KCI 등재학술지

제8권 1호 2026년 6월
Vol. 8 No. 1, Jun. 2026

Journal of DQS

국방품질연구논집

Journal of Defense Quality Society

국방 네트워크 환경에서의 비지도 이상점수 통합 메타학습 기반 이상탐지	최인준, 이가현, 최현석, 김유경, 김예진, 이성임
유도무기 소표본 품질평가에서 사전정보 기반 베이지안 판정의 효과 분석	이대한
여성 육군 장병을 위한 동작 기반 분할 구조 팔꿈치 보호대 설계 및 착용 평가	이옥경, 이예진
함정용 복합재 추진기의 캐비테이션 및 소음 특성에 관한 모형시험 연구	정홍석, 설한신, 김성훈, 최희영, 김명진
지속가능항공유(SAF) 전환 운영에 대한 공급사슬 구성원의 이해관계: 국방분야를 중심으로	임세환, 최경환
Frame ID 기반 UART 동적 프레임 구성과 경량 AEAD를 결합한 UART 통신 설계 제안	박준현, 한규진, 이재규, 이봉수
항공기 시뮬레이터용 마그네틱 인디케이터 개발	홍정음, 이상천, 박종훈
VARTM을 활용한 선박용 복합재 추진기의 수지 주입 거동 연구	조형순, 강승구, 김성권, 김석주, 김명진
무기체계의 이기종 COTS 보드 단종대체를 위한 시스템 통합 및 보드 단일화 방안의 효용성에 관한 연구	구본탁
위성 간 자유공간광통신을 위한 연속 스파이럴 스캔 PAT의 평균 획득 시간 해석 및 설계 지침	오동하, 노정훈
유도무기 ASRP 결과의 창정비 연계 적용에 관한 연구	김영현, 한성재, 김철수, 박순우, 홍성돈
모션인식 기반 K10 탄약운반장갑차 고장예측 시스템	한승현, 권영호, 전형규
방산 중소기업의 국방품질경영체제 국방 특수 요구사항 이행을 위한 품질통제점 적용 방안	윤철근, 박종훈, 이상천
다중 재머 환경에서의 비전 트랜스포머 기반 GNSS 재밍 신호 분류기법	오우림, 이재흥, 김완식
군수업체의 시스템적 차원 안전확보를 위한 두 가지 제언 : 통합경영체제의 도입과 계약특수조건의 수정	안남수, 김성수, 정원찬
무기체계 획득 초기 단계(소요기획·선행연구·탐색개발) RAM-C 분석 활용 방안	이재원, 한승진, 성시일, 배경빈, 박재훈
K2전차용 KGAS-1 차선 설계 및 실사격 대체 검증 프로세스 수립	권기훈, 구영빈, 신부균, 배범수
차량용 전력 케이블 절연체의 가속 열화 시험	유영철, 서태완, 이대현, 홍성훈
궤도형 차량 적재 환경에서 휴대용 대전차 유도무기의 진동영향성 분석 및 감쇠 설계	현종훈, 박성열, 곽태산, 송의정, 박재민
군용 고정익 항공기 탈출계통 사출모드선택기 신뢰성 개선 연구	양진용, 김형철, 최형준
한국인 인체치수조사 프로토콜을 적용한 군 인체측정 시스템 개발 연구	이아람, 고병욱, 김민승, 박선미, 배성훈
항공용 실란트 성능 요구도 및 품질 인증 체계 고찰	김희성, 안교진, 권동준, 박재철
함정용 HPC 시스템을 위한 수랭식 소형 캐비닛의 설계 최적화 및 실험적 검증	김혜민, 최윤혁, 김현실
무기체계 통제소 콘솔장치의 중복 로그인 방지 기법 연구	이예원, 김홍집, 황종수, 배재효
고발열 무기체계 열관리시스템 개발품질 개선을 위한 1D 가상시험환경 구현 및 검증	김민규, 김인수, 이경훈, 송용석
소비자 위험을 고려한 방탄복에 대한 후면변형 평가 기준의 정량적 비교 분석	백승원, 안남수, 성호용, 김종환
무기체계 체계안전성 관리 및 자료수집체계 구축 방안	전건욱, 정운찬, 박순철, 김유석
선택적 특징 융합을 적용한 트랜스포머 기반 소형 객체 탐지	이강민, 박장식
우리나라 무기체계를 위한 통합체계지원(IPS) 지원정보체계(Computer Resources) 요소의 강화 전략	박윤규, 김상부, 배인화
함정 건조 공정의 예방적 품질보증 강화를 위한 5M1E 프레임워크 적용 연구	민일홍, 백용관, 박효진
생성형 AI 기반 군용 카무플라주 패턴 디자인 개발 및 평가	손대성, 강다예, 이정순

한국연구재단
등재학술지

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

국방기술품질원
DTaQ Defense Agency for Technology and Quality

국방품질연구회
Defense Quality Society

dtaqdqs.jams.or.kr

국방기술품질원 DTaQ Defense Agency for Technology and Quality
국방품질연구회 Defense Quality Society

국방품질연구논집은 연 2회 발행되는 학술논문지입니다.
홈페이지 https://www.dtaq.re.kr:8084/dqs

발행처 경상남도 진주시 동진로 420(충무공동) 국방기술품질원
발행일 2026년 6월 30일
발행인 신상범
편집위원장 박종훈
편집위원 김상부, 이영순, 김성수, 설한신, 박장식, 이정순, 홍성훈, 류재철, 이부일, 김흥섭, 노정훈, 최진영, 오상윤, 추원식, 이소희, 박민규
감수/편집 서재현 / 김진영, 서민준
연락처 055-751-5274, 5277
국방인트라넷 12426@dtaq.mil
인트라넷 12426@dtaq.re.kr

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1, Jun. 2026

CONTENTS

- 국방 네트워크 환경에서의 비지도 이상점수 통합 메타학습 기반 이상탐지 2
- 유도무기 소표본 품질평가에서 사전정보 기반 베이지안 판정의 효과 분석 19
- 여성 육군 장병을 위한 동작 기반 분할 구조 팔꿈치 보호대 설계 및 착용 평가 33
- 함정용 복합재 추진기의 캐비테이션 및 소음 특성에 관한 모형시험 연구 46
- 지속가능항공유(SAF) 전환 운영에 대한 공급사슬 구성원의 이해관계: 국방분야를 중심으로 54
- Frame ID 기반 UART 동적 프레임 구성과 경량 AEAD를 결합한 UART 통신 설계 제안 71
- 항공기 시뮬레이터용 마그네틱 인디케이터 개발 82
- VARTM을 활용한 선박용 복합재 추진기의 수지 주입 거동 연구 93
- 무기체계의 이기종 COTS 보드 단종대체를 위한 시스템 통합 및 보드 단일화 방안의 효용성에 관한 연구 104
- 위성 간 자유공간광통신을 위한 연속 스파이럴 스캔 PAT의 평균 획득 시간 해석 및 설계 지침 113
- 유도무기 ASRP 결과의 창정비 연계 적용에 관한 연구 123
- 모션인식 기반 K10 탄약운반장갑차 고장예측 시스템 135
- 방산 중소기업의 국방품질경영체제 국방 특수 요구사항 이행을 위한 품질통제점 적용 방안 148
- 다중 재머 환경에서의 비전 트랜스포머 기반 GNSS 재밍 신호 분류기법 158
- 군수업체의 시스템적 차원 안전확보를 위한 두 가지 제언 : 통합경영체제의 도입과 계약특수조건의 수정 170
- 무기체계 획득 초기 단계(소요기획·선행연구·탐색개발) RAM-C 분석 활용 방안 180
- K2전차용 KGAS-1 차선 설계 및 실사격 대체 검증 프로세스 수립 195
- 차량용 전력 케이블 절연체의 가속 열화 시험 205
- 궤도형 차량 적재 환경에서 휴대용 대전차 유도무기의 진동영향성 분석 및 감쇠 설계 219
- 군용 고정익 항공기 탈출계통 사출모드선택기 신뢰성 개선 연구 229
- 한국인 인체치수조사 프로토콜을 적용한 군 인체측정 시스템 개발 연구 238
- 항공용 실란트 성능 요구도 및 품질 인증 체계 고찰 252
- 함정용 HPC 시스템을 위한 수랭식 소형 캐비닛의 설계 최적화 및 실험적 검증 262
- 무기체계 통제소 콘솔장치의 중복 로그인 방지 기법 연구 271
- 고발열 무기체계 열관리시스템 개발품질 개선을 위한 1D 가상시험환경 구현 및 검증 280
- 소비자 위험을 고려한 방탄복에 대한 후면변형 평가 기준의 정량적 비교 분석 295
- 무기체계 체계안전성 관리 및 자료수집체계 구축 방안 309
- 선택적 특징 융합을 적용한 트랜스포머 기반 소형 객체 탐지 319
- 우리나라 무기체계를 위한 통합체계지원(IPS) 지원정보체계(Computer Resources) 요소의 강화 전략 331
- 함정 건조 공정의 예방적 품질보증 강화를 위한 5M1E 프레임워크 적용 연구 340
- 생성형 AI 기반 군용 카무플라주 패턴 디자인 개발 및 평가 352

공지사항

- 국방품질연구회(DQS) 368
- 국방품질연구논집 원고 모집 안내 369

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 02-18, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.001

국방 네트워크 환경에서의 비지도 이상점수 통합 메타학습 기반 이상탐지

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Meta-learning Integration of Unsupervised Anomaly Scores for Intrusion Detection in Defense Network Environments

최인준, In Joon, Choi
단국대학교, 정보통계학과, 학부과정
Undergraduate Student, Department of Statistics, Dankook University

이가현, Ka Hyun, Lee
단국대학교, 정보통계학과, 학부과정
Undergraduate Student, Department of Statistics, Dankook University

최현석, Hyun Seok, Choi
단국대학교, 정보통계학과, 학부과정
Undergraduate Student, Department of Statistics, Dankook University

김유경, Yu Gyeong, Kim
단국대학교, 정보통계학과, 학부과정
Undergraduate Student, Department of Statistics, Dankook University

김예진, Ye Jin, Kim
단국대학교, 정보통계학과, 학부과정
Undergraduate Student, Department of Statistics, Dankook University

이성임†, Sungim, Lee
단국대학교, 통계데이터사이언스학과, 교수
Professor, Department of Statistics and Data Science, Dankook University

Abstract

This study proposes a meta-learning-based framework to enhance the robustness of unsupervised anomaly detection in defense network environments. Conventional signature-based intrusion detection systems rely on predefined attack patterns and labeled data, which limits their applicability in dynamic military networks where labeled anomalies are scarce. Using the benchmark NSL-KDD and UNSW-NB15 datasets, we evaluated five unsupervised anomaly-detection models: k-Nearest Neighbors (kNN), Local Outlier Factor (LOF), Histogram-based Outlier Score (HBOS), Isolation Forest (IF), and Autoencoder (AE). To account for the highly skewed and heavy-tailed distributions commonly observed in network traffic data, we compared the Min-Max normalization and Quantile transformation preprocessing strategies and applied bootstrapping to obtain statistically stable decision thresholds. The experimental results show that Quantile transformation reduces the influence of extreme values and changes the distribution of anomaly scores, whereas individual models exhibit heterogeneous detection behaviors depending on algorithmic characteristics and data complexity. To integrate these heterogeneous anomaly representations effectively, we constructed a meta-learning model based on an artificial neural network. The proposed framework achieved strong discrimination performance, with AUC values of 0.98 for NSL-KDD and 0.95 for UNSW-NB15, while achieving a recall of up to 0.97, effectively minimizing undetected attack traffic. These results demonstrate that integrating heterogeneous anomaly scores through meta-learning mitigates threshold sensitivity and provides a robust anomaly-detection strategy for complex network security environments.

keywords : cyber security, data preprocessing, unsupervised learning, anomaly scores, meta-method

† Corresponding Author : Sungim, Lee
Tel : +82-31-8005-3256, email : silee@dankook.ac.kr
Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 29th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

대규모 네트워크 환경에서 공격 트래픽을 신속하게 탐지하는 것은 시스템을 안정적으로 운영하고 보안을 유지하기 위한 필수 과제이다. 특히, 국방 네트워크 환경에서는 작전 수행의 연속성과 정보 보안을 유지하기 위해 공격 트래픽 탐지가 핵심적인 사이버 보안 문제로 인식되고 있다[1-3]. 그러나, 실제 네트워크 환경에서 관측되는 공격 트래픽은 정상 트래픽과 유사한 형태로 지속적으로 진화함에 따라 이를 효과적으로 판별하는 것은 여전히 어려운 문제이다.

군용 네트워크는 민간 네트워크와 달리 기능별로 분리된 구조와 높은 보안 요구 수준을 가지며, 데이터 수집과 공유가 제한적인 경우가 많다. 또한 공격 트래픽이 탐지되지 못할 경우 단순한 서비스 장애를 넘어 지휘통제 체계의 신뢰성 저하, 작전 정보 유출, 임무 수행 지연 등으로 이어질 수 있어 이상탐지의 중요성이 더욱 크다. 그러나 이러한 환경에서는 공격 데이터의 발생 빈도가 낮고, 보안상 이유로 라벨링된 공격 샘플을 충분히 확보하기 어려워 탐지 모델 구축에 제약이 발생할 수 있다[2-3].

기존의 네트워크 침입 탐지 시스템(intrusion detection system)은 주로 사전에 정의된 공격 시그니처와의 비교를 통해 이상 여부를 판단하는 시그니처 기반 방식에 의존해 왔다. 이러한 방식은 이미 알려진 공격에 대해서는 높은 탐지 성능을 보이지만, 이전에 보고되지 않은 새로운 유형의 공격이나 제로데이(zero-day) 공격에 대해서는 효과적으로 대응하지 못한다는 한계가 있다[4]. 또한, 공격 양상이 변화하는 환경에서는 지속적인 시그니처의 업데이트가 필수적이며, 이는 실시간 탐지 체계 구축에 제약 요인으로 작용한다[5].

이러한 시그니처 기반 탐지의 한계와 라벨 확보의 어려움을 보완하기 위해 최근에는 데이터의 구조적 특성에 기반하여 이상을 탐지하는 비지도 학습 기반 접근법이 주목받고 있다[6-10]. 비지도 이상탐지 기법은 정상 데이터의 분포 또는 밀도 특성을 학습하고, 이와 통계적으로 상이한 패턴을 이상으로 판단한다. 특히 네트워크 트래픽 데이터는 정상 트래픽이 대부분을 차지하는 반면 공격 트래픽의 비율이 매우 낮은 클래스 불균형(class imbalance) 특성이 있어 실제 운영 환경에서는 공격 데이터에 대한 충분한 사례 확보가 어려운 경우가 많다. 이러한 환경에서는 공격 유무에 의존하지 않는 비지도 학습 기반 접근이 현실적인 대안이 될 수 있다.

그러나 비지도 학습 기반 이상탐지 역시 몇 가지 중요한 한계를 가진다. 첫째, 대부분의 비지도 모델은 연속적인 이상점수(anomaly score)를 산출하며, 실제 운영 환경에서는 이를 기반으로 이상 여부를 결정하기 위한 임곗값(threshold)을 설정해야 한다. 하지만 네트워크 트래픽의 분포는 시간대, 부하 수준, 운영 정책 등에 따라 지속적으로 변화하므로, 고정된 임곗값은 탐지 성능의 불안정성을 초래할 수 있다. 둘째, 고차원 데이터 환경에서는 전처리 방식이나 이상점수의 정의에 따라 점수 분포가 크게 달라질 수 있으며, 동일한 관측치라도 모델 및 전처리 조합에 따라 상이한 탐지 결과가 도출될 수 있다. 즉, 비지도 이상탐지의 성능은 개별 모델의 선택뿐 아니라 전처리 방식과 임곗값 설정에 구조적으로 의존하는 한계를 가진다.

이에 본 연구에서는 개별 비지도 학습 모델의 이상점수를 통합적으로 활용하여 최종 공격 여부를 판별하는 메타학습 기반 이상탐지 프레임워크를 제안한다. 제안 방법은 다양한 비지도 모델로부터 산출된 이상점수를 입력 변수로 활용하고, 실제 공격 여부를 출력값으로 하는 인공신경망을 학습함으로써, 개별 모델에서 요구되는 임곗값 설정 문제를 완화할 수 있는 장점이 있다. 또한, 단일 모델의 점수에 의존하지 않고 서로 다른 통계적 특성을 가진 다수의 이상점수를 통합적으로 활용함으로써 단일 모델의 한계를 극복하고 탐지 성능의 안정성과 강건성을 동시에 고려할 수 있다. 아울러 본 연구에서는 개별 이상점수에 대한 임곗값 설정을 위해 붓스트랩 방법을 적용한 후 전처리 방식(정규화 및 분포변환)과 임곗값 설정의 조합이 탐지 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기로 한다. 이를 통해 전

처리 방법의 효과, 임곗값 설정에 따른 영향, 그리고 메타학습 기반 통합 모델의 성능 개선 효과를 비교 검증하고자 한다. 이때, 네트워크 침입 탐지 벤치마크 데이터셋인 NSL-KDD와 UNSW-NB15를 활용하여 제안 방법의 적용 가능성과 탐지 성능을 평가한다[11-12].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 비지도 이상탐지 기법과 전처리 방법을 소개하고, 3장에서는 네트워크 데이터에 적용된 비지도 학습 모델의 설정과 메타학습 구조를 제시한다. 4장에서는 전처리 및 임곗값 설정 전략에 따른 개별 비지도 학습 모델의 분석 결과와 메타모델의 탐지 성능을 비교 고찰하고, 5장에서는 결론 및 토의 내용을 제시한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 한계와 향후 과제를 논의한다.

2. 이론적 배경 및 관련 연구

2.1. 비지도 이상탐지 모델들

본 절에서는 네트워크 트래픽 이상탐지를 위해 다섯 가지 비지도 학습 모델을 소개한다. 각 모델에 대해 p 차원의 i번째 입력 관측치 $\boldsymbol{x}_i^t = (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{ip})$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$에 대한 이상점수 산출 방식과 핵심 기법을 정리하고, 관련 연구를 소개한다.

2.1.1. k-최근접 이웃(k-Nearest Neighbors, kNN)

kNN 기반 이상탐지는 관측치 간 거리 정보를 이용하여 이상 여부를 판단하는 대표적인 거리 기반 비지도 이상탐지 기법이다. 이 접근법에서는 정상 데이터로 구성된 기준 집합이 주어졌을 때, 새로운 관측치가 기준 집합으로부터 떨어진 정도를 이상점수로 정의한다. 즉, 정상 관측치는 기준 집합과 가까운 위치에 분포하는 반면 이상 관측치는 상대적으로 먼 위치에 분포한다는 직관에 기반한다[6].

일반적으로 kNN에서 범주형 변수는 원-핫 인코딩(one-hot encoding)을 통하여 이진 변수로 변환한 후 유클리드 거리를 계산하는 방식이 사용된다. 그러나 이 경우 연속형 변수와 범주형 변수 간 거리 스케일이 달라 관측치 간 거리를 적절히 정의하기 어렵다는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Gower (1971)가 제안한 가우어 거리(Gower distance)를 사용하였다[13].

관측치 $\boldsymbol{x}_i^t = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ip})$와 $\boldsymbol{x}_j^t = (x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jp})$에 대한 가우어 거리는 (1)과 같이 정의된다.

$$d_G(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j) = \frac{\sum_{l=1}^{p} w_l a_{ijl} d_{ijl}}{\sum_{l=1}^{p} w_l a_{ijl}} \quad (1)$$

여기서 w_l는 변수 l의 가중치를 의미하며, 일반적으로 결측이 없는 경우 $w_l = 1$로 설정한다. a_{ijl}는 관측치 $\boldsymbol{x}_i$와 $\boldsymbol{x}_j$가 변수 l에서 비교 가능한 경우 1, 그렇지 않은 경우 0으로 정의되는 지시 변수이다. d_{ijl}는 변수 유형에 따른 부분 거리(partial distance)로, 수치형 변수의 경우 부분 거리는 다음과 같이 정의된다.

$$d_{ijl} = (\,|\, x_{il} - x_{jl} \,|\,)/R_l$$

여기서 $R_l = \max_{1 \le i \le n}(x_{il}) - \min_{1 \le i \le n}(x_{il})$는 변수 l의 범위를 의미한다. 범주형 변수의 경우 부분 거리는 다음과 같이 정의된다.

$$d_{ijl} = \begin{cases} 1, & x_{il} \neq x_{jl} \\ 0, & x_{il} = x_{jl} \end{cases}$$

이와 같은 정의를 통해 수치형 변수는 범위로써 정규화된 절대 차이를 반영하고, 범주형 변수는 값의 일치 여부를 반영함으로써 혼합형 변수 환경에서도 일관된 거리 계산이 가능해진다. 이를 바탕으로 관측값 $\boldsymbol{x}_i$에 대한 이상점수 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 $\boldsymbol{x}_i$와 가장 가까운 k개 이웃까지의 평균 거리로, (2)와 같이 정의된다.

$$S(\boldsymbol{x}_i) = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} d_G(\boldsymbol{x}_i, nn_j(\boldsymbol{x}_i)) \quad (2)$$

이때 $nn_j(\boldsymbol{x}_i)$는 $\boldsymbol{x}_i$의 j번째 근접 이웃을 의미한다. 최종적으로 관측치의 이상여부는 이상점수와 사전에 설정된 임곗값을 비교하여 결정한다.

Bai와 Fossaceca (2024)는 NSL-KDD와 UNSW-NB15 데이터셋에 대하여 kNN을 비지도 이상탐지 모델로 적합하였는데, 이들은 정상 트래픽만을 학습 집합으로 저장한 뒤, $k=1$의 최근접 이웃을 사용하였다[14].

kNN 기반 이상탐지는 구조가 단순하고 해석이 직관적이라는 장점이 있지만, 거리 계산에 기반하므로 특징 공간의 스케일과 전처리 방식에 민감할 수 있다. 특히 고차원 네트워크 트래픽 환경에서는 이상점수의 분별력이 떨어지거나, k의 결정 및 임곗값 설정에 따라 탐지 성능의 변동성이 크게 나타날 수 있다.

2.1.2. 국소이상치계수(Local Outlier Factor, LOF)

Breunig 등 (2000)에 의해 제안된 LOF는 개별 관측치의 주변 구조를 반영하는 국소 밀도(local density) 기반의 비지도 이상탐지 기법이다[7]. LOF는 데이터가 전역적으로 단일한 확률 분포를 따른다는 가정 대신, 특정 관측치의 밀도를 이 관측값이 속한 주변 이웃들의 국소 밀도와 비교하고, 이때의 상대적인 비율을 이상점수로 사용한다. 이러한 접근은 전역적 거리 기준에 기반하는 기존 방법들이 국소 구조가 혼재된 데이터에서 이상 관측치를 효과적으로 식별하지 못하는 한계를 보완하기 위해 제안되었다. 따라서 LOF는 다양한 국소 패턴이 공존하는 네트워크 트래픽 데이터에서 이상 여부를 탐지하는 데 유용한 기법으로 활용될 수 있다.

LOF는 각 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$에 대해 k-최근접 이웃(k-nearest neighbors)을 설정하고, 국소 도달 가능 밀도(local reachability density; lrd)를 구한 뒤 이를 주변 이웃의 밀도와 비교함으로써 이상점수를 산출한다. 먼저 $k-distance(\boldsymbol{x}_i)$는 $\boldsymbol{x}_i$로부터 k번째 최근접 이웃까지의 거리로 정의하고, $N_k(\boldsymbol{x}_i)$는 k개 최근접 이웃 집합을 나타낸다. 이를 바탕으로 $\boldsymbol{x}_i$와 이웃 $\boldsymbol{x}_j$ 간의 도달 가능 거리(reachability distance)는 다음과 같이 정의된다.

$$reach-dist_k(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j) = \max\{k-distance(\boldsymbol{x}_j), d_G(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j)\}$$

이때 $d_G(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j)$는 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$와 $\boldsymbol{x}_j$ 사이의 가우어 거리를 의미하고, 이는 앞서 식(1)의 정의와 동일하다. 도달 가능 거리는 두 관측 벡터 간 거리가 지나치게 작게 평가되는 경우를 방지하기 위해, 이들 거리의 하한선을 이웃 $\boldsymbol{x}_j$의 $k-distance(\boldsymbol{x}_j)$로 설정함으로써 $\boldsymbol{x}_i$의 lrd 추정이 과도하게 커지는 것을 방지한다. 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$에서 lrd는 k개 최근접 이웃 집합으로부터 평균 도달 가능 거리의 역수로 다음과 같이 구한다.

$$lrd_k(\boldsymbol{x}_i) = \left(\frac{1}{|N_k(\boldsymbol{x}_i)|} \sum_{\boldsymbol{x}_j \in N_k(\boldsymbol{x}_i)} reach-dist_k(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j) \right)^{-1}$$

최종적으로 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$의 LOF 이상점수 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 해당 관측 벡터의 lrd를 주변 이웃들의 평균 lrd와 비교한 비율로 산출되며, (3)과 같이 정의된다. 일반적으로 $S(\boldsymbol{x}_i)$가 1에 가까울수록 정상 범주에 속하며, 1보다 클수록 주변 이웃 대비 밀도가 낮아 이상일 가능성이 큰 것으로 알려져 있다.

$$S(\boldsymbol{x}_i) = \frac{1}{|\ N_k(\boldsymbol{x}_i)\ |} \sum_{\boldsymbol{x}_j \in N_k(\boldsymbol{x}_i)} \frac{lrd_k(\boldsymbol{x}_j)}{lrd_k(\boldsymbol{x}_i)} \quad (3)$$

이와 같은 LOF의 국소 밀도 기반 특성은 네트워크 트래픽 데이터에 적용될 경우, 장점과 한계가 알려져 있다. Auskalnis 등 (2018)은 NSL-KDD 데이터셋에서 정상 트래픽 내에도 공격 트래픽과 유사한 밀도 구조를 갖는 관측치가 존재함을 확인하고, 이러한 표본이 LOF의 이상점수를 왜곡하여 탐지 성능을

저해할 수 있음을 분석하였다[15]. 또한 전처리 과정에서 특정 임곗값을 기준으로 데이터 정제를 반복 수행함으로써 성능이 개선될 수 있음을 보고하였다. Otokwala 등 (2022)은 UNSW-NB15 데이터셋을 포함한 데이터 비교 실험을 통해, LOF의 탐지 성능이 데이터의 분포 구조에 따라 상이하게 나타날 수 있음을 보고하였다[16]. 특히 데이터에 포함된 이상치 분포의 특성과 구조가 이상탐지 기법 간 성능 차이에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이러한 선행연구의 결과들은 LOF의 탐지 성능이 단순한 기법 자체의 특성뿐만 아니라 데이터의 구조적 특성과 전처리 방식에 의해 민감하게 반응할 수 있음을 알려주며, 이상탐지 성능의 안정성 확보를 위해 체계적인 분석의 필요성을 제기한다.

2.1.3. 아이솔레이션 포레스트(Isolation Forest, IF)

Liu 등 (2008)에 의해 제안된 IF는 무작위 나무 모형을 기반으로 개별 관측치가 고립되는 평균 분할 횟수를 이용하여 이상 여부를 판단하는 비지도 이상탐지 기법이다[8]. IF는 LOF나 kNN에서와 같이 데이터의 분포나 밀도를 추정하지 않고, 이상 관측치는 정상 관측치에 비해 더 적은 횟수의 분할만으로도 쉽게 고립된다는 특성에 착안하여 이상 여부를 판단한다. 이러한 접근은 대규모 고차원 데이터에서 모든 관측치 간의 거리 또는 밀도를 계산해야 하는 기존 방법들이 겪는 연산 비용의 문제를 극복하고자 제안되었다[17].

IF는 정상 데이터로부터 무작위 비복원 추출된 부분 표본 집합을 사용하여 다수의 독립적인 나무 모형을 구성하고, 각 나무에서 임의의 속성과 분할 기준을 선택하여 데이터를 재귀적으로 분할한다. 이후 각 관측치가 고립되기까지 필요한 분할 횟수를 기반으로 이상점수를 계산하며, 평균 분할 깊이가 작을수록 해당 관측치는 정상 데이터로부터 상대적으로 쉽게 분리되는 것으로 해석되어 이상일 가능성이 높다고 판단한다.

구체적으로 $h(\boldsymbol{x}_i)$를 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$가 단독 노드가 되기까지의 분할 횟수라고 정의하면, 이상 관측치의 경우 적은 횟수의 분할만으로 고립되므로 $h(\boldsymbol{x}_i)$는 작고, 정상 관측치의 경우 상대적으로 큰 값을 갖게 된다. IF는 다수의 나무 모형을 사용하므로, 여러 나무 모형에서 구한 평균 분할 깊이 $E(h(\boldsymbol{x}_i))$를 사용한다. 전체 T개의 나무 모형을 구축한다고 할 때, t번째 나무 모형에서 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$의 분할 횟수는 $h_t(\boldsymbol{x}_i)$로 표기할 수 있으며 $E(h(\boldsymbol{x}_i))$는 다음과 같이 정의된다.

$$E(h(\boldsymbol{x}_i)) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h_t(\boldsymbol{x}_i)$$

이때 분할 깊이는 부분 표본 집합의 크기 $m(< n)$에 영향을 받기 때문에, 이를 보정하기 위해 무작위 이진 탐색 트리(binary search tree)에서 탐색 실패 시의 평균 깊이 $c(m)$을 기준값으로 사용한다. 이때 $c(m) = 2H(m-1) - 2(m-1)/m$이고, $H(m)$은 조화수(harmonic number)를 나타낸다[8]. 이를 기반으로 IF의 이상점수 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 (4)와 같이 정의되며, 0과 1 사이의 값을 가지게 된다.

$$S(\boldsymbol{x}_i) = 2^{-\frac{E(h(\boldsymbol{x}_i))}{c(m)}} \tag{4}$$

즉, 평균 분할 깊이가 작을수록 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 1에 가까워지고, 이는 적은 횟수의 분할만으로 해당 관측치가 쉽게 고립됨을 의미하므로 이상일 가능성이 높은 것으로 해석된다. 반대로 평균 분할 깊이가 클수록 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 0에 가깝게 된다.

Xiao 등 (2018)은 네트워크 관리 데이터를 대상으로 통계적 특징 추출 기법으로 변수를 선택한 후 IF를 학습하는 이상탐지 모델을 제안하고, 다양한 유형의 네트워크 데이터에 대해 신속하고 정확한 탐지가 가능함을 보였다[18]. 특히, 무작위 분할과 부분 표본을 활용한 IF의 구조적 특성으로 인해, 고차원 환경에서도 낮은 연산 복잡도로 효과적인 이상탐지

가 가능함을 입증하였다. Elsaid와 Binbusayyis (2024)는 이러한 IF 기반 접근을 확장하여, 시간에 따라 데이터 분포가 변화하는 대용량 네트워크 스트리밍 환경에 최적화된 IF 이상탐지 모델을 제안하였다[17]. 해당 연구에서는 불필요한 특징 제거와 차원 축소를 결합한 동적 전처리를 통해 NSL-KDD 데이터셋과 UNSW-NB15 데이터셋에서 기존 IF 대비 탐지 정확도와 처리 속도를 동시에 개선하였으며, 이는 대규모 네트워크 트래픽 환경에서 IF 기반 기법이 효과적으로 작동할 수 있음을 시사한다.

2.1.4. 히스토그램 기반 이상탐지(Histogram-based Outlier Score, HBOS)

HBOS는 각 변수의 분포를 독립적인 히스토그램으로 근사하여 이상 여부를 판단하는 분포 기반 비지도 이상탐지 기법이다[9]. HBOS는 변수 간의 독립성을 가정함으로써 다차원 데이터의 결합 분포를 개별 변수의 주변 분포의 곱으로 근사하며, 이를 통해 거리 계산이나 복잡한 밀도 추정 없이도 효율적인 이상탐지를 수행한다. 이러한 접근 방식은 연산 과정을 단순화하여 대용량 데이터 환경에서도 빠르고 효율적인 이상탐지를 가능하게 한다. HBOS는 l번째 설명변수 x_l $(l=1,\cdots,p)$에 대해 히스토그램을 생성하고, l번째 설명변수의 i번째 관측값 x_{il}이 속한 구간의 밀도를 기반으로 이상점수를 산출한다. 관측 벡터 $\boldsymbol{x}_i$에 대한 전체 이상점수 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 각 변수별로 히스토그램에서 추정된 밀도의 역수에 로그를 취하여 합한 값으로 정의되며, (5)와 같이 표현된다.

$$S(\boldsymbol{x}_i) = -\sum_{l=1}^{p} \log\left(\hat{f}_l(x_{il})\right) \tag{5}$$

여기서 $\hat{f}_l(x_{il})$는 관측값 x_{il}이 속한 히스토그램 구간의 정규화된 밀도를 의미한다. 만약 x_{il}이 l번째 변수의 히스토그램에서 m번째 구간에 포함된다면, 해당 밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{f}_l(x_{il}) = \frac{n_{lm}}{n \times w_{lm}}$$

위 식에서 n_{lm}는 l번째 설명변수가 m번째 구간에 포함된 관측값의 개수, w_{lm}는 해당 구간의 너비를 나타낸다. 이를 통해 구간의 너비가 서로 다른 경우에도 각 구간의 분포 밀도를 확률적으로 일관되게 추정할 수 있다. 식(5)에서 관측값 x_{il}이 정상 데이터가 밀집한 구간에 속한다면 히스토그램 밀도는 커지고, $S(\boldsymbol{x}_i)$는 작아진다. 반대로 빈도가 낮은 희소 구간에 속하면 $S(\boldsymbol{x}_i)$는 증가한다. 한편, 설명변수 x_l이 범주형 변수인 경우에는 연속형 변수와 같이 구간을 나누는 대신, 각 범주를 하나의 이산 구간으로 간주한다. 이때, $\hat{f}_l(x_{il})$은 해당 범주의 상대도수, 즉, 전체 관측값 중 해당 범주에 속하는 비율로 정의한다. 즉, c번째 범주에 속하는 관측값의 개수를 n_{lc}라 할 때, 해당 밀도는 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{f}_l(x_{il}) = \frac{n_{lc}}{n}$$

따라서 범주형 변수의 경우에도 빈도가 적은 범주일수록 작은 밀도 값을 갖게 되고, 이는 로그 변형을 통해 큰 이상점수로 반영된다.

Goldstein과 Dengel (2012)은 변수 간 상관관계를 고려하지 않는 대신, 각 변수의 분포를 독립이라고 가정함으로써 대규모 데이터 환경에서도 히스토그램 기반 밀도 추정을 가능하게 하였다[9]. 이러한 특성은 대량의 트래픽이 실시간으로 유입되는 네트워크 환경에서 정밀한 거리 계산보다 빠른 처리 속도가 요구되는 침입 탐지 시스템에 적합한 장점을 제공한다.

그러나 Paulauskas와 Baskys (2019)는 네트워크 트래픽과 같이 분포의 비대칭성이 큰 데이터의 경우 구간 설정 방식이 이상점수의 안정성과 탐지 성능에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 보였다[19]. 동적 구간 설정이 탐지 성능 면에서 유리할 수 있으나, 정적 구간 설정은 빈 구간을 통해 정상과 이상

데이터를 보다 명확하게 구분할 수 있으며, 선형 시간 복잡도로 처리 속도가 빠르다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 정적 구간 설정 방식을 채택하였다.

2.1.5. 오토인코더(Autoencoder, AE)

고차원 데이터 집합의 핵심 구조를 학습하기 위한 차원 축소 기법은 오랫동안 연구되어 왔다. 이 과정에서 입력 데이터 집합을 저차원의 잠재 공간으로 압축한 뒤 이를 다시 원래의 공간으로 복원하도록 학습하는 신경망 구조인 AE가 제안되었으며, 심층 구조의 AE를 활용한 대표적 차원 축소 접근이 제시된 바 있다[10, 20]. AE는 입력 데이터의 주요 구조적 특성을 잠재 표현(latent representation)으로 학습하는 데 목적을 둔다.

이 같은 구조적 특성으로 인해, 정상 데이터만을 학습한 AE는 정상 관측치에 대해서는 낮은 재구성 오차(reconstruction error)를 보이는 반면, 학습되지 않은 이상 관측치에 대해서는 상대적으로 재구성 오차가 크게 나타난다. 이러한 점에 착안해, 재구성 오차를 이상점수로 활용하는 비지도 이상탐지 접근은 초기 연구들에서 제안된 이후, 다양한 도메인과 데이터 유형에서 후속 연구를 통해 검증·확장되어 왔다[21-22].

AE의 구조는 입력 관측치 $\boldsymbol{x}_i$를 저차원의 잠재 공간(latent space)으로 축소하는 인코더(encoder)와, 해당 잠재 공간으로부터 원본 관측치를 재구성하는 디코더(decoder)로 구성된다. 입력 관측치 $\boldsymbol{x}_i$가 주어질 때, 인코더는 다음과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{z}_i = f_\theta(\boldsymbol{x}_i)$$

여기서 $\boldsymbol{z}_i$는 입력 관측치 $\boldsymbol{x}_i$를 l차원($l < p$)으로 축소하여 얻은 잠재 변수를 의미하며, $f_\theta(\cdot)$는 모수 θ를 갖는 인코더 신경망을 나타낸다. 디코더는 잠재 변수 $\boldsymbol{z}_i$를 이용하여 입력과 동일한 p차원의 재구성된 입력 관측치 $\hat{\boldsymbol{x}}_i$를 생성하며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\boldsymbol{x}}_i = g_\phi(\boldsymbol{z}_i) = g_\phi(f_\theta(\boldsymbol{x}_i))$$

여기서 $g_\phi(\cdot)$는 모수 ϕ를 갖는 디코더 신경망을 의미한다. 본 모형은 입력 관측치 $\boldsymbol{x}_i$와 재구성된 입력 관측치 $\hat{\boldsymbol{x}}_i$간의 차이를 최소화하도록 모수가 추정되며, 일반적으로 (6)과 같은 재구성 오차를 목적함수로 사용한다.

$$S(\boldsymbol{x}_i) = \| \boldsymbol{x}_i - \hat{\boldsymbol{x}}_i \|^2 \quad (6)$$

결과적으로 정상 데이터만으로 학습된 AE는 정상 패턴을 따르는 관측치에 대해서는 작은 재구성 오차를, 관측치가 정상 분포에서 벗어난 경우에는 상대적으로 큰 재구성 오차를 보이게 된다. 이에 (6)을 이상점수로 정의하며, 이 값이 클수록 이상일 가능성이 높은 것으로 해석할 수 있다.

기존 연구에서는 네트워크 침입 탐지 벤치마크 데이터를 대상으로 다양한 AE 모델들을 비교하여, 모델의 구조 및 규제 방식에 따라 탐지 성능과 안정성이 크게 달라질 수 있음을 보고하였다[23]. 또한 네트워크 트래픽의 시간적 또는 공간적 의존성을 반영하기 위해 CNN이나 순환 신경망을 결합한 확장된 AE 모델이 제안되어 왔다[24]. 그러나 본 연구에서는 모형 구조의 확장보다는 재구성 오차에 기반한 이상점수가 전처리 방법과 임곗값 설정에 따라 어떻게 달라지는지를 체계적으로 분석하기 위해 기본적인 AE 모델을 사용하기로 한다.

2.2. 전처리와 이상탐지 성능

네트워크 트래픽 데이터는 다수의 수치형 설명변수로 구성되며, 변수별 단위와 값의 범위가 다르고 분포 형태 또한 균일하지 않은 경우가 많다. 특히 특정 변수에서 관측치가 영(zero) 또는 작은 값에 집중되거나, 소수의 극단값이 빈번히 관측되는 비대칭적

분포 특성은 정상 트래픽을 이상으로 잘못 탐지하여 가짜 양성률(false positive rate)을 높이는 주요 원인이 된다[25].

비지도 이상탐지 모델은 거리, 밀도, 재구성 오차 등 데이터의 기하학적 구조에 기반하여 이상점수를 산출하므로, 변수 간 스케일 차이와 분포 특성에 민감하다. 특히 LOF와 kNN과 같은 거리 기반 이상탐지 기법이나 AE 기반 재구성 오차를 이상점수로 사용하는 모델은 변수 스케일에 민감하므로, 전처리 단계에서의 정규화는 매우 중요하다. 또한, Zimek 등 (2012)은 고차원 데이터에서 이상탐지 성능이 데이터의 표현 방식과 변수 간 스케일 차이에 따라 크게 달라질 수 있음을 지적하며, 전처리의 중요성을 강조하였다[26]. 실제로 고차원 이상탐지 문제에서는 비균등 분포나 극단값의 존재가 일부 변수의 기여도를 과도하게 증폭시켜 이상점수의 분포를 왜곡할 수 있다. 이에 따라, 이러한 왜곡을 완화하기 위한 데이터 정규화나 스케일 조정의 필요성이 제기되어 왔다[27]. 따라서 전처리 과정은 모형 적합 이전 단계에서 이상점수의 안정성과 이상탐지 성능에 간접적으로 영향을 미치는 핵심 요소라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 네트워크 트래픽 데이터의 스케일 및 분포 특성을 조정하기 위해 최소-최대 정규화(min-max normalization)와 분위수 변환(quantile transformation)을 고려하였다. 두 방법은 모두 설명변수를 동일한 범위로 변환한다는 공통점을 가지지만, 극단값 처리 방식과 분포 보존 여부에 차이가 있다. 이에 본 절에서는 각 전처리 방법의 정의와 특성을 소개한다.

첫째, 최소-최대 정규화는 각 수치형 설명변수의 최솟값과 최댓값을 이용하여 값의 범위를 [0, 1]로 통일함으로써, 변수 간 스케일의 차이가 이상점수에 과도하게 반영되는 문제를 완화하는 선형 변환 기법이다. 즉, l번째 수치형 설명변수 x_l $(l = 1, \cdots, p)$에 대해 학습 데이터에서 계산한 최솟값과 최댓값을 사용하여 식(7)과 같이 변환한다. 최소-최대 정규화는 설명변수 내의 상대적 크기 관계를 유지하면서 범위를 통일하는 특징을 가진다.

$$x_{il}' = \frac{x_{il} - \min_{1 \le i \le n}(x_{il})}{\max_{1 \le i \le n}(x_{il}) - \min_{1 \le i \le n}(x_{il})} \quad (7)$$

둘째, 분위수 변환은 변수의 경험적 누적분포함수(empirical cumulative distribution function)를 이용하여 분포의 형태를 균등분포에 가깝게 재조정하는 비선형 변환이다. 변수에 극단값이 존재하거나 분포의 치우침이 심한 경우에 선형 정규화만으로 극단값의 영향력을 충분히 통제하기 어려울 수 있는데, 이때 분위수 변환이 유용하다. 본 연구에서는 l번째 수치형 설명변수 x_l에 대해 학습 데이터로부터 경험적 누적분포함수 $\hat{F}_l(\cdot)$를 추정한 뒤 식(8)과 같이 변환하도록 한다.

$$x_{il}' = \hat{F}_l(x_{il}) \quad (8)$$

분위수 변환은 단조 증가 변환이므로 관측값의 순위를 보존하며 [0, 1]의 범위로 압축해 극단값의 영향을 완화한다. 특히 네트워크 트래픽 데이터는 일부 변수에서 0 또는 작은 값에 관측치가 밀집되는 경향이 있어, 최소-최대 정규화를 적용하더라도 여전히 분포의 비대칭성이 크게 반영될 수 있다. 반면 분위수 변환은 분포의 형태를 고려함으로써, 모델 적합 과정에서 극단값의 영향을 보다 효과적으로 조정할 수 있다.

한편, 본 연구에서 kNN이나 LOF와 같이 거리 기반 모델을 사용하는 경우 수치형과 범주형 변수가 혼합된 데이터에서 관측값 간 유사도를 측정하기 위해 식(1)의 가우어 거리를 사용하였다. 또한, 나무 기반 모델인 IF를 적용할 때는 원-핫 인코딩으로 인한 고차원 희소성(sparsity) 문제를 완화하기 위해 바이너리 인코딩(binary encoding)을 활용하였다. 바이너리 인코딩이란 범주형 정보를 비트(bit) 형태로 변환하는 방식으로, 범주의 수준 수가 많은 경우 차원의 급격한 증가를 방지할 수 있는 장점이 있다. 인공신경망 모델인 오토인코더의 경우 기존 연구와의 비교를 위해 원-핫 인코딩을 적용하여 분석하였다.

3. 연구 방법론

본 장에서는 네트워크 이상탐지 문제에서 대표적인 벤치마크 데이터셋인 NSL-KDD와 UNSW-NB15를 대상으로, 2절에서 소개한 다섯 가지 비지도 학습 기반 이상탐지 모델을 적용한다. 먼저 3.1절에서 각 데이터의 특징을 설명하고, 3.2절에서는 2.2절에서 제시한 전처리 방법을 적용한 후 각 비지도 학습 모델의 학습 과정과 하이퍼파라미터 설정을 제시한다. 3.3절에서는 각 모델로부터 산출된 이상점수를 기반으로 이상 여부를 결정하기 위해, 임곗값 설정 방법으로 붓스트랩 절차를 적용한다. 마지막으로 3.4절에서는 각 비지도 학습 모델의 결과를 입력 변수로 활용하여 이상 여부를 판단하는 메타 기반 통합 모델을 제시한다. Figure 1은 네트워크 트래픽 데이터를 기반으로 개별 이상탐지 모델 학습과 메타모델 학습 과정을 포함한 전체 프레임워크의 구조를 도식화한 것이다.

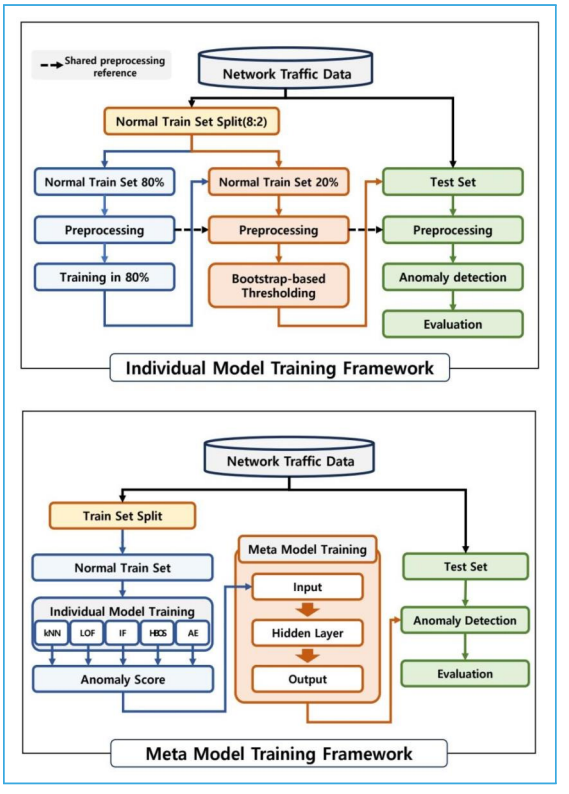


Figure 1. Architecture of the individual model and meta-model training frameworks applied to network traffic data

3.1. 데이터셋 소개

3.1.1. NSL-KDD 데이터셋

NSL-KDD 데이터셋은 네트워크 침입 탐지 성능 평가를 위해 널리 사용되어 온 KDD Cup 99 데이터셋의 구조적 문제를 개선하기 위해 제안되었다[11]. 기존 KDD Cup 99는 학습 데이터의 약 78%와 평가 데이터의 약 75%가 중복 관측치로 구성되어 있어, 특정 패턴에 과도하게 적합된 모델이 높은 성능을 보이는 편향 문제가 지적되었다. NSL-KDD 데이터셋은 이러한 중복을 제거하여 보다 공정한 성능 비교가 가능하도록 구성되어 왔다. 이 데이터는 41개의 설명변수와 1개의 반응변수로 구성되며, 반응변수는 정상 트래픽과 다양한 공격 유형을 나타낸다. 학습 데이터와 평가 데이터로 구성되며, 각각 125,973개와 22,544개의 관측치를 포함한다. 설명변수의 유형별 구성은 Table 1에 요약하였다.

3.1.2. UNSW-NB15 데이터셋

호주 사이버 보안 센터(ACSC)에서 생성된 UNSW-NB15 데이터셋은 기존의 KDD Cup 99나 NSL-KDD와 같은 벤치마크 데이터셋이 현대 네트워크 환경과 최신 공격 유형을 충분히 반영하지 못한다는 한계를 극복하기 위해 제안되었다[12]. 이 데이터는 실제 정상 트래픽과 합성된 최신 공격 시나리오를 결합하여 생성되었으며, 보다 현실적인 침입 탐지 환경을 나타낸다고 알려져 있다. UNSW-NB15 데이터셋은 42개의 설명변수와 2개의 반응변수로 구성되며, 반응변수는 정상과 9가지 공격 유형으로 구분된다. 해당 데이터셋은 학습 데이터 175,341개와 평가 데이터 82,332개의 관측치로 구성되며, 설명변수의 유형별 구성 또한 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Number of variables by type (N: numeric, C: categorical, B: binary)

Dataset	N	C	B	Total
NSL-KDD	32	3	6	41
UNSW-NB15	37	3	2	42

3.2. 비지도 이상탐지 모델의 적용 및 설정

본 연구에서는 모형 간 비교의 공정성과 결과의 일반성을 확보하기 위해 각 이상탐지 모형의 하이퍼파라미터를 선행연구에서 검증된 표준 설정에 근거하여 일관되게 적용하였다. 이를 통해 임의적 튜닝으로 인한 성능 왜곡 가능성을 최소화하고, 각 이상탐지 기법 고유의 구조적 특성이 탐지 성능에 미치는 영향을 명확히 평가하고자 하였다. 또한 모든 무작위 추출 및 초기화 과정에서 난수 시드(seed)를 42로 고정하여 실험의 재현성을 확보하였다.

kNN은 Bai와 Fossaceca (2024)의 설정을 따라 최근접 이웃 수 k를 1로 설정하였다[14]. LOF는 Breunig 등 (2000)과 Otokwala 등 (2024)을 참고하여 최근접 이웃 수 k를 10으로 설정하였다[7, 16]. IF는 Elsaid와 Binbusayyis (2024)의 연구에 따라 식(4)에서 부분 표본 크기(m)를 512, 나무 수(T)를 100으로 설정하였고, 각 나무 모형 학습 시 전체 설명변수의 40%를 무작위로 선택하였다[17]. HBOS의 계급 구간 수는 두 데이터셋 모두 10개로 설정하였다. 마지막으로 AE는 Vaiyapuri와 Binbusayyis (2020)의 구조를 기반으로 병목(bottleneck) 구조를 적용하였다[23]. 모델 학습에서 최적화 알고리즘은 Adam, 학습률은 0.001, 활성화 함수는 하이퍼볼릭 탄젠트(tanh)를 사용하였다. 배치 크기는 128, 학습 에폭(epoch)은 500으로 설정하였으며, 과적합 방지를 위한 조기 종료(early stopping)를 적용하였다. 각 하이퍼파라미터의 구성은 Table 2와 같다.

Table 2. Hyperparameter settings for each model

Model	Hyperparameter	Value
kNN	Distance metric	Gower distance
	Neighborhood size (k)	1
LOF	Distance metric	Gower distance
	Neighborhood size (k)	10
IF	Number of trees	100
	Subsampling size	512
	Feature subsampling ratio	0.4
HBOS	Number of bins	10
AE	1st hidden layer	32
	2nd hidden layer	24
	Latent layer	16
	Optimizer	Adam
	Learning rate	0.001
	Batch size	128
	Epochs	500
	Early stopping	20
	Activation function	tanh

3.3. 붓스트랩 기반 임곗값 설정

모델 간 탐지 성능을 공정하게 비교하기 위해서는 임곗값 설정 과정에서 발생할 수 있는 추정의 변동성을 최소화하고 일관된 기준을 적용하는 것이 중요하다. 그러나 비지도 학습 모델에서 산출되는 이상점수의 분포를 제대로 파악하는 것은 어렵기 때문에, 적절한 임곗값을 설정하는 것은 쉽지 않은 문제이다. Kang과 Kim (2011)은 분포 가정에 대한 의존을 완화하기 위해 붓스트랩 기법을 활용하여 임곗값을 추정하였다[28]. 이에 본 연구에서는 Efron (1979)이 제안한 붓스트랩 방법을 적용하여 정상 검증 데이터에서 산출된 이상점수를 기반으로 임곗값을 설정하였다[29]. 구체적으로, 각 모델별 정상 검증 데이터의 이상점수 집합에 대해 복원추

출 기반 붓스트랩을 500회 수행하였다. 각 붓스트랩 표본에서 상위 α%의 비율을 공격으로 판정하도록 임곗값을 산출하였고, 이렇게 얻어진 임곗값들의 분포에서 중앙값을 최종 임곗값으로 채택하였다. 이러한 절차는 단일 표본에 기반한 추정 오차를 완화하고 모델 간 비교의 일관성을 확보하기 위한 것으로, 붓스트랩을 활용한 임곗값 추정이 평가의 신뢰성을 높인다는 Tobar 등 (2023)의 연구 결과와도 부합한다[30].

3.4. 메타 기반 통합 모델

본 연구에서는 각 비지도 학습 모델로부터 산출된 이상점수를 입력 변수로 활용하여 정상·공격 여부를 예측하는 메타 기반 통합 모델을 제안한다. 비지도 학습 모델은 이상점수의 임곗값 설정에 따라 탐지 성능이 달라지며, 모델별로 산출되는 점수의 분포와 성능 특성 또한 다르다. 이에 본 연구에서는 이질적인 이상점수를 하나의 결정 구조로 통합하기 위한 메타 프레임워크를 설계하였다. 이러한 접근은 기저 모델(base model)이 산출한 예측값 또는 점수를 입력 변수로 사용하고, 이를 종합하여 최종 판단을 수행하는 상위 학습기(meta learner)를 추가로 학습하는 스태킹 앙상블 방법과 유사한 구조를 갖는다[31].

본 연구에서는 개별 비지도 모델이 전처리 방법과 결합하여 더 나은 성능을 보인 조합으로부터 산출된 이상점수를 메타모델의 입력으로 사용하였다. 메타모델은 5차원 입력을 받아 하나의 은닉층을 거쳐 이진 확률을 출력하는 인공신경망 모델로 구성하였다. 출력층에는 시그모이드(sigmoid) 함수를 적용하여 공격 확률로 해석하였고, 손실 함수는 이진 크로스엔트로피(binary cross entropy)를 사용하였다. 최적화 알고리즘은 Adam을 적용하였고, 은닉층의 차원은 10, 과적합 방지를 위한 드롭아웃(dropout)은 0.2, 학습은 20 에폭 동안 수행하였다.

Figure 2는 본 연구에서 사용한 메타모델의 전체적인 구조를 도식화한 것이다.

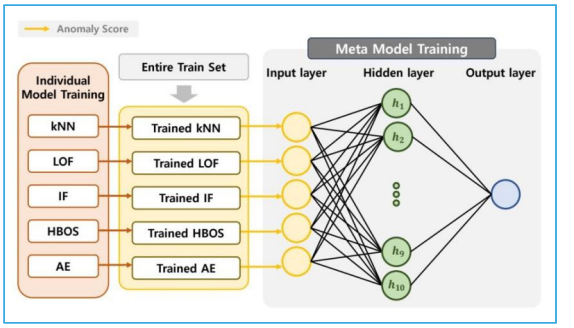
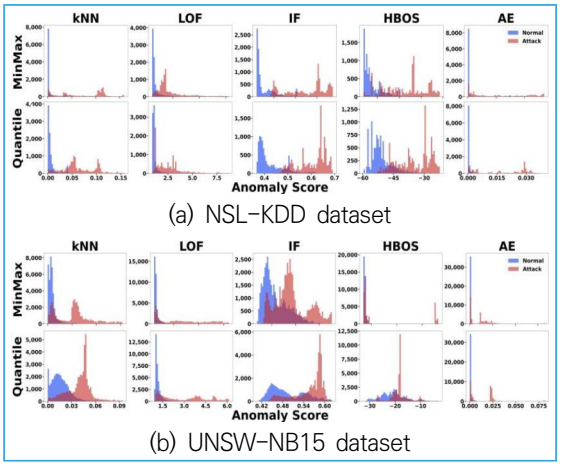


Figure 2. Meta-model training architecture using anomaly scores from multiple base models

4. 실험 결과 분석

4.1. 전처리 방법이 이상점수 분포에 미치는 영향

전처리 방법이 이상점수의 통계적 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 NSL-KDD와 UNSW-NB15 데이터셋을 대상으로 실험을 수행하였다. Figure 3은 각 데이터에 대해 최소-최대 정규화와 분위수 변환을 적용한 후, 이상점수 분포의 변화를 시각적으로 나타낸 것이다. 최소-최대 정규화를 적용한 경우 정상 관측치는 주로 낮은 점수 영역에 집중되고, 공격 관측치는 상대적으로 넓은 점수에 분포하는 경향이 나타났다. 반면 분위수 변환을 적용한 경우에는 정상과 공격 관측치 간 이상점수가 보다 균등하게 분포



(a) NSL-KDD dataset

(b) UNSW-NB15 dataset

Figure 3. Distributions of anomaly scores by model and preprocessing method

하면서 정상과 공격 관측치 간 분포의 겹침이 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 전처리 방식이 이상점수의 분포 구조에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 또한 이상탐지 기법의 특성에 따른 민감도 차이도 관찰되었다. kNN, LOF와 같은 거리·밀도 기반 모델은 입력 분포 변화에 민감하게 반응하여 분위수 변환 시 공격 샘플의 상위 꼬리 분포가 더욱 뚜렷하게 형성되었다. 반면 IF는 구조적 고립도에 기반한 모델로서 전처리 변화에 대해 상대적으로 이상점수가 안정적인 분포 형태를 유지하였다. 이러한 결과는 전처리 방법이 이상점수의 분포 구조와 분리도에 유의한 영향을 미침을 보여준다. 특히 분위수 변환은 거리·밀도 기반 모델에서 정상과 공격 샘플 간 분리도를 향상시키는 경향을 보였으나, 모든 이상탐지 기법에서 일관되게 우수한 성능을 보이는 것은 아니었다. 예컨대 구조적 고립도에 기반한 IF나 재구성 오차 기반 AE의 경우 전처리 변화에 대한 반응이 상대적으로 다르게 나타났다. 이는 단일 임곗값 기반의 이상탐지에서 전처리 방식과 모델 선택 시, 알고리즘 구조에 따라 탐지 결과가 달라질 수 있음을 시사한다. 특히 실제 네트워크 탐지 환경에서는 임곗값 설정에 따라 성능이 변화할 수 있으므로, 다양한 모델에서 산출된 이상점수를 통합하여 보다 안정적인 탐지 결과를 도출하는 것이 필요해 보인다.

4.2. 모델별 성능 비교

이 절에서는 최소-최대 정규화와 분위수 변환 적용에 따라 다섯 가지의 이상탐지 모델 성능 변화를 비교 분석하였다. AUC 기준으로 분석한 결과(Table 3), NSL-KDD 데이터셋에서는 대부분의 모델이 0.92 이상의 높은 분리 성능을 보이며 전반적으로 안정적인 탐지 능력을 나타냈다. 특히 kNN, IF, AE 모델의 경우 전처리 방식 변화와 관계없이 AUC가 0.94~0.97로 나타났다. 반면 LOF는 0.83~0.85 수준에 그쳐 상대적으로 낮은 분리 성능을 보였다.

UNSW-NB15 데이터셋에 대해서는 전체적으로 AUC 성능이 다소 떨어졌는데, kNN, LOF, AE는 전처리 방식과 무관하게 0.90 내외의 성능을 보였지만, IF와 HBOS는 다소 낮은 AUC 값을 보였고, 특히 HBOS는 분위수 변환 시 0.75로 낮은 값을 나타내었다. UNSW-NB15 데이터셋의 경우는 NSL-KDD 데이터셋에 비해 모델 구조와 전처리 방식 간 분리 성능이 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

전처리와 모델의 조합 관점에서 살펴보면, 분위수 변환은 전처리에 대한 차이보다 모델 간 차이가 더 크게 나타남을 알 수 있다. NSL-KDD 데이터셋의 경우 전처리 방식과 상관없이 LOF의 AUC 성능이 낮았으며, 다른 모델의 성능은 비교적 높게 나타났다. 또한 분위수 변환에 대해 AUC 값이 소폭 상승하는 경향이 나타났다. UNSW-NB15 데이터셋에서는 전처리와 상관없이 LOF와 AE 모델의 성능이 높고, IF와 HBOS의 성능이 낮게 나타났다. 다만, 이 두 방법의 경우 IF는 분위수 변환에 대해 성능이 상승하고, HBOS는 오히려 감소하는 등 모델의 성능은 전처리 방법과 모델에 따라 탐지 성능이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 앞에서도 언급한 바와 같이 여러 모델에서 산출된 이상점수를 통합하여 안정적인 탐지에 대한 필요성이 크다는 것을 확인할 수 있다.

Table 3. Model-wise AUC performance by preprocessing method

Dataset	Model	Min-Max	Quantile	Diff
NSL-KDD	kNN	0.95	0.96	+0.01
	LOF	0.85	0.83	-0.02
	IF	0.95	0.97	+0.02
	HBOS	0.92	0.95	+0.03
	AE	0.94	0.97	+0.03
UNSW-NB15	kNN	0.89	0.87	-0.02
	LOF	0.90	0.91	+0.01
	IF	0.79	0.82	+0.03
	HBOS	0.78	0.75	-0.03
	AE	0.88	0.90	+0.02

AUC는 임곗값 설정과 무관하게 이상점수의 순위 구별 능력을 평가하는 지표로, 무작위로 선택된 공격

관측치가 정상 관측치보다 높은 이상점수를 받을 확률로 해석될 수 있다. 따라서, AUC는 모델의 전반적인 판별 성능을 나타내는 반면, 정밀도, 재현율, 특이도, F1 점수는 임곗값 설정하에서의 실제 판정 성능을 반영한다. 따라서 본 절에서는 전처리 방식과 임곗값 수준에 따른 세부 성능 지표의 변화를 비교하여 개별 모델의 성능을 분석하기로 한다. 이를 위해 3.3절에서 소개한 방식으로 $\alpha = 0.10$과 $\alpha = 0.15$의 두 가지 수준의 임곗값을 선택하였고, 이에 따른 탐지 성능의 민감도도 함께 살펴보기로 한다. Table 4와 Table 5는 각각 최소-최대 정규화와 분위수 변환을 적용한 경우, 두 데이터셋에서의 모델별 탐지 성능을 비교한 결과를 나타낸다.

먼저 두 데이터셋 간 성능 수준을 비교하면, 전반적으로 NSL-KDD 데이터셋에서 대부분의 모델이 높은 성능을 보인 반면 UNSW-NB15 데이터셋에서

Table 4. Detection performance of unsupervised models under different threshold levels (α) with min-max normalization

Dataset	Model	α=0.10				α=0.15				AUC
		Precision	Recall	Specificity	F1 score	Precision	Recall	Specificity	F1 score	
NSL-KDD	kNN	0.90	0.89	0.87	0.89	0.88	0.92	0.84	0.90	0.95
	LOF	0.83	0.62	0.83	0.71	0.83	0.82	0.78	0.82	0.85
	IF	0.92	0.76	0.92	0.83	0.91	0.80	0.90	0.85	0.95
	HBOS	0.92	0.71	0.92	0.80	0.92	0.76	0.91	0.83	0.92
	AE	0.91	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90	0.86	0.90	0.94
UNSW-NB15	kNN	0.86	0.80	0.84	0.83	0.82	0.82	0.78	0.82	0.89
	LOF	0.87	0.80	0.85	0.83	0.84	0.83	0.80	0.83	0.90
	IF	0.78	0.51	0.83	0.62	0.77	0.69	0.75	0.73	0.79
	HBOS	0.84	0.53	0.87	0.65	0.78	0.59	0.80	0.67	0.78
	AE	0.86	0.76	0.85	0.81	0.81	0.81	0.77	0.81	0.88

Table 5. Detection performance of unsupervised models under different threshold levels (α) with quantile transformation

Dataset	Model	α=0.10				α=0.15				AUC
		Precision	Recall	Specificity	F1 score	Precision	Recall	Specificity	F1 score	
NSL-KDD	kNN	0.88	0.95	0.82	0.91	0.84	0.96	0.77	0.90	0.96
	LOF	0.84	0.63	0.84	0.72	0.83	0.79	0.78	0.81	0.83
	IF	0.96	0.82	0.95	0.89	0.95	0.88	0.93	0.91	0.97
	HBOS	0.96	0.75	0.96	0.84	0.94	0.79	0.94	0.86	0.95
	AE	0.90	0.91	0.86	0.90	0.88	0.96	0.82	0.91	0.97
UNSW-NB15	kNN	0.88	0.77	0.87	0.82	0.85	0.81	0.83	0.83	0.87
	LOF	0.86	0.85	0.83	0.86	0.83	0.89	0.77	0.86	0.91
	IF	0.82	0.70	0.81	0.76	0.77	0.76	0.73	0.77	0.82
	HBOS	0.73	0.29	0.86	0.42	0.69	0.32	0.83	0.44	0.75
	AE	0.90	0.80	0.88	0.85	0.86	0.83	0.83	0.84	0.90

는 일부 모델에서 성능 저하가 나타났다. 특히 kNN과 AE는 두 데이터셋 모두에서 비교적 높은 F1 점수를 유지하며 안정적인 탐지 성능을 보였다. LOF 역시 두 데이터셋에서 유사한 수준의 F1 점수를 기록하여 데이터 변화에 따른 성능 변동이 크지 않은 것으로 나타났다.

반면 IF와 HBOS는 데이터 변화에 따라 성능 차이가 비교적 크게 나타났다. IF는 NSL-KDD 데이터셋에서는 재현율이 0.76~0.88 수준으로 비교적 안정적인 탐지 성능을 보였으나, UNSW-NB15 데이터셋에 최소-최대 정규화를 적용한 경우 재현율이 0.51~0.69 수준으로 감소하여 공격 탐지 능력이 저하되는 경향을 보였다. HBOS 역시 UNSW-NB15 데이터셋에서 상대적으로 낮은 재현율을 보여 데이터 특성 변화에 민감한 모습을 나타냈다. 이러한 결과는 밀도 기반 또는 분포 기반 접근이 데이터 분포 구조 변화에 영향을 받을 수 있음을 시사한다.

한편, 전처리 방식에 따른 성능 차이도 일부 모델에서 관찰되었다. 분위수 변환을 적용한 경우 IF의 재현율이 UNSW-NB15 데이터셋에서 0.70~0.76 수준으로 회복되는 등 일부 모델에서 탐지 성능이 개선되는 경향이 나타났다. 반면 HBOS는 분위수 변환 적용 시 UNSW-NB15에서 재현율이 0.29~0.32 수준으로 크게 감소하여 전처리 방식에 따른 영향이 모델마다 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 데이터셋 간 특성 변화는 모든 모델에서 동일한 방향의 성능 변화를 유발하지 않았으며, 모델의 탐지 원리와 데이터 분포 구조에 따라 성능 변화 양상이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 이는 단일 모델에 의존하기보다는 서로 다른 탐지 특성을 가진 모델의 정보를 통합하는 접근이 필요함을 시사한다.

4.3. 메타분석 성능

Table 6은 다섯 가지 비지도 이상탐지 모델이 산출한 이상점수를 입력으로 하여, 신경망 기반 메타분류기를 학습한 결과를 요약한 것이다.

Table 6. Performance of meta-classifier combining unsupervised anomaly scores

Dataset	Precision	Recall	Specificity	F1 score	AUC
NSL-KDD	0.96	0.89	0.95	0.93	0.98
UNSW-NB15	0.77	0.97	0.65	0.86	0.95

두 데이터셋 모두에서 메타모델은 높은 AUC 값을 보였으며(NSL-KDD: 0.98, UNSW-NB15: 0.95), 이는 서로 다른 모델에서 산출된 이상점수를 통합함으로써 정상과 공격 트래픽을 효과적으로 구분할 수 있음을 보여준다.

먼저 NSL-KDD 데이터셋에서는 정밀도(0.96), 재현율(0.89), 특이도(0.95)가 전반적으로 고르게 나타났으며, F1 점수 역시 0.93로 확인되었다. 이는 메타모델이 공격 탐지와 정상 판정을 균형 있게 수행하면서 안정적인 분류 성능을 달성하고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 여러 비지도 모델의 이상점수를 결합함으로써 개별 모델이 가지는 한계를 상호 보완하고, 보다 일관된 탐지 결과를 도출할 수 있음을 시사한다.

UNSW-NB15 데이터셋에서도 메타모델은 재현율이 0.97로 매우 높게 나타나 대부분의 공격 트래픽을 효과적으로 탐지하는 성향을 보였다. 이는 다양한 공격 유형이 포함된 복잡한 네트워크 환경에서도 메타모델이 높은 탐지 성능을 유지할 수 있음을 보여준다. 특이도는 0.65로 상대적으로 낮게 나타나 일부 정상 트래픽이 공격으로 판정되는 경향이 관찰되었으나, F1 점수는 0.86, AUC는 0.95로 나타나 전체적인 이상탐지 능력은 여전히 높은 수준을 유지하였다. 비지도 이상탐지 모델의 이상점수를 결합하는 메타학습 접근은 서로 다른 데이터 환경에서도 안정적으로 높은 이상탐지 성능을 달성할 수 있음을 보여준다. 특히 개별 모델의 성능이 데이터 특성에 따라 크게 달라질 수 있는 상황에서, 여러 모델의 정보를 통합적으로 활용하는 메타모델이 보다

견고하고 일관된 탐지 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론 및 토의

본 연구는 비대칭적이고 극단값이 빈번하게 나타나는 네트워크 트래픽 데이터 환경에서 비지도 학습 기반 이상탐지 모델의 탐지 성능과 안정성을 향상시키기 위해, 분위수 변환 기반 전처리와 메타학습 구조를 결합한 이상탐지 프레임워크를 제안하였다. 실험 결과, 분위수 변환은 변수 분포의 비대칭성과 극단값 영향을 완화함으로써 이상점수의 분리 능력과 학습 안정성을 향상시키는 효과를 보였다. 또한 개별 모델들은 알고리즘적 특성에 따라 서로 다른 탐지 양상을 나타냈다. kNN과 LOF와 같은 국소 기반 모델은 데이터 분포 변화에 민감하게 반응하였으며, IF는 전역적 고립 구조를 기반으로 비교적 안정적인 성능을 유지하였다. HBOS는 데이터 복잡도에 따라 성능 편차가 크게 나타난 반면, AE는 비선형 잠재 표현 학습을 통해 우수한 이상탐지 능력을 나타내었다.

이러한 개별적인 모델들의 특성을 종합적으로 검증하기 위해 다섯 가지 모델의 결과를 결합한 다수결 투표(majority vote) 기반 앙상블 분석을 별도로 수행하였고, 그 결과 NSL-KDD 데이터셋에서는 앙상블 모델이 F1 점수 0.92, 재현율 0.94 수준의 성능을 기록하며 단일 모델의 성능 변동성을 일부 완화하는 효과를 보였다. 그러나 데이터 구조가 보다 복잡한 UNSW-NB15 데이터셋에서는 F1 점수가 0.85, 재현율이 0.81 수준에 머물러 단순한 다수결 결합 방식만으로는 다양한 공격 패턴에 대한 탐지 성능을 충분히 개선하기 어려운 한계도 확인하였다. 이는 NSL-KDD 데이터셋이 정제된 벤치마크 데이터셋으로서 비교적 일관된 공격 분포를 형성하는 것과 달리, UNSW-NB15 데이터셋은 현대적 네트워크 프로토콜의 다양성과 변칙적인 공격 기법이 반영되어 데이터 내부의 이질성(heterogeneity)이 높기 때문으로 분석된다. 이러한 환경에서는 개별 모델 간의 예측 불일치가 심화되어, 단순 다수결 과정에서 공격 신호가 상쇄되는 구조적 한계가 발생한 것으로 해석된다.

그러나 본 연구에서 제안한 메타학습 기반 이상탐지 구조는 개별 비지도 모델이 갖는 임곗값 의존성과 성능 편차의 한계를 완화하고, 복잡한 네트워크 트래픽 환경에서도 안정적이고 일관된 탐지 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다. 나아가 국방 네트워크 환경에서는 공격 트래픽의 미탐이 작전 수행 및 정보 보안에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구의 메타학습 기반 통합 구조는 라벨 확보가 제한적이고 미탐 비용이 큰 국방 네트워크 환경에서 유용한 이상탐지 전략이 될 수 있음을 시사한다.

6. 향후 과제

제안된 프레임워크의 실제 운용 가능성을 평가하기 위해서는 탐지 성능뿐만 아니라 지연 시간(latency)과 연산 비용에 대한 추가적인 검토가 필요하다. 본 연구의 메타학습 구조는 다수의 비지도 이상탐지 모델에서 산출된 이상점수를 결합하므로, 단일 모델 기반 탐지 방식에 비해 더 많은 연산 자원을 요구할 수 있다. 특히 kNN과 LOF와 같은 거리 기반 모델은 관측치 수와 차원이 증가할수록 계산 비용이 커질 수 있으며, 이는 자원이 제한되고 실시간 응답이 요구되는 전술 에지(tactical edge) 환경에서는 중요한 제약 요소가 된다. 따라서 향후 연구에서는 전처리부터 개별 모델의 이상점수 산출, 메타모델의 최종 예측에 이르는 지연 시간을 정량적으로 측정하고, 모델 경량화 및 운용 환경에 적합한 모델 선택 전략 등을 함께 검토할 필요가 있다.

또한 본 연구에서는 NSL-KDD와 UNSW-NB15 데이터셋을 기반으로 검증하였으나, 최신 공격 유형과 암호화 트래픽 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이에 따라 실제 국방 환경 적용 가능성을 보다 명확히 평가하기 위해서는 최신 침입 탐지 데이터셋과 군용 네트워크의 폐쇄적 운영 특성을 반영한 추가적인 검증이 요구된다.

사 사

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부/교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-00561280).

참고문헌

1 Oh, C.-M. (2025). Analysis of cybersecurity threats and response strategies in the defense network environment. *Journal of the Korea Institute of Information Technology Policy and Management, 17*(1), 3819-3824.

2 Kajander, A., Liivoja, R., & Naagel, M. (2025). Cybersecurity of weapon systems: International law requirements and technical standards. *Journal of Cybersecurity, 11*(1), tyaf017. https://doi.org/10.1093/cybsec/tyaf017

3 Kim, J. G., Kim, H., Lee, J., & Lee, S. (2023). Intrusion Detection Model for the Enhancement of Cybersecurity in Defense IoT. *Journal of Defense and Security, 5*(2), 11-43. https://doi.org/10.23425/defsec.2023.5.2.11

4 Khraisat, A., Gondal, I., Vamplew, P., & Kamruzzaman, J. (2019). Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges. *Cybersecurity, 2*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7

5 Alshamrani, A., Myneni, S., Chowdhary, A., & Huang, D. (2019). A survey on advanced persistent threats: Techniques, solutions, challenges, and research opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21*(2), 1851-1877. https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2891891

6 Angiulli, F., & Pizzuti, C. (2002). Fast outlier detection in high dimensional spaces. In T. Elomaa, H. Mannila, & H. Toivonen (Eds.), *Principles of data mining and knowledge discovery* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2431, pp. 15-27). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45681-3_2

7 Breunig, M. M., Kriegel, H.-P., Ng, R. T., & Sander, J. (2000). LOF: identifying density-based local outliers. In *Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data* (pp. 93-104). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/335191.335388

8 Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation forest. In *2008 eighth ieee international conference on data mining* (pp. 413-422). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17

9 Goldstein, M., & Dengel, A. (2012). Histogram-based outlier score (HBOS): A fast unsupervised anomaly detection algorithm. In S. Wölfl (Ed.), *KI-2012: Poster and Demo Track* (pp. 59-63).

10 Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science, 313*(5786), 504-507. https://doi.org/10.1126/science.1127647

11 Tavallaee, M., Bagheri, E., Lu, W., & Ghorbani, A. A. (2009). A detailed analysis of the KDD CUP 99 data set. In *2009 IEEE symposium on computational intelligence for security and defense applications* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/CISDA.2009.5356528

12 Moustafa, N., & Slay, J. (2015). UNSW-NB15: A comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set). In *2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/MilCIS.2015.7348942

13 Gower, J. C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics, 27*(4), 857-871. https://doi.org/10.2307/2528823

14 Bai, K. Z., & Fossaceca, J. M. (2025). EM-AUC: A Novel Algorithm for Evaluating Anomaly Based Network Intrusion Detection Systems. *Sensors, 25*(1), 78. https://doi.org/10.3390/s25010078

15 Auskalnis, J., Paulauskas, N., & Baskys, A. (2018). Application of local outlier factor algorithm to detect anomalies in computer network. *Elektronika ir Elektrotechnika, 24*(3), 96-99. https://doi.org/10.5755/j01.eie.24.3.20972

16 Otokwala, U., Arifeen, M., & Petrovski, A. (2024). A comparative study of novelty detection models for zero day intrusion detection in industrial internet of things. In G. Panoutsos, M. Mahfouf, & L. S. Mihaylova (Eds.), *Advances in computational intelligence systems* (pp. 238-249). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55568-8_20

17 Elsaid, S. A., & Binbusayyis, A. (2024). An optimized

isolation forest based intrusion detection system for heterogeneous and streaming data in the industrial Internet of Things (IIoT) networks. *Discover Applied Sciences, 6*(9), 483. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06165-w

18 Xiao, C.-H., Su, C., Bao, C.-X., & Li, X. (2018). Anomaly detection in network management system based on isolation forest. In *2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC)* (pp. 56-60). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/document/8843003

19 Paulauskas, N., & Baskys, A. (2019). Application of histogram-based outlier scores to detect computer network anomalies. *Electronics, 8*(11), 1251. https://doi.org/10.3390/electronics8111251

20 Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1985). *Learning internal representations by error propagation* (ICS Report No. 8506). University of California.

21 Sakurada, M., & Yairi, T. (2014). Anomaly detection using autoencoders with nonlinear dimensionality reduction. In *Proceedings of the MLSDA 2014 2nd workshop on machine learning for sensory data analysis* (pp. 4-11). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2689746.2689747

22 An, J., & Cho, S. (2015). *Variational autoencoder based anomaly detection using reconstruction probability*. Seoul National University.

23 Vaiyapuri, T., & Binbusayyis, A. (2020). Application of deep autoencoder as an one-class classifier for unsupervised network intrusion detection: a comparative evaluation. *PeerJ Computer Science, 6*, e327. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.327

24 Singh, A., & Jang-Jaccard, J. (2022). *Autoencoder-based unsupervised intrusion detection using multi-scale convolutional recurrent networks*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.03779

25 Lazarevic, A., Ertoz, L., Kumar, V., Ozgur, A., & Srivastava, J. (2003). A comparative study of anomaly detection schemes in network intrusion detection. In *Proceedings of the 2003 SIAM international conference on data mining* (pp. 25-36). Society for Industrial and Applied Mathematics. https://doi.org/10.1137/1.9781611972733.3

26 Zimek, A., Schubert, E., & Kriegel, H.-P. (2012). A survey on unsupervised outlier detection in high-dimensional numerical data. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal, 5*(5), 363-387. https://doi.org/10.1002/sam.11161

27 Aggarwal, C. C. (2017). An introduction to outlier analysis. In *Outlier analysis* (2nd ed., pp. 1-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3_1

28 Kang, J. H., & Kim, S. B. (2011). Bootstrap-Based Fault Identification *Method. Journal of Korean Society for Quality Management, 39*(2), 234-243.

29 Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *The Annals of Statistics, 7*(1), 1-26. https://doi.org/10.1214/aos/1176344552

30 Tobar, A., Flores, M., Castillo-Paez, S., Naya, S., Zaragoza, S., & Tarrio-Saavedra, J. (2023). Bootstrap-LOCI data mining methodology for anomaly detection in buildings energy efficiency. *Energy Reports, 10,* 244-254. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.025

31 Wolpert, D. H. (1992). Stacked generalization. *Neural networks, 5*(2), 241-259. https://doi.org/10.1016/S0893-6080(05)80023-1

유도무기 소표본 품질평가에서 사전정보 기반 베이지안 판정의 효과 분석

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Evaluating Prior Information Based Bayesian Acceptance for Small Sample Guided Weapon Quality Assessment

이대한†, Daehan Lee
방위사업청, 기반전력사업본부, 해군소령
Lieutenant Commander, Current Capabilities Program Agency, Defense Acquisition Program Administration

Abstract

Evaluation of guided weapon hit probability is typically conducted under small-sample conditions because of limited flight tests, which necessitates a statistical method for small-sample quality evaluation. The Clopper-Pearson (CP) interval guarantees a nominal confidence level; however, its conservativeness yields excessively wide intervals, increasing the likelihood that a qualifying system could be judged as unacceptable. This study proposes a Bayesian acceptance method that constructs a prior distribution from the modeling and simulation (M&S) results and combines it with live-fire test data. Prior information credibility is translated into an effective sample size (ESS), and calibration principles are suggested based on the verification, validation, and accreditation (VV&A) results. The method is evaluated using the confidence interval width, operating characteristic (OC) curves, decision repeatability, and Sobol' global sensitivity analysis. The results show that under the representative scenario (acceptance threshold $p_0 = 0.70$, decision confidence $1-\gamma = 0.80$, AQL $P_1 = 0.85$, RQL $P_2 = 0.60$, and effective sample size $n_0 = 10$), the Bayesian criterion reduces the minimum number of tests required from 21 to 15 and decreases live-fire tests by approximately 38%, while maintaining the risks of producers and consumers within allowable limits. Sobol' analysis identifies the true hit probability and effective sample size as the dominant factors governing the minimum test requirement. However, the reduction depends on the agreement between the prior and true hit probabilities, required precision, and live-fire/prior-information allocation. Excessive reliance on M&S may increase the risk of incorrect decisions. Therefore, M&S-based prior information effectively reduces small-sample uncertainty. However, its use should be conditional on rigorous VV&A and conservative prior-strength calibration.

keywords : guided weapon, small-sample quality evaluation, Bayesian acceptance, prior information, hit probability

† Corresponding Author : Daehan Lee
Tel : +82-2-2079-6894, Fax : +82-2-773-7587, email : dxt0711@naver.com
Defense Acquisition Program Administration, 13809, 47, Gwanmun-ro, Gwacheon-si, Gyeonggi-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 22th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

유도무기의 비행시험은 개발기간, 예산, 시험장 환경, 지원 인력 및 장비 등의 제약으로 인해 통계적으로 충분한 표본을 확보하기 어려운 경우가 많다. 이러한 소표본 조건에서도 명중확률에 대한 합격판정은 규정된 신뢰수준을 만족하는 통계적 근거를 필요로 하며, 실무적으로는 신뢰구간에 기반한 판정 규칙이 활용될 수 있다. 이항비율에 대한 정확한(exact) 신뢰구간으로 사용되는 CP(Clopper-Pearson) 구간은 지정된 신뢰수준을 보장하지만[1], 실제 포함확률이 명목 신뢰수준을 필요 이상으로 초과하는 보수성을 가져 구간이 불필요하게 넓어질 수 있다[2-3]. Thulin (2014)은 이러한 보수성이 동일한 판정 수준을 달성하는 데 필요한 표본 수를 증가시킬 수 있음을 정량적으로 보였다[4].

소표본 조건에서 이러한 한계를 완화하려면 시험 외부의 정보를 결합하여 추정 불확실성을 줄일 필요가 있다. 그 대표적인 수단이 모델링 및 시뮬레이션(Modeling & Simulation, M&S)이며, M&S는 실사격 시험을 직접 대체하기보다 제한된 실사격 자료를 보완하는 분석 수단으로 활용될 수 있다. 국방 분야에서는 VV&A(Verification, Validation, and Accreditation) 체계를 통해 M&S의 사용 목적에 상응하는 신뢰성을 확보하도록 요구하고 있으므로[5-7], VV&A를 거쳐 신뢰성이 확인된 M&S 결과는 소표본 추정의 불확실성을 줄이기 위한 보조적 사전정보로 해석할 수 있다.

이와 같은 정보 결합에는 베이지안 접근이 적합하다. 이항 시험 상황에서 Beta-Binomial 모형을 적용하면 M&S 결과를 명중확률에 대한 사전분포로 표현하고, 실사격 관측값을 반영하여 사후분포를 해석적으로 갱신할 수 있다[8-9]. 신뢰성 공학 분야에서는 제한된 시험데이터를 보완하기 위해 사전정보를 활용하는 연구가 지속적으로 수행되어 왔으나[10-14], 기존 연구는 주로 제품 신뢰성 입증이나 표본수 산정에 초점을 두고 있어, 유도무기 비행시험과 같이 실사격 횟수가 제한된 조건에서의 합격판정 문제는 직접적으로 다루지 못하였다.

합격판정 체계의 성능은 운용특성(Operating Characteristic, OC) 곡선을 통해 생산자 위험과 소비자 위험을 동시에 정량화하여 평가할 수 있다[15-16]. 또한 합격판정 결과는 시험 발수, 명중확률 참값, 유효 표본 크기, 합격 임곗값 등 여러 매개변수의 영향을 받으므로, Sobol' 전역 민감도 분석을 통해 판정 품질을 지배하는 요인을 식별할 필요가 있다[17-19].

한편, M&S 결과에 부여할 통계적 가중치, 즉 사전분포의 유효 표본 크기를 어떻게 설정할 것인지에 대한 실무적 기준은 아직 충분히 정립되어 있지 않다. 이 때문에 M&S 결과는 시험평가의 정량적 통계분석에 직접 반영되지 못하고 참고자료 수준에 머무는 경우가 많다. 미국 국가연구위원회(National Research Council, NRC) 역시 국방 획득에서 빈도주의 시험 방법의 한계를 지적하고, 베이지안 접근을 포함한 새로운 통계 방법론의 도입을 제기한 바 있다[20].

이에 본 연구는 비행시험 횟수가 제한된 유도무기 시험평가에서 M&S 사전정보를 결합한 베이지안 판정체계의 효과와 한계를 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로, M&S 결과를 Beta 사전분포로 구성하여 실사격 데이터와 결합하는 베이지안 갱신 모형을 제시하고, CP 기반 판정과의 비교를 통해 판정 위험 및 최소 시험 발수의 변화를 분석하며, Sobol' 전역 민감도 분석으로 시험 발수를 지배하는 주요 변수를 식별한다.

2. 분석 모형과 판정 기준

2.1. 이항시험 모형과 사전정보의 반영

유도무기 비행시험에서 각 발사의 결과는 명중 또는 비명중으로 구분되므로, 개별 시험 결과는 성공확률 P_{true}를 갖는 Bernoulli 확률변수로 모델링할 수 있다. 총 N회의 시험에서 명중 횟수를 X라 하면, X는 식(1)과 같이 이항분포를 따른다.

$$P(X=x \mid P_{true},\ N)=\binom{N}{x}P_{true}^{x}(1-P_{true})^{N-x},\quad x=0,1,\cdots,N \qquad (1)$$

빈도주의 관점에서는 관측된 X와 N만으로 P_{true}를 추정하지만, 소표본 환경에서는 추정의 불확실성이 크게 나타날 수 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 시험 외부의 사전정보를 베이지안 사전분포로 반영한다. 이항 모형의 켤레 사전분포로 Beta 분포를 사용하면 명중확률 P의 사전분포는 식(2)와 같이 표현된다[8-9].

$$P\sim B(\alpha_0,\beta_0),\ f(P \mid \alpha_0,\beta_0)=\frac{P^{\alpha_0-1}(1-P)^{\beta_0-1}}{B(\alpha_0,\beta_0)} \qquad (2)$$

여기서 $B(\alpha_0,\ \beta_0)$는 Beta 함수이며, α_0와 β_0는 각각 사전 성공 횟수와 사전 실패 횟수에 대응하는 모수이다. 사전분포의 평균 μ_0와 유효 표본 크기(effective sample size) n_0는 식(3)과 같이 정의된다.

$$\mu_0=\frac{\alpha_0}{\alpha_0+\beta_0},\qquad n_0=\alpha_0+\beta_0 \qquad (3)$$

μ_0는 사전분포의 중심을 나타내고, n_0는 사전정보가 실사격 몇 발분의 정보량에 해당하는지를 나타내는 강도(prior strength) 매개변수이다. μ_0와 n_0가 주어지면 사전분포의 모수는 식(4)와 같이 결정된다.

$$\alpha_0=n_0\mu_0,\qquad \beta_0=n_0(1-\mu_0) \qquad (4)$$

이와 같이 정의된 사전분포에 실사격 결과 x발 명중을 결합하면, 명중확률의 사후분포는 식(5)와 같이 갱신된다[8-9].

$$P \mid x\sim B(\alpha_0+x,\quad \beta_0+N-x) \qquad (5)$$

이에 따른 사후평균은 식(6)으로 주어진다.

$$\hat{p}_{Bayes}=\frac{\alpha_0+x}{\alpha_0+\beta_0+N}=\frac{n_0}{n_0+N}\mu_0+\frac{N}{n_0+N}\hat{p} \qquad (6)$$

식(6)은 사후평균이 사전평균 μ_0와 관측 비율 $\hat{p}$의 가중평균임을 보여주며, n_0가 클수록 사전정보의 영향이 커진다[8,12].

본 논문에서는 사전정보가 없는 기준선으로 균등 사전분포 $Beta(1,\ 1)(n_0=2)$을 사용하고, $n_0>2$인 경우를 정보적 사전분포로 간주한다. M&S 결과를 대표적 사전정보로 상정하되, 분석의 초점은 특정 M&S 모형 자체가 아니라 사전정보의 통계적 반영 효과에 둔다.

2.2. 구간추정 기반 판정 기준

소표본 비행시험에서는 점추정만으로 합격 여부를 판단하기 어려우므로, 명중확률의 구간추정에 기반한 판정이 필요하다. 본 연구에서는 기존 기준으로 CP 신뢰구간을, 제안 기준으로 베이지안 신뢰구간(Credible Interval, CI)을 사용하여 두 방법의 판정 특성을 비교한다. 이때 구간 추정의 유의수준은 α, 합격판정의 오류 허용수준은 γ로 구분한다. 또한 Wilson 스코어 구간을 빈도론적 비교 기준선으로 함께 사용한다[2-3,21-22].

CP 구간은 이항분포에 대한 exact 신뢰구간으로, 모든 참 명중확률 P_{true}에 대해 포함확률이 $1-\alpha$ 이상이 되도록 구성된다. 양측 CP 구간은 식(7)과 같다.

$$L_{CP}=B^{-1}\left(\frac{\alpha}{2};\ x,\ N-x+1\right),\quad U_{CP}=B^{-1}\left(1-\frac{\alpha}{2};\ x+1,\ N-x\right) \qquad (7)$$

여기서 $B^{-1}(q;\ a,\ b)$는 $Beta(a,\ b)$ 분포의 q

분위수이다. 합격판정에서는 편측 하한이 사용되며, 유의수준 γ에 대한 CP 편측 하한은 식(8)과 같이 정의한다.

$$L_{CP}^{(1)}(x,N;\ \gamma) = B^{-1}(\gamma;\ x,\ N-x+1) \quad (8)$$

베이지안 신뢰구간은 식(5)의 사후분포에 대해 식(9a) 및 식(9b)와 같이 정의된다.

$$L_B = B^{-1}\left(\frac{\alpha}{2};\ \alpha_0+x,\ \beta_0+N-x\right) \quad (9a)$$

$$U_B = B^{-1}\left(1-\frac{\alpha}{2};\ \alpha_0+x,\ \beta_0+N-x\right) \quad (9b)$$

사전분포에 따라 $Beta(1,1)$을 적용한 기준선 베이지안 구간과 정보적 사전분포를 적용한 정보적 베이지안 구간으로 구분한다.

본 연구의 합격판정은 명중확률이 요구 기준 p_0 이상임을 일정 신뢰수준으로 보장할 수 있는지에 의해 식(10)과 같이 정의한다. CP 기준에서는 편측 하한이 p_0 이상이면 합격으로 판정한다.

$$L_{CP}^{(1)}(x,N;\ \gamma) \geq p_0 \quad (10)$$

베이지안 기준에서는 식(11)과 같이 명중확률 P가 p_0 이상일 사후확률이 $1-\gamma$ 이상이면 합격으로 판정한다.

$$\Pr(P \geq p_0 \mid x) = 1 - I_{p_0}(\alpha_0+x,\ \beta_0+N-x) \geq 1-\gamma \quad (11)$$

여기서 $I_{p_0}(a,\ b)$는 정규화 불완전 베타함수, 즉 $Beta(a,\ b)$분포의 누적분포함수 값이다. 식(11)은 사후분포의 γ 분위수가 p_0 이상인 조건과 동치이므로, 신뢰구간 하한에 의한 판정과 동일한 결과를 준다.

소표본에서는 구간 폭과 하한의 위치가 사전정보의 강도와 관측자료의 양에 민감하게 반응하므로, 두 기준 간 판정 차이가 발생할 수 있다.

2.3. 사전정보 강도 설정

사전정보를 활용할 때 가장 중요한 실무적 문제는 사전분포의 평균 μ_0뿐 아니라 그 강도를 어떻게 설정할 것인가이다. 본 연구에서는 사전정보의 강도를 유효 표본 크기(effective sample size) n_0로 나타내며, 이는 사전정보가 통계적으로 몇 발의 추가 시험 결과와 동등한 영향력을 갖는지를 의미한다[8,12].

n_0가 지나치게 작으면 사전정보의 소표본 보완 효과가 제한적이며, 반대로 지나치게 크면 관측자료보다 사전정보가 과도하게 우세해져 사전분포와 실측값이 부합하지 않는 상황에서 오판정 위험이 증가할 수 있다. 따라서 n_0는 임의로 설정하는 값이 아니라 사전정보의 신뢰도에 비례하여 보수적으로 설정되어야 한다.

본 연구에서는 VV&A를 통해 확인된 M&S의 신뢰수준을 n_0 설정의 근거로 해석한다. 모형 검증 범위, 과거 실측자료와의 부합 정도, 적용 환경의 일치성, 예측 오차 수준 등이 충분히 확보된 경우에 한해 상대적으로 큰 n_0를 허용할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 작은 n_0를 적용하거나 사전정보를 반영하지 않는 것이 타당하다[5-7]. 다만, 본 논문에서의 n_0값은 특정 체계에 대한 절대 기준이 아니라 사전정보의 강도 변화가 판정 품질에 미치는 영향을 분석하기 위한 분석 변수로 사용된다.

이상의 논의를 바탕으로 VV&A 수준별 n_0 설정의 탐색적 가이드라인을 Table 1에 제시한다. 각 수준의 n_0 범위는 본 연구의 분석 결과에 기초하여 설정하였다. 상한은 M&S 유효 표본의 교환비율이 양수를 유지하는 범위와, 소비자 위험 β_R이 허용한계를 초과하지 않는 조건을 근거로 한다. 본 가이드라인은 특정 체계에 대한 확정적 기준이 아니라, 사전정보 강도가 판정 품질에 미치는 영향을 본 연구의

Table 1. Exploratory Guidelines for Effective Sample Size (n_0) Calibration Based on VV&A Level

VV&A level	Condition	n_0 range	Basis
High	Live-fire comparison data available; operational environment matched; quantitative prediction accuracy confirmed	10–20	M&S exchange rate remains positive
Moderate	Limited live-fire comparison or analogous environment; partial quantitative verification	5–10	Consumer's risk β_R maintained within allowable limit
Low	Qualitative trend agreement only; limited verification scope	2–5	Approaching non-informative prior
Not performed	VV&A not conducted or accreditation denied	2	Beta(1,1) baseline (uniform prior)

결과에 기초하여 정리한 탐색적 기준점이다. 실무 적용 시에는 대상 체계의 VV&A 보고서에 제시된 예측 오차, 검증 범위, 적용 환경의 일치 정도를 종합적으로 고려하여 n_0를 설정하여야 한다.

2.4. 운용특성 곡선과 판정 위험

합격판정 방법의 성능은 단일 사례의 합격 여부만으로 평가하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 참 명중확률 P_{true}가 주어졌을 때 해당 체계가 합격할 확률을 나타내는 운용특성 곡선을 사용한다[15-16]. 운용특성 곡선은 판정 규칙의 수락 확률을 P_{true}의 함수로 나타내며, 이를 통해 생산자 위험과 소비자 위험을 동시에 평가할 수 있다.

운용특성 곡선으로부터 두 가지 판정 위험을 정의한다[15-16,23]. 생산자 위험 α_R은 성능이 합격 기준 이상인 체계가 불합격 판정을 받을 확률이며, 합격품질수준(Acceptance Quality Level, AQL) P_1에서 식(12)와 같이 정의된다.

$$\alpha_R = 1 - OC(P_1) \tag{12}$$

소비자 위험 β_R은 성능이 수락할 수 없는 수준인 체계가 합격 판정을 받을 확률이며, 한계품질수준(Rejectable Quality Level, RQL) P_2에서 식(13)과 같이 정의된다.

$$\beta_R = OC(P_2) \tag{13}$$

여기서 $OC(\cdot)$는 판정 규칙에 따라 CP 기반 또는 베이지안 기반의 운용특성 곡선을 의미하며, $P_1 > p_0 > P_2$를 가정한다. 이상적인 판정을 위해서는 P_1 부근에서는 높은 합격확률을, P_2 부근에서는 낮은 합격확률을 가져야 한다.

2.5. 최소 시험 발수의 결정

합격판정 체계의 실무적 활용을 위해서는 주어진 판정 위험 허용 한계 하에서 필요한 최소 시험 발수를 결정할 필요가 있다. 생산자 위험과 소비자 위험의 허용 한계를 각각 α_R*, β_R*라 하면, 최소 시험 발수 $N_{\min}$은 식(14)와 같이 정의된다.

$$N_{\min} = \min\left\{N \in Z^+ : \alpha_R(N) \le \alpha_R \text{ and } \beta_R(N) \le \beta_R\right\} \tag{14}$$

즉, 판정 규칙과 합격 임곗값 등 나머지 설계 조건을 고정한 상태에서 두 위험을 동시에 만족시키는 최소 N을 구한다.

한편, 추정 정밀도의 관점에서는 기대 구간 폭을 기준으로 최소 발수를 정의할 수도 있다. 참 명중확률 P_{true}에서 기대 구간 폭은 식(15)와 같다.

$$\overline{W}(N, P_{true}) = \sum_{x=0}^{N} P(X=x \mid P_{true}, N)\ [U(x,N) - L(x,N)] \quad (15)$$

여기서 $L(x, N)$와 $U(x, N)$선택한 구간추정법의 하한과 상한이다. 목표 구간 폭 W^*가 주어지면, $\overline{W}(N, P_{true}) \leq W^*$를 만족하는 최소 N을 정밀도 기준의 최소 발수로 정의한다.

빈도론적 기준의 최소 발수 $N_{\min}^{CP}$와 베이지안 기준의 최소발수 $N_{\min}^{Bayes}$의 차이 $\triangle N = N_{\min}^{CP} - N_{\min}^{Bayes}$는 M&S 사전정보 도입에 따른 발수 절감량을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 설계와 민감도 분석

3.1. 수치분석 방법

수치 분석은 네 가지 항목으로 구성하였다. 첫째, CP 구간, Wilson 구간, 베이지안 신뢰구간의 기대 구간 폭을 비교하여 소표본 환경에서의 추정 정밀도를 평가하였다. 둘째, CP 하한 기준과 베이지안 기준의 운용특성 곡선을 비교하고, 생산자 위험 α_P와 소비자 위험 β_P를 정량화하였다. 셋째, 동일한 참 명중확률 p를 갖는 체계에 대해 반복 시험을 가정하여 합격 여부의 변동성을 평가하였다. 넷째, 정보적 사전분포 도입에 따른 구간 폭, 판정 위험, 최소 시험 발수 $N_{\min}$의 변화를 분석하여 사전정보의 효과와 한계를 검토하였다.

기대구간 폭과 운용특성 곡선은 확률질량함수를 가능한 모든 관측값 $x = 0, 1, \cdots, N$에 대해 직접 합산하는 해석적 방법으로 산출하였다. 판정 반복성 평가에는 MC(Monte Carlo) 시뮬레이션을 사용하였으며, 반복 횟수는 $N_{MC} = 10{,}000$으로 설정하고, 난수 시드를 고정하여 재현성을 확보하였다.

3.2. 분석 시나리오 설계

시뮬레이션의 주요 입력 조건은 Table 2와 같다. 시험 발수 N은 5~50 범위에서 10개 수준을 설정하였고, 참 명중확률 p는 0.60, 0.70, 0.80, 0.85,

Table 2. Simulation Input Parameters

Parameter	Symbol	Value	Remarks
No. of test rounds	N	5, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50	Guided weapon flight test quantity
True hit probability	P_{true}	0.60, 0.70, 0.80, 0.85, 0.90	Range from deficient to superior systems
Acceptance threshold	p_0	0.70	Representative value; determined by system-specific operational requirements
Decision confidence level	$1-\gamma$	0.80	MIL-STD-1916 [24] sampling plan
CI confidence level	$1-\alpha$	0.95	For Item 1 (interval width comparison) only
Non-informative prior	Beta(α_0, β_0)	Beta$(1, 1)$	Uniform distribution; baseline [8]
Informative prior	Beta(α_0, β_0)	Beta$(8, 2)$	$\hat{P}_{MS} = 0.80,\ n_o = 10,$
MC replications	N_{MC}	10,000	Acceptance rate SE ≤ 0.005
AQL	P_1	0.85	Producer risk eval. point; p_0 above
RQL	P_2	0.60	Consumer risk eval. point; p_0 below
Acceptable risk limits	$\alpha_R^*,\ \beta_R^*$	0.20, 0.10	Upper bounds for $\alpha_R,\ \beta_R$ in Eq. (12)-(14),
Target CI width	W^*	0.30, 0.25, 0.20	Precision criterion for expected interval width evaluation

0.90의 다섯 수준을 사용하였다. 합격 임곗값 $p_c = 0.70$은 유도탄의 단발 명중확률(Single-Shot Probability of Kill, SSPK)이 일반적으로 0.5~0.9 범위에 분포하는 점을 고려한 분석용 대푯값이며, 판정 신뢰수준 $1-\gamma = 0.80$은 MIL-STD-1916의 $C = 0$ 샘플링 계획에 근거한 설정이다[24]. 본 연구의 허용 위험 설정($\alpha_R^* = 0.20$, $\beta_R^* = 0.10$) 역시 동 규격의 $C = 0$ 계획에서 도출되는 운용특성 곡선의 특성과 정합적이다. 구체적으로, $C = 0$ 계획에서 AQL 수준의 로트가 합격할 확률은 통상 0.80 이상, RQL 수준의 로트가 합격할 확률은 0.10 이하가 되도록 설계되며, 이는 본 연구의 $P_1 = 0.85$에서 $\alpha_R \le 0.20$, $P_1 = 0.60$에서 $\beta_R \le 0.10$ 조건과 대응한다.

신뢰구간 폭 비교에는 $1-\alpha = 0.95$를 적용하였다. 기준선 사전분포는 $Beta(1, 1)$, 정보적 사전분포는 $Beta(8, 2)$를 대표 시나리오로 사용하였다. AQL과 RQL은 각각 $P_1 = 0.85$, $P_2 = 0.60$으로 설정하였으며, $\alpha_R^* = 0.20$, $\beta_R^* = 0.10$으로 소비자 위험을 더 보수적으로 제어하였다.

목표 구간 폭 w^*는 0.30, 0.25, 0.20의 세 수준을 사용하였다. 이와 같은 설정은 소표본 비행시험에서 나타날 수 있는 품질 수준 범위와 판정 환경을 대표적으로 반영하기 위한 것이다. 사전분포 중심 $\mu_0 = 0.80$은 합격 임곗값 $P_0 = 0.70$을 상회하되 AQL $P_1 = 0.85$에는 미치지 않는 값으로 M&S가 체계의 명중확률을 합격 기준 이상으로 예측하되 다소 보수적인 추정치를 제시하는 상황을 대표한다.

유효 표본 크기 $n_0 = 10$은 VV&A를 거친 M&S 결과가 실사격 10발 수준의 정보량을 제공한다고 가정한 것이며, 민감도 분석에서는 n_0를 변화시켜 사전정보 강도의 영향을 검토하였다.

3.3. Sobol' 전역 민감도 분석

최소 시험 발수 $N_{\min}$에 가장 큰 영향을 미치는 입력 변수를 식별하기 위해 Sobol' 지수에 기초한 분산 기반 전역 민감도 분석을 수행하였다[17-19]. 출력 변수는 베이지안 기준의 최소 시험 발수로 두었고, 주요 입력 변수는 참 명중확률 p, 유효 표본 크기 m, 합격 임곗값 p_c로 설정하였다. 사전분포 중심 μ_0는 M&S가 제시하는 목표 명중확률을 반영한다는 가정하에 0.80으로 고정하였다. 입력 변수들은 다음과 같이 지정된 범위 내에서 균일분포를 따르며, 상호 독립으로 가정하였으며, P_{true}는 $[0.60, 0.95]$, n_0는 $[2, 20]$, p_0는 $[0.60, 0.80]$ 범위의 균일분포를 각각 따르는 것으로 설정하였다. 균일분포는 각 변수의 범위 내에서 특정 값을 선호할 사전 근거가 없을 때 최대 엔트로피 원칙에 따라 선택되는 분포이며, Sobol' 분석의 표준적인 입력 분포 설정이다[19]. 사전분포 중심 μ_0는 M&S가 제시하는 목표 명중확률을 반영한다는 가정하에 0.80으로 고정하였다.

Sobol' 분석에서는 1차 지수와 총효과 지수를 함께 산출하였다. 1차 지수는 특정 입력변수의 단독 효과를, 총효과 지수는 해당 변수와 다른 변수 간 상호작용을 포함한 전체 영향을 의미한다. 이를 통해 최소 시험 발수의 변동이 어떤 변수에 의해 주로 결정되는지, 그리고 변수 간 상호작용이 얼마나 중요한지를 평가하였다. S_i와 $S_{T,i}$의 추정에는 Saltelli et al. (2010)의 추정량을 사용하였으며, 기본 표본 크기 $N_s = 2{,}048$(총 모형 평가횟수 16,384)로 설정하고 부스트트랩 95% 신뢰구간이 지수 추정값의 ±10% 이내이면 수렴한 것으로 판단하였다[18].

3.4. 수치 계산 절차

모든 계산은 Python(v3.14, Python Software Foundation, USA) 환경에서 수행하였으며, 수치연산에는 NumPy(v2.4), 확률분포 및 특수함수 계산에는 SciPy(v1.17), Sobol' 민감도 분석에는 SALib(v1.5)를 사용하였다. 최소 시험 발수 $N_{\min}$은 격자 탐색(grid search)으로 산출하였다. 각 N에서 운용특성 곡선을 직접 합산하여 계산하고, P_1에서

의 생산자 위험 α_R과 P_2에서의 소비자 위험 β_R을 평가하였다. 탐색범위 내에서 조건을 충족하는 N이 없는 경우에는 상한값 $N=50$으로 처리하고, 해당 조합에서는 추가 시험이 필요함을 명시하였다.

한편 기대구간 폭 비교에서는 각 방법의 하한 $L(x,\ N)$과 상한 $U(x,\ N)$으로부터 $\overline{W}$(식(15))를 계산하여 정밀도를 비교하였다. 반복 시험 분석에서는 고정된 P_{true}와 N에서 이항분포에 따른 관측 결과의 변동이 합격 여부에 미치는 영향을 확인하였다. 수치 정확성은 무정보 사전분포하에서의 베이지안-CP 근사 일치, MC 합격률과 해석적 운용특성 곡선의 일치, Sobol' 지수의 합산 조건의 세 가지로 검증하였다.

4. 분석결과 및 해석

4.1. 신뢰구간 폭

소표본 환경에서 구간추정 방법의 정밀도를 비교하기 위해 CP 구간, Wilson 구간, 기준선 베이지안 구간, 정보적 베이지안 구간의 기대 95% 구간 폭을 계산하였다. Figure 1은 참 명중확률 P_{true}의 네 조건(0.70, 0.80, 0.85, 0.90)에서 시험 발수 N에 따른 기대 구간 폭의 변화를 나타낸 것이다. 파란색 곡선은 CP 구간, 빨간색 곡선은 M&S 사전정보를 반영한 정보적 베이지안 구간($Beta(8,\ 2),\ n_0=10$)을 나타낸다. 회색 음영은 Wilson 구간, Jeffreys 사전분포 기반 구간, 균등 사전분포 기반 구간의 기대

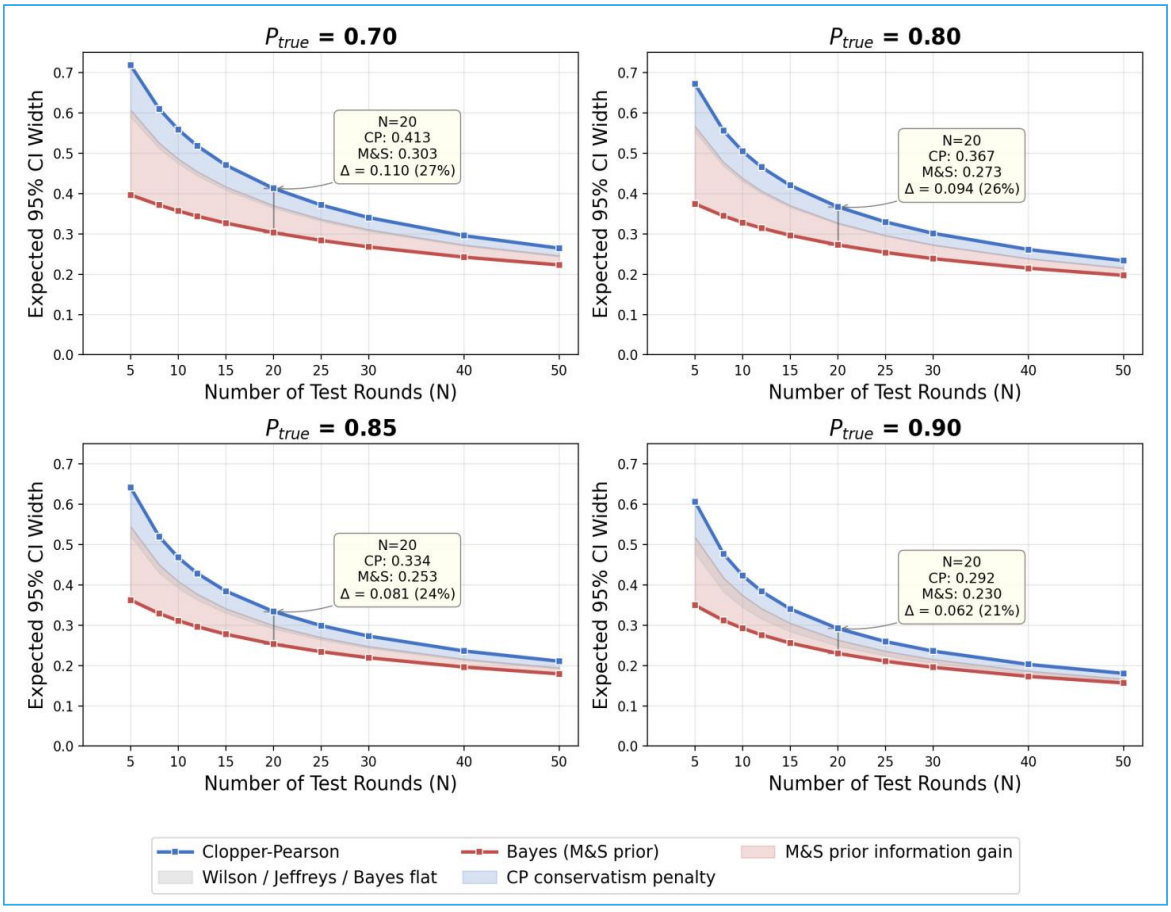


Figure 1. Expected 95% interval width as a function of the number of test rounds N (Δ: CP–Bayesian width difference at N = 20)

폭 범위를 나타내며, 세 방법 간 차이가 미미하여 단일 밴드로 표시하였다. 파란색 음영은 CP 구간의 보수성에 따른 초과 폭을, 분홍색 음영은 사전정보 반영에 따른 폭 축소 효과를 나타낸다.

CP 구간은 모든 시험 발수 영역에서 가장 넓은 폭을 보인다. 반면 정보적 베이지안 구간은 동일 N에서 더 좁으며, $N=20$에서 CP 대비 폭 축소율은 P_{true}에 따라 21~27%로 나타났다. 이는 사전정보를 결합할 경우 동일한 시험 발수에서도 추정 정밀도를 유의하게 개선할 수 있음을 보여준다.

4.2. 운용특성 곡선과 판정 위험

운용특성 곡선은 판정 규칙의 식별력을 평가하는 핵심 도구이며, 시험 발수가 부족하면 곡선이 완만해져 생산자 위험과 소비자 위험이 동시에 증가한다. Figure 2(a)는 CP 하한 기준의 운용특성 곡선을 시험 발수별로 나타낸 것이다. $N=10$에서는 p_0부근에서 합격과 불합격이 명확히 구분되지 않으며, N이 증가하면 식별력이 높아지지만 $N=40$에서도 P_0 부근의 불확실 구간은 완전히 해소되지 않는다. Figure 2(b)는 $N=20$에서 다양한 판정 규칙의 운용특성 곡선을 비교한 것이다. 본 분석의 설정 ($N=20$, $1-\gamma=0.80$, $p_0=0.70$)에서 CP 하한 기준은 20발 중 실패를 3발 이하로 허용하는 $c=3$ 규칙과 동일한 판정 결과를 주며, 이는 성능이 충분한 체계도 불합격시키기 쉬운 보수적 기준이다. 베이지안 기준은 사전정보가 추가 표본 역할을 하여 이러한 보수성을 완화하지만, 그 대가로 성능이 미달인 체계가 합격될 가능성도 높아진다.

CP 기준은 소비자 위험 β_R를 낮게 유지하는 대신 생산자 위험 α_R가 크게 나타나는 비대칭 구조를 보였다.

$P_{true}=0.85$인 체계가 약 35% 확률로 불합격 판정을 받을 수 있음을 의미한다. 베이지안 기준은 사전정보가 추가 표본의 역할을 하여 α_R을 크게 낮추지만, β_R이 상승한다.

식(14)의 두 조건에 의한 최소 시험 발수는 CP 기준에서 $N_{\min}=21$, 베이지안 기준에서 $N_{\min}=15$이다. $N=21$에서 CP 기준의 판정 위험은 $\alpha_R=0.198$, $\beta_R=0.037$로 허용 한계를 충족하며, $N=20$에서는 $\alpha_R=0.352$(Table 3)로 한계를 초과하므로 $N_{\min}=21$이 최소 조건이 된다. 절

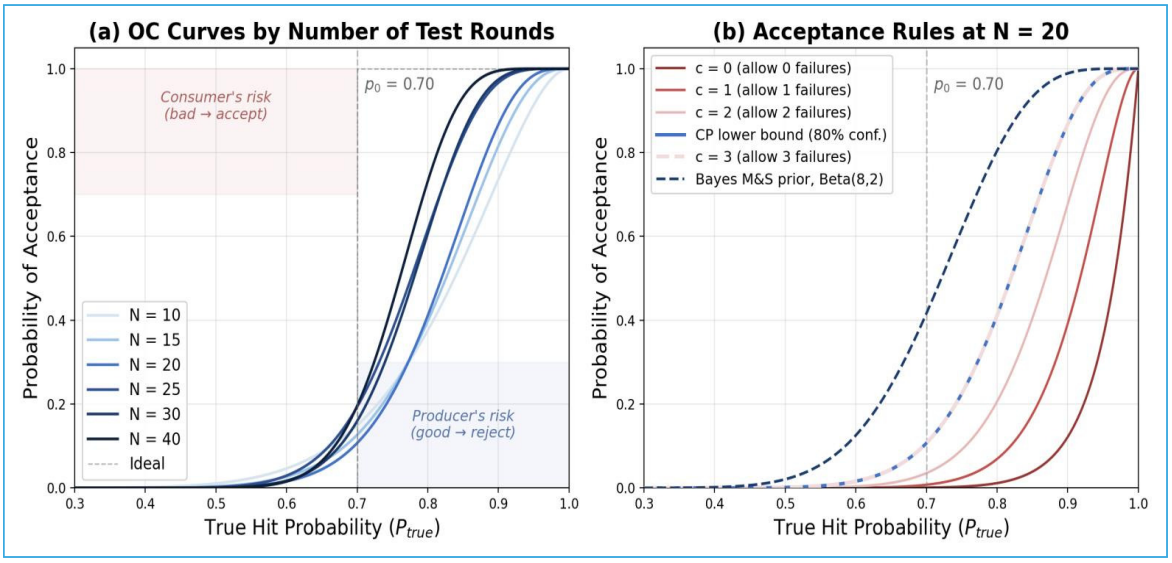


Figure 2. Operating characteristic curves under CP-based and Bayesian acceptance criteria

감량 $\triangle N = 6$발은 $n_0 = 10$의 60%에 해당하며, 나머지 40%는 소비자 위험 상승 억제에 소요된다. 이때 $N = 15$에서 베이지안 기준 $\beta_R = 0.091$로 허용한계 0.10에 근접하여, 시험 발수를 더 줄일 경우 소비자 위험이 허용 범위를 초과할 수 있다.

Table 3. Acceptance Risks by Number of Test Rounds ($p_0 = 0.70,\ 1-\gamma = 0.80,\ P_1 = 0.85,\ P_2 = 0.60$)

N	CP α_R	CP β_R	Bayes (info) α_R	Bayes (info) β_R
10	0.456	0.046	0.180	0.167
15	0.396	0.027	0.177	0.091
20	0.352	0.016	0.067	0.126
25	0.162	0.029	0.070	0.074
30	0.153	0.017	0.070	0.044
40	0.067	0.016	0.030	0.035

4.3. 판정 반복성

소표본 시험에서는 동일한 참 명중확률 p를 갖는 체계라도 반복 시험 시 관측 결과의 변동에 따라 합격 여부가 달라질 수 있다. 이러한 판정 반복성의 문제를 확인하기 위해, $P_{true} = 0.82$로 합격 임곗값 $p_0 = 0.70$을 상회하는 체계에 대해 CP 하한 기준으로 반복 시험을 수행할 때의 $\hat{p}$분포와 합격·불합격 판정을 Figure 3에 나타내었다.

분석 결과, $N = 10$에서 합격률은 44.7%로 나타나 기준을 상회하는 체계임에도 절반 이상의 시험에서 불합격 판정을 받는다. $N = 20$에서도 합격률은 50.1%에 불과하며, $N = 25$에서도 약 71% 수준에 머문다. 합격률이 80%를 초과하려면 $N \geq 40$이 필요하며, 이항분포의 이산성으로 인해 합격률은 N에 대해 비단조적으로 변동한다. 이러한 결과는 CP 하

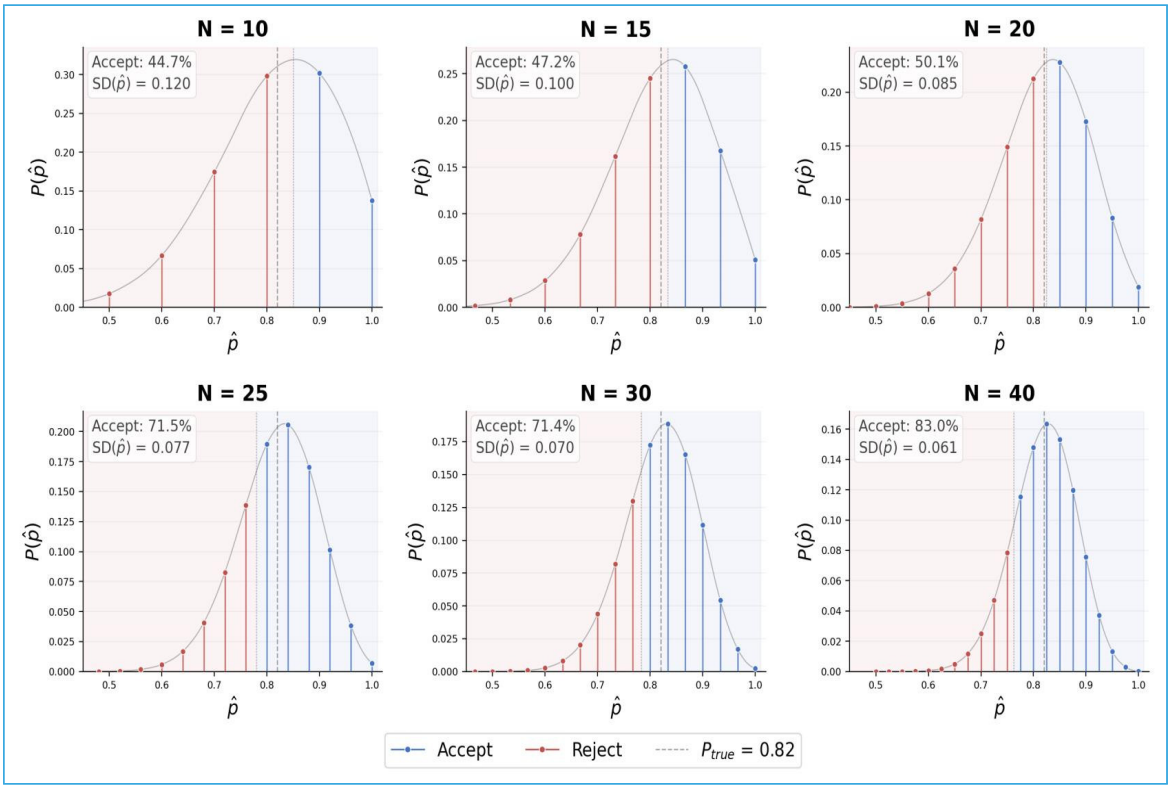


Figure 3. Distribution of $\hat{p}$ and acceptance decisions under repeated CP lower bound testing ($P_{true} = 0.82,\ p_0 = 0.70,\ 1-\gamma = 0.80,\ N_{MC} = 10{,}000$)

한 기준이 소표본 환경에서 판정 변동성을 크게 만들 수 있음을 보여준다.

4.4. M&S 사전정보의 효과와 한계

사전정보의 도입 효과는 추정 정밀도 향상과 실사격 발수 절감 측면에서 확인할 수 있으며, 그 크기는 유효 표본 크기 n_0, 사전평균 μ_0, 요구 정밀도 수준에 따라 달라진다. 목표구간 $W^* \leq 0.30$ 기준에서 CP는 24발을 요구하는 반면, 정보적 사전분포를 반영한 베이지안 기준은 $n_0 = 10$에서 15발(38% 절감), $n_0 = 20$에서 6발로 감소한다. 반면 $W^* \leq 0.20$에서는 CP 59발 대비 $n_0 = 10$이 49발, $n_0 = 20$이 39발로 절대 절감량은 증가하지만 절감 비율은 17~34%에 머문다. 즉, 사전정보의 효과는 요구 정밀도 수준이 높아질수록 제한적이다.

사후분포의 수렴 과정과 발수 절감 효과를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4(a)에서 $Beta(8, 2)$ 사전분포($n_0 = 10$) 하에서 실사격 데이터가 누적되면 사후분포가 $P_{true} = 0.80$ 부근으로 수렴하며, $N = 20$에서 베이지안 95% 신뢰구간 폭은 0.278로 동일 N에서의 CP 구간 폭 0.379보다 좁다. Figure 4(b)는 n_0 증가에 따른 필요 발수의 변화를 보여준다.

사전정보에 따른 정밀도 개선 효과를 보다 넓은 조건에서 확인하기 위해 Figure 5에 N, P_{true}, n_0에 따른 기대 구간 폭과 교환비율을 나타내었다. Figure 5(a)는 $n_0 = 10$일 때 기대 구간 폭이 N과 P_{true}의 함수로 변화하는 양상을 등고선으로 나타낸 것이며, 점선은 CP 기준의 등구간 폭 곡선으로 베이지안 기준과의 정밀도 차이를 시각적으로 보여준다. 사전정보의 효과가 P_{true}에 따라 어떻게 달라지는지를 교환비율로 분석하였다. 교환비율은 베이지안 기준과 동일한 기대 구간 폭을 CP 기준으로 달성하는 데 필요한 등가 시험 발수와 실제 시험 발수의 차이를 유효 표본 크기 n_0로 나눈 값으로, M&S 유효 표본 1발이 대체하는 실사격 발수를 의미한다. Figure 5(b)에서 교환비율은 $P_{true} = 0.65 \sim 0.70$ 부근에서 최대이며, 사전분포 중심($\mu_0 = 0.80$)을 넘으면 급감하여 $P_{true} = 0.90$ 이상에서 0에 수렴한다.

이상의 결과를 종합하면, M&S 사전정보는 통상적 정밀도 요구($W^* \leq 0.30$) 하에서 실사격 발수를 약 38% 절감할 수 있다. 그러나 이 효과에는 다음과 같은 제한이 따른다. 첫째, 교환비율이 P_{true}에 강하게 의존하므로 사전분포와 참값이 부합하지 않으면 절감 효과가 크게 떨어진다. 둘째, W^*가 작아질

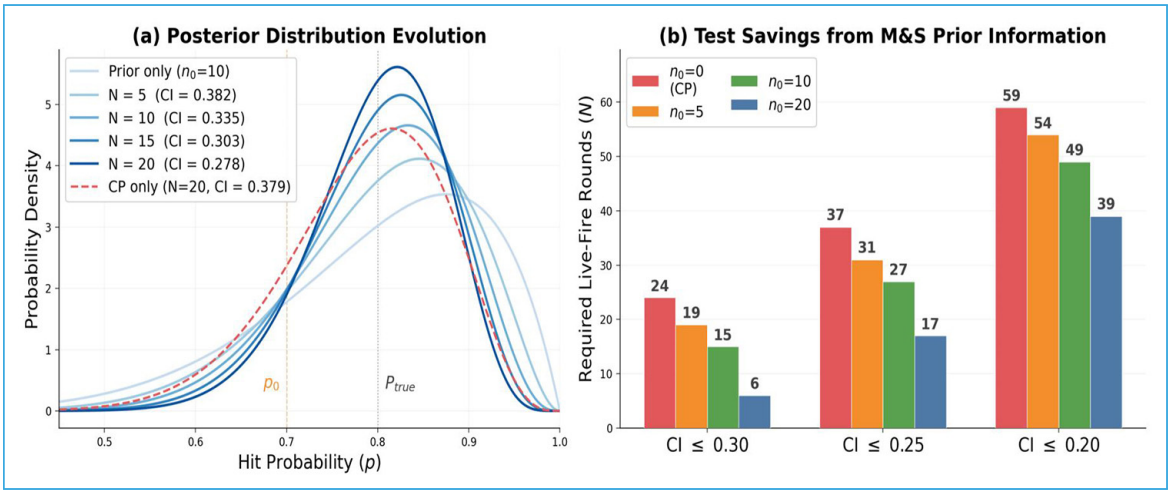


Figure 4. Bayesian posterior evolution and test savings

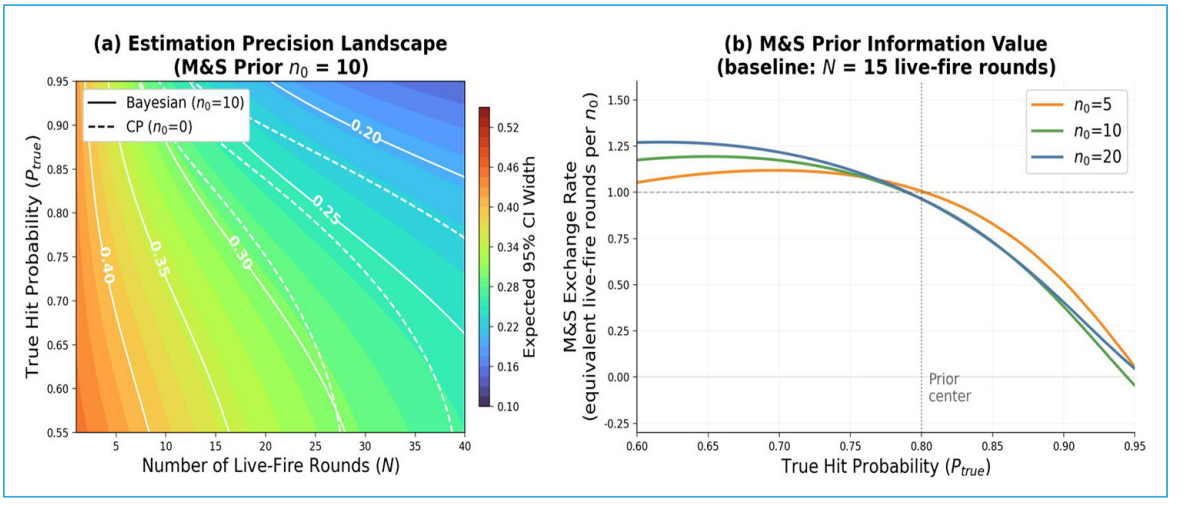


Figure 5. M&S prior calibration and estimation precision

수록 실사격 데이터의 비중이 커진다. 셋째, Table 3에서 확인한 바와 같이 실사격을 지나치게 줄이면 소비자 위험 β_R이 허용 한계를 초과한다.

4.5. Sobol' 전역 민감도 분석

앞선 분석에서 시험 발수가 P_{true}, n_0, p_0에 복합적으로 의존함을 확인하였다. 이 가운데 $N_{\min}$에 가장 큰 영향을 미치는 변수를 Sobol' 분석으로 정량화한다. 결과를 Table 4에 정리하였다. 전체 표본에서 $N_{\min}$의 평균은 24.3발, 표준편차는 10.2발이다.

1차 지수의 합 $\sum S_i = 0.654$로, $N_{\min}$ 총 분산의 약 65%가 주효과로 설명되며 나머지 35%는 상호작용에 기인한다. P_{true}와 n_0의 1차 지수(각 0.289, 0.298)는 거의 같아 $N_{\min}$에 동등한 영향을 미친다. p_0의 1차 지수(0.067)는 작지만 총효과 지수 $S_{T,i} = 0.318$은 약 5배로, p_0가 상호작용을 통해 $N_{\min}$에 큰 영향을 미친다.

P_{true}의 총효과 지수 $S_{T,i} = 0.635$가 세 변수 중 가장 크며, 2차 상호작용 지수에서 $P_{true} \times n_0$가 0.150으로 가장 크고, $P_{true} \times p_0$은 0.107, $n_0 \times p_0$는 0이다.

1차 지수의 합 $\sum S_i = 0.654$, 2차 지수의 합 $\sum S_{2,ij} = 0.257$로 총 0.911이며, 나머지 약 9%는 3차 이상 상호작용과 추정 오차에 기인한다.

시험 계획 수립에서 이 결과는 다음과 같은 의미를 가지고 있다. 첫째, P_{true}에 대한 사전 추정과 n_0의 교정이 시험 발수를 결정하는 핵심 요소이며, n_0는 VV&A를 통해 설정되므로 VV&A의 엄밀성이 시험 발수에 직접 반영된다. 둘째, p_0는 작전운용성능

Table 4. Sobol' Sensitivity Indices ($N_s = 2{,}048$, total evaluations 16,384)

Input variable		Index	95% CI	$S_{T,i}$	95% CI
First-order indices		S_i			
True hit probability	P_{true}	0.289	±0.045	0.635	±0.051
M&S effective sample size	n_0	0.298	±0.044	0.489	±0.038
Acceptance threshold	p_0	0.067	±0.040	0.318	±0.034
Second-order indices		$S_{2,ij}$			
$P_{true} \times n_0$		0.150	±0.058		
$P_{true} \times p_0$		0.107	±0.053		
$n_0 \times p_0$		0	±0.038		

에 의해 결정되어 조정할 수 없지만, P_{true}와의 강한 상호작용($S_{ij} = 0.150$)은 P_{true}가 p_0 근방에 위치할 때 시험 발수가 급격히 변동할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 소표본 유도무기 품질평가에서 M&S 결과를 사전정보로 활용한 베이지안 판정 체계를 제안하고, CP 기준과의 비교를 통해 그 효과를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 베이지안 기준은 생산자·소비자 위험을 허용 한계 이내로 유지하면서 최소 시험 발수를 CP 기준 21발에서 15발로 줄였으며, 정밀도 기준에서도 실사격 발수를 약 38% 절감할 수 있음을 확인하였다. Sobol' 전역 민감도 분석에서는 참 명중확률 P_{true}와 유효 표본 크기 n_0가 최소 시험 발수 $N_{\min}$의 변동을 지배하는 핵심 변수로 확인되었다. 이는 판정 성능이 사전정보의 정확성과 강도 설정에 크게 좌우됨을 보여준다.

사전정보 기반 베이지안 판정은 소표본 시험의 불확실성 완화와 시험 부담 절감에 유효한 대안이 될 수 있다. 다만 사전정보와 실제 자료 간 불일치가 클 경우 판정 왜곡 가능성이 증가하므로, 실무 적용 시에는 사전평균의 타당성 검토와 유효 표본 크기의 보수적 설정이 선행되어야 한다. 본 연구는 M&S 사전정보를 활용한 베이지안 판정체계의 이론적 구조와 시뮬레이션 기반 성능 평가에 초점을 두었으며, 실제 체계 적용을 위한 기초 분석으로서의 의의를 갖는다. 다만 본 방법의 적용에는 몇 가지 조건이 따른다. 사전정보 기반 베이지안 판정은 VV&A를 통해 M&S의 예측 정확도가 정량적으로 확인된 경우에 한해 적용하여야 하며, n_0는 Table 1의 가이드라인에 따라 보수적으로 설정하되 Table 3에서 확인된 바와 같이 n_0의 과대 설정은 소비자 위험 초과로 이어질 수 있다. 또한 사전평균 μ_0와 참 명중확률 간 괴리가 클 경우 교환비율이 급감하여 사전정보가 오히려 추정 정밀도를 저하시킬 수 있으므로, 사전평균의 타당성을 별도로 검토하여야 한다. 아울러 본 연구의 수치 결과는 $p_0 = 0.70$, $1-\gamma = 0.80$의 대표 시나리오에 기초하므로, 조건이 크게 다른 체계에 적용할 경우에는 운용특성 곡선과 판정 위험을 재계산할 필요가 있다. 향후에는 사전정보와 관측 자료 간 불일치를 명시적으로 진단하는 절차, 계층적 사전분포를 포함한 확장 모형, 적응형 판정 기준으로의 발전과 함께 실제 평가자료를 활용한 실증 검증이 필요하다.

참고문헌

1 Clopper, C. J., & Pearson, E. S. (1934). The Use of Confidence or Fiducial Limits Illustrated in the Case of the Binomial. *Biometrika, 26*(4), 404-413. https://doi.org/10.1093/biomet/26.4.404

2 Agresti, A., & Coull, B. A. (1998). Approximate is Better than "Exact" for Interval Estimation of Binomial Proportions. *The American Statistician, 52*(2), 119-126. https://doi.org/10.1080/00031305.1998.10480550

3 Brown, L. D., Cai, T. T., & DasGupta, A. (2001). Interval estimation for a binomial proportion. *Statistical Science, 16*(2), 101-133. https://doi.org/10.1214/ss/1009213286

4 Thulin, M. (2014). The cost of using exact confidence intervals for a binomial proportion. *Electronic Journal of Statistics, 8*(1), 817-840. https://doi.org/10.1214/14-EJS909

5 U.S. Department of Defense. (2024). *DoD Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) (DoDI 5000.61).*

6 U.S. Department of Defense. (2024). *Modeling and Simulation Verification, Validation, and Accreditation for Operational Test and Evaluation and Live Fire Test and Evaluation (DoDM 5000.102).*

7 U.S. Department of Defense. (2012). *Documentation of verification, validation, and accreditation (VV&A) for models and simulations (MIL-STD-3022).*

8 Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2013). *Bayesian data analysis (3rd ed.).* CRC Press.

9 Liu, Y., & Abeyratne, A. I. (2019). *Practical applications*

of bayesian reliability. John Wiley & Sons.

10 Kleyner, A., Elmore, D., & Boukai, B. (2015). A Bayesian Approach to Determine Test Sample Size Requirements for Reliability Demonstration Retesting after Product Design Change. *Quality Engineering, 27*(3), 289-295. https://doi.org/10.1080/08982112.2014.990035

11 Yoon, Y., Yang, M. S., Bai, C. H., & Shim, J. (2025). *Bayesian zero-failure reliability demonstration tests: Sample size estimation and its limitation. Journal of Mechanical Science and Technology, 39*(7), 3651-3666. https://doi.org/10.1007/s12206-025-2409-1

12 Leoni, L., BahooToroody, F., Khalaj, S., Carlo, F. D., BahooToroody, A., & Abaei, M. M. (2021). Bayesian Estimation for Reliability Engineering: Addressing the Influence of Prior Choice. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(7), 3349. https://doi.org/10.3390/ijerph18073349

13 Coolen, F. P. A. (1996). On Bayesian reliability analysis with informative priors and censoring. *Reliability Engineering & System Safety, 53*(1), 91-98. https://doi.org/10.1016/0951-8320(96)00037-3

14 Li, M., & Meeker, W. Q. (2014). Application of Bayesian methods in reliability data analyses. *Journal of Quality Technology, 46*(1), 1-23. https://doi.org/10.1080/00224065.2014.11917951

15 Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to statistical quality control (8th ed.)*. John wiley & sons.

16 Schilling, E. G., & Neubauer, D. V. (2017). *Acceptance sampling in quality control (3rd ed.)*. Chapman & Hall/CRC.

17 Sobol', I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation, 55*(1-3), 271-280. https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6

18 Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications, 181*(2), 259-270. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018

19 Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.

20 National Research Council. (1998). *Statistics, testing, and defense acquisition: New approaches and methodological improvements*. National Academies Press.

21 Wilson, E. B. (1927). Probable inference, the law of succession, and statistical inference. *Journal of the American Statistical Association, 22*(158), 209-212. https://doi.org/10.1080/01621459.1927.10502953

22 Newcombe, R. G. (1998). Two-sided confidence intervals for the single proportion: Comparison of seven methods. *Statistics in Medicine, 17*(8) 857-872. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0258(19980430)17:8<857::AID-SIM777>3.0.CO;2-E

23 Dodge, H. F., & Romig, H. G. (1959). *Sampling Inspection Tables: Single and Double Sampling (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.

24 U.S. Department of Defense. (1996). *DoD preferred methods for acceptance of product (MIL-STD-1916)*.

여성 육군 장병을 위한 동작 기반 분할 구조 팔꿈치 보호대 설계 및 착용 평가

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Design and Wear Evaluation of a Motion-Based Segmented Elbow Protector for Female Army Soldiers

이옥경, Okkyung Lee
경북대학교, 의류학과, 장수생활과학연구소, 조교수
Assistant Professor, Department of Clothing and Textiles, Center for Beautiful Aging, Kyungpook National University

이예진†, Yejin Lee
충남대학교, 의류학과, 교수
Professor, Department of Clothing and Textiles, Chungnam National University

Abstract

This study presents a motion-based design approach for an elbow protector tailored to the repetitive flexion and ground-contact conditions encountered during low-posture military locomotion. Unlike conventional protectors designed for static postures, this study focuses on crawling movements as representative tasks that require both joint mobility and contact protection. An anatomical model of the elbow in a 90° flexed posture was developed based on anthropometric data, and three-dimensional (3D) scanning was employed to characterize skin deformation patterns during flexion. Based on the observations, five protector prototypes with different segmentation configurations were designed and fabricated. All prototypes shared identical sleeve materials and overall dimensions, and variations were introduced in the number and orientation of the padding segments. Subjective evaluations were conducted with ten participants after they performed flexion-extension and crawling movements. The ease of movement, perceived impact absorption, and overall comfort were assessed using a 7-point Likert scale. The results showed that protectors incorporating circumferential segmentation provided better adaptation to movement and greater overall comfort than those with longitudinal segmentation, without significantly reducing perceived impact absorption. In particular, the two-line circumferential segmentation structure achieved the most balanced performance across all the evaluation criteria. These findings suggest that segmentation facilitates controlled deformation during joint motion and that a motion-based design framework provides a practical foundation for developing elbow protectors for female military personnel.

keywords : elbow protector, segmentation structure, motion-based design, wearability evaluation, military low-posture locomotion

† Corresponding Author : Yejin Lee
Tel : +82-42-821-6824, Fax : +82-42-821-8887, email : yejin@cnu.ac.kr
Chungnam National University, 34134, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 27th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

관절 보호대는 외부 충격 및 반복 접촉에 따른 국소적 기계적 하중을 완화함으로써 관절 및 주변 연부조직을 보호하기 위한 장비로 스포츠, 산업 작업, 군사 활동 등 다양한 물리적 위험 환경에서 적용되고 있다[1-6]. 그러나 실제 현장에서는 보호대가 불편하거나 관절 가동 범위를 제한한다고 인식될 경우 사용을 기피하거나 착용을 중단하는 사례가 보고되고 있다[7]. 이는 보호 장비의 효과가 단순한 보호 성능에 의해 결정되는 것이 아니라, 실제 사용 환경에서의 착용 수용성과 지속적 착용 여부에 의해 좌우될 수 있음을 의미한다. 선행연구에 따르면 보호 장비의 안전 성능이 충분하더라도 착용감 저하, 움직임 제한, 심리적 수용성 부족이 동반될 경우 실제 착용률이 감소하는 경향이 확인되었다[8-9]. 또한, 보호대가 동작 수행을 방해할 경우 사용자는 관절 사용 방식이나 지지 전략을 변화시키게 되며, 이러한 보상적 움직임은 동작 효율 저하와 근육 피로 증가를 유발하여 수행 능력 저하로 연결된다. 따라서 관절 보호대는 단순히 충격 완화의 보호 기능을 넘어, 실제 사용 환경에서 지속적 착용이 가능하도록 인간공학적으로 설계되어야 한다.

팔꿈치는 상완과 전완을 연결하는 관절로 상지의 체중 지지와 전방 이동 동작에서 힘 전달과 자세 안정성에 중요한 역할을 한다. 특히 넘어짐이나 충돌 시 외력을 직접 받기 쉬우며, 지면과 접촉하는 동작에서는 압착과 마찰이 반복적으로 발생한다. 이러한 반복 접촉은 통증, 피부 손상, 연부 조직 자극, 국소 피로 및 기능 저하로 이어질 수 있다. 저자세 이동과 같이 상지가 체중 지지와 추진에 동시에 관여하는 동작에서는 팔꿈치의 굴곡 각도가 지속적으로 변화하면서 지면 접촉이 반복된다. 이 과정에서 관절 주변 연부 조직의 변형이 누적되고 특정 부위에 국소적 압력 집중이 발생할 수 있음이 보고된 바 있다[10-11].

한편 팔꿈치 보호대는 외부 충격으로부터 관절을 보호하는 동시에 관절의 굴곡·신전 동작을 충분히 허용해야 하는 구조적 요구를 가진다. 따라서 보호 성능과 관절 가동성은 설계 과정에서 상충되는 요소로 작용한다. 일반적으로 보호 패드의 두께가 증가할수록 충격 보호 성능은 향상되지만 관절 움직임은 제한되는 경향이 있으며, 반대로 탄성이 높은 구조는 움직임에는 유리하나 패드가 쉽게 변형되어 외부 충격을 충분히 분산시키지 못할 가능성이 있다. 게다가 동일한 소재라 하더라도 관절 주변의 곡면 영역에서 굴곡과 신전이 반복될 경우 재료의 변형 경로가 안정적으로 확보되지 않으면 국소적인 압박 집중, 말림(rolling), 미끄러짐(slip), 열·습 축적 등과 같은 착용 불편 요인이 발생하기 쉽다. 이러한 현상은 보호대의 착용 지속성을 저해하여 결과적으로 보호 장비의 실질적 효과를 약화시킬 수 있다. 최근 보호장비 설계 연구에서는 소재 물성뿐 아니라, 굴곡 시 발생하는 변형을 분산시키기 위한 패드 형상 분할이나 개구(open) 구조가 착용감 및 동작 수용성 개선에 기여할 수 있음을 보고하였다[12]. 따라서 팔꿈치 보호대 설계에서도 패드의 기계적 물성과 함께 형태, 배치, 분절 위치와 같은 구조적 요소가 관절 동작과 어떻게 상호작용하는지를 통합적으로 고려할 필요가 있다.

이러한 설계 문제는 군사 훈련 환경과 같이 저자세 이동 동작이 반복적으로 수행되는 상황에서 더욱 중요해진다. 군사 환경에서는 지면과의 접촉이 빈번하게 발생하며, 그중 포복(crawling)은 은폐와 기동을 동시에 요구하는 대표적인 저자세 이동 동작이다. 포복은 수행 환경과 상황에 따라 낮은 포복, 높은 포복, 응용 포복으로 구분되지만, 공통적으로 팔꿈치 관절이 체중 지지와 전방 이동에 반복적으로 관여한다. 군사 포복은 일반적인 네발 보행이나 무릎 보행과는 다른 운동학적 특성을 가지며, 상지가 지지와 추진을 동시에 수행하는 이동 양식이다[13]. 이러한 저자세 이동에서는 팔꿈치와 전완 부위를 중심으로 지면과의 반복 접촉이 발생하며, 압박, 마찰, 국소 충격이 누적될 가능성이 높다. 포복은 정적인 유지 자세가 아니라 지지–이동–회복이 연속적으로 반복되는 동적 과업이므로, 보호대가 굴곡 상태에서의 자연

스러운 관절 움직임을 제한할 경우, 사용자는 지지 방식이나 관절 사용 양상을 변화시킬 수 있다. 이는 피로 증가와 착용 회피로 이어질 수 있다.

최근 여군의 비율과 역할이 지속적으로 확대되고 있음에도 불구하고, 군 피복 및 개인장구류는 여전히 남군 중심으로 설계된 경우가 많아 여성의 체형 특성과 착용 요구를 충분히 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 실제로 여군을 대상으로 한 연구에서는 군복 및 개인장구류가 사이즈 부적합, 착용 불편, 열적 부담 등의 문제를 야기하는 것으로 보고되고 있다[14]. 이러한 문제는 훈련 수행 시 불편감 증가와 수행 효율 저하로 이어질 수 있다.

그러므로 여군을 위한 보호 장비 설계에서는 단순한 기능 확보를 넘어 대상자의 신체 특성과 실제 훈련 환경을 반영한 접근이 요구된다. 군사 훈련에서 반복적으로 수행되는 포복 동작은 여성 장병에게도 동일하게 요구되며, 상지의 체중 지지와 지면 접촉이 빈번하게 발생하는 상황에서 관절 보호의 중요성이 크다.

이와 같은 여군 피복 및 장구류의 구조적 한계에도 불구하고, 기존 팔꿈치 보호대 설계는 대체로 팔을 편 정자세에서의 외형 적합성이나 패드 면적 확보에 초점이 맞춰져 있다. 그러나 실제 사용 환경에서는 팔꿈치 굴곡 각도가 지속적으로 변하고 지면 접촉이 반복되는 굴곡 자세가 빈번함에도, 이러한 조건을 설계의 출발점으로 삼아 구조를 체계적으로 최적화한 연구는 충분히 축적되지 않았다. 일부 시판 제품에서 패드에 분할선을 적용한 사례가 확인되지만, 분할선의 위치·방향·개수가 동작 특성과 접촉 기전에 근거해 도출되었는지에 대한 근거를 제시한 연구는 제한적이다. 분할선은 관절 굴곡 시 보호대의 변형을 허용하고 국소 압박을 완화할 수 있는 잠재적 설계 요소인 반면, 과도하게 적용될 경우 제작 공정의 복잡화와 비용 증가로 이어질 수 있다. 보호대 설계의 핵심 과제는 분할선의 단순 적용 여부를 넘어, 실제 동작 맥락에 기반해 필요한 최소 분할선 개수와 최적 위치를 도출하는 데 있다. 특히, 군사 훈련에서 나타나는 고부하 저자세 이동처럼 상지가 체중 지지와 추진을 동시에 수행하는 상황은 기존 스포츠 중심 또는 정적 착용 중심 논의로는 충분히 설명되기 어려우며, 이를 구조 설계의 기준으로 삼는 연구가 요구된다.

이러한 문제의식에 기반하여 본 연구는 군사 훈련에서 반복적으로 수행되는 포복 동작을 대표적인 저자세 이동 맥락으로 설정하였다. 포복 과정에서 팔꿈치 부위에 반복적으로 요구되는 지면 접촉, 지속적 굴곡 변화, 국소 압박의 분산 특성을 설계 요구 조건으로 정리하고, 이를 바탕으로 분할선 기반 분절 구조의 팔꿈치 보호대를 설계·제작하였다. 본 연구는 단일 포복 자세에 한정된 특화 설계가 아니라, 실제 훈련에서 빈번히 나타나는 낮은 포복·높은 포복·응용 포복 전반에 공통적으로 요구되는 기능 조건을 최소한의 구조적 개입으로 충족하는 설계를 지향하였다. 이를 위해 실제 동작에서 나타나는 보호대의 변형 경로를 정의하고, 이에 대응하는 구조 요소로서 분할선을 도출하는 동작 기반 설계(motion-based design) 접근을 제안한다. 기존의 형태 적합성 중심 설계와 달리, 본 접근은 실제 착용 시 발생하는 '동작–접촉–변형'의 연계 구조를 설계 기준으로 반영한다. 또한 팔꿈치 굴곡 시 피부 변형을 정량적으로 분석하여 분할선의 방향과 개수를 도출함으로써, 보호대 구조 설계를 위한 데이터 기반 설계 프레임워크를 제시한다. 이를 바탕으로 최소한의 구조적 개입을 통해 착용 지속성과 보호 효과를 동시에 향상시킬 수 있는 관절 보호대 설계 전략을 도출한다.

이에 본 연구의 목적은 (1) 포복 동작 전반에서 팔꿈치 주변의 반복 접촉 특성을 반영한 보호대 구조 설계 논리를 제시하고, (2) 분할선 기반 분절 구조가 관절 가동성과 착용 불편감에 미치는 영향을 정량적으로 평가하며, (3) 군사 훈련과 같이 체중 지지와 추진이 동시 요구되는 고부하 작업·훈련 상황에 적용 가능한 동작 기반 관절 보호대 설계의 기초 근거를 마련하는 데 있다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 설계

포복 동작은 Figure 1과 같이 낮은 포복, 높은 포복, 응용 포복으로 구분되며, 세 유형 모두 팔꿈치 관절이 굴곡된 상태에서 상지가 체중 지지 및 전방 이동에 반복적으로 관여하는 특성을 가진다. 이러한 동작 특성을 고려하여 본 연구의 설계 접근은 동작 기반 관점에서 구성되었으며, 연구 설계는 다음의 3단계로 진행하였다. (1) 팔꿈치 굴곡 상태를 기준으로 보호대의 기본 형상과 구조 방향을 설정하기 위해 굴곡 자세에서 요구되는 형상 적합성, 변형 수용성, 접촉 압력 분산 특성을 중심으로 설계 요구 조건을 체계화하였다. (2) 도출된 요구 조건을 바탕으로 분할선 구조를 적용한 팔꿈치 보호대 시제품을 설계·제작하였다. 분할선의 위치와 개수는 굴곡 시 변형이 집중되는 부위와 예상 변형 경로를 고려하여 설정하였다. (3) 제작된 시제품을 착용한 상태에서 팔꿈치 굴곡·신전 동작과 포복을 포함한 저자세 이동 동작을 수행하도록 한 후, 주관적 착용 평가를 실시하였다. 평가 항목은 동작 편이성, 충격 흡수감, 전반적 착용감으로 구성하였다.

본 연구는 분할선 구조가 관절 가동성과 착용 불편감에 미치는 영향을 실제 동작 맥락에서 검토함으로써, 동작 기반 관절 보호대 설계 접근의 실증적 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

2.2. 동작 기반 구조 설계

2.2.1. 팔꿈치 굴곡 자세 기반 레플리카 제작

본 연구에서는 팔꿈치 약 90° 굴곡 상태를 기준 설계 자세로 설정하고, 해당 자세에서의 상완과 전완의 외형을 반영하여 레플리카를 Figure 2(a)와 같이 제작하였다. 사이즈는 20~30대 여성의 평균 체형을 대표할 수 있도록 제8차 한국인 인체치수조



Figure 1. Representative military crawling postures (low crawl, high crawl, and modified crawl) and corresponding elbow–ground contact configurations (Source: Adapted from publicly available online sources Naver Blog "parksale123", https://blog.naver.com/parksale123/220267650354)

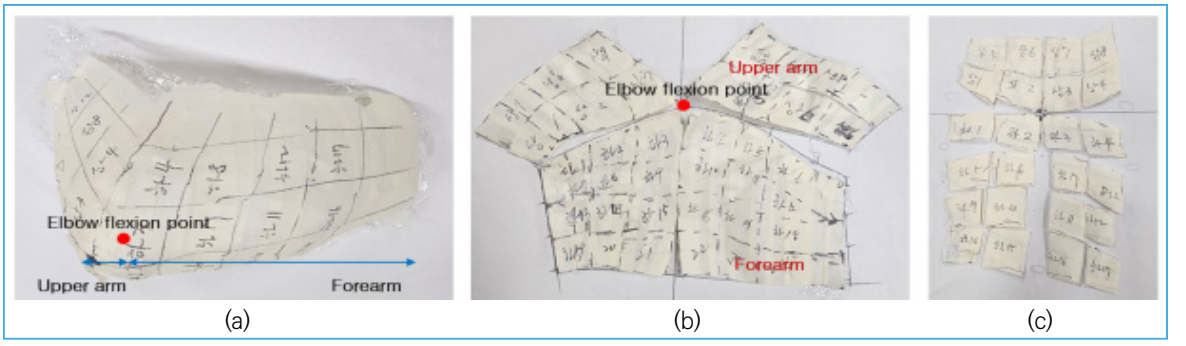


Figure 2. Development of an elbow flexion–based replica model and padding segmentation process. (a) Elbow flexion–based replica, (b) Sleeve replica configuration and (c) Padding replica configuration

사를 기반으로 설정하였다[15]. 포복 동작은 팔꿈치 관절의 굴곡과 신전이 반복되는 동작이지만, 체중 지지와 지면 접촉이 집중되는 구간은 주로 중간 굴곡 범위에서 나타나는 것으로 포복 동영상 분석 및 예비 관찰 결과를 통해 확인되었다. 이에 따라 팔꿈치 약 90° 굴곡 상태를 대표 설계 자세로 설정하였다.

레플리카 제작에는 Table 1의 제8차 한국인 인체치수조사에 제시된 20~30대 여성의 평균 팔 치수를 적용하였으며[15], 위팔둘레, 팔꿈치둘레, 아래팔 수평길이, 상완 수직길이, 팔길이, 팔꿈치 높이 항목을 반영하였다.

이후 역설계(reverse engineering) 방식을 적용하여 레플리카 형상을 기반으로 보호대의 기본 구조인 토시와 충격 흡수 패드 형상을 각각 Figure 2(b)와 Figure 2(c)와 같이 도출하였다.

2.2.2. 팔꿈치 굴곡에 따른 피부 변형 및 포복 동작 접촉 구간 분석

레플리카 제작과 병행하여 팔꿈치 관절 굴곡에 따른 피부 변형 특성을 정량적으로 파악하기 위해 3차원 스캔(Artec 3D Spider, Artec 3D, Luxembourg)을 수행하였다. 팔꿈치 관절을 180° 신전 상태와 약 90° 굴곡 상태로 각각 설정한 후, 상완-전완 연결 부위를 중심으로 둘레 방향과 길이 방향의 피부 길이 변화를 Figure 3과 같이 측정하였다. 이때 팔을 자연스럽게 내린 상태에서 팔꿈치 가운뎃점을 기준으로 팔 축에 수직인 팔꿈치둘레선을 생성하고, 이를 기준으로 3cm 간격으로 상완 방향 2구간, 전완 방향 4구간에 걸쳐 둘레 방향 분석을 위한 기준선을 설정하였다. 다음으로 팔꿈치 가운뎃점을 기준으로 길이 방향(팔 축 방향) 분석을 위한 기준 세로선을 설

Table 1. Arm-related anthropometric measurements of participants and Korean women in their 20s–30s (8th Size Korea survey) (unit: cm)

Items	Participants (N=10)	20s–30s women's (SizeKoea, 2021)
	Mean (SD)	
(Elbow-flexed) Upper arm circumference	27.0 (3.2)	26.2 (2.9)
(Elbow-flexed) Elbow circumference	25.7 (1.7)	25.4 (1.8)
(Elbow-flexed) Elbow-wrist length	25.6 (1.4)	25.0 (1.2)
(Elbow-flexed) Upper arm vertical length	33.1 (1.6)	32.4 (1.5)
(Elbow-flexed) Arm length	60.1 (3.0)	59.6 (2.6)
(Elbow-flexed) Elbow height	99.7 (3.2)	99.4 (2.4)

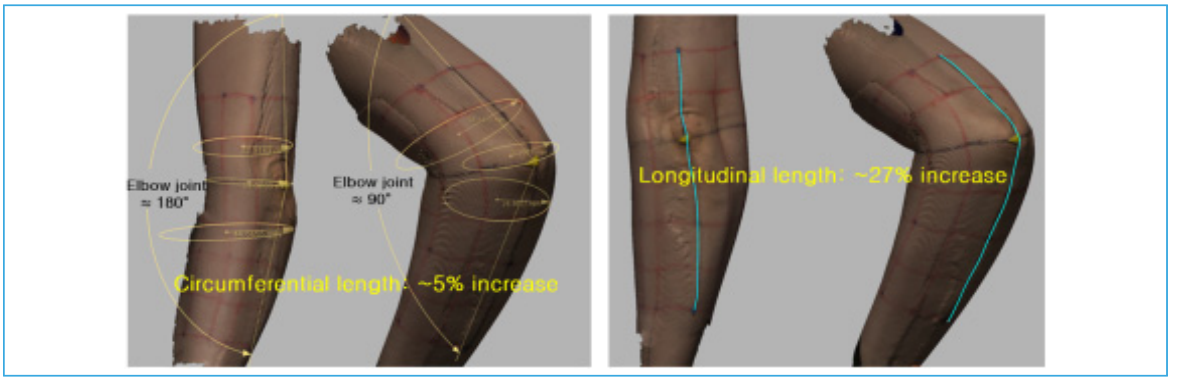


Figure 3. Changes in skin length and circumferential dimensions around the elbow joint during flexion (180° to 90°)

정하고, 이를 기준으로 3cm 간격으로 세로선을 추가로 생성하였다. 각 자세에서 동일한 기준선에 대해 3차원 형상 데이터를 획득하고, 대응 위치 간 길이 변화를 비교하여 변형률을 산출하였다.

본 측정은 20~30대 여성 평균 팔 치수에 해당하는 대표 피험자 1인을 대상으로 수행되었으며, 설계 기준 도출을 위한 기초 변형 경향 파악을 목적으로 단일 사례 분석으로 수행하였다.

분석 결과, 팔꿈치 관절이 180°에서 90°로 굴곡될 때 피부 길이는 둘레 방향에서 약 5% 증가한 반면, 길이 방향에서는 약 27% 증가하였다. 해당 변화율은 180° 신전 상태를 기준으로 90° 굴곡 상태에서의 상대적 길이 증가율로 정의하였다. 이는 굴곡 시 발생하는 변형이 둘레 방향보다 길이 방향에서 더욱 지배적으로 나타남을 확인한 것이다.

따라서 팔꿈치 보호대 설계에서는 굴곡 시 길이 방향 신장을 수용할 수 있는 구조가 요구된다. 이를 바탕으로 굴곡 시 변형이 크게 발생하는 방향을 중심으로 분절선의 배치와 방향을 설정하였다.

한편 포복 동작 시 지면과 접촉이 발생하는 부위를 확인하기 위해 포복 동작 경험이 있는 피험자 10명을 대상으로 군 훈련 상황을 모사하여 포복 동작을 관찰하였다. 관찰 결과, 팔꿈치가 굴곡된 상태에서 체중 지지와 지면 접촉이 반복적으로 발생하였으며, 팔꿈치 전방부와 전완 내측이 주요 접촉 구간으로 확인되었다. 동시에 팔꿈치 후면부에서는 굴곡에 따른 신장이 발생하는 경향이 나타났다.

이러한 피부 변형 특성과 접촉 구간 분석 결과를 바탕으로 팔꿈치 보호대의 충격 흡수 패드 분할선 설계를 위한 기준을 다음과 같이 설정하였다. (1) 분할선은 굴곡 시 발생하는 피부 신장 방향을 고려하여 배치한다. (2) 지면과의 반복 접촉 구간은 연속적인 보호 면적으로 유지하되, 압축 변형 및 변형 집중이 예상되는 영역에는 분절 구조를 적용한다. (3) 분할선의 개수와 위치는 보호 성능과 관절 가동성을 유지하는 범위 내에서 최소화한다.

2.3. 보호대 시제품 제작 및 착용 평가

2.3.1. 분할선 구조 적용 팔꿈치 보호대 제작

팔꿈치 보호대는 Figure 4에 제시된 바와 같이 토시(sleeve)와 충격 흡수 패드(padding)로 구성하였다. Figure 4(b)의 충격 흡수 패드 이미지는 실제 제작된 시편 사진을 기반으로, 분절 구조와 패드 형상을 보다 명확하게 표현하기 위해 생성형 인공지능(Gemini 3.0, Google DeepMind, USA)을 활용하여 보조적으로 생성하였다. 해당 이미지는 구조적 특징에 대한 이해를 돕기 위한 도식적 시각 자료로 활용되었으며, 정량적 분석에는 활용되지 않았다.

토시는 3mm 두께의 네오프렌(neoprene)을 기본 소재로 사용하였으며, 다트(dart)를 적용하여 팔꿈치 굴곡 형상이 자연스럽게 유지되도록 설계하였다. 또한, 신전 동작 시 수용성을 높이기 위해 전완 굴곡면 부위에 폴리에스터 90%와 스판덱스 10% 혼용의

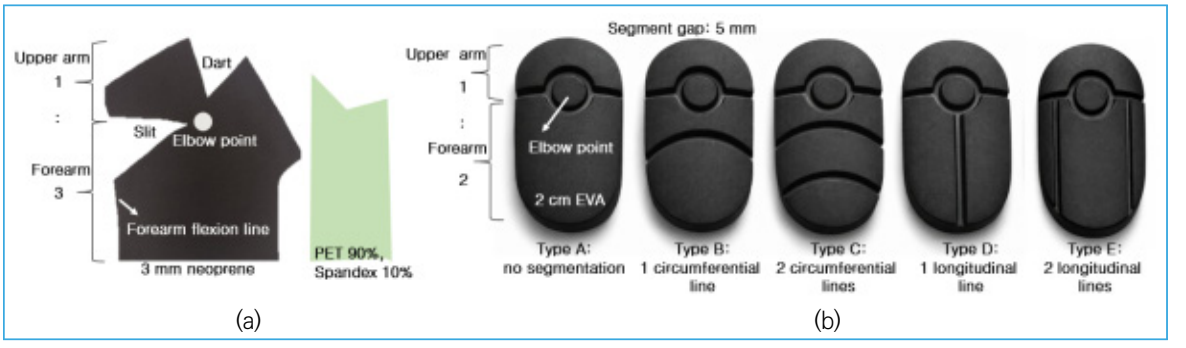


Figure 4. Sleeve pattern and segmented padding configurations of the elbow protector. (a) Sleeve pattern, and (b) Padding configurations with different segmentation designs

4-way 스트레치 소재(150–180g/m²)를 부분 적용하였다. 이와 함께 슬릿(slit) 구조를 적용하여 굴곡–신전 전환 시 발생할 수 있는 당김과 착용 불편감을 완화하도록 하였다. 토시 길이는 팔꿈치 가운뎃점을 기준으로 상완:전완 = 1:3의 비율로 설정하였다. 봉제는 301 lockstitch와 304 zigzag stitch를 병용하였으며, 플랫 심(flat seam)으로 마감하였다. 본 연구에서 사용된 토시는 슬리브 형태로 제작되어 상완에서 전완까지 연속적으로 착용되도록 하였으며, 네오프렌 소재의 신축성을 활용하여 팔에 밀착되도록 하였다. 또한 착용 시 팔꿈치 가운뎃점을 기준으로 보호대가 정확한 위치에 정렬되도록 하였고, 착용 중 위치 이탈을 최소화하기 위해 일정 수준의 압박이 유지되도록 하였다.

토시의 전체 길이는 20cm로 설정하였으며, 상완부와 전완부의 둘레 차이를 반영하여 상단 폭은 11.5cm, 하단 폭은 10.5cm로 설정하였다.

충격 흡수 패드는 EVA(ethylene-vinyl acetate) 소재를 사용하였으며, 구조 효과 비교를 위해 분할선이 없는 구조(A type)와 분할선의 방향 및 개수가 서로 다른 구조(B–E type)로 구분하여 설계하였다. 충격 흡수 패드는 저자세 이동(포복 포함)에서 지면 접촉이 집중되는 팔꿈치 전방부와 전완 내측을 중심으로 배치하였다. 지면 접촉 면적과 반복 접촉 분포를 고려하여 패드의 상완:전완 보호 비율은 1:2로 설정하였으며, 패드 중심이 팔꿈치 가운뎃점에 정렬되도록 설계하였다. 패드의 크기는 길이 12cm, 폭 9cm로 설정하여 팔꿈치 굴곡 상태에서 체중 지지와 지면 접촉이 반복되는 주요 접촉 영역을 충분히 포함하도록 하였다. 패드 두께(1cm, 2cm, 3cm)와 분할선 간격(3mm, 5mm, 7mm)은 예비 실험을 통해 검토하였다. 패드 두께의 경우, 1cm는 지면 접촉 시 충격 완화 효과가 충분하지 않았으며, 3cm는 굴곡 동작 시 두께로 인한 간섭으로 관절 가동성이 저하되고 착용 시 이질감이 증가하는 경향을 보였다. 반면 2cm는 충격 완화와 관절 움직임 허용 간의 균형이 가장 우수한 조건으로 확인되었다. 이에 최적 두께 조건(2cm)을 기준으로 분할선 간격을 비교한 결과, 3mm는 동작 시 분절 간 겹침이 발생하였고, 7mm는 굴곡 시 간격이 벌어져 충격 흡수 측면에서 불리한 특성을 보였다. 반면 5mm는 변형 수용성과 구조 안정성 간의 균형을 유지하면서 착용감과 동작 수용성 측면에서 가장 적절한 조건으로 평가되었다.

최종적으로 패드 두께는 약 2cm, 내부 분할선 간격은 약 5mm로 설정하였으며, 패드가 완전히 분리되지 않도록 설계하여 굴곡 시 재료 변형을 허용하면서도 보호의 연속성이 유지되도록 하였다. 토시와 충격 흡수 패드는 일체형 구조로 설계하였으며, 패드는 네오프렌 토시의 내측에 통합되도록 구성하여 팔꿈치 및 전완 접촉 부위에 대응하도록 정렬하였다. 네오프렌 토시는 밀착과 지지를 담당하고, 부분 적용된 스트레치 소재는 굴곡 시 발생하는 변형을 수용하여 전체 구조의 착용 안정성을 유지하도록 하였다.

분할선 구조는 방향에 따라 서로 다른 형태로 설계하였다. B type과 C type은 둘레 방향 분할(circumferential segmentation)을 적용한 구조이며, D type과 E type은 길이 방향 분할(longitudinal segmentation)을 적용한 구조이다. 이러한 구조적 차이를 통해 분할선 방향과 개수가 보호대의 동작 적응성과 착용 성능에 미치는 영향을 비교할 수 있도록 하였다. 둘레 방향 분절선은 팔꿈치 굴곡 시 발생하는 피부 변형 경로를 반영하여 곡선 형태로 설정하였으며, 굴곡 시 형성되는 곡면을 따라 변형이 자연스럽게 분산되도록 하였다. 또한 포복 동작 시 전완 부위에서도 지면과의 반복 접촉이 발생한다는 점을 고려하여, 전완 영역의 분절 구조를 함께 설계 변수로 포함하였다. 전완 부위의 분절 구조는 접촉 하중의 분산과 굴곡–신전 전환 시 발생하는 당김 및 압박 완화에 기여하도록 의도하였다. 본 연구에서 적용된 분할선 구조와 패드 배치는 포복 동작 시 발생하는 접촉 압력을 분산시키기 위한 설계 요구 조건을 반영한 것이다.

모든 시제품은 동일한 토시 소재와 외형 조건을 유지하고, 충격 흡수 패드의 분할선 구조만을 독립 변수로 설정하여 제작하였다. 분할선이 적용되지 않은 A type 시제품은 Figure 5에 제시하였다.



Figure 5. Prototype elbow protector. The padding is integrated within the sleeve and is highlighted for illustrative purposes. (a) Prototype sleeve structure, and (b) Prototype sleeve with integrated padding

2.3.2. 착용 평가 방법

제작된 보호대는 팔꿈치 굴곡·신전 기본 동작과 함께 포복 동작을 포함하여 착용 평가를 수행하였다. 포복 동작은 낮은 포복, 높은 포복, 응용 포복의 세 가지 유형으로 구성하였으며, 각 피험자는 실내 실험 공간에서 전방 이동 후 출발 지점으로 복귀하는 방식으로 각 동작을 수행하였다. 해당 왕복 동작을 3회 반복한 후, 종합적인 착용 경험을 기반으로 평가하였다.

피험자는 20~30대 여성 총 10명으로 구성되었으며, 분할선 구조에 따른 보호대 유형(A-E type)을 무작위 순서로 착용하도록 하였다.

평가 전에는 각 동작 수행 방법에 대한 사전 안내와 연습 기회를 제공하였다. 보호대는 팔꿈치 가운뎃점을 기준으로 동일한 위치에 정렬하고, 착용 시 유사한 밀착 상태가 유지되도록 조정하였다. 각 조건 간 피로 영향을 최소화하기 위해 보호대 조건 사이에 충분한 휴식 시간을 제공하였다.

주관적 평가는 굴곡 동작 편이성, 충격 흡수감, 전반적 착용감을 중심으로 수행되었으며, 각 항목은 7점 리커트 척도(1=매우 낮음, 7=매우 높음)를 사용하여 기록하였다.

2.4. 분석 방법

주관적 평가 결과는 각 조건별 평균값과 표준편차(Mean±SD)를 산출하여 기술 통계적으로 제시하였다. 5종의 팔꿈치 보호대 차이를 비교하기 위하여 반복측정 설계에 적합한 비모수 검정인 Friedman 검정을 적용하였다. 이는 동일 피험자가 모든 보호대 유형(A-E type)을 평가한 반복측정 자료이며, 평가 점수가 7점 리커트 척도 기반의 순서형 자료이고 표본 수(N=10)가 제한적인 점을 고려하여 선택하였다. 유의한 차이가 확인된 경우, 사후 분석으로 Wilcoxon signed-rank 검정을 실시하였으며, 다중 비교에 따른 제1종 오류를 통제하기 위해 Bonferroni 보정을 적용하였다. 유의수준은 α=0.05로 설정하였다. 통계 분석은 SPSS (Version 29.0, IBM, USA)를 사용하여 수행하였다.

3. 연구 결과

3.1. 분할선 구조 유형에 따른 동작 편이성

분할선 구조 유형에 따른 동작 편이성 평가 결과는 Figure 6에 제시하였다. 분할선이 적용되지 않은 A type은 평균 3.54±0.36점으로 가장 낮은 점수를 보였다.

가로 방향 분할선이 적용된 B type과 C type은 각각 5.62±0.41점과 6.21±0.33점으로 나타났으며, C type이 모든 유형 중 가장 높은 평균값을 보였다. 특히, C type은 B type 대비 추가적인 증가 경향을 나타냈다.

세로 방향 분할선이 적용된 D type과 E type은 각각 4.98±0.52점과 5.06±0.40점으로, A type 대비 높은 점수를 보였으나, 가로 방향 분할선 구조(B, C type)보다는 낮은 값을 나타냈다.

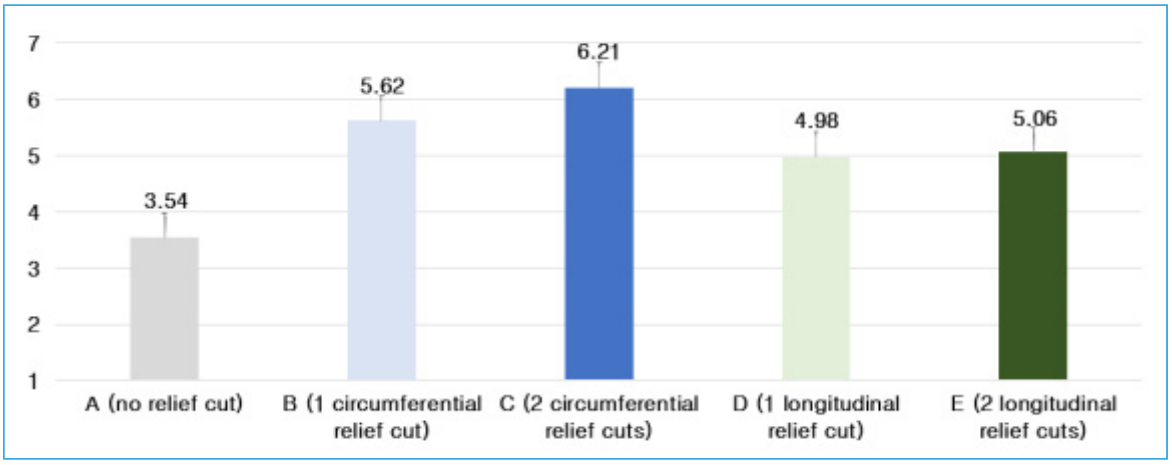


Figure 6. Effect of relief-cut configuration on ease of movement (7-point Likert scale)

Friedman 검정 결과, 보호대 유형에 따른 동작 편이성 점수는 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($\chi^2(4) = 15.02$, $p<.01$). 사후 분석(Wilcoxon signed-rank test, Bonferroni 보정 적용)에서 C type은 A type 대비 유의하게 높은 점수를 나타냈으며($p<.01$), B type 또한 A type 대비 유의한 향상을 보였다($p<.05$). 반면, D type과 E type 간 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($p>.05$).

3.2. 분할선 구조 유형에 따른 충격 흡수감

분할선 구조 유형에 따른 충격 흡수감 평가 결과는 Figure 7에 제시하였다. 각 유형의 평균 점수는 비교적 좁은 범위 내에서 분포하였다.

분할선이 적용되지 않은 A type은 6.02±1.12점으로 가장 높은 평균 점수를 나타냈으며, B type은 5.89±0.98점, C type은 5.78±1.01점, D type은 5.93±0.78점, E type은 5.77±1.32점으로 나타났다. 모든 유형에서 평균 점수는 5.7 이상으로 비교적 높은 수준을 유지하였다.

분할선 구조 유형에 따른 충격 흡수감 점수의 차이를 분석한 결과, 보호대 유형 간 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(Friedman test, $\chi^2(4)=5.59$, $p>.05$). 이는 분할선 구조의 적용 여부가 주관적 충

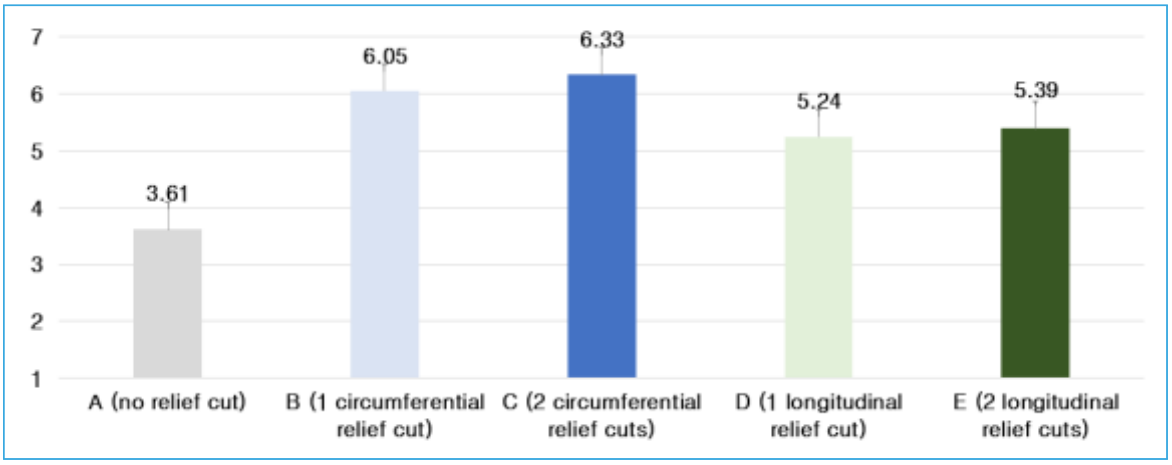


Figure 7. Effect of relief-cut configuration on overall comfort (7-point Likert scale)

격 흡수감 인식에는 유의한 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

3.3. 분할선 구조 유형에 따른 착용감

분할선 구조 유형에 따른 착용감 평가 결과는 Figure 8에 제시하였다. 보호대 유형 간 평균 점수에는 차이가 나타났다.

분할선이 적용되지 않은 A type은 3.61± 0.56점으로 가장 낮은 점수를 기록하였다. 가로 방향 분할선이 적용된 B type과 C type은 각각 6.05±0.69점, 6.33±0.71점으로 나타났으며, C type이 가장 높은 평균 점수를 보였다.

세로 방향 분할선이 적용된 D type과 E type은 각각 5.24±0.95점, 5.39±0.73점으로 나타났으며, A type보다는 높은 값을 보였으나 가로 방향 분할선 구조(B, C type)보다는 낮은 점수를 기록하였다.

Friedman 검정 결과, 보호대 유형에 따른 착용감 점수는 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다($\chi^2(4)=16.10$, $p<.01$). 사후 분석(Wilcoxon signed-rank test, Bonferroni 보정 적용)에서 B type과 C type은 A type 대비 유의하게 높은 점수를 보였으며($p<.01$), D type과 E type 또한 A type 대비 유의한 향상을 나타냈다($p<.05$). 반면, B type과 C type 간 차이 및 D type과 E type 간 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($p>.05$).

4. 토 론

4.1. 분할선 구조와 굴곡 중심 변형 수용성

본 연구 결과는 팔꿈치 보호대에서 분할선 구조가 관절 굴곡 시 요구되는 변형 수용성에 직접적인 영향을 미침을 보여준다. 무절개 구조(A type)는 충격 흡수감에서는 비교적 높은 평가를 받았으나, 반복적인 굴곡·신전 조건에서 동작 편이성과 착용감이 가장 낮게 나타났다. 이는 연속적인 단일 패드 구조가 굴곡 시 발생하는 형상 변화를 충분히 분산하지 못하고, 굴곡 중심부에서 중첩과 국소 압박을 유발했기 때문으로 해석된다.

그러나 가로 방향 분할선이 적용된 B 및 C type은 동작 편이성과 착용감 모두에서 유의하게 높은 점수를 보였다. 특히 C type(가로 분할선 2개)은 굴곡 약 90° 전후의 반복 동작에서 패드가 단계적으로 분절·전개되는 양상이 인지되었으며, 이는 굴곡 중심 변형이 집중되는 구간에서 재료 변형 경로를 보다 효과적으로 수용한 결과로 판단된다. 이러한 결과는 앞서 확인된 길이 방향 피부 변형 증가 특성과도 일관되며, 굴곡 중심을 가로 방향으로 분절하는 구조

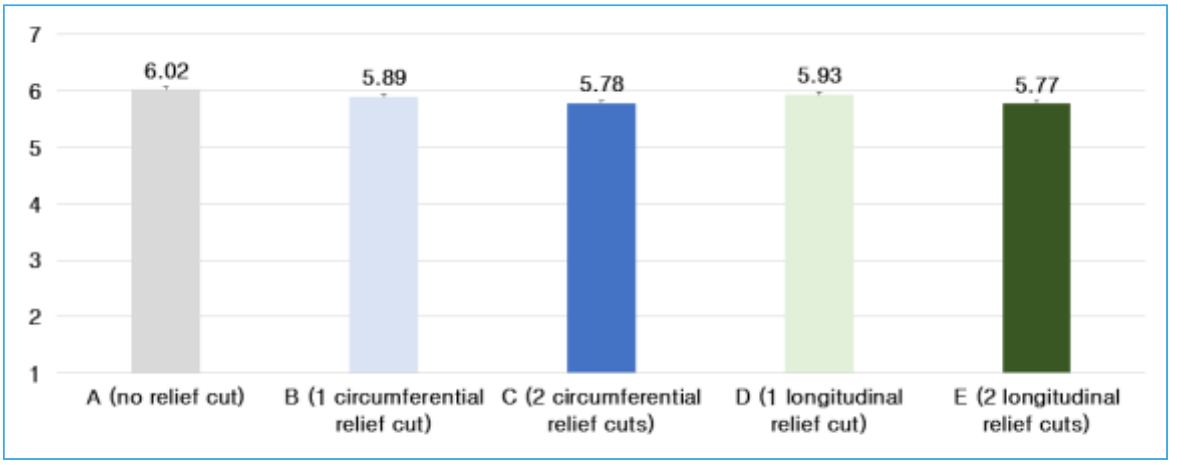


Figure 8. Effect of relief-cut configuration on perceived impact absorption (7-point Likert scale)

가 실제 관절 운동학적 특성과 더 잘 대응함을 시사한다.

4.2. 세로 분할선 구조의 한계와 방향성 차이

세로 방향 분할선이 적용된 D 및 E type은 무절개 구조에 비해 동작 수용성이 개선되었으나, 가로 분할선 구조에 비해서는 상대적으로 낮은 평가를 받았다. 세로 분할선은 길이 방향 변형을 허용하는 데에는 기여하였으나, 포복과 같이 체중 지지와 지면 접촉이 동시에 발생하는 상황에서는 좌우 방향의 구조적 안정성이 다소 저하되는 경향이 나타났다.

이는 분할선의 방향이 단순한 분절 수의 문제가 아니라, 굴곡 중심에서의 변형 집중 방향과 밀접하게 연관됨을 보여준다. 즉, 팔꿈치 관절의 굴곡은 길이 방향 신장과 함께 중심부에서의 국소적 접힘이 동시에 발생하므로, 이를 효과적으로 수용하기 위해서는 굴곡 중심을 기준으로 한 가로 방향 분절 구조가 보다 효과적으로 작용할 가능성이 있다.

4.3. 분할선 간격과 패드 두께의 설계적 균형

분할선 간격과 패드 두께에 대한 예비 실험 결과는 구조적 완화 효과와 착용 안정성 사이에 균형점이 존재함을 보여주었다. 분할선 간격이 5mm일 때 굴곡 시 변형 수용성이 상대적으로 우수하게 인지되었으며, 간격이 증가할수록 분절 효과는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 분할선의 구조적 완화 기능이 충분히 발현되기 위해서는 일정 수준 이상의 분절 밀도가 요구될 가능성을 보여준다.

패드 두께 비교에서는 2cm 조건이 충격 흡수감과 가동성 간 균형 측면에서 가장 적절한 반응을 보였다. 1cm 조건은 충격 완화 인식이 다소 낮았으며, 3cm 조건에서는 굴곡 시 부피감 증가와 동작 저항에 대한 인지가 일부 보고되었다. 이러한 결과는 분할선 구조와 패드 두께가 독립적으로 작용하는 요소라기 보다는 상호 보완적으로 영향을 미치는 설계 변수임을 의미한다. 지나치게 넓은 분할선 간격이나 과도한 두께는 구조적 완화 효과를 제한할 수 있으며, 본 연구에서 적용한 5mm 절개 간격과 2cm 패드 두께 조합은 동작 수용성과 보호 성능 간 균형을 고려한 합리적인 설계 범위로 해석될 수 있다.

4.4. 보호 성능과 가동성 간 구조적 상충 요인

충격 흡수감 평가에서는 분할선 구조 유형 간 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 이는 분절 구조가 적용되더라도 적절한 패드 두께와 차등 구조가 유지될 경우, 인지된 충격 흡수 성능이 현저히 저하되지 않음을 의미한다. 따라서 분할선 구조는 충격 완화 성능을 현저히 감소시키지 않으면서도, 굴곡 중심 변형을 수용하여 동작 편이성과 착용감을 향상시킬 수 있는 설계 전략으로 해석된다.

종합적으로 볼 때, 분할선 구조는 단순한 패턴 분할 요소가 아니라, 반복적인 굴곡과 지면 접촉이 요구되는 동적 사용 맥락에서 보호 성능과 가동성 간의 구조적 균형을 조정하는 핵심 설계 변수로 작용한다. 특히 군사 훈련과 같은 저자세 이동 환경에서는 가로 방향 다단 분절 구조가 가장 안정적인 착용 반응을 제공하는 설계 대안이 될 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 군사 훈련 환경에서 반복적으로 수행되는 포복 동작을 사용 맥락으로 설정하고, 팔꿈치 굴곡 중심 변형과 반복 접촉 조건을 반영한 분할선 기반 보호대 구조를 설계·검토하였다. 팔꿈치 굴곡 자세를 설계의 출발점으로 설정하고, 피부 변형 특성과 접촉 구간 분석을 기반으로 분절 구조 설계 원리를 도출하였다.

주관적 착용 평가 결과, 분할선 구조는 팔꿈치 보호대의 동작 수용성과 전반적 착용 반응에 유의한 영향을 미쳤다. 무절개 구조는 충격 흡수감은 유지하였으나, 반복 굴곡 조건에서 가동성과 착용감이 제한되는 경향이 나타났다. 반면, 가로 방향 분할선이 적용된 구조는 굴곡 시 변형을 효과적으로 분산시키며 동작 편이성과 착용감에서 가장 우수한 반응을 보였

다. 특히, 가로 분할선 2개를 적용한 구조는 보호 성능과 가동성 간의 균형 측면에서 상대적으로 안정적인 설계 대안으로 확인되었다.

분할선 간격과 패드 두께에 대한 설계 검토에서는 5mm 간격과 2cm 두께 조건이 구조적 완화 효과와 착용 안정성 간 균형을 형성하는 것으로 나타났다. 이는 분할선 분절 밀도와 패드 두께가 독립적 요소라기 보다는 상호 보완적으로 작용하여 착용 반응을 형성할 수 있음을 시사한다.

본 연구는 제한된 표본(N=10)을 대상으로 한 7점 리커트 기반 주관적 평가에 근거하였으며, 객관적 압력 분포 측정이나 충격 흡수 성능에 대한 정량적 검증을 포함하지 못한 한계를 가진다. 또한, 평가 동작이 포복 동작에 한정되었다는 점에서 연구 결과의 일반화에는 신중한 해석이 필요하다.

본 연구에서 개발된 보호대는 팔꿈치 굴곡 상태에서의 반복 접촉 및 체중 지지 조건을 중심으로 설계되었으므로, 팔을 신전한 중립 자세에서는 구조적 형상 유지로 인해 형태 적합성 측면에서 제한이 나타날 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 관절 각도 변화에 대응할 수 있는 구조 설계를 통해 착용 범용성을 확장할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 이 연구는 분할선 구조를 단순한 패턴 분할 요소가 아니라, 관절 굴곡 시 나타나는 변형 경로와 변형 집중 구간을 수용하고 분산하기 위한 핵심 구조 설계 변수로 개념화하고, 이를 동작 기반 설계 접근으로 체계화하였다는 점에서 본 연구는 의의를 가진다. 기존의 팔꿈치 보호대가 주로 정적 보호 기능을 중심으로 설계되어 온 것과 달리, 본 연구는 동작 반응형 분할 구조를 적용함으로써 반복적인 굴곡 및 지면 접촉 동작에서의 구조적 적응성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 즉 본 연구는 분할선의 유무를 단순 비교하는 수준을 넘어, 굴곡 중심의 변형 분포와 변형 집중 구간을 구조 도출의 기준으로 설정하여 분할선의 위치·방향·개수를 구조 설계 변수로 체계화함으로써 기존 팔꿈치 보호대 설계 접근과 차별화된다. 기존 연구가 주로 소재 물성이나 패드 두께와 같은 재료 중심 변수에 초점을 두어 왔다면, 본 연구는 실제 동작 맥락에서의 '동작-접촉-변형' 연계 구조를 설계 출발점으로 삼아 보호대 구조 설계 방법론의 확장 가능성을 제시하였다.

향후 연구에서는 객관적 압력 분포 분석, 충격 흡수 성능 평가, 장시간 착용 조건에서의 내구 및 안정성 검증을 통해 설계 개념의 정량적 타당성을 확장할 필요가 있다. 이러한 접근은 군사 훈련 환경뿐 아니라 반복 접촉과 관절 굴곡이 요구되는 산업 작업 및 스포츠 환경으로의 적용 가능성을 제시한다.

참고문헌

1 Park, H., Park, J., & Kim, J. (2023). Effects of Wearing a Microcurrent Wrist Guard on Pain Scale, Range of Motion, and Muscle Strength in Elderly Women with Carpal Tunnel Syndrome. *Journal of Fashion Business, 27*(5), 1-12. https://doi.org/10.12940/jfb.2023.27.5.1

2 Lee, S. (2022). Effect of Elbow Sleeve and Kinesio Taping Treatment on Pain, Wrist Joint ROM and Golf Performance in Senior Female Golf Player with Medial Epicondylitis. *Journal of the Korean Society of Physica / Education*, *20*(2), 143-153. https://doi.org/10.22997/jcses.2022.20.2.143

3 Zhang, Y. (2025). *Effects of Joint Brace Application and Sliding Repetition on the Biomechanics of Curling Delivery.* [Unpublished doctoral dissertation]. Jeonbuk National University.

4 Jeon, K., Ahn, S., & Jeong, H. (2023). Kinetic Variables of Lower-Extremity Joint during Forward Jump Landing With Versus Without Elastic Ankle Strap. *Korean Journal of Sport Science*, *34*(3), 415-423. https://doi.org/10.24985/kjss.2023.34.3.415

5 Wu, S., Zeng, T., Liu, Z., Ma, G., Xiong, Z., Zuo, L., & Zhou, Z. (2022). 3D printing technology for smart clothing: A topic review. *Materials*, *15*(20), 7391. https://doi.org/10.3390/ma15207391

6 Xiao, Y.-Q., & Kan, C.-W. (2022). Review on development and application of 3D printing technology in textile and fashion design. *Coatings*, *12*(2), 267. https://doi.org/10.3390/coatings12020267

7 Lee, H., & Hong, K. H. (2019). Survey on Injuries during Snowboarding and Wearing Satisfaction to Develop

Snowboard Protector. *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, *21*(4), 497-508. https://doi.org/10.5805/SFTI.2019.21.4.497

8 Post, E., Komisar, V., Sims-Gould, J., Korall, A. M. B., Feldman, F., & Robinovitch, S. N. (2019). Development of a stick-on hip protector: A multiple methods study to improve hip protector design for older adults in the acute care environment. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, *6*, 2055668319877314. https://doi.org/10.1177/2055668319877314

9 Vecchiato, M., Russo, L., Livio, A., Zanardo, E., Mezzalira, M., Farina, E., Demeco, A., & Palermi, S. (2025). Protective Equipment in Football: A Review of History, Evolution, Materials, and Contemporary Use. *Sports*, *13*(11), 392. https://doi.org/10.3390/sports13110392

10 Gallagher, S., Pollard, J., & Porter, W. L. (2011). Locomotion in restricted space: Kinematic and electromyographic analysis of stoopwalking and crawling. *Gait & Posture*, *33*(1), 71-76. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.027

11 Vitali, R. V., Cain, S. M., Davidson, S. P., & Perkins, N. C. (2019). Human crawling performance and technique revealed by inertial measurement units. *Journal of Biomechanics*, *84,* 121-128. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.12.030

12 Hong, K. H., & Lee, H. (2020). Development of hip protectors for snowboarding utilizing 3D modeling and 3D printing. *Fashion and Textiles*, *7*(1), 39. https://doi.org/10.1186/s40691-020-00236-3

13 Skvortsov, D., Anisimov, V., & Aizenshtein, A. (2021). Experimental Study of Military Crawl as a Special Type of Human Quadripedal Automatic Locomotion. *Applied Sciences*, *11*(16), 7666. https://doi.org/10.3390/app11167666

14 Lee, O., & Lee, Y. (2023). Investigation on Development Plans for Female Army Uniforms: A Focus on In-depth Interviews. *Journal of Defense Quality Society*, *5*(1), 28-43. https://doi.org/10.23199/jdqs.2023.5.1.004

15 국가기술표준원. (2021). *제8차 한국인 인체치수 조사사업 최종보고서*.

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 46-53, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.004

함정용 복합재 추진기의 캐비테이션 및 소음 특성에 관한 모형시험 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

An Experimental Study on Cavitation and Noise Characteristics of a Composite Propeller for Naval Vessels

정홍석†, Hongseok Jeong
선박해양플랜트연구소, 함정공학연구센터, 선임연구원
Senior Researcher, Naval Ship Engineering Research Center, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

설한신, Hanshin Seol
선박해양플랜트연구소, 함정공학연구센터, 책임연구원
Principal Researcher, Naval Ship Engineering Research Center, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

김성훈, Sunghoon Kim
HD현대중공업, 선박성능연구실, 책임연구원
Senior Researcher, Ship Performance Research Department, HD Hyundai Heavy Industries

최희영, Heeyoung Choi
HD한국조선해양, 미래기술연구원, 책임연구원
Senior Researcher, Advanced Research Center, HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering

김명진, Myoungjin Kim
한국카본, 부품BG/부품연구소, 이사
Director, Composite Parts R&D, Hankuk Carbon

Abstract

This study experimentally compares the cavitation characteristics, hull pressure fluctuations, and underwater radiated noise of a composite propeller with those of a geometrically identical metallic propeller using model tests. To account for the similarity in the deformations of the model and the full-scale propeller, a Mach number similarity-based cavitation scaling method was applied to the composite propeller, whereas conventional similarity parameters were used for the metallic propeller. Under the same operating conditions, the composite propeller exhibited a slight reduction in the extent of cavitation. Correspondingly, the hull pressure fluctuations decreased overall with a maximum reduction of approximately 26%, and the higher-harmonic components were attenuated. Full-scale extrapolation of the propeller noise based on ITTC procedures indicated an average broadband noise reduction of approximately 2 dB in the 1/3-octave bands for the composite propeller. Image analysis revealed negligible deformation in the metallic propeller, whereas the composite propeller exhibited a trailing-edge deflection under load, which likely reduced the effective angle of attack and contributed to the mitigation of cavitation, pressure fluctuations, and broadband noise.

keywords : composite propeller, propeller cavitation, propeller noise, hull pressure fluctuation, model test

† Corresponding Author : Hongseok Jeong
Tel : +82-42-866-3477, email : hsj@kriso.re.kr
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, 34103, 32, 1312beon-gil, Yuseong-daero, Daejeon, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 27th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

함정 운용 시 발생하는 수중방사소음은 음향 탐지체계에 의한 피탐(detection) 성능에 직접적인 영향을 미치며, 따라서 음향 스텔스 성능 향상은 함정 설계 시 핵심 요소로 인식되고 있다. 특히 추진기 캐비테이션은 고속에서 지배적인 소음이고 차폐가 어려워 함정 추진기 설계 시 캐비테이션을 최소화할 수 있는 기술이 요구된다. 캐비테이션 초생속도(Cavitation Inception Speed, CIS)는 이러한 관점에서 중요한 설계 지표로, CIS 이후에는 수중방사소음이 급격히 증가하며 함정의 탐지 가능성이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다.

기존 연구에서는 추진기 형상뿐 아니라 선체 부가물 및 운용 조건이 캐비테이션 초생 특성에 미치는 영향이 다양하게 분석되어 왔다. 예를 들어, 추진기 유입 유동을 변화시키는 스트럿과 같은 부가물 형상 최적화를 통해 CIS를 향상시킬 수 있음이 보고되었으며, 공기 주입 시스템과 같은 운용 조건 또한 CIS 및 수중방사소음 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다[1-2]. 또한 최근에는 영상 기반 분석 기법을 활용하여 캐비테이션 초생을 정량적으로 탐지하려는 연구도 수행되고 있다[3]. 이러한 연구들은 캐비테이션이 단순한 유동 현상을 넘어 소음 및 탐지 성능과 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다.

최근에는 재료 특성을 활용하여 추진기 자체의 캐비테이션과 소음을 저감하려는 시도도 확대되고 있다. 복합재 추진기는 금속 추진기 대비 높은 비강성, 재료 감쇠 특성을 가지고 있으며, 유체 하중에 의해 탄성 변형이 발생하여 추진기 캐비테이션과 수중방사소음을 저감할 수 있는 잠재적인 대안으로 주목받고 있다.

복합재 추진기를 실선에 적용하기 위해서는 설계 단계에서 수치해석과 모형시험을 병행하여 캐비테이션 및 소음 성능을 신뢰성 있게 예측·검증하는 절차가 필수적이다. 최근에는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 유한요소해석(Finite Element Method, FEM)을 결합한 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction, FSI) 해석을 통해 복합재 추진기의 변형 및 성능을 예측하는 연구가 수행되고 있으며[4-5], 모형시험을 통해 캐비테이션 및 소음 특성을 평가하려는 연구도 이루어지고 있다[6]. 그러나 기존의 모형시험 기법은 주로 금속 추진기를 대상으로 정립된 강체(rigid) 가정에 기반하고 있어[7], 복합재 추진기에서 중요한 변형 특성과 이에 따른 유동–구조 연성 효과를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.

복합재 추진기는 동일 운용 조건에서도 날개 변형으로 인해 유효 형상과 하중 분포가 변화하며, 이에 따라 캐비테이션 발생 양상 및 소음 특성이 달라질 수 있다. 따라서 복합재 추진기의 성능을 정확히 평가하기 위해서는 이러한 변형 효과를 고려할 수 있는 새로운 모형시험 기법이 필요하다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 마하 수(Mach number) 상사 기반의 모형시험 기법이 제안되었으며[8-9], 이는 유동 조건과 구조적 변형 특성을 동시에 고려할 수 있는 방법으로 제시되고 있다.

본 연구에서는 이러한 마하 수 상사 기반 모형시험 기법을 적용하여 동일 형상의 금속 추진기와 복합재 추진기의 캐비테이션, 선체 변동압력 및 추진기 소음 특성을 비교 분석하였다. 이를 통해 복합재 추진기의 탄성 변형이 캐비테이션 발생 특성 및 수중방사소음에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 복합재 추진기의 음향 스텔스 성능 향상 가능성을 검토하고자 한다.

2. 모형시험 구성 및 시험조건

2.1. 모형시험 구성

본 연구의 대상 선박은 선박해양플랜트연구소의 친환경대체연료 해상실증 선박(Korea Green-ship Test Bed, K-GTB)이며, K-GTB는 open-strut 구조와 쌍축 추진기라는 점에서 함정과 비슷한 부분이 있다. 선박해양플랜트연구소에서 보유 중인 대형캐비테이션터널(Large Cavitation Tunnel, LCT)에

서 모형시험이 이루어졌으며, Figure 1은 대형캐비테이션터널의 구조를 나타낸다. 터널 외부로 연결된 모터를 이용하여 내부의 물을 순환시키며, 상부의 시험부에 모형선 및 추진기를 설치하여 시험이 이루어진다. Table 1은 대형캐비테이션터널의 주요 사양을 나타낸 것이다.

추진기 캐비테이션 모형시험 시 추진기 캐비테이션의 안정적인 거동을 위해 모형추진기의 직경이 230mm 이상이 되도록 축척비를 결정하였으며, 최종적으로 직경이 240mm가 되도록 축척비를 7.917로 설정하였다(실선 추진기 직경 1.9m). K-GTB의 경우 선형의 폭(breadth)이 넓어 해당 축척비로 모형선을 제작할 경우 대형캐비테이션터널에 맞지 않는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 선형의 반쪽만 활용하였으며, 나머지 부분은 추진기 유입류에 영향을 최소화할 수 있도록 모델링하고 제작하였다. Figure 2는 설치된 모형선과 금속 추진기를 나타낸다.

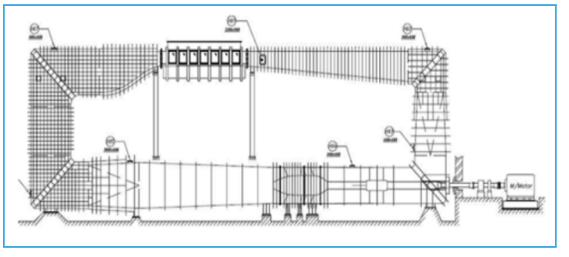


Figure 1. Schematic view of LCT of KRISO

Table 1. Principal particulars of KRISO LCT

Item	Value
Size of the tunnel	60m×22.5m×6.5m (L×H×B)
Size of the test section	12.5m×1.8m×2.8m (L×H×B)
Max. flow speed at the test section	16.5m/s
Min. pressure at the test section	0.02~3.5bar

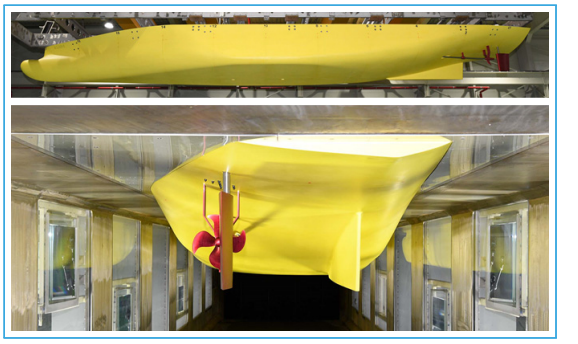


Figure 2. Installation of model ship in LCT

Table 2. Principal particulars of design propellers

Item	Value
Number of blades	4
Expanded Area Ratio (EAR)	0.55
Hub ratio	0.165
Mean pitch ratio	0.67
Total skew (degrees)	31.9

본 연구에서 활용한 금속 추진기의 주요 설계 변수는 Table 2에 나타냈으며, 복합재 추진기도 동일한 설계 변수를 갖도록 설계하였다. Figure 3은 설치된 모형 추진기를 나타낸다.

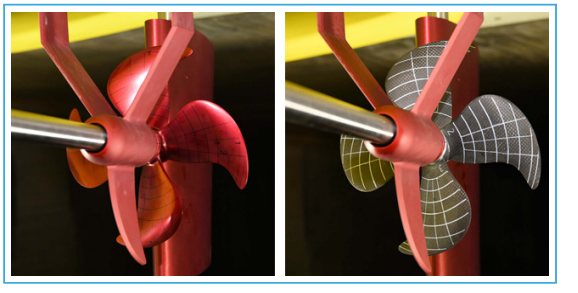


Figure 3. Installation of model-scale aluminium and composite propellers

추진기에서 발생한 캐비테이션 관찰을 위하여 시험부에 스트로보스코프(stroboscope)와 비디오카메라를 설치하였으며, 추진기 변위 확인을 위해 터널 벽면과 수직한 방향으로 카메라를 설치하였다. 추진기에서 발생한 캐비테이션 소음 계측을 위해 터널

내 설치된 수중음향센서를 이용하였으며, B&K type 8105 하이드로폰을 이용하였다. 하이드로폰에서 계측된 음향 신호는 신호증폭기와 데이터 수집장치를 이용하여 컴퓨터에 저장하였으며, 주파수는 102.4kHz까지 계측하였다. 불안정한 추진기 캐비테이션 소음의 특성을 계측하기 위해서는 충분히 긴 시간의 소음 계측이 필요하며, 이를 위해 1분간 계측을 수행하였다.

추진기 기인 선체 변동압력을 계측하기 위해 추진기 상방 선체에 하이드로폰 배열을 설치하였으며, Figure 4는 설치 위치 배열을 나타낸다. 이때 센서 간 간격은 0.125D(D: 직경)이며, C0는 프로펠러 중심을 나타낸다.

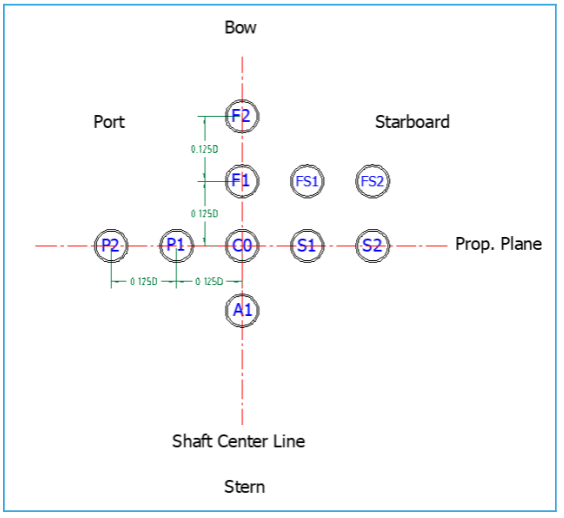


Figure 4. Measuring positions of pressure fluctuation at the hull (C0: propeller center)

추진기 비교 모형시험의 유의성을 확보하기 위하여, 모형선 설치 후 같은 시기에 추진기를 각각 설치하여 시험을 수행하였다.

2.2. 모형시험 조건

일반적으로 추진기 캐비테이션 모형시험을 위한 시험 조건은 추력계수(K_T)와 캐비테이션 수(σ_n)로 결정하나[6], 복합재 추진기의 모형시험을 위해서는 모형-실선의 변형 특성 상사를 고려하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 최근 제안된 마하 수 상사 기반의 캐비테이션 모형시험 기법을 활용하였다[5]. 따라서 기존 추진기의 경우 무차원수인 추력계수와 캐비테이션 수를 기반으로 시험 조건을 결정하였으며, 복합재 추진기의 경우 동일 유속에서 금속 추진기와 동일 추력을 내는 회전수, 동일 터널 압력을 기반으로 모형시험 조건을 설정하였다. Table 3과 Table 4는 각각 실선 A 노트에 해당하는 금속 추진기와 복합재 추진기 모형시험 조건을 나타낸다. Table 4의 압력은 금속 추진기의 캐비테이션 수 시험 조건을 맞추었을 때의 허브 센터 압력 기준이다.

Table 3. Test condition for aluminium propeller

Item	Value
K_T	0.1516
σ_n	1.75

Table 4. Test condition for composite propeller

Item	Value
n (rps)	48.8
P_T (kPa)	130.0

해당 선속 조건에서 추진기 소음을 계측하였으며, 시험 후 추진기를 더미 허브로 교체하여 동일한 유속, 회전수에서 배경소음 계측을 수행하였다. 계측된 추진기 소음의 실선확장은 국제수조회의(International Towing Tank Conference, ITTC) 추진기 캐비테이션 소음 모형시험 기법에 기반하여 이루어졌으며, 이는 식(1)과 같다.

$$\Delta SPL = 20\log_{10}\left[\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_m}\right)^x\left(\frac{n_s D_s}{n_m D_m}\right)^y\left(\frac{D_s}{D_m}\right)^z\right] \quad (1)$$

이때 σ는 캐비테이션 수, n은 회전수, D는 추진기 직경이며, 아래 첨자 m과 s는 각각 모형, 실선을 의미한다. 계측소음을 L_{p+n}, 배경소음을 L_n이라고

했을 때, 배경소음 보정은 다음과 같이 이루어진다.

i) $L_{p+n} - L_n$ 〈 3 dB: 데이터 유효성 없음

ii) 3 dB 〈 $L_{p+n} - L_n$ 〈 10 dB:

$$L_p = 10\log_{10}\left(10^{\left(\frac{L_{p+n}}{10}\right)} - 10^{\left(\frac{L_n}{10}\right)}\right)$$

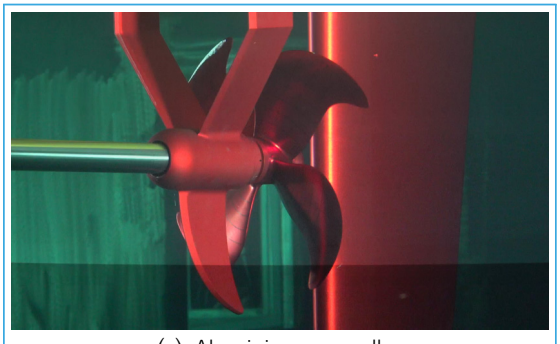
iii) $L_{p+n} - L_n$ 〉 10 dB: $L_p = L_{p+n}$

이때 L_p는 보정된 소음이다.

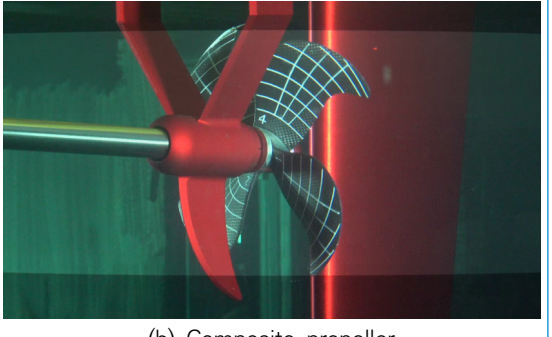
3. 결과 및 고찰

3.1. 추진기 캐비테이션 및 소음

Figure 5는 추진기별 시험 조건에서 추진기 캐비테이션을 나타낸다. 두 추진기 모두 해당 조건에서 날개 끝 와류 캐비테이션이 주로 일어난 것을 확인할 수 있다.



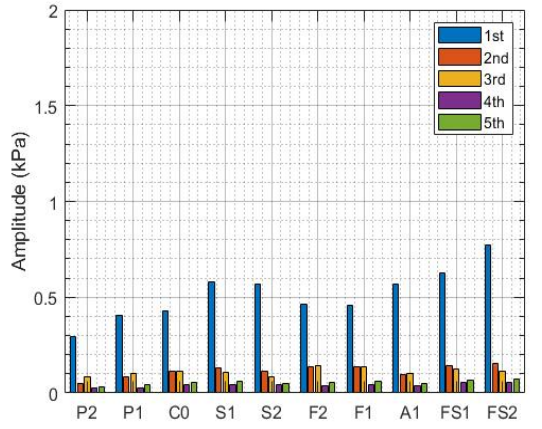
(a) Aluminium propeller



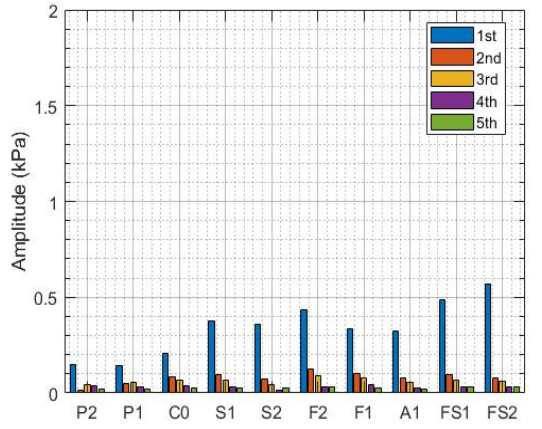
(b) Composite propeller

Figure 5. Comparison of propeller cavitation

캐비테이션 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 선체 상방에 설치된 센서와 터널 내 설치된 센서를 이용하여 선체 변동압력과 추진기소음을 비교하였다. Figure 6은 금속 추진기와 복합재 추진기의 선체 변동압력 실선 추정 결과를 비교한 것이다. 두 추진기 모두 비슷한 변동압력 경향을 나타내며, 복합재 추진기 적용 시 변동압력이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 가장 높은 변동압력은 FS2 지점에서 발생하였으며, 금속 추진기는 0.77kPa, 복합재 추진기는 0.57kPa로 나타나 약 26%가 감소하였다. 또한, 복합재 추진기 적용 시에 고차 성분이 순차적으로 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Aluminium propeller



(b) Composite propeller

Figure 6. Comparison of pressure fluctuation

Figure 7과 Table 5는 계측한 추진기소음을 실선확장하여 비교한 것이다. 복합재 추진기 적용 시 캐비테이션의 감소로 광대역소음이 전반적으로 감소한 것으로 나타났으며, 1/3 옥타브 밴드 기준 평균으로는 2dB가 감소하였다. 날개통과주파수(Blade Passing Frequency, BPF) 소음의 경우 복합재 추진기 적용 시 날개별 형상, 조립의 차이로 인해 직접적인 비교가 어려웠으며, 따라서 광대역소음만을 비교하였다. BPF 소음은 향후 모형 제작 및 조립 정도의 개선 후 평가 가능할 것으로 판단된다.

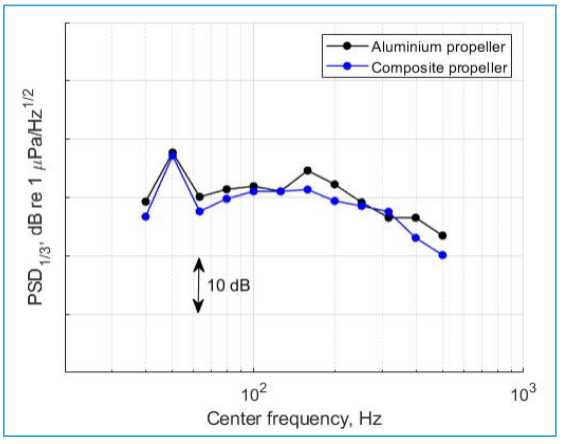


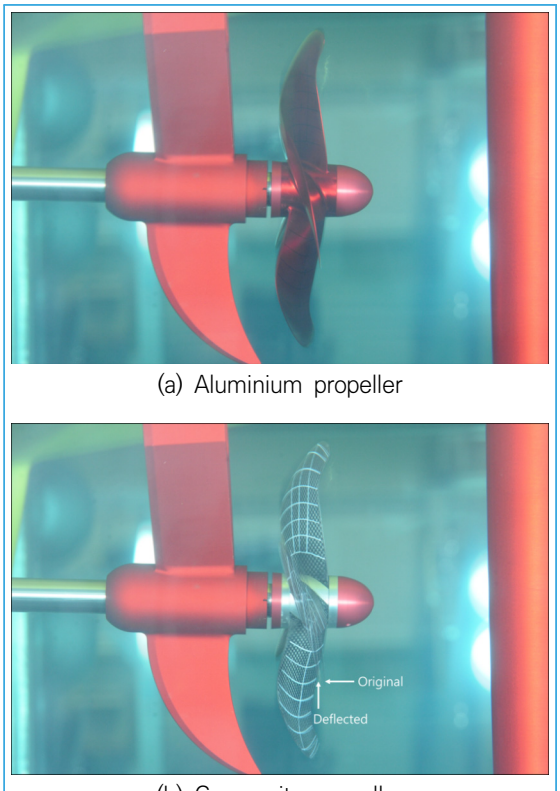
Figure 7. Comparison of propeller broadband noise

Table 5. Difference between aluminium propeller noise and composite propeller noise (predicted at full scale)

Center frequency (Hz)	Difference (dB)
40	3
50	1
63	2
80	2
100	1
125	0
160	3
200	3
250	1
316	-1
400	3
500	3
Average	2

3.2. 추진기 날개 변위 분석

본 연구에서 활용된 금속 추진기와 복합재 추진기는 동일한 형상을 기반으로 하고 있으며, 시험 조건에서 복합재 추진기의 변형을 조사하기 위해 시험 전 정지상태의 추진기 형상과 시험 조건에서의 추진기 형상을 각각 촬영하여 변형을 비교하였다. Figure 8은 정지상태와 시험 조건에서의 추진기 사진을 겹쳐서 도시한 것이다. 금속 추진기의 경우 정지상태와 시험 조건에서 추진기의 변형이 일어나지 않고 있으며, 복합재 추진기의 경우 시험 조건에서 날개 끝 후연(trailing edge) 부분이 선수(bow) 방향으로 2~3mm 변형된 것으로 나타났다. 이로 인해 날개의 유효 받음각이 감소하게 되어 캐비테이션이 감소한 것으로 판단된다. 다만 모형 추진기의 경우 날개별 제작 정도와 조립에 의한 불확실성이 존재하



(a) Aluminium propeller

(b) Composite propeller

Figure 8. Comparison of deflection of propeller blades

여 날개별로 변형의 정도는 다른 것으로 확인하였다. 또한 본 시험에서는 단일 카메라를 활용하여 변위계측을 수행하였으므로, 정확한 날개 변위 분석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 선박해양플랜트연구소 연구선 K-GTB를 대상으로 금속 추진기와 복합재 추진기의 캐비테이션 특성, 추진기소음 및 선체 변동압력을 비교하기 위한 모형시험을 수행하였다. 복합재 추진기의 경우 모형-실선 간 변형 특성 상사를 고려하기 위하여 마하 수 상사 기반 캐비테이션 모형시험 기법을 적용하여 시험 조건을 설정하였다.

시험 결과, 두 추진기 모두 날개 끝 와류 캐비테이션이 지배적으로 발생하였으며, 복합재 추진기에서 캐비테이션이 소폭 감소하는 경향이 나타났다. 선체 변동압력의 경우, 복합재 추진기 적용 시 전반적인 감소 경향을 보였으며, 최대 변동압력 기준으로 약 26% 감소하였다. 또한 고차 성분이 순차적으로 감소하는 특성이 확인되었다.

추진기 소음의 경우 복합재 추진기 적용 시 광대역소음이 1/3 옥타브 밴드 기준 평균 약 2dB 감소하였다. 이를 분석하기 위해 추진기 날개 변위를 관찰하였으며, 복합재 추진기에서 날개 끝 후연부가 선수방향으로 변형되어 유효 받음각 감소를 유도하고 추진기 캐비테이션을 줄이는 것으로 확인하였다.

본 연구를 통해 동일 형상 조건에서도 복합재 추진기가 탄성 특성에 의해 캐비테이션 및 소음·변동압력 측면에서 저감 효과를 나타낼 가능성이 있음을 확인하였다. 다만 제한된 축척비로 인해 상대적으로 작은 크기의 모형 제작이 요구됨에 따라 제작 및 조립에 의한 실험 오차가 발생하였으며, 향후에는 제작 및 조립성을 고려한 축척비의 산정 및 시험이 필요할 것으로 보인다. 또한, 추진기 변형의 정량적 계측 및 제작 불확실성 저감을 통한 추가 검증이 필요하다.

사 사

이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-016).

참고문헌

1 Seol, H., Paik, B., Ahn, J., Park, Y., & Jeong, H. (2022). Improvement of Ship Propeller Cavitation Inception Speed by changing the alignment angle of the inclined shaft support strut. *Journal of Defense Quality Society, 4*(2), 116-123. https://doi.org/10.23199/jdqs.2022.4.2.016

2 Seo, C., Lim, T., Lee, P., & Seo, D. (2023). Study on effect of air leakage in PRAIRIE system between URN and CIS of propeller. *Journal of Defense Quality Society, 5*(1), 166-172. https://doi.org/10.23199/jdqs.2023.5.1.019

3 Kim, D., & Seol, H. (2024). Development of a real-time VCIS detection model using YOLOv8. *Journal of Defense Quality Society, 6*(2), 111-119. https://doi.org/10.23199/jdqs.2024.6.2.011

4 He, X. D., Hong, Y., & Wang, R. G. (2012). Hydroelastic optimisation of a composite marine propeller in a non-uniform wake. *Ocean Engineering, 39*, 14-23. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.10.007

5 Li, M., Hong, Y., Si, B., Ding, Y., Tang, Z., Wang, R., & He, X. (2024). Numerical and experimental study of the cavitation performance of a composite propeller. *Physics of Fluids, 36*(10), 103303. https://doi.org/10.1063/5.0228410

6 Paik, B.-G., Kim, G.-D., Kim, K.-Y., Seol, H.-S., Hyun, B.-S., Lee, S.-G., & Jung, Y.-R. (2013). Investigation on the performance characteristics of the flexible propellers. *Ocean Engineering, 73*, 139-148. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.09.005

7 International Towing Tank Conference. (2017). *Model-scale propeller cavitation noise measurements* (ITTC Recommended Procedures and Guidelines No. 7.5-02-01-05, Revision 01). https://www.ittc.info/media/7993/75-02-01-05.pdf

8 Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2025). Numerical Study

on the Dynamic Scaling Law of Composite Propellers for Naval Ships. *Journal of Defense Quality Society, 1*(1), 16-25. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.1.002

9 Kim, S., Park, J., Lee, H., Choi, H., Jeong, H., Seol, H., & Kim, M. (2025). A Study on Propulsion Performance and Cavitation Test Method of Composite Propellers Using a Large Cavitation Tunnel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 62*(3), 179-186. https://doi.org/10.3744/SNAK.2025.62.3.179

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 54-70, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.005

지속가능항공유(SAF) 전환 운영에 대한 공급사슬 구성원의 이해관계: 국방분야를 중심으로

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Understanding Stakeholder Interests in Supply Chain Transition toward Sustainable Aviation Fuel: A Military Aviation Perspective

임세환, Sehwan Lim
연세대학교, 기술경영학협동과정, 박사과정
Ph.D student, MOT, Yonsei University

최경환†, Kyunghwan Choi
국방대학교, 국방과학학부, 교수
Professor, School of Defense Science, Korea National Defense University

Abstract

Sustainable Aviation Fuel (SAF), derived from eco-friendly raw materials, is a critical resource for implementing carbon-neutrality policies in the aviation industry. While previous studies have largely focused on the economic viability and environmental impact of SAF production technologies, establishing a stable distribution environment requires a clear understanding of the interests of the in the supply chain, specifically incorporating the buyer's perspective. Accordingly, this study explores the preferred characteristics of SAF production technologies from the profit-oriented viewpoint of each supply chain member by comparing the quality attributes of SAF with those of conventional jet fuel. Specifically, this study targets the defense sector, which is a key buyer of jet fuel while pursuing multifaceted values, such as supply stability and cost-effectiveness. In conclusion, the buyer's perspective must be integrated into the supplier's decision-making process to ensure effective and sustainable operation of the SAF supply chain. Furthermore, suppliers and buyers should exchange the necessary information to achieve mutual benefits, and practical procedures are required to ensure that these dynamics are reflected within contractual agreements.

keywords : sustainable aviation fuel, carbon neutrality, jet fuel quality, supply chain coordination

† Corresponding Author : Kyunghwan Choi
Tel : +82-041-831-3325, Fax. +82-2-748-7588 email : ckh5028@korea.kr
Korea National Defense University, (33021) 1040, Hwangsanbul-ro, Yangchon-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 7th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

항공산업은 국가 경제의 주요 기반으로, 글로벌 경제 성장과 국가 안보에 중추적인 역할을 담당하고 있다. 민간에서 항공은 국제 교류와 물류의 핵심수단이 되어 세계 경제를 견인하고 있으며, 국방분야에서 항공력은 국가 안보를 유지하는 데 필수적 역량이다. 이러한 항공기를 움직이는 연료는 대부분 원유기반의 항공유로, 전 세계적으로 이산화탄소 배출 저감을 통한 기후위기에 대응하기 위한 주요 대상이 되고 있다. 항공산업은 전기 등의 친환경 에너지로 전환이 용이한 자동차 산업 등과 달리, 항공설계 기술의 한계, 공항 인프라 전환 문제 등으로 에너지 자체의 전환은 어려운 상황이다. 이로 인하여 친환경 원료 기반이면서 기존 항공유와 유사하며, 기존 항공기 플랫폼에 그대로 적용이 가능한 지속가능항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF)가 핵심 대안으로 주목받고 있다.

현재 항공산업의 이산화탄소(CO^2) 배출량은 전체 산업 배출량의 2~3% 수준이다. 향후 항공수요 증가로 인하여 이는 더욱 늘어날 것으로 예상되기에 SAF 활용의 시급성이 높아지고 있다. 그렇지만 정유사와 항공사는 Table 1과 같이 상충되는 이해관계를 가지고 있는데, 정유사는 SAF 생산설비 확충을 위해 대규모 투자를 필요로 하고 수요가 안정적으로 뒷받침 되어야 하지만, 항공사는 이를 수용하기에는 연료

Table 1. Stakeholders in SAF Adoption

–		Refiner	
		SAF Investment	Status Quo
Air-line	SAF Adoption	**(High, High)** Market lead, Green growth	(Low, Mid) No suppliers
	Status Quo	(Mid, Low) No buyers (Refiner loss)	**(Mid, Mid)** Short-term stability

* **The government** should support the SAF market through early incentives and regulatory reforms, driving investment and enabling stable adoption.

비 부담이 높기에 적극적으로 SAF를 사용하기에는 쉽지 않은 상황이다. 이에 따라, SAF 확산을 위해서는 정부와 국제사회의 역할이 중요하다고 할 수 있다. 현재는 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)와 유럽연합(European Union, EU)을 중심으로 SAF 의무혼합비율 목표를 지정하고, 이를 연차별로 확대하는 방향으로 항공산업 분야의 탄소 배출 감축을 추진하고 있다. 구체적으로 전 세계 각 국가들은 ICAO가 주도하는 국제항공 탄소상쇄·감축제도(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA)에 적극 참여하고 있다. 특히, EU는 ReFuelEU Aviation 규정을 통해 2025년부터 EU 공항에서 공급하는 기존 항공유에 일정 비율의 SAF 혼합을 의무화하는 등의 강력한 정책을 추진하고 있다. 이러한 정책적 요소에도 불구하고 SAF 생산량은 아직 전 세계 항공유 사용량의 0.53%에 불과하며, 이는 생산비용, 기술적 한계, 인프라 부족 등이 주요 장애물로 작용하고 있기 때문이다. 그렇지만 이러한 현실적 제약에도 불구하고, ICAO는 2050년까지 완전한 탄소중립을 목표로 하고 있으며, 이를 달성하기 위해서는 생산기술 발전과 안정적 수요 확보, 공급사슬 관리가 필수적이다. 국내에서도 국토교통부와 산업통상자원부는 CORSIA의 SAF 의무 이행시기에 맞추어 2027년부터 국제선에 SAF 1% 혼합 의무화를 추진하고 있으며, 다수의 항공사, 정유사들의 이해관계를 조율하고 있다[1].

향후에 SAF가 안정적으로 시장에 보급되고 확산되기 위해서는 견고한 공급사슬(supply chain)을 구축해야 한다. 이를 위해서는 공급, 수요 측면의 다양한 의사결정자의 조정과정이 필수적이다[2]. 그렇지만, 그간의 SAF에 관한 선행연구는 SAF의 친환경 성과 수준, 다양한 원재료 기반의 SAF 제조기술 수준, 공급원 검토 등의 생산자 관점에 주로 초점을 맞추고 있다[3-6]. SAF가 안정적으로 정착되기 위해서는 수요자 관점도 중요한데, 이들은 새로운 제조방법으로 생산되는 항공유를 혼합하여 운영해야 하는 리스크를 가지고 있기 때문이다. 또한, 항공유

구매기업(기관) 운영에 연료비는 상당한 비중을 차지하는 만큼 항공유의 작은 특성, 운영환경 변화는 성과에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 따라서, 수요자들이 SAF 관련 공급사슬 파트너들과 함께 창출할 수 있는 운영적 가치에 대한 연구와 SAF 수요자 관점에서 공급업체와의 이해관계에 대한 연구가 필요한 상황이다.

이에 따라, 본 연구는 기존 항공유 대비 SAF의 품질특성 차이에 기반하여, SAF 사용이 공급사슬 각 단계 미치는 영향성과 구성원 간의 이해관계를 면밀히 살펴보고자 한다.

최근 국제 정세변화는 이러한 분석의 필요성을 더욱 높이고 있다. 2026년 3월 미국-이란 전쟁으로 인한 호르무즈 해협 봉쇄로 국제 항공유 가격이 2025년 대비 2배 이상 급등하면서 SAF의 가격 경쟁력이 재평가 받는 상황으로 전환되었다. 또한, 중동지역에 집중된 원유 공급사슬의 취약성도 나타나고 있다. 이러한 맥락에서 SAF는 단순한 친환경 연료를 넘어서 에너지 안보와 공급 안정성을 확보할 수 있는 전략적 자원으로 인식될 필요가 있다. 특히, 한정된 예산으로 작전지속성을 유지해야하는 국방분야는 단순히 연료의 도입가격뿐만 아니라 운영 안정성에 대해 어느 분야보다도 민감도가 높은 분야라고 할 수 있다. 또한, 국방분야는 국내 항공유 소비의 8% 수준을 차지하고 있어 산업에 미치는 파급력도 크다고 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 국방분야 맥락에서 SAF 공급사슬 이해관계자들의 관계를 파악하고 한다. 기본적으로 국방분야에서 SAF를 도입하면, 해외 원유 수입 의존도 감소와 근거리 공급사슬 구축으로 에너지 자립도 향상, 연료 친환경성으로 인한 장비 수명주기 증가 등의 운영적 이점을 기대할 수 있다. 하지만, SAF는 새로운 항공유 제조기술로 기존 항공유와의 생산원료, 품질특성 차이로 인해 항공유 공급사슬 구성원들 간의 다양한 이해관계가 새롭게 생겨날 수밖에 없다. 이에 따라 SAF가 신속하고 원활하게 군 운영에 정착되기 위해서는 군은 연료특성에 기초한 명확한 요구사항을 공급업체에 전달해야 하며, 공급업체는 이를 의사결정에 반영해야 한다.

본 연구에서는 먼저 SAF 기술동향과 국가별 활용동향을 살펴보고 선행연구를 기반으로 기존 항공유와 SAF 간의 품질특성 차이를 분석하여 향후 변화요소를 확인한다(2장). 다음으로 국방분야를 중심으로 항공유 생산부터 최종 고객의 사용단계까지 공급사슬 구성원들 간의 이해관계를 분석하고, 시사점을 도출한다. 그리고 향후 필요한 조정 방향과 실무적 방향에 대해 탐색하고자 한다(3~4장).

2. SAF 현황

2.1. SAF 기술동향

SAF는 기존 항공기 엔진 및 연료 인프라와 완벽히 호환되는 드롭인(drop-in) 특성을 가지고 있기 때문에, 항공산업에서 환경 규제에 대응한 가장 현실성 있는 대안으로 주목받고 있다. SAF 제조기술은 크게 원료 물질과 생산공정에 따라 OTJ(Oil to Jet), ATJ(Alcohol to Jet) 등으로 구분할 수 있다[8]. OTJ(Oil-to-Jet) 기술은 식물성 기름이나 동물성 지방을 원료로 사용하여 수소첨가반응 등을 거쳐, HEFA-SPK(Hydroprocessed Esters and Fatty Acids-Synthetic Paraffinic Kerosene) 등을 생산하는 상용화된 공정이다[8-10]. ATJ 기술은 목질계 바이오매스나 당질계 원료에서 얻은 알코올을 SAF로 전환하는 방법이다. 궁극적인 탄소중립 달성을 위해서는 재생에너지로부터 얻은 전기를 통해 물을 분해하여 수소를 얻고, 이를 이산화탄소 등과 결합하는 PTL(Power to Liquid) 방식을 적용하는 것이 필요하다[11].

현재 항공유 규격인 ASTM(American Society for Testing and Materials) D1655와 ASTM D7566에는 Table 2와 같이 총 11가지의 SAF 인증 생산방식에 대해 규정하고 있다[10]. 상용 항공유 규격인 ASTM D1655에서는 기존 항공유 생산공정에서 SAF를 공동처리하는 코프레싱(co-processing) 방식을 허용하여, 정유업체들이 투자규모를 최소화하여 SAF를 생산할 수 있게 되었으나, 최대허용 혼

Table 2. ASTM-Approved SAF Production Pathways and Blending Limits

Category		Production Pathway	Primary Feedstocks	Blending Limit
ASTM D7566	Annex1	FT-SPK (Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene)	Coal, natural gas, biomass	50%
	Annex2	HEFA-SPK (Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids)	Vegetable oils, animal fats, etc.	50%
	Annex3	HFS-SIP (Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars)	Sugar-derived biomass	10%
	Annex4	FT-SKA (Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources)	Coal, natural gas, biomass	50%
	Annex5	ATJ-SPK (Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene [isobutanol])	Alcohols derived from biomass, etc.	50%
	Annex6	CHJ (Catalytic hydrothermolysis jet fuel)	Triglycerides	50%
	Annex7	HC-HEFA-SPK (Synthesized paraffinic kerosene from hydrocarbon-hydroprocessed esters and fatty acids)	Algae	10%
	Annex8	ATJ-SKA (Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene with aromatics)	Sugars	50%
ASTM D1655	Annex1	Co-processed HEFA	FOG (fats, oils, and grease) co-processed with petroleum	5%
	Annex1	Co-processed FT	Fischer-Tropsch feedstocks co-processed with petroleum	5%
	Annex1	Co-processed biomass	Biomass co-processed with petroleum	5%

합치는 현재 5%에 불과한 단점이 있다[11]. 주요 SAF 제조규격과 혼합유에 대한 규격을 정의하는 ASTM D7566에는 새로운 SAF 생산기술의 인증 시에 해당 사항에 대한 정보가 부록(annex)에 추가되고 있다.

국내 기업들은 코프로세싱과 HEFA-SPK 방식을 SAF 생산기술로 주로 사용하고 있거나 사용할 예정이다. 이는 해당 방식들이 기존 생산설비를 최대로 활용할 수 있어서 신규 설비투자를 최소화할 수 있기 때문이다. 특히, HEFA-SPK는 50%까지 혼합이 허용되고 기존 바이오디젤 생산설비를 상당 부분 활용할 수 있는 장점이 있기에 Total社(프랑스), Neste社(핀란드) 등 주요 정유업체들이 활용하고 있는 SAF 제조 기술이다[8,10].

국방분야에서 사용하고 있는 항공유 종류는 JP(Jet Propellant)-8로 민간에서 사용 중인 항공유 Jet A-1(ASTM D1655 규격)에 결빙방지제, 부식/산화방지제 등의 첨가제를 추가한 형태의 연료이다. 한국군에서 운영하는 대부분의 군용 항공기는 미국 국방 규격인 MIL-DTL-83133의 JP-8을 정격연료로서 적용하고 있으며, MIL-DTL-83133 최신판(2024년)에는 개정연도 이전까지 ASTM에서 인증된 SAF 제조규격을 사용 가능한 것으로 반영하고 있다. 이는 SAF를 국방분야에서 사용하기 위한 별도 인증 절차는 없으며, SAF를 군용기에 적용하여도 일반적으로 운영상에 문제가 없다는 것을 의미한다. 그렇지만, 국방분야에서 운영하는 기종이 다양하기에 기종별 세부 사용요건과 장기간 SAF 혼합유 사용이 항공기 운영에 미치는 영향성 등에 대한 추가적인 검토는 필요한 상황이다.

2.2. 주요국 국방분야 SAF 도입현황

주요국들은 국방분야에서 안정적 공급사슬 관리라는 운영적 목적과 정부정책 지원 목적으로 SAF를 시범 도입하고 있다. 이는 민간분야에서 환경적 이슈에 대응하고 적절한 방식으로 SAF를 도입하여 재무적 성과에 도움이 되게 하려는 방향과 다소 다르다고 할 수 있다. 아직까지 SAF는 신규 제조기술 개발과 상용화가 진행 중으로 구체적으로 국방분야 공급사슬에서 어떠한 이해관계가 존재하는지에 대해서는 세부적으로 제시되고 있지는 않다. 그렇지만, SAF 사용이 확대될수록 적절한 SAF 기술을 채택하기 위한 조직 내·외부 공급사슬 이해관계 조정과 의사결정 과정이 중요해질 것으로 보인다. 각 국가별 국방분야에서 SAF 도입 추진현황은 아래와 같다.

미국 국방부는 과거 2016년까지 미국 본토 내 공군기지 항공유의 50%를 SAF로 대체하는 목표를 제시하였다[12]. 이에 따라 2007~2012년 사이에 SAF 189만gal를 구매하는 등 항공유 생산방식과 원료를 다양화하는 정책을 적극적으로 추진하였다[12]. 해당 정책의 주요 목적은 환경문제에 대한 대응은 아니었으며, 국제유가 급등에 따른 에너지 자립도를 확보하는 차원이었다. 하지만, 2011년 이후 미국 내 셰일원유 생산량이 급증함에 따라 기존 석유제품 수급이 원활해지자 SAF 활용 정책은 정체되었다.

현재 미국 국방부는 전 세계적인 환경이슈에 대응하고, 기존 대비 바이오연료의 경제성 등이 개선됨에 따라 2028년까지 현재 사용 중인 석유기반 연료의 10%를 바이오연료로 대체한다는 수정된 목표를 가지고 있다. 이는 미국 정부의 2030년까지 항공유 수요의 10%, 2050년까지 100%를 SAF로 대체한다는 목표에 따른 것으로 향후 SAF 혼합유에 대한 국방부 내 품질보증 및 관리절차가 수립될 것으로 보인다. 또한, 현재까지 F-35, C-17, A-10 등 다양한 항공기에 대해 제조사와 협력하여 SAF 적용 실증시험을 진행함으로써 기존 항공유를 대체할 시에 문제점 등을 식별하고 있다.

영국 국방부는 정부의 강력한 친환경 정책과 자국 석유기업의 대규모 SAF 개발 투자 추세에 맞추어, 2040년까지 탄소중립을 목표로 SAF 보급 정책을 시행하고 있다. 영국 공군은 2021년부터 다양한 유형의 SAF의 군용 적합성을 전투기, 수송기 등에 비행시험을 통해 검증하고 있으며, 대량의 SAF를 조달(2024년 약 240만gal)하고 있다[13]. 영국군이 적극적으로 SAF를 도입하는 이유는 첫째로 해외에 의존하는 기존 항공유 공급사슬을 국내를 포함한 공급사슬 다변화를 통해 운영 안정성을 확보하는 데 있으며, 그다음으로 탄소절감을 통한 환경문제에 대응하는 데 있다[14].

EU의 적극적인 탄소중립 정책 추진에 따라 EU 국가들의 국방분야에서 SAF 적용사례를 다수 식별할 수 있다. 예를 들어, 프랑스 공군은 정유업체(Total 등)와 협력하여 헬기에 100% SAF 비행시험을 진행하였다. 스위스 공군은 구체적인 SAF 활용계획을 제시하였는데, 2027년까지 2%, 2030년까지 10% SAF 혼합계획을 발표하였다. EU 국가들의 군사분야 SAF 정책은 국가적 환경정책과 목표에 맞추

어 SAF 사용정책을 추진하고 있는 수준으로 원유 해외 공급의존 탈피 등의 적극적인 수단으로 제시하고 있지는 않다.

호주군은 영국군과 같이 적극적인 SAF 도입정책을 펼치고 있으며, 2050년까지 100% SAF 사용 목표를 추진하고 있다. 이러한 목표의 배경은 국내 생산 기반으로 항공유의 공급사슬을 안정적으로 확보하는 것이라 밝히고 있다[15]. 이를 위해 호주군은 1개 비행부대을 지정하여, 다양한 항공기에 SAF를 적용하여 비행시험 중에 있다[15].

한국의 경우, 국방과학연구소 주관 SAF 개발 및 터빈엔진 실증 시험(2016~2020) 등이 시행되기도 하였지만, SAF 개발 및 보급을 위한 법률 조항(석유사업법·시행령 등)이 2024년이 되어서야 마련되는 등 SAF 도입을 위한 국가 제도적 기반이 그동안 갖춰져 있지 않았다. 이로 인해 국방분야에서도 유럽, 미국과 대비하여 다소 늦게 SAF를 포함한 바이오연료 사용 및 확산 정책이 시작되고 있는 상황이다. 그렇지만 주요국 국방 및 민간 분야의 시범운영 결과를 참고하고, 국내·외 관련기관과 협력하여, SAF 공급사슬을 지속적으로 갖추어 나간다면 기존의 항공유 공급능력 등을 기반으로 SAF 사용이 안정적으로 확산될 수 있을 것이다.

위 국가별 사례를 종합하면, 그동안 국방분야에서 항공유는 주요 무기체계 운영을 위한 핵심 물자로 안정적인 관리가 이루어졌고 큰 기술적인 변화는 없었다. 하지만, 전 세계적인 대체에너지 확산 흐름으로 인해 SAF 사용은 불가피하며, 국방분야에서는 민간분야와 다르게 경제적, 환경적 측면 이외에도 운영적 측면에서도 SAF의 이점을 바라보고 있다. 이는 민간에서도 SAF 사용이 안정화된 이후에 중요한 측면으로 국방환경 관점에서 먼저, 공급사슬 이해관계를 살펴본다면, 향후 안정적인 SAF 보급·확산에 제한요소를 미리 식별할 수 있을 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 SAF와 기존 항공유 간의 규격상의 품질특성 차이 비교를 기반으로 공급사슬 구성원 간의 이해관계를 분석하고자 한다.

2.3. SAF의 품질특성

SAF의 품질특성은 SAF 사용 확산시점에 공급사슬 이해관계자들이 적절한 SAF 제조기술, 사용규모 등을 의사결정하기 위한 핵심적인 고려요소 이다. SAF 생산, 구매, 운영·관리, 사용 등 각각의 공급사슬 위치에서는 자신의 성과에 도움이 될 수 있는 세부 품질특성이 우수한 SAF 기술을 선택하고 적극 사용하기를 원할 것이다.

이에 따라 SAF의 품질특성을 알아보면, SAF 혼합유는 ASTM D1655 부록 또는 ASTM D7566 표준을 적용받는다. 해당 표준서들에 따르면, SAF 혼합유로 인증받기 위해서는 ASTM D1655 요건을 따르면서 SAF 생산방식에 맞는 품질요건을 추가적으로 만족해야 한다[10]. 이때, SAF 제조기술별로 기존 항공유와의 주요 특성 차이는 부록으로 명시하였다. 규격상의 특성 차이와 선행연구를 기반으로 기존 항공유(Jet A-1, JP-8)와 SAF 품질특성을 비교하면 Table 3과 같으며, 주요특성별 세부적으로 비교하여 판단한 내용은 아래와 같다.

2.3.1. 에너지 특성(밀도, 열량): SAF 생산방식별 상이

밀도(density)는 고정된 연료 부피에 저장된 에너지를 나타낼 수 있는 지표이다. 항공기 연료가 다른 조건이 동일하나 밀도가 작다면 장거리 운항을 하는데 지장을 줄 수 있다. 기존 항공유의 경우, 775.0~840.0kg/m^3 기준을 적용받고 있으며, FT-SPK, HEFA, ATJ-SPK 등 SAF의 경우, 730.0~770.0kg/m^3 기준을 적용받는다. 추가로 에너지양을 나타내는 항공유의 품질특성으로는 참발열량이 있다. 참발열량은 연료가 연소할 때 발생하는 열량 중 수증기 응축열 등을 제외한 순수 발열량으로 기존 항공유의 경우, 42.8MJ/kg 수준의 열량을 요구하고 있다. SAF에 대한 추가적인 참발열량 요구조건은 없으나, SAF는 기존 항공유 대비 높은 열량이 발생한다는 연구가 존재한다[16]. 해당 특성은 항공기 연비에 직결되므로 군용기의 작전임무의 적절한 연료 여부 판단에 중요한 요소이다.

2.3.2. 저온 운영 특성: 유사할 것으로 예상

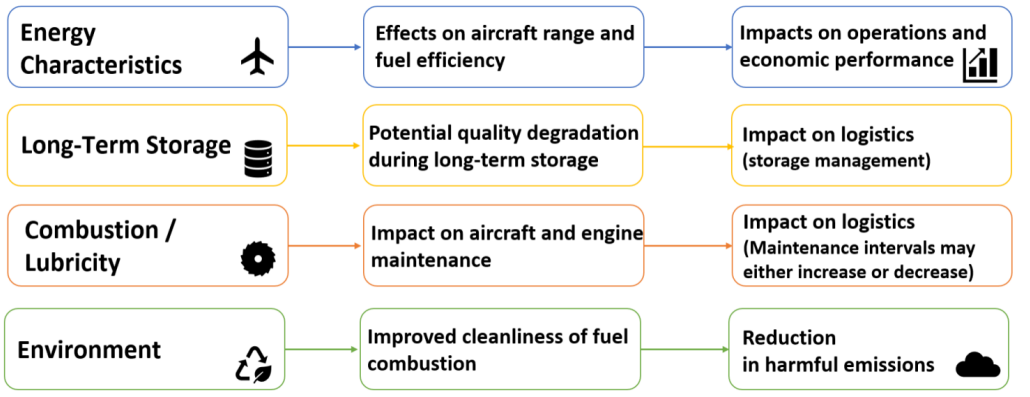
항공기는 높은 고도에서 운영되기에 낮은 온도에서도 안정적으로 흐르는 특성을 유지해야 한다. 이러한 특성은 항공유의 빙점과 동점도(유체의 점도, viscosity)를 통해 알 수 있다. 빙점은 SAF 생산방식별 차이가 있으나, 기존 항공유와 유사한 기준을 적용받고 있다. SAF의 동점도도 대부분의 SAF 생산방식에서 기존 항공유과 비교하여, 유사한 수준으로 제시되고 있다[17]. 물론, SAF 품질기준은 기존 항공유 기준에서 추가적으로 -40℃에서의 동점도를 확인하도록 요구하고 있지만, 극지방에서 운영하고 있지 않는 한국군의 군용기 특징을 고려한다면, 저온에서의 안정성은 충분히 보장될 수 있을 것으로 기대한다.

2.3.3. 장기 저장 안정성(열산화안정성 및 전산가) : 추가적인 검토 필요

미군의 유류 품질관리 규격서인 MIL-STD-3004에는 유류의 장기저장으로 인한 품질특성 변화 여부를 측정하기 위한 권고 시험항목으로 각 제품 규격마다 B-2 시험항목을 제시하고 있다. 장기간 항공유 저장으로 인한 시험항목으로는 기존 항목에 추가하여, 열산화안정성, 전산가(산화·열화 지표, acidity)가 있다. 이 항목들은 전쟁 등 위기 상황을 대비하여, 대량의 항공유를 장기간 저장하는 국방분야의 물류운영 특성을 고려한다면, 향후 저장관리에 중요한 특성이라 할 수 있다.

Table 3. Comparison of SAF Fuel Characteristics Based on Previous Studies

Category	Review of Previous Studies	Related Specifications
Energy Characteristics	• Varies depending on SAF production pathway [ex. Desitiy: (Jet A-1) 775.0~840.0kg/m^3, (HEFA/FT-SPK) 730.0~770.0kg/m^3]	Density, Calorific value
Low-Temperature Operating Characteristics	• Similar [ex. (Jet A-1/SAF) Freezing point,: Max -47.0℃]	Freezing point, Viscosity
Long-Term Storage Stability	• Additional evaluation required [ex. Acidity: (FT-SPK/HEFA) Max 0.015]	Thermal stability, Oxidation stability
Combustion Characteristics	• SAF shows superior performance [ex. Smoke point: (Jet A-1) 25~30mm, (SAF) 〉 30mm]	Smoke point, Flash point, etc.
Lubricity	• Conventional aviation fuel shows superior performance [ex. Lubricity: (SAF) Max 0.85]	Lubricity
Flash Point	• Similar (some studies report SAF superiority)	-
Environmental Characteristics	• SAF shows superior performance (reduction of nitrogen oxides, sulfur oxides, etc.)	-



열산화안정성은 엔진 연료계통에 형성되는 침전물 양과 관련되며, 침전물이 과다하면 항공기에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 이는 고온에서 침전물 형성과 압력강하를 측정함으로써 확인할 수 있다(ASTM D3241). Corporan et al. (2011)은 기존 항공유(JP-8)와 SAF의 상기 특성을 비교하면서, 높은 온도에서 기존 항공유의 저항성이 더 높다는 것을 밝혔다[18]. 이와 같이 SAF는 열산화안정성이 기존 항공유에 대비하여 동등 이상으로 알려져 있는데, 이는 SAF을 구성하는 파리핀 화합물이 침전물을 덜 형성하는 등의 화학적 조성 특성에 기인한다[17].

이와 반면에, SAF는 전산가에 대한 더 엄격한 품질기준을 요구하는데, 이에 대한 원인은 Yang et al. (2019)의 연구에서 제시한 SAF의 산화안정성 저하 특성에 대한 분석내용을 통해 유추할 수 있다[17]. Yang et al. (2019)에 따르면, 연료 내 산소 함유비율은 산화안정성을 저하시키는 주요한 요인이며, 일반적으로 SAF의 산화안정성은 기존 항공유에 비해 상대적으로 낮다고 제시한다[17]. 이는 주로 SAF의 방향족 함량이 낮고, 산화방지제 등이 첨가되어 있지 않기 때문이다[17]. SAF와 기존 항공유의 산화와 관련한 특성 차이가 군의 저장관리 환경에서 유의미한 차이가 있는지와 이와 연계한 적정 유류품질관리 방안에 대해서는 후속 연구에서 심층적으로 다룰 필요성이 있다.

2.3.4. 연소특성 : 일반적으로 SAF가 우수할 것으로 예상

Ryu et al. (2024) 연구에서는 HEFA 공정으로 생산된 SAF가 실제 엔진시험 간 기존 항공유와 유사한 점화지연, 추력 등 엔진 성능 특성을 보인다는 것을 밝혔다[19]. 이때, 연료 품질기준에 따른 두 연료 간 연소특성은 그을음을 내지 않고 태울 수 있는 불꽃이 높이를 의미하는 연점으로 측정할 수도 있다. 높은 연점은 연기를 덜 발생시킨다는 것을 의미하며, 기존 항공유의 연점 기준은 25mm 이상으로 보통 30mm 이하 수준이지만, SAF를 혼합할수록 연점이 증가하여 최대 45.7mm까지 나타내었다[17]. Yang et al. (2019)은 SAF 유형별 그을음 형성지수(Threshold Sooting Index, TSI) 비교치도 제시하였는데, 기존 항공유(JP-8)의 TSI가 19.28인 반면, HEFA 및 FT-SPK 방식으로 생산한 SAF는 9~17 범위로 낮은 그을음을 생성한다는 점을 밝혔다[17]. 이는 그을음을 발생시키는 방향족 함량이 바이오연료가 낮기 때문이며, 그을음을 감소는 엔진부품 주기정비소요 감소, 관련 부품의 교체 소요 감소, 고장 간 평균시간(MTBF, Mean Time between Failure) 개선 등 정비성에 긍정적 영향을 줄 수 있다.

2.3.5. 윤활성: 기존 항공유가 우수할 것으로 예상

윤활성은 항공엔진 구성품의 마모를 최소화할 수 있는 연료의 특성을 나타내는데, 연료를 회전체에 잠군채 일정시간 경과 후, 마모된 정도를 측정하는 방식으로 평가할 수 있다. 해당 시험 방법은 기존 항공유에 품질 규격에서는 요구하고 있지 않으나, SAF 규격에서는 0.85mm 이하로 요구하고 있다. 이는, 항공유 내 산소, 질소 및 유황 관련 물질이 윤활성을 보완할 수 있는데, 이러한 화합물은 SAF 수소처리 공정 중에서 제거되어 기존 항공유 대비 함량이 적기 때문으로 볼 수 있다[17,20]. 윤활성이 낮아지면, 오링(o-ring) 등의 관련 부품의 잦은 교환이 필요할 수 있어, 항공기 정비관리에 부정적 영향을 미칠 것으로 보인다.

2.3.6. 기타 요인(인화점, 증류특성, 오염물질 배출 등)

일반적으로 SAF는 기존 항공유와 유사한 인화점과 증류특성을 보인다[17]. SAF 혼합비율에 따라 다소 차이가 존재하지만, 측정온도가 올라갈수록 증류성상의 특성은 유사한 것으로 밝혀졌다[21]. 높은 인화점은 연료 수송, 저장 간 화재, 폭발 등의 안전관리에 유리한 요소이며, SAF가 더 높은 인화점을 가지고 있다는 연구도 존재하며, 이는 SAF의 낮은 산소화물과 방향족함량의 영향으로 인한 것으로 추정할 수 있다[21].

환경적 측면에서 기본적으로 기존 석유제품들은 불완전 연소가 발생되어, 대기오염 물질을 방출한다. 이에 반해 SAF는 방향족 함량이 적어 오염입자를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다[21]. 또한, 기존 석유제품에서 배출되는 주요 유해물질은 황산화물인데, SAF 생산과정과 사용단계에서 황은 일반적으로 원료 자체가 아닌 전처리 생산공정에서 발생하기 때문에, 기존 항공유 대비 상당히 적은 양이 발생할 수 있다[20].

3. SAF 공급사슬과 이해관계

3.1. SAF 공급사슬관리

공급사슬관리(Supply Chain Management, SCM)는 공급사슬 전체의 장기적 성과를 향상시키기 위해 기업 내부의 경영활동과 공급사슬 내 기업들 간의 전략적이고 체계적인 조정 과정이라고 정의할 수 있다[22]. SCM을 통해 공급사슬 파트너 간의 장기적 협력 관계를 구축하고, 제품, 정보 등의 전달 프로세스를 효율화하여 공급사슬 전체의 지속적인 성과 창출을 기대할 수 있다[22-23]. SCM의 핵심은 공급사슬을 하나의 개체로 여겨 공동의 가치를 창출하는 것과 동시에 고객 가치를 중시하고 공급사슬 구성원들이 고객 지향성을 갖추도록 하는 것이다[23].

SAF 공급사슬은 Figure 1과 같이 원료 공급자, 공급자(생산업체), 구매자, 군수지원자, 운영자(최종고객)로 구성되어 있다. 개발단계에 있는 제품 공급사슬에서는 수요자 측면에 있는 고객과 상위 공급업체를 제품 공급사슬 활동에 적극 참여하게 함으로써 공급사슬 성과를 향상 시킬 수 있다[24]. Awudu & Zhang (2012)에 따르면, 바이오연료 제품이 앞으로 시장 경쟁력을 갖추기 위해서는 견고한 공급사슬 구축이 중요하고 다양한 불확실성을 해결하기 위한 공급사슬 구성원들의 통합적 의사결정 체계가 필요하다[2]. 이에 따라, 향후 안정적인 SAF로의 항공 연료 전환과 SAF 운영성과 달성을 위해서는 수요자 측면을 고려하고 전체 공급사슬 관점에서 각 공급사슬 구성원 간의 이해관계를 조정해야 한다.

그러나, 최근 연구들은 SAF의 원료유형별 생산성, 경제성과 친환경성 등 공급자 측면에 초점을 맞추고 있다. 이는 SAF 제조규격이 지속적으로 개발 중인

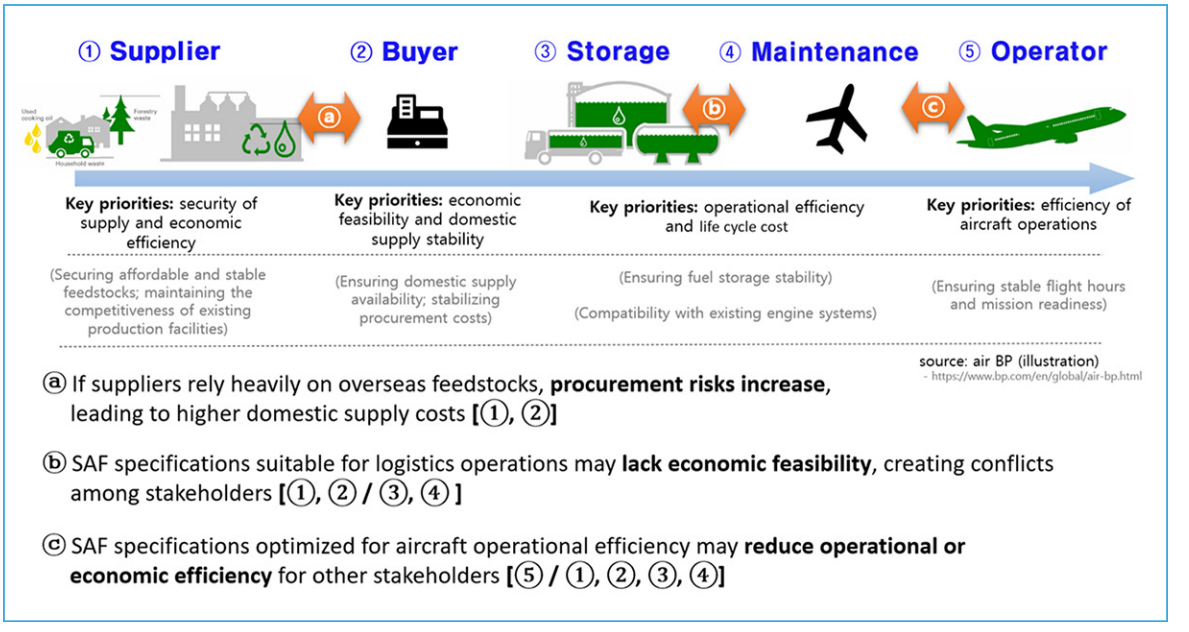


Figure 1. SAF-Centric Supply Chain

현재 상황을 반영하지만, 향후 SAF의 도입 확산과 운영 안정성을 보장하기 위해서는 수요자의 요구사항은 공급사슬 의사결정 프로세스에 통합되어야 한다. 이를 통해 SAF 공급자는 구매자의 수요량과 공급 시기를 명확히 파악하여 수요 불확실성을 줄이고, 전체 SAF 공급사슬 안정성을 높일 수 있다[2].

이와 같이 SAF의 수요자 측면의 공급사슬 이해관계를 공급업체 의사결정에 반영함으로써 장기적인 공급사슬 성과 향상을 기대할 수 있으며[25-26], 이를 위해서는 각 공급사슬 구성원들의 관점을 면밀히 살펴봐야 한다. 본 연구에서는 국방분야에서 발생할 수 있는 SAF 공급사슬 구성원들 간의 세부적인 이해관계를 기존 항공유와 SAF의 품질특성에 근거하여 다음과 같이 제시한다.

3.2. 공급자(Supplier) : 안정적 원료 확보, 경제성 중시

현재 한국은 기존 항공유의 원료인 원유를 수입에 의존하며, 특히 중동(70%)과 미주지역(19%)에서 주로 수입하고 있다[27]. 반면에 SAF는 바이오매스(폐식용유, 폐목재 등), 팜유, 포집된 이산화탄소 등 다양한 원료를 기반으로 하며, 국내와 다양한 해외 공급사슬을 통해 공급받을 수 있는 장점을 가지고 있다. 유사한 사례로 바이오디젤과 바이오중유는 의무혼합제도 등을 통해 국내 보급되고 있으며, 국내 생산비율이 30%대에 이르고 있다[10]. 이는 국내 폐자원 순환시스템 등에 의한 것으로 바이오연료 원자재의 상당수가 국내 조달할 수 있는 점은 물론, 다양한 수입 경로를 운영하여 공급사슬 안정성을 높일 수 있다는 점을 보여준 사례이다.

초기 SAF 생산은 기존 석유제품 생산시설 사용이 가능한 코프로세싱 방식과 HEFA 방식이 적용되고 있는데, 이들은 주로 오일/지방류를 원료로 하고 있다. 이에 따라 현재는 확보가 비교적 용이한 폐식용유가 SAF 원재료로 각광받고 있다. 향후에는 국내에 상당한 물량을 보유 중인 목재 폐기물, 임업 부산물 등 다양한 폐자원을 SAF 원료로 사용할 수 있을 것으로 기대하고 있다[28]. 그렇지만, 국내의 우수한 폐자원 재사용 체계에도 불구하고, 절대적인 물량이 향후 SAF의 수요를 감당하기에는 충분하지 않아, SAF를 통해 연료의 해외 의존도를 낮추는 효과는 제한적이라는 의견도 존재한다[29]. 또한, 국토교통위원회 정책보고서(2024)에서도 많은 SAF 생산기업들이 많은 물량을 확보할 수 있는데다가 저렴한 수입산 팜유에 의존하고 있다는 점을 지적하고 있다[30].

국방분야에서 SAF 도입이 확대되면, 기존 원유기반 공급체계 대비, 국내 또는 근거리 원료 공급체계 운영으로 항공유를 보다 안정적으로 조달할 것으로 기대할 수 있다. 그러나, 이는 군이 공급업체가 운영하고 있는 SAF 공급사슬 상류(upstream)에 대한 가시성(visibility)가 확보하고 있거나, 공급업체가 기존 항공유와 대비하여 구매자 관점에서 안전한 공급사슬을 운영하고 이를 상호 신뢰할 수 있을 때를 전제로 한다[31]. 이를 정리하면, 공급자 관점에서 합리적인 SAF 원료와 생산방식이 수요자의 이익과 부합하지 않을 수 있으며, 이는 공급자가 원하는 만큼의 생산량을 확보하지 못하는 악순환으로 연결될 수 있다.

3.3. 구매자(Buyer) : 경제성, 국내원료 확대를 통한 공급 안정성 중시

SAF는 현재 일부 생산방식(HEFA 등)이 상용화 단계에 진입했고, 가격은 기존 항공유와 대비하여 고가이나, 혼합비율이 현재는 1% 내·외로 적은 수준으로 운영에 큰 제약은 없다. 다만, 구매자들은 급격히 예산이 증대되지 않는 범위에서 항공유를 조달해야 안정적으로 항공기 운영을 지원할 수 있으므로 SAF의 가격 경쟁력을 주요 관심사로 가질 것이다. 항공운송행동그룹(Air Transport Action Group, ATAG)에 따르면, 현재 상용 단계에 진입한 SAF의 가격은 기존 항공유 평균 가격('00년~'19년)보다 높으나, '40년 이후에는 기존 항공유 평균 가격 이하로 하락할 것으로 긍정적으로 전망하고 있다[32]. 이는 바이오매스(목질계, 농업 잔류물 등)를 활용한 SAF 생산

기술의 급격한 발전과 생산량 증가 전망에 따른 것이다.

향후 SAF 수요량 급증에 따른 다양한 SAF 제조기술이 접목되고, 생산 원료 특성에 맞는 공급사슬이 최적화되면 구매비용 절감으로 이어질 수 있다[6]. 하지만, SAF 생산원료 확보 상황은 SAF 혼합유 단가 하락폭을 제한할 수 있다[4]. 장기적으로 SAF 수요와 공급이 증가하면서, 기존 원유기반 항공유에 대한 수요는 상대적으로 감소할 것이며 이는 기존 항공유의 비용감소 요인으로, 전체적인 SAF 혼합 연료 비용감소 효과를 가져올 수 있을 것이다. 이를 종합하면, 2030년 이후 예상되는 SAF와 기존 항공유의 시장경쟁 구도는 기존 석유제품이 가진 혼합 연료의 가격을 안정화할 수 있을 것이다[33]. 군에서도 연료비는 군수예산 중 큰 비중을 차지하므로, SAF 혼합 연료의 가격을 향후 면밀히 주시할 필요성이 있다. 정부정책에 따라 의무혼합 비율이 정해지면, 이를 준수하면서 안정적 항공작전을 위해 소요량을 필수적으로 확보해야만 한다. 이에 따라 혼합비율이 10% 이상으로 급격히 늘어날 것으로 예상되는 2030년대에는 SAF 가격을 기존 항공유 가격 대비 2배라고 가정한다면, 기존 조달금액의 10% 이상을 추가적으로 마련해야하므로 이에 대한 대비가 필요하다.

구매자 관점에서 기존 항공유 대비 SAF에 대한 또다른 중요한 요소는 항공유 원재료의 리드타임과 공급 안정성이다. SAF 공급사슬이 기존 항공유와 대비해서 크게 개선된다면, Figure 2와 같이 구매자 입장에서 많은 경제적 가치가 창출될 수 있다. 먼저, SAF 공급사슬이 국내와 국내 인근국가 위주로 구성되면 현재 장기간의 원유 도입 리드타임으로 인해 설정된 원유와 석유제품 재고수준이 감소하여, 그 만큼의 유류 구매비용을 절감하고 공급사슬 위험에 따른 부담도 줄일 수 있다[3]. 이에 대한 파급효과로 유류 재고일수 감소는 유류시설과 유지비에도 영향을 미치는데, 유류저장 소요 감소에 따라 고가의 유류저장탱크 신축 및 유지보수 비용을 지속적으로 절감할 수 있기 때문이다. 이를 위해서 먼저, 구매자는 공급업체가 공급 안정성이 낮은 친환경 원료 혹은 해외 원재료에만 의존하지 않고 국산 원재료 비율을 높일 수 있도록 협력해야 한다. 다음으로 경제성과 공급 안정성을 최우선하는 구매자 관점을 공급계약에 반영하여, 각종 위기상황에도 예산소요 급증을 방지하고 연료 수급 차질을 최소화할 수 있는 관리 프로세스를 구축해야 한다. 이를 위해 구매자 관점에서 적

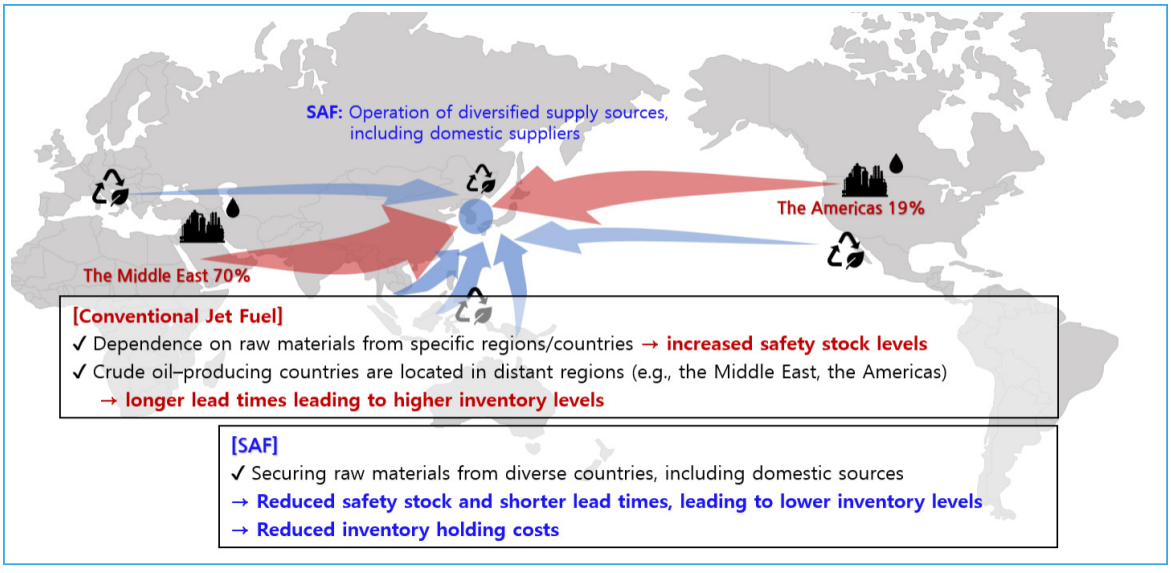


Figure 2. Expected Effects of SAF Supply Chain Improvement

정 단가와 안정된 공급사슬을 확보한 우수 업체와 전략적인 합의 혹은 계약을 체결함으로써 SAF 공급 업체의 행동 변화를 유도해야 한다.

3.4. 유류저장시설 운영(Storage)

다수의 연구에서는 SAF를 대량으로 장기간 저장하는 것에 대한 영향성 연구가 필요함을 지적하고 있다[17,19,34,37]. 일반적으로 SAF는 기존 항공유와 대비하여, 산화에 취약하여 장기간 악조건하에서의 연료 품질 변화에 대한 관찰과 분석이 요구된다. 통상 민간 항공분야에서는 10일분 내·외의 항공유를 저장하고 있고 단기간 내에 사용하지만, 국방분야는 위기상황 대비 수개월분을 비축하고 이를 순환저장 하고 있다. 현재도 국방분야는 장기저장유에 대한 품질관리 지침을 하고 있고 품질결함 시 재활용·재사용 절차를 마련하고 있지만, SAF 도입 시에는 좀 더 세부적인 관리절차가 소요될 것으로 전망한다. 예를 들어 장기저장 규격검사 주기 단축, 검사항목별 별도 자체 허용한계치 운영과 이를 초과할 경우에 일반검사에서 엄격한 검사로 전환 등의 대책 마련, 산화 취약성이 낮은 제조기술을 적용한 SAF 도입, SAF 전용 저장탱크 운영 등의 검토 조치가 필요할 것으로 보인다.

3.5. 정비관리(Maintenance)

SAF는 드롭인(drop-in) 연료로 기존 항공엔진 체계의 변경 없이 그대로 사용이 가능하지만, 연료 특성 차이로 인해 항공기 수명주기 동안에 정비관리에 영향을 미칠 수 있다. 먼저, 항공유 유형에 따른 엔진성능 특성의 유의한 변화는 예방정비와 비계획 정비 소요 증·감 등의 정비성에 영향을 줄 수 있다. SAF가 엔진관리 전반에 미치는 영향에 대해 검토한 연구는 찾기 어려우나, 연료의 분무 및 연소특성, 엔진 부품과의 상호작용 등으로 정비성을 비교할 수 있다[17,19,34-37].

구체적으로, Kumal et al. (2020)은 HEFA 기반 SAF는 방향족 함량이 낮아 기존 항공유 대비 그을음 형성이 감소하는 특징을 구체적으로 제시하였다[35]. SAF 혼합비율을 높일수록 그을음 입자가 작아지고 응집되는 수준이 낮아졌는데, 이는 엔진부품 세척 등에 필요한 정비시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 엔진 부품 교환주기를 단축하여 운영유지비에도 긍정적 효과를 기대할 수 있는 특성이다. Ryu et al.(2024)과 Ryu et al.(2024) 연구에서는 기존 항공유와 SAF 간의 점화성능은 유사한 것으로 밝혔고, 엔진 분무특성으로는 저온에서 SAF가 점도가 더 낮아 분무특성이 우수하지만 고온에서는 반대의 결과를 보인다는 것을 제시하였다[19,37]. 이에 따라 항공기의 운영조건과 항공유의 특성에 따라 엔진 연료 노즐 등의 연료계통 점검주기 등의 변화가 필요할 수 있다. 대표적으로 Yang et al. (2019)와 Mohd Noh et al. (2016)의 연구에서는 SAF의 윤활성이 낮아 엔진부품의 마모 등에 부정적 영향을 줄 수 있다는 것을 밝히고 있다[17,34]. 이를 종합하여 볼 때, SAF 사용 시에는 기존 항공유 사용과 대비하여 연소 후, 그을음이 감소되지만, 윤활성이 낮아질 수 있어 유지보수에 미치는 영향성에 대한 세부적인 후속연구가 필요하다.

3.6. 항공기 운항(Operator, 최종사용자)

항공기를 직접 사용하는 부서는 항공기 탑재연료가 충분한 성능을 발휘하여, 화물 및 여객수송, 기동임무를 안정적으로 수행할 수 있는지 최우선적으로 고려할 것이다. 항공유가 발휘할 수 있는 단위당 열에너지는 '연료 밀도(kg/m^3)×연료탱크 용량(m^3)×열량(MJ/kg)'으로 산출할 수 있다. 기존 항공유의 열량은 42.8MJ/kg 수준이며, SAF는 생산방식별 차이가 존재하지만, 일반적으로 기존 항공유 보다 다소 높은 수준(43~47MJ/kg)로 보고 되고 있다[16]. 하지만, SAF 100% 비율 제품의 밀도는 SAF 규격서인 ASTM D7566를 기준으로 기존 항공유와 단순 비교하면, 6~9% 범위까지 낮을 수 있는 것을 알 수 있다. 혼합수준 등에 따라 차이가 발생하겠지만, 단위당 열에너지는 기존 항공유가 좀 더 많을 수 있다는

것을 예상할 수 있다. 하지만, 연료의 밀도가 낮다는 것은 단위 부피당 무게가 적은 것으로 이는 항공기 총 중량 감소효과를 가져와 운항효율에 긍정적 영향을 끼칠 수 있다[16]. Blakey et al. (2011)은 이러한 관점에서 보잉 747-200B를 기준으로 기존 항공유와 SAF 간의 운항 효율 특성을 연구하였으며, 결론적으로 SAF가 기존 항공유와 유사한 운항효율을 나타낼 수 있으며, 항공임무 유형에 따라 유리한 연료형태가 있다는 것을 밝혔다[38].

항공기 운항 부서 입장에서는 원활한 항공작전 수행을 위해 경제성, 공급사슬 다변화 등의 요인 보다는 기존 항공유와 동등한 수준 이상의 운항 효율이 가장 중요한 요인이다. 군에서는 다양한 종류의 항공기를 보유하고 있으며, 각 항공기의 설계 특성은 상이하다. 따라서 운항 효율성을 정확하게는 판단하기 위해서는 시간당 연료소모율 등의 데이터를 비교하여 유의미한 차이 여부를 통계적으로 검증하는 절차가 필요하다. 만약 운항효율에 뚜렷한 SAF 제조기술이 확인된다면, 이는 작전 운영에 중요한 변화요인이 될 수 있을 것이다. 이때, 공급사슬 총괄 관리자는 이러한 가치를 창출하기 위해 운항 효율에 적합한 SAF의 혼합비율 증가 설정 등을 추가 검토해야 한다.

4. 결 론

4.1. 연구결과

SAF 생산기술은 일부 상용화가 되었고 현재 항공기 플랫폼에 그대로 적용이 가능하지만, 아직 다수의 SAF 생산기술이 개발단계에 머물러 있다. 이에 따라 기존 연구는 SAF 기술 상용화를 촉진하려는 공급자 중심으로 이루어졌다. 이를 통해 친환경 원료를 석유제품 생산공정에 사용할 수 있도록 석유사업법 등의 관련 법규가 정비되는 등의 성과가 있었다. 그러나 현재 국내 항공산업에서 SAF 혼합비율은 1% 이내 수준으로 시장 규모가 제한적이며, 이에 따라 SAF 수요자 요구사항과 관점이 분명하지 않은 상태이다. 향후 전세계적 친환경 정책 요구 증가와 법적 기반 확충에 따른 SAF 공급 확대에 면밀하게 대응하기 위해서는 공급자 중심 관점에서 벗어나 수요자 관점을 통합적으로 고려해야 한다. 특히, 국방분야는 항공유의 주요 소비자로 이러한 논의에서 예외가 될 수 없다. 앞으로 군은 항공유를 단순히 비용요소로서 바라보는 것에서 벗어나 전체 운영에 미치는 전략적 요소로 재정의해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 SAF와 기존 항공유와의 품질특성 차이와 선행연구를 기반으로 공급사슬 구성원들이 가질 수 있는 관점을 탐색적으로 분석하였다.

국방분야는 SAF의 핵심 수요자로서 SAF 도입에 있어 항공기 운항효율성을 비롯한 안정적 공급사슬과 경제성 등을 종합적으로 고려해야 한다. 특히 2026년 미국과 이란 전쟁 간 확인한 중동 원유공급 위기와 같이, 유사시 연료 공급안정성은 국방운영에 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 이를 위해 수요자는 먼저, 다수의 SAF 생산기술에 활용이 가능하면서도 국내 및 인근 국가에서 획득할 수 있는 원료 위주의 SAF 공급사슬이 구축되도록 공급업체, 정부 등의 이해관계자와 지속적으로 협력해야 한다. 둘째, 수요자는 군용 항공기들에 SAF 사용 간의 작전운용성 보장을 위해 생산기술, 원료, 적정 혼합비율에 대한 운항 안정성 검증과 표준화를 정책적으로 추진하고 이를 공급자 의사결정에 포함될 수 있도록 해야 한다.

4.2. 제언 및 한계점

공급사슬 구성원 간의 이해관계 조정 실패는 공급사슬 전체에 걸친 성과 저하로 이어진다[39]. SAF 공급자가 수요자의 요구사항을 충족하지 못하면 수요자는 공급자의 기대 구매물량 만큼 SAF를 확보하지 않게 되어 SAF 판매량, 단가 목표를 달성하지 못하게 된다. 이로 인하여 공급자와 수요자 모두는 일정량 이상의 SAF 생산·사용 등의 정책 목표를 달성하기 어려울 것이다.

SAF 공급사슬에서 이해관계를 조정하기 위해서는 먼저, 공급사슬 구성원 간의 정보공유가 무엇보다도

중요하다[39-41]. 공급사슬에서 제품 공급자는 수요자와 장기적인 관계를 유지하면서 제품의 세부 특성과 생산정보 등을 수요자에게 공유하면, 수요자는 이를 자신의 이익에 좀 더 부합하는 방향으로 조정방안을 제시할 수 있다[40]. 이를 SAF 관점에서 보면, SAF 공급자는 수요자에게 생산기술별 사용하는 원료 현황, 단가, 공급원 등 수요자가 공급 안정성을 판단하는 데 필요한 핵심 정보를 제공할 수 있다. 동시에 수요자는 공급자에게 연료 사용 간의 운항 특이성, 정비관리 소요변동 사항, 장기 저장 시 품질특성 변화 등 중요 정보를 공유할 수 있다. 이러한 정보 교환을 통해 공급자는 제품을 개선할 수 있는 수요자 중심의 핵심 요소와 기회를 확보하게 되어 상호 이해관계가 조정되고 공동의 이점을 창출할 수 있다. 실무적으로 이를 달성하기 위해서는 SAF 도입 시에 정부기관 유류 계약 방식을 개선하여 적용할 필요성이 있다. 유가 변동을 고려하여 월별로 정산하는 기존 계약방식에 추가하여, 정유업체가 SAF 혼합량에 대한 각종 정보를 공개하고 생산원가를 수시로 정산받는 계약구조를 적용한다면 공급자는 안정적으로 SAF를 생산하고 수요자는 정확한 공급사슬 정보를 획득할 수 있을 것이다. 또한, 수요자가 원하는 SAF 원료를 사용할 경우 관련 투자비 등을 보상해주는 계약조건을 고려해볼 수도 있다.

공급사슬의 장기적인 가치는 근본적으로 고객 요구사항을 지속적으로 파악하고 이를 공급사슬 전체의 관점에서 조율해 나가는 프로세스에서 창출될 수 있다[23]. 본 논문에서 제시한 SAF의 품질특성 비교는 선행연구와 품질규격에만 기초한 것이지만, 기존 항공유와 면밀한 비교를 통해 각 공급사슬 구성원별로 SAF 도입에 있어 중요하게 판단하는 요소를 도출하였다는 데 의의가 있다. 본 연구에서 도출된 요소를 기준으로 후속 연구에서 각 공급사슬 구성원들의 중요도 인식수준을 정량적으로 분석한다면 더욱 정교한 판단이 가능할 것으로 보인다. 이를 통해, SAF 공급자는 본 논문에서 제시한 공급사슬 구성원들의 요구사항을 참고하여 장기적으로 수요자 관점에서 SAF 공급 방향을 설정할 수 있을 것이다. 또한, 구매자, 정비관리자 등 수요자 내부 그룹에서도 SAF 도입 실증·평가 등을 통해 예상가능한 이익을 적절히 판단하고 전체 공급사슬과 조정하면서 향후 필수적인 SAF 도입에 적극적으로 동참할 수 있을 것이다.

참고문헌

1 Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2024). *South Korea's SAF Expansion Drives Climate Action and Market Leadership.*

2 Awudu, I., & Zhang, J. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(2), 1359–1368. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.016

3 Shahriar, M. F., & Khanal, A. (2022). The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel, 325*, 124905. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905

4 Braun, M., Grimme, W., & Oesingmann, K. (2024). Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. *Journal of Air Transport Management, 117*, 102580. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102580

5 Watson, M. J., Machado, P. G., da Silva, A. V., Saltar, Y., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Dowling, A. W. (2024). Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 449*, 141472. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141472

6 Chireshe, F., Petersen, A. M., Ravinath, A., Mnyakeni, L., Ellis, G., Viljoen, H., Vienings, E., Wessels, C., Stafford, W. H. L., Bole-Rentel, T., Reeler, J., & Görgens, J. F. (2025). Cost-effective sustainable aviation fuel: Insights from a techno-economic and logistics analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 210*, 115157. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115157

7 Rutner, S. M., Aviles, M., & Cox, S. (2012). Logistics evolution: a comparison of military and commercial logistics thought. *The International Journal of Logistics Management, 23*(1), 96-118. https://doi.org/10.1108/09574091211226948

8 한국석유관리원, 한양대학교, & 한국바이오연료포럼. (2024a). *바이오 항공유 최신 기술 동향* (기술·연구·표준 동향 No. 02)

9 Lim, Y.-K., & Doe, J.-W. (2023). The Status of Production and Usage of Bio-Jet Fuel. *Applied Chemistry for Engineering, 34*(5), 472-478. https://doi.org/10.14478/ACE.2023.1076

10 한국석유관리원, 한양대학교, & 한국바이오연료포럼. (2023). 바이오항공유의 국내·외 동향 (기술·연구·표준 동향 No. 01)

11 Cabrera, E., & de Sousa, J. M. M. (2022). Use of sustainable fuels in aviation—a review. *Energies, 15*(7), 2440. https://doi.org/10.3390/en15072440

12 Blakeley, K. (2013). *DOD alternative fuels: policy, initiatives and legislative activity* (CRS Report No. R42859). Congressional Research Service.

13 Royal Air Force. (2024). *RAF defends UK's skies using sustainable aviation fuel*. https://www.raf.mod.uk/news/articles/raf-defends-uks-skies-using-sustainable-aviation-fuel/

14 Royal Air Force. (2022). *Project BIOFUEL*. https://www.raf.mod.uk/our-organisation/units/astra/news/project-biofuel/

15 BioEnergyTimes. (2025). *Royal Australian Air Force begins 12-month SAF programme*. https://bioenergytimes.com/royal-australian-air-force-begins-12-month-saf-programme/

16 Raji, A. M., Manescau, B., Chetehouna, K., Ekomy Ango, S., & Ogabi, R. (2025). Performance and spray characteristics of fossil JET A-1 and bioJET fuel: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 207*, 114970. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114970

17 Yang, J., Xin, Z., He, Q. (Sophia), Corscadden, K., & Niu, H. (2019). An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *Fuel, 237*, 916-936. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.079

18 Corporan, E., Edwards, T., Shafer, L., DeWitt, M. J., Klingshirn, C., Zabarnick, S., West, Z., Striebich, R., Graham, J., & Klein, J. (2011). Chemical, thermal stability, seal swell, and emissions studies of alternative jet fuels. *Energy & Fuels, 25*(3), 955-966. https://doi.org/10.1021/ef101520v

19 Ryu, G., Jeong, B. H., Kim, C. T., & Kim, H. J. (2024). Application Study on Turbo Engine Using Blended Bio-jet Fuel Manufactured in HEFA Process. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 28*(3), 55-61. https://doi.org/10.6108/KSPE.2024.28.3.055

20 Song, Z., Li, Z., & Liu, Z. (2024). Comparison of Emission Properties of Sustainable Aviation Fuels and Conventional Aviation Fuels: A Review. *Applied Sciences, 14*(13), 5484. https://doi.org/10.3390/app14135484

21 Why, E. S. K., Ong, H. C., Lee, H. V., Chen, W.-H., Asikin-Mijan, N., & Varman, M. (2021). Conversion of bio-jet fuel from palm kernel oil and its blending effect with Jet A-1 fuel. *Energy Conversion and Management, 243*, 114311. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114311

22 Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business logistics, 22*(2), 1-25. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x

23 Min, S., Zacharia, Z. G., & Smith, C. D. (2019). Defining supply chain management: In the past, present, and future. *Journal of business logistics, 40*(1), 44-55. https://doi.org/10.1111/jbl.12201

24 Yao, X., & Askin, R. (2019). Review of supply chain configuration and design decision-making for new product. *International Journal of Production Research, 57*(7), 2226-2246. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1567954

25 Elvers, D., & Song, C. H. (2016). Conceptualizing a framework for customer integration during new product development of chemical companies. *Journal of Business & Industrial Marketing, 31*(4), 488-497. https://doi.org/10.1108/JBIM-12-2014-0262

26 Ruzo-Sanmartín, E., Abousamra, A. A., Otero-Neira, C., & Svensson, G. (2023). The impact of the relationship commitment and customer integration on supply chain performance. *Journal of business & industrial marketing, 38*(4), 943-957. https://doi.org/10.1108/JBIM-07-2021-0349

27 한국석유공사. (2025). *국내 원유수입_국가별* [데이터세트]. 공공데이터포털. https://www.data.go.kr/data/15054606/fileData.do?recommendDataYn=Y

28 한국석유관리원, 한양대학교, & 한국바이오연료포럼. (2024b).

지속 가능한 바이오매스 개발 동향 (기술·연구·표준 동향 No. 01)

29 허종식. (2024). *지속가능항공유(SAF) 2027년 의무화 … 폐식용류 원료 확보 비상* [2024 정기국회 보도자료]. 더불어민주당. https://theminjoo.kr/main/sub/news/view.php?brd=17&post=1207855

30 이소영. (2024). *지속가능성 빠진 지속가능항공유: 정부의 SAF 확산전략* [2024 국정감사 정책보고서]. 국토교통위원회.

31 Caridi, M., Moretto, A., Perego, A., & Tumino, A. (2014). The benefits of supply chain visibility: A value assessment model. *International Journal of Production Economics, 151*, 1-19. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.025

32 Air Transport Action Group. (2021). *Waypoint 2050: Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: A vision of net-zero aviation by mid-century* (2nd ed.).

33 딜로이트 인사이트. (2022). *기후기술과 수소경제의 미래* (No. 24, pp. 136-229). 딜로이트 안진회계법인.

34 Mohd Noh, H., Rodrigo, G. A., & Abdul Rahman, N. A. (2016). The adaptation of sustainable biojet fuels and its effect on aircraft engine maintenance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 152*, 012043. https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012043

35 Kumal, R. R., Liu, J., Gharpure, A., Vander Wal, R. L., Kinsey, J. S., Giannelli, B., Stevens, J., Leggett, C., Howard, R., Forde, M., Zelenyuk, A., Suski, K., Payne, G., Manin, J., Bachalo, W., Frazee, R., Onasch, T. B., Freedman, A., Kittelson, D. B., & Swanson, J. J. (2020). Impact of biofuel blends on black carbon emissions from a gas turbine engine. *Energy & Fuels, 34*(4), 4958-4966. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00094

37 Ryu, G., Lee, J., & Kim, H. J. (2024). A Study on the Spray Characteristics on Blended Bio-jet fuel and Jet A-1 fuel according to Pressure and Temperature. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 28*(3), 41-54. https://doi.org/10.6108/KSPE.2024.28.3.041

38 Blakey, S., Wilson, C. W., Farmery, M., & Midgley, R. (2011). Fuel effects on range versus payload for modern jet aircraft. *The Aeronautical Journal, 115*(1172), 627-634. https://doi.org/10.1017/S000192400000631X

39 Arshinder, Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2008). Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics, 115*(2), 316-335. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.05.011

40 Patnayakuni, R., Rai, A., & Seth, N. (2006). Relational antecedents of information flow integration for supply chain coordination. *Journal of management information systems, 23*(1), 13-49. https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222230101

41 Lehoux, N., D'Amours, S., & Langevin, A. (2014). Inter-firm collaborations and supply chain coordination: review of key elements and case study. *Production Planning & Control, 25*(10), 858-872. https://doi.org/10.1080/09537287.2013.771413

42 Kankam, G., Kyeremeh, E., Som, G. N. K., & Charnor, I. T. (2023). Information quality and supply chain performance: The mediating role of information sharing. *Supply Chain Analytics, 2*, 100005. https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100005

부 록

항공유 제조규격 요약(ASTM D1655, ASTM D7566)

Property		Jet A-1 specification	SAF specification (Before blending)	-
Density at 15℃, kg/m^3		775.0~840.0	730.0~770.0	FT-SPK, HEFA, ATJ-SPK, etc.
			765.0~780.0	SIP, etc.
			-	-
Distillation	10 % recovered, temperature (T10)	Max 205.0	-	-
	Final boiling point, temperature	Max 300.0	-	-
	Distillation residue, percent	Max 1.5	-	-
	Distillation loss, percent	Max 1.5	-	-
	T50-T10, ℃	-	Min 15.0	Additional SAF Requirements (Vary by Production Method)
	T90-T10, ℃	-	Min 40.0	
Existent gum, mg/100 mL		Max 7	-	-
Freezing point,℃		Max -47.0	-40.0	F-T SPK
CORROSION(100 ℃, 2 h)		Max 1	-	-
COMBUSTION	① Smoke point, mm	Min 25.0	-	-
	② Smoke point, mm	Min 18.0	-	-
	② Naphthalenes, volume, percent	Max 3.00 이하	-	-
Microseparometer ,P Rating	Without electrical conductivity additive	Min 85	-	-
	With electrical conductivity additive	Min 70	-	-
Electrical conductivity(pS/m)		50~600	-	-
Flash point, ℃		Min 38.0	-	-
Sulfur, total mass percent		Max 0.30	-	-
Aromatics, volume percent	① IP 156, ASTM D1319	Max 25.0	Min 8.0	-
	② IP 436, ASTM D6379	Max 26.5	Min 8.4	-
THERMAL STABILITY	Filter pressure drop, mmHg	Max 25.0	-	Measurement Methods Differ (Temperature, etc.)
	Tube rating(Annex A1)	Max 3.0	-	
Net heat of combustion, MJ/kg		Min 42.8	-	-
Sulfur, total mass percent		Max 0.3	-	-
Acidity, total mg KOH/g		Max 0.10	Max 0.015	FT-SPK, HEFA, ATJ-SPK, etc.
Viscosity, -20℃		Max 8.0	-	-
Viscosity, -40℃		-	Max 12.0	-
Lubricity,^{P} mm		-	Max 0.85	-

* ASTM D7566-24d(Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons)
* ASTM D1655-22a(Standard Specification for Aviation Turbine Fuels)

Frame ID 기반 UART 동적 프레임 구성과 경량 AEAD를 결합한 UART 통신 설계 제안

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Proposal for Secure UART Communication Design Combining Frame ID-based Dynamic Frame Configuration and Lightweight AEAD

박준현†, Joonhyun Park
현대위아, 무인체계개발팀, 책임연구원
Senior Research Engineer, Unmanned System Development Team, Hyundai-Wia

한규진, Kyujin Han
현대위아, 무인체계개발팀, 책임연구원
Senior Research Engineer, Unmanned System Development Team, Hyundai-Wia

이재규, Jaekyu Lee
현대위아, 무인체계개발팀, 책임연구원
Senior Research Engineer, Unmanned System Development Team, Hyundai-Wia

이봉수, Bongsoo Lee
현대위아, 무인체계개발팀, 책임연구원
Senior Research Engineer, Unmanned System Development Team, Hyundai-Wia

Abstract

This study analyzes the security vulnerabilities of the UART and proposes an alternative. Because of the lack of link-layer cryptographic authentication, UART is inherently vulnerable to sniffing, command injection, replay, and man-in-the-middle attacks by attackers having physical access. Numerous case studies and practical reports in industrial OT and IoT have demonstrated that UART debug exposure can lead to console access and privilege escalation. Furthermore, although pure CRC is an excellent error detection method, its linear structure renders it unsuitable for use as an authentication MAC. Considering these practical limitations, this paper proposes a hierarchical design that combines (①) a frame ID-based dynamic frame configuration (table-based field placement/length/dummy/verification), (②) variable-length and key-based dummy data insertion, and (③) a dual verification layer (enhanced CRC versus lightweight AEAD). Although obfuscation is a secondary measure that increases the cost of reverse engineering (field semantic recovery), the AEAD provides standards-based guarantees for integrity, authentication, and replay prevention. AEAD is expected to be implemented even in limited MCU environments by 2025 with the adoption of Ascon, standardized by NIST SP800-232.

keywords : UART legacy security, reverse engineering resistance, AEAD, ASCON, embedded security

† Corresponding Author : Joonhyun Park
Tel : +82-55-280-9448, email : 33268@hyundai-wia.com
Hyundai-Wia, 51537, 154, Jeongdongro, seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 7th. 2026 Revised May 7th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)는 간단한 배선을 통한 저비용으로 설계 구현이 가능하며, 비교적 낮은 구현 복잡도와 구현 용이성, 그리고 통신 전체의 범용성으로 임베디드(Embedded) 장치에서 수십 년간 광범위하게 사용되어 왔다.

하지만 UART RS-232/ RS-422/ RS-485 계열 링크는 설계 특성상 보안 기능(암호화·인증)이 없으므로 물리적 노출이 불가피한 UART 링크의 특성상 공격자는 스니핑(Sniffing) 공격을 통해 프로토콜 구조를 쉽게 파악 및 분석할 수 있으며, 분석된 결과를 통해 인위적 조작된 명령 주입하여 무기체계 장비에 대한 리플레이 공격(Replay Attack) 을 반복 수행할 수 있다[1-2]. 또한, UART의 보안 취약성과 관련하여 수십 년간 업그레이드되지 않은, 현용 중인 직렬 UART 장비와 설비가 다수 존재함을 지적하며[3], 하드웨어 해킹 가이드는 물리적으로 식별된 UART 핀을 통해 부트 로그 관찰 → 콘솔 접근 → 루트 shell 권한 획득의 절차와 가이드를 구체적으로 보여준다[4-5]. 이는 프로토콜 구조 노출은 단순한 노출이 아니라 공격자에게 권한 및 임의 명령을 조작하여 무기체계 장비를 임의 제어할 수 있는 경로를 제공하는 것이며, 이는 신뢰성과 보안성이 매우 중요한 무기체계에서 임무 실패로 이어질 수 있을뿐더러, 운용 신뢰성 저해를 초래할 수 있음을 시사한다.

보안 설계 중 Kerckhoffs/Shannon의 기본원칙에 따르면 “공격자는 암호 알고리즘을 포함한 시스템 전체 설계를 잘 알고 있다.”는 가정하에 보안은 오직 키의 비밀성에 의존해야 함을 강조한다[6].

따라서 본 논문은 기존 암호 알고리즘을 적용하는 것에 그치지 않고, 물리적 보안 위협에 대응하여 역공학(Reverse Engineering) 비용을 실질적으로 높이는 난독화(Obfuscation)와 표준 기반 무결성을 보장하는 인증(Authentication)을 분리 설계한 실전적 보안 프레임 구조를 제안한다. 일부 선행연구에서는 UART 기반 시스템 보호를 위해 키 인증 구조를 적용함으로써 무단 접근에 대응하려는 접근이 제안되었다[1]. 이러한 관점은 본 논문에서 제안하는 Key 기반 Dummy 생성 및 AEAD(Authenticated Encryption with Associated Data) 기반 인증 구조와 같이, UART 보안의 핵심을 키의 비밀성에 두는 설계 원칙과 일치한다.

이러한 계층적 구조는 자원 제한적인 저전력 MCU(MicroController Unit) 환경에서도 시스템 요구 사양에 따라 보안 기능을 점진적이고 유연하게 도입할 수 있다는 점에서 기존 연구들과 차별화된 고유한 기여도를 갖는다.

Figure 1과 같이 난독화와 표준 인증을 분리하여 저전력 MCU 기반 장치의 환경적 제약이 존재하는 상황에서도 보안의 요구 수준 등을 고려하여 점진적으로 도입이 가능한 실전적 보안 설계 방안을 제시하고자 한다. 본 설계는 기존 UART의 물리/링크 계층을 유지하면서 경량 보안 프레임 계층과 선택적 인증 계층을 추가하여 난독화, 무결성, 인증 및 재전송 방지 기능으로 보안 효과를 강화한다. 궁극적으로 UART의 범용적 사용성을 해치지 않으며 통신의 보안성과 신뢰성을 강화하여 국방 품질 표준에 부합하는 통신 기술 확보에 기여하고자 한다.

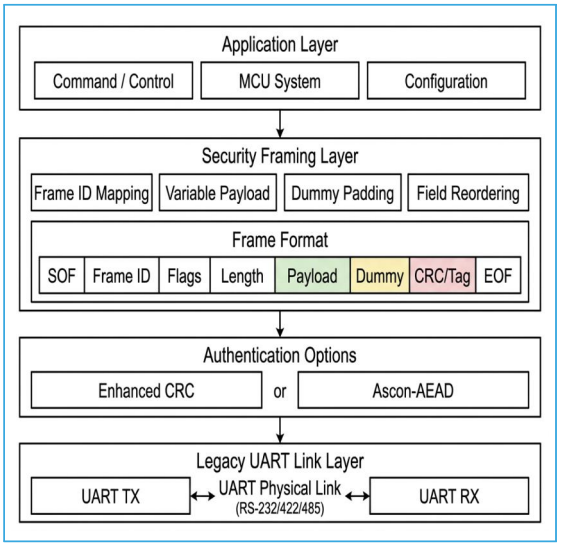


Figure 1. Overview of the proposed hierarchical UART security architecture

Figure 1은 본 논문에서 제안하는 계층형 UART 보안 구조를 나타낸다. 제안 방식은 기존 Legacy UART의 Application 계층과 물리/링크 계층은 그대로 유지하면서, 경량 보안 프레이밍 계층과 인증 계층을 추가하는 구조로 설계하였다. 보안 프레이밍 계층에서는 Frame ID 기반 동적 프레임(Dynamic Framing) 구성, 가변 길이 필드 제어, Dummy 데이터 삽입, 필드 재배치를 통해 통신 패턴의 고정성을 제거하여 역공학 및 트래픽 분석의 난이도를 높이는 데 목적이 있다. 인증 계층에서는 강화 CRC(Cyclic Redundancy Check) 또는 Ascon-AEAD를 선택적으로 적용하여 메시지의 무결성 검증, 송수신 인증, 리플레이 공격 방지 기능을 제공한다. 이를 통해 기존 UART의 범용성과 호환성을 유지하면서도 저전력 MCU 환경에서 실현 가능한 수준의 보안성 향상을 달성할 수 있다.

2. 배경 및 관련 연구

2.1. 배경

UART 헤더 정보가 공격자에게 노출되는 경우 공격자는 단순히 통신 로그만을 수집 및 분석하여 통신 프레임을 임의 조작 가능하다. 이는 콘솔에 대한 접근·권한 조작·임의 명령 주입이 가능함을 보여준다[1-2,4-5]. 이는 수신 능력을 보유한 공격자가 목표 장비에 대하여 장기간 도청할 수 있는 환경이라면 공격자는 프레임 구조를 역추적하여 패킷 변조 삽입 및 과거 패킷 재생을 할 수 있다는 것을 의미하며, 이는 무기체계의 신뢰성 및 운용상 보안의 치명적인 결함을 가져올 수 있다. 따라서 본 논문은 UART 동적 프레임화 기법을 통해 프로토콜의 결정론적 패턴을 제거함으로써, 역공학에 드는 자원과 비용을 비약적으로 증대시키는 방안을 제안한다. 고정된 프레임 구조를 유지하는 통신 방식은 장기간 도청 환경에서 공격자에게 패턴 분석의 단서를 제공할 수 있다. 이에 따라 다른 직렬 통신 환경에서도 프레임 랜덤화 및 난독화를 통해 분석 난이도를 높이려는 연구가 보고되었으며[7], 본 논문은 이러한 설계 철학을 UART 환경에 맞게 확장한 실용적 보안 구조를 가진 프레임 구조를 제안하고자 한다. 이는 곧 공격자가 통신 전체의 흐름과 패턴을 이해하지 못한다면 역공학의 난이도가 증가하게 된다. 또한 보안 측면에서의 CRC 기법의 한계에 관해서도 연구하였으며, 현재 CRC 기법과 더불어 경량 Ascon AEAD의 기법을 도입하므로 저비용·최소한의 오버헤드를 통해 통신의 보안을 강화하는 방안 제안한다.

CRC는 기본적으로 사이클릭 선형 코드에 기반한 오류 검출을 목적으로 하기에 공격자는 바이트 변조 후 CRC를 변조 또한 비교적 쉽게 재계산할 수 있으므로 CRC 자체는 통신 패킷 인증 용도로는 매우 부적절하다[8-9].

따라서 ACRIC(Authenticated CRC)는 CRC의 Legacy 포맷인 기존 필드를 유지하며 Key 기반의 연산을 CRC에 접목하여 메시지 인증을 달성하려는 연구가 진행되어 왔다. 이는 산업 Legacy UART에서 점진 도입의 실용적 대안이 될 수 있으나, 표준 AEAD 대비 보안 가정과 분석 범위가 다르다[10]. 이에 따라 경량 NIST는 2025년 SP800-232로 Ascon 기반 경량 AEAD/Hash/XOF를 표준화하였다. Ascon은 스펀지 구조·경량 S-Box 기반의 저전력 MCU 환경에서도 낮은 연산량과 적은 메모리 비용으로 상당한 수준의 높은 보안을 제공하도록 설계하였다[11-12].

UART는 물리 계층의 단순성으로 인해 보안에 매우 취약하다. 공격자가 물리적으로 접근할 경우, 디버그 포트를 통해 펌웨어 추출(Dumping)하거나 역공학을 통해 시스템 구조를 파악하는 것이 가능하다[4]. 특히, 무기체계 제어 장치에서 UART를 통한 스니핑(Sniffing), 커맨드 인젝션(Command Injection) 공격은 시스템 권한 탈취로 이어질 수 있는 실질적인 위협으로 보고되고 있다[5].

본 논문에서는 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 Ascon 기반의 경량 AEAD를 도입함으로써 UART의 난독화와 더불어 인증 기능을 도입하고자 한다. 이는 UART가 스

니핑, 커맨드 인젝션 공격 등에 취약함을 개선 설계를 하고자 하는 것이다. 설계의 최종 목표는 보안성을 강화하는 것이며, 이와 동시에 추가 소요되는 오버헤드를 최소화하여 UART의 실시간 통신 성능을 보장할 수 있도록 하는 것이다.

동적 프레임화는 고정된 통신 프레임 구조를 탈피하여, 메시지 전송 시 필드의 위치, 길이, 순서 등을 유동적으로 변경하는 기법을 의미한다. 이는 공격자가 고정된 패턴을 분석하여 데이터의 의미를 파악하는 역공학 시도를 효과적으로 차단할 수 있는 기반이 된다. 한편, 기존 UART에서 주로 사용되는 CRC는 데이터 전송 중 나타날 수 있는 무작위 비트 오류를 검출하는 데 우수한 성능을 보이지만, 수학적으로 선형 구조(Linear Structure)의 기반이므로 보안 측면으로 사용하기에는 한계점을 가지고 있다. 이러한 선형성은 공격자가 의도적으로 데이터를 변조하더라도 그에 맞는 CRC 값을 쉽게 계산할 수 있으므로, 단순 오류 검출을 넘어선 보안 목적의 무결성 인증(Message Authentication Code, MAC)으로 활용하기에는 취약점이 존재한다[8-9].

2.2. 위협 모델 설정

공격자는 물리적 UART 핀의 정보를 알고 있고 이를 통해 수동 도청이 가능한 능력을 보유하고 있으며, 수동 도청의 결과 통신 로그를 외부 저장장치에 기록할 수 있는 능력과 장기간 도청을 할 수 있는 환경에 노출되어 있다고 가정한다. 또한, 시스템 설계 정보는 외부로 유출되거나 공개되었다고 가정(Shannon의 최대가정)한다. 그러나 Key는 대외적으로 노출되지 않은 상태를 유지한다[6]. 공격자 최종 목적은 통신 정적 포맷을 분석하여 정상적인 통신 신호 체계를 무시하도록 변조한 데이터를 전달하여 시스템을 무력화하는 것이다. 이로써 시스템의 오동작을 유발하여 궁극적으로 공격 대상 무기체계의 무력화를 목표로 시스템에 대한 공격을 시도한다. 공격자는 Legacy UART 통신의 고정된 패킷과 패킷 간 연관성 등을 분석하여 공격을 시도한다고 가정한다.

2.3. 제안 설계

2.3.1. 프레임 형식

통신 패킷 프레임의 구조는 Figure 2와 같이 SOF(Start of Frame) | Frame ID | Flags | Length | Payload | Dummy | CRC | EOF(End of Frame) 순으로 구성된다. Frame ID에 따라서 Payload의 프레임 구성은 가변적이다. 첫 번째 패킷에서 1, 2번 바이트에 위치한 데이터는 이후 매핑(Mapping)된 Table에 따라 다른 번호에 할당될 수 있으며 이는 공격자가 통신 패킷 분석을 통해 쉽게 통신 트래픽을 분석하지 못하도록 한다. Figure 1의 Security Framing Layer 계층의 4. Filed Reordering을 참고하면 각 바이트의 순서가 통신 시 순서가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 여기서 Frame ID는 테이블 인덱스이자 상태 변수이며, “Table[Frame ID]”는 필드 배치 / 비트 폭 / 인코딩 / Dummy 길이 분포, 검증 함수(강화 CRC or Ascon-AEAD)를 정의된 Table에 따라 패킷의 형태로 구성하게 된다. 따라서 통신 수행에 있어 약속된 매핑 정보를 기반으로 지속적 가변을 하여 통신 패킷의 은닉화를 수행한다.

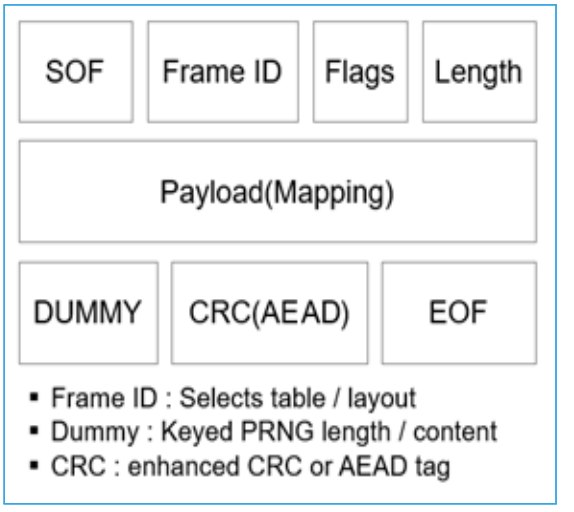


Figure 2. Dynamic frame format based on frame ID (variable length, dummy, and validation fields)

Reinvent UART Security에 따르면 UART는 시스템 및 현장에서 여전히 심각한 보안 허점이며, 이를 극복하기 위해서는 UART 설정을 활용한 경량 난독화 기법을 제안하고 있다[3]. Dummy 정보는 Key 기반 PRNG[1]로 길이와 내용을 생성하여 패킷 전체 길이를 가변함으로써 공격자가 통신 패킷과 트래픽의 패턴을 분석하는 것을 방해한다.

2.3.2. 동작

Figure 3과 같이 동작 초기화 단계에서 송/수신 측에서 미리 정해진 Session ID와 Key, Frame ID=0, Table Version 등으로 사전 합의한다. Table Version을 통해 송신과 수신 측은 사전 합의된 Table Version에 해당하는 매핑 Table을 참조하여 통신을 시작하게 된다. 이후 송신 측은 Table[Frame ID]로 매핑된 페이로드와 Dummy 영역을 생성하고 통신 패킷에 결합을 진행한다. 이후 검증 모드에 따라 강화 CRC 또는 Ascon-AEAD 태그를 부착한다. 수신 측은 약속된 동일 규칙으로 검증 후 성공 시 Frame ID 전이 가능 유무에 대하여 송신 측에 전달한다. Frame ID 전이 정보를 받은 송신 측은 CRC, Tag의 값을 기반으로 난수 함수를 통해 다음 Frame ID를 선정한다. Flags는 통신 성공 정보만 전달하는 것이 아니라 통신의 실패 정보에 따라 초기화 정보도 함께 포함한다. 만약 실패가 발생하는 경우 해당 Flags 정보를 기반으로 송/수신 측 모두 Resync를 시도하며 통신의 복구 과정을 거치게 된다. 통신 실패가 10회 누적되면 Resync 교환으로 초기화 단계에서 약속된 Frame ID 값으로 재동기화를 한다. Frame ID는 편의상 0부터 시작함으로 설계하였다. 하지만 Table Version 및 시스템의 환경에 따라 다양한 값으로 설정할 수 있으며, 한 바이트 기준으로 최대 255개의 Table을 구성할 수 있다.

이러한 매핑 Table은 Key값에 포함되는 중요한 정보이므로, 핵심 관리가 필요한 부분이기도 하다.

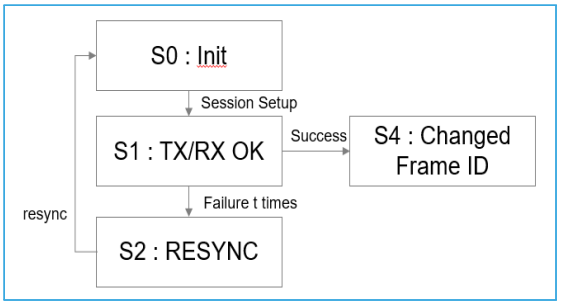


Figure 3. State transition and frame ID transition flow

2.3.3. 검증 계층 이원화 제안

① 강화 CRC

Frame ID 별 다항식 / 초깃값 / 리플렉션 / 바이트 순서 변경 또는 입력 마스킹 등으로 패턴 학습을 어렵게 하지만, 인증은 제공하지 못한다[4-5]. 따라서 오류 검출에 대해서는 강력한 기능을 제공하지만, 인증과 검증을 위해서는 다른 계층 기법을 도입해야 효과적인 검증이 가능하다.

② Ascon-AEAD

nonce=SessID | Frame ID | AAD = Header 바인딩으로 무결성·인증·리플레이 방지를 기본적으로 제공한다. 태그 길이와 Dummy 비율을 조절하여 오버헤드를 관리할 수 있다[10-11]. 본 논문에서는 상위 8바이트만 추출 AEAD[0:7]만 사용하였으며, 그 이상의 길이는 오히려 통신 오버헤드만 증가시킬 수 있다고 판단하였다. 결과적으로 8바이트의 태그 길이로도 충분한 보안 강도를 확보할 수 있었다.

두 개의 기법 중 오버헤드 발생이 통신에 미치는 영향력이 치명적인 시스템에서는 강화 CRC를 선택한다. 만약 오버헤드의 증가보다 높은 보안성 유지가 필요한 시스템에서는 Ascon-AEAD를 채택함으로써 시스템에 성능과 보안 요구 사양에 알맞게 선택하여 적용이 가능한 방안을 제안하고자 한다.

1) PRNG : 비밀 키 없이는 출력이 절대 예측되지 않는 암호학적 난수 생성기

2.3.4. 키 관리·재동기화

PSK(Pre-Shared Key)[2] 기반 초기 배포 후, N 프레임마다 KDF(Key Derivation Function)로 키 롤링을 수행한다. 재동기는 슬라이딩 윈도우, 타임아웃, Back-off를 조합하여 노이즈 환경에서도 동기 상실을 최소화하도록 설계가 필요하다. 하지만 본 논문에서는 시스템 적용 시 이러한 노이즈 환경에서의 동기를 유지하는 것에 대해서는 깊게 다루지 못하였다. 따라서 이는 시스템 적용 간 추가 연구가 필요한 부분이다. 향후 본 제안 논문을 통해 보안 기법 적용에 있어 재동기화에 필요한 변수의 조합에 대해 추가 확장 연구를 수행할 계획이다.

2.3.5. 분석

① 실험 환경 및 평가 기준

실험 환경은 Cortex M3/M4 급의 MCU 기반의 임베디드 시스템으로 선정하였으며, 통신 속도는 115,200 bps 조건에서 수행하였다. 세부 실험 환경 및 측정 조건은 Table 1과 같으며, Legacy UART와 제안 기법의 기능적 차이는 Table 2에 정리하였다.

성능 평가는 전송 지연시간(Latency), 유효 스루풋(Throughput), 추가 오버헤드(Overhead) 관점으로 분석 평가하였다. 이는 통신에서 유효성을 결정짓는 인자로 알려져 있으며, 본 논문에서도 동일 기준으로 성능 평가를 수행하고자 한다.

Table 1은 실험 환경을 나타내며, Table 2는 기존 UART와 제안 방식의 기능적 차이를 요약한 것이다. 이를 통해 제안 기법이 보안성과 실효성을 동시에 고려한 구조임을 확인할 수 있다.

Table 1. Experimental platform and implementation environment

Item	Legacy UART
Target MCU	ARM Cortex-M3/M4
Clock Frequency	80-160Mhz
Flash Memory	512KB ~ 1MB
RAM	≥ 128KB
UART Baud Rate	115,200 bps
Cryptographic Library	TinyCrypt / Lightweight AEAD
Authentication Method	Enhanced CRC / Ascon-AEAD
Tag Length	8 Byte
Payload Size Test	32/64/80/100/128/160 Byte
Dummy Padding Ratio	0~40%
Measurement Metric	Latency, Throughput, Overhead

Table 2. Security and protocol feature comparison between legacy UART and proposed UART scheme

Item	Legacy UART	proposed UART
Frame Structure	Fixed	Dynamic
Payload Length	Static	Variable
Dummy Padding	None	Supported
Integrity Check	CRC Only	CRC/AEAD
Authentication	Not supported	Supported
Replay Protection	Not supported	Supported
Reverse Engineering Resistance	Low	Improved

2) PSK 기반 배포 방식은 제품 생산 라인에서 JTAG/OCD로 Flash 영역에 주입하거나, 출고시 1회성 Key를 주입하는 방식을 의미한다. 이러한 배포 방식을 활용하여 처음 기기 설치 / 출고 시점 양단에 동일 비밀 키를 넣어두고 이 키를 기반으로 UART 통신의 모든 인증에 사용하는 방식이며 UART 같은 저수준 링크에서 사전 공유키는 거의 유일한 현실적 보안 기법이다.

② 성능 오버헤드 분석

Figure 4는 Legacy UART와 제안 기법의 전송 지연시간을 비교한 결과를 나타낸다. 기본적으로 Payload 크기에 비례하여 지연시간이 선형적으로 증가한다. 그럼에도 불구하고 동적 프레임화 처리, Frame ID 매핑, Dummy 구성, 인증 태그 생성 및 검증 과정이 추가되더라도 Legacy UART 대비 지연시간의 증가 폭은 그리 크지 않았다. Payload가 클수록 오히려 오버헤드의 크기는 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 본 시스템에서 중점적으로 실험한 Payload 100 Byte 기준으로 보았을 때 추가 지연은 약 0.61㎳ 내외 수준으로 나타났다. 전체 전송 시간 대비 상대적 오버헤드는 약 7% 수준이었다. 따라서 제안 기법은 보안 기능을 추가하더라도 UART 기반 실시간 제어 및 상태 전송 통신 환경에서 또한 충분히 적용 가능한 수준임을 의미한다.

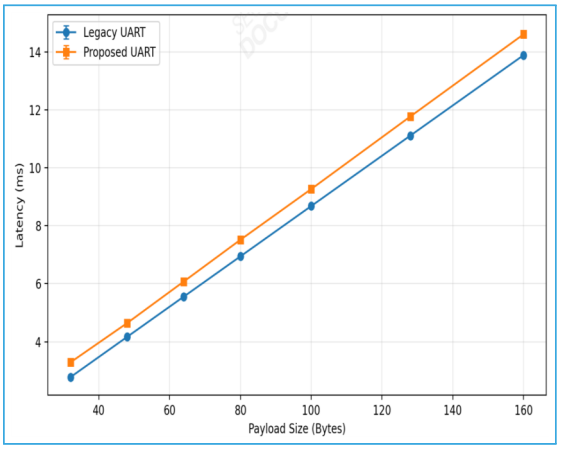


Figure 4. Comparison of latency by payload at 115,200bps

Figure 4에서 확인할 수 있듯이 제안 기법은 기존 UART 대비 일정 수준의 처리 지연이 존재하지만, 전체 전송 시간 증가 폭은 제한적이다. 특히 Payload 크기가 증가할수록 상대적 오버헤드는 점진적으로 전체 비율은 감소하는 경향을 보인다.

Table 3은 Figure 4에 사용된 세부 측정 데이터를 나타낸다. 본 실험의 오버헤드 측정은 MCU 내부 DWT(Data Watch point and Trace) 타이머를 활용하여 수행되었으며, 코드의 각 실행 지점마다 클럭(Clock) 사이클을 마이크로초(㎲)로 환산하여 산출하였다. 전송 지연 측정은 로직 분석기(Logic Analyzer)를 통해 실제 물리 계층(UART TX/RX 핀)에서의 파형을 100회 반복 측정하여 평균값으로 도출하였다. 이러한 방법으로 하드웨어 처리 지연과 통신 지연을 분리하여 정량적으로 분석하였다. 분석 결과는 Figure 4 및 Table 3과 같이 Payload 크기가 증가할수록 상대적 오버헤드는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

Table 3. Measured latency data used in figure 4

Payload Size(Byte)	Legacy UART(㎳)	Proposed UART(㎳)	Overhead (%)
32	2.81	3.27	16.4
48	4.18	4.67	11.7
64	5.56	6.08	9.4
80	6.94	7.50	8.1
100	8.68	9.29	7.0
128	11.11	11.77	5.9
160	13.89	14.61	5.2

Figure 5은 Dummy 비율과 스루풋(Throughput) 간 비교 분석한 자료이다. Dummy 비율이 높아질수록 스루풋의 수치는 낮아지며, 이는 통신 효율성의 감소를 의미한다.

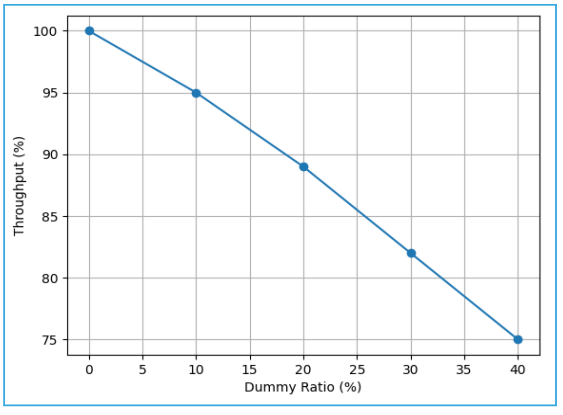


Figure 5. Throughput and dummy data ratio

Table 4. Measured throughput data used in figure 5

Dummy Ratio (%)	Effective Throughput (%)
0	92.4
5	88.7
10	84.9
15	81.2
20	78.0
30	72.6
40	67.3

Table 4는 Dummy Padding 비율에 따른 유효 스루풋 측정 결과를 나타낸다. Dummy 비율 증가는 보안성 향상에 기여하지만, 반대로 통신 효율 감소를 수반한다. 따라서 Dummy 비율은 보안성(난독화 수준)과 통신 효율성 간 Trade Off 관계임을 확인할 수 있었다.

③ Dummy Padding과 Throughput 분석

Figure 5는 Dummy 비율 증가에 따른 유효 스루풋 변화를 나타낸다. Dummy 데이터는 프레임 길이 패턴의 은닉과 트래픽 분석 방해를 위한 요소로 작용된다. 실험 결과 Dummy 비율이 증가할수록 유효 스루풋은 점진적으로 감소하였다. 이는 Dummy 데이터가 실제 유효 Payload 외에 추가 전송 자원을 점유하기 때문이다.

④ 보안성 분석

기존 Legacy UART는 프레임 길이, 필드 순서, CRC 위치 등이 고정되어 있어 장기간 도청 환경에서 패턴 분석과 명령 추론의 가능성이 높다. 반면 제안 방식은 Frame ID 기반 동적 프레임 구성, 가변 길이 Payload, Key 기반 Dummy 삽입을 통해 프레임 구조의 결정론적 특성을 감소시킨다. 이에 따라 공격자는 통신 구조를 추적하기 위해 더 많은 수집 시간과 분석 비용이 필요하다. 또한, Ascon-AEAD 적용 시 메시지 무결성 검증, 송수신 인증, 리플레이 공격 방지가 가능하다. 따라서 제안 기법은 단순 난독화 수준을 넘어 실제 통신 보안 요구사항을 만족시키는 구조로 평가할 수 있다.

⑤ 실용적 및 적용 가능성 분석

제안 기법은 기존 UART 하드웨어 계층을 변경하지 않고 상위 계층인 Application 계층의 소프트웨어적인 계층 분화(Security Framing Layer와 Authentication Layer)를 통하여 구현 가능하다는 장점이 있다. 따라서 신규 장비뿐 아니라 기존 Legacy UART 기반 시스템에도 단계적 적용할 수 있음을 확인할 수 있다. 예를 들어 초기 단계에서는 강화 CRC 기반의 검증 구조를 적용하며, 이후 필요 시 AEAD 기반 인증 구조로 확장하는 점진적 이행이 가능하며, 이는 기존 제품에도 점진적 적용 가능함을 의미한다. 또한, Cortex-M급 저전력 MCU 환경에서도 제한적인 연산 오버헤드만 발생함을 확인할 수 있다. 이는 저전력 임베디드 장치, 무기체계 부품 간 직렬 통신 환경 등 다양한 분야에서 현실적으로 적용 가능함을 시사한다.

⑥ 종합 평가

제안 기법은 Legacy UART 대비 제한적인 수준의 성능 오버헤드만 발생시키면서도 프레임 구조의 은닉, 무결성 검증, 인증 및 리플레이 공격 방지 기능을 동시에 제공할 수 있다. 이는 기존 UART의 범용성과 호환성 및 실시간 통신 기능을 유지하면서 보안성을 향상할 수 있는 현실적이고 실용적인 대안이 될 수 있음을 보여준다.

2.3.6. 구현 및 적용 고려사항

본 절에서는 제안 기법을 실제 임베디드 시스템에 적용하기 위한 구현 관점에서 고려 필요 사항들을 기술한다. 제안 방식은 기존 UART 하드웨어 계층을 변경하지 않고 상위 소프트웨어 계층에서 동작하도록 설계되었으므로, 신규 장비뿐 아니라 Legacy UART 기반 시스템에도 비교적 낮은 비용으로 적용

할 수 있다. 특히 저전력 MCU 환경을 고려하여 연산 자원, 메모리 사용량, 통신 지연 및 호환성을 종합적으로 고려해야 할 필요가 있다.

① MCU 자원 및 연산 부하 고려사항

UART는 주로 저가형 MCU 또는 제한된 자원을 갖는 임베디드 장치에서 주로 사용된다. 따라서 제안된 보안 기법을 적용하는 경우 연산으로 인한 오버헤드가 시스템의 통신 성능에 미치는 영향력을 선제적으로 검토를 수행하여야 한다. 제안 기법에서 검증한 시스템에서는 약 10% 수준의 오버헤드를 가진다. 이는 시험 환경 시스템에서 미치는 통신 지연의 영향력이 미미한 수준이므로 적용함에 문제가 되지 않았다. 동적 프레임화, Dummy 추가, CRC 계산은 비교적 간단한 연산을 통해서도 손쉽게 구현이 가능하며, 이는 실시간 제어를 위한 통신 환경에도 부담이 크진 않다. 또한 AEAD 적용 시에는 인증 태그 생성 및 검증 과정에서도 추가 연산이 필요하나 Ascon 계열 알고리즘은 경량 암호를 목표로 설계되어 Cortex-M급 MCU 환경에서도 현실적인 처리 성능을 제공한다. 하지만 모든 시스템이 Table 1과 같은 시험 환경과 동일할 수 없으므로, 시스템 요구사항, 제한된 자원을 고려하여 CRC 기반 경량 모드와 AEAD 기반 강화 보안 모드를 선택적으로 운용하는 것이 바람직하다.

② 단계적 보안 적용 전략

기존 UART 기반 시스템은 운용 중단 없이 점진적으로 보안 기능을 도입하는 것이 중요하다. 이를 위해 제안 기법은 다음과 같은 3단계 구분을 통해 단계적 적용 전략을 고려할 수 있다.

- 1단계 : 강화 CRC만 적용하여 오류 검출 및 기본 무결성 검증 수행
- 2단계 : 동적 프레임화 및 Dummy 적용으로 통신 패턴 은닉성 강화
- 3단계 : Ascon-AEAD 적용을 통한 인증, 무결성 검증 및 리플레이 공격 방지 구현

③ 운용 환경별 파라미터 설정

제안 기법의 성능과 보안성은 운용 파라미터 설정에 따라 달라질 수 있다. 대표적인 설정 항목은 다음과 같다.

- Payload 길이 : 짧을수록 응답성은 우수하나 상대적 오버헤드는 증가할 수 있음
- Dummy 비율 : 높을수록 난독화 효과는 증가하나, 스루풋은 감소함
- Tag 길이 : 짧을수록 통신 효율은 증가하나 인증(보안) 강도는 낮아질 수 있음
- 보안 모드 선택 : CRC 기반 경량 모드와 AEAD 기반 강화 모드 중 운용 환경에 따라 선택 필요

따라서 실제 적용 환경에서는 요구 보안 수준, 응답 주기, MCU 성능 등을 고려하여 적절한 파라미터를 설정하는 것이 바람직하다.

④ Legacy UART와 호환성 고려 사항

UART 물리 계층 및 기본 송수신 인터페이스를 변경하지 않으므로 기존 하드웨어를 유지할 수 있다는 장점이 있다. 단, 송신 측과 수신 측 모두 동일 프레임 규칙과 키 정보를 공유하여야 한다. 따라서 기존 Legacy UART 장치와 혼재 운용이 필요한 시스템에서는 일반 모드와 보안 모드를 구분할 수 있는 운용 정책이 별도 필요하다. 또한 유지 보수 단계에서는 펌웨어 업데이트를 통해 기능 확장이 가능하므로, 기존 장비를 전면 교체하지 않더라도 보안 기능을 점진적으로 적용할 수 있다.

⑤ 적용 우선순위 및 권장 운용 시나리오

제안 기법은 시스템 자원과 요구 보안 수준에 따라 선택적으로 적용하는 것이 바람직하다. 통신 오버헤드가 치명적인 환경에서는 강화 CRC와 동적 프레임화 중심의 경량 모드를 우선 적용할 수 있으며, 외부 접근 가능성이 높거나 인증 요구 수준이 높은 환경에서는 Ascon-AEAD 기반 강화 보안 모드를 적

용할 수 있다. 또한, 신규 장비에는 전체 기능을 통합 적용할 수 있으며, 기존 Legacy UART 시스템에는 펌웨어 업데이트를 통한 부분 적용도 가능하다. 따라서 실제 운용 환경에서는 성능과 보안성 사이의 균형을 고려한 단계적 적용 전략적 접근을 통해 효과적인 적용이 가능하다.

2.3.7. 한계와 향후 연구

Legacy UART 환경에서 적용 가능한 경량 보안 구조를 제안하고, 성능 오버헤드와 통신 효율성의 관점에서 기본적인 타당성을 분석하였다. 기본 구조와 적용 가능성에 대해 초점을 두었으며, 다양한 오류 및 트래픽 환경에서의 최적 파라미터 도출은 추가적인 실험 연구가 필요하다. 실제 운용 환경에서는 다양한 환경과 주변 장치로 인한 간섭 노이즈, 프레임 손실, 비정상적인 재전송, 장시간 운용 중 동기 오차 누적에 따른 통신 실패 등 고려해야 할 추가 요인들이 존재하는 것이 사실이다. 따라서 본 제안 기법을 발전시키기 위해서는 이러한 문제점들에 대한 고려와 해결이 필요하다. 따라서 실질적 시스템에서의 심화 검증 및 방안 도출에 대한 후속 연구가 필요하다. 특히 송수신 간 상태 불일치가 발생하는 경우 재동기화 성능의 허용 시간 간격, 탐색 윈도우 크기, Back-off 등 운용 파라미터에 따라 난독화 적용으로 인해 앞서 설명한 통신의 가용성이 저해될 가능성이 있다. 또한, Dummy 비율 변화에 따른 보안성 향상 정도를 정량적으로 측정하기 위한 평가와 침입 시스템(IDS) 연계 운용에 대한 연구도 필요하다. 이를 통해 통신 은닉 효과에 대하여 정형적인 평가를 통해 검증할 수 있을 것으로 예상한다. 본 논문은 이러한 추가 연구를 수행하여 이상 행위 탐지 기능을 고려한 확장 가능한 UART 보안 구조로 발전시켜 나갈 수 있을 것으로 기대한다.

앞으로 실험 보드가 아닌 실제 시스템 기반 구현을 통해 다양한 외부 요인을 고려하고, 장시간 신뢰성 시험이 필요한 국방 임베디드 장비에서의 실증 평가를 추진할 예정이다. 앞서 언급한 Dummy 비율에 대한 효율성에 대한 정량적인 측정과, 동기 실패가 발생하는 경우 각 요소 간 최적의 인자 선정에 대한 연구를 추가로 수행하여 국방 무기체계에 적합한 UART 통신의 보안 기법으로 발전시킬 예정이다.

3. 결 론

본 논문은 MCU 기반 Legacy UART에서 실현 가능한 보안 강화안을 제안하였다. Frame ID 기반 동적 프레이밍 기법과 키(Key) 기반의 Dummy 도입을 통해 역공학 비용을 상승시켜 공격자로 하여금 쉽게 공격하지 못하도록 하는 데 초점을 두었다. 그리고 Ascon-AEAD의 표준 기법을 도입함으로써 통신 패킷의 위·변조 및 리플레이를 차단할 수 있었다. 또한 단계적 이행(강화CRC → AEAD)을 통해 현장에서 단계적 적용 가능성에 대한 수준을 제시하였다. 결과적으로 Kerckhoffs 원칙[6]을 준수하는 저전력 MCU 기반의 UART 통신 보안 설계를 하드웨어 기반이 아닌 소프트웨어 계층 분리 및 추가 설계 구현을 통하여 달성할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1 Jaisachin, B. (2025). Enhancing security in logic-locked systems through UART-based key authentication. In *2025 International Conference on Computational, Communication and Information Technology (ICCCIT)* (pp. 649-653). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCCIT62592.2025.10927961

2 Kim, J. H., Joo, Y. J., Hur, A., Cho, M. K., Ryu, Y. S., Lee, G. H., Jang, W. H., & Yu, J. G. (2021). Design and implementation of secure UART based on digital signature and encryption. *Journal of convergence security, 21*(2), 29-35. https://doi.org/10.33778/kcsa.2021.21.2.029

3 Xie, Z., Yan, C., Ji, X., & Xu, W. (2023). BitDance: Manipulating UART serial communication with IEMI. In *Proceedings of the 26th International Symposium on Research in Attacks, Intrusions and Defenses* (RAID '23) (pp. 63-76). Association for Computing Machinery.

https://doi.org/10.1145/3607199.3607249

4 Chen, D. D., Egele, M., Woo, M., & Brumley, D. (2016). Towards automated dynamic analysis for Linux-based embedded firmware. In *Proceedings of the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS 2016)*. Internet Society. https://doi.org/10.14722/ndss.2016.23415

5 Uwaezuoke, E., & Swart, T. G. (2025). A vulnerability assessment and exploitation analysis of a powerline communication HomePlug AV network adapter. *International Journal of Information Security, 24*(4), 168. https://doi.org/10.1007/s10207-025-01081-5

6 Kerckhoffs, A. (1883). La cryptographie militaire. *Journal des sciences militaires, 9*, 5–38, 161–191.

7 Madl, T., Brückmann, J., & Hof, H.-J. (2018). CAN obfuscation by randomization (CANORa): A technology to prevent large-scale malware attacks on driverless autonomous vehicles. In *CSCS 2018 Proceedings*. Association for Computing Machinery.

8 Peterson, W. W., & Brown, D. T. (1961). Cyclic codes for error detection. *Proceedings of the IRE, 49*(1), 228–235. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1961.287814

9 Kowalk, W. (2006, August). *CRC cyclic redundancy check: Analysing and correcting errors* [Technical report]. Universität Oldenburg.

10 Lotto, A., Brighente, A., & Conti, M. (2025). *Securing legacy communication networks via authenticated cyclic redundancy integrity check* (arXiv:2411.14394v2) [Preprint]. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.14394

11 Turan, M. S., McKay, K. A., Chang, D., Kang, J., & Kelsey, J. (2025). *Ascon-based lightweight cryptography standards for constrained devices: Authenticated encryption, hash, and extendable output functions* (NIST Special Publication No. 800-232). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-232

12 National Institute of Standards and Technology. (2025). *NIST finalizes "lightweight cryptography" standard to protect small devices*. https://www.nist.gov/news-events/news/2025/08/nist-finalizes-lightweight-cryptography-standard-protect-small-devices

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 82-92, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.007

항공기 시뮬레이터용 마그네틱 인디케이터 개발

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Development of a Magnetic Indicator for Aircraft Simulators

홍정음, Jeong-heum Hong
(주)카프마이크로, 연구개발센터, 연구원
Research Engineer, R&D Center, Capmicro

이상천†, Sang-cheon Lee
경상국립대학교, 산업시스템공학부/공학원구원, 교수
Professor, Department of Industrial and Systems Engineering/ERI, Gyeongsang National University

박종훈, Jong Hun Park
대구가톨릭대학교, 경영학과, 교수
Professor, Department of Business Administration, Daegu Catholic University

Abstract

The objective of this study is to develop and localize a magnetic indicator, which is mounted on the MISC (Miscellaneous) panel of aircraft simulators, for speed brake display. This study focuses on designing a cost-effective and maintainable alternative to expensive imported components while ensuring compatibility with existing simulator systems.

The electromagnetic coil was designed to meet a target resistance of 850Ω and a current of 0.033 A under 28 V DC operating conditions. To ensure nighttime visibility and compliance in line with aviation standards, Night Vision Imaging System (NVIS) Green A-grade lighting was integrated. The front display film was fabricated using a polycarbonate material with precision silk screen printing. Performance verification was conducted through prototype testing, focusing on the physical dimensions, luminance, symbol transition functionality, and NVIS compatibility.

Results: Prototype testing confirmed that all technical requirements were satisfied, including external dimensions, luminance levels, and reliable symbol-switching functions. Specifically, the lighting performance of the NVIS satisfied the rigorous MIL-STD-3009 standards. From an economic perspective, the developed design achieved significant cost reduction, lowering the unit price to approximately one-quarter (25%) of the original aircraft-grade equipment.

keywords : aircraft simulator, magnetic indicator, speed brake, localization, NVIS(Night Vision Imaging System), electromagnet design

† Corresponding Author : Sang-cheon Lee
Tel : +82-55-772-1696, email : sclee@gnu.ac.kr
Gyeongsang National University, 124, 501, Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 27th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

항공기 시뮬레이터는 항공 기술의 고도화와 조종사 훈련의 중요성 증대에 따라 개발된 장치로, 실제 항공기 조종을 훈련하거나 다양한 비행 환경을 시험하기 위해 활용된다. 이러한 시뮬레이터는 실제 조종석 환경을 최대한 유사하게 재현하여 조종사들에게 높은 수준의 현실감을 제공하고, 비행 절차 숙달, 비상 상황 대응 및 유지보수 능력 향상 등의 효과를 제공한다.

시뮬레이터의 조종석 내부는 항공기의 실제 조종석과 유사할수록 높은 몰입감을 제공하기에, 시뮬레이터를 구성하는 내부 장비는 외형적인 조건이나 주요한 기능은 실제 항공기 장비의 요구 조건을 충족하면서도 구조적으로는 단순화하여 제작 비용을 절감하는 것이 필요하다. 그러나 방위산업의 특성상 기술자료의 확보가 쉽지 않아 고가의 실제 장비를 그대로 사용하는 경우가 많다. 이는 장비 단가의 상승뿐 아니라, 긴 납기와 유지보수의 불편함을 동반한다.

국내 방산업체들은 스위치, 패널, 장비 등을 제작하고 있지만, 마그네틱 인디케이터(magnetic indicator)와 같은 아날로그 계기는 국내 시장 규모의 한계로 인해 관련 인프라와 기술력이 부족하여 해외 의존도가 매우 높은 실정이기에 이러한 문제점이 더욱 두드러진다.

본 논문은 T/TA-50 및 F-16 항공기의 MISC 패널(Miscellaneous Panel)에 탑재되는 속도 브레이크 표시용 마그네틱 인디케이터를 국산화 개발하는 내용을 소개하고 있다. MISC 패널은 보조 장치 및 기능 스위치가 집약된 장치로, 속도 브레이크 상태를 표시하는 표시기(indicator)가 포함된다. 속도 브레이크 표시기는 속도 브레이크의 닫힘(closed), 열림(open), 부분 열림(partially open) 상태를 조종사에게 직관적으로 전달하는 것을 목적으로 한다.

항공기 계측 장비 개발과 관련된 최근의 연구들을 살펴보면, Ramirez-Lopez (2024)는 자이로스코프 및 자기 물리학 원리를 활용한 디스플레이 알고리즘을 제시하였고[1], Deng et al. (2024)은 실시간 태도 지시계(attitude indicator) 시뮬레이션 알고리즘을 통해 조종사의 상황 인식 능력을 향상시키는 소프트웨어적 접근법을 연구하였다[2]. 또한 Taylor et al. (2007)은 조종사의 경험이 수행 능력에 미치는 영향을 분석하며 인디케이터 설계 시 인지 부하(cognitive load)를 줄이는 직관적 설계의 중요성을 강조하였다[3].

이처럼 최근의 연구들은 주로 디지털 디스플레이 및 소프트웨어 알고리즘 구현에 집중되어 있다. 글래스 콕핏(glass cockpit)으로 대변되는 현대 항공 산업의 통합 항공전자(avionics) 시스템 관점에서는 너무나 당연한 현상이다.

그러나 이러한 디지털화는 비행 효율성을 극대화하고 조종사의 업무 부하를 경감시키는 결정적인 기여를 했으나, 동시에 전력 공급에 대한 의존도를 심화시키고 소프트웨어 오류나 전기 계통의 결함(electrical fault) 발생 시 정보의 소실(black-out)이라는 새로운 유형의 위험을 초래하였다. 따라서 고도화된 시스템일수록 디지털 오류와는 독립적으로 작동하며, 최악의 상황에서도 확정적인 정보(deterministic information)를 제공할 수 있는 이종 중복성(dissimilar redundancy)의 확보가 필수적으로 요구된다[4].

이러한 맥락에서 기계-전기적(electromechanical) 원리로 작동하는 마그네틱 인디케이터는 여전히 필요한 장비이다.

마그네틱 인디케이터의 구동 기술은 직선형 솔레노이드의 선형 변위를 회전 운동으로 변환하는 메커니즘을 제시한 Leland (1950)의 연구에서 출발하였다[5]. 이후 항공기 전원 상실(power failure) 시에도 마지막 상태를 유지해야 하는 안전 요구사항이 증대됨에 따라, 영구자석의 자속(magnetic flux)을 이용하여 별도의 전력 소모 없이 위치를 고정(latching)하는 쌍안정(bistable) 메커니즘이 도입되었다[6]. 이후 항공기에 사용되는 마그네틱 인디케이터 기술은 수십 년간 근본적인 설계의 변화 없이 답보 상태에 머물러 있지만, 디지털 시스템의 잠재적 오류에 대비한 대체 불가능한 백업 장치로서 존재하고 있다[7].

대한민국의 항공우주 연구는 주로 체계 개발이나 AESA(Active Electronically Scanned Array) 레

이더, 미션 컴퓨터(mission computer) 같은 고부가가치 전자 장비 국산화에 집중되었기에[8-9], 마그네틱 인디케이터와 같은 백업을 위한 기술은 상대적으로 관심을 받지 못했다.

그 결과, 마그네틱 인디케이터는 해외 제작에 의한 장비 단가 상승과 긴 납기, 유지보수의 어려움과 같은 문제점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 마그네틱 인디케이터를 국산화 개발하였다. 개발되는 인디케이터는 외부 추가 신호 없이 전압 제어만으로 심볼 전환 및 내부 조명 제어가 가능하도록 설계하였으며, 시제품 제작, 성능 평가를 통해 항공기 시뮬레이터로의 적용 가능성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 개발 대상인 마그네틱 인디케이터의 개념과 특징을 소개한다. 3장에서 설계의 요구사항과 상세 설계를 소개한 후, 4장에서는 시제품 제작과 성능 평가를 통해 항공기 시뮬레이터로의 적용 가능성을 검증하였다. 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

2. 마그네틱 인디케이터

항공기 조종석에는 다양한 계측 장비와 스위치 장비, 인디케이터 장비가 탑재된다. 물리량을 정량적으로 표시하는 계측 장비, 조작 신호를 전달하는 스위치 장비, 그리고 시스템의 작동 상태를 시각화하는 인디케이터 장비로 구분된다[10].

마그네틱 인디케이터는 영구자석 또는 전자석에 의해 발생하는 자기력을 이용하여 내부 표시부(flag)를 구동함으로써 특정 시스템의 상태를 시각화하는 장치이다. 일반적으로 '열림(open)', '닫힘(closed)', '부분 열림(partially open)'과 같은 불연속적인 상태 정보를 전달하는 데 사용되며, 별도의 복잡한 신호 처리 과정 없이 전원의 인가 여부 및 전압 제어만으로 상태 전환이 이루어지는 직관적인 인터페이스를 가진다.

본 연구의 대상인 속도 브레이크 인디케이터는 브레이크의 작동 상태를 심볼 형태로 즉각적으로 전달하여 조종사의 상황 인식(situation awareness) 능력을 보조하는 핵심적인 역할을 수행한다.

마그네틱 인디케이터의 핵심 작동 원리는 코일 전자석에 인가된 전기에너지를 자기 에너지로 변환하여 표시 심볼을 물리적으로 전환하는 것이다. 코일 전자석에 전압이 인가되면 흐르는 전류(I)에 의해 자기장(B)이 형성되는데, 이는 전자기학의 기본 원리인 암페어의 오른나사 법칙(Ampere's right-hand screw rule)으로 설명된다. 즉, 형성된 자기장은 표시 필름이 장착된 기구물에 작용하여 표시 필름이 회전하게 되는데, 이때 전면 표시 창에 시현되는 심볼이 변경된다. 일반적인 마그네틱 인디케이터의 내부 형상은 Figure 1과 같이 크게 네 가지 핵심 요소로 구성된다.

- 코일 전자석(electromagnet coil): 전기에너지를 자기력으로 변환하여 상태 플래그를 구동하는 동력을 발생시킨다.
- 상태 플래그(flag): 시스템의 현재 상태를 나타내는 심볼이 인쇄된 가동부로, 자기력에 의해 일정 각도 회전한다.
- 시현 창(display window): 외부 케이스에서 플래그의 심볼이 조종사에게 노출되는 개구부이다.
- 복귀 스프링(return spring): 전원 차단 시 자기력이 소멸되면 탄성 에너지를 이용하여 플래그를 즉시 기본 위치(default position)로 복귀시키는 안전 기구이다.

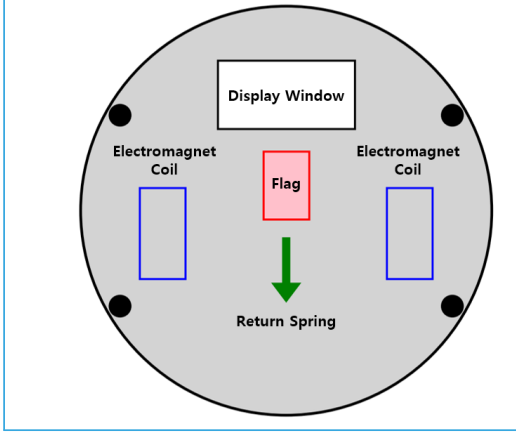


Figure 1. Internal components of magnetic indicator

이러한 기계적 구조는 전자식 디스플레이에 비해 전력 소모가 적고 전원 차단 시의 상태를 물리적으로 명확히 구분할 수 있다는 신뢰성 측면의 장점을 가진다.

3. 설계 요구사항 및 부품 설계

항공기용 인디케이터 설계 시에는 조종사의 인지 특성을 고려한 시인성(visibility)과 극한의 환경에서도 작동해야 하는 신뢰성(reliability), 유지보수 용이성(maintainability) 등이 최우선적으로 고려되어야 한다[1].

항공기 인증 절차와 관련된 계측 장비 개발은 국토교통부의 소형항공기급 인증기 개발 연구사업을 통해 이루어졌고, 이는 항공기 시뮬레이터 탑재 장비의 인증 절차에 대해 기초 자료를 제공한다[11]. 국제적으로는 FAA(Federal Aviation Administration), EASA(European Union Aviation Safety Agency) 등의 기관들이 항공기의 계기 설계와 관련된 안전 규격 및 가시성 요구 조건을 제시하고 있고, 국내에서는 국토교통부에서 항공기 형식 증명 지침이 관련 인증 절차와 요구 조건을 제공하고 있다[12].

3.1. 설계 요구사항

마그네틱 인디케이터를 개발하기 위해서는 우선 기존 실항공기용 장비의 요구조건을 확인하고, 이를 충족할 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 대표적인 요구조건에는 형상 및 치수, 입력 신호 및 출력 신호, 조명 색상, 심볼 사양 등이 포함된다.

Table 1에는 마그네틱 인디케이터의 설계 요구사항을 정리하였다. 본 장비는 실항공기용 인디케이터와 동일한 조건을 만족하기 위해 코일 전자석 구동용 28VDC 전원과 조명 구동용 5VDC 전원을 입력으로 사용하며, 입력 신호는 +28V 전원 2개, 28V용 접지 1개, +5V 전원 1개, 5V용 접지 1개로 총 5개로 구성된다.

외형 치수는 28×36×65mm(W×H×D) 이내로

Table 1. Magnetic indicator design requirements

Item	Requirements
Input voltage	28VDC (Coil electromagnet), 5VDC (Lighting)
Number of input signal	5EA (3 Coil electromagnet, 2 Lighting)
Outer dimensions	28x36x65mm (WxHxD), within the specified dimensions
Display window size	11.7x11.7mm (WxD)
Mounting standard	#2-56 screw
Luminance	0.6fL±0.4fL (1fL=3.4cd/m^2)
Display symbol	1 symbol when power OFF, 2 symbols (up, down) when power ON
Symbol font	Font=MS33558, Height=3.2mm
Lighting color	TYPE II, CLASS B, NVIS Green A
Operating time	Immediate rotation of display area when power ON
Light transmittance	Only display symbols transmit light through the front film
AR coating	Applied on window to reduce light reflectance

설계하여 MISC 패널 장착 시 간섭이 발생하지 않도록 하였으며, 시현 창의 크기는 실항공기와 동일하게 11.7×11.7mm로 설정하였다. 체결부는 항공 규격을 고려하여 #2-56 UNC 나사 규격을 준수하였다. 표시 심볼은 전원 미인가 시의 중간 위치 심볼을 포함하여 전원 인가 방향에 따라 열림 및 닫힘 상태를 나타내는 총 3종으로 구성되며, 문자 표기는 MS33558 글꼴을 적용하고 글자 높이는 3.2mm로 설정하였다. 조명은 MIL-STD-3009에 따른 Type II, Class B, NVIS(Night Vision Imaging System) Green A 사양을 적용하였고, 심볼 영역에만 선택적으로 투과되도록 필름 구조를 설계하였다. 또한, 전면 윈도우에는 AR(Anti-Reflection) 코팅을 적용하여 반사율을 최소화하였다. 마지막으로 동작 특성은 전원 인가 시 별도의 응답 시간 요구조건은 없으나 표시 심볼은 즉각적으로 전환되도록 구현

하였다.

실항공기용 마그네틱 인디케이터에 인가되는 입력 신호 사양은 Table 2와 같다. 현재 운용 중인 항공기 시뮬레이터는 실항공기 탑재용 장비를 그대로 적용하고 있으므로, 본 연구에서 개발하는 마그네틱 인디케이터는 기존 시스템과의 상호 호환성(compatibility)을 반드시 유지해야 한다. 따라서 Table 2에 명시된 입력 신호 규격을 설계 제약 조건으로 설정하고, 별도의 신호 변환이나 인터페이스 수정 없이 직접 교체가 가능하도록 개발을 진행하였다.

Table 2. Magnetic indicator input signal

Signal name	Signal description	Signal type
Power	+28VDC	Discrete in
Ground	GND	Discrete in
Power	+28VDC	Discrete in
Lighting power	0~+5VDC	Analog input
Lighting ground	GND	Discrete in

3.2. 주요 구성품 설계

마그네틱 인디케이터의 주요 구성품으로는 코일 전자석, 전면 필름, 조명용 PCB(Printed Circuit Board)가 있다. 주요 구성품을 먼저 설계하고 조립을 하기 위한 기구물 및 상용품을 설계한다.

3.2.1. 코일 전자석

코일 전자석은 보빈(bobbin) 또는 별도 구조물에 도선을 권선하여 제작하며, 전압 인가 시 흐르는 전류에 의해 자기장을 발생시켜 영구자석과 유사한 특성을 갖는다. 특히 전류의 크기와 방향을 제어함으로써 자기장의 세기와 방향을 임의로 조절할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구의 핵심은 이러한 코일 전자석을 활용하여 마그네틱 인디케이터의 표시 심볼을 전환하는 메커니즘을 개발하는 데 있다. 실제 항공기용 마그네틱 인디케이터의 작동 분석 및 분해 결과, 코일 전자석의 적용을 확인하였으며 전원 인가 시 약 30mA의 전류가 측정되었다. 이를 기초로 본 연구에서 설계할 코일 전자석의 사양을 확립하였다. 인가 전압은 28VDC, 권선 저항은 850Ω으로 설정하였으며, 이에 따라 산출된 전륫값은 약 32.9mA이다.

한편, 코일 전자석은 전원 인가 시 줄 열(Joule heat)에 의한 발열이 동반되므로, 항공기 시뮬레이터의 부품 허용 온도(40~85℃)를 고려하여 권선 및 관련 자재의 내열 성능이 해당 기준을 상회하도록 설계에 반영하였다.

보빈은 권선의 정렬 상태를 유지하고 설계 의도에 부합하는 외형을 결정하며, 용도에 따라 다양한 재질로 제작이 가능하다. 본 연구에서는 장착 공간의 협소함과 높은 치수 정밀도를 고려하여 SLA(Stereolithography) 방식의 3D 프린팅 공정을 적용하였다. SLA 장비의 ±50㎛ 미만의 치수 정밀도와 적층 면의 매끄러운 표면 마감 능력은 미세 권선 작업 시 발생할 수 있는 코일의 중첩 및 절연 손상을 방지하며, 정밀한 자기장 형성이 필요한 전자석 코어 제작에 최적화되어 있다.

보빈의 중심부에는 회전축이 관통할 수 있는 사각 홀(hole)을 설계에 반영하였다. 이 홀은 자기장에 반응하여 구동하는 표시 기구물의 회전 공간을 확보함으로써, 심볼 전환 시 회전 메커니즘이 안정적으로 작동할 수 있도록 돕는 역할을 수행한다.

특히, 제작 소재로는 코일의 발열 특성을 고려하여 일반 레진(standard resin) 대신 고내열성 레진(high-temperature resin)을 채택하였다. 고내열성 레진은 최대 180℃의 열변형 온도를 견딜 수 있으며 기계적 강도가 우수하여, 작동 중 발생하는 줄 열(joule heat) 및 기계적 하중 하에서도 보빈의 형태적 안정성과 신뢰성을 확보하기에 적합하다.

보빈 설계 완료 후, 목표 자기장을 형성하기 위한 권선 설계를 수행하였다. 설계 프로세스는 권선 종류 선정, 단면적 산출, 목표 저항 기반 권선 길이 계산, 총 권선 횟수 산출 순으로 진행되었다. 본 장비는 DC 전원을 사용하므로 경제성과 효율성이 우수한 에나멜선(enamel wire)을 채택하였다. 특히, 구리 도체 표면에 폴리에스테르 수지를 균일하게 코팅하

여 155℃ 수준의 내열성과 우수한 전기적 절연성을 확보한 폴리에스테르 동선(polyester copper wire)을 사용하였다. 이는 제한된 공간 내에서 촘촘한 권선을 가능케 하여 자기장 강도를 극대화하는 데 유리하다.

보빈의 설계 치수(내경 5×12×2mm, 외경 13×12×10.3mm)를 기준으로 산출된 권선 가능 단면적은 약 48.0mm²이다. 권선 굵기는 AWG(American Wire Gauge) 41 규격을 적용하였으며, 목표 저항값 850Ω을 구현하기 위한 총 권선 길이를 산출하였다. 우선 식(1)를 이용하여 AWG 41의 도체 단면적(A)을 계산하였다.

$$A = \pi \times (\frac{\phi}{2})^2 \quad (1)$$

권선 직경(ϕ) 0.071mm를 대입하여 산출된 단면적은 0.00397mm²이다. 이를 바탕으로 구리의 고유저항($\rho = 1.16 \times 10^{-8} \Omega m$)과 목표 저항($R$)을 식(2)에 대입하여 필요한 총 권선 길이(L)를 도출하였다.

$$L = \frac{R \times A}{\rho} \quad (2)$$

계산 결과, 목표 저항을 만족하기 위해 필요한 총 권선의 길이는 약 200.9m로 산출되었다. 최종적으로 보빈에 감아야 할 총 권선 횟수(N)를 산출하기 위해 1회전당 평균 길이(l_{avg})를 계산하였다. 먼저 식(3)를 통해 보빈 외경(D_{out})과 내경(D_{in}) 차이에 따른 권선 두께(t) 가 4mm임을 확인하였다.

$$t = \frac{(D_{out} - D_{in})}{2} \quad (3)$$

이어 식(4)와 (5)를 사용하여 평균 권선 폭(b_{avg})과 깊이(h_{avg})를 각각 9mm와 6mm로 산출하였다.

$$b_{avg} = b_{in} + t \quad (4)$$

$$h_{avg} = h_{in} + t \quad (5)$$

그리고 이를 식(6)에 대입하여 1회전당 평균 길이(l_{avg}) 30mm를 도출하였다.

$$l_{avg} = 2 \times (b_{avg} + h_{avg}) \quad (6)$$

마지막으로 총 권선 길이를 1회전당 평균 길이로 나눈 식(7)을 통해 총 권선 횟수를 결정하였다.

$$N = \frac{L}{l_{avg}} \quad (7)$$

산출된 총 권선 횟수는 6,696회이며, 이는 AWG 41 권선을 해당 횟수만큼 권선할 시 목표 저항 850Ω을 달성할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 설계한 코일 전자석은 28VDC 입력 시 약 0.033A를 소모하며, AWG 41 규격의 폴리에스테르 동선을 6,696회 권선하여 850Ω의 저항을 구현하도록 설계되었다. 또한, SLA 방식의 고내열성 레진 보빈을 적용하여 열적·구조적 안정성을 확보하였으며, 향후 시제품 제작을 통해 설계의 타당성을 검증한다.

3.2.2. 전면 필름

마그네틱 인디케이터의 전면 필름은 장치의 상태(중간, 닫힘, 열림)를 나타내는 심볼을 표시하는 핵심 구성요소이다.

전면 필름의 기재(substrate)로는 기계적 강도와 열적 안정성이 우수한 투명 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC)를 채택하였다. 폴리카보네이트는 85% 이상의 높은 가시광선 투과율을 보유하여 내부 LED 조명의 효율적인 전달이 가능하며, 약 140℃에 이르는 넓은 내열 온도를 갖추고 있어 환경 변화에 따른 열팽창 및 수축이 적다. 이는 정밀한 공차가 요구되는 소형 부품 제작에 적합하다.

필름의 기본 크기는 표시창 규격인 11.7×11.7

mm에 맞추어 설계되었으며, 회전 기구물과의 간섭을 방지하기 위해 구동 반경과 회전 각도를 정밀하게 산출하였다. 설계 소프트웨어를 활용한 구동 시뮬레이션 결과, 중간 위치에서 양단(열림/닫힘) 상태로 전환되기 위해 필요한 최적 회전 각도는 45.67°로 도출되었다.

심볼의 시인성을 극대화하고 선택적 광투과를 제어하기 위해 실크 인쇄(silk screen printing) 공법을 적용하였다. 실크 인쇄는 잉크의 도막 두께 조절이 용이하여 반복 인쇄를 통해 뚜렷한 색감을 구현할 수 있으며, 소형 부품의 정밀 인쇄에 적합하다.

광학적 특성 구현을 위해 다음과 같은 다층 인쇄 방식을 수행하였다:

심볼 및 문자는 항공기 부품 표준 글꼴인 MS33558을 적용하고, 문자의 높이는 3.2mm로 설정하였다. 투명 PC 필름 전면에 무광 백색(matte white) 잉크를 먼저 인쇄하여 높은 휘도를 확보하였다.

심볼 영역을 제외한 나머지 부분에는 무광 흑색(matte black) 잉크를 도포하여 내부 조명이 새어 나오지 않도록 완전한 차광 처리를 수행하였다.

전면 필름은 코일 전자석의 자기력에 의해 구동되는 회전 기구물 상단에 결합된다. 필름의 소형화된 크기로 인해 일반적인 나사(screw) 체결 방식은 적용이 불가하므로, 본 연구에서는 소형 리벳(rivet)을 활용한 고정 방식을 설계하였다. 리벳팅 공법은 반복적인 회전 및 진동 환경에서도 필름의 이탈을 방지하고 물리적 결합력을 안정적으로 유지하는 이점이 있다.

전면 필름의 상세 사양을 Table 3에 정리하였다.

3.2.3. 조명용 PCB

공기 탑재 장비는 야간 비행 시 조종사가 각인 및 형상을 명확히 식별할 수 있도록 NVIS 조명 시스템을 갖추어야 한다. 특히 마그네틱 인디케이터는 장치의 상태를 실시간으로 전달해야 하므로, 야간 시인성 확보를 위해 NVIS Green 색상의 조명을 적용한다.

NVIS는 야간 작전 시 지형 및 목표 식별 능력을 극대화하기 위한 시스템이다. NVIS 조명은 주간에는 시각적 간섭을 최소화하면서, 조종사가 NVG(Night Vision Goggles)를 착용했을 때 장비에서 방출되는 미세한 광원을 증폭시켜 높은 시인성을 제공한다.

NVIS 조명의 색 좌표 및 광학적 성능은 MIL-STD-3009 규격에 의해 엄격히 정의된다. Figure 2는 해당 규격에서 규정하는 NVIS 색도 영역(chromaticity diagram)을 나타내며, 본 연구는 이를 준수하여 설계되었다.

Table 3. Summary of front design requirements

Category	Requirements	Remarks
Material	Transparent polycarbonate	Ensures mechanical strength and durability
Optical properties	Visible light transmittance ≥ 85%	Allows NVIS lighting transmission
Operating temperature range	Stable up to 140℃	Suitable for simulator environment
Dimensions	Front display window : 11.7×11.7mm (W×H)	Reflects rotation angle of approx. 45.67°
Symbol printing method	Silk screen printing	Suitable for small precision components
Printing colors	Symbols/characters : White, Background : Matte black	Ensures contrast and readability
Character specifications	Font : MS33558, Character height : 3.2mm	Complies with aviation standard font
Fixing method	Small rivet fastening	Alternative where screw application is difficult

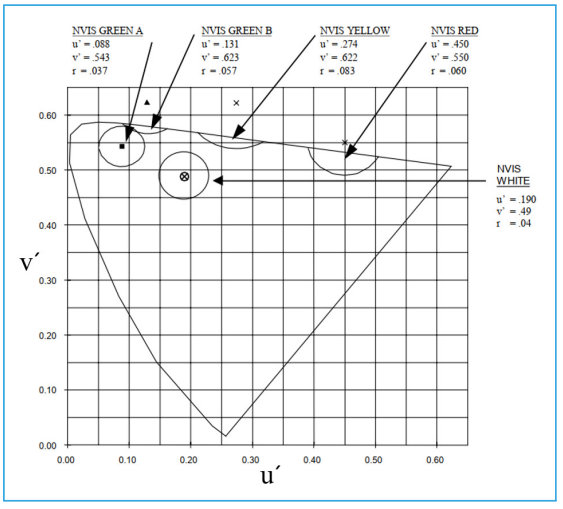


Figure 2. NVIS lighting color limits

마그네틱 인디케이터의 요구 성능을 충족하기 위해 MIL-STD-3009 규격을 준수하는 NVIS Green A 등급의 Lumitron사 L-54105-130F-6153 모델을 채택하였다(Figure 3). 해당 조명은 5VDC 정격 전압에서 동작하며, 0~5VDC 범위의 외부 전압 가변에 따라 선형적인 조광 제어(dimming)가 가능하여 야간 비행 환경에 최적화된 시인성을 제공하도록 설계되었다.

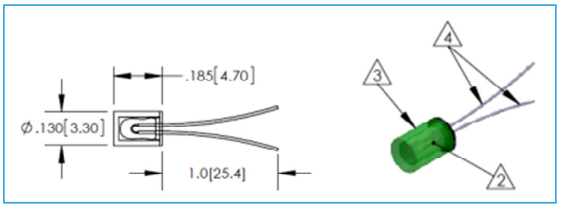


Figure 3. L-54105-130F-6153

선정된 NVIS 조명의 안정적인 전력 공급 및 실장을 위해 전용 PCB를 설계하였으며, 5VDC 입력 전원을 병렬로 분기하는 회로 구성을 통해 두 개의 LED 모듈이 균일한 조광 특성을 유지하며 독립적으로 구동되도록 하였다. 또한, 납땜 및 배선 연결을 위한 최적 규격의 비아 홀(via hole)과 더불어 기구물 결합을 위한 체결 홀을 설계에 반영함으로써, 진동 및 충격 등 실제 비행 환경에서 발생할 수 있는 기계적 외력에 대한 위치 안정성을 확보하였다.

4. 시제품 제작 및 성능 평가

4.1. 시제품 제작

하우징을 제외한 내부 핵심 구성품의 조립 상태는 Figure 4와 같다.

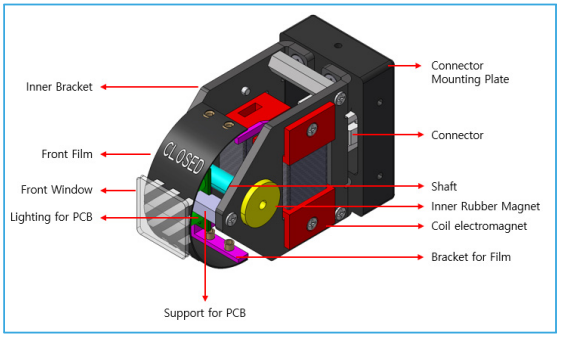


Figure 4. Isometric view of the magnetic indicator prototype

제작된 시제품에는, 우측 내부 브래킷의 내측과 외측에 각각 1개씩 총 2개의 고무 자석이 적용되었다. 이는 코일 전자석의 전원이 차단되었을 때, 전면 필름이 '중간 위치(intermediate position)' 심볼을 정확히 유지하도록 하기 위한 설계이다. 이를 위해 이극 착자(two-pole magnetization)된 고무 자석을 중앙 홀 기준으로 좌우 극성이 다르게 배치하였으며, 조립 시 극성 정렬을 통해 심볼의 중앙 정렬을 구현하였다.

마그네틱 인디케이터는 설계 의도에 따라 중간 위치뿐만 아니라 닫힘(closed) 및 열림(open) 위치 심볼을 정확히 시현해야 한다. 시제품 제작 과정에서 필름용 브래킷이 닫힘 위치까지 회전할 때의 회전 반경을 측정하였으며, 인접 기구물과의 물리적 간섭 발생 여부를 검토하여 구동의 안정성을 확인하였다.

최종적으로 하우징을 포함한 전체 조립을 완료하였다. 외관에는 무광 흑색 도장(matte black coating)

을 적용하여 제품의 완성도를 높였으며, 이를 통해 실제 항공기 시뮬레이터 탑재에 적합한 수준의 형상적 일체성 및 심미적 요구사항을 확보하였다.

4.2. 성능 평가

본 연구에서는 제작된 시제품이 설계 사양을 만족하는지 확인하기 위해 광학적 특성 및 기능 시험을 수행하였다. 특히 항공용 장비의 특성을 고려하여 심볼 시현의 정확성과 NVIS 조명 적합성을 집중적으로 검증하였으며 성능 평가 결과는 Table 4와 같다.

마그네틱 인디케이터의 휘도(luminance) 요구 규격은 0.6fL±0.4fL이다. 본 시험은 외부 광원이 차단된 암실 환경에서 수행되었으며, 휘도계(TES-137)를 사용하여 시제품의 발광 휘도를 측정하였다. 측정 결과 1.752cd/m의 휘도 값이 관측되었으며, 이를 단위 환산 시 0.511fL로 나타나 설계 요구 조건에 충족함을 확인하였다.

시제품은 전원 상태에 따라 닫힘(closed), 열림(open), 중간(middle) 심볼을 정확히 시현해야 한다. 본 시험에서는 정면 기준 좌측 코일 전자석에 +28VDC 전원을 인가하였을 때 닫힘 심볼이, 우측 코일 전자석에 +28VDC 전원을 인가하였을 때 열림 심볼이 시현되도록 내부 배선을 구성하였다.

시험 결과, 코일 전자석에 전원을 인가하면 즉각적으로 심볼이 변경되었으며, 전원을 차단하면 중간 위치 심볼이 정상적으로 표시되었다. 또한, 글자 및 심볼의 형태, 굵기, 위치는 설계와 일치하였다.

마지막으로 시제품의 NVIS 조명 색상 및 호환성 검증을 수행하였다. 일반 가시광 조명은 육안 검사 및 색좌표 측정만으로 검증이 가능하나, 항공용 NVIS 조명은 야간 투시경(NVG)과의 간섭을 방지하기 위해 MIL-STD-3009 규격에 따른 색좌표, 복사 휘도(radiance), NVG 호환성을 종합적으로 평가해야 한다.

본 시험에서는 분광 복사계인 DTS-140을 사용하여 마그네틱 인디케이터에 적용된 NVIS Green A 조명을 정밀 측정하였다. 분석 결과, MIL-STD-3009에서 규정하는 장비 타입(type), 등급(class), 및 장치(device) 기준을 모두 충족하는 색도 영역 내에 분포함을 확인하였으며, 최종적으로 적합 판정을 획득하였다. Figure 5는 분광 분석을 통해 도출된 NVIS 조명 시험 결과 보고서를 보여준다.

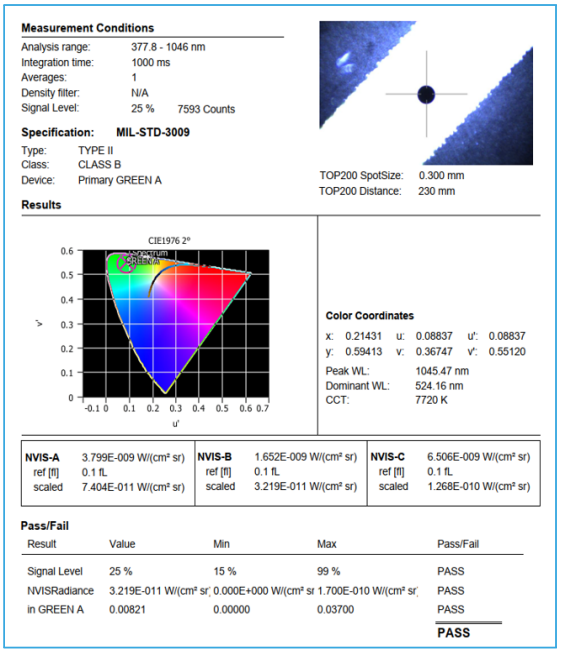


Figure 5. NVIS lighting test report

Table 4. Prototype test results of magnetic indicator

Category	Item	Requirements	Remarks	Result
Luminance	Brightness	0.6fL±0.4fL(0.2~1.0fL)	0.511fL (1.752cd/m²)	Pass
Symbol	Display symbol	1 symbol when OFF, 2 symbols when ON	Closed/Middle/Open symbols correctly displayed	Pass
Lighting	NVIS color	NVIS Green A (MIL-STD-3009 Compliant)	NVIS Green A (DTS-140 verified)	Pass

5. 결 론

본 연구에서는 항공기 시뮬레이터의 MISC 패널에 탑재되는 마그네틱 인디케이터를 설계 및 제작하고, 요구 사양에 대한 검증 시험을 수행하였다. 코일 전자석, 전면 필름, 조명용 PCB 및 정밀 기구물을 포함한 전체 개발 공정을 체계적으로 정립하였으며, 시제품 제작과 성능 검증을 통해 실제 시뮬레이터 환경에서의 적용 가능성을 입증하였다.

주요 시험 및 평가 결과, 개발된 마그네틱 인디케이터는 실항공기 탑재 장비와의 운용 호환성을 유지함과 동시에 시뮬레이터용 부품으로서 요구되는 높은 기능성과 신뢰성을 확보한 것으로 나타났다. 특히, 본 연구를 통해 확보한 코일 전자석 및 전면 필름 제작 기술은 마그네틱 인디케이터뿐만 아니라, 유사한 구동 원리를 가진 다양한 항공용 아날로그 계기류 개발에도 유연하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

그러나 본 연구에서 제안한 마그네틱 인디케이터는 기계-전기적(electromechanical) 원리로 작동하는 아날로그 계기의 특성상 몇 가지 한계점을 지닌다.

첫째, 코일 전자석과 상태 플래그, 복귀 스프링 등의 물리적 구동에 의존하므로, 지속적이고 반복적인 작동에 따른 마찰 및 기계적 피로 누적에 대한 장기적인 수명(Lifecycle) 검증이 부족하다. 둘째, 기계적 구조의 특성상 불연속적인 3가지 상태(닫힘, 열림, 중간)만을 표시할 수 있어, 브레이크의 세밀한 변화율 등을 디지털 장비처럼 점진적으로 시현하기에는 제약이 따른다.

이러한 한계를 극복하고 향후 시스템을 개선하기 위해서는 다음과 같은 후속 작업이 고려될 수 있다. 먼저, 내부 기계적 구동부의 작동 상태나 코일의 저항 변화를 확인하여 자가 진단 할 수 있는 모니터링 방안의 모색이 가능하다. 이 경우에 코일 구동 시 필연적으로 발생하는 줄 열(Joule heat)이 밀폐된 패널 환경에서 부품에 미치는 열적 스트레스와 장기 운용 시의 성능 저하 여부를 확인할 데이터에 대한 검토나 전력 효율을 높여 발열을 최소화하는 구동 회로 최적화 및 내마모성을 극대화할 수 있는 신소재 적용 검토가 필요하다.

향후 연구에서는 이러한 개선 사항을 반영함과 동시에, 다양한 형상 및 장착 구조를 가진 마그네틱 인디케이터로 연구 범위를 확대할 필요가 있다. 특히 본 연구를 통해 확보한 코일 전자석 및 전면 필름 제작 기술은 마그네틱 인디케이터뿐만 아니라 유사한 구동 원리를 가진 다양한 항공용 아날로그 계기류 개발에도 유연하게 적용될 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서 설계된 핵심 부품들을 다른 아날로그 계기 제작에도 응용함으로써 항공기 시뮬레이터 핵심 구성품의 국산화 범위를 넓힐 수 있으리라 판단된다.

종합하면, 본 연구는 항공기 시뮬레이터용 마그네틱 인디케이터의 기술적 자립 기반을 마련하였으며, 이를 통해 외산 의존도를 낮추어 비용 절감 및 유지보수 효율성 측면에서 유의미한 성과를 거두었다. 본 연구의 결과물은 향후 항공기 시뮬레이터 국산화 사업 확대와 관련 장비 제조 기술 발전에 크게 기여할 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 1저자인 홍정음의 경상국립대학교 석사학위논문을 수정 및 재편집한 것임.

참고문헌

1 Ramirez-Lopez, A. (2024). The Use of Computational Algorithms to Display the Aircraft Instruments That Work with Gyroscopic and Magnetic Physics (Theory for Programming an Elementary Flight Simulator). Applied Sciences, 14(16), 7099. https://doi.org/10.3390/app14167099

2 Deng, L., Sun, Y., Liu, C., & Jin, K. (2024). Real-time attitude indicator simulation algorithm in flight simulators. In *Proceedings of the International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2023)* (Vol. 13090, pp. 615-621). SPIE.

3 Taylor, J. L., Kennedy, Q., Noda, A., & Yesavage, J. A. (2007). Pilot age and expertise predict flight simulator performance: a 3-year longitudinal study. *Neurology, 68*(9), 648-654. https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000255943.10045.c0

4 Yeh, Y. C. (2001). Safety critical avionics for the 777 primary flight controls system. In *Proceedings of the 20th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (Vol. 1, pp. 1C2/1-1C2/11). IEEE. https://doi.org/10.1109/DASC.2001.963311

5 Leland, G. H. (1950). *Magnetically operated device* (U.S. Patent No. 2,496,880). U.S. Patent and Trademark Office.

6 Mohler, D. B. (1994). *Permanent magnet brushless torque actuator* (U.S. Patent No. 5,337,030). U.S. Patent and Trademark Office.

7 Li, W., & Wang, J. (2014). Magnetic sensors for navigation applications: an overview. *The Journal of navigation, 67*(2), 263-275. https://doi.org/10.1017/S0373463313000544

8 Jeong, H., Kwon, T., Son, W., & Park, J. (2023). Study on quality improvement of radar warning receiver for rotary-wing aircraft through analysis of cause of defect. *Journal of Defense Quality Society, 5*(1), 20-27. https://doi.org/10.23199/jdqs.2023.5.1.003

9 Park, S. S., Kim, D. W., Kim, J. Y., Jeong, A. Y., & Kim, M. S. (2025). A study on the establishment of procedure for parts localization airworthiness review related to compliance of system safety. *Journal of Defense Quality Society, 7*(1), 82-92. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.1.009

10 Federal Aviation Administration. (2016). *Pilot's handbook of aeronautical knowledge* (FAA-H-8083-25B). U.S. Department of Transportation.

11 한국항공우주산업(주). (2013). *소형항공기급 인증기 개발 최종보고서* (보고서 번호: 07항공-안전02-4-1(7); 발간등록번호: 11-1613000-001890-01). 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 항공안전기술개발사업단.

12 국토교통부. (2024). 항공기 형식증명 지침 [국토교통부훈령 제1701호].

VARTM을 활용한 선박용 복합재 추진기의 수지 주입 거동 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Analysis of Resin Flow Behavior during VARTM Manufacturing of Composite Marine Propellers

조형순, Hyeongsun Cho
한국카본, C.I. BG 연구팀, 어시스턴트
Assistant, C.I. BG/R&D Team,
Hankuk Carbon

강승구, Seunggu Kang
한국카본, C.I. BG 연구팀, 어시스턴트
Assistant, C.I. BG/R&D Team,
Hankuk Carbon

김성권, Sungkwon Kim
한국카본, C.I. BG 연구팀, 매니저
Manager, C.I. BG/R&D Team,
Hankuk Carbon

김석주, Seokju Kim
한국카본, C.I. BG 연구팀, 매니저
Manager, C.I. BG/R&D Team,
Hankuk Carbon

김명진†, Myoungjin Kim
한국카본 C.I. BG 연구팀, 이사
Director, C.I. BG/R&D Team,
Hankuk Carbon

Abstract

Composite propellers for marine vessels offer significant advantages, such as reduced weight, enhanced corrosion resistance, and improved vibration damping, leading to a superior overall performance. However, unlike metallic materials, composite structures require different manufacturing processes, and variations in the processing conditions can result in performance inconsistencies and potential defects. Therefore, the selection of an appropriate manufacturing method and careful design of the process parameters are important. In this study, Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) is used to fabricate a composite propeller. The process parameters were designed via numerical simulations using the commercial software RTM-Worx, and the parameters determined from the simulations were subsequently applied to the manufacturing process. To validate the proposed process parameters, simulation and fabrication were initially conducted on a prototype representing a portion of the propeller, followed by full-scale simulation and manufacturing of the complete propeller. Nondestructive inspection of the fabricated propeller confirmed the absence of detectable defects. A comparison between the simulation and experimental results showed that the resin infusion times did not match owing to temperature effects, whereas the overall resin flow pattern showed good agreement.

keywords : composite propeller, carbon fiber reinforced plastic, VARTM, RTM simulation

† Corresponding Author : Myoungjin Kim
Tel : +82-55-350-8726, Fax : +82-55-350-8888, email : mjkim@hcarbon.com
Hankuk Carbon, 50404, 103, Saposandanjungang-ro, Bubuk-myeon, Miryang-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 23rd. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

선박용 프로펠러에 일반적으로 사용되는 니켈-알루미늄-황동 합금은 우수한 기계적 성질과 내식성을 보유하고 있으나 높은 중량에 의한 추진 축계 발열/고착 문제, 연강 재질 선체와의 전위차에 의한 갈바닉 부식 문제 등의 단점을 가지고 있다[1-2]. 특히 함정(수상함, 수중함)의 경우 생존과 직결되는 수중방사소음(Unerwater Radiated Noise, URN)을 줄이기 위하여 재질 자체의 흡음성을 보유하고 있는 망간 함량을 높인 소노스톤(sonoston) 재질을 적용하고 있으나 열악한 제작성으로 인하여 국내에는 대형 크기의 프로펠러 제작에 성공한 사례는 아직까지 없는 상황이다.

한편 섬유강화 복합재는 제조원가가 높다는 단점이 있지만 우수한 비강성, 비강도, 내식성, 진동감쇠 특징과 경량 재료로 알려져 있어 우주항공, 자동차, 철도차량, 풍력발전 등 산업 전반에 폭넓게 적용되고 있다[3-5].

선박용 프로펠러를 복합재로 제작하는 경우 복합재의 이방성 굽힘변형 특성에 의한 유연한 프로펠러 설계를 적용하여 효율 증가 및 캐비테이션 초생 속도(Cavitation Inception Speed, CIS) 지연에 의한 수중방사소음을 감소시킬 수 있으며 고감쇠 특성으로 인한 저진동/저소음 추진기 설계가 가능하고 경량 특성에 의한 축계 고착 문제를 해소할 수 있으며 부품 경량화가 가능하여 기동성을 향상시킬 수 있다[6-7]. 또한, 비자성체 특성으로 전자기장 교란 최소화를 통한 함정의 스텔스 성능 향상과 비부식체로 방식 비용을 절감할 수 있는 장점을 갖는다.

이러한 복합재 장점을 활용하여 국내외에서는 선박용 복합재 프로펠러를 개발하는 연구가 진행되어 왔다. 일본 나카시마 프로펠러는 직경 2m급 복합재 프로펠러를 세계 최초로 상선에 적용하여 상용화하였다[7-11]. 복합재 프로펠러는 양면이 3차원의 곡면 형상을 하고 있어 고정밀도 몰드 설계 및 제조 기술 연구가 진행되고 있으며, 5축 CNC(Computerized Numerical Control) 기반 몰드 가공, 3D 프린팅을 활용한 대형 몰드 제작, 열변형을 고려한 금형 설계 등 복합재 추진기에 대한 형상 정밀도를 높이는 방향의 제조 기술 연구가 활발히 진행되고 있다[9-14].

복합재는 제작 방법에 따라 성능과 제작성 그리고 구조물의 건정성이 크게 달라지기 때문에 형상 설계 후 제작 방법을 우선적으로 고려해야 한다. 양면이 3차원 형태인 선박용 복합재 프로펠러는 복합재의 강도와 강성을 확보할 수 있고 설계한 외형 형상으로 제작하기 유리한 RTM(Resin Transfer Molding)과 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 공정이 주로 사용된다. 선박용 복합재 프로펠러는 두께가 두꺼운 부분과 얇은 두께 부분이 모두 존재하며, 각 부분에 수지 도달 시간의 차이가 발생하게 된다. 이는 복합재의 일부분이 미함침되어 결함 위치로 남게 될 수 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해 RTM과 VARTM 공정에서 수지 주입 위치와 진공 포트 위치 그리고 유로 패스 설계가 중요한 변수가 된다[15-16].

본 논문에서는 VARTM 공정을 사용하여 해상 선박용 복합재 프로펠러를 개발하기 위해 시행착오(trial and error) 기법이 아닌 상용 시뮬레이션 프로그램을 통해 다중 유입 채널과 유로 패스 설계를 실시하였으며, 시뮬레이션 결과를 제작 공정에 적용하여 선박용 복합재 프로펠러 개발에 시간 및 비용을 절감할 수 있도록 하였고 시뮬레이션 결과와 제작 결과를 비교하여 시뮬레이션 결과의 유효성을 확인하였다. Figure 1은 복합재 프로펠러의 기하학적 형상을 나타내었다.

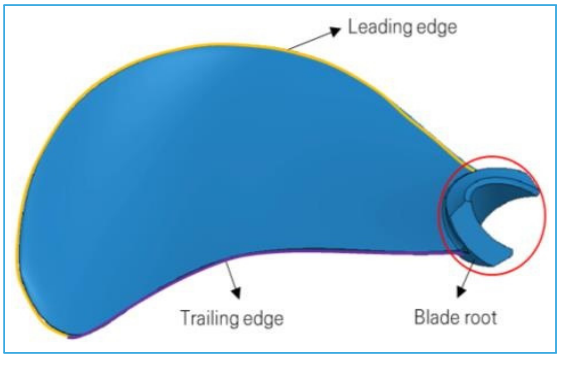


Figure 1. Geometry of the composite propeller

2. 복합재 프로펠러의 개발 프로세스

본 논문에서 수행한 복합재 프로펠러의 개발 프로세스는 먼저 추진 효율을 높일 수 있는 프로펠러의 형상을 선정하였고, 이후에는 선정한 프로펠러 형상에서 구조 안전성을 확보할 수 있도록 복합재의 적층 패턴을 선정하였으며, 동시에 제작성을 검토하였다. 이때, 프로펠러에 적용된 소재는 비용 절감과 함침성을 위해 심재에 유리섬유를 사용하였고 스킨에는 강도와 강성 확보를 위해 탄소섬유를 사용하였다.

선정된 프로펠러 형상과 복합재 패턴, 소재를 고려하여 제작성을 검토한 결과 VARTM 공법을 이용하여 제작하였을 경우 양호한 프로펠러의 제작 비용과 양호한 프로펠러 간의 제작 재현성을 보일 것으로 판단하여 VARTM 공법으로 제작하였다. Figure 2는 프로펠러 제작 프로세스를 나타낸다.

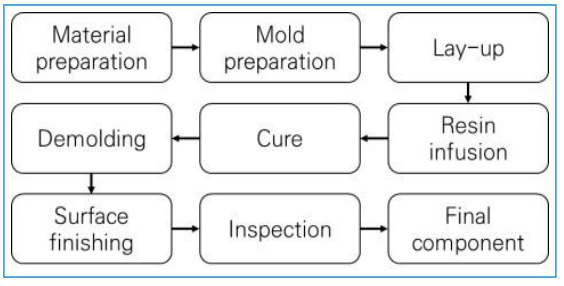


Figure 2. Manufacturing process of the composite propeller

VARTM 공정의 주요 변수는 수지 주입 위치와 진공 포트 그리고 유로 패스의 위치와 수량이며, 이에 따라 제작된 복합재의 건전성이 달라진다. 따라서, 본 논문에서는 개발 비용을 줄이기 위해 상용 시뮬레이션 프로그램인 RTM-Worx(v3.14, Polyworx B.V., Netherlands)를 사용하여 수지 주입 시뮬레이션을 수행하였고 이를 통해 수지 주입 위치와 진공 포트 그리고 유로 패스의 위치를 선정하였다.

수지 주입 시뮬레이션의 건전성 평가를 위해 프로펠러에서 가장 두꺼운 부분 중 일부에 대해 제작하였고, 단면을 확인하여 수지 함침의 건전성을 판단하였다. 이후 복합재 프로펠러에 대한 시뮬레이션과 제작을 수행하였다. Figure 3은 개발 프로세스를 나타낸다.

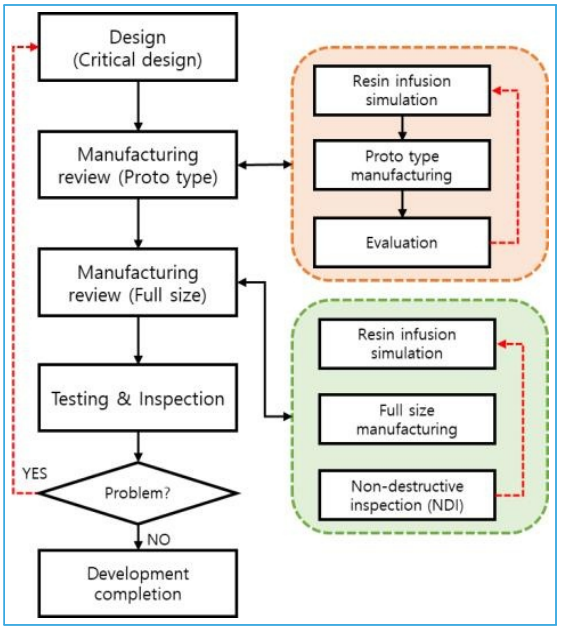


Figure 3. Development process of the composite propeller

3. 복합재 프로펠러 제작을 위한 유로라인 설계 및 제작

복합재 프로펠러 제작에서 다중 유입 채널 및 유로 패스 설계를 위해 상용 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 수지 주입 시뮬레이션을 실시하였고 시뮬레이션과 동일한 형상의 프로펠러를 제작하여 검토된 유로 패스로 수지 주입이 이루어지는지, 미함침 부위가 생기지 않는지를 확인하였다.

3.1. Darcy's law

복합재 추진기 수지 주입을 위하여 사용되는 상용 프로그램의 이론적 배경은 Darcy's law이다. Darcy's law는 다공성 매질을 통과하는 유체 흐름에 대한 법칙으로 유체의 단위 시간당 유량과 유체

의 점성 유체가 흐르는 거리 및 압력차이 사이의 비례관계를 의미하며, 식(1) 및 식(2)와 같다[17].

$$\frac{Q}{A} = -\frac{K\Delta P}{\eta L} \quad (1)$$

$$V_f = \frac{1}{\phi}\frac{Q}{A} \quad (2)$$

여기서, Q는 유량(m^3/s), A는 단면적(m^2), K는 투과성 계수(m^2), η는 점도$(Pa \cdot s)$, ΔP는 압력차(Pa), L은 유동 경로 길이(m) V_f는 유체속도(m/s), ϕ는 공극률(무차원)을 나타낸다.

투과성 계수(permeability)와 공극(porosity)의 관계를 설명하기 위하여 식(3)의 Kozeny-Carman 방정식을 도입한다.

$$K = \frac{\phi^3}{k_c S^2 (1-\phi)^2} \quad (3)$$

여기서, K는 투과성 계수(m^2), ϕ는 공극률(무차원), k_C는 Kozeny 상수, S는 비표면적(m^{-1})을 나타낸다.

상기 이론식에 대하여 섬유(reinforcement)를 통과한 수지 유동은 중력을 고려한 Darcy's law와 연속방정식의 식을 이용하면 식(4)와 같은 압력만 모르는 연속방정식으로 표현할 수 있다.

$$\underline{\nabla} \cdot \left(\frac{\underline{K}}{\eta} (\underline{\nabla} P - \rho_r \underline{g}) \right) = 0 \quad (4)$$

여기서, $\underline{K}$는 투과성 계수 텐서(m^2), η는 점도$(Pa \cdot s)$, P는 압력(Pa), ρ_r은 수지 밀도(kg/m^3), $\underline{g}$는 중력가속도(m/s^2)를 나타낸다.

3.2. 프로토 타입 수지 함침 시뮬레이션 및 제작

프로펠러를 제작하기 전에 프로펠러에서 가장 두꺼운 부분인 중앙 부분에 해당하는 모델을 프로토 타입으로 정하고 프로토 타입에 대해 수지 함침과 제작성 확인을 진행하였다. 이때, 프로토 타입에서 가장 두꺼운 부분은 130mm이다. Figure 4는 프로토 타입 모델의 형상을 나타낸다.

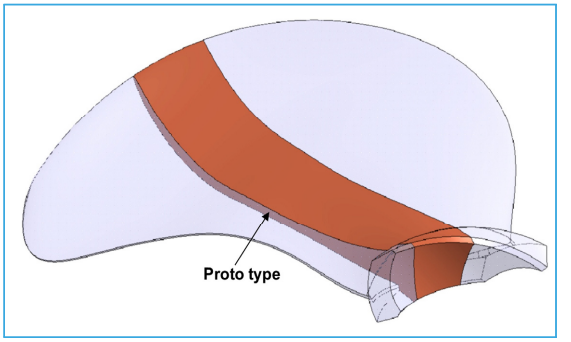


Figure 4. Prototype geometry

수지 함침성을 설계하기 위해 적층 패턴을 부여하지 않은 프로토 타입의 수지 주입 시뮬레이션을 실시하였다. Table 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 물성을 나타낸다. 투과성 계수는 경험값을 사용하였다.

Table 1. Analysis Parameters for the Prototype

Index	Properties
V_f (%)	60
K_{11} (m^2)	4 e-11
K_{22} (m^2)	4 e-11

* V_f – Fiber volume fraction
* K_{11} – 1-Direction coefficient of permeability
* K_{22} – 2-Direction coefficient of permeability

시뮬레이션의 조건은 프로펠러의 루트(root) 중간을 수지 주입구로 설정하고 상단 2개소에 진공 포트를 두도록 하였다. 또한, 수지 주입구와 진공 포트 바깥쪽인 프로펠러 끝단까지 수지가 고르게 채워질 수 있도록 프로펠러 하단을 러너 서페이스로 설정하였다. Figure 5는 프로토 타입의 시뮬레이션 조건을 나타내고 Figure 6은 시간변화에 따른 수지 함침 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

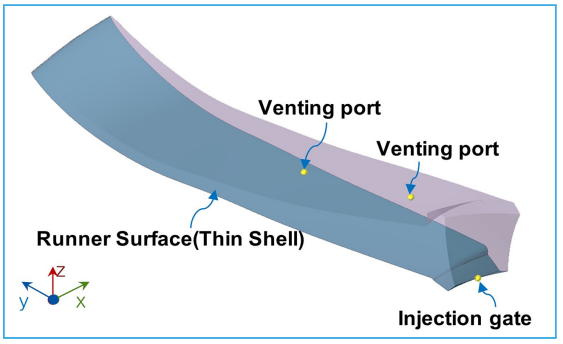


Figure 5. Simulation condition for the prototype

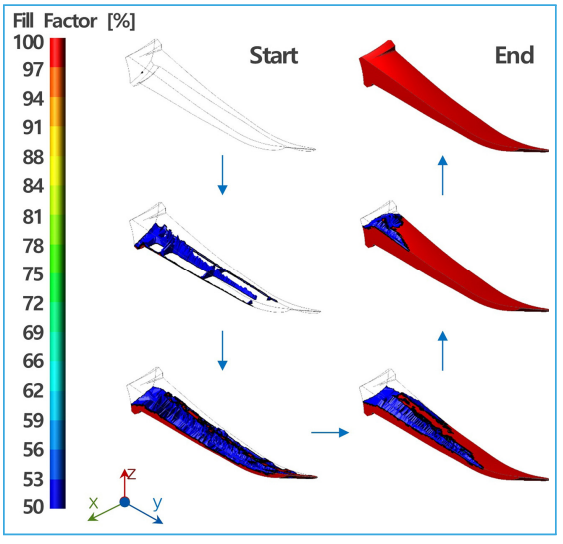


Figure 6. Time-dependent simulation results of the prototype

프로토 타입의 시뮬레이션 결과 수지 주입구의 인접 공간에서부터 수지가 채워지기 시작하여 프로펠러 하단의 러너 서페이스 면을 모두 채우고 하단에서부터 상단으로 올라오며 수지를 채우는 결과를 나타내었다. 또한, 시뮬레이션 결과 수지의 빈공간이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

프로토 타입의 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 실물 크기로 제작하여 비교하였다. 시뮬레이션과 동일한 위치의 수지 주입구와 진공 포트를 생성하였고, 시뮬레이션의 러너 서페이스는 얇은 그물망(flow mesh)으로 적용하였다. Figure 7은 프로토 타입의 수지 주입 조건을 나타낸다.

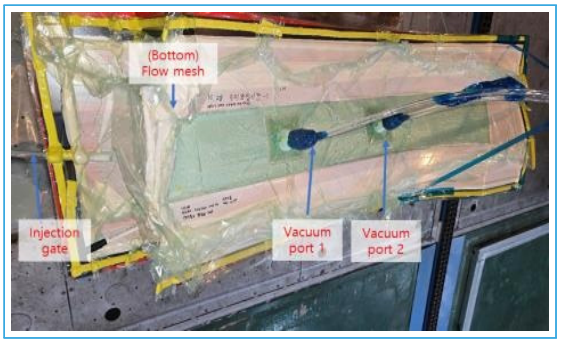


Figure 7. Resin infusion conditions for the prototype

프로토 타입 제작에 사용된 소재는 심재에 유리섬유와 스킨에는 카본 NCF(Non-crimp fabric) 소재이며, 수지는 에폭시 수지를 사용하였다. 이때, 몰드는 40℃로 가열하여 사용하였다. Figure 8은 프로토 타입을 제작하는 과정을 나타낸다.

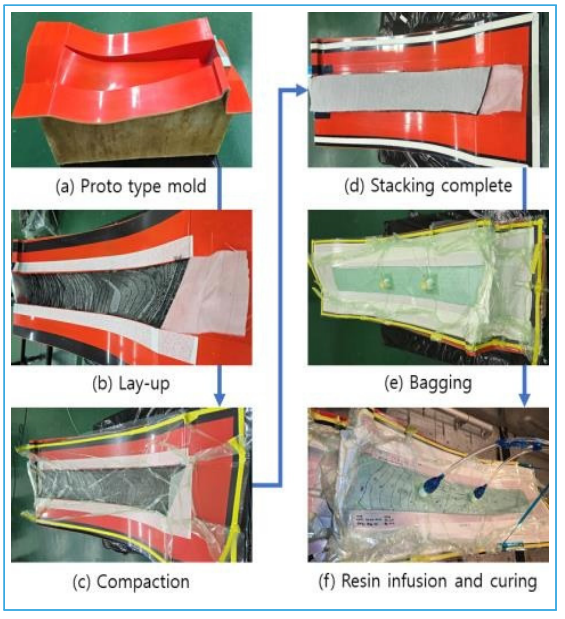


Figure 8. Prototype manufacturing process

수지 주입 시 표면에 수지가 주입됨에 따라 등고선과 유사한 형태로 나타나게 된다. 이 선을 일정 시간마다 표면에 표기하여 수지 주입의 진행도를 판단하는 데 사용하였다. Figure 9와 10은 프로토 타입의 수지 주입 형태를 시간에 따라 나타낸 모습이다.

프로펠러의 하단에 그물망(flow mesh)을 따라 흐른 수지가 양쪽 끝단 부분에서부터 가운데로 채워지는 형태를 나타냈다. 실제 제작에서 프로토 타입의 수지가 모두 주입되는 데 205분이 소요되었다.

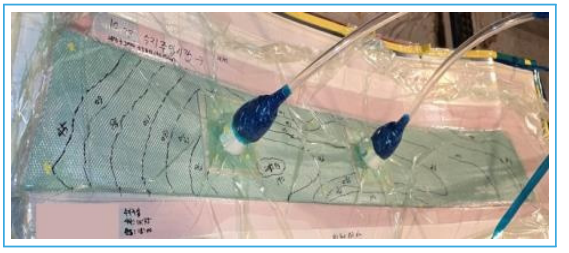


Figure 9. Resin flow pattern in the prototype

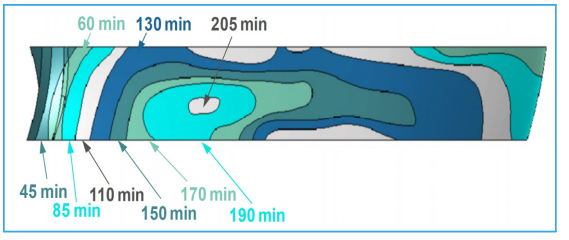


Figure 10. Schematic diagram of the resin flow pattern in the prototype

수지 주입에 대한 시뮬레이션 결과와 제작 결과를 비교하였을 때 프로펠러의 엣지(edge)에서부터 수지가 주입되는 경향은 유사하게 나타났으나, 프로펠러의 루트(root) 부에서 수지 주입 형태는 다르게 나타났다. 이는 프로토 타입의 시뮬레이션에서 적층을 고려하지 않아 발생한 것으로 두께 방향의 투과성 계수를 무시하게 되어 가장 두꺼운 부분인 루트 부에서 차이를 나타낸 것으로 판단하였다.

수지가 내부까지 고르게 함침되었는지를 확인하기 위해 프로토 타입으로 제작한 프로펠러를 절단하여 단면을 확인하였다. Figure 11은 프로토 타입으로 제작한 프로펠러를 절단한 단면 모습을 나타낸다.

단면을 절단하여 확인 결과 수지가 고르게 함침된 것을 확인하였다.



Figure 11. Sectioned view of the prototype

3.3. 복합재 프로펠러의 제작

복합재 프로펠러(full-size)에 대해 수지 주입 시뮬레이션을 실시하여 공정 변수를 선정하였고 시뮬레이션 결과와 실제 제작하였을 때의 수지 주입 결과를 비교하였다. 시뮬레이션과 제작에 사용된 소재는 스킨에 카본 NCF와 심재에는 유리섬유를 사용하였으며, 수지는 에폭시 수지를 사용하였다. Figure 12는 제작되는 복합재 프로펠러 형상을 나타낸다.

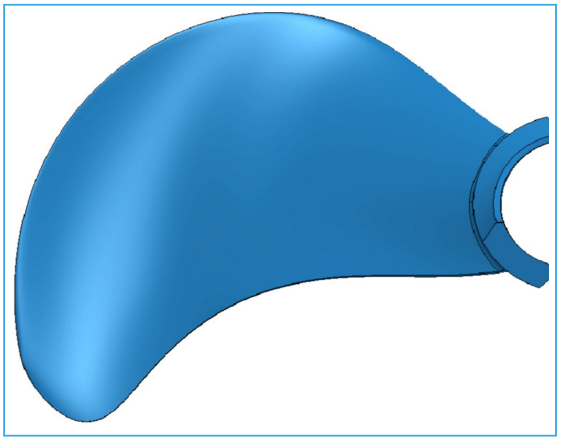


Figure 12. Overview of the composite propeller

시뮬레이션에는 실제 제작 방법과 동일한 적층 패턴과 소재가 적용되도록 하였다. 이때, 코어와 스킨 소재의 투과성 계수는 경험값을 사용하였다. Table 2는 복합재 프로펠러의 시뮬레이션에 사용된 주요 물성을 나타낸다.

Table 2. Analysis Parameters of the Composite Propeller

Index	Core	NCF Carbon
V_f (%)	53	55
K_{11} (m^2)	4.85 e-11	4 e-12
K_{22} (m^2)	4.85 e-11	4 e-12
K_{33} (m^2)	5 e-12	4 e-13

* V_f – Fiber volume fraction
* K_{11} – 1-Direction coefficient of permeability
* K_{22} – 2-Direction coefficient of permeability
* K_{33} – 3-Direction coefficient of permeability

시뮬레이션의 조건은 프로펠러의 루트(root) 중간에 수지 주입구로 설정하고 상단 2개소에 진공 포트를 두도록 하였다. 또한, 수지 주입구와 진공 포트 바깥쪽인 프로펠러 끝단까지 수지가 고르게 채워질 수 있도록 프로펠러 하단을 러너 서페이스로 설정하였다. Figure 13은 복합재 프로펠러의 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

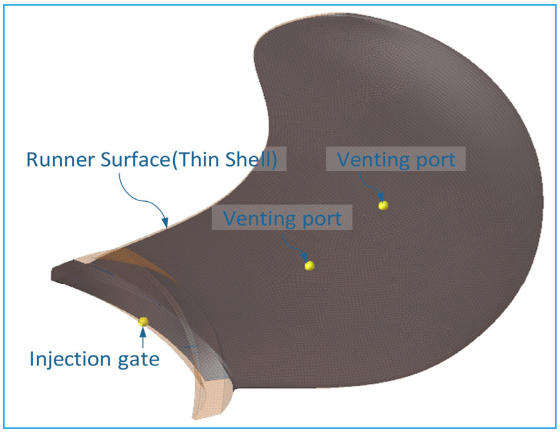


Figure 13. Simulation condition for the composite propeller

Figure 14는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 주입구와 인접한 루트부, 러너 서페이스가 적용된 하단 면이 가장 빠르게 수지 주입이 완료되며, 프로펠러의 하단 면에서부터 상단으로 수지가 주입되어 프로펠러의 상단 면 중간부가 가장 늦게 수지 주입이 완료되는 모습을 나타내었다. 수지 주입에는 약 193분의 시간이 소요되는 것으로 계산되었다.

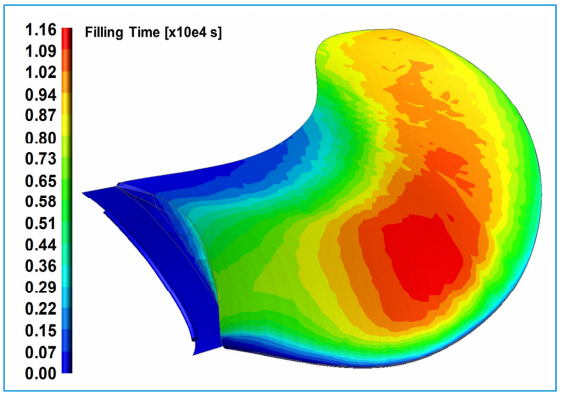


Figure 14. Simulation results of the composite propeller : resin infusion time

시뮬레이션 결과를 바탕으로 복합재 프로펠러를 제작하였다. 복합재 프로펠러는 시뮬레이션과 동일한 방법으로 제작하였다. 이때, 수지 주입 시간을 줄이기 위해 몰드를 40℃로 예열하여 수지를 주입하였고, 실제 제작에서 수지 주입에는 54분이 소요되었다. Figure 15는 복합재 프로펠러의 제작 과정을 나타내고, Figure 16과 17은 시간 변화에 따른 수지 주입 모습을 나타낸다.

시뮬레이션 결과와 실제 제작 시 유사한 위치에서 최종 수지 함침이 이루어지는 것을 확인하였다.

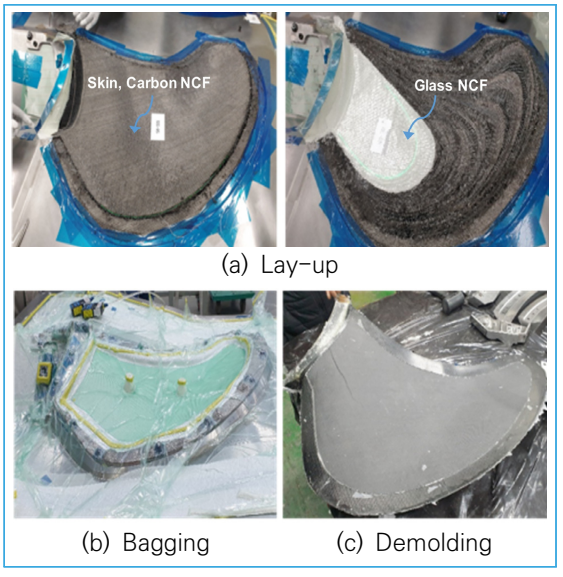


Figure 15. Composite propeller manufacturing process



Figure 16. Resin flow pattern in the composite propeller(Mold: 40℃, Resin: Room Temp.)

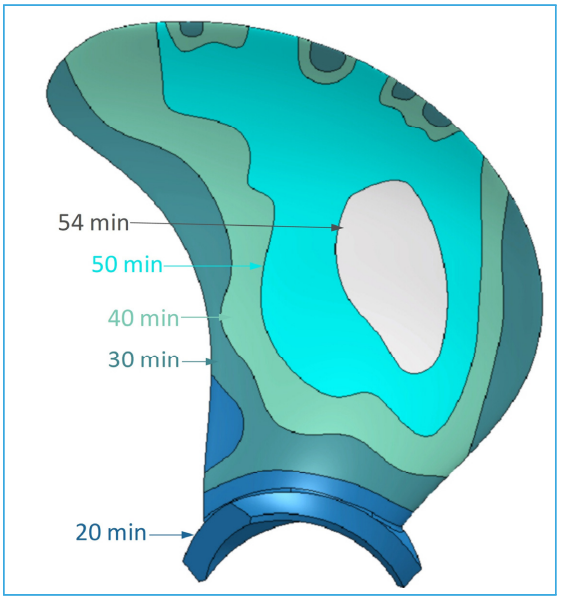


Figure 17. Schematic diagram of the resin flow pattern in the composite propeller (mold: 40℃, resin: room temp.)

시뮬레이션과 실제 제작에서 수지 주입 시간 차이가 발생하였다. 이는 실제 제작에서 수지 주입의 시간을 단축하기 위해 수지와 몰드를 예열하여 사용하였기 때문에 발생된 차이로 판단하였다. 수지의 온도 변화에 따라 수지의 점도가 변하게 된다. 수지의 점도는 몰드에 주입되는 수지의 흐름성을 달라지게 하여, 수지 주입시간의 차이를 발생하게 된다.

수지 주입 시간과 온도의 영향을 확인하기 위해 동일한 조건에서 온도를 변수로 복합재 프로펠러를 추가 제작하였고, 제작 시 몰드 온도 50℃, 수지 온도 37℃로 예열하여 수지를 주입을 하였을 때 수지 주입 시간이 20분으로 큰 폭으로 단축되는 것을 확인하였다. Figure 18과 19는 온도 변화에 따른 수지 주입 시간의 변화를 확인하기 위해 추가 제작한 프로펠러의 수지 주입 모습을 나타내며, Table 3은 온도에 따른 수지 주입 시간을 요약하여 나타낸다.



Figure 18. Resin flow pattern in the composite propeller(mold: 50℃, resin: 37℃)

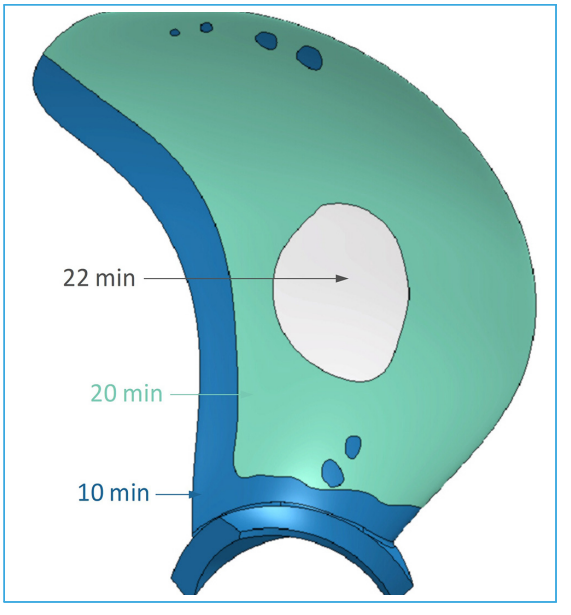


Figure 19. Schematic diagram of the resin flow pattern in the composite propeller (mold: 50℃, resin: 37℃)

Table 3. Resin Impregnation Time of the Composite Propeller

Index	Time(min)	Mold temp.	Resin temp.
Simulation	193	Room Temp.	Room Temp.
Test 1	54	40℃	Room Temp.
Test 2	20	50℃	37℃

제작이 완료된 프로펠러는 비파괴검사를 통해 수지 함침에 대한 건전성 평가를 실시하였다. 비파괴검사는 프로펠러 위치별 총 11회의 촬영을 실시하였으나, 수지가 미함침되어 발생된 결합 부위는 없었다. Figure 20과 21은 제작이 완료된 프로펠러의 비파괴검사 준비 모습과 비파괴검사 결과의 대표 모습을 나타낸다.

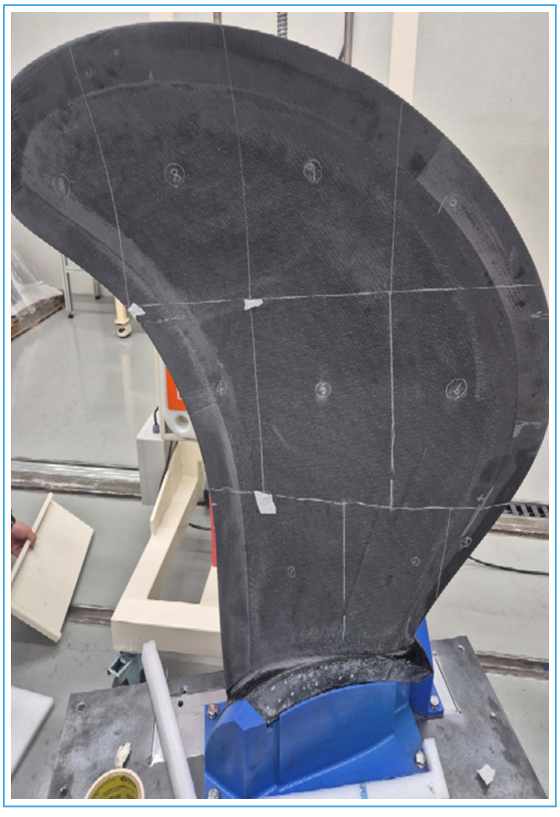


Figure 20. Preparation non-destructive inspection

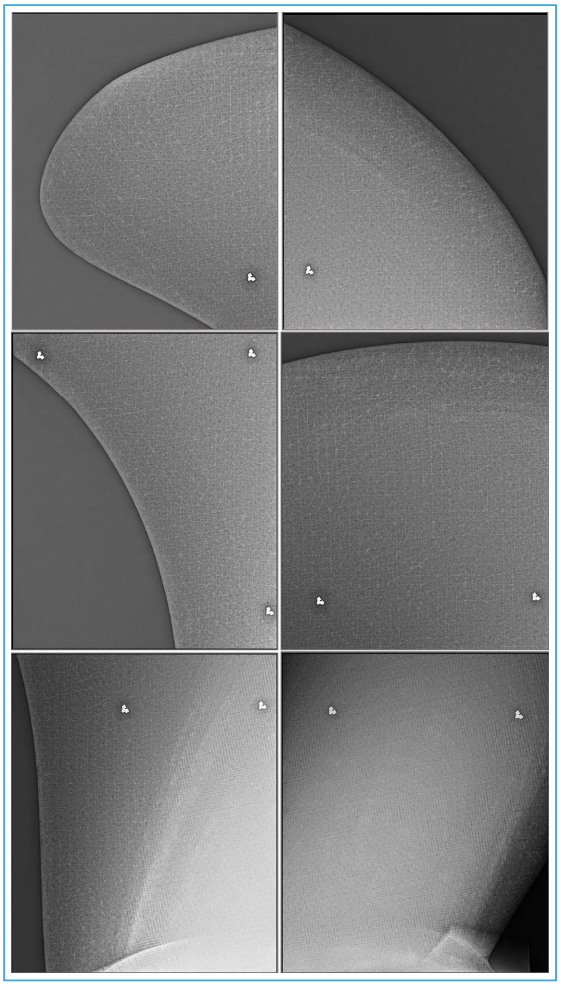


Figure 21. Non-destructive inspection results

4. 결 론

본 논문에서는 복합재 프로펠러 제작을 위하여 복합재 프로펠러 형상 및 유로 패스 적용에 따른 수지 함침에 대하여 상용 시뮬레이션 프로그램을 통하여 VARTM 공정 설계를 하였고, 실제 제작에 반영하여 시뮬레이션의 결과를 검증하였다.

복합재 프로펠러의 제작과 시뮬레이션은 프로토타입의 프로펠러와 전체 크기의 프로펠러 각각에 대해 수행하였다.

복합재 프로펠러 제작을 위한 수지 주입 시뮬레이션을 통해 VARTM 공정에서 수지 주입 모습을 모사

하여 시간에 따른 수지 흐름을 확인할 수 있었으며, 시뮬레이션과 동일한 조건으로 프로펠러를 제작하였을 때 동일한 위치에서 최종 함침 되는 것을 확인하였다. 또한, 제작된 복합재 프로펠러의 건전성 확인을 위해 프로펠러의 단면 절단과 비파괴검사를 통해 수지 함침 여부를 확인한 결과 프로펠러 내부까지 함침이 준수하게 된 것을 확인하였다.

본 논문에서 수행한 시뮬레이션은 VARTM 공정 개발에서 시행착오를 줄일 수 있으며, 이를 통해 개발 비용과 시간을 줄일 수 있을 것으로 보인다.

또한 실제 프로펠러 제작은 외부 열원이 부여된 조건에서 수지 주입 시간이 크게 달라짐을 확인하였으며, 수지 주입 시간은 온도 변화에 따른 수지 점도가 변함에 따라 영향을 받은 것으로 보인다. 추후에는 외부 열원을 고려한 시뮬레이션에 대한 연구가 필요할 것으로 판단한다.

사 사

이 연구는 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행됨(KRIT-CT-22-016).

참고문헌

1 Song, Q. N., Xu, N., Bao, Y. F., Jiang, Y. F., Gu, W., Zheng, Y. G., & Qiao, Y. X. (2017). Corrosion and cavitation erosion behaviors of two marine propeller materials in clean and sulfide-polluted 3.5% NaCl solutions. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 30*(8), 712-720. https://doi.org/10.1007/s40195-017-0602-7

2 Castro, F. S., Kogishi, A. M., Silva Junior, H. C., Dantas, J. L. D., Steffen, L. A., & Teixeira, D. (2023). Development of a marine composite propeller. *Proceedings of the 27th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2023)*. https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-0277

3 Gharghabi, P., Lee, J., Colmer, T., Mazzola, M. S., Lacy, T. E., & Kluss, J. (2018). *Investigating the composite/metal interface and its influence on the electrical resistance measurement*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.06246

4 Lee, Y.-S., Song, S.-A., Kim, W.-J., Kim, S.-S., & Jung, Y.-S. (2015). Fabrication and Characterization of the Carbon Fiber Composite Sheets. *Composites Research, 28*(4), 168-175. https://doi.org/10.7234/COMPOSRES.2015.28.4.168

5 Jung, I., Kim, J., Kim, E., Kim, C. D., Kim, N. R., Yang, C.-M., Yu, W.-R., Ahn, C.-H., Jeon, S.-Y., Cheon, J., & Na, W. (2024). Enhanced composite laminate fastening and delamination repair using hierarchical thermoplastic composite rivets. *Composites Part B: Engineering, 277*, 111382. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111382

6 Lee, H. (2017). *A study on the BEM-FEM based hydro-elastic analysis of composite marine propellers* [Doctoral dissertation, Seoul National University]. https://doi.org/10.23170/snu.000000140883.11032.0000966

7 Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2025). Numerical Study on the Dynamic Scaling Law of Composite Propellers for Naval Ships. *Journal of Defense Quality Society, 1*(1), 16-25. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.1.002

8 Nakashima Propeller Co., Ltd. (n.d.). *CFRP propeller*. https://www.nakashima.co.jp/eng/product/detail/16

9 Lee, S.-G., Nam, J.-H., Hyun, B.-S., Paik, B.-G., Lee, C.-S., Jang, H.-G., & Nho, I.-S. (2012). Enhanced Manufacturing and Performance Analysis of Flexible Composite Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 49*(6), 521-527. http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2012.49.6.521

10 Gunkler, A., & Archibald, C. M. (2011). Composite propeller construction. In *Proceedings of the 2011 ASEE North Central & Illinois-Indiana Section Conference*.

11 Paul, A., Schmidt, A., & Wolf, E. (2011). Acoustically optimized propeller made from composite materials. *ThyssenKrupp Techforum, 1*, 58-63.

12 Lee, H., Ko, J., Kang, S., & Jang, M. (2025). Optimal Design and Structural Analysis of Marine Propellers Subject to Expansion/Contraction in Sand Casting. *Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety, 31*(3), 400-409. https://doi.org/10.7837/kosomes.2025.

31.3.400

13 Lee, C.-S., & Lee, J.-H. (2010). Geometric modeling and tool path generation of model propellers with a single setup change. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50(1),* 253-263. https://doi.org/10.1007/s00170-009-2495-8

14 Park, J. W., Jung, C. W., Kwon, Y. S., & Kang, S. P. (2016). Development of Furan Mold Design and Machining System for Marine Propeller Casting. *Transactions of the KSME, A, 40*(1), 121-128. http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.1.121

15 Lee, H., Park, G., Kong, C., & Park, H. (2014). Design of Natural Fiber Composites Chemical Container Using Resin Flow Simulation of VARTML Process. *International Journal of Aerospace System Engineering, 1*(1), 21-28. https://doi.org/10.20910/IJASE.2014.1.1.021

16 Song, X. (2003). *Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM): Model development and verification* [Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University]. VTechWorks.

17 Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. Victor Dalmont.

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 104-112, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.009

무기체계의 이기종 COTS 보드 단종대체를 위한 시스템 통합 및 보드 단일화 방안의 효용성에 관한 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

A study on the effectiveness of system integration and board unification for replacing discontinued heterogeneous COTS boards in weapon systems

구본탁†, Bontak Gu
한화시스템, 전자광학체계3팀, 전문 연구원
Senior Engineer, Electro-Optics System Team 3, Hanwha Systems

Abstract

Recently, the use of commercial-off-the-shelf (COTS) boards based on an open-system architecture has increased owing to the Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages (DMSMS). COTS boards offer the advantage of being readily available without the requirement for separate designs or manufacturing processes, resulting in lower initial development costs and guaranteed quality and durability based on field experience. However, operations of the COTS boards are discontinued during the discontinuation cycle of each processor. Weapon systems designed with heterogeneous COTS boards frequently require replacement, which results in significant redevelopment and maintenance costs. Furthermore, advances in technology have led to successful models of COTS boards, offering significantly improved performance at relatively low prices. Therefore, system redesign strategies that consider the resources available from COTS boards are essential for replacing discontinued components. This study demonstrates the need for system integration and redesign by establishing a single-COTS board test environment using a shipboard Infrared Search and Track (IRST) system equipped with various COTS boards. The proposed configuration achieved equivalent or better performance than the existing configurations with a 40% reduction in cost. This demonstrates the importance of system integration and unification of COTS boards when designing replacements for discontinued boards.

keywords : DMSMS, COTS, system integration, hardware discontinuation replacement, weapon system.

† Corresponding Author : Bontak Gu
Tel : +82-54-460-8800, Fax : +82-54-460-8519, email : gubontak@hanwha.com
Hanwha systems, 39370, 264-60, Sanho-daero, Gumi-si, Gyeongsangbuk-Do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 27th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

최근 무기체계의 부품단종 문제로 인해 우리 군의 전투준비태세와 수명주기 비용에 심각한 악영향을 미침에 따라 상용 보드 및 부품 표준화 적용 방안이 부품단종 대응 방안으로 제안되고 있다[1]. 또한, 인공지능, 빅데이터, 블록체인과 같은 첨단 기술을 접목한 무기체계 개발이 활발하게 진행되면서 막대한 계산량을 실시간으로 처리하기 위한 개방형 시스템 아키텍처 기반의 COTS(Commercial Off-The-Shelf) 보드 활용도가 점차 높아지고 있다. COTS 보드는 별도의 설계나 제작 없이 즉시 사용 가능하므로 초기 개발 비용이 적고, 실전 경험을 통해 품질이나 내구성이 보장되어 있다는 이점이 있다. 하지만, 무기체계에서 흔히 사용하는 고성능 COTS 보드의 경우 Intel 계열의 Core i7, i9, Xeon CPU를 비롯하여 NVIDIA SoC, ARM Cortex-A 시리즈 등의 상용 프로세서들을 주로 사용하기 때문에 각 프로세서의 단종 주기에 따라 COTS 보드의 단종도 함께 발생하게 된다는 문제점이 있다. 특히 무기체계 개발 당시 하드웨어 요구성능에 따라 이기종 COTS 보드로 설계된 무기체계의 경우 COTS 보드의 각기 다른 단종 주기로 인해 빈번한 대체 개발이 발생하게 되어 개발 비용뿐만 아니라 지속적인 유지관리 비용 증가를 초래하게 된다. 한편, COTS 보드의 단종 주기 동안 과학기술 발전으로 후속 모델은 상당히 향상된 연산 능력과 확장된 인터페이스를 기존 동급 성능 모델 대비 낮은 가격으로 제공하고 있기 때문에 단종대체 시점에는 무기체계의 하드웨어 요구사항과 COTS 보드의 제공 자원을 고려한 시스템 재설계 방안이 반드시 고려되어야 한다. 무기체계의 부품단종에 관한 이전 연구들은 무기체계 특성을 고려한 부품단종 관리방안이나 단종부품 사전관리 대상 선정 프로세스를 제안하는 등 부품의 단종을 예측하고 적기에 대응하는 것이 주요 관심사이다[2-3]. 하지만 본 연구에서는 COTS 보드가 적용된 무기체계의 단종대체 개발에 있어 비용과 성능을 고려한 효과적인 COTS 보드 대체 설계 방안이 주요 관심사라는 점에 차별점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이기종 COTS 보드가 탑재된 함정용 IRST(Infra-Red Search and Track)로 구성된 시험 환경을 구성하여 시스템 통합 및 재설계를 통한 이기종 COTS 보드의 단일화 구성 방안을 제시하고 시험을 통해 효용성을 보인다[4].

2. 배 경

2.1. 개방형 시스템 아키텍처

무기체계의 최근 추세는 개방형 표준을 통해 전자장비를 표준화함으로써 상호 운용성, 확장성, 신뢰성을 높이고 시스템 비용은 절감하며, 유지관리 비용을 증가시키는 맞춤형 전자 장비 설계의 수를 최소화하는 것이다. 개방형 시스템 아키텍처는 시스템 간 상호 운용성, 이식성, 개방형 소프트웨어 표준을 조합하여 제공하는 시스템 설계 방식이며, 개방형 아키텍처 표준인 OpenVPX를 기반으로 무기체계의 센서 시스템에 적용되는 개방형 아키텍처 표준인 SOSA와 항공기 탑재 시스템에 적용되는 개방형 아키텍처 표준인 FACE, 지상무기체계에 적용되는 개방형 아키텍처 표준인 NGVA가 대표적이다[5].

2.2. Curtiss-Wright사의 COTS

개방형 시스템 아키텍처 기반의 COTS 보드는 하드웨어 인터페이스 표준을 준수하면서 크기와 용도에 따라 다양한 시스템 구조를 가진다. 국방, 항공우주, 산업용 시장에서 가장 널리 사용되고 있는 임베디드 컴퓨팅 보드를 생산하는 Curtiss-Wright사는 아키텍처 표준과 크기, 기능 등에 따라 다양한 제품군을 보유하고 있으며, Table 1은 6U OpenVPX 처리카드의 제품별 주요 사양을 나타낸다. 6U OpenVPX 처리카드는 SBC(Single Board Computer)와 DSP(Digital Signal Processing)로 분류할 수 있다. SBC의 경우 범용 프로세서를 기반으로 다양한 기능을 통합해야 하는 시스템 환경에 적합하도록 설계되었으며, DSP의 경우 고속 연산과

병렬처리를 통해 실시간 데이터 처리에 적합하게 설계되어 영상처리와 탐지추적 알고리즘 처리에 주로 활용되고 있다. Figure 1은 컴퓨터 성능을 수치로 나타낼 때 주로 사용되는 GFLOPS(초당 수행할 수 있는 부동 소수점 연산량) 값으로 단종 모델과 대체 모델의 성능을 비교한 그래프이다.

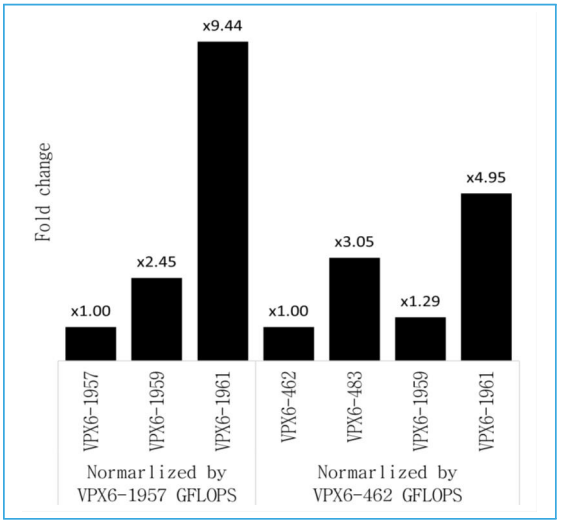


Figure 1. Normalized by GFLOPS of VPX6-1957 and VPX6-462

각 그래프는 단종 모델의 GFLOPS 값을 기준으로 대체 모델의 GFLOPS 값을 정규화하여 배수로 나타내었다. VPX6-1957의 후속 모델인 VPX6-1959은 이전보다 2.45배 향상된 성능을 보이지만 VPX6-1957의 단종으로 인한 지속적인 유지보수 비용 증가로 인해 Table 1에서 나타나듯이 VPX6-1959보다 오히려 낮은 비용을 보인다. 또한, VPX6-1959의 후속 모델인 VPX6-1961은 VPX6-1957 대비 무려 9.44배 향상된 성능을 보인다. 2023년에 출시된 VPX6-1961은 VPX6-462 대비 4.95배까지 향상된 처리능력을 약 38% 낮은 가격으로 제공함을 알 수 있다. 이와 같이 후속 모델의 상당한 성능 향상은 무기체계의 COTS 보드 단종대체 방안을 고려할 때 개발자에게 다양한 선택의 폭을 제공하며, 이전 모델의 유지보수 비용 증가와 더불어 시스템 재설계를 비롯한 종합적인 단종 대체 방안 마련에 대한 필요성을 보인다.

2.3. 함정용 IRST의 신호처리장치

무기체계는 특성상 개발부터 양산까지 최소 5년에서 10년 이상까지 소요되기 때문에 전력화 시점에

Table 1. Specification of 6U VPX Processor Cards (Curtiss-Wright Corp, USA)

Category	SBC(Single Board Computer)			DSP(Digital Signal Processing)	
	VPX6-1957	VPX6-1959	VPX6-1961	VPX6-462	VPX6-483
Image					
Release	2012	2015	2023	2011	2016
EOL	Discontinued (2018)	Discontinued (2022)	TBC	Discontinued (2019)	Discontinued (2025)
CPU	Intel i7-3612QE	Intel i7-5850EQ	Intel Xeon W-11865MRE	*2x* Intel i7-3612QE	*2x* Intel Xeon-D
Core	4-core	4-core	8-core	*2x* 4-core	*2x* 12-core
GFLOPS	141	346	1331	269	820
RAM	8GB DDR3	16GB DDR3	32GB DDR4	*2x* 4GB DDR3	*2x* 32GB DDR4
FLASH	NAND 16GB	NAND 32GB	NAND 32GB	*2x* NAND 8GB	*2x* NAND 32GB
Cost	~$24000 (2022.10)	~$19400 (2022.01)	~$21000 (2024.06)	~$34000 (2019.09)	~$52000 (2024.06)

서 COTS 보드 단종은 불가피하게 발생하게 된다. Figure 2의 함정용 IRST는 함정방어능력 증대를 위하여 저고도 대함 미사일 등 다수의 위협표적에 대해 전방위, 동시탐지 및 추적기능을 수행하기 위해 개발된 감시정찰 무기체계이다.

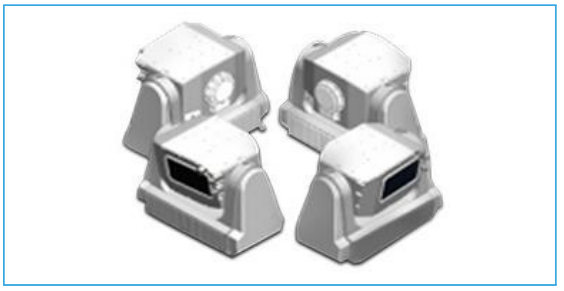


Figure 2. IRST for naval platform

함정용 IRST는 전방위 적외선 영상 촬영을 위한 4개의 센서부와 영상처리, 표적 탐지추적, 시스템제어를 위한 신호처리장치로 구성되어 있다. 신호처리장치 CSCI[1]는 시스템 연동 및 제어, 4개의 센서부에서 수신된 적외선 영상 데이터 처리, 표적 탐지 및 추적 등의 작업을 수행하기 위해 Figure 3과 같이 영상처리CSC[2], 탐지처리CSC, 추적처리CSC, 시스템제어CSC로 구성되어 있다.

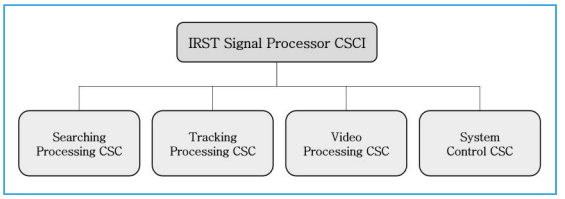


Figure 3. SW configuration item of the IRST signal processor

모든 CSC는 고속 이더넷 통신 방식을 사용하며 이더넷 스위치를 거쳐 데이터를 송수신한다. 신호처리장치는 각 CSC의 요구 인터페이스와 작업부하를 고려하여 Curtiss-wright사의 VPX6-1957(SBC)과 VPX6-462(DSP)를 사용한 이기종 COTS 보드 구성으로 Figure 4와 같이 설계되었다. 4개의 센서부에서 전송되는 실시간 고화질 영상 데이터를 각각 수신받아 처리하기 위해 VPX6-462(DSP) 4개에서 탐지처리CSC가 개별적으로 동작한다. 각 탐지처리CSC에서 처리된 데이터는 영상처리CSC와 추적처리CSC로 전달되는데 VPX6-462(DSP)는 Table 1와 같이 CPU, RAM, Flash, NIC 등이 2개씩 구성되어있는 독립적인 2개의 시스템 구조를 가지기 때문에 영상처리CSC와 추적처리CSCU는 하나의 VPX6-462(DSP)의 각 시스템에 탑재되어 독립적으

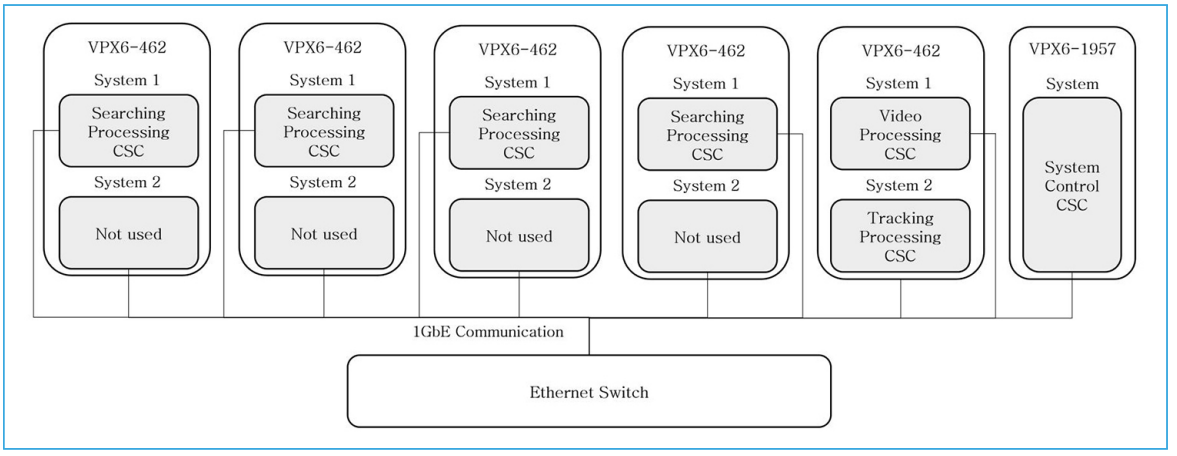


Figure 4. The legacy system structure of IRST

1) CSCI : 소프트웨어 형상항목(Computer Software Configuration Item)
2) CSC : 소프트웨어 구성품(Computer Software Component)

로 동작하게 된다. 따라서, VPX6-1957과 같은 단일 시스템 구조의 COTS보드로 대체하기 위해서는 별도의 시스템에서 독립적으로 동작하는 영상처리CSC와 추적처리CSC를 단일 시스템에서 동작하도록 시스템 통합 방안이 반드시 고려되어야 한다. 또한, 시스템제어 및 외부 연동을 수행하는 시스템제어CSC는 높은 확장성을 가진 VPX6-1957(SBC)에서 동작하도록 설계되었다.

3. 본 론

3.1. 시험 환경

본 절에서는 기존 이기종 COTS 보드의 단종대체를 위한 시스템 통합 및 COTS 보드 단일화 구성 방안을 제안하고 제안된 구성의 성능 분석을 위해 Figure 5와 같이 시험 환경을 구성하였다. 시험 환경은 함정용 IRST의 신호처리장치를 비롯하여 녹화영상 입력용 원시영상저장장치, 영상 및 표적 전시용 모니터, 장비제어용 운용콘솔로 구성된다. Figure 4와 같이 함정용 IRST의 신호처리장치는 VPX6-462(DSP)와 VPX6-1957(SBC)를 사용한 구성으로 최초 설계되었으나 본 시험 환경에서는 VPX6-462(DSP)와 VPX6-1957(SBC)의 단종대체 방안으로 기존보다 낮은 비용에 높은 처리 성능을 제공하는 VPX6-1959(SBC) 1종만을 사용한 단일 COTS 보드 환경으로 구현하였다. Figure 5의 원시영상저장장치에서 출력된 적외선 영상 3채널은 광케이블을 통해 신호처리장치의 A1, A3, A5 슬롯에 장착된 VPX6-1959(SBC)로 1채널씩 입력된다.

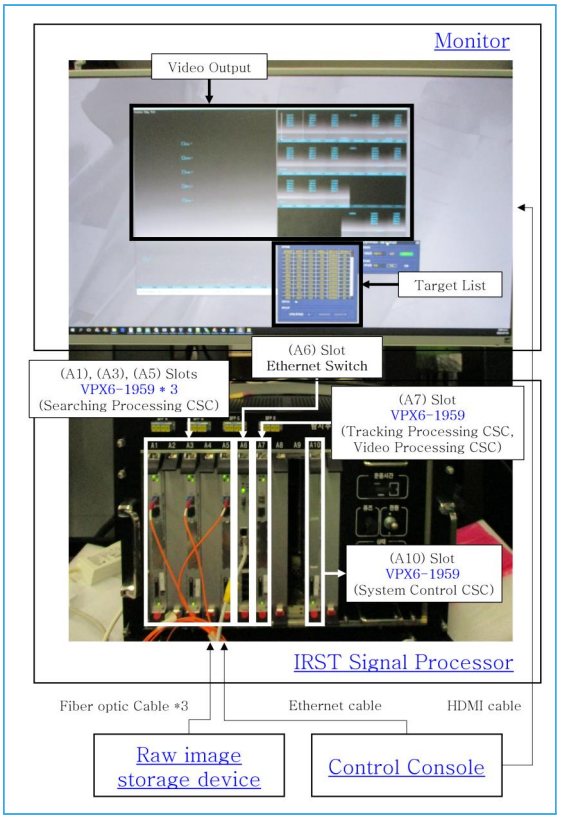


Figure 5. Test environment

입력된 영상은 탐지처리CSC의 처리를 거쳐 A7 슬롯에 장착된 VPX6-1959(SBC)로 전송되고 영상처리CSC와 추적처리CSC에 의해 최종 출력영상과 표적목록을 생성한 뒤 운용콘솔로 전송하여 모니터에 전시되게 된다. 탐지처리CSC는 적외선 영상 4채널 입력을 각각 처리하기 위해 4개의 COTS 보드로 구성되어야 하지만, 본 시험 환경에서 사용되는 신호처리장치의 경우 VPX6-1959(SBC)를 장착할 수 있는 6U 슬롯을 5개(A1·A3·A5·A7·A10)만 보유하고 있기 때문에 탐지처리CSC 동작을 위한 VPX6-1959(SBC)는 3개(A1·A3·A5 슬롯)만을 사용하여 3채널의 적외선 영상을 처리한다. 또한, A7 슬롯에 장착된 VPX6-1959(SBC)는 영상처리CSC와 추적처리CSC를 처리하는데 성능 비교를 위해 기존 4채널 영상 입력과 동일한 처리부하를 가지도록 설계하였다. A10 슬롯의 VPX6-1959(SBC)는 시스템제어CSC를 처리하며, 이외의 구성은 기존과 동일하다.

3.2. 시스템 통합 설계

3.1 절과 같이 VPX6-1959(SBC) 1종만을 사용하는 단일 시스템 환경을 구성하기 위해서는 기존 VPX6-462(DSP)의 두 시스템에서 독립적으로 동작하던 영상처리CSC와 추적처리CSC를 단일 시스템

으로 구성된 VPX6-1959(SBC)에서 동작하도록 Figure 6과 같이 설계되어야 한다.

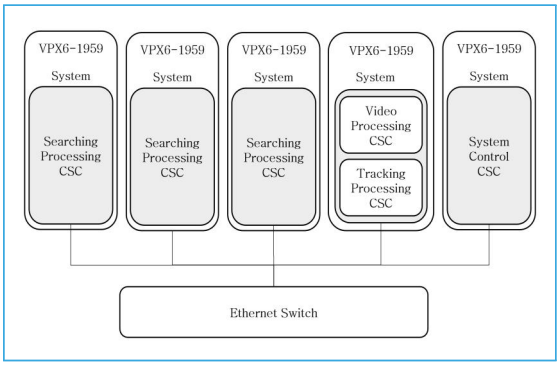


Figure 6. Proposed system structure of IRST in the paper

각 CSC는 리눅스 시스템 기반의 COTS 보드에서 기능별로 구분된 프로세스들의 구성으로 데이터를 처리하게 된다. 영상처리CSC는 이더넷 통신을 위한 이더넷 수신(ethernet receive) 프로세스와 이더넷 송신(ethernet send) 프로세스, 영상처리(video) 프로세스로 구성되어 있으며, 추적처리CSC는 이더넷 수신 프로세스, 이더넷 송신 프로세스, 표적 생성·추적·관리를 위한 추적처리(track) 프로세스 구성되어 있다. 이들을 하나의 시스템에서 함께 동작하기 위해서는 Figure 7과 같이 두 가지 방안을 고려할 수 있다;

첫째, 포트 포워딩을 사용하여 기존 프로세스 구조를 유지하고 동일 시스템 내 네트워크 포트로 CSC를 구분하여 영상처리CSC와 추적처리CSC 사이를 포함한 모든 CSC가 이더넷 통신 방식을 유지하는 방안(Figure 7-(a)).

둘째, 동일 시스템에는 하나의 이더넷 송신 프로세스와 하나의 이더넷 수신 프로세스만을 가지고 이를 함께 사용하여 외부 CSC와는 이더넷 통신 방식을 유지하고 동일 시스템 내 영상처리 프로세스와 추적처리 프로세스는 프로세스 간 통신 방식인 IPC(Inter-Process Communication)를 사용하는 방안(Figure 7-(b)).

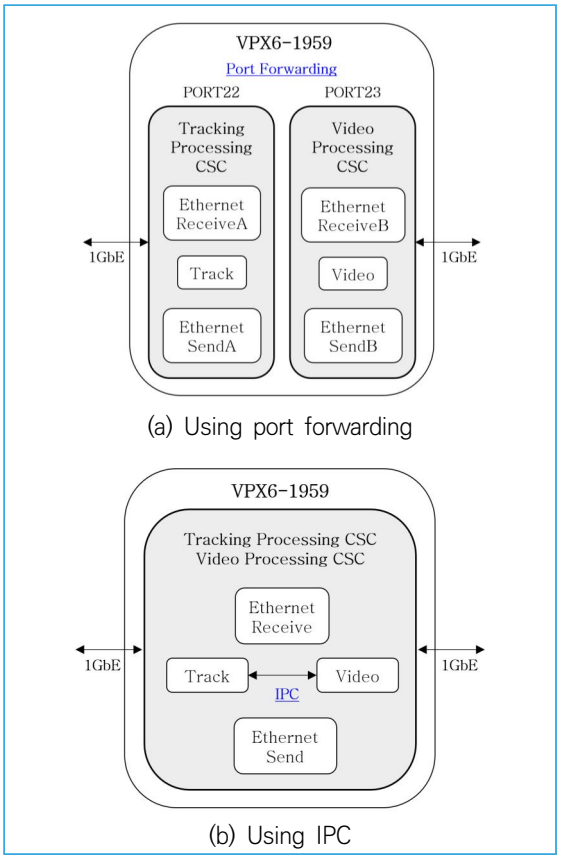


Figure 7. Communication method between CSCs in the same system

공유 메모리를 사용하여 프로세스 간 통신하는 방식인 IPC는 네트워크 통신 방식인 포트 포워딩에 비해 통신 속도가 빠르고 안정적이기 때문에 본 연구에서는 IPC 방식을 사용하여 Figure 7의 (b)와 같이 영상처리CSC와 추적처리CSC를 하나의 시스템에서 동작하도록 구현하였다[6].

3.3. 성능시험 방안

본 절에서는 3.2절과 같이 시스템 통합을 통해 단일 COTS 보드로 구성한 함정용 IRST의 단종 대체 설계 모델이 기존 대비 동등 이상의 성능을 제공하는지 비교 분석을 위한 방안으로 갱신율과 응답 속도 측정 방안을 사용한다. 본 연구에서는 네트워크 패킷 분석을 통한 성능 비교를 위해 네트워크 패킷

캡처 및 분석을 위해 널리 사용되는 프로그램인 Wireshark(v4.4.8, Wireshark Foundation, US)를 사용하였다[7].

3.3.1. 영상 및 표적 갱신율

함정용 IRST는 4개의 센서부에서 방위각 90도 범위의 적외선 영상을 각자 생성한 후 특정 주기마다 신호처리장치로 전송한다. 신호처리장치는 수신된 영상을 바탕으로 표적을 탐지 및 추적하여 표적목록을 생성하고, 4개의 90도 영상을 360도 파노라마 영상으로 합성한 후 밝기 및 대조비 처리를 거쳐 최종 영상과 표적목록을 운용콘솔로 전송하게 된다. 따라서 신호처리장치는 표적목록 및 최종 출력영상을 요구되는 주기마다 일정하게 전송하기 위한 처리요구성능을 만족하여야 하며, 갱신율은 장비의 성능을 나타내는 주요 지표로 사용된다. 본 절에서는 네트워크 패킷 분석을 통한 갱신율 측정을 위해 Figure 8과 같이 장비 간 네트워크 패킷이 송수신되는 주요 지점(A·B·C·D) 중 원시영상저장장치에서 입력된 영상이 영상처리CSC를 거쳐 최종 출력되는 C지점에서 패킷을 수집하여 분석하였고, 이를 통해 제안된 단일 COTS보드 구성이 기존 이기종 COTS 보드 구성 대비 동등 이상의 갱신율을 제공하는지 확인한다.

3.3.2. 응답 속도

운용자가 운용콘솔에서 영상 제어(영상 중심 위치 이동) 명령을 수행했을 때 영상처리CSC에 의해 중심 위치가 이동된 영상을 운용콘솔에서 수신하는데 걸리는 전체 소요 시간을 측정하여 응답 속도를 분석하였다. Figure 8의 A-B 구간은 운영자가 운용콘솔에서 영상 중심 위치 이동 기능을 수행하여 함정용 IRST 신호처리장치로 영상제어 명령을 전송하는 시점(A)부터 신호처리장치에서 명령을 수신(B)하는데 걸리는 네트워크 지연시간을 의미하며, B-C 구간은 신호처리장치의 시스템제어CSC에서 수신된 명령을 영상처리CSC로 전달하고 처리된 영상을 운용콘솔로 전송하는 시점(C)까지의 처리시간을 의미한다. 또한, C-D 구간은 중심 위치가 이동된 영상이 신호처리장치에서 전송(C)되어 운용콘솔에서 수신되는 지점(D)까지의 네트워크 지연시간을 나타낸다. 본 시험에서는 A 지점에서의 네트워크 패킷 전송 시간과 D 지점에서의 네트워크 패킷 수신 시간을 측정하여 운용콘솔에서 명령이 전송되는 시점부터 처리된 영상을 운용콘솔에서 수신하는 시점까지의 전체 지연시간을 측정하였다.

3.4. 시험 결과

3.1절과 같이 함정용 IRST에서 출력하는 최종 영상과 표적 갱신율을 분석하기 위해 Wireshark 프로그램을 사용하여 Figure 8의 C지점에서 240개 네트워크 패킷을 수집 및 분석하였다. 시험 결과에 따르면 본 연구에서 제안한 단일 COTS 보드 구성에서

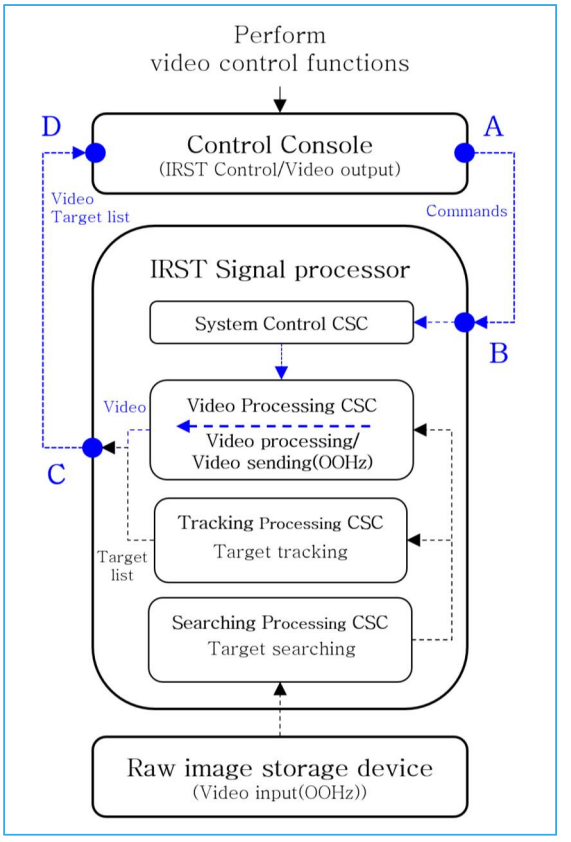


Figure 8. Latency measurement environment for performance comparison

의 갱신율이 품질보증 요구 기준과 약 0.1%의 오차만을 보였으며, 이는 0.1ms 이하의 오차 수준으로 요구 기준을 충분히 만족한다.

또한, 기존 COTS 보드 구성에서는 약 0.25% 오차가 나타났기 때문에 제안된 단일 COTS 보드 구성은 기존보다 동등 이상의 성능을 제공함을 알 수 있다. 특히, 네트워크 패킷에 따른 수신 주기의 편차가 기존 COTS 보드 구성에서는 최대 7.48%까지 나타났지만, 본 연구에서 제안한 단일 COTS 보드 구성에서는 최대 2.9%로 줄어들면서 상당히 일정한 수신 주기를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 기존 i7-3612QE 프로세서 대비 VPX6-1959 i7-5850EQ 프로세서는 66% 증가된 L3캐시 용량, 메모리 대역폭 향상, 공정 미세화 등을 통해 실시간 데이터 처리에 있어 안정적인 타이밍 성능을 제공하기 때문이다. 또한, 3.3.2절에서 운용자가 운용콘솔을 통해 영상 중심 위치 이동 명령을 함정용 IRST로 전송했을 때 해당 명령을 통해 처리된 영상이 2주기(2프레임) 이내에 수신되는지 분석하기 위해 A-D 구간의 지연시간을 20회 측정하였다. 시험 결과에 따르면 A-D구간의 지연시간은 갱신 주기의 최소 -70.9%에서 최대 21.7%까지 측정되었다. 이처럼 응답 속도가 갱신 주기보다 지연되는 이유는 시스템제어CSC에서 전송한 영상제어 명령이 영상처리CSC으로 수신되는 시점에 따라 다음 프레임에 처리될 수 있기 때문이다. 즉, 영상처리CSC에서 처리 명령을 수신하는 시점에 이미 해당 프레임에 관련 처리 프로세스가 끝났을 경우, 해당 주기에는 명령이 반영되지 않는다. 이를 Figure 9과 같이 영상처리(Video) 프로세스의 처리 순서와 명령어 수신 시점으로 나타낼 수 있다.

영상처리(Video) 프로세스는 영상 중심 위치 이동 작업을 B시점에서 수행하기 때문에 B시점 이전에 시스템제어CSC에서 영상 중심 위치 이동 명령을 수신할 경우, 해당 주기 프레임에 명령이 반영되어 처리되지만, 이미 B시점 이후의 처리 단계를 수행중인 상태에서 명령을 수신하게 되면 다음 주기 프레임에 해당 명령이 반영되어 전송하게 된다. 이 경우 A-D구간의 지연시간이 갱신 주기를 초과할 수 있다. 본 시험 결과인 갱신 주기의 최대 21.7%와 최소 -70.9% 지연시간을 통해 영상 중심 위치 이동 명령이 프로세스에서 처리되어 반영되는 시점을 유추할 수 있으며, 최대 지연시간과 최소 지연시간의 차가 갱신 주기 이내를 보이기 때문에 응답 속도에 있어 충분한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 이처럼 본 절의 시험결과를 통해 시스템 통합 및 단일 COTS 보드 구성으로 구현한 신호처리장치는 기존 이기종 COTS 보드 구성 대비 동등 이상의 성능을 제공할 뿐만 아니라 장비의 품질요구기준을 충분히 만족함을 알 수 있다.

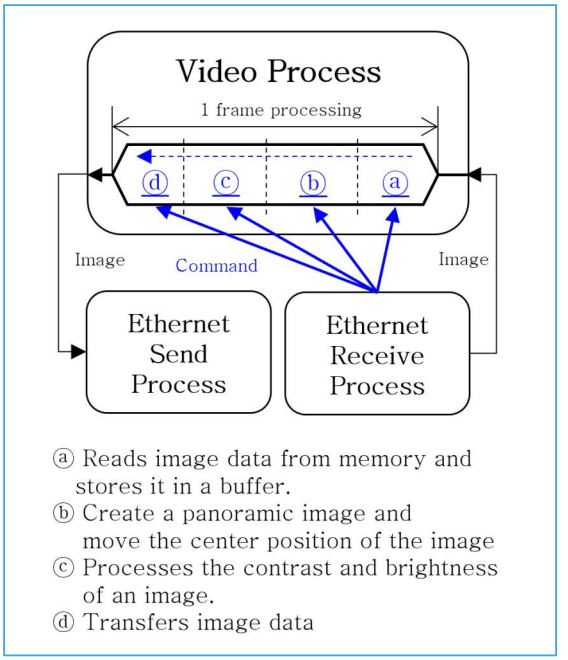


Figure 9. Command receiving point in video process

3.5. 비용 분석

본 절에서는 본 연구에서 구성한 단일 COTS 보드 구성과 기존 이기종 COTS 보드 구성을 비용 측면에서 비교 분석하였다. Table 1의 각 보드 비용을 기준으로 계산했을 때 본 연구에서 제안한 구성은 Table 2와 같이 기존 대비 40% 낮은 비용으로 구성될 수 있다. 이는 기존보다 상당히 낮은 비용으로

3.4절의 시험 결과와 같이 동등 이상의 성능을 제공할 수 있다는 점에서 상당한 의미가 있다.

Table 2. Comparison of Total Costs by Board Configuration Based on the Costs in Table 1

Category	Total cost of 6 COTS boards	
Previous Configuration	$194,000	
Proposed Configuration	$116,400	**40%↓**

또한, Table 2는 함정용 IRST 신호처리장치에 탑재되는 보드 중 본 연구에서 대상으로 하는 6개의 COTS 보드 비용만을 합산하여 나타낸 것이기 때문에 이기종 COTS 보드로 인해 빈번하게 발생하는 단종 재개발 비용과 유지관리 비용, 후속 군수 지원 등 추가 부수비용을 함께 고려했을 경우 COTS 보드 단일화를 통해 얻을 수 있는 비용 절감 효과는 상당하다.

4. 결 론

최근 급격한 과학기술 발전으로 COTS 보드는 기존 대비 낮은 가격에 상당한 성능 향상이 이뤄지고 있으며, 이는 COTS 보드의 단종 대체 설계 시 개발자에게 대체 보드 선택에 있어 다양한 선택의 폭을 제공하고 있다. 본 연구에서는 COTS 보드 단종 대체를 위한 보드 단일화 및 시스템 통합을 고려한 종합적인 재설계 방안의 필요성을 시험으로 보였다. 3.1절과 같이 이기종 COTS 보드로 설계된 함정용 IRST를 활용한 시험 환경을 구성하여 3.2절과 같이 COTS 보드 단일화 및 시스템 통합을 통해 구현한 시스템 재설계 방안이 기존 대비 동등 이상의 성능을 제공할 뿐만 아니라 40% 이상의 비용 절감할 수 있음을 3.3절과 3.4절에서 시험을 통해 각각 보였다. 따라서, 최근 무기체계에 널리 적용되고 있는 COTS 보드의 단종 대체 설계에 있어 시스템 통합 및 COTS 보드 단일화 방안을 고려한 종합적인 시스템 재설계 방안은 우리 군의 전투준비태세와 수명주기 비용 감소를 위해 반드시 고려되어야 한다.

참고문헌

1 Jung, H. W., & Shim, B. H. (2020). DMSMS Management Survey and Analysis Method. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 21*(5), 257-265. https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.5.257

2 Park, K.-D., & Rhee, J.-M. (2013). A Study on DMSMS Management for Weapon systems. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 14*(11), 5866-5871. https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.11.5866

3 김두정, 김진만, 최한웅, & 강문식. (2023). 무기체계의 부품 단종 대응을 위한 사전관리 대상 선정 프로세스 및 위험도 평가의 개선. 한국산학기술학회 논문지, 24(11), 109-115.

4 김연수, 이주형, & 홍석민. (2014, 2월). 함정에서 360°전방위 영상 감시가 가능한 신개념 적외선 탐색 및 추적(IRST) 기술. *국방과 기술, 420*, 88-96.

5 Cooper, R., & Littlefield, M. (2009, September). *Open VPX: Architectures for high-performance embedded computing* [Conference session]. 13th Annual Workshop on High Performance Embedded Computing (HPEC 2009), MIT Lincoln Laboratory.

6 Dutta, P. (2025). *Towards fast interprocess communication* [Undergraduate honors thesis, University of Texas at Austin]. Texas ScholarWorks. https://doi.org/10.26153/tsw/60587

7 Nath, A. (2015). *Packet Analysis with Wireshark*. Packt Publishing.

위성 간 자유공간광통신을 위한 연속 스파이럴 스캔 PAT의 평균 획득 시간 해석 및 설계 지침

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Analytical Investigation of Mean Acquisition Time for Continuous Spiral Scan PAT in Inter-Satellite Free-Space Optical Communication and Design Guidelines

오동하, Dongha Oh
충북대학교, 반도체공학부, 석사과정
Master Student, School of Semiconductor Engineering, Chungbuk National University

노정훈†, Junghoon Noh
충북대학교, 반도체공학부, 교수
Professor, School of Semiconductor Engineering, Chungbuk National University

Abstract

Rapid link acquisition is a critical requirement in free-space optical (FSO) communication systems to minimize connection losses and ensure efficient operation. This study presents an analytical investigation of the mean acquisition time in a pointing, acquisition, and tracking (PAT) system employing a continuous spiral scan. By modeling the initial pointing error as a Rayleigh-distributed random variable, we derive closed-form expressions for the single-scan and repeat-until-success acquisition times. The analysis reveals that when repeated attempts are allowed without limit, the mean acquisition time converges to a constant value, independent of the search radius. This invariance property implies that precise optimization of the search radius is unnecessary provided that the design constraints are satisfied. To address practical scenarios, we further introduce constraints on the maximum number of repetitions and the per-scan time limit and derive feasible bounds. Monte Carlo simulations are conducted to validate the analytical results, confirming excellent agreement across different settings. The findings demonstrate that system designers can freely select the search radius within a feasible range without compromising the average performance, thereby simplifying the implementation while guaranteeing reliable link acquisition. This study provides practical design guidelines for future inter-satellite FSO communication systems.

keywords : free-space optical communication, pointing acquisition and tracking, spiral scan, mean acquisition time, inter-satellite link

† Corresponding Author : Junghoon Noh
Tel : +82-54-478-7502, email : jh.noh@cbnu.ac.kr
Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 2nd. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

최근 저궤도 위성을 중심으로 한 대규모 위성군의 확산과 더불어, 위성 간 광학 링크의 상용화가 빠르게 진전되고 있다. 대표적으로 SpaceX의 Starlink 체계는 수천 기의 위성에 레이저 링크를 적용하여 궤도면 내·간 통신을 실험함으로써 지상 게이트웨이에 대한 의존도를 줄이고, 전 지구적 커버리지와 낮은 지연을 동시에 달성하고 있다[1-2]. 최근에는 이러한 레이저 링크 기술을 외부 고객에게 제공하겠다고 발표하면서, 광학 통신 기술의 산업적·상업적 확산이 본격화되고 있음을 보여주었다.

군사 영역에서도 광학 위성 간 링크는 차세대 작전 네트워크의 핵심 기술로 부상하고 있다. 미국 국방성 산하 SDA(Space Development Agency)가 주도하는 PWSA(Proliferated Warfighter Space Architecture)는 저궤도에 다수의 소형 위성을 배치하여 단일 정지궤도 위성을 대신하여 보다 탄력적으로 생존성 높은 군사위성망을 구축하는 것을 목표로 한다. PWSA는 특히 전장 지휘, 통제와 더불어 탄도미사일 및 극초음속 위협에 대한 조기 경보와 추적을 지원하기 위해 설계되었다[3]. 이러한 임무 수행에는 위성 간 대량의 정보를 신속하게 교환하는 능력이 필수적이며, 이에 따라 광학 위성 간 링크가 핵심 기술로 자리매김하고 있다. 국제적으로 널리 활용되는 CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems) 광통신표준과 더불어, SDA는 군사적 목적의 위성군에서 상호운용성을 보장하기 위해 OCT(Optical Communications Terminal) 표준을 제정하였다[4-5]. 최신 버전의 OCT 표준은 물리계층 인터페이스뿐만 아니라 PAT(Pointing Acquisiton and Tracking) 절차와 탐색 스캔 알고리즘까지 포함하여 상세히 규정하고 있다. 이와 함께 DARPA의 Blackjack 프로그램은 Mandrake-2 위성을 통해 OISL 장비의 궤도상 성능을 검증하였고, NASA의 TBIRD 미션은 6U CubeSat 기반에서 200Gb/s급 레이저 하향 링크를 시연하여[6], 광학 링크 기술이 이미 상용·군사 영역 모두에서 실질적인 운용 단계에 진입하였음을 보여주었다.

이러한 맥락에서 자유공간광통신(Free Space Optical, FSO) 시스템에서의 PAT 기술은 두 단말 간 레이저 빔을 정확히 정렬하고 링크를 신속히 형성하기 위한 핵심 요소로 자리 잡고 있다[7-8]. 특히 위성 간 링크의 경우 통신 빔 발산 각이 매우 좁고 거리(수백~수천 km)가 멀기 때문에 초기 포인팅 오차를 정밀하게 보정해야 하며, 제한된 가용 시간 내에 획득 시간을 최소화하는 것이 시스템 성능을 좌우한다. PAT 성능을 개선하기 위해 다양한 공간 탐색 방식이 제안되어 왔으며, 그중에서도 연속 스파이럴 스캔은 구현의 단순성과 높은 공간 커버리지 효율 덕분에 가장 널리 활용되는 방법으로 알려져 있다[9-10]. 스파이럴 패턴은 송신기가 불확실성 영역을 나선 형태로 훑으며 탐색하는 방식으로, 레이저 빔을 연속적으로 회전시키면서 바깥쪽으로 이동해 나간다. 이때 빔 스팟의 발산 각과 중첩률에 따라 스파이럴 스캔 경로의 단계 간격이 결정되며, 적절한 값으로 설정하면 공간 누락 없이 효율적인 탐색이 가능하다.

이러한 스파이럴 스캔 방식은 기본적으로 높은 효율성을 갖지만, 실제 운용에서는 탐색 절차를 어떻게 최적화할 것인지가 중요한 과제로 남는다. 특히 불확실성 영역(Field-Of-Uncertainty, FOU)의 크기 설정은 획득 확률과 소요 시간의 균형을 결정하는 핵심 요소이다. FSO 링크의 송신기 불확실성 영역은 목표 단말(수신기)이 존재할 것으로 예상되는 각도 범위를 의미하며, 여기서는 θ_U로 표기한다. 설계자는 일반적으로 FOU 크기 (θ_U)를 얼마나 크게 설정할지 결정해야 하는데, θ_U가 크면 한 번의 스캔으로 높은 획득 확률을 얻을 수 있으나 스캔에 소요되는 시간이 길어지고, θ_U 가 작으면 스캔 시간을 짧아지나 여러 번 반복해야 할 수 있다. 전통적으로는 “한 번의 스캔에서 99% 이상 획득”을 목표로 3σ 수준의 θ_U를 선택하는 경우가 많았다. 예를 들어 Rayleigh 분포에서 $\theta_U = 3\sigma$이면 $P_{acq} \approx 0.98$로 높으므로 단일 스캔으로도 높은 확률로 링크를 획득할 수 있기 때문이다.

그러나 반복 스캔이 가능하다면 반드시 θ_U를 크게 설정할 필요성에는 의문이 제기된다. 최근 연구에서는 포인팅 오차를 고정된 것으로 두고, 빔 획득이 성공할 때까지 다중 스캔을 수행하는 경우의 평균 획득 시간을 해석적으로 최적화한 결과, $\theta_U/\sigma \approx 1.3$에서 최솟값을 갖는다고 보고하였다[9]. 이는 전통적인 3σ기준보다 훨씬 작은 FOU PAT 시스템에서 평균 획득 시간을 이론적으로 분석하여, θ_U값에 상관없이 일정함을 증명한다. 그리고 제한된 스캔 반복 횟수, 단일 스캔 최대 허용시간의 설계 제약 조건에 따라 θ_U의 적절한 범위를 도출하는 설계 기준을 제안한다. 제안하는 접근법은 시간 최적화를 위한 미세한 θ_U의 조정보다 설계 제약을 만족하는 범위 내에서 임의의 θ_U를 선택해도 평균 성능이 동일함을 활용하여, 시스템 설계를 단순화하고도 성능을 보장할 수 있음을 보이는 것이다.

2. 시스템 모델

본 연구의 시스템 모델은 한 쌍의 통신 위성 간 광링크 획득 시나리오를 가정한다. 한 위성(송신기)은 초기 포인팅 불확실성 영역 내에서 탐색용 광비콘 신호를 발사하고, 다른 위성(수신기)은 넓은 수신 시야각(FOV)으로 이를 검출한다(stare/scan 방식). 송신기는 연속 스파이럴 스캔 방식으로 불확실성 영역(θ_U)전체를 훑으며 빔을 송신하고, 수신기는 신호 검출 즉시 응답 신호를 되돌려 보낸다. 송신기는 응답 신호를 수신하면 스캔을 중지하고 추적 모드로 전환한다. 스캔 중 획득은 송신기의 발사 레이저 빔이 수신기 방향과 충분히 정렬되어 수신기 탐지기에 신호가 포착되는 순간으로 정의된다.

연속 스파이럴 스캔의 궤적은 극좌표 (r,ϕ)에서 다음과 같이 기술할 수 있다. 스파이럴 궤적은 식(1)과 같이 정의되며, 그 예시는 Figure 1에 나타내었다. 그림에서는 불확실성 영역 θ_U내에서 빔이 나선형 경로를 따라 L_θ 간격으로 균등하게 배치되는 탐색 지점을 확인할 수 있다.

$$r(\phi) = \frac{L_\theta}{2\pi} \tag{1}$$

여기서 ϕ는 중심에서 회전한 각도이고 L_θ는 2π 라디안(즉, 한 바퀴) 회전할 때마다 반경이 증가하는 크기(스텝 길이)를 의미한다. 따라서 송신 빔은 ϕ = 0에서 시작하여 각도가 증가할수록 점차 바깥쪽으로 이동하며 나선을 그리게 된다. ϕ가 $2\pi, 4\pi, \ldots$일 때마다 빔은 한 바퀴씩 회전하면서 탐색 반경이 L_θ씩 확장되는 구조이다. 한편, 송신기의 불확실성 영역(Field-of-Uncertainty, FOU)은 초기 포인팅 오차의 최대 반경 θ_U로 정의된다. 스파이럴 스캔은 $r = \theta_U$에 도달할 때까지 지속되며, 이는 ϕ가 $\Phi_U = 2\pi\theta_U/L_\theta$에 도달할 때와 같다. 즉 $\phi = \Phi_U$에서 스파이럴 궤적은 반경 θ_U의 원을 감싸게 되며, 이 시점에서 탐색이 종료된다.

위 스캔 모델에서, 송신기가 빔을 일정 각속도로 회전시키고 있다고 가정하면 방사형으로 바깥쪽 이동하는 속도도 일정하게 유지된다. 본 연구에서는 획득 시간 산정을 단순화하기 위해, 단일 스캔 종료 후 빔을 초기 위치로 복귀시키는 리셋 시간과 구동기(gimbal)의 가감속 및 응답 지연은 전체 획득 시간

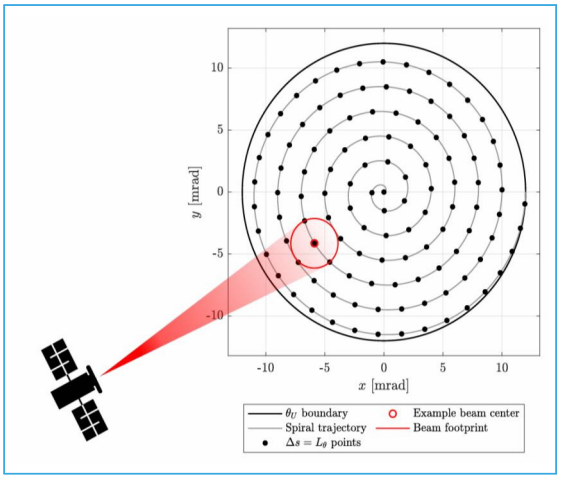


Figure 1. Example of a continuous spiral scan trajectory

에 비해 충분히 작아 무시할 수 있다고 가정한다. 이에 따라 스캔에 소요되는 시간은 빔이 이동한 경로 길이와 검출을 위해 각 지점에서 요구되는 유효 체류 시간에 의해 결정된다. 일반적으로 체류 시간(dwelling time) T_{dwell}은 수신기의 응답 지연 및 신호 전파 시간을 포함한다. 예를 들어 수신기 검출 회로의 응답 시간 T_R과 송수신 간 광신호 왕복 시간 $2R/c$ (R: 거리, c: 광속)을 합하여 식(2)와 같이 모델링할 수 있다.

$$T_{dwell} = T_R + \frac{2R}{c} \tag{2}$$

예를 들어 링크 거리가 $R = 1000\text{km}$ 수준인 위성 간 링크에서는 $2R/c \approx 6.7\text{ms}$이며, 여기에 검출기 응답 지연(몇ms 수준)을 더해 T_{dwell}은 수십ms 정도로 볼 수 있다. 송신기는 이 시간 동안 한 지점에 머물러 신호를 송수신하고, 이후 다음 지점으로 이동하는 과정을 연속적으로 수행한다. 연속 스파이럴 스캔의 경우에는 빔이 연속적으로 움직이지만 빔 스팟이 속도에 따라 유효 체류 시간 T_{dwell}동안 한 영역을 커버한다고 볼 수 있다.

스파이럴 스캔을 통해 중심에서 거리 r에 위치한 지점까지 도달하기까지 빔이 회전한 각도는 $\phi_r = 2\pi r/L_\theta$이며, 탐색 시간은 이 각도에 비례한다. 한편 스파이럴 스캔은 빔이 회전하면서 거의 균등한 면적밀도로 영역을 커버하므로, 시간은 탐색 반경에 따른 면적 비율에 비례한다고도 볼 수 있다. 알려진 결과에 따르면 $T(r)$은 반경의 제곱에 비례하며, 식(3)과 같이 표현된다.

$$T(r) = \frac{r^2}{L_\theta^2} T_{dwell} \tag{3}$$

이 식은 $r = 0$일 때 $T(0) = 0$, 반경 r이 증가함에 따라 시간 $T(r)$이 이차적으로 증가하며, $r = \theta_U$일 때 $T(\theta_U)$가 전체 스캔 시간에 해당함을 보여준다. 또한 식(3)에서 알 수 있듯이 스캔 시간은 빔 발산 각과 중첩률에 의해 정의되는 스텝 간격 L_θ 및 체류 시간 T_{dwell}에 따라 결정된다. L_θ가 작을수록 탐색이 더 촘촘히 이루어져 $T(r)$이 증가하며, L_θ가 크면 더 빠르게 면적을 커버하며 $T(r)$이 감소한다.

이와 같은 설정에서 한 번의 스캔으로 목표 수신기를 획득할 확률 P_{acq}과 대응하는 획득 시간을 정의할 수 있다. 목표 수신기가 불확실성 영역 내 임의 위치에 존재한다고 가정하면, 그 위치의 반경(편차 각도) θ는 식(4)와 같이 Rayleigh 분포를 따른다.

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right), \quad \theta \geq 0 \tag{4}$$

여기서 σ는 포인팅 오차의 표준편차이다. 이는 2차원 등방 가우시안 분포를 가정할 때, 방위각과 고각 두 축의 표준편차가 동일할 경우 반경 분포가 Rayleigh 분포로 귀결됨을 의미한다.

3. 획득 시간 분석

3.1. 단일 획득 시간

수신기가 불확실성 원추의 반각 θ_U내에 존재한다고 가정하면, 획득 확률 P_{acq}은 θ가 θ_U이하일 확률로 정의된다. 단일 스캔에서 목표를 획득할 확률은 Rayleigh 분포의 누적분포함수(CDF)로 표현된다. 불확실성 영역의 반경이 θ_U일 때, 단일 스캔 획득 확률은 식(5)와 같다.

$$P_{acq}(\theta_U) = \int_0^{\theta_U} f(\theta)d\theta = 1 - \exp\left(-\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5}$$

여기서 P_{acq}는 θ_U가 커질수록 증가하며 θ_U가 무한대로 발산할 때 P_{acq}는 1로 수렴한다. 예를 들어 $\theta_U = 3\sigma$인 경우 $P_{acq} \approx 0.9989$로 단일 스캔만으로

도 높은 확률의 획득이 가능하다. 반면 $\theta_U = \sigma$인 경우 $P_{acq} \approx 0.3935$로 한 번의 시도로 획득할 확률은 크게 감소한다.

획득 확률과 함께 단일 스캔의 획득 시간을 정의할 수 있다. 이는 스캔 시작 시점부터 목표 신호를 최초로 검출하기까지 소요되는 시간으로, 목표 위치 θ에 따라 달라지는 확률적 변수이다. 목표가 중심에 가까울수록 탐색 시간이 짧고, 바깥쪽에 있을수록 탐색 시간이 길어진다. 만약 목표가 불확실성 영역 밖($\theta > \theta_U$)에 위치하면 해당 스캔에서는 끝까지 검출되지 못하고, 이 경우 탐색 시간은 전체 스캔 시간 $T(\theta_U)$로 정의된다. 따라서 본 연구에서는 단일 스캔 획득 시간을 조건부로 정의하여, $\theta \le \theta_U$일 때는 $T(\theta)$, $\theta < \theta_U$일 때는 $T(\theta_U)$를 적용한다.

이 정의를 바탕으로 단일 스캔 평균 획득 시간 T_{SS}을 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{SS}(\theta_U) = \int_0^{\theta_U} T(\theta) f(\theta) d\theta + \int_{\theta_U}^{\infty} T(\theta_U) f(\theta) d\theta \quad (6)$$

식(6)에서 두 번째 적분 항은 θ_U보다 큰 영역에서 시간 $T(\theta_U)$가 고정된 상수로 적용되므로, 식(7)과 같이 단순화할 수 있다.

$$\int_{\theta_U}^{\infty} f(\theta) d\theta = \exp(-\theta_U^2/(2\sigma^2)) = 1 - P_{acq} \quad (7)$$

따라서 식(6)은 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{SS} = \int_0^{\theta_U} \frac{\theta^2}{L_\theta^2} T_{dwell} f(\theta) d\theta + (1 - P_{acq}) \frac{\theta_U^2}{L_\theta^2} T_{dwell} \quad (8)$$

이를 정리하면 다음과 같이 더 간단한 닫힌 형 해석 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{SS}^{(tatal)}(\theta_U) &= \frac{T_{dwell}}{L_\theta^2} \left\{ 2\sigma^2 - (\theta_U^2 + 2\sigma^2) \exp\left(-\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2}\right) + \theta_U^2 \exp\left(-\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2}\right) \right\} \\ &= \frac{2\sigma^2}{L_\theta^2} T_{dwell} \left(1 - \exp\left(-\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2}\right)\right) \\ &= \frac{2\sigma^2}{L_\theta^2} T_{dwell} P_{acq} \end{aligned} \quad (9)$$

이 결과는 단일 스캔 평균 획득 시간이 θ_U의 크기에 따라 증가하다가 일정 값으로 포화됨을 보여준다. θ_U가 0에 가까울 때는 탐색 영역이 극히 작아 $T_{SS} \approx 0$에 수렴하지만, 이 경우 획득 확률 역시 매우 낮다. 반대로 θ_U가 매우 커지면 T_{SS}은 $2\sigma^2 T_{dwell}/L_\theta^2$로 수렴하여 포화되며, 이는 $P_{acq} \approx 1$일 때 평균적으로 $\theta \approx \sqrt{2}\sigma$지점에서 획득이 이루어지는 효과를 반영한다.

3.2. 반복 획득 시간

앞 절의 단일 스캔 분석에서는 불확실성 영역의 크기가 평균 획득 시간에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 실제 시스템에서는 단일 시도에 국한되지 않고 동일한 스캔을 여러 차례 반복하여 획득을 시도할 수 있다. 즉, 첫 번째 스캔에서 획득하지 못한 경우 송신기는 빔을 초기 위치로 리셋한 뒤 동일한 스캔을 다시 수행할 수 있으며, 이 과정을 반복함으로써 최종적으로는 높은 확률로 링크 획득에 도달한다. 특히 이론적으로 반복 횟수에 제한이 없다면, 언젠가는 획득이 이루어질 확률이 1에 수렴하게 된다. 본 절에서는 이러한 무한 반복 시나리오를 가정하고 평균 획득 시간을 해석적으로 도출한다. 이 경우 평균 획득 시간은 θ_U에 의존하지 않고 일정한 상숫값으로 수렴함을 확인할 수 있다.

스캔 반복 과정은 성공 확률 P_{acq}를 갖는 기하분포 시행으로 해석할 수 있다. 각 시도의 실패 확률은 $1 - P_{acq}$이며, k번째 시도에서 처음으로 획득이 이루어질 확률은 식(10)과 같다.

$$P(\text{success at } k\text{-th trial}) = (1-P_{acq})^{k-1}P_{acq} \tag{10}$$

이때 k번째에 성공하는 경우 총소요 시간은 T은 앞선 $k-1$회의 실패에 소요되는 시간$(k-1)T(\theta_U)$와 마지막 시도의 조건부 획득 시간 $T_{acq,k}$의 합으로 나타낼 수 있다. $T_{acq,k}$는 단일 스캔의 조건부 획득 시간 분포와 동일하며, 성공 시 평균은 식(11)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} E[T_{acq} \mid \text{success}] &= \frac{\int_0^{\theta_U} T(\theta)f(\theta)d\theta}{P_{acq}} \\ &= \frac{T_{dwell}}{L_\theta^2 P_{acq}}[2\sigma^2 - (\theta_U^2+2\sigma^2)\exp(-\frac{\theta_U^2}{2\sigma^2})] \end{aligned} \tag{11}$$

성공과 관계없이 총 평균 획득 시간은 식(12)와 같이 모든 가능한 시도의 기댓값으로 표현된다.

$$\begin{aligned} E[T_{tot}] = &\sum_{k=1}^{\infty}(1-P_{acq})^{k-1} \\ &\times P_{acq}\{(k-1)T(\theta_U) + E[T_{acq} \mid sucess]\} \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 $\Sigma_{k=1}^{\infty}(1-P_{acq})^{k-1}P_{acq}=1$이며, 기하 분포의 성질에 따라

$$\sum_{k=1}^{\infty}(k-1)(1-P_{acq})^{k-1}P_{acq} = \frac{1-P_{acq}}{P_{acq}} \tag{13}$$

임을 이용하면 식(14)와 같이 단순화된다.

$$E[T_{tot}] = E[T_{tot} \mid sucess] + \frac{1-P_{acq}}{P_{acq}}T(\theta_U) \tag{14}$$

마지막으로, $T(\theta_U)=\theta_U^2 T_{dwell}/L_\theta^2$을 대입하고 정리하면 최종적으로 식(15)를 얻는다.

$$E[T_{tot}] = \frac{2\sigma^2}{L_\theta^2}T_{dwell} \tag{15}$$

위 결과는 반복 스캔을 무한히 허용하는 경우 평균 획득 시간이 θ_U와 무관한 일정한 상수로 수렴함을 명확히 보여준다. 즉, θ_U가 작아 단일 시도의 성공 확률이 낮을 경우에는 다수의 반복이 필요하지만, 단일 시도의 소요 시간이 짧으며, 반대로 θ_U가 크면 한 번의 시도가 오래 걸리지만, 성공 확률이 높아 반복 횟수가 줄어든다. 두 효과가 상쇄되어 평균적으로는 동일한 획득 시간을 갖게 된다. 따라서 반복 시나리오에서는 설계자가 θ_U를 어떻게 설정하더라도 기대 획득 시간은 일정하게 유지된다.

4. 불확실성 영역 설정

앞 절에서는 이상적으로 반복 횟수가 무한히 허용되는 경우 평균 획득 시간이 θ_U와 무관하게 일정한 상숫값으로 수렴함을 보였다. 그러나 실제 시스템에서는 반복 시도 횟수나 단일 스캔 시간에 제약이 존재하므로, θ_U를 임의로 설정할 수는 없다. 따라서 본 절에서는 현실적인 설계 제약 조건을 고려하여 θ_U의 적절한 선택 범위를 도출한다. 대표적인 제약 조건으로는 제한된 반복 횟수 내에서 목표 획득 확률을 보장해야 한다는 요구사항과, 단일 스캔에 허용되는 최대 시간을 초과하지 않아야 한다는 조건을 들 수 있다.

먼저, 최대 반복 횟수를 N으로 제한할 때 누적 획득 확률은 식(16)과 같이 정의된다.

$$P_{acq,total} = 1-(1-P_{acq})^N \tag{16}$$

여기서 P_{acq}는 식(5)의 단일 스캔에서의 획득 확률이다. 설계 목표 확률을 P_{target}이라 하면$P_{acq,}$을 만족하는 최소의 θ_U를 선택해야 한다. 이 조건을 전개하면 식(17)을 얻을 수 있다.

$$P_{acq} = 1-(1-P_{target})^{1/N} \tag{17}$$

이를 Rayleigh 분포 기반의 $P_{acq}=$

$1-\exp(-\theta_U^2/(2\sigma^2))$에 대입하면 식(18)을 얻는다.

$$\theta_{U,\min} = \sigma\sqrt{-\frac{2}{N}\ln(1-P_{target})} \tag{18}$$

이 값을 최대 N번 시도 내에 목표 확률을 만족하기 위해 필요한 최소 탐색 반경을 의미한다. 예를 들어 $P_{target} = 0.99, N = 3, \sigma = 4$ mrad인 경우 $\theta_{U,\min} \approx 6.9$ mrad가 된다.

다음으로, 단일 스캔에 허용되는 최대 시간 $T_{\max}$이 주어지는 경우를 고려한다. 단일 스캔 시간은 $T(\theta_U) = \theta_U^2 T_{dwell}/L_\theta^2$로 표현되므로, 식(19)를 얻을 수 있다.

$$T(\theta_U) \le T_{\max} \Rightarrow \theta_{U,\max} = \sqrt{\frac{T_{\max} L_\theta^2}{T_{dwell}}} \tag{19}$$

예를 들어 $T_{\max} = 3s$, $L_\theta = 1$ mrad, $T_{dwell} = 0.016\,s$인 경우 $\theta_{U,\max} \approx 13.4$ mrad가 된다. 결국 θ_U의 허용 범위는 $\theta_{U,\min} \le \theta_U \le \theta_{U,\max}$으로 주어진다. 만약 $\theta_{U,\min} > \theta_{U,\max}$라면 주어진 조건을 동시에 만족할 수 없으므로, 설계 목표 또는 시스템 파라미터(N, $T_{\max}$등)를 재조정해야 한다. 그러나 일반적인 경우에는 두 값 사이에 충분한 여유가 존재한다.

한 예로, 초기 포인팅 오차가 표준편차 $\sigma = 4$ mrad, 목표 누적 획득 확률 $P_{target} = 0.99$, 최대 반복 횟수 $N = 3$, 단일 시도 시간제한 $T_{\max}$ = 3s를 가정한다. 이는 실제 LEO-GEO 위성 간 실험에서 보고된 수치와 유사하다. 이 경우 $\theta_{U,\min} \approx 6.9$ mrad, $\theta_{U,\max} \approx 13.4$ mrad의 범위를 얻을 수 있으며 설계자는 이 구간 내에서 θ_U를 선택하면 된다. 예를 들어 $\theta_U = 10$mrad를 택하면 누적 획득 확률은 $1-(1-0.92)^3 \approx 0.9997$로 충분히 높으며, 단일 스캔 시간도 T(10mrad)≈2.78s로 제한 이내이다. 평균 획득 시간은 약 0.53s로 앞서 이론적으로도 도출한 값과 일치한다.

결론적으로, θ_U는 특정한 최적값 하나로 고정하기보다는 위와 같은 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 자유롭게 설정할 수 있다. 이 범위 내에서는 평균 획득 시간 관점에서 차이가 없으므로, 구현상의 편의나 시스템적 고려에 따라 적절한 값을 선택하는 것이 바람직하다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안한 획득 시간 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 초기 포인팅 오차는 Rayleigh 분포로 모델링하였으며, 표준편차는 $\sigma = 4$ mrad 로 설정하였다[9]. 스파이럴 스캔의 단계 간격은 $L_\theta = 1$ mrad로 두었으며, 각 지점의 체류 시간은 위성 간 거리 1000km를 가정할 때의 광신호 왕복 시간(약 6.7ms)에 수신기 응답 및 처리 지연(약 10ms)을 더하여 T_{dwell} =16.7ms로 설정하였다. 수신기 응답 및 처리 지연은 일반적으로 수ms에서 수십ms 수준으로 보고되어 있다[11].

먼저 Figure 2는 평균 획득 시간을 이론식과 시뮬레이션으로 비교한 결과를 보여준다. 단일 스캔의 경우 성공 조건부 평균 획득 시간과 실패 시 전체 스캔을 포함하는 무조건 평균 획득 시간을 각각 계산하였다. 두 결과 모두 이론식과 시뮬레이션이 0.2% 이내의 상대 오차로 잘 일치하였으며, 특히 동일한 설정으로 반복할 경우 최종 평균 획득 시간은 θ_U와 무관하게 일정한 상숫값으로 수렴함을 확인하였다. 이는 θ_U가 작을수록 성공 확률은 낮지만 반복 시도가 많아지고, 반대로 θ_U가 커지면 단일 시도 시간은 길지만 성공 확률이 높아져 결과적으로 평균 시간이 동일해지는 보상 효과를 반영한다.

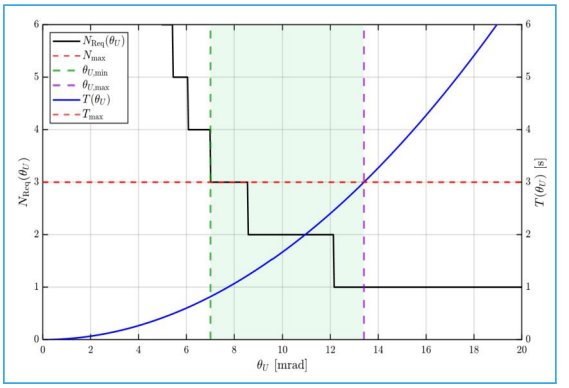


Figure 2. Feasible range of θ_U under probability and time constraints

다음으로, 설계 제약 조건을 고려하여 θ_U의 유효 범위를 확인하였다. 여기서 고려한 제약은 두 가지로, 첫째 $N=3$회의 반복 시도에도 누적 획득 확률이 $P_{target}=0.99$ 이상을 달성해야 한다는 조건, 둘째 단일 스캔에 소요되는 시간이 $T_{\max}=3$를 넘지 않아야 한다는 조건이다. Figure 3과 같이 시뮬레이션 결과 θ_U의 허용 가능한 범위는 약 7-13mrad로 도출되었으며, 이 범위에서는 두 조건을 동시에 만족할 수 있다. 이는 전통적으로 사용되는 3σ 기준을 확보할 수 있음을 보여준다.

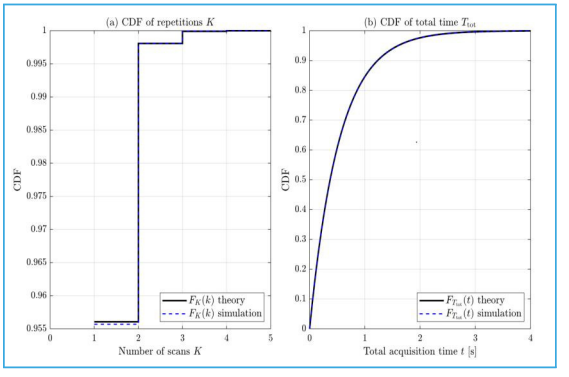


Figure 3. CDFs of (a) scan repetitions K and (b) total acquisition time Tat θ_U = 10 mrad

이와 같이 결정된 범위를 바탕으로, 대표적인 설계점으로 θ_U = 10mrad를 선택하였다. Figure 4는 해당 조건에서 획득에 필요한 반복 횟수 K와 총 획득 시간 T의 누적분포함수(CDF)를 나타낸다. 반복 횟수 K의 분포는 기하 분포적 특성을 보이며, 전체의 99% 이상이 세 번 이하의 시도 내에 획득을 달성함을 확인할 수 있다. 총 획득 시간 T의 분포 역시 해석적 예측과 매우 잘 일치하였으며, 평균적으로 수 초 이하의 짧은 시간 내에 링크 획득이 이루어짐을 보여준다. 이는 제안된 해석 모델이 실제 확률적 동작을 정확히 묘사하고 있으며, 제약 조건을 고려한 설계에서도 높은 신뢰성을 확보할 수 있음을 검증한다.

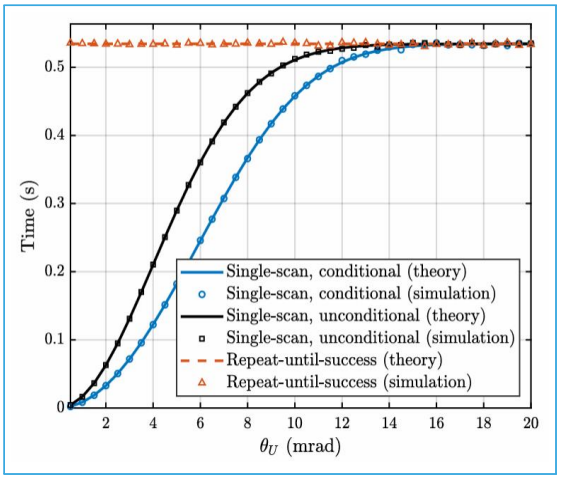


Figure 4. Mean acquisition time versus θ_U: theory and simulation

종합하면, 시뮬레이션 결과는 평균 획득 시간이 θ_U 와 무관하게 일정한 불변성을 보이는 해석적 특성을 수치적으로 확인하였으며, 반복 횟수와 시간 제약을 함께 고려할 경우 θ_U의 허용 범위를 도출할 수 있음을 보여준다. 또한, 도출된 범위 내에서는 특정 최적값을 찾기보다는 제약 조건을 만족하는 한 임의의 값을 선택하더라도 평균 성능을 동일하게 유지됨을 확인하였다. 이러한 결과는 실제 위성 간 광통신 시스템 설계에서 포인팅-정렬-추적(PAT) 절차를 단순화하면서도 신뢰성 있는 링크 획득을 보장하는 데 중요한 근거를 제공한다.

6. 결 론

본 논문은 위성 간 FSO 시스템에서 연속 스파이럴 스캔 기반 PAT 절차에서 평균 획득 시간을 해석적으로 분석하고, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다. 분석 결과, 충분한 반복 시도가 보장될 경우 평균 획득 시간은 탐색 반경 θ_U와 무관하게 일정한 값으로 수렴함을 확인하였다. 이는 θ_U를 크게 설정하거나 작게 설정하더라도 기대 성능이 동일하게 유지됨을 의미하며, 설계 시 최적의 값을 구하기보다 주어진 제약 조건 내에서 유연하게 θ_U를 선택할 수 있음을 보여준다.

또한, 반복 횟수와 단일 스캔 제한 시간과 같은 현실적 제약 조건을 반영하여 θ_U의 최소 및 최대 허용 범위를 산출할 수 있음을 제시하였다. 이 범위 내에서 선택된 임의의 θ_U는 동일한 평균 성능을 제공하면서도 누적 획득 확률과 시간 제약을 동시에 만족할 수 있다. 이는 실제 위성 간 FSO 시스템 설계에서 구현상의 유연성과 최적화를 동시에 가능하게 한다.

다만 본 연구는 편향이 없는 포인팅 오차를 가정하고 Rayleigh 분포를 적용하였으며, 스캔 간 리셋 시간 및 구동기(gimbal)의 동역학적 특성을 무시할 수 있는 단순화된 모델에 기반하였다. 실제 운용 환경에서는 초기 정렬 오차나 궤도 불확실성으로 인해 잔여 편향이 존재할 수 있으며, 이 경우 포인팅 오차는 Rician 분포로 모델링하는 것이 적절하다. 또한 구동기의 가감속, 응답 지연 및 스캔 간 리셋 시간은 실제 획득 시간에 추가적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 편향 및 구동기 동역학을 포함한 일반화된 모델을 기반으로 평균 획득 시간을 분석하고, 이에 적합한 최적 PAT 전략을 도출할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2023학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 우수신진연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2026-25497766).

참고문헌

1 Chaudhry, A. U., & Yanikomeroglu, H. (2021). Laser intersatellite links in a Starlink constellation: A classification and analysis. *IEEE Vehicular Technology Magazine, 16*(2), 48–56. https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3063706

2 Handley, M. (2018). Delay is not an option: Low latency routing in space. In *Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks* (pp. 85–91). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3286062.3286075

3 U.S. Government Accountability Office. (2025). *Laser communications: Space Development Agency should create links between development phases* (GAO-25-106838).

4 Noh, J. Overview and Performance Analysis of the CCSDS Standard for Space Optical Communication, *Journal of Defense Quality Society, 5*(2), 190–198. https://doi.org/10.23199/jdqs.2023.5.2.022

5 선승우, & 노정훈. (2024). SDA Optical Communications Terminal 표준 개요. *정보와 통신, 41*(8), 56–63. 한국통신학회.

6 Schieler, C. M., Riesing, K. M., Bilyeu, B. C., Robinson, B. S., Wang, J. P., Roberts, W. T., & Piazzolla, S. (2022). TBIRD 200-Gbps CubeSat downlink: System architecture and mission plan. In *2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications* (ICSOS) (pp. 181–185). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSOS53063.2022.9749714

7 Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2017). Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19*(1), 57–96. https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2603518

8 Kaymak, Y., Rojas-Cessa, R., Feng, J., Ansari, N., Zhou, M., & Zhang, T. (2018). A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20*(2), 1104–1123. https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2804323

9 Li, X., Yu, S., Ma, J., & Tan, L. (2011). Analytical expression and optimization of spatial acquisition for intersatellite optical communications. *Optics Express, 19*(3), 2381-2390. https://doi.org/10.1364/OE.19.002381

10 Lee, K., Mai, V., & Kim, H. (2023). Acquisition time in laser inter-satellite link under satellite vibrations. *IEEE Photonics Journal, 15*(4), 7303009. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3291807

11 Kaushal, H., Jain, V. K., & Kar, S. (2017). *Free space optical communication*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3691-7

유도무기 ASRP 결과의 창정비 연계 적용에 관한 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

A Study on the Application of ASRP Results to Depot Maintenance for Guided Weapons

김영현, Yeonghyeon Kim
국방기술품질원, 유도탄수명분석팀, 선임연구원
Senior Researcher, PGM Life Analysis Team, Defense Agency for Technology and Quality

한성재, Seongjai Han
안보경영연구원, 운영혁신본부, 연구위원
Associate Researcher, Operation Innovation Group, Security Management Institute

김철수, Choulsu Kim
안보경영연구원, 운영혁신본부, 책임연구위원
Senior Researcher, Operation Innovation Group, Security Management Institute

박순우, Soonwoo Park
국방기술품질원, 유도탄수명분석팀, 선임연구원
Senior Researcher, PGM Life Analysis Team, Defense Agency for Technology and Quality

홍성돈†, Seongdon Hong
국방기술품질원, 첨단기술팀, 책임연구원
Principal Researcher, Advanced Technology Team, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

Guided missiles are susceptible to cumulative performance degradation following long-term storage because of environmental factors, such as temperature, humidity, vibration, material aging, and the decline of electronic components. Therefore, the focus of reliability management is shifting from responding to failures during operations to adopting a preventive approach during storage. The Ammunition Stockpile Reliability Program (ASRP) has been developed to systematically monitor and evaluate the condition of missiles. Depot maintenance is essential for restoring functionality and maintaining performance; however, its plans are established five to seven years in advance. In contrast, the ASRP is conducted one–two years before the expiration of the design life, resulting in a limited linkage between the two.

This study examined the potential for linking ASRP results with the review of overhaul policy, with the aim of addressing this limitation. This study analyzed the current status of overhaul execution for domestically developed missiles, relationship between overhaul and ASRP items, constraints of the ASRP system, and cost-effectiveness of adjusting overhaul cycles. The results indicate that the ASRP outcomes can provide technical reference data for revising overhaul cycles and scopes. This study proposes a three-step application approach and presents a foundation for improving the rationality and efficiency of policies regarding guided missile maintenance.

keywords : ASRP, guided missiles, depot maintenance, reliability, defense quality

† Corresponding Author : Seongdon Hong
Tel : +82-42-251-5530, Fax : +82-42-251-5410, email : sdhong@dtaq.re.kr
Defense Agency for Technology and Quality, Advanced Technology Team, 34327, 70, Saneopdanji-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 8th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

유도탄은 다른 무기체계와 달리 획득 후 바로 사용하기보다는 장기간 저장 후에 1회성으로 사용되는 특성을 가지며, 이러한 운용 개념으로 인해 차별화된 품질관리 및 신뢰성 측면의 접근이 요구된다. 특히 저장 기간 동안 탄약고나 외부의 온·습도 변화, 이동 간 진동, 재료의 시간에 따른 자체적인 열화, 전자부품 우발고장이나 점검 과정에서의 성능 저하 등 다양한 환경 요인의 영향을 지속적으로 받게 되는데, 이러한 영향은 사용 이전에는 고장으로 표출되지 않을 수 있으나, 장기적으로 성능 저하와 잠재 결함의 축적으로 인해 사용 시점에서는 제대로 운용이 안 될 수 있는 어려움을 내포하고 있다. 따라서 유도탄의 품질관리는 운용 단계에서의 고장 대응 중심 정비 및 관리뿐만 아니라, 저장 단계에서의 예방적 신뢰성 관리가 핵심 과제로 인식되고 있다.

이와 같은 저장 중심 관리 개념을 제도적으로 구현한 대표적인 사례가 미국의 ASRP (Ammunition Stockpile Reliability Program)이다. ASRP는 저장 중인 탄약 및 유도탄을 대상으로 표본 시험과 실사격이나 주기 점검 등의 데이터를 분석하여, 탄약의 운용가용성(신뢰성 상태)을 체계적으로 감시·평가하는 것을 목적으로 한다[1-2]. 미 국방부 및 육군은 ASRP를 통해 확보된 정보를 유도탄의 안전성 확인 수단을 넘어, 탄약 관리 정책과 유지·정비 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용하고 있다. 이러한 접근은 저장 신뢰성 정보를 관리 의사결정에 활용하려는 예방적 신뢰성 관리 철학을 반영한 것이다[3-5].

한편, 창정비(Depot-level Maintenance, DM)는 무기체계의 기능 회복 또는 개선과 성능의 지속적인 유지를 목적으로 수행되는 핵심 정비 단계로서, 정비 주기와 수행 범위의 적정성은 무기체계의 가용성과 국방 예산 운용의 효율성에 직접적인 영향을 미친다. 이때 유도탄에 있어서 창정비 주기가 과도하게 짧을 경우, 상태와 무관한 반복 정비로 인해 비용 증가와 자원 낭비가 발생할 수 있으며, 반대로 과도하게 길 경우에는 저장 중 열화가 누적되어 운용 단계에서 안전성 저하 및 임무 실패 위험이 증가할 가능성이 있다. 이러한 특성으로 인해 창정비 정책은 신뢰성 정보를 기반으로 한 합리적 검토가 요구된다.

국내에서도 유도탄을 대상으로 ASRP를 수행하면서, 유도탄의 안전성 확인과 함께 잔존수명을 예측하는 기초 자료로 활용이 되고 있다. 다만, 유도탄 ASRP 결과를 활용하여, 단위 구성의 수명이 연장되더라도, 창정비와 연계가 되지 않을 경우 직접적인 수명연장 효과는 제한될 수가 있다. 이는 우리군의 유도탄에 대한 창정비 정책이 개발단계에서 제시된 설계수명을 기초로 하여 정비 주기를 설정하고 있으며, 이를 준비하는 시점과 ASRP가 수행되는 시점의 차이가 있어, 지금까지는 이 둘을 연계하는 데 애로사항이 있었다. 이로 인해 저장 단계에서 수행되는 유도탄의 ASRP에 의해 축적된 신뢰성 정보가 정비 정책 결정 과정에서 충분히 활용되지 못하는 구조적 한계가 존재한다.

그러나, 유도탄 ASRP의 결과를 활용하여 유도무기의 신뢰성 평가체계, 제도 개선 방향 등이 지속적으로 검토되고 있으며, 최근에는 ASRP 데이터를 활용한 데이터 마이닝 기법 적용이나 소량·불연속 데이터 기반 신뢰성 평가 방법론에 대한 연구도 수행되고 있다. 또한 무기체계 창정비의 효과성과 영향요인에 대한 연구를 통해, 정비 정책 결정 과정에서 신뢰성 정보의 중요성이 강조되고 있다.

그럼에도 불구하고 기존 연구들은 ASRP 제도 자체의 개선, 저장 신뢰성 평가 기법 연구, 또는 일반적인 무기체계 창정비 효과 분석에 주로 초점을 두어 왔으며, 기존 ASRP 결과와 창정비 수행 현황을 종합적으로 분석하여 연계 적용 가능성을 검토한 연구는 많지 않다.

기존의 무기체계 신뢰성 관리 연구들은 주로 가속노화 시험을 통한 특정 구성품의 수명 예측 모델 수립이나, 야전 고장 데이터를 활용한 정비 최적화 방법론 제안에 집중되어 왔다. 그러나 이러한 연구들은 설계 단계의 이론적 수치나 운용 중 발생한 고장 정보에 치중되어 있어, 실제 장기 저장 환경에서 획득되는 ASRP 결과와 국가 차원의 대규모 예산이 투입

되는 창정비 제도 간의 실무적 연계 방안을 제시하는 데에는 한계가 있었다.

이에 본 연구는 유도탄의 창정비와 관련된 실태조사 및 분석 결과를 기반으로, ASRP 결과를 유도탄 창정비 주기와 연계 적용할 수 있는 가능성을 국방품질관리 관점에서 분석하고자 한다. 이를 위하여 창정비를 수행 중이거나 계획 중인 탄종을 대상으로 창정비 현황을 분석하고, 현재 수행 중인 ASRP 대상품목과의 일치성이나 추가적인 제안 가능성을 조사·분석함으로써, 현재의 제도적 한계를 체계적으로 고찰하는 데 목적이 있다.

2. 연구배경

2.1. 유도탄의 저장 특성과 예방적 신뢰성 관리 필요성

유도탄은 저장 후 제한적으로만 사용되거나, 주기 점검을 통해 상태를 파악한 뒤 장기간 저장되는 무기체계로서, 다른 무기체계와 달리 운용 단계에서 발생하는 고장 이력만으로는 신뢰성에 대한 분석의 한계가 있다. 그러나 미 국방부의 RAM(Reliability, Availability, Maintainability) 관리 개념에서 보면, 무기체계의 신뢰성 정보는 단순한 성능 지표가 아니라, 체계 수명주기 전반의 의사결정을 지원하는 핵심 입력 정보로 정의되며, 이러한 관점은 유도탄의 저장 중 신뢰성 정보를 체계적으로 확보·관리하는 것도 안전성과 가용성 확보를 달성하기 위한 필수적 요소이다.

2.2. ASRP의 개념과 제도적 역할

유도탄 ASRP는 저장 중인 탄약 및 유도탄의 신뢰성 상태를 주기적으로 감시·평가하기 위한 제도로, 샘플링을 통한 성능 시험과 실사격 및 감시활동을 통해 확보된 다양한 데이터를 분석하여 성능 저하 경향과 결함 가능성을 사전에 식별하는 것을 목적으로 한다. 따라서, 고장 발생 이후의 대응이 아닌, 고장 가능성에 대한 사전 인지를 통해 관리 조치를 검토하는 예방적 신뢰성 관리 개념을 제도적으로 구현하는 것이다.

이를 위하여 미 육군은 AR 702-6 및 DA PAM 742-1 등을 통해 ASRP의 수행 절차, 책임체계, 결과 활용 방향을 규정하고 있으며, ASRP 결과를 탄약 관리 정책 및 유지·정비 전략 수립 시 참고 자료로 활용하고 있다[1,4]. 또한, NATO 및 UN의 국제 지침에서도 저장 중 탄약과 폭발물의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 체계적인 감시·평가 활동의 중요성을 강조하고 있다[6-7]. 이러한 제도적 배경은 ASRP가 단순한 시험 프로그램을 넘어, 관리 의사결정을 지원하는 신뢰성 정보 생산체계로 기능할 수 있음을 시사한다.

2.3. 국내 ASRP 관련 선행연구 동향

국내에서도 일반탄약 및 유도무기의 ASRP 제도 개선을 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. Yoon et al.(2004)은 저장탄약시험절차(ASTP)의 등급체계와 판정기준을 분석하여, 생산 품질 수준과 야전 관리 특성을 고려한 평가 기준의 합리화 필요성을 제기하였다[8]. 그리고 Choi et al.(2005)은 장기 저장 탄약의 신뢰성 차이를 고려한 발전 방향을 제안하며, 데이터 기반의 수명연장과 정비 정책의 유기적 연계를 통해 국방 예산을 절감하고 군수 지원의 효율성을 높일 수 있음을 강조하였다[9].

최근에는 ASRP의 고도화를 위하여 시험결과에 따른 상태 판정 중심에서 데이터를 보다 적극적으로 활용하기 위한 분석 방법론 연구도 등장하고 있는데, Roh et al.(2020)은 ASRP 데이터를 대상으로 데이터 마이닝 기법을 적용하여, 저장 신뢰성 상태에 영향을 미치는 주요 요인을 식별할 수 있음을 보였으며[10], Ahn et al.(2019)은 시료 부족과 데이터 불연속성이라는 저장탄약 데이터의 현실적 제약을 극복하기 위한 평가 프레임워크를 제시하였으며, 이를 통해 제한된 환경에서도 정밀한 품질 예측과 체계적인 의사결정이 가능해진다는 점을 핵심 장점으로 내

세웠다[11]. 이러한 연구들은 ASRP 결과가 단순 합·불 판정에 그치지 않고, 관리 의사결정을 지원하는 정보로 확장될 수 있음을 학술적으로 뒷받침한다.

2.4. 창정비와 ASRP 결과의 활용 한계

창정비는 유도탄 체계의 기능 회복과 성능 유지를 목적으로 수행되는 핵심 정비 단계로서, 정비 주기와 범위의 적정성은 전력 가용성과 국방 예산 운용 효율성에 직접적인 영향을 미친다. 이때 창정비는 수행 주체에 따라서 군직정비, 외주정비, 군직 및 외주정비 병행의 3개 유형으로 구분되며, 형태에 따라서는 순환(주기)정비, 고장정비로 구분될 수 있다. 이때 창정비 대상은 SMR(Source, Maintance, Recovery)에 따라 선정하고 있다.

유도탄 창정비를 수행하기 위한 정비 요소개발은 통상 착수 5~7년 전부터 시작되며, 실질적인 예산 편성은 정비 수행 2~3년 전에 완료된다. 반면, 유도탄의 저장 신뢰성을 평가하는 ASRP는 설계수명이 도래하기 불과 1~2년 전에서야 수행되는 구조적 특성을 지닌다. 이러한 업무 간의 시점의 차이로 인해 ASRP를 통해 도출된 신뢰성 분석 결과를 1차 창정비 계획이나 예산에 적기에 반영하는 것은 현실적으로 매우 제한적이다. 이러한 한계는 경제적 효과 분석에서도 나타난다. 현재 유도탄 ASRP 수행 후에는 식(1)과 같은 자산가치 중심의 산식을 적용하여 경제적 효과를 분석하고 있으나, 이는 창정비가 계획된 유도탄의 특성을 반영하기에는 미흡한 점이 있다. 창정비를 통해 수명을 연장하는 탄종의 경우, 단순히 도입 단가와 수명을 기준으로 계산하는 기존 방식은 실제 정비 예산의 절감 효과를 과소평가하거나 왜곡할 가능성이 높다. 따라서 창정비 대상 유도탄에 대해서는 정비비용과 운영유지 단계의 실질적인 비용 회피액을 고려할 수 있는 별도의 경제성 평가 모델 정립이 필요하다.

$$\text{경제효과(원)} = \text{단가(원)} \times \text{재고량(발)} \times \frac{\text{연장기간(년)}}{\text{설계수명(년)}} \quad (1)$$

한편, 기존 연구에서는 창정비 정책이 주로 시간 기반 기준이나 경험적 판단에 의존하여 운영되는 경향이 있으며, 저장 신뢰성 정보가 체계적으로 반영되는 사례는 제한적인 것으로 나타난다. 그리고 Hur는 국내 무기체계 창정비의 효과성에 영향을 미치는 요인을 분석하면서, 창정비 요소개발이나 정비활동에서 소요되는 비용 요소 선정과 경제성 확보 차원에서 방위산업 기반 구축에 기여할 수 있는 군수 정비운영의 개선 요소를 도출해야 함과 정비 정책 결정 과정에서 신뢰성 정보의 중요성을 강조하였다[12]. 그러나 RCM(Reliability-Centered Maintenance) 관점에서 수행된 연구들은, 실제 고장 메커니즘과 신뢰성 데이터를 기반으로 정비 수준과 주기를 결정하는 접근이 합리적임을 제시하고 있다[13-14]. 이러한 논의는 저장 신뢰성 정보와 창정비 정책 간 연계 필요성을 이론적으로 뒷받침하는 것이다.

2.5. 연구 필요성 및 의의

기존 선행연구들은 ASRP 제도의 운영과 개선, 저장 신뢰성 평가 방법론, 또는 창정비의 일반적 효과 분석에 주로 초점을 두어 왔으며, ASRP 결과를 유도탄 창정비 정책 검토에 체계적으로 연계 적용하는 문제에 대해서는 제한적으로만 논의가 이루어져 왔다. 특히 국내 유도탄을 대상으로, 기존 ASRP 결과와 창정비 수행 현황을 종합적으로 분석하여 연계 적용 가능성을 검토한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구는 창정비 분석 결과를 기반으로, ASRP와 창정비의 기능적 역할을 구분하고 저장 신뢰성 정보를 창정비 정책 검토에 활용할 수 있는 가능성과 그 한계를 국방 품질관리 관점에서 고찰하고자 한다. 이는 새로운 제도나 기준을 제안하기보다는, 이미 축적된 신뢰성 정보를 합리적으로 해석·활용할 수 있는 정책적 논의 틀을 제시한다는 점에서 연구의 의의를 가진다.

3. 본 론

3.1. 국내개발 유도탄 창정비 현황

본 연구의 분석 대상은 국내개발 유도탄 중 창정비(수명연장 포함)가 완료되었거나 수행 중, 또는 계획 단계에 있는 체계로 한정하였다. 이러한 범위 설정은 ASRP 결과와 창정비 정책 간의 연계 가능성을 실질적으로 검토하기 위한 것으로, 발사대·차량 등 탑재체계는 제외하고 유도탄 본체만을 대상으로 하였다. 이에 따라서 본 연구에서 분석 대상 유도탄은 총 8개 탄종으로 한정하였다.

한편, 창정비 수행 단계는 탄종별로 상이한데, 일부 체계는 이미 창정비가 완료된 상태인 반면에 다른 것들은 수명연장 사업과 연계되어 창정비가 진행중이거나 향후 수행이 계획되어 있다. 획득 이후 단순히 저장 시간의 경과가 아니라 개발 시기, 설계 특성, 저장 기간, 시효성 구성품의 존재 여부 등 복합적인 요인에 의해 결정되는 것으로 분석되었다.

Table 1은 ASRP와 창정비의 주요 특성을 비교하여 보여준다. 창정비는 순환정비를 통해 전체적인 성능을 보장하고 결함 구성품을 정비하는 데 중점이 두는 반면, ASRP는 전문 시험 시설을 활용한 저장 상태의 분석시험을 통해 구성품의 노화 상태를 정밀 진단하고 잔존 수명을 예측하여 수명연장 여부를 판단하는 기술적 근거를 제공한다. 두 업무는 최종 목적과 세부 방법론에서 차별화된 전문 영역을 보유하고 있다.

3.2. 탄종별 창정비 및 ASRP 대상품목 비교

3.1.을 기초로 하여 유도탄별로 창정비와 ASRP 대상품목을 비교·분석하여 두 제도 간의 관리 대상 중복성과 차별성을 검토하였다. 이 분석은 ASRP 결과가 창정비 정책에 어느 수준까지 활용될 수 있는지를 판단하기 위한 핵심 근거가 될 수 있다. Table 2는 창정비와 ASRP의 대상품목 현황을 정리한 결과이다.

창정비를 수행하는 대상은 적게는 13개 품목에서 많게는 73개 품목으로 탄종별로 차이가 있었다. 이 중 ASRP 대상과 중복되는 품목 수는 적게는 2개, 많게는 7개 품목까지 중복됨을 확인할 수 있었다. 이때 창정비 대상품목의 선정 기준은 SMR 부호의 셋째 자리가 D, 넷째 자리가 D 또는 Z인 품목이며, 전기,

Table 1. Comparison of Characteristics between ASRP and Depot Maintenance

Category	ASRP	Depot Maintenance(Overhaul)
Objective	• Verification of status for time-limited and shelf-life items • Residual life assessment	• Performance guarantee through complete disassembly, inspection, and repair • Component maintenance and reliability recertification
Timing	• 1-2 years prior (X-1~2Y) to the expiration of the component life cycle	• Cyclic Maintenance: According to depot maintenance policies • Periodic Inspection: Based on design life cycle (e.g., 10 years)
Method	• Execution of sample verification and testing according to the plan • Implementation of test procedures by item and extension of cycles	• Unplanned corrective maintenance for components with performance defects • Complete disassembly and cyclic maintenance through element development
Activity	• Non-functional/functional testing • Residual life prediction through data analysis	• Cyclic maintenance (timely promotion of element development) • Corrective maintenance for components (unplanned)

Table 2. Comparison of the Number of Items for ASRP and Depot Maintenance (Unit: EA)

Category	Common	Army			Navy (Marine)			Air Force	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Depot Maintenance	48	73	24	26	13	13	14	61	50
ASRP	7	11	6	5	4	12	5	15	17
Overlap	5	7	3	3	2	5	2	3	3

전자류(회로카드 조립체, 케이블 조립체, 전원 공급기) 품목이 다수에 해당한다는 것을 확인 할 수 있었다.

ASRP 대상품목은 열전지, 추진기관 관련 부품, 안전장전장치 등 저장 중 열화의 가능성이 높은 시효성 구성품을 주로 대상으로 하고 있으며, 창정비와 ASRP의 대상품목들의 조립수준이 상이함을 확인할 수 있었다. 창정비를 수행하는 품목들의 조립수준은 장입탄 단위부터 가장 하위 모듈 단위(회로카드 등) 수준까지 비교적 넓게 분포되어 있는 반면, ASRP를 수행하는 대상품목의 조립수준은 주로 조립체 수준의 부품 단위로 분포되어 있다. 이러한 분석 사례는 저장 신뢰성 평가 결과가 창정비의 범위 및 검토 시점에 참고 자료로 활용될 수 있는 구조적 기반이 존재함을 의미한다.

3.3. ASRP 수행체계와 정보의 활용 한계

앞서 설명한 바와 같이 유도탄 ASRP는 저장 중의 안전성과 임무수행을 위해 요구되는 신뢰성 및 신뢰수준의 상태를 감시·평가하기 위한 제도로, 이를 위해 표본을 선정하여 비기능 및 기능시험을 수행하고, 그 결과를 분석·판정하는 절차를 거치게 된다. 이에 대한 국내 유도탄(Precision Guided Munition, PGM)의 ASRP 절차는 Figure 1에 정리하였다. Figure 1에서 보면 시험 대상 선정, 표본 추출, 이송 및 분해, 비기능 및 기능시험 수행, 결과 분석 및 후속 조치의 단계로 되어 있는 것을 알 수 있으며, 이는 ASRP 수행 절차가 저장 중 유도탄이 표본 시험

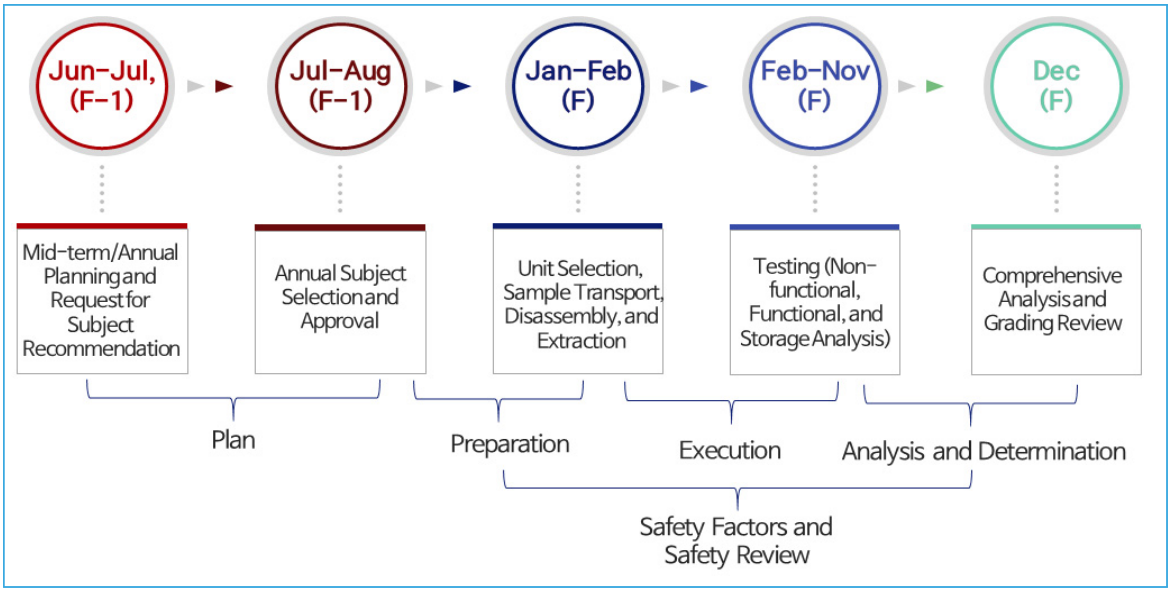


Figure 1. ASRP execution process for guided missiles

을 통해 단계적으로 평가되는 구조를 보여준다. 이러한 프로세스는 시험의 결과를 활용하여 저장된 유도탄의 안전성 또는 기능에 대한 상태를 객관적으로 파악할 수 있는 장점을 가지지만, 동시에 표본 기반이라는 특성(신뢰도와 신뢰수준으로 결과를 표현)으로 인해 개별 유도탄 단위의 정비 결정에 일괄 적용하기에는 다소 한계가 있을 수 있다.

한편, 유도탄 ASRP 결과는 규격 일치 또는 불일치로 판정하고, 이를 기초로 CC-A(제한 없이 사용 및 불출 가능), CC-B(조건부 사용 가능) 등과 같은 탄약의 상태 기호를 추천하는 형태로 진행되고 있다. 이와 함께 one-shot device인 유도탄의 특성상 고장 메커니즘과 시험 항목 간의 연계성을 체계화하는 것 또한 매우 어려운 것이 현실이다. 따라서 이러한 결과만을 이용하여 창정비 주기를 바로 조정하는 정책적 의사결정의 적용에는 제한적인 것이 사실이다.

3.4. ASRP와 창정비 연계 검토

유도탄 ASRP와 창정비의 연계 적용을 위해서는 기능적 역할을 명확히 구분한 상태에서, 상호 보완적 역할을 해야 한다. 왜냐하면, 유도탄 ASRP는 저장 중 안전성 및 요구 신뢰도와 신뢰수준을 기준으로 현재의 상태를 진단·평가하여 의사 결정을 지원하는 기능을 수행하는 반면, 창정비는 실제로 기능을 회복하고 성능을 재생하는 조치·수행의 기능을 담당한다. 또한 창정비를 위한 요소개발 시점은 설계수명 도래 5~6년 전부터 진행되고, 이를 위한 예산편성은 2~3년 전에 진행되므로 ASRP가 수명도래 시점에서 진행되는 것과 시기적인 차이가 있다. 따라서 이 둘 간의 연계를 위해서는 단기적 방안과 중·장기 방안으로 구분하여 제시할 필요가 있다. 기존 제도 틀을 유지한 상태에서 저장 신뢰성 정보의 활용도를 단계적으로 확대하는 접근이 현실적 대안임을 강조한다.

한편, 이 둘 간의 연계를 위해서는 몇 가지 전제가 필요한데, 우선 창정비와 ASRP 수행 시 도출되는 데이터는 각 업무 간 상호 전달 및 반영되어야 하며, 창정비 수행 여부는 개발단계에서, ASRP 시료는 양산단계에서 확보가 완료되어야 한다. 또한 현재 화공품을 포함한 시효성 품목 중심의 ASRP에서 시한성 품목과 전자부품 등을 포함한 체계 단위로의 ASRP 확대가 필요하다. 이러한 사항들이 체계화되었을 때, 다음과 같이 ASRP 및 창정비 업무의 고도화 대안을 고려할 수 있다.

3.4.1. 수명주기 간 점진적인 창정비 주기 연장

본 대안은 유도탄의 1차 창정비는 기존 국방부 방침 및 설계수명(예: 10년)에 따라 정상적으로 수행하되, 해당 과정에서 축적된 ASRP 결과와 야전 고장실적 등 신뢰성 데이터를 종합 분석하여 차기(2차) 정비 주기를 탄력적으로 조정하는 방안이다.

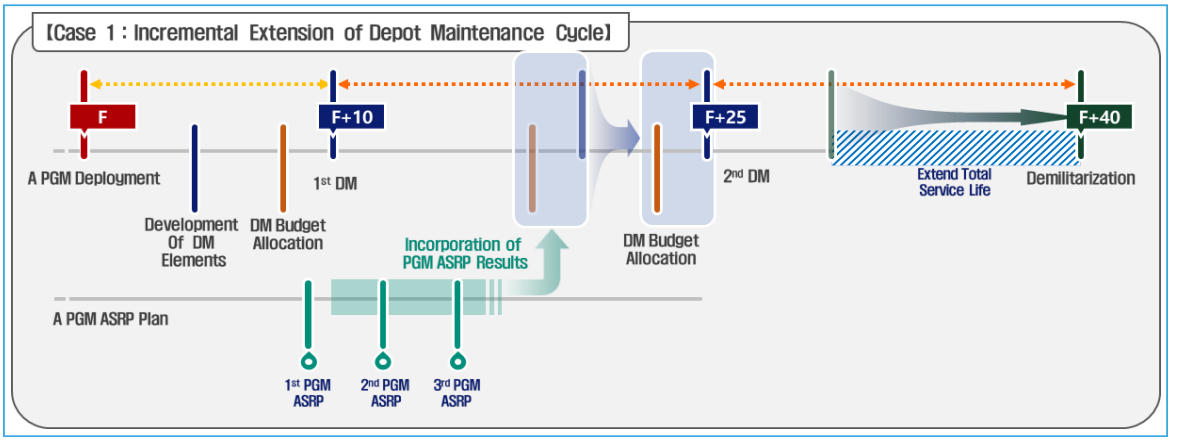


Figure 2. Incremental extension of depot maintenance cycle (Case 1)

Figure 2와 같이 설계수명이 도래하는 F+10년에 1차 창정비를 수행하고, 이후 ASRP의 결과를 반영하여 차기 창정비 주기를 연장하여 전체 수명주기를 40년으로 연장할 수 있다. 현재 우리 군의 창정비 체계는 수행 5~7년 전부터 예산편성과 요소개발 등 행정적 절차가 착수되는 구조적 특성을 지니고 있다. 이로 인해 설계수명 도래 직전에 수행되는 ASRP 결과를 최초 창정비 시점에 즉각적으로 반영하는 데에는 시기적인 제약이 존재한다. 따라서 1차 창정비는 계획대로 이행하여 초기 신뢰성을 확보하고, 이후 도출된 분석 데이터를 바탕으로 차기 정비 시점을 결정하는 방식이 현행 제도 틀 안에서 가장 실현 가능성이 높은 대안으로 평가된다.

본 대안의 핵심 목표는 1차 창정비 과정에서 확보된 실물 시료의 시험 데이터와 운용 단계의 야전 고장 데이터를 연계하여, 차기 정비 주기를 점진적으로 연장함으로써 정비 효율성을 극대화하는 것이다. 다만, 이를 실무적으로 적용하기 위해서는 현재 추진기관 및 화공품 등 시효성 품목에 편중된 ASRP 대상 범위를 시한성 품목과 주요 전자부품까지 단계적으로 확대하는 과정이 선행되어야 한다. 유도탄을 구성하는 핵심 섹션 전반에 대한 신뢰성 정보가 확보될 때 비로소 완성탄 단위의 종합적인 수명평가가 가능해지며, 이를 통해 데이터에 기반한 객관적인 정비 주기 연계체계를 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

3.4.2. 야전정비 능력 확대를 통한 구성품 단위 정비 수행

본 대안은 유도탄 전체를 분해하여 정비하는 기존 방식에서 탈피하여, ASRP 결과에 따라 성능 저하가 우려되는 특정 구성품 단위로 창정비를 수행하는 방안으로 Figure 3에 나타내었다. 유도탄 정비개념에 야전정비가 포함되어 있거나 군직 정비 인프라가 확보된 탄종을 대상으로 하며, 해당 정비 부대 및 기관에서 유도탄 구성품에 대한 시험, 분해, 조립 역량을 별도로 보유하고 있어야 실질적인 적용이 가능하다. 현재 해군 병기탄약창의 경우, 주요 유도탄 구성품에 대한 정밀 점검 및 정비 인프라를 갖추고 있으며, 이를 기반으로 추진기관 등 시효성 품목의 ASRP 결과에 따라 선별적인 정비 및 교체를 수행함으로써 운영 효율성을 제고하고 있다.

본 방안의 가장 큰 장점은 유도탄의 전반적인 상태가 양호할 경우, 전체 정비 대신 성능 열화가 식별된 품목만을 선별적으로 정비함으로써 정비 공기를

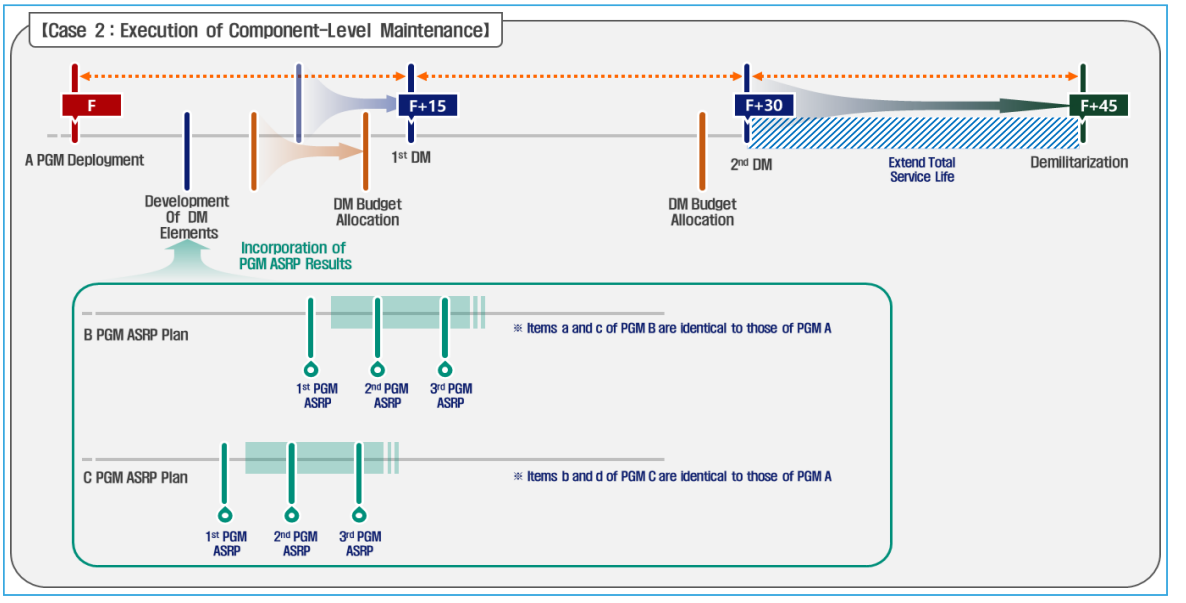


Figure 3. Execution of component-level maintenance (Case 2)

획기적으로 단축하고 국방 예산을 최적화할 수 있다는 점이다. 이를 실효성 있게 운영하기 위해서는 야전 및 군직 정비를 수행하는 부대에 유도탄 ASRP 결과뿐만 아니라 정비 및 운용 데이터(전투탄 실사격 결과 등)에 대한 접근 권한을 부여하고, 이를 정비 주기 및 단계 설정의 의사결정 지원 도구로 활용할 수 있는 제도적 기반이 마련되어야 한다. 다만, 보증탄 개념을 적용하여 야전정비 개념이 부재한 탄종이나 정비 인프라가 미비한 경우에는 적용이 제한될 수 있으므로, 탄종별 정비 가능 범위에 대한 기술적 검토와 시설 및 장비 등 인프라에 대한 사전 분석이 반드시 선행되어야 한다.

3.4.3. 선행연구 및 추가시험 등을 통한 최초 창정비 시기 조정

본 대안은 Figure 4와 같이 최초 ASRP 수행 시점 이전부터 선행 연구 및 추가 시험 등 데이터 기반의 정밀 분석을 병행하여, 유도탄의 최초 창정비 착수 시기를 결정하는 방안이다. 이는 유도탄 수명주기 전반의 효율성을 극대화할 수 있는 가장 이상적인 연계 모델로 평가되나, 실질적인 적용을 위해서는 평가 기법의 고도화와 데이터 신뢰성 확보가 필수적으로 뒷받침되어야 한다. 이를 위해 기존 설계수명 단계(양산 후 약 9~10년)에서 단발성으로 수행되던 ASRP의 시점을 양산 후 4~5년 차에 추가적으로 수행하여 초기 노화 데이터를 조기에 확보할 필요가 있다. 또한, 추진기관 등 시효성 품목 외에도 시한성 품목 및 전자부품 등으로 ASRP 평가 대상을 대폭 확대함으로써 체계 단위의 종합 수명평가 체계를 구축해야 한다.

이러한 접근은 미군의 헬파이어(Hellfire) 유도탄 ASRP 사례와 유사한 관리 방식으로, 단순히 합·불 판정 중심의 기능시험 결과에 의존하던 기존 의사결정 체계에서 벗어나 수명주기 전반의 노화 추세를 분석하는 데이터 중심 관리체계로의 전환을 의미한다. 양산 초기부터 수명 도래 시점까지 지속적인 추가시험을 통해 고밀도 데이터를 축적하고 노화 경향성을 정밀하게 분석함으로써, ASRP 결과가 창정비 정책 결정을 지원하는 핵심적인 의사결정 도구이자 토대로 활용될 수 있도록 정립해 나가야 한다. 궁극적으로 이러한 신뢰성 평가 기법의 고도화는 유도탄의 실질적인 잔존 수명을 기반으로 정비 시점을 최적화하여 국방 예산 절감과 전력 가용성 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

3.5. ASRP 결과와 연계한 창정비 주기 조정의 경제적 효과 분석 모델

유도탄 ASRP의 경제적 가치를 보다 정밀하게 산출하기 위해, 본 연구에서는 창정비 수행 여부에 따른 탄종별 특성을 반영한 새로운 분석 모델을 정립하였다. 기존의 산출 방식은 유도탄의 획득 단가와

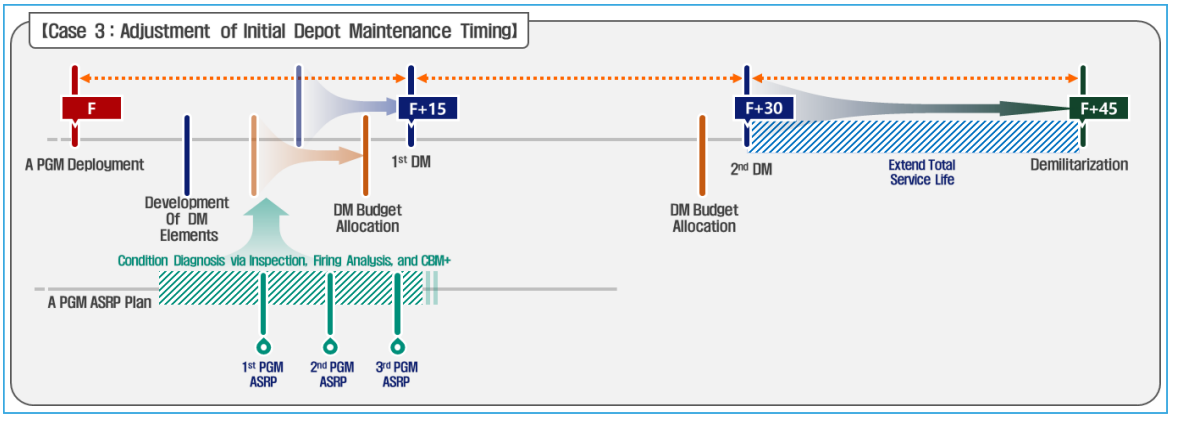


Figure 4. Adjustment of initial depot maintenance timing (Case 3)

연장 수명 비율을 단순 곱하는 자산가치 중심의 방식을 취하고 있어, 이미 창정비가 진행 중이거나 계획된 탄종의 실질적인 예산 절감 효과를 반영하는 데 한계가 있었다. 특히 창정비 비용이 도입 단가 대비 낮게 형성되는 유도탄의 특성상, 기존 산식은 경제적 효과를 과소 혹은 과대 평가할 우려가 있다. 이에 따라 정비 불가능 탄종은 현행 방식을 유지하되, 창정비를 통해 수명을 연장하는 탄종에 대해서는 실제 국방 예산의 절감 효과를 객관적으로 평가할 수 있는 고도화된 모델을 적용하였다.

새로운 분석 모델은 유도탄의 도입 가격이 아닌 실제 '창정비에 소요되는 비용'을 핵심 기준으로 설정하여, ASRP 결과에 따른 정비 주기 조정 시 예상되는 예산 절감액을 산출하였다. 본 모델은 정비 주기가 연장됨에 따라 감소하는 직접적인 정비 비용뿐만 아니라, 차기 정비 시점이 유예됨에 따라 얻게 되는 예산 집행의 효율성까지 종합적으로 고려한다. 구체적으로는 전체 수명주기(LCC) 동안의 정비 횟수 변화를 확인하고, 이에 따른 노무비, 재료비 등 실제 정비 원가와 고정 비용의 절감 효과를 반영하도록 설계되었다. 이를 1발 기준으로 정형화한 절감비용 산출 모델은 식(2)와 같다[15].

$$C_c = \left\{\left[\frac{L}{T_0}\right](C_0 + C_r) + \left[\frac{L}{T_0}\right](1-e^{-\lambda T_0})C_f\right\} - \left\{\left[\frac{L}{T_1}\right](C_0 + C_r) + \left[\frac{L}{T_1}\right](1-e^{-\lambda T_1})C_f\right\} \quad (2)$$

C_c : 절감 비용
L : 유도탄 전체수명(30~40년 가정)
T_o: 창정비 주기(최초 설정)
T_1: 창정비 주기(조정 후)
C_o: 유도탄 정비단가
C_r: 창정비 수행 시 발생하는 위험비용
λ : 고장률(실적 또는 설계값 적용)
C_f: 고장정비 평균단가

식(2)에서 유도탄 1발당 정비단가(C_0)는 창정비 요소 개발 시 시제 창정비 등을 수행하므로 추정이 가능하며, 정비단가는 창정비 수행 시 반드시 발생되는 비용이므로 창정비 횟수 및 정비 대상 발수에 비례하는 것으로 정리할 수 있다. 한편, 창정비 간에 발생하는 위험비용(C_r)은 유도탄 정비 수행 시 탄두, 신관 등 폭발의 위험성이 내재하고 있어 이를 고려한 것이며, 창정비 주기 변경 등에 따라 유휴 시설, 장비, 인력 등 발생 시 해당 비용을 위험(risk)으로 볼 수 있다. 이때 외주정비는 보험료(직접경비), 위험 보상액(이윤) 등을 반영하여 위험에 대한 대응이 일부 가능하나, 군직정비의 경우 각 군별 특성을 고려한 별도 산정이 요구된다.

한편, 고장정비와 관련하여 고장률(λ), 고장정비 평균단가(C_f)가 있으며, 이를 기준으로 고장정비비는 '고장률 × 고장정비 평균단가'에 해당하는 $(1-e^{-\lambda T_0}) \times C_f$ 또는 $(1-e^{-\lambda T_1}) \times C_f$를 적용하였다. 이때, 고장률의 경우 지수분포를 이루는 것으로 가정하였으며, 고장률이 일정하다고 가정할 때 고장률이 λ인 경우 시간 t에 대해 누적고장확률은 $1-e^{-\lambda t}$이므로 창정비 주기 T_0 또는 T_1에 따라 창정비 주기 조정 전후 변경 사항을 적용할 수 있다. 다만, 관련 산식을 적용하기 위해서는 고장률은 설계치 또는 실적을, 고장정비 평균단가는 해당체계 또는 유사 체계 실적가를 알아야 한다.

본 연구를 통하여 산출한 비용절감 산출 모델의 실효성을 검증하기 위해, 단가체계가 상이한 두 가지 유도무기를 대상으로 주기 조정에 따른 창정비 비용의 절감 효과를 시뮬레이션하였다. 분석을 위한 기초 가정으로 유도무기의 전체 수명주기를 30년으로 설정하였으며, 운용 수량은 체계별로 500발을 확보하고 있는 것으로 가정하였다.

기존의 창정비 정책은 설계수명에 기초하여 10년 주기로 수행됨에 따라 전 수명주기 동안 총 2회의 창정비가 요구되나, ASRP 수행 결과를 반영하여 최초 창정비 주기를 15년으로 연장할 경우 전체 수행 횟수는 1회로 감소하게 된다. 이때 창정비 수행 시 발생하는 위험비용은 정비단가 구성항목 중 일반관리비 및 이윤에 포함된 것으로 간주하여 산출 과정에

Table 3. Example of Cost Savings Calculation (Inventory Quantity : 500 EA)

Category	Total Life Cycle (L)	Initial DM Cycle (T_0)	Adjusted DM Cycle (T_1)	DM Unit Cost (C_0)	Failure Rate (λ)	Unit CM Cost (C_f)	Cost Savings
Missile A	30	10	15	450 Million KRW	0.06	88 Million KRW	220 Billion KRW
Missile B	30	10	15	75 Million KRW	0.04	12 Million KRW	38 Billion KRW

서는 제외하였다.

Table 3은 이러한 가정 사항을 바탕으로 도출된 분석 결과이다. 정비 단가가 상대적으로 높은 A 유도무기의 경우 창정비 횟수가 1회 줄어듬에 따라 전 수명주기 동안 약 2200억 원의 비용 절감이 가능한 것으로 나타났으며, 비교적 저가인 B 유도무기에서도 약 380억 원 수준의 예산 절감 효과가 확인되었다.

결론적으로 본 모델은 ASRP의 기술적 판단이 창정비 대상 탄종의 운영유지비를 최적화하는 데 있어 객관적인 평가 기준을 제시하며, 장기적으로 국방 예산의 효율적 활용을 지원하는 실질적인 의사결정 도구로서 의미를 갖는다.

4. 결 론

본 연구는 장기간 저장되는 유도탄 체계의 특성과 예방적 신뢰성 관리 필요성에 주목하여, ASRP 결과를 창정비 정책 검토에 연계 적용할 수 있는 가능성을 국방 품질관리 관점에서 분석하였다. 이를 위해 신규 시험이나 추가 데이터를 생성하지 않고, 현재 운영 중인 유도탄의 창정비 현황을 조사·분석하였다.

그 결과, 국내개발 유도탄의 창정비는 탄종별로 수행 단계와 목적이 상이하며, 특히 장기 저장이 전제되는 체계의 경우 창정비가 단순한 기능 복구를 넘어 수명연장과 성능 유지의 핵심 관리 수단으로 활용되고 있음을 확인하였다. 또한, 유도탄별 창정비 대상품목과 ASRP 대상품목 간 비교 분석을 통해, 열전지, 추진기관 관련 부품 등 시효성 구성품을 중심으로 일정 수준의 중복성이 존재함을 확인하였다. 이는 저장 신뢰성 평가 결과가 창정비 범위 및 시점 검토에 참고 정보로 활용될 수 있는 기술적 기반이 존재함을 시사한다.

반면 ASRP 수행체계는 저장 중 유도탄의 신뢰성 상태를 객관적으로 진단할 수 있는 제도적 수단으로 기능하고 있으나, 표본 기반 시험이라는 구조적 특성으로 인해 개별 유도탄 단위의 정비 수행 여부를 직접 결정하는 기준으로 활용하기에는 한계가 있음이 확인되었다. 특히 시험결과가 규격 일치 또는 불일치를 통해 상태를 판정하는 것 중심으로 제공되어 정비 주기 조정과 같은 정책적 의사결정에 직접 적용하기에는 정량적 정보가 제한적이라는 점이 주요 제약으로 도출되었다.

이에 따라 본 연구는 ASRP와 창정비의 기능적 역할을 명확히 구분한 연계 개념의 중요성을 확인하였다. ASRP는 저장 중 신뢰성 상태를 진단·평가하는 기능을 수행하고, 창정비는 기능 회복과 성능 재생을 담당하는 조치 수단으로 기능한다는 역할 구분을 전제로 할 때, ASRP 결과를 창정비 수행 여부의 자동 결정 기준으로 활용하기보다는 창정비 주기 및 범위를 검토하기 위한 기술적 참고 정보로 활용하는 접근이 합리적인 대안으로 도출되었다.

한편, ASRP 결과를 창정비 정책 검토에 반영하는 시나리오를 가정하여 이에 대한 비용 효과를 분석한 결과, 비용 절감 가능성이 제시되었다. 다만 해당 결과는 분석 과정에서 설정된 가정과 제한 조건에 기반한 것으로, 절대적인 비용 절감 효과로 해석하기보다는 정책 검토 단계에서 상대적 경향을 파악하기 위한 참고 지표로 활용하는 것이 적절함이 확인되었다.

종합하면, 본 연구는 기존에 독립적으로 운영되어

온 ASRP와 창정비 제도를 연계하여 해석함으로써, 저장 신뢰성 정보의 정책적 활용 가능성과 한계를 체계적으로 정리하였다는 데 의의가 있다. 이는 유도탄 창정비 정책의 합리화를 위한 직접적인 제도 변경을 제안하기보다는, 기존에 축적된 신뢰성 정보를 어떻게 해석하고 활용할 수 있는지에 대한 학술적 논의의 기초를 제공한다. 다만, 현 수준에서는 실제 창정비 정책 변경에 따른 효과를 실증적으로 검증하지 못한다는 한계를 가진다. 향후에는 ASRP 수행 이력과 창정비 결과 데이터를 장기적으로 축적·연계 분석함으로써, 저장 신뢰성 정보가 정비 정책 합리화에 미치는 영향을 정량적으로 검토할 필요가 있다.

참고문헌

1. Department of the Army. (2009). *AR 702-6: Ammunition Stockpile Reliability Program.*
2. Kim, D., Kim, M., Lee, J., & Lee, J. (2023). Study on shelf-life of small-caliber ammunition propellants based on accelerated and real-time aging test. *Journal of Defense Quality Society, 5*(1), 207-216. https://doi.org/10.23199/jdqs.2023.5.1.024
3. U.S. Department of Defense. (2005). *DOD guide for achieving reliability, availability, and maintainability.*
4. Department of the Army. (2016). *Ammunition surveillance procedures (DA PAM 742-1).*
5. Kim, B. R., Lee, Y. H., & Jung, H. C. (2025). Methodology for select CSI of guided weapons based on RAM for system safety. *Journal of Defense Quality Society, 7*(2), 254-264. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.2.024
6. North Atlantic Treaty Organization (NATO). (2025). *AASTP-1: NATO guidelines for the storage of military ammunition and explosives* (Edition D, Version 1). NATO Standardization Office.
7. United Nations Office for Disarmament Affairs. (2021). *International Ammunition Technical Guidelines (IATG) 01.60: Ammunition faults and performance failures* (3rd ed.). United Nations.
8. Yoon, K., Kwon, T., & Park, B. (2004). The Study on the Grade System and the Grading Criteria of Ammunition Stockpile Test Procedures. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 7*(4), 26-35.
9. Choi, S.-C., Bae, Y.-H., & Kim, D.-E. (2005). A Study on the Development of ASRP for Improvement of the Stockpile Ammunition Reliability. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 8*(4), 32-40.
10. Roh, Y. C., Cho, N.-W., & Lee, D. (2020). A Study on Determinants of Stockpile Ammunition using Data Mining. *Journal of Korean Society for Quality Management, 48*(2), 297-307. https://doi.org/10.7469/JKSQM.2020.48.2.297
11. Ahn, N., Kim, J., Kim, M., & Lee, J. (2019). Case Study on Quality Prediction of the Ammunition Stockpile Reliability Program Based on a Small Amount of Discontinuous Data. *Journal of Advances in Military Studies, 2*(1), 1-14. https://doi.org/10.37944/jams.v2i1.39
12. Hur, Y. (2024). Exploring the critical factors of depot maintenance on weapon systems in South Korea. *Journal of Advances in Military Studies, 7*(3), 1-12. https://doi.org/10.37944/jams.v7i3.271
13. Ma, N., & Xiang, Y. (2015). Analysis of repair level for missile based on reliability centered maintenance. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering* (pp. 975-980). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/amcce-15.2015.411
14. Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
15. Blanchard, B. S. (2003). *Logistics engineering and management* (6th ed.). Pearson.

모션인식 기반 K10 탄약운반장갑차 고장예측 시스템

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Development of Motion Recognition Based Fault Prediction System for a K10 Ammunition Resupply Vehicle

한승현, Seunghyun Han
육군종합군수학교, 화력장비학과, 학과장
Head Officer, Department of Fire Equipment, Army Consolidated Logistics School

권영호, Youngho Kwon
육군종합군수학교, 교무과, 교육계획장교
Academic Planning Officer, Academic Affairs Office, Army Consolidated Logistics School

전형규†, Hyungkyu Jeon
육군종합군수학교, 화력장비학과, 자주포정비교관
Self Propelled Howitzer Maintenance Instructor, Department of Fire Equipment, Army Consolidated Logistics School

Abstract

This study aimed to develop a fault prediction system for motor-driven ammunition loading and resupply of a K10 Ammunition Resupply Vehicle (ARV) based on motion recognition. As the K10 ARV is a critical component for ensuring the stable fire support of the K9 self-propelled Howitzer, the reliability of its resupply system directly affects mission continuity. This study implemented a system capable of real-time motor-status data acquisition and predictive analyses which is based on Condition-Based Maintenance Plus (CBM+). The methodology involved collecting multi-axis motion data, including acceleration, angular velocity, and gyroscopic signals via sensors attached to the motors to generate baseline motion patterns for normal operation. A machine learning-based algorithm was then applied to train the normal-state data and construct a fault prediction model capable of detecting anomalies during abnormal operations. This systematic process was designed to encompass data preprocessing, feature extraction, and model training and validation. The analysis results confirmed that the implemented system could detect real-time motor-status anomalies relative to the normal ranges and predict potential failure signs at an early stage. By implementing the concept of prognostic maintenance in a field environment, this study suggests a transition from traditional preventive maintenance to active condition-based maintenance (CBM+) approach. This system is expected to enhance equipment readiness and maintenance efficiency of the K10 ARV, ultimately contributing to the strategic direction of future weapon system development through real-time anomaly detection for similar platforms.

keywords : ARV, CBM+, motion recognition, machine learning, fault prediction

† Corresponding Author : Hyungkyu Jeon
Tel : +82-42-878-1612, email : hkyu6415@gmail.com
Army Consolidated Logistics School, 34059, 220-1, Jaun-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 22nd. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

현대 전장에서 전투장비의 가동률 확보는 전투력 유지의 핵심요소로 인식 되고 있다. 특히, 포병전력의 신속한 화력지원을 위해 운용되는 K10 탄약운반장갑차(Ammunition Resupply Vehicle, ARV)는 K9 자주포의 지속적인 탄약 보급을 담당하는 핵심 지원장비로서, 그 신뢰성과 운용 효율성이 전투 임무의 성공 여부에 직접적인 영향을 미친다.

K10 탄약운반장갑차의 핵심 기능은 탄약 자동 적재 및 보급 시스템으로, 다수의 전동기와 센서 기반 구동장치로 구성되어 있다. 그러나 이 시스템은 하나 이상의 전동기에서 고장이 발생할 경우 전체 기능이 정지되는 취약한 단일 장애 구조를 가지고 있어, 실제 운용환경에서 장비의 신뢰성을 저하시킬 우려가 있다. 반면, K9 자주포와 같이 직접 화력을 투사하는 전투장비에 대해서는 체계적인 상태진단 및 정비지원체계가 구축되어 있으나, K10 탄약운반장갑차에 대한 예지정비기반의 관리체계는 아직 미비한 실정이다.

K10 탄약운반장갑차는 K9 자주포와 달리 직접 화력을 투사하는 장비가 아닌 지속지원을 위해 존재하는 장비로 평시 작전 및 훈련, 화력대기태세 수준 유지에 있어 K9 자주포보다 상대적으로 기여도가 낮아 야전에서의 운용여건과 상태가 모두 달라 직접적인 고장원인을 찾기에도 어려운 실정이다.

이에 본 연구에서는 K10 탄약운반장갑차의 전동기 구동 데이터를 수집·분석하여 모션인식 기반의 고장예측 시스템을 연구하고자 한다. 구체적으로 각 전동기의 모션패턴을 가속도계 측정을 통해 데이터화하고 정상 상태와 이상 상태를 구분할 수 있는 모델을 생성하여, 구동 중 발생할 수 있는 이상징후를 조기에 탐지하고 고장을 사전에 예측하는 기술적 기반을 연구하고, 이를 통해 K10 탄약운반장갑차 가동률 향상 및 운용 신뢰성을 제고하는 것이다.

또한, 본 연구는 단순한 장비 진단기술 개발에 국한되지 않고 향후 K10 탄약운반장갑차와 같이 전동기를 구동장치로 활용하는 각종 무기체계로의 확대 적용 가능성을 고려하고, 특히 차세대 유·무인 복합 및 무인화 무기체계에 적용 가능한 모션인식 기반의 고장예측 기술로 발전시켜, 우리 군의 무기체계 전반에 걸친 총수명주기 및 통합군수지원 역량을 강화하는데 기여할 것이다.

2. 배경 및 관련 연구

2.1. K10 탄약운반장갑차의 탄약 적재·보급 시스템 개요

K10 탄약운반장갑차의 탄약 적재·보급 시스템은 Figure 1과 같이 컨베어, 수직이송, 수평이송, 적재장치, 장약이송으로 구분되어 있으며, 총 22개의 전동기로 구성되어 작동된다. 이때 각 전동기로 작동하는 장치별로 모션패턴 데이터를 수집하고 알고리즘 모델을 생성하여 패턴을 분석한다. 이후 머신러닝 학습을 통해 이상탐지 시스템을 개발, 장비 작동 간 이상탐지 시스템에 의해 각 장치별 전동기의 이상 유무를 실시간 예측하여 고장 전 정비를 통해 장비 가동 신뢰성 보장, 지속지원 여건을 확립하고자 한다.

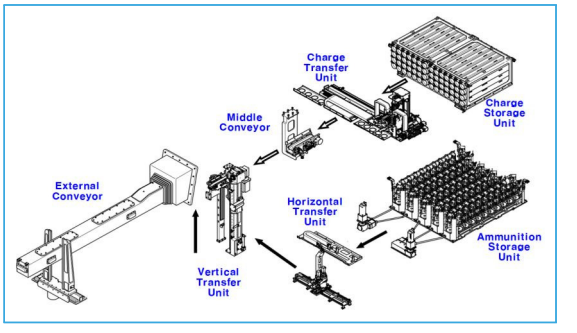


Figure 1. Configuration of the ammunition loading and resupply system in K10 ARV

2.2. K10 탄약운반장갑차의 전동기 종류 및 5개년 수요현황

2.2.1. 장치별 전동기 구성

K10 탄약운반장갑차의 탄약 적재·보급 시스템의 전동기는 총 13종 22개로 구성되어 작동되며, 5종의 전동기는 장치를 달리하나 동일한 유형의 전동기가 장착되어 운용된다. 이에 대한 세부사항은 Table 1과 같다.

Table 1. Motor Configuration by Component

Component category	Motor name	NIIN	Identical motor type (●▲◎★♠)
External conveyor	Left/right motor	37512-1386	·
	Up/down motor	37512-1383	·
	Auxiliary conveyor Front/rear motor	37512-1385	·
	Auxiliary conveyor Supply motor	37512-1384	·
	Transfer motor	37512-1381	★
Vertical transfer unit	Up/down motor	37512-8439	·
	Transfer motor	37512-9442	·
	Grip motor	37512-1382	●
Horizontal transfer unit	Left/Right motor	37512-1382	●
	Front/Rear motor	37512-8129	·
	Rotation motor	37512-9325	▲
	Grip motor	37512-9325	▲
Ammunition storage rack	Left motor	37518-6391	◎
	Right motor	37518-6391	◎
Middle conveyor	Transfer motor	37512-1382	●
Charge transfer unit	Left/right motor	37512-9443	·
	Up/down motor	37512-1381	★
	Charge delivery left motor	37512-9441	♠
	Charge delivery right motor	37512-9441	♠
	Charge extractor connection motor	37512-1382	●
	Charge extraction left motor	37512-9325	▲
	Charge extraction right motor	37512-9325	▲

* NIIN : National Item Identification Number

2.2.2. K10 탄약운반장갑차 전동기별 5개년 수요현황

K10 탄약운반장갑차에 장착되어 구동되는 13종의 전동기에 대해 수요실적 분석을 위해 국방군수통합정보체계를 기준으로 5개년 수요현황을 조사하여 분석해 본 결과는 아래 Table 2와 같이 확인되며 정보체계 상 화면은 Figure 2와 같다.

1개의 전동기만 고장 나도 K10 탄약운반장갑차의 핵심 기능인 탄약 보급·적재 시스템 구동이 불가능한 점을 고려하면 5개년 평균 수요를 단순 수치로 계산할 경우 연평균 43대의 K10 탄약운반장갑차의 장비 불가동으로 판단할 수 있다.

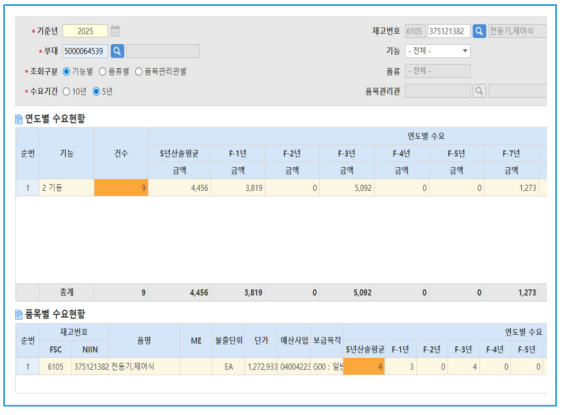


Figure 2. 5-Year demand performance status by electric motor

Table 2. 5-Year Demand Performance Status by Electric Motor

No.	Item name	NIIN	5-Year demand	Annual demand				
				F-1	F-2	F-3	F-4	F-5
1	Motor, control type	37512-1381	5	0	5	4	6	3
2		37512-1382	4	3	0	4	0	0
3		37512-1383	3	1	2	2	4	2
4		37512-1384	2	0	1	1	3	0
5		37512-1385	3	2	2	4	1	1
6		37512-1386	1	3	1	1	0	1
7		37512-8129	2	0	3	1	3	2
8		37512-8439	2	0	3	1	3	2
9		37512-9325	9	7	21	5	5	7
10		37512-9441	2	1	2	3	0	0
11		37512-9442	1	1	0	1	1	1
12		37512-9443	3	1	2	5	0	0
13		37518-6391	1	0	0	1	0	0
Sum			43	18	40	30	22	14

2.2.3. CBM+ 적용 고장진단 예측의 개념

상태기반정비(Condition-Based Maintenance Plus, CBM+)란 실시간으로 획득/저장한 정비 상태 정보를 데이터베이스화하여 예방정비 알고리즘을 개발하고, 이를 통해 고장분석 및 예방정비를 수행하여 정비 분야뿐만 아니라 예산, 조달 등 군수계획에 활용하는 개념으로서, 도식화하면 Figure 3과 같이 나타낼 수 있다[1].

Figure 3는 CBM+의 전반적인 구성체계를 나타낸 것으로 센서를 통해 획득한 데이터를 기반으로

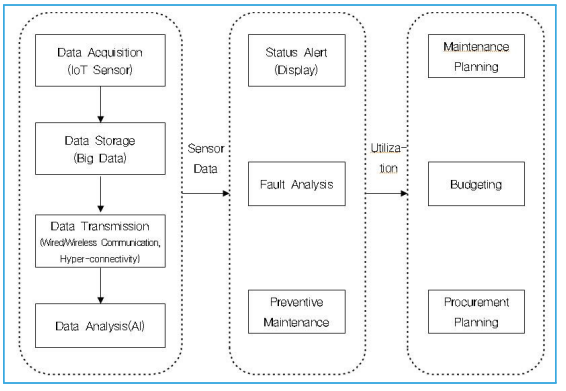


Figure 3. Concept of CBM+

상태정보를 분석하고, 이를 활용하여 상태경고, 예방정비 등의 단계를 거치는 순환적 구조를 보인다. 특히 IoT센서를 통해 수집된 상태정보가 빅데이터 플랫폼을 거쳐 분석됨으로서 장비의 이상징후를 조기에 탐지할 수 있는데 이를 기존 정비와 상태기반정비로 비교하여 나타내면 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Comparison Between Traditional Maintenance Systems and CBM

Category	Classification	Details
Corrective maintenance	Breakdown maintenance	* Maintenance performed upon failure
Preventive maintenance	TBM	* Maintenance performed according to planned schedule
Predictive maintenance	CBM	* Fault diagnosis is possible * Maintenance timing is determined by maintenance officer
	CBM+	* Predicts occurrence of failures * Maintenance timing is automatically determined by analysis tools

Table 3은 기존의 정비체계와 CBM+의 차이를 비교한 것으로, 과거의 고장 정비는 고장이 발생한 이후에 정비가 이루어지는 반응적 체계로 인해 정비에 따른 시간 및 비용 손실이 컸다. 이후 시간기반정비(Time-Based Maintenance, TBM)는 일정 주기에 따라 계획적으로 정비를 수행하였으나, 장비 상태와 무관한 주기적 정비로 인해 불필요한 자원 소모가 발생하는 한계가 있었다. 이에 비해 CBM은 센서 데이터를 기반으로 장비의 실제 상태를 진단하여 사전에 고장을 예측할 수 있도록 발전하였으며, CBM+는 이를 한 단계 확장하여 인공지능 알고리즘과 분석 Tool을 적용함으로써 정비 시점을 자동으로 판단하고 최적화된 예측정비를 수행할 수 있게 하였다.

CBM+ 적용을 통해 기대되는 효과는 다음과 같다. 첫째, 시스템 유지비용 절감 측면에서 불필요한 정비를 최소화하여 시간과 예산을 절감하고 장비 가동률을 높일 수 있다. 둘째, 안정성 제고를 통해 사전 예측정비로 돌발 고장 및 사고를 예방할 수 있다. 셋째, 운용 가능 시간의 예측이 가능해져 장비 운용 계획 및 정비 일정의 효율성을 높일 수 있다. 넷째, 물류 효율화를 통해 정비 부품을 사전에 준비할 수 있으며 부품 재고의 최적화를 달성할 수 있다. 마지막으로 장비 수명연장 측면에서는 구성품 상태를 기반으로 교체 주기를 합리화하여 장비의 기대 수명을 연장할 수 있다.

2.2.4. 전동기 모션인식 기반에 적용하는 핵심기술

(1) 모션패턴 기술

모션패턴(motion pattern) 기술은 기계나 로봇의 움직임을 데이터로 분석하여 최적의 동작을 구현하는 기술로 현재 기술성숙도 7 이상에 해당하는 성공한 기술로 평가된다. 이 기술은 산업현장 전반에서 적용되고 있으며, 자동차, 제조, 반도체, 전자부품 등 다양한 분야에서 실질적으로 활용되고 있다.

모션패턴 기술은 센서로부터 획득한 진동, 위치, 속도 등의 데이터를 시계열로 분석하여 기계의 상태를 진단하고, 인공지능 기반의 알고리즘을 통해 정상 상태와 비정상 상태를 구분한다. 이를 통해 장비의 이상 동작을 조기에 탐지하고, 효율적인 제어 및 반응이 가능하도록 지원한다. 또한, EtherCAT, OPC UA, ROS 등과 같은 산업용 표준 통신규격을 기반으로 다양한 장비 간 연동을 실현하고 있다.

특히 AI 및 센서 융합 기술과 결합될 경우 모션패턴 기술은 디지털 트윈(digital twin) 기반 시뮬레이션에 적용되어 실제 장비의 운용 상태를 가상환경에서 재현하고, 이상 신호를 사전에 예측할 수 있는 체계를 구축할 수 있다. 예를 들어 K1 전차의 파워팩에 진동 센서를 부착하여 수집된 데이터를 기반으로 모션패턴을 분석하고, 이를 인공지능으로 학습시켜 고장을 진단하는 연구가 수행된 바 있다. 이러한 연구는 군수장비의 예지정비체계 구축 가능성을 제시한다는 점에서 중요한 의의를 가진다.

(2) 머신러닝 기술

머신러닝(machine learning) 기술은 기술성숙도 7 이상으로 평가되며, 이미 다양한 산업 분야에서 안정적으로 운용되고 있는 고도화된 기술이다. 제조, 금융, IT, 헬스케어 등 다방면에서 활용되고 있으며, 단순한 알고리즘 수준을 넘어 데이터 기반의 자가학습(self-learning)과 패턴 인식 능력을 갖춘 형태로 발전하였다.

특히 제조산업 분야에서 머신러닝 기술이 생산관리시스템(PLC, ERP, MES 등)과 연동되어 스마트 팩토리(smart factory)내 설비 제어 및 자동화를 수행하고 있다. TensorFlow, PyTorch 등과 같은 대표적 머신러닝 프레임워크는 기술 표준화가 이루어져 다양한 사업환경에서 범용적으로 운용되고 있다.

머신러닝 기술은 방대한 데이터를 기반으로 스스로 학습하고 모델을 개선하는 특성을 지니며, 데이터의 양과 다양성이 증가할수록 보다 정밀하고 정확한 예측이 가능하다. 최근에는 ChatGPT, Gemini, Claude 등 생성형 인공지능(generative AI)의 발전에 따라 텍스트, 이미지, 음성 등 복합형 데이터를

동시에 처리할 수 있게 되었으며, 데이터가 지속적으로 변화하는 환경에서도 스스로 적응하고 재학습하는 자율형 구조로 발전하였다.

2.2.5. CBM+ 방산 및 민간분야 적용사례와 한계

(1) 방산 및 민간분야 적용사례

방산 분야에서는 Figure 4에서 보듯 K1 전차 파워팩 고장진단체계 연구 사례가 있다. K1 전차의 파워팩에 음향 및 진동 센서를 부착하여 정상데이터를 수집하고, 이를 기반으로 인공지능(Artificial Intelligence, AI)을 활용한 고장진단 체계를 개발한 선행연구가 존재한다. 정상 상태의 데이터를 패턴화하여 고장을 진단하는 이 체계는 운용 중 수집되는 음향 및 진동의 주파수를 시계열화하여 데이터를 축적하고, 이를 통해 비정상적인 상태를 탐지하는 방식으로 구성되어 있다.

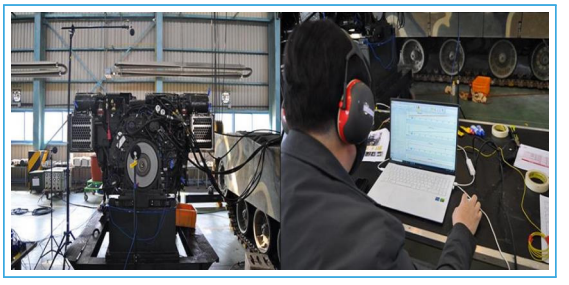


Figure 4. Research on K1 tank fault diagnosis system

그러나 실제 운용에서는 정상 모델과의 미세한 차이를 구별하여 어려운 경우가 발생하며, 기존 고장 데이터가 충분하지 않을 경우에는 정상 모델을 기준으로 고장 징후를 예측하기 때문에 진단의 정확도가 저하되는 한계가 있다. 또한, 장비의 건전성 지수를 계산하는 측면에서도 데이터의 불균형이나 환경 변수의 영향으로 인해 오차가 발생할 수 있다는 점이 확인되었다.

민간분야에서는 Figure 5와 같이 2014년 한국수력원자력발전소 관련 업체의 머신러닝 기반 관계 시스템을 발전소 플랜트에 적용하여 실시간 및 과거 데이터를 분석하고 설비의 건전성을 평가함으로써 이상 신호를 조기에 탐지하였다. 이를 통해 비정상 작동을 사전에 예측하고 잠재적 고장을 예방하는 체계를 구축하였다[2].

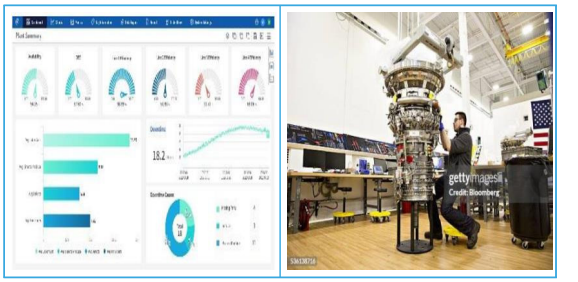


Figure 5. Fault detection for power plant facilities and prognostics for aircraft engine failure

또한, 항공산업에서도 머신러닝 기술의 적용이 확대되고 있다. 2018년 미국의 항공 엔진 제조업체 GE Aviation 社는 항공기 엔진에 장착된 센서 데이터를 실시간으로 분석하여, 머신러닝 기반의 고장예측 모델을 구축하였다. 이 시스템은 엔진의 이상 신호를 조기에 탐지하고, 이를 기반으로 정비 일정을 자동으로 최적화하여 운항 안정성을 높이는 동시에 유지비용을 절감하였다.

(2) 민간분야 적용사례의 한계점

군과 민간 분야의 공통점은 설비 운전 데이터를 수집·분석하여 고장을 예측한다는 점에서 유사하지만, 군용 무기체계는 발전소 설비와 비교할 때 운용환경과 요구성능 면에서 큰 차이를 보인다. 특히, 군용 장비는 진동, 전류, 온도, 전압, 저항 등 다양한 데이터를 종합적으로 분석해야 하며, 알고리즘의 특성에 따라 적용 방식과 정비 운용환경 등 고려사항이 크게 달라진다.

이러한 점에서 민간분야의 CBM+ 기술을 군에 적용하기 위해서는 운용환경의 특수성과 장치별·장비별 데이터의 다양성을 반영한 별도의 알고리즘 보정 및 모델링이 필요함을 알 수 있다.

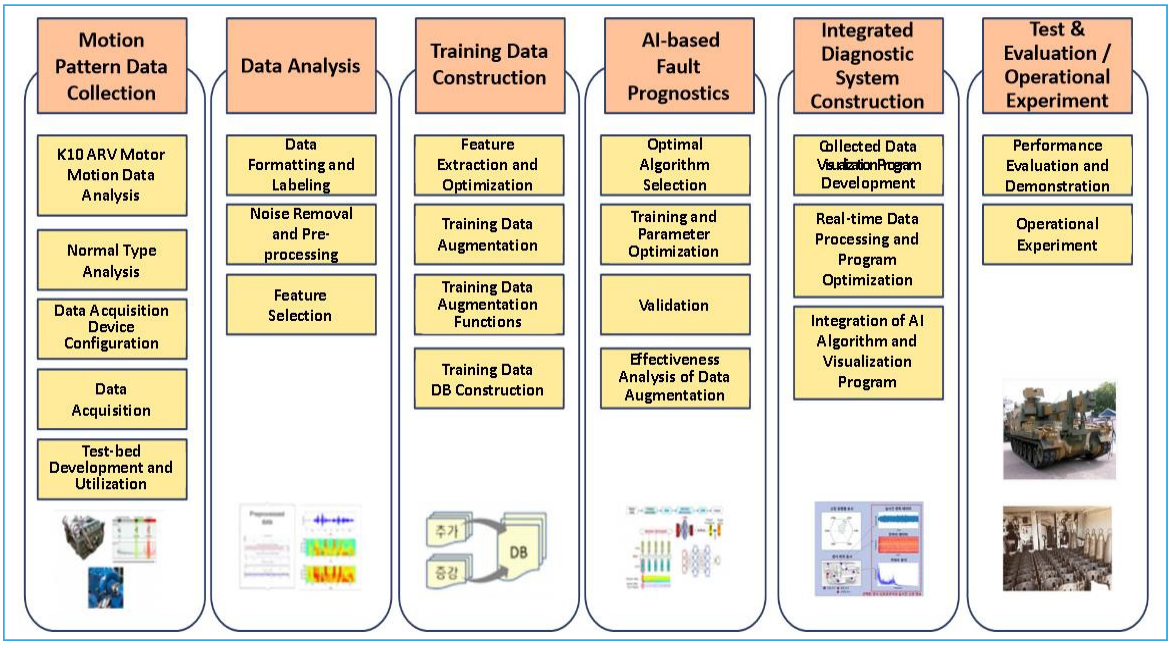


Figure 6. Concept of system operations and experiment

3. 시스템 설계 및 데이터 수집

3.1. 시스템 운영 및 실험개념

본 연구에서는 전동기 모션인식 기반 고장진단 시스템을 구현하기 위해 데이터 수집에서부터 분석, 학습자료 구축, 인공지능 고장예측기, 통합진단체계 구축, 그리고 시험평가로 구성되며 그 전체적인 개념은 Figure 6과 같다[3].

시스템은 전동기를 기반으로 장비에서 모션패턴 데이터를 수집하고, 이를 분석하여 학습자료를 구성한 후 인공지능 알고리즘을 통해 고장을 예측할 수 있도록 설계된다. 이후 통합진단체계와 시험평가 과정을 통해 실제 운용환경에서의 적용 가능성을 검증하도록 구성된다. 각 단계의 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 모션패턴 데이터 수집

K10 탄약운반장갑차 전동기에 부착된 센서를 통해 가속도, 각속도, 자이로 등의 모션패턴 데이터를 수집하도록 구성된다. 수집된 데이터는 정상 상태의 기준 데이터를 확보하기 위해 테스트 베드를 활용하여 얻어지며, 알고리즘 학습을 위한 표준 데이터를 구축할 수 있도록 한다[4].

(2) 수집 데이터 분석

수집된 데이터는 표준화된 형식으로 변환되어 데이터베이스에 저장되며, 라벨링 규칙에 따라 유형별로 분류되도록 한다. 이 과정에서 노이즈 제거 및 전처리 절차를 걸쳐 인공지능 학습에 적합한 특징(feature)을 추출할 수 있도록 한다.

(3) 학습자료 구축

학습자료는 정밀 자료획득장치를 활용하여 자동보급, 적재 등 다양한 운용 조건에서 데이터를 수집하고, 이 데이터를 바탕으로 학습용 데이터베이스를 구성하도록 한다. 데이터 검증 단계에서는 이상치 제거 및 정합성 점검을 통해 학습의 신뢰도를 확보하도록 설계된다.

(4) 인공지능 기반 고장예측

머신러닝 기반 알고리즘을 적용하여 모션패턴의 특성을 반영한 고장예측 모델을 구현하도록 한다. 정상 상태 데이터를 기준으로 모델 구조를 최적화하고, 파라미터 검증을 통해 예측 정확도를 향상시키도록 한다. 또한, 지속적인 학습이 가능한 자가학습 기능을 포함하여 데이터 축적에 따라 모델 성능이 점진적으로 개선되도록 구성 된다[5].

(5) 통합진단체계 구축

통합진단체계는 수집 및 분석된 데이터를 실시간으로 처리하고, 시각화 기반 인터페이스를 통해 운용자가 장비 상태를 직관적으로 확인할 수 있도록 설계된다. 이를 통해 장비 작동의 건전성을 효율적으로 파악하여 정비를 진행토록 의사결정이 가능하게 한다.

(6) 시험평가 및 운용성 실험

구축된 시스템은 군 운용환경에서 야전실험을 통해 성능과 운용성을 검증하도록 계획된다. 시험평가에서는 예측 정확도, 탐지 속도, 탐지 패턴 등의 항목을 검증하여 시스템의 실질적 적용 가능성을 분석하도록 한다.

이와 같이 본 연구의 시스템 운영 및 실험 개념은 데이터 수집부터 운용성 검증에 이르는 전 과정을 체계적이고 단계적으로 구성함으로써 향후 군 장비의 지능형 조장진단 및 예측정비 체계 개발에 기초자료로 활용될 수 있도록 한다.

3.2. 시스템 요구사항

시스템 요구사항은 기능 및 성능 측면에서 기준을 정립하였다. 데이터 취득의 정합성, 알고리즘의 유효성, 그리고 전장 환경에서의 임무 지속성 및 신속 대응의 실효성을 확보하는 데 중점을 두었다.

(1) 기능 요구사항

기능 요구사항은 시스템의 핵심 임무 수행을 위한 구성요소와 작동방식을 제어한다. 중점적으로 센서를 활용한 정밀한 모션 데이터 취득 및 분석을 통해 장비의 기준모델을 정립하는 것을 요구하는데 이는 고장 발생 전 미세한 이상징후를 조기에 감지하기 위한 필수 단계이다. 또한, 머신러닝 기법을 적용한 고장탐지 알고리즘 개발 및 실제 운용환경에 기반한 최적화가 필수적이며, 핵심 장치인 이송장치의 다양한 모션패턴을 반영해야 한다. 마지막으로 개발된 시스템은 test-bed 및 실제 현장 검증을 통해 실효성을 입증해야 하며, 사용자 편의를 위한 실시간 데이터 시각화 기능을 포함하여 운용자가 즉각적인 조치를 취할 수 있도록 지원해야 한다. 기능 요구사항은 아래 Table 4를 참고한다.

Table 4. Functional Requirements

Functional requirements
① Acquire motion data using sensors and develop a baseline model through data analysis.
② Sensor types must include acceleration, angular velocity, and gyroscope functions.
③ Develop a fault detection algorithm through machine learning.
④ Algorithm optimization must consider motion pattern analysis and the physical placement of sensors.
⑤ Validate simulation for fault data through a test-bed
⑥ Operational validation must be conducted in actual field environments to confirm effectiveness.
⑦ Visualize data by developing a user interface and real-time data display, installed on an internal display within the equipment.

(2) 성능 요구사항

성능 요구사항은 개발 시스템이 충족해야 하는 정량적인 기준을 제시하며, 군용 장비로서 요구되는 높은 신뢰성 및 가용성을 확보하는 데 목적이 있다. 탐지 성능 및 신뢰성은 일반적인 무기체계의 내장형 시험장비(Built In Test, BIT) 설계 시 90% 이상의 고장탐지를 목표로 하는 군수기준을 준용하였으며, 탐지속도는 장비 최초 예열구동을 위해 작

동 간 안정화 시간을(60초) 바탕으로 기준을 정립하였다. 또한, 데이터 범위 및 고장탐지 모션패턴 수는 원활한 데이터 구축 및 작동 모션 수를 기초로 기준을 판단하였다. 성능 요구사항은 아래 Table 5를 참고한다.

Table 5. Performance Requirements

Performance requirements
① The accuracy of anomaly detection must be 90% or higher
② The speed of normal detection must be within 10 seconds.
③ There must be 10 or more motion patterns for fault detection
④ The number of acquired motion pattern data must be 100 or more.

3.3. 센서 설치 및 데이터 수집결과

K10 탄약운반장갑차의 전동기 모션(수직, 수평, 상승, 하강, 회전) 데이터 취득을 위해 Figure 7과 같이 수직, 수평 이송장치에 센서를 설치하여 작동데이터를 추출하였다. 이때 센서는 가속도 및 각속도, 위치 변위를 모두 측정 가능한 모션인식 센서를 설치하였으며, 작동데이터를 시계열화하여 주파수 파형 형태로 변환, Figure 7과 같이 구현하였다. 시스템 요구사항은 기능 및 성능 측면에서 기준을 정립하였다. 데이터 취득의 정합성, 알고리즘의 유효성, 그리고 전장 환경에서의 임무 지속성 및 신속 대응의 실효성을 확보하는 데 중점을 두었다.

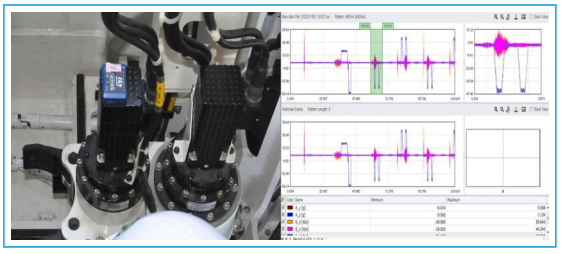


Figure 7. Attachment of motion recognition sensors and extraction of operational data

이후 수집된 데이터를 표준화된 형식으로 변환하여 라벨링 규칙(장치별 모션)에 따라 유형별로 수직 이송장치, 수평 이송장치로 구분하였으며 각 장치의 작동에 대해 분류하였다.

먼저 Figure 8은 수직 이송장치에 대한 데이터로서 그림 중앙의 분석결과(analysis)를 보면 시간의 흐름에 따라 위치 변위 값을 다음과 같이 4개로 분류하였다.

① 수직이송기 상승 : VERT_BD-UP
② 수직이송기 회전 : VERT_BD-RT
③ 수직이송기 역회전 : VERT_BD-RT(R)
④ 수직이송기 하강 : VERT_BD-DN(R)

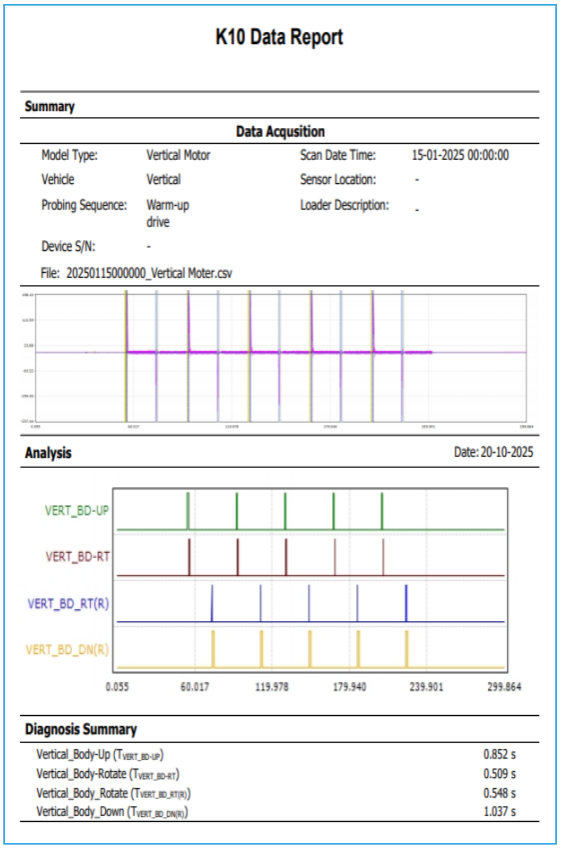


Figure 8. Vertical motion pattern data for the K10 ARV motor

위와 같이 분류하여 파형의 변화를 확인할 수 있다. 이때 평균 작동시간(diagnosis summary)을 확인할 수 있으며, 이 가속도와 각속도를 바탕으로 위치 변위값과 작동시간을 확인할 수 있다. 평균 작동시간은 다음과 같이 4개로 확인할 수 있다.

① 수직이송기 상승 : Vertical_Body-up
② 수직이송기 회전 : Vertical_Body-Rotate
③ 수직이송기 역회전 : Vertical_Body-Rotate(R)
④ 수직이송기 하강 : Vertical_Body-Down

다음으로 Figure 9은 수평 이송장치에 대한 데이터로 분석결과(analysis)를 보면 시간의 흐름에 따라 위치 변위값을 다음과 같이 7개로 분류하여 파형의 변화를 확인할 수 있도록 하였다.

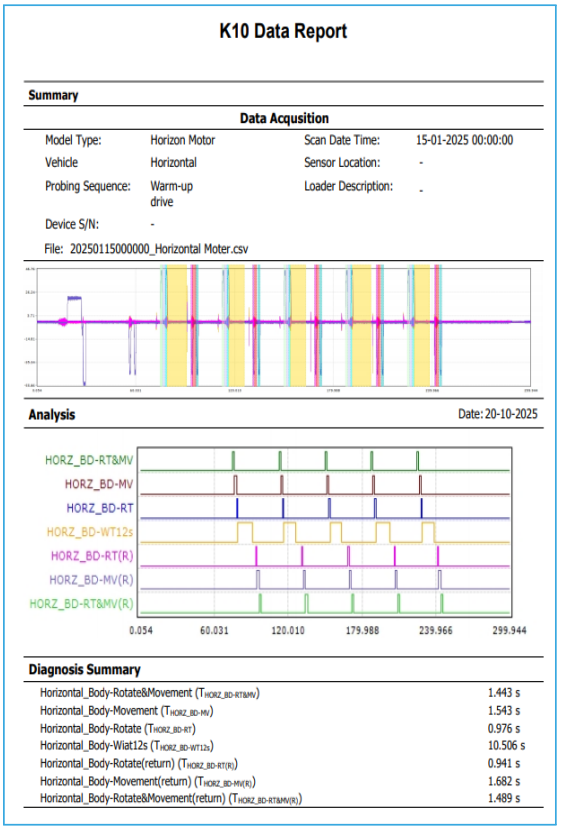


Figure 9. Horizontal motion pattern data for the K10 ARV motor

① 수평이송기 회전 및 이동 : HORZ_BD-RT&MV
② 수평이송기 이동 : HORZ_BD-MV
③ 수평이송기 회전 : HORZ_BD-RT
④ 수평이송기 대기 : HORZ_BD-WT12S
⑤ 수평이송기 역회전 : HORZ_BD-RT(R)
⑥ 수평이송기 역방향 이동 : HORZ_BD-MV(R)
⑦ 수평이송기 역회전 및 역방향 이동 : HORZ_BD-RT&MV(R)

위와 같이 분류하여 파형의 변화를 확인할 수 있다. 이때 평균 작동시간을 확인할 수 있으며, 이 위치 변위값과 작동시간을 바탕으로 가속도와 각속도를 확인할 수 있다. 평균 작동시간은 다음과 같이 7개로 확인할 수 있다.

① 수평이송기 회전 및 이동 : Horizontal_Body-Rotate&Movement
② 수평이송기 이동 : Horizontal_Body-Movement
③ 수평이송기 회전 : Horizontal_Body-Rotate
④ 수평이송기 대기 : Horizontal_Body-Wait12s
⑤ 수평이송기 역회전 : Horizontal_Body-Rotate(R)
⑥ 수평이송기 역방향 이동 : Horizontal_Body-Movement(R)
⑦ 수평이송기 역회전 및 역방향 이동 : Horizontal_Body-Rotate&Movement(R)

위 자료에서 확인할 수 있듯이 주파수 파형의 변화가 전동기의 움직임을 의미하며, 이러한 데이터를 수집하고 노이즈를 제거하여 학습모델을 생성, 패턴분석에 대한 정확도를 나타내 본 결과는 Table 6과 같다.

각 장치에 대한 모션 패턴을 구분하고, 최소 1,000개에서 최대 1,000,000개의 모션 데이터를 취득하여 알고리즘을 생성하였으며 이때 정상범위를 벗어난 고장 및 이상탐지의 정확도는 70~90% 수준으로, VERT_BD_UP 등 4개 항목을 제외한 7개 항

Table 6. Accuracy Analysis Table for Motion Pattern Training Models

Device category	Acquisition date	Pattern name	Data count (Threshold)	Accuracy (%)
Vertical	2025.01.15.	VERT_BD_UP	1,000,000	70
Vertical	2025.01.15.	VERT_BD_RT	2,000	90
Vertical	2025.01.15.	VERT_BD_DN(R)	1,000,000	95
Vertical	2025.01.15.	VERT_BD_RT(R)	1,000	90
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-RT&MV	1,000	90
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-MV	1,000,000	80
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-RT	1,000,000	90
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-WT12S	1,000,000	70
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-MV(R)	1,930	70
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-RT(R)	1,580	80
Horizontal	2025.01.15.	HORZ_BD-RT&MV(R)	1,000	96

목의 고장탐지가 90% 이상을 기록하며 무기체계 내장형 시험장비 설계시의 목표기준을 준용하였을 때 유의미한 결과를 도출하였다고 볼 수 있다.

이는 차후 학습모델을 수정 및 보완하면 충분히 전 항목에 대한 90% 이상탐지가 가능할 것으로 보이며, 본 연구의 결과는 K10 탄약운반장갑차의 고장예측 시스템 개발을 실현할 수 있는 기초 결괏값으로 정리된다.

4. 기대효과 및 확산방안

4.1. 기대효과

단기적으로 K10 탄약운반장갑차의 고장예측 시스템은 핵심 기능인 이송장치에 대한 정밀한 고장진단 및 예측을 가능하게 하여 장비의 가동률을 보장하고, 궁극적으로 작전 지속지원 능력을 극대화할 수 있다. 나아가 장기적으로 본 시스템은 유사한 유형의 이송장치를 운용하는 K56 탄약운반장갑차에도 즉시 확대 적용 가능하며, 이를 통해 포병 화력운용의 지속지원 여건을 안정적으로 보장하고 전체 장비 가동률을 극대화하는 효과를 기대할 수 있다. 해당 내용은 Table 7을 참고한다.

Table 7. Utilization Plan by Development Stage and Expected Effects

Category	Primary target of utilization
Short-term	• Developmnet and application of the prognostics system for the K10 ARV • Application of the prognostics system for the K56 ARV
Long-term	• Application of the prognostics system to weapon systems equipped with motors similar to current transport/ transfer units. • Integration into the design and application of the prognostics system during the performance upgrade of the K10 ARV following the development of K9 Block- I • For future weapon systems (manned/ unmanned hybrid and unmanned combat equipment), reflecting the prognostics system in the driving unit design as motor usage increases, and embedding proprietary fault diagnosis software.

(1) 장비 가동률 향상 측면 기대효과

이 시스템은 장비의 고장을 사전 예측하여 예방정비를 가능하게 함으로써 장비 가동률을 획기적으로 향상시킨다. 현재 전력화된 K10 탄약운반장갑차

530여대 중 연평균 20여대 이상이 불가동 상태인 점을 고려할 때 본 시스템 도입 시 절감되는 금전적 가치는 1대당 약 31억 원을 기준으로 연간 약 600억 원 이상일 것으로 추정된다. 궁극적으로 K10 탄약운반장갑차의 장비 가동률 향상은 포병 화력지원 태세의 안정적인 확보로 이어진다.

(2) 포병화력 지원여건 측면 기대효과

K9 자주포의 최대 발사속도는 분당 6발, 지속발사 속도 분당 2발로 총 48발의 적재 탄약을 약 20분 이내에 완전소모할 수 있어 신속한 탄약 보급이 필수적이다. 따라서 K10 탄약운반장갑차의 장기가동률 확보가 최우선으로 고려되어야 한다. 탄약 재보급 시 K10 탄약운반장갑차는 분당 10발의 탄약 보급이 가능하여 인력으로 보급 시 소요되는 시간당 10발보다 포병화력 지원여건에서 60배 이상의 빠른 속도로 재보급이 가능함으로 대화력전, 화력지원에서 매우 큰 효과를 발휘한다.

(3) 방산 수출 및 군사외교 증대 효과

현재 K9 자주포는 튀르키예, 폴란드, 인도, 호주, 이집트 등 11개국에 수출되어 K-방산의 선두주자로 신뢰성을 높이고 있었다. 따라서 함께 수출되는 K10 탄약운반장갑차의 고장예측 시스템은 잠재 구매 예정국가로의 수출 확대 가능성을 높일 수 있으며, 방산산업 관련 국제적 위상을 높일 수 있는 여건을 마련할 것이다.

4.2. 확산방안

본 연구의 핵심기술은 이송장치와 동일하거나 유사한 유형의 모션패턴이 발생하는 모든 무기체계에 적용할 수 있다. 먼저 동일유형의 구동장치를 사용하는 K56 탄약운반장갑차 약 300여대를 시작으로 유사유형의 구동장치를 사용하는 K1계열 및 K2 전차, 천마, 비호 등 현재 운용 중인 무기체계를 대상으로 확대 적용이 가능하며, 현존 및 미래 무기체계를 대상으로 동일·유사한 유형의 모션패턴을 발생하는 장치까지 해당 범위를 넓힐 수 있다. 이는 무기체계 개발부터 CBM+를 가능하도록 설계하여 실시간 무기체계의 작동상태를 판단하여 고장예측을 가능하도록 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 K10 탄약운반장갑차의 핵심 기능인 탄약 자동 적재·보급 시스템의 신뢰성 향상을 목표로 모션인식 기반의 고장 예측 시스템을 제안하였다. 해당 시스템은 장비 내부의 다수 전동기에서 발생하는 모션 데이터를 수집·분석하여, 구동 패턴의 변화를 기반으로 이상 징후를 탐지하고, 고장을 사전에 예측할 수 있도록 제안하였다.

기존의 정비 방식이 사후정비 또는 주기적 예방정비에 의존해 왔다면, 본 연구는 데이터 기반 예지정비 체계를 도입함으로써 장비의 고장률을 감소시키고, 작전 중단 시간을 최소화 할 수 있는 기술적 대안을 제시하였다. 이를 통해 K10 탄약운반장갑차의 가동률과 신뢰성을 향상시키고, 포병 전력의 지속적인 화력지원 능력을 보장할 수 있음을 확인하였다.

또한, 제안된 고장예측 모델은 K10 탄약운반장갑차에 국한되지 않고, 유사한 구동장치를 사용하는 무기체계로의 확대 적용이 가능하다. 특히, 향후 개발될 유무인 복합 및 무인화 무기체계 전반에 CBM+ 및 통합군수지원 체계를 고도화할 수 있을 것이다.

결론적으로, 본 연구는 군 장비의 총수명주기관리 관점에서 장비의 신뢰성 확보와 운용 효율성 향상을 동시에 달성할 수 있는 실질적인 방안을 제시하였다. 향후 연구에서는 전동기 모션데이터 딥러닝 기반 이상탐지 알고리즘을 적용하여, 보다 정밀한 예측 정확도를 확보하고, 야전 운용시험을 통해 시스템의 실효성을 검증하는 단계를 추진할 예정이다. 이를 통해 본 연구가 궁극적으로 지속 가능한 전력의 혁신적 발전에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1 Rhee, J.-M., Jeon, D.-J., Kim, Y.-G., & Kim, S.-J. (2024). The Operational Availability Improvement based on PMS & CBM+ Strategy. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 25*(6), 246-252. http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.6.246

2 전력경제신문. (2018, Oct 9). *BNF테크놀러지(주), 플랜트 히스토리 핵심기능 탑재한 스마트팩토리 솔루션. 전력경제신문.* https://www.epetimes.com/news/articleView.html?idxno=23475

3 Jeong, J. E., & Choi, G. (2024). On the Study of the Establishment of Condition Based Maintenance System for Weapon Systems. *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange, 10*(6), 65-83. http://dx.doi.org/10.47116/apjcri.2024.06.06

4 Shin, B. C., & Hur, J. W. (2022). A Study of Sensor Reasoning for the CBM+ Application in the Early Design Stage. *Journal of the Korean Society of Systems Engineering, 18*(1), 84-89. https://doi.org/10.14248/JKOSSE.2022.18.1.084

5 Kim, J., Jeong, S. R., & Kim, N. (2023). Performance Comparison of Anomaly Detection Algorithms: in terms of Anomaly Type and Data Properties. *Journal of Intelligence and Information Systems, 29*(3), 229-247. http://dx.doi.org/10.13088/jiis.2023.29.3.229

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 148-157, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.013

방산 중소기업의 국방품질경영체제 국방 특수 요구사항 이행을 위한 품질통제점 적용 방안

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

A Quality Control Gate Approach to Implementing the Specific Requirements of a Defense Quality Management System for Small and Medium-sized Enterprises

윤철근, Cheol Geun Yoon
(주)아이스펙, 품질보증부, 이사
Director, Quality Assurance Dept, I-Spec Co.

박종훈†, Jong Hun Park
대구가톨릭대학교, 경영학과, 교수
Professor, Department of Business Administration, Daegu Catholic University

이상천, Sang Cheon Lee
경상국립대학교, 산업시스템공학부/공학연구원, 교수
Professor, Department of Industrial and Systems Engineering/ERI, Gyeongsang National University

Abstract

This study proposes a Quality Control Gate (QCG)-based approach to bridge the gap between formal certification and the practical implementation of the Defense Quality Management System (DQMS) for small and medium-sized enterprises (SMEs) in the defense sector. Although the aim of using a DQMS is to enhance product quality and competitiveness, many defense SMEs experience a gap between the original intent of the system and its actual implementation owing to limited resources and a lack of systematic quality management experience.

While the focus is on the defense-specific additional requirements of Clause 8 of the DQMS, particularly Configuration Management (8.1.3.1-8.1.3.4) and Manufacturing Process Improvement (8.5.1.1), this study also analyzes the linkage between these requirements and the Quality Control Gates (QCG) operated by the Defense Agency for Technology and Quality (DTaQ) and prime contractors, as well as the evaluation stages of defense SMEs.

The results reveal a close relationship between the additional requirements of Clause 8 and QCG, demonstrating that their integration enables the unified management of design, production, and quality activities during the development phase. This integration allows defense SMEs to establish preventive quality management systems. This study is significant because it proposes a practical and implementable quality management approach by integrating the DQMS requirements with a QCG evaluation system.

keywords : Defense Quality Management System, Defense-Specific Additional Requirements, Quality Control Gate, Configuration Management, Defense Quality 4.0

† Corresponding Author : Jong Hun Park
Tel : +82-53-850-3451, Fax : +82-53-359-7066, email : icelatte@cu.ac.kr
Daegu Catholic University, 38430, Hayang-ro 13-13, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 14th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

국방품질경영체제(Defense Quality Management System, DQMS)는 일정한 품질경영 능력을 확보하고 있다는 것을 공식적으로 인증하는 제도로써 DQMS 인증을 보유한 방산기업은 경영 개선 및 경쟁력 향상에 효과가 있음이 다양한 연구를 통해 확인되었다[1-3]. 그러나 인증 획득에 평균 19.2개월이 소요된다는 점에서 알 수 있듯이 인증 절차는 기업 입장에서 부담이 될 수 있다[4]. 또한, 어렵게 DQMS 인증을 취득하더라도 인적·물적 자원이 부족하고 체계적인 품질 대응 경험이 미비한 중소기업들은 인증 유지와 지속적인 개선 활동에 현실적인 어려움을 겪고 있고, 이들 기업의 상당수는 품질경영 시스템 역량을 향상시키기 위한 인력 수급과 전문성 확보에 한계를 호소하고 있다. 중소기업의 경우 실무 중심의 업무 환경에서 단기적 생산성과 납기 대응이 최우선 과제로 작용하기 때문에, 품질경영 활동은 종종 '인증을 위한 형식적인 절차'로 인식되며, 고객 요구에 수동적으로 대응하는 수준에 그치는 경향이 있다. 이러한 상황은 DQMS의 도입 취지와 실제 운용 간 괴리를 발생시키는 주요 원인이 된다. Figure 1(a)에 제시된 바와 같이 DQMS 인증은 1999년부터 시작되어 누적 인증 기업 수가 지속적으로 증가하였다[3]. Figure 1(b)에서 확인할 수 있듯이 최근에는 인증 유지 기업 수가 감소하는 경향이 나타나고 있다. 일시적인 감소일 수 있겠지만 앞서 언급한 중소기업의 어려움에 의한 영향인지에 대해서는 추이를 계속 확인할 필요는 존재한다. 이러한 상황에서 정부는 2023년 '국방품질 4.0'정책을 기점으로 품질관리 체계를 예방, 개선, 혁신 중심의 품질보증으로 전환하고, 기존의 점검, 통제 방식에서 컨설팅 방식으로 변화할 것을 제안하고 있다. 이를 통해 개발, 생산 프로세스 설계 및 관리 지원, 업무 요소 분석, 관련 기관 및 기업과의 협력을 강화를 도모하고 있고 기업의 역량 강화를 통한 품질 확보와 체계 및 협력기업 대상 맞춤형 관리, 지원 방안을 표명하고 있다. 본 연구는 방산 중소기업이 DQMS를 단순한 인증이 아닌, 국방 정책에 호응할 수 있는 실질적인 도구로 활용할 수 있도록 지원하는 것을 목적으로 한다. 본 논문의 2장에서는 DQMS의 발전과 인증 절차 및 구조를 알아보고 최근 DQMS 관련한 연구들에 대해 알아본다. 3장에서는 최근 수행되고 있는 정부 및 체계기업의 활동을 알아보고 그와 연관된 DQMS 항목을 분석하여 방산 중소기업의 효과적인 DQMS 이행 방안에 대해 분석하였고, 결론을 4장에 기술하였다.

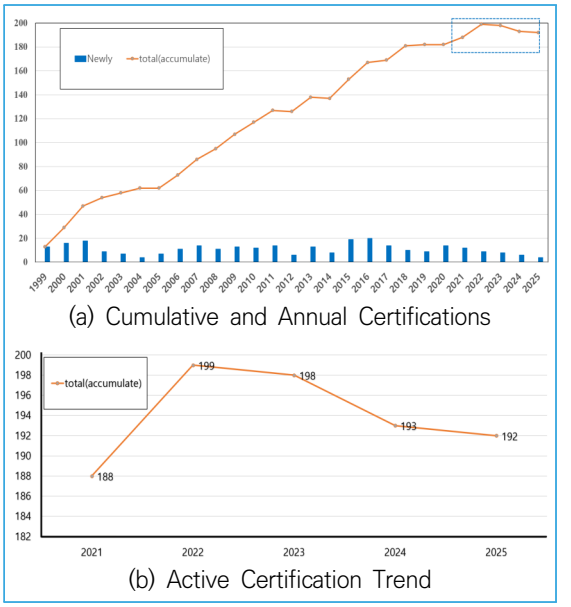


Figure 1. Trend of DQMS certification numbers

2. 이론적 배경

2.1. DQMS의 발전

DQMS는 방산기업 품질경영시스템의 완성도를 높이고, 방산 납품 과정에서의 리스크를 사전에 예방하기 위한 목적으로 제정되었다. 국방기술품질원이 군수품의 신뢰성을 보장하기 위해 계약된 군수품의 모든 품질 특성을 검사와 시험만으로 확인할 수 없으므로, 기업의 품질경영시스템을 검증하여 제품 규격의 적합성을 보장하는 것에 목적을 두고 있다. 이를 위해 다품종 소량 생산, 장기간 보관 및 사용, 극

한 환경에서 운용, 계약에 따른 생산 납품, 형상 관리 등 군수품의 특성을 강조한 표준으로 만들어지게 되었다.

Figure 2에 제시된 바와 같이 KDS 0050-9000은 제정 이후 여러 차례 개정을 통해 발전해 왔다. 1998년 처음으로 품질보증의 형태로 제정되었으며, 이후 국제 품질경영시스템과의 정합성을 강화하기 위해 2002년에는 ISO 9001:2000의 내용을 반영하였다. 2010년에는 1차 개정을 통해 ISO 9001:2008 개정 내용을 반영하고 기존 요구사항을 보다 구체화한 KDS 0050-9000-1을 발표하였다. 이어 2012년 2차 개정에서는 KDS 0050-9000-2가 개정되어, 공정거래 조항이 새롭게 추가되었다. 2015년에는 3차 개정으로 KDS 0050-9000-3에 생산 프로세스 검증을 비롯한 7개의 국방 특수 요구사항이 추가되었다. 이어 2016년 4차 개정에서는 KDS 0050-9000-4에 ISO 9001:2015의 개정 내용을 반영하여 리스크 관리를 강조하고, 위변조 방지와 같은 국방 특수 요구사항을 추가하였다. 2020년에는 5차 개정인 KDS 0050-9000-5를 통해 ISO 9001:2015의 최신화 내용을 반영하고 윤리경영 및 안전 관련 요구사항을 한층 강화하였다. 그리고 2024년에는 DQMS 인증의 기준이 규격서 KDS 0050-9000에서 국방 표준서 KDS STD-0005로 변경되었는데 내용상 큰 차이는 없지만, 방산 수출이 증가하는 추세 속에서 국내 중심의 규격에서 국제적인 표준으로 발전하려는 방향성을 제시한다는 점에서 의미가 크다.

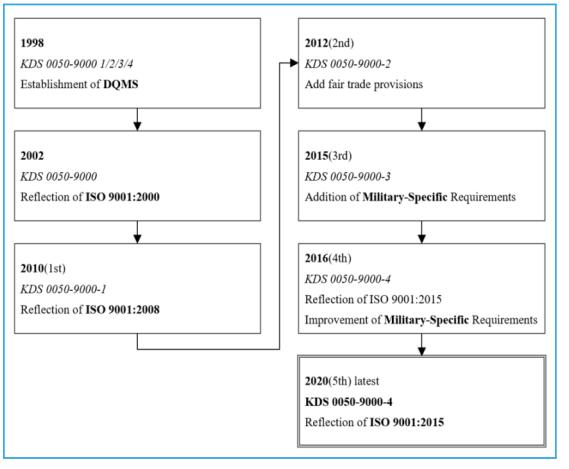


Figure 2. History of revision of DQMS standards

2.2. DQMS 인증 절차

DQMS 인증 절차에 대한 관련 법규로 방위사업법 제29조의 2항이 제시되어 있다[5]. 이 법규에는 인증기준에 따라 군수품의 품질을 보장할 수 있는 품질경영시스템을 구축한 경우 그 방산기업에 대하여 인증할 수 있다는 내용이 명시되어 있다. 인증 신청 조직의 자격으로 국방 규격의 요구사항에 따라 품질경영시스템을 수립하여 6개월 이상 실행하고, 내부심사와 경영검토의 최소 1회 이상 실적이 있어야 한다. 심사 시 기업의 품질경영 분야의 주요 성과와 프로세스 운영과 관련된 사항을 검토하게 된다. 심사 절차는 Figure 3에 제시된 바와 같이 단계로 구성되어 있으며, 각 단계에서 적합성 평가가 수행된다.

인증 적격 심의에서는 인증 대상 범위 및 대상 조직, 인증 분류 및 범위, 적용 규격 등 인증의 적합성과 심사 내용, 부적합 내용 및 조직 시정조치 결과 등 심사 결과의 타당성을 확인하게 된다. 인증 심의

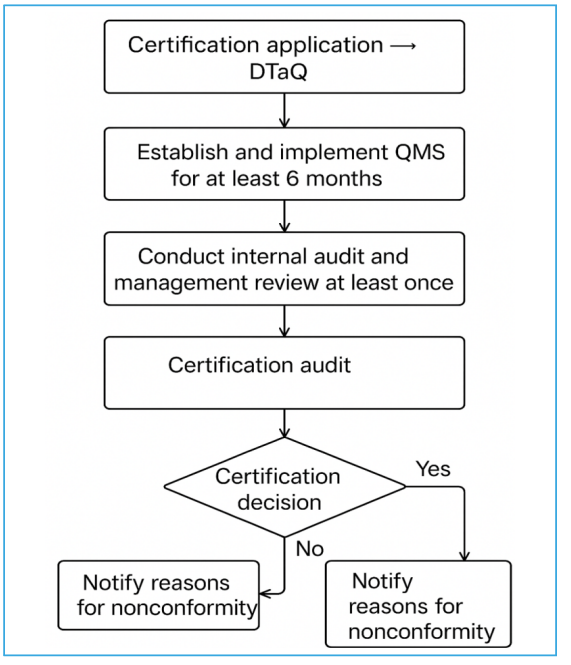


Figure 3. DQMS certification process

결과 적격으로 결정된 조직에 대해 방위사업청으로 인증서 발급 의뢰하게 되고 부적격으로 결정된 인증 신청조직에 대해서는 사유 및 내역을 첨부하여 해당 조직에 통보하게 된다. 이러한 절차를 바탕으로 기업은 DQMS 인증을 추진할 수 있다.

2.3. DQMS의 구조

품질경영시스템에서 말하는 '시스템'은 단순한 구조나 장치를 의미하는 것이 아니라, 조직 전체가 품질 목표를 달성하기 위해 설계하고 운영하는 일련의 프로세스를 의미한다. 품질경영시스템 인증을 획득한 기업은 조직 전반의 성과 향상과 지속 가능한 발전을 위한 기반을 확보하게 되며, 이는 제품의 경쟁력 제고는 물론, 시스템 구축에 크게 기여하는 것으로 연구되었다[6]. 가장 보편적인 품질경영 표준으로 ISO 9001을 예로 들 수 있다. ISO 9001은 국제 표준으로, 모든 산업 분야에 적용이 가능하고 제품 및 서비스의 일관된 품질보증을 목적으로 하고 있다. ISO 9001 인증은 기업이나 조직의 품질보증 능력에 대한 고객 입장의 관심 사항으로 조직의 전략, 방침 및 목표를 일관성 있게 정렬된 시스템을 통하여 성과를 획득할 수 있게 하는 것을 목적으로 하고 있다.

ISO 9001에서는 품질경영시스템의 수립과 운영에 있어 객관적 증거를 통한 입증을 요구하기 때문에 기업은 이를 수행하기 위해 요구사항에 대해 충분한 이해가 필요하다. 이와 같은 구조는 고객 요구를 충족하는 제품과 서비스를 제공하여 고객 만족 달성이라는 목표를 지속적으로 유지할 수 있게 도움을 줄 수 있다. DQMS는 ISO 9001 요구사항을 기반으로 국방 특수 요구사항이 결합된 구조로 구성되어 있으며, Figure 4에 제시된 바와 같이 "Plan(계획)-Do(실

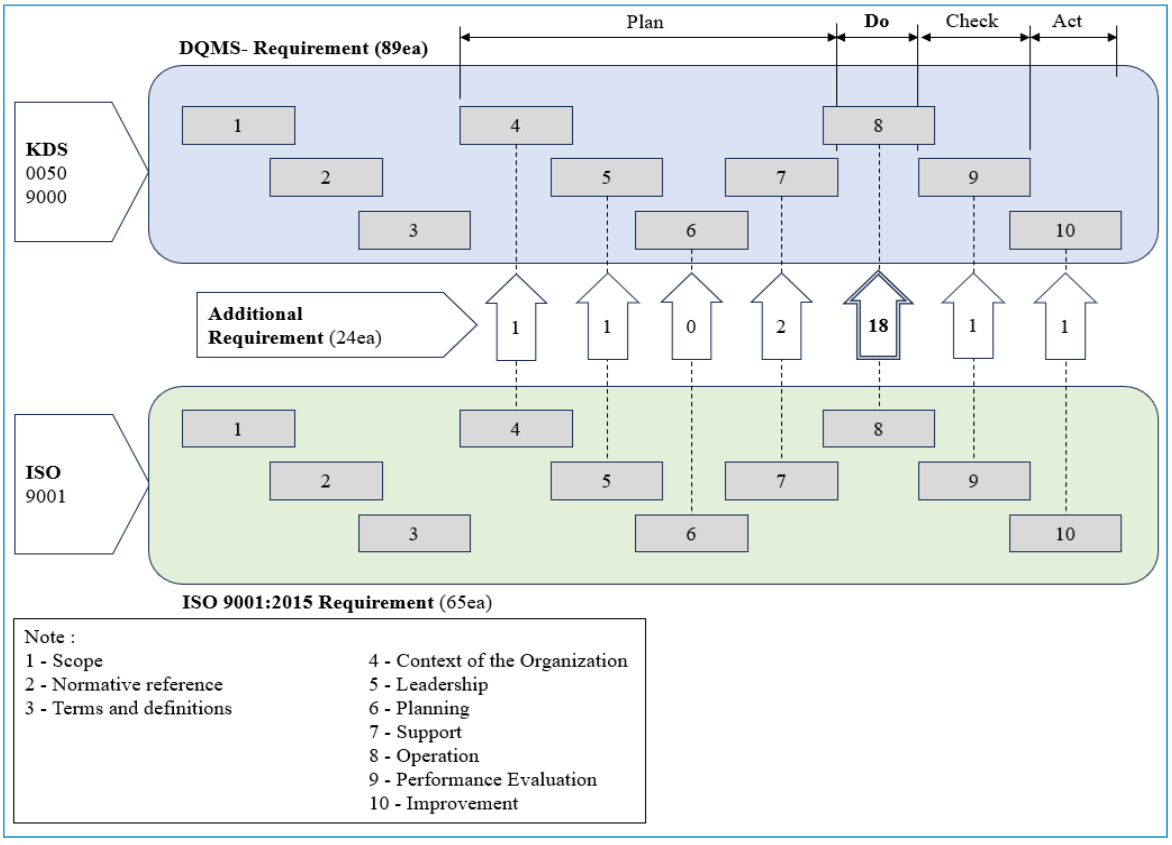


Figure 4. DQMS combined ISO 9001 with additional requirement

행)-Check(검토)-Act(조치)" 체계 내에서 실행 중심의 요구사항이 강조된다. 계획(Plan)단계는 4~7절, 실행(Do)단계는 8절, 검토(Check)단계는 9절, 조치(Act)단계는 10절이다.

특히 국방 특수 요구사항은 8절에 18항목이 포함되어 있어 총 24항목의 75%로 높은 비중을 차지하고 있다. 8절에 국방 특수 요구사항이 다수 포함되어 있다는 것은, DQMS가 현장 실행을 중시하고 있다는 점을 시사한다. 즉 DQMS가 기업의 품질경영시스템에서 실행 능력을 강조하고 있다는 근거로 볼 수 있다. Table 1에 제시된 바와 같이 DQMS 8절의 국방 특수 요구사항은 총 18개 항목으로 구성되어 있다.

Table 1. Clause 8 of DQMS defense additional requirement

Items	Requirement title
8.1.1	Acceptance criteria for products and processes
8.1.2	Quality assurance activity plan
8.1.3.1	Configuration Identification
8.1.3.2	Configuration Control
8.1.3.3	Configuration Verification
8.1.3.4	Configuration Status Accounting/Record Retention
8.1.4	Prevention of counterfeiting or tampering
8.1.5	Avoid use of suspected unauthorized parts
8.4.2.1	Verification of externally provided processes, products and services
8.5.1.1	Manufacturing Process Review/Improvement
8.5.1.2	Management of special processes
8.5.1.3	Work instruction
8.5.1.4	Software loading process management
8.5.1.5	Preventive maintenance
8.5.4.1	Storage and inventory
8.5.4.2	Storage Life Items Control
8.5.5.1	Handling of user complaints and quality information
8.7.3	Management of nonconforming products

8.1(운용 기획 및 관리)의 하위 항목으로 8.1.1(제품 및 프로세스의 수락기준의 문서화), 8.1.2(품질보증 활동계획서), 8.1.3.1(형상식별), 8.1.3.2(형상통제), 8.1.3.3(형상확인), 8.1.3.4(형상자료 유지), 8.1.4(위조 또는 변조의 방지), 8.1.5(의심되는 미승인부품의 사용방지)가 이에 해당된다.

8.4(외부에서 제공되는 프로세스, 제품 및 서비스의 관리)의 하위 항목으로 8.4.2.1(외부에서 제공되는 프로세스, 제품 및 서비스의 검증)이 있다.

8.5(생산 및 서비스 제공)의 하위 항목으로 8.5.1.1(생산 프로세스 검토), 8.5.1.2(특수공정에 대한 관리), 8.5.1.3(작업지침서), 8.5.1.4(소프트웨어 장입 프로세스 관리), 8.5.1.5(예방 보전), 8.5.4.1(보관 및 재고), 8.5.4.2(저장수명 제품의 관리), 8.5.5.1(사용자 불만 및 품질정보 등의 처리)가 이에 해당된다.

8.7(부적합 출력/산출물의 관리) 하위 항목으로 8.7.3(불합격품의 관리)로 항목별 제목을 확인할 수 있다.

2.4. 국방 품질 정책에 따른 제조가능성 분석 및 형상관리 교육

DQMS 인증제도의 도입 확대는 방위산업 제품의 품질 수준 제고에 기여하고 있으며[5], 정부는 최근 이를 위한 제도적 기반 마련을 위해 적극적으로 나서고 있다. '국방품질 4.0' 정책을 통해 기존의 사후 점검 중심의 통제형 품질보증 체계에서 벗어나, 제품의 기획, 개발단계부터 생산, 운용, 폐기에 이르기까지 전주기를 아우르는 통합 품질관리 체계 구축을 추진하고 있다. 이는 방산기업에 대해 단순한 품질검증 수준을 넘어, 자율성과 책임 의식을 기반으로 한 선제적 품질확보 전략으로 전환하고자 하는 정부의 정책적 방향성을 반영한 것이다.

방산 중소기업을 대상으로 한 '무기체계 제조가능성 분석 및 형상관리 교육'은 사전개념 연구단계와 연계하여, 형상관리 강화와 제조기업의 품질역량 향상을 지원하기 위한 활동이다[7]. 또한, 사전개념 연

구는 소요 제기 이전 단계에서 기술, 일정, 비용 등의 사업 리스크를 사전에 식별하고 관리하기 위한 제도적 기반으로 활용된다[8]. 이 교육의 개요는 무기체계 제조기업 대상으로 개발단계 제조가능성 분석 소개 및 형상관리에 대한 교육을 추진하는 것으로 설명되었다. 교육 내용으로는 신속소요 연구개발 사업의 제조가능성 분석과 무기체계 제조기업 대상 신속소요 연구개발 사업에 대해 소개하였다. 그리고 사전개념 연구와 제조가능성 분석과 주요 분석 사항을 소개하였다. 형상관리에 대한 교육으로 무기체계에 대한 형상식별서 작성 시 주요 문제점 분석과 형상식별 가이드북의 주요 사항을 소개하였다. 이 교육 활동과 연관된 국방 특수 요구사항을 선정하여 3장에서 분석하고자 한다.

2.5. 선행 연구 고찰

DQMS와 관련된 연구는 국방 및 방산 분야 학술지를 중심으로 지속적으로 이루어지고 있다. 기존 연구들은 주로 DQMS 인증이 기업의 경영성과 및 품질 수준 향상에 미치는 영향 분석에 초점을 두고 있다. DQMS 인증이 방산기업의 품질성과와 경영성과에 긍정적인 영향을 미친다는 점이 실증적으로 분석되었으며[1], 군수품 품질 향상을 위한 DQMS 적용 방안도 제시된 바 있다[2]. 또한, DQMS 요구사항에 대한 중요도-난이도 분석을 통해 형상관리 관련 항목이 상대적으로 높은 난이도를 가지는 핵심 요구사항임이 제시되었으며[9], 기업의 DQMS 요구사항 대응 과정에서 발생하는 업무 부담과 중소기업이 겪는 현실적인 어려움도 분석되었다. 이러한 연구들은 DQMS 요구사항의 특성과 적용상의 문제점을 이해하는 데 기여하고 있다. 한편, 최근 연구에서는 개발단계 품질관리 및 제조가능성 분석의 중요성이 강조되고 있다. 무기체계 개발단계에서 품질통제 프로세스 적용을 통해 설계 품질 향상과 품질 비용 절감 효과가 확인되었으며[10], 제조 가능성 분석을 체계화하여 개발 초기 단계에서 제조 리스크를 사전에 식별하는 방법론도 제안되었다[11].

그러나 기존 연구들은 개별 요구사항 분석이나 인증 효과 분석에 집중되어 있으며, DQMS 요구사항을 실제 현장 적용 관점에서 통합적으로 연계하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 중소기업의 적용 방안으로 구체화한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 DQMS 8절 추가 요구사항과 체계기업의 평가 체계를 연계하여 방산 중소기업이 실질적으로 적용 가능한 실행 방안을 제시함으로써 기존 연구와 차별성을 갖고자 한다.

3. 품질통제점(QCG : Quality Control Gate) 기반 방산 중소기업 적용 방안 분석

3.1. 형상관리의 중요성과 제조가능성 분석의 대응 방향

형상관리와 관련이 있는 DQMS 국방 특수 요구사항은 다음과 같다. 8.1.3.1(형상식별), 8.1.3.2(형상통제), 8.1.3.3(형상확인), 8.1.3.4(형상자료 유지) 항목으로 제품의 형상을 체계적으로 식별·관리하고 변경사항을 통제하는 것을 목적으로 하고 있다. 형상관리는 군수품의 기능적, 물리적 특성을 식별하고 이를 문서화한 후, 해당 특성의 변경을 체계적으로 통제하는 활동을 의미한다. 방산 업무는 군수품의 특성상 요구사항이 명확히 특정되어 있기 때문에, 형상을 정확히 식별하고 이에 대한 검토 및 확인을 수행해야 하며, 제조 공정에서는 실증 등을 통해 그 형상이 요구사항에 부합하는지 반드시 검증되어야 한다. 이러한 정부 요구사항에 효과적으로 대응하기 위해서는, 개발단계에서 다양한 공정과 시험을 거쳐 품질이 체계적으로 검증될 수 있는 시스템이 구축되어야 한다. 그에 따라 형상관리는 타 사업 분야에 비해 방산기업이 가져야 할 가장 특수한 요구사항이라 볼 수 있다. DQMS 인증을 준비하는 기업을 대상으로 요구사항의 중요도와 난이도를 분석한 연구를 살펴보면 형상관리의 난이도 인식이 높은 것을 확인할 수 있다[9].

제조가능성 분석 관련 DQMS 군수 추가항목은 8.5.1.1 제조공정 개선으로 군수품 특화 제조공정의 지속적인 개선을 위해 현장 피드백을 설계에 반영하고, 군수품 생산공정의 완전성 향상으로 이어지도록 지원하는 것을 목적으로 하고 있다. 단순한 시정, 개선 활동을 넘어, P-FMEA, 특수공정 관리로 연결되는 제조성숙도 체계를 구축하도록 요구한다. 이는 현장 데이터를 설계에 피드백하고 형상통제를 통해 제조공정을 예방 중심으로 전환하고, 군수 규격의 일관된 적합성을 보장하는 데 목적이 있다. 특히 인력·자원이 한정된 중소기업일수록 이 요구사항을 표준화하여 시작해 반복 및 확장하는 전략이 효과적 일수 있다.

3.2. 품질통제점(QCG) 평가를 통한 관리 체계 구축 방안

국방기술품질원은 제조 후 불량 검출 중심에서 예방적 품질관리로 전환을 추진하고자 기술·생산·품질 연계성 강화를 위해 기술문서 및 시제품 검증 능력 향상을 통한 개발 품질 확보를 추구하고 있다. 이에 따라 개발·생산·프로세스 설계 관리 지원 및 협력 강화를 위해 국방기술품질원과 체계기업 간 QCG를 단계별로 설정하여 연계성을 강화하고 있다. 개발단계 품질관리 프로세스를 정립하고, 이를 37개 무기체계 사업에 적용하여 효과를 검증한 연구 결과에 따라 QCG 평가는 국방기술품질원의 개발단계 품질관리의 핵심 도구로서, 설계품질 향상, 최초 양산 준비성 확보, 개발-양산-운용단계의 연계 품질관리 기반 마련에 기여하고 있다고 알려졌다[10]. QCG 평가는 품질관리 통합 및 비용 절감을 위해 설계 품질, 규격화, 생산 품질보증 체계를 통합 관리하여 시행착오를 방지하여 품질 실패 비용 저감의 효과가 있으므로 이러한 방안을 통해 방산기업의 품질 역량을 향상시키고, 체계적인 품질관리 체계를 구축하는 것이 가능하다. 이후 국방기술품질원에서는 소요기획 단계부터 제조위험을 조기 식별하고 이를 양산계획에 반영하기 위해 기술·공정 중심의 항목으로 구성된 제조가능성 분석 프레임 워크를 제안하고, 실제 사전개념연구 과제에 적용하여 제조가능성 분석 절차의 체계화 방안 제안하는 연구를 수행하였다[11].

방산 중소기업의 품질경영 수준을 향상시키기 위해서는 설계, 생산, 품질 활동 간의 연계성을 확보하고, 개발단계부터 양산단계까지 일관된 품질관리 체계를 구축하는 것이 중요하다. 이를 위해 Figure 5에 제시된 바와 같이 방산 체계기업인 H社는 국방기술품질원과의 QCG를 활용하여 협력기업의 품질관리 활동을 단계적으로 검증하고 통합 관리하는 프로세스를 실시하고 있다. 이 프로세스는 상세설계 검토(Critical Design Review, CDR), 설계검증(Design Verification Review, DVR), 시제검증(Production Verification Review, PVR) 단계로 구성되며, 각 단계에서 협력기업을 5단계로 평가한다.

Table 2에 제시된 바와 같이 DQMS 8절의 국방 특수 요구사항은 CDR, DVR, PVR 단계에 따

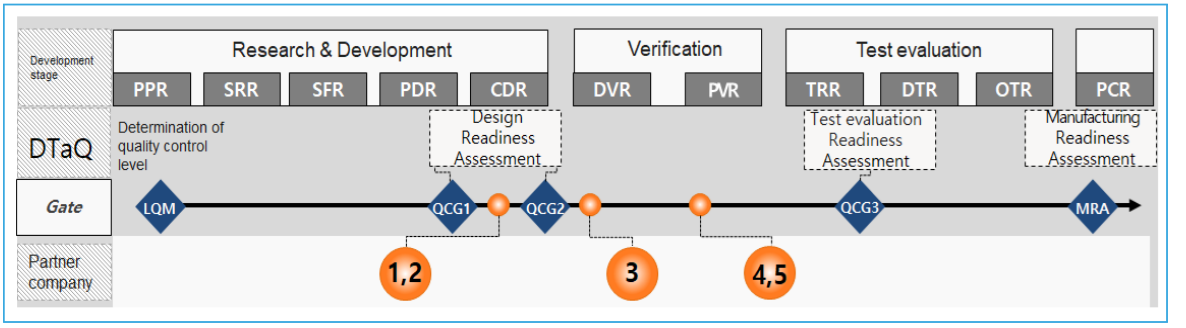


Figure 5. Development quality verification process and verification activities

Table 2. Mapping of Defense Additional Requirements in DQMS (Clause 8) to Evaluation Stages

Stage	Items	Purpose	Effects
CDR	8.1.1, 8.1.2, 8.1.3.1, 8.1.3.2	Clarification of design criteria and establishment of configuration baseline	Elimination of ambiguity in design criteria and prevention of initial quality risks
DVR	8.1.3.3	Verification of design results and assurance of configuration consistency	Assurance of design quality and establishment of verification-based quality management system
PVR	8.1.3.4, 8.5.1.1, 8.7.3	Quality assurance before mass production and stabilization of manufacturing processes	Stabilization of initial mass production quality and reduction of quality failure costs

라 매핑될 수 있다. 먼저, CDR 단계에서는 설계 완성도 확보와 초기 품질 리스크 식별을 주요 목적으로 하고 있으며 DQMS 항목 중 8.1.1(제품 및 프로세스의 수락기준의 문서화), 8.1.2(품질보증활동계획서), 8.1.3.1(형상식별), 8.1.3.2(형상통제)과 연관이 있는 것으로 분석이 가능하다. 이 단계에서는 수락기준의 적정성, 품질보증활동계획서, 형상식별 및 형상통제 체계, 단종부품 관리 여부를 주요 평가 항목으로 설정한다. 평가 방법으로는 설계문서 및 도면 검토를 통해 수락기준의 일관성을 확인하고, 품질계획의 적합성을 검증하며, 단종부품 및 대체 부품 적용 여부를 검토한다. 이러한 평가를 통해 설계 산출물이 요구사항과 정합성을 확보하고 형상관리 체계가 구축된 상태를 목표 수준으로 설정할 수 있으며, 기대 효과로는 설계단계에서의 오류를 사전에 제거하고 개발 리스크를 최소화할 수 있다.

다음으로, 설계검증 단계에서는 설계 결과의 검증과 시제품 제작 준비상태 확보를 목적으로 하고 있으며 DQMS 항목 중 8.1.3.3(형상확인)과 연관이 있는 것으로 분석이 가능하다. 주요 평가 항목은 형상확인 결과, 시험계획의 적정성, 공정 검토 결과로 구성된다. 평가 방법으로는 시험계획 대비 검증 수행 여부를 확인하고, 설계 산출물과 시험 결과 간 일치성을 분석하며, 공정의 적합성을 검토한다. 이를 통해 검증 데이터 기반으로 설계 적합성이 확보되고 시제품 제작이 가능한 상태를 목표 수준으로 설정할 수 있으며, 기대 효과로는 설계 품질 확보와 시험 기반 품질검증 체계 확립이 가능하다.

다음으로, 시제검증 단계에서는 양산 전 품질 확보와 제조공정 안정화 검증을 목적으로 하고 있으며 DQMS 항목 중 8.1.3.4(형상자료 유지), 8.5.1.1(생산 프로세스 검토), 8.7.3(불합격품의 관리)과 연관이 있는 것으로 분석이 가능하다. 주요 평가 항목은 설계문서와 시제품 간 일치성, 전수검사 결과, 환경시험 결과, 불합격품 처리 기록이다. 평가 방법으로는 전수검사 및 환경시험(진동, 온도, 습도, 내구도 등)을 수행하고, 불일치 항목에 대한 시정조치와 공정 개선 활동을 확인한다. 이를 통해 설계와 생산 결과 간 완전한 일치성과 양산 가능 상태 확보를 목표 수준으로 설정할 수 있으며, 기대 효과로는 초기 양산 품질 안정화와 품질 실패 비용 감소가 기대된다. 이와 같이 QCG 기반 평가를 DQMS 국방 특수 요구사항과 연계하여 구조화함으로써 협력기업의 품질관리 활동은 단순 대응 수준에서 벗어나 DQMS의 근본적인 취지인 예방 중심의 품질관리 체계로 전환될 수 있다. 또한 형상관리와 제조공정 개선 요구사항이 개발 전 단계에 걸쳐 반복적으로 검증됨으로써 설계, 생산, 품질 간 데이터 흐름이 일원화되고, 품질 문제의 사전 예방과 지속적 개선이 가능해질 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 방산 중소기업이 DQMS 인증 및 유지 과정에서 직면하는 현실적 한계와 국방 품질 정책의 변화 방향을 종합적으로 분석하고, DQMS를 단순한 인증 수단이 아닌 실질적인 품질혁신 도구로 활용할 수 있는 실행 방안을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 특히 DQMS 8절의 국방 특수 요구사항을 중심으로 형상관리(8.1.3.1~4)와 제조공정 개선(8.5.1.1) 항목을 핵심 요소로 도출하고, 이를 국방기술품질원 및 체계기업에서 운영 중인 QCG 기반 평가체계와 연계하여 분석하였다. 이를 통해 DQMS 요구사항과 현장 적용 간 연계를 보완하고, 방산 중소기업이 실질적으로 적용 가능한 품질관리 방안을 제시하였다. 연구 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, DQMS 8절 국방 특수 요구사항은 단순한 규격 준수 항목이 아니라, 형상관리와 제조공정 개선을 중심으로 설계, 생산, 품질 활동을 통합적으로 관리하기 위한 핵심 요구사항임을 확인하였다. 특히 개발 전 단계(CDR, DVR, PVR)에 걸쳐 적용되는 형상관리 항목은 시제품 제작 및 양산 준비 단계에서 실질적인 품질 향상 활동으로 연결되어 제조공정 개선 항목으로 이어지는 것을 확인하였다.

둘째, 방산 중소기업이 QCG 기반 평가체계로 개발 시 설계 및 생산, 품질 간 업무에 대한 통합 품질관리 체계를 구축할 수 있음을 확인하였다. 특히 단계별 평가(CDR, DVR, PVR)를 통해 품질 리스크를 사전에 식별하고 관리할 수 있으며, 이는 기존의 사후 검출 중심 품질관리에서 예방 중심 품질관리로의 전환을 가능하게 할 수 있다.

본 연구는 DQMS 요구사항과 QCG 평가체계를 통합적으로 분석하여 방산 중소기업의 품질경영 수준을 향상시킬 수 있는 이행 방안을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히 협력기업의 개발 품질관리 체계 방안으로 개발 초기 단계부터 양산단계까지 일관된 품질 확보가 가능함을 제시하였다.

그러나 본 연구는 특정 체계기업 사례를 중심으로 분석되었기 때문에 모든 방산 중소기업에 일반화하는 데에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 다양한 체계기업 및 방산 중소기업을 대상으로 실증 데이터를 확보하여 제안된 개발 품질관리 체계의 효과를 정량적으로 검증할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 2024년 대구가톨릭대학교 연구년 중 수행한 것임.

참고문헌

1 Noh, J., & Ree, S. (2011). An Empirical Study on the Influence of Business Performance by the Defense Quality Management System. *Journal of Korean Society for Quality Management, 39*(3), 444-460.

2 Ju, J.-C., Kim, S., Lee, J., & Ahn, N.-S. (2016). Suggestion for the Enhancement of Military Supplies via Segregation of Defense Quality Management System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 17*(8), 251-261. https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.8.251

3 국방기술품질원. (2025). *국방기술품질원_국방품질경영체제(DQMS) 인증업체 현황* [Data set]. 공공데이터포털. https://www.data.go.kr/data/15052703/fileData.do

4 Lee, S. C., Kim, Y., & Park, J. H. (2018). Analysis of the Company's Work Load for DQMS Requirements. *Journal of Business Research, 33*(4), 65-85. https://doi.org/10.22903/jbr.2018.33.4.65

5 Korea Ministry of Government Legislation. (2009). Defense Acquisition Program Act (Act No. 9561). Korean National Law Information Center.

6 Kim, I.-H., Ku, T.-Y., & Choi, G.-S. (2007). Certification of quality management system and firm performance: An empirical approach based on the experiences of small and medium enterprises (SMEs) in Korea. *Journal of the Society of Korea Industrial and System Engineering, 30*(1), 15-24.

7 국방기술품질원. (2025). *국방기술품질원, 무기체계 제조기업 품질향상 위한 실무교육 실시.* DTaQ 미디어룸. https://dtaq-media.kr/news?id=367

8 국방부. (2021). *국방전력발전업무훈령* (국방부훈령 제2539호). 국가법령정보센터.

9 Kim, Y.-H., Park, J. H., & Lee, S. C. (2017). Importance-Difficulty Analysis for DQMS Requirements. *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, 40*(3), 49-58. https://doi.org/10.11627/jkise.2017.40.3.049

10 Seo, M.-S., & Lee, Y.-M. (2022). Effect research through application of quality control process in the weapon system's development stage. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23*(3), 154-159. https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.3.154

11 Kim, M.-H. (2025). A Study on Manufacturability Analysis Methodology in Weapon System Requirement Planning Process. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 26*(8), 311-320. https://doi.org/10.5762/KAIS.2025.26.8.311

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 158-169, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.014

다중 재머 환경에서의 비전 트랜스포머 기반 GNSS 재밍 신호 분류기법

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Vision Transformer-Based GNSS Jamming Signal Classification in Multi-Jammer Environments

오우림†, Woorim Oh
코리아디펜스인더스트리, 연구소, 주임연구원
Research Engineer, R&D Center, Korea Defense Industry

이재흥, Jaeheung Lee
코리아디펜스인더스트리, 연구소, 연구원
Engineer, R&D Center, Korea Defense Industry

김완식, Wanshik Kim
코리아디펜스인더스트리, 연구소, 수석연구원
Team Leader, R&D Center, Korea Defense Industry

Abstract

This study proposes a vision transformer-based multilabel classification method for Global Navigation Satellite System (GNSS) jamming signals in multi-jammer environments. Previous studies have mainly focused on single-jammer scenarios or CNN-based classifications using time-frequency images. In real-world environments, there may be multiple jammers whose signatures overlap in the time-frequency domain, thereby increasing the difficulty of classification. In this study, GNSS signals and various types of jamming signals were synthesized and converted into time-frequency images, and a semantic three-channel input representation was constructed to reflect the power distribution and its variations along the time and frequency axes. The problem was formulated as a 12-class multilabel classification task, and the proposed vision-transformer-based model was compared to a CNN-based model with a similar parameter scale. The experimental results showed that the proposed model achieved an F1-score of 0.9327 and a subset accuracy of 86.10%, outperforming the CNN-based model. In addition, the semantic three-channel representation yielded a better performance than a simple colormap-based input. These results indicate that a vision transformer architecture capable of modeling the global context, together with a semantically designed input representation, is effective for GNSS jamming-signal classification in multi-jammer environments.

keywords : GNSS jamming classification, multi-jammer, vision transformer, MobileViT

† Corresponding Author : Woorim Oh
Tel : +82-42-829-2676, email : woorim.oi@kodef.co.kr
Korea Defense Industry Corporation, R&D Center, 99, Oesam-ro 8beon-gil, YuseonGu, Daejeon, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 30th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

GNSS(Global Navigation Satellite System)는 항법, 측위, 시각 동기 기능을 제공하는 핵심 기반 기술이다. 최근에는 차량, 무인이동체, 물류, 통신, 국방 등 적용 분야가 빠르게 확대되면서 수신 신뢰성에 대한 요구 수준도 함께 높아지고 있다. 그러나 GNSS 신호는 지상 수신 시 전력이 매우 낮아 의도적 또는 비의도적 전파 간섭에 취약하다. 그중 재밍(jamming)은 비교적 단순한 송신 장비만으로도 GNSS 수신기의 획득(acqusition), 추적(tracking) 성능을 저하시킬 수 있으므로, GNSS 기반 시스템의 운용 안정성을 위협하는 주요 요인으로 간주된다[1].

재밍 대응 기술은 일반적으로 간섭 검출, 유형 식별, 그리고 항재밍 처리의 단계로 구성된다. 특히 재머 유형 식별은 이후의 대응 전략을 결정하는 핵심 정보로 활용된다는 점에서 중요하다. 재머는 유형에 따라 서로 다른 시간-주파수 특성을 나타내므로, 이를 고려하지 않고 동일한 제거 기법을 일관적으로 적용할 경우 충분한 대응 성능을 확보하기 어렵다[2]. 따라서 단순한 재머 존재 여부 판단이 아닌 간섭 형태를 세분화하여 분류 및 식별하는 기술이 필요하다. 이러한 필요성에 따라 재밍 신호의 탐지 및 분류를 위한 다양한 연구가 수행되었다.

Hong (2023)는 머신러닝 기반 분류기법과 이상탐지 기법을 계층적으로 통합하여 하이브리드 재밍 검출 및 분류 알고리즘을 제안하였으며[3], Morales Ferre et al. (2019)는 시뮬레이션을 통해 모사한 GNSS 기저대역 신호를 스펙트로그램(Spectogram) 기반 이미지로 변환하여 CNN(Convolution Nerual Network), SVM(Su-pport Vector Machine)과 같은 학습 기반 기법을 이용하여 재밍 신호를 분류하는 연구를 수행하였다[4]. Yoo (2020)는 해당 연구를 기반으로 별도의 복잡한 전처리 없이 GNSS 신호를 직접 활용하는 CNN 기반 분류기법으로도 연구가 확장되었고[5], Yoo et al. (2021)은 시뮬레이션으로 생성된 모의 신호가 아닌 실제 GPS 수신 장비를 활용하여 재밍 신호 식별 성능을 검증하였다[6]. 또한, 서로 다른 특성을 가지는 다양한 간섭 신호를 대상으로 여러 머신러닝 기법을 적용한 재밍 탐지 연구와 GNSS 대역 내 재밍 신호 및 방향 탐지 알고리즘에 관한 연구도 진행되었다[7-8].

그러나 기존 연구의 상당수는 단일 재머 환경을 전제로 수행되었으며, 다중 재머가 동시에 존재하는 현실적인 간섭 상황은 상대적으로 충분히 다루어지지 않았다. 실제 전장 환경에서는 서로 다른 유형의 재머가 동시에 운용될 가능성을 배제하기 어렵고, 이에 따라 수신 신호에는 복합적인 간섭이 형성될 수 있다. 이러한 환경에서는 단일 재머 분류에 기반한 접근만으로는 충분한 분류 성능을 기대하기 어려우므로 다중 재머 환경을 고려한 재머 신호 분류에 대한 연구가 필요하다.

이러한 문제는 분류 모델의 구조와도 밀접하게 연결된다. CNN은 지역적 패턴과 형태적 특징을 효과적으로 추출할 수 있으나, 입력 전역에 분산된 특징 간의 관계를 직접적으로 반영하는 것에는 구조적인 제약이 있다. 반면 트랜스포머(transformer) 계열 모델은 self-attention을 기반으로 입력 전체의 상관관계를 학습할 수 있어, 다중 재머 환경에서 요구되는 전역적 특성을 보다 효과적으로 해석할 가능성이 있다. GNSS 분야에서도 Xu et al. (2025)은 기존 기만 탐지 방식의 일반화 학습을 완화하기 위해 트랜스포머와 전이학습을 활용한 스푸핑 탐지기법을 제안하였으며[9], Wang et al. (2025)은 GNSS 위치결정 정확도에 영향을 미치는 전리층 변화를 예측하기 위한 트랜스포머 기반 모델을 제안하였다[10]. 또한, GNSS 분야 외에도 CNN의 지역적인 특징과 트랜스포머의 전역적 특징을 결합한 하이브리드 방식을 이용하여 고장 진단 및 의료 진단에 적용되고 있다[11-12]. 다중 재머 분류 문제에서도 국소 및 전역 특징을 함께 반영할 수 있는 분류 모델이 필요하다.

본 논문에서는 다중 재머 환경에서의 GNSS 재밍 신호 분류를 다중라벨 분류 문제로 설정하고, 분류 모델로 MobileViT 기반 구조를 적용하였다. 분류 입력의 경우 GNSS 신호에 다양한 재밍 신호를 중첩

한 수신 신호를 시뮬레이션으로 생성하고, 이를 시간-주파수 영상으로 변환하여 활용하였으며, 다중 재머의 중첩 구조를 확실히 드러내기 위해 단순 RGB 영상이 아닌 전력 분포와 시간 및 주파수 축 방향의 변화 정보를 반영한 의미 기반 3채널 입력을 이용하였다. 제안하는 구조의 유효성을 확인하기 위해 기존 CNN 기반 분류 모델과의 성능 비교를 수행함으로써 다중 재머 환경에서는 비전 트랜스포머 계열 구조가 높은 분류 성능을 보이는 것을 확인하였다.

2. GNSS 재머 및 관련 기술

2.1. GNSS 재밍 신호

GNSS 재밍은 수신 대역에 간섭 신호를 인가하여 위성 신호를 방해하는 행위를 의미한다. 재머 신호는 보통 협대역 신호와 광대역 신호로 나눌 수 있으며, 구현 형태에 따라 단일 톤, 다중 톤, 협대역 잡음, 주파수 스윕(sweep) 및 펄스(pulse) 신호 등으로 구분할 수 있다. 이러한 신호들은 수신기 관점에서 각각 다른 시간-주파수 특성을 보인다. 단일 톤은 좁은 주파수 성분에 에너지가 집중되고, 스윕 계열은 시간에 따라 주파수가 변하며, 협대역 잡음은 일정 대역폭을 유지한 채 연속 잡음 성분으로 나타난다.

재밍의 강도는 보통 JSR(Jammer-to-Signal Ratio)로 표현한다. JSR이 증가하면 재머 에너지가 위성 신호보다 상대적으로 커지며, 이로 인해 수신기의 GNSS 신호 획득 및 추적 단계의 성능이 불안정해지게 된다. 실제 수신 환경에서는 경로 손실, 다중경로, 도플러 효과 및 채널 페이딩 등이 재머 신호와 함께 복합적으로 작용하므로 JSR이 높은 환경에선 위성 신호로부터 유용 신호를 분리하는 것이 어려워진다.

2.2. 재머 유형 분류

본 연구에서는 Table 1과 같이 재머 클래스를 정의하였다. 시간-주파수 영상에서 클래스별 특징은 Figure 1에서 볼 수 있다. NoJam 클래스는 재밍 신호 없이 GNSS 신호와 백색잡음이 주를 이룬다. NB 클래스는 특정 협대역에 연속적으로 에너지가 분포하는 형태를 띠며, DME 클래스는 시간 축에서 국부 펄스가 주기적으로 나타나는 특성이 있다. SingleAM 클래스는 하나의 협대역 톤 성분으로 구성되며, 시간-주파수 영상에서는 수평선 형태로 나타난다. SingleFM 클래스는 중심 주파수 주변에 측대역이 분포하는 형태를 보이며, 스윕 계열 클래스(h~l)는 시간에 따라 주파수가 선형적으로 이동하는 사선 패턴을 형성한다. DualChirp 클래스는 상향 스윕과 하향 스윕이 중첩된 구조를 가지므로

Table 1. Jammer Class Definitions

Class	Description
NoJam	Only GNSS signal and background noise are present
NB (Narrow-Band)	Narrowband noise interference concentrated within a limited frequency band
DME	Pulse-pair interference producing broadband impulsive signatures.
SingleAM	Single continuous-wave tone interference.
MultiAM	Multi-tone continuous-wave interference with several narrowband spectral lines.
SingleFM	Single FM-modulated tone interference with sideband structure.
MultiFM	Multiple FM-modulated tones forming clustered sidebands
SingleChirp	Single chirp interference with random sweep range, period, and direction
SingleChirp20	Single chirp interference with fixed sweep parameters
DualChirp	Superposed up-chirp and down-chirp interference
MultiChirp	Multiple chirp components with different sweep slopes
ChirpBorio	Rapid periodic chirp jammer with a very short sweep period

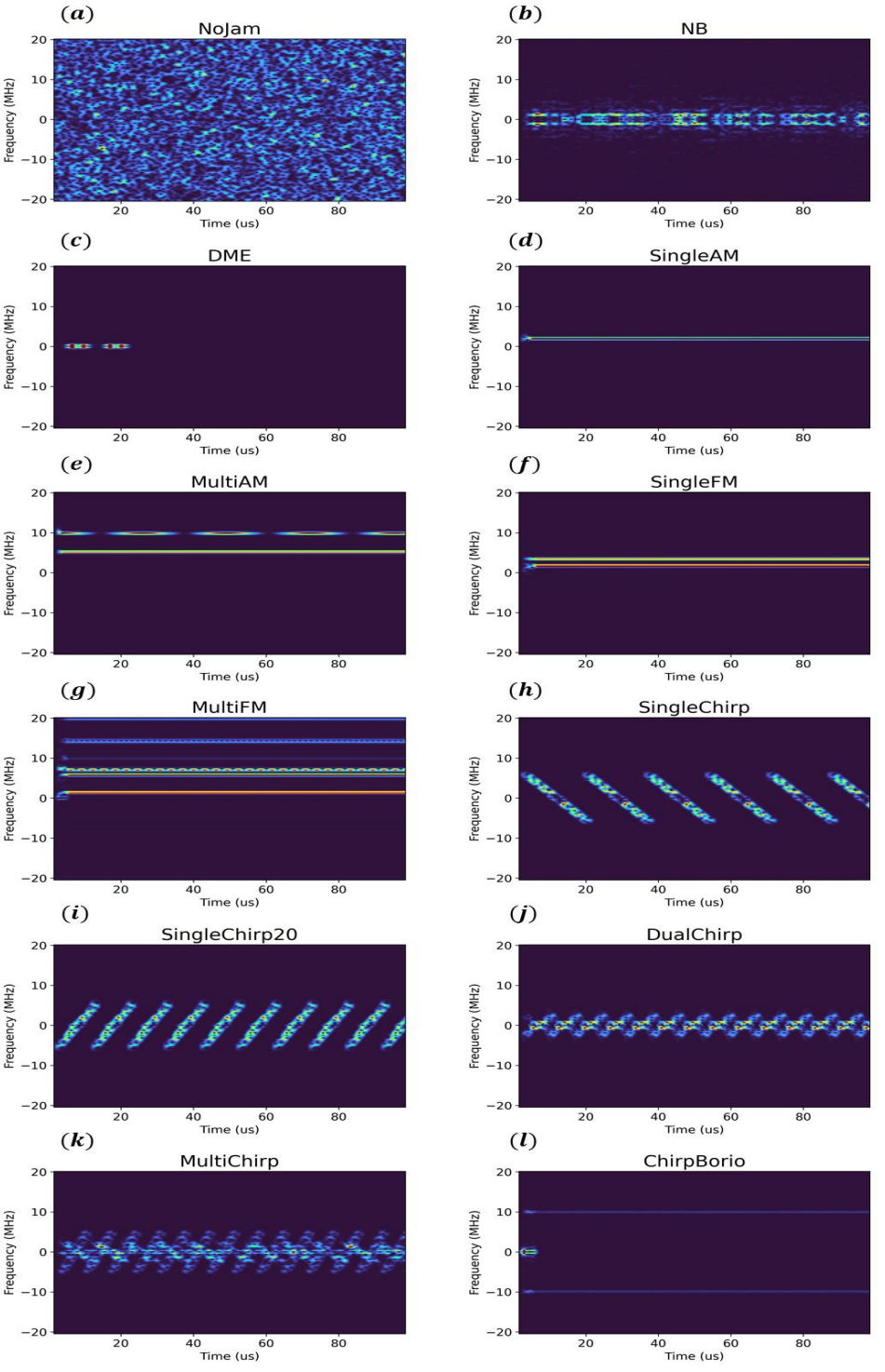


Figure 1. Time-frequency images of the 12 jammer class. (a) NoJam, (b) NB, (c) DME, (d) SingleAM, (e) MultiAM, (f) SingleFM, (g) MultiFM, (h) SingleChrip, (i) SingleChrip20, (j) DualChrip, (k) MultiChrip and (l) ChripBorio

시간-주파수 영역에서 교차형 패턴을 나타낸다. MultiChrip, MultiFM 및 MultiAM은 다수의 성분이 동시에 존재하므로 단일 재머보다 복잡한 군집 구조를 형성한다.

2.3. 시간-주파수 영상

시간-주파수 영상은 재머 분류에서 두 가지 장점이 있다. 첫째, 시간 정보와 주파수 정보를 동시에 표현하므로 간섭의 동적 변화를 직접 관찰할 수 있다. 둘째, 재머 유형별 구조 차이가 시각적 패턴으로 드러나므로 영상 기반 분류에서 활용하기 쉽다. 특히 스윕 계열 재머, DME 및 다중 톤 재머와 같이 시간 변화 특성이 핵심인 재머는 주파수 스펙트럼을 이용한 표현보다 시간-주파수 영상에서 그 차이가 더 분명하게 나타난다.

시간-주파수 영상의 생성은 단시간 푸리에 변환(Short-time Fourier Transform, STFT)을 기반으로 스펙트로그램을 생성하여 얻을 수 있다. 기존 연구는 생성된 데이터를 이진 영상으로 저장하여 활용하였지만[4], 본 연구에서는 시간-주파수 표현 자체는 기존 절차를 따르되, 단일 재머 중심의 단색 영상 표현을 다중 재머 환경에서의 분류와 의미 기반 3채널 입력 구조로 확장하였다.

2.4. 다중 재머 환경

다중 재머 환경에서는 둘 이상의 재머가 동시에 존재한다. 예를 들어 NB와 SingleChrip 재머가 동시에 존재하는 경우 Figure 2-a와 같이 협대역 잡음 띠와 스윕 신호의 사선 구조가 하나의 영상에서 동시에 관측된다. NB와 MultiFM이 함께 존재할 경우, Figure 2-b와 같이 넓은 잡음 대역과 측대역 구조가 겹쳐 나타나면서 그 경계가 불명확해지게 된다.

다중 재머가 혼재된 시간-주파수 영상에서는 재머 간 상대 전력 차이로 인해 단일 재머 데이터와는 다른 영상 특성을 갖게 될 수 있다. 이와 같은 문제에 접근하기 위해선 다중 재머가 혼재된 영상에서 모든 경우의 수를 개별 클래스로 반영하는 단일 클래스 분류 접근보다는, 각 클래스의 존재 여부를 독립적으로 판정할 수 있는 다중라벨 분류로 접근하여 서로 다른 패턴이 동시에 나타나는 조합 관계를 명확히 해석할 방법이 필요하다.

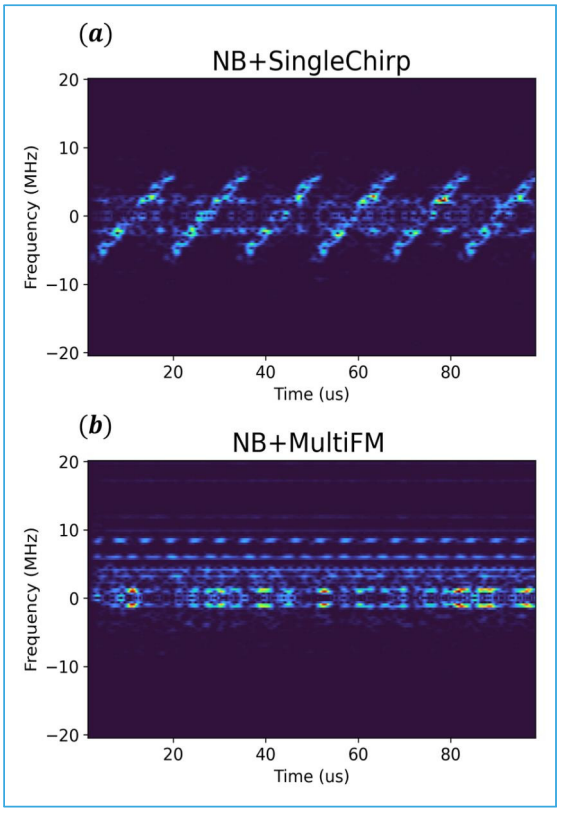


Figure 2. Multi-jammer, (a) NB+SingleChirp and (b) NB+MultiFM

2.5. CNN vs 비전 트랜스포머

CNN은 지역적인 수용 영역(receptive field)을 반복적으로 확장하면서 이미지의 특징을 추출한다. 이 구조는 이미지 전체의 지역 패턴 검출에 매우 효과적이지만, 공간적으로 떨어진 패턴 간 상호관계를 반영하는 데에는 한계가 있다. 다중 재머가 혼재된 시간-주파수 영상에서는 서로 다른 위치에 나타난 구조가 재머 조합을 구성하는 경우가 많으므로, 지역

적인 특징만으로는 분류기의 성능이 불안정해질 수 있다.

비전 트랜스포머(Vision Transformer, ViT)는 입력 영상을 일정 크기의 패치로 나눈 뒤, 각 패치를 토큰으로 간주하여 self-attention 기반 인코더에 입력하는 구조이다[13]. 이를 통해 이미지 전역의 상관관계를 계층적으로 학습하여 특정 패치 정보가 멀리 떨어진 다른 패치와 어떤 관계를 갖는지 학습할 수 있다. 하지만, 일반적인 비전 트랜스포머는 연산량과 파라미터 수 측면에서 모바일 또는 경량 환경에서 부담이 크다. 또한, 이미지 데이터의 분석에 있어서 지역 패턴 특징의 학습에선 CNN에 비해 비효율적인 특성도 있다.

이를 보완하기 위해 MobileViT 계열 모델은 CNN 기반 지역 표현과 트랜스포머 기반 전역 표현을 결합하는 방식을 제안하였다[14]. 이러한 구조는 기존 방식 대비 연산 효율이 높으며, 적은 데이터에서도 ViT 단독 모델보다 높은 안정성을 보인다. 본 연구에서는 MobileViT 모델 구조를 채택하여 모델이 다중 재머가 혼재된 시간-주파수 영상에서 각 재머의 독립적 존재 여부를 판정할 수 있게 학습을 수행하였다.

3. MobileViT 기반 재머 분류 시스템

3.1. GNSS 및 재밍 신호생성

본 연구에서는 GPS L1 프로파일에 기반한 신호를 생성하였다. GPS 신호 프로파일은 확산 부호길이, 칩 레이트(chip rate), 중심 주파수 등 실제 GPS L1과 동일한 파라미터를 포함한다.

재머 신호는 클래스별 정의에 따라 개별적으로 합성되며, 채널 모델을 거친 후 GNSS 신호와 합산된다. 채널 모델의 구현은 기존 연구와 같이, 실제 GNSS 환경에서 발생할 수 있는 배경 잡음, 다중 경로, 도플러 및 페이딩 효과를 포함하였다. 재머 전력은 JSR 값으로 제어할 수 있으며, 복수의 재머가 동시에 존재할 경우 각각의 재머가 독립적인 JSR을 갖도록 하였다. GNSS 신호 및 재밍 신호생성을 위해 사용한 파라미터는 Table 2와 같다.

Table 2. Spectrogram Parameters

Item	Value
STFT parameters	
Signal duration	1ms
Window length	128 samples
Overlap	128 samples
FFT size	128 points
Hop size	8 samples
Overlap ratio	93.75%
Jamming signal parameters	
C/N0 range	25 to 50 dB-Hz
JSR range	40 to 50 dB

3.2. MobileViT 기반 분류 모델

본 연구의 분류기는 MobileViTv3-XXS 구조를 기반으로 하였다. MobileViTv3는 CNN을 이용한 지역 특징 추출과 트랜스포머 블록을 이용한 전역 특징 추출을 하나의 백본(backbone) 안에서 통합한 경량 모델이다.

구현된 모델의 구조는 Table 3과 같다. Stem-convolution이후 MobileNetV2 계열 IR(Inverted-residual) block과 MobileViTv3 block을 단계적으로 배치하였다. stage 3부터 stage 5까지 MobileViTv3 block을 삽입하여 국부 특징과 전역 특징이 반복적으로 결합되도록 하였으며, 마지막에는 1x1 projection과 global average pooling을 거쳐 다중라벨 분류 헤드를 구성하였다. 출력층은 12차원 logit을 생성하며, 추론 시에는 sigmoid를 적용하여 각 클래스의 존재 확률을 계산할 수 있게 하였다.

Table 3. MobileViT Model Specification

Layer	Operator	Output	Params	Note
Stem	ConvBNAct	16x128x128	464	3x3 conv, stride 2
Stage 1	IR	16x128x128	1,472	x1
Stage 2	IR	24x64x64	7,696	x3
Stage 3	IR + MobileViTv3Block	64x32x32	89,392	IR x1, dim 64, depth 2, heads 4
Stage 4	IR + MobileViTv3Block	80x16x16	255,536	IR x1, dim 80, depth 4, heads 4
Stage 5	IR + MobileViTv3Block	128x8x8	315,328	IR x1, dim 96, depth 3, heads 4
Head	ConvBNAct	512x8x8	66,560	1x1 projection
Global Pool	AdaptiveAvgPool2d	512x1x1	0	output 1x1
Dropout	Dropout	512	0	p=0.2
Classifier	Linear	12	6,156	12 logits

3.3. 의미 기반 3채널 입력

본 연구에서는 단순 컬러맵 기반 RGB 영상 대신 Figure 3과 같이 물리적 의미를 반영한 3채널 입력을 구성하였다. 첫 번째 채널 R은 로그 전력 맵(log-power map) 데이터를 나타낸다. 이는 시간-주파수 영역에서 절대적인 에너지 분포를 표현하는 기본 채널이다. 두 번째 채널 G는 시간축 방향의 전력 변화량을 나타낸다. 실제 구현에서는 로그 전력 맵 데이터를 시간 축으로 차분한 뒤 절댓값을 취하여 구성하였다. 세 번째 채널 B는 주파수 축 방향의 전력 변화량을 나타내며, 로그 전력 맵 데이터를 주파수축으로 차분한 뒤 두 번째 채널과 같이 절댓값을 취하는 방식으로 구성하였다.

이러한 구성 방법은 기존 단일 채널 방식의 데이터에서도 모델이 충분히 학습할 수 있는 정보지만, 좀 더 작은 모델이 비교적 쉽게 데이터를 학습할 수 있도록 돕는 보조 데이터 역할을 수행한다. R 채널은 재머 에너지의 위치와 대역폭 정보를 반영하고, G 채널은 시간 변화가 큰 재머 구조를 강조하며, B 채널은 주파수 경계와 대역 구조를 강조한다. 예를 들어 스윕 계열 재머는 시간축 변화 정보가 두드러지고, 협대역 톤 또는 협대역 잡음은 주파수축 변화와 경계 정보에서 구분성이 높아질 수 있다.

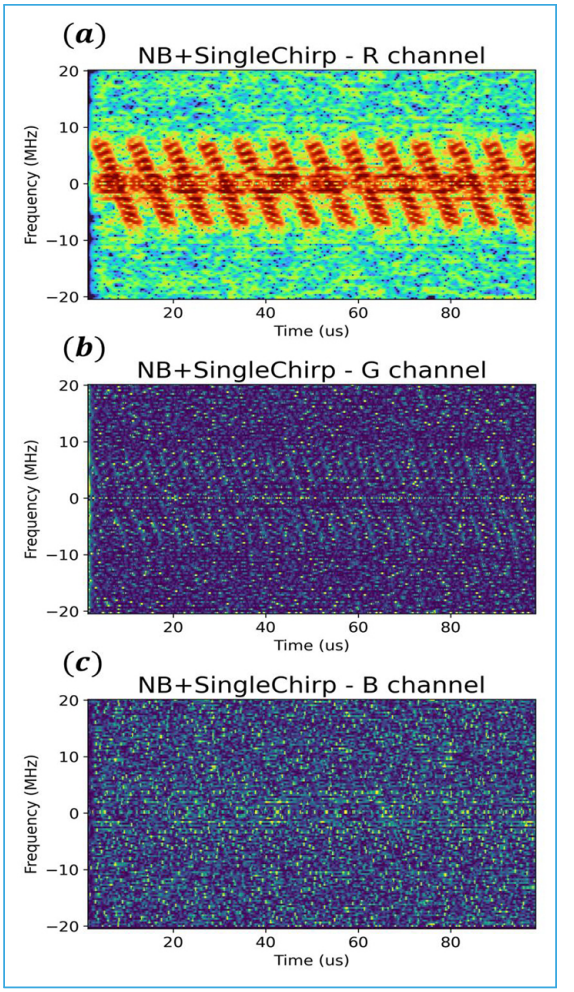


Figure 3. Semantic 3-channel RGB image. (a) Red channel, (b) Green channel and (c) Blue channel

4. 실험 구성 및 성능 평가

4.1. 데이터셋

학습 및 평가 데이터셋은 기존 연구를 통해 공개된 절차를 기준으로 하되, 상기 기술한 바와 같이 다중 재머 조합과 3채널 입력 구성으로 데이터를 확장하였다. 데이터셋 구성은 Table 4와 같다.

Table 4. Dataset Configuration for Training and Evaluation

Type	1-Jammer	2-Jammer	3-Jammer
Train	30,000	21,000	9,000
Validation	7,500	5,250	2,250
Test	10,000	7,000	3,750

재머 조합은 단일 재머 및 다중 재머 데이터로 구성하였으며, 다중 재머 데이터는 재밍 신호가 없는 NoJam 클래스를 제외한 재머 유형 중 2개 또는 3개를 임의로 선택하여 중첩하였다.

데이터셋은 3채널 입력 표현의 효과를 평가하기 위해 기존 데이터 생성 방식을 이용한 데이터와 의미 기반 3채널 데이터 생성 방식을 이용한 데이터로 분리하여 구축하였다.

4.2. 비교 모델

비교 모델로는 상기 MobileViT 모델과 CNN 모델을 사용하였다. 사용한 CNN 모델의 구조는 Table 5와 같다. 두 모델 모두 입력 크기와 출력 클래스 수를 동일하게 적용하였으며, 다중라벨 분류에 맞는 구조로 설계하였다. 상기 2종 데이터셋과 2종 모델의 조합으로 총 4개의 비교 모델을 구성하였으며, 이를 통해 본 논문에서 제안하는 트랜스포머 기반 MobileViT를 이용한 방법론과, 의미 기반 3채널 데이터의 효용성을 입증하였다.

Table 5. CNN Model Specification

Layer	Operator	Output
Stem	ConvBNAct + MaxPool	32x128x128
Stage 1	ConvBNAct + MaxPool	64x64x64
Stage 2	ConvBNAct + MaxPool	128x32x32
Stage 3	ConvBNAct + MaxPool	256x16x16
Stage 4	ConvBNAct	256x16x16
Global Pool	AdaptiveAvgPool2d	256x1x1
Dropout	Dropout	256
Head	Linear	12

4.3. 학습 환경(학습 파라미터)

본 논문의 모델 학습에 사용한 파라미터는 Table 6과 같다.

Table 6. Learning Parameters

Parameter	Value
Optimizer	AdamW
Loss	BCEWithLogitsLoss
LR scheduler	CosineAnnealingLR
Epochs	30
Batch size	32
Learning rate	0.0003
Weight decay	0.0001

4.4. 실험 결과

4종 비교 모델을 학습한 결과는 Figure 4와 같다. 4개 모델 모두 Train F1-Score가 증가하는 구간에 Validation F1-Score 또한 증가하는 양상을 보이는 것을 볼 수 있다.

각 학습 모델에 대한 Micro F1-score와 Subset Accuracy는 Figure 5와 같으며 해당 결과는 Table 7에 요약되어 있다.

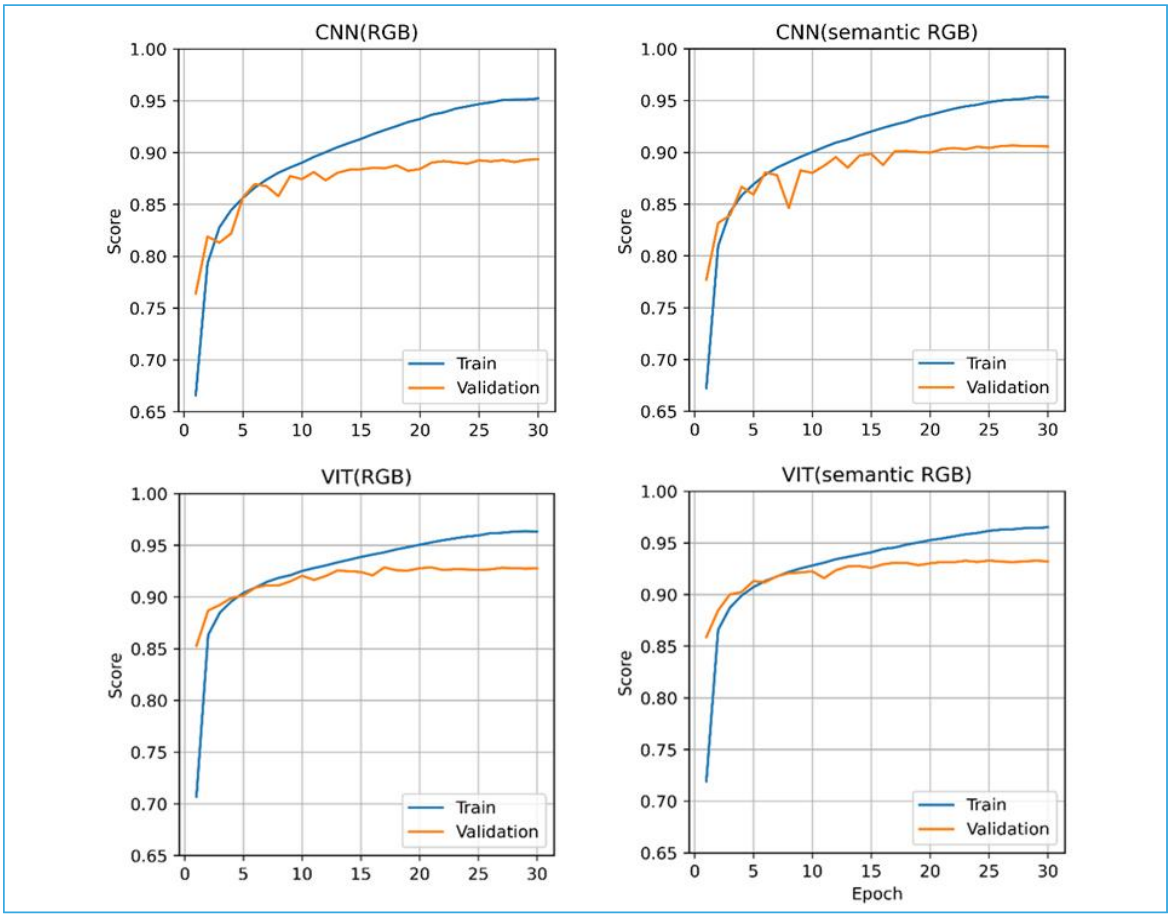


Figure 4. Training and validation learning curves for four models

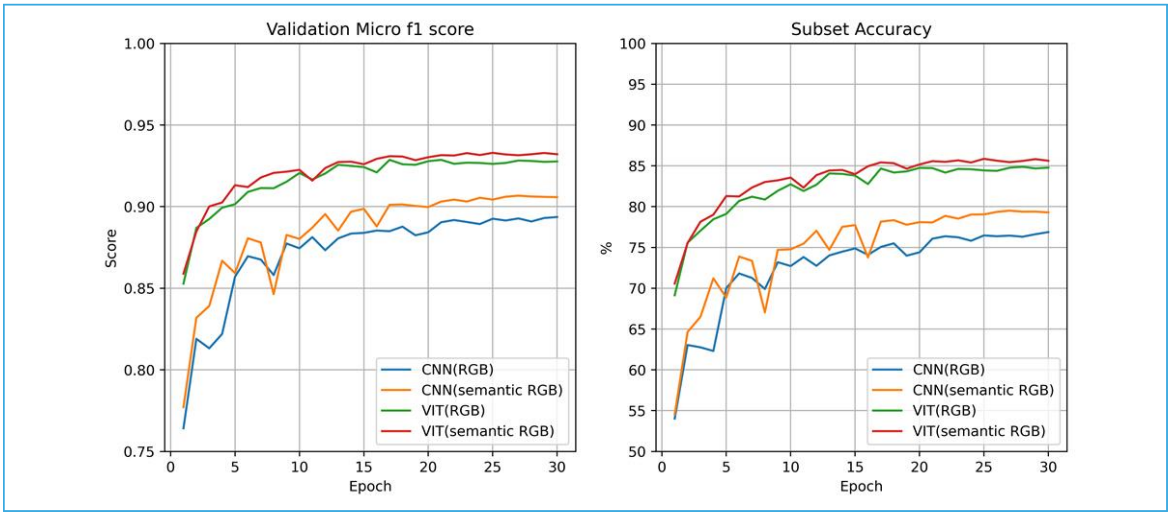


Figure 5. F1-score and subset accuracy comparison of four models

Table 7. Overall Performance Comparison

Model	Micro F1-score	Subset Accuracy (%)
CNN (RGB)	0.8949	77.20
CNN (Semantic RGB)	0.9069	79.65
VIT (RGB)	0.9271	84.63
VIT (Semantic RGB)	0.9327	86.10

Table 8은 의미 기반 3채널 데이터를 사용한 2개 모델에 대한 단일 재머 및 다중 재머 환경에서의 성능을 보여준다.

Table 8. Performance by Jamming Condition

Model (Semantic RGB)	Micro F1-score	Subset Accuracy (%)
CNN (Single Jammer)	0.9412	91.77
CNN (Multi Jammer)	0.8891	66.92
VIT (Single Jammer)	0.9587	94.99
VIT (Multi Jammer)	0.9198	76.85

Figure 6, 7은 의미 기반 3채널 데이터를 적용한 MobileViT 모델의 confusion matrix이다. 단일 재머 추정 성능의 경우 MultiAM 클래스를 일부 SingleAM 클래스로 오분류 하였고, 이 외 클래스의 경우 대부분 높은 성능을 보인다. MultiAM, SingleAM 오분류 예시에서, 낮은 JSR을 갖는 MultiAM 신호는 주기적인 진폭 변조에 의해 측대역에 나타나는 영상 특성이 낮게 나타나고, 이로 인해 JSR이 높은 SingleAM과의 차이를 확인하기 어려워진다. 이처럼, JSR을 고정한 상태로 데이터를 생성할 경우 각 클래스 간 차이가 비교적 분명하게 나타나지만, 임의의 JSR 범위로 다수의 데이터를 생성하였으므로 전력 밀도 측면에서 클래스 간 비슷한 양상을 보일 확률이 증가하게 된다.

다중 재머 추정 성능의 경우 경우의 수가 많아, 대표적인 10가지 조합에 대해 성능을 분석하였다. MultiAM+NB 분류 문제를 NB+SingleFM로 일부 오분류 하였으며, 이외 다수의 분류 문제에서 단일 재머 성능보다 낮은 수치를 보여준다. 이는 상기 기술한 단일 재머 추정에서의 문제가 동일하게 작용한 것으로 사료되나, 다중 재머의 데이터 수가 단일 재머 데이터에 적은 이유로 인해 다중 재머에 대한 모델의 일반화 성능이 더욱 저하된 것으로 보인다.

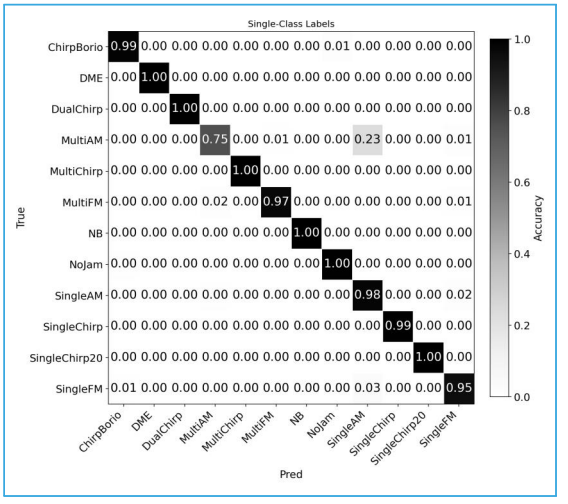


Figure 6. Confusion matrix (Single-jammer)

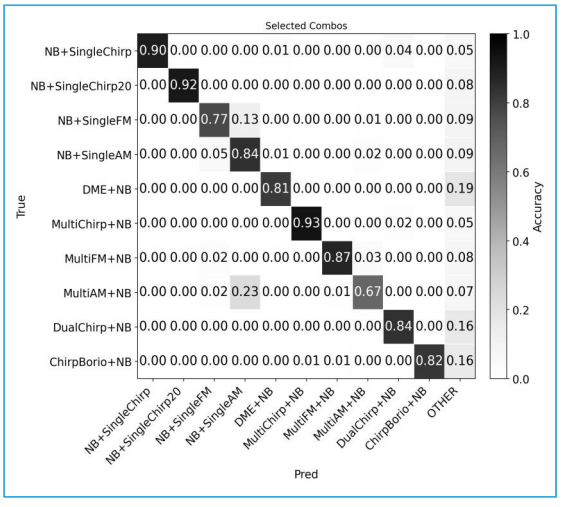


Figure 7. Confusion matrix (Multi-jammer)

5. 결 론

본 논문은 다중 재머 환경에서의 GNSS 재밍 신호 분류 문제를 다중라벨 분류 관점에서 다루고, 이를 위한 MobileViT 기반 분류 모델과 의미 기반 3채널 입력 구성을 제안하였다. 제안하는 시스템은 GNSS 및 재밍 신호를 시뮬레이션으로 생성하고, 이를 스펙트로그램으로 변환하여 얻은 시간-주파수 영상 데이터를 통해 3채널 영상으로 확장 구성하여 모델 학습에 사용하였다.

본 연구에서 활용한 비전 트랜스포머 모델은 초소형 모델로, 군 운용 환경의 Edge 장치에서도 활용 가능성이 높으나, RF 신호처리 특성상 높은 실시간성 요구 조건으로 인해 항재밍 장치에 직접 적용하더라도 실용성이 낮다.

하지만 전장 환경에서 수집된 신호 데이터를 배치 단위로 분석하는 용도로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 실시간성을 보장하지 못하는 대신, 분석결과를 통해 변화하는 재밍 환경을 인지하고, 알맞은 항재밍 방법을 선택하여 대응할 수 있다.

본 논문의 실험은 시뮬레이션 기반 데이터에 의존하므로, 실 환경 신호와 오차가 크게 존재한다. 실 환경에서는 본 논문에서 고려한 재머 특성보다 더 다양한 특성을 가지는 재머가 존재하며, GNSS 채널 모델도 더욱 다양한 모델이 존재할 수 있다. 따라서, 실 환경에서 제안하는 기법을 적용하기 위해선 실제 환경을 충분히 모사할 수 있는 균형 잡힌 데이터가 필요하며, 이를 잘 학습할 수 있는 경량화된 모델과 적합한 학습 절차가 필요하다.

위와 같은 한계점에도 불구하고, 본 논문의 결과는 다중 재머 분류 문제에서 비전 트랜스포머 기반 모델이 효과적일 수 있음을 보여준다. 또한, 시간-주파수 영상을 단순히 사용하기보단 분류 목적에 맞는 표현으로 재구성하는 접근이 유효함을 시사한다.

향후에는 실측 데이터를 기반으로 데이터의 다양성을 확장하여 데이터 신뢰도를 높이고, GNSS 채널 조건과 재머 신호 특성을 자세히 분석하여 실제 환경을 충분히 반영할 수 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1 Jiang, P., Geng, X., Pan, G., Li, B., Ning, Z., Guo, Y., & Wei, H. (2025). GNSS anti-interference technologies for unmanned systems: A brief review. *Drones, 9*(5), 349. https://doi.org/10.3390/drones9050349

2 Deng, Z., Zhang, Z., Gao, X., & Liu, P. (2025). Differentiated gnss baseband jamming suppression method based on classification decision information. *Applied Sciences, 15*(13), 7131. https://doi.org/10.3390/app15137131

3 Hong, S. (2023). *A study on machine learning based jamming classification and detection for wireless communications* [Master's thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology]. Korea Advanced Institute of Science and Technology.

4 Morales Ferre, R., De La Fuente, A., & Lohan, E. S. (2019). Jammer classification in GNSS bands via machine learning algorithms. *Sensors, 19*(22), 4841. https://doi.org/10.3390/s19224841

5 Yoo, S. (2020). An Improved GNSS Jamming Classification Scheme Using Convolutional Neural Network. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 26*(11), 1016-1027. https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2020.20.0112

6 Yoo, S., Sin, C. S., & Kim, S. Y. (2021). Machine Learning-Based Jamming Classification Scheme for Real GPS L1 C/A Signal. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 46*(11), 1804-1806. https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.11.1804

7 Jeong, I. (2019). Application and Performance Analysis of Machine Learning for GPS Jamming Detection. *Journal of Korean Institute of Information Technology, 17*(5), 47-55. https://doi.org/10.14801/jkiit.2019.17.5.47

8 Morales Ferre, R., Richter, P., De La Fuente, A., & Lohan, E. S. (2019). In-lab validation of jammer detection and direction finding algorithms for GNSS. In *2019 9th International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/

ICL-GNSS.2019.8752944

9 Xu, J., Sun, C., Jin, K., Bai, L., Zhang, S., Yuan, B., Xu, L., & Qin, L. (2025). A cross-scenario GNSS spoofing detection method based on transfer learning. In *Proceedings of the 38th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2025)* (pp. 2682-2693). Institute of Navigation. https://doi.org/10.33012/2025.20434

10 Wang, H.-S., Jwo, D.-J., & Lee, Y.-H. (2025). Transformer-based ionospheric prediction and explainability analysis for enhanced GNSS positioning. *Remote Sensing, 17*(1), 81. https://doi.org/10.3390/rs17010081

11 Zhang, S., Zhou, J., Ma, X., Pirttikangas, S., & Yang, C. (2024). Tsvit: A time series vision transformer for fault diagnosis of rotating machinery. *Applied Sciences, 14*(23), 10781. https://doi.org/10.3390/app142310781

12 Tragakis, A., Liu, Q., Kaul, C., Roy, S. K., Dai, H., Deligianni, F., Murray-Smith, R., & Faccio, D. (2024). GLFNet: Global-local (frequency) filter networks for efficient medical image segmentation. In *2024 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)* (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISBI56570.2024.10635344

13 Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2020). *An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale* [Preprint]. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929

14 Wadekar, S. N., & Chaurasia, A. (2022). *MobileViTv3: Mobile-friendly vision transformer with simple and effective fusion of local, global and input features* [Preprint]. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.15159

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 170-179, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.015

군수업체의 시스템적 차원 안전확보를 위한 두 가지 제언 : 통합경영체제의 도입과 계약특수조건의 수정

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Two Systematic Measures to Ensure Safety in Defense Contractors: integrated management system and revision of special contract conditions

안남수, Namsu Ahn
육군사관학교, 기계시스템공학과, 교수
Professor, Department of Mechanical and Systems Engineering, Korea Military Academy

김성수†, Sungsu Kim
경북대학교, 경영학부 & 에너지환경경제연구소, 교수
Professor, School of Business Administration & RIEEE, Kyungpook National University

정원찬, Wonchan Jeong
국방기술품질원, 품질기획실, 선임연구원
Senior Researcher, Quality Planning Department, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

This study proposes two strategies for enhancing system-level safety in defense industries. The first integrates the requirements of the existing defense quality management and occupational health and safety systems. The second mandates the implementation of recognized safety management systems (e.g., ISO 45001 and KOSHA-MS) for high-risk contractors in agreements made with the Defense Acquisition Program Administration (DAPA). To support the first strategy, an integrated management system was developed by unifying the requirements of the defense quality management system, Industrial Safety and Health Act, Serious Accidents Punishment Act, and occupational safety systems. Second, a revision of the DAPA's special contract terms was prepared. Considering the distinct advantages and limitations of each strategy, a deliberate policy judgment is required.

keywords : integrated management system, special contract conditions, defense contractors, defense quality management system

† Corresponding Author : Sungsu Kim
Tel : : +82-53-950-5422, Fax : +82-53-950-6247, email : sungsukim@knu.ac.kr
School of Business Administration, Kyungpook National University, 41566, 80, Daehakro, Buk-gu, Daegu, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 26th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

2026년 현재 대한민국은 경제, 정치, 문화 등 여러 방면에서 선진국 수준에 도달했다고 인정받고 있다. 그러나 이러한 이면에는 산업재해로 인한 사망만인율(만 명당 사고 사망자 수)이 0.39로 OECD 국가의 평균인 0.29를 훨씬 초과한다는 그늘도 존재하는 것이 현실이다[1]. 이에 정부는 산업현장의 안전을 확보하기 위해 산업안전보건법 외에 추가로 중대재해처벌법을 2022년에 제정하였으나, Table 1의 사망자 수 추이와 같이 통계적으로 유의미한 감소세를 보였다고 간주하기는 어렵다[2].

Table 1. Trends in the number of industrial accident deaths and mortality rate per 10,000 workers

	2020	2021	2022	2023	2024
Number of death	2,062	2,080	2,223	2,016	2,098

이러한 현상의 원인에 대해서는 다양한 의견 및 해석이 존재한다. 공통으로 지적하는 점은, 다른 산업 대비 건설업의 사망률이 압도적으로 높다는 점, 하청 노동자의 사망률이 높다는 점, 고령 노동자의 사망비중이 높다는 점, 현장 작업자의 안전의식이 낮다는 점, 안전관리체제가 제대로 동작하지 않는다는 점 등을 안전분야 전문가들은 지적한다.

첫 번째와 두 번째 원인은 고질적인 병폐인 하청의 악용, 소위 위험의 재하청으로 불리는 문제이다. 그러나 사실 하청은 긍정적인 측면, 즉, 원청 업체는 핵심역량에 집중하고 하청 업체는 안정적 일감 확보를 할 수 있다는 점도 존재한다. 따라서 단기간에 장점을 유지하고 단점을 보완하는 해결책을 마련하기는 쉽지 않으리라고 판단된다. 세 번째 요인인 작업자의 고령화는 대한민국의 인구구조 추세로 인해 피할 수 없는 요인이라고 여겨진다. 네 번째 요인인 현장 작업자의 안전의식 개선은 여러 안전교육 및 현장 안전관리가 강화되면서 점차 나아지고 있는 것으로 여겨진다.

마지막 요인인 안전관리체제의 구축 및 실현은 가장 시급하면서도 효과적인 안전확보방안이다. 이는 지난 2024년 국방분야 일차 리튬전지 생산업체에서 발생한 사고에서 확인할 수 있다. 당시 화재로 인해 23명이 사망하고 9명이 다치는 대형 참사가 발생하였다. 화재의 일차적인 원인은 배터리 연쇄 폭발로 밝혀졌지만, 안전점검 미준수, 비상사태 대비교육 미실시, 배터리 화재 진압용 특수 소화기 미설치 등 시스템적 차원의 안전확보가 미흡하여 피해가 커진 것으로 분석되었다.

본 논문은 폭발물/위험물을 취급하며, 다수의 특수공정이 존재하고, 납기준수가 엄격하며, 최근 생산량의 급증한 군수업체가 안전에 취약할 수 있다는 가능성을 고려하여, 국방 분야의 시스템적 차원 안전확보방안에 관해 연구하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 이어지는 2장에서는 세 가지 관점에서 안전경영체제를 살펴보고자 한다. 먼저 산업안전 관련 두 가지 법에서 요구하는 시스템적 차원의 안전요소들을 식별 및 확인하고, 이후 ISO(International Standard Organization) 경영체제의 인증현황을 살펴본다. 마지막으로 통합경영체제 관련 선행연구를 고찰하고자 한다. 3장에서는 국방 분야에서 시스템적인 차원의 안전을 확보하기 위한 두 가지 현실적인 방안을 제시하고, 각각의 장단점 역시 분석하였다. 마지막 4장에서는 본 연구의 기여도를 요약하고, 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. 선행연구 고찰

본 장에서는 산업안전보건법과 중대재해처벌법에서 요구하는 시스템적 차원의 안전요소를 먼저 식별하고, 이후 각종 ISO 경영체제의 인증현황과 요구사항 목차를 파악한다. 기존 연구는 개별 법령의 해석에 치중했지만, 본 연구는 두 법령의 요구사항을 시스템적 안전요소로 통합한다는 점에서 차별성을 갖는다. 마지막으로 안전보건경영체제와 타 경영체제와의 통합경영체제 관련 선행연구 결과를 요약하여 제시한다.

2.1. 산업안전보건법 및 중대재해처벌법의 시스템적 차원 안전요소 식별

현재 대한민국에서 산업체의 안전을 확보하기 위한 법은 1981년 제정된 산업안전보건법과 2021년에 제정된 중대재해처벌법을 들 수 있다[3-4]. 다만 두 법은 목적 및 성격이 다른데, 산업안전보건법은 현장의 산업재해를 예방하고 쾌적한 작업환경을 조성하기 위한 법이다. 따라서 법 조항은 실행 관점의 현장안전관리 요구사항을 주된 내용으로 담고 있다. 예를 들어, 산업현장 내 안전보건표지의 설치·부착 및 유해 기계설비의 방호장치 구비요건 등을 담고 있는 법이 산업안전보건법이다. 반면 중대재해처벌법은 사업주 혹은 경영자가 안전을 확보하기 위해 수행해야 하는 의무사항 등을 명시한 법으로 경영자의 리더십, 안전보건인력 및 예산배정, 유해 및 위험요인 파악 및 개선, 안전보건관리체계 점검 및 평가 등을 요구하고 있다.

두 법에서 개인이 아닌 조직 차원의 수행(예 사규 제정, 자원 투입, 운영, 성과측정, 환류 등), 즉, PDCA(Plan-Do-Check-Action) 관점의 업무는 시스템적 차원의 안전요소로 식별하였다. 예를 들어 안전모의 착용은 작업자 개인이 준수해야 하는 사항이지만, 유해 및 위험 설비의 안전검사 같은 경우는 유해설비를 식별하고 사내 공식적인 절차에 의해 정기적인 검사를 받아야 하므로 시스템적 차원의 안전요소로 식별하였다.

산업안전보건법에서 다음 두 가지 사항은 시스템적 차원의 안전요구사항으로 식별하였다. 첫 번째 사항은 위험성 평가의 시행이다. 위험성 평가는 사업장 위험요소 식별, 분석, 위험완화 대책수립, 대책실행, 위험감시 등의 단계가 지속적으로 순환하여 사업장의 안전을 확보하는 요소이다. 두 번째 사항은 유해 및 위험한 설비·기계의 경우 안전인증, 자율안전확인, 안전검사 등을 실시해야 한다는 요소이다.

중대재해처벌법의 시스템적 차원의 안전요소는 크게 4가지 차원으로 구분해 볼 수 있다. 각 차원의 세부 실행방안은 중대재해처벌법의 필수 요구사항으로 고용노동부에서 배포한 자료를 참조하여 Table 2와 같이 재작성했다[5].

Table 2. Four dimensions and implementation measures of the serious accident punishment act

Dimension	Implementation
Management leadership	• Clear and specific safety and health management policies and goal setting • Public announcement and posting to effectively communicate to all workers
Assign Personnel and allocate budget	• Designate safety and health personnel and organizations, and assign them appropriate authority and responsibility • Allocate budget for safety and health, and execute the budget according to its intended use
Risk assessment and improvement	• Conduct risk assessments to identify and improve hazardous and dangerous factors • Engage workers in identifying and improving hazardous and dangerous factors through safety briefing meetings (TBM) before work and worker training • Establish procedures for worker participation and feedback(safety and health suggestion systems, near-miss reporting, operation of safety communication channels, etc.) • Select contractors and subcontractors with the capability to prevent industrial accidents during contracting, outsourcing, and consignment
Regular inspections and evaluations on the system	• Prepare manuals and conduct training and inspections for emergency situations such as accidents • Investigate industrial accidents and near-miss incidents and establish measures to prevent recurrence • Conduct regular inspections and evaluations at least once every six months on compliance with obligations under related laws and on the safety and health management system

2.2. ISO 경영체제 현황 및 요구사항 목차

ISO 경영체제들은 HLS(High Level Structure)라고 하여 모두 목차가 동일하다. 이는 여러 경영체제를 쉽게 통합하고, 중복작업에 대한 노력 감소로 업무 효율성을 높이며, 경영체제의 인증·유지 비용을 절감하기 위함에 목적이 있다. HLS 1장은 적용범위, 2장은 인용표준, 3장은 용어와 정의, 4장은 조직상황, 5장은 리더십, 6장은 기획, 7장은 지원, 8장은 운영, 9장은 성과평가, 10장은 개선으로 구성된다. 4장부터 10장의 HLS 장/절의 구성은 Table 3과 같다.

Table 3. Chapters and clauses of HLS

Chapter	Clause
4. Organizational Context	4.1 Understanding the organization and its context 4.2 Understanding the needs and expectations of interested parties 4.3 Determining the scope of the system application
5. Leadership	5.1 Leadership and commitment 5.2 Policy 5.3 Organizational roles, responsibilities, and authorities
6. Planning	6.1 Actions to address risks and opportunities 6.2 Planning for objectives and achieving those objectives
7. Support	7.1 Resources 7.2 Competence 7.3 Awareness 7.4 Communication 7.5 Documented information
8. Operation	8.1 Operational planning and control
9. Performance evaluation	9.1 Monitoring, measurement, analysis, and evaluation 9.2 Internal audit 9.3 Management review
10. Improvement	10.1 General 10.2 Nonconformity and corrective action 10.3 Continual improvement

따라서 2.1절에서 식별한 시스템적 차원의 안전 요소들은 HLS의 적절한 장/절에 배치가 되어야 할 것이다. 또한, 부록에서 제시한 안전경영체제 전체 요구사항은 HLS의 장/절에 부합하도록 작성하였다.

참고로 현재 ISO 경영체제는 9001 품질경영시스템, 14001 환경경영시스템, 45001 안전보건경영시스템, 22000 식품안전경영시스템, 27001 정보보안경영시스템, 50001 에너지경영시스템, 37001 부패방지경영시스템, 13485 의료기기경영시스템, 27701 정보보호경영시스템, 19943 원자력공급망경영시스템, 37301 준법경영시스템, 42001 인공지능경영시스템 등이 존재한다. 그러나 Table 4에서 확인할 수 있는 것처럼 9001, 14001, 45001을 주로 획득하여 운용하고 있는 실정이다.

Table 4. ISO management system certification status(As of 2026, Korean accreditation support center)

	9001	14001	45001	Other ISOs.
Number	25425	14586	13838	2567
%	45.1	25.9	24.5	4.6

2.3. 통합경영체제 관련 선행연구

중앙조달 군수품을 납품하는 모든 군수업체(단순품보형 제외)는 계약특수조건 ⑧항에 따라 국방품질경영체제(Defense Quality Management System, DQMS)를 구축하고 운용해야 한다[6]. 따라서 군수업체가 시스템적 차원의 안전을 확보하기 위해 안전보건경영체제를 구축하고자 한다면, 기존 국방품질경영체제와의 통합을 염두에 두어야 한다. 따라서 본 절에서는 품질경영체제와 안전보건경영체제와의 통합경영체제 관련 선행 학술연구를 살펴보고자 한다.

통합경영체제 관련 최초의 연구로는 2003년에 수행된 연구로 조사된다[7]. 해당 연구에서는 제조물책임법, KS, ISO 9001, ISO 14001 등을 통합한 통합경영시스템을 제안하였다. 그리고 이를 중소기업에 적용하여 절차서는 55종에서 26종으로, 지침서는

55개에서 45개로, 양식류는 165개에서 65개로 감소하였다고 주장하였다. 또한, 기타 효과로는 일관성 있는 업무의 진행과 파일링 시스템의 합리성 향상 등을 부가적인 장점으로 언급하였다.

이후 연구에서는 ISO 9001 품질경영시스템, ISO 14001 환경경영시스템, OHSAS 18001 보건안전경영시스템, PL시스템 통합경영체제 구축을 제시하였다[8]. 이를 통해 기존 77건의 절차서에서 27건의 절차서로 절차서를 축소하여 업무 효율을 증대시켰다고 언급하였다. 또한, 소비자 피해보상건수와 비용 역시 개선되는 부수적인 효과를 누렸다고 주장하였다.

만일 산업안전보건법과 중대재해처벌법의 시스템적 차원의 안전요소를 국방품질경영체제의 요구사항에 통합한다면 Table 5와 같은 장/절로 통합이 가능할 것으로 판단된다. 단, 안전·보건예산 편성 및 용도에 맞는 집행, 유해위험요인을 파악·개선하는 위험성 평가의 실시, 근로자 참여 및 의견청취 절차 마련은 국방품질경영체제의 기존 요구사항에는 존재하지 않으므로 새롭게 신설해야 할 것이다.

3. 시스템적 차원의 안전확보방안

본 장에서는 군수업체의 시스템적 차원 안전확보를 위한 두 가지 현실적인 방안을 제시하고 장·단점을 살펴보고자 한다.

3.1. 국방품질경영체제와 안전보건경영체제의 통합

현재 국방품질경영체제는 품질을 확보하기 위한 요구사항이 주를 이루고 있으나, 안전 및 윤리경영을 확보하기 위한 요구사항 역시 일부 포함하고 있다.

안전 관련 요구사항으로는 7.1.4 프로세스 운용환경에 따르면 '조직은 제품 및 생산 프로세스의 니즈

Table 5. Integration of systematic safety elements from the industrial safety and health act and the serious accident punishment act into the requirements of the defense quality management system

Requirements	DQMS	
	Number	Items
Clear and Specific Safety and Health Management Policies and Goal Setting	5.2.1	Establishment of Quality Policy
Published and posted to be effectively communicated to all employees	5.2.2	Communication of the quality policy
Designate safety and health organization personnel, and assign authority and responsibility	5.3	Organizational Roles, Responsibilities, and Authorities
Through pre-work safety inspection meetings and worker training, workers participate in and share the identification and improvement of hazardous and risky factors	5.1.1	Generals
Selection of subcontractors with industrial accident prevention capabilities for contracting, service, and consignment	8.4	Control of externally provided processes, products, and services
Preparation of emergency response manuals for accidents and other emergency situations, along with training and inspection	7.2.1	Education and training
Investigation of industrial accidents and near-miss incidents, and prevention of recurrence	10.2.1 10.3	Nonconformity and Corrective Action Continuous improvement
Regular inspections and evaluations at least once every six months on compliance with obligations under relevant laws and the safety and health management system	9.2.1 9.3.2	Internal audit Management Review Inputs
Safety Certification, Voluntary Safety Confirmation, and Safety Inspection	7.1.4	Process Operating Environment

에 적합하도록 정리, 청결 및 수리된 상태로 시설을 유지하여야 하며, 작업자 등의 건강과 안전에 부정적 영향을 미치거나 사고를 유발할 수 있는 위해 요소를 제거하여야 한다.'고 명시되어 있다. 또한, 8.5.1.3 작업지침서 역시 '작업지침서에는 명확하고 실질적인 방법(문구, 견본, 도해 등)으로 일솜씨 기준을 포함하여야 하며, 작업자가 준수해야 할 관련 법규 요구사항과 사고 예방을 위한 주의사항이 포함되어야 한다'고 요구하고 있다.

윤리경영 관련 요구사항으로는 5.4 윤리경영에서 '최고경영자는 법적 및 규제적 책임의 준수를 포함하여 사회가 요구하는 윤리적 기대를 조직의 의사결정 및 행동에 반영토록 보장하여야 하며, 다음 사항을 포함하여 실행하여야 한다'를 요구하고 있으며, 9.3.2 경영검토 입력에서는 '사회적 책임과 윤리경영 성과'를 명시하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 안전보건경영체제와 국방품질경영체제와의 통합경영체제(안)을 작성하였으나, 분량의 제한으로 일부만 부록 Table 1과 같이 제시하고자 한다.

이러한 통합경영체제는 대외기관 신뢰성 강화, 안전보건 및 품질경영 통합심사에 따른 효율성 향상, 경영진의 인식 개선 등과 같은 효과를 기대할 수 있을 것이다. 반면 다음과 같은 단점을 가질 수 있다. 첫 번째는 상이한 목표 간 충돌 가능성이다. 일반적으로 품질경영체제는 고객의 지속적인 만족을 목표로 하며, 안전보건경영체제는 관련 법령 및 행정규칙의 충실한 준수를 목표로 한다. 따라서 두 목표 간 충돌 시 해소방안이 마땅치 않다. 두 번째는 업무의 혼선 가능성이다. 산업현장에서 품질과 안전은 별개의 전문인력이 수행함이 일반적이나, 두 체제 간 통합시 업무수행의 주체가 모호해질 수 있다. 세 번째는 경영체제 인증심사 리스크다. 한 번의 심사로 두 경영체제의 적합을 받을 수 있으나, 역시 한 번의 심사로 두 경영체제의 부적합을 받을 수도 있다. 마지막으로 높은 초기구축비용 및 구축기간을 들 수 있다. 현재까지 통합경영체제를 구축한 사례가 많지 않음에 따라, 업무 프로세스 재설계 및 컨설팅에 따른 비용 및 기간의 소요가 예상된다.

3.2. 계약특수조건 내 안전보건경영체제 구축·실행 반영

두 번째 방안으로 방위사업청 물품제조구매 계약특수조건 표준 제20조(감독 및 검사)에 고위험 군수품을 제조하는 업체의 안전보건경영체제(ISO 4500, KOSHA-MS 등)의 구축 및 실행을 의무화하는 것이다.

이를 위해서는 현재의 특수조건 제20조 8항 3호와 20조 9항에 Table 6과 같은 내용의 추가 및 수정이 필요하다.

Table 6. Standard for special conditions of manufacturing, purchasing, and contracting of goods

Item	Contents
Addition article 20, paragraph 8, subparagraph 3	High-risk companies must comply with the establishment and implementation of an occupational safety and health management system that meets either ISO 45001 or KOSHA-MS (requirements for the occupational safety and health management system) according to the type of quality assurance. They also must follow the evaluation and corrective actions of the quality assurance institution. However, in the case of companies without an established occupational safety and health management system, the system establishment plan must be reflected in the company's quality assurance plan and submitted to the quality assurance institution.
Modification article 20, paragraph 9	The contracting party, in the case of Paragraph 8, Subparagraph 3, shall submit a quality and safety assurance plan including the production plan (schedule and measures included), the status of preparation for production/quality/safety assurance, the establishment and implementation plan of the Defense Quality Management System and Occupational Safety and Health Management System , and the general status of the company (new company) to the quality assurance institution designated by the contract officer within () days after the contract.

이를 통한 기대효과로는 고위험 군수품을 생산하는 업체의 빠른 안전문화 확산이 가능하다는 점, 타 법령의 개정 없이 계약특수조건만 수정하면 됨에 따라 빠른 제도 도입이 가능하다는 점, 중대재해처벌법에서 요구하는 안전보건경영체제의 자연스러운 준수가 유도된다는 점, 품질업무는 품질부서에서 담당하고 안전업무는 안전부서에서 담당하는 업무 일관성 확보가 가능하다는 점 등을 들 수 있다. 예상되는 단점으로는 ISO 45001과 KOSHA-MS는 국방 분야의 특수성을 미고려한 안전보건경영체제라는 점과 3자 심사에 따른 형식적인 체제 구축 및 이행가능성 등을 들 수 있다. 참고로 DQMS는 기존 ISO 9001 품질경영체제에 국방분야 특수성을 추가하여 만든 경영체제이다.

3.3. 두 가지 방안의 장·단점 비교

본 절에서는 통합경영체제의 도입을 통한 시스템적 차원의 안전확보방안과 계약특수조건의 수정을 통한 안전확보방안의 장단점을 비교하고자 한다. 비교결과는 아래 Table 7과 같다.

4. 결론 및 향후 연구방향

국내에서 안전확보는 상징적인 목표가 아닌 모든 기업이 바로 지금 달성해야 하는 최우선적인 목표가 되었다.

본 논문에서는 군수업체의 시스템적 차원 안전확보를 위한 두 가지 방안을 제시하고, 각각의 장·단점을 분석하였다. 첫 번째 방안은 기존 모든 군수업체가 구축 및 실행하고 있는 국방품질경영체제에 안전보건경영체제 및 각종 산업안전 관련 법령의 안전요구사항을 통합하는 것이며, 두 번째 방안은 군수업체가 방위사업청과 계약 시 안전보건경영체제(ISO 45001, KOSHA-MS 등)의 구축을 의무화하는 방안이다. 정책적인 측면에서는 첫 번째 방안이 고려될 수 있으나, 운영하는 기업으로서 실질적인 이득은 크지 않으리라고 여겨진다. 두 번째 방안은 빠른 제도의 도입과 실질적인 개선 효과의 기대가 가능하나, 시간이 지남에 따라 형식적인 체제 이행을 견제하는 제도적 장치가 필요할 것으로 여겨진다.

향후 연구 방향으로는 국방 분야에 특화된 안전보건경영체제의 요구사항을 작성하는 것이다. 국방 분야는 산업의 특성상, 정부/정부 대리인/주계약업체/협력업체의 역할과 책임의 구분이 필요하며, 관급자재의 관리, 형상통제의 강화, 부적합품의 관리 등 여러 특수한 상황을 고려해야 하기 때문이다. 또한, 중소 방산 협력업체의 경우에는 안전경영체제의 도입이 추가적인 재무적·행정적 부담으로 작용할 수 있다. 따라서 정부(방위사업청) 차원의 중소기업 안전인증 비용 지원 혹은 컨설팅 지원 등의 제도 신설과 같은 정책적인 연구 역시 필요하다.

Table 7. Comparison of alternatives

	Integrated Management System	Special Contract Term
Pros	• Strengthening external credibility • Integrated audit • Increased management interest	• Possible dissemination of safety culture • Possible rapid system implementation • Natural inducement of compliance with the Serious Accident Punishment Act • Securing work consistency
Cons	• Lack of resolution plans when conflicting management goals arise • Ambiguity in work responsibility • Audit risks • High initial establishment costs and time	• Lack of consideration for the special characteristics of the defense sector • Possibility of formalistic establishment and implementation due to third-party audits

사 사

본 연구는 연구자 개인의 의견이며, 퇴고 과정에서 생성형 AI(구글 Gemini 3.0 flash)의 도움을 받음

참고문헌

1. 연합뉴스. (2025, 8월 12일). 2030년까지 산재사망자 OECD 평균으로 줄인다…1만명당 0.29명. *연합뉴스*. https://www.yna.co.kr/view/AKR20250812080600530
2. 고용노동부. (2024). *2024 산업재해현황분석: 산업재해보상보험법에 의한 업무상 재해를 중심으로*(발간등록번호 11-1492000-100071-10).
3. OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ACT, Act No. 20677 (2025). https://www.law.go.kr/LSW//lsInfoP.do?lsiSeq=268551&ancYd=20250121&ancNo=20677&efYd=20250722&nwJoYnInfo=N&efGubun=Y&chrClsCd=010202&ancYnChk=0#0000
4. SERIOUS ACCIDENTS PUNISHMENT ACT, Act No. 17907 (2021). https://www.law.go.kr/법령/중대재해처벌법
5. 고용노동부. (2024, 1월 28일). (참고) *중대재해처벌법 및 안전보건관리체계에 대한 주요 문답* [보도자료]. https://www.moel.go.kr/news/enews/report/enewsView.do?news_seq=16131
6. 방위사업청. (2025). 물품 제조·구매 계약특수조건 표준(일반 및 방산), 방위사업청예규 제996호. https://www.law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?chrClsCd=&admRulSeq=2100000261468
7. Yu, W.-J. (2003). Research about integrated system construction design of ISO 9001:2000, KS and product safety management by PL (product liability) law practice. *Journal of Korean Society for Quality Management, 31* (4), 184-193.
8. 8. Kim, K. S., Lim, G. C., & Chung, S. S. (2011). A study on the PL response by integrated management system. *Journal of Korean Society for Quality Management, 39* (1), 120-130. https://doi.org/10.7469/JKSQM.2011.39.1.120

부록

Table 1. Integrated management system draft

Contents	Occupational health & safety management system	Defense quality management system	Integrated management system
5.2.1 Establishment of quality policy	Top management shall establish, implement, and maintain a quality policy that: a) is appropriate to the organization's purpose and context and supports the organization's strategic direction; b) provides a framework for setting quality objectives; c) includes a commitment to meeting applicable requirements; d) includes a commitment to continual improvement of the quality management system.	Top management must establish, implement, and maintain an occupational health and safety policy that: a) is appropriate to the nature of the hazards and risks threatening the organization's occupational health and safety and the size of the organization; b) includes a commitment to compliance that goes beyond legal requirements; c) reflects the management philosophy of the occupational health and safety manager and a commitment to worker participation and consultation; d) is committed to eliminating hazards and reducing occupational health and safety risks; e) demonstrates a commitment to continuous improvement and implementation to protect the safety and health of workers; e) regularly reviews the occupational health and safety policy to ensure its suitability for the organization;	Integrated Quality, Safety, and Health Management Policy To achieve sustainable development and stakeholder satisfaction, the CEO establishes, implements, and maintains an integrated quality, safety, and health management policy, sharing it company-wide and regularly reviewing it. a) Organizational Appropriateness and Strategic Support This policy is appropriate to the organization's purpose and context, the nature of hazards and risks that threaten the organization's safety and health, and its size. It supports the organization's strategic direction. b) Framework for Goal Setting Provides a clear framework for setting, implementing, and reviewing quality and safety and health objectives, thereby continuously improving the performance of the management system. c) Compliance with Laws and Requirements We strictly comply with applicable legal and other requirements and strive to achieve quality and safety and health standards that exceed legal standards. d) Commitment to Improvement We pursue continuous improvement of the quality and safety and health management systems and engage in activities to eliminate risks and reduce safety and health risks. e) Participation and Communication of Organization Members The policy reflects the management philosophy of the Safety and Health Manager and fosters a cooperative safety and quality culture by ensuring the participation and

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 170-179, Jun. 2026

Contents	Occupational health & safety management system	Defense quality management system	Integrated management system
		f) provides a framework for establishing and reviewing occupational health and safety objectives; and g) is committed to consultation and participation with workers or their representatives (if any).	consultation of all workers and the input of worker representatives (if any). f) Regular Review and Maintaining Conformity The policy is regularly reviewed to ensure its continued suitability to the organization's circumstances and goals, and any improvements are reflected. g) Statement of Commitment Through this policy, the CEO clearly expresses a strong commitment to raising awareness of the importance of quality and safety and health to all members and stakeholders and to implementing it.

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 180-194, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.016

무기체계 획득 초기 단계(소요기획·선행연구·탐색개발) RAM-C 분석 활용 방안

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Application of RAM-C Analysis in the Early Acquisition Phases of Weapon Systems (Requirements Planning, Preliminary Research, and Technology Development)

이재원, Jae-Won Lee
국방기술품질원, 국방신뢰성연구센터, 선임연구원
Senior Researcher, Defense Reliability Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

한승진, Seung-Jin Han
국방기술품질원, 국방신뢰성연구센터, 선임연구원
Senior Researcher, Defense Reliability Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

성시일, Si-Il Sung
경기대학교, 산업경영정보공학과, 부교수
Associate Professor, Department of Industrial and Management Engineering, Kyonggi University

배경빈, Kyoung-Bin Bae
국립창원대학교, 경영학과(생산관리), 석사과정
Master's Student, Department of Business Administration, Changwon National University

박재훈†, Jaehun Park
국립창원대학교, 경영학과(생산관리), 교수
Professor, Department of Business Administration, Changwon National University

Abstract

This study proposed an analysis procedure and algorithm for applying RAM-C in the early acquisition stages of weapon systems. To this end, stage-specific application plans were developed for the requirement planning, preliminary research, and exploratory development phases, and a decision-support framework linking operational availability, combat readiness, and life cycle cost was presented. In addition, through a UAV case study, the applicability of the proposed approach to quantitative requirement setting, design alternative evaluation, and economic feasibility assessment was verified.

keywords : Logistics support analysis, RAM-C, life cycle cost, performance based logistics, trade-off analysis, early acquisition phase of weapon systems

† Corresponding Author : Jaehun Park
Tel : +82-55-213-3337, Fax : +82-55-213-3339, email : pjh3479@cwnu.ac.kr
Changwon National University, 51140, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised June 17th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

현대 무기체계는 첨단화 및 복합화됨에 따라 획득 비용뿐만 아니라 운용유지 단계에서 발생하는 비용이 총수명주기비용(Life Cycle Cost, LCC)의 상당 부분을 차지하고 있다. 우리 군은 이러한 비용을 효율적으로 관리하고 최적의 군수 지원을 보장하기 위해 다양한 정책을 모색하고 있다. 과거 미군은 RAM(Reliability, Availability, Maintainability) 기반 비용 분석을 통해 RAM 목표를 충족시키면서도 획득비 절감을 중점적으로 고려했다. 그러나 2003년 총수명주기관리(Total Life Cycle System Management, TLCSM)제도 도입과 2009년 RAM-C(Reliability, Availability, Maintainability, and Cost) 시행 이후, 무기체계의 획득 비용뿐만 아니라 운용유지 비용까지 포함하는 수명주기비용 관리 체제로 전환하였다. 특히, 주요 국방획득프로그램(Major Defense Acquisition Program, MDAP)에서는 RAM-C 결과보고서 제출을 의무화하고 있다. 우리 국방부는 2021년, 총수명주기 관점에서 후속 군수지원을 강화하기 위해 무기체계 획득 및 운용 단계에 개발업체 주도의 RAM-C 업무를 도입하였다. 또한, RAM-C 분석 결과를 성과기반군수(Performance Based Logistics, PBL) 사업의 성과 기준으로 활용하도록 하였으며, 총수명주기관리 업무훈령 개정을 통해 RAM-C 수행을 위한 제도적 근거를 마련하였다[1-3].

그러나 기존의 RAM-C 분석은 주로 체계개발 이후의 시험평가나 야전 운용 단계에서 기결정된 설계를 검증하는 사후 확인 성격에 치중됐다. 일반적으로 무기체계 수명주기비용의 약 70~80%는 설계가 고착화되는 초기 획득 단계에서 결정된다. 따라서 개발 후반부에 발견된 신뢰도 결함이나 과도한 유지비용 문제는 전체 사업의 리스크를 가중시키고 예산 효율성을 저해하는 주요 원인이 된다. 이에 따라, 무기체계의 경제성과 전투준비태세를 동시에 보장하기 위해서는 획득 초기 단계부터 RAM-C 요소를 선제적으로 고려할 수 있는 체계적인 접근이 시급하다[1-4].

본 연구는 기존 RAM-C 분석의 한계를 극복하고, 의사결정의 유연성이 가장 높은 초기 획득 단계(소요기획, 선행연구, 탐색개발)에 집중하여, 해당 단계에서 RAM-C를 어떻게 활용할 수 있는지에 대한 방안과 이를 구체화하기 위해 알고리즘을 제시한다.

본 연구는 다음과 같은 차별성을 가진다. 첫째, 검증에서 기획 및 설계로의 패러다임 전환이다. 기존 연구가 이미 도출된 설계안의 RAM-C 수치를 산출하는 데 그쳤다면, 본 연구는 초기 단계에서 목표 성능과 비용의 최적 균형점(trade-off)을 찾기 위한 능동적인 활용 방안을 제시한다. 둘째, 단계별 특성을 반영한 맞춤형 활용 알고리즘의 제안이다. 데이터가 불충분한 소요기획 단계와 기술적 구체화가 진행되는 탐색개발 단계의 차이를 고려하여, 각 단계의 입력 변수와 분석 목적에 최적화된 RAM-C 적용 알고리즘을 개발한다. 셋째, 선제적 리스크 관리 도구로서의 실효성 확보이다. 초기 단계에서 운용유지비 추정 및 신뢰도 목표 설정을 정교화함으로써, 향후 체계개발 및 양산 단계에서 발생할 수 있는 설계 변경과 비용 초과 리스크를 최소화할 수 있는 과학적 근거를 제공한다[1-4].

2. 배경 연구

2.1. RAM-C의 개념

RAM-C는 무기체계의 신뢰도(reliability), 가용도(availability), 정비도(maintainability)에 비용(cost)을 추가한 개념이다.

신뢰도는 일정 기간 무기체계가 고장 없이 의도된 기능을 수행할 확률을 의미하며, 가용도는 임무 수행 시 무기체계를 사용할 수 있는 정도이다. 정비도는 고장이 발생한 장비가 복구되어 정상적으로 작동하는 데 걸리는 시간이며, 비용은 획득부터 운영 유지, 폐기까지의 총수명주기비용을 말한다[5].

기존의 RAM 분석이 기술적인 성능 요소에 초점을 두었다면, RAM-C는 여기에 비용 요소를 추가하여 RAM 수준 향상이 총수명주기비용에 미치는 영

향을 정량적으로 분석한다는 점에서 차별점을 가진다. 즉, RAM-C는 RAM 요소가 무기체계의 총수명주기비용에 어떠한 영향을 미치는지를 체계적으로 분석함으로써, 설계 방향 설정, 투자 결정, 위험 관리 및 계약 조건에 반영되는 필수적인 분석 도구이다. 이러한 RAM-C 분석은 단지 비용 산출만이 아닌, RAM 성능과 비용 간의 인과관계를 분석하여 더욱 최적화된 의사결정 도구로 사용된다.

2.2. 무기체계의 수명주기

본 절의 무기체계 수명주기 구분과 단계별 RAM 업무 내용은 국방부 총수명주기관리업무훈령, 방위사업청 RAM 업무지침 및 RAM 업무편람에서 제시하는 내용을 기반으로 정리하였다. 무기체계 수명주기 전반에 걸친 RAM-C 분석은 각 단계의 의사결정에 필요한 비용 지표와 성능 목표를 제공함으로써, 총수명주기비용을 최적화하고 군의 요구 성능을 보장하는 데 그 목적이 있다. 무기체계의 수명주기는 국방부 총수명주기관리업무훈령 및 방위사업청 RAM 업무지침을 참고할 수 있다. 해당 문헌에는 무기체계의 수명주기를 7단계로 구분하고 있으며, 각 단계는 소요기획, 선행연구, 탐색개발, 체계개발, 시험평가, 야전운용, 구매 단계로 구성된다. 본 연구에서는 무기체계 획득 단계 설정을 위해 국방부 총수명주기관리업무훈령 및 방위사업청 RAM 업무지침의 7단계 수명주기를 그대로 준용한다.

국방부 총수명주기관리업무훈령 및 방위사업청 RAM 업무지침에서 제시하는 수명주기 단계별 RAM 업무내용을 바탕으로 RAM-C 분석 목적과 주요 분석 기법 및 산출물을 Table 1과 같이 정리할 수 있다[1-3]. 다만, Table 1의 RAM-C 분석 목적, 주요 분석 기법 및 산출물은 선행 규정의 RAM 업무 내용을 본 연구의 목적에 맞게 재구성한 것이다.

먼저 소요기획 단계에서는 무기체계의 작전요구성능(Required Operational Capability, ROC)과 예상 운용환경을 토대로 RAM 성능이 비용에 미치는 영향을 개략적으로 예측하며, 향후 개발의 기준이 될 RAM 목표 수준의 가이드라인(baseline)을 수립한다. 이는 유사 체계의 평균고장간격(Mean Time Between Failure, MTBF)과 평균수리시간(Mean Time To Repair, MTTR) 데이터를 기반으로 RAM 지표 변화가 운용유지비에 미치는 민감도를 도출하여, 설정된 목표의 재정적 타당성을 검토하고 예산 편성의 방향을 제시하는 과정이다.

이어지는 선행연구 단계에서는 기술적 대안별 RAM 수준에 따른 장기적 비용 영향과 작전 효과를 비교하여 구체적이고 합리적인 요구조건을 설정한다. 이때 고장 빈도와 정비 시간에 따른 가동률 분석뿐만 아니라 정비 인력 소요 및 작전 손실 비용까지 고려한 비용-효과 분석을 수행하며, 그 결과는 RAM-C 계획 문서 초안 구성 및 차기 단계의 제안요청서 작성을 위한 핵심 자료로 활용된다.

탐색개발 단계에 진입하면 기본 설계가 설정된 RAM 목표를 충족하는지 사전에 평가하고, 분석 범위를 주요 구성품(Line Replaceable Unit, LRU) 수준으로 구체화하여 설계 방향의 타당성을 검증한다. 특히 LCC 민감도 분석과 비용편익 분석을 통해 비용 상승 요인을 사전에 식별하고 설계 개선 조치의 경제적 기여도를 산출한다.

이후 체계개발 단계에서는 상세설계와 실제 시험 자료를 반영하여 RAM 성능을 정량적으로 최종 검증한다. 고장모드영향분석(Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis, FMECA) 및 신뢰도 성장 시험 결과에 기반하여 정비 정책 및 예비 부속 소요량을 최적화하는 등 군수지원 상세 분석을 수행하며, 설계 변경 시의 비용 효과성을 평가하여 비용 효율적인 최종 설계를 확정한다.

전력화 직전의 시험평가 단계에서는 실제 시험 데이터(MTBF, MTTR 실측치)를 바탕으로 운용유지비에 미치는 실질적 영향을 정밀 산정한다. 사전 예측치와의 편차를 분석하여 성능 미달 시 발생하는 추가 비용과 작전 능력 손실을 정량화하며, 이는 전력화 여부 결정 및 야전 배치 전 재정적 리스크 평가의 결정적 근거가 된다.

체계가 전력화된 야전 운용 단계에서는 야전 실측

데이터를 통해 수명주기비용을 지속적으로 추적하고 성과기반군수(Performance Based Logistics, PBL) 및 성능개량(Product Improvement Program, PIP) 투자의 경제적 근거를 마련한다[6]. 실시간 고장 빈도 분석을 통해 정비 체계 개선이나 예산 재조정을 수행하며, 축적된 데이터는 후속 체계의 소요기획을 위한 피드백 자료로 활용되어 분석의 선순환 구조를 형성한다.

마지막으로 국외 도입 시의 구매사업 단계에서는 제조국의 운용 실적을 분석하여 한국군 정비 여건 및 운용환경에 따른 비용 영향을 예측한다. 이를 바탕으로 무상보증(warranty) 및 페널티 기준을 설정함으로써 도입 시의 경제적 불확실성을 최소화하고 방어적 계약 전략을 수립하는 데 기여한다.

Table 1. Objectives of RAM-C analysis by cycle phase

Life cycle phase	RAM-C Analysis Objective	RAM activities
Requirement planning phase	Establish RAM target concept and secure baseline data	• Analysis of operational concept and operating environment • Review of RAM data from similar systems • Establish initial MTBF/MTTR targets • Estimation of Operating and Support(O&S) cost incorporating RAM factors
Preliminary research phase	Quantification of RAM requirements and evaluation of design feasibility	• Evaluation of RAM suitability of candidate technologies • Quantification of RAM requirements(Preparation of the draft RAM-C report) • Preliminary LCC analysis based on initial RAM data
Exploratory development phase	Reflection of RAM performance into design and review of design alternatives	• Evaluation of RAM performance for each design alternative • Development of Reliability Block Diagrams(RBD) and FMEA • Development of a maintainability model • Execution of RAM simulation • Update of the RAM-C report
System development phase	Securing RAM performance in detailed design and test preparation	• Detailed RAM analysis(FMECA, LORA) • Design of Reliability Growth Test(RGT) • Planning of Maintainability Demonstration Test(MDT) • Design improvement feedback • Assignment of SMR codes based on the results of Level Of Repair Analysis(LORA)
Test & evaluation phase	Verification and validation of RAM requirements	• Execution of RAM Demonstration Tests(RDT, MDT) • Measurement of MTBF and MTTR • Evaluation of RAM target achievement • Analysis of test results and implementation of corrective actions
Operation & sustainment phase	Maintenance and improvement of field RAM performance	• Collection of RAM operational data • Reliability growth tracking • Improvement of maintenance manuals and maintenance plans • Optimization of component life and maintenance intervals • Re-estimation of maintenance costs
Foreign procurement phase	Securing RAM suitability of foreign systems and incorporation of RAM warranty clauses in contracts	• Collection of foreign RAM data • Review of operational history(ODR) – Analysis of applicability to the ROK military operational environment • Establishment of RAM warranty provisions in contracts

3. 제안하는 방법

본 장에서는 무기체계 수명주기 중 초기 단계에 해당하는 소요기획, 선행연구, 탐색개발을 대상으로 RAM-C의 구체적인 활용 방안(3.1장) 및 적용 알고리즘(3.2장)을 제시한다.

3.1. 무기체계 수명주기의 초기 단계 RAM-C 활용안

3.1.1. 소요기획 단계

본 단계에서 수행하는 RAM-C 분석은 군의 전투준비태세 목표와 체계의 운용가용도를 동시에 충족하기 위한 최적의 체계 규모를 산출하고, 이에 따른 총수명주기비용을 추정하는 데 목적이 있다.

분석은 크게 세 가지 시나리오로 진행된다. 첫째, 설정된 목표 운용가용도와 전투준비태세율을 달성하기 위한 체계 총배치 수량을 도출한다. 둘째, 가용한 예산이나 배치 수량에 제한이 있는 경우, 주어진 제약 조건 내에서 전투준비태세를 보장할 수 있는 최소 목표 운용가용도를 역산한다. 마지막으로, 이러한 대안별 분석 결과를 바탕으로 획득비와 운용유지비가 포함된 총수명주기비용을 산출하여 경제적 타당성을 검토한다[7]. 본 단계의 RAM-C 분석을 통해 도출되는 주요 항목과 그 세부 내용은 Table 2와 같다.

이와 같은 분석 결과는 향후 다음과 같이 정책적 의사결정에 활용될 수 있다. 첫째, 정비 인프라의 적정성 검토이다. 대안별로 도출된 1회 고장당 허용 불가동 시간을 바탕으로, 현재 군의 정비 역량과 군수지원 체계 내에서 해당 목표 달성이 가능한지를 기술적으로 검증한다. 둘째, 최적 대안 선정 및 중기계획 반영이다. 분석을 통해 도출된 체계 배치 수량과 총수명주기비용의 상관관계를 검토하여, 비용 대효과가 극대화되는 지점을 식별한다. 선정된 최종안의 목표 운용가용도와 예산 규모는 향후 국방 중기계획 및 관련 획득 사업의 기초 자료로 활용되어 정책적 일관성을 보장한다.

3.1.2. 선행연구 단계

본 단계에서의 RAM-C 분석은 소요기획 단계에서 도출된 체계 수준의 목표치와 배치 규모를 기준으로, 이를 달성하기 위한 하위 부체계(sub-system) 및 구성품(component) 단위의 최적 구조를 식별하는 데 주안점을 둔다. 본 단계에서는 분석의 범위를 물리적 하위 구조로 확장하여 대안별 성능 차이가 수명주기비용에 미치는 영향을 정밀하게 평가함으로써, 실질적인 RAM 설계 가이드라인을 수립한다.

우선, 목표 운용가용도와 전투준비태세율이 주어진 조건에서 각 부체계 및 구성품별 설계 대안에 따

Table 2. Main items and contents of RAM-C analysis in the requirement planning phase

Category	Main analysis and outputs	Remarks
Estimation of required quantity	Derivation of required system quantity to satisfy target operational availability and Combat Readiness(SSR).	Alternative comparison and evaluation
Determination of operational threshold	Derivation of the minimum operational availability required to maintain combat readiness under deployment quantity constraints.	Including calculation of downtime per failure
Cost optimization	Derivation of the optimal deployment quantity and corresponding operational availability under budget constraints.	Reflection of acquisition cost constraints
Economic analysis	LCC estimation based on the determined deployment quantity, including acquisition, operation, and maintenance costs.	Presentation of total LCC

른 수명주기비용을 산출한다. 구성품의 신뢰도 지표인 MTBF를 기반으로 연간 고장 횟수를 예측하고, 이를 바탕으로 부체계 단가와 정비비율, 배치 수량을 고려한 연간 정비비용을 도출한다. 이 과정에서 산출된 부체계별 고장 빈도는 단순 비용 계산을 넘어, 향후 정비 리소스 소요량, 예비 부품 확보 규모, 정비 소요시간 등 군수지원 요소 전반을 예측하는 기초자료로 활용된다.

이러한 정량적 분석 결과를 바탕으로 대안별 LCC를 비교 검토하여 최종적인 RAM 요구조건을 수립한다. 도출된 정량적 지표들은 RAM-C 문서 초안의 핵심 자료가 되며, 향후 설계 단계의 기술 요구사항 문서화와 RAM 시험평가의 합격 기준 설정에 직접적으로 반영된다. 또한, 민감도 분석 및 작전 손실 비용과 같은 간접비용 요소까지 고려함으로써 차기 설계 단계의 기술 결정에 실질적인 방향성을 제공한다.

본 단계에서 도출되는 RAM-C 분석의 주요 결과물과 그 활용 방안을 정리하면 Table 3과 같다.

3.1.3. 탐색개발 단계

본 단계에서의 RAM-C 분석은 선행연구 단계의 개략적인 분석 결과를 기반으로 하되, 보다 구체화된 체계 구조 정보를 활용하여 기술적 대안들에 대한 상세 분석을 수행하는 것을 목적으로 한다. 본 단계의 가장 큰 특징은 분석 대상을 부체계 수준에서 주요 구성품인 LRU 수준까지 세분화하여 식별한다는 점이다. 이를 통해 각 기술적 대안이 수명주기비용에 미치는 영향을 정량적으로 비교·검토할 수 있는 정밀한 분석 기반을 마련하게 된다.

본 단계에서는 유사 체계의 평균값에 의존하던 기존 방식에서 벗어나, 식별된 개별 LRU별로 MTBF와 MTTR를 직접 할당함으로써 분석의 정확도를 제고한다. 특히 유지비용 산출 시 구성품별 평균고장간격과 정비 단가를 연계한 상세 계산 방식을 적용하며, 이전 단계에서는 고려되지 않았던 초도 보급량 산출을 반영하여 실제 전력화 초기 소요 예산까지 분석 범위에 포함한다.

이러한 세부 구조 정보를 바탕으로 수행되는 대안별 RAM-C 분석은 최적의 무기체계 설계를 확정하는 핵심 기제로 작용한다. 획득비, 운용비, 유지비를 종합적으로 산출하여 장기적 경제성이 가장 우수한 대안을 결정하며, LRU 수준에서의 최적 예비 부품 소요량을 산출하여 군수지원 분석의 실효성을 높인다. 또한, 체계 전체의 목표 성능을 달성하기 위해 식별된 구조별로 신뢰도와 정비도를 할당함으로써, 후속 단계인 체계개발에서의 상세설계 및 기술적 요구사항을 규정하는 결정적인 지침을 제공한다.

Table 3. Detailed outputs for each analysis item in the preliminary research phase

Category	Detailed outputs	Key applications and expected outcomes
Subsystem-level LCC estimation	Derivation of target availability, annual failure frequency, and annual maintenance cost for each component alternative	Identification of optimal design alternatives and prediction of maintenance resources and spare parts demand
Quantitative RAM requirements	Specification of minimum requirements for MTBF and MTTR and upper limits for maintenance cost	Documentation of technical requirements and establishment of RAM test and evaluation criteria
Availability sensitivity analysis	Quantifying Availability Variation according to changes in MTBF and MTTR	Identification of design improvement priorities and key vulnerable subsystems
Indirect cost and risk assessment	Economic conversion of operational loss costs (such as power gaps) due to under-availability	Providing a basis for technical decision-making and selection of RAM test items in the next design phase

3.2. RAM-C 분석 알고리즘

3.2.1. 소요기획 및 선행연구 단계

소요기획 단계에서는 군의 전투준비태세 목표와 경제적 제한 사항을 동시에 고려하여 최적의 체계 규모를 산출한다. 분석 알고리즘은 크게 세 가지 시나리오로 구분한다.

[시나리오 1] 목표 운용가용도 기반의 체계 총배치 수량 및 LCC 산출

설정된 목표 운용가용도(A_0)와 전투준비태세율(P)을 충족하기 위한 체계 총배치 수량(N)을 이항분포(binomial distribution)의 역함수를 활용하여 산출한다. 각 무기체계가 A_0를 가질 때, P 이상의 확률로 최소 임무 수행 가능 수량(s)을 확보하도록 다음 식(1)과 같이 N을 계산한다.

$$P(X \geq s) = \sum_{k=s}^{N} \binom{N}{k} A_0^k (1-A_0)^{N-k} \geq P \quad (1)$$

복합 운영 장비의 경우 임무 수행을 위한 무인기와 지상통제장비가 모두 정상 상태여야 한다고 가정하면, 두 구성요소는 직렬 구조로 볼 수 있다. 따라서, 복합 운용 장비(예: 무인기 및 지상통제장비)의 경우, 다음 식(2)와 같이 각 구성요소의 가용도를 동시에 고려한다. 여기서, A_o는 무인기, A_1는 지상통제장비의 예를 의미한다.

$$P(X \geq s) = \sum_{k=s}^{N} \binom{N}{k} A_0^k (1-A_0)^{N-k} \quad (2)$$
$$X\, A_1 (1-A_1) \geq P$$

단, 실제 무기체계에서는 지상통제장비의 중복성, 예비 장비 운용 여부, 임무 운용 개념에 따라 직렬, 병렬 또는 k-out-of-n 구조가 적용될 수 있으므로, 실제 사업 적용 시에는 RBD를 기반으로 체계 구조를 정의해야 한다.

배치 수량 N이 결정되면 획득 비용(C_{acq}), 운용비용(C_{ops}), 유지비용(C_{maint}), 그리고 수명주기비용(LCC)을 식(3)과 같이 산출한다. U는 연간 운용 시간, r은 정비비 비율을 의미한다.

$$LCC = C_{acq} + C_{ops} + C_{maint}$$

where

$$C_{acq} = N \times unit-price \quad (3)$$
$$C_{ops} = N \times \sum (personnel \times salary)$$
$$C_{maint} = \sum (System-price \times \frac{U}{MTBF} \times r)\ N$$

C_{acq}의 경우 체계의 N에 체계당 납품 단가(unit-price)를 곱한 값으로 산출된다. C_{ops}의 경우 N에 총운용 인원수(personnel)와 운용 인원 연봉(salary)을 곱한 값으로 계산된다. 운용 인원수에는 운용 인원, 정비 인원, 행정 인원 등이 포함된다. 운용 인원 연봉에는 운용, 정비, 행정 인원 연봉 등이 포함된다. C_{maint}의 경우 부체계 수준에서 유사 무기체계의 MTBF를 기반으로 산출한다.

본 연구의 사례에서는 초기 획득 단계에서 확보 가능한 자료의 제약을 고려하여 운용비용을 운용, 정비, 행정 인력의 인건비 중심으로 단순화하였다. 실제 사업 적용 시에는 유류비, 교육훈련비, 시설운영비, 소모품비, 보험성 비용 등 체계 특성에 따른 추가 운용비 항목을 포함할 수 있다. 유지비용 역시 부체계 또는 LRU 단가, 예상 고장횟수, 정비비율을 활용한 모수적 추정 방식으로 산출하며, 세부 자료가 확보되는 단계에서는 창정비비, 수리부속비, 외주정비비 등을 세분화하여 반영할 수 있다.

[시나리오 2] 체계 총배치 수량이 설정된 후, 전투준비태세율을 만족하는 최소 목표 운용가용도 산출

예산 및 물류상의 문제로 체계 총배치 수량의 제한이 있을 때, 전투준비태세율을 만족하기 위해 무기체계의 목표 운용가용도는 최소 얼마 이상이 되어야

하는지를 산출하는 것으로 이항분포 역문제로 접근한다. '총 N 대만 배치 가능하다면, 개별 무기체계는 얼마나 신뢰성 있게 작동해야 할까?'를 산출하는 것으로 다음 식(4)와 같이 'A_0는 최소 얼마여야 할까?'를 산출한다.

$$P = \sum_{k=s}^{N} \binom{N}{k} A_0^k (1-A_0)^{N-k} \Rightarrow A_{\min} \quad (4)$$

MTBF를 이용하여 고장 횟수 산출 후 목표 운용가용도 달성을 위한 1회 고장당 불가동 시간을 다음과 같이 산출한다.

- **총장 빈도** = 연간 운용시간 / MTBF
- **총불가동시간** = $(1-A_0)\times$연간 운용시간
- **1회 고장당 불가동시간** = $\frac{(1-A_0)\times \text{연간운용시간}}{\text{연간고장횟수}}$ = $(1-A_0)\times$MTBF

[시나리오 3] 예산 제약 하의 최적 배치 수량 및 가용도 조합 산출

주어진 총예산(C) 내에서 전투준비태세율을 충족하는 최적의 운용가용도와 체계 총배치 수량(N, A) 조합을 산출한다. 이를 위해 우선 예산 범위 내 최대 배치 가능 수량을 다음의 순서대로 산정한다. 먼저 체계 1대당 발생하는 연간 총소요비용(C_{unit})을 도출한다. 이는 체계당 획득 단가, 운용 인건비, 그리고 부체계별 평균고장간격과 정비비 비율(r)을 고려한 유지비의 합으로 다음 식(5)와 같이 산정한다.

C_{unit} = 체계당 획득 단가(C_1)+(운용인건비(C_2)×운용 인원수(H)+(부체계 단가(C_4)×운용시간(U)/부체계 MTBF×정비비 비율(r))) (5)

도출된 C_{unit}을 바탕으로 총예산 내에서 배치할 수 있는 이론적 최대 수량을 다음 식(6)과 같이 결정한다.

$$N_{\max} = \left[\frac{C}{C_{unit}} \right] \quad (6)$$

다음으로, 반복 탐색을 통한 최적해를 식별한다. 이를 위해 임무 수행을 위한 최소 장비 수부터 앞서 산출한 $N_{\max}$까지 체계 수량을 가변시키며, 각 N에 대하여 목표 전투준비태세율을 만족하는 최소 운용가용도를 탐색한다[8-9].

각 N에 대해 A_o=080~0.99 범위에서 이항 누적합을 앞선 식(1)을 이용하여 계산한다. 여기서 P 이상이 되는 A_o 중 가장 작은 A_o값을 선택하여 해당 N과 A_o 합이 총예산을 넘지 않으면 후보로 저장한다. 최적 조합 선택은 위 조건을 만족하는 (N, A_o) 중 가장 작은 A_o 또는 가장 작은 총비용을 반환한다.

3.2.2. 탐색연구 단계

탐색개발 단계의 RAM-C 분석은 앞선 선행연구에서 도출된 개략적인 분석 결과를 바탕으로, 체계의 하위 구조를 주요 구성품인 LRU 수준까지 세분화하여 기술적 대안별 경제성을 정밀하게 비교 및 검토하는 데 주안점을 둔다. 본 단계의 분석 알고리즘은 다음의 두 가지 시나리오로 수행된다.

[시나리오 1] 공통 부체계 유지비용 산출

기술적 대안의 선택과 관계없이 공통으로 적용되는 고정 부체계(예: 공용 플랫폼, 기본 전력장치 등)에 대한 연간 유지비용을 우선하여 산출한다. 이는 해당 부체계의 단가에 연간 고장 횟수(=연간 운용시간/부체계 MTBF)와 정비비 비율 및 전체 체계 배치 수량을 곱하는 방식으로 산정된다.

[시나리오 2] 기술적 대안의 유지비용 산출 및 보급 최적화

본 연구에서는 탐색연구 단계에서 기술적 대안별

유지비용을 산출하면서, 정비 단계 최적화(LORA)보다는 예비 부속 수량 최적화에 집중한다. 이는 수리 수준이 이미 단일 정비 단계에서 수행되는 것으로 가정하고, 고장 발생 시 수리를 원칙으로 하되 이를 지원하기 위한 보급수량 산정의 적정성을 평가하는 것이 목적이기 때문이다.

각 LRU별 연간 고장 수요를 식(7)과 같이 예측하고, 이를 바탕으로 전력화 초기의 안정적인 운영을 위한 초도보급수량을 식(8)과 같이 산출한다. 초도보급수량은 고장 예측치와 보급 보장기간을 고려한 기본 수요에 목표 예비율과 수요 불확실성에 대비한 안전재고를 합산하여 결정한다. 초도보급비용은 초도보급수량에 부품단가를 곱해서 산출한다[10].

LRU별 연간 고장 수요
= 연간 운용시간/MTBF (7)

초도보급수량
= (고장예측×보급기간)×(1+목표 예비율)+ 안전재고 (8)

이 과정에서는 재보급 주기와 예비품 확보율 목표, 그리고 보관 및 관리에 필요한 재고유지비용을 종합적으로 반영하여 보급 정책의 실효성을 제고한다. 수리가 가능한 것으로 식별된 LRU에 대하여 연간 발생하는 정비비용을 식(9)와 같이 산출하며, 이를 체계 총배치 수량에 적용하여 대안별 전체 정비 소요비용을 식(1)과 같이 확정한다.

LRU 연간 정비비(개당)
= LRU 단가×(운용시간/MTBF)×LRU 정비비율 (9)

전체 정비비용
= LRU 연간 정비비(개당)×체계 배치 수량 (10)

마지막으로 시나리오 1에서 산출된 고정 부체계 유지비, 시나리오 2에서 산출된 대안별 초도보급비, 그리고 전체 정비비용을 통합하여 대안별 총수명주기비용을 도출한다. 이를 통해 하위 구성품 수준에서의 기술적 선택이 전체 경제성에 미치는 영향을 비교 분석함으로써, 비용 대 효과가 극대화된 최적의 설계를 확정하는 근거로 활용한다.

초기 획득 단계에서는 유사 체계 자료를 활용하기 때문에 MTBF, MTTR, 부품 단가, 정비비율 등 주요 입력 변수에는 불확실성이 존재한다. 본 연구의 사례 분석은 알고리즘의 적용 절차를 설명하기 위해 대표값 기반의 점 추정치를 사용하였으나, 실제 사업 적용 시에는 입력 변수의 최소값, 최빈값, 최대값을 이용한 삼각분포 또는 고장·정비 자료의 편향성을 고려한 로그정규분포를 설정하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 운용가용도와 LCC의 신뢰구간을 산출할 수 있다. 따라서 본 연구의 알고리즘은 점 추정 기반 분석뿐만 아니라 확률론적 민감도 분석으로 확장 가능한 구조를 가진다.

4. 사례 적용

본 장에서는 본 연구에서 제안한 방법과 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해, 다음과 같은 가상의 예제를 설정하여 분석 결과를 도출하였다.

국방부는 전방 지역에서 실시간 감시 및 정찰 임무를 수행할 수 있는 다목적 전술무인기를 도입하고자 한다. 소요기획 단계에서 Table 4와 같은 기초 데이터 확보가 가능하다고 가정하며, 해당 데이터들은 분석의 주요 입력 데이터로 활용된다. 본 사례는 실제 획득사업 자료가 아닌, 제안 알고리즘의 적용 절차와 의사결정 논리를 설명하기 위한 가상 예제이다. 따라서 Table 4의 입력값은 유사 체계 자료와 초기 가정값을 기반으로 구성한 예시이며, 실제 사업 적용 시에는 유사 체계 운용자료, 업체 제안자료, RAM 예측자료, 전문가 판단 등을 종합하여 입력값을 설정해야 한다.

Table 4. Basic data setting

Category	Value	Remarks
Average annual operating time	800hours	Based on one UAV
Number of operating personnel	2 persons	Operator and maintenance personnel per UAV
Annual personnel cost for operating personnel	60million KRW	Based on annual salary
Minimum number of systems required for mission(s)	15units	Standard for operation of troops
Combat readiness rate(P)	0.9(90%)	Based on military operational
Mission Subsystem cost	20million KRW	Based on core sensor
Mission Subsystem MTBF	200hour	Reference from similar UAV analysis
Average maintenance rate	0.2 (20%)	Assumed maintenance cost ratio based on unit price
Production cost per system	1million KRW	Unit procurement cost per UAV

4.1. 소요기획 단계

군에서 목표 운용가용도(A_0)를 85%로 설정할 경우를 가정한 상태에서 UAV의 총배치 수량(N)을 산출해 보자. 임무 수행 최소 체계수량(s)이 15대 이므로, 최소 15대 이상이 정상 가동될 확률이 90% 이상이 되는 최소한의 N을 식(1)을 이용하여 탐색한다. 계산 결과 N=16일 때 확률은 0.2839, N = 17일 때는 0.5198, N = 18일 때는 0.7264, N = 19일 때는 0.8496이며, N = 20일 때, 0.9327로 산출된다. 따라서 최소 조건을 만족하는 총배치 수량은 20대이며, 이보다 더 작으면 목표 확률에 미달하고 크면 과잉 투자가 된다. 참고로, N=20일 때의 상세 계산은 다음과 같다.

$$P(X \geq 15) = \sum_{k=15}^{20} \binom{20}{k} 0.85^k (0.18)^{20-k} \approx 0.9327$$

UAV의 총배치 수량이 20대로 결정됨에 따라, 총수명주기 비용은 Table 5와 같이 산출할 수 있다.

만약 예산 제약으로 UAV를 최대 16대까지만 보유할 수 있는 상황을 가정해 보자. 이때 최소 15대가 동시에 작동해야 하며 전투준비태세율 0.9를 만족해야 한다면, 각 UAV가 확보해야 할 최소 운용가용도(A_0)를 탐색하면 된다.

이는 $P(X \geq 15) = \sum_{k=15}^{16} \binom{16}{k} A_0^k (1-A_0)^{16-k} \geq 0.9$

을 만족하는 최소 A_0를 찾는 문제와 같다. 계산 결과, A_0=0.91일 때 확률은 0.876, A_0=0.925일 때 확률은 0.901이 된다. 따라서 각 UAV는 최소 92.5% 이상의 운용가용도를 가져야 한다. A_0 =MTBF/(MTBF+MTTR+ALDT) 수식에서 MTTR을 2시간이라고 가정하고 ALDT(행정 및 군수 지연시간)을 생략(고유가용도 개념 적용)하면, MTBF는 최소 24.7시간 이상이어야 한다. 만약 기존 설계의

Table 5. LCC estimation results

Acquisition cost		20units×1billion KRW = 20billion KRW
Operating cost		20units×2personnel×60million KRW = 2.4billion KRW/year
Maintenance cost	Annual number of failures per system	800hours/200hours = 4failures/year
	Maintenance cost per system	20million KRW×4failures×0.2 = 16million KRW
	Total maintenance cost per year	16million KRW×20 systems = 320million KRW/year

MTBF가 20시간 미만이었다면, 고신뢰 부품 교체나 설계 수정이 필수적임을 시사한다.

최종적으로, 국방부가 총예산 250억 원 내에서 다목적 UAV를 도입하려 할 때, 임무 요건(s=15, P≥0.9)을 충족하는 최적의 조합을 탐색하고자 한다. UAV 1대당 연간 총비용을 획득 및 운용유지 측면에서 산출하면 약 11.36억이며, 예산 내 최대 가능 수량은 22대(=250/11.36)이다. 이를 바탕으로 탐색한 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Exploration of optimal combinations under budget constraints

N	A_o (Operational Availability)	Binomial cumulative probability	Total cost = N×11.36
18	0.925	0.901	20.45billion KRW
19	0.91	0.904	21.58billion KRW
20	0.895	0.902	22.72billion KRW
21	0.88	0.905	23.86billion KRW
22	0.865	0.906	25billion KRW

최적 조합을 선택(누적 확률≥0.9, 총비용≤250억, 최소 A_o 또는 최소 총비용 선택)해 보면, N=18, A_o=0.925, 총비용=204.5억이 가장 경제적임을 알 수 있다.

4.2. 선행연구 단계

특정 체계를 구성하는 핵심 부체계인 센서, 추진, 통신 모듈에 대해 각각 세 가지 설계 대안(A, B, C)을 설정하고 이에 따른 RAM 성능을 분석하였다. 구성품별 상세 규격과 대안별 성능 지표는 Table 7과 같다고 가정해 보자. 다만, 본 사례에서는 설명의 단순화를 위해 구성품별 RAM 지표를 비교하였으나, 실제 체계 수준의 MTBF와 가용도는 단순 가중평균으로 산출하기 어렵다. 체계가 직렬계인지, 병렬계인지, 또는 중복 구조를 갖는지에 따라 산출 방식이 달라지므로, 실제 적용 시에는 RBD를 구성한 후 구성품별 평균고장간격과 정비시간을 반영하여 체계 수준의 RAM 지표를 산출해야 한다. 본 연구의 사례 분석은 대안별 RAM-C 분석 절차를 설명하기 위한 예시로 한정한다.

대안별 체계 전체 RAM 성능을 산출하기 위해 구성품별 가중평균을 적용한 결과, 대안 A의 전체 MTBF는 약 283.3h, MTTR은 2.33h로 나타났다. 대안 B는 MTBF 323.3h, MTTR 1.83h를 기록하였으며, 대안 C는 MTBF 366.7h, MTTR 1.5h로 가장 우수한 성능을 보였다. 이를 바탕으로 산출한 대안별 A_0는 대안 A는 0.9918, 대안 B는 0.9944, 대안 C는 0.9959 순으로 나타났다. 즉 기술적 신뢰성 측면에서는 대안 C가 가장 유리함을 확인할 수 있다.

연간 800시간 운용과 정비 비율 100%를 가정하여 수명주기비용을 산출해 보자. 대안 A의 경우, EO/IR 센서의 연간 고장 횟수는 약 5.33회로 산출되며 이에 따른 대당 정비비는 533만 원이다. 여기에 전기모터와 송수신기의 정비비를 합산하면 대당 연간 유지비는 약 1,000만 원이며, 18대를 기준으로 총 1.8억 원의 연간 유지비가 발생함을 알 수 있다. 동일한 방식으로 대안 B와 C의 비용을 산출하여 비교한 결과는 Table 8과 같다.

Table 7. Alternatives and RAM performance values for mission subsystem components

subsystem	Component	Alternative A	Alternative B	Alternative C
Sensor module	EO/IR sensor	MTBF = 150h MTTR = 3h	MTBF = 200h MTTR = 2h	MTBF = 250h MTTR = 2h
Propulsion module	Electric motor	MTBF = 400h MTTR = 2h	MTBF = 450h MTTR = 1.5h	MTBF = 500h MTTR = 1h
Communication module	Transmitter/receiver	MTBF = 300h MTTR = 2h	MTBF = 320h MTTR = 2h	MTBF = 350h MTTR = 1.5h
Maintenance cost per component		1million KRW	1.2million KRW	1.5million KRW

Table 8. Comparison of economic feasibility and LCC by alternative

Category	Alternative A	Alternative B	Alternative C
Production cost per system	1billion KRW	1.05billion KRW	1.1billion KRW
Annual maintenance cost	0.18billion KRW	0.1787billion KRW	0.1913billion KRW
Annual personnel cost	2personnel×60million KRW×18units = 2.16billion KRW(common)		
Total cost for 10 years (assumed)	Approx. 41.76billion KRW	Approx. 41.747billion KRW	Approx. 41.813billion KRW

분석 결과, 대안 C는 가장 우수한 RAM 성능을 제공하지만, 높은 생산비와 정비 단가로 인해 총비용이 가장 높게 산출되었다. 반면, 대안 B는 대안 A보다 향상된 신뢰성을 보장하면서도 생산비와 유지비의 균형을 통해 가장 낮은 총수명주기비용을 기록하였다. 따라서 본 연구는 MTBF 300시간 이상, MTTR 2시간 이하, 정비 단가 120만 원 이하라는 목표 요건을 모두 충족하면서 비용 효율성이 가장 우수한 대안 B를 최종 추천 대안으로 판단하면 된다.

운용가용도의 미세한 변화가 작전 성공 확률에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도 분석을 해 보자. 18대의 UAV 중 최소 15대가 동시에 작동해야 하는 임무 환경에서, 이항분포를 기반으로 전투준비태세율($P \geq 0.9$) 보장 여부를 검토한 결과는 Table 9와 같다.

Table 9. Analysis of combat readiness rate according to changes in operational availability

Operational Availability Alternative	Combat Readiness Rate ($P(X \geq 15)$)	Note
(A) 0.9918	0.872	Not satisfied
(B) 0.9944	0.916	Satisfied
(C) 0.9959	0.938	Margin available

분석 결과, 대안 A는 가용도 목표 미달로 인해 심각한 전력 손실 위험을 내포하고 있음이 드러났다. 특히 대안 A가 목표 전투준비태세율을 만족하지 못함에 따라 발생할 수 있는 간접적인 작전 손실 비용을 추정한 결과, 임무 실패에 따른 재투입 비용과 감시 공백으로 인한 피해액 등을 포함하여 연간 약 36억 원의 손실이 예상된다. 이를 10년 누적 가치로 환산하면 약 360억 원에 달하며, 결과적으로 대안 A의 총비용은 직접 비용(417.6억 원)과 손실 비용(360억 원)을 합산하여 총 777.6억 원까지 상승하게 된다. 이는 대안 B의 총비용인 417.47억 원과 비교할 때 전략적 및 경제적 측면에서 막대한 손실을 초래함을 시사한다. 따라서 초기 단계에서의 정교한 RAM-C 분석은 예산 절감뿐만 아니라 국가 안보 리스크를 최소화하는 필수적인 과정이라 할 수 있다.

4.3. 탐색개발 단계

UAV의 기술적 대안별 RAM 성능 차이가 총수명주기비용 및 작전 효율성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 기본 입력 정보를 Table 10과 같이 설정하였다. 체계 총수량은 20대이며, 10년간의 총 LCC 산정을

Table 10. Input information and common data

Category	Value	Remark
Annual operating time	800 hours	Based on one UAV
Number of operating personnel	2 persons	per UAV
Personnel cost	60million KRW	per person
Total number of deployed systems	20units	Based on force requirement
Production cost per system	1billion KRW	Fixed
Service life	10 years	Basis for total LCC estimation

기준으로 한다. 설정된 입력 정보를 바탕으로 대안 A와 B를 비교 분석해 보았다. 분석의 신뢰성을 높이기 위해 10년의 운용 기간을 기준으로 획득, 운용, 유지 및 간접 손실 비용을 종합적으로 산출하였다.

먼저 기술적 대안과 관계없이 발생하는 공통 비용을 산출한 결과, 획득 비용은 200억 원(20대×10억), 10년 운용비용은 240억 원(20대×2명×6,000만 원×10년)으로 집계되었다. 또한 공통 부체계 유지비용은 연간 고장 횟수 4회를 바탕으로 산출 시에 대당 1,600만 원이 소요되며, 10년 총액은 32억 원이다.

비교 대상인 대안 A와 B의 핵심 LRU(센서, 통신기) 구성 및 RAM 정보는 Table 11과 같으며, 이를 토대로 유지비용과 수리 부속 초도보급비용을 산출하였다.

대안 A의 경우 센서와 통신기의 낮은 MTBF으로 인해 대당 연간 유지비가 720만 원으로 산출되었으며, 10년 총유지비는 14.4억 원이다. 초도보급수량은 안전재고를 포함하여 센서 5개, 통신기 5개가 요구되며, 이에 따른 초기 보급비용 9,000만 원과 10년 재고유지비용 9,000만 원이 발생한다. 대안 B의 경우 대안 A 대비 단가는 높으나 향상된 신뢰성을 바탕으로 고장 횟수가 감소하여 대당 연간 유지비가 656만 원으로 절감되었다. 10년 총유지비는 13.12억 원이며, 초도보급 및 재고유지비용 역시 각각 7,900만 원으로 대안 A보다 경제적인 것으로 나타났다.

기술적 대안의 RAM 성능 차이는 직접비용뿐만 아니라 작전 실패에 따른 간접비용을 발생시킨다. 대안 A의 경우 센서 MTBF가 목표치(600h)에 미달하여 감시 실패 및 작전 재투입 리스크가 존재하며, 이를 비용으로 환산하면 10년간 약 50억 원의 작전 손실 비용이 발생하는 것으로 분석되었다. 반면, 모든 요구조건을 충족하는 대안 B는 해당 손실 비용이 발생하지 않는다. 모든 비용 요소를 종합하여 대안별 최종 판단 결과는 Table 12와 같다.

종합적으로 검토했을 때, 대안 A와 B는 초기 획득

Table 11. LRU configuration and performance information by alternative

Alternative	LRU Configuration	MTBF(hours)	Maintenance Ratio	Unit cost (10,000 KRW)
Alternative A	Sensor 1, Communication 1	500/400	0.2/0.25	1,000/800
Alternative B	Sensor 2, Communication 2	800/600	0.3/0.2	1,300/1,000

Table 12. Comparison and evaluation results of total LCC by alternative

Category	Alternative A	Alternative B	Remark
Direct acquisition/ operating cost	44billion KRW	44billion KRW	**Same**
Common maintenance cost (10 years)	3.2billion KRW	3.2billion KRW	**Same**
LRU maintenance cost (10 years)	1.44billion KRW	1.312billion KRW	**Alternative B preferred**
Supply and inventory maintenance cost	0.18billion KRW	0.158billion KRW	**Alternative B preferred**
Operational loss cost (indirect)	5billion KRW	0billion KRW	**Alternative A risk**
Total LCC	**53.82billion KRW**	**48.591billion KRW**	**Approx. 5.23billion KRW difference**

비와 인건비 측면에서는 차이가 없으나, 대안 B는 핵심 LRU의 우수한 신뢰성과 정비성을 바탕으로 유지보수비 및 보급 지원 비용을 유의미하게 절감하였다. 무엇보다 대안 A는 RAM 요구조건 미달에 따른 약 50억 원의 작전 손실 위험을 내포하고 있지만, 대안 B는 기술적 요구사항을 모두 충족하면서도 총 LCC 측면에서 약 52.3억 원 더 경제적인 것으로 분석되었다. 따라서 대안 B가 최적의 설계 대안인 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 무기체계 획득 초기 단계인 소요기획, 선행연구 및 탐색개발 단계를 중심으로 RAM-C의 활용 방안과 단계별 분석 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 소요기획, 선행연구 및 탐색개발 단계의 RAM-C 분석은 방위사업관리규정 및 국방전력발전업무훈령에서 제시하는 무기체계 획득 절차와 연계하여 활용될 수 있다. 구체적으로 소요기획 단계의 분석 결과는 작전요구성능과 전투준비태세 목표 설정의 기초자료로, 선행연구 단계의 분석 결과는 사업추진 기본전략 수립 및 기술적·경제적 타당성 검토의 근거로, 탐색개발 단계의 분석 결과는 체계개발 및 시험평가 단계에서 검증해야 할 RAM 요구조건과 시험평가 기준을 구체화하는 자료로 활용될 수 있다. 또한 국방시험평가 및 운용시험평가 단계에서 확보되는 MTBF, MTTR, 정비소요시간, 고장빈도 등의 실측 자료는 초기 RAM-C 분석에서 설정한 가정값과 비교·검증되어야 하며, 그 결과는 양산, 운용유지, 성능개량 및 차기 무기체계의 소요기획 단계로 환류됨으로써 RAM-C 기반 의사결정의 선순환 구조를 형성할 수 있다.

분석 결과, 다음과 같은 세 가지 사항을 확인할 수 있었다. 첫째, 소요기획 단계에서는 목표 운용가용도와 전투준비태세율을 기준으로 체계 총배치 수량을 산출할 수 있었으며, 예산 제약 조건 하에서 임무 요구를 만족하는 최적의 수량과 가용도 조합을 도출할 수 있었다. 둘째, 선행연구 단계에서는 부체계 및 구성품 대안별 RAM 성능 차이가 연간 정비비와 총수명주기비용에 직접적인 영향을 미치며, 이를 바탕으로 정량적 RAM 요구조건 설정과 설계 대안의 경제성 평가가 가능함을 확인하였다. 셋째, 탐색개발 단계에서는 분석 대상을 LRU 수준까지 세분화함으로써 유지비, 초도보급비, 재고유지비 및 작전손실비용을 포함한 보다 정밀한 경제성 분석이 가능하였고, 이를 통해 최적 설계 대안을 식별할 수 있음을 확인하였다. 다만 본 연구는 초기 획득 단계에서 RAM-C를 어떻게 활용할 수 있는지를 제시하는 절차적 및 개념적 연구로서, 사례 분석은 가상의 입력자료를 활용한 예시라는 한계를 가진다. 향후 연구에서는 실제 운용 중인 무기체계의 획득비, 운용비, 유지비, 수명주기비용 자료를 활용하여 예측값과 실적값의 차이를 검증할 필요가 있다. 또한 MTBF, MTTR, 정비비율, 부품단가 등 주요 입력 변수의 불확실성을 확률분포로 모델링하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 운용가용도와 LCC의 신뢰구간을 제시함으로써 분석의 신뢰성을 높일 필요가 있다.

향후에는 본 연구에서 제시한 분석 절차와 알고리즘을 실제 무기체계 획득사업에 적용하여 실효성을 검증할 필요가 있다. 또한 주요 입력 변수의 불확실성이 분석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 입력 자료 표준화와 검증 절차의 체계화를 통해 RAM-C 분석의 신뢰성과 활용성을 더욱 높일 필요가 있다.

사 사

본 연구는 해양수산부 제5차 해운항만물류 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1 방위사업청. (2021). *획득단계 수명주기관리규정* (방위사업청 훈령 제673호). 국가법령정보센터. https://law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000202732

2 방위사업청. (2021). *무기체계 RAM 업무지침* (방위사업청 예규 제726호). 국가법령정보센터. https://law.go.kr/LSW

/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000203233

3 방위사업청. (2018). *무기체계 RAM 업무지침&업무편람* (제2판, 발간등록번호 11-1690000-0022014-12).

4 Office of the Secretary of Defense, & Joint Staff. (2009). *Department of Defense Reliability, Availability, Maintainability, and Cost Rationale Report Manual*. U.S. Department of Defense.

5 Joo, Y., Park, H., Kim, J., & Lee, Y. (2025). Improvement Measures for the RAM-C Based PBL Item Selection Process. *Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 32*(3), 41-49. https://doi.org/10.52798/KADIS.2025.32.3.4

6 Jung, S.-J., Ha, J.-S., Do, H.-J., & Kim, J.-S. (2023). PBL system linkage plan using RAM-C analysis tool according to the total life cycle management task enactment. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 24*(2), 67-73. https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.2.67

7 Nahmias, S. (2009). *Production and operations analysis* (6th ed.). McGraw-Hill.

8 Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.

9 Mitchell, M. (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/3927.001.0001

10 Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson.

K2전차용 KGAS-1 차선 설계 및 실사격 대체 검증 프로세스 수립

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Development of Reticle Design for K2 MBT KGAS-1 and Establishment of a Validation Process for Live-fire Test Substitution

권기훈†, Gi-Hun Gwon
현대로템, 방산시스템기술3팀, 매니저
Manager, Defense System Engineering Team 3, Hyundai Rotem

구영빈, Young-Been Koo
현대로템, 방산시스템기술3팀, 책임매니저
Senior Manager, Defense System Engineering Team 3, Hyundai Rotem

신부균, Bu-Kyun Shin
현대로템, 방산시스템기술3팀, 책임매니저
Senior Manager, Defense System Engineering Team 3, Hyundai Rotem

배범수, Beom-Su Bae
현대로템, 방산시스템기술3팀, 매니저
Manager, Defense System Engineering Team 3, Hyundai Rotem

Abstract

This study proposes a design methodology for the lead, elevation, and stadia reticles of a Gunner's Auxiliary Sight (KGAS-1) and presents a corresponding verification method. Conventional live-fire testing has significant constraints that are inherent, including uncontrollable environmental variables, high costs, and a lack of domestic testing ranges capable of accommodating 4,000m long-range targets. To overcome these limitations, an efficient alternative verification procedure was established using measurement data from the main gun and the KGAS-1. Notably, during the verification process, the consistency of the comparative data was ensured by eliminating the parallax compensation values arising from the geometric offset between the Gunner's Primary Sight (GPS), main gun, and KGAS-1. The experimental results demonstrated that the maximum errors for the lead and elevation reticles remained within the required limits for ballistic lead accuracy, thereby validating the proposed design process. The findings of this study are expected to serve as a standard validation methodology for evaluating the performance of the K2 MBT, the K1 series and next-generation system models applying optical sights.

keywords : Gunner's Auxiliaty Sight, Reticle Design, Verification Methodology, Parallax Compensation, K2 MBT

† Corresponding Author : Gi-Hun Gwon
Tel : +82-55-717-3249, email : 275472@hyundai-rotem.co.kr
Hyundai Rotem Company, 488, Changwon-daero, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 15th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

현대 지상 무기체계에서 사격통제장치는 표적 획득 및 정밀 타격을 위한 핵심 기술이다. 특히 포수보조조준경(KGAS-1) 내에 전시되는 포탑 방위각(lead), 포고저각(elevation) 및 스타디아(stadia) 차선은 탄종별 탄도 특성과 표적과의 거리를 포수에게 시각적으로 제공하는 결정적인 인터페이스이다. 따라서 주포의 탄도 제원을 차선 설계에 정확히 반영하는 것은 사격 정밀도와 직결되는 필수적인 기술이다. 그동안 설계된 차선의 정밀도를 검증하기 위해 실사격 시험(live-fire test)이 수행되어 왔다[1]. 그러나 실사격 시험은 다음과 같은 명확한 한계를 지닌다. 첫째, 풍향, 기온, 포구 속도의 변화 등 통제 불가능한 외부 환경 변수로 인해, 순수하게 조준경 차선 설계 자체의 오차만을 독립적으로 산출하는 데 구조적 한계가 있다. 둘째, 국내 사격장 여건상 4,000m 장거리 시험 공간 확보가 제한적이며, 이로 인해 2,000m 이상 차선의 정확도를 실증적으로 검증하는 데 제약이 따른다[2]. 셋째, 사격장 확보 및 탄약 소모, 사격장 인근 주민들의 민원 등에 따른 막대한 예산과 자원이 소요된다[3]. 본 연구에서는, 이러한 제약을 극복하기 위해, 실사격 없이도 차선 설계의 정밀도를 검증할 수 있는 검증 프로세스를 제안한다. 제안된 프로세스는 주포의 실제 구동에 따라 포수운용전시기(Gunner's Operational Display, GOD)에 전시되는 데이터에서 포수조준경과 주포 사이의 장착 위치에 따른 시차를 제거한 기준 데이터를 산출하고, 이를 포수보조조준경 차선을 이용한 실측값과 직접 비교하는 프로세스를 구축함으로써 검증의 신뢰성을 극대화하였다. 본 연구를 통해 K2전차뿐만 아니라, K1 계열 및 향후 광학 조준 시스템이 탑재될 차세대 유사 무기체계에도 적용 가능한 표준 검증 방법론을 제안한다.

2. 포수보조조준경 이론

2.1. 포수보조조준경 구성

포수보조조준경은 Figure 1과 같이 대물부(objective lends), 차선(reticle), 미러(mirror), 릴레이부(relay lens), 대안부(ocular lends)로 구성된 광학계를 활용하며 장착 위치는 Figure 2와 같이 K2전차 주포 좌측에 장착되어 있다.

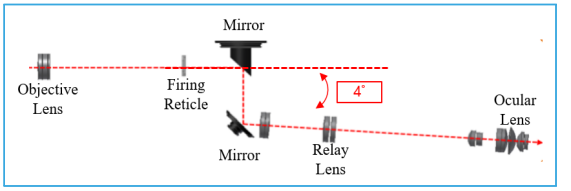


Figure 1. Optical System of KGAS-1

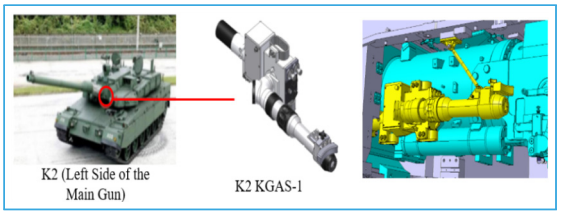


Figure 2. Mounting Position

2.2. 포수보조조준경 차선 구성

포수보조조준경의 차선은 Figure 3과 같이 포탑 방위각, 포고저각, 스타디아 차선으로 구성되며 각 차선의 기능은 다음과 같다.

(1) 포탑 방위각 : 1,000m 거리에서 16km/h의 속도로 이동하는 표적을 조준하기 위한 수평 조준 눈금이다.
(2) 포고저각 : 사거리와 탄종별 초고각을 이용한 수직 조준 눈금이다.
(3) 스타디아 : 전차와 같이 크기가 정해진 표적을 눈금 사이에 위치시켜, 별도의 거리 측정기 없이 표적까지의 사거리를 측정하기 위한 눈금이다.

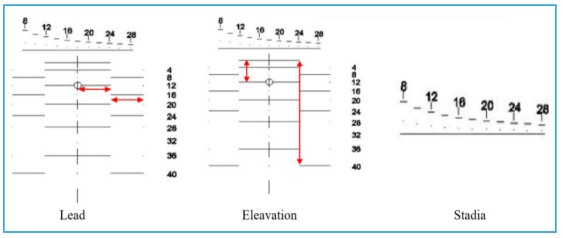


Figure 3. Configuration of Reticle Pattern

3. 차선 설계 방법

3.1. 포수보조조준경의 차선 설계

포수보조조준경의 차선 설계에 대한 기본 개념은 Figure 4와 같이 입사각도(angle of incidence)와 대물부 초점거리(focal length of the objective housing)를 이용한 삼각함수로 정의되며 각 차선의 길이 단위는 mm이다.

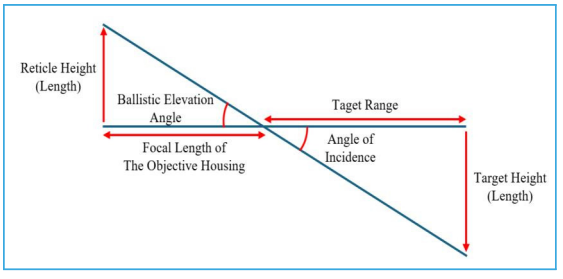


Figure 4. Design Concept for the KGAS-1 Reticle

3.2. 포탑 방위각 차선 설계

포수보조조준경의 포탑 방위각 차선은 1,000m 거리에서 16km/h의 속도로 이동하는 표적을 효과적으로 조준할 수 있도록 설계되었으며, 상세 설계 기준은 Table 1과 같다.

Table 1. Reference Data for Lead

TOF at 1000m	Target Velocity (LOS Speed)
K279(AP) : 0.00s	16km/h
K277(HEAT) : 0.00s	

Table 1에서 AP(Armor Piercing)는 높은 포구 속도를 이용한 운동 에너지로 장갑을 물리적으로 관통하는 철갑탄이며, HEAT(High-Explosive Anti-Tank)는 폭약의 폭발력을 한 점으로 집중시켜 형성된 메탈 제트로 장갑을 관통하는 대전차고폭탄이다. 사거리별 각 탄종의 포구 속도 및 탄도 특성 등 고유한 탄약 제원에 따른 차이에 따라 동일 사거리에서 비과시간(Time of Flight, TOF)은 서로 다르며, 본 논문에서는 보안 규정에 따라 TOF 값은 명시하지 않는다.

$$Lead\ Angle = \top \times \frac{\varphi}{\cos(roll)} \quad (1)$$

포수보조조준경의 방위각 차선은 탄도해 lead 보상 공식을 활용하며, 식(1)과 같이 방위각을 정의할 수 있다[4]. 식(1)에서 포탑 방위각 계산에 적용되는 변수로는 비과시간(TOF), 조준선속도(φ), 좌우 경사값(roll)이다.

$$X_{lead} = Focal\ Length \times \tan(Lead\ Angle) \quad (2)$$

식(1)로부터 산출된 방위각을 기반으로, 식(2), Figure 5와 같이 삼각함수를 적용하여 방위각 차선의 길이(X_{lead})를 정의할 수 있다.

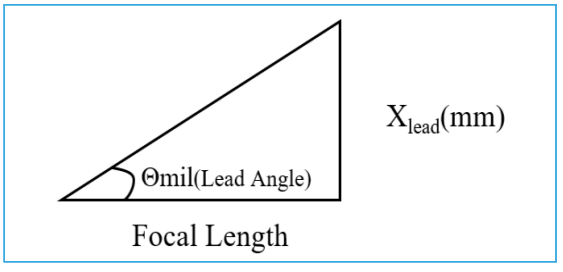


Figure 5. Lead Length Design Concept

3.3. 포고저각 차선 설계

포수보조조준경의 포고저각 차선은 탄종과 사거

리별 초고각과 대물부 초점거리를 이용해 설계되었다.

$$X_{elevation} = Focal\ Length \times \tan(Ballistic\ Elevation\ Angle) \quad (3)$$

설계방법은 3.1절의 Figure 4에 제시한 삼각함수 관계를 활용하며, 이를 통해 고저각 차선의 길이($X_{elevation}$)를 식(3)과 같이 정의할 수 있다. 탄종 및 사거리별 초고각 정보는 보안 규정에 따라 본 논문에서는 명시하지 않았으나, 포고저각 차선 길이 산출 방식은 모든 탄종과 사거리에 대하여 동일한 메커니즘이 적용된다.

3.4. 스타디아 차선 설계

포수보조조준경의 스타디아 차선은 적 전차의 높이 및 적 전차 차체 높이와 사거리를 기반으로 설계되었다.

$$X_{stadia} = Focal\ Length \times \tan(Angle\ of\ Incidence) \quad (4)$$

설계방법은 3.1절의 Figure 4에 제시한 삼각함수를 활용하며, 이를 통해 스타디아 차선의 길이(X_{stadia})를 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

4. 차선 설계 체계 검증 방법

4.1. 체계 검증 목적

실사격 시험에 따른 시간적, 경제적 손실을 최소화하고, 외부 환경 변수가 배제된 설계 자체의 정밀도를 확인하기 위해 효율적이고 신뢰성 있는 입증 방안을 수립하였다.

이를 위해 주포의 실제 구동에 따라 포수조준경을 통해 Figure 6의 포수운용전시기에 전시되는 방위각 및 고각 측정값을 기준 데이터로 설정하였다. 이후 포수보조조준경에 적용된 차선을 이용해 동일한 목표물을 조준하여 얻은 방위각, 고각 측정 데이터와 비교 분석함으로써, 설계된 차선의 정확성을 입증하여야 한다.



Figure 6. Gunner's Operational Display

4.2. 체계 검증을 위한 기본 설정

K2전차 사격통제컴퓨터는 실시간 탄도 계산 및 다양한 환경 변수에 대한 오차 보정을 수행한다[5]. 본 연구에서는 차선 설계의 정밀도를 독립적으로 검증하기 위해 시스템에 적용된 보상값 제거 프로세스를 수행하여 포수보조조준경과 동일한 운용 환경을 구현하였다.

이에 따라, 포수운용전시기상의 조준감사(bore sighting), 탄도입력(ballistic input), 기타장치(other devices)를 Figure 7, 8, 9와 같이 표준상태로 설정함으로써 실험 조건의 정합성을 확보하였다. 포수운용전시기 표준상태 설정값은 다음과 같다.

(1) 조준감사
- 방위각, 고각의 주간(DAY)/CCD/열상(thermal image)/공축(coax) 값 : 0

(2) 탄도입력
- 대기온도(air temperature) : 15°
- 대기압력(air pressure) : 101.3Kpa
- 탄약온도(ammo temperature) : 21°
- 그 외 : 0
- 방법선택(select method) : manual

(3) DMRS 보정(DMRS Compensation) : 미적용

Setting Value

Boresighting

Type	Elevation	Azimuth
Day (Mil)	0	0
CCD(Pixel)	0	0
Thermal Image (Pixel)	0	0
COAX (Mil)	0	0

* Elevation / Azimuth : "0" Setting
- Day : 0
- CCD : 0
- Pixel : 0
- Coax : 0

Figure 7. Initial Setting Value of Boresighting

Setting Value

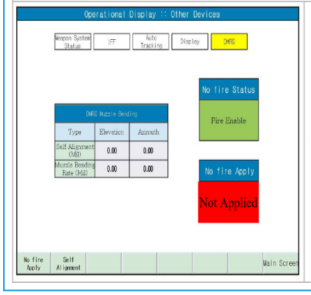
Ballistic Input

Type	Ballistic Input Values	Select Method
Air Temperature (Celsius degree)	15.0	Manual
Air Pressure (Kpa)	101.30	Manual
Ammo Temperature (Celsius degree)	21.0	Manual
Wind Direction (degree)	0	Manual
Wind Speed (m/s)	0	Manual
Roll (Mil)	0	Manual
Angle Of Sight (Mil)	0	Manual
LOS Speed (Mil/s)	0	Manual
Range (m)	0	Manual
MRS Uncompensated Value (Mil)	0	Manual

- Air Temperature : 15.0
- Air Pressure : 101.3
- Ammo Temperature : 21.0
- Other 0 Setting

Figure 8. Initial Setting Value of Ballistic Input

Setting Value



* DMRS Compensation : Not applied

Figure 9. Initial Setting Value of Other Devices

이후 포미망원경을 활용하여 주포의 표적 기준을 설정하였으며, Figure 10과 같이 주포와 포수보조조준경의 지향점을 일치시키는 조준감사를 수행한 후 Figure 11과 같이 포수통제판(Gunner's Control Panel, GCP)에서 각 탄종에 부합하는 주탄종선택스위치(primary ammo select switch)와 부탄종선택스위치(sub ammo select switch)를 설정하였다.

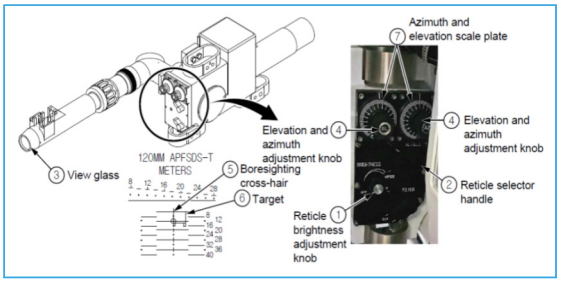


Figure 10. Boresighting Procedure

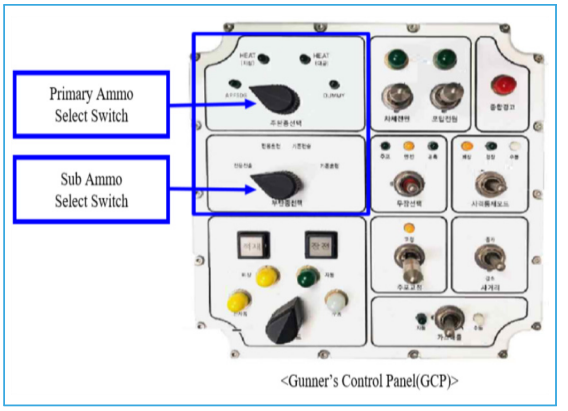


Figure 11. Gunner's Control Panel Initial Setting

4.3. 포탑 방위각 차선 체계 검증

포수보조조준경 포탑 방위각 차선 입증을 위해 비교 기준 데이터 확보가 선행되어야 한다.

먼저 Figure 12와 같이 포수조준경에 의해 전시되는 포수표적전시기 차선을 특정 기준점에 일치시켜 최초 위치(initial position)를 지정한다.



Figure 12. Ref.Data Acquisition Procedure [Step 1]

이후 Figure 13과 같이 포수운용전시기 탄도입력 설정에서 조준선 속도와 사거리를 입력하면 사격통제컴퓨터의 탄도 계산에 의해 포수표적전시기에 전시되는 차선은 최초 위치로부터 입력 제원에 상응하는 변위만큼 입력 사거리(input range)로 이동하게 된다.

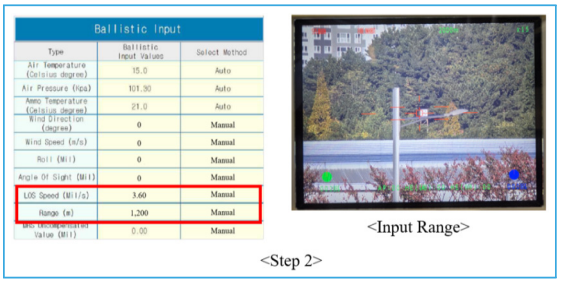


Figure 13. Ref.Data Acquisition Procedure [Step 2]

그리고 Figure 14와 같이 입력 제원에 부합하는 포탑 위치 확인을 위해 포수 수동 손잡이를 이용해 다시 최초 위치로 이동시킨다. 포수운용전시기상의 해당 시점 방위각을 사거리별로 기록하고 이 과정을 통해 수집된 데이터가 포수보조조준경 포탑 방위각 차선 검증을 위한 기준 데이터가 된다.

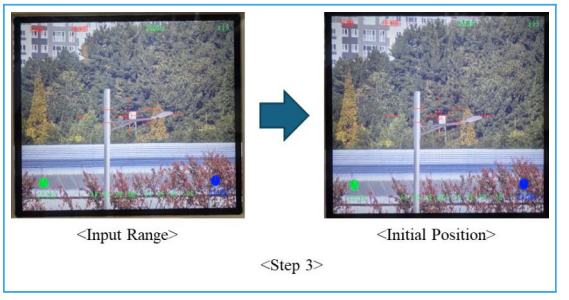


Figure 14. Ref.Data Acquisition Procedure [Step 3]

이어 Figure 15와 같이 포수보조조준경 차선의 중심선을 기준으로 표적을 최초 위치에 정렬한 후, 수동 손잡이를 이용하여 차선을 좌우 방향으로 이동시킨다. 차선이 각 측정 지점에 도달할 때마다 해당 위치에서의 포탑 방위각(measurement position)을 측정한다.

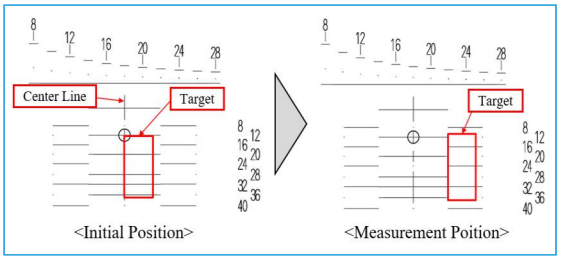


Figure 15. Comparison Data Acquisition Procedure

4.4. 포고저각 차선 체계 검증

포탑 방위각과 동일한 방식으로 비교 기준 데이터를 도출하기 위해 Figure 16과 같이 포수표적전시기에 전시되는 차선을 특정 기준점에 일치시켜 최초 위치를 지정한다.

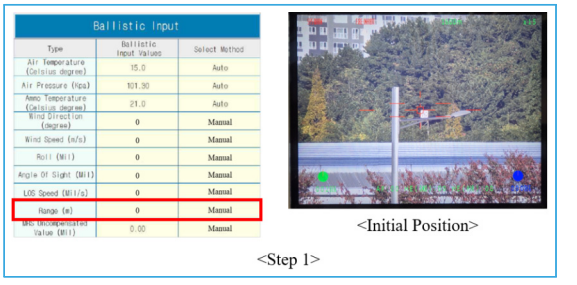


Figure 16. Ref.Data Acquisition Procedure [Step 1]

이후 Figure 17과 같이 포수운용전시기 탄도입력 설정에서 사거리를 입력하면 사격통제컴퓨터의 탄도 계산에 의해 포수조준경 차선은 최초 위치로부터 입력 제원에 상응하는 변위만큼 입력 사거리로 이동하게 된다.



Figure 17. Ref.Data Acquisition Procedure [Step 2]

그리고 Figure 18과 같이 입력 제원에 부합하는 포탑 위치 확인을 위해 포수 수동 손잡이를 이용해 다시 최초 위치로 이동시킨다. 포수운용전시기상의 해당 시점 고저각을 사거리별로 기록하고 이 과정을 통해 수집된 데이터가 포수보조조준경 포고저각 차선의 검증을 위한 기준 데이터가 된다.

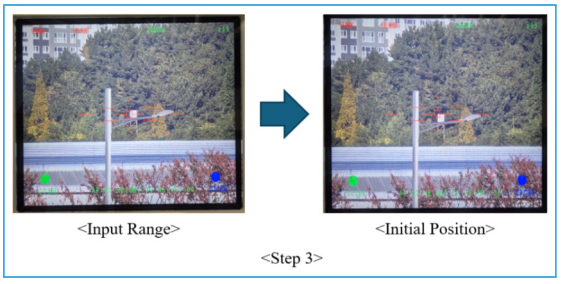


Figure 18. Ref.Data Acquisition Procedure [Step 3]

다음으로 Figure 19와 같이 포수보조조준경 차선의 중심선을 기준으로 표적을 조준한 후, 수동손잡이를 이용해 차선을 수직방향으로 이동시킨다. 각 사거리별 눈금 지점에 도달할 때마다 해당 위치에서 포고저각을 측정한다.

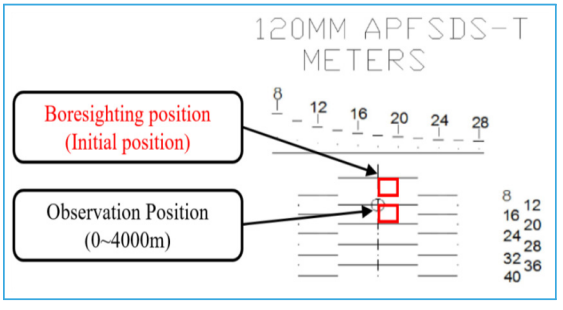


Figure 19. Comparison Data Acquisition Procedure

5. 결과 분석

5.1. 시차 보상값 제거

시차(parallax)란 조준경과 주포의 물리적인 장착 위치 차이로 인해 발생하는 수평, 수직 방향의 관측 오차를 의미한다. 검증대상인 포수보조조준경은 별도의 탄도 보정이 적용되지 않는 순수 관측 장비인 반면, 기준 데이터로 활용되는 주포의 구동값은 사격통제시스템에 의해 시차 보상이 자동으로 적용된 상태이다.

따라서 Figure 20과 같이 주포와 포수 조준경의 물리적 장착 위치에 따른 시차 보상값을 제거하는 과정이 필수적이다. 이를 통해 사격통제시스템의 보정을 배제하고, 설계된 차선과 주포 구동간의 직접적인 비교가 가능하도록 하였다.

Range	Measured by Main Gun	Range	Measured by Main Gun	
	Lead		Lead	Remove Lead Compensation
0	567.60	0	567.60	
400	565.06	400	565.06	563.31
800	564.18	800	564.18	563.30
1200	563.88	1200	563.88	563.30
1600	563.69	1600	563.69	563.25
2000	563.59	2000	563.59	563.24
2400	563.59	2400	563.59	563.30
2800	563.59	2800	563.59	563.34
3200	563.49	3200	563.49	563.27
3600	563.49	3600	563.49	563.30
4000	563.49	4000	563.49	563.32

<Remove Lead Compensation>

Range	Measured by Main Gun	Range	Measured by Main Gun	
	Elevation		Elevation	Remove Elevation Compensation
0	105.05	0	105.05	
400	107.5	400	107.5	106.57
800	108.8	800	108.8	108.33
1200	110.7	1200	110.7	110.39
1600	113.05	1600	113.05	112.82
2000	115.85	2000	115.85	115.66
2400	119.2	2400	119.2	119.04
2800	123.4	2800	123.4	123.27
3200	128.65	3200	128.65	128.53
3600	135.5	3600	135.5	135.45
4000	144.6	4000	144.6	144.51

<Remove Elevation Compensation>

Figure 20. Parallax Compensation Value Elimination

5.2. 사거리별 기준 데이터 산출

포수보조조준경의 방위각과 고각은 최초 지점(0m)을 기준으로 설계된다. 따라서 주포 구동을 통

해 수집된 데이터를 기준 데이터로 사용하기 위해서는 사거리별로 최초 지점(0m) 기준의 데이터 확보가 필요하다.

이를 위해 5.1절에서 시차 보상값을 제거한 데이터를 바탕으로, Figure 21과 같이 각 사거리별 측정 데이터에서 최초 지점(0m)의 측정값을 소거하였다. 이러한 계산 과정을 통해 모든 데이터를 0m 기준값으로 환산함으로써, 포수보조조준경 차선 설계를 객관적으로 입증하기 위한 최종 기준 데이터를 산출하였다.



Range	Measured by Main Gun	
	Lead	Remove Lead Compensation
0	567.60	
400	565.06	563.31
800	564.18	563.30
1200	563.88	563.30
1600	563.69	563.25
2000	563.59	563.24
2400	563.59	563.30
2800	563.59	563.34
3200	563.49	563.27
3600	563.49	563.30
4000	563.49	563.32

Range	Measured by Main Gun		
	Lead	Remove Lead Compensation	From 0m
0	567.60		
400	565.06	563.31	-4.29
800	564.18	563.30	-4.29
1200	563.88	563.30	-4.29
1600	563.69	563.25	-4.34
2000	563.59	563.24	-4.35
2400	563.59	563.30	-4.30
2800	563.59	563.34	-4.25
3200	563.49	563.27	-4.32
3600	563.49	563.30	-4.30
4000	563.49	563.32	-4.28

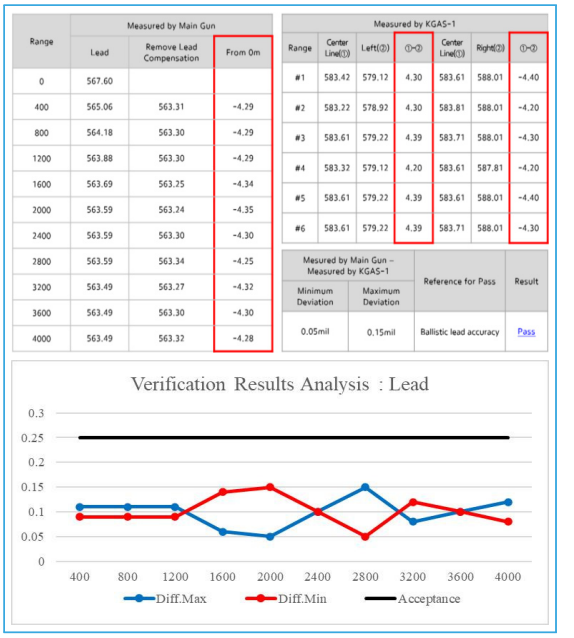
Range	Measured by Main Gun	
	Elevation	Remove Elevation Compensation
0	105.05	
400	107.5	106.57
800	108.8	108.33
1200	110.7	110.39
1600	113.05	112.82
2000	115.85	115.66
2400	119.2	119.04
2800	123.4	123.27
3200	128.65	128.53
3600	135.5	135.45
4000	144.6	144.51

Range	Measured by Main Gun		
	Elevation	Remove Elevation Compensation	From 0m
0	105.05		
400	107.5	106.57	1.52
800	108.8	108.33	3.28
1200	110.7	110.39	5.34
1600	113.05	112.82	7.77
2000	115.85	115.66	10.61
2400	119.2	119.04	13.99
2800	123.4	123.27	18.22
3200	128.65	128.53	23.48
3600	135.5	135.45	30.40
4000	144.6	144.51	39.46

Figure 21. 0m-Based Reference Data(Lead/Elevation)

5.3. 포탑 방위각 체계 검증 결과 분석

K277탄 포탑 방위각 측정 결과, 5.2절에서 산출한 최종 기준 데이터와 포수보조조준경 방위각 측정값 사이에서 최대 오차는 Figure 22와 같이 0.15mil로 확인되었다. 이는 시험 합격 기준인 탄도해석 정확도 오차(ballistic lead accuracy) 0.25mil을 충족하는 수치이며, 이를 통해 방위각 차선 설계 결과의 타당성을 입증하였다[6].



Range	Measured by Main Gun		
	Lead	Remove Lead Compensation	From 0m
0	567.60		
400	565.06	563.31	-4.29
800	564.18	563.30	-4.29
1200	563.88	563.30	-4.29
1600	563.69	563.25	-4.34
2000	563.59	563.24	-4.35
2400	563.59	563.30	-4.30
2800	563.59	563.34	-4.25
3200	563.49	563.27	-4.32
3600	563.49	563.30	-4.30
4000	563.49	563.32	-4.28

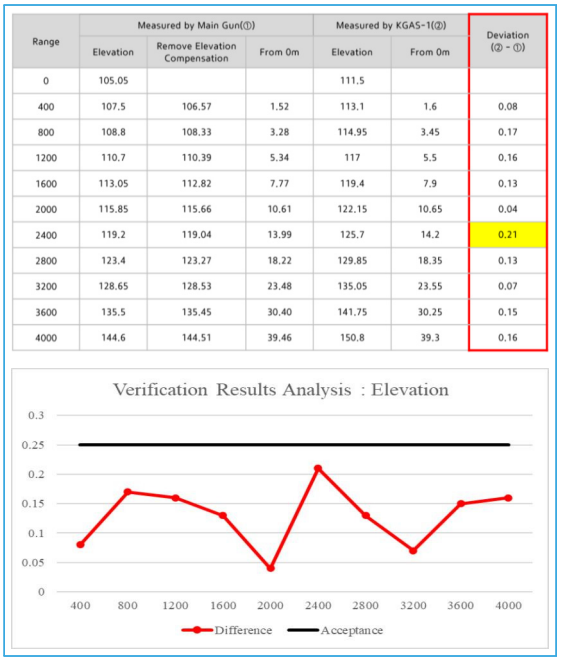
Range	Measured by KGAS-1					
	Center Line(①)	Left(②)	①-②	Center Line(①)	Right(②)	①-②
#1	583.42	579.12	4.30	583.61	588.01	-4.40
#2	583.22	578.92	4.30	583.81	588.01	-4.20
#3	583.61	579.22	4.39	583.71	588.01	-4.30
#4	583.32	579.12	4.20	583.61	587.81	-4.20
#5	583.61	579.22	4.39	583.61	588.01	-4.40
#6	583.61	579.22	4.39	583.71	588.01	-4.30

Mesured by Main Gun - Measured by KGAS-1		Reference for Pass	Result
Minimum Deviation	Maximum Deviation		
0.05mil	0.15mil	Ballistic lead accuracy	Pass

Figure 22. Verification Results Analysis : Lead

5.4. 포고저각 체계 검증 결과 분석

K277탄 포고저각 측정 결과, Figure 23과 같이 발생한 최대 오차는 0.21mil로 확인되었다. 이는 시



Range	Measured by Main Gun(①)			Measured by KGAS-1(②)		Deviation (② - ①)
	Elevation	Remove Elevation Compensation	From 0m	Elevation	From 0m	
0	105.05			111.5		
400	107.5	106.57	1.52	113.1	1.6	0.08
800	108.8	108.33	3.28	114.95	3.45	0.17
1200	110.7	110.39	5.34	117	5.5	0.16
1600	113.05	112.82	7.77	119.4	7.9	0.13
2000	115.85	115.66	10.61	122.15	10.65	0.04
2400	119.2	119.04	13.99	125.7	14.2	0.21
2800	123.4	123.27	18.22	129.85	18.35	0.13
3200	128.65	128.53	23.48	135.05	23.55	0.07
3600	135.5	135.45	30.40	141.75	30.25	0.15
4000	144.6	144.51	39.46	150.8	39.3	0.16

Figure 23. Verification Results Analysis : Elevation

험 합격 기준인 탄도해석 정확도 오차 0.25mil을 충족하는 수치이며, 이를 통해 사거리별 고각 차선 설계 결과의 타당성을 입증하였다.

5.3. 포탑 방위각 체계 검증 결과 분석과 5.4. 포고저각 체계 검증 결과 분석은 K277 탄종(HEAT)을 대상으로, 4절에서 정의한 사거리별 1회 측정 데이터를 기반으로 설계 결과를 분석하는 방법론을 제시하였다. 이어지는 5.5절에서는 본 프로세스의 범용성을 입증하기 위해, 탄도 특성이 상이한 K279 탄종(AP)을 활용하여 도출된 최종 검증 결과를 제시한다.

5.5. K279 탄종을 활용한 타당성 검증

Figure 24와 같이 K279 탄종을 활용해 3회 검증한 결과, 모든 사거리에서 오차가 0.25mil 이내로 산출되어 결과의 타당성을 확인하였다. 이는 본 논문에서 제시하는 검증 프로세스의 신뢰성을 입증함과 동시에, 해당 방법론이 특정 탄종에 국한되지 않고 상이한 탄도 특성을 가진 탄종에도 범용적으로 적용 가능함을 증명하였다.

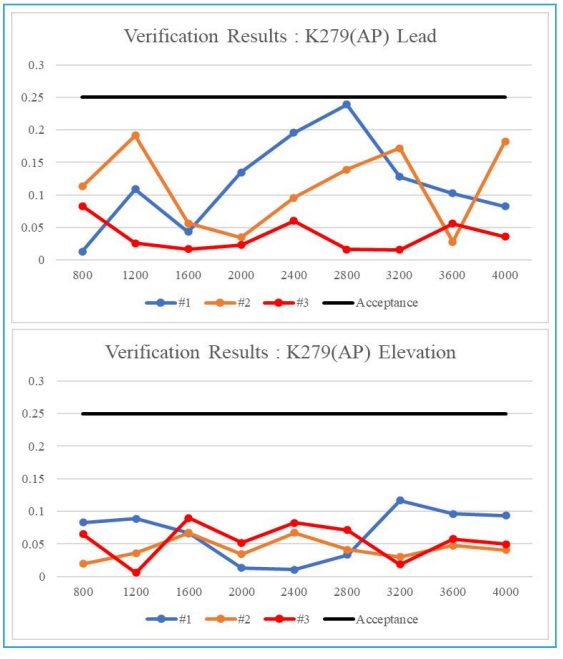


Figure 24. Verification Results Analysis : Elevation

6. 결 론

본 연구에서는 포수보조조준경 차선의 설계 원리를 정립하고 기존 실사격 시험의 시공간적·경제적 한계를 극복할 수 있는 새로운 검증 프로세스를 제안하여 그 유효성을 입증하였다. 현재 국내 사격장 여건상 4,000m 장거리 표적에 대한 실사격 시험 공간이 제한적이라는 물리적 한계가 존재한다. 이로 인해 2,000m 이상으로 설계된 차선의 정확도를 실제 사격으로 검증하는데 제약이 따랐다. 본 연구에서 제안한 검증 절차는 이러한 지형적·환경적·비용적 제약에서 벗어나, 포수보조조준경에 반영된 최대 사거리(4,000m)까지의 조준 정밀도를 수치적으로 완벽히 검증할 수 있다는 점에서 독보적인 실용성을 갖는다. 또한, 기존의 실사격 방식은 외부 환경 변수에 의한 확률적 오차가 개입되지만, 본 프로세스는 주포의 실제 구동 물리량과 조준경의 사격 제원 데이터를 기반으로 시스템 간 시차 보상값을 배제함으로써 기준 데이터를 정밀하게 측정하였다. 최종 검증 결과, 모든 탄종의 차선 측정 오차가 합격 기준인 탄도해석 정확도 오차 0.25mil 이내를 충족함을 확인하였으며, 이는 이론적 설계값이 실제 시스템에 일관되게 구현되고 있음을 입증한 것이다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 검증 방법은 K2전차뿐만 아니라 K1 계열 전차 및 향후 광학 조준 시스템이 적용될 유사 무기체계에 범용적으로 적용이 가능하며 표준 방법론으로 활용될 가치가 매우 높을 것으로 기대된다.

참고문헌

1 Yoo, B. J., Hwang, G. H., Ryu, C. H., Kim, M. K., Ye, S. H., & Han, U. S. (2012). Systems Engineering based Live Fire Test of Weapon Systems. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 15* (1), 28-35.

2 홍종태, 한승조, 안창수, & 최종근. (2021). 사격안전을 위한 둔감형 전차 연습탄 연구. *2021년 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집* (pp. 5868-5871). 대한산업공학회.

3 Park, J., Yoo, S.-H., Lee, J.-W., & Kim, J. (2018). A Study on Conditions of Location of Artillery firing range for Long-range firing training. *Korean Journal of Military Art and Science, 74*(1), 267-280. https://doi.org/10.31066/kjmas.2018.74.1.011

4 Jeoun, Y.-M. (2007). A ballistic lead-computation method to improve firing accuracy of army combat vehicles. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 10*(2), 31-37.

5 강석종, & 이종효. (2015). 자상전투차량 사격통제장치 기술 발전추세. *2015년 한국군사과학기술학회 추계학술대회 논문집* (pp. 31-32).

6 Agency for Defense Development, (2008), *TANK,COMBAT,FULL-TRACKED* (Defense Standard KDS 2350-4003, 14th rev.).

차량용 전력 케이블 절연체의 가속 열화 시험

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

An Accelerated Degradation Test of Automotive Power Cable Insulation

유영철, Yung Chul Yoo
한국건설기계연구원, 첨단부품연구그룹, 책임연구원
Principle Researcher, Advanced Components Research Group, Korea Construction Equipment Technology Institute

서태완, Tae Wan Seo
한국건설기계연구원, 첨단부품연구그룹, 전임연구원
Senior Researcher, Advanced Components Research Group, Korea Construction Equipment Technology Institute

이대현, Dae Hyun Lee
한국건설기계연구원, 첨단부품연구그룹, 연구원
Researcher, Advanced Components Research Group, Korea Construction Equipment Technology Institute

홍성훈†, Sung Hoon Hong
전북대학교, 산업시스템공학과, 교수
Professor, Department of Industrial and Information Systems Engineering, Jeonbuk National University

Abstract

Automotive cables are essential for supplying electrical power and signals and their reliability has become increasingly critical with advancements in autonomous driving and in-vehicle infotainment systems. This study aims to predict the service lifetime and evaluate the reliability of automotive power cables through an Accelerated Degradation Test (ADT) focusing on the thermal aging of insulation. The ADT was designed using temperature as the acceleration factor, with three acceleration levels of 175 ˚C, 190 ˚C, and 205 ˚C based on a cable temperature class of 150 ˚C. The elongation was measured at predefined intervals at each acceleration level and used as the degradation data. Degradation models were derived to estimate the failure times at each acceleration level, followed by life-stress relationship analysis. Linear degradation models were obtained at 175 ˚C and 190 ˚C, whereas a Power-law model was identified at 205 ˚C. The Weibull distribution and Arrhenius model were selected as the life distribution and acceleration model, respectively. The predicted B10 life at a service temperature of 150 ˚C was 4272 h, demonstrating that the cable satisfies the target reliability requirements. The proposed methodology provides practical guidance for accelerated degradation tests and for verifying the reliability of automotive cables.

keywords : Accelerated Degradation Test, Arrhenius Model, B10 Life, Degradation Model, Weibull Distribution

† Corresponding Author : Sung Hoon Hong
Tel : +82-63-270-2331, Fax : +82-63-270-2333, email : shhong@jbnu.ac.kr
Jeonbuk National University, 54896, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 1st. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

자동차용 케이블은 전력 및 신호 등을 분배·전달하는 인체의 혈관 같은 역할을 하는 핵심 부품이다. 케이블은 전기가 흐르는 도체와 이를 보호하고 전기나 열을 차단하는 절연체, 전자파를 차단하는 차폐체, 그리고 전선의 외피에 해당하는 쉬이즈(Sheath) 등으로 구성된다.

최근 국방 현대화 및 유무인 복합 전투체계 구축을 위한 전기 자동차 및 자율 주행 기술의 보급 확대로 자동차용 케이블은 안전성 확보와 에너지 효율 극대화를 위해 경량화 및 고기능화가 가속화되고 있다. 케이블 경량화를 위해 도체는 점차 가늘어지는 세경화 추세이며, 동일한 도체 단면적으로도 더 많은 전력을 이송할 수 있도록 절연체의 내열 등급도 점점 높아지고 있다. 안전성 향상을 위해 난연성 강화와, 전자파에 의한 기기의 오작동을 예방하기 위한 전자파 차폐체 기술 등의 적용도 확대되는 추세이다. 이러한 케이블의 수명 확보는 군용 차량을 포함한 자동차 전체 시스템의 신뢰성을 결정하는 핵심 요소로 급격한 기술 변화 속에서 제품을 신속하게 개발하고 신뢰성을 평가하는 기술의 필요성이 크게 증대되고 있다. 하지만, 일반적인 수명 시험으로는 케이블의 고장 데이터를 관측하는 데 상당한 시간과 비용이 소요된다. 따라서, 시험 시간을 줄이기 위해 실제 사용 조건보다 가혹한 조건에서 시험을 수행하여 신속하게 고장 데이터를 확보하고 수명을 예측하는 가속 시험이 널리 활용되고 있다.

케이블 절연체의 가속 시험은 온도 스트레스를 가속 인자로 사용하는 가속 열화 시험(Accelerated Degradation Test; ADT)이 주를 이루고 있다. 차량용 케이블 시험 표준인 ISO 19642-2(2019)는 고온, 저온, 고습, 마찰, 온존 등이 신뢰성에 영향을 주는 다양한 스트레스 인자에 대한 시험평가 방법을 규정하고 있다. 이 중에서 고온 사용 환경에 의한 열스트레스에 장기간 노출되어 발생하는 절연체의 물리적 특성 저하(경화, 갈라짐, 절연 파괴 등)를 평가하는 장기 열 노화, 단기 열 노화, 열 과부하, 온도 및 습도 사이클링 시험 등이 큰 비중을 차지하고 있어 온도를 가속 인자로 결정하는 핵심적인 근거로 작용하였다[1]. ISO 19642-1(2019)은 차량용 케이블의 내열 등급을 A Class(-40~85)에서 H Class (-40~250) ℃까지 8단계로 정의하고 있어 가속 계수 산출 시 사용 수준의 온도 기준을 제시하고 있다[2]. 가속 열화 시험의 대표적인 연구로는 원자력 발전소용 통신 케이블 재킷과 XLPE(Cross-Linked Polyethylene) 절연체를 대상으로 한 연구가 있으며, 두 연구 모두 온도를 가속 수준으로 선정하고 열적 노화에 따른 연신율 변화를 아레니우스 가속 모형에 적용하여 분석하였다[3-4]. 이 외에도 절연 저항을 성능 열화 데이터로 설정하여 등가 수명에 대한 신뢰성을 분석한 연구와 전선 피복용 PVC의 TGA(Thermogravimetric Analysis) 결과를 열화 데이터로 활용한 연구 등 다양한 접근방법이 소개된 유사 연구들이 있다[5-6]. 케이블 절연체와 물성이 유사한 고무 복합재료와 침투성 보호의에 대해서도 아레니우스 모형 기반의 가속 수명 시험 및 가속 열화 시험에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[7-10]. 앞에서 분석한 선행 연구들은 공통적으로 아레니우스 모형을 이용한 수명-스트레스 관계를 단순히 선형 관계식으로 변환하여 사용 수준에서의 수명 예측에 초점을 맞추고 있으며, 성능 열화 데이터의 경향을 나타내는 수명-성능 관계에 대한 구체적인 열화 모형 분석은 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 논문은 케이블 절연체의 가속 열화 시험을 위해 기존 연구에서 제시되지 않은 성능 열화 데이터를 활용하여 통계적 열화 모형을 도출하고, 이를 기반으로 시험 설계, 수행, 분석 및 수명 예측의 4단계 절차로 구성된 체계적인 수명 예측 방법론을 제시한다. 시험 설계는 7개 로트당 12개씩, 총 84개의 덤벨형 시편을 제작하여, 175℃, 190℃, 205℃의 세 가지 가속 수준에 각각 28개(로트당 1개씩 7개로 구성된 시편 세트 4개)씩 배치하였다. 시험 수행은 각 가속 온도에서 28개 시편을 동시에 고온 노화시키고, 미리 설정된 시간 간격에서 시편 세트를 순차적으로 4회 꺼내어 연신율을 측정한다. 통계적 데이터

분석은 고장이 발생하기 전이라도 주기적 시간 간격에서 측정된 성능 열화 데이터의 경향을 수학적으로 모델링하여 고장 시간을 추정한다. 이는 일반적인 가속 수명 시험보다 고장 시간 데이터 확보에 소요되는 시험 시간을 대폭 단축할 수 있는 큰 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라, 추정된 고장 시간을 바탕으로 수명 분포를 도출하고 수명-스트레스 관계를 분석하여 사용 수준의 수명을 예측하여 일반 가속 수명 시험과 동일한 결과의 도출을 가능하게 해준다. 특히, 본 논문은 연신율 데이터를 활용한 최적 열화 모형 선정부터 모수 추정, 고장 시간 산출에 이르는 상세한 통계적 분석 절차를 체계화하였다는 점에서 기존 연구와 차별화되는 특징을 갖는다고 할 수 있다.

본 논문은 다음의 크게 네 가지 단계로 구성된다. 2장에서는 가속 열화 시험에 대한 이론적 배경을 고찰한다. 3장에서는 가속 열화 시험의 설계 및 열화 데이터 측정 방법과, 열화 데이터를 이용하여 열화 모형을 도출하고 가속 수준별 고장 시간을 추정하는 방법을 기술한다. 또한, 수명-스트레스 관계를 이용하여 수명 분포와 가속 모형을 분석하고 사용 조건에서의 수명을 예측한다. 마지막으로 4장 결론에서는 그 결과를 정리하고 검토한다.

2. 이론적 배경

2.1. 가속 열화 시험 개요

가속 열화 시험은 시간의 흐름에 따라 성능이 점진적으로 열화되는 제품을 대상으로 수행한다. 이 시험은 고장을 직접 관측하는 대신 가속 수준별 시간의 변화에 따른 성능 특성치의 변화를 주기적 또는 지속적으로 관측하여 열화 데이터를 취득하여 적합한 열화 모형을 도출한다. 이후 외삽을 통해 고장 시간을 추정하고 이를 바탕으로 수명을 예측하는 시험이다. Figure 1은 가속 수준별 성능 열화 데이터와 수명의 관계를 이용하여 성능 열화에 따른 고장 시간 예측 과정을 보여준다. 특히, 열화 모형을 활용하여 성능 기준치(Threshold Level) 도달 시점을 고장 시간으로 추정하는 가속 열화 시험의 원리를 도식화한 것이다[11-13].

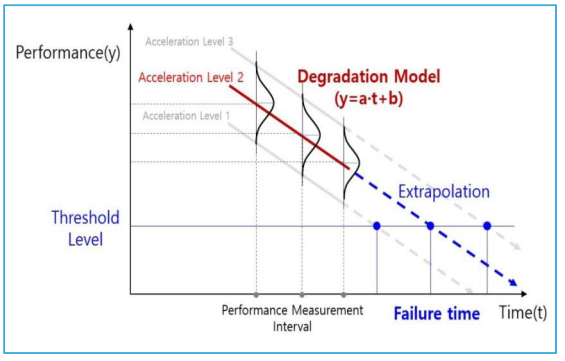


Figure 1. Concept of accelerated degradation test

Figure 2는 본 논문의 가속 열화 시험의 수행 절차와 세부 내용을 표현한 것으로 시험 설계, 시험 수행, 데이터 분석, 수명 예측의 4단계로 구성된다. 시험 설계 단계의 핵심 내용은 가속 인자 및 수준을 선정하고, 성능 특성치의 고장 판정 기준을 수립하는 것이다. 시험 수행 단계는 성능 열화 데이터의

Test Design	Test Execution	Data Analysis	Life Prediction
• Target Items • Failure Analysis • Acceleration Factor and Level • Sample size • Performance Degradation Characteristics • Performance Measurement Interval • Failure criteria	• Test Equipment Setup • Test Condition Setup • Test Environmental Maintenance • Ensure Traceability • Performance Measurement • Measurement Data Collection • Data Reproducibility Evaluation	• Life-Performance Relationship - Degradation Model - Model Parameter - Failure Time Estimation • Life-Stress Relationship - Life Distribution - Acceleration Model - Distribution/Model Parameter - Acceleration Validation	• Acceleration Factor • Service Life at Use conditions • Failure Rate • Reliability • MTTF/MTBF • Characteristic Life • Reliability Assurance

Figure 2. Procedure of accelerated degradation test

측정이다. 데이터 분석 단계는 수명-성능 관계 분석을 통한 열화 모형 도출 및 고장 시간 데이터 추정과 수명-스트레스 관계 분석이다. 마지막으로, 수명 예측 단계는 가속 계수와 사용 수준의 수명 예측을 통한 신뢰성 보증이다. 이러한 가속 열화 시험은 일반적인 가속 수명 시험에 비해 다음의 세 가지 장점을 갖고 있다. 첫째, 시험 시간을 단축할 수 있다. 고장이 발생하기 전이라도 성능 열화 경향이 확인되면 열화 모형을 이용하여 수명을 평가할 수 있으므로, 고장 발생 시점까지 시험을 지속하지 않아도 되어 전체적인 시험 기간이 줄어든다. 둘째, 수명 예측 결과의 정확도를 높일 수 있다. 신뢰도가 높아 고장 데이터를 확보하기 어려운 제품의 경우, 아주 적은 수의 고장 데이터를 활용한 가속 수명 시험보다 성능 열화 데이터를 이용한 분석이 수명 예측의 정확도를 높일 수 있다. 셋째, 신뢰성 관련 정보를 더 많이 얻을 수 있다. 고장에 이르는 성능 열화 과정에서 수집한 물리·화학·전기적 특성에 대한 기술 정보와 열화 모형의 통계적 분석 정보 등 일반 가속 수명시험에서는 얻기 어려운 추가 정보를 확보할 수 있다[11].

2.2. 열화 모형

열화 모형은 시간이 경과함에 따라 제품의 성능이 변화하는 경향을 수학적으로 표현한 것이다. 대표적인 열화 모형의 종류는 아래와 같이 성능이 감소하거나 증가하는 모양에 따라 선형, 대수형, 지수형 등으로 나눌 수 있다. 특히, 지수형 열화 모형은 지수 모형과 거듭제곱 모형 2종류가 있다. 이러한 열화 모형은 각각의 가속 수준에서 측정한 열화 데이터와 수명 간의 관계를 분석하고, 미리 정의된 고장 판정 성능 기준치에 도달하는 시점까지 외삽 하여 고장 시간을 추정하는 데 활용된다[12-13].

(1) 선형(Linear Type) 열화 모형 : 1종

- Linear Model : $y = ax + b$ (1)

(2) 지수형(Exponential Type) 열화 모형 : 2종

- Exponential Model : $y = b \cdot e^{a \cdot x}$ (2)

- Power Model : $y = b \cdot x^{a}$ (3)

(3) 대수형(Logarithmic Type) 열화 모형 : 1종

- Logarithmic Model : $y = a \cdot \ln(x) + b$ (4)

여기에서 y는 제품의 성능, x는 시간, a, b는 상수이다.

2.3. 수명 분포

수명 분포는 제품의 고장 시간 데이터를 활용해 시간의 흐름에 따른 고장 발생 확률의 변화를 통계적으로 분석함으로써 수명, 고장률, B10 수명 (전체 제품 중 10 %가 고장에 도달하는 시점), 신뢰도 등을 추정하는 도구이다. 신뢰성 분석에 가장 많이 사용되는 대표적인 수명 분포는 지수 분포, 와이블 분포, 대수정규 분포 등이 있다.

본 논문은 고온 사용 환경의 열적 노화에 의한 절연체의 열화 고장 수명 분석에 적합한 와이블 분포를 사용하였으며, 3.4절의 고장 시간에 대한 수명 분포 적합성 검정을 통하여 이를 확인하였다. 와이블 분포는 분포의 모양을 결정하는 형상 모수(β)와 수명을 나타내는 척도 모수로 구성되며, 형상 모수에 따라 증가형($\beta > 1$), 감소형($\beta < 1$), 일정형($\beta = 1$) 등 다양한 고장률을 다룰 수 있어 신뢰성 데이터 분석에 가장 널리 활용된다. 아래의 식은 와이블 분포의 신뢰성 척도들로 식(5)는 단위 시간당 고장이 발생하는 비율을 나타내는 확률 밀도 함수이고, 식(6)은 특정 시점까지 고장이 나지 않을 확률을 표현한 신뢰도 함수이며, 식(7)은 특정 시점까지 고장이 발생하지 않다가 순간적으로 고장이 날 확률을 나타내는 고장률 함수이다[14-15].

(1) 확률 밀도 함수

$$f(t)=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}\cdot\exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (5)$$

(2) 신뢰도 함수

$$R(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (6)$$

(3) 고장률 함수

$$\lambda(t)=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (7)$$

여기에서 $f(t)$는 확률 밀도 함수, θ는 척도 모수, t는 시간으로 확률 변수($t>0$)이며, $R(t)$는 신뢰도 함수, $\lambda(t)$는 고장률 함수이다.

2.4. 가속 모형

가속 모형은 가속 조건의 데이터를 분석하여 사용 환경에서의 수명을 추정하기 위한 통계적 함수로, 가속 조건의 수명 분포와 관련 신뢰성 정보를 사용 조건으로 외삽하기 위해 수명-스트레스 관계를 도출하는 역할을 수행한다. 가속 열화 시험에 사용되는 대표적인 가속 모형은 아레니우스(Arrhenius) 모형, 역승(Inverse Power Law) 모형과 두 모형이 결합된 형태의 아이링(Eyring) 모형과 펙(Peck's) 모형, 코핀-맨슨(Coffin-Manson) 모형 등이 있다. 차량용 절연체를 포함한 복합재료의 경우 앞의 기존 연구 분석 내용과 같이 온도 스트레스에 의한 화학 작용에 의한 노화로 인한 고장이 가장 많이 발행하므로, 이의 수명-스트레스 관계는 잘 나타내는 아레니우스 모형을 적용하여 분석하였다. 식(8)은 아레니우스 모형 식으로 화학 반응 시 발생하는 활성화 에너지와 온도와 반응률 관계에서 유래되었으며, 화학 반응이 임계점에 도달하면 고장이 발생한다는 가정을 기반으로 만들어졌다. 또한. 식(9)는 가속 수준의 수명을 사용 수준으로 외삽하고 모수 추정을 단순화하기 위하여 아레니우스 모형의 양변에 로그를 취해 선형 식으로 변환한 형태이다[15].

$$L(T)=A\cdot e^{\left(\frac{E_a}{k\cdot T}\right)} \quad (8)$$

$$\ln(L(T))=\left(\frac{E_a}{k}\right)\cdot\left(\frac{1}{T}\right)+\ln(A) \quad (9)$$

여기에서 $L(T)$는 온도 T에서의 수명, T는 절대온도(섭씨온도 + 273.16), A는 모형 상수, E_a는 모형 모수 활성화 에너지(Activation Energy, eV), k는 기체 상수(8.6173×10^{-5} eV/K)이다.

식(10)은 사용 조건과 가속 조건 간의 수명의 비율을 의미하는 가속 계수이다.

$$AF=\frac{L(T_{use})}{L(T_{acceleration})}=\exp\left[\frac{E_a}{k}\times\left(\frac{1}{T_{use}}-\frac{1}{T_{acceleration}}\right)\right] \quad (10)$$

여기에서 AF는 가속 계수, T_{use}는 사용 수준 온도, $T_{acceleration}$는 가속 수준 온도이다.

3. 케이블 절연체의 가속 열화 시험

3.1. 시험 설계

다수의 선행 연구에 따르면 케이블의 주 고장 모드는 열적 열화에 의한 화학적 반응으로 연성이 저하되어 발생하는 절연 파괴로 알려져 있다[6-9]. 이에 따라 차량용 전력 케이블 절연체 가속 열화 시험의 가속 인자는 온도 스트레스로 결정하였다. 가속 수준은 케이블의 내열 등급을 반영하여 최고 내열 온도 150℃보다 25℃ 높은 온도를 첫 번째 가속 수준을 설정하고, 15℃ 간격으로 증가시켜 175℃, 190℃, 205℃의 3수준으로 설계하였다.

시험 시편은 7개 로트별 12개씩 Figure 3과 같이 덤벨형(Dumbbell Type)으로 총 84개를 제작하였으며, 세 가지 가속 수준별로 28개씩을 할당하였다. 시편으로 제작된 절연체는 주재료인 합성 고무와 난연성 확보를 위한 난연재 등으로 구성되어 있으며, 조사 가교(Radiation Cross-Linking)를 통하여 내열성을 포함한 물리·화학적 특성을 향상시킨 제품이다.

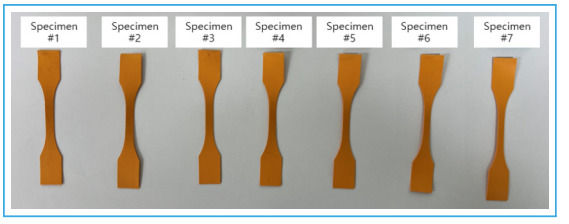


Figure 3. Specimens of automotive power cable insulation

온도에 따른 열화 특성을 평가하기 위한 성능 열화 데이터는 연신율로 정의하였으며, 시편 제작 및 측정 절차는 IEC 60811-501(2023) 표준을 적용하였다[16]. 연신율 측정은 미리 정해진 가속 온도 조건에 28개의 시편을 동시에 고온 노화시키고, 규정된 측정 주기마다 로트별 1개씩 7개로 구성된 시편 세트를 순차적으로 4회 꺼내어 측정하는 것으로 설계하였다. 이 과정을 가속 수준별로 반복하고 연신율 측정 시 인장 속도는 25mm/min로 설정하였다. Table 1은 가속 수준, 가속 수준별 시편 개수, 측정 간격, 측정 횟수에 대하여 가속 열화 시험의 상세 설계 내용을 요약한 것이다.

Table 1. Accelerated degradation test design

Acceleration levels	175 ℃	190 ℃	205 ℃
Number of Specimens	28	28	28
Measurement Interval	72 h	24 h	24 h
Number of Measurements	4	4	4

3.2. 시험 수행 및 성능 열화 데이터 측정

가속 열화 시험의 성능 열화 데이터 측정은 175℃, 190℃, 205℃의 세 가지 가속 수준에서 수행하였다. Figure 4와 같이 각 가속 수준별로 로트별 1개씩 7개로 구성된 시편 세트 4개(28개)를 동시에 설치하고 설정된 온도에서 노화시킨다. 노화 과정 중 시편은 175℃ 조건에서 72시간 간격으로 7개로 구성된 시편 세트를 4회, 190℃와 205℃ 조건에서 24시간 간격으로 4회를 꺼내어 연신율을 측정하여 Figure 5와 같은 결과를 얻었다. Figure 5는 절연체 시편의 인장 하중에 따른 시편의 늘어난 길이를 나타낸 그래프로 연신율 산출에 사용된다. 연신율은 시험 전 설정한 시편 길이 대비 시편이 끊어질 때까지 늘어난 길이의 비이다.



Figure 4. Setup of specimens in the high-temperature chamber

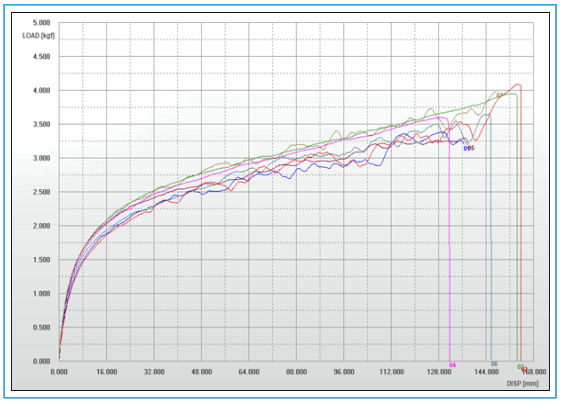


Figure 5. Graph of elongation measurement results (at the 175℃ and 72h)

Table 2는 각 가속 수준별로 정해진 시간 간격에서 측정한 연신율 성능 열화 데이터를 정리한 것이다. 연신율은 재료가 인장 시험에서 끊어질 때까지 얼마나 늘어났는지를 나타내는 비율로 재료의 연성(Ductility, 늘어나는 성질)을 평가하는 지표이다. Table 2에서 보는 바와 같이 고온 열화 시간의 흐름에 따라 연신율 데이터는 대체로 유의미하게 감소하는 경향을 보이게 된다. 연신율이 높은 전선이 낮은 전선 대비 열화가 덜 진행되어 수명이 긴 것으로 판단할 수 있는 것이다. Table 2에서 일부 데이터의 경우 열화 시간이 늘어났으나 연신율이 도리어 높아지는 데이터 역전 현상이 나타나는데, 이는 전선의 수명과 연신율이 양의 상관성을 띠지만 상관계수 1인 완전 양의 상관관계가 아니므로 발생하는 데이터이다.

3.3. 수명-성능 관계 분석

연신율에 대한 성능 열화 데이터 분석은 신뢰성 관련 전문 분석 소프트웨어인 Weibull++을 이용하였다. 분석 절차는 첫째, 성능 열화 데이터와 수명 관계를 통계적, 도시적으로 분석하여 적합한 열화 모형을 찾는다. 둘째, 각 가속 수준별 도출된 열화 모형의 모수를 추정한다. 마지막으로, 가속 모형을 이용하여 각 가속 수준별로 고장 판정 기준값을 벗어나는 시점의 고장 시간을 추정한다. 절연체의 고장 판정 기준은 노화에 의해 연신율이 100% 이하로 떨어지는 시점으로, 케이블 관련 시험 표준들과 시험 결과에 기초한 업계 의견을 반영하여 결정하였다.

Table 3은 가속 수준별 가장 적합한 열화 모형을 찾기 위해 최소 제곱법을 적용하여 통계적으로 분석한 결과이다. 가장 대표적인 열화 모형인 선형, 지수, 거듭제곱, 대수 모형 4종을 대상으로, 최소 제곱법 통계량인 식(11)의 SSE 값을 계산하여 가장 적합한 모형의 순위를 결정하였다. SSE 값은 모형의 적합도를 평가하는 지표로 실제 관측값과 모형이 예측한 값의 차이를 제곱하여 더한 값으로 작은 값을 가질수록 선정한 모형이 적합하다. 분석 결과 최적 열화

Table 2. Performance degradation data(Elongation)

Acceleration Level	High Temperature Aging Time (h)	Elongation (%)						
		Specimen #1	Specimen #2	Specimen #3	Specimen #4	Specimen #5	Specimen #6	Specimen #7
175℃	72	682.85	779.80	773.25	658.30	689.40	728.45	737.85
	144	684.30	681.40	720.45	635.15	714.70	714.70	706.75
	216	497.70	552.65	578.70	578.70	627.15	596.80	627.90
	288	321.95	209.85	515.80	342.20	363.20	446.35	81.85
190℃	24	811.55	725.55	742.90	738.55	794.25	792.05	794.95
	48	674.90	669.85	625.75	625.75	605.45	647.40	742.20
	72	46.35	67.35	191.05	617.05	356.65	615.60	574.35
	96	130.30	499.90	388.50	353.05	331.35	427.55	123.05
205℃	24	58.65	86.90	251.10	319.75	594.60	589.55	637.30
	48	30.45	34.80	40.55	41.30	42.75	44.90	32.60
	72	4.25	7.15	9.40	12.30	15.20	15.20	13.75
	96	5.70	6.45	7.20	6.45	6.45	5.00	5.00

모형으로 175 ℃와 190 ℃는 선형 모형, 205 ℃는 거듭제곱 모형으로 확인되었다.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y_i})^2 \quad (11)$$

여기에서 SSE는 오차제곱합(Sum of Squared Errors), y_i는 실제 데이터, $\hat{y_i}$는 모형을 통해 예측된 값, $(y_i - \hat{y_i})$는 오차이다.

절연체 성능 열화 데이터의 시간에 따른 경향을 확인하기 위하여, Table 3의 분석 결과를 기반으로

Table 3. Results of degradation model Goodness-of-Fit analysis

Acceleration Levels: 175℃

Goodness-of-Fit analysis — SSE

Degradation model	SSE	SSE of Each Specimens						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Linear	**141474.4853**	9828.0205	16620.1245	1433.3445	12456.3338	21118.3208	4928.0505	75090.2908
Exponential	**403377.8774**	18065.8301	51816.8389	1775.4741	18475.7853	29866.1445	7648.4677	275729.3369
Power	**527321.1478**	33848.5315	82250.4031	5519.8328	28721.8356	43750.4325	15889.2498	317340.8624
Logarithmic	**261510.8795**	23133.8361	40723.1668	4009.7234	22674.2757	35502.0392	12430.6197	123037.2186

Goodness-of-Fit analysis — Ranks

Degradation model	Ranks	Ranks of Each Specimens						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Linear	**1**	1	1	1	1	1	1	1
Exponential	**3**	2	3	2	2	2	2	3
Power	**4**	4	4	4	4	4	4	4
Logarithmic	**2**	3	2	3	3	3	3	2

Acceleration Levels: 190℃

Goodness-of-Fit analysis — SSE

Degradation model	SSE	SSE of Each Specimens						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Linear	**407339.0345**	84695.0580	184709.4868	69839.7945	12173.7780	10701.6750	4091.6305	41127.6118
Exponential	**585095.4506**	115082.6682	213272.5913	63351.7531	17670.2892	5645.5656	5507.7648	164564.8184
Power	**721514.4376**	192761.8114	202906.7843	62241.6716	26889.9197	10212.5273	10243.8050	216257.9183
Logarithmic	**430131.1443**	84923.87112	167302.3572	58696.3695	20719.1309	6012.5967	7573.1058	84903.7130

Goodness-of-Fit analysis — Ranks

Degradation model	Ranks	Ranks of Each Specimens						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Linear	**1**	1	2	4	1	4	1	1
Exponential	**3**	3	4	3	2	1	2	3
Power	**4**	4	3	2	4	3	4	4
Logarithmic	**2**	2	1	1	3	2	3	2

Acceleration Levels: 205℃

Goodness-of-Fit analysis — SSE

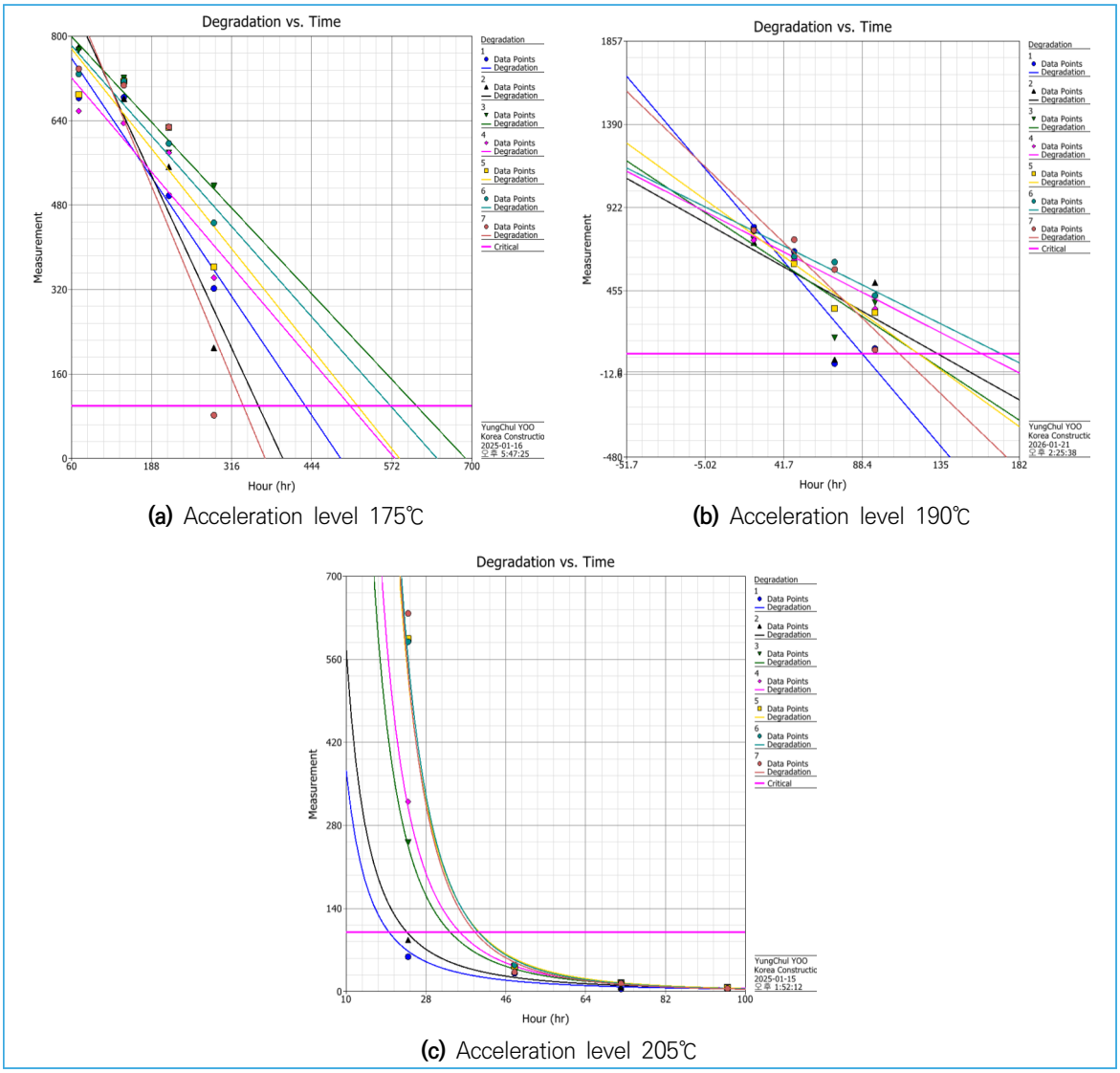
Degradation model	SSE	SSE of Each Specimens						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Linear	**309598.0990**	252.6768	660.8025	11984.19075	21138.2745	86515.9150	83682.7358	105363.5038
Exponential	**205383.7110**	101.4813	105.4620	5629.3302	9921.0294	58858.1690	45658.4664	85109.7728
Power	**17792.4635**	263.9983	241.3220	68.7078	126.3027	4848.9959	1184.6246	11058.5123
Logarithmic	**159584.6584**	95.5302	190.3121	5470.2564	10119.2726	44796.8367	42945.9501	55966.5003

Goodness-of-Fit analysis — Ranks

Degradation model	Ranks	Ranks of Each Specimens						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Linear	**4**	3	4	4	4	4	4	4
Exponential	**3**	2	1	3	2	3	3	3
Power	**1**	4	3	1	1	1	1	1
Logarithmic	**2**	1	2	2	3	2	2	2

각 가속 수준별 수명-성능 관계를 Figure 6과 같이 도식적으로 분석하였다. (a)는 175℃ 가속 수준에서 선형 모형, (b)는 190℃ 가속 수준에서 선형 모형, (c)는 205℃ 가속 수준에서 거듭제곱 모형을 도식화한 것이다. 가속 수준별로 7개의 시료에 대하여 특정 시간 간격별로 측정한 연신율 데이터와 추정된 열화 모형 추세선이 높은 적합도를 보임에 따라, 앞선 통계적 분석 결과와도 일치함을 확인하였다. 또한, 고장 판정 기준(연신율 100%인 시점)에서의 고장 시간을 추정하기 위하여 각 가속 수준별 열화 모형의 모수를 도출하여 Table 4에 결과를 정리하였다.

수명-성능 관계 분석의 최종 목적은 열화 모형과 모수를 추정하여 규정된 고장 판정 기준에 도달하는 시점의 고장 시간을 예측하는 데 있다. Table 5는 연신율이 100% 이하로 떨어지기 시작하는 시점을 고장 판정 기준으로 설정하고 Table 3과 4의 분석 결과를 바탕으로 시편 및 가속 수준별 고장 시간을 추정한 결과



(a) Acceleration level 175℃

(b) Acceleration level 190℃

(c) Acceleration level 205℃

Figure 6. Graphical analysis of life-performance relationship

Table 4. Estimation of degradation model parameter

Acceleration Level	Degradation Model	Model Parameter	Number of Specimen						
			1	2	3	4	5	6	7
175℃	Linear Model $y = ax + b$	a	−1.76	−2.55	−1.27	−1.40	−1.48	−1.34	−2.84
		b	864.0	1015.6	875.6	804.8	865.2	862.6	1050.3
190℃	Linear Model $y = ax + b$	a	−11.14	−5.33	−6.24	−4.86	−6.82	−4.69	−9.10
		b	1083.8	810.5	861.5	874.9	931.3	902.0	1104.5
205℃	Power Model $y = b \cdot x^a$	a	−1.95	−2.03	−2.69	−2.85	−3.25	−3.39	−3.44
		b	3.3×10^4	6.3×10^4	1.3×10^6	2.7×10^6	1.6×10^7	2.6×10^7	3.0×10^7

Table 5. Failure time estimation using degradation model

Number of Specimen	Failure Time (h)		
	175℃	190℃	205℃
1	433.39	88.36	19.65
2	358.54	133.28	23.68
3	610.89	122.01	33.44
4	505.04	159.61	35.63
5	516.73	121.84	39.99
6	569.48	171.04	39.82
7	334.28	110.41	39.02

이다. 그 결과 온도 상승에 따라 고장 시간이 단축되는 명확한 가속 효과를 확인하였다. 이에 따라 좀 더 명확한 가속성 검증을 위해 다음 절에서 수명-스트레스 관계를 통계적 기법을 적용하여 분석하였다.

3.4. 수명-스트레스 관계 분석

수명-스트레스 관계는 앞 장에서 추정한 Table 5의 가속 수준별 고장 시간을 이용하여 MiniTab 18 통계 소프트웨어를 활용해 분석하였다. 분석 절차는 확률지에 고장 시간 데이터 도시, 분포 적합성 평가, 가속성 검증, 수명-스트레스 관계 분석, 사용 조건의 수명 예측 및 모수 추정 순으로 이루어진다. Figure 7은 가속 수준별 고장 시간을 확률지에 타점하고 통계적

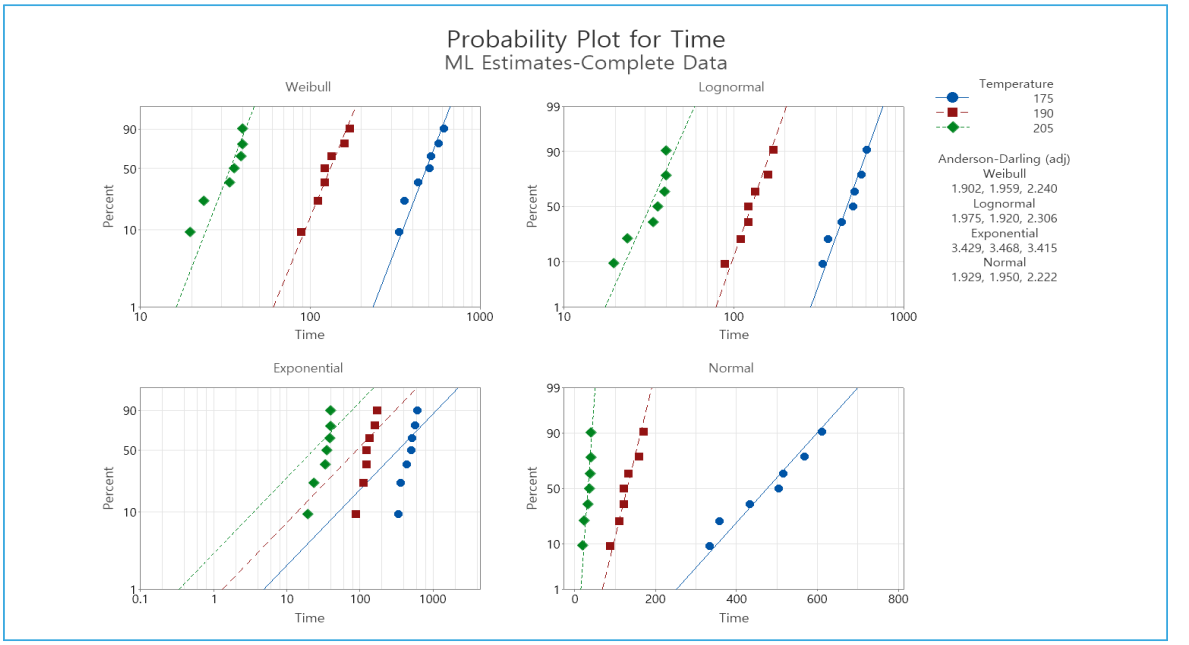


Figure 7. Life distribution goodness-of-fit analysis

검정을 통하여 수명 분포의 적합성을 도시적 방법과 통계적 방법으로 확인한 결과이다. 수명 분포로 널리 사용되는 와이블, 대수정규, 지수, 정규 분포를 대상으로 수행하였으며, 각 분포의 적합성은 수집된 고장 시간 데이터가 수명 분포를 얼마나 잘 따르는지 확인하는 Anderson-Darling 검정 방법을 적용하였다. Anderson-Darling 검정 결과 통계량 값이 2개의 가속 수준에서 가장 작은 값(175℃에서 1.902, 205℃에서 2.240)을 갖는 와이블 분포를 수명 분포로 선정하였다.

Figure 8은 가속성이 성립하는지 확인하기 위한 와이블 확률지 분석 결과이다. 가속 수준별 기울기(형상 모수)가 175℃는 5.83, 190℃는 5.46, 205℃는 5.77로 매우 유사하게 나타났고, 형상 모수의 통계적 동일성 검정에서도 P-value가 0.987로 분석되어 가속 수준 간 동일성이 확인되었다. 따라서 2가지 분석 결과로 가속 수준별 고장 시간 데이터의 가속성이 성립함을 알 수 있다[14].

가속 열화 시험의 수명-스트레스 관계 분석은 와이블 분포와 온도 스트레스에 가장 적합한 아레니우스 모형을 적용하여 분석하였다. 앞선 분석을 통해 가속성이 확인됨에 따라 동일한 형상 모수를 적용하여 가속 수준별 고장 시간을 와이블 확률지에 타점한 결과를 Figure 9에 정리하였으며, 통계적으로 추정된 형상 모수, 척도 모수, Anderson-Darling(AD) 통계량 값, 고장 시간 데이터 개수(F), 중단 데이터 개수(C)도 함께 그림에 제시하였다. 그래프 우측의 일점쇄선은 가속 조건의 고장 시간 데이터를 바탕으로 도출된 사용 조건(150℃) 수명 분포 추정치를 의미하며, 중앙의 선은 중앙값을, 양옆의 선은 95% 신뢰구간을 각각 나타낸 것이다. 와이블 분포에 대한 모수 추정 결과는 Table 6과 같으며, 형상 모수는 5.47, 사용 조건에서의 척도 모수는 6447.56시간, B10 수명은 4272.12시간이 예측되었다.

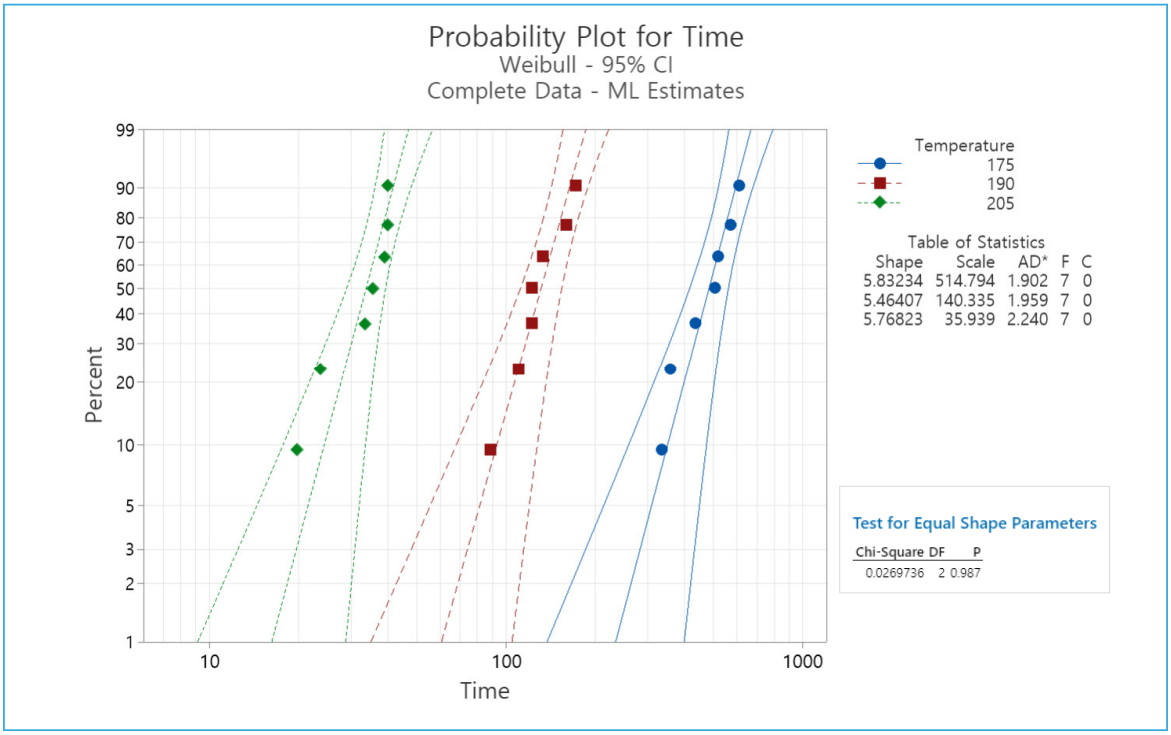


Figure 8. Verification of acceleration using Weibull probability plots

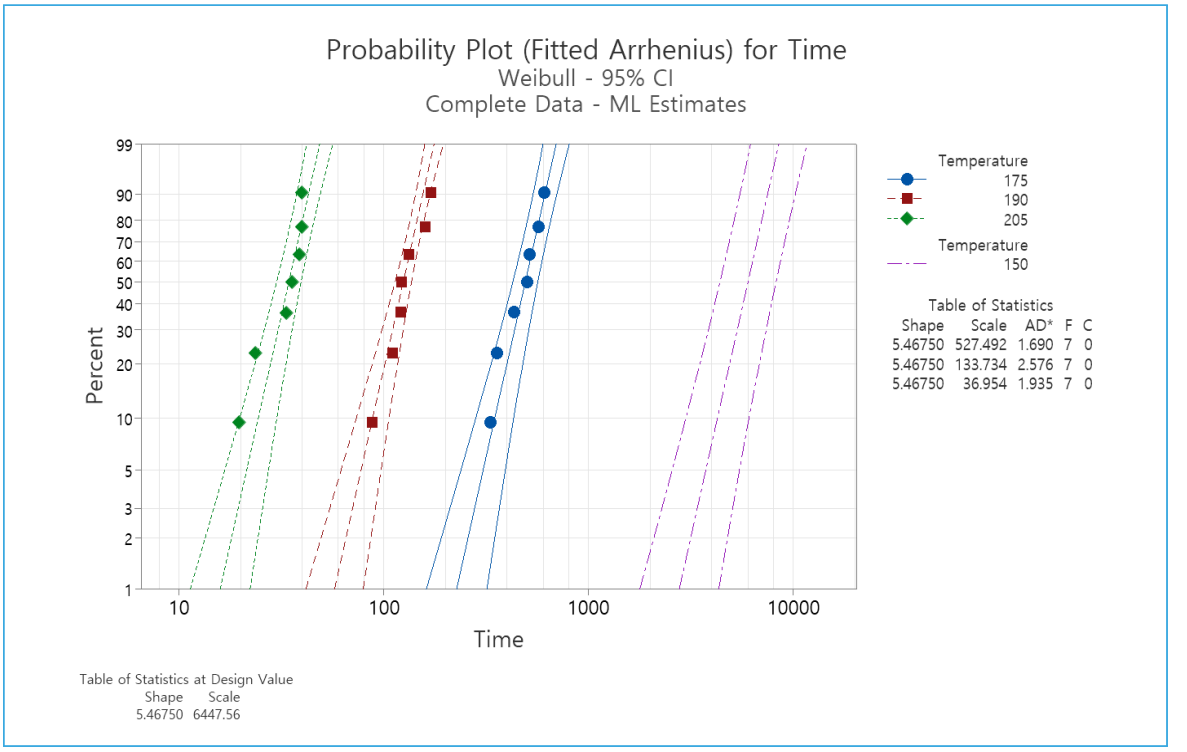


Figure 9. Weibull probability plots of failure times for each acceleration level

Table 6. Estimation result of life distribution parameter by failure time analysis

Parameter		Coeff-icient	95.0% Normal Confidence Interval	
			Lower	Upper
Shape Parameter		5.47	3.89	7.69
Use Condition (150℃)	Scale Parameter	6 447.56	4 717.75	8 810.57
	B_{10} Life	4 272.12	2 996.36	6 091.07

Figure 10은 가속 조건의 고장 시간 데이터를 기반으로 사용 조건의 수명을 외삽하기 위하여 수명-스트레스 관계를 나타낸 그래프이다. 고장 시간 데이터 그래프의 각 수준별 고장 시간 타점에 대한 추세선이 거의 수평이고 95% 신뢰구간에 타점된 점들이 대부분 포함되어 있으므로 가속 모형으로 적용된 아레니우스 모형이 적합하다는 것을 의미한다. 이를 근거로 아레니우스 모형의 모수를 산출하고, 사용 수준 온도인 150℃를 기준으로 식(10)을 이용하여 가속계수(Acceleration Factor)를 추정하였으며, 결과를 Table 7에 정리하였다. Table 7에서 가속 계수는 175℃로 온도를 가속할 경우 사용 수준의 수명보다 19.69배, 190℃는 48.21배, 205℃는 174.49배 단축됨을 알 수 있었다.

Table 7. Estimation result of acceleration model parameter and acceleration factor

Acceleration Model	Activation Energy (eV)	Acceleration Factor		
		175℃	190℃	205℃
Arrhenius model	1.64	19.69	48.21	174.49

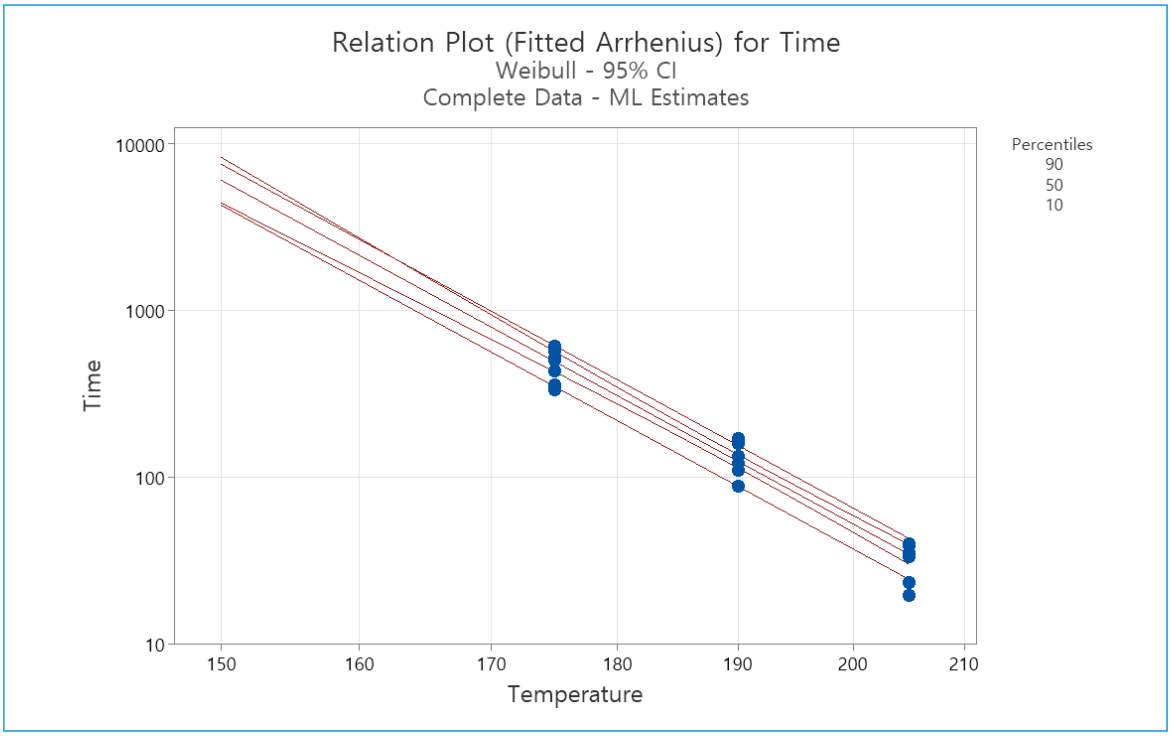


Figure 10. Life-stress relationship plots of failure times for each acceleration level

4. 결 론

차량용 전력 케이블 절연체의 수명을 예측하기 위하여 가속 열화 시험을 설계하고 실시하였다. 절연체의 절연 파괴 고장 모드에 가장 큰 영향을 미치는 열적 스트레스를 가속 인자로 선정하였으며, 세 가지 가속 수준(175℃, 190℃, 205℃)에서 각 28개씩 총 84개의 성능 열화 데이터를 수집하였다. 성능 열화 데이터 분석은 각각의 가속 수준에서 일정 노화 시간 간격에서 측정한 연신율을 이용하였다. 이 데이터를 이용하여 각 가속 수준별 가장 적합한 열화 모형(175℃와 190℃는 선형 모형, 205℃는 거듭제곱 모형)을 찾아서 고장 시간을 예측하였다. 이때 고장 시간은 연신율이 100% 이하로 떨어지는 시점을 기준으로 추정하였다.

가속 수준별 열화 모형에 의해 추정된 고장 시간들을 바탕으로 수명-스트레스 관계를 분석하여 수명 분포와 가속 모형을 도출하였다. 그 결과 수명 분포는 와이블 분포, 가속 모형은 아레니우스 모형이 가장 적합한 것으로 확인되었다. 이를 통해 형상 모수, 척도 모수와 같은 수명 분포 모수와 활성화 에너지 등 가속 모형 모수를 산출하였다. 그 결과 형상 모수는 5.47, 활성화 에너지값은 1.64 eV, 사용 수준 150℃에서의 척도 모수 6447.56시간과 B10 수명 4272.12시간 등의 주요 신뢰성 정보를 획득하였다. 이는 고객이 요구하는 신뢰성을 충분히 만족할 수 있는 수명이다. 또한, 아레니우스 모형을 기반으로 각 가속 수준별 가속 계수를 추정하였으며, 사용 수준(150℃)으로 시험하는 것보다 175℃는 19.69배, 190℃는 48.21배, 205℃는 174.49배 시험 시간을 단축할 수 있음을 알 수 있었다.

결론적으로, 본 논문은 차량용 전력 케이블의 가속 열화 시험의 체계적 설계·수행·분석 방법론을 제시하였으며, 실제 사례 연구를 통해 사용 조건에서의 수명이 고객의 목표 신뢰성을 충분히 만족함을 입증하였다. 또한, 본 논문은 국방 현대화와 유무인 복합

전투 체계 구축을 위해 활발히 도입 및 연구가 추진되고 있는 군용차량 전동화 유사 부품의 신뢰성 보증 및 정보 수집을 위한 시험에 유용한 지침으로 사용될 것으로 기대된다. 특히, 성능 열화 데이터 측정 및 열화 모형 분석을 통하여 고장 시간을 획득하기 위한 시험 시간의 단축 사례가 관련 분야에 널리 적용되기를 바란다.

본 논문에서는 가속 온도에 따라 열화 모형이 다르게 확인되었다. 205°C 가속 조건은 성능 열화의 전체적인 변화 경향이 충분히 관측되어 거듭제곱 모형이 적합했으나, 175°C와 190°C는 측정 간격 대비 열화 속도가 느려 선형 변화 구간 내에서 데이터가 수집된 것으로 판단된다. 따라서 향후 시험 설계를 보완하고 추가 실험을 수행하여 열화 모형 및 수명 예측의 신뢰성을 더욱 높일 예정이다.

참고문헌

1. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 19642-2:2019, Road vehicles—Automotive cables—Part 2: Test methods.*
2. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 19642-1:2019, Road vehicles—Automotive cables—Part 1: Vocabulary, design guidance and general requirements.*
3. Jung, J. H., & Kim, Y. S. (2017). An accelerated degradation test of nuclear power plants communication cable jacket. *Journal of Korean Society for Quality Management, 45*(4), 969-980. https://doi.org/10.7469/JKSQM.2017.45.4.969
4. Alghamdi, A. S., & Desuqi, R. K. (2020). A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing. *Heliyon, 6*(1), e03120. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03120
5. Jeong, J.-D., Lee, J.-Y., Kang, S.-D., & Kim, J.-H. (2020). Analyzing the reliability for life evaluation of cables according to accelerated degradation test. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 34*(11), 16-22. https://doi.org/10.5207/jieie.2020.34.11.016
6. Park, H.-J., Kim, K.-H., & Kim, H. (2004). Evaluation of thermal aging on PVC using thermo gravimetry analysis and accelerated thermal aging test. *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, 18*(3), 45-50.
7. Bang, J., Je, Y., Yoon, T., & Doh, J. (2023). Accelerated life testing data-based lifetime prediction of rubber material for bushing using global-local optimization technique. *Journal of Applied Reliability, 23*(3), 211-220. https://doi.org/10.33162/JAR.2023.8.23.3.211
8. Ahn, W., & Lee, H. S. (2017). Life time prediction using accelerated ageing test for a CR/CB rubber composite. *Elastomers and Composites, 52*(4), 237-241. https://doi.org/10.7473/EC.2017.52.4.237
9. Gim, M.-J., Lee, J.-H., Bae, S.-H., Yoon, J.-H., & Yun, J.-H. (2024). Accelerated thermal aging test for predicting lifespan of urethane-based elastomer potting compound. *Elastomers and Composites, 59*(2), 73-81. https://doi.org/10.7473/EC.2024.59.2.73
10. Kim, C., & Jung, D. (2025). Lifetime of permeable protective clothing based on Arrhenius model. *Journal of Defense Quality Society, 7*(2), 168-177. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.2.016
11. Nelson, W. B. (2004). *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis.* John Wiley & Sons.
12. 수원대학교 신뢰성혁신센터. (2006). *열화 데이터 분석 Guideline.*
13. ReliaSoft. (n.d.). *Introduction to life data analysis. In ReliaSoft Life Data Analysis Reference.* https://help.reliasoft.com/reference/life_data_analysis/lda/introduction_to_life_data_analysis.html
14. 서순근. (2017). *Minitab 신뢰성분석: 현장사례 중심 Minitab 실무완성.* 이레테크.
15. 산업자원부 기술표준원. (2005). *신뢰성용어 해설서* (발간등록번호 11-1410119-000010-01)).
16. International Electrotechnical Commission. (2023). *IEC 60811-501:2012/AMD2:2023, Amendment 2—Electric and optical fibre cables—Test methods for non-metallic materials—Part 501: Mechanical tests—Tests for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds.*

궤도형 차량 적재 환경에서 휴대용 대전차 유도무기의 진동영향성 분석 및 감쇠 설계

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Vibration Analysis and Damping Design of a Man-Portable Anti-Tank Guided Missile Mounted on a Tracked Vehicle

현종훈†, Jong-hoon Hyun
LIG 디펜스&에어로스페이스, 기계기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Mechanical Engineering, LIG D&A

박성열, Sung-yul Park
LIG 디펜스&에어로스페이스, 기계기술팀, 선임연구원
Research Engineer, Mechanical Engineering, LIG D&A

곽태산, Tae-san Kwag
LIG 디펜스&에어로스페이스, 기계기술팀, 선임연구원
Research Engineer, Mechanical Engineering, LIG D&A

송의정, Eui-jung Song
LIG 디펜스&에어로스페이스, 기계기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Mechanical Engineering, LIG D&A

박재민, Jae-min Park
LIG 디펜스&에어로스페이스, 기계기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Mechanical Engineering, LIG D&A

Abstract

This study investigated the vibration environment acting on a mounted Man-Portable Anti-Tank Guided Missile (MP-ATGM) system during vehicle transportation and a structural mitigation approach to improve operational reliability is proposed. Field measurements were conducted to compare the vibration characteristics of a small tactical wheeled vehicle and tracked armored vehicle under representative driving conditions. The measured acceleration responses indicated that the tracked vehicle produced higher vibration levels and wider frequency distributions, particularly in the vertical direction owing to repeated track–ground impacts. These characteristics may increase the mechanical stress and influence the stability of sensitive onboard electronic components. Laboratory tests were performed using an electrodynamic shaker system to reproduce this operational vibration environment under controlled conditions. Based on the measured vibration characteristics, a vibration-attenuation structure was designed and applied to the mounting interface. Experimental verification demonstrated that the proposed design effectively reduced the transmitted vibration level and improved system stability under simulated transportation conditions. These results provide useful guidelines for the design of vibration-resistant mounted weapons systems.

keywords : MP-ATGM, vibration environment, tracked vehicle, vibration mitigation, electrodynamic shaker test

† Corresponding Author : Jong-hoon Hyun
Tel : +82-54-469-8616, email : jonghoonhyun@ligdna.com
LIG Defense&Aerospace, 39262, 354-25, Sanho-daero, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, Korea
Received April 7 6th. 2026 Revised April 29th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

21세기 들어 세계 정세는 과거에 비해 불안정한 양상을 보이고 있으며, 그에 따라 각국은 급변하는 작전 환경에 대응하기 위해 군사전략 및 무기체계 운영 방식을 유연하게 대처할 수 있도록 노력하고 있다. 특히 2022년 2월 시작된 우크라이나와 러시아의 전쟁은 현대전의 양상이 기존의 대규모 기갑전 중심에서 탈피되어, 비정형 및 도심 전투 위주의 고기동, 저위험 전술 중심으로 급격히 변화되고 있음을 단적으로 보여주는 사례이다. 이와 같은 현대 전장 환경에서는 경량화되고 높은 민첩성을 보장하는 무기체계의 전술적 가치가 더욱 부각 되고 있으며, 그 중심에 가장 화두가 되는 유도무기 분야는 휴대용 대전차 유도무기(Man-Portable Anti-Tank Guided Missile, MP-ATGM)가 있다.

MP-ATGM은 단독 보병이나 소규모 작전 단위에서도 효과적으로 운용이 가능한 장점이 기동성과 은밀성이 요구되는 현대전에 적합한 솔루션으로 평가받고 있다. 해당 무기체계의 주요 구성품은 유도탄체계, 발사장비로 구성되어 있으며, 소형전술차량, 경장갑차, 무인차량 등 다양한 운반 플랫폼에 통합하여 운용할 수 있다는 점에서 그 활용성이 매우 뛰어나다. 특히 발사 후 망각형(fire-and-forget)방식의 유도 기술과 모든 구성품 부품을 경량 소재를 적용하여 운용자의 하중 부담을 크게 줄였으며, 전장에서 생존성을 극대화하였다.

한국군 또한 이러한 흐름에 발맞춰, Figure1과 같이 기존에 소형전술차량에 탑재되어 사용되던 MP-ATGM을 Figure2와 같은 궤도형 전차 등 보다 중량급 플랫폼에 통합하려는 시도를 지속적으로 수행하고 있다. 이는 플랫폼 간 상호 운용성 확보라는 측면에서 전략적 의미가 크게 작용하고 있으며, 전차 또는 중장갑차의 자가방어 능력을 강화하고 복합적인 임무 수행 능력을 향상 시키는 데 기여할 수 있다. 그러나 플랫폼 간 기계적 특성의 차이, 특히 진동 및 충격 환경의 차이점은 단순한 무기 장착이 아닌, 운용 신뢰성 확보를 위해 정밀한 환경 적합성 검토가 필수적으로 요구된다. 소형전술차량과 궤도형 전차는 구동 방식, 현가 시스템, 무게 중심, 노면 반응 특성 등에서 큰 차이를 보이고 있으며, 이것은 무기체계가 받는 동적 하중에 대한 응답에서 중대한 영향이 있음이 예상된다.

따라서 본 연구는 기존에 소형전술차량 기반으로 설계/개발된 MP-ATGM 시스템을 궤도형 전차에 탑재하였을 때, 해당 운용 환경에서 발생할 수 있는 진동 특성의 차이를 정량적으로 분석하고, 무기체계의 성능 저하 없이 안정적인 운용이 가능할 수 있도록 감쇠 구조 설계 방안을 제안 및 검증하는 것을 목적으로 한다. 연구의 결과는 궤도형 차량을 넘어 다양한 플랫폼 간 통합 운용체계 설계 시 핵심 기초 설



Figure 1. Light Tactical Vehicle-Mounted Portable Anti-Tank Guided Missile



Figure 2. Tracked Armoured Vehicle

계 자료로 활용될 수 있으며, 향후 감쇠소재 개발 및 내환경 평가 지표 설계에도 많은 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 진동 규격 분석

2.1. 소형전술차량 수송 진동 규격

소형전술차량은 경량, 고기동성 전술 임무를 수행을 위한 차량으로, 비교적 복합적인 노면 조건과 야전 환경을 기반으로 하여 소요군들의 다양한 작전 환경에서 운용된다. 이 차량에 탑재되는 전술 장비 및 무기체계의 내환경 성능 검증은 야전 환경에서 신뢰성 확보를 위한 군용 장비의 핵심 검증 절차로서 모든 장비는 철저히 검증되어 현재 양산 및 전력화되어 소요군이 운용하고 있다. 특히 차량 운행 중 발생하는 진동과 충격은 장비의 전자·기계적 내구성 및 운용 안정성에 큰 영향을 미치므로, 이를 위해 이미 오랜기간 다양한 환경에서 확보된 시험 데이터를 기반으로 제정된 표준화 시험 규격으로 최종 검증이 요구된다.

소형전술차량의 수송진동 규격 조건은 국제적으로 통용되는 미국 국방성의 MIL-STD-810G 규격 중 514.6 절차는 차량 탑재 장비에 적용되는 진동 시험 방법과 조건을 상세히 규정하고 있다. 이 중 Category 4는 복합 차륜 차량이 노출되는 실제 작전 환경을 반영하여 설계된 진동 프로파일로서, 소형전술차량의 환경과 유사하게 다변량 노면 진동과 차량 주행 특성을 통합하여 재현하고 있다. 해당 진동 시험은 차량 전-후 방향의 X축(longitudinal direction), 차량 좌-우 방향의 Y축(tranverse direction), 차량 상-하 방향의 Z축(vertical direction) 세 축 방향에서 각각 120분 동안 진동/가진을 적용하여 시험이 수행되고 있으며, PSD(Power Spectral Density)를 활용하여 진동 강도 및 주파수 분포를 정량화한다. 특히 Z축 방향은 차량 지면과 수직으로 발생하는 충격과 진동이 집중되는 축으로, MP-ATGM뿐만 아니라 정밀 유도무기 체계와 각종 군수품 및 민감한 전술 장비의 가장 취약한 영역이다.

Table 1. Composite Wheeled Vehicle Vibration Exposure Vertical

Vertical	
Frequecy(Hz)	PSD, g^2/Hz
5	0.17590
8	0.51200
11	0.06600
12	0.05850
13	0.03480
15	0.14410
16	0.12370
20	0.02410
23	0.05360
26	0.01240
27	0.01180
30	0.03310
34	0.00860
39	0.03470
43	0.00730
45	0.01410
49	0.00840
52	0.00890
57	0.00450
67	0.01600
80	0.00370
90	0.00770
93	0.00530
98	0.00650
99	0.00630
111	0.00460
123	0.00690
128	0.00550
164	0.00310
172	0.00350
215	0.01330
264	0.00560
276	0.00960
292	0.00320
348	0.00440
417	0.00310
500	0.00080
RMS	**2.24g**

본 진동 규격에 따라 축별 진동의 RMS(Root Mean Square)값 비교한 결과, Z축 방향의 진동이 약 2.24g으로 확인되어 가장 세기가 큰 값이며 실제 야전 환경에서 작전 중 장비가 견뎌야 하는 진동 스트레스 수준을 정량적으로 제시한다. RMS는 시간 영역에서 측정된 진동 가속도 신호의 평균 에너지 수준을 나타내는 대표적인 물리량이다. 일반적으로 RMS 값이 높을수록 구조물 및 장비에 전달되는 동적 하중이 증가하는 것으로 해석할 수 있으며, 반복 진동 환경에서는 기계적 피로 누적과 전자 부품의 성능 안정성에 영향을 미칠 수 있다

해당 규격의 주파수별 PSD 값은 상세하게 Table 1과 프로파일은 Figure 3으로 확인 할 수 있다[1]. 또한, 향후 궤도형 차량의 수송진동 규격과 비교 검토 시 가장 강력한 Z축 방향의 진동 수치를 기준으로 적용하여 비교 분석할 것이다.

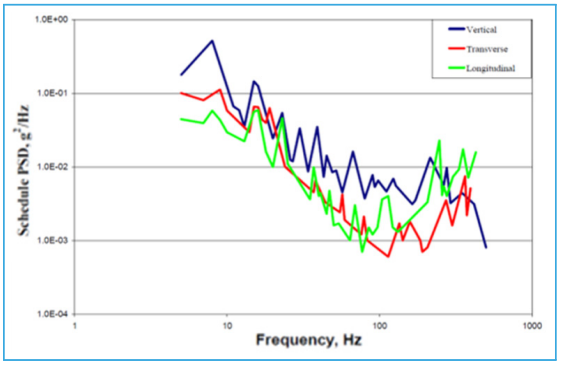


Figure 3. Composite Wheeled Vehicle Vibration Exposure Curve

2.2. 궤도형 차량 수송 진동 규격

궤도형 차량은 구동 및 형상 구조가 트랙(track) 기반으로 이루어져 있어 지면과의 접촉면이 넓고 지속적 편이다. 이러한 구조는 불규칙한 지형 주행 시 연속적인 충격 전파를 유발하며, 각 궤도 마디(link)가 노면과 충돌할 때 발생하는 고주파 진동이 차체에 직접 전달되는 경향이 있다. 그 결과, 소형전술차량에 비해 더 복잡한 진동 스펙트럼을 형성하며, 고주파 대역의 에너지 성분도 증가하게 된다.

궤도형 차량의 진동 환경을 재현하기 위한 기준으로 MIL-STD-810C에 포함된 514.2-VI tracked vehicles 관련 시험 조건을 활용하였다. 해당 규격은 궤도 기반 플랫폼에 대한 주파수 분포와 진동 에너지 수준이 정량적으로 정의되어 있어, 소형전술차량 환경과의 상대 비교를 수행하는 데 유용한 기준이 될것이다. 특히 동일한 형식의 PSD 기반 데이터를 활용할 수 있다는 점에서, 시험 결과에 대한 정량적 해석 및 플랫폼 간 비교 분석에 적합한 기준으로 판단하였다. 한편, 최신 규격인 MIL-STD-810G 및 H에서는 개별 플랫폼 특성에 맞춘 테일러링(tailoring) 절차를 중심으로 진동시험 조건을 설정하도록 권장하고 있으며, 특정 궤도형 차량에 대한 일반화된 진동 프로파일은 명시되어 있지 않다. 이로 인해 플랫폼 간 상대 비교를 수행하는 경우 시험 기준 선정에 일정 수준의 제약이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상호 비교 가능성과 정량적 분석의 일관성을 확보하기 위해, 기준값이 명확하게 정의된 기존 규격을 적용하였다. 또한, 기존 공개 자료와 관련 선행연구들을 종합적으로 검토한 결과, 궤도형 차량은 주행 과정에서 트랙과 지면의 반복 접촉에 의해 수직 방향 진동 성분이 상대적으로 크게 나타나며, 저주파 영역과 고주파 영역이 동시에 포함된 복합적인 진동 특성을 가지는 것으로 확인된다. 이러한 특성은 적용된 시험 기준의 주파수 분포 경향과도 일정 부분 유사성을 보이며, 결과적으로 해당 조건은 보수적인 내환경 검증 기준으로 활용 가능하다고 판단하였다. 다만 적용된 기준은 과거 개발된 궤도형 플랫폼의 특성을 기반으로 설정된 시험 규격이므로, 최신 궤도형 장비에 적용되는 현가장치 기술 및 진동 저감 구조를 완전하게 반영한다고 보기는 어렵다. 따라서 향후에는 최신 MIL-STD 규격에서 제시하는 테일러링 절차와 실차 계측 데이터를 함께 적용하여, 실제 운용 환경에 보다 근접한 진동 평가 체계를 구축할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 장갑차 전용 플랫폼의 진동 특성을 명확히 반영하기 위해 정량적인 진동 세기와 주파수 값이 반영되어 있는 MIL-STD-810C 기준인 Table2와 Figure 4를 인용하였다[2].

Table 2. Tracked Vehicles Vibration Exposure Chart

Equipment Conditions	Test Time Schedule (Per Axis)		Curve
	Maximum Cycling Time	Sweep T	
Tracked Vehicles	3 Hours	15min 5-500-5Hz	W

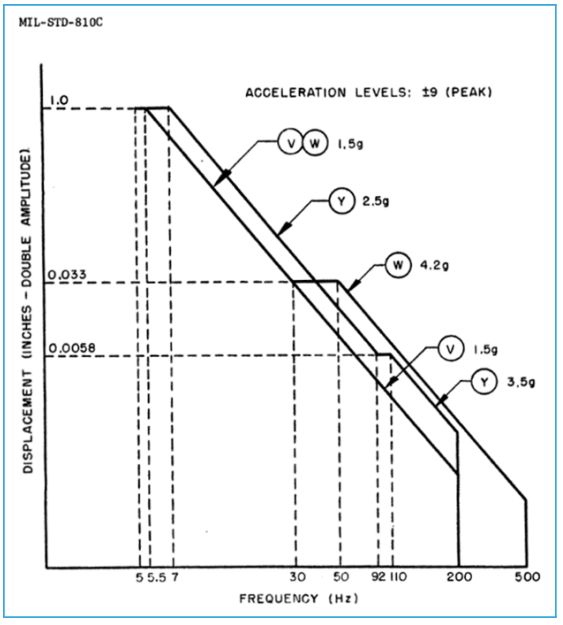


Figure 4. Tracked Vehicle Vibration Exposure Curve

해당 규격에 따르면 수송진동과 유사하게 각 X, Y, Z축별로 180분 이상 진동시험을 수행해야 하며, 진동 PSD의 면적이 넓고 고주파 대역까지 확장된 양상을 보인다. 특히 궤도형 전차는 주행 속도, 노면 특성, 트랙 마모 상태 등 많은 변수로 인해 진동 스펙트럼이 더욱 가변적으로 변화할 수 있으므로, 시험 조건 선정 시 이에 대한 충분한 통계적 데이터 확보와 시뮬레이션 검증이 병행되어야 한다. 또한, 복합 플랫폼 운용이 증가함에 따라, 플랫폼 맞춤형 내환경 시험 프로파일 설정이 향후 무기체계 신뢰성 확보에 있어 핵심 요소로 작용할 것이다. 따라서 앞서 언급한 것처럼 혼선을 방지하기 위해 MIL-STD-810의 최신 규격이 아닌 정량적 진동 세기와 주파수 값이 명시된 810C를 규격을 검토에 인용하였다.

2.3. 소형전술차량과 궤도형 차량 수송 진동 규격 비교

소형전술차량과 궤도형 차량 간의 진동 특성 차이가 MP-ATGM의 성능에 어떤 영향을 미치는지를 정량적으로 파악하기 위해, 본 연구에서는 궤도형 차량의 진동 규격인 Table 2를 동일한 조건의 무기체계를 궤도형 차량에 탑재 상황을 가정하여 진동가진기 기반의 시뮬레이션 시험을 수행하였다. 실험은 Z축 방향을 중심으로 진행되었으며, 이는 앞서 분석된 바와 같이 두 플랫폼에서 가장 높은 진동 강도를 나타내는 축이기 때문이다.

시험 조건은 MIL-STD-810C Table 2를 기반으로 설정되었으며, 고정 주파수 범위는 10Hz에서 500Hz까지 PSD 스펙트럼은 플랫폼별 실측 데이터를 근거로 하여 테일러링하였다. 이를 통해 실제 운용 환경에서 발생 가능한 진동 응답을 최대한 현실적으로 재현하고자 하였다. 시험체에는 1축 가속도 센서를 부착하여 응답 진동 수준을 측정하고, FFT(Fast Fourier Transform)를 활용하여 주파수 대역별 공진 및 증폭 현상을 정밀 분석하였다.

해당 내용 분석 결과에 따르면 궤도형 전차 플랫폼에서 계측된 진동 PSD는 약 80Hz 이상의 중·고주파 영역에서 소형전술차량에 비해 상대적으로 큰 진폭을 나타내는 경향이 확인되었다. 또한, 저주파 대역(약 30~50Hz)에서는 특정 구조물과의 공진 현상이 관찰되었다. 이런 현상은 플랫폼에 장착되는 MP-ATGM 체계 및 하위구성품의 구조물, 전자 회로 및 내부 부품과의 공진 가능성을 높이며, 반복 피로에 의한 전기적 성능 불량 및 기구 구조물 손상을 초래할 수 있는 요소로 작용한다.

RMS 값은 MIL-STD-810 기반 통합 가중계수 산출 방식에 따라 계산되었으며, 소형전술차량 규격 기준 대비 궤도형 차량 규격에서의 가중계수는 1.86으로 도출되었다. 소형전술차량 규격은 MIL-STD-810G 기반의 random vibration 조건이며, 궤도형 차량 규격은 MIL-STD-810C 기반의 sine vibration 조건으로 구성되어 있다. 따라서 두 시험 결과를 단순 RMS 값

만으로 직접 비교할 경우 가진 방식과 시험 시간 차이에 따른 피로 누적 특성이 충분히 반영되지 않는 한계가 존재한다. 이에 따라 본 논문에서는 서로 다른 진동 입력 조건 간 상대적인 진동 수준을 비교하기 위하여 random vibration equivalence approach를 참고한 공학적 환산 방법을 적용하였다[3].

가중계수 산출에는 Tom Irvine이 제안한 time-scaling 기반 random vibration 등가 환산 개념을 활용하였다[3]. 해당 방법은 진동 피로 손상이 시험 지속 시간과 진동 에너지 수준의 함수 관계를 가진다고 가정하며, 시험 시간 변화에 따른 등가 진동 수준을 식(1)과 같이 표현한다.

$$(\frac{W_0}{W_1}) = (\frac{T1}{T2})^{1/M} \quad (1)$$

여기서 W_0와 W_1은 등가 random vibration level(G^2/Hz)을 의미하며, T_1와 T_2은 각 시험 조건의 가진 시간을 나타낸다. 또한, M은 재료 및 구조물의 피로 특성을 반영하는 계수로, 일반적인 random vibration 환경에서는 4를 적용한다[3]. 그리고 MIL-STD-810C 기반 궤도형 차량 진동시험 시간을 0.25시간(15분), MIL-STD-810G 기반 소형전술차량 조건 시간을 2시간으로 적용하였다. 이를 환산식에 대입한 결과는 식(2)와 같다.

$$(\frac{W_0}{W_1}) = (\frac{2}{0.25})^{1/4} = 1.86 \quad (2)$$

따라서 1.86의 가중계수는 시험 지속 시간과 가진 방식 차이를 고려하여 등가 random vibration 수준으로 환산한 상대 비교 계수이며 플랫폼 간 상대적인 진동 환경 차이를 보다 정량적으로 비교하기 위하여 환산 가중계수를 추가적으로 적용하였다[6]. 그러므로 MP-ATGM을 포함하여 동일 구조물 및 부품이 궤도형 차량에 탑재될 경우, 소형전술차량과 비교하여 진동 하중이 평균적으로 약 86% 더 크게 작용한다는 것을 의미한다.

해당 기준을 실험 측정 결과에 반영한 Table 3에 따르면 궤도형 차량의 Z축 RMS 값은 3.06g로 나타나, 소형전술차량 Z축 RMS 2.24g 대비 약 1.36배 이상 높은 진동 강도를 가지는 것으로 확인되었다.

Table 3. Vibration Response Comparison Between Wheeld and Tracked vehicles

Frequecy(Hz)	Wheel Vehicle PSD(g^2/Hz)	Tracked Vehicle PSD(g^2/Hz)
5	0.17590	0.04179
8	0.51200	0.06604
11	0.06600	0.04324
12	0.05850	0.03863
13	0.03480	0.03500
15	0.14410	0.03202
16	0.12370	0.02941
20	0.02410	0.02375
23	0.05360	0.02099
26	0.01240	0.01786
27	0.01180	0.01703
30	0.03310	0.01623
34	0.00860	0.02238
39	0.03470	0.03386
43	0.00730	0.04472
45	0.01410	0.05314
49	0.00840	0.06749
52	0.00890	0.06894
57	0.00450	0.06292
67	0.01600	0.05354
80	0.00370	0.04515
90	0.00770	0.04035
93	0.00530	0.03925
98	0.00650	0.03753
99	0.00630	0.03671
111	0.00460	0.03277
123	0.00690	0.03069
128	0.00550	0.02841
164	0.00310	0.02202
172	0.00350	0.02087
215	0.01330	0.01686
264	0.00560	0.01393
276	0.00960	0.01323
292	0.00320	0.01229
348	0.00440	0.01028
417	0.00310	0.00865
500	0.00080	0.00001
RMS	**2.24g**	**3.06g**

이것은 MP-ATGM이 소형전술차량에 탑재되는 것보다 궤도형 차량에 탑재될 경우 구조물과 내부 회로, 커넥터, 센서 부위 등에 보다 강한 기계적 하중이 인가됨을 의미하며, 구조물 피로, 체결류 풀림, 회로카드조립체(Printed Circuit Board, PCB) 손상 등 다양한 신뢰성 문제를 유발할 가능성이 높다. 따라서 소형전술차량에 장착 환경이 검증된 MD-ATGM 체계를 궤도형 차량에 장착할 경우 진동 감쇠 개선이 요구된다[4].

3. 개선 방안

3.1. 진동 감쇠 방안 설계

이전 소형전술차량과 궤도형 차량의 진동 규격 비교 분석 결과에 따라 궤도형 차량에 MP-ATGM 시스템을 적재할 경우 진동 하중 완화를 위한 감쇠 구조의 필요성이 명확해졌다. 따라서 본 연구에서는 적용 가능성과 제품 실효성을 동시에 만족시킬 수 있는 감쇠 소재로 실리콘 고무(silicone rubber)를 선정하였다. 실리콘 고무는 비선형 감쇠 특성을 가지며, 낮은 영률과 높은 변형 회복력을 보유하고 있어 진동 흡수 능력이 탁월한 것으로 알려져 있다[5]. 또한, 극한 온도 및 습도 조건에서도 물성 변화가 적어 군수품 내환경 조건에 적합하며 현재 MP-ATGM을 소형전술차량에서 다단 적재 시 완충 작용을 위해 사용되고 있다. 그뿐만 아니라 다른 고무 재질보다 수급이 쉬워 정비성에 용이하다.

실리콘 고무 패드는 Shore A 기준 경도 50의 사양으로 제작되었으며, 이는 일반적인 진동 흡수 용도의 기준 경도 범위 내에 해당한다. 구조 설계 측면에서는 실리콘 고무를 궤도형 차량 바닥면과 결합이 되는 MP-ATGM의 하부 결합부에 삽입하여 플랫폼으로부터 전달되는 진동 하중이 MP-ATGM 본체에 전달되지 않고 중간에서 감쇠되게 하였다.

3.2. 감쇠 구조의 동특성 검토

감쇠 구조 적용에 따른 진동 저감 메커니즘의 이론적 검토를 위해 MP-ATGM 시스템과 실리콘 고무 패드로 구성된 장착 구조를 단순화한 1자유도 질량-스프링-감쇠계(mass-spring-damper system) 모델로 가정하였다. 해당 모델은 외부 가진에 의해 발생한 진동이 감쇠 구조를 거쳐 상부 구조물로 전달되는 과정을 해석하기 위한 대표적인 동역학 모델이다. 일반적으로 구조계의 고유진동수는 질량과 강성의 상관관계에 의해 결정되며, 식(3)으로 표현된다[6].

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3}$$

여기서 m은 상부 구조물의 등가 질량이며, k는 감쇠 구조의 등가 강성을 의미한다. 동일 질량 조건에서 감쇠재의 두께가 증가할 경우 유효 강성은 감소하는 경향을 나타내며, 이에 따라 시스템의 고유진동수 또한 상대적으로 낮은 주파수 영역으로 이동할 가능성이 존재한다.

본 연구에 적용된 실리콘 고무는 점탄성 특성을 가지는 재료로, 반복 하중 조건에서 입력된 진동 에너지의 일부를 내부 마찰 형태로 소산시키는 특성이 있다[7]. 이러한 특성은 특정 주파수 영역에서 진동 전달률을 감소시키는 데 영향을 줄 수 있으며, 궤도형 차량과 같이 중·고주파 성분이 복합적으로 존재하는 환경에서 효과적인 감쇠 특성을 나타낼 가능성이 있다. 또한, 감쇠재 두께 변화는 구조계의 강성과 감쇠 특성에 영향을 끼치므로, 공진 주파수 이동 및 전달 진동 응답 변화가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 감쇠재 두께 조건에 따른 진동 응답 특성 변화를 비교하기 위하여 단계별 두께 조건을 적용한 진동 시험을 수행하였다.

3.3. 진동 측정 시스템 구성 및 방안

전체 측정 시스템 구성은 Figure 5와 같이 구성하였으며 패드의 두께는 각각 10mm, 20mm, 30mm, 40mm로 증가 시키면서 실험을 수행하였다. 이는

두께에 따른 감쇠 성능 변화를 정량적으로 분석하기 위함이다.

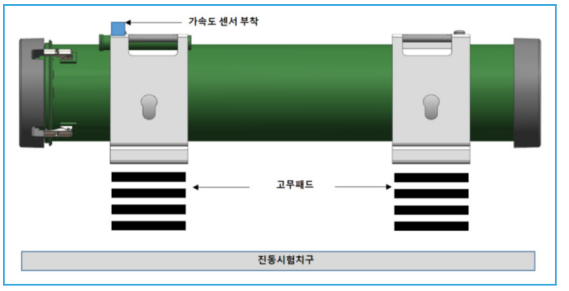


Figure 5. Vibration Mitigation System

실험은 동일한 궤도형 차량의 진동 규격 조건 MIL-STD-801C의 진동 조건하에서 각 두께별 Grms 값(RMS 기준 가속도 응답)과 공진 주파수 이동량을 비교 분석하는 방식을 적용한다. 구조물 고유 진동수는 감쇠체 도입 시 변경될 수 있으므로, 패드 적용 전후의 주파수 응답 스펙트럼도 함께 측정한다. 그리고 본 연구에서 실시한 진동실험은 Figure 6과 같이 LING Dynamic Systems가 제조한 전기역학식 진동 시험기 V9-440T/HBT1500C를 사용하여 수행하였다.



Figure 6. Electro-Dynamic Vibration Shaker

LING Dynamic Systems의 V9 시리즈는 항공우주, 자동차, 방위 산업 분야를 포함한 다양한 산업 분야에서 장시간 고하중 진동 시험을 위한 장비로 널리 활용되고 있다. 이 시험기는 비교적 넓은 주파수 범위에 걸쳐 주기적 및 무작위 진동 입력을 안정적으로 제공할 수 있으며, 중형에서 대형 시험체의 운동 응답 특성을 평가하기 위한 충분한 구조체 하중 지원 능력을 갖추고 있다[6]. 특히 V9-440T/HBT1500C 모델은 고출력 전기역학식 구동부를 포함하고 수냉식 설계를 적용해 장시간 시험 수행 시에도 열 안정성을 확보가 가능하다.

이러한 높은 연속 힘 출력과 광범위 주파수 응답 능력은 실제 야전환경을 고려한 운송 및 작전 환경에서 발생하는 장비의 실제 탑재 진동 스펙트럼을 정밀하게 재현하는 데 기여하며, 이는 본 연구에서 적용한 소형전술차량 및 궤도형 차량 운송 진동 조건하에서 MP-ATGM 시스템의 동적 내구성 및 기능 신뢰성을 평가하는 데 필수적인 요소라고 판단된다.

3.4. 진동 실험 결과 및 해석

각 실리콘 고무 패드 두께에 따른 진동 감쇠 효과를 비교한 결과, 두께 증가에 따라 진동 응답 강도는 유의미하게 감소하는 경향을 보였다. Figure 7과 같이 Grms 값 기준으로 볼 때, 10mm 두께의 경우 감쇠 효과는 제한적이었으며, 20mm 이상부터는 점진적으로 진동 에너지의 흡수가 증가함을 확인할 수 있다. 특히 30mm 두께 이상부터는 Z축 진동 응답이 궤도형 차량 플랫폼 기준 목표치에 근접하거나 초과 감소하였으며, 40mm에서는 명확히 기준 이하로 감소하였다.

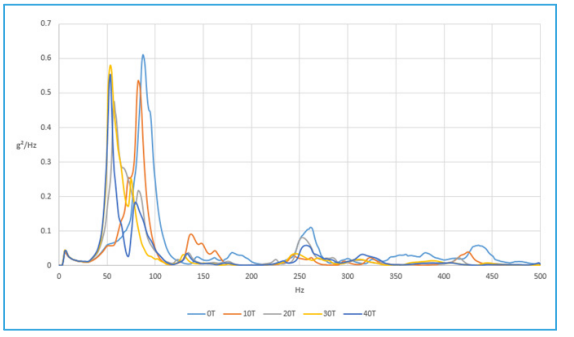


Figure 7. Effect of Rubber Thickness Increase on Vibration Response Intensity

구체적으로 Table 4와 같이 40mm 실리콘 고무 패드 적용 시 궤도형 전차 조건에서 측정된 Grms 값은 약 2.1g으로 소형전술차량 기준 환경과 유사한 수준까지 감쇠되었다. 공진 주파수 측면에서도, 패드의 도입에 따라 공진 피크가 저주파수 방향으로 소폭 이동하였으며, 전체 PSD 스펙트럼의 평탄화(flattening) 현상이 관찰되었다. 추가적으로 감쇠 패드 적용 이후 1차 공진주파수가 기존 대비 저주파 영역으로 일부 이동하는 경향은 실리콘 고무가 삽입되면서 시스템 전체의 유효 강성이 감소하고, 구조계의 동적 응답 특성이 변화하였기 때문으로 판단된다. 일반적으로 구조물의 고유진동수가 낮아질 경우 특정 저주파 가진 조건에서는 공진 발생 가능성이 증가할 수 있으나, 본 연구 대상인 MP-ATGM 시스템의 경우 주요 전장품 및 장착 구조물의 민감 응답 영역이 상대적으로 중·고주파 대역에 분포하는 특성을 가진다. 따라서 감쇠 구조 적용에 따른 공진주파수의 저주파 이동은 실제 운용 환경에서 중·고주파 진동 에너지의 전달 감소 측면에서 유리하게 작용할 가능성이 있는 것으로 분석된다. 또한, 두께 증가에 따라 PSD 응답 곡선의 국부 피크가 완화되고 전체 응답 분포가 보다 균일한 형태를 나타내는 경향이 확인되었으며, 이는 특정 주파수 영역에 진동 에너지가 집중되는 현상이 감소하였음을 의미한다. 결과적으로 40mm 조건은 단순한 진동 크기 저감뿐만 아니라 구조계 전반의 동적 안정성 측면에서도 상대적으로 유리한 특성을 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 감쇠체가 특정 주파수에서의 진동 증폭을 억제하고, 보다 균일한 진동 응답 특성을 유도함을 알 수 있다.

Table 4. Effect of Rubber Thickness Increase on Vibration Response Intensity

Rubber T	1st Resonance	G Peak	Grms
0T	87.5Hz	0.6	4.8
10T	82.5Hz	0.53	4.0
20T	57.5Hz	0.47	3.1
30T	50.4Hz	0.57	2.3
40T	46.6Hz	0.55	2.1

이러한 실험 결과는 진동 하중에 대한 감쇠체 두께 최적화의 필요성을 뒷받침하며, 특히 고무 패드가 일정 이상 두께를 확보해야만 충분한 진동 차단 효과를 나타낸다는 점을 실증적으로 보여준다. 추가적으로 실험 결과의 신뢰성과 재현성을 확보하기 위해 각 실리콘 고무 패드 두께 조건에 대한 진동시험은 동일 조건에서 총 3회 반복 수행하였다. 진동 응답 값은 반복 측정 결과의 평균값을 적용하였으며, Grms 측정 편차는 전 조건에서 ±0.05g 범위 내로 나타났다. 각 시험 종료 후에는 MP-ATGM 시스템에 대한 기능 점검을 실시하여 통신 상태, 응답 지연 여부 및 주요 하위 구성품의 정상 동작 여부를 확인하였다.

기능 점검결과 40mm 조건에서는 모든 하위구성품 및 유도 성능 관련 부품이 정상 작동하였으며, 반면 10mm, 20mm 조건에서는 간헐적 통신 장애 및 응답 지연 현상이 일부 관찰되었다. 이와 같은 결과는 무기 체계의 장착 플랫폼이 변경될 경우 진동 감쇠 성능이 무기체계의 핵심 기능 유지와 직결된다는 점을 시사하며, 감쇠 구조물 설계 시 두께, 재질, 적용 위치 등 다변수 최적화를 통해 신뢰성을 확보하는 것이 필수적임을 강조한다.

4. 결 론

본 연구는 기존에 소형전술차량 기반으로 개발된 MP-ATGM 시스템을 궤도형 전차에 탑재하였을 때 발생할 수 있는 진동 환경의 차이와 그에 따른 기계적, 전기적 영향성을 실험적으로 규명하였다. 실험 결과, 궤도형 전차의 Z축 진동 강도는 소형전술차량 대비 약 1.36배 이상 높은 수준이며, 고주파 진동 구성 비율 또한 증가하여 시스템 내부의 민감한 전자장비에 더욱 불리한 환경을 조성함을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 제안된 실리콘 고무 기반 감쇠 구조물은 단순한 진동 완충을 넘어, 시스템 전반의 동적 응답 특성을 개선하는 효과를 보였다. 특히 40mm 두께의 실리콘 고무 패드는 진동 하중을 소형전술차량 수준으로 감쇠시키는 데 효과적이었으

며, 전자 장비의 정상 작동을 보장하는 수준의 응답 특성을 확보하였다. 이 결과는 장비 신뢰성 확보를 위한 실질적 설계 기준으로 제시될 수 있다.

향후 연구에서는 다음과 같은 방향으로 확장이 예상된다. 첫 번째로 온도, 습도, 충격 등 다양한 환경 변수를 포함한 다중한 인자 시험을 수행하는 복합 환경 평가, 두 번째로 X, Y, Z축 방향의 공진 영향성을 포함한 복합 진동 하중 해석 및 다축 진동 시험, 세 번째로는 실리콘 고무 외에 메타소재, 점탐성 재료 등 신규 감쇠 소재의 적용성 검토를 통한 고급 감쇠 소재 개발 등을 예상할 수 있다.

결과적으로 궤도형 전차는 주행 속도, 노면 특성, 트랙 마모 상태에 따라 진동 스펙트럼이 더욱 가변적으로 변화할 수 있으므로, 시험 조건 선정 시 이에 대한 충분한 통계적 데이터 확보와 시뮬레이션 검증이 병행되어야 한다. 향후 복합 플랫폼 운용이 증가함에 따라, 플랫폼 맞춤형 내환경 시험 프로파일 설정이 무기체계 신뢰성 확보에 있어 핵심 요소로 작용할 것이며 금번 연구 결과가 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. U.S. Department of Defense. (2008). *Environmental engineering considerations and laboratory tests* (MIL-STD-810G).
2. U.S. Department of Defense. (1975). *Environmental test methods* (MIL-STD-810C). Department of Defense.
3. Irvine, T. (2010). *Time-scaling equivalence methods for random vibration testing* (Rev. J). Vibrationdata.
4. Harris, C. M., & Crede, C. E. (Eds.). (1961). *Shock and vibration handbook*. McGraw-Hill.
5. Rao, S. S. (2017). *Mechanical vibrations* (6th ed.). Pearson.
6. Inman, D. J. (2021). *Engineering vibration* (5th ed.). Pearson.
7. Landel, R. F., & Nielsen, L. E. (1993). *Mechanical properties of polymers and composites* (2nd ed.). Marcel Dekker.

군용 고정익 항공기 탈출계통 사출모드선택기 신뢰성 개선 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Reliability Improvement of the Ejection Mode Selector of Fixed-Wing Military Aircraft

양진용†, Jinyong Yang
국방기술품질원, 항공1팀, 연구원
Researcher, Aviation System Team 1, Defense Agency for Technology and Quality

김형철, Hyungchul Kim
국방기술품질원, 항공1팀, 연구원
Researcher, Aviation System Team 1, Defense Agency for Technology and Quality

최형준, Hyoungjun Choi
국방기술품질원, 감항인증1팀, 선임연구원
Senior Researcher, Airworthiness Certification Team 1, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

The ejection mode selector is a device designed to select an ejection sequence based on the number of pilots in a tandem seat supersonic fixed-wing aircraft. To transmit the initiation signal through the designated path the device aligns the internal gas channels with the selected mode. The mode selection process involves pulling the handle shaft, rotating it to the required position for channel alignment, and reseating the shaft into the housing to secure the channel connection. This study analyzes the root causes of quality issues, specifically improper seating of the handle shaft and generation of internal debris, and proposes an improved configuration to address these issues. Design modifications, including the selection of alternative materials for the rings and bushings near the spring, and an optimized coating for the handle shaft were implemented. Verification parameters were established for both operational and extreme environmental conditions. The effectiveness and reliability of the improved configuration were validated through analyses and tests.

keywords : ejection mode selector, eject system, fixed-wing aircraft, root cause analysis

† Corresponding Author : Jinyong Yang
Tel : +82-55-751-5337, Fax : +82-55-751-5266, email : jyang@dtaq.re.kr
Defense Agency for Technology and Quality, 52851, 420, Dongjinro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 29th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

항공기의 발명은 이동, 운송 등 일상부터 전쟁까지 인간사의 다양한 부분에 변화를 가져왔다. 이동공간은 지상에서 공중으로 확장되었고, 물리적 장애물의 감소는 이동 소요시간을 획기적으로 줄이게 되었다. 다만 공중에서 발생하는 기체 결함과 피격은 조종사와 탑승자에게 피할 수 없는 위협으로 작용할 수 있다. 이렇듯 조종 불능에 빠진 항공기로부터 조종사와 탑승자의 안전을 위해 다양한 탈출 방식과 메커니즘 개선 연구가 수행되어 오고 있다.

1910년대 초반 낙하산을 활용한 항공기 탈출이 실시되었다. 1912년 미 육군 대위 Albert Berry는 약 460m 상공에서 운행 중인 복엽기에서 탈출을 수행했다[1]. 뛰어내리는 탈출자의 무게로 인해 고정된 끈이 낙하산을 당기며 전개되는 방식으로 작동되었다. 이후 1919년 Leslie Irvin은 리프코드를 당기는 형태로 낙하산을 전개하여 탈출에 성공했고, 이는 표준 비상장비로서의 낙하산 전개 방식을 정의하게 되었다[2].

이후 높은 속도에서 조종사가 기체로부터 충돌 없이 안전한 사출고도 및 거리를 확보할 수 있는 방법으로 사출좌석이 연구되었다. 독일과 스웨덴은 조종사와 시트를 함께 사출하는 방식의 탈출 방식에 대한 연구를 개별적으로 수행하였다. 독일 Heinkel 사는 He280 항공기에 압축공기를 활용한 좌석사출 방식의 탈출방법을 개발하였다. 이후 1942년 Helmut Schenk는 He280 시제기 비행시험 중 조종불능 상태에 빠져 좌석사출 방식으로 탈출을 실시하였다[3]. 스웨덴은 폭약 형태의 카트리지로 좌석을 탄도학적 궤적에 따라 사출하는 방식에 대한 연구를 수행하였다[4]. 1946년 스웨덴 공군 조종사는 J21 항공기와 J22 항공기의 공중 충돌 사고에서 탈출계통을 작동시켜, 비상 상황에서 카트리지 좌석 사출을 사출시킨 최초 사례로 기록되었다[5]. 이는 지금까지도 사용되는 사출좌석의 기술 표준으로 자리 잡게 되었다.

이후 항공기의 속도가 더욱 빨라지며, 안전한 탈출을 위해 폭약 카트리지 방식보다 더 빠른 좌석사출 매커니즘 개발이 요구되었다. 고속의 제트기 구조물로부터 충분히 안전한 거리를 확보하기 위해서, 폭약 카트리지는 높은 폭발력이 필요했고 이는 조종사의 몸에 과도한 G-force를 가하게 되었다. 따라서 탈출 시 지속적인 추력을 작용하여, 낮은 초기 가속도로도 충분한 사출고도를 확보할 수 있는 로켓추진 방식의 사출좌석이 연구되었다[6]. 로켓추진 방식의 사출좌석은 1958년 미국 Convair F-102 항공기에 최초로 적용되었다[7-8]. 비슷한 시기 영국 역시 로켓추진 사출좌석 방식을 연구하였다. Martin-Baker 사는 고도가 0m인 지상에서, 속도 역시 0m/s인 상태에서의 사출을 다루는 0-0(zero-zero) 기술을 연구하였고, 1962년 좌석사출 시험을 성공하여 저고도 저속도에서도 안전한 탈출 기술을 최초로 시연하였다[9]. 이후 이는 현재까지 적용되는 군용 항공기 좌석사출에 표준으로 지정되어 세계적으로 사용되고 있다. 이렇듯 탈출하는 조종사의 신체에 가해지는 부하를 줄이는 방향의 좌석 사출 연구가 다수 수행되어 왔으며, 현대에는 좌석 사출 시 고도, 자세, 속도를 탐지하여 낙하산을 전개하는 계통설계가 이루어지고 있다.

현재 전 세계의 전투기는 기술 발전에 따라 이전보다 점차 높은 속도에서 운용되고 있다. 높은 속도에서도 조종사의 안전을 담보하기 위해 탈출 계통은 이전보다 계통 구성이 복잡해지고 있다. 특히 복좌기는 짧은 시간 안에 두 조종사의 사출을 성공해야 하므로, 더욱 복잡한 작동 메커니즘과 구성을 갖는다. 위 기능을 구현하는 구성품인 사출모드선택기는 탑승한 조종사의 인원과 전/후방 사출순서 등에 따라 사출모드를 지정하도록 하여, 복좌기 조종사들의 안전한 사출에 기여한다[10].

본 연구에서는 초음속 고정익 항공기 탈출계통 중 사출모드선택기에 발생한 결함의 원인을 분석하였다. 원인 제거를 위해 하위 조립체 대체 재질 적용, 표면처리 변경 등의 개선형상을 제시하였다. 개발 시 검토했던 시험 항목 및 방법을 통해 개선형상의 기능/성능 충족 여부를 입증하였다.

2. 탈출계통 결함 분석

2.1. 탈출계통 구성 및 기능

항공기 계통 결함으로 인한 조종 불능 상태와 적으로부터의 피격 상황은 항공기 조종사 안전에 위협으로 작용한다. 조종이 가능하지 않은 위협적인 상황에서 조종사는 사출을 결심하게 된다. 이 경우 물리적인 탈출도 중요하지만, 조종사의 인체에 가해지는 상해가 크지 않도록 안전한 좌석 사출이 필요하다.

초음속 군용 고정익 항공기의 조종실 계통은 단좌 혹은 복좌 형태로 설계된다. 복좌기 두 조종사의 안전한 탈출에는 함께 탑승한 조종사의 존재 또한 위협이 될 수 있다. 위와 같은 위협으로부터 회피를 위해서는 순차적인 사출이 요구된다. 또한, 항공기는 저속부터 고속까지 넓은 속도 범위에서 운용되므로, 좌석 사출 시 고려되는 외력 및 환경 조건이 다양하다. 위와 같은 이유로 탈출계통은 개념설계부터 다양한 변수를 내포하고 있고, 계통설계는 높은 신뢰도를 요구함과 동시에 복잡성을 수반한다.

탈출계통은 Figure 1과 같이 탈출장치와 캐노피 작동장치, 장구류 등으로 구성된다. 탈출장치는 캐노피 내의 좌석 사출과 관련된 구성요소로 사출좌석, 캐노피잠금해제장치, 캐노피사출로켓모터, 캐노피사출핸들, 순차제어장치, 사출모드선택기 등이 포함된다. 캐노피작동장치는 캐노피의 개폐 구동 구성요소이며, 하위 구성품으로는 캐노피 작동기, 수동작동장치, 유연토크축, 캐노피 스위치 등이 있다. 그리고 기타 조종사의 생환에 필요한 장구류가 탈출계통에 포함된다.

탈출계통 작동 시 단/복좌 형태에 따라 작동순서에는 차이가 발생한다. 또한 후방석에 위치한 사출모드선택기 설정 위치에 따라 작동 순서가 달라진다. 복좌 항공기에 2명의 조종사 탑승 시 사출모드선택기를 both 상태로 설정한 형상을 기준으로 조종사의 비상탈출 결정에 따른 탈출계통 작동 순서는 다음

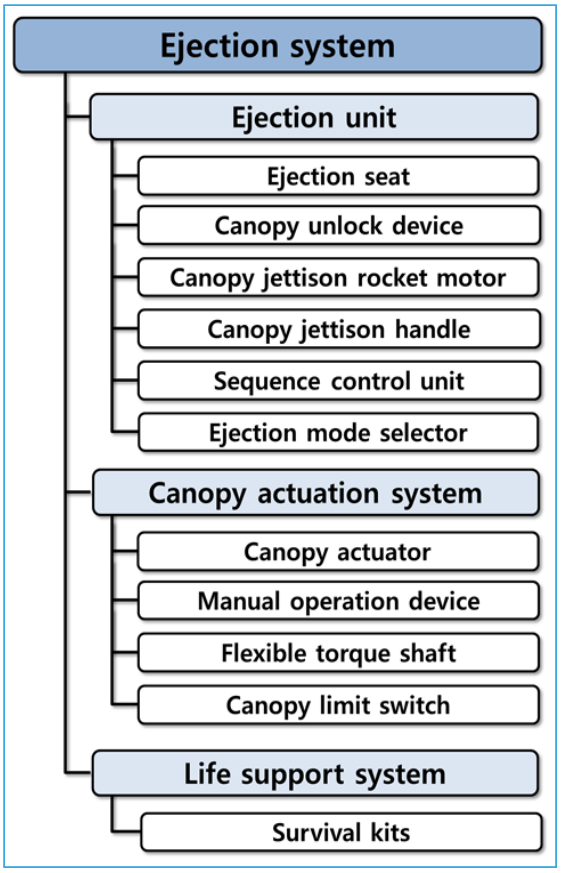


Figure 1. Components of ejection system in aircraft

Figure 2와 같다.

비상탈출을 결정하여 사출핸들을 당겼을 때, 사출시점에서 FDR(Flight Data Recorder) 저장을 위한 동작이 시작된다. 이에 따라 zeroise 커터가 작동하여 기체 내 임무 및 비행 관련 정보를 삭제한다. 다음으로는 캐노피의 잠금이 해제되고, FDR 저장신호를 송출한 후 캐노피사출로켓이 작동하며 캐노피를 사출한다. 이후 후방석-전방석 순서 사출을 위해 지연된 시간 간격을 두고 순차적으로 좌석 사출이 진행된다. 먼저 조종사의 신체를 보호하기 위해 조종사의 사출자세를 고정한다. 다음으로는 좌석 초동 작동이 시작되며, 비상산소를 공급하게 된다. 좌석이 항공기에서 분리된 후 좌석의 초기 자세 제어를 위해 좌석제어기가 동작한다.

분리된 좌석의 고도와 속도를 감지하고, 감속낙하

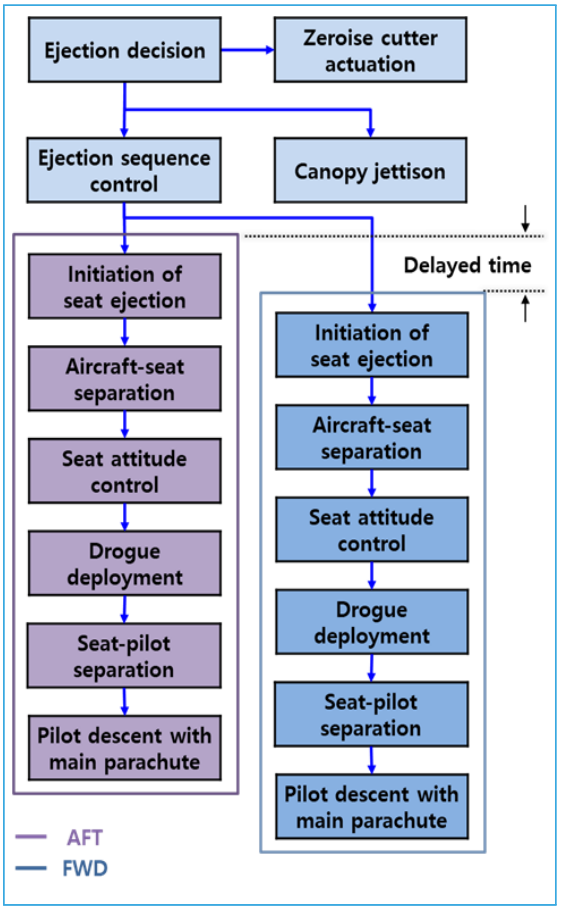


Figure 2. Flow diagram of seat ejection in both mode

산이 전개, 팽창되며 좌석 자세와 피치를 제어하여 초기 사출 안정성을 확보한다. 이후 주 낙하산이 전개가 시작되며 주 낙하산 전개 안정성 확보를 위해 감속 낙하산의 구속을 순차적으로 해제한다. 다음으로 하네스와 팔/다리 보호장치가 분리되며 좌석과 조종사의 분리가 이루어진다. 최종적으로 주 낙하산이 팽창하고, 생환을 위한 장구류가 전개되며 탈출계통 작동이 종료된다.

2.2. 사출모드선택기 기능 및 구성

결함이 발생한 부위는 복좌기 후방석에서 장착된 사출모드선택기로, 전방좌석과 후방좌석의 안전한 사출을 위해 좌석들의 사출 형태를 선택하는 밸브이다. 사출형태는 아래 Table 1과 같이 3가지 모드로 구분된다. both 모드는 사출핸들 조작 시 후방석 사출 이후 일정한 지연 시간을 두고 전방석이 사출되는 작동 형태를 갖는다. normal 모드는 사출핸들 작동 위치에 따라 상이한 사출 형태를 갖는다. normal 모드 선택 후 후방석 조종사가 사출핸들을 당길 경우 후방석만 사출된다. 전방석 조종사가 사출핸들을 당길 경우 both 모드와 같이 후방석이 사출된 후, 지연시간을 두고 전방석이 사출된다. 마지막으로 solo 모드는 후방석 조종사가 미탑승한 형태로, 사출핸들 작동 시 전방석 사출만 수행된다.

Table 1. Ejection responses for various ejection modes

Ejection mode	Seat ejection result	
	FWD handle operation	AFT handle operation
Solo	FWD	-
Normal	AFT → FWD (Delayed)	AFT
Both	AFT → FWD (Delayed)	

사출모드선택기의 설계형상에 따라 모드를 선택하는 동작은 서로 다르지만, 기본적인 동작원리는 다음과 같다. 특정 모드 선택을 위해 레버 혹은 핸들축 형태의 조작부를 해당 모드에 위치하도록 조작한다. 조작부는 실수에 의한 접촉으로 모드가 변경되지 않도록 핸들축을 당기는 등의 예비동작을 실시해야 조작될 수 있도록 설계되어 있다. 조작부를 특정 모드에 위치시키면 해당 모드의 신호를 전달할 수 있는 가스 입/출력단에 한하여 관로가 개방되고, 이외의 관로는 차단된다. 이후 사출핸들이 작동되며 발생하는 폭발가스는 관로를 따라 이송되고, 출력되는 가스 신호의 배관에 따라 의도된 사출모드의 작동을 구현한다. Figure 3은 solo 모드로 사출모드선택기를 위치시킨 경우이다. 의도된 신호 전달을 위해 (a)와 같이 solo 모드 배관만 개방되고, (b), (c)의 both, normal 모드 신호 전달 배관은 차단된다.

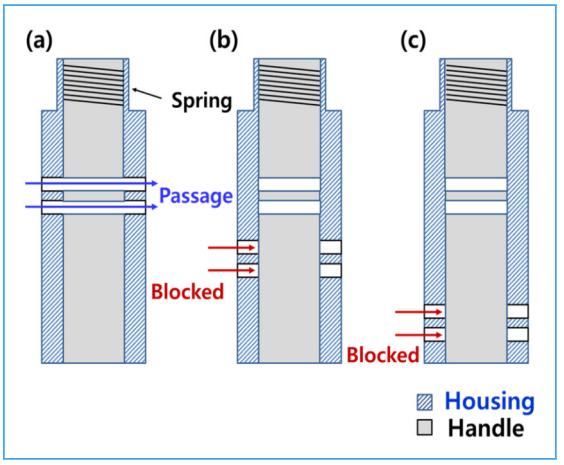


Figure 3. Section views of ejection mode selector for gas ducts in solo mode. (a) solo mode section, (b) both mode section and (c) normal mode section.

이와 같은 동작을 위해 사출모드선택기의 하우징은 각 모드에 대해 가스신호 입력단과 출력단을 갖는다. 입력단 2개, 출력단 2개가 하우징 축에 수직이 되는 위치로 나란히 정렬된 구조를 갖도록 설계된다. 각 모드의 관로는 하우징 축에 대해 서로 다른 방향으로 위치하도록 설계되어 있다. 조작부 축과 수직으로 가공된 Hole은 입력단과 출력단이 연결되는 유일한 통로가 되므로, 타 관로의 가스신호 입출력이 차단된다.

2.3. 결함 내용 및 원인 분석

본 품질개선 연구에는 조작부로 핸들축 형태를 갖는 사출모드선택기가 고려되었다. 핸들축으로 모드를 변경하기 위해서는 조작부를 당긴 채로 원하는 모드 방향으로 회전시키고, 다시 당긴 조작부를 놓아야 한다. 핸들축 내부에는 스프링이 장착되어 복원력에 의해 당긴 핸들축이 제자리에 안착하도록 한다. 하지만 모드 변경을 위해 당긴 핸들축이 정상 위치에 안착하지 않는 결함이 발생하여 이를 해소하고자 하였다.

본 결함 발생 시 사출모드선택기로 모드를 선택 후 핸들축이 끝까지 복귀되지 않아, Figure 4와 같이 하우징과 핸들축의 hole이 하나의 축을 갖는 온전한 이송경로가 형성되지 않는다. 핸들축 조작 후 미안착 현상을 사전에 인지한다면 외력을 가해 안착시킬 수는 있으나, 이를 인지하지 못할 경우 단차 발생 정도에 따라 사출 폭발가스가 출력단에 온전히 전달되지 않을 수 있고 이는 탈출계통 신뢰성을 저해할 수 있다. 또한 무리한 외력을 가해 동작 시, 추가적인 결함을 야기할 가능성이 있다.

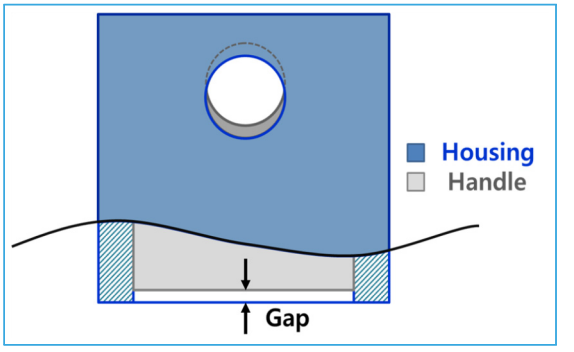


Figure 4. Misalignment between housing and handle interface under improper handle seating defect

결함 발생 원인을 분석하기 위해 외관 및 분해검사를 수행하였고, 특이사항으로 두 개의 현상이 발생한 것을 식별하였다. 첫 번째는 Figure 5에서 확인할 수 있는 핸들축에 장착된 오링(o-ring)의 잔여물

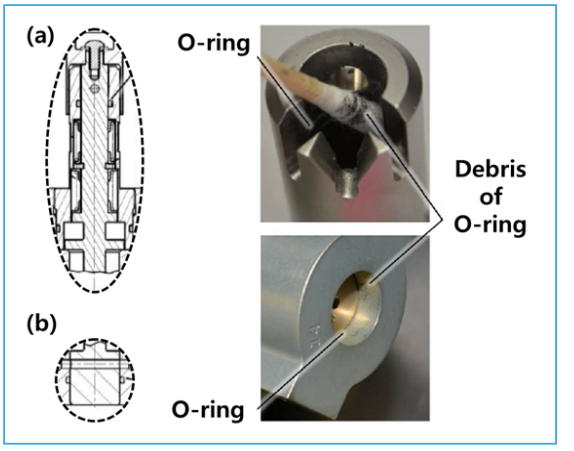


Figure 5. O-ring debris on mode selector housing. (a) upper handle and (b) lower handle

발생이다. 오링은 핸들축을 당기고 회전할 때 외부 이물질 유입방지를 위해 핸들축 상단과 하단에 장착되는 하위 구성품이다. 이로 인해 오링은 핸들축과 하우징 구조물 사이에서 지속적으로 마찰하는 구조를 갖는다. 다만 반복적인 마찰로 인해 잔여물이 발생할 경우, 두 구조물 사이에서 마찰력을 증대시켜 핸들 안착에 장애물로 작용할 수 있다. 이물질 유입방지를 위해 장착한 오링이 되려 구성품 동작을 방해하는 이물질이 되는 결과를 낳는다.

두 번째는 Figure 6의 핸들축 표면에 발생한 마모 현상이다. 핸들축을 따라 장착된 스프링 사이에는 다수 와셔가 설치되어 있다. 이 와셔의 동작 범위 인근에서, 핸들축 외부 표면이 탈락하고 마모된 것이 식별되었다. 반복 동작이 가해지는 동안 상대적인 표면 내마모성 등의 차이로 핸들축 표면에 손상이 발생한 것으로 식별되었다. 손상 발생은 핸들축 동작 중 와셔 또는 스프링이 마모 부위 인근에서 고착되거나, 구동부 조작에 저항으로 작용하는 결과로 이어졌다. 이는 핸들축 동작 및 복원 시 마찰력이 증가할 수 있는 원인으로 판단된다. 결함 해소를 위해 오링 잔여물 생성 방지를 위한 재질 및 형상 변경과 핸들축 및 와셔의 재질 및 표면처리를 개선하는 형상을 고려하였다.

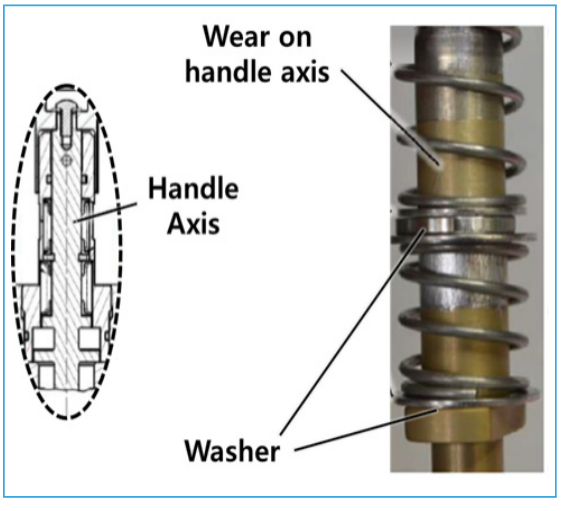


Figure 6. Wear phenomena on handle surface of ejection mode selector

3. 품질개선 형상 검증

3.1. 품질개선 형상

결함 원인에 따라 크게 네 가지의 품질개선 형상을 고려하였다. Figure 7과 같이 핸들축 오링을 변경하였다. 누적되는 구동-복원 동작으로 인해 발생하였던 잔여물 생성 방지를 위해, 오링의 내구성을 증대하고 마찰력을 감소하는 방안을 고려하였다. 오링의 내구성을 증대하기 위해 기존 EPR(Ethylene Propylene Rubber)의 재질을 FVMQ(Fluorosilicone)로 변경하였다. FVMQ은 상대적으로 내마모성이 우수하여 해석적으로 영구수명을 갖고, 낮은 마찰계수와 표면 특성으로 윤활 특성을 갖는다. 또한 핸들축 상하단에 장착되는 오링 마찰력 감소를 위해 오링이 안착되는 홈의 지름을 증가시켰다. 오링과 구조물의 접촉면적 및 마찰력을 줄여 핸들축을 당긴 후 원복과 안착이 용이하도록 설계를 변경하였다.

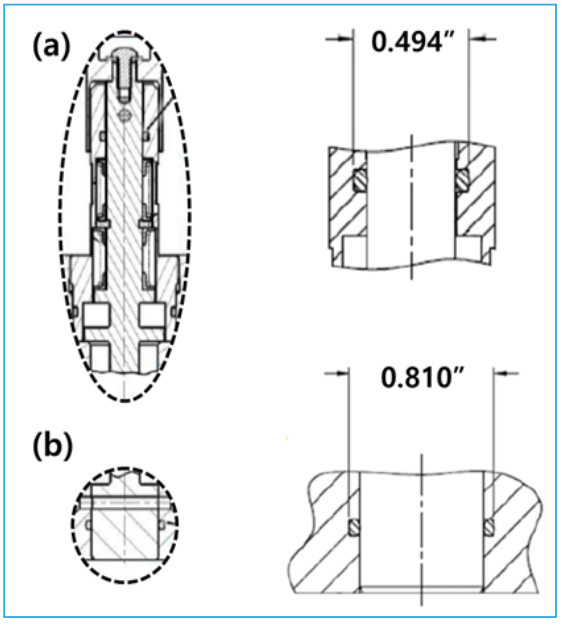


Figure 7. Structural modification in o-ring groove. (a) upper handle and (b) lower handle

두 번째 사항으로는 마모가 발생했던 핸들축의 표면처리 방법을 Table 2와 같이 개선하였다. 핸들축

내부 스프링을 따라 설치된 와셔와 핸들축의 간섭으로 인해 발생한 마모로 마찰력이 증대되었으므로 핸들축의 표면처리 방법을 변경하였다. MIL-DTL-5541, type 1을 따르는 chemical conversion coating이 기존 형상에 적용되었다. 개선 형상에 대해서는 MIL-A-8625, type II, class 2 규격을 적용한 gold anodizing을 통해 핸들축 표면의 내마모 성능을 상대적으로 개선하였다.

Table 2. Comparison of surface treatment method for handle axis

Item	Before	After
Method	Chemical conversion coating	Gold anodizing
Spec.	MIL-DTL-5541, Type 1	MIL-A-8625, Type II, Class 2

세 번째 사항으로는 Figure 8의 핸들축 스프링에 장착된 와셔 형상 개선이다. 핸들축 표면처리 개선으로 내마모 성능은 개선하였으나, 반복 동작특성을 고려할 때 내구도를 추가로 증가할 수 있도록 마모의 원인이 된 와셔의 형상과 재질을 변경하였다. 기존 와셔는 (a)와 같이 스테인리스 스틸 재질의 와셔로 0.17~0.40의 마찰계수를 갖는다. 핸들축에 가해지는 마찰력을 상대적으로 낮추고 내마모성을 확보하기 위해, (b)와 같이 와셔를 T500 series 재질의 복합재 부싱으로 변경하였다. 복합재 부싱의 마찰계수는 0.09~0.27로 기존 대비 마찰계수 평균값을 대폭 낮추었다. 변경 전 핸들축 형상은 스프링 사이에 와셔가 위치하였으나, 변경 후에는 부싱 형상이 적용되어 스프링 양 끝단이 위치한 핸들축 표면을 보호할 수 있도록 설계하였다.

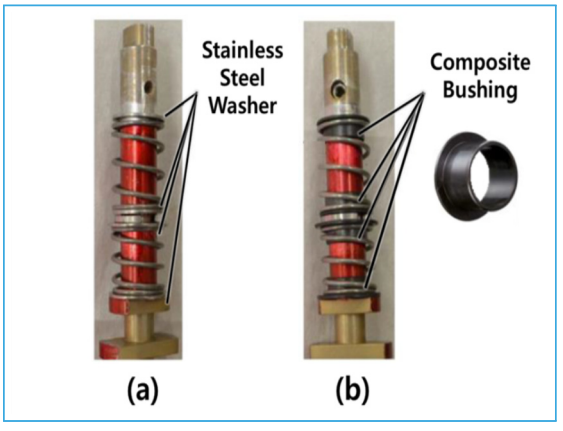


Figure 8. Washer material and shape modification

마지막으로 핸들축 동작 후 원활한 안착을 위해 복원력이 더 높은 소재의 스프링으로 변경하였다. 기존에는 스테인리스 스틸 소재의 스프링이 적용되었으나, 티타늄-알로이 소재를 적용하여 핸들축이 원활히 안착되도록 형상을 변경하는 설계를 검토하였다.

3.2. 시험검증조건

앞선 장절의 네 가지 방안의 형상개선을 통해, 품질원인의 제거/개선 유효성과 구성품 성능 및 기능의 충족 여부를 검토하기 위해 시험을 수행하였다.

사출모드선택기는 최초 개발 시 시제를 활용하여 핸들 반복동작 및 환경시험, 폭발성능에 대한 신뢰성을 시험으로 검증하였다. 본 품질개선 형상 역시 개발 당시와 동일한 시험항목과 절차를 적용하여 품질인증시험 수행을 계획하였다. 결함 제거 유효성을 검증하기 위해 가장 중요한 시험항목은 핸들 반복작동으로 총 00,000cycles로 구성되어 있다. 1cycle은 normal 모드에서 solo 혹은 both 모드, 다시 normal 모드로 핸들부를 위치시키는 동작으로 구성된다. 이외 항목으로는 환경시험 항목과 개별 사출모드에 대한 폭발성능 확보 여부를 검증하였다. 또한, 사출모드선택기 수락시험절차서에 따라 수락시험을 실시하여 품질개선 형상의 로트 단위 물량에 대한 핸들 작동성, 구조 건전성, 폭발 성능과 생산 품질을 입증하고자 하였다.

4. 검증 결과

4.1. 1차 품질인증시험 결과

품질인증시험은 다수 시제를 활용하고, 환경시험 항목이 많고 개별 시간이 오래 소요되는 점, 시험 일

정을 일괄적으로 꾸릴 수 없는 점 등을 고려하여 2차에 걸쳐 품질인증시험을 수행하였다.

1차 시험항목 수행을 위해 모든 시제는 핸들 반복작동 혹은 환경시험 항목을 수행한 뒤, X-Ray를 통해 내부 손상 등을 확인하였다. 이후 사출모드와 온도 조합에 대해 개별적인 폭발성능 확인 시험을 수행하였다. 이외 시제는 낙하, 염무, 먼지에 대한 환경 내구도를 입증하도록 시험 항목을 구성하였다.

시험 결과 핸들 반복작동을 제외한 모든 1차 품질인증시험 항목에 대해 기준을 충족함을 확인하였다. 다만 핸들 반복작동 00,000cycle 수행 후, X-Ray 검사 시 시험 시제 모두 내부 티타늄-알로이 스프링의 파손이 추정되었다. 분해검사를 통해 모든 스프링 파손을 확인하였고, 하우징 및 핸들축 등 타 구성품의 손상은 식별되지 않았다. 기존 형상 개발 시 스프링 파손 이력이 보고된 바 없어 하나의 형상 변경 사항 혹은 다수 변경 사항 간 상호작용을 원인으로 초기 추정하였다. 스프링과 기계적으로 접촉하는 타 부위의 손상이 없고, 상대적인 강성 및 강도 등을 고려하면 소재를 변경한 스프링에 반복적으로 가해진 응력으로 인해 파손된 것으로 판단하였다. 따라서 형상 변경 사항이었던 티타늄-알로이 스프링을 이전 스테인리스 스틸 소재의 스프링으로 원복하여, 핸들 반복작동에 대한 신뢰성을 재검증하는 것으로 시험 계획을 수정하였다.

4.2. 2차 품질인증시험 결과

1차 품질인증시험 결과 및 후속조치로 스프링 소재를 기존 형상인 스테인리스 스틸로 변경하여 2차 품질인증시험을 실시하였다. 2차 시험항목은 1차에서 성공하지 못한 핸들 반복작동과, 1차에서 수행하지 않은 환경시험 항목으로 구성하였다. 1차 시험에서 성공한 진동, 충격, 낙하, 염무, 먼지 시험항목은 기존 스테인리스 스틸 스프링의 개발 검증이력과, 1,2차 시험항목 간 스프링 소재의 형상 차이만 존재하는 점을 고려하여 유사성으로 검증하였다.

2차 품질인증시험 역시 핸들 반복작동 혹은 환경시험 항목을 시제별로 수행하고, X-Ray 검사를 통해 이상 유무를 검증한 후 모드/온도 조합별 폭발 성능 시험을 실시하였다. 핸들 반복작동 결과 핸들이 정상 위치로 복원된 후 안착되었고, X-Ray 검사 결과, 이전과 같은 스프링 파손 및 인접 구조물에 대한 손상 역시 없었다. 이어서 사출모드선택기의 폭발 성능 시험 결과 기능/성능 또한 충족하였다. 온습도 및 고도, 저온, 고온 시험 결과 역시 기준을 충족하였고 후속으로 수행된 폭발 성능 역시 만족하였다.

형상 개선으로 체계 혹은 상위 구성품에서 요구되는 극한환경과 폭발 성능 모두 확보할 수 있으며, 핸들 미안착 및 오링 잔여물 결함 또한 확인되지 않았다. 또한 내부 마찰력을 증가시키는 요인이었던 핸들축 표면 마모 역시 발생하지 않았고, 부싱 또한 상위 조립체의 운용환경, 극한환경을 고려하여 내구성을 입증하였다.

추가로 생산성을 고려한 양산 물량에 대한 품질을 고려하기 위해 로트 단위 물량 수락시험 결과, 품질 개선 형상의 로트 단위 물량 역시 결함이 제거됐으며, 생산 품질 역시 확보됨을 보였다. 본 연구를 통해 도출한 Table 3의 개선형상이 사출모드선택기의 결함을 개선하고, 생산품질에 영향을 미치지 않으므로 품질문제 개선에 적합함을 확인하였다.

Table 3. Improved design of sub-components in ejection mode selector

Item	Configuration
O-ring	Fluorosilicone
O-ring Groove Depth	Upper : 0.494in Lower : 0.810in
Handle Axis Finish	Gold anodizing
Washer	Composite bushing
Spring	Stainless steel, 302 series

5. 결 론

탈출계통 구성품인 사출모드선택기는 복좌 형태의 군용 항공기에 장착된 구성품으로, 후방 조종사 탑승 유무 및 전/후방 조종사의 사출 형태에 따른 사

출모드를 결정하는 기능을 한다. 사출모드 조작은 핸들축을 당긴 채로 원하는 사출모드로 회전 후 놓는 동작으로 이루어지며, 각 모드에 요구되는 가스신호 입/출력단 관로를 연결하는 역할을 한다. 모드 조작에는 핸들축이 당겨졌다 안착되는 동작이 반복 수행된다. 핸들축에는 원활한 안착을 위한 스프링과, 반복 동작 중 이물질 내부 침투를 방지하기 위한 오링이 장착되어 있다.

본 연구에서는 오링과 와셔 등 사출모드선택기 핸들축에 장착된 하위 장착물들이 유발하는 핸들축 미안착 결함에 대한 원인을 분석하였다. 반복적인 마찰로 인해 오링 잔여물 발생이 식별되었고, 이것이 핸들축과 하우징 사이에서 마찰력을 증대시키는 원인으로 작용할 수 있음이 확인되었다. 또한 핸들축의 스프링과 와셔 인근에서 축 마모가 식별되었고, 안착 동작 중 특정 구간에서의 걸림 유발 가능성이 확인되었다. 따라서 각 원인에 대한 형상 개선 방안을 검토하였다. 오링 관련 결함 개선을 위해 오링의 EPR 재질을 내마모성이 강하고, 윤활성능을 갖는 FVMQ로 변경하였다. 핸들축 마모 결함 방지를 위해 핸들축의 표면처리를 gold anodizing으로 변경하여 내마모 성능을 개선하였다. 또한 핸들축에 반복적인 마찰을 가했던 와셔를 스테인리스 스틸에서 복합재 부싱 형태로 변경하여, 마찰계수를 낮추었다. 마지막으로 복원력이 더 높은 스프링 적용을 고려하였다.

위 형상 개선방안에 대해 기능/성능 충족 여부를 확인하기 위해 시험을 수행하였다. 핸들의 반복동작과, 개발 시 검토한 환경시험 항목, 사출모드에 따른 저온, 상온, 고온 상 폭발성능을 확인하였다. 핸들 반복작동 중 시험실패가 확인되었고, 분해검사 결과 스프링 파손이 확인되어, 기존 설계에 적용된 스프링으로 원복하였다. 2차 시험에서는 스프링과 관련된 시험 항목의 기존 개발 성공 이력 및 1차 시험결과를 고려하여, 1차 시험에서 통과한 항목들은 유사성으로 검증하였다. 2차 시험 항목으로는 앞서 실패했던 핸들 반복작동 및 1차에서 확인치 못한 환경시험 항목으로 구성하였다. 2차 시험 결과, 모든 시험항목에서 기준/성능을 충족하여, 스프링 재질을 원복한 형상개선안이 유효함을 확인하였다. 마지막으로 수락시험절차서에 따라 수락시험을 실시하여 로트 단위 물량에서의 결함 개선효과와 생산품질을 입증하였다.

본 연구를 통해 사출모드선택기에 발생한 핸들 미안착 결함의 원인을 분석하고, 개선안을 제시하여 기능/성능의 충족 여부를 시험을 통해 검증하였다. 추후 본 연구가 군용 고정익 항공기의 탈출계통 설계 시 유사 결함 방지를 위해 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1 Jackson, R. (2006). *Baling out: Amazing dramas of military flying*. Pen and Sword Aviation.

2 Theotokis, N. (2023). *Airborne landing to air assault: A history of military parachuting*. Pen & Sword Military.

3 Nichol, J. (2024). *Eject! Eject!: Escaping disaster in the skies and surviving what comes next*. Simon & Schuster UK.

4 Sandstedt, P. (1989). Experiences of rocket seat ejections in the Swedish Air Force: 1967–1987. *Aviation, Space, and Environmental Medicine, 60*(4), 367–373.

5 Holme, O. (1981). Aircraft technology development in Sweden 1930–1980. *Journal of Aircraft, 18*(5), 408–409. https://doi.org/10.2514/3.57504

6 Parate, B. A. (2022). Science and technology of aircraft seat ejection: Advanced concepts. *Cogent Engineering, 9*(1), 2034267. https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2034267

7 Chunn, S. P., & Shannon, R. H. (1964). USAF rocket ejection experience. *Aerospace Medicine, 35*(9), 866–870.

8 Shannon, R. H. (1973). *The influence of operational experience on aircraft escape system development* (AIAA Paper No. 73-1340). American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.1973-1340

9 Martin, J. (1966). Ejection Seats. *The Journal of the Royal Aeronautical Society, 70*(661), 276–279. https://doi.org/10.1017/S0001924000094434

10 최상훈, 최재호. (2023). *군용 고정익 항공기 사출시스템 작동 신뢰성 향상을 위한 Mode Selector Valve 개선 연구*. 한국품질경영학회 2023년 춘계학술발표논문집, 174.

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 238-251, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.021

한국인 인체치수조사 프로토콜을 적용한 군 인체측정 시스템 개발 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Development of a Military Anthropometric Measurement System Based on the Size Korea Protocol

이아람†, Ah Lam Lee
KATRI시험연구원, 융합표준연구소, 사이즈코리아사업단 ,책임연구원
Head Researcher, Size Korea Business Group, Convergence Standards Institute, KATRI Testing & Research Institute

고병욱, Benjamin Ko
KATRI시험연구원, 융합표준연구소, 사이즈코리아사업단, 연구위원
Principal Researcher, Size Korea Business Group, Convergence Standards Institute, KATRI Testing & Research Institute

김민승, Minseung Kim
KATRI시험연구원, 융합표준연구소, 사이즈코리아사업단, 팀장
Team Manager, Size Korea Business Group, Convergence Standards Institute, KATRI Testing & Research Institute

박선미, Sunmi Park
건국대학교, 패션디자인학과, 교수
Professor, Dept. of Fashion Design, Konkuk University

배성훈, Seonghun Bae
링스컴퓨팅시스템즈, 기술사업실, 수석연구원
Principal Research Engineer, Tech Biz Division, Lynx Computing Systems, Inc.

Abstract

This study established a standardized anthropometric measurement system tailored for military environments by adapting a protocol developed for the Korean national anthropometric survey (Size Korea). The anthropometric measurements of 381 soldiers aged 18-29 were obtained using a structured manual measurement procedure that incorporated station-based operations, landmark definitions, and examiner training to ensure consistency. Technical Error of Measurement (TEM) and %TEM analyses were conducted through pilot testing, enabling the identification and correction of measurement error factors, and establishing a reliable and reproducible measurement framework. Analysis of the collected data revealed distinct body shape characteristics among male and female soldiers compared to those of the general population of Korea. Additional differences were observed among female groups from different military training institutions, particularly in torso circumference measurements. These findings highlight the need for military-specific sizing systems for uniforms and for equipment. Overall, this study provides an empirically verified measurement system suitable for military use and offers foundational data and methodological guidance for future military sizing standards, equipment design, and establishment of a comprehensive anthropometric database.

keywords : military anthropometry, anthropometric measurement system, anthropometric survey, technical error of measurement, sizing system

† Corresponding Author : Ah Lam Lee
Tel : +82-2-3668-2952, Fax : +82-2-3668-2949, email : allee@katri.kre.kr
KATRI Testing & Research Institute, 02579, 51, Wangsan-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 13th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

최근 장병의 체격이 다양화되면서, 변화된 체격에 적합한 군복·보호장비·장구류 등 군수품의 규격과 치수체계의 개선 필요성이 대두되고 있다. 한국인의 인체는 세대 변화와 생활 방식 변화에 따라 전반적인 체격 증가, 비만도 증가 등 구조적 변화가 지속적으로 관찰되고 있는데[1], 이러한 변화는 제품 설계와 환경 구축에서 치수 기준의 재정비가 필요함을 시사한다. 특히 군 환경과 같이 맞음성·기능성이 중요한 분야에서는 최신 인체자료의 확보 중요성이 더욱 강조되는데, 실제로 전투복과 같은 주요 군복에서 일부 장병이 현행 규격 범위 외에 위치하여 맞춤 보급이나 개별 보완 조치가 필요하다는 사례도 보고되는 현 시점에서, 이러한 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 군 인체치수 데이터 최신화가 필요하다[2].

제품 설계에 있어 기본이 되는 인체치수를 획득하기 위하여 해외에서는 대규모의 인체치수 측정사업을 진행한 바 있다. 미국의 ANSUR (Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel)은 6,000명 이상의 현역 및 예비군을 대상으로 90개 이상의 인체치수를 수집하여 폭넓은 군수품 설계의 기준 자료로 활용되고 있다. 이는 군복 치수체계뿐 아니라 헬멧, 방탄장비, 배낭, 차량·항공기 탑승 공간까지 폭넓은 군사·산업 분야에서 활용되고 있다[3-4].

국내에서도 국가기술표준원의 민간 한국인 인체치수조사 사업인 사이즈코리아(Size Korea)가 1979년 이후 현재까지 40년 이상 기간 동안 정기적으로 수행되며 한국인의 체형을 체계적으로 기록해오고 있다. 한국인 인체치수조사 사업의 데이터는 의류, 공공시설, 가전·가구 등의 설계에 폭넓게 활용되고 있다[5-7].

대한민국 군에서는 2010년~2011년 차세대국방섬유기술개발 협력사업, 2020년 국가기술표준원-공군 인체정보 빅데이터 협력사업 등을 통해 피복 및 군수품 규격 설계를 위한 인체치수를 수집한 바 있다[8-9]. 그러나 기존 조사는 특정 사업 목적에 종속된 단발성 측정으로 수행되어 대상, 항목, 측정방법, 프로토콜 측면에서 연속성이 다소 부족하다. 이러한 이유로 군 피복류 설계 시 한국인 인체치수조사 자료를 보완적으로 인용하는 사례가 존재하나[10-11], 이는 최신 장병 체형을 반영하기에는 구조적인 한계가 있다. 나아가 군 복무자는 연령구성, 체력요건, 직무특성 등으로 인해 일반 성인과 구분되는 고유한 체형특성을 지니고 있음에도[12], 이를 체계적으로 검증할 수 있는 표준화된 군 인체치수 프로토콜은 아직 구축되어 있지 않다. 특히 측정오차, 측정자 간 편차, 측정환경 차이에 따른 변동성 등은 군 피복 및 장구류 설계에 요구되는 정밀한 자료 품질 확보의 장애요인이 되고 있는데, 이는 치수체계의 부적합, 착용 불편, 장구류 보급 비효율, 수선·재고 비용 증가로 이어질 수 있다.

이러한 배경에서, 변화하는 군 체형을 정밀하게 반영하고 군수품의 기능성·안전성·맞춤성을 향상시키기 위해서는 표준화된 군 인체측정 시스템의 구축이 필수적이다[13]. 이에 국가 수준의 인체치수 측정사업인 한국인 인체치수조사에서 축적된 측정 프로토콜을 군 환경에 적용하여 군에 최적화된 인체측정 시스템을 개발하는 작업은 향후 치수체계 개정 및 군수품 규격 고도화를 위한 출발점이 된다.

한국인 인체치수조사는 국제표준(ISO 7250-1, ISO 8559-1)을 기반으로 설계되었으며, 측정부위 정의, 기준점 설정, 측정자 교육 등을 포함한 고도화된 운영체계를 갖추고 있다. 이를 군 환경에 적용함으로써, 군 인체 자료의 측정 신뢰도와 데이터 품질을 국제 표준 수준으로 확보할 수 있다[14-15]. 특히 기술적 측정오차(Technical Error of Measurement, TEM) 및 상대적 측정오차율(%TEM) 기반의 정밀도 검증, 측정자 교육·훈련, 스테이션 기반 운영체계 등은 반복가능하고 재현성 있는 군 인체자료 구축에 반드시 필요한 요소다.

따라서 본 연구는 한국인 인체치수조사에서 확립된 표준화된 측정 프로토콜을 적용하여 군 인체측정 체계를 개발하고, 그 과정에서 확보된 자료의 측정 신뢰도와 특성을 검토함으로써 인간공학적 군수 물자 설계의 기반이 되는 군 인체측정 자료 구축의 기반을 마련하고자 한다.

2. 군 인체측정 시스템 구축

2.1. 표본설계

본 연구의 군 인체측정 표본설계는 국제표준 ISO 15535에서 제시하는 변동계수(Coefficient of Variation, CV) 기반 최소 표본수 산정 방식을 적용하여 수행되었다. 본 조사는 측정대상 기관의 협조 범위와 조사 기간을 고려하여 만 18세~29세의 장교·부사관 후보생 및 초기 복무자를 대상으로 하였으며, 우선 남군 표본수를 산정한 후 미군 ANSUR II의 성별 비율(2:1)을 반영하여 여군 표본수를 결정하였다[3, 16].

$$n = \left(\frac{1.96 \times CV}{a}\right)^2 \times 1.534^2 \quad (1)$$

남군 표본수 산정에는 식(1)을 활용하였으며, 변동계수를 기반으로 95% 신뢰수준에서 목표 상대적 정확도(α)를 충족하는 표본수(n)을 산출하였다. 군 집단의 변동계수를 직접 산출하기 어려운 점을 고려하여, 기준값은 제8차 한국인 인체치수조사(20-29세)의 자료를 사용하였다[17]. 남자 주요 인체치수 중 변동계수가 가장 큰 가슴두께 항목을 기준으로 5세 단위 변동계수를 산출한 결과, 20~24세는 9.540, 25~29세는 8.742로 나타났다. 이를 상대적 정확도 2.5%와 함께 식(1)에 적용하여 연령대별 최소 피측정자 수를 산출한 결과, 20~24세는 132명, 25~29세는 110명으로 나타났다. 이를 합산하여 남군 표본수는 242명으로 산출되었으며, 이에 따라 2:1의 성별 비율을 적용한 여군 표본수는 121명으로 설정되었다.

2.2. 측정항목 및 방법

2.2.1. 측정항목

본 연구에서 사용된 군 인체측정항목은 군 피복 및 물자류 설계에 활용 가능하도록 국제표준과 선행 인체치수조사 항목을 기반으로 선정하였다. 단기간 내 다수 인원을 효율적으로 측정해야 하는 군 환경을 고려하여 핵심 치수를 중심으로 총 65개 항목(직접측정 54개, 계산 11개)을 구성하였으며, Table 1과 Figure 1에 측정항목 명과 측정방법을 제시하였다.

측정항목 선정을 위하여 ISO 7250-1:2011, ISO 8559-1:2017, 제8차 한국인 인체치수조사의 직접측정 137개 항목, 미군 ANSUR II의 134개 항목, 그리고 전투복·비행복·베레모 등 국방규격서에 명시된 요구 치수항목을 검토하였다[3,14-15,17]. 이러한 비교·분석 과정을 통해 국제표준 및 기타 인체조사와의 연속성을 유지하면서 군 피복 치수체계 구축, 착용적합성 분석, 물자류 설계 등 실무 활용성을 확보하는 항목들을 최종적으로 도출하였다.

선정된 항목 중 직접측정 항목 54개는 높이(9개), 너비·두께(5개), 둘레(13개), 길이(8개), 앉은자세(5개), 머리(7개), 손·발·몸무게(7개)로 구성되었으며, 계산항목 11개는 직접측정 데이터를 기반으로 산출하는 것으로 구성하였다. 이 항목들은 단기간 내 다수 인원을 측정해야 하는 군 환경을 반영하여 측정항목을 축소·정리함으로써, 현장 적용성이 고려된 것이다.

2.2.2. 측정방법

측정방법은 제8차 한국인 인체치수조사 프로토콜에서 확립된 표준화된 절차를 준용하였다[18]. 해당 프로토콜은 인체치수측정 국제표준을 기반으로 구성된 절차로, 본 연구에서도 동일한 측정방법을 적용하여 인체치수 측정 결과 표준화의 기반을 확보하였다.

직접측정 54개 항목은 정기 교정을 통해 정밀도가 확보된 마틴계측기, 신장계, 체성분분석기 등을 활용하여 mm 및 kg 단위로 수집하였다. 측정의 정확도 확보를 위하여 체표에 23종(좌우 포함 29개) 측정 기준점을 설정하여 체표에 표시하였고, 측정 기준점 명은 Table 2에 나열하였다. 부위별 치수 측정 시 발생할 수 있는 신체 정렬의 편차를 최소화하기

Table 1. 65 body measurements measured in army anthropometric surveys

Category	Code	Measurements	Category	Code	Measurements
Height	V01	Stature	Sitting	S01	Sitting Height (Erect)
	V02	Eye Height		S02	Shoulder Breadth
	V03	Cervical Height		S03	Hip Breadth, Sitting
	V04	Axilla Height		S04	Abdominal Depth, Sitting
	V05	Waist Height		S05	Buttock-Knee Length
	V06	Waist Height (Omp.)	Head	H01	Head Circ.
	V07	Hip Height		H02	Bitragion Coronal Arc
	V08	Crotch Height		H03	Sagittal Arc of Head
	V09	Tibial Height		H04	Head Length
Breadth / Depth	B01	Chest Breadth (Axilla)		H05	Head Breadth
	B02	Waist Breadth		H06	Head Height
	B03	Chest Depth (Axilla)		H07	Face Length
	B04	Waist Depth	Hand / Foot / Weight	F01	Hand Circ.
	B05	Hip Depth		F02	Hand Length
Circ.	C01	Neck Circ.		F03	Hand Breadth (Metacarpals)
	C02	Neck Base Circ.		F04	Foot Breadth
	C03	Upper-Arm Circ., Flexed		F05	Foot Length
	C04	Wrist Circ.		F06	Lateral Malleolus Height
	C05	Chest(male) or Bust(female) Circ.		F07	Body Weight
	C06	Waist Circ.	Derived	D01	Torso Height V03 - V08
	C07	Waist Circ. (Omp.)			
	C08	Hip Circ.		D02	Straight Body Rise V05 - V08
	C09	Thigh Circ.		D03	Straight Body Rise (Omp.) V06-V08
	C10	Knee Circ.		D04	Front-Neck Point to Waist (Omp.) L04 + (V05-V06)
	C11	Calf Circ.		D05	Waist-Back Length (Omp.) L05+(V05-V06)
	C12	Inferior Leg Circ.		D06	Total Crotch Length (Omp.) L06+2×(V05-V06)
	C13	Diagonal Trunk Circ.		D07	Cervical Height, Sitting S01-(V01-V03)
Length	L01	Back Neck Point to Acromion Length, Left		D08	Eye Height, Sitting V02-V01+S01
	L02	Across Back Shoulder Width (Through Back Neck Point)		D09	Back Neck Point to Wrist Length L02-L01+L07
	L03	Interscye, Back (Axillary Fold)		D10	Back Neck Point to Acromion Length, Right L02-L01
	L04	Front-Neck Point to Waist			
	L05	Waist Back Length			
	L06	Total Crotch Length		D11	Body Mass Index $F07/V01(m)^2$
	L07	Arm Length (Acromion)			
	L08	Outside Leg Length			

Circ.= Circumference, Omp.= Omphalion level

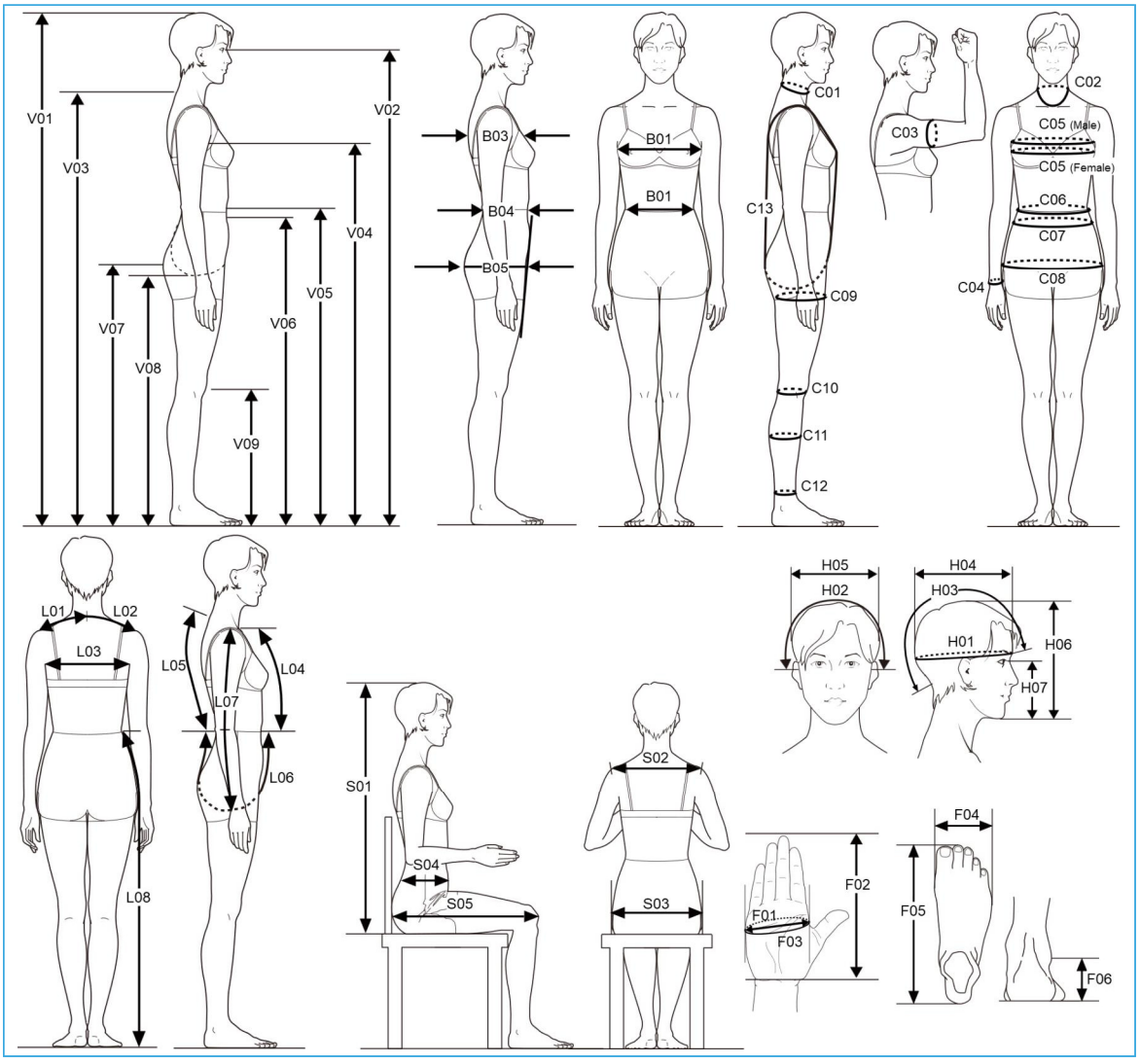


Figure 1. Visualization of anthropometric measurements corresponding to table 1

Table 2. 29 anthropomtric landmarks

Cervical / Posterior Axillary Fold, Right and Left / Posterior Axillar, Right and Left / Radiale / Buttock Protrusion / Ulnar Styloid / Gluteal Fold / Calf Protrusion / Lateral Malleolus / Side Neck Point, Right and Left / Front Neck Point / Infrathyroid / Acromion, Right and Left / Anterior Axillar, Right and Left / Bust Point, Right and Left / Lateral Waist / Anterior Waist at Omphalion / Buttock Protrusion, Lateral Level / Radial Styloid / Crotch Level / Mid-Patella / Tibiale / Inferior Leg

위해 피측정자의 자세를 선자세 4종(바로선자세, 기본선자세, 팔굽힌선자세, 아래팔올린선자세)과 앉은자세 3종(바로앉은자세, 응용앉은자세, 벽면응용앉은자세)으로 세분화하였다.

측정효율을 높이고 장비 변경에 따른 시간 손실을 최소화하기 위하여 항목별 측정부위와 측정도구 특성을 고려하여 직접측정 54개 항목 측정과정을 3개의 스테이션으로 구분하였다. Figure 2는 스테이

션별 측정 순서를 나타낸 도식이다. 스테이션 1은 기준점 표시와 높이, 몸무게 관련 항목, 스테이션 2는 길이·둘레·발 관련 항목, 스테이션 3은 너비·두께·머리·손 및 앉은자세 관련 항목으로 구성하였다. 기존 인체치수조사의 표준화된 절차를 준용하되, 단기간 내 다수 인원을 측정해야 하는 군 환경을 고려하여 측정 동선 및 작업 흐름을 효율적으로 구성하였다.

정확한 치수 확보를 위해 피측정자는 전용 측정복을 착용하였다. 측정복은 신체 표면에 밀착되는 신축성 소재로 제작되어 인체 형태를 왜곡 없이 나타내도록 설계되었으며, 여성은 상·하의, 남성은 하의로 구성하였다. 모든 측정복은 피험자의 체형에 적합한 사이즈로 제공하여 측정과정에서 의복의 들뜸이나 압박에 따른 오차를 최소화하였다.

2.3. 측정 운영

본 연구의 측정은 제한된 기간 동안 군 일과시간 내에 다수의 피험자를 측정해야 하는 조건을 고려하여, 2개의 측정팀(X, Y 팀)을 병행 운영하였다. 두 팀 모두 동일한 공간 구성과 측정 동선을 적용하여 측정환경 차이로 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다. 조사는 2025년 8월부터 9월까지 실시되었다.

피험자 측정 절차는 Figure 2와 같이 입장-대기실-접수실-탈의실-스테이션 1-스테이션 2-스테이션 3—기준점 제거-퇴장의 순서로 구성되었으며, 각 스테이션에서 기준점 표시 및 54개 직접측정 항목을 수행하였다. 피험자는 측정 참여 전 주의사항과 절차에 대한 안내를 받고 동의 절차를 완료하였다.

측정 인력 구성은 팀당 9명 (스테이션별 2명×3개 스테이션, 대기실·접수실·기준점제거 각 1명)으로 총 18명이 투입되었다. 스테이션에는 주측정자와 보조측정자를 배치하였으며 주측정자는 기준점 확인 및 항목별 치수를 측정하고, 보조측정자는 장비 준비와 기록을 담당하였다. 측정 인력은 남녀 피측정자 모두를 측정할 수 있는 여성 측정자를 중심으로 선발하였으며, 모든 인력은 교육을 통해 측정 개념과 절차를 충분히 숙지한 인원으로 구성하였다. 또한 각 팀에 현장관리자를 배치하여 비상상황 대응과 품질관리 총괄을 담당하도록 하였다.

측정은 스테이션 간 순차적으로 이루어졌으며, 스테이션당 약 7분, 접수 및 환복을 포함한 전체 과정에 피험자 1인당 약 30분이 소요되었다. 각 측정팀은 10분 간격으로 새로운 피험자를 측정하였으며, 두 개 팀을 병행 운영할 경우 시간당 약 10명의 측정이 가능하도록 구성하였다. 각 측정실은 칸막이로 구획하여 피험자 간 신체 노출을 최소화할 수 있도록 설계하였다. 특히 스테이션 구조는 측정부위 및 측정도구 특성을 기준으로 구성하여 측정 작업의 병렬화와 이동 동선 최소화를 고려하였으며, 이는 군 환경에서의 대규모 인원 측정 효율성을 확보하기 위한 것이다.

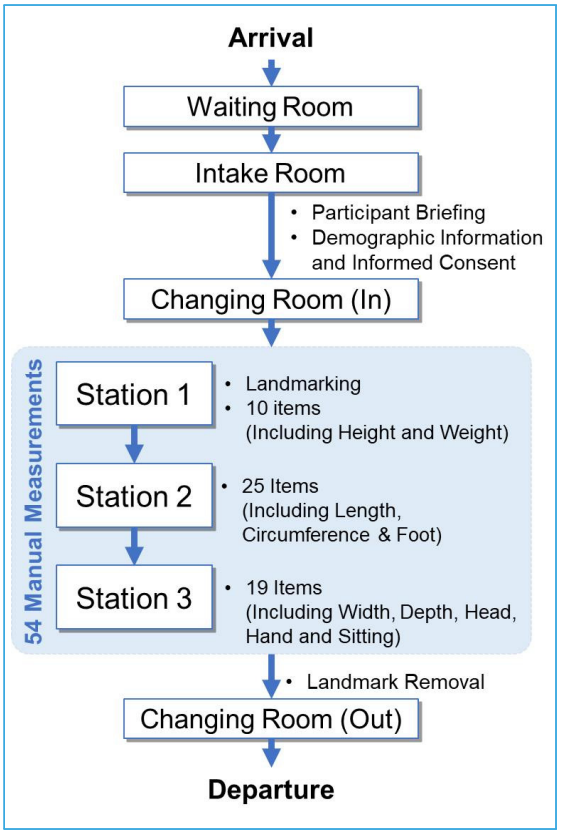


Figure 2. Sequence of the participant measurement procedure

2.4. 측정 교육 및 신뢰도 관리

2.4.1. 측정 교육

본 연구에서는 대규모 군 인체측정의 정밀도와 일관성을 확보하기 위하여 측정자에 대한 체계적인 교육과 신뢰도 관리 절차를 마련하였다. 측정자 교육은 이론 교육–실습–모의측정의 단계로 이루어졌다. 이론 교육에서는 측정 항목 정의, 기준점 위치, 측정 자세, 장비 사용 원칙 등 인체측정의 기본 원리를 교육하였다. 실습 교육에서는 기준점 표시, 장비 조작, 항목별 측정 절차를 반복적으로 수행하여 측정오차를 최소화하였다. 이후 실제 측정 환경과 동일한 동선 및 시간 조건에서 모의측정을 실시하여 측정자의 숙련도와 팀 내 역할 수행 능력을 점검하였다.

2.4.2. 신뢰도 관리

본 연구에서는 측정의 정밀도와 일관성을 확보하기 위해 TEM과 %TEM을 활용한 정밀도 관리, 장비 교정에 기반한 정확도 관리, 표준 프로토콜 준수에 의한 타당도 확보 절차를 체계적으로 적용하였다. TEM은 반복 측정값 간 편차의 표준오차로 절대적 정밀도를 나타내며, %TEM은 TEM을 해당 항목의 평균값(Variable Average Value, VAV)으로 나누어 산출하는 상대적 정밀도 지표로 인체부위 간 비교가 가능하다[19].

모의측정 단계에서는 두 측정팀이 남녀 각 1명의 피측정자를 대상으로 3회 반복측정을 실시하였으며, 이를 통해 측정자 내 변동을 평가하였다. 분석 대상은 몸무게를 제외한 직접측정 53개 항목으로 설정하였다. TEM은 반복측정 편차(Di)의 제곱합을 기반으로 식(2)와 같이 산출하였으며, %TEM은 산출된 TEM을 항목 평균값으로 나누어 백분율로 환산하여 식(3)과 같이 계산하였다.

$$TEM = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{2n}} \tag{2}$$

$$\%\,TEM = \frac{TEM}{VAV} \times 100 \tag{3}$$

국제적으로 통일된 인체측정 허용오차 기준이 존재하지 않으므로, 본 연구에서는 제8차 한국인 인체치수조사에서 사용된 TEM 및 %TEM 허용기준을 적용하였다. 이는 선행연구와 대규모 국가조사 수행 경험을 반영한 가장 현실적이고 신뢰성 있는 기준으로 판단된다.

또한, 두 측정팀 간 측정 정밀도를 확보하기 위하여 팀별 TEM 및 %TEM 평균을 비교하였다. 이 과정을 통하여 실제 측정 이전 단계에서 측정자 숙련도와 측정 절차의 표준화 수준을 검증하였다. TEM과 %TEM의 산출 및 평균 비교는 Microsoft Excel을 사용하여 수행하였다.

2.4.3. 자료 이상치 검토

측정 완료 후 수집된 데이터는 분석 전 단계에서 이상치 검토 절차를 거쳤다. 본 연구의 이상치 검토는 입력 오류 탐지, 논리적 편집규칙 적용을 통하여 이루어졌다. 평균 ±3 표준편차 범위를 초과하는 값에 대해 개별 재검토를 실시하고, 관련 항목 간의 비례 관계 및 성별·연령별 산포도를 활용하여 입력 오류 여부를 판단하였다. 오류로 확인된 값은 수정하고, 원인을 확인할 수 없는 경우 결측값으로 처리하였다.

논리적 편집규칙은 제8차 한국인 인체치수조사의 편집규칙 중 군 측정항목에 해당하는 9개 규칙을 적용하였다. 신체부위 간 논리적 관계(예: 키〉눈높이, 허리높이〉엉덩이높이 등)에 위배되는 자료는 측정기록과 대조하여 검토하였으며, 필요 시 상관항목 비교 및 산포도 분석을 통해 이상치 여부를 재확인하였다.

2.4.4. 통계분석

군인 인체치수의 특성 분석을 위한 통계분석에는 Python 3.11.9를 활용하였다. 성별 인체치수 특성, 제8차 한국인 인체치수와의 비교, 측정대상 기관 집단 간 인체치수 비교를 위하여 평균, 표준편차 및 백분위수(percentiles)를 산출하였다. 또한 집단 간 비교를 위해 독립표본 t-검정을 수행하였으며, 통계적 유의성은 $p<.05$ 수준에서 검정하였다.

3. 군 인체측정 결과

3.1. 측정인원

본 연구에서 구축된 군 인체측정 시스템을 통해 만 18세에서 29세에 해당하는 총 381명(남군 255명, 여군 126명)의 인체치수측정이 완료되었다. 세 곳의 기관에서 측정이 이루어졌으며, A기관 남군 255명, B기관 여군 76명, C기관 여군 50명을 측정하였다. 피측정자 특성상 신규 입소자 비중이 높아, 만 18~24세가 전체의 96.6%(368명)를 차지하였다.

3.2. 측정 신뢰도

Table 3은 사전 모의측정 자료를 기반으로 측정팀 X와 Y에 대해 각각 TEM 및 %TEM를 산출한 결과를 제시한 것이다. 분석 결과, 측정자 내 정밀도는 전반적으로 허용 기준을 충족하거나 관리 가능한 수준으로 나타났다. 직접측정 53개 항목 중 TEM 허용기준을 초과한 항목은 23개(배꼽수준허리둘레, 엉덩이둘레, 목둘레, 머리둘레, 목밑둘레, 어깨너비, 가슴너비, 앉은엉덩이너비, 발너비, 가슴두께, 엉덩이두께, 앉은배두께, 목뒤높이, 겨드랑높이, 앉은키, 앞중심길이, 등길이, 겨드랑뒤접힘사이길이, 목뒤어깨사이길이, 앉은엉덩이무릎수평길이, 샅앞뒤길이, 다리가쪽길이, 눈살-머리마루-뒤통수길이), %TEM 기준을 초과한 항목은 4개(손둘레, 가쪽복사높이, 샅앞뒤길이, 얼굴수직길이) 그리고 두 기준을 동시에 초과한 항목은 1개(샅앞뒤길이)로 나타났다.

측정오차의 원인을 분석한 결과, 겨드랑점·샅점과 같이 시각적으로 확인이 어려운 비가시성 기준점의 경우 피험자 체형·자세·줄자 장력 차이에 따라 기준점 재현성이 저하되는 경향이 있었다. 또한, 가슴둘

Table 3. Comparison of mean TEM and %TEM between measurement teams X and Y

Category		Measurements	TEM (mm)				%TEM (%)			
			Threshold	Team X	Team Y	t-value	Threshold	Team X	Team Y	t-value
Height	Standing	Stature	7	0.6	2.0	-3.16	2.0	0.0	0.1	-3.18
	Standing	Crotch Height	10	9.7	4.8	2.02	2.0	1.3	0.6	2.09
	Sitting	Sitting Height (Erect)	6	22.9	3.0	1.53	5.0	2.5	0.3	1.55
Breadth	Trunk	Shoulder Breadth	5	8.1	3.3	1.68	5.0	2.1	0.9	1.65
	Limbs & Head	Head Breadth	2	2.8	0.6	2.26	5.0	1.7	0.4	2.08
Depth	Trunk	Chest Depth (Axilla)	4	5.9	4.8	0.43	5.0	2.8	0.7	1.93
Circ.	Trunk	Bust or Chest Circ.	10	3.6	8.7	-3.52	1.5	0.4	0.8	-2.75
		Waist Circ.	5	6.2	2.9	1.65	1.5	0.8	0.3	1.56
		Hip Circ.	5	7.9	7.3	0.14	1.5	0.8	0.7	0.29
	Limbs & Head	Neck Circ.	4	4.3	5.0	-1.33	1.5	1.3	1.3	-0.49
		Upper-Arm Circ., Flexed	4	2.1	4.4	-1.37	1.5	0.7	1.2	-1.03
		Head Circ.	4	3.3	5.0	-1.04	1.5	0.6	0.9	-1.10
Length	Trunk	Waist Back Length	6	17.3	7.4	1.66	5.0	4.3	1.7	1.56
		Arm Length (Acromion)	6	3.3	5.2	-1.41	5.0	0.6	1.0	-1.23
		Total Crotch Length	8	26.7	17.4	0.68	2.0	3.9	2.3	0.82
	Limbs & Head	Hand Length	2	1.8	1.1	1.56	2.0	1.0	0.6	1.53
		Foot Length	2	1.1	1.0	0.16	2.0	0.4	0.4	-0.06

Circ.=Circumference
Cells exceeding the acceptable threshold are shaded.
No significant team differences observed for any of the presented items.

레·허리둘레 등 호흡 및 자세 의존성이 큰 항목에서 반복측정 간 편차가 상대적으로 크게 나타났으며, 수평자·줄자 사용 시 평행 유지 실패나 피부 압박에 따른 ±3~5mm 수준의 도구 기반 오차도 일부 확인되었다. 특히 샅앞뒤길이는 기준점 위치, 줄자 장력, 자세 유지가 복합적으로 영향을 미치는 항목으로 TEM 및 %TEM 기준을 모두 초과하였다.

8Table 3에 나타난 측정팀 X와 Y의 TEM 및 %TEM 평균값을 비교한 결과, 대부분 항목에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않아 두 팀 간 정밀도는 유사한 수준으로 확인되었다. 다만 비가시성 기준점 및 자세 의존성이 높은 일부 항목(앉은키·샅앞뒤길이, 등길이 등)에서 팀 간 차이가 관찰되었는데, 이는 주로 기준점 표시 및 도구 조작 방식의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

이러한 결과를 토대로 TEM 및 %TEM 초과 항목과 팀별 편차가 확인된 항목에 대해 기준점 표시 재점검, 장비 사용 절차 표준화, 반복 실습 중심의 재교육, 항목별 변동 모니터링 강화를 실시하여 측정 신뢰도를 향상시켰다. 측정 완료 후 수집된 자료는 입력 오류 점검, 논리적 편집규칙 검토를 통해 정제되었으며, 총 20,574개의 측정값 중 3개의 이상치가 제거되었다.

3.3. 군인 인체치수의 특성

3.3.1. 성별 인체치수 특성

수집된 남군과 여군의 주요 인체치수에 대한 평균, 표준편차, 5·50·95 백분위수는 Table 4에 제시하였다. 군 피복 및 장구류 설계에 주로 사용되는 키,

Table 4. Descriptive statistics of anthropometric data for Korean male and female military personnel

Measurements (unit=cm)	Male (n=255)					Female (n=126)				
	Mean	S.D.	5th	50th	95th	Mean	S.D.	5th	50th	95th
Stature	175.7	6.6	163.6	175.8	185.8	161.7	5.3	153.7	161.7	171.4
Crotch Height	78.8	4.0	71.8	78.8	85.2	73.1	3.6	67.3	73.0	78.8
Chest Depth (Axilla)	21.5	2.4	18.2	21.4	25.4	20.1	2.5	17.1	19.5	25.1
Neck Circ.	37.3	2.8	33.6	37.0	42.4	33.8	2.5	30.5	33.0	38.3
Upper-Arm Circ., Flexed	31.5	4.0	25.4	31.4	38.6	28.3	3.5	23.7	27.6	35.2
Chest(male) or Bust(female) Circ.	98.2	8.5	85.1	97.7	112.8	86.8	7.9	76.8	85.5	101.9
Waist Circ. (Omp.)	86.3	12.3	70.1	83.8	108.4	80.6	8.9	68.4	78.6	97.8
Hip Circ.	98.2	8.3	86.6	96.9	113.8	96.0	6.0	87.4	95.1	109.0
Waist Back Length	44.4	2.5	40.5	44.3	48.7	39.7	2.0	36.5	39.7	43.1
Arm Length (Acromion)	58.0	3.1	53.1	58.0	62.5	53.1	2.6	49.0	53.2	57.5
Sitting Height (Erect)	94.1	3.6	88.7	94.0	99.8	87.2	2.7	82.8	87.0	91.5
Shoulder Breadth	41.5	2.3	38.0	41.5	45.2	37.2	1.8	34.3	37.1	40.2
Head Circ.	58.0	1.7	55.3	58.0	60.9	56.0	1.5	53.7	56.0	58.6
Hand Circ.	20.4	1.2	18.7	20.4	22.4	18.3	0.9	16.8	18.3	20.0
Foot Length	25.4	1.3	23.4	25.4	27.2	23.1	1.1	21.5	23.1	24.9
Body Weight (kg)	75.6	15.9	54.8	73.2	103.6	61.1	10.7	48.0	59.2	81.7
Torso Height	70.4	3.2	65.1	70.4	75.7	64.0	3.0	59.2	63.9	69.0
Body Mass Index (kg/m2)	24.4	4.6	18.6	23.8	33.1	23.4	3.8	18.4	22.8	31.5

Circ.=Circumference; Omp.=Omphalion level

가슴둘레, 허리둘레의 성별 차이를 살펴보면, 남군의 평균 키는 175.7(6.6)cm, 여군은 161.7(5.3)cm로 약 14cm의 성별 차이가 확인되었다. 가슴둘레의 경우 남군은 98.2(8.5)cm, 여군의 젖가슴둘레는 86.8(7.9)cm로 약 11cm 차이를 나타냈다. 또한, 배꼽수준허리둘레는 남군 86.3(12.3)cm, 여군 80.6(8.9)cm로 성별 간 약 6cm 차이가 확인되었다. 이것은 남녀 군인의 체형 구성에 뚜렷한 차이가 존재함을 보여주며, 향후 군 피복 및 장구류 설계 시 성별 체형 특성을 반영한 치수체계 구축이 필수적임을 시사한다.

3.3.2. 8차 한국인 인체치수와 비교

본 연구에서는 군인 집단의 체형적 특성을 보다 명확히 파악하기 위하여, 2020~2021년에 실시된 제8차 한국인 인체치수조사의 동 연령대 자료와 비교 분석을 수행하여 Table 5에 나타내었다[17]. 군

Table 5. Comparison of mean measurements between the 2025 military and the 8th size korea survey

Measurements (unit=cm)	2025 military		8th Size Korea		t-value
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Male	(n=255)		(n=343)		
Stature	175.7	6.6	174.6	5.7	2.24*
Chest Circ.	98.2	8.5	99.6	6.7	-2.20*
Waist Circ.(Omp.)	86.3	12.3	84.3	9.8	2.13*
Head Circ.	58.0	1.7	58.7	1.7	-4.72***
Body Weight (kg)	75.6	15.9	72.9	12.2	2.29*
BMI (kg/m2)	24.4	4.6	23.9	3.6	1.56
Female	(n=126)		(n=271)		
Stature	161.7	5.3	161.1	4.9	1.00
Bust Circ.	86.8	7.9	83.7	7.3	3.67***
Waist Circ.	76.4	8.8	71.8	7.2	5.14***
Head Circ.	56.0	1.5	56.4	1.5	-2.40*
Body Weight (kg)	61.1	10.7	55.2	8.9	5.36***
BMI (kg/m2)	23.4	3.8	21.3	3.1	5.43***

***p < .001, *p < .05

피복 및 장구류 설계와 직접적인 연관성이 있는 주요 인체치수 항목을 중심으로 수행하였으며, 분석의 해석 가능성과 실용성을 고려하여 대표 항목을 선정하여 비교하였다. 비교 대상은 본 연구의 실제 측정 대상인원 연령 구성에 부합하는 20~24세 남자 343명, 여자 271명으로 설정하였으며, 이를 통해 군인 집단이 일반 성인과 구분되는 체형적 특성을 갖는지 확인하였다.

군인 집단과 8차 한국인 인체치수조사의 주요 항목 평균값을 비교한 결과, 남군은 일반 성인 남성에 비해 키(t=2.24, p<.05)와 배꼽수준허리둘레(t=2.13, p<.05)가 유의하게 컸으며, 반대로 가슴둘레(t=-2.20, p<.05)와 머리둘레(t=-4.72, p<.001)는 더 작은 값을 보였다.

여군은 일반 성인 여성에 비해 젖가슴둘레(t=3.67, p<.001), 허리둘레(t=5.14, p<.001), 몸무게(t=5.36, p<.001), BMI(t=5.43, p<.001)가 유의하게 큰 경향이 나타났으며, 머리둘레(t=-2.40, p<.05)는 작은 것으로 확인되었다. 키는 두 집단 간 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다.

이와 같이 남녀 모두에서 군인은 일반 성인보다 머리둘레는 작고 몸통둘레는 큰 체형적 경향을 보였다. 이는 입대 과정에서 요구되는 신체적 기준과 이에 부합하는 지원자의 자기선택 효과, 그리고 입대 초기집단이 가지는 동질적 연령 및 체형 특성이 반영된 결과로 해석된다. 향후 군 피복·장구류 규격의 검토 시 군인 집단의 특수성을 반영한 인체치수 참조가 필요함을 보여준다.

3.3.3. 측정대상 기관 집단별 인체치수 비교

여군 측정대상 126명은 B 기관(76명)과 C 기관(50명), 두 기관에서 수집되었다. 기관 간 체형 비교는 군 피복 및 장구류 설계와 직접적인 연관성이 있는 주요 인체치수 항목을 중심으로 수행하였다. 두 집단의 주요 인체치수를 비교하여 Table 6에 제시하였다. 분석 결과, 젖가슴둘레(t=6.43, p<.001), 허리둘레(t=6.17, p<.001), 몸무게(t=5.05, p<.001),

Table 6. Comparison of mean measurements between female groups in unit B and unit C

Measurements (unit=cm)	Unit B (n=76)		Unit C (n=50)		t-value
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
Stature	161.5	5.9	161.8	4.3	-0.33
Bust Circ.	89.7	8.2	82.3	4.6	6.43***
Waist Circ.	83.9	9.1	75.7	5.9	6.17***
Head Circ.	55.8	1.7	56.3	1.3	-1.63
Body Weight (kg)	64.3	11.8	56.2	6.2	5.05***
BMI (kg/m2)	24.6	4.1	21.4	2.0	5.76***

***p < .001
Circ.=Circumference

BMI(t=5.76, p<.001)는 모두 B 기관 집단이 유의하게 큰 값을 보였다. 반면, 키와 머리둘레는 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

Figure 3은 여성 측정대상 기관별 젖가슴둘레-키 및 허리둘레-키 산점도와 각 집단의 95% 신뢰범위 타원 영역, 그리고 평균값을 제시한 그래프이다. 평균비교에서 살펴본 바와 마찬가지로, 키의 경우 두 기관 평균 사이에 큰 차이는 없으나, B 기관 집단의 분포 폭이 더 넓어 상대적으로 다양한 신장이 나타남을 알 수 있다. 젖가슴둘레와 허리둘레에서는 B 기관 집단의 분포 중심이 오른쪽, 즉 더 큰 치수 구간으로 이동해 있었다. 특히 젖가슴둘레 85~95cm, 허리둘레 70~80cm 구간에서 B 기관 집단의 상대빈도가 높아, 둘레 항목 전반에서 기관 간 체형 차이가 뚜렷하게 확인되었다.

이와 같은 결과는 여군 내에서도 기관 특성에 따라 체형 구성이 상이할 수 있음이 확인되며, 기관 간 체형 차이는 기관별 모집 대상 특성 및 집단 구성의 차이에 기인할 가능성이 있다. 이는 군 피복 및 장구류 설계 및 보급 과정에서 집단 특성의 검토 필요성을 시사하며, 추가적인 자료와 분석을 통해 기관별 체형 특성을 반영한 호칭 공급 비율 조정 방안이 고려될 수 있을 것이다.

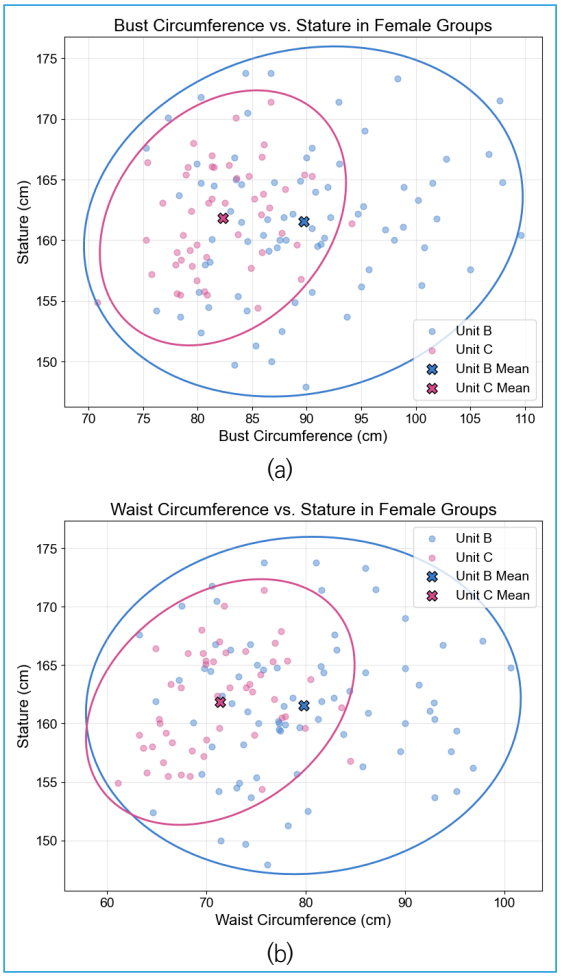


Figure 3. Scatter plots and 95% confidence ellipses for female groups in unit B and unit C. (a) bust circumference vs. stature and (b) waist circumference vs. stature

4. 결론

4.1. 결론 및 의의

본 연구는 한국인 인체치수조사에서 확립된 표준화된 측정 프로토콜을 기반으로 군 환경에서 적용 가능한 인체측정 시스템을 구축하여 군 인체측정 자료의 기반을 마련하는 것을 목적으로 수행되었다. 구축된 인체측정 시스템의 검증을 위하여 18~29세 장병 381명을 대상으로 표준화된 직접측정 절차를 적용하였으며, 측정 운영체계, 기준점 설정, 측정자 교

육·검증을 포함하는 군 특화형 인체측정 프로세스를 설계하였다. 본 연구는 기존 한국인 인체치수조사 프로토콜을 군 환경에 적용하는 과정에서, 단기간 내 다수 인원을 측정해야 하는 특성을 반영하여 측정시간 단축, 스테이션 기반 동선 최적화, 측정자 운영 구조 개선 등의 측면에서 운영체계를 재구성하였다. 또한 TEM 및 %TEM 기반의 정밀도 관리체계를 적용하여 측정 신뢰도를 정량적으로 검증하였다는 점에서 차별성을 가진다. 본 연구가 가지는 의미는 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째, 본 연구는 군 환경의 제약(시간, 공간, 장비, 인력)을 고려한 표준화된 측정 운영 구조를 구축함으로써 군 환경에 적합한 인체측정체계를 실제로 구현했다는 점에서 의의를 가진다. 특히 스테이션 기반 측정 흐름, 기준점 설정 방식, 효율적 측정 순서 조정 등은 향후 군 인체조사 모델로 활용될 수 있는 운영 표준을 제시한다.

둘째, 사전 모의측정과 TEM·%TEM 분석을 통해 측정오차 요인을 체계적으로 검증하고 보완함으로써, 측정 신뢰도를 확보할 수 있는 표준화 기반을 마련하였다. 팀 간 정밀도 비교에서도 대부분 항목에서 통계적으로 동등한 수준인 것으로 나타나, 반복성과 재현성이 확보된 측정체계임을 확인하였다.

셋째, 수집된 자료 분석 결과 남녀 군인은 일반 성인 집단과 구분되는 체형 특성을 보였으며, 기관별 여군 집단 간에도 몸통둘레 중심의 체형 차이가 존재함을 확인하였다. 이는 군 피복·장구류 설계에서 군 특화형 치수체계의 필요성을 뒷받침하는 실증적 근거를 제공한다.

마지막으로, 본 연구는 군 인체측정체계의 개발·검증 과정을 학술적으로 제시하고 실제 측정자료까지 생산함으로써, 군수 분야의 인간공학적 설계 기반 마련이라는 실무적 기여와 함께, 군 인체자료 구축 방법론에 대한 학술적 기반을 제공하였다.

종합적으로, 본 연구는 군 환경에서 실질적으로 적용 가능한 표준화된 인체측정체계를 구축하고 그 신뢰도와 체형 특성을 검증함으로써, 향후 군 피복·장구류 규격 개정과 치수체계 개발, 군 인체 DB 구축 등으로 확장할 수 있는 기초 기반을 마련했다는 점에서 의의가 크다. 다만 본 연구는 측정대상 이 18~29세와 일부 기관으로 제한되어 전 장병 집단을 완전히 대표하기 어렵고, 직접측정 중심의 조사 특성상 일부 비가시성 기준점에서 오차 가능성이 존재한다는 한계가 있다. 향후 연구에서는 측정대상 범위의 확대와 3D 스캔 기반 정밀 측정기술의 도입을 통해 군 인체자료의 대표성과 활용성을 더욱 강화할 필요가 있다.

4.2. 제언

본 연구에서 구축된 군 인체측정체계와 수집된 인체치수 자료가 향후 군 피복·장구류 및 물자 설계 고도화에 실질적으로 반영될 수 있도록 다음을 제언하는 바이다.

첫째, 군 인체측정체계가 향후 지속적으로 활용되기 위해서는 정기적인 군 인체치수조사 체계의 마련이 필요하다. 장병의 체형 변화와 군수품 규격 개정 주기를 고려할 때, 한국인 인체치수조사 프로토콜과 연계된 군 인체치수조사를 주기적으로 실시함으로써 데이터의 최신성과 연속성을 확보해야 한다. 이를 위해 전담 조직을 지정하거나 관련 외부기관과의 연계를 통해 조사 경험과 전문 인력이 투입될 수 있는 운영 기반을 구축하는 것이 바람직하다.

둘째, 본 연구에서 적용한 스테이션 기반 측정 운영모델은 제한된 시간 안에 다수의 군인을 효율적으로 측정할 수 있다는 점에서 군 환경에 적합한 방식으로 확인되었다. 향후 군 인체치수조사의 규모를 확대할 때에도 이러한 운영 모델을 표준화하여 적용하면 조사 효율성과 측정 품질을 동시에 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

셋째, 측정 결과 직접측정 방식의 고유한 한계, 특히 비가시성 기준점과 자세 의존 항목에서 오차 발생 가능성이 일부 존재하였다. 이를 보완하기 위해서는 기준점 표시법, 도구 조작 절차, 측정자 교육을 정례화하여 정밀도 관리체계를 더욱 강화할 필요가 있다. TEM과 %TEM 기반의 신뢰도 평가도 매 조사

주기마다 반복 적용하여 측정 품질을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다.

넷째, 수집된 인체자료가 군 피복 및 장구류 설계에 활용되기 위해서는 데이터의 체계적 저장과 관리 또한 중요하다. 직접측정 자료와 향후 확장될 수 있는 3D 스캔 기반 자료가 상호 연계될 수 있도록 표준화된 데이터 구조를 마련하고, 군수품 설계 기관이 활용할 수 있는 통합 군 인체데이터베이스 구축을 고려해야 한다. 이러한 체계가 마련되면 군 복지·보급·설계 전 과정에서 과학적 근거에 기반한 의사결정이 가능해질 것이다.

다섯째, 군 체형은 일반 성인과 구별되는 경향을 보이므로, 수집된 인체자료가 군 규격과 신속하게 연계될 수 있는 체계를 구축하는 것이 중요하다. 나아가 이러한 자료는 가상착의, 디지털 트윈 기반 피복 검증, AI 기반 치수 추천 등 신기술과 결합될 경우, 군수품 설계의 정밀성과 개발 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

종합하면, 본 연구에서 제시한 군 인체측정체계를 기반으로 측정조사의 정례화, 신뢰도 관리의 강화, 통합 데이터 체계 구축, 그리고 군 규격과의 연계 체계 확립이 이루어진다면, 군 환경에 최적화된 과학적 체형 데이터 기반을 지속적으로 확보할 수 있을 것이다.

참고문헌

1 국가기술표준원. (2022, March 30). *한국인 평균 키 40년 전보다 남 6.4cm, 여 5.3cm 커졌다* [보도자료]. 산업통상자원부. https://www.kats.go.kr/content.do?cmsid=240&mode=view&page=19&cid=23007

2 Koo, D. S., Yoon, H. J., Jeon, C., & Kim, S. (2025). A Survey on the Supply of Combat Uniforms for Obesity Specimen Type. *The Korean Fashion and Textile Research Journal, 27*(4), 354-363. https://doi.org/10.5805/SFTI.2025.27.4.354

3 Gordon, C. C., Blackwell, C. L., Bradtmiller, B., Parham, J. L., Barrientos, P., Paquette, S. P., Corner, B. D., Carson, J. M., Venezia, J. C., Rockwell, B. M., Mucher, M., & Kristensen, S. (2014). *2012 anthropometric survey of U.S. Army personnel: Methods and summary statistics* (Technical Report No. NATICK/TR-15/007). U.S. Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center.

4 Garneau, C. (2024). *The Military Anthropometry Resource Companion (MARC): Overview and sample use cases* (Technical Note No. DEVCOM DAC-TN-2024-008). DEVCOM Analysis Center.

5 Size Korea. (n.d.). *사이즈코리아 소개*. https://sizekorea.kr/about/intro

6 Park, J., & Im, Y. (2022). Comparative Study on Domestic and Foreign Human Dimension for Product Design: Focused on Korean and American Anthropometric Data. *Journal of the Ergonomics Society of Korea, 41*(4), 317-325. https://doi.org/10.5143/jesk.2022.41.4.317

7 Kang, J., Jeon, H., Kim, E., Kim, K., Jung, H., & Lee, C. (2024). Cross-cultural comparison of body dimensions and trends: an analysis of ANSUR and Size Korea datasets for automotive seating design. *Ergonomics, 67*(1), 123-134. https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2206073

8 국방부. (2011). *軍 고기능성 차세대 신형 전투복 보급* [보도자료]. 국방부. https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=155785986

9 국가기술표준원, & 대한민국 공군. (2020). *3D 신체 Big data로 군복, 신발 등 맞춤형 軍보급시대 연다: 국가기술표준원·대한민국 공군과 상호협력 합의서 체결* [보도자료]. 산업통상자원부. https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156428782

10 Kim, D., Kim, S. W., & Yoon, M. (2020). A Study on the Improvement Suggestions of the Size System and Mass Production Quality for R.O.K. Navy Female's Winter Jumper: Based on Size Korea Data Analysis. *Korean Journal of Human Ecology, 29*(5), 711-724. https://doi.org/10.5934/kjhe.2020.29.5.711

11 Ministry of National Defense. (2025). *UNIFORM, COMBAT* (Defense Standard KDS 8415-4011, 8th rev.).

12 Jung, K., Jo, J., Jeong, J., Park, J., Lee, W., Uem, J., Lee, J., Kang, B., Kim, H., Park, S., & You, H. (2008). Anthropometric Analysis of Korean Helicopter Pilots for Helicopter Cockpit Design. *Journal of the Ergonomics Society of Korea, 27*(4), 37-44.

13 Ko, H., Lee, M., & Hong, S. (2023). A Study on the Improvement Direction on Combat Clothing through Comparison of Combat Uniforms Design between the ROK Army and the US Army. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 24*(9), 497-505. https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.9.497

14 International Organization for Standardization. (2017). *Basic human body measurements for technological design—Part 1: Body measurement definitions and landmarks* (ISO Standard No. 7250-1:2017).

15 International Organization for Standardization. (2017). *Size designation of clothes—Part 1: Anthropometric definitions for body measurement* (ISO 8559-1:2017).

16 International Organization for Standardization. (2023). *General requirements for establishing anthropometric databases* (ISO Standard No. 15535:2023).

17 국가기술표준원. (2021). *제8차 한국인 인체치수 조사사업: 최종보고서.*

18 국가기술표준원. (2019). *2020년 제8차 한국인 인체치수측정조사 대비 프로토콜 개발 최종보고서.*

19 Perini, T. A., de Oliveira, G. L., dos Santos Ornellas, J., & de Oliveira, F. P. (2005). Technical error of measurement in anthropometry. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte, 11*(1), 81-85. https://doi.org/10.1590/S1517-86922005000100009

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 252-261, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.022

항공용 실란트 성능 요구도 및 품질 인증 체계 고찰

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Study on the Performance Requirements and Material Qualification System of Aerospace Sealants

김희성, Heeseong Kim
한국항공우주산업(주), 재료공정팀, 책임연구원
Senior Research Engineer, Materials and Processes, Korea Aerospace Industries

안교진, Kyojin An
한국항공우주산업(주), 재료공정팀, 책임연구원
Senior Research Engineer, Materials and Processes, Korea Aerospace Industries

권동준†, Dong-Jun Kwon
경상국립대학교, 나노신소재융합공학과, 부교수
Associate Professor, Materials Science and Convergence Technology, Gyeongsang National University

박재철, Jaecheol Park
한국건설생활환경시험연구원, 영남본부, 수석연구원
Principal Researcher, Yeongnam Regional Headquarters, Korea Conformity Laboratories

Abstract

This study addresses the qualification criteria and approval processes for aerospace sealants in the context of AMS 3281. The primary objective is to reinterpret specification-based requirements from a design-oriented perspective and clarify the link between material characterization and manufacturing control within the certification framework. The core performance attributes, including sealing integrity, environmental durability, resistance to fluid exposure, and process applicability, are examined through a structured assessment of specification-defined test regimes. In parallel, the roles of the Process Control Document (PCD) and Statistical Process Control (SPC) are evaluated with respect to process consistency and data traceability. The analysis demonstrated that sealant performance arises from the combined influence of formulation, process variables, and service conditions rather than isolated material properties. Qualification is defined as the combined evaluation of compliance and process robustness. The findings provide a systematic interpretation of aerospace sealant certification and suggest directions for enhancing the domestic qualification infrastructure.

keywords : aerospace sealant, AMS 3281, material qualification system, PCD, SPC

† Corresponding Author : Dong-Jun Kwon
Tel : +82-55-772-1656, email : djkwon@gnu.ac.kr
Gyeongsang National University, 501, Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 28th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

항공기 구조에서 기밀 유지와 유체 누설 방지는 설계 단계에서부터 중요하게 고려되는 기본 요구조건 중 하나이다. 특히 연료탱크 및 구조 접합부와 같이 외부 환경과 직접 접촉하는 영역에서는 미세한 누설도 장기적인 안전 문제로 이어질 가능성이 존재하기 때문에, 이를 방지하기 위한 재료의 선택이 핵심 요소로 작용한다. 그렇기 때문에 Figure 1과 같이 항공용 실란트는 단순한 충전재를 넘어 항공기 운용 기간 동안 지속적으로 기능을 유지해야 하는 특수 재료로 분류되어 적용되고 있다[1].



Figure 1. Aerospace Sealant

실란트는 초기에는 비교적 단순한 탄성 고분자 시스템을 기반으로 사용되었으나, 항공기 운용 조건이 점차 가혹해짐에 따라 성능 요구 수준 역시 지속적으로 상향되어 왔다. 이에 따라 내화학성, 특히 항공유와의 상호작용에 대한 내유성을 확보할 수 있는 재료가 요구되었으며, 현재는 폴리설파이드(polysulfide) 계열이 대표적인 실란트 재료로 적용되고 있다[2-3]. 폴리설파이드계 실란트는 연료 노출 환경에서도 체적 변화 및 물성 저하가 상대적으로 적고, 장기간 밀봉 상태를 유지할 수 있는 특성을 가지고 있다[4-5].

항공기 운용 환경은 고도 변화에 따른 압력 차이, 반복적인 온도 사이클, 연료 및 외부 오염물질에 대한 지속적인 노출 등 복합적인 요인을 가지고 있다. 그렇기 때문에 실란트는 초기 물성뿐 아니라 장기적인 성능 유지 능력이 중요한 평가 항목으로 간주된다.

이와 같은 요구사항은 SAE AMS(Society of Automotive Engineers Aerospace Material Specification) 규격 체계에 반영되어 있으며, 그중 AMS 3281은 연료탱크 적용을 위한 실란트의 성능 기준을 규정하고 있다[6]. AMS 3281 규격은 항공유 노출 환경에서의 내화학성뿐 아니라 침투 저항성, 온도 변화에 따른 물성 안정성, 장기 밀봉 성능 등을 종합적으로 평가하도록 제시하고 있는데, 이는 실험실 수준의 단순 물성 평가를 넘어 실제 운용 환경을 모사한 조건에서 재료의 적합성을 검증하기 위한 것이다.

항공용 실란트는 일반 산업용 재료와 달리 인증 과정에서 요구되는 범위가 상대적으로 넓다. 재료의 성능 검증뿐 아니라 생산 공정의 일관성과 품질 관리 체계까지 포함하여 평가가 이루어지기 때문에, 기술 개발 이후에도 추가적인 검증 단계가 필요하기 때문이다. 이런 특성은 신규 소재의 시장 진입을 제한하는 요인으로 작용되며, 국내 산업에서는 여전히 해외 제품에 대한 의존도가 높은 상황이 초래하고 있다.

본 연구에서는 AMS 3281 규격을 기반으로 항공용 실란트의 성능 요구도를 설계 요구도 관점에서 재정리하고, 재료 성능 평가와 품질 시스템 검증이 결합된 인증 구조를 통합적으로 고찰한다. 또한 국내 산업 환경을 고려하여 시험 및 인증 인프라의 제약 요소를 도출하고, 향후 기술 적용 가능성 확대를 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 항공용 실란트 시장 특성 및 산업 구조 분석

항공우주 및 방산 분야에 적용되는 실란트는 운용 환경의 특수성으로 인해 일반 산업용 재료와 구별되는 독자적인 시장 특성을 가진다. 항공기 운항 증가와 유지보수 사업의 확대는 실란트 적용 수요와 직접적으로 연계되며, 최근에는 무인기 및 도심 항공 모빌리티와 같은 신규 플랫폼의 등장으로 적용 영역이

점차 확장되는 경향이 확인된다. 이런 변화는 단순 수요 증가를 넘어 적용 조건의 다양화로 이어지며, 재료 성능 요구 수준 또한 함께 고도화되고 있다.

재료의 성능 요구도는 규격을 통해 정량적으로 정의되며, 재료의 적용 가능 여부는 규격 적합성 검증 결과에 의해 결정된다.

실란트의 품질 인증 체계는 제조 공정 중심 접근과 성능 시험 중심 접근이 병행되는 구조로 구분된다. 전자는 공정 관리 능력과 생산 재현성을 핵심 요소로 다루며, 후자는 규격에서 정의된 시험 항목을 통해 재료의 기능적 적합성을 판단하는 데 중점을 둔다.

AMS 3281 규격에서는 물성, 기계적 특성, 환경 내구성 등을 포함한 시험 항목이 구체적으로 정의되어 있다. 그리고 원재료 관리 기준, 배합 조건, 제조 공정, 경화 조건 및 품질 검사 절차를 포함하는 PCD(Process Control Document)가 요구되며, 이를 통해 생산 과정의 일관성이 확보된다. 인증 시험을 통해 확보된 물성은 반복 생산 과정에서도 동일하게 재현되어야 하며, 공정 변경이 발생할 경우에는 동등성 검증 절차가 수행된다.

이와 같은 AMS 기반 인증 구조는 시장 공급 체계 형성에 직접적인 영향을 미친다. 규격 시험 수행, 공정 문서화, 반복 검증 과정은 상당한 시간과 기술적 역량을 요구하므로, 제한된 기업 중심의 공급 구조가 형성되는 경향이 나타난다. 즉, 일정 수준 이상의 인증 이력을 확보한 기업이 중심이 되는 공급 구조가 형성되어 신규 진입 장벽이 높아지게 된다. 국내의 경우 시험 인프라와 인증 경험의 제약으로 인해 항공용 실란트의 해외 공급 의존도가 높다.

3. 항공용 실란트 인증 체계

3.1. AMS 3281 기반 성능 평가 및 적용 구조

항공기 연료탱크 및 구조 접합부에 적용되는 실란트는 실제 운용 환경에서는 항공유와의 장기 접촉, 반복적인 온도 변화에 따른 열적 사이클, 고도 변화로 인한 압력 변화가 동시에 작용하므로, 초기 물성 확보도 중요하지만 장기 성능 유지 특성이 핵심 평가 기준으로 작용한다. 그렇기 때문에 재료 적합성 평가는 규격 기반 성능 검증과 실제 적용 조건을 고려한 추가 검증 절차가 결합된 형태로 수행된다.

항공용 실란트 인증은 AMS 상용규격을 중심으로 한 성능 평가 체계와 완제기 제작사의 QPL(Qualified Product List) 승인 절차로 구분된다. AMS 3281 규격은 실란트가 충족해야 할 요구 성능과 시험 방법을 정의하며, 재료의 적합성을 판단하기 위한 기준으로 활용된다. 해당 규격에 따른 시험 평가는 시공성, 기계적 특성, 환경 내구성 및 밀봉 성능을 포함하는 다층적 구조로 구성된다. 시험 항목은 실제 항공기 운용 환경을 반영하여 구성되며, 규격 요구조건을 만족하는 경우 재료의 기본 성능이 확보된 것으로 판단된다.

AMS 기반 인증 과정에서는 재료 성능뿐 아니라 제조 공정과 품질 관리 체계에 대한 요구사항도 함께 고려된다. SAE AS5502에서는 공정 관리, 데이터 추적성, 공정 변경 통제와 같은 품질 요소를 규정하고 있으며, Figure 2와 같은 SAE Aerospace Council의 AMS G-9 실란트 태스크 그룹을 통한 공정 검증 절차는 제조 공정이 규격 요구조건과 일관되게 유지되는지를 확인하기 위한 수단으로 적용된다[7-8]. 즉, 항공용 실란트 인증이 단순 시험 결과의 적합성 확인에 국한되지 않고, 제조 시스템의 일관성까지 포함하는 평가 체계임을 의미한다[9-10].

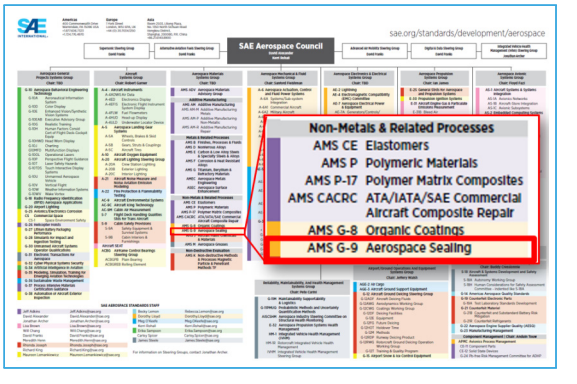


Figure 2. SAE Aerospace Council

완제기 제작사에서는 재료의 실제 적용 가능성을 검증하기 위해 Figure 3과 같이 단계적인 절차를 수행한다. 초기 단계에서는 실란트의 조성 설계 및 공정 조건이 설정되며, 반복적인 실험을 통해 공정의 재현성이 확보된다. 이후 확정된 조건을 기반으로 PCD가 작성되며, 원재료 관리 기준, 배합 절차, 제조 공정, 경화 조건 및 품질 검사 항목이 포함된다. PCD는 인증 시험 당시의 조건이 양산 과정에서도 동일하게 유지되도록 관리하기 위한 기준으로 활용되며, 공정 변경 시에는 추가적인 검증 절차가 요구된다.

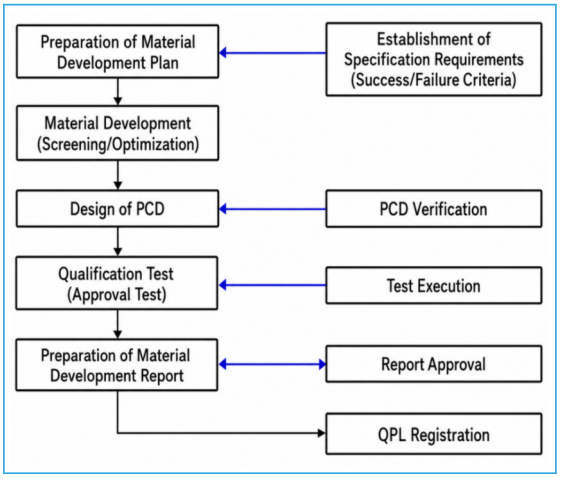


Figure 3. Flow Chart of Sealant Development

PCD 확정 이후에는 AMS 규격 또는 제작사 내부 요구사항에 따라 재료 인증 시험(material qualification)이 수행되며, 시험 결과는 기술자료 형태로 정리되어 승인 절차를 거친다. 시험 평가 결과가 요구 기준을 만족하는 경우 해당 재료는 QPL에 등록될 수 있으며, 이는 해당 재료가 규격 및 적용 요구조건을 충족함을 의미한다.

3.2. AMS 3281 시험 요구도

AMS 3281 시험 요구도는 단순 물성 확인을 넘어 실제 운용 환경에서의 성능 유지 여부를 검증하는 구조를 가지고 있으며, 실란트 성능을 제품 특성과 공정 변수로 구분하여 해석할 필요성을 내포하고 있다. AS9103에 따라 실란트의 설계 요구도와 직접적으로 연결되는 핵심 성능 요소는 KC(Key Characteristic)으로 정의되며, 이는 누설 방지, 내구성, 내식성과 같이 적용 환경에서 반드시 확보되어야 하는 기능적 요구를 의미한다[11]. KPP(Key Process Parameter)는 혼합 상태, 도포 조건, 경화 거동과 같은 공정 변수로 정의된다.

시험 평가 항목은 기능 단위로 구성되어 있으며, Table 1과 같이 누설 방지, 환경 내구성, 화학적 안정성, 공정 적용성, 경량화, 저장 안정성으로 구분할

Table 1. Sealing Material KC & KPP

No.	Sealing Material KC & KPP			
	Product KC	Process KC	Properties (AMS 3281)	Key Component
1	No leakage	Intimate contact, Curing	Flow, Peel, Cure time	Base Polymer, Adhesion promoter
2	Durability	Curing, Additives control	Weathering, Flexibility	Stabilizer, Plasticizer
3	No Corrosion	Sealant Chemical Composition	Hydrolytic stability, Corrosion resistance	Adhesion promoter, Antioxidant
4	Manufacturability	Application, Mixing	Application & Assembly time	Thixotropic Agent, Accelerator
5	Weight Reduction	Filler optimization	Specific gravity	Lightweight filler
6	Storage Stability	Formulation, Packaging	Storage stability	Stabilizer, Packaging form

수 있다. 각 항목은 독립적인 물성 평가라기보다 재료 조성, 공정 조건, 운용 환경이 상호작용하는 과정에서 나타나는 성능을 반영하도록 설계되어 있다. Table 2 ~ Table 7은 AMS 3281의 재료 성능 요구도를 Table 1의 핵심품질 특성인 Product KC로 구분하여 재구성한 내용이다.

3.2.1. 누설 방지 성능

유체의 밀봉 기능은 실란트의 가장 핵심 성능에 해당되며, 항공기의 구조적 안전성과 직접적으로 연결된다. 연료탱크와 같은 환경에서는 미세한 누설도 항공기 안전에 문제가 될 수 있기 때문에, 초기 단계에서부터 안정적인 밀봉 상태가 확보되어야 한다.

Table 2의 AMS 3281 요구사항에 따른 연료누설, 압력저항, 접착 및 연료탱크 모사 시험을 통해 실란트의 밀봉 성능을 검증한다.

실란트 적용 시에는 재료가 계면을 따라 충분히 퍼지면서도 과도한 흐름이 없어야 한다[12]. 동시에 경화가 일정한 시간 범위 내에서 진행되어야 구조적 안정성이 확보된다. 이러한 특성은 유동 거동, 박리 강도와 같은 접착 유지 특성, 경화 시간 등 시험을 통해 확인되며, 모든 요소가 균형을 이룰 때 밀봉 기능이 효과적으로 발현된다[13].

3.2.2. 환경 내구성

운용 환경에서는 온도 변화와 외부 노출 조건이 반복적으로 발생하므로, 실란트는 장기간에 걸쳐 물성 변화가 없는 상태를 유지해야 한다. 초기 시험 결과만으로는 충분한 판단이 어렵고, 시간 경과에 따른 성능 유지 여부가 중요한 기준으로 작용한다.

시험 평가는 환경 변화 이후에도 재료가 유연성을 유지하는지, 내부 구조가 안정적으로 유지되는지를 중심으로 이루어진다. 외부 환경에 노출된 이후에도 기능이 유지되는지를 확인하는 과정은 장기 사용 환경을 모사하는 시험을 통해 수행된다. 이러한 거동은 재료 내부 구조의 안정성과 밀접하게 연결된다. Table 3은 열충격 및 내후성 시험을 통해 물성 유지, 균열 방지 및 장기 환경 내구성을 검증하기 위한 AMS 3281의 시험요구사항이다.

3.2.3. 화학적 안정성

실란트는 금속 및 복합재와 직접 접촉하는 조건에서 사용되며, 연료 및 수분 환경이 동시에 작용되는 경우가 많다. 이와 같은 환경에서는 재료 자체의 안정성뿐 아니라 기재에 미치는 영향까지 함께 고려되어야 한다.

시험 평가과정에서는 장기간 노출 이후에도 화학

Table 2. Sealing Performance Requirements of AMS 3281

Product KC	Test Item	Requirement	Objective	Test Method
Sealing Performance	Fuel Leakage Test	No leakage	Verification of fuel tank sealing integrity	AS5127 Sec. 4.13
	Pressure Resistance	No leakage or failure	Performance under pressure conditions	AS5127 Sec. 4.14
	Adhesion (Lap Shear/Peel)	Above specified minimum	Interfacial sealing integrity	ASTM D1002/ ASTM D3167/ AS5127 Sec. 4.8
	Integral Tank Simulation	Performance retention	Validation under representative structural conditions	AMS 3281 Sec. 3 + AS5127 Sec. 4.15

적 변화가 발생하지 않는지, 그리고 기재 표면에 부식이 유도되지 않는지를 확인한다.

Table 4의 AMS 3281 요구사항에 따라 연료, 윤활유 및 수분 노출 조건에서 화학적 내구성과 유체 적합성을 검증한다.

3.2.4. 공정 적용성

실란트는 제품 생산 및 공정 적용과정에서 안정적인 취급 및 재현성 확보가 요구된다. 혼합, 도포, 조립 단계에서의 작업성은 최종 품질에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

시험 평가에서는 작업 가능 시간과 조립 가능 시간을 중심으로 공정 적합성을 확인한다. 해당 특성은 점도 변화와 경화 속도의 균형에 의해 좌우되며, 실제 공정 조건에서의 적용 가능성과 밀접하게 연계된다[14].

점도, 가용시간, 건조시간, 처짐 및 작업성 등 Table 5의 요구사항을 통해 실란트 혼합 재현성, 시공 중의 적용성, 작업 시간 및 수직면 안정성을 검증한다.

3.2.5. 경량화

항공기 기체구조에서는 중량 감소가 중요한 설계 요소로 작용한다. 실란트는 단일 적용량이 크지 않더

Table 3. Environmental Resistance Requirements of AMS 3281

Product KC	Test Item	Requirement	Objective	Test Method
Environmental Resistance	High Temperature Resistance	Property retention	Resistance to elevated temperature exposure	AS5127 Sec. 4.10
	Low Temperature Flexibility	No cracking	Prevention of brittle failure at low temperature	AS5127 Sec. 4.11
	Thermal Cycling	Performance retention	Resistance to repeated thermal loading	AS5127 Sec. 4.12
	Weathering / Aging	Limited degradation	Long-term environmental durability	ASTM G155

Table 4. Chemical Resistance Requirements of AMS 3281

Product KC	Test Item	Requirement	Objective	Test Method
Chemical Resistance	Fuel Immersion (Jet Fuel)	Limited swelling and degradation	Compatibility with aviation fuel	ASTM D471/ AS5127 Sec. 4.9
	Hydraulic Fluid Resistance	Property retention	Resistance to hydraulic fluid exposure	ASTM D471
	Oil Resistance	Limited property change	Resistance to lubricating oil exposure	ASTM D471
	Water Resistance	Property retention	Moisture resistance evaluation	ASTM D570

Table 5. Processability Requirements of AMS 3281

Product KC	Test Item	Requirement	Objective	Test Method
Process ability	Viscosity/Flow	Within applicable range	Applicability during installation	AS5127 Sec. 4.3
	Application Life (Pot life)	Minimum specified duration	Workable processing time	AS5127 Sec. 4.4
	Tack-Free Time	Within specified limit	Surface curing rate	AS5127 Sec. 4.5
	Workability	Uniform application achievable	Field applicabiliys	AS5127 Sec. 4.3
	Sag Resistance	No flow	Applicability on vertical surface	ASTM D2202
	Tooling Property	Adequate handling characteristic	Installation quality control	AS5127 Sec. 4.7
	Mixing Ratio	Within specified range	Reproducibility of material properties	PCD

라도 전체 적용 범위를 고려할 경우 누적 중량에 충분히 영향을 미칠 수 있다.

재료의 밀도가 경량화 특성을 정량적으로 판단하는 대표적인 지표로 활용되며, ASTM (American Society for Testing and Materials) D1475 시험 방법을 통해 단위 체적당 질량으로 평가된다. 경량화는 주로 재료의 조성 설계 단계에서 결정되며, 기계적 성능의 저하 없이 물성을 유지하는 것이 중요한 설계 기준으로 고려된다. Table 6의 요구사항에 따른 밀도, 인장강도, 신율, 경도 및 인열강도를 통해 경량화, 구조 건전성 및 균열 저항성을 검증한다.

3.2.6. 저장 안정성

실란트는 일정 기간 보관 이후에도 초기 성능이 유지되어야 하며, 이는 제품 신뢰성과 직결되는 요소이다. 보관 중 점도 변화나 경화 반응이 진행될 경우 실제 적용과정에서 문제가 발생할 수 있다.

시험 평가에서는 일정 기간 경과 이후에도 물성 변화가 허용 범위 내에 있는지를 확인하며, 시간에 따른 성능 유지 여부를 평가한다. 이러한 특성은 재료 조성과 함께 포장 방식 및 보관 조건의 영향을 받는다.

Table 7은 장기 저장 안정성과 저장 기간 동안 물

Table 6. Lightweight / Physical Properties Requirements of AMS 3281

Product KC	Test Item	Requirement	Objective	Test Method
Lightweight/ Physical Properties	Density	Tear Resistance	Weight reduction and uniformity	ASTM D1475
	Tensile Strength	Above specified minimum	Structural integrity	ASTM D412
	Elongation	Above specified minimum	Deformation capability	ASTM D412
	Hardness (Shore A)	Within specified range	Balance of elasticity and strength	ASTM D2240
	Tear Resistance	Above specified minimum	Crack propagation resistance	ASTM D624

Table 7. Storage Stability Requirements of AMS 3281

Product KC	Test Item	Requirement	Objective	Test Method
Storage Stability	Shelf Life	Retention over specified period	Long-term storage capability	AMS 3281 Sec. 3
	Viscosity Change	Limited variation	Stability during storage	ASTM D2196
	Separation	No separation	Maintenance of material homogeneity	ASTM D1849

성 유지성을 검증하기 위한 AMS 3281의 요구사항을 나타낸다.

4. 재료 품질 관리

항공용 실란트는 규격에 따른 인증 시험을 통해 성능 요구도와 작업성이 검증되며, 기준을 만족하는 경우 해당 재료는 해당 재료규격서 QPL에 등재된다. 이후 단계에서는 인증 과정에서 확보된 물성이 실제 생산 및 적용 환경에서도 동일하게 유지되도록 관리 체계가 운영되며, Figure 4와 같이 구조화된 품질 관리 절차가 적용된다.

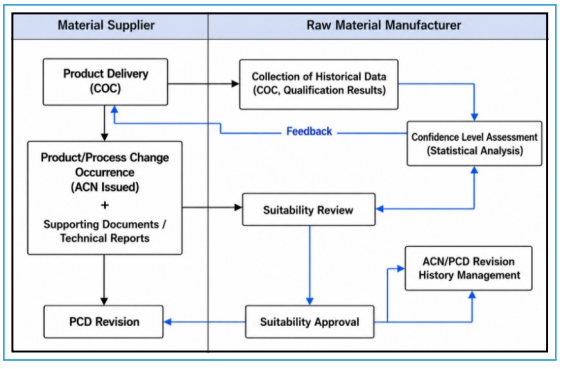


Figure 4. Flow Chart of Material Quality Control

QPL 등재 이후의 재료 품질 관리는 제조 공정의 일관성과 물성 재현성 확보를 핵심 목표로 한다. 이를 위해 제조 과정은 SPC(Statistical Process Control) 기반으로 운영되며, 재료규격서에서 요구하는 주요 특성 값에 대해 공정 데이터가 지속적으로 축적되고 분석된다. 각 특성치는 관리 한계 내에서 변동 여부가 평가되며, 이러한 데이터 기반 접근은 공정 안정성을 정량적으로 확보하는 수단으로 활용되고 있다.

초기 승인 이후에는 PCD의 개정 이력, 원재료 변경, 공급망 구성 변화 등 품질에 영향을 미칠 수 있는 요인을 정기적으로 검토한다. 검토 과정은 재료 특성 변화 가능성을 사전에 식별하기 위한 목적이며, 필요 시 재료 공급사에 기술적 협의 또는 공정 개선 요구로 이어진다. 이를 통해 공정 조건과 재료 특성 간의 일관성이 유지된다.

완제기 제작사는 납품된 재료에 대해 재료 공급사가 발행한 시험 성적서인 COC(Certificate of Conformance)와 입고 검사 데이터를 기반으로 물성 정보를 체계적으로 관리한다. 축적된 데이터는 Figure 5와 같이 통계적 방법을 통해 분석되며, 평균값뿐 아니라 분산, 편차, 이상 데이터 발생 여부 등을 함께 고려하여 품질 수준을 평가한다. 이러한 방식은 단일 시점의 결과가 아닌 장기적 경향을 반영한다는 점에서 중요하다.

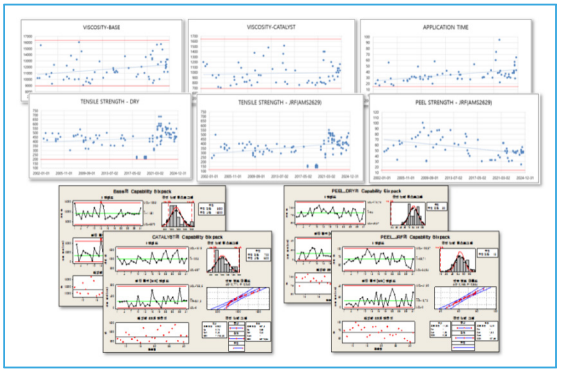


Figure 5. Statistical Process Control

Figure 6은 일반산업 특정 실란트 재료의 20년치 박리강도 물성으로 SPC 장기 데이터의 사례를 보여주고 있으며 제조사의 정량적 데이터는 생략하였다, 전체 측정값은 규격 요구 조건을 만족하는 범위 내에 분포하는 것으로 확인되지만, 시간 경과에 따라 평균값이 점진적으로 감소하는 경향이 관찰된다. 즉, 단기적인 공정 이상이 아닌 장기적인 물성 저하 경향이 존재함을 알 수 있다.

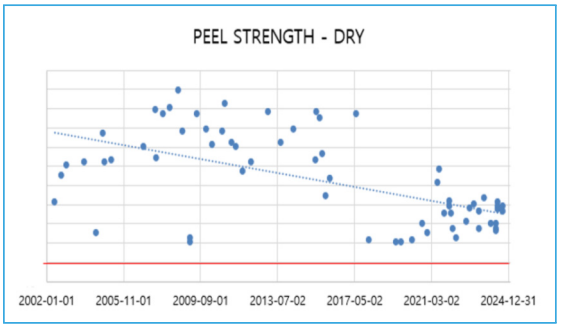


Figure 6. Example of Sealant Properties over 20 years

SPC 관점에서는 관리 한계를 벗어나는 이상점은 없으나, 평균 이동 또는 공정 중심의 편향이 점진적으로 진행되고 있는 상태로 해석할 수 있다. 특히 최근 영역은 20년 전 대비 데이터 분포가 상대적으로 낮은 영역에 집중되어 있으며, 이는 원재료 특성 변화, 배합 비율 미세 변동, 경화 조건 변화 또는 저장 조건 영향과 같은 공정 인자의 누적 효과로 설명될 수 있다. 결국 개별 로트 수준에서는 규격 적합성을 유지하더라도, 장기적으로는 품질 안정성에 잠재적 위험 요소로 작용할 가능성을 보여주고 있다.

그렇기 때문에 항공산업에서는 PCD 개정이 이루어질 경우에는 변경 내용이 재료 성능 및 적용 적합성에 미치는 영향을 별도로 분석해야 하며, 필요시 추가 시험을 수행하여 기존 QPL 등재 상태의 유지 가능성을 검토해야 한다. 특히 원재료 구성, 공정 변수, 경화 조건과 같은 요소의 변화는 기계적 특성 및 화학적 안정성에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로, 이에 대한 체계적인 영향성 평가가 요구된다.

5. 국산화 및 인증 인프라 현황

물리적 특성, 기계적 성능, 환경 내구성, 화학적 안정성 및 공정 적용성을 포함하는 항공용 실란트 인증 체계는 실제 항공기 운용 환경을 모사하도록 설계되어 있기 때문에 이와 같은 전반적 시험 요구를 국내에서 통합적으로 수행할 수 있는 기반은 아직 충분히 확보되지 않은 상태로 평가된다. 그래서 일부 항목은 국내에서 제한적으로 수행되는 반면, 핵심 성능 검증은 해외 시험기관에 의존하는 구조가 형성되어 왔다. 이는 시험 비용 증가와 인증 기간 지연을 동시에 유발하게 되며, 신규 실란트 소재의 적용 확장성을 제한하는 요소로 작용할 수 있다. 또한 인증 실적을 중심으로 형성된 공급 체계와 결합될 경우, 시장 진입 장벽은 더욱 높아지게 될 것으로 보여진다.

최근에는 이러한 한계를 완화하기 위한 연구개발 활동이 진행되고 있으며, Figure 7과 같이 실란트 국산화 개발과 병행하여 인증 기반 구축을 위한 시험평가 체계 정립이 동시에 진행되고 있다[15]. 단순 물성 확보 중심의 연구 범위를 넘어, 시험-평가-인증으로 연계되는 전주기 구조를 구축하는 방향으로 확장되고 있는 것으로 보여진다.



Figure 7. R&D Program for Sealant Localization and Certification Infrastructure Development

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 AMS 3281 규격을 기반으로 항공용 실란트의 성능 요구 구조와 인증 체계를 고찰하였다.

실란트는 복합 환경에서 장기 성능 유지가 요구되는 고신뢰성 재료로 정의되며, 성능은 재료 조성과 공정 변수의 결합 결과로 해석된다.

시험 평가 체계는 누설 방지, 환경 내구성, 화학적 안정성, 공정 적용성 등 기능 단위로 구성되며, 성능은 재료 조성뿐 아니라 공정 변수와 운용 환경이 결합된 결과로 나타난다. 재료 특성은 KC와 KPP의 구조를 기반으로 구성되며, 실란트 성능이 재료 설계와 제조 공정에 의해 결정됨을 의미한다.

재료 인증은 규격 시험과 공정 품질 관리가 결합된 형태로 평가되며, PCD를 기반으로 한 공정 일관성 확보가 필수적으로 요구된다. 최근 국산화와 연계된 인증 인프라 구축이 확대되고 있으며, 향후 적용 기반은 점진적으로 확장될 것으로 판단된다.

참고문헌

1 Duell, A. A. (1967). Selection of sealants for integral fuel tanks. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 39*(12), 10–13. https://doi.org/10.1108/eb034317

2 Usmani, A. M. (1982). Chemistry and technology of polysulfide sealants. *Polymer-Plastics Technology and Engineering, 19*(2), 165–199. https://doi.org/10.1080/03602558208067730

3 Clark, L. J., & Cosman, M. A. (2003). Use of Permapol® P3.1 polymers and epoxy resins in the formulation of aerospace sealants. *International Journal of Adhesion and Adhesives, 23*(5), 343–348. https://doi.org/10.1016/S0143-7496(03)00002-2

4 Lowe, G. B., Lee, T. C. P., Comyn, J., & Huddersman, K. (1994). Water durability of adhesive bonds between glass and polysulfide sealants. *International Journal of Adhesion and Adhesives, 14*(2), 85–92. https://doi.org/10.1016/0143-7496(94)90002-7

5 Giannis, S., Adams, R. D., Clark, L. J., & Taylor, M. A. (2008). Investigation of the water and fuel exposure characteristics of aircraft fuel tank sealants and the effect on their glass transition temperature. *Journal of Applied Polymer Science, 108*(5), 3073–3091. https://doi.org/10.1002/app.27961

6 SAE International. (2022). *AMS3281G: Sealing compound, polysulfide (T) synthetic rubber for integral fuel tank and fuel cell cavities low density for intermittent use to 360°F (182°C)*. https://doi.org/10.4271/AMS3281G

7 SAE International. (2024). *AS5502F – Standard requirements for aerospace sealants and adhesion promoters*. https://doi.org/10.4271/AS5502F

8 SAE International. (n.d.). *SAE Aerospace Council*. https://saebrand.widen.net/s/km5qdsj5vt/p251926250_update_aero_org_chart_fe

9 Lee, H.-S. (2007). Certification methodology of aerospace materials system. *Journal of Aerospace System Engineering, 1*(2), 13–20.

10 Kwon, H. M., Hong, S. H., Lee, M. K., & Lim, S. U. (2016). Literature Review on the Statistical Quality Control in Journal of the KSQM for 50 Years. *Journal of Korean Society for Quality Management, 44*(1), 1–16. https://doi.org/10.7469/JKSQM.2016.44.1.001

11 SAE International. (2022). *AS9103B: Aerospace series — Quality management systems — Variation management of key characteristics* (SAE Standard No. AS9103B). https://doi.org/10.4271/AS9103B

12 Usmani, A. M., Chartoff, R. P., Warner, W. M., Butler, J. M., Salyer, I. O., & Miller, D. E. (1981). Interfacial considerations in polysulfide sealant bonding. *Rubber Chemistry and Technology, 54*(5), 1081–1095. https://doi.org/10.5254/1.3535847

13 Giannis, S., & Adams, R. D. (2019). Failure of elastomeric sealants under tension and shear: Experiments and analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives, 91*, 77–91. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.03.007

14 Pirayesh, A., Salami-Kalajahi, M., Roghani -Mamaqani, H., & Najafi, F. (2019). Polysulfide Polymers: Synthesis, Blending, Nanocomposites, and Applications. *Polymer Reviews, 59*(1), 124–148. https://doi.org/10.1080/15583724.2018.1492616

15 오상미. (2024). *경남 양산에 우주항공·방산용 실란트 소재 국산화 실증평가 기반 구축*. 기계신문. https://www.mtnews.net/news/articleView.html?idxno=19088

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 262-270, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.023

함정용 HPC 시스템을 위한 수랭식 소형 캐비닛의 설계 최적화 및 실험적 검증

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Design Optimization and Experimental Validation of a Water-Cooled Compact Cabinet for Naval High-Performance Computing Systems

김혜민†, Hyemin Kim
한화시스템, HW1팀, 전문연구원
Senior Engineer, HW Team 1, Hanwha Systems

최윤혁, Yoonhyuck Choi
한화시스템, 기계기술팀, 전문연구원
Senior Engineer, Mechanical Engineering Team, Hanwha Systems

김현실, Hyunsil Kim
국방과학연구원, 제5기술연구원 제1체계개발단, 책임연구원
Senior Researcher, 5th R&D Institute 1st PMO, Agency for Defense Development

Abstract

The integration of virtualization and artificial intelligence (AI) into modern naval combat systems has accelerated the development of high-performance computing (HPC)-based equipment for satisfying advanced operational requirements. However, the substantial heat generated and the relatively large form factor of HPC systems present significant challenges for their deployment in military platforms, where compact design and stable performance are critical. In naval applications, the operational stability of shipborne cabinets is directly linked to overall system performance and vessel survivability. Consequently, maintaining optimal thermal conditions for onboard devices is essential. Typical cooling approaches include air cooling and liquid cooling systems, with sealed configurations often adopted in liquid-cooled designs to enhance the heat dissipation efficiency. In this study, a compact cooling structure of a Cabinet with HPC was developed to improve the spatial efficiency in naval environments. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed to evaluate the thermal fluid behavior and verify the operational stability under high-temperature conditions. Subsequently, high-temperature operational tests were conducted, and the results demonstrated a consistent performance. The maximum deviation between the CFD predictions and experimental temperature measurements was within 4.2%, confirming both the operational stability of the system and the reliability of the numerical analysis.

keywords : HPC, naval cabinet cooling, liquid cooling system, combat system cabinet

† Corresponding Author : Hyemin Kim
Tel : +82-54-460-8736, email : hm09.kim@hanwha.com
Hanwha Systems, 39370, 264-60, Sanho-daero, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 30th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

최근 해군 전력의 스마트화와 디지털 전환을 본격화하면서 함정에는 가상화 기반 및 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기반의 상황인식, 자율 제어, 고속 신호처리, 통신 기능을 수행하는 첨단 전자장비가 탑재되고 있다[1-2]. 이러한 시스템은 방대한 양의 센서 데이터를 실시간으로 분석하고, 고도화된 알고리즘을 통해 전술적 결정을 지원하기 위해 HPC(High-Performance Computing)가 요구된다[3]. 그 결과, 함정 내부에는 높은 연산 처리와 전력 소모를 수반하는 장비가 증가하게 되었으며, 이는 시스템의 발열 증가로 이어지고 있다[4-5]. 기존 함정용 전자장비 캐비닛은 주로 단일 보드 컴퓨터(Single Board Computer, SBC) 기반의 VME(Versa Module Eurocard bus) 랙 구조를 중심으로 개발되어 왔다. 이러한 구조는 상대적으로 낮은 전력 밀도와 발열 특성을 가지는 장비에 적합하며, 공랭 방식뿐만 아니라 열교환기 및 수랭식 냉각을 포함한 다양한 냉각 기술이 적용되어 왔다. 특히 수랭식 냉각 방식은 고발열 장비의 열 제거를 위해 다수의 연구 및 적용 사례가 보고되고 있다. 그럼에도 불구하고, 기존 연구는 주로 개별 장비 수준의 열관리 또는 공랭 기반 성능개선에 초점을 두고 수행된 경우가 많으며, HPC와 같은 고발열 장비를 대상으로 함정의 밀폐 환경 및 운용 조건을 동시에 고려한 캐비닛 단위의 냉각구조 설계와 이에 대한 실험적 검증 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 이와 같은 고발열 장비가 제한된 공간 내에 고밀도로 집적되어 설치되면 열이 축적되는 문제가 발생하게 된다. 또한 함정 특유의 밀폐된 구조, 고온·고습·진동 등 가혹한 해양 운용환경으로 인해 열 방출이 더욱 어려우며, 이에 인한 냉각성능 저하 시 전자장비의 성능 저하는 물론 오작동, 열 피로에 의한 수명 감소, 영구 손상이 발생할 수 있다[4,6]. 이는 단순한 장비의 고장을 넘어서 함정 운용 핵심기능의 상실로 이어지며, 전투 수행 능력과 생존 가능성을 심각하게 위협하게 된다. 특히, 가상화 기반 및 AI 기반 시스템의 경우 HPC를 활용한 실시간 데이터 처리와 안정적인 연산 수행이 필수적이며, 열로 인한 성능 저하 또는 시스템 불안정은 지휘·통제 기능의 저하로 직결될 수 있다. 따라서 이러한 시스템의 안정적인 운용을 위해서는 제한된 공간과 밀폐구조를 고려한 효과적인 열관리 방안이 요구된다. 수랭식 냉각 방식은 고발열 전자장비의 열 제거에 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 특히 밀폐구조와 제한된 공간을 가지는 함정 환경에서는 공랭 기반 냉각의 적용이 제한되기 때문에 캐비닛 단위 열관리를 위한 현실적인 대안으로 고려될 수 있다. 따라서, 생존성 확보를 위해 고온의 환경과 내부 장치의 발열에도 안정적으로 작동할 수 있는 전자장비 캐비닛 단위의 냉각구조 설계가 핵심 기술 과제로 요구된다[6].

본 연구에서는 HPC를 적용한 함정용 캐비닛을 대상으로, 내부 발열 조건과 운용환경을 고려한 냉각구조를 설계하였다. 설계안에 대하여 수치해석과 고온운용시험을 통해 캐비닛 냉각구조의 안정성을 실험적으로 검증하였다. 이를 통해 HPC를 적용한 함정용 캐비닛의 안정적인 운용을 뒷받침할 수 있는 실질적 냉각 설계 방안을 제시하고, 향후 HPC 기반 함정 캐비닛의 신뢰성과 생존성을 향상시키고자 한다.

2. 냉각구조 설계 및 검증

HPC를 적용한 함정용 캐비닛의 효율적인 냉각구조를 설계하고, 수치해석을 통한 사전 검증과 실제 장비에 대한 고온운용시험 및 온도 측정을 통해 수치해석의 신뢰성과 냉각구조의 안정성을 검증하고자 하였다.

이를 위해 세부 목표를 Figure 1과 같이 캐비닛 성능요구조건 확인, 운용 외기온도 기준 선정, 냉각구조 설계, 수치해석 수행, 고온운용시험 수행, 수치해석 데이터와 고온운용시험 측정 데이터 비교 및 검증 순으로 설정하였다.

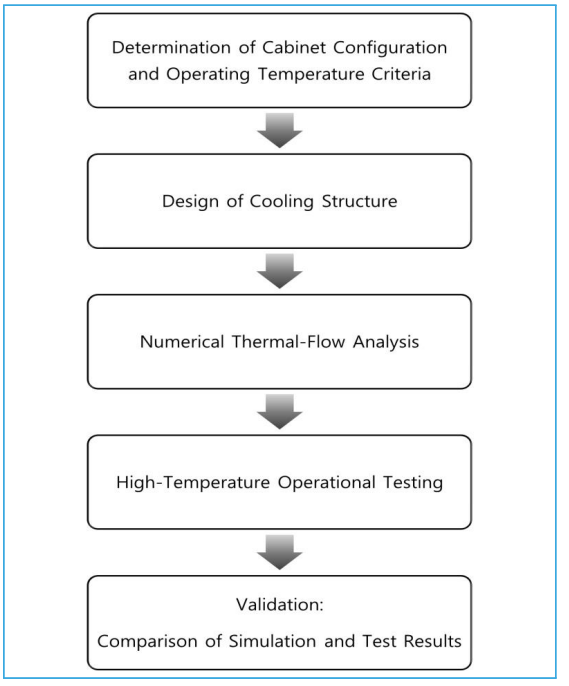


Figure 1. Verification Process of Cooling Structure of Electronic Equipment Cabinet

2.1. 캐비닛 구성 및 작동온도 기준

함정은 고온·고습 및 밀폐구조의 해양환경에서 장기간 운용되므로, 장비의 운용성과 생존성 확보를 위해 내환경성이 필수적으로 요구된다. 특히, HPC는 높은 발열 특성으로 인해 캐비닛 내부 온도가 상승할 수 있으며, 적절한 열관리가 이루어지지 않을 경우 성능 저하 또는 장비 손상이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 수랭식 냉각시스템을 적용하여 캐비닛 단위에서 자체 냉각성능을 확보하고자 하였다. 함정에 설치되는 전자장비는 장기간 해양환경에서 운용되므로, 운용성과 생존성 확보를 위해 관련 규격에서 요구하는 내환경 조건을 만족해야 한다. 함정의 내환경성 조건 및 운용 기준은 국가 및 적용 규격에 따라 상이하며, 한국 해군에서는 함정 설계/건조 기준과 미국 군사규격인 MIL 규격을 주로 적용하고 있다. 함정 설계/건조 기준에 따르면 공조장치가 운용되는 함 내에 설치되는 전자장비의 경우에 운용온도 기준을 0℃~50℃로 명시하고 있으며, 해당 온도 범위에서 장비의 정상 작동이 보장되어야 한다. 반면, MIL-STD-810H에는 한국지역(Basic Hot(A2)) 기준 운용가능온도를 0℃~43℃로 명시하고 있다[7]. 본 연구에서는 고온 환경에서의 운용 안정성을 보다 보수적으로 확보하기 위해 MIL 기준보다 7℃ 높은 함정 설계/건조 기준을 적용하였으며, 이에 따라 캐비닛의 운용가능온도의 기준을 50℃로 설정하였다.

2.2. 냉각구조 설계

함정용 캐비닛은 해양환경으로 인해 높은 습도와 염분에 노출될 수 있으므로, 캐비닛 내부에 탑재되는 장비 보호를 위해 밀폐구조를 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 밀폐구조는 자연대류에 의한 냉각을 제한하여 내부 열축적을 유발하며, 이로 인해 시스템 성능 저하, 작동 중지 및 장비 수명 단축이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 냉각수를 이용한 열교환 방식을 적용하여, 캐비닛 내부에서 발생한 열을 외부로 효과적으로 배출할 수 있도록 설계하였다. 또한 함정의 구조적 특성상 장비 설치 공간이 제한적이므로, 컴팩트한 구조 내에서 냉각성능을 확보할 수 있는 설계가 요구된다[6]. 특히, 인공지능, 가상화 및 시뮬레이션 등에 활용되는 HPC는 다수의 CPU와 GPU를 기반으로 높은 연산성능을 제공하는 동시에 높은 발열량 특성을 가진다. 이러한 발열을 해소하기 위해 HPC 내부에는 방열판과 송풍팬이 적용된 공랭구조가 포함되어 있으며, 그로 인해 HPC는 기존 단일 보드 컴퓨터 기반의 VME 또는 VPX(Versatile Performance Switching) 시스템 대비 깊이가 큰 구조를 갖는다.

본 연구에서 설계된 HPC를 적용한 함정용 소형 캐비닛에는 가상화 기반 전투체계의 원활한 운용을 지원하기 위해 HPC(5대), 안정적인 전원공급을 위한 전원공급장치(power supply unit), 내·외부 장비 간 통신을 위한 네트워크장치(network unit)가 통합 탑재되며, 그 외에 구성품으로는 몸체조립체, 냉각시스템(cooling system), 환경제어장치 등이 있다. 주요 장치는 IEC 60297-3-101의 19인치 표

준 랙 규격을 적용하였다[8].

또한, HPC는 장치 내부에 적용된 송풍팬에 의해 Figure 2와 같이 공기가 전면에서 유입되어 후면으로 배출되는 유동구조를 가지며, 냉각시스템은 Figure 3과 같이 열교환기와 다수의 송풍팬으로 구성되어 가열된 공기를 열교환기로 인입시키고 냉각된 공기를 배출시키는 재순환 구조로 설계하였다.

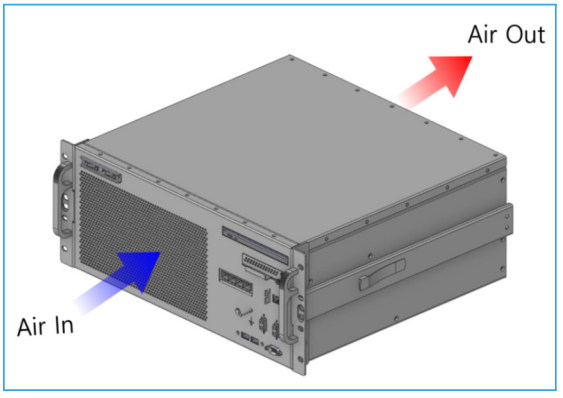


Figure 2. HPC Geometry and Airflow Path of Electronic Equipment Cabinet

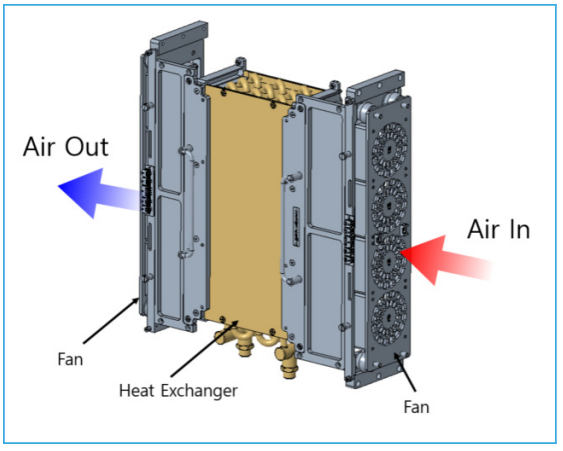


Figure 3. Cooling System Structure and Airflow Path

이와 같은 공기 유동 특성을 기반으로 캐비닛 내부의 냉각효율을 극대화하고 전체 크기를 최소화하기 위해 주요 장치와 냉각시스템의 배치를 최적화하였다. 주요 장치는 캐비닛 우측에 적층구조로 배치하고, 냉각시스템은 좌측 상·하부에 분산 배치하였다. 또한, 전·후면에 공기 유동 공간을 확보하여 내부 공기 유동이 원활하게 형성되도록 설계하였으며, 캐비닛 내부의 공기 유동은 Figure 4와 같다.

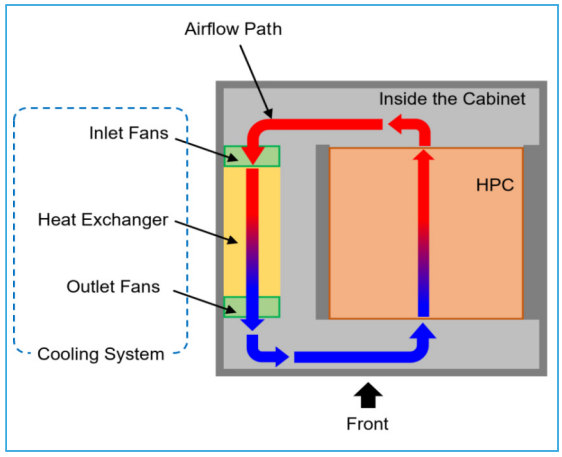


Figure 4. Electronics Placement and Airflow Path

2.3. 수치해석

2.3.1. 해석 모델링 구성

수치해석을 통해 작동 외기온도 기준 50℃에서의 온도분포 및 공기 유동을 확인하고 장치의 작동 가능 온도와 비교를 통하여 HPC를 적용한 함정용 캐비닛의 냉각구조에 대해 고온 환경의 운용 안정성을 확인하고자 하였다. 수치해석은 CFD 소프트웨어인 ANSYS Icepak(v2024 R1, ANSYS, USA)을 활용하였으며, 해석 난류모델 중 Two-equation(k-ε) 방정식 모델을 사용하였다[9-10]. 해석은 Intel Xeon w5-3435X CPU(3.10 GHz, 16 cores), 256 GB RAM이 탑재된 워크스테이션으로 수행하였다. 병렬 연산을 위해 12 Cores를 활용하였으며, 해석 소요시간은 약 22시간이었다. 수치해석의 결과에 영향을 미치는 캐비닛 구성은 크게 발열원인 주요 장치와 냉각시스템으로 구분할 수 있다. 주요 장치의 경우 캐비닛 내부에 탑재되어 운용 부하가 증가함에 따라 소비전력이 증가하며, 그에 비례하여 발열량 역시 증가한다.

캐비닛의 최대 성능에서의 운용 안정성을 확인하

기 위하여 최대 부하 상태에서의 발열량을 적용하였으며, 주요 발열원의 발열량은 전원공급장치의 경우 255W, HPC(5대)는 532W, 네트워크장치는 500.5W로 Table 1과 같다.

Table 1. Heating Value by Device

Equipment	Heating Value (W)	Category
Power Supply Unit	255.0	Development Equipment
HPC	532.0	Commercial Equipment
Network Unit	500.5	

수치해석을 위해 Figure 5와 같이 해석 모델링을 구성하였다. 효율적인 해석을 위해 주요 장치의 경우 내부 벤트(vent) 및 송풍팬을 구현하였으며, 냉각시스템의 경우 흡·배기를 위한 다수의 송풍팬과 물을 냉매로 활용하는 열교환기를 구현하였으며, 그 외에

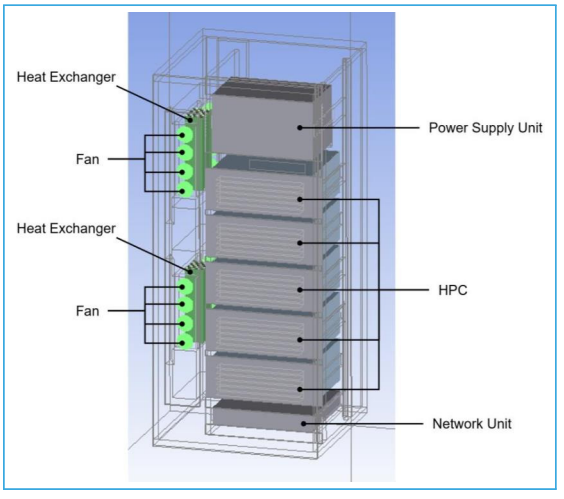


Figure 5. Numerical Thermal Analysis Modeling

수치해석에 영향이 적은 부분에 대하여 형상 제거 또는 단순화를 진행하였다. 각 구성품의 주요 재질은 알루미늄(Al)을 적용하였으며, 열교환기는 구리(Cu)를, 열교환기의 냉매제는 물(H_2O)을 적용하였다.

2.3.2. 수치해석 결과

주요 장치들의 안정적인 성능 확보를 위해는 장치 주변에 원활한 공기 유동이 형성되어야 하며, 각 장치의 운용가능온도 이하로 유지되는 것이 요구된다. 수치해석을 통해 주요 장치 주변 공기의 평균온도와 유속을 분석하였다. 주요 장치의 운용가능온도 범위는 전원공급장치가 0℃~+55℃, HPC는 -15℃~+55℃, 네트워크장치는 -5℃~+55℃이며, 모든 장치의 최고 운용가능온도는 55℃로 동일하다. 수치해석 결과는 Table 2와 같으며, 주요 장치의 주변부 유속의 경우 전원공급장치는 1.6~2.3m/s, HPC는 2.1~5.4m/s, 네트워크장치는 1.2~2.2m/s로 나타났다. 네트워크장치 주변의 유속은 전원공급장치 및 HPC 대비 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. Figure 6(a)는 상부 열교환기에 의해 냉각된 공기가 배기용 송풍팬에 의해 캐비닛 전면으로 배출된 공기 유동과 유속의 변화를, Figure 6(b)는 하부 열교환기에 의해 냉각된 공기가 배기용 송풍팬에 의해 캐비닛 전면으로 배출된 공기 유동과 유속의 변화를 보여주고 있으며, Figure 6(c)는 상·하부 열교환기의 전체 공기 유동구조를 나타내고 있다. 상·하부 열교환기의 송풍팬에 의해 배출된 냉각된 공기는 HPC 전면에서 내부로 인입되어 HPC 내부의 발열소자들을 냉각시키고 가열된 공기는 HPC에 장착된 송풍팬을 통해 캐비닛 후면으로 배출된다. HPC로 인입되는 공기를 제외한 나머지 냉각된 공기는 캐비

Table 2. Ambient Average Flow, Ambient Average Temperature and Operational Temperature by Equipment

Equipment	Ambient Flow (m/s)	Ambient Average Temperature (℃)	Operational Allowable Temperature (℃)
Power Supply Unit	1.6 to 2.3	49.0	0 to +55
HPC	2.1 to 5.4	47.5	-15 to +55
Network Unit	1.2 to 2.2	52.2	-5 to +55

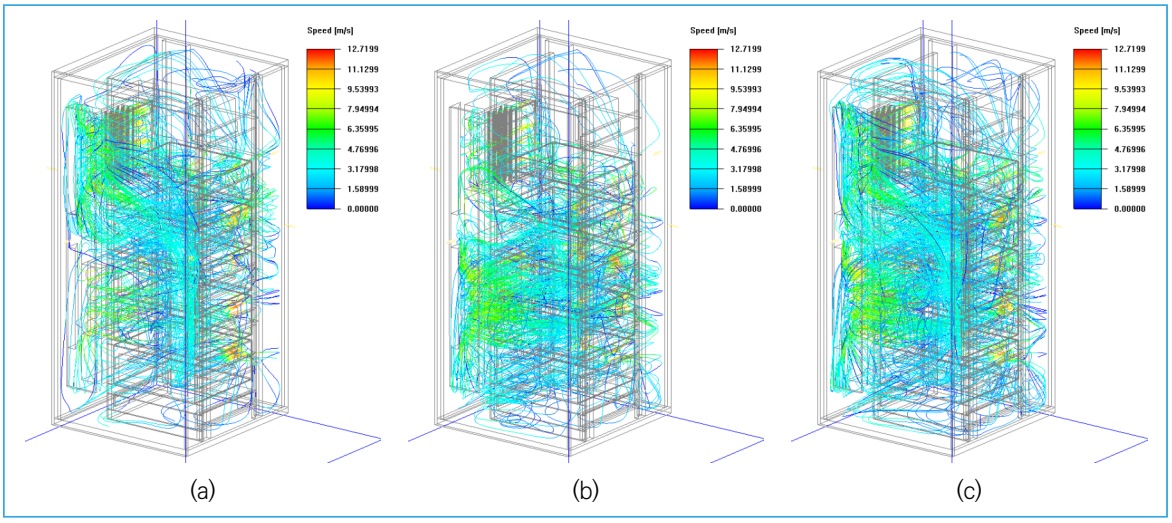


Figure 6. Streamlines started at Exhaust Fans; (a) of Upper Heat Exchanger, (b) of Lower Heat Exchanger and (c) of All Heat Exchanger

닛의 전반적인 내부를 순환하며 전원공급장치와 네트워크장치를 냉각시키고 가열된 공기는 열교환기의 흡기용 송풍팬에 의해 인입되어 열교환기에 의해 다시 냉각되고 배기용 송풍팬에 의해 배출되는 순환 유동구조를 형성한다. 이는 Figure 4에서 제시한 냉각 유동 설계 개념과 동일하다. 각 주요 장치의 주변 평균온도의 경우 전원공급장치는 49.0℃, HPC는 47.5℃, 네트워크장치는 52.2℃로 나타났으며, 캐비닛 하부에 위치한 네트워크장치의 주변 온도가 가장 높은 것으로 확인되었다. 주요 장치 주변 온도 분포를 분석하기 위해 캐비닛 내부공기 온도를 기준으로 온도별 영역을 iso-surface로 나타내었다. Figure 7(a)의 40℃와 Figure 7(b)의 43℃ 공기영역은 냉각시스템이 위치한 캐비닛 좌측과 캐비닛 중앙의 HPC 전면에 분포를 나타내고 있으며, Figure 7(c)는 46℃의 공기영역으로 캐비닛 전면과 캐비닛 중앙의 HPC 전·후면에 걸쳐 분포하는 것으로 나타났다. Figure 7(d)는 49℃의 공기영역으로 캐비닛 전면, 상부 및 후면에 전반적으로 분포하며, Figure 7(e)는 52℃의 공기영역으로 캐비닛 하부 및 우측면에

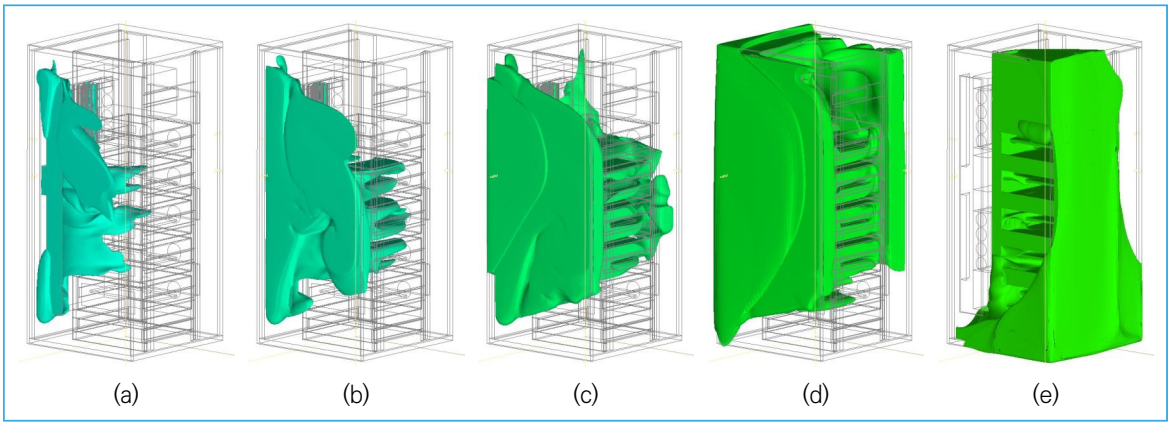


Figure 7. Temperature Iso-surface of the Air Inside the Cabinet; (a) at 40℃, (b) at 43℃, (c) at 46℃, (d) at 49℃ and (e) at 52℃

집중적으로 분포하는 것이 확인되었다. 이 결과로 캐비닛 하부와 우측면에서 캐비닛 하부와 우측면에 상대적으로 높은 온도 영역이 형성됨을 확인할 수 있었다. 주요 장치 주변의 평균온도가 모두 운용 가능 최고온도인 55℃ 이하로 유지됨을 확인하였으며, 이를 통해 HPC를 적용한 캐비닛에 대한 운용 안정성을 확보하였다고 판단할 수 있다.

2.4. 고온운용시험 및 온도 측정

2.4.1. 시험 및 측정 방법

냉각구조 설계에 맞추어 설계된 캐비닛을 제작하였으며, 수치해석 결과의 신뢰성 검증과 실제 고온 환경에서의 운용 안정성 확인을 위해 온도 측정 및 고온운용시험을 수행하였다. 고온운용시험은 MIL-STD-810G, Method 501.5를 기준으로, 본 연구에서 설정한 목표 운용온도인 50℃ 조건에 맞도록 테일러링(tailoring)하여 적용하였다. 또한, 온도시험챔버(heating & cooling chamber)를 활용하여 Figure 8과 같이 고온운용시험을 수행하였다. 수치해석 결과와 시험측정 온도의 비교를 위해 고온운용시험 동안 캐비닛 내부 주요 위치에서 온도 측정을 수행하였다.



Figure 8. High Temperature Operation Test

온도 측정은 온도시험챔버의 외기온도가 50℃로 충분히 안정화된 상태에서 캐비닛을 최대 운용 조건으로 설정한 상태에서 수행하였으며, 열평형에 도달한 이후의 온도 구간을 분석 대상으로 설정하였다. 해당 구간에서 측정된 데이터 중 상·하위 5%를 제외한 데이터의 평균온도를 측정 온도로 정의하였다.

온도 측정 위치는 냉각시스템의 열교환 성능과 캐비닛 내부 온도 분포 특성을 함께 평가하기 위해 선정하였다. 냉각시스템의 열교환 성능 확인을 위해 상부 냉각시스템의 공기 배기부(Point.1)와 흡기부(Point.2), 하부 냉각시스템의 공기 배기부(Point.3)와 흡기부(Point.4), 수치해석 결과에서 상태적으로 높은 공기 온도가 나타난 전원공급장치의 우측 후면부(Point.5)와 네트워크장치의 우측 후면부(Point.6)를 포함하여 총 6부위에서 온도를 측정하였으며, 그 위치는 Figure 9와 같다.

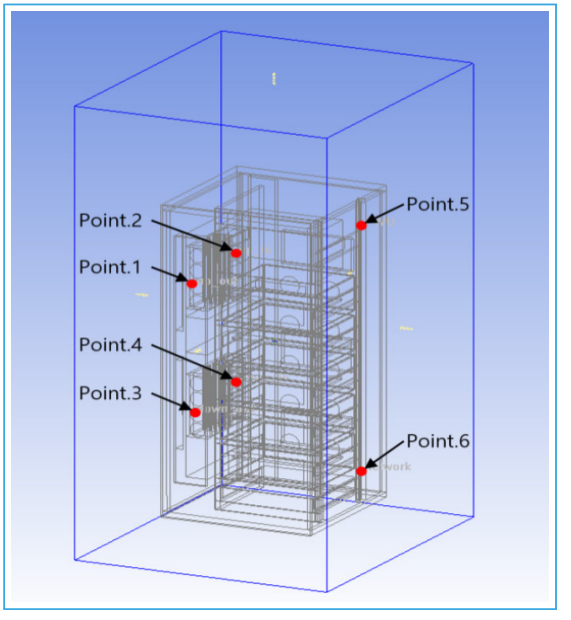


Figure 9. Temperature Measurement Points

2.4.2. 시험 및 측정 결과

고온운용시험 동안 캐비닛의 운용상태가 안정임을 확인하였으며, 각 측정 위치의 측정 온도는 상부 냉각시스템의 공기 배기부 34.5℃, 흡기부 46.1℃,

하부 냉각시스템의 공기 배기부 36.0℃, 흡기부 50.7℃, 전원공급장치의 우측 후면 46.0℃, 네트워크장치의 우측 후면부 50.6℃로 각 장치들의 운용 가능 온도인 55.0℃보다 낮음을 확인하였다.

2.5. 수치해석과 측정 데이터 비교

수치해석 데이터와 측정 데이터의 비교는 MIL-STD-2218과 IEEE(HIR)의 Modeling and Simulation에 명시된 내용을 적용하여 수치해석 데이터와 측정 데이터 간의 오차 범위 ±5% 이내를 수치해석 신뢰성 확보의 기준으로 결정하였다[11-12]. 측정 데이터와의 비교를 위해 각 측정 위치에 해당하는 수치해석 결과를 도출하였다. 위치별 온도는 상부 냉각시스템의 공기 배기부 33.4℃, 흡기부 44.9℃, 하부 냉각시스템의 공기 배기부 34.5℃, 흡기부 48.9℃, 전원공급장치의 우측 후면부 47.3℃, 네트워크장치의 우측 후면부 52.4℃로 확인되었다. 냉각시스템의 배기·흡기부에서는 수치해석 데이터 대비 측정 데이터에서 다소 높은 온도를 보였다. 이러한 차이는 수치해석 모델링 과정에서 케이블 및 내부 기구물 등이 반영되지 않아 실제 대비 공기 유동 저항이 감소함에 따라 열교환이 보다 원활하게 이루어진 것으로 판단된다. 또한, 전원공급장치의 우측 후면부 및 네트워크장치의 우측 후면부에서 수치해석 결과보다 측정 데이터가 높게 나타났으며, 이는 장치의 수치해석 모델링 구현 시 내부 벤트의 구현 누락으로 인해 공기 유동이 감소한 결과로 판단된다. 측정된 6부위의 평균온도 오차는 4.2% 이내로 확인되었으며, Table 3과 같다. 이를 통해 수치해석 결과와 시험 데이터 간의 신뢰성이 확보됨을 확인하였다.

본 연구를 통해 해석모델의 신뢰성을 검증하였으며, 고발열의 HPC를 적용한 함정용 캐비닛의 냉각구조가 외기온도 50℃의 고온 환경조건에서도 장비 성능 및 운용 안정성에 적합함을 입증할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 HPC를 적용한 함정용 캐비닛을 대상으로 내부 발열 특성과 운용환경을 고려한 수랭식 냉각구조 기반의 소형화 설계를 수행하고, 수치해석 및 고온운용시험을 통해 성능을 검증하였다. 냉각시스템을 캐비닛 측면에 배치함으로써 전체 크기를 최소화하는 동시에 HPC의 전·후 유동구조에 맞는 효과적인 냉각구조를 설계하였다. 또한, ANSYS

Table 3. Comparison Between Simulated and Measured Temperatures

No.	Measurement Point	Simulated Temp. (℃)	Measured Temp. (℃)	Absolute Error (℃)	Relative Error (%)
1	Outlet Fans of Upper Heat Exchanger	33.4	34.5	1.1	3.2
2	Inlet Fans of Upper Heat Exchanger	44.9	46.1	1.2	2.6
3	Outlet Fans of Lower Heat Exchanger	34.5	36.0	1.5	4.2
4	Inlet Fans of Lower Heat Exchanger	48.9	50.7	1.8	3.5
5	Rear Side of Power Supply Unit	47.3	46.0	1.3	2.9
6	Rear Side of Network Unit	52.4	50.6	1.8	3.6

Icepak을 활용한 수치해석의 온도 분포 결과를 통해 주요 장치의 허용온도 범위 이하임을 확인하였으며, 고온운용시험에서 측정한 데이터와의 비교 결과, 수치해석 데이터와의 오차 범위가 4.2% 이내로 나타나 설계 및 수치해석의 신뢰성을 검증 하였다.

본 연구를 통해 HPC를 적용한 함정용 수랭식 소형 캐비닛의 열적 안정성과 운용 신뢰성을 확인함과 동시에 고온 환경에 대한 수치해석 기반의 냉각 설계가 실제 운용환경에서의 열유동 예측에 유효함을 확인하였다. 또한, 본 연구 결과는 향후 다양한 운용조건 및 구성 변경에 따른 캐비닛 최적화 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행됨(UG220507DD).

참고문헌

1 Lee, J., & Bae, H. (2025). Conceptual Development of Maritime Surveillance Operations in the Era of Intelligent Warfare: Focused on an Information Superiority Model Using Satellite, AI, and Unmanned Systems. *Journal of the Korea Society for Naval Science and technology, 8*(2), 220-230. https://doi.org/10.31818/JKNST.2025.6.8.2.220

2 Choi, J. H., Yi, A. R., Ryu, S. H., & Kim, J. G. (2025). Development Directions for Naval Guns Considering Development Trends in Weapon Systems and Future Warfare Conditions. *Journal of the Korea Society for Naval Science and technology, 8*(2), 286-294. https://doi.org/10.31818/JKNST.2025.6.8.2.286

3 Lee, D.-W., Bae, B.-K., & Cho, K.-S. (2022). A feasibility study of virtualization for Submarine Combat System. *Journal of the Korea Society of Computer and Information, 27*(9), 121-129. https://doi.org/10.9708/jksci.2022.27.09.121

4 Oh, Y.-K., & Yang, H.-D. (2015). A Study on Control of Heat Generation in Computer using Thermoelectric Cooling System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 16*(1), 43-49. http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.43

5 O, J., & Lim, S. (2013). Server System Power Management using CPU Cooling Fan Control Method. *Journal of KIISE : Computer Systems and Theory, 40*(3), 159-166.

6 Sung, J. (2022). A study on the optimal design of a cooling system for cabinet mounted on naval vessel. *Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 29*(1), 69-79. https://doi.org/10.52798/KADIS.2022.29.1.6

7 U.S. Department of Defense. (2019). *Environmental engineering considerations and laboratory tests* (MIL-STD-810H).

8 International Electrotechnical Commission. (2004). *Mechanical structures for electronic equipment—Dimensions of mechanical structures of the 482.6 mm (19 in) series: Part 3-101: Subracks and associated plug-in units* (IEC 60297-3-101).

9 ANSYS, Inc. (2024). *Icepak user's guide* (Release 2024 R2). https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ice_ug/ice_ug.html

10 ANSYS, Inc. (2024). *Fluent theory guide* (Release 2024 R2). https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html

11 U.S. Department of defense. (1992). *Thermal design, analysis and test criteria for airborne electronic equipment* (MIL-STD-2218).

12 Heterogeneous Integration Roadmap Committee. (2020). Modeling and simulation (Chapter 14). In *Heterogeneous Integration Roadmap, 2020 edition*. IEEE Electronics Packaging Society.

무기체계 통제소 콘솔장치의 중복 로그인 방지 기법 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

A Study on Duplicate Login Prevention in Weapon System Control Center Consoles

이예원†, Yewon Lee
LIG 디펜스&에어로스페이스, 미사일시스템통제기술연구소, 선임연구원
Research Engineer, Command and Control Systems for Surface-to-Air Missiles, LIG Defense&Aerospace

김홍집, Hongjip Kim
LIG 디펜스&에어로스페이스, 미사일시스템통제기술연구소, 연구원
Research Engineer, Command and Control Systems for Surface-to-Air Missiles, LIG Defense&Aerospace

황종수, Jongsu Hwang
LIG 디펜스&에어로스페이스, 미사일시스템통제기술연구소, 수석연구원
Senior Research Engineer, Command and Control Systems for Surface-to-Air Missiles, LIG Defense&Aerospace

배재효, Jaehyo Bae
LIG 디펜스&에어로스페이스, 미사일시스템통제기술연구소, 수석연구원
Senior Research Engineer, Command and Control Systems for Surface-to-Air Missiles, LIG Defense&Aerospace

Abstract

In a weapon system control center, multiple console devices often share user accounts to access the operational systems. In such environments, duplicate logins may occur when the same account is used, which can lead to security issues and operational confusion. In addition, when a console device terminates abnormally, the login session may remain active, restricting subsequent login attempts. This study proposes a duplicate login prevention method for console devices in weapon system control centers. The proposed method manages login sessions by creating account-based lock files in an external storage system and periodically updating the session status of each console device. The system determines whether an account is currently in use by checking for the existence and update times of the locked file. Furthermore, if a console device terminates unexpectedly, the session is automatically cleared by verifying the last update time of the lock file and applying a timeout algorithm. This approach prevents orphan sessions and allows for new login attempts after the expiration of the current session. A performance evaluation was conducted through a comparison with the conventional method and operational scenario-based verification. The proposed method can be implemented without a centralized authentication server or database, making it suitable for control-center environments where multiple console devices operate simultaneously.

keywords : duplicate login, console, weapon system control center, external storage system, SFTP

† Corresponding Author : Yewon Lee
Tel : +82-031-5179-7737, Fax : +82-031-8026-7088, email : yewon.lee@ligdna.com
LIG Defense&Aerospace, 13488, 333, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 13th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

무기체계 통제소 콘솔장치는 전장 상황 전시, 작전 및 교전 명령 처리, 장비 상태 전시 등을 수행하는 사용자 인터페이스 장치로서 장시간 안정적인 운용이 요구되는 고신뢰성 시스템이다[1]. 해당 시스템은 외부 네트워크와 분리된 폐쇄망 환경에서 운용되며, 비인가 사용자 접근을 방지하기 위해 사용자 계정을 기반으로 접근 통제를 수행한다. 이때 동일 계정의 중복 로그인은 시스템 접근 추적성 저하나 비인가 사용자 접근 가능성과 같은 보안 문제를 유발할 수 있으며, 이는 체계 안정성과 품질에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

민간 시스템에서는 중복 로그인 방지를 위해 세션 플래그 기반 제어, 데이터베이스 기반 세션 관리 기법 등을 널리 사용하고 있다[2]. 그러나 무기체계 통제소 환경은 일반 웹 기반 시스템과 달리 사용자가 프로그램을 직접 종료하는 방식이 아니라 장치 전원 종료와 함께 프로그램이 종료되는 방식으로 운용된다. 또한 프로세스 비정상 종료나 네트워크 일시 단절 등 예측 불가능한 상황이 발생할 수 있다.

이와 같은 상황에서는 세션 정보가 정상적으로 해제되지 않아 고아 세션이 잔존하며, 이로 인해 정상 사용자의 재로그인이 차단되는 문제가 발생할 수 있다. 또한, 폐쇄망 기반 분산 구조에서는 데이터베이스 기반 세션 관리 기법을 적용하기 어렵다. 따라서 국방 시스템에서는 민간 시스템에서 사용하는 중복 로그인 방지 기법을 그대로 적용하기 어려우며, 무기체계 특성을 고려한 독립적이고 경량화된 중복 로그인 방지 구조가 필요하다.

이에 본 논문에서는 폐쇄망 무기체계 통제소 콘솔장치 환경에 적합한 SFTP(Secure File Transfer Protocol) 서버 기반의 lock 파일 방식 세션 관리 구조를 제안한다. 제안하는 기법은 일반적인 분산 시스템의 lock 및 timeout 개념을 기반으로 하며, 별도의 중앙 인증 서버나 데이터베이스 구축이 어려운 폐쇄망 통제소 환경에 적용 가능하도록 파일 기반 구조로 단순화한다. 또한, 사용자 계정별로 lock 파일을 생성하여 로그인 세션을 관리하고 콘솔장치에서 주기적으로 세션 상태를 갱신하도록 설계한다. 일정 시간 동안 갱신이 이루어지지 않은 세션은 비정상 종료된 것으로 판단하여 고아 세션 문제를 방지할 수 있다. 이를 통해 중복 로그인 방지와 동시에 시스템 가용성, 신뢰성, 접근 추적성을 향상시킬 수 있는 구조를 제시한다.

본 논문에서는 제안하는 중복 로그인 방지 기법의 시스템 구조 및 동작 알고리즘을 상세히 기술한다. 또한 기존 방식과 비교하여 로그인 처리 시간, 중복 로그인 차단 정확성, 비정상 종료 후 재로그인 복구 시간 등을 정량적으로 분석하고 실제 무기체계 통제소에도 적용 가능한 시스템임을 확인한다.

2. 관련 연구 및 연구 목표

2.1. 관련 연구

2.1.1. 민간 시스템의 중복 로그인 방지 기법

웹 기반의 민간 시스템에서는 동일 사용자 계정의 동시 접속을 제한하기 위해 세션 기반 제어 기법이 널리 사용된다[3-4]. 대표적으로 로그인 시 활성 세션 존재 여부를 확인하고 실행 중인 세션이 있을 경우 신규 로그인을 차단하거나 기존 세션을 강제 종료하는 방식이 적용된다. 일부 시스템에서는 중앙 데이터베이스에 세션 정보를 저장하여 동시 접속 횟수를 관리하기도 한다.

이러한 방식은 인터넷이 연결된 환경에서 정상적인 로그아웃 절차를 전제로 설계된 경우가 많고 비정상 종료 상황에서는 세션이 자동으로 정리되지 않을 수 있다[5]. 또한, 서버 중심 구조에서는 세션 정보의 정합성을 유지하기 위한 동기화 과정이 필요하다. 이러한 구조는 인터넷이 연결되지 않은 폐쇄망 기반의 무기체계 통제소 환경에는 적용하기에는 어려움이 있다.

2.1.2. 분산 시스템의 세션 및 상태 관리 기법

분산 시스템에서는 세션이나 자원 상태의 유효성을

판단하기 위해 주기적으로 상태를 확인하거나 유효시간 기반 만료 기법이 활용된다[6-7]. 이러한 구조는 일정 시간 동안 갱신 신호가 수신되지 않을 경우 해당 자원을 자동으로 비활성화하여 고아 상태를 방지할 수 있다.

또한, distributed lock 또는 임시 노드 기반 자원 관리 기법도 유사한 원리를 사용하여 일정 조건이 충족되지 않을 경우 자동으로 세션이나 자원을 해제하여 동시접근 문제를 방지한다. 그러나 이러한 기법은 대규모 서버 환경이나 클라우드 기반의 구조를 전제로 설계된 경우가 대부분이다[8]. 따라서 폐쇄망 무기체계와 같은 특수한 운용 환경에 적용하기에는 한계가 있으며, 해당 환경에 적합한 경량화된 세션 관리 구조에 대한 연구가 필요하다.

2.1.3. 무기체계 소프트웨어 품질 관련 연구 동향

무기체계 소프트웨어의 품질을 향상시키기 위해 개발 과정에서 신뢰성 시험, 취약점 점검, 소스코드 메트릭 분석 등의 다양한 검증 절차가 적용되고 있다[9-10]. 이러한 절차를 통해 가용성 향상, 무결성 검증, 안정성 확보, 보안성 증대 등을 기대할 수 있다. 특히 폐쇄망 환경에서는 외부 위협 차단과 내부 데이터 무결성 유지가 중요한 요소로 고려된다. 그러나 사용자 세션 관리 측면에서 중복 로그인 방지 구조를 품질 특성과 연계하여 분석한 연구는 상대적으로 부족하다.

2.2. 연구 목표

기존 연구는 민간 시스템 또는 대규모 분산 환경을 중심으로 세션 관리 기법을 제시하고 있으나 폐쇄망 무기체계 통제소 환경에 적합한 경량화된 로그인 세션 제어 구조는 충분히 다루어지지 않았다. 특히 별도의 중앙 서버 없이 다수의 콘솔장치가 계정 상태를 공유하고 비정상 종료 상황에서도 자동으로 세션을 복구할 수 있는 구조에 대한 연구는 부족하다.

본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해 SFTP 서버 기반의 lock 파일 방식 세션 관리 기법을 제안하고 기존 분산 lock 구조와의 차별성을 분석한다. 또한, 품질 특성 관점에서 로그인 지연 시간, 중복 로그인 차단 정확성, 장애 복구 시간 등을 평가하여 무기체계 콘솔장치 환경에 적합한 중복 로그인 방지 구조를 제시하는 것을 연구 목표로 한다.

3. 중복 로그인 방지 기법

3.1. 시스템 구성도

무기체계 통제소 내에는 전술 작전을 수행하기 위한 다수의 콘솔장비와 계정 정보, 설정 파일 저장 등을 위한 리눅스 기반의 외부 저장소가 존재한다. 이러한 환경에서 동일 계정의 중복 로그인은 시스템 접근 추적성 저하나 비인가 사용자 접근 가능성과 같은 보안 문제를 유발할 수 있다. 따라서 콘솔장치 간 로그인 상태를 공유하고 동일 계정의 동시 접속을 제한할 수 있는 관리 구조가 필요하다.

본 연구에서는 폐쇄망 환경에서 데이터베이스를 사용하지 않고 중복 로그인을 방지할 수 있도록 SFTP 서버 기반의 lock 파일 방식 세션 관리 구조를 제안한다. 제안하는 방식에서는 로그인 성공 시 사용자 계정별로 lock 파일을 생성하여 로그인 세션의 존재 여부를 관리하고 주기적인 상태 갱신을 통해 세션의 활성 상태를 판단한다.

제안하는 시스템의 구조는 Figure 1과 같은 구조를 가지며, 콘솔장치와 외부 저장소는 이더넷 스위치

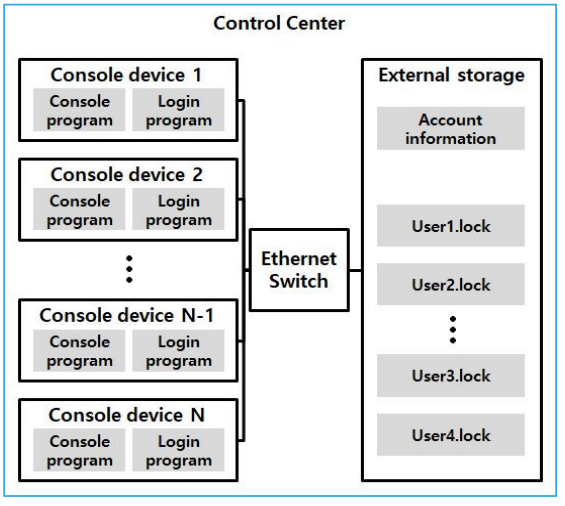


Figure 1. Proposed system configuration

로 연결된다. 콘솔장치에는 콘솔장치 응용 프로그램과 로그인 프로그램을 설치되며, 로그인 프로그램은 외부 저장소와 연동하여 사용자가 입력한 계정 정보를 검증하고 로그인 가능 여부를 판단한다.

외부 저장소에는 사용자 계정 정보와 계정별 lock 파일이 저장되며, SFTP를 통해 외부 저장소와 콘솔장치 간 파일을 송수신한다. 이때 lock 파일은 해당 계정의 로그인된 사용자 세션 상태를 나타내며 계정별로 하나의 Lock 파일을 생성한다.

lock 파일에는 사용자 계정, 로그인한 콘솔 정보, 세션 생성 시각, 마지막 세션 갱신 시각을 기록한다. 콘솔장치는 로그인 이후 일정 주기로 lock 파일의 마지막 갱신 시간을 업데이트하여 세션 활성 상태를 유지한다. 만약 프로그램 비정상 종료나 장치 전원 종료로 인해 상태 갱신이 수행되지 않을 경우 일정 시간이 경과한 후 세션은 자동으로 만료된 것으로 판단한다.

이와 같은 구조를 적용하면 별도의 데이터베이스를 구축하지 않고도 다수의 콘솔장치 간 로그인 상태를 공유할 수 있다. 또한, 중앙 서버 구조를 사용하지 않는 경량 구조이므로 폐쇄망 기반의 무기체계 통제소 콘솔장치에 적용할 수 있다.

3.2. 시퀀스 다이어그램

중복 로그인 방지 절차는 Figure 2와 같이 로그인 요청, lock 파일 존재 여부 확인, lock 파일 생성 및 상태 갱신 단계로 구성된다. 콘솔장치에서 로그인 정보를 입력하면 외부 저장소에 저장된 계정 정보를 통해 사용자 인증을 수행한다. 계정 인증 성공 시 로그인 프로그램에서 외부 저장소에 해당 계정의 lock 파일 존재 여부를 확인하여 기존 세션의 활성 여부를 판단한다.

lock 파일이 존재하지 않는 경우 해당 계정을 사용 중인 활성 세션이 없는 것으로 판단하여 새로운 Lock 파일을 생성하고 로그인을 허용한다. 이후 콘

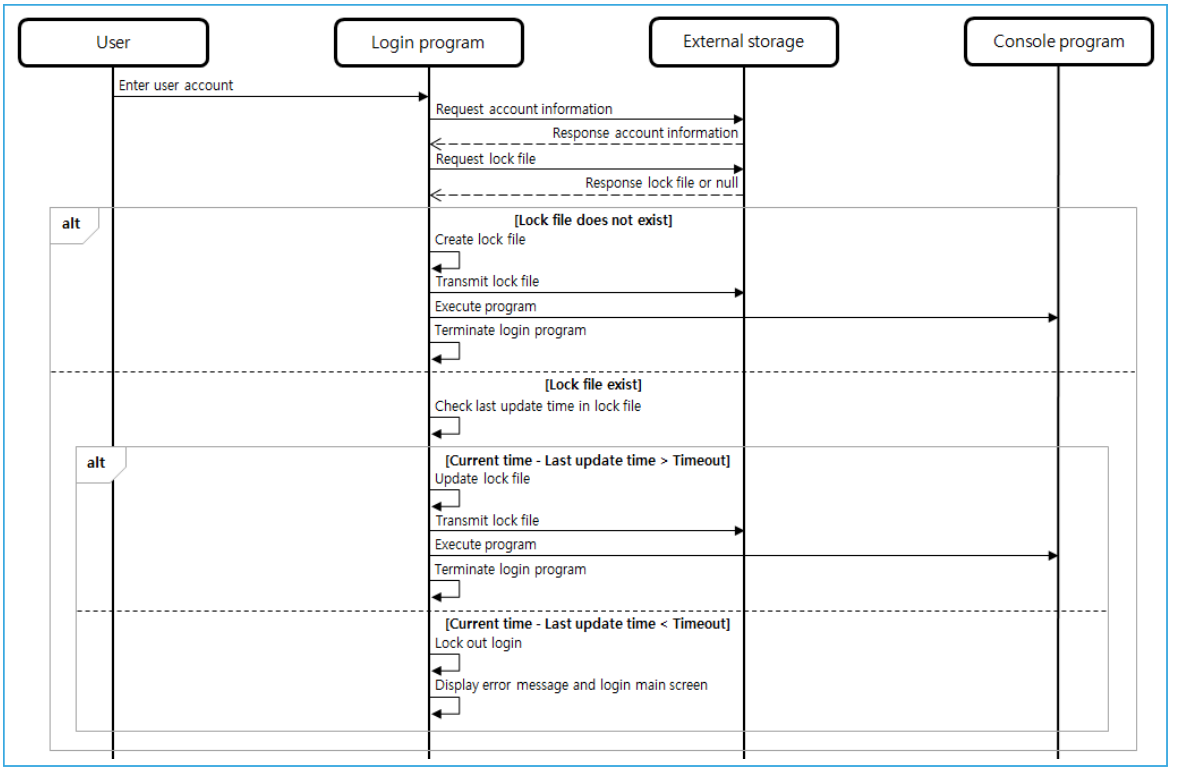


Figure 2. Proposed sequence diagram

솔장치 응용 프로그램을 실행되며, 로그인 프로그램은 자동으로 종료된다.

lock 파일이 존재하는 경우 파일 내의 마지막 갱신 시각을 확인한다. 현재 시각과 마지막 갱신 시각의 차이가 타임아웃값보다 클 경우 세션이 만료된 것으로 인지하여 lock 파일을 갱신한 후 로그인을 허용한다. 반대로 현재 시각과 마지막 갱신 시각의 차이가 타임아웃으로 설정한 값보다 작을 경우 해당 계정을 사용 중인 활성 세션이 있는 것으로 판단하여 로그인을 차단한다. 이 경우 사용자에게 오류 메시지를 전시하고 로그인 화면을 다시 전시하여 다른 계정을 입력할 수 있도록 한다.

로그인 성공 이후 콘솔장치는 일정 주기로 lock 파일의 마지막 갱신 시각을 업데이트한다. 이를 통해 현재 해당 계정으로 로그인된 콘솔장치가 존재함을 다른 콘솔에서 인지할 수 있다. 또한, 콘솔장치가 비정상적으로 종료될 경우 lock 파일 갱신이 중단되므로 일정 시간이 경과한 후 해당 계정은 다른 콘솔장치에서 사용할 수 있는 상태가 된다.

3.3. Lock 파일 관리 알고리즘

제안하는 중복 로그인 방지 기법은 Table 1과 같이 lock 파일 기반의 유효시간 검증 방식으로 동작한다.

로그인 성공 이후 세션 상태 유지를 위해 콘솔장치는 일정 주기로 lock 파일의 갱신 시각을 업데이트한다. 세션 상태 갱신 주기는 일정한 간격으로 수행되며, 일정 시간동안 갱신이 이루어지지 않을 경우 해당 세션은 비정상 종료된 것으로 판단한다. 예를 들어 세션 갱신 주기를 30초로 설정하고 세션 유효시간을 60초로 설정한 경우 60초 이상 갱신되지 않는 세션은 만료 처리된 것으로 판단하여 신규 로그인 요청을 허용한다.

이와 같은 방식은 콘솔장치 간 세션 상태 공유 구조를 단순화하면서도 비정상 종료 상황에서 세션을 자동으로 정리할 수 있으므로 폐쇄망 기반의 무기체계 환경에서 효율적인 중복 로그인 방지 구조를 제공한다. 또한, 동일 시점에 복수의 콘솔장치가 동시에 로그인을 요청하는 경우에는 외부 저장소에 최초 생성된 lock 파일만 유효하도록 하며, 이후 요청은 lock 파일 존재 여부 확인 절차에 따라 차단한다.

Table 1. Proposed system pseudo code – login

Line	Code
1	load account from external storage
2	**if** account **is not** exist
3	return LOGIN_FAIL
4	**end if**
5	**if** password **is** mismatch
6	return LOGIN_FAIL
7	**end if**
8	
9	check lock_file
10	**if** lock_file **does not** exist
11	create lock_file
12	return LOGIN_SUCCESS
13	
14	**if** current_time – last_time 〉 TIMEOUT
15	update lock_file
16	return LOGIN_SUCCESS
17	**else**
18	return LOGIN_DUPLICATE
19	**end if**
20	**end if**

4. 성능 평가

중복 로그인 방지 기법의 동작 특성과 적용 효과를 분석하기 위해 기존 방식과의 비교와 운용 시나리오 기반 동작 검증을 수행하였다.

4.1. 시험 환경

본 연구는 무기체계 통제소 환경에서 다수의 콘솔장치가 동일 계정을 사용하여 시스템에 접근하는 상

황을 가정하여 설계하였다. 따라서 실제 통제소 환경과 유사한 시험 환경을 구축하였으며, Figure 3과 같이 두 대의 컴퓨터를 이더넷 케이블로 연결하여 성능 평가를 수행하였다.

하나의 컴퓨터에서는 콘솔장치로 사용하기 위해 Windows 환경에서 로그인 프로그램과 콘솔장치 응용 프로그램을 설치하였다. 다른 컴퓨터는 외부 저장소로 사용하기 위해 Linux 환경에서 계정 정보와 lock 파일을 관리하도록 하였다.

성능 평가는 동일한 시험 환경에서 항목별로 10회 반복 수행하여 평균값을 산출하였다. 로그인 처리 시간은 계정 정보 입력 후 응용 프로그램 실행 완료 시점까지 측정하였으며, 중복 로그인 차단율은 동일 계정 동시 로그인 시도에 대한 차단 성공 횟수로 산정하였다. 비정상 종료 후 복구 시간은 lock 파일 갱신 중단 시점부터 재로그인이 허용되는 시점까지 측정하였다.

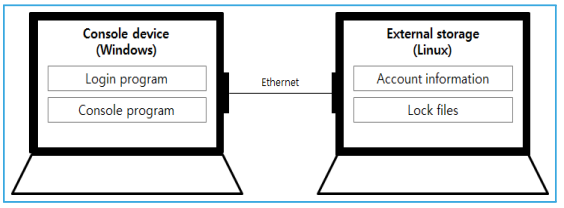


Figure 3. Test environment of the proposed system

4.2. 기존 방식과의 비교

기존의 통제소 콘솔장치 환경에서는 사용자 계정의 로그인 상태를 중앙에서 관리하지 않거나 단순히 로그인 세션만 관리하는 방식을 사용하였다. 이러한 방식은 콘솔장치 간 로그인 상태 공유가 어려우므로 동일 계정의 중복 로그인 발생 가능성이 존재한다. 또한, 콘솔장치가 비정상적으로 종료되는 경우 세션 상태가 잔존하여 현재 사용 중인 계정이 아님에도 로그인이 제한될 수 있다.

제안하는 기법은 외부 저장소에 사용자 계정별 lock 파일을 생성하여 로그인 세션을 관리함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있으며, 콘솔장치에서 주기적으로 세션 상태를 갱신하도록 설계하여 비정상 종료로 인해 발생할 수 있는 고아 세션 문제도 방지할 수 있다. 기존 방식과 제안하는 방식의 특징을 비교하면 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of existing and proposed methods

Category	Existing method	Proposal method
Share login status	△	○
Prevent duplicate login	△	○
Abnormal termination handling	△	○
Applicable system structure	Single console	Multiple console

콘솔장치 간 로그인 상태 공유와 중복 로그인 방지는 기존 방식에서는 제한적으로 가능하지만 제안하는 기법은 lock 파일을 통해 계정 정보를 관리하므로 보다 효율적인 상태 처리가 가능하다. 또한, 콘솔장치 비정상 종료 시 기존 방식은 로그인 상태 관리 세션이 잔존할 수 있으나 제안 방식은 timeout 기반으로 처리되므로 세션 잔존 문제가 발생하지 않는다. 그리고 기존 방식이 단일 콘솔 중심의 구조였다면 제안 방식은 다수 콘솔장치 환경에서도 적용할 수 있다.

4.3. 운용 시나리오 기반 동작 검증

제안하는 시스템의 동작을 검증하기 위해 통제소 콘솔장치 환경에서 발생할 수 있는 대표적인 로그인 시나리오를 구성하고 동작 과정을 분석하였다. 또한, 로그인 처리 시간 및 장애 복구 시간을 측정하여 정량적 성능 평가를 병행하였다. 이때 유효한 사용자 계정을 사용한다는 가정하에 성능 평가를 수행하였다.

4.3.1. 시나리오 1 : 정상 로그인

시나리오 1은 Figure 4와 같이 정상 로그인 상황을 나타낸다. 콘솔장치에서는 외부 저장소의 해당 계정 lock 파일이 존재하는지 확인한다. 이때 해당 계정으로 접속 중인 콘솔장치가 없으므로 신규 lock 파일을 생성하여 외부 저장소에 저장한 후 로그인이 허용된다.

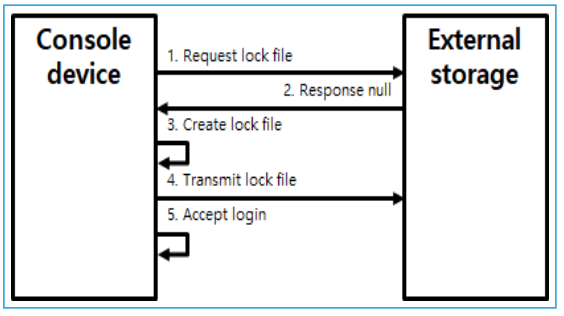


Figure 4. Scenario 1 : Normal login

4.3.2. 시나리오 2 : 중복 로그인 시도

시나리오 2는 Figure 5와 같이 중복 로그인 시도 상황을 나타낸다. 콘솔장치 1번에서 해당 계정을 사용 중이므로 lock 파일이 주기적으로 갱신된다고 가정한다. 이때 콘솔장치 2번에서 동일한 계정으로 로그인을 시도하면 해당 계정의 lock 파일 존재 여부를 확인한 후 마지막 갱신 시각을 확인한다. 현재 시각과 마지막 갱신 시각의 차이가 timeout으로 설정된 시간보다 작다면 해당 계정이 사용 중인 것으로 판단하여 로그인을 차단한다.

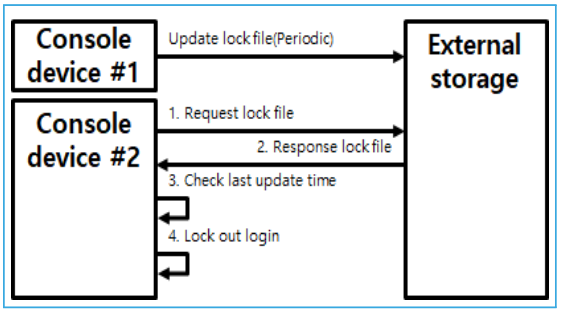


Figure 5. Scenario 2 : Duplication login

4.3.3. 시나리오 3 : 콘솔장치 비정상 종료

시나리오 3은 Figure 6과 같이 콘솔장치 비정상 종료 상황을 나타낸다. 이는 콘솔장치의 전원이 차단되거나 응용 프로그램이 종료된 경우를 의미한다. 이 경우 해당 계정의 lock 파일은 더 이상 갱신되지 않으며 외부 저장소에는 lock 파일이 남아 있는 상태로 유지된다.

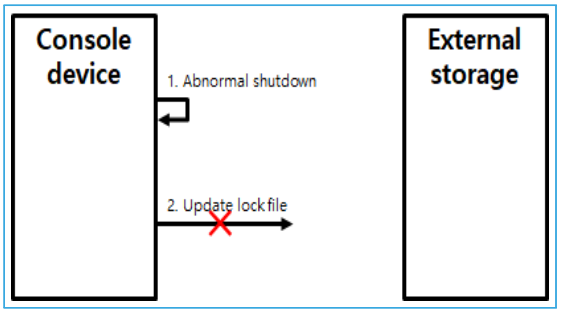


Figure 6. Scenario 3 : Abnormal shutdown

4.3.4. 시나리오 4 : 세션 timeout 이후 재로그인

시나리오 4는 Figure 7과 같이 세션 timeout 이후 재로그인을 수행하는 상황을 나타낸다. 콘솔장치 1번에서 해당 계정의 Lock 파일을 생성하였으나 이후 갱신이 중단된 상황을 가정한다. 이때 콘솔장치 2번에서 동일한 계정으로 로그인을 시도하면 해당 계정의 lock 파일 존재 여부를 확인한 후 마지막 갱신 시각을 확인한다. 현재 시각과 마지막 갱신 시각의 차이가 timeout으로 설정된 시간보다 크다면 만료

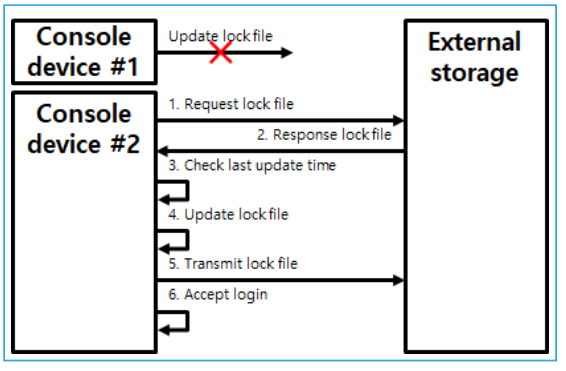


Figure 7. Scenario 4 : Re-login

된 세션으로 판단하여 Lock 파일을 갱신한다. 이후 외부 저장소에 lock 파일을 저장한 후 로그인이 허용된다.

4.4. 적용 효과 분석

제안하는 중복 로그인 방지 기법을 통제소 콘솔장치에 적용할 경우 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다. 첫째, 동일 계정에 대한 중복 로그인 시도를 차단하여 계정 관리의 안정성을 향상시킬 수 있다. 둘째, 콘솔장치의 비정상 종료 상황에서도 사용 중이던 세션 상태를 다음 로그인 시도 시 정리할 수 있으므로 고아 세션으로 인한 재로그인 제한 문제를 방지할 수 있다. 셋째, 외부 저장소 기반 Lock 파일 구조를 활용하므로 별도의 데이터베이스를 구축하지 않고도 다수 콘솔장치의 로그인 상태를 공유할 수 있다. 이때 lock 파일 전송은 SFTP 기반 암호화 채널을 사용하여 외부 저장소 접근 권한을 제한하며, 이를 통해 임의 수정 및 삭제 가능성을 최소화할 수 있다.

각 시험 항목은 10회 반복 측정하였으며 평균값과 표준편차를 산출하였다. Table 3과 같이 제안 기법은 계정 정보 입력 후 응용 프로그램 실행 완료 시점까지 평균 0.92초의 처리 시간이 소요되어 실제 운용 환경에서도 충분한 응답성을 확보할 수 있다.

Table 3. Quantitative evaluation result

Evaluation Item	Measurement result	Standard deviation	Condition
Average login processing time	0.92s	0.12	10 trials
Duplicate login blocking rate	100%	0.6	10 attempts
Session recovery time	60.8s	-	Timeout =60s
Lock update success rate	100%	-	10 cycles

또한, 동일 계정 중복 로그인 시도 시 10건에 대해 모두 접근이 차단되어 안정적인 접근 통제 성능을 확인하였다. 비정상 종료 상황에서는 timeout 설정값 60초 기준 평균 60.8초 내에 세션이 복구되어 재로그인이 가능함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 무기체계 통제소 환경에서 동일 계정의 중복 로그인 문제를 해결하기 위한 중복 로그인 방지 기법을 제안하였다. 제안 기법은 외부 저장소에 사용자 계정별 lock 파일을 생성하고 콘솔장치에서 주기적으로 이를 갱신하는 구조를 기반으로 한다. 이를 통해 다수의 콘솔장치가 동일한 계정을 사용하는 환경에서도 계정별 로그인 상태를 공유하고 중복 로그인 여부를 판단할 수 있다. 또한, 콘솔장치가 비정상적으로 종료되는 경우에도 lock 파일의 마지막 갱신 시각을 기준으로 세션 상태를 판단하여 만료된 세션을 자동으로 정리할 수 있다.

성능 평가 결과 평균 로그인 처리 시간은 0.92초, 중복 로그인 차단 성공률은 100%, 비정상 종료 후 세션 복구 시간은 timeout 설정값 이내로 확인되었다. 이는 제안 기법이 별도의 중앙 인증 서버 없이 폐쇄망 환경에서 실용적으로 적용 가능함을 의미한다. 따라서 본 연구에서 제안한 기법은 무기체계 통제소뿐 아니라 다수의 콘솔장치가 운용되는 다양한 폐쇄망 환경에서도 효율적인 계정 관리 및 접근 통제 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 본 연구는 2대 장비 기반 시험 환경에서 검증되었으므로 향후 다수 콘솔장치 환경에서의 동시접속 부하, 저장소 장애 복구, 시간 동기 오차에 대한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

1 Lee, Y., Lee, S., Choi, J., & Jung, W. (2025). Implementation of an On-Device AI Chatbot System in an Air-Gapped Control Central Console Environment. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology,*

28(5), 525-535.

2 Kim, J.-W., Ullah, F., Sarwar, G., Lee, H.-W., & Lee, S.-C. (2013). Session Management and Control Architecture for N-Screen Services. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, 13*(2), 15-23.

3 Jo, J., Chae, Y., & Kong, J. (2020). Development of User Authentication and Authorization System for Network Access Control. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 45*(11), 1921-1931. https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.11.1921

4 Kim, S.-H., & Kim, S. (2021). User-Centric Access Control Service for Blockchain-Based Private Information Management. *Journal of The Korea Institute of Information Security & Cryptology, 31*(3), 341-351. https://doi.org/10.13089/JKIISC.2021.31.3.341

5 Min, S.-O., & Lee, J.-S. (2018). Device Mutual Authentication and Key Management Techniques in a Smart Home Environment. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 19*(10), 661-667. https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.661

6 Choi, C.-H. (2022). Study on Threshold Scheme based Secure Secret Sharing P2P System. *Journal of Internet Computing and Services, 23*(3), 21-33. https://doi.org/10.7472/jksii.2022.23.3.21

7 Kim, Y., & Park, Y. (2015). A Study of Improved Session Management for Mobile Web under BYOD environment. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 19*(5), 1117-1124. https://doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.5.1117

8 Min, S.-Y., Lee, K.-H., & Jin, B.-W. (2016). A Design of Authority Management Protocol for Secure Storage Access Control in Cloud Environment. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 17*(9), 12-20. https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.12

9 Lee, J., Cha, S., Baek, S., & Kim, S. (2018). Research for Construction Cybersecurity Test and Evaluation of Weapon System. *Journal of The Korea Institute of Information Security & Cryptology, 28*(3), 765-774. https://doi.org/10.13089/JKIISC.2018.28.3.765

10 Ryu, I. S. (2018). Weapon System Software Quality Improvement using Software Reliability Prediction Model. *Journal of Advances in Military Studies, 1*(2), 1-12. https://doi.org/10.37944/jams.v1i2.34

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 280-294, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.025

고발열 무기체계 열관리시스템 개발품질 개선을 위한 1D 가상시험환경 구현 및 검증

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Implementation and validation of a 1D virtual testing environment for enhancing the development quality of thermal management systems in high-heat weapon systems

김민규, Minkyu Kim
현대로템, M&S팀, 연구원
Researcher, Modeling & Simulation Team, Hyundai Rotem

김인수, Insoo Kim
현대로템, M&S팀, 책임연구원
Senior Researcher, Modeling & Simulation Team, Hyundai Rotem

이경훈, Kyounghoon Lee
현대로템, M&S팀, 책임연구원
Senior Researcher, Modeling & Simulation Team, Hyundai Rotem

송용석†, Yongseok Song
현대로템, M&S팀, 책임연구원
Senior Researcher, Modeling & Simulation Team, Hyundai Rotem

Abstract

This study implemented and validated a 1D virtual testing environment for a high heat load weapon system. This thermal management system (TMS) is characterized by high-power and nonperiodic thermal profiles. The primary objective of this framework is to identify and mitigate potential quality issues that may arise during the development phase. Experiments were conducted at ambient temperatures of 23.2℃ and 36.1℃ to characterize the operational behavior of the thermal management system and to identify potential quality issues that could arise during the development process. The results indicated that the compressor outlet pressure increased at higher ambient temperatures, leading to an elevated compressor discharge temperature. A one-dimensional virtual test environment was modeled to predict the compressor discharge temperature under extreme ambient conditions. The reliability of this model was initially established using the experimental data from the 23.2℃ and 36.1℃ conditions, and it was further validated against additional experimental results obtained at 28.4℃ and 43.8℃. Notably, under the 43.8℃ condition, the absolute error between the experimental and simulation data was only 0.6 K. This variance was well within the measurement uncertainty range of the temperature sensors, confirming the high fidelity of the model. Finally, this study proposes a methodology for enhancing the operational stability. By implementing a thermal management system within a virtual environment, potential thermal issues can be proactively identified and mitigated, thereby ensuring reliable operation under steady-state conditions.

keywords : high-heat weapon systems, thermal management system, virtual test environment, mitigating potential quality issue, operational stability

† Corresponding Author : Yongseok Song
Tel : +82-31-688-0435, email : yongseok.song@hyundai-rotem.co.kr
Hyundai Rotem, 37, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 28th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

최근 우크라이나전과 같은 현대전은 주로 도심지역에서 발생한다. 이러한 전투 환경은 지향성 무기의 이점을 극대화할 수 있다. 기존 전통 무기체계는 노출의 위험과 더불어 민간인의 피해를 야기하는 반면 지향성 무기는 이러한 단점을 상쇄한다. 지향성 무기의 대표적인 특징은 순간적인 에너지를 한곳으로 집중하여 목표물에 영구적인 손상을 입힌다. 이러한 특성으로 인해 폭발적인 에너지 집중과 함께 출력으로 변환되지 못한 에너지는 열량으로 소산되면서 운용 과정에서 고밀도 발열 특성을 갖는다[1]. 지향성 무기뿐만 아니라 현대 전술 체계가 소형화 및 고출력화됨에 따라 레이더와 같은 전자 장비 또한 단위 면적당 발열량이 급증하는 고밀도 발열특성이 나타난다. 고발열 무기체계의 특징은 특정 범위의 온도 및 습도 환경에서 운용되어야 한다. 체계 내부에 열에너지가 축적되어 온도가 상승할 경우 장치의 내구도 및 효율이 감소하므로 이를 방지하기 위해서는 열관리가 선행되어야 한다. 따라서 열관리 시스템은 고발열 무기에 대한 품질확보의 핵심 구성품이며, 해당 무기체계의 운전은 열관리 장치와 연동되어 신속하고, 안정적이며, 효율적으로 제어되어야 한다.

효율 측면에서 대표적인 고효율 열관리 방법으로 알려진 것은 증기압축식 냉동사이클이다. 이는 물리적으로 닫힌 계에서 냉각유체가 순환하고 압축-응축-팽창-증발 과정을 반복하며 압축일을 통해 투입한 에너지에 대비해서 많은 열량을 방출하고 흡수하는 순환 과정이다. 이러한 증기 압축식 냉동사이클은 냉각과 관련된 다양한 분야에서 활용된다. 실제 열역학, 열전달, 유체역학 기반 지식을 바탕으로 가상환경 내 냉동사이클을 구현하여 최적 설계 및 제어 전략을 찾는 연구 또한 활발하게 진행되어 왔다[2]. 뿐만 아니라 연구 목적을 넘어 산업계에서 가상환경 구현을 통해 에너지 소모 및 성능 최적화, 실험 최소화 등 가상 환경 구현을 통해 실제 환경 실험을 대체하려는 시도가 활발하다[3]. 가상 환경에서 구현된 모델은 통해 실제 모델을 안전성과 신뢰성을 증가시키고 성능 최적화를 기대할 수 있다. 이러한 시대적 흐름에 따라 기존 연구 결과들을 조화롭게 활용하면 고발열 무기체계에 대한 가상환경을 구현하고 이를 통해 실제 환경을 모사하여 최적 설계 및 전략을 탐색할 수 있다. 즉, 실제 시험이 어려운 환경, 고장에 취약한 환경에 대해 검증하고 M&S(Modeling and Simulation)를 통해 품질 확보가 가능하다. 하지만 신뢰 가능한 M&S를 수행하기 위해서는 반드시 물리현상에 근거한 모델링이 선행되고, 실험상관식 적용 시에 실제 환경에서의 실험 결과를 반영하여 실제 시스템의 특성을 반영하는 연구가 선행되어야 가상환경을 통한 국방품질확보 목표를 달성할 수 있다.

열관리시스템 시뮬레이션은 응용 분야, 운전 상태, 구현 목적에 따라 구현하는 방식이 제각각 다르게 구성된다. Cha (2015)은 상용 냉장고 내부 냉동사이클에 대해 시뮬레이션하고 이를 통해 최적 냉각유체 충전량을 조사하였다[4]. Jeong et al. (2012)는 압축기 입구 파이프라인과 캐필러리 라인과 교차하는 흡입관-모세관 열교환 냉동 사이클에 대하여 가상환경을 구현하고 이에 대한 성능을 예측하였다[5]. Gardenghi (2020)은 가정용 냉장고의 운전 방식인 on-off 제어를 직접 가상환경 내에서 구현하여 실험과 비교하였다[6]. Koury et al. (2001)은 에어컨 시스템에서 주로 사용되는 가변속도 압축기로 구성된 냉동사이클에 대하여 가상환경을 구현하고 실험 결과와 비교하였다[7]. Ling et al. (2015)은 지구 온난화 지수가 낮은 냉각유체로 구성한 히트펌프 사이클에 대하여 가상환경으로 구현하고 실제 결과와 비교하였다[8]. Kim and Kim (2002)은 CO_2 고압사이클, 기타 냉각유체가 저압사이클을 구성하는 다단사이클에 대하여 가상환경으로 구현하였다[9]. 고밀도 발열체를 효과적으로 냉각하기 위해서는 기존 방식의 공랭 냉각은 낮은 열교환계수로 인해 효율이 낮다[10]. 증기압축 냉동사이클을 통해 냉각수를 냉각하는 칠러는 고밀도 발열체 냉각에서 적극적으로 활용된다. 이러한 고

밀도 발열체는 제한된 체적 내에 높은 발열량을 나타내는 열적 특성으로 최대 $1kW/cm^2$까지 발열한다고 알려져 있다. 이러한 특성은 임계열소산(critical heat dissipation)과 같은 문제를 나타내기도 한다. Zhang et al. (2008)은 전력장치를 냉각하기 위한 냉각장치로 칠러를 가상환경으로 구현하고 이를 실험결과와 비교하였다[11]. Browne and Bansal (2002)은 수냉식 칠러 시스템을 가상환경 내에서 구현하고 이를 실제 시험환경에서 시험 후 비교하였다[12]. 상기한 기존 가상환경 구현 연구는 주로 냉각수를 대상으로 국한되었다. 하지만 최근 열교환 효율을 극대화하기 위해 냉각수가 아닌 상변화 유체를 사용하는 유동비등 기반의 열관리 시스템이 주목받고 있다[13]. 하지만 유동비등 열교환은 단상 열교환과 다른 열교환 메커니즘으로 인해 시뮬레이션으로 구현 시 불연속성이 발생하여 높은 컴퓨터 연산능력을 요구하고, 이를 가상환경으로 구현하려는 시도도 여전히 부족하다.

본 연구는 고발열 무기체계 열관리시스템을 개발하는 과정에서 발생 가능한 개발품질 문제를 식별하고 1D 가상환경시험 구현을 통해 이를 설계 단계에서 예측 및 예방 가능한 방안에 대하여 연구하였다.

2. 실험 및 가상시험 결과 비교

2.1. 시스템 특성

본 연구에서 개발하는 고발열 무기체계 열관리시스템은 Figure 1과 같이 두 개의 서브 모듈로 구성된다. 고발열체에서 생성된 열을 전달받고 칠러를 통해 열을 방출하는 고발열체 냉각모듈, 판형 열교환기를 통해 고발열 냉각모듈로부터 열을 흡수하여 대기로 방출하는 칠러 모듈로 구성된다. 칠러 모듈은 고발열 냉각모듈을 흐르는 냉각 유체와 판형 열교환기를 통해 열교환하여 고발열 장치 내에서 생성된 고출력, 비주기적 특성의 열량을 제거한다. 온도 민감도로 인해 다른 열관리시스템 대비 높은 운전 안정성을 필요로 한다.

2.2. 실험장치 구성

고발열 무기체계 시스템 발열을 모사하기 위해 발열체는 Figure 2와 같이 발열체는 냉각판에 삽입되어 대류열전달을 통해 벽면에서 각 냉각모듈의 냉각유체로 열을 전달한다. 고발열체 냉각모듈의 작동유체는 판형열교환기를 통해 칠러 모듈의 냉각 유체와 열교환하고, 칠러 모듈의 냉각유체는

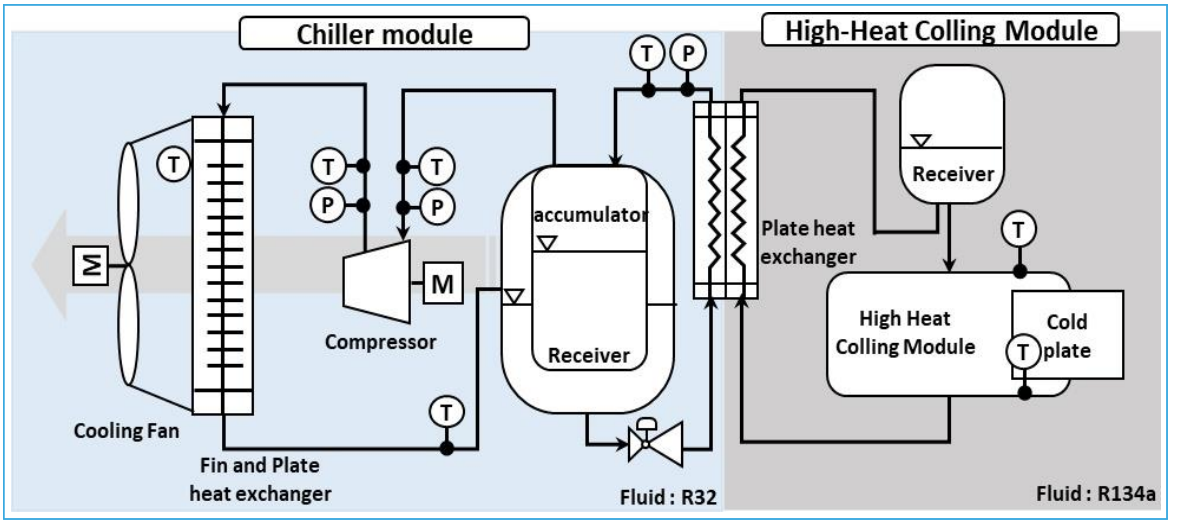


Figure 1. System architecture

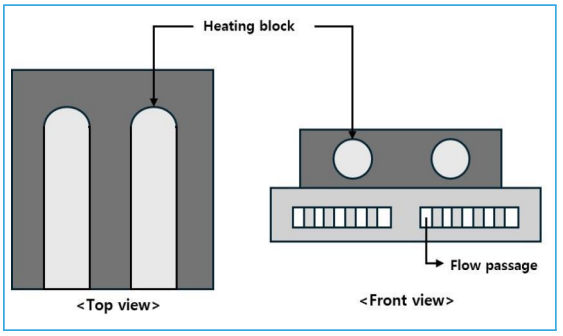


Figure 2. Surrogate heat source

최종적으로 응축기에서 공기와 열교환하여 발생한 열을 시스템 외부로 방출한다. 외기온도를 특정 온도로 고정한 상태에서 발열체를 통해 운전을 모사하였다.

발열체의 발열량 변화에 따라 변화하는 냉각판 측정 온도를 제어하기 위해 칠러 모듈의 압축기 회전속도, 냉각팬 회전속도를 변화시켜 시스템을 제어하였다. 실험의 제어는 각 운전 상태의 발열량을 고정한 상태에서 외기온도 변화에 따라 칠러 모듈 및 고발열체 냉각모듈의 상태량을 계측하였다. 실험 결과에 대한 저장은 정상상태의 경우, 시스템의 상태량이 안정된 상태에서 5분간 운전 후, 20초 동안 측정하여 시간에 대한 평균으로 계산하였다. 운전 제어 변수는 압축기 회전속도(rpm), 압축기 입구과열도(K), 압축기 출구압력(bara)이다. 스크롤 형식의 가변속도 압축기를 사용하였으며, 외기온도에 따라 선형적으로 속도를 증가시키면서 냉각판의 온도를 제어하였다. 응축기에 설치된 냉각팬 회전속도를 조절하여 압축기 출구압력을 제어하여 과도한 압축비 상승 및 비효율적 운전을 예방하였다. 압축기 입구과열도는 팽창밸브를 통해 5K으로 자동제어되나, 실제 실험장치에서는 액분리기 내장 수액기를 사용하였고, 이에 목푯값인 5K보다 과도하게 과열되어 냉동사이클 운전 안전성을 추가로 확보하였다. 외기온도에 따른 시험 조건은 23.2℃, 36.1℃로 구분되며 본 연구에서는 36.1℃ 실험값을 본 연구에서 사용된 열관리장치의 운전정보를 대표하는 기준값으로 설정하였다. 따라서 실험 결과 및 시뮬레이션을 분석 시 기준값 대비 비율로 결과로 나타내었다. 칠러 모듈에 대한 운전은 외기 조건을 일정하게 공급할 때, 발열체 입구 유체에 온도를 일정하게 유지하면서 발열량을 인가하여 운전 특성데이터를 부착 센서를 통해 획득하였다. 실험장치 사용 센서 상세정보는 Table 1에 나타내었다. 압력과 온도를 측정하여 REFPROP(v10.0, NIST, USA)을 통해 엔탈피 등의 필요 상태량으로 변환하였다[14].

Table 1. Specification of sensor

Type	State	Module	Location	Range	Accuracy
RTD	Temperature	Chiller	Compressor inlet	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
			Compressor outlet	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
			Condenser outlet	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
			Evaporator outlet	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
			Ambient	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
		High-heat cooling	Cold plate inlet	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
			Cold plate outlet	-40~100℃	$\pm(0.3+0.005\|t\|)$ [%]
Pressure Transducer	Pressure	Chiller	Compressor inlet	0~10bara	± 1% of full scale
			Compressor outlet	0~50bara	± 1% of full scale
			Evaporator outlet	0~35bara	± 0.8% of full scale

※ t : $temperature$ [℃]

2.3. 정상상태(steady state) 실험 결과

외기온도를 각각 23.2℃와 36.1℃로 운전하면서 발열체에 일정한 열을 가하였을 때 발열체 온도와 냉각유체와의 열교환이 서로 균형을 이루어 온도가 변화하지 않는 상태에서의 계측값을 획득하여 REFPROP을 통해 필요 상태량으로 변환하여 P-h 그래프를 Figure 3과 같이 도시했다. 외기온도 23.2℃와 36.1℃를 비교했을 때, 압축기 입구압력은 1.7% 상승하고, 외기온도가 높아짐에 따라 응축기 열전달량이 상승하며 압축기 출구압력은 25.9% 상승하였다. 응축기 출구 엔탈피가 증가하면서 증발잠열은 9.2% 감소하고, 측정되는 압축기 소모 전력은 25.5% 상승했다. 외기온도 12.9℃ 상승할 때 필요 냉각량을 확보하기 위해 시스템의 질량유량은 약 38.0% 증가하고, 압축비가 21.3% 증가하면서 압축기 토출온도는 18.4% 상승했다. 본 연구에서 사용한 칠러모듈의 작동 유체 R32 냉매는 낮은 온난화 지수와 높은 열전달 효율, 그리고 에어컨 냉매에서 R410A의 대체 냉매로 상용 압축기 개발이 활발하므로 부품 수급이 원활한 장점이 있지만 이러한 장점에도 불구하고 높은 토출온도로 인한 압축기 작동안전성에 대한 위험성이 존재한다.

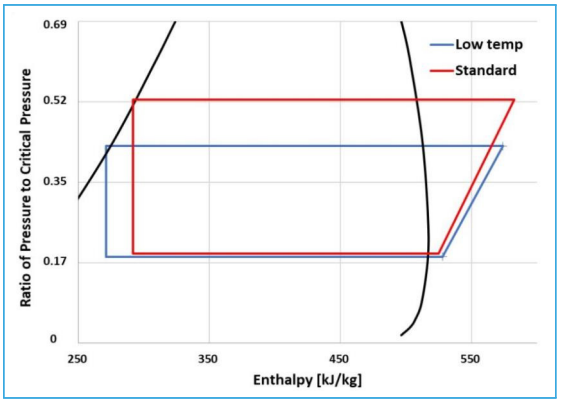


Figure 3. P-h diagram of the chiller

R32 냉매와 R134a 냉매에 대한 등엔트로피 과정에서 토출온도 변화를 Figure 4에 나타내었다. 본 연구에서 활용된 R32 유체는 기체 구간에서 타 유체보다 등온선이 밀집되고 기울기가 가파르다. 포화온도 20℃에서 R32와 R134a를 같은 압축비로 가압했을 때, 압축기 등엔트로피 출구온도는 R32가 105.3℃, R134a가 70.7℃로 실제 운전 시 R32의 압축기 출구온도는 쉽게 높아질 수 있다. 압축기 일반적으로 오일유에 대한 탄화를 방지하기 위해 권장하는 최대 작동온도는 120℃로, 외기가 극도로 높아지는 43℃ 이상 조건에서 가상환경을 통한 선행적 검증이 필요하다[15]. 이는 개발품질 향상을 위해 시스템 설계 시 외기온도 상승에 따른 압축기 출구온도 영향을 반드시 고려해야 함을 시사한다. 정상상태 실험결과에서 식별된 개발품질문제를 설계 단계에서 식별하기 위해서 고발열 무기체계 열관리시스템의 물리적 특성을 반영한 1D 가상시험환경을 구현하였다.

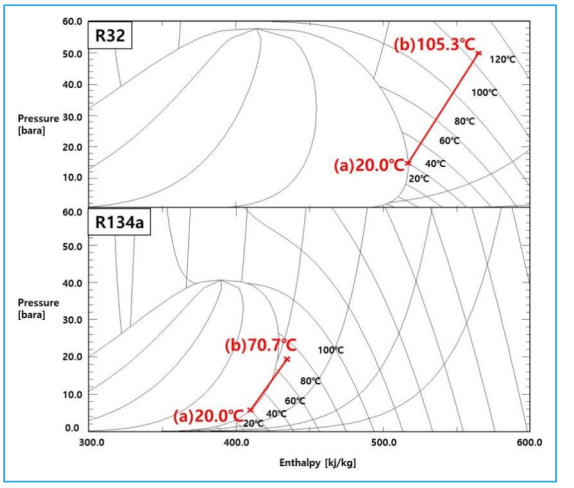


Figure 4. Discharge temperature characteristics of R32 vs. R134a under isentropic process

2.4. 가상시험환경 구현

본 연구에서 구현하는 열관리시스템은 열교환기마다 개별적인 열수력학적인 특성을 가지며 이에 따라 주요 구성품에 대한 상관식 정보는 부록 Table 1에 정리하였다. 해당 열관리시스템의 특징은 제어변수인 전자식 팽창밸브(Electronic Expansion Valve, EEV)의 개도 변화에 의해 급변하는 압력파동과 느린 열적관성이 공존하는 강성(stiffness) 특

성을 갖는다. 외란이 발생하지 않는 구간에서는 비강성(non-stifness) 특성 또한 존재하므로 단일한 수치해석 방법을 적용하기엔 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 위의 문제를 다루기 위해 비강성 구간과 강성 구간을 자체적으로 판별하여 최적의 해를 탐색하도록 해석엔진을 제공하는 Simcenter Amesim(v2310, SIEMENS, Germany) 플랫폼을 활용하였다.

2.4.1. 컴포넌트 모델링 – 압축기

본 시스템에서는 밀폐형 스크롤 압축기를 사용하였다. 압축기 거동에 대해 동적으로 모델링하는 것은 높은 컴퓨팅 파워가 요구되나, 동적 구현의 장점은 목적에 따라 상쇄될 수 있다. 이를테면 고발열 무기체계 열관리시스템은 압축기를 가변속도 제어한다. 따라서 압축기의 시동 단계를 제외한 운전 단계에서 정적인 운전 특성을 갖는다. 이에 따라 압축기를 제조사가 제공하는 엔트로피 효율로 식(1)과 같이 계산하여도 실제와 유사하게 거동하는 시스템을 모사할 수 있다.

$$\eta_{c,i} = \frac{h_{dis,isen} - h_{suc}}{h_{dis,act} - h_{suc}} \quad (1)$$

$\eta_{c,i}$는 엔트로피 효율을 나타내며 $h_{dis,isen}$은 등엔트로피 과정에서의 압축기 출구 엔탈피, h_{suc}은 압축기 입구 엔탈피, $h_{dis,act}$는 실제 압축기 출구 엔탈피를 나타낸다. 일반적으로 상용 압축기는 제조사에서 실험을 통해 제공하는 다항식 형태의 효율 상관식을 제공한다. 해당 제조사는 압축기 출구온도를 제공하므로 이를 통해 역산하면 식(2)와 같다.

$$h_{dis,act}(W_{comp}) = f(T_{dis}(W_{comp}), P_{sat}(T_c)) \quad (2)$$

W_{comp}은 압축기의 회전속도(rpm)이고 T_{dis}는 압축기 출구온도, T_c는 응축온도를 나타낸다. 따라서 W_{comp}마다 등엔트로피 효율은 식(3)과 같이 도출하였다.

$$\eta_{c,i}(W_{comp}) = f(h_{dis,act}(W_{comp}), h_{d,isen}, h_{suc}) \quad (3)$$

압축기 회전속도(W_{comp})가 바뀔 경우 식(3)을 통해 계산된 압축기 효율에 의해 변화된 상태량이 즉각 다음 계산구간에 적용되는 압축기의 준동적(semi-dynamic) 거동을 구현하였다.

2.4.2. 컴포넌트 모델링 – 열교환기

칠러 응축기는 Figure 5와 같이 공기 측의 열교환 효율을 극대화하기 위해 표면적을 최대로 증가시킨 루버핀-튜브 형태의 열교환기를 사용하였다. 공기는 평판핀 형태에서 표면적을 최대한 늘린 루버핀을 추가로 장착한 형상을 냉각유체가 흐르는 방향에 교차하는 방향으로 통과한다. 압축된 고온의 냉각유체와 외기와의 공기와의 열교환계수를 결정하기 위해 Chang et al. (2000)의 루버핀 형상에 대한 일반화된 상관식을 활용하였다[16]. 해당 상관식에 대하여 평판핀의 정보와 루버핀과의 특성길이비, 면적비를 입력값으로 열전달 계수를 추정하기 위해 다음과 같이 가정하였다.

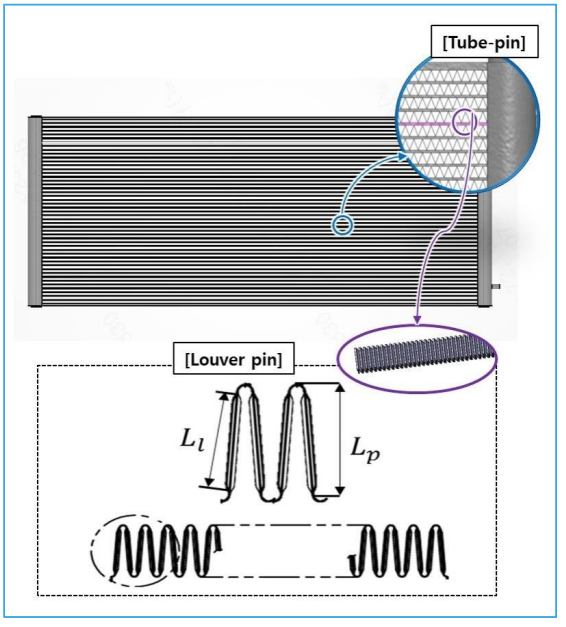


Figure 5. Geometry of the fin and plate HEX

1) 루버핀과 평판핀의 대류열전달 계수는 같다.

$$h_l = h_p$$

2) 재료가 같으므로 전도열전달 계수가 같다.

3) 핀에 의해 생성된 강한 난류에 의해 루버핀을 통과하는 공기와 평판핀을 통과하는 공기의 유속은 같다.

$$V_{air,l} = V_{air,p}$$

4) 루버핀을 통과하는 공기와 평판핀을 통과하는 공기의 동점성 계수는 같다.

$$\upsilon_{air,l} = \upsilon_{air,p}$$

h_l은 루버핀의 대류열전달 계수, h_p는 평판핀의 대류열전달 계수, $V_{air,l}$은 루버핀을 통과하는 공기의 유속, $V_{air,p}$은 평판핀을 통과하는 공기의 유속, $\upsilon_{air,l}$은 루버핀을 통과하는 공기의 동점성계수, $\upsilon_{air,p}$은 평판핀을 통과하는 공기의 동점성계수를 나타낸다. 이를 통해 루버핀에 열전달계수 계산 수식을 유도하면 식(4)와 같다.

$$Nu_p = \Phi_p J\left(\frac{L_p}{L_l}\right)^{0.49} (Re_p)^{0.51} (\mathrm{Pr}_p)^{0.33} \quad (4)$$

$$\Phi_p = \frac{A_l}{A_p} \quad (5)$$

Nu_p는 핀의 전도열전달에 대한 대류열전달의 비를 나타내는 무차원수이며 Φ_p은 평판핀의 면적에 대한 루버핀의 면적이다. J는 Chang et al. (2000)이 제시한 열전달 계수를 계산하기 위한 루버핀 열교환기의 형상정보 팩터이다. L_p는 평판핀 특성길이, L_l은 루버핀 특성길이, Re_p는 유체의 점성력에 대한 관성력의 비를 나타내는 무차원 수, Pr_p은 유체의 특성으로 열이 확산되는 속도에 대한 운동량이 확산되는 속도의 비를 나타내는 무차원 수이다. 식(4)를 통해 해당 열교환기의 루버핀 특성길이를 반영하여 열교환기의 대류열전달 계수를 계산하였다.

칠러 모듈의 증발기는 판형열교환기로서, Figure 6과 같이 판이 겹겹이 쌓여 작동유체(R32-R134a) 간 표면적을 극대화한 열교환기이다. 냉각유체 R32가 판형열교환기 내에서 고발열 냉각모듈의 냉각유체 R134a와 판을 매개로 열교환한다.

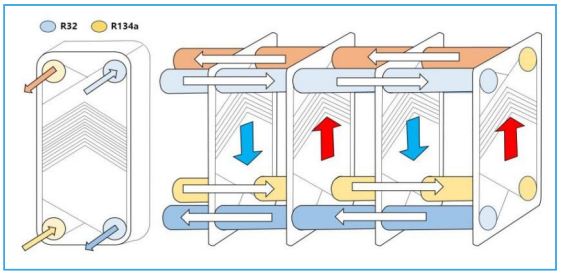


Figure 6. Geometry of the plate HEX

Arima et al. (2010)은 판형 열교환기에 대해 암모니아를 냉각유체로 사용하여 국부적 증발 열교환 상관식을 식(6)과 같이 제시하였다[17].

$$\frac{h_{loc}}{h_{LZ}} = 16.4\phi\left(\frac{1}{X_{vv}}\right)^{1.08} \quad (6)$$

h_{LZ}는 전체 유량 중 액체 성분만 흐른다고 가정시의 단상 열전달계수, X_{vv}는 유동 상태에 따른 각 액상, 기상의 상태량의 비를 나타내며 이를 통해 국부적인 대류열전달계수 h_{loc}을 도출한다. ϕ는 보정계수이다. 해당 상관식은 건도가 높은 조건에서 dry-out이 발생하여 오차율이 높아지는 것으로 알려져 있으므로 실험 결과를 통해 본 시스템에 적합한 보정계수 ϕ를 사용한다.

2.4.3. 컴포넌트 모델링 - 팽창밸브

본 시스템에 적용된 팽창밸브는 개도를 조정하여 과열도를 제어한다. 가상시험환경에서는 실제 시스템과 마찬가지로 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어로 과열도 5K 확보되도록 개도를 제어하였다. 팽창밸브는 과냉 상태에 가까운 냉각유체가 팽창밸브를 통과하며 압력강하로 단열팽창하면 기화하며

유속이 음속까지 가속한다[18]. 음속에 도달하면 밸브 출구압력 변화에 관계없이 질량 유량이 늘어나지 않는 질식유동(choking flow)이 발생하며 이러한 물리현상을 반영한 질량유량 상관식을 적용하기 위해 Leung (1986)이 제시한 균질평형모델(homogeneous equilibrium mode)을 적용하였다[19]. 토출 함수 φ을 도입하여 냉각유체 질량유량을 식(7)과 같이 계산한다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{\frac{2P_{EEV,in}}{\nu_{EEV,in}}} \Psi \tag{7}$$

C_d는 질량유량 계수, A는 밸브 유로의 단면적, $P_{EEV,in}$은 팽창밸브의 입구압력, $\nu_{EEV,in}$는 냉각유체의 동점성 계수를 나타낸다. 입구 조건의 과냉도가 큰 액체일 경우 비압축성으로 계산되어 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \sqrt{\left(1 - \frac{P_{EEV,out}}{P_{EEV,in}}\right)} \tag{8}$$

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{\frac{2(P_{EEV,out} - P_{EEV,in})}{v_{EEV,in}}} \tag{9}$$

$P_{EEV,out}$은 팽창밸브의 출구압력을 나타낸다. 입구 조건이 강한 과냉 액체일 경우 식(9)와 같이 시스템을 흐르는 질량유량은 압력차에 비례하고, 그렇지 않은 경우 식(7)과 같이 입구압력 조건에 따라 질량유량이 결정되어 질식유동 현상을 반영한다.

2.4.4. 컴포넌트 모델링 – 냉각판

냉각판은 Figure 2에서 나타난 것과 같이 발열체를 냉각하는 고발열 냉각모듈 내 냉각유체 R134a와 발열체 사이에서 전도를 통해 열전달 매개체 역할을 한다. 냉각판으로 전도된 열은 다시 냉각유체와 대류열전달을 통해 열교환된다. 본 가상시험환경은 칠러 모듈의 작동안전성을 검증하기 위한 목적이므로 냉각판은 단순 열량(lumped heat)을 적용하였다.

2.5. 가상시험환경 정합성 검증

2.5.1. 보정계수 적용

Figure 7과 같이 고발열 무기체계 열관리시스템을 가상시험환경으로 모델링하였다. 앞서 논의한 것과 같이 R32 냉각유체의 판형열교환기에 대한 증발

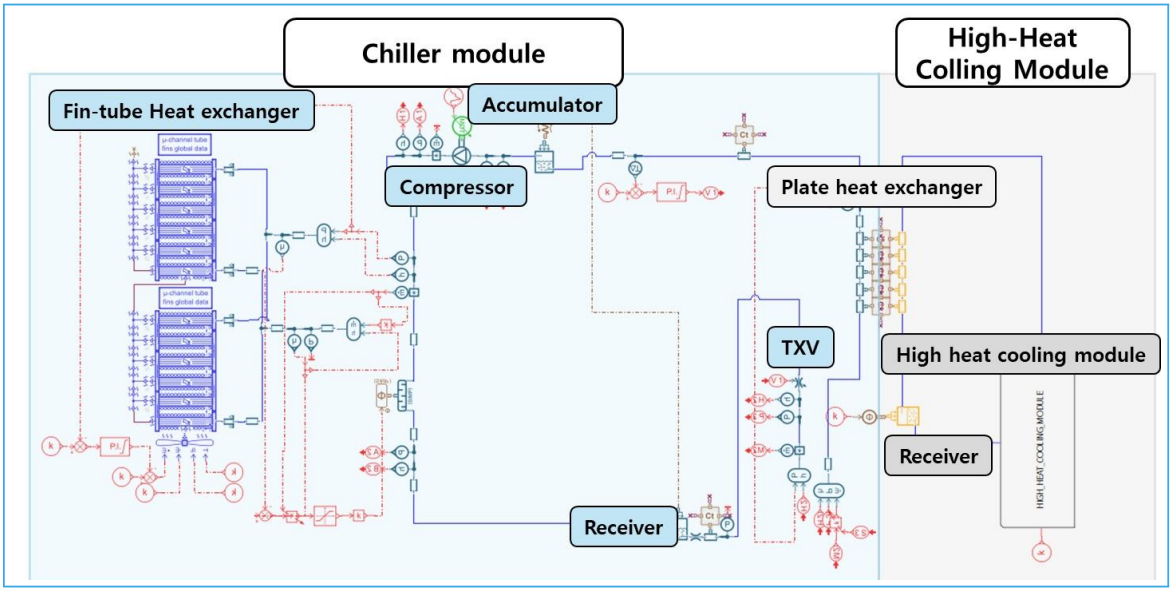


Figure 7. System architecture for virtual testing and evaluation

열전달 상관식은 높은 건도에서 신뢰성을 보장하기 어렵다. 따라서 Table 2와 같이 외기 23.2℃와 36.1℃에 대해 실험결괏값을 이용해 식(6)의 열전달 보정 계수를 적용하여 시험-시뮬레이션 간 오차율을 최소화하였다.

Table 2. Test cases for correction

Type	Ambient temperature	Design temperature
Correction	23.2℃	Low
Correction	36.1℃	Standard

2.5.2. 정합성 검증

보정이 적용된 가상시험환경 모델 정합성을 검증을 위해 Table 3과 같이 중간, 고온 조건에서 실험을 추가 수행하고 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Table 3. Test cases for validation

Type	Ambient temperature	Design temperature
Validation	28.4℃	Intermediate
Validation	43.8℃	High

각 시험별 제어 변수는 환경온도 변화에 따른 압축기 속도(rpm), 압축기 입구과열도(K), 압축기출구 압력(bara)이다. 외기온도 36.1℃(기준 조건) 실험결과에 대한 보정조건과 검증조건에서의 각 실험값의 비율을 Figure 8에 나타내었다. 외기온도 36.1℃은 기준 조건과 같은 조건이므로 항상 1로 나타난다. 앞서 분석한 결과와 같이 외기온도가 높아질수록 압축기 출구압력이 높아지는 것을 확인하였다. 압축기 입구과열도는 외기온도에 따라 일정한 경향성을 보이지 않았는데, 이는 본 시스템에 장착된 전자식 팽창밸브가 증발온도 대비 5K으로 자동제어하였으나, 전자식 팽창밸브 컴포넌트 자체에 개도 명령값의 이력현상과 액분리기 내장형 수액기의 내부 열교환으로 인해 외기온도마다 일정한 경향성을 갖지 않은

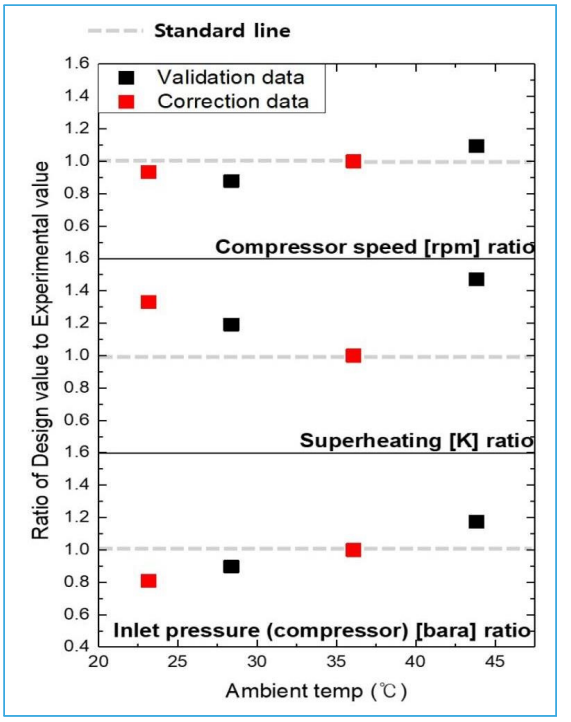


Figure 8. Changes in control parameters with respect to ambient temperature

것으로 보인다. 각 시뮬레이션 조건은 실험 조건에 맞는 외기환경에 대해 동일한 압축기로 운전한다. 사전에 목표 압축기 출구압력을 실험결과와 동일하게 설정하여 목표한 압축기 출구압력보다 시스템의 압축기 출구압력이 낮을 경우 냉각팬 제어를 통해 응축기에서의 열교환량을 낮춘다. 마찬가지로 과열도 또한 매칭되는 실험 결과와 동일한 값을 목푯값으로 설정하여 팽창밸브 개도 제어를 통해 질량유량을 조절함으로써 과열도를 제어하였다. 시뮬레이션은 각 케이스마다 3,000초 동안 계산을 수행하고 정적상태에 도달했을때부터 20초간 평균하여 분석하였다.

모든 케이스의 제어변수 실험결과와 시뮬레이션 결과 간 차이를 Table 4에 나타내었다. 압축기 회전속도, 압축기 입구과열도는 0%로 동일하였고 압축기 출구압력은 최대 0.8%를 오차가 발생했다. 압축기 출구압력은 시스템 내 냉각팬 속도를 조절함에 의해 냉동시스템 전체 상태량에 상호 영향을 받으므

로 다른 제어변수 대비하여 오차를 보이는 것으로 보인다.

Table 4. Comparison between experimental and simulation results for each test case

Ambient temperature [℃]	Error [%]		
	Speed	Superheat	Outlet pressure
23.2	0.0	0.0	0.7
28.4	0.0	0.0	0.8
36.1	0.0	0.0	0.7
43.8	0.0	0.0	0.6

시스템 상태량에 대한 정합성을 검증하기 위한 변수로 실험결과간 비교($\epsilon_{E,n}$), 시뮬레이션 결과간 비교($\epsilon_{S,n}$), 실험결과와 시뮬레이션 결과간 비교($\epsilon_{V,n}$)를 아래와 같이 3개의 첨자로 구분하여 선언하였다. 첫 번째 변수는 실험결과(외기온도 36.1℃)와 각 실험결과와의 차이를 비교한다. 임의의 물성치가 온도일 경우 차이로, 그 외에는 비율로 식(9)와 같이 계산하였다.

$$\begin{cases} \epsilon_{E,n} = x_{E,n} - x_{E,St} \ [K] \text{ if } x \ is \ temperature \\ \epsilon_{E,n} = x_{E,n} / x_{E,St} \ [-] \ else \end{cases} \quad (9)$$

$\epsilon_{E,n}$는 외기온도 36.1℃(기준조건)에 대한 n번째 케이스 n번째 케이스 실험결과에 대한 오차를 나타낸다. $x_{E,n}$은 임의의 물성치에 대한 n번째 케이스 실험결과를 나타내며 $x_{E,St}$는 임의의 물성치에 대한 외기온도 36.1℃(기준조건)에서의 실험 결과를 나타낸다.

두 번째 변수로 시뮬레이션 결과(외기온도 36.1℃)와 각 시뮬레이션 결과 비교를 통해 시뮬레이션 결과 간 경향성을 파악하기 위해 식(10)과 같이 비교 변수를 제시하였다.

$$\begin{cases} \epsilon_{S,n} = x_{S,n} - x_{E,St} \ [K] \text{ if } x \ is \ temperature \\ \epsilon_{S,n} = x_{S,n} / x_{E,St} \ [-] \ else \end{cases} \quad (10)$$

$\epsilon_{S,n}$은 외기온도 36.1℃(기준 조건)에 대한 n번째 케이스 시뮬레이션 결과에 오차를 나타낸다. $x_{S,n}$은 임의의 물성치에 대한 n번째 케이스 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

마지막으로 각 케이스별 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 가상시험환경에 대한 정확도를 검증하기 위해 식(11)과 같이 비교 변수를 제시하였다.

$$\begin{cases} \epsilon_{V,n} = x_{S,n} - x_{E,n} \ [K] \text{ if } x \ is \ temperature \\ \epsilon_{V,n} = x_{S,n} / x_{E,n} \ [-] \ else \end{cases} \quad (11)$$

$\epsilon_{V,n}$은 임의의 물성치에 대해 n번째 케이스 시뮬레이션 결과와 실험결과에 대한 오차를 나타내며 이는 해당 물성치에 대한 시스템 정확도를 검증할 수 있는 지표이다.

압축기 입구온도는 시험 및 시뮬레이션 비교 결과를 Figure 9 (A)에 나타내었다. $\epsilon_{E,n}$는 외기온도 43.8℃에서 가장 높게 나타났으며 외기온도 상승에 따른 영향은 크지 않았다. $\epsilon_{S,n}$은 $\epsilon_{E,n}$과 비슷한 경향을 보였다. $\epsilon_{V,n}$은 최대 -2.1K로 저온 조건인 23.2℃ 영역에서 실험결과와 시뮬레이션 결과 간 오차가 가장 큰 것으로 나타났다. Figure 9 (B)는 압축기 출구온도를 나타내며 개발 품질에 있어서 중요하게 다루어야 하는 인자이다. $\epsilon_{E,n}$는 외기온도가 상승할 때 압축기 출구온도가 상승하는 경향을 보였으며, 이는 압축기 출구압력 상승에 따른 영향으로 보인다. $\epsilon_{S,n}$ 또한 $\epsilon_{E,n}$과 비슷한 경향을 보이며 가상시험환경 또한 물리적 현상을 반영하는 것을 확인할 수 있다. $\epsilon_{V,n}$은 최대 4.47K이며, 마찬가지로 저온 조건인 23.2℃ 영역에서 실험 결과와 시뮬레이션 결과 간 오차가 가장 큰 것으로 나타났다. 압축기 소모전력은 Figure 9 (C)에 나타내었다. $\epsilon_{E,n}$은 외기온도 상승에 따라 증가하는 경향을 보이며, $\epsilon_{S,n}$ 또한 마찬가지로 실제 실험 결과와 경향성이 동일하다. $\epsilon_{V,n}$은 외기온도 23.2℃에서 최솟값인 0.98를 보였고 외기 43.8℃에서 최댓값인 1.01을 보였다. 압축

기 입구압력은 Figure 9 (D)에 나타내었다. $\epsilon_{E,n}$은 외기온도 28.4℃에서 1.02로 가장 크게 나타났다. 이는 다른 케이스와 비교해서 외기온도에 비해 낮은 속도의 압축기를 운전하여 압축비가 낮아져 입구압력이 높게 나타나는 것으로 추정된다. $\epsilon_{S,n}$은 외기 23.2℃에서 0.91로 가장 낮았으며 경향성은 $\epsilon_{E,n}$과 일치하였으나 오차의 절댓값은 상대적으로 크게 나타났다. $\epsilon_{V,n}$은 압축기 출구압력은 마찬가지로 외기 23.2℃에서 0.93으로 가장 낮게 나타나고 다른 케이스에서는 대체로 실험결과와 시뮬레이션 결과의 오차가 크지 않은 것으로 나타났다. 압축기 출구압력은 Figure 9 (E)에 나타내었다. $\epsilon_{E,n}$는 외기온도 상승

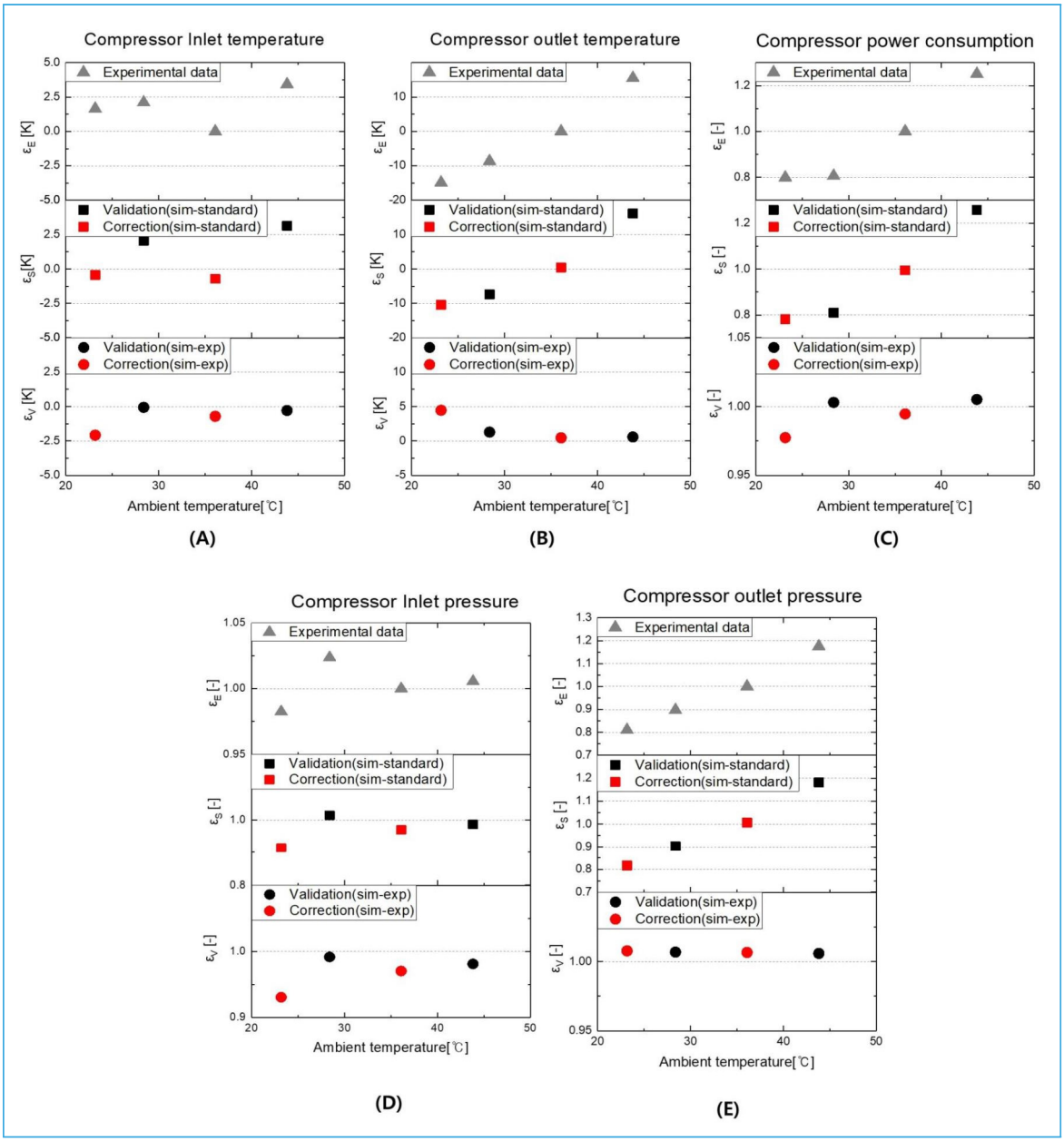


Figure 9. Error analysis of state variables in the thermal management system

에 따라 증가하는 경향을 보였고 $\epsilon_{S,n}$ 또한 비슷한 경향을 보이며 실험결과와 일치하는 경향을 보였다. $\epsilon_{V,n}$ 또한 모두 1.01을 보이며 높은 정확도를 보였다. 통계적인 정합성 검증 결과를 Table 5에 나타내었다. ϵ_V는 기준 실험 결과 대비 시뮬레이션 결과를 퍼센트로 재표현하였다. 온도로 나타낸 ϵ_V는 단위를 K으로 표현하였다. 본 연구에서 검증한 모든 케이스에 대해 시뮬레이션 결과와 실험결과의 압축기 출구 온도는 평균적으로 1.4 K, 최대 4.5 K의 오차를 보였고 1.6 K의 표준 편차를 보였다. 이에 따라 개발된 가상시험환경은 실제 시험이 어려운 극한 환경에서의 가상 정적 시험을 통해 설계타당성을 확보하고 개발품질을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 고온 운용환경인 외기 43.8℃ 조건에서 압축기 출구 온도의 실험결과 대비 시뮬레이션 결과 오차는 0.6 K으로 오차가 매우 낮음을 보였다.

Table 5. Statistical comparison of errors for all cases

ϵ_V				
Property	Avg	dev	Max	Low
Inlet pressure (comressor) [%]	-3.0	2.0	0.0	7.0
Ontlet pressure (comressor) [%]	1.0	0.0	1.0	0.0
Consumption power (compressor) [%]	0.0	1.0	1.0	-2.0
Inlet temperature (compressor) [K]	-0.6	0.8	0.0	-2.1
Outlet temperature (compressor) [K]	1.4	1.6	4.5	0.0

3. 결 론

본 연구는 고발열 무기체계 열관리장치 개발 간 발생 가능한 품질 문제를 사전 식별 및 개선방안 도출 연구를 수행하였다. 발생 가능한 개발품질 문제를 사전 식별하기 위해 고발열 무기체계를 모사한 발열체를 냉각하는 열관리장치를 제작하고, 운용 시험을 통해 외기 고온 조건에서 압축기 출구온도가 작동 조건 이상이 될 수 있음을 인지하였다. 품질문제 예측 및 개선을 위해 물리현상을 반영한 가상시험환경을 구현하고 실험 결과와의 비교를 통해 외기 고온 조건 및 저온 조건에서의 열관리장치 가상시험환경의 정합성을 확보하였다. 이를 통해 유동비등 열교환 방식의 고발열 무기체계 열관리장치에서 발생 가능한 품질문제 식별 및 개선 방법론의 유효성을 실증하였다. 개발된 가상시험환경 모델은 향후 개조 개발, 타 플랫폼 개발에도 같은 방법을 적용해 정적 운전 조건에서 발생 가능한 품질 위험을 사전에 인지하고 제어 전략, 설계 변경을 통해 회피하여 개발 기간/비용을 획기적으로 단축할 수 있다. 본 연구에서는 정적운전에서 발생할 수 있는 품질문제를 다루었지만, 실제 고발열 무기체계 운용특성인 비주기성은 동적운전상태에서 많은 품질문제를 야기할 수 있다. 본 연구에서 개발된 1D 가상시험환경은 동적운전상태를 예측을 고려하지 않았다. 이를 위해서는 시스템의 강성 특성을 고려한 연산효율성 개선 연구가 필요하다. 향후 이를 개선하여 동적 운전상황에서의 발생 가능한 품질문제를 예측하고 개선할 수 있는 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 국방기술진흥연구소의 재원으로 핵심기술 연구개발과제의 지원을 받아 수행됨.(No.21-107-F00-017)

참고문헌

1 Shin, M.-W. (2022). A Study on the Development of High Energy Laser(HEL) Weapon System. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23*(5), 141-151. https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.5.141

2 Ding, G.-L. (2007). Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems. *International Journal of refrigeration, 30*(7), 1119-1133. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.02.001

3 Hwang, Y. J., & Park, N. (2024). Virtual design on the heat pump refrigeration cycle: challenges and approaches. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 32*(1), 8. https://doi.org/10.1007/s44189-024-00052-0

4 Cha, S. Y. (2015). *The transient state modeling and optimization of refrigerant charge amount for a house hold refrigerator* [Master's thesis, Seoul National University].

5 Jeong, J. H., Park, S. G., Sarker, D., & Chang, K. S. (2012). Numerical simulation of the effects of a suction line heat exchanger on vapor compression refrigeration cycle performance. *Journal of mechanical science and technology*, *26*(4), 1213-1226. https://doi.org/10.1007/s12206-012-0204-2

6 Gardenghi, A. R. (2020). *Transient modeling of vapor compression refrigeration systems for domestic applications* [Master's thesis, University of São Paulo].

7 Koury, R. N. N., Machado, L., & Ismail, K. A. R. (2001). Numerical simulation of a variable speed refrigeration system. *International journal of refrigeration, 24*(2), 192-200. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00014-1

8 Ling, J., Bhanot, V., Alabdulkarem, A., Aute, V., & Radermacher, R. (2015). Transient simulation of heat pumps using low global warming potential refrigerants. *Science and Technology for the Built Environment, 21*(5), 658-665. https://doi.org/10.1080/23744731.2015.1034044

9 Kim, S. G., & Kim, M. S. (2002). Experiment and simulation on the performance of an autocascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant. *International Journal of Refrigeration, 25*(8), 1093-1101. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00110-4

10 Biela, J., & Kolar, J. W. (2007). Cooling concepts for high power density magnetic devices. In *2007 Power Conversion Conference-Nagoya* (pp. 1-8). IEEE. https://doi.org/10.1109/PCCON.2007.372915

11 Zhang, T., Catano, J., Zhou, R., & Wen, J. T. (2008). Dynamic modeling of refrigeration cycle for electronics cooling. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 10, pp. 1587-1596). https://doi.org/10.1115/IMECE2008-69047

12 Browne, M. W., & Bansal, P. K. (2002). Transient simulation of vapour-compression packaged liquid chillers. *International journal of refrigeration, 25*(5), 597-610. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00060-3

13 Agostini, B., Fabbri, M., Park, J. E., Wojtan, L., Thome, J. R., & Michel, B. (2007). State of the art of high heat flux cooling technologies. *Heat transfer engineering, 28*(4), 258-281. https://doi.org/10.1080/01457630601117799

14 Lemmon, E. W., McLinden, M. O., & Huber, M. L. (2018). *NIST reference fluid thermodynamic and transport properties—REFPROP version 10.0* (NIST Standard Reference Database 23). National Institute of Standards and Technology.

15 Stewart, M. (2018). *Surface production operations: Volume IV: Pumps and compressors*. Gulf Professional Publishing.

16 Chang, Y.-J., Hsu, K.-C., Lin, Y.-T., & Wang, C.-C. (2000). A generalized friction correlation for louver fin geometry. *International journal of heat and mass transfer, 43*(12), 2237-2243. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00289-6

17 Arima, H., Kim, J. H., Okamoto, A., & Ikegami, Y. (2010). Local boiling heat transfer characteristics of ammonia in a vertical plate evaporator. *International journal of refrigeration, 33*(2), 359-370. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.09.017

18 Kim, M. K., Lee, H., & Jeong, J. H. (2023). Evaluation of correlations for mass flow rate of refrigerant through electronic expansion valve in air-water heat pump system using R32. *International Journal of Refrigeration, 151*, 267-277. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.03.020

19 Leung, J. C. (1986). A generalized correlation for one component homogeneous equilibrium flashing choked flow. *AIChE Journal, 32*(10), 1743-1746. https://doi.org/10.1002/aic.690321019

20 Mehendale, S. S., Jacobi, A. M., & Shah, R. K. (2000). Fluid flow and heat transfer at micro-and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews, 53*(7), 175-193. https://doi.org/10.1115/1.3097347

21 Gnielinski, V. (1976). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *International chemical engineering, 16*(2), 359-368.

22 Cavallini, A., & Zecchin, R. (1974). A dimensionless correlation for heat transfer in forced convection condensation. In *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference* (Vol. 5, pp. 309-313). https://doi.org/10.1615/IHTC5.1220

23 Focke, W. W., Zachariades, J., & Olivier, I. (1985). The effect of the corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 28*(8), 1469-1479. https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90249-2

24 McAdams, W. H., Woods, W. K., & Heroman Jr, L. C. (1942). Vaporization inside horizontal tubes-II benzene-oil mixtures. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 64*(3), 193-199. https://doi.org/10.1115/1.4019013

25 Churchill, S. W. (1977). Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering, 84*(24), 91-92.

부 록

Table 1. Correlations applied in the simulation model

Component	Target variable	Author	Fluid	Correlation
Compressor	Isentropic efficiency	-	R32	$\eta_{c,i}(RPM) = f(h_{dis,act}(RPM), h_{d,isen}, h_{suc})$
Plate-fin HEX	Heat transfer coefficient	Chang et al. [16]	Air	$Nu_f = \Phi J \left(\frac{L_f}{L_l}\right)^{0.49} (Re_f)^{0.51} (\mathrm{Pr}_l)^{0.33}$
	Heat transfer coefficient for condensing	Mehendale et al. [20]	R32	$h_{TP} = h_{LO}[(1-x)^{0.8} + \left(3.8 \frac{x^{0.76}(1-x)^{0.04}}{(P_{red})^{0.38}}\right)$
	Heat transfer coefficient for single phase	Gnielinski [21]	R32	$Nu = \frac{\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0.11}\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)\mathrm{Pr}}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(\mathrm{Pr}^{0.66}-1)}\left[1+\left(\frac{D_h}{L}\right)^{0.66}\right]$
Plate HEX	Heat transfer coefficient for condensing	Cavallini and Zecchin [22]	R134a	$N = \frac{hD_i}{k_l} = 0.05 Re^{0.8} \mathrm{Pr}_l^{0.33}$
	Heat transfer coefficient for evaporating	Arima et al. [17]	R32	$\frac{h_{loc}}{h_{LZ}} = 16.4\phi \left(\frac{1}{X_{vv}}\right)^{1.08}$
HEX common	Heat transfer coefficient for single phase	Focke et al. [23]	R134a, R32	$Nu = 0.405 Re^{0.7} \mathrm{Pr}^{0.5}\ 300 < Re < 2000$ $Nu = 0.84 Re^{0.6} \mathrm{Pr}^{0.6}\ 2000 < Re < 20000$
	Pressure for two phase	McAdams et al. [24]		$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10}\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_{TP}\sqrt{f}}\right)$
	Pressure for single phase	Churchill [25]		$f = 8\left[\left(\frac{8}{Re}\right)^{12} + \left[\left(2.46 \ln\left(\frac{1}{\left[\frac{7}{Re}\right]^{0.9} + 0.27_{rr}}\right)\right)^{16} + \frac{37530}{Re}\right]^{-3/2}\right]^{1/12}$
EEV	Mass flow	Leung [19]	R32	$\dot{m} = C_d A \sqrt{\frac{2(P_{out} - P_{in})}{v_{in}}}$
Cold plate	Temperature	-	-	Lumped

소비자 위험을 고려한 방탄복에 대한 후면변형 평가 기준의 정량적 비교 분석

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Comparative Analysis of Backface Deformation Evaluation Criteria for Soft Armor Considering Consumer Risk

백승원, Seungwon Baik
육군사관학교, 기계·시스템공학과, 부교수
Associate Professor, Department of Mechanical and Systems Engineering, Korea Military Academy

안남수, Namsu Ahn
육군사관학교, 기계·시스템공학과, 교수
Professor, Department of Mechanical and Systems Engineering, Korea Military Academy

성호용, Hoyong Sung
육군사관학교, 국방운동과학과, 부교수
Associate Professor, Department of Military Kinesiology, Korea Military Academy

김종환†, Jong-Hwan Kim
육군사관학교, 기계·시스템공학과, 교수
Professor, Department of Mechanical and Systems Engineering, Korea Military Academy

Abstract

Backface deformation (BFD) is a key performance indicator in soft armor testing because it reflects the risk of behind armor blunt trauma, even without complete perforation. Although major ballistic standards adopt a common limit of 44 mm, their pass/fail decision structures differ substantially. This study quantitatively compares the BFD acceptance criteria defined in NIJ STD 0101.06/07, Maritime Armor System (MAS) NQ/PD 16-03B, and Korean Defense Standard (KDS 8470-4003). Four decision rules were formulated to represent deterministic and statistical acceptance structures, and their acceptance probability functions were analyzed. Monte Carlo simulations were conducted across varying means and standard deviations of the BFD with additional consideration of sample-size effects. The results show that the relative strictness of each criterion is not fixed but depends on the quality distribution and test design. Deterministic criteria are sensitive to extreme observations, whereas UTL-based criteria become more restrictive as variability increases or the sample size decreases. In particular, the NIJ mixed criterion provides a broader acceptance region, whereas the MAS criterion tended to be more conservative, with higher variability. These findings indicate that the practical interpretation of the 44 mm limit depends not only on the threshold itself but also on the statistical framework used for evaluation. This study provides a quantitative basis for comparing the BFD criteria and discussing their suitability in relation to consumer risk and procurement objectives.

keywords : backface deformation, ballistic testing standards, soft armor, NIJ STD 0101.06/07, upper tolerance limit, Monte Carlo simulation

† Corresponding Author : Jong-Hwan Kim
Tel : +82-02-2197-2921, email : jongkim@kma.ac.kr
Department of Mechanical and Systems Engineering, Korea Military Academy, 01806, 574, Hwarang-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 23th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

현대 군·경의 작전환경에서 개인 방호체계는 임무 수행 인원의 생존성을 좌우하는 핵심요소로 인식되고 있다. 방탄복의 방호성능 평가는 탄두의 관통 여부뿐만 아니라, 실제 작전환경에서 관통이 발생하지 않더라도 피격에 따른 방탄재의 변형으로 인해 착용 인원에게 전달되는 둔상 손상(Behind Armor Blunt Trauma, BABT)의 위험을 고려해야 한다. 이러한 이유로 방탄복 성능시험에서는 탄두 충격에 따라 방탄재 후면에 발생하는 변형의 깊이, 즉 후면변형(Backface Deformation, BFD 또는 Backface Signature, BFS)이 중요한 방호성능 지표로 활용되고 있다.

후면변형은 방탄재가 탄두의 운동에너지를 흡수 및 분산하는 과정에서 후면으로 발생하는 비관통 변형을 정량적으로 나타내는 지표로서, 특정한 재료적 성질을 갖는 유성점토(clay backing material)를 활용하여 인체의 연부조직 반응을 모사함으로써 측정된다. 일반적인 연성 방탄복(soft armor)과 유성점토의 설치 방식 및 후면변형 형상은 Figure 1과 같다.

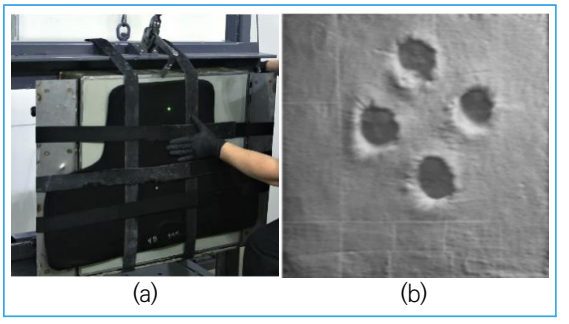


Figure 1. Clay backing setup and rear-face deformation. (a) Setup of the soft armor with clay backing and (b) Rear-face deformation pattern

Figure 1(b)와 같은 후면변형은 인체의 심각한 둔상 손상으로 이어질 수 있어, 이러한 위험을 최소화하기 위해 국내·외에서 다양한 방탄 성능시험 표준이 제정되어 왔다. 국제적으로는 미국 NIJ(National Institute of Justice) STD 0101 계열 표준이 군·경 및 민수용 방탄복 시험의 대표적인 기준으로 활용되고 있다[1-2]. 한편, 국내 군용 방탄체계 분야에서는 국방규격 KDS(Korea Defense Standard) 8470-4003(방탄복, 파편 및 소총 방호용), 8470-4007(방탄복, 지뢰보호용) 등이 방탄성능 평가의 주요 기준으로 적용되고 있으며, 이들 국방규격 역시 후면변형을 핵심 평가지표 중 하나로 채택하고 있다.

특히, 동일한 후면변형 허용치 44mm 기준을 적용함에도 불구하고 표준별 판정구조와 해석 방식에는 차이가 존재한다. NIJ STD 0101.06 및 0101.07 표준은 개별 사격결과 중 기준 초과여부를 판단하는 절대적 기준에 더해 단측 공차한계(Upper Tolerance Limit, UTL) 기반 통계 기준까지 허용하는 반면, 국내 국방규격은 절대적 기준만을 고려하는 구조를 채택하고 있다[1-5]. 이러한 판정구조의 차이는 동일한 방탄복이 표준에 따라 상이한 합격 가능성을 가지게 됨을 의미하며, 이는 방호 신뢰성과 소비자 위험에 영향을 줄 수 있다.

그럼에도, 기존 연구에서는 후면변형의 물리적 의미나 인체 손상과의 상관관계에 대한 논의는 활발히 이루어진 반면, 서로 다른 시험 표준 및 국방규격 간 판정구조의 차이가 합격확률과 소비자 위험에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 정량적 비교 연구는 상대적으로 제한적이었다.

이에 본 연구에서는 연성 방탄복을 중심으로 NIJ 표준, 국내 국방규격, 그리고 미 해군 MAS(Maritime Armor System) NQ/PD 16-03B의 후면변형 판정기준을 통제된 통계적 가정하에서 수용 기준을 비교하기 위한 일반화된 분석 틀을 제공한다. 이를 통해 판정기준의 엄격성을 소비자 위험 관점에서 해석하고, 향후 판정기준 적용에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 후면변형 관련 규정 및 구매요구서와 기존 후면변형 연구를 고찰하고, 3장에서는 연성 방탄복의 다양한 후면변형 판정기준의 구조를 비교한다. 4장에서는 샘플 수 변화에 따른 평가 결과를 정량적으로 분석한다. 이어

서 5장에서는 분석 결과의 의미와 향후 발전 방향을 논의하며, 마지막으로 6장에서 결론을 제시한다.

2. 문헌연구

본 장에서는 방탄복 성능 평가에서 후면변형(BFD/BFS) 개념이 어떻게 규정되고 운용되는지 확인하기 위해, 대표 규정인 미국 NIJ STD 0101.06/0101.07, 국내 KDS 국방규격, 미군의 구매요구서인 MAS NQ/PD 16-03B의 구성과 시험절차를 개념 수준에서 정리한다.

2.1. NIJ STD 0101.06 및 NIJ 0101.07

NIJ STD 0101.06은 방탄복의 탄도저항 성능을 평가하기 위한 시험방법과 최소 성능요구사항을 제시하는 규정으로[1], 관통(perforation) 저항뿐 아니라 후면에서 발생하는 변형을 평가함으로써 둔상 위험을 억제하려는 평가 논리를 포함한다.

NIJ STD 0101.06는 Table 1과 같이, 방탄복을 Type IIA, II, IIIA(연성/권총탄 중심) 및 Type III, IV(경성/소총탄 중심)로 분류해 탄두의 종류와 위협 수준에 따라 체계적으로 구분한다.

NIJ STD 0101.06은 후면변형을 측정하기 위해 표준화된 유성점토(roma plastilina no.1)를 통해 후면변형 깊이 측정의 신뢰성을 확보한다. 후면변형의 측정은 유성점토 표면에서 변형의 기준면을 설정하고, 측정기로 깊이를 측정하는 절차로 구성된다. 필요시 동일 위치에 대해 재측정을 수행하고, 측정자 편향을 줄이기 위해 다른 평가자가 재측정하도록 규정하는 방식으로 측정 신뢰성을 보강한다. 또한 시험 결과의 재현성을 위해 점토 블록은 규정된 절차로 준비되며, 시험 전 유성점토 상태의 적합성을 낙구시험(drop test)을 통해 점검하는 절차가 포함된다.

NIJ STD 0101.07은 0101.06을 시험운영 측면과 표준 체계를 상당 부분 재편한 최신 표준으로서[2], 후면변형은 BFD(Backface Deformation)로 기술된다. NIJ STD 0101.06이 방탄 성능을 Type IIA-IV 체계로 분류하는 것과 달리, NIJ STD 0101.07은 Table 2와 같이 권총탄(Handgun, HG)

Table 1. Threat Ammunition Specified in NIJ STD 0101.06

Level	Threat Round (Caliber)	Projectile Type	Projectile Mass(g)	Reference Velocity (m/s)
Type IIA	9×19 mm	FMJ RN	8.0	373 ± 9.1
	.40 S&W	FMJ	11.7	352 ± 9.1
Type II	9×19 mm	FMJ RN	8.0	398 ± 9.1
	.357 Magnum	JSP	10.2	436 ± 9.1
Type IIIA	.357 SIG	FMJ FN	8.1	448 ± 9.1
	.44 Magnum	SJHP	15.6	436 ± 9.1
Type III	7.62×51 mm	FMJ (M80)	9.6	847 ± 9.1
Type IV	.30-06 Spring field	AP	10.8	878 ± 9.1

Table 2. Threat Ammunition Specified in NIJ STD 0101.07 and NIJ STD 0123.00[3]

Level	Threat Round (Caliber)	Projectile Type	Projectile Mass(g)	Reference Velocity (m/s)
HG1	9mm Luger	FMJ RN	8.0	398 ± 9.1
	.357 Magnum	JSP	10.2	436 ± 9.1
HG2	9mm Luger	FMJ RN	8.0	448 ± 9.1
	.44 Magnum	JHP	15.6	436 ± 9.1
RF1	7.62×51mm	FMJ Steel Jacket	9.7	847 ± 9.1
	7.62×39mm	MSC	8.0	732 ± 9.1
	5.56mm M193	FMJ	3.6	990 ± 9.1
RF2	7.62×51mm	FMJ Steel Jacket	9.7	847 ± 9.1
	7.62×39mm	MSC	8.0	732 ± 9.1
	5.56mm M193	FMJ	3.6	990 ± 9.1
	5.56mm M855	FMJ	4.0	950 ± 9.1
RF3	.30-06 M2	AP	10.7	878 ± 9.1

과 소총탄(Rifle, RF) 기준으로 위협 기반 분류방식을 도입하였다.

2.2. MAS NQ/PD 16-03B

MAS NQ/PD 16-03B는 구매요구서로서, 기본 조끼(base vest)와 방호 구성품을 포함한 시스템 및 구성품 수준의 성능요구사항을 규정한다[4]. 주목할 점은 MAS가 NIJ나 KDS와 같은 성능 시험표준(standard)이라기보다, 군 조달을 전제로 납품 품목의 수락 여부를 판단하기 위한 계약 및 품질보증 성격의 문서라는 점이다. 따라서 MAS는 납품 로트의 품질 일관성과 생산 변동성을 고려하여 시험 및 판정절차를 구성한다.

MAS 문서 역시 후면변형을 기록하기 위해 유성점토를 사용하며, 점토 블록을 규정된 형상으로 준비한 뒤 일정 시간과 온도에서 조건화(conditioning)하여 시험에 적용하도록 한다. 또한 시험 전 유성점토의 상태를 낙구시험으로 확인하는 절차를 포함한다. MAS는 후면변형 깊이 측정을 레이저 스캐너로 수행하도록 명시하고, 변형되지 않은 기준 표면과 최심부(deepest point)의 차이를 깊이로 정의하는 등 측정 기준면 설정을 구체화하고 있다. 이러한 문서 성격은 3장에서 다루는 바와 같이, MAS가 후면변형 판정에 UTL 기반의 통계적 기준을 적용하여 조달 위험을 관리하는 구조로 이어진다.

2.3. 한국군 방탄복 국방규격

국내 군용 방탄복의 성능 평가는 국방규격(KDS) 및 구매요구서를 중심으로 수행된다. 대표적인 규격으로는 KDS 8470-4003(다목적 방탄복)과 KDS 4220-3004(부력방탄복)가 있으며[5-6], 이들은 각 군의 작전환경과 위협 수준에 최적화된 방호 요구성능을 정의하고 있다.

KDS 8470-4003은 NIJ STD 0101.06의 Level IIIA급에 상응하는 방호 능력을 목표로 하며, 이에 따라 .44 Magnum 및 .357 SIG 권총탄에 대한 후면변형(Perforation-Backface Signature, P-BFS) 시험을 필수 항목으로 규정하고 있다. 반면, 해상 작전용인 KDS 4220-3004는 과거 파편 방호용 규격(KDS 8470- 1005)을 준용하고 있어, 현재 파편모의체(Fragment Simulating Projectile, FSP)에 대한 V50[1] 시험만을 요구한다. 즉, 다목적 방탄복과 달리 별도의 권총탄 후면변형 시험이나 환경처리 절차가 포함되어 있지 않아, 해상 및 고온 환경에서의 방호 신뢰성에 대한 개선 필요성이 제기되고 있다[7].

이처럼 국내 국방규격 체계 내에서도 품목에 따라 후면변형 평가의 적용 범위와 환경조건이 상이하다. 본 연구에서는 이러한 규격 현황을 바탕으로, 특히 KDS 8470-4003에서 모든 사격결과가 44 mm 상한을 만족해야 하는 절대적 판정기준을 적용하는 국내 규격의 특성에 주목한다. 이는 통계적 기법에 UTL을 도입하여 합격확률을 조정하는 NIJ 및 MAS 기준과 정량적으로 비교했을 때, 실제 소비자 위험 관점에서 어떠한 차이가 있는지 3, 4장에서 상세히 분석하고자 한다.

2.4. 기존 후면변형 관련 연구

앞 절에서 정리한 바와 같이 NIJ·MAS·KDS는 유성점토를 이용한 후면변형 측정을 핵심 성능평가지표로 채택하고 있으며, 이를 바탕으로 후면변형의 발생원인, 환경처리 영향, 그리고 측정기술 고도화에 관한 연구들이 수행되어 왔다.

후면변형에 영향을 미치는 요인으로는 탄두의 종류 및 탄속, 방탄재 적층구조와 재료특성 외에도 운용 및 보관 환경에 따른 차이를 모사하기 위해 환경처리 및 노후화(aging) 방식이 적용되어 왔다. 다만 기존 연구들은 환경처리 전·후 후면변형의 차이를 비교하여, 동일 탄종에서 탄속 차이와 후면변형 차이를 분리해 해석하는 데 한계가 있었다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근 연구에서는 군에 납품된 방

1) 방호재의 관통/미관통 확률이 각 50%로 추정되는 탄두의 위협속도(m/s)

탄복의 시험결과를 활용하여 환경처리 여부에 따른 탄속과 후면변형량을 t-검정으로 비교하였다[8]. 결과적으로 환경처리 영향이 탄종에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 특히 에너지 수준이 높은 탄종에 대해 노후화 자체보다 실제 운동에너지 변동이 후면변형에 더 큰 영향을 줄 가능성을 보였다.

한편, 후면변형의 평가는 재료뿐 아니라 측정기술의 정밀도와 기준면 설정, 최심부 정의 등의 측정량 정의에도 크게 좌우된다. 전통적으로는 유성점토 후면변형에 대한 수기 측정시, 최심부가 조준점과 불일치할 수 있고 측정 불확도가 상대적으로 크다는 점이 지적되어 왔다. 이에 따라 3D 레이저 스캐너 등 비접촉 정밀 계측을 활용하여 사전(pre-impact)·사후(post-impact) 표면을 3차원으로 스캔한 뒤, 두 표면 간 최대 거리를 기반으로 후면변형을 산출하는 접근이 제시되었다[9]. 이러한 방법은 측정자 편향과 반복 측정 오차를 줄이는 데 기여할 수 있다.

더 나아가 탄두의 충격 중 후면변형의 시간 이력, 즉 시간 의존적 후면변형(time-dependent BFD) 데이터를 확보하려는 연구도 존재한다. 투명 후면재와 고속촬영을 결합하여 충격 동안의 변형 진화를 재구성하는 방법이 제시되었으며[10], 이를 통해 변형 깊이뿐 아니라 변형률 및 형상 변화 등 동특성 분석 가능성이 제안되었다. 이러한 정밀 계측 방식은 향후 후면재의 종류, 온도 조건, 계측 불확도를 포함한 시험조건의 설계 및 개선 논의에 활용될 수 있다.

요약하면 기존 연구는 환경처리, 노후화 및 계측기술 개선이 후면변형에 미치는 영향을 정량화하는 방향으로 발전해 왔다. 그러나 동일 시험 데이터가 서로 다른 표준의 판정구조에 의해 얼마나 다른 합격확률로 해석되는지, 즉 소비자 위험 관점의 기준 간 정량 비교는 상대적으로 제한적이었다. 또한 환경처리, 공정 변동, 계측 불확도는 후면변형 분포의 평균과 산포를 변화시키는 요인으로 작용하므로, 판정기준의 엄격성 비교는 (μ,σ) 공간에서 수행될 필요가 있다. 이에 3장에서는 표준별 후면변형 판정규칙을 정리하고, 4장에서는 합격확률함수 기반으로 기준 간 수용 영역과 상대적 엄격성을 정량적으로 비교한다.

3. 방탄복 후면변형 판정기준

본 장에서는 권총탄에 대한 방탄복의 후면변형 방호성능을 측정 및 판정하는 대표 규격인 미국의 NIJ STD 0101.06/07, MAS NQ/PD 16-03B, 그리고 국내의 국방규격인 KDS 8470-4003의 적용 세부사항을 정리한다. 이 문건들은 모두 관통과 후면변형을 핵심 성능지표로 다루지만, 방호성능 결과의 신뢰성을 확보하는 관점에서 일부 차이를 보인다. 각 표준의 판정기준에 대한 차이는 Table 3에 요약하였다.

3.1. NIJ STD 0101.06/07

NIJ STD 0101.06/07에서 규정한 후면변형 P-BFS/BFD 합격 판정절차는 Figure 2와 같다.

Table 3. Comparison of Backface Deformation Acceptance Criteria

Category	NIJ STD 0101.06 / 07		MAS NQ/PD 16-03B	Korean Defense Standard (KDS)
	Criteria 1	Criteria 2		
Absolute rejection limit	BFS/BFD 〉 50 mm		Not applied	Not applied
Individual measurement criterion	All BFS/BFD ≤ 44 mm	Not applied	Not applied	All BFS/BFD ≤ 44 mm
Statistical acceptance criterion	Not applied	95/80 one-sided UTL ≤ 44 mm	90/90 one-sided UTL ≤ 44 mm	Not applied

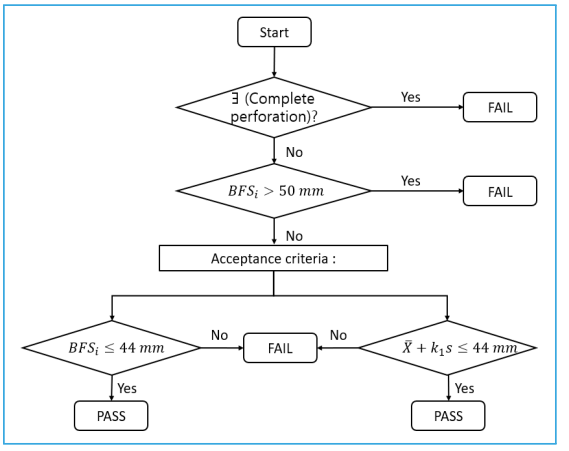


Figure 2. Flowchart of the P-BFS acceptance decision process in NIJ STD 0101.06/07

본 판정절차는 유효사격(fair hit)[2]만을 대상으로 수행되며, 유효사격에 의해 완전관통(complete perforation)이 발생한 경우 즉시 불합격으로 판정된다. 완전관통이 발생하지 않은 경우, 유효사격에 따른 후면변형 측정값 중 하나라도 50 mm를 초과하면 즉시 불합격 처리된다. 위의 두 가지 절대적 불합격 조건이 모두 발생하지 않은 경우에 한하여, 44 mm 기준에 대한 판정이 수행된다. 이때 유효사격의 후면변형 측정값이 44 mm 이하인 경우 합격으로 판정하며, 44 mm를 초과하는 후면변형 값이 존재할 경우 식(1)과 같이 정규분포를 가정한 단측 공차한계를 적용하여, 95% 신뢰수준에서 모집단의 80%가 44 mm 이하임을 만족하는지를 검증한다.

$$X_U = \bar{X} + k_1 s \leq 44\,mm \quad (1)$$

식(1)에 적용되는 단측 공차한계는 시험 결과가 정규분포를 따른다는 가정하에, 모집단 특성에 대한 통계적 불확실성을 고려하여 합격 여부를 판단하기 위한 기준이다. 상한 공차한계는 표본평균 $\bar{X}$와 표본표준편차 s를 이용하여 정의되며, 편의상 X_U로 표기한다. k_1은 표본 수에 따라 결정되는 공차한계 계수[3]이다. 본 규격에서 k_1은 95% 신뢰수준($\gamma = 0.95$)에서 모집단의 최소 80%($p = 0.80$)가 특정 한곗값 이하에 존재함을 보장하도록 설정된다. 즉, $X_U \leq 44$ mm를 만족할 경우, 시험에 사용된 표본으로부터 추정한 후면변형 분포에 대해 95%의 신뢰로 모집단 후면변형 값의 80% 이상이 44 mm 이하임을 통계적으로 주장할 수 있다. 이러한 공차한계 기반 판정방식은 개별 측정값의 최대치만으로 합격 여부를 결정하는 방식과 달리, 시험 데이터의 분포 특성을 반영함으로써 제한된 표본 수 환경에서도 합리적인 안전 여유를 확보할 수 있도록 설계되었다.

NIJ STD 0101.07에서 규정한 P-BFD 합격 판정 절차는 표현의 방식은 다소 상이하지만 Figure 2와 근본적으로 동일한 판정기준/절차를 적용한다.

3.2. MAS NQ/PD 16-03B

MAS NQ/PD에서는 NIJ 규격과 달리 FAT(First Article Test) 및 LAT(Lot Acceptance Test) 절차를 명시적으로 포함하고 있으며, 이는 규격의 적용 목적과 검증 대상의 차이에 기인한다. NIJ 규격이 방탄복의 최소 성능 요구충족 여부를 확인하는 인증 중심의 기술 표준인 반면, MAS NQ/PD는 군 조달을 전제로 실제 납품 물량의 수락 여부를 판단하기 위한 구매규격이다. 이에 따라 MAS NQ/PD는 시제품 단계에서 설계 적합성을 검증하는 FAT와 양산 단계에서 로트 단위의 품질 일관성을 확인하는 LAT를 통해 생산 변동성과 공정 편차에 따른 위험을 통계적으로 통제하도록 설계되었다. 이러한 FAT/LAT 기반 검증체계는 군수품 조달 환경에서 요구되는 책임성과 신뢰성을 확보하기 위한 필수적인 절차라 할 수 있다. 이러한 FAT 및 LAT 기반의 조달 검증절차를 운용하기 위해, 후면변형의 성능 판정을 위한 구체적인 통계 처리 규칙을 함께 제시하고 있다. 특히 권총탄에 대한 후면변형 합불 판정은 90/90 단측 공차한계가 44 mm 이하를 만족해야 하는 기준을 적용한다.

2) 피탄 간 거리와 속도 요구조건을 충족하는 사격
3) 부록(k factor value) 참조

3.3. 한국군 방탄복 국방규격

국내 국방규격에 따른 후면변형 판정기준은 방호 대상 위협에 따라 이원화되어 운영되고 있다. 지상 작전용인 KDS 8470-4003(다목적 방탄복)의 경우, NIJ STD 0101.06 표준을 준용하여 권총탄(.44 Magnum, .357 SIG) 피격 시 발생하는 후면변형의 한곗값을 44 mm로 규정하고 있다[5]. NIJ 표준이 통계적 기법(95/80 UTL)을 통해 일부 측정값이 기준을 초과하더라도 전체 분포가 신뢰 구간 내에 있다면 추가 합격의 기회를 부여하는 것과 달리, 현행 국방규격(KDS 8740- 4003)은 모든 유효사격 결과가 44 mm 이하를 만족해야 한다. 즉, 단 한 발의 사격이라도 44 mm를 초과할 경우 해당 로트나 모델은 즉시 불합격으로 처리되며, 이는 산술적으로 식 (2)와 같은 조건을 만족해야 함을 의미한다.

$$\max(x_i) \leq 44\,mm \tag{2}$$

여기서 x_i는 개별 유효사격에 따른 후면변형 측정값이다. 이러한 방식은 통계적 변동성을 허용하지 않는 매우 엄격한 기준으로 보일 수 있으나, 동시에 소요군 입장에서는 성능의 편차를 엄격히 통제하여 최악의 상황에서도 인체 손상을 최소화하려는 의도가 반영된 것으로 해석된다. 본 연구에서는 이러한 국방규격의 절대적 판정방식이 4장에서 다룰 시료 수 변화 및 통계적 확률 관점에서 소비자 위험에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 분석한다.

3.4. 후면변형 판정기준 요약

NIJ STD 0101.06/07, 그리고 한국의 국방규격 모두 관통과 후면변형을 결합하여 방탄복의 방호성능을 판정하며, 유효사격에 의한 완전관통 발생 시 즉시 불합격 처리하고, 후면변형 성능의 핵심 한곗값으로 44 mm를 적용한다.

반면, 44 mm 기준을 충족하는 방식과 이를 해석하는 통계적 판정기준에는 차이가 존재한다. NIJ STD 0101.06/07은 모든 후면변형 측정값이 44 mm 이하인 경우를 직접적인 합격 조건으로 설정하는 동시에, 정규분포를 가정한 단측 공차한계를 추가 합격 기준으로 허용하며, 이때 95 % 신뢰수준에서 모집단의 80 %가 44 mm 이하임을 보장하는 95/80 공차한계를 적용한다. 한편, 국내의 국방규격은 절대적 기준 만을 적용하며 통계적 기반의 추가합격을 허용하지 않는다. 반면, MAS NQ/PD 16-03B는 군조달 환경을 전제로 후면변형 성능 판정에 90/90 공차한계를 적용함으로써, 동일한 한곗값을 유지하면서도 NIJ 규격에 비해 통계적으로 더 보수적인 판정기준을 요구한다. 이러한 차이는 후면변형 성능요구의 엄격성이 단순한 한곗값 자체보다는, 이를 해석하는 통계적 커버리지와 신뢰수준의 설정에 의해 결정됨을 의미한다.

4. 후면변형 판정기준의 정량적 분석

본 장에서는 NIJ STD 0101 표준, 국방규격, 그리고 MAS NQ/PD 16-03B의 후면변형 판정기준이 판정결과(합·불)에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다.

4.1. 합격확률함수 정의

각 판정기준의 소비자 위험[4]을 평가하기 위해 합격확률함수를 정의한다. 즉, 동일한 품질 파라미터 θ 하에서 합격 합률이 낮을수록 해당 판정기준이 더 엄격하며, 이에 따라 소비자 위험이 더 낮다고 본다.

후면변형의 크기를 확률변수 X로 두고, 유효사격(fair shot)에서 측정된 후면변형 값의 표본을 $x = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$라 하자. 어떤 판정기준 j에 대응하는 의사결정함수를 $D_j(x) \in \{0,1\}$(합격 $D_j = 1$, 불합격 $D_j = 0$)로 정하면 판정기준 j의 합격확률함

4) "후면변형 허용한계(44 mm)에 근접한 품질수준의 방탄복이 시험에서 합격되어 사용자에게 인도될 확률"로 정의

수(Acceptance Probability Function, APF)는 식(3)과 같이 정의된다.

$$APF_j(\theta) = \Pr_\theta\{D_j(x) = 1\}. \quad (3)$$

여기서 품질 파라미터 θ는 후면변형의 확률변수 X의 분포로 정의하므로 $\theta = (\mu, \sigma)$로 둘 수 있다.

4.2. 의사결정함수 정의

후면변형 측정값 표본이 $x = \{x_1, x_2, \ldots x_n\}$일 때, 표본평균 $\bar{x}$와 표본표준편차 s를 식(4)와 같이 산출한다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \quad (4a)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}. \quad (4b)$$

상측 단측 공차한계는 식(5)와 같이 계산된다.

$$UTL_{\gamma/p}(x) = \bar{x} + k_{\gamma/p,n}\, s, \quad (5)$$

여기서 $k_{\gamma/p,n}$은 표본크기 n, 모집단의 포함비율(coverage) p, 신뢰수준(confidence) γ에 의해 결정되는 공차계수(tolerance factor)이다. 또한 지시함수 $I(\cdot)$는 조건이 참이면 1, 거짓이면 0을 반환하는 함수로 정의한다.

Rule 1은 NIJ STD 0101.06/07에서 제시하는 판정기준으로서, 식(6)과 같이 모든 후면변형이 44 mm 이하이거나, 50 mm를 초과하지 않는 범위 내에서 44 mm를 초과하는 측정치가 있는 경우 통계적 기준으로 추가합격을 허용한다.

$$\begin{aligned} &Rule\,1: \\ &(\max_i x_i \le 44) \vee \\ &\{(\max_i x_i \le 50) \wedge (UTL_{95/80}(x) \le 44)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

이에 상응하는 의사결정함수는 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} D_1(x) = I\,[&(\max_i x_i \le 44) \\ &\vee \{(\max_i x_i \le 50) \wedge (\bar{x} + k_{95/80}\, s \le 44)\}]. \end{aligned} \quad (7)$$

Rule 2는 다음의 식(8)과 같이 NIJ STD 0101.06/0101.07에서 제시하는 모든 후면변형이 44 mm 이하를 요구하는 최댓값 기반 판정기준이며, 동시에 국내의 국방규격에서 제시하는 판정기준에 해당한다.

$$Rule\,2: \max_i x_i \le 44. \quad (8)$$

이에 대응하는 의사결정함수는 식(9)와 같다.

$$D_2(x) = I(\max_i x_i \le 44). \quad (9)$$

Rule 3은 NIJ STD 0101.06/07에서 제시하는 추가적인 판정기준인 50mm 상한조건과 통계적 조건을 결합한 판정기준으로 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} &Rule\,3: \\ &(\max_i x_i < 50) \wedge (UTL_{95/80}(x) \le 44). \end{aligned} \quad (10)$$

이에 대응하는 의사결정함수는 식(11)과 같다.

$$D_3(x) = I\{(\max_i x_i < 50) \wedge (\bar{x} + k_{95/80,n}\, s \le 44)\}. \quad (11)$$

Rule 4는 MAS NQ/PD 16-03B와 같이 UTL 기반 판정만으로 합격여부를 결정하는 통계적 판정기준으로 식(12)와 같이 90/90 단측 공차한계가 44 mm 이하를 만족해야 하는 판정기준이다.

$$Rule\,4: UTL_{90/90}(x) \le 44. \quad (12)$$

이에 대응하는 의사결정함수는 식(13)과 같다.

$$D_4(x) = I(\bar{x} + k_{90/90,n}\, s \le 44). \quad (13)$$

4.3. 판정기준 간 포함관계 분석

앞서 정의한 Rule 1~3은 기본적으로 상호 포함관계를 지니며 각 판정기준에 대해 합격으로 판정되는 데이터 집합을 $A_r (r = 1, 2, 3)$로 정의된다. 따라서 Rule 1은 Rule 2, 3 중 어느 하나라도 만족하면 되므로 A_1은 A_2와 A_3의 합집합으로 정의된다. 집합 A_2와 A_3는 일반적인 포함관계가 성립하지 않으며, 다음 $n = 9$의 데이터 집합 예시를 통해 각 집합의 포함관계를 간접적으로 설명할 수 있다.

Case 1) {41.0, 41.1, 40.9, 41.0, 41.0, 41.2, 40.8, 41.1, 40.9}
Case 2) {44.0, 44.0, 44.0, 44.0, 44.0, 44.0, 40.0, 40.0, 40.0}
Case 3) {45.8, 38.1, 39.3, 40.7, 38.4, 37.7, 39.1, 38.3, 37.9}

Case 1은 max = 41.2, $\bar{x}$ = 41.0, $s = 0.1$로 $UTL_{95/80} = 41.2$ 이다. 따라서 Rule 1, 2, 3 모두 만족한다. Case 2는 max = 44.0 으로 Rule 2는 만족하지만 $\bar{x}$ = 42.7, $s = 2.0$ 으로 $UTL_{95/80} = 46.2 > 44.0$이므로, Rule 3은 만족하지 못한다. 반면, Case 3은 max = 45.8 로 Rule 2는 만족하지 않지만, $\bar{x}$ = 39.5, $s = 2.5$, $UTL_{95/80} = 43.9 < 44.0$이므로 Rule 3을 만족한다. Rule 4는 상이한 단측 공차한계(k)를 적용하므로 직접적인 포함관계 비교는 무의미하며 다른 Rule과의 판정기준 관점에서의 엄격성 비교는 다음 절에서 상세히 다룬다.

4.4. 합격확률 기반 소비자 위험 비교[5)]

본 절은 앞서 정의한 Rule 1~4의 의사결정함수를 활용하여 동일한 분포가정 하에서 합격확률을 비교하여 각 판정기준의 소비자 위험을 비교한다. 규칙 자체의 엄격성을 비교하기 위해 본 절에서는 표본을 크기를 $n = 9$로 가정하였다. 후면변형 값을 확률변수 X로 두고, 조건 내 후면변형 측정치는 정규분포 $N(\mu, \sigma^2)$를 따르는 데이터를 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 각 3,000회 생성하여 판정기준 별 합격여부를 판정하였다.

4.4.1. 판정기준 별 엄격성 비교

동일한 조건에서 생성된 후면변형 데이터를 기준으로 앞서 정의한 네 가지 판정기준(Rule 1~4)에 대한 합격확률을 비교한다. 기존 연구에 따르면 연성 방탄복의 후면변형 표준편차는 약 0.5~4 mm 범위가 일반적이므로[11], 본 절에서는 표준편차 1mm 기준의 실험 결과를 보인다.

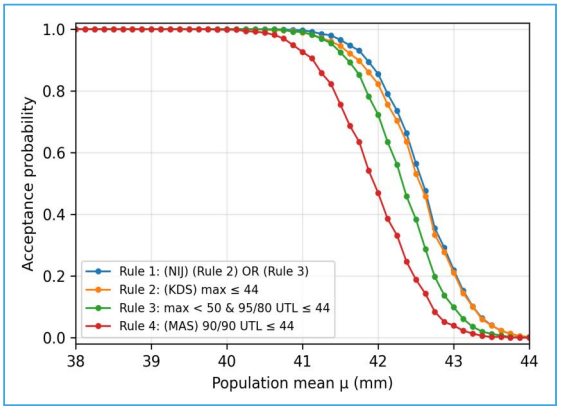


Figure 3. Pass probability distribution for each decision criterion ($\sigma = 1\,mm, n = 9$)

Figure 3은 $\sigma = 1$ mm 및 $n = 9$ 조건에서 평균 μ 변화에 따른 Rule 1~4의 합격확률을 비교한 결과이다. μ가 44 mm에 가까워질수록 모든 판정기준의 합격확률은 감소하지만, 감소속도 및 기울기는 판정기준에 따라 달라진다. Rule 1은 "Rule 2 또는 Rule 3을 만족하면 합격"인 합집합 구조이므로, 모든 μ구간에서 합격확률이 Rule 2, 3보다 큰 값으로 유지되어 상대적으로 가장 완화된 판정특성을 갖는다. 반면, Rule 2는 표본의 극값에 직접 영향을 받으

5) 본 절의 Figure는 Python 기반 코드로 생성되었으며, 코드 작성 과정에서 생성형 AI(Claude의 Sonnet 4.6 및 OpenAI의 GPT-5.3)를 보조 도구로 활용함.

므로 μ의 값이 44 mm에 가까워질수록 합격확률이 비교적 급격히 감소하는 경향을 보인다. Rule 3은 평균과 표준편차를 함께 반영하는 통계적 공차한계 기반 규칙으로, σ가 작을 때는 평균 중심의 판정특성이 강해져 μ가 일정 수준까지는 Rule 2와 유사한 수준의 감소를 보이지만, μ가 커지면 UTL 조건에 의해 빠르게 불합격확률이 증가한다. Rule 4는 더 큰 공차계수 ($k_{90/90} > k_{95/80}$)를 사용하므로 동일한 (μ, σ)에서 Rule 3보다 통상 더 낮은 합격확률을 나타내며, 그 차이는 μ의 값 42 mm 전후에서 뚜렷해진다.

4.4.2. 상대적 엄격성 분석

(μ, σ) 평면의 각 범위에서 Rule 1~4의 합격확률을 비교하여, 가장 엄격한(합격확률이 최소인) 판정기준을 Figure 4에 도식하였다(T는 동률(tie)을 의미). Figure 4의 각 셀의 색은 가장 낮은 합격확률을 나타내며, 녹색은 최저합격확률이 1에 가까우며, 반대로 적색은 최저합격확률이 0에 가깝다.

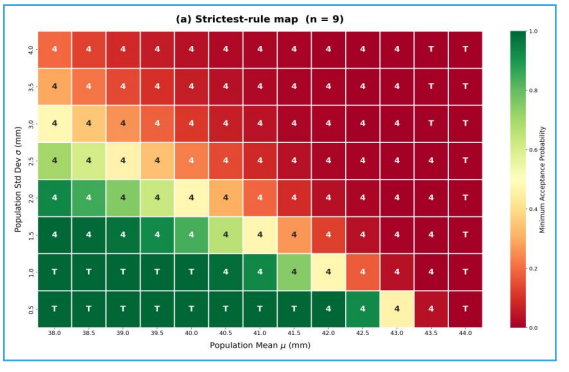
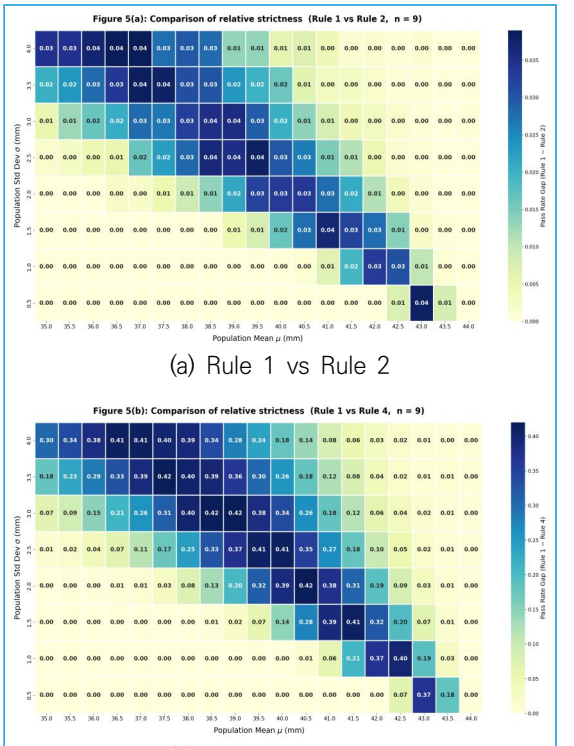


Figure 4. Strictest-rule map on the (μ, σ) plane $(n = 9)$

이 결과는 평균 및 산포로 표현되는 품질수준 조합에 따라 어떤 규칙이 실질적으로 가장 보수적인 판정경계를 형성하는지를 보여준다. Rule 1~4의 상대적 엄격성은 단일 순서로 고정되지 않으며 μ 및 σ 수준에 따라 조건부 역전이 나타난다는 것을 알 수 있다. 특히 σ가 증가할수록 UTL 항(ks)의 영향이 커져 UTL 기반 규칙(Rule 4)이 더 엄격해지는 구간이 확대된다.

Figure 5(a)와 (b)는 각 Rule 1과 2, Rule 1과 4의 상대적 엄격성을 $\Delta = APF_1(\theta) - APF_i(\theta)$로 정의하여 (μ, σ) 평면에 도시한 것이다. Figure 5(a)와 (b)에서 Δ의 값이 양(+)의 값으로 크게 나타나는 청색의 대각선 띠 영역은, 평균 μ가 44 mm보다 많이 낮더라도 산포 σ가 증가함에 따라 각 Rule 2, 4의 UTL 제약이 통과확률을 빠르게 낮추는 구간을 반영한다. 반면 $\Delta \approx 0$에 가까운 영역(특히 평균 μ가 낮고 산포 σ가 매우 작은 구간)에서는 비교되는 두 규칙 모두 거의 합격하여 상대적 차이가 작아진다.



(a) Rule 1 vs Rule 2

(b) Rule 1 vs Rule 4

Figure 5. Comparison of relative strictness $(n = 9)$

4.4.3. 소결론

각 판정기준에 대한 합격확률 기반 분석 결과는 다음과 같은 특징을 보인다. 첫째, 동일한 44 mm

임계값을 사용하더라도 엄격성은 임계값 자체보다 판정기준과 단측 공차계수(k) 및 표본크기(n)의 조합에 따라 좌우된다. 둘째, 일반적으로 가장 엄격한 판정기준은 Rule 4이며, (μ, σ) 영역에 따라 일부 동일한 수준의 엄격성을 보이는 판정규칙들이 존재한다. 따라서, 각 규칙의 우열 판단은 시험설계 및 품질 특성을 함께 고려하여 수행되어야 한다. 다양한 수준의 표본크기($n = 6, 9, 12$)에 대한 Rule 1-4의 합격 분석 결과는 Figure 6과 같다. Figure 6의 첫 번째 열의 그림은 (μ, σ) 공간에서 최소 합격확률 규칙을 도식화한 것으로, μ와 σ 증가에 따라 UTL 기반 규칙, 특히 Rule 4가 엄격성을 지배하는 영역이 확대됨을 보인다. 두, 세 번째 열은 각각 Rule 1 대비 Rule 2와 Rule 4의 상대적 차이를 Δ로 나타내어, Rule 1이 Rule 2, 4 대비 추가 합격 영역을 제공하는 구간을 청색의 대각선 띠 형태로 확인할 수 있다.

5. 고찰 및 논의

5.1. 소비자 위험도 관점에서의 함의

본 연구는 품질모수를 (μ, σ)로 두고 합격확률을 산출함으로써, 각 품질수준에 따라 판정기준의 후면변형 합격 수준으로 분석하였다.

이 과정에서 Rule 2는 개별 측정치 초과를 원천

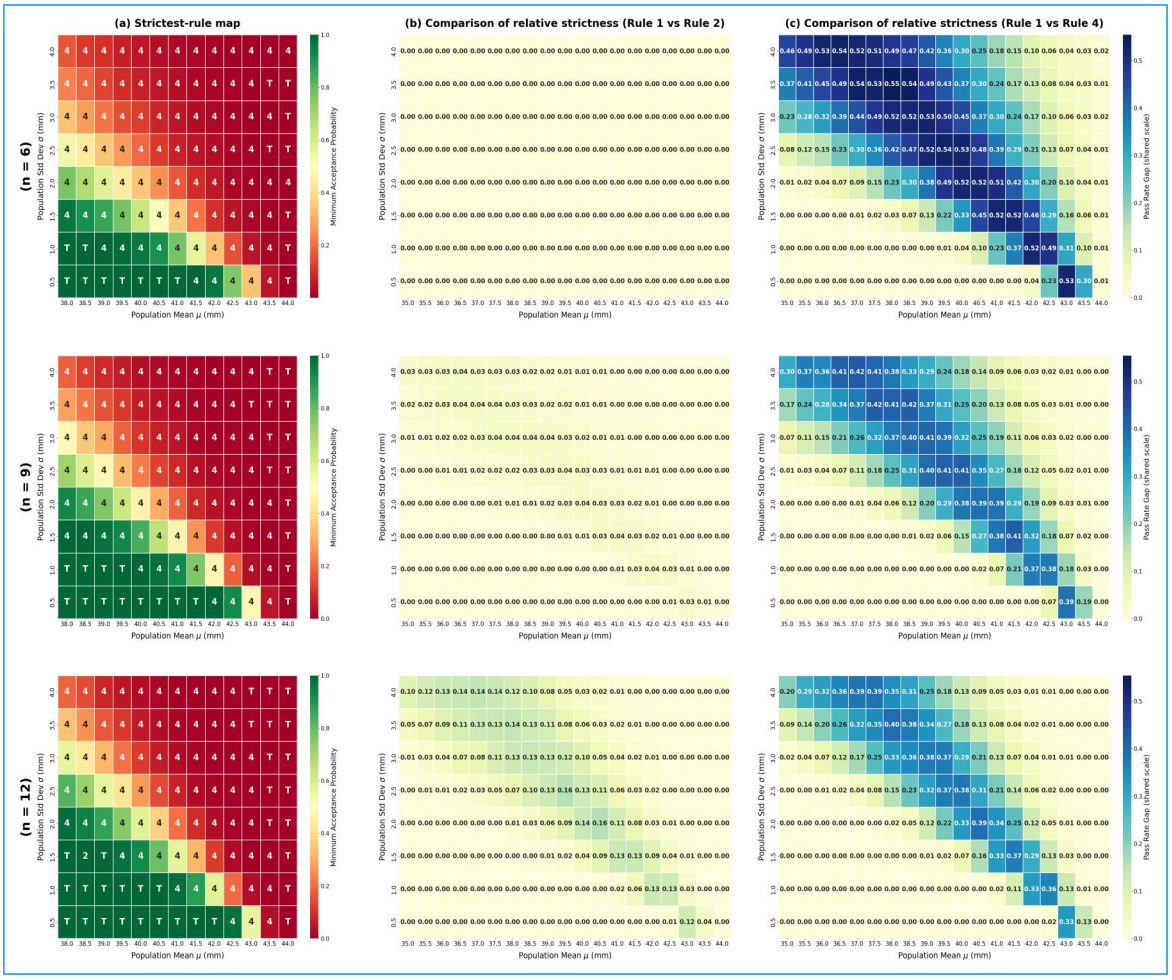


Figure 6. Acceptance probability and relative stringency maps for NIJ and MAS Criteria ($n = 6, 9, 12$)

허용하지 않으므로 직관적으로 소비자 위험을 낮추는 방향의 설계처럼 보일 수 있으나, 동시에 방호성능시험의 기타 요소들인 시험환경, 측정오차, 유성점토의 조건화 편차 등 비정상 변동까지 모두 제품 성능 변동으로 흡수하여 불필요한 불합격 가능성(생산자 위험)이 존재한다. 반대로 Rule 1은 통계적 추가합격을 허용하므로 생산자 위험을 완화하는 장점이 있으나, 특정 (μ, σ) 영역에서 상대적으로 소비자 위험이 커질 가능성이 존재한다. MAS의 Rule 4는 조달 수락이라는 목적에 맞게 분포의 하위 성능(coverage)을 더 넓게 보장하도록 설계된 만큼, 특히 산포가 커지거나 공정 변동이 큰 상황에서 상대적으로 보수적 판정을 유도할 수 있다.

따라서 제시된 판정기준 중 가장 합리적인 기준을 하나를 확정하는 것은 적절하지 않으며, 판정기준을 적용하는 상황 및 목적(군 조달, 인증, 품질보증)과 표준이 허용하는 소비자 및 생산자 위험의 균형을 함께 고려하여 판정기준의 타당성을 채택하는 것이 타당하다.

5.2. 표본크기와 시험설계가 판정 엄격성에 미치는 영향

4장에서 표본크기 변화에 따른 합격확률 변화를 비교하여, 동일한 기준이라도 표본의 크기가 달라지면 판정의 엄격성이 크게 달라질 수 있음을 보였다. 특히 최댓값 기반의 Rule 2는 모든 후면변형 측정값 44 mm 이하를 요구하므로 표본의 크기가 증가할수록 통과확률이 감소하는 경향이 강하다. 즉, 표본의 크기가 늘어나는 것만으로도, 동일한 품질조건 하에서 판정이 더 엄격해지는 구조이다.

반면 UTL 기반 규칙(Rule 3, Rule 4)은 표본의 크기 증가가 공차계수 감소 효과를 가져온다. 이는 UTL 기반 규칙이 단순히 표본의 수를 증가시키는 것만으로 엄격해지는 것이 아니라, 평균 수준과 산포 수준을 함께 반영하여 엄격성이 결정됨을 의미한다.

이러한 결과는 시험 기준의 엄격성 논의가 단지 44 mm 한계값 또는 UTL 채택 여부의 이분법으로는 충분하지 않으며, 표본의 크기 및 시험조건 구성(반복 측정 등)까지 포함한 시험설계 관점에서 함께 고려될 필요가 있다.

5.3. 표준 및 규격별 판정구조의 해석

NIJ 규격은 민·군, 치안 영역에서 널리 활용되는 성능 표준으로서, 일정 수준의 안전을 보장하면서 다양한 제조사와 제품군을 포괄하는 인증 성격이 강하다. 이에 비해 MAS는 군 조달을 전제로 FAT/LAT 체계를 명시하고 로트 품질의 일관성을 통제하려는 목적을 갖는다. KDS는 소요군 중심의 요구성능을 직접 반영하며, 최악 조건에서의 위험을 최소화하려는 보수적 설계가 강조될 수 있다.

이러한 각 표준별 적용 목적의 차이를 고려하면, 세 문서가 서로 다른 판정구조를 채택한 것은 단순한 엄격 혹은 완화의 문제가 아니라, 각 체계가 감당하려는 소비자 위험, 생산자 위험, 인증 실패비용, 운용 실패위험 등의 차이를 반영한 결과로 해석될 수 있다. 본 연구의 정량적 분석은 이러한 해석을 뒷받침하는 근거를 활용될 수 있으며, 특히 산포의 크기가 실질 엄격성 평가의 핵심 변수로 작용한다는 점에서 품질보증 체계의 중요성이 다시 한 번 강조된다.

6. 결 론

본 연구는 연성 방탄복의 후면변형 성능평가에서 동일한 한계값(44mm)을 적용하더라도 판정구조의 차이에 따라 합격·불합격 결과가 달라질 수 있음을 정량적으로 분석하였다. NIJ STD 0101.06/0101.07, 국내 국방규격, MAS NQ/PD 16-03B의 판정기준을 Rule 1~4로 정의하고 합격확률함수를 적용한 결과, 실질적 엄격성은 44mm 임계값 자체보다 판정구조, 공차계수, 표본크기의 조합에 의해 좌우되었으며, 판정기준 간 우열을 단일 순서로 일반

화하기는 어렵고 적용 목적과 소비자·생산자 위험의 균형, 시험설계를 함께 고려하여 타당성을 논의할 필요가 있다.

향후 연구에서는 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다. 첫째, 실제 시험 데이터를 기반으로 하여 후면변형 분포의 비정규성을 고려한 시험 및 분석을 수행할 필요가 있다. 둘째, 환경처리 및 노후화에 따른 평균과 산포의 변화 모형을 도입하여, 운용 조건 변화가 합격확률과 소비자 위험에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 마지막으로, 후면변형 뿐 아니라 완전관통 여부, 충격 속도의 편차 등을 함께 고려하여 실제 시험절차를 더 충실히 반영할 필요가 있다.

참고문헌

1. National Institute of Justice. (2008). *Ballistic resistance of body armor: NIJ Standard-0101.06*. U.S. Department of Justice. https://nij.ojp.gov/library/publications/ballistic-resistance-body-armor-nij-standard-010106
2. National Institute of Justice. (2023). *Ballistic resistance of body armor: NIJ Standard 0101.07*. U.S. Department of Justice. https://nij.ojp.gov/library/publications/ballistic-resistance-body-armor-nij-standard-010107
3. National Institute of Justice. (2023). Specification for NIJ ballistic protection levels and associated test threats: NIJ Standard 0123.00. U.S. Department of Justice. https://nij.ojp.gov/library/publications/nij-ballistic-protection-levels-and-test-threats-nij-standard-012300
4. Naval Sea Systems Command. (2019). *Body armor, maritime armor system (MAS)* (Purchase Description NQ/PD 16-03B). U.S. Department of Defense.
5. Defense Acquisition Program Administration. (2018). *Body armor, fragmentation-small arms protective* (Defense Standard KDS 8470-4003, 5th rev.).
6. Defense Acquisition Program Administration. (2016). *Body armor, ship, buo* (Defense Standard KDS 4220-3004, 9th rev.).
7. Gu, S. H., Cho, S. H., Park, J. H., & Park, H. Y. (2023). A study on improvement of testing method for buoyancy body armor. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 24*(7), 158-164. https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.7.158
8. Gu, S. H., Ryu, S. B., & Song, S. H. (2022). The effect of environmental treatment of body armor on bulletproof performance. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 23*(11), 136-141. https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.11.136
9. Gilson, L., Vercammen, E., Ben Rhouma, M., Bernardi, A., Coghe, F., Imad, A., & Rabet, L. (2024). 3D scanning technique for morphological analysis of behind armour blunt trauma. *International Journal of Impact Engineering, 192,* 105013. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.105013
10. Goode, T., Shoemaker, G., Schultz, S., Peters, K., & Pankow, M. (2019). Soft body armor time-dependent back face deformation (BFD) with ballistics gel backing. *Composite Structures, 220*, 687-698. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.025
11. National Research Council. (2012). *Testing of body armor materials: Phase III*. The National Academies Press.

부 록(k factor value)

Number of BFS/BFD Measurement (n)	80% probability with 95% confidence[6] ($p = 80\%, \gamma = 95\%$)	90% probability with 90% confidence[7] ($p = 90\%, \gamma = 90\%$)
6	2.143	2.494
7	1.961	2.333
8	1.837	2.219
9	1.745	2.133
10	1.673	2.066
11	1.616	2.011
12	1.568	1.966
13	1.528	1.928
14	1.494	1.895
15	1.464	1.867
16	1.438	1.842
17	1.415	1.820
18	1.394	1.800

6) NIJ STD 0101.06 and NIJ STD 0101.07
7) International STD ISO 16269-6 (Statitical interpretation of data)

무기체계 체계안전성 관리 및 자료수집체계 구축 방안

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

A Framework for System Safety Management and Data Collection Architecture in Weapon Systems

전건욱†, Geonwook Jeon
안보경영연구원, 분석평가본부, 책임연구원
Senior Researcher, Analysis Evaluation Group, Security Management Institute

정운찬, Woonchan Chung
(주)카이엠, 대표이사
CEO, KAIEM Co.,LTD.

박순철, Suncheol Park
국방기술품질원, 항공센터, 선임연구원
Senior Researcher, Aviation System Center, Defense Agency for Technology and Quality

김유석, Yooseok Kim
국방기술품질원, 항공센터, 연구원
Researcher, Aviation System Center, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

This study proposes an integrated framework for establishing a safety management system and a data collection system to ensure the safety of weapon systems throughout their lifecycle. In response to the growing emphasis on proactive industrial safety, this study highlights the need for a systematic approach to identify, assess, and manage risks during the development, production, and operational phases of weapon systems. Despite this need, institutionalized system safety activities within the Republic of Korea's military remain largely limited to aircraft and naval vessels. To address this gap, this study analyzes advanced computerized System Safety Programs (SSP) implemented in the United States, United Kingdom, and Sweden, and derives a nine-step standard system safety process applicable to the Korean defense environment. The proposed process incorporates key lifecycle safety functions, including Critical Safety Item (CSI) management, preliminary and detailed hazard analyses, integration with production-phase quality assurance, and risk re-evaluation through operational data feedback.

In addition, this study presents a logical database structure for the integrated management of hazard analysis results, quality verification results, accident and failure records, and corrective action histories. Analytical frameworks based on statistical methods and natural language processing (NLP) are proposed to support the analysis of structured and unstructured data. The proposed framework is expected to enhance proactive risk prediction, accident prevention, and data-driven maintenance and decision-making, while also contributing to improvements in the quality management of defense industries, international competitiveness, and system safety expertise.

keywords : system safety, hazard analysis, risk management, CSI

† Corresponding Author : Geonwook Jeon
Tel : +82-2-544-5926, Fax : +82-2-544-5939, email : gwjeon@smi.re.kr
Security Management Institute, 10F, 527 Eonju-ro, Gangnam-gu, Seoul, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 28th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

국방 분야에서 무기체계의 성능과 생존성은 오랫동안 획득 사업의 핵심 목표였으나, 반복적으로 발생하는 안전사고와 막대한 인명·재산 피해는 안전성 중심의 사업관리가 필수적임을 보여주고 있다. 우리 군에서도 매년 다양한 유형의 무기체계 관련 사고가 보고되고 있음에도 불구하고, 그 원인과 위해요인(hazard)을 전 수명주기 관점에서 체계적으로 식별·분석·관리하는 제도적 장치와 데이터 인프라는 여전히 미흡한 실정이다.

최근 방위사업법 시행령 개정을 통해 개발단계 무기체계에 체계안전성(system safety)을 제도적으로 적용하려는 움직임이 본격화되면서, 예방적 안전관리 체계를 어떻게 설계·구축할 것인가가 중요한 정책 및 연구 과제로 부상하고 있다[1]. 체계안전성은 복잡한 시스템이 사람, 환경, 장비에 미치는 위해요인을 공학적·관리적 수단을 통해 식별하고, 그 위험도(risk)를 허용 가능한 수준으로 낮추도록 보증하는 활동으로 정의된다. 선진국에서의 체계안전성은 개발·시험·생산·운용·폐기 등 전 수명주기에 걸친 위해요인 식별, 위험도 평가, 위험 경감 및 잔여 위험 수용 절차를 표준화하고 있으며, 국방 획득 사업에서 필수프로그램으로 자리 잡고 있다[2, 3].

국내에서도 체계안전성에 대한 관심과 연구는 점진적으로 확대되고 있다. 각종 연구에서 MIL-STD-882E를 중심으로 국내 항공무기체계 개발 사례를 분석하고 우리나라 무기체계 연구개발 사업에 적합한 시스템안전 적용 방안과 선진 시스템 안전관리 사례를 분석하여 우리 군 환경에 적합한 체계안전성 관리 도입 방향을 제시하였다[4, 5, 6]. 그러나 기존 연구는 개별 무기체계 또는 규정 설계 중심에 머물러 있어, 개발·양산·운용 전 단계를 연계하는 공통 체계안전성 관리체계와 위험관리대장(hazard log) 중심 자료수집체계의 통합 구조를 구체적으로 제시하지 못하였다. 특히 우리 군의 경우 항공기·함정을 제외한 대부분의 무기체계는 별도의 체계안전성 관리 대상에서 벗어나 있으며, 부대 안전사고 관리에서도 무기체계를 단순히 '기인물' 수준으로만 분류하는 등, 무기체계 특성에 기반한 정량적 위험분석 및 체계적 정보 축적이 이루어지지 못하고 있다. 이로 인해 개발·양산 단계에서 수행된 위험분석 결과와 양산단계 품질보증 및 운용단계의 사고·고장 정보가 서로 연계되지 못하고, 각 단계의 산출물이 분리되는 문제가 발생하고 있다. 향후 항공기 및 함정 등 감항인증 대상을 포함한 무기체계를 모두 포괄하는 통합 체계안전성 관리체계를 구축하기 위해서는 이러한 단절을 해소하고 데이터 기반으로 전 수명주기 활동을 연계하는 정보시스템 설계가 필수적이다.

본 연구는 우리 군 환경에 적용 가능한 무기체계 체계안전성 관리체계와 자료수집체계의 통합 프레임워크를 제시하고, 이를 9단계 관리 프로세스와 위험관리대장 기반 데이터 연계 구조로 구체화하는 것을 목적으로 한다.

2. 국내·외 체계안전성 관리 및 자료수집 체계 운영 현황

선진국 군에서는 무기체계 체계안전성을 전력획득 및 운용의 핵심 요소로 간주하고 있으며, 이를 위해 Figure 1과 같이 전산화된 체계안전성 관리시스템을 구축하여, 무기체계 수명주기 전반에서 인원·장비·환경 측면의 위험을 통합적으로 관리하고 있다. 미국은 MIL-STD-882E를 기반으로 하는 system safety program을 통해 체계안전성 관리절차를 제도화하고, 예비 위해요인 목록과 분석, 서브시스템 위해요인 분석, 주요안전품목 관리, 위험 추적과 검증 등의 활동을 일관된 절차로 수행한다[3]. 영국은 DEF STAN 00-56과 ASEMS를 통해 체계안전성과 환경·직업안전 요구사항을 통합적으로 관리하며, 스웨덴 역시 FMV system safety 체계를 통해 유사한 구조의 제도적 절차를 구축하고 있다[2, 7]. 이들 국가는 공통적으로 위험의 식별, 평가, 검증, 보고, 피드백에 이르는 전 과정을 전산화하고, 각 단계에서 생성되는 안전활동 결과를 실시간으로 축적·분석·공유하는 통합 관리체계를 운용하고 있다.



Figure 1. Safety Management System in Advanced Countries

국내 공공부문에서도 교통안전공단 등 일부 기관은 항공·철도·자동차 등 운송수단에 대해 관련 법령에 근거한 감항·안전 인증 제도를 운영하고 있으며, 감항인증, 형식승인, 결함 분석 및 리콜 관리 등 전 과정을 통합 정보시스템을 통해 관리하고 있다[8]. 이러한 사례는 위험분석, 기술기준 검토, 검증시험, 등록 및 사후관리까지의 과정이 데이터 기반으로 운영될 수 있음을 보여주며, 무기체계 체계안전성 관리체계 설계에 있어 참조 가능한 실질적 모델을 제공한다.

국내 방산업체는 다음 Figure 2와 같이 ISO 9001, AS9100 등 품질경영체계를 기반으로 개발·양산 단계 품질관리를 수행하고 있으며, 일부 사업에서는 고객 요구에 따라 체계안전성관리계획과 위험관리대장을 작성·관리하고 있다.

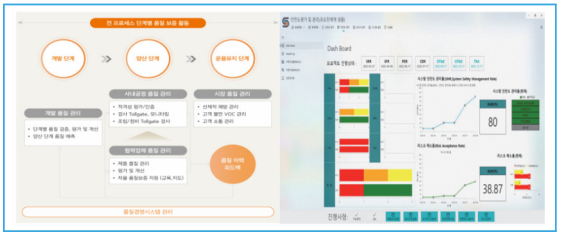


Figure 2. Quality Management Activities and Safety Management Tool for Domestic Defense Industries

다만 방산업체별로 체계안전성 관련 절차와 데이터 구조가 표준화되어 있지 않고, MIL-STD-882E 등 국방 표준 기반의 통합 체계안전성 관리시스템은 여전히 미흡한 상황이다. 특히 위험분석 결과와 정부품질보증(Government Quality Assurance, GQA) 결과 간의 연계가 체계적으로 이루어지지 않아, 축적된 자료가 차기 사업이나 개선사업에 충분히 활용되지 못하는 한계가 존재한다.

한국 군의 경우 항공기 및 함정은 감항인증 체계를 통해 일정 수준의 체계안전성 관리가 이루어지고 있으나, 그 외 대부분의 무기체계는 독립된 체계안전성 관리가 실시되지 못하고 있다. 부대 안전사고 관리업무에서 무기체계는 사고발생 시 '기인물' 항목 중 하나로 단순 포함되는 수준에 머무르고 있으며, 무기체계 개발·운용 단계에서 발생 가능한 위험요소를 사전에 식별·평가·검증하는 절차가 제도화되어 있지 않다. 이에 따라 체계안전성 관련 정보가 조직 내에 체계적으로 축적·환류되지 못하고 있으며, 유사 사고의 재발을 방지하기 위한 데이터 기반의 분석과 정책적 의사결정도 제한적인 수준에 머물러 있다.

이와 같은 국내·외 구축 사례를 분석한 결과, 우리 군 또한 무기체계 체계안전성을 효과적으로 관리하기 위해 선진국에서 적용하고 있는 체계안전성 관리 시스템을 벤치마킹하여 전산화된 체계안전성 관리 및 자료수집체계 구축이 필요하다.

3. 체계안전성 관리체계 구축 방안

본 연구에서는 개발, 양산, 운용 절차를 비교·분석하여 단계별 입력자료, 수행업무, 산출물을 기준으로 9단계 체계안전성 관리 프로세스를 도출하였다. 제안하는 체계안전성 프로세스는 체계안전성 관리계획 수립, 주요안전품목 후보 식별, 예비위해요인 목록 작성, 예비위해요인 분석, 서브시스템 위해요인 분석, 주요안전품목 관리활동 수행, 관리결과 보고, 양산단계 품질보증 활동과의 연계, 운용단계 추적 및

모니터링 등 9단계로 구성되며, 개발단계에서의 위험분석, 주요 안전품목 관리, 양산단계 품질보증과 위험관리 연계, 운용단계 위험 재평가 및 데이터 환류의 흐름이 서로 긴밀히 연결되도록 설계되어 있다.

초기 위험도 평가는 PHL(Preliminary Hazard List)·PHA(Preliminary Hazard Analysis) 결과를 기준으로 수행하고, 최종 위험도 평가는 SSHA(Subsystem Hazard Analysis)·시험결과·경감조치 반영 여부를 기준으로 재평가하며, 양산단계 품질보증 및 정부검사 결과는 위험관리대장과 CSI(Critical Safety Item) 관리정보에 직접 연계되도록 한다. 운용단계에서는 사고사례, 정비·개선 이력, 위험 재평가 결과를 지속적으로 데이터베이스화하여, 유사 무기체계 개발 및 차기 무기체계 안전성 검토를 위한 기초자료로 활용하는 환류체계를 구축해야 한다. 세부 절차는 Table 1과 같다.

Table 1. System Safety Process(9 Steps)

Phase		Main Content	Detailed Description
Planning and preliminary analysis	Step 1	Establish the system safety management plan	• develop the SSPP • define roles and responsibilities
	Step 2	Identify candidate subsystems for CSIs	• Derive functions and subsystems based on the WBS • Close out subsystems that do not affect critical safety
	Step 3	Develop the PHL	• Structure hazards based on risk rating • Prioritize potential hazards
Hazard analysis and initial risk assessment	Step 4	Perform PHA	• Conduct the initial risk assessment • Calculate the RAC(Risk Assessment Code) • Quantify risk based on PHA results; assign the initial risk level(high/medium/low) • Among identified hazards, confirm high-impact items as preliminary hazards
Detailed analysis and final risk assessment	Step 5	Perform SSHA	• Derive detailed causes based on components and apply analytical techniques, including FTA and ETA • Apply risk reduction and acceptance management criteria (acceptable, tolerable with mitigation, unacceptable) based on the ALARP(As Low As Reasonably Practicable) principle • Conduct the final risk assessment • Select CSIs and critical characteristics • Determine CSI selection based on whether unacceptable risk remains
Test / Mass Production / Operation / Feedback	Step 6	Perform CSI management activities	• Manage configuration based on TRR(Test Readiness Review) criteria • Conduct production and quality management • Manage test and evaluation readiness • Manage test and evaluation results • Manage readiness for standardization • Manage readiness for mass-production quality assurance
	Step 7	Report CSI management results	• Consolidate test and evaluation results and management history • Document materials for standardization
	Step 8	Perform quality assurance activities and risk management in the mass-production phase	• Link QA(Quality Assurance) results with the Hazard Log and CSI management • Store quality information in a database and connect it with accident cases from the operational phase
	Step 9	Conduct operational-phase tracking and monitoring	• Collect accident and improvement cases • Recalculate the RAC and reevaluate risk • Conduct tracking and monitoring • Build the database and provide feedback

무기체계의 체계안전성 관리는 분석 대상 체계를 명확히 하고 WBS(Work Breakdown Structure) 형태로 구조화하여 안전성 평가가 필요한 영역을 식별한다. 이후 무기체계 내에서 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있는 주요 구성품이나 계통을 식별한다.

PHL은 잠재적 위해요인을 식별한 목록으로 시스템 구성품, 재료, 환경적 요인, 체계 간 연동성, 유해물질, 건강 위해요인 등을 포함한다. 도출된 PHL을 기준으로 PHA와 SSHA가 수행된다. 이 과정에서 위해요인의 원인과 결과를 분석하고, 초기 위험도를 평가한다. 또한, 필요시 위험 경감조치를 도출하고 경감 후 위험도를 재평가한다. 이때 위해요인의 구체적 원인은 결함 수 분석(Fault Tree Analysis, FTA)와 사건수 분석(Event Tree Analysis, ETA)를 통해 분석하고, 심각도, 발생가능성 잔여 위험수준을 종합평가하여 CSI를 선정한다.

분석 결과는 위험도 관리 기준에 따라 분류되고 위험의 심각도와 발생빈도를 종합하여 위험 수준을 평가하고, 그 결과는 ALARP 원칙(수용 가능, 경감 수용 가능, 수용 불가)으로 관리된다.

이후 모든 분석 결과는 위험관리대장에 체계적으로 기록된다. 위험관리대장은 위해요인, 분석결과, 경감조치, 위험수준 등을 체계적으로 저장하고 추적관리하는 핵심 도구로 작동한다. 또한 운용단계에서 발생한 사고사례나 개선사례는 데이터베이스에 축적되어 위험관리대장과 연계되며, 이를 통해 새로운 위해요인 식별 및 기존 항목 보완이 이루어진다. 특히 비정형 사고사례 데이터는 인공지능 기반 자동 분류를 통해 구조화되어 기존 위해요인과 매핑되거나, 새로운 항목으로 추가된다.

양산단계에서는 품질보증(Quality Assurance, QA) 및 그 결과가 위험관리대장 및 CSI 관리와 연계되고 모든 품질정보는 DB화 이후 운용단계 사고사례와 연계된다.

체계 운용 중에는 위험 재평가와 위험 추적 및 모니터링이 지속적으로 수행된다. 고장률 갱신이나 설계 변경 등으로 인해 분석 결과가 달라지는 경우 위험관리대장은 최신화되며, 변경 전 분석 내용은 이력으로 보존된다. 이를 통해 분석 과정의 신뢰성과 추적성을 확보한다.

이렇게 축적된 데이터는 체크리스트의 형태로 제공된다. 무기체계 분야, 체계 분류, 구성품 종류별로 정리된 체크리스트는 새로운 체계 분석 시 분석자가 신속히 참고할 수 있도록 한다. 전체적인 흐름도는 Figure 3과 같다.

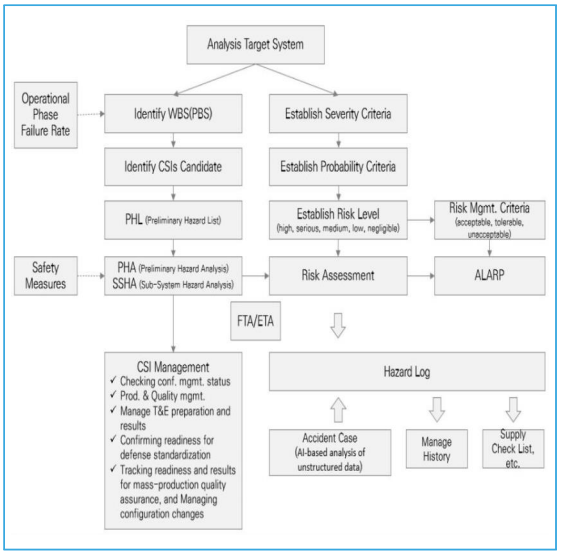


Figure 3. Flowchart for Establishing the System Safety Architecture of Weapon Systems

또한 체계안전성 관리체계에는 다수의 기관과 사용자가 참여하므로, 데이터의 공개 범위와 수정 권한을 명확히 구분하는 접근통제체계가 필수적이다. 본 연구에서는 역할 기반 접근통제 구조를 적용하여, 관리자, 분석자, 등록자, 조회자 등으로 사용자 역할을 구분하고, 각 역할별로 접근 가능한 데이터 범위와 기능을 세분화하는 방안을 제시한다. 시스템 차원에서는 다단계 인증, 접속 로그 기록 및 감사 기능, 데이터 암호화, 문서 암호 설정, 공인인증서 기반의 암호화, 데이터베이스 접근제어 등을 종합적으로 적용하여, 데이터 유출 및 위·변조를 방지하는 보안체계를 갖추어야 한다.

4. 체계안전성 자료수집체계 구축 방안

자료수집체계는 체계안전성 관리 프로세스를 실질적으로 뒷받침하는 데이터 인프라로서, 전주기 체계안전성 확보를 지원하기 위한 관리용 데이터베이스 구조와 수집·분석·제공 메커니즘을 포함한다. 본 연구에서는 체계안전성 관리용 데이터베이스 구축을 위해, 위험분석 산출물, 품질검증 결과, 사고 및 결함 사례, 개선 조치 이력 등 각 단계별 산출물을 체계적으로 관리할 수 있는 데이터 항목을 정의하고, 이를 체계별·계열별로 통합 관리할 수 있는 저장 구조를 Figure 4와 같이 설계하였다. 제안된 구조에서는 개발, 양산, 운용단계에서 생성되는 위험·품질·검증 정보를 체계 ID, WBS 코드, Hazard ID, CSI ID를 기준으로 연계하고, 단계별 결과가 위험관리대장을 중심으로 축적·갱신되도록 구성한다.

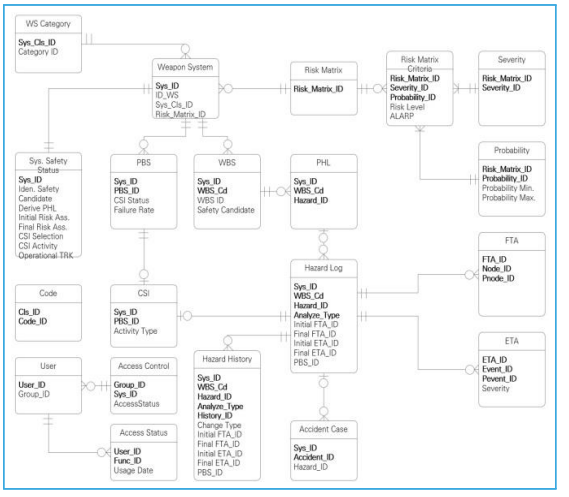


Figure 4. Logical Structure of the Data

수집된 데이터의 효율적 분석을 위해 본 연구는 정형 데이터와 비정형 데이터에 대한 분석 방안을 구분하여 제시한다. 정형 데이터에 대해서는 결함 수 분석과 사건 수 분석을 활용하여 위험원인을 정량·정성적으로 분석하는 방법을 제안하며, 이를 통해 특정 사고 유형의 발생 확률, 치명도, 상호 인과관계 등을 체계적으로 도출할 수 있도록 한다. 비정형 데이터 분석은 Figure 5와 같이 사고보고서, 정비이력, 개선조치 문서를 대상으로 자연어 처리와 폐쇄형 대규모 언어모델(Large Language Model, LLM)을 적용하는 절차로 구성된다. 이를 통해 사고 유형 분류, 원인 요약, 유사사례 검색, Hazard ID 매핑을 수행하되, 최종 결과는 분석자 검토를 거쳐 확정하도록 한다. 이러한 접근은 비정형 데이터를 단순히 첨부 문서 수준으로 보관하는 데 그치지 않고, 구조화된 분석 정보로 변환하여 위험관리 의사결정에 적극적으로 활용할 수 있도록 해준다.

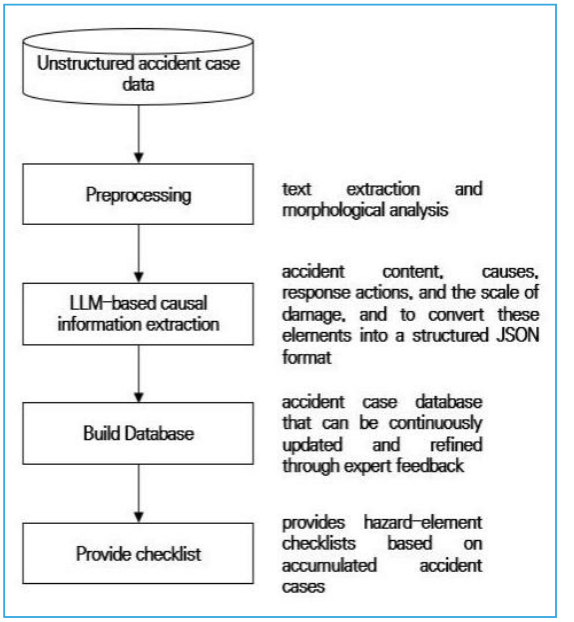


Figure 5. AI Application Areas

분석된 데이터는 사용자 친화적 방식으로 가공·제공되어야 한다. 이를 위해 본 연구는 정형화된 보고서 템플릿을 설계하고, 분석 결과를 기반으로 자동 생성되는 보고서 체계를 제안한다. 또한, 주요 안전품목 선정 결과, 반복사고 상위 항목, 체계별 위해요인 통계, 위험도 변화 추이, 원인분석별 비율 등 다양한 지표를 직관적으로 확인할 수 있는 데이터 시각화 방안을 마련하였다. 이러한 시각화 도구는 정책결정자와 실무자가 복잡한 위험정보를 단시간에 이해하고, 우선순위를 설정하는 데 중요한 역할

을 할 수 있다.

자료수집체계는 다양한 출처에서 발생하는 데이터를 통합적으로 수집·유지·관리해야 하므로, 데이터 유형과 수집 절차, 표준 입력 항목을 명확히 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 MIL-STD-882E와 국내 무기체계 사고·품질정보 관리 항목을 기준으로, 사고발생 정보, 원인분석, 위험등급, 조치결과, 검증 및 종결 정보를 중심으로 필수·선택 항목을 구분하고, 이를 기반으로 Table 2의 표준 입력 항목을 제안하였다.

Table 2. Accident Information Data Items

Category		Description	Remarks
Basic Information	Occurrence Date and Time	Date and time of the accident occurrence (YYYY-MM-DD HH:MM)	Required
	Service Branch	Army, Navy, Air Force, Marine Corps, joint units, etc.	Required
	System Identifier	Abbreviated code for the weapon system or end item	Required
	System Name	Name of the system or end item	Required
Classification Information	Weapon System Field	System field defined in Appendix 4 of the Defense Capability Development Directive	Required
	Weapon System Classification	Mid-level classification code based on the same standard	Required
	Defense Equipment Code	DELIIS equipment identification code	Required
Accident Details	Accident Description	Description of the accident sequence and its impact	Required
	Accident Cause	Examples include operator error, maintenance error, and procedural error	Required
	Detailed Cause	Select the detailed cause based on the component WBS code	Optional
Action Results	Action Result	Examples include design change, procedure change, and education/training	Required
	Action Details	Description of the detailed corrective actions taken	Required
	Effectiveness Evaluation	Determination of whether the action was effective or ineffective	Required
Damage Information	Equipment Damage	Damage level such as destroyed, major damage, moderate damage, or minor damage	Optional
	Damage Amount	Amount of damage (unit: KRW 100 million)	Optional
Casualty Information	Number of Fatalities	Number of fatalities caused by the accident	Optional
	Number of Seriously Injured	Number of seriously injured personnel	Optional
	Number of Slightly Injured	Number of slightly injured personnel	Optional
Document Information	Report	Accident case report(electronic file)	Required
Hazard Identification	Hazard ID	Unique identification number for the hazard	Required

5. 구축 필요 자원 및 법·제도 개선방안

체계안전성 관리 및 자료수집체계는 단순한 정보시스템 구축 사업이 아니라, 데이터 기반 전주기 통합운영체계로 정의될 필요가 있다. 기술적 측면에서 본 체계는 Figure 6과 같이 웹·애플리케이션 서버, 데이터베이스, 인공지능 분석모듈로 구성된 3계층 클라우드 아키텍처를 채택하며, 위험분석, 품질검증, 데이터관리 기능을 통합하는 방향으로 설계된다. 서버 인프라는 범용 서버와 AI 서버, 스토리지로 구성되고, 운영체제와 DBMS, WAS 등은 국방 정보체계 환경과 호환되는 오픈소스 기반 표준을 적용하는 것을 원칙으로 한다. 또한 AI 기반 위험 패턴 분석 모듈, 데이터 정합성 검증 도구, 백업·복구 및 이중화, 네트워크 및 시스템 보안체계 등도 필수적으로 확보되어야 한다.

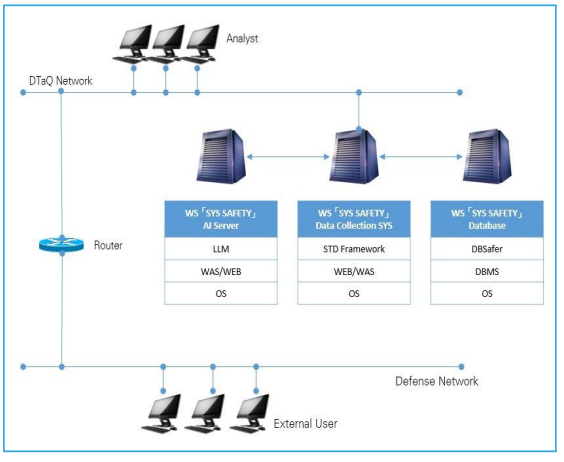


Figure 6. System Architecture

인력 측면에서는 개발단계에서 프로젝트 관리, 시스템 개발, 데이터 분석, AI 모델링, 보안, 행정지원 기능을 수행할 약 11명 규모의 개발조직이 필요하며, 운용단계에서는 시스템 운영, 데이터 품질 유지, 접근통제, 사용자 교육 및 지원을 담당할 약 5명 규모의 운영조직이 필요할 것으로 분석되었다. 특히 개발단계의 위험분석 전문가, 양산단계의 품질보증 담당자, 운용단계의 데이터 분석 및 AI 예측 전문가가 체계안전성 관리체계 내에서 유기적으로 연계되도록 표준 업무절차와 역할·책임 체계를 명확히 규정해야 한다.

조직 및 운영자원 측면에서, 체계안전성 관리, 품질보증, 데이터관리를 통합 지원하는 중앙운영센터의 구축이 필요하다. 이 센터는 국방기술품질원을 중심으로 방위사업청 및 각 사업단과 연계하여 데이터를 통합·관리하고, 실시간 위험 모니터링, 백업체계 운용, 장애 대응, 사용자 훈련 기능을 수행하게 된다.

예산 측면에서, 시스템 구축비는 기존 국방 시스템 구축 사례, 방산업체 및 연구기관 협업 비용, 해외 사고사례 데이터 구매 비용, AI 기반 분석 모델 구축 비용 등을 종합적으로 고려하여 산출해야 한다. 본 연구에서는 기능점수 방식에 기반한 소프트웨어 개발비와 하드웨어 및 소프트웨어 직접경비를 산정한 결과, 시스템 구축에 상당 규모의 초기 투자가 필요하다는 점을 제시하였다. 또한 사고사례 등 안전관련 자료 수집 및 분석 활동에 필요한 연간 비용은 단순한 유지비가 아니라 체계안전성 관리체계의 데이터 품질과 신뢰성을 유지하기 위한 핵심 운영비용으로 정의되어야 하며, 사업관리 예산 편성 시 별도의 항목으로 반영될 필요가 있다.

법·제도 측면에서는 Table 3과 같이 현행 방위사업법, 시행령, 방위사업관리규정, 품질관리규정을 정비하여 개발단계 위해분석 결과, 양산단계 품질보증 결과, 운용단계 사고·고장 정보를 동일 식별체계로 연계할 필요가 있다. 방위사업법에는 전 수명주기에서의 품질보증 및 체계안전성 확보 의무를 명시하고, 시행령에는 전주기 품질보증 절차와 체계안전성 관리의 구체적 내용을 규정하는 방안을 제시할 수 있다. 방위사업관리규정과 품질관리규정에는 위험식별, 평가, 검증, 보고, 자료등록 등 체계안전성 활동의 단계별 절차와 양산단계 품질보증과의 연계 절차를 포함함으로써, 상위법과 하위 규정 간 정책·집행·데이터 관리의 일관성을 확보할 수 있다.

이러한 법·제도 정비는 방위산업에 여러 가지 파급효과를 미칠 것이다. 무기체계의 안전성 검증 절차

Table 3. Key Provisions of the Relevant Legislation

Legislation	Current Key Provisions	Proposed Revision Key Provisions
Defense Acquisition Program Act (2025.7.22), Article 28 (Quality Assurance)	Focused mainly on R&D and procurement; stages are not clearly defined	Expanded to cover the full life cycle from development to mass production and operation; explicitly stipulates linkage between QIMS and MDS
Defense Acquisition Program Act (2025.7.22), Article 32 (Establishment of the Defense Agency for Technology and Quality)	Focused mainly on simple support functions	Strengthens the legal basis for performing full life-cycle quality assurance and information management
Enforcement Decree of the Defense Acquisition Program Act (2025.7.22), Article 71 (Delegation of Authority), Article 71-2 (new)	Only provides the legal basis for delegation of authority	Newly establishes specific full life-cycle quality assurance procedures

강화는 방산업체의 품질관리 수준과 제품 신뢰성을 향상시키고, 국내 무기체계의 국제 경쟁력 제고에도 기여할 수 있다. 동시에 추가적인 안전성 평가와 시험·인증 절차로 인해 개발비와 사업 일정이 증가하고, 특히 중소·중견 방산기업의 부담이 확대될 가능성도 존재한다. 다만 국제적 수준의 안전관리 기준을 충족할 경우, 해외 시장에서의 신뢰도 향상과 수출 경쟁력 강화라는 긍정적 효과도 기대할 수 있으며, 이에 대응하기 위한 연구개발 투자 확대와 시험·평가 인프라 확충이 필요하다.

6. 결론 및 기대효과

본 연구는 무기체계 전 수명주기에서 체계안전성을 확보하기 위한 관리 및 자료수집체계 구축 방안을 제시하고, 이를 실현하기 위한 기술·인력·조직·제도 측면의 요구사항을 종합적으로 분석하였다.

제안된 체계는 무기체계 운영 과정에서 위험요소의 사전 식별과 사고 대응의 체계화를 지원할 수 있으나, 실제 효과는 시범 적용과 검증을 통해 추가 확인될 필요가 있다. 또한 데이터 기반 유지보수 및 개선 의사결정을 통해 불필요한 비용을 절감하고, 전력 운영의 효율성을 높이는 데 기여할 수 있다.

방위산업 측면에서도 체계안전성 관리체계의 구축은 방산업체의 품질 및 안전성 수준을 향상시키고, 국제 표준에 부합하는 안전관리 역량을 확보함으로써 수출 경쟁력을 강화하는 효과를 가져올 수 있다. 나아가 산·학·연 협력 기반의 안전성 분석 연구와 기술개발이 활성화되고, 체계안전성 데이터 분석 전문가 등 전문 인력 양성에도 기여할 수 있다.

연구결과는 체계안전성 정보시스템 구축 및 운영, 위험 분석 및 예측 모델 적용, 사용자 맞춤형 대시보드 제공, 방위산업체 및 연구기관과의 협력 체계 강화, 체계안전성 관련 법·제도 정비 및 국제 표준 반영, 교육 및 인력양성 프로그램 개발 등 다양한 형태로 활용될 수 있다. 향후에는 시범 적용, 전문가 평가, 사용자 검증을 통해 제안 체계의 타당성과 효과성을 검증할 필요가 있다.

참고문헌

1 국방기술품질원. (2023). *『무기체계 「체계안전성」 도입방안 연구』 결과보고서*, 방위사업청.

2 UK Ministry of Defence. (2017). *Safety management requirements for defence systems: Part 1: Requirements* (Defence Standard 00-56 Part 1 Issue 7).

3 U.S. Department of Defense. (2012). *System safety* (MIL-STD-882E).

4 Im, S., Kim, H., Lim, J., Yoon, J., & Jang, S. (2023).

Development of Safety Management Tool to Improve Weapon System Safety. *Journal of the KNST, 6*(2). 183-189. https://doi.org/10.31818/JKNST.2023.06.6.2.183

5 Kim, J. K., Choi, J. G., & Kim, J. D. (2025) A Study on the System Safety Application of Defense Weapon Systems, *Korean Journal of Safety Culture,* 44. 59-77.

6 Park, S., Kim, J., Jin, J., & Yoon, D. (2021). System Safety Application for the Weapon System. *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering, 44*(4). 106-112. https://doi.org/10.11627/jksie.2021.44.4.106

7 Swedish Armed Forces. (2024). *Handbook system safety* (H SystSäk Eng, Version 3.0). Swedish Defense Materiel Administration (FMV).

8 한국철도공사. (n.d.). 철도안전관리체계. https://info.korail.com/info/contents.do?key=771

선택적 특징 융합을 적용한 트랜스포머 기반 소형 객체 탐지

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Transformer Based Small Object Detection with Selective Feature Fusion

이강민, Kang Min Lee
경성대학교, 전자공학과, 학부생
Undergraduate Student, Department of Electronic Engineering, Kyungsung University

박장식†, Jang Sik Park
경성대학교, 전자공학과, 교수
Professor, Department of Electronic Engineering, Kyungsung University

Abstract

Small-object detection in military border surveillance suffers from a significant bounding-box precision gap when lightweight models resize high-resolution images (1920×1080 pixels) to their input resolution. RF-DETR, a state-of-the-art real-time detection transformer, achieved high recall but limited localization precision on a military border dataset because 73% of the annotated objects became effectively small after resizing to 576×576. This makes the precision gap pervasive across classes rather than being confined to inherently small objects. To address this problem while preserving the NAS-optimized decoder structure of RF-DETR, this study applied two complementary techniques to NAS-unmanaged pipeline gaps. First, Selective Cross-Attention (SCA) uses the self-attention map of DINOv2 as a spatial prior to select only the top-25% of small-object candidate CNN tokens for cross-attention injection into ViT features. Unlike prior CNN-ViT fusion approaches, which indiscriminately merge all CNN tokens, the proposed selective strategy suppresses background-dominant tokens and prevents the dilution of small-object features. Second, the Normalized Wasserstein Distance (NWD) is introduced into the Hungarian matching cost instead of the GIoU, stabilizing the GT assignment for scale-sensitive objects without the inference-time overhead. The proposed SOD-SCA+NWD framework achieves a mAP@50:95 of 0.906 and Person AP@50:95 of 0.713 on the AIHub military border dataset, which consists of 10 classes and 41,472 test GT instances. It also reduces the total number of false positives from 121 to 74, corresponding to a 38.8% reduction. TensorRT FP16 benchmarks on NVIDIA Jetson AGX Orin 64GB confirm real-time deployment at 7.46 ms, corresponding to 134.0 FPS, with only 7.0% latency overhead compared with the RF-DETR-Base.

keywords : small object detection, detection transformer, CNN-ViT feature fusion, NWD, military border surveillance

† Corresponding Author : Jang Sik Park
Tel : +82-51-663-4768, email : jsipark@ks.ac.kr
Department of Electronic Engineering, Kyungsung University, 48434, 309, Suyeong-ro, Nam-gu, Busan, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 29th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

객체 탐지(object detection)는 영상 보안 감시 시스템(video surveillance system)에 있어 필수적으로 요구되는 기술이다. 특히 카메라 또는 EO-IR 카메라 영상 데이터를 활용하여 자동으로 객체를 탐지함으로써 효율적인 군 경계를 지원하는 데 활용되고 있다. 군 경계 감시 체계는 광범위한 감시 영역에 대하여 사람, 조류, 무인항공기, 소형선박 등의 다양한 객체를 신속하고 정확하게 탐지하는 것이 요구된다.

최근 딥러닝 객체 탐지 기술의 발전으로 고성능 GPU(Graphic Processing Unit) 또는 NPU(Neural Processing Unit)를 탑재한 워크스테이션 또는 서버를 활용한 객체 탐지 시스템이 민간의 영상 보안 감시뿐만 아니라 군 경계에도 적용되고 있다. 또한, 엣지 컴퓨팅 환경에서 객체 탐지 시스템 구현을 위한 모델 경량화 및 최적화 연구가 활발히 진행되고 있다.

객체 탐지 기술은 CNN(Convolutional Neural Network) 계열과 트랜스포머(transformer) 계열 모델이 제안되고 있다. CNN 계열에서는 YOLO 계열의 모델이 주로 활용되고 있다. 최근 트랜스포머를 기반으로 하는 객체 탐지 모델로 DETR(Detection Transformer)이 제안되었고[1], 탐지 성능을 개선하여 Deformable DETR, DINO, Co-DETR 모델이 제안되었다[2-4]. 실시간 처리를 위하여 RT-DETR와 RF-DETR이 제안되어 실시간 객체 탐지에 있어 주목할 결과를 도출하였다[5-6]. 특히 RF-DETR은 NAS(Neural Architecture Search) 구조와 DINOv2 ViT(Vision Transformer)를 결합하여 COCO 데이터셋 벤치마크에서 우수한 성능을 보였다[6-8]. RF-DETR은 객체 탐지에 있어 GIoU 기준에 따른 성능 차이가 크다. 이는 모델이 객체의 위치는 파악하지만 바운딩 박스(bounding box)의 크기와 경계를 정밀하게 반영하지 못한 결과이다. 특히 소형 객체에 대해서 IoU 기준에 따른 현저한 차이가 있다.

본 논문에서는 효율적인 경계를 위하여 트랜스포머 기반의 소형 객체 탐지 모델을 제안한다. 제안하는 모델은 RF-DETR의 DINOv2 백본을 활용하고 CNN-ViT 융합 및 선택적 교차 어텐션(Cross-attention), 소형 객체 탐지에 적합한 손실함수를 적용한다[9]. 제안하는 모델의 첫 번째 주안점으로는 RF-DETR의 특정 블록이 소형 객체의 특징을 나타내는 것을 확인하고 이를 강조하는 선택적 교차 어텐션(Selective Cross-Attention, SCA)을 적용하는 것이다. 두 번째는 RF-DETR의 헝가리안 정합(hungarian matching) 손실에서 GIoU를 대신하여 NWD(Normalized Wasserstein Distance)를 적용하는 손실 함수를 제안한다[10].

제안하는 소형 객체 탐지 모델(Small Object Detection, SOD)의 학습과 성능 평가를 위하여 군 경계 실환경 데이터셋과 합성 데이터셋을 활용한다. GPU 워크스테이션과 온디바이스 AI 디바이스상에서의 시험 및 성능 평가 결과 제안하는 객체 탐지 모델이 소형 객체 탐지 성능을 개선할 수 있음을 보인다.

2. 원거리 소형 객체 탐지

2.1. 트랜스포머 기반 객체 탐지

DETR은 트랜스포머의 자기 어텐션(self-attention)과 이분 매칭을 영상 데이터의 객체 탐지에 적용하여 CNN YOLO 계열 모델에서 주로 사용하는 앵커(anchor)와 NMS(Non-Maximum Suppression) 없는 효율적인 모델이다[1]. Deformable DETR은 변형 가능한 어텐션으로 수렴 속도와 소형 객체 성능을 개선한다[2]. DINO는 대조적 디노이징과 앵커 초기화로 COCO 데이터셋에 대하여 우수한 탐지 성능을 보인다[3]. Co-DETR은 협업적 하이브리드 할당으로 학습 효율을 높이며[4], RT-DETR은 하이브리드 인코더 설계로 DETR의 실시간 처리 가능성을 제시한다[5]. RF-DETR은 NAS를 통해 디코더 구조, 쿼리 수, 입력 해상도 등을 자동 탐색하

여 DINOv2 백본과 결합한 실시간 객체 탐지를 수행한다[6-7].

2.2. 소형 객체 탐지와 NWD

Wang et al. (2021)은 BBox(Bounding Box)를 2D 정규분포(Gaussian distribution)로 모델링하고 Wasserstein-2 거리를 계산하는 NWD를 제안하였다[10]. NWD는 GIoU(Intersection over Union)가 극소형 객체에서 1~2화소(pixel) 오차에도 급격히 변동하는 문제를 완화하여 안정적인 거리 측정을 제공한다. Xu et al. (2022)은 NWD를 항공영상 소형 객체 검출에 적용하여 유효성을 검증하였다[11]. 그러나 선행 연구들은 주로 헝가리안 정합 이후의 비용 또는 회귀 손실 단계에서 NWD를 활용하였다. 매칭 단계에서 잘못된 GT(Ground Truth) 할당이 이루어지면 이후 손실 함수를 정교하게 설계하더라도 학습 신호의 품질을 충분히 개선하기 어렵다. 본 연구는 이러한 한계를 고려하여 NWD를 헝가리안 정합 비용에 직접 도입한다. 한편, 드론 촬영 영상 환경의 소형 객체 탐지 벤치마크도 유사한 스케일 문제를 보고하며, 이는 본 연구의 군 경계 감시 도메인 분석과 일치하는 경향을 보인다[12].

2.3. CNN-ViT 특징 융합

ViT 백본은 고정 패치 크기(16×16)를 사용하므로 입력 영상에서 작은 객체가 소수의 패치에만 대응된다. 이 경우 객체 중심은 포착되더라도 경계 정보가 충분히 표현되지 않아 BBox 정밀도가 저하될 수 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 CNN 분기의 고해상도 특징을 ViT 특징에 결합하는 CNN-ViT 융합 연구가 수행되었다. 대표적으로 ViT-Adapter는 CNN 분기에서 생성된 전체 토큰을 ViT 특징에 교차 어텐션으로 융합하여 조밀 예측(dense prediction) 성능을 개선하였다[9]. 그러나 군 경계 감시 영상과 같이 원거리 배경 비중이 큰 환경에서는 전체 CNN 토큰을 일괄적으로 융합하는 방식에 한계가 있다. 첫째, 전체 영상 면적 대비 소형 객체가 차지하는 비율이 낮기 때문에 CNN 토큰의 대부분은 배경 정보를 포함한다. 이러한 토큰을 모두 ViT 특징에 주입하면 객체 탐지에 직접 기여하지 않는 배경 정보까지 함께 처리되어 연산량이 증가한다. 둘째, 배경 토큰이 소형 객체 토큰과 함께 융합되면 소형 객체의 국소 특징이 상대적으로 희석되어 위치 정밀도 개선 효과가 제한될 수 있다.

Caron et al. (2021)은 DINO의 자기지도 학습 특성상 자기 어텐션이 전경 객체 영역을 자연스럽게 활성화함을 보였으며[13], DINOv2는 이러한 특성을 계승한다[7]. 본 연구는 이 특성을 CNN 토큰 선택의 공간적 사전 지식(prior)으로 활용한다. 구체적으로 DINOv2 블록 4의 자기 어텐션 맵과 CNN 분기 특징 D_3를 결합하여 소형 객체 히트맵 S를 생성하고, S 값이 높은 상위 25% CNN 토큰만 선택하여 ViT 특징에 융합한다. 따라서 제안 방식은 CNN 특징을 단순히 추가하는 것이 아니라, 소형 객체 후보 영역에 해당하는 고해상도 특징만 선별적으로 강조하는 구조이다.

2.4. 소형 객체 탐지 설계 고려 사항

RF-DETR의 NAS가 최적화한 컴포넌트, 즉 디코더 FFN(Feed-Forward Network) 차원, 레이어와 쿼리 수, 입력 해상도, 어텐션 윈도잉을 수정하면 NAS 탐색의 최적성이 훼손될 수 있다[6]. 본 연구의 두 기법은 NAS가 직접 관리하지 않는 파이프라인 간극, 즉 백본-프로젝터 사이의 특징 융합과 헝가리안 정합 비용 산출에만 적용된다. 따라서 RF-DETR의 NAS 최적화 구조는 보존된다.

RF-DETR-Base의 DINOv2 ViT-S/16 백본은 16×16 화소 고정 패치 단위로 이미지를 처리한다. 576×576 입력에서는 36×36, 즉 1,296개 토큰을 생성하지만, 군 경계 데이터의 Person 객체가 원본에서 약 35×55 화소 크기인 경우 리사이즈 후 약 10.5×16.5 화소로 축소되어 약 0.7개 패치 면적으로만 표현된다. 이러한 극소 면적의 패치 표현만으로는 객체의 경계를 정밀하게 표현하기 어렵기 때문에

BBox 정밀도가 구조적으로 제한된다.

이러한 해상도 한계를 극복하기 위해 CNN 분기의 고해상도 특징을 ViT 특징에 보충하는 접근을 고려할 수 있다. 그러나 기존 ViT-Adapter와 같이 CNN 전체 토큰을 무차별적으로 융합하면 배경 영역의 잡음(noise)이 소형 객체 특징을 희석시키는 부작용이 발생할 수 있다[9]. 따라서 소형 객체가 존재할 가능성이 높은 영역만 선별하여 해당 토큰만 융합하는 선택적 전략이 필요하다.

3. 제안하는 소형 객체 탐지

제안하는 소형 객체 탐지 파이프라인은 Figure 1과 같다. SOD 파이프라인은 RF-DETR에 소형 객체 후보 추출, SCA 모듈, NWD 기반 정합 비용을 추가하여 소형 객체 탐지 정확도를 개선한다.

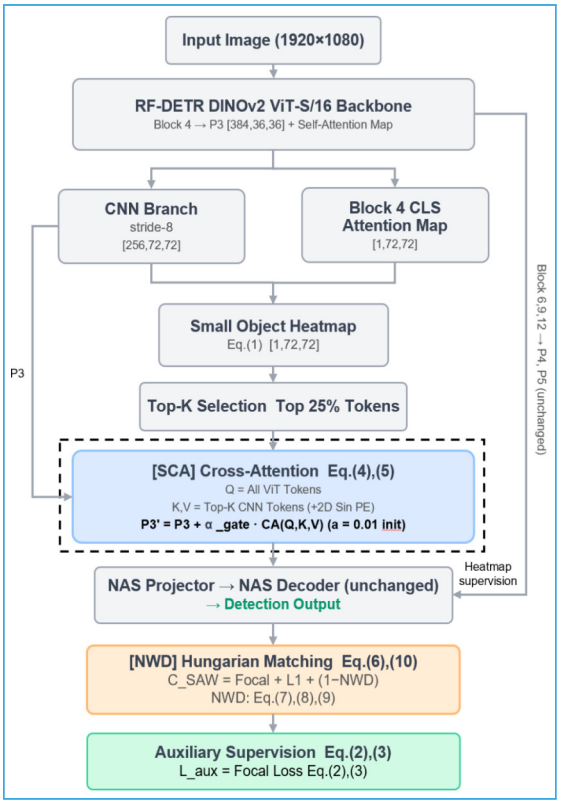


Figure 1. Pipeline of the proposed small object detection

소형 객체 후보 추출은 DINOv2 백본에서 출력된 특징맵을 CNN 분기(CNN branch)와 클래스 어텐션 맵 모듈에 결합하여 소형 객체 히트맵을 생성한다. SCA는 소형 객체 히트맵의 상위 25% 토큰을 선택하고, 해당 토큰을 이용해 소형 객체 속성을 강화하는 교차 어텐션을 수행한다. 강화된 특징맵은 NAS 투영 모듈로 전달된다. NWD 모듈은 RF-DETR의 정합 비용 산출 과정에서 GIoU를 대신하여 NWD를 적용함으로써 소형 객체의 위치 정확도를 개선하도록 한다.

소형 객체 탐지 성능 개선을 위한 본 논문의 주안점은 Table 1과 같이 블록 4 특징 강조와 NWD 기반 비용함수이다.

Table 1. Comparison of RF-DETR and proposed object detection pipeline

Model	RF-DETR-Base	SCA+NWD (proposed)
Backbone	DINOv2 ViT-S/16	
Encoder	Non-Win + Win × 2 interleave	
Block 4 enrichment	**none**	**Selective CNN-ViT cross-attention**
Projector	Multi-scale(NAS-optimization)	
Decoder	Decoder Group × 4	
Heads	Class + Box	
Hungarian matchig cost	**GIoU**	**NWD**

첫째, 블록 4 특징 강조는 기존 ViT-Adapter 에서 CNN 각 특징점 즉 토큰을 ViT 특징에 균등하게 융합하는 대신 DINOv2 자기 어텐션 맵을 소형 객체 후보 가능성이 높은 상위 25% CNN 특징만 선택적으로 융합하는 SCA 구조로 제안한다[9]. 둘째, 헝가리안 정합 비용함수에 GIoU 대신 NWD를 적용하여 면적 비율이 아닌 분포 간 거리와 형태 차이로 유사도를 측정하게 되므로 객체 크기에 따른 민감도 차이를 완화함으로써 소형 객체 탐지 성능을 개선하고자 한다.

3.1. 선택적 교차 어텐션

CNN 분기는 입력 영상에서 Conv3×3(stride 2) 3개 레이어와 Conv3×3(stride 1) 1개 레이어로 구성된다. 각 단계의 레이어를 거치면서 해상도 72×72로 작아지면서 특징이 정제된 [256, 72, 72] 크기의 특징맵(D_3)을 출력한다. 각 레이어의 정규화는 GroupNorm을 사용하여 작은 배치(batch)에서도 안정적으로 동작한다[14].

CNN 분기에서 추출한 고해상도 특징 중 어느 영역을 ViT에 융합할지 결정하기 위해 소형 객체 히트맵 S를 생성한다. DINOv2 백본 블록 4의 특징은 소형 객체의 특징을 잘 포함하고 있다. 블록 4 클래스 어텐션 맵 생성 모듈은 DINOv2 블록 4의 클래스 토큰이 각 패치에 부여한 어텐션 가중치 맵을 생성한다.

CNN 분기의 D_3 특징맵과 DINOv2 블록 4 어텐션 가중치 맵을 결합한(concat) 후 1×1 Conv와 시그모이드(sigmoid)를 적용하여 각 위치의 소형 객체 존재 가능성을 0~1 범위로 출력한다. 이 과정은 식(1)과 같다.

$$S = \sigma(Conv_{1\times 1}([D_3;\ A])) \tag{1}$$

여기서, S는 소형 객체 히트맵, D_3은 CNN 분기의 stride-8 특징맵, A는 DINOv2 블록 4의 클래스 어텐션 가중치 맵이다. $[D_3;\ A]$는 채널 방향 결합을 의미하며, $\sigma(\cdot)$는 시그모이드 함수이다.

소형 객체 히트맵 S는 추론 시 Top-K 토큰 선택의 기준이 되므로, 학습 과정에서 S가 실제 소형 객체 위치를 정확히 반영하도록 직접 감독이 필요하다. 이를 위해 소형 GT BBox(area≤1024) 중심에 가우시안 히트맵(Gaussian heatmap)을 생성하고, S와의 차이를 focal loss로 감독한다[15]. 보조 감독 손실, L_{aux}는 식(2)와 같다.

$$L_{aux} = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\alpha_i(1-p_i)^{\gamma}\log p_i \tag{2}$$

여기서 N은 히트맵의 전체 위치 수, p_i는 i번째 위치에서 모델이 예측한 소형 객체 존재 확률, α_i는 샘플 가중치이다. γ는 쉬운 샘플의 손실 기여를 억제하는 초점 계수이며, 본 논문에서는 $\gamma = 2$, $\alpha_i = 0.25$로 설정한다. GT 히트맵은 각 소형 객체 GT BBox 중심에 가우시안 커널로 생성하며, 커널 $G(x,y)$은 식(3)과 같이 정의한다.

$$G(x,y) = \exp(-E_x - E_y) \tag{3}$$

$E_x = (x-c_x)^2/2\sigma_x^2$, $E_y = (y-c_y)^2/2\sigma_y^2$ 이며, 여기서 x와 y 는 히트맵의 가로, 세로 좌표이며, c_x, c_y는 소형 GT BBox(area≤1024)의 중심 좌표 기준이다. σ_x와 σ_y는 각각 가우시안 커널의 가로 및 세로 표준편차이며, BBox의 너비 w와 높이 h를 이용해 $\sigma_x = w/6$, $\sigma_y = h/6$ 으로 설정한다.

히트맵 S가 생성되면 값이 높은 상위 25% 위치의 CNN 토큰만 선택하여 ViT 특징에 융합한다. 25%의 선택 비율은 평가 데이터셋의 소형 객체 면적 비율(전체 이미지 대비 약 5%)을 고려하되, 객체 주변 문맥 정보까지 포함하도록 여유를 둔 설정이다. 전체 토큰 대신 상위 25%만 사용함으로써 교차 어텐션의 연산량이 약 75% 감소하고, S 값이 낮은 배경 영역의 CNN 특징이 ViT 특징에 주입되지 않아 배경 잡음에 의한 소형 객체 특징 희석을 방지한다.

SCA는 CNN 분기, 소형 객체 히트맵, 선택적 교차 어텐션으로 구성된다. SCA 모듈의 상세 구조는 Figure 2와 같다.

선택된 CNN 토큰을 키(key)와 값(value)으로, ViT의 전체 1,296개 토큰을 쿼리(query)로 하여 교차 어텐션을 수행한다. Q와 K에는 각각 2D 삼각 위치 인코딩(Position Encoding, PE)을 추가하여 공간 정보를 보존한다. 교차 어텐션은 식(4)와 같이 스케일 내적 어텐션(scaled dot-product attention)으로 계산한다.

$$CA(Q,K,V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (4)$$

여기서 Q는 ViT 전체 토큰으로부터 생성된 쿼리, K와 V는 Top-K로 선택된 CNN 토큰으로부터 생성된 키와 값, d_k는 키 벡터의 차원이다. $softmax(\cdot)$는 쿼리와 키의 유사도를 확률 분포로 정규화하는 함수이다. SCA가 적용된 특징 P_3'는 식(5)와 같이 계산한다.

$$P_3' = P_3 + \alpha_{gate} \cdot CA(Q,K,V) \quad (5)$$

여기서 P_3 는 DINOv2 백본의 블록 4의 특징이고, P_3'는 소형 객체의 속성을 강화한 특징맵이다. α_{gate} 는 교차 어텐션 주입 강도를 제어하는 학습 가능 게이팅 파라미터이며 0.01 초기화한다. 본 연구에서는 $Q = P_3$, $K = V = TopK(D_3, S)$로 정의한다. SCA는 P_3 특징의 차원(384)을 변경하지 않으므로, 이후 NAS 프로젝터와 디코더에 대한 수정이 불필요하다.

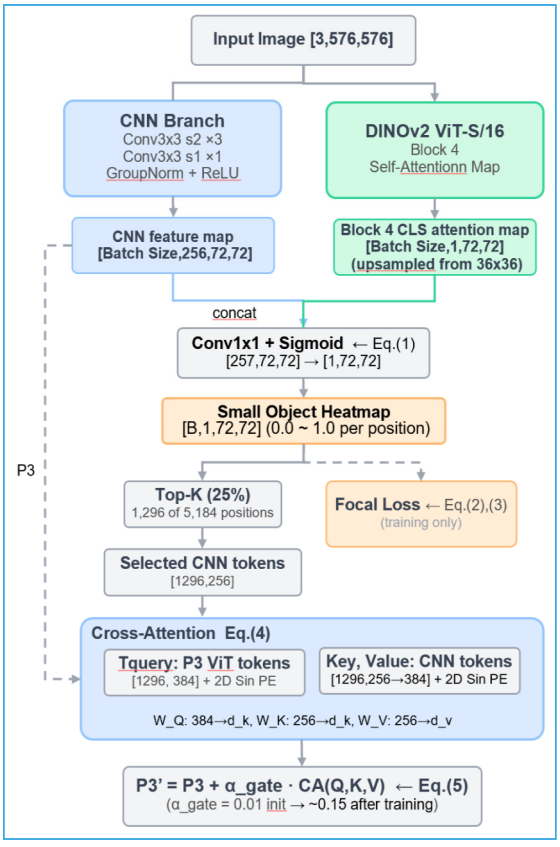


Figure 2. Architecture of the SCA module

3.2. 제안하는 소형 객체 탐지 모델의 손실 함수

DETR 계열 모델은 헝가리안 정합을 통해 예측 쿼리와 GT를 일대일 배정하며, 정합 손실 함수(loss function)에 반영한다. RF-DETR의 정합 손실은 식(6)과 같이 구성된다.

$$C_{base} = \lambda_{cls} \cdot L_{focal} + \lambda_{L1} \cdot L_{L1} + \lambda_{giou} \cdot L_{GIoU} \quad (6)$$

여기서 C_{base}는 예측 쿼리와 GT 간의 매칭 비용이다. L_{focal}은 focal loss 기반의 분류 비용을 나타내고[15], L_{L1}은 정규화 좌표 기준의 L_1 위치 손실이고, L_{GIoU}는 GIoU 기반의 형태 유사도 비용을 나타낸다. 각 항의 가중치는 λ_{cls} = 2, λ_{L1} = 5, λ_{giou} = 2로 설정한다.

GIoU 항은 객체 크기에 민감한 구조적 한계를 갖는다. IoU는 두 박스의 겹치는 면적을 합집합 면적으로 나누어 계산하므로, 동일한 화소 오차라도 객체가 작을수록 겹치는 면적 비율의 변화가 크게 발생한다. 소형 객체에서는 미세한 위치 오차가 IoU를 급격히 하락시키는 반면, 대형 객체에서는 동일한 오차가 IoU에 상대적으로 작은 영향을 준다. 평가 데이터셋에서는 리사이즈 후 다수 객체가 소수의 ViT 패치 크기로 축소되므로, 이러한 불안정성이 여러 클래스에 걸쳐 발생한다.

본 논문에서는 GIoU 대신 NWD를 적용한다. NWD는 BBox를 2D 가우시안 분포로 모델링하여 두 분포 간의 거리를 측정한다. BBox를 확률 분포로 변환하면 면적 비율이 아닌 분포 간 이동 거리와 형태 차이로 유사도를 측정하게 되므로 객체 크기에 따른 민감도 차이가 완화된다. 가우시안 분포의 평균과 공분산은 식(7)과 식(8)로 각각 정의한다.

$$\mu = (c_x, c_y) \tag{7}$$

$$\Sigma = diag(w^2/4, h^2/4) \tag{8}$$

여기서 μ는 가우시안 분포의 평균으로, bbox의 중심 좌표 (c_x, c_y)를 대입한다. Σ는 가우시안 분포의 공분산 행렬로, w와 h는 각각 BBox의 너비와 높이이다. $diag(\cdot)$는 대각 행렬을 구성하는 연산이다.

$$W_2^2 = \left| \left| \mu_A - \mu_B \right| \right|^2 + \left| \left| \sigma_A - \sigma_B \right| \right|^2 \tag{9}$$

여기서 μ_A와 μ_B는 각각 예측 BBox와 GT BBox를 모델링한 가우시안 분포의 평균이다. σ_A와 σ_B는 각 BBox의 표준편차 벡터이며, $\sigma = (w/2, h/2)$로 정의한다. 식(9)의 첫째 항은 두 BBox 중심 간 거리를, 둘째 항은 BBox의 크기 및 형태 차이를 측정한다.

Wasserstein 거리를 0~1 범위의 유사도로 정규화하기 위해 식(10)의 지수 함수를 적용한다.

$$NWD(A, B) = \exp\left(-\frac{W_2}{C}\right) \tag{10}$$

여기서 W_2는 식(9)에서 산출한 W_2^2의 제곱근이며. C는 정규화 상수이다. 본 연구에서는 좌표가 0~1 범위로 정규화되어 있음을 고려하여 $C = 0.5$로 설정한다. NWD가 1이면 두 분포가 완전히 일치하고, 0에 가까울수록 상이하다.

16×16 화소 객체에서 2화소의 양방향 이동이 발생하면 IoU는 0.62까지 급락하는 반면, NWD는 0.78을 유지하여 상대적으로 높은 유사도를 보존한다. 96×96 화소 객체에서는 동일한 2화소 이동에도 IoU가 0.96, NWD가 0.99로 두 지표가 모두 안정적이다. 즉 NWD는 소형 객체에서 급격한 유사도 하락을 완화하면서 대형 객체에서의 안정성도 유지한다. Figure 3은 16×16 객체에서의 IoU와 NWD 응답 차이를 비교한 것이다.

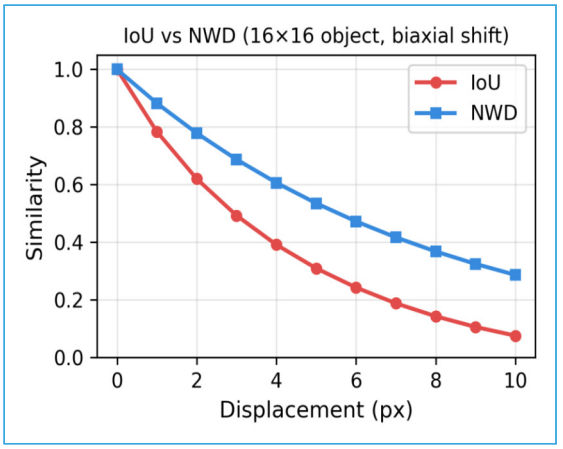


Figure 3. IoU and NWD response comparison

$$C_{NWD} = \lambda_{cls} \cdot L_{focal} + \lambda_{L1} \cdot L_{L1} + \lambda_{nwd} \cdot (1 - NWD) \tag{11}$$

여기서 C_{NWD}는 NWD를 적용한 정합 비용을 나타낸다. (1 - NWD)는 식(10)의 유사도를 비용으로 변환한 항으로, 두 분포가 유사할수록 비용이 낮아진다. 본 연구에서는 λ_{nwd} = 2, λ_{giou} = 0으로 설정하여 식(6)의 GIoU를 NWD로 대체하고, λ_{cls} = 2와 λ_{L1} = 5는 기존 RF-DETR와 동일하게 유지한다. 헝가리안 매칭은 학습 과정에서만 적용되기 때문에 파라메터가 추가되지 않는다.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

4.1. 시험 환경

제안 모델의 성능 검증에는 AI-Hub의 군 경계 실데이터와 합성데이터를 8:1:1 비율로 분할하여 통합한 데이터셋을 사용하였다[16]. 동일 원본 영상이 서로 다른 세트에 중복되지 않도록 ID를 기준으로 분리하여 데이터 누수를 방지하였다. 시험(test) 세트는 영상 20,172장과 GT 41,472건으로 구성되며, 클래스별 분포는 Table 2에 요약된다. Fixed_Wing, Fishing_Boat, Warship의 비중이 60% 이상을 차지하고, 군 경계 감시의 핵심 표적인 Person은

1,069건(2.6%)으로 상대적으로 적다. Bird, Person 그리고 Leaflet 세 클래스는 평균 bbox의 작은 변이 30화소 이하의 소형 객체이며, 전체 GT의 73%가 입력 해상도 576×576 기준으로 한 변 길이가 32화소 미만인 소형 객체이다.

Table 2. GT distribution by class

Class	GT Count	Ratio	Mean bbox
Fixed_Wing	8,487	20.5%	≈ 90×40px
Fishing_Boat	8,508	20.5%	≈ 120×80px
Warship	7,976	19.2%	≈ 250×120px
UAV	5,708	13.8%	≈ 50×30px
Rotary_Wing	2,844	6.9%	≈ 80×60px
Merchant_Ship	2,417	5.8%	≈ 200×100px
Bird	1,574	3.8%	≈ 24×24px
Trash_Bomb	1,445	3.5%	≈ 60×60px
Leaflet	1,444	3.5%	≈ 28×40px
Person	1,069	2.6%	≈ 35×55px

학습은 NVIDIA RTX 5090 32 GB 환경에서 AdamW 최적화 알고리즘을 적용한다. 초기 학습률(learning rate)은 1×10^{-4}, 배치 크기는 16, 최대 학습 횟수(epoch)는 100으로 설정한다. 학습률 조정은 코사인 감쇠(cosine annealing) 스케줄을 적용하고, 학습 초기 1 epoch 동안 점진적으로 학습률을 증가시키는 준비 학습(warm-up)을 적용한다. 가중치 감쇠(weight decay)는 1×10^{-4}로 설정하고, 데이터 증강에는 모자이크(mosaic), 자동 증강 정책(rand augment), 색상 변환(color jitter)을 사용한다. 검증 과정(validation)에서 mAP가 10 epoch 연속 개선되지 않으면 조기 종료(early stopping)한다. 이때 대기 횟수(patience)는 10으로 설정한다. 시험은 동일한 GPU로 PyTorch FP32 정밀도로 수행하였고, 온디바이스 성능 평가는 NVIDIA Jetson AGX Orin 64 GB에서 TensorRT FP16 정밀도로 수행한다.

4.2. 성능 시험 결과 및 분석

성능 평가는 mAP를 적용하였으며, 시험 결과는 Table 3과 같다. Table 3은 전체 클래스에 대한 mAP@50:95와 Person 클래스에 대한 AP@50:95를 비교한 결과이다. mAP@50:95는 데이터셋의 모든 클래스를 대상으로 한 평균 탐지 성능을 의미하고, Person AP@50:95는 원거리 소형 객체 성격이 강한 Person 클래스만을 대상으로 한 평균 탐지 성능이다.

Table 3. Performance comparison on military border dataset

Model	mAP @50:95	Person AP@50:95
YOLOv11-N	0.837	0.290
YOLOv11-S	0.868	0.389
YOLOv11-M	0.870	0.374
YOLOv11-L	0.874	0.380
YOLOv12-N	0.825	0.215
YOLOv12-S	0.854	0.301
YOLOv12-M	0.867	0.370
YOLOv12-L	0.870	0.369
RF-DETR-Base	0.902	0.673
SOD-NWD	**0.907**	**0.694**
SOD-SCA	**0.904**	**0.704**
SOD-SCA+NWD	**0.906**	**0.713**

YOLOv11과 YOLOv12의 mAP@50:95는 0.825~0.874 범위이고[17-18], RF-DETR-Base는 0.902로 CNN 계열 모델보다 높은 성능을 보인다. 특히 Person 클래스에서 YOLOv11과 YOLOv12의 Person AP@50:95는 0.215~0.389 범위에 머무는 반면, RF-DETR-Base는 0.673을 기록하여 상대적으로 우수한 성능을 보인다. 이를 통해 본 데이터셋에서는 CNN 계열의 YOLO 모델에 비해 트랜스포머 기반 객체 탐지 모델이 원거리 소형 객체 탐지에서 더 높은 표현력을 보임을 확인할 수 있다. 또

한, Area Attention을 적용한 YOLOv12는 동일 스케일의 YOLOv11 대비 동등하거나 낮은 성능을 보인다[18]. YOLOv12의 국소 영역 어텐션은 일반적인 실시간 객체 탐지에서는 효과적일 수 있으나, 본 평가 데이터셋과 같이 원거리 소형 객체가 많은 환경에서는 직접적인 성능 개선으로 이어지지 않았다. 반면 RF-DETR의 DINOv2 ViT 백본은 전역 self-attention을 통해 패치 수준의 소형 객체 단서를 더 안정적으로 반영하여 상대적으로 우수한 탐지 결과를 보인다.

제안 모델의 ablation 결과를 보면 SOD-NWD는 RF-DETR-Base 대비 mAP@50:95를 0.902에서 0.907로 개선하고, Person AP@50:95를 0.673에서 0.694로 개선한다. 이는 NWD가 헝가리안 정합 단계에서 작은 객체의 BBox 정합 안정성을 보완한 결과로 해석할 수 있다. SOD-SCA는 mAP@50:95 0.904, Person AP@50:95 0.704를 기록하여 SCA만 적용하더라도 RF-DETR-Base 대비 Person 클래스 성능이 향상됨을 보인다. 최종 모델인 SOD-SCA+NWD는 mAP@50:95 0.906, Person AP@50:95 0.713을 기록한다. 전체 mAP 개선 폭은 크지 않지만, Person AP@50:95는 RF-DETR-Base 대비 +0.040 향상되어 제안 기법이 원거리 소형 객체의 평균 탐지 성능을 개선함을 확인할 수 있다.

SOD-NWD와 SOD-SCA는 서로 다른 방식으로 성능 향상에 기여한다. SOD-NWD는 mAP@50:95를 0.907로 가장 높은 탐지 성능을 보인다. SOD-SCA는 Person AP@50:95를 0.704로 향상시켜 소형 객체 후보에 대한 특징을 보강하는 효과가 있다. 따라서, 제안 소형 객체 탐지 모델은 군 경계 감시에서 중요한 원거리 소형 객체 탐지 성능이 개선된 것을 확인할 수 있다.

Figure 4는 평가 데이터셋의 10개 클래스에 대한 오탐지(False Positive, FP)의 원인을 중복 탐지(FP_duplicate), 배경 오탐지(FP_background), 그리고 위치 오탐지(FP_localization)으로 분류한 결과이다.

중복 탐지는 하나의 객체에 대하여 중복 탐지하는

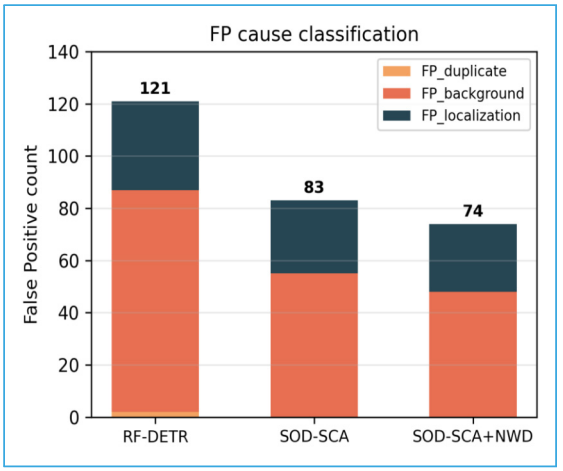


Figure 4. FP cause classification by experiment configuration

것이고, 배경 오탐지는 배경을 객체로 탐지하는 것이다. 위치 오탐지는 실제 객체 근처에서 탐지하였으나, BBox의 위치가 부정확한 것으로 IoU가 0.5 미만인 것을 나타낸다.

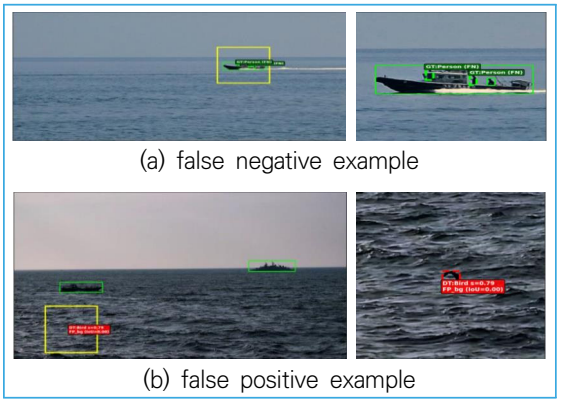
RF-DETR-Base의 오탐지는 121건이고, SOD-SCA+NWD는 74로 38.8% 감소하였다. FP_background는 85건에서 48건으로, FP_localization은 34건에서 26건으로 감소하였으며, FP_duplicate는 2건에서 0건으로 제거되었다.

Figure 5는 RF-DETR-Base 모델이 탐지하지 못한 Person 객체를 SOD-SCA+NWD가 탐지한 결과를 보여준다. 제안하는 SOD 파이프라인은 ViT 패치 해상도만으로 포착하기 어려운 Person 클래스 객체의 공간적 특징을 stride-8 CNN 분기와 선택적 교차 어텐션으로 보완하여 전경과 배경의 판별력을 개선한다.

Figure 6은 제안하는 소형 객체 탐지 모델 적용에서 발생하는 미탐지와 오탐지 결과이다. 첫 번째 열에는 입력 영상에 대하여 GT와 탐지 결과 BBox를 표시한 것이고, 두 번째 열은 미탐지 또는 오탐지 영역을 확대한 것이다. (a)는 선상의 사람이 탐지되지 않은 사례로써 소형 객체인 사람(Person)의 특징과 선박과 유사하여 탐지되지 않았다. (b)는 파도를 새(Bird)로 오탐지한 결과로써 파도의 텍스처과 새와



Figure 5. Person detection results of RF-DETR-Base(left) and SOD-SCA+NWD(right)



(a) false negative example

(b) false positive example

Figure 6. Results of false detection, (a) false negative example (b) false positive example

유사하여 새로 탐지한 것으로 판단된다. EO-IR 다중모드 탐지와 결합한다면 미탐지와 오탐지를 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3. 온디바이스 AI 분석

본 논문에서는 제안하는 객체 탐지 모델을 온디바이스 AI 환경에서 탐지 성능과 처리 속도를 비교분석한다. NVIDIA Jetson AGX Orin 64GB에서 TensorRT FP16 기준으로 성능과 처리 속도를 비교한다.

처리 속도와 탐지 성능을 비교한 결과는 Table 4에 나타낸다. RF-DETR-Base는 1프레임 처리 시간이 6.97ms로 143.3FPS를 기록하였고, SOD-SCA+NWD는 7.46ms, 134.0FPS를 기록하였다. SOD-SCA+NWD는 RF-DETR-Base 대비 약 7.0%의 지연 증가가 있으나, 실시간 처리 기준을 만족한다.

Table 4. AGX Orin TensorRT FP16 deployment analysis

Model	TensorRT FP16(ms)	FPS
RF-DETR-Base	6.97	143.3
SOD-SCA+NWD	7.46	134.0

5. 결 론

본 연구는 군 경계 감시 환경에서 원거리 소형 객체 탐지 성능을 개선하기 위해 SCA와 NWD를 결합한 SOD-SCA+NWD 모델을 제안하였다. SCA는 DINOv2 self-attention map을 이용해 소형 객체 후보 영역의 CNN 토큰만 선택적으로 ViT 특징에 융합하고, NWD는 헝가리안 정합 단계에서 소형 객체의 BBox 정합 안정성을 높인다.

시험 결과, SOD-SCA+NWD는 mAP@50:95 0.906, Person AP@50:95 0.713을 기록하였다. RF-DETR-Base 대비 mAP@50:95는 0.004, Person AP@50:95는 0.040 향상되었고, 전체 FP는 121건에서 74건으로 38.8% 감소하였다. 또한, Jetson AGX Orin 64 GB에서 7.46 ms, 134.0 FPS의 처

리 속도를 보여 실시간 온디바이스 적용 가능성을 확인하였다.

향후 장면 복잡도에 따라 Top-K 토큰 선택 비율을 동적으로 조정하고, 연속 프레임에 대한 객체 추적과 EO-IR 데이터를 추가하여 해무, 저조도, 배경 텍스처가 복잡한 감시 환경에서의 탐지 성능 개선 연구를 하고자 한다.

사 사

본 논문은 2025 년도 정보통신기획평가원의 정보보호핵심원천기술개발사업, 한미조인트콜 선진국제공동연구(과제명: 멀티-뷰 기반 군중이상상황 자율대응을 위한 AI Crowd Dynamics 기술 및 실증시스템 개발, RS-2024-00460386)의 지원으로 수행되었음. 본 논문 원고 작성 과정에서 생성형 인공지능 Anthropic Claude(claude.ai)를 사용하여 문장 교정, 영문 초록 작성 및 논문 내 흐름도, 이미지 생성 보조 도구로 활용하였으며, 실험 설계, 데이터 수집 및 분석, 결과 해석은 저자가 수행하였음.

참고문헌

1 Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Kirillov, A., & Zagoruyko, S. (2020). End-to-end object detection with transformers. In A. Vedaldi, H. Bischof, T. Brox, & J.-M. Frahm (Eds.), *Computer vision – ECCV 2020* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12346, pp. 213–229). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_13

2 Zhu, X., Su, W., Lu, L., Li, B., Wang, X., & Dai, J. (2021). Deformable DETR: Deformable transformers for end-to-end object detection. In *Proceedings of the International Conference on Learning Representations* (ICLR 2021).

3 Zhang, H., Li, F., Liu, S., Zhang, L., Su, H., Zhu, J., Ni, L., & Shum, H.-Y. (2023). DINO: DETR with improved denoising anchor boxes for end-to-end object detection. In *Proceedings of the International Conference on Learning Representations* (ICLR 2023).

4 Zong, Z., Song, G., & Liu, Y. (2023). DETRs with collaborative hybrid assignments training. *2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (ICCV 2023, pp. 6725–6735). https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.00621

5 Zhao, Y., Lv, W., Xu, S., Wei, J., Wang, G., Dang, Q., Liu, Y., & Chen, J. (2024). DETRs beat YOLOs on real-time object detection. *2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR 2024, pp. 16965–16974). https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.01605

6 Robinson, I., Robicheaux, P., Popov, M., Ramanan, D., & Peri, N. (2025). *RF-DETR: Neural architecture search for real-time detection transformers* (arXiv: 2511.09554). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.09554

7 Oquab, M., Darcet, T., Moutakanni, T., Vo, H. V., Szafraniec, M., Khalidov, V., Fernandez, P., Haziza, D., Massa, F., El-Nouby, A., Assran, M., Ballas, N., Galuba, W., Howes, R., Huang, P.-Y., Li, S.-W., Misra, I., Rabbat, M., Sharma, V., Synnaeve, G., Xu, H., Jegou, H., Mairal, J., Labatut, P., Joulin, A., & Bojanowski, P. (2024). DINOv2: Learning robust visual features without supervision. *Transactions on Machine Learning Research*.

8 Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft COCO: Common objects in context. In D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, & T. Tuytelaars (Eds.), *Computer vision – ECCV 2014* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8693, pp. 740–755). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48

9 Chen, Z., Duan, Y., Wang, W., He, J., Lu, T., Dai, J., & Qiao, Y. (2023). Vision transformer adapter for dense predictions. In *Proceedings of the International Conference on Learning Representations* (ICLR 2023).

10 Wang, J., Xu, C., Yang, W., & Yu, L. (2021). *A normalized Gaussian Wasserstein distance for tiny object detection* (arXiv:2110.13389). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.13389

11 Xu, C., Wang, J., Yang, W., Yu, H., Yu, L., & Xia, G.-S. (2022). Detecting tiny objects in aerial images: A normalized Wasserstein distance and a new benchmark.

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 190, 79-93. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.06.002

12 Zhu, P., Wen, L., Du, D., Bian, X., Fan, H., Hu, Q., & Ling, H. (2022). Detection and tracking meet drones challenge. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 44*(11), 7380-7399. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3119563

13 Caron, M., Touvron, H., Misra, I., Jégou, H., Mairal, J., Bojanowski, P., & Joulin, A. (2021). Emerging properties in self-supervised vision transformers. *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (ICCV 2021, pp. 9630-9640). https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00951

14 Wu, Y., & He, K. (2018). Group normalization. In V. Ferrari, M. Hebert, C. Sminchisescu, & Y. Weiss (Eds.), *Computer vision - ECCV 2018* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11217, pp. 3-19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01261-8_1

15 Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision* (ICCV 2017, pp. 2999-3007). https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324

16 AI Hub. (2024). *군 경계 작전 환경 내 인식 데이터*. https://aihub.or.kr/aihubdata/data/view.do?dataSetSn=71858

17 Khanam, R., & Hussain, M. (2024). *YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements* (arXiv: 2410.17725). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725

18 Tian, Y., Ye, Q., & Doermann, D. (2025). *YOLOv12: Attention-centric real-time object detectors* (arXiv: 2502.12524). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.12524

우리나라 무기체계를 위한 통합체계지원(IPS) 지원정보체계(Computer Resources) 요소의 강화 전략

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Enhancement Strategy for Computer Resources Element of Integrated Product Support(IPS) for Korean Weapon System

박윤규, Yun Gyu Park
국방과학연구소, 제1기술연구원 제3체계개발단 1팀, 선임연구원
Senior Researcher, The 1st R&D Institute, 3rd PMO, 1st Team, Agency for Defense Development

김상부†, Sang Boo Kim
국립창원대학교, 산업시스템공학과, 교수
Professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

배인화, In Hwa Bae
국립창원대학교, 산업시스템공학과, 박사후보자
Ph.D. Candidate, Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

Abstract

The Computer Resources element, which is one of the elements of Integrated Product Support (IPS), was not included in Integrated Logistics Support (ILS) and was newly introduced as the transition from ILS to IPS. The introduction of this element is expected to optimize the support for weapon systems under the new operational conditions by strengthening the support for weapon systems-related software compared to the past. However, it can be seen that many of the major activities related to the Computer Resources element presented in the IPS Elements Guidebook of the United States are excluded from the Korean Ministry of National Defense's Total Life Cycle Management Instruction on IPS. This may result in some insufficiency in fulfilling the purpose of the IPS for Korean weapon systems. Therefore, this study conducted a survey of relevant experts on the essential activities of the Computer Resources element and synthesized and analyzed their opinions. Based on the survey results, a proposal is presented to enhance the Computer Resources element by adding some major activities that must be introduced in the activities of the IPS Elements Guidebook, which are not specified in the instructions of the Ministry of National Defense of Korea. The enhanced strategy for the Computer Resources element proposed in this study is expected to help provide efficient operational support for the software and hardware related to Korean weapon systems, achieve target operational availability, and optimize the operating and maintenance costs.

keywords : integrated product support, integrated logistics support, computer resources, total life cycle system management

† Corresponding Author : Sang Boo Kim
Tel : +82-55-213-2988, Fax : +82-55-213-3729, email : sbkim@cwnu.ac.kr
Changwon National, University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 30th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

우리나라 무기체계에 대한 군수지원의 개념은 2021년을 기점으로 많은 변화가 진행되었다. 우리나라 국방부에서는 2021년 무기체계와 전력지원체계의 소요, 획득, 운영유지 및 처분을 포함하는 총수명주기 간 업무에 대해 총수명주기관리업무 훈령을 제정하였으며, 무기체계 개발 시 필수적으로 개발하여 소요군에 인도하던 종합군수지원(Integrated Logistics Support, ILS)의 개념이 소요제기부터 운영유지 단계를 거쳐 폐기까지로 군수지원의 영역이 확대된 통합체계지원(Integrated Product Support, IPS)의 개념으로 변화되었다. 아울러 우리나라 국방부의 IPS 도입에 따라 무기체계에 대한 군수지원을 위한 요소 개발에서 기존의 ILS 11대 요소가 IPS 12대 요소로 변경되었으며, ILS 개념에 없던 3가지 요소인 체계지원관리(Product Support Management, PSM), 유지관리(sustaining engineering) 및 지원정보체계(computer resources) 요소가 신설되었다.

IPS에서 신설된 3가지 요소 중 지원정보체계 요소에 관하여 우리나라 국방부의 총수명주기관리업무 훈령에는 미국에서 적용하고 있는 IPS Elements Guidebook 내용의 일부 내용만을 명시하고 있으며, 이는 IPS 개념 도입 본래의 목적을 달성하는데 충분하지 않을 수 있다. 또한 총수명주기관리업무 훈령에 명기되어 있지 않으면 체계개발 시 관련 업무에 대해서 활동하지 않는 문제점을 가지고 있다.

IPS 개념이 우리나라에 도입된 후 다양한 무기체계를 대상으로 IPS 업무와 관련된 연구가 수행 되어 왔다. Lee et al. (2022)은 미국의 선진사례를 바탕으로 우리 군에 최적화된 한국형 통합체계지원 개념을 정의하고, 제도 정착을 위한 정책적 제언을 제시하였다[1]. Kim et al. (2021)은 IPS 도입 시 연구개발주관기관이 수행할 수 있는 업무에 대해 정의하고, 향후 한국형 무기체계의 개발 방향에 대해 제시하였다[2]. Sung (2022)는 기존 군수지원요소를 살펴보고, 이러한 과정을 통해 통합체계지원의 다양한 요소 개발을 위해 필요한 신뢰성 도구에 대한 고찰을 다루었다[3]. Song (2023)은 ILS 개념을 대체하기 위해 도입된 통합체계지원 개념의 12대 요소개발 및 체계지원분석 산출물(Logistics Product Data Report, LPDR)과의 연관성에 관해 연구하였다[4]. Kim et al. (2022)는 한국의 LSAR(Logistic Support Analysis Record)과 미국의 LPD(Logistic Product Data)를 비교 및 분석하여 LPD의 한국 도입 시 필요한 정책을 제안하였다[5]. Kim et al. (2021)은 상용 소프트웨어 및 체계지원분석 관련 규격과 방법에 대해 조사한 후 PSA를 이용해 비용분석 기초자료로 사용하여, 시간과 비용을 절감할 수 있는 방법에 대해 고찰하였다[6]. Lee et al. (2020)은 PSM 요소의 개념 및 활동을 분석하고, 미국 사례를 바탕으로 국내 적용성을 판단하여 발전 방안을 제안하였으며[7], Park et al. (2024)는 IPS 신설 요소인 유지관리 요소에 대해 PSM Guidebook과의 비교분석을 통해 실무 적용 방안을 제시하였다[8].

현재까지 우리나라 IPS와 관련된 많은 연구가 이루어지고 있지만 지원정보체계 요소에 대해서 구체적인 개념과 강화 방안을 연구한 사례는 찾아보기 어렵다. 따라서, 이 연구에서는 총수명주기관리업무 훈령에서 명시하고 있는 IPS 지원정보체계 요소 정의 및 활동들에 대해 미국의 IPS Elements Guidebook 내용과 비교 분석을 수행하고, 전문가 집단을 대상으로 설문조사를 실시하여 우리나라 IPS 지원정보체계 요소의 강화 방안을 구성하여 제시하였다.

2. 지원정보체계 개념 및 활동 비교

2.1. 지원정보체계 개요 및 주요 활동

군수지원의 개념이 ILS에서 IPS로 개념이 변경됨에 따라 체계지원관리, 유지관리, 지원정보체계 3가지 요소가 추가되었다. 나머지 요소의 경우 ILS와 동일하게 적용되거나 연구 및 설계 반영과 표준화 및 호환성이 통합되었고, 기술교범과 기술자료관리가 하나로 통합되는 것과 같이 명칭 변경, 통합 등

부분적으로 변경되었다. Table 1은 기존의 ILS 요소와 IPS 요소를 비교하여 변화된 내용을 정리한 표이다.

지원정보체계 요소는 무기체계 주요 임무 수행 시 소프트웨어의 비중이 커짐에 따라 등장하게 된 신설 요소이며, 중요한 임무를 수행하는 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어를 지원하는 데 필요한 설비, 하드웨어, 소프트웨어, 문서, 인력 및 인원을 식별/계획/자원 조달 및 확보하는 활동으로 모든 무기체계 개발에 있어 중요한 활동 분야이다[9].

Table 1. Comparison of ILS and IPS Elements

No.	ILS Elements	IPS Elements	Notes
1	-	Product Support Management	New
2	Design Interface	Design Interface	
3	Standardization and Interchangeability		
4	-	Sustaining Engineering	New
5	Maintenance Planning	Maintenance Planning & Management	
6	Support Equipment	Support Equipment	
7	Supply Support	Supply Support	
8	Manpower & Personnel	Manpower & Personnel	
9	Training & Training Support	Training & Training Support	
10	Technical Manual	Technical Data	
11	Packaging, Handling, Storage & Transportation	Packaging, Handling, Storage & Transportation	
12	Facilities	Facilities & Infrastructure	
13	-	Computer Resources	New
14	Computer Resources	-	

2.2. 총수명주기업무 훈령과 IPS Elements Guidebook의 비교

2.2.1. 지원정보체계 정의 및 주요 활동

IPS 지원정보체계 요소와 관련하여 우리나라 총수명주기관리업무 훈령과 미국의 IPS Elements Guidebook의 정의와 주요 활동을 살펴보면 일부 내용의 차이가 있다. 우리나라에서는 '획득된 기술교범·기술자료 관리, 정비·보급지원 관리 및 주장비의 주요 내장형 소프트웨어 유지보수 등을 위한 정보체계 및 전산 자원에 대한 소요를 식별·확보·관리하는 활동'으로 정의하고 있다[10]. 그러나 미국에서는 '핵심 컴퓨터 하드웨어/소프트웨어 시스템을 운영하고 지원하는 데 필요한 시설, 하드웨어, 소프트웨어, 문서, 인력 및 인원을 포함'로 정의하고 있다[9]. 이로부터 지원정보체계 요소에 대한 총수명주기관리업무 훈령과 IPS Elements Guidebook의 정의가 부분적으로 다르다는 것을 알 수 있다. 또한, 지원정보체계 요소와 관련한 주요 활동에도 일부 차이가 있으며, 이는 Table 2, 3에 정리되어 있다.

Table 2. Definitions of Computer Resources Element in MND Instruction and IPS Elements Guidebook

Category	Definition
MND Instruction (KOREA)	Activities to identify, secure, and manage information systems and computer resources for the management of acquired technical manual and data, maintenance and supply support management, and sustainment of major embedded software of main equipment
IPS Elements Guidebook (USA)	Identify, plan, resource, and acquire facilities, hardware, software, documentation, manpower and personnel necessary for planning and management of mission critical computer hardware and software systems

Table 3. Activities of Computer Resources Element in MND Instruction and IPS Elements Guidebook

Category	Activities
MND Instruction (KOREA)	Identifying, securing, and managing the requirements for new or improvement of the booklet and electronic technology instructional management information system Manage technical interfaces such as cataloging, standardization, RAM and system support analysis, and maintenance Embedded Software maintenance Establish and take action to protect against network security threats and attacks
IPS Elements Guidebook (USA)	Mission critical computer hardware/ software operation and support(47 Item) Management reports development and maintenance(15 Item) System Security/Information Assurance (9 Item) Coordinate and implement agreements necessary to manage technical interfaces Establish and update plans for periodic test and certification activities required throughout the lifecycle

우리나라 지원정보체계 활동은 내장형 소프트웨어 유지보수, 네트워크 보안 위협 및 공격에 대한 보호 계획 등 일부 활동을 제외하고 나머지 활동은 IPS Elements Guidebook과 다른 활동들을 정의하고 있다. 이는 미국과 우리나라의 개발 환경에 따른 차이에서 기인한다고 판단된다. IPS Elements Guidebook의 지원정보체계 활동 내용에 나오는 모든 활동을 도입하여 우리나라 지원정보체계 활동으로 적용할 필요는 없지만 우리나라 무기체계 특성에 부합하거나 중요한 활동을 식별해서 선별적인 도입이 필요하다.

2.2.2. 지원정보체계 개발 단계별 산출물

앞서 지원정보체계의 정의 및 활동 비교를 바탕으로 무기체계 개발 단계별 지원정보체계 요소 산출물을 비교하면 Table 4와 같다. 미국의 경우 소요제기 시

Table 4. Computer Resources Element Outputs by Developmental Stages (USA & KOREA)

Category		Outputs by Developmental Stages					
USA	Phase	User Need / Technology Opportunities & Resources	Materiel Solution Analysis	Technology Development	Engineering & Manufacturing Development	Production & Deployment	Operations & Support
	Outputs	• LCSP • CARD/LCCE/ ICE • RFP • TEMP • IPS • ICD • RAM-C Report • HSI Report	• LCSP • Acquisition Strategy • TEMP • SEP • RAM-C Report • CDD • PESHE • CORE (50/50) • SOR/DSOR • BCA • LCCE/CARD • Initial FMECA • RFP • HSI Plan	• LCSP • Acquisition Strategy • SEP • TEMP • CPD • PESHE • CORE (50/50) • SOR/DSOR • Product Support • BCA • IMS • LCCE/CARD • HSI Plan	• LCSP • Acquisition Strategy • SEP • TEMP • CPD • PESHE • CORE (50/50) • SOR/DSOR • Product Support BCA • IMS • LCCE/CARD • HSI Plan	• LCSP • Prognostics and Health Management • QDR • ECP/ECR • Corrosion Control	• LCSP • Prognostics and Health Management • QDR • ECP/ECR • Corrosion • Control
KOREA	Phase	Requirement Institution	Prior Research/Exploration Development		System Development/Production		Operations & Support
	Outputs	• Requirements Suggestion • Requirement Documents	• Overview Life Cycle Sustainment Plan • Report on the Results of Previous Studies • Life Cycle Sustainment Plan (draft)		• Life Cycle Sustainment Plan (Revision) • New and Improvement Support Information System Establishment and Management Plan		• Life Cycle Sustainment

부터 수명주기관리계획서(Life Cycle Sustainment Plan, LCSP)를 비롯하여 시험평가기본계획서(Test and Evaluation Master Plan, TEMP), 체계공학계획(Systems Engineering Plan, SEP) 등 활동에 따른 여러 단계별 산출물이 필요하다. 그러나 우리나라의 경우 소요제기 시점을 제외한 각 개발단계에서 LCSP를 최신화하는 내용만으로 구성되어 있다. 이러한 산출물의 차이는 효율적이고 경제적인 운영유지를 위해 수행하는 IPS 개념을 완성하기에는 완전하지 않은 지원정보체계로 이어질 것이며 우리나라 지원정보체계 업무 수행 시 기존 미국의 개념을 포함한 활동을 우리나라에 적극적으로 도입하는 것이 필요하다고 볼 수 있다.

2.2.3. 지원정보체계의 주요 활동

우리나라 총수명주기관리업무 훈령의 지원정보체계 요소 주요 활동에 대해서 살펴보면, 체계개발 단계에는 ① 책자형 및 전자식 기술교범 관리를 위한 정보체계 신규 또는 개선 소요 식별·확보 ② 목록화, 규격화, RAM 및 체계지원분석, 유지관리 등의 자료관리를 위한 정보체계 개선 소요 식별·확보 ③ 운영유지 간 정비 및 보급 지원을 위한 전용정보체계 소요 식별·확보 ④ 정보체계 유지보수를 위한 자원소요 식별·확보 ⑤ 지원정보체계 네트워크 보안 위협 및 공격에 대한 보호 계획 수립 및 조치 ⑥ 수명주기관리계획서 지원정보체계 분야 최신화의 6가지 활동이 포함되어 있다. 또한 운영유지 단계는 ① 책자형 및 전자식 기술교범 관리를 위한 정보체계 관리 ② 목록화, 규격화, RAM 및 체계지원분석, 유지관리 등의 자료 관리를 위한 정보체계 관리 ③ 운영유지 간 정비·보급 지원을 위한 전용정보체계 관리 ④ 정보체계 유지보수 ⑤ 지원정보체계 네트워크 보안 위협 및 공격에 대한 보호 조치 ⑥ 수명주기관리계획서 지원정보체계 분야 최신화의 6가지 활동으로 구성되어 있다.

IPS Elements Guidebook의 경우 시스템의 설계로 인해 적용할 수 있는 시스템 핵심 기능에 취약성이 발생할 수 있는 모든 구성요소의 역할과 일치성을 보장하기 위한 활동을 제시하였다. 핵심 컴퓨터 하드웨어/소프트웨어 운용 및 지원에 관련된 47개 활동(핵심 범주), 관리보고서 개발 및 유지에 관련된 15개 활동(관리 범주), 시스템 보안/정보 보증에 관련된 9개 활동(보안 범주)으로 우리나라 대비 많은 활동을 세부적으로 나누어 작성되어 있다.

결론적으로 지원정보체계 요소가 언급된 두 문서를 비교하면 IPS Elements Guidebook에는 적용하고 있으나 총수명주기관리업무 훈령에는 명기되어 있지 않은 지원정보체계 요소의 업무 활동들이 대다수를 차지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 각 활동들의 내용을 살펴보면 우리나라의 경우 지원정보체계 요소의 활동들이 미국의 지원정보체계 요소의 활동들과 다르게 한국형 활동을 중심으로 적용되어 있음을 알 수 있다.

3. 우리나라 IPS 지원정보체계 요소의 강화 전략

우리나라와 무기체계 개발 환경이 많은 차이가 있는 미국에서 활용하고 있는 IPS Elements Guidebook의 지원정보체계에 대한 모든 활동 내용을 우리나라에 도입할 수는 없으나 IPS 개념에서 지원정보체계의 근본적인 목적을 달성하는 데 필요한 활동 중 우선 도입이 필요한 활동을 선정하여 적용하는 것이 필요하다. 이 연구에서는 IPS Elements Guidebook의 지원정보체계 주요 활동을 대상으로 전문가 설문을 통해 우리나라 지원정보체계 요소를 강화할 수 있는 활동을 선정하였다.

3.1. 설문지 설계

IPS Elements Guidebook에서 지원정보체계 활동으로 제시하고 있는 활동 중 우선 도입이 필요한 활동에 대해 전문가 설문조사를 수행하기 위한 설문지를 설계하였다. 설문은 핵심 47개 활동(핵심 컴퓨

터 하드웨어/소프트웨어 운용 및 지원), 관리 15개 활동(관리보고서 개발 및 유지), 보안 9개 활동(시스템 보안/정보 보증)에 대해 10점 Scale을 사용하여 우선 도입이 필요한 경우 10점, 그렇지 않은 활동에 대해서는 1점을 부여하도록 하였다.

설문은 IPS와 관련된 업무를 수행하거나 SW 유지보수 업무를 수행하고 있는 담당자 156명을 대상으로 수행하였다. 전체 전문가를 IPS 전문가 그룹과 SW 전문가 그룹으로 구분한 후 IPS 그룹은 소요군 및 정부 기관(소요군, 기품원, 국과연), 체계업체, IPS 전문업체로 나누었으며(그룹 1, 2, 3) SW 전문가 그룹은 소요군과 체계업체(그룹 1, 2)로 구분한 후 설문을 수행하였다.

3.2. 설문 결과 분석

수집한 전문가 그룹별 응답 결과를 분석하기 위해 데이터 스크리닝을 수행하였다. 데이터 스크리닝은 불성실한 응답자의 응답과 이상치를 제거하는 방식으로 진행되었다. 데이터 스크리닝 후 각 문항에 대한 대푯값을 설문 결과의 평균과 중앙값으로 구분하여 활용하되 왜도를 기준으로 선정하였다. 왜도가 (-1,1)에 포함되는 경우 평균을 대푯값으로 선정하고 그 외의 경우에는 중앙값을 대푯값으로 선정하였다[11-12]. 각 문항의 설문 결과 대푯값을 선정한 후 전문가 그룹별 전문성을 반영하기 위해 Table 5와 같이 가중치를 부여하여 각 문항별 최종 설문 결과에 대한 대푯값을 도출하였다.

Table 5. Weighted Average Scores for Survey Groups

Class	IPS(40%)			SW(60%)	
Group	1	2	3	1	2
Weight	0.2	0.12	0.08	0.35	0.25

가중치는 지원정보체계 요소의 특성을 고려하여 IPS 그룹과 SW 그룹에 각각 40%와 60%를 부여하였으며 그룹 내 전문가 그룹별로 전문성 및 요소 이해도를 기준으로 가중치를 부여하였다.

가중치를 적용하여 3개의 범주인 핵심 범주(Ⅰ), 관리 범주(Ⅱ), 보안 범주(Ⅲ)에 속한 71개 활동에 대해 가중 평균을 Table 6과 같이 산출하였다. 대푯값 중 *로 표시한 문항은 중앙값을 대푯값으로 선정한 문항을 의미한다. 문항별 최종 대푯값 비교를 통해 전체 71문항 중 상위 50% 문항을 지원정보체계 요소 중 우선 도입이 필요한 활동으로 선정하였다.

Table 6. Weighted Averages Score of 71 IPS Computer Resources Element Activities

Class		IPS			SW		Weighted Average
Cat.	No.	Group 1 (0.20)	Group 2 (0.12)	Group 3 (0.08)	Group 1 (0.35)	Group 2 (0.25)	
Ⅰ	1	7.57	9.00*	7.87	8.75	7.95	8.27
	2	7.14	8.75	7.56	7.85	7.38	7.67
	3	7.21	7.48	7.07	7.38	7.19	7.29
	4	7.78	7.82	7.61	8.00*	7.76	7.84
	⋮						
	47	8.00*	5.22	6.56	6.15	5.29	6.23
Ⅱ	48	7.50	6.85	7.27	7.31	7.52	7.34
	⋮						
	62	7.14	5.88	6.83	6.31	6.45	6.50
Ⅲ	63	7.50	8.03	7.99	7.69	7.81	7.75
	⋮						
	71	6.86	6.79	7.67	7.54	7.24	7.25

3.3. 중요 지원정보체계 요소 선정

앞서 71개 문항의 전문가 설문 결과에 대하여 가중 평균을 이용하여 상위 50%에 속한 활동을 중요 지원정보체계 요소로 선정하였으며 그 내용은 다음과 같다.

첫 번째 핵심 범주에 선정된 활동은 Table 7과 같으며, IPS Elements Guidebook에 포함된 47개 활동 중 17개 활동이 선정되었다. 17개 활동의 주요 내용은 소프트웨어의 개발, 인증 및 검증, 수명주기 관리 및 소프트웨어 유지, 비용관리 등이다.

Table 7. Selected Activities for Category I

Activity No.	Activity Details
1	Mission Critical Computer Hardware and Software
2	Information Technology
3	Digital Engineering
4	The Integrated Data Environment
5	Joint Information Environment
6	Software Acquisition Overview
7	Standards for Software Development, Validation and Verification
9	Autonomous Systems
10	Net-Ready KPP Requirements for Interoperability and Operational Effectiveness
11	Software Life Cycle Management
15	Software Intellectual Property and Data Rights
25	Information Technology Acquisition
33	Support Software and Software Intensive support equipment
35	Software Architecture Development and Documentation
37	Software Reuse including Use of COTS and Open Source Software
38	Software Sustainment Cost Estimation
40	Fielding of Computer Resource Systems

두 번째 관리 범주에 선정된 활동은 Table 8에 정리되어 있는 11개 활동이다. 이 관리 범주 활동은 15개 활동 중 11개 활동이 선정된 것으로 활동 대부분이 중요 요소로 선정되었으며, 프로그램 및 소프트웨어 변경 관리, 소프트웨어 기준선 관리, 라이선스 관리, 소프트웨어 구성 품목 정의 결정 등과 관련된 활동들이다.

Table 8. Selected Activities for Category II

Activity No.	Activity Details
48	Deficiency Reporting and Tracking
49	Joint Deficiency Reporting and Tracking
50	Disaster Recovery Planning and Execution
51	Computer Resources(System Software Maintenance) Working Group Stand up and Management
52	Computer Programs(System Software) and Software Baselines Management
53	Computer Programs and Software Modifications Management
54	Software Licenses Management
55	Software and Hardware Obsolescence Management
57	Specifications Determination
59	Computer Software Configuration Item(CSCI) Definitions Determination
61	Electronic Data Interchange(EDI) Management

세 번째 보안 범주에는 8개 활동이 선정되었다. 보안 범주 활동은 전체 9개 활동 중 8개 활동이 선정되어 1개의 활동을 제외한 나머지 활동이 모두 선정되었다. 해당 결과는 보안이 무기체계에서 매우 중요한 분야임을 의미하며 선정된 활동은 Table 9와 같다.

Table 9. Selected Activities for Category III

Activity No.	Activity Details
63	Computer and Software Security Planning
65	Program Protection Plan
66	Cyber Security
67	Supply Chain Risk Management
68	Anti-Tamper
69	Data Protection and Software Assurance
70	Malware / Malicious Code
71	Hardware Assurance

위와 같이 지원정보체계 요소와 관련한 다양한 분야의 전문가들을 대상으로 하여 실시한 설문조사 결과로부터 핵심 범주의 17개 활동, 관리 범주의 9개 활동, 보안 범주의 8개 활동이 최종 선정되었다. 선정된 36개 활동은 우리나라 무기체계 총수명주기간 소요군, 기술지원기관, 개발업체의 IPS와 소프트웨어 분야에서 근무하고 있는 전문가들이 중요하게 고려해야 한다고 판단한 활동이라고 말할 수 있다.

3.4. 우리나라 지원정보체계 요소의 강화 전략

전문가 설문조사 결과의 분석으로부터 선정된 활동들의 내용을 살펴보면, 핵심 범주에서는 소프트웨어의 개발, 인증 및 검증, 수명주기 관리 및 소프트웨어 유지, 비용관리 등의 활동이 주요 내용이며, 관리 범주에서는 프로그램 및 소프트웨어 변경 관리, 소프트웨어 기준선 관리, 라이선스 관리 등이 주요 내용이 된다. 보안 범주의 경우 1개 활동을 제외한 전체 활동이 선정되어 무기체계 개발 및 운영유지에 있어 보안의 중요성을 확인할 수 있었다. 선정된 활동 외에도 전체적인 설문 응답 결과를 분석해 보면 설문에 응답한 IPS 그룹과 S/W 그룹의 전문가들이 설문 대상 활동 71개 대부분에 대해 높은 적용 필요성을 강조하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 현재의 총수명주기관리업무 훈령에서 다루는 활동만으로는 지원정보체계 활동을 그 목적에 맞게 수행하는 것이 어렵다는 것을 암시한다.

따라서 우리나라 IPS의 지원정보체계 요소의 강화 방안으로 앞선 설문조사 분석 결과로부터 도출된 36개의 활동을 선별하여 적용하는 것이 필요하며, 해당 활동을 분류하여 개발 대상 무기체계의 LCSP의 부록으로 제시해야 한다. 또한 현재 우리나라 IPS의 지원정보체계 업무로 분류된 활동들의 재분류가 필요하다. 현재 진행 중인 사업들의 지원정보체계 요소 확인 시 정보체계 개선 소요에 대한 식별, 확보, 관리업무는 기존 업무 내용을 유지하고, 단순히 구축된 정보체계에서 사용하는 데이터베이스를 제공하는 업무는 기술교범 및 기술자료 관리 요소에서 다룬다면 적절할 것으로 판단된다. 또한 총수명주기관리업무 훈령에 명기되지 않은 지원정보체계의 주요 활동에 대한 반영 여부를 각 무기체계 특성에 맞게 회의체에서 결정하여 추진한다면 IPS의 도입 취지에 부합할 것으로 판단된다. 추가로 지원정보체계 요소의 특성을 반영하여 민간 영역의 기술을 방산 영역으로 도입시키는 요소로 활동이 필요하며 인공지능, 로봇, 사물인터넷(Internet of Things, IoT)과 관련된 내용도 정보 보안과 관련해서 지원정보체계 요소에서 다룬다면 방산 분야도 최신 기술을 접목해 우리나라 지원정보체계 요소를 강화할 수 있을 것이라 기대한다.

4. 결 론

이 연구는 군수지원의 개념이 최근 ILS에서 IPS로 전환됨에 따라 ILS에는 없었던 신설 요소 중 지원정보체계 요소의 강화 전략에 대해 다루었다. 특히 우리나라 총수명주기관리업무 훈령과 IPS Elements Guidebook의 비교를 통해 지원정보체계 요소의 정의, 활동 및 산출물에서 차이가 존재함을 확인하였다. 또한, 우리나라 총수명주기관리업무 훈령의 지원정보체계 요소 관련 활동은 한국형으로 구축될 때 많은 활동을 미적용하거나 축소 또는 다른 요소에 반영되어 있어 일부 활동만이 IPS Elements Guidebook의 활동과 일치하고 있다. 이에 따라 IPS Elements Guidebook의 71개 활동 중 우리나라 IPS 지원정보체계 요소를 강화하기 위한 주요 활동을 전문가 설문조사를 통해 선정하였으며 설문조사 결과 분석을 바탕으로 핵심 범주에서 17개, 관리 범주에서 11개 그리고 보안 범주 8개 등 총 36개의 활동을 선정하였다. 아울러 IPS 및 소프트웨어 전문가 집단의 담당자들은 IPS Elements Guidebook의 71개 지원정보체계 활동에 대해서 대부분의 활동이 중요한 내용이라고 인식하고 있음을 확인할 수 있었다.

이 연구에서 제시한 우리나라 IPS 지원정보체계 요소 강화 전략에서는 훈령 및 규정 개정 전에 사업

별로 IPS-MT 등 의사결정 과정을 통해 지원정보체계에 필요한 활동을 선별적으로 추가하는 것이 필요함을 강조하였으며, 이를 통해 IPS에서 기대하는 무기체계 총수명주기비용 효율을 높이는 데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1 Lee, S.-S., Kim, M.-Y., Lee, M.-J., & Seo, Y.-W. (2022). A study on improvement of product support management for weapon system life cycle management. *Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 29*(2), 57-71. https://doi.org/10.52798/KADIS.2022.2.5

2 Kim, S. H., Lee, J. H., & Park, C. S. (2021). Study on the utilization of field operational data for aircraft weapon systems with the introduction of IPS. In *Proceedings of the KSAS Fall Conference* (pp. 1542-1543). The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences.

3 Sung, S.-I. (2022). The role of reliability engineering in the transition from integrated logistics support to integrated product support. *Journal of Applied Reliability, 22*(4), 319-324. https://doi.org/10.33162/JAR.2022.12.22.4.319

4 Song, K. (2023). Relationship between PSA output (LPDR) and the development of 12 elements of IPS. *Journal of Defense Quality Society, 5*(2), 33-43. https://doi.org/10.23199/jdqs.2023.5.2.004

5 Kim, G. Y., Kim, N. S., Cho, K. H., Lee, H., & Park, J. H. (2022). A study of domestic application of U.S. LPD (Logistics Product Data). *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 50*(9), 663-668. https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.9.663

6 Kim, H., Lee, H., Kim, G., Shin, J., & Nam, J. (2021). A study on life cycle cost analysis method using product support analysis data. In *Proceedings of the KSAS Fall Conference* (pp. 1540-1541). The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences.

7 Lee, S.-S., Kim, M.-Y., Lee, M.-J., & Kim, K.-H. (2020). A Study of domestic application of U.S. IPS (Integrated Product Support). *Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 27*(2), 69-85. https://doi.org/10.52798/KADIS.2020.27.2.6

8 Park, Y.-G., Kim, S.-B., & Bae, I.-H. (2024). Practical approach to application of sustaining engineering elements of integrated product support (IPS). *Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 31*(3), 13-21. https://doi.org/10.52798/KADIS.2024.31.3.2

9 Defense Acquisition University. (2024). *Integrated Product Support (IPS) Elements Guidebook*.

10 국방부. (2024). *총수명주기관리 업무훈령* [국방부훈령 제2925호, 2024. 5. 16., 일부개정]. 국가법령정보센터.

11 Muthén, B., & Kaplan, D. (1985). A comparison of some methodologies for the factor analysis of non-normal Likert variables. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 38*(2), 171-189. https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1985.tb00832.x

12 Sorgente, A., & Lanz, M. (2019). The multidimensional subjective financial well-being scale for emerging adults: Development and validation studies. *International Journal of Behavioral Development, 43*(5), 466-478. https://doi.org/10.1177/0165025419851859

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 340-351, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.030

함정 건조 공정의 예방적 품질보증 강화를 위한 5M1E 프레임워크 적용 연구

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

A Study on the Application of the 5M1E Framework to Strengthen Preventive Quality Assurance in the Naval Ship Construction Process

민일홍†, Ilhong Min
국방기술품질원, 함정센터, 선임연구원
Senior Researcher, Naval System Center, Defense Agency for Technology and Quality

백용관, Yongkawn Beak
국방기술품질원, 함정센터, 선임연구원
Senior Researcher, Naval System Center, Defense Agency for Technology and Quality

박효진, Hyojin Park
국방기술품질원, 함정센터, 선임연구원
Senior Researcher, Naval System Center, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

This study aims to develop a preventive process-based quality assurance (QA) framework tailored for naval ship construction to address the inefficiencies of current post-process inspection models. By integrating systematic process reviews into key construction phases based on the "Process Approach" which is a core principle of modern quality management this research proposes a shift toward proactive risk management. Five core processes (welding, coating, NDT, piping, and electrical installation) were selected because of their impact on platform quality. For each, checklists based on the 5M1E framework (Man, Machine, Material, Method, Measurement, Environment) were developed and applied in two stages, an initial process review stage and a subsequent field verification stage, all linked to the requirements of the Defense Quality Management System (DQMS) for consistency. Field applications across the three shipyards revealed common systemic weaknesses in equipment maintenance and material control that are difficult to identify through traditional inspections, despite procedural documentation. The proposed 5M1E-based QA framework provides a structured and theoretically sound foundation for transitioning from reactive to preventive quality assurance. Its effectiveness is validated by its alignment with the Process Approach and conceptual similarity to proven frameworks, such as NADCAP, in the aerospace industry. Integrating this framework can improve risk management, support effective resource allocation, and strengthen the practical effectiveness of DQMS certification by shifting focus from documentation to evidence-based process capabilities.

keywords : Preventive Quality Assurance, Process Approach, 5M1E, Naval Shipbuilding, DQMS

† Corresponding Author : Ilhong Min
Tel : +82-51-750-2575, Fax : +82-51-758-3992, email : ilhong_min@dtaq.re.kr
Defense Agency for Technology and Quality, 48250, 46, Gwangil-ro 67beon-gil, Suyeong-gu, Busan, Korea
Received April 6th. 2026 Revised April 28th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

함정은 운용성과 생존성이 핵심인 고도의 무기체계로서, 이러한 핵심 성능을 보장하기 위해서는 무기체계의 근간을 이루는 플랫폼의 구조적 건전성과 품질확보가 반드시 선행되어야 한다. 그러나 국내 함정 건조 산업은 공정 완료 후 문제를 확인하는 사후적 검사에 의존하고 있어, 위험을 사전에 통제하는 예방적 품질보증 활동은 미흡한 실정이다. 이는 국방품질경영체제(Defense Quality Management System, DQMS)가 요구하는 프로세스 접근법(process approach)의 취지와도 맞지 않는다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해, 함정 건조의 핵심 기반공정에 프로세스 접근법을 실질적으로 적용하는 방법론을 제시한다. 이를 위해 공정의 투입요소를 체계적으로 분석하는 5M1E(Man, Machine, Material, Method, Measurement, Environment) 프레임워크를 활용하여 프로세스 점검 체크리스트를 개발하였다.

개발된 체크리스트를 조선소의 국방품질경영체제와 연계하여, 공정 단계별 위험요인을 선제적으로 관리하는 예방 중심의 품질보증체계를 구축하는 것이 본 연구의 최종 목표이다. 이 연구는 국방품질경영체제와 같은 상위 원칙과 실제 현장의 간극을 메우는 실용적인 방안을 제시하며, 향후 축적될 품질 데이터를 통해 데이터 기반 의사결정체계로 확장될 수 있다는 점에서 큰 의의가 있다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1. 연구의 배경 및 필요성

전통적으로 선박 및 함정 무기체계의 품질은 최종 제품이 요구조건을 충족하는지 확인하는 검사 활동을 통해 확보되어왔다. 이는 품질확보의 기본적인 단계로, 관련 연구들 역시 검사의 효율성과 정확성을 높이는 방향으로 발전해왔다. 예를 들어, Hwang and Kim (2022)이 함정 무기체계에 대한 제품 검사의 체계 강화 방안을 제시하였으며[1], 다수의 연구에서도 디지털 전환 기술과 새로운 측정 기법을 도입하여 검사 기술을 개선하려는 노력이 이어졌다[2-5]. 이처럼 사후적 품질 확인 단계의 효율적인 관리 방법과 관련된 기술은 활발히 연구되고 있으나, 공정 초기 단계에서부터 품질 리스크를 선제적으로 관리하고 예방하는 접근에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 국방 품질경영 분야에서는 기존의 사후 관리 중심에서 벗어나 예방적 접근의 중요성이 점차 강조되고 있다. Seo and Lee (2022)는 무기체계 개발 단계에서부터 품질확보 요소를 공정 흐름 내에 내재화하고, 실행 과정에서의 품질 리스크를 사전에 식별·통제하는 예방 중심 품질보증체계의 도입 필요성을 강조하였다[6].

이러한 맥락은 국제적인 국방 품질경영 정책에서도 명확히 나타난다. 미국 국방계약관리청(Defense Contract Management Agency, DCMA)은 사후적 품질검사 방식이 반복적 시정조치로 이어지는 한계를 인식하고, 탐지-예방 전환 개념(Detection to Prevention, D2P)을 정책적으로 도입하였다[7]. 이는 품질문제가 발생한 이후의 조치가 아닌, 공정 실행 전 평가(process evaluation), 공정 실행 중 평가(progress evaluation), 공정 완료 후 제품 평가(product evaluation)의 각 단계별 사전 점검을 통해 품질 리스크를 차단하고 근본 원인을 예방하려는 체계적 관리 구조이다. 이는 방산 및 함정 무기체계 플랫폼 품질보증이 단순한 결과 확인 중심에서 프로세스 기반의 선제적 통제로 보완되어야 함을 시사한다.

국내 산업 현장에서도 이러한 예방적 접근의 필요성이 제기되었다. Kyung (2013)은 국내 조선 기자재 업체의 ISO 9001 품질경영시스템 유지 실태 분석 결과, 시정조치 및 예방조치가 가장 시급한 과제로 지목되었으며, 이는 단순 문서화를 넘어 데이터 기반의 예방 프로세스 구축이 필요함을 시사한다고 보고하였다[8]. 또한, 미 해군 함정건조 감독기관인 함정건조감독단(Supervisor of Shipbuilding, Conversion and Repair, SUPSHIP) 역시 공정 실행 이전의 절차평가(procedure evaluation)와 체

크리스트를 활용한 현장 점검의 중요성을 강조하며, 실행력 기반의 품질확보 활동을 명확히 요구하고 있다[9].

2.2. 프로세스 검토와 품질경영시스템

프로세스 검토(process review)는 공정의 입력요소와 실행조건을 사전에 점검하여 품질 리스크를 예방하는 예방 중심의 품질보증 활동이다. 이는 생산 완료 후 제품을 검사하는 사후적 방식과 차별화된다. 이러한 접근의 이론적 기반은 ISO 9001 품질경영시스템의 '프로세스 접근법(process approach)'으로, 조직의 모든 활동을 상호 연관된 프로세스 시스템으로 관리하여 일관되고 예측 가능한 결과를 달성하는 것을 목표로 한다. Shin et al. (2016)은 미국 국방계약관리청의 사례를 분석하며, 국내 군수품 품질보증체계 역시 사후 확인 중심에서 공정 기반의 사전 점검체계인 프로세스 검토 개념으로 전환되어야 함을 제시하였다[10]. 특히 5M1E 기준을 중심으로 구성된 공정 점검체계는 '프로세스 접근법'의 현장 적용을 구체화하기 위한 효과적인 도구이며, 반복적인 품질문제의 원인을 구조적으로 차단할 수 있는 기반이 된다고 설명하였다.

이러한 접근법의 타당성은 실제 산업 현장 적용 사례를 통해 구체화된다. Park et al. (2022)은 함정 섬유강화플라스틱(Fiber-Reinforced Plastics, FRP) 구조물 생산 공정에서 기존의 제품확인 감사를 프로세스 검토 방식으로 전환하며, 요구사항에 부합하는 제품이 일관되게 생산될 수 있는지를 사전적으로 확인하는 품질관리 활동을 수행하고 그 효과를 보고하였다[11]. 더 나아가 Dong et al. (2022) 또한 실험실 품질관리라는 다른 분야에서 5M1E 기반 모델을 도입하여 각 요소 간 상호작용을 분석함으로써, 공정 중심의 품질 리스크 관리 방식이 다양한 분야에서 유효함을 뒷받침하였다[12].

2.3. 선행사례: 항공우주산업의 NADCAP

본 연구에서 제안하는 5M1E 기반 검토체계의 타당성은 항공우주 분야의 NADCAP(National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program) 사례를 통해 설명할 수 있다. NADCAP은 Boeing, Airbus 등이 공급업체의 특수공정 품질을 보증하기 위해 공동 운영하는 산업계 주도 인증 프로그램이다[13].

NADCAP의 핵심은 최종 검사만으로 품질보증이 어려운 특수공정에 대해, 산업계 전문가가 개발한 상세 체크리스트로 심층 공정 감사를 수행하는 것이다. 이 체크리스트는 인력, 장비, 자재, 절차, 측정, 환경 등 공정의 모든 요소를 평가하며, 이는 5M1E 프레임워크의 구성요소와 일치한다. NADCAP 인증은 현재 항공우주 산업의 필수 조건으로, 공급업체의 품질 향상과 결함률 감소에 크게 기여한 것으로 평가된다. 따라서 본 연구는 NADCAP이 항공우주 분야에서 검증한 성공 철학을 함정 건조 분야에 적용하려는 시도라고 할 수 있다.

2.4. 연구 목표

이상의 선행연구와 이론적 배경을 바탕으로, 본 연구는 국내 함정건조 분야의 주요 기반공정에 예방중심 품질확보를 위한 프로세스 검토 개념을 도입하고, 이를 실제 현장에 적용 가능한 형태로 설계하고자 한다. 본 연구는 함정건조 공정 중 반복적으로 적용되는 공통 프로세스 항목을 도출하고, 이에 대한 품질관리 절차와 프로세스 검토 방법을 설계하였으며, 공정별 투입조건을 구조화하기 위해 5M1E 요소에 따라 점검 체크리스트를 개발하였다. 해당 체크리스트는 용접, 도장, 비파괴검사, 배관, 전선 설치 등 5개 핵심공정을 대상으로 하며, 각 공정의 착수 전 단계에서 품질확보를 위한 주요 투입요소의 적절성을 점검하고, 공정 수행 중 현장 이행 여부 및 출력결과의 효과성을 체계적으로 검토할 수 있도록 구성하였다. 이는 기존의 검사 결과 중심 품질보증 활동을 실행 프로세스 중심의 예방적 품질관리 방식으로 전환할 수 있는 실질적 기반을 확보하는 것을 목적으로 한다.

3. 방법 및 수행 절차

3.1. 대상 및 적용 범위

함정 플랫폼 건조 과정에서 구조적 건전성과 기능적 신뢰성 확보에 직결되는 핵심 공정들을 중심으로 프로세스 기반 품질확보체계를 적용하였다. 선정된 5개 공정(용접, 도장, 비파괴검사, 배관 설치, 전선 설치)은 대부분의 함정 건조 현장에서 공통적, 반복적으로 수행되고, 검사 물량이 많은 공정임을 고려하여 선정되었다. 특히 선정된 공정은 공정 수행 과정과 공정에 투입되는 입력요소의 적합성이 중요하며, 최종 제품의 출력만으로 품질의 적합성을 완전하게 확인하기 제한되는 성격을 가진다. 즉, 공정 종료 후 외관검사나 완성품 검사를 통해 일부 부적합을 확인할 수는 있으나, 용접조건, 도장 환경, 비파괴검사자의 판정능력, 배관 및 전선 설치 과정/사용 자재의 적합성 등 공정 중 투입요소와 실행조건이 적절했는지는 최종 결과만으로 충분히 검증하기 어렵다. 각 공정은 수행 방식과 품질 기준이 상이하나, 품질 결과가 인원, 장비, 자재, 작업방법, 측정수단, 작업환경 등 다양한 입력요소의 영향을 받을 수 있다는 공통점이 있다. 다만 공정별로 주요 영향요소와 관리 중점은 다르므로, 이를 공정 특성에 맞게 선별·통제하기 위해 5M1E 기반 프로세스 검토가 필요한 대표 공정으로 판단하였다, Table 1은 본 연구에서 분석 대상으로 삼은 함정건조 5개 핵심 공정의 개요와 각 공정별 품질확보를 위한 관리 포인트를 정리한 것이다.

3.2. 공정에 대한 프로세스 검토 구조 설계

본 연구에서는 기존의 사후 검사 중심 품질보증 방식에서 벗어나, 공정 수행 전 및 공정 진행 간의 각 단계에서 품질 확보를 위한 요인을 점검할 수 있도록 프로세스 검토 기반 품질관리 구조를 설계하였다. 이 구조는 초기 프로세스 검토(Initial Process Review), 현장 확인(Field Verification) 두 가지 점검 단계로 구성되며 단계별 검토내용과 시기를 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Overview of Five Core Processes in Naval Shipbuilding

Process	Description	Necessity	Key Control Points
Welding	Joining of metal components to form structural integrity	Essential for structural strength and durability of the hull	WPS compliance, welder qualification, prevention of porosity/cracks
Painting	Forming a protective coating on metal surfaces to prevent corrosion	Required for corrosion resistance and aesthetic maintenance	Coating thickness, drying conditions, painting sequence
NDT (Non-Destructive Testing)	Inspection technique to detect internal defects without damaging the product	Ensures structural safety and reliability	Selection of appropriate test method, defect acceptance criteria, inspector qualification
Piping Fabrication & Installation	Fabricating and installing piping systems for fluid and air flow within the ship	Necessary for operation of critical fluid systems such as fuel and cooling	Pipe material, weld quality, routing compliance, conformance to installation standards
Cable Fabrication & Installation	Assembling and installing electrical cables for power supply and signal transmission	Essential for power distribution and control/communication functions	Cable routing, shielding, fastening, insulation resistance testing, conformance to installation standards

Table 2. Two-Stage of Process Review

Stage	Items to Verify/Check	Timing of Execution
Initial Process Review	Appropriateness of input elements (5M1E) based on procedures and requirements	Before process initiation
Field Verification	On-site fulfillment of planned conditions including work methods, materials, and equipment status and conformance of output to specified requirements	During process execution

이러한 이중 구조 설계는 품질경영시스템의 일반적인 실패 요인인 '문서와 현장의 괴리'를 체계적으로 관리하기 위함이다. 특히 함정건조는 공정 간 연계성이 높아, 계획된 통제가 현장에서 이행되지 않을 경우 후속 공정과 성능·안전 요구조건에 연쇄적으로 영향을 줄 수 있으므로, 계획과 실행을 분리해 점검할 필요가 있다.

초기 프로세스 검토는 '계획의 품질'을 검증하는 단계이다. 이 단계에서는 해당 공정을 수행하기 위해 수립된 절차서, 작업자의 자격 요건, 장비 목록 및 교정 상태 등이 계약 요구조건과 기술 사양을 충족할 수 있도록 '계획'되었는지를 평가한다. 또한 검사·기록·불일치 처리 등 품질관리체계가 문서상으로 누락 없이 구성되어 있는지까지 확인함으로써, 실행 단계에서 발생할 수 있는 변동요인을 최소화한다.

반면, 현장 확인은 '실행의 품질'을 검증하는 단계로, 사전에 계획된 조건들이 실제 작업 현장에서 일관되고 정확하게 '실행'되고 있는지를 확인한다. 이 두 단계를 분리함으로써 품질문제의 근본 원인을 보다 정밀하게 진단할 수 있다. 예를 들어, 초기 프로세스 검토 단계에서 문제가 발견되면 이는 시스템 계획, 자원 배분, 또는 절차 수립의 문제임을 의미한다. 반면, 초기 검토는 통과했으나 현장 확인에서 문제가 발생했다면 이는 작업자 교육, 현장 감독, 또는 규율 준수의 문제일 가능성이 높다.

이처럼 진단적 정확성을 높이는 2단계 검토 방안은 함정건조와 같이 고신뢰성과 연속성이 요구되는 플랫폼 품질보증에 적합한 구조로 설계되었다.

3.3. 5M1E 기반 프로세스 검토 체크리스트 개발

본 연구에서는 프로세스 기반 품질확보체계의 실행을 위해, 각 공정에서 품질에 영향을 미치는 주요 투입요소를 구조적으로 점검할 수 있도록 5M1E 요소를 기준으로 한 점검 체크리스트를 설계하였다. 5M1E는 제조 및 건조 품질관리에 있어 공정 수행에 영향을 미치는 대표적인 6대 입력요소로, ISO 9001 품질경영시스템에서도 공정 설계와 평가에 널리 활용되는 체계이다.

5가지의 각 공정마다 적용되는 5M1E 입력조건은 상이하며 공정별 해당하는 입력조건을 식별하여 해당하는 입력조건에 대한 점검을 수행할 수 있도록 체크리스트에 반영하였다. 특히 도장 공정은 온도, 습도, 환기, 표면 상태, 건조 조건 등이 도막 형성, 부착성 및 경화 품질에 직접적인 영향을 미치는 주요 입력조건이므로 환경(environment)을 독립적인 점검요소로 반영하였다. 반면 용접, 비파괴검사, 배관 및 전선 설치 공정의 작업환경은 품질에 영향을 미칠 수 있으나, 본 연구의 적용 범위에서는 작업방법, 장비 상태, 계측 신뢰성 등과 비교할 때 공정 품질을 직접 결정하는 독립 입력조건으로서의 영향이 상대적으로 제한적이므로 별도 항목으로 반영하지 않았다. 공정별 해당하는 요소는 Table 3과 같다.

체크리스트는 공정별 2종으로 구성되며, 초기 프로세스 검토용과 공정 수행 중 현장 이행 여부를 확인하는 실행 점검용으로 구분된다. 초기 프로세스 검토 체크리스트는 공정 착수 전에 조선소가 보유한 국방품질경영체제 내의 해당 공정 관련 품질절차서 및 표준서가 적절한지, 또한 함정의 계약요구조건 및 기술적 사양이 관련 문서에 충분히 반영되어 있는지를 확인하기 위해 활용된다. 아울러, 공정 수행을 위한 자격 보유 인력과 작업 인원 구성, 보유 설비의 상태, 적용 계측기 및 검교정 체계의 적절성 또한 점검 대상에 포함된다.

이후 공정이 진행되는 동안 품질보증담당원이 사

Table 3. Relevant 5M1E Elements by Process

Process	Relevant 5M1E Elements					
	Man	Machine	Material	Method	Measurement	Environment
Welding	○	○	○	○	○	-
Painting	○	○	○	○	○	○
NDT	○	○	-	○	○	-
Piping Fabrication & Installation	○	○	○	○	○	-
Cable Fabrication & Installation	○	-	○	○	-	-

전에 계획한 주기에 따라, 초기 검토 시 확정된 조건들이 현장에서 실제로 충족되고 있는지를 확인하는 실행 점검이 수행된다. 이와 같이 이중 구조로 구성된 체크리스트는 계획과 실행 간의 불일치로 인한 품질 리스크를 최소화하고, 함정건조 기반공정에서 일관된 품질보증 활동의 확보를 가능하게 한다. Table 4~7은 본 연구에서 개발한 용접 및 도장공정 점검 항목의 예시이며, 점검자는 국방품질경영체제 인증 요구사항과의 연계성을 기반으로 점검을 수행한다.

Table 4. Developed Welding Process Review Checklist(Initial Process Review)

5M1E	Review Items	Linked DQMS Requirement	
Man	• Qualified welding personnel (with certified welding skills) are assigned to the welding process. • Has the qualification of welding personnel been verified by an authorized inspection agency or classification society? • Are welders managed according to relevant procedures (e.g., new qualification, renewal, re-examination)? • Are subcontractors selected in accordance with the relevant procedure?	7.2	Personnel Competence
		7.2.1	Training and Competency Management
		8.4.1	Control of External Providers
		8.4.2.1	Verification of Supplied Processes, Products, or Services
Machine	• Are the welding-related production equipment/facilities owned by the contractor identified (listed)? • Are the owned equipment/facilities managed according to the relevant procedures?	7.1.3	Infrastructure
		8.5.1.5	Preventive Maintenance
Material	• Do the base materials (steel) used conform to the contract requirements? • Are the welding consumables appropriate for the base materials? • Are welding consumables managed according to relevant procedures? • Are the material certificates (e.g., mill test certificates) of base materials and welding consumables checked and managed? • Is it possible to verify falsification or tampering of the material certificates (base materials and welding consumables)?	8.1.4	Prevention of Counterfeit or Tampered Items
		8.1.5	Prevention of Use of Suspect or Unapproved Parts
		8.4.1	Control of External Providers
		8.4.2.1	Verification of Supplied Processes, Products, or Services
		8.5.4.1	Storage and Inventory Control

5M1E	Review Items	Linked DQMS Requirement	
Method	• Has the welding procedure (or WPS) been certified by an authorized inspection agency or classification society? • Are inspection and documentation of welding results carried out according to relevant procedures? • Are nonconforming or rejected outputs analyzed and corrective actions taken?	8.1.1	Product and Process Acceptance Criteria
		8.5.1	Control of Production and Service Provision
Measurement	• Are the measuring instruments related to the welding process identified (listed)? • Are the management and calibration of measuring instruments related to welding carried out in accordance with the relevant procedures? (by an authorized organization)	7.1.5	Monitoring and Measuring Resources

Table 5. Developed Welding Process Review Checklist(Field Verification)

5M1E	Review Items	Linked DQMS Requirement
Man	• Are the welders deployed on site approved and qualified?	Same as Table 4
Machine	• Do the equipment and facilities installed and in use on site match the identified (listed) production equipment/facilities?	Same as Table 4
Material	• Are the base materials and welding consumables used on site in compliance with contract requirements? • Are base materials and welding consumables stored in accordance with relevant procedures? • Is traceability of materials (base materials, welding consumables) ensured on site?	Same as Table 4
Method	• Are technical documents related to the applicable welding procedure (e.g., WPS) accessible on site?	Same as Table 4
Measurement	• Do the measuring instruments related to the welding process used on site match those identified (listed)?	Same as Table 4

Table 6. Developed Painting Process Review Checklist(Initial Process Review)

5M1E	Review Items	Linked DQMS Requirement	
Man	• Are personnel with the required work competency for the painting process secured? • Are painting workers and related personnel managed in accordance with relevant procedures? • Are subcontractors selected in accordance with relevant procedures?	7.2	Personnel Competence
		7.2.1	Training and Competency Management
		8.4.1	Control of External Providers
		8.4.2.1	Verification of Supplied Processes, Products, or Services
Machine	• Are the contractor-owned production equipment/facilities related to the painting process identified and listed? • Are the owned equipment/facilities managed in accordance with relevant procedures?	7.1.3	Infrastructure
		8.5.1.5	Preventive Maintenance

5M1E	Review Items	Linked DQMS Requirement	
Material	• Do the materials used in the painting process conform to the contractual requirements? • Are coating materials managed in accordance with relevant procedures? • Are certificates for coating materials verified and managed? • Is it possible to verify whether the certificates for coating materials have been falsified or tampered with?	8.1.4	Prevention of Counterfeit or Tampered Items
		8.1.5	Prevention of Use of Suspect or Unapproved Parts
		8.4.1	Control of External Providers
		8.4.2.1	Verification of Supplied Processes, Products, or Services
		8.5.4.1	Storage and Inventory Control
Method	• Do painting process documents reflect contract requirements, supplier instructions, and technical data? • Are painting inspection results documented and maintained according to relevant procedures? • Are nonconforming or rejected outputs analyzed and corrected?	8.1.1	Product and Process Acceptance Criteria
		8.5.1	Control of Production and Service Provision
Environment	• Are painting environmental requirements defined in relevant technical documents? • Are environmental conditions recorded and traceable during painting?	8.5.1	Control of Production and Service Provision
Measurement	• Are the measuring instruments related to the welding process identified (listed)? • Are the management and calibration of measuring instruments related to welding carried out in accordance with the relevant procedures? (by an authorized organization)	7.1.5	Monitoring and Measuring Resources

Table 7. Developed Painting Process Review Checklist(Field Verification)

5M1E	Review Items	Linked DQMS Requirement
Man	• Are personnel assigned to on-site work from the contractor's workforce or approved subcontractors?	Same as Table 6
Machine	• Do the equipment/facilities installed or used on-site match the identified and listed production equipment/facilities?	Same as Table 6
Material	• Are specified materials, such as paint, thinner, and hardener, used on-site in accordance with contract requirements and supplier instructions? • Are coating materials stored in accordance with relevant procedures? • Is traceability of coating materials used on-site maintained?	Same as Table 6
Method	• Are mixing ratios, curing times, and other coating-specific requirements followed during painting?	Same as Table 6
Environment	• Are required environmental conditions maintained during painting?	Same as Table 6
Measurement	• Do measuring instruments used on-site match the identified and listed instruments for the painting process?	Same as Table 6

3.4. 프로세스 점검 실효성 확보방안

프로세스 점검의 실효성 확보를 위해, 각 체크리스트의 질문 항목별로 국방품질경영체제 인증 요구조항과의 연계를 명시하였다. 점검 과정에서 식별된 부적합이나 시정조치 사항은 추후 국방품질경영체제 인증심사(사후, 갱신 등)에 피드백되도록 계획되었다. 이는 국방품질경영체제 인증심사가 단순한 문서 중심 심사에서 벗어나, 실제 공정 수행에서의 취약점과 관리 상태에 대한 객관적 데이터를 기반으로 한 실효성 있는 심사로 전환되는 기반을 마련하는 데 목적이 있다. 즉, 본 프레임워크는 국방품질경영체제 인증의 실질적 가치를 높이는 도구로 기능할 수 있다. 더불어, 수집된 데이터를 공정별, 조선소별로 누적 분석함으로써, 반복적으로 문제가 식별되는 항목이나 체계업체별 취약 공정에 대해 관리강화를 유도하고, 반대로 안정적인 품질이 확보되는 항목에 대해서는 점검 주기를 조정하여 관리 효율성을 높일 수 있다.

4. 적용 결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 프로세스 검토 체크리스트는 국방품질경영체제 인증을 보유한 3개 조선소의 5대 핵심 공정에 실제 적용되었다. 적용 대상은 용접, 도장, 비파괴검사, 배관 제작·설치, 전선 제작·설치 공정이며, 각 조선소가 보유한 절차서와 품질보증계획을 기준으로 초기 프로세스 검토와 현장 확인을 수행하였다. 초기 프로세스 검토는 공정 착수 전 절차서, 작업자 자격, 장비 상태, 자재 관리, 검사·계측 수단, 작업방법 등 공정 투입조건의 적절성을 확인하는 데 중점을 두었다. 현장 확인은 초기 검토에서 확인된 조건이 실제 작업 현장에서 일관되게 이행되는지를 확인하는 방식으로 수행하였다. 그 결과, 제안된 프로세스 검토체계는 기존의 제품 중심 검사만으로는 사전에 식별하기 어려운 잠재적·시스템적 공정 리스크를 확인하는 데 효과가 있음을 확인하였다.

본 연구에서 식별한 주요 프로세스 리스크와 개선 내용은 Table 8과 같다. Table 8의 사례들은 입력

Table 8. Major Process Risks and Preventive Actions

Category	Identified Risk and Corrective Action
Case 1 Painting	**[Method]** The actual hardener mixing ratio was controlled by weight, whereas the procedure specified the ratio by volume. This created a risk that workers could misinterpret the required mixing amount. Therefore, the procedure was revised to align with the actual work method, preventing mixing errors, coating curing defects, reduced adhesion, and potential repainting.
Case 2 Piping installation	**[Material / Method]** Material markings on pipe surfaces were removed during cutting and fabrication, which made visual identification difficult and resulted in the mixing of visually similar lower-grade pipe materials. To prevent recurrence, a portable metal composition analyzer was introduced, field material verification procedures were added, and storage areas were separated by material grade.
Case 3 Welding	**[Machine / Measurement]** During the initial process review before welding, some welding machines with expired calibration periods were found in the work area. Accordingly, the use of welding machines was restricted unless calibration validity was confirmed, preventing reduced weld reliability, additional inspection, and potential rework.
Case 4 Welding/ Painting	**[Material / Method]** Verification of certificates, consistency between certificates and actual materials, and traceability management were insufficient during the receipt and issue of welding consumables and coating materials. Therefore, certificate verification, material consistency checks, issue-history control, and lot traceability were strengthened to prevent expansion of the affected scope, delayed root-cause analysis, and extensive re-verification.

요소 중 하나의 단순한 누락이 아니라, 공정 투입요소 간의 불일치가 품질 리스크로 확대될 수 있음을 보여준다. 예를 들어 도장 공정의 경화제 배합 단위 불일치는 절차서상 작업방법과 실제 작업조건 간의 불일치에 해당하며, 작업자가 이를 오인할 경우 도막 품질 저하와 재도장으로 이어질 수 있다.

배관 설치 공정의 재질 마킹 소실 문제는 자재 식별, 절단·가공 방법, 현장 확인 절차가 상호 연계되지 않을 때 발생하는 리스크로, 최종 외관검사만으로는 재질 오적용 여부를 충분히 확인하기 어렵다. 또한 교정 유효성이 확보되지 않은 용접기의 배치는 특정 장비 하나의 관리 문제에 그치지 않고, 해당 장비로 수행된 용접부 전체의 검사 신뢰성과 직결된다.

따라서 본 연구에서 식별된 사례는 표면적으로는 절차서 오류, 장비 교정 미흡, 자재 추적성 부족 등 기본적인 관리사항으로 보일 수 있으나, 그 영향은 단일 공정 또는 단일 제품에 한정되지 않는다. 특히 함정 건조공정은 동일한 입력조건을 기반으로 반복적으로 수행되며, 검사물량이 많기 때문에, 초기 투입조건이 부적절할 경우 그 영향은 다수의 작업물량과 검사물량으로 확대될 수 있다. 이러한 점에서 제안된 프로세스 검토는 단순 부적합 사항 식별에서 더 나아가, 품질문제로 확대되기 전 단계에서 잠재 손실을 사전에 차단하는 예방적 품질보증 수단이 될 수 있다.

더불어, 본 연구에서는 프로세스 검토의 정량적 효과를 검토하기 위해, 현장 적용 과정에서 식별된 오류사항을 품질보증계획상 관련 검사 항목과 연계하였다. Table 9의 사례별 검사 대상 건수는 해당 함정건조 사업의 관련 공정 검사계획에서 식별된 검사 수를 의미한다. 즉, 프로세스 검토에서 확인된 부적절한 입력조건이 실제 작업에 반영되었을 경우 영향을 받을 수 있는 검사 대상 범위를 사례별로 도출한 것이다.

다만 작업물량 및 검사에 대한 품셈은 조선소와 계약업체마다 상이하고, 공개되지 않은 내부 자료에 해당하여 직접적인 접근이 제한된다. 따라서 본 연구에서는 재작업비용을 실제 금액으로 산정하지 않고, 검사 대상 건수를 기준으로 간접 산출이 가능하도록 산정식을 제시하였으며 제시된 사례별 검사 건수와 산정식을 Table 9에 나타내었다.

Table 9. Quantitative Estimation Structure of Potential Rework and Re-inspection

Case	Quantitative Estimation Criteria	Number of Inspection Targets
Case 1	Coating work areas or inspection targets requiring repainting or additional verification due to hardener mixing-ratio errors	37
Case 2	Pipe inspection targets with unidentified material specifications or potential mixing of lower-grade materials	252
Case 3	Weld inspection targets potentially affected by welding machines with expired calibration validity	78
Case 4	Material usage scope requiring verification due to insufficient certificate verification, material consistency checks, or traceability control	N/A

※ **Rework Cost** = No. of Inspection Targets × (Rework M/H per NC item + M/H per Re-inspection)
※ NC item: Non-conformitng item

Table 9에서 제시한 각 사례별 검사 대상 건수는 해당 부적합 입력조건과 연계될 수 있는 검사 범위와 건수를 의미한다. 특히 Case 2는 해당 재질이 사용된 계통으로 범위를 한정하였음에도, 배관 설치물량과 검사·작업 횟수가 많아 총 252건의 검사 대상이 식별되었다. 이는 배관 제작 및 설치 공정에서 재질 식별 오류가 발생할 경우 영향 범위가 넓게 확대될 수 있음을 보여준다. 반면 Case 4는 용접재료 및 도료의 성적서·일치성·추적성 관리 미흡에 관한 사항으로, 특정 검사 항목의 재작업 건수로 직접 환산하기에는 제한이 있다. 그러나 자재 적합성 문제가 발생할 경우 동일 로트 또는 동일 기간에 사용된 자

재 전반으로 품질 영향이 확산될 수 있어, 품질보증 관점에서는 매우 중요한 관리요소이다. 따라서 본 사례는 정량 산정 대상에서는 “해당 없음”으로 제시하였으나, 부적절한 자재 사용을 예방하고 문제 발생 시 영향 범위 확정과 후속 조치를 효율화하기 위한 핵심적인 시스템적 관리 사례로 포함하였다.

Table 9의 검사 대상 건수에 재작업 품셈과 재검사 품셈을 적용하면 전체 재작업 비용과 추가 검사 부담을 추정할 수 있다. 다만 본 산정식은 재작업 조치와 재검사에 필요한 최소 수준의 품셈만을 반영한 것이다. 실제 현장에서는 공정 지연에 따른 대기시간, 추가 검사 확대, 품질·관리 인력 투입, 자재 손실 및 일정 영향 등이 추가될 수 있으므로 실제 재작업 비용은 더 클 가능성이 있다. 향후에는 유사 함정건조 사업 간 제도 적용 전·후의 공정 부적합률, 재작업 대상 건수, 추가 검사 건수 등을 비교하여 정량적 효과를 분석할 예정이다.

5. 결 론

본 연구는 함정 건조 산업에 반복적으로 적용되는 공정들을 대상으로 공정 착수 전 단계에서부터 품질 리스크를 사전에 점검하고 통제할 수 있는 프로세스 검토체계를 연구하고, 이를 실제 조선소 현장에 적용하여 예방 중심 품질보증체계의 실행 가능성과 실효성 확보 방안을 제시하고자 하였다. 본 연구의 주요 결과 및 기여는 다음과 같다.

1. 국내 함정건조 조선소의 공통 공정(용접, 도장, 비파괴검사, 배관 설치, 전선 설치)에 대하여, 품질경영의 핵심 원칙인 ‘프로세스 접근법’을 구현하기 위한 구조화된 프레임워크를 정립하였다. 5M1E 요소를 기준으로 점검항목을 구성하고, 초기 프로세스 검토(적절성 평가)와 현장 이행 점검(충족성 확인)의 이중 구조를 적용함으로써, 문서 기반 적합성뿐만 아니라 현장 실행력까지 포함하는 심층적인 프로세스 품질점검체계를 구축하였다.

2. 체크리스트를 국방품질경영체제 및 ISO 9001 요구사항과 연계하여 구성하였으며, 현장 적용을 통해 장비 및 자재 관리 분야의 잠재적이고 시스템적인 취약 요소를 식별하고 개선하였다. 이는 본 프레임워크가 사후 검사 방식으로는 발견하기 어려운 근본 원인 수준의 리스크를 효과적으로 찾아낼 수 있음을 입증한다.

3. 본 연구에서 도출된 프로세스 검토 결과는 국방품질경영체제 사후관리 및 갱신심사에 객관적인 데이터로 환류될 수 있다. 이를 통해 국방품질경영체제 심사가 기존의 문서 중심 검토에서 벗어나, 조직의 실제 공정 수행 능력을 평가하는 증거 기반의 심사로 전환될 수 있는 가능성을 확인하였다. 이는 국방품질경영체제 인증제도의 실질적 가치와 신뢰성을 강화하는 데 기여할 수 있다.

4. 향후 점검 이력 데이터가 지속적으로 누적될 경우, 공정별 및 조선소별로 반복적으로 식별되는 품질관리 취약 요소를 정량적으로 분석하고, 해당 결과를 바탕으로 중점 관리 대상 항목을 선별하거나 점검 주기 및 관리 자원 배분의 우선순위를 설정하는 데이터 기반 품질경영체계로 확장할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 문서 중심의 정형화된 점검체계를 넘어, 실제 현장에서의 품질관리 이행 수준을 반영한 실효성 중심의 품질관리 방식이 정착될 수 있을 것이다.

참고문헌

1 Hwang, K., & Kim, J. (2022). A study for improving quality management system of naval ships to enhance safety. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 59*(6), 432-438. https://doi.org/10.3744/SNAK.2022.59.6.432

2 Park, B. Y. (2023). *A digital quality control method for ships based on point cloud data considering 3D scanning*

characteristics [Doctoral dissertation, Mokpo National Maritime University]. RISS.

3 Lee, Y., Choi, J., Yeom, H., Kim, Y., & Kim, J. (2018). A study on process review elaboration for rotorcraft special process. In *Proceedings of KIIT Conference* (pp. 246–248).

4 Baek, T., O, D., Jeong, Y., Lee, P., & Kwon, Y. (2018). Analysis of core technologies and fields for smartization of shipbuilding processes in shipyards [Special issue]. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, 55*(4), 9–15.

5 Lee, S. (2019). *A study on preventing human errors of structural quality inspector for ship's accommodation* [Master's thesis, University of Ulsan]. RISS.

6 Seo, M.-S., & Lee, Y.-M. (2022). Effect research through application of quality control process in the weapon system's development stage. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23*(3), 154–159. https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.3.154

7 Defense Contract Management Agency. (2020). DCMA Instruction 2303: Surveillance (Change 1). U.S. Department of Defense.

8 Kyung, J.-H. (2014). A study on maintaining the certificate and improvement schemes of the ISO 9001 quality management system for shipbuilding and offshore industrial subcontractors in South Korea [Master's thesis, University of Ulsan]. RISS.

9 Naval Sea Systems Command. (2023). *SUPSHIP operations manual(SOM) (S0300-B2-MAN-010): Chapter 9 — Contract administration quality assurance program (CAQAP)*. U.S. Department of the Navy.

10 Shin, B.-C., Hwang, W.-Y., Ahn, N.-S., Kim, D.-H., Lee, G.-L., Jang, B.-K., & Byun, J.-H. (2016). Suggestions on enhancing the effectiveness of government quality assurance activities for military supplies in production stage. *Journal of Korean Society for Quality Management, 44*(1), 153–166. https://doi.org/10.7469/JKSQM.2016.44.1.153

11 박효진, 민일홍, & 오현석. (2022). 프로세스 검토를 통한 함정 FRP 구조물 정부품질보증활동 효율화 사례. *한국품질경영학회 추계학술발표논문집*(p. 95).

12 Jin, D., Ma, D., Zhang, Y., Yang, B., Wang, D., & Guo, L. (2022). Introduction of '5M1E' mode of quality management in chemical analysis laboratory of special equipment. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Creative Industry and Knowledge Economy (CIKE 2022)* (pp. 1–4). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/aebmr.k.220404.001

13 Performance Review Institute. (2023). *NADCAP supplier accreditation program* [Brochure].

국방품질연구논집 Vol. 8 No. 1 : 352-367, Jun. 2026 https://doi.org/10.23199/jdqs.2026.8.1.031

생성형 AI 기반 군용 카무플라주 패턴 디자인 개발 및 평가

ISSN 2671-4744(Print)
ISSN 2671-9673(Online)

Image Generative AI-Based Design and Evaluation of Military Camouflage Patterns

손대성, Daeseong Son
충남대학교, 의류학과, 학부생
Undergraduate student, Department of Clothing and Textiles, Chungnam National University

강다예, Dayae Kang
충남대학교, 의류학과, 박사
PhD, Department of Clothing and Textiles, Chungnam National University

이정순†, Jungsoon Lee
충남대학교, 의류학과, 교수
Professor, Department of Clothing and Textiles, Chungnam National University

Abstract

This study investigates the potential of generative artificial intelligence (AI) for developing terrain-adapted camouflage patterns and examines the relationship between visual suitability and actual camouflage performance. Camouflage images were generated using Midjourney, based on four representative terrain types in South Korea: mountainous, farmland, coastal, and complex environments. The generated patterns were first evaluated by apparel experts on the basis of design suitability and terrain representation and subsequently assessed by ROTC cadets for camouflage performance using real environmental background images. Existing military camouflage patterns were included in this comparison. The results demonstrated that generative AI can effectively produce diverse pattern candidates that reflect terrain-specific color distributions and structural features. Mountain-based patterns exhibited the highest level of terrain representation, whereas farmland and coastal patterns exhibited relatively low distinctiveness. However, an evaluation of camouflage performance revealed that visually, terrain-adapted patterns did not always achieve superior concealment. Certain farmland patterns with high visual suitability showed limited camouflage effectiveness, indicating a discrepancy between perceived appropriateness and functional performance. These findings suggest that camouflage effectiveness is influenced by color matching, pattern structure, and visual disruption mechanisms. Generative AI is therefore a valuable tool for rapidly generating design alternatives; however, additional validation considering human visual perception is required to ensure practical camouflage performance.

keywords : generative AI, AI pattern generation, camouflage design, military uniform, terrain adaptation pattern

† Corresponding Author : Jungsoon Lee
Tel : +82-42-821-6830, email : jungsoon@cnu.ac.kr
Chungnam National University, 34134, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea
Received April 6th. 2026 Revised May 13th. 2026 Accepted June 30th. 2026 Published June 30th. 2026

1. 서 론

군복의 전장 생존성과 작전 수행 능력 향상이 점차 중요해짐에 따라, 군용 의복의 기능성 향상과 설계 효율화를 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 기존 연구에서는 방호 성능을 유지하면서 동작 적응성을 향상시키는 의복 설계, 착용 적합성을 개선하기 위한 맞음새 연구, 단열 및 환경 적응 기능 향상을 위한 소재 및 염색 기술 적용, 그리고 국가별 지형 특성에 따른 위장 패턴 분석 등이 보고된 바 있다[1-4]. 이러한 연구들은 군용 의복이 단순한 피복을 넘어 생존성과 직결된 기능성 시스템으로 발전하고 있음을 보여준다.

카무플라주(camouflage)는 대상의 색상과 형태를 주변 환경과 유사하게 만들어 시각적 식별을 어렵게 하는 위장 기법으로, 군복 설계에서 핵심적인 요소이다[5-6]. 이는 자연계 생물의 보호색 원리에서 착안된 개념으로, 인간의 시각 인지 체계를 교란시켜 대상의 탐지 및 식별을 지연시키는 역할을 한다. 초기 카무플라주 패턴은 자연 환경의 색채를 단순 모사하는 방식으로 시작되었으며, 제1차 세계대전 당시에는 군함, 항공기, 전차 등 군사 장비의 위장을 목적으로 활용되었다[7]. 제2차 세계대전을 거치면서 군복을 포함한 다양한 군사 장비에 위장 패턴이 본격적으로 적용되었으며, 독일군의 다색 헬멧 도색이나 눈밭 환경에서 사용된 백색 위장복과 같은 사례는 환경 특성에 따른 위장 전략의 초기 형태로 볼 수 있다[8].

전장 환경의 복잡성이 증가함에 따라 위장 패턴은 점차 정교한 설계 방식으로 발전하였다. 특히 1990년대 이후에는 픽셀 단위의 분절 구조를 활용한 디지털 위장 패턴이 도입되면서 시각적 은폐 효과가 크게 향상되었다. 대표적으로 캐나다군의 CADPAT (Canadian Disruptive Pattern)은 작은 사각형 픽셀을 불규칙하게 배치하여 대상의 윤곽선을 분절시키고 시각적 인식을 지연시키는 효과를 나타내며, 이를 계기로 다양한 국가에서 디지털 위장 패턴이 군복에 적용되었다[9-11]. 대한민국 또한 2011년 기존의 얼룩무늬 패턴을 개선한 5도색 디지털 전투복을 도입하여 시각적 은폐 효과 향상을 도모하였다[12]. 이러한 흐름은 위장 패턴이 단순한 색상 조합을 넘어 형태 인지 및 시각 정보 처리 메커니즘을 고려한 설계 대상으로 발전하고 있음을 시사한다.

위장 패턴은 국가별 지리적·환경적 특성과 밀접하게 연관되어 있으며, 색상 분포 및 패턴 구조는 해당 지형의 시각적 특성을 반영한다[4,13]. 예를 들어 사막 지형에서는 베이지 및 갈색 계열, 산림 지형에서는 녹색 계열 색상이 주로 사용되며, 이는 배경 환경과의 색상 유사성을 극대화하기 위한 전략이다. 대한민국의 경우 약 64%가 산지로 구성되어 있으면서도 해안 및 농경지 지형이 혼재된 복합 환경을 가지므로[14], 다양한 지형 조건에서 효과적으로 적용 가능한 위장 패턴 설계가 요구된다.

그러나 기존의 위장 패턴 개발 방식은 환경 분석, 색채 추출, 패턴 설계, 시제품 제작 및 반복 검증으로 이어지는 다단계 과정으로 구성되어 있어 시간과 비용이 많이 소요되며, 설계자의 경험에 의존하는 경향이 크다는 한계를 가진다[4]. 이러한 방식은 다양한 설계 대안을 충분히 탐색하는 데 제약이 있으며, 복잡한 작전 환경에 최적화된 패턴 도출을 어렵게 만든다.

최근 생성형 인공지능(generative artificial intelligence)은 텍스트 기반 입력을 통해 다양한 이미지를 자동으로 생성할 수 있는 기술로, 디자인 및 시각 콘텐츠 생성 분야에서 빠르게 활용이 확대되고 있다[15-17]. 특히 이미지 생성형 AI는 사용자가 정의한 조건에 따라 다양한 시각적 결과를 단시간 내에 생성할 수 있는데 이러한 특성은 복잡한 환경 조건을 고려해야 하는 카무플라주 패턴 설계에 있어 유용한 도구로 활용될 수 있다.

그러나 기존 연구들은 주로 생성형 AI(Artificial Intelligence)를 활용한 이미지 생성 가능성이나 시각적 적합성 평가에 초점을 두고 있으며, 생성된 패턴이 실제 환경에서 얼마나 효과적인 위장성능 가지는지에 대한 검증은 상대적으로 부족한 실정이다[18]. 특히 지형 특성을 잘 반영한 것으로 평가된 패

턴이 실제 시각적 은폐 효과에서도 우수한지에 대한 비교 분석은 충분히 이루어지지 않았다. 또한, 단일 지형을 기반으로 설계된 패턴과 다양한 지형 요소를 통합한 복합 패턴 간의 위장 효과 차이에 대한 연구 역시 제한적이다[19].

따라서 본 연구에서는 생성형 인공지능을 활용하여 산지, 농경지, 해안사구 및 복합 지형을 반영한 카무플라주 패턴을 생성하고, 생성된 패턴의 시각적 지형 적합성과 시각적 은폐 효과를 비교·분석하고자 한다. 특히 지형 특성 반영도와 시각적 은폐 효과 간의 관계를 검토함으로써, 시각적으로 적합한 패턴이 실제 위장 효과로 이어지는지 여부를 규명하고자 한다. 이를 통해 생성형 AI 기반 카무플라주 패턴 설계의 활용 가능성과 한계를 동시에 제시하고, 향후 효율적인 위장 패턴 설계를 위한 방향을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 생성형 인공지능을 활용하여 특정 지형에 적합한 카무플라주 이미지를 생성하고 해당 이미지의 군용 위장복으로의 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 생성된 이미지에 대하여 의류학 전공자를 대상으로 의복패턴으로서의 적절성과 지형 적합성을 평가하였다. 또한 학군사관후보생(Reserve Officer Training Corps, ROTC)을 대상으로는 생성 이미지의 위장 적합성과 기존 육군복의 위장 적합성을 평가하였다. 얻어진 결과를 바탕으로 생성형 인공지능 기반 지형 맞춤형 카무플라주 생성의 가능성을 분석하였다.

2.1. 지형 맞춤형 카무플라주 이미지 생성

카무플라주 이미지 생성을 위하여 산지, 해안사구, 농경지, 복합 지형의 네 가지 대표 지형을 선정하였다. 이미지 생성 과정에서 각 지형의 시각적 특징이 반영될 수 있도록 지형별 핵심 색채와 배경 특성, 위장복 패턴으로써의 질감을 포함하는 프롬프트를 구성하였고 Table 1과 같다. 이를 Midjourney의 '/imagine'명령어에 입력하여 이미지를 제작하였다. Midjourney는 직전에 출력된 결과를 참고하

Table 1. Prompts used for generating terrain-adapted camouflage patterns using Midjourney

Terrain	Prompt
Mountain	camouflage pattern designed for mountainous terrain in South Korea, featuring terrain-matching dark green and rock gray colors, non-reflective 2D organic shapes, flat 2D surface, camouflage pattern only, seamless printed surface, no cloth, no folds, no fabric, no texture, no shading, no lighting, optimized for concealment in forested rocky highlands --ar 1:1
Farmland	camouflage pattern designed for agricultural plains in South Korea, featuring terrain-matching soft green and brownish soil colors, non-reflective 2D organic shapes, flat 2D surface, camouflage pattern only, seamless printed surface, no cloth, no folds, no fabric, no texture, no shading, no lighting, optimized for concealment in flat open farmand environment --ar 1:1
Coastal	camouflage pattern designed for coastal sand dune terrain in South Korea, featuring terrain-matching light beige and pale olive colors, non-reflective 2D organic shapes, flat 2D surface, camouflage pattern only, seamless printed surface, no cloth, no folds, no fabric, no texture, no shading, no lighting, optimized for concealment in dry sandy dune environments --ar 1:1
Complex	camouflage pattern designed for mountainous terrain, agricultural plains, and coastal sand dune terrain in South Korea, featuring terrain-matching dark green and rock gray, soft green and brownish soil, light beige and pale olive colors, non-reflective 2D organic shapes, flat 2D surface, camouflage pattern only, seamless printed surface, no cloth, no folds, no fabric, no texture, no shading, no lighting, optimized for concealment in forested rocky highlands, flat open farmland environments, and dry sandy dune environments --ar 1:1

여 다음의 이미지를 생성하므로 첫 번째 결과를 제외한 이미지 도출 작업을 5번 반복하여 각 지형별로 총 20가지의 이미지를 확보하고 이를 설문 평가용 자극물로 활용하였다.

2.2. 의복패턴으로의 활용 적합성 평가

AI 기반으로 생성된 카무플라주 패턴 이미지의 활용 가능성을 검토하기 위해 의류학 전공자 20명을 대상으로 설문을 실시하였다.

생성된 이미지가 의복패턴으로서 적절한지 평가하기 위해 이미지 생성 회차별 4개의 이미지 중 의복패턴으로서 가장 적절하다고 판단되는 1개의 이미지를 선택하도록 하였다. 가장 많이 선정된 이미지를 다음 설문에 사용하였으며 1개 이미지 이상이 동일한 인원이 선택하였을 경우 1개 이상의 이미지를 선정하였다.

선정된 이미지의 패턴 구조(모양, 윤곽, 분포 색상조합)가 산지, 농경지, 해안사구, 통합 지형 등 각 지형의 특성을 반영하여 군용 위장복에 사용하기에 적합한지를 매우 적합한 경우 7점, 전혀 적합하지 않을 경우 1점으로 하여 7점 척도로 평가하여 의복패턴으로서의 활용 가능성과 시각적 지형 적합성을 평가하였다. 또한, IBM SPSS Statistics를 이용하여 각 패턴별 평균과 표준편차를 산출하고 동일 지형 내 생성 패턴 간 평가 점수에 차이가 있는지 확인하기 위해 일원분산분석(One-way ANOVA)를 실시하였다. 종속변수는 평가 점수로 설정하였고 독립변수는 패턴으로 설정하였다. 통계적 유의수준은 $p < .05$로 설정하였으며 패턴 간 차이의 실질적 크기를 확인하기 위해 효과 크기인 에타제곱(η^2)을 함께 제시하였다.

2.3. 시각적 위장 효과 평가

시각적 은폐 효과 평가는 Han (2019)의 방법을 참고하여 산지, 농경지, 해안사구의 환경에서 AI 기반으로 생성된 카모플라주 패턴과 현재 사용되는 군복의 패턴을 환경사진에 배치하고 설문조사를 실시하였다. 또한 AI 기반으로 생성된 이미지의 시각적 은폐 효과를 검증하기 위해 기존 군복 패턴의 성능을 평가하여 비교하였다. 산지와 농경지는 육군복 패턴을, 해안사구는 육군복과 해병대 군복 패턴을 사용하였다. 평가를 위한 산지, 농경지, 해안사구 환경 이미지는 지형별로 100장씩 NAVER와 Google 검색엔진을 통해 2026년 1월 28일부터 2월 3일까지 산지 지형은 '산', '등산', '등산 브이로그', 농경지 지형은 '평지', '평탄 지형', '시골 평지', '평지 들판 풍경', '김제 평야', '평야 산책로', 해안 지형은 '한국 해수욕장', '해변 모래 언덕', '태안 신두리해안사구', '한국 해안사구', '해안사구 브이로그', '한국 해안 모래 언덕'의 키워드 검색을 통해 수집하였다. 그 중 우리나라 지형의 산지 특성인 나무, 낙엽, 흙, 바위 등의 요소, 농경지 특성인 지평선과 농지의 요소, 해안사구 특성인 모래 요소를 포함하면서 위장환경에 적합한 지형별 3가지를 Figure 1과 같이 선정하여 사용하였다.

설문은 학군사관후보생 40명을 대상으로 해당 지형 사진에 배치된 카무플라주 이미지의 위장 정도를 평가함으로써 AI 생성 카무플라주 패턴의 위장 기능과 군사적 활용 가능성을 살펴보고자 하였다. 선별된 패턴들은 PowerPoint 2019 프로그램에서 2×2cm로 조정하여 부드러운 가장자리 1.5p를 적용하였다. AI로 생성된 위장 패턴은 실제 환경 이미지에 Figure 2과 같이 배치하여 삽입한 후 위장 패턴이 주변 배경환경에 얼마나 잘 은폐되는 정도를 매우 잘 숨겨졌을 경우 7점을, 전혀 숨겨지지 않은 경우 1점으로 하여 7점 척도로 평가하였다. 이후 패턴 간 시각적 은폐 효과의 차이를 검증하기 위해 각 지형 조건별로 일원분산분석을 수행하였다. 종속변수는 각 배경에서의 패턴별 평균 점수로 설정하였으며 독립변수는 패턴 유형으로 설정하였다. 통계적 유의수준은 $p < .05$로 설정하였으며 효과 크기인 에타제곱(η^2)을 산출하였다.

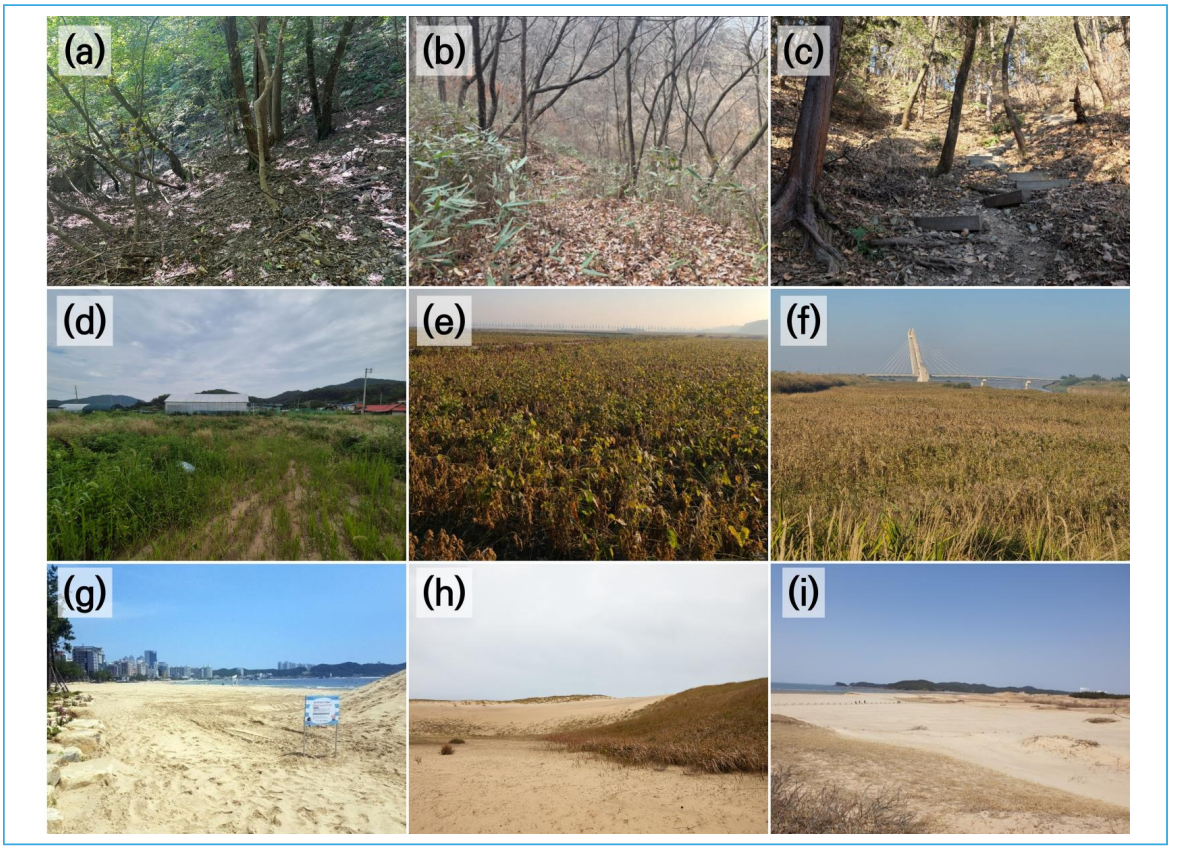


Figure 1. Representative environmental images used for camouflage performance evaluation: (a–c) mountainous terrain, (d–f) farmland terrain, and (g–i) coastal terrain in South Korea

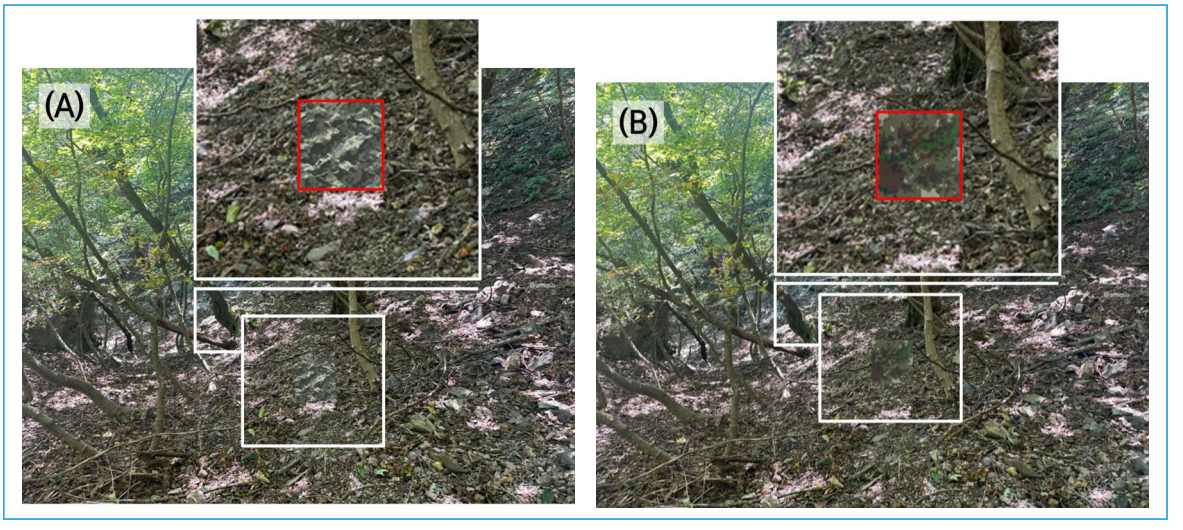


Figure 2. Example stimuli used for camouflage performance evaluation: (A) AI-generated camouflage pattern and (B) current South Korean military camouflage pattern

3. 결과 및 고찰

3.1. 지형별 카무플라주 AI 이미지

3.1.1. 산지 지형 이미지의 특징

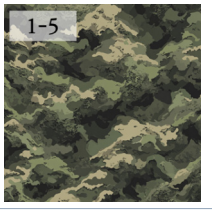
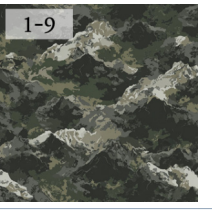
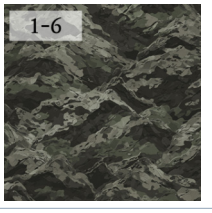
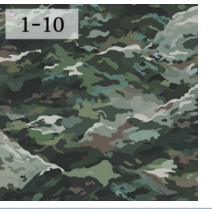
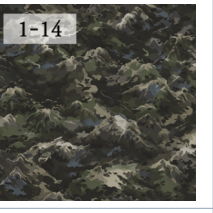
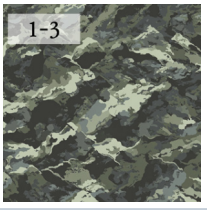
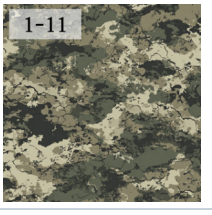
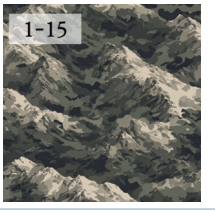
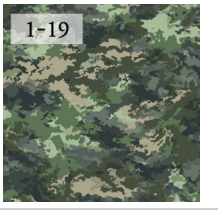
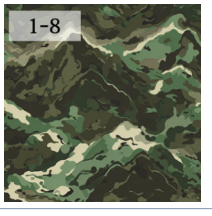
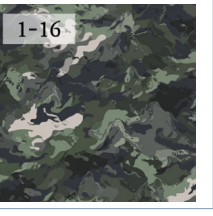
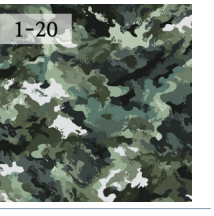
산지 지형을 대상으로 생성된 카무플라주 패턴은 Table 2와 같다.

전반적으로 산림의 암석이 혼재된 환경의 암녹색(dark green), 회색(gray) 계열의 색채 구성이 주요하게 나타났다. 산지의 식생과 암석, 토양 환경을 반영한 결과로 해석되며 녹색 계열이 전체 패턴의 기반이 되며 회색이 보조적으로 분포하여 자연 환경과 유사한 색 조합을 형성한 것으로 분석된다. 또한 특정 영역에 색상이 집중되지 않고 전체적으로 분산된 형태로 배치되었고 명도의 대비가 크지 않아 색상 간 전환이 급격하지 않으므로 시각적인 인지를 분산시킬 것으로 보인다.

형태적으로는 경계가 명확하게 구분되지 않는 연속적인 형태를 보인다. 이러한 형태는 자연 지형의 불균일한 표면 구조를 반영하면서 시각적 인지의 분산을 유도하는 카무플라주 패턴의 특징에 부합하는 것으로 판단된다. 전반적으로 평면적인(flat) 구성이 유지되었으나 1-1의 이미지는 산악 지형을 연상시키는 질감 표현이 나타났다. 이는 프롬프트에서 질감과 음영을 제한하였음에도 불구하고 생성형 AI가 지형적 특성을 반영하려는 과정에서 질감 요소를 일부 포함한 결과로 볼 수 있다.

반복생성 결과로는 산지 지형 이미지는 기본적인

Table 2. AI-generated camouflage patterns for mountain terrain across five iterative generations

Image generation count				
1st	2nd	3rd	4th	5th
 1-1	 1-5	 1-9	 1-13	 1-17
 1-2	 1-6	 1-10	 1-14	 1-18
 1-3	 1-7	 1-11	 1-15	 1-19
 1-4	 1-8	 1-12	 1-16	 1-20

색채와 형태적 특성을 유지하면서 세부 패턴 구성에서는 다양한 변형이 나타났다. 이는 동일한 조건에서도 다양한 시안을 도출할 수 있음을 의미하며 산지 환경을 반영하는 카무플라주 패턴을 효율적으로 생성할 수 있음을 알 수 있다.

3.1.2. 농경지 지형 이미지 특징

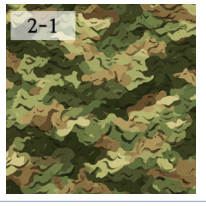
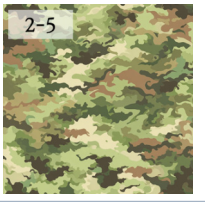
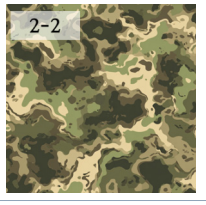
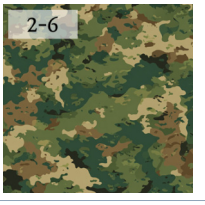
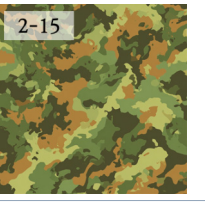
농경지 지형을 대상으로 생성된 카무플라주 패턴은 Table 3과 같다.

연녹색(soft green)과 갈색(brownish soil color)의 토양색 계열이 주를 이루어 농경지 지형의 색 특성을 반영한 결과를 보였다. 산지 지형에 비해 명도 대비가 완만하며 채도가 낮은 색의 분포를 보여 특정 색상이 과도하게 강조되지 않는 색채 구성이 나타났다. 농경지 지형도 역시 색상 구성이 전체적으로 분산되어 주목되지 않아 윤곽을 흐리게 하는 시각적 효과를 가질 것으로 판단된다.

형태적 측면에서는 완만하고 넓게 확장되는 듯한 패턴 구조가 관찰되었다. 패턴의 형태 간 경계는 부드럽고 연속적으로 이어지며 급격한 분절보다는 완만한 곡선 형태를 중심으로 구성되어 평탄한 지형의 특성이 반영되었다. 또한 평면적인 형태가 유지되어 질감 표현이 산지 지형에 비해 적게 나타나 단순화된 구조를 형성하였으므로 프롬프트에서 설정한 평면적 2D 조건(flat 2D surface)과 질감 제거 조건(no fabric, no texture)이 안정적으로 반영되었다고 분석된다.

반복 생성 결과, 농경지 지형 카무플라주 이미지는 낮은 채도가 유지되면서 세부 패턴의 형태에서는 다양한 변형이 나타나는 경향을 보인다. 카무플라주

Table 3. AI-generated camouflage patterns for farmland terrain across five iterative generations

Image generation count				
1st	2nd	3rd	4th	5th
 2-1	 2-5	 2-9	 2-13	 2-17
 2-2	 2-6	 2-10	 2-14	 2-18
 2-3	 2-7	 2-11	 2-15	 2-19
 2-4	 2-8	 2-12	 2-16	 2-20

패턴으로서 구조적으로 안정적으로 유지되어 농경지 환경을 반영하는 카무플라주 패턴 생성이 가능함을 시사한다.

3.1.3. 해안사구 지형 이미지의 특징

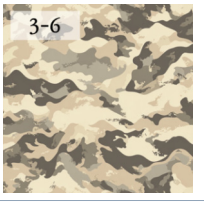
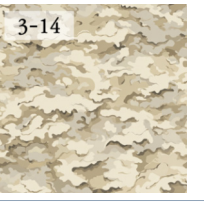
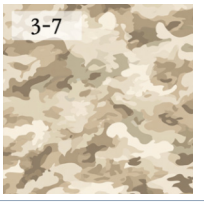
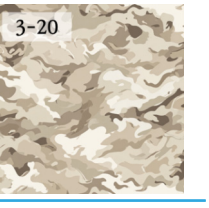
해안사구 지형을 대상으로 생성된 카무플라주 패턴은 Table 4와 같다.

전체적으로 밝은 베이지색(light beige)와 연한 올리브색(pale olive) 계열을 중심으로 하여 사구 지형의 모래와 희박한 식생 환경의 색 특성을 반영하였다. 낮은 채도와 높은 명도를 기반으로 한 색 분포를 보이며 어두운 색의 사용은 비교적 적게 나타나 밝은 색의 환경에 적합한 색채 구성을 보인다.

해안사구 지형의 이미지 또한 패턴의 색상 간 뚜렷한 대비 없이 전환이 완만하고 점진적으로 이루어져 시각적으로 특정 색에 주목되지 않는다.

형태적으로는 사구 지형의 완만한 곡선과 모래의 흐름, 낮은 색상대비를 반영한 것으로 분석된다. 상대적으로 작은 크기의 패턴 요소가 분포하는 경향을 보이며 산지와 농경지에 비해 곡선과 흐르는 듯한 표현이 두드러져 분절성이 약하고 넓게 확산되는 형태를 보인다. 음영이 없는 조건(no shading)을 설정하였음에도 불구하고 3-3, 3-4, 3-9, 3-18과 같은 일부 이미지에서는 패턴 요소의 맞닿은 부분에 그림자와 같은 시각적 효과를 보였다. 이는 사구 지형의 곡면 구조와 자연광에 의한 그림자 특성이 반영된 결과로 보인다. 동시에, 모래사장의 동일 색상 환경

Table 4. AI-generated camouflage patterns for coastal terrain across five iterative generations

Image generation count				
1st	2nd	3rd	4th	5th
 3-1	 3-5	 3-9	 3-13	 3-17
 3-2	 3-6	 3-10	 3-14	 3-18
 3-3	 3-7	 3-11	 3-15	 3-19
 3-4	 3-8	 3-12	 3-16	 3-20

에서 패턴의 형태를 구분하기 위한 AI의 해석이 개입되어 명도변화를 통해 형태적으로 분절을 시도한 경향을 보인 것으로 분석된다.

반복해서 생성할 경우 곡선적인 패턴의 특성과 색채가 일관되게 유지되면서 세부 구성에서는 다양한 변형이 일어났다. 산지와 농경지 조건에 비하여 실제 지형 묘사와는 다른 패턴 구조가 나타나므로 AI가 사구와 같은 단순한 색채 구조 환경에서 패턴을 생성할 수 있음을 시사한다.

3.1.4. 통합 지형 이미지의 특징

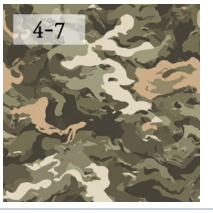
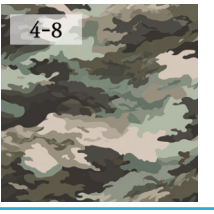
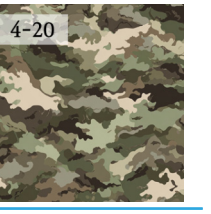
산지, 농경지, 해안사구를 통합한 지형을 대상으로 생성된 카무플라주 패턴은 Table 5와 같다.

암녹색과 회색 계열을 중심으로 하는 산지 요소, 연녹색과 갈색 계열의 농경지 요소, 베이지색과 연한 올리브색의 해안사구 요소가 동시에 나타난 색채 요소를 보였다. 모든 패턴이 세 가지의 지형 요소를 반영하는 색 분포를 보인다. 서로 다른 지형의 색채 특성을 동시에 반영하면서 단일 환경에서와 다르게 급격한 대비와 낮은 대비가 공존하는 특징이 나타난다.

형태적인 특성을 살펴보면 한 이미지 안에서의 패턴 요소의 크기 및 면적이 비교적 다양한 수준을 보인다. 이는 서로 다른 지형의 형태와 색채 특성이 동시에 반영되면서 발생한 결과로 해석된다.

반복 생성결과, 통합 지형 카무플라주 이미지는

Table 5. AI-generated camouflage patterns for complex terrain combining mountainous, farmland, and coastal features

Image generation count				
1st	2nd	3rd	4th	5th
 4-1	 4-5	 4-9	 4-13	 4-17
 4-2	 4-6	 4-10	 4-14	 4-18
 4-3	 4-7	 4-11	 4-15	 4-19
 4-4	 4-8	 4-12	 4-16	 4-20

색채의 방향성은 각기 다른 지형을 반영하도록 유지되면서 세 지형의 요소가 다양한 비율로 결합되어 복합 환경에 대응하는 다양한 패턴이 생성되었다.

3.2. 의복패턴으로써 적합한 이미지 선정과 지형 특성 반영도

네 가지 지형별 AI 기반으로 생성된 총 80개의 카무플라주 패턴 중 의복패턴으로 이용하기에 적합한 패턴이라고 평가된 이미지와 지형 특성 반영도 평가 결과를 Table 6에 나타냈다.

산지 지형 카무플라주 이미지는 1-3, 1-6, 1-9, 1-12, 1-14, 1-19가 의복패턴으로 이용이 가능하다고 평가되었다. 각 패턴 간의 지형 특성 반영도 차이는 통계적으로 유의하지 않았으나 ($F(5,114) = 2.210$, $p = .058$) p값이 유의수준에 근접한 것으로 나타나 패턴 간 차이가 존재하는 경향을 확인할 수 있다. 사후검정 결과 가장 높은 평균을 보인 1-6과 가장 낮은 평균을 보인 1-19 간에는 유의한 차이가 나타났다 ($p<.05$). 1-6과 1-14는 각각 5.75점과 5.65점으로 지형 특성을 잘 반영하고 있다는 평가를 받았으며 이 이미지들은 암녹색(dark green)과 회색(rock gray) 계열의 색상 조합이 큰 대비 없이 안정적으로 구성되어 산지의 암석과 식생이 혼합된 환경 특성을 반영하는 특징을 보인다. 반면 1-19는 4.65점으로 상대적으로 낮은 평가를 받았다. 이는 1-19 패턴이 밝은 녹색과 진한 베이지색이 주를 이루는 색상 조합으로 인해 암석의 특성이 나타나지 않은 것에서 기인한다고 분석된다. 이러한 결과는 색상 구성과 명도 대비가 지형 인지에 영향을 미치며 지형적 특징이 충분히 반영되지 않을 경우 평가가 낮아진다는 것을 시사한다.

농경지 지형 카무플라주 이미지는 2-3, 2-7, 2-11, 2-16, 2-20이 의복패턴으로 이용이 가능하다고 평가되었다. 지형 특성 반영도 평가 결과, 농경지 지형에서는 복잡한 형태보다는 균일한 요소가 적합한 것으로 평가되는 경향이 나타났다. 2-7이 상대적으로 낮은 평가를 받았으며 색상 간 대비가 강하

Table 6. Selected camouflage patterns suitable for apparel applications and their corresponding terrain representation scores(mean ± SD), including one-way ANOVA results

Terrain	Pattern no.	Score	Mean
Mountain	1-3	5.30 ± 1.08	5.38 ± 1.21
	1-6	5.75 ± 1.37	
	1-9	5.30 ± 1.08	
	1-12	5.50 ± 1.10	
	1-14	5.65 ± 1.04	
	1-19	4.65 ± 1.35	
	F(5,114)		2.210
	p-value		.058
	η^2		.088
Farmland	2-3	4.50 ± 1.47	4.64 ± 1.34
	2-7	4.20 ± 1.32	
	2-11	4.80 ± 1.32	
	2-16	5.10 ± 1.33	
	2-20	4.60 ± 1.23	
	F(4,95)		1.263
	p-value		.290
	η^2		.050
Coastal	3-3	4.10 ± 1.59	4.68 ± 1.64
	3-7	5.05 ± 1.64	
	3-10	4.95 ± 1.70	
	3-14	4.25 ± 1.45	
	3-17	4.95 ± 1.67	
	3-19	4.65 ± 1.73	
	F(5,114)		1.207
	p-value		.310
	η^2		.050
Complex	4-2	5.15 ± 1.09	5.04 ± 1.10
	4-6	5.45 ± 0.94	
	4-10	4.90 ± 1.02	
	4-14	4.35 ± 1.18	
	4-20	5.35 ± 0.99	
	F(4,95)		3.512
	p-value		.010
	η^2		.129

고 명도의 차이가 크게 나타나 밝은 색상 부분에 주목되기 때문으로 판단된다. 반면 2-16은 상대적으로 높은 평균을 보이며 저채도의 녹색과 베이지색이 균형 있게 분포하고 색상 간 대비가 크지 않아 농경지의 농경지 환경과 유사하다고 인식된 것으로 보인다. 그러나 일원분산분석결과 패턴 간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다($F(4,95) = 1.263$, $p = .290$). 이는 농경지 지형에서는 패턴 간 시각적 은폐 효과의 차이가 크지 않으며 전반적으로 유사한 수준으로 평가되었음을 의미한다.

해안사구 지형 카무플라주 이미지는 3-3, 3-7, 3-10, 3-14, 3-17, 3-19가 의복패턴으로 이용 가능하다고 평가되었다. 3-7, 3-10, 3-17은 각각 5.05, 4.95, 4.95점으로 4.1점의 3-3보다 지형 특성 반영도에서 상대적으로 높은 평가를 받았다. 3-7, 3-10, 3-17은 해안사구 환경을 반영한 부드럽고 연속적인 패턴과 베이지색(light beige)을 중심으로 한 색상 구성, 낮은 대비의 특징을 보인다. 반면 3-3은 밝은 베이지 색상과 패턴 요소에 음영 효과가 강하게 나타나면서 입체감이 형성된 것이 평가에 부정적인 영향을 미치는 경향이 있는 것으로 분석된다. 마찬가지로 밝은 베이지 색상과 음영효과를 보이는 3-14도 4.3점의 상대적으로 낮은 평가를 보인다. 그러나 일원분산분석결과 해안사구 지형에서 패턴 간 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타나($F(5,114) = 1.207$, $p = .310$) 전반적으로 유사한 수준으로 평가된 것으로 분석된다.

통합 지형 카무플라주 이미지는 4-2, 4-6, 4-10, 4-14, 4-20이 의복패턴으로 이용 가능하다고 평가되었다. 낮은 채도와 명도의 녹색(dark green)과 베이지색(light beige), 갈색(brownish soil) 계열의 색상이 균형 있게 분포하는 4-6과 4-20은 5.45와 5.35점으로 지형 특성을 잘 반영한다고 평가되었다. 해당 패턴은 과도한 색상의 대비 없이 혼합되며 불규칙하지만 연속적인 형태를 보여 산지, 농경지, 해안사구 요소가 혼합된 통합지형의 특성을 효과적으로 반영하는 것으로 타나났다. 반면 4-14는 4.35점으로 상대적으로 낮은 점수를 보이는데 이는 색상대비가 커 베이지색이 두드러지게 나타나면서 지형 요소 간 조화가 부족한 데에서 기인하는 것으로 분석된다. 일원분산분석결과, 패턴 간 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($F=(4,95) = 3.512$, $p = .010$). 사후검정 결과에서도 높은 평가를 받은 패턴과 낮은 평가를 받은 패턴 간의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($p<.05$). 이는 통합 지형과 같은 다양한 지형 요소가 혼합된 환경에서는 색상 구성과 형태적 균형 여부에 따라 위장 패턴의 지형 반영도가 달라질 수 있음을 시사한다.

지형 특성 반영도 평균을 비교한 결과, 산지 지형이 5.38점으로 가장 높게 나타났으며 복합 지형이 5.04점, 농경지 지형과 해안사구 지형은 각각 4.64, 4.68점으로 상대적으로 낮은 평가를 받았다. 산지 지형은 명확한 고저 차이와 불규칙한 형태 구조를 가지므로 패턴으로 구현될 수 있는 특징이 있어 높은 평가를 받은 것으로 분석된다. 복합 지형 또한 세 지형 요소가 혼합되어 다양한 형태와 색상 구성이 가능하여 비교적 높은 점수를 나타내는 것으로 보인다. 농경지 지형과 해안사구 지형은 비교적 단순하고 반복적인 형태를 가져 지형을 특정할 수 있는 요소가 제한적이기 때문에 생성된 패턴이 특정 지형을 명확히 인식되지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 지형의 구조적 복잡성과 다양성이 생성형 AI를 활용해 생성한 카무플라주 패턴의 지형 특성 반영도에 영향을 미쳤을 것으로 분석된다.

3.3. 생성된 카모플라주 패턴의 각 환경에서의 시각적 은폐 효과 평가

AI 기반으로 생성된 이미지의 시각적 은폐 효과 검증을 위해 기존 군복 패턴의 효과를 함께 평가하였다. 산지 환경 이미지에서의 시각적 은폐 효과 평가 결과를 Table 7에, 농경지 환경 이미지에서의 시각적 은폐 효과 평가 결과를 Table 8에, 해안 환경 이미지에서의 시각적 은폐 효과 평가 결과를 Table 9에 나타내었다.

Table 7. Camouflage performance of each pattern evaluated in mountain terrain environments and one-way ANOVA results

	Patternno.	Environment images			Mean
		(a)	(b)	(c)	
AI-generated mountain pattern	1-3	4.40	5.15	5.93	5.16 ± 1.09
	1-6	6.43	2.65	6.28	5.12 ± 0.82
	1-9	6.10	2.58	6.40	5.03 ± 0.73
	1-12	6.03	4.08	6.53	5.54 ± 0.94
	1-14	6.28	5.13	6.55	5.98 ± 0.87
	1-19	4.33	5.08	6.53	5.31 ± 1.01
AI-generated complex terrain pattern	4-2	4.05	5.98	5.70	5.24 ± 1.18
	4-6	5.68	5.63	3.83	5.04 ± 1.12
	4-10	5.25	6.18	5.73	5.72 ± 0.95
	4-14	5.48	5.93	6.13	5.84 ± 1.06
	4-20	6.15	5.88	5.55	5.86 ± 0.97
Current pattern	Army	6.28	5.85	4.43	5.52 ± 1.00
				F(11,468)	4.852
				p-value	〈.001
				η^2	.102

Table 8. Camouflage performance of each pattern evaluated in farmland terrain environments and one-way ANOVA results

	Pattern no.	Environment images			Mean
		(d)	(e)	(f)	
AI-generated farmland pattern	2-3	3.37	2.58	3.18	3.04 ± 1.53
	2-7	2.95	2.93	2.73	2.87 ± 1.46
	2-11	2.33	3.10	3.48	2.97 ± 1.47
	2-16	2.03	2.35	2.58	2.32 ± 1.38
	2-20	4.55	4.05	3.83	4.14 ± 1.40
AI-generated complex terrain pattern	4-2	1.65	1.85	2.28	1.93 ± 1.04
	4-6	2.10	2.30	2.60	2.33 ± 1.17
	4-10	1.80	1.88	2.18	1.95 ± 1.13
	4-14	1.80	1.88	2.18	2.01 ± 1.16
	4-20	1.90	2.05	2.20	2.05 ± 1.19
Current pattern	Army	4.03	3.10	3.48	3.53 ± 2.00
				F(10,429)	11.115
				p-value	〈.001
				η^2	.206

Table 9. Camouflage performance of each pattern evaluated in coastal terrain environments and one-way ANOVA results

	Pattern no.	Environment images			Mean
		(g)	(h)	(i)	
AI-generated costal pattern	3-3	5.83	2.85	3.53	4.07 ± 1.08
	3-7	5.30	2.60	2.90	3.60 ± 1.15
	3-10	5.93	2.70	3.63	4.08 ± 1.05
	3-14	5.70	2.40	3.33	3.81 ± 1.15
	3-17	6.03	3.20	4.28	4.50 ± 1.14
	3-19	5.90	5.63	3.30	3.94 ± 1.09
AI-generated complex terrain pattern	4-2	3.10	2.15	2.38	2.54 ± 1.15
	4-6	4.60	1.65	1.60	2.62 ± 0.89
	4-10	4.45	2.13	2.33	2.97 ± 1.02
	4-14	4.70	1.83	1.95	2.83 ± 0.90
	4-20	2.90	1.63	3.00	2.51 ± 1.08
Current pattern	Army	2.68	2.83	2.58	2.69 ± 2.20
	Marine	2.75	2.45	2.78	2.66 ± 2.04
				F(12,507)	12.457
				p-value	〈.001
				η^2	.228

산지 환경에서 패턴 간 시각적 은폐 효과에는 통계적으로 유의한 차이가 나타났다($F(11,468) = 4.852$, p〈.001), η^2=.102). 그러나 AI 생성 산지 패턴 중에서는 1-14 패턴이 5.98점으로 가장 높은 평가를, 1-9 패턴이 5.03점으로 가장 낮은 평가를 나타내었으며 AI 생성 복합 지형 패턴은 4-20 패턴이 5.86점으로 가장 높은 평가를 받았고 4-6 패턴이 5.04점으로 상대적으로 낮은 평가를 받는 등 모든 패턴의 평균 점수가 5점 이상으로 평가되어 산지 환경에서는 전반적으로 높은 수준의 시각적 은폐 효과가 확인되었다. 이는 산지 환경의 복잡성으로 인해 패턴 간 차이가 제한적으로 나타난 것으로 보이며 산지 환경에서는 AI 생성 패턴이 현 육군복 수준 혹은 그 이상의 시각적 은폐 효과를 확보할 수 있음을 시사한다.

농경지 환경에서는 AI 농경지 패턴의 평균 점수는 3.08, 복합 지형 패턴은 2.05, 기존 위장 패턴은 3.53점으로 나타났다. 농경지 지형 조건의 AI 생성 패턴은 기존 위장 패턴과 함께 3점대의 유사한 점수로 평가되었다. AI 생성 농경지 패턴은 2-20이 4.14점으로 가장 높은 평가를 받았으며 2-16패턴이 2.32점으로 가장 낮은 평균을 나타냈다. 일원분산분석 결과, 농경지 환경에서 패턴 간 시각적 은폐 효과에는 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며 이는 농경지 환경에서 패턴의 색상 및 형태적 적합성이 은폐 효과에 큰 영향을 미침을 의미한다. 지형 반영도 평가에서 2-16패턴이 5.1점으로 비교적 높은 평가를 보인 것(Table 6)과 반대로 시각적 은폐 효과에서는 낮은 점수를 보였다. 이는 단순한 심미적 적합성과 실제 위장 효과 간에 불일치가 발생할 수 있음을 보여주며 위장 패턴 설계에서는 시각적 인식 교란으로 인한 형태 인식 방해가 중요함을 시사한다. 복합 지형 패턴의 경우 모든 농경지 지형 환경에서 최고 점수 2.33점, 최저 점수 1.93점으로 평가되었다. 다양한 색상과 형태가 혼합된 구조가 비교적 단순한 형태와 색을 보이는 농경지 환경에서는 오히려 시각적 은폐 효과를 저하시킴을 나타낸다.

해안환경에서는 AI 생성 해안패턴의 평균 점수는 4.00점, 복합 지형 AI 생성 패턴은 2.69점, 기존 위장 패턴은 육군 2.69점, 해병대 2.66점으로 나타났다. 해안 지형 조건에서 AI 생성 해안패턴은 다른 패턴 유형에 비해 높은 점수를 보였으며 특히 3-17 패턴이 4.50점으로 가장 높은 평가를 받았다. 반면 3-7과 3-14 패턴은 각각 3.60점과 3.81점으로 상대적으로 낮은 평가를 나타냈다. 일원분산분석 결과, 해안 환경에서 패턴 간 시각적 은폐 효과에는 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며 ($F(12,507) = 12.457$, $p<.001$, $\eta^2=.228$) 이는 해안 환경에서 패턴의 색상 및 형태적 적합성이 은폐 효과에 큰 영향을 미침을 의미한다. 밝은 베이지 계열 중심의 색상 구성과 낮은 대비를 가지는 패턴인 3-17 패턴의 경우 해안의 모래 및 완만한 표면 질감과 유사한 시각적 인상을 형성하여 높은 은폐 효과로 이어졌으므로 4.50점의 높은 평가를 나타내는 것으로 분석된다. AI 생성 복합 지형의 패턴은 다양한 지형의 색상이 혼합되어 있어 다양한 환경을 동시에 반영하여 하안과 같이 색상과 구조가 단순한 환경에서는 배경과의 불일치를 유발하였다. 특히 녹색 계열은 해안 환경에서 시각적으로 두드러지는 요소로 작용하였으며 복잡한 형태 구조 역시 배경의 단순성과 대비되어 패턴이 쉽게 인식되는 것으로 판단된다. 또한 기존 위장 패턴 역시 평균 2점대의 낮은 평가를 보여 해안 환경에서는 기존 군용 패턴이 충분한 시각적 인폐 효과를 확보하지 못하였음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 생성형 인공지능 도구인 Midjourney를 활용하여 산지, 평가, 해안사구 및 복합 지형의 특성을 반영한 카무플라주 패턴을 생성하여 의류학 전공자 및 학군사관후보생을 대상으로 생성된 패턴의 적합성, 지형 반영도와 실제 시각적 은폐 효과를 평가하였다.

그 결과, 생성형 인공지능을 통해 각 지형의 색상 및 형태적 특성을 반영한 다양한 패턴을 도출할 수 있었다. 특히 산지 및 해안사구 지형에서는 환경 특성을 반영하는 색채 구성과 형태적 특징이 안정적으로 나타났다. 또한 반복 생성 과정에서도 특성을 유지하면서 다양한 시안이 생성되어 생성형 인공지능이 초기 패턴 디자인 단계에서 후보 시안을 도출하는 데에 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

농경지 지형에서는 지형 반영도가 높게 평가된 패턴이 실제 시각적 은폐 효과에서 낮은 점수를 보이는 경우가 확인되어 지형의 색상 및 질감을 잘 반영한다고 평가된 패턴이 반드시 높은 시각적 은폐 효과를 보이지는 않았다. 생성형 인공지능 기반 패턴은 특정 지형에 최적화된 경우에는 높은 시각적 은폐 효과를 나타내었지만 복합 지형 패턴과 같이 다양한 환경의 요소를 반영하는 패턴의 경우 시각적 은폐 효과 저하가 나타나는 경향이 있었다. 복합 지형 패턴은 여러 지형 요소를 반영하고 있음에도 불구하고 농경지와 해안 환경에서 낮은 성능을 보였으며 기존 위장 패턴 또한 모든 지형에서 일관되게 높은 성능을 보이지는 않았으므로 다양한 색상과 형태의 혼합이 특정 환경에서는 오히려 시각적 지각이 쉽게 일어남을 알 수 있다.

종합적으로, 본 연구에서는 생성형 인공지능이 특정 지형 특성을 반영한 카무플라주 패턴을 생성하고 다양한 시안을 도출할 수 있는 디자인 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다. 범용 위장 패턴 설계에는 농경지와 해안사구 환경에서는 한계가 존재하였으나 환경 특화 설계 시각적 은폐 효과 향상에 매우 적합하였다. 따라서 특정 환경에 알맞은 카무플라주 패턴 디자인 설계를 위한 강력한 보조도구임이 확인되었다. 향후 연구에서는 다양한 지형 조건을 보다 정밀하게 반영한 프롬프트 설계와 시각적 은폐 효과 평가의 객관적 지표를 도입하고 실제 착용 환경에서의 검증을 통한 생성형 인공지능 기반 카무플라주 패턴의 실용성을 검증할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022M3C1C5A02094018)

참고문헌

1. Eom, R., Lee, O., Jung, H., Cho, K. M., & Lee, Y. (2025). User-centered design approach and wearability evaluation of CBRN protective clothing. *Journal of Defense Quality Society, 7*(2), 294-307. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.2.028
2. Lee, O., & Lee, Y. (2025). Evaluation of the size suitability of army combat uniforms for women using 3D virtual simulation based on the sixth and eighth Size Korea data. *Journal of Defense Quality Society, 7*(1), 129-139. https://doi.org/10.23199/jdqs.2025.7.1.013
3. Kang, D., & Lee, J. (2024). Assessment of Dyeability and Thermal Insulation Enhancement of Silk Fabric Using Iron Oxide. *Journal of Defense Quality Society, 6*(1), 83-91. https://doi.org/10.23199/jdqs.2024.6.1.008
4. Yun, E. (2019). Study of camouflage pattern on world military uniforms. *Journal of Communication Design, 69*, 370-385. https://doi.org/10.25111/jcd.2019.69.29
5. Matthews, R., & Matthews, T. J. (2024). Military mimicry: the art of concealment, deception, and imitation. *Defense & Security Analysis, 40*(3), 379-404. https://doi.org/10.1080/14751798.2024.2352271
6. Xiao, H., Qu, Z., Lv, M., Jiang, Y., Wang, C., & Qin, R. (2020). Fast self-adaptive digital camouflage design method based on deep learning. *Applied Sciences, 10*(15), 5284. https://doi.org/10.3390/APP10155284
7. Pembury Smith, M. Q. R., & Ruxton, G. D. (2020). Camouflage in predators. *Biological Reviews, 95*(5), 1325-1340. https://doi.org/10.1111/brv.12612
8. Kwon, S., & Ha, J. (2006). A study on modern military uniform design. *Journal of the Korean Society of Costume, 56*(9), 143-156.
9. King, A. (2014). The digital revolution: Camouflage in the twenty-first century. *Millennium: Journal of International Studies, 42*(2), 397-424. https://doi.org/10.1177/0305829813512885
10. Schaefer, H. M., & Stobbe, N. (2006). Disruptive coloration provides camouflage independent of background matching. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 273*(1600), 2427-2432. https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3615
11. Stevens, M., & Merilaita, S. (2009). Defining disruptive coloration and distinguishing its functions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364*(1516), 481-488. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0216
12. Yu, D. H., & Park, C. H. (2019). Transition process and development direction of army uniform after liberation of Korea. *Journal of Military History Studies*, 148, 41-77. https://doi.org/10.17934/jmhs..148.201912.41
13. Kang, J., Lee, M., Hong, S., & Moon, S. (2016). A Study on Performance for Camouflage of Domestic and Foreign Combat Uniforms. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles, 40*(6), 1025-1033. https://doi.org/10.5850/jksct.2016.40.6.1025
14. Yoon, H.-S., Park, S.-Y., & Yoo, C.-I. (2010). Review of the Functional Properties and Spatial Distribution of Coastal Sand Dunes in South Korea. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 22*(2), 180-194.
15. Patel, K., Shah, M., Qureshi, K. M., & Qureshi, M. R. N. (2026). A systematic review of generative AI: importance of industry and startup-centered perspectives, agentic AI, ethical considerations & challenges, and future directions. *Artificial Intelligence Review, 59*, 7. https://doi.org/10.1007/s10462-025-11435-z
16. Sengar, S. S., Hasan, A. B., Kumar, S., & Carroll, F. (2025). Generative artificial intelligence: A systematic review and applications. *Multimedia Tools and Applications, 84*(21), 23661-23700. https://doi.org/10.1007/s11042-024-20016-1
17. Noy, S., & Zhang, W. (2023). Experimental evidence on the productivity effects of generative artificial intelligence. *Science, 381*(6654), 187-192. https://doi.org/10.1126/science.adh2586
18. Li, M., Yu, M., Liu, B., & Peng, Q. (2024). The pattern

design of a camouflage suit based on the cycle generative adversarial network algorithm. *AATCC Journal of Research, 11*(Suppl. 1), 126–137. https://doi.org/10.1177/24723444231185633

19 Han, C. (2019). Camouflage assessment of camouflage patterns focusing on patterns and the shapes and colors of environmental images. *Journal of Communication Design*, *67*, 300–310. https://doi.org/10.25111/jcd.2019.67.23

국방품질연구회(DQS)

Defense Quality Society

설립 목적

군수품 전순기국방품질경영에 관한 학문과 기법의 보급, 응용으로 방위산업 발전에 기여

- 국방품질경영 학문·기법 보급과 현장 응용
- 국방품질·기술혁신을 위한 인프라 구축
- "산·학·연·관·군" 기술협력 허브기관

연 혁

'11년 9월	'13년 6월	'18년 11월 ~ 현재
설립승인 <방위사업추진회>	창립총회	군수품 분임 대회 정기 개최
'19년 3월 ~ 현재	'19년 6월 ~ 현재	'20년 7월 ~ 현재
국방품질연구논집 정기 발간	국방품질종합학술대회 정기 개최	DQS Magazine 정기 발간

미션/비전

미션 국방품질경영 글로벌 리더의 학술적 동반자

비전 국방품질 연구자산의 독보적 Knowledge-Bank 구축

주요 사업

정책 / 제도	학술행사	산학협동	교류협력
국방품질 경영 이론, 정책/제도 연구	종합학술대회, 분임 혁신대회, 전문학술지/ 매거진 발간	DQS 전문 연구분과 운영/기술지원	국내 학술단체 및 기관과의 교류

DQS 주요 추진업무

주요업무	내 용	시 기
국방품질연구논집 발간 <KCI 등재학술지>	국방품질경영 전문학술지	6월, 12월
군수품 현장 품질기술 분임 혁신대회	3개 그룹별 분임조 대회 (중소·벤처기업 / 소요군 / 대·중견기업)	매년 1회
국방품질종합학술대회	국방품질 정책 / 제도 발전방향	매년 1회
DQS Magazine 발간	국방품질경영 Web 기고지	연중 매월 게재
전문 연구분과 학술활동	연구분과별 간담회· 학술세미나 등	2월 ~ 12월

전문 연구분과 학술활동

연구분과	주요활동
국방품질인증·제도 연구	국방품질시스템·제품인증 및 제도 기법 연구
AI·SW 연구	AI·SW 정책/제도 및 평가 관련 연구
국방신뢰성연구	국방신뢰성 정책/제도, 저장신뢰성, RAM 연구
항공·감항연구	항공 무기체계 최신기술·품질 및 감항인증 연구
소음진동연구	소음진동 기준 및 평가제도 연구
무기체계 공급망관리연구	무기체계 부품관리 및 공급망 연구
C5ISR 연구	지휘정찰 신기술 개발 동향/품질보증 방안 연구
유도탄약안전품질연구	유도탄약 무기체계 품질안전 연구
표준화연구	국방 표준화 정책/제도 연구
빅데이터 기반 운용성 연구	데이터분석 기반 운용성 개선 연구
우주위성연구	우주무기체계 품질, 표준, 인증, 시험방안 연구
국방사이버연구	국방사이버 적용 무기체계 품질관리방안 연구
K-방산수출전략 연구	국제품질협력 및 수출 관련 전략 연구

회원 가입 (무료)

가입안내

방법 1

- https://www.dtaq.re.kr:8084/dqs/ ➡ **회원가입(우측상단)**

방법 2

- 국방기술품질원 홈페이지(우측상단) ➡ DTaQ 정보서비스 ➡ **국방품질연구회** ➡ **회원가입(우측상단)**

회원혜택(무료)

- 국방품질종합학술대회 참가
- 군수품 현장 품질·기술 분임 혁신대회 참가
- DQS 연구분과 회원참여 및 학술행사 참가
- 국방품질연구논집 투고 / 매거진 기고 참여
- "산·학·연·관·군" 품질전문가 교류·소통 참여

원고 모집 안내

국방품질연구논집〈KCI 등재학술지〉

투고 분야

- ☑ 국방품질과 연관성 있는 정책 및 제도 관련 분야
- ☑ 군수품 전순기(개발-양산-운영-폐기)에 걸쳐 품질과 연관된 신뢰성, 시험평가, 인증, 표준화, 단종/위조, 안전 등 관련 분야
- ☑ 군수품 생산 및 운용장비 품질개선 관련 분야
- ☑ 부품국산화, 군수품 개조개발 및 운용전력 성능개량(개선) 관련 분야
- ☑ 국방품질과 연관된 최신 품질경영 이론, 신기술 및 응용 관련 분야
- ☑ 국방분야와 접목 가능한 중소·벤처 기술 관련 분야
- ☑ 기타 국방 및 방산 관련 학문과 기술, 국방품질과 연관성이 있는 수준조사 및 기술기획 관련 분야

투고 안내

- **온라인 논문투고시스템(JAMS) 무료회원 가입 후 투고**
  (투고 형식, 양식은 홈페이지 공지사항 참조)
  - https://dtaqdqs.jams.or.kr
- **발행 (연2회, 6월, 12월)**
  - 투고마감 : 매년 1호(3.25.), 매년 2호(9.25.)

투고 혜택

- **투고료, 심사료 면제**
- **논문 게재 시 소정의 원고료 지급**
- **우수논문 선정 및 포상**



DQS Web 매거진

기고 분야

- ☑ **기고분야〈연중 상시 모집〉**

① Q-Special : 품질경영 관련 특별 기고(칼럼)
② Q-Trend & Issues : 최근 품질경영 추세(동향), 신기법 등
③ Q-강좌 : 품질인이 알아야 하는 강좌(특강)
④ 현장 Focus : 현장 품질이슈 해결, 품질(성능) 개선 등
⑤ 포토 단신 : 분과별 주요 학술활동 이모저모

기고 안내

- **DQS 사무국에 기고문 제출(E-mail)**
  - 메일 : 12426@dtaq.re.kr
- **형식**
  - 기고문 형식, 양식은 국방품질연구회 홈페이지 다운로드
  〈홈페이지 : https://www.dtaq.re.kr:8084/dqs〉
- **발행〈Webzine 형태로 매월 게재〉**
  * 게재 : 국방기술품질원 홈페이지 -> 미디어룸 -> DQS
  * 소정의 원고료 지급

공통 알림

논문투고/기고 안내 및 주의사항

- 원고 투고 시 준수해야 할 연구윤리규정, 투고 및 발행 규정, 편집 및 심사 규정은 국방품질연구회 홈페이지에서 열람 및 다운받으실 수 있습니다.
- 원고는 반드시 보안성 검토 후 제출하고, 게재 여부는 심사 후 개별 연락합니다.
- 제출한 원고는 다른 곳에 게재되지 않은 것이어야 하며, 연구윤리규정을 준수한 것이어야 합니다.
- 모집한 원고는 일체 반환하지 않으며, 편집위원회의 심의를 거쳐 게제됩니다.
- 게제된 모든 내용의 저작권은 국방기술품질원에 있으며, 도용이나 표절은 금합니다.

문의 국방품질연구회 사무국 김진영, 서민준(055-751-5274, 5277)

주의
• 자료의 지식재산권 보호를 위해 본 간행물에 게시된 자료의 무단복제·전재를 금합니다.
• 본 논집에 게재된 논문은 국방기술품질원의 공식적인 견해가 아니며, 필자의 개인 의견임을 알려드립니다.

Journal of DQS

국방품질연구논집

Journal of Defense Quality Society

제8권 1호 2026년 6월
Vol. 8 No. 1, Jun. 2026

국방기술품질원 DTaQ Defense Agency for Technology and Quality
경상남도 진주시 동진로 420(충무공동)
Tel. 055-751-5274, 5277 | Fax. 055-751-5266 | www.dtaq.re.kr
국방품질연구회 Defense Quality Society