

국방품질연구논집

Journal of Defense Quality Society

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

국제물류 환경에서의 복합운송 최적화를 위한 혼합정수선형계획 모형	김민규, 김성권, 전수진, 김수하, 김홍섭
합정용 복합재료 프로펠러의 동역학적 모형시험 상사법에 대한 수치적 연구	김성훈, 박정용, 이형석
기획단계 국방 R&D 소요예산 예측을 위한 텍스트 회귀분석 모델	정자훈, 류준열, 여용현, 안남수
심층 트랜스포머 네트워크 기반의 인공지능 기술을 이용한 무기체계 실시간 이상 감지 기술	오우림, 김완식, 진재훈
기동무기체계의 내구도 주행시험 현황과 개선 방향	이상훈, 여성재, 이동훈
전기식 포탑의 전력공급 품질 향상 및 구동 설계 개선을 위한 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치 설계 및 검증	강한길, 박해원, 이계승, 김현민
국방규격 목록화 정보와 연계한 국방표준서 활용방안 연구	이민철, 안혜원
표면 거칠기 및 소프트 기동 각가속도 변화에 따른 저널 베어링 마찰 진동 해석	권혁성, 이가향, 서준호
군용항공기 부품국산화 시스템안전 감항영향성 검토 절차 수립에 관한 연구	박상수, 김동욱, 김진영, 정아영, 김민성
상관관계 분석을 이용한 부틸 고무의 자연노화에 따른 특성 연구	문원경, 배만재
합정 기본성능 분야 체계공학(SE) 절점별 Look Right 모델 연구	권태용, 이창열, 강상호, 이길홍
군 통신 웰터의 스킵드 조립체 내구성 강화를 위한 품질개선 연구	전다예, 구기범
3차원 가상착의를 활용한 제6·8차 사이즈코리아 데이터 기반 여군 전투복의 치수적합성 평가	이옥경, 이예진
레이트레이싱 시뮬레이션을 이용한 도심환경의 UAV 기반 비저상 통신 LoS 확률 예측 연구	이인석
ISO 26262 기반 군 무기체계 기능안전성 전자제어장치 도입 방안 연구	김남현, 유인곤, 홍성훈, 이민구
방위산업에서 해외 원자재 조달 리스크의 다차원적 평가	하승희, 박규성, 김성수

CONTENTS

• 국제물류 환경에서의 복합운송 최적화를 위한 혼합정수선형계획 모형	2
• 함정용 복합재료 프로펠러의 동역학적 모형시험 상사법에 대한 수치적 연구	16
• 기획단계 국방 R&D 소요예산 예측을 위한 텍스트 회귀분석 모델	26
• 심층 트랜스포머 네트워크 기반의 인공지능 기술을 이용한 무기체계 실시간 이상 감지 기술	35
• 기동무기체계의 내구도 주행시험 현황과 개선 방향	44
• 전기식 포탑의 전력공급 품질 향상 및 구동 설계 개선을 위한 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치 설계 및 검증	52
• 국방규격 목록화 정보와 연계한 국방표준서 활용방안 연구	62
• 표면 거칠기 및 샤프트 기동 각가속도 변화에 따른 저널 베어링 마찰 진동 해석	71
• 군용항공기 부품국산화 시스템안전 감항영향성 검토 절차 수립에 관한 연구	82
• 상관관계 분석을 이용한 부틸 고무의 자연노화에 따른 특성 연구	93
• 함정 기본성능 분야 체계공학(SE) 절점별 Look Right 모델 연구	103
• 군 통신 셀터의 스키드 조립체 내구성 강화를 위한 품질개선 연구	115
• 3차원 가상착의를 활용한 제6·8차 사이즈코리아 데이터 기반 여군 전투복의 치수적합성 평가	129
• 레이트레이싱 시뮬레이션을 이용한 도심환경의 UAV 기반 비지상 통신 LoS 확률 예측 연구	140
• ISO 26262 기반 군 무기체계 기능안전성 전자제어장치 도입 방안 연구	149
• 방위산업에서 해외 원자재 조달 리스크의 다차원적 평가	160

공지사항

• 국방품질연구회(DQS)	171
• 국방품질연구논집 원고 모집 안내	172

국제물류 환경에서의 복합운송 최적화를 위한 혼합정수선형계획 모형

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

Mixed Integer Linear Programming Model for Optimizing Multimodal Transportation in International Logistics Environment

김민규, Minkyu Kim

국립창원대학교, 스마트제조융합협동과정, 석사과정
Master's course, Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

김성권, Sungkwon Kim

국립창원대학교, 스마트제조융합협동과정, 박사과정
Doctoral course, Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

전수진, Sujin Jeon

국립창원대학교, 산업시스템공학과, 석사과정
Master's course, Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

김수하, Suha Kim

국립창원대학교, 산업시스템공학과, 석사과정
Master's course, Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

김흥섭[†], Heungseob Kim

국립창원대학교, 산업시스템공학과, 부교수
Associate Professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Changwon National University

Abstract

The demand for international logistics continues to increase owing to changes in the international trade structure, an increase in multinational corporations, and the growth of the online market. Accordingly, companies are striving to establish strategies to efficiently operate global supply chains. In particular, Korea has shown increasing interest in the MRO(Maintenance, Repair, Operations) market, providing logistics services for exported weapon systems owing to the recent activation of defense industry exports. In this context, this study proposes a MILP(Mixed-Integer Linear Programming) model to establish an optimal intermodal transportation plan to economically and efficiently operate a global supply chain. The goal is to transport large quantities of goods produced in multiple regions to multiple domestic and international demanders by linking two or more vehicles, such as trucks, railways, ships, and aviation, to meet delivery dates and transport at the lowest cost. Two numerical experiments were conducted to verify and validate the MILP model. The analysis and visualization of the experimental results confirmed that all constraints, such as the conditions for transshipment, aircraft/ship service schedule, and delivery date, were complied with, and a realistic transportation plan was established.

keywords : international logistics, multimodal transport, SDVRP-SDPTW, mixed-integer linear programming

[†] Corresponding Author : Heungseob Kim

Tel : +82-55-213-3724, email : heungseob79@changwon.ac.kr

Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 20th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

최근 우리나라의 방산수출이 급성장함에 따라 글로벌 4대 방산 수출국으로 도약이 기대되고 있다. 우리나라의 방산 수출액은 2013~2017년(5개년) 대비 2018~2022년 기간 중 1.8배 성장하여 글로벌 방산 수출 점유율이 상승되었다. 2023년 방산 수출액(130억 달러)은 2022년(173억 달러) 대비 다소 감소하였으나, 수출국이 4개국에서 12개국, 수출 무기체계는 6종에서 12종으로 증가함에 따라 방산수출의 질적 성장으로 평가되고 있다. 이에 따라 정부는 방위산업을 국가전략산업으로 지정하고, 2027년까지 글로벌 방산수출 시장의 5% 점유를 통해 세계 4대 방산 수출국으로 도약한다는 목표를 제시하였다 [1].

방산수출 활성화와 함께 무기체계 운영유지를 지원하는 MRO(Maintenance, Repair, Operation) 산업에 대한 관심이 증대되고 있다. MRO 산업은 정비를 위한 부품 공급, 무기체계 창정비 및 성능 개량, 훈련체계 등 IPS(Integrated Product Support)를 포괄하는 사업 영역이다. 특히, MRO는 무기체계 제작사에 한해 지원이 가능함에 따라 무기체계 수출과 함께 제작사에 의존이 불가피한 잠금효과(Lock-in effect)가 발생하는 특징을 갖는다. 즉, MRO는 방산수출과 함께 확정적으로 확보되는 시장이라고 할 수 있다. 또한, 무기체계 총수명주기비용(TLCC, Total Life Cycle Cost)의 분포는 Figure 1과 같이 제시되고 있으며[2-3], 평균적으로 연구개발(R&D) 10%, 양산 30%, 그리고 운영유지가 60%를 점유하는 것으로 분석되고 있다. 이는 무기체계 판매(연구개발+양산) 시장보다 MRO 사업의 시장이 더욱 크게 형성됨을 의미한다.

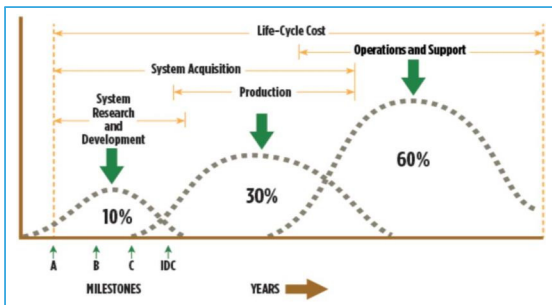


Figure 1. TLCC for weapon system [2]

MRO 사업 영역 중 '정비용 부품 공급'은 구독경제형(Subscription economy) 사업으로, 수출 무기체계 수명기간 동안 일정 수준의 수익이 지속적으로 보장되는 특징을 갖는다. Ryu et al. (2010)은 획득비 대비 부품 비용의 비율을 Table 1과 같이 제시하고 있다[4]. 즉, 무기체계를 운용하기 위해 획득비 대비 일정 비율만큼의 비용이 소요됨을 의미하며, 방산수출국 입장에서는 정비용 부품을 공급하는 MRO 사업을 통해 영위할 수 있는 수익의 범위가 된다. 따라서 방산수출을 주도하고 있는 주요 방산체계종합기업들은 '정비용 부품 공급' 사업을 영위하기 위해 글로벌 공급망(Global supply chain)을 구축하고, 글로벌 공급망을 효율적으로 운영하기 위한 전략을 수립해야 하는 시점에 있다. 글로벌 공급망에서 물품 운송(Cartage)은 하나의 계약으로 두 가지 이상의 운송수단 활용을 통해 목적지까지 수송하는 복합운송(Multimodal transportation)으로 실현된다. 복합운송은 방위산업뿐만 아니라 모든 산업 분야의 수출입을 위한 국제물류(International logistics)에 적용된다.

MRO 사업 영역 중 '정비용 부품 공급'은 구독경제형(Subscription economy) 사업으로, 수출 무기체계 수명기간 동안 일정 수준의 수익이 지속적으로 보장되는 특징을 갖는다. Ryu et al. (2010)은 획득비 대비 부품 비용의 비율을 Table 1과 같이 제시하고 있다[4]. 즉, 무기체계를 운용하기 위해 획득비 대비 일정 비율만큼의 비용이 소요됨을 의미하며, 방산수출국 입장에서는 정비용 부품을 공급하는 MRO 사업을 통해 영위할 수 있는 수익의 범위가 된다. 따라서 방산수출을 주도하고 있는 주요 방산체계종합기업들은 '정비용 부품 공급' 사업을 영위하기 위해 글로벌 공급망(Global supply chain)을 구축하고, 글로벌 공급망을 효율적으로 운영하기 위한 전략을 수립해야 하는 시점에 있다. 글로벌 공급망에서 물품 운송(Cartage)은 하나의 계약으로 두 가지 이상의 운송수단 활용을 통해 목적지까지 수송하는 복합운송(Multimodal transportation)으로 실현된다. 복합운송은 방위산업뿐만 아니라 모든 산업 분야의 수출입을 위한 국제물류(International logistics)에 적용된다.

Table 1. Parts Cost to Acquisition Cost Ratio

Class.	Average ratio by operating period			
	10 years	20 years	30 years	40 years
Panzer	8%	50%	164%	
Aircraft	12%	40%	85%	143%

복합운송은 통운송(Through transport), 결합수송(Combined transport), 협동일관수송(Intermodal transport)이라고도 불리며, Figure 2와 같이 한가지의 운송수단을 이용한 화물 운송이 아닌 트럭, 철도, 선박, 항공과 같은 두 가지 이상 서로 다른 운송수단을 연계하여 물품을 운송하는 방법이다. 국제무역에서 일반적으로 고려되어 온 운송 개념은 'Port

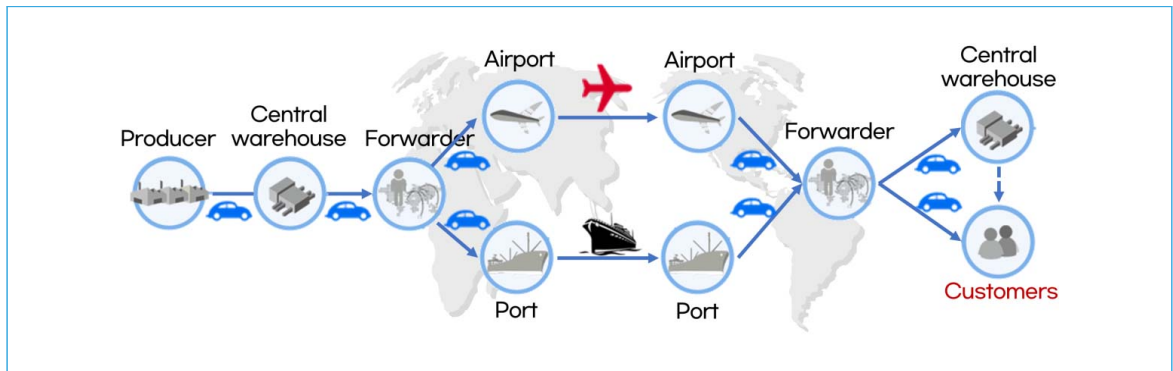


Figure 2. Multimodal transport for international logistics

to Port’, 즉, 항구에서 항구로의 컨테이너를 화물 단위로 운송하는 것이다. 반면, 복합운송은 ‘Door to Door’, ‘Depot to Depot’의 형태로 생산지부터 최종 수요지까지의 운송을 목표로 하고 있으며, 화물의 형태(자동차, 제품 등)가 단위화된다. 따라서 화주는 화물의 특성과 수입업자(수요자)의 요구에 따라 복수의 운송수단을 결합해 최종 목적지까지 화물을 운송하게 된다. 특히, 보안물자를 많이 취급하는 방위산업에서는 다른 산업들보다 ‘Door to Door’, ‘Depot to Depot’의 형태의 국제물류가 더욱 일반적이라고 할 수 있다. 일반산업 분야에서도, 과거에는 국제무역의 주체가 기업이었으나, 최근에는 온라인 마켓(Online market)의 보편화에 따라 국내 소비자(개인)가 해외 온라인 쇼핑몰에서 물건을 직접 구매하는 해외직구가 급증하고 있다. 이러한 국제무역 환경 변화에 따라 ‘Door to Door’ 형태의 국제물류 수요가 증대되고 있으며, 이에 따라 경제성과 효율성을 고려한 복합운송의 중요성이 부각되고 있다.

따라서 본 연구는 나눔배송이 가능하고 배송/회수 시간 제약이 있는 배송과 수거를 동시에 고려하는 차량경로문제(SDVRP-SDPTW, Split Delivery Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup under Time Windows)를 바탕으로 여러 종류의 수요 물품, 복수의 운송수단 활용, 나눔배송/합배송, 환적(Transshipment), 화물기(Cargo plane)/화물선(Cargo ship)의 운항스

케줄 등 현실적이고 다양한 국제물류 환경을 고려하여 경제적이고 효율적인 복합운송 계획을 수립하기 위한 새로운 유형의 SDVRP-SDPTW에 대한 혼합 정수선형계획(MILP, Mixed Integer Linear Programming) 모형을 제시한다.

2. 배경이론 및 기존문헌 고찰

공급망관리(SCM, Supply Chain Management) 분야에서 차량 운행 경로와 배송 일정은 물류비용과 고객만족도에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요하게 고려되고 있는 요소이다. 이에 따라 차량경로문제(VRP, Vehicle Routing Problem)는 오랜 기간 매우 활발하게 연구되어 왔으며, 물류기업과 고객 및 외부 환경의 요구사항을 반영하여 Figure 3과 같이

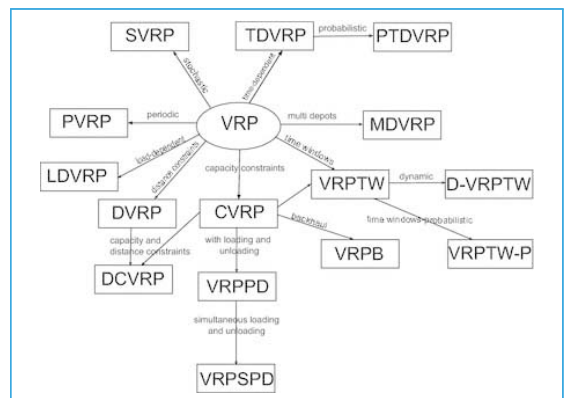


Figure 3. Hierarchy of VRP variants [5]

다양한 형태로 발전해 왔다[5]. Figure 3을 살펴보면, VRP에서 VRP-SDPTW(Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup under Time Windows)로의 발전 과정은, VRP → CVRP(Capacitated VRP) → VRPPD(VRP with Pickup and Delivery) → VRP-SPD(VRP with Simultaneous Pickup and Delivery) → VRP-SDPTW이다. 원조 VRP는 하나의 물류센터에서 물품을 적재한 차량들이 다수의 수요지들로 배송하는 상황에서 차량들의 총 이동거리, 시간 등의 비용적 요소를 최소화하는 각 차량의 이동 경로를 탐색하는 최적화 문제이다. CVRP는 차량들의 적재량이 제한됨을 고려하여 VRP를 보다 현실화한 문제이며, VRPPD는 반품, 회수 등의 역물류(Reverse logistics)를 고려하여 차량들이 이동하면서 물품을 배송하거나 회수하기 위한 이동 경로를 탐색하는 문제이다. 단, 차량이 방문하는 지점들은 수요지와 회수지 중의 하나로 구분된다. VRP-SPD는 기본 개념은 VRPPD와 동일하나, 임의의 지점에서 배송과 회수가 동시에 수행될 수 있도록 개선한 문제이다[6]. 가장 발전된 형태인 VRP-SDPTW는 각 수요지/회수지에 방문하는 시간대(Time windows)를 준수하는 제약(Constraint)을 추가한 문제이다[7].

위와 같은 문제들은 기본적으로 각 지점들의 수량과 회수량은 1대의 차량으로 충족시킬 수 있는 것으로 가정하고 있다. 하지만, 현실의 물류 환경에서는 다양한 종류, 대량의 물품에 대한 수요를 충족시키기 위해 나눔배송(Split delivery) 개념을 활용하고 있으며, 이를 통해 물류비용을 절감하고 있다. VRP 계열 중 SDVRPTW(Split Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows)는 한 건의 계약을 복수의 차량으로 배송하는 개념의 나눔배송과 납기를 고려하는 문제이다[8-9]. 또한, SDVRPTW에 대한 기존 문헌들은 배송 대상 물품을 1가지로 고려하는 연구[10-14]와 여러 가지 물품의 배송을 고려하는 연구[15-16]로 분류될 수 있다. 현실적인 물류 환경을 고려할 때, Song et al. (2020), Huang

et al. (2023)과 같이 여러 종류의 물품을 고려하는 SDVRPTW가 보다 유용하고 발전된 형태라고 할 수 있다[15-16]. 또한, SDVRPTW를 위한 해법으로는, Luo et al. (2017)과 Li et al. (2020)은 Branch-and-price-and-cut 알고리즘[10,12], Bianchessi et al. (2019)은 Extended Branch-and-cut 알고리즘을[11], 그리고 Zhao et al. (2023)은 2단계 탐색 양자입자 군집 최적화(Two-stage search quantum particle swarm optimization) 알고리즘을 제안하였다[13].

물류운영전략 측면에서 SDVRPTW와 유사한 형태로 연구되어 온 분야는 옴니채널(Omnichannel) VRP이다. 옴니채널은 소비자가 온라인, 오프라인, 모바일 등 다양한 경로를 넘나들며 상품을 검색하고 구매할 수 있도록 한 서비스를 일컫는다. 이러한 옴니채널 VRP는 물품의 공급망을 중앙창고와 매장, 즉, 2계층 공급망(Two-echelon supply chain)으로 고려하는 연구가 많다. 이때, 물류운영전략으로는, 첫째, 실제 매장(Physical store)에 대한 배송은 대형 차량을 이용하여 중앙창고에서 매장으로, 둘째, 온라인 고객에게는 대형 차량이 중앙창고에서 중간 집하지로 제품을 배송하고 소형 차량을 이용해 고객에게 제품을 배송한다. Arslan et al. (2021)은 온라인 채널 기반 공급망 배치 문제를 위한 2단계 확률계획(Two-stage stochastic programming) 모형을[17], Liu et al. (2022)은 공급망 비용과 고객 편의성을 함께 고려하여 옴니채널 VRP를 해결하기 위한 다목적 접근(Multi-objective approach) 방식을 제안했다[18]. Akyüz et al. (2022)와 Yang and Li (2025)는 여러 종류의 물품을 고려하는 옴니채널 VRP를 제안하였으며[19-20], 더불어 Yang and Li (2023)은 역물류, 즉, 회수(Pickup)까지 고려하고 있다[20]. Paul et al. (2019), Schubert et al. (2021)과 Guo et al. (2021)은 나눔배송을 고려한 옴니채널 VRP를 제안하고 있으나, 물품의 종류는 1가지로 고려하고 있다[21-23]. 가장 최근의 Li and Wang (2025)은 여러 종류의 물품과 나눔배송을 함께 고려하고 있으며[24], 옴니채널 VRP의 해법으로

ALNS(Adaptive Large Neighborhood Search) 알고리즘을 제안하고 있다.

본 연구는 국제물류를 위한 복합운송에 초점을 맞추고 있어 여러 종류의 물품, 복수의 운송수단 간의 연계, 그리고 운항스케줄이 지정되어 있는 항공, 해운 환경을 반영하고 있다. 복수의 운송수단 간의 연계 측면에서, 보다 경제적이고 효율적인 국내운송을 위해 나뉘배송/합배송 전략이 주요적으로 활용되며, 국제물류를 위해 항공과 해운이 필수적임에 따라 육로운송에서 항공/해운으로의 전환을 위해 환적이 필수적으로 발생한다. 결론적으로, 기존 연구들과의 차이점은 임의의 물품이 최종 목적지에 도착할 때까지 복수의 운송수단이 활용될 수 있으며, 현실적인 운송과 경제적/효율적 운송을 위해 중간 경유지에서 환적이 고려될 수 있다. 기존 문헌 고찰과 본 연구의 차별성은 Table 2와 같이 요약된다.

3. 복합운송 최적화 수리계획 모형

본 연구는 여러 생산지에서 여러 종류의 물품들을 육상·해상·항공 운송을 복합적으로 이용하여 다수의 최종 소비자들이 원하는 시간대에 최소의 비용으로

운송하는 복합운송 계획을 수립하기 위한 혼합정수 선형계획 모형을 제안한다. 복합운송 계획을 위한 혼합정수선형계획 모형을 개발함에 있어 기존 연구들과 차별적으로 고려하거나 가정하고 있는 사항은 다음과 같다.

- (1) 운송수단의 적재 용량, 운임(고정비, 변동비), 운행 속도 등은 상이하며, 운송수단별 운행이 불가능한 공간이 고려된다. 예시적으로, 차량(트럭)으로는 항공, 해운이 불가능하다.
- (2) 운송수단의 최초 출발은 생산지와 중간지(항구, 공항)에서만 가능하며, 각 지점이 보유하고 있는 수량 이내에서 출발이 가능하다.
- (3) 수요지의 물품별 수요량은 충족되어야 한다.
- (4) 육상운송 과정에서 환적이 필요한 경우, 물품을 적재할 차량은 하역하는 차량이 도착하기 전에 환적 지점을 떠날 수 없다.
- (5) 해상·항공 운송의 출발시간은 사전에 계획되어 있는 운항스케줄에 따른다. 따라서 환적을 위한 적·하역 작업은 운항스케줄상의 출발시간 이전에 완료되어야 한다.

본 연구에서 제안하는 복합운송 계획을 수립을 위한

Table 2. Summary of the Literature Review

Literature	Split delivery	Types of products (Single, Multiple)	Types of vehicles (Road, Air, Ship)	Trans-shipment
Luo et al. (2017)[10], Bianchessi et al. (2019)[11], Li et al. (2020)[12], Zhao et al. (2023)[13], Wu et al. (2024)[14]	Considered	Single	(Single/Multiple, ×, ×)	
Song et al. (2020)[15], Huang et al. (2023)[16]	Considered	Multiple	(Single/Multiple, ×, ×)	
Arslan et al. (2021)[17], Liu et al. (2022)[18]		Single	(Multiple, ×, ×)	
Akyüz et al. (2022)[19], Yang and Li (2025)[20]		Multiple	(Multiple, ×, ×)	
Paul et al. (2019)[21], Schubert et al. (2021)[22], Guo et al. (2021)[23]	Considered	Single	(Multiple, ×, ×)	
Li and Wang (2025)[24]	Considered	Multiple	(Multiple, ×, ×)	
This study	Considered	Multiple	(Multiple, Multiple, Multiple)	Considered

혼합정수선형계획 모형은 식 (1)-(18)과 같으며, 입력 파라미터들(Input parameters)과 의사결정 변수들(Decision variables)의 표기(Notation)는 다음과 같다.

〈입력 파라미터〉

- P : 생산지 노드(Node)의 집합
- T : 공항, 항만 노드의 집합
- C : 수요지 노드의 집합
- N : 전체 Node의 집합; $N = P \cup T \cup C$
- K : 운송수단 유형 k 의 집합 $k \in K$
- S : 각 운송수단 보유량 집합 $s \in S$
- G : 물품 종류 g 의 집합 $g \in G$
- M : 충분히 큰 수(Big M)
- R_{ij} : 노드 i 에서 j 까지의 거리
- F_k : 운송수단 유형 k 의 고정 비용
- V_k : 운송수단 유형 k 의 변동비(적재량 당 비용)
- Q_k : 운송수단 유형 k 의 적재 용량
- a_k : 운송수단 유형 k 의 물품 단위 무게 당 적하역에 소요되는 작업시간
- H_{ik} : 노드 i 에서 보유, 즉, 활용 가능한 운송수단 유형 k 의 수량
- D_i^g : 노드 i 로 운송할 물품 g 의 수요량(무게)
- L_i^g : 노드 i 에서 적재해야 하는 물품 g 의 무게
- Vel_k : 운송수단 유형 k 의 평균 속도
- B_i : 항공기/선박이 운항스케줄에 따라 노드 i 를 출발하는 시간
- T_i^s, T_i^g : 노드 i 에 도착해야 하는 시간대

〈의사결정 변수〉

- $x_{ijks} = \begin{cases} 1, & s \text{ 번째 운송수단 } k \text{ 가 노드 } i \text{ 에서 } j \text{ 로 이동} \\ 0, & \text{ 그렇지 않은 경우} \end{cases}$
- d_{ijks}^g : s 번째 운송수단 k 가 노드 i 에서 j 로 이동할 때, 물품 g 의 운송량(무게)

- d_{iks}^g : s 번째 운송수단 k 가 노드 i 에서 하역하는 물품 g 의 양(무게)
- l_{iks}^g : s 번째 운송수단 k 가 노드 i 에서 적재하는 물품 g 의 양(무게)
- t_{iks} : s 번째 운송수단 k 가 노드 i 에 도착하는 시간

〈혼합정수선형계획 모형〉

$$\text{Min. } \sum_{i \in (P \cup T)} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} F_k x_{ijks} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} V_{ijk} d_{ijks}^g \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijks} \leq 1, \forall j \in N, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihks} - \sum_{j \in N} x_{hjks} = 0, \forall h \in C, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{s \in S} x_{hjks} \leq H_{hk} + \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{ihks}, \forall k \in K, \forall h \in (P \cup T) \quad (4)$$

$$x_{iiks} = 0, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (5)$$

$$M \sum_{i \in N \setminus h} x_{ihks} \geq l_{hks}^g, \forall h \in N, \forall g \in G, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (6)$$

$$M \sum_{i \in N \setminus h} x_{ihks} \geq d_{hks}^g, \forall h \in N, \forall g \in G, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} d_{ijks}^g - \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} (d_{hks}^g - l_{hks}^g) \leq \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} d_{hjks}^g, \forall h \in N, \forall g \in G \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} l_{iks}^g = \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} d_{iks}^g + L_i^g - D_i^g, \forall i \in N, \forall g \in G \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} d_{ijks}^g \geq d_{jks}^g, \forall j \in N, \forall g \in G, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} d_{iks}^g \geq D_i^g, \forall i \in N, \forall g \in G \quad (11)$$

$$d_{ijks}^g + l_{hks}^g - d_{hks}^g - M(1 - x_{ijks}) \leq \sum_{h \in N} d_{hjks}^g, \forall i, j \in N, \forall g \in G, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{g \in G} d_{ijks}^g \leq Q_k, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (13)$$

$$B_h \geq \text{Max}(t_{hks}) - M \left[\text{Max} \left\{ 1, \sum_{g \in G} l_{jks}^g \right\} - \sum_{g \in G} l_{jks}^g \right], \forall h \in N, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (14)$$

$$\text{Max}(B_i, t_{iks}) + a_k \left(\sum_{g \in G} d_{iks}^g + \sum_{g \in G} l_{iks}^g \right) + \frac{R_{ij}}{\text{Vel}_k} \quad (15)$$

$$-M(1 - x_{ijks}) \leq t_{jks}, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \forall s \in S$$

$$T_i^s \leq t_{iks} \leq T_i^s, \forall i \in C, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (16)$$

$$x_{ijks} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (17)$$

$$d_{ijks}^g, d_{iks}^g, l_{iks}^g, t_{iks} \in R^+, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \forall s \in S \quad (18)$$

혼합정수선형계획 모형의 목적함수인 식 (1)은 고정비용(Fixed cost)과 변동비용(Variable cost)으로 구성되는 총 운송비용을 최소화하는 것이다. 여기서, 고정비용은 해당 운송수단을 이용하기 위해 기본적으로 부과되는 이용료이며, 변동비용은 운송수단에 적재되는 물량에 비례하여 추가적으로 부과되는 운송비용을 의미한다.

식 (2)-(5)는 운송수단들의 이동 경로 생성에 대한 제약식들(Constraints)로, 식 (2)는 동일한 운송수단이 임의의 노드에 1회 이하로 방문하도록 제약하고 있다. 단, 임의의 노드에 여러 운송수단이 중복하여 방문하는 것은 허용된다. 이는 임의의 노드가 보유하고 있는 다량의 물품을 복수의 운송수단이 분할적으로 운송하거나, 임의의 노드에 다량의 물품을 복수의 운송수단이 배송할 수 있도록 허용하기 위한 목적이다. 식 (3)은 운송수단들의 이동 경로에 대한 연속성(Route continuity) 제약으로 수요지(C)에 한해 적용되도록 하였으며, 이는 중간 경유지에서의 환적(Transshipment)을 고려한 것이다. 즉, 중간 경유지에서 환적이 발생하는 경우, 적재된 물품을 다른 운송수단으로 하역하는 운송수단의 이동 경로는 환적지에서 종료되기 때문에 이후의 경로 연속성을 제약할 필요가 없기 때문이다. 식 (4)는 생산지 노드(P)와 공항, 항만 노드(T)에서 출발하는 운송수단은 각 노드가 보유한 운송수단의 수량(대수) 이내이어야 함을 제약하고 있다. 식 (5)는 운송수단들이 임의의 노드에서 머물지 않도록 제약하고 있다.

식 (6)-(8)은 물품의 흐름과 운송수단들의 이동 경로를 연계하기 위한 제약식들이다. 식 (6)-(7)은 임

의 운송수단의 물품 g 의 적재와 하역은 운송수단이 방문하는 노드에서만 가능함을 의미한다. 식 (8)은 각 노드에서 각 물품의 흐름에 대한 연속성 제약이다. 즉, Figure 4와 같이 임의의 노드에서 유출되는 물품의 무게는 (유입된 물품 g 의 무게 - 하역되는 물품 g 의 무게 + 적재되는 물품 g 의 무게)와 같아야 함을 의미한다. 따라서 식 (8)은 운송수단 간 물품 g 에 대한 환적이 발생하는 경우에도 물품 흐름의 연속성이 보장되도록 하고 운송수단들의 이동 경로와 일치시키는 역할을 한다.

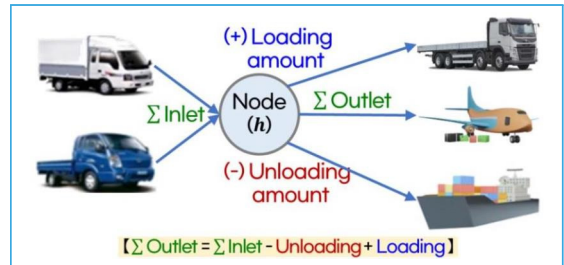


Figure 4. Continuity of goods flow

식 (9)-(11)은 운송수단들의 적재량 산정과 수요지들의 수요량 충족에 대한 제약식들이다. 식 (9)는 노드 i 에 지정된 물품 g 에 대한 수요량(D_i^g)과 적재하여 다른 노드로 이동해야 하는 양(L_i^g)이 노드 i 를 방문하는 운송수단들에 의해 충족되어야 함을 제약하고 있다. 식 (10)은 각 노드에 하역하는 물품 g 의 무게는 운송수단에 적재된 무게 이하여야 함을 의미하며, 식 (11)은 운송수단들이 임의의 수요지에 방문하여 하역하는 물품 g 의 무게는 해당 수요지의 물품 g 에 대한 수요량을 충족하여야 함을 의미한다. 즉, 임의의 수요지의 수요량을 충족시키기 위해 복수의 운송수단이 활용될 수 있음을 의미한다.

식 (12)-(13)은 운송수단들의 적재량에 관련된 제약들이다. 식 (12)는 각 운송수단이 방문하는 각 노드에서 물품 g 의 적재량을 산정하며, 식 (13)은 임의의 운송수단이 방문하는 모든 노드에서 운송수단에 적재된 물품들의 무게의 합이 적재 용량을 초과할 수 없음을 제약하고 있다.

식 (14)-(16)은 운송수단들의 이동 시간에 대한 제약식들이다. 식 (14)는 노드 h 에서 환적이 있는 경우, 물품을 하역하는 운송수단들은 물품을 적재하는 운송수단의 출발시간(B_{hi}) 이전에 노드 h 에 도착하여야 함을 제약하고 있다. 식 (15)는 노드 i 를 경유하여 노드 j 에 도착하는 운송수단의 도착시간을 산정하는 제약이다. 즉, 노드 j 도착시간은 (노드 i 도착시간 + 노드 i 에서의 적·하역 작업시간 + 노드 i 에서 노드 j 로의 운행시간)으로 산정된다. 여기서, 공항/항만에서 운영되는 화물기(Cargo plane), 화물선(Cargo ship)의 경우는 지정된 운항스케줄에 따라 지정된 출발시간이 고려되어야 한다. 따라서 $\text{Max}(B_i, t_{iks})$ 는 공항/항만 노드에 도착한 시간(t_{iks})과 운항스케줄상의 출발시간(B_i) 중 늦은 시간이 적용되도록 하였다. 식 (16)은 운송수단들이 수요지에 도착하는 시간에 대한 제약으로, 모든 물품은 고객과 약속된 시간대 $[T_i^s, T_i^e]$ 에 배송이 완료되어야 함을 의미한다.

식 (17)-(18)은 의사결정 변수들의 형태와 범위를 지정하고 있다. 식 (17)은 x_{ijks} 가 이항 변수(Binary variable, Boolean)임을, 식 (18)은 $q_{ijks}^g, d_{iks}^g, l_{iks}^g$ 과 t_{iks} 가 양의 실수(Positive real number)임을 지정하고 있다.

4. 수치실험 결과 및 분석

본 장에서는 3장에서 제안된 혼합정수선형계획 모형의 목적함수와 제약식들에 대한 확인/검증(V&V, Verification and Validation)을 위한 수치 실험(Numerical experiment) 예제와 결과를 제시한다. 수치실험은 2가지 예제를 바탕으로 수행되었다. 첫 번째 실험은 국내·외 수요지들에 대한 복합운송 계획을, 두 번째 실험은 해외 수요지들에 대한 복합운송 계획을 수립하는 예제이다. 실험예제에서 운송수단에 대한 입력 파라미터는 Table 3과 같은 항공운송과 해운의 특성을 고려하여 Table 4와 같이 적용하였다. 생산지, 수요지, 공항/항만 등 노

Table 3. Features of Air and Maritime Transport

Class.	Air transport	Maritime transport
Transit time	Short-term	Long-term
Timely arrival	High	Normal
Convenience of use	High	Low
Carrying capacity	Limited	Large
Freight charge	High	Low
Frequency of operation	High	Low

Table 4. Input Parameters for Vehicles

Vehicles (k)	Capacity (Q_k)	Velocity (Vel_k)	Charge	
			Fixed (F_k)	Variable (V_k)
Truck#1	150	100	10	0.025
Truck#2	300	90	15	0.027
Cargo plane	600	916	300	0.010
Ship	48,000	46	400	0.001

드들의 위치는 Google maps상에서 제공되는 위·경도 좌표와 노드 간의 거리를 이용하였다. 또한, 수치실험은 Windows 10 운영체제, 2.1GHz Intel Xeon Silver 4116 CPU, 64GB RAM 환경에서 수행되었으며, 실험예제들의 최적해(Optimal solution)는 IBM사의 ILOG CPLEX 12.8.0.0(Community version) 소프트웨어를 통해 탐색되었다.

4.1. 국내·외 수요지에 대한 복합운송

본 절에서는 국내·외 수요지들에 대한 복합운송 계획을 수립하는 실험예제를 다룬다. 실험예제는 Table 5와 같이 생산지는 1개소(포항), 공항 2개소(김해국제공항, 룡비치뮤니시플공항) 그리고 수요지는 대구 등 6개소로 구성되었다. 운송되는 물품은 2종으로 고려하고, 각 수요지에 대해 준수해야 하는 납기(Delivery time)가 지정된 것으로 가정하였다.

실험예제 데이터를 적용한 최적 복합운송 계획은 Table 6과 같이 요약되며, 모든 수요지의 수요량이 충족되고 납기가 준수됨을 확인할 수 있다. Figure 5는

Table 5. Data of Nodes for Example #1

Node no.	Class.	Place	Position		Production/Demand(kg)		Delivery time	
			Latitude	Longitude	Item#1	Item#2	Start(T_i^s)	End(T_i^e)
①	P	[KR] Pohang	36.0937°N	129.3698°E	250	300		
②	T	[KR] Gimhae Int'l Airport	35.1036°N	129.0413°E	-	-		
③	T	[US] Long Beach Municipal Airport	33.7479°N	118.2144°W	-	-		
④	C	[KR] Daegu	35.8675°N	128.5942°E	50	70	0	5
⑤	C	[KR] Changwon	35.2267°N	128.6796°E	100	50	0	5
⑥	C	[KR] Daejeon	36.3504°N	127.3874°E	-	20	0	10
⑦	C	[US] Los Angeles	34.0281°N	118.2676°W	70	90	0	30
⑧	C	[US] San Diego	36.2114°N	115.2794°W	-	10	0	36
⑨	C	[US] Las Vegas	32.8092°N	117.1433°W	30	80	0	25

*KR : Republic of Korea, US : United States of America

Table 6. The Results of Example #1

Region	Vehicle	Vehicle routing (Item#1/Item#2)				
KR	Truck#2 (A)	Node	①	⑤	⑥	
		Arrival	-	3.21	5.15	
		Loading	100/200			
		Unloading		100/180	-/20	
	Truck#1 (A)	Node	①	④	⑤	②
		Arrival	-	3.33	4.99	8.03
		Loading	50/70		-/130	
	Truck#1 (B)	Node	①	②		
		Arrival	-	8.03	At node ⑤, transfer from truck#2(A)	
		Loading	100/50			
Unloading			100/50			
KR → US	Cargo plane	Node	②	③		
		Arrival	8.03	18.45		
		Loading	100/180			
		Unloading		100/180		
US	Truck#1 (C)	Node	③	⑨		
		Arrival	18.45	24.15		
		Loading	30/80			
		Unloading		30/80		
	Truck#2 (B)	Node	③	⑦	⑧	
		Arrival	18.45	27.90	30.00	
		Loading	70/100			
		Unloading		70/90	-/10	

Table 6을 시각화한 결과이다. 운송수단들의 경로를 살펴보면, 생산지(①, 포항)에서 Truck#1 2대와 Truck#2 1대가 Item#1 250kg, Item#2 300kg을 적재하고 국내운송을 시작한다. Truck#2(A)는 Item#1 100kg과 Item#2 200kg을 적재하고 출발하여 창원(수요지 ⑤)에 3.21시간에 도착하여 Item#1 100kg과 Item#2 180kg을 하역한다. 여기서, Item#1 100kg과 Item#2 50kg은 창원(수요지 ⑤)의 수요량을 공급하는 것이며, 잔여량 Item#2 130kg은 다른 수요지로 이동될 예정이다. 이후, 대전(수요지 ⑥)에 5.15시간에 도착하여 Item#2 20kg을 공급하고 운행을 종료한다. Truck#1(A)은 대구(수요지 ④)에 3.33시간에 도착하여 Item#1 50kg과 Item#2 70kg을 공급한 후, 공차(Deadhead) 상태로 창원(수요지 ⑤)에 4.99시간에 도착하여 Truck#2(A)가 3.21시간에 하역해 둔 Item#2 130kg을 적재, 즉, 환적한다. 여기서, 임의의 노드에서 환적이 발생할 때, 물품을 하역하는 운송수단이 적재하는 운송수단보다 해당 노드에 먼저 도착해야 한다는 제약이 정상적으로 적용되고 있음을 확인할 수 있다. 이후, Truck#1(A)는 창원(수요지 ⑤)에서 환적한 Item#2 130kg을 김해국제공항(공항 ②)에 하역한 후 운행을 종료한다. 또한, Truck#1(B)는 생산지에서 적재한 Item#1 100kg과 Item#2 50kg을 김해국제공항(공항 ②)에 하역한다.

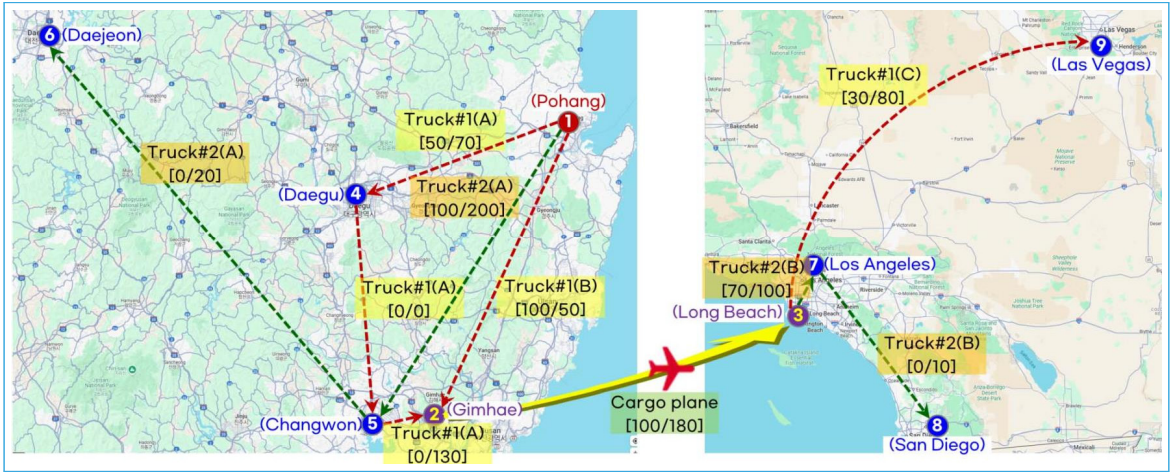


Figure 5. Visualization for table 6

따라서 Truck#1(A)와 Truck#1(B)에 의해 김해국제공항(공항 ②)에 하역된 물품의 양은 Item#1 100kg과 Item#2 180kg이며, 이러한 물품들은 화물기(Cargo plane)을 이용해 김해국제공항(공항 ②)에서 롱비치뮤니시플공항(공항 ③)으로 이동된다.

롱비치뮤니시플공항(공항 ③)에서 Truck#1(C)와 Truck#2(B)를 이용해 미국 내에서의 국내운송이 시작된다. Truck#1(C)는 Item#1 30kg과 Item#2 80kg을 샌디에이고(수요지 ⑨)에 공급하고 운행을

종료한다. Truck#2(B)는 Item#1 70kg과 Item#2 100kg을 적재하여 로스앤젤레스(수요지 ⑦)에 Item#1 70kg과 Item#2 90kg을 공급한 후, 라스베이거스(수요지 ⑨)로 이동해 Item#2 10kg을 공급한다.

4.2. 국외 수요지에 대한 복합운송

본 절에서는 우리나라에서 생산된 물품을 미국과 호주에 위치한 수요지들로 운송하기 위한 복합운송

Table 7. Data of Nodes for Example #2

Node no.	Class.	Place	Position		Production/Demand(kg)		Delivery time	
			Latitude	Longitude	Item#1	Item#2	Start(T_i^s)	End(T_i^e)
①	P	[KR] Gumi	36.0923°N	128.4057°E	250	300	-	-
②	T	[KR] Incheon Int'l Airport	37.4651°N	126.4472°E	-	-	-	-
③	T	[KR] Pusan Newport	35.4652°N	129.0971°E	-	-	-	-
④	T	[AU] Sydney Int'l Airport	33.9402°S	151.1773°E	-	-	-	-
⑤	T	[US] Port of Long Beach	33.7545°N	118.2215 W	-	-	-	-
⑥	C	[AU] Newcastle	32.9435°S	151.7027°E	50	70	0	17
⑦	C	[AU] Central Coast	33.3515°S	151.4420°E	40	30	0	20
⑧	C	[AU] Canberra	35.3009°S	149.1245°E	60	20	0	24
⑨	C	[US] Los Angeles	34.0445°N	118.2547 W	50	60	0	230
⑩	C	[US] Phoenix	33.4261°N	112.1519 W	20	40	0	250
⑪	C	[US] Las Vegas	36.1173°N	115.0865 W	30	80	0	250

*KR : Republic of Korea, US : United States of America, AU : Australia

계획을 수립하는 실험예제를 다룬다. 실험예제는 Table 7과 같이 생산지는 1개소(구미), 항만/공항 4개소(부산신항, 인천국제공항, 시드니국제공항, 롱비치항), 그리고 수요지는 6개소(미국, 호주 각 3개소)

Table 8. The Results of Example #2

Region	Vehicle	Vehicle routing (Item#1/Item#2)			
KR	Truck#2 (A)	Node	①	②	
		Arrival	-	3.28	
		Loading	150/120		
	Truck#2 (B)	Node	①	③	
		Arrival	-	3.30	
		Loading	100/180		
KR → AU	Cargo plane	Node	②	④	
		Arrival	3.28	13.47	
		Loading	150/120		
		Unloading		150/120	
AU	Truck#1 (A)	Node	④	⑦	⑧
		Arrival	13.47	16.66	20.84
		Loading	100/50		
	Truck#2 (C)	Node	④	⑥	
		Arrival	13.47	16.67	
		Loading	50/70		
KR → US	Ship	Node	③	⑤	
		Arrival	3.30	211.22	
		Loading	100/180		
		Unloading		100/180	
US	Truck#1 (B)	Node	⑤	⑨	⑩
		Arrival	211.22	213.51	219.17
		Loading	20/130		
	Truck#1 (C)	Node	⑤	⑨	⑪
		Arrival	211.22	213.84	224.72
		Loading	80/50	-/30	
		Unloading		50/-	30/80

로 구성되었다. 운송되는 물품은 2종으로 고려하고, 각 수요지에 대해 준수해야 하는 납기가 지정된 것으로 가정하였다.

실험예제 데이터를 적용한 최적 복합운송 계획은 Table 8과 같이 요약되며, 모든 수요지의 수요량이 충족되고 납기가 준수됨을 확인할 수 있다. Figure 6은 Table 8을 시각화한 결과이다. 운송수단들의 경로를 살펴보면, 생산지(①, 구미)에서 Item#1 250kg과 Item#2 300kg은 수출을 위한 국제운송을 위해 Truck#2 2대가 이용하여 인천국제공항(②)과 부산신항(③)으로 운송된다. 첫 번째 차량 Truck#2(A)는 Item#1 150kg과 Item#2 120kg을 적재하고 인천국제공항(②)으로, 두 번째 차량 Truck#2(B)는 Item#1 100kg과 Item#2 180kg을 적재하고 부산신항(③)으로 운송을 시작한다. 인천국제공항(②)에 도착한 물품들은 화물기(Cargo plane)를 이용해 호주에 위치한 시드니국제공항(④)으로, 부산신항(③)에 도착한 물품들은 화물선(Cargo ship)을 이용해 미국에 위치한 롱비치항(⑤)으로 출발한다.

인천국제공항(②)을 출발하여 호주의 시드니국제공항(④)에 도착한 Item#1 150kg과 Item#2 120kg은 Truck#1, Truck#2 각 1대를 이용해 호주 내 국내운송을 시작한다. Truck#1(A)는 Item#1 100kg과 Item#2 50kg을 적재하고 출발하여 센트럴코스트(수요지 ⑦)에 Item#1 40kg과 Item#2 30kg, 캔버라(수요지 ⑧)에 Item#1 60kg과 Item#2 20kg을 순차적으로 공급한다. Truck#2(C)는 Item#1 50kg과 Item#2 70kg을 적재한 후, 뉴캐슬(수요지 ⑥)에 전량 공급하는 것으로 운행을 종료한다.

부산신항(③)을 출발하여 미국의 롱비치항(⑤)에 도착한 Item#1 100kg과 Item#2 180kg은 Truck#1 2대를 이용해 미국 내 국내운송을 시작한다. Truck#1(B)는 Item#1 20kg과 Item#2 130kg을 적재하고 출발하여 로스앤젤레스(수요지 ⑨)에 Item#2 90kg을 하역한다. 이때, 로스앤젤레스(수요지 ⑨)의 Item#2에 대한 수요량은 60kg이며, 초과량 30kg은 Truck#1(C)에 환적되어 다른 수요지로 공급될 예정이다. 이후, Truck#1(B)는 피닉스(수요지

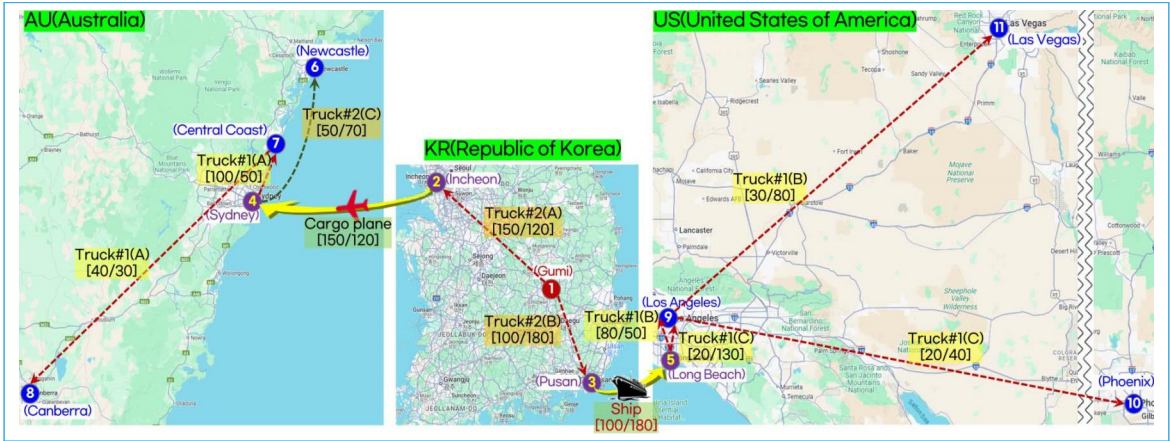


Figure 6. Visualization for table 8

⑩로 이동하여 Item#1 20kg과 Item#2 40kg을 공급하고 운송을 종료한다. Truck#1(C)는 Item#1 80kg과 Item#2 50kg을 적재하고 출발하여 로스앤젤레스(수요지 ⑨)에 Item#1 50kg을 하역하고, Truck#1(B)가 하역해 둔 Item#2 30kg을 환적한다. 이후, 라스베이거스(수요지 ⑪)에 도착하여 Item#1 30kg과 Item#2 80kg을 공급하는 것으로 운행을 종료한다.

5. 결론 및 향후 연구방향

온라인 마켓과 옴니채널의 성장세로 인해 국제물류의 수요가 지속적으로 증대되고 있으며, 특히, 우리나라는 최근의 방산수출 활성화에 따라 수출 무기체계 후속 군수지원을 위한 MRO 시장에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 배경에서, 본 연구는 글로벌 공급망을 경제적이고 효율적으로 운영하기 위한 복합운송 최적화를 위한 혼합정수선형계획 모형을 제안하였다. 즉, 다수의 지역에서 생산된 대량의 물품을 다수의 국내·외 수요지로 운송함에 있어 트럭, 철도, 선박, 항공과 같은 두 가지 이상 운송수단을 연계하여 납기를 준수하면서 최소의 비용으로 운송하는 것을 목표로 한다.

혼합정수선형계획 모형은 나눔배송, 배송/회수 시

간 제약을 고려하고 배송과 수거를 동시에 고려하는 SDVRP-SDPTW를 바탕으로, 여러 종류의 수요 물품, 복수의 운송수단 활용, 운송수단 간의 환적, 항공기/선박의 운항스케줄 등 경제성 증대를 위한 국제물류 운영 전략과 현실적인 제약사항들을 고려하여 개발되었다. 또한, 두 가지의 수치실험을 통해 제안하는 복합운송 최적화를 위한 혼합정수선형계획 모형을 검증하고 타당성을 확인하였다. 실험 결과에 대한 분석과 시각화를 통해 환적 조건, 항공기/선박의 운항스케줄 및 수요지에 대한 납기 준수 등 모든 제약 조건들이 정상적으로 적용되고 현실적인 운송 계획이 수립됨을 확인하였다.

향후 연구방향으로는, 첫째, VRP 계열의 최적화 문제들은 NP-hard(Non-deterministic Polynomial time-hard)로 분류되며, 이에 따라 노드의 증가 등으로 문제의 크기가 증대될수록 최적 해를 탐색하기 위한 계산시간이 지수적으로 증가한다. 따라서 현실적인 시간 내에 합리적인 수준의 복합운송 계획을 수립하기 위한 메타휴리스틱(Metaheuristic) 알고리즘 등의 새로운 해법을 개발하거나, 해 공간(Solution space)을 감소시키기 위해 문제의 구조적 특징을 검토하는 것이다. 둘째, 본 연구는 수요량이 확정적(Deterministic demand)인 것으로 고려하고 있으나, 온라인 마켓, 옴니채널의 수요에 대응

하기 위한 운송계획 수립에 있어서는 확률적 수요에 대한 고려가 필요하다. 셋째, 완벽한 ‘Door to Door’ 서비스를 위해 최근 라스트마일 배송에 대한 관심이 높아지고 있으며, 라스트마일 배송 수단으로 드론, 물류 로봇 등이 고려되고 있다. 따라서 혁신적 기술들을 운송계획 등 물류운영 전략 수립에 고려할 필요가 있다.

사사(Acknowledgements)

본 논문은 해양수산부 제5차 해운항만물류 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- 1 '23-'27 Defense Industry Development master plan, Defense Acquisition Program Administration, 2023.
- 2 Gkikas, Z., A Life Cycle Cost Approach for Military Aviation, Hellenic Aerospace Industry, 2016.
- 3 Diaz Cuesta, M., Ventura, S., Vega Vera, C. J., Sánchez Lacasa, V., & Yenes Gallego, J. I., "Machine Learning in Defense Engineering Program Management: A Full Life-Cycle Approach Using Open Data", *Social Science Research Network*, pp. 1-34, 2025.
- 4 Ryu, M. K., Lee, Y. B., & Kang, S. J., "Development and Application of the Spare-parts Cost Estimating Relationships", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 13(4), pp. 601-611, 2010.
- 5 Režnar, T., Martinovič, J., Slaninová, K., Grakova, E., & Vondrák, V., "Probabilistic time-dependent vehicle routing problem", *Central European Journal of Operations Research*, 25, pp. 545-560, 2017.
- 6 Bouanane, K., Amrani, M. E., & Benadada, Y., "The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup: a taxonomic survey", *International Journal of Logistics Systems and Management*, 41(1-2), pp. 77-119, 2022.
- 7 Fan, J., "The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery based on customer satisfaction", *Procedia engineering*, 15, pp. 5284-5289, 2011.
- 8 Desaulniers, G., "Branch-and-price-and-cut for the split-delivery vehicle routing problem with time windows", *Operations Research*, 58(1), pp. 179-192, 2010.
- 9 Yan, S., Chu, J. C., Hsiao, F. Y., & Huang, H. J., "A planning model and solution algorithm for multi-trip split-delivery vehicle routing and scheduling problems with time windows", *Computers & Industrial Engineering*, 87, pp. 383-393, 2015.
- 10 Luo, Z., Qin, H., Zhu, W., & Lim, A., "Branch and price and cut for the split-delivery vehicle routing problem with time windows and linear weight-related cost", *Transportation Science*, 51(2), pp. 668-687, 2017.
- 11 Bianchessi, N., Drexl, M., & Irnich, S., "The split delivery vehicle routing problem with time windows and customer inconvenience constraints", *Transportation Science*, 53(4), pp. 1067-1084, 2019.
- 12 Li, J., Qin, H., Baldacci, R., & Zhu, W., "Branch-and-price-and-cut for the synchronized vehicle routing problem with split delivery, proportional service time and multiple time windows", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, pp. 1-22, 2020.
- 13 Zhao, J., Dong, H., & Wang, N., "Green split multiple-commodity pickup and delivery vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, 159, pp. 1-11, 2023.
- 14 Wu, S., Bo, H., Jin, C., & Liu, X., "Nested column generation for split pickup vehicle routing problem with time windows and time-dependent demand", *Computers & Operations Research*, 164, pp. 1-18, 2024.
- 15 Song, X., Jones, D., Asgari, N., & Pigden, T., "Multi-objective vehicle routing and loading with time window constraints: a real-life application", *Annals of Operations Research*, 291(1), pp. 799-825, 2020.
- 16 Huang, M., Du, B., & Guo, J., "A hybrid collaborative framework for integrated production scheduling and vehicle routing problem with batch manufacturing and soft time windows", *Computers & Operations*

Research, 159, pp. 1–17, 2023.

- 17 Arslan, A. N., Klibi, W., & Montreuil, B., “Distribution network deployment for omnichannel retailing”, *European Journal of Operational Research*, 294(3), pp. 1042–1058, 2021.
- 18 Liu, P., Hendalianpour, A., Feylizadeh, M., & Pedrycz, W., “Mathematical modeling of vehicle routing problem in omni-channel retailing”, *Applied Soft Computing*, 131, pp. 1–22, 2022.
- 19 Akyüz, M. H., Muter, İ., Erdoğan, G., & Laporte, G., “Minimum cost delivery of multi-item orders in e-commerce logistics”, *Computers & Operations Research*, 138, pp. 1–15, 2022.
- 20 Yang, J., & Li, Y., “A multicommodity pickup and delivery problem with time windows and handling time in the omni-channel last-mile delivery”, *International Transactions in Operational Research*, 32(3), pp. 1524–1565, 2025.
- 21 Paul, J., Agatz, N., Spliet, R., & De Koster, R., “Shared capacity routing problem – An omni-channel retail study”, *European Journal of Operational Research*, 273(2), pp. 731–739, 2019.
- 22 Schubert, D., Kuhn, H., & Holzapfel, A., “Same-day deliveries in omnichannel retail: Integrated order picking and vehicle routing with vehicle-site dependencies”, *Naval Research Logistics (NRL)*, 68(6), pp. 721–744, 2021.
- 23 Guo, C., Thompson, R. G., Foliente, G., & Kong, X. T., “An auction-enabled collaborative routing mechanism for omnichannel on-demand logistics through transshipment”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 146, pp. 1–22, 2021.
- 24 Li, N., & Wang, Z., “Vehicle routing problem for omnichannel retailing including multiple types of time windows and products”, *Computers & Operations Research*, 173, pp. 1–12, 2025.

함정용 복합재료 프로펠러의 동역학적 모형시험 상사법에 대한 수치적 연구

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

Numerical Study on the Dynamic Scaling Law of Composite Propellers for Naval Ships

김성훈[†], Sunghoon Kim

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

박정용, Jeongyong Park

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

이형석, Hyongsuk Lee

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

Abstract

Unlike metallic marine propellers that consider only hydrodynamic scaling, composite propellers must consider hydroelastic scaling, incorporating blade deformation effects. This study numerically investigated the hydroelastic scaling of composite propellers using the Mach and Froude number scaling laws. A composite propeller was designed to replicate the KP458 propeller shape under design load conditions through FSI(Fluid-Structure Interaction) analysis based on the BEM(Boundary Element Method)-FEM(Finite Element Method) and CFD(Computational Fluid Dynamic)-FEM methods. To evaluate the performance of both model-scale and full-scale composite propellers, FSI analyses were performed using both the BEM-FEM and CFD-FEM approaches. Under open-water conditions, all the propellers exhibited identical deformation and performance. However, in self-propulsion analyses using CFD-FEM behind wake conditions, local deformation differences between full-scale and model-scale propellers emerged owing to wake effects, particularly in Froude number scaling. The Mach number scaling law is the most realistic approach as it more accurately approximates the full-scale analysis results than the Froude number scaling law, while allowing the use of the same material and stacking sequence as the full-scale composite propeller.

keywords : composite propeller, fluid-structure interaction, dynamic scaling law, froude number scaling, mach number scaling

[†] Corresponding Author : Sunghoon Kim

Tel : +82-2-479-6025, email : sunghoon.kim.prop@hd.com

HD Hyundai Heavy Industries, 477, Bundangsuseo-ro, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 25th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

복합재는 Ni-Al-Br 합금에 비해 약 20% 수준의 낮은 밀도를 가지며, 고감쇠성과 비자성 특성을 갖춘 가벼운 재료로, 진동 및 소음 저감 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다[1-2]. 이러한 저진동·저소음 성능이 중요한 함정 분야에서는 복합재의 우수한 특성을 활용하여 함정용 복합재료 프로펠러가 개발·적용되어 왔다[3-4].

2014년, 일본 나카시마 프로펠러는 세계 최초로 직경 2m급 복합재료 프로펠러의 상용화에 성공했다. 이후 일본 내에서 5척 이상의 화물선과 페리선 등 중소형 선박에 복합재료 프로펠러를 적용하여 시운전을 진행한 결과, 연비 향상과 함께 기관실 진동이 40% 감소하는 등 우수한 추진 성능과 소음·진동 저감 효과를 확인했다고 보고하였다[5]. 또한, HD현대그룹에서도 2m급 복합재료 프로펠러를 제작하여 국내 최초로 실증을 완료한 바 있다[6].

함정 및 수중함의 프로펠러 공동 성능과 CIS (Cavitation Inception Speed) 성능을 평가하기 위해서는 모형시험 단계에서의 검증이 필수적이다. 그러나 복합재료 프로펠러의 모형시험법에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 일반적인 금속 프로펠러와 달리, 복합재료 프로펠러는 하중이 가해질 때 형상이 변형되므로, 이를 고려한 구조적 형상 변화를 포함하는 유탄성학적 상사법의 개발이 반드시 필요하다.

몇몇 연구자들은 복합재료 프로펠러의 모형시험을 수행하여 유체-구조 연성 해석(FSI, Fluid-Structure Interaction)의 검증을 시도한 바 있다[7-9]. Maljaars et al. (2018)은 복합재 프로펠러를 제작해 공동수조에서 시험하고, DIC(Digital Image Correlation)로 계측한 변위를 BEM(Boundary Element Method)-FEM(Finite Element Method) 연성 해석과 CFD (Computational Fluid Dynamics)-FEM 연성 해석 결과 검증에 활용했다[7]. Kawakita (2019)는 하이스큐 복합재 프로펠러의 성능시험과 변동압력 계측을 통해 유체역학적 특성을 분석했다[8]. 그리고, Rokvam et al. (2021)은 600mm 길이의 CFRP

(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 프로펠러 날개에 정적 하중을 가해 DIC로 변위를 측정하고 FEM 해석 결과와 비교했다[9].

Young (2010)과 Motley and Young (2012)는 항공 및 풍력 터빈 분야에서 활용되던 프루드 수 (Froude number)와 마하 수(Mach number)를 기반으로 한 공탄성 상사법을 선박용 복합재료 프로펠러의 유탄성 상사법에 적용할 수 있는지 검토하였다 [10-11]. 이를 위해 BEM-FEM 연성 해석을 활용하여 프로펠러 단독 성능 및 반류가 있는 조건에서의 수치적 분석을 수행하였으며, 그 결과 모형 프로펠러와 실선 프로펠러의 형상 변화가 거의 일치함을 확인하였다. 그러나 여전히 관련 연구는 제한적이며, 보다 체계적인 모형시험 기법과 상사법 개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 함정 설계 단계에서 필수적인 공동 성능 및 CIS 성능 시험 방법을 개발하고자, 프루드 수와 마하 수 상사법을 BEM-FEM 연성 해석과 CFD-FEM 연성 해석을 통해 보다 정밀하고 체계적으로 검토하고자 한다.

2. 복합재료 프로펠러의 유탄성학적 상사법

서론에서 언급한 바와 같이, 유탄성학적 상사법에는 프루드 수 상사와 마하 수 상사가 있다. 2.1장과 2.2장에서 각각의 상사법에 대한 특징을 상세하게 작성하였다.

2.1. 프루드 수 상사법

프루드 수 상사는 금속 프로펠러의 경우와 동일하게 프루드 수를 맞춰 모형 시험을 수행하므로, 자유수면 효과를 고려할 수 있는 예인수조에서 자항 시험을 진행할 수 있다. 또한, ITTC(International Towing Tank Conference) 78 방법과 같은 기존의 실선 성능 추정 기법을 활용하여 실선 프로펠러의 추진 성능을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 모형 시험에서 실선 프로펠러와 동일한 변형을 재현하려면, 실선 프로펠러와는 물성이 다른 재료와

적층 설계가 필요하다. 이를 위해 프루드 수를 만족하는 모형 복합재료 프로펠러의 경우, 실선 복합재료 프로펠러와 동일한 밀도를 유지하면서도 탄성 계수를 모형의 축척 비율에 맞게 조정해야 한다. 하지만 이러한 요구를 충족하는 적절한 재료를 확보하는 것은 불가능하다.

2.2. 마하 수 상사법

반면, 마하 수 상사법은 모형 복합재료 프로펠러의 재료와 적층 설계를 실선 복합재료 프로펠러와 동일하게 사용하고, 시험 유속 조건을 실선과 동일하게 맞춰 수행하는 방법이다. 따라서, 모형 제작을 위한 재료 수급 문제없이 현실적으로 가능한 유일한 모형 시험 상사법으로 볼 수 있다. 다만, 실선 크기의 복합재료 프로펠러와 동일한 유속에서 작동해야만 동일한 변형이 발생하고, 유탄성학적 상사를 만족할 수 있다. 이에 따라, 실선 유속과 동일한 유속에서 동작 가능한 시험 장비와 고용량 동력계가 필요하다는 단점이 있다. 또한, 프루드 수가 일치하지 않기 때문에 기존의 자항 시험 방법을 통해 실선 복합재료 프로펠러의 추진 성능을 추정할 수 없다.

프루드 수 상사법은 ITTC 방법을 적용할 수 있다는 장점이 있지만, 실제 재료 수급이 어려운 단점이 있다. 반면, 마하 수 상사법은 고용량 동력계가 필요하다는 제약이 있으나, 실선 프로펠러와 동일한 재료 및 적층 설계가 가능하다는 이점을 갖는다. 이러한 기술적 특성 외에도, 각 상사법이 유탄성학적 특성에 미치는 영향을 비교하고자, 프루드 수 상사와 마하 수 상사를 기반으로 모형 복합재 프로펠러를 설계한 후, BEM-FEM 및 CFD-FEM 연성 해석을 통해 그 유탄성학적 거동을 수치적으로 검토하였다.

3. 수치적 기법

본 연구에서는 복합재료 프로펠러의 단독 성능 해석과 복합재료 프로펠러의 역설계를 위해 상대적으로 신속하게 계산할 수 있는 BEM-FEM 연성해석을

사용하였고, 점성 효과를 고려하기 위해 몇몇 계산에는 CFD-FEM 연성 해석을 적용하였다[12]. 반류의 영향이 있는 자항 상태의 해석에는 CFD-FEM 연성 해석을 이용하였다. BEM-FEM 연성 해석과 달리, CFD-FEM 연성 해석은 레이놀즈 수의 차이에 따라 발생하는 프로펠러 자체의 점성 효과뿐만 아니라, 선체 반류가 레이놀즈 수에 따라 달라지는 영향까지 함께 고려할 수 있다.

CFD 해석의 비정상 난류 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 난류 모델은 $k-\omega$ SST 방정식을 적용하였으며, 상용 CFD 프로그램인 Simcenter STAR-CCM+(17.06 version)을 사용하였다. 균일류에서의 단독 성능 해석에는 MRF(Multiple Reference Frame) 기법을 적용하였으며, 자항 성능 해석에는 중첩 격자 (Overset grid) 기법을 사용하였다.

구조 해석은 Abaqus(2023 version)을 사용하였으며, FEM 해석을 위해 SC8R 연속체 셀 (Continuum shell) 격자를 적용하였다. 복합재료의 적층 모델을 Figure 1에 도시되어 있는 적층 근사 모델을 사용하였으며, 총 6,400개의 구조 요소를 적용하였다[12].

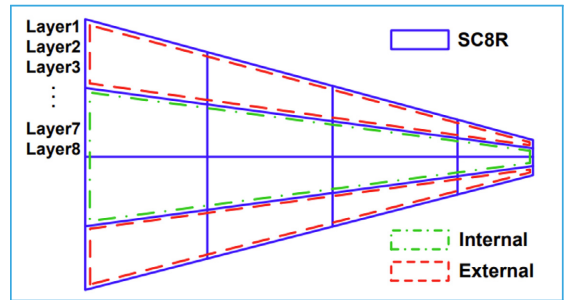


Figure 1. Simplified element model of Lee (2018) [12]

또한, 프로펠러의 회전 및 변형으로 인해 발생하는 원심력과 코리올리 힘의 영향을 해석에 반영하여 계산을 수행하였다. 구조 연성 해석은 강한 유체-구조 연성 해석(Strongly coupled FSI)을 수행하였기 때문에, 부가 질량 및 유체 동역학적 감쇠 모델을 적용하지 않고 계산을 진행하였다. FSI 해석기법은 Simcenter STAR-CCM+와 Abaqus에서 제공하는 FSI 연성 라이브러리를 활용하였으며, 사용된 FSI

알고리즘은 가장 일반적으로 사용되는 Block Gauss-Seidel iteration 방법을 적용하였다.

4. 대상 프로펠러

대상 프로펠러로는 벤치마킹용으로 널리 사용되는 KVLCC2(KRISO Very Large Crude Carrier 2)용 프로펠러인 KP458을 선정하였고, 복합재료 프로펠러의 설계 조건은 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Design Condition of Composite Propeller

Item	Value
Propeller diameter [m]	9.86
No. of blades	4
Ship speed [knots]	16.73
Power × RPM	23,109 kW × 78.0 RPM
Wake fraction	0.344

설계 하중 조건에서 BEM-FEM과 CFD-FEM 연계 해석을 통해 역설계를 수행하였으며, 하중이 가해지면, KP458의 형상과 동일하도록 설계를 진행하였다. 또한, 복합재료의 굽힘-비틀림(Bend-twist) 특성을 고려하여 설계하였기 때문에, 프로펠러 형상의 변화는 피치(Pitch) 분포와 레이크(Rake) 분포에 한정되며, 다른 형상 요소는 변화가 거의 발생하지 않는다. Figure 2와 3은 각각 하중이 가해지지 않은 상태에서의 복합재료 프로펠러와 KP458의 피치와 레이크 형상을 나타낸다.

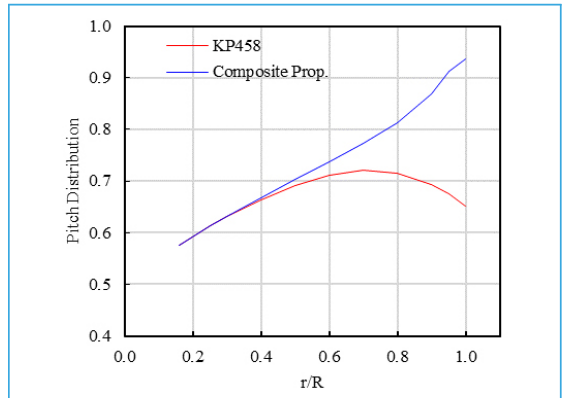


Figure 2. Pitch of KP458 and composite propeller

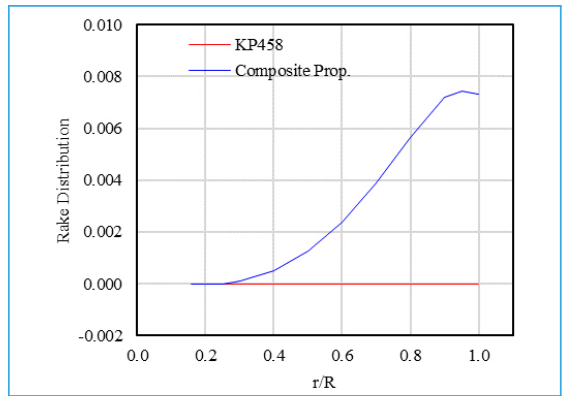


Figure 3. Rake of KP458 and composite propeller

또한, 설계된 추진기에 대해 Table 2에 제시된 Young (2010)의 마하 수 및 프루드 수 조건을 만족하는 자항 시험 상태를 기준으로, 해석 조건과 복합재료의 물성치를 계산하여 정리하였다[10].

Table 2. Conditions and Properties of FSI Analysis for Full and Mach no. and Fr. no. Scaling

Variable	Full scale	Mach no. scale	Fr. no. scale
Diameter [mm]	9,860	280	280
Axial velocity [knots]	16.73	16.73	2.82
RPS [1/s]	1.30	45.78	7.72
Reynolds number	5.5×10^7	1.2×10^6	2.5×10^5
Material density [kg/m ³]	1,498	1,498	1,498
Elastic modulus, E ₁ [GPa]	110	110	3.12
Elastic modulus, E ₂ , E ₃ [GPa]	8	8	0.23
Shear modulus G ₂₃ , G ₁₃ , G ₁₂ [GPa]	4	4	0.11
Poisson's ratio	0.37	0.37	0.37

5. BEM-FEM 연성 해석

복합재료 프로펠러는 유속에 따라 형상이 변하기 때문에, 단독 성능 해석은 각 유속 조건별로 개별적으로 수행해야 한다. 반류비(Wake fraction)를 고려한 16.73 노트(knots)의 운항 조건을 재현할 수 있도록, 단독 성능 해석은 7, 9, 11 노트에서 수행하였다. 7, 9, 11 노트 조건에서 BEM-FEM 연성 해석을 이용한 단독 성능 해석을 수행하였으며, 해석 결과는 Figure 4와 5에 정리되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 복합재료 프로펠러는 하중이 가해지면 형상이 변하며, 하중이 클수록 변위도 증가한다. 따라서 속도가 가장 빠른 11 노트에서 하중이 가장 크게 작용하므로 형상 변화가 크며, 이에 따라 단독 성능 곡선의 변화도 가장 두드러진다.

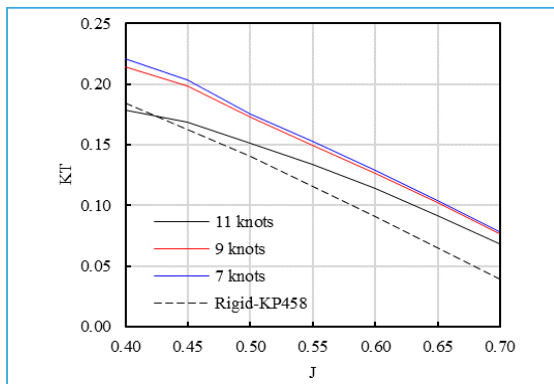


Figure 4. Thrust coefficients of full-scaled composite propeller by BEM-FEM analysis

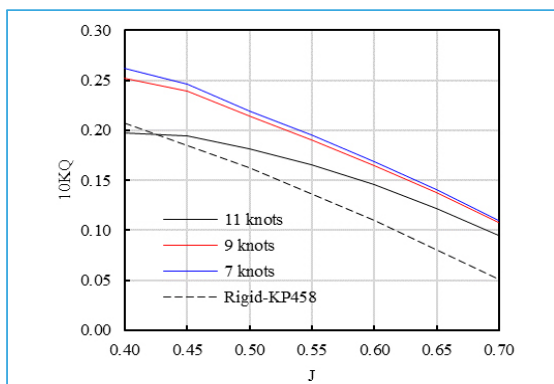


Figure 5. Torque coefficients of full-scaled composite propeller by BEM-FEM analysis

모형 프로펠러 상사법의 영향을 분석하기 위해, 하중이 가장 큰 11 노트에서 단독 성능 상태의 실선 복합재료 프로펠러와 마하 수 및 프루드 수 상사를 적용한 모형 복합재료 프로펠러에 대해 BEM-FEM 연성 해석을 수행하였다. 그 결과는 Figure 6에 정리되어 있으며, 해석 결과, 세 가지 경우 모두 변형이 동일하게 나타나 동일한 추력 계수와 토크 계수를 얻었음을 알 수 있다. 또한, 동일한 반류 조건에서 BEM-FEM 연성 해석을 수행하여 하중이 가해졌을 때의 변형된 피치와 레이크 형상을 계산하였으며, 그 결과는 Figure 7과 8에 정리되어 있다.

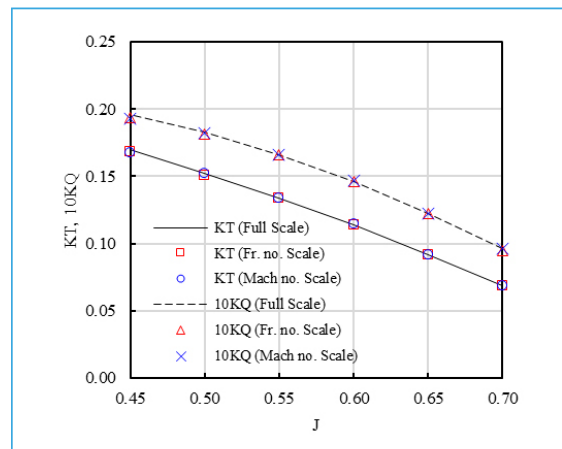


Figure 6. Thrust and torque coefficients of composite propellers for open-water condition by BEM-FEM analysis

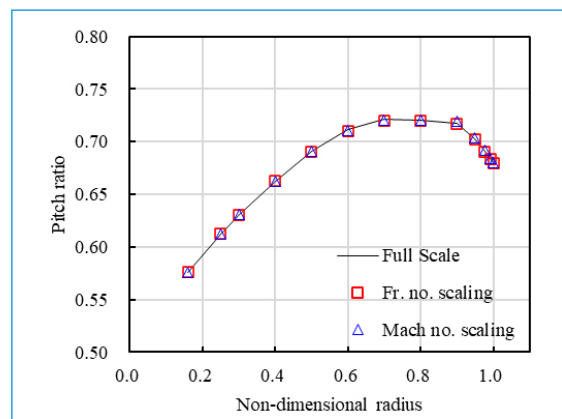


Figure 7. Pitch ratio distribution of composite propellers by BEM-FEM analysis behind wake condition

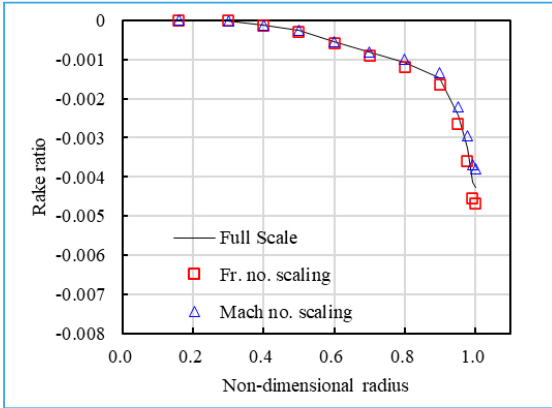


Figure 8. Rake ratio distribution of composite propellers by BEM-FEM analysis behind wake condition

그림에서 볼 수 있듯이, 실선 복합재료 프로펠러와 마하 수 및 프루드 수 상사를 적용한 모형 프로펠러 모두 동일한 변형을 보였다. 이는 BEM-FEM 연성 해석은 레이놀즈 수 효과가 고려되지 않기 때문에, 세 프로펠러에 가해지는 무차원화된 유체 하중 계수가 동일하기 때문이다. 따라서, 유체력의 상사가 완벽하게 유지된다면 복합재료 프로펠러의 변형은 동일한 결과를 보일 것으로 예상된다.

6. CFD-FEM 연성 해석

레이놀즈 수의 영향을 확인하기 위해 CFD-FEM 연성 해석을 수행했다. Table 2에 제시된 레이놀즈 수는 자항 상태에서의 값이지만, 각 상사법에 대해 단독 상태에서 전진비 0.45일 때의 레이놀즈 수와 거의 동일하다. Figure 9는 유속 11노트, 전진비 0.45 조건에서 수행한 연성 해석 결과로 얻은 추력 계수와 토크 계수를 보여준다. 레이놀즈 수가 높은 실선 복합재 프로펠러는 추력 계수가 가장 크고 토크 계수가 가장 작았던 반면, 레이놀즈 수가 가장 낮은 프루드 수 상사의 모형 복합재 프로펠러는 추력 계수가 가장 작고 토크 계수가 가장 컸다. 이는 금속 프로펠러의 단독 성능 시험 결과와 마찬가지로, 레이놀즈 수가 증가할수록 추력 계수는 증가하고 토크

계수는 감소하는 경향을 나타낸다.

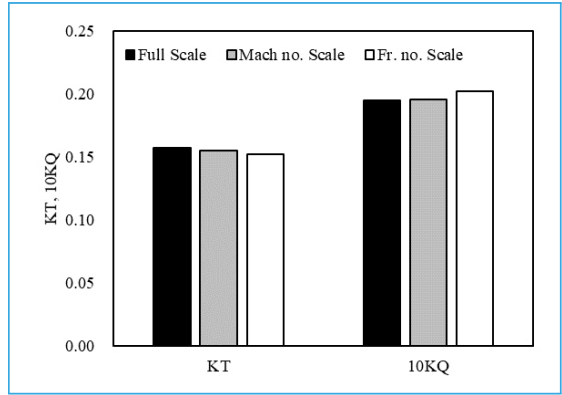


Figure 9. Thrust and torque coefficients of composite propellers at $J = 0.45$ by CFD-FEM analysis

레이놀즈 수 효과로 인한 추력 계수와 토크 계수의 변화인지, 형상으로 인한 요소인지 알아보기 위해, 변형된 형상을 분석해 보았다. 그 결과는 Figure 10과 11에 표기되어 있고, BEM-FEM 연성 해석과 동일하게 3개의 복합재료 프로펠러의 형상은 피치 0.3%, 레이크는 0.5% 이내로 거의 동일하게 변한 것을 알 수 있었다. BEM-FEM 연성 해석과 동일하게 CFD-FEM 연성 해석에서도 단독 상태에서의 무차원화된 하중 분포는 거의 동일하기 때문이다.

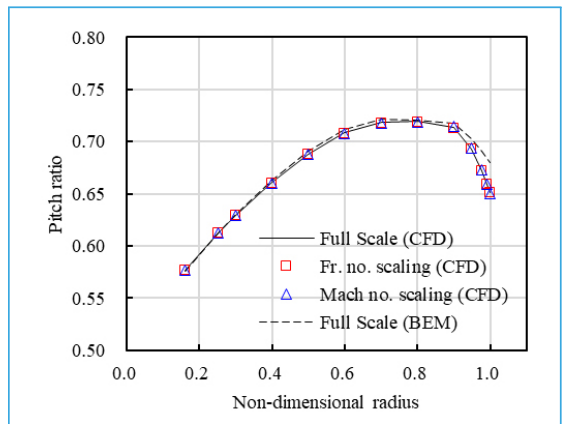


Figure 10. Pitch ratio distribution of composite propellers by CFD-FEM analysis behind wake condition

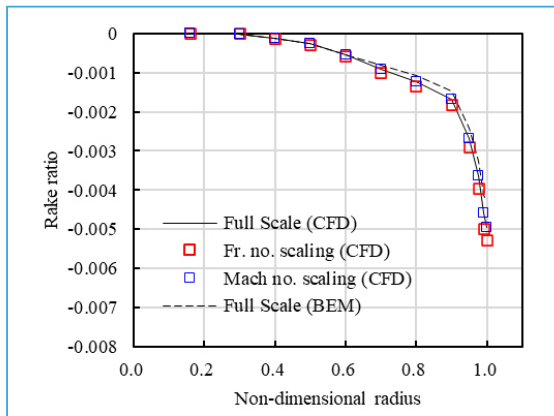


Figure 11. Rake ratio distribution of composite propellers by CFD-FEM analysis behind wake condition

반류 중에서 효과를 알아보기 위해, 선체와 러더가 포함되어 있는 자항 상태에서의 복합재료 프로펠러를 CFD-FEM 연성 해석을 수행하였다. Figure 12과 Figure 13은 실선 복합재료 프로펠러와 프루드 수 상사법 및 마하 수 상사법을 이용한 모형 프로펠러의 70% 및 90% 반경에서의 피치를 날개의 위치별로 나타낸 것이다. 전체적인 해석 경향을 보면, 상사법을 적용한 모형 프로펠러들은 실선 복합재료 프로펠러와 유사한 변형 양상을 보인다.

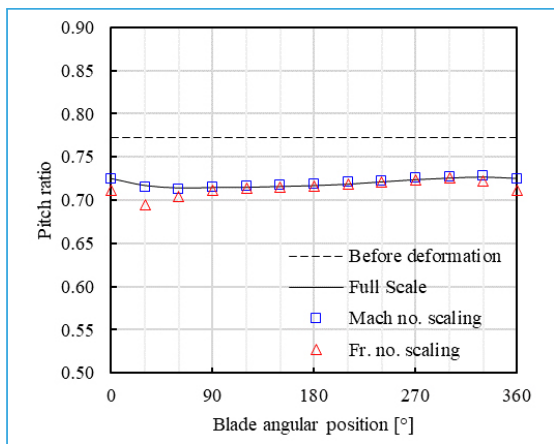


Figure 12. Pitch ratio at 70% radii of composite propellers behind wake condition by CFD-FEM analysis

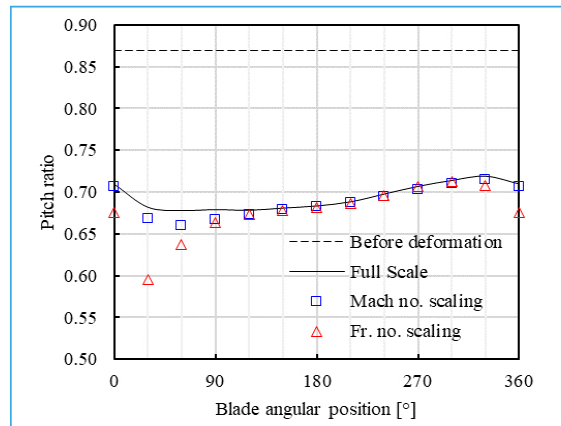


Figure 13. Pitch ratio at 90% radii of composite propellers behind wake condition by CFD-FEM analysis

70% 반경에서는 마하 수 상사법을 적용한 모형 프로펠러가 실선 복합재료 프로펠러와 평균 0.1%의 피치 차이를 보이며, 날개의 위치가 30°일 때 0.3% 차이로 가장 큰 차이를 나타냈다. 반면, 프루드 수 상사법을 적용한 모형 프로펠러는 평균 0.6%의 차이를 보였으며, 날개의 위치가 30°일 때 3.0%로 가장 큰 차이를 보였다. 날개의 변형이 더 크게 발생하는 90% 반경 지점에서는 마하 수 상사법과 프루드 수 상사법이 각각 평균 0.6%와 2.0%의 차이를 보였다. 마하 수 상사법을 적용한 모형 프로펠러의 경우, 가장 큰 차이는 60°에서 1.5%였고, 프루드 수 상사법을 적용한 모형 프로펠러의 경우는 30°에서 약 10% 수준의 차이를 나타냈다. BEM-FEM 해석과 달리, 선체의 레이놀즈 수 효과로 인해 선체의 경계층 두께가 달라지면서 프로펠러 면에서의 반류에도 차이가 발생한다. 이로 인해 프로펠러로 유입되는 흐름의 속도가 달라지고, 국부적으로 프로펠러의 하중이 차이가 발생하면서 복합재료 프로펠러의 형상 변화의 차이에도 영향을 미치게 된다.

Figure 14는 실선 크기와 마하 수 상사법 및 프루드 수 상사법을 적용한 모형 크기에서 CFD를 이용해 계산한 프로펠러 면의 축 공칭 반류(Axial nominal wake)를 보여준다. 레이놀즈 수가 가장 큰 실선 프로펠러의 반류 속도가 가장 빠르며, 반대

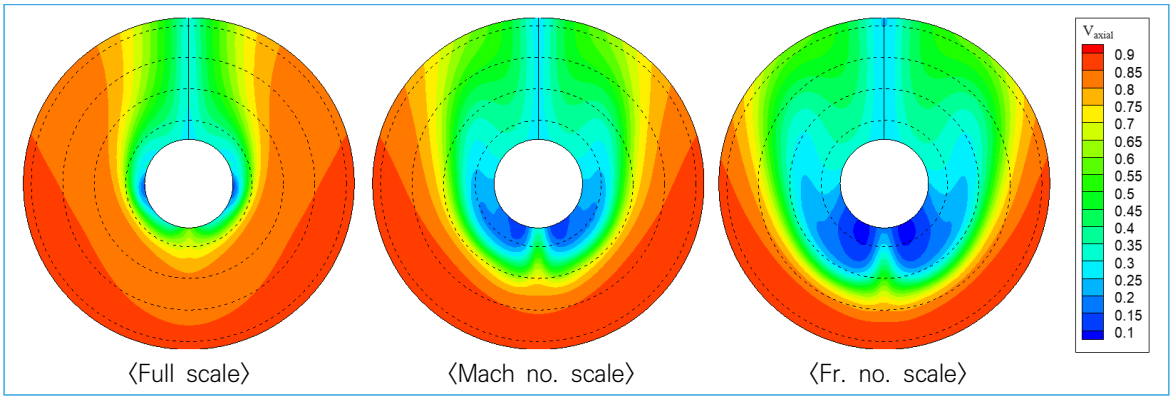


Figure 14. Axial nominal wake pattern at propeller plane (Full scale, Mach no. scale, Fr. no. scale).

로 레이놀즈 수가 가장 낮은 프루드 수 상사법에서는 가장 느린 반류가 나타난다. 이로 인해, 유속이 가장 낮은 프루드 수 상사법에서는 상대적으로 높은 하중이 발생하여 피치 변화가 크게 나타났다. 특히, 날개 끝단에서 반류가 느린 -30° 에서 90° 사이 구간에서 가장 큰 차이가 발생한 것으로 확인된다. 한편, 프루드 수 상사법보다 높은 유속에서 수행되는 마하 수 상사법의 경우, 레이놀즈 수가 실선 조건에 더 가까워 반류가 실선 반류와 더욱 유사하게 나타났다. 이에 따라, 복합재료 프로펠러의 변형 형상도 프루드 수 상사법을 이용한 복합재료 프로펠러보다 실선 복합재료 프로펠러와 유사한 양상을 보였다.

그리고, Figure 15은 마하 수 상사법을 적용한 직경 1,000mm의 모형 복합재료 프로펠러에 대해 CFD-FEM 연성 해석을 통해 계산된 90% 반경에서의 피치를 날개의 위치별로 나타낸 것이다. 실선 복합재료 프로펠러와의 평균 피치 차이는 약 0.3% 수준으로, 280mm 모델과 비교했을 때 실선 프로펠러와 더욱 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 따라서, 반류의 영향을 최소화하기 위해서는 가능한 한 축적비를 최대한 키워 모형시험을 실선에 가까운 레이놀즈 수에서 수행하는 것이 실선과 최대한 유사한 결과를 얻을 수 있다.

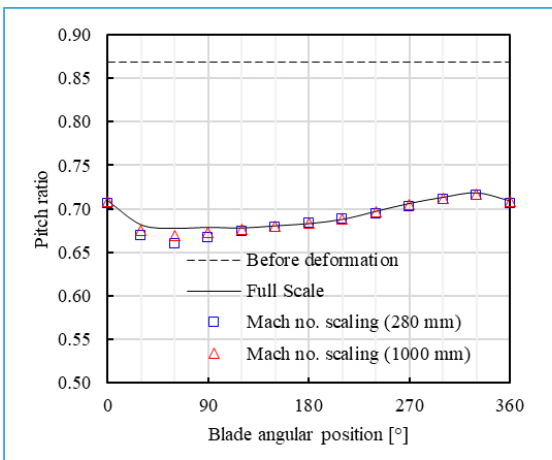


Figure 15. Pitch ratio at 90% radii of Mach no. scaled composite propellers behind wake condition by CFD-FEM analysis.

7. 결론

본 연구에서는 함정용 복합재료 프로펠러의 유탄성학적 상사 타당성을 분석하기 위해, Young (2010)이 제안한 마하 수 상사법과 프루드 수 상사법을 적용하여 수치 해석을 수행하였다[10]. BEM-FEM 및 CFD-FEM 연성 해석을 통해 KP458 프로펠러의 설계 하중 조건에서 형상이 일치하도록 복합재료 프로펠러를 설계하였으며, 실선 복합재료 프로펠러와 상사법을 적용한 모형 복합재료 프로펠러의 변형 및 성능을 평가하였다.

단독 성능 조건에서 BEM-FEM 및 CFD-FEM 연성 해석을 수행한 결과, 실선 복합재료 프로펠러와

마하 수 및 프루드 수 상사법을 적용한 모형 복합재료 프로펠러는 유사한 변형 및 성능 특성을 보였다. 또한 동일한 반류 조건하에서 수행한 BEM-FEM 연성 해석 결과 역시 변형과 성능이 일치함을 확인하였다. 그러나 CFD-FEM을 이용하여 선체와 러더를 포함한 자항 해석을 수행한 결과, 전체적으로 유사한 변형 양상을 보였음에도 불구하고 일부 국부적인 차이가 발생하였다. 레이놀즈 수가 상대적으로 작은 프루드 수 상사법의 경우, 반류 속도가 감소함에 따라 프로펠러의 0° 부근에서 더 큰 변형이 나타났으며, 이에 비해 레이놀즈 수 조건이 실선과 보다 유사한 마하 수 상사법에서는 이러한 차이가 감소하는 경향을 보였다. 특히, 마하 수 상사법에서 모형의 크기가 클수록 실선 복합재료 프로펠러와의 거동 유사성이 증가하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 복합재료 프로펠러의 모형 시험에서는 시험 설비의 제약 범위 내에서 가능한 한 큰 모형을 사용하는 것이 실선과의 유사한 결과를 도출하는 데 유리할 것으로 판단된다.

프루드 수 상사법은 모형 시험 조건에 적합한 재료의 공급이 어려울 뿐만 아니라, 자항 상태에서 레이놀즈 수 효과로 인해 실선 복합재료 프로펠러와의 거동 차이가 마하 수 상사법에 비해 더욱 크게 나타나는 한계가 있다. 반면, 마하 수 상사법은 실선 복합재료 프로펠러와 동일한 재료 및 적층 설계를 모형 프로펠러에 적용할 수 있으며, 레이놀즈 수 또한 실선 조건에 더 근접하므로, 가장 현실적인 복합재료 프로펠러 모형 시험 방법으로 평가될 수 있다. 따라서 마하 수 상사법은 함정용 프로펠러의 설계 및 개발 과정에서 필수적인 공동 성능 시험 및 CIS 시험을 수행하기 위한 효과적인 접근법이 될 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 마하 수 상사법을 기반으로 함정용 복합재료 프로펠러에 대한 공동 성능 시험 및 CIS 시험 기법을 보다 체계적으로 개발할 계획이다.

사사(Acknowledgements)

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임니

다(KRIT-CT-22-016).

참고문헌

- 1 Ashkenazi, Y., Gol'fman, I., Rezhkov, L., & Sidorov, N., Glass-fiber-reinforced plastic parts in ship machinery, Sudostroyenniye Publishing House. 1974.
- 2 Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill, P., & Challis, K., "Review of advanced composite structures for naval ships and submarines", *Composite structures*, 53(1), pp. 21-42, 2001.
- 3 Paul, A., Schmidt, A., & Wolf, E., "Acoustically optimized propeller made from composite materials", *ThyssenKrupp techforum*, 1, pp. 59-63, 2011.
- 4 Molland, A. F., Kim, K. H., Descotte, L., Jacquin, E., Heinke, H. J., Kude, T., Ukon, Y., Minchev, A., Salvatore, F., Tang, D. H., & Van, S. H., "The propulsion committee: final report and recommendations to the 24th ITTC", *Proceedings of the 24th ITTC*, 1, pp. 73-136, 2005.
- 5 ClassNK, https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/assets/pdf/katsudou201511_D.pdf, 2025, 03, 20
- 6 Choi, H. Y., Hah, Z. H., Kim, Y. H., Kang, B. G., Kim, S. H., Lee, H. S., & Lee, D. J., "Development of low noise composite marine propeller", *Proceedings of 2024 Fall Conference of the Korean Society for Composite Material*, pp. 110, 2024.
- 7 Maljaars, P., Bronswijk, L., Windt, J., Grasso, N., & Kaminski, M., "Experimental validation of fluid-structure interaction computations of flexible composite propellers in open water conditions using BEM-FEM and RANS-FEM methods", *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(2), pp. 1-23, 2018.
- 8 Kawakita, C., "An Experimental Study on Hydrodynamic Performance of Flexible Composite Model Propellers", *Proceedings of 6th International Symposium on Marine Propulsors*, 2019.
- 9 Rokvam, S. Ø., Vedvik, N. P., Mark, L., Rømcke, E., Ølnes, J. S., Savio, L., & Echermeier, A., "Experimental verification of the elastic response in a numeric model of a composite propeller blade with

bend twist deformation”, *Polymers*, 13(21), pp. 1–19, 2021.

- 10 Young, Y. L., “Dynamic hydroelastic scaling of self-adaptive composite marine rotors”, *Composite Structures*, 92(1), pp. 97–106, 2010.
- 11 Motley, M. R., & Young, Y. L., “Scaling of the Transient Hydroelastic Response and Failure Mechanisms of Self-Adaptive Composite Marine Propellers”, *International Journal of Rotating Machinery*, 2012(1), pp. 1–11, 2012.
- 12 Lee, H. S., “A Study on the BEM-FEM based Hydro-elastic Analysis of Composite Marine Propellers (Doctoral dissertation)”, *Graduate School of Seoul National University*, pp. 1–158, 2018.

기획단계 국방 R&D 소요예산 예측을 위한 텍스트 회귀분석 모델

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

Text Regression Model for Defense R&D Budget Prediction in the Planning Stage

정자훈, Jahoon Jeong

육군사관학교, 기계시스템공학과,
조교수
Assistant Professor,
Department of Mechanical &
Systems Engineering, Korea
Military Academy

류준열, Joonyeol Ryu

서울대학교, 산업공학과, 박사과정
Ph.D. candidate, Department
of Industrial Engineering,
Seoul National University

여용현, Yongheon Yeo

국방기술진흥연구소,
전력지원체계연구센터, 선임연구원
Senior Researcher, Force
Support Systems Research
Center, Korea Research
Institute for Defense
Technology and Advancement

안남수†, Namsu Ahn

육군사관학교, 기계시스템공학과,
교수
Professor, Department of
Mechanical & Systems
Engineering, Korea Military
Academy

Abstract

This study proposes a text regression analysis model to enhance the reliability and accuracy of R&D budget predictions. Using text data from the Defense Force Support System Requirements Document, we introduce a data-driven approach for budget forecasting. This study combines NLP(Natural Language Processing) and machine learning techniques to quantitatively analyze and predict budgets required in the defense R&D sector. This method is expected to strengthen the objectivity of the budget formulation process and enhance the precision of strategic decision-making. Additionally, the methodology presented in this study offers a reliable framework for generating dependable results even in data-constrained environments, providing a critical foundation for the development and practical application of future defense R&D budget prediction models.

keywords : R&D budget prediction, defense force support system, natural language processing, text regression analysis

† Corresponding Author : Namsu Ahn

Tel : +82-2-2197-2923, email : namsu.ahn@gmail.com

Korea Military Academy, 574, Hwarang-ro, Nowon-gu, Seoul, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 30th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

국방 R&D 과제의 성공 여부는 국가 안보와 직결되는 중요한 단계로, 군용 장비의 획득, 유지 보수, 작전 수행을 위한 핵심 요소이다. 이를 위해 투입되는 국방 R&D 예산은 방위산업 발전과 군 작전의 효율성뿐만 아니라, 장기적인 국방력 강화 및 미래 전력 건설에도 큰 영향을 미친다. 현재 소요기획 단계에서 국방 R&D 예산의 추정은 전문가의 경험적 판단, 과거 유사 사업의 예산, 시장 물가 변동 등의 요소를 종합적으로 고려하여 산정된다. 다만, 이러한 방식은 실무에서 오랫동안 활용되어 온 신뢰할 수 있는 접근법이지만, 전문가의 주관적 판단이 개입될 가능성이 있다. 또한, 과거 사례에 기반한 예측은 변화하는 전략적 요구 및 기술 발전을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다.

최근 자연어 처리(NLP, Natural Language Processing)와 머신러닝 기법의 발전은 대규모 텍스트 데이터에서 유의미한 패턴을 추출하고 이를 정량적으로 분석하는 기능을 제공하고 있다. 특히, 텍스트 회귀 분석(Text regression)은 문서의 텍스트 데이터를 활용하여 연속형 값을 예측하는 기법으로 [1-3], 국방전력지원체계 소요기획서[4]와 같은 정책 문서의 내용을 정량적 예측 모델로 변환하는 데 적합한 접근법으로 판단된다. 본 연구에서는 인터넷망에 공개된 “25~34 국방전력지원체계 소요기획서”를 활용하여, 과제 설명(개요, 필요성 및 운용 개념, 주요 요구사항)과 해당 사업의 예산 간의 관계를 학습하고 이를 기반으로 소요예산을 예측하는 모델을 개발하고자 한다.

데이터가 제한적인 환경에서도 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해, 본 연구에서는 데이터 분할 전략을 신중히 설계하고, 불용어 제거, 표준화, 토큰화 등의 NLP 기반 전처리 기법을 적용하여 데이터 품질을 향상하고자 하였다. 또한, 직관적인 통계 기반의 방법론인 Bag-of-Words(BoW), Term Frequency-Inverse Document Frequency(TF-IDF), Bi-gram, Latent Semantic Allocation(LSA)과 같

은 임베딩 기법을 중심으로 Kor2Vec 등 사전 학습된 딥러닝 기반 임베딩 방법까지 다양한 표현 방식을 비교하여 최적의 텍스트 변환 방법을 검토하여 사용하고자 한다[5-6].

이와 함께 해석력이 뛰어난 선형 회귀 모형 4개와 부스팅을 활용해 적은 데이터에서도 강력한 예측 능력을 보여주는 Gradient Boost 및 XGBoost를 활용하여 성능을 비교하고, 가장 효과적인 모델을 선정하여 예측력을 극대화하고자 하였다[7-8].

본 연구는 기존의 경험 및 전문가 기반의 예산 추정 방식에서 벗어나 데이터 기반 접근법을 도입함으로써 국방 전력지원체계 R&D 예산 예측의 신뢰성과 정밀도를 높이는 데 기여하고자 한다. 특히, NLP와 머신러닝 기법을 활용하여 국방 소요 기획서의 텍스트 데이터를 구조화된 정보로 변환하고, 이를 바탕으로 더 체계적이고 객관적인 예산 예측 모델을 제시하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 이어지는 2장에서는 관련 문헌을 검토하였고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 예산 추정 방법론을 단계별로 제시하였다. 4장은 3장의 방법론을 구현하여 실험 결과를 제시하고, 이를 다양한 각도에서 분석하였다. 마지막 5장에서는 본 연구의 기여도 요약 및 향후 연구 방향을 논하였다.

2. 관련문헌 검토

2.1. 기획단계 국방 R&D 소요예산 추정

과제 기획단계에서는 해당 과제에 대해 구체화 된 내용이 없음에 따라 모수추정법 및 공학적비용추정법 등의 잘 알려진 예산 추정 기법을 사용하여 소요예산을 추정하는 것이 어렵다. 따라서 기획 단계에서 국방 분야 R&D 소요예산의 추정은 현재까지 저자들이 파악하기로는 일차적으로 복수의 개발가능 기관에 의뢰하여 이루어지며, 이후 전문가로 구성된 위원회 등을 통해 예산을 확정하는 형태로 이루어지고 있다.

미 국방부 역시 델파이 기법 등을 활용해 여러 전문가의 의견을 통합하는 방식으로 비용을 추정하고 있는 것으로 알려져 있다[9]. 그러나 이러한 전통적 방법은 개별 전문가의 인지적 편향(예: 낙관적 편향, 대비 효과 등)을 내포할 가능성이 높다는 점이 단점으로 지적된다[10]. 유럽에서는 과거 유사 사례에 기반한 통계적 분석과 전문가 의견을 결합한 하이브리드 모델이 도입되었으며, 이를 통해 보다 객관적인 비용 산정에 대한 노력이 진행된 것으로 파악되었다[11-12]. 한국 역시 방위사업청에서 정한 ‘방위사업 비용관리 훈령’에 따라 전문가 집단 평가와 과거 데이터 분석을 병행하는 방식으로 소요예산을 산출하고 있으나, 여전히 주관적 판단에 더 의존하고 있다는 점이 지적되었다.

최근 미국 및 유럽의 일부 사례에서는 비용 추정의 불확실성을 정량화하기 위해 확률적 모형 및 Bayesian 네트워크 기반 접근법이 도입되어, 제한된 데이터 상황에서도 전문가 지식의 체계적 구조화를 통해 예산 추정의 객관성을 높이려는 시도가 이루어진 것을 확인하였다[13].

선행연구를 요약하면, 기획단계 국방 분야 R&D 예산 추정에서도 신뢰성과 정확성을 높이려는 필요성은 모두 공감하고 있는 것으로 파악된다. 또한 이를 위해 데이터 기반의 예산 추정 시도들이 일부 이루어지고 있다. 다만, 이러한 데이터 기반 접근법은 전문가의 경험과 지식을 배제하는 것이 아니라, 전문가의 지식을 객관적 데이터 기반의 추정과 융합함으로써 더욱 정교하고 신뢰할 수 있는 예산 추정 체계를 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2. 텍스트 회귀 분석

텍스트 회귀 분석은 구조화된 수치 데이터가 부족한 상황에서 보고서, 기획서, 예측 문서 등 비정형 텍스트 데이터로부터 비용에 영향을 미치는 주요 인을 도출해 내고, 이를 회귀 모형이나 부스팅 알고리즘에 적용하여 예측력을 향상하는 접근법이다.

특히 국방 분야는 보안상의 이유로 자료 접근이

제한되어 정형화된 수치 데이터가 충분치 않은 경우가 많다. 또한, 국방 관련 문서는 주로 기밀 유지가 필요한 보고서와 기획서 등 텍스트 형식으로 존재하며, 이들 문서에 내재한 핵심 정보를 효과적으로 추출하기 위해서는 BoW, TF-IDF, Bi-gram, LSA와 같은 통계적 임베딩 기법과 Word2Vec과 같은 딥러닝 기반 임베딩 기법의 비교 분석이 필요하다[14-15]. 또한 소규모 데이터를 대상으로 하더라도 예측 정확도를 높이는 방안이 필요하다. 예로 텍스트 데이터를 수치화한 후 회귀 분석 기법이나 XGBoost와 같은 부스팅 알고리즘을 사용하는 것이 있다[16].

이러한 접근법은 국방 데이터의 특성, 즉, 제한된 데이터양, 보안으로 인한 접근 제한, 도메인 특화 용어 등을 문체에 맞춰 전처리 과정을 세밀하게 구성함으로써, 과적합을 방지하고 안정적인 예측 모델을 구축하는 데 기여할 수 있다.

이번 연구에서는 인터넷망에 공개된 국방 전력지원체계 소요기획서를 활용하여, 일반적인 NLP 접근법보다 더 정확한 특성 추출이 가능하게 하였다. 또한 제한된 데이터 환경에서도 모델의 예측 정확도를 높였다.

3. 연구 방법론

본 장에서는 국방전력지원체계 소요기획서의 텍스트 데이터를 활용하여 예산을 예측하는 텍스트 회귀 분석 모델을 제안하고자 한다. 이를 위해 데이터 수집, 데이터 전처리, 데이터 임베딩, 회귀 모형 구축, 평가의 순서로 분석 방법을 설계하였다.

3.1. 데이터 수집

연구에 사용된 데이터는 공개된 “25~34 국방전력지원체계 소요기획서”에서 주요 과제 부분을 추출하여 활용하였다. 해당 주요 과제는 Figure 1의 형태로 소요기획서에 첨부되어 있으며, 총 38개의 과제가 존재한다.

3.3. 텍스트 데이터 임베딩

텍스트 형태의 입력 데이터를 AI(Artificial Intelligence)모델이 이해하기 위해서는 임베딩(Embedding)이라는 작업이 필수적이다. 텍스트 임베딩은 텍스트 데이터를 수치 형태로 변환하는 것으로 데이터의 길이와 크기, 목적에 따라 단어/문장/문단 단위 등으로 임베딩이 가능하다. 즉 사람이 이해할 수 있는 텍스트를 컴퓨터가 처리할 수 있도록 고차원 공간의 벡터로 표현하는 과정이라고 볼 수 있다.

현재 데이터의 특성(텍스트 데이터의 길이가 짧으며 전체 데이터의 숫자가 부족)을 고려하여 이번 연구에서는 단어 단위 임베딩 기법을 선택하였다.

여러 임베딩 기법 중 본 연구에서는 직관적이며 통계기반의 BoW, TF-IDF, Bi-gram, LSA를 선정하였다. 다른 단어 기반 딥러닝 모델인 Kor2Vec, FastText, GloVe는 사용하였으나, 성능이 현저히 좋지 않아 후보군에서 제외했다. 이는 짧은 문맥과 적은 데이터의 특성에 기인한 것으로 보인다.

3.4. 회귀 모형 선정

추출된 의미 있는 특성들을 활용해 예산을 예측하기 위해 6개의 회귀 모형을 선정했다. 내재적 해석력을 가진 4개의 선형 회귀모형(단순 선형회귀, Ridge, ElasticNet, Lasso)과 강력한 비선형 모형인 XGBoost regressor, Gradient boost regressor를 사용하였다. 이때, 모델의 과적합을 방지하고 최적의 하이퍼파라미터를 찾기 위해 3-Fold 교차 검증을 시행했으며, 또한 이와 더불어 주요 하이퍼-파라미터별 Grid search를 적용해 모델별 최적 성능의 결과를 도출하였다.

3.5. 평가 지표

앞서 살펴본 4개의 임베딩 방법과 6개의 회귀 모형의 조합으로 총 24개의 학습 모델이 도출되었으

며, 이를 평가하기 위해 전통적인 회귀모델의 평가 지표(Evaluation metrics)인 R-squared와 Mean Absolute Percentage Error(MAPE)를 사용하였다.

R^2 는 수식 (1)과 같이 계산하며 모델의 예측이 실제 값과 얼마나 일치하는지를 평가하는 지표이다(n 은 데이터의 개수, y_i 는 실제 관측값, \hat{y}_i 는 예측값, \bar{y} 는 실제 관측값의 평균을 의미함). 이 값은 1에 가까울수록 좋은 예측을 하였음을 의미한다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

MAPE는 수식 (2)와 같이 계산하며 예측 값과 실제 값 간의 차이를 백분율로 나타내어 예측 정확도를 평가하는 지표이다(n 은 데이터의 개수, y_i 는 실제 관측값, \hat{y}_i 는 예측값을 의미함). MAPE 값이 0에 가까울수록 예측이 정확하고, 값이 클수록 예측이 부정확함을 의미한다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (2)$$

요약하면, R-squared는 모델의 설명력을 평가하는 반면, MAPE는 예측이 실제 값에 얼마나 근접했는지를 직관적으로 보여주기에 상호 보완적으로 사용하기 용이하다.

본 장에서 기술한 전체적인 연구방법론의 순서는 Figure 4와 같이 나타낼 수 있다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1. 전반적 결과 분석

본 연구에서 제안하는 방법론은 총 4개의 텍스트 임베딩 방법과 6개의 회귀 모형의 조합을 바탕으로

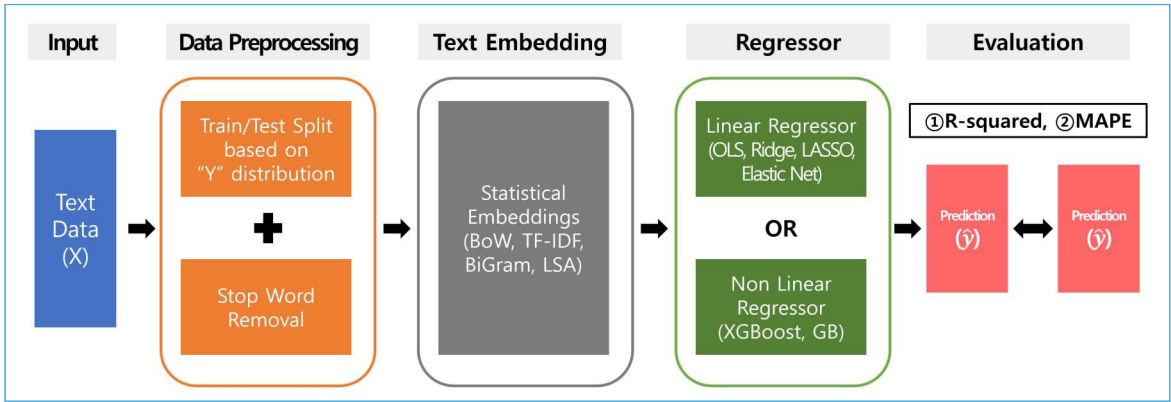


Figure 4. The proposed text regression model pipeline

도출된 총 24개(= 4개 임베딩 × 6개 회귀모형)의 모형을 학습 데이터를 통해 학습시키고, 학습된 각 모형을 테스트 데이터를 통해 평가함으로써 가장 우수한 모형을 찾는 것이다. 각 24개의 모형에 대한 전반적인 성능분석 결과는 Table 2와 같다.

가장 좋은 성능을 보인 조합은 BoW와 TF-IDF 임베딩 기법을 사용하여 XGBoost와 결합한 경우이다. 이 조합은 R^2 가 0.735, MAPE가 0.751로 뛰어난 예측 성능을 보였으며, 주어진 데이터에서 가장 높은 R^2 와 상대적으로 낮은 MAPE 값을 기록했다.

비선형 모델인 XGBoost와 GB(Gradient Boost)는 모든 임베딩 기법에서 상대적으로 높은 R^2 와 낮은 MAPE 값을 기록했다. 특히 XGBoost는 BoW, TF-IDF, Bi-gram, LSA 등 모든 임베딩 기법에서 R^2 가 0.7을 넘고 MAPE가 0.75 이하로, 예측 성능이 뛰어났음을 보여준다. GB도 R^2 가 0.7대, MAPE가 0.77~0.79로 좋은 성능을 보였지만, XGBoost보다는 다소 낮았다. 반면, 선형 회귀 모델인 OLS, Ridge, Lasso, Elastic Net은 대부분 R^2 가 0.5 이하로 상대적으로 낮고, MAPE가 비교적 높은 값을 보였다. 특히 Ridge 모델은 TF-IDF와 Bi-gram 임베딩에서 R^2 가 0.3대에 불과하고, MAPE는 1.4로 매우 높은 값을 기록했다. 이는 선형 모델이 비선형 관계나 복잡한 패턴을 잘 처리하지 못함을 시사한다.

Table 2. Model Performance Comparison Across Different Embeddings and Regressors (Best for Each Embedding in Red, Overall Best in Blue Bold)

Embedding	Regressor	$R^2(\uparrow)$	MAPE(\downarrow)
BoW	(Linear) OLS	0.622	1.267
	(Linear) Ridge	0.511	0.920
	(Linear) LASSO	0.637	0.682
	(Linear) Elastic Net	0.614	0.738
	(Non-Linear) XGBoost	0.735	0.751
	(Non-Linear) GB	0.722	0.777
TF-IDF	(Linear) OLS	0.588	1.634
	(Linear) Ridge	0.361	1.458
	(Linear) LASSO	0.631	0.772
	(Linear) Elastic Net	0.638	0.824
	(Non-Linear) XGBoost	0.736	0.751
	(Non-Linear) GB	0.714	0.788
Bi-gram	(Linear) OLS	0.616	1.032
	(Linear) Ridge	0.326	1.418
	(Linear) LASSO	0.581	0.827
	(Linear) Elastic Net	0.615	0.732
	(Non-Linear) XGBoost	0.725	0.760
	(Non-Linear) GB	0.715	0.789
LSA	(Linear) OLS	0.622	1.268
	(Linear) Ridge	0.511	0.920
	(Linear) LASSO	0.637	0.682
	(Linear) Elastic Net	0.614	0.739
	(Non-Linear) XGBoost	0.721	0.753
	(Non-Linear) GB	0.701	0.776

4.2. 비선형 모형의 결과 해석

비선형 모델인 XGBoost와 GB는 예측 결과에 대한 내재적인 해석이 제한적이기 때문에, Feature importance를 활용하여 예측에 영향을 미친 주요 특성들을 해석한다. Figure 5는 두 모델과 조합하여 좋은 결과를 냈던 TF-IDF 임베딩과의 결과에서 Top 10 features의 중요도를 시각화한 결과이다.

두 모델 모두 “이해” 특성이 가장 중요한 변수로 나타났으며, XGBoost는 “미래” 외에도 “장비”, “도입” 등이 중요한 특성으로 평가되었다. 반면 GB는 “이해” 외에도 중요 특성들이 고르게 분포되어 있었다. 이는 두 모델이 동일한 핵심 특성을 고려했으나, XGBoost는 일부 특성에 더 높은 중요도를 부여했지만, GB는 더 균등한 중요도를 반영한 결과임을 나타낸다.

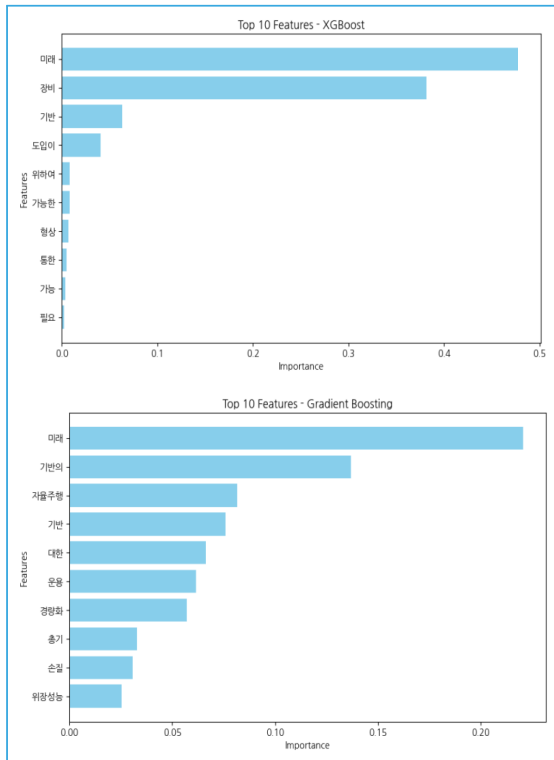


Figure 5. Visualization of top 10 features based on feature importance in non-linear models (Top: XGBoost, Bottom: GB)

4.3. 선형 모형의 결과 해석

LASSO 및 ElasticNet 모델은 TF-IDF 임베딩과의 조합에서 가장 좋은 성능을 보였으며, Figure 6은 두 모델을 바탕으로 도출된 선형 회귀 모형의 계수를 양의 값이 큰 순서대로 10개를 나타낸 결과이다. 두 모델 모두 “미래” 특성이 예산 예측에 가장 큰 영향을 미쳤으며, ElasticNet과 LASSO는 “군집”과 “로봇” 특성들도 중요한 역할을 한 것으로 나타났다. LASSO는 L1 규제를 적용하여 일부 특성의 Coefficient 값을 0으로 만들지만, 중요한 특성들은 여전히 높은 값을 기록했다.

특히, 이런 선형 모형들은 Feature coefficients를 바탕으로 예산 예측을 위한 회귀 방정식을 구성할 수 있다. ElasticNet 모형의 결과를 바탕으로 회귀식을 아래의 수식 (3)과 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + 4.21 \cdot \text{높은} + 2.93 \cdot \text{미래} + \dots \quad (3)$$

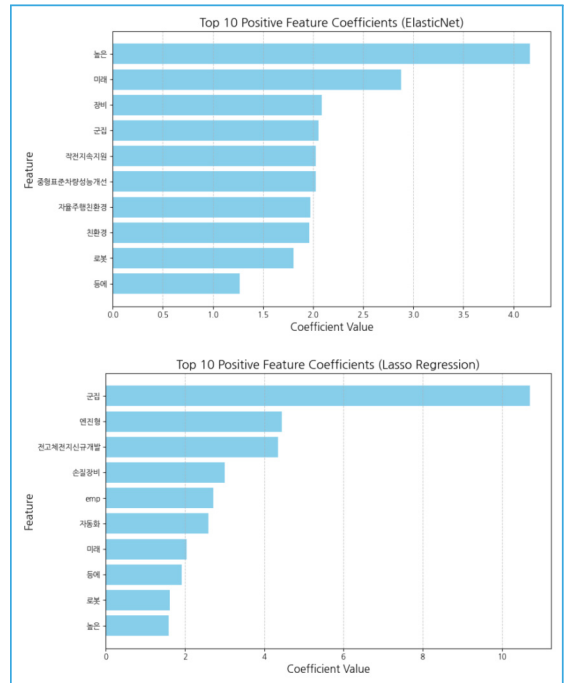


Figure 6. Visualization of Top 10 Features Based on Feature Importance in Linear Models (Top: LASSO, Bottom: ElasticNet)

즉, 이를 통해 학습 모델의 구현이 익숙하지 않은 사용자도 수식을 통해 예산을 예측할 수 있다는 장점이 있는 모델이다.

5. 결론 및 향후 발전방향

본 연구는 데이터 분석 기법을 활용한 새로운 예측 모델을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 특히, 자연어 처리와 머신러닝 기법을 결합하여 국방전력지원체계 소요기획서의 텍스트 데이터를 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 예산을 예측하는 접근 방식을 제안함으로써 보다 체계적이고 객관적인 의사결정을 지원할 가능성을 확인하였다.

다만 데이터의 본질적인 한계로 인해 몇 가지 제한점을 가진다. 첫 번째는 연구에서 사용한 데이터가 총 38개로 모델이 충분한 학습을 수행하기 어려웠다. 보다 신뢰성 높은 예측을 위해서는 과거 예산 데이터 혹은 무기체계 데이터 등 추가적인 데이터를 확보할 필요가 있다. 두 번째 한계점 역시 데이터 부족으로 인해 최신 딥러닝 모델들의 성능을 충분히 검증하지 못했다는 점이다.

향후 연구 방향으로는 BoW, TF-IDF, Bi-gram, LSA 등의 전통적인 텍스트 임베딩 기법과 XGBoost, GB과 같은 머신러닝 모델을 중심으로 분석을 진행하였으나, BERT, T5, GPT 등 대형 사전 학습된 언어 모델(PLM, Pre-trained Language Model)을 적용하고 비교할 기회가 부족했다. 이러한 모델들은 문맥 정보를 더욱 정교하게 반영할 수 있어 국방 관련 문서의 복잡한 서술 구조를 학습하는 데 유리할 가능성이 있으므로, 향후 연구에서는 이들을 포함한 다양한 딥러닝 모델을 적용하여 성능을 검토할 필요가 있다.

추가로 연구 주제를 전력지원체계가 아닌 무기체계 분야로 전환하여 보다 많은 데이터를 통해 보다 신뢰도 높은 국방 예산 예측 모델을 개발하고, 실무에서 활용할 수 있는 체계적인 예측 시스템을 구축하는 방향으로 연구를 확장할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1 Jiang, J., Liu, B., Peng, W., & Srinivasan, K., "TextRegress: A Python Package for Advanced Regression Analysis on Long-Form Text Data", *Software Impacts*, 24, pp. 1-4, 2025.
- 2 Liang, R., Zhang, W., & Ye, H., "Interpretable deep learning based text regression for financial prediction", *Expert Systems*, 40(9), pp. 1-17, 2023.
- 3 Taha, K., "Text Regression Analysis: A Review, Empirical, and Experimental Insights", *IEEE Access*, 12, pp. 137333-137344, 2024.
- 4 '25~'34 국방전력지원체계 소요기획서, 국방기술진흥연구소, 2024.
- 5 Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J., "Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space", *arXiv*, pp. 1-12, 2013.
- 6 Chen, T., & Guestrin, C., "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System", *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 785-794, 2016.
- 7 Gentzkow, M., Kelly, B., & Taddy, M., "Text as Data", *Journal of Economic Literature*, 57(3), pp. 535-574, 2019.
- 8 Demir, S., & Sahin, E. K., "An investigation of feature selection methods for soil liquefaction prediction based on tree-based ensemble algorithms using AdaBoost, gradient boosting, and XGBoost", *Neural Computing and Applications*, 35(4), pp. 3173-3190, 2023.
- 9 Dalkey, N., & Helmer, O., "An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts", *Management Science*, 9(3), pp. 458-467, 1963.
- 10 Okoli, C., & Pawlowski, S. D., "The Delphi Method as a Research Tool: An Example, Design Considerations and Applications", *Information & Management*, 42(1), pp. 15-29, 2004.
- 11 Jorgensen, M., & Shepperd, M., "A Systematic Review of Software Development Cost Estimation Studies", *IEEE Transactions on Software Engineering*, 33(1), pp. 33-53, 2007.

- 12 Morris, P. W., & Pinto, J. K., *The Wiley Guide to Project, Program, and Portfolio Management*, John Wiley & Sons, pp. 120-150, 2010.
- 13 Fenton, N., & Neil, M., *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks*, CRC Press, 2018.
- 14 Deerwester, S., Dumais, S. T., Furnas, G. W., Landauer, T. K., & Harshman, R., "Indexing by Latent Semantic Analysis", *Journal of the American Society for Information Science*, 41(6), pp. 391-407, 1990.
- 15 Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J., "Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space", *arXiv*, pp. 1-12, 2013.
- 16 Chen, T., & Guestrin, C., "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System", *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 785-794, 2016.

심층 트랜스포머 네트워크 기반의 인공지능 기술을 이용한 무기체계 실시간 이상 감지 기술

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

Real-time Anomaly Detection for Weapon Systems using Deep Transformer Networks based on AI

오우림†, Woorim Oh

KDI, 연구소, 주임연구원
Research Engineer, R&D Center, Korea
Defense Industry

김완식, Wanshik Kim

KDI, 연구소, 수석연구원
Team Leader, R&D Center, Korea
Defense Industry

진재훈, Jaehoon Jin

KDI, 연구소, 선임연구원
Senior Research Engineer, R&D Center,
Korea Defense Industry

Abstract

This study explores the applicability of AI(Artificial Intelligence) -based anomaly detection technologies in the testing and operation of weapon systems by implementing an anomaly detection mechanism for projectiles using AI technology. Traditional methods, such as LSTM(Long Short-Term Memory)-based autoencoders commonly used for anomaly detection, often suffer from overfitting to normal data and fail to adequately capture the complex relationships inherent in multivariate time-series data. To address these limitations, this study utilizes the TranAD(Transformer-based Anomaly Detection) model that is based on the transformer architecture widely used in the AI field. TranAD combines transformer structures with adversarial training to robustly and effectively learn generalized features from normal data, thereby accommodating both long- and short-term temporal patterns. This study utilizes radar observation data and predicts the trajectories of projectiles for training and experimentation. By analyzing information such as attitude, position, and velocity from the observation data, the model detects abnormal states in the projectile behavior. Additionally, the discrepancy between the predicted and the observed trajectories is incorporated as an auxiliary input variable to enhance the generalization of the model across various trajectories.

keywords : AI, deep learning, transformer, anomaly detection

† Corresponding Author : Woorim Oh

Tel : +82-42-829-2676, email : woorim.o@kodef.co.kr

Korea Defense Industry Corporation R&D Center, 99, Oesam-ro 8beon-gil, YuseonGu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 21st. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

현대 사회는 인공지능(AI, Artificial Intelligence) 기술의 급격한 발전과 함께 4차 산업혁명 시대를 맞이하고 있다. 특히, 딥러닝 기술은 이미지 인식, 자연어 처리, 음성 인식 등 다양한 분야에서 괄목할 만한 성과를 거두며 우리 삶의 방식을 근본적으로 변화시키고 있다. 최근 몇 년간 OpenAI의 GPT 시리즈, DeepSeek의 R1과 같은 대규모 언어 모델(LLM, Large Language Model)은 인간을 뛰어넘는 수준의 문제 해결 능력을 보여주며 AI 기술의 잠재력을 입증하였다. 이러한 AI 기술의 발전은 국방 분야에도 혁신적인 변화를 가져오고 있으며, 무기체계의 성능 향상, 운용 효율성 증대, 안전성 강화 등 다양한 측면에서 새로운 가능성을 제시하고 있다[1].

무기체계 개발 및 운용 과정에서 발생할 수 있는 잠재적 위험 요소를 사전에 식별하고 대응하는 것은 매우 중요한 과제이다[2]. 무기체계의 결함이나 이상 상태는 예상치 못한 사고로 이어져 인명 피해는 물론 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있기 때문이다. 특히 로켓과 같은 발사체의 경우, 비행 중 발생하는 미세한 이상 징후를 조기에 감지하지 못하면 의도하지 않은 궤적으로 비행하여 치명적인 피해로 이어질 수 있다. 전통적으로 무기체계 시험평가 과정에서 이상 상태 감지는 주로 숙련된 전문가의 육안 관측이나 제한적인 센서 데이터 분석에 의존해 왔다. 그러나 이러한 방식은 인간의 인지 능력 및 반응 속도의 한계로 인해 실시간으로 발생하는 이상 현상을 포착하는 데 어려움이 있으며, 복잡하고 방대한 데이터 속에서 숨겨진 패턴을 발견하는 데도 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 AI 기반 이상 탐지 기술, 그중에서도 Transformer 모델을 활용하여 무기체계 시험평가 과정에서 발생하는 이상 상태를 실시간으로 감지하는 시스템을 구현하고 그 성능을 검증하고자 한다. Transformer 모

델은 2017년 “Attention is All You Need”라는 논문에서 처음 소개된 이후, 자연어 처리(NLP, Natural Language Processing) 및 대규모 언어 모델 분야에서 획기적인 성능 향상을 가져왔으며, 최근에는 이미지, 음성, 시계열 데이터 등 다양한 분야로 응용 범위가 확장되고 있다[3]. Transformer 모델의 핵심은 Self-Attention 메커니즘으로, 입력 데이터의 각 요소 간의 관계를 효과적으로 파악하여 문맥 정보를 반영한 고차원적인 특징 표현(Representation)을 생성할 수 있다. 이러한 특징은 복잡하고 다양한 패턴을 가진 시계열 데이터 분석에 매우 적합하며, 기존의 순환 신경망(RNN, Recurrent Neural Network) 기반 모델에 비해 장기 의존성 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

본 연구에서는 Transformer 기반의 이상 탐지 모델인 TranAD(Transformer-based Anomaly Detection) 모델을 활용한다. 230mm급 천무 무유도 로켓의 시험 단계에서 획득한 레이더 관측데이터를 통해 모델 학습을 수행하고, 모델의 출력 값을 기반으로 로켓의 이상을 감지하는 시스템을 구현한다. 학습된 모델은 전력화 이후의 운용 단계에서도 이상 상태 감지 모델로 활용될 수 있으며, 학습 데이터에 따라 로켓뿐 아니라 전차, 장갑차, 전투기, 헬기 등 다양한 무기체계의 개발 단계 시험평가 및 운용 단계에서 이상 감지를 위해 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. AI 기반 이상 감지 기술

2.1. 이상 탐지 기술

이상 탐지(Anomaly detection)는 정상 패턴에서 벗어난 이상 데이터를 식별하는 기술로, 다양한 산업과 연구 분야에서 활용되고 있다[4].

기존의 이상 탐지 기술은 크게 통계적 방법, 전통적 기계학습 모델, 그리고 심층 신경망 기반 모델로 구분할 수 있다. 통계적 접근법(가우시안 혼합 모델,

ARIMA 등)은 사전에 정의된 임계값이나 분포에 기반하여 이상치를 판별하지만, 복잡하고 고차원적인 패턴이나 비선형 관계를 충분히 포착하지 못하는 한계가 있다[5]. 전통적 기계학습 기반 모델(SVM, Isolation Forest 등)은 정상 데이터와 이상 데이터를 분류 혹은 군집화하는 방식으로 활용되는데, 효과적인 모델 구성을 위해 도메인 지식에 의한 특징 공학(Feature engineering)이 선행되어야 하는 어려움이 있다[6].

최근 들어 심층 신경망(DNN, Deep Neural Network)을 활용한 이상 탐지 방법들이 등장하면서 이상 탐지 성능이 향상되고 있다. 특히, 장단기 메모리(LSTM, Long Short-Term Memory) 기반 Autoencoder 모델은 대표적인 비지도 학습 기반의 시계열 데이터 이상 탐지 기법으로 주목받았다[7]. 이 모델은 정상 데이터를 학습한 후, 입력 데이터에 대한 재구성 오류를 계산하여 그 오류가 임계치보다 큰 경우 이상으로 간주한다[7]. 이는 시계열 데이터의 장단기 특성을 학습하여 이상 여부를 판단한다는 점에서 매우 유용하다. 그러나 순차적으로 데이터를 처리하는 특성상 매우 긴 시계열에 대한 장기 의존성을 완벽히 학습하는 데 한계가 있고, 정상 데이터에만 과적합(Over-fitting)되는 경향이 있어 실전 환경에서 새로운 이상 징후를 잡아내는 데 어려움이 있다.

2.2. Transformer 기반 TranAD 모델

본 연구에서는 종래 기술의 문제점을 개선할 수 있는 Transformer 기반 이상 감지 모델인 TranAD 모델을 활용하였다[8]. TranAD 모델은 크게 인코더(Encoder), 디코더(Decoder) 및 이상 점수 계산 부로 이루어져 있다. 인코더는 Self-attention 기술을 기반으로 재표현(Representation) 벡터를 생성하고, 2종의 디코더에서 이를 복원하며, 이상 점수 계산 부는 평균 제곱 오차를 기반으로 이상 점수를 산출한다.

2.2.1. TranAD의 주요 기술적 특징

하나. Multi-head self-attention: 모델은 Figure 1와 같이 Q, K, V 파라미터를 기반으로 자기 어텐션(Self-attention)을 수행한다. 이를 통해 시계열의 각 시점 요소가 다른 모든 시점을 참조하여 멀리 떨어져 있는 데이터 간의 영향을 모두 학습할 수 있으며, Figure 2와 같이 자기 어텐션을 다중 차원으로 확장하여 다양한 차원(Multi-head)에서 각 시점 요소 간 관계를 학습할 수 있다.

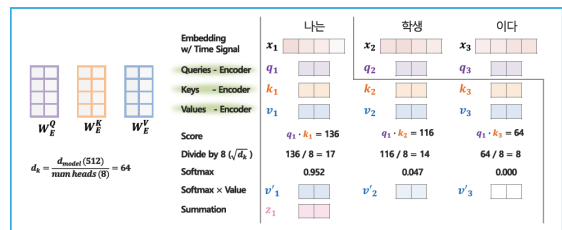


Figure 1. Overview of self-attention

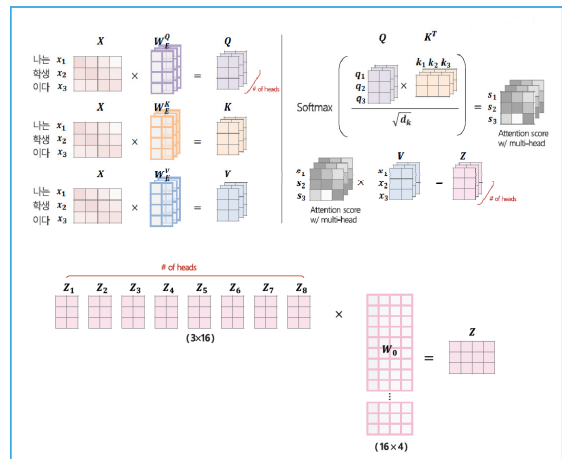


Figure 2. Overview of multi-head self-attention

둘. 적대적 학습(Adversarial training): 모델 학습 단계에서 서로 다른 역할(Reconstruction, prediction)을 하는 2종의 디코더 구조를 기반으로 적대적 학습을 수행하여 모델이 정상 데이터 및 다양한 이상 패턴을 함께 학습하도록 유도한다. 이는 모델의 정상 데이터에 대한 과적합 현상을 완화하고

재구성 오류를 증폭시켜 작은 이상 신호도 놓치지 않도록 한다[8].

셋. 재구성 기반 이상 탐지: 모델은 입력 시계열을 인코딩한 후 다시 디코딩하여 원본 시계열을 재구성하는 구조를 갖는다. 이 과정에서 산출되는 재구성 오류를 이상 탐지 기준으로 활용하는데, 모델은 정상 패턴을 충실히 복원하도록 학습되었기 때문에 재구성 오류가 큰 경우 해당 입력을 이상으로 간주할 수 있다.

2.2.2. TranAD의 무기체계 적용

Transformer 기반의 이상 감지 기술인 TranAD는 다변량 시계열 데이터를 분석하여 이상을 감지하기 위해 개발되었다. 앞서 기술한 TranAD의 기술적 특징은 복잡한 상관관계를 갖는 무기체계의 다변량 시계열 데이터를 분석하기에 적합하다고 볼 수 있다. 현대의 무기체계는 다양한 센서를 활용하며, 센서들은 서로 유기적으로 동작하여 기능을 수행한다. TranAD는 단순히 여러 개의 센서 데이터를 각 분석하는 것이 아니라, 데이터 간 관계를 학습할 수 있기 때문에 종래의 이상 감지 기술보다 무기체계 이상 감지 기술에 적합하다고 할 수 있다.

3. TranAD 모델 기반 실시간 이상 상태 감지 시스템

3.1. 시스템 구성

Figure 3은 시스템의 전체 구성 및 흐름을 보여준다. 칼만 필터(Kalman filter)는 관측데이터를 입력받아 현재 궤적과 예측 궤적 간 차이를 산출하고, 이 값은 관측데이터와 함께 데이터 정규화 및 윈도우 업데이트 과정(Sliding window)을 거쳐 모델에 입력된다.

모델은 입력된 시계열 데이터를 기반으로 데이터를 재구성하고 입력데이터와의 차이를 기반으로 재구성 오차를 산출하여 실시간 이상 감지에 제공한다.

실시간 이상 감지기는 각 데이터의 손실(평균 제곱 오차) 값을 기반으로 미리 설정된 임계치와 비교하여 이상 상태를 실시간으로 판별한다.

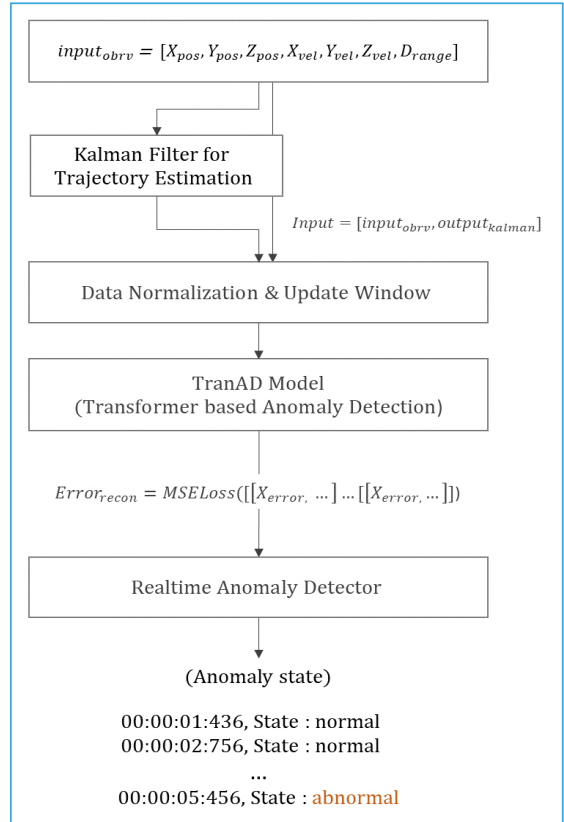


Figure 3. Architecture of system

3.2. 칼만 시스템 개요 및 적용

본 연구에서는 칼만 필터를 통해 얻은 예측 정보를 활용함으로써 모델에게 이상 감지를 위한 보조 판단 지표를 제공하여, 모델의 일반화 성능을 개선하고 모델 학습 시간을 단축시켰다.

필터의 시스템 모델로 비행체의 등속 운동을 가정한 등속도 모델을 사용하여 로켓의 일반적인 비행 궤적을 예측하도록 설계하고, 실제 관측된 궤적과의 차이를 산출하도록 구성하였다.

수식 1.1과 같이 시스템 상태 변수는 총 6종으로, 3차원 위치($X_{pos}, Y_{pos}, Z_{pos}$)와 3차원 속도

$(X_{vel}, Y_{vel}, Z_{vel})$ 로 구성된다. 수식 1.2는 상태 천이 행렬로, 등속도 모델을 표현한 것이다. 각 축에 대한 속도가 일정하다고 가정하므로, 칼만 예측 단계에서 다음 시각의 위치는 이전 위치에 현재 속도를 반영한 값으로 예측하고, 속도는 이전 상태 값을 사용한다.

$$X_k = [X_{pos}, Y_{pos}, Z_{pos}, X_{vel}, Y_{vel}, Z_{vel}]^T \quad (1.1)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta t = time \delta \quad (1.2)$$

칼만 필터의 관측 변수로는 위치 및 속도 측정값을 사용하여 상태와 동일한 차원의 관측을 가정하였다. 따라서 관측 행렬은 수식 1.3과 같이 단위행렬로 표현하였다.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

필터의 잡음 설정에서는 위치 측정값의 오차를 보정하기 위해 측정 잡음을 프로세스 잡음보다 상대적으로 크게 설정하여 센서로부터 얻은 측정값보다 모델이 예측한 값을 상대적으로 더 신뢰하도록 설정하였다. 속도 값의 경우 예측 단계에서 이전 상태 속도를 사용하므로, 프로세스 잡음을 측정 잡음보다 크게 설정하여 측정값을 상대적으로 더 신뢰할 수 있도록 하였다.

칼만 필터는 매 시각 예측 단계와 수정 단계를 거치는데, 수정 단계에서 발생하는 관측값과 예측값의 차이를 잔차라고 한다. 본 연구에서는 잔차 값 중 위치에 해당하는 값을 궤적 오차로 정의하였다. 정상적인 상황에서는 비행체가 등속도 모델에 가깝게 움직이므로 잔차가 작게 유지된다. 반면 이상 상황이 발생하면 예측과 실제 값 간의 오차가 급격히 커지게 된다.

3.3. TranAD의 적용

TranAD 모델은 다변량 시계열 데이터의 이상을 감지하기 위해 설계되었기 때문에, 본 시스템 적용을 위해 전체적인 구조를 변경해야 할 사항은 없다. 다만, 본 시스템의 적용을 위해 입력데이터 특성(특징 수, 윈도우 사이즈)에 맞게 Table 1과 같이 파라미터를 수정하였다.

Table 1. TranAD Parameters

Parameters	Description
Positional encoding dimension (row × col)	(2*feats × window size)
Transformer encoder/decoder embed dimension	2*feats
Transformer encoder/decoder number of heads	window size
Fully-connected network linear layer dimension	(2*feats, feats)

3.4. 데이터 및 학습 환경

본 연구에서는 230mm급 무유도 로켓의 비행시험 데이터를 활용하였으며, TranAD 모델에는 Table 2과 같이 총 8개의 특징을 가진 다변량 시계열 데이터가 입력된다.

데이터는 포물선 형태로 비행하는 로켓의 궤적에서 산출된 데이터로, 개발 단계에서 측정된 다양한 궤적 정보가 포함되어 있다. 단-사거리, 중-사거리, 장-사거리 데이터를 모두 포함하고 있으며 다양한 환경에서 측정된 데이터로, 정상 비행 궤적 정보를 일반화하기에 충분하다.

비정상 데이터의 경우 정상 데이터로부터 발생 가능한 이상 상태 시나리오를 가정하여 적용하였다. 모델은 정상 상태를 학습함으로써, 정상이 아닌 데이터를 감지하는 데 목적이 있으므로, 모델이 정상 궤적에 대해 충분히 일반화되었다는 가정하에 시나리오로 가정한 비정상 데이터 또한 모델을 평가하기에 적합

하다고 볼 수 있다.

Table 2. Model Input Features

Input	Description
Position X	Radar observed position
Position Y	
Position Z	
Velocity X	Radar observed velocity
Velocity Y	
Velocity Z	
Rocket range	Estimated flight range of the rocket
Trajectory error	Discrepancy between real-time estimates and radar measurements

각 특징은 단위와 범위가 서로 다르므로, 수식 2와 같이 모델 입력 전에 모든 특징 값을 0~1 범위로 정규화하여 각 특징의 스케일 차이가 학습에 미치는 영향을 줄였다.

$$x'_i = \frac{x_i - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}, \forall i \in \{1, 2, \dots, 8\} \quad (2)$$

$$x_i = \text{feature}_i, (\text{feats} = 8)$$

시계열 데이터의 특성을 반영하기 위해 수식 3과 같이 슬라이딩 윈도우(Sliding Window) 기법을 적용하였다. 연속된 시점의 데이터를 하나의 입력 시퀀스로 구성하고, 윈도우를 한 시점(20msec)씩 이동시키며 샘플을 생성하였다. 따라서 모델은 최근 50개 시점에 해당하는 데이터 패턴을 보고 현재 시점의 이상 여부를 판단하도록 학습하였다. 윈도우 크기 50은 비행 데이터의 특성과 이상 탐지의 민감도 간의 균형을 고려하여 선정된 값으로, 데이터의 특성(측정 주기 등)에 따라 다르게 설정할 수 있다.

$$W_t = \{x_{t-49}, x_{t-48}, \dots, x_{t-1}, x_t\} \quad (3)$$

$$W_{t+1} = \{x_{t-48}, x_{t-47}, \dots, x_t, x_{t+1}\}$$

$$W_t = \text{window at time } t \\ (\text{window size} = 50, \text{stride} = 1)$$

학습 데이터셋과 검증 데이터셋의 구성은 정상 비행 데이터 위주로 이루어졌으며, 소수의 이상 사례를 포함한다. 학습 데이터는 정상 데이터와 비정상(이상) 데이터의 비율이 약 99.5% 대 0.5%로, 이상 징후가 극히 드문 불균형 데이터셋을 사용하였다. 대량의 정상 패턴을 학습함으로써 모델이 정상 상태의 범위를 충분히 익히도록 하고, 극히 일부 존재하는 이상 패턴에 대해 모델이 민감도를 가지도록 하기 위함이다. 테스트 데이터는 학습/검증 데이터와 분리된 데이터로, 모델의 평가를 위해 전체 데이터에서 모든 사거리 및 환경 정보를 포함하도록 구성하였다. Table 3에서 자세한 데이터셋 구성을 볼 수 있다.

Table 3. Summary of Dataset Partitioning for Model Training and Evaluation

Types	Normal samples	Abnormal samples
Train	234,595	1,178
Validation	2,970	30
Test	117,778	117,778

모델 학습은 PyTorch 기반으로 구현되었으며, 학습 환경과 주요 하이퍼 파라미터에 대한 설정은 Table 4와 같다.

Table 4. Hyper Parameters

Parameters	Value
Epoch	150
Batch	64
Features	8
Window size	50
Base learning rate	0.0017
StepLR step	50
StepLR gamma	0.5
Optimizer	AdamW
AdamW weight decay	1e-7
Encoder and decoder layer feed forward dimension	16
Encoder and decoder layer drop-out	0.1

AdamW 옵티마이저는 Adam에 가중치 감쇠를 적용한 것으로, 과적합을 방지하고 일반화 성능을 높이는 데 기여한다. 학습률 스케줄러로는 StepLR를 사용하여 초기에는 상대적으로 큰 학습률로 빠르게 수렴을 유도하고, 이후 학습이 진행됨에 따라 학습률을 단계적으로 낮춤으로써 미세한 조정이 가능하게 했다.

4. 결과

4.1. 평가 환경

본 시스템의 학습 및 평가는 Table 5와 같은 환경에서 진행하였다.

Table 5. System Environment for Training and Evaluation

Category	Component	Specification
PC hardware	CPU	Intel i9-13900F
	RAM	DDR4 128GB
	GPU	NVIDIA RTX 4070Ti (12GB)
Software	Code	Python
	Framework	Pytorch2.5+cu124
	Other libraries	numpy, matplotlib, tqdm

4.2. Kalman Filter 기반 궤적 예측

Kalman Filter의 성능은 Figure 4와 같다. 이상 궤적이 발생한 경우 예측 궤적(주황 점선)과 측정 궤적(파란 실선)과의 차이(회색 점선)가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 목표 비행 궤적에 따라 값의 크기가 달라질 수 있다는 문제가 있지만, 전체 학습 데이터를 동일한 범위로 정규화하고, 목표 사거리를 모델에 함께 입력함으로써 해당 문제가 발생하지 않도록 설계하였다.

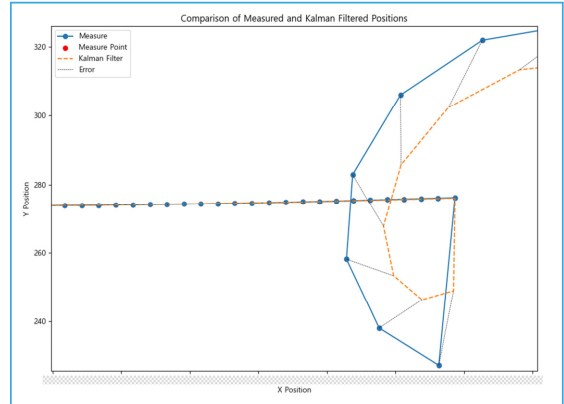


Figure 4. Kalman filter estimated trajectory

4.3. 모델 학습 결과

모델을 학습한 결과 검증 손실(Validation loss)은 Figure 5와 같이 이상적으로 감소하여 약 0.000175를 달성하였다. 평균 제곱 오차로 산출된 검증 손실은 0~1 사이로 정규화된 입력데이터와 재구성한 데이터 간 오차이므로, 해당 결과를 통해 모델이 데이터를 충실하게 복원하도록 학습되었음을 확인할 수 있다.

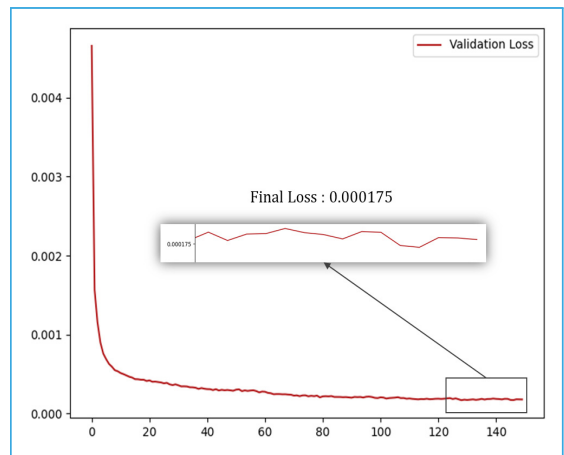


Figure 5. Evaluated validation loss

Figure 6 및 Table 6은 모델 학습 후 정상 데이터와 비정상 데이터를 이용하여 모델을 평가한 결과이다. 비정상 데이터는 정상 데이터를 일부 포함하고

있어 정상 데이터와 유사한 최소 손실 값을 갖는다. Figure 6의 하단 그래프는 비정상 데이터의 손실 값을 보여준다. 비정상 구간의 손실 값을 분석한 결과, 약 0.1 구간에 임계치를 설정하면 정상 데이터와 비정상 데이터를 구분할 수 있었다.

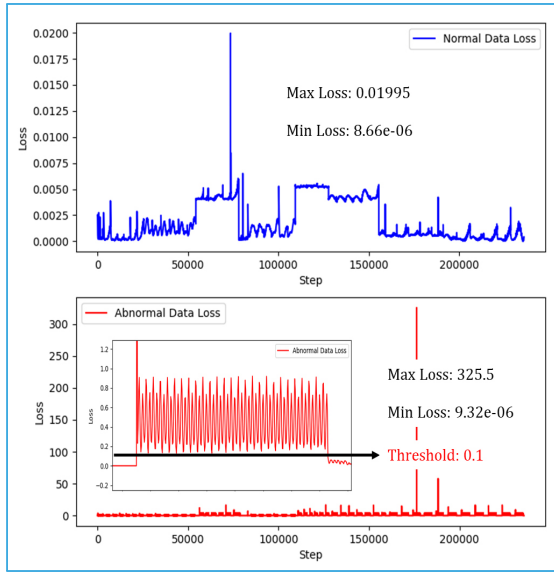


Figure 6. Normal and abnormal data loss

Table 6. Tested Loss

Data	Minimum loss	Maximum loss
Normal	8.66e-06	0.0019995
Abnormal	9.32e-06	325.5

4.4. 이상 상태 감지 모델의 성능

학습된 모델의 Accuracy 및 F1 Score를 측정한 결과는 Table 7과 같다. Accuracy는 99.44로, 235,556개의 샘플(각 1초 길이) 중 99.44% 샘플에 대해 정확하게 이상 감지를 수행하였다. 하지만, 테스트 데이터셋 중 0.56%의 비정상 데이터를 정상으로 인식하였다. 해당 문제를 분석한 결과, 이상 상태가 발생한 즉시 이상 상태로 판별하지 못하고 윈도우 내 비정상 데이터가 일정량 이상 쌓인 후 이상 상태로 분류되는 것을 확인하였다. 이는 학습 시 사용한

윈도우 사이즈 파라미터로 인해 발생하는 문제로, 윈도우 사이즈를 줄이면 해당 부분을 일부 개선할 수 있으나, 학습 비용 증가 및 추론 성능 저하를 확인하여 현재 파라미터를 최종 파라미터로 선정하였다.

Table 7. Summary of Model Evaluation Result

Metric	Value
Total samples	235,556
False positive	1,319
False negative	0
True positive	106,161
True negative	128,076
Accuracy	99.44
Recall	1.0
Precision	0.9877
F1 score	99.38

Figure 7, 8은 각각 정상과 비정상 비행 궤적 중 일부 궤적의 이상 점수 분석 결과를 보여준다. 로켓은 포물선 형태로 비행하기 때문에, Figure 8과 같은 급격한 궤적 변화(동체 이상)가 있을 때는 이상 점수가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

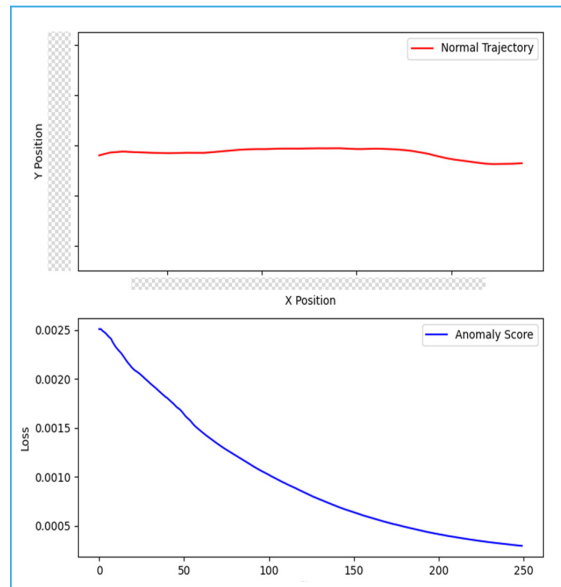


Figure 7. Sample test of normal trajectory

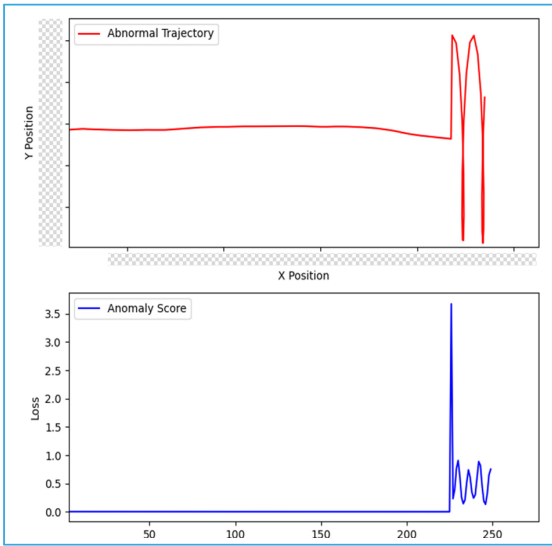


Figure 8. Sample test of abnormal trajectory

Figure 9는 약 5분간 측정된 모델의 추론 속도를 보여준다. 평균 추론 속도는 1.63msec로 측정되었다. 이는 설정한 업데이트 주기(20msec)보다 빠른 속도로, 학습된 모델이 실시간 시스템에서 지연 없이 동작할 수 있음을 알 수 있다.

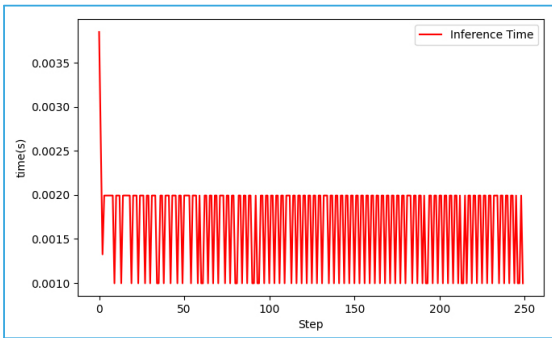


Figure 9. Model inference time

5. 결론

본 연구는 인공지능 기술을 기반으로 무기체계 연구개발 및 운용 단계에서 발생할 수 있는 무기체계의 이상 상태를 실시간으로 감지할 수 있는 시스템을 제안하였다. 종래의 이상 상태 감지 기술의 문제점을 개선할 수 있는 Transformer 기반 인공지능

기술을 활용하여 시스템을 구현하고 230mm급 무유도 로켓의 시험 데이터로 모델 학습 및 평가를 수행하였다.

학습된 모델은 실시간 환경에서 높은 정확도로 빠르게 데이터의 이상을 감지하였다. 230mm급 무유도 로켓의 시험 데이터 기반으로 모델의 성능을 측정된 결과 Accuracy, F1 score에서 각각 99.44, 99.38을 달성하였다. 하지만 일부 데이터의 경우 비정상 상태를 정상으로 감지하기도 하였다. 본 연구에서는 이를 입력 윈도우 크기와 관련된 문제로 특정하였으며, 향후 해당 문제를 보다 정밀하게 분석하고 개선하기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1 Artificial Intelligence and International Security, <https://www.cnas.org/publications/reports/artificial-intelligence-and-international-security>, 2025, 2, 18
- 2 MIL-STD-882E: System Safety, United States Department of Defense, 2012.
- 3 Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I., "Attention Is All You Need", *arXiv*, pp. 1-15, 2023.
- 4 Bishop, C. M., Pattern Recognition and Machine Learning, Springer, 2006.
- 5 Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M., Time Series Analysis: Forecasting and Control(5th ed.), John Wiley & Sons, 2015.
- 6 Schölkopf, B., Platt, J. C., Shawe-Taylor, J., Smola, A. J., & Williamson, R. C., "Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution". *Neural Computation*, 13(7), pp. 1443-1471, 2001.
- 7 Malhotra, P., Vig, L., Shroff, G., & Agarwal, P., "LSTM-based Encoder-Decoder for Multi-sensor Anomaly Detection", *arXiv*, pp 1-5, 2016.
- 8 Tuli, S., Casale, G., & Jennings, N. R., "TranAD: Deep Transformer Networks for Anomaly Detection in Multivariate Time Series Data", *Proceedings of the VLDB Endowment*, 15(6), pp. 1201-1214, 2022.

기동무기체계의 내구도 주행시험 현황과 개선 방향

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

Status and Prospects to Improve Endurance Driving Tests for Ground Military Systems

이상훈†, Sanghoon Lee

현대로템, 시험평가팀, 책임연구원
Senior Researcher, Test & Evaluation
Team, Hyundai Rotem

여성재, Seongjae Yeo

현대로템, 시험평가팀, 책임연구원
Senior Researcher, Test & Evaluation
Team, Hyundai Rotem

이동훈, Donghoon Lee

현대로템, 시험평가팀, 책임연구원
Senior Researcher, Test & Evaluation
Team, Hyundai Rotem

Abstract

This study investigates endurance driving tests for ground military vehicles. An endurance driving test is a critical test and evaluation process in the development of these vehicles and requires extensive time and resources. This study defines durability and endurance, analyzes the current test standards and evaluation criteria, and identifies key issues. It clearly outlines the establishment of standards for endurance driving tests without ambiguity. Furthermore, it proposes new and diverse methods for conducting endurance driving tests, such as accelerated lifespan testing, for ground military vehicles.

keywords : endurance driving test , durability, ground military vehicles, MIL-STD

† Corresponding Author : Sanghoon Lee

Tel : +82-31-688-8443, email : sanghoon.lee@hyundai-rotem.co.kr

Hyundai Rotem, 37, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 25th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

내구도 주행시험은 기동무기체계 개발시험평가 과정에서 가장 중요한 시험평가 항목 중 하나로, 무기체계의 신뢰성과 운용 수명을 검증하는 핵심 평가 절차이다. 가장 긴 시험평가 기간이 소요되며, 막대한 비용과 자원이 투입되는 시험으로도 그 중요성 또한 큰 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 내구도의 개념을 명확히 정의하고, 내구도 주행시험의 규격 및 기준, 현행 운용 실태를 분석함으로써, 해당 시험의 타당성과 신뢰성을 검토하고자 한다. 또한, 내구도 주행시험에서 사용되는 주행거리 산출 방식과 문제점을 도출하고, 이를 개선하기 위한 방안을 제시함으로써 보다 효율적이고 정확한 시험평가 체계를 확립하는 데 기여하고자 한다.

2. 본론

2.1. 내구도 정의

내구도의 정의를 살펴보기 전에, 보다 넓은 개념인 신뢰성 또는 신뢰도의 정의를 우선적으로 고찰할 필요가 있다. 다양한 기관에서는 신뢰성의 여러 측면에 대해 각각의 관점에서 정의를 제시하고 있다.

MIL-STD-721에서는 신뢰성을 다음과 같이 정의하고 있다. 신뢰성은 제품이 주어진 사용조건 아래서 의도하는 기간 동안 정해진 기능을 성공적으로 수행하는 능력 또는 성질을 말하며 이를 신뢰도로 표현을 하고 있다[1]. 한국분석시험연구원에서는 정의하고 있는 신뢰성 시험이란 의도한 기간 내에 안정된 품질 확보를 위해 상품의 기획 단계에서 출하 후 실사용 상태까지를 고려하여 각 단계별 제품의 신뢰성 향상을 위한 선택, 개선 또는 신뢰성의 확인, 실증을 위하여 실시하는 시험을 말한다[2]. 즉, 신뢰성 시험은 고장 시간에 대한 정보를 얻어 이에 의한 아이템의 신뢰성(평균수명, 고장률 등)을 측정, 평가

하기 위한 시험으로 개발 및 제조과정에서 신뢰성 향상, 평가, 보증을 위하여 실시되는 모든 시험을 의미한다. 따라서, 신뢰도 관점에서 일반적으로 내구도란 “특정 장비가 고장 없이 목표수명 또는 교환 시점까지 의도한 기능을 성공적으로 발휘할 확률”로 정의한다[1].

한편, 우리나라에서는 Durability와 Endurance를 “내구성” 혹은 “내구도”라는 단어로 혼용하여 사용하는 경우가 많다. 이에, 좀 더 명확한 개념적 구분을 위해, TOP(Test Operation Procedure) 문서에서 고찰할 필요가 있다. TOP-1-2-502, TOP-2-2-506, TOP-2-506A 문서에서는 Durability와 Endurance를 다음과 같이 정의하고 있다. Durability는 시스템, 구성 요소 또는 재료가 예상되는 운영 및 환경조건에서 시간이 지남에 따라 마모, 손상 또는 열화를 견뎌 낼 수 있는 능력을 말한다. 일반적으로 Durability test는 기계적 마모, 환경 노출 및 반복 사용 주기를 포함한 시뮬레이션 되는 실제 스트레스에 시스템을 적용하는 것을 포함한다. 반면, Endurance는 일반적으로 시스템 또는 구성 요소가 장기간 고장 없이 필요한 기능을 수행할 수 있는 능력을 말한다[3-5]. 여기에는 종종 기계적 스트레스, 열 조건 및 기타 임무 관련 요소를 포함한 운영 부하 하에서 지속적인 성능이 포함되고, 시험은 시스템이 성능 저하 또는 고장을 경험하기 전에 얼마나 오래 작동할 수 있는지를 평가한다.

따라서, 내구도 주행시험에 뜻하는 내구도는 Endurance를 의미하고, 현재 우리나라 국방 무기체계의 내구도 주행시험은 별다른 규격이나 지침을 제시하고 있지 않기 때문에, 일반적으로 미국 규격인 TOP 2-2-506를 기준으로 주행거리 및 도로배분율을 산출하여 적용하고 있다.

2.2. 내구도 주행시험 규격

2.2.1. 우리나라 및 미 육군 시험 규격

군용차량의 내구시험은 개발기관에서 신뢰성 확보

를 위해 수행하며 국방규격(KDS, Korean Defense Specification)에 문서화되어 있다. 일반적으로 국방규격은 미 육군 시험평가규격에 공개된 자료를 준용하여 탑재 중량 기준으로 계열화 제정을 한다. 이러한 계열화 제정의 경우 미군의 내구시험 절차서상 각 장비별 임무특성 및 운용환경 등 세부사항은 자세히 기술되지 않아 별도방안을 검토할 필요가 있다.

기동무기체계의 내구시험은 연구개발기관에서 체계의 내구 품질 신뢰성 확보를 위해 개발시험평가 기간에 수행되며, 그 기준은 국방 규격에 의해 명시되어 있다. 새롭게 개발되거나 성능 개량되는 기동무기체계 같은 경우 미 육군 시험평가규격을 준용하여 주행거리 및 도로배분율을 산출하고 있다. 1981년 제정된 TOP 2-2-506과 2014년 개정된 TOP 2-2-506A이 제시하고 있는 내구도 주행시험 기준이 다르기 때문에 현재는 최신 규격인 TOP 2-2-506A를 준용하여 시험 기준을 산출하는 것이 바람직하다고 판단된다. 최신 규격에서는 차륜형 및 궤도형의 중량 및 사용 목적에 따라 일부 구분되어 제시되지만, 임무 특성 및 운용환경 등 세부사항에 대해서는 명확하게 제시하고 있지 않아 시험기준 산출에 모호한 부분이 발생된다.

2.2.2. 우리나라 내구도 주행시험 현황

우리나라 기동무기체계 중 전차, 자주포, 장갑차의 내구도 주행시험 현황을 Table 1에서 보여주고 있다. 궤도형 차량인 전차와 자주포는 9,600km, 궤도형 장갑차 역시 9,600km 내구도 주행시험을 완료하였고, 차륜형장갑차의 경우는 32,000km 주행시험을 완료하여 무기체계의 내구도 입증 증명했음을 알 수 있다[6].

2.3. 내구도 주행시험 기준

2.3.1. 우리나라 및 미 육군 시험 기준

2.3.1.1. 국방규격 내구도 주행 시험기준

국내에서 개발 완료되어 야전에 배치된 차륜형장갑차 계열차량을 대상으로 내구도 주행 시험 기준을 논하고자 한다. 개발시험평가 기간 중 32,000km 내구 주행시험을 수행한다. 차량은 연료를 만충 수준으로, 냉각수, 윤활유 및 유압유를 적정 수준으로 주입하고, 별도로 포장되는 모든 기본불출품목, 추가인가 목록, 적재탄 및 개인화기와 개인군장을 포함한 조종수 0명, 차장 0명, 지휘관 및 참모요원 0명에 대한

Table 1. Endurance Driving Test Distance of Tracked and Wheeled Vehicles

Category		Development year	Driving test distance
Tank	K1series	K1	'85. 8.
		K1A1	'98. 8.
		K1A2	'12. 8.
	K2	'08. 12.	9,600km
Artillery	K55 series	K55	'85. 1.
	K55A1		'10. 9.
	K9		'98. 10.
Armored vehicles	Tracked	K200	'84. 10.
		K21	'07. 7.
		ARV	'10. 12.
	Wheeled	K808	'16. 6.

중량의 총합인 전투중량으로 Table 2의 주행도로 배분율에 따라 주행한다.

Table 2. Endurance Driving Test Distance and Proportion of Wheeled Armored Vehicle

Category	Distance	Proportion
Primary	6,400km	20%
Secondary	16,000km	50%
Cross country	9,600km	30%
Total	32,000km	100%

임의의 0시간 동안 평균 00km/h 속도로 총 00분 이상으로 주행 속도와 시간을 제한한다. 야지에서는 00km/h 이하의 속도로 주행하여야 한다. 험지에서는 00km/h 이하의 속도로 주행하여야 한다. 큰 바위 등 돌출된 장애물은 피해야 한다. 무리한 속도로 주행하여 차체, 현수장치, 조향장치 및 동력 전달장치에 닿거나 과도하게 부딪히지 않도록 하여야 한다.

2.3.1.2. 미 육군 내구도 주행 시험기준

미 육군 시험평가 최신 규격인 TOP 2-2-506A는 차량의 내구도 시험에 대한 시험 방법 및 절차를 명시한다. 규격 내 주행거리 산출방법으로는 OMS/MP (Operational Mod Summary/Mission Profile)를 준용한다고 다음과 같이 명시되어 있다. “Endurance testing should follow guidance given in a vehicle’s OMS/MP(내구 주행시험은 차량의 OMS/MP에 주어진 안내를 따라야 한다).” OMS/MP는 무기체계가 미래 전장 환경에서 어떻게 사용되어질 것인가를 개발자 측면에서 체계적이고 정량적으로 기술하여 무기체계의 필수임무 기능을 요약한 문서이다.

TOP-2-2-506A는 탑재중량에 따라 Table 3에 의거하여 Category를 분류하고 해당 Category별 Mission profile은 Table 4에 따라 구분한다. 이때 주행비율은 Sample profile을 따르고 주행거리는 각 장비별 OMS/MP를 우선하도록 권고한다.

Table 3. Description of Wheeled Vehicle Categories

Vehicle type	Description
Wheeled light	Wheeled vehicles with a gross vehicle weight rating (GVWR) up to and including 24,000 pounds (lb). Vehicles such as the High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle (HMMWV), Joint Light Tactical Vehicle (JLTV), commercial sport utility vehicles (SUVs), and pickup trucks would fall under this category.
Wheeled medium	Wheeled vehicles with a GVWR of 24,001 lb up to and including 60,000 lb. Vehicles in the Family of Medium Tactical Wheeled Vehicles (FMTV), Medium Tactical Vehicle Replacement (MTVR), or other medium commercial off-road vehicles would fall under this category.
Wheeled heavy	Wheeled vehicles with a GVWR of 60,001 lb and greater. Vehicles such as the HEMTT, PLS, LVSR, and other heavy commercial off-road vehicles would fall under this category.
..	..
Wheeled truck-tractor and trailer, light and medium	Truck-tractors and all compatible semitrailers. Vehicles such as the M1088 and MK31 truck-tractors, and M871/M872 semitrailers would fall under this category.
..	..

Table 4. Sample Vehicle Mission Profiles, unit : %

Vehicle type	Primary	Secondary	Trails/Rough trails	Cross country
Wheeled light	30	30	20	20
Wheeled medium	20	50	15	15
Wheeled heavy	30	50	10	10
..
Wheeled truck-tractor and trailer, light and medium	50	40	10	-
..

2.3.1.3. 국방규격과 미 TOP규격의 차이점

국방규격과 미 TOP규격의 차이점은 다음과 같다. 국방규격은 차량의 탑재 중량을 기준으로 TOP를 참고하여 시험규격을 제정하고 제정 이후 개발차량은 제정규격을 참고하여 필요사항에 따라 개정한다. 반면에 TOP규격인 TOP-2-2-506의 경우 차량별 탑재중량 Category에 따라 주행비율과 주행거리가 프로파일로 포함되어 있으나 2014년 개정 시 각 차량별 OMS/MP를 우선적으로 따르되 OMS/MP에 따라 시험절차를 확립할 경우, 권고사항을 따르도록 명시되어 있다. 현재의 국방규격은 Category에 따른 비교주행이 우선적으로 적용되는 경향이 있어 계열화 차량의 일률적인 주행거리가 적용됨으로 개발기간 장기화 및 개발특성 제한 등을 수반할 가능성이 있다는 점이 단점이자 차이점이라 할 수 있다.

내구도 주행시험의 목적을 고려해 볼 때 개발차량이 전형적인 야전조건에서 장기간 고장 없이 의도한 기능을 발휘하는지 검증을 위해서는 차량의 운용형태 및 임무 유형을 바탕으로 주행시험의 기준이 추가적으로 검토되어야 할 것이다. 합리적이고 목적에 부응하는 내구도 주행거리 시험기준을 확립할 경우 개발단계에서 목표성능에 대한 충분한 검증은 물론 상당한 시험평가 기간의 단축도 가능할 것으로 예상된다.

2.4. 내구도 주행시험 기준 선정

내구도 주행시험 기준 선정을 위해서 차륜형 계열 차량 중 의무후송 임무를 수행하는 계열차량으로 산출하는 방식을 설명한다. 의무후송 계열차량은 들것 환자 이송장치 등 의무 장비가 적용되는 신규 개발 차량으로 임무의 목적을 고려하여 합리적이며 타당한 검증 계획 수립이 필수적이다. 2014년 미군이 개정한 TOP-2-2-506A의 시험기준 프로파일과 권고사항을 참고하고, 차륜형 계열차량의 OMS/MP의 분석을 통하여 내구도 주행시험의 거리기준과 절차를 다음과 같이 수립하였다.

2.4.1. TOP 분석을 통한 주행거리 비율 선정

2.4.1.1. 작전유형에 따른 OMS/MP 분석

의무후송이란 환자발생 지점에서 중대 환자수집소 및 대대 구호소까지 전투현장에서 전상자에 대한 응급처치와 후송을 수행임무로 정의한다. 따라서 OMS/MP상 차륜형 계열차량의 작전지역을 분석 시 의무후송에 적합한 지역, 작전부대는 차륜형 계열차량이 실제 운용될 특성사단과 대대로 선정하여 고유임무인 의무지원을 위한 작전형태가 분석되어 있다.

작전은 일반적으로 공격, 후퇴, 역습 등의 다양한 작전이 존재하며, 주행별 지형은 이러한 작전에 결정적인 영향을 준다. 그러나 이러한 작전형태별 지형의 영향은 차량의 이동보다는 기계화 부대의 작전측면에서의 지형 이점이 우선시되기 때문에 차륜형 계열차량의 고유임무 또는 유형별 차량의 대표 주행경로 및 비율 확인을 위해서는 해당 계열화 차량의 주행경로 및 주행비율에 주목할 필요가 있다.

이러한 계열화 차량의 주행경로 및 주행비율 구체화는 미 육군 시험평가규격인 TOP 2-2-506A에 기술되기 때문에 이를 확인하고 주행경로의 세분화하는 작업을 통해 쉽게 도출이 가능하다.

2.4.1.2. TOP에 따른 차량 Category 선정

차륜형 계열차량은 Table 5의 TOP-2-2-506A의 Category 분류 기준에 의거 Wheeled medium을 적용한다. Wheeled medium의 주행비율은 다음과 같다.

Table 5. Endurance Driving Test Distance Proportion of Emergency Wheeled Armored Vehicle, unit : %

Vehicle type	Primary	Secondary	Rough trails/ Cross country
Wheeled medium	20	50	30

체계 개발의 효율적 측면과 내구도 주행시험의 신뢰성 확보 측면에서 고려해 볼 때, 미 육군 시험평가 규격 내 Category별 권고되는 주행비용은 합리적이라고 판단된다.

2.4.2. OMS/MP 분석을 통한 내구도 주행거리 선정

일반적으로 OMS/MP는 미래 작전환경과 부여된 임무에 기초하여 개발된 문서로서 무기체계 개발 시 기초자료이다. 따라서 OMS/MP는 개발 무기체계가 미래전장의 임무분석과 다양한 전장상황을 분석하여 필요한 제원이 기술되어 있으며 전·평시를 구분하여 작성되어 있다. 일반적으로 평시는 부대별 교육훈련 모델을 기초로 연간훈련과 관련한 제원들을 분석하여 그 결과가 반영되어 있으며, 운용부대와 작전지역을 한정된 가상의 시나리오로 적용되어 있다. 또한 전시 OMS/MP는 치열한 전투가 이루어지는 국면에 대해 72시간 동안의 전투 시나리오를 작성해 분석되어 있다.

2.4.2.1. 평시/전시 OMS/MP 분석

유사체계인 장갑차와 의무차량을 운용 중인 부대인 00사단 00대대의 연간교육훈련계획을 기초로 훈련형태별 연간 운용거리를 파악한다. 전시 OMS/MP 분석에서는 작전지역 고려 시 차륜형 계열차량의 필요성이 제기되는 부대의 72시간 시나리오를 바탕으로 파악한다.

2.4.3. 내구도 주행거리 선정

내구도 주행거리 선정은 차량의 작전유형별 연간 운용거리를 분석하여 참조하였다. 이는 미 육군 시험평가규격 TOP 2-2-506A의 주행거리 산출 방식과 일치한다.

내구도 주행거리 선정은 체계개발의 효율적 측면과 내구도 주행시험의 목적을 고려해 볼 때 차륜형 계열차량의 연간 기동거리 산출 값과 유사체계의 창정비 순환주기(시간, 주행거리)를 고려하여 산출하는

방식이 합리적일 것으로 판단된다.

육군 장비정비규정(육군규정 480) 제11조상 창정비의 목적은 내구적 한계에 도달한 무기체거나 장비를 완전분해 수리하여 잔여 수명을 연장하기 위함이다. 따라서 이러한 창정비의 순환주기(시간, 주행거리)를 내구도 주행거리 산출방식에 고려함은 시험의 목적인 신뢰성 확보 측면에서도 부합된다고 판단된다. 차륜형 계열차량의 내구도 주행거리는 OMS/MP의 연간 기동거리 및 창정비 순환주기를 기준으로 산출한다. 이러한 내구도 주행거리 설정 방식은 차륜형 계열차량의 내구도 주행거리 시험은 물론 향후 타 무기체계의 체계적이고 정량적인 주행거리 선정 측면에서도 적절한 신뢰성을 기여할 것으로 판단된다 [7-8].

2.5. 내구도 주행시험 개선 방향

현재 일어나고 있는 우크라이나와 러시아의 전쟁에서도 기존의 전통적인 무기체계를 가지고 수행하는 전쟁방식이 아닌 새롭고 복합적인 형태의 전쟁방식이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 미래의 전장 환경이나 운용 환경을 생각한다면 기존의 내구도 주행시험 기준으로는 시험기준 산출이 더욱더 모호하고 기준에 부합하지 않는 무기체계들이 많은 것으로 예상된다. 따라서, 다양하고 복합적인 기동무기체계를 아우를 수 있는 새로운 내구도 주행시험 기준을 제시할 필요가 있고, 또는 다른 방식으로 내구도 주행시험을 대체할 수 있는 방안도 고려해 볼 필요가 있다.

2.5.1. 내구도 주행시험 기준 제시

OMS/MP가 제시되지 않는 개발차량에 대해서는 어떤 규격을 따라 주행거리 및 도로 배분율을 산출해야 하는지가 매년 논쟁의 대상이 된다. 따라서, 여러 가지 내구도 주행시험 기준 중에 오랜 기간 미국 뿐 아니라 많은 나라에서 준용했던 TOP 2-2-506을 참고하여 운용목적에 따라 규정된 주행거리를 적

용하는 방법이다. 이 방법은 이미 많은 개발 완료된 차량에서 적용한 기준으로 유효성은 입증되어 있다고 판단된다. Table 6에서 제시하는 주행거리는 CAT 1의 전투차량은 32,000km, CAT 2의 동일한 차체에 전투지원 목적을 가지는 차량으로 19,000km 그리고 마지막으로 CAT 3는 CAT 1과 CAT 2에 해당되지 않는 차량으로 증량 및 운용거리가 적은 차량으로 6,400km를 주행하여 검증하는 방안이다. 이 기준은 간결하고 검증이 많이 되어있지만, 지속적으로 표준차량 및 계열화 차량들이 다양해지면서 운용 목적과 다양한 임무를 수행하는 차량들을 단지 3가지 유형으로만 구분하여 모든 차량들을 적용하기 어려운 부분들이 있다[6].

Table 6. Example of Distance on Vehicle Type

Category	Description	Distance
CAT 1	Tactical trucks and armored cars	32,000km
CAT 2	Truck bodies with tactical support equipment	19,000km
CAT 3	Lightweight, low mileage trucks	6,400km

이 밖에도 차량의 중요요소를 가지고 주행거리 기준을 산정하는 방식도 제안되고 있다. 예를 들면, 무게중심과 증량의 변화가 표준차량에서 얼마나 변경되는지에 따라 주행거리 산출을 달리하는 방법이다.

2.5.2. 내구도 주행시험 대안 제시

미 육군 ATC(Aberdeen Test Center)에서 차륜형 군용차량의 가속 내구도 시험을 두 가지 다른 방식으로 수행하여 앞으로의 내구도 주행시험 방법론의 새로운 방향을 제시하고 있다. 전통적인 방식인 실제 차량으로 내구도 주행시험을 수행하는 방법과 연구실 혹은 가상환경을 이용하여 가속 내구도 주행 시험을 수행하는 방법으로 지상무기체계의 내구도 주행시험을 현대화하는 방법을 보여주고 있다. 기존의 군용 차량 내구도 주행시험은 비용이 많이 들고

시간이 오래 걸리는 단점이 존재한다.

ATC에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 가속 내구성 시험(ADT, Accelerated Durability Testing)을 제안한다. 해당 시험은 Figure 1과 같이 구성하여 수행하고 핵심 내용은 다음과 같다. 첫 번째는, 전통적인 군용 차량 신뢰성 시험의 한 계로서, 기존 시험은 실제 운행 환경을 모사하지만, 수개월 혹은 1년 이상의 긴 시험평가 기간과 시험을 수행하기 위한 높은 비용이 발생하는 단점이 있다. 따라서, 이를 개선하기 위해서는 시험기간을 단축시키면서도 신뢰성은 유지하는 방법이 필요하다. 이에 대한 시험방법은 가속 내구성 시험의 적용이다. HIL(Hardware-in-the-Loop) 시뮬레이션을 활용하여 실제 차량 테스트 이전에 가상의 환경에서 시험이 가능하도록 구축하는 방안이다.



Figure 1. Up-armored HMMWV testing on the ATC VDS(Vehicle Durability Simulator)

가속된 필드 테스트(AFT, Accelerated Field Testing)를 통해 기존보다 짧은 시간 내에 신뢰성을 검증하고, 데이터 기반 모델링과 센서 기술을 활용하여 유지보수에 대한 예측 지원을 할 수 있다. 이러한 새로운 시험방법을 통해 시험기간 단축과 비용 절감 효과를 얻을 수 있다. 이는 신뢰성 데이터를 보다 빠르게 획득하여 차량 설계 및 운용 효율성 성능을 향상시키는 데 기여할 수 있다.

결론적으로, ATC에서 수행된 이 연구는 군용 차량의 신뢰성 시험을 현대화하는 실용적인 접근법을

제시하여, HIL 시뮬레이션과 가속 내구성 시험을 결합하여 보다 신속하고 경제적인 테스트가 가능함을 보여준다[9].

3. 결론

일반적으로 무기체계 개발을 시작해서 완료하기 까지 오랜 시간이 걸리는 문제점 때문에 최근에는 개발기간을 단축시키는 신속획득사업이라는 제도가 신설되었다. 계열형 무기체계의 경우, 개발기간이 단축되어 신속하게 야전에 배치할 수 있도록 무기 개발이 진행되고 있다. 그런 점에서 내구도 주행시험은 개발 시험평가 항목 중 가장 많은 시험평가 시간 소요를 요구하고 있기 때문에 정량적이고 효율적인 내구도 주행거리 기준의 산출이 필요한 부분이라고 판단된다. 불필요하고 과도하게 내구도 주행을 수행한다면 많은 시간과 재원이 낭비되는 일이 발생할 수 있고 결과적으로 개발사업 기간에 영향을 줄 수 있기 때문에 앞으로 내구도 주행거리 기준은 축적된 데이터를 바탕으로 기관의 연구를 통해 명확한 기준을 제시한다면, 시험평가를 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 전통적으로 수행해 왔던 시제차량의 내구도 주행뿐만 아니라 연구실에서 수행하는 가속 내구 주행시험이나 시뮬레이션을 통해 수행하여 대체할 수 있는 새로운 방법들도 지속적으로 시범 적용하여 신뢰성을 높이면서도 개발기간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 방안도 같이 고려해야 한다. 현재까지는 내구도 주행시험을 줄이기 위한 연구가 미진한 상황이지만 앞으로 다양한 연구가 진행된다면 획기적으로 내구도 주행시험의 소요 자원 및 기간을 줄일 수 있을 것으로 기대가 된다.

참고문헌

- 1 MIL-STD-721C Definitions of Terms for Reliability and Maintainability, Department of Defense (USA), 1981.
- 2 Korea Analysis Test Researcher, <https://www.katr>.

re.kr/bbs/content.php?co_id=reliability, 2025, 03, 20

- 3 TOP 02-2-506 Endurance Testing of Track and Wheeled Vehicle, U.S. ARMY TEST AND EVALUATION COMMAND, 1981.
- 4 TOP 02-2-506A Endurance Testing of Track and Wheeled Vehicle, U.S. ARMY TEST AND EVALUATION COMMAND, 2014.
- 5 TOP 01-2-502 Durability, U.S. ARMY TEST AND EVALUATION COMMAND, 1984.
- 6 Eom, D., "A Study on the Improvement of the Endurance Testing Standard for Combat Vehicles", *Journal of the Korean Association of Defense Industry Studies*, 20(2), pp. 63-77, 2013.
- 7 Park, J., & Lee, J. W., "Direction of Development of Tests and Evaluations for Military Maneuvering Equipment: Focusing on Vehicle Durability", *Journal of Applied Reliability*, 19(2), pp. 123-133, 2019.
- 8 Jeong, E. B., Kang, D. S., Choi, J. H., Kim, H. S., & Choi, M. S., "Endurance test procedure and validation of Multipurpose tactical vehicle", *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, pp. 256-261, 2014.
- 9 Ramsey, G., Schultz, G., & Clerkin, J., "Modernizing Military Ground Vehicle Reliability Testing", *Proceedings of the 2018 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*, pp. 1-11, 2018.

전기식 포탑의 전력공급 품질 향상 및 구동 설계 개선을 위한 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치 설계 및 검증

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

Design of an Ultra-Capacitor-Based Energy Storage System to Improve the Power Supply Quality and Driving Performance of an Electric Gun/Turret Driving System

강한길†, Hangil Kang

현대로템, 기동기술개발실,
책임연구원
Senior Research Engineer,
Department of Mobility
Technology Development,
Hyundai Rotem

박해원, Haewon Park

현대로템, 기동기술개발실,
책임연구원
Senior Research Engineer,
Department of Mobility
Technology Development,
Hyundai Rotem

이계승, Gyeseung Lee

현대로템, 기동기술개발실,
책임연구원
Senior Research Engineer,
Department of Mobility
Technology Development,
Hyundai Rotem

김현민, Hyunmin Kim

국방기술품질원, 기동화력센터,
선임연구원
Senior Researcher, Land
System Center, Defense
Agency for Technology and
Quality

Abstract

The power supply device of an electric gun/turret driving system provides power from a DC-DC converter, whereas the instantaneous peak power exceeding the rated output required by the driving system is supplied by the energy storage unit. Using an ultra-capacitor as an energy storage unit offers the advantage of a stable power supply through a high-capacity capacitor. However, the heat generated by the charge and discharge currents can affect capacitor durability. In this study, we explore design application strategies to leverage the advantages of an ultra-capacitor-based energy storage unit while improving its durability. Furthermore, we verify the enhancement of the power supply quality and improvement in the driving performance of the electric gun/turret driving system. Finally, we describe the quality improvement achieved by implementing the designed energy storage unit.

keywords : ultra-capacitor, energy storage unit, DC-DC converter, electric gun/turret driving system, cell balancing circuit

† Corresponding Author : Hangil Kang

Tel : +82-31-688-4401, email : Jayden@hyundai-rotem.co.kr

Hyundai Rotem, 16082, 37, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 21st. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

기동무기체계의 전기식 포탑 구동 시스템은 구동 전력을 공급하기 위한 승압형 컨버터, 침두부하 보상과 회생 에너지가 저장되는 에너지 저장장치, 승압된 전압을 분배하기 위한 고전압분배기 및 포탑을 제어하기 위한 전동기 구동장치로 Figure 1과 같이 구성된다.

전기식 포탑 구동 시스템의 전원공급 장치는 승압형 컨버터에서 전력을 공급하고 포탑의 급격한 가속시 필요한 침두부하 제어를 위한 순시(순간적인)전력은 에너지 저장장치로 전력을 공급한다.

기존 전기식 포탑 구동 시스템에서는 에너지 저장장치용으로 고밀도 전해 커패시터를 사용하고 있으나 최근 신재생 에너지 및 전기자동차 등 다빈도의 충전, 방전이 요구되는 시스템에서는 불규칙한 출력의 응답특성에 대응할 수 있는 고용량의 울트라 커패시터 에너지 저장장치를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-4].

울트라 커패시터(UC, Ultra Capacity)의 정전용량은 기존 고밀도 커패시터 대비하여 많게는 수십 배에서 적게는 수배 이상의 용량 특성을 갖고 있다.

울트라 커패시터를 에너지 저장장치로 구성하면

고용량의 정전용량을 활용하여 안정적인 출력 전압을 유지하면서 전력공급이 가능한 장점이 있는 반면 울트라 커패시터 개별 셀의 정격전압은 낮기 때문에 고전압의 구동 시스템에 적용하기 위해서는 커패시터 셀을 직렬로 구성하여 설계해야 한다.

울트라 커패시터가 직렬로 구성된 에너지 저장장치는 등가직렬저항(ESR, Equivalent Series Resistance)이 증가하게 되고 이는 에너지 저장장치 발열의 원인이 되어, 내부 온도 상승으로 인한 커패시터의 성능을 저하시킨다. 또한 에너지 저장장치의 경우 다량의 커패시터 셀로 구성되어 있어 개별 셀 간의 용량, 내부 저항의 차이에 기인한 충전, 방전 특성 차이로 인하여 특정 셀의 과충전 및 과방전으로 열화가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치를 설계하면서 앞서 언급한 발열로 인한 장치 성능 저하 및 커패시터 셀 간 전압 불균형을 개선하기 위한 설계 방안을 제시한다.

최대 부하 조건에서 방열설계 유무에 따른 열 해석을 수행하여 열 해석 결과를 통하여 방열설계를 적용할 때 에너지 저장장치의 내구 품질 향상을 확인한다. 또한 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치를 완성차에 장착하여 포탑 구동 시험을 통해

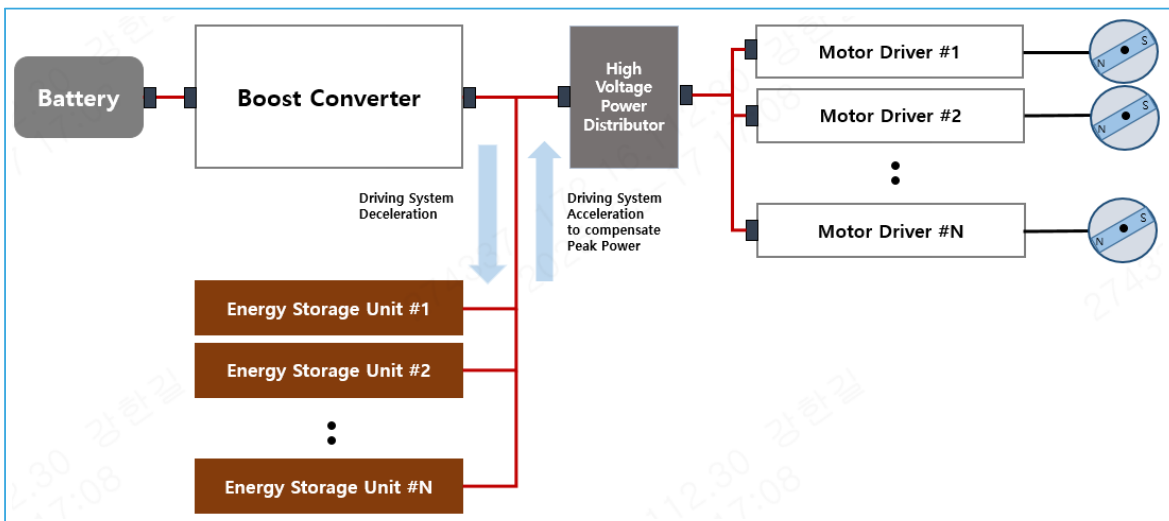


Figure 1. Electric gun/turret driving system block diagram [1]

기존 고밀도 전해 커패시터 기반 에너지 저장장치와 대비하여 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치를 적용할 시 전기식 포탑 구동성능의 개선 효과를 확인한다.

마지막으로 본 연구를 바탕으로 설계된 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치를 완성차에 장착하여 전력화한 결과를 소개하고 품질 개선 효과를 서술한다.

2. 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치 설계

2.1. 울트라 커패시터의 온도와 수명 영향성

전기식 구동 시스템의 전력공급을 위한 에너지 저장장치는 커패시터 셀의 사용전압이 시스템에서 요구하는 정격전압 이상으로 구성하도록 설계하여야 한다. 일반적으로 울트라 커패시터는 전해 커패시터와 비교하여 정전용량이 크지만 사용전압은 낮다.

본 연구에서 선정된 울트라 커패시터 셀의 사용전압 사양을 고려하면, 구동 시스템에서 요구하는 정격전압의 에너지 저장장치로 사용하기 위해서는 각 커패시터 셀을 직렬로 구성하여 설계해야 한다.

커패시터를 직렬로 구성하면 식 (1)과 같이 정전용량은 1/N배, 등가직렬저항은 식 (2)와 같이 N배가 된다.

$$C = \frac{C_{UC}}{N} \tag{1}$$

C : Capacitance (F)

C_{UC} : UC's Capacitance (F)

N : Number of UCs

$$R_{ESR} = N \times R_{ESR_{UC}} \tag{2}$$

R_{ESR} : Equivalent series resistance (Ω)

$R_{ESR_{UC}}$: UC's equivalent series resistance (Ω)

Table 1은 본 연구에서 설계한 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치의 사양이다.

Table 1. Specification of UC Energy Storage Unit

Category	Ultra capacitor
Capacitance	2.75 F
ESR	180.8 m Ω
Rated voltage	260 V

울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치에 전류가 공급되면 등가직렬저항이 증가하면서 발열량도 선형적으로 증가한다. 등가직렬저항과 발열량의 관계는 식 (3)과 같다[5].

$$\Delta T = i_s^2 \times R_{ESR} \times R_{th} \tag{3}$$

ΔT : Heating value ($^{\circ}\text{C}$)

i_s : Maximum continuous current (A)

R_{th} : Thermal resistance ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

Figure 2는 울트라 커패시터의 사용온도 대비 기대수명 그래프이다.

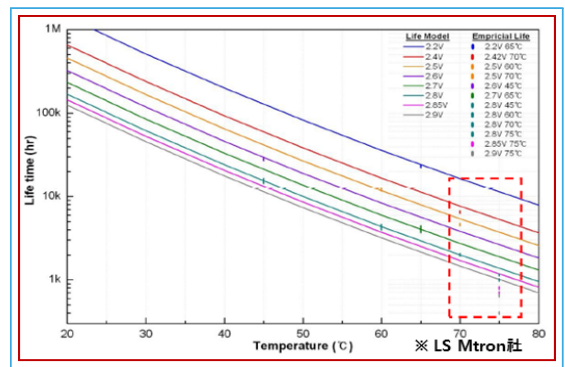


Figure 2. UC Temp./Life time [1]

울트라 커패시터의 기대수명은 온도가 상승할수록 감소하게 된다. 가령 울트라 커패시터를 정격전압 (2.6V)에서 사용온도가 20 $^{\circ}\text{C}$ 일 경우 기대수명은 약 300,000 시간인 반면, 65 $^{\circ}\text{C}$ 일 경우 기대수명은 약 6,000시간으로 감소하게 된다.

따라서 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치의 기대수명을 개선하여 품질 향상을 위해서는 방열 설계를 통해 커패시터의 온도 상승을 낮춰야 한다.

2.2. 울트라 커패시터 에너지 저장장치 방열설계

Figure 3은 자연냉각 방식으로 설계된 울트라 커패시터 에너지 저장장치로 알루미늄 하우징을 통해 외부로 열을 방출하는 구조로 구성한다.

다량의 커패시터 셀이 결합되어 있는 에너지 저장장치는 특정한 부분에 열이 집중되면 해당 영역에 있는 커패시터는 고온의 영향으로 열 폭주가 발생할 수 있고, 기대 수명에 영향을 주어 품질 문제를 야기할 수 있다.

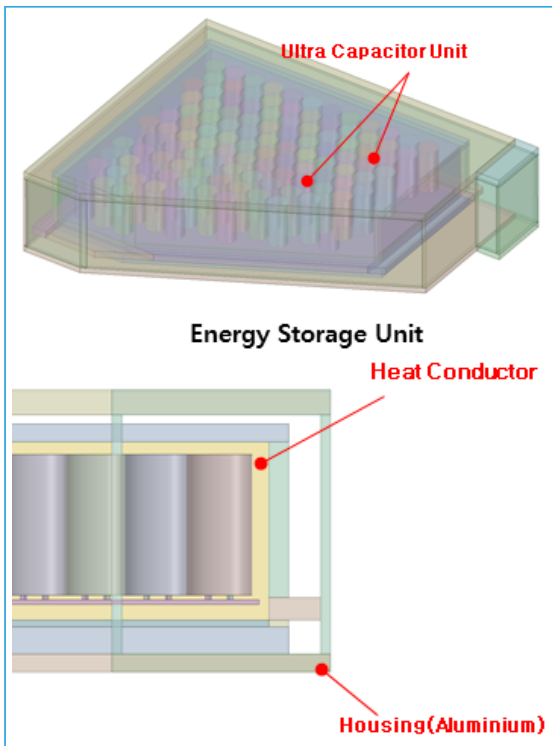


Figure 3. UC heat dissipation design [1]

따라서 특정 영역에 열이 집중되는 것을 제한하기 위해 알루미늄 하우징과 울트라 커패시터 셀 사이 공간에 열전도체를 적용한다[1].

열전도체는 Epoxy 수지를 기반으로 한 2액형 접착제로 구성한다. Epoxy 수지는 강력한 접착력, 내약품성, 내후성, 내수성과 더불어 절연 특성의 장점이 있으며, 특히 우수한 열전도성을 갖추고 있어 알루미늄 하우징을 통한 자연 냉각 방식의 구조와 결합하여 효율적이고 균일한 열 방출이 가능하다.

Table 2는 울트라 커패시터 에너지 저장장치의 부품별 열전도계수이다. 내부에 열전도체를 추가하여 발생하는 열이 한 부분에 집중되는 것을 방지한다(공기 열전달계수 : 0.025W/mk)[1].

Table 2. Energy Storage Unit Heat Transfer Coefficient [1]

Category	Heat transfer coefficient [W/m-k]
Housing	202.4
UC	100
Bus plate	0.3
Heat conductor (Modified BPA epoxy resin)	1.5

2.3. 울트라 커패시터 에너지 저장장치 셀 전압 불균형 방지 설계

울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치는 앞서 서술한 바와 같이 각 커패시터 셀의 정전용량은 높지만 정격전압이 낮아 전기식 포탑 구동 시스템에 적용하기 위해서는 다량의 커패시터 셀을 직렬로 구성하여야 한다. 시스템에서 요구하는 정전용량과 정격전압에 따라서 에너지 저장장치 내부 커패시터의 개수를 선정한다.

다량의 커패시터가 직렬로 구성되어 있는 에너지 저장장치는 커패시터 셀 간 등가직렬저항이 차이가 있다. 등가직렬저항이 상대적으로 높은 셀은 전압 강하가 커지며, 낮은 셀은 상대적으로 더 큰 전류를 받는다. 이는 충전, 방전의 속도 차이의 원인이 되고 결과적으로 전압 불균형이 발생한다. 이는 특정 셀에 과충전, 과방전을 야기하여, 열 폭주 현상 및 배터리

폭발 등의 위험을 초래할 수 있다. 따라서 울트라 커패시터의 수명 연장 및 에너지 저장장치의 안정성 향상을 위해서는 셀 간 전압 불균형을 방지할 수 있는 설계 적용이 필요하다.

Table 3. Comparison of Balancing Circuit Types

Category	Passive balancing	Active balancing
Operating principle	Uses resistors to dissipate excess energy as heat from overcharged cells	Transfers excess energy from overcharged cells to undercharged ones using active components
Design structure	Simple and Easy circuit	Complex circuit
Efficiency	Low efficiency due to energy loss as heat	High efficiency as energy is not wasted
Cost	Low	High

Table 3은 셀 밸런싱 회로 종류를 비교 분석한 표이다. 전기식 포탑 구동 시스템의 에너지 저장장치에는 본 논문 2.2.에서 서술한 자연냉각식 방열 방식의 설계구조와 비용을 고려하여 패시브 밸런싱(Passive balancing) 회로를 적용한다.

Figure 4와 같이 커패시터의 등가직렬저항 대비 큰 밸런싱 저항을 울트라 커패시터 각각의 셀과 병렬로 구성하여 전류가 증가되면 식 (4)와 같이 전력

을 열로 소모하여 등가직렬저항의 편차로 인한 셀 간 충전, 방전 속도 차이로 발생하는 특정 셀의 과충전 또는 과방전 위험을 방지한다.

$$P = I^2 R \tag{4}$$

P : Power (W)
 I : Current (A)
 R : Resistor (Ω)

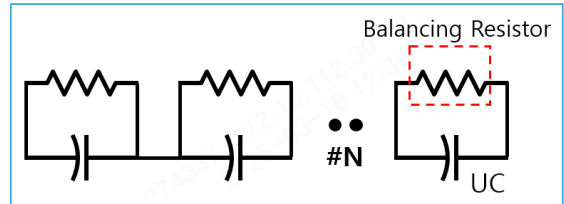


Figure 4. Circuit of UC passive balancing

3. 에너지 저장장치 방열설계 검증

전기식 포탑 구동 시스템에서 실제 소모되는 전류를 실측하고, 실측한 소모 전류를 바탕으로 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치의 열 해석을 수행하였다.

발열량에 영향을 미치는 주요 변수는 식 (3)에서와 같이 최대연속전류량이다. 여기서 전류량은 포탑 구동 시스템에서 구동 시 소비되는 전류를 의미한다.

열 해석을 수행하기 위해 Figure 5와 같은 조건에서 전기식 포탑 구동 시스템이 최고 속도로 동작할

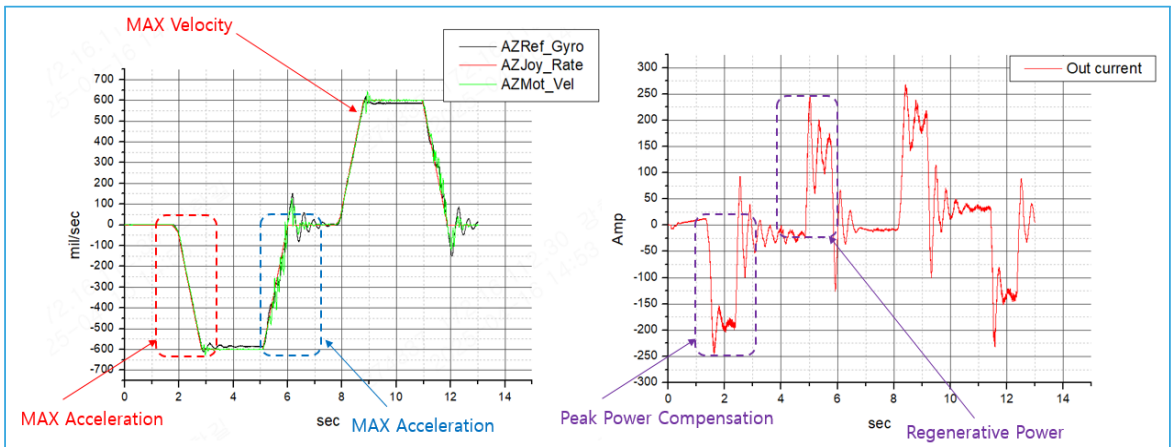


Figure 5. In/out current with gun/turret driving system maximum velocity

때의 입출력 전류를 소모 전류로 가정하였다. 또한, 최대 가속 및 감속을 반복하는 방식으로 일반적인 운용 환경보다 더욱 가혹한 조건을 설정하여 해석을 진행하였다[1].

3.1. 울트라 커패시터 에너지 저장장치 해석 모델 및 경계조건

울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치의 열 해석은 전기식 포탑 구동 시스템이 동작할 때 에너지 저장장치의 최고 온도를 분석하는 것을 목표로 수행되었다.

특히, 최대 속도로 가속, 감속 구동하는 상황에서 발생하는 발열을 기준으로 정상 상태에서의 기체-고체 복합 열전달 특성을 평가하였다.

또한 본 논문 2.2.에서 제안한 자연냉각 방식의 방열 설계의 효과를 검증하기 위해 방열 설계 적용 여부에 따른 에너지 저장장치의 온도 변화를 비교 분석하였다.

열 해석 과정에서는 전자 기기의 열 해석 및 냉각 솔루션 시뮬레이션 소프트웨어인 Ansys Icepak (Ansys社, version 2021R1)을 활용하였다.

Figure 6은 열 해석을 위한 에너지 저장장치 모델을 나타낸다. 해석의 경계 조건으로 외기 온도는 20°C로 설정하였으며, 열전달은 자연 대류 방식으로 구현하였다. 자연 대류의 방향은 중력의 반대 방향으로

로 설정되었고, 단일 커패시터의 발열량은 1.35W로 설정하였다[1].

또한, 해석에 사용된 격자는 사면체 격자로 설정되었으며, 449만 개로 설정하였다[1].

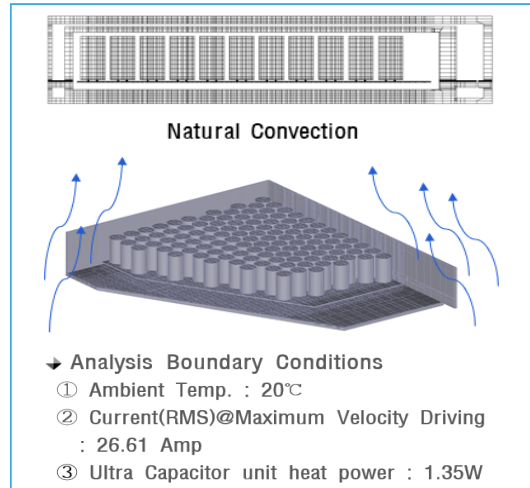


Figure 6. Energy storage unit analysis model

3.2. 울트라 커패시터 에너지 저장장치 열 해석 결과

열 해석 결과, Figure 7에서 확인할 수 있듯이 방열 설계가 적용되지 않은 경우, 열전도율이 낮아 자연 대류에 의한 열평형이 높은 온도에서 이루어졌으며, 이로 인해 온도 편차가 증가하였다. 반면, 방열

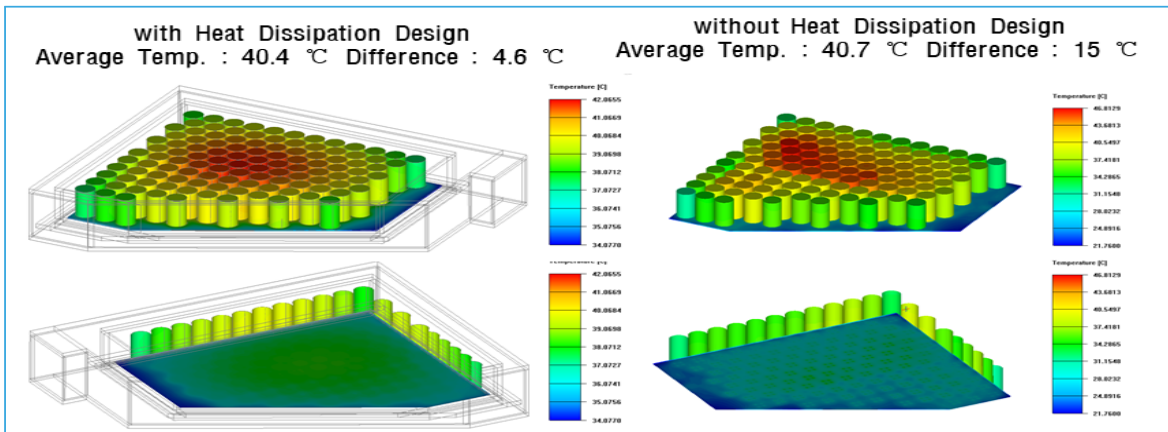


Figure 7. Result of energy storage unit thermal analysis [1]

설계를 적용한 경우에는 에너지 저장장치의 평균 온도는 방열 설계 미적용 시와 유사하였으나, 온도 편차가 15℃에서 4.6℃로 약 10.4℃ 낮아졌다. 에너지 저장장치의 최고 온도의 감소는 울트라 커패시터의 기대 수명을 늘려 에너지 저장장치의 내구성능 개선을 의미한다.

4. 전기식 포탑 구동 시스템의 구동 성능 개선

전기식 포탑 구동 시스템에서의 에너지 저장장치는 전해 커패시터, 배터리, 울트라 커패시터 등을 포함한 다양한 방식으로 구성할 수 있으며, 시스템 요구 조건에 따라 적절한 저장 장치를 선택하여 설계할 수 있다[6].

현재 기존 구동 시스템에는 전해 커패시터 기반의 에너지 저장장치를 사용하고 있다. 전해 커패시터는 우수한 온도 특성을 가지는 장점이 있으나, 상대적으로 낮은 축전용량으로 인하여 병렬 설계 구성으로 약 1.0F 미만의 축전용량을 확보한다. 그러나 기대 수명 이상의 사용으로 특정 전해 커패시터의 소손이 발생할 경우, 단락 상태에서 에너지 저장장치가 제 기능을 할 수 없다. 또한 최대 가속 및 감속 시 전압 변동이 크게 발생하며, 포탑의 중량 또는 부하가 증가할 경우 구동 시스템에 적용하기 어려운 한계가 존재한다.

반면, 일반적으로 울트라 커패시터로 에너지 저장

장치를 구성할 경우, 온도 특성은 기존의 전해 커패시터 기반의 에너지 저장장치에 비해 다소 열세이나 본 논문에서는 3.2의 방열 설계 개선을 통하여 셀 간 온도편차를 완화하였고, 2.3과 같이 상대적으로 큰 셀 축전용량을 직렬로 구성하여 약 수 F의 에너지 저장장치를 설계하였다. 이는 기대수명 이상 사용할 때 일부 셀의 커패시터 소손으로 인한 단락으로 에너지 저장장치의 성능 저하는 발생할 수 있지만, 셀 단락으로 인한 운용 불가 상태를 방지할 수 있다.

본 절에서는 울트라 커패시터 기반의 에너지 저장장치를 궁극적으로 완성차에 장착하고 포탑 구동 시스템을 대상으로 한 구동 성능시험을 통해 에너지 저장장치의 전원 공급 품질 향상과 구동 성능 개선 효과를 실증적으로 확인한다. 이를 통해 본 시스템의 성능 개선 효과를 검증한다.

4.1. 고밀도 전해 커패시터 기반 에너지 저장장치 구동 시험 결과

에너지 저장장치의 구동 성능을 시험하기 위해 완성차에서 포탑의 최대 급가속 상태를 통제조건으로 하여 구동시험을 진행한다.

시험조건은 최대속도 기준에서 포탑 구동 시스템의 가속, 감속을 반복적으로 진행하여 일반적인 운용 환경보다 가혹한 조건에서 시험을 진행하였다.

Figure 8의 좌측 그래프는 포탑의 속도 변화를 나

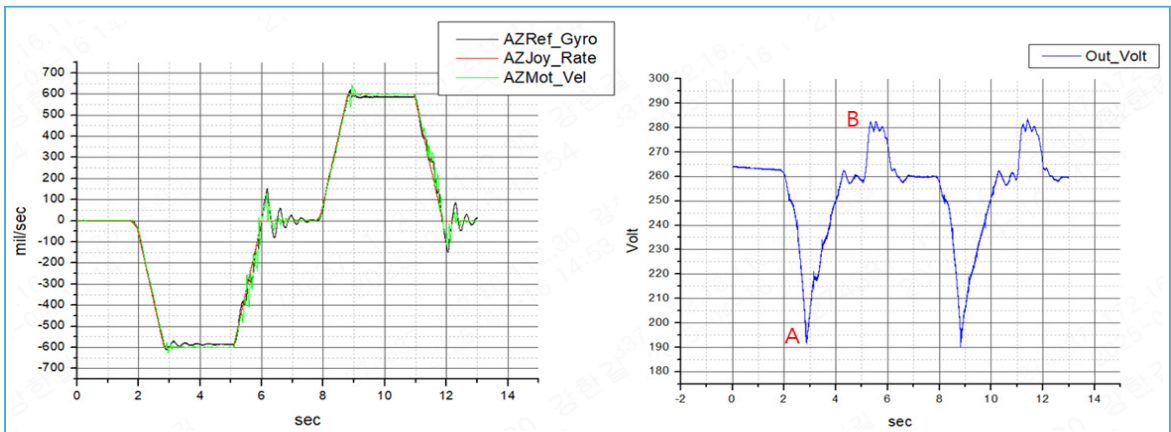


Figure 8. Electrolytic capacitor based energy storage unit operation test results

타내며, 우측 그래프는 포탑의 구동 속도에 따른 에너지 저장장치의 전압 변동을 보여준다.

우측 그래프의 A지점에서 B지점을 살펴보면, 최대 전압과 최소 전압의 차이가 약 90V 이상으로 나타나며, 특히 포탑이 최대 속도로 구동될 때 에너지 저장장치의 전압이 정격 전압인 260V 대비 약 190V까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 구동 시스템이 회생 제동될 때는 정격전압이 기준전압 이상의 상승으로 구동 시스템이 구동전력 관리를 위해 구동성능을 제한한다.

이러한 전압 변동은 에너지 저장장치 내 커패시터의 급격한 충전, 방전을 야기하며, 이는 에너지 저장 장치의 내구성능에 부정적인 영향을 준다. 또한, 구동 시스템에 공급되는 전압의 변동성 증가로 인한 전력공급의 불안정으로 포탑의 구동 성능이 제한되어 결과적으로 시스템의 성능이 저하된다.

4.2. 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치 구동 시험 결과

4.1.과 같이 시험조건은 최대속도 기준에서 포탑 구동 시스템의 가감속을 반복적으로 진행하여 일반적인 운용 환경보다 가혹한 조건에서 시험을 진행하였다.

Figure 9의 좌측 그래프는 포탑의 속도 변화를 나타내며, 우측 그래프는 포탑의 구동 속도에 따른 울

트라 커패시터 기반 에너지 저장장치의 전압 변동을 시각적으로 제시한다. 우측 그래프 A지점에서 B지점을 분석한 결과, 최대 전압과 최소 전압 간 차이가 약 38V 이하로 유지되며, 특히 포탑이 최대 속도로 구동될 때도 전압이 231V 이상으로 유지하는 것을 볼 수 있다.

이는 Figure 8의 결과와 비교했을 때 전압 변동 폭이 약 136% 감소한 것으로, 커패시터의 급격한 충전, 방전 현상을 완화하여 에너지 저장 장치의 기대 수명이 향상된 것을 의미한다. 또한, 보다 안정적인 전원을 구동 시스템에 공급하여 구동 시스템이 구동 전력 관리를 위해 구동 성능을 제한하지 않도록 하여 시스템의 구동 성능 개선 효과를 확인할 수 있다.

5. 에너지 저장장치의 품질 향상 효과

설계된 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치는 실제 운용 차량에 장착하여 신뢰성 검증을 위한 입증시험을 수행하였다.

완성차 운용시험 결과, 기존 고밀도 전해 커패시터 기반 에너지 저장장치에서 발생했던 커패시터 소손 및 구동 성능 저하와 같은 품질 문제가 발생하지 않음을 확인하였다.

이를 바탕으로, 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치의 전력화를 통해 안정된 전력 공급 품질 및

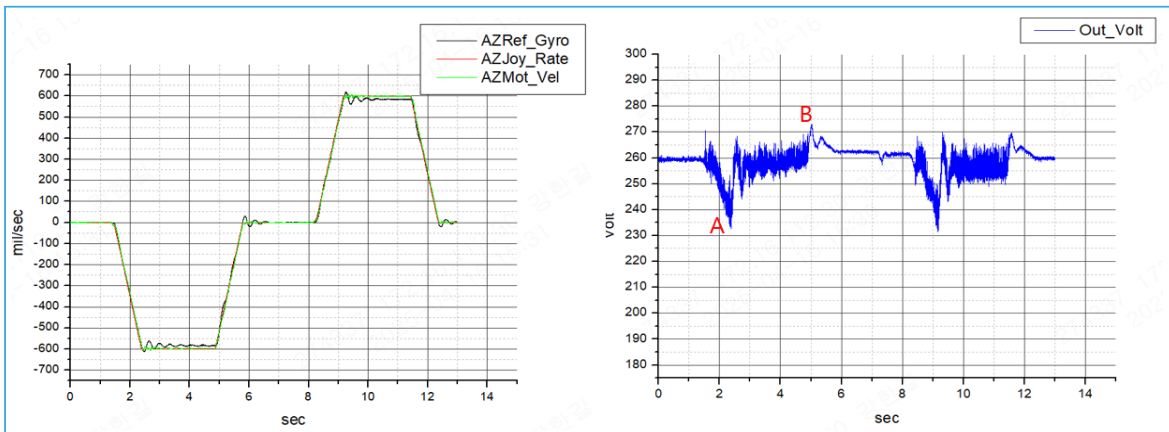


Figure 9. UC based energy storage unit operation test results

구동 성능 개선으로 인한 품질 개선 효과와 정량적 이점을 기술한다.

5.1. 에너지 저장장치 품질 개선 효과

기존의 고밀도 전해 커패시터 기반의 에너지 저장 장치는 전력화 이후 수년간 운용된 다수의 완성차 차량에서 커패시터 소손 및 포탑 구동성능 저하와 같은 품질 문제가 발생하였다. 이로 인하여 약 20%의 운용률 하락과 더불어 고장품 교체를 위한 품질 비용 상승을 초래하였다.

본 논문에서 제안한 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치를 적용할 경우, 내구성능 개선을 통한 기대 수명 증가를 바탕으로 무기체계 운용률 향상이 기대 된다.

5.2. 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치 적용의 경제적 효과

본 논문에서 설계된 에너지 저장장치는 상대적으로 고용량의 정전용량 특성을 가진 울트라 커패시터의 장점을 활용하여 기존 고밀도 전해 커패시터 기반 에너지 저장장치 대비 수배 이상의 정전용량을 제공한다.

서론에서 기술한 바와 같이, 전기식 포탑 구동 시스템에서 에너지 저장장치는 침두부하를 제어할 때 순간적인 전력을 공급하는 핵심 역할을 수행한다.

Figure 1에서 확인할 수 있듯이, 고전압 전력을 사용하는 부하가 증가할수록 침두부하 역시 증가하며, 이에 따라 추가적인 에너지 저장장치의 도입이 필요해진다. 최근 기동무기체계의 발전은 승무원의 생존성 향상과 임무 다변화에 따른 능동방호장치 및 원격제어무기 등의 적용을 요구하고 있으며, 이로 인해 포탑의 중량 증가와 함께 침두부하도 증가하는 추세이다. 기존 에너지 저장장치를 운용할 경우, 이러한 침두부하 증가에 대응하기 위해 두 개 이상의 저장장치가 필요할 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제안한 고용량의 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치를 적용하면, 기존 전해 커패시터 기반의 에너지 저장장치와 달리 완성차 중량 증가 및 비용 상승 없이 단일 에너지 저장장치로 효율적인 포탑운용이 가능하다.

6. 결론

본 논문에서는 전기식 포탑 구동 시스템에 적용되는 에너지 저장장치의 성능 개선을 위해 울트라 커패시터 기반의 설계를 제안하고, 이를 기존 고밀도 전해 커패시터 기반 시스템과 비교, 분석하였다.

설계된 에너지 저장장치는 자연냉각 방식의 방열 구조와 패시브 밸런싱 회로를 적용하여 발열문제를 효과적으로 해결하고, 셀 간 전압 불균형을 최소화함으로써 내구성을 향상시켰다.

열 해석 결과, 방열 설계를 적용한 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치는 커패시터 셀 간 온도 편차가 방열설계 미적용 시보다 감소하여 방열 설계의 효과를 검증하였고, 이를 통해 커패시터의 기대 수명이 증가할 수 있음을 확인하였다.

또한, 완성차 구동 시험을 통해 기존 고밀도 전해 커패시터 기반 에너지 저장장치 대비 급가속 구동 시 전압 변동 폭이 감소하고, 보다 안정적인 전력 공급이 가능하여 구동 성능이 향상됨을 검증하였다.

다년간의 운용시험 결과, 기존 고밀도 전해 커패시터 기반 시스템에서 발생했던 커패시터 소손 및 구동 성능 저하 문제가 발생하지 않았으며, 품질 신뢰성이 확보되었다. 이를 통해 기존 시스템 무기체계 운용률 향상을 바탕으로 품질개선 효과를 기대할 수 있으며, 향후 추가 양산될 완성차에 적용 시 추가적인 경제적 이점이 예상된다.

또한, 기동무기체계의 발전과 함께 포탑의 중량 증가로 인한 침두부하 증가 예상을 고려하면, 본 연구에서 설계한 고용량 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치는 기존 시스템 대비 더 높은 정전용량을 제공하여 추가적인 에너지 저장장치도입 없이 효율

적인 전력 운용이 가능하다.

이를 통해 향후 전력화 과정에서 구동 성능 향상과 더불어 시스템의 안정성을 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 울트라 커패시터 기반 에너지 저장장치는 울트라 커패시터의 장점을 극대화하면서 단점을 보완하는 설계적 방안을 적용하여, 전기식 포탑 구동 시스템의 성능과 신뢰성을 향상시키는 데 기여할 수 있다. 따라서 향후 기동부 기계계뿐만 아니라 다양한 전력 운용 시스템에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 1 Park, H., Kim, H., Seong, S., & Choi, W., "Heat Dissipation Design of Energy Storage Unit with Ultra-Capacitor to improve Durability for Electric Gun/Turret Driving System", *Journal of Defense Quality Society*, 4(2), pp. 108-115, 2022.
- 2 Grbovic, P. J., Delarue, P., Le Moigne, P., & Bartholomeus, P., "Modeling and control of the ultracapacitor-based regenerative controlled electric drives", *IEEE Transactions on industrial electronics*, 58(8), pp. 3471-3484, 2010.
- 3 Misal, S., & Divakar, B., "Performance Evaluation of Ultra-Capacitor in Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles", *2013 7th Asia Modelling Symposium*, pp. 212-217, 2013.
- 4 Kim, S. H., Lee, K. B., Choi, S. W., & Choi, W. J., "Development of the Improved Dynamic Model of the Supercapacitor Considering Self-Discharge", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 14(3), pp. 188-196, 2009.
- 5 2.7V 325F ULTRACAPACITOR CELL DataSheet(Document number: 3003346-EN.1), Maxwell Technology, 2021.
- 6 Jung, J. H., & Kim, M. S., "An Accelerated Degradation Test of Electric Double-Layer Capacitors", *Journal of Applied Reliability*, 12(2), pp. 67-78, 2012.

국방규격 목록화 정보와 연계한 국방표준서 활용방안 연구

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

A Study on the Utilization of Defense Standard Documents Linked with the Cataloging of Defense Specifications

이민철†, Mincheol Lee

한국조달연구원, 국방조달연구부, 연구부장
Director, Defense Procurement Research Department,
Korea Institute of Procurement

안혜원, Hyewon An

국방기술품질원, 기술기획실, 선임연구원
Senior Researcher, Defense Technology Planning Department,
Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

This study proposes a plan to improve the utilization of defense standard documents by linking them with defense specification catalog information. Accordingly, 712 types of defense specifications were identified by examining the application standards of 269 defense standard documents currently in use. Using 888,746 defense drawings employed in munitions procurement from 2021 to 2024 and the exact matching technique, 102,770 linked defense specification catalog entries were derived. This analysis enabled the identification of defense standard documents and producer information that were highly associated with defense specifications. Furthermore, 51 defense standard documents widely used in munitions procurement were extracted. These findings can serve as a basis for proposing alternatives for the future utilization of defense standard documents and improving the overall system.

keywords : defense standard document, defense specifications, defense technology data, data matching, exact matching

† Corresponding Author : Mincheol Lee

Tel : +82-2-796-8234(Direct 602), email : asem@kip.re.kr

Korea Institute of Procurement, 06226, 5F, 6F, 319, Eonju-ro, Gangnam-Gu, Seoul, South Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 23rd. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

국방표준서(Defense standard document)는 군수품의 획득, 관리, 운영유지 과정에서 인터페이스, 설계, 제조공정, 시험방법 등에 대한 표준화된 기준을 제공하므로 군수품 획득 단계에서 다양한 형태의 이점으로 발현될 수 있다[1].

첫째, 군수품의 품질과 성능을 균일하게 유지할 수 있다. 특히 무기체계 설계, 제조공정, 시험 과정에서 공통적이거나 반복적으로 사용되는 공학적이거나 기술적 사항을 표준화할 경우 무기체계의 균일한 성능을 보장할 수 있다.

둘째, 무기체계의 상호운용성을 향상시킬 수 있다. 구성품, 결합체, 부분품이 표준화가 가능해져 신규 무기체계 개발 또는 운영 간 상호 호환성이 향상된다. 이러한 효과는 무기체계 연구개발(R&D, Research and Development) 비용 절감, 기간 단축, 유지보수 비용 절감 등의 국방경영 효율화 향상으로 발현될 수 있다.

셋째, NATO 등 동맹국 간의 국제협력과 방위산업 수출을 위한 기회의 수단으로 활용될 수 있다. 국제표준은 국내의 방위산업에 국한되지 않고 국제 방위산업 시장에서도 전략적으로 활용될 수 있다. 이는 국내 방위산업 경쟁력 강화에 도움을 줄 수 있다.

이러한 장점에도 불구하고 국내 방위산업에서의 국방표준서의 활용은 다른 선진국들과 비교하면 미흡한 실정이다. 그 원인으로 국방표준서 활용에 대한 강제적 법적 규제와 기존 국방규격(Defense specification)과의 연계성이 부족하다는 인식이 지배적이다. 법적 강제성에 대한 부분은 관련 법령인 “방위사업법” 개정을 통해 추진되어야 하는 부분이 있어 중·장기적인 접근을 요한다. 하지만, 기존 국방규격의 연계성은 조달체계, 기술자료 구조의 분석과 매칭을 통해 단기적으로 개선 방안을 도출할 수 있다.

하지만, 이러한 논의들을 뒷받침할 수 있는 연구들은 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 현재 관리되고 있는 국방표준서를 국방규격과 연계한 활용방안을 제시하기 위해 다음과 같이 논문을 구성하여

서술하였다.

논문의 제2장은 국방기술자료 이해와 국방표준서와 국방규격의 특성 차이를 고찰하고 주요 시사점을 도출하였다. 제3장은 연구프레임워크를 설계하고 국방표준서와 연계가 가능한 국방규격을 매칭하여 분석하였다. 제4장은 주요 연구 결과에 대한 설명과 향후 연구 방향에 대해 서술하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 국방표준서와 국방규격의 이해

우리 군은 군수품의 기술적 요구조건과 품질보증 방법 등을 제시하기 위해 국방규격과 국방표준서 등의 기술자료를 제정하여 관리하고 있다.

2025년 3월 기준 제정되어 관리되고 있는 국방표준서와 국방규격은 방위사업청(DAPA, Defense Acquisition Program Administration) 국방표준 종합정보시스템(KDSIS, Korea Defense Standard Information System)을 통해 Table 1과 같이 조사되었다. 조사된 자료의 현황을 보면 전체 기술자료 중 국방도면(Defense drawing)이 차지하는 비중이 크며, 이어서 품질보증요구서(QAR, Quality Assurance Requirement), 국방 규격서(Defense specification document), 소프트웨어 기술자료

Table 1. Status of Enactment about Defense Standards

Category		Status of enactment (Unit, types)
Defense standard document		269
Defense specifications	Defense specification document	7,307
	Defense drawing	1,197,044
	QAR	34,562
	Software technical data	3,364
	Special technical data	Restrict
	Parts / BOM list	verification

* DAPA KDSIS, As of March 2025

(Software technical data), 국방표준서(Defense standard document) 순이었다. 그중 국방규격으로 분류되고 있는 특수기술자료(Special technical data)와 부품/BOM(Bill of Material) 목록자료는 그 특성상 현황이 확인되지 않았다.

2.1.1. 국방표준서

국방표준서는 군수품의 획득, 관리, 운영유지 과정에서 공통적이거나 반복적으로 사용되는 인터페이스, 설계, 제조공정, 시험방법 등을 공학적이거나 기술적으로 작성한 공통 적용문서이다. 국방표준서는 2019년부터 방위사업청 예규 ‘표준화 업무규정’에 따라 제정되고 있으며, 무기체계 연구개발 또는 핵심 기술 연구개발의 산출물에서 도출된 공통 기준, 절차, 방법 등을 국방표준서로 제정할 수 있다. 이때 유사한 국방표준서는 제정을 지양하고, 유사 표준서들은 통폐합하는 것을 원칙으로 하며, 국방규격과 동일한 내용의 국방표준서를 제정하는 경우 기존 국방규격을 폐지한다. 국방규격이 폐지 완료되기 전까지 국방표준서와 국방규격 사이에 일관성이 없거나 차이가 있는 경우에는 국방표준서 내용을 우선으로 적용하여 관리되고 있다[2].

2.1.2. 국방규격

국방규격은 군수품의 조달을 위하여 필요한 제품 및 용역에 대한 성능, 재료, 형상, 치수 등 기술적인 요구사항과 요구 필요조건의 일치성 여부를 판단하기 위한 절차와 방법을 서술한 사항으로 Table 2와 같이 규격서, 도면, QAR, 소프트웨어 기술자료, 특수기술자료, 부품/BOM 목록으로 구성된다[3].

국방 규격서는 군수품의 성능, 품질, 시험방법, 운용, 정비 등 전반적인 기술적 기준을 정리한 공식 문서이다. 이는 군수품 및 방산 장비의 일관성 유지, 품질 보장, 상호운용성 확보를 목적으로 하며, 군수품의 개발·생산·조달·운용·정비 등 전 과정에서 필수적으로 적용된다. 국방 규격서는 제품의 특성, 군수지원의 효율성, 경제적 조달 및 국내의 기술 수준·

Table 2. Type of Defense Specifications

Category	Contents
Defense specification document	Define basic design and performance standards for munitions
Defense drawing	Specifications illustrating the shape and size of a particular part or equipment
QAR	Quality and performance standards required for the production of munitions
Software technical data	Technical information needed to improve software development, testing, operation, maintenance and performance
Special technical data	Technical data used for specific or limited purposes among information essential for the design, production, maintenance, etc. of munitions
Parts/BOM list	Describe each part and component in detail during weapon system development and procurement

능력 등을 고려하여 국산화 추진 가능 품목, 소요량 다수품목, 고가품목 위주로 작성하고, 조달 단위, 보급품 단위 수준에서 효과적인 방법을 선택하여 완제품, 구성품 또는 결합체 단위로 성능형 규격, 상세형 규격, 혼합형 규격으로 구분하여 작성하며, 부품 단위의 규격은 도면으로 관리되고 있다. 국방 규격서는 군수품의 품질과 성능을 표준화하기 위한 세부적인 규정을 포함하며, 규격의 목적 및 적용 범위 정의, 관련 법령 및 규정 등을 명시하고 있는 일반 요구조건과 구조, 재료, 치수 및 형태 등 세부 사양, 성능 및 기능적 요구사항 등을 명시하고 있는 설계 및 기술적 요구사항, 품질보증 및 성능 테스트 방법, 내구성 시험, 환경시험, 전자파 적합성 시험 등의 시험 및 검증 절차, 보관 및 운송 시 요구되는 보호 기준이 명시된 포장 재료 및 방법 등을 서술한다.

국방도면은 군수품의 설계, 제작, 시험, 유지보수에 필요한 형상, 치수, 재질, 공차, 기능, 조립 방법 등을 기술적으로 표현하고 있다. 이는 국방규격의 중요한 구성 요소로서, 무기체계 및 군수물자의 설계

기준을 표준화하여 호환성, 정비성, 성능 신뢰성을 확보하는 역할을 담당한다. 국방도면에는 군수품의 제작 및 조립을 위한 필수 기술 정보가 포함되며, 형상 및 치수 정보, 재료 및 표면처리 정보, 조립 및 가공 방법, 기능 및 성능 요구사항, 시험 및 검사 기준 등이 포함된다.

품질보증요구서는 군수품의 품질보증을 위하여 검사해야 할 개수를 지정하고 그 검사 특성 및 방법과 합격품질한계(AQL, Acceptance Quality Limit)를 명시하는 문서이다. 군수품의 생산, 조달, 유지 보수할 때 품질 기준과 보증 절차를 명확히 규정함으로써 일관된 품질 관리 체계를 확립하는 역할을 한다. 품질보증요구서는 군수품의 설계, 생산, 검사, 시험, 유지보수 등의 품질을 보장하기 위한 구체적인 요구사항을 포함하며, 품질경영시스템 요구, 초도 생산품 검사, 공정검사 및 최종 검사, 환경시험 및 성능 시험 요구사항, 불량 및 품질 문제 대응 방안 등이 포함된다.

소프트웨어 기술자료는 군에서 사용하는 소프트웨어의 개발, 시험, 운용, 유지보수 및 성능 개선을 위해 필요한 기술적인 정보를 포함한다. 이는 군사 작전 및 방산 시스템에서 사용되는 임베디드 소프트웨어, 운영체제, 응용 프로그램, 네트워크 시스템, 사이버 보안 소프트웨어 등을 체계적으로 관리하고 유지하기 위한 필수적인 자료로 활용된다. 소프트웨어 기술자료는 소프트웨어 개발부터 유지보수, 보안 관리, 성능 평가까지의 전 과정에 필요한 내용을 포함하며, 소프트웨어 요구사항 명세서(SRS, Software Requirements Specification), 소프트웨어 설계 문서(SDD, Software Design Document), 소스 코드 및 코드 설명서, 소프트웨어 시험 계획서 및 절차서(STP, Software Test Plan), 시험 결과 보고서 등으로 구분되어 관리된다.

특수기술자료는 군수품의 설계, 제작, 유지보수 등에 필수적인 정보 중 특정 목적이나 제한된 용도로 사용되는 기술자료를 의미한다. 일반적인 기술자료와는 달리 군사적 중요성, 보안성, 그리고 특정 기업의 독점 기술이 포함될 가능성이 있는 자료를 포

함한다. 특수기술자료는 군수품의 성능, 기능, 운용 및 정비와 관련된 전문적인 기술정보를 포함하며, 설계 및 제작 관련 정보, 운용 및 유지보수 정보, 시험 및 검증 데이터 등이 포함되어 있다.

부품/BOM목록은 특정 제품이 어떤 부품들로 구성되는가에 대한 데이터로 최종 제품과 부품들과의 관계를 계층적으로 표현하여 제품을 구성하는 부품 정보 및 부품 구조 정보가 결합된 구조 목록이다.

2.2. 국방표준서와 국방규격의 특성 차이

2.1절에서 설명한 내용들을 다시 정리하면 국방표준화 문서인 국방표준서와 국방규격은 Table 3과 같이 특성 차이를 보인다.

국방표준서는 군수품의 전반적인 기술, 공정, 절차를 포함하고 있으며, 국방규격은 특정 제품의 상세한 성능, 설계기준을 제공한다. 국방표준서는 광

Table 3. Differences in the Characteristics of Defense Standard Document and Defense Specifications

Category	Defense standard document (KDS-STD-0000)	Defense specifications (KDS-FSC-0000)
Purpose	Defines general technologies, processes, and procedures for military supplies	Provides detailed design and performance criteria for specific products
Scope	Applied to broad technologies, testing, and processes	Applied to individual products and components
Contents	Includes quality assurance, testing procedures, and operational methods	Includes design specifications, performance standards, and material requirements
Codification	Impossible	Possible
Contract document	Impossible	Possible

범위한 기술, 시험, 공정에 적용하는 반면 국방규격은 개별 제품 및 부품에 적용한다. 국방표준서는 품질보증, 시험 절차, 운용 방식 등을 포함하고 있으나, 국방규격은 설계 사양, 성능 기준, 재질 규격을 포함한다. 따라서, 국방표준서는 “어떻게 시험하고 운용할 것인가”를 정하고, 국방규격은 “어떤 제품을 어떤 기준으로 만들 것인가”를 정의하는 문서라고 볼 수 있다[4].

이러한 특성을 반영하여 방위사업청은 “군수품 조달관리규정”에 따라 군수품은 국방규격을 우선 적용함을 원칙으로 하고 있으며, 특정조달품목 경우는 국제규격을 우선 적용하도록 하고 있다. 그리고 군수품의 조달요구를 위해 군수품목록정보에 수록된 품명, 재고번호(NSN, NATO Stock Number), 참조번호(Reference number) 등을 명시하여, 군수품 조달 계약 시 설계 사양, 성능 기준, 재질 규격 등을 명시한 국방규격을 계약문서에 포함하도록 하고 있다.

군수품에 대한 목록 관련 자료는 목록화를 통해서 생산되는 각종 자료(식별자료, 참조자료, 관리자료, 특성자료 등)로 관리되며, 군수품 관리를 위하여 생산자부호 부여 시 업체(생산설비에 의해 직접 생산하거나 설계와 생산을 통제하는 업체)의 생산자명, 생산자부호, 사업자등록번호, 주소, 전화번호, 홈페이지 등을 확인하여 부여한다[5].

이러한 정보는 군수품 조달 측면에서 국방표준서 활용성을 높이기 위한 중요한 정보이다. 따라서 본 연구는 이러한 국방규격 군수품 목록화 정보에 착안하여 3장에서 국방표준서와 국방규격의 연계방안에 대해 연구프레임워크를 설계하고 분석한다.

3. 국방규격과 국방표준서 연계방안

3.1. 연구 프레임워크(Framework)

국방규격의 목록화 정보와 연계한 국방표준서 활용방안을 검토하기 위해 Figure 1과 같이 5단계의

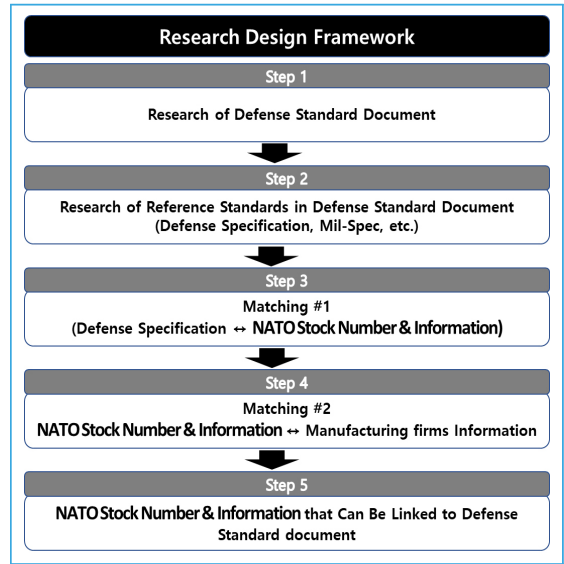


Figure 1. Framework of research design

절차로 설계하여 진행하였다.

첫 번째 단계는 검토 대상인 국방표준서를 수집하였다. 방위사업청에서 관리하고 있는 국방표준종합정보시스템을 활용하여 현재 활성화되어 관리되고 있는 국방표준서를 조사한다.

두 번째 단계는 조사된 국방표준서의 국방규격, 미국 군사규격(Mil-Spec, Military Specification), 도면 등 적용규격을 조사한다. 국방표준서에 적용된 규격은 국방표준서 제정 시 연계성이 높은 자료이다. 따라서 향후 국방규격 매칭 정보로 활용성이 높다.

세 번째 단계는 조사된 국방표준서의 적용규격 중 목록화 정보를 식별하고 수집한다. 적용규격의 목록화 정보는 제품에 대한 생산자 정보, 참조규격 등 군수품 조달을 위한 필수 정보이므로 향후 군수품 조달체계에서 국방표준서 활용을 위해 필요한 정보이다.

네 번째 단계는 수집된 목록화 정보를 적용규격을 인용하고 있는 국방표준서와 매칭한다. 이를 통해 국방표준서와 연계된 국방규격, 목록화 정보 등을 정리할 수 있다.

마지막 단계는 매칭된 국방표준서와 국방규격 목록화 정보를 국방표준서별로 정리하고 활용 가능한 국방표준서를 도출한다.

3.2. 매칭 자료 및 방법

데이터 매칭은 별개의 데이터 파일을 결합하여 하나의 데이터 파일을 만드는 방법으로 영국의 “National Statistics code of Practice Protocol on Data Matching(2003)”에 따르면 정확 매칭(Exact matching), 판단 매칭(Judgemental matching), 확률적 매칭(Probability matching), 통계적 매칭(Statistical matching), 데이터 연결(Data linking) 등 크게 5가지의 종류로 나누어 볼 수 있다[6].

정확 매칭은 각 데이터셋의 변수(예: 이름, 일련번호, 코드 등) 값이 100% 동일할 경우에만 두 데이터를 연결하는 방식이다. 이 방식은 오류 가능성을 최소화하고, 데이터 처리의 투명성과 일관성을 보장할 수 있다. 정확 매칭은 고전적 매칭 이론(Classical record linkage theory)에 기반을 두고 있으며, 이는 1950년대 Fellegi와 Sunter에 의해 제안된 통계적 레코드 매칭 이론에서 발전된 개념으로 일치/불일치 확률 모델링 없이 정확한 값 기준으로 판단을 요하며, 비확률적(Deterministic) 매칭 방식에 속한다. 정책 데이터, 의료정보, 교육자료, 국방정보 등 신뢰도가 중요한 분야에서 주로 사용된다[7].

본 연구는 국방표준서와 국방규격의 특성을 고려하여 데이터의 신뢰성 확보와 데이터 통합을 목적으로 정확 매칭 기법을 적용하였다. 정확 매칭을 위해 매칭자료는 Table 4와 같이 국방표준서 269종, 국

Table 4. Matching Target Status of Defense Standard Document and Defense Specifications

Data name	Status of data
Defense standards document	269 types
Application standards of defense standards document (KDS, KDC, Mil-Spec)	712 types
Defense drawing	888,746 types
Central procurement performance (2021~2024년)	64,108 cases

방표준서 적용규격 712종, 국방도면 및 규격자료 888,746종, 2021년부터 2024년까지 4개년의 중앙조달실적 자료 64,108건으로 활용하였으며, Stata (Stata Corp 社) 프로그램을 활용하여 1:1 매칭 알고리즘으로 매칭을 진행하였다. Stata 프로그램은 통계분석, 데이터 관리와 그래픽 능력이 뛰어난 프로그램으로 대량의 데이터 병합, 조합 분석이 가능하므로 주로 통계학, 경제학, 사회과학 등에서 주로 활용되고 있다.

3.3. 국방표준서와 국방규격 매칭 결과

국방표준서 269종을 국방규격 712종과 매칭한 결과 Table 5와 같이 237종의 적용규격이 분석되었으며, 관련된 국방도면은 102,770종이 매칭되었다.

Table 5. Matching Results between Defense Standard Document and Defense Specifications

Category	Data name	Status of data
Matching result	Application standards (KDS, KDC, Mil-Spec)	237종
	Defense drawing	102,770종

그리고 매칭된 국방도면을 4개년의 중앙조달실적 자료와 매칭한 결과 Table 6과 같이 1,362개의 생산기업 정보와 군수품 조달규격과 연계성이 높은 51개 국방표준서로 식별되었으며, Figure 2와 같은 자료구조로 정리할 수 있다.

Table 6. Matching Results of Production Firms Linked to Defense Standard Document

Number of matching	Defense standard document	Manufacturing firms
Total	51	1,362

최종적으로 매칭된 51개 국방표준서에 대한 연관성이 높은 상위 10개의 국방규격 생산기업을 빈도분석을 진행한 결과, Table 7과 같이 ① STD-0186

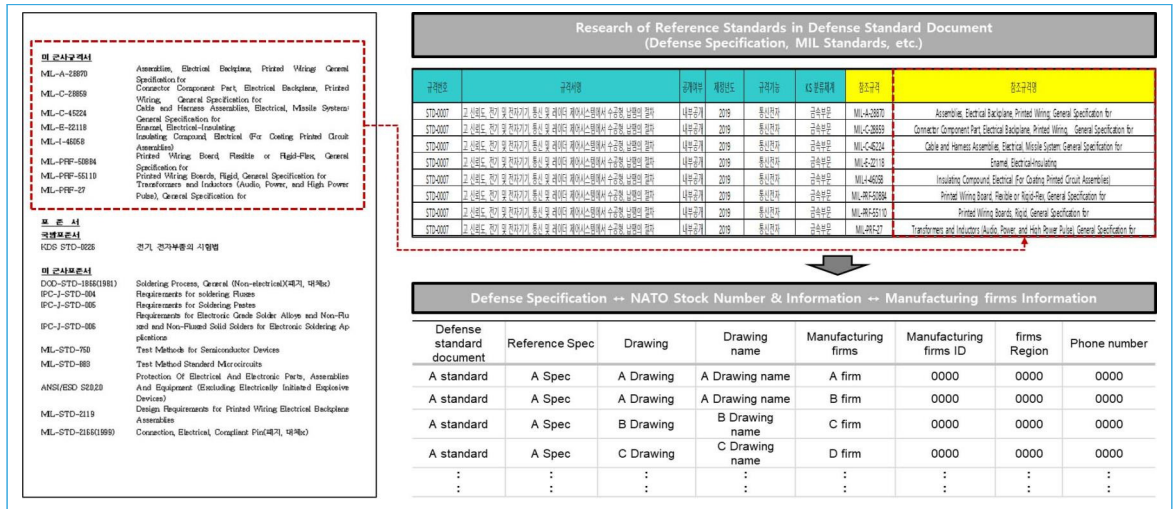


Figure 2. Examples of matching information between the application standard of the defense standard documents and procurement information of defense specifications

Table 7. Frequency Analysis of Production Firms Matching with Defense Standard Document

Defense standard document	Manufacturing firms	Ratio(%)	Defense standard document	Manufacturing firms	Ratio(%)
STD-0186	356	26.1%	STD-0114	4	0.3%
STD-0087	179	13.1%	STD-0119	4	0.3%
STD-0065	176	12.9%	STD-0141	4	0.3%
STD-0193	136	10.0%	STD-0166	4	0.3%
STD-0154	62	4.6%	STD-0048	3	0.2%
STD-0151	60	4.4%	STD-0054	3	0.2%
STD-0103	56	4.1%	STD-0132	3	0.2%
STD-0182	46	3.4%	STD-0138	3	0.2%
STD-0149	45	3.3%	STD-0199	3	0.2%
STD-0122	44	3.2%	STD-0204	3	0.2%
STD-0187	24	1.8%	STD-0046	2	0.1%
STD-0150	21	1.5%	STD-0076	2	0.1%
STD-0161	14	1.0%	STD-0085	2	0.1%
STD-0196	14	1.0%	STD-0188	2	0.1%
STD-0070	11	0.8%	STD-0015	1	0.1%
STD-0081	9	0.7%	STD-0018	1	0.1%
STD-0113	9	0.7%	STD-0027	1	0.1%
STD-0035	7	0.5%	STD-0041	1	0.1%
STD-0094	6	0.4%	STD-0073	1	0.1%
STD-0155	6	0.4%	STD-0079	1	0.1%
STD-0181	6	0.4%	STD-0115	1	0.1%
STD-0068	5	0.4%	STD-0128	1	0.1%
STD-0121	5	0.4%	STD-0164	1	0.1%
STD-0022	4	0.3%	STD-0183	1	0.1%
STD-0052	4	0.3%	STD-0192	1	0.1%
STD-0062	4	0.3%	Total	1,362	100%

유기피막을 위한 금속표면의 청정처리 및 전처리, ② STD-0087 폴리우레탄 도료, 화학작용제 저항성, ③ STD-0065 고 고형분 에폭시 도료, ④ STD-0193 화포 일반표준, ⑤ STD-0154 구조용 강재의 용접 절차, ⑥ STD-0151 합금강 및 탄소강 정밀주물, ⑦ STD-0103 지상전자장비에 대한 끝손질, ⑧ STD-0182 철강용 흑색산화피막, ⑨ STD-0149 금속 및 목재의 표면처리, ⑩ STD-0122 썰링, 잠금과 멈춤 콤팩트 단일 성분이 매칭된 국방표준서 51종 중 85.1%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 몇 가지 시사점을 도출할 수 있다.

첫째, 현재 제정되어 관리되고 있는 국방표준서의 경우 국방규격과의 연계성이 낮은 수준이다. 전체 269종 중 51종(18%)만이 국방규격과 매칭이 가능하였다. 이러한 결과는 국방표준서 제정 시 관련 국방규격들과의 연계성을 고려하지 않고 제정되기 때문에 발현된 현상이라고 판단된다. 이를 개선하기 위해 국방표준서 개발 시점부터 관련 국방규격들과 면밀한 연계성 검토와 관리가 필요하다.

둘째, 국방규격과 매칭된 국방표준서의 경우 무기체계 제조공정에서 적용되는 소재에 대한 전처리 과정과 관련된 국방표준서와 주로 매칭되었다. 이는 국내 군수품 조달환경에서 제조공정, 시험방법 등에서 매칭된 국방표준서가 주로 활용될 수 있음을 시사한다.

마지막으로 군수품의 인터페이스, 설계 단계뿐만 아니라 양산 및 품질보증 단계에서도 국방표준서 활용성을 높일 수 있음을 시사한다. 국방표준서의 국방규격과 연계된 군수품 목록화 정보를 분석하여 1,362개의 연계 가능 생산기업이 분석되었다. 이는 관련 정부기관 또는 연구기관뿐만 아니라 산업계에서도 국방표준서의 활용 가능성이 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구는 국방표준서와 국방규격 간의 연계성을 강화하기 위한 방안으로, 국방규격 목록화 정보 자료에 정확 매칭 기법을 적용하여 데이터 구조화를 수

행하였다. 이를 통해 개발 및 양산 단계에서 실질적으로 활용 가능한 연계 규격 정보, 조달 정보, 생산자 정보를 식별할 수 있었으며, 이는 국방표준서가 단순한 참고문헌 수준을 넘어 국방 산업 현장에서 실질적으로 적용 가능한 기술자료로 전환되는 계기를 마련하였다는 점에서 의의가 있다.

또한, 본 연구를 통해 국방표준서의 활용도를 제고하기 위한 몇 가지 핵심적인 연구 결과와 개선 방안을 도출하였다.

첫째, 국방표준서와 국방규격의 효과적인 연계를 위한 체계적인 매칭 절차와 방법론을 제시하였다. 이는 국방표준서가 제정된 2019년 이후 지속적으로 제기되어 온 국방표준서 활용성 문제를 해결하기 위한 대안으로 활용될 수 있으며, 특히 연구개발 단계에서의 설계기준 정립, 양산 단계에서의 품질보증 강화를 위한 기반 자료로 활용될 수 있다.

둘째, 분석을 통해 국방표준서와 연계 가능한 국방규격 및 생산기업 정보를 식별하였으며, 이를 바탕으로 군수품의 설계, 상호운용성, 제조공정, 시험방법 등에서 국방표준서의 현장 적용 가능성을 제고할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

셋째, 군수품 조달환경과 연계성이 높은 국방표준서를 식별함으로써, 특히 소재의 전처리 과정 등 제조공정 중심의 적용 분야에서 활용 가치가 높은 국방표준서를 도출하였다. 이러한 결과는 향후 국방조달 정책 수립 및 기술자료 관리의 전략적 기초 자료로 활용될 수 있다.

종합적으로, 본 연구는 국방표준서의 활용성 제고를 위해 국방규격과의 연계성에 중점을 두고 접근하였으며, 정확 매칭 기법을 통해 실무적으로 유용한 자료를 식별하고 구조화하는 데 기여하였다. 특히 조달환경 내에서 실질적 활용 가능성이 높은 국방표준서를 제시함으로써, 국방표준서의 실효성 제고를 위한 기초를 마련하였다.

다만, 국방표준서의 전반적인 활용도 향상을 위해서는 관련 법령의 정비 및 활용을 유도할 수 있는 제도적 인센티브 마련, 이해관계자 간의 활용 공감대 형성과 협력 체계 구축, 국방표준서의 내용 고도화

및 체계적 관리 강화 등의 후속연구가 요구된다. 향후 본 연구에서 제시된 매칭 기법과 분석 결과를 바탕으로, 이러한 과제들을 포괄적으로 검토하고 보완할 수 있는 후속연구를 진행해 나갈 예정이다.

참고문헌

- 1 Lee, M., & An, H. W., "Improvement to Operation System of Defense Standards: Emphasis on Operation of U.S. Defense Standardization Program", *Journal of Defense Quality Society*, 6(1), pp. 50-59, 2024.
- 2 방위사업청훈령 제897호 표준화 업무규정, 방위사업청 (DAPA, Defense Acquisition Program Administration), 2025.
- 3 Son, H. G., & Kim, J. S., "A Study on the Development of Defense Standards Suitability Review through Analysis of Developed Countries Defense Standards. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 23(8), pp. 348-356, 2022.
- 4 Lee, M., & An, H. W., "The Effect of Suitability Review on Quality Satisfaction of the Defense Standards", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 25(9), pp. 286-292, 2024.
- 5 방위사업청훈령 제887호 군수품조달관리규정, 방위사업청 (DAPA, Defense Acquisition Program Administration), 2025.
- 6 Lee, Y. S., Kim, S. U., An, H. Y., Lim, K. E., & Kim, H. K., "A Study on the Statistical Matching between Survey Data and Administrative Data", *Journal of the Korean Official Statistics*, 14(1), pp. 82-98. 2009.
- 7 Fellegi, I. P., & Sunter, A. B., "A theory for record linkage", *Journal of the American Statistical Association*, 64(328), pp. 1183-1210, 1969.

표면 거칠기 및 샤프트 기동 각가속도 변화에 따른 저널 베어링 마찰 진동 해석

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

Friction-Induced Vibration Analysis of Journal Bearings under Variations in Surface Roughness and Shaft Startup Angular Acceleration

권혁성, Hyucksung Gwon

부산대학교, 기계시스템설계전공, 석박통합과정생
Integrated Master's-Ph.D. Candidate,
Mechanical System Design, Pusan
National University.

이가향, Gahyang Lee

국방기술품질원, 국방신뢰성연구센터, 연구원
Researcher, Defense Reliability Research
Center, Defense Agency for Technology
and Quality

서준호†, Junho Suh

부산대학교, 기계공학부, 부교수
Associate Professor, School of Mechanical
Engineering, Pusan National University

Abstract

This study investigates the friction-induced vibration behavior of journal bearings during startup through numerical analysis, focusing on the impact of surface roughness and angular acceleration. Journal bearings are critical components of mechanical systems, and their transient dynamics during startup are particularly prone to frictional instabilities and vibrations. To model these phenomena, the average Reynolds equation is employed to describe the lubrication flow, whereas the GW(Greenwood and Williamson) model is used to account for the surface roughness effects at the contact interface. The numerical model integrates the average Reynolds equation with the GW model, enabling a detailed analysis of the hydrodynamic and contact phenomena in the mixed lubrication regime. Variations in the angular acceleration are also simulated to explore their influence on the dynamic behavior of the system. The results revealed that surface roughness significantly affected the lubrication regime, altering the vibration amplitudes, whereas angular acceleration contributed to complex dynamic responses during the startup phase. These findings underscore the importance of incorporating both hydrodynamic and contact mechanics models to accurately predict friction-induced vibrations under transient conditions. By providing a comprehensive understanding of the relationship between the operational parameters and dynamic responses, this study lays the foundation for optimizing journal bearing performance and reliability under variable startup conditions.

keywords : mechanical friction, mixed lubrication, surface roughness, angular acceleration, torsional vibration

† Corresponding Author : Junho Suh

Tel : +82-51-510-2332, email : junhosuh@pusan.ac.kr

Mechanical Engineering Building, Pusan National University, 2, Geumjeong-ro 65beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 29th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

함정에 적용되는 수운할 저널 베어링은 운전 초기 낮은 회전속도 구간에서 윤활 유막 형성이 불완전하여 혼합 윤활 상태를 겪게 된다. 이로 인해 저널과 베어링 표면의 미세 돌기 사이에 금속 간 접촉이 발생하고, 이에 따른 기계적 마찰은 축의 비틀림 진동을 유발하여 기동 시 소음 및 시스템 안정성 저하로 이어진다. 이러한 소음 문제는 함정의 운용 효율성과 은밀성에 악영향을 미치므로, 함정용 수운할 저널 베어링의 기동 조건에서 발생하는 마찰 진동 특성에 대한 정량적 분석이 필요하다.

기존 연구에서는 베어링의 기동 및 정지 시 접촉 및 마모 특성, 부상속도 변화, 열-마찰 응답에 관한 분석이 수행되어 왔다. Mokhtar et al. (1977a)은 정하중을 가하는 실험 장치를 통해 저널 베어링의 기동 및 정지 시의 거동에 대해 분석했고[1], 같은 해 발표한 또 다른 연구(1977b)에서는 기동 시 축과 베어링 사이 주로 미끄럼 접촉이 발생하여 마모가 발생하며, 정지 시에는 회전이 멈춘 후에 접촉이 발생해 마모 발생을 야기하지 않음을 확인하였다[2]. Harnoy (1995)는 저널 베어링 시동 시 발생하는 가변 마찰에 대해 분석하였으며, 낮은 시동 가속도, 축 유연성, 그리고 높은 회전 관성이 에너지 손실과 비틀림 진동을 발생시킬 수 있음을 확인하였다[3]. Lu and Khonsari (2005)는 간단한 베어링 실험과 수치 해석을 통해 하중 및 윤활유 공급 온도에 따른 저널 부상 속도 변화를 분석하여, 윤활유 공급 온도와 하중이 각각 증가할수록 부상 속도 또한 높아진다는 결과를 도출하였다[4]. Bouyer et al. (2007)은 반복적인 기동과 정지를 겪는 Two-Lobe 베어링의 마모 성능을 실험과 수치 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 마모는 베어링의 최대 압력을 증가시키고 윤활유 온도를 전반적으로 감소시키는 결과를 확인하였다[5]. Cui et al. (2018)은 베어링 간극과 가속 시간의 영향에 따른 축과 베어링의 접촉 거동을 분석하여 큰 간극은 작은 접촉력, 짧은 접촉

시간을 발생시키며, 가속 시간의 감소 또한 작은 접촉력, 짧은 접촉 시간을 야기함을 확인하였다[6]. Sander and Allmaier (2018)는 탄성 유체 윤활 해석을 통해 금속-금속 간 접촉에 의한 마모와 마모 형상에 따른 축의 움직임, 접촉 압력 변화를 확인하였다[7]. Xiang et al. (2020)은 혼합-열탄성유체윤활 해석을 통해 가속 시간, 간극, 베어링 셸 두께가 온도, 접촉 압력, 열팽창 및 고착 위험에 미치는 영향을 분석하였는데, 시동 초기 강한 접촉에 의해 최대 온도가 빠르게 상승하여 저널 부상 직전 최대 온도에 도달하고, 가속 시간이 짧아질수록 접촉은 줄어들지만 최대 온도와 열팽창이 증가하며, 간극이 감소하면 최대 접촉 압력은 감소하지만 온도와 열팽창 증가로 빠른 시동과 고하중에서 고착 위험을 증가시키고, 베어링 셸이 얇아지면 최대 온도와 접촉 압력이 증가하고 초기 접촉 압력이 더욱 커짐을 확인하였다[8].

저널 베어링의 기동 과정에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔지만 마찰에 의한 저널의 비틀림 진동에 대한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 기동 과정에서 발생하는 기계적 마찰과 점성 전단에 의한 저널의 비틀림 진동에 대해 분석하고자 한다. 특히 표면 조도와 각가속도 차이에 따른 마찰 진동 특성에 대해 비교 분석하였다.

2. 수치 모델

기동 과정에서 저널 베어링은 얇은 유막 두께에 의해 혼합 윤활 조건을 겪는 베어링 개략도를 Figure 1에 나타냈다. 혼합 윤활 영역에서 운전되는 저널 베어링의 최소 유막 지점에서 저널과 베어링 표면의 돌기의 형상 및 분포는 윤활유 흐름 및 접촉에 영향을 미친다. 따라서 실제 표면 거칠기 프로파일 혹은 수치적 방법을 통한 거친 표면 형상이 필요하다. 본 연구에선 Hu and Tunder (1992)의 수치적 방법을 통해 생성한 표면을 사용하였다[9].

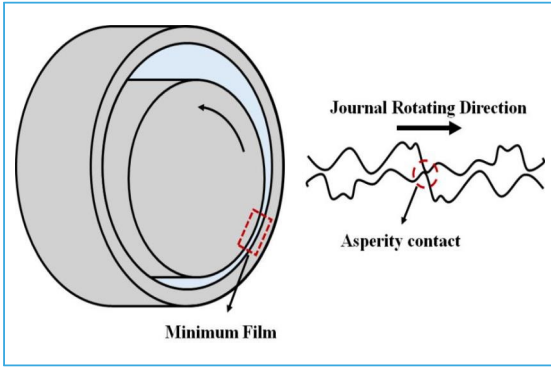


Figure 1. Schematic of journal bearing operating under mixed lubrication condition

2.1. 평균 레이놀즈 방정식

저널 베어링의 윤활 성능을 예측하기 위해, 돌기 형상이 윤활 특성에 미치는 영향을 고려한 Patir와 Cheng의 평균 레이놀즈 방정식을 적용하였다[10]. 이 방정식은 저널 베어링 내부의 유막 압력 분포를 계산하기 위한 지배 방정식으로, 윤활 상태 해석에 있어 핵심적인 역할을 수행한다. 윤활유는 비압축성이고 점도가 일정한 뉴턴 유체로 가정하였으며, 이에 따라 평균 레이놀즈 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) = \frac{u_1 + u_2}{2} \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial x} + \frac{u_1 - u_2}{2} \sigma \frac{\partial \phi_s}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 ϕ_x 와 ϕ_y 는 각각 x, y 방향에 대한 압력 유동 계수 (Pressure flow factor), ϕ_s 는 전단 유동 계수(Shear flow factor)이며, 유동 계수는 Patir and Cheng(1979)이 제시한 값을 사용했다[10]. \bar{p} 는 평균 압력, h 는 겉보기 유막 두께, \bar{h}_T 는 저널과 베어링 돌기 높이를 고려한 평균 유막 두께, σ 는 저널 표면과 베어링 표면의 등가 거칠기, u_1, u_2 는 저널과 베어링의 선속도, μ 는 윤활유의 점도이다.

2.2. 돌기 접촉 모델

기동 과정에서 유막 두께가 매우 얇은 조건에서 저널 표면과 베어링 표면의 돌기 간의 접촉이 발생하여 저널을 지지하고 기계적 마찰을 발생시킨다. 본 연구에서 돌기 접촉력은 통계적 방법을 사용한 Greenwood-Williamson(GW) 탄성 접촉 이론을 사용하여 계산하였다[11]. 이 모델은 저널 표면과 베어링 표면 사이의 미세 돌기 간 접촉을 수치적으로 모델링함으로써, 저널 베어링의 접촉 압력 분포를 계산하기 위한 기초 이론으로 활용된다. Figure 2에 GW접촉 모델의 개략도를 나타냈으며, 접촉하는 두 거친 표면을 각각 매끈한 강체 표면과 돌기가 존재하는 거친 탄성 표면으로 가정한다. 또한 거친 표면의 돌기는 모두 반경(β)을 동일하게 가진 구 형태로 가정한다. GW 접촉 모델에서 제시하는 돌기 접촉압력(P_{con})과 접촉력(F_{con})은 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{con} = \frac{4}{3} E \beta^{1/2} \int_d^\infty (z-d)^{3/2} \phi(z) dz \quad (2)$$

$$F_{con} = \int P_{con} dA \quad (3)$$

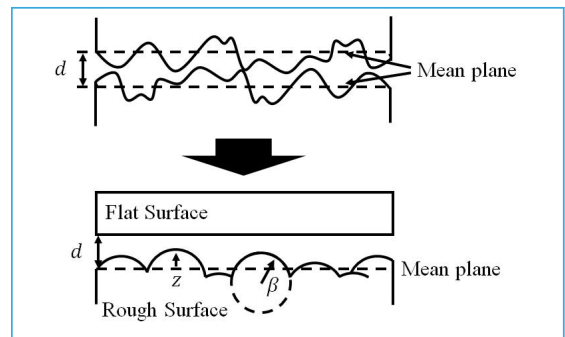


Figure 2. Schematic of GW elastic contact model

여기서 E 는 두 표면 재료의 plain-stress modulus이며 $E = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$ 로 나타낼 수 있다. d 는 두 표면의 겉보기 거리 즉, 유막 두

께를 나타내며, z 는 각 돌기의 높이, $\phi(z)$ 는 돌기 높이 분포의 확률밀도 함수이며, dA 는 수치 해석 과정의 격자 면적이다.

2.3. 마찰 모델

저널 베어링에서 발생하는 마찰은 기계적 마찰과 윤활유의 점성 전단으로 구분할 수 있다. 기계적 마찰은 고전적인 Coulomb의 마찰 이론을 따른다고 가정하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{f,mech} = \eta_k F_{con} \quad (4)$$

평균 점성 전단 응력과 점성 마찰력은 Patir and Cheng(1979)의 이론에 따라 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$\bar{\tau} = \frac{\mu(u_2 - u_1)}{h} (\phi_f + \phi_{fs}) + \phi_{fp} \frac{h}{2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \quad (5)$$

$$F_{shear} = \bar{\tau} A \quad (6)$$

여기서 ϕ_{fs}, ϕ_{fp} 는 평균 전단 응력을 나타내도록 정의된 전단 응력 계수(Shear stress factor)이며, $\phi_f = hE \left(\frac{1}{h_T} \right)$ 이며, A 는 전단 응력이 가해지는 영역의 면적이다.

두 가지 마찰 요소를 결합한 저널 베어링의 마찰력은 식 (7)과 같으며, 저널의 접선 방향 반대로 가해진다.

$$F_f = F_{f,mech} + F_{shear} \quad (7)$$

2.4. 베어링 모델

저널 베어링의 자유물체도를 Figure 3에 나타냈다. 중심이 O_B 인 베어링은 고정되어 있으며, 중심이 O_J 인 저널은 총 3가지 자유도(저널 중심의 x, y 방향

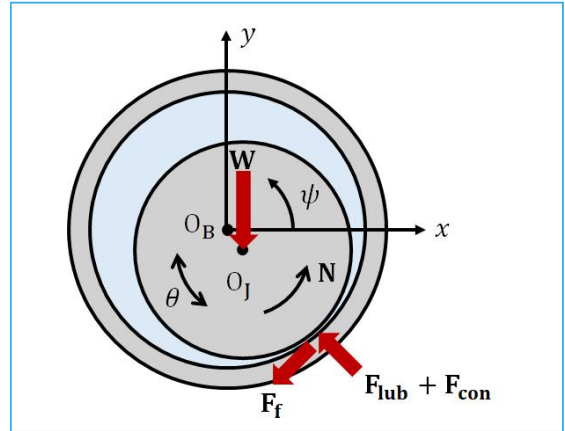


Figure 3. Journal bearing free diagram

자유도, 비틀림 자유도 θ)가 존재한다. 또한 저널은 가변 회전속도 N 으로 회전하며, 정하중 W 를 받고, 유막에 반력과 접촉에 반력에 의해 지지되며, 마찰력이 회전 방향의 반대 방향으로 가해진다.

저널의 운동 방정식을 행렬 형태로 나타내면 식 (8) ~ (13)과 같다.

$$[M] \{\ddot{\mathbf{q}}\} + [C] \{\dot{\mathbf{q}}\} + [K] \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (8)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_t \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\{\mathbf{F}\} = \begin{bmatrix} -F_{lub,x} - F_{con,x} - F_{fric,x} \\ W - F_{lub,y} - F_{con,y} - F_{fric,y} \\ -F_{fric} \cdot R_J \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 I 는 저널의 관성 모멘트(Moment of inertia)이며, c_t, k_t 는 각각 비틀림 감쇠, 비틀림 강성이다. $F_{lub,i} (i = x, y)$ 는 윤활 해석을 통한 유막 반력의 x, y 성분을 의미하며 $F_{con,i} (i = x, y)$ 는 기

계적 접촉 반력의 x, y 성분, $F_{fric,i} (i = x, y)$ 은 마찰 모델에 의한 마찰력의 x, y 성분이며 식 (14) ~ (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{lub,x} = \int \cos \psi \bar{p} dA \quad (14)$$

$$F_{lub,y} = \int \sin \psi \bar{p} dA \quad (15)$$

$$F_{con,x} = \int \cos \psi P_{con} dA \quad (16)$$

$$F_{con,y} = \int \sin \psi P_{con} dA \quad (17)$$

$$F_{fric,x} = \int \sin \psi (\eta_k P_{con} + \bar{\tau}) dA \quad (18)$$

$$F_{fric,y} = \int \cos \psi (\eta_k P_{con} + \bar{\tau}) dA \quad (19)$$

여기서 ψ 는 베어링 원주 방향 각도이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수치 해석 조건 및 경계 조건

Figure 4에 나타낸 수치 해석에 사용한 베어링의 Geometry parameters는 Table 1과 같다. 패드 아크 각도 60° , 패드 사잇각 12° 인 총 5개의 고정 패드 베어링이다.

베어링 패드의 표면 돌기가 정규분포를 따른다고 가정하였다. 베어링의 Surface parameter는 Table 2에 나타냈다. Skewness가 0일 경우 표면 거칠기 분포는 대칭적인 정규분포를 나타낸다. Skewness가 양의 방향으로 증가하거나 음의 방향으로 감소할수

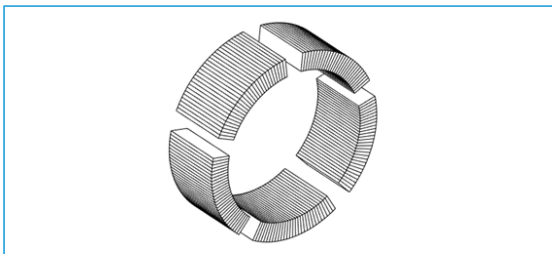


Figure 4. Schematic of the target bearing

Table 1. Bearing Geometry Parameters

Parameters	Value
Bearing radius (mm)	12
Bearing length (mm)	8
Clearance (mm)	0.04
Arc angle ($^\circ$)	60
Angle between pad ($^\circ$)	12

Table 2. Surface Parameters

Parameters	Value
Skewness	0
Kurtosis	3
Rq (μm)	0.1

록 분포의 비대칭성이 커지며, 이는 표면의 미세 돌기들이 한쪽으로 치우쳐 분포함을 의미한다. Kurtosis = 3은 표면 거칠기 분포가 정규분포와 유사함을 의미하며, 값이 3보다 크면 분포가 중심에 집중되어 돌기들이 평균값 근처에 밀집해 있는 경향을 나타낸다. 반면, 3보다 작으면 보다 평탄한 분포를 가짐을 의미한다.

Table 3은 수치 해석에 사용한 재료 물성치를 나타냈다. 윤활유 점도는 $0.027\text{Pa}\cdot\text{s}$, 베어링의 탄성계수는 73GPa , 포아송비는 0.37을 사용했으며, 샤프트의 탄성계수는 210GPa , 포아송비는 0.3, 관성모멘트는 $0.025\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 비틀림 감쇠는 $6.2832\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, 비틀림 강성은 $39478\text{N}\cdot\text{m}$ 을 사용했다.

Table 3. Material Parameters

Parameters	Value
Lubrication viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	0.027
Bearing Young's modulus (GPa)	73
Bearing Poisson's ratio	0.37
Shaft Young's modulus (GPa)	210
Shaft Poisson's ratio	0.3
Moment of inertia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.025
Torsional damping ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	6.2832
Torsional stiffness ($\text{N}\cdot\text{m}$)	39478

Table 4는 베어링의 운전 조건을 나타내며, 베어링은 수직 방향으로 5kN의 정하중을 받으며, 회전 속도는 Figure 5와 같이 1rpm에서 301rpm까지 3초간 각가속도 10.472rad/s²로 선형적으로 증가한 후 0.5초간 301rpm으로 유지된다.

Table 4. Analysis Condition

Parameters	Value
Load (kN)	5
Maximum rotating speed (rpm)	301
Acceleration time (sec)	3
Angular acceleration (rad/s ²)	10.472

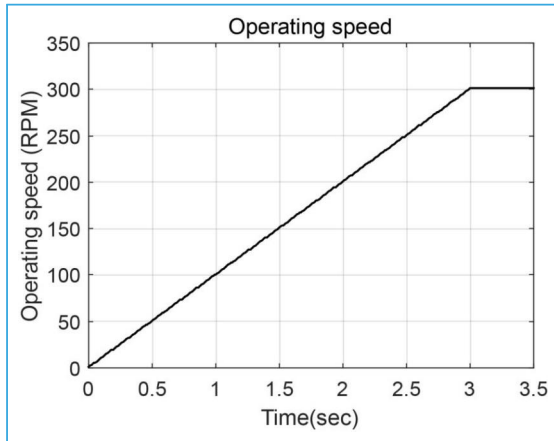


Figure 5. Journal operating speed

평균 레이놀즈 방정식 기반의 윤활 해석은 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 이용해 각 베어링 패드에 대해 30×20 메쉬로 수행되었으며, 음압 발생을 방지하기 위해 Reynolds 공동 조건을 적용하였다. 접촉 해석은 동일한 도메인과 격자를 사용하여 유막 두께에 따른 접촉 반력을 계산하였다.

베어링의 과도 거동을 수치적으로 해석하기 위해 MATLAB(MathWorks 社, R2024b version)의 내장 ODE 솔버인 ode45를 사용하였다. 이 솔버는 Dormand-Prince 방식의 4~5차 Runge-Kutta 알고리즘에 기반한 적응형 시간 간격 기법을 사용하여, 비선형 미분방정식의 안정적인 수치 해석에 효과적

이다. 시뮬레이션은 시간 구간 [0, 3.5]초에서 수행하였으며, 절대 오차 허용값(AbsTol)은 1×10^{-6} , 상대 오차 허용값(RelTol)은 1×10^{-3} 으로 설정하였다. 초기 위치는 1 RPM 회전속도에서의 저널 베어링 정적 평형 위치를 기준으로 설정하였다.

3.2. 해석 결과

Figure 6은 회전속도의 증가에 따른 저널 베어링의 마찰계수 변화를 시간에 따라 나타낸다. 검은색 실선으로 나타낸 전체 마찰계수(Total friction coefficient)는 초기값이 0.1로 상대적으로 높으며, 시간이 지남에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 저널 베어링의 회전속도가 증가함에 따라 접촉 마찰이 점차 감소하고, 유체 유막 형성이 진행됨에 따라 윤활 상태가 혼합 윤활 영역(Mixed lubrication regime)에서 유체 윤활 영역(Full film lubrication regime)으로 전환되기 때문으로 해석된다. 이러한 전환은 저널과 베어링 표면 간의 접촉이 줄어들고, 유체 윤활 효과가 지배적으로 작용하게 되어 마찰이 감소하는 주요 원인으로 판단된다.

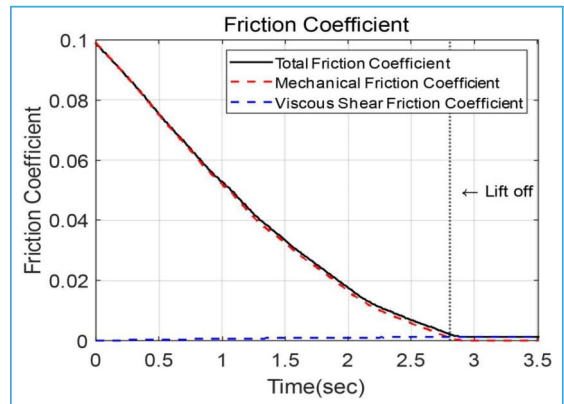


Figure 6. Friction coefficient

빨간색 점선으로 표시한 기계적 마찰계수(Mechanical friction coefficient)는 전체 마찰계수와 유사한 경향을 보이며, 이는 초기 혼합 윤활 단계에서 접촉 마찰이 전체 마찰에 주요 기여 요인임

을 나타낸다. 2.05초(206RPM) 부상(Lift off) 지점 이후에는 기계적 마찰계수가 0이 되어 전체 마찰계수에 더 이상 영향을 미치지 않으며, 점성 전단 효과가 지배적인 역할을 한다.

파란색 점선으로 표현된 점성 전단 마찰계수(Viscous shear friction coefficient)는 윤활유 점성 전단에 의한 마찰계수를 나타낸다. 초기부터 점차 증가하는 값을 가지지만 기계적 마찰에 의한 영향에 비해 미비한 형태를 보인다. 하지만 부상 이후에는 기계적 마찰이 제거되면서 점성 전단 마찰계수가 주요 마찰 요인으로 작용하게 된다.

Figure 7은 마찰에 의해 발생하는 저널의 비틀림 진동을 (a) 원본 진동(Original amplitude)과 진동의 이동 평균(Moving average)을 나타내고 (b) 피크-피크 진동 진폭(Peak-peak amplitude)의 변화를 시간에 따라 나타낸다.

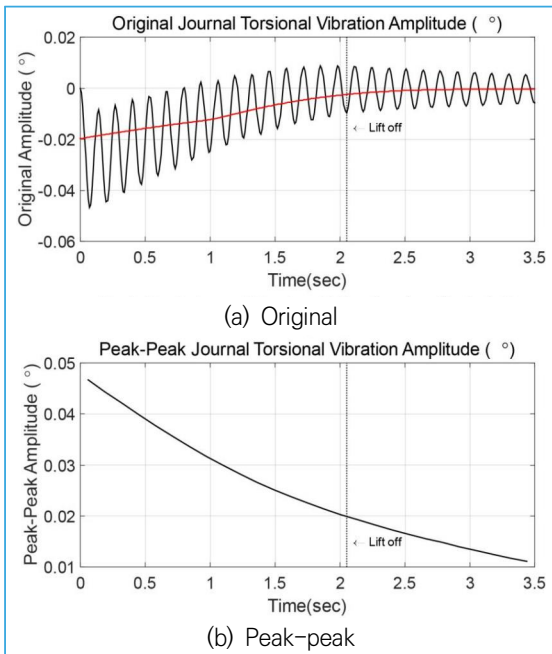


Figure 7. Journal torsional vibration amplitude
(a) Original (b) Peak-peak

원본 진동은 초기에는 진폭이 최대 0.047°로 상대적으로 크게 나타나며, 시간이 지남에 따라 즉, 회

전속도가 증가함에 따라 진동이 점차 감소하는 양상을 보인다. 부상 지점에 도달하기 전까지는 비틀림 진동이 비교적 크고 진폭의 중심이 0°에서 벗어나 있어 시스템이 불안정한 상태를 보인다. 그러나 부상 이후에는 진동의 크기가 감소하고 진폭의 중심이 안정화되며, 시스템이 안정적인 상태에 도달한다. 이러한 변화는 부상 이전에는 혼합 윤활 영역에서 접촉 마찰로 인한 비틀림 진동이 지배적이지만, 부상 이후에는 유체 윤활 영역으로 전환되며 접촉 마찰이 제거되어 시스템의 안정성이 회복된 결과로 해석된다.

피크-피크 진동 진폭은 초기 약 0.05°로 큰 값을 보이며 시간이 지남에 따라 선형적으로 감소하는 추세를 나타낸다. 이는 저널과 베어링 상이의 접촉 마찰 감소와 유체 윤활 상태 전환에 따라 비틀림 진동의 근원이 제거된 결과로 판단된다.

Figure 7은 저널의 비틀림 진동이 마찰 계수의 변화와 밀접하게 연관되어 있음을 보인다. 혼합 윤활 영역에서는 접촉 마찰이 비틀림 진동을 유발하며 진폭을 상대적으로 높은 수준으로 유지시키며 시스템을 불안정하게 만든다. 하지만 부상 이후에는 접촉 마찰이 사라지며 비틀림 진동 진폭이 감소하여 시스템이 안정화됨을 확인하였다. 이는 마찰 감소가 베어링의 동적 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 매개변수 해석

본 연구에서 표면 조도, 각가속도 2가지 매개변수의 차이에 따른 저널의 마찰 진동 특성 변화에 대해 분석하였다.

4.1. 표면 조도

표면 조도는 Table 5와 같이 돌기 높이 분포의 제곱 평균 제곱근(rms, Rq)값인 0.1을 기준으로 60%, 80%, 100%, 120%, 140%인 값에 대해 평가 진행하였다.

Table 5. Surface Roughness & Lift off Speed

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Rq(μm)	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14
Lift off (rpm)	119	166	206	257	300
Lift off (sec)	1.18	1.65	2.05	2.56	2.99

Figure 8은 표면 거칠기(Rq) 차이에 따른 베어링의 마찰계수 변화를 시간에 따라 나타낸다. 또한 Table 5는 베어링의 표면 거칠기에 따른 부상속도와 부상 시간 차이를 보여준다. 모든 경우에서 마찰계수는 초기 최댓값인 0.1에서 점차 감소하는 경향을 나타냈으며, 표면 거칠기가 매끄러울수록 마찰계수는 빠르게 감소하여 빠르게 유체 윤활 영역으로 단시간에 도달하였다. 반면, 거칠기 값이 클수록 Rq값이 증가함에 따라 마찰계수의 감소는 느려졌으며, 이는 유체 윤활 영역 진입이 지연됨을 시사한다.

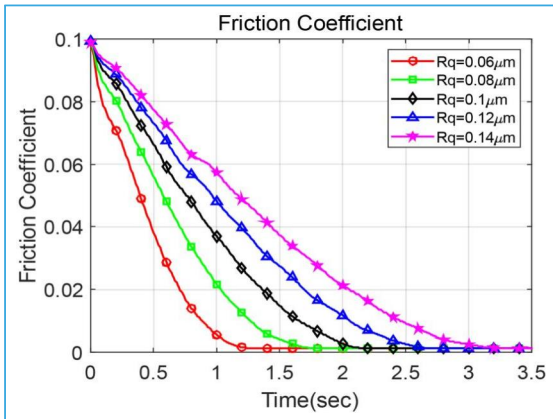


Figure 8. Friction coefficient according to surface roughness

부상속도 역시 유사한 경향을 보였다. 낮은 Rq를 가진 베어링은 더 낮은 회전속도에서 유체 윤활 영역으로 진입하였지만, 높은 Rq값을 가진 베어링은 더 높은 회전속도를 필요로 하였다. 이는 돌기 접촉

이 거친 표면에서 증가하여 유체 윤활 영역으로의 전환을 지연시키기 때문으로 판단된다.

Figure 9는 표면 거칠기에 따른 저널의 비틀림 진동 진폭을 피크-피크 형태로 나타낸 것이다. 모든 조건에서 시간 경과에 따라 감쇠 거동을 보였으며, 이는 접촉 마찰과 유막 형성에 따른 에너지 소산으로 해석된다. 표면 거칠기 증가 시 초기 진폭이 커지는 경향이 나타났고, 이는 큰 마찰력 및 유막 불안정성에 기인한 것으로 보인다. 한편, 시간이 지날수록 진폭이 유사한 수준으로 수렴하는 현상은 마찰 지배 영역에서 유체 지배 영역으로 전이되며 표면 특성의 영향이 상대적으로 감소하기 때문으로 해석된다.

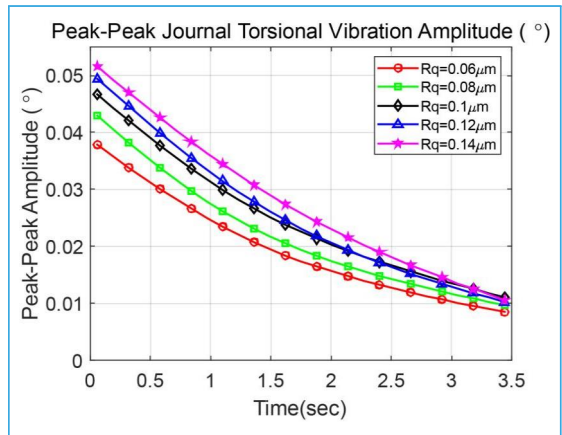


Figure 9. Peak-peak journal torsional vibration amplitude according to surface roughness

Figure 10은 저널의 진동 진폭에 대한 이동 평균(Moving average) 값을 나타내며, 표면 거칠기 차이에 따른 진폭 변화의 경향을 확인할 수 있다. 시간이 지남에 따라 모든 거칠기 경우에서 이동 평균 값이 증가하여 0에 가까워지는 양상을 보이며, 거칠기가 클수록(높은 Rq) 이동 평균의 증가속도가 더 빠르게 나타났다. 이는 초기 진동 감쇠가 느린 거친 표면에서 더 큰 잔류 진동이 발생함을 시사한다. 특히, Rq=0.06 μm 와 같은 매끄러운 표면에서는 이동 평균 값이 상대적으로 낮고 완만한 증

가를 보이며, 이는 매끄러운 표면이 진동 안정화를 촉진한다는 것을 확인할 수 있다. 반면, $Rq=0.14\ \mu\text{m}$ 와 같은 거친 표면에서는 초기 진동이 크고 이동 평균 값의 증가가 뚜렷하게 나타나, 거친 표면이 윤활유 필름의 안정적 형성을 방해할 수 있음을 보여준다.

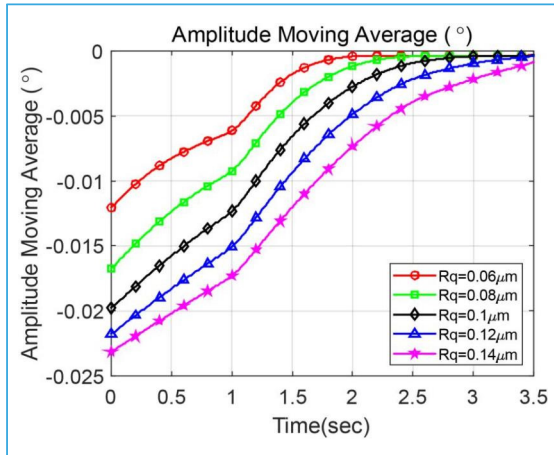


Figure 10. Torsional vibration amplitude moving average according to surface roughness

4.2. 각가속도

각가속도는 Table 6과 같이 10.472 기준으로 60%, 80%, 100%, 120%, 140%인 값을 대상으로 평가 진행하였다.

Figure 11은 각가속도 차이에 따른 베어링의 마찰계수 변화를 시간에 따라 나타낸다. 시간이 지남에 따라 모든 경우에서 마찰계수는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 높은 각가속도 조건에서는 마찰계수가 빠르게 감소하며, 단시간 내에 유체 윤활 상태에 도달하였다. 반면, 낮은 각가속도에서는 마찰계수의 감소가 느리게 진행되었다. 이는 높은 각가속도에서 빠르게 회전속도가 증가하여 윤활유 필름 형성을 가속화하기 때문으로 판단된다. 또한, Table 6에서 확인할 수 있듯 부상속도는 모든 경우에서 약 200RPM 정도로 유사하게 나타났다.

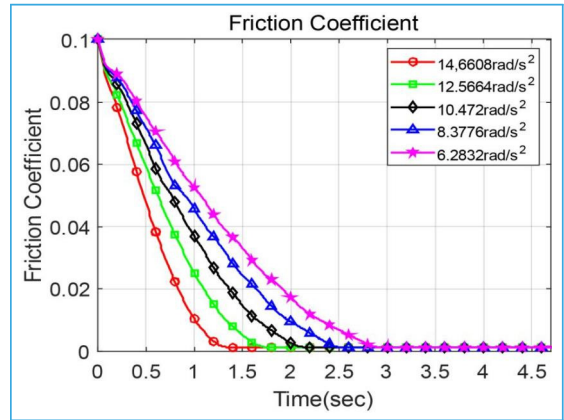


Figure 11. Friction coefficient according to angular acceleration

Table 6. Angular Acceleration & Lift off Speed

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Angular acceleration (rad/s ²)	6.2832	8.3776	10.472	12.5664	14.6608
Lift off (rpm)	206	206	206	201.8	201.7
Lift off (sec)	1.23	1.64	2.05	2.41	2.81

Figure 12는 저널의 비틀림 진동 진폭을 피크-피크 형태로 시간에 따라 나타냈다. 모든 경우에서 동일한 시간에 비슷한 크기의 진폭을 보였다. 이는 시

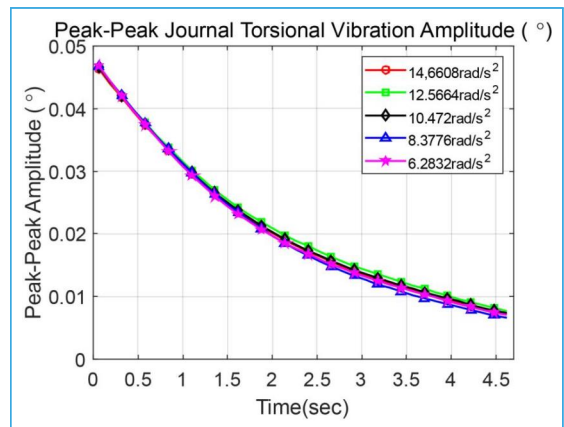


Figure 12. Peak-peak journal torsional vibration amplitude according to angular acceleration

시스템의 비틀림 고유 진동 특성이 동일하기 때문이며, 윤활유 필름 형성이 충분히 이루어진 이후에는 마찰력의 차이가 진동 감쇠에 미치는 영향이 제한적일 수 있기 때문에 판단된다.

Figure 13은 각가속도 조건에서의 진동 진폭의 이동 평균을 나타낸다. 높은 각가속도 조건에서는 이동 평균 값이 빠르게 증가하며 0°에 가까워지는 경향을 보였다. 이는 높은 각가속도가 윤활 상태로의 전환을 가속화하고 초기 비틀림 진폭 에너지를 빠르게 소산시키기 때문으로 판단된다. 반면, 낮은 각가속도 조건에서는 이동 평균 값이 완만히 증가하며, 초기 비틀림 진폭의 잔류 효과가 상대적으로 오래 유지되었다.

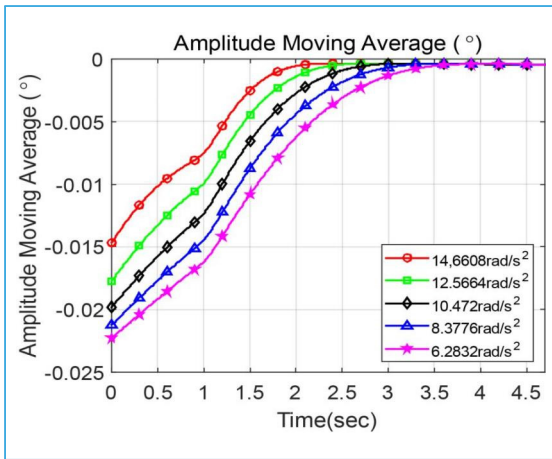


Figure 13. Torsional vibration amplitude moving average according to angular acceleration

결론적으로, 각가속도는 저널 베어링의 마찰계수 감소속도 및 진동 안정화에 중요한 영향을 미친다. 높은 각가속도는 윤활 상태의 전이를 가속화하고 진동 감쇠를 촉진하는 반면, 낮은 각가속도는 진동 감쇠가 느리게 진행되어 초기 잔류 진동이 유지된다. 모든 조건에서 유사한 피크-피크 형태의 비틀림 진폭을 보이는 것은 시스템의 구조적 고유 특성과 윤활 상태 안정화 이후의 마찰력 차이가 진동 특성에 미치는 영향이 제한적임을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 저널 베어링의 기동 과정에서 발생하는 마찰 진동 현상을 수치적으로 분석하여 표면 조도와 각가속도가 베어링 동역학에 미치는 영향을 규명하였다. 이를 위해 평균 레이놀즈 방정식과 GW모델을 결합하여 혼합 윤활 상태에서의 유체역학적 윤활과 접촉 메커니즘을 분석할 수 있는 수치 모델을 사용하였다. 표면 거칠기는 $R_q = 0.1 \mu\text{m}$ 를 기준으로 5가지 경우에 대해 분석하였으며, 각가속도는 10.472 rad/s^2 를 기준으로 5가지 경우에 대해 분석하였다.

해석 결과, 표면 조도는 윤활 특성과 진동 특성에 증대한 영향을 미치며, 조도가 감소할수록 마찰 진동의 크기가 현저히 줄어드는 경향을 보였다. 이는 매끄러운 표면이 마찰계수의 변동성을 완화하고, 보다 안정적인 윤활 상태 유지를 가능하게 함을 시사한다. 또한 각가속도는 저널 베어링의 윤활 상태 전환 및 진동 안정화 과정에 중요한 영향을 미치며, 높은 각가속도는 마찰계수의 빠른 감소와 진동 안정화에 유리한 반면, 낮은 각가속도에서는 윤활유 필름 형성과 안정화가 지연되는 경향을 보였다.

본 연구는 함정용 수윤활 저널 베어링의 기동 시 비틀림 진동 특성에 대한 수치해석적 접근을 통해 마찰 특성과 응답을 정량적으로 분석하였다. 이는 함정용 수윤활 베어링 설계 최적화에 적용 가능할 것으로 기대된다. 또한 향후 군용 회전체 시스템의 기동 안정성 확보 및 소음·진동 저감을 위한 설계 지침 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 본 연구는 수윤활 저널 베어링의 표면 조도 기준 설정이나 운전 조건 설정 등 실제 설계 단계에서의 기술적 고려사항을 제시함으로써, 관련 기술의 실용성과 응용 가능성을 더욱 명확히 하는 데 기여할 수 있다.

사사(Acknowledgements)

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R111A3060132).

참고문헌

- 1 Mokhtar, M. O. A., Howarth, R. B., & Davies, P. B., "The behavior of plain hydrodynamic journal bearings during starting and stopping", *ASLE TRANSACTIONS*, 20(3), pp. 183-190, 1977a.
- 2 Mokhtar, M. O. A., Howarth, R. B., & Davies, P. B., "Wear characteristics of plain hydrodynamic journal bearings during repeated starting and stopping", *ASLE TRANSACTIONS*, 20(3), pp. 191-194, 1977b.
- 3 Harnoy, A., "Model-based investigation of friction during start-up of hydrodynamic journal bearings", *Journal of Tribology*, 117(4), pp. 667-673, 1995.
- 4 Lu, X., & Khonsari, M. M., "On the lift-off speed in journal bearings", *Tribology Letters*, 20, pp. 299-305, 2005.
- 5 Bouyer, J., Fillon, M., & Pierre-Danos, I., "Influence of wear on the behavior of a two-lobe hydrodynamic journal bearing subjected to numerous startups and stops", 129(1), pp. 205-208, 2007.
- 6 Cui, S., Gu, L., Wang, L., Xu, B., & Zhang, C., "Numerical analysis on the dynamic contact behavior of hydrodynamic journal bearings during start-up", *Tribology International*, 121, pp. 260-268, 2018.
- 7 Sander, D. E., & Allmaier, H., "Starting and stopping behavior of worn journal bearings", *Tribology International*, 127, pp. 478-488, 2018.
- 8 Xiang, G., Han, Y., He, T., Wang, J., Xiao, K., & Li, J., "Transient tribo-dynamic model for journal bearings during start-up considering 3D thermal characteristic", *Tribology International*, 144, pp. 1-18, 2020.
- 9 Hu, Y. Z., & Tonder, K., "Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and Fourier analysis", *International journal of machine tools and manufacture*, 32(1-2), pp. 83-90, 1992.
- 10 Patir, N., & Cheng, H. S., "Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces", *Journal of Lubrication Technology*, 101(2), pp. 220-229, 1979.
- 11 Greenwood, J. A., "The area of contact between rough surfaces and flats", *Journal of Lubrication Technology*, 89(1), pp. 81-87, 1967.

Appendix 기호 설명

\bar{p}	: Mean hydrodynamic pressure (Pa)
h	: Film Thickness(μm)
\bar{h}_T	: Average film thickness considering protrusion height (μm)
ϕ_x	: Pressure flow factor for x direction
ϕ_y	: Pressure flow factor for y direction
ϕ_s	: Shear flow factor
ϕ_{fs}	: Shear stress factor
ϕ_{fp}	: Shear stress factor
ϕ_f	: Shear stress factor
σ	: Combined roughness
μ	: Lubrication viscosity (Pa·s)
N	: Total number of asperities
β	: Asperities radius (μm)
E'	: Plain-stress modulus (Pa)
z	: Height of asperities (μm)
η_k	: Coefficient of friction
m	: Mass of Journal (kg)
I	: Moment of inertia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
c_t	: Torsional damping ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)
k_t	: Torsional stiffness ($\text{N}\cdot\text{m}$)
R_J	: Journal radius (mm)
O_J	: Center of journal
O_B	: Center of bearing
ψ	: Bearing circumferential angle

군용항공기 부품국산화 시스템안전 감항영향성 검토 절차 수립에 관한 연구

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

A Study on the Establishment of Procedure for Parts Localization Airworthiness Review related to Compliance of System Safety

박상수[†], Sang Soo Park

국방기술품질원, 감항인증연구센터, 선임연구원
Senior Researcher, Airworthiness
Certification Research Center, Defence
Agency for Technology and Quality

김동욱, Dong Wook Kim

국방기술품질원, 감항인증연구센터, 연구원
Researcher, Airworthiness Certification
Research Center, Defence Agency for
Technology and Quality

김진영, Jin Young Kim

국방기술품질원, 대외협력실, 연구원
Researcher, Department of Public
Cooperations, Defence Agency for
Technology and Quality

정아영, Ah Young Jeong

국방기술품질원, 표준연구실, 연구원
Researcher, Defence Standards Research
Department, Defence Agency for
Technology and Quality

김민성, Min Sung Kim

국방기술품질원, 감항인증연구센터, 선임연구원
Senior Researcher, Airworthiness
Certification Research Center, Defence
Agency for Technology and Quality

Abstract

Airworthiness certification is a fundamental requirement to ensure that an aircraft meets established safety standards and complies with technical regulations across multiple domains. As the domestic aviation industry advances, the localization of foreign components used in existing aircrafts is increasing. These localized components must undergo an airworthiness review prior to installation, during which applicable certification criteria are identified and potential impacts on compliance are evaluated. The scope of the conformity verification must be adapted based on the specific characteristics and intended function of each component. However, research on the development of tailored certification criteria and verification methods for localized parts remains limited. This study investigates the airworthiness certification criteria related to system safety and analyzes the associated review procedures. The findings aim to enhance the efficiency of airworthiness reviews in future part localization programs.

keywords : military aircraft, parts localization program, airworthiness review, system safety

[†] Corresponding Author : Sang Soo Park

Tel : +82-55-751-5344, Fax : +82-55-751-5266, email : kiki6092@dtaq.re.kr

Defence Agency for Technology and Quality, 52851, 420, Dongjinro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Korea

Received April 1st. 2025 Revised May 16th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

감항인증은 항공기 개발 및 개조 시 전 수명주기 동안 비행안전성이 있다는 것을 정부가 인증하는 제도이다. 감항인증 제도는 국제민간항공의 안전한 운송체계 질서 확립을 목적으로 국제민간항공기구(ICAO, International Civil Aviation Organization)가 창설되면서 민간을 중심으로 본격적으로 시행되었다. 우리나라는 1952년 ICAO에 가입하고, 1963년 항공안전법을 제정하면서 감항인증이 의무화되었다.

반면에 군의 경우 작전 및 전술 운용을 위한 성능을 주로 고려했기 때문에 감항인증을 수행하지 않았으나, 비행안전성 확보의 중요성을 깨닫고 2000년대 초반 미국, 유럽을 시작으로 감항인증 제도를 도입하기 시작하였다. 우리나라의 경우 2009년, KT-1 훈련기의 튀르키예 수출을 계기로 「군용항공기 비행안전성 인증에 관한 법률」(이하 법)이 제정되면서 본격적으로 감항인증 제도가 시행되었다[1-2].

2009년 제도 시행 이후 소형무장헬기, FA-50을 포함한 100여 개 이상의 군용항공기 사업이 추진되어 감항인증이 완료되었으며[3], 국내 항공산업이 발전함에 따라 해외에 의존하던 부품의 국산화를 위한 지원이 확대되고 있다[4-5]. 국산화된 부품의 항공기 적용을 위해서는 장착에 따른 비행안전 영향성을 반드시 검토하여야 하며, 민간은 부품에 대한 별도의 인증제도를 운영하고 있으나[6], 군의 경우 감항인증 대상에 부품을 포함하지 않기 때문에 ‘감항영향성 검토’라는 업무를 별도로 수행하게 된다.

‘감항영향성 검토’는 장착 대상 항공기에 적용된 감항인증기준 중 해당 부품에 적용할 감항인증기준을 식별하여 영향성이 있는지 확인하는 과정으로 부품의 특성에 따라 적용되는 감항인증기준 및 적합성 검증 수준을 조정하여야 한다. 그렇지 않을 경우 해당 부품에 적합하지 않은 감항인증기준이 적용될 수 있으며, 일정 및 비용 측면에서 비효율을 야기할 수 있다.

현재 법에 명시되어 있는 기술 분야는 시스템엔지

니어링/시스템안전, 추진체/세부계통, 전기/전자기 환경 등 8개로 대부분의 기술 분야는 국산화 품목에 따라 기준 조정이 용이하다. 그러나, 시스템안전 분야는 전체 수명주기에서 항공기 체계의 목표 안전수준을 만족할 수 있도록 검증하는 분야로 국산화 품목의 특성에 따른 적용 감항인증기준 식별 및 조정에 이해관계자 간 이견이 다수 발생하였다. 이에 따라 시스템안전 감항영향성 검토를 위한 기준 식별 및 입증지침 수립 필요성이 제기되었다.

시스템안전 분야 입증지침 수립 관련 선행연구로 수리온 헬기의 체계결빙 능력 인증을 위한 시스템안전 관점에서의 검토 결과를 포함하여 고찰을 수행한 사례가 있으나[7], 항공기 운용환경에 대한 고찰 결과가 주 내용이며, 부품 단위에서 입증지침 수립과 관련된 연구는 전무한 실정이다. FA-50 조종간에 대한 부품국산화 감항영향성 검토 절차의 적용 사례를 분석한 연구가 존재하나, 사업 관점에서의 절차 적용 사례에 대한 고찰이라는 점에서 한계가 있다[8].

이러한 사항에 착안하여 본 논문에서는 부품 관점에서의 시스템안전 감항영향성 검토 절차 수립을 위한 연구 수행 결과를 기술하였다. Figure 1은 본 연구의 프로세스를 요약한 결과로 첫째, 부품국산화 감항영향성 검토 절차에 대해 파악하고 둘째, 시스템안전 관련 감항인증기준에 대한 분석을 수행한 후 셋째, 부품국산화 감항영향성 검토 사례 분석을 통해 최종적으로 감항영향성 검토 절차(안)를 도출하였다.

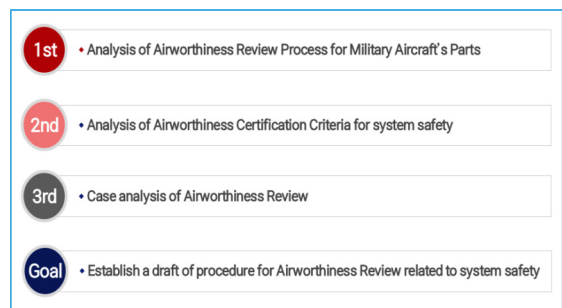


Figure 1. Research process

2. 부품국산화 감항영향성 검토

2.1. 무기체계 부품국산화 사업

무기체계 부품국산화 사업은 무기체계 및 전력지원 체계 획득과 관련된 수입 장비, 부품 등을 연구개발 등의 방법을 통해 성능·기능을 개선하거나 새롭게 개발하기 위해 지원하는 사업이다[9]. 부품국산화의 종류는 체계부품국산화, 양산부품국산화, 핵심부품국산화, 수출연계부품국산화, 구매조건부 국산화, 산업부 협력 부품국산화, 부품 성능개발 등 8개 사업으로 구분되며, 무기체계 획득 단계로 구분된다[10].

2.2. 부품국산화 감항영향성 검토

부품국산화 감항영향성 검토는 법 제15조와 법 시행령 제15조에 따라 국산화 사업 주관기관인 국방기술품질원(이하 기품원)이 주도적으로 수행한다. 본래 법 제15조 및 법 시행령 제15조는 감항인증 권한의 일부를 각 군 또는 전문기관에 위탁할 수 있다는 내용의 조항이나, 현재 군 감항인증 제도는 부품단위의 감항인증을 고려하고 있지 않으므로 감항영향성 검토라는 이름으로 관련 업무를 수행하고 있다. 감항인증과 절차는 유사하나 인증서를 발행하지 않는다는 점에서 차이가 있다. 세부 업무 수행 내용은 기품원 내부규정인 ‘군용항공기 비행안전성 인증 업무규정’에 명시되어 있으며, 신청 단계, 계획 확정 단계, 영향성 검토 단계(감항인증기준 충족 여부 확인 단계), 결과 통보 순으로 진행된다. 각 절차별 수행 업무는 Table 1과 같다.

2024년 기준으로 총 27개 부품국산화 과제의 감항영향성 검토를 완료하였으며, 현재까지 감항영향성 검토가 완료된 품목에 의한 비행안전 관련 문제는 보고되지 않고 있다. Table 2는 현재까지 진행 혹은 완료된 부품국산화 사업을 정리한 결과이며, Table 3은 주요 부품국산화 과제의 감항영향성 검토 결과를 요약한 결과이다. 시스템안전 분야는 체계안

Table 1. Procedure of Airworthiness Review

Category	Contents
Application	<ul style="list-style-type: none"> Composition of airworthiness team Participate in engineering review such as CDR(Critical Design Review)
Determination of plan	<ul style="list-style-type: none"> Review of airworthiness certification criteria for tailoring Determination of airworthiness plan including TACC(Tailored Airworthiness Certification Criteria)
Compliance of criteria	<ul style="list-style-type: none"> Airworthiness assessment for first flight Organize safety review board Airworthiness assessment of the proposed compliance report
Notification of results	<ul style="list-style-type: none"> Risk coordination and decisions related to non-compliance criteria Notification of results to project management team

Table 2. Parts Localization Program for Military Aircraft

Aircraft type	Number of program	Example
LAH	15	Check valve
KUH-1	12	DC power converter
T-50	2	Throttle quadrant
ETC. (ex. RF-16)	9	Monitor

Table 3. Result of Major Project Airworthiness Review

Project name	Aircraft type	Technology field for airworthiness review
TRU(Transformer Rectifier Unit)	KUH-1	<ul style="list-style-type: none"> System safety System engineering Electrical system / E3 * E3 : Electromagnetic Environment Effect
After seat HUD monitor * HUD : Head-up Display	RF-16	<ul style="list-style-type: none"> System safety Structure Avionics / E3
Check valve for ECS * ECS : Environmental Control System	LAH	<ul style="list-style-type: none"> System safety System engineering Crew system
DC engine starter-generator	LAH	<ul style="list-style-type: none"> System engineering Subsystem / propulsion system Electrical system / E3
Interior/exterior light system	LAH	<ul style="list-style-type: none"> System engineering Crew system Electrical system / E3

전 요구도를 만족할 수 있도록 제반사항을 확인하는 기술 분야로 대부분의 부품국산화 과제가 적용 대상으로 식별되고 있다.

3. 시스템안전 감항인증기준

감항인증기준은 표준감항인증기준(SACC, Standard Airworthiness Certification Criteria)과 기타 감항인증기준으로 구분된다. SACC는 법 제3조에 따라 군용항공기 비행안전성 확보를 위해 방위사업청(DAPA, Defense Acquisition Program Administration)이 고시하는 기준을 의미하며, 기타감항인증기준은 국제적으로 통용되는 감항인증기준으로 사업적으로 SACC 적용보다 효율적일 경우에 활용되는 기준을 의미한다.

과거 군용항공기 연구개발에 활용된 감항인증기준은 Table 4와 같이 SACC Part 1, SACC Part 2, FAR Part 29가 있다. SACC Part 1은 미 공군의 감항인증기준인 MIL-HDBK-516C를 기반으로 제정되었으며, 모든 항공기 형식에 적용이 가능하나 고정익 유인 전투기 특성을 기초로 기준이 작성되어 있다. 이에 따라 국내에서는 FA-50, T-50 수출기 등 고정익 전투기의 감항인증에 주로 활용되었다. SACC Part 2는 북대서양조약기구(NATO, North Atlantic Treaty Organization)의 STANAG-4671을 기반으로 고시되었으며, 데이터링크, 지상체 등 무인기시스템에 특화된 기준이 포함되어 있는 것이 특징이다. 국내에서는 사단정찰용무인기 등에 적용되었다. 미 연방항공청(FAA, Federal Aviation Administration)의 FAR(Federal Aviation Regulations) part 29는 회전익항공기에 특화된 민간 감항인증기준으로 기타감항인증기준으로서 육군의 수리온 헬기(KUH-1)와 소형무장헬기(LAH)에 적용되었다. 그 이유는 수리온 및 소형무장헬기 개발 사업이 민수용 헬기 개발사업과 연계하여 진행되어 표준감항인증기준을 적용하는 것보다 유리한 경우로 판단되었기 때문이다. 시스템안전 관련 기준은 SACC

Part 1의 경우 14장에 수록되어 있으며, SACC Part 2 및 FAR part 29의 경우 특정 장절에 관련된 내용이 포함되어 있다.

Table 4. Airworthiness Certification Criteria Using Development of Military Aircraft

Document	MTOW	Type	Agency
SACC Part 1	ALL	ALL	DAPA (South Korea)
SACC Part 2	150 kg < MTOW < 20,000 kg	Fixed wing UAS	
FAR Part 29	MTOW > 7,000 lb	Rotorcraft	FAA (United States)

* MTOW : Maximum Take-Off Weight

3.1. 표준감항인증기준 Part 1

표준감항인증기준 Part 1에서 시스템안전 분야는 14장에서 다루게 된다[11]. Table 5는 14장의 구성을 보여주며, 시스템안전 계획, 시스템안전 설계 요구도, 소프트웨어 안전계획 파트로 구분된다. 시스템안전 계획 파트는 시스템안전 계획이 적절하게 구성되어 있는지 검증하도록 요구하고 있으며, 시스템안

Table 5. Airworthiness Certification Criteria for System Safety in SACC Part 1

Category	Contents
14.1 System safety program	<ul style="list-style-type: none"> System safety process
14.2 Safety design requirements	<ul style="list-style-type: none"> Hazard identification/control/resolution process Mitigation of mishap risks Subsystem protection Single point failure assessment Environmental conditions
14.3 Software safety program	<ul style="list-style-type: none"> Approach to software safety Software safety analyses and assessment Identification of safety designated /significant software

전 설계요구도 파트에서는 위험요소 식별 및 평가 절차의 적절성, 분석 결과의 안전 요구도 만족 여부 등을 검증한다. 소프트웨어 안전계획 파트에서는 시스템 안전계획 내에 소프트웨어 안전계획이 포함되고 소프트웨어 안전 분석 및 평가 결과가 허용 가능한 범위임을 입증할 것을 요구한다.

3.2. FAR Part 29

FAR Part 29 내 시스템안전 관련 요구사항은 1309 장절에 아래와 같이 명시되어 있다[12].

- 고장 조건이 극히 드물어야 하고 항공기에 위험을 끼치지 않을 것
- 요구되는 고장확률을 만족한다는 점을 분석 혹은 시험을 통해 반드시 검증할 것

FAR Part 29는 Part 1과는 다르게 기준이 상세하게 구분되어 있지 않은데, FAR Part 29는 민간 감항인증기준으로 1309 장절에 대한 세부 입증내용 및 방법 등을 별도 지침에 기술하고 있어 관련 설계 요구사항만 감항인증기준에 명시하고 있다[13].

표준감항인증기준 Part 2는 북대서양조약기구의 감항인증기준인 STANAG-4671을 기반으로 고시되었으며, STANAG-4671은 유럽 민간 감항인증기준인 CS-23을 기반으로 고시되었다. 이에 따라 시스템안전 관련 장절은 FAR Part 29와 유사하다. 주요 참고문서로는 민간 항공 안전평가 지침서인 SAE 4761과 미군 시스템안전 표준서인 MIL-STD-882 등을 언급하고 있다[14].

4. 부품국산화 시스템안전 감항영향성 검토 사례 분석

감항영향성 검토에서 가장 중요한 단계는 적용 운용항공기의 기종별 감항인증기준(TACC, Tailored Airworthiness Certification Criteria)에서 해당 부품과 연관된 감항인증기준을 식별하는 것이다. 이에 따라 시스템안전 분야 적용 대상 부품 식별을 위

한 감항영향성 검토 사례 분석을 수행하였다.

4.1. KUH-1 직류전원변환기

KUH-1 직류전원변환기는 주 발전기, APU (Auxiliary Power Unit) 발전기 및 교류 GPU (Ground Power Unit)로부터 공급되는 교류 전원을 직류 전원으로 변환하는 장치이다. 8감항영향성 검토를 위한 기준은 FAR Part 29 기반으로 작성된 수리온의 TACC 778 항목 중 13개 항목을 식별하였으며, 기술 분야는 시스템엔지니어링/시스템안전, 전기/전자기환경이 포함되었다. Figure 2는 KUH-1의 시스템안전 평가 결과로 총 1,045개의 위험요소에 대한 분석을 완료했으며, 직류전원변환기와 관련된 위험요소가 존재하여 항공기 체계에서 부품으로 할당된 안전 관련 요구도를 할당된 점과 낙되, 화재 등으로 인한 위험요소가 존재함을 고려하여 시스템 안전 관련 감항인증기준을 식별한 것으로 판단된다.

Severity Probability	Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
	149EA	129EA	421EA	346EA
Frequent	0	0	0	0
Probable	0	0	0	346
Occasional	0	0	421	0
Remote	0	51	0	0
Improbable	149	78	0	0

Risk level	Risk Assessment Criteria	
Unacceptable	Unacceptable	0EA
Undesirable	Undesirable	0EA
Acceptable	Acceptable	1045EA

Figure 2. Result of KUH-1 risk assessment

Table 6은 직류전원변환기의 정량적 안전 목표를 보여주며, Table 7은 특정 위험에 따른 안전 목표를 보여준다. 정량적 안전 목표는 AC 29.1309의 심각도 및 발생빈도 분류 및 정의를 바탕으로 고장조건에 따른 심각도를 고려하여 안전 목표(목표 발생확률)를 설정하였다. 특정 위험에 따른 안전 목표는 특정 위험으로 화재, 낙되, 고전자기파 영향을 선정하여 이에 따른 개발 요구도 충족을 안전 목표로 설정

하였다. 기준 충족 여부의 검증을 위해 기능적 위험 요소 분석, 고장유형/영향성요약 결과, 공통요인 분석 결과 등을 검토하였고, 최종적으로 안전 목표를 달성함을 확인하였다. 또한, 지상 및 비행시험 간 기능점검(고장모드 포함)을 통해 장비가 정상 작동함을 확인하였으며, 운용과 정비 안전성 측면의 잠재적인 위험요소가 없음을 확인하였다.

Table 6. Function Safety Goal of KUH-1 Transformer Rectifier Unit

Function	Failure condition	Severity	Goal
Power conversion	Loss of power conversion function	major	$\leq 10^{-5}$
	Deterioration of power conversion function	major	$\leq 10^{-5}$
Temperature monitoring	Loss of high temperature monitoring function	major	$\leq 10^{-5}$
	Deterioration of high temperature monitoring function	major	$\leq 10^{-5}$
Cooling	Loss of cooling function	Hazardous	$\leq 10^{-7}$
	Deterioration of cooling function	major	$\leq 10^{-5}$

Table 7. Particular Safety Goal of KUH-1 Transformer Rectifier Unit

Risk category	Failure condition	Goals
Fire	Cause of ignition containing explosive gas mixtures	Qualification of explosive requirement (MIL-STD-810G)
Lightning	Loss of function caused by lightning effect	Qualification of lightning requirement (DO-160G, Level 3)
High electro magnetic	Loss of battery charge function caused by high electromagnetic	Qualification of electromagnetic compatibility (KDS 1520-4001)

4.2. LAH 환경제어계통 체크밸브

LAH 체크밸브는 두 개의 엔진으로부터 공급되는 고온의 블리드에어를 난방 장치로 공급하는 부품으로 감항영향성 검토를 위한 기준은 FAR Part 29 기반으로 작성된 LAH의 TACC 1,180 항목 중 7개 항목을 식별하였으며, 기술 분야는 시스템엔지니어링/시스템안전, 승무원시스템이 포함되었다.

Figure 3은 LAH의 시스템안전 평가 결과를 보여주며, 체크밸브 관련 위험요소는 식별되지 않은 것으로 확인되었으나 체크밸브로 고온의 유체가 누설될 경우 화재가 발생할 가능성이 있다는 점을 고려하여 감항인증기준을 적용하였다.

Severity \ Probability	Severity	Catastrophic	Critical	Marginal	Negligible
		128 EA	94 EA	351 EA	327 EA
Frequent (P>10E-3)	0	0	0	0	
Probable (P≤10E-3)	0	0	0	256	
Occasional (P≤10E-5)	0	0	275	61	
Remote (P≤10E-7)	0	28	32	6	
Improbable (P≤10E-9)	125	66	44	3	
Eliminated	Eliminated				

Risk level	Risk Assessment Criteria	
Unacceptable	0 EA	
Undesirable (Tactical Function)	0 EA	
Acceptable	900 EA	

Figure 3. Result of LAH risk assessment

Table 8은 체크밸브의 정량적 안전 목표를 보여주며, 직류전원변환기와 동일하게 AC 29.1309의 심각도 및 발생빈도 분류 및 정의를 바탕으로 안전 목표를 설정하였다. 또한, 운용 간 누설이 발생하지 않음을 품질인증시험으로 입증하도록 안전 목표를

Table 8. Function Safety Goal of LAH Check Valve

Function	Failure condition	Severity	Goal
Supply bleed air	Loss of supply bleed air	Negligible	$\leq 10^{-3}$
Block reverse flow	Loss of blocking reverse flow	Negligible	$\leq 10^{-3}$

설정하였다. 체크밸브의 기능적 고장 조건에 따른 심각도는 무시 가능한 수준(Negligible)으로 안전 목표는 10^{-3} 이며, 체크밸브 자체의 '고장 간 평균시간'(MTBF, Mean Time Between Failures) 요구도가 안전 목표보다 높다는 점과 신뢰도 분석 결과에 따른 고장 발생률이 안전 목표를 상회하는 것을 확인하였다. 또한, 품질인증시험 결과, 누설이 미발생함을 확인하였다.

4.3. LAH 난방유량조절밸브/차단밸브

LAH 난방유량조절밸브는 환경제어계통으로 공급되는 엔진 블리드 에어의 유량을 조절하며, 제어장치의 전기적 신호에 의해 제어되는 구성품이다. 차단밸브는 환경제어계통으로 공급되는 엔진 블리드 에어의 공급과 차단을 위한 구성품이다. 감항영향성 검토를 위한 기준은 LAH의 TACC 1,180 항목 중 12개 항목을 식별하였으며, 기술 분야는 시스템엔지니어링/시스템안전, 전기/전자기환경이 포함되었다. 시스템안전 기준 식별을 위해 항공기 단위의 시스템안전 평가 결과 중 영향을 주는 위험요소가 있음을 식별하였고 이에 따른 구성품 안전 목표를 체계에서 할당함을 확인하였다. Table 9는 난방유량조절밸브와 차단밸브의 정량적 안전 목표를 보여준다.

Table 9. Function Safety Goal of LAH ECS Control/Shotoff Valve

Function	Failure condition	Severity	Goal
Bleed air control	Loss of bleed air control	major	$\leq 10^{-5}$
	Deterioration of bleed air control	major	$\leq 10^{-5}$

기준 충족 여부의 검증을 위해 기능적 위험요소 분석, 고장유형/영향성요약 결과, 공통요인 분석 결과 등을 검토한 결과, 안전 목표를 달성함을 확인하였다. 또한, 분석 결과가 LAH 시스템안전 평가 결과에 영향을 미치지 않음을 확인하였으며, 품질인증시험 결과를 바탕으로 해당 구성품이 성능 요구도를 만족하

여 최종적으로 비행안전에 영향 없음을 확인하였다.

4.4. RF-16 전방시현용 모니터

RF-16 전방시현용 모니터는 RF-16 후방조종석의 전면에 장착되는 모니터로 항공기 전방의 상황을 시현을 목적으로 하고 있다. RF-16은 군 감항인증제도 시행 이전에 도입된 항공기로 기종별 감항인증기준이 존재하지 않으며, 체계 시스템안전 평가 결과도 없다. 이에 따라 고정익전투기에 주로 적용되는 '표준감항인증기준 Part 1'에서 해당 부품과 연관된 기준을 식별하였으며, 총 4개 분야(시스템엔지니어링/시스템안전, 구조, 항공전자/컴퓨터자원, 전기/전자기환경) 9개 기준이 식별되었다. 시스템안전 관련 기준은 2항목(14.2.10, 14.3.6)으로 기준에서 요구하는 바는 다음과 같다.

- (14.2.10) 변경 또는 개조된 장비나 소프트웨어에 대한 시스템안전 변경 분석이 수행되고 있음을 검증
- (14.3.6) 적절한 소프트웨어 안전시험분석이 계획되고 수행되어 있는지를 검증

14.2.10은 전방시현용 모니터가 변경되면서 체계 영향성에 대한 검토를 위해 기준을 설정한 것으로 판단되며, 14.3.6은 구성품 소프트웨어가 개발됨에 따라 소프트웨어 산출물의 적절성 및 코드 결함 관련 검토를 위해 기준을 적용한 것으로 보인다. 기준 충족 여부 확인을 위해 시스템안전 분석 결과, 지상/비행시험 결과, 소프트웨어 산출물 및 신뢰성시험 결과를 검토했으며, 해당 품목이 비행필수기능이 없다는 점, 지상/비행 시험 간 작동에 이상이 없었다는 점, 소프트웨어 신뢰도를 확보한 점을 바탕으로 비행 안전 영향성 없음을 확인하였다.

4.5. LAH 항공기용 내외부등 시스템

LAH 항공기용 내외부등 시스템은 조명계통의 일부로 전술임무를 포함한 항공기 주/야간 운행에 적

합한 조명을 제공하기 위한 시스템이다. 국산화 대상 조명은 일반등, 다용도등 등 일반적인 조명이며, LAH 시스템안전 평가 과정에서 체계 위험요소 분석 결과 등을 검토한 결과, 관련 위험요소가 존재하지 않음을 확인하여 시스템안전 관련 감항인증기준은 미적용되었다.

4.6. 분석결과 종합

시스템안전 감항영향성 검토 사례 분석 결과, 시스템안전 감항영향성 검토 대상으로 식별된 부품의 경우 항공기 관점에서 해당 부품과 연관된 위험요소가 존재하며, 이에 따라 안전성 목표 달성 관련 요구도가 부품 개발 요구도에 포함되어 있는 것을 확인하였다. 또한, 입증을 위해 기능적 위험요소 분석, 공통요인 분석 결과 등을 활용한 것을 확인하였다.

LAH 항공기용 내외부등 시스템의 경우 부품 개발 요구도에 안전성 목표 달성 관련 요구도가 포함되어 있으나 항공기 관점에서 위험요소가 식별되지 않아 시스템안전 감항인증기준을 식별하지 않은 것을 확인하였다. 반면에 체크밸브의 경우 부품 개발 요구도에 안전성 관련 요구도가 없으며, 항공기 관점에서의 위험요소도 식별되지 않았으나 감항인증기준으로 식별되어 기능적 위험요소 분석, 공통요인 분석 등을 별도로 수행하는 결과를 낳았다.

RF-16 전방시현용 컴퓨터는 해외 구매 항공기로써 항공기 관점에서의 위험요소 분석 결과를 확인할 수는 없었으나, 소프트웨어 측면에서 신뢰도 검증을 위해 기준을 식별하였다. 이에 기능적 위험요소 분석 등 별도의 안전성 분석을 수행하지는 않고 신뢰도 분석 및 기능점검 시험 결과를 바탕으로 입증한 것을 확인하였다.

5. 시스템안전 감항영향성 검토 절차(안)

4장에서 분석한 결과를 바탕으로 Figure 4와 같이 시스템안전 감항영향성 검토 절차(안)을 수립하였

다. 시스템안전 감항영향성 검토 절차는 크게 개발요구도 검토, 위험요소 분석 결과 검토, 체계안전 영향성 검토로 구분할 수 있다.

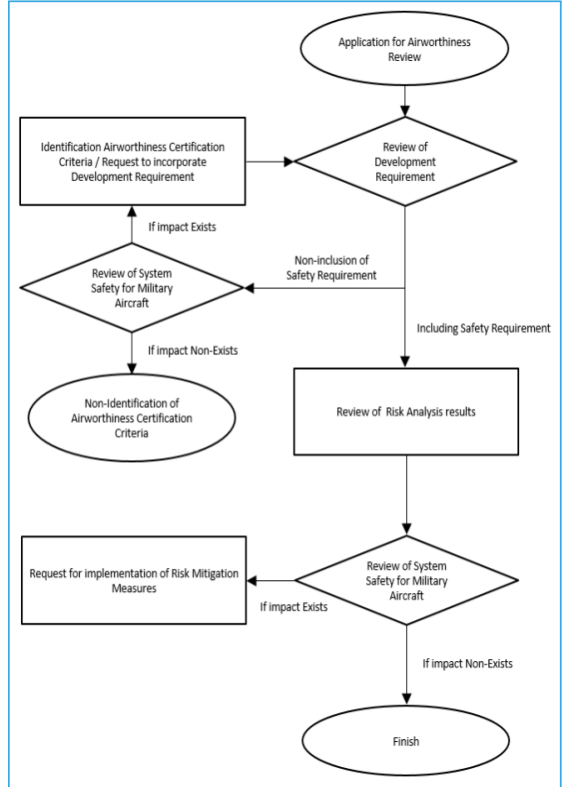


Figure 4. Procedure of system safety airworthiness review (Draft)

5.1. 개발요구도 검토

감항영향성 검토 사례 분석 결과, 부품의 개발요구도에 안전요구도가 포함되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 체계업체에서 해당 부품이 체계안전에 영향을 미칠 가능성이 있다고 판단한 결과로 볼 수 있다. 현재 군 감항인증 제도는 인증 대상이 항공기 체계 단위이기 때문에 체계 단위에서의 시스템안전 평가가 주로 수행된다. 반면에 민간은 AC 29.1309에 따라 부품단위부터 안전 요구도를 부여하게 된다. 이에 따라 부품국산화 품목에 안전 요구도가 필요할 경우 AC 29.1309에 정의된 심각도 및 발생빈

도를 바탕으로 요구도를 수립하는 것을 확인할 수 있었다.

감항영향성 검토 시 AC 29.1309의 정의에 따라 개발 요구도가 적절히 수립되었는지 검토하는 것이 중요할 것으로 판단한다.

5.2. 위험요소 분석 결과 검토

개발요구도에 안전 목표가 포함되어 있을 경우 목표 달성 여부를 확인하여야 한다. 이를 위해 기능적 위험요소 분석 결과, 고장유형/영향성요약 결과, 공통요인 분석 결과 등을 검토하여 안전 목표 달성 여부를 판단하여야 한다. 추가로 소프트웨어 관련 국산화 이취질 경우 소프트웨어 개발 프로세스에 의해 도출되는 산출물 및 신뢰성 시험 결과를 확인하여야 한다. 이 외에 필요할 경우 구성품 품질인증시험, 체계 연동시험(지상 또는 비행시험) 결과를 통한 정상 작동 여부를 확인하여야 한다.

5.3. 체계안전 영향성 검토

구성품 단위에서 안전 목표를 달성하였다면, 최종적으로 체계 시스템안전 평가 결과에 영향을 주는지 여부를 확인하여야 한다. 이를 위해 체계 위험요소 중 해당 부품과 연관된 사항이 있는지 식별하는 것이 중요하며, 해당 부품과 연관된 위험요소가 식별될 경우 기 승인된 위험도 평가 결과에 영향을 주는지 검토하여야 한다. 영향성이 없을 경우 최종 감항영향성 없음으로 판단하여도 무방할 것으로 보이나, 영향이 있음을 확인할 경우 부품의 신뢰도를 높이거나 체계 관점에서 추가적인 위험도 감소 대책을 적용해야 할 필요가 있다.

구성품 단위에서 안전 목표가 없더라도 체계안전 영향성 검토 단계를 통해 체계 시스템안전 평가 및 위험요소 결과를 검토하고, 해당 부품과 연관된 위험요소가 식별될 경우 개발요구도에 안전 목표를 반영해 줄 것을 요구하여야 한다.

5.4. 시범 적용 결과

5.4.1. LAH용 브레이크 유닛

LAH용 브레이크 유닛은 항공기 유압 시스템 및 축압기에서 생성된 일정한 제동압력을 조종석 페달 조작에 의한 명령에 따라 휠 브레이크 조립체로 제공하는 구성품이며, 시스템안전 감항영향성 검토 절차를 적용한 결과는 다음과 같다.

1단계로 시스템안전 분야 감항영향성 검토 대상 식별을 위해 해당 부품의 개발요구도를 검토하였다. 브레이크 유닛의 개발요구도를 검토한 결과, 구성품 단위의 안전성 목표가 설정됨을 확인하였으며, 요구도 추적 결과 브레이크 유닛과 관련한 항공기 위험요소가 존재함을 확인하였다. 이에 따라 본 부품국산화 품목의 감항영향성 검토를 위해 시스템안전 분야를 검토 대상으로 식별하였다. Table 10은 브레이크 유닛의 안전 목표를 보여주며, Table 11은 LAH 항공기 위험요소 중 브레이크 유닛과 관련된 위험요소를 보여준다.

Table 10. Function Safety Goal of LAH Brake Unit

Failure condition	Severity	Goal
Loss of hydraulic pressure supply for single-side differential brake (Left or right)	Marginal (Major)	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$
Loss of hydraulic pressure supply for both-side differential brake (Left or right)	Marginal (Major)	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$
Unintended application of hydraulic pressure supply for single-side differential brake (Left or right)	Marginal (Major)	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$
Unintended application of hydraulic pressure supply for both-side differential brake (Left or right)	Marginal (Major)	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$
Loss of Parking brake hydraulic pressure supply function	Negligible (Minor)	$\leq 1.0 \times 10^{-3}$
Unintended application of hydraulic pressure supply for parking brake	Marginal (Major)	$\leq 1.0 \times 10^{-5}$

Table 11. Analysis for Brake Unit in LAH Subsystem Hazard Analysis

Description	Probability
Loss of brake unit (Pressure-reducers & check valve)	$\leq 0.0 \times 10^{-0}$

현재 본 부품국산화 사업은 진행 중인 사업으로 시스템안전 감항영향성 유무 판단을 위한 적합성 검증을 수행하는 과정인 2단계와 3단계는 추후 진행될 예정이다. 적합성 검증을 위해 기능적 위험요소 분석 결과, 고장유형/영향성요약 결과, 공통요인 분석 결과 등을 검토할 예정이며, 안전 목표 달성 여부와 항공기 연동 시험 결과를 바탕으로 감항영향성 유무를 최종 판단할 예정이다.

5.4.2. P-3C용 데이터관리체계 핵심장비 2종

P-3C용 데이터관리체계 핵심장비 2종은 데이터 관리 목적의 임무 수행 및 분석을 지원하는 구성품이며, 시스템안전 감항영향성 검토 절차를 적용한 결과는 다음과 같다.

1단계로 시스템안전 감항영향성 검토 대상 여부를 판단한 결과, 부품 개발 요구도에 구성품 장착에 따른 별도의 안전성 관련 요구도가 포함되어 있지 않음을 확인하였다.

부품 단위에서의 안전성 관련 요구도가 존재하지 않는 경우 항공기 단위에서 해당 부품과 연관된 위험요소가 존재하는지 검토하여야 한다. P-3C는 해외 구매 항공기로서 기능적 위험요소 분석 결과 확보가 제한된다. 하지만 본 부품국산화 품목은 임무장비 제어 및 임무 중 획득한 영상 데이터의 분배 기능을 담당하는 장비로서, 비행필수 장비가 아니라는 점과 국내 개발 군용항공기의 위험요소 검토 결과, 본 부품국산화 품목과 연계된 위험요소가 없다는 점을 근거로 시스템안전 감항영향성 검토 대상으로 미식별하였다.

6. 결론

국내 항공산업이 발전함에 따라 KF-X, 상륙공격헬기 등 다양한 항공기의 체계개발 사업이 진행되고 있다. 뿐만 아니라 항공산업이 발전하면서 해외에 의존하던 부품의 국산화를 위한 지원이 확대되고 있으며, 군용항공기에 적용되는 부품의 국산화 사업이 증가함에 따라 체계 장착을 위한 감항영향성 검토 소요가 증가하고 있다. 감항영향성 검토는 대상 항공기의 기종별 감항인증기준 중 해당 부품과 연관된 감항인증기준을 식별하여 비행안전 영향성이 있는지 검토하는 과정으로 해당 부품에 연관되지 않는 감항인증기준을 식별할 시 비용/일정의 비효율을 야기할 가능성이 있기 때문에 부품의 성격을 고려하여 감항영향성 검토가 이뤄져야 한다. 또한, 부품의 성격에 따라 일관된 감항영향성 검토가 이뤄질 수 있도록 기술 분야별 감항영향성 검토를 위한 기준 수립 절차 확립이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 여러 기술 분야 중 이해관계자 간 이견이 다수 발생한 시스템안전 분야의 감항영향성 검토 수립을 위해 감항인증기준 및 감항영향성 검토 사례를 분석하였고 다음과 같은 공통사항을 발견할 수 있었다.

첫째, 감항영향성 검토 대상 품목이 적용 대상 항공기의 시스템안전 평가 결과에 영향을 주는 것을 확인하였다. 둘째, 부품단위의 안전 목표가 있음을 확인하였다. 하지만 공통사항이 적용되지 않는 품목도 사례 분석 결과를 통해 파악했으며, 분석 결과를 종합하여 시스템안전 감항영향성 검토 절차(안)를 도출하였다. 또한, 시범적용을 통해 시스템안전 검토 대상 식별이 가능함을 확인하여 절차의 유용성을 확인하였다.

본 연구 결과는 감항영향성 검토를 위한 시스템안전 분야 적용 여부 결정 간 발생한 이해관계자 간 이견을 해결할 뿐만 아니라, 군용항공기에 적용되는 부품국산화 품목 개발 시 감항인증기준 식별을 위한 가이드로 활용될 예정이다.

본 연구의 프로세스를 바탕으로 타 기술 분야의 감항영향성 검토 절차 수립을 위한 연구가 지속적으로 수행될 예정이며, 지속적인 사례 고찰을 통해 절차를 고도화시킬 예정이다. 이를 통해 최종적으로 검토 대상 부품의 성공적인 국산화뿐만 아니라 부품이 적용된 군용항공기의 비행안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 1 MILITARY AIRCRAFT AIRWORTHINESS CERTIFICATION ACT, DAPA(Defense Acquisition Program Administration), 2024.
- 2 군용항공기 비행안전성 인증에 관한 업무규정, 방위사업청, 2020.
- 3 Park, S. & Jeong, A., "A Study on improving Flight Safety of Military Aircraft based on Military Airworthiness Certification System and Case Study", *Journal of Defence Quality Society*, 3(2), pp. 57-63, 2021.
- 4 Ryu, S., "A Study of the selection criteria for Localization of Military Weapon", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(4), pp. 338-344, 2021.
- 5 Jeong, J. H., Lee, S. H., & Choi, Y. H., "Research on Development Direction to Expand the Localization of Materials in the Defense", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 24(2), pp. 103-109, 2023.
- 6 Lee, K. Y., Yi, B. J., Chung, H. G., & Ryoo, C. K., "A Study on Certification Procedures for Aircraft Parts Manufacturer Approval", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 42(12), pp. 1073-1079, 2014.
- 7 Kim, Y., Kim, M., & Park, S., "A Discussion on Airworthiness Certification Criteria and Case of Ice Protection for Military Rotorcraft", *Journal of Defence Quality Society*, 4(2), pp. 9-17, 2022.
- 8 Ahn, K. P., "Localization Development of Control Grips for FA-50 and System Development of Airworthiness Review", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(9), pp. 92-98, 2021.
- 9 무기체계 부품국산화개발 관리규정, 방위사업청, 2025.
- 10 Kim, S. K., Choi, C. S., Choi, Y. H., & Kim, J. H., "A Study on Trend of Technology Development for Part Localization of Weapon System through Patent Information", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(6), pp. 524-533, 2021.
- 11 군용항공기 표준감항인증기준 (Part 1), 방위사업청, 2024.
- 12 PART 29—AIRWORTHINESS STANDARDS: TRANSPORT CATEGORY ROTORCRAFT, Federal Aviation Administration, 2023.
- 13 AC 29-2C - Certification of Transport Category Rotorcraft, Federal Aviation Administration, 2023.
- 14 군용항공기 표준감항인증기준 (Part 2), 방위사업청, 2024.

상관관계 분석을 이용한 부틸 고무의 자연노화에 따른 특성 연구

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

A Study on the Characteristics of Butyl Rubber with Natural Aging using Correlation Analysis

문원경, Wonkyung Moon

국방기술품질원, 국방신뢰성연구센터, 연구원
Researcher, Defense Reliability Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

배만재[†], Manjae Bae

국방기술품질원, 국방신뢰성연구센터, 책임연구원
Principal Researcher, Defense Reliability Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

Butyl rubber, also known as IIR(Isobutylene-Isoprene Rubber), is a copolymer comprising approximately 98% isobutylene and 2% isoprene. It has excellent basic physical properties, such as gas permeability, chemical resistance, ozone resistance, and weather resistance, and has high tensile strength owing to the skeleton structure of carbon bonds. In addition, it has a unique property in that when aged, the chains are cut, softened for a short period of time, and cured after a specific time. Because of these properties and excellent durability, the most commercialized reliability test and life prediction method for rubber involves measuring changes in hardness, tensile strength, and elongation after accelerated aging to high temperatures.

In this study, samples were produced after the natural aging of military chemical protective gloves produced from 1988 to 2017, and the trend of changes in the physical properties of butyl rubber over time was observed using the test method specified in domestic standards. The trend of changes in the physical properties was confirmed using correlation analysis, and tensile stress and elongation were selected as the test evaluation parameters for life prediction.

keywords : butyl rubber, isobutylene-isoprene rubber, natural aging, correlation analysis, crosslinking density

[†] Corresponding Author : Manjae Bae

Tel : +82-42-251-5540, email : mjbae@dtaq.re.kr

Defense Reliability Research Center, 70, Saneopdanji-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 14th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

과학기술의 발전으로 화학·생물학 분야에서 신물질이 발견되거나 개발되고 있다. 이러한 신물질들로 인한 의료 분야의 발전이 있지만, 부정적인 면으로는 전쟁 또는 테러 등에 사용되는 무기의 개발이 있다. 이런 상황을 대비하여 군인에게 지급되는 개인 보호 장비는 보호의, 장갑, 덧신, 방독면이다. 개인 보호 장비 중 화생방 방호 장갑과 덧신은 미군에서는 부틸 고무로 제조하고 저장수명을 20년으로 설정하여 운영하고 있다. 한국군도 동일한 재질의 제품을 사용하고 있다[1].

부틸 고무는 약 98%의 Isobutylene과 약 2%의 Isoprene의 공중합체인 합성 고무이며, 기본 물성인 기체 투과도, 내산화성, 내오존성, 내후성과 같은 특성이 우수하며, 탄소 결합의 골격 구조로 인장강도는 높고, 노화 시에는 사슬의 절단이 일어나 단기간에는 부드러워지고 특정 시간 이후에 경화되는 고유한 성질을 가지고 있다. 이런 특성과 우수한 내구성으로 고무류의 가장 상용화된 신뢰성 시험 및 수명예측 방법은 고온으로 가속 노화시킨 후, 경도, 인장강도 및 신장률의 변화 등을 측정하는 방법이다[2].

본 연구는 상용화된 수명예측방법(가속노화)과 비교를 위한 기초데이터 확보와 물리시험 항목 중 수명예측을 위한 시험 항목을 선정하는 것이 목적이다. 이를 위하여 자연 노화된 저장연도 35년(1988년도 생산)부터 5년(2017년도 생산)인 부틸 고무로 제작된 군용 화생방 방호 장갑을 시료로 제작하였다. 시험 항목은 고무의 점탄성 특성을 포함하는 3차원 구조, 열적 특성, 물리적 특성, 육안 특성 등을 수행하였으며, 시험 방법은 국내의 표준으로 부틸 고무의 저장 기간에 따른 물성 변화 추세를 관찰하였다. 시험 결과로 확인된 물리적 특성의 변화 추세는 상관관계 분석을 이용하여, 수명예측을 위한 시험평가 항목을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 부틸 고무

부틸 고무는 약 98%의 Isobutylene과 약 2%의 Isoprene의 공중합체인 합성 고무로 구조식은 Figure 1과 같다.

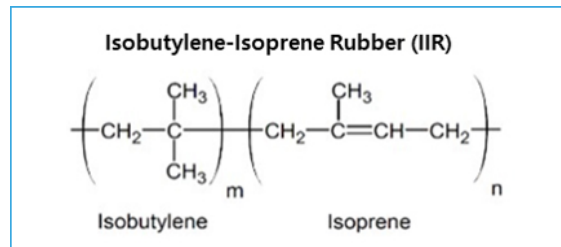


Figure 1. Chemical structure of butyl rubber

Isobutylene에 존재하는 메틸기로 인해 낮은 기체 투과도의 특성을 발현하고 있으며, 낮은 불포화도로 인해 외부요인으로부터 영향을 받을 확률이 낮아 내산화성, 내오존성, 내후성과 같은 특성이 우수하다. 물리적 특성으로는 Backbone structure로 인해 어떤 힘이 가해졌을 때, 재정렬 또는 결정화되어 높은 인장강도 특성을 나타내고 있다. 부틸 고무의 특성 파악을 위한 기초 시험 항목으로는 가교 밀도, 표면분석, 유리전이온도가 있다.

이런 특성으로 부틸 고무는 미군과 한국군에서 방독면의 고무안면부, 화학방호용 장갑과 덧신 등으로 사용되고 있다. 미군의 군사규격인 MIL-HDBK-695E은 부틸 고무에 대한 저장수명을 Table 1과 같이 권장하고 있다[3].

1999년도 개정판은 권장수명이 5 ~ 10년, 2011년도 개정판에는 20년 이상으로 변경되었다.

Table 1. Recommended Shelf Life of Butyl Rubber

Type of rubber	Common or trade name	ASTM D1418 abbreviation
Silicone	Silicone	Q
Fluorosilicone	Silastic LS	FVMQ
Polysulfide	Thiokol	T
Fluorocarbons	Fluorel, Viton	FKM
Polyacrylate	Acrylic	ACM, ANM
Perfluorocarbon	KALREZ	FFKM
Isobutylene/ Isoprene	Butyl	IIR
Ethylene/ Propylene/Diene	Ethylene propylene diene terpolymer	EPDM
Ethylene propylene	Ethylene propylene copolymer	EPM

2.2. 수명예측시험

일반적으로 고무의 노화는 산화반응에 의해 발생한다. 산화반응은 산소 분자가 고무 내부로 침투하여 고무 사슬에 존재하는 이중결합을 공격하면서 자유 라디칼 형성을 통해 시작된다. 자유 라디칼 반응은 높은 온도에서 빠르게 진행되며, 특히 장기간 저장된 고무의 경우 첨가된 산화방지제가 이동하거나 증발하면서 한번 시작된 산화반응을 억제하지 못하고 연쇄반응이 일어나게 된다. 이러한 산화반응은 가교반응과 별개의 화학 과정이긴 하지만 고무와 같은 특정 재료에서는 서로 연관될 수 있다. 즉, 산화반응에 의해 생성된 자유 라디칼은 새로운 사슬의 가교반응 기회를 제공하게 되고 과도한 산화 및 가교반응은 고무 사슬의 규칙적인 배열을 파괴하여 무질서하게 만든다. 이러한 미세구조의 변화는 고무 표면에 균열을 발생시켜 인장강도 및 신장률 등의 특성이 감소하는 결과의 원인이다[4].

부틸 고무로 제작된 장갑의 재료의 특성과 보관 상태를 고려하면 온도에 의한 성능 열화가 가장 큰 부분을 차지한다고 판단할 수 있다. 부틸 고무의 수명추정은 온도에 의한 재료의 열화를 측정하는 방법을 기

준으로 등온시험과 비등온시험으로 구분할 수 있다. 등온시험은 크게 아레니우스 모델과 WLF(Williams Landel Ferry) 모델이 사용된다. 비등온시험은 미분법인 Kissinger 방법, Friedman 방법, Chatterjee-Conrad 방법과 적분법인 Coats-Redfern 방법, Ozawa-Flynn-Wal 방법 등이 있다. 각 방법은 활성화 에너지를 구하는 방법의 차이가 있으며, 잔여 수명의 신뢰성을 높이기 위해서는 적절한 활성화 에너지를 도출하는 것이 가장 중요하다.

2.3. 가교 밀도

가교(Crosslink)란 고분자 사슬을 화학적 또는 물리적 결합으로 연결하여 3차원 망상 구조를 만드는 것으로 가교 과정을 거치면서 고무 소재 특유의 탄성과 복원력을 가지게 된다. 화학적 가교는 분자 사슬 간의 화학 결합에 의한 것이고 물리적 가교는 사슬의 상호작용에 의한 것이다. 망상구조를 이루는 고무는 사슬을 신장시켜도 본래의 상태로 돌아가는 탄성을 갖는다.

가교 밀도(Crosslinking density)란 단위체 안에서 가교 결합된 것의 분율로 정의하며, 가교 밀도는 가교 고무의 물성에 직접적인 영향을 미치므로 가교 밀도를 어느 정도 수준으로 설정할 것인지는 매우 중요한 요소이다. 가교 밀도가 물성에 미치는 영향을 확인하는 연구가 많이 진행되었으며, 가교 밀도에 따른 물성의 대표적인 변화는 Figure 2와 같이 알려져 있다[5].

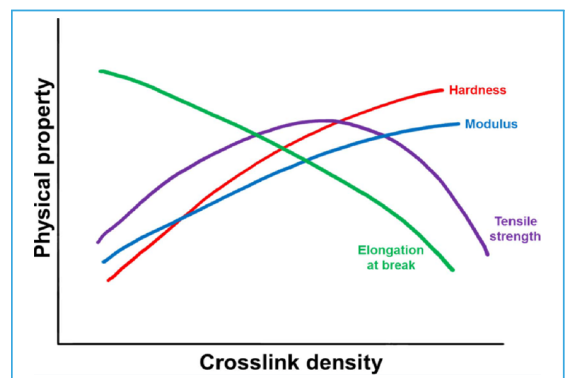


Figure 2. Typical variation of physical properties with crosslink density

가교 밀도가 증가할수록 경도와 모듈러스는 증가하며 신장률은 감소한다. 그러나, 인장강도는 초기에는 증가하다 어느 시점에서 감소하는 경향을 보인다. 인장강도는 사슬의 배향에 따라 결정되는 특성이며, 가교 밀도가 일정 수준 이상 증가하면 가교점이 증가하여 사슬의 배향이 제한되기 때문이다[6].

가교 밀도의 측정은 시험편을 구성하고 있는 고무가 잘 용해되는 용매를 팽윤 용매로 사용하여 팽윤 전과 후의 무게 차이를 측정하여 Flory-Rehner equation을 이용하여 구한다[7].

3. 실험

3.1. 실험 재료

부틸 고무로 제작되는 화학방호용 장갑은 저장 화생방장비·물자 신뢰성평가 대상으로 수명이 도래하는 시점에 신뢰성평가를 통해 시효연장 여부를 결정하고 있다. 실험 재료는 1988년도부터 2017년도까지 생산되어 저장 중인 화학방호용 장갑으로 자연 노화된 제품으로 시험 당시 보유 중인 시료를 사용하였다. 장갑의 저장기간이 5년으로 설정되어, 연구 시점에서 보관하고 있는 제품의 제한으로 모든 저장 연도의 제품을 선정할 수 없었다. 시험 시편은 화학방호용 장갑을 시험항목에 필요한 형상으로 절단하여 제작하였으며, 시료 번호는 화학방호용 장갑 16종을 저장연도로 Table 2와 같이 부여하였다.

Table 2. Test Sample List

No	Storage year (years)	Year of test	Year of manufacture
1	35	2023	1988
2	33	2023	1990
3	32	2022	1990
4	31	2022	1991
5	30	2022	1992
6	29	2023	1994
7	27	2022	1995
8	25	2023	1998
9	23	2022	1999
10	22	2023	2001
11	19	2022	2003
12	15	2022	2007
13	12	2022	2010
14	9	2022	2013
15	8	2023	2015
16	5	2022	2017

3.2. 시험 방법

자연 노화된 부틸 고무의 특성 확인을 위한 시험 항목은 물리적 특성, 가교 밀도, 표면분석, 유리전이온도이며, 시험은 각 시료당 3번 반복하여 평균값을 사용하였다. 시험 항목별 시험 표준은 Table 3과 같다.

3.2.1. 성분 분석

시료의 주 재질을 확인하기 위하여 푸리에 적외선

Table 3. Standards for Test Items

Category	Test item	Standard	Test equipment	Specimen
General property	Composition analysis	KS M ISO 4650	FT-IR	-
Physical property	Tensile strength	KS M 6518	UTM	Dumbbell shaped
	Tensile stress(200%)	KS M 6518	UTM	Dumbbell shaped
	Elongation rate	KS M 6518	UTM	Dumbbell shaped
Chemical property	Crosslinking density	ASTM D6814-2	Scale	1cm x 1cm
Rheology	Surface analysis	KS B 5601	SEM-EDX	-
Thermal property	Tg	KS M ISO 11357-2	DSC	10 mg

분광분석기(FT-IR, Fourier Transform-Infrared Spectroscopy)를 이용하여 성분 분석을 수행하였다. 측정 결과는 관찰된 피크들을 KS M ISO 4650 (고무-확인 방법-적외선 분광분석법)에서 제시하는 특성 피크와 비교하여 판정하였다.

3.2.2. 물리적 특성 측정

부틸 고무의 물리적 특성변화를 확인하기 위해, 인장강도, 인장응력(200%), 신장률을 측정하였다. 시험 시편은 화학방호용 장갑의 손목 부위에서 Figure 3과 같이 아령형 3호의 형상으로 5개씩 채취하였다.



Figure 3. Specimen for physical properties(Tensile strength, tensile stress, elongation rate)

시험장비는 만능재료시험기(Model 5965, Instron 社, USA)를 사용하여, KS M 6518(가황 고무 물리 시험 방법)에 따라 측정하였다.

3.2.3. 가교 밀도 측정

가교 밀도 측정을 위하여 시험 시편은 왼손 장갑의 손바닥 부위에서 1cm x 1cm 크기의 정사각형으로 Figure 4와 같이 3개를 채취하여 ASTM D6814-02(Standard test method for determination of percent devulcanization of

crumb rubber based on crosslink density) 표준을 적용하였다.



Figure 4. Specimen for crosslinking density

가교 밀도의 측정은 시험편을 테트라하이드로퓨란 용액에 3일, n-헥세인 용액에 2일간 침지한 후, 무게를 측정하고 톨루엔 용액에 3일간 침지하여 팽윤시킨 후 무게를 측정한다. 가교 밀도는 팽윤 전과 후의 무게 차이를 측정하여 식 (1)과 같은 Flory-Rehner equation을 이용하여 구한다.

$$V_e = \frac{-[In(1 - V_r) + V + x_1 V_r^2]}{[V_1 (V_r^{1/3} - V_r)/2]} \quad (1)$$

V_e = effective number of chains in a real network per unit volume

x_1 = polymer-solvent interaction parameter

V_1 = molecular volume of solvent

V_r = volume fraction of polymer in a swollen network in equilibrium with pure solvent

3.2.4. 표면분석

표면분석은 저장기간이 짧은 시료 2종과 가교 밀도 시험 결과 중 변화가 큰 대표시료 2종에 대하

여 분석하였다. 시험장비는 주사전자현미경(Model VHX-S770E, KEYENCE 社, USA)을 사용하여, 부틸 고무의 표면 변화를 30 μ m 기준으로 확인하였다. 추가로 장비에 장착된 EDX(Energy Disperse X-ray Spectroscopy)로 O/C 비(Oxygen-to-Carbon ratio)를 비교하였다.

3.2.5. 유리전이온도 측정

부틸 고무의 저장기간에 따른 열적 특성변화를 확인하기 위해 시험시료 8종을 선정하여 장갑의 손바닥 부위에서 시험편을 채취하였다. 시험 방법은 KS M ISO 11357-2(플라스틱-시차주사열량계(DSC, Differential Scanning Calorimetry)-제2부: 유리전이온도의 측정)에 따라 시차주사열량계(Model Q200, TA Instrument 社, USA)를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 성분 분석 확인

푸리에 적외선 분광분석기를 이용하여 측정한 결과는 Figure 5와 같이 2,950, 1,460, 1,370, 1,390, 1,230 및 890 cm^{-1} 에서 특징적인 피크들이 관찰되었다.

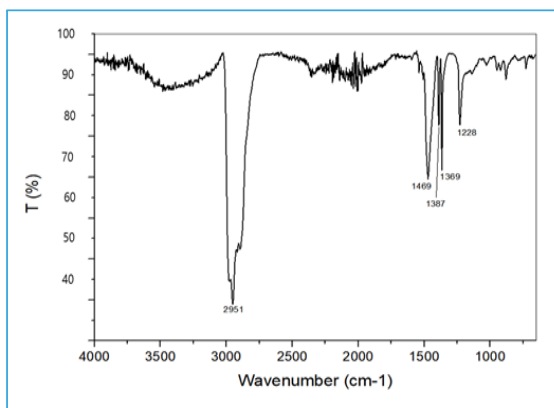


Figure 5. Result from FT-IR

관찰된 피크들은 KS M ISO 4650에서 제시하는 부틸 고무의 특성 피크임을 확인하였다. 화학방호용 장갑의 주 재질은 부틸 고무임을 검증하였다.

4.2. 물리적 특성 확인

부틸 고무의 물리적 특성 중 인장강도 측정 결과는 Figure 6과 같다.

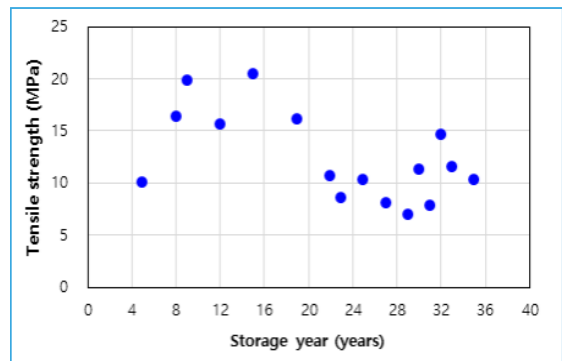


Figure 6. Variation of the tensile strength with the storage year

측정 결과를 보면 인장강도는 저장 초기에는 증가하다가 2005년도에 생산되어 저장된 제품(저장기간 18년)을 기점으로 점차 감소하는 경향을 확인하였다.

인장응력(200%)은 저장 기간이 21년이 지나면서 물성이 변화되는 제품을 Figure 7에서 확인하였다.

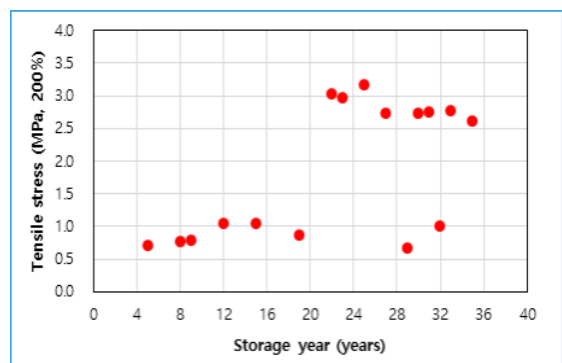


Figure 7. Variation of the tensile stress with the storage year

일반 고무제품의 품질관리 기준인 2.25MPa을 고려하면, 고장 발생으로 판단할 수 있는 항목임을 시험으로 확인하였다.

저장기간에 따른 신장률의 변화는 Figure 8과 같다.

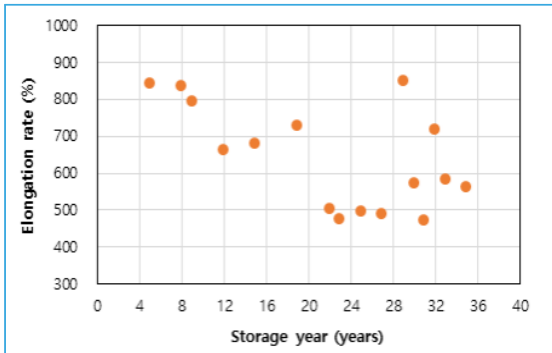


Figure 8. Variation of the elongation with the storage year

저장기간에 따라 신장률은 감소하는 추세이며, 2011년도 생산된 제품(저장기간 22년)부터 낮은 물성의 제품들이 확인되었다.

인장강도, 인장응력(200%), 신장률에 대한 저장기간에 따른 변화를 시험으로 확인한 결과, 물리적 특성 중에 인장응력(200%)이 고무 수명을 예측할 수 있는 시험항목으로 예상되었다.

4.3. 가교 밀도 확인

가교 밀도 측정을 위하여 고무 시편을 용매에 적시면, Figure 9와 같이 팽윤된다.

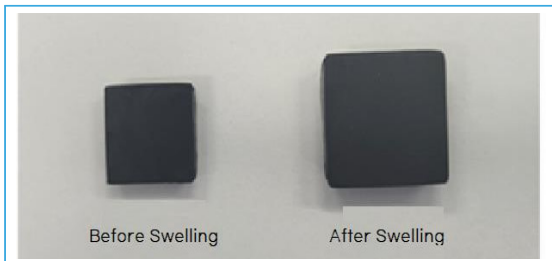


Figure 9. Shape of specimen before and after swelling

팽윤 전과 후의 무게 차이를 측정하고 식 (1)을 이용하여 구한 결과는 Figure 10과 같다.

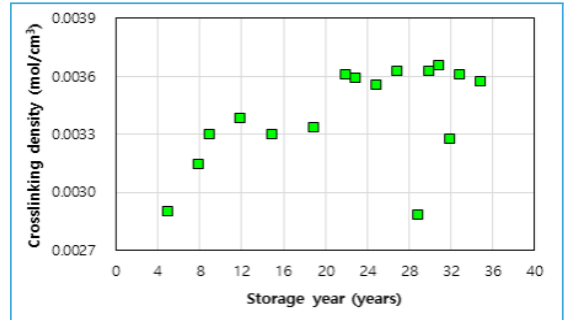


Figure 10. Variation of the crosslinking density with the storage year

장기 저장된 가교 밀도 값은 저장기간 5년 시료의 가교 밀도 값(0.00290 mol/cm³)과 비교했을 때, 저장기간 29년 시료를 제외하고 모두 증가되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 저장기간이 20년 이상 된 시료에서 높은 가교 밀도를 갖는 시험 결과를 확인하였다. 변화율을 계산해 보면 약 20 ~ 25%이다.

4.4. 표면분석 확인

표면분석은 저장기간이 짧은 시료 2종(저장기간 5년, 8년)과 가교 밀도 시험 결과 변화가 큰 대표시료 2종(저장기간 22년, 25년)에 대한 표면 형상 및 EDX 측정 그래프는 Figure 11 ~ 14와 같다.

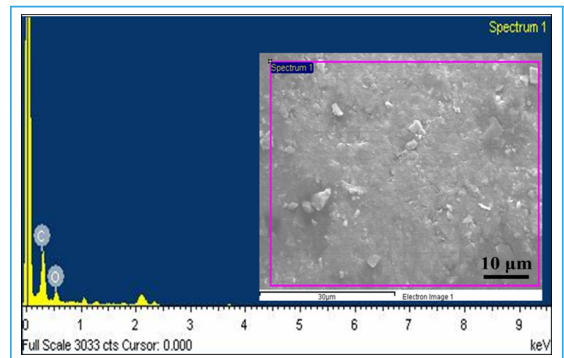


Figure 11. Result of EDX graph and surface measurement (#2017)

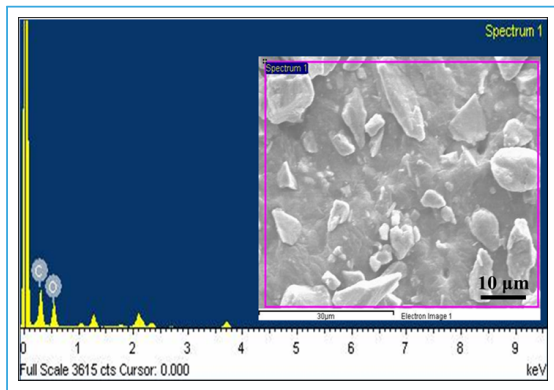


Figure 12. Result of EDX graph and surface measurement (#2015)

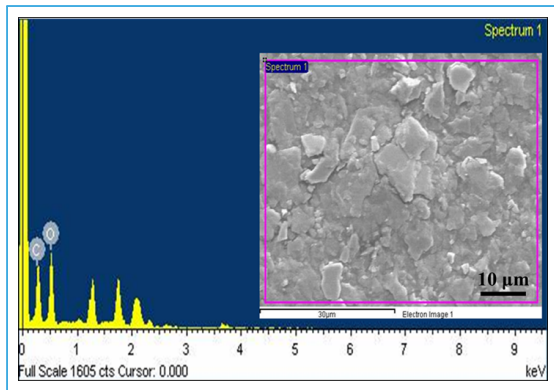


Figure 13. Result of EDX graph and surface measurement (#2001)

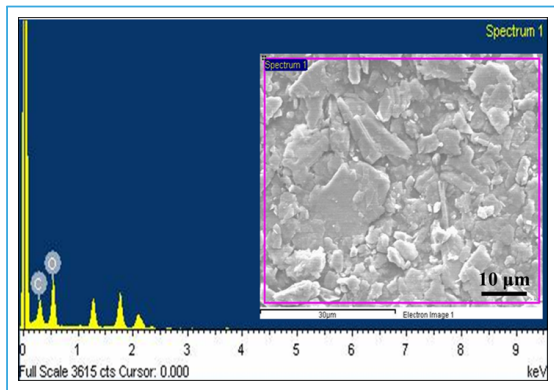


Figure 14. Result of EDX graph and surface measurement (#1998)

저장기간이 짧은 시료와 가교 밀도 변화가 큰 시료에 대한 O/C 비 측정치는 Table 4와 같다.

Table 4. Results of O/C ratio from SEM

Group	Storage year	O/C ratio					
		#1	#2	#3	#4	#5	Avg.
A	25	1.64	1.73	1.84	2.44	1.25	1.78
	22	1.18	1.07	1.59	1.72	1.61	1.43
B	8	0.64	0.43	0.36	0.49	0.44	0.47
	5	0.43	0.39	0.41	0.33	0.44	0.40

시험 결과로 산소의 함량이 크게 높아진 현상을 두 개 그룹(그룹A : 저장연도 25년, 22년, 그룹B : 저장연도 8년, 5년)에 대한 t-검증을 통해 두 그룹 간의 차이는 단측 검정 p-value는 1.682×10^{-6} , 양측 검정 p-value는 3.364×10^{-6} 으로 매우 큰 유의성이 있는 것을 확인하였다. 부틸 고무가 노화되는 과정이 산화에 의한 것이라는 기존 연구 결과를 확인할 수 있었다.

4.5. 유리전이온도 확인

유리전이온도(Tg)는 반결정성 또는 비결정성 고분자가 딱딱한 유리질 상태에서 부드러운 고무상태로 변화하기 시작하는 온도이다. 상온에서 유연한 성질을 가지고 있는 고무는 영하의 영역에서 유리전이 온도를 갖는 것이 일반적이다. 16종의 시료 중 8종을 선정하여 KS M ISO 11357-2에 따라 DSC 장비를 이용하여 측정한 결과는 Figure 15와 같다.

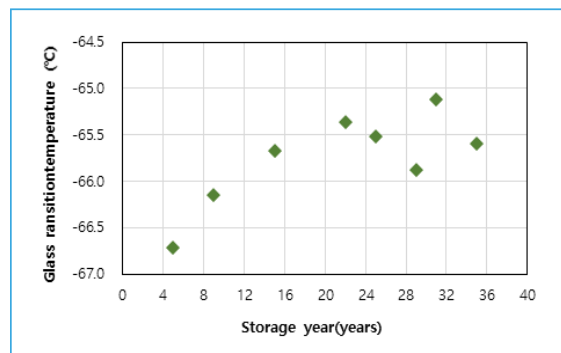


Figure 15. Variation of the glass transition temperature with the storage year

측정 결과는 저장 기간이 길어질수록 유리전이온도가 증가하는 경향을 확인하였지만, 측정방법의 오차범위를 고려하면 유의미한 차이로 판단되지는 않는다.

4.6. 상관관계 분석

고무의 물리적 특성은 가교 밀도에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 앞서 평가한 저장기간에 따른 부틸 고무 16종 시료의 가교 밀도와 인장강도, 가교 밀도와 200% 인장응력 및 가교 밀도와 신장률 결과를 그래프로 나타내면 Figure 16 ~ 18과 같다.

Figure 16 ~ 18에서 육안으로 확인된 가교 밀도와 물리적 특성과의 관계를 수치로 비교하기 위하여,

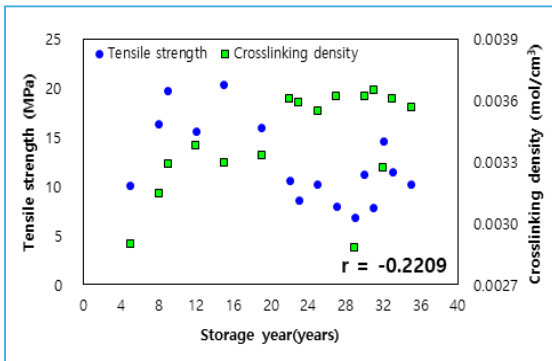


Figure 16. Correlation graph between crosslinking density and tensile strength

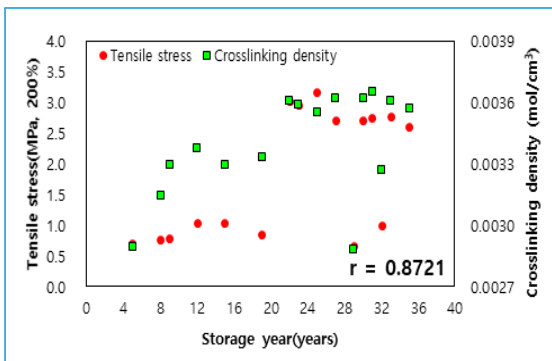


Figure 17. Correlation graph between crosslinking density and tensile stress(200 %)

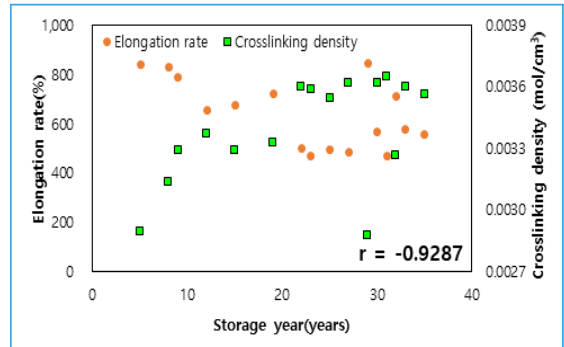


Figure 18. Correlation graph between crosslinking density and elongation rate

가교 밀도와 인장강도, 200% 인장응력, 신장률과의 상관관계 분석을 하였다. 각 물리적 특성별 상관계수를 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Results of Correlation Coefficient

	Storage year	Crosslinking density	Tensile strength	Tensile stress	Elongation rate
Storage year	1				
Crosslinking density	0.5394	1			
Tensile strength	-0.5612	-0.2209	1		
Tensile stress	0.6113	0.8721	-0.5794	1	
Elongation rate	-0.5761	-0.9287	0.4591	-0.9389	1

저장기간에 따라 가교 밀도와 인장응력은 양의 상관관계, 인장강도와 신장률은 음의 상관관계를 나타낸다. 즉, 저장기간이 길어질수록 가교 밀도와 인장응력은 증가, 인장강도와 신장률은 감소하는 경향을 나타내는 것이다. 가교 밀도와 3가지 물리적 특성과의 상관관계를 살펴보면, 인장강도의 상관계수 $r = -0.2209$, 인장응력은 상관계수 $r = 0.8721$, 신장률 상관계수 $r = -0.9287$ 로 인장강도보다 인장응력과 신장률이 가교 밀도의 변화를 잘 대변하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 인장응력과 신장률 역시 매우 높은 상관관계를 보임을 알 수 있다.

5. 결론

저장기간이 5년에서 35년까지 자연 노화된 부틸 고무 시료의 가교 밀도를 측정된 결과, 장기 노화된 시료에서 가교 밀도가 20 ~ 25%의 변화율로 증가되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 저장환경에서 산화에 의한 가교 밀도의 증가로 확인되었다. 또한, 물리적 시험항목인 인장강도, 200% 인장응력 그리고 신장률의 변화를 측정하여 가교 밀도와의 상관관계를 분석한 결과 인장강도보다 200% 인장응력과 신장률이 가교 밀도의 변화를 더욱 잘 대변하고 있음을 통계적으로 확인할 수 있었다. 이러한 결과의 원인은 가교 밀도가 증가하면 인장응력은 증가하나 신장률은 감소하여 결국 이 두 가지 물성에 영향을 받은 인장강도는 가교 밀도와 특이한 경향성을 갖는 것으로 해석된다. 따라서, 수명예측을 위한 평가항목은 인장강도보다 200% 인장응력과 신장률을 우선 선택할 필요가 있다.

본 연구 결과로 장기 노화과정에서 가교 밀도와 같은 화학적 결합의 변화에 따른 산화의 영향으로 미세 크랙 또는 핀홀의 발생과 같은 물리적 변화가 일어나게 되고 이는 결국 고장을 일으킬 수 있음을 확인하였다. 그러나, 다른 저장환경에 노출되어 자연 노화된 시료를 대상으로 평가한 결과이므로 저장환경에 영향이 존재할 수 있어서 이에 따른 차이가 존재할 가능성이 있다. 따라서 향후 표준화된 저장장소에 노출시킨 시료를 이용한 평가가 추가로 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1 Kim, C., & Cho, Y., "Study on Variation of Liquid Repellency for Functional Fabric according to Long-term Storage", *Journal of Defense Quality Society*, 5(1), pp. 58-64, 2023.
- 2 Kang, H. J., Kim, Y. D., Jeong, H. Y., & Lee, T. S., "The Effect of Heat Ageing Natural Vulcanized Rubber", *Proceedings of the KSME Conference*, pp. 309-314, 2000.
- 3 MIL - HDBK - 695E Rubber Product: Recommended Shelf Life, Department of Defense (USA), 2011.
- 4 Tikhomirov, S. G., Polevoy, P. S., Semenov, M. E., & Karmanov, A. V., "Modeling of the Destruction Process of Butyl Rubber", *Radiation Physics and Chemistry*, 158, pp. 205-208, 2019.
- 5 Son, C. E., & Choi, S. S., "Analytical Techniques for Measurement of Crosslink Densities of Rubber Vulcanizates", *Elastomers and Composites*, 54(3), pp. 209-219, 2019.
- 6 Choi, S. S., & Kim, J. C., "Thermal Aging Behaviors of Weather Resistant Rubber Composites of EPDM, IIR, and BIIR", *Elastomers and Composites*, 47(2), pp. 148-155, 2012.
- 7 Du, Y. Q., Zheng, J., & Yu, G. B., "Storage Life Prediction under Pre-strained Thermally-accelerated Aging of HTPB Coating Using the Change of Crosslinking Density", *Defence Technology*, 17(4), pp. 1387-1394, 2021.

함정 기본성능 분야 체계공학(SE) 절점별 Look Right 모델 연구

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

System Engineering Look Right Model for the Naval Ship Basic Performance by Milestone

권태웅[†], Taewoong Kwon

HD현대중공업, 특수선사업부,
책임엔지니어
Senior Engineer, Naval&Special
Ship Division,
HD Hyundai Heavy Industries

이창열, Changyeol Lee

HD현대중공업, 특수선사업부,
책임엔지니어
Senior Engineer, Naval&Special
Ship Division,
HD Hyundai Heavy Industries

강상호, Sangho Kang

HD현대중공업, 특수선사업부,
책임엔지니어
Senior Engineer, Naval&Special
Ship Division,
HD Hyundai Heavy Industries

이길홍, Kilhong Lee

HD현대중공업, 특수선사업부,
책임엔지니어
Senior Engineer, Naval&Special
Ship Division,
HD Hyundai Heavy Industries

Abstract

To develop a high-quality naval ship, a design that fulfills the requirements should be developed and its compliance with the requirements must be verified through tests and evaluations. Furthermore, actively incorporating the latest trends and identified improvement needs of existing operational naval ships into the design is the right way to develop high-quality naval ships. However, in the case of the ROK(Republic of Korea) naval ship projects, even after 10 years since the application of the system engineering process, the interpretation and verification methods for the requirements are not yet standardized. During the execution of the naval ship project, frequent instances exist where specific individuals misinterpret the same requirements or insist on unrealistic and excessive test and evaluation methods, causing confusion in the progress of the project. This study proposes standardizing the review and decision-making items for each requirement at each system engineering milestone to prevent confusion during project execution. Owing to the extensive and wide-range requirements of naval ship projects, this study narrowed its scope to the basic performance field and intends to expand to other systems in the future.

keywords : system engineering, test and evaluation, shift left, look right, naval ship basic performance

[†] Corresponding Author : Taewoong Kwon

Tel : +82-52-203-0736, email : rio6760@naver.com

HD Hyundai Heavy Industries, 400, Bangeojinsunhwandoro, Dong-gu, Ulsan, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 18th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

2013년 탐색개발을 착수한 수상함(OO함) 사업에 국내 최초로 체계공학(SE, System Engineering) 절차가 적용된 이후, HD현대중공업이 총 3척의 대형 함정에 SE 절차 및 기법을 적용하여 적기에 함정을 인도한 바 있다. 함정의 체계공학은 설계 초기 단계부터 ROC(Required Operational Capability), TLR(Top Level Requirement)과 같은 군 요구조건을 면밀히 분석하여 필요한 기능을 할당한 후에, 설계 충족성을 확인하고, 시험평가를 통해 최종 성능을 검증하는 절차로, Figure 1과 같이 “Shift left”를 통한 Risk management를 병행할 경우 품질 향상뿐 아니라, 비용/일정 측면에서도 그 효과가 탁월하여 체계공학의 가치가 극대화될 수 있음이 확인되었다[1].

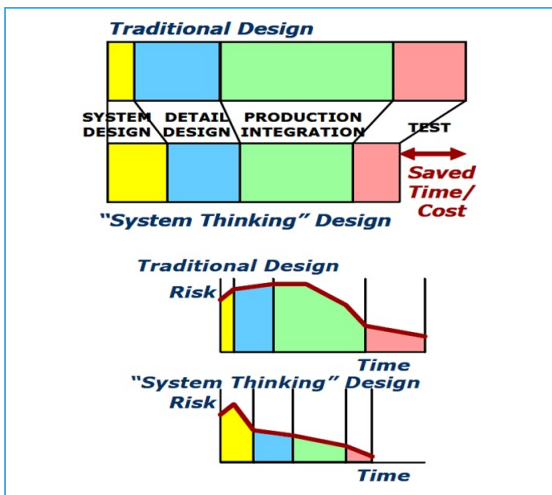


Figure 1. Value of system engineering [1]

체계공학은 축적되고 숙련된 기술과 경험에 시너지를 더해주는 방법론으로 “System thinking method”가 근본 가치이지, 단순히 요구조건을 분할하거나, 타 사업에서 충분히 검증된 요구조건을 특정 개인의 검증되지 않은 경험과 기우 등으로 신규 사업에서 재검토하는 요구조건 수정/해석의 도구가 아니다.

좋은 함정을 개발하기 위해서는 기본적으로 요구조

건을 만족하는 설계가 선행되어야 하고, 내실 있는 시험평가를 통하여 요구조건이 충분히 검증되어야 한다.

이에 더하여 최신 트렌드/신기술 적용, 실적함정의 시험평가 보완요구사항, 승조원 개선요구사항, 전력화평가 개선요구사항, 기품원 시정조치요구사항 등이 신조 함정 설계에 피드백되어 선반영된다면 최신에 고품질 함정을 최적의 비용으로 개발하고 설계 기술 발전에도 도움이 될 것으로 본다.

본 연구에서는 HD현대중공업이 SE 기법을 통해 건조한 3척의 대형 함정에 공통적으로 적용된 요구조건 중 기본성능 분야에 대한 Look right 모델 및 개선 방안 등을 제안하고자 한다.

2. Look right model

“Look right”는 개발 후반부에 발생할 사항을 개발 초반부터 고려하는 것으로 “Shift left”와 함께 체계공학의 핵심가치로 분류되는 기법이다.

고도로 숙련된 엔지니어의 경우, 장기간 축적된 경험을 통해 “Look right”를 고려한 설계를 수행하게 된다. 하지만, 설계 경험 또는 시험평가 등 검증 경험이 부족한 엔지니어의 경우, “Look right”를 고려하지 않거나, 경험 부족에서 오는 과도한 우려로, 과한 설계 또는 불필요한 단서 조항을 첨부한 체계 요구조건을 제안하게 된다.

Figure 2는 SE 절차 적용 이전의 함정 개발 프로세스와 SRR(System Requirement Review)-SFR(System Functional Review)-PDR(Preliminary Design Review)-CDR(Critical Design Review)-T&E(Test and Evaluation) 등으로 이어지는 SE 절차를 조합하여 도식화한 기본성능 분야의 Look right model이다.

SE 절차 도입 초기에는 경험 부족으로 인해 함정 개발 후반부, 특히 시험평가에 대한 불확실성으로 “Look right”를 실현하기에 제한적이었으나, 3척의 함정에 대한 체계공학과 시험평가를 수행한 경험을 바탕으로 Figure 2와 같은 “Look right” 모델 구현이 가능하였다.

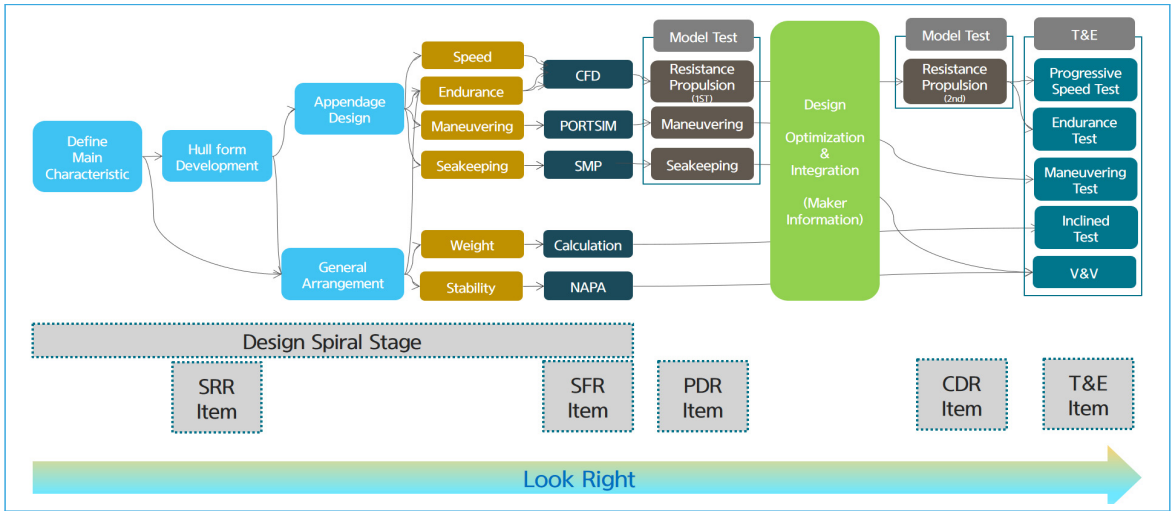


Figure 2. Look right model for ship basic performance system engineering

3. 기본성능 분야 공통 요구조건

당사에서 건조한 국내 선도함 5종·해외함정 3종의 기본성능 분야 요구조건을 검토한 결과, Table 1과 같은 공통적인 요구조건이 사양 기술문서에 명시되어 있음을 확인할 수 있었다.

Table 1. Common Requirements of ROK Naval Ship Basic Performance

Category		Requirement
Ship speed	Ship speed	Max. speed : over 00 kts
		Crusing speed : over 00 kts
		Time to max. Speed : less than 00 minutes
Hydro dynamics	Endurance	Over 0,000 NM
	Seakeeping	Heli.operation (sea state 0)
		RAS/FAS (Sea state 0)
		Transit (Sea state 0)
		Survival (Over sea state 0)
Roll stabilizer		
Hydro statics	Weight	0,000 ton ± 00%
	Stability	Stable with over 00% damage of ship length

* RAS : Replenishment At Sea

* FAS : Fueling At Sea

함정의 기본성능 분야 공통 요구조건은 크게 함속, 함속거리, 내해성 등의 유체동역학적 분야와 중량, 복원성 등의 유체정역학적 분야로 구분할 수 있다.

4. 기본성능 분야 체계공학 절점별 검토 및 의사결정 필요사항

본 장에서는 앞서 제시한 기본성능 분야의 Look right 모델과 실적함정 체계공학, 시험평가를 통해 축적된 Lessons-learned를 바탕으로, SRR-SFR-PDR-CDR-T&E 절점별 검토 및 의사결정 필요사항을 기술하고자 한다.

4.1. SRR

SRR은 연구개발주관기관이 군 요구조건을 정확하게 이해하고 체계요구조건으로 명확하게 반영되었는지 확인하는 절차이며, 함정사업의 경우 통상 기본 설계 착수 이후 3개월 시점에 수행한다.

해당 기간 동안 체계종합 엔지니어는 요구조건 분할 및 분석과 병행하여, 「제원선정-선형개발-검증(해석)-개념 일반배치(G/A, General Arrangement)-대안 검토」 등을 Design spiral 형태로 반복 수행하게 된다.

합정의 제원과 선형개발은 초기에 합정성능의 태생을 결정하는 매우 중요한 요소로, 사업 진행 간 제원과 선형의 변경 발생 시, 비용/일정에 미치는 영향이 상당하므로, 다양한 경우의 수에 대한 영향성 검토가 필요하다.

HD현대중공업은 제원선정 단계에서 Set-based design 기법을 통해 발생할 수 있는 모든 경우의 수에 대하여 소요마력, 중량, 복원성, 내항성, 조종성, 구조강도 등 조선공학적 요소를 초기에 검토 가능한 설계통합 프로그램인 PISSON(HD현대중공업社, 2020 version)을 보유하고 있다.

또한, 최근에는 AI 기반의 선형 최적화 기술을 개발하여 주어진 제원 범위 내에서 100여 종 이상의 선형 요소를 변경하며 최적화된 선형을 도출해 낼 수 있는 CAESSES(HD현대중공업社, 2024 version)를 전문 연구 인력을 통해 활용하여 Figure 3과 같이 최적의 선형을 도출하고 있다.

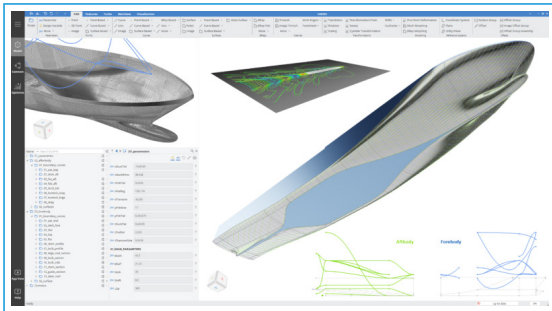


Figure 3. CAESSES CFD(Computational Fluid Dynamics) model

SRR 단계에서 기본성능 요구조건은 설계 결과를 기반으로 명확화, 구체화할 사항은 거의 없다고 판단되며, 실적합정 T&E를 통해 얻은 경험을 통해 Table 2와 같은 사항을 명확화하는 것이 적합하다고 판단된다.

최대속력, 순항속력의 경우 설계를 위한 해상상태를 Sea state 1 이하 등으로 정의하고, 시험평가를 위한 해상상태는 Sea state 3 이하, 배수량은 시험평가 단계에서 구현 가능한 배수량을 시험 배수량으로 정의할 필요가 있다.

Table 2. SRR Action Item for Basic Performance Requirement

Requirement	SRR action item
Max. speed : over OO kts	<input type="checkbox"/> Define sea state for design
Crusing speed : over OO kts	<input type="checkbox"/> Define sea state & displacement for T&E
Time to max. speed : less than OO minutes	<input type="checkbox"/> Define max. speed
Over O,000 NM	<input type="checkbox"/> Define operation condition at crusing speed
Heli.operation (Sea state O)	<input type="checkbox"/> Define wave height, heading
RAS/FAS (Sea state O)	
Transit (Sea state O)	
Survival (Over sea state O)	
Roll stabilizer	None
O,000 ton ± OO%	None
Stable with over OO% damage of ship length	None

항속거리의 경우 순항연료유 계산을 위한 24시간 평균전력부하의 운용 기준을 재정립할 필요가 있다. 미 해군의 DDS(Design Data Sheet) 310-1에 따르면 24시간 평균전력부하는 전투함의 경우 3급 전투배치 수준에서 순항속력으로 기동하는 것으로 정의하고 있으며, 미국방부는 3급 전투배치 순항의 기준을 4시간 당직근무, 8시간 휴무로 운용개념을 제시하고, 무장장비의 경우 적의 기습공격에 대비하여 1/3 수준만 준비태세를 갖추는 것으로 정의하고 있다[2-3].

따라서 향후 SRR 단계에서는 발전기 용량 산출을 위한 전력부하 계산과는 별도로, 순항연료유 계산을 위한 24시간 평균전력부하 기준을 3급 전투배치 수준으로 정의하여 과도한 연료유 탱크 배치를 방지할 필요가 있다.

내항성능의 경우 파고는 평균 유의파고로 적용하고, 침로조건은 실제 운용개념에 적합한 침로범위를 선정하는 것이 타당하다. 선박의 6자유도 운동은 배수량, 함 길이, 관성반경 등 태생적인 요인에 기인하며, 횡동요 감쇄를 위해 함안정 조타기(RRS, Rudder Roll Stabilizer) 등 횡동요 감쇄장치(Roll stabilizer)를 적용할 수는 있으나, 이는 횡동요 감쇄

및 그로 인한 연성효과를 기대하는 수준으로 근본적인 내향성능 향상을 기대하기는 어렵다.

예를 들어 해외 군수지원함의 경우 소요군이 임무별 내향성능 요구조건을 제시할 때, 최적침로(Best heading) 조건을 제시하였으며 실제 운용개념을 기반으로 반드시 달성해야 할 최적침로를 제시하고 있다.

국내 함정사업의 경우 간혹 특수 임무에 대해 전방 위침로를 요구하는 경우가 있다. 그러나 과한 요구조건에 따른 내향성능 만족을 위해 불필요하게 함 제원 및 빌지킬을 대형화하는 것은 저항/추진 성능 감소 및 비용 향상을 야기하게 되므로 지양해야 한다.

4.2. SFR

SFR은 군 요구조건 및 SRR을 통해 정의한 체계 요구조건에 대해 기능 할당이 제대로 되었는지 확인하는 절차이다.

현재까지는 ROC, TLR에 명시된 Level 3. 수준의 기능을 요구조건과 맵핑하여 「요구조건-기능 Matrix」를 생성하고, 장비/설비와 요구조건을 맵핑하여 「물리-기능 Matrix」를 작성하여 SFR를 수행하고 있다.

SFR 단계에서 검증방안으로 분석(Analysis), 검사(Inspection), 시연(Demonstration), 시험(Test)을 명기하고 있으나, 개발시험평가(DT&E, Developmental Test & Evaluation), 운용시험평가(OT&E, Operational Test & Evaluation)에 대한 검증 방안이 아닌, 기본설계시험평가에 대한 검증 방안이 제시되고 있다. 기본설계시험평가는 기본적으로 자료에 의한 시험평가의 방식으로 잠정 전투용

적합성을 판단하므로, 굳이 분류를 하자면 대부분 분석(Analysis)으로 분류될 것이나, 본래의 분류 취지와 맞지 않고, 장비 단위로 시험을 수행하는 함정사업과 거리가 있는 분류 방식이다.

DT&E, OT&E 단계에서 장비류의 경우 대부분 실시험을 원칙으로 하며, 설치(Inspection)-기능(Function)-성능(Performance)-연동(Interface)-특수 요구조건(Special requirement)

순으로 검증을 하게 된다. 이 과정에서 자료, 검사, 실시험이 혼합된 방식으로 시험을 진행하는 경우가 대부분이다.

분석, 검사, 시연, 시험으로 분류하는 방식은 부품 단위로 평가하는 일반 무기체계에는 유효할 수 있으나, 장비 단위로 평가하는 함정사업과는 거리가 있으며, 시험평가 단계에서 상기와 같이 분류할 경우 혼란을 야기할 수 있다.

최근 개정된 SE기반 기술검토회의 가이드북에도 명시되지 않은 내용이므로[1], 향후 함정사업 기술검토회의에서는 제외하는 것이 바람직하다.

장비/설비류는 장비제작사 측으로 제공할 요구 기능, 요구 성능 등의 사양을 정의하고 할당하는 방향으로 SFR을 수행하는 것이 효과적일 것이며, 이때 「임무-기능/성능/연동 Matrix」를 구성하는 것이 더욱 효과적일 것으로 판단된다. ROC, TLR을 분석하면, 제목 단위에서 임무가 명시되는 경우가 많으며, 하위 레벨에서 체계소요와 성능필수조건이 명기된다. 이를 바탕으로 기능, 성능, 연동에 대한 요구조건을 연결할 경우 Table 3과 같은 「임무-기능/성능/연동 Matrix」 작성을 할 수 있다.

Table 3. Example of Mission-Function/Performance/Interface Matrix

Case	Mission	Requirement			
		System	Function / Performance / Interface		
A	Anti-surface warfare	SSR	-	Function	To be defined by SFR
			Detect up to OO km	Performance	Mil. requirement
			Interface with combat system	Interface	Mil. requirement
B	Heli. operation	Transverse	-	Function	To be defined by SFR
		Lighting	-	Function	To be defined by SFR
C	-	-	-	Function	To be defined by SFR

ROC, TLR을 분석하면 Mission의 명기 유무, 체계소요의 명기 유무, 기능/성능/연동의 명기 유무에 따라 3가지 Case로 구분이 가능하며, SFR을 통하여 정의할 사항을 색으로 표현하였다.

먼저 임무, 체계소요, 필수성능이 군 요구조건에 명기되어 있는 경우(Case A)를 예로 들고자 한다. 군 요구조건에는 대함전 임무 수행을 위한 체계소요로 대함레이더가 제시되었으며, 탐지 가능 거리를 수치로 표현하고, 전투체계와의 연동조건이 제시되었다. 설계자는 실적함 장비 분석, 국방규격 검토 등을 통해, 장비에 대한 기능 요구조건(비디오 처리기능, 안정화 기능, 근거리 탐지 기능 등)을 검토하여 SFR을 통해 확인하는 것이 적절하다고 판단된다.

다음으로 임무, 체계소요는 명시되어 있으나, 기능/성능이 명시되지 않은 경우(Case B)이다.

군 요구조건에는 헬기 운용이라는 임무, 이를 위한 헬기이송장치, 헬기유도등이라는 체계소요가 정의되었으나, 이에 대한 구체적인 기능/성능은 제시되지 않았다. 설계자는 실적함 사례 등을 분석하여 장비에 대한 기능 요구조건(헬기 고정, 이송, 정지, 대상기종 등)을 검토하여 SFR을 통해 확인하는 것이 적절하다고 판단된다.

마지막으로 임무, 체계소요, 기능/성능/연동에 대한 요구조건이 명기되지 않았으나, 함정으로서 기본적으로 구비해야 할 사항(Case C)에 대한 내용으로 발전기가 예라고 할 수 있다.

군 요구조건에는 명시되지 않지만, 함 운용을 위한 필수장비로 설계자는 전력부하분석을 통해 산출한 발전기 요구 용량, 제어 방식 등을 검토하여 SFR을 통해 논의하는 것이 적절하다.

결론적으로 SFR은 「임무-기능/성능/연동 Matrix」를 정의하고 누락된 임무-체계소요-기능-성능-연동에 대한 내용을 할당하는 것이 필요할 것으로 판단된다. SFR을 통해 신규 할당된 기능을 포함하여 체계/부체계설계기술서(SSDD, System Subsystem Design Description) 초안을 작성하고 기본설계 종료 시까지 보완하는 것이 적절할 것이며, 신규 정의된 기능에 대한 구체적인 수치가 포함된 성능은 사업추진 간

별도의 절차(장비 사양서, 설비 사양서, 구매 사양서 등)를 통해 확정하는 것이 바람직할 것이다.

기본성능 분야에 대해서는 장비-설비와 다른 방식의 SFR 수행이 필요하다. 해당 분야는 군 요구조건에 체계소요, 성능 필수조건 등으로 구분되어 명기되지 않고 직접적인 수치로 성능이 요구되고 있다. 또한 Figure 2에 명시된 바와 같이 설계 공정 특성상, SFR 시점에 Design spiral을 진행하는 단계에 있으며, 전산유체역학 등으로 수행한 초기 설계 결과를 직접 확인하는 것이 적절하다. 상기 특성을 고려, 기본성능 분야는 SFR 단계에서 기능할당이 아닌 Table 4와 같은 전산유체해석 결과 확인 위주로 진행하는 것이 적합하다.

Table 4. SFR Action Item for Basic Performance Requirement

Requirement	SFR action item
Max. speed : over OO kts	<input type="checkbox"/> Review the result of CFD
Crusing speed : over OO kts	<input type="checkbox"/> Selection of propulsion method
Time to max. speed : less than OO minutes	None
Over O,000 NM	<input type="checkbox"/> Review the estimation of fuel consumption
Heli.operation (Sea state O)	<input type="checkbox"/> Review the result of SMP(Ship Motion Prediction)
RAS/FAS (Sea state O)	
Transit (Sea state O)	
Survival (Over sea state O)	
Roll stabilizer	<input type="checkbox"/> Select the type of roll stabilizer
O,000 ton ± OO%	<input type="checkbox"/> Review the result of 1 st weight estimation
Stable with over OO% damage of ship length	<input type="checkbox"/> Review the result of 1 st stability calculation

4.3. PDR

PDR은 기본설계를 수행한 결과가 군 요구조건, 체계요구조건을 충족하는지 확인하는 절차이며, 통상 기본설계 종료 3개월 이전 시점에 수행한다.

PDR 이전까지 SSDD 초안을 최신화하고, PDR이 종료되면 SSDD를 최신화하여 확정한다.

기본성능 분야의 경우 SFR 이후 G/A가 구체화되고, 개별 장비에 대한 개략적인 정보가 취합되면서 중량/복원성 계산의 정도가 향상된다. 속력/항속거리 분야의 경우 재고 프로펠러(Stock propeller)를 기준으로 예인수조에서 모형시험을 수행하게 되고, 그 결과를 바탕으로 장비제작사에 제공할 엔진 요구마력 및 프로펠러 단독효율을 결정하게 된다.

내항성능(Seakeeping) 분야의 경우 요구되는 해상상태를 해양공학수조에서 파 캘리브레이션을 통해 구현하여 해상상태별 운동 값을 계측하고 함의 내항성능을 평가하게 된다.

기본성능 분야는 PDR 단계에서 Table 5에 명시된 사항 위주로 구체화된 설계 결과, 모형시험 결과 등을 확인하는 것이 적절하다.

Table 5. PDR Action Item for Basic Performance Requirement

Requirement	PDR action item
Max. speed : over OO kts	<input type="checkbox"/> Review the result of model test (Resistance&propulsion)
Crusing speed : over OO kts	
Time to max. speed : less than OO minutes	<input type="checkbox"/> Review the estimation
Over O,000 NM	<input type="checkbox"/> Review the result of endurance calculation
Heli.operation (Sea state O)	<input type="checkbox"/> Review the result of SMP or model test
RAS/FAS (Sea state O)	
Transit (Sea state O)	
Survival (Over sea state O)	
Roll stabilizer	<input type="checkbox"/> Review the required roll reduction efficiency
O,000 ton ± OO%	<input type="checkbox"/> Review the result of 3 rd weight estimation
Stable with over OO% damage of ship length	<input type="checkbox"/> Review the result of 3 rd Stability calculation

4.4. CDR

CDR은 상세설계를 수행한 결과가 군 요구조건, 체계요구조건을 충족하는지 확인하는 절차이며, 통상 착공 3개월 이전 시점에 수행한다.

상세설계는 장비/설비 제작사와 계약이 진행되고, 제작사로부터 제작사규격을 접수하여 본함에 탑재/연동/배치하며 설계를 구체화하는 과정이다.

함속 요구조건에 관련된 저항/추진 모형시험은 제작사에서 설계한 설계 프로펠러 모형을 제작하여 시험을 수행하며, 엔진 제작사규격에 명시된 최대출력을 근거로 함속을 추정하게 된다.

항속거리의 경우, 제작사로부터 접수한 연료소모율, 모형시험을 통해 확인된 순항속력 시의 소요마력, 구체화된 전력부하분석 결과, 탱크배치 결과 등을 토대로 예상 항속거리를 계산한다.

내항성능 모형시험은 기본설계에 종료되며, 함 제원이 변경되지 않는 이상 내항성능의 변화가 미미하여 상세설계 단계에서는 통상 수행하지 않으므로, CDR 항목에서 제외하는 것이 바람직하다.

중량과 복원성은 제작사로부터 접수한 장비 중량과 최신화된 G/A를 바탕으로 상세설계 단계에 2~3회 계산하게 된다.

기본성능 분야의 CDR은 Table 6에 명시된 사항 위주로 구체화된 설계 결과, 제작사 자료 등을 통해 수행한 모형시험 결과 등을 확인하는 것이 적절하다.

Table 6. CDR Action Item for Basic Performance Requirement

Requirement	CDR action item
Max. speed : over OO kts	<input type="checkbox"/> Review the result of model test (Resistance&propulsion)
Crusing speed : over OO kts	
Time to max. speed : less than OO minutes	<input type="checkbox"/> Review the estimation
Over O,000 NM	<input type="checkbox"/> Review the result of fuel oil calculation
Heli.operation (Sea state O)	None
RAS/FAS (Sea state O)	

Requirement	CDR action item
Transit (Sea state O)	
Survival (Over sea state O)	
Roll stabilizer	<input type="checkbox"/> Review the designed roll stabilizer
0,000 ton ± 00%	<input type="checkbox"/> Review the result of weight estimation
Stable with over 00% damage of ship length	<input type="checkbox"/> Review the result of 4 th stability calculation

4.5. T&E

T&E는 각 요구조건에 대한 충족 여부를 확인하는 최종 단계로 개발목표 충족 여부를 확인하는 개발시험평가와 전투용 적합성을 확인하는 운용시험평가로 구분된다.

본 절에서는 시험평가 단계에서의 항목 분류, 시험조건, 시험방법 및 절차, 공학적 검증 방법 등을 제시하고자 한다.

4.5.1. 함속

국내 함정사업 군 요구조건에 명기된 함속(Ship speed) 관련 공통 요구사항은 최대속력, 순항속력, 흑서기 최대속력이 있으며 시험평가 방안으로 Table 7, 8의 방법을 제안한다.

해외함정 사업 및 상선 분야의 경우, ITTC (International Towing Tank Conference), IMO (International Maritime Organization), ISO (International Organization for Standardization) 등 국제 표준에 따라 실선 시험 수행 이후, 환경조건 (해상상태 등) 및 배수량을 보정하여 함속을 추정하는 방법을 택하고 있다. 국내의 경우 과거 시운전 획득 제도 시절, KDX-II, KDX-III Class 함정에 대해 함종별 특성 등을 고려하여 별도 시운전 배수량으로 시험을 실시하고 공학적인 방법으로 이를 보정한 사례가 있으나 이후 시험평가 제도 도입 이후 선도함에 대해 강제적으로 만재 배수량을 구현하는 방식으로 시험을 수행하고 있다. 이는 안전 문제, 연료유 과다 사용, 연료유 수급 빈도 증가로 인한 일정 손실

등의 문제를 야기하므로, 향후에는 선도함 사업부터 국제적으로 공인되어 널리 사용되고 있는 보정 방법을 적극 활용할 필요가 있다[4].

Table 7. T&E Standard for Ship Speed

Item	Standard
T&E item & Criteria	[1] Max. speed : over 00 kts [2] Cruising speed : over 00 kts
Condition	[1] Sea state : under 3 [2] Displacement : designated displacement ± 2%
Test procedure	[1] Progressive speed test [2] Correction by ITTC method

Table 8. T&E Standard for Time to Max. Speed

Item	Standard
T&E item & Criteria	Time to max. speed : less than 00 minutes
Condition	[1] Sea state : under 3 [2] Displacement : designated displacement ± 2% [3] Environment : summer (7.1~8.31)
Test procedure	[1] Ahead power test [2] Correction by IMO method

4.5.2. 항속거리

항속거리(Endurance) 시험의 경우 1시간 동안 연료소모량을 측정한 후, 연료유 탱크 총 용량을 고려하여 계산을 확장하여 항속거리를 추정하는 방법을 적용하고 있다. 다만, 순항속력 시험을 수행할 때, 해상조건 및 전력부하 조건이 실제 작전운용 상태와 다르므로 Table 9와 같이, 순항속력으로 추진하는 것이 아닌 순항속력에 상응하는 RPM을 구현하여 시험을 수행하는 것이 바람직하다.

시험을 위한 전력부하조건은 앞서 4.1장에서 서술한 바와 같이, 설계 단계에서 3급 전투배치 순항 기준을 정의한 값을 구현하여 시험을 수행하는 것이 바람직하다.

Table 9. T&E Standard for Endurance

Item	Standard
T&E item & Criteria	Over 0,000 NM
Condition	[1] Sea state : under 3 [2] Displacement : designated displacement \pm 2% [3] RPM : RPM corresponding to cruising speed [4] Electric load : Condition III wartime cruising load
Test procedure	[1] Operate at designated RPM for 1 hours and measure the fuel consumption [2] Analysis corresponding to Fuel tank capacity

4.5.3. 내항성능

내항성능은 배수량, 함 크기, 무게중심 등 함정의 제원적인 요인에 기인한다. 기본설계 단계에서 선정된 제원, 선형, 무게중심은 상세설계 단계에서 큰 변화가 발생하지 않으며, 대부분 중량여유(4%) 이내 범위 내에서의 차이로 내항 성능에 영향을 미치는 수준이라 보기 어렵다. Figure 4, 5는 과거 OO함의 기본설계 시점의 배수량 등 제원과 최종 경사시험 이후에 확정된 배수량 등 제원을 기반으로 내항성능 비교를 한 그래프이며, 당시 모형시험 대비 200톤가량의 배수량 차이가 발생하였음에도 내항성능에 미치는 영향은 상당히 미미함을 확인할 수 있었다.

즉, 기본설계 시험평가 결과로 충분히 대체 가능한 항목이며, 상세설계 단계에서는 시험평가 영역에서 제외하고 CDR 등의 Design review를 통해 확인하는 것이 적절하다고 판단된다.

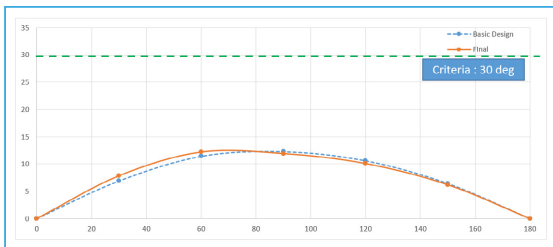


Figure 4. Comparison of roll between basic design and inclined test result

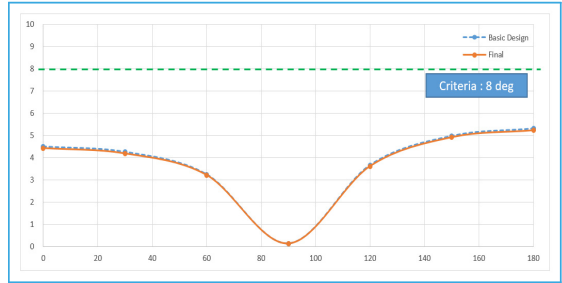


Figure 5. Comparison of pitch between basic design and inclined test result

함정의 경우 횡동요 감쇄장치로 횡요감쇄탱크 (Anti rolling tank), 핀 안정기(Fin stabilizer), 함 안정 조타기를 주로 채택한다. Table 10과 같이 횡동요 감쇄장치는 해상상태 O에서 횡동요 감쇄효율을 측정하는 방식으로 시험을 수행한다. 해상상태 O를 조우하기 쉽지 않으므로, 해상상태 O 조우불가시 Forced roll 기능을 활용하여 인위적으로 함의 동요를 발생시킨 후 이에 대한 감쇄효율을 측정하는 것이 합리적인 방법이다.

Table 10. T&E Standard for Roll Stabilizer

Item	Standard
T&E item & Criteria	Roll stabilizer
Condition	Sea state O - If sea state O is not encountered, activate forced roll
Test procedure	Measure roll reduction efficiency

4.5.4. 경하중량

경하중량(Light Weight)은 중경사 시험을 통해 측정하는 것으로, 출항 1개월 전 시점에 수행하는 Critical path에 해당하는 시험이다. 기본적으로 Table 11과 같이 98% 이상의 탑재조건이 충족될 경우 시험을 실시하고, 실선 흡수 계측을 통해 ROC 경하중량 요구조건 만족 여부를 판단한다.

Table 11. T&E Standard for Weight

Item	Standard
T&E item & Criteria	0,000 ton ± 00%
Condition	Unloaded weight : within 2% (Adjustable to business characteristics)
Test procedure	Inclined test

4.5.5. 복원성능

복원성능(Stability)은 함 제원, 선형, 중량분포, 탱크배치에 기인하는 성능으로, 함의 손상을 일으킬 수 있는 조건이거나 손상시킨 상태에서 평가를 해야 하는 항목이므로 실선 시험이 불가하다. 따라서 NAPA(NAPA社, 2024 version)라고 하는 전 세계적으로 공통적으로 사용하는 선박설계 및 해석 소프트웨어를 활용한 복원성 해석 결과가 함정설계조건 기준에서 제시하는 항목별 기준을 만족하는지 판단한다.

최근 5개의 대형함정 사업 운용시험평가에서 공통적으로 적용한 방법은 Table 12와 같이 V&V (Verification & Validatio) 절차 준용이었다. 현재 정립된 V&V 방법은 시뮬레이션 Tool의 적합성과 수행 인력의 전문성을 확인하는 Verification을 수행하고, 해석 모델이 실제 함정 설계 결과대로 구현이 되었고, 결과가 정확한지 확인하는 Validation을 수행하는 것이다.

Table 12. T&E Standard for Ship Stability

Item	Standard
T&E item & Criteria	Stable with over 00% damage of ship length
Condition	None
Test procedure	Review the result of stability calculation (V&V)

5. 기본성능 분야 검증 개선 방향

상기와 같이 기본성능 분야로 범위를 한정하여

Look right model을 만들어 본 결과, 일부 개선 및 발전이 필요한 항목이 식별되었다. 함정사업 연구개발 분야 엔지니어는 보다 신뢰성 있고 고도화된 프로세스와 소프트웨어를 개발하는 것이 중요하지만, 경제성 측면과 일정 측면에서 보다 경쟁력 있는 대안을 발굴하여 전체적인 사업비용을 절감하는 것도 중요하다고 판단된다. 본 장에서는 Look right model을 기반으로 검토한 비용 절감 방안과 발전 필요 사항에 대해 기술하고자 한다.

5.1. 내항성능

내항성능의 경우 SMP 해석-모형시험을 통해 성능을 확인하고 기준만족 여부를 판단한다.

내항성능은 각 해상상태별로 함정의 운동 특성을 예상하여 임무를 어느 정도 수행할 수 있는지 판단하는 것이 주목적으로 매우 정교한 운동 값을 요구하는 분야에 해당되지 않는다.

Figure 6, 7은 SMP 해석과 모형시험 결과를 비교한 것으로 운동 값의 차이가 미미하여, 전체 운용성 지수(Operation index)에 미치는 영향은 거의 없다는 점을 확인할 수 있다.

즉 SMP 해석만으로도 내항성능에 발생할 수 있는 위험인자 분석이 충분히 가능하고, 다양한 Case에 대해 신속한 설계 대안 분석이 가능하므로, 차기 기본설계 사업부터는 내항성능의 경우 모형시험을 생략하고 SMP 해석을 통해 성능을 최종 확인하는 방안을 제안하고자 한다.

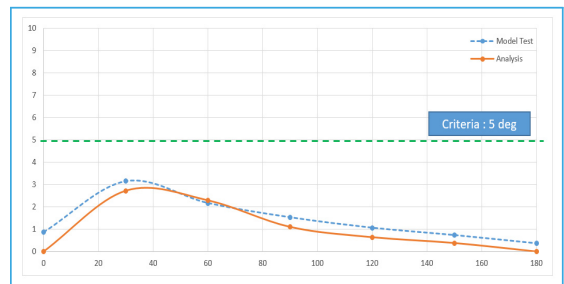


Figure 6. Comparison of roll between SMP analysis and model test

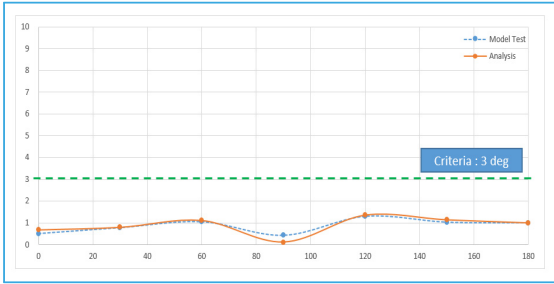


Figure 7. Comparison of pitch between SMP analysis and model test

내항성능의 경우 함 크기 및 선형 등에 따라 해석과 모형시험 간의 상관관계에 차이가 발생할 수 있으며, 함의 입무특성에 따라 내항성능에 대한 중요도에 차이가 있을 수 있으므로, 유사 실적함 자료 및 함의 요구조건 분석 등을 통해 사업 추진 간에 모형시험 수행 여부를 결정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

5.2. 조종성능

조종성능(Maneuvering)의 경우, 군 요구조건에 제시되지 않지만 함정 기본성능의 필수 분야로, 해석 프로그램을 통해 초기 성능을 확인한 이후 모형시험(자유항주시험)을 수행하고, 최종적으로는 실선 시험을 통해 성능을 확인한다. 해석 프로그램과 모형시험은 초기 성능 확인에도 목적이 있으나, 궁극적으로는 조종성능 확보를 할 수 있는 타 설계(형상, 크기, 용량 등)를 하는 것이 그 목적이라고 할 수 있다.

조종성능 분야의 Look Right Model에 따라, 최종 검증은 실선 시험을 통해 수행되기 때문에 설계 단계에서는 모형시험을 수행하지 않고 해석만으로도 조종 성능 만족에 검증이 가능하고, 타 설계를 위한 자료 확보가 가능하다.

Table 13은 당사에서 건조한 최신 함정의 해석, 모형시험, 실선시험 결과 비교 자료이다. 해석과 모형시험은 정수 상태를 기준으로 하고, 실제 시험은 해상상태 3 및 조류가 있는 상태에서 수행하였다는 점을 감안하면, 조종성능 해석으로도 충분한 의사 결

정이 가능하다고 판단된다.

따라서 차기 기본설계 사업부터는 조종성능 해석을 설계 초기단계에 수행하고 그 결과를 토대로 모형시험 수행 여부를 결정하는 것이 타당할 것이다.

Table 13. Comparison of Analysis, Model Test and Sea Test Results

Item	Standard	Results	
Advance	Less than 4.5L	Analysis	3.8L
		Model test	3.2L
		Sea test	3.1L
Tactical diameter	Less than 5.0L	Analysis	3.9L
		Model test	3.6L
		Sea test	3.5L
Overshoot angle (10°/10°)	Less than 00.0°	Analysis	5.3°
		Model test	5.9°
		Sea test	6°

조종성능의 경우 함 크기, 선형, 러더 특성 등에 따라 해석과 모형시험 간의 상관관계에 차이가 발생할 수 있으므로, 유사 실적함 자료 및 함의 요구조건 분석 등을 통해 사업 추진 간에 모형시험 수행 여부를 결정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

5.3. 경하중량

최근 연구개발 중인 함정은 미래탑재/개발 후 탑재 장비가 다수 배치되는 추세로, 중경사시험 수행 시점에 98% 이상의 탑재조건 충족이 제한적일 수 있으므로, 사업 특성에 맞게 해당 조건을 조정할 수 있도록 유연성을 확보해야 한다. 또한 선도함의 경우 착공 이후에도 설계변경 및 승조원 개선요구사항 반영으로 인한 중량 증가가 발생할 수 있으므로, 좋은 함정을 개발하기 위해서는 선도함 중량 요구조건 제한치에 유연성을 확보하여 지속적인 개선이 수용될 수 있도록 하는 것이 적절하다.

5.4. 복원성능

복원성능 해석을 위해서 대부분의 연구개발주관 기관(조선소)은 NAPA라는 선박계산 계산프로그램을 사용하는데, 이는 세계 13개국의 선급에서 인증을 받고, 노르웨이 해사청에서 검증을 하는 매우 공신력 있는 소프트웨어이다. 이미 5개 이상의 대형함정 사업에서도 Verification이 완료된 소프트웨어이므로, 향후 사업에서는 필요시 Validation만 수행할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

6. 결론

이상과 같이 기본성능 분야 중 공통 요구조건들에 대해 Look right 모델을 생성하여, 함정 개발 주기 동안에 검토하고 의사 결정해야 할 사항들을 제안하였다.

향후 의장, 무장, 항해통신 등 기본성능 분야 외의 분야에도 확대하여 SE 절점별 검토/의사 결정을 제안할 예정이다.

차기 사업부터는 요구조건에 대한 새로운 해석과 과도한 시험은 지양하고 군의 운용 경험을 통해 획득한 개선 요구사항을 피드백하여, 설계 초기 단계에서 적극 반영하여야 할 것이다. 또한 공학적으로 신뢰성이 있다면, 비용 측면에서 효율적인 대체 방안을 적극 도입하여 가격 경쟁력도 향상시킬 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

- 1 Systems Engineering Technical Review GUIDEBOOK (GPRN : 11-1690000-001840-11), DAPA(Defense Acquisition Program Administration), 2024.
- 2 Electric Power Load Analysis(EPLA) for Surface Ships (Report number : DDS 310-1 Rev 1), NAVSEA(Naval Sea Systems Command), 2012.
- 3 Navy Basic Military Requirements (NAVEDTRA 14325), NAVAL EDUCATION AND TRAINING PROFESSIONAL

DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY CENTER, 2003.

- 4 ISO 15016 Ship and Marine technology, Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data, International Organization for Standardization (ISO), 2015.

군 통신 쉘터의 스키드 조립체 내구성 강화를 위한 품질개선 연구

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

A Study on Quality Improvement of Enhancing the Durability of Skid Assemblies in Military Communication Shelters

전다예, Daye Jun

국방기술품질원, 지휘정찰3팀, 연구원
Researcher, C4ISR System Team 3, Defense Agency for
Technology and Quality

구기범†, Kibeom Ku

국방기술품질원, 지휘정찰3팀, 선임연구원
Senior Researcher, C4ISR System Team 3, Defense Agency for
Technology and Quality

Abstract

This study aims to enhance the durability of skid assemblies in military communication shelters to prevent rubber failure. To identify the cause of rubber damage, the mechanical properties of the material used in the skid assembly were analyzed, and the standards relating to rubber were reviewed. Consequently, the cause of the rubber damage was identified as the degradation of rubber, which is a temperature- and humidity-sensitive material. To establish design strategies for the improvement of skid assemblies, skid assemblies applied to similar shelters and research papers on skid assemblies were reviewed. Then, three types of skid assemblies were designed using the considered design strategies. After designing the three types of improved models for skid assembly, the most suitable skid assembly was selected by analyzing the structural and drop impact simulations. Finally, the shape of the selected skid assembly was determined by adding a complementary material. A prototype of the selected skid assembly was tested according to the military specifications. Because the prototype met the related test items of the military specifications, the skid assembly was applied to a military communication shelter.

keywords : communication shelter, skid assembly, rubber aging, impact, quality improvement

† Corresponding Author : Kibeom Ku

Tel : +82-2-961-1526, email : slal123@dtaq.re.kr

Defense Agency for Technology and Quality, 37 Hoegi-ro, Dongdaemun-Gu, Seoul, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 22nd. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

2022년 6월, 군에서 운용 중인 통신 쉘터의 스킵 조립체 내 완충 고무가 파손되는 현상이 발생하였다. 통신 쉘터는 내부에 통신에 필요한 장비를 탑재하고 운용 인원이 탑승하여 운용된다. 항공기 또는 차량으로 운송되므로 이동 중 또는 착륙 시에 쉘터에 가해지는 진동/충격 완화를 위해 쉘터 하부에 스킵 조립체가 장착된다. 스킵 조립체는 Figure 1 과 같이 상/하부 브래킷 사이에 완충 고무가 조립되는 구조로 구성되어 있다. 완충 고무파손 시, 쉘터가 주저앉아 인명상의 피해가 발생할 수 있다. 국방기술 품질원에서는 군의 요청에 따라 동일한 스킵 조립체가 장착된 통신 쉘터에 대한 원인 분석 및 조치를 위한 기술지원 업무를 수행하였다.



Figure 1. Skid assembly

원인 분석에 앞서, 완충 고무파손의 사태 파악을 위해 해당 스킵 조립체가 적용된 쉘터에 대한 전수 조사를 하였다. 그 결과, 생산 후 약 5년이 지난 쉘터에서 완충 고무의 파손이 발생하였으며 전체 쉘터의 약 9%에서 파손이 식별되었다.

원인을 파악하기 위해 파손된 완충 고무의 화학적, 물리적 성질에 대한 원자재를 분석하고, 통신 쉘터의 체계 운용 조건에서 완충 고무에 가해지는 하중을 분석하였다. 분석 결과, 고무의 원자재는 기술 자료의 요구조건에 부합하였고 완충 고무가 받는 하중 또한 물리적 한계 이내였다.

다음은 해외 규격자료를 검토하여 완충 고무의 파손에 영향을 받는 요인을 탐색하였다. MIL-HDBK-695E에

따르면, 완충 고무의 재질인 폴리우레탄 고무는 온도, 습도, 빛 등의 환경적 요인에 의해 노화 및 물성의 열화가 발생하며[1], 폴리우레탄 고무는 노화에 대해 최대 5년의 저항 기간을 가진다는 것을 확인하였다.

원인 분석 결과, 완충 고무는 시간의 경과에 따라 노화가 진행되었으며, 경도 저하 등의 물성 변화와 지속적인 하중으로 파손된 것으로 추정되었다.

완충 고무의 파손은 운용 인원의 안전과 큰 연관이 있으며, 유사체계의 통신 쉘터에서는 동일한 문제가 발생하지 않았다. 이를 고려할 때, 통신 쉘터의 스킵 조립체 내 완충 고무의 파손은 설계상 내구성 및 신뢰성 부족에서 기인한 것으로 품질개선이 필요하다고 판단하였다.

2. 스킵 조립체의 개선요구사항 도출 및 개선된 형상 설계

2.1. 유사 체계 쉘터 스킵 조립체 검토

품질개선을 수행하기 위해, 생산 후 5년이 지난 시점에도 완충 고무가 파손이 일어나지 않은 유사 체계에 사용되는 통신 쉘터(이하 유사 체계 쉘터)의 스킵 조립체를 검토하였다. 유사 체계 쉘터의 스킵 조립체는 완충 고무가 파손된 통신 쉘터(이하 고무 파손 쉘터)와 같이 상, 하부 브래킷과 완충 고무로 구성되어 있고, 상/하부 브래킷이 완충 고무를 감싸는 형태이다. 또한, Figure 2와 같이 타원형 홀을 통해 볼트가 브래킷을 관통해 체결되는 형태이다.

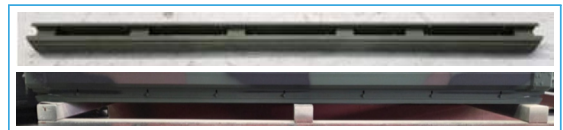


Figure 2. Comparison of skid assembly

이는 볼트가 홀을 따라 움직임이 위아래로 제한되어 완충 고무가 일정 이상의 변형 즉, 응력을 받지 않도록 한다. 구조가 단순하여 다양한 축으로 인장

및 압축 응력, 비틀림 등을 모두 받을 수 있는 고무 파손 헬터의 스키드 조립체와 비교하면 충격에 대한 내구성이 유리한 구조이다.

완충 고무 측면에서 유사 체계 헬터는 에테르 재질의 고무를 사용하였으며, Figure 3과 같이 고무 가운데에 홀 가공이 되어있어 고무 파손 헬터와 차이점을 보였다. 이러한 차이점은 고무 파손 헬터의 스키드 조립체에 대한 품질개선을 위한 설계사항으로 반영하였다.

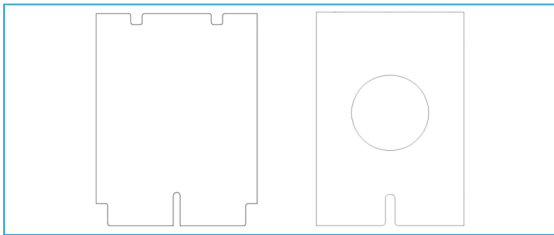


Figure 3. Comparison of elastomer shape

2.2. 완충 고무 연구사례 검토

폴리우레탄 고무는 형상에 따라 강성도와 유효 압축 모듈러스가 달라지고, 유효 압축 모듈러스 및 강성도가 높을수록 충격을 더 많이 흡수한다[2]. 또한, 경도에 따른 동적 탄성률(Dynamic modulus) 측정 실험을 수행하였다. 경도가 큰 고무일수록, 동적 탄성률도 증가하였고 충격에 따른 최대 변형량이 적어지는 결과가 나타났다[3]. 그리고 폴리우레탄 고무가 온도 및 습도에 의해 내구성에 영향을 받는 것을 확인하였다[4-5].

폴리우레탄 에스테르는 에테르의 내구성을 개선한 것으로, 인장강도 및 내유성, 내마모성이 강한 장점이 있다. 그리고 폴리우레탄 에테르는 에스테르와 비교하였을 때, 물에 대한 안전성이 강하고, -32 0°F~300°F(약 -195℃~149℃)의 온도에서 더 높은 압축강도를 보이는 것으로 나타났다[6-7].

위의 연구사례로부터 폴리우레탄 고무는 온/습도에 노출되면, 노화가 일어나 내구성에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 고무의 형상에 따

라 유효 압축 모듈러스가 달라지므로 완충 고무에 가해지는 응력에 대한 변형이 달라질 수 있다. 마지막으로, 폴리우레탄 에테르는 폴리우레탄 에스테르와 비교하여 온/습도에 대한 안정성이 강하다. 즉, 일반 군의 운용 환경을 고려할 때, 폴리우레탄 에스테르 재질보다 에테르가 더 적합한 재질이다. 이 연구 결과는 스키드 조립체와 완충 고무 품질개선 설계에 적용되었다.

2.3. 스키드 조립체의 설계사항 도출

유사 체계 헬터의 스키드 조립체 및 연구자료 분석으로부터, 고무 파손 헬터의 스키드 조립체의 품질개선을 위한 설계 요구사항이 도출되었다.

- 1) 완충 고무에 홀 가공을 추가하여 유효 압축 모듈러스를 향상, 충격 흡수 성능을 개선한다.
- 2) 군의 운용 환경을 고려하여 고무의 재질을 기존의 에스테르에서 에테르로 변경한다.
- 3) 완충 고무가 일정 이하의 수직 방향의 하중만 받을 수 있도록 스키드 조립체를 설계한다.
- 4) 소형전술차량의 허용 하중을 고려하여 개선된 스키드 조립체의 무게를 가능한 한 늘리지 않는다.

2.4. 스키드 조립체의 형상설계

도출된 설계사항을 바탕으로 3개의 개선된 스키드 조립체를 설계하였다. Table 1은 설계 요구사항

Table 1. Comparison of the Improved Skid

	Basic model	Improved model 1	Improved model 2	Improved model 3
Rubber hole	-	27mm	40mm	27mm
Rubber material	Ester	Ether		
Bracket shape	Flat	U-shaped		U-shaped (Side-cut)
Stress limit	-	M8 bolt through the bracket (Only compressive)		
Weight	48kg	62kg	61kg	50kg

이 반영된 스키드 조립체를 비교 요약한 것이다.

한편, 기본/개선된 스키드 조립체에 대해 구조해석 및 충돌해석 검증에 위한 3D 유한요소 모델을 작성하였다. 또한, 개선된 스키드 조립체와 구조/충돌 해석 결과를 비교하기 위해 기존 형상도 작성되었다. 기존 형상은 Figure 4와 같이 상·하부 브래킷 사이에 홀 가공되지 않은 완충 고무가 존재하는 구조로, 바닥으로부터 오는 모든 응력과 충격을 완충 고무가 받는다. 완충 고무의 움직임을 제한하는 구조적 장치가 없어서 수직 및 전단 응력을 받는 구조이며, 총 중량은 48kg이다.

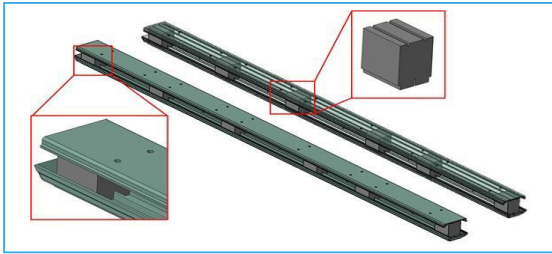


Figure 4. Shape of basic model

개선품 모델 1은 Figure 5와 같이 유사 체계 셀터의 스키드 조립체를 참고하여 유사한 형상으로 설계하였다. 상·하부의 브래킷은 완충 고무가 자외선에 노출되지 않도록 ‘ㄷ’자 모양으로 감싸고, 상·하부 브래킷의 날개 부분에 M8 사이즈의 볼트가 가공된 타원형 홀을 통과하여 체결된다. 완충 고무는 기본 모델에 27mm의 홀 가공을 적용하였다.

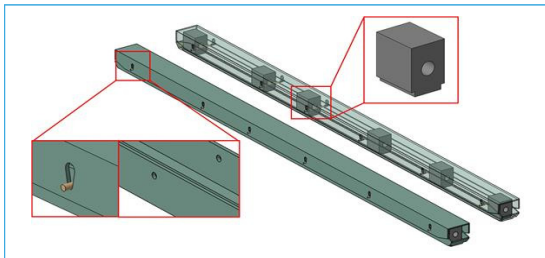


Figure 5. Shape of improved model 1

이러한 구조는 완충 고무가 충격으로 수직 압축 응력만 받을 수 있게 되며, 압축 응력 또한 제한할 수 있으므로 완충 고무의 내구성이 향상된다. 아울러,

완충 고무의 압축 모듈러스가 개선되어 충격 흡수 성능이 개선된다. 개선품 모델 1의 무게는 기본 모델에 형상과 볼트 등이 추가되어 62kg으로 계산되었다.

개선품 모델 2의 형상은 Figure 6과 같이 개선품 모델 1의 형상과 같으나, 완충 고무의 홀 가공 크기만 27mm에서 40mm로 변경되었다. 고무의 기계적 특성은 그 형상에 영향을 받기 때문에, 홀 가공 치수가 40mm일 때의 완충 고무의 기계적 거동을 비교하기 위하여 설계하였다. 총 중량은 61kg이다.

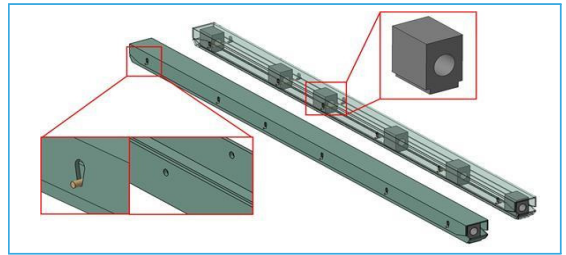


Figure 6. Shape of improved model 2

개선품 모델 3은 모델 1에서 경량화를 위해 Figure 7과 같이 상·하부 브래킷 날개 부분의 살 빼기를 적용한 형상이다. 완충 고무의 홀 가공 치수는 개선품 모델 1과 같은 27mm이며, 살 빼기 부분은 유선형의 곡선으로 설계하여 회전 낙하 시에 한쪽 끝에서 전해지는 충격으로부터의 변형을 방지할 수 있게 했다. 총 중량은 50kg으로 계산되었다.

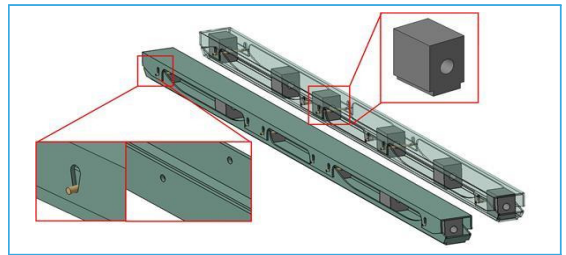


Figure 7. Shape of improved model 3

2.5. 스키드 조립체의 설계검증

스키드 조립체 설계에 대한 검증을 위해 DFMEA (Design Failure Mode and Effect Analysis) 기

Table 2. DFMEA for Failure Mode (S: Severity, O: Occurrence, D: Detection, RPN : Risk Priority Number)

Effect of failure	Cause	Before improvement				Action item	Design target	After improvement			
		S	O	D	RPN			S	O	D	RPN
Rubber breakage	Strength	8	5	10	400	Change rubber shape	Rubber	8	1	10	80
	Stress					Limit rubber movement	Skid bracket				
	Temperature					Change the material of rubber	Rubber				
	Humidity										

법을 이용하여 Table 2와 같이 정리하였다. 고장모드는 완충 고무파손이고, 고장 영향은 헬터의 차량 이탈 및 차량 전복으로 설정하였다. 고장 원인은 1) 고무의 기계적 강도 부족, 2) 온/습도에 의한 경화, 3) 고무에 작용하는 복합 응력이다. 스키드 조립체의 무게는 고장모드와 연관이 적다고 판단하여 제외하였다.

분석 결과, 기본 스키드 조립체는 고장모드 발생 시 인명피해의 가능성(S)과 시간에 따른 고무의 경화(O), 운전자 관점에서 사전 검출이 어려운 점(D)을 들어 RPN(S×O×D)이 400으로 계산되었다. 이는 여러 연구사례로 보아 개선이 필요하다고 할 수 있다[8-10]. 개선품은 기존품과 유사한 형태로 영향의 심각도와 검출도는 변함이 없으나, 운용 환경에 맞는 재질 및 스키드 브래킷 변경으로 인한 고무의 피로 저하로 발생빈도가 낮아져 RPN이 80으로 감소한 결과를 보였다.

3. 개선된 스키드 조립체의 구조 해석 및 충돌 해석 검증

3.1. 스키드 조립체 해석 조건

작성된 4가지의 스키드 조립체 형상에 대한 기계적인 성능(응력, 변형량)을 확인하고 비교하기 위해 구조해석 및 충돌해석을 위한 시나리오를 구상하고, 해석을 수행하였다.

유한요소모델 작성 및 구조해석은 Ansys社の의 APDL(ANSYS Parametric Design Language)과 Ansys Mechanical을 이용하였으며, 충돌해석은 동

사의 Ansys LS-Dyna로 수행하였다. 모델은 상/하부 스키드 브래킷, 고무, 볼트의 4가지 컴포넌트로 구성하였다. 재질은 각 컴포넌트의 실물을 고려하여 적용하였다(단, 볼트는 임의의 재질을 적용). 모델의 상·하부 브래킷은 알루미늄을, 완충 고무의 소재는 폴리우레탄 고무를 적용하였으며, 볼트는 SM45C를 적용하였다. 각 소재에 적용된 기계적 물성은 Table 3과 같다.

Table 3. Mechanical Properties of Materials

Mechanical properties	Aluminium	SM45C	Polyurethane rubber
Density(kg/m³)	2,700	7,600	1,255
Elastic modulus (MPa)	68,900	207,000	Hole 0: 58.17 Hole 27: 58.43 Hole 40: 58.76
Poisson's ratio	0.33	0.3	0.4
Yield strength(MPa)	215	370	-
Tangent modulus(MPa)	500	1,450	-

3.2. 스키드 조립체 구조해석

3.2.1. 스키드 조립체 구조해석 조건

구조해석은 최대 중량을 상정한 헬터가 차량에 올린 후 턴버클로 고정된 상태를 시나리오로, 헬터의 차중과 턴버클의 장력이 스키드 조립체에 작용하는 응력과 변형량을 분석하기 위해 Figure 8과 같이 수행하였다. 단, 볼트에 작용하는 응력은 미미할 것으로 판단되어 볼트의 기계적인 성능 분석은 수행하지 않았다.

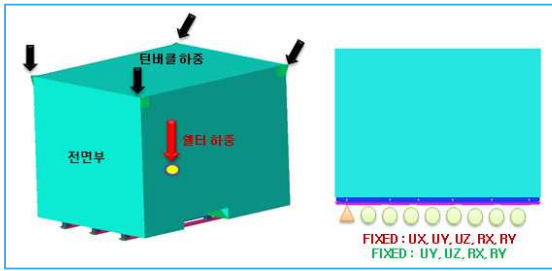


Figure 8. Conditions for structural analysis

3.2.2. 스킨드 조립체 구조해석 결과

스킨드 조립체의 구조해석 결과는 Figure 9와 같으며, 모든 스킨드 조립체에서 전면부에 응력 집중 현상과 이에 따른 최대 변형량이 발생하였다. 이는 통신 주장비들이 쉘터의 앞부분에 탑재되어 무게 중심이 쉘터의 앞부분에 위치하기 때문으로 보인다.

스킨드 브래킷에서는 모든 모델에서 전면부 끝단에서 최대 변형이 발생하였다. 최대 응력은 기본 모델의 경우 상부 브래킷의 옆 날개 부분에서, 개선품 모델 2와 3에서는 상부 브래킷의 볼트 홀에서, 마지막 모델 3에서는 살 빼기가 적용된 곡선 부분에서 발생하였다.

완충 고무 또한 전면부 스킨드 조립체 내의 고무에서 최대 변형량 및 최대 응력이 발생하였다. 구체적으로 변형량의 경우 공통으로 완충 고무의 상단부에서 가장 많은 변형을 보였다. 응력의 경우 기본 모델은 고무 분포된 결과를 보였지만, 개선품 모델들에서 홀 가공된 부분에 응력이 집중된 결과를 보였다. Table 4와 5는 각각 스킨드 브래킷과 완충 고무에 대한 구조해석 결과를 요약한 것이다.

Table 4. Result of Structural Analysis of the Skid Bracket

Skid assembly	Maximum of deformation(mm)	Maximum of stress(MPa)
Basic model	1.51	11.2
Improved model 1	1.89	26.0
Improved model 2	2.53	30.8
Improved model 3	1.95	17.7

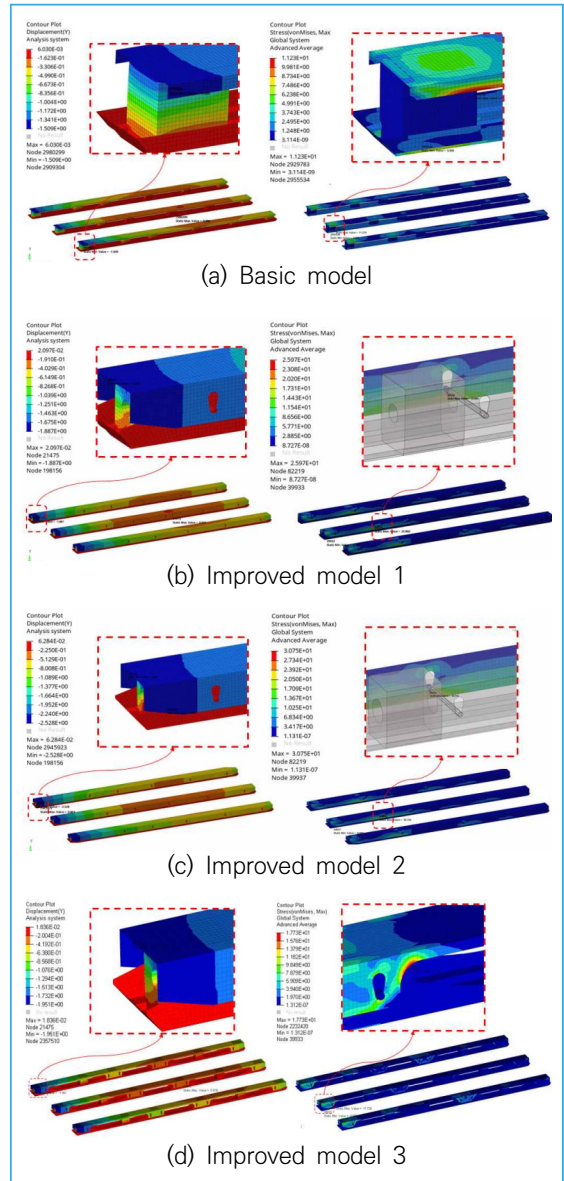


Figure 9. Result of structural analysis

Table 5. Result of Structural Analysis of the Rubber

Category	Maximum of deformation(mm)	Maximum of stress(MPa)
Basic model	1.49	2.24
Improved model 1	1.83	2.29
Improved model 2	2.47	3.00
Improved model 3	1.89	2.35

구조해석 결과를 비교하였을 때 개선품 모델은 기본 모델보다 더 높은 최대 변형량과 응력을 보여주었다. 이는 스키드 브래킷의 형태 및 완충 고무의 형상 변경에 따른 것에 기인한 것으로 판단된다. 특히, 개선품 모델 2는 개선품 모델 1과 비교하여 스키드 브래킷 및 완충 고무에서 최대 변형량과 최대 응력이 모두 상대적으로 높은 결과를 보여주었다. 이에 따라, 같은 구조해석 조건에서 완충 고무의 내부 홀 가공 크기가 커질수록 스키드 브래킷뿐 아니라 완충 고무에 작용하는 응력과 변형량이 증가한다는 결과를 확인할 수 있다.

3.3. 스키드 조립체 충돌해석

3.3.1. 스키드 조립체 충돌해석 조건

충돌해석은 헬터의 항공 운송 후 지면 착륙 시 받는 충격을 시나리오로, 최대 중량을 가진 헬터가 지면으로부터 일정 높이에서 떨어지는 것을 가정하였다. 낙하의 형태는 헬터를 평행하게 들어 올린 후 떨어뜨리는 평낙하와 헬터의 전/후/측면 한쪽만 들어 올린 후 떨어뜨리는 회전 낙하로 나누었다. 단, 충돌 해석을 위한 시간을 줄이기 위하여 헬터를 충돌 직전까지 위치시킨 후, 헬터에 Table 6과 같이 속도, 가속도 등 운동 특성을 부여하고 Figure 10~13와 같이 충돌해석을 수행하였다.

Table 6. Conditions for Drop Impact Test

Category	Conditions of drop impact test
Flat	Gravitational acceleration : 9.81m/s ² Velocity : 3.003m/s
Rotational (Side)	Gravitational acceleration : 9.81m/s ² Angular velocity : 1.49rad/s
Rotational (Front)	Gravitational acceleration : 9.81m/s ² Angular velocity : 0.8rad/s
Rotational (Rear)	Gravitational acceleration : 9.81m/s ² Angular velocity : 0.86rad/s

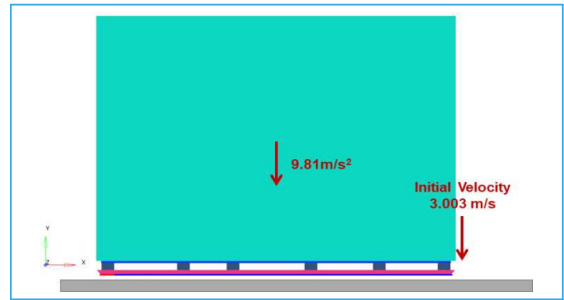


Figure 10. Condition of flat drop impact test

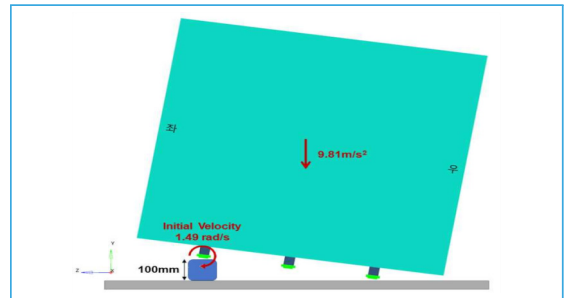


Figure 11. Condition of rotational drop impact test (Side)

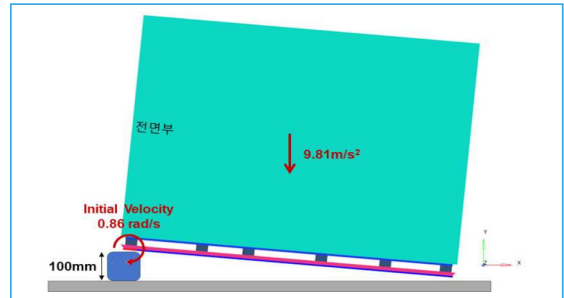


Figure 12. Condition of rotational drop impact test (Front)

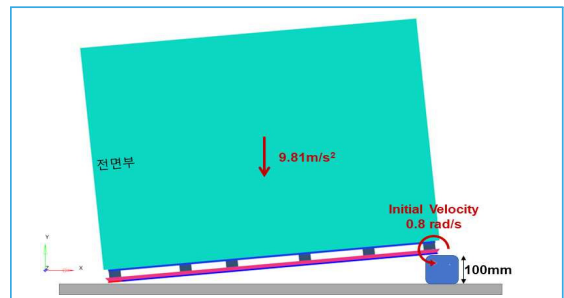


Figure 13. Condition of rotational drop impact test (Rear)

3.3.2. 스키드 조립체 충돌해석 결과

3.3.2.1. 스키드 브래킷 충돌해석 결과(평낙하)

스키드 조립체의 충돌해석 결과는 Table 7에 정리하였다. 평낙하 시험에서는 개선 후의 스키드 조립

체에 작용하는 충격량과 충격력이 기존과 비교하여 감소함을 확인하였다. 이는 Figure 14와 같이 개선된 스키드 조립체의 충격 시간이 기존 스키드 조립체보다 더 길기 때문으로 보인다. 한편, 개선된 모델 2는 모델 1과 비교하여 충격량과 평균 충격력은 같

Table 7. Result of Drop Impact Analysis of the Skid Assembly

Skid assembly	Condition of drop impact test	Impulse (kN·s)	Maximum of impulsive force	Average of impulsive force	Maximum Von-Mises Stress(MPa)
Basic model	Flat	15.6	1,557.6	741.3	Bracket: 95.5
	Rotational (Side)	7.9	491.1	247.6	Bracket: 100.0
	Rotational (Front)	5.9	352.6	184.6	Bracket: 185.5
	Rotation (Rear)	5.5	324.1	167.0	Bracket: 139.1
Improved model 1	Flat	15.5	1,090.6	672.9	Bracket: 121.2 Bolt: 304.1
	Rotation (Side)	8.1	337.0	198.5	Bracket: 219.6 Bolt: 360.2
	Rotation (Front)	5.9	224.1	137.2	Bracket: 222.1 Bolt: 372.1
	Rotation (Rear)	5.5	209.7	128.8	Bracket: 217.4 Bolt: 370.5
Improved model 2	Flat	15.0	1,230.1	427.6	Bracket: 347.9
Improved model 3	Flat	15.4	1,093.9	669.8	Bracket: 95.6 Bolt: 263.6
	Rotation (Side)	8.1	329.4	196.8	Bracket: 220.3 Bolt: 370.8
	Rotation (Front)	5.9	219.3	133.3	Bracket: 215.7 Bolt: 369.3
	Rotation (Rear)	5.5	203.5	125.8	Bracket: 215.0 Bolt: 323.9

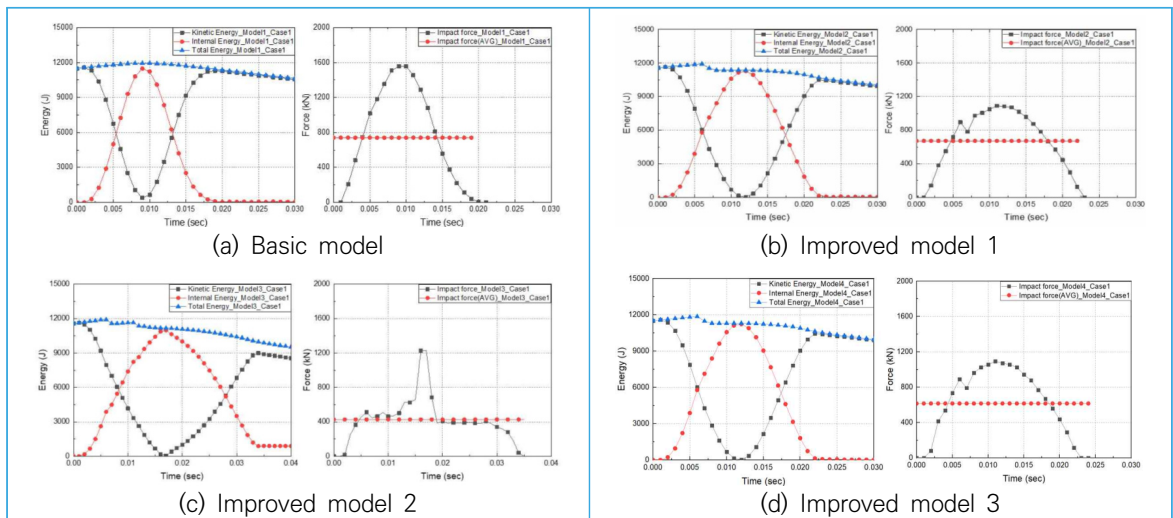


Figure 14. Result of flat drop impact analysis

소하였으나 최대 충격력과 응력이 증가하였는데, 이는 완충 고무가 충격을 흡수하며 압축되는 과정에서 볼트의 허용 거리를 넘어 볼트가 브래킷의 홈 하한 부를 타격했기 때문으로 보인다. 또한, 스키드 브래킷에 작용하는 하중이 허용응력을 크게 초과하여 개선품 모델 2는 낙하 충격 시 영구변형 및 파손의 우려가 있어 헬터에 적용하기 어려운 것으로 판단하였다.

낙하 충격 시의 스키드 브래킷에 작용된 최대 응력은 기본 모델보다 개선품이 더 높은 결과가 나타났다. 기존 모델의 최대 응력은 하부 스키드 브래킷에, 개선품 모델은 볼트 체결 부에서 작용하였다. 그러나, 개선품 모델 2를 제외한 각 개선품 스키드 브래킷 및 볼트에 작용된 최대 응력은 재료의 항복 응력을 초과하지 않기 때문에 조립체 구조상 평낙하 충격에 대해 안전한 것으로 판단하였다.

3.3.2.2. 스키드 브래킷 충돌해석 결과(회전 낙하)

회전 낙하 해석 결과에서 개선품 모델은 충격량에서 기본 모델과 유사한 결과를 보였고 충격력은 더 낮은 결과를 보여주었다(개선품 모델 2는 평낙하에서 헬터 적용에 적합하지 않다고 판단하여 회전 낙하를 수행하지 않았다). 이는 평낙하와 마찬가지로 개선품 모델의 낙하 시 충돌 시간이 Figure 15-17과 같이 기본 모델에 비해 길어져 낮아진 것으로 보인다. 최대 응력 역시 평낙하와 마찬가지로 개선품 모델이 기본 모델보다 높다.

개선품 모델의 스키드 브래킷 및 볼트에 작용한 응력은 Table 7과 같이 낙하 면에 따라 해당 재질의 항복 응력을 넘는 결과가 나타났다. 이는 회전 낙하 충격 시 스키드 조립체에 영구 변형이 발생할 수 있다는 가능성을 시사하므로, 실 제품에 적용할 때에는 항복 응력이 해석 결과에서 보인 최대 응력보다 높은 재질을 사용해야 한다.

3.3.2.3. 완충 고무 충돌해석 결과

완충 고무에 대한 충돌해석은 개선품 모델 1과 3이 같은 홈 치수의 완충 고무를 사용하므로, 기본 모

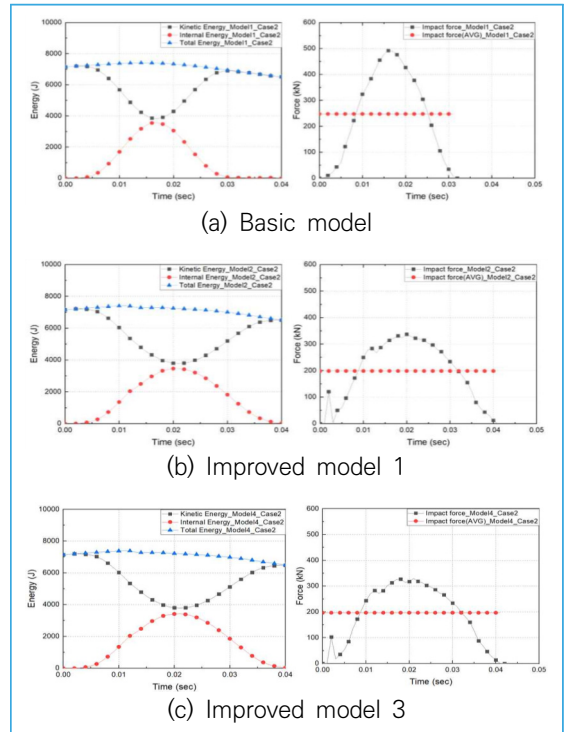


Figure 15. Result of rotational drop impact analysis (Side)

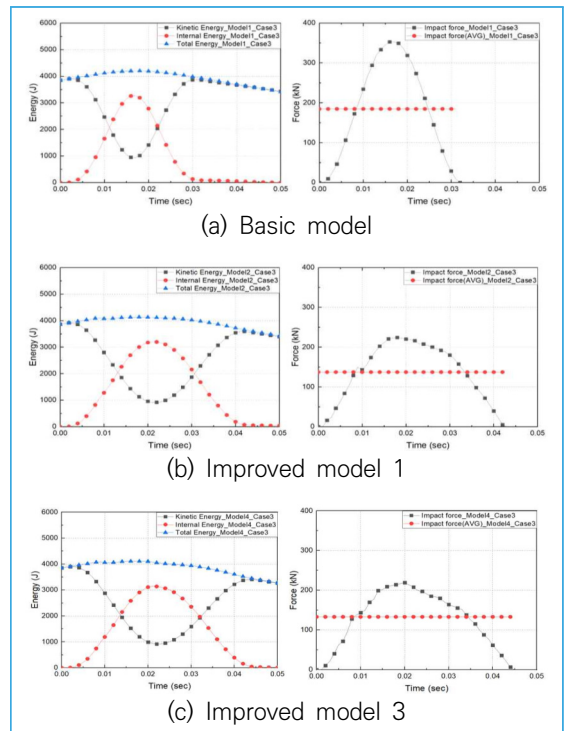


Figure 16. Result of rotational drop impact analysis (Front)

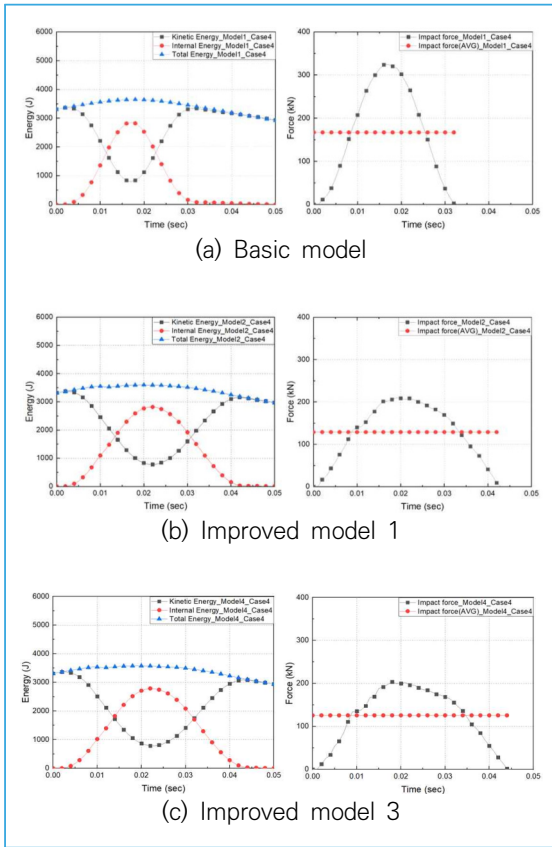


Figure 17. Result of rotational drop impact analysis (Rear)

텔의 완충 고무와 개선품 모델 3의 완충 고무에 대해 수행되었다. 또한, 전면 회전 낙하와 후면 회전 낙하에서 완충 고무의 충돌해석 결과가 유사할 것으로 판단하여 전면과 측면에 대한 회전 낙하 충돌해석을 수행하였다.

Table 8은 완충 고무의 충돌해석 결과로 낙하시험의 종류와 상관없이 기본 모델과 비교하여 개선품 모델 3의 최대 변형량은 증가하였으나 최대 응력은 감소한 것을 확인할 수 있다.

Figure 18은 평낙하 시험 결과로 기본 모델과 개선품 모델 3은 전체 완충 고무에 걸쳐 응력이 작용하나 전면에 특히 큰 응력과 변형량이 발생하였다. 이는 전술한 바와 같이 쉘터의 무게 중심이 쉘터의 전면에 위치하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 8. Result of Rotational Drop Impact Analysis of the Rubber

Skid assembly	Condition of drop impact test	Maximum of deformation (mm)	Maximum Von-Mises Stress(MPa)
Basic model	Flat	22.23	28.99
	Rotation (Side)	22.91	36.19
	Rotation (Front)	27.06	44.35
Improved model 3	Flat	23.35	26.84
	Rotation (Side)	25.56	30.80
	Rotation (Front)	31.37	34.53

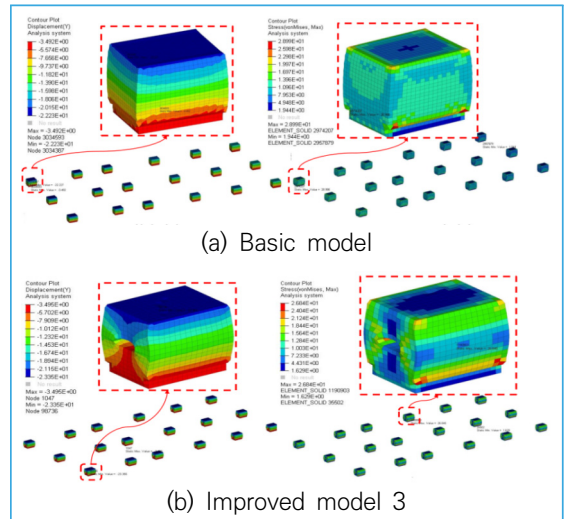


Figure 18. Result of rotational drop impact analysis (Flat)

측면 낙하인 Figure 19에 따르면, 기본 모델과 개선품 모델 1의 낙하한 쪽 완충 고무에서 최대 응력과 최대 변형량이 발생하였다. 개선품 모델 1의 측면 낙하에 대해 기본 모델보다 최대 변형량이 약 2.7mm 늘어난 반면, 최대 응력은 약 5.4MPa 감소하는 효과를 나타내었다.

전면 낙하도 측면 낙하와 마찬가지로 Figure 20과 같이 전면부의 완충 고무에서 최대 변형량과 응력이 발생하였으며, 평낙하와 회전 낙하를 통틀어 가장 큰 변형량과 응력이 나타난 결과를 보여주었다. 기본 모델과 개선품 모델 3의 기계적인 성능도 큰 차

이를 보여주었는데, 개선품 모델 3의 변형량이 기본 모델보다 약 4.3mm 늘어난 반면, 최대 응력은 약 9.8MPa이 감소하는 효과를 보여주었다.

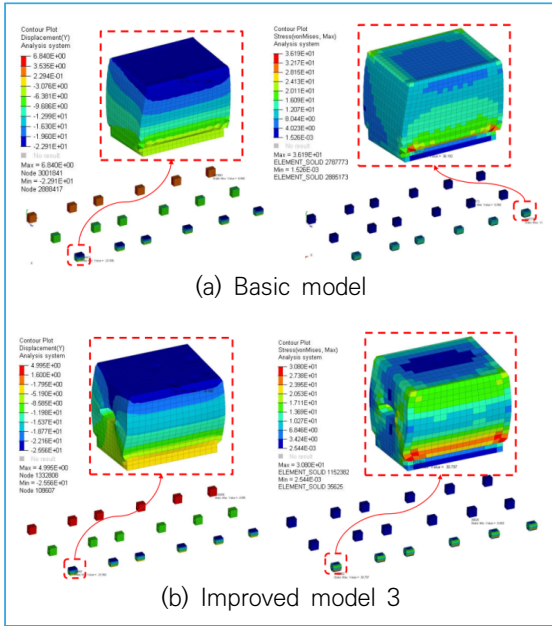


Figure 19. Result of rotational drop impact analysis (Side)

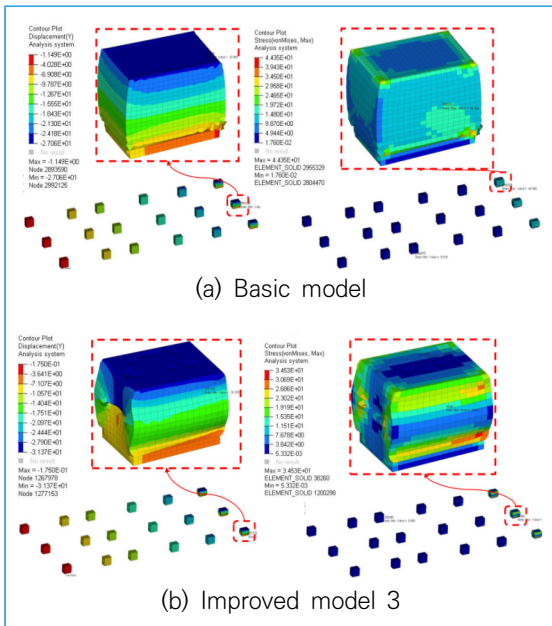


Figure 20. Result of rotational drop impact analysis (Front)

4. 스키드 조립체 품질개선 결과

4.1. 스키드 조립체 개선품 형상 결정

본 연구에서는 완충 고무의 내구성을 향상하기 위하여 유사 체계 헬터의 스키드 조립체를 검토, 연구 논문 분석 등을 통해 설계사항을 도출하였다. 도출된 설계사항을 적용하여 3가지의 개선품 모델을 작성하고, 구조해석 및 충돌해석을 수행하였다.

그 결과, 개선품 모델 2는 낙하 충격 시 스키드 조립체의 영구 변형과 파손 발생 가능성이 커 선정 대상에서 제외되었다. 개선품 모델 1과 3은 기본모델과 비교하여 구조해석에서 응력과 변형량이 증가하였으나 유의미한 수준은 아니었다. 충돌해석에서 충격량은 유사하나 충격력이 감소한 결과를 보여주었으며 스키드 브래킷의 최대 응력이 증가하였다.

개선품 모델 1과 3을 비교하였을 때, 구조해석 상 변형량에서 유의미한 차이를 보이지 않았으며 개선품 모델 3의 스키드 브래킷 응력이 8.3MPa 감소한 결과를 보여주었다. 평낙하에서는 충격량과 충격력에서 큰 차이를 보이지 않았으나, 개선품 모델 3의 브래킷과 볼트의 최대 응력이 더 낮은 결과를 보여주었다. 마지막으로 회전 낙하에서는 개선품 모델 3의 브래킷과 볼트에 작용하는 응력이 대체로 더 낮은 결과를 보여주었다. 무게 또한 50kg으로 62kg인 개선품 모델 1보다 10kg 이상 더 가볍다.

따라서, 개선품 모델 3이 최종 형상으로 결정되었다. 다만, 구조해석 및 충돌해석에서 설계 미흡 사항이 발견되어 형상을 일부 보완하였다.

첫째, 완충 고무의 수를 6개에서 7개로 늘려 스키드 조립체의 기계적 성능을 개선하였다. 둘째, 낙하 충격 시 볼트에 가해지는 응력을 보완하기 위하여 8mm에서 10mm로 치수를 변경하고, 볼트 재질을 기계 구조용 탄소강 SM45C에서 스테인리스강 볼트 (A2-70-ST5)로 변경하였다. 볼트의 항복강도가 370N/mm²에서 450N/mm²로 높아지므로 안전성이 강

화되었다. 그리고 완충 고무 수만큼 체결되는 볼트 수도 1개 추가하였다. 셋째, 개선품 모델 3은 일부 완충 고무가 바깥에 노출되는 구조로 자외선에 노출되면서 완충 고무의 내구수명이 감소할 가능성이 있다. 그러므로 완충 고무가 위치한 곳에 스킨드 브래킷 날개를 π 자로 감싸 자외선에 노출되지 않게 하였다. 넷째, 볼트를 통해 완충 고무의 상하 움직임을 제한하였으므로 완충 고무가 흡수할 수 있는 응력이 작용할 경우, 남은 충격이 셸터로 올라올 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 상대적으로 취약한 셸터 후면 판넬(내부)에 브래킷을 장착하였다. 마지막으로, 연구사례를 참고하여 개선된 스킨드 조립체의 완충 고무가 유사 체계 셸터보다 향상된 동적 탄성률을 갖도록 경도 기준을 높였다. 이러한 설계 보완으로 무게가 일정 부분 증가하였으나, 기존 셸터의 무게 경향으로 보았을 때 규격에는 만족하는 것으로 판단하였다. 최종 완성된 스킨드 조립체 개선품의 형상은 Figure 21-24와 같다.

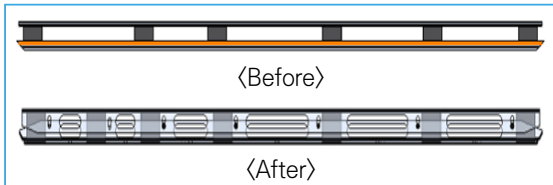


Figure 21. Comparison of the skid assembly

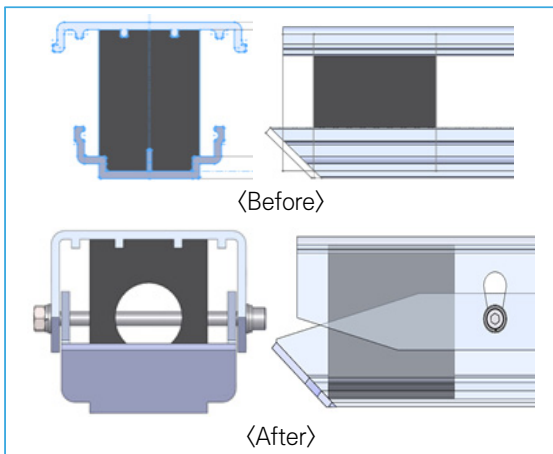


Figure 22. Comparison of the skid bracket

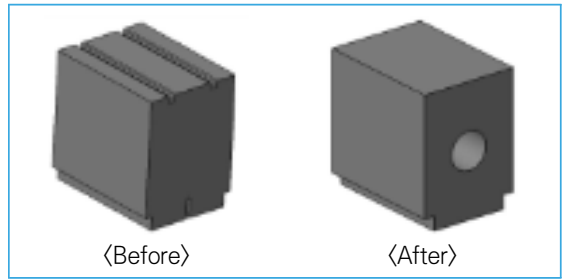


Figure 23. Comparison of the rubber

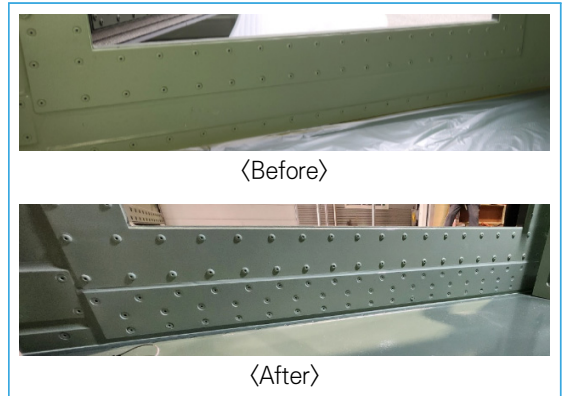


Figure 24. Comparison of the bracket

4.2. 시제품 검증

설계가 완료된 개선 스킨드 조립체에 대한 기능 검증을 위해, 관련 규격에서 스킨드 조립체와 관련하여 명시된 시험을 수행하였다. 시험 항목은 Table 9에 명시된 9가지이며 수행 결과, 규격의 요구조건에 만족하였다(단, 차량 수송 시험은 셸터 후면 판넬(내부)에 브래킷을 보강하기 전 수행했다).

5. 결론

본 연구에서는 군에서 운용 중인 통신 셸터의 완충 고무파손 사건을 시작으로 통신 셸터의 스킨드 조립체 개선을 수행하였다. 개선에 앞서, 파손 현상을 파악하기 위해 군에서 같은 스킨드 조립체를 사용하는 통신셸터에 대한 완충 고무 파손 실태를 조사하였다. 그리고 파손 원인을 검토하기 위해 완충

고무의 재질분석과 헬터 하중 분석, 관련 규격 검토 등을 수행하였다. 그 결과 환경요인에 영향을 받는 시효성 자재인 고무의 시간에 따른 열화로 인해 파손이 발생한 것으로 판단하였으며 현상의 위험성을 고려하여 스킨드 조립체의 품질개선이 필요한 것으로 판단하였다.


유사 체제 헬터의 스킨드 조립체를 분석하고, 연구 논문을 검토하여 스킨드 조립체의 설계사항을 도출하였다. 도출된 설계사항을 바탕으로 3가지의 개선품 모델을 작성하고 컴퓨터 해석 프로그램으로 구조 및 충돌해석을 수행하여 가장 적합한 모델을 선정하였다.

선정된 개선품 모델은 추가적인 설계 보안을 거쳐 시제품으로 제작되고, 관련 국방규격에 따라 시제품을 검증하였다. 그 결과, 선정된 개선품 모델은 규격의 요구조건을 만족하였으며, 기술변경을 통해 통신 헬터의 생산에 적용되었다.

본 연구에서 수행한 스킨드 조립체의 품질개선을 통해 기존의 스킨드 조립체가 내재한 고장모드(완충 고무 파손)에 대한 내구성이 향상했으리라 판단한다. 그러나, 여전히 완충 고무의 고장으로 인한 영향의 심각도가 높고, 고장 모드 검출도를 높이기 위한 개선은 이루어지지 않았다. 이를 해결하기 위해, 운용 환경에서 완충 고무의 수명을 파악하고 주기적으로 교체함으로써 고장을 예방할 수 있을 것으로 판단한다. 아울러, 고 하중과 반복 하중에서 탄성 특성이 좋으면서도 자연환경에서의 내구성이 좋은 폴리우레탄 고무를 적용할 수 있다면 더욱 강건한 스킨드 조립체를 설계 및 적용할 수 있을 것이라 기대된다.

본 연구사례와 같이, 수요가 있는 군수품에 대한 품질개선이 시의적절이 이루어진다면 군수품이 최적의 성능을 발휘하는 데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

Table 9. Result of Military Standard Test

Test	Picture	Result
1 st immersion		Pass
1 st water spray		Pass
Flat drop		Pass
Rotational drop		Pass
2 nd immersion		Pass
2 nd water spray		Pass
On-road		Pass
Off-road		Pass
EMI shielding	-	Pass

참고문헌

- 1 MIL - HDBK - 695E Rubber Product: Recommended Shelf Life, Department of Defense (USA), 2011.
- 2 Choi, E., Park, S., & Woo, D., "Estimation of Compressive Stiffness of Polyurethane Rubber Springs and Its Application", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 29(3), pp. 229-236, 2017.
- 3 Kim, D. J., Kim, W. D., & Lee, Y. S., "A study on the Dynamic Modulus Measurement and Prediction of Rubber Structure on Low Velocity Impact", *Proceedings of the KSME conference*, pp. 1-4, 2004.

- 4 Lee, J. M., Song, K. O., Yoon, M. S., Ha, S. W., & Cho, S. Y., "Life Prediction of Polyurethane Rubber Spring Using Accelerated Heat Aging Test", *Proceedings of the KSME conference*, pp. 1566-1570, 2018.
- 5 Zimmer, B., Nies, C., Schmitt, C., Paulo, C., & Possart, W., "Chemistry, polymer dynamics and mechanical properties of a two-part polyurethane elastomer during and after crosslinking. Part II: moist conditions", *Polymer*, 149, pp. 238-252, 2018.
- 6 Ciesielski, A., *An Introduction to Rubber Technology*, Rapra Technology Ltd., 1999.
- 7 Madden, J. P., Keith Baker, G., & Smith, C. H., "Polyether-Polyol-and Polyester-Polyol-Based Rigid Urethane Foam Systems", *Journal of Cellular Plastics*, 8(4), pp. 201-207, 1972.
- 8 Pattnaik, S., "Design Failure Modes and Effects Analysis(DFMEA) of An All-Terrain Vehicle", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(6), pp. 339-345, 2015.
- 9 Lee, C. H., Yang, K. W., & Kim, S. B., "Reestablishment of RPN Evaluation Method in FMEA Procedure for K21", *Journal of Korean Society for Quality Management*, 40(3), pp. 306-315, 2012.
- 10 Ling, D., Huang, H. Z., Song, W., Liu, Y., & Zuo, M. J., "Design FMEA for A Diesel Engine Using Two Risk Priority Numbers", *2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 1-5, 2012.

3차원 가상착의를 활용한 제6·8차 사이즈코리아 데이터 기반 여군 전투복의 치수적합성 평가

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

Evaluation of the Size Suitability of Army Combat Uniforms for Women Using 3D Virtual Simulation Based on the Sixth and Eighth Size Korea Data

이옥경, Okkyung Lee

경북대학교, 의류학과, 조교수
Assistant Professor, Department of Clothing and Textiles,
Kyungpook National University

이예진†, Yejin Lee

충남대학교, 의류학과, 교수
Professor, Department of Clothing and Textiles, Chungnam
National University

Abstract

This study evaluated the fit and size suitability of military uniforms for women using a 3D virtual garment simulation based on anthropometric data from the sixth (2010) and eighth (2021) Size Korea surveys. The results showed that avatars based on the eighth survey data exhibited a higher degree of garment-body contact and a reduced mean of ease distance than those based on the sixth survey data. Additionally, stress analysis during movement revealed increased stress in specific body areas (center front, back chest, back sleeve, hip, and upper thigh) in the eighth survey avatars, with an expanded stress distribution around the waistband in seated positions. Notably, low size suitability was observed in areas not previously considered in the military uniform size chart selection, such as the chest circumference, hip circumference, and thigh area, that might restrict mobility and negatively impact combat performance. This study is significant because it objectively evaluates the fit of military uniforms for women using 3D virtual simulations and identifies key body areas to consider in next-generation uniform designs.

keywords : army combat uniforms, 3D virtual simulation, size suitability, Size Korea data, women

† Corresponding Author : Yejin Lee

Tel : +82-42-821-6824, email : yejin@cnu.ac.kr

Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised May 31st. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

현대 패션 산업은 4차 산업혁명의 영향으로 메타버스, 인공지능, 빅데이터 등 첨단 기술과 융합되고 있다. 특히, 3차원 가상착의 기술(3D virtual simulation technology)은 전통적인 의복 설계, 제작, 평가 방식을 혁신적으로 변화시키며, 패션 산업의 핵심 도구로 자리 잡았다. 이 기술은 실제 제작 과정 없이 제품을 확인할 수 있어 리드타임(Lead time) 단축, 디자인 자유도 확대, 의사소통 효율성 향상 등의 장점을 제공한다. 또한, 작업 공정 축소, 원가 절감, 탄소 배출량 및 화석연료 사용 감소 등의 환경적 이점도 갖추어 국내·외 패션 업체와 교육 기관에서 활발히 활용되고 있다[1-3]. 현재 글로벌 패션 기업들은 3차원 가상착의 기술을 적극 도입하여 샘플 제작 비용을 절감하고, 디자인 평가의 효율성을 높이고 있다. 예를 들어, 나이키(Nike)와 아디다스(adidas)는 이 기술을 활용해 의류의 착용감을 사전에 테스트하고 최적의 패턴을 설계하고 있다. 또한, 자라(Zara)와 H&M과 같은 패스트 패션(Fast fashion) 브랜드는 신속한 제품 출시를 위해 3차원 가상착의를 도입하여 프로토타입 제작 단계를 최소화하고 있다.

이러한 기술의 발전은 기능성 의류 분야에서도 활용 가능성이 높다. 방호복, 소방복, 방탄복과 같은 특수 의류뿐만 아니라, 정밀한 맞춤새 분석이 중요한 군복 제작에도 효과적으로 적용될 수 있다. 전투복(Combat uniform)은 군인의 생존성과 기동성을 보장하는 필수 장비로 디자인, 소재, 기능성, 착용 방법 등의 연구를 통해 지속적으로 개선이 이루어져 왔다[4-8]. 그러나 국내 여군 전투복의 치수 체계는 2011년 ‘인간공학적 여군 전투복 개발사업’과 2015년 ‘한반도 작전환경에 적합한 방한복 상의 내·외피 치수 체계 개발 및 패턴 개발사업’을 기반으로 정립된 이후[9] 지금까지 큰 변화 없이 유지되고 있는 실정이다.

제8차 사이즈코리아 인체치수조사에 따르면, 지

난 10여 년간 한국 여성의 평균 키가 커지고, 몸무게가 증가했으며, 다리가 길어지는 등 전반적 체격 변화가 나타났다고 보고되었다[10]. 이는 여군의 체형이 변화했을 가능성을 시사하며, 현재 운영 중인 여군 전투복이 변화된 여군의 신체 치수에는 어떠한 지 검토가 필요함을 의미한다. 전투복의 맞춤새와 치수적합성을 평가하기 위해서는 여군을 대상으로 한 실제 착용 평가가 필요하나, 군 내부에서 직접적 착의 실험을 진행하는 데는 현실적인 제약이 많다. 이를 해결할 대안으로 3차원 가상착의 기술이 활용될 수 있다.

관련 선행 연구에 따르면, 재킷, 팬츠, 스커트, 윈피스 등 다양한 의류 아이템에서 실제착의와 가상착의 간 유사성이 높게 나타나, 3차원 가상착의 평가의 신뢰성과 우수성이 입증되었다[11-15]. 이 기술을 활용하면, 다양한 체형 데이터를 반영한 가상 아바타를 제작하여 여러 동작 시 보다 과학적이고 객관적인 방식으로 맞춤새를 검증할 수 있다. 무엇보다, 실험적 접근이 어려운 군복 연구에서 효과적인 분석 도구로 활용될 수 있으며, 전투복 설계 및 개선 과정에서 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있다.

이에 본 연구는 최근 여군의 신체 치수 변화를 반영하여, 3차원 가상착의 기술을 활용해 여군 전투복의 맞춤새와 치수적합성을 과학적으로 검증하고자 하였다. 이를 위해 현재 여군 전투복 사이즈 체계의 기반이 된 제6차[16] 및 제8차 사이즈코리아[10] 인체치수조사 데이터를 활용하여, 여군의 주요 연령층(20~40대) 평균 신체 데이터를 기반으로 3차원 아바타를 각각 생성하고, 여군 전투복(상의: 85-164-W, 하의: 75-164-W) 착의 시 치수 체계의 개선이 필요한 부위를 정밀 분석하였다. 본 연구는 단순히 현행 치수 체계를 검토하는 데 그치지 않고, 여군 전투복 개발을 위한 체계적이고 데이터 기반의 개선 방향을 제시함으로써, 향후 군복 설계의 과학적 접근과 효율성 향상에 기여할 것으로 기대된다. 특히, 여군의 착용적합성과 동작편의성을 극대화하기 위한 실질적 기초 자료를 제공함으로써, 향후 군복 품질 향상과

착용자 만족도 제고에 실질적 영향을 미칠 것으로 전망된다.

2. 연구 방법

2.1. 실험대상자 및 아바타 생성

본 연구는 현용 여군 전투복의 치수적합성을 확인하기 위해 3차원 가상착의 아바타를 실험대상으로 활용하였다. 아바타의 치수는 여군의 주요 연령층(20~49세)을 고려하면서 현용 여군 전투복 설계의 기초자료가 된 제6차 사이즈코리아(1,675명)와 가장 최신 자료인 제8차 사이즈코리아(1,807명) 인체치수 조사의 직접 측정치 데이터(총 3,482명)로 설정하였다. 아바타 제작은 3차원 가상착의 시스템인 3D CLO(3D CLO Virtual Fashion Inc., 2025.0.324 version, Korea)의 여성 아바타 바디를 불러온 후 아바타 편집 기능을 통해 키, 가슴둘레, 허리둘레, 엉덩이둘레 등의 주요 신체 치수를 입력하고, ‘아바타 자동 변환’ 기능을 적용하여 Figure 1과 같이 생

성하였다. 2개의 아바타(6차 아바타 & 8차 아바타)에 사용된 주요 신체 치수 항목과 평균값은 Table 1에 제시하였다.

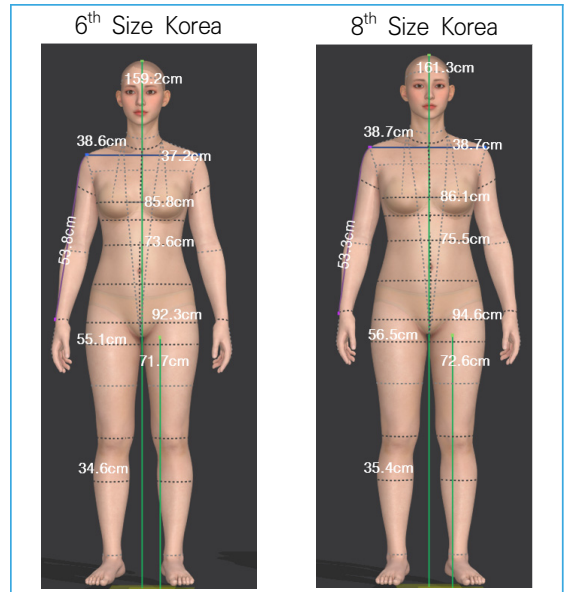


Figure 1. Comparison between avatars generated based on the 6th and 8th Size Korea average body measurements

Table 1. Body Size of the Avatars Based on the 6th and 8th Size Korea Data

Items	6 th Size Korea	8 th Size Korea
	Mean (Standard deviation)	
Height (cm)	159.2 (5.3)	161.3 (5.1)
Weight (kg)	55.2 (7.3)	57.9 (9.7)
Shoulder width (cm)	37.2 (2.6)	38.7 (2.1)
Arm length (cm)	53.8 (2.4)	53.3 (2.4)
Crotch (cm)	71.7 (3.7)	72.6 (4.3)
Neck base circumference (cm)	38.6 (2.1)	38.7 (2.9)
Chest circumference (cm)	85.2 (5.4)	88.1 (6.7)
Bust circumference (cm)	85.8 (6.9)	86.1 (8.1)
Waist circumference (cm)	73.6 (7.4)	75.5 (8.7)
Hip circumference (cm)	92.3 (4.9)	94.6 (6.5)
Thigh circumference (cm)	55.1 (3.9)	56.5 (5.2)
Calf circumference (cm)	34.6 (2.4)	35.4 (2.8)

2.2. 3차원 가상착의 방법 및 분석

2.2.1. 3차원 가상착의 방법

앞서 설명한 절차에 따라 생성된 두 개의 아바타에 동일한 사이즈의 상의(85-164-W)와 하의(75-164-W) 현용 전투복 패턴(Figure 2)을 착의시킨 후 가상착의 평가를 실시하였다. 전투복 사이즈는 상의의 경우 젓가슴둘레와 키, 하의의 경우 허리둘레와 키를 기준으로 선정하므로, 이를 고려하여 가장 적합한 사이즈를 적용하였다. 또한, 가상착의에 사용된 패턴은 국방부에서 제공한 사계절용 전투복(소재: 폴리에스테르 73%, 레이온 27%)이었다.

두 개의 아바타에 현 전투복을 가상착의시키는 과정에서 작업자의 숙련도에 따른 영향을 배제하기 위해 패턴을 아바타에 배치 시 배치 포인트(Arrangement points)를 사용하였고, 재봉 후 시뮬레이션(Simulation)은 자동으로 수행하였다. 전투복 소재는 CLO Fabric Kit(3D CLO Virtual Fashion Inc., Korea) 물성 측정기를 사용하여 Table 2와 같이 특성 값을 획득한 후 프로그램에 반영하였다. 두께는 0.5mm, 밀도는 19g/m²이었으며, 위사와 경사의 스트레치 성능은 각각 60g/s², 63g/s²이었다. 또한, 굽힘강성은 위사 방향 53g×mm²/s², 경사 방향 54g×mm²/s², 바이어스 방향 52g×mm²/s²으로 측정되었다.

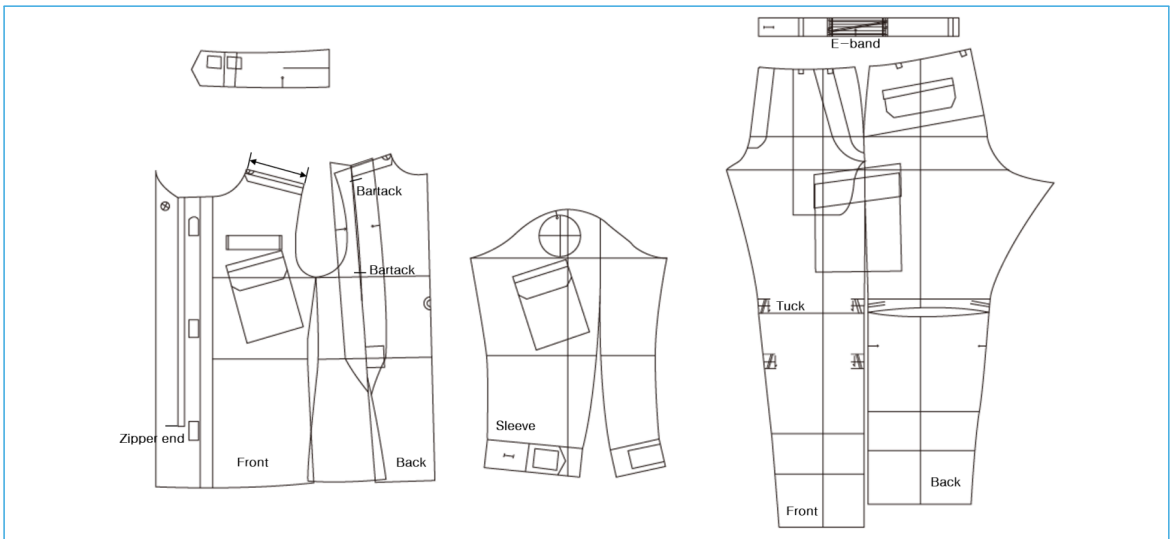


Figure 2. Pattern of women's army combat uniforms

Table 2. Material Properties of Army Combat Uniforms for Virtual Simulation Using CLO Fabric Kit

Items	Properties	Items	Properties
Weft stretch	60 (g/s ²)	Buckling ratio of bias	30 (No units)
Warp stretch	63 (g/s ²)	Buckling stiffness of weft	25 (No units)
Bias shear	46 (no units)	Buckling stiffness of warp	25 (No units)
Bending strength of weft	53 (g×mm ² /s ²)	Buckling stiffness of bias	25 (No units)
Bending strength of warp	54 (g×mm ² /s ²)	Internal damping	1 (No units)
Bending strength of bias	52 (g×mm ² /s ²)	Density	19 (g/m ²)
Buckling ratio of weft	30 (No units)	Coefficient of friction	3 (No units)
Buckling ratio of warp	30 (No units)	Thickness	0.5 (mm)

2.2.2 응력분포 및 단면 형상과 공극 거리 분석

두 개의 아바타에 대한 전투복 가상착의 결과는 응력분포(Stress), 아바타와 전투복 사이의 수평 단면 형상과 공극 거리를 비교하였다. 응력분포는 3D CLO에서 확인하였으며, 단면 형상과 공극 거리는 3D CLO의 데이터를 Geomagic Design X(3D Systems, Inc., 2023.3.0 version, Korea)로 내보내어 진행하였다. 분석 자세는 정자세, 달리기 자세, 의자에 앉아서 무릎관절을 90° 굽힌 자세 세 가지로 설정하였다.

응력분포는 전투복 전체를 대상으로, 각 동작별로 설정한 수평 기준면에서 단면 형상과 공극 거리를 평가하여 분석하였다. 기준면은 착용감과 활동성에 크게 영향을 미치는 가슴둘레선, 엉덩이둘레선, 넓다리둘레선을 중심으로 선행연구[17-18]를 근거로 선정하였다. 정자세에서는 상의의 기준면을 가슴둘레선에, 하의의 기준면을 엉덩이둘레선 및 넓다리둘레선에 두었으며, 달리기 자세에서는 엉덩이둘레선에서 16.5cm 아래, 앉은 자세에서는 허리둘레선에서 22.5cm 아래에 기준면을 설정하였다. 기준면 위치는 두 아바타의 키 차이를 반영해 프로그램에서 자동 생성된 둘레선 좌표를 사용하였으며, 수평 단면 2상은 기준면과 아바타·전투복의 중첩 영역으로,

공극 거리는 그 단면을 일정 간격으로 분할한 뒤 Z축 거리를 측정하여 도출하였다.

3. 연구결과

3.1. 전투복의 3차원 가상착의 이미지

제6차와 제8차 사이즈코리아 데이터 기반으로 생성된 아바타에 동일한 여군 전투복(상의 85-164-W, 하의 75-164-W)을 착용시킨 가상착의 결과는 Figure 3에 제시하였다.

Figure 3을 통해 확인한 결과, 제6차 아바타와 제8차 아바타 모두 전투복 착용 시 외관상 전체적인 실루엣은 유사하게 나타났으나, 부위별 밀착도와 여유분에서는 차이가 내재되어 있었다. 특히, 상의 밑단 부위를 살펴보면, 제6차 아바타에서는 앞과 뒤 모두 곡선 형태를 보인 반면, 제8차 아바타에서는 팽팽하게 밀착되어 직선 형태를 나타내는 차이가 나타났다. 또한, 제8차 아바타는 전반적으로 신체에 더 밀착되는 경향을 보였다. 이러한 차이는 제8차 사이즈코리아 데이터에서 관찰된 신체 치수 증가(가슴둘레 2.9cm, 엉덩이둘레 2.3cm, 넓다리둘레 1.4cm 증가)가 반영된 결과로 해석할 수 있다. 비

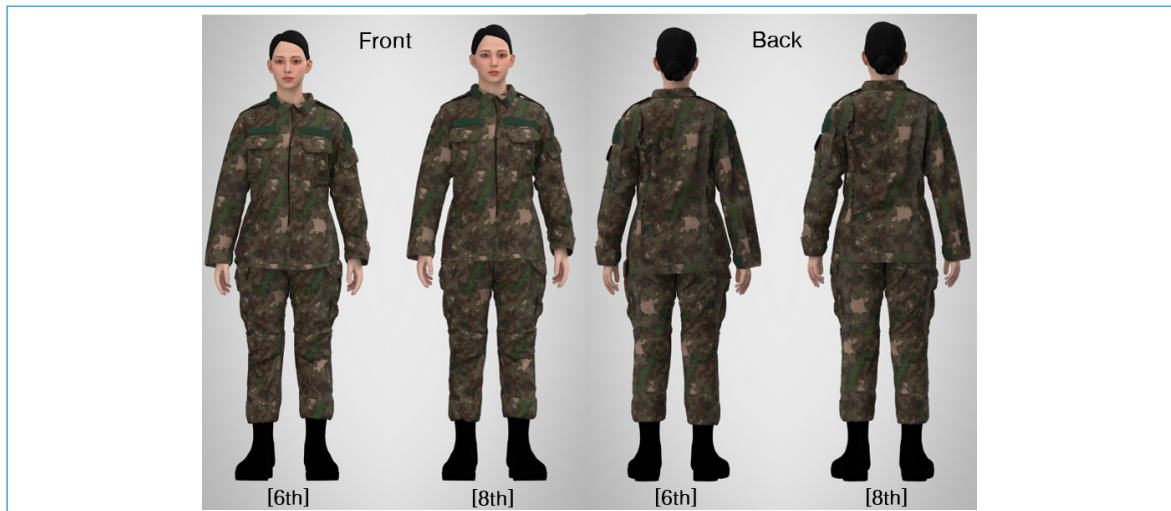


Figure 3. Virtual simulation of army combat uniforms on avatars based on the 6th and 8th Size Korea data

록 외관상으로는 뚜렷한 차이가 눈에 띄지 않았지만, 실제 응력 분포 분석에서는 해당 부위에서 높은 응력이 관찰되어 착용 적합성 저하 가능성을 시사하였다. 이를 통해 최근 여성 신체 치수 변화가 전투복 부위별 맞춤새에 미치는 영향을 1차적으로 확인할 수 있었다.

3.2. 전투복의 3차원 가상착의 응력분포 분석

다양한 동작에 따른 응력분포 결과를 Table 3에 제시하였다. 응력분포 분석은 외관상으로 식별하기

어려운 착용 차이를 정량적으로 파악하기 위한 방법으로 활용되었으며, 특히, 가슴, 엉덩이, 넓다리 부위에서 제8차 아바타의 응력 값이 제6차 아바타보다 높게 나타났다.

정자세에서는 가슴둘레선 위치의 앞중심 부위에서, 달리기 자세에서는 뒤품, 소매 뒤쪽, 엉덩이, 넓다리 위쪽 부위에서, 그리고 앉은 자세에서는 앞 허리밴드와 뒤 허리밴드 아래 엉덩이 부위에서 제8차 아바타의 응력 집중이 관찰되었다.

이러한 결과는 제6차와 제8차 인체치수조사 데이터와 밀접한 관련이 있을 것으로 보인다. 두 조사 간

Table 3. Stress Simulation of Army Combat Uniforms on Avatars Based on the 6th and 8th Size Korea Data by Posture

		Front		Back	
		6th	8th	6th	8th
Strain distribution (kPa)	Straight posture				
	Running posture				
	Sitting posture				

신체 치수의 유의한 차이를 검증하기 위해 독립표본 t-test를 실시하였다. Table 4에 제시된 바와 같이, 제8차 조사에서는 가슴둘레, 어깨가쪽사이길이, 겨드랑앞벽사이길이, 겨드랑뒤벽사이길이가 각각 2.9cm, 1.5cm, 0.8cm, 0.7cm 증가하였다. 이를 바탕으로 최근 20~49세 여성의 어깨 폭이 넓어졌으며, 상의의 앞품과 뒤품에 해당하는 부위 또한 커졌음을 알 수 있다[19]. 이러한 변화는 Table 3의 가상착의 분석에서 정자세 시 앞중심 부위에 응력이 집중된 원인과 연관될 가능성이 높다.

또한, 허리둘레(1.9cm), 엉덩이둘레(2.3cm), 엉덩이두께(2.7cm)는 모두 약 2.0cm 이상 증가하였으며, 넓다리둘레(1.4cm), 허리두께(1.2cm), 가슴 두께(1.3cm) 역시 약 1.0cm 이상 커졌다. 키와 체중 또한 각각 2.1cm, 2.7kg 증가하면서 상·하체 체격이 전반적으로 커진 것으로 나타났다. 신체 치수 변화는 달리기 동작 시 엉덩이와 넓다리 부위, 그리고 앉은 자세에서 엉덩이 부위에 높은 응력이 발생하는 원인이 되었을 것으로 추측된다. 따라서 제8차

평균 인체치수를 가진 여성이 현용 전투복의 적절한 사이즈를 선택하더라도 팔꿈치와 무릎을 구부리거나 앉은 동작에서 불편함을 느낄 가능성이 클 것으로 판단된다.

3.3. 전투복의 수평 단면 형상 및 공극 거리 분석

전투복과 아바타 사이의 부위별 수평 단면 형상 및 공극 거리는 Table 5에 요약하였다. 정자세에서는 아바타 유형과 관계없이 가슴둘레 뒷부분의 공극 거리가 앞부분보다, 엉덩이둘레 앞부분이 뒷부분보다 유의하게 더 크게 나타났고, 넓다리둘레는 좌·우 모두 균일하게 분포하였다.

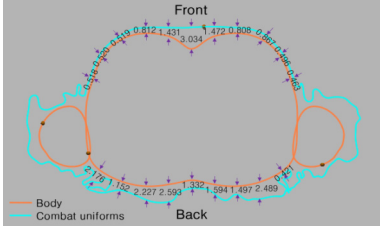
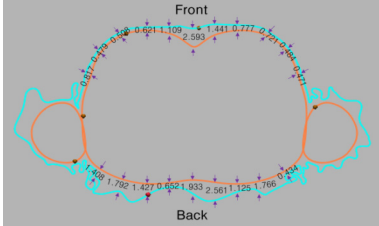
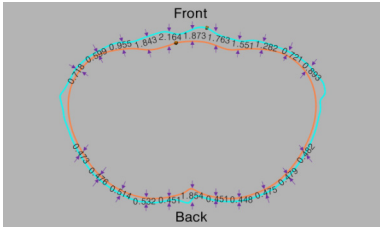
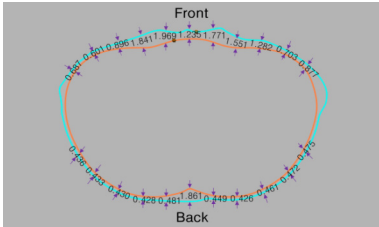
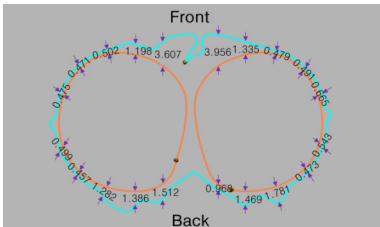
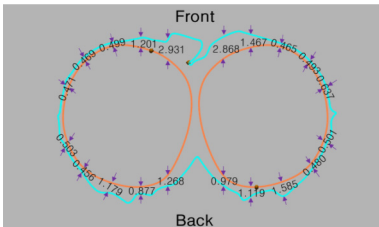
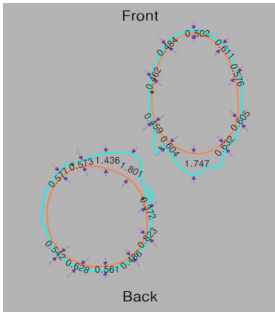
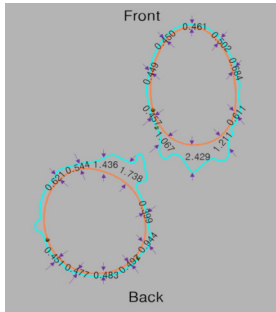
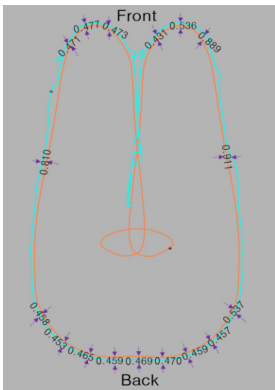
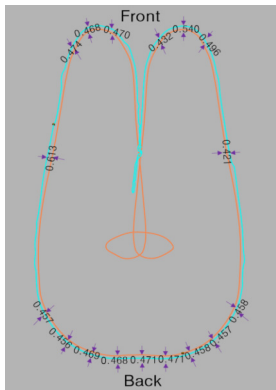
동작 자세로 전환 시에는 다음과 같은 경향이 관찰되었다. 달리기 자세에서는 다리의 전·후방 이동 방향에 따라 대응 부위의 여유 공간이 증가하였으며, 앉은 자세에서는 전반적인 공극 거리가 감소하여 전투복이 신체에 더욱 밀착되는 양상을 보였다.

Table 4. t-test Results for Height, Length, Circumference, and Depth Items According to the 6th and 8th Size Korea Data (Unit: cm)

Classification	Measurement items	Mean (SD)		Mean difference	t-value
		6 th	8 th		
Height	Stature	159.2 (5.3)	161.3 (5.1)	2.1	-11.822***
	Crotch H.	71.7 (3.6)	72.6 (3.4)	0.9	-8.360***
Length	Posterior shoulder L.	37.2 (2.6)	38.7 (2.1)	1.5	-18.448***
	Interscye (back)	36.3 (2.4)	37.1 (2.1)	0.8	-10.501***
	Interscye (front)	31.7 (2.0)	32.4 (1.8)	0.7	-10.172***
Circumference	Chest C.	85.2 (5.4)	88.1 (6.7)	2.9	-14.167***
	Waist C.	73.6 (7.4)	75.5 (8.7)	1.9	-6.979***
	Hip C.	92.3 (4.9)	94.6 (6.5)	2.3	-11.493***
	Thigh C.	55.1 (3.9)	56.5 (5.2)	1.4	-9.409***
Depth	Chest D.	18.3 (1.7)	19.6 (2.3)	1.3	-18.834***
	Waist D.	18.0 (2.4)	19.2 (3.0)	1.2	-12.504***
	Hip D.	21.4 (1.9)	24.1 (2.7)	2.7	-33.408***
Etc.	Body weight (kg)	55.2 (7.3)	57.9 (9.7)	2.7	-9.251***

*** α .001, H: height, L: length, C.: circumference, D.: depth

Table 5. Overlapping cross-section image and distance of ease between the 6th and 8th avatars and army combat uniforms (Unit: cm)

		6th	8th
Straight posture	Bust cir.		
	Hip cir.		
	Thigh cir.		
Running posture	Thigh cir.		
Sitting posture	Hip cir.		

C.: Circumference

특히, 제8차 아바타 대비 제6차 아바타에서는 전반적으로 공극 거리가 줄어들었는데(Table 5), 이는 가슴둘레와 엉덩이둘레가 약 2cm 이상, 넓다리둘레가 약 1cm 이상 증가한 신체 특성을 반영한 결과로 해석된다. 가슴둘레·엉덩이둘레 앞부분과 달리기 자세의 넓다리둘레 앞·뒷부분에서 이 차이가 가장 뚜렷했으며, 상대적으로 증가 폭이 작았던 넓다리둘레에서는 차이가 적었다. 공극 거리 감소는 압박감을 높이고, 동작 시 가동 범위를 제한할 수 있다.

Table 6에서는 동일 간격으로 측정된 모든 공극 거리를 합산한 결과, 제8차 아바타와 전투복 사이 공극 거리가 제6차보다 작게 나타나 현행 전투복의 치수 조정 필요성을 의미한다. 특히, 동작 자세에서 공극 거리 감소가 착용자의 불편감과 활동성 저하로 이어질 우려가 있다.

공극 거리는 착의 시 신체와 의복 사이의 여유 공간을 의미하며, 선행연구에 따르면 이 값이 1.0cm 이하로 좁아질 경우, 착용감이 저하되고 압박감이 증가하는 것으로 보고되었다[13-14]. 본 연구에서도 제8차 아바타 착용 시 일부 부위에서 1.0cm 이하의 공극 거리가 관찰되어(Table 6) 실제 착용 시 불편감이 유발될 가능성이 높다. 다만, 전투복 착용 적합성 평가는 부위별 기능적 요구를 반영하여 수행되어야 하며, 단순 평균값만으로 전반적인 착용감을 평가

하는 데에는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 부위별 최소 여유분 기준을 정량화하고, 이들 기준과 착용감과 동작적합성 간의 연관성을 규명하여 전투복 치수 설계에 반영하고자 한다. 아울러, 여군 전투복 설계 시 신체 치수 변화에 따른 패턴 보정을 검토함과 동시에, 현행 전투복 소재(위사·경사 스트레치 성능 각각 60g/s², 63g/s²)보다 신축성이 우수한 기능성 원단의 적용 가능성을 모색함으로써 움직임의 자유를 보장할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 제6차(2010) 및 제8차(2021) 사이즈코리아 인체치수조사 데이터를 활용하여 3차원 가상착의 분석을 통해 현용 여군 전투복의 맞춤새 및 치수적합성을 객관적으로 평가하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 3차원 가상착의 분석 결과, 제6차 인체 데이터를 적용한 아바타는 상·하의 모두 여유로운 핏과 적절한 착용감을 보였으나, 제8차 데이터를 적용한 아바타는 평균 신체 치수 증가에 따라 전투복이 몸에 밀착되는 경향이 나타났다.

둘째, 동작에 따른 응력 분포 분석에서는 제8차 아바타가 제6차 아바타에 비해 정자세에서는 앞중심

Table 6. Average Distance of Ease between the 6th and 8th Avatars and Army Combat Uniforms (Unit: cm)

			6 th	8 th	Difference (6 th - 8 th)
Straight posture	Bust cir.	Front	0.995	0.911	0.084
		Back	1.720	1.455	0.265
	Hip cir.	Front	1.306	1.219	0.087
		Back	0.603	0.577	0.026
	Thigh cir.	Front	1.346	1.150	0.196
		Back	1.037	0.795	0.242
Running posture	Thigh cir.	Front	0.739	0.603	0.136
		Back	0.586	0.571	0.015
Sitting posture	Hip cir.	Front	0.546	0.480	0.066
		Back	0.470	0.462	0.008

부위, 달리기 자세에서는 뒤통, 소매 뒤흘, 엉덩이, 넓다리 위쪽 부위에서 응력이 더 크게 나타났으며, 앉은 자세에서는 앞·뒤 허리밴드와 엉덩이 부위에서 응력 면적이 확장되었다.

셋째, 수평 단면 형상과 공극 거리 분석 결과, 제8차 아바타는 전반적으로 전투복과의 밀착도가 높고 평균 공극 거리가 더 작은 것으로 나타났다.

이러한 분석 결과는, 제8차 데이터와 유사한 신체 치수를 가진 여군이 현용 전투복을 착용할 경우, 정 자세에서는 상의, 동작 자세에서는 하의의 치수 적합성이 저하될 수 있음을 시사한다. 특히, 현행 사이즈 체계에서 고려되지 않는 가슴둘레, 엉덩이둘레, 넓다리 부위의 치수 차이가 착용 적합성 저하에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 동작 시 자유도를 제한하여 전투 수행 능력에 부정적 영향을 초래할 가능성이 있다. 또한, 동작 자세에서 신체 부위별 밀착도 및 공극 거리 변화가 정자세보다 더 두드러지게 나타나, 전투복의 활동성 개선이 필요함을 확인할 수 있었다.

본 연구의 의의는 3차원 가상착의를 활용하여 현용 여군 전투복의 맞춤새와 치수 적합성을 과학적이고 반복 가능한 방법으로 평가하고, 향후 군복 설계 시 고려해야 할 주요 신체 부위를 도출했다는 데 있다. 3차원 가상착의 기술은 다양한 체형 데이터를 기반으로 동작별 의복 반응을 비교할 수 있다는 장점이 있으나, 소재 물성 반영의 한계, 개인별 체형 차이, 착용자의 감각적 반응을 완벽히 재현하기 어렵다는 제약이 존재한다. 그럼에도 불구하고 선행 연구에 따르면, 가상착의 결과는 실제 착의 결과와 주요 부위(가슴, 엉덩이, 허벅지 등)에서 유사한 경향을 보이며, 특히, 응력 분포 및 공극 거리 분석에서 높은 재현성을 나타내는 것으로 보고되었다[17-18]. 따라서 본 연구는 실제 착의 실험이 어려운 군복 분야에서 치수 적합성 평가를 위한 유효한 도구로 활용될 수 있음을 시사한다. 다만, 본 연구는 평균 체형에 국한된 분석이라는 한계를 가지며, 실제 착의 평가를 포함하지 않았다는 점에서도 보완이 필요하다. 향후 연구에서는 사이즈코리아 데이터의 BMI 등급 및 체형 클러스터링을 기반으로 정상, 과체중, 국소 비만, 저

체중 등 다양한 대표 체형군을 도출하고, 각 체형군별 아바타를 제작하여 동일 동작에서의 공극 거리 및 응력 분포를 비교·분석할 예정이다. 이를 통해 체형별 착용 적합성 차이를 정량화하고, 평균 체형 외에도 다양한 체형을 고려한 전투복 패턴 설계 가이드라인을 제시할 계획이다. 또한, 실제 여군을 대상으로 착의 평가를 실시하고 가상착의 결과와 비교·분석하여, 보다 우수한 착용감을 제공하는 새로운 전투복 개발을 위한 실질적 자료를 마련하고자 한다.

사사(Acknowledgements)

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행됨(No. RS-2022-NR072432).

참고문헌

- 1 “3D 기술로 패션쇼를?” 원단 재질무게 입력하면 샘플이 ‘똑딱’ [미래 on], <https://v.daum.net/v/20240319053004231>, 2025, 02, 07
- 2 Kwak, Y., “A study on the 3D simulation system improvement through comparing visual images between the real garment and the 3D garment simulation of women's jacket”, *The Journal of the Convergence Culture Technology*, 2(3), pp. 15-22, 2016.
- 3 Choi, Y., “A qualitative study on 3D designer jobs in fashion vendors”, *Fashion & Textile Research Journal*, 23(4), pp. 504-514, 2021.
- 4 Ko, H. J., Lee, M. H., & Hong, S. D., “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 Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 24(9), pp. 497-505, 2023.
- 5 Kim, J. H., “Exploration of Material Characteristics Factors and Development of Prediction Models that Influence Subjective Tactile Sensations and Autonomic Nervous System Responses of Combat Uniform Wearers (Master's thesis)”, *Yonsei University*

Graduate School, pp. 1-124, 2020.

- 6 Kim, K. S., Nam, Y. J., & Kim, M. K., "A design study on women's army combat uniform to improve functionality", *Journal of Basic Design & Art*, 17(5), pp. 59-72, 2016.
- 7 Kang, J., Lee, M., Hong, S., & Moon, S., "A study on performance for camouflage of domestic and foreign combat uniforms", *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 40(6), pp. 1025-1033, 2016.
- 8 Lee, S., "A study on the enhancement of the Korea military uniforms system (Doctoral dissertation)", pp. 1-145, *Graduate School of Konkuk University*, 2023.
- 9 KDS 8415-4011-3 전투복, 국방부, 2020.
- 10 『한국인인체치수조사』 통계정보보고서, 산업통상자원부, 2022.
- 11 Park, J., & Lee, J., "Reproducibility of virtual power shoulder jacket by silhouette variation", *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 24(3), pp. 315-324, 2022.
- 12 Lee, J., & Lee, J., "Reproducibility of virtual pants fit applied with the stretchable fabric and movements", *The Research Journal of the Costume Culture*, 30(3), pp. 429-443, 2022.
- 13 Won, Y., & Lee, J. R., "Study on the Comparison of Fit Similarity Between the Actual and Virtual Clothing According to the Pants Silhouette", *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 23(6), pp. 826-835, 2021.
- 14 Cha, S. J., "A study on comparing visual images between real and 3D simulation", *Korean Society of Basic Design & Art*, 15(6), pp. 707-722, 2014.
- 15 Lee, S., & Lee, J., "A Study on Applicability of Custom-Tailored Clothing of 3D Virtual Clothing System - Focused on Middle-Aged Women -", *Journal of Fashion Business*, 14(4), pp. 161-173, 2010.
- 16 제6차 한국인 인체치수 직접측정 조사사업 보고서(최종보고서), 지식경제부, 2010.
- 17 Lee, O., & Lee, H., "Evaluation of Protective Clothing Using 3D Virtual Fitting", *Textile Coloration and Finishing*, 35(2), pp. 107-120, 2023.
- 18 Park, J., & Lee, J., "Reproducibility of virtual power shoulder jacket by silhouette variation", *The Korean Fashion and Textile Research Journal*, 24(3), pp. 315-324, 2022.
- 19 Lee, O., Kang, J., & Lee, Y., "Combat uniforms patterns suggestions for female soldiers considering anthropometric changes in Korean women", *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiels*, 48(6), pp. 1180-1193, 2024.

레이트레이싱 시뮬레이션을 이용한 도심환경의 UAV 기반 비지상 통신 LoS 확률 예측 연구

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

A Study on LoS Probability Estimation for UAV-Based Non-terrestrial Network in Urban Environments Using Ray-Tracing

이인석†, Inseok Lee

국방기술진흥연구소, 기술전략연구팀, 연구원
Researcher, Technology Strategy Research Team,
Korea Research Institute for defense Technology planning and
advancement

Abstract

This paper presents simulation results for estimating the LoS(Line-of-Sight) probability in UAV(Unmanned Aerial Vehicle)-based non-terrestrial network environments. The existing LoS probability models proposed by the ITU-R(International Telecommunication Union - Radiocommunication sector) have been primarily designed for ground-based scenarios with base stations installed on building rooftops. Therefore, these existing models have limitations when applied to non-terrestrial platforms such as UAVs. In this study, we analyzed the effects of the UAV altitude, 2D distance between the UAV and the UE(User Equipment), and building height distribution on the LoS probability through ray-tracing simulations using real urban map data from Korea. The simulation results showed that the LoS probability increased with UAV altitude. However, the magnitude of this increase significantly depended on the building height distribution within an urban environment. Specifically, in urban areas with lower building height distributions, a sufficient LoS probability was achievable even at relatively low UAV altitudes. Conversely, in areas with densely distributed high-rise buildings, UAVs had to maintain higher altitudes to secure appropriate LoS probabilities. Additionally, based on the ground distances between the UAV and the UEs, we proposed a suitable coverage criterion by comparing our simulation results with that of the conventional ITU-R M.2412 LoS probability model. The results of this study are expected to provide valuable guidelines for designing and optimizing UAV-based non-terrestrial military communication systems in urban environments.

keywords : line-of-sight probability, non-terrestrial network, ray-tracing, ITU-R recommendation, UAV

† Corresponding Author : Inseok Lee

Tel : +82-55-751-4550, email : inseok@krit.re.kr

Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement, 40, Sadeul-ro 123beon-gil, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 24th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

차세대 군용 무선통신은 지상과 공중, 해상과 우주 영역을 포함하는 다영역 작전을 지원하기 위해 발전하고 있으며, 특히 3차원의 입체적인 통신 구조인 비지상 통신(NTN, Non-Terrestrial Network)의 활용이 필수적으로 대두되고 있다. UAV(Unmanned Aerial Vehicle), 저궤도 위성, 고고도 플랫폼과 같은 공중 및 우주 기반 플랫폼을 활용한 비지상 통신은 지형적 장애물을 극복하고, 광역 통신 커버리지를 제공하며, 지상 네트워크의 취약성을 보완할 수 있는 핵심 기술로 자리 잡고 있다[1-2]. 비지상 통신 성능을 예측하기 위해서 가장 필요한 요소 중 하나는 정확한 LoS(Line-of-Sight) 확률 모델과 경로 손실(Path loss) 모델이다. UAV 및 위성을 이용한 공중-지상(A2G, Air-to-Ground) 통신의 경우에 LoS 확률이 높을수록 신호 품질이 향상되며, 이는 데이터 전송률, 통신 지연, 네트워크 안정성 등에 직접적인 영향을 미친다. 그러나, 도심 지역이나 산악 지역과 같은 복잡한 환경에서는 건물, 지형 장애물로 인해 LoS 확률이 낮아지고, 신호 경로 손실이 심화되는 문제가 발생한다. 특히, 높은 주파수 대역에서는 신호의 회절과 투과 특성이 제한적이므로, LoS 여부가 통신 성능을 결정짓는 주요 요인이 된다. 따라서, 효과적인 비지상 통신 설계를 위해서는 운용 환경에 맞는 정확한 LoS 확률 모델과 경로 손실 예측 모델이 필수적이다.

국제무선통신연합인 ITU-R(International Telecommunication Union - Radiocommunication sector)에서 소개하고 있는 LoS 확률 모델 및 경로 손실 모델은 주로 기지국이 건물 옥상(Rooftop)에 위치한 지상 셀룰러 통신 환경을 기준으로 설계되었다. 이 모델들은 비지상 통신에 그대로 적용하기에는 부적절한 것으로 예상된다. UAV 기반의 공중-지상 통신에서는 고도, 건물 밀도, 건물의 높이 등이 LoS 확률과 경로손실에 미치는 영향이 매우 커진다. 특히, UAV는 지속적으로 이동하면서 LoS/Non-LoS 전환이 빈

번하게 발생하며, 전술적 운용을 위해 다양한 고도와 경로에서의 통신 안정성이 요구된다. 하지만 ITU-R의 LoS 확률 모델은 지상 통신을 기준으로 하고 있어, UAV, HAPS(High Altitude Platform Station), LEO(Low Earth Orbit) 등의 공중 플랫폼과 지상 단말 간의 동적 채널 변화를 정확히 반영하지 못한다.

따라서, UAV 기반 비지상 통신을 위한 새로운 채널 모델 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 레이트레이싱 시뮬레이션을 이용하여, 좁은 도심지역 환경에서 UAV 기반의 비지상 통신을 위한 LoS 확률과 경로손실을 예측하고 모델을 제안한다. 이를 위해 실제 한국 도시의 지도 데이터를 이용하여 시뮬레이션 환경을 구현하고, UAV의 고도, 거리, 건물 높이에 따른 LoS 확률 변화를 예측한다. 본 연구에서 제안하는 모델은 도심 환경에서 비지상 통신 기반 전술 네트워크 설계와 통신 성능 예측에 기여할 것으로 예상된다. 특히, UAV 통신을 고려한 새로운 LoS 확률을 예측하여, 기존 채널 모델의 한계를 보완하고 활용도를 향상시키는 것을 목표로 한다.

2. 관련 연구

2.1. ITU-R의 LoS 확률 모델

ITU-R에서는 미래 이동통신기술의 트렌드에 대하여 기술한 보고서(Report)와[1], 6G 이동통신의 비전에 대한 권고서(Recommendation)를 발간하였다[2]. 해당 문서에서는 지상 통신과 비지상 통신의 통합, 차량과 UAV, 로봇 등이 모두 연결되는 D2D(Device-to-Device) 통신 등 다양한 미래통신의 모습에 대하여 언급하고 있으며, 6G 상용통신뿐만 아니라 레이더, 군용 통신과의 간섭 분석의 중요성에 대하여 강조하고 있다. ITU-R M.2412는 IMT-2020(5G)의 성능평가 방법에 대한 가이드라인을 제안하고 있는 보고서이다[3]. 해당 문서에서는 채널 모델 평가 방법을 제안하면서, 실내와 도심지역, 비도심지역에 대한 LoS 확률 모델을 소개한다.

이 모델은 다수의 측정 데이터를 기반으로 만들어진 모델이고, 송신기와 수신기의 거리에 따른 LoS 확률을 계산할 수 있는 수식의 형태로 제안되어 있다. 하지만 실외 환경 시나리오의 경우에 기지국의 위치가 건물의 옥상에 위치한다고 가정한다. 옥상의 기지국과 지상의 UE(User Equipment) 간, 즉 옥상-지상 환경을 가정하고 만들어진 모델인 것이다. 실제로, ITU-R M.2412의 Dense urban-eMBB, UMa 시나리오의 경우에는 기지국의 높이가 25m로 고정되어 있다. UAV를 이용한 비지상 통신의 경우, UAV의 높이가 건물보다는 높게 떠 있을 것으로 예상되기 때문에 이 모델을 그대로 적용하기에는 적절하지 않을 수 있다. ITU-R M.2412의 Dense urban-eMBB, UMa 시나리오의 LoS 확률(P_{LoS}) 모델은 수식 (1)과 같이 제안하고 있으며,

$$P_{LoS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18 \text{ m} \\ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right)\left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > 18 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

d_{2D} 는 기지국과 UE 사이의 지상 거리(2D distance)를 의미하고 위 수식에서 UE의 높이는 1m로 가정되어 있다. 본 논문에서는 ITU-R M.2412의 Dense urban-eMBB, UMa 시나리오의 LoS 확률 모델을 도시 환경의 통신 성능 비교 대상으로 삼아서, 시뮬레이션 결과와 비교하여 원활한 통신을 위한 UAV의 높이의 적정값을 찾는 데 활용하도록 한다.

또한, ITU-R P.1410 문서는 3~60GHz 주파수 대역에서 지상 이동통신을 위한 전파 모델이 나와 있는 권고서로, 도심 및 교외 환경에 적용 가능한 LoS 확률 예측 모델을 제안하고 있다[4]. 이 모델은 건물 위로 LoS 경로가 존재할 확률을 이론적으로 계산하는 방식이기 때문에, 비지상 환경에서도 일부 활용될 가능성은 있다. 이 모델에서는 도시 환경에 관한 세 가지 파라미터를 정의하며, 그 파라미터는 아래와 같다.

- α : 전체 지역 대비 건물 면적 비율
- β : 단위 면적당 건물 개수
- γ : 레일레이 분포를 따르는 건물 높이의 특성

위의 세 가지 파라미터를 이용하여 이론적으로 LoS 확률을 계산하는 모델이다. ITU-R P.1410 문서에서 건물 높이의 확률분포 $P(h)$ 는 수식 (2)와 같이 나타내며,

$$P(h) = \frac{h}{\gamma^2} e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}}, \quad (2)$$

h 는 건물 높이이고 γ 은 레일레이 스케일 파라미터이다. 송신기로부터 d_i 만큼 떨어져 있는 위치에서 LoS 확률 확률은 수식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있고,

$$P_{LoS,i} = \prod_{j=1}^i P_j, \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (3), (4)$$

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh,$$

$$= 1 - e^{-h_i^2/2\gamma^2},$$

P_i 는 건물의 높이가 h_i 보다 낮은 확률이다. 그러나 이 모델은 건물의 배치를 너무 단순하게 가정하는 단점이 있다. 송신기와 수신기 사이의 건물이 항상 일정 간격으로 배치되어 있다고 가정하며, 두 지점 간의 거리에 관계없이 항상 건물이 한 개 이상 존재한다고 가정한다. 이러한 가정은 실제 도시 환경과 크게 다르며, 결과적으로 오차를 유발할 가능성이 높다. 실제로 몇몇 연구에서는 이 ITU-R 모델과 레이 트레이싱 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, ITU-R 모델은 비지상 통신의 LoS 확률 예측에 활용하기에는 적절하지 못할 것이라 언급했다[5].

2.2. 관련 연구 동향

도심에서의 비지상 통신 환경에서 LoS 확률과 경로손실을 예측하는 모델에 관한 연구는 활발히 진행되고 있다. Gapeyenko et al. (2021)은 맨해튼 그리드 환경을 가정한 뒤, 푸아송 프로세스 기반의 UAV 통신의 LoS 확률 모델을 제안하였으며 Closed-form 수식을 도출하였다[5]. Begishev et al. (2022)은 적분 기하학 기법을 활용하여 밀리미터파 시스템이 구축된 도심 환경에서 UAV LoS 확률을 분

석하였고, UAV LoS 차폐 확률을 Closed-form 수식으로 도출하였다[6]. Al-Hourani et al. (2014)은 저고도 공중 플랫폼의 수직 각도별 LoS 확률과 최대 무선 커버리지 예측 결과를 제안하였으며[7], Al-Hourani (2020)은 멜버른 도심 3D 지도와 레이트레이싱 시뮬레이션을 활용하여 LoS 확률 예측 결과를 보였다[8]. Modad et al. (2022)은 다양한 실제 환경에서의 광범위한 분석을 기반으로 일반화된 LoS 모델을 제안하며 제안된 모델의 성능을 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해 신호 대 간섭비 및 커버리지 측면에서 분석하였다[9]. 기존의 3GPP(3rd Generation Partnership Project) 모델 및 문헌에서 제안된 LoS 모델들에 비하여, 셀 단위의 모델을 제안하고 다양한 환경에 대해 일반화할 수 있는 모델을 제안하였다. 경로손실 모델과 관련하여서는 Song et al. (2022) 레이트레이싱 시뮬레이션과 뉴욕 3D 지도 데이터를 이용하여 공중-지상 환경의 Large scale 채널 모델링 방법을 제안하였다[10]. LoS와 Non-LoS의 경로손실 지수(Pathloss exponent)와 쉐도잉 표준편차 등을 시뮬레이션을 이용하여 결과를 보였다. Kim et al. (2024)은 기하학적 분석(Geometric analysis)을 통해, 격자 형태로 구성된 도시 환경에서의 지상 통신과 비지상 통신에 모두 활용할 수 있는 LoS 확률 모델을 제안하였다[11].

3. 실험 방법

본 논문에서는 국내의 실제 3D GIS(Geographic Information System) 데이터를 이용하여 레이트레이싱 시뮬레이션을 통해 비지상 통신에서의 LoS 확률과 커버리지를 예측해 보고자 한다. MathWorks社의 MATLAB(R2023b version)을 이용하여 건물과 충돌하지 않는 직선 경로의 존재를 찾을 수 있는 레이트레이싱 시뮬레이터를 개발하였으며, 지도데이터는 국가공간정보포털(브이월드)의 데이터 오픈마켓에 공개되어 있는 수치지형도 v2.0을 사용하였다. 시뮬레이션 환경은 너무 복잡하지 않으면서 일반적인 도심 건물과 도로가 존재하는 위치로 선정하고자

하였으며, 세종시 대평동 지역을 선정하여 MATLAB으로 3D 지도를 구현하였다. 구현한 지도상의 건물 개수는 29개이다. 건물의 위치 좌표는 수치지형도의 위도, 경도 데이터를 활용하였으며 건물 높이는 임의로 설정하였다.

수치지형도의 데이터에서 건물 높이 값은 대부분 미등록되어 있어, 정확한 건물 높이 데이터를 얻기는 어렵다. 일반적으로 정확한 건물 높이 정보들을 수집하는 것이 어렵기 때문에, 많은 연구에서는 앞서 언급한 ITU-R의 환경별 지도 파라미터 값인 α , β , γ 값을 참조하여 사용하고 있다. Table 1에 일반적으로 통용되는 ITU-R 지도 파라미터를 나타내었다. 비도심지역과 일반 도심지역, 건물이 밀집된 도심지역, 고층 건물이 많은 도심지역, 네 가지 경우에 따라 참고할 수 있는 파라미터를 설정한 것이다. 본 논문에서는 ITU-R의 건물 높이 분포 파라미터인 감마 값에 따라서 레일레이 분포를 따르는 수열을 생성하여 건물 높이로 설정하였다. 이는 감마값이 증가함에 따라 LoS 확률이 어떻게 변화하는지 관찰하기 위함이다. 본 연구 결과를 활용한다면, 비지상 통신 시스템을 구축하고자 하는 지역의 건물 높이들을 정확히 모르는 상황에도 대략적인 근삿값으로 LoS 확률을 예측해 볼 수 있을 것이다.

Table 1. Parameters of the ITU-R P.1410 Model for Selected Environments

Environment / Parameter	α	β	γ
Suburban	0.1	750	8
Urban	0.3	500	15
Dense urban	0.5	300	20
High-rise urban	0.5	300	50

본 논문에서는 두 가지의 UE 배치 시나리오로 시뮬레이션을 진행하였다. UAV는 기지국과 같은 역할을 수행한다고 가정한다. 첫 번째는 좁은 지역의 도심 환경에서 UAV 높이에 따른 LoS 확률을 예측하기 위한 UE 배치 시나리오이다. 건물 사이의 도로에 일정 간격으로 다수의 UE를 배치하였다. Figure 1은

첫 번째 시나리오에 사용된 UAV와 UE 배치를 보이고 있으며, 지도의 중앙 근처에 UAV가 위치하도록 설정하였다. 배치된 총 UE 수는 1,327개이고, UAV는 1개만 배치하였다. UE의 높이는 전부 1m로 설정하고, UAV의 경우에 위치는 고정시키고 높이는 10m에서 200m까지 10m 간격으로 높여가면서 시뮬레이션하였다. 첫 번째 배치 시나리오의 시뮬레이션 결과는 Figure 5에 나타내었다.

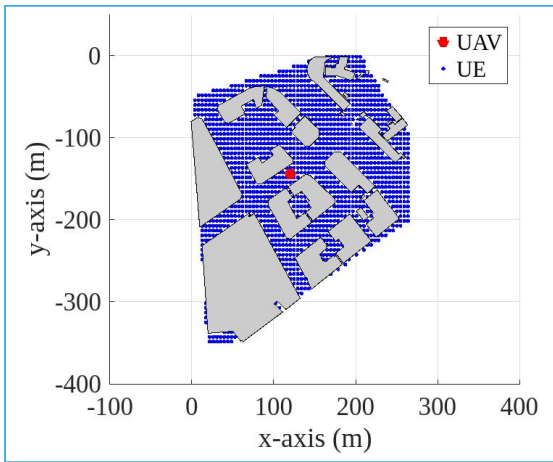


Figure 1. UAV and UEs deployment scenario 1

두 번째는 UAV를 중심으로 일정 반경으로 UE를 원형으로 배치하는 시나리오이다[10]. 이 배치 방법은 UAV와 UE의 지상 거리 변수를 추가하여, UAV의 높이와 지상 거리에 따른 LoS 확률을 예측하여 적정 커버리지 범위까지 예측해 보기 위한 시나리오이다. 첫 번째 UE 배치 시나리오는 UAV와 UE 간의 지상 거리가 일정하지 않기 때문에 새로운 배치 방법을 적용한 것이다. 커버리지 예측을 위한 배치 시나리오는 Figure 2에 나타내었다. UAV의 배치는 Figure 1과 동일하다. Figure 2에서는 UE가 UAV를 중심으로 일정한 반경을 이루며 랜덤하게 배치된 것을 볼 수 있으며, UAV와 UE의 지상 거리에 따라서 LoS 확률을 출력하도록 시뮬레이션을 진행했다. UE는 UAV와의 거리가 10m부터 최대 160m까지 10m 간격으로 배치하였다. 건물의 높이와 UAV 높

이의 변화는 첫 번째 시나리오와 동일하며, UE의 개수는 1,144개이다. 이 시나리오에서는 5G 성능평가 방법을 제안하고 있는 ITU-R M.2412의 LoS 확률 모델과 비교하여 적절한 커버리지를 예측해 보도록 한다. 두 번째 배치 시나리오의 시뮬레이션 결과는 Figure 6, 7, 8, 9에 나타내었다.

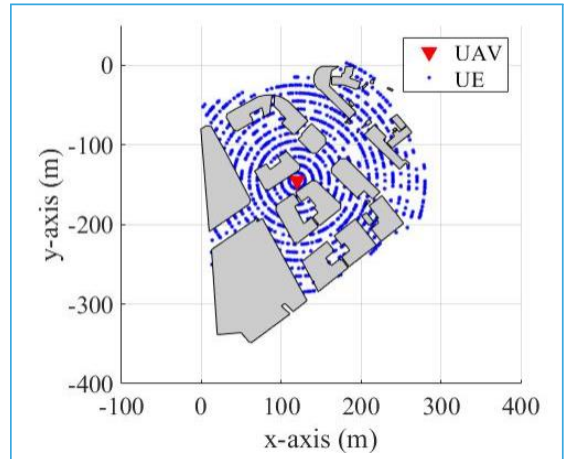


Figure 2. UAV and UEs deployment scenario 2

Figure 3은 감마값에 따라 생성한 레일레이 분포의 누적분포함수(CDF, Cumulative Distribution Function)를 나타낸 것이다. MATLAB의 Raylrnd 함수를 활용하여 레일레이 분포를 따르는 수열을 생성하였으며, 그 분포에 맞게 시뮬레이션 환경의 건물 높이 분포가 설정되도록 하였다. 감마값은 8, 15, 20, 50으로 설정하여 각각의 지도를 생성한 후 시뮬레이션을 진행했다. 4가지 시뮬레이션 경우에 따라서, 시뮬레이션에 사용된 건물 높이의 최댓값과 감마값을 Table 2에 나타내었다. 전체 UE 중에서, UAV와의 LoS 경로가 존재하는 UE의 개수를 찾아서 LoS 확률을 출력한다. UAV의 높이에 따라 각각의 LoS 확률을 출력하도록 시뮬레이션하였다. Figure 4는 각각의 시뮬레이션 Case의 3D 지도를 출력한 것이다. 감마 값이 높을수록 높은 건물이 많이 배치되어 있음을 볼 수 있다. 각각의 건물의 높이는 Figure 3의 case 1, 2, 3, 4의 레일레이 분포를 따르면서도

무작위로 높이 재배치를 50회 반복하여, 건물 분포에 따른 LoS 확률을 얻을 수 있도록 시뮬레이션을 진행했다. UE의 높이와 개수 등 상세한 시뮬레이션 설정값은 Table 3에 나타내었다.

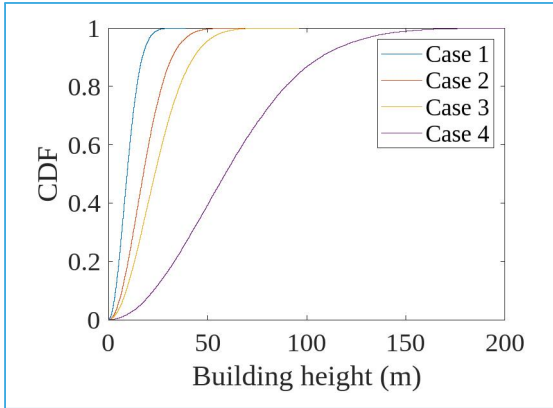


Figure 3. Building height distribution of four simulation cases

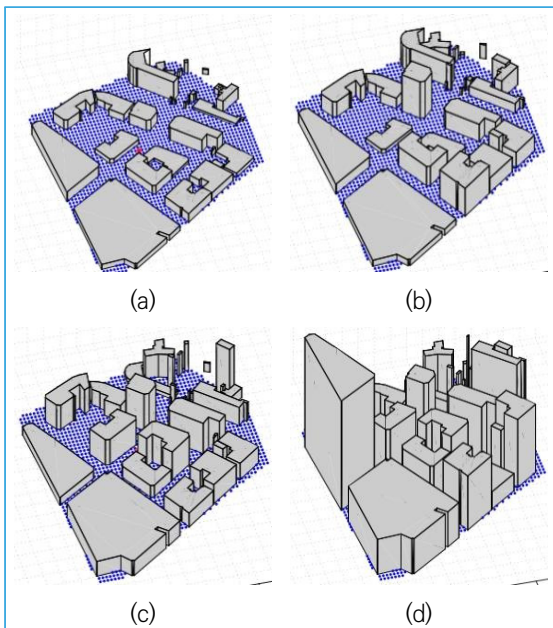


Figure 4. 3D visualization of four simulation cases (a) Case 1, gamma = 8 (b) Case 2, gamma = 15 (c) Case 3, gamma = 20 (d) Case 4, gamma = 50

Table 2. Simulation Cases Based on Building Height Distribution

Simulation case / Specification	Max height of building (m)	γ
Case 1	26.7	8
Case 2	50.8	15
Case 3	66.7	20
Case 4	166.7	50

Table 3. Simulation Configurations

Simulation parameters	Value
The number of buildings	29
UE height	1m
The number of UEs in deployment scenario 1	1,327
The number of UEs in deployment scenario 2	1,144
UAV height	10 ~ 200m (10m Interval)
2D distance between UAV and UEs (Only deployment scenario 2)	10 ~ 160m (10m Interval)

4. 실험 결과

Figure 5는 첫 번째 UE 배치 시나리오(Figure 1)에서 UAV의 높이에 따른 LoS 확률 시뮬레이션 결과를 보인다. 가로축은 UAV의 높이를 나타내고 세로축은 LoS 확률을 나타낸다. 같은 UAV의 높이인 경우를 가정하면, 4가지의 시뮬레이션 Case에 따라 대략적으로 10퍼센트 정도의 확률 차이가 발생함을 볼 수 있다. 감마값이 50인 경우는 전반적인 건물 높이가 높으므로 가장 낮은 LoS 확률을 보이며, UAV가 50m 정도까지는 20퍼센트의 낮은 LoS 확률이 유지됨을 확인할 수 있다. 그 외의 경우에는 50m 정도의 높이에서 30퍼센트 이상의 LoS 확률을 보인다. ITU-R M.2412의 Dense urban-eMBB, UMa 시나리오에서 셀 경계의 LoS 확률을 계산해보면 대략 35퍼센트로 설정되어 있음을 알 수 있는데, 그 이유

는 Figure 6의 설명에서 상세히 후술한다. 적절한 LoS 확률의 기준을 35퍼센트 이상으로 가정한다면, Case 1과 Case 2에서는 UAV 높이가 최소 20m 이상, Case 3에서는 최소 70m 이상, Case 4에서는 최소 80m 이상이어야 함을 알 수 있다.

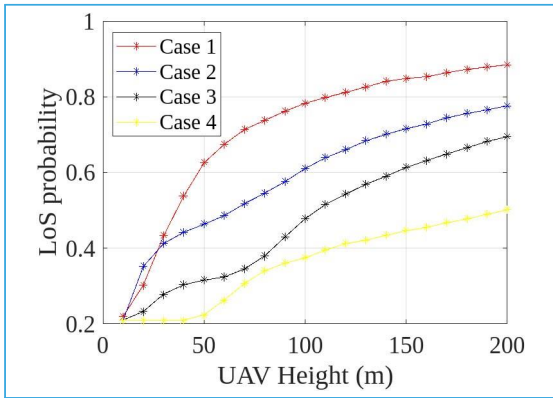


Figure 5. Simulation result of LoS probability based on UAV height

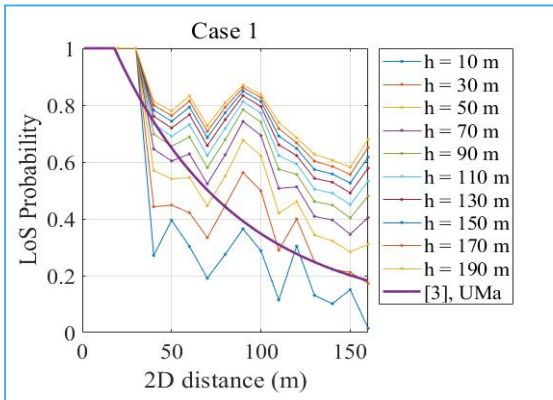


Figure 6. Comparison of LoS probability based on 2D distance between simulation results and ITU-R M.2412 (Case 1)

Figure 6, 7, 8, 9는 두 번째 UE 배치 시나리오 (Figure 2)에서 UAV와 UE 간의 지상 거리에 따른 LoS 확률 시뮬레이션 결과를 보인다. 비교를 위해 ITU-R M.2412의 Dense urban-eMBB, UMa 시나리오의 LoS 확률 계산 결과도 같이 포함하였다. UMa 시나리오의 경우에 기지국 간의 거리(Inter-site

distance)가 200m로 설정되어 있다. 즉, 기지국에서 셀 경계까지는 100m로 가정되어 있는 환경이다. 기지국에서의 지상 거리가 100m일 때, LoS 확률은 약 35퍼센트이다. 통신 환경에 따라 적절한 LoS 확률에 대한 기준은 매번 달라질 수 있지만, 이 논문에서는 도심 환경에서 원활한 통신을 위한 LoS 확률은 35퍼센트 이상이라고 가정하도록 한다. 또한, LoS 확률이 35퍼센트가 되는 지상 거리를 커버리지 경계로 간주하도록 한다. Figure 6의 시뮬레이션 Case 1에서는 UAV의 높이가 30m 인 경우가 UMa 시나리오와 유사한 그래프를 보인다. UMa 시나리오는 기지국 높이가 25m로 설정되어 있고 시뮬레이션 Case 1의 최대 건물 높이가 26.7m인 점을 보았을 때, 건물 높이 분포의 감마값이 8인 경우가 UMa 시나리오와 가장 유사한 것으로 판단할 수 있다. Figure 7의 시뮬레이션 Case 2에서는 UAV의 높이가 30 ~ 50m 인 경우가 UMa 시나리오와 유사한 그래프를 보인다. Figure 8의 시뮬레이션 Case 3에서는 UAV의 높이가 90 ~ 130m 정도의 경우에 UMa 시나리오와 유사하다. Figure 9의 시뮬레이션 Case 4에서는 건물의 높이가 대부분 높기 때문에 UMa의 시나리오와 차이가 크게 나타나며, UAV의 적정 높이는 200m 이상이 되어야 할 것으로 보인다. 또한, 시뮬레이션 Case 3과 4에서 UAV와 지상 거리가 40m 이하로 가까운 UE들은 UAV의 높이가 높아져도 LoS 확률에 차이가 거의 없는 것으로 확인된다. UAV와 가까운 UE들은 두 가지의 경우로 나눌 수 있다. 하나는 시야를 막는 건물이 없어서 UAV의 높이와 상관없이 LoS 확보가 된 경우이고, 두 번째는 UE의 위치가 시야를 막는 높은 건물에 너무 가까이 붙어있어 UAV의 높이가 높아져도 LoS 확보가 힘든 경우이다. 시뮬레이션 Case 3과 4에서는 두 번째 유형의 UE가 많아진 것이다. 시뮬레이션 Case 1과 2의 경우에는 건물의 높이가 낮기 때문에, 건물에 근접한 UE라 하더라도 UAV의 높이가 높아진다면 LoS 확률이 차이가 발생한다고 해석할 수 있다.

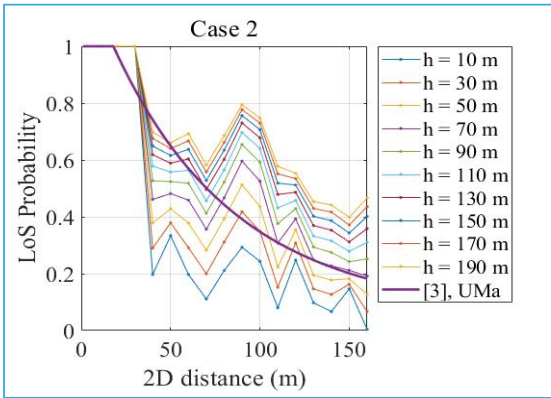


Figure 7. Comparison of LoS probability based on 2D distance between simulation results and ITU-R M.2412 (Case 2)

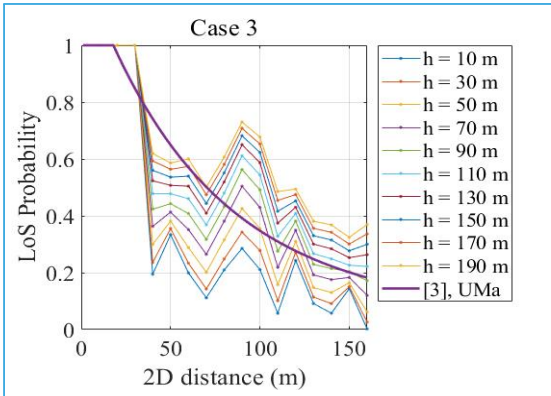


Figure 8. Comparison of LoS probability based on 2D distance between simulation results and ITU-R M.2412 (Case 3)

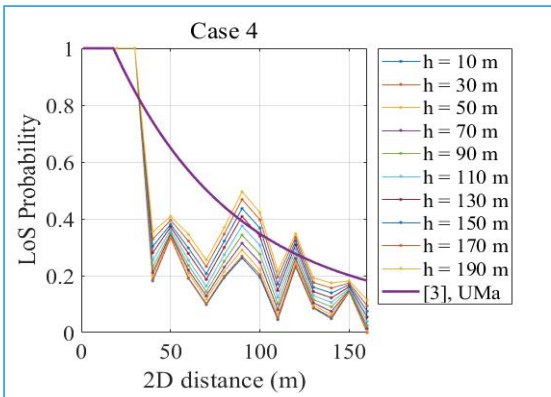


Figure 9. Comparison of LoS probability based on 2D distance between simulation results and ITU-R M.2412 (Case 4)

5. 결론

본 논문에서는 UAV 기반 비지상 통신 환경에서 LoS 확률을 예측해 보기 위해 시뮬레이션을 수행하고 결과를 출력하였다. 기존의 ITU-R에서 제안하고 있는 표준 모델은 주로 지상 기지국 중심의 환경을 기준으로 개발되어 비지상 통신 환경의 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 한국의 실제 도심 지역 지도 데이터를 활용한 레이트레이싱 시뮬레이션을 통해 UAV의 고도, UAV와 UE 간의 거리, 건물 높이에 따른 LoS 확률을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, UAV의 운용 높이가 높아질수록 전반적으로 LoS 확률이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 건물 높이 분포 파라미터의 값에 따라 LoS 확률 변화가 뚜렷하게 나타났다. 낮은 감마값을 가지는 환경에서는 20m 정도의 낮은 고도에서도 충분한 LoS 확보가 가능했으나, 고층 건물이 존재하는 환경에서는 70m 이상의 높은 UAV 고도를 유지해야만 적정 수준의 LoS 확률을 얻을 수 있었다. 또한 UAV와 UE 간의 지상 거리를 고려한 결과, 기존 ITU-R M.2412의 지상 통신 환경 모델과의 비교를 통해 UAV 기반 비지상 통신에서 적정 커버리지 범위를 가지는 UAV 고도를 제시하였다. 이러한 LoS 확률 결과는 UAV 기반의 비지상 통신 시스템 구축 시 적절한 UAV 운용 고도와 UAV를 중계기로 활용할 때의 배치 계획 수립 등 무선통신 시스템의 성능 예측에 활용될 수 있다. 군용 목적으로 UAV의 LoS 확률은 통신 품질 분석을 넘어서 소형 드론을 이용한 작전 시 적정 고도 설정, 소규모 도심지 전투에서 안티 드론 건을 이용한 드론 요격 확률, 안티 드론 건의 적정 목표 성능 도출, 드론 요격을 위한 레이저 무기의 활용성 검토 등의 연구에 참고 자료로 사용될 수도 있을 것이다.

다만 본 논문에서 사용된 지도가 작기 때문에 도출된 LoS 확률 결과가 건물 배열에 영향을 많이 받는 한계점이 있는 것으로 보인다. LoS 확률은 통신 환경에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에, 모든 환경에 범용적으로 적용 가능한 LoS 확률 모델을 찾는

것은 사실상 불가능하다. 그러므로 타 연구에서도 대부분 실내/실외, 도심/비도심 등 목표로 하는 통신 환경을 명확히 제시하고 있으며 모델링 방법에도 차이가 있다. 본 논문에서 목표로 하는 환경은 좁은 지역에서 건물과 도로가 존재하는 도심 환경인데, 이러한 좁은 환경에서는 LoS 확률이 건물 높이뿐 아니라 건물 배치에 영향을 많이 받을 수 있다. 향후 연구에서는 좁은 도심지라는 비슷한 조건하에 건물 배치가 다른 지역 지도를 다수 활용하여, 특정 건물 배치에 종속되는 경향을 줄이고 신뢰성 있는 LoS 확률 모델 결과를 제안하고자 한다.

또한, 본 논문에서는 ITU-R M.2412의 LoS 확률을 성능 기준으로 삼아 분석하였으나, 목표로 하는 성능이나 실험 환경에 따라 기준은 얼마든지 달라질 수 있음을 고려해야 한다. 본 논문에서는 LoS 확률만을 고려하기 때문에 5G의 Urban macro 시나리오와 성능을 비교하였지만, UAV가 가질 수 있는 중량이나 출력의 한계를 고려하였을 때 매크로 기지국만큼의 성능을 내기는 힘들 것이므로 실제 통신 시스템 구축을 위해서는 좀 더 정교한 기준이 필요할 것으로 생각된다. LoS 확률만을 성능 기준으로 고려했을 때에는 UAV의 고도가 높아지기만 하면 좋은 성능을 얻을 수 있겠지만, 실제로는 UAV의 고도가 높아지면 경로 손실과 전력 소모량의 상승, 피탐지 확률과 요격 위험성 증가 등의 단점들도 발생하게 된다. 따라서 향후 연구에서는 실제 건물의 높이까지 반영한 LoS 확률, 경로 손실, 전력 소모와 피탐지 확률까지 고려한 적정 고도 분석, 그 외에 추가적인 채널 파라미터를 분석하여 보다 정교하고 현실적인 비도시 통신 모델을 개발하는 방향으로 진행할 필요가 있다. 그러한 연구를 위해서는 시뮬레이션과 함께, 실제 측정 데이터를 이용한 검증과 보정 과정도 필수적으로 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

1 ITU-R WP 5D, Future technology trends of terrestrial International Mobile Telecommunications systems

towards 2030 and beyond(ITU-R Report M.2516-0), 2022.

2 ITU-R, Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond(ITU-R Recommendation M.2160-0), 2023.

3 ITU-R, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020(ITU-R Report M.2412-0), 2017.

4 ITU-R, Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz(ITU-R Recommendation P.1410-5), 2012.

5 Gapeyenko, M., Moltchanov, D., Andreev, S., & Heath, R. W., "Line-of-sight probability for mmwave-based uav communications in 3d urban grid deployments", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(10), pp. 6566-6579, 2021.

6 Begishev, V., Moltchanov, D., Gaidamaka, A., & Samouylov, K., "Closed-form uav los blockage probability in mixed ground and rooftop-mounted urban mmwave nr deployments", *Sensors*, 22(3), pp. 1-16, 2022.

7 Al-Hourani, A., Kandeepan, S., & Lardner, S., "Optimal lap altitude for maximum coverage", *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6), pp. 569-572, 2014.

8 Al-Hourani, A., "On the probability of line-of-sight in urban environments", *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(8), pp. 1178-1181, 2020.

9 Modad, B. A. A., Yu, X., Song, H. J., Chiang, Y. Y., & Molisch, A. F., "Cell-by-cell line-of-sight probability models based on real-world base station deployment", *GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference*, pp. 4782-4787, 2022.

10 Song, M., Huo, Y., Liang, Z., Dong, X., & Lu, T., "Air-to-ground large-scale channel characterization by ray tracing", *IEEE Access*, 10, pp. 125930-125941, 2022.

11 Kim, K. W., Kwon, H., & Park, S., "Line-of-Sight Probability in Urban Environments Representing Deterministic Grids", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 73(3), pp. 1792-1804, 2025.

ISO 26262 기반 군 무기체계 기능안전성 전자제어장치 도입 방안 연구

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

A Study on the Introduction of the Functional Safety Electronic Control Unit in Military Weapon Systems based on ISO 26262

김남현, Namheon Kim

충남대학교, 산업대학원,
산업공학과
Department of Industrial
Engineering, Chungnam
National University

유인곤, Ingon Yu

충남대학교, 정보통계학과
Department of Information and
Statistics, Chungnam National
University

홍성훈, Sunghoon Hong

전북대학교,
산업정보시스템공학과, 교수
Professor, Department of
Industrial and Information
Systems Engineering, Jeonbuk
National University

이민구†, Minkoo Lee

충남대학교, 정보통계학과, 교수
Professor, Department of
Information and Statistics,
Chungnam National University

Abstract

The functional safety ECU(Electronic Control Unit) used in military combat equipment is inadequate. Consequently, safety accidents have resulted in a loss of confidence in the military and a reduction in combat effectiveness. Accordingly, this study examines ISO 26262, an automotive functional safety standard, to determine its potential applicability to the introduction of military weapon systems and analyze the tactical effects of introducing functional safety ECUs.

This study examines the process of weapon system introduction and suggests a potential approach for applying the procedural V-model of ISO 26262 in the R&D(Research and Development) phase. Furthermore, it presents new ROC(Requirement Of Capability), OMS/MP(Operational Mode Summary/Mission Profile), and RAM (Reliability, Availability, Maintainability) evaluation criteria that are used to add functional safety criteria to the weapon system performance requirements. In addition, it analyzes ECUs that have been introduced in the military and presents the ECU used in other countries.

In conclusion, the introduction of a functional safety ECU for military weapon systems based on ISO 26262 could increase combat power and the quality of military equipment, as well as tactical utilization.

keywords : ISO 26262, V-model, weapon system, electronic control unit, functional safety

† Corresponding Author : Minkoo Lee

Tel : +82-42-821-5431, email : sixsigma@cnu.ac.kr

Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised May 19th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

전투장비는 전투에서 승리를 보장하기 위해 개발되는 장비로서 최신 과학기술이 적용되어 적 전투장비보다 우위의 성능을 갖추기 위해 개발되는 첨단장비이다. 하지만, 최초 개발 시 전투적 성능에만 중점을 두고 설계되는 탓에 평상시 전투부대에서 전투장비 운용 간 각종 안전사고가 발생한다. 한 가지 예시로, 불과 몇 년전까지만 해도 전투장비에 기초적인 기능안전성 전자제어장치인 후방카메라가 없어 관련된 안전사고가 여러 건 발생하였다. 이는 갈수록 줄어드는 전투병력의 손실로 이어지고 최첨단 전투장비의 비전투 손실 또한 야기시켜 필요한 순간에 기능 발휘를 하지 못하는 사례가 발생한다.

안전사고가 발생하는 가장 큰 원인은 전투장비 개발 간 전투적 성능만을 중요시하고, 기능안전성 분야를 간과하기 때문이며, 아직 우리 군의 전투장비는 기능안전성 기술이 미흡하여 전투부대 내 장비 운용 간 안전사고가 간헐적으로 발생하고 있다.

전투장비의 개발에서 기능안전적 요소를 고려하고 도입한다면 상당수의 안전사고를 미연에 방지하거나 피해를 최소화시켜 인명피해를 크게 줄일 것이다. 또한 우리 군의 전투장비는 대다수가 혼성장비로서 동일한 차체에 상부 무기장치를 다르게 장착하여 새로운 전투장비로 거듭나고 있다. 천마, 비호, 천무, 저탐레이더 등 동일한 장갑차, 차량 등 차체를 이용하여 대공유도무기, 대공포, 유도탄, 레이더장비 등 탑재장비에 따라 무기체계가 달라진다. 이러한 차체 분야에 대해 그 성능을 향상시킬 수 있는 기능안전성 전자제어장치가 적용된다면 각각의 무기체계에서 기본임무 이상의 확대된 전술적 효과를 발휘하리라 판단한다. 그러므로 군 무기체계에 기능안전성 전자제어장치의 도입은 필수적이며 중요성이 강조된다.

군 안전사고에 대하여 다음과 같은 선행연구가 제시되었다. Seoung (2021)은 군 차량사고를 중심으로 교통사고 원인별 사고분석을 실시하고 FMEA 기반의 사고 도출 예방 모델을 제시하였다[1]. 또한 김

영주 et al. (2020)은 우리 군이 운용 중인 무기체계에 적용 중인 안전시스템을 분석해 보고 안전사고 사례분석 및 안전공학 주요기술을 바탕으로 무기체계에서 인간 및 안전공학의 중요성을 강조한다[2].

더불어 Sokolović and Marković (2023)은 군의 작전능력 향상을 위한 기능안전성 전자제어장치의 중요성을 인식하고, 무기체계에서 자동화된 대응과 의사결정을 가능하게 하도록 IoT(Internet of Thing)를 활용한 고도화된 기능안전성 전자제어장치를 활용할 것을 강조한다[3].

본 논문에서는 군 안전사고의 심각성을 인지하고 차량 기능안전 표준 ISO 26262를 군 무기체계에 적용하는 방안을 연구하였다. 또한 기능안전성 전자제어장치를 전술적 활용에 사용하는 예시를 제시하였다. 기능안전성 전자제어장치를 군 전투장비에 효과적으로 적용한다면 전·평시 작전적으로 유용하게 활용할 수 있다. 우리 군도 기능안전성 전자제어장치의 전투장비 적용을 활성화해야 할 필요성이 요구된다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ISO 26262와 전자제어장치에 대한 이론적 배경을 알아보고 3장에서는 ISO 26262에 기반하여 군 무기체계 획득절차의 개선 필요성과 개선 방향을 제시한다. 4장에서는 군 무기체계 내 기능안전성 장치 도입에 대한 내용을 제시한다. 5장에서는 전반적인 내용을 종합한다.

2. 이론적 배경

2.1. ISO 26262

ISO 26262는 자동차 전자제어장치의 오작동으로 인한 안전사고 및 인명손실을 최소화하기 위해 국제 표준기구인 ISO에서 제정한 자동차 기능안전 국제 규격이다. 2009년도에 발생한 도요타 렉서스의 급발진 사고와 원인을 알 수 없는 오류에 의한 자동차의 각종 기능안전사고들은 오히려 무분별한 전자제어장치 개발을 차단하고, 국제적으로 규격화된 전자

제어장치들을 자동차에 적용하는 데 기여하였으며, ISO 26262란 기능안전 국제규격이 탄생하는 계기가 되었다. 2011년 11월에 제정되었고 두 번째 개정판이 2018년 12월에 제정되었다[4].

이로 인해 기존 복수의 공급자에 의해 개발되었던 동일한 전자제어장치들이 통일된 기술표준을 갖게 되었으며, 다수의 전자제어장치 작동에 따른 오작동 및 시스템적 결함에 대한 기능안전성을 확보하는 계기가 되었다. ISO 26262는 무게 3.5톤을 넘지 않는 자동차에 장착되는 안전과 관련된 시스템으로서 적어도 하나 이상의 전기 또는 전자시스템을 포함하는 경우에 적용된다. ISO 26262는 차량의 기능안전성 전반과 관련된 12개 파트로 구성되어 있으며, 43개의 요구 사항(세부 분야별 총 588개) 및 권고 사항을 포함한다[5].

특히 12개의 파트 중 3단계에서 7단계까지는 V-model을 통해 제품의 기능안전성을 구현한다. V-model이란 크게 검증과 확인의 과정으로 이루어지며 검증과정에서는 시스템에 필요한 요구사항을 단계별로 분석한다. 이를 토대로 시제품을 구현하고, 확인과정에서는 역순으로 검증과정에 대응되는 테스트

트를 실시하여 분석한 요구사항을 만족하는지 단계별로 확인한다.

이 과정에서 단계별 절차상 문제 발생 시 실질적인 개발단계에서 해결할 수 있는 단계까지 환류를 시킴으로써 문제점이 개선되어 제품개발에 반영된다.

2.2. 전자제어장치

전자제어장치(ECU, Electronic Control Unit)란 센서(Sensor), 액추에이터(Actuator)와 함께 차량의 제어시스템을 구성하는 핵심장치로서 기존에는 점화시기와 연료분사, 공회전, 한겻값 설정 등 엔진의 핵심 기능을 정밀하게 제어하는 역할을 수행했다. 최근 들어 컴퓨터 성능의 발전과 전기차, 자율주행의 등장으로 자동변속기 제어를 비롯해 구동계통, 제동계통, 조향계통 등 차량의 모든 부분을 제어하는 것으로 그 역할이 확대되었다. 기능안전성 관련 전자제어기술은 Table 1과 같이 크게 3개 분야로 구분된다. 차량에 사용되는 주요 전자제어장치의 예시는 Figure 1에 나타내었다.

Table 1. Classification of ECU

Type		Details
Vehicle safety	Active safety	Preventive safety
		Accident avoidance
	Active-passive safety integration	Autonomous driving
		Automatic parking
Vehicle Informatization	Mobile telecommunication	Crash safety
		Preventing damage escalation
		Telematics
	Information system	Automobile navigation system
V2V(Vehicle to Vehicle) communication		
Convenience	Common foundation technology	Driver information system
		In-vehicle network
	Entertainment system	Human-machine interface
Comfort & security		Embedded hardware & software
		Digital vehicle audio video system
		Vehicle security and vehicle occupant comfort

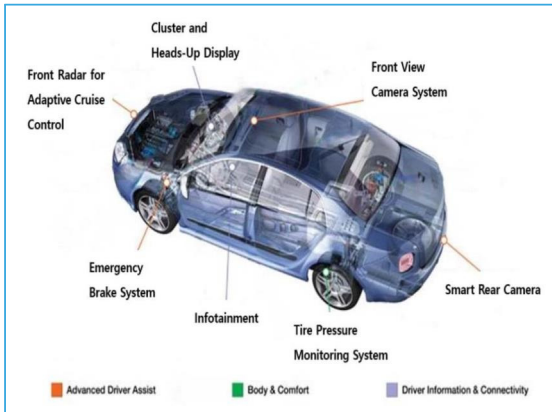


Figure 1. Vehicle ECU in functional safety

이처럼 수많은 전자제어장치가 차량에 사용되고 있으며, 그 중요도는 점차 증가하는 추세이다.

차량안전 분야는 능동적 안전개념(Active safety)과 수동적 안전개념(Passive safety), 두 개념이 융합된 능동 및 수동 통합 안전개념(Active-passive safety integration)의 세부기술들이 있다. 최근에는 능동적 안전개념 분야의 기술뿐만 아니라 통합안전 기술들이 활발히 연구되고 있다. 수동안전 분야는 차량의 주행 안정성과 충돌 안전성이 대표적인 기술로서 사고를 유발할 수 있는 결함을 최소화하고 사고 발생 시 피해를 최소화하기 위한 기술이다. 능동안전 분야는 인간의 감각을 대신하는 센서와 제어기, 액추에이터(Actuator)를 이용하여 사고를 미리 예방하거나 운전자의 안전운전을 지원하는 기술로, 수동안전기술, IT(Information Technology) 기술 등과 복합적으로 적용된다.

차량 정보화 분야는 차량 자체의 네트워크(In-vehicle network)와 외부 통신을 기반으로 운전자에게 필요한 정보를 실시간으로 전달하는 기술로 정보통신기술을 자동차에 접목시키기 위해 텔레매틱스(Telematics), 운전자정보시스템, 차량탐재 네트워크 등 다양한 기술들이 융합된다. 차량과 관련된 정보통신은 차량과 외부와의 정보통신을 가능하게 하는 기술, 차량 내부의 제어신호와 데이터의 교환을 위한 차량내부 네트워크 기술과 이 두 가지 기술의 접점에 존재하는 운전자정보시스템 기술들이

있다. 최근에는 차량 간 통신기술(V2V, Vehicle to Vehicle)을 이용한 전방추돌 감지 시스템과 같이 차량 안전 시스템과 연동하여 활용되는 경우 외에도, 차량과 인프라(Vehicle to infrastructure) 및 차량과 모바일 기기(Vehicle to nomadic)와도 연결하여 빠른 경로 탐색, 모바일 기기를 통한 차량 상태 모니터링 등 타 시스템과 융합하여 활용되는 통합 시스템이 등장하고 있다.

편의성 분야는 위성방송 및 디지털 오디오, 비디오 매체를 즐길 수 있는 엔터테인먼트 시스템과 자동 주차 및 내비게이션 시스템 등 안전과 밀접한 관련이 있는 운전자 편의성 지원에 관련된 기술을 포함하며 자동차가 복합문화 공간으로 변화하는 데 큰 역할을 담당한다[6].

기능안전성 관련 전자제어기술은 빠른 속도로 발전하는 분야이다. 앞으로 더 많은 기술이 개발되어 차량에 적용될 것으로 예상된다.

3. ISO 26262 기반 무기체계 획득 절차 개선

3.1. 군 무기체계 획득 절차

군 무기체계 획득 절차는 Figure 2에 제시하였다 [7]. 절차는 크게 소요기획단계와 획득단계, 운영유지단계 세 단계로 구분된다.

먼저 소요기획 단계에서는 소요군에서 새로운 무기체계에 대한 소요요청을 실시하여 합참에 건의한다. 합참에서는 합동참모회의를 통해 소요제기를 국방부에 건의하면, 국방부에서 장관 결재로 소요 결정이 된다. 이때 소요군에서는 기존 유사장비의 야전운용제원을 수집 및 분석하여 RAM 목표값과 군수지원분석의 운용 및 정비소요를 제시한다. RAM은 신뢰도(Reliability), 가용도(Availability), 정비도(Maintainability)의 약어로서, 무기체계의 소요제기부터 폐기에 이르는 전 수명주기 동안 목표값 설정 및 할당, 설계지원 및 평가, 설계 개선 및 방안 도출, 군수지원분석, 종합군수지원 요소개발 및 야전운용제원 수집·분석 등의 임무를 지원하는 체계공학

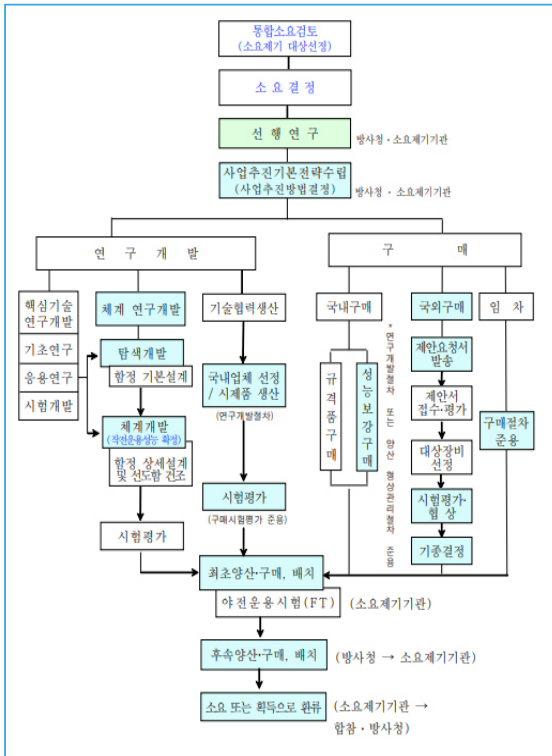


Figure 2. Military weapon system requirement process

업무로서 장비가동률과 전투준비태세 향상 및 총 수명주기비용 절감의 핵심 성능지표이다[8]. 무기체계 소요가 결정되면 방위사업청은 전문연구기관 등에 의뢰하여 대상무기체계에 대한 선행연구를 실시하고, 사업추진 기본전략을 수립하여 선행연구 간 무기체계 개발 시 경제성, 국내기술 성숙도 등을 고려하여 연구개발과 구매 여부를 결정한다.

획득단계는 연구개발과 구매사업으로 나뉜다. 연구개발은 개발대상 및 방법에 따라 무기체계 연구개발, 핵심기술 연구개발, 기술협력생산 등 크게 세 부분으로 구분되고, 무기체계 연구개발은 체계연구개발단계, 탐색개발단계, 체계개발단계, 양산단계로 구분하여 추진함을 원칙으로 하며, 사업추진전략에 따라 탐색개발은 생략이 가능하다. 핵심기술 연구개발은 기초연구, 응용연구, 시험개발단계로 추진하고, 기술협력생산은 차기 무기체계 개발을 위한 기술축적을 위하여 외국의 제작사와 기술협력을 통하여 국내에서 생산하는 것으로 개발 절차는 무기체계 연구

개발 절차를 준용한다. 연구개발 시 무기체계 설계 목표는 기존 유사장비의 야전운용제한 및 미래 운용 개념 문서 등을 기초로 설정한다.

구매사업은 구매 형태에 따라 국내 구매, 국외 구매, 임차로 구분되며, 국내 구매는 국내에서 운영 중인 장비, 물자를 일부 개조 또는 성능개량을 보장하여 구매하는 것으로 민수규격품 구매와 국방규격품 구매로 구분한다. 국외 구매는 업체제안서 평가, 시험평가 및 협상을 통해 조건충족업체를 선정하고, 업체 간 경쟁 입찰을 통해 기종을 결정한다. 임차로 획득하는 경우는 구매에 의한 획득보다 경제적인 경우와 구매에 의한 획득으로 전력화시기 충족이 불가능한 경우, 장비의 진부화, 구식화 또는 지속적인 성능개량 등으로 장비를 임차하는 것이 효율적인 경우 등이다.

운영유지단계는 무기체계 배치 후 운용유지 전반에 해당한다. 양산된 무기체계는 소요군에서 운용유지하며, 도태는 국방부와 소요군에서 실시한다. 운용유지 간 소요군은 운용 및 정비제원을 수집 및 분석하여 예측값과 실측값을 비교분석하여 관리하며, 신규 무기체계 개발 시 활용한다[9].

3.2. 군 무기체계 획득 기준

군 무기체계 획득 기준으로 앞서 설명한 RAM과 더불어 OMS/MP(Operational Mode Summary / Mission Profile), ROC(Required Operational Capability) 등이 사용된다. 먼저 소요기획단계에서 사용되는 OMS/MP는 체계가 향후 배치되었을 때 전·평시에 어떻게 사용될 것인지를 설명하는 문서로서, 연간 체계 사용방법을 구조화·정량화하여 나타내며, 성능규격과 시험계획 및 체계지원요소 개발 지원 등에 활용한다. 여기에서 OMS는 무기체계 전·평시 운용형태를 계량화하여 무기체계 임무에 대한 세부작전 형태별 운용시간, 대기시간, 총가동시간 등 시간 형태로 나타내며, MP는 전·평시 임무형태별 핵심기능을 계량화한 것으로 기동거리(km), 무장(발수), 지휘통신/감시 및 생존(운용시간) 형태로 나타낸다.

ROC는 군사전략 목표달성을 위해 획득이 요구되는 무기체계의 운용개념을 충족시킬 수 있는 성능수준과 무기체계능력을 제시한 것으로서 주요 작전운용성과 기술적·부수적 성능으로 구별되며[7], OMS/MP를 통해 개략적인 기준을 성립한 후 체계연구개발, 탐색개발을 통해 구체적으로 작성된다. 이것이 결정되면 국방부에서 제기된 예산을 토대로 사업을 추진하고, 요구한 성능의 무기를 제작할 수 있는 업체들은 입찰서를 내고 경쟁한다. 즉, 개발 무기 체계에 대한 군 최종 요구사항이라 볼 수 있다.

3.3. 무기체계 획득 절차 간 V-model 적용

무기체계 획득 절차는 ISO 26262의 기능안전성 전자제어장치 개발절차와는 다른 시스템을 보이고 있다. 단계별 절차에 의해 무기체계를 개발하면서 OMS/MP에 의해 소요가 결정되고 나면 ROC가 결정되고 예산이 편성되면 요구사항에 대한 변경 자체가 불가하다. 하지만, ISO 26262는 V-model을 통하여 제품을 개발하고, 생산 및 운영단계까지 문제점을 도출하여 피드백하는 시스템으로 사용자의 불만 및 요구사항이 반영되는 제품개발 프로세스이다. 무기체계 획득절차상 군의 특수성으로 인해 적용하는 것이 제한될 수도 있다. 그럼에도 우리 군은 기존 무기체계 획득 절차를 개선해 보다 우수한 성능의 무기체계를 개발하기 위해서 ISO 26262의 V-model 도입이 반드시 필요하다. 모든 무기체계 획득 절차에 대해 적용하기에는 제한이 되지만, 소요 제기 단계, 선행연구 단계, 탐색개발단계, 체계개발 단계에서 도입이 필요한 부분을 도출하여 부분 적용하는 것도 하나의 방법이다[10].

이러한 필요성이 대두되어, 현재 무기체계 연구개발 및 시험 평가(RDT&E, Research, Development, Test, and Evaluation) 절차는 Figure 3와 같이 V-model 형태로 진행된다[11]. 추가로 적용해야 할 부분이라면, 연구개발 절차에서 검증 실패 시 이전 단계로 돌아가는 유연함과 소요제기 단계 등 무기체계 획득절차 전반에 있어 필요한 부분에 V-model

을 적용하는 것이 요구된다.

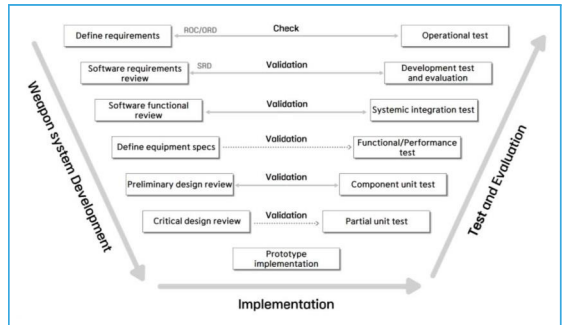


Figure 3. Weapon system RDT&E process

3.4. 기능안전성을 고려한 평가기준

무기체계 연구개발에 있어서 기준이 되는 OMS/MP, ROC, RAM분야 개선이다. 서론에서 제시한 바와 같이 무기체계는 발전하고, 운용 간 유사한 안전사고는 지속적으로 발생하고 있다. 그러나, 현행 무기체계 연구개발의 평가기준에서 기능안전성 분야는 고려되지 않고 있다. 평가 기준의 개선을 통해 선진화된 기능안전성 전자제어장치의 도입이 필요하다. 이에 대한 대책으로 무기체계 도입의 기준이 되는 OMS/MP, ROC, RAM 목표값 선정에 기능안전성을 고려한 평가기준의 추가가 필요하다.

이에 대한 평가기준으로 OMS/MP-S(Safety)를 제안한다. 평시 OMS/MP 작성에는 출동, 교육훈련, 점검 및 검열, 기타 요소를 포함하여 작성하게 되는데, 이때 유사장비의 안전사고 유형을 포함하는 것이다. 예로 K1전차의 경우 야전 운용 간 후방 압박사고 00회, 측면 추돌사고 00회 등 사고유형에 대한 순위별로 작성한 후 유형에 대한 검토 후 예방 대책을 위해 기능안전성 전자제어장치를 확인하여 적용 방안을 개략적으로 도출한다.

또한 ROC-S를 제안한다. 이는 OMS/MP-S를 통해 소요제기된 기능안전성 전자제어장치에 대해 탐색개발을 거쳐 전시와 평시 두 가지 조건을 충족하는 기능안전성 전자제어장치를 포함하는 기준을 의미한다. 기능안전성 전자제어장치를 무기체계에 적

용하여 전투장비를 개발하는 것이므로 이를 활용한 작전적 성능이 요구된다. 도입된 기능안전성 전자제어장치는 전시·평시를 가리지 않고 일어나는 안전사고에 대한 대비와 더불어 전시에 활용 가능한 작전적 성능도 기대된다.

마지막으로 RAM-S(Safety)를 제안한다. 기존의 신뢰도, 운용도, 정비도와 더불어 안전성을 추가한 기준이다. ROC-S를 통해 제기된 기능안전성 전자제어장치에 대해서 안전성에 대한 목표값을 선정하여 판단한다. 목표값 선정에 대한 기준은 간단하다. 기능안전성 전자제어장치의 경우 ISO 26262의 국제규격의 승인 여부를 기준으로 한다. ISO 26262는 앞서 본 바와 같이 전자제어장치의 기능안전성 분야의 기준이 되어 생산부터 폐기 시까지의 모든 상황을 고려 제시된 규격이기 때문에 추가적인 평가 기준으로 사용하기에 적합하다.

4. 군 무기체계 내 기능안전성 전자제어장치 도입

4.1. 전술적 활용

전차중대 기동작전에서 기능안전성 전자제어장치의 활용 예시를 Figure 4에 제시하였다. 먼저 각각의 전차는 적을 스스로 탐색하고 격멸할 수 있어야



Figure 4. Tank company maneuvers utilize ECU

한다. 이에 대한 방안으로 상황 인식 시스템(SAS, Situation Awareness System), 나이트 비전 카메라 등의 장치 사용을 가정하였다. 이를 활용하면 전차는 차체 안에서 모든 상황파악이 가능하게 되고, 전차장의 지시에 의해 상황에 따라 즉각 대처가 가능해진다. 전차 내부에서 모든 상황판단이 이루어진다면 전차장, 조종수, 탄약수, 포수 등 각각의 임무를 명확히 수행할 수 있으며 전차 1대당 4명의 팀이 내부에서 생존성이 확보된 가운데 전투에 전념할 수 있다.

각각의 정보들을 통합 관리할 수 있는 시스템 개발로 전차대대, 기갑여단에서의 통합 지휘통제가 가능하다면, 이로 인한 작전적 효과가 기대된다. 활용의 예시로 전술정보통신체계(TICN, Tactical Information Communication Network)과 기능안전성 전자제어장치의 연계를 제시한다[12]. TICN은 디지털화된 군 통신망을 통해 데이터 전송을 지원하는 시스템을 의미한다. TICN의 구조는 Figure 5에 제시한 바와 같다.

TICN을 통해 전송하는 데이터에 개별 전차의 시야정보를 추가해 지휘에 활용한다면 작전 지휘는 훨씬 수월할 것이다. 예시로 지휘관이 00호 전차 주변의 상황에 문제가 생겼다는 보고를 받았을 때 해당 전차의 시야정보를 통해 상황을 한눈에 살펴보고 통신하여 예기치 못한 적의 공격 및 지형상의 제한사항을 쉽게 극복할 것이다. 화력, 기동 등 전통적인 전투적 성능도 중요하지만, 현대전은 지능형 전투의

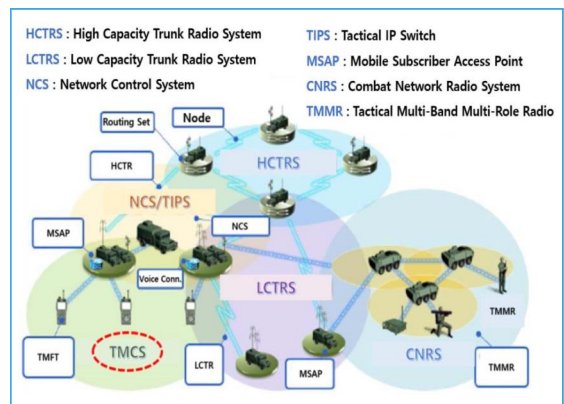


Figure 5. Structure of TICN system

중요성이 두드러진다. 확실한 정보력을 바탕으로 즉각적인 대응이 가능하도록 전투장비를 발전시키기 위해서는 기능안전성 전자제어장치의 도입을 통한 무기체계의 개선이 필요하다.

또한 각 부대별 상황에 맞는 주둔지 방호 작전과 국지도발 대비작전 등 지역별 작전수행 시 전투장비에 장착된 기능안전성 전자제어장치를 활용하여 자체 감시능력을 강화한다면 탄약부대 방호작전의 예시로 다음과 같은 작전적 효과가 예상된다. 탄약부대는 중대급이지만 면적 자체가 크고, 자체 인원 및 장비로 방호하고 있다. 그러나 문제는 넓은 지역을 담당하면서도 감시장비는 경계인원, 탐조등, 휴대용 탐조등, 야간투시경뿐이며, 탄약고 내 주요 목지점에는 목진지를 운용한다. 예상되는 적은 특수전부대로 주요시설 파괴가 목적이므로 언제 어디에서 침투할지는 아무도 모른다. 그러다 보니 실질적인 ASP 방호 작전에서 취약점 여러 곳이 존재한다. 1개 탄약고만 적의 피해를 입어도 화재, 폭발에 의한 연쇄 피해가 발생하고, 저장된 탄약량을 고려하였을 때 전투부대에 적시 탄약지원이 불가하여 전투여건 보장이 안 되는 상황도 발생한다.

하지만, 전투부대가 아니다 보니 감시장비 및 경계병력의 보강은 불가피한 실정에서 모든 차량들이 전차와 마찬가지로 지능형 전조등, 나이트 비전, 어라운드 뷰 모니터 등 자체 감시능력을 갖고 있다면 Figure 6에서 제시한 바와 같이 부대 지역 내 차량 소산 시 주요 교차로 및 예상 침투로 방향에 차량을 위치시키고, 자체 감시 및 무선망을 이용하여 실시간

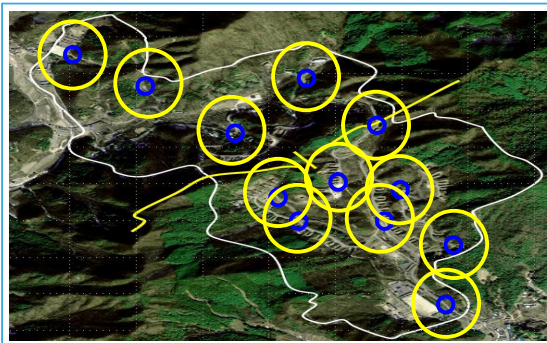


Figure 6. Base protection utilize ECU

보고토록 하며, 감시구역 내에서 적을 찾고, 격멸함으로써 작전적 효과는 더욱 향상된다. 그러므로, 차량 안에서 정보를 획득하여 전투병력을 유도하는 체계하 광활한 지역 또는 주요 방호시설 지역에서의 작전적인 보강은 상당히 이루어진다.

전차와 탄약부대의 예로 제시하였지만, 기능안전성 전자제어장치의 활용도는 전투장비의 전투적 성능에 부가하여 전장에서 작전수행능력을 극대화하기 위한 보조적인 수단으로서 미래 전투수행개념을 충족시켜 줄 수 있다.

4.2. 국내 도입 현황

현재 우리 군도 기능안전성 전자제어장치의 필요성을 느끼고 신규무기체계 및 성능개량 무기체계에 도 각종 기능안전성 장치를 추가하여 개발하고 있다. Table 2에 우리 군이 최근 도입한 무기체계에 적용된 기능안전성 전자제어장치를 제시하였다. 전술적 측면을 본다면 합동지휘통신체계(C4I, Command, Control, Communication and Intelligence)와 GPS(Global Positioning System)의 탑재가 눈에 띈다. 이를 이용해 앞서 언급한 바와 같이 전술적인 장점을 가지고 전투를 수행할 수 있을 것이다. 또한 열상감망경과 전후방 카메라의 탑재로 서론에서 예시로 제시한 안전사고의 예방은 물론 조종수의 안전한 시야 확보를 통한 전술적 활용도 기대된다.

4.3. 해외 활용 사례

2020년대 현대전 사례에서 가장 대표적인 이스라엘-팔레스타인 분쟁과 러시아-우크라이나 전쟁을 토대로 기능안전성 전자제어장치의 활용 사례를 분석하였다.

전차용 SAS의 중요성이 강조된다. 한 가지 예시로 아이언비전을 제시한다. 아이언비전은 고글 형태 HMD(Head Mounted Display)를 착용하여 외부의 카메라를 통해 증강현실 형태로 외부의 영상 정보를 제공한다. 이스라엘에서 개발되었으며 이스라

Table 2. ECU in recently adopted weapon system

Equipment		Adopt period	Type of ECU	
			Active safety	Vehicle information & convenience
Tank	K1A2	2013	<ul style="list-style-type: none"> • Front & rear view cameras 	<ul style="list-style-type: none"> • KJCCS (Korean Joint Command & Control System) • GPS
	K2	2014	<ul style="list-style-type: none"> • Front & rear view cameras • Thermal periscope 	<ul style="list-style-type: none"> • KJCCS • GPS • Air conditioning and ventilation unit
Armored car	K806/K808	2017	<ul style="list-style-type: none"> • Front thermographic camera • Rear view cameras • ABS (Anti-lock Braking System) 	<ul style="list-style-type: none"> • CTIS * K808 only • Air conditioning and ventilation unit
Self-propelled artillery	K9A1	2018	<ul style="list-style-type: none"> • Rear view cameras • Thermal periscope 	<ul style="list-style-type: none"> • GPS
Tactical vehicle	K-151	2017	<ul style="list-style-type: none"> • Rear view cameras • 4-channel ABS • CTIS (Central Tire Inflation System) • Differential lock 	<ul style="list-style-type: none"> • Automotive navigation system • GPS • Air conditioning and ventilation unit

엘-팔레스타인 분쟁 및 러시아-우크라이나 전쟁에서 활용되고 있는 장비이다. 전차와 장갑차에 SAS 장비를 적용하면 Figure 7에서 제시한 바와 같이 조종수가 안전을 보장받은 상태에서 시야를 확보할 수 있어 기동성과 생존성이 향상되고, 아군의 피해를 낮출 것으로 기대된다[13].

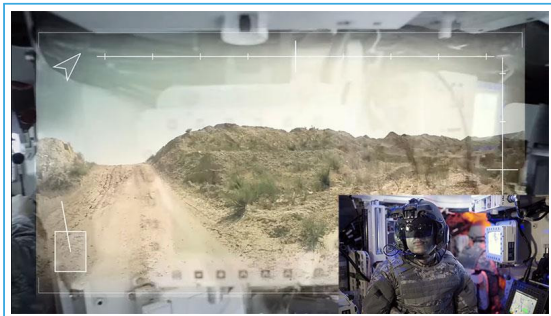


Figure 7. Example of using iron vision

박영근 and 김학윤 (2020)은 현대전에서 드론이 더 이상 조연이 아닌 주연으로 부각되고 있으며 전

쟁의 승패를 좌우할 수 있는 게임체인저 역할을 맡고 있음을 강조한다[14]. 오래전부터 드론은 전쟁에 활용되었으나 우크라이나전의 경우 수많은 드론이 전쟁에 투입되며 로봇이 전투를 대신하는 드론전쟁 양상이 진행되고 있다. 이를 통해 해래식 무기체계의 한계 및 미래전쟁의 방향성을 보여주고 있다. 이 경우 드론의 핵심기술로 자율주행 기술과 통신기술, 외부 인식 센서 등 수많은 기술이 융합되어 사용되는데, 이는 기능안전성 전자제어장치 기술을 차량에 국한하지 않고 다른 전투장비에 적용한 예시이다.

4.4. 기능안전성 전자제어장치 도입 방안

우리 군에 도입된 기능안전성 전자제어장치는 상용화되어 있는 기능안전성 전자제어장치 기술수준과 해외의 무기체계와 비교하여 상대적으로 뒤쳐진다는 한계점이 있다. 3장에서 언급하였듯이 기능안전성을 고려한 평가기준이 없는 상태로 무기체계 도입이 진

행되어 발전된 기능안전성 기술이 중요하게 고려되지 않고 있다. 이를 해결하기 위해 다음과 같은 무기체계 도입 방안이 고려된다.

소요 기획 단계에서는 기능안전성을 고려한 평가 지표를 추가한다. 평가 기준은 ISO 26262의 2단계(기능안전성 관리)와 3단계(개념단계) 내용을 바탕으로 군 무기체계에 맞추어 구성한다.

획득 단계에서는 무기체계 연구개발 절차에 ISO 26262 제품개발 프로세스를 추가한다. 이는 ISO 26262의 4단계(시스템 수준의 제품개발), 5단계(하드웨어 수준의 제품개발), 6단계(소프트웨어 수준의 제품개발), 7단계(생산 및 운용)에 해당하며 개발 및 생산 과정에서 기능안전성 요건을 달성하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

운영유지단계에서는 기능안전성 기술의 지속성을 확보한다. 이는 ISO 26262의 8단계(지원 프로세스)에 해당하며 도입된 기능안전성 전자제어장치의 운영유지 외에도 무기체계 운영 간 기능안전성 문제를 기록하여 소요 기획 단계의 새로운 기술 도입에도 도움이 될 수 있도록 한다.

5. 결론

우리 군의 무기체계는 과거와 달리 1990년대 이후 기존 외국장비 모방방식에서 벗어나 자체 연구개발로 자주국방에 한 걸음 앞서 있다. 또한 기존 기계식 구형장비가 아닌 첨단 과학기술을 접목한 복합정밀장비로 개발을 추진함으로써 자체적인 전력 증강 뿐만 아니라 해외에도 그 우수성을 알리고 있다. 이처럼 첨단 무기체계로 인해 고성능화가 빠르게 진행되고 있는 상황에서 숙련된 인원의 생존성 보장 및 전투장비의 안전사고 예방과 불확실한 전장상황에서 각 전투장비별 전장 가시화는 실질적인 미래 무기체계에서 반드시 해결해야 할 과제이다. 이는 무기체계 연구개발 절차에서 살펴보았듯이 작전성만을 강조할 것이 아니라 최초 무기체계 소요 판단 시 기능안전성을 포함하여 요구사항을 작성함으로써 기능안전성

전자제어장치를 현 무기체계 성능개량부터 미래 무기체계 개발에 적용해야 한다. 이와 같은 미래의 발전방향을 고려해 봤을 때 ISO 26262의 V-model 개발체계를 도입해야 함을 인식하였다.

급속도로 진화하고 있는 기능안전성 전자제어장치를 자동차만을 위한 기술로 인식하기보다는 전투장비에 적극 적용함으로써 작전성 및 안전성을 두루 갖춘 무기체계를 개발해야 한다. 선별적으로 필요한 기술을 접목하여 작전에 활용하고, ISO 26262와 같은 개발시스템을 도입한다면 안전하고, 작전 활용도가 높은 전투장비를 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 군에서 전력화되어 활용 중인 TICN과 기능안전성 전자제어장치의 연계를 제시한다. TICN을 통해 전투병과 전투체계와 전장상황을 공유한다면 평시 상황에서는 기능안전성을, 전시 상황에서는 전장가시화를 통한 정보 획득으로 효과적인 작전통제가 가능하며 더 큰 시너지 효과가 발생할 것으로 예상된다.

지금까지 첨단 무기체계 개발 간 안전성과 전장가시화를 위해 접목 가능한 기능안전성 전자제어장치 개념, 관련기술 및 필요성과 군 무기체계 획득절차에 대한 V-model 적용방안, 기능안전성을 포함한 소요판단 방안 등을 제시하였다. ISO 26262는 차량용 기능안전 규격이므로 향후 추가 연구를 통해 차량 이외의 군 무기체계에도 기능안전성 전자제어장치의 도입 방안을 고려해보는 방향이 제시된다. 본문에서 제안한 무기체계 획득 절차 및 기능안전성 전자제어장치가 전투장비를 개발하는 데 중요한 역할을 담당하여 미래 육군의 모습을 한층 발전시키는 계기가 되었으면 한다.

사사(Acknowledgements)

본 연구는 DS 융합인재 양성사업(RS-2022-NRO 68754)으로 지원되었습니다.

참고문헌

- 1 Seoung, Y. M., "A Study on the Derivation of Safety Accident Factors of Military Vehicle Accidents by applying FMEA Technique (Master's thesis)", *Graduate School of General, Seoul National University of Science and Technology*, pp. 1-74, 2021.
- 2 김영주, 오돈석, 은영민, & 이정민, "인간 및 안전공학과 연계된 안전시스템 군(軍) 우선 적용방안", *국방과 기술*, 496, pp. 106-119, 2020.
- 3 Sokolović, V. S., & Marković, G. B., "Internet of Things in military applications", *MILITARY TECHNICAL COURIER*, 71(4), pp. 1148-1171, 2023.
- 4 ISO 26262-1:2018 Road Vehicles – Functional Safety, International Organization for Standardization (ISO), 2018.
- 5 Jung, E. K., Kwon, H. M., Lee, M. K., Kim, D. C., & Hong, S. H., "Automotive Functional Safety-ISO 26262 and Its Countermeasures", *Journal of Korean Society for Quality Management*, 41(2), pp. 185-196, 2013.
- 6 SILICONSTUDIO KOREA, 디지털 디자인 트렌드 및 핫 이슈 : Automobile, 2010.
- 7 국방부훈령 제2924호 국방전력발전업무훈령, 국방부, 2024.
- 8 국방부훈령 제2925호 총수명주기관리업무훈령, 국방부, 2024.
- 9 Sim, J. G., "A Study on Efficient ILS for cutting-edge weapon system acquisition: Focused on the field data collection and analysis methodology (Doctoral dissertation)", *Graduate School of Taejon University*, pp. 1-142, 2013.
- 10 Kim, N. H., Lee, M. K., "Study on the Application of Function Safety Electronic control unit in the Weapon System (Master's thesis)", *Chungnam National University Graduate School of Industry*, 2014.
- 11 Do, G., & Seo, M., "A Study for Establishing Key Performance Indicator of Quality Control in Weapon System Development Stage", *Journal of Defense Quality Society*, 4(1), pp. 136-144, 2022.
- 12 Lee, S., & Lee, C., "A Case Study of TICN MSM Function Consistent with the Military Operation Concept", *Journal of Defense Quality Society*, 3(2), pp. 74-81, 2021.
- 13 Kim, D. H., Park, T. W., Kim, M. S., & Bae, M. S., "A Study on the Effect of Ironvision on Tank and Armored Combat Vehicle", *Proceedings of the KAIS Spring Conference*, pp. 299-301, 2024.
- 14 박영근, & 김학윤, "러시아-우크라이나 전쟁에서 대두된 드론의 역할과 우리 군 미래전력 구축방안", *국방과 기술*, 539, pp. 126-139, 2024.

방위산업에서 해외 원자재 조달 리스크의 다차원적 평가

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

A Multidimensional Assessment of Overseas Raw Material Procurement Risks in the Defense Industry

하승희, Seunghee Ha

경북대학교, 경영학부, 박사과정
Doctoral Student, School of Business
Administration, Kyungpook National
University

박규성, Gyuseong Park

경북대학교, 경영학부, 석사과정
Master Student, School of Business
Administration, Kyungpook National
University

김성수†, Sungsu Kim

경북대학교, 경영학부&에너지환경경제연구소, 교수
Professor, School of Business
Administration & RIEEE, Kyungpook
National University

Abstract

This study proposes a refined model to assess the risks associated with sourcing raw materials from overseas for the defense industry. The model incorporates market concentration, Country Risk(CR), Political Distance(PD), Transportation Risk(TR), and raw material Price Volatility(PV). Using data from the past ten years (2014-2023), this study identifies high-risk supplier countries and critical import items. The findings revealed a significant concentration of procurement from specific countries such as the United States and Germany, with Egypt emerging as the highest-risk supplier. Additionally, cotton linters pulp (HS 470610) was identified as the highest-risk item because of its heavy dependence on China, coupled with the high country risk, transportation risk, and political uncertainty between South Korea and China. This study provides a strategic foundation for reducing reliance on specific suppliers and diversifying supply chains to enhance stability. These findings offer practical insights for policymakers and industry leaders in managing supply chain risks, ultimately contributing to the sustainability and security of the defense industry.

keywords: defense industry supply chain management, procurement risk assessment,
market concentration, country risk, transportation risk, raw material price volatility

† Corresponding Author : Sungsu Kim

Tel : +82-53-950-5422, email : sungsukim@knu.ac.kr

Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, Republic of Korea

Received April 1st. 2025 Revised April 25th. 2025 Accepted June 27th. 2025 Published June 30th. 2025

1. 서론

국방 및 방위산업은 국가 안보를 유지하고 군사적 경쟁력을 확보하는 데 필수적인 역할을 한다. 현대 방위산업은 첨단 기술을 적용한 무기 체계뿐만 아니라, 이를 구성하는 원자재의 안정적인 조달에도 크게 의존하고 있다. 특히, 주요 방위산업 원자재의 수입이 차단되거나 공급망에 문제가 발생할 경우, 이는 단순한 산업적 차원을 넘어 국가 안보에 중대한 영향을 미칠 수 있다[1]. 더욱이, 트럼프 2기 행정부 출범 이후 미국의 통상 정책 변화에 대한 불확실성이 증가하면서 방위산업 원자재 조달이 위협받고 있다. 이에 따라, 공급망 리스크를 사전에 식별하고 대응 전략을 수립하는 연구의 중요성이 더욱 부각된다.

기존 연구들은 방위산업의 수출 경쟁력 강화 또는 민간 기업 중심의 공급망 위험 분석에 초점을 맞추고 있으며, 글로벌 공급망의 복잡성과 국방 관련 데이터의 기밀성으로 인해 방위산업 원자재의 리스크를 정량적으로 평가한 연구는 매우 제한적이다. 일부 연구에서는 시장 집중도, 국가 위험도, 정치적 거리를 고려한 분석이 이루어졌으나[2], 공급망의 동적인 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 방위산업 원자재의 공급망 리스크를 보다 현실적으로 평가하기 위해서는 특정 국가나 기업에 대한 의존도를 넘어, 운송 위험도 및 원자재 가격 변동성과 같은 실질적이고 동적인 요소를 고려할 필요가 있다. 본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해 최근 10년(2014~2023년)간의 데이터를 기반으로 방위산업 원자재 중 수입 규모 기준 상위 품목을 선정하고, 품목별 위험도를 계량화하였다. 또한, 기존 연구에서 간과된 요인인 국가별 운송 위험도와 품목별 가격 변동성을 반영하여 새로운 해외 조달 위험 지수(OPRI, Overseas Procurement Risk Index)를 도출함으로써 주요 수입 품목의 리스크를 보다 정교하게 평가하고, 실효성 있는 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

2. 문헌연구

공급망(Supply chain)은 원자재 조달부터 최종 소비자에게 전달 및 판매된 물품의 회수와 재활용까지 전 과정을 포함하는 물자 흐름을 의미한다. 그중 조달(Procurement)은 원자재, 부품 등을 획득하는 공급망 흐름의 한 과정이다. 공급망 리스크(Supply chain risk)는 그 범위에 따라 내부 위험, 외부 위험, 네트워크 위험으로 구분될 수 있다. 조달 리스크(Procurement risk)는 공급망 내 조달의 과정에서 발생할 수 있는 불확실성과 위험 요소를 뜻하며, 조달 리스크는 공급망의 변동성, 지정학적 요인, 경제적 불안정성, 가격 변동성 등 다양한 요인에 의해 발생할 수 있다[3].

조달 및 공급망 리스크 평가에 관한 해외 연구에서는 주요 리스크 요인으로 공급업체 신뢰성, 물류 지연, 수요 변동성 등이 지목된다. 특히, 원자재 수입과 관련된 연구에서는 특정 공급국에 대한 높은 의존도가 문제로 지적되며, 시장 집중도를 활용한 분석이 코로나19 이후 활발히 진행되고 있다.

Sun et al. (2019)은 리튬 이온 배터리 관련 원자재의 공급망 전 과정(광산 채굴, 정제, 제조)에서의 위험을 평가하였다[4]. 이 연구에서는 허핀달-허쉬만 지수(HHI, Herfindal-Hershman Index)를 활용하여 특정 국가에 대한 공급 집중도를 분석하고, 세계 거버넌스 지표(WGI, Worldwide Governance Indicator)를 적용하여 국가별 거버넌스 수준을 반영함으로써 공급 중단 확률을 평가하였다. Wasim et al. (2020)은 GDP 대비 석유 수입 비율, 시장 유동성, 지정학적 위험, 운송 위험, 유가 변동성 등을 고려한 석유 공급 취약성 지수를 개발하고 평가 모델을 제시하였다[5]. 또한, Kruyt et al. (2009)은 수입 의존도, 정치적 안정성, 에너지 가격, 공급-수요 지수 등의 다양한 에너지 안보 지표를 활용하여 모델 기반 시나리오 분석을 수행함으로써 에너지 공급 안정성을 평가하였다[6]. Kong et al. (2019)은 중국의 천연가스 수입 위험을 평가하기 위해 자원

리스크, 정치적 리스크, 운송 리스크, 가격 변동성 리스크, 구매력 리스크, 의존도 리스크를 종합적으로 고려한 평가 프레임워크를 구축하였다[7]. 국내 방위산업 분야의 원자재 관련 연구로는 Son and Kim (2022)의 방산 물자 시설재 및 원자재 수입품의 공급망 위험 평가 연구가 있다[2]. 이 연구는 시장 집중도 지수에 국가 위험도와 정치적 관계를 고려한 가중치를 부여하여 방산 원자재의 공급망 리스크를 분석하였다. 그러나 이 연구는 공급망의 복잡한 동적 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 공급망 리스크는 단순한 의존도 평가를 넘어, 공급 과정에서 발생하는 다양한 변동성을 고려할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 국가별 운송 위험도와 품목별 가격 변동률을 추가적으로 고려하여 보다 정교한 위험 평가를 수행하고자 한다. 국가 위험도는 정치·경제의 안정성을 보여주고, 한국과의 정치적 거리는 외교 관계의 밀접성과 정책적 리스크를 반영하며, 운송 리스크는 운송 기반의 물류 차질 가능성을 나타낸다. 또한, 가격 변동성은 비용 예측과 재고 전략에 영향을 주므로, 이들 변수들은 방위산업 원자재 공급망이 직면한 지정학적, 물류적, 경제적 리스크를 포괄적으로 설명하고, 품목별 조달 안정성을 정량적으로 비교·평가할 수 있는 이론적 기반을 제공한다. 이를 통해, 기존 연구에서 다루지 못했던 공급망의 실질적 변동성을 반영하고, 방위산업 원자재의 안정적 조달을 위한 보다 현실적인 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

본 연구는 국가 위험도를 내부 위험, 시장 집중도와 운송 위험을 네트워크 위험, 한국과의 정치적 거리 및 가격 변동성을 외부 위험으로 정의하여 공급망 리스크를 보다 체계적으로 분석하고자 한다.

3. 연구방법

3.1. 데이터

본 연구는 최근 10년(2014년~2023년)간 방위산업 시설재 및 원자재 수입 품목 중 상위 50개를 대상으로 조달 리스크 평가를 수행하였다. 데이터는 웹사이트 BandTrass의 수출입 무역통계를 활용하였고, 거래구분은 ‘방위산업용 시설재 및 원자재 수입’, 품목은 ‘6단위 전체’로 설정하여 품목별, 거래 구분별, 국가별, 연도별로 구성된 자료를 파이썬 기반의 크롤링 기법을 통해 일괄 수집하였다. 그 외 관련 데이터 정보와 출처는 Table 1에 제시되어 있다.

3.2. 위험 식별 지표

3.2.1. 시장 집중도

시장 집중도란 특정 시장에서 소수의 기업이 차지하는 점유율을 측정하는 지표로, 원자재, 에너지와 관련한 공급망 위험 및 공급망 중단 연구에서 많이 활용된다. 본 연구에서는 시장 집중도를 평가하는 대

Table 1. Risk Factors and Sources

Risk factors	Measurement indicators	Source
Market concentration	Import statistics of defense industry facilities and raw materials	BandTrass
Country risk	Worldwide governance indicators	World Bank
Political relationship	Ideal point distance	Bailey, Strezhnev, and Voeten (2017)[8]
Transportation risk	Sub-dimensions of Logistics Performance Index (LPI) - International shipments score - Timeliness score - Tracking and tracing score	World Bank
Price volatility	Import statistics of defense industry facilities and raw materials	BandTrass

표적인 방법인 HHI를 Equation 1과 같이 적용하였다.

$$HHI = \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (1)$$

N 은 제품을 생산하는 국가 또는 기업의 수를 나타내고, S_i 는 개별 공급국 또는 기업의 시장 점유율을 나타낸다. 지수는 각 국가 및 기업의 시장 점유율을 제곱하여 합산하는 방식으로 산출한다. 본 연구에서는 S_i 를 특정 품목에 대한 공급국 i 의 수입 비중으로 정의하여 수입이 한 국가에 집중된 경우 HHI 값이 1에 가까워지고, 다양한 국가에서 균등하게 수입하는 경우에는 0에 가까운 값을 갖는다. 즉, HHI 값이 1에 가까울수록 수입 다각화가 이루어지지 않은 상태이며, 해당 품목의 공급망 위험성이 높음으로 평가된다.

3.2.2. 국가 위험도

국가 위험도(CR, Country Risk)는 유럽연합(EU, European Union)의 핵심 원자재 분석 방법론을 참고하여, 각국의 행정 시스템이 공급 위험에 미치는 영향을 반영하기 위해 WGI를 활용하였다. 이는 세계은행(World Bank)이 매년 발표하는 지표로, 의사 표현과 책임성(Voice & Accountability), 정치적 안정성과 폭력 부재(Political stability & Absence of violence), 정부의 효과성(Government effectiveness), 규제 질(Regulatory quality), 법치(Rule of law), 부패 통제(Control of corruption)의 6가지 차원으로 구성된다. 일시적인 사건이나 조사 오류의 영향을

최소화하기 위해, 2014년부터 2023년까지 국가별로 6개 차원의 평균값을 표준화하여 사용하였다. 또한, 품목별 국가의 시장 점유율에 국가 위험도 값을 곱하여 가중치를 부여하였다.

3.2.3. 정치적 거리

기존 연구에서는 국가 위험도만으로 국가 간 관계를 평가하는 데 한계가 있음을 지적하며, 정치적 관계(Political relations)를 고려한 연구들이 제시된 바 있다[9]. 이에 본 연구에서는 UN 총회의 국가별 투표 데이터를 활용한 이상점 거리(Ideal points distance)를 적용하여 공급국과 한국 간의 정치적 관계를 정량적으로 반영하였다[8]. 이상점 거리는 국가 간 이념적 차이와 정치적 관계를 측정하는 지표로, 원자재 공급망 연구에서 활용된다. 본 연구에서는 한국과 공급국 간 연도별 이상점 거리의 평균값을 표준화하여 사용하였으며, 품목별 국가의 시장 점유율에 정치적 거리(PD, Political Distance) 값을 가중치로 반영하였다.

3.2.4. 운송 위험도

선행 연구에서 원자재 공급망의 운송 위험은 주로 공급국과 수입국 간의 물리적 거리로 측정해 왔다. 그러나, 운송 과정은 거리뿐만 아니라 비용 효율성, 적시성, 추적 가능성 등의 다양한 요인에 영향을 받는다. 본 연구에서는 이러한 제한점을 보완하고자 세계은행의 물류 성과 지수(LPI, Logistics Performance Index) 중 운송과 직접 관련된 3가지 지표를 활용하여 운송 위험도(TR, Transportation Risk)를 Table 2와 같이

Table 2. Key Factors for Transportation Risk

Evaluation factors	Measurement indicators	Source
International shipment capacity	International shipments score from LPI	Gaudenzi and Borghesi (2006)[10] Tummala and Schoenherr (2011)[11] Wagner and Neschat (2010)[12]
On-time delivery	Timeliness score from LPI	Wu, Blackhurst, and Chidambaram (2006)[13] Schoenherr, Tummala, and Harrison (2008)[14]
Tracking & Traceability	Tracking & Tracing score from LPI	Buchholz, Schumacher, and Al Barazi (2022)[15]

평가하였다. 본 연구의 분석 기간(2014년~2023년)에 해당하는 국제 운송 능력(International shipment capacity), 적시성(On-time delivery), 추적 및 추적 가능성(Tracking & Traceability)의 평균값을 활용하여 각 공급국의 운송 위험도를 산출하고, 이를 표준화하여 품목별 수입국의 시장 점유율에 가중치를 부여하였다. 수입 비중(S_i)에 국가 위험도(CR), 정치적 거리(PD), 국가별 운송 위험도(TR)를 고려하여 수정된 시장 집중도(HHI_{mod} , Modified Market Concentration Index)는 Equation 2와 같다.

$$HHI_{mod} = \sum_{i=1}^N (CR_i \cdot PD_i \cdot TR_i) \cdot S_i^2 \quad (2)$$

이 지표는 기존의 정치적 거리와 국가 위험도 중심의 방식과 달리, 운송 과정의 위험까지 포함하여 공급망 리스크를 보다 정교하게 반영할 수 있다는 장점이 있다.

3.2.5. 원자재 가격 변동률

원자재 가격은 공급 상황과 경제적 영향을 반영하는 주요 지표로, 공급 안정성(SOS, Security of Supply) 평가에서 중요한 요소로 간주된다[6]. 기존 연구에서는 급격한 가격 상승을 위험 요인으로 보았으나, 일부 연구에서는 가격 급등뿐만 아니라 급락도 공급망 위험

을 초래할 수 있음을 지적하였다[16]. 가격 변동성이 클수록 공급망의 불안정성이 증가하며, 본 연구에서는 변동 폭이 클수록 높은 위험으로 정의한다.

BandTrass의 방위산업 원자재 수입 금액 및 수입 중량 데이터를 활용하여 단가(수입 금액/수입 중량)를 산출하였으며, 가격 변동률(PV, Price Volatility)은 국가별 차이를 고려하지 않고 품목별로 계산하였다. 연구 기간 동안의 가격 변동률은 시작 연도와 마지막 연도의 가격을 기준으로 산출하고, 해당 연도에 수입이 없을 경우 인접 연도의 데이터를 활용하여 보완하였다. 변동률은 절댓값으로 표준화하고, 25%, 50%, 75%, 100%의 네 개 구간으로 나누어 각각 0.25, 0.5, 0.75, 1의 값을 부여하여 이상치로 인한 왜곡을 방지하였다. 최종적으로, HHI_{mod} 에 가격 변동률(PV) 가중치를 곱하여 공급망 위험을 평가하였다. OPRI의 최종 식은 Equation 3과 같다.

$$OPRI = HHI_{mod} * (1 + PV) \quad (3)$$

4. 연구 결과

4.1. 수입 현황과 최대 공급국

Table 3은 전체 수입 품목을 대상으로 주요 공급국과 수입 규모를 분석한 것이며, Figure 1은 본 연

Table 3. Import Volume by Value and Weight

Rank	Import value (Millian USD)	Supplier country	Import weight (kg)	Supplier country
1	1,649	USA	28309950.9	Germany
2	1,382	Germany	14664002.5	USA
3	210	UK	12132512	China
4	136	Israel	6184908.05	Canada
5	103	France	3774165.14	Sweden
6	82	China	1986549.68	France
7	55	Canada	1754751.46	Japan
8	51	Italy	804694.48	UK
9	47	Sweden	797435.86	India
10	43	Austria	574636.62	Italy

구에서 분석한 상위 50개 품목의 국가별 수입 현황을 추가적으로 검토한 것이다.

지난 10년간 방위산업의 수입 원자재 품목 수는 총 1,226개이며, 수입 중량 기준 주요 공급국은 독일, 미국, 중국, 캐나다, 스웨덴 순으로 나타났다. 반면, 수입 금액 기준으로는 미국, 독일, 영국, 이스라엘, 프랑스가 주요 공급국으로 분석되었다. 수입 금액과 수입 중량의 순위 차이는 국가별 수입 제품의 단가 차이 때문으로 해석할 수 있다. 미국과 독일에서 수입되는 제품은 고부가가치 원자재를 포함하는 반면, 중국에서 수입되는 제품은 상대적으로 저부가가치 품목이 포함되는 경향이 있다. 본 연구에서는 수입 규모를 평가할 때 수입 금액 기준으로 분석을 수행하였다.

Figure 1과 같이, 상위 50개 품목의 수입 규모를 분석한 결과 독일과 미국에 대한 의존도가 압도적으로 높았으며, 영국, 이스라엘, 프랑스 등이 그 뒤를 이었다. 일부 국가의 수입 규모는 5,000만 달러 이하로, 특정 국가에 대한 수입 집중도가 두드러졌다. 독일과 미국은 방위산업 선진국으로, 독일은 특수 합금 및 베어링 등 정밀 기계 생산에 강점을 가지며, 미국은 F-35 전투기, 글로벌호크, 이지스 시스템 등

한국의 주요 방산 무기체계의 핵심 부품과 원자재를 공급한다. 이에 따라 주요 공급국의 위험도를 면밀히 평가할 필요가 있다.

4.2. 공급국 위험도

Table 4는 각 공급국의 위험도를 나타낸다. 좌측 열(CR×PD)은 기존 선행 연구에서 사용된 지표로, 국가 위험도(CR)와 한국과의 정치적 거리(PD)를 반영한 위험 지수를 기반으로 2014년부터 2023년까지의 기간으로 업데이트하여 위험국 순위를 재정리한 것이다. 반면, 우측 열(CR×PD×TR)은 본 연구에서 국가별 운송 위험도(TR)를 추가적으로 고려한 결과이다.

국가 위험도와 정치적 거리만 고려할 경우, 이집트, 베트남, 인도네시아, 스와질랜드, 중국 순으로 위험국이 선정되었다. 반면, 운송 위험도를 추가로 고려할 경우에는 이집트, 카자흐스탄, 인도네시아, 러시아, 베트남, 필리핀 순으로 상위 위험국이 재구성되었다. 주목할 점은 기존 선행 연구에서 위험국으로 분류되지 않았던 이집트가 수입 대상국 51개국 중 위험도 1위로 평가되었다는 것이다. 한국은 2022년

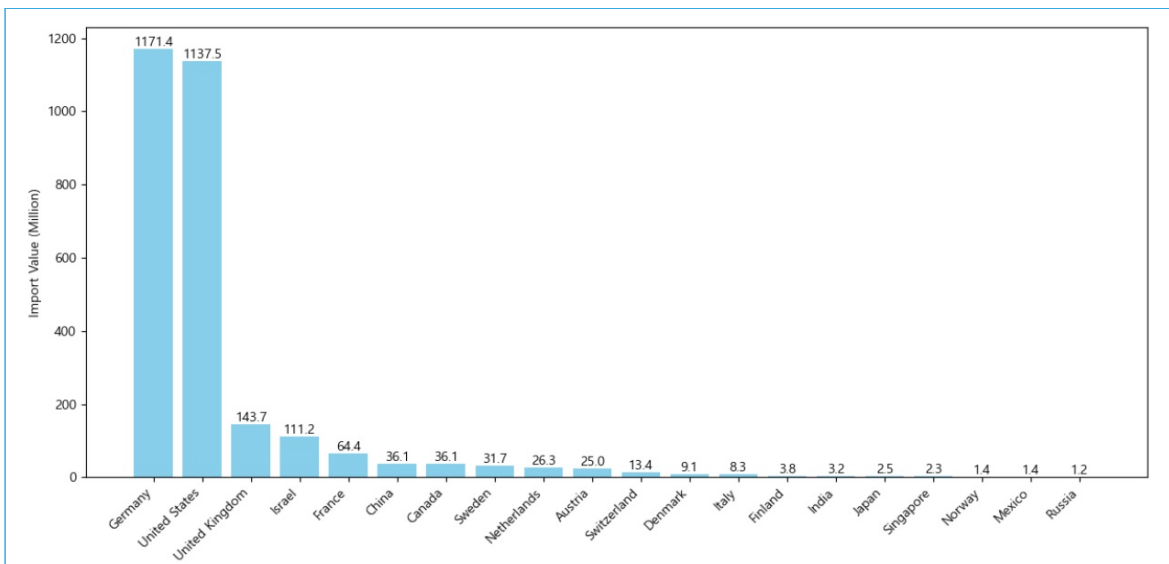


Figure 1. Country distribution of the top 50 defense industry raw materials

Table 4. Risk Ranking of Supplier Countries

Risk rank (Safety rank)	CR×PD	CR×PD×TR	Risk rank (Safety rank)	CR×PD	CR×PD×TR
1 (51)	Egypt	Egypt	...	(Omitted)	...
2 (50)	Vietnam	Kazakhstan	42 (10)	Georgia	Singapore
3 (49)	Indonesia	Indonesia	43 (9)	Portugal	Andorra
4 (48)	Eswatini	Russia	44 (8)	Ireland	Denmark
5 (47)	China	Vietnam	45 (7)	Andorra	Norway
6 (46)	Hong Kong	Philippines	46 (6)	Netherlands	Netherlands
7 (45)	Kazakhstan	Brazil	47 (5)	Denmark	Austria
8 (44)	Philippines	Argentina	48 (4)	Austria	Finland
9 (43)	Thailand	Mexico	49 (3)	Sweden	Sweden
10 (42)	South Africa	Thailand	50 (2)	Norway	Germany
...	(Omitted)	...	51 (1)	Finland	Belgium

이집트로부터 HS Code 760612 품목을 처음 수입하였다. 즉, 새로운 수입 대상국인 이집트는 높은 위험도를 보이며, 향후 교역 안정성을 고려한 리스크 관리가 필요하다. 또한, 기존 연구에서는 상위 5위권에 포함되지 않았던 카자흐스탄(7위)과 러시아(12위)가 본 연구에서 국가별 운송 위험도를 반영한 결과 각각 2위와 3위로 상승하였다. 이는 공급망 위험 평가에서 운송 위험을 고려할 필요성을 시사한다.

안정적인 공급국은 주로 유럽에 집중되어 있으며, 상위 10개국 중 9개국(벨기에, 독일, 스웨덴, 핀란드, 오스트리아, 네덜란드, 노르웨이, 덴마크, 안도라)이 유럽 지역에 속하는 것으로 나타났다. 현재 유럽으로부터의 원자재 수입 규모는 제한적이므로, 공급 안정성을 고려한 수입 비중 확대가 필요하다.

한국과 인접한 러시아(4위)와 중국(14위)은 전체 51개국 중 위험국으로 분류되었다. 반면, 일본은 위험국 41위, 안전국 11위로 평가되며 비교적 안정적인 공급국으로 나타났다.

주요 수입 대상국인 미국은 51개국 중 21위의 중간 정도 수준의 위험국으로 평가되었다. 이는 미국이 한국과의 동맹 관계에도 불구하고 지정학적 요인과 정책적 우선순위 차이로 인해 상대적으로 높은 정치적 거리 값을 보였으며, 운송 위험도 또한 12위로 평가되었기 때문이다. 특히, 트럼프 2기 행정부의 관세

및 방위산업 관련 무역 규제가 위험도를 더욱 높일 것으로 예상되므로 공급망 안정성 측면에서 완전히 신뢰하기에는 한계가 있다. 반면, 수입 규모 2위인 독일은 위험국 50위(안전국 2위)로 나타나, 글로벌 공급망에서 높은 안정성을 보이며 신뢰할 수 있는 공급국으로 평가된다.

4.3. 해외 조달 위험 분석

본 연구에서는 HHI, CR, PD, TR, PV를 종합적으로 고려한 OPRI를 활용하여 위험 원자재 품목을 Figure 2와 같이 식별하고, 기본 HHI 지수와 비교 결과를 부록에 제시하였다. 위험 평가 결과, HS Code 470610(면 린터 펄프)이 HHI 지수와 OPRI 평가에서 모두 가장 높은 위험도를 기록하였다. 본 품목은 제지, 섬유, 화약, 의약품 산업 등에서 광범위하게 활용된다. 방위산업에서는 인화성이 높은 니트로셀룰로오스(Nitrocellulose)의 주요 원료로 사용되며, 폭약, 발사약, 로켓 추진제 제조에 필수적이다. 현재 중국에 대한 높은 시장 집중도와 국가 위험, 운송 위험, 한·중 간 정치적 불확실성이 결합되어 최고 위험 품목으로 분류되었다. 면 린터 펄프의 주요 수출국인 스페인, 우즈베키스탄 등을 대체 공급국으로 확보하는 공급망 다변화가 필요하다.

HS Code 810890(기타 티타늄과 그 제품), 841381(펌프), 901420(항공용 및 우주 항공용 기기), 841191(터보제트 및 터보프롭 부품), 731829(기타 비나선형 철강 제품)는 HHI 지수와 OPRI 평가에서 모두 상위 10대 위험 품목에 포함되었다. 이는 특정 국가 의존도가 높아 공급망 리스크가 크다는 점을 시사한다.

기본 HHI 분석에서는 포함되지 않았으나 OPRI 평가에서 위험 품목으로 확인된 HS Code 852691(항공용 무선기기), 852990(기타 HS 8525-8528에 해당하는 기타 부속품), 731815(스크루 및 볼트)는 정치적 요인, 운송 리스크, 가격 변동성을 반영했을 때 높은 위험도를 보였다. 특히, HS Code 852691은 다각화된 공급망에도 불구하고 가격 변동성이 커 OPRI 평가에서 3위로 상승하였다.

반면, HHI 분석에서 위험도가 높았던 HS Code 850213(AC 모터)은 OPRI 평가에서는 상대적으로 안전한 품목으로 분류되었다. 이는 독일의 안정적인 공급망과 운송 위험, 가격 변동성을 고려한 결과로 해석된다.

본 연구는 HHI, CR, PD, TR, PV를 종합적으로 고려하여 한국 방위산업 원자재의 조달 위험을 분석하였고, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 특정 공급국에 대한 수입 편중 현상이 두드러졌다. 둘째, 공급국 위험 평가에서 이집트가 위험국 1위로 나타났으며, 미국(21위)은 동맹국임에도 안정성이 낮았다. 중국과 러시아는 위험국, 일본은 상대적으로 안전한 공급국으로 평가되었으며, 가장 안전한 국가는 유럽 지역에 집중되었다. 셋째, OPRI 분석 결과, 먼 린터 펄프는 중국 단일 공급에 의존하며 공급국 위험과 가격 변동성이 높아 HHI 및 OPRI에서 모두 최고 위험 품목으로 선정되었다. 반면, HS Code 850213(AC 모터)은 독일의 안정적인 공급망이 반영되어 OPRI에서는 위험도가 낮아졌다.

5. 시사점 및 한계점

본 연구는 방위산업 원자재 및 시설재의 조달 위험을 종합적으로 평가하며 다음과 같은 시사점을 제시한다. 첫째, 기존 연구에서 상대적으로 다루지 않

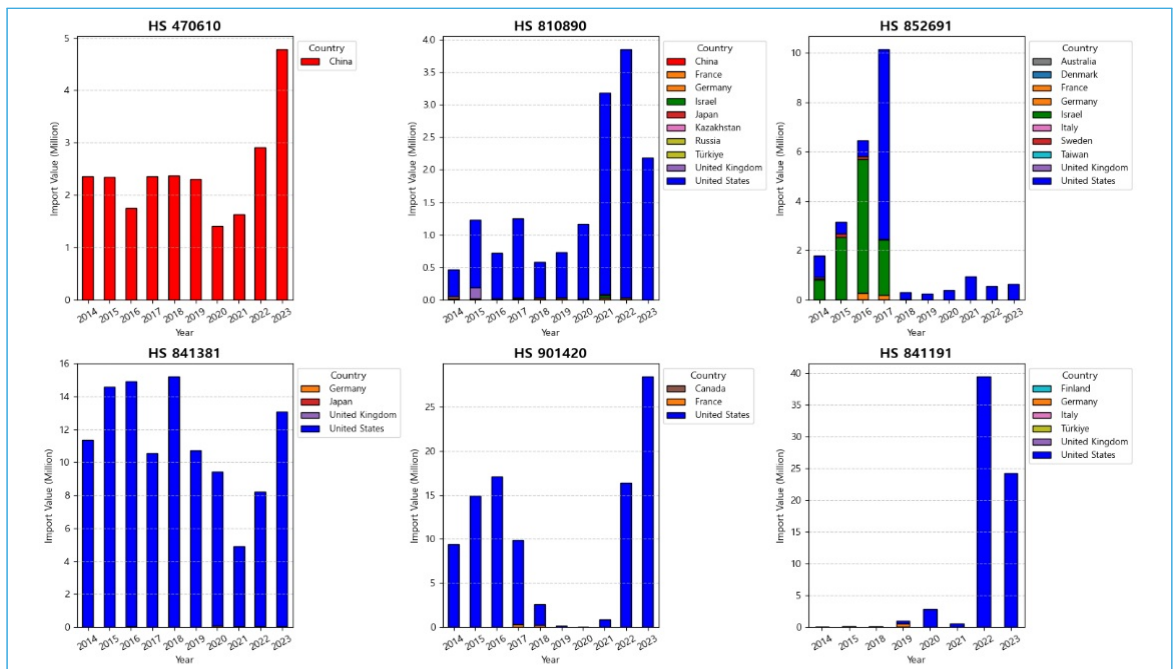


Figure 2. High-risk defense industry raw materials

은 방위산업 수입 품목을 대상으로 조달 위험을 평가하였다. 기존 연구가 완제품이나 무기체계에 초점을 맞춘 반면, 본 연구는 핵심 원자재 및 부품의 조달 안정성을 분석하여 방위산업 공급망의 기초적 안정성 평가에 기여한다. 둘째, 새로운 수입 대상국과 위험 품목을 구체적으로 식별하였다. 특히, 신규 수입국인 이집트의 위험 수준이 높은 것으로 평가되었으며, 조달 리스크가 높은 품목군을 도출하여 특정 수입국 의존도를 줄이고 공급망 다변화의 필요성을 제시하였다. 셋째, 최신 데이터를 반영하고 기존 연구에서 사용되지 않은 요인을 고려하여 연구 범위를 확대하였다. 본 연구는 시장 집중도, 국가 위험도, 정치적 거리 외에도 국가별 운송 위험도와 품목별 가격 변동률을 추가적으로 반영하여 동적인 공급망 위험 평가를 수행하였다. 특히, 국가별 운송 위험도 반영은 물류 효율성과 공급망 탄력성(Supply chain resilience) 분석을 가능하게 하여 조달 전략 수립에 시사점을 제공한다. 또한, 본 연구는 방산업체가 공급망 재편 및 다변화 전략 수립 과정에서 국가 및 품목별 리스크를 사전에 정량적으로 평가할 수 있는 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있다. 예를 들어, OPRI 지수가 일정 기준을 초과하는 경우는 2차 공급선 확보, 재고 비축, 국산화 우선 개발 대상으로 분류할 수 있다.

그러나, 본 연구는 다음의 한계점도 가진다. 첫째, 지표 결합 방식의 고도화가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 위험 요인을 반영하였으나, 위험 평가의 신뢰도를 높이기 위해서는 변수 간 상관성을 확인하는 것이 필요하다. 또한, 지표 간에 동일한 가중치를 부여하였으나, 향후 연구에서는 AHP(Analytic Hierarchy Process), 회귀분석, 구조방정식모형(SEM, Structural Equation Modeling) 등 다양한 기법을 통해 가중치를 도출하여 적용하는 것도 필요하다. 둘째, 본 연구는 10년 동안의 평균값을 활용하여 리스크를 평가하였기에 연도별 급변 요소를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 향후에는 시계열 기반의 위험 추적 모델을 도입하여 시기에 따른 정책 반응성을 제고할 필요가 있다. 셋째, 공급 측면의

위험에 집중하여 수요 측면 요소를 반영하지 못하였다. 향후 연구에서는 수요 변화, 산업 내 대체재 여부, 국내 생산 역량 등을 포함하여 보다 종합적인 공급망 평가가 이루어질 필요가 있다. 또한, 공급망 리스크의 동적 요소로서 기후 리스크(Scope 3), 환율 변동성, ESG(Environmental, Social and Governance) 규제 등에 대한 변수를 포함하여 지속 가능한 공급망으로의 확장 가능성을 살펴볼 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1 Park, K. S., Kim, S. S., & Ha, S. H., "Analysis of Research Trends in Defense and Military Supply Chains using Thematic Analysis and Topic Modeling: A Systematic Review", *Journal of Defense Quality Society*, 6(2), pp. 97-110, 2024.
- 2 Son, W., & Kim, J., "Assessment of Raw Materials Supply Chain Risk : a case study from Korean Defense Industry (2011 to 2020)", *Journal of Trade Finance and Insurance*, 23(4), pp. 129-152, 2022.
- 3 Gurtu, A., & Johny, J., "Supply Chain Risk Management: Literature Review", *Risks*, 9(1), pp. 1-16, 2021.
- 4 Sun, X., Hao, H., Hartmann, P., Liu, Z., & Zhao, F., "Supply risks of lithium-ion battery materials: An entire supply chain estimation", *Materials Today Energy*, 14, pp. 1-7, 2019.
- 5 Iqbal, W., Fatima, A., Yumei, H., Abbas, Q., & Iram, R., "Oil supply risk and affecting parameters associated with oil supplementation and disruption", *Journal of Cleaner Production*, 255, pp. 1-14, 2020.
- 6 Kruyt, B., Van Vuuren, D. P., de Vries, H. J., & Groenenberg, H., "Indicators for energy security", *Energy Policy*, 37(6), pp. 2166-2181, 2009.
- 7 Kong, Z., Lu, X., Jiang, Q., Dong, X., Liu, G., Elbot, N., & Chen, S., "Assessment of import risks for natural gas and its implication for optimal importing strategies: A case study of China" *Energy Policy*, 127, pp. 11-18, 2019.
- 8 Bailey, M. A., Strezhnev, A., & Voeten, E.,

“Estimating Dynamic State Preferences from United Nations Voting Data”, *Journal of Conflict Resolution*, 61(2), pp. 430–456, 2017.

- 9 Kashcheeva, M., & Tsui, K. K., “Political oil import diversification by financial and commercial traders”, *Energy Policy*, 82, pp. 289–297, 2015.
- 10 Gaudenzi, B., & Borghesi, A., “Managing risks in the supply chain using the AHP method”, *The International Journal of Logistics Management*, 17(1), pp. 114–136, 2006.
- 11 Tummala, R., & Schoenherr, T., “Assessing and managing risks using the supply chain risk management process (SCRMP)”, *Supply Chain Management: An International Journal*, 16(6), pp. 474–483, 2011.
- 12 Wagner, S. M., & Neshat, N., “Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory”, *International Journal of Production Economics*, 126(1), pp. 121–129, 2010.
- 13 Wu, T., Blackhurst, J., & Chidambaram, V., “A model for inbound supply risk analysis”, *Computers in Industry*, 57(4), pp. 350–365, 2006.
- 14 Schoenherr, T., Tummala, V. R., & Harrison, T. P., “Assessing supply chain risks with the analytic hierarchy process: Providing decision support for the offshoring decision by a US manufacturing company”, *Journal of Purchasing and Supply Management*, 14(2), pp. 100–111, 2008.
- 15 Buchholz, P., Schumacher, A., & Al Barazi, S., “Big data analyses for real-time tracking of risks in the mineral raw material markets: implications for improved supply chain risk management”, *Mineral Economics*, 35(3), pp. 701–744, 2022.
- 16 Behrendt, S., Scharp, M., Kahlenborn, W., Feil, M., Dereje, C., Bleischwitz, R., & Delzeit, R., *Seltene Metalle: Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan*, Umweltbundesamt, pp. 1–68, 2007.

Appendix 1. Top 10 High-Risk Defense Industry Items

Rank	HS code	Items	OPRI	Top supplier country
1	470610	Cotton linters pulp	0.0779	China
2	810890	Other titanium and its products	0.0245	USA
3	852691	Radio navigation equipment	0.0202	USA
4	841381	Pumps	0.0196	USA
5	901420	Aircraft or space navigation equipment	0.0194	USA
6	841191	Turbojets or turbopropeller parts	0.0160	USA
7	852990	Miscellaneous components (for HS 8525–8528)	0.0153	USA
8	731815	Other screws and bolts	0.0153	USA
9	852910	Various types of antennas and effective antennas, and their parts	0.0152	USA
10	731829	Other non-threaded articles of iron or steel	0.0148	USA

Appendix 2. HHI and OPRI Results for 50 Items

HS code	HHI	OPRI	Top supplier country
282990	0.532	0.0043	France
292990	0.996	0.0001	Germany
470610	1.000	0.0779	China
722540	0.517	0.0066	USA
722870	0.881	0.0001	Germany
731815	0.691	0.0153	USA
731829	0.905	0.0148	USA
732690	0.415	0.0027	Germany
760612	0.531	0.0011	Germany
761699	0.445	0.0075	USA
810890	0.936	0.0245	USA
840810	0.991	0.0001	Germany
840820	0.703	0.0007	Germany
840890	0.783	0.0001	Germany
840999	0.830	0.0002	Germany
841112	0.573	0.0108	USA
841191	0.981	0.0161	USA
841330	0.405	0.0004	Germany
841381	0.995	0.0196	USA
841480	0.380	0.0016	UK
847149	0.463	0.0030	Canada
847989	0.676	0.0037	UK
848120	0.527	0.0097	USA
848180	0.385	0.0056	USA

HS code	HHI	OPRI	Top supplier country
848210	0.466	0.0038	Germany
848310	0.762	0.0003	Germany
848330	0.360	0.0006	Germany
848340	0.608	0.0013	Germany
848710	0.865	0.0001	Germany
848790	0.631	0.0098	USA
850213	1.000	0.0001	Germany
850680	0.728	0.0141	USA
851762	0.270	0.0064	USA
852349	0.503	0.0037	France
852610	0.298	0.0089	USA
852691	0.467	0.0202	USA
852910	0.508	0.0152	USA
852990	0.403	0.0153	USA
853650	0.526	0.0075	USA
853710	0.214	0.0039	USA
854081	0.545	0.0020	Netherlands
854370	0.354	0.0061	USA
871000	0.459	0.0027	Germany
880330	0.424	0.0083	USA
901310	0.862	0.0001	Germany
901390	0.268	0.0055	USA
901420	0.988	0.0194	USA
901480	0.850	0.0139	USA
903180	0.246	0.0041	USA
903289	0.655	0.0014	Germany

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

연혁

'11년 9월

설립승인 <방추위>

'13년 6월

창립총회

'18년 11월 ~ 현재

군수품 분임대회 정기 개최

'19년 3월 ~ 현재

국방품질연구논집
정기 발간

'19년 6월 ~ 현재

국방품질종합학술대회
정기 개최

'20년 7월 ~ 현재

DQS Magazine
정기 발간

미션/비전

미션

국방품질경영 글로벌 리더의 학술적 동반자

비전

국방품질 연구자산의 독보적
Knowledge-Bank 구축

주요 사업

정책 / 제도



국방품질
경영 이론,
정책/제도 연구

학술행사



종합학술대회,
분임 경진대회,
전문학술지/
매거진 발간

산학협동



DQS 전문
분과위원회
운영/기술지원

교류협력



국내
학술단체 및
기관과의 교류

DQS 주요 추진업무

주요업무	내용	시기
✓ 국방품질연구논집 정기 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 분과 학술활동	분과별 간담화· 학술세미나 등	3월 ~ 12월

전문 분과 학술활동

분과	주요활동
✓ 국방품질경영제도연구	✓ 국방품질 정책/제도 및 기법 연구
✓ 국방인증제도연구	✓ 국방품질인증 경영체제 구축방안 연구
✓ AI SW연구	✓ AI SW 정책/제도, 시험관련 연구
✓ 국방신뢰성연구	✓ 국방신뢰성 정책/제도, 저장신뢰성, RAM 연구
✓ 항공감항연구	✓ 항공 무기체계 최신기술·품질 및 감항인증 연구
✓ 소음진동연구	✓ 소음진동 기준 및 평가제도 연구
✓ 무기체계 공급망관리연구	✓ 무기체계 부품관리 및 공급망 연구
✓ CSISR 연구	✓ 지휘정찰 신기술 개발 동향/품질보증 방안 연구
✓ 유도탄약안전품질연구	✓ 유도탄약 무기체계 품질안전 연구
✓ 표준화연구	✓ 국방 표준화 정책/제도 연구
✓ 빅데이터 기반 운용성 연구	✓ 데이터분계 기반 운용성 개선 연구
✓ 우주위성연구	✓ 우주무기체계 품질, 표준, 인증, 시험방안 연구
✓ 국방사이버연구	✓ 국방사이버 적용 무기체계 품질관리방안 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

- ✓ 국방품질 종합학술행사 참가
- ✓ 군수품 품질기술혁신 분임 경진대회 참가
- ✓ DQS 분과위 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 게재됩니다.
- 게재된 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.

국방품질연구논집

Journal of Defense Quality Society

제7권 1호 2025년 6월
Vol.7 No.1 Jun 2025