

국방품질연구논집

Journal of Defense Quality Society

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

신뢰성 물리학 분석을 활용한 수출형 K2전차 전장품 신뢰성 평가 사례연구	문성목, 김인수, 김호범, 권형안
항공정비 품질엔지니어의 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도 분석에 대한 연구	이상천, 박종훈, 최병선
함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소 도출연구	권정국, 이동현, 김준우, 이관우, 김기훈
KANO 모델을 활용한 ISO 9004:2018 주요 지침의 유형 분석	윤철근, 이상천, 박종훈, 김성광
국방표준서 운영제도 개선 방안 연구: 미국 국방표준화 프로그램 운영사례를 중심으로	이민철, 안혜원
군대에서 다림질 경험이 의복 다림질 관리행동에 미치는 영향: 20~50대 성인 남성을 대상으로	이선영, 이정순
ChatGPT를 활용한 유스케이스 기반의 테스트 케이스 생성: 실험 및 평가	이상인, 김현수
산화철을 이용한 실크직물의 염색성과 단열력 향상 평가	강다예, 이정순
민군 겸용 드론 표준화를 위한 150kg 이하 중량별 드론 표준 등급 분류 기준 제안	이경택, 박민규, 정진석, 조동연
딥러닝을 위한 비단조 활성화 함수	정재진
연소화염의 온도 계측에서 복사의 영향에 관한 연구	기원도, 이재호, 이재원, 노관영, 임지환
항공 소재 물성 데이터에 대한 분포 적합성 비교 평가 및 고찰	안교진, 신재호, 김영순
5G 시스템에서 프리엠블 사용 방식에 따른 2-단계 랜덤 액세스의 지연시간 분석	이효진, 이종관, 임재성
고정형 레이더의 운용주파수 가용성 확대 및 위치기반 재밍 회피 최적화	권용욱, 김성균, 김상열, 이준하, 김홍준
거리별 유효 빔폭 임계치 알고리즘 적용을 통한 레이더 근거리 해상표적 분리현상 해소에 대한 연구	김상열, 권용욱, 김성균, 이준하
현장 적용 결과에 기반한 국방품질경영체제 정량적 평가 모델의 개선 방안	박종만, 김상부, 배인화, 정원찬
유선유도 수중 유도무기의 광통신 두절 현상에 대한 원인 분석 및 개선방안 연구	이상훈, 남준식, 김효섭, 최재훈
AS6171 기반 무기체계 위조 전자부품 관리 방안에 관한 연구	공혜원, 서한울, 박장식

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

발행처 경상남도 진주시 동진로 420(충무공동) 국방기술품질원
발행일 2024년 6월 30일
발행인 허건영
편집위원장 김상부
편집위원 이영순, 홍성훈, 이정순, 임재성, 류재철, 박장식, 이선희,
정재우, 김성수, 박종훈, 김흥섭, 설한신, 이부일, 서상철, 노정훈
감수/편집 서재현 / 김진영, 서민준
연락처 055-751-5274, 5277
국방인트라넷 12426@dtaq.mil
인트라넷 12426@dtaq.re.kr

CONTENTS

• 신뢰성 물리학 분석을 활용한 수출형 K2전차 전장품 신뢰성 평가 사례연구	2
• 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도 분석에 대한 연구	16
• 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소 도출연구	29
• KANO 모델을 활용한 ISO 9004:2018 주요 지침의 유형 분석	40
• 국방표준서 운영제도 개선 방안 연구: 미국 국방표준화 프로그램 운영사례를 중심으로	50
• 군대에서 다림질 경험이 의복 다림질 관리행동에 미치는 영향: 20~50대 성인 남성을 대상으로	60
• ChatGPT를 활용한 유스케이스 기반의 테스트 케이스 생성: 실험 및 평가	73
• 산화철을 이용한 실크직물의 염색성과 단열력 향상 평가	83
• 민군 겸용 드론 표준화를 위한 150kg 이하 중량별 드론 표준 등급 분류 기준 제안	92
• 딥러닝을 위한 비단조 활성화 함수	103
• 연소화염의 온도 계측에서 복사의 영향에 관한 연구	110
• 항공 소재 물성 데이터에 대한 분포 적합성 비교 평가 및 고찰	118
• 5G 시스템에서 프리엠블 사용 방식에 따른 2-단계 랜덤 액세스의 지연시간 분석	126
• 고정형 레이더의 운용주파수 가용성 확대 및 위치기반 재밍 회피 최적화	136
• 거리별 유효 빔폭 임계치 알고리즘 적용을 통한 레이더 근거리 해상표적 분리현상 해소에 대한 연구	143
• 현장 적용 결과에 기반한 국방품질경영체제 정량적 평가 모델의 개선 방안	152
• 유선유도 수중 유도무기의 광통신 두절 현상에 대한 원인 분석 및 개선방안 연구	165
• AS6171 기반 무기체계 위조 전자부품 관리 방안에 관한 연구	176

공지사항

• 국방품질연구회(DQS)	184
• 국방품질연구논집 원고 모집 안내	185

신뢰성 물리학 분석을 활용한 수출형 K2전차 전장품 신뢰성 평가 사례연구

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

Case Study on Reliability Evaluation of Electronic Equipment of Export-type K2 Main Battle Tank via Reliability Physics Analysis

문성목†, Seongmok Moon

현대로템, 디펜스솔루션연구소,
책임연구원
Senior Research Engineer,
Defense Solution R&D Center,
Hyundai Rotem Company

김인수, Insoo Kim

현대로템, 디펜스솔루션연구소,
책임연구원
Senior Research Engineer,
Defense Solution R&D Center,
Hyundai Rotem Company

김호범, Hobum Kim

현대로템, 디펜스솔루션연구소,
책임연구원
Senior Research Engineer,
Defense Solution R&D Center,
Hyundai Rotem Company

권형안, Hyeongahn Kwon

엑슬리트엣지, 대표이사
CEO, ExleetEdge Co. LTD

Abstract

In this study, a reliability physics analysis (RPA) is performed to evaluate the reliability of the principal electronic equipment for export-type K2 main battle tanks. The purpose of the RPA is to ensure the reliability of electronic equipment operating under the harsh environment and operational conditions of the Middle East. Based on the RPA results, the potential failure risk factors are identified in advance at the electronic equipment design stage, and whether the reliability target of a 5% failure probability over 10 years is achieved is evaluated. For the RPA, the harmonic vibration, shock, and temperature conditions of the STANAG standard are applied. In particular, CFD analysis inside the K2 main battle tank crew room and a conjugated heat transfer analysis of the electronic equipment are performed to obtain the temperature data of PCB devices under Middle Eastern environmental conditions. A reliability analysis of solder fatigue, PTH fatigue, shock, and harmonic vibrations in harsh Middle Eastern environments for existing products is performed, based on which many potential problems are identified. Subsequently, the overall reliability is improved by referring to supplementary measures for solving problems derived from existing products in a detailed preliminary prototype design. In the next stage, the completed detailed prototype design faithfully addresses the problems identified in the preliminary prototype reliability analysis, thus satisfying the target life with a failure probability of 5% over 10 years. In the future, we shall conduct an accelerated life test until an actual failure occurs and obtain the life data of the electronic equipment to analyze the cause of failure.

keywords : Reliability Physics Analysis(RPA), Sherlock, Export-type K2 Main Battle Tank, Physics of Failure(PoF), Printed Circuit Board(PCB)

† Corresponding Author : Seongmok Moon

Tel : +82-031-596-9521, email : seongmoon@hyundai-rotem.co.kr

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

Received April 9th. 2024 Revised May 14th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

향후 K2전차의 중동 수출형 버전에 설치될 전장품의 신뢰성을 평가하기 위하여 전장품의 취약점을 미리 파악하고 설계단계에서 전장품 수명을 예측하기 위해 신뢰성 물리학 분석(Reliability Physics Analysis, RPA) 기법이 활용되었다. 특히 중동지방의 운영개념 및 가혹한 운용환경을 충족하도록 주요 전장품에 대한 환경요구조건 만족여부에 대한 확인이 필요하다. 따라서 중동지역에서 운용될 경우 신뢰성이 약화될 것으로 판단되어 신뢰성 확보 및 기대 수명을 예측하기 위해 신뢰성 물리학 분석기법을 적용하여 전장품 신뢰성 평가를 수행하였다. 이를 위하여 신뢰성의 전반적인 수준 향상을 위해 신뢰성 물리학 분석도구인 ANSYS Sherlock 소프트웨어(이하 Sherlock)를 활용하여 설계단계에서 내재된 고장 위험요소를 파악하여 위험 완화조치를 개조개발 완성시제 전에 적용하였다[1]. Sherlock을 이용한 신뢰성 수명예측기법은 자동차, 우주항공, 조선, 해양, 국방 등 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 이를 통한 보다 신뢰성 있는 전장품 설계에 활용되고 있다.

Malendele *et al.*[2]는 미래 자동차 전장품에 내장되는 9개 FPBGA(Fine Pitch Ball Grid Array)의 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)에 대하여 PSD(Power Spectrum Density)로 정의된 Random 진동 프로파일로 PCB의 고장에 대해 시험값과 예측결과를 비교하였다. Sherlock에서 사용하는 수정된 Steinberg 모델을 이용하여 Random 진동환경에서의 PCB 수명을 예측하였으며, 예측값과 시험결과와의 정량적 오차가 있지만 솔더 수명의 위치 예측성에 있어서는 시험결과와 일치하였다. Park *et al.*[3]은 우주용 전장품의 발사진동 환경에서 PCB기판의 솔더접합부 피로수명 예측결과와 발사진동 수명시험 및 단면 SEM 촬영결과와 비교하였으며, 이를 통하여 최대 6.9%의 오차만을 보여주면서 전장품 솔더접합부에 대한 수명예측에 있어서 Sherlock의 유효함을 입증하였다. Cha *et al.*[4]는

함정 격실 내 캐비닛 내부 랙조립체에 장착되는 FPGA(Field Programmable Gate Array) 보드에 대하여 실제 운용환경 및 신뢰성 목표를 고려한 온도, 진동 그리고 충격 프로파일을 설정하여 6개 고장 유형에 대한 신뢰성 평가를 수행하였다. 이를 통한 신뢰성 취약점을 도출하였고 신뢰성 목표를 만족시키기 위한 설계 대안을 제시하였다. Kim *et al.*[5]은 해양 환경조건의 수중에 매설하는 회로카드조립체(Printed Board Assembly, PBA)에 대하여 MIL STD-810G 규격[6]에서의 운용온도조건인 $-32 \sim +43^{\circ}\text{C}$ 구간의 온도 프로파일을 적용하였고, 국내 원전발전소에서 분석한 4가지 원전지역 중 가장 가혹한 지역의 지진 프로파일의 진동조건을 적용하였다. 이를 통하여 Solder Fatigue, PTH(Plated Through Hole) Fatigue 그리고 Random 진동에 대하여 분석하고 설계 개선사항을 도출하여 신뢰성이 있는 설계를 입증하였다. Cha *et al.*[7]는 운용환경이 항온/항습시설의 탄약고가 아닌 외부환경에 노출되어 있는 선상탄의 중앙처리보드에 대하여 신뢰성 물리학 분석 방법론을 활용하고 신뢰성 향상을 위한 방안을 검토하였다. 국내 실정에 맞는 큰 일교차의 외부 환경온도 프로파일을 적용하여 Solder Fatigue 및 PTH Fatigue의 취약부위를 확인하였으며, 체계 개발 초기 단계에서부터 신뢰성 향상을 위한 노력을 하고 적절한 정비주기 산출을 통해 예비정비를 함으로써 가용도를 높였다.

본 연구는 중동 수출형 K2전차의 주요 전장품 10종[8] 중 현수제어기 내부에 장착된 PCB 4종류에 대하여 4가지 고장유형으로 RPA를 수행하였다. 현재 운용중인 현수제어기에 대하여 가혹한 중동 환경 조건에서의 신뢰성 분석을 수행하였고, 이를 통해 도출된 잠재된 고장 위험요소들에 대하여 충실히 보완하였다. 그 다음의 예비시제 단계에 이어 최종적인 완성시제 단계에서는 10년간 고장확률 5% 이하의 목표수명($B_5 \geq 10$ 년)이 충족되도록 신뢰성 설계를 수행하였다[9].

2. 신뢰성 물리학 분석

2.1. RPA 도구 Sherlock 개요

본 연구에서 적용된 RPA 도구인 Sherlock은 전자장치의 설계 데이터와 부품 명세를 바탕으로 정확한 PCB 및 조립품 모델을 만든 후 그것이 실제 환경에서 겪게 될 조건들을 고장 물리(Physics of Failure, PoF)를 기반으로 시뮬레이션하여 설계 초기 단계에서 제품의 고장을 빠르고 정확하게 예측한다. Figure 1은 일반적으로 신뢰성 물리학 분석을 수행하기 위한 전반적인 업무절차를 도식화한 그림이다. 첫 번째 단계에서는 전장품 회로 설계, 부품 명세, enclosure 설계, 해석조건(온도, 진동, 충격) 등과 같은 전장품 모델링에 필요한 입력자료를 수집한다. 다음 단계에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 분석을 위해 단순화된 3차원 모델(PCB 조립품 모델, Enclosure 모델)을 작업하여 이를 통해 분석된 CFD 결과로 Thermal Map을 작성하게 된다. Thermal Map은 Sherlock에서 다루는 고장 요인들에 대해 분석하기 위한 입력자료로 활용되며, 그 결과로 나타난 수명 예측 곡선과 부품별 수명 예측표를 살펴 잠재된 고장 위험을 식별하고 이에 대한 보완책을 수립한다. 위와 같은 과정은 제품의 개발기간동안 신뢰성 목표를 달성하기까지 반복적으로 적용한다.

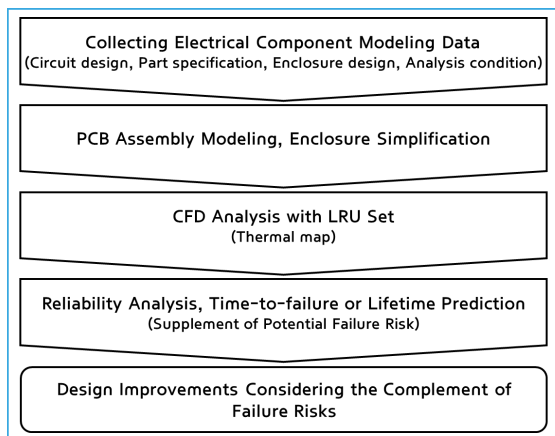


Figure 1. RPA Procedure

2.2. RPA 고장유형

기본적으로 RPA에서 다루는 고장유형은 크게 열/진동/충격에 의한 3가지의 고장유형으로 나눌 수 있다. 열적인 요인으로는 Solder Fatigue와 PTH Fatigue로 다시 구분할 수 있으며, 진동에 의한 요인으로는 Harmonic/Random/Resonance로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 전장품의 고장을 유발시키는 요인들 중 가장 비중이 큰 4가지 분석(Solder Fatigue, PTH Fatigue, Harmonic 진동, 충격)에 중점을 두었다. Figure 2는 “Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules[10]”에서 인용한 것으로 실제 자동차 운행 시 전장품 고장 발생에 가장 큰 영향을 미치는 원인들을 도식화한 그림이다. 4가지 고장 발생 원인 중 온도에 의한 환경요인이 55%를 차지할 정도로 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 특히, 본 연구에서 다루는 체계운용 온도조건이 가혹한 환경의 중동 지역인 점을 감안한다면 보다 높은 신뢰성 설계를 위해 실제 운용환경을 고려한 가혹한 조건의 운용환경 프로파일을 설정하여 분석할 필요가 있다.

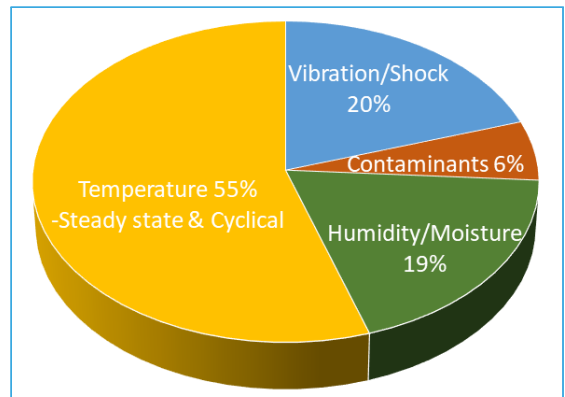


Figure 2. Sources of Stress for Electronic Equipment[10]

2.2.1. Solder Fatigue 분석

전자부품과 보드를 연결하는 Solder Joint는 주위 온도가 변화하면 접착부위의 열팽창계수가 서로

다르기 때문에 각각 온도에 따라 수축과 팽창하는 정도가 서로 다르기 마련이다. 이와 같은 이유로 연결 부위에 전단력이 발생하고 그 피로가 오랫동안 반복되면 Figure 3에서 보여준 바와 같이 결과적으로 균열이 발생하여 고장의 원인이 된다[11].

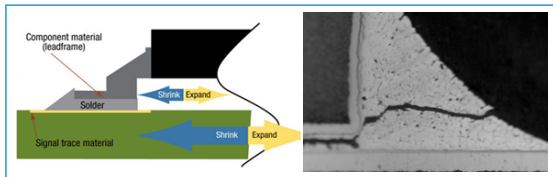


Figure 3. Failure Mechanisms by Solder Fatigue[11]

2.2.2. 진동 분석

진동에 의해 회로기판이 휘면 Solder에 변형이 생기거나(Figure 4(a)) 부품의 Lead도 휘게 되어(Figure 4(b)) 고장이 유발된다[11].

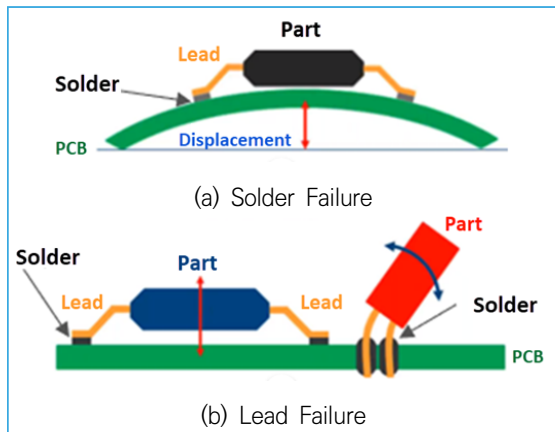


Figure 4. Two Failure Mechanisms by Vibration[11]

2.2.3. 기계적 충격 분석

기계적 충격(낙하, 충돌, 격발, 타격, 폭발 등)은 전장품의 연결부위에 심각한 변위나 변형을 야기시켜 고장을 유발한다. 충격으로 인한 고장은 누적된 피로 때문에 생기는 고장과 보드에 작용한 과부하(변형이 Critical Strain보다 커진 경우)로 인한 고장이 있을 수 있다. 기계적 충격 및 진동환경에서의 수명

예측을 위해 Steinberg 모델을 사용하고 있으며, Sherlock에서는 변위 대신에 변형률을 기반으로 기계적 충격 및 진동에 의한 수명을 예측하고 있다[4].

2.2.4. PTH Fatigue 분석

PTH는 Via를 통해 PCB 적층구조 내의 회로들을 연결해 주는 역할을 하는데, Figure 5에서 보여주는 바와 같이 원통형의 구리와 PCB를 이루는 물질들 간의 열팽창계수 차이로 인해 온도 변화에 따라 피로가 누적되어 원통 형태의 PTH 허리나 연결 부위가 끊기는 현상으로 고장이 야기될 수 있다. 이 현상은 PCB의 Via와 관련된 문제 중 가장 많이 발생하는 유형이다[12].

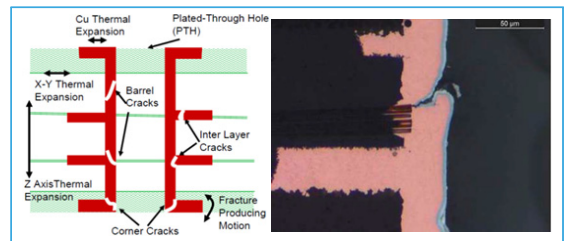


Figure 5. Failure Mechanism by PTH Fatigue[12]

2.3. 결합 고장확률 곡선

앞에서 설명한 여러 가지 분석방법으로 구한 고장 확률 곡선은 각각 그 분석에서 관심을 가진 고장 유발 요인에 대한 고장확률을 예측하여 보여주는 것이다. Sherlock은 이렇게 분석한 각각의 고장 유발 요인이 합쳐진 전체적인 고장확률이 어떻게 예측되는지도 보여주는데 그때의 고장확률은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{신뢰도 (Reliability, } R) &= 1 - \text{고장확률 (Probability of Failure, } PoF) \\ &= 1 - \text{고장확률 (Probability of Failure, } PoF) \end{aligned} \quad (1)$$

결합된 신뢰도는 각각의 분석 신뢰도들의 곱으로 구한다.

$$R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

$$= (1 - PoF_1)(1 - PoF_2) \dots (1 - PoF_n)$$

(2)

위의 식으로부터 결합된 고장확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PoF = 1 - R$$

$$= 1 - (1 - PoF_1)(1 - PoF_2) \dots (1 - PoF_n)$$

(3)

2.4. 연구절차

2.4.1. RPA 수행절차

Figure 6은 K2전차 무기체계 개조개발에서 RPA를 수행하기 위한 절차를 도식화한 그림이다. 개조개발 완성제품(Completed Product)에 대한 최종 설계안을 확보하기 위하여 현재 K2전차에서 운용 중인 현수제어기의 기존제품(Existing Product)에 대한 혹독한 중등 환경조건에서의 신뢰성 분석으로부터 시작되었다. 기존제품에 대한 Solder Fatigue, PTH Fatigue, 충격 그리고 Harmonic 진동조건인 신뢰성 분석을 통하여 도출된 잠재된 문제점에 대해 보완할 방안들을 찾아 보완책을 제시하였다. 이를 예비시제(Preliminary Prototype) 상세설계안에 반영하여 전체적인 신뢰성 향상을 도모하였다. 그 다음 단계에서 기존제품과 예비시제의 신뢰성 분석을 통해 도출된 문제점들에 대한 보완책들을 완성시제(Completed Prototype)에 충실히 보완함으로써

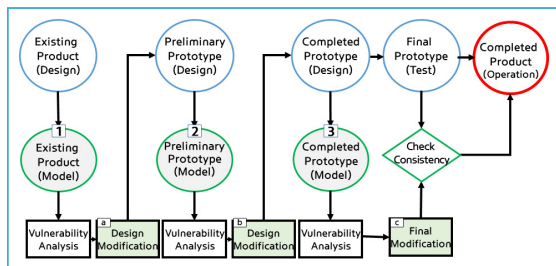


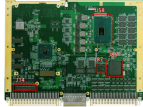

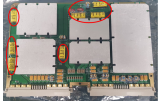
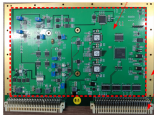
Figure 6. RPA Procedure for K2 Main Battle Tank

최종적인 완성제품은 신뢰성 목표인 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 충족하도록 설계되었다.

2.4.2. RPA를 위한 분석대상

RPA를 수행하기 위해 선정된 분석대상은 K2전차에 장착된 주요 전장품 10종 중 현수제어기이며, 대상 보드수는 4가지 종류이다. 현수제어기는 차량의 현수시스템을 제어하는 장치로서 시스템 제어연산 및 감시를 통해 차량 자세제어 기능, 궤도장력 조절을 수행한다. Table 1은 RPA에 적용된 대상 전장품 및 PCB를 나타낸 것이다.

Table 1. Electronic Equipment & PCB List for RPA

Electronic Equipment	PCB
Suspension Controller Unit	Main Control_CPU 
	Main Control_COM 
	Power Supply 
	Signal Process 

2.4.3. RPA를 위한 분석조건

본 연구에서는 중등 수출형 K2전차 현수제어기에 대한 신뢰성 목표를 10년간 고장확률 5% 이하의 목표수명($B_5 \geq 10$ 년) 충족여부로 판단하였다. 여기서 임무 수행 시간은 연간 152시간을 가동하는 것으로 가정하였다. 이와 같은 신뢰성 목표 달성 여부를 평가하기 위하여 본 연구에서는 아래와 같은 분석조건

에 대하여 RPA를 수행하였다.

- 무기체계 주변의 온도조건

무기체계 운용 시 주변의 온도조건은 STANAG-2895 규격[13] A1(Extreme Hot Dry) 지역에서의 기후 조건을 근거로 Figure 7에서와 같은 온도 프로파일로 설정되었다. Figure 2에서 살펴본 바와 같이 무기체계 운용 시 온도조건은 고장 발생원인 중에 가장 밀접한 관련이 있을 것으로 판단되며, 특히 중동 지역의 가혹한 환경조건을 고려하여 STANAG 규격의 A1지역 기후조건을 적용하였다.

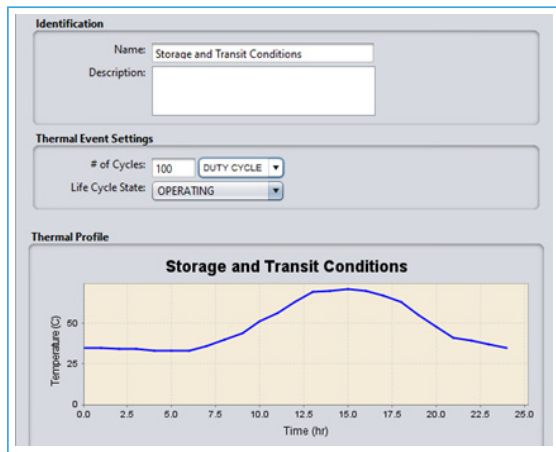


Figure 7. Temperature Profile for RPA

- 진동조건

진동조건은 MIL-STD-810C 규격[14]을 근거로 진동 조건을 설정하였으며 Table 2에서와 같이 3축 별 주파수 범위에 따라 진동 프로파일을 적용하였다. 5~500~5Hz의 주파수 범위에 대해 사이클당 15분씩 진동을 가한다. 그리고 아래의 Table 2에 규정된 조건으로 3개의 직교축 상의 각 방향에 대해 총 180분(12사이클)간 진동을 가한다. 대상 보드들 중 고유 진동수가 500Hz 이상인 것들은 요구 진동 프로파일의 주파수 범위 밖에 있어서 Sherlock이 Harmonic 진동 해석으로 취약성을 탐지할 수 없다. 이와 같은 경우에는 Figure 8에서와 같이 501~2,000Hz 구간에 아주 작은 크기의 진동값(0.0001G)을 임의로

추가해 만든 진동 프로파일을 적용해 문제를 해결하였다.

Table 2. Vibration Conditions for RPA

Axis	Frequency Range [Hz]	Amplitude
Vertical	5 ~ 25	±1.0g
	25 ~ 51	0.762mm D.A.
	51 ~ 500	±4.0g
Transverse or Longitude	5 ~ 25	±1.0g
	25 ~ 36	0.762mm D.A.
	36 ~ 500	±2.0g

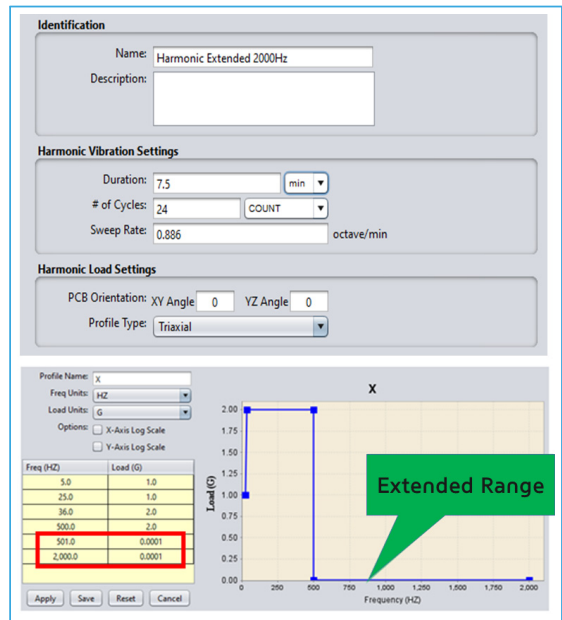


Figure 8. Vibration Profile for RPA

- 충격조건

충격조건은 MIL-STD-810C 규격[14]을 근거로 Figure 9에서 보여준 바와 같이 운행 시 충격과 발포 충격에 대하여 각각 6개 축방향(x, y, z축 방향 및 그 반대방향)의 반정현파 충격하중 프로파일을 적용하였다. 운행 시 충격조건과 발포 충격조건은 Figure 9에 명시된 바와 같이 각각 30G/100G의 충격가속도 및 11ms/1.5ms의 지속시간 조건으로 총 18회 충격을 가한다.

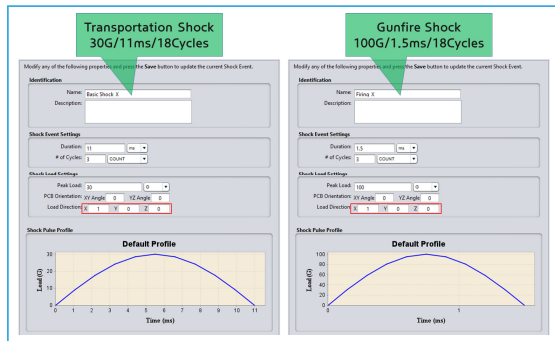


Figure 9. Shock Profile for RPA

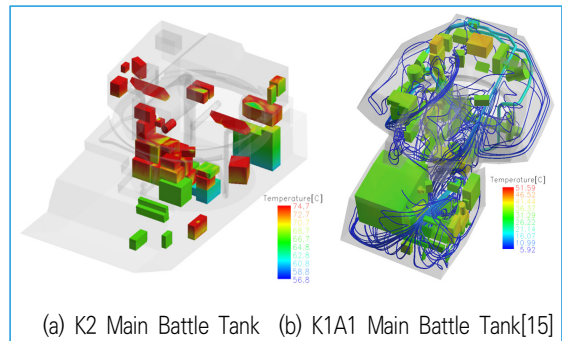


Figure 10. Surface Temperature Contours for Electronic Equipment of Main Battle Tank[°C]

2.4.4. PCB 온도조건

본 연구에서는 RPA를 수행하기 위한 온도조건을 크게 두 가지로 나누어 복합적으로 적용하였는데 첫 번째는 무기체계 운용 시 주변의 온도조건 적용을 위한 STANAG-2895 규격[13]이고, 또 하나는 중동 환경에서 무기체계 운용조건에서의 PCB 각 소자 온도값 데이터 정보를 얻기 위한 Thermal Map 적용이다. 본 연구에서는 현수제어기의 각 PCB Thermal Map을 도출하기 위해 중동 환경조건에서의 K2전차 승무원실 내부열유동해석 및 현수제어기 단품수준에서의 복합열전달해석(Conjugated Heat Transfer)을 수행하였다.

- 현수제어기 주변온도 도출

Figure 10(a)은 중동지역에서의 무기체계 운용 온도 55°C 조건 및 냉방장치 미작동 상태에서의 K2 전차 실내 전장품 표면온도 분포를 나타내고 있다. 무기체계 운용 시 전장품 발열량 및 중동지역에서의 태양복사량[13]을 고려하였으며, 이 해석결과로부터 현수제어기 주변온도값(64.5°C)을 도출하였다. Figure 10(b)은 K1A1전차 냉방장치 성능시험의 해석검증을 위하여 수행했던 해석결과이며, 각 승무원 측정위치별 온도값을 해석결과와 비교하였다[15]. 측정위치별 시험값과 해석값간의 오차는 0.2~1.5°C 범위이며, 이를 통하여 K2전차 승무원실 내에서의 전장품 주변온도 평가에 대한 사전 검증과정을 거쳤다.

- PCB Thermal Map 도출

Figure 11은 현수제어기 회로카드조립체 표면온도 분포를 나타내고 있다. 현수제어기 내부는 메인보드에 회로카드조립체들이 병렬로 장착된 형상을 보여주고 있다. K2전차 승무원실 내부열유동해석으로부터 도출된 현수제어기 주변온도값(64.5°C)을 해석 조건에 적용하였으며, Enclosure를 포함한 복합열 전달해석을 수행하였다. PCB 소자 내부에서 발생하는 열의 대부분은 열전도에 의해 외부로 방출되며, 현수제어기 Enclosure 내부 유동영역의 평균온도는 87.4°C인 것으로 나타났다. 이것은 RPA 수행을 위하여 중동 환경조건에서의 PCB 소자의 온도정보를 얻기 위해 87.4°C의 가혹한 주변 온도조건이 적용되었음을 의미한다. Figure 12는 현수제어기 RPA 수행을 위하여 적용된 4가지 PCB에 대한 Thermal Map을 보여주고 있다.

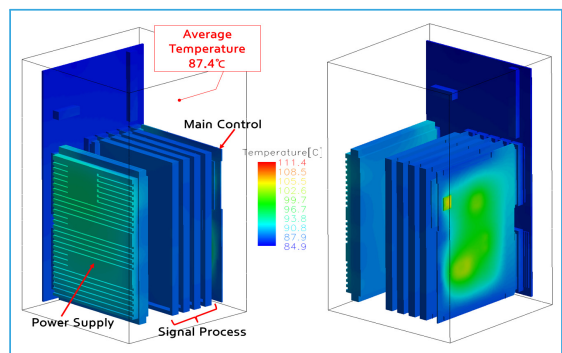


Figure 11. Surface Temperature Contours for PBA of Suspension Controller[°C]

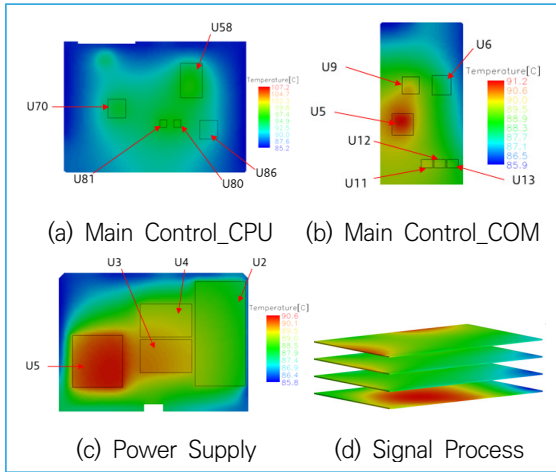


Figure 12. Thermal Map for PCB of Suspension Controller[°C]

3. 신뢰성 물리학 분석 결과

3.1. 기존제품 분석결과

3.1.1. 분석결과 종합

현수제어기는 Table 1에서 보여준 바와 같이 주 제어보드_CPU, 주제어보드_COM, 입출력신호처리보드, 전원공급보드로 구성되어 있으며 4가지 분석 조건에 대하여 RPA를 수행하였다. Figure 13은 RPA 수행을 위한 각 PCB별 해석모델을 보여주고 있다.

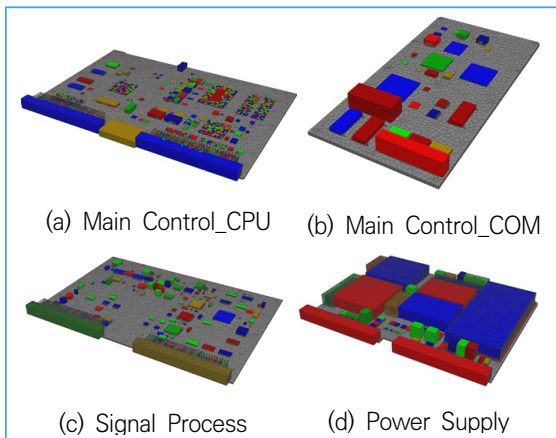


Figure 13. RPA Model for PCB of Suspension Controller

현재 K2전차에서 운용 중인 현수제어기 기존제품에 대하여 가혹한 중등 환경조건에서의 신뢰성 분석을 수행하였고, Figure 14에서 나타난 바와 같이 현수제어기 4종류의 PCB에 대한 4가지 고장요인에 따른 고장확률 곡선을 보여주고 있다. 주제어보드_COM을 제외하고 나머지 PCB들은 신뢰성 목표인 10년간 5% 이하의 고장확률을 훨씬 상회하고 있는 결과를 보여주고 있다. 특히 입출력신호처리보드는 고장확률을 100%의 심각한 신뢰성 수준을 보여주고 있다.

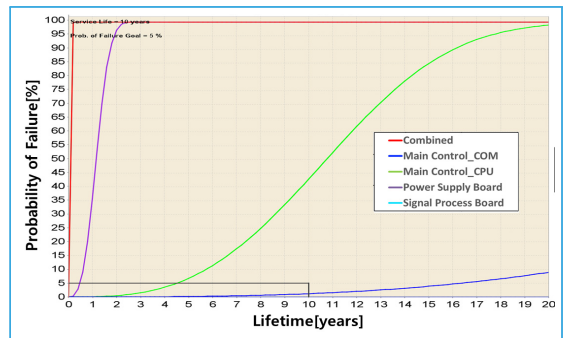


Figure 14. Probability of Failure for PCB of Existing Product

Table 3. Results of RPA for Existing Product

PCB Board	Failure Mode	RPA Result	Problematic Device
Main Control_CPU	Solder Fatigue	Fail	J14
	Shock		U86
	Vibration	Pass	
	PTH Fatigue		
Main Control_COM	Solder Fatigue	Pass	
	Shock		
	Vibration	Pass	
	PTH Fatigue		
Signal Process	Solder Fatigue	Pass	
	Shock		U43
	Vibration	Fail	U35, U8, U36, U4, U43, U38, U19, U42, U40, U37, U44, U6, U46, U41, U45, U46
			PTH Fatigue
Power Supply	Solder Fatigue	Pass	
	Shock		C31, C4, C1, C2
	Vibration	Pass	
			PTH Fatigue

3.1.2. 주제어보드_CPU 분석결과

Table 3에서 보여준 바와 같이 주제어보드_CPU의 J14소자는 Solder Fatigue 분석결과로 신뢰성 목표인 수명 10년간 고장확률 5% 이하의 목표수명 ($B_5 \geq 10$ 년)을 약간 상회하는 수준인 약 6%인 것으로 나타났다. 그리고 U86소자는 충격 분석결과로 고장확률이 약 3.4% 수준이며 10년간 5% 이하의 고장확률을 충족하는 것으로 확인되었다.

3.1.3. 주제어보드_COM 분석결과

Figure 15에서 보여준 바와 같이 주제어보드_COM의 신뢰성 분석결과로 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

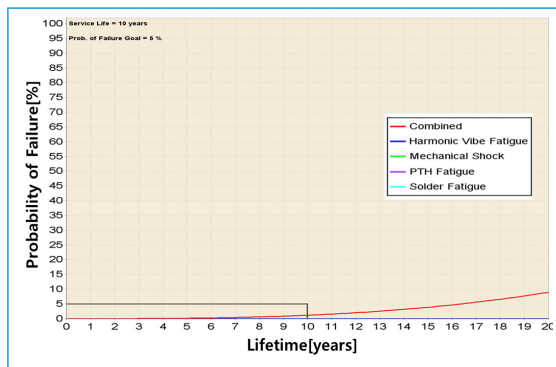


Figure 15. Probability of Failure for Main Control_COM of Existing Product

3.1.4. 입출력신호처리보드 분석결과

Table 3에서 보여준 바와 같이 입출력신호처리보드의 U43소자는 충격분석 결과로 수명 10년간 고장확률이 7.6%인 것으로 나타나 신뢰성 목표인 10년간 고장확률 5% 이하를 상회하는 것으로 확인되었다. 그리고 Harmonic 진동조건에 대하여 분석한 결과, Table 3에서와 같이 16개 소자는 10년간 고장확률 5% 이하를 만족하지 못하는 것으로 나타났다, 특히 Table 4에서 보여준 바와 같이 12개 소자는 10년간 고장확률이 100%인 것으로 확인되었다.

Table 4. Life Prediction for Signal Process of Existing Product

RefDes	Package	Part Type	Side	Solder	Max Disp	Max Strain	Damage	TTF (years)	Failure Prob
U35	OFF-44 (MO-108A)	IC	TOP	63SN37PB	8.8E-1	2.4E-3	5.9E2	0.0	100.0
U8	SSOP-38 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	2.9E-1	2.4E-3	5.2E2	0.0	100.0
U38	OFF-44 (MO-108A)	IC	TOP	63SN37PB	7.1E-1	2.2E-3	2.5E2	0.0	100.0
U4	SSOP-38 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	1.2E-1	2.1E-3	1.3E2	0.1	100.0
U43	324 F-BGA	IC	TOP	63SN37PB	3.7E-1	3.4E-3	4.3E1	0.2	100.0
U33	SSOP-28 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	3.6E-1	1.7E-3	1.2E1	0.8	100.0
U19	SOIC-16 (MS-013)	IC	TOP	63SN37PB	4.1E-1	1.6E-3	7.9E0	1.3	100.0
U42	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	1.5E-1	1.6E-3	6.8E0	1.5	100.0
U40	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	8.4E-2	1.6E-3	6.4E0	1.5	100.0
U37	OFF-44 (MO-108A)	IC	TOP	63SN37PB	4.7E-1	1.6E-3	5.7E0	1.8	100.0
U44	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	9.2E-2	1.5E-3	3.5E0	2.9	100.0
U6	SOIC-16 (MS-013)	IC	TOP	63SN37PB	2.4E-1	1.5E-3	3.3E0	3.1	100.0
U46	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	1.5E-1	1.4E-3	1.3E0	7.4	91.3
U41	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	2.9E-1	1.4E-3	1.1E0	9.2	72.9
U45	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	4.5E-2	1.4E-3	1.0E0	9.7	67.1
U47	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	7.6E-2	1.3E-3	7.0E-1	14.3	29.1
U16	SOIC-16 (MS-013)	IC	TOP	63SN37PB	5.5E-1	1.2E-3	2.6E-1	37.9	1.8
U9	SSOP-20 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	4.3E-1	1.2E-3	2.8E-1	38.0	1.8
U10	SSOP-20 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	3.4E-1	1.2E-3	2.0E-1	50.3	0.9
U11	SSOP-20 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	2.1E-1	1.2E-3	1.7E-1	68.4	0.5
U48	TSSOP-48 (MO-1L)	IC	TOP	63SN37PB	3.3E-2	1.2E-3	1.7E-1	69.2	0.5
U14	SSOP-20 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	4.4E-1	1.2E-3	1.3E-1	74.5	0.2
TC18	KEMET-X	CAPACITOR	TOP	63SN37PB	2.6E-2	1.1E-3	5.3E-2	>100	0.0
U23	SOIC-16 (MS-013)	IC	TOP	63SN37PB	7.5E-1	1.0E-3	3.3E-2	>100	0.0
L4	1206	INDUCTOR	TOP	63SN37PB	4.3E-2	1.6E-3	2.1E-2	>100	0.0
U26	SOIC-16 (MS-013)	IC	TOP	63SN37PB	4.6E-1	9.2E-4	9.0E-3	>100	0.0
U21	SSOP-16 (MO-13)	IC	TOP	63SN37PB	1.4E-1	9.1E-4	8.3E-3	>100	0.0
U7	PDIP-08 (MO-095)	IC	TOP	63SN37PB	1.8E-1	9.1E-4	8.2E-3	>100	0.0

3.1.5. 전원공급보드 분석결과

Table 5는 전원공급보드에 대하여 충격분석결과로 도출된 부품별 수명에측표를 보여준 것으로 4개 소자(C31, C4, C1, C2)는 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 만족하지 못한 것으로 나타났다.

Table 5. Life Prediction for Power Supply of Existing Product

RefDes	Package	Part Type	Side	Max Disp	Max Strain	TTF (years)	Failure Prob	Failure Prob / Cycle
C31	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	1.5E-2	1.7E-2	5.6	83.0	2.4E1
C4	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	8.6E-3	8.2E-3	24.5	33.5	6.3E0
C1	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	1.2E-2	7.2E-3	27.1	30.9	4.8E0
C2	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	9.2E-3	4.5E-3	89.7	10.6	1.7E0
C20	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	9.2E-3	2.6E-3	>100	1.4	2.4E-1
C14	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	4.5E-3	2.3E-3	>100	0.7	1.1E-1
C25	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	6.9E-3	1.7E-3	>100	0.1	2.5E-2
C15	1206	CAPACITOR	TOP	4.6E-4	2.1E-3	>100	0.0	1.0E-3
CMF4	DIP IND	INDUCTOR	TOP	4.9E-3	6.2E-4	>100	0.0	3.7E-5
C42	AW-D	CAPACITOR	TOP	1.9E-3	6.5E-5	>100	0.0	3.6E-12
U5	CDIP FILT	IC	TOP	1.8E-4	1.1E-4	>100	0.0	1.5E-7
C41	AW-D	CAPACITOR	TOP	2.6E-3	6.7E-5	>100	0.0	4.5E-12
C44	2220	CAPACITOR	TOP	1.3E-4	8.1E-6	>100	0.0	0.0E0
CMF9	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.7E-3	1.4E-4	>100	0.0	3.1E-9
C43	2220	CAPACITOR	TOP	9.0E-5	3.7E-6	>100	0.0	0.0E0
CMF8	DIP IND	INDUCTOR	TOP	6.0E-3	2.1E-4	>100	0.0	3.8E-8
C46	1206	CAPACITOR	TOP	1.9E-3	2.4E-5	>100	0.0	0.0E0
CMF7	DIP IND	INDUCTOR	TOP	5.5E-3	2.2E-4	>100	0.0	4.4E-8
C45	1206	CAPACITOR	TOP	1.7E-3	1.7E-5	>100	0.0	0.0E0
CMF6	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.1E-3	1.5E-4	>100	0.0	4.7E-9
C48	2220	CAPACITOR	TOP	2.7E-3	3.0E-5	>100	0.0	2.2E-14
CMF5	DIP IND	INDUCTOR	TOP	8.6E-4	1.7E-4	>100	0.0	7.9E-9
C47	2220	CAPACITOR	TOP	3.9E-3	2.9E-5	>100	0.0	1.1E-14
CMF3	DIP IND	INDUCTOR	TOP	6.8E-3	2.9E-4	>100	0.0	2.9E-7

3.2. 예비시제 분석결과

3.2.1. 분석결과 종합

현수제어기 기본제품에 대하여 가혹한 중등환경조건에 대하여 신뢰성 분석을 한 결과로 주제어보드_COM을 제외한 나머지 PCB들은 신뢰성 목표인 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 만족하지 못하는 것으

로 나타났다. 심지어 입출력신호처리보드는 고장확률 100%의 심각한 신뢰성 수준을 보여주고 있다. 이를 통하여 도출된 잠재된 문제점들에 대해 충실히 보완책을 마련하였고, 그 다음 단계에서 예비시제 상세설계 안에 반영함으로써 전체적인 신뢰성 수준이 향상되었다. Figure 16과 Table 6에서 보여준 바와 같이 현수제어기 기존제품과 예비시제에 대한 4종류의 PCB 분석결과를 비교하였을 때, 전반적으로 기존제품의 분석결과보다 더 나은 신뢰성 결과를 보여주고 있다.

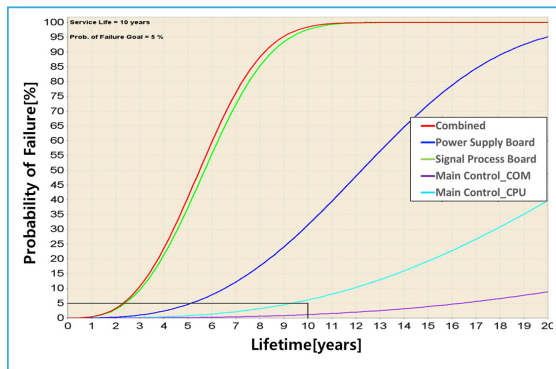


Figure 16. Probability of Failure for PCB of Preliminary Prototype

Table 6. Results of RPA for Preliminary Prototype

PCB Board	Failure Mode	RPA Result	Problematic Device
Main Control_CPU	Solder Fatigue	Fail	J14
	Shock	Pass	U86
	Vibration		
	PTH Fatigue		
Main Control_COM	Solder Fatigue	Pass	
	Shock		
	Vibration		
	PTH Fatigue		
Signal Process	Solder Fatigue	Pass	
	Shock		
	Vibration	Fail	U19, U7
	PTH Fatigue	Pass	
Power Supply	Solder Fatigue	Pass	
	Shock	Fail	C31, C4, C1
	Vibration	Pass	
	PTH Fatigue		

3.2.2. 주제어보드_CPU 분석결과

예비시제 단계에서 주제어보드_CPU의 설계안과 해석조건이 동일하기 때문에 10년간 고장확률이 동일하였다. 신뢰성 목표를 충족시키지 못한 요인에 대해서는 완성시제 단계에서 보완하였다.

3.2.3. 주제어보드_COM 분석결과

3.1.3절에서 설명한 바와 같이 기존제품에서의 주제어보드_COM은 신뢰성 분석결과로 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 만족하는 것으로 나타났기 때문에 설계안 변경 없이 동일한 조건으로 진행되었다.

3.2.4. 입출력신호처리보드 분석결과

Figure 17에서 보여준 바와 같이 예비시제 단계에서 입출력신호처리보드의 진동해석 결과로서 보드의 중앙 부근이 진동에 매우 취약한 것으로 확인되었다. 진동에 대해 신뢰성 향상을 위한 보완책으로 PCB 측면 양단 가장자리를 지지해 줄 수 있는 프레임 혹은 마운트 포인트를 설치하는 방안, 몰딩 재질 변경 혹은 면적/높이 증가와 같은 방안들이 있다[11]. 본 연구에서는 중앙 부근에 마운트 포인트를 추가함으로써 중앙 부근을 강화할 수 있는 보완책을 제시하였다. Table 4와 Table 7의 빨간 음영부분을 서로 비교해 보면 결과적으로 입출력신호처리보드의 진동분석결과는 기존제품에 비해 크게 개선된 것으로 나타났으며, U19소자를 제외하고 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 모두 충족하는 것으로 확인되었다.

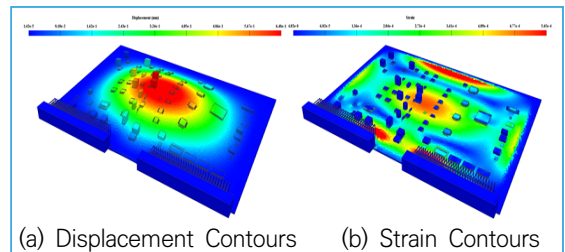


Figure 17. RPA Results for Signal Process of Preliminary Prototype

Table 7. Life Prediction for Signal Process of Preliminary Prototype

RefDes	Package	Part Type	Side	Solder	Max Disp	Max Strain	Damage	TTF (years)	Failure Prob
U19	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	1.3E-1	1.4E-3	1.5E0	6.5	97.5
U7	GFP-48	IC	TOP	63SN37PB	4.9E-1	1.2E-3	2.1E-1	47.8	0.9
U43	GFP-64 (MS-926B)	IC	TOP	63SN37PB	2.3E-1	1.2E-3	1.4E-1	69.1	0.3
U1	BGA324_PO_8MM	IC	TOP	63SN37PB	3.6E-1	8.4E-4	1.4E-1	71.5	0.3
U22	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	9.4E-2	1.1E-3	7.0E-2	>100	0.0
U14	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	9.8E-1	1.0E-3	3.4E-2	>100	0.0
U12	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	7.1E-1	1.0E-3	2.7E-2	>100	0.0
U15	GFP-48	IC	TOP	63SN37PB	4.8E-1	1.0E-3	2.7E-2	>100	0.0
U45	TSSOP-16 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	2.2E-1	9.5E-4	1.6E-2	>100	0.0
U23	TSSOP-16 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	5.7E-2	9.5E-4	1.5E-2	>100	0.0
U38	SOIC-8 (MS-912BA)	IC	TOP	63SN37PB	7.3E-2	9.5E-4	1.4E-2	>100	0.0
U13	GFP-48	IC	TOP	63SN37PB	5.8E-1	9.3E-4	1.1E-2	>100	0.0
U47	TSSOP-16 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	2.0E-1	9.3E-4	1.1E-2	>100	0.0
U55	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	1.3E-1	9.2E-4	9.6E-3	>100	0.0
U54	SOIC-16 (MO-946)	IC	TOP	63SN37PB	2.0E-1	8.8E-4	5.7E-3	>100	0.0
U49	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	2.0E-1	8.7E-4	5.5E-3	>100	0.0
U51	RU-20 (MO-153AC)	IC	TOP	63SN37PB	4.6E-1	8.6E-4	4.8E-3	>100	0.0
U26	MSOP-48 (MO-18)	IC	TOP	63SN37PB	9.9E-1	8.6E-4	4.4E-3	>100	0.0
U56	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	6.8E-2	8.4E-4	3.7E-3	>100	0.0
U46	SOIC-8 (MS-912AA)	IC	TOP	63SN37PB	2.0E-1	8.4E-4	3.6E-3	>100	0.0
U24	SOIC-8 (MS-912AA)	IC	TOP	63SN37PB	4.4E-1	8.3E-4	2.9E-3	>100	0.0
U6	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	5.9E-1	8.3E-4	2.9E-3	>100	0.0
U50	RU-20 (MO-153AC)	IC	TOP	63SN37PB	5.1E-1	8.0E-4	2.0E-3	>100	0.0

3.2.5. 전원공급보드 분석결과

Table 3을 살펴보면 기존제품에서의 전원공급보드의 RPA 수행결과는 충격조건에 매우 취약한 것으로 나타났으며, 이에 대한 보완책으로 Molding 재질을 대체하는 것으로 제시되었다. 기존제품에서 사용된 Molding 재질은 Dow Corning의 3145RTV였으나 부드러운 Molding 특성으로 인하여 여전히 충격에 취약하였다. 그리하여 몇 가지 Molding 재질 후보군들 중에서 Henkel Loctite의 Hysol ES1002 물성치를 적용하여 분석한 결과, Table 5와 Table 8의 빨간 음영부분을 서로 비교하였을 때 충격조건에 대한 고장 확률이 크게 개선된 것을 확인할 수 있다.

Table 8. Life Prediction for Power Supply of Preliminary Prototype

RefDes	Package	Part Type	Side	Solder	Max Disp	Max Strain	TTF (years)	Failure Prob	Failure Prob / Cycle
C1	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	1.3E-2	8.0E-3	14.4	50.1	5.9E0	
C31	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	2.0E-2	7.4E-3	31.8	27.0	5.1E0	
C4	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	9.9E-3	6.9E-3	>100	5.3	8.9E-1	
C29	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	1.0E-2	3.1E-3	>100	3.1	5.2E-1	
C2	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	7.8E-3	2.5E-3	>100	1.1	1.7E-1	
C14	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	3.4E-3	1.7E-3	>100	0.2	2.1E-2	
C25	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	7.4E-3	1.9E-3	>100	0.1	1.2E-2	
CMF4	DIP IND	INDUCTOR	TOP	4.3E-3	6.5E-4	>100	0.0	5.3E-5	
C42	AVX-D	CAPACITOR	TOP	1.9E-3	6.5E-5	>100	0.0	3.6E-12	
U5	CDIP FILT	IC	TOP	1.5E-4	1.2E-4	>100	0.0	2.1E-7	
C41	AVX-D	CAPACITOR	TOP	2.7E-3	6.9E-5	>100	0.0	3.9E-12	
C44	2220	CAPACITOR	TOP	1.2E-4	1.8E-4	>100	0.0	2.9E-9	
CMF9	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.8E-3	1.6E-4	>100	0.0	6.2E-9	
C43	2220	CAPACITOR	TOP	8.1E-5	5.2E-6	>100	0.0	0.0E0	
CMF8	DIP IND	INDUCTOR	TOP	6.1E-3	2.3E-4	>100	0.0	6.9E-8	
C45	1206	CAPACITOR	TOP	2.0E-3	2.1E-5	>100	0.0	0.0E0	
CMF7	DIP IND	INDUCTOR	TOP	5.5E-3	2.3E-4	>100	0.0	6.9E-8	
C45	1206	CAPACITOR	TOP	1.7E-3	2.0E-5	>100	0.0	0.0E0	
CMF6	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.1E-3	1.5E-4	>100	0.0	4.7E-9	
C48	2220	CAPACITOR	TOP	2.7E-3	2.8E-5	>100	0.0	1.1E-14	
CMF5	DIP IND	INDUCTOR	TOP	8.7E-4	1.5E-4	>100	0.0	4.3E-9	
C47	2220	CAPACITOR	TOP	3.9E-3	2.9E-5	>100	0.0	1.1E-14	
CMF3	DIP IND	INDUCTOR	TOP	7.4E-3	3.2E-4	>100	0.0	5.6E-7	
C49	1206	CAPACITOR	TOP	1.6E-3	1.5E-5	>100	0.0	0.0E0	

3.3. 완성시제 분석결과

3.3.1. 분석결과 종합

Figure 18은 완성시제 단계에서의 현수제어기를 4가지 분석요인에 대하여 각 PCB 별 고장확률 곡선

을 나타내고 있다. 예비시제의 신뢰성 분석을 통해 도출된 문제점들에 대한 보완책들을 최종적으로 완성시제 상세설계안에 충실히 보완하였다. 이로써 현수제어기 PCB에 따른 개별적인 신뢰성 분석결과는 Figure 18과 Table 9에서 보여준 바와 같이 수명 10년간 신뢰성 목표인 고장확률 5% 이하를 충족하는 것으로 나타났으나 결합된 신뢰성 분석결과는 약 6% 정도의 고장확률을 보여주고 있다.

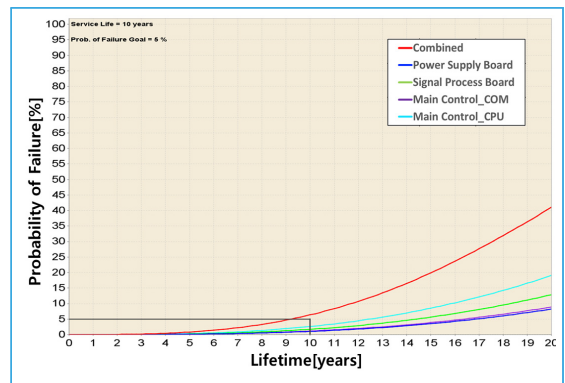


Figure 18. Probability of Failure for PCB of Completed Prototype

Table 9. Results of RPA for Completed Prototype

PCB Board	Failure Mode	RPA Result	Problematic Device
Main Control_CPU	Solder Fatigue	Pass	U86
	Shock		
	Vibration		
	PTH Fatigue		
Main Control_COM	Solder Fatigue	Pass	
	Shock		
	Vibration		
	PTH Fatigue		
Signal Process	Solder Fatigue	Pass	L2
	Shock		
	Vibration		
Power Supply	PTH Fatigue	Pass	
	Solder Fatigue		
	Shock		
	Vibration		

3.3.2. 주제어보드_CPU 분석결과

Table 10에서 나타난 바와 같이 완성시제 단계에서 주제어보드_CPU의 RPA 수행결과로서 수명 10년간 고장확률 5% 이하는 만족하는 것으로 나타났다. 충격분석에서 U86소자는 10년간 고장확률이 3.4%로 신뢰성 목표인 5% 이하를 만족하는 것으로 확인되었다.

기존제품에서 주제어보드_CPU의 J14소자는 Solder Fatigue 분석결과로 고장확률이 약 6% 수준인 것으로 확인되었으며, 이에 대한 보완책으로는 라미네이트 변경, 패드 사이즈 확대, 볼납 높이 증가 및 Solder 변경과 같은 4가지 방안이 있는 것으로 알려져 있다 [7]. 본 연구에서는 예비시제 모델링에서 사용된 J14의 재질 물성치값이 과도하게 보수적으로 설정된 것이 확인되어 완성시제에서 더 적합한 재질 물성치값으로 조정하였다. 이와 같은 보완책을 Solder Fatigue 분석에 반영하여 기존제품에서 약 6% 수준의 고장확률에서 최종적으로 신뢰성 목표인 10년간 5% 이하를 만족하도록 설계하였다.

Table 10. Life Prediction for Main Control_CPU of Completed Prototype

RefDes	Package	Part Type	Side	Max Disp	Max Strain	TTF (years)	Failure Prob	Failure Prob / Cycle
U88	484-FBGA	IC	TOP	3.5E-2	1.1E-3	>100	3.4	5.7E-1
U58	1440-FCBGA	IC	TOP	3.5E-2	1.3E-3	>100	0.9	1.5E-1
U87	96-FBGA	IC	TOP	3.6E-2	5.6E-4	>100	0.0	2.3E-3
U70	CBGA-B37	IC	TOP	3.7E-2	7.4E-4	>100	0.0	1.6E-3
U7	259-FBGA	IC	BOT	2.5E-2	4.2E-4	>100	0.0	1.3E-3
U13	78-FBGA	IC	BOT	2.1E-2	4.2E-4	>100	0.0	2.5E-4
U5	90+46L-MCM-8S...	IC	BOT	2.2E-2	3.0E-4	>100	0.0	1.8E-4
U48	78-FBGA	IC	TOP	2.1E-2	3.9E-4	>100	0.0	1.7E-4
U12	78-FBGA	IC	BOT	1.1E-2	3.8E-4	>100	0.0	1.4E-4
U47	78-FBGA	IC	TOP	1.1E-2	3.8E-4	>100	0.0	1.3E-4
U95	S01C-12 (MO-228)	IC	TOP	2.4E-2	5.1E-4	>100	0.0	1.2E-4
U73	S01C-12 (MO-228)	IC	TOP	1.4E-2	5.1E-4	>100	0.0	1.2E-4
U18	78-FBGA	IC	BOT	2.5E-2	3.5E-4	>100	0.0	8.0E-5
U52	78-FBGA	IC	TOP	2.5E-2	3.2E-4	>100	0.0	4.8E-5
U57	78-FBGA	IC	TOP	1.2E-2	3.1E-4	>100	0.0	4.0E-5
R448	0402	RESISTOR	BOT	1.4E-4	7.2E-6	>100	0.0	0.0E0
R449	0402	RESISTOR	BOT	1.4E-4	6.6E-6	>100	0.0	0.0E0
R446	0402	RESISTOR	BOT	8.3E-3	9.3E-6	>100	0.0	0.0E0
R447	0402	RESISTOR	BOT	7.5E-3	1.4E-5	>100	0.0	0.0E0
R444	0402	RESISTOR	BOT	2.8E-3	4.6E-5	>100	0.0	0.0E0
R445	0402	RESISTOR	BOT	2.9E-2	1.1E-4	>100	0.0	2.2E-13
R442	0402	RESISTOR	BOT	1.4E-4	1.1E-5	>100	0.0	0.0E0
R443	0603	RESISTOR	BOT	1.4E-4	8.1E-6	>100	0.0	0.0E0
R451	0402	RESISTOR	BOT	2.7E-2	7.4E-5	>100	0.0	1.1E-14
R452	0402	RESISTOR	BOT	3.9E-3	2.2E-5	>100	0.0	0.0E0
R450	0402	RESISTOR	BOT	2.4E-2	9.2E-5	>100	0.0	5.6E-14
R437	0402	RESISTOR	BOT	5.0E-4	2.1E-5	>100	0.0	0.0E0

3.3.3. 주제어보드_COM 분석결과

3.2.3절에서 설명했던 바와 같이 완성시제 단계에서의 주제어보드_COM은 동일한 설계안 및 분석조건으로 신뢰성 분석을 진행하였고 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

3.3.4. 입출력신호처리보드 분석결과

예비시제 단계에서 입출력신호처리보드의 중앙 부근에 마운트 포인트를 추가함으로써 Harmonic 진동해석결과는 크게 개선된 것으로 나타났으나, 취약부위는 여전히 존재하였다. 따라서 중앙 부근에 마운트 포인트를 3개 추가함으로써 Figure 19에 나타난 바와 같이 중앙 부근에서 더욱 안정된 진동특성을 보여주었다. 그리고 Table 11에서 보여준 바와 같이 L2소자가 가장 취약한 것으로 나타났으나, 수명 10년간 고장확률이 3%인 것으로 확인되어 신뢰성 목표인 10년간 5% 이하는 달성한 것으로 나타났다.

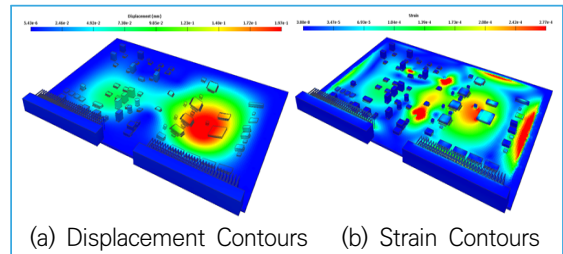


Figure 19. RPA Results for Signal Process of Completed Prototype

Table 11. Life Prediction for Signal Process of Completed Prototype

RefDes	Package	Part Type	Side	Max Disp	Max Strain	TTF (years)	Failure Prob	Failure Prob / Cycle
L2	C-BEND-7390-38	INDUCTOR	TOP	9.2E-3	2.6E-3	>100	3.0	3.9E-1
U1	BGA-188	IC	TOP	2.1E-1	1.3E-3	>100	0.4	7.4E-2
L4	C-BEND-7390-38	INDUCTOR	TOP	2.2E-2	1.9E-3	>100	0.4	6.8E-2
L3	C-BEND-7390-38	INDUCTOR	TOP	2.2E-2	1.9E-3	>100	0.4	6.4E-2
L1	C-BEND-7390-38	INDUCTOR	TOP	4.9E-3	1.9E-3	>100	0.3	5.7E-2
P2	PDP-64 (MO-016...)	PLUG CO...	TOP	1.1E-3	3.7E-4	>100	0.0	3.7E-3
P1	PDP-64 (MO-016...)	PLUG CO...	TOP	1.2E-3	3.6E-4	>100	0.0	3.4E-3
U86	TSSOP-48 (MO-1...	IC	TOP	1.9E-1	8.7E-4	>100	0.0	1.9E-3
U18	TSSOP-48 (MO-1...	IC	TOP	2.9E-2	5.2E-4	>100	0.0	7.5E-5
U23	TSSOP-48 (MO-1...	IC	TOP	5.0E-2	4.9E-4	>100	0.0	5.0E-5
J1	MO-079	JACK	TOP	5.3E-2	4.4E-4	>100	0.0	3.2E-5
U43	QFP-64 (MS-026B...	IC	TOP	8.8E-2	4.4E-4	>100	0.0	2.5E-5
U19	TSSOP-48 (MO-1...	IC	TOP	6.0E-2	4.3E-4	>100	0.0	2.3E-5
U83	QFP-44 (MS-022A...	IC	TOP	2.0E-1	4.2E-4	>100	0.0	1.9E-5
R205	0603	RESISTOR	TOP	6.5E-2	9.3E-5	>100	0.0	1.7E-12
R327	0603	RESISTOR	TOP	3.5E-3	1.4E-5	>100	0.0	1.1E-14
R569	0603	RESISTOR	TOP	4.2E-2	2.1E-4	>100	0.0	3.1E-10
R328	0603	RESISTOR	TOP	3.1E-3	5.0E-5	>100	0.0	3.9E-14
R325	0603	RESISTOR	TOP	2.6E-3	3.8E-5	>100	0.0	1.1E-14
R326	0603	RESISTOR	BOT	3.3E-3	4.6E-5	>100	0.0	2.2E-14
R202	0603	RESISTOR	TOP	8.1E-2	6.7E-5	>100	0.0	2.1E-13
R323	0603	RESISTOR	BOT	1.4E-2	6.0E-5	>100	0.0	3.3E-14
R203	0603	RESISTOR	TOP	9.1E-2	9.5E-5	>100	0.0	2.0E-12
R324	0603	RESISTOR	TOP	2.8E-3	3.2E-5	>100	0.0	0.0E0
R321	0603	RESISTOR	BOT	1.4E-2	5.1E-5	>100	0.0	3.3E-14
R563	0603	RESISTOR	TOP	6.0E-2	1.9E-4	>100	0.0	1.6E-10
R201	0603	RESISTOR	TOP	7.3E-2	3.5E-5	>100	0.0	0.0E0

3.3.5. 전원공급보드 분석결과

Table 6에서 보여준 바와 같이 예비시제 단계에서 전원공급보드의 Molding 재질로 Henkel Loctite의

Hysol ES1002 물성치를 적용하여 분석한 결과로서 충격조건에 관한 고장확률이 크게 개선되었지만, 여전히 고장확률 5% 이하를 만족시키지 못하는 소자들이 있는 것으로 확인되었다. 따라서 이에 대한 보완책으로 Molding 재질을 Hitech Korea의 HT-130DL로 변경하였을 때 Table 12의 초록 음영부분에서 알 수 있듯이 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

Table 12. Life Prediction for Power Supply of Completed Prototype

RefDes	Package	Part Type	Side	Max Disp	Max Strain	TTF (years)	Failure Prob	Failure Prob / Cycle
C42	AVX-D	CAPACITOR	TOP	1.7E-3	2.4E-4	>100	0.0	1.5E-8
U5	CDIP FILT	IC	TOP	2.2E-4	1.1E-4	>100	0.0	1.7E-7
C41	AVX-D	CAPACITOR	TOP	2.4E-3	2.4E-4	>100	0.0	1.9E-9
C44	2220	CAPACITOR	TOP	2.9E-4	1.9E-4	>100	0.0	2.9E-9
OMF9	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.9E-3	2.5E-4	>100	0.0	1.2E-7
C43	2220	CAPACITOR	TOP	8.3E-5	5.2E-6	>100	0.0	0.0E0
OMF8	DIP IND	INDUCTOR	TOP	7.4E-3	2.4E-4	>100	0.0	8.0E-8
C46	1206	CAPACITOR	TOP	2.2E-3	2.7E-5	>100	0.0	0.0E0
OMF7	DIP IND	INDUCTOR	TOP	6.4E-3	2.7E-4	>100	0.0	1.9E-7
C45	1206	CAPACITOR	TOP	1.9E-3	2.4E-5	>100	0.0	0.0E0
OMF6	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.2E-3	2.5E-4	>100	0.0	1.1E-7
C48	2220	CAPACITOR	TOP	2.8E-3	3.3E-5	>100	0.0	3.3E-14
OMF5	DIP IND	INDUCTOR	TOP	9.1E-4	2.5E-4	>100	0.0	1.3E-7
C47	2220	CAPACITOR	TOP	2.7E-3	3.4E-5	>100	0.0	3.3E-14
OMF4	DIP IND	INDUCTOR	TOP	2.1E-3	2.0E-4	>100	0.0	2.9E-8
OMF3	DIP IND	INDUCTOR	TOP	3.9E-3	3.9E-4	>100	0.0	1.9E-6
C49	1206	CAPACITOR	TOP	1.5E-3	1.4E-5	>100	0.0	0.0E0
OMF2	DIP IND	INDUCTOR	TOP	3.4E-3	3.5E-4	>100	0.0	1.1E-6
OMF1	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.7E-3	2.4E-4	>100	0.0	9.9E-9
C51	2220	CAPACITOR	TOP	5.1E-3	3.9E-5	>100	0.0	7.8E-14
C50	1206	CAPACITOR	TOP	1.5E-3	1.1E-5	>100	0.0	0.0E0
R1	1206	RESISTOR	TOP	1.9E-4	4.2E-6	>100	0.0	0.0E0
C53	1206	CAPACITOR	TOP	1.7E-3	1.9E-5	>100	0.0	0.0E0
R2	1206	RESISTOR	TOP	1.2E-3	3.6E-5	>100	0.0	1.1E-14
C52	2220	CAPACITOR	TOP	4.2E-3	3.9E-5	>100	0.0	5.6E-14
C55	2220	CAPACITOR	TOP	8.2E-4	6.5E-6	>100	0.0	0.0E0

4. 결론

본 연구에서는 중동 수출형 K2전차에 장착될 주요 전장품 10종 중 현수제어기 내부의 PCB 4종류에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 RPA 기법을 활용하였다. 특히 중동지역의 가혹한 운용환경조건에서 전장품 신뢰성의 전반적인 수준 향상을 위해 RPA 도구인 ANSYS Sherlock을 활용하였으며, 이를 통하여 설계단계에서 내재된 고장 위험요소를 미리 파악하여 위험 완화조치를 완성시제 상세설계에 충분히 반영하였다.

RPA 수행을 위하여 MIL-STD-810C 규격의 Harmonic 진동조건과 충격조건 및 STANAG-2895 규격의 온도조건을 적용하였다. 특히 중동 환경에서 무기체계 운용조건에서의 PCB 각 소자 온도 데이터 정보를 얻기 위하여 중동 외기조건에서의 K2전차 승무원실 내부열유동해석 및 현수제어기 단품수준에

서의 복합열전달해석을 수행하였다. 냉방장치 미작동 상태에서 전장품 발열량 및 중동지역에서의 태양 복사량을 고려하여 K2전차 승무원실 내부열유동해석을 수행하였으며, 이 해석결과로부터 현수제어기 주변온도값을 도출하였다. 이를 통하여 도출된 현수제어기 주변온도값을 Enclosure를 포함한 복합열전달해석에 적용하였고, 각 PCB에서 도출된 Thermal Map을 RPA 수행에 활용하였다.

우선 현수제어기 기존제품에 대하여 가혹한 중동 환경조건에서의 Solder Fatigue, PTH Fatigue, 충격, 그리고 Harmonic 진동에 대한 신뢰성 분석을 수행하였고, 이를 통하여 잠재된 고장 위험요소를 도출할 수 있었다. 기존제품을 통해서 도출된 문제점에 대한 보완책을 그 다음 예비시제 상세설계안에 반영하였고 그로 인해 전체적인 신뢰성 향상을 도모하였다. 그리고 그 다음 단계에서 기존제품과 예비시제의 신뢰성 분석을 통해서 도출된 문제점들에 대한 보완책들을 최종적으로 완성시제 상세설계안에 충실히 보완함으로써 신뢰성 목표인 10년간 고장확률 5% 이하의 목표수명($B_5 \geq 10$ 년)이 충족되도록 신뢰성 설계를 수행하였다.

향후 해당장치에 대한 무고장 가속수명시험이 아닌 실제 고장이 발생할 시점까지의 가속수명시험을 실시하여 예측수명결과를 확보할 수 있다면 RPA 수명분석 결과와 비교하여 일치성에 관한 검증은 해볼 필요가 있다. 또한 그 전이라도 가용한 실물의 반응을 직접 특성화하여 RPA 시뮬레이션에 반영하는 과정을 통해 RPA 수명분석의 정확도를 더 높일 수 있을 것으로 전망된다.

후기

본 연구는 국방기술진흥연구소의 무기체계 개조 개발지원사업 “중동 수출형 K2전차 주요장치 개조 개발(과제번호 : F190014)”사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1 Moon, S., Kim, I. S., Kim, H. J., & Kwon, H. A, "A Study on the Reliability Evaluation of Middle East Export-type K2 Tank Electrical Equipment", *Fall Conference of the Korean Reliability Society*, pp. 29-29, 2022.
- 2 Malendele, P., Park, S., & Han, C., "Application and Validation of Sherlock with Steinberg's Model for Life Prediction of BGA on Printed Circuit Board Under Random Vibration", *Proceedings of KSME Annual Meeting*, pp. 1732-1736, 2021.
- 3 Park, T., Park, J., Park, H., & Oh, H., "Structural Reliability Evaluation on Solder Joint of BGA and TSSOP Components under Random Vibration Using Reliability and Life Prediction Tool of Sherlock", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, 45(12), pp. 1048-1058, 2017.
- 4 Cha, J., Park, K., Lee, K., Bak, B., Kim, H., & Kwon, H., "A Study on Design for Reliability for the PBA of Warship based on Reliability Physics Analysis", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 20(12), pp. 535-545, 2019.
- 5 Kim, J., Lee, K., Yoon, H., Lee, S., Heo, J., & Kwon, H., "Reliability Design Analysis for Underwater Buriened PBA Based on PoF", *Journal of Applied Reliability*, 17(4), pp. 280-288, 2017.
- 6 MIL-STD-810G - Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Part One Annex C-3, US Department of Defense, 2008.
- 7 Cha, J., Lee, Y., Koh, H., Jo, S., Kim, G., & Yoon, Y., "A Case Study on the Reliability Design of Missile CPU-board with Reliability Physics", *Journal of Applied Reliability*, 22(2), pp. 164-177, 2022.
- 8 Moon, S., Choi, B., Choi, H., & Kim, Y., "Reliability Evaluation of Export-type K2 Tank Electronic Equipment by Acceleration Life Test", *Journal of Defense Quality Society*, 5(1), pp. 102-110, 2023.
- 9 Kim, H., Moon, S., & Sung, H., "A Study on the Reliability Evaluation Method for Electronic Equipment of Export-type K2 Tank", *KIMST Annual Conference Proceedings*, pp. 512-513, 2023.
- 10 Colman, B., *Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules*, ZVEI, Electronic Components and Systems Division, 2013.
- 11 ANSYS Inc., *Sherlock Theory Reference*, 2021.
- 12 Alter Technology, <https://wpo-altertechnology.com/thermomechanical-failures-in-plated-through-vias-pt-vs/>, 2024, 03, 29
- 13 STANAG 2895 - Extreme Climatic Conditions and Derived Conditions for Use in Defining Design/Test Criteria for NATO Forces Materiel, North Atlantic Treaty Organization, 1990.
- 14 MIL-STD-810C - Environmental Test Methods, Method 514.2 Vibration, US Department of Defense, 1975.
- 15 Moon, S., Kwon, S. W., An, S. H., Lee, K. H., & Kang, H. S., "A Numerical Study for Evaluation of Thermal Comfort in the Cabin Room of the Tracked Vehicle", *KIMST Annual Conference Proceedings*, pp. 1641-1642, 2013.

항공정비 품질엔지니어의 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도 분석에 대한 연구

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

Competency Utilization for Performing Core Tasks of Aircraft Maintenance Quality Engineers

이상천, Sangcheon Lee

경상국립대학교, 산업시스템공학부/공학연구원,
교수
Professor, Department of Industrial and
Systems Engineering/ERI, Gyeongsang
National University

박종훈†, Jonghun Park

대구가톨릭대학교, 경영학과, 교수
Professor, Department of Business
Administration, Daegu Catholic University

최병선, Byungsun Choi

진에어, 정비본부, 엔지니어
Engineer, Maintenance Center, Jinair

Abstract

In this study, the utilization of competencies for performing the core tasks of aircraft maintenance quality engineers is surveyed. The core tasks of aircraft maintenance quality engineers are derived based on the PDCA framework through a literature review, and the importance and performance of the core tasks are surveyed to perform an IPA(Importance-Performance Analysis). Additionally, the utilization of competencies for the core tasks is surveyed, where the competencies are referenced from a previous study by Choi et al.[5]. The survey results show that aircraft maintenance quality engineers exhibit a certain level of competency in the Plan and Do stages. Furthermore, “maintaining the effectiveness of in-house monitoring, measurement, analysis, and evaluation of measuring instruments” and “investigate non-conformities and defects during maintenance to analyze the root cause” are identified as tasks to be prioritized for competency improvement. The competencies of “quality management” and “quality system management” in management as well as “honesty/moral” in collaboration technology are used more frequently than other competencies.

keywords : Core Work, Core Competency, Importance-Performance Analysis, Utilization of competencies, Aircraft Maintenance Quality Engineers

† Corresponding Author : Jonghun Park

Tel : +82-053-850-3451, email : icelatte@cu.ac.kr

Daegu Catholic University, 13-13, Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 3rd. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

항공기는 비행(Flying)이라는 특수한 기능을 수행하기에 고도의 신뢰성을 확보할 수 있도록 설계, 제작된다[1-2]. 그러나 최초로 높은 신뢰도로 제작되었다 하더라도 시간이 지나면서 다양한 이유로 열화가 발생하고 고장 발생 확률이 높아질 수밖에 없다. 따라서 항공기가 제작사에서 군(軍) 또는 운항사로 인도된 이후에도 지속적으로 정비하는 것이 매우 중요하다[3]. 특히 첨단기술을 탑재한 최신 항공기를 운영하는 공군에게 고도의 신뢰성을 유지하기 위한 정비는 필수불가결하다[4].

정비사가 항공기를 정비하는 과정에서 발생할 수 있는 오류를 관리하여 항공기 사고를 예방하는 것을 정비품질(Maintenance Quality)이라 하며 항공정비 품질엔지니어가 담당한다[5]. 항공정비 품질엔지니어가 담당하는 업무는 항공정비 전반에 걸친 품질 관계 모니터링, 품질경영시스템 유지, 법과 가이드를 고려한 적정범위 결정, 업무의 규정 준수 평가 등이며, 전사가 유기적으로 정비업무를 수행할 수 있도록 하는 역할을 한다[5-6]. 따라서 항공기의 안전한 운영을 위해서는 항공정비 품질엔지니어의 역할이 매우 중요하다 할 수 있다. 이에, Choi et al.[5]는 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량을 도출하고 특징을 파악하는 연구를 수행하였다.

Choi et al.[5]의 연구는 항공기 관련 직종 종사자의 업무 및 핵심역량에 관한 선행연구들[7-12]을 종합하고 관련 전문가들의 의견을 반영하여 3개 영역 21개의 핵심역량을 도출한 후, 해당 핵심역량에 대하여 현업 종사자를 대상으로 중요도(Importance)와 보유도(Retention)에 대한 실증조사를 통한 IPA(Importance-Performance Analysis) 매트릭스 분석을 실시하였다.

Choi et al.[5]의 연구는 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량을 정의했다는 점에서 그 가치를 찾을 수 있으며, 본 연구는 Choi et al.[5]가 제시한 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량을 실제 업무까지로 확장한다. 즉, 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량이

실제 항공정비 업무에 어느 정도 활용되고 있는지를 조사하고 특징을 파악하는 것을 목적으로 한다.

본 연구의 결과를 바탕으로, 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량의 향상을 꾀할 수 있는 효과적인 교육프로그램의 개발 및 교육프로그램의 효율적 관리를 가능케 하는 기초자료를 제공할 수 있으며, 더 나아가 교육프로그램 및 업무의 효과를 평가할 수 있는 근거로 사용될 수 있을 것이라 예상된다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장 문헌연구에서는 Choi et al.[5]의 연구결과를 중심으로 관련 문헌들을 통해 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량과 핵심업무를 도출한다. 3장은 핵심업무에 대한 IPA 분석과 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도를 확인하기 위한 조사설계의 내용을 소개하고, 4장에서는 그 분석 결과를 기술한다. 마지막으로 5장에서 연구결과를 정리한다.

2. 문헌연구

2.1. 항공정비 및 정비품질

국토교통부는 항공정비를 항공기 또는 항공 제품의 지속적인 감항성을 보증하는 데 필요한 작업으로서 오버홀(Overhaul), 수리, 검사, 교환, 개조 및 결함수정 중 하나 또는 이들의 조합으로 이루어진 작업이라고 명시하고 있으며[13], 미연방항공청의 항공법에서는 예방정비를 제외한 점검(Inspection), 오버홀, 수리(Repair), 보존(Preservation) 및 부품 교체(Part Replacement)로 정의했으며[14], 항공안전기술원의 용어사전에서는 항공기 또는 항공 제품의 지속 감항성 보증을 위해 필요한 작업으로 오버홀, 수리, 검사, 교환, 개조 및 결함수정 중 하나 또는 이들의 조합으로 이루어진 작업이라고 정의하고 있다[15].

항공정비 관련 업무는 항공기 정비생산, 정비기술, 정비품질 및 정비 자재관리 등으로 구분되며, 안전을 중시하는 항공정비의 특성상 정비품질에 큰 관심을 가진다[16]. 항공기의 정비품질 업무는 항공기가 기술기준에 적합하도록 계속된 감항성 유지를 보증하

기 위한 일련의 업무들이며, 구체적으로 계획정비 프로그램의 개발 및 유지관리, 감항성 유지 정보 검토 및 작업지침서 개발, 항공기 결함 등에 관한 분석/신뢰성 관리, 심사업무, 정비업무에 관한 절차의 개발 및 관리, 그 밖의 정비를 위한 지원을 의미한다.

2.2. 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량

McClland[17]는 역량을 조직의 비전과 목표를 달성하기 위해 자신이 맡은 업무를 성공적으로 수행할 수 있는 구성원들의 행동이라 정의하였다. 핵심역량은 목표 달성의 핵심으로 작용하는 원천이며 효과적이고 상향화된 성과를 만들게 하는 개인이나 조직의 내적 특성[18], 직무에 있어 기본적으로 갖추어야 할 능력과 자질[19-21], 개인의 업무수행에서 핵심 부분으로 업무성과와 관련성이 높은 지식, 기술, 태도의 집합체[22] 등과 같이 정의하고 있다.

Choi et al.[5]는 이러한 정의에 기반하여 항공기 관련 직종 종사자의 핵심역량에 관한 선행연구들[7-12]을 종합하고 관련 전문가들의 의견을 반영하여 Table 1과 같이 3개 영역 21개의 핵심역량을 도출하였다.

2.3. 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무

Table 1에 제시된 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량이 실제 항공정비 업무에 어느 정도 활용되고 있는지를 조사하기 위해서는 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무를 먼저 정의할 수 있어야 한다.

항공정비와 정비품질에 대한 정의는 2.1장에서 소개하고 있으며, 해당 정의를 기반으로 각 항공사 정비조직 또는 MRO(Maintenance, Repair and Overhaul) 업체에서 정의한 항공정비 품질엔지니어의 업무는 품질보증, 품질심사, 자격관리, 교육 훈련, 항공기 검사, 정비문서관리 등의 범주로 구분하고 있으며, 대략적인 내용을 정리하면 Table 2와 같다.

항공정비 품질엔지니어의 핵심업무를 파악할 수 있는 또 하나의 방법은 항공품질경영시스템에 정의된 내용이다. 항공분야 품질시스템은 1960년대 미국의

Table 1. Core Competencies of Aircraft Maintenance Quality Engineers[5]

Area	Core competencies
Management technology	1. Quality Management
	2. Risk Management
	3. Quality System Management
	4. Quality Assurance
	5. Safety Management
	6. Qualification Management
	7. Education Management
Elemental technology	8. Aircraft Maintenance
	9. Domestic/INT'L Law
	10. Inspection
	11. Audit
	12. Language
	13. Creating Document
	14. Collecting Information
Collaborative technology	15. Communication
	16. Interpersonal Relationship
	17. Leadership
	18. Honesty/Moral
	19. Decision Making
	20. Problem Solving
	21. Teamwork

항공산업이 품질관리의 효율성을 높이고 군수품 품질 향상을 위해 MIL-Q-9858을 개발하기 시작하여 1979년 영국의 BS5179를 거쳐 여러 국가표준기구와 단체들의 주도로 1987년 ISO9000 시리즈로 제정된 이후 전 세계적으로 적용이 확산하였다. 이후 1994년 항공산업의 특성이 반영된 AS9000 시리즈가 미국의 주도로 제정되어 현재 2016년에 개정된 AS9100D까지 발전해왔다[23-24]. AS9100D에서 품질관리업무에 관한 요구사항을 정리하면 Table 3과 같다[24].

본 연구에서는 Table 2와 Table 3의 내용을 PDCA(Plan-Do-Check-Action)에 의거하여 재정리하는 방법으로 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무를 도출하고자 하였다. 즉, 실무적인 관점에서 항공사 MRO 업체가 정의하고 있는 업무와 시스템적 관리의 관점에서 항공품질경영시스템에서 정의한 업무를 파악하고, 공통된 업무를 대상으로 PDCA라는 품

Table 2. Works of the Aircraft Maintenance Quality Engineers

Work	Details of Work	
Quality Assurance	<ul style="list-style-type: none"> • Planning • Quality system operation • New maintenance capability certification • Revision of maintenance work order • Maintaining certification of internal/external maintenance organizations • Review of civil/county air traffic regulations/laws 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedures control • SMS(Safety Management System) manual control • Customer quality control • Domestic/foreign quality group activities • Rental business • Management of customer dissatisfaction and quality nonconformity
Quality Audit	<ul style="list-style-type: none"> • Establishment and implementation of quality audit year plan • Inspection of customer's quality assessment • Attendance at Quality assessment Seminar and training • Review and prepare quality audit checklist 	<ul style="list-style-type: none"> • Issuance and confirmation of nonconformity improvement measures • Preparation and reporting of quality audit results • Management of documents related to quality audit
Qualification Management	<ul style="list-style-type: none"> • Valuation/appointment/dismissal of maintenance worker qualifications 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance of manpower list
Education Training	<ul style="list-style-type: none"> • Establishment and operation of annual education and training plan • Budgeting and implementation of education and training • Development/Revision of education and training program manual 	<ul style="list-style-type: none"> • Education and training management • Deploy and manage e-learning
Aircraft Inspection	<ul style="list-style-type: none"> • Carry out incoming aircraft process/final inspection • Outsourcing maintenance • Quality check and final inspection • Customer inspection request and inspection 	<ul style="list-style-type: none"> • Aircraft RTS(Return To Service) • Rotable part support • Test flight on-boarding
Maintenance Document	<ul style="list-style-type: none"> • Establishment of standards for recording maintenance documents • Confirmation and correction of maintenance document 	<ul style="list-style-type: none"> • Electronic document conversion and customer delivery • Electronic file retention/subsidiary

질관리 및 실행의 원칙을 기준으로 핵심업무를 도출하였다. PDCA는 품질관리의 대상을 제품에서 프로세스로 확장시킨 개념이며, 처음 소개된 1950년대부터 현재까지도 품질관리의 가장 근간이 되는 접근법이기 때문에 핵심업무를 분류하고 정의하기에 적합한 기준이라 할 수 있다[25-26].

일차적으로 친화도법의 일종인 KJ기법(Kawakita Jiro Method)을 사용하여 Table 2와 Table 3의 내용을 분류하고, PDCA에 의거하여 재정리한 결과 Table 4와 같이 계획(Plan), 실행(Do), 평가(Check), 개선(Action)에 걸쳐 13개 핵심업무가 도출되었으며,

이차적으로 MRO 업체에 재직 중인 항공정비 품질분야 경력 10년 이상의 전문가 5인과의 인터뷰를 통해 도출된 내용의 타당성을 확인하였다.

3. 조사설계 및 수집

3.1. 조사설계

본 연구는 문헌연구를 통해서 도출된 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무에 대하여 다음의 두 가지 설문조사를 설계하였다.

Table 3. Requirements for Quality Management by AS9100D[24]

Category	Requirements	
Organizational status	<ul style="list-style-type: none"> Understanding the organization and its situation Understand stakeholder needs and expectations 	<ul style="list-style-type: none"> Determination of the scope of quality management system Quality management system and its process
Leadership	<ul style="list-style-type: none"> Leadership and will expression General information Customer-focused Policy 	<ul style="list-style-type: none"> Establishment of quality policies Communication on quality policy Roles, responsibilities, and privileges of the organization Ethical management
Planning	<ul style="list-style-type: none"> Measures to address risks and opportunities Quality objectives and planning to achieve quality objectives 	<ul style="list-style-type: none"> The planning of a change
Support	<ul style="list-style-type: none"> Resources General information Human resources Infrastructure 	<ul style="list-style-type: none"> Process operational environment Monitoring and measurement resources Competence/Qualification Document recording and management
Operation	<ul style="list-style-type: none"> Operation planning and management Operational risk management Communication with customers 	<ul style="list-style-type: none"> Manage external products and services Nonconformity management
Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> Monitor, measure, analyze and evaluate An internal examination 	<ul style="list-style-type: none"> Management review
Improvement	<ul style="list-style-type: none"> Nonconformity and corrective action 	<ul style="list-style-type: none"> Continuous improvement

첫째, 핵심업무에 대한 기초적 정보를 파악하기 위하여 Table 4에 대한 중요도(Importance)와 수행도(Performance)를 조사하였다. 중요도와 수행도 모두 Likert 5점 척도로 측정하여, 중요도는 '전혀 중요하지 않다'는 1점, '중요하지 않다'는 2점,

'보통이다'는 3점, '중요하다'는 4점, '매우 중요하다'는 5점으로, 수행도는 '전혀 수행하지 않는다'는 1점, '수행하지 않는다'는 2점, '보통이다'는 3점, '수행한다'는 4점, '많이 수행한다'는 5점으로 측정하였다.

Table 4. Core works of the Aircraft Maintenance Quality Engineers

Stage	Core works of aircraft
Plan	<ul style="list-style-type: none"> a. Establishment, operation, and revision of in-house quality management manuals b. Establishment, operation, and revision of in-house procedures for maintenance activities and quality assurance c. Establishing and operating a quality assurance plan
Do	<ul style="list-style-type: none"> d. Conducting inspections in accordance with aircraft maintenance work plans e. Activities to improve reliability of the quality system f. Validation of corrective action validity and re-corrective action g. Maintaining the effectiveness of in-house monitoring, measurement, analysis, and evaluation of measuring instruments
Check	<ul style="list-style-type: none"> h. Conducting an internal audit to verify the effectiveness of the in-house quality system i. Review quality document typos, errors, and validity of documents j. Periodic in-house management reviews
Action	<ul style="list-style-type: none"> k. Investigate nonconformities and defects during maintenance to analyze the root cause l. Root cause analysis of nonconformities extracted from various reviews m. Continuous improvement and development of the quality system through corrective action

둘째, 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도를 조사하기 위하여, Table 4의 13개 항목 각각에 대하여 Table 1에서 정의된 핵심역량의 활용도를 조사하였다. 활용도 역시 '전혀 활용하지 않다'는 1점부터 '많이 활용한다'의 5점까지의 Likert 5점 척도를 사용하였다.

3.2. 자료수집 및 분석

설문조사는 항공사, MRO 업체 및 군(軍)의 품질업무 담당자를 대상으로 실시하였으며, 본 연구의 목적을 이해하고 동의한 42명의 자료를 수집하였다.

응답자의 평균 근무연수는 14.5년으로 4년 이상 10년 이하가 35.7%(15명)로 가장 많았고 다음으로 11년 이상 20년 이하와 21년 이상이 각 28.6%(12

명), 3년 이하의 신입 급이 7.1%(3명)로 나타났다. 품질업무 경력 연수는 평균 6.4년으로 4년 이상 10년 이하 품질업무 경력자가 45.2%(19명)로 가장 많았으며 3년 이하 신입 급이 31.0%(13명), 11년 이상 20년 이하 품질업무 경력자가 19.0%(8명), 21년 이상 품질업무 경력자가 4.8%(2명)로 나타났다.

4. 분석

4.1. 핵심업무의 중요도와 수행도

항공정비 품질엔지니어 핵심업무의 중요도와 수행도 조사결과는 Table 5와 같다. 가장 중요하다고 응답한 업무는 계획단계의 'b. 사내 정비 행위와 품질보증 절차 확인'으로, 동시에 가장 수행도가 높은

Table 5. Importance and performance of core work of the Aircraft Maintenance Quality Engineers

	Core work	Importance		Performance		IPA Result
		Mean	Std.	Mean	Std.	
Plan	a. Establishment, operation, and revision of in-house quality management manuals	4.23	0.70	4.04	0.58	I
	b. Establishment, operation, and revision of in-house procedures for maintenance activities and quality assurance	4.33	0.65	4.14	0.64	I
	c. Establishing and operating a quality assurance plan	4.09	0.82	3.71	0.77	III
Do	d. Conducting inspections in accordance with aircraft maintenance work plans	4.19	0.80	3.95	0.90	I
	e. Activities to improve reliability of the quality system	3.95	0.73	3.81	0.80	III
	f. Validation of corrective action validity and re-corrective action	4.04	0.73	4.04	0.79	IV
	g. Maintaining the effectiveness of in-house monitoring, measurement, analysis, and evaluation of measuring instruments	4.19	0.67	3.81	0.86	II
Check	h. Conducting an internal audit to verify the effectiveness of the in-house quality system	4.23	0.63	3.95	0.79	I
	i. Review quality document typos, errors, and validity of documents	4.14	0.71	4.09	0.61	I
	j. Periodic in-house management reviews	3.61	0.85	3.57	1.01	III
Action	k. Investigate nonconformities and defects during maintenance to analyze the root cause	4.19	0.59	3.92	0.75	II
	l. Root cause analysis of nonconformities extracted from various reviews	4.23	0.69	3.95	0.66	I
	m. Continuous improvement and development of the quality system through corrective action	4.23	0.75	4.04	0.73	I
Total		4.13	0.54	3.92	0.55	

것으로 스스로 평가하고 있는 항목이기도 하다. 반대로 중요도가 가장 낮게 평가되는 항목은 실행단계의 'j. 주기적 사내 경영검토 실시'이며, 동시에 가장 낮은 수행도를 보이고 있는 것으로 평가되었다. 또한 표준편차 역시 1.01로 가장 커서 해당 업무에 대한 품질엔지니어들의 인식 및 태도가 실제로도 소극적임을 유추할 수 있다.

중요도와 수행도의 상관계수는 $\rho = 0.76$ 으로, 중요하다고 인식하는 업무에 대하여 수행도도 높다고 평가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 'h. 사내 품질 시스템 유효성 검증을 위한 내부 심사 실시'와 'l. 부적합 사항의 근본 원인 분석'의 업무는 높은 중요도로 인식함에도 불구하고 수행도는 상대적으로 낮다고 평가되었다. 이와 반대로, 'i. 품질 서류의 오류 및 유효성 검토'와 'f. 시정조치 유효성 검증 및 재시정조치 실시'는 중요도를 낮게 평가하지만 수행도는 상대적으로 높게 평가하고 있다. 그런데 해당 항목이 인증심사를 위한 실질적인 행위들을 고려한다면, 항공정비 품질엔지니어들이 인증심사를 준비하는 작업 자체는 정비업무로서 중요하다고 판단하지 않고 있지만, 인증을 준비하는 업무능력은 매우 향상되어 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

이러한 특징적 이해를 조금 더 체계적으로 접근하기 위하여 IPA 분석을 실시하였다. IPA 분석은 수행도(X축)와 중요도(Y축)의 설문 결과의 평균값을 기준으로 4개 사분면으로 구분하여 분석하는 기법으로, I사분면은 현상유지(Keep up the good work), II사분면은 집중개선(Concentrate here), III사분면은 후순위(Low priority), 그리고 IV사분면은 과잉노력(Possible overkill)으로 판단하며[27], 구체적인 근거는 다음과 같다.

I사분면(현상유지)은 중요도가 높은 항목에 대하여 높은 수준으로 이미 보유하고 있는 것이니 충분히 좋은 상황이라 판단할 수 있다. 따라서 I사분면에 존재하는 핵심역량은 현상유지만으로도 충분하다고 판단한다. II사분면(집중개선)은 높은 중요도로 평가됨에도 불구하고 현재의 보유 수준이 낮기 때문에 보유수준을 향상시켜야 할 항목으로 분류한다. III

사분면(후순위)은 낮은 중요도의 항목에 대하여 보유 수준이 낮은 경우이므로 여유를 가지고 개선해도 되는 항목으로 판단하며, 높은 보유도를 가지고 있지만 중요도는 그리 높지 않은 IV사분면의 분류에 대해서는 기존에 과도하게 관리를 했다고 판단하고, 이곳에 투자할 역량을 집중개선인 II사분면에 속한 역량으로 배분하여 선택과 집중이 가능토록 하는 등의 분석 및 전략적 선택이 가능하다.

Figure 1은 항공정비 품질엔지니어의 13개 핵심 업무에 대한 IPA 분석 매트릭스이며, Table 5의 IPA Result는 각 핵심업무가 속한 사분면을 표시한 것이다.

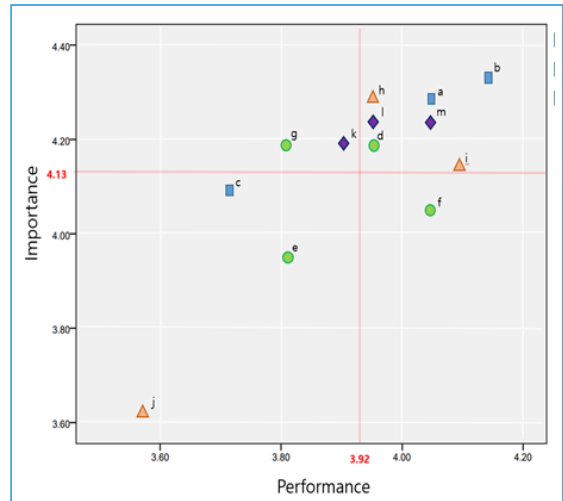


Figure 1. IPA analysis matrix for core work of air maintenance quality engineers

앞서 중요도는 낮게 평가하지만 수행도는 상대적으로 높게 평가하고 있는, IPA 분석에서 IV사분면 과잉노력에 포함될 것으로 예상되었던, 'i. 품질 서류의 오류 및 유효성 검토'와 'f. 시정조치 유효성 검증 및 재시정조치 실시' 중 실제로 IV사분면에 속한 업무는 'f. 시정조치 유효성 검증 및 재시정조치 실시' 뿐이고, 'i. 품질 서류의 오류 및 유효성 검토'는 I사분면 현상유지에 속해있음이 확인되었다. 그러나 Figure 1에서 확인했을 때, 업무 i의 중요도가 평균에 걸쳐있는 반면 수행도는 오른쪽으로 치우쳐 위치

하기에 지금까지 과도하게 노력했다고 판단해도 무리가 없어 보인다. 즉, 업무 f와 i는 자원의 효율적 사용의 관점에서 지금까지 낭비의 가능성이 높았으니, 향후 역량개발에 있어 여분의 노력을 다른 분야에 투입하는 것이 추천된다.

IPA 분석에서 가장 관심을 가지는 II사분면 집중 개선에는 계획단계와 평가단계의 업무는 나타나지 않았다. 이는 현재 항공정비 품질엔지니어들이 계획과 평가단계에 대해서는 일정 수준의 업무역량을 확보하고 있음을 시사한다. 그러나 실행단계의 'g. 모니터링, 측정, 분석 및 평가를 통해 유효성 유지'와 개선단계의 'k. 정비 중 발생된 부적합 사항 및 결함 조사 실시'가 II사분면에 위치하며, 따라서 업무 g와 k는 우선적으로 역량향상을 위한 노력을 해야 할 것이라 판단된다.

당장 고려해야 할 사항은 아니지만, 지속적인 관리와 개선이 필요하다고 판단하는 III사분면 저우선에는 'c. 항공정비품질관리 보증계획 수립', 'e. 품질보증계획에 따른 품질보증 활동 실시', 'j. 주기적인 사내 경영검토 실시'가 위치하였다. 특히 업무 j는 중요도와 수행도 모두 가장 낮게 인식되고 평가되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 항공정비 품질엔지니어들은 사내 경영검토의 효과성을 매우 낮게 평가하고 있다는 사실을 간접적으로 확인할 수 있다.

마지막으로 I사분면 현상유지에 위치하고 있는 핵심업무는 'a. 항공정비 품질관리 매뉴얼 확인', 'b. 사내 정비 행위와 품질보증 절차 확인', 'd. 항공기 정비 작업 계획에 따라 검사 실시', 'h. 사내 품질시스템 유효성 검증을 위한 내부 심사 실시', 'l. 부적합 사항의 근본 원인 분석', 'm. 시정조치를 통한 품질시스템의 지속적 개선'이며, 앞서 언급하였듯이 'i. 품질 서류의 오류 및 유효성을 검토'는 I사분면에 속해있지만 IV사분면 과잉노력에 걸쳐 있다고 판단된다.

IPA 분석의 내용을 PDCA의 관점에서 조망하면, 계획단계의 업무들에 대하여 중요도를 매우 높게 인식하고 수행도도 높게 평가하고 있는 경향을 보인다. 즉, 항공정비 품질엔지니어들이 계획단계를 중요하게 판단하고 집중하고 있다는 것을 시사한다. 반대로

실행단계의 핵심업무들이 다른 단계의 핵심업무들에 비하여 중요도가 낮게 인식되고 있으면서 수행도도 낮게 평가되고 있음이 확인된다. 이는 항공정비 품질엔지니어들이 실행단계에 관심을 상대적으로 적게 보인다는 것을 의미한다. 이는 품질확보를 위한 실질적인 업무들에 상대적으로 적은 관심을 보인다는 우려를 동반하기도 한다.

4.2. 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도

핵심업무별 핵심역량의 활용도를 조사한 결과는 지면의 관계로 Appendix 1로 제공하였다.

각 핵심업무별로 가장 높은 활용도를 평가받은 핵심업무는 다음과 같다. 계획단계에 속한 'a. 항공정비 품질관리 매뉴얼 확인', 'b. 사내 정비 행위와 품질보증 절차 확인', 'c. 항공정비품질관리 보증계획 수립' 업무 모두 가장 활용도가 높은 핵심역량은 '1. 품질관리'이다. 계획단계에서는 구체적 사안에 대응하는 구체적 역량보다는 전체를 이해하려는 포괄적인 개념의 역량인 '1. 품질관리'의 활용이 높은 것이라는 당연한 결과로 판단된다.

수행단계의 'd. 항공기 정비작업 계획에 따라 검사 실시'는 당연히 '10. 검사(Inspection)'이고, 'e. 품질보증계획에 따른 품질보증 활동 실시'는 '1. 품질관리', 'f. 시정조치 유효성 검증 및 재시정조치 실시'는 '4. 품질보증'으로 나타났으며, 마지막으로 'g. 모니터링, 측정, 분석 및 평가를 통해 유효성 유지'에서 가장 높은 점수의 핵심역량은 '1. 품질관리'이다. 실행단계이기에 업무가 구체적이고 실질적이기에 필요한 역량도 그에 상응하는 역량인 것으로 판단된다.

다음으로 평가단계의 'h. 사내 품질시스템 유효성 검증을 위한 내부 심사 실시'에서 가장 많이 활용되는 핵심역량은 '18. 정직성/도덕성'인 것으로 나타났다. 내부 심사가 대상이기에 당연히 스스로의 정직성/도덕성이 필요하다고 판단한 것으로 보인다. 'i. 품질 서류의 오류 및 유효성을 검토'의 가장 높은 점수의 핵심역량은 '8. 항공기 정비'인 것이 조금 특이하지만, 평가를 위한 서류 검토를 위해서는 평가 대상

인 항공기에 대한 이해도가 높아야 한다고 판단한 것으로 유추된다. 평가단계의 마지막인 'j. 주기적인 사내 경영검토 실시'에서 가장 높게 활용되는 핵심역량은 18. 정직성/도덕성'과 '19. 의사결정'인 것으로 나타났으며, 경영진에게 의사결정 역량과 함께 정직성이 필요하다고 판단한 것으로 보인다.

항공정비 품질 엔지니어 핵심업무의 마지막 단계인 개선단계의 'k. 부적합 사항 및 결함 조사 실시'에서 '2. 리스크관리'가, '1. 부적합 사항의 근본 원인 분석'이 '18. 정직성/도덕성', 그리고 개선단계의 마

지막인 'm. 시정조치를 통한 품질시스템의 지속적 개선'은 '1. 품질관리'와 '16. 대인관계'의 핵심역량이 가장 높은 점수를 받았다. 시정조치에서 대인관계의 역량이 많이 활용되는 것은 시정조치를 취하는 과정에서 심사자와의 관계 및 상호 이해도 향상을 의미하는 것으로 판단되나, 동시에 심사자의 객관성 및 독립성 저하의 우려를 야기시키는 결과이기도 하다.

Table 6은 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무별 핵심역량의 활용도 우선순위를 핵심역량의 기술별로 정리한 것이며, 앞서 설명한 내용 역시 쉽게 파악할

Table 6. Priority of utilization of core competencies by core work

Stage	Core work	Rank	Core Competencies		
			Management Technology	Elemental Technology	Collaboration Technology
Plan	a	1 st	Quality Management	Creating Document	Honesty/Moral
		2 nd	Quality System Management	Collecting Information	Decision Making
	b	1 st	Quality Management	Language	Honesty/Moral
		2 nd	Quality System Management	Audit	Leadership
	c	1 st	Quality Management	Language	Honesty/Moral
		2 nd	Quality System Management	Creating Document	Decision Making
Do	d	1 st	Quality Assurance	Inspection	Communication
		2 nd	Quality System Management	Aircraft Maintenance	Interpersonal Relationship
	e	1 st	Quality Management	Language	Honesty/Moral
		2 nd	Quality System Management	Collecting Information	Teamwork
	f	1 st	Quality Assurance	Language	Problem Solving
		2 nd	Quality Management	Audit	Honesty/Moral
	g	1 st	Quality Management	Inspection	Honesty/Moral
		2 nd	Quality System Management	Aircraft Maintenance	Decision Making
	Check	h	1 st	Quality Management	Audit
2 nd			Quality System Management	Collecting Information	Communication
i		1 st	Quality Management	Aircraft Maintenance	Honesty/Moral
		2 nd	Quality Assurance	Inspection	Decision Making, Problem Solving
j		1 st	Quality System Management	Audit	Honesty/Moral
		2 nd	Risk Management	Creating Document	Decision Making
Action	k	1 st	Risk Management	Collecting Information	Honesty/Moral
		2 nd	Quality Management	Aircraft Maintenance	Interpersonal Relationship
	l	1 st	Risk Management	Inspection	Honesty/Moral
		2 nd	Quality Management	Aircraft Maintenance	Problem Solving
	m	1 st	Quality Management	Creating Document	Interpersonal Relationship
		2 nd	Quality System Management	Audit	Honesty/Moral

수 있도록, 가장 높은 활용도로 평가된 역량은 볼드체로 추가 표시하였다. 구체적으로, 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무 13개에 대하여 관리기술, 요소기술, 협업기술 각각에 대하여 활용도가 높은 핵심역량을 2개씩 표시한 것으로 종합해 보면 다음과 같은 특징을 확인할 수 있다.

관리기술에서는 ‘1. 품질관리’와 ‘3. 품질시스템관리’ 역량이 각각 11번과 9번으로 두드러지게 많이 활용되는 것으로 조사되었고, 그 외에 ‘4. 품질보증’과 ‘리스크관리’ 정도가 많이 활용되는 역량으로 조사되었다. 요소기술에서는 ‘11. 감사(Audit)’와 ‘8. 항공기 정비’ 역량이 각각 5번으로 가장 많았다. 그러나 이어서 ‘14. 정보수집’, ‘13. 문서작성’, ‘10. 검사’, ‘12. 어학’이 4번씩으로 조사되어, 전반적으로 다양한 역량들이 골고루 활용되고 있음을 알 수 있다. 협업기술에서는 ‘18. 정직성/도덕성’ 역량이 12번으로 압도적으로 높은 것으로 나타났다. 그 외에 ‘19. 의사결정’이 4번, ‘15. 의사소통’, ‘16. 대인관계’, ‘20. 문제해결’ 정도가 2번 정도로 확인되었다.

5. 결론

본 연구는 항공정비 품질엔지니어의 핵심업무를 도출하고, 도출된 업무들에 대하여 IPA 분석을 실시하였다. 그리고 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량이 실제 항공정비 업무에 어느 정도 활용되고 있는지를 조사하였다. 조사 결과 중 특징적인 내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 항공정비 품질 엔지니어는 중요하다고 판단하는 업무에 대하여 수행도를 높게 평가하는 경향이 있으며 이는 너무 당연한 결과일 것이다. 그러나, ‘i. 품질 서류의 오류 및 유효성 검토’와 ‘f. 시정조치 유효성 검증 및 재시정조치 실시’와 같이 인증심사와 관련된 업무들에 대해서는 중요도를 낮게 평가하지만 수행도는 상대적으로 높게 평가하고 있다. 이는 항공정비 품질엔지니어들이 인증심사를 준비하는 작업 자체는 정비업무로서 중요하다고 판단하지 않고 있지만, 인증을 준비하는 업무능력은 매우 향상되어

있음을 시사한다.

둘째, 계획단계의 업무들에 대하여 중요도와 수행도 모두 높게 평가하고 있는 경향을 보인다. 이는 항공정비 품질엔지니어들이 계획단계를 중요하게 판단하고 집중하고 있다는 것을 시사한다. 반대로 실행단계의 핵심업무들에 대해서는 중요도와 수행도가 다른 단계의 핵심업무들에 비하여 낮게 평가되고 있다. 이는 항공정비 품질엔지니어들이 실행단계에 관심을 상대적으로 적게 보인다는 것을 의미하며, 품질확보를 위한 실질적인 업무들에 상대적으로 적은 관심을 보인다는 우려가 엿보인다.

셋째, 항공정비 품질엔지니어들이 계획과 평가단계의 업무들에 대해서는 일정 수준의 역량을 확보하고 있으며, 실행단계의 ‘g. 모니터링, 측정, 분석 및 평가를 통해 유효성 유지’와 개선단계의 ‘k. 정비 중 발생된 부적합 사항 및 결함 조사 실시’가 우선적으로 역량향상을 해야 하는 업무로 조사되었다.

넷째, 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량 중 관리기술에서는 ‘1. 품질관리’와 ‘3. 품질시스템관리’ 역량이 그리고 협업기술에서는 ‘18. 정직성/도덕성’이 다른 역량에 비해 정비업무에서 두드러지게 많이 활용되고 있다. 그러나 요소기술에 속하는 역량들은 정비업무에 골고루 활용되고 있음을 확인하였다.

마지막으로, 협업기술에서는 ‘18. 정직성/도덕성’이 압도적으로 많이 활용되는 것으로 조사되었다. 그러나 동시에 ‘m. 시정조치를 통한 품질시스템의 지속적 개선’이라는 업무에서 ‘16. 대인관계’가 가장 많이 활용되는 것으로 조사되었으며, 이는 시정조치를 취하는 과정에서 심사자와의 관계 및 상호 이해도 향상을 의미하는 것으로 판단되나, 동시에 심사자의 객관성 및 독립성 저하를 우려하게 하는 상반되는 특징을 보였다.

물론 다음과 같은 한계점도 존재한다. 4.2절에서 소개하는 핵심업무에 대한 핵심역량의 활용도 조사 결과는 13개의 핵심업무와 21개의 핵심역량의 교차형 설문을 통해서 자료를 수집하였기에 기술통계적인 관점에서 정보를 얻기에는 한계가 존재한다. 또한 조사의 척도가 Likert 5점 척도이기에 모수적 분석

에도 제약이 존재한다. 따라서 본 연구의 결과를 기반으로 조금 더 정밀한 조사모형을 활용한 추후연구가 필요하다.

그럼에도 불구하고, 본 연구의 결과는 개념적으로만 인식하던 항공정비 품질엔지니어의 핵심역량과 핵심업무와의 관계를 실증조사를 통해 확인했다는 점에서 일차적인 가치가 있으며, IPA 분석을 통해 핵심업무의 중요도와 수행도 기반에 업무의 효율성 및 핵심역량의 활용도를 검증하였다는 점에서 이차적인 가치가 있다고 판단된다. 즉, 항공정비품질과 핵심업무 그리고 핵심역량의 연결고리가 완성되었다고 할 수 있다.

따라서 실무적으로는 Choi et al.[5]의 연구결과와 본 연구의 결과를 근거로, 항공정비품질에 직접적인 영향을 미치는 핵심역량과 그 활용도가 높은 핵심업무에 대한 교육 프로그램의 개발이 가능하고, 해당 프로그램의 계획 및 운영에 대한 평가 기준으로 활용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- 1 Park, S., & Jeong A., "A Study on improving Flight Safety of Military Aircraft based on Military Airworthiness Certification System and Case Study", *Journal of Defense Quality Society*, 3(2), pp. 57-63, 2021.
- 2 Kim, Y., Kim, M., & Park, S., "A Discussion on Airwothiness Certification Criteria and Case of Ice Protection for Military Rotorcraft", *Journal of Defense Quality Society*, 4(2), pp. 9-17, 2022.
- 3 Yoon, Y. H., "A New Paradigm for Aircraft MRO Industries", *The Journal of Aerospace Industry*, 75, pp. 1-24, 2012.
- 4 Choi, J. M., Yang, S. H., Hwang, Y. H., Son, I. S., On, Y. S., & Kim, Y. J., "Failure Data Analysis of J79 Engine Transfer Gearbox for Aircraft Maintenance Planning", *Transactions of the KSME*, A, 34(6), pp. 781-787, 2010.
- 5 Choi, B., Park, J. H., & Lee, S. C., "A Study on the Core Competency of Aircraft Maintenance Quality Engineer", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 46(2), pp. 47-56, 2023.
- 6 Lee, C.Y., and Park, J.H. "Incremental Analysis for Introduction of Advanced Robotic Laser Coating Removal System for Depainting of Fighter Jets", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 45(4), pp. 8-20, 2022.
- 7 Kim, K. W., & Lee, K. S., "Study on Leadership Core Competency Modeling of Civil Aviation Instructor Pilots -A Comparative Study of Importance and Performance-", *Journal of the Aviation Management Society of Korea*, 17(1), pp. 67-85, 2001.
- 8 Lee, D. H., "Study on the Competency Modeling and General Competencies of a Cabin Attendant", *International Journal of Tourism and Hospitality Research*, 20(2), pp. 335-350, 2006.
- 9 Choi, S. Y., "A Study on the work level evaluation for the core competency of aircraft maintenance crew", *Kyungnam University*, 2013.
- 10 Choi, S. Y., "A Study on the Improvement of the Maintenance Ability of Aircraft Mechanic Using Fuzzy Theory", *Graduate School of Kyungnam University*, 2015.
- 11 Lee, K. S. & Bae, Y. J., "A Study on the Construction Quality Engineer's Confidence a Priority using AHP", *Conference Proceedings of Korea Quality Congress in Fall*, pp. 163-190, 2017.
- 12 Kim, K. Y. & Lee, K. S., "Study on Leadership Core Competency Modeling of Civil Aviation Instructor Pilots: A Comparative Study of Importance and Performance", *Journal of the Aviation Management Society of Korea*, 17(1), pp. 67-85, 2019.
- 13 Flight Safety Regulations for Aeroplanes, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021.
- 14 Federal Aviation Regulation, Federal Aviation Administration, 2022.
- 15 KIAST Glossary, Korea Institute of Aviation Safety Technology, 2022.
- 16 S. J. Choi, "Research on selecting aircraft MRO companies", *Conference Proceedings of The Korean Society for Aviation and Aeronautics*, pp. 266-271, 2015.

- 17 McClelland, D. C., "Testing for competence rather than for Intelligence", *American Psychologist*, 28(1), pp. 1-14, 1973.
- 18 Spencer, L. M. & Spencer, S. M., *Competence at work models for superior performance*, John Wiley & Sons, New York, 2008.
- 19 White, R. W., "Motivation reconsidered: the concept of competence", *Psychological review*, 66(5), pp. 297-333, 1959.
- 20 Yun, C.-I., Kim, M.-S., Youn, S.-K., & Park, M.-J., "The Essential Characteristics and Dimensions of Competence as Human Ability", *Korean Journal of Educational Research*, 45(3), pp. 233-260, 2007.
- 21 Lee, Y. S., "Educational Needs Analysis of Newly Employed Elementary School Teachers to Improve Their Job Competences", *The Journal of Korean Teacher Education*, 34(3), pp. 53-80, 2017.
- 22 Parry, S. B., "The quest for competencies", *Training*, 33(7), pp. 48-56, 1996.
- 23 Lee, S. J & Byun, J.-H., "Comparison of Quality Standards and Evolutionary Direction", *Journal of Korean Society for Quality Management*, 32(3), pp. 126-140, 2004.
- 24 SAE AS9100D: Aerospace Quality Systems Revision D, SAE International, 2016.
- 25 Patel, P. M., & Deshpande, V. A., "Application of plan-do-check-act cycle for quality and productivity improvement-A review", *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5(1), pp. 197-201, 2017.
- 26 Isniah, S., Purba, H. H., & Debora, F., "Plan do check action (PDCA) method: literature review and research issues", *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, 4(1), pp. 72-81, 2020.
- 27 Kim, M., Lee, T., & Kim, S.-Y., "A Study on the Importance of Non-face-to-face Lecture Properties and Performance Satisfaction Analysis AHP and IPA: Focusing on Comparative Analysis of Professors and Students", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 44(3), pp. 176-191, 2021.

Appendix 1. Results of the analysis of the utilization of core competencies by core work

Area	Core competency	Core works														
		Plan			Do			Check			Action					
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m		
Management technology	1. Quality Management	4.14	4.04	3.85	3.61	4.04	3.66	3.81	3.71	3.90	3.33	3.85	3.81	4.00		
	2. Risk Management	3.76	3.71	3.52	3.66	3.81	3.57	3.61	3.66	3.57	3.34	4.00	3.85	3.85		
	3. Quality System Management	3.90	3.90	3.81	3.66	3.81	3.66	3.71	3.71	3.42	3.38	3.76	3.71	3.95		
	4. Quality Assurance	3.81	3.85	3.52	3.95	3.66	3.81	3.61	3.42	3.76	3.23	3.85	3.57	3.71		
	5. Safety Management	3.71	3.42	3.38	3.66	3.47	3.52	3.52	3.42	3.33	3.28	3.71	3.42	3.71		
	6. Qualification Management	3.42	3.57	3.19	3.19	3.38	3.52	3.04	3.04	3.23	3.00	3.19	3.28	3.38		
	7. Education Management	3.09	3.33	3.33	3.42	3.42	3.42	3.23	3.09	3.19	3.04	3.09	3.28	3.33		
	8. Aircraft Maintenance	3.71	3.81	3.47	4.00	3.71	3.33	3.61	3.42	3.95	3.28	3.85	3.85	3.71		
	9. Domestic/INT'L Law	3.66	3.57	3.47	3.47	3.57	3.57	3.42	3.33	3.42	3.19	3.47	3.61	3.52		
Elemental technology	10. Inspection	3.42	3.71	3.57	4.04	3.52	3.76	3.76	3.66	3.81	3.23	3.81	3.85	3.76		
	11. Audit	3.52	3.81	3.52	3.28	3.71	3.76	3.28	3.71	3.61	3.38	3.66	3.71	3.76		
	12. Language	3.66	3.90	3.76	3.95	3.81	3.90	3.52	3.47	3.57	3.23	3.71	3.76	3.71		
	13. Creating Document	3.76	3.66	3.66	3.42	3.66	3.61	3.47	3.57	3.81	3.38	3.66	3.66	3.85		
	14. Collecting Information	3.76	3.71	3.52	3.52	3.76	3.66	3.52	3.71	3.47	3.33	3.90	3.61	3.71		
	15. Communication	3.61	3.57	3.57	3.90	3.71	3.57	3.33	3.81	3.47	3.42	3.95	3.61	3.76		
	16. Interpersonal Relationship	3.66	3.66	3.61	3.85	3.66	3.61	3.28	3.76	3.52	3.33	3.81	3.66	4.00		
	17. Leadership	3.28	3.71	3.33	3.47	3.38	3.61	3.33	3.47	3.42	3.19	3.47	3.47	3.57		
	18. Honesty/Moral	3.76	3.90	3.71	3.81	3.85	3.71	3.76	3.85	3.90	3.47	3.81	3.90	3.90		
Collaborative technology	19. Decision Making	3.76	3.66	3.66	3.57	3.61	3.66	3.76	3.76	3.66	3.47	3.71	3.71	3.66		
	20. Problem Solving	3.71	3.61	3.54	3.61	3.47	3.81	3.66	3.76	3.66	3.42	3.66	3.81	3.95		
	21. Teamwork	3.61	3.66	3.59	3.61	3.76	3.61	3.57	3.57	3.52	3.38	3.47	3.76	3.33		

함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소 도출연구

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

Derivation of Quality Management Factors for Naval-Weapon System Research and Development Stages

권정국, Jeongguk Kwon

국방기술품질원, 함정센터, 연구원
Researcher, Naval Sea Systems, Defense Agency for Technology and Quality

이동현, Donghyun Lee

국방기술품질원, 대군기술지원실, 연구원
Researcher, Department of Military Field Quality Support, Defense Agency for Technology and Quality

김준우, Jonwoo Kim

국방기술품질원, 함정센터, 선임연구원
Senior Researcher, Naval Sea Systems, Defense Agency for Technology and Quality

이관우, Kwanwoo Lee

국방기술품질원, 함정센터, 책임연구원
Principal Researcher, Naval Sea Systems, Defense Agency for Technology and Quality

김기훈†, Kihun Kim

부산대학교, 산업공학과, 조교수
Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Pusan National University

Abstract

To address the dearth of studies pertaining to quality management factors in the R&D phase of naval weapon systems, this study investigates and analyzes quality management factors in the civilian sector to derive three pertinent factors for the R&D of naval weapon systems. An empirical analysis based on the reflection rates of technical review opinions from a pilot project validates these factors. Additionally, suggestions for improvement and development plans for each factor are provided based on empirical cases following the definition of quality management factors.

keywords : Quality Management Factor, Naval weapons systems, Quality management, Comparative study, Empirical evidence

† Corresponding Author : Kihun Kim

Tel : +82-051-510-2336, email : kihun@pusan.ac.kr

Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, Republic of Korea

Received April 12th. 2024 Revised May 6th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

함정 무기체계는 기관, 통신, 전투체계 등과 관련된 다수의 탑재장비가 상호운용적으로 통합 연동된 복합무기체계이며 연구개발단계에서 시제품인 선도함이 시험평가 이후 곧바로 군에 인도되어 함 수명 주기 동안 운용되는 특성을 가지고 있다. 이와 같은 특성 때문에 함정 무기체계는 연구개발단계의 완성성을 추구하고, 장기간의 사업기간 및 무기체계의 복잡성으로부터 기인한 사업 위험성을 해소할 수 있도록 체계적인 연구개발이 수행되어야 하며 이와 상응한 전문적인 품질관리가 필수적이다. 기존에는 해군 조함단의 함정기술처 및 감독관실에서 함정 무기체계의 획득을 주관하며 연구개발단계 설계 적합성을 검증하였으나, 방위사업청 개청 이후 함정 무기체계 연구개발단계의 사업관리, 형상관리 등의 업무가 각 군에서 방위사업청으로 이관됨에 따라 함정 무기체계 또한 획득 업무가 해군 조함단에서 방위사업청으로 이관되었다. 그러나 신규 건조되는 함정 무기체계 연구개발사업 수의 증가 대비 방위사업청 사업 수행 인력은 역으로 감소하여 사업의 위험도가 증가하였으며 또한 종합군수지원, 관급 무기체계 획득 등 해군 군참부 및 해군본부에서 수행하던 업무까지 이관됨에 따라, 기존 조함단 업무 대비 업무량이 증가하게 되었다. 이러한 문제에 따라 방위사업청은 연구개발단계 설계 적합성 검토, 형상관리, 생산관리 등의 업무를 면밀하게 검토하기 어려운 실정이다 보니 체계공학 기반 요구조건 추적 수준의 계약 요구조건 만족 여부에 집중할 수밖에 없었다. 이러한 시기와 맞물려, 차기 고속정 OOO의 디젤엔진 실린더 헤드 균열, OOO급 잠수함의 추진전동기 고장, 차기 호위함 CPP(Controllable Pitch Propeller) 누유, 추진전동기 오작동 등 추진계통 주요 장비 문제가 발생하였고, 품질문제 발생의 주요 원인을 분석한 결과, 연구개발단계에서 장비선정 및 설계 적합성 기술검토 미흡에 기인하여 양산단계까지 품질문제가 전이되는 사항을 확인하였으며 이에 따라 연구개발단계 품질관리의 중요성이 언급되었다[1].

이에 따라, 방위사업청은 함정 무기체계 연구개발 단계의 전문적인 품질관리 필요성을 느끼고 2020년 방위사업법 시행령을 함정 무기체계의 경우 양산단계 품질보증을 수행하던 국방기술품질원이 연구개발 단계에서부터 품질보증 업무를 수행토록 개정하였으며, 국방기술품질원의 의견을 수렴하여 2023년 하위 훈령인 방위사업관리규정 및 방위사업 품질관리 규정을 Table 1에 제시된 업무를 수행토록 개정하였다.

Table 1. Research and Development Tasks of DTaQ*

R&D Stage (Naval ship)	Contents
Basic Design	Assessment of System Requirements Interoperability by ROC*, ORD*, SSDD*
	Review the Basic Design Plan and Action Plan
	Review of design documents
	Review of equipment RFP*
Detailed Design	Review the Detailed Design Plan and Action Plan
	Review of design documents
	Technical data review of equipment manufacturing specifications

* DTaQ: Defense agency for Technology and Quality

* ROC: Required Operational Capability

* ORD: Operational Requirements Document

* SSDD: System Subsystem Design Description

* RFP: Request for Proposal

개정 이후 기본설계 사업 O건, 상세설계 및 선도함 건조 사업 O건이 시범대상 사업으로 선정되어 국방기술품질원이 연구개발단계 품질보증을 수행 중이다. 그러나 부여된 업무의 효과성을 확인하고 세부 품질관리 요소 도출을 위한 연구가 부재하여 이와 관련된 연구가 필요한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 함정 무기체계의 연구개발단계에서의 품질관리 요소 도출을 위하여 민간분야의 연구개발단계 품질관리 요소를 식별하고 이를

활용하여 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소를 도출하고 현재 수행 중인 시범대상 사업의 실증사례를 들어 효과성을 검증하며 보완사항 및 발전 방향을 제시한다.

2. 연구개발단계 품질요소 관련 연구

본 절에서는 함정 무기체계 연구개발단계 품질요소를 도출하기 위해 함정 무기체계의 연구개발단계를 서술하고 이에 상응한 민수분야 연구개발단계 품질요소 관련 연구 및 문헌을 조사하고 분석하여 민수분야의 연구개발단계 품질관리 요소를 정의하고자 한다.

2.1. 연구개발단계 정의

연구개발단계란 국방과학기술용어사전에 정의된 바에 의하면 무기체계의 경우 탐색 개발, 체계 개발 단계로 구분됨을 의미한다[2]. 함정 무기체계의 경우 방위사업법 시행령(2023.08.)에 따르면 연구개발단계란 일반 무기체계의 탐색 개발에 해당하는 기본설계, 체계 개발에 해당하는 상세설계 및 선도함 건조로 구분할 수 있다. 그러나 하위 훈령인 방위사업관리규정(2024.03.)상에는 함정 무기체계 연구개발은 기본설계단계, 상세설계 및 선도함 건조단계, 후속함 건조단계까지 포함하여 구분하고 있기에, 본 논문에서는 연구의 목적과 범위를 명확화하기 위하여 Figure 1과 같이 함정 무기체계의 연구개발단계를 기본설계, 상세설계 및 선도함 건조단계인 설계단계로 한정하여 서술한다.

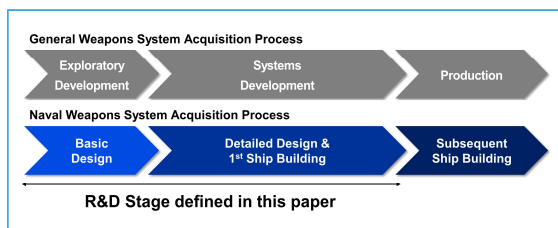


Figure 1. Naval Ship R&D Stage

2.2. 민수분야 연구개발단계 품질요소

본 논문에 정의한 바와 같이 연구개발단계는 설계 단계를 의미하며 민수분야의 설계단계 품질요소를 조사 및 분석한 결과는 다음과 같다.

Zairi는 설계품질은 고객의 요구조건이 제품 또는 서비스 설계 간 지속해서 달성되는 사항으로 정의하였으며[3], Flynn et al.은 설계품질은 제품이 당연히 만족해야 하는 기능적·성능적 특성과 내구성 등의 신뢰성 요구사항이 명확히 식별됨을 확인하는 것임을 제시하였다[4]. Barrie의 경우 제품 및 서비스의 설계가 목적을 달성하는 일련된 과정을 거친 결과와 개발 과정에서 고객의 요구사항을 정확하게 이해하고 만족시킬 뿐만 아니라 미래의 요구사항까지 충족시키는 것을 설계품질이라 언급하였으며[5], Oakland는 제품 또는 서비스가 합의된 요구사항을 달성하기 위해 얼마나 잘 관리되었는지 측정하는 지표를 설계품질의 정량적 요소라 정의하였고[6], Meirovich가 정의한 설계품질은 기본적으로 고객의 요구사항과 제품의 성능 적합성을 확인하는 것을 나타내며, 아울러 제품의 내부 속성뿐만 아니라 외부 요소와의 상호작용이 반영되어야 함을 나타내고 있다. 이는 제품의 성능이 동일한 상태에서 고객의 요구사항과 기대치가 진화하는 데에서 발생하는 간극이 설계품을 저하시킬 수 있음을 나타낸다. 즉 진화하고 구체화되는 고객의 요구를 분석하여 제품 개발 간 동일한 속도로 제품의 성능을 향상시킬 수 있도록 설계하는 것이 제품의 잠재적 설계품질이라 정의하고 있다[7]. 그리고 Naidu et al.은 설계품질이 고객에 적합한 요구사항이 무엇인지 식별하고, 식별된 요구사항에 책임을 지고 이를 충실히 구현하여 고객의 요구사항을 충족시킬 수 있는 명세로의 변환 활동의 합성이라 정의하고 있으며[8], Mandal은 설계품질이 고객의 요구사항 및 인식에 대한 시장조사에서 얻은 적절한 제품의 특징 및 사양에 중점을 두고 두 차원 간의 적합성이 설계품질이라 정의하고 있다[9]. Chong & Chun의 경우 제품의 개발과정 중에 가장 궁극적인 목표는 고객의 요구사항을 충족 또는

Table 2. Definition of Quality of Design

Author or Documents	Contents & Keyword
M. Zairi (1991)	<p>“QoD(Quality of Design) as the degree of achievement of purpose by the design itself that starts with market research, sales input analysis and continues to the development of the product/service concept which would satisfy the customer.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity
Flynn, B. B. (1994)	<p>“A second aspect of product design for quality is reliability engineering, which helps to achieve low failure rates, even with relatively broad product lines and rapidly changing designs. It is related to the performance dimensions of conformance, reliability and durability.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Product Specifications(Essential)
Barrie G. Dale (2003)	<p>“Quality of design: the degree to which the design of the product and service achieves its purpose.” “Satisfying customer expectations and understanding their needs and future requirements”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity / Evolving Requirements
John S. Oakland (2003)	<p>“Quality of Design is defined as a measure of how well the product or service is designed to achieve the agreed requirements. It further elaborates that QoD is also about the activities of design and development.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity
Meirovich (2006)	<p>“suitability of product features to customer requirements“ “not only the internal attributes of the product but also its interaction with external factors should be taken into account. The level of product features should be analyzed based on the evolving nature of consumer demands over time in alignment with the extent of customer requirements”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity / Evolving Requirements
N. V. R. Naidu, K. M. Babu, G. Rajendra (2006)	<p>“Identification of what constitutes fitness for use to the user.” “Choice of concept of product or service to be responsible to the identified needs of the user.” “Translation of the chosen product concept into a detailed set of specifications which is faithfully executed, will then meet the user’s need.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity / Product Specifications(Essential)
S. K. Mandal (2007)	<p>“Quality of conference to design is the extent to which the product or service achieves the design. QoD should focus on appropriate product features and design specification, which are obtained from market research on customers, their requirements and perceptions.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Product Specifications(Essential)
Yjh Tng Chong, Chun-Hsien Chen (2009)	<p>“Meeting or exceeding customer requirements to increase customer satisfaction is the ultimate target of total quality management, recognizing that customer needs evolve over time and must also be satisfied accordingly.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity / Evolving Requirements
Charantimath P. M. (2011)	<p>QoD (Quality of Design) is based on market research to identify product quality characteristics. The main goal is to develop products and services that meet customer needs within a specified cost. Consumer research identifies both current and future customer needs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Evolving Requirements / Product Specifications(Essential)
Mundra (2014)	<p>“Quality of Design (QoD) is a measure of how well the product or service is designed to achieve the desired requirements.”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity
ISO 9001 (2015)	<p>“Satisfaction of Essential Product Characteristics for Meeting Requirements and Intended Purposes”</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyword: Requirement Connectivity / Product Specifications(Essential)

넘어서는 것이 품질관리의 기본적인 목표라 서술하였으며 더 나아가 현재는 기술의 급격한 발전과 경쟁의 증가, 정보와 소비 트렌드의 신속한 전파로 인하여 고객이 정보로 노출되는 정도가 증가함에 따라 고객의 요구사항은 급격히 빠르게 진화하고 있으며 이러한 진화적 요구사항을 충족시키는 것이 품질관리의 중요한 요소임을 강조하였다[10]. Charantimath의 경우 설계품질이란 고객 요구사항 이전에 제품의 기본적인 특성을 파악하여야 하며 고객의 요구사항은 현재와 미래 모두를 파악하여 충족할 수 있도록 하는 것이라 정의하였다[11]. Ankesh의 연구결과에 따르면, 제품이나 서비스가 요구사항에 얼마나 맞게 설계되었는지 측정하는 것이라 정의하며[12], 아울러, ISO 9001(2015) Quality Management system – Requirements에서도 설계품질과 관련된 정의를 간접적으로 유추할 수 있는데, ISO Documents의 8.3.5. 설계와 개발의 출력 간의 관계에서 요구사항의 충족과 의도된 목적에 필수적인 제품의 특성 만족 여부를 확인하는 것이 설계품질이라 정의하고 있다.

설계품질과 관련된 연구 및 문헌조사 자료를 분석한 결과를 통해 요구사항 만족이라는 공통된 목표를 확인할 수 있다. 또한, 설계 품질을 충족하기 위하여 세부적인 품질요소들을 범주화하였을 때 Figure 2와 Table 3과 같이 첫 번째, 개발과정 간의 요구사항이 연계될 수 있도록 추적하는 연계성 충족요소 두 번째, 고객의 진화하는 요구사항 충족요소 세 번째, 고객이 요구하지 않더라도 제품 또는 서비스의 당연한 본연적 성질 충족요소와 같은 세 가지의 요소를 품질요소로 식별하고 관리대상으로 범주화할 수 있다.

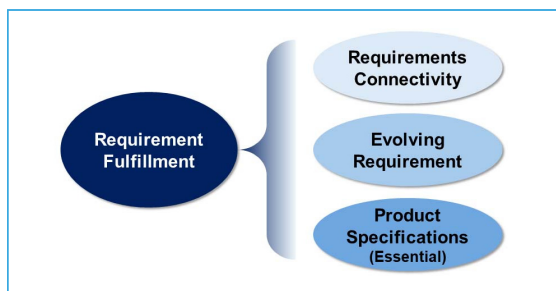


Figure 2. Quality of Design detailed elements

Table 3. Classification of Quality of Design Elements

Quality of Design Elements	Authors or Documents
Requirements Connectivity	M.Zairi(1991), B. G. Dale(2003), John S. Oakland(2003), Meirovich(2006), Naidu(2006), Chong(2009), Mundra(2014), ISO 9001(2015)
Evolving Requirement	B. G. Dale(2003), Meirovich(2006), Chong(2009), Charantimath P. M(2011)
Product Specifications (Essential)	Flynn, B. B(1994), Naidu(2006), S.K. Mandal(2007), Charantimath P. M.(2011), ISO 9001(2015)

2.2.1. 개발과정 요구사항 연계성 충족

첫 번째 설계단계 품질요소는 개발과정 간 요구사항 연계성 충족사항이다. 즉 고객의 요구사항이 제품설계 단계 초기에 식별되고 요구사항이 구체화되어 개발되는 과정에서 요구사항이 누락되거나 의미가 왜곡되지 않도록 연계성을 추적 관리하고 충족됨을 확인하여야 한다. 복잡한 체계의 제품 또는 서비스의 경우 요구사항이 적게는 수십 가지 많게는 수백 가지에 이르러 요구사항 만족이라는 목적을 달성하는 데 있어 많은 리스크가 존재하기에, 민수분야에서는 체계공학 활동을 통해 해당 리스크를 완화하고 있으며, 효과성은 이미 충분히 검증되었다 [13-17]. 이처럼 고객 요구사항이 누락되지 않고 연계되어 최종 제품 또는 서비스에 충족될 수 있도록 확인하여야 하는 요구사항 연계성 충족은 설계품질 관리 요소이다.

2.2.2. 진화적 요구사항 충족

두 번째 설계단계 품질요소는 진화적 요구사항 충족이다. 고객의 요구사항이 제품설계 초기 단계에 식별되어 이에 따라 연구개발이 진행되는 중에 유사군 제품 또는 서비스의 기술발전, 이전 모델에서 발생한 품질문제 개선사항 등의 새로운 정보에 고객은 노출

되며 제품 또는 서비스의 설계 초기 단계 요구사항과 기대치가 진화할 수 있다는 점을 고려하는 것이다. 이러한 진화적 요구사항이 설계단계에 고려되지 않는다면 고객이 제품 또는 서비스를 실제로 사용할 시점에 고객의 요구사항과 계획된 성능 또는 기능 간의 품질 간극이 Figure 3과 같이 발생하며 이로 인해 품질만족도가 저하될 수 있다. 이에 따라 진화적 요구사항 충족은 설계품질의 요소로 관리되어야 한다.

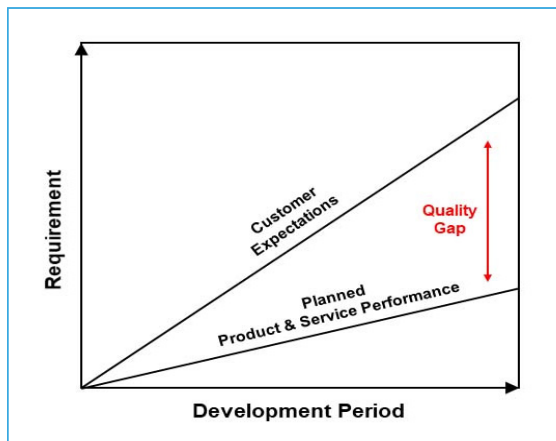


Figure 3. The Gap in Design Quality According to Evolving Requirements

2.2.3. 제품 또는 서비스의 본연적 성질 충족

세 번째 설계단계 품질요소는 제품 또는 서비스의 본연적 성질 충족이다. 이는 고객이 기대하는 제품 또는 서비스가 당연히 갖춰야 할 기능이나 성능들이 별도로 요구하지 않더라도 만족할 수 있도록 제품 또는 서비스를 설계하여야 함을 의미한다. 즉, 고객의 요구사항에 반영되어 있지 않더라도 제품 또는 서비스의 당연한 성질로써 설계 기준서, 지침서, 표준서 등을 통해 정의되어 있는 것이 일반적이다. 아울러, 2.2.2절에서 기술한 진화적 요구사항이 시간의 흐름에 따라 당연한 성질로 인식되는 경우 본연적 성질에 추가 또는 수정되므로 지속해서 관리되어야 할 설계품질의 요소이다.

3. 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소

본 절에서는 국방분야 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소를 도출하기 위하여 앞서 정의된 민수분야 연구개발단계 품질관리 요소를 기준으로 함정 무기체계 환경을 분석하여 적합한 품질관리 요소를 Figure 4와 같이 도출하였으며 시범 대상사업의 실증사례를 통해 요소의 효용성을 검증하고 보완사항을 식별하여 발전 방향을 제시하였다.

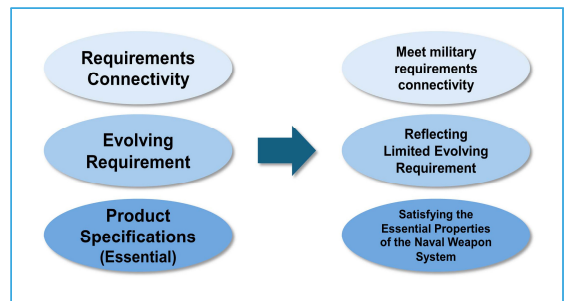


Figure 4. Quality of Design factor (Left: Civilian Sector/ Right: Defense Sector)

3.1. 군 요구사항 연계성 충족

첫 번째, 개발과정 요구사항 연계성 충족 사항이다. 민수분야에서 개발과정 요구사항 연계성 충족여부를 관리하고 점검하기 위하여 체계공학 활동을 수행하고 QFD(Quality Function Deployment) 등의 방법론을 활용하여 고객의 요구사항을 제품 또는 서비스에 구현한다. 이와 마찬가지로 국방분야 함정 무기체계에서도 군의 요구사항을 만족시키기 위하여 체계공학 기반 사업관리를 통해 군의 최초 요구조건인 작전운용성능(ROC), 운용요구서(ORD) 등과 같은 상위요구조건이 연구개발단계를 거치면서 설계 산출물인 도면 및 보고서에 정확히 연계될 수 있도록 수행 중이며, 효과적인 사업관리를 위하여 함정 사업의 특수성을 반영한 체계공학 개선방향 등 관련 선행연구도 존재한다[18-19].

이에 따라 함정 무기체계의 연구개발단계 품질관리 요소는 Figure 5와 같이 상위 요구사항이 개발과정 흐름에 따라 연계됨을 확인하는 수평적 검토와 각 시점에서 요구사항별 충돌 여부를 확인하고 설계요인이 변경될 시 다른 체계의 요구사항과의 간섭 또는 충돌을 확인하고 연계하는 수직적 검토 활동을 통해 설계품질을 확보하는 것을 의미한다.

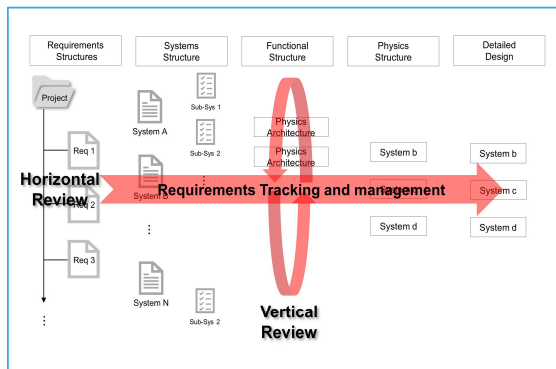


Figure 5. Concept of Meet Military Requirements connectivity

3.2. 제한적인 진화적 요구사항 충족

두 번째, 진화적 요구사항 충족의 경우 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소로 적용하였을 때 군의 요구사항이 신기술의 등장, 실적함정 또는 유사함정에 발생한 품질문제 개선사항, 성능개량 사항 등에 대한 정보인지에 따라 진화되는 사항을 반영하는 것을 의미한다. 하지만 국방분야에서 진화적 요구사항을 반영하는 것은 쉽지 않은 사항이다. 국방 전력발전업무훈령(2023.09.)에 따르면 소요기획 단계에서 나선형 또는 점증형 형태의 진화적 요구사항을 적용한 획득전략을 우선 고려하도록 명시하고 있지만 선정대상 평가항목지표 등 과학적 절차가 부재하여 소요기획 단계에서 진화적 요구사항 반영 대상 사업을 선정하기 쉽지 않고[20-21], 이미 단일 작전 운용성능(ROC)이 적용된 사업을 설계단계에서 수정 반영하는 과정은 제도적 근거는 마련되어 있지만 요구조건을 수정하는 행위는 이해관계당사자인

연구개발주관기관 봐주기 등으로 해석될 수 있기에 진화적 요구사항을 제대로 적용한 사업은 거의 전무하다[22].

이에 따라, 국방분야 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소에서는 제한적인 진화적 요구사항 충족을 설계품질 요소로 정의한다. 즉, 상위요구조건의 범위 내에서 유사함정, 실적함정의 고장이력 등 수십 년간 축적한 품질문제 데이터와 같은 시기 연구개발 사업이 진행되는 타 함정사업에서 선제적으로 발생한 품질이슈 등에 대한 데이터를 설계단계에 지속적으로 반영하여 군의 요구사항을 구체화하는 등 민수분야와 같이 고객이 선도되어 요구사항을 진화시키는 것이 아니라 품질관리를 수행하는 자가 선도되어 과거 또는 현재 데이터를 기반으로 요구사항을 진화시키는 개념의 설계품질을 확보하는 것을 의미한다.

3.3. 함정 무기체계의 본연적 성질 충족

제품 또는 서비스의 본연적 성질 충족요소의 경우 함정 무기체계의 본연적 성질 충족요소로 해석할 수 있다. 즉, 함정이 당연히 갖춰야 할 기본성능인 파랑의 저항에 따른 선박의 복원성, 침로 안정성, 변침성능, 선회성능, 정지성능 등을 의미하는 조종 또는 기동성능, 그리고 이러한 개념을 종합하는 내항성능 등의 만족성을 확인하는 것을 의미한다. 이를 통해 군의 상위요구조건인 작전운용성능, 운용요구서 등에 별도로 구체적으로 제시되지 않더라도 반드시 만족해야 할 사항을 점검하고 관리하는 요소를 의미하며, 이는 보통 해군의 함정 설계/건조 기준서와 국제선급 규칙, 체계별 선행연구 문헌 등을 참조하여 함정 무기체계의 본연적 성질을 충족하도록 기술을 검토하고 검토 의견을 설계 산출물이 연구개발 주관기관으로부터 제출되는 시기인 기술 검토 단계에서 제시하여 설계품질을 높이는 것을 나타낸다.

3.4. 시범 대상사업 실증사례 분석

현재 국방기술품질원의 시범 대상사업 연구개발 단계 품질보증 절차는 방위사업청이 수립한 기본/상세설계 기본계획서 및 연구개발주관기관이 작성한 기본/상세설계 실행계획서를 검토하고 계약문서 검토 이후 연구개발주관기관의 품질보증계획서를 제출 받아 위험식별 및 평가를 수행한 다음 정부 품질보증계획서를 수립한다. 해당 시기는 대개 계약 이후 3개월 이내 수행되며 이후에는 설계단계가 진행됨에 따라 기본설계 단계에서는 체계공학 활동을 기반으로 체계요구조건 검토, 연계성 검토, 체계기능 검토, 설계 산출물(보고서, 사양서, 도면 등) 검토, 장비 제안요청서 검토 등의 기술검토가 수행되며, 상세설계 단계에서는 설계연계표 검토, 설계 산출물(제작규격, 계통도, 배치도 등) 검토 등이 수행된다. 세부절차는 아래 Figure 6과 같다.

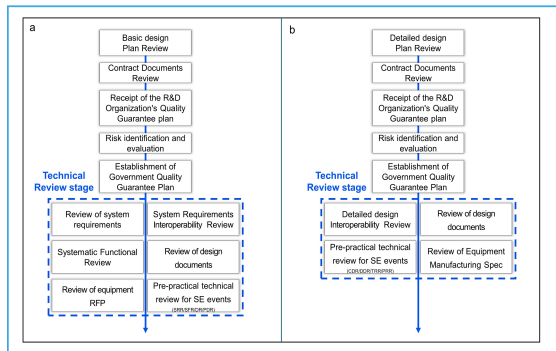


Figure 6. R&D stage procedure (a)Basic Design, (b) Detailed Design

방위사업법 시행령 및 하위규정 개정 이후 함정 무기체계 연구개발단계 기술문건의 정부 검토비중이 6~7%에서 시범 대상사업의 경우 83~88%까지 확대되었으며, 국방기술품질원의 약 12개월간 검토 의견은 3,400여 건, 반영 의견은 2,800여 건으로 반영률은 82%에 이르고 Figure 7에 나타난 바와 같이 연구개발단계에 참여한 기관의 총 검토 의견 중 79.7%를 차지하고 있다.

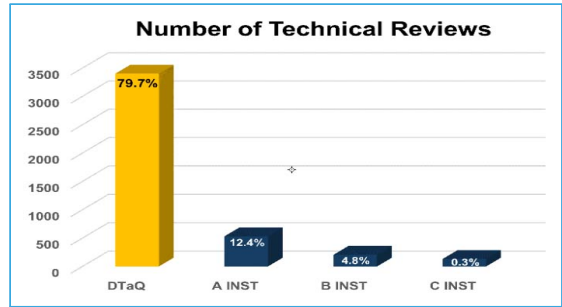


Figure 7. Number of technical reviews by related organizations

국방기술품질원의 검토 의견에서 본 연구에서 식별한 품질관리 요소별 비중 및 반영률은 Figure 8과 같으며, 요소별 의견의 예시는 Table 4와 같다.

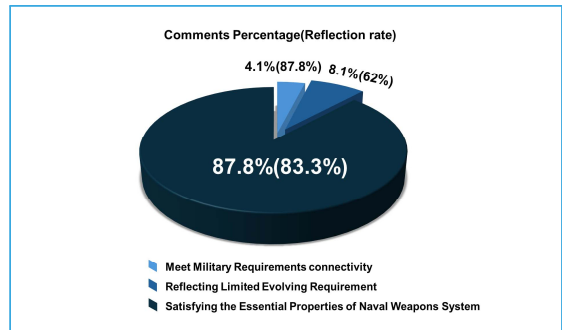


Figure 8. Comments Percentage & Reflection rate of Quality Management Factors

Table 4. Example of Comments

Category	Comments
Meet Military Requirements connectivity	“The change in the design factor is currently in conflict with other system-level requirements, please correct it.”
Reflecting Limited Evolving Requirement	“Other Naval Ship have encountered OOO issues related to the OOO Propulsion system, and the cause is OOO, so please take measures to prevent such problems from occurring in the current design”
Satisfying the Essential Properties of Naval Weapons System	“The current propulsion system arrangement is expected to be OOO. Change the layout to reduce OOO and OOO”

첫 번째 요소인 군 요구사항 연계성 충족 여부 검토와 관련된 의견은 4.1%의 비중을 차지하고 있으며, 두 번째 요소인 제한적인 진화적 요구사항 반영 검토 의견은 8.1%의 비중을, 세 번째 요소인 함정 무기체계의 본연적 성질 충족 여부 검토 의견은 87.8%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다.

세 가지의 품질관리 요소 중 첫 번째, 군 요구사항 연계성 충족 여부 확인 비중이 상대적으로 낮은 사유는 기술검토 의견에서 제시되기보다 SRR(System Requirements Review), SFR(System Functional Review), PDR(Preliminary Design Review), CDR(Critical Design Review), DDR(Design Decision Review) 등의 체계공학 활동 실무 검토 회의 시 주로 언급되는 사항이고, 무엇보다도 요구 조건관리의 중요도는 방위사업청, 연구개발주관기관 등 가장 최우선적인 사항이므로 해당 사항의 설계품질 미흡 정도는 낮은 편이다. 하지만, 해당 품질 요소로 분류된 검토 의견의 반영률은 약 94%로 대부분의 의견이 반영되어 가장 높은 효과성을 보인다. 이에 대한 사유로는 앞서 서술한 바와 같이, 요구조건 연계의 중요성 때문에 해당 사항의 문제는 사업 위험 영향 가중치가 가장 높기 때문에 요구조건 누락, 충돌 등의 의견이 제시될 경우 대거 반영되기 때문이다. 즉, 해당 품질요소에 기반한 기술 검토 의견은 설계품질에 중요한 영향을 미치며 이는 곧 설계품질 관리요소로 다루어져야 할 대상임을 시사한다.

두 번째, 제한적인 진화적 요구사항 반영 비중이 낮은 사유로는 우선 국방기술품질원이 보유하고 있는 데이터 품질의 문제점에 기인한다. 현재 해군의 함정을 건조하는 모든 조선소와 연구개발, 양산과정을 수행하며 합의 설계부터 운용유지단계까지 단일 조직에서 업무를 수행하는 기관은 국방기술품질원이 유일하다. 이는 곧 합의 전순기 품질 데이터를 보유하고 활용할 수 있음을 예상할 수 있다. 그러나 이러한 데이터를 활용한 품질관리 요소인 제한적인 진화적 요구사항 반영으로 분류된 검토의견의 반영률은 약 62%를 나타내는데, 이는 합의 전 순기에 관

여하고 있다는 국방기술품질원의 강점을 효율적으로 활용하지 못하고 있음을 시사한다. 이에 대한 사유는 첫 번째, 데이터 품질의 문제다. 해당 품질요소는 실적함, 유사함의 품질문제가 기록된 데이터에 기반한 기술검토 의견이 성능 보완적, 개선적 성격을 띄며 제시되어 설계품질을 확보하는 것이지만, 해당 데이터가 정확하게 어느 장비에서 어떤 원인으로 발생하였다는 사실이 분류되지 않은 모호한 상태의 데이터로 축적되어 있는 상태에서 활용되다 보니 개발과정에 있는 본 합의 실적과 맞지 않아 반영이 어려운 현실이다. 두 번째 사유는 앞서 서술하였듯, 해당 품질요소에 따른 기술검토 의견이 합의 성능을 위한 성능 보완적, 개선적 의견이나 본 합의 최상위 요구조건 범위 내에서 유효하다. 즉, 요구조건 범위를 벗어나는 의견의 경우 연구개발주관기관의 판단에 따라 반영 여부를 결정하기 때문이다. 그러나 해당 업무는 상기 환경분석 결과에 따라 국방기술품질원이 가장 효율적으로 수행할 수 있고, 동일 품질문제 재발생 방지 측면과 축적된 데이터를 기반으로 함정 무기체계의 설계품질을 진화적으로 성장시킬 수 있다는 점을 고려하면, 반드시 관리되어야 할 품질관리 요소이다. 이에 따라 설계품질을 제고하기 위해서는 데이터 품질 개선을 위한 후속 연구가 필요하다.

세 번째, 함정 무기체계의 본연적 성질 충족요소에 기반한 기술검토 의견은 총 기술검토 의견의 87.8%를 차지하고 있고, 해당 품질요소로 분류된 검토 의견의 반영률은 83.3%로 효과성은 기대치 대비 높은 성과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이는 주로 공학 분야의 기술 검토내용으로 함정의 본연적 성능을 만족시키기 위한 사항이다. 해당 요소가 전체 검토 의견의 주를 차지하고 있으며, 반영률이 83.3%에 해당하는 것은 현재 개발 중인 함정에서 연구개발주관기관이 놓칠 수 있는 사항들을 제시함으로써 최적의 함정을 설계하고 합의 기본적인 성능 확보를 위한 설계품질의 가장 중요한 요소임을 시사할 수 있다.

3.5. 연구개발단계 품질관리 요소 발전방향

첫 번째, 군 요구사항 연계성 충족요소의 발전 방향에 대한 제언이다. 현재 함정 무기체계 연구개발 단계에서는 연계성 충족을 위해 체계공학 기반 사업 관리를 수행하고 있다. 이에 따라, 품질관리 요소 또한 체계공학 활동을 통해 상위요구조건들이 무기체계의 개발완료 시점까지 연계성이 추적되고 관리되며 이는 계약요구사항으로 관리되고 있다. 즉, 개발 과정 흐름에 따라 연계됨을 확인하는 것은 현재 정해진 절차대로 수행되고 있으나, 특정 시점에서 특정체계의 설계변수 변경이 다른 체계의 영향성 또는 요구조건의 충돌 등을 검토하는 시스템 또는 프로세스가 부재한 사항이다. 이에 따라, 체계적인 군 요구사항 연계성 충족확인을 통해 설계품질을 향상시키기 위해서는 함정 무기체계의 체계별 영향성을 추적하고 설계변수 변경 시 곧바로 관련 설계변수를 식별하여 연동될 수 있도록 방법론과 관련된 연구가 필요하다.

두 번째, 제한적인 진화적 요구사항 충족의 경우, 앞서 서술한 바와 같이 본 논문에서 제한적인 진화적 요구사항의 의미는 주어진 상위요구조건 범위 내에서 설계품질을 높이기 위하여 과거의 실적함정 또는 유사함정, 같은 시기 연구개발 중인 타 사업 등의 품질문제 개선사항 또는 성능개량 사항 등에 대한 품질정보를 연구개발단계에 환류하는 것을 의미하므로, 품질정보를 체계적으로 관리할 수 있도록 표준분류체계 연구 등을 통해 데이터 수집방안과 수집된 데이터에서 유의미한 정보를 설계단계에 환류할 수 있도록 데이터 처리와 관련된 연구 등을 통해 품질정보 인프라 구축을 수행하여야 한다.

세 번째, 함정 무기체계 본연적 성질 충족 확인 요소이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 주로 함정 설계/건조 기준 및 국제선급 규칙 등 기술문건을 기준으로 기술검토 및 품질관리를 수행하고 있기에, 품질관리 요소의 효과성을 제고하기 위해서는 함정 설계/건조 기준의 완전성이 뒷받침되어야 한다. 함정 설

계/건조 기준의 경우 해군 주관으로 매년 개정 소요를 취합하고 반영하는 실무 위원회를 개최하기에, 이에 따라 설계/건조 기준이 실제 설계단계에 반영될 때의 현실적인 문제 또는 함 수명주기 내 발생했던 품질문제, 고장이력 등의 정보를 지속적으로 분석하고 재발 방지를 위한 기준을 식별하여 함정 설계/건조 기준에 반영할 수 있도록 소요를 제기하고 기준서의 완전성을 확보하여야 한다.

4. 결론

본 연구는 방위사업법 시행령 및 하위 훈령개정에 따른 국방기술품질원의 함정 무기체계의 연구개발단계 품질보증 업무가 수행됨에 따라 규정 개정 당시 수행업무를 정의하기 위하여 민수분야의 연구개발단계 품질관리 요소를 조사 및 분석한 자료를 기반으로 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소를 도출하였으며 아울러, 시범대상 사업의 사례를 분석하여 도출된 품질관리 요소의 효용성을 실증하였고 요소별 발전 방향을 제안하였다.

본 연구를 통해 도출된 함정 무기체계 연구개발단계 품질관리 요소는 기존에 정의되어 있지 않던 연구개발단계 품질관리 요소를 정의함으로써, 요소별 실행방안 및 발전방향에 대한 참고기준이 될 것으로 기대하며 요소별 후속연구를 통해 체계적인 품질관리와 궁극적으로 함정 무기체계의 품질향상을 할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 본 연구에서는 시범 대상사업 사례가 제한적임에 따라 대한민국 함정을 건조하는 전체 연구개발주관기관의 경우를 다루지는 못하였다. 이러한 한계점을 해결하기 위하여 실증사례의 표본이 축적됨에 따라 효용성을 추가로 검증하는 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

참고문헌

- 1 Ki-chul Hwang, Jong-ha Kim, "A Study for Improving Quality Management System of Naval Ships to Enhance Safety", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 246(59), pp. 432-438, 2022.
- 2 Defense Science and Technology Terminology Dictionary, Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement, 2021.
- 3 Zairi, M., Total Quality Management for Engineers, Woodhead Publishing Ltd, 1991.
- 4 Flynn, Barbara B., Roger G. Schroeder, and Sadao Sakakibara., "A framework for quality management research and an associated measurement instrument", *Journal of Operations Management*, 11(4), pp. 339-366, 1994.
- 5 Barrie G. Dale, Managing Quality(Fourth Edition), Blackwell Pvt. Ltd, 2003.
- 6 Oakland J. S., Total Quality Management: Text with Casese, Elsevier, 2003.
- 7 Meirovich, Gavriel, "Quality of design and quality of conformance: Contingency and synergistic approaches", *Total Quality Management & Business Excellence*, 17(2), pp. 205-219, 2006.
- 8 N. V. R. Naidu, K. M. Babu, G. Rajendra, Total Quality Management, New Age International Pvt. Ltd, 2006.
- 9 Mandal S. K., Total Quality Management – Principles and Practice, Vikas Publishing House Pvt. Ltd, 2007.
- 10 Chong Yih Tng, & Chun-Hsien Chen, "Customer needs as moving targets of product development: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48, pp. 395-406, 2010.
- 11 Charantimath P.M., Total Quality Management, Dorling Kindersley Pvt. Ltd, 2011.
- 12 Ankesh Mundra, "Quality of Design", *Journal of Management and Commerce Innovations*, 2(1), pp. 110-112, 2014.
- 13 Honour, Eric C., "6.2. 3 Understanding the value of systems engineering", INCOSE international symposium, 14(1), pp. 1207-1222, 2004.
- 14 Henderson, Kaitlin, & Alejandro Salado, "Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature", *Systems Engineering*, 24.(1), pp. 51-66, 2021.
- 15 Elm, Joseph P., et al., "A survey of systems engineering effectiveness", Software Engineering Institute report CMU/SEI-2008-SR-034, 2008.
- 16 Elm, Joseph P., & Dennis Goldenson, "The business case for systems engineering study: Results of the systems engineering effectiveness survey", pp. 1-154, 2012.
- 17 Robert J Halligan, "The Business Case for Systems Engineering", Project Performance International, 2018.
- 18 Sung-Chul Shin, Jin-Won Park, Jae-Chon Lee, "An SE-Based System Architecture Process for Submarine's Basic Design", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 20(3), pp. 91-99, 2019.
- 19 Bottero, Mattia, & Paola Gualeni, "Systems Engineering for Naval Ship Design Evolution", *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 2024.
- 20 Jongung Cheon, Sukjae Jeong, "A Study on the Evaluation Indicators for Determining the Possibility of the Application of the Weapon Systems Evolutionary ROC", *Journal of Military Art and Science*, pp. 143-172, 2019.
- 21 Tae Woong Park, Taeho Kim, Hochan Lee, "Analysis of the Cause of Required Operational Capability(ROC) Correction and A Study on the Development of Evaluation Item Index for an Evolutionary Acquisition", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 24(8), pp. 445-454, 2023.
- 22 Wonjin Oh, "Suggestions for Revitalizing Evolutionary Acquisition in Weapon System Acquisition", *Defense and Technology*, 507, pp. 58-65, 2021.

KANO 모델을 활용한 ISO 9004:2018 주요 지침의 유형 분석

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

Analysis of types of ISO 9004:2018 main guidance titles using
KANO model

윤철근, Cheolgeun Yoon

(주)아이스펙, 품질보증부, 부서장
Head of Department, Quality Assurance Dept, I-Spec Co.

이상천†, Sangcheon Lee

경상국립대학교,
산업시스템공학부/공학연구원, 교수
Professor, Department of Industrial and Systems Engineering/ERI, Gyeongsang National University

박종훈, Jonghun Park

대구가톨릭대학교, 경영학과, 교수
Professor, Department of Business Administration, Daegu Catholic University

김성광, Sungkwang Kim

방산인증컨설팅(KDCC), 대표
CEO, Korea Defense Certification Consulting(KDCC)

Abstract

The purpose of this study is to classify the properties of the ISO 9004:2018 guidance, present the coefficients of satisfaction and dissatisfaction, and prioritize the main guidance. A total of 22 detailed items from ISO 9004:2018 are used in a survey, and the Kano model is used to classify the attributes. Based on the classified attributes, the coefficients of satisfaction and dissatisfaction are calculated and analyzed to derive a priority order of improvement. The core items are “improvement” and “innovation,” and the mandatory items are “process responsibility” and “authority for managing processes.” Thus, an effective and efficient plan for managing the quality-management system is presented.

keywords : ISO 9004:2018, Kano model, DQMS, Customer satisfaction coefficient

† Corresponding Author : Sangcheon Lee

Tel : +82-055-772-1696, email : sclee@gnu.ac.kr

Gyeongsang National University, 124, 501, Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 5th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

품질경영시스템 인증을 보유한 기업은 제품의 경쟁력 확보는 물론, 시스템 구축에 긍정적인 영향을 끼치고 있다는 연구[1]에서 확인할 수 있듯 품질경영시스템의 관리는 필수적이라 할 수 있다. 규격 일치성 중심의 개선보다는 프로세스 중심의 개선이 요구되면서 품질경영시스템의 기능과 범위, 중요성이 크게 증대되고 있고 기업이 필요로 하는 평가척도는 스스로 규격 요구사항을 참조하여 개발할 수밖에 없으며, 기업의 우선순위 선정과 자가 진단을 할 수 있는 점검시트를 제공해 주고자 하는 연구[2]가 이루어지고 있다.

ISO 9004는 품질관리시스템의 지속 가능한 성공을 위한 지침을 제공하는 국제 표준이다. 대부분의 업체가 보유하고 있는 ISO 9001은 조직의 제품 및 서비스에 대한 신뢰를 제공하는 데 중점을 두고 있지만, ISO 9004는 조직의 품질관리시스템을 넘어서 지속 가능한 성공을 달성할 수 있도록 돕기 위해 설계되어서 조직의 능력에 대한 신뢰를 제공하고 있다. ISO 9004는 시시각각으로 변해가는 복잡한 경영 환경 속에서 조직의 성숙도를 높여 장기적으로 지속 가능 성공을 지지하고 요구 사항에 적합 여부를 평가하는 품질경영시스템 인증제도인 ISO 9001을 초월하여 스스로 조직 성숙도를 높여감으로써 제품전략, 사업전략 및 경영전략을 혁신해 나가는 선순환구조의 도입이라고 연구되었다[3]. 따라서 ISO 9001 인증을 획득한 기업은 ISO 9004의 지침으로 조직의 효율성과 성과를 개선할 수 있다. ISO 9004에는 품질경영시스템에 대해 자체평가가 가능한 부속서가 제공되어 이를 활용하여 자체 진단이 가능하다. Figure 1은 ISO 9004:2009의 부속서에서 제공하는 자체평가 도구 결과의 예시이다. 총 6가지 항목인 4. 조직의 지속적 성공을 위한 경영방식, 5. 전략 및 방침, 6. 자원 관리, 7. 프로세스 관리, 8. 모니터링, 측정, 분석 및 검토, 9. 개선, 혁신 및 학습을 평가 도구로 5가지 성숙단계로 정량화하여 조직이 자신의

강점 및 약점을 자체평가하고, 그 성숙도를 결정하며, 개선 및 혁신의 기회를 파악하는 도구를 제공한다. 이 결과는 경영검토 및 사업계획 시 기획 및 검토를 위한 입력으로 사용할 수 있다.

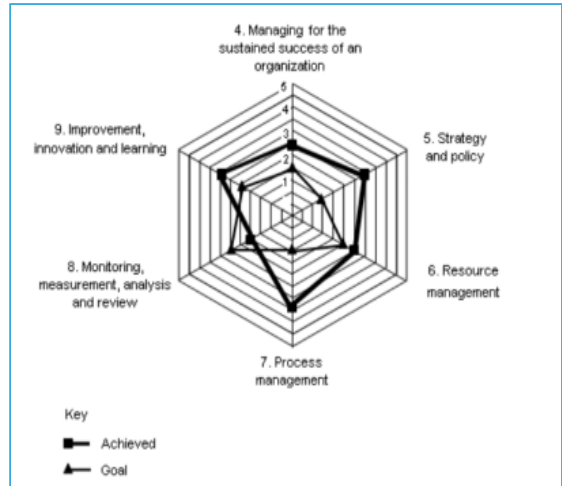


Figure 1. Example illustration of the results of a self-assessment

최신판인 ISO 9004:2018은 조직의 품질과 정체성의 개념을 중시하는 취지로 개정되었다[4]. 이 표준으로 조직의 정의 항목을 토대로 자체평가를 실시한다면 품질경영시스템 개선에 좋은 표준이 될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 국방품질경영 업무의 전문가들을 대상으로 ISO 9004:2018 지침들에 대해 설문조사를 실시하였다. 그 대상은 크게 2가지 계층으로 구분하였다. 첫 번째 그룹은 국방기술품질원 인증 심사원과 컨설턴트로 구성된 심사위원으로 ISO 9004:2018 지침들을 고객의 관점에서 가치를 알아보고자 한다. 두 번째는 방산업체 종사자들을 대상으로 평가대상자의 관점에서 의견을 종합하고자 한다. 고객 만족을 위한 품질계획 수립을 위해서는 고객의 각 해당 품질에 대한 인식을 파악함으로써 고객 니즈를 파악할 수 있어야 하는데, 이를 위해 Kano 모델을 이용할 수 있다고 연구되었다[5]. Kano 모델을 사용하여 지침별 특성을 평가하고, 주

요 지침을 선정하여 전략적인 우선순위로 분석하여 향후 방산업체 품질경영시스템을 효과적이고 효율적으로 관리할 수 있는 방안에 대해 알아보하고자 한다. 특히 국방품질경영시스템(DQMS) 인증을 획득한 업체에 대해 향후 시스템 유지, 보수에 필요한 우선순위 내용을 제시하고자 한다.

2. 연구 배경

2.1. ISO 9004:2018의 구성

ISO 9004:2018은 1절(Clause)부터 11절로 구성되어 있고 내부에 세부 항목들(Items)로 구성되어 있어 이것을 Table 1에 나타내었다. 각 절의 내용을 요약해 보면 아래와 같다. 1절 범위(Scope)는 이 표준이 적용되는 범위와 목적을 설명한다. 2절 인용 표준(Normative references)은 ISO 9004가 참조하는 다른 표준들에 대한 정보를 제공한다. 3절 용어와 정의(Terms and definitions)는 ISO 9004에서 사용하는 주요 용어와 정의를 설명한다. 4절 조직의 품질과 지속적 성공(Quality of an organization and sustained success)은 조직의 고유한 특성이 고객 및 기타 이해관계자의 니즈와 기대를 충족시키는 정도이고 지속적 성공을 달성하는 데 무엇이 관련되는지를 결정하는 것을 설명한다. 5절 조직의 상황(Context of the organization)은 조직의 내부 및 외부 요인을 이해하고 조직의 목적과 방향성을 명확히 하는 데 중점을 두고 있다. 5절의 세부 항목으로 관련 이해관계자(Relevant interested parties), 외부 및 내부 이슈(External and internal issues)가 있다. 6절 조직의 정체성(Identity of an organization)은 조직의 미션, 비전, 가치 및 문화(Mission, vision, values and culture)를 기반으로 하여, 조직의 특성에 따라 결정됨을 말한다. 7절 리더십(Leadership)은 상위 경영진의 역할과 책임을 강조하고 있다. 7절의 세부 항목은 방침 및 전략(Policy and strategy), 목표(Objectives), 의사소통(Communication)으로 구성되어 있다. 8절 프로

Table 1. ISO 9004:2018 Clause & Items

Clause	Items	Guidance Title
1		Scope
2		Normative references
3		Terms and definitions
4		Quality of an organization and sustained success
	4.1	Quality of an organization
	4.2	Managing for the sustained success of an organization
5		Context of an organization
	5.1	General
	5.2	Relevant interested parties
	5.3	External and internal issues
6		Identity of an organization
	6.1	General
	6.2	Mission, vision, values and culture
7		Leadership
	7.1	General
	7.2	Policy and strategy
	7.3	Objectives
	7.4	Communication
8		Process management
	8.1	General
	8.2	Determination of processes
	8.3	Responsibility and authority for processes
	8.4	Managing processes
9		Resource management
	9.1	General
	9.2	People
	9.3	Organizational knowledge
	9.4	Technology
	9.5	Infrastructure and work environment
	9.6	Externally provided resources
	9.7	Natural resources
10		Analysis and evaluation of an organization's performance
	10.1	General
	10.2	Performance indicators
	10.3	Performance analysis
	10.4	Performance evaluation
	10.5	Internal audit
	10.6	Self-assessment
	10.7	Reviews
11		Improvement, learning and innovation
	11.1	General
	11.2	Improvement
	11.3	Learning
	11.4	Innovation

세스 관리(Process management)는 프로세스 네트워크로 연결된 활동을 통해 가치를 제공하고 프로세스 네트워크가 일관되면 더욱 효과적이고 효율적이라고 명시되어 있다. 8절의 세부 항목은 프로세스의 결정(Determination of processes), 프로세스에 대한 책임과 권한(Responsibility and authority for processes), 프로세스 관리(Managing processes)로 구성되어 있다.

9절 자원 관리(Resource management)는 효과적으로 자원을 관리하고 할당하는 방법에 대해 설명한다. 9절의 세부 항목은 인원(People), 조직의 지식(Organizational knowledge), 기술(Technology), 기반구조 및 업무 환경(Infrastructure and work environment), 외부 제공 자원(Externally provided resources), 천연 자원(Natural resources)으로 구성되어 있다. 10절 조직 성과의 분석 및 평가(Analysis and evaluation of an organization's performance)는 조직의 성과를 모니터링, 측정, 분석하고 평가하는 방법을 제시한다. 10절의 세부 항목은 성과지표(Performance indicators), 성과분석(Performance analysis), 성과평가(Performance evaluation), 내부심사(Internal audit), 자체평가(Self-assessment), 검토(Reviews)로 구성되어 있다. 11절 개선, 학습 및 혁신(Improvement, learning and innovation)은 지속적인 개선을 통해 조직의 전반적인 성능과 효율성을 높이는 방법에 대해 다루고 있다.

단, 11개의 절과 33개의 세부 항목 전체를 통합적으로 관리하기에는 다소 어려움이 있다고 판단된다. 특히 중소기업은 인증제도를 해석하고 획득하기 위한 인적, 물적 자원이 부족하다는 연구[6]에서 알 수 있듯 주요 지침을 찾아서 전략적으로 접근해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

2.2. 설문 항목

Figure 2는 ISO 9004:2018 각 절(Clause) 간의 구조를 나타낸 것으로 5절부터 11절까지 세부 항목

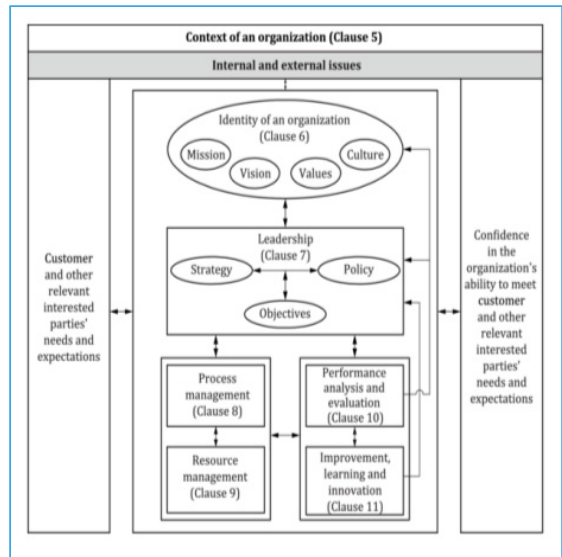


Figure 2. Structure of ISO 9004:2018

간의 상호관계를 확인할 수 있다. 이 항목들은 고객 및 이해관계자의 기대와 니즈 및 그것을 충족시키는 조직의 능력에 대한 신뢰와 관계가 있다는 것을 보여주고 있다. 5절부터 11절까지 세부 항목 중 각 절의 설명으로 내용이 구성된 일반 사항(General)과 방산 업무와 관계가 적다고 판단되는 천연자원(Natural resources)은 제외하였고 자체평가와 검토는 의미가 비슷하여 합친 후 총 22개의 항목으로 정리하여 Table 2로 나타내었다. 설문 항목에 대한 설명은 아래와 같다.

5.2 관련 이해관계자는 조직의 결정 또는 활동에 영향을 미칠 수 있거나, 영향을 받을 수 있거나 영향을 받을 것으로 인식할 수 있는 당사자이다. 5.3 외부 이슈는 조직의 지속적 성공 달성 능력에 영향을 줄 수 있는 조직 외부에 존재하는 요인이다. 내부 이슈는 지속적 성공을 달성하는 조직의 능력에 영향을 줄 수 있는 조직 자체에 존재하는 요인이다. 6.2 미션은 조직의 존재 목적, 비전은 조직의 미래 모습에 대한 열망, 가치는 조직에 중요한 것을 결정하기 위해 의도된 원칙 및 사고방식, 문화는 조직의 정체성과 상호 관련 있는 신념, 역사, 윤리 및 관찰되는 행동과 태도이다. 7.2 방침은 조직의 의도와 방향을 수립하기 위해 이해관계자의 니즈와 기대를

Table 2. Survey items

Items	Guidance Title
5.2	Relevant interested parties
5.3	External and internal issues
6.2	Mission, vision, values and culture
7.2	Policy and strategy
7.3	Objectives
7.4	Communication
8.2	Determination of processes
8.3	Responsibility and authority for processes
8.4	Managing processes
9.2	People
9.3	Organizational knowledge
9.4	Technology
9.5	Infrastructure and work environment
9.6	Externally provided resources
10.2	Performance indicators
10.3	Performance analysis
10.4	Performance evaluation
10.5	Internal audit
10.6/7	Self-assessment & Reviews
11.2	Improvement
11.3	Learning
11.4	Innovation

충족시키고 개선을 증진하기 위한 의지의 표명이고, 전략은 시장에서 적절한 모델을 적용하거나 설계 및 실행하기 위해 견고한 기반과 기준을 세우는 것이다. 7.3 목표는 방침 및 전략에 기초하여 정의하고 단기/장기 목표를 구분하고 명확하게 이해할 수 있어야 하며 정량화되어야 한다. 7.4 의사소통은 목표와 방침과 전략을 효과적으로 전달시키게 하고 의미 있고 적절하고 지속적이어야 하며 피드백 메커니즘을 통해 조직의 상황 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 대비책이 될 수 있다. 8.2 프로세스의 결정은 조직이 이해관계자의 니즈와 기대를 지속적으로 충족시키는 산출물을 제공할 수 있게 하고 조직의 방침, 전략 및 목표에 따라 결정된다. 8.3 프로세스에

대한 책임과 권한은 각 프로세스에 대해 프로세스의 성질 및 조직문화에 따라 프로세스 책임자가 지정되고 프로세스가 미치는 영향을 결정, 유지, 관리 및 개선하기 위한 책임과 권한이 규정되어야 한다. 8.4 프로세스 관리는 프로세스 간의 정렬/연계를 높이기 위한 시스템으로 관리하고 프로세스의 출력에 대한 기준을 결정하고, 출력을 기준과 비교하여 프로세스의 능력 및 성과를 평가한다. 9.2 인원은 역량이 있고 적극적으로 참여하며 권한을 부여받고 동기가 부여된 주요한 자원을 의미하며 조직에 기여할 수 있는 현재 또는 잠재적 역량과 가용성을 보유한 인원을 유지하기 위한 프로세스를 개발하고 실행해야 한다. 9.3 조직의 지식은 외부 또는 내부의 출처에 기반을 두고 자산으로 인식하고 조직의 지속적인 성공의 필수적 요소로 관리하고 조직의 단기/장기 니즈를 지원하는데 필요한 지식을 고려하고 식별, 수집, 분석, 검색, 유지 및 보호하는 방법을 평가한다. 9.4 기술은 제품 및 서비스 제공, 마케팅, 경쟁 우위, 민첩성 및 이해관계자와의 상호작용과 관련된 프로세스에서 조직의 성과에 중대한 영향을 미칠 수 있는 기존 및 신규 기술 개발이 필요하다. 9.5 기반 구조 및 업무환경은 조직이 필요한 것을 결정하고 이러한 자원이 어떻게 할당, 제공, 측정 또는 모니터링되고, 최적화되고 유지되고 보호되는지를 결정할 수 있다. 9.6 외부 제공 자원은 조직과 이해관계자 모두에게 영향을 줄 수 있으므로 외부공급자 및 파트너와의 관계를 효과적으로 관리하는 것이 중요하다. 10.2 성과지표는 미션, 비전, 방침, 전략 및 목표 대비 계획된 결과의 달성에 대한 진행 상황을 모든 계층과 프로세스 및 기능에서 평가하기 위해 사용된다. 적절한 성과지표 및 모니터링 방법의 선정은 조직의 효과적인 측정 및 분석에 필수적이다. 10.3 성과분석을 통해 조직 내 불충분하거나 비효율적인 자원, 역량, 조직의 지식, 리스크와 기회, 리더십 등을 파악할 수 있다. 성과에 미치는 리더십 활동과 그 활동의 효과 사이의 상호관계를 실증하기 위한 명확한 기본체제를 갖추어 리더십 활동의 강점 및 약점을 분석할 수 있다. 10.4 성과평가는 이해관

계자의 니즈와 기대의 관점에서 이루어진다. 성과가 니즈와 기대로부터 차이가 발견되면, 조직의 성과에 영향을 미치는 프로세스와 그들의 상호작용을 식별하고 분석한다. 파악된 성과와 실패는 조직의 방침, 전략 및 목표에 대한 영향에 근거하여 시정조치를 위한 우선순위를 정한다. 10.5 내부심사는 조직의 경영시스템이 선정된 기준에 대한 적합성 수준을 결정하는 도구로서 조직의 성과를 이해, 분석 및 개선하는데 유용한 정보를 제공하고 이전에 식별된 문제점과 부적합 사항을 해결하기 위한 진행상황을 모니터링하고 문제점, 부적합 사항, 리스크 및 기회를 식별할 수 있다. 10.6 자체평가는 조직의 강점과 약점을 결정하기 위하여 활용할 수 있고 개선 및 혁신의 우선순위를 정하고 계획하고 실행할 수 있도록 도와주고 10.7 검토는 미션, 비전, 가치 및 문화와 관련하여 적응성, 유연성 및 대응성의 측면을 포함하여 이전에 수행된 개선, 학습 및 혁신활동에 대한 평가 및 판정을 다룬다. 11.2 개선은 성과를 증진시키는 활동으로 효과성과 효율성이 높아져서 비용, 시간 및 에너지 절약, 폐기물 감소와 같은 이점을 얻을 수 있다. 이해관계자의 니즈와 기대를 보다 효과적으로 충족시킬 수 있다. 11.3 학습을 통해 개선과 혁신을 장려할 수 있다. 경험, 정보분석 및 개선과 혁신의 결과를 비롯한 많은 것으로부터 학습할 수 있다. 학습 접근법은 개인의 능력과 조직의 능력을 전체적으로 통합할 수 있다. 11.4 혁신은 외부와 내부 이슈 및 이해관계자의 니즈와 기대의 변경으로 인해 요구된다. 혁신적 사고를 장려하고 혁신을 가능하게 하는 프로세스를 수립하며 혁신적 아이디어를 실현하여야 한다.

2.3. Kano model

Kano 모델은 고객 만족도와 제품의 기능 및 성능의 관계를 분석하는 데 사용되는 도구로, 일본에서 1980년대에 개발하였다. 이 모델은 제품이나 서비스의 특징이 고객 만족에 미치는 영향을 이해하고, 이를 바탕으로 제품 개발의 우선순위를 정하는 데

효과가 있어 다양한 분야에서 활용되고 있다. 품질특성의 충분, 불충분의 물리적 측면과 만족, 불만족의 심리적 측면 간의 상관관계를 분석하여 품질 속성을 분류하고 품질 수준에 따라 품질 평가 차이를 비교하는 방법으로 연구되었다[7]. Figure 3은 Kano 모델의 예시를 나타낸 것으로 긍정과 부정 질문에 대한 응답을 기준으로 품질 특성을 매력적(A:Attractive), 일원적(O:One-dimensional), 당연적(M:Must be), 무관심(I:Indifferent), 역(R: Reverse)으로 분류하여 분석한다.

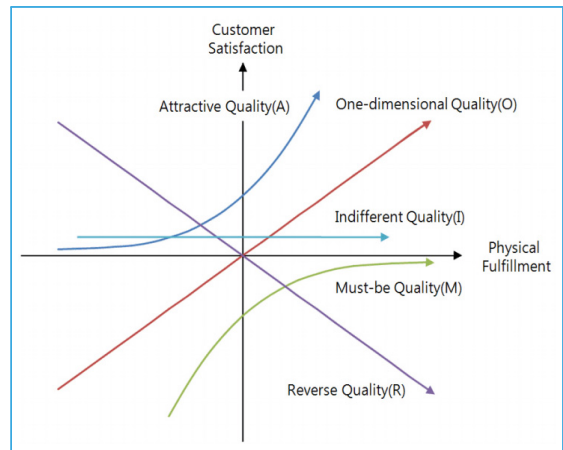


Figure 3. Kano model Example

Kano 모델의 품질 속성 중 당연적 품질과 일원적 품질, 매력적 품질이 주요 속성으로 볼 수 있다. 당연적 품질은 고객이 기본적으로 기대하는 품질 수준을 의미한다. 충족되지 않으면 강하게 불만을 느끼게 되는 요소들로서 고객 충족이 필수적이라고 할 수 있다. 일원적 품질은 일반적인 품질 속성이며, 매력적 품질은 제공받지 않아도 느끼지 못하고 충족되었을 때 고객 만족이 커지는 품질 속성이다. 본 연구에서는 무관심 요인에 대해 더 넓은 범위의 고객의 반응으로 분석하여 기존 Kano 모델의 무관심(I) 영역 중 일부를 매력적(A), 일원적(O), 당연적(M)으로 바꾼 수정된 Kano 모델[8]을 사용하였다. Table 3은 그 수정표를 나타낸 것이다.

Table 3. Modified Kano decision table

		Dys-functional				
		1.Contribute	2.Must	3.Do n't care	4.Can live with it	5.Bad effect
Functional	1.Contribute	Q	A	A	A	O
	2.Must	R	A	A	O	M
	3.Do n't care	R	I	I	M	M
	4.Can live with it	R	I	I	I	M
	5.Bad effect	R	R	R	I	Q

품질 속성을 분류할 때 최빈값을 이용한 방법은 단순하고 직관적이지만, 요구사항의 세부적인 차이를 반영하는 데 한계가 있다. 이 문제점을 해결하기 위하여 고객만족계수로 분석한 연구[9]를 기반으로 고객 만족과 불만족에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여, 보다 균형 잡힌 평가와 체계적인 개선이 가능한 방법을 채택하였다. 고객만족계수인 만족계수(CS: Coefficient of Satisfaction)와 불만족계수(CD: Coefficient of Dissatisfaction)는 M, O, A, I의 각 응답수로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CS = \frac{A + O}{A + O + M + I} \quad (1)$$

$$CD = -\frac{O + M}{A + O + M + I}$$

3. 실증 자료 구축

설문은 품질경영시스템의 만족과 불만족에 대한 긍정과 부정의 설문지를 사용하여 측정하였다. Kano 질문에 대한 답변은 ①기여한다(Contribute), ②당연하다(Must), ③그저 그렇다(Don't Care), ④참을 만하다(Can live with it), ⑤악영향을 끼친다(Bad effect)를 사용하였다. Figure 4는 설문지의 예를 나타낸 것으로 관련 이해관계자 관리가 잘되고 있거나 잘되고 있지 않다면 품질경영시스템에 어떠한 영향을 끼친다고 보는지 ①부터 ⑤까지 선택하도록 만들었다. 설문조사는 2023년 11월부터 2024년 1월까지 진행하였다. 국방기술품질원 인증 심사원, 컨설턴트를 한 그룹으로 30명, 방산업체 종사자를 한 그룹으로 33명에게 설문을 의뢰하여 총 63부를 수집하였다. 두 그룹의 비율을 거의 동일하게 하고 방산업체 설문 대상은 근무연수를 다양하게 구성함으로써 특정 부류에 편중되지 않을 것으로 판단하였다. Table 4는 설문 대상을 표로 나타낸 것이다.

Table 4. Respondents of the Survey

Characteristics	Years of service	Number
Defense agency	-	5
Defense industry	Consultant	25
	5~10	8
	10~15	7
	15~20	5
	20~25	8
	25 or more	5

No	If the judgment on the evaluation items is as follows, what effect do you think it will have on the quality management system?	Contribute	Must	Don't Care	Can live with it	Bad effect
1	If the Relevant interested parties are well managed?	(①)	(②)	(③)	(④)	(⑤)
2	If the Relevant interested parties are not well managed?	(①)	(②)	(③)	(④)	(⑤)

Figure 4. Questionnaire

4. 분석

Kano 모델을 통하여 각 지침의 설문에 대한 분류와 고객만족계수의 CS와 CD를 계산한 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Respondents of the Survey

Items	A	O	M	I	CS	CD
5.2	18	32	11	2	0.794	-0.683
5.3	15	39	4	5	0.857	-0.683
6.2	17	38	6	2	0.873	-0.698
7.2	19	36	7	1	0.873	-0.683
7.3	13	42	7	1	0.873	-0.778
7.4	11	45	7	0	0.889	-0.825
8.2	16	37	9	1	0.841	-0.730
8.3	12	39	12	0	0.810	-0.810
8.4	13	36	10	4	0.778	-0.730
9.2	19	36	8	0	0.873	-0.698
9.3	16	39	6	2	0.873	-0.714
9.4	15	44	2	2	0.937	-0.730
9.5	15	39	6	3	0.857	-0.714
9.6	14	40	5	4	0.857	-0.714
10.2	18	37	7	1	0.873	-0.698
10.3	13	45	5	0	0.921	-0.794
10.4	14	39	8	2	0.841	-0.746
10.5	15	40	4	4	0.873	-0.698
10.6/7	18	38	5	2	0.889	-0.683
11.2	22	36	3	2	0.921	-0.619
11.3	20	34	4	5	0.857	-0.603
11.4	24	32	2	5	0.889	-0.540
Ave.					0.866	-0.708

22개의 지침 모두 최빈값이 일원적 속성으로 나타났다. ISO 9004 지침은 품질 전문가들에 의해 다년간 연구되어온 것으로 고객 만족에 비례하여 충족 시 만족, 불충족 시 불만족을 일으키는 일원적 속성인 것은 당연한 결과로 판단된다. 그러나 일원적 속성 외에도 매력적 또는 당연적 속성 또한 상당 부분 존재한다. 일원적 속성으로만 취급하고 초점을 둔 품

질경영시스템 개선 전략을 수립할 경우 왜곡이 발생할 수 있다는 연구[10]에서 알 수 있듯 고객만족계수를 통해 모든 속성을 고려한 분류를 진행할 필요가 있다. 고객만족계수에서 만족계수와 불만족계수의 평균선이 속성 분류선이 된다. 최빈값이 일원적이더라도 당연적 속성과 매력적 속성, 무관심 속성의 응답 수에 따라 해당 지침이 당연적 속성으로 분류되거나, 매력적 속성으로 분류될 수 있다. 본 연구에서 각 속성을 품질경영시스템 관점에서 ‘Core’, ‘Mandatory’, ‘General’, ‘Indifference’의 용어로 정의하였다.

‘Core’ 영역은 핵심 지침 항목으로 개선되었을 경우 더 큰 만족을 불러올 수 있는 영역으로 이에 해당하는 품질 속성은 향후 개선 정도에 따라 고객의 관점에서 매력적 속성으로 발전할 수 있다. ‘Mandatory’ 영역은 만족도 개선 여지가 반드시 필요한 영역으로 경쟁을 위해 필수적으로 갖추어야 할 항목으로 볼 수 있다. 일원적 속성은 ‘General’로, 무관심 속성은 ‘Indifference’로 정의한다. Figure 5는 만족계수, 불만족계수의 평균을 바탕으로 품질경영시스템 용어로 재분류하여 속성을 분류한 자료이다.

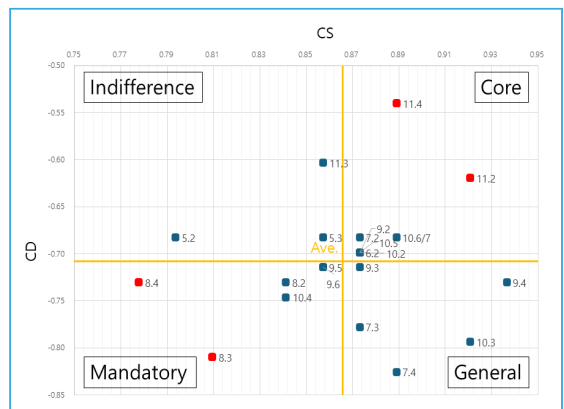


Figure 5. Classification of attributes according to customer satisfaction coefficient

‘Core’ 영역은 6.2 미션, 비전, 가치 및 문화 7.2 방침 및 전략, 9.2 인원, 10.2 성과지표, 10.5 내부

심사, 10.6/7 자체평가 및 검토, 11.2 개선, 11.4 혁신 총 8개, 'Mandatory' 영역은 8.2 프로세스의 결정, 8.3 프로세스에 대한 책임과 권한, 8.4 프로세스 관리, 9.5 기반구조 및 업무환경, 9.6 외부 제공 자원, 10.4 성과평가 총 6개의 지침이 분류되었다. 'General' 영역은 7.3 목표, 7.4 의사소통, 9.3 조직의 지식, 9.4 기술, 10.3 성과분석 총 5개, 'Indifference' 영역은 5.2 관련 이해관계자, 5.3 외부 및 내부 이슈, 11.3 학습 총 3개로 분류되었다.

4가지 영역으로 분류가 되었으나 지침 전체의 분포는 큰 차이가 없었다. 단, 'Core' 영역 중 11.2 개선, 11.4 혁신, 'Mandatory' 영역 중 8.3 프로세스에 대한 책임과 권한, 8.4 프로세스 관리가 평균 대비 수치가 크게 확인되어 주요 지침으로 선정할 수 있다고 판단된다.

개선과 혁신은 품질 대외 경쟁력을 향상시킬 수 있는 지침으로 경쟁사를 따돌리고 고객 확보가 가능한 경쟁우위로 작용할 수 있다. 품질경영시스템 주요 항목 간 관계 분석에 관한 연구[11]에서 개선은 다음과 같이 정의되고 있다. 최고경영자의 책임과 권한으로 품질방침과 목표를 수립하고 전 종업원의 참여와 자체 검토를 통한 분석, 부적합품에 대한 재발방지활동 등으로 정의하였다. 혁신은 품질경영시스템 운영에서 전사적 관리 활동 외에 체계적인 혁신활동으로 진화시켜 나가는 방법론에 대한 연구[12]를 참고할 수 있다. 개선과 혁신 활동은 시정조치, 개선제안제도, 획기적인 변화, 조직 개편 등을 들 수 있다. 부적합 재발 방지를 위한 조치를 취하고, 프로세스나 제품 또는 서비스 내에서 점진적이고 지속적인 개선제안 활동과 프로세스에 중대한 변화를 이끌어 낼 수 있는 프로젝트, 신규 프로세스, 제품 또는 서비스의 실행, 업무 변화를 일으키는 신기술 도입 등의 활동을 예로 들 수 있다.

프로세스에 대한 책임과 권한, 관리에 대해 최고경영자와 전 종업원의 참여하에 설정하고 프로세스를 수립하는 것이 품질경영시스템이라고 주장하는 연구[13]를 통해 이것의 중요성을 알 수 있다. 이를 위한 방법으로 Figure 6의 Turtle diagram 작성을

예로 들 수 있다. 프로세스를 정의할 때 무엇을(what), 누가(who), 무엇 때문에(what for), 어떻게(how) 수행할 것인가를 정하여야 한다. 이때 누가에 해당하는 프로세스 책임과 권한자 선정 시 각 인원의 교육훈련과 지식의 정도, 업무 숙련도 등을 고려하여 결정할 수 있다. 이후 프로세스는 핵심성과지표인 KPI(Key Performance Indicator)로 관리할 수 있다.

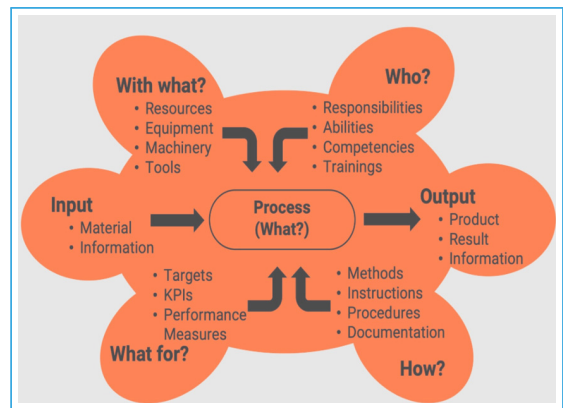


Figure 6. Turtle diagram

5. 결론

본 연구의 목적은 품질경영시스템 관리를 위하여 필요한 지침의 속성을 분류하고 전략적 방향을 도출하여 품질경영시스템 인증을 획득한 중소기업의 개선에 필요한 우선순위를 제시하는 것이다. 이를 위해 ISO 9004:2018의 지침들에 대해 국방기술품질원 인증 심사원과 컨설턴트, 방산업체 종사자를 대상으로 설문을 수집하여 Kano 모델로 분석하였다. 모든 지침이 일원적 속성임을 확인할 수 있었고 각 지침의 만족계수와 불만족계수를 계산하여 Kano 모델 속성 분류의 한계점을 극복한 방법으로 분석하였다.

본 연구의 요점을 정리하면 다음과 같다. 개선과 혁신은 'Core' 영역 최상위에 위치하여 전략적 경쟁우위를 확보할 수 있는 지침으로 평가된다. 프로세스에 대한 책임과 권한 및 프로세스 관리는 'Mandatory' 영역 최상위에 위치하고 있어 경쟁을

위해 필수적으로 갖추어야 할 지침으로 평가된다.

본 연구 결과는 방산업계의 다양한 대상들의 의견으로 ISO 9004:2018의 지침 속성을 평가함으로써 DQMS를 보유한 방산 중소기업이 한정된 인력으로 보다 더 효과적이고 효율적으로 품질경영시스템 개선할 수 있도록 방향성을 제시하였다. 향후에서 본 분석 결과를 기 설문자들을 대상으로 심층 인터뷰를 실시하여 지침의 속성과 중요성에 대해 좀 더 심화된 연구할 진행할 계획이다.

참고문헌

- 1 Tae-Yong, K. D., "Certification of quality management system and firm performance: An empirical approach based on the experiences of small and medium enterprises (SMEs) in Korea", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 30(1), pp. 15-24, 2007.
- 2 Chulwoo Lee, & Sanghum Yoon., "An Exploratory Study for the Scale Development of QMS : Focusing on the ISO9001:2015 revision", *Korean Journal of Business Administration*, 30(10), pp. 1725-1753, 2017.
- 3 Kim, S. E., "A Study of Sustainable Successful Management System Using ISO9004 Model", In Proceedings of the Safety Management and Science Conference, pp. 139-155, 2012.
- 4 Korean Standards Service Network, <https://kssn.net/index.do>, 2018, 04, 03
- 5 Shim, J. Y., "A Study on the Airlines Internal Service Quality Using Kano Model-Focused on case of K Airlines", *Journal of the Aviation Management Society of Korea*, 11(4), pp. 99-124, 2013.
- 6 Park, J. H., & Lee, S. C., "An Exploratory Study on the Success Factors of Defence Quality Management System", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 41(4), pp. 160-170, 2018.
- 7 Hong, J. S., Lee, S. C., & Park, J. H., "An Analysis of Potential Customer Satisfaction Improvement Index of Smart Phone by Usage Characteristics", *Journal of the Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 43(2), pp. 56-64, 2020.
- 8 Kim, T. O., "Analysis of quality characteristics of smart phone using modified Kano model", *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 35(1), pp. 57-65, 2012.
- 9 Cho, Y. W., "Propose new methodology based on Kano's Model", *Journal of the Korea Safety Management & Science*, 15(1), pp. 259-269, 2013.
- 10 Hwang, Jung-Yup, Kim, Chae-Bogk, & Park, Sung-Min, "Car Maintenance Service Quality Evaluation using Kano Model and Potential Customer Satisfaction Improvement Index", *Korean Business Education Review*, 36(5), pp. 1-24, 2021.
- 11 Kim, Kyung Soo, "Analysis of Circular Relation among ISO 9001 Core QMS Requirements using Non-recursive Structural Regression Model", *Korean Business Education Review*, 27(2), pp. 577-596, 2012.
- 12 Kim, Yong Jun, & Youngbae Chung, "A Study on the Effects of ISO 9001:2008 Quality Management Systems's Requirement Implementation According to the Certification Motives on Management Performance : Focused on the Manufacturer in the Small Businesses", *Journal of the Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 38(4), pp. 1-10, 2015.
- 13 Kwon, Tai Hoan, Park, Gi Seok, & Chen, Gang, "Differences in Strategic Quality Management and Performance Measurement between ISO Accredited and non-ISO Accredited in Chinese Companies", *Korean International Accounting Review*, 51, pp. 409-428, 2013.

국방표준서 운영제도 개선 방안 연구: 미국 국방표준화 프로그램 운영사례를 중심으로

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

Improvement to Operation System of Defense Standards: Emphasis on Operation of U.S. Defense Standardization Program

이민철†, Mincheol Lee

한국조달연구원, 국방조달연구센터, 센터장
Director, Defense Research Center, Korea Institute of Procurement

안혜원, Hyewon An

국방기술품질원, 표준연구실, 선임연구원
Senior Researcher, Defense Standards Research Department, Defense Agency for Technology and Quality

Abstract

The purpose of this study is to identify and address problems by analyzing the U.S. defense standard operating system. By analyzing the operation cases of the U.S. defense standardization program, several improvement measures are derived and the problems are analyzed from various perspectives in terms of the institutionalization, system activation, and system efficiency of the Korean military's defense standard operation system. Thus, an effective policy reflecting the defense standard operating system is expected. The development of a utilization index to revitalize the defense standard operating system should be supplemented and developed through additional research in the future.

keywords : Defense Standards Operation System, Case Study, Defense Standardization Program

† Corresponding Author : Mincheol Lee

Tel : +82-02-796-8234, email : mcl80@naver.com

Korea Institute of Procurement, 319, Eonju-ro, Gangnam-gu, Seoul, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 13th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

국방분야 표준화는 군수품의 기술적 요구조건과 품질보증 방법을 정의하기 위한 기술자료로 국방규격과 국방표준서 등의 형태로 구분된다. 이러한 표준화 기능은 총 수명주기 비용 절감 및 획득 기간 단축, 군수품 상호운용성·호환성·공통성의 증진 및 국방자원의 운영체계 구축에 필수적이며 사업관리, 품질보증, 원가산정, 계약관리 및 군수자원관리 등의 기준을 제공하는 역할을 수행한다[1].

이를 위해 방위사업청은 2019년부터 군수품에 공통적이고 반복적으로 사용되는 공정, 절차, 규정, 원자재, 시험방법 등에 대해 국방표준서로 제정하여 관리하고 있으며, 국방표준서의 적절성을 검토하기 위해 ‘표준화 업무규정’에 제·개정된 날로부터 5년 주기로 국방표준서의 적합성을 검토하도록 규정하고 있다[2].

하지만 현재 국방표준서는 국방 분야의 공통 성격의 국방규격서를 국방표준서로 전환하여 제정하고 관리하는 수준이라 국방규격서와 국방표준서의 정의와 범위에 대한 운영 개념이 혼재되어 있다[3].

특히, 필요한 성능, 재료, 형상, 치수 등의 필요 조건의 일치성 여부를 판단하기 위해 관리되는 국방규격서, 도면, 품질보증요구서(QAR, Quality Assurance Requirement), 소프트웨어 기술문서, 부품 BOM(Bill Of Material) 목록 등의 군수품 조달 및 품질보증의 기준문서인 국방규격 제·개정 업무[4]와 달리, 국방표준서 운영제도는 국방표준서 제·개정 업무에 대한 명확한 선정 기준과 절차 등이 구체화 되어 있지 않아, 관계 분야에서 제도 활성화와 운영에 제약조건으로 인식되고 있다.

따라서 본 연구는 우리 군의 국방표준서 운영제도에 체계적인 운영 방안을 제언하기 위해 선진사례를 분석하여 주요 시사점과 제도운영에 관한 개선 방안을 다음과 같이 구성하여 도출하였다.

논문의 제2장은 국방표준서 운영제도 이해와 미국의 국방표준화 프로그램 운영사례를 분석하고 주

요 시사점을 도출하였다. 제3장은 우리 군의 국방표준서 운영실태를 분석하고 개선 방안을 제언하였다. 그리고 제4장은 주요 연구결과와 향후 연구방향에 대해 서술하였다.

2. 국방표준서 이해와 선진사례

2.1. 국방표준서 운영제도 이해

국방표준서는 군수품의 획득, 관리, 운영유지 과정에서 공통적이거나 반복적으로 사용되는 인터페이스, 설계, 제조공정, 시험방법 등을 공학적이거나 기술적으로 작성한 공통 적용 문서이다[5].

표준화 업무규정 제69조 1항에 따라 국방표준서 작성기관은 방위사업청 통합사업관리팀, 방위사업청 각 사업본부 표준자원관리팀, 국방기술품질원, 국방과학기술진흥연구소, 국방과학연구소, 각 군, 업체 등으로 규정하고 있다.

국방표준서 작성관리기관은 표준화 업무규정 제 69조 2항에 따라 국방표준서 제·개정(안) 작성을 관리한다. 제정 후 국방표준서의 관리(개정 등)는 Table 1에 명시된 기관들이 수행한다.

Table 1. Overview of task the Defense Standards

Category	Contents
Agency in charge	R&D management agency, Project (service) management agency, Exclusive Agency
Review and Operation System	Technical Review Committee (DAPA), Expert Committee (Exclusive Agency)
Suitability Review	Review every five years from the date of enactment and revision

그 중 국방표준서 전담기관은 표준화 업무규정 제 69조 3항에 따라 국방표준서 심의(안)에 대한 기술 지원, 국방표준서에 대한 적절성 검토 및 관리(개정·폐지 및 공개 등), 국방표준서 제도 활성화를 위한

조사·연구 등을 수행하며, 현재 국방기술품질원이 그 업무를 담당하고 있다.

국방표준서 제정 기준은 표준화 업무규정 제71조에 명시된 5가지 국방표준서 제정 및 적용 원칙을 적용하여 추진하고 있다.

첫째, 군수품에 공통적, 반복적으로 사용되는 규정, 절차, 규정, 원자재, 시험방법 등에 대해서는 국방표준서로 제정한다.

둘째, 유사한 국방표준서 제정을 지양하고 유사 표준서들은 통폐합한다.

셋째, 국방표준과 동일한 내용의 국방표준서를 제정한 경우에는 해당 국방표준을 폐지하여야 한다.

넷째, 국방표준 폐지가 완료되기 전까지 국방표준서와 국방표준 사이에 일관성이 없거나 차이가 있는 경우에는 국방표준서의 내용이 우선한다.

다섯째, 무기체계 연구개발 또는 핵심기술 연구개발과 연계하여, 그 산출물의 활용을 통해 공통 기준, 절차, 방법 등에 대한 국방표준서를 제정할 수 있다.

국방표준서 제정 업무는 Table 2와 같이 2019년 시행 이후 2022년까지 257종이 제정되어 운영되고 있다.

Table 2. Status of Defense Standards(2019-2022)

Category	Year of enactment				Total
	2019	2020	2021	2022	
Frequency	63	82	80	32	257
Ratio(%)	24.5	31.9	31.1	12.5	100.0

국방표준서 개정·폐지 업무는 5년마다 시행하고 있는 국방표준서 적합성 검토절차에 따라 추진한다. 국방표준서 작성관리기관이 차기 연도(F+1) 국방표준서 적합성 검토계획을 당해 연도(F년) 12월 말까지 작성하여 방위사업청에 제출하고, 국방표준서 적합성 검토 매 분기 종료 시까지 검토 완료하여야 한다.

국방표준서 적합성 검토는 적합성 검토 실시기관에서 국방표준서의 적정성을 검토하고, 필요하다고 인정할 때 개정 또는 폐지를 위한 행정조치를 수행하며,

절차는 국방표준서의 개정·폐지 절차에 따른다.

방위사업청은 국방표준서 적합성 검토 실시기관의 검토 결과에 대한 관리와 유지를 위하여 전산 이력관리를 추진하고, 적합성 검토 실시기관은 적합성 검토가 완료되면 국방표준서 개정 및 폐지 등에 관해 소요군의 의견을 반영한다.

국방표준서 작성 관련기관은 국내 산업기술의 향상 또는 군사요구도의 변경 등으로 개정 또는 폐지가 필요하다고 인정할 때 국방표준서의 개정 또는 폐지를 국방표준서 작성관리기관에 요청할 수 있다.

2.2. 미국의 국방표준화 프로그램

미 DoD(Department of Defence)의 ASSIST(Acquisition Streamlining and Standardization Information System)에 관리 중인 표준화 문서는 2022년 미국의 국방표준화 프로그램(Defense Standardization Program, DSP) 보고서에 따르면, Table 3과 같이 전체 114,658개 중 28,559개의 활성 문서가 유지되고 있으며, 설계, 획득, 지원, 품질보증 등 무기체계를 뒷받침하는 기술, 엔지니어링 문서로 관리되고 있다. 매년 평균 2,500건의 개정, 통지 또는 새 문서를 포함하여 3,000건 이상의 문서의 제·개정 업무가 발생하는데, 제·개정 사유의 대부분은 인용문서의 최신화 정보와 관련성이 있다[6].

미 DoD는 국가 기술이전 및 발전에 관한 법률(National Technology Transfer and Advancement Act)에 따라 비정부 표준을 사용하는 모든 연방 기관과 표준 및 적합성 평가 활동에 협력관계를 유지하고 있다. DoD는 표준화 프로그램의 모든 문서의 약 1/3을 구성하는 8,172개의 비정부 표준을 채택하고 있다.

해당 자료들은 군사적으로 고유하거나 상용 프로세스, 절차, 활동 및 방법에 대한 공통된 공학적, 기술적 요구사항을 수립하는 문서들로 DSP에 따라 DSPO(Defense Standardization Program Office)에서 관리한다.

Table 3. Number of Active Standardization Documents in ASSIST(US DoD, As of January, 2022)

Standardization Documents		Abbreviation	Active	Total	Ratio(%)
Defense Standardization Documents	Defense Standard	MIL-STD	494	2,671	1.7
	Defense Specification	MIL-SPEC	10,170	57,870	35.6
	Defense Handbook	MIL-HDBK	302	653	1.1
	Data item Description	DID	1,225	1,789	4.3
International Standard Agreements	International Standard Agreement	ISA	2,780	4,884	9.7
Nongovernmental Standards	Nongovernment Standard	NGS	8,333	14,130	29.2
Federal Standardization Documents	Federal Standard	FED-STD	78	1,018	0.3
	Federal Specification	FED-SPEC	570	7,521	2.0
	Commercial Item Description	CID	2,820	8,592	9.9
Other	Other Document Types	-	1,787	15,530	6.3
Total Documents			28,559	114,658	100.0

DSP 절차는 원본 권한과 목적으로 구별되는 9가지 주요 유형의 표준화 문서를 정의하고, 프로세스, 관행, 절차 및 방법을 설명하는 것을 “표준서”라고 정의하고, 제품 또는 프로세스에 대한 특정 기술 요구사항을 식별하는 문서를 “규격서(사양서)”라고 정의한다.

2.2.1. 국방규격서(Defense Specification, MIL-SPEC)

국방규격서는 군용 고유 재료 또는 실질적으로 수정된 상용 품목에 대한 필수 기술 요구사항을 설명하는 사양이며, MIL-PRF-32562, MIL-C-17/179B 및 MIL-DTL-5541F 등의 형식으로 구성한다.

2.2.2. 국방표준서(Defense Standard, MIL-STD)

국방표준서는 군용 고유 또는 실질적으로 수정된 상업적 프로세스, 절차, 관행 및 방법에 대한 균일한 엔지니어링 및 기술 요구사항을 설정하는 표준이다. 국방표준은 인터페이스 표준, 설계기준 표준, 제조 공정 표준, 실행업무 표준, 시험방법 표준의 5가지로 구분되며, MIL-STD-810, MIL-STD-961 및 MIL-STD-130 형식으로 구성한다.

2.2.3. 국방 핸드북(Defense Handbook)

국방 핸드북은 DSP에서 다루는 재료, 프로세스, 관행 및 방법에 대한 표준 절차, 기술, 엔지니어링 또는 설계 정보를 제공하며, 문서의 형식은 MIL-HDBK-116, MIL-HDBK-251 및 MIL-HDBK-2189과 같이 구성한다.

2.2.4. 데이터 항목 설명서(Data item Description, DID)

데이터 항목 설명서(DID)는 계약자에게 필요한 데이터를 정의하는 완성된 양식이며, 데이터 콘텐츠, 준비 지침, 형식 및 용도를 정의한다. 문서의 형식은 DI-TMSS-80007, DI-QCIC-80203 및 DI-ILSS-80483 구성한다.

2.2.5. 연방규격서(Federal Specification, FED-SPEC)

연방규격서(FED-SPEC)는 상용 또는 수정된 상용 제품에 대해 미 조달청인 GSA(General Services Administration)에서 발행하거나 통제하는 사양으로, 상용 품목 기술서(CID)에 대해 광범위한 요구사항 또는 테스트를 포함하며, O-I-1279B 및 W-L-101/37B. 형식으로 구성한다.

2.2.6. 연방표준서(Federal Standard, FED-STD)

연방표준서는 모든 연방 기관에서 사용하는 프로세스, 절차, 관행 및 방법을 다루는 GSA에서 발행하거나 통제하는 표준이며, FED-STD-313 및 FED-STD-H28과 같은 형식으로 구성한다.

2.2.7. 상용 품목 기술서(Commercial Item Description, CID)

상용 품목 기술서는 GSA에서 관리하는 간소화된 제품 설명으로, 기능 또는 성능 특성별로 정부의 요구를 충족하는 사용 및 허용 가능한 상용 품목을 설명하며, A-A-180C 및 A-A-1889와 같은 형식으로 구분한다. 우리 군은 이러한 형식의 문서를 구매요구서로 정의하고 있다.

2.2.8. 국제 표준화 협정서(International Standardization Agreement, ISA)

국제 표준화 협정서는 비슷하거나 유사한 군사 장비, 탄약, 공급품 및 상점을 채택하기 위한 다국적 조약 기구의 일부 또는 모든 회원국 간의 협정 기록이며, AOP-52 및 STANAG-7098의 형식으로 구성한다.

2.2.9. 비정부 표준(Nongovernment Standard, NGS)

비정부 표준은 표준, 사양, 핸드북 또는 관련 문서를 계획, 개발, 설정 또는 조정하는 민간 부문 협회, 조직 또는 기술 협회에서 개발한 국가 또는 국제 표준화 문서이며, 개별 회사의 기준을 포함하지는 않는다. ASSIST는 DoD에서 채택한 NGS를 나열하며, ASME-B16.18, IPC-T50, ASTM-B166, ISO8535-1 및 SISO-STD-013 형식으로 구성한다.

2.3. 미국의 국방표준서 문서 유형

미국의 국방표준화 프로그램에서 관리되고 있는 문서 중 미 국방표준서는 주로 여러 개의 군사적인

고유 응용 프로그램을 충족하기 위해 Table 4와 같이 인터페이스 표준(Interface Standard), 설계기준 표준(Design Criteria Standard), 제조 프로세스 표준(Manufacturing Process Standard), 실행업무 표준(Standard Practice), 시험방법 표준(Test Method Standard)의 5가지 유형으로 구분하며, 전체 국방표준화 프로그램 문서 중 1.7% 수준에서 관리되고 있다[7].

Table 4. Registration status by type of U.S. defense standards (As of 2023)

Category	Frequency	Ratio(%)
Design Criteria Standard	39	9.4%
Interface Standard	116	27.8%
Manufacturing Process Standard	7	1.7%
Standard Practice	149	35.7%
Test Method Standard	106	25.4%
Total	417	100.0%

2023년 기준 ASSIST에 등록된 국방표준서는 417종이며, 제정되어 등록된 현황은 실행업무 표준 149종(35.7%), 인터페이스 표준 116종(27.8%), 시험방법 표준 106종(25.4%), 설계기준 표준 39종(9.4%), 제조 프로세스 표준 7종(1.7%) 순으로 등록되어 있다[8].

2.3.1. 인터페이스 표준

인터페이스 표준은 상호 교환성, 상호 연결, 상호 운용성, 호환성 또는 통신을 허용하기 위해 시스템, 하위 시스템, 장비, 조립품, 구성 요소, 항목 또는 부품의 물리적, 기능적 또는 군사 운영 환경 인터페이스 특성을 지정한다.

2.3.2. 설계기준 표준

설계기준 표준은 시스템, 하위 시스템, 장비, 조립품, 구성품, 품목 또는 부품의 개발에서 준수해야 하는 군 고유 설계 또는 기능 기준을 설정한다.

2.3.3. 시험방법 표준

시험방법 표준은 제품 또는 프로세스의 품질, 특성, 성능 및 속성을 측정, 식별 또는 평가하기 위한 절차 또는 기준을 지정한다.

2.3.4. 실행업무 표준

실행업무 표준은 특정 비 제조기능을 수행하는 방법에 대한 절차를 지정하는 표준으로 최소한 일정 시간 동안 민간부문 회사로부터 계약자를 통해 획득되는 기능을 위해 개발된다.

2.3.5. 제조 프로세스 표준

일반적으로 국방부는 제조 프로세스 표준을 개발해서는 안 된다. 그러나 드문 경우지만 DoD만이 그러한 프로세스를 지정하기 위한 필요 지식을 갖고 있는 경우 DoD가 제조 프로세스를 지정하는 표준을 개발할 수도 있다. 이를 위해 제조 프로세스 표준은 제조공정의 원하는 결과나 제조 프로세스 수행 방법에 대한 특정 절차 또는 기준을 명시해야 한다.

3. 국방표준서 운영제도 현실태 및 개선 방안

3.1. 제도화 측면

미국의 국방표준화 프로그램은 public Law 104-113, 국가 기술이전 및 발전에 관한 법률(National Technology Transfer and Advancement Act)의 법적 근거를 바탕으로 DoD 지침인 Instruction 4120.24 'Defense Standardization Program'을 제정하여 관리하고 있다.

관련 우방국인 NATO 회원국 역시 북대서양 조약에 따라 AAP-03 NATO 표준화 문서의 생산, 유지 및 관리에 대한 지침(Directive for the production, maintenance and management of NATO standardization documents)을 제정하여 NSO

(Nato Standardization office)에서 STANAG (Standardization Agreement)를 관리 및 운영하고 있다.

하지만 우리나라의 경우 관련 법령 및 시행령인 「방위사업법」 제26조(표준화)와 「방위사업법 동 시행령」 제31조에는 국방규격 제·개정 업무만이 명시되어 있을 뿐, 국방표준서 운영에 관한 법적 근거는 반영되지 못한 실정이다.

이를 개선하기 위해 Table 5와 같이 방위사업법 제26조와 방위사업법 동 시행령 제31조에 국방표준서 업무가 반영될 수 있도록 관련 법령 및 시행령 정비 필요하다.

Table 5. Amendment to Defense Acquisition Program Act & Enforcement

Relevant Act & Enforcement	Before	After
Defense Acquisition Program Act & Enforcement Article 26	formulate, amend, or abolish the standards for munitions	formulate, amend, or abolish the specifications and standards for munitions
Enforcement Defense Acquisition Program Act Article 31	Enactment and Amendment of National Defense Standards	Enactment and Amendment of National Defense Standards and Specifications

3.2. 제도 활성화 측면

국방표준서 제도 활성화를 위해 선제적으로 해결되어야 할 몇 가지 개선사항이 있다.

첫째, 국방표준서의 공개등급에 대한 재검토가 필요하다.

국방표준서는 방위사업청 표준화 업무규정 제77조 2호에 공개를 원칙으로 하고 있다. 하지만, Table 6과 같이 현재 제정된 국방표준서 중 1.9%만이 전체 공개등급으로 분류되어 있어, 국방표준서의 활용 접근성에 제한적 요인으로 인식되고 있다.

Table 6. Disclosure of Defense Standards (2019-2022)

Category	Year of enactment				Total	Ratio (%)
	2019	2020	2021	2022		
Internal	25	35	11		71	27.6
Company	36	47	67	31	181	70.4
Full	2		2	1	5	1.9
Total	63	82	80	32	257	100.0

미 DoD의 경우 ASSIST를 통해 별도의 접근 권한 없이 28,559개의 활성화 문서에 대해 생성, 유지 관리, 검색 및 구현하는 데 사용될 수 있도록 시스템을 운영하고 있다[8]. 또한, 수년에 걸쳐 QPD (Qualified Products Database), WSIT(Weapon System Impact Tool) 및 Pin Point와 같은 추가 기능 및 도구를 ASSIST와 통합하여 표준화 문서를 활용하는 사용자들을 위한 프로세스 및 분석 기능을 자동화하였다.

이렇듯, Table 7과 같이 공통적이고 반복적인 사항을 기술하고 있는 국방표준서의 경우 활용 접근성이 쉽도록 전체 공개(Full) 기본원칙으로 정하고, 보안상의 이유로 업체 공개(Company) 및 내부 공개(Internal) 등의 제한적 공개 대상에 대해서는 국방표준서의 활용 지수 현황과 요구사항에 대한 사전 검토 심의 등을 통해 결정하도록 한다. 또, 국방표준서 활용 접근성 향상을 위해 국방표준종합정보시스템(Korea Defense Standard Information System, KDSIS) 접근 권한을 미 DoD의 Assist 시스템 수준으로 개선한다면 국방표준서의 접근성이 향상될 것으로 판단된다.

Table 7. Improvement of Disclosure of Defense Standards

Category	Before	After
Basic Principles	Review of Open rating	Review of Full disclosure
KDSIS	restrictive approach	Full Access

둘째, 관련 분야의 제조기업이 국방표준서를 적극 활용할 경우 제공되는 인센티브 방안이 모색되어야 한다.

방위사업청은 방위사업법 제29조의34 품질경영 체제인증(이하 “품질경영인증”)을 받은 방산업체의 경우 군수품 조달 또는 방산물자의 연구개발 등을 위한 계약 체결 시 가산점을 부여하도록 명시하고 있다.

하지만, 품질경영인증은 군수품 규격 또는 국방규격으로 생산된 제품만을 기준으로 정하고 있어 국방표준서를 적용한 제품 생산 및 공정 개선 등의 경우는 반영되지 못하고 있다.

미 DoD의 경우 안정적인 디자인 및 구성 제품으로 인정된 경우 QPL(Qualified Product List) 제품으로 인증하여 운영하고 있는데, 이러한 QPL 이외도 제조업체의 재료 및 프로세스를 인정한 QML (Qualified Manufacturer List) 인증 제도를 운영하여, 반복 가능한 시험 및 인증업무를 면제시켜 줌으로 반복적인 시험비용 절감과 과도한 행정소요를 감소시켜 국방경영 효율화에 기여하고 있다.

따라서 우리 군도 Table 8과 같이 국방표준서 활용 우수기업에 대해 국방품질경영상 가점, 물품적격 심사기준 가점, 품질검사 일부 면제 등의 인센티브를 국방품질경영시스템(Defense Quality Management System, DQMS) 심사대상에 반영하여 군수산업 현장에서의 국방표준서 활용도 증대를 도모할 필요가 있다.

Table 8. Improvement of Defense Standards Incentives

Category	Before	After
DQMS certification target	Defense Specification	Defense Specification & Standard

3.3. 제도 효율화 측면

국방표준서 제도 효율화 측면에서도 몇 가지 개선이 필요하다.

첫째, 군수품 기능 분류에 대한 재검토 및 정비가 필요하다. Table 9와 같이 2022년 기준 제정된 국방표준서 257종 중 81.3%(209종)가 군수품 기능 분류상 '기타'로 분류되어 있어, 국방표준서 관리 및 운영에 비효율적인 요인으로 인식되고 있다.

Table 9. Status of defense standards by functional classification

Category	Frequency of Enactment	Ratio(%)
Subsistence	1	0.4
Others	209	81.3
Combat Reserve Oil	2	0.8
General Material	1	0.4
Personal Belongings	13	5.1
Ammunition	3	1.2
Communication	4	1.6
Paint	3	1.2
Clothing	8	3.1
Firepower	1	0.4
Chemical	12	4.7
Total	257	100.0

2.3절의 사례에서 살펴본 것처럼 미국의 경우 국방표준서의 효율적 관리와 운영을 위해 5가지 분류로 구분하여 군사적 상호 연계성 체계를 구축하고 있다.

우리 군도 미 DoD 국방표준서 5가지 분류기준과 같이 상호 연계성을 고려하여 Table 10과 같이 표준 활용 특성분류를 고려한 제도 정비가 필요하다.

Table 10. Improvement of Functional classification

Category	Before	After
Functional classification	Functional Classification of Defense Specification	Functional classification by characteristic

둘째, 국방표준서의 활용성에 대한 체계적 관리와 분석을 위한 모니터링시스템 개선이 필요하다.

국방표준서는 제정된 후 방위사업청 KDSIS에 등록되어 활용되어 진다. 하지만, 現 KDSIS는 국방표준서의 심의 요청, 검색 및 조회 등의 정보 제공 위주의 기능만이 구현되어 있어, 국방표준서 활용성에 대한 분석 등의 모니터링 기능에는 한계를 지니고 있다.

따라서 국방표준서의 효율적인 운영관리 시스템 개선을 위해 Table 11과 같이 국방표준서 활용도를 분석할 수 있는 활용도 지수 개발이 필요하다. 또, 국방표준서 활용도 지수 기능은 KDSIS에 기존 이력 현황 확인 기능에 추가하여 열람하거나 저장된 국방표준서의 통계적 처리 기능과 연계하여 국방표준서 활용도에 대한 가시적 지표를 도출할 수 있도록 개선해야 한다.

Table 11. Improvement of Defense Standards Incentives

Category	Before	After
Utilization Index	-	Number of Inquiries and Views & Add citation status check function
Monitoring system (KDSIS)	Only history can be checked	Only history can be checked & Utilization Index

4. 결론

본 연구는 미국 국방표준화 프로그램 운영사례를 중심으로 우리 군의 국방표준서 운영제도의 주요 현실태를 분석하여 문제점을 파악하고 몇 가지 개선 방안을 도출하였다.

첫째, 국방표준서의 대내·외적 제도 활성화를 위해서 관련 법령인 방위사업법에 국방규격 업무와 동일 수준의 국방표준 업무 명시가 필요하다는 점을 식별하였으며, 방위사업법 및 동 시행령에 국방표준

관련 조항에 대한 수정(안)을 제안하였다.

둘째, 국방표준서 활성화를 위해 기존의 공개등급 기준 개선이 필요하다. 관련 규정에 공개를 원칙으로 하고 있으나, 현실태에서는 일부 제한된 정보만이 공개되고 있어 국방표준서 활성화에 제약요인으로 인식되고 있었다. 이를 개선하기 위해 기존의 제정된 국방표준서의 공개등급 재검토가 필요하며, 신규 제정되는 국방표준서의 경우 전체공개를 원칙으로 하여 보안상의 이유로 제한적인 공개등급 부여가 필요할 경우만 심의를 통해 결정하는 방식으로의 제도 정비가 필요하다.

셋째, 국방표준서 운영 활성화를 위해 국방표준서 활용 우수기업에 대한 인센티브 제공이 필요하다. 현재 국방규격을 적용하여 군수품을 생산하는 기업의 경우 방위사업법에서 정하고 있는 ‘품질경영인증’ 대상이 되어 군수품 조달 또는 방산물자의 연구개발 등을 추진 시 계약 체결에서의 가산점이 부여되고 있다. 향후 국방표준서 활용성 증대와 제도 활성화를 위해서는 ‘국방품질경영’ 인증 대상에 국방표준서도 포함하여 국방규격서와 동일한 인센티브 대상으로 적용해야 할 것으로 판단된다.

넷째, 국방표준서 기능 분류에 대한 재검토와 제도 정비가 필요하다. 2019년부터 시행된 국방표준서 업무는 국방규격 제·개정 업무 기준 및 절차를 다수 준용하고 있어 제정된 국방표준서 기능 분류 특성이 국방규격과 동일하게 적용되고 있다. 이는 국방표준서의 기능과 특성을 고려할 때 업무의 체계적 관리 측면에서 비효율적인 요인으로 인식될 수 있다. 이를 개선하기 위해 선진사례인 미 DoD 국방표준서 특성분류 체계를 검토하여 우리 군도 적용할 필요가 있다.

다섯째, 국방표준서 활용도에 대한 체계적 관리와 분석을 위한 활용도 지수 개발 및 모니터링시스템 개발이 필요하다. 현재 국방표준서 자료는 KDSIS를 통해 관리되고 있지만, 국방표준서 활용 실적 등에 대한 분석자료는 제공되고 있지 않다. 또한, 타 표준 및 국방규격 등과의 상호 연계성을 확인할 수 있는 수단도 제한적인 실정이다. 이를 개선하기 위해 국방

표준서 활용도 지수 개발이 필요하며, KDSIS 기능 개선을 통해 모니터링 체계를 강화해 나가야 할 것으로 판단된다.

기존의 국방표준서 관련 연구는 주로 선진국의 국방표준서 동향 분석 연구, 국내 산업표준과 미 국방표준서 관리체계에 대한 개념, 절차, 상호운용성 측면 위주 등의 개념적인 연구들에 머물러 있어, 국방표준서 제도를 시작하는 현시점에서 연계성 있는 문제점 분석과 정책 대안을 제시하는데, 한계가 있었다.

본 연구는 우리 군의 국방표준서 운영실태를 제도화 측면, 제도 활성화 측면, 제도 효율화 측면의 다각적인 관점에서 현상을 분석하고 개선 방안을 도출하였다. 특히, 선진사례인 미 DoD 국방표준화 프로그램 사례를 우리 군의 실정에 맞는 국방표준서 운영체제의 주요 문제점과 연계하여 개선 방안을 도출하고 대안을 제시하였다는 점에서 그 의의를 찾는다.

하지만, 지속적인 국방표준서 운영 활성화를 위해서는 본 연구를 통해 도출된 국방표준서 활용도 지수 개발, 모니터링시스템 개선 등의 추가적인 연구가 필요하며, 이를 위해 향후 추가적인 연구를 통해 보완 발전시킬 예정이다.

참고문헌

- 1 Defense Standardization Guidebook, Defense Agency for Technology and Quality, p. 94, 2020.
- 2 Defense Acquisition Program Administration, <https://www.dapa.go.kr/dapa/rlm/rlawd/RIlnNttList.do>, 2023, 8, 1
- 3 Yeom, S.-K., & Jang, J.-Y., "A Study on the Introduction of Defense Standard for the Systematic Management of Defense Technical Data", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(8), pp. 164-171, 2021.
- 4 Son, H. G., and 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*, 23(8), pp. 348-356, 2022.

- 5 Defense Standards Improvement Work Guidebook, Defense Agency for Technology and Quality, 2021.
- 6 State of the Defense Standardization Program Report Special Edition, US DoD, pp. 3-5, 2022.
- 7 Defense Standardization Program(DSP) Procedures(MANUAL 4120.24), US DoD, p. 34, 2014.
- 8 ASSIST(Acquisition Streamlining and Standardization Information System), <https://quicksearch.dla.mil/qsSearch.aspx>, 2023, 11, 30

군대에서 다림질 경험이 의복 다림질 관리행동에 미치는 영향: 20~50대 성인 남성을 대상으로

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

Effect of Military Ironing Experiences of 20s-50s Men on Their Clothing Ironing and Care Behaviors

이선영, Sunyoung Lee

충남대학교, 바이오응용화학연구소, 연구원
Researcher, Research institute for Applied Chemistry & Biological Engineering, Chungnam National University

이정순[†], Jungsoon Lee

충남대학교, 의류학과, 교수
Professor, Department of Clothing and Textiles, Chungnam National University

Abstract

In this study, we investigate clothing ironing, clothing care perceptions and habits, and current usage of iron products among adult men in their 20s to 50s. Additionally, we examine whether differences exist in clothing ironing and care behaviors based on ironing experience in the military or by age. A total of 640 adult men in their 20s to 50s who were discharged from the military and white-collar workers living in Korea are surveyed using a questionnaire. The data are statistically processed using SPSS 26.0, and descriptive statistics, frequency analysis, cross tabulation, and t-tests are used for analysis. The result shows that 'ironing' is perceived as the least preferred after 'cleaning the house' among houseworks. 'Ironing' provides the impression of 'neatness.' Replies belonging to the ironing category include 'removing wrinkles from clothes using a hot plate iron', 'steam treatment with a steam iron', 'classifying clothes to be ironed by type', 'treating clothes using a clothing care device', 'crumples are treated' and 'spraying water on clothes'. Additionally, 'functions of ironing' and 'wrinkle removal' are recognized as the most important aspects. Compared with the men without military ironing experience, those with military ironing experience indicate significantly higher levels of ironing satisfaction and frequency (once a week), prefers luxury ironing information, verifies labels before ironing, and exhibit the intention to purchase course-selective iron products. Additionally, the older age groups indicate greater satisfaction with ironing and a higher ironing frequency (once a week). Based on these results, we provide basic data for the development of high-performance iron products.

keywords : Clothing ironing and care behaviors, Ironing perception, Ironing habits, Current usage of iron, Ironing xperience in military

[†] Corresponding Author : Jungsoon Lee

Tel : +82-042-821-6830, email : jungsoon@cnu.ac.kr

Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 8th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

의복 관리행동은 의복을 계획하고 사용하고 정리, 보관하며, 착용하지 않는 의복을 처리하는 과정으로 의생활의 실천이며 의생활을 영위하기 위한 구체적인 행동이다. 의생활 과정을 과학적이고 합리적으로 영위하여야 하며, 이를 위해 의류와 관계되는 물질적 자원과 노력 등을 최대한 유효하게 운영하고자 의복 관리가 필요하다[1]. 의복 관리행동은 가족원의 목적 달성과 욕구충족뿐만 아니라 환경보전과 효율적인 자원 활용을 위해 합리적이고 과학적인 지식을 바탕으로 발전적인 의생활을 영위하는데 나타나는 행동으로 정의할 수 있다[2]. 의복 관리에 있어서 의복을 세탁, 정리 및 손질하는 취급행동은 의복을 처음 상태로 유지하고 보존할 수 있는지에 대해 직접적인 영향을 미치며 경제성과 환경적인 문제를 포함하기 때문에 취급행동을 합리적으로 할 수 있어야 한다[3].

지금까지 의복 관리행동에 관한 선행연구는 특정 지리적 특성, 연령대나 직업군 등 특정 집단을 대상으로 하여 실태 조사로 이루어져 왔다. Lee and Choi[4]는 체계적인 환경과 의생활의 질적 향상을 위하여 서울 거주 도시 가정을 대상으로 세탁 관리행동의 실태 조사연구를 하였다. Chung and Kim[5]은 인천시에 거주하는 노인 여성들을 대상으로 계절별 내의 종류 및 세탁 습관에 관한 실태 조사를 통해 의생활 발전 방향을 제시하였다.

Bae et al.[6]은 20대 이상 여성을 대상으로 유형화된 집단의 라이프 스타일에 따른 의복의 관리행동 중 세탁, 관리부분을 조사하여 세제, 환경, 세탁 효과에 대한 군집 별 유의한 차이가 있는 부분이라 하였다. Lee et al.[7]과 Lee[8]는 대학생들의 세탁 행동, 세탁인지도, 환경보전을 위한 의생활 행동 실태를 조사하여 친환경적인 세탁 관련 교육 프로그램 개발의 기초자료를 제공하였다. Lee and Shim[9]은 남녀 대학생들을 대상으로 의복의 구매, 취급, 보관행동을 포함한 의복 관리행동과 섬유품질표시 활용 실태조사와 인지도와 활용도에 따른 의복 관리행동 차이를 연구하여 대학생들은 관리행동에서 취급

행동이 비교적 낮고 섬유 품질표시의 인지도는 높은 수준이나 실생활에서 실천하고 있지 않다고 하였다. Lee[10]는 예비 교사들을 대상으로 의생활 관리행동 실태를 파악하고, 예비 교사들의 합리적 의생활 관리를 유도하고 변화하는 의생활에 적응하기 위해 의생활 영역의 학습 요구도와 선호도를 연구하였다. Kang[11]은 성인 여성을 대상으로 의생활 관리 및 의류의 환경오염 인식을 연구하여 환경교육적 방안을 제시하고자 하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 성인 남성을 대상으로 한 의복 관리행동 연구는 전무하다. 그러나 가족가치의 확산과 가족 친화적인 사회환경으로 남성의 가사노동 참여는 높아지고 있는 추세이므로 성인 남성을 대상으로 한 의복 관리행동에 대한 연구는 필요하다고 할 수 있다.

한편, 명품 다리미란 고급 재료와 신기술을 활용하여 제작된 고품질 다리미 제품을 말한다. 브랜드의 명성, 뛰어난 성능과 고급스러운 디자인을 제공하며, 다림질 시에 옷을 보호하고 최상의 다림질 효과를 나타낸다. Laurastar, Miele, De'Longhi, Siemens 와 Electrolux 등 럭셔리 브랜드에서 생산되며, 고객의 요구에 맞추어 다양한 모델이 제공된다. 최근, 명품 다리미사인 Laurastar사의 다리미 가격은 100~400만 원대의 비싼 가격을 형성하고 있음에도 불구하고 구매 고객층은 20대 중반 남성과 40대 중반 여성으로, 군대에서 옷을 다려 입던 20대 남성들이 직장생활을 시작한 뒤 양복과 와이셔츠를 다리기 위해 100만 원대 제품을 많이 사고, 가족 옷을 다루는 40대 중반 주부가 400만 원대 고가제품을 주로 구매한다고 회사 측은 전했다[12].

우리나라에서 대부분의 성인 남자들은 다른 사회와는 차별화된 군의 구성원으로서 법률에 의거하여 일정 기간 동안 군 복무를 해야 하며, 군 복무 중에 특별한 군 생활 경험을 하게 된다. 군 생활환경은 내무반, 부대시설, 복무기간, 식사와 군복 등의 영역에서 시간의 흐름에 따라 변화를 거듭해 왔다. 이 중에서 군복은 1960년대 카키색 민무늬 군복, 1980년대 얼룩무늬 군복, 2011년 보급된 디지털 무늬 신형 군

복으로 변화되어 왔다[13]. 디지털 무늬 신형 군복은 현대적이며 활동성이 높고 다림질을 하지 않아도 된다고 알려져 있으나, 군대에서 다림질 경험은 연령대에 따라 다르고, 이는 의류 관리행동에도 영향을 미칠 것으로 생각된다.

군 구성원들과 관련된 많은 연구가 이루어졌는데 Jeong and Hah[14]는 제대 군인의 일반적 특성과 역경 정도, 자아탄력성, 사회적 지지, 군 생활 만족이 군 경험 후 성장에 미치는 영향에 대해 연구하여 병사들의 생활 만족에 영향을 미치는 요인을 살펴봄으로써 병사들을 위한 사회복지 실천 대안을 마련하였다. Cho et al.[15]은 한국 군요원 카투사들의 군 생활 적응도의 만족도와 상관성이 있는 개인적 요인과 환경요인을 규명하였다. Yoo[16]는 군 병사 개인적 특성, 심리적 요인, 부대생활 요인이 군 생활 만족에 미치는 상대적 영향을 연구하였다. Lee and Lee[13]는 심층인터뷰를 통해 여군 육군용 군복의 불만족 사항과 개선 요구사항을 분석한 바 있다.

그런데, 지금까지 군 생활에서 다림질 경험을 의류 관리행동과 관련지어 고찰된 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 20~50대 성인 남성을 대상으로 하여 의류 다림질 관리에 대한 인식, 다림질 관리행동 습관 및 다리미 제품 사용실태를 조사하고자 한다. 군 다림질 경험, 연령대에 따라 다림질 관리 인식, 행동 습관 및 다리미 제품 사용에 있어 어떠한 차이가 있는지 살펴보고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 조사 대상과 조사 도구

본 조사 대상자는 전국에 거주하는 20~50대 성인 남성으로 현역 군필자이며 사무직 종사자를 대상으로 총 640명으로 설문지법을 이용하여 2020년 12월 1일부터 12월 17일까지 조사하였다. 조사도구는 의류학 전문가의 의견과 선행연구[17-18]를 토대로 인구통계학적 특성을 구성하였다. 다림질 인식(가사노동 비선호도, 다림질 범주, 기능, 다림질 과정, 만족도, 명품 다리미 정보, 구매 가격대 등), 다림질 행동 습관(주담당자, 만족도, 빈도, 장소, 보조가전, 세탁소 이용, 문제점, 대상 의류, 라벨 확인 등), 다리미 제품 사용 실태(가격, 성능, 불만족 이유, 종류, 다리미판, 추가기능 등)에 관한 문항을 포함하여 총 39문항으로 구성하였다.

회수된 설문지의 자료는 SPSS-statistics 26.0 프로그램을 이용하여 통계 처리하였으며, 기술통계, 빈도분석, 교차 분석, T-test를 사용하였다.

2.2. 자료 분석

회수된 설문지의 자료는 SPSS-statistics 26.0 프로그램을 이용하여 통계 처리하였으며, 기술통계, 빈도분석, 교차 분석, T-test를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조사 대상자의 일반적인 특성

조사 대상자의 일반적인 특성은 Table 1과 같다. 연령대별로 각 160명을 대상으로 하였다. 결혼 여부는 기혼은 401명(62.7%), 미혼은 239명(37.3%)이었다. 학력별로는 대졸 511명(79.8%), 대학원 졸업 103명(16.1%), 고졸 26명(4.1%)이었으며, 구성원수별로는 4명이 217명(33.9%)으로 가장 많았다. 또한, 거주지별로는 서울 35.0%(224명), 경기 27.8%(178명), 부산 6.7%(43명), 인천 5.0%(32명), 경남 3.6%(23명), 충남 2.7%(17명), 대구 2.8%(18명), 대전, 경북, 전북이 각각 2.3%(15명), 광주 2.0%(13명), 강원 1.6%(10명), 울산 1.4%(9명), 전남 1.1%(7명), 제주 0.4%(4명), 세종 0.3%(2명)이었다. 군 다림질 유경험집단은 85.8%(549명), 무경험집단은 14.2%(91명)이었다.

3.2. 의류 다림질 인식과 다림질 행동습관

3.2.1. 다림질 인식

다림질 관리행동에 대한 인식을 조사하였는데, 가사노동의 종류별 비선호도, 다림질 범주, 기능, 다림

Table 1. Characteristics of subjects

Category		Frequency (%)
Age	20	160 (25.0)
	30	160 (25.0)
	40	160 (25.0)
	50	160 (25.0)
Marriage	married	401 (62.7)
	unmarried	239 (37.3)
Education	High School Graduates	26 (4.1)
	University Graduates	511 (25.0)
	Graduate Graduates	103 (16.1)
Ironing experience in the military	Experienced	549 (85.8)
	Unexperienced	91 (14.2)
Residence	Seoul	224 (35.0)
	Busan	43 (6.7)
	Daegu	18 (2.8)
	Incheon	32 (5.0)
	Daejeon	15 (2.3)
	Ulsan	9 (1.4)
	Gwangju	13 (20.0)
	Sejong	2 (0.3)
	Gyeonggi-do	178 (27.8)
	Gangwon-do	10 (1.6)
	Chungcheongbuk-do	15 (2.3)
	Chungcheongnam-do	17 (2.7)
	Gyeongsangbuk-do	15 (2.3)
	Gyeongsangnam-do	23 (3.6)
	Jeollabuk-do	15 (2.3)
	Jeollanam-do	7 (1.1)
	Jeju	4 (0.6)

질 과정, 만족도 및 명품 다리미 정보 인식 등을 조사, 분석한 결과를 Figure 1에 제시하였다.

우선, 가사노동 중 선호하지 않은 순서를 분석하기 위해 가장 선호하지 않은 평가된 노동에 가중치 5점을, 비선호도 순서대로 평가된 각 노동에 대해 가중치 4점, 3점, 2점, 1점씩 부여하여 각 노동별로 환산된 점수를 이용하여 평균을 구하였다.

가사 노동별로는 ‘집 안 청소하기’(3.575) > ‘다림질하기’(3.383) > ‘옷장 정리하기’(2.881) > ‘요리하기’(2.602) > ‘세탁하기’(2.559) 순으로 나타났다. 여기서 ‘다림질하기’는 ‘집 안 청소하기’의 다음으로 선호하지 않는 가사 노동으로 인식하고 있었다.

다림질하면 떠오르는 단어는 ‘깨끗함/말끔함’ 245명(43.78%) > ‘반듯함/정리감’ 169명(28.45%) > ‘각잡힘/칼주름’ 4명(14.09%) > ‘귀찮음/불편감’ 8명(11.24%) > ‘구김 제거’ 5명(5.35%)으로 나타났다.

다림질 범주에 대해서 보면 ‘열판 다리미로 의류 구김을 제거한다’가 555명(86.719%) > ‘스팀다리미로 스팀 처리한다’는 484명(75.625%) > ‘다림질할 의류를 종류별로 분류한다’는 435명(67.969%) > ‘의류 관리기기(스타일러 등)에 의류를 넣어 처리한다’는 166명(67.188%) > ‘구겨진 의류에 물을 뿌린다’ 430명(67.187%) 순으로 나타났다.

또한, 구김 제거용 스프레이 제품을 분사한다’는 227명(35.469%), ‘건조기에서 의류를 건조한다’는 217명(33.906%), ‘욕실에 옷을 걸어 놓는다’는 135명(21.094%)으로 나타났다.

다리미 기능의 중요도에 대한 조사 결과는 ‘구김 제거’(4.72) > ‘살균/소독’(2.75) > ‘축감 개선’(2.65) > ‘속성/건조’(2.64) > ‘착용자의 이미지 개선’(2.22) 순으로 나타났다. 조사 대상자들이 다리미 기능 중 가장 중요한 것을 ‘구김제거’라고 인식하고 있음을 알 수 있다. 다림질 과정 중 가장 귀찮은 과정은 무엇인지 질문에 대해서는 ‘다림질 본작업’ 74명(46.3%) > ‘다림질 전 준비/세팅 작업’ 61명(38.1%) > ‘다림질 후 정리 작업’은 25명(15.6%) 순이라고 하였다. 누구의 다림질에 가장 만족하는지에 대해서는 ‘세탁소’가 365명(57.0%)으로 가장 많았고 ‘본인’ 206명(32.2%), ‘배우자’ 66명(10.3%) 순으로 나타났다.

명품 다리미정보에 대해서는 114명(17.8%)만이 인식을 하고 있었다. 구매의사가 있는 다리미 가격대에 대해 ‘100만 원 이하’가 599명(93.6%)으로 가장 많았다.

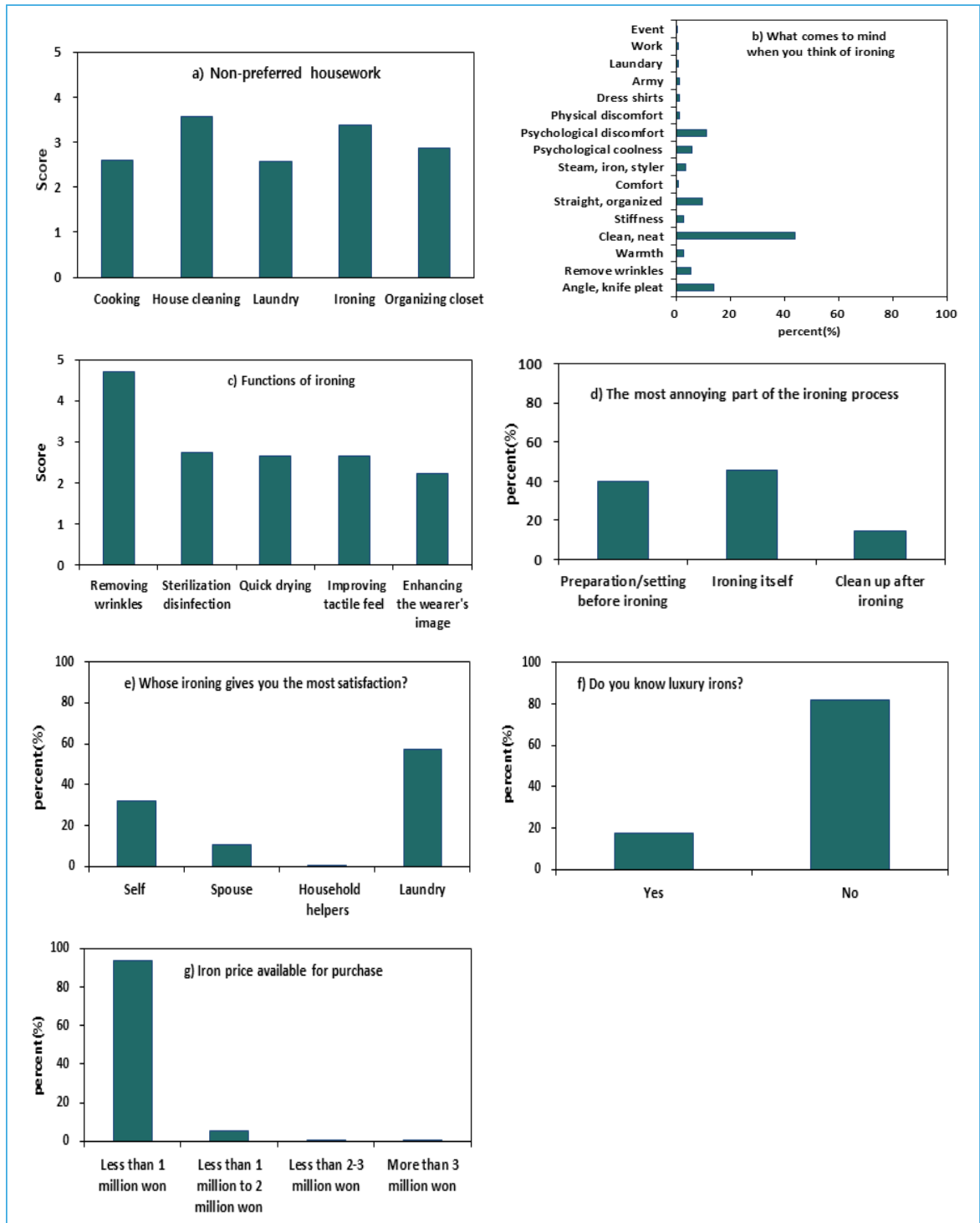


Figure 1. Ironing perceptions: a) Non-preferred housework, b) What comes to mind when you think of ironing, c) Function of ironing, d) the most annoying part of ironing process e) Whose ironing gives you the most satisfaction? e) Whose ironing gives you the most satisfaction? f) Do you know luxury irons? g) Iron price available for purchase

3.2.2. 의류 다림질 관리 습관

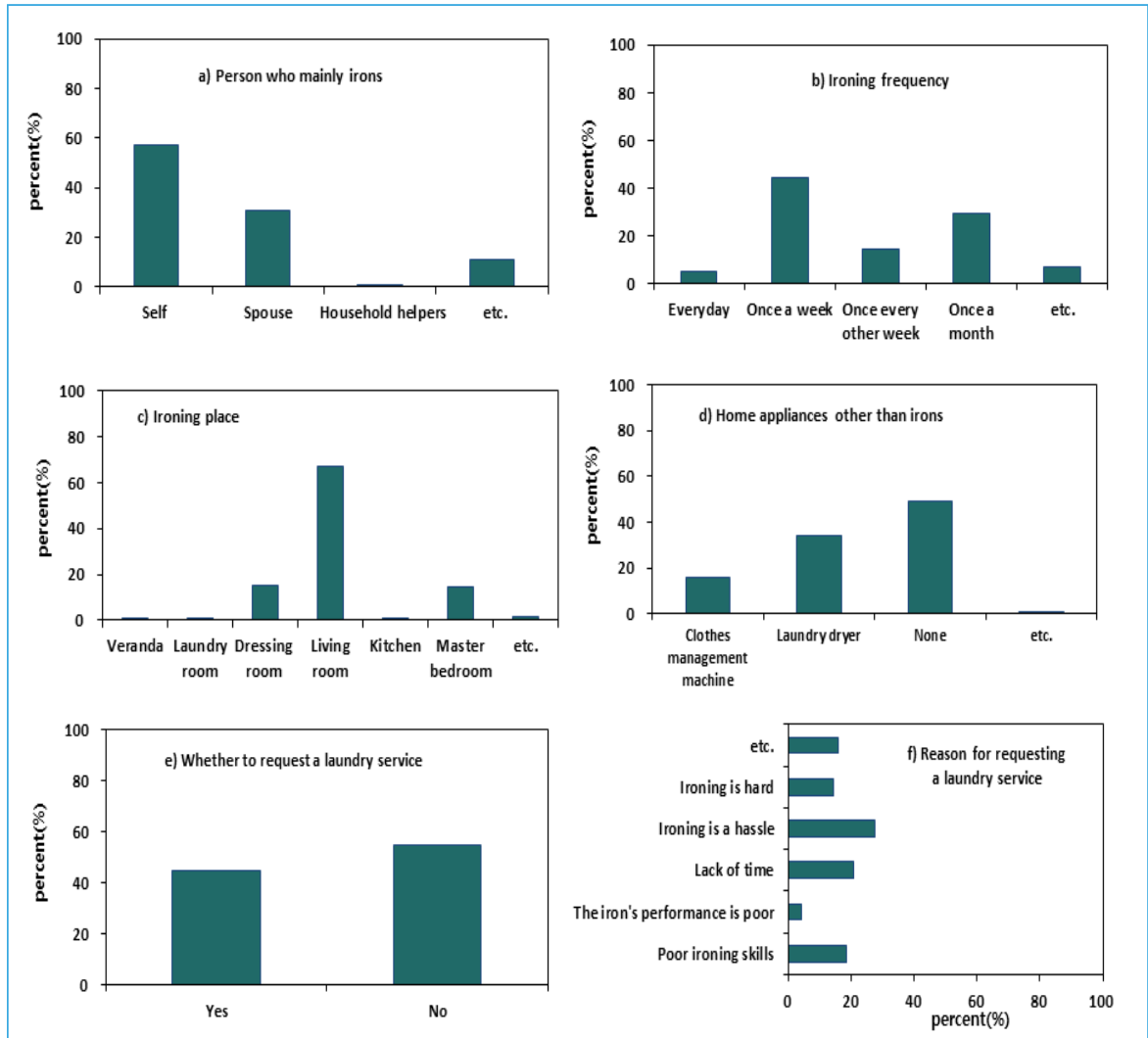
의류 다림질 관리 습관을 조사한 결과를 Figure 2에 제시하였다. 다림질 주담당자는 ‘본인’이 368명(57.5%)으로 가장 많았고, 다음으로 ‘배우자’가 196명(30.6%)으로 나타났다.

다림질 빈도에 대해서는 ‘일주일에 한 번’ 285명(44.5%) > ‘한 달에 한 번’ 187명(29.22%) > ‘격주에 한 번’ 91명(14.22%) 순이었다. 일주일에 한 번 다림질한다고 응답한 비율이 가장 높게 나타났다.

다림질 장소에 대해서는 ‘거실’ 428명(66.9%) > ‘드레스룸(옷방)’ 99명(15.5%) > ‘안방’ 92명(14.4%)

> ‘베란다’ 7명(1.1%) 순으로 나타났다. 다리미 외 사용하는 가전제품에 대한 질문에는 스타일러와 같은 의류관리기, 건조기 등을 들었는데, 보다 효과적인 의류 관리를 위해 이러한 가전제품과 다리미를 동반 사용하는 것을 알 수 있다.

한편, 세탁물을 세탁소에 의뢰하는 이유에 대해 ‘귀찮아서’ 162명(27.55%) > ‘시간이 없어서’ 121명(20.58%) > ‘다림질 기술이 미숙해서’ 107명(18.20%) > ‘다림질이 힘들어서’ 83명(14.12%) 순으로 나타났다. 기타 이유로는 ‘불편해서’, ‘어려워서’, ‘번들거려서’, ‘오래되어서’ 등을 들었다.



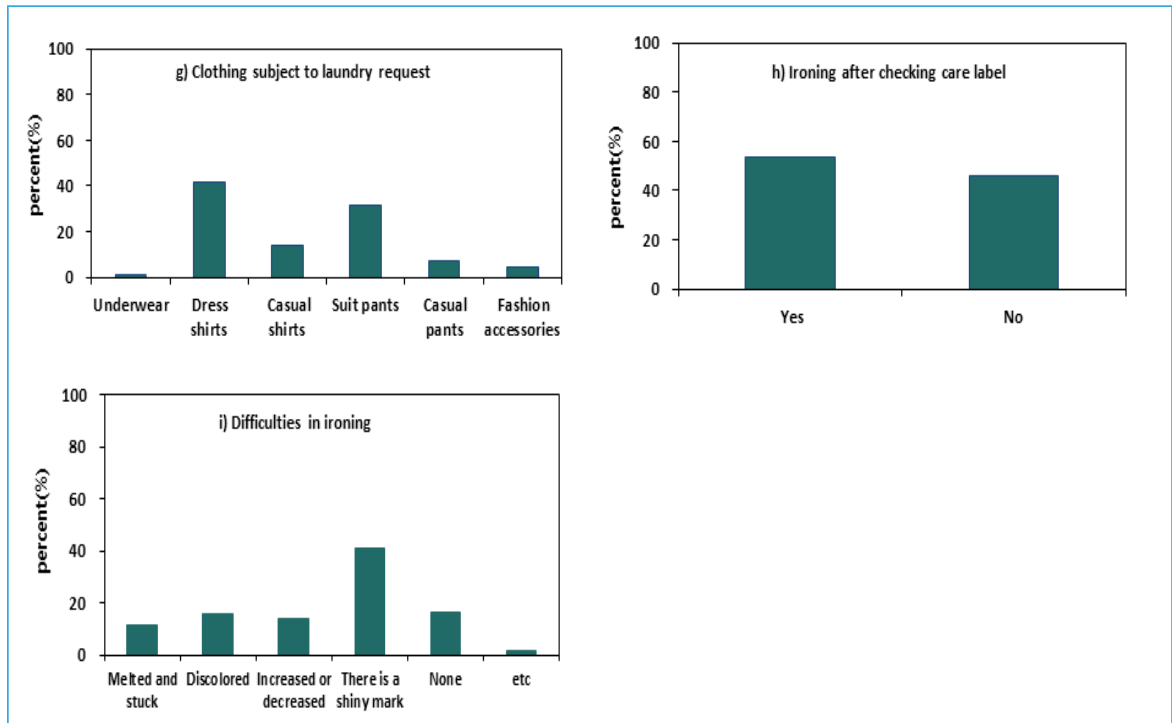


Figure 2. Ironing behavior habits: a) Person who mainly irons, b) Ironing frequency, c) Ironing place, d) Home appliances other than irons, e) Whether to request a laundry service, f) Reason for requesting a laundry service, g) Clothing subject to laundry request, h) Ironing after checking care label, i) Difficulties in ironing.

세탁소에 세탁물을 의뢰하는 대상 의류에 대한 문항에는 ‘Y-셔츠’ 537명(41.34%) > ‘정장 바지’ 410명(31.56%) > ‘캐주얼 셔츠’ 184명(14.16%) > ‘캐주얼 바지’ 93명(7.16%) > ‘패션 소품’ 62명(4.77%) > ‘속옷’ 13명(1.01%)으로 나타났다. 여기서, 조사 대상자들은 Y-셔츠와 정장 바지를 세탁소에 가장 많이 의뢰하고 있었는데, 이는 정장에 해당되는 의류 품목으로 사회활동에서 깔끔한 이미지 연출이 중요한 출근복에서는 보다 더 세심하게 의류를 관리하기 때문이라고 사료된다. 다림질 전 의류 취급표시(care label)를 확인하는지에 대한 질문에 대해 ‘확인한다’(344명, 53.8%)는 과반수 이상으로 나타났다. 다림질 과정에서 가장 어려운 점에 대해서 ‘변들거리는 자국이 생겼다’ 349명(40.82%) > ‘늘어나거나 줄어들었다’ 119명(13.82%) > ‘늘어붙었다’ 97명(11.35%) > ‘변색되었다’ 136명(5.91%) 순으로 나타났다. 번

들거리는 자국이 생겼다는 점을 가장 곤란한 점으로 들었다.

3.2.3. 다리미 제품의 사용 실태 조사

다리미 제품의 사용 실태를 조사하여 분석한 결과를 Figure 3에 제시하였다. 본 조사 대상자들이 현재 주로 사용하고 있는 다리미는 ‘10만원 미만’이 386명(60.3%)이 가장 많았고, 그 다음으로는 ‘10만원 이상~50만원 미만’ 232명(36.3%)으로 나타났다.

현재 사용하고 있는 다리미의 종류에 대해서 ‘스팀식’ 537명(73.16%) > ‘스탠드형 스팀식’ 184명(25.07%) > ‘건열식’ 13명(1.77%) 순으로 나타났다.

다리미 제품의 성능 만족도에 대해 ‘만족한다’가 486명(76.4%)으로 응답비율이 매우 높게 나타났다.

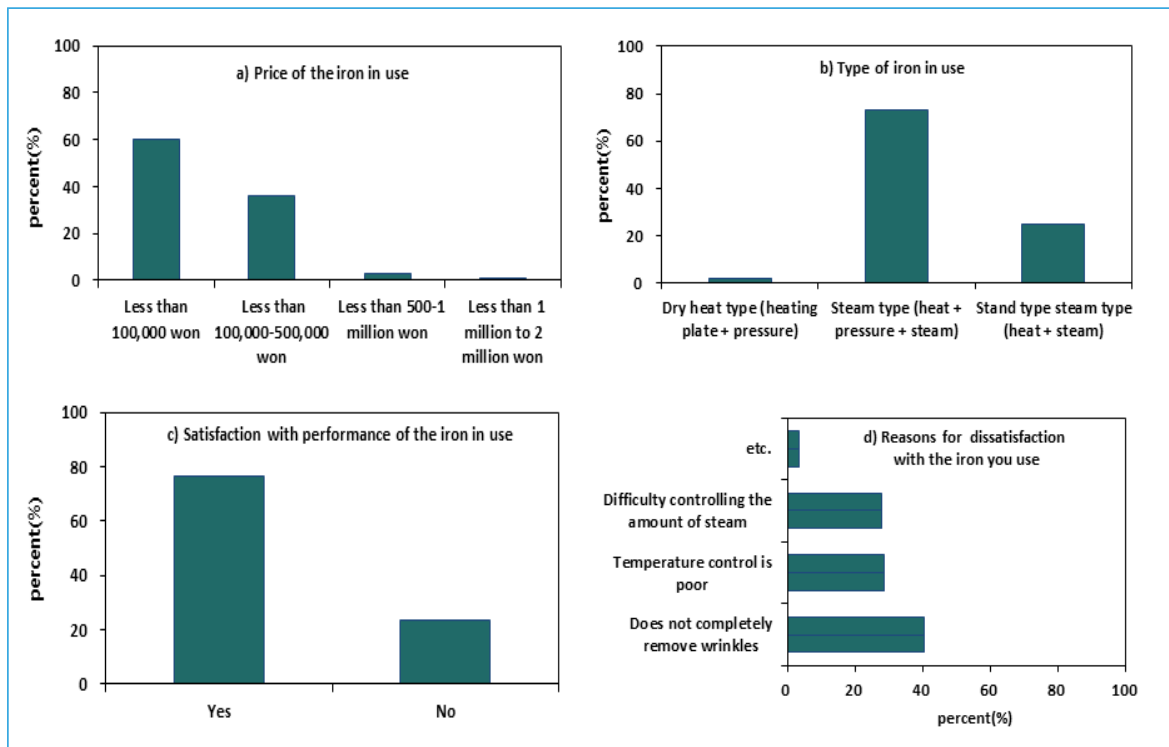


Figure 3. Status of the iron you are currently using: a) Price of the iron in use, b) Type of iron in use, c) Satisfaction with performance of the iron in use, d) Reasons for dissatisfaction with the iron you use.

또한, 다리미 제품에 대해 불만족스럽다고 생각하는 이유에 대해서는 ‘구김의 완벽한 제거가 부족해서’ 85명(13.3%) > ‘온도조절이 원활하지 않아서’ 60명(9.4%) > ‘스팀조절이 원활하지 않아서’ 59명(9.2%) 순으로 나타났다. 그 밖에도 ‘어려워서’, ‘귀찮아서’, ‘불편해서’ 등 이유를 들었다.

다리미판의 사용 실태를 조사한 결과를 Figure 4에 제시하였다. 다리미판의 형태에 대해 ‘좌식형’ 400명(62.5%) > ‘스탠드형’ 172명(26.9%) > ‘겸용(좌식형+스탠드형)’ 69명(10.3%) 순으로 나타났다. 다리미판 성능의 만족도에 대해서는 ‘만족한다’가 34명(67.8%)으로 비교적 높게 나타났다. 다리미판이 불만족스럽다고 생각하는 이유로는 ‘다리미판의 크기가 적절하지 않아서’가 83명(23%) > ‘다리미판 높이가 조절이 되지 않아서’ 72명(11.3%) > ‘다리미판의 형태가 적절하지 않아서’ 69명(10.6%)

> ‘커버 소재가 부적절해서’ 43명(6.7%) > ‘다리미와 다리미판이 일체형이 아니라서’ 19명(3.0%) 순으로 나타났다. 앞으로 구매 의향이 있는 다리미 제품을 조사한 결과를 Figure 5에 제시하였다. 대부분의 조사 대상자들은 섬유류의 종류에 따른 다림질 코스가 설정되어 있는 다리미 제품 선호하는 것으로 조사되었다. 응답자의 90% 이상의 응답자는 온도 조절장치와 스팀양 조절장치가 필요하다고 응답하였다. 이는 일반 다리미와 달리 명품 다리미에는 뛰어난 다림질 효과를 위해 정밀한 온도와 스팀조절 시스템이 탑재되어 있는데, 본 조사 대상자들도 실제로 이러한 정확하고 효율적인 다리미의 기능을 요구하고 있음을 확인하였다. 따라서 이러한 소비자 요구에 맞추어 일반 다리미에서 온도와 스팀양 조절기능을 보다 정밀하게 개선시켜야 할 것으로 사료된다.

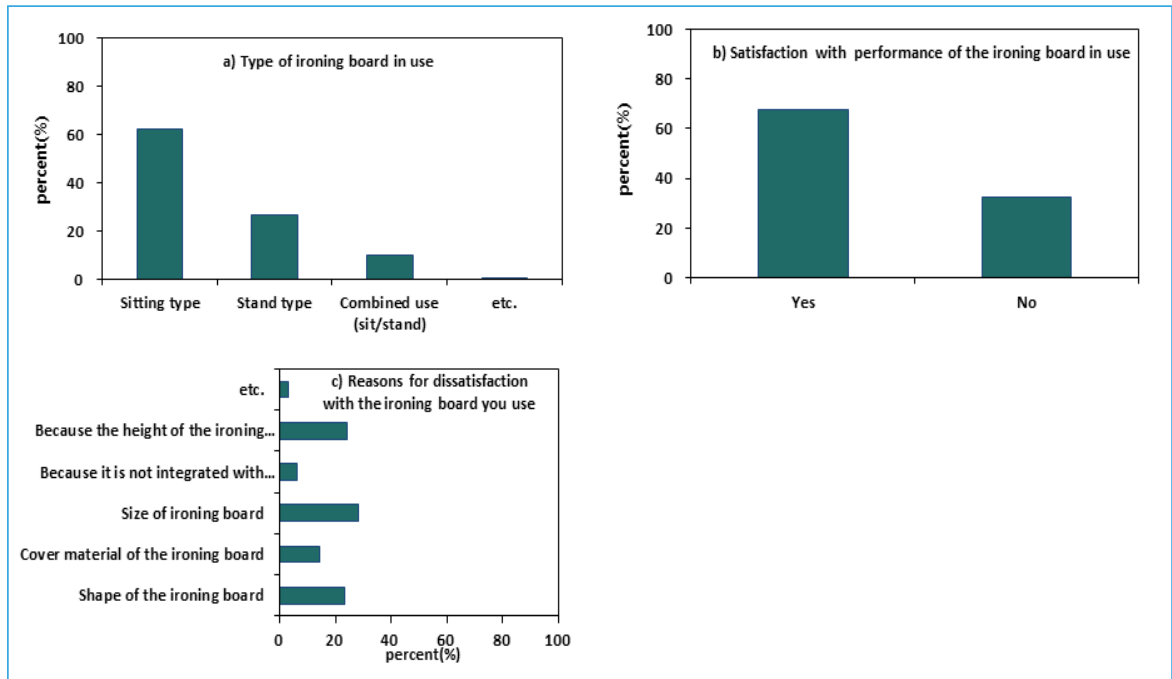


Figure 4. Status of the iron board you are currently using: a)Type of ironing board in use, b) Satisfaction with performance of the ironing board in use, c) Reasons for dissatisfaction with the ironing board you use.

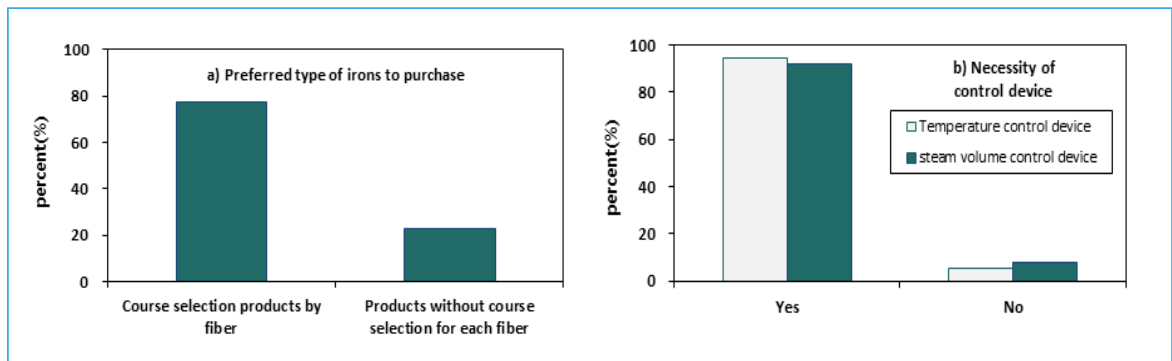


Figure 5. Consumer demands for the Irons: a) Preferred type of irons to purchase, b) Necessity of control device.

3.3. 군 다림질 경험과 연령대에 따른 다림질 관리 행동 차이

3.3.1. 군 다림질 경험에 따른 차이

군 다림질 경험에 따른 다림질 관리행동을 조사하여 교차분석을 실시하고 유의한 차이가 나타나는 문

항을 Table 2에 제시하였다. 다림질 주담당자에 대해 '본인'이라고 응답한 비율이 가장 높았는데, 군 다림질 유경험집단은 322명(55.8%), 무경험집단은 47명(51.7%)으로 유경험집단이 무경험집단보다 더 높게 나타났다. 반면, '세탁소'로 응답한 비율은 유경험집단 53명(9.2%), 무경험집단 21명(23.1%)으로 유경험집단이 무경험집단보다 더 낮게 나타났다. 다

Table 2. Differences in clothing ironing management behavior according to ironing experience in the military

Category	Frequency	Experienced groups		Unexperienced groups		Pearson Chi-square
		frequency	%	frequency	%	
Main person responsible for ironing	Self	322	55.8	47	51.7	15.941 ^a
	Spouse	175	30.3	22	21.2	
	Household helpers	4	0.7	1	1.1	
	Laundry	53	9.2	21	23.1	
Ironing satisfaction	Self	187	34.4	17	18.7	10.383 ^a
	Spouse	57	10.4	9	9.9	
	Household helpers	3	1	0	0	
	Laundry	306	55	65	71.4	
Ironing frequency	Once a day	28	5.1	4	4.4	14.270 ^a
	Once a week	260	47.4	25	27.5	
	Once every two weeks	74	13.5	17	18.7	
	Once a month	149	27.1	38	41.8	
	etc.	38	6.9	7	7.7	
Information about luxury iron	Known	106	19.3	8	8.8	5.897 ^a
	Unknown	443	80.7	83	91.2	
Checking labels before ironing	Checked	305	55.6	39	42.9	5.063 ^a
	Unchecked	244	44.4	52	57.1	
Necessity of temp. control device	Yes	523	95.3	82	90.1	4.011 ^a
	No	25	4.7	9	9.9	
Preferred iron to purchase	With course selection	436	79.4	60	65.9	8.138 ^a
	Without course selection	113	20.6	31	34.1	

림질 만족도에 대해서 ‘본인 만족도’는 유경험집단 187명(34.4%), 무경험집단 17명(18.7%)으로 나타나 본인 만족도는 유경험집단이 무경험집단보다 더 높았다.

반면, 세탁소 다림질 만족도는 유경험집단은 306명(55%), 무경험집단은 65명(71.4%)으로 나타나 유경험집단이 무경험집단보다 세탁소 다림질 만족도가 더 낮았다.

다림질 빈도는 유경험집단은 ‘일주일에 한 번’ 260명(47.4%)이 가장 많았고, 그 다음으로 ‘한 달에

한 번’ 149명(27.1%) 순으로 나타났다. 이에 반해, 무경험집단은 ‘한 달에 한 번’ 38명(41.8%)이 가장 많았고 그 다음으로 ‘일주일에 한 번’ 25명(27.5%) 순으로 나타났다. 명품 다리미 정보에 대해 ‘인지한다’는 응답비율은 유경험집단이 106명(19.3%)으로 무경험집단 8명(8.8%)보다 더 높게 나타나 유경험집단이 무경험집단보다 명품 다리미에 대한 더 높은 인지도를 보이고 있었다. 다림질 전 의류제품의 취급 표시를 확인하는지에 대해 ‘확인한다’고 한 응답은 유경험집단 305명(55.6%), 무경험집단 39명(42.9%)

으로 나타났는데, 이는 유경험집단이 무경험집단보다 의류 관리에 있어서 더 많은 주의를 기울이고 있음을 시사한다. 다리미의 온도조절 장치가 '필요하다'고 하는 응답비율은 유경험집단 523명(95.3%)이 무경험집단 82명(90.1%)보다 더 높게 나타나 다리미 온도조절 장치에 대한 더 높은 요구도를 보이고 있었다. 구매 의향이 있는 다리미의 경우, '섬유별 코스 선택형 제품'에 대하여 유경험집단 436명(79.4%)은 무경험집단 60명(65.9%)보다 더 높게 나타났고, 유경험집단이 무경험집단보다 섬유별 코스 선택형에 대해 더 높은 선호도를 가지고 있었다. 이로써 군 다림질 유경험집단은 다리미 기능에서 온도조절, 섬유별 코스선택 등 더 섬세한 제어를 추구하는 경향이 있음을 알 수 있다.

3.3.2. 연령대에 따른 의류 다림질 관리행동 차이

연령대에 따른 의류 다림질 관리행동의 차이를 살펴보기 위해 교차분석을 실시하였다. 분석 결과, 연령대에 따라 유의한 차이가 나타나는 문항들을

Table 3에 제시하였다. 전 연령대에서 다림질 주담당자에 대해 본인이라고 응답한 비율이 가장 높게 나타났다. 연령대별로 보면 20대에서는 주담당자가 '본인'이라고 한 응답비율이 가장 높았고, 그 다음으로는 '세탁소'로 나타났다. 반면, 30~50대에서는 주담당자는 '본인'이 가장 높은 응답비율을 보였고 그 다음으로 '배우자', '세탁소' 순으로 나타났다. '세탁물을 세탁소에 맡긴다'라고 한 응답비율은 20대에서 50대로 연령대가 높아질수록 낮아지는 경향을 보였다.

본인의 다림질 만족도를 보면, 50대 > 40대 > 30대 > 20대 순으로 나타나 연령대가 높아질수록 본인의 다림질 만족도가 유의하게 더 높아지는 것을 알 수 있다. 다림질 빈도에 대해서는 20대는 '한 달에 한 번 한다'는 응답비율이 30대, 40대, 50대는 '일주일 한 번 한다'는 응답비율이 가장 높았다. 다림질 주기는 20대는 30~50대보다 더 긴 것을 알 수 있다.

Table 3. Differences in clothes ironing management behavior according to age group

Category	Frequency	20-29		30-39		40-49		50-59		Pearson Chi-square
		frequency	%	frequency	%	frequency	%	frequency	%	
Main person responsible for ironing	Self	109.0	68.1	98.0	61.3	82.0	51.3	79.0	49.4	114.060 ^a
	Spouse	9.0	5.6	41.0	25.6	67.0	41.9	79.0	49.4	
	Household helper	2.0	1.3	1.0	0.6	2.0	1.3	0.0	0.0	
	Laundry	40.0	25.0	20.0	12.5	9.0	5.6	2.0	1.3	
Ironing satisfaction	Self	44.0	27.5	50.0	31.3	54.0	33.8	58.0	36.3	51.035 ^a
	Spouse	0.0	0.0	11.0	6.9	27.0	16.9	28.0	17.5	
	Household helper	0.0	0.0	2.0	1.3	1.0	0.6	0.0	0.0	
	Laundry	116.0	72.5	97.0	60.6	78.0	48.8	74.0	46.3	
Ironing frequency	Once a day	9.0	5.6	3.0	1.9	8.0	5.0	12.0	7.5	34.906 ^a
	Once a week	53.0	33.1	70.0	43.8	73.0	45.6	89.0	55.6	
	Once every two weeks	25.0	15.6	22.0	13.8	18.0	11.3	26.0	16.3	
	Once a month	59.0	36.9	48.0	30.0	51.0	31.9	29.0	18.1	
	Etc.	14.0	8.8	17.0	10.6	10.0	6.3	4.0	2.5	

4. 결론

본 연구에서는 군대를 전역한 20~50대 성인 남성을 대상으로 의류 다림질 관리행동에 대한 인식, 습관, 다리미 제품의 사용 현황 등 다림질 실태를 조사하였다. 또한, 의류 다림질 관리행동은 군 다림질 경험이나 연령대에 따라 차이가 있는지 알아보려고 하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

다림질 관리 인식에 대한 조사 결과, 가사 노동 중 '다림질하기'는 '집안 청소하기' 다음으로 선호하지 않은 것으로 인식하는 것으로 나타났다. 다림질하면 떠오르는 단어로는 '말끔함'을 가장 많이 들었다. 다림질 범주로 '열판 다리미로 의류 구김을 제거한다', '스팀다리미로 스팀 처리한다', '다림질할 의류를 종류별로 분류한다', '의류 관리기기에 의류를 넣어 처리한다', '구겨진 의류에 물을 뿌린다' 등의 관리행동이 다림질에 속한다고 응답하였으며, 다리미의 기능은 구김 제거를 가장 중요하게 인식하였다.

다림질 관리행동 습관에 대한 조사 결과를 보면, 다림질 빈도는 '일주일에 한번 한다'가 가장 많았으며, 다림질 장소로는 '거실'이 가장 많았다. 세탁소에 세탁물을 의뢰하는 이유로 '귀찮아서'를 가장 많이 들었다. 세탁소에 의뢰하는 의류로 가장 많은 것은 '드레스 셔츠'와 '정장 바지'로 나타났다. 조사 대상자의 과반수 이상이 다림질 전에 의류에 부착된 취급 라벨(care label)을 확인하는 것으로 나타났다. 다림질에서 가장 어려운 점으로 번들거리는 자국이 생긴다는 점을 들었고, 현재 사용하는 다리미는 가격대 '10만원 미만', '스팀식', '좌식형'이 가장 많았다. 구매 의향이 있는 다리미에 대해서 온도와 스팀양 조절장치가 필요하다고 응답하였다.

또한, 군 다림질 경험이나 연령대에 따른 다림질 관리행동 차이를 분석한 결과, 군 다림질 경험이 있는 집단은 군 다림질 경험이 없는 집단에 비해 다림질 주담당자, 본인의 다림질 만족도, 다림질 빈도(주 1회), 명품 다리미 제품 정보 인식, 다림질 전 의류의 라벨 확인, 섬유별 코스 선택형 다리미 제품을 구매

의사에 있어서 유의하게 더 높게 나타났다. 또한, 연령대가 높아질수록 본인의 다림질 만족도와 다림질 빈도(주 1회)가 유의하게 더 높게 나타났다.

이상의 연구결과로부터 군대를 다녀온 군 다림질 경험이 있는 남성은 일상생활에서 다림질과 같은 의생활 관리행동에 대해 주도적이며 만족도가 높다는 것을 알 수 있었다. 이는 군 다림질 경험이 의생활 관리와 같은 가사노동에 대해 긍정적인 관점을 가지고 있다는 것을 간접적으로 시사한다고 할 수 있다.

참고문헌

- 1 Lee, Y., "A Survey Pre-service Teacher on Need of Clothing Management Behavior and Learning Needs of Clothing Life", *Journal of the Korea Practical Arts Education*, 30(4), pp. 49-68, 2017.
- 2 Lee, K. S. and Choi, J. W., "A Study on The Comparison of Housewife's Clothing Management Behaviors in Rural & Urban Community-The development of measuring scales on clothing management behaviors-", *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 26(1), pp. 95-103, 2002.
- 3 Choi, S. and Park, M., "Effect of Awareness of the Clothing Area in Home Economics Curriculum on Learning Needs and Clothing Management Behavior of College Students", *Hanyang University Graduate School of Education Master's Thesis*, 2008.
- 4 Lee, J. W. and Choi, D. S., "A Study of the Laundering Management in the Urban House hold", *Human Ecology Research*, 21(3), pp. 7-96, 1983.
- 5 Chung, H. and Kim, K. J., "A Study on the Elderly Women's Clothing Behavior in Under-wear", *Journal of the Korea Society of Clothing and Textiles*, 26(5), pp. 737-747, 2002.
- 6 Bae, J. S., Cho, E. Y. and Park, E. H., "Behavior on Clothes Care of Female Consumers by Lifestyle Groups", *Human Ecology Research*, 39(6), pp. 1-136, 2001.
- 7 Lee, H. S., Lee, J., Kim, S. G., Kim, M. and Lee, H., "A Study on the Laundry Behavior of University

- Students”, *Human Ecology Research*, 16(3), pp. 147-161, 2004.
- 8 Lee, Y., “Research on Development of Consumer Education Program for Clothing & Textile Area in Practical Arts”, *Journal of Korea Practical Arts Education*, 27(2), pp. 53-72, 2017.
- 9 Lee, S. Y. and Shim, H. S., “Clothing Management Behavior and Care Label Use of College Students”, *Fashion & Textile Research Journal*, 23(6), pp. 852-859, 2021.
- 10 Lee, Y., “A Survey Pre-service Teacher on Need of Clothing Management Behavior and Learning Needs of Clothing Life”, *Journal of Korea Practical Arts Education*, 30(4), pp. 49-68, 2017.
- 11 Kang, Y., “Research on Consumers’ Recognition of CO2 Emissions from Clothing - Focusing on Residents of Seoul -”, *Journal of the Korean Society of Fashion Design*, 13(3), pp. 39-56, 2013.
- 12 The Korea Economic Daily, <https://www.hankyung.com/economy/article/2019030718821>, 2019, 03, 08
- 13 Lee, O. and Lee, Y., “Investigation on Development Plans for Female Army Uniforms: A Focus on In-depth Interviews”, *Journal of Defense Quality Society*, 5(1), pp. 28-43, 2023.
- 14 Jeong, E. and Hah, Y., “The Effect of Ego-Resiliency, Social Support, Military Life Satisfaction on Growth Related Military Service in Korean Veterans”, *Korean Journal of Military Nursing Research*, 32(1), pp. 53-65, 2014.
- 15 Cho, H. M., Im, Y. and Park, S., “A Study on Strengthening Defense Manpower System for Improvement of Execution Capability on Combined Operations between the U. S. and ROK Militaries: Elements of Influence on KATUSA’s adaptation to military life”, *The Korean Journal of Security Affairs*, 59(2), pp. 73-103, 2016.
- 16 Yoo, Y., “A Study on Factors affecting Military Life Satisfaction”, *Korean Academy of Military Social Welfare*, 5(2), pp. 5-30, 2012.
- 17 Ko, S. Y., Kim, C. H., Park, J. H., Lee, H. J., Lee, J. H. and Lee, K., “Laundering and Care of Knitwear Products”, *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 31(9), pp. 1364-1372, 2007.
- 18 Jung, H. K. and Lee, J. R., “Survey on the Management of Clothes and the Perception of Up-cycling Fashion Based on the University Students Majoring Fashion”, *Fashion and Textile Research Journal*, 22(6), pp. 803-811, 2020.

ChatGPT를 활용한 유스케이스 기반의 테스트 케이스 생성: 실험 및 평가

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

Test Case Generation Based on Use Cases Using ChatGPT : Experimental Evaluation

이상인, Sangin Lee

충남대학교, 컴퓨터공학과
Department of Computer Science and Engineering, Chungsam
National University

김현수[†], Hyeonsoo Kim

충남대학교, 컴퓨터융합학부, 교수
Professor, Department of Computer Science and Engineering,
Chungsam National University

Abstract

In this study, we investigate the potential of ChatGPT, which is a generative AI tool, in automating test case generation. Based on systematic experiments, we analyze the response of ChatGPT to myriad use-case information structures to obtain insights into its behavior and output. The primary aim is to devise strategies for harnessing generative AIs, such as ChatGPT, in test case generation and broader software testing. The findings provide clearer understanding into the manner by which AI contributes to test case generation, thus suggesting a direction for future endeavors in integrating such models into software quality assurance.

keywords : ChatGPT, Automated Test Case Generation, Generative AI, Software Testing

[†] Corresponding Author : Hyeonsoo Kim

Tel : +82-042-821-6657, email : hskim401@cnu.ac.kr

Chungsam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 24th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

오늘날 소프트웨어는 인간 세상의 모든 분야에서 광범위하게 사용될 뿐만 아니라 구성이 복잡해짐으로 인해 소프트웨어의 결함은 막대한 재정적 손실과 심한 경우 인명의 손상을 초래할 수 있다. 따라서 소프트웨어 테스트는 제품 출시 전에 소프트웨어 품질을 보장하는 더욱 중요한 역할을 하고 있다. 소프트웨어에 내재되어 있는 결함을 효과적으로 찾기 위해서는 무엇보다도 테스트 케이스의 작성이 중요하다[1].

OpenAI의 ChatGPT로 대표되는 대규모 언어 모델(Large Language Model, LLM)의 발전은 질문 답변, 번역, 텍스트 생성과 같은 일상적인 작업에서 인간과 같은 이해력에 필적하는 기능을 선보였다[2]. 또한 LLM은 소프트웨어 모델링[3], 소프트웨어 테스트[4] 등 소프트웨어 공학 전반에서 점점 더 많이 활용되고 있다[5]. 특히 소프트웨어의 내부 구조, 설계 및 구현을 고려하여 테스트를 진행하는 화이트박스 테스트 생성에 사용되었다[6-9]. 이 연구들은 ChatGPT를 탐구하여 효과적인 화이트박스 테스트 케이스를 생성할 수 있는 잠재력을 보여주었다. 이와 대조적으로 소프트웨어의 내부 구조를 고려하지 않고 요구사항에 따라 테스트를 수행하는 블랙박스 테스트에 LLM을 사용하는 방법은 많이 연구되지 않았다.

유스케이스(Use Case)는 소프트웨어 시스템이 사용자에게 제공하는 기능 또는 서비스를 기술하기 위한 수단으로 사용자의 요구사항을 구체적이고 상세하게 표현할 수 있다. 객체지향 개발 방법론이 등장하면서 사용자의 요구사항을 표현하기 위한 수단으로 널리 활용되고 있다. 또한 시스템이 의도한 대로 정확하게 동작하는지 검증하기 위한 테스트 케이스 설계의 기반으로도 활용되고 있다[10].

이 논문에서는 이러한 유스케이스를 활용하여 ChatGPT의 테스트 케이스 생성 능력을 평가하고자 한다. 이 과정에서 ChatGPT의 입력 프롬프트

명령에 포함되는 명세 정보의 양과 수준이 테스트 케이스 생성에 어떻게 영향을 미치는지를 파악하고자 입력 프롬프트 명령에 포함될 유스케이스 구성 요소를 선택적으로 조합하기 위한 전략을 세우고 각 전략에 따라 생성된 테스트 케이스의 효과성을 분석한다.

2. 관련 연구

소프트웨어 테스트는 크게 블랙박스 테스트와 화이트박스 테스트라는 두 가지 범주로 분류할 수 있다. 블랙박스 테스트는 테스트 엔지니어가 소프트웨어의 내부 로직 흐름을 고려하지 않고 소프트웨어의 입력과 출력에만 집중하는 테스트 기법이다. 반면, 화이트박스 테스트는 테스트 엔지니어가 소프트웨어의 내부 동작에 대한 지식을 가지고 있으며 로직 흐름, 알고리즘 및 메서드를 테스트할 수 있는 기법이다. 테스트 목적 관점에서 보자면 블랙박스 테스트는 주로 소프트웨어의 기능을 테스트하여 요구사항 명세를 충족하는지 확인하는 데 중점을 두지만, 화이트박스 테스트는 주로 소프트웨어의 내부 코드가 정확하고 효율적인지 확인하는 데 중점을 둔다[1].

명세 기반 테스트는 소프트웨어 요구사항 명세를 사용하여 테스트 케이스를 도출하는 기법으로서 블랙박스 테스트 기법의 범주에 속한다. 자연어로 작성된 요구사항 명세가 주어지면 자연어 처리 기법을 거쳐 테스트 케이스를 생성한다는 개념에 맞춰 다양한 연구가 진행되었다. 그렇지만 If-then-else와 같이 제약적인 형태로 기술된 요구사항만 처리한다든지[11], 요구사항 명세로부터 요구사항 기반 모델을 생성하는 과정이 반자동으로 실행된다거나[12], 테스트 입력 데이터를 위한 제약 조건을 생성하기 위하여 시스템 도메인 모델(즉, 클래스 다이어그램)을 엔지니어가 수동으로 생성해야 하거나, 자동으로 생성된 제약 조건에 대해서도 검사 과정과 수정 과정에 엔지니어가 개입해야 하며[13], 테스트 케이스를

생성하기 위한 정보를 추출한다고 하지만 실제로는 요구사항 명세에서 유스케이스의 구성 정보를 추출하는 수준의 연구[14] 등에 머물러 있다. 이와 같이 자연어로 기술된 소프트웨어 요구사항 명세로부터 테스트 케이스를 자동으로 생성하는 것은 여전히 큰 도전과제로 남아 있다.

최근 연구들은 이러한 문제를 극복하고자 다양한 방법론을 탐구하고 있고, AI를 활용한 테스팅 방법론이 주목받고 있다. 특히 자연어 이해 능력이 탁월한 LLM을 이용하여 자연어를 처리하고, LLM이 가지고 있는 충분한 배경지식과 추론 능력을 활용하여 테스트 케이스를 생성하려는 시도는 기존 연구의 한계점을 극복할 수 있는 대안으로 높은 관심을 받고 있다. 연구 [6]에서는 소스 코드에 대한 정보를 프롬프트로 기술하여 ChatGPT로부터 단위 테스트를 위한 코드의 생성 방법을 제안하고 있다. 소스 코드를 기반으로 테스트 코드를 생성하는 방법이므로 관심 있는 메소드(Method)의 생성자, 메소드 몸체, 클래스 시그니처(Class signature) 정보 등을 프롬프트의 최대 범위까지 기술하도록 요구함으로써 프롬프트에 사용되는 글자 수 제한이라는 영향을 받을 가능성이 매우 높다. 연구 [7]에서는 ChatGPT가 파이썬 프로그램의 단위 테스트 스크립트를 생성하는데 얼마나 효과적인지를 파악하기 위해 기존 단위 테스트 생성기(Pynguin)로 생성된 테스트 케이스와 비교하는 실험적 연구를 진행하였다. 실험을 위해 세 가지 유형의 코드 단위를 고려하였으며 생성된 테스트 케이스는 커버리지(Coverage), 정확성 등의 기준에 따라 평가하였다. 실험 결과 ChatGPT와 Pynguin을 함께 사용하면 단위 테스트 생성 성능이 향상될 수 있을 것이라 평가하였다. 연구 [8]에서는 단위 테스트 케이스를 생성하는 ChatGPT의 능력을 측정하기 위해 테스트 대상 Java 코드를 입력으로 GPT가 테스트 케이스를 생성하도록 하였다. 단위 테스트에 대한 테스트 케이스를 생성하는 것이 목표이므로 분기 커버리지, 변이 점수(Mutation score) 등을 측정하여 생성된 테스트 케이스의 능력을 확인하였다. 연구 [9]에서는 ChatGPT로 생성된

Java 단위 테스트의 품질을 평가하는 데 초점을 맞추고 있다. 이를 위해 코드 커버리지, 변이 점수, 테스트 세트의 빌드 및 실행 성공률이라는 세 가지 품질 매개변수를 평가에 활용하였다. 실험의 단순성과 생성된 테스트 코드가 사람의 분석을 거치지 않았음에도 주목할 만한 결과가 도출되었음을 언급하며 ChatGPT의 테스트 케이스 생성 능력을 높이 평가하고 있다. 연구 [5]에서는 애플리케이션 개발 전반에 걸쳐 LLM을 활용하기 위한 접근 방식을 제안하고 이를 위해 메타 모델 개념을 기반으로 소프트웨어 개발 생명 주기(Software development life cycle)의 각 단계에서의 산출물을 생성하기 위한 프롬프트 템플릿(Prompt template)을 정의하고 있다. 이 중에서 테스트 케이스 생성을 위해서는 4단계에 걸쳐 반복적으로 프롬프트를 발행하여 각 서비스에 대한 기능 테스트부터 각 화면에 대한 테스트, 최종적으로 시스템 테스트까지 테스트 케이스를 생성하기 위한 템플릿을 제시하고 있다. 그러나 연구가 테스트 케이스 생성에 초점이 맞춰져 있지 않기 때문에 비록 4단계에 대한 프롬프트 템플릿을 제시하고 있지만 템플릿의 내용이 구체적이지 않아서 사용자들의 통찰력이 요구된다.

최근까지의 연구에서는 주로 코드 기반 테스팅 방법에 대한 생성형 AI의 활용 방안에 중점을 두고 탐구하였다. 이러한 연구들은 테스트 커버리지를 높이는 등의 여러 장점을 제시하며 많은 관심을 받아왔다. 그러나 명세 기반 테스팅 방법에 관한 연구는 상대적으로 부족한 상태이다. 명세 기반 테스팅의 중요성에 비해 그에 대한 생성형 AI의 활용 연구는 미흡하여, 이 분야에 관한 추가적인 연구가 필요하다는 점을 강조하고자 한다. 지금까지 언급한 여러 관련 연구들을 비교한 내용을 Table 1에 정리하였다. 관련 연구 항목에서 [n] 형태의 표기는 n번 참고문헌의 연구를 의미한다. 여기서 특히 주목할 것은 여러 연구들이 프롬프트 입력으로 소스 코드를 제공하지만 우리 연구와 연구 [5]는 명세를 입력으로 제공한다는 것이다.

Table 1. Comparison of related studies

	Research					
	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	Our
Test approach	BB	WB	WB	WB	WB	BB
Prompt input	RqS	SC	SC	SC	SC	UCS
Variability in prompt configuration	Y	Y	N	N	N	Y
Influence of prompt length limits	M	H	H	H	H	L

[Legend] WB: White Box, BB: Black Box, SC: Source Code, RqS: Requirement Spec., UCS: Use Case Spec., Y: Yes, N: No, H: High, M: Mid, L: Low

3. ChatGPT를 활용한 유스케이스 기반의 테스트 케이스 생성

유스케이스는 비즈니스 및 시스템 프로세스의 콘텍스트 내에서 기능적 요구사항을 표현하기 위한 구조를 제공한다[10]. 유스케이스로부터 테스트 케이스를 생성하기 위한 지금까지의 연구들에서는 유스케이스 명세로부터 여러 시나리오를 도출하고 도출된 시나리오를 테스트하기 위한 테스트 케이스를 생성하는 것이 일반적인 방법[13, 15, 16]이었다. 기존 연구들에서는 인공지능 기술의 추론 능력을 사용하지 않았기 때문에 유스케이스 명세의 구성 요소를 일부만 선택하려 시도하지 않았다. 그러나 우리 연구의 목적은 유스케이스 명세의 구성 요소를 일부만 선택할 경우에 생성형 AI 모델이 테스트 케이스를 충분히 생성할 수 있는지를 파악하는 것과 생성된 테스트 케이스의 효과성을 분석하는 것이므로 3.1절에서 제시한 전략에 맞춰 유스케이스의 구성 요소들을 선택하는 방법을 사용한다. Table 2는 유스케이스 명세의 구성 요소를 나타낸다.

이 실험에서는 ChatGPT 인터페이스를 통해

GPT-4를 활용한다. GPT-4가 갖는 핵심 장점 중 하나는 모델이 가진 트랜스포머 아키텍처에 있다. 이는 Self-Attention 메커니즘을 통해 모델이 자연어 기반의 유스케이스 명세를 더 잘 이해할 수 있게 한다.

Table 2. Components of Use Case Specification

Section	Description
① Use case name	use case name
② Brief description	paragraph that captures the goal of the use case
③ Actor	external entities that interact with the system
④ Preconditions	things that must be true before the use case can execute
⑤ Main flow	the actual steps of interaction between the actor and system
⑥ Postconditions	things that must be true when the use case has finished
⑦ Alternative flows	list of alternatives to the main flow

3.1. 테스트 케이스 생성 전략

유스케이스 템플릿은 Table 2와 같이 고정된 요소로 구성되므로 이 연구에서는 이러한 구성 요소들의 조합이 테스트 케이스 생성에 어떻게 영향을 미치는지를 관찰하고자 이들 요소를 조합하기 위한 전략을 세우고 각 전략에 따라 생성된 테스트 케이스의 효과성을 분석한다. 각 전략에서 선택한 구성 요소는 Table 2에 표시된 유스케이스 구성 요소의 번호를 사용하여 표현한다.

[전략 1] (②만 선택) - 가장 기본적인 유스케이스 목표에 대한 설명만을 포함한다. 유스케이스의 개략적인 설명 정보를 기반으로 생성된 테스트 케이스를 통해 AI의 추론 능력을 확인하는 것이 목적이다.

[전략 2] (② + ④ + ⑥) - 유스케이스의 목표와

전/후 조건을 포함한다. 유스케이스가 실행되기 전에 만족해야 할 조건과 실행 후 만족해야 할 조건은 테스트 과정에서도 반드시 확인해야 할 항목에 해당한다. 테스트 과정에서 확인해야 할 항목을 명시적으로 포함하였을 때 테스트 케이스가 어떻게 생성되는지를 파악하고자 한다.

[전략 3] (② + ④ + ⑤ + ⑥) - 유스케이스의 목표와 전/후 조건, 기본 흐름을 포함한다. 유스케이스의 기본 흐름은 액터와 시스템 간의 상호작용을 구체적으로 표현한 것이다. 기본 흐름을 추가하여 유스케이스의 동작을 상세하게 제공하였을 때 테스트 케이스가 어떻게 생성되는지를 파악하고자 한다.

[전략 4] (② + ④ + ⑥ + ⑦) - 유스케이스의 목표와 전/후 조건, 대안 흐름을 포함한다. 기본 흐름에서 발생할 수 있는 예외 상황은 대안 흐름으로 표현된다. 이 전략에서는 기본 흐름은 배제하였지만, 유스케이스의 개략적인 설명 정보와 대안 흐름 정보를 바탕으로 예외 상황에 대해 테스트 케이스가 어떻게 생성되는지를 파악하고자 한다.

[전략 5] (② + ④ + ⑤ + ⑥ + ⑦) - 유스케이스의 목표와 전/후 조건, 기본 흐름, 대안 흐름을 모두 포함한다. 이 전략에서는 유스케이스 명세에서 의미 있는 정보를 제공하는 모든 요소를 포함하였을 때 테스트 케이스가 어떻게 생성되는지를 파악하고자 한다.

3.2. 프롬프트 작성 및 입력

각 전략에 따라 적절한 프롬프트를 작성하고 ChatGPT 인터페이스를 통해 GPT-4에 제출한다. 생성된 테스트 케이스들은 테스트 조건(Test conditions), 테스트 데이터(Test data), 그리고 예상 결과(Expected result)의 내용을 포함해야 한다. 그러므로 템플릿 패턴으로 프롬프트를 작성하여 출력 결과로 상기 내용들을 포함하도록 요구한다. 작성된 프롬프트의 예시는 Table 3과 같다.

Table 3. Elements of a Prompt and Their Examples

Element	Example
Command	Generate test cases to test the following use case specification. The test case should contain the following information.
Components of Test Cases to be generated	1. Test conditions 2. Test data 3. Expected results
Use Case Specification	The use case specification is described below. [Use case components selected for each strategy]

작성된 프롬프트의 뒤에 전략별 정보 구성에 따른 유스케이스 내용을 추가하여 최종 프롬프트를 완성한다. 각각의 프롬프트는 서로 다른 채팅 세션에 제출하여 GPT-4의 응답을 관찰한다.

3.3. 결과 테스트 케이스 분석

제공된 유스케이스 정보의 복잡도와 풍부함에 따른 GPT-4의 응답 패턴을 관찰한다. 정보 제공의 깊이와 범위가 증가함에 따라 생성된 테스트 케이스의 수와 상세성에 어떤 변화가 있는지를 중점적으로 분석한다. 각 테스트 케이스가 테스트 조건, 테스트 데이터, 그리고 예상 결과의 세 가지 요소를 적절히 포함하는지 확인한다. 각 구성에서의 응답 결과를 비교하여, 최적의 테스트 케이스 생성 전략을 도출하고자 한다.

3.4. 테스트 케이스 생성 예시

이 절에서는 ATM 시스템의 Validate User 유스케이스에 대해 [전략 2]에 따라 작성된 프롬프트와 이에 대한 GPT-4의 응답 결과로 생성된 테스트 케이스 중 일부를 Table 4에서 보여준다. 작성된 프롬프트는 다음과 같다.

Table 4. Generated Test Case of Validate User

Test Conditions	1. ATM is powered on. 2. The ATM is connected to the bank. 3. Bank customer uses an invalid or expired card.
Test Data	1. Invalid or expired ATM card. 2. Any PIN.
Expected Results	1. The ATM fails to validate the user. 2. The ATM logs the event including the reason for the failure (invalid card).

Generate test cases to test the following use case specification. The test case should contain the following information.

1. Test conditions
2. Test data
3. Expected results

The use case specification is described below.

[Brief description]

This use case describes the typical behavior of an ATM verifying a user. It involves the same process no matter what kind of transaction a bank customer performs.

[Preconditions]

The network connection is active between the ATM and the bank.

[Postconditions]

1. Successful Completion

If the use case succeeds, the user is validated and may continue with the specific transaction.

2. Failure Situation

If the validation fails, the ATM shall log the event including the reason for the failure.

4. 실험 결과 논의

본 연구에서는 유스케이스 정보의 다양한 구성을 바탕으로 GPT-4를 활용하여 테스트 케이스를 생성하는 실험을 수행하였다. ATM 시스템에서 2개, 인터넷 쇼핑몰 시스템에서 4개, 그리고 도서 관리 시스템에서 2개의 유스케이스를 추출, 총 8개의 유스케이스를 실험 대상으로 선택하였다. 이러한 다양한 유스케이스를 통해 GPT-4의 다양한 응답 패턴과 그 성능을 종합적으로 평가하고자 하였다. 목표는 GPT-4가 어떠한 유스케이스 정보를 기반으로 얼마나 정확하고 효과적으로 테스트 케이스를 생성하는지에 대한 깊은 이해를 얻는 것이다. 현재는 위에 언급한 사례 시스템과 같이 널리 알려진 시스템을 실험 대상으로 삼았으나, 향후에는 함정 전투 체계 중 전술 소프트웨어 분산 통제 시스템과 같이 매우 제한적인 범위에서 사용되는 시스템을 선택한 다음 이 시스템으로부터 도출된 유스케이스 명세를 사용하여 테스트 케이스를 생성하는 실험을 진행할 계획이다. 이를 통해 널리 알려진 시스템과 특수 목적의 제한된 시스템 간의 생성된 테스트 케이스의 효과성에 차이가 있는지 등에 대해서도 고찰해 볼 예정이다. 이 절에서는 선택된 8개의 유스케이스를 대상으로 실험을 통해 도출된 주요 결과와 그 결과의 해석에 대해 논의한다.

4.1. 생성된 테스트 케이스 수

이 지표는 GPT-4가 제공된 유스케이스 정보의 구성에 따라 얼마나 많은 테스트 케이스를 생성하는지에 대한 양적인 평가를 제공한다. 이를 통해 각 구성별로 GPT-4의 반응성 및 생성 능력을 파악할 수 있다. Table 5는 8개의 유스케이스에 대해 각각의 전략에 따라 생성된 테스트 케이스 수를 나타낸다. 프롬프트 명령에서 생성할 테스트 케이스 수를 지정하지 않았기 때문에 하나의 유스케이스에 대해 4개에서 10개까지의 테스트 케이스를 생성하는 것을 볼 수 있다.

Table 5. Number of Generated Test Cases

Use Case ID	Strategy No.				
	1	2	3	4	5
ATM-01	5	5	5	6	6
ATM-02	6	4	4	8	10
ISM-01	6	6	5	6	5
ISM-02	5	6	5	6	7
ISM-03	6	5	4	7	5
ISM-04	5	5	5	5	5
LMS-01	5	5	4	7	5
LMS-02	5	5	5	7	5

[전략 3]에 비해 [전략 4]의 경우 대체로 생성된 테스트 케이스 수가 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 [전략 3]에서는 Main flow를 포함하므로 이를 중심으로 한 예외 상황을 고려하지만 [전략 4]에서는 구체적인 Alternative flow를 포함하므로 이에 따라 각 Alternative flow를 고려한 테스트 케이스가 생성되기 때문이다. 이러한 현상은 GPT-4가 보다 정확한 정보에 기반하여 작동하므로, 더 명확하고 구체적인 정보가 제공될 때는 이를 고려한 테스트 케이스를 생성하고 있음을 보여준다.

4.2. 테스트 케이스의 정확성 및 강건성

관련 연구에서 언급한 몇몇 연구들에서 생성된 테스트 케이스의 정확성을 판단하기 위해 몇 가지 기준을 사용하고 있다. 그중에서 가장 많이 사용되는 것이 커버리지이다. 이는 생성된 테스트 케이스를 실행하여 ChatGPT의 입력으로 주어진 소스 코드를 어느 정도 커버했는지를 평가하여 높은 커버리지를 달성할수록 테스트 케이스가 정확하다고 판단한다.

이 연구에서는 생성된 테스트 케이스들이 시스템의 정상 상황뿐만 아니라 예외 상황이나 경계 조건을 얼마나 효과적으로 다루는지도 평가한다. 이는 시스템의 안정성 보장에 있어 중요한 측면으로, 테스트 케이스의 품질과 실제 개발 환경에서 잠재적 문제점을 얼마나 잘 찾아내는지를 평가하는 데 사용될 수

있다. 이를 위해 두 가지 지표를 도입하였다. Table 6은 두 가지 지표에 대해 유스케이스 구성 요소의 변화에 따른 8개의 유스케이스의 실험 결과를 정리한 것이다. 수치 값은 각 지표에 대한 평균값이다.

Table 6. Average Flow Coverage and Unspecified Flow Counts based on Use Case Configuration

Strategy No.	Avg. Flow Coverage (%)	Avg. Number of Unspecified Flow
1	63.3	1.87
2	66.0	1.60
3	73.5	0.62
4	97.5	1.57
5	100.0	0.25

1) Flow Coverage: 명세에 명시된 기본/대안 흐름(Main/Alternative flow) 대비 생성된 테스트 케이스들이 커버하는 흐름 비율을 백분율로 나타낸 것으로, 생성된 테스트 케이스들이 주어진 유스케이스 명세 내에 명시된 흐름을 얼마나 커버하는지를 나타낸다. 명세에 명시되어 있지 않은 흐름은 이를 계산할 때 포함하지 않는다. 높은 Flow coverage 값은 테스트 케이스가 시스템의 여러 예외 상황이나 경계 조건을 포함하게 됨을 의미하며, 이는 테스트 케이스의 정확성이 높다는 것을 의미한다. 주목할 만한 사실은 [전략 4]의 경우 Main flow를 포함하지 않았음에도 커버리지가 매우 높게 나온다는 것이다. 이는 Brief description과 Pre/Post-condition만으로도 유스케이스 명세의 Main flow의 내용을 GPT-4가 추론하고 있으며 여기에 Alternative flow가 추가됨으로써 GPT-4는 유스케이스 명세의 전체적인 내용을 충분히 파악하고 있다고 생각할 수 있다. 이를 통해 프롬프트 길이 제한으로 인해 유스케이스의 모든 구성 요소를 포함하기 어려운 경우에는 Main flow를 포함하지 않아도 충분히 정확성 높은 테스트 케이스를 생성할 수 있다고 판단할 수 있을 것이다.

2) Number of unspecified flow: 생성된 테스트 케이스 중 명세에 명시되어 있지 않은 발생 가능한 상황을 커버하는 테스트 케이스 수를 계산한 것이다. 실제 환경에서는 명세에 명시되지 않은 다양한 상황이 발생할 수 있는데, 이런 상황에서 시스템이 문제없이 동작한다면 시스템은 강건하다고 말할 수 있다. 따라서 이러한 상황을 커버하는 테스트 케이스의 존재도 중요하다. 이를 계산할 때 명세에 명시되어 있는 흐름은 포함하지 않는다. 이 지표를 통해 유스케이스 작성자가 예상치 못한 다양한 상황들을 GPT-4가 얼마나 잘 도출하는지를 나타낼 수 있으며, 이를 통해 GPT-4의 추론 능력과 창의성을 평가할 수 있다.

4.3. 테스트 케이스의 적절성

테스트 케이스의 적절성은 테스트 케이스가 유스케이스 명세에 얼마나 근접한지를 평가하는 지표이다. 테스트 케이스가 유스케이스의 명세와 근접할수록 시스템의 예상된 동작을 정확하게 파악하고 있고, 시스템 동작에 필요한 데이터를 적절하게 제시하고 있음을 의미한다. 이 연구에서는 이를 평가하기 위해 세 가지 지표를 도입하였다. Table 7은 유스케이스 구성 요소의 변화에 따른 8개의 유스케이스의 실험 결과를 정리한 것이다. 수치 값은 각 지표에 대한 평균값이다.

1) Appropriateness of test data: 생성된 테스트 케이스의 테스트 데이터 구성이 적절한지를 평가한다. 테스트 데이터가 유스케이스 명세에서 요구되는 데이터 조건과 일치하는지 확인한다. 결과는 ‘예’ 또는 ‘아니오’로 나타낸다. 예를 들어, ‘회원 가입’ 유스케이스에서 요구되는 정보가 주민등록번호, 이름, 주소, 아이디, 비밀번호, 이메일 주소, 휴대폰 번호라면, 생성된 테스트 케이스의 테스트 데이터가 이 모든 정보를 포함한다면 ‘예’, 그렇지 않다면 ‘아니오’이다. Table 7은 ‘예’의 비율을 반영한 것이다.

2) Appropriateness of expected result: 생성된 테스트 케이스의 예상 결과가 유스케이스의 사후 조건(Post-condition)을 만족하는지를 확인한다. 이는 테스트 케이스가 예상된 결과를 정확하게 반영하고 있는지를 평가하는 것이다. 결과는 ‘예’ 또는 ‘아니오’로 나타낸다. 예를 들어, ‘주문 결제’ 유스케이스의 사후 조건이 “회원이 온라인 입금 결제를 선택하였으면 결제 상태가 ‘입금 대기’로 저장된다.”라면, 생성된 테스트 케이스의 예상 결과가 이 내용을 포함한다면 ‘예’, 그렇지 않다면 ‘아니오’이다. Table 7은 ‘예’의 비율을 반영한 것이다.

Table 7. Evaluation for Appropriateness of Test Cases

Strategy No.	Appropriateness of Test Data (%)	Appropriateness of Expected Result (%)	Avg. Detailed Level of Test Case
1	85.7	40.0	0.76
2	90.5	80.0	0.76
3	100.0	71.4	2.52
4	98.4	100.0	2.62
5	98.4	100.0	2.61

3) Detailed level of test case: 생성된 테스트 케이스의 내용이 유스케이스 명세에 기술된 세부 내용을 얼마나 충실하게 포함하는지를 평가한다. 생성된 테스트 케이스의 예상 결과의 내용 중 유스케이스 명세의 기본/대안 흐름(Main/Alternative flow)의 세부 과정 또는 결과를 포함하는 항목의 수를 계산한다. 사후 조건(Post-condition)에 해당하는 항목은 이를 계산할 때 포함하지 않는다. 높은 Detailed level of test case 값은 테스트 케이스가 주어진 유스케이스 명세에 잘 부합하고, 해당 시스템의 예상 동작을 정확하게 반영한다는 것을 의미한다.

4.4. 평가 지표에 따른 통찰

테스트 케이스 생성에 대한 평가 결과를 통해, GPT-4의 반응과 성능에 대한 몇 가지 통찰을 얻을 수 있었다.

첫째, 유스케이스 정보 구성이 풍부해질수록 GPT-4는 테스트 케이스를 더 정확하고 강건하게 생성한다는 점을 확인할 수 있었다. 이는 테스트 케이스가 예외 상황이나 경계 조건을 잘 다루고, 주어진 명세의 흐름을 효과적으로 반영함을 의미한다.

그러나 둘째, 흥미로운 점은 Unspecified flow의 개수는 상대적으로 정보가 부족한 상황에서 더 높게 나타나곤 했다. 이러한 결과는 GPT-4가 주어진 정보 내에서만 제한적으로 작동하는 것이 아니라, 특정 조건 아래 스스로 추론하며 새로운 시나리오를 도출할 수 있음을 시사한다.

셋째, 테스트 케이스의 적절성 측면에서 상세한 상호작용 정보가 제공되면 테스트 데이터의 구성을 완전하게 파악할 수 있고, 예외 상황을 모두 고려할 때 유스케이스의 사후 조건을 완전하게 만족할 수 있으며, 유스케이스 정보 구성이 풍부해질수록 기본/대안 흐름의 세부 과정을 포함하는 항목의 개수가 증가함을 알 수 있다. 주목할 만한 사실은 [전략 4]와 [전략 5]의 평가 결과는 거의 차이가 없다는 것이다. 이는 Brief description이 Main flow를 대체하여도 GPT-4는 유스케이스 명세의 내용을 충분히 파악하고 있다고 생각할 수 있다.

이러한 관찰을 통해, 우리는 GPT-4를 활용하여 더 다양한 상황을 고려하는 유스케이스를 작성할 때, 정보 구성을 조절하며 실험적인 접근을 시도해 볼 필요가 있다는 통찰을 얻었다. 더 나아가, GPT-4의 추론 능력을 최대한 활용하여, 주어진 명세뿐만 아니라 명세 외의 정보나 예상치 못한 시나리오를 탐색하는 데에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 GPT-4를 활용하여 유스케이스 기반의 테스트 케이스 생성에 대한 실험 및 평가를 진

행하였다. 결과적으로 입력 데이터의 품질이 출력 결과에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 “좋은 Input이 있으면 좋은 Output이 나온다.”는 전통적인 컴퓨팅 원리가 GPT-4와 같은 AI 모델에서도 그대로 적용되는 것을 시사한다.

그러나 완벽하고 세부적인 Input을 구성하는 것은 여전히 전문가의 경험과 지식이 필요한 영역이다. AI는 이 과정을 완전히 대체하기보다는, 전문가의 작업을 보조하며 효율성을 향상시키는 도구로 활용될 수 있다. 유스케이스나 테스트 케이스를 작성할 때 AI의 도움을 받으면, 초기 단계에서의 오류를 줄이며 더욱 정교한 결과물을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문에서는 커버리지 관점에서 생성된 테스트 케이스의 효율성을 평가하고 있다. 그렇지만 향후 연구에서는 커버리지 측정이 아닌 다른 척도를 사용하여 테스트 케이스의 효율성을 평가하는 실험을 수행할 예정이다. 이를 통해 GPT-4의 활용 가능성과 그 한계를 더욱 명확하게 이해하며, 실제 개발 환경에서의 적용성을 검증할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 1 Mathur, Aditya P., Foundations of Software Testing, Addison-Wesley, 2008.
- 2 ChatGPT, <https://chat.openai.com>, 2024, 1, 15
- 3 Camara, J., Troya, J., Burgueno, L., & Vallecillo, A., “On the assessment of generative AI in modeling tasks: an experience report with ChatGPT and UML”, *Software and Systems Modeling*, 22, pp. 781–793, 2023.
- 4 <https://www.functionize.com/automated-testing/generative-ai-in-software-testing>, 2024, 2, 14
- 5 Rajbhoj, A., Somase, A., Kulkarni, P., & Kulkarni, V., “Accelerating Software Development Using Generative AI: ChatGPT Case Study”, *Proceedings of the 17th Innovations in Software Engineering Conference*, pp. 1–11, 2024.
- 6 arXiv, <https://arxiv.org/abs/2305.04764v1>, 2024, 2, 15

- 7 arXiv, <https://arxiv.org/abs/2312.10622v2>, 2024, 2, 15
- 8 Yi, G., Chen, Z., Chen, Z., Wong, W. E., & Chauu, N., "Exploring the Capability of ChatGPT in Test Generation", *Proceedings of IEEE 23rd Int. Conf. on Software Quality, Reliability, and Security Companion*, pp. 72-80, 2023.
- 9 Guilherme, V. H. & Vincenzi, Auri M. R., "An initial investigation of ChatGPT unit test generation capability", *Proceedings of the 8th Brazilian Symposium on Systematic and Automated Software Testing*, pp. 15-24, 2023.
- 10 Arlow, J. & Neustadt, I., *UML 2 and the Unified Process: Practical Object-Oriented Analysis and Design 2nd Ed*, Addison-Wesley, 2005.
- 11 Ansari, A., Fatima, A. S., Shagufta, M. B., & Tehreem, S., "Constructing test cases using natural language processing", *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics*, pp. 95-99, 2017.
- 12 Gropler, R., Sudhi, V., Calleja Garcia, E. J., & Bergmann, A., "NLP-based requirements formalization for automatic test case generation", *Proceedings of the 29th Int. Workshop on Concurrency, Specification and Programming*, pp. 18-30, 2021.
- 13 Wang, C., Pastore, F., Goknil, A., & Briand, L. C., "Automatic generation of acceptance test cases from use case specifications: an NLP-based approach", *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(2), pp. 585-616, 2022.
- 14 Lim, J. W., Chiew, T. K., Su, M. T., Ong, S., Subramaniam, H., Mustafa, M. B., & Chiam, Y. K., "Test case information extraction from requirements specifications using NLP-based unified boilerplate approach", *The Journal of Systems and Software*, 211, pp. 1-12, 2024.
- 15 Hue, C. T. M., Hanh, D. D., & Binh, N. N., "A transformation-based method for test case automatic generation from use cases", *Proceedings of 10th Int. Conf. on Knowledge and Systems Engineering*, pp.252-257, 2018.
- 16 Alrawashed, T. A., Almomani, A., Althunibat, A., & Tamimi, A., "An automated approach to generate test cases from use case description model", *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 119(3), pp. 409-425, 2019.

산화철을 이용한 실크직물의 염색성과 단열력 향상 평가

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

Assessment of Dyeability and Thermal Insulation Enhancement of Silk Fabric Using Iron Oxide

강다예, Dayae Kang

충남대학교, 의류학과, 대학원생

Graduate student, Department of Clothing and Textiles, Chungnam
National University

이정순[†], Jungsoon Lee

충남대학교, 의류학과, 교수

Professor, Department of Clothing and Textiles, Chungnam
National University

Abstract

In this study, to develop lightweight clothing for extremely cold conditions, concentration, time, temperature, and pH-dependent dyeing of silk fabrics using Fe₂O₃ nanoparticles is conducted, and the dyeing characteristics, surface properties, light fastness, and thermal-insulation functionality are evaluated. The dyeing results show a light red color and red yellowish stains at concentrations of 0.5, 5, 15, 25, and 50g/L, with no increase in dye uptake at 50g/L. Therefore, the optimal dyeing conditions are 60°C for 40 min under pH 5. The light fastness of the dyed fabric shows minimal color difference (1.77) even after exposure to a UV-C lamp for 900 hours, thus indicating high light fastness. SEM analysis shows Fe₂O₃ nanoparticles on the surface of the dyed fabric, with an increase in particle density at higher dye concentrations. Thermogram analysis of the dyed fabric on a 30°C hot plate shows that the thermal insulation of the fabric dyed with a concentration of 0.5g/L is better than that of untreated fabric, whereas the fabrics dyed with concentrations of 5, 15, and 25g/L exhibit improved thermal insulation compared with that dyed with 0.5g/L. The fabrics dyed with concentrations of 5, 15, and 25g/L show similar thermal insulation properties. Therefore, silk fabrics dyed with Fe₂O₃ nanoparticles exhibit high thermal insulation and light fastness, thus rendering them suitable for use in combatant personal clothing.

keywords : Army military uniforms, Wearing condition, Insulation ability, Functional fabric, Iron oxide

[†] Corresponding Author : Jungsoon Lee

Tel : +82-042-821-6830, email : jungsoon@cnu.ac.kr

Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 8th. 2024 Accepted June 14th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

무기체계 중심의 정책으로 전력 지원체계의 관심이 낮았던 과거에 비해 다양한 비무기 장비 보급품에 대한 연구가 이루어짐에 따라 전투복 등 피복의 지속적 개선 필요성이 제기되고 있다[1]. 독일과 미국 등 선진국에서는 병사 각각의 전투력을 중요하게 여겨 병사들의 장구류, 개인 장비, 피복을 개선함으로써 전장 여건에서 생존 가능성을 높이기 위한 노력을 하고 있다[2-5]. 우리나라 국방부는 국방기술품질원에 국방 전력 지원체계 연구개발실을 2017년에 신설하여 비무기체계의 발전을 위한 방안을 모색[6]하고 국방부에서 워리어플랫폼(Warrior platform)을 통해 개인전투체계 도입과 확산을 추진하고 있다[7]. 워리어플랫폼은 전투원이 착용하는 전투복, 장구류 등의 장비가 통합된 전투체계를 의미하며 인구가 감소함에 따른 병력 감축에 대응하기 위해 개인의 전투력을 최고조로 발휘하도록 구축되고 있다[8]. 비무기체계 군사용 개인장비 및 섬유 소재의 중요성이 부각되면서 용도에 따른 기능성을 소재에 부여하거나 온도에 대해 대처할 수 있는 군사용 섬유 개발에 대한 활발한 연구가 필요한 것으로 보이며[9] 군인들의 기본 생활과 전투력 향상에 직결되는 기능성 피복류 분야는 전시 상태에서 군인의 최상 컨디션 유지를 위해 발전 필요성이 증대될 것으로 보인다. 군에서는 몹시 심한 추위의 상황에서 임무를 수행하는 것이 가능하도록 방한복이 보급되는데, 체온 유지에서 비롯되는 쾌적감을 위한 방한복의 기능은 양질의 훈련과 그 결과에 영향을 미칠 것이다[8]. 또한 군용 섬유제품은 운용환경과 제품을 관리하는 과정에서 직사광선에 많이 노출되기 때문에 높은 수준의 일광견뢰도가 중요하다[10]. 본 연구에서는 방한 제품의 경량화와 기능화를 위해 수분율과 흡습 시 발열량이 높은 견섬유[11]로 제작된 직물을 화학적 안정성 및 자성 특성을 가져 전자파 흡수, 바이오 등의 분야의 핵심 소재로 쓰이고 있는[12] Fe_2O_3 Nanoparticle로 염색하여 그 염색성과 염색 후 직

물의 표면 특성, 단열성, 염색견뢰도를 평가하여 산화철 나노파티클로 염색된 견직물의 활용 가능성을 밝히고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. Fe_2O_3 를 이용한 견직물 염색

2.1.1. 시험포

사용한 시험포는 경사 35D, 위사 48D로 이루어져 있으며 무게는 $45 \pm 2g/m^2$, 두께는 $0.12 \pm 0.01mm$, 직물의 밀도는 $150 \times 139(5 \times 5cm)$ 인 100% 정련된 평직 견직물을 사용하였다.

2.1.2. Fe_2O_3 nanoparticle

30%의 100~300nm Fe_2O_3 Nanoparticle(Ditto Technology, Korea)을 Stock solution으로 하여 증류수에 0.5, 5, 15, 25, 50g/L로 희석하여 염액으로 사용하였다.

2.1.3. 염색

직물과 염액의 무게 비를 1:50으로 하여 IR Dyeing machine(Han Won Testing Machine Co., Korea)에서 Table 1과 같이 시간별, 온도별, pH별로 염색하여 적절한 염색 조건을 살펴보았으며 pH는 Acetic acid(Extra pure grade, Duksan)로 조절되었다. 또한 염색 조건별로 세 번 반복하여 시료의 염착량과 색 특성의 평균을 산출하였다.

Table 1. Conditions of dyeing

Category	Conditions
Concentration (g/L)	0.5, 5, 15, 25, 50
Temperature (°C)	20, 40, 60, 80, 100
Times (min)	20, 40, 60, 80, 100
Hydrogen exponent (pH)	3, 3.5, 4, 5, 6

2.1.4. 염착량 및 표면색 평가

염색된 시료의 염착량(K/S)과 색 특성 평가는 시료를 반으로 접어 앞뒤 다섯 곳을 측정하고 반대로 접어 앞뒤 다섯 곳을 측정해서 한 시료 당 총 20회를 색차계(Color difference meter, Color reader JS-555, C.T.S.)를 사용하여 측정하였다. 광원 D65, 관측 시야 10°에서 표면반사율을 측정하고 식 (1)의 Kubelka-Munk 식으로 K/S값을 계산하여 염착량을 평가하였다.

$$Dye\ uptake\ (K/S) = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (1)$$

표면색은 CIE Lab 표색계의 명도지수 L*와 색좌표 지수 a*, b*로 나타내었다.

2.2. 염색된 직물의 일광견뢰도 평가

0.5, 5, 15, 25g/L의 Fe₂O₃ Stock solution으로 염색된 견직물의 일광견뢰도를 평가하기 위해 UV-C Lamp를 사용하는 UV 조사장치를 이용하여 복위 40°, 자오선 20°로 한여름 정오의 태양광 에너지에 준하는 조건에서 60, 100, 140, 400, 900분 동안 염색된 직물에 UV를 조사하였다. 이때 UV-C Lamp 조사 시간 5분은 여름 정오의 1시간 UV 조사 시간에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 12, 20, 28, 80, 180시간 동안 여름 정오의 UV를 조사한 것과 같다. 일광 조사 전후 시험편의 CIE Lab 표색계의 L*, a*, b* 값을 이용하여 색차를 식 (2)를 통해 산출하였다.

$$\begin{aligned} Color\ difference\ (\Delta E) \\ = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta L^* &: L^*_{before} - L^*_{after} \\ \Delta a^* &: a^*_{before} - a^*_{after} \\ \Delta b^* &: b^*_{before} - b^*_{after} \end{aligned}$$

2.3. 염색된 직물의 표면분석

염색된 견직물의 표면특성은 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope, JSM-IT800, JEOL)을 통해 관찰되었다.

2.4. 염색된 직물의 단열력 분석

염색된 직물의 단열력을 평가하기 위하여 겨울철 피부의 평균 온도인 30°C[13]의 hot plate에 8 × 8cm 크기의 미처리 견직물과 0.5, 5, 15, 25g/L 염액으로 염색된 견직물을 손으로 평평하게 펼쳤고 펼쳐지는 과정은 1초 미만이 되게 하였다. 손으로 펼친 후 3초가 경과하였을 때 Thermal imaging camera(E53, Teledyne FLIR)를 이용하여 촬영한 후 FLIR tools 프로그램을 통해 시료의 평균 온도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Fe₂O₃를 이용한 견직물 염색

3.1.1. 농도에 따른 변화

50분 동안 온도 60°C에서 염액 pH 4 조건으로 Fe₂O₃의 농도를 달리하여 견직물을 염색했을 때 염착량의 변화를 Figure 1에 나타내었고 염색 특성을 Table 2에 나타내었다.

Figure 1을 보면 Fe₂O₃의 농도를 0.5g/L에서 15g/L로 증가시키면 각각 약 0.82±0.09, 1.51±0.32, 2.52±0.42로 염착량이 증가하다가 25g/L에서 약 3.05±0.44에 도달한 후 더 이상 염착량이 증가하지 않았다. 이는 25g/L 이상으로 농도가 증가하면 염착평형을 이루는 것으로 랭뮤어 등온선 모델(Langmuir isotherm model)에 따르면 일정한 흡착 에너지를 가지는 표면에서 더 이상 상호작용이 일어날 분자들이 없기 때문에 최대의 흡착이 일어난 것이다[14].

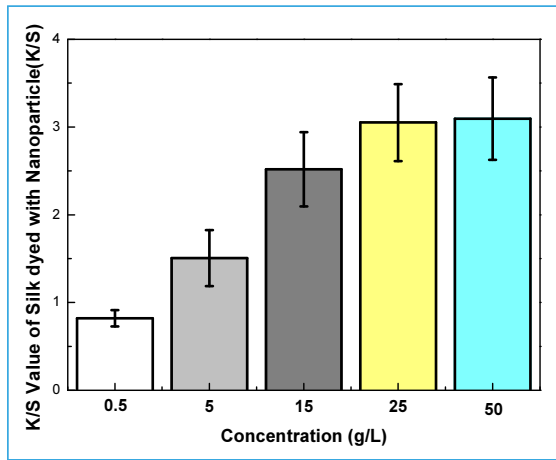


Figure 1. Effect of dye concentration on the uptake of silk fabric dyed with Fe₂O₃.

Table 2에 나타난 바와 같이 색의 명도를 나타내는 L*값은 0.5g/L에서 15g/L까지 감소하여 어두워졌다가 그 이후 농도가 증가하면 다시 밝아진다. 녹색과 붉은색의 기미를 뜻하는 a*값은 모든 농도에서 양수(+)를 나타내어 붉은색을 띠는 것으로 보이며 0.5g/L에서 15g/L까지 증가하였다가 25g/L 농도에서 감소하여 15g/L에서 붉은색이 가장 강하게 나타나며 25g/L 농도 이후 붉은 기미에 변화가 없다. 노란색과 파란색의 기미를 나타내는 b*의 값은 모든

Table 2. Color characteristics of silk fabrics dyed with Fe₂O₃ at different dyeing concentration for 50 minutes at 60°C and pH 4

Concentration (g/L)	L*	a*	b*	image
0.5	70.66 ±1.32	17.37 ±1.23	13.18 ±1.00	
5	64.31 ±2.73	20.94 ±1.10	17.22 ±1.04	
15	57.75 ±2.06	23.23 ±1.50	19.50 ±1.35	
25	61.41 ±1.14	20.34 ±0.67	22.59 ±0.66	
50	64.60 ±2.64	20.42 ±1.43	28.01 ±0.87	

농도에서 양수를 나타내어 노란 기미를 띠고 농도가 증가할수록 노란 기미가 더해지는 것으로 보인다. 종합적으로 5g/L에서는 명도가 높은 붉은색으로, 그 이상의 농도에서는 노란 기미가 더해진 비교적 어두운 붉은색으로 나타났다. 낮은 농도에서는 염착량이 높은 농도보다 상대적으로 낮지만, 농도별로 다른 색을 발현하였다고 판단되어 본 연구에서는 0.5, 5, 15, 25g/L의 적절한 염색 조건을 확인하고자 한다.

3.1.2. 시간에 따른 변화

0.5, 5, 15, 25g/L의 Fe₂O₃를 온도 60°C에서 pH 4 조건으로 견직물에 염색할 때 시간 변화에 따른 염색성을 Figure 2에 나타내었다. K/S값이 0.5g/L는 약 0.69±0.04, 5g/L는 1.59±0.25, 15g/L는 2.54±0.40, 25g/L는 3.33±1.26으로 나타났으며 모든 염액에서 40분 염색 이후에 염착량이 더 이상 증가하지 않는 것으로 보이므로 모든 농도에서 40분 동안 염색하는 것이 효과적이라고 할 수 있다.

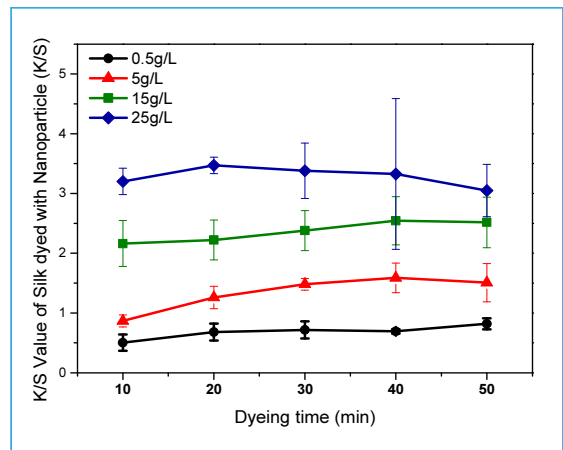


Figure 2. Effect of dye time on the uptake of silk fabric dyed with Fe₂O₃.

3.1.3. 온도에 따른 변화

0.5, 5, 15, 25g/L의 Fe₂O₃를 견직물에 40분 동안 염액 pH 4 조건으로 염색할 때 온도 변화에 따

른 염착량을 Figure 3에 나타내었고 60°C에서 염색된 직물의 색 특성을 Table 3에 나타내었다. Figure 3을 보면 0.5g/L와 5g/L는 온도에 의해 염착량이 크게 변화하지 않았지만 60°C에서 각각 0.49 ± 0.47 , 1.74 ± 0.24 로 가장 높은 염착량을 보였다. 15g/L와 25g/L는 60°C에서 각각 3.25 ± 0.43 , 0.90 ± 0.64 로 가장 높았다가 80°C에서 각각 2.44 ± 0.31 , 3.29 ± 0.30 으로 염착량이 급격하게 저하되었기 때문에 모든 농도의 염액은 60°C에서 염색하는 것이 가장 적절하다고 분석되었다. 60°C 이상에서 염착량이 감소한 것은 일정 온도 이상의 조건에서 염료의 운동에너지가 지나치게 증가하며 섬유 공간에 흡착되지 못하므로 염착량이 감소하는 것이라 분석된다[15]. Table 3의 색 특성을 살펴보면 0.5g/L의 농도에서 L*값이 크게 나타나고 a*값이 양수이며 b*값이 상대적으로 낮아 다른 농도보다 밝은 명도의 노란 기미가 낮은 붉은색을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 5g/L와 15g/L는 a*값이 높아져 붉은 기미가 더해진다. 25g/L에서는 a*값이 낮아지고 b*값은 높아져 노란 기미가 있는 붉은색이 얻어진다.

3.1.4. pH에 따른 변화

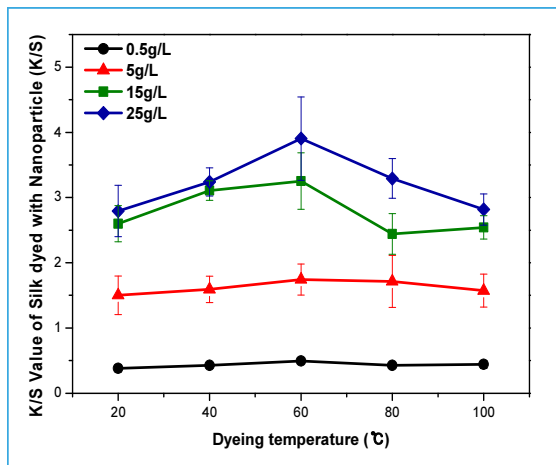


Figure 3. Effect of dye temperature on the uptake of silk fabric dyed with Fe₂O₃.

Table 3. Color characteristics of silk fabrics dyed with Fe₂O₃ at 60°C for 40 minutes at pH 4.

Concentration (g/L)	L*	a*	b*	image
0.5	76.19 ± 0.85	14.77 ± 0.57	11.58 ± 0.9	
5	61.46 ± 1.98	22.09 ± 1.13	17.37 ± 0.73	
15	55.7 ± 1.95	22.87 ± 0.7	20.98 ± 0.29	
25	54.02 ± 1.64	22.93 ± 1.27	22.02 ± 1.66	

40분 동안 60°C에서 0.5, 5, 15, 25g/L의 Fe₂O₃ 염액의 pH를 3, 3.5, 4, 5, 6으로 조정하여 견직물에 염색한 견직물의 염착량을 Figure 4에 나타내었고 색 특성 중 녹색과 붉은색을 나타내는 a*값의 변화를 Figure 5에, 파란색과 노란색을 나타내는 b*값의 변화는 Figure 6에 나타내었다.

Figure 4를 보면 모든 염액은 pH 3에서 3.5의 강한 산성 조건에서 염착량이 낮다. 0.5g/L와 5g/L는 pH 5 이후로 염착량을 유지하는 것으로 보이며 15g/L와 25g/L는 pH가 5에서 염착량이 가장 높고 이후의 pH 조건에서 염착량이 줄어든다.

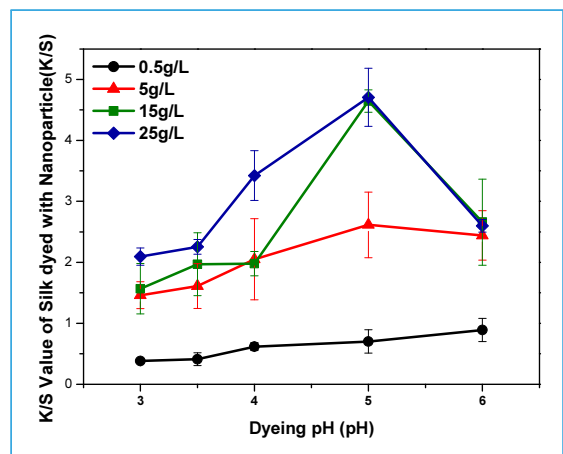


Figure 4. Effect of hydrogen exponent on the uptake of silk fabric dyed with Fe₂O₃.

Figure 5에 나타난 바와 같이 모든 농도의 염액 a^* 의 값은 모든 pH의 조건에서 양수의 값을 보여 붉은 기미를 나타낸다. 염액 0.5g/L는 pH가 3일 때 a^* 의 값이 약 16.52 ± 0.98 , pH가 3.5일 때 약 15.36 ± 1.43 으로 나타나 유사한 수준의 붉은 기미를 보이며 pH가 3.5보다 높아질수록 붉은 기미가 줄어든다. 5g/L와 15g/L는 pH가 3.5일 때 붉은 기미가 가장 강하게 나타난다. 25g/L일 때에는 pH의 변화가 붉은 기미에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. Figure 6에 나타난 바와 같이 b^* 의 값 또한 모든 염액과 pH 조건에서 양수를 나타나 노란 기미가

존재한다는 것을 알 수 있으며 염액 0.5g/L의 pH가 높아질수록 노란 기미가 줄어들고 5g/L와 15g/L, 25g/L는 pH가 3.5일 때 노란 기미가 가장 강하게 나타난다. pH가 감소할수록 붉은 기미와 노란 기미가 증가하는 경향을 보이는 이유는 철 산화물이 pH 4 미만의 조건에서는 피막이 용해되어 없어지고 수소가 발생하며 부식이 일어나 색의 발현이 크기 때문으로 분석되었다[16]. 따라서 염착량이 높고 노란 기미의 b^* 값이 낮은 pH 5의 조건에서 붉은빛을 내는 염색 직물을 얻는 것에 가장 효과적일 것으로 보인다.

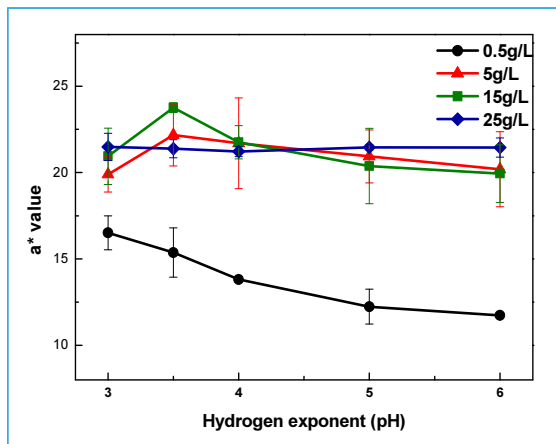


Figure 5. Effect of hydrogen exponent on a^* value of silk fabric dyed with Fe_2O_3 .

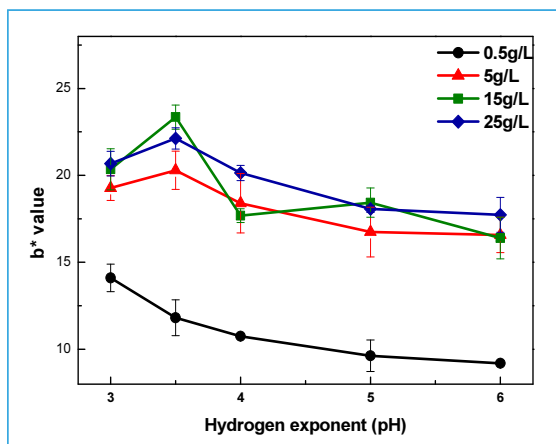


Figure 6. Effect of hydrogen exponent on b^* value of silk fabric dyed with Fe_2O_3 .

3.2. Fe_2O_3 로 염색된 견직물의 일광견뢰도

60°C에서 pH 3.5로 조정된 0.5, 5, 15, 25g/L의 염액으로 40분 동안 염색된 직물의 일광견뢰도를 평가하여 Figure 7에 나타내었다. 60분 동안 UV-C Lamp를 이용해 일광을 조사했을 때 색의 변화를 나타내는 ΔE 가 0.5g/L는 약 0.55, 5g/L는 약 0.53, 15g/L는 약 0.64, 25g/L는 약 0.60으로 측정되어 일광에 의한 색의 변화가 매우 미미한 것으로 분석된다. 시간을 증가시켜 일광을 조사할 경우 일광 조사 전후의 색차가 증가하나 900분 조사했을 때 ΔE 가 0.5g/L는 약 0.93, 5g/L는 약 2.25, 15g/L는 약

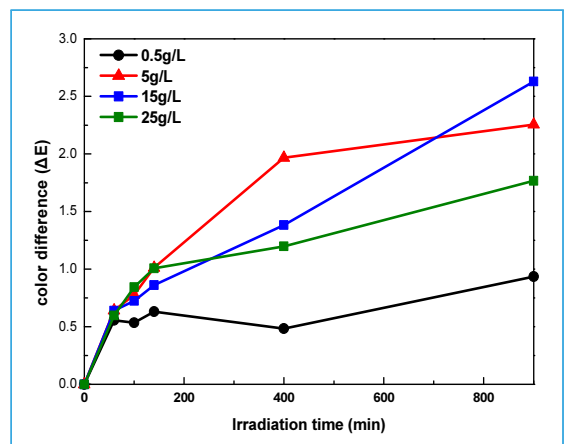


Figure 7. Color difference(ΔE) between before and after UV irradiation.

2.63, 25g/L는 약 1.77로 측정되어 육안으로 관찰 되는 색의 변화는 크지 않은 것으로 분석된다.

3.3. Fe₂O₃로 염색된 견직물의 표면분석

60℃에서 pH 3.5로 조정된 0.5g/L와 25g/L의 Fe₂O₃ 염액으로 40분 동안 염색된 직물과 미처리 시료의 표면을 관찰하여 염색 후 표면의 변화를 Figure 8에 나타내었다. 미처리 시료와 달리 Fe₂O₃으로 염색된 직물 표면에서 입자가 관찰되었다. 이 입자는 Fe₂O₃ Nanoparticle인 것으로 보이며 염색 과정을 통해 견직물의 섬유에 부착된 것으로 판단된다. 염액의 농도가 높을수록 Fe₂O₃ Nanoparticle의 부착이 증가하여 Fe₂O₃ Nanoparticle의 농도가 높은 염액으로 염색된 직물이 농도가 낮은 염액으로 염색된 직물에 비해 붉은 기미가 증가하는 것에 영향을 미치는 것으로 분석된다.

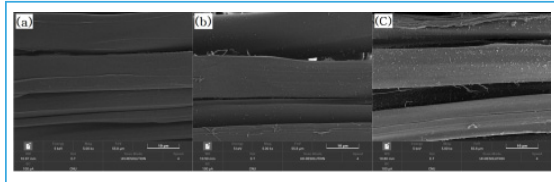


Figure 8. SEM image of (a) untreated silk, (b) silk dyed with 0.5g/L Fe₂O₃, (c) silk dyed with 25g/L Fe₂O₃.

3.4. Fe₂O₃로 염색된 견직물의 단열성 평가

미처리 견직물과 0.5, 5, 15, 25g/L의 Fe₂O₃ 염액으로 40분 동안 60℃에서 pH 5 조건에서 염색된 실크의 Thermogram 이미지와 평균 온도를 Table 4에 나타내었다. 미처리 시료의 평균 온도는 26.9℃, 0.5g/L로 염색된 시료는 26.7℃로 Fe₂O₃로 염색했을 때 시료의 평균 온도가 0.2℃ 낮아졌다. 5g/L와 15g/L, 25g/L로 염색된 시료의 평균온도는 각각 26.3g/L, 26.5g/L, 26.3g/L로 나타나 미처리 시료 대비 0.4-0.6℃ 낮은 것으로 측정되었다. 염착

량이 가장 낮았던 0.5g/L 염색 직물이 다른 염색 직물보다 단열력이 낮았으며 5, 15, 25g/L로 염색된 직물은 염착량에 차이가 있음에도 단열력에는 차이가 없었다. 열전도도가 견직물보다 큰 금속 성분 Fe₂O₃가 열에너지를 흡수하고 열전도도가 상대적으로 낮은 견직물[17]에 열에너지를 전달하는 시간을 늦춰 열에너지의 손실을 줄임으로써 견직물의 단열력을 증가시켰고, 체온의 손실을 낮춰 의복 내의 온도를 유지시키므로 Fe₂O₃로 염색된 직물이 미처리 직물보다 보온성이 향상되었다고 분석된다.

Table 4. Thermogram images of the untreated silk and dyed silk samples.

Concentration (g/L)	Image	Temperature average (°C)	30°C vs (%)
0		26.9	89.6
0.5		26.7	89.2
5		26.3	87.6
15		26.5	87.6
25		26.3	87.6

3. 결론

전투원 개인의 전투력을 향상하기 위해 비무기계 전력 지원체계에 대한 관심이 증가하면서 군수용 의복 장비의 기능성에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다. 본 연구에서는 혹한의 상황에서 병사의 컨디션을 최상으로 유지하기 위해 전자파 흡수, 바이오 분야 등의 소재로 쓰이고 있는 Fe₂O₃ Nanoparticle로 견직물을 염색하여 염색 특성과 표면 특성, 일광견뢰도, 단열성을 평가하여 보온성을 향상시킨 섬유 소재를 제안하고자 하였다.

염색 결과, 0.5, 5, 15, 25, 50g/L로 염색하면 25g/L에서 농도를 높이면 염착량이 더 이상 증가하지 않았으며 0.5, 5, 15, 25g/L의 염색 직물은 연한 붉은색에서 노란 기미가 있는 붉은색까지 다양한 색상을 보여 네 가지 농도의 염액의 시간별, 온도별, pH별 염색성을 살펴보았다. 모든 염액은 40분 동안 60℃에서 염색했을 때 가장 높은 염착량을 보였으며 pH 5의 조건에서 높은 염착량과 낮은 b*값을 보여 노란 기미가 가장 적으므로 붉은 기미를 얻기에 가장 적절한 것으로 나타났다. 0.5, 5, 15, 25g/L 염액으로 40분 동안 60℃에서 pH 5 조건으로 염색된 견직물은 여름 정오의 자외선 1800시간 조사에 해당하는 UV-C Lamp를 900시간 동안 조사하였을 때 자외선 조사 전후의 색차(ΔE)가 약 1.77로 측정되어 일광에 대한 내구성이 매우 뛰어난 것으로 분석된다. 염색된 직물의 표면은 농도가 높은 염액으로 염색될수록 Fe₂O₃ Nanoparticle의 입자가 더 많은 것으로 관찰되었다. 보온성을 살펴봤을 때 미염색된 시료보다 0.5g/L 염액으로 염색된 시료가 열을 차단하는 기능이 향상되어 시료의 평균온도가 0.2℃ 낮게 나타났으며 그 이상의 염액 농도로 염색된 시료는 26.3-26.5℃의 평균온도를 보여 미처리 시료보다 보온성이 향상하였다고 판단된다. 따라서 Fe₂O₃ Nanoparticle로 염색된 견직물은 보온성과 일광견뢰도가 높아 공군의 머플러와 같은 붉은색 계열의 개인에게 지급되는 군수용 의복 섬유에 활용하는 것

에 적합할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1 Ko, H. J., Lee, M. H., Hong, S. D. & Jeon, Y. M., "운용 환경을 고려한 군용 섬유제품 평가 방법", *The Korean Fiber Society*, 25(1), pp. 38-45, 2021.
- 2 Eva M. van Baarle, Carlijn Damsté, Sanne A. J. de Bruijnd and Gwendolyn C. H. Bakx, "Moral Issues in Soldier Enhancement: Military Physicians' Perspectives", *Journal of Military Ethics*, 21(3-4), pp. 198-209, 2022.
- 3 Program Executive Office Soldier, <https://www.peosoldier.army.mil/sep/>, 2023, 3, 14
- 4 Program Executive Office Soldier, <https://www.peosoldier.army.mil/Equipment/Equipment-Portfolio/Project-Manager-Soldier-Survivability-Portfolio/Ghillie-Suit-Accessory-Kit-Upgrade/>, 2023, 3, 14
- 5 Lockhart, C. E. & Johnson, D., "Soldier as a system", *U.S. Army War College*, 2006.
- 6 Noh, Y. G., "A Study on the Promotion of Warrior Platform and Future Development Plan", *Military Research and Development*, 14(1), pp. 95-146, 2020.
- 7 Kim, J. E., Kim, J. Y., Nam, K. H., Ryu, K. H., Park, C. W., Seo, Y. B., Sul, I. H., Sim, S. B., An, S. G., Woo, J. W., Lee, D. Y., Lee, S. H., Lee, E. J., Lee, J. H., Lee, J. G., Jeon, J. W. & Jo, E. I., "A forecast for 2021 Security Environment & Policy suggestions for National Defense", *Korea Institute for Defense Analyses*, 2021.
- 8 변성원, 최은경, 장승욱, 이정인, 박윤철, 도성준, 이권선, 최준동, 유은주, "비무기계 군사용 섬유소재 혁신화 방안 연구", *Korea Institute of Industrial Technology*, 2006.
- 9 The Korean Institute of Defense technology, <http://kidet.or.kr/webzine/2106/01.php>, 2021, 6
- 10 Kim, T. H. & Cho, H. H., "The Influence of Wearing Army Combat Uniform on the Thermal Responses in Heat Environment", *Fashion & Textile Research Journal*, 16(1), pp. 167-174, 2014.
- 11 Hong, S., Kim, B., Jeon, Y. & Lee, J., "A study on the Improved Lightfastness Test Method for Military Textile Products", *Textile Coloration and Finishing*,

- 27(4), pp. 288-300, 2015.
- 12 Kim, S., *피복재료학*, Gyomoonsa, 2010.
- 13 Coi, J. H. & Kim, M. J., *Clothing and Health*, Gyomoonsa, 2011.
- 14 AD, W., "Equilibrium of Dyeing: A Review", *Advance Research in Textile Engineering*, 7(2), pp. 1073-1076, 2022.
- 15 Kim, Y. & Lee, J., "The Dye-Property of Loess on Hair According to Temperature", *Journal of The Korean Society of cosmetology*, 16(1), pp. 201-210, 2010.
- 16 Bae, S. I. & Kang, K. Y., "A Study on Rust Printing Technique Using Iron Rust", *Journal of Basic Design & Arts*, 19(6), pp. 285-296, 2018.
- 17 Xue, Y., Lofland, S. & Hu. X., "Thermal Conductivity of Protein-Based Materials: A Review", *Polymers*, 11(3), pp. 456-473, 2019.

민군 겸용 드론 표준화를 위한 150kg 이하 중량별 드론 표준 등급 분류 기준 제안

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

Proposal for Standard Classification of Drone by Weight Under 150kg for Standardization of Dual-Use Drones

이경택, Kyungtaek Lee

한국무인이동체연구조합, R&D센터,
센터장
Head of Center, R&D Center,
Korea Research Association for
Unmanned Vehicle

박민규, Minkyu Park

한국무인이동체연구조합, R&D센터,
기획팀장
Planning Team Manager, R&D
Center, Korea Research
Association for Unmanned
Vehicle

정진석, Jinseok Jeong

한국항공우주연구원,
무인이동체원천기술개발사업단
기술총괄팀, 선임연구원
Senior Reseracher, Unmanned
Vehicle Advanced Research
Center Technology Coordination
& Management Team, Korea
Aerospace Research Institute

조동연†, Dongyoun Cho

서경대학교, 군사학과, 조교수
Assistant Professor,
Department of Military Studies,
Seogyong University

Abstract

This study presents a standard classification of drones weighing 150 kg or less to provide reference for dual-use drone standardization studies. Demand surveys from industry, academia, research institutes, and military, as well as economic analyses are conducted qualitatively and quantitatively. Accordingly, the criteria are classified into four categories, i.e., 3.5, 12, 25, and 150 kg, based on the drone weight. The result can be used as a basis for dual-use drone standardization studies. To achieve accurate and reliable data analysis, constant updates will be performed.

keywords : Dual-Use Drone, Standardization, MTOW(Maximum Take-off Weight), Classification of Standardization, Common Platforms

† Corresponding Author : Dongyoun Cho

Tel : +82-02-443-7386, email : dongyoun@skuniv.ac.kr

Seogyong University, 124, Seogyong-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea

Received April 12th. 2024 Revised May 6th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 연구배경 및 필요성

최근 전 세계적으로 드론 산업을 집중적으로 육성하는 추세에 따라 시장 규모 또한 급속하게 성장하고 있다. 2020년 드론 시장 보고서(2020 Drone Market Report)에 따르면 글로벌 드론 시장은 2020년 기준 약 23.2조 원으로 연평균 13.8% 성장하여 2025년에는 약 40.5조 원에 이를 것으로 전망하였다. 국방기술품질원은 글로벌 드론 시장의 약 70%를 차지하는 군사용 드론 시장 규모의 경우 2017년 약 30억 3,700만 달러에서 2026년에는 40억 7,500만 달러에 달할 것으로 전망하였다. 최근 러시아-우크라이나 전쟁을 통해 보여준 드론의 활약상은 드론이 이미 현대전의 일부가 되었음을 보여주고 있으며 향후 이러한 수요는 더욱 커질 것으로 전망된다.¹⁾ 즉, 미래 글로벌 드론 시장은 성장률 측면에서는 민간 드론 시장이, 전체 규모 측면에서는 군용 드론 시장이 앞다퉈 성장하는 모양새로 향후 드론 시장에서 민과 군의 교차 영역은 필연적으로 확장될 것으로 판단된다[1]. 이러한 민군 드론 시장의 성장세를 견인하는 주요배경에는 기술의 급속한 발전이 있다. 특히 민간 분야의 드론 관련 기술발전 속도는 군 발전 속도를 뛰어넘어 반도체 산업에 이어 드론 분야에서도 무어의 법칙(Moore's Law)²⁾이 이미 깨진 것이 아니냐는 평가를 심심치 않게 접할 수 있다. 전 세계적으로 민간이 드론 기술의 발전을 견인함에 따라 군은 더욱 복잡해진 전장 환경에서 운용 가능한 드론의 소요와 요구성능을 발전시키고 제기할 수 있게 되었다. 이러한 고도화된 군의 소요와 점차 증가하는 수요는 민간 드론의 기술 발전을 촉진하고 기업들이 민간 시장뿐 아니라 국방 분야까지 진출할 수 있다는 가능성을 열었다는 점에서 시사점이 있다.

문제는 글로벌 민간 드론 시장의 약 70% 이상을

중국이 독점하고 있다는 것으로 드론의 표준화 필요성이 제기된 주된 요인으로 작용해 왔다. 최근의 표준 경쟁은 국가 간 사활을 건 전략적 경쟁으로 진화하는 모습을 보이고 있다[2]. 이에 따라 드론 표준화 추진의 미비는 국내 드론 시장에서의 가격경쟁력 저하는 물론 민간 드론업체의 연구개발 동력 부족을 야기하였다. 이는 드론 관련 '기술, 제작, 서비스' 부분의 인재 부족으로 이어지는 등 연속적인 부작용으로 연결되어 왔다. 이러한 악순환은 공공기관 및 민간의 수요 증가 추세를 대부분 외산 드론으로 충당해 온 행보에서 기인한다. 이는 군의 드론 전력화 운용에도 악영향을 끼쳐 온전한 운용 및 유지보수에도 차질을 빚는 결과로 이어졌다.

이러한 국내 드론 산업의 구조적 한계와 문제점을 해결하는 데 조금이나마 기여하기 위해 본 연구를 통해 국내 민과 군에서 보유 중인 드론을 중량별로 조사·분석하여 중량별 드론의 표준 등급 분류 기준을 제시하여 민군 겸용의 드론 표준화를 위한 첫 단추를 끼워보려 한다. 연구의 성과는 드론의 공통 플랫폼화를 위한 기반을 제공할 것이며, 드론의 모듈화 가능성을 살펴볼 수 있을 것으로 기대한다. 이에 제2장에서는 국내의 동향을 살펴보고, 제3장에서는 중량별 드론의 표준 등급 분류 기준을 분석·제시하며, 제4장 결론을 통해 시사점을 분석·도출하고자 한다.

2. 드론 전력화 / 표준화 추진 동향

미국, 영국 및 유럽의 경우 군이 민간의 고도화된 기술과 제품을 신속하고 효율적으로 도입할 수 있는 프로그램을 발전시키고 있다. 미국의 경우 아래 Table 1과 같이 국방 기술 중 유망한 기술 영역을 설정하고 이를 신속하게 획득하기 위한 전략을 실행한다.

1) 김문경, "우크라이나 전쟁 2년...커지는 드론 비중", YTN 2024.02.25.자 기사, <https://www.ytn.co.kr/_ln/0101_202402250629080647>, (검색일: 2024.03.12.)

2) 무어의 법칙(Moore's Law)은 반도체 집적회로의 성능이 24개월마다 2배로 증가한다는 법칙으로 경험적 관찰에 근거를 두고 있다.

Table 1. Examples of Emerging Technologies for Rapid Demonstration Acquisition Project

Artificial Intelligence	Hyper Connectivity	Cloud
Augmented/Virtual Reality	Human System	Cyber Physical System
Advanced Biology	Cyber/Blockchain	
Big Data	Autonomous/Robotics	
Drone(Unmanned Aerial Vehicle)	Advanced Propulsion and Energy	
Advance Material/Sensor		

이 중 드론 분야는 미 국방부 예하 국방혁신단(Defense Innovation Unit)이 추진하고 있는 ‘Blue UAS’ 프로그램에서 미국의 추진전략을 엿볼 수 있다. Blue UAS 프로그램은 크게 신속성과 신뢰성에 중점을 두고 소요군이 적시에 민간 드론을 획득할 수 있는 방법론을 제시한다. 나아가 중국에 대한 의존도를 줄이고 미국 및 일부 동맹국들의 드론 시장을 보호하며 보안 측면에서 신뢰성을 담보하기 위한 목적을 가지고 있다.³⁾ 이는 경제와 안보라는 가치를 동시에 충족할 수 있도록 기술발전 분야에서 민간과 군이 협력하는 방안을 점차 발전시키고 있는 것으로 평가된다.

한편, 우리나라는 신속시범사업을 통해 신기술이 적용된 민간의 제품을 구매한 후 소요군의 시범운용을 통해 군사적 활용성을 확인하고 신속하게 군에 전력화하기 위한 노력을 기울이고 있다. 이는 기존의 소요기획, 예산확보 및 사업추진이라는 단계를 거쳐 필요한 무기체계를 연구개발이나 구매를 통해 군에 배치하는 방식과는 달리 기술발전 속도가 빠른 분야에 있어 민간기술을 보다 신속하게 군에 적용하기 위한 노력의 일환이라는 측면에서 의의가 있다. 특히 2021년에는 신속시범사업을 통해 선정된 감시정찰용 수직이착륙드론이 군 최초로 전력화까지 연계되어 국내 큰 관심을 받았다. 이러한 발전은 국내 민군

협력방식에 대한 변화의 필요성을 인식시키는 계기가 되었고 현재의 민군기술협력사업이 자리를 잡는데 큰 영향을 끼쳤다. 민군기술협력사업이란 군과 민이 공동으로 활용되는 기술의 개발·이전, 규격 표준화 및 기술정보 교류 등을 효율적으로 수행하기 위하여 추진하는 사업을 의미한다. 이는 크게 민군기술 개발사업, 민군기술이전사업, 민군규격표준화사업, 민군기술정보교류사업으로 나뉘며 이 중 본 연구와 밀접한 민군규격표준화사업은 민수규격⁴⁾과 국방규격⁵⁾의 표준화 사업을 칭한다. 현재 각 군은 유무인 복합전투체계 구축 추진의 일환으로 다양한 전장 환경에서 임무수행이 가능한 무인항공기를 도입하고 있는 데 반해 ① 국내 드론 산업의 높은 대외 의존도, ② 글로벌 시장 대비 낮은 기술 및 가격경쟁력, ③ 해외 부품 수급으로 인한 고장 발생 시 자체 유지 보수 및 정비의 제한 등 드론의 군 전력화 추진을 저해하는 요소가 적지 않은 것으로 평가된다. 즉, 국방 분야에서도 드론의 적시적인 도입과 운용 및 유지 측면에서 표준화의 필요성이 증대되는 상황이다. 민수와 군수 모든 영역에서 증대되는 표준화 필요성은 본 연구를 포함한 실질적인 추진 노력을 견인할 수 있을 것으로 기대한다. 표준화의 효용성은 민과 군 모든 영역에서 드러날 것으로 전망되는데, 민수 분야에서는 드론의 가격경쟁력 회복, 업체의 생산효율 향상, 국내 드론 산업의 자생력 확보는 경쟁력 강화를 기대할 수 있다. 국방 분야에서는 군수품의 다양성 감소로 인한 획득기간 단축, 총 수명주기 비용의 절감, 군수품의 상호 운용성 및 호환성 증진 등을 통한 저비용, 고효율의 국방자원 운영체계 기반 구축 등이 가능할 것으로 기대된다[3]. 또한 품질보증, 원가산정, 사업관리, 계약관리, 군수자원관리 등의 기준을 제공함에 따라 드론의 전력화가 보다 용이하게 진행될 수 있을 것으로 판단된다.

3) 보다 자세한 내용은 DepSecDef Ban on COTS UAS(May 2018), NDAA FY20 Sec 848(Dec 2019), Executive Order 13981(Jan 2021), DepSecDef Guidance for the Operation and Procurement of UAS(Sep 2021) 참고

4) 산업표준화법 제12조에 따른 한국산업표준, 정보통신산업진흥법 제13조에 따른 정보통신표준, 물품관리법 제6조에 따른 표준

5) 방위사업법에 따라 방위사업청장이 정한 군수품에 관한 규격

역으로 드론의 표준화가 적시적으로 이루어지지 않았을 경우 다양한 위험성이 드러날 수 있다. 드론의 표준화가 제대로 이뤄지지 않을 경우 다음과 같은 제한사항 발현이 예상된다. 첫째, 체계적인 전력 운용이 제한된다. 전력의 효과적인 배치와 운용에 있어 신속성과 예측가능성이 떨어지며, 전력별 성능 차이 등으로 체계적인 전투수행이 제한된다. 이는 장비의 성능 및 특성이 동일할 때 전력운용계획의 수립이나 통제가 용이하다는 점을 미루어볼 때 오히려 악화될 가능성이 높다고 해석할 수 있다. 둘째, 효율적인 군수지원이 제한된다. 만약 상호 호환이 되지 않는 전력체계들이 운용될 경우 군수지원요소가 증가할 수 있으며 이는 적기의 군수지원 제한으로 이어질 수 있다[4]. 셋째, 총 수명 비용이 증가한다. 획득 시 고려해야 할 사항이 증가하게 되고 결국 다품종 소량 획득 구조로 단가 상승 및 개발 리스크가 증가하게 된다. 결국 예상되는 위험성을 해결하기 위해서는 드론의 표준화가 반드시 이루어져야 한다. 군이 운용 중인 드론 대부분이 민간의 상용 드론을 구매/획득하여 전력지원체제로 운용되고 있기에 국방 드론의 표준화가 아닌 민군 겸용의 드론 표준화가 필요하다라는 점에서 본 연구의 의의를 다시 한번 찾을 수 있다.

3. 중량별 드론 표준 등급 분류

본 연구진은 민군 겸용 드론의 표준 개발을 위해 민군 드론의 소요 발굴 및 정량화, 민군 드론의 요구성능 도출 및 정량화, 성능 및 제작기준 표준을 연구하였다. 이를 위해 산·학·연·군 의견 수렴 및 분석, 드론 관련 국내외 표준 개발 현황 및 추진 동향 조사 분석 등 민과 군의 교차 영역에서 표준 개발 시점(始點)을 확립하고자 하였다. 다만, 자체중량 150kg 이하의 민과 군의 모든 드론의 중량별 소요에 대한 표준 개발은 물리적으로 불가능함과 동시에 설령 개발하더라도 ‘표준의 본질’을 저해하는 역설적인 결과 초래를 우려하였다. 이에 연구진은 자체중량 150kg 이하 드론에 대한 효율적이고 합리적인 표준안을 개발하기 위해 ‘중량별 드론 표준 등급 분류 기준안’을 제안하였다.

이를 위해 민군 겸용의 중량별 드론 표준 등급 분류 기준을 설정하기 위해 정성·정량적 방법을 통합 적용하여 분석하였다. 정량적으로 중량별 드론 표준 등급을 도출(刀攪)하기에 앞서 정성적으로 산·학·연·군 이해당사자 간 견해 차이를 인식하는 것을 최우선 과업으로 판단하였다. 이에 중량별 드론 표준 등급 분류 기준에 대하여 산·학·연·군 전문가 31명을 대상으로 설문 및 델파이를 진행하였고, 그 결과 Table 2와 같이 민과 군을 비롯한 소속기관의 역할

Table 2. Summary of the Results of the Survey on Drone Standard Ratings by Weight

Category	Survey Results
Downward Standard(7)	<ul style="list-style-type: none"> • 1kg, 10kg, 25kg, 150kg • Most drones used by the military weigh less than 5kg • 7kg is ambiguous as a standard because there is no difference in weight from 10kg • The minimum class must be reclassified to 5kg • It is appropriate to specify a minimum rating of 2 to 4kg as drones are expected to become smaller and lighter in the future • 2kg is needed considering military tasks and weight criteria of the micro drone should be included • Considering the operation of micro-drones, it is necessary to classify them into 3 / 10 / 30 / 100kg
Upward Standard(1)	<ul style="list-style-type: none"> • Considering multiple pieces of mission equipment, 10kg, 15kg, 25kg, and 150kg are appropriate
Etc(3)	<ul style="list-style-type: none"> • A rating system based on the weight of the drone is likely to be a drag on the drone industry • This should be limited to particular purpose classification based on the needs of the group • 7 / 10kg should be incorporated if the reason is unclear because of the slight difference in weight

과 성격에 따라 다양한 의견 차이가 있음을 확인하였다. 산·학·연·군 대상의 설문조사 결과는 Table 3과 같은 판단 기준을 척도로 분석하였다. Table 3에서는 군과 민의 입장에서 중요하게 여겨지는 척도를 각 6가지로 제시하였고, 효과적인 전투력 발휘가 군의 입장이라면, 시장에서의 경쟁력 확보는 민의 입장으로 정리할 수 있다[5].

Table 3. Qualitative Considerations

Military	Civil
① Interoperability	① Marketability
② Autonomy	② Economies of Scale
③ Network Security	③ Scalability
④ Human-Machine Collaboration	④ Consensus-Based
⑤ Reliability	⑤ Coherence & Coordination & Collaboration
⑥ Maintainability	⑥ Adaptability

다음 정량적 분석은 분석의 범위와 신뢰성 제고를 위해 선행연구 및 참고 가능한 기준점 설정을 선행할 필요가 있었다. 이에 먼저, 항공안전법 시행규칙과 미래국방 2030 기술전략상 제시된 중량 등급을 살펴보았다. 항공안전법 시행규칙 제306조 ④ 제3항에 따른 초경량비행장치 조종자 증명 규정 중 제1항제4호가목에 따른 무인동력비행장치에 대한 자격기준, 시험실시 방법 및 절차 등은 다음 각호의 구분에 따른 무인동력비행장치별로 구분하여 달리 정해야 한다고 규정되어 있다. 첫째, 1종 무인동력비행장치는 최대이륙중량이 25킬로그램을 초과하고 연료의 중량을 제외한 자체중량이 150킬로그램 이하인 무인동력비행장치이다. 둘째, 2종 무인동력비행장치는 최대이륙중량이 7킬로그램을 초과하고 25킬로그램 이하인 무인동력비행장치이다. 셋째, 3종 무인동력비행장치는 최대이륙중량이 2킬로그램을 초과하고 7킬로그램 이하인 무인동력비행장치이다. 넷째, 4종 무인동력비행장치는 최대이륙중량이 250그램을 초과하고 2킬로그램 이하인 무인동력비행장치이다. 물론, 4종으로 구분한 배경은 조종자 자격증명 구분을 위한 것으로 본 연구의 목적과

는 상이하지만 150kg 이하의 중량 범위 내 법적으로 명시되어 있는 구분 기준인 만큼 하나의 참조점으로 삼았다.

또한 국가기술표준원의 KSW 9000에 따르면 무인기를 중소형(25~150kg), 소형(2~25kg), 초소형(~2kg)으로 구분하고 있다. 본 연구에서는 25kg급 이하 드론의 표준 등급 분류 기준을 보다 구체화하고 있다는 점에서 KSW 9000과 그 방향성을 함께하고 있다고 볼 수 있다.

한편 국방기술진흥연구소는 2022년 미래국방 2030 기술전략을 발간하면서 k-means 알고리즘을 적용한 국방 클러스터링 분석 결과를 제시하였다. 결과에 따르면 10kg급/25kg급/150kg급에 해당하는 드론의 분포도가 가장 높은 것으로 나타났고, 분석 간 적용한 방법론과 결과를 중량별 드론 표준 등급 분류 기준 설정을 위한 주요 참조점으로 설정하였다. 나아가 Table 4와 같이 중량별 민군 드론에 대한 클러스터링 분석, 중량별 부품 단가의 경제성 등을 단계별 분석 지표로 삼아 분석하였다.

Table 4. Quantitative Considerations

Step 1	Step 2	Step 3
Military Drone K-means Clustering Results	Analysis of Drones Requirements in the Army by Weight	An Economic Analysis of Increasing Unit Cost of Parts by Weight
Survey		

이와 같이 민군 겸용 드론 소요에 대한 정성적 판단과 기술·경제적 관점에서의 정량적 분석 결과를 종합하여 총 3단계에 걸쳐 결과를 도출하였다. 1단계는 미래국방 2030 기술전략에서 제시된 선행연구 결과인 10kg급/25kg급/150kg급을 시작으로 분류 기준 연구에 착수하였고, 2단계는 중량별 육군이 보유한 상용 드론 비중 분석 및 민수용 드론에 대한 추가적인 클러스터링 분석 결과를 토대로 4kg급을 추가하고 기존 10kg급을 12kg급으로 조정하였다. 3단계는 중량별 부품 단가 기준의 경제성 분석을 통

해 기존 4kg을 3.5kg으로 하향 조정한 후 전 단계를 걸쳐 산·학·연·군의 다양한 의견을 지속 수렴/분석하여 반영하였다.

3.1. K-means 국방 클러스터링 분석

미래국방 2030 기술전략에서는 기 반영된 드론 소요 71건을 대상으로 계열화, 모듈화 가능성을 분석하고 이를 통해 공통 플랫폼 및 표준 임무장비에 대한 성능을 제시하였다[6]. 먼저, 데이터 분석 결과를 바탕으로 널리 쓰이고 있는 KDD(Knowledge Discovery in Database) 방법론을 수정하여 데이터를 분석하였다. 다만 현 드론 소요 71개의 데이터 특성상 전체 데이터 중 분석 가능한 데이터는 제한적일 것이라는 판단하에 기존의 KDD 방식을 변경하여 데이터마이닝 단계에서 알고리즘을 사용한 분석뿐만 아니라 전문가 집단에 의한 분석을 추가적으로 수행함으로써 데이터 분석 방식을 개선하였음을 밝혔다. 또한 데이터마이닝을 위한 알고리즘들은 지도학습 기반의 대표적인 방법인 Decision Tree, 비지도학습 기반의 대표적인 방법인 K-means

Clustering 및 그밖에 Artificial Neural Network 등 다양한 방법들이 있으나, 연구의 대상과 관련된 표준화된 데이터가 제한적이기 때문에 복잡한 기법을 사용하기 제한되고 수 개의 공통 플랫폼 산출이라는 명확한 목표가 있음에 따라 Figure 1과 같이 K-means Clustering을 사용하였다[6]. 클러스터 분석이란 주어진 데이터들의 특성을 고려해서 데이터 집단을 정의하고 이 집단의 대표할 수 있는 대푯값을 찾는 것이다[7].

동(同) 기술전략은 최대이륙중량 기준의 국방 드론에 대한 클러스터링 분석을 통해 공통 플랫폼 중량 등급을 도출하였다. 즉 국방 드론 중량의 분포도가 밀집한 영역의 적정 중량을 공통 플랫폼화하여 제시한 것으로 국방 드론이 지향하는 공통화/모듈화/계열화를 위한 첫 단계로 볼 수 있다. 이는 임무장비를 장착하지 않고 순수 기체성능만을 고려하여 도출한 결과로, 분석된 성능은 기술적으로 공통화된 소요의 플랫폼으로 적합한 것으로 평가하였다. 또한 중량별 드론 표준 등급 설정과 직결되는 것으로, 제시된 10kg급/25kg급/150kg급 표준 중량을 본 연구의 참조점이자 시작점으로 삼았다. 앞선 연구결과를

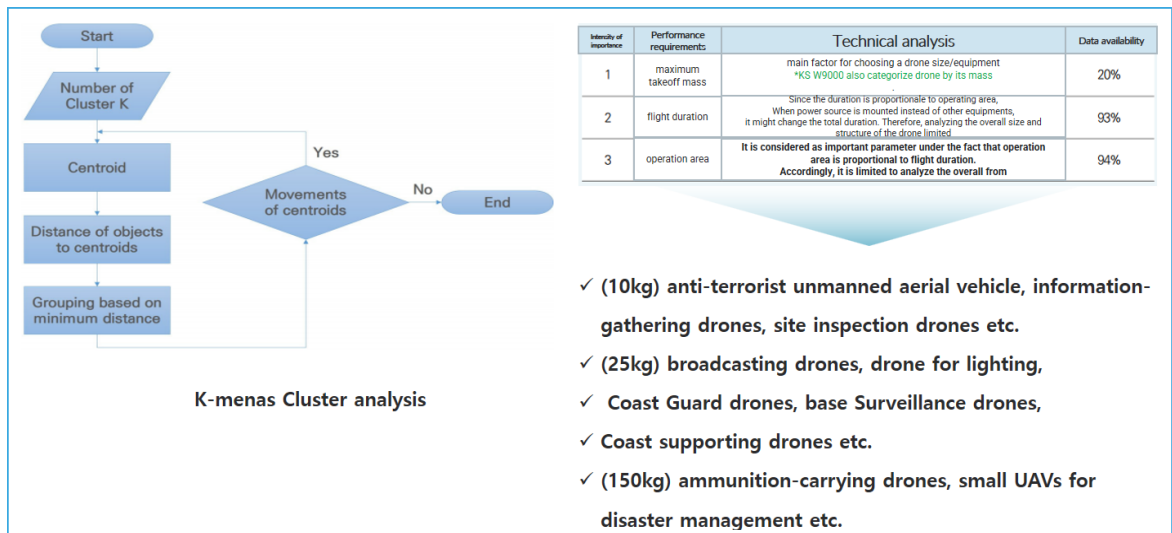


Figure 1. Result of Data Analyzed by K-means Clustering⁶⁾

6) 국방기술진흥연구소, 「미래국방 2030 기술전략」, 2022, pp. 90~91. 발췌

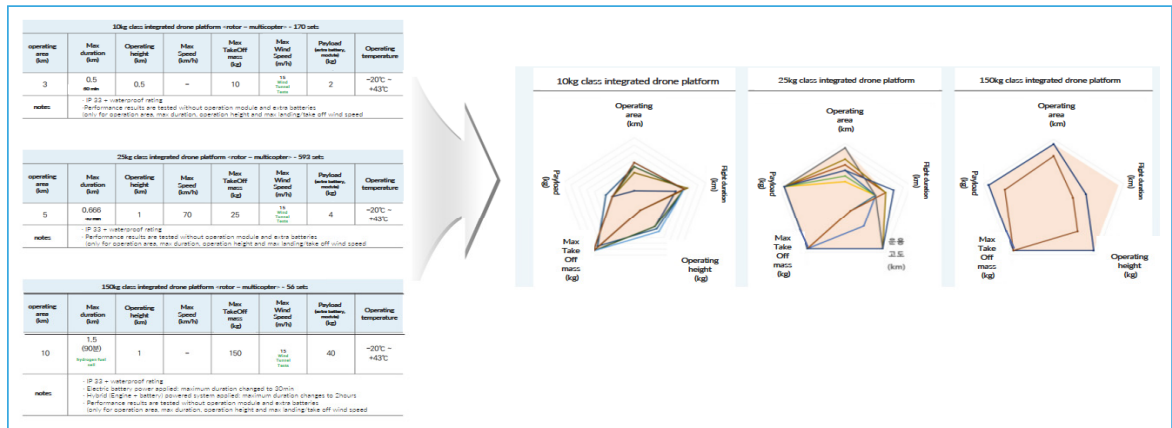


Figure 2. Common Platform Proposal⁷⁾

기초로 도출한 공통화된 소요의 공통플랫폼별 성능은 Figure 2와 같다.

Figure 2는 실선으로 표기된 공통화된 소요 성능 대비 면으로 표기된 공통플랫폼 성능을 비교한 도표를 나타낸다. 이를 본 민군 겸용 드론 표준화 연구와 연계하여 보면 모든 소요 성능을 100% 충족할 수 없으나 대부분의 요구성능을 공통적이고 일반적으로 충족함을 알 수 있다. 즉 가장 높은 수준의 성능이 아닌 최적화를 함의하고 있어 표준연구의 지향점과 결이 같음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구진은 중량별 드론 표준 등급 분류 기준 설정 또한 동일한 방법론을 차용하여 적용함에 타당성이 있다고 판단하였다.

3.2. 중량별 육군 드론 소요 및 민수용 드론 클러스터링 분석

2022년 6월에 개최된 민군 겸용 드론 표준화 세미나에서 육군이 공개한 발표자료에 따르면, Table 5와 같이 현재 육군이 운용 중인 상용 드론의 최대 이륙중량별 비중은 10kg 이하의 드론이 전체의 75%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 10kg 이하의 드론은 운반의 편의성을 고려하여 중대급 이

하에서 운용되는 반면 10kg 초과 드론은 수송용 드론, 소총 드론 등 대대급 이상에서 주로 사용되고 있음을 밝혔다. 이를 기초로 육군은 드론봇 공통플랫폼 선정 및 표준화 추진 방향을 제대별로 구분하여 제시하였다.

Table 5. Drones in the ROK Army

* unit: kg							
~2	2~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~	
29%	28%	18%	12%	3%	6%	4%	

육군은 향후 군단급 이상 제대에 MUAV와 군단 UAV-II 플랫폼을 기반으로 정찰·공격·지원용으로 계열화 및 모듈화를 지향하고, 사·여단급의 경우 수직이착륙형으로 계열화 및 모듈화를 추진할 계획이라고 밝혔다. 대대급 이하 드론은 상용 드론을 표준 플랫폼으로 선정하여 진화적 획득을 지향하는 한편 대대급은 해안경계용 정찰드론급, 중대급은 근거리 정찰드론급, 분·소대는 레이싱 드론급을 기준으로 함을 밝혔다.

이를 기초로 분석한 결과 연구팀은 기존 10kg급/25kg급/150kg급의 등급 분류 기준에 육군이 보유한 상용 드론 비중의 57%를 차지하는 5kg급 이하 드론의 중간값과 2차 클러스터링 분석 결과를 반영하

7) 국방기술진흥연구소, 「미래국방 2030 기술전략」, 2022, pp. 93-94. 발췌

여 4kg급/12kg급/25kg급/150kg급으로 재설정하였다. 분석과정을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 한국교통안전공단에서 제시한 「초경량 무인비행장치 용도별 중량별 기체등록 현황(2022)」에 따르면 무인멀티콥터, 무인비행기, 무인헬리콥터 등 전체 등록 수는 38,103대로 집계되었는데, 이 중 본 연구와 관련된 무인멀티콥터는 32,553대로 전체 등록 수량에서 85.4%의 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이를 최대이륙중량을 기준으로 재분류하면 Table 6과 같이 나타낼 수 있으며 민수용 무인멀티콥터 클러스터링 분석 결과 Figure 3과 같이 최대이륙중량 25kg 이하의 비중이 80.3%로 압도적인 현황을 보였다.

Table 6. Analysis of Drone Clustering for commercial use⁸⁾

* unit: kg				
~0.25	0.25~2	2~7	7~25	25~
0.7%	30.7%	11.9%	37.0%	19.7%

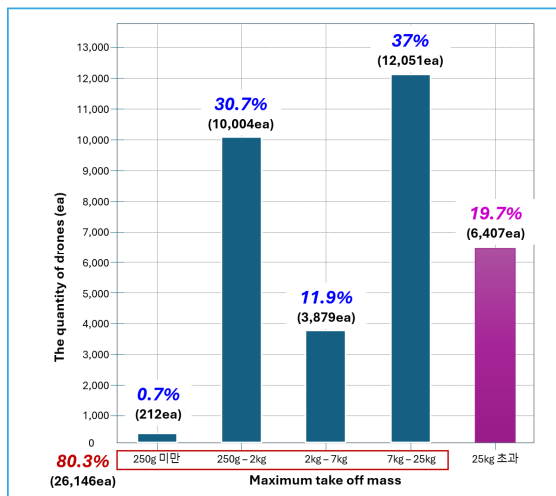


Figure 3. K-means Clustering of Civil Drones

이를 육군의 중량별 상용 드론 보유 현황과 비교해 보면 군사용 상용 드론 또한 25kg 이하의 드론이 96%로 육군의 중량별 드론 비중과 유사함을 알 수 있

다. 2차 K-means 클러스터링 분석 결과 4kg급/12kg급/25kg급/150kg급으로 육군의 중량별 드론 비중을 기초로 분석한 결과와 유사한 값이 도출되었다. 다만 기존에 설정한 10kg급보다 12kg급에서의 밀집도가 더욱 높아 표준 중량 등급을 12kg급으로 수정하여 재설정하였다.

3.3. 중량별 기체 단가 증가 폭을 고려한 경제성 분석

일반적으로 기체 중량이 증가하면 이에 비례하여 기체의 단가는 증가한다. 다만 이러한 중량 증가에 따른 기체 단가의 증가 폭은 선형(Linear)의 형태를 보이지 않고 지수의 형태로 나타나는 경향이 두드러졌다. 특정 중량 구간에서 기체 단가의 증가 폭이 급등하는 형태를 보였는데, 연구진은 기체 단가의 증가 폭이 급등하는 구간이 드론의 표준 중량 등급 범위 내에 속하게 되면 경제적 관점에서 표준의 본질을 저해할 수 있다고 판단했다. 이에 중량별 기체 단가 증가 폭을 고려하여 단가와 중량 간 상관관계를 분석한 결과 Figure 4와 같이 중량별 기체 단가가 급등하는 구간은 7kg/15kg/30kg/170kg으로 도출되었다. 기체 단가 급등 구간을 기준으로 그룹별 중량 범위의 중간값을 도출하면 3.5kg/12kg/25kg/150kg으로 나뉜다. 기체 단가가 급등한 중량값을 기준으로 구분된 선형 형태의 중량 구간을 표준 구간으로 그룹화할 경우 단가 측면에서의 경제적 손실이 최소화 되는 구간으로 해석할 수 있다. 다만 기체를 비롯한 제품의 단가는 기업 보안에 준하는 사항으로 ‘중량별 드론 기체 단가’에 대한 신뢰성 있는 충분한 데이터를 확보하는 데 어려움이 있었음을 밝힌다. 그럼에도 불구하고 최대이륙중량 증가에 따라 부품 단가가 특정 구간에서 급등한다는 사실을 확인하였다는 것은 본 연구의 주된 성과라 할 수 있다.

8) 본 자료는 한국교통안전공단에서 공시한 용도/중량별 기체 등록 현황으로 미등록 기체의 현황은 미포함되어 있으나, 민수용 드론에 대한 국내 전반적인 실정 파악을 위한 기초자료로 삼기에 충분할 것으로 판단하였다.

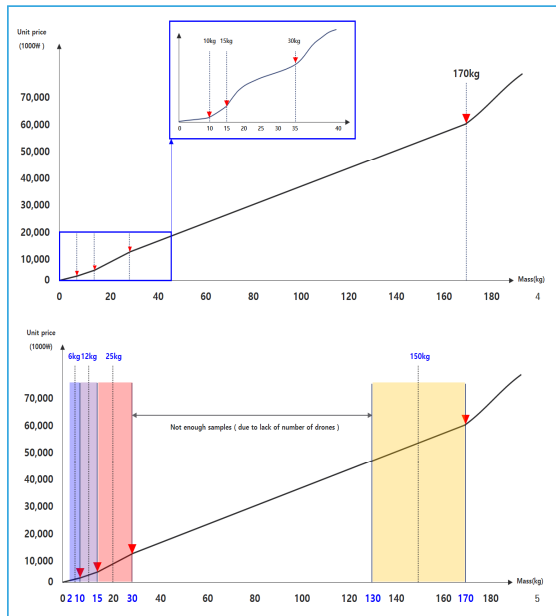


Figure 4. Estimated Cost and Drone Weight

지금까지 총 3단계에 걸쳐 중량별 드론 표준 등급 분류 기준 도출을 위한 분석 과정을 살펴보았다. 연구진은 최종적으로 3.5kg급/12kg급/25kg급/150kg급을 드론 표준 중량 등급 기준으로 설정함으로써 민군 겸용 드론 표준화를 위한 4개의 공통플랫폼을 제시하였다. 이는 군의 소요 및 성능, 그리고 경제성 측면을 고려한 결과라는 점과 드론의 물리적인 '모듈화, 공통화, 계열화'를 위한 첫 단추를 채웠다는 점에서 의미가 있다.

3.4. 시사점

본 연구는 k-means, Mean-Shift 등 다양한 알고리즘을 적용한 클러스터링 분석 방법을 활용하여 중량별 드론 표준 등급 분류 기준을 제안하였다. 물론, KSW 9000 표준서의 중량별 분류 기준, 항공안전법 시행규칙 내 초경량비행장치 조종자 자격증명 기준 등과 연계하여 분석했음에도 불구하고 동일한 분류 기준은 도출되지 않았다. 본 연구의 목적이 민군 겸용 드론 표준화를 위한 중량별 드론 표준 등급 분류 기준의 제안임을 미루어볼 때, 연구의 목적과 방향, 이에

따른 방법론의 상이로부터 기인한 결과로 판단된다.

드론의 모듈화, 계열화, 공통화 추세에 발맞추어 민군 겸용의 드론 표준화를 온전히 추진하기 위해서는 우선적으로 공통플랫폼화된 기체 표준 플랫폼이 요구된다. 따라서 150kg 이하의 민수와 군수용 드론 전체를 대상으로 어떠한 중량대에 가장 많이 분포되어 있는지를 분석하여 이를 공통플랫폼의 기초로 삼았다. 나아가 표준의 본질을 침해하지 않기 위해서는 표준 적용 시 부작용을 최소화하기 위한 방향으로 접근하는 것이 타당하기에 클러스터링 분석 방법론을 우선 차용하여 연구하였다. 또한 도출된 결괏값에 대한 검증과 신뢰성 확보를 위해 최대이륙 중량 증가에 따른 부품 단가 증가 폭 분석 등의 추가연구를 통해 결론을 도출하였다. 따라서 본 연구는 표준화와 모듈화라는 다소 상이한 방향성을 하나로 모을 수 있는 가능성을 열었다는 점에 큰 의미가 있다.

4. 결론 및 제언

본 논문에서는 민군 겸용 드론 표준화를 위한 150kg 이하의 중량별 드론 표준 등급 분류 기준안을 제시하였다. Figure 5와 같이 1단계는 미래국방 2030 기술전략에서 제시한 국방기술진흥연구소의 선행연구 결과를 기초로 10kg급/25kg급/150kg 등급을 적용하였고, 2단계는 중량별 육군의 상용 드론

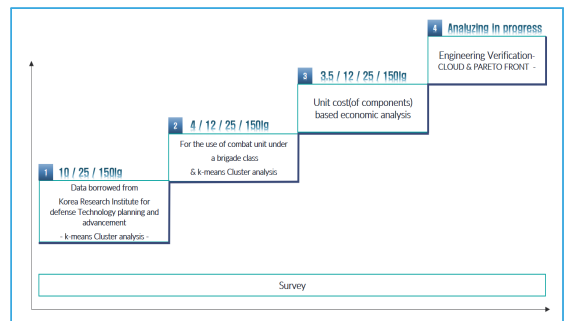


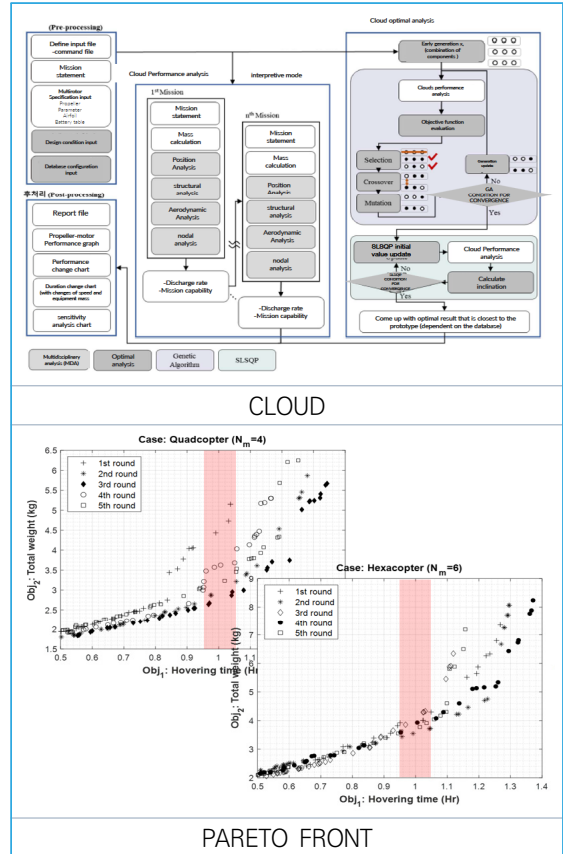
Figure 5. A Study on the Standard Classification Criteria of Drones by Weight

보유 비중 분석 및 민수용 드론에 대한 클러스터링 분석 결과를 기초로 4kg 등급의 추가와 함께 기존 10kg급을 12kg급으로 조정하였다. 3단계로는 부품 단가 기준의 경제성 분석을 통해 기존 4kg급을 3.5kg급으로 하향 조정하였다.

본 연구는 충분한 데이터 확보의 제한 및 민(民)과 군(軍)이 보유하고 있는 150kg 이하의 모든 드론에 대한 총량적인 클러스터링 분석이 전제되지 않은 결과라는 분명한 한계점을 지니고 있다. 그러나 본 연구를 통해 민과 군이라는 상이한 영역 간의 교차점을 찾고 민군 겸용 드론 표준 개발의 시작점을 제공했다는 측면에서 의의를 찾을 수 있다.

본 연구에서 제시한 4개의 중량별 드론 표준 등급은 국방기술진흥연구소에서 제시한 공통플랫폼과 접목·발전시켜 국방 드론이 추구하는 모듈화/계열화/공통화와 연계 가능할 것으로 판단된다. 다만 연구성과의 고도화를 위해 향후 신뢰성이 확보된 충분한 데이터를 기반으로 다양한 조건에서 정량적 분석을 할 필요가 있다. 예를 들어 Table 7과 같이 드론 최적화 설계 프로그램(CLOUD)을 활용하여 군사용 드론에 대한 요구성능의 타당성 검증, 임무형상별 최적화된 드론의 부품 조합에 따른 중량값 검증, 공통플랫폼 성능지표 중 중량을 기준으로 한 드론 최적화 설계 여부 검증 등을 후속하여 연구할 필요가 있다[8]. 또한 PARETO FRONT⁹⁾ 기법을 활용하여 표준 기체 사양 바탕의 탑재 중량, 배터리 용량 등 임무에 따라 달라지는 설계변수의 영향을 분석하고, 비행속도, 체공시간 등 주요 비행 성능 및 기체의 중량, 그리고 제조 단가 등의 다양한 목적함수에 대한 파레토 최적 분석, 다목적 최적설계 수행 및 다중 목적 최적화를 통한 드론 중량별 표준 등급 분류의 기초자료를 획득하는 등의 후속 연구는 더욱 고도화되고 신뢰성 있는 연구성과를 이끌어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

Table 7. A Study on the Advancement of Research Using Quantitative Techniques



참고문헌

- 1 European Parliament, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2019\)642230](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2019)642230). 2019, 8, 10
- 2 Yoo Kyung Ro, "US-China Drone Wars: Standard Competitions for Technology, Discourse, and Institution", *Korean Journal of International Relations*, 61(2), pp. 81-123, 2021.
- 3 Hyung-Gon Ryu, "A Study on the Improvement Plan of Korea Defense Standardization", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 18(4), pp. 459-468, 2015.
- 4 UNMANNED SYSTEMS ROADMAP 2007-2032, U.S.

9) 설계자가 다뤄야 하는 매개변수가 너무 많을 때, 매개변수 전체 범위를 고려하는 대신 효율적인 세트를 제한하고 절충하는 방식

Department of Defense, 2007.

- 5 Unmanned Systems Integrated Roadmap FY 2017-2042, U.S. Department of Defense, 2018.
- 6 National defense technical strategy 2030: DRONE, Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement, 2022.
- 7 Kwon, G. D., Lee, M. G., "Optimal Classification and Allocation Model for Standardization of Common platform for Unmanned Aircraft", Journal of the Aviation Management Society Of Korea, 19(3), pp. 127-141, 2021.
- 8 Soohun Oh, Minwoo Kim, Hyeongseok Kim, Daejin Lim, Kwanjung Yee, Dongmin Kim, "The Solution Development for Performance Analysis and Optimal Design of Multicopter-type Small Drones", 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems(ICUAS), pp. 975-982, 2020.

딥러닝을 위한 비단조 활성화 함수

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

Non-monotonic activation function for deep learning

정재진[†], Jaejin Jeong국립금오공과대학교, 전자공학부, 조교수
Assistant Professor, Dept. of Electronic Engineering,
Kumoh National Institute of Technology

Abstract

The activation function significantly affects the performance of neural networks. Among the numerous functions, the Rectified Linear Unit(ReLU) is widely used in many deep learning applications owing to its simplicity and performance. This study proposes a new nonlinear activation function derived from logarithmic and hyperbolic tangent functions. It exhibits the following distinct characteristics: 1) If the input is greater than 0, then the output is the same as the input, 2) if the input is approximately 0, then the output exhibits non-linear characteristics, and 3) if the input is negative infinity, then the output has a value of approximately zero. Simulation results show that the proposed activation function surpasses the ReLU, Mish, and Power Function Linear Units in terms of classification accuracy. In particular, when applied to the CIFAR-10 classification using the VGG19 network, it increases the accuracy by approximately 1%.

keywords : Convolutional Neural Network(CNN), Deep learning, Activation function

[†] Corresponding Author : Jaejin Jeong

Tel : +82-054-478-7503, email : jeong@kumoh.ac.kr

Kumoh National Institute of Technology, 61, Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 9th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

딥러닝 기술은 이미지 분류, 자연어 처리, 음성 인식 등 다양한 분야에서 우수한 성능을 보여주고 있다. 이에 따라 현재 딥러닝 기술은 국방, 의료, 제조 산업 등 여러 분야에 광범위하게 적용되고 있다.

활성화 함수(Activation function)는 신경망(Neural network)에서 뉴런의 출력을 결정하는 비선형 함수로, 네트워크에 비선형성을 도입하여 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 과거에는 시그모이드 함수(Sigmoid function)나 쌍곡선 탄젠트 함수(Hyperbolic tangent function)와 같이 생물학적 뉴런의 활성화 방식을 모방한 활성화 함수가 사용되었다. 그러나 이러한 함수들의 기울기 값은 1보다 작아 신경망의 깊이가 깊어지는 경우 기울기가 사라지는 기울기 소실 문제가 발생하여 가중치의 학습이 어려워지는 문제점을 가지고 있다[1]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 2010년 ReLU(Rectified Linear Unit) 함수가 개발되었다[2]. ReLU는 입력이 음수인 경우에는 0, 양수인 경우에는 입력을 그대로 출력하는 함수이다. 따라서 구현이 쉽고 우수한 성능을 가지는 장점이 있다. 하지만 ReLU는 학습 과정 중 일부 뉴런이 죽는 'Dying ReLU' 현상이 발생할 수 있다. 또한 가중치 합이 음수인 경우 기울기의 값이 0이기 때문에 경사하강법이 작동하지 않아 학습이 어려워지는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제를 극복하기 위해 다양한 활성화 함수가 활발히 연구되고 있다[3-8]. 개발된 함수는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 단조 활성화 함수를 이용하는 것이며, 다른 하나는 비단조 활성화 함수를 사용하는 것이다. 단조 활성화 함수로는 LReLU(Leaky ReLU), SELU(Scaled Exponential Linear Unit) 등이 개발되었다[3-4]. 이러한 함수들은 입력이 음수일 때 활성화 함수의 출력이 ReLU와 달리 0이 아닌 값을 가지는 특징이 있다. 최근에는 깊은 신경망에서 네트워크의 성능을 향상시키기 위해 다양한 비단조 활성화 함수가 개발되었다[5-8]. 비단조

함수와 단조 함수의 가장 큰 차이는 입력이 음수인 구간에서 나타난다. 비단조 함수는 단조 함수와 달리 입력이 음수인 구간에서 입력의 크기에 따라 감소한 후 증가하는 형태를 가진다. 이러한 특성으로 인해 함수의 1차 도함수 모양이 단조 함수와 상당한 차이를 보인다. 따라서 비단조 활성화 함수가 딥러닝 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 딥러닝 성능을 향상시키기 위한 새로운 비단조 활성화 함수를 제안한다. 이 함수는 로그와 쌍곡선 탄젠트 함수를 결합하여 얻어진다. 쌍곡선 탄젠트 함수와 로그 함수의 합성을 통해 함수의 출력을 0과 1 사이로 제한하고, 이를 입력값과 결합하여 최종 활성화 함수의 출력을 구한다. 제안된 활성화 함수의 성능을 검증하기 위해 이미지 분류 데이터셋을 사용하여 기존의 활성화 함수와 비교하고 평가를 수행하였다. CIFAR-10 데이터셋에 VGG19 네트워크를 적용한 결과, 제안된 활성화 함수는 다른 활성화 함수에 비해 약 1%의 테스트 정확도 향상을 확인하였다.

본 논문의 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 기존 활성화 함수에 대해 간단히 소개한다. 3장에서는 새로운 활성화 함수를 제안한다. 4장에서는 실험 결과를 통해 성능 평가가 제시되며, 5장에서 전반적인 내용을 종합하고 결론을 도출한다.

2. 기존 활성화 함수

여기에서는 ReLU, Swish, HardSwish, Mish 및 PFLU와 같은 기존에 개발된 활성화 함수를 소개한다. 첫 번째는 딥러닝에서 가장 활발히 사용되는 ReLU 함수이다. 이 함수는 아래와 같은 수식으로 표현된다[2].

$$f(x) = \max(x, 0) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 x 는 입력 신호를 의미하고, $\max(a, b)$ 는 a 와 b 중에서 최댓값을 반환하는 함수를 의미한다.

즉, ReLU 함수는 입력이 양수이면 함수의 입력과 출력이 같고, 입력이 음수인 경우에는 0을 출력한다.

두 번째는 Swish 함수이다. Swish는 비단조 활성화 함수로 아래와 같은 수식으로 표현된다[5].

$$f(x) = \frac{x}{1 + e^{-\beta x}}$$

여기서 β 는 사용자 파라미터이다. 이 함수는 기존의 활성화 함수인 시그모이드 함수의 출력에 입력을 곱하여 출력한다. Swish는 부드러운 곡선의 형태를 가지고 있으므로, 모든 입력에 대해 미분 가능하다는 특징을 가지고 있다.

세 번째 소개할 함수는 HardSwish이다. 이 함수는 Swish의 계산 복잡성을 줄이기 위해 소개되었으며 아래와 같은 수식으로 표현된다[8].

$$f(x) = \frac{x \min(6, \max(x + 3, 0))}{6}$$

여기서 $\min(a, b)$ 는 a 와 b 중에서 최솟값을 반환하는 함수를 의미한다. 위의 수식을 통해 알 수 있듯이 HardSwish 함수는 곱셈과 덧셈 연산을 통해 구현되므로 계산 비용이 적다는 장점이 있지만 미분 가능하지 않다는 단점이 존재한다.

네 번째로 소개할 함수는 Mish이다. Mish는 다음과 같은 수식으로 표현된다[7].

$$f(x) = x \tanh(\text{softplus}(x))$$

여기서 $\text{softplus}(x) = \ln(1 + e^x)$ 이며, \tanh 는 쌍곡선 탄젠트 함수를 의미한다. Mish 함수는 Swish와 마찬가지로 미분 가능하고 매끄러운 함수이다.

마지막으로 소개할 함수는 PFLU로 아래와 같은 수식으로 표현된다[8].

$$f(x) = \frac{x}{2} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{1 + x^2}} \right)$$

여기서 \sqrt{x} 는 숫자 x 의 제곱근을 의미한다. PFLU는 Mish와 Swich처럼 미분 가능한 부드러운 함수이면서, 지수 함수의 연산이 없어 계산량에서 이점을 가지는 함수이다.

Figure 1은 위에서 언급한 다양한 활성화 함수의 모양을 보여준다. ReLU, Swish, HardSwish, Mish, 그리고 PFLU와 같은 활성화 함수들의 출력은 양의 입력 범위에서는 유사한 형태를 보이며, 음의 무한대에서 유사한 함수값을 가진다. 그러나 입력이 0 근처에 있을 때 각 활성화 함수가 서로 다른 출력값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

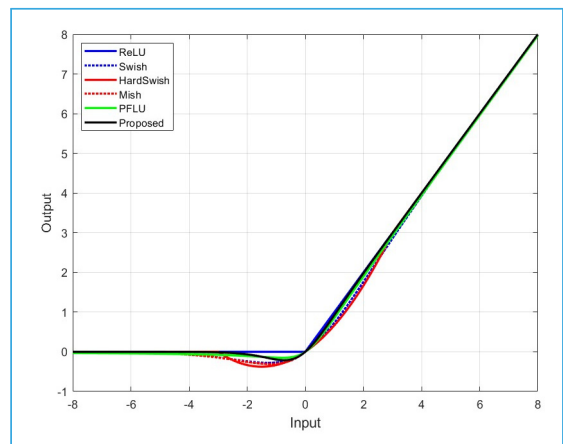


Figure 1. Comparison of various activation functions.

3. 제안하는 활성화 함수

제안하는 활성화 함수는 하나의 자유도 β 를 가지는 새로운 비단조 활성화 함수이다. 먼저, 쌍곡선 탄젠트 함수를 사용하여 함수의 값의 범위를 -1에서 1 사이의 값으로 제한한다. 그 다음 로그함수를 이용하여 함수의 범위는 0에서 1로 변경하고, 이 결과에 입력을 곱하여 최종적으로 활성화 함수의 출력값을 얻는다. 이러한 방식으로 제안하는 활성화 함수의 수식은 아래와 같다.

$$f(x) = x \log_3(2 + \tanh(\beta x))$$

Figure 1에서 제안된 함수의 형태를 다른 활성화 함수와 비교해 보면, 양의 입력 범위에서는 ReLU 함수와 가장 유사한 형태를 보인다. 또한, 음의 무한대에서는 기존의 다른 활성화 함수들과 유사한 형태를 가지고 있다. 제안된 함수와 기존의 비단조 함수 간의 가장 큰 차이는 입력이 -2에서 0 사이인 구간에서 함수의 형태이다.

제안된 함수의 특성을 분석하기 위해 함수의 1차 미분을 구하면 아래와 같다.

$$f'(x) = \frac{\ln(\tanh(\beta x) + 2)}{\ln 3} + \frac{\beta x \operatorname{sech}^2(\beta x)}{\ln 3(\tanh(\beta x) + 2)}$$

위 결과에 따르면 제안된 활성화 함수는 Mish, PFLU와 같이 모든 구간에서 미분 가능하다는 특성을 가진다. Figure 2에서는 Mish, PFLU와 제안된 함수의 1차 도함수를 나타낸다. 세 함수의 형태는 유사하지만, 도함수의 결과에서는 큰 차이를 확인할 수 있다. 기울기 값의 크기와 분포가 이러한 차이가 신경망의 성능에 영향을 미친다. 아래에는 제안된 함수가 가지는 몇 가지 특징을 소개한다.

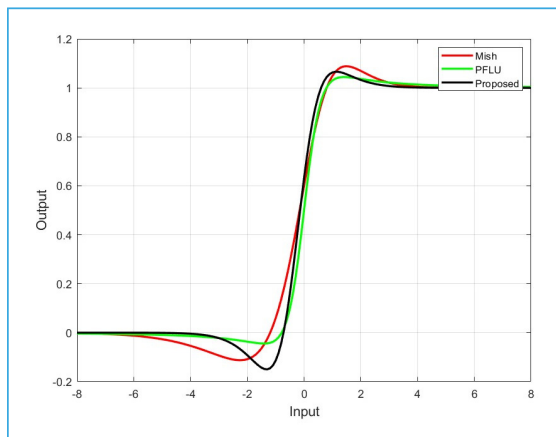


Figure 2. Comparison of the first derivative of non-monotonic activation functions.

1) 성질 1

양의 구간에서 ReLU 함수의 비슷한 형태를 가진

다. 제안된 함수는 양수 구간에서 $\tanh(\beta x)$ 에 의해 0에서 1 사이의 값을 가진다. 이 결과를 로그 함수에 입력하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$0.6309 \approx \log_3(2) < \log_3(2 + \tanh(\beta x)) \leq 1$$

따라서 양의 입력 구간에서 제안된 활성화 함수의 출력 범위는 $0.6309x < f(x) \leq x$ 이므로 ReLU 함수와 유사한 모양을 가진다.

2) 성질 2

제안된 활성화 함수는 입력이 음의 무한대 값을 가지는 경우 출력이 0에 가까운 값을 갖는다. 즉, $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$ 을 의미한다. 이것을 증명하기 위해 활성화 함수의 식을 다시 쓰면 아래와 같다.

$$f(x) = \frac{x}{\log_3(2 + \tanh(\beta x))} = \frac{N(x)}{D(x)}$$

위 식의 극한값을 구하기 위해 로피탈의 정리를 활용하여 극한값을 계산하면,

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{N'(t)}{D'(t)} = -0$$

따라서 음의 무한대의 입력에 대해 제안된 활성화 함수의 출력은 0이 된다. 이러한 특성은 기존의 활성화 함수인 ReLU, Mish, PFLU와 유사하다.

3) 성질 3

음의 입력에 대해 제안된 활성화 함수의 출력은 음수의 값을 가진다. 즉, $f(x) < 0$ for $x < 0$. 음의 입력 구간에서 쌍곡선 탄젠트 함수값의 범위는 -1에서 0 사이의 값을 가지므로 활성화 함수의 출력은

아래와 같은 값의 범위를 가진다.

$$0.6309x < f(x) = x \log_3(2 + \tanh(\beta x)) \leq 0$$

성질 1과 성질 3을 통해 제안된 활성화 함수는 Zero centered 하다는 것을 나타낸다.

4) 성질 4

$f'(x) = 0$ for $\frac{-1}{\beta} \leq x \leq 0$ 이 존재한다. 1차 도함수의 결과를 활용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. $f'(0) > 0$, $f'(-\frac{1}{\beta}) < 0$. 따라서 제안된 함수는 $\frac{-1}{\beta} \leq x \leq 0$ 의 구간에서 $f'(x) = 0$ 을 가지며, 이것은 제안된 함수가 비단조 함수라는 것을 나타낸다.

4. 실험 결과

제안된 함수와 기존의 함수들의 성능 비교를 위해 분류 문제에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 성능 검증을 위해 사용된 데이터셋은 두 가지이다. 첫 번째는 신경망 검증에 널리 활용되는 MNIST 데이터셋이다. Figure 3은 MNIST 데이터셋을 보여주고 있으며, 이 데이터는 손으로 쓴 0에서 9까지의 숫자로 60,000개의 학습 데이터와 10,000개의 테스트 데이터로 구성되어 있다. 이 데이터셋의 이미지는 28×28 이며 회색조 영상이다. 두 번째는 개,

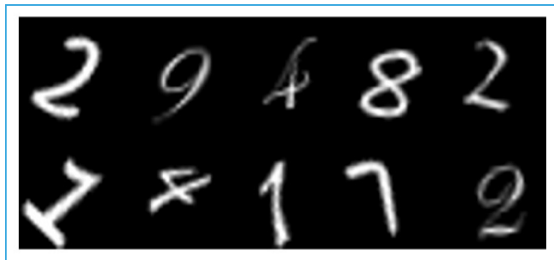


Figure 3. MNIST dataset images

개구리, 말, 배, 트럭, 자동차, 비행기, 새, 고양이, 사슴 등의 10가지 범주를 가지고 50,000개의 학습 데이터와 10,000개의 테스트 데이터로 구성된 CIFAR-10 데이터셋이다[9]. Figure 4는 CIFAR-10 데이터셋의 예를 나타내며, 이미지는 32×32 이며 RGB 컬러 영상이고, 각 범주당 5,000장의 학습 데이터와 1,000장의 테스트 데이터로 분리되어 있다. 두 데이터셋 데이터의 전처리를 위해서 데이터의 최댓값을 나누어 정규화를 진행하였다.

공정한 비교를 위해 네트워크의 가중치는 동일한 초기 가중치로 설정하였으며, 손실 함수는 교차 엔트로피(Cross entropy)를 사용하였다. 모든 실험에서 모델의 학습을 위해 SGD(Stochastic Gradient Descent), 학습률(Learning rate)은 0.01로 설정하였다. 그리고 제안된 활성화 함수의 β 는 0.7로 설정하였다.

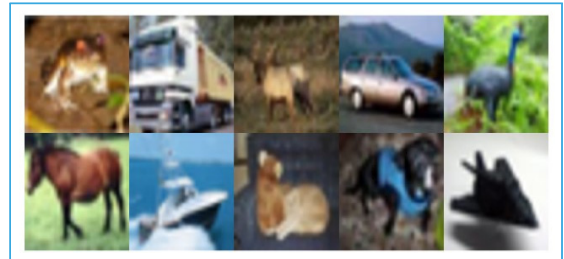


Figure 4. CIFAR-10 dataset images

첫 번째 실험에서는 네트워크의 레이어 수 변화에 따른 정확도를 평가하였다. 이를 위해 500개의 뉴런을 가지는 완전 연결층을 추가하여 네트워크의 레이어 수를 변화시켰고, MNIST 데이터셋을 사용하였다[7]. 실험에서 사용한 배치 크기는 128, 에포크는 10으로 설정하였다. Figure 5는 레이어 수 변화에 따른 테스트 정확도 변화를 보여준다. 작은 레이어의 모델에서는 모든 활성화 함수가 유사한 테스트 정확도를 보였지만, 레이어 수가 증가함에 따라 ReLU와 PFLU는 정확도가 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 반면에 Mish는 ReLU와 PFLU에 비해 레이어 수의 변화에 민감하지는 않았다. 하지만 레

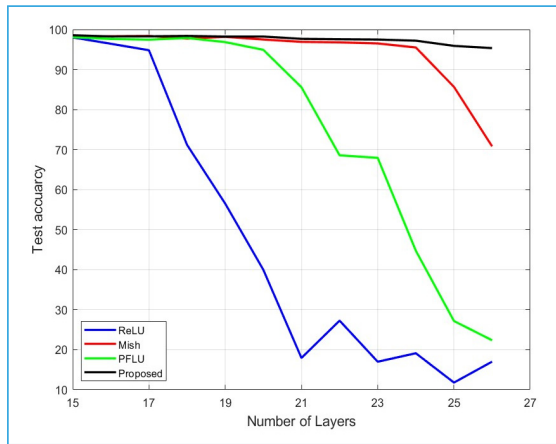


Figure 5. Test accuracy according to number of layers on MNIST dataset.

이러의 수가 25 이상인 깊은 네트워크에서는 테스트 정확도가 급격하게 감소하였다. 반면 제안된 활성화 함수는 모든 경우에서 유사한 테스트 정확도를 유지하였으며, 레이어의 수에 따른 성능 감소가 미미하였다. 이 결과는 제안된 함수가 학습이 어려운 대규모 네트워크에서 기존에 개발된 다른 활성화 함수에 비해 우수한 성능을 가질 수 있다는 것을 시사한다.

두 번째 실험에서는 CIFAR-10 데이터셋을 사용하여 VGG19 모델을 이용한 영상 분류를 진행하였다. 모든 컨볼루션층 뒤에는 배치 정규화를 적용하였으며, 배치 크기는 64, 에포크는 30으로 설정하였다. Figure 6은 학습 데이터의 손실을 나타낸다. 손실 그래프에서는 Mish, PFLU, 제안된 활성화 함수의 경우 ReLU에 비해 손실값이 더 빨리 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 Mish, PFLU 및 제안된 함수가 ReLU와 달리 Zero centered 활성화 함수이기 때문이다. Figure 7은 테스트 데이터의 정확도를 나타낸다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 ReLU에 비해 Mish, PFLU, 제안된 함수의 성능이 높은 것을 볼 수 있다. 세부적인 최고 정확도는 Table 1과 같다. Table 1의 결과를 보면 Mish의 경우 77.66%의 정확도를 가지고 제안된 함수는 78.65%의 정확도를 가진다. 따라서 제안된 함수를 이용한

경우 약 1%의 정확도 향상을 가져온다.

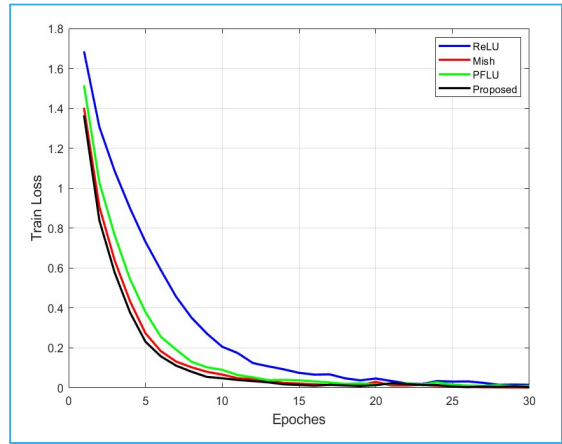


Figure 6. Comparison of different activation function by training loss on CIFAR-10.

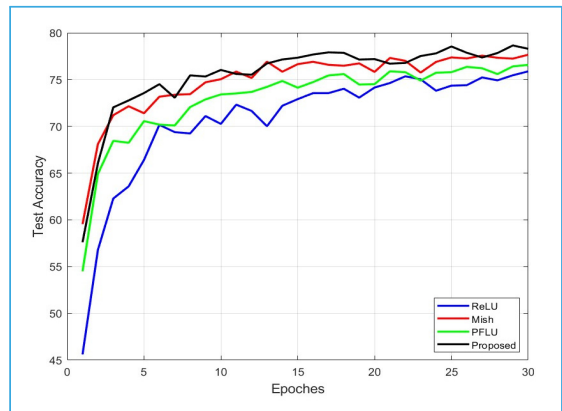


Figure 7. Comparison of different activation function by test accuracy on CIFAR-10.

Table 1. CIFAR1-10 Result(Test Top-1 Accuracy)

ReLU	Mish	PFLU	Proposed
75.88%	77.66%	76.57%	78.65%

5. 결론

본 연구에서는 딥러닝에서 중요한 역할을 하는 활성화 함수에 대한 연구를 수행하고, 새로운 비선형 활성화 함수를 개발하여 딥러닝 성능을 향상시키는

데에 초점을 맞추었다. 제안된 함수는 로그 및 쌍곡선 탄젠트 함수를 결합하여 유도되었다. 제안된 활성화 함수의 성능을 평가하기 위해 이미지 분류 데이터셋을 활용하여 기존의 활성화 함수와 비교하였으며, CIFAR-10 데이터셋에 VGG19 네트워크를 적용한 결과, 제안된 활성화 함수는 약 1%의 테스트 정확도 향상을 보여주었다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2022-2023).

참고문헌

- 1 Aurélien Géron, Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow, O'Reilly Media, Inc., 2019.
- 2 Nair, Vinod and Hinton, Geoffrey, "Rectified linear units improve restricted boltzmann machines", *Proceedings of the 27th international conference on machine learning(ICML-10)*, pp. 807-814, 2010.
- 3 Maas, Andrew L and Hannun, Awni Y and Ng, Andrew Y and others, "Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models", *Proc. icml*, 30(1), pp. 3, 2013.
- 4 Klambauer, Gunter and Unterthiner, Thomas and Mayr, Andreas and Hochreiter, Sepp, "Self-normalizing neural networks", *31st Conference on Neural Information Processing Systems*, 2017.
- 5 Ramachandran, Prajit and Zoph, Barret and Le, Quoc V, "Searching for activation functions", *arXiv*, 2017.
- 6 Howard, Andrew and Sandler, Mark and Chu, Grace and Chen, Liang-Chieh and Chen, Bo and Tan, Mingxing and Wang, Weijun and Zhu, Yukun and Pang, Ruoming and Vasudevan, Vijay and others, "Searching for mobilenetv3", *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, pp. 1314-1324, 2019.
- 7 Misra, Diganta, "Mish: A self regularized non-monotonic activation function", *arXiv*, 2019.
- 8 Zhu, Meng and Min, Weidong and Wang, Qi and Zou, Song and Chen, Xinhao, "PFLU and FPFLU: Two novel non-monotonic activation functions in convolutional neural networks", *Neurocomputing*, 429, pp. 110-117, 2021.
- 9 Krizhevsky, A. and Hinton, G., Learning multiple layers of features from tiny images, University of Toronto, 2009.

연소화염의 온도 계측에서 복사의 영향에 관한 연구

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

Effect of Radiation on Temperature Measurement of Combustion Flames

기완도†, Wando Ki

현대로템, 유도무기개발팀, 책임연구원
Senior Research, Guided Munitions
Development Team, Hyundai Rotem

이재호, Jaeho Lee

현대로템, 유도무기개발팀, 책임연구원
Senior Research, Guided Munitions
Development Team, Hyundai Rotem

이재원, Jaewon Lee

현대로템, 유도무기개발팀, 책임연구원
Senior Research, Guided Munitions
Development Team, Hyundai Rotem

노광영, Kwanyoung Nho

테림, 부속기술연구소, 연구소장
CTO, R&D Center, Telim

임지환, Jiwan Lim

방위사업청, 지상유도무기사업팀, 전문관
Specialized public officer, Guided Weapon
Program Department, Defense Acquisition
Program Administration

Abstract

Temperature measurement methods can be categorized into contact and non-contact methods. In contact methods, thermocouples are primarily used, whereas in non-contact methods, temperature is derived by measuring the spectroscopic signal emitted from an object. For temperature measurements using thermocouples, a simple configuration is possible but limitations exist, such as data disturbance and durability caused by high temperatures. In particular, in supersonic flows and high-temperature combustion environments, measurements using thermocouples are almost impossible because of the generation of shock waves and the flame temperature. Therefore, in this study, spectrometers and lenses are constructed, and the temperature of methane flame with respect to the oxidizer is measured.

keywords : Spectrometer, Combustion Temperature, Optical Metrology, Boltzmann Plot

† Corresponding Author : Wando Ki

Tel : +82-031-688-1724, email : romancewolf@hanmail.net

Guided Munitions Development Team, Hyundai Rotem, 16082, 37 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 13th. 2024 Accepted June 13th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

근래에 들어 화두로 떠오르고 있는 극초음속 무기는 음속의 5배 이상 속도로 비행해 지구상 어느 곳이든 1~2시간 이내에 타격할 수 있으며, 빠른 속도로 인하여 현존 방어 시스템으로는 탐지 및 요격이 어렵다는 장점을 지니고 있다. 이러한 극초음속 무기를 시험하기 위해서는 고온, 고속의 화염온도 측정이 가능한 초음속 시험평가 설비가 필요하다. 이러한 유동의 온도를 계측하는 방법으로는 열전대를 직접 유동에 삽입하여 측정하는 접촉식 온도측정 방법[1]과 광학계측을 이용한 비접촉식 온도측정 방법[2-4]으로 구분된다.

접촉식 온도측정 방법은 전통적인 방법으로써 가장 많이 사용되어 왔다. 탐침 직경이 커질수록 고온의 온도를 계측할 수 있으나 유동특성을 변화시키거나 복사 및 전도 열전달에 의한 오차가 증가한다[5]. 특히 열전대 비드 보호를 위해 케이스를 만들 경우 오차가 크게 증가한다[6]. 탐침 직경이 작아질 경우 열손실에 의한 오차는 작아지나 측정할 수 있는 온도의 상한값이 낮아지고 유동에 의한 파손 및 진동이 발생할 수 있다.

이러한 이유로 고온, 고속의 유체 온도를 측정하기 위해 다양한 비접촉식 온도측정 방법들이 연구되어 왔으며 2D 온도장을 측정할 수 있는 대표적인 방법으로는 레이저 유도발광[3], 광학 고온계[7], Boltzmann Plot법[4], 쉘리렌[8] 등이 있다. 레이저 유도발광의 경우 높은 정확도를 갖는 가장 진보된 방법이나 설비 구축을 위해서는 많은 비용을 들여야 하며 사용자의 숙련도에 따라서는 1년 이상의 시간이 소요되기도 한다. 분광기는 평면의 온도장을 계측할 수 없지만 Volumetric하게 발생하는 라디칼 자발광 신호를 사용해 화염의 온도를 측정할 수 있고 레이저 유도발광법보다 경제적이며 진동 및 열원으로부터 안정적으로 계측이 가능하다. Bousquet 등의 연구자들은 분광기를 이용한 Boltzmann Plot법으로 연소화염 온도를 측정하고 문헌값과 비교하여 그 타당성을 검

증한 바 있다[4].

또한 분광기로 유동 내 고정된 고체의 흑체복사 파장을 계측하여 고체의 온도를 측정할 수 있다[9]. 쉘리렌 기법의 경우 충격파를 포착하고 화염면을 찾기 위한 유동 가시화 분야로 연구가 시작되었으나 현재는 등온 및 반응 유동장의 온도 또는 농도의 정량적 측정에도 사용되고 있다. 광경로를 따라 분포된 기체온도와 농도의 비균질성에 대해 높은 민감도를 갖는 쉘리렌 기법은 라디칼 자발광이 부족한 고온유체의 온도장을 계측할 때도 유용하다.

따라서 초음속이나 화염온도 계측에 더 적합하다 판단되는 비접촉식 방법 중, 분광기를 이용하여 화염 온도를 계측하고 열전대 온도 계측 결과와 비교하여 복사열전달에 의한 온도 계측 영향을 확인하고자 한다[1-2].

2. 실험조건 및 결과

2.1. 실험장치 구성 및 방안

2.1.1. 열전대 형상 조건에 따른 온도 계측

먼저, 본 연구의 연소 환경 및 온도 범위를 고려하여 열전대 타입은 B타입으로 선정하였다. B타입 열전대는 일반적으로 백금-로듐(Platinum-Rhodium) 합금인 PtRh 합금을 사용하며, 하나의 와이어에는 70% 백금과 30% 로듐(Pt70-Rh30)이 함유되어 있고, 다른 와이어에는 94% 백금과 6% 로듐(Pt94-Rh6)이 함유되어 있다. PtRh 합금 특성상 내열성 기계강도가 우수하며 뛰어난 산화 저항성을 가지고 있어 고온의 온도(약 1,973K)까지 측정이 가능하다. 또한 환원성 분위기에서도 다른 열전대에 비해 장시간 사용할 수 있다. 실험에서 사용된 열전대의 형상특성 및 보호관의 재질과 같은 제원은 다음 Table 1과 같다.

Figure 1은 본 연구에서 사용된 열전대 별 보호관 형상 조건을 나타낸 모식도이다. 열전대 보호관 재질

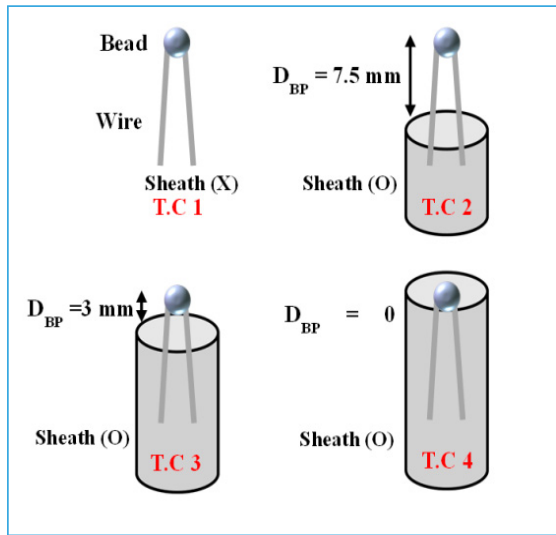


Figure 1. Specification and Shape of Thermocouples

은 알루미나(Al_2O_3) 재질이며, D_{BP} 는 보호관의 끝과 비드(측정점) 사이의 거리이다. D_D 는 비드(측정점)의 직경, W_D 는 소선의 직경, L 은 열전대의 전체 길이를 나타낸다.

본 실험에서는 보호관이 열전대 온도 측정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 비드 직경, 소선 직경과 같은 다른 조건들은 고정하였으며, 비드와 보호관 사이의 길이만 변화를 주었다. 또한, 비드와 보호관 사이의 길이는 상용 보호관을 사용하였기에 기성품의 길이에 따라 3mm와 7.5mm를 선택하였다.

열전대 형상 조건에 따른 온도 측정 영향을 확인 및 검증하기 위한 실험 장치 구성 P&ID는 Figure 2와 같다. 실험에 사용된 Calibration 버너는 평면 화염을 형성할 수 있는 McKenna Flat Burner를 사용하였다. 이 버너는 청동 또는 스테인리스 스틸

재질의 허니콤과 같은 형상의 다공성 소결 버너판과 플러그로 구성되며 연소화염의 경우, 온도는 같은 높이에서는 일정하며 화염면에서 멀어질수록 낮아지는 특징을 가지고 있음이 알려져 있다[10].

Figure 2 구성도의 붉은색 선은 실험의 연료 라인인 메탄(CH_4) 공급 라인이며, 파란색으로 표현된 라인은 산화제 라인인 일반 공기(Dry Air) 공급 라인이다. 연료 및 산화제는 레귤레이터(R01~03)를 통해 유량계 공급 압력이 조정되며 일정한 유량의 연료 및 산화제를 Line Mixer로 공급해 준다. 또한 평면 화염 버너의 경우 예혼합실이 있어서 예혼합 화염 특성상 역화 현상이 발생되기 쉽기 때문에 역화 방지기를 Line Mixer 전단에 설치하여 역화 현상을 방지하도록 하였다. 앞에서 언급한 대로 본 연구는 비드의 직경 및 소선의 직경을 고정하여 실험을 진행하였다. 따라서 오직 보호관의 유무와 비드와 보호관 사이 거리(D_{BP})가 온도 측정에 미치는 영향을 계측하고 분석할 수 있었다.

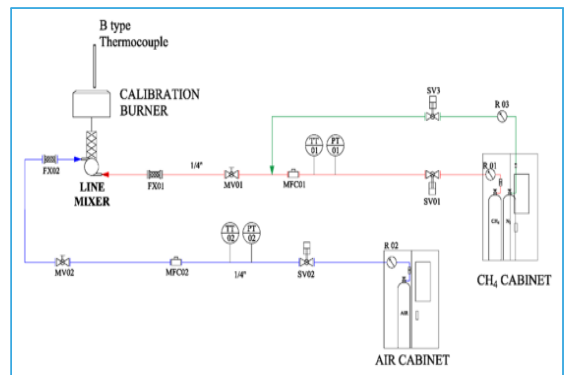


Figure 2. P&ID for Temperature Measurement with Thermocouple

Table 1. Specification of Thermocouple

Thermocouple	Sheath	D_{bp} (mm)	D_D (mm)	W_D (mm)	L (mm)
T.C 1	X	-	1.1	0.5	150
T.C 2	O	7.5	1.1	0.5	150
T.C 3	O	3	1.1	0.5	150
T.C 4	O	0	1.1	0.5	150

Figure 3은 본 실험의 진행모습이다. 사진에서와 같이 평면 화염 버너 위 2mm 위치에 Figure 1에서 볼 수 있는 4개 형상의 열전대를 분포시키고 시간에 따른 온도를 측정하였다. 이후, 동일한 높이에서의 화염 온도를 분광기를 이용한 Boltzmann Plot 방법으로 측정하였으며 이 두 개의 결과를 비교하였다.

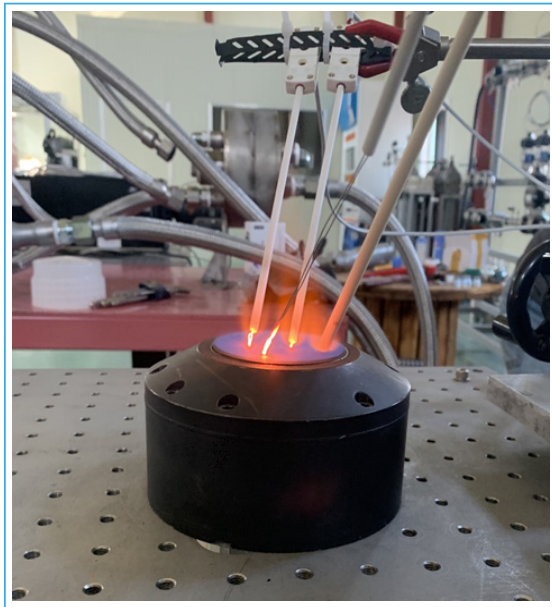


Figure 3. Temperature Measurement on the Mckenna Flat Burner

2.1.2. 열전대 복사에 따른 온도 계측

열전대의 경우 화염과 같은 고온의 물체의 온도를 측정할 때 가열로 인해 열복사 현상이 발생하면서 에너지 소실을 일으켜 정확한 온도 측정을 어렵게 한다. 따라서 열전대의 복사 효과 및 그에 따른 정량적인 데이터 확보를 위해 실험을 진행하였다. 실험은 열전대의 효과를 확인 및 차폐하기 위해 Figure 4, Figure 5와 같은 연소실을 이용하였다.

Figure 4 및 Figure 5의 오른쪽이 메탄 및 산화제 공급라인이고 플렌지를 통과하면서 화염이 발생하여 연소가 이루어지게 된다. 시험방법은 먼저 Figure 4와 같은 조건에서 화염을 발생시키고 열전

대로 온도를 측정한다. 그리고 곧이어 Figure 5와 같이 덮개를 씌우고 온도를 측정하여 두 값을 비교하였다. 이때, 유의할 것은 열전대의 화염 측정위치가 틀어지지 않도록 해야 한다.

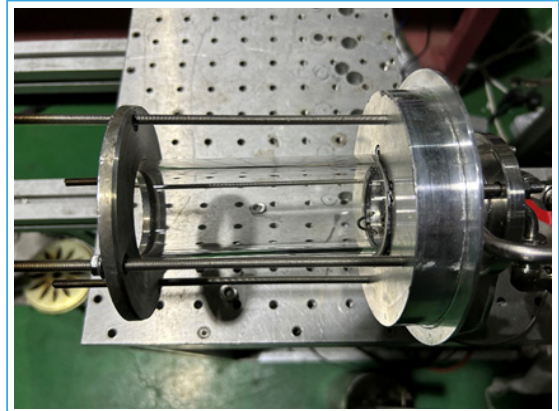


Figure 4. Burner for Radiation Experiment (open state)



Figure 5. Burner for Radiation Experiment (close state)

2.1.3. 장비 사양 및 시험조건

Figure 6은 본 실험에 쓰인 분광장비의 사진이다. 분광기(Spectrometer)는 바닥 상태의 원자나 분자가 외부에서 에너지를 흡수할 때 혹은 들뜬 상태의 원자나 분자가 외부로 에너지를 방출할 때 그 라디칼 및 분자의 종류에 따라 특정 파장대역의 복사 에너지를 흡수하거나 방출하는데, 이를 측정할 수 있는 장치다. 분광기를 이용한 Boltzmann Plot

방법은 들뜬 상태의 전자가 바닥 상태로 천이되면서 발생하는 복사 에너지를 측정하고, 이때 측정된 복사 에너지가 전자온도의 함수임을 이용하여 복사 에너지값을 온도값으로 환산하는 온도 계측하는 방법이다.



Figure 6. Princeton Instruments, Acton SP-2558 Spectrometer

본 실험은 버너의 연소 과정 중 발생하는 OH 라디칼을 정량적으로 파악하고 분석하기 위해 Table 2 같은 사양의 분광기를 사용하여 메탄 화염의 연소 온도를 측정하였다. 또한, OH 라디칼의 UV 대역인 310nm 부근의 파장 대역을 측정하기 위해 집광 렌즈와 광섬유는 모두 UV 등급의 용융 실리카 재질을 사용하였다.

Table 2. Specification of Spectrometer

Specification	
Vendor	Princeton Inst.
Product No.	SP-2558
Focal Length	500mm
Focal plane size	27*14mm
Step size	0.005nm
Repeatability	0.05nm
Resolution	0.045nm

Table 3은 열전대 형상(Thermocouple Exp.) 또는 열전대 복사(Radiation Exp.) 실험 시의 연료

및 산화제 공급 조건을 정리한 표로서, 각 실험에서 연료 및 산화제의 공급유량(LPM, Liter/Minute), 당량비(Equiv. Ratio)와 같은 조건을 확인할 수 있다.

Table 3. Condition of Experiments

Case	Equiv. Ratio	CH ₄ (LPM)	Oxidizer (LPM)
Thermo couple Exp.	0.78	2	24.36
	1	2	19
Radiation Exp.	0.45	3	13.2

2.2. 실험 결과

열전대를 통해 계측된 열전대 형상 조건에 따른 온도 변화 그래프는 Figure 7과 같다.

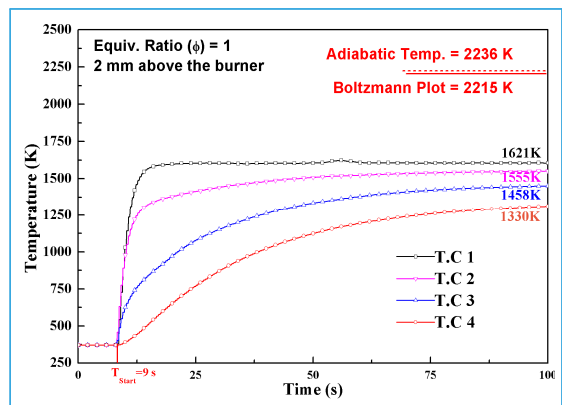


Figure 7. Experimental Results of Thermocouple and Spectrometer Measurement at Equivalence Ratio 1

열전대는 평면화염 버너 위 2mm에 위치되었으며, 당량비는 1로 완전 연소반응이 일어날 수 있도록 연료와 산화제를 공급하였다. 본 실험의 화학평형 계산을 통한 단일화염 온도(Adiabatic Flame Temperature)의 경우 약 2,236K으로 계산되었다.

열전대 측정의 경우, 버너로부터 동일한 높이에 위치해 있어 동일한 당량비에서 반복한 실험에서도

결과는 거의 유사하였으며 온도평형이 이루어졌을 때의 값을 확인하기 위하여 시간에 따른 측정결과를 도시하였다. Boltzmann Plot 측정의 경우, 버너로부터 동일한 화염높이에서 동일한 당량비일 때의 온도값은 시간에 따라 변하지 않기 때문에 한 포인트의 온도값만 계측되며, 이 또한 반복 측정결과가 거의 동일하였다. Figure 7에 나타나듯이 열전대 계측 온도의 경우 모든 형상 조건에서 단열화염 온도보다 낮게 측정되었다. 이는 열전대의 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation)에 의한 영향으로 해석되며, Hindasageri 등의 연구자들은 열전대의 와이어 및 비드 등에 의해 발생된 전도, 대류, 복사의 영향으로 인해 열손실이 발생되어 측정 오차가 발생된다고 보고한 바가 있다[5].

열전대를 통해 계측된 최대 온도의 경우 Table 4와 같이 정리하였으며, 계측된 온도의 순서는 T.C 1, T.C 2, T.C 3, T.C 4 순으로 계측 온도의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. Boltzmann Plot 방법을 이용해 계측된 광학 화염 온도의 경우(열전대와 동일한 높이) 계산을 통한 단열화염 온도와 유사하게 나타났다.

Table 4. Thermocouple Experiments Results of Equiv. 1

Type	Max. Temperature
Adiabatic Temperature	2,236K
Boltzmann Plot	2,215K
T.C 1	1,621K
T.C 2	1,555K
T.C 3	1,458K
T.C 4	1,330K

Figure 8은 Lucht. R. P et al.[11]의 온도값과 본 실험을 통해 획득한 계측 결과를 비교한 그래프이다. 참고문헌과의 비교를 위하여 당량비는 0.78로 공급되었으며 앞선 실험과 동일하게 버너 위 2mm 기준 결과이다.

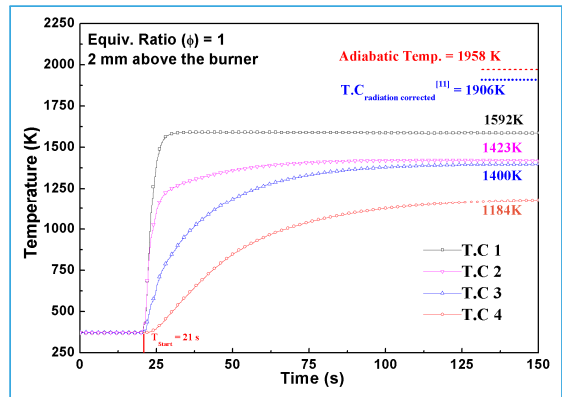


Figure 8. Experimental Results of Thermocouple and Spectrometer Measurement at Equivalence Ratio 0.78

당량비의 감소로 인해 전체적인 최대 계측 온도 및 화학평형 계산을 통한 단열 화염 온도는 감소되었으나, 경향은 당량비 1의 결과와 비슷함을 확인할 수 있다. 최대 온도까지 도달되는 속도의 경우 보호관이 없는 T.C 1이 가장 빠르게 최대 온도에 도달되었으며, T.C 2, 3, 4 순으로 도달되는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서도 단열화염 온도와 열전대 계측값과는 커다란 차이가 발생하고 있으며, 이런 이유로 참고문헌에서는 별도의 보정식을 통하여 1,906K란 온도를 도출하였다. Table 5에 계측된 최대 온도를 참고문헌 비교값과 함께 정리하였다.

Table 5. Thermocouple Experiments Results of Equiv. 0.78

Type	Max. Temperature
Adiabatic Temperature	1,958K
T.C Radiation Corrected[11]	1,906K
T.C 1	1,592K
T.C 2	1,423K
T.C 3	1,400K
T.C 4	1,184K

마지막으로 Figure 9는 열전대의 열복사가 온도 계측에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험 결과 그

래프이다. 덮개가 연소기 주위에 위치한 순간 약 100K가량 급격하게 온도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 이후 복사평형이 일어나면서 온도가 덮개를 덮기 이전과 비슷한 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 결과는 열전대에서 측정하는 온도 중에서 최소 100K 이상에 해당하는 열량이 열복사로 빠져나가고 있음을 알 수 있다.

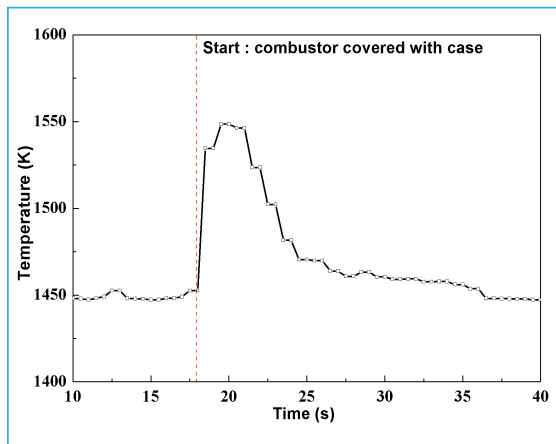


Figure 9. Experimental Results of Thermocouple and Spectrometer Measurement

3. 결론

세 가지 실험을 통하여 화염 온도 측정 시, 열전대의 열복사에 관한 영향을 검토하였다. 먼저, 당량비 1의 메탄 화염에서 열전대의 온도와 광학계측 기법인 분광계 이용 Boltzmann Plot 방법과 비교하였으며, 두 번째 실험에서는 당량비 0.78에서 온도 계측을 실시하고 이를 참고문헌과 비교하였다. 참고문헌에서는 해당 경우에 대하여 열전대 측정의 경우, 별도의 보정식을 제시하였다. 마지막으로 열전대로 화염온도 측정 중에 덮개로 덮어서 열전대의 온도 계측에 미치는 영향을 측정하였다. 첫 번째와 두 번째 실험에서는 단열화염 온도 대비 수백K 이상의 온도 차이가 발생하였으며, 단열화염 온도가 높을수록 열전대와의 측정오차가 더욱 커지는 것을 확인하였다. 이는 예상되었던 결과로, 열복사가 그만큼 크게

영향을 미치고 있음을 나타내며, 실험 중에도 열전대가 빛을 내며 달아오르는 것으로 확인이 가능하였다. 이론상, 열복사 에너지는 적외선에서 가시광 영역으로 넘어갈수록 커지기 때문에, 1,000K가 넘는 화염 온도에서는 열복사에 의한 보정이 필수적이거나 광학계측을 이용하여야 제대로 된 측정이 가능할 것으로 판단된다. 마지막 실험의 경우, 복사 에너지를 순간적으로 차단할 수는 있었으나, 복사를 차단하는 방법으로 고안된 복사 차단용 덮개마저 복사평형을 이루어 정량적인 데이터를 얻기에는 부족하였다. 향후, 덮개 내부에 단열재를 사용하는 방식 등으로 복사를 차단하는 방법에 대한 실험방법을 보완하여 추가 실험을 수행하여야 복사에 대한 정량적인 데이터를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Stephenson, D. A., "Tool-Work Thermocouple Temperature Measurements—Theory and Implementation Issues", *Journal of Engineering for Industry*, 115(4), pp. 432-437, 1993.
- J. Y. ZHU, D. DUNN-RANKIN & G. S. SAMUELSEN, "CARS Temperature Measurements in a Droplet Stream Flame", *Combustion Science and Technology*, 83, pp. 97-114, 1992.
- Vladimir Dulin, Dmitriy Sharaborin, Roman Tolstoguzov, Aleksei Lobasov, Leonid Chikishev, Dmitriy Markovich, Sirui Wang, Chen Fu, Xunchen Liu, Yuyang Li, Yi Gao, "Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A2\Sigma^+X2\Pi(1-0)$ band", *Proceedings of the Combustion Institute*, 38(1), pp. 1877-1883, 2021.
- Bruno Bousquet, Vincent Gardette, Vincent Motto Ros, Rosalba Gaudiuso, Marcella Dell'Aglio, Alessandro De Giacomo, "Plasma excitation temperature obtained with Boltzmann plot method: Significance, precision, trueness and accuracy", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 204, 2023.
- Hindasageri, V., Vedula, R. P., Prabhu, S. V., "Thermocouple error correction for measuring the flame temperature with determination of emissivity

- and heat transfer coefficient”, *Review of Scientific Instruments*, 84(2), 2013.
- 6 Wando Ki, Jaewon Lee, Sanghoon Kim, Kwanyoung Noh, Siwook Nam, Jihwan Lim, & Hyuckjoon Namkoug, “A study on effect of sheath shape on temperature measurement”, *Proceedings of the 2023 KSPE Spring Conference*, 2023.
 - 7 Kostkowski, Henry J., and Richard Dean Lee, Theory and methods of optical pyrometry, US Department of Commerce National Bureau of Standards, 1962.
 - 8 Aleiferis, P., Charalambides, A., Hardalupas, Y., Soulopoulos, N., Taylor, A. M. K. P., Urata, Y., “Schlieren-based temperature measurement inside the cylinder of an optical spark ignition and homogeneous charge compression ignition engine”, *Applied Optics*, 54(14), pp. 4566–4579, 2015.
 - 9 Thomai Panagiotou, Yiannis Levendis, Michael Delichatsios, “Measurements of particle flame temperatures using three-color optical pyrometry”, *Combustion and Flame*, 104(3), pp. 272–287, 1996.
 - 10 R. J. Cattolica, S. Yoon, E. L. Knuth, “OH Concentration in an Atmospheric-Pressure Methane-Air Flame from Molecular-Beam Mass Spectrometry and Laser-Absorption Spectroscopy”, *Combustion Science and Technology*, 28(5–6), pp. 225–239, 1982.
 - 11 Robert P. Lucht, Donald W. Sweeney, Normand M. Laurendeau, “Laser-saturated fluorescence measurements of OH concentration in flames”, *Combustion and Flame*, 50, pp 189–205, 1983.

항공 소재 물성 데이터에 대한 분포 적합성 비교 평가 및 고찰

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

Evaluation and consideration of goodness of fit for test data of aerospace material properties

안교진, Kyojin An

한국항공우주산업, 재료공정팀, 선임연구원
Research Engineer, Materials and
Processes, Korea Aerospace Industries

신재호, Jaeho Shin

경상국립대학교, 정보통계학과 및
바이오의료빅데이터학과(BK21프로그램)
Department of Information Statistics and
Department of Bio&Medical Bigdata(BK21
Program), Gyeongsang National University

김영순[†], Youngsoon Kim

경상국립대학교, 정보통계학과 및
바이오의료빅데이터학과(BK21프로그램), 교수
Profressor, Department of Information
Statistics and Department of Bio&Medical
Bigdata(BK21 Program), Gyeongsang
National University

Abstract

The aim of this study is to evaluate and select the most appropriate test methods for assessing the goodness of fit of aerospace material property data. Obtaining airworthiness certification is critical for ensuring aircraft operational use, and statistical analysis is crucial for verifying material properties through testing. The specimens selected to represent the material population must account for the diversity arising from production processes and exhibit the inherent variability, which may affect the material behavior. By employing these specimens, standardized tests are conducted, followed by statistical analyses to determine the material allowables. These allowables are integral to aircraft design because they significantly affect both performance and quality. Consequently, selecting the correct distribution for data analysis is crucial as it improves the modeling of material allowables and thus the overall reliability. Furthermore, this study can benefit the aerospace industry by offering comprehensive insights into material development, which can enhance quality and foster deeper understanding regarding material property data.

keywords : Airworthiness Certification, Aerospace Material, Design Allowable, Statistical Analysis,
Goodness of Fit

[†] Corresponding Author : Youngsoon Kim

Tel : +82-055-772-1461, email : youngsoonkim@gnu.ac.kr

Gyeongsang National University, 124, 501, Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 7th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

항공 산업은 집약적 지식과 기술을 갖춰 고부가가치를 창출할 수 있는 미래를 이끄는 산업이다. 또한, 산업구조의 고도화, 무역 수치 및 타 산업에 미치는 파급 효과가 매우 높아 반드시 육성해 나가야 할 국가적 전략산업 중 하나이다.

국내에서는 대표적으로 고정익 KF-21, 회전익 LAH, KUH 및 KUH 파생형 등 군용기를 지속적으로 자체 개발 및 생산을 하고 있다. 개발 과정 중에는 항공기의 구조, 강도, 성능에 대하여 항공기가 비행하기에 적합한 안정성과 신뢰성을 갖추고 있는지 검증하기 위해 감항인증을 획득해야 한다. 감항인증은 전기제 및 부품뿐만 아니라 재료에 대해서도 평가 및 검증하고 있으며, 이는 군용기에 대해 엄격하게 품질을 관리하고 있다고 할 수 있다.

국내의 항공 소재에 대한 물성시험 및 검정방법은 MMPDS(Metallic Material Properties Design Standard)와 CMH-17(Composite Materials Handbook)을 근간으로 평가를 하고 있으며, 매년 추가적인 연구에 대한 교류는 있으나 검정방법은 기존 방식대로 평가를 유지하고 있는 추세이다.

본 논문에서는 항공 소재의 일관성 있는 물성 평가와 설계 허용값 산출에 영향을 미칠 수 있는 분포 형태별 적합성 검정(Goodness-of-fit) 방법에 따라 검정 결과를 상대 비교하고자 한다. 이를 통해 분포 검정 방법이 적절한지 확인하고 향후 항공 소재 통계 분석 기준 및 절차에 대해 고찰을 하고자 한다.

2. 항공 소재 통계 분석 기준

2.1. 군용 감항인증

국내 군용기는 MIL-HDBK-516 또는 이를 근간으로 작성된 '군용항공기 표준감항인증기준에 관한 고시'에 따라 감항인증을 획득하게 된다.

항공 소재는 군용항공기 표준감항인증기준 '4.3.1

재료 선정'에 따라 입증되고 일관성 있는 재료 특성 데이터를 사용하고 검증되어야 한다고 기술되어 있다. 재료의 적합성 검증을 위해 상용규격서, 정부규격서, 획득기관에 의해 승인된 규격서에 따라 수행하게 된다. 일반적으로 재료 검증은 기계적/물리적/화학적 특성을 획득하기 위해 표준화된 시험 절차에 따라 수행한다. 이러한 과정을 거쳐 검증된 재료의 설계 허용값의 데이터베이스를 구축하여 항공기 설계에 적용할 수 있도록 한다. 이는 표준감항인증기준 '5.3.2 재료 및 공정'에서 기술된 바와 같이 '재료의 허용값은 재료의 특성과 중요성을 적절한 통계적인 보정을 이용하여 산출된 최소값이고; 구성품 및 조립체 다양성, 예상 극한환경, 제작공정, 수리기법 및 품질검증절차를 고려하여 정해졌으며; 이러한 것들이 확인되었음을 검증한다.'에 근간으로 항공 소재는 통계 분석을 통해 재료 허용값이 산출된다[1]. 산출된 재료 허용값은 항공기 설계 및 구조 안정성 평가에 활용할 수 있다.

2.2. 항공 소재 통계 분석 절차

항공 소재 특성에 대한 데이터베이스 구축을 위한 과정은 간략하게 Figure 1과 같다.

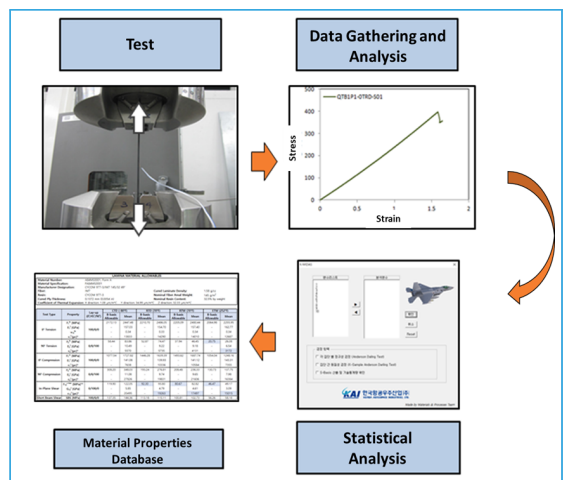


Figure 1. Process for establishing a materials properties database

먼저, 항공기에 적용할 소재가 선정되면, 필요한 물성에 따라 표준화된 시험 방법으로 시험을 수행하게 된다. 이를 통해 얻은 시험 결과를 바탕으로 통계 분석 절차에 따라 재료 물성을 구하게 된다. 통계 분석 절차는 MMPDS 및 CMH-17에 따라 Figure 2, Figure 3과 같이 금속재와 복합재에 따라 허용값 산출 순서도가 결정된다[2-3].

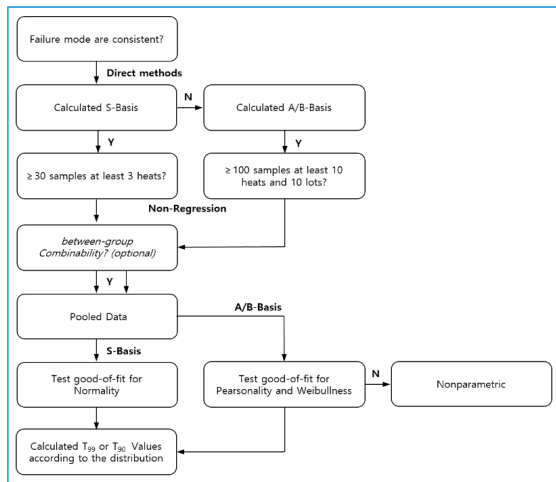


Figure 2. Flowchart of design allowable calculation for metal

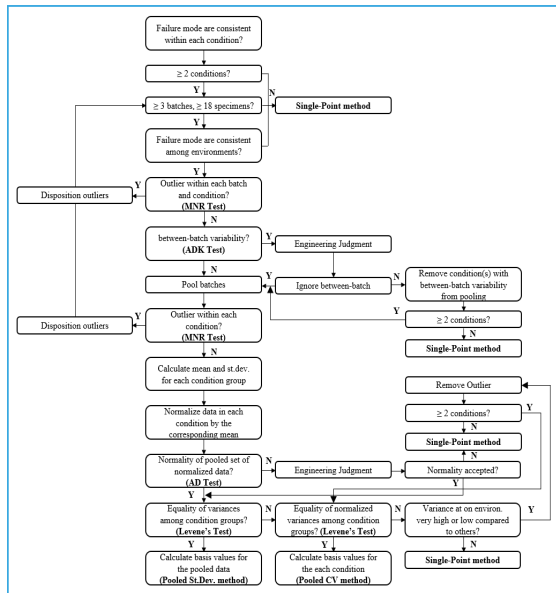


Figure 3. Flowchart of design allowable calculation for composite

시험이 완료된 시편은 표준화된 시험 방법의 허용 조건에서 일관성을 갖는 파손 모드(Failure Mode) 양상을 보여야 한다. 준비되는 시편은 재료의 모집단을 대표하는 표본이 되므로, 주요 공정 변수를 고려한 재료 생산과 각 공정에서 금속재의 조성 또는 복합재 생산 환경 등에 따라 재료에 미칠 수 있는 변동성이 내재되어 있어야 한다. 이는 재료 특성의 편차를 보상할 수 있도록 최소한의 공정 과정과 시편 수량 조건을 수립하여 시험 매트릭스를 구성하게 된다.

시험 데이터에 대한 재료 허용값 산출을 위해 특정 분포에 대한 적합성을 검정하고, 해당 분포에 따른 재료 허용값을 산출할 수 있다. 산출된 재료 허용값은 항공기 설계 시, 구조 안정성 평가를 위해 활용될 수 있다.

3. 항공 소재 데이터 분석

3.1. 데이터 및 분포 소개

본 논문에서 활용된 데이터는 A, B, C 업체에서 생산된 금속재의 길이 방향(Longitudinal Direction)에 대한 인장강도(TUS, Tensile Ultimate Strength) 및 항복강도(TYS, Tensile Yield Strength)이다. 데이터는 원데이터(Raw Data) 기준으로 검정에 영향이 없는 것을 확인하고 전체적으로 변환하였으며, 정보는 Table 1과 같다.

데이터 분석을 위한 분포 적합성 검정은 정규분포, Pearson(Type III) 분포, Weibull 분포에 대해 통계 검정량을 산출하여 확인하고자 한다. 해당 분포들은 자연현상에서 나타나는 다양한 현상에 대해 모델링이 유용하다. 정규분포는 중심극한정리를 통해 다양한 현상에서 나타나는 데이터 분포 검정에 적합하다. Pearson 및 Weibull 분포는 시험에서 얻은 데이터가 다양성과 불규칙한 특성을 가질 수 있기 때문에 모수 추정치에 따라 유연하게 해당 분포에 적합할 수 있다.

통계학에서 검증된 각 분포는 다른 형태를 가지고

Table 1. Raw data for metal tensile strength

Company	A	A	B	B	C
Group	1	2	3	4	5
No.	TUS	TYS	TUS	TYS	TUS
1	156.4	140.4	151.5	154.7	141.1
2	158.0	141.7	151.6	155.5	141.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	171.7	153.4	156.8	158.7	143.2
30	173.3	153.5	157.1	158.7	143.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
99	⋮	⋮	166.6	161.9	145.9
100	⋮	⋮	168.5	161.9	145.9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
299	⋮	⋮	⋮	169.5	153.8
300	⋮	⋮	⋮	172.0	154.4

있으며, 시험 데이터가 어디에 얼마나 밀집되고 퍼져 있는지를 확인할 수 있다. 이에 확률밀도함수(Probability Density Function, 이하 “PDF”)와 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, 이하 “CDF”)를 알 수 있다.

본 논문에서는 T. W. Anderson과 D. A. Darling의 Anderson-Darling Test 개념에 따라 Anderson-Darling(이하 “AD”) 검정 통계량을 산출하여 분포 적합성 검정을 하고자 한다[4]. 동시에 Kolmogrov-Smirnov(이하 “K-S”) 검정 통계량을 산출하여 비교하고자 한다. AD 및 K-S 검정은 다음과 같이 가설을 설정하고 검정하게 된다.

- 귀무가설(H_0): 표본 분포는 특정 분포를 따른다.
- 대립가설(H_1): 표본 분포는 특정 분포를 따르지 않는다.

정규분포의 경우, 정규성 검정을 위해 다양한 방법을 고려할 수 있다. 시각적으로는 Quantile-Quantile (Q-Q) Plot, 정량적 분석은 AD Test, K-S Test, Shapiro-Wilk(S-W) 등과 같은 검정 방법을 통해 검정할 수 있다.

AD 검정은 재료 물성 데이터의 특징을 현실적으

로 반영할 수 있는 특정 분포 꼬리(Tail)에 가중치를 두어 검정을 수행하게 되고, 경험적 누적분포함수(Empirical Cumulative Distribution Function)를 적용함으로써 다른 검정 방법 대비 검정력이 우수하다. 이상적인 정규분포의 누적분포함수와 경험적 누적분포함수의 차이를 검정 통계량과 임계값(Critical Value)을 비교하여 정규성이 통계적으로 유의미한지 확인하는 방식이다. 정규분포에 대한 경험적 누적분포함수는 Figure 4와 같이 표본 수량이 커질수록 이상적인 정규분포에 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

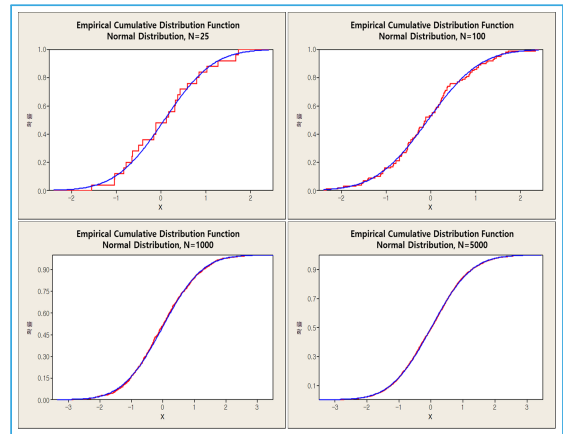


Figure 4. Empirical cumulative distribution function for normal distribution (sample size 25 / 100 / 1,000 / 5,000)

마찬가지로 K-S 검정도 경험적 누적 분포함수를 적용함으로써 검정 대상 분포와의 차이를 비교하는 방식이다. 표본 크기가 크고 분포의 형태가 주로 정규분포에 가까운 경우 유용하며, 검정할 대상 분포와 실제 데이터의 분포에 대한 CDF 차이를 통계량으로 계산함으로써 AD 검정 대비 직관적인 방법으로 간단하고 빠르게 검정이 수행된다.

3.1.1. 정규분포

정규분포의 PDF와 CDF는 식(1), 식(2)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), -\infty < x < \infty \quad (1)$$

$$F(x) = \Pr(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt, -\infty < x < \infty \quad (2)$$

여기서, μ 는 모집단 평균으로 위치를 나타내는 모수이고, σ^2 는 모집단 분산으로 데이터의 산포를 나타내는 모수이다.

3.1.2. Pearson 분포

Pearson 분포의 PDF와 CDF는 식(3), 식(4)와 같다[5-6].

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta} \left(\frac{x-c}{\theta}\right)^{k-1} e^{-\frac{x-c}{\theta}}, x > 0 \quad (3)$$

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x-c}{\theta}\right), x > 0 \quad (4)$$

θ 와 k 는 척도 모수와 형태 모수이고, c 는 위치 모수이다. 식(3)의 $\Gamma(k)$ 는 Gamma function으로 식(5)과 같이 표현할 수 있고, 식(4)의 $\gamma\left(k, \frac{x-c}{\theta}\right)$ 는 Incomplete gamma function으로 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma(k) = \int_0^\infty x^{k-1} e^{-x} dx \quad (5)$$

$$\gamma\left(k, \frac{x-c}{\theta}\right) = \int_0^{\frac{x-c}{\theta}} t^{k-1} e^{-t} dt \quad (6)$$

3.1.3. 3-모수 Weibull 분포

3-모수 Weibull 분포의 PDF와 CDF는 식(7)과 식(8)과 같다[7-8].

$$f(x, \gamma, k, \lambda) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x-\gamma}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-((x-\gamma)/\lambda)^k}, & x \geq \gamma \\ 0, & x < \gamma \end{cases} \quad (7)$$

$$F(x, \gamma, k, \lambda) = \begin{cases} 1 - e^{-((x-\gamma)/\lambda)^k}, & x \geq \gamma \\ 0, & x < \gamma \end{cases} \quad (8)$$

k 는 형상 모수, λ 는 척도 모수, γ 는 위치 모수이다.

3.2. 분포별 적합성 검정

3.2.1. Anderson Darling 검정

3.2.1.1. 정규분포 AD 검정

먼저, 정규분포에 대한 AD 검정은 아래 수식을 통해 확인할 수 있다.

$$Z_{(i)} = \frac{X_{(i)} - \bar{X}}{s} \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

식(9) 정규분포 표준화를 위한 수식으로 $X_{(i)}$ 는 결괏값 오름차순으로 i 번째 표본이며, \bar{X} 는 표본 평균, s 는 표본 표준편차이다. 정규분포에 대한 AD 검정 통계량은 식(10)과 같으며,

$$AD = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1-2i}{n} [\ln(F_0(Z_{(i)})) + \ln(1 - F_0(Z_{(n+1-i)}))] \right]^{-n} \quad (10)$$

여기서, F_0 는 표준 정규분포함수이다.[2]

만약, 식(11)이 성립되면, 귀무가설이 기각되어 표본에 따른 분포는 정규분포하지 않는다고 할 수 있다. (유의수준 $\alpha=0.05$)

$$AD > \frac{0.752}{1 + \frac{0.75}{n} + \frac{2.25}{n^2}} \quad (11)$$

3.2.1.2. Pearson 분포 AD 검정

Pearson 분포에는 다양한 형태의 분포가 있으며, 여기서 다루는 분포는 Pearson Type III로 Gamma 분포라고도 한다.

Pearson 분포에 대한 AD 검정 통계량은 식(12)와 같으며, 모집단 평균(\bar{X}), 표준편차(S), 왜도(q)의 추정치를 통해 산출할 수 있다[2].

$$AD = - \sum_{i=1}^n \left[\frac{2i-1}{n} \ln(F_{\bar{x},s,q}(X_{(i)})) - 2F_{\bar{x},s,q}(X_{(i)}) \right] - \frac{3n}{2} \quad (12)$$

여기서, 표본의 평균(μ), 표준편차(σ), 왜도(q)에 대한 $F_{\mu,\sigma,q}(x)$ 는 식(13)과 같다.

$$F_{\mu,\sigma,q}(x) = \begin{cases} 1) q > 0.1265 \\ H \left[\frac{4}{q} \left(\frac{2}{q} + \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right], \\ 2) q > 0.1265 \\ 1 - H \left[\frac{4}{q} \left(\frac{2}{q} + \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right], \\ 3) 0.025 < q \leq 0.1265 \\ \varnothing \left\{ \left[\sqrt[3]{\frac{\frac{4}{q} \left(\frac{2}{q} + \frac{x-\mu}{\sigma} \right)}{\frac{8}{q}} - 1 + \frac{2}{9 \cdot \frac{8}{q^2}}} \right] / \sqrt{\frac{2}{9 \cdot \frac{8}{q^2}}} \right\}, \\ 4) -0.1265 \leq q < -0.025 \\ 1 - \varnothing \left\{ \left[\sqrt[3]{\frac{\frac{4}{q} \left(\frac{2}{q} + \frac{x-\mu}{\sigma} \right)}{\frac{8}{q}} - 1 + \frac{2}{9 \cdot \frac{8}{q^2}}} \right] / \sqrt{\frac{2}{9 \cdot \frac{8}{q^2}}} \right\}, \\ 5) |q| \leq 0.025 \\ \varnothing \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \end{cases} \quad (13)$$

$H(x)$ 는 $8/q^2$ 자유도를 갖는 χ -제곱 누적분포함수이다.

만약, 식(14)가 성립되면, 귀무가설이 기각되어 표본에 따른 분포는 Pearson 분포하지 않는다고 할 수 있다. (유의수준 $\alpha=0.05$)

$$AD > 0.3167 + 0.034454 \cdot \ln(n) \cdot [\exp(q) - 1]^2 \quad (14)$$

3.2.1.3. 3-모수 Weibull 분포 AD 검정

3-모수 Weibull 분포는 위치(Location or Threshold), 형상(Shape), 크기(Scale) 모수를 추정하여 AD 검정 통계량을 산출할 수 있다.

3.2.1.3.1과 3.2.1.3.2에 따라 3개의 모수를 활용하여 AD 검정 통계량을 식(15)와 같이 산출할 수 있다[2].

$$AD = - \sum_{i=1}^n (C_i \ln F_i - 2F_i) + \frac{r^2}{n} \ln F_{r+1} - 2r F_{r+1} + \frac{n}{2} F_{r+1}^2 \quad (15)$$

$$F_i = 1 - \exp \left(- \left(\frac{X_{(i)} - \tau}{\alpha} \right)^\beta \right), \quad i = 1, \dots, r \quad (16)$$

여기서, $F_{n+1} = 1$ 이며, $C_i = \frac{2i-1}{n}$ 이다.

만약, 식(17)이 성립되면, 귀무가설이 기각되어 표본에 따른 분포는 Weibull 분포하지 않는다고 할 수 있다. (유의수준 $\alpha=0.05$)

$$AD > 0.3951 + 4.186 \times 10^{-5} n \quad (17)$$

3.2.1.3.1. 위치 모수 추정

위치 모수 τ 를 추정하기 위해 식(18)을 따른다. K 는 $4n/15$ 에서 정수를 사용한다.

$$R(\tau) = \frac{\sum_{i=K+1}^{3K-2} L_i(\tau)}{\sum_{i=1}^{3K-2} L_i(\tau)} \quad (18)$$

여기서,

$$L_i(\tau) = \frac{1}{D_i} [\ln(X_{(i+1)} - \tau) - \ln(X_{(i)} - \tau)] \quad (19)$$

D_i 는 식(20)과 같이 계산되며, $i = 5, 6, \dots, 3K-2$ 이다.

$$\begin{aligned} D_1 &= n \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{n+1} \right), \\ D_2 &= \left(\frac{n(n-1)}{2} \right) \ln \left(1 + \frac{1}{n(n-2)} \right), \\ D_3 &= \left(\frac{n(n-1)(n-2)}{6} \right) \ln \left(1 + \frac{2n-3}{(n-1)^3(n-3)} \right), \\ D_4 &= \left(\frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{24} \right) \\ &\quad \ln \left(1 + \frac{6n^4 - 48n^3 + 140n^2 - 176n + 81}{n(n-4)(n-2)^6} \right), \\ D_i &= \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i+0.5}{n+0.25} \right) \right] - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i-0.5}{n+0.25} \right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

위치 모수 τ 는 $R(\tau) = \gamma$ 수식에 따라 추정할 수 있으며, $R(\tau)$ 는 τ 의 단조(Monotonic) 감소연속함수이다.

3.2.1.3.2. 형상 및 크기 모수 추정

형상 모수 β 는 식(21)에서 $g(\beta) = 0$ 이 되는 해를 찾으면 된다.

$$g(\beta) = \frac{\sum_{i=1}^r Z_{(i)}^{\beta} \ln Z_{(i)} + (n-r) Z_{(r)}^{\beta} \ln Z_{(r)}}{\sum_{i=1}^r Z_{(i)}^{\beta} + (n-r) Z_{(r)}^{\beta}} - \frac{1}{\beta} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r Z_{(i)} \quad (21)$$

여기서, r 은 데이터 표본 수량 n 과 같다. 크기 모수 α 는 식(22)과 같다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{r} \left(\sum_{i=1}^r Z_{(i)}^{\beta} + (n-r) Z_{(r)}^{\beta} \right) \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (22)$$

3.2.2. Kolmogorov-Smirnov 검정

K-S 검정은 검정 대상 분포와 실제 데이터 분포에 대한 CDF의 거리 차이를 계산하여 분포 적합성을 검정한다. 실제 데이터 CDF는 $F(x)$ 로, 적합성 검정 분포에 대한 CDF는 $F_n(x)$ 으로 식(23)과 같다[9].

$$F_n(n) = \frac{\text{Number of (elements } \in \text{ the sample } \leq x)}{n} \quad (23)$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1_{(-\infty, x]}(x_i)$$

두 누적 확률분포의 차이는 식(24)과 같이 각 분포의 최댓값 중 최솟값이 D_n 이며, D_n 이 작을수록 분포에 적합하다고 할 수 있다.

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (24)$$

3.3. 적합성 검정 결과 비교

각 분포에 따른 AD 검정과 K-S 검정 결과는 다음

과 같이 p-value를 구하여 상대 비교할 수 있다. 여기서, p-value는 통계학에서 가설 검정 및 통계적 추론에서 사용되는 개념으로 통계적 가설 검정에서 사용되는 지표이다. 귀무가설이 참일 때 해당 표본 데이터를 관측할 확률을 나타내며, 그 기준은 유의수준보다 큰 경우이다. 본 논문에서는 MMPDS와 동일하게 유의수준 0.05 기준으로 검정하였다[10].

Table 2. Results of p-value for each distribution

Group	p-value	정규분포	Pearson 분포	Weibull 분포
1	AD	0.275	0.969	0.430
	K-S	0.669	0.755	0.854
2	AD	0.329	0.896	0.449
	K-S	0.886	0.864	0.902
3	AD	0.734	0.993	0.512
	K-S	0.909	0.953	0.987
4	AD	0.072	0.738	0.216
	K-S	0.334	0.448	0.487
5	AD	0.003	0.126	0.005
	K-S	0.440	0.487	0.463

AD 검정 대비 K-S 검정에서 정규분포와 Weibull 분포의 p-value가 컸으며, 반면 Pearson 분포는 p-value가 대체로 작았다. 전반적으로는 K-S 검정으로 인한 p-value가 컸으며, AD 검정 대비 분포별 적합성 검정에 대한 귀무가설(표본 분포는 특정 분포를 따름)이 참인 경우가 많았다.

4. 결론 및 고찰

본 논문은 항공 금속 소재 물성 평가를 위한 시험 데이터 분포 적합성 검정을 위해 AD와 K-S 검정을 활용하여 확인하였다. AD와 K-S는 경험적 누적분포함수를 통해 분포의 적합성을 검정하는 동일한 개념으로 접근하지만, 표본 데이터 분포와 검정 분포의 차이를 구하는 방식과 데이터 분석 시에서 3.1절에서 설명한 바와 같이 강조하는 측면이 다르기 때문

에 검정 통계량에 따른 p-value도 차이가 있었다.

분포별 적합성 검정에 따라 시험 데이터의 설계 허용값은 달라질 수 있으며, 이는 항공기 중량과 성능에도 영향을 미친다. 따라서 항공기 품질 향상을 위한 일환으로 분포에 대한 적합성 검정은 적절한 분포를 선정하고 적절한 방식으로 검정되어야 한다. 후속 통계 분석 업무로 설계 허용값 산출은 AD 검정에 대한 절차는 정립되어 있으나, K-S 검정 결과 활용에 대한 적합성과 절차 기준은 추가적인 연구가 필요하다.

항공 소재 측면에서 어떤 검정 방법이 우수하고 적합한지는 향후 연구를 통해 불규칙한 시험 데이터에 따른 다양한 경우의 수를 추가 분석할 필요가 있다. 그리고 검정 방법에 따른 p-value가 차이 나는 원인을 통계학적으로 연구한 내용을 MMPDS 및 CMH-17 Coordination Meeting 참석을 통해 제언하고자 한다.

참고문헌

- 1 MIL-HDBK-516C Airworthiness Certification Criteria, Department of Defense, pp. 54-89, 2014.
- 2 MMPDS-2023 Metallic Materials Properties Development and Standardization, Battelle Morial Institute, pp. 116-137, 2023.
- 3 CMH-17-1H Composite Materials Handbook Volume 1. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, SAE International, pp. 1-161, 2022.
- 4 T. W. Anderson and D. A. Darling, "A Test of Goodness of Fit", *J. Amer. Statist. Assoc*, 49, pp. 765-769, 1954.
- 5 Matalas, N. C., J. R. Wallis, "Eureka! It fits a Pearson type 3 distribution", *Water Resources Research*, 9(2), pp. 281-289, 1973.
- 6 Bobee, B. , and R. Robitaille, "The Use of the Pearson Type 3 and Log Pearson Type 3 Distribution Revisited", *Water Resources Research*, 13(2), pp. 427-443, 1977.
- 7 K. C. Datsiou and M. Overend, "Weibull parameter

estimation and goodness-of-fit for glass strength data", *Structural Safety*, 73, pp. 29-41, 2018.

- 8 E. S. Lindquist, "Strength of materials and the Weibull distribution", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 9(3), pp. 191-194, 1994.
- 9 A. N. Komogorov, "Sulla Determinazione Empirica di una Legge di Distribuzione", *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 4, pp. 83-91, 1933.
- 10 Wasserstein Ronald L, Lazar Nicole A, "The ASA Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose", *The American Statistician*, 70(2), pp. 129-133, 2016.

5G 시스템에서 프리엠블 사용 방식에 따른 2-단계 랜덤 액세스의 지연시간 분석

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

Latency Evaluation of Two-Step Random Access Based on Preamble Usage in 5G System

이효진, Hyojin Lee

아주대학교, 국방디지털융합학과
Department of Military Digital
Convergence, Ajou University

이종관, Jongkwan Lee

육군사관학교, 컴퓨터과학과, 교수
Professor, Department of Computer
Science and Engineering, Korea Military
Academy

임재성[†], Jaesung Lim

아주대학교, 국방디지털융합학과, 교수
Professor, Department of Military Digital
Convergence, Ajou University

Abstract

In this study, we numerically evaluate the delay time characteristics of a two-step random access (RA) process proposed in the 5G standard. The 5G RA process comprises two RA stages, i.e., if the MsgA process fails a certain number of times in the two-step RA process, then it proceeds to the four-step RA process. Whereas the latency of the two-step RA is investigated more frequently compared with the four-step RA, the combination of two- and four-step RA operations has not been investigated. Therefore, in this study, we design a delay time analysis model by introducing the cumulative number of failures as an analysis parameter in a 5G two-step RA process. The 5G RA process uses 64 preambles to mitigate the RA collision probability. We evaluate the performance of the combined 5G RA process via two approaches, i.e., sharing 64 preambles and separating the preambles between two- and four-step RA processes. Results show that the preamble sharing method exhibits better delay time characteristics than the preamble separation method in the combined 5G RA process.

keywords : 5G, Physical Layer, 2-step Random Access Channel, Latency Evaluation, Preamble

[†] Corresponding Author : Jaesung Lim

Tel : +82-031-219-2545, email : jaslim@ajou.ac.kr

Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Received April 12th. 2024 Revised May 7th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

2020년 7월 3GPP는 Release 16을 발표하면서, 5G 환경의 네트워크에 대한 표준 내용을 제시하였다[1]. 5G에서는 3가지의 주요한 상황을 지원할 수 있도록 설계되었다. 개선된 데이터 전송 속도 지원을 위한 eMBB(enhanced Mobile BroadBand), 다량의 머신타입통신 단말의 사용 지원을 위한 mMTC(massive MTC), 고신뢰와 초저지연 네트워크를 위한 URLLC(Ultra Reliable and Low Latency Communication)의 3가지 상황 지원이 가능하도록 정의하였다[2-3]. 3GPP는 이러한 시나리오를 위해서 랜덤 액세스(Random Access, RA)에 대하여, 4G의 4-단계 RA에 추가하여 개선된 5G 2-단계 RA 과정을 제시하였다. 또한 5G의 이러한 지원은 군사 작전용 전술이동통신 서비스 구현에 필수적이다. 군의 차세대 전술이동통신 기술로의 5G 활용을 위하여 주파수 대역과 전파 특성, 군 통신망과의 연동 방안 등의 연구가 진행 중이다.

RA란 단말과 기지국 사이에서 사용할 물리 계층 자원의 초기 등록과정이다[4]. RA는 네트워크 통신 시작을 위한 가장 기본적인 과정이며, 이 과정에서 성공해야만 통신 자원 할당과 상위 계층 프로토콜이 구동될 수 있다. 3GPP 표준에서는 RA 과정을 위하여 랜덤 액세스 채널(Random Access Channel, RACH)을 사용한다.

RA 과정에서 단말은 물리계층의 상향링크 환경에서 기지국과 통신을 한다. RA에서 사용하는 상향링크 물리채널은 2가지가 있다[5]. 첫 번째는 PRACH(Physical Random Access Channel)이다. 이 채널에서 단말과 기지국은 특정 시간과 주파수 자원 블록을 할당받기 위한 정보를 교환하며, 다중접속 성공 확률을 높이기 위하여 64개의 프리엠블을 채택하고 있다. 두 번째는 PUSCH(Physical Uplink Shared Channel)이다. 이 채널에서는 PRACH의 RA 과정에서 할당받은 기지국과 공유된 시간과 주파수 자원을 이용하여 데이터를 전송하게 된다.

RACH의 RA 방식은 CBRA(Contention based

Random Access)와 CFRA(Contention Free Random Access)가 있다. 기본적으로 네트워크 통신을 위해서는 CBRA 방식이 사용되며, CFRA는 핸드오버 과정에서 사용된다. 본 연구에서는 CBRA에서의 RACH에 중점을 두고 연구를 진행한다.

3GPP에서 5G 표준으로 새롭게 제안한 2-단계 RA 방식의 성능분석을 위한 선행연구가 수행되었다. 처리량에 대한 분석[6], QoS 만족을 위한 시도에 대한 분석[7], 메시지 구조에 따른 분석[8] 등이 존재한다. 특히 2-단계 RA 과정의 지연시간을 평가한 연구로서는 RA 시도 실패 횟수 제한이 없는 조건에서 2-단계 RA의 성능을 분석한 연구[9]와 2-단계 RA와 4-단계 RA의 지연시간을 수치적 모델로 평가하여 2-단계 RA의 우수함을 입증한 연구[10]가 있다.

5G 표준에서는 2-단계 RA를 제안하고 있으나 실제 5G RA 절차는 먼저 1차 과정으로 2-단계 RA를 시도한다. 특정 횟수 이상 실패가 반복될 때는 2차 과정으로 4-단계 RA를 수행한다. 즉, 2-단계와 4-단계 RA 과정을 결합한 하이브리드 방식으로 동작한다. 하지만 위에서 살펴본 선행연구[9-10]에서는 이러한 하이브리드 방식을 고려하지 않았기 때문에 2-단계, 4-단계를 결합한 5G RA 절차를 충분히 반영하지 못했다고 볼 수 있다. 또한 5G 단말은 RA 과정에서 64개의 프리엠블 중에서 하나를 선택하여 RACH로 메시지를 송신한다. 2개 이상의 단말이 동일 프리엠블을 선택하여 전송할 때는 충돌이 발생하여 실패하게 된다. 이에 대하여 4G 환경에서 프리엠블 할당 방식에 따른 지연시간을 연구한 사례가 있으나[11], 5G RA 표준 환경에는 부적합하다.

2-단계 RA에서는 실패 임계점을 기준으로 4-단계 RA와 함께 사용되지만, 제한된 프리엠블의 사용 방식에 대한 제안과 이에 대한 지연시간 분석 연구는 진행되지 않았다. 또한 5G 환경에서 진행된 연구들[9-10]은 모두 2-단계 RA와 4-단계 RA를 함께 고려하지 않았다.

본 논문에서는 2-단계와 4-단계 RA를 결합한 하이브리드 RA 과정에서 RA 실패 임계점을 고려한 지

연시간 분석 모델을 설계 및 제안하고 수치적으로 성능을 평가하려고 한다. 동시에 1차 RA 과정과 2차 RA 과정에서 프리엠블 할당 방식을 제안하고 프리엠블 할당 방식이 지연시간에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이에 따라 군의 차세대 전술이동통신 기술로의 5G 활용을 위한 기초분석 연구를 제공하고자 한다.

2. 5G 표준 RA 기법

2.1. 4-단계 RA 과정

4-단계 RA는 4G 표준 액세스 방식으로 Msg1 ~ Msg4, 4번의 메시지 교환 과정을 통해서 수행된다. Figure 1은 4-단계 RA의 과정을 설명한다. 첫 번째로, 단말은 64개의 제한된 프리엠블 세트에서 하나를 선택하여 Msg1을 통해 기지국에 전송한다. 기지국은 단말이 PUSCH에서 사용할 시간과 주파수 자원을 Msg2로 전달한다. 이것을 받은 단말은 Msg3를 통해 Msg2의 PUSCH 자원을 페이로드 형태로 전송한다. 기지국은 Msg3까지 수신하게 되면 연결되었다는 응답으로 Msg4를 전송한다.

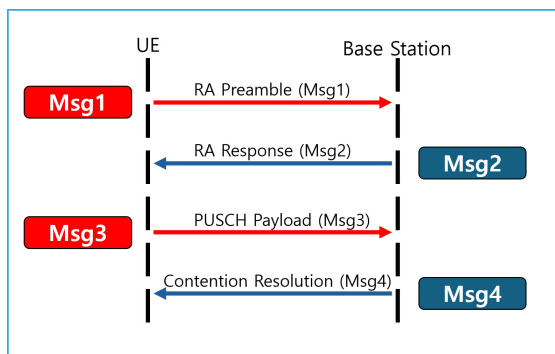


Figure 1. Procedure of 4-step random access

4-단계 RA의 Msg1에서 단말들이 동일한 프리엠블을 선택했을 경우, 중복되어 선택된 프리엠블들이 충돌된다. 따라서 기지국에서는 이에 대한 해석이 불가능하여 단말의 RA 시도가 실패하게 된다.

2.2. 2-단계 RA 과정

2-단계 RA는 5G 환경의 RA 표준으로 MsgA와 MsgB, 2번의 메시지 교환 과정을 통해 수행된다 [12]. 기존의 4-단계 RA에서 단말과 기지국 각각이 2번씩 전송하던 것을 MsgA와 MsgB로 묶어, 더 효율적인 RA가 가능하도록 설계하였다.

Figure 2에서는 2-단계 RA의 과정을 설명하고 있다. MsgA는 PRACH의 프리엠블과 PUSCH의 PRU(PUSCH Resource Unit) 자원을 가리키는 페이로드로 구성이 되어있으며, 2-단계 RA의 MsgA는 4-단계 RA의 Msg1과 Msg3을 조합한 것이고 MsgB는 Msg2와 Msg4를 조합한 것이다. 이렇게 2-단계 RA에서 한 번의 패킷 교환을 위해서는 사전에 프리엠블과 페이로드가 연결되어 있어야 한다. 이때, MsgA에서 하나의 PRU 자원에 몇 개의 프리엠블이 사전 연결되었느냐에 따라 일대일 방식, 다대일 방식으로 나누어진다. 이러한 연결방식으로 통신환경에서 단말 밀도를 결정할 수 있다.

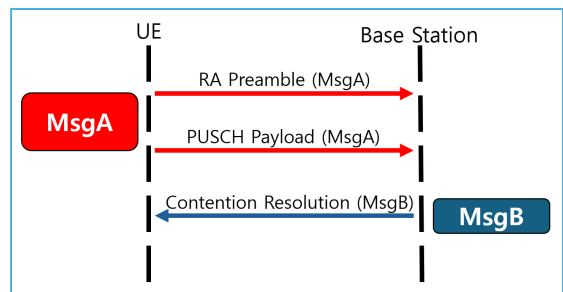


Figure 2. Procedure of 2-step random access

Figure 3은 2-단계 RA의 Flow chart를 나타낸다. 랜덤 액세스의 실패 임계점을 고려한 2-단계와 4-단계 RA를 결합한 하이브리드 RA 과정이다. 그리고 Table 1은 기지국의 해석과 그에 따른 절차에 따라서 2-단계 RA 과정을 Process case로 나눠서 정리하였다. 이 둘을 통해서 2-단계 RA의 표준 과정을 이해할 수 있다.

Figure 3에서 가장 먼저 단말은 2-단계 RA의

MsgA를 수행한다. 기지국은 MsgA의 프리엠블을 먼저 해석하고, 이것이 해석되면 PUSCH의 페이로드 자원을 해석한다. 페이로드까지 해석이 끝나면, 기지국은 MsgB로 RAR(Random Access Response)를 송신한다. 여기까지 성공적으로 마친 단말은 RA를 종료한다. 이러한 내용은 Table 1의 Case 1에 해당된다.

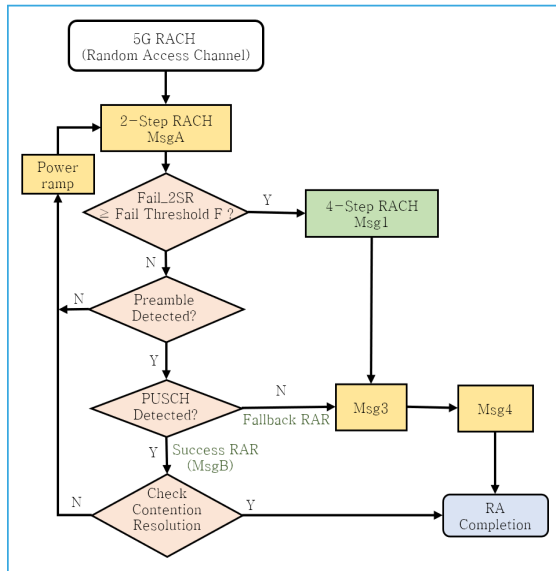


Figure 3. Flow chart of 2-step random access

반면 프리엠블 해석은 가능하지만, 페이로드의 해석이 불가능하면, 기지국은 Fallback RAR을 보낸다. 이것을 받은 단말은 4-단계 RA의 Msg3을 보내고, 이것을 수신한 기지국이 Msg4를 전송하여 RA를 종료한다. 이러한 내용은 Table 1의 Case 2에 해당된다.

여러 단말이 동일한 프리엠블 선택으로 충돌할 경우에는 Table 1의 Case 3에 해당하며, 기지국이 프리엠블 탐지를 못 할 때는 Table 1의 Case 4에 해당한다. Case 3 또는 Case 4의 경우에는 MsgA의 전송이 실패한 것으로 본다. 이때, Figure 3와 같이 일정 시간 동안 정지했다가 다시 MsgA 전송을 시도한다. 하지만, 2-단계 RA 시도가 일정 횟수 이상 실패할 경우, 4-단계 RA를 수행한다. 이러한 특정 횟수를 본

논문에서는 ‘실패 임계점(Fail Threshold)’이라고 정의한다. 결국, 4-단계 RA가 실행되기 위해서는 Case 3, 4의 횟수가 실패 임계점에 도달해야 한다.

Table 1. Process case of 2-Step RA

Case	Interpretation of BS	Subsequent Procedures
1	Interpreted Preamble Interpreted Payload	- BS transmits MsgB. - 2-Step RA is completed
2	Interpreted Preamble Not Interpreted Payload	- Msg3 of 4-Step RA proceeds.
3	Duplicate Preamble	- UE retransmits MsgA
4	Undetectable Preamble	- UE retransmits MsgA

실패 임계점 유무와 그 크기에 따라서, RA 과정 중 단말이 4-단계 RA 과정으로의 진행 여부가 결정된다. 이는 단말의 지연시간에 큰 영향을 미칠 수 있지만, 이것을 반영하여 지연시간을 분석한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 논문에서는 실패 임계점을 도입할 경우, RA의 지연시간 분석 모델을 설계하고자 한다. 또한 분석 모델을 활용하여, 5G의 RA 과정에서 사용되는 프리엠블의 사용 방식에 따라 지연시간 분석 모델을 설계하고자 한다. 이를 통해, 지연시간 감소를 위한 프리엠블 사용 방식을 제안한다.

3. 2-단계 RA 분석 모델

3.1. 2-단계 RA 지연시간 계산

선행연구에서는 2-단계 RA의 지연시간 분석 모델에서 실패 임계점을 고려하지 않고 발생 가능한 각 Case들의 확률값과 각 Case 평균시간의 합으로 설정하였다[9]. 본 연구에서는 [9]의 모델을 분석하고 실패 임계점을 반영하여 분석 모델을 개선한다. 우선 Case 3, 4의 발생 확률을 설계하기 위한 수식

전개는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 1 - \frac{63^{x-1}}{64^{x-1}} &= \left(1 - \frac{1}{64}\right)^{x-1} \\
 &= \left(1 - \frac{1}{64}\right)^{-64 \times \frac{x-1}{-64}} \\
 &= 1 - e^{-\frac{x-1}{64}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

위 식에서 1-(프리엠블이 충돌하지 않을 확률)을 통해서 프리엠블의 충돌 확률을 구한다. x 개의 단말이 존재한다고 해보자. 충돌이 발생하지 않는 해당 단말 하나를 뺀 $x-1$ 개의 단말들이 64개의 프리엠블 중에서 해당 단말이 선택한 63개의 프리엠블을 선택해야 한다. 이렇게 수식을 정리했을 때, 자연상수 e 가 정의된 꼴이 나오기 때문에, 자연상수 e 로 정리될 수 있으며, $x-1$ 은 근사된 x 로 표현 가능하다. 따라서 이를 정리하면 (2)와 같다.

$$P_1 = 1 - e^{-x/64} \tag{2}$$

따라서 P_1 은 2-단계 RA의 프리엠블이 충돌할 확률이며, Table 1에서 Case 3, 4에 해당하는 확률이다. 여기서 x 는 RA를 시도하는 단말의 개수를 RO(RA Occasion)로 나눈 값을 의미하며, 통신 트래픽의 밀도로 이해할 수 있다. 2-단계 RA의 MsgA는 프리엠블과 PRU가 사전에 연결된 구조이며, PRU에서 전송하는 페이로드에서 충돌이 발생할 수 있다. 이러한 Case 2에 대한 충돌 확률은 아래와 같으며, (2)와 비슷한 방법으로 구할 수 있다.

$$P_2 = 1 - e^{-x(M-1)/64} \tag{3}$$

여기에서 M 은 하나의 PRU당 연결된 프리엠블의 수이다. 이 수식을 통해 프리엠블과 PRU의 연결 개수에 따라, 하나의 RO에 접근 가능한 단말의 개수가 달라진다는 것을 이해할 수 있다. 이렇게 2-단계 RA의 각 Case들이 발생 가능한 확률과 해당 Case에

걸리는 시간의 곱의 합을 통하여, 아래와 같이 2-단계 RA 과정이 종료될 때까지 걸리는 지연시간을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_{2SR} &= t_1 + \left(\frac{P_1}{1-P_1}\right) \times t_2 \\
 &\quad + t_3 \times P_2 + t_4 \times (1-P_2)
 \end{aligned} \tag{4}$$

T_{2SR} 은 2-단계 RA가 종료될 때까지 걸리는 총 지연시간을 말하며, $t_1 \sim t_4$ 는 2-단계 RA에서 각 단계의 경과 시간이다. t_1 은 PRACH Occasion에 걸리는 시간이다. t_2 는 프리엠블 충돌이 발생하는 Case 3, 4에 대한 시간이다. 이것은 백오프(Back-off) 시간이라고 하며, 프리엠블의 해석이 불가하여 MsgA 재전송이 이뤄지게 된다. t_3 은 RAR의 Fall-back이 이뤄지며 4-단계 RACH의 Msg3 전송이 이뤄진다. 기지국이 프리엠블은 잘 받았으나, 페이로드를 해석하지 못하는 Case 2에 해당되는 시간이다. t_4 는 MsgA를 기지국이 수신하고 난 이후에 MsgB의 전송과 2-단계 RA의 마무리가 이뤄지는 단계이다. t_4 가 발생하려면, 기지국이 MsgA의 성공적인 수신이 필요하다. 따라서 t_1 과 t_4 의 합은 Case 1에 소요되는 시간을 나타낸다.

선행연구[9]에서는 2-단계 RA의 실패 임계점이라는 개념을 포함하지 않기 때문에, 프리엠블에서의 실패가 무한히 반복되어도, 2-단계 RA 내에서 마치는 것을 수식 (4)에서 의미하고 있다. 이는 Case 3, 4에 해당하는 t_2 의 항이 확률들의 합을 통한 급수의 표현으로 정리되었음을 통해 볼 수 있다.

3.2. 실패 임계점을 고려한 지연시간 계산

본 연구에서는 실패 임계점이라는 개념이 들어있을 경우의 지연시간 분석 모델을 수정하였다. 선행 연구[13]에서도 실패 임계점을 포함할 경우의 지연시간 식을 개선하였으나, Case 3, 4의 제한된 횟수로 인해 Case 1, 2의 확률도 바뀐다는 점을 고려하

지 않았다. Case 3, 4가 몇 번 연속으로 발생하고 나서 Case 1, 2가 발생했는지에 따라서, 확률이 달라져야 한다. 따라서 실패 임계점을 반영한 Case 3, 4의 발생 횟수와 확률에 따라서 t_3, t_4 가 발생할 확률도 달라져야 하고, 이러한 내용을 반영하여 수식 (5)로 정리하였다. $T_{2SR_{FF}}$ 는 2-단계 RA의 실패 임계점을 반영하였을 때의 걸리는 전체 지연시간이다. 이때, F 는 실패 임계점의 크기를 나타낸다.

$$T_{2SR_{FF}} = \left[\begin{array}{l} t_1 \\ + P_1^F((F-1)t_2 + T_{4SR}) \\ + P_1^{F-1}(1-P_1)\{(F-1)t_2 + t_3P_2 + t_4(1-P_2)\} \\ + P_1^{F-2}(1-P_1)\{(F-2)t_2 + t_3P_2 + t_4(1-P_2)\} \\ \vdots \\ + P_1^0(1-P_1)\{0 \times t_2 + t_3P_2 + t_4(1-P_2)\} \end{array} \right] \quad (5)$$

$T_{2SR_{FF}}$ 는 Geometric 확률 분포 개념을 적용하여, 수식을 변형한 것이다[14]. Geometric 분포는 이산 확률 분포로, 성공확률 p 의 베르누이 시행에 대하여, 특정 횟수 시행 후 첫 번째 성공을 얻을 확률을 말한다. 실패 임계점의 크기 F 까지 도달하기 위하여, 1, 2, ..., $F-1, F$ 의 각 크기 번째의 2-단계 RA 시도에서 성공한 경우들을 더해야 한다.

만약, 첫 번째의 2-단계 RA 시도에서 바로 성공했을 때는 Case 3, 4에 해당하는 시간을 더하지 않고, 나머지 Case 1, 2에 해당하는 시간의 항을 더하면 된다. 반면, 2-단계 RA에서 프리엠블 해석을 $F-1$ 만큼 실패하고, F 번째의 시도에서 성공했을 경우, Case 3, 4의 횟수는 $F-1$ 이 되며, 나머지 Case 1, 2 과정의 확률은 F 번째에서 성공할 확률을 곱한 것과 같다. 단말이 2-단계 RA의 프리엠블 전송을 F 번 실패했을 경우, 실패 임계점을 넘어갔기 때문에 t_2 에 해당하는 과정을 $F-1$ 번 진행하고 4-단계 RA로 넘어가게 된다. 따라서, 4-단계 RA에 해당하는 지연시간 계산식은 다음 수식 (6)과 같다.

$$T_{4SR} = t_5 + \left(\frac{P_1}{1-P_1} \right) \times t_6 + t_7 \quad (6)$$

여기서 쓰이는 T_{4SR} 은 2-단계 RA를 실패 임계점 횟수 F 만큼 실패하여, 4-단계 RA를 수행할 때 걸리는 시간이다. $t_5 \sim t_7$ 는 2-단계 RA에서 각 단계마다 걸리는 시간이다. t_5 는 처음 단말이 프리엠블을 선택하여 전송하는 Msg1을 수행하기까지 걸리는 시간을 말한다. t_6 은 기지국이 이러한 Msg1의 해석이 불가하여, 다시 Msg1을 전송하기까지 걸리는 시간을 말한다. Msg1의 해석이 불가할 때는 보통 단말의 프리엠블 선택이 중복될 때 발생한다. t_7 은 기지국이 Msg1 수신을 성공적으로 마친 후, Msg2, Msg3, Msg4의 내용을 차례로 주고받을 때 걸리는 수행 시간을 말한다. T_{4SR} 을 반영하여 수식 (5)를 정리하면 다음 수식 (7)과 같이 쓸 수 있다. 수식 (7)은 실패 임계점을 고려한 2-단계 RA 지연시간 분석 모델이다.

$$T_{2SR_{FF}} = t_1 + P_1^F(F-1)t_2 + t_5 + \sum_{k=0}^{F-1} P_1^k(1-P_1)\{kt_2 + t_3P_2 + t_4(1-P_2)\} \quad (7)$$

3.3. 2-단계 RA와 4-단계 RA 간 프리엠블 공유에 따른 지연시간

5G의 2-단계 RA에서는 실패 임계점을 기점으로 4-단계 RA를 사용할 수 있으며, 각 2-단계 RA와 4-단계 RA는 한정된 64개의 프리엠블 자원을 공유하여 사용한다. 이때, 프리엠블의 사용방법에 따라서 달라지는 지연시간을 분석하고자 한다.

제안하는 프리엠블의 사용 방식은 Figure 4를 통해서 이해할 수 있다. 우선, 전체 64개의 프리엠블을 나눠서 사용할 경우가 있다. 또한, 2-단계 RA에서 사용하기 위해 선택할 프리엠블의 그룹과 2-단계 RA의 실패 임계점 이후, 4-단계 RA에서 사용하기 위해 선택할 프리엠블의 그룹이 달라지는 경우가 있다. 이때, 이렇게 달라진 2개의 프리엠블 그룹의 프리엠블 개수의 총합은 64개이다. 반면 2-단계 RA와 4-단계 RA 전체가 프리엠블을 공통으로 사용할 경

우, 2-단계 RA에서 실패 임계점 횡수만큼 실패 이후, 4-단계 RA로 진행할 경우에도 전체 64개의 프리엠블을 공통으로 경쟁하여 선택한다.

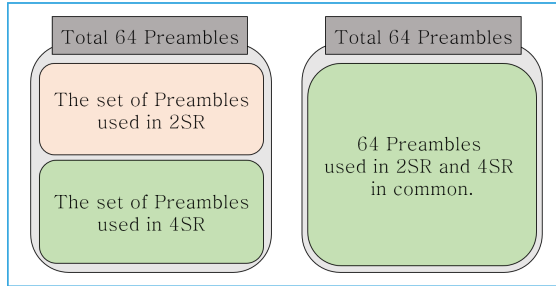


Figure 4. Preambles usage method in random access

64개의 프리엠블을 2-단계 RA가 사용할 그룹과 4-단계 RA가 사용할 그룹으로 나눌 경우, 설계되는 식은 아래와 같이 변경될 수 있다.

$$P_{p,1} = 1 - e^{-x/n} \tag{8}$$

$$P_{p,2} = 1 - e^{-x(M-1)/n} \tag{9}$$

$$T_{4SR_p} = t_5 + \left(\frac{P_{p,3}}{1 - P_{p,3}} \right) \times t_6 + t_7 \tag{10}$$

$$P_{p,3} = 1 - e^{-(x \times P_{p,1}^F)/(64-n)} \tag{11}$$

수식 (8) ~ (11)에서 n 은 2-단계 RA에서 사용되는 프리엠블의 개수이다. 이때, 4-단계 RA에서 사용되는 프리엠블의 개수는 $64 - n$ 이 된다. (8), (9)에서는 (2), (3)과 다르게, 프리엠블의 개수가 n 으로 달라졌다.

T_{4SR_p} 는 프리엠블을 나눠서 사용할 경우, 4-단계 RA에서 걸리는 시간이다. 이때, $t_5 \sim t_7$ 은 수식 (6)의 상수와 같다. 하지만, $(64 - n)$ 개의 프리엠블 그룹에서 경쟁하는 단말의 개수가 $x \times P_{p,1}^F$ 로 달라진다. 단말이 4-단계 RA 과정을 이용한다는 것은 해당 단말이 Case 3, 4가 실패 임계점만큼 실패했다는 것이다. 따라서 단말의 수 x 에서 $P_{p,1}$ 의 확률은 실패 임계점 F 를 곱한 것으로 수정되어야 한다.

4. 수치 분석 및 성능 평가

64개의 프리엠블에서 2-단계 RA와 4-단계 RA의 프리엠블 비율이 각각 3:1, 1:1, 1:3을 가지는 상황에 대해서 분석하였다. 따라서 2-단계 RACH의 프리엠블 개수와 4-단계 RACH의 프리엠블 개수의 순서쌍에 따라 (48, 16), (32, 32), (16, 48)의 상황에 대해서 분석하였다. 수식 (3)과 (9)에서 PRU와 프리엠블의 관계를 나타내는 M 은 4로 고정하였다. 또한, 2부터 8까지의 실패 임계점을 가질 때, 각 프리엠블 사용 방식에 따라 2-단계 RA를 완료하기까지 걸리는 전체 지연시간을 확률적으로 분석하였다. 통신밀도라고 할 수 있는 (단말의 개수)/(RO의 개수)인 x 값이 30, 40, 50, 60인 4가지 경우를 분석하여, 다양한 통신환경에서의 평균 지연시간을 분석하고자 한다.

수식에서 포함되는 변수 $t_1 \sim t_7$ 은 선행연구[9]를 참고하여, 각 시간 변수는 평균값으로 설정하였으며 Table 2와 같다.

Table 2. Latency Evaluation Parameter

Parameter	Contents	Value
t_1	Time for PRACH occasion	2ms
t_2	Back-off-time (Preamble interpretation is not possible, retransmission of MsgA)	2ms
t_3	Occasion of fall-back RAR, process of 4-step RA Msg3	20ms
t_4	Time for the BS to receive MsgA and to perform up to 2-step RA	10ms
t_5	Time for 4-step RA PRACH occasion	2ms
t_6	4-step RA backoff time (Preamble interpretation is not possible, retransmission of Msg1)	20ms
t_7	The remaining 4-step RA latency time	19ms

Figure 5는 프리엠블 사용 방식과 실패 임계점에 따른 평균 지연시간을 수치적으로 평가 및 분석한 그래프이다. Figure 5(a)에서 통신밀도가 30일 때, Figure 5(b)에서 50일 때의 두 가지 상황을 분석함으로써 확률적 분석이 보편적으로 같은 경향을 보임을 알아보았다. 이를 통해 모든 통신밀도의 환경에서 공통으로 프리엠블 그룹을 사용했을 때 가장 낮은 지연시간의 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 수식 (2)와 (8)의 프리엠블 선택 시, 충돌할 확률을 통해서 이해할 수 있다. 선택 가능한 프리엠블 그룹이 클수록 충돌 확률은 낮아지고, 이는 지연시간의 감소로 이어지게 된다. 2-단계 RA와 4-단계 RA 모두가 공통으로 프리엠블을 선택할 때는 두 종류의 RA 모두, 단

말들이 64개의 그룹에서 선택 가능하므로 충돌 확률이 낮아지지만, 2-단계 RA와 4-단계 RA에서의 프리엠블 선택 그룹이 나뉘면, 선택 가능한 프리엠블의 개수가 적어지므로, 더 큰 충돌 확률을 가지게 된다. 이는 4-단계 RA 방식을 이용하게 되는 단말의 증가를 초래한다.

2-단계 RA에서 사용되는 프리엠블의 그룹이 적어서 큰 충돌 확률을 가질 때에는 4-단계 RA에서의 프리엠블 개수가 늘어나기 때문에 4-단계 RA에서의 충돌 확률은 낮아질 수 있지만, 수식 (9)에서처럼 더 많은 단말들이 4-단계 RA로 유입되므로 통신밀도가 급격하게 증가된다. 이러한 통신밀도의 증가는 전체 지연시간의 급격한 증가를 초래한다. 따라서 공통된 프리엠블 그룹에서 단말이 선택하는 것이 더 적은 지연시간을 가질 수 있음을 알 수 있다. 만약, 프리엠블을 나눠서 사용하더라도, 2-단계 RA 그룹의 크기가 더 작을 때 좋은 성능을 보인다.

지연시간에 영향을 미치는 변수는 프리엠블 이외에도, 통신밀도와 MsgA의 구조가 있다. MsgA는 프리엠블과 페이로드가 사전에 연결되어 있기 때문이다. 수식 (3)과 (9)에서 볼 수 있듯이 하나의 PRU당 연결되는 프리엠블의 개수가 달라짐에 따라서, Case 2에서의 단말충돌 확률이 달라진다. 선행연구[12]에서는 공통된 프리엠블을 사용할 때, MsgA 구조에 따른 평균 지연시간만을 분석하였다. 반면, 본 연구에서는 프리엠블을 나눠서 사용할 때 MsgA 구조에 따른 평균 지연시간 평가를 추가로 진행하였다. 이 내용은 Figure 6에서 볼 수 있다.

Figure 6은 프리엠블을 나눠서 사용할 때, PRU 연결방식에 따른 평균 지연시간을 수치적으로 평가 및 분석한 그래프이다. 통신밀도를 40으로 고정된 상태에서 Figure 6(a)는 하나의 PRU당 4개의 프리엠블이 연결되었을 때, Figure 6(b)는 하나의 PRU당 2개의 프리엠블이 연결되었을 때의 상황이다. 평가를 위해서 수식에서 포함되는 변수 $t_1 \sim t_7$ 은 Figure 5와 마찬가지로 Table 2에서 정리하였다. 프리엠블이 나눠지는 방식은 전체 64개의 프리엠블에 대하여 1/4 ~ 3/4을 가지는 상황에 대해서 분석

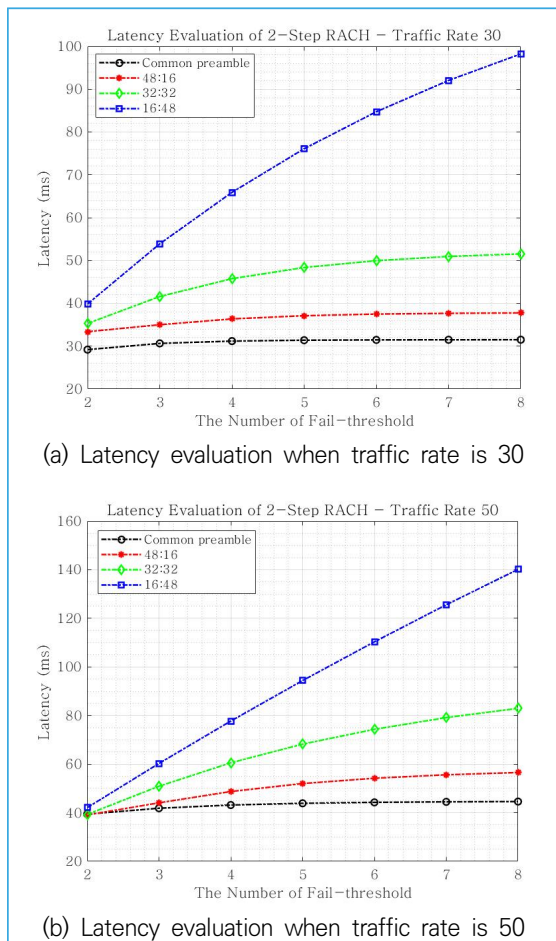


Figure 5. Latency Evaluation of Preamble usage method.

하였다. 따라서 Figure 6에서 x축이 16이 되면, 2-단계 RA의 프리엠블 개수는 16이 되고, 4-단계 RA의 프리엠블 개수는 48이 된다. 이러한 방식으로 2-단계 RA가 48개의 프리엠블을 가질 때까지 분석하였다. 하나의 PRU에 2개의 프리엠블이 연결되었을 경우와 4개의 프리엠블이 연결되었을 경우, 각각의 상황에 대한 평균 지연시간을 평가 및 분석하였다.

Figure 6에서 하나의 PRU당 연결되는 프리엠블 개수에 따라서 평균 지연시간은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향성은 실패 임계점이 커짐에 따라서도 달라지지 않는다는 것을 알 수 있다.

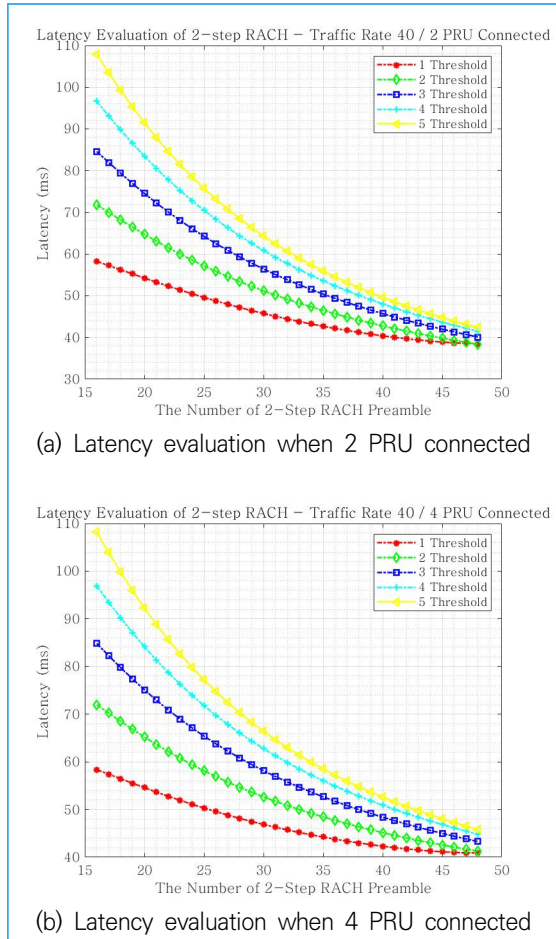


Figure 6. Latency evaluation of PRU mapping method when using preamble separately.

전체적으로 실패 임계점이 적을수록, 평균 지연시간의 크기는 작아진다는 것을 알 수 있으며, 이는 Figure 5에서도 실패 임계점이 적을수록 평균 지연시간이 적다는 것을 알 수 있다.

마찬가지로, Figure 6에서 2-단계 RA의 프리엠블의 수가 많아질수록 지연시간이 낮게 평가됨을 알 수 있다. 이러한 내용은 Figure 5에서도 2-단계 RA가 사용하는 프리엠블의 비중이 더 클수록 평균 지연시간이 적어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, Figure 6의 기울기 변화를 통해서 실패 임계점이 클수록 프리엠블 개수에 따른 평균 지연시간의 변화 정도가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 실패 임계점이 커질수록 프리엠블 사용 변화에 대한 영향력이 커진다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 5G 표준 RA 방식이 2-단계 RA에서 4-단계 RA로 넘어가게 되는 특정 지점을 실패 임계점으로 정의하고 Geometric 분포로 모델링하여, 2-단계 RA 과정의 실패 확률을 통한 지연시간 분석 모델을 설계하였다. 이러한 분석 모델을 활용하여 64개의 공통된 프리엠블 그룹에서 선택할지, 혹은 2-단계 RA와 4-단계 RA 각각 나눠진 프리엠블 그룹에서 선택할지의 2가지 방식에서의 지연시간을 수치적으로 평가하였다. 그 결과, Figure 5와 같이 통신밀도와 관계없이 프리엠블을 공통으로 사용했을 때가 가장 적은 지연시간을 보임을 알 수 있다. 이뿐만 아니라 하나의 PRU당 연결되는 프리엠블의 수에 따른 평균 지연시간을 평가하였다. 그 결과, PRU의 연결방식은 크게 지연시간에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 추후 과제로 통신밀도와 하나의 PRU당 연결된 프리엠블 수에 따른 평균 지연시간 분석 모델 연구를 진행할 수 있다. 이에 따라 본 연구는 군의 전술이동통신 서비스에서 5G 활용을 위한 기초 분석 연구를 제공한다.

사사

이 성과는 정부(과학기술통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행한 연구임(No. 2021R1A2C2007112)

참고문헌

- 1 "3GPP; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items", *3rd Generation Partnership Project*, 2020.
- 2 H. Y. Lee, et al., "The Features and Future Prospects of 3GPP 5G", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 1224-1225, 2018.
- 3 Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold, 5G NR: The next generation wireless access technology, Academic Press, 2020.
- 4 "3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 16)", *3rd Generation Partnership Project*, 2021.
- 5 Zaidi, Ali, et al., 5G Physical Layer: principles, models and technology components, Academic Press, 2018.
- 6 J. Choi, "Performance Analysis of 2-Step Random Access With CDMA in Machine-Type Communication", *IEEE Transactions on Communications*, 69(4), pp. 2387-2397, 2021.
- 7 J. Choi, "On Fast Retrial for Two-Step Random Access in MTC", *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), pp. 1428-1436, 2021.
- 8 J. Kim, G. Lee, S. Kim, T. Taleb, S. Choi and S. Bahk, "Two-Step Random Access for 5G System: Latest Trends and Challenges", *IEEE Network*, 35(1), pp. 273-279, 2021.
- 9 "Further discussion and evaluations for 2-step RACH", *3rd Generation Partnership Project*, 2019.
- 10 Z. Li, L. Tian, Y. Yin and W. Cao, "On Contention-based 2-step Random Access Procedure", *2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 771-776, 2020.
- 11 Hyun-Yong Hwang and Jee-Hyeon Na, "Random Access Method with Prioritized RACH Preamble Allocation Scheme", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 1345-1346, 2017.
- 12 Wong, Vincent WS, et al., Key technologies for 5G wireless systems, Cambridge university press, 2017.
- 13 Hyojin Lee, Hoki Baek, and Jaesung Lim, "Latency Evaluation of Access Structure at 2-Step RACH in 5G System," *2021 Proceedings of Korea Institute of Military Science and Technology*, pp. 985-986, 2021.
- 14 Oliver C. Ibe, Fundamentals of Applied Probability and Random Processes 2nd Ed., Academic Press, 2014.

고정형 레이더의 운용주파수 가용성 확대 및 위치기반 재밍 회피 최적화

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

Optimization of Operational Frequency Availability and Location-Based Jamming Avoidance of Fixed Radar

권용욱, Yongwook Kwon

LIG넥스원, 레이더기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Radar Production
Engineering, LIG Nex1

김성균, Sunggyun Kim

LIG넥스원, 레이더기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Radar Production
Engineering, LIG Nex1

김상열, Sangyeul Kim

LIG넥스원, 레이더기술팀, 선임연구원
Research Engineer, Radar Production
Engineering, LIG Nex1

이준하, Junha Lee

LIG넥스원, 레이더기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Radar Production
Engineering, LIG Nex1

김홍준†, Hongjun Kim

경북대학교, 전기공학과, 교수
Professor, Department of Electric
Engineering, Kyungpook National University

Abstract

Early warning radars for monitoring a country's mountainous regions are installed in close proximity to minimize the area obstructed by mountainous regions. A radar installation environment in close proximity causes mutual interference within the same platform. Such mutual interference affects the operation of the radar's ECCM function and reduces the availability of the radar's frequency resources. This paper presents a method that can improve frequency availability through location-based improved ECCM function optimization and verifies its effectiveness by applying it to radar.

keywords : Radar Interference, Interference Prediction, Jamming Avoidance, Operational Frequency Availability

† Corresponding Author : Hongjun Kim

Tel : +82-053-950-5601, email : hongjoon@knu.ac.kr

Kyungpook National University, 80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 10th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

국내의 많은 산악지역을 감시하기 위한 조기경보 레이더는 산악지역에 의한 차폐 구역을 최소화하기 위하여 밀집된 위치에 설치된다. 또한, 레이더를 운용하기 위한 자원이 한정적인 관계로 많은 레이더가 동일 주파수 대역을 운용하고 있다. 제한된 주파수 자원과 밀집된 레이더 사이트 위치는 레이더 간의 주파수 간섭을 유발한다. 주파수 간섭은 레이더의 잡음 수준을 증가시켜 레이더가 가진 성능을 발휘하지 못하는 요인이 된다. 현대의 레이더는 전자전 대응능력을 통해 간섭이 발생하는 주파수 채널을 회피하는 등의 기능을 포함한다[1]. 이 같은 전자전 회피 기능은 레이더가 보유한 주파수 자원의 가용성을 저하시키는 결과를 초래하게 된다. 레이더의 주파수 자원은 주파수 특성을 통한 맹목속도 회피 등 주요한 인자이므로 주파수 자원의 가용성 저하는 성능에 영향을 준다고 볼 수 있다.

본 논문은 산악지역 감시를 위해 설치된 조기경보 레이더가 상호 인접한 위치에 설치됨에 따라 발생된 동일 플랫폼 간의 주파수 간섭에 대하여 설명한다. 두 번째로 조기경보 레이더의 전자전 회피 기능에 따라 발생하는 주파수 가용성 저하 현상을 개선하기 위하여 위치 기반 재밍 회피 최적화 방안을 제시한다. 마지막으로 주파수 가용성을 높이기 위한 제시된 최적화 방안을 실제 조기경보 레이더에 적용하여 간섭의 수준 변화와 주파수 가용성의 증가 수준을 검증하였다.

2. 본론

2.1. 조기경보 레이더 상호 간섭

본 논문에서 적용할 조기경보 레이더는 산악지역에서 발생하는 음영구역을 탐지하기 위한 레이더이다. 레이더의 설치 위치는 Figure 1과 같으며, 인접한 레이더 간의 상호 주파수 간섭으로 주파수 가용

률이 현저하게 낮은 수준이다. 레이더 4는 인근한 레이더의 운용주파수와 충분히 이격이 되어 가용률이 높은 수준이다. 하지만 레이더 2, 3, 5는 가용률이 30% 수준으로 할당되어 있는 주파수 자원을 활용하지 못하고 있는 상황이다.

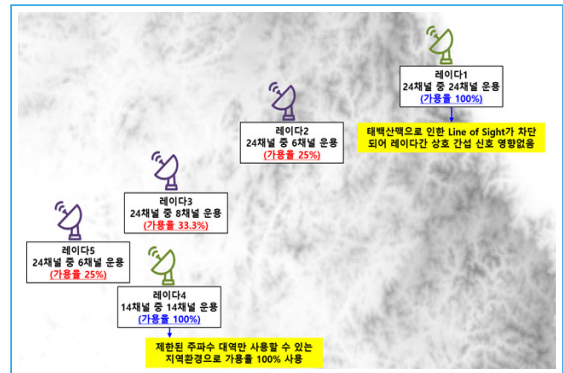


Figure 1. Radar's installation location

Table 1은 Figure 1에서 명시된 각 레이더의 위치에서 주파수 가용도를 정리하였다. 레이더 1의 경우 지형에 의한 차폐로 상호 간섭이 발생하지 않지만, 레이더 2, 3, 5의 경우 상호 간섭에 의해 40% 이하의 주파수 가용률로 운용되고 있다.

Table 1. Operational Frequency Availability

Site	Operational Frequency	Availability
Radar #1	24 / 24	100%
Radar #2	6 / 24	25%
Radar #3	8 / 24	33.3%
Radar #4	14 / 14	100%
Radar #5	6 / 24	25%

Figure 2는 수치 지형 표고데이터(Digital terrain elevation data)를 활용하여 레이더 3과 5의 설치 위치에서 상호 간섭의 가능성을 확인하였다. 2개의 레이더가 설치된 사이트 위치는 광학적인 기준 방향(Bore-sight)에 위치한 것으로 확인된다.

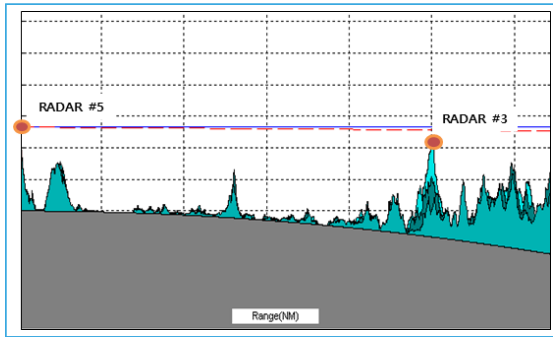


Figure 2. Optical analysis result between Radars

Figure 3은 레이더의 수신 신호를 분석하여 상호 간섭을 확인하였다. Figure 3의 X축은 방위각 방향을 나타내며, Y축은 레이더의 거리 방향을 나타낸다. Z축은 레이더가 수신한 신호의 레벨을 나타내며, 간섭이 발생된 경우 특정 방위각에서 전체 거리의 잡음이 증가되는 현상으로 나타난다.

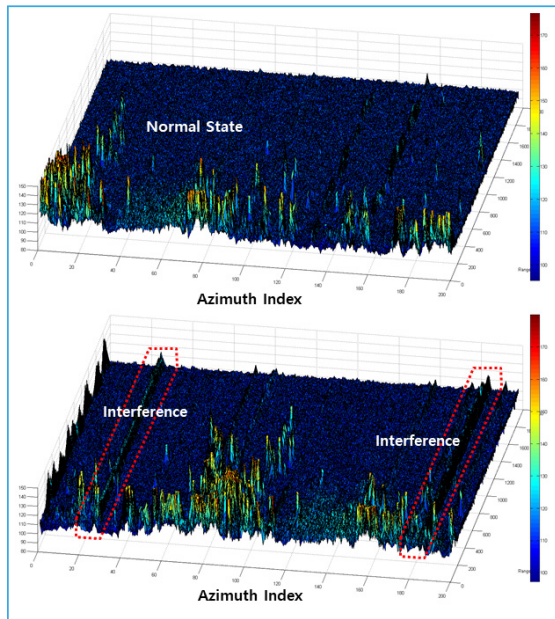


Figure 3. Frequency interference effect

Figure 4는 간섭이 발생하는 방위각에 대하여 정상 상태와 간섭 상태를 2차원으로 비교하였다. 그림의 X축은 거리 셀을 나타내며, Y축은 신호의 상대적 크리를 나타낸다[2]. 위의 그림은 잡음이 발생하지

않는 방위각에서의 잡음레벨이며, RMS 기준 약 110dB의 잡음 수준을 나타낸다. 반면, 간섭을 받은 방위각에서는 RMS 기준 약 120dB 수준으로 주파수 간섭에 의해 증가된 잡음 수준은 약 10dB 수준으로 나타난다. 이와 같은 잡음 수준의 증가는 레이더의 잡음대신호비를 감소시키는 결과를 초래하게 되며, 레이더의 주요 성능인 탐지성능을 저하시키는 요인이 된다. 일반적으로 레이더는 재밍에 의한 성능저하를 회피 및 최소화하기 위하여 ECCM(Electronic Counter-Counter Measures) 기능을 보유하게 된다.

조기경보 레이더는 이와 같은 간섭 효과는 전자전에 의한 공격과 동일하게 반응하게 된다. 즉, 상호 간섭에 의한 탐지율 저하를 제거하기 위하여 ECCM 기능이 동작하게 되며, 간섭으로 판단되는 주파수 자원을 운용자원에서 제외하게 된다.

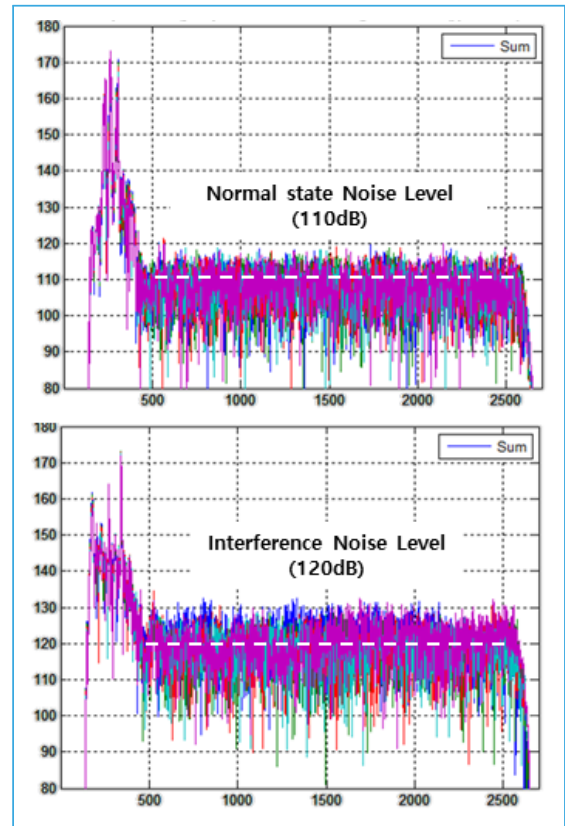


Figure 4. Comparison of noise levels

2.2. 조기경보 레이더의 ECCM 기능

ECCM 기능은 간섭을 받은 주파수 채널을 제외하여 간섭이 없는 주파수만 운용함으로써 전자전 공격을 회피하는 기능이다.

Figure 5는 조기경보 레이더의 주파수 관리 방법을 표현한다. 조기경보 레이더는 주파수에 의한 맹목 속도에 대한 개선 효과를 위하여 일반적으로 가변 주파수 운용모드로 사용된다. 하지만 가변 주파수 운용모드는 수신 신호의 합성을 고려하여 스캔 단위로 가변하게 된다. 스캔 단위는 안테나가 1번 회전을 하는 단위로 조기경보 레이더는 안테나가 1번 회전하는 동안 하나의 주파수로 운용됨을 의미한다. 즉, 레이더는 주파수 특성에 따른 성능 증대의 효과를 확보하기 위하여 다양한 주파수 세트를 포함하여 운용되며, 안테나 회전 단위(1 스캔)로 동일한 주파수를 운용함으로써 주파수 가변에 따른 비일관성(Non-coherent)을 배제하여 신호처리 과정의 이득을 최대화한다. 이는 신호처리 과정에서 발생할 수 있는 주파수 변화의 이득저하를 최소화하기 위함이다.

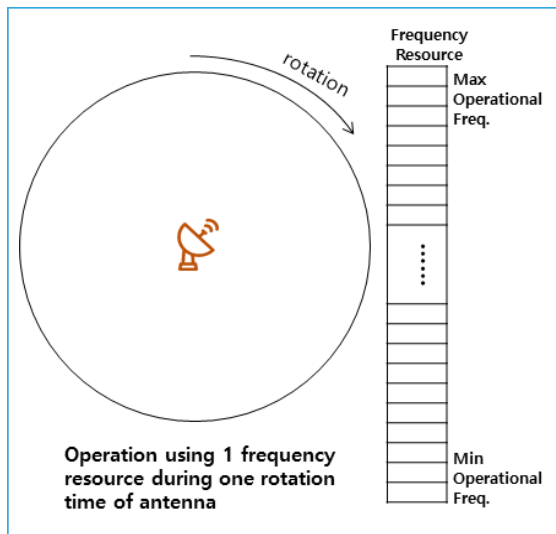


Figure 5. Frequency resource management

조기경보 레이더의 밀집한 설치 환경과 설치 위치 간의 광학적 기준 방향(Bore-Sight)에 의한 상호 간

섭이 발생한다. 상호 간섭은 앞서 언급한 바와 같이 조기경보 레이더의 ECCM 동작을 유발하게 된다. ECCM 기능의 동작은 레이더가 보유한 주파수 자원 중 간섭이 발생하는 주파수 자원을 제외하게 된다. 제외된 주파수 자원은 주파수 가변에 의해 레이더가 가질 수 있는 탐지상의 장점을 제외하게 된다.

Figure 6은 간섭 신호가 발생할 경우, 조기경보 레이더의 ECCM 기능이 동작하는 순서도를 나타낸다. 레이더 운용 후 운용주파수가 선택되며, 레이더의 설계된 빔 템플릿에 따라 펄스폭, 펄스 간격에 따라 운용된다. 레이더는 별도의 재밍 신호를 판단하는 타이밍을 포함하여 레이더의 간섭 상태를 판단한다. 해당 시간대에 수신된 신호의 크기를 시스템에 설정된 재밍 판단 임계치와 비교하여 ECCM의 동작 여부를 결정한다. 재머 환경을 회피하는 방법은 설정된 주파수 세트에서 간섭이 발생하는 주파수 세트를 선정하고, 운용주파수 세트에서 해당 주파수를 제외하여 운용하는 것이다. 이와 같이 주파수 자원을 제외하는 ECCM의 동작 상태에 의해 레이더의 주파수 자원 가용성은 감소하게 된다. 이와 같은 ECCM 기능은 외부의 재밍 공격을 회피할 수 있는 좋은 방법이지만, 본 논문에서 인용한 상호 간섭의 환경에서는 주파수 자원의 가용성을 저하시키는 요인으로 작용한다.

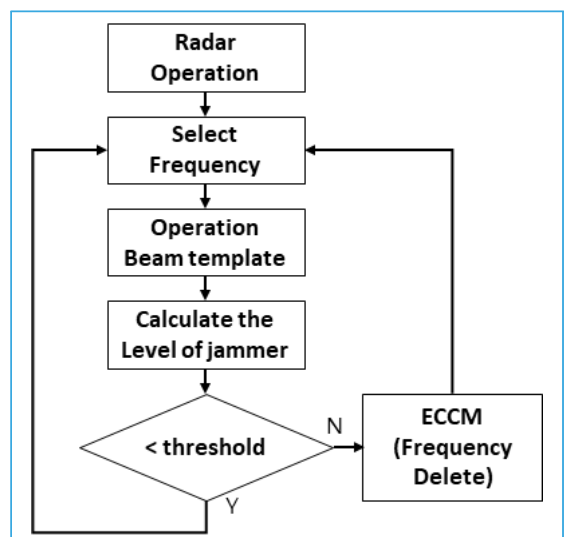


Figure 6. A ECCM function's flow chart of radar

인접한 동일 레이더 간에 상호 간섭이 발생할 경우, 간섭받은 주파수 자원을 제외하게 된다. Figure 7은 앞서 설명한 바와 같이 상호 간섭에 의해 발생된 레이더의 ECCM에 의해 주파수 가용도가 감소하는 현상을 나타낸다. 예를 들어 주파수 세트 100개 중 50번째 주파수 간섭이 발생할 경우, 레이더는 전 방위각에 대하여 50번째 주파수 세트를 전 방위각에 대하여 제외하게 된다. 상호 간섭이 발생하는 주파수 채널이 증가할 경우, 전 방위각에서 제외되는 주파수 세트가 증가하여 주파수 가용도는 급격하게 증가하게 된다[3].

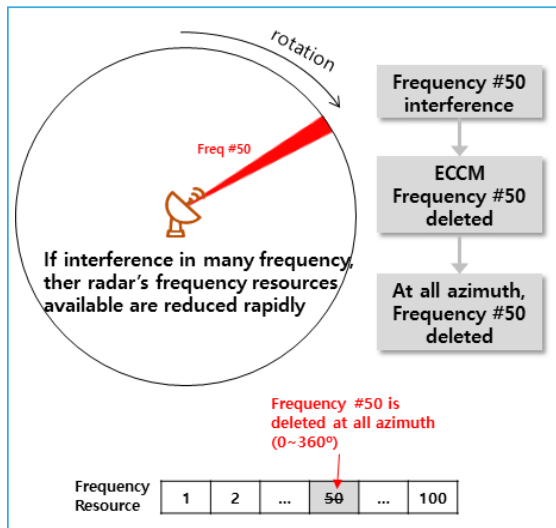


Figure 7. A ECCM function operation of radar

2.3. 위치 기반 재밍 회피 최적화 방안 제시

본 논문에서 제안하는 위치 기반 재밍 회피 최적화 방안은 주파수 가용성을 감소시키는 레이더의 ECCM의 알고리즘을 개선하는 방식이다.

Figure 8은 위치 기반 재밍 회피 최적화 방안의 순서도를 나타낸다. 조기경보 레이더는 운용하는 주파수 자원을 16개의 섹터로 분리하여 관리한다. 주파수 자원 관리 방법은 분리된 섹터에서 간섭이 발생할 경우 해당 섹터에서만 주파수 운용을 일정 스캔 동안 중지한다. 이와 같은 주파수 자원 관리 방법

은 펄스 합성 단위의 방위각 단위와 동기화되어 관리된다[4]. 이를 통해 신호처리 과정에서 합성되는 레이더 펄스 간에는 동일한 주파수 자원을 사용한다. 이는 신호처리 과정의 일관성(Coherence)을 유지하여 신호처리 과정의 손실 발생을 방지한다. 또한 일정 스캔 이후 제외된 주파수 자원을 다시 운용함으로써 간섭 환경이 제외된 경우의 주파수 가용성 증가를 도모한다.

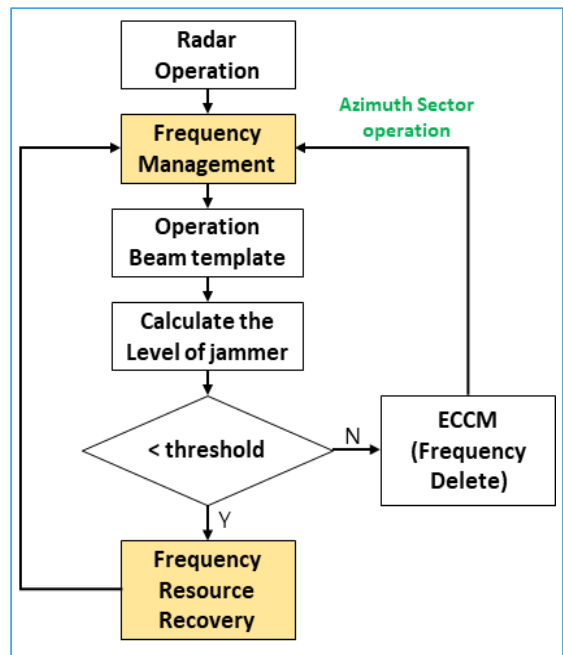


Figure 8. A proposed ECCM function's flow chart

Figure 9는 제안한 개선 방식의 동작 방법을 도식화하였다. 조기경보 레이더는 16개의 섹터로 분리하여 주파수 자원을 관리하고, 간섭이 발생된 섹터에서만 간섭 주파수 자원을 제거한다. 16개의 섹터는 본 논문에서 인용한 레이더의 표적 처리의 기본 분류 영역을 동일하게 적용하였다. 섹터 3에서 50번째 주파수 세트의 간섭이 발생할 경우, 해당 섹터에서만 50번째 주파수 세트를 제외한다. 간섭이 발생하지 않은 섹터에서는 해당 주파수 자원을 지속 운용함으로써 가변 주파수에 의한 탐지 효과를 유지할 수 있게 된다. 또한, 일정 스캔 이후 제외된 주파수 자원

을 복원하여 재밍 상태를 재확인하여 제외 여부를 지속적으로 판단한다. 이와 같은 일련의 과정으로 간섭이 발생하지 않는 섹터에서는 해당 주파수 세트의 지속적인 운용이 가능하며, 재밍 환경의 변화에 따라 주파수 세트의 가용성을 유지할 수 있다[5].

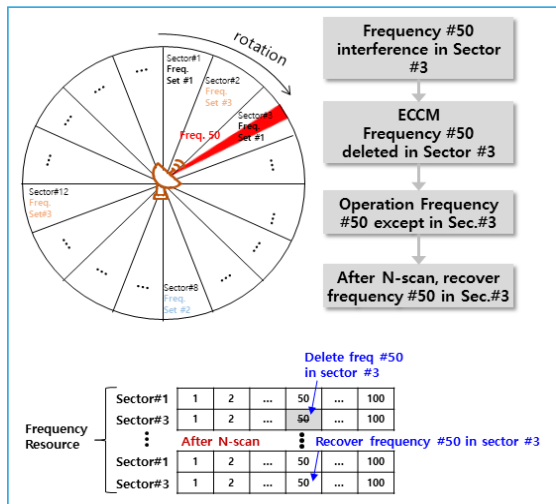


Figure 9. A proposed ECCM function operation of radar

2.4. 최적화 방안 적용 시험 결과

본 논문에서 제안한 위치 기반 재밍 회피 최적화 방안을 밀집한 환경에 설치된 조기경보 레이더에 적용하여 그 효과를 검증하였다.

Figure 10은 조기경보 레이더의 주파수 자원의 가용률 확인 결과를 나타낸다. Figure 10에서 제시하는 주파수 가용률은 조기경보 레이더에 제안한 방식을 적용하고 약 1년 동안 지속 운용하여 제외된 주파수 자원의 운용 상태를 확인한 결과이다. 주파수 가용성을 앞서 설명한 Figure 1과 비교할 경우, 레이더 2, 3, 5의 가용성을 확보한 것을 확인할 수 있다. 해당되는 레이더는 특정 방위각에 대하여 상호 간섭된 주파수 자원을 제외하였으나, 그 외의 방위각에서는 해당 자원을 사용할 수 있다. 또한, 일정 시간을 두고 간섭 상태를 재확인하여 제외된 주파수 세트를 복원함으로써 자원의 가용성을 확보하였다.

간섭이 발생하는 방향의 자원이 유동적으로 변경되는 것을 확인하였으나, 다른 섹터의 경우 모든 주파수 자원을 활용하는 것을 확인하였다.

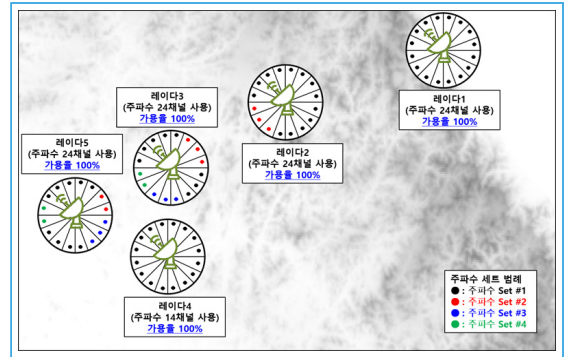


Figure 10. The result of proposed ECCM function

아래 Table 2는 레이더 3에서 제안된 ECCM 기능을 적용하기 전과 후의 100 스캔 동안 누적된 영향성을 확인한 결과이다. 위치 기반 재밍 회피 최적화 방안을 적용함으로써 레이더의 주파수 가용성을 높힐 수 있음을 확인하였다.

Table 2. Result of Operational Frequency Availability

Site	ECCM(Before)	ECCM(Atger)
Operational Frequency Channel	6 / 24	24 / 24
Availability	41 %	100 %

3. 결론

본 논문에서는 조기경보 레이더의 밀집된 설치 환경에 의해 발생할 수 있는 동일 레이더 간의 상호 간섭으로 발생하는 주파수 자원의 가용성 저하를 개선하고자 하였다. 제안하는 방법은 주파수 자원을 섹터별로 분리하여 관리하고, 간섭받은 주파수 자원에 대하여 섹터별로 ECCM을 동작하도록 한다. 또한 일정 스캔 이후 간섭에 의해 제외된 주파수 자원을 복구하여 간섭이 제거된 환경에서 주파수 자원 가용성

을 복구한다. 위와 같이 섹터별로 주파수 자원을 관리하는 위치 기반 재밍 회피 방식을 실제 플랫폼에 적용하여 밀집된 환경에 설치된 조기경보 레이더의 주파수 가용성 증가를 약 1개월의 모니터링을 통하여 확인하였다.

본 논문에서 확인한 적용 시험 결과는 유사한 설치 환경에 설치되는 레이더에 적용하여 한정된 주파수 자원의 가용성을 높일 수 있을 것으로 기대한다. 본 논문에서는 16개의 섹터를 분리하였으나, 레이더의 설계 및 신호처리의 펄스 수에 따라 일관성 (Coherent)을 유지하는 범위에서 조정이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1 Merrill. Skolnik, Radar Handbook, McGraw-Hill, 1990.
- 2 B. R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni, MATLAB Simulation for Radar Systems Design, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- 3 S. W. Seo, S. M. Lee, and Y. S. Kim, "Antenna polarization isolation and resource control for frequency interference reduction between opposite sectors", *The Journal of Korean Institute of Communication and Information Sciences*, 40(6), pp. 1014-1023, 2015.
- 4 S. W. Kwon, Y. W. Kwon, and H. S. Kim, "Method and apparatus for selecting minimum interference frequency based on jamming detection with minimum time resource and statistical processing", The Korean Intellectual Property Office Patent 10-2018-0088718, 2018.
- 5 Myung-Hoon Park, Se-Woong Kwon, Woo-Joong Jeon, Hyun-Seung Kim, Seung-Ki You and Ki-Won Lee, "Analysis of Radar Interference Using a Modeling and Simulation Method", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 30(10), pp. 829-838, 2019.

거리별 유효 빔폭 임계치 알고리즘 적용을 통한 레이다 근거리 해상표적 분리현상 해소에 대한 연구

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

Resolving Near-Range Maritime Target Splitting Using Distance-Specific Effective Beam and Threshold Algorithm in Radar Systems

김상열†, Sangyeol Kim

LIG넥스원, 레이더기술팀, 선임연구원
Research Engineer, Radar
Production Engineering, LIG Nex1

권용욱, Yongwook Kwon

LIG넥스원, 레이더기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Radar
Production Engineering, LIG Nex1

김성균, Sunggyun Kim

LIG넥스원, 레이더기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Radar
Production Engineering, LIG Nex1

이준하, Junha Lee

LIG넥스원, 레이더기술팀, 수석연구원
Chief Research Engineer, Radar
Production Engineering, LIG Nex1

Abstract

Early-warning radar systems, which typically employ parabolic antennas for two dimensional(2D) radar configurations, prioritize maintainability. Installation at elevated sites introduces a phenomenon where, as sea-surface targets approach, they intersect with the lower section of the radar beam, thus broadening its base. This broadening effect results in the splitting of single targets into apparent multiples as they approach each other. This paper proposes a software-based method for limiting the effective beamwidth of parabolic antenna-based 2D radar systems to mitigate the target splitting of close-range maritime targets.

keywords : Parabolic Antenna, Target Split, Effective Beamwidth, Near Target Detect, Look Angle

† Corresponding Author : Sangyeol Kim

Tel : +82-054-469-8980, email : sangyeol.kim@lignex1.com

LIG Nex1, 124, 354-25, Sanho-daero, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 8th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

현대의 레이더는 능동형 위상배열레이더로 발전하는 추세이다. 하지만 비용/정비 및 유지보수를 목적으로 파라볼릭 안테나 기반의 2차원 레이더를 작전에 활용하는 경우도 있다. 해안가에 설치되는 조기경보레이더는 대함의 최대탐지거리를 고려하여 높은 고도에 위치한 사이트에 철탁을 설치하고 철탁에 안테나를 탑재한다[1]. 이 경우, 비용저감 및 정비성을 고려하여 파라볼릭 안테나 기반의 2차원 레이더를 채택하였다. 그리고 본 논문에서 검토한 2차원 레이더의 빔패턴은 그 목적에 따라 저고도 영역의 빔 커버리지를 갖도록 오프셋 파라볼릭(Offset-Parabolic) 형태의 CSC² 패턴으로 설계되었다[2, 6].

파라볼릭 안테나 기반의 레이더는 물리적인 반사판과 급전기 설계를 통하여 빔패턴이 확정된다[3-4]. 반사판 및 급전기 설계에 따라 고정된 빔패턴을 사용하므로, 사이트별 환경 및 특성에 따라 빔패턴을 최적화할 수 없다.

높은 고도의 사이트에 레이더를 설치할 경우 대함 표적이 근거리로 올수록 고각 빔패턴의 하단을 맞으며, 빔 하단으로 갈수록 반사판의 가공 정밀도와 급전기의 초점 거리 조정과 같은 제조상의 오차에 의해 유효 빔폭이 넓어지는 경향이 있다.

그로 인해 대함표적이 가까워짐에 따라 1개 표적이 2개 표적으로 전시되는 표적 분리 현상이 나타났다. 이러한 현상은 레이더 운용자에게 혼란을 초래하여 작전 운용에도 영향을 미친다.

본 논문에서는 표적 분리 탐지에 대한 현상을 분석하여 빔패턴과 연관성 분석을 통해 원인을 파악하였다. 분석된 원인을 통해 소프트웨어적인 유효 빔폭을 제한하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에 대하여 MATLAB을 이용해 M&S(Modeling and Simulation)를 통한 개선 수준을 확인하고, 실 레이더 적용을 통한 개선 여부를 확인하였다.

2. 본론

2.1. 현상 분석

2.1.1. 근거리 표적 분리 현상

높은 고도의 사이트에 설치된 조기경보레이더에서 레이더유효단면적(RCS)이 큰 표적 1개를 2개의 표적으로 분리 탐지하는 현상이 발생하였다. Figure 1은 200 스캔 동안 누적한 탐지 데이터이다. 1 스캔은 안테나가 방위각 방향으로 한 바퀴 회전했을 때의 단위이며, 200 스캔은 표적을 200회 탐지했다는 의미와 같다. 파란색 네모로 표시한 부분이 분리 탐지된 대함표적들이다. 선박자동식별시스템(AIS)과의 교차 확인을 통해 실제로는 1개의 대함표적을 확인하였다[5].

표적분리현상은 여러 이유로 발생할 수 있으며, 이론적으로 많은 연구가 이루어졌다[6-8]. 그 해결 방법 또한 레이더의 종류, 안테나 형태, 탐지 알고리즘 등 특성별로 다양하다. 하지만 본 레이더에서의 표적분리현상은 아래와 같은 3가지 특징을 가지고 있다. 방위각 방향으로 분리되고, 근거리에서만 발생되며, 대함 표적에서만 발생한다는 점이다.

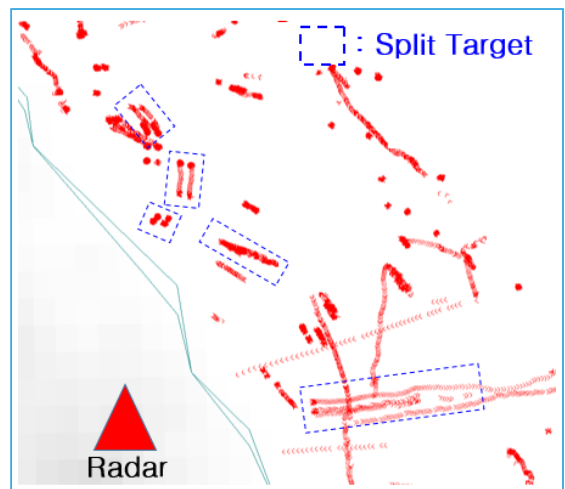


Figure 1. Target Split Case for 200 Scan

표적 분리 현상이 발생한 대함 표적 중 거리방향으로 멀어지는 표적을 확인 시, Figure 2와 같이 근거리에서 2개로 분리되던 표적이 원거리로 나가면서 1개 표적으로 전이되었다. 동일한 대함표적이어도 근거리에 위치한 경우에만 표적 분리 탐지 현상이 발생함을 확인하였다.

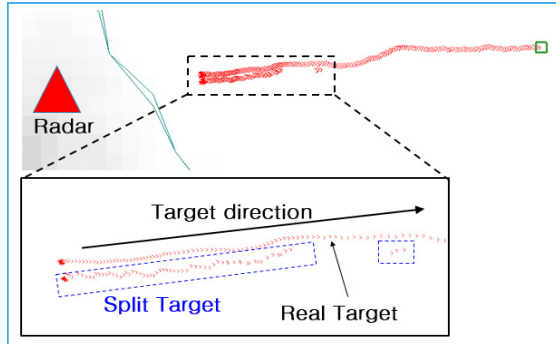


Figure 2. Target Split Case

2.1.2. 거리에 따른 표적 파워 분포

레이더는 방위각 방향으로 360° 회전을 하면서 다수의 레이더 빔을 방사하여 수신한 신호로 표적을 탐지한다. 빔폭과 표적의 크기, 회전속도 등의 요인에 의해 1개의 표적에 맞고 오는 수신신호는 Figure 3과 같이 파워분포를 가진 여러 수신신호로 형성된다. 빔마다 맞고 오는 수신신호 단위를 Hit라고 하며, 파워분포를 가진 여러 Hit를 하나의 Plot으로 융합하는 과정을 클러스터링이라 한다. Plot은 이후 데이터 처리과정과 추적필터를 거쳐 Track으로 정의되어 레이더 화면에 전시된다.

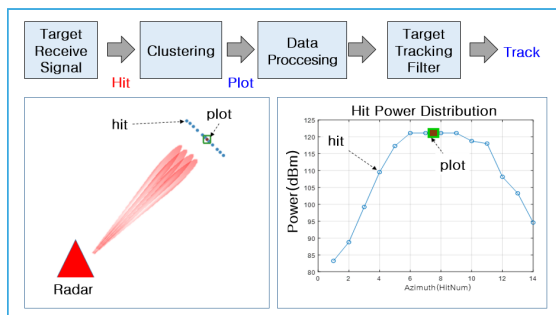


Figure 3. Target Detection & Clustering

동일한 대함표적에서의 근거리 Hit 파워분포와 원거리 Hit 파워분포 차이는 Figure 4와 같다. Figure 4의 상측 그래프는 원거리에 위치한 표적의 파워 분포이고 하측 그래프는 표적 분리 현상이 발생한 근거리에 위치한 표적의 파워분포이다. 근거리 파워분포가 원거리 파워분포 대비 방위각 방향으로 넓게 퍼졌다. 방위각 방향으로 넓게 퍼질 때, Plot이 2개 생성되어 표적이 분리되었다. 정상적으로 탐지 시에는 파워가 최대인 Hit에 Plot이 생성되지만, 표적 분리 탐지 시에는 파워가 최대인 Hit와 더불어 파워가 비교적 낮은 측면에도 Plot이 생성되었음을 볼 수 있다.

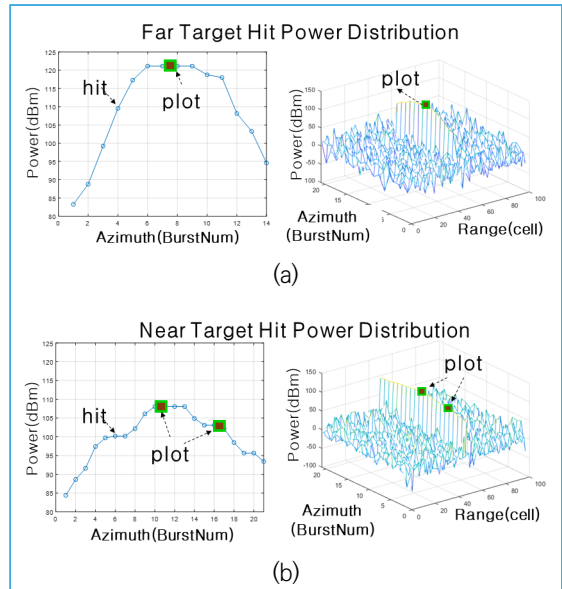


Figure 4. (a) Far Target Hit Power Distribution
(b) Near Target Hit Power Distribution

Figure 5는 거리 방향으로 멀어지는 표적의 거리별 Hit 분포이다. 원거리에서는 거리별 Hit 개수가 크게 차이나지 않았으나, 약 12km부터 Hit 개수가 급격하게 증가하였고, 표적이 분리된 거리와 일치하였다. 근거리 표적 분리 현상과 Hit 개수 증가 간 연관성이 있을 것으로 판단하여, 근거리에서 Hit 개수가 증가하는 원인을 분석하고 Hit 개수를 원거리와 비슷한 수준으로 유지하는 방안을 연구하였다.

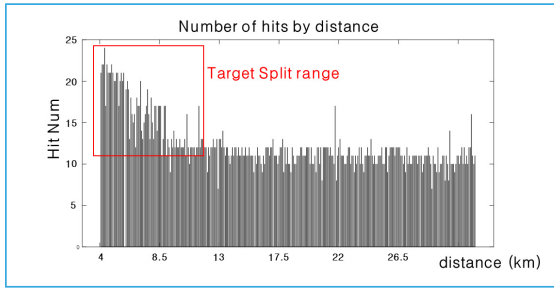


Figure 5. Number of Hits by Distance

2.2. 근거리 표적 분리 현상 원인 분석

2.2.1. 파라볼릭 안테나의 빔패턴 특성

파라볼릭 안테나 기반의 레이더는 물리적 반사판과 급전기의 설계를 통해 빔패턴이 확정된다. 제작 후 시험 공장에서 빔패턴을 측정하며, 측정 후 안테나의 방위각 빔패턴과 고각 빔패턴을 확인할 수 있다.

Figure 6은 근거리 표적 분리 현상이 나오는 레이더의 안테나 방위각/고각 안테나 빔패턴이다. 방위각 방향으로 회전하므로 방위각 빔패턴은 정밀한 표적 분리를 위하여 빔폭을 좁게 설계하며, 고각 빔패턴은 탐지 영역을 확보하기 위해 넓은 팬빔으로 설계한다.

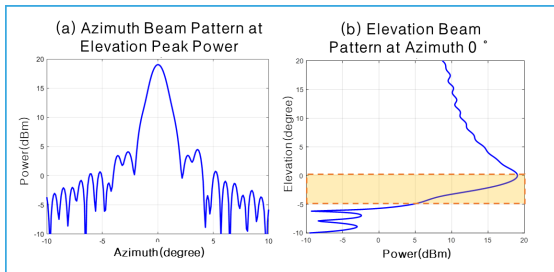


Figure 6. (a) Antenna Azimuth Beam Pattern
(b) Antenna Elevation Beam Pattern

팬빔을 사용하는 레이더는 최대 이득을 갖는 빔피크 지점과 이득이 잘 유지되는 지점이 관심표적을 향하도록 빔을 설계한다. 해안가에 설치되는 조기경보레이더는 대공표적과 대함표적을 모두 탐지해야 한다. 빔피크 지점을 기준으로 고각빔 상단은 대공표적을 탐지하는 데 사용하고, 고각빔 하단은 대함표적

을 탐지하는 데 주로 사용한다. 고각빔의 하단은 이득이 급격하게 떨어지는 지점으로, 신호처리 시 이득 감소값을 보상해 주도록 설계되어 있다. 따라서 이득 감소 영향 외에 고각빔 하단의 다른 특성으로 인해 표적 분리 현상이 발생하는지 확인할 필요가 있다.

2.2.2. 레이더와 표적 간 시선각 변화

조기경보레이더는 고지대에 고정형으로 설치되어 대공표적 및 대함표적을 탐지한다. 해수면에 위치한 대함표적의 경우, 표적의 고도가 해수면으로 고정되므로 거리에 따라 시선각이 변한다. Figure 7은 대함표적이 거리에 따라 시선각이 변하는 것을 도식화한 그림이다.

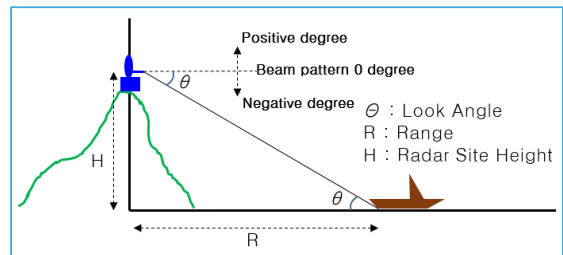


Figure 7. Relation between Distance, Altitude & Look Angle

시선각과 수평거리, 설치고도 사이에는 다음 수식 (1)과 같은 관계를 가진다.

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{H}{R}\right) \quad (1)$$

θ : Look angle (degree)

H : Radar installation altitude (m)

R : Target range (m)

시선각은 빔이 표적에 맞는 고각 빔패턴의 각도를 의미한다. 고각 빔패턴 기준으로 θ 는 항상 음의 값을 가지며, R 이 작아질수록 θ 의 절댓값은 커진다. 설치고도가 200m일 때, 표적과의 거리 0~50km 시선각은 Figure 8과 같다. 원거리에서는 시선각이 $0^\circ \sim$

-1° 분포를 갖지만, 근거리에서는 -1° ~ -5° 분포를 가지며 거리에 따른 시선각이 급격하게 증가한다.

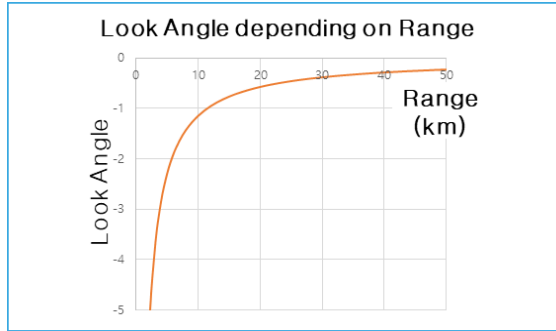


Figure 8. Look Angle depending on Range

시선각은 고각 빔패턴에서 빔이 대함표적에 맞는 위치를 의미한다. 즉, 조기경보레이더는 원거리 표적에 대해서는 수신 빔 고각 패턴의 0° ~ -1° 방향으로 수신한다. 반면 표적이 근거리로 근접할 경우, -1° ~ -5° 방향으로 수신한다.

2.2.3. 거리에 따른 방위각 빔폭 변화

Figure 9는 고각에 따른 방위각 패턴의 변화이다. 시선각이 커질수록 안테나 주엽의 이득이 줄어들고 빔폭이 증가하는 것을 볼 수 있다.

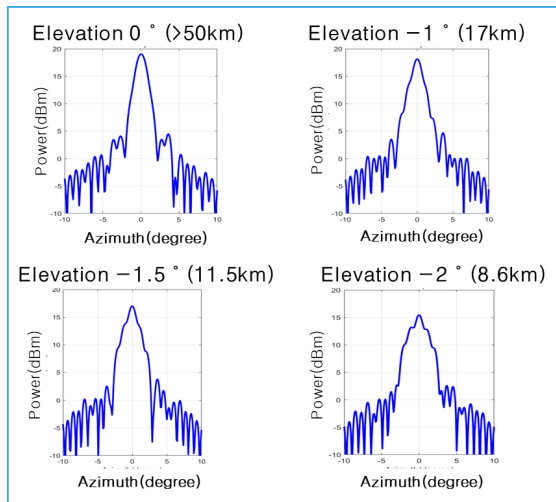


Figure 9. Azimuth Beam Pattern for each Elevation Degree

Figure 10은 고각의 변화에 따른 방위각 15dB 빔폭이다. 여기서 두 가지를 알 수 있다. 첫 번째는 0° 이하 시선각에서는 빔폭이 급격하게 넓어진다는 점이다. 대공 표적에 사용하는 고각 범위에서는 방위각 빔폭의 변화가 적다. 하지만 대함표적에 사용하는 고각 범위에서는 방위각 빔폭이 급격하게 증가하여 표적 신호처리 시 빔폭의 변화를 고려해야 한다.

두 번째는 시선각 0° 이하의 15dB 빔폭은 선형으로 근사가 가능하다는 점이다. Figure 10의 우측 그림은 대함표적 탐지 영역에서의 빔패턴이다. 빔패턴 데이터를 갖고 있다면, 최소제곱법을 이용한 선형회귀를 통해 기울기 k를 얻을 수 있다.[9]

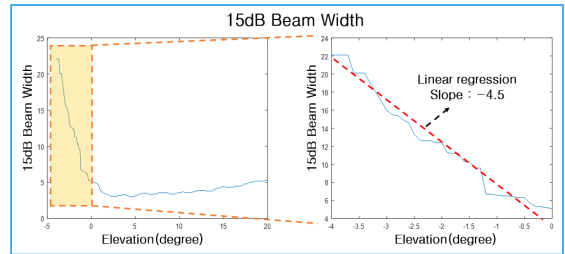


Figure 10. 15dB Beamwidth Graph

$$15dB\text{Beamwidth} = k \times \theta + BW_{peak}, \theta \leq 0 \quad (2)$$

θ : Look angle (degree),

k : Beamwidth Slope

BW_{peak} : Peak Power Beamwidth (@ 0°)

수식 (1)을 이용하여 15dB 빔폭을 거리 R에 관한 수식으로 치환하면,

$$15dB\text{Beamwidth} = -k \times \tan^{-1}\left(\frac{H}{R}\right) + BW_{peak} \quad (3)$$

사이트에 설치된 1개의 레이더는 고정된 빔패턴에 의해 k와 BW_{peak} 값이 상수로 정의된다. 레이더 설치 고도 H는 설치 시 고정값이므로, 15dB 빔폭은 거리 역수의 아크탄젠트값과 비례하는 관계를 가진다.

표적 분리 현상이 발생한 조기경보레이다의 안테나 빔패턴, 설치 고도, 안테나 최대 이득값을 수식 (3)에 대입하니, 표적 분리 현상이 발생하는 거리는 BW_{peak} 대비 빔폭이 2배 이상 되는 지점에서 나타났다. 유효 빔폭이 커져 Hit 분포가 넓어지고, 분포 범위가 2배 이상 되었을 때 표적이 2개로 분리되었다.

2.3. 개선 방안

2.3.1. 유효 빔폭 임계치 알고리즘 적용

Hit 분포 퍼짐에 의해 발생한 표적 분리 현상은 다양한 방법으로 현상을 완화할 수 있다. CFAR (Constant False Alarm Rate) 처리 시 거리별 레벨을 조정하여 확률적으로 필터링을 조정할 수도 있고, 클러스터링 범위를 조정하여 넓게 분포된 Hit에서도 하나의 Plot만 생성할 수도 있다. 하지만 이번 케이스의 경우 시선각에 따른 방향각 빔폭이 넓어지는 게 원인이라는 점, 설치 사이트 고도에 유연하게 조정 가능한 파라미터 설정이 필요하다는 점에서 유효 빔폭을 제한하는 방법을 고안하였다. 유효 빔폭이 커져 Hit 분포가 넓어졌으므로, 유효 빔폭을 줄이면 Hit 분포를 제한할 수 있다. 하지만 파라볼릭 안테나는 빔패턴이 고정이므로 빔폭을 조정할 수 없다.

이러한 물리적 한계를 극복하기 위해 유효 빔폭 임계치를 두어 소프트웨어적으로 빔폭을 제한하는 방안을 제안하였다. 표적 수신신호에서 Hit를 검출하고 유효 빔폭 이내인지 확인 후 클러스터링을 수행하도록 절차를 추가하였다. 이를 위해 유효 빔폭의 범위 임계치를 두고, 해당 임계값보다 낮은 신호는 제거하여 유효 빔폭을 정의하였다. 이때 임계치는 안테나 이득 대비 상댓값으로 정의한다. Figure 11은 신호처리 과정에서 유효 빔폭 임계치 알고리즘이 적용된 위치이다. Hit가 클러스터링 되기 전에 알고리즘을 추가하여 제한된 Hit가 클러스터링 되도록 하였다. 본 조기경보레이다에서는 15dB 빔폭 사용하는 것과 같은 효과를 보기 위해, 피크치 대비 15dB 떨어진 지점을 유효 빔폭으로 정의하였다.

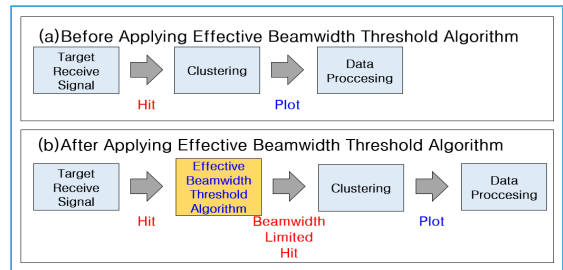


Figure 11. Signal Process (a)before & (b)after Effective Beamwidth Threshold Algorithm

Figure 12는 고각 0°에서 15dB 임계치를 적용했을 때의 유효 빔폭을 도식화한 그림이다. 약 4°의 빔폭을 신호처리에 사용하고 부엽 및 4° 이상의 안테나 주엽은 신호처리에 사용하지 않도록 설정하였다.

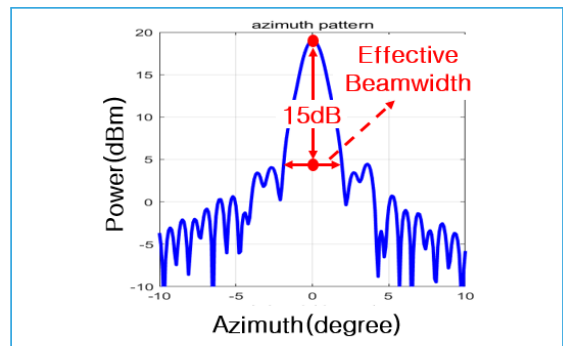


Figure 12. Effective Beamwidth when Applying 15dB threshold at 0 degrees

하지만 Figure 9와 수식 (3)과 같이 시선각이 클수록 안테나 주엽의 빔폭이 커지므로, 15dB 임계치를 모든 거리에 대해 적용하면 근거리에서 빔폭이 커지게 되어 유효 빔폭을 적용하는 의미가 없다. 이를 위해 모든 고각에서 BW_{peak} 빔폭을 갖도록 하는 임계치를 수식으로 정의하였다.

$$\text{유효빔폭 임계치}(EBW_{th}) = 15 + k \times \tan^{-1}\left(\frac{H}{R}\right) \quad (4)$$

수식 (4)에 따라 유효 빔폭 임계치를 적용하였을 때, 거리 및 고도별 유효 빔폭 임계치는 Figure 13과 같다. Figure 13(a)와 같이 고도가 낮을수록 동일

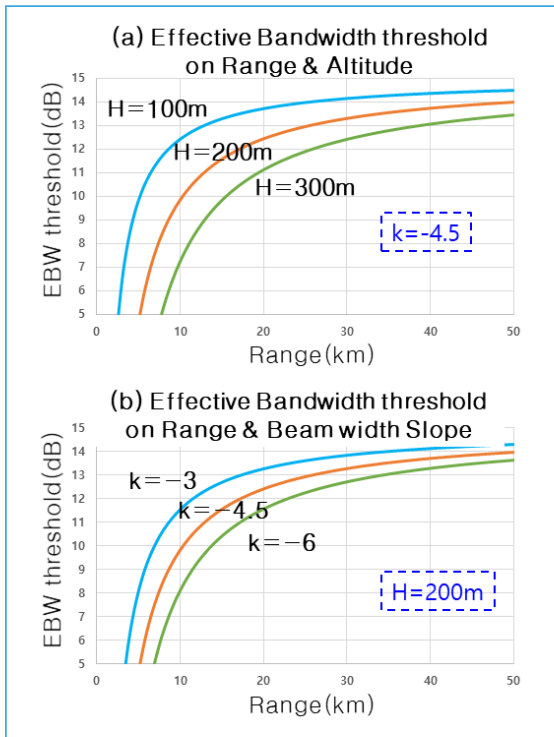


Figure 13. Effective Beamwidth threshold
(a) on Range & Altitude
(b) on Range & Beamwidth Slope

거리에서 시선각이 작으므로 임계치를 높이 가져갈 수 있다. 고도가 높으면 완만한 곡선을 그리는 반면에 고도가 낮으면 특정 거리에서 급격하게 임계치가 낮아진다. Figure 13(b)와 같이 안테나 특성값인 빔폭 기울기에 따른 빔폭 임계치 변화도 고도에 따른 변화와 유사한 경향을 가진다. 단, 수식 (3)에서 고도는 탄젠트 역함수 내의 변수이지만 빔폭 기울기는 곱 형태로 존재하므로, 고도에 따른 변화가 더 크다.

유효 빔폭 임계치 알고리즘을 적용하여도 표적 분리 현상 완화가 불가능한 임계 거리가 존재한다. 이를 대함표적 최소탐지거리로 정의하면, 설치 사이트별 대함 표적 최소탐지거리를 제시하는 데에도 사용할 수 있다.

2.3.2. M&S 적용 결과

기존 탐지 데이터에 유효 빔폭 임계치 알고리즘을 적용하여 표적 분리 현상이 완화되는지 시뮬레이션

으로 확인하였다. 표적 분리 현상이 있던 근거리 표적 확인 시, Figure 14와 같이 유효 빔폭 임계치보다 낮은 신호가 제거되며, 적절한 개수의 Hit 분포를 갖게 되어 Plot이 1개만 생성되었다. Plot은 최대 파워를 갖는 Hit 지점에 생성되었으며, 파워가 낮은 Hit에 생성되던 허위 Plot이 제거되었음을 볼 수 있다.

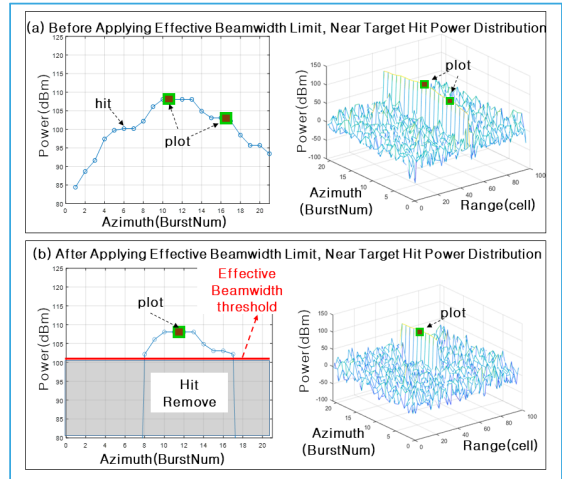


Figure 14. Near Target Hit Power Distribution
(a) before & (b) after Applying Effective Beamwidth Threshold

Figure 5에서 확인한 거리에 따른 Hit 분포가 유효 빔폭 임계치 알고리즘 적용 후 어떻게 바뀌는지 시뮬레이션한 결과는 Figure 15와 같다. 적용 전에는 거리에 따른 Hit 수가 근거리에서 급격하게 증가였지만, 유효 빔폭 임계치 알고리즘 적용 시 근거리에서도 원거리와 유사한 Hit 수를 가졌다.

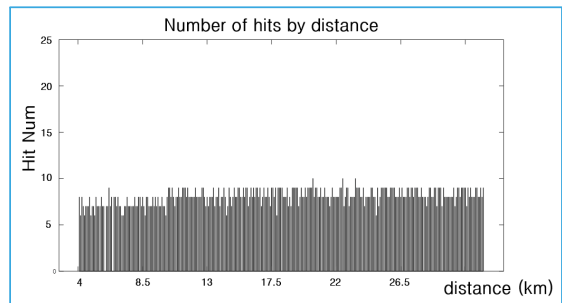


Figure 15. Number of Hits by Distance after Applying Effective Beamwidth Threshold Algorithm

기존 항적 데이터에 유효 빔폭 임계치 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 시, Figure 16과 같이 전 구간에서 대함표적 분리 현상이 사라졌다. 넓은 Hit 분포에 의해 2개 Plot으로 갈라졌던 근거리 대함표적이 Hit 분포가 일정하게 유지됨으로 인해 근거리에서도 분리되지 않았다.

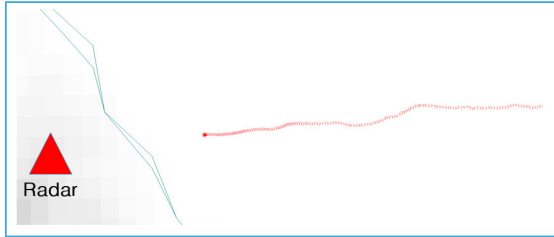


Figure 16. Target Split Removed after Applying Effective Beamwidth Threshold Algorithm

2.3.3. 적용 후 실제 운용 결과

유효 빔폭 임계치 알고리즘을 적용한 소프트웨어를 레이더 시스템에 적용 후, RCS가 20m^2 인 2개의 대함 표적을 여러 방향으로 진입/이탈하며 근거리 표적 분리 현상이 사라졌는지 확인하였다. Figure 17은 유사 방위에서 진입/이탈을 반복한 대함표적의 누적항적이다. 그리고 Figure 18은 넓은 방위각 범위에서 진입/이탈/횡이동을 수행한 대함표적의 누적항적이다.

확인 결과, 전 구간에서 대함표적이 갈라지는 현상이 사라졌음을 확인하였다. 또한 Plot 분포가 방위정확도 규격 이내로 들어옴을 확인하여, 실 표적 Plot은 유지되고 허위 Plot이 사라졌음을 알 수 있었다.

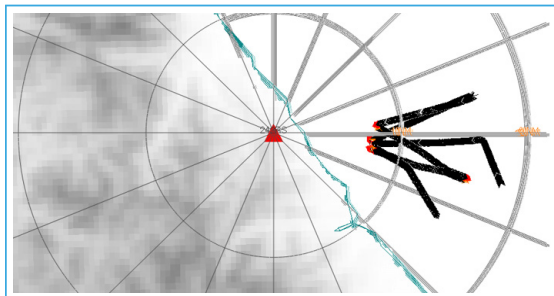


Figure 17. Target Split Removed Case1 : Repeated in&out movement at similar azimuths

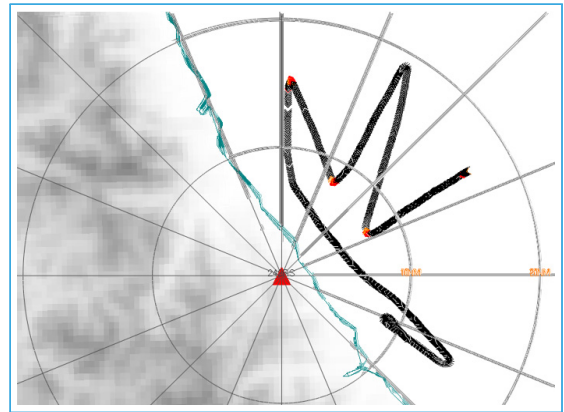


Figure 18. Target Split Removed Case2 : In&out and lateral movement at wide azimuths

3. 결론

본 논문에서는 파라볼릭 안테나 기반 조기경보레이다에서 발생한 근거리 해상표적 분리 현상을 완화하기 위한 기법을 알아보았다. 시선각에 의해 고각 빔패턴의 하단을 사용하게 되고, 이로 인해 넓어지는 빔폭을 제한해 주어야 했다. 시선각에 따른 거리별 유효 빔폭 임계치 알고리즘을 적용하여, 거리에 따른 빔폭 임계치를 지정해 Hit가 방위각 방향으로 퍼지는 것을 완화하였다. 그로 인해 표적 분리 현상이 사라짐을 시뮬레이션을 통해 확인하고, 실제 적용하여 표적 분리 현상이 사라졌음을 확인할 수 있었다. 표적 분리 구간에서는 표적을 정확히 인지할 수 없으므로 작전 시 운용할 수 없는 영역으로 지정이 된다. 해당 기법을 적용하여, 표적이 분리되는 거리를 획기적으로 줄였고 근거리 작전 영역을 넓힐 수 있었다. 본 논문에 적용한 기법은 파라볼릭 안테나 기반의 유사 레이더에도 적용하여 근거리 탐지 성능을 증대시킬 것으로 기대한다.

참고문헌

- 1 M. H. Park, W. J. Jeon, H. S. Kim and S. W. Kwon, "Research on Variation of Detection Performance according to Altitude of Radar by Using Modeling and

- Simulation Method”, *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 30(12), pp. 964–971, 2019.
- 2 Radartutorial.eu, <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Cosecant%20Squared%20Pattern.en.html>, 2024, 3, 13
 - 3 ALAN W.RUDGE, and NURDIN A.ADAIA, “Offset-Parabolic-Reflector-Antennas: A Review”, *Proceedings of the IEEE*, 66(12), pp. 1592–1618, 1978.
 - 4 J.J.LEE, LEONARD I.PARAD and R.S.CHU, “A Shaped Offset_Fed Dual-Reflector Antenna”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 27(2), pp. 165–171, 1979.
 - 5 J.JEONG, T.KIM and C.S.YANG, “A study on real-time ship monitoring system constuction using AIS”, *The Korean Society for Marine Enviroment and Energy*, pp. 38, 2015.
 - 6 Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems Third Edition*, McGraw-Hill, 2000.
 - 7 M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing Second Edition*, McGraw-Hill, 2014.
 - 8 J. V. DiFranco, W. L. Rubin, *Radar Detection*, Artech House, 2004.
 - 9 Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regression, 2024, 4, 28

현장 적용 결과에 기반한 국방품질경영체제 정량적 평가 모델의 개선 방안

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

Improvement in Quantitative Evaluation Model of Defense Quality Management System Based on Field Application Results

박종만, Jongman Park

국방기술품질원, 품질연구본부,
선임연구원
Senior Researcher, Quality
Research Headquarters,
Defense Agency for
Technology and Quality

김상부†, Sangboo Kim

창원대학교, 산업시스템공학과, 교수
Professor, Department of
Industrial and Systems
Engineering, Changwon
National University

배인화, Inhwa Bae

창원대학교, 산업시스템공학과
Department of Industrial and
Systems Engineering,
Changwon National University

정원찬, Wonchan Jeong

국방기술품질원, 품질연구본부,
선임연구원
Senior Researcher, Quality
Research Headquarters,
Defense Agency for
Technology and Quality

Abstract

A Defense Quality Management System(DQMS) is introduced to improve the quality assurance capability of defense industries and effectively conduct the government's quality assurance activities. However, to maintain the certification, many defense companies perform minimal activities, such as certification examinations and submission of corrective measures for nonconformity. In 2021, the Defense Agency for Technology and Quality developed a quantitative evaluation model for the DQMS to induce self-rescue efforts by companies and institutionalize them.

In this study, practical methods for improving the quantitative evaluation model of a DQMS are proposed based on field application results. The developed quantitative evaluation model is applied to 20 DQMS certified defense companies and the results are analyzed. The proposed practical improvement methods include reducing the number of evaluation items, designing documentation forms for preparing an audit, and imposing strict qualifications to the auditors.

The DQMS quantitative evaluation model is expected to be stably institutionalized, thereby improving the quality-management system of defense companies and the quality of their products.

keywords : Defense Quality Management System, Quantitative Evaluation Model, Field Application, Defense Industry

† Corresponding Author : Sangboo Kim

Tel : +82-055-213-3722, email : sbkim@cwnu.ac.kr

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

Received April 9th. 2024 Revised May 29th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

품질경영시스템은 고객의 신뢰 확보와 요구사항에 적합한 제품 또는 서비스를 일관성 있게 제공하기 위하여 도입되고 있으며, 이는 민간 부문뿐만 아니라 군수 부문에서도 마찬가지이다.

국방기술품질원은 1998년 방산 물자의 품질향상과 방산 업체의 경쟁력 강화를 위하여 ISO 9001 요구사항에 군수품 특성을 고려한 특수요구사항이 반영된 국방규격(KDS 0050-9000)을 수립하고 국방품질경영체제(Defense Quality Management System, DQMS)를 제정하였다[1].

DQMS는 1999년 1호 인증을 수여한 후 지금까지 총 196개 기업이 인증을 유지 중이며, 연도별 인증업체 추이는 Figure 1과 같다. 기업의 품질 수준 하락, 경영 환경변화 등의 이슈로 연간 평균 약 4개 기업이 인증 취소되었고, 약 12개 기업이 인증을 신규 취득하고 있다. 최근 9년간 총 101개 기업이 신규로 인증을 취득하고 있어, 2015년 이전 16년보다 더 많은 군수업체가 DQMS 인증에 관심을 가지고 참여하고 있다고 판단된다.

국방품질경영체제는 현재까지 DQMS 인증심사

활동 등을 통해 군수품 품질향상에 이바지해 왔지만, 대부분의 인증업체는 인증 취득 이후 최소한의 인증 유지 활동(심사 수검 및 부적합 시정조치)만을 진행함으로써 군수품 품질향상이라는 본연의 목적이 간과되는 경향을 보여주고 있다. 이에 부적합 및 관찰사항으로 제공되는 기존 심사 방식 결과와 더불어 새로운 정량적 평가를 적용함으로써 군수품 품질향상의 목적을 달성하는 데 부분적인 도움을 제공하고자 한다. 실제로 정량적 평가를 진행하는 경우, 정량적 평가 심사 결과로부터 자사의 품질 수준, 이전 심사 결과 대비 현재 품질경영시스템 수준 파악, 취약분야 및 비교우위를 갖는 프로세스 파악, 동종업체나 기업 규모에 따른 수준 파악 등을 쉽게 확인할 수 있으며 이를 통해 자사의 군수품 품질향상을 도모할 수 있을 것이다. 또한, DQMS 인증기관인 국방기술품질원은 정량적 평가 결과를 활용하여 우수 인증업체에 대해 사후 관리 심사 면제 혜택을 부여함으로써 기업 자구노력을 유도하면서 인증업체의 심사 부담을 줄이는 효과를 얻을 수 있다.

국방기술품질원은 2020년부터 민간 분야에서 운영 중인 품질시스템의 정량적 평가모델을 조사하여 기업의 품질경영체제 수준을 정량적으로 평가하는

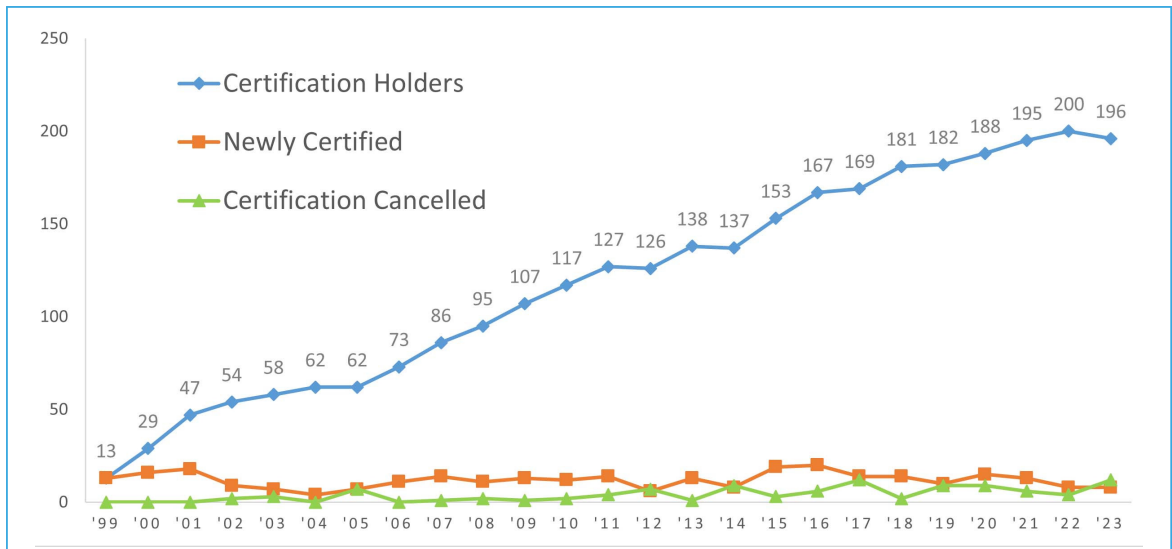


Figure 1. Trends of DQMS certification related numbers (1999-2023, Defense Agency for Quality Technology and Quality)

모델을 개발하였다[2]. 이 연구에서는 기존의 심사 방식(부적합 및 관찰 사항 도출) 대비 변화된 심사 방식인 정량적 평가제도의 시범 적용 및 평가를 통해 이 제도를 적용할 때 나타날 수 있는 문제점을 파악하고 개선 방안을 제안하고자 한다. 이를 통해 DQMS 정량적 평가모델의 안정적인 제도화로 이어지도록 하는 것이 이 연구의 주요 목적이다.

2장에서는 국방품질경영체제 정량적 평가모델을 소개하고, 3장에서는 현장 적용 과정과 적용 결과 및 결과에 대한 분석을 다루었다. 4장에서는 현장 적용 분석 결과에서 발견된 문제점들에 대해 설명하고, 이에 대한 해결 방안을 제시하였다.

2. 국방품질경영체제 정량적 평가모델

국방 분야 이외의 민간 분야에서는 이미 오래전부터 품질경영체제의 정량적 평가와 관련한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 수행된 대표적인 연구들은 다음과 같다.

Moon et al.[3]은 한국 국가 품질상의 효과를 측정하기 위한 방법론을 개발하는 연구로 MB 상 평가 모델, 선행연구, 설문 조사를 활용하여 79개 문항을 개발하였다. Kim et al.[4]은 말콤 볼드리지 평가 모델의 핵심가치와 마이클 포터의 가치사슬 모형을 기반으로 평가모델을 개발하고 총 83개 방산 업체의 자가 진단결과를 분석하여 개선점을 찾고 이를 최종 반영한 품질경영 수준 진단모델을 개발하였다. Kim & Kim[5] 등은 여러 국가의(미국, 유럽, 일본 등) 국가 품질상의 비교 및 분석을 통해 우리나라의 기업과 단체에 적합한 국가 품질상을 설계하는 것을 목적으로 핵심가치 설정, 고유의 기준 개발 및 가치 포인트 등에 관한 제안을 하였다. Park & Lim[6]은 세계 각국의 기업 경쟁력을 강화하기 위해 만든 국가 품질상, 특히, 말콤 볼드리지 국가 품질상의 평가 모델을 분석하였고, 이를 기반으로 기업의 품질경영체제를 발전시키기 위해 추진해야 하는 사안들을 제안하였다. 그리고 Park & Song[7]은 품질 경영상의 평가 기준이 기업의 경영 품질을 올바르게 측정할 수

있는지를 고찰하고, 미국의 말콤 볼드리지 국가 품질상의 운영조직, 자문조직, 심사위원회 등의 요소에 관해 우리나라의 품질경영상과 비교 분석하고 국가 품질상의 위상 확립과 경쟁력 강화를 위한 변화를 모색하였다. Cho et al.[8]은 우리나라를 비롯한 여러 나라의 인증기관 평가 사례 비교를 통해 우리나라에 적용이 가능한 평가모델을 개발하였다. 개발한 모델은 인증기관의 인증 서비스 활동에 대한 주요 지표를 다루고 있으며 이를 실제 현장에 적용하였다. Wilson & Collier[9]는 자동차 산업을 대상으로 말콤 볼드리지 국가 품질상의 기준과 성과 간의 인과관계를 분석하였으며 분석 결과 영향을 미치는 요소로 리더십, 프로세스 관리, 정보 분석 등을 확인하였다. Ghosh et al.[10]은 말콤 볼드리지 국가 품질상에서 암시하는 전략적 품질 계획과 운영적 품질 계획 간의 관계에 대해 분석하였다. 분석 결과, 전략적 품질 계획을 바탕으로 운영적 품질 계획을 주도하며 이를 바탕으로 긍정적 비즈니스 결과, 고객 및 시장 집중, 인적 자원 관리가 가능함을 확인하였다.

민간 부문의 품질경영체제에 대한 정량적 평가 모델과 마찬가지로 국방품질경영체제의 정량적 평가모델은 DQMS 인증심사를 통해 국방규격(KDS 0050-9000) 요구사항의 만족을 부적합 및 관찰사항으로 판단하는 것이 아니라, 기업의 품질 및 경영 운영 수준을 평가하여 정량화된 결과 도출의 필요에 따라 개발되었다.[2]

정량적 평가모델은 기업의 품질경영시스템 수준을 파악하기 위해 성숙도 수준 평가(600점)와 운영성과 평가(400점)를 구분하여 1000점 만점으로 평가한다.

성숙도 수준 평가는 ISO 9004:2018(품질경영-지속적 성공을 달성하기 위한 가이드)에 제시된 성숙도 수준 자체평가 항목을 기본으로 하여 평가 문항이 구성되었다. 조직상황(1항)부터 개선(7항)에 이르는 대분류 7개와 그 하위에 구성된 중분류 25개로 이루어져 있으며, 각 중분류를 중요도에 따라 수준을 구분하여 필수 5항목(프로세스 정의, 상호작용, 실행 결과, 실행수준/범위, 검토 및 개선)에서 제품 관련 성과를 확인할 수 있는 7항목(성과지표, 효율성 지

표, 리스크/기회, 목표달성계획, 모니터링/측정/분석, 개선 실증, 경쟁사 비교)을 추가하여, 최대 12항목으로 평가 Code를 구분하여 세분화하였다. 이에 중분류 25항목에는 각각 5항목으로 구성된 21개의 중분류와 12항목으로 구성된 4개의 중분류로 나누어지며, 세부 항목별 평가 내용은 Table 1과 같다. 성숙도 수준 평가는 총 153항목의 평가로 600점의 점수가 부여된다.

운영성과 평가는 산업 분야에서 널리 적용되고 있는 성과지표에 기반하고 있으며, 단순 수행 여부 확인에 그치지 않고, 평가의 변별력을 높이기 위해 기

업의 수치화된 성과지표를 적용하였다. 특히, 지표의 수집 중요성이 고려된 필수지표와 선택 지표로 구분하였으며, 제품 설계의 책임이 없는 조직은 설계 및 개발 관련 지표가 해당하지 않으므로 이에 관한 내용을 평가에 제외될 수 있도록 했다. 이에 성과지표에서 “선택”으로 구분되며, 선택 지표를 제출하면, 가점을 부여토록 하여 반드시 갖춰야 할 지표와 불필요한 지표의 구분할 수 있게 하였다.

성숙도 수준 평가와 운영성과 평가의 합산점수는 Table 2의 점수 분포에 따라 5등급(860점 이상, 매우 우수), 4등급(859점~720점, 우수), 3등급(719

Table 1. Maturity evaluation items and contents [2]

Phase	Evaluation items	Evaluation Details
Plan	Process definition	√ Is the process/activity defined?
	Interaction	√ Is the process sequence/interaction systematic?
	Performance Indicators	√ Is there a performance indicator for monitoring and measuring processes/activities?
	Efficiency Indicator	√ Is there a performance indicator to monitor whether the process/activity is efficient?
	Risks/Opportunities	√ Are the risks and opportunities related to the work determined? √ Is there an action plan to address risks/opportunities?
	Goal achievement plan	√ Is there an action plan for achieving the goal?
Do	Results of execution	√ Is there an execution result?
	Execution Level/Range	√ Is there a job that runs at a level that exceeds the requirements? √ Does scope consider stakeholders as well as customers?
Check /Action	Monitoring/Measuring/analysis	√ Do you monitor, measure, and analyze activity outcomes?
	Review and Improve	√ Review and improve performance indicators and performance? √ Are the results of the action linked to improvements in the system/process/procedure?
Improvement	Demonstration of improvement	√ Does execution performance demonstrate improvement?
	Comparison of competitors	√ What is the level of performance compared to competitors?

Table 2. Rating table of quantitative evaluation model [2]

Level \ Category	Level 5 (Excellent)	Level 4 (Good)	Level 3 (Neutral)	Level 2 (Not bad)	Level 1 (Bad)
Maturity	520 & above	519 ~ 440	439 ~ 360	359 ~ 280	280 & under
Operational Performance	340 & above	339 ~ 280	279 ~ 220	219 ~ 160	160 & under
Total	860 & above	859 ~ 720	719 ~ 580	579 ~ 440	440 & under

점~580점, 만족), 2등급(579점~440점, 미흡), 1등급(440점 미만, 부족)으로 구성된다. DQMS 인증기업의 경우 최소 3등급 이상을 목표로 하고, 4등급 이상일 경우 인증기업에 혜택을 부여함으로써 기업 자구노력을 독려하도록 설계되었다.

3. 국방품질경영체제의 현장 적용 및 결과 분석

3.1. 현장 적용 평가 설계

성숙도와 운영성과 평가로 이뤄지는 DQMS의 정량적 평가모델의 현장 적용 가능성 및 개선점을 확인하기 위해 시범적으로 현장 적용 평가를 수행하였다. 현장 적용 평가를 위해 DQMS 인증기업 중 약 10%에 해당하는 20개사를 무작위로 선정하여, 2개

월('21.09.01.~'21.10.30.) 동안 별도로 구성된 정량적 평가 심사원이 정량적 평가모델을 활용하여 인증기업을 평가하였다. 정량적 평가의 현장 적용 평가 수행에 참여하는 심사원들은 국방 품질 분야에서 10년 이상의 경력과 품질경영시스템(ISO 9001) 심사원 자격을 보유하고 DQMS 인증심사 심사원으로서 심사에 참여한 경험이 있는 인원으로 선정하였다. 아울러 정량적 평가의 일관성을 기하기 위하여 총 3차례에 걸쳐 평가 기준 검토 및 모의평가를 진행하는 워크숍을 개최하였다.

3.2. 현장 적용 평가 결과 및 분석

DQMS 인증기업 중 현장 적용 평가를 수행한 20개사의 정량적 평가모델에 따른 심사 적용 결과는 Table 3과 같다. 단, 기업의 명칭은 생략하였으며,

Table 3. Results of quantitative evaluation for 20 companies selected

No.	Company Name	Category of Business	Number of Employees	Company Size	Maturity Level	Operational Performance	Total Score
1	A	machinery/metal	408	Medium	327.7	292.0	619.7
2	B	electrical/electronic	115	Small	373.8	394.1	767.9
3	C	electrical/electronic	84	Small	342.7	345.1	687.9
4	D	machinery/metal	57	Small	363.9	287.9	651.8
5	E	electrical/electronic	16	Small	288.0	289.0	577.0
6	F	food	82	Small	330.0	323.6	653.6
7	G	machinery/metal	38	Small	333.3	263.5	596.8
8	H	chemical	135	Small	346.8	330.0	676.8
9	I	chemical	937	Medium	360.1	301.0	661.1
10	J	machinery/metal	149	Small	338.7	351.3	690.0
11	K	electrical/electronic	99	Small	362.8	272.5	635.3
12	L	food	442	Medium	302.9	306.3	609.2
13	M	electrical/electronic	125	Small	358.0	268.8	626.7
14	N	machinery/metal	125	Small	331.4	263.5	594.9
15	O	electrical/electronic	219	Small	386.9	297.9	684.8
16	P	chemical	333	Medium	383.9	332.9	716.8
17	Q	machinery/metal	54	Small	314.2	336.8	651.0
18	R	machinery/metal	74	Small	387.3	315.0	702.3
19	S	electrical/electronic	57	Small	380.4	314.2	694.6
20	T	electrical/electronic	12	Small	339.7	N/A	339.7

Table 4. Summary of quantitative evaluation results of field application

Classification		Level 5 (Excellent)	Level 4 (Good)	Level 3 (Neutral)	Level 2 (Not bad)	Level 1 (Bad)	Average
Maturity	Criteria	520 & above	519~440	439~360	359~280	280 & under	347.6
	Company Number	0	0	8	12	0	-
Operational Performance	Criteria	340 & above	339~280	279~220	219~160	160 & under	294.3
	Company Number	3	12	4	0	0	-
Total Score	Criteria	860 & above	859~720	719~580	579~440	440 & under	641.9
	Company Number	0	1	17	1	0	-

기업 T의 경우 기업 내부 사정으로 운영성과 평가를 진행할 수 없었다. 인증기업 20개 사의 평가 결과를 성숙도, 운영성과, 종합결과의 범주로 정량적 평가 등급 부여에 따라 구분한 결과는 Table 4와 같다. 성숙도의 경우, 중간값인 3등급보다 한 단계 낮은 2등급(359점~280점)에 12개 사(60%)가 위치하면서 가장 높은 빈도를 보였고, 이와 반대로 운영성과의 경우 중간값인 3등급보다 한 단계 높은 4등급(339점~280점)에 가장 많은 12개 사(60%)가 분포하였다. 이 두 평가를 반영한 종합평가의 경우 중간값인 3등급(719점~580점)에 17개 사(85%)가 분포하여, 정량적 평가모델이 최초 설계한 만족 등급에 가장 많은 업체가 위치함을 확인할 수 있다.

업종별 정량적 평가 결과는 Figure 2와 같이 정리된다. 화학, 전기/전자, 기계/금속, 식품 순으로 점수가 높았으며, 이 중 화학업종의 경우 성숙도와 운영성과 모두 가장 높은 점수를 획득하였다. 식품업종의 경우 운영성과는 평균 이상 수준이었으나, 성숙도 평가에서 가장 낮은 점수를 받았고 종합평가에서도 가장 낮은 점수를 받았다. 이는 위험 물질을 다루는 군수 화학업체의 특성상 품질과 업무절차에 대한 관리가 타 업종 대비 철저히 이뤄지고 있고, 상대적으로 식품업체의 경우 제품에 대한 품질 활동 및 시스템 활동보다는 위생과 맛에 집중하는 업종별 차이라고 판단된다.

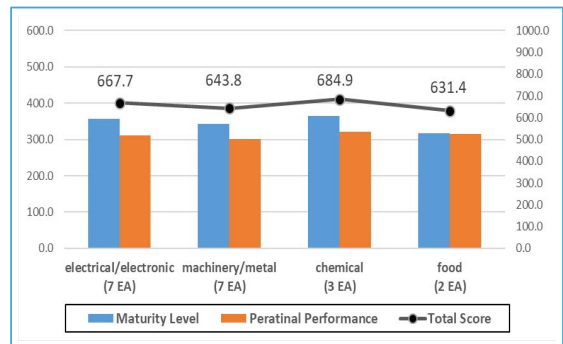


Figure 2. Quantitative evaluation scores by industry

기업의 규모별 품질경영시스템의 수준을 확인하기 위하여, 현장 적용 평가에 참여한 20개사를 종업원 300인 초과인 경우와 300인 이하인 경우로 구분하였고, 정량적 평가 결과를 분석한 그래프는 Figure 3과 같다. 이 결과는 성숙도, 운영성과 모두 종업원 300인 초과 기업의 점수가 높게 나타났지만, 그 차이가 1000점 만점에 20점(약 2%) 수준으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

정량평가에 참여한 심사원 간의 점수 분포의 차이는 Figure 4를 통해 확인해 볼 수 있다. 총 4명의 정량적 평가 심사원 중 심사원 D의 경우, 성숙도 평가 점수가 다른 심사원 대비 현저히 낮은 분포를 나타냈다. 각 심사원이 평가한 기업의 규모나 업종이 유사하게 배정되었음을 고려할 때 심사원의 주관적인

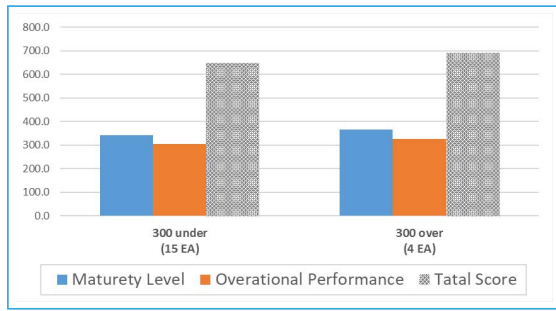


Figure 3. Quantitative evaluation scores by company size

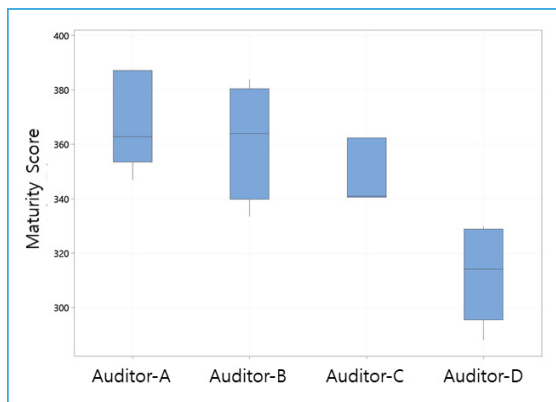


Figure 4. Box-plot of maturity assessment scores by auditors

평가 및 역량이 성숙도 평가에 영향을 미칠 가능성이 존재함을 알 수 있다.

3.3. 정량적 평가모델 및 적용의 문제점

DQMS 정량적 평가모델의 현장 적용 결과 분석 및 참여한 심사원과 인터뷰를 통해 정량적 평가모델의 개선 필요사항들을 확인하였다. 그중 개선이 우선 적용되어야 할 사항과 정량적 평가 결과의 신뢰성 및 객관성 확보에 필요한 사항을 개선 대상으로 선정하였다.

첫째, 성숙도 평가에 너무 많은 시간이 소요되어 성숙도 평가의 질적 저하가 우려되는 문제이다. 앞서 언급한 바와 같이 성숙도 수준 평가는 총 153항목을 1~5점으로 평가해야 하는데, 기존 인증심사와 더불어 진행되는 정량적 평가의 특성상 시간 제약이 많

아 153개의 항목을 모두 평가하는 것은 모든 항목의 정확한 평가에 지장을 줄 수 있다고 판단되었다.

둘째, 운영성과 평가에 있어 기업에서 관리되는 데이터와 평가 기준이 달라 평가시간이 많이 소요되고, 다양한 이유로 원자료(Raw Data)가 확보되지 않아 평가 결과에 신뢰성이 보장되지 않는 문제가 있었다. 예를 들면, 기업에서 관리 되지 않는 데이터가 제출 요청된다거나, 요구하는 자료가 아닌 유사 자료가 제출되는 경우 또는 제출된 자료의 신뢰성이 의심되는 사례 등이다.

셋째, 심사원 간의 평가 기준과 역량 차이로 인한 심사 결과의 객관성 확보 문제가 부각되었다. 현장 적용 평가를 위하여 심사원 선정 시 일정 수준의 자격과 경험을 보유한 심사원을 선정하고, 모의평가와 워크숍을 통해 정량적 평가의 이해를 높이는 노력을 진행하였으나, Figure 4의 심사원 D의 경우와 같이 현장 적용 평가 결과가 다른 심사원들과 크게 차이는 경우가 발생하였다.

4. 국방품질경영체제 정량적 평가모델 개선 방안

4.1. 성숙도 평가 관련 개선 방안

성숙도 평가에 너무 많은 시간이 소요되어 성숙도 평가의 질적 저하가 우려되는 문제는 DQMS 심사 간 발견된 요구사항별 부적합 데이터와 성숙도 평가 항목을 연계하여, 평가 결과에 영향을 미치지 않는 평가 항목을 제외함으로써 성숙도 평가의 시간을 줄이는 개선 방안을 고려하였다.

DQMS 심사는 심사규격(KDS 0050-9000)과 인증기업의 품질경영시스템 간의 차이를 부적합과 관찰사항으로 정리하여 인증기업에 통보한다. 이 중 부적합은 인증기업에 시정조치(시정 및 예방조치)를 요청하는 사안으로 기업의 품질경영시스템의 주요 문제점으로 식별된 내용이다.

최근 3년간의 DQMS 인증기업의 인증심사를 통

해 발견된 부적합은 Table 5와 같이 총 1,567개이다. 이 중 “8.5 생산 및 서비스 제공” 요구사항에서 241건으로 가장 많은 부적합이 발견되었고, 뒤이어 “7.1 자원”은 138건, “6.1 리스크와 기회를 다루는 조치” 135건 순으로 부적합이 많이 발견되었다. 반면에 “5.1 리더십과 의지표명”, “5.2 방침”, “8.6 제

품 및 서비스의 불출/출시(Release)” 요구사항은 최근 3년간 5건 미만의 부적합이 발견되지 않는 요구사항으로 확인되었다.

DQMS 심사규격의 내용과 성숙도 평가 항목을 비교하여, Table 5와 같이 정리하였다. 이를 통해, DQMS 심사규격 중 현저하게 부적합 발견이 적은

Table 5. Numbers of non-conformance report(2018~2021) and the related maturity evaluation item

Criteria of DQMS	Number of NCR	Criteria of Maturity Evaluation	Maturity Evaluation
4.1	36	1.1 Understanding the Organization and Its Context	○
4.2	33	1.2 Understanding the Needs and Expectations of Interested Parties	○
4.4	103	1.3 Quality Management System and Its Processes	○
5.1	1	2.1 Leadership and Commitment	×
5.2	2	2.2 Policy	×
5.3	6	2.3 Organizational Roles, Responsibilities, and Authorities	×
5.4	53	2.4 Ethical Management	○
6.1	135	3.1 Actions to Address Risks and Opportunities	○
6.2	54	3.2 Quality Objectives and Planning to Achieve Them	○
6.3			
7.1	138	4.1 Resources(Infrastructure, Work Environment)	○
7.2	101	4.2 Competency/Eligibility(People, Training)	○
7.3	8	4.3 Communication	×
7.4			
7.5	93	4.4 Documented Information	○
8.1	105	5.1 Operational Planning and Control	○
8.2	30	5.2 Requirements for Products and Services	○
8.3	25	5.3 Design and Development of Products and Services	○
8.4	76	5.4 Control of Externally Provided Processes	○
8.5	241	5.5 Production	○
8.6	2	5.6 Inspection & Test	×
8.7	21	5.7 Control of Nonconforming Outputs	×
9.1	70	6.1 Monitoring, Measurement, Analysis, and Evaluation	○
9.2	64	6.2 Internal Audit	○
9.3	53	6.3 Management Review	○
10.1	10	7.2 Continual Improvement	×
10.3			
10.2	107	7.1 Nonconformity and Corrective Action	○

성숙도 평가 항목을 식별할 수 있는데, 2.1 리더십 및 의지표명, 2.2. 방침, 2.3 역할, 책임 및 권한, 4.3 인식, 의사소통, 5.6 제품 및 서비스 불출, 5.7 부적합 출력의 관리, 7.2 지속적 개선 등 총 7개의 평가 항목이다.

이렇게 식별된 성숙도 평가 항목 7개는 다른 평가 항목과 비교하여 큰 문제점이 없거나, 심사를 통해 발견되기 어려운 항목, 또는 성숙도 평가에 있어 대부분 기업이 높은 점수를 받아 변별력이 없는 평가 항목으로 판단된다.

중분류 25개 항목, 총 153항목을 평가해야 했던 기존 성숙도 평가에서 식별된 7개 중분류 항목을 제외함으로써 총 35개(23%) 요구사항을 줄일 수 있다. 결론적으로 평가 기준이 153항목에서 불필요한 항목을 제외한 118항목으로 감소하게 되었고, 이를 통해 성숙도 평가에 너무 많은 시간이 소요되어 성숙도 평가의 질적 저하가 우려되는 문제가 해결될 수 있을 것이다.

4.2. 운영성과 평가 관련 개선 방안

현장 적용 평가에서 발견된 문제점은 기업에서 관리되고 있는 데이터와 운영성과 평가 기준이 달라 데이터 취합 및 분석에 많은 시간이 소요되는 문제, 그리고 제공된 데이터의 원자료(Raw Data)가 확보되지 않는다는 것이다. 이 문제는 심사 이전에 이뤄지는 심사기관과 인증기업 간의 업무 프로세스 개선을 통해 해결할 수 있다.

DQMS 인증심사는 인증기업의 인증 유효 율을 기준으로 2~4개월 전 심사신청서와 심사 관련 서류(인증신청 범위, 생산 및 납품실적, 품질경영체제 연계표, 경영 검토 자료, 내부 심사 자료 등)를 심사기관인 국방기술품질원으로 제출 후 시작된다. 이는 심사 이전 인증기업이 별도의 심사 서류를 제공하지 않는 민간 인증심사와 차별되는 절차이다. 이러한 절차를 활용하여, 심사 이전 제출자료에 운영성과 평가 데이터를 제출하도록 하는 것이다. 이를 위해, DQMS 인증 업무규정 내 인증신청 시 제출되어야 할 운영성

과 평가 양식을 추가하고, 작성 요령을 세부적으로 명시하여 인증기업이 심사 전 충분한 사전 준비를 할 수 있게 하는 것이다.

운영성과 평가 양식(Table 6) 및 작성 요령(Table 7)은 기존 DQMS 인증 업무규정과 형태와 구성을 같이 하여 이해를 쉽게 하였고, 특히 인증기업이 운영성과 평가 작성에 혼선과 오해가 없도록 작성 요령을 상세히 표현하였다. 주요 내용은 아래와 같다.

운영성과는 이전 연도와 당해 연도의 비교를 통해 평가를 진행하게 되는데, 운영성과 입력 시 연도를 구분하여 입력하도록 하였다. 또한, 문제가 되었던 원자료(Raw Data) 확인을 항목별 증빙서류 파일의 제공을 통해 진행할 수 있도록 제시하였다.

총매출액과 영업이익은 DQMS 인증의 특성상 민수 분야와 군수 분야를 구분하여 입력하도록 했으며, 인도된 제품 불량률, 공정 불량률, 공급품(부품 등) 불량률은 PPM(Parts per Million) 단위로 계산하도록 산출식에 반영하여 작성 시 이해를 돕도록 했다.

심사 범위에서 제조뿐 아니라, 설계/개발 업무가 포함된 인증기업에 대해서는 필수적으로 제출해야 하는 개발 목표 달성률과 개발 일정 준수율은 설계/개발 포함 시에만 작성할 수 있게 했다. 각 공정에서 생산된 전체 제품 중 공정검사를 통해 발생한 불량률을 나타내는 공정 불량률과 생산공정이 모두 완료된 전체 제품 중 최종검사를 통해 발견되는 불량률을 나타내는 완제품 불량률의 작성 요령 및 산출식을 명확히 하여 손쉽게 작성할 수 있도록 하였다.

현장 적용 평가에서 오해가 많았던, 공급품(부품/원소재 등) 라인 중단 건수는 협력업체의 라인 중단이 아닌 협력업체의 공급 지연으로 인해 직영공정의 라인이 중단된 건수를 확인하는 것으로 명확화하였으며, 공급품(부품/원소재 등) 원가 개선율은 협력업체 제작으로 기인한 원가 개선율에 추가하여 직영 제작에서 외주제작 전환을 통한 원가 개선율도 반영할 수 있도록 하였다. 윤리경영은 청탁, 법규 미준수, 위/변조 등 윤리경영과 관련된 예시를 제시하여 제

Table 6. Assessment form for operational performance

Classification		Previous year Ⓐ	Current year Ⓑ	Unit	Documentary Evidence Ⓒ
Management Performance	Ⓓ Sales	Non-defense		won	
		Defense		won	
		Total		won	
	Ⓔ Operating profit	Non-defense		won	
		Defense		won	
		Total		won	
(external) Customer	Ⓕ Delivered Product Defect Rate			PPM	
	Ⓖ User Compliance Rate			%	
	Ⓗ Delivery Compliance Rate			%	
	Ⓙ On-Time Action Rate			%	
(internal) Development	Ⓚ Development Target Achievement Rate			%	
	Ⓛ Development Schedule Compliance Rate			%	
	Ⓜ Development Cost Target Achievement Rate			%	
(internal) Production	Ⓨ Process Defect Rate			PPM	
	Ⓩ Finished Product Defective Percentage			%	
	ⓐ Productivity			%	
	ⓑ Cycle Time			minute	
	ⓓ UPH(Unit per Hour)			UHP	
	ⓕ Manufacturing Cost Improvement rate			%	
(internal) Purchase	ⓖ Supply(parts, etc.) defect rate			PPM	
	ⓗ Supply(parts, raw materials, etc.) defect rate			%	
	Ⓣ Supply(parts, raw materials, etc.) Number of line interruptions			case	
	Ⓤ Supply(parts/raw materials, etc.) cost improvement rate			%	
Ⓦ Ethical management				case	

출에 참고할 수 있도록 했다.

결론적으로 운영성과 평가에서 데이터의 확보가 어렵고, 원자료의 확인이 불가능한 문제들은 DQMS 인증 업무규정에 따라 Table 6과 Table 7의 운영성과 평가 양식 및 작성 요령을 활용하여 인증기업이 사전 작성 후 제출하고, 심사 팀은 이를 검토·집계함으로써 해결할 수 있도록 개선하였다.

4.3. 정량적 평가 심사원 제도 관련 개선 방안

앞서 현장 적용 평가 결과 분석을 통해 정량적 평가 심사원에 따라 성숙도 평가 분포가 차이가 나는 것을 확인하였고, 이는 심사원의 평가 기준 및 역량이 결과에 영향을 끼치는 것으로 해석된다. 정량적 평가 심사원은 정량적 평가 결과의 신뢰성 보장과

Table 7. Writing instructions for operational performance assessment form

【 Writing instructions 】

- ㉠/㉡ : [[Required] Enter indicators separated by when they are aggregated
(e.g., data scheduled to be aggregated at the end of the current year are entered in the previous year)
- ㉢ : [Required] Attach evidence of entered data and enter file name (e.g., sales.xlsx)
- ㉣ : [Option] Amount of revenue from sales of goods or provision of services
- ㉤ : [Option] Gross profit of sales minus sales and general management expenses
(Calculation: Gross Revenue - Sales Cost - Management Cost)
- ㉥ : [Requirement] Defect rate found in product delivered to customer
(Calculation formula: Delivered product defect rate ÷ Number of delivered products × 10⁶)
- ㉦ : [Requirement] Number of user complaints raised compared to the shipped product
(Calculation: Number of user complaints ÷ Number of product shipments × 100)
- ㉧ : [Requirement] Product shipment completion rate within the payment deadline agreed or modified by the contract
(Calculation formula: Number of delivery compliance (early + on-time - delay) ÷ Total number of deliveries × 100)
- ㉨ : [Requirement] Whether the customer's request (contract review, non-conforming corrective action reply, production status, etc.) has completed the action within the deadline
(Calculation: Number of delays in customer requests ÷ Total number of customer requests × 100)
- ㉩ : [Required - including design/development] Rate of achievement of the organization's target design development
(Calculation formula: Number of completed developments ÷ Total planned developments × 100)
- ㉪ : [Required - when including design/development] The organization's target compliance with the design development schedule
(Calculation formula: Number of developments completed in the schedule ÷ Total planned developments × 100)
- ㉫ : [Option] Target attainment rate of planned cost as development cost
(Calculation formula: Cost used for development ÷ Total cost allocated for development × 100)
- ㉬ : [Requirement] Percentage of defective products produced through process inspection among production quantities
(Calculation formula: Number of defective products that occurred during the process ÷ Total number of products produced in each process × 10⁶)
- ㉭ : [Required] Percentage of defective products generated after final inspection among production quantities
(Calculation formula: Number of defective products that occurred during the final inspection ÷ Total number of products that performed the final inspection × 100)
- ㉮ : [Option] The ratio of output to production of the product (Calculation formula: Output ÷ Input × 100)
- ㉯ : [Option] The beginning of the product the time it takes to complete from the last process
(Calculation formula: (Material/Material) Production input date - (Product) Final shipment inspection date)
- ㉰ : [Option] Output per unit hour
(Calculation formula: Total number of products produced ÷ Total time spent in production (person × time))
- ㉱ : [Option] The total amount of materials, labor, and expenses incurred during the manufacturing process
(Calculation formula: (Previous year's manufacturing cost rate - this year's manufacturing cost rate) ÷ Previous year's manufacturing cost rate)
- ㉲ : [Required] Defect rate found in products received by subcontractor
(Calculation formula: Number of defective products in stock ÷ Total number of products in stock × 10⁶)
- ㉳ : [Required] The rate of completion of warehousing of products within the payment deadline agreed or changed by the contract
(Calculation formula: Number of compliance with delivery (early + on-time - delay) ÷ Total number of warehousing × 100)
- ㉴ : [Option] Number of line interruptions for our company due to suppliers' supplies
- ㉵ : [Option] Cost improvement rate due to subcontractor production
(Calculation formula: (Contract amount for the previous year - Contract amount for this year) ÷ Contract amount for this year × 100
※ Cost improvement rate is also reflected by switching from direct production to outsourcing production)
- ㉶ : [Required] Number of violations such as solicitation, non-compliance with laws, forgery/modification, etc

객관성 확보를 위해 기존의 DQMS 심사원보다 높은 수준의 자격 및 경력 사항이 필요하다는 것이다. 이에 기존 심사원의 자격 기준을 분석하고 정량화 평가 심사원 자격을 제도적으로 구체화하는 방안을 제시하였다.

기존 DQMS 인증 심사원은 ISO 9001의 심사원 자격요건을 갖추며, 방위산업 분야 품질 관련 업무 경력을 보유하거나, 수년간의 심사 경력을 갖춘 인원으로 구성된다. 그들은 많은 심사 경험과 인증기업 제품에 대한 공학적 지식은 보유하고 있지만, 새로운 평가 방식에 대한 심사 경험, 평가 항목과 평가 절차에 대한 이해가 부족하다는 것이다. 이에 정량적 평가에 참여가 가능한 심사원의 경험, 지식, 절차의 기준을 수립하고, 이를 제도적으로 규정화한다면 역량을 갖춘 심사원들로부터 정량화 평가가 높은 신뢰도로 수행될 수 있을 것이다.

따라서 DQMS 인증 업무규정에 포함할 정량적 평가 심사원의 자격 부여 기준을 Table 8과 같이 제안하였다. 정량적 평가 심사원은 크게 심사원, 심사팀

장, 검증 심사원으로 구분되는데, 심사원의 경우 연 중 1회 실시되는 심사원 평가에 80점 이상을 득하고 정량평가 심사원 교육을 이수하는 것을 자격 조건으로 하였다. 필수 경력으로는 DQMS 인증심사 참여 10회 이상, 정량적 평가 참관 2회 이상이어야 하고, 검증 심사원으로부터 현장 입회 평가를 완료하여야 한다. 심사팀장의 경우, 심사원의 학력/훈련/자격/경력에 추가하여 심사원 평가에 90점 이상을 득하고 검증 심사원으로부터 정량적 평가 보고서 평가를 완료해야 하는 조건을 정하였다.

정량적 평가에 참여하는 심사원의 자격과 별개로 심사의 질을 높이기 위한 제도화 방안으로 장기적인 심사프로그램이 뒷받침되어야 한다. 사후 관리 심사에 정량적 평가에 참여할 심사원들을 배정하여, 정량적 평가 전에 심사기업의 품질경영시스템의 체계 및 심사 환경을 사전에 파악될 수 있도록 하는 것이다. 제도적으로는 정량적 평가에 참여하는 심사팀 인원 중 최소 1명은 이전 사후 관리 심사에 참여한 인원으로서 심사팀을 구성하는 것으로 구체화할 수 있을 것이다.

Table 8. Criteria for qualifying examiners for quantitative evaluation of DQMS

Classification	Academic/Training/Qualification	Career
Auditor	<ul style="list-style-type: none"> DQMS Auditor DQMS Examiner's Evaluation score of 80 or higher Quantitative Evaluation Examiner Training Completed 	<ul style="list-style-type: none"> Participate in DQMS certification review at least 10 times Attend quantitative evaluation at least twice Quantitative evaluation Field admission evaluation completed
Auditor Leader	[Education/training/self-sufficiency of judges] <ul style="list-style-type: none"> DQMS Examiner's evaluation score of 90 or higher 	[Securing experience as a judge] <ul style="list-style-type: none"> Quantitative evaluation report evaluation completed
Verification Auditor	A person who meets the educational background/training/qualification/career requirements of the head of the quantitative evaluation review team and is appointed by the head of the quality certification team	

- * The quantitative evaluation examiner's curriculum should include understanding of quantitative evaluation, understanding of maturity evaluation, understanding of operational performance evaluation, and simulation of quantitative evaluation.
- * Quantitative assessment examiners must participate in the quantitative assessment examiner's workshop twice a year (first half and second half).
- * The quantitative evaluation examiner shall conduct an annual evaluation of educational background/training/qualification/career, and shall suspend his/her qualification as a quantitative evaluation examiner if he/she fails to meet the items.

5. 결론

이 연구에서는 국방품질경영체제의 정량적 평가 모델에 대한 현장 적용 평가를 바탕으로 기존 DQMS 인증업체의 품질경영체제 수준이 이를 통해 효과적으로 평가될 수 있는지를 확인하였고, 동시에 정량적 평가 과정에서 나타난 문제점에 대한 개선 방안을 제안하였다.

정량적 평가모델의 성숙도 평가에 너무 많은 시간이 소요되는 문제는 최근 3년간 DQMS 인증심사 결과를 기준으로 성숙도 평가에서 제외가 가능한 요구 사항을 식별 후 삭제함으로써 기존 평가 대비 약 77% 수준으로 평가시간의 감소를 기대할 수 있었다.

또한, 기업이 관리하는 데이터와 운영성과 평가 기준이 달라 시간이 많이 소요되는 문제와 원자료가 확보되지 않는 문제는 DQMS 인증 업무규정에 새로운 양식과 명확한 작성 방법을 제시하여 인증업체에 사전 작성 후 제출하도록 하여 문제를 개선하고자 하였다.

심사원의 평가 기준과 역량 차이로 인한 심사 결과의 신뢰성 및 객관성 확보 문제는 기존 DQMS 심사원 자격요건을 강화하는 방안을 추가하여 정량적 평가 심사원 자격의 획득·유지·취소 기준을 세분화하여 관리토록 제도화를 제안하였다.

이 연구에서 제시한 정량적 평가모델의 개선 방안이 실질적인 제도의 개선으로 연계되어 적용하게 될 때 국방품질경영체제에 대한 정량적 평가의 신뢰성 확보에 도움이 될 것이라 기대된다. 다만 이 연구에서 다른 DQMS의 현장 적용과 관련하여 대상 기업의 수와 심사원의 선정 등의 제약으로 인해 분석 결과가 제한적일 수 있다고 판단된다. 향후 연구에서는 충분히 확보된 현장 적용 자료를 바탕으로 DQMS 정량적 평가모델의 추가적인 개선 방안을 모색하고, 기업의 성장과 정량평가 결과의 상관관계 등의 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- 1 Park, J. M., Yang, J. M. & Kim, Y. G., "An Empirical Study on the Importance of Standard for DQMS Using Analytic Hierarchy Process", *Journal of Applied Reliability*, 20(3), pp. 271-276, 2020.
- 2 Kim, Y. H. & Ha, J. S., "A Study on the Development and Institutionalization Plan of a Quantitative Evaluation Model of Defense Quality Management System", *J Korean Soc Qual Manag*, 50(2), pp. 183-197, 2022.
- 3 Moon, J. Y., Lee, S. C. & Su, Y. H., "Developing Instruments for Measuring the Effectiveness of the Korean National Quality Award", *J Korean Soc Qual Manag*, 34(2), pp. 22-43, 2006.
- 4 Kim S. D., Bae, S. J., Yang, J. E., Chung, K. S., Riew, M. C., Lim, S. U., Kim, M., Park, S. H. & Jeong, J. S., "Model Development and Analysis for Assessment of the National Defense Industry Quality Management", *J Korean Soc Qual Manag*, 44(2), pp. 277-296, 2016.
- 5 Kim, T. K. & Kim, Y. S., "A Comparison of Quality Awards Program in the Major G-20 for Developing a Korean National Quality Award Model", *J Korean Soc Qual Manag*, 39(2), pp. 337-346, 2011.
- 6 Park, N. G. & Lim, W. H., "A Study on the Quality Management of Malcolm Baldrige and Evaluation Model", *Innovation Enterprise Research*, 4(2), pp. 119-137, 2019.
- 7 Park, Y. T. & Song, H. G., "Criteria for Quality Award and Measurement of Management Quality", *J Korean Soc Qual Manag*, 26(2), pp. 82-92, 1998.
- 8 Cho, Y. S., Hur, S. Y., Kim K. Y. & Cho, J. H., "The study on evaluation model development for the ISO certification bodies", *Korean J. of Bus. Admin.*, 21(3), pp. 985-1009, 2008.
- 9 Wilson D. D. & Collier, D. A., "An Empirical Investigation of the Malcolm Baldrige National Quality Award Causal Model", *Journal of the Decision Sciences Institute*, 31(2), pp. 361-383, 2000.
- 10 Ghosh, S., Handfield, R. B., Kannan, V. R.M & Tan, K. C., "A structural model analysis of the Malcolm Baldrige National Quality Award framework", *International Journal of Management & Decision Making*, 4(4), pp. 289-311, 2004.

유선유도 수중 유도무기의 광통신 두절 현상에 대한 원인 분석 및 개선방안 연구

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

Cause analysis and improvement measures for optical communication outage of wire-guided underwater guidance weapon

이상훈†, Sanghoon Lee

국방기술품질원, 유도탄약센터,
선임연구원
Senior Researcher,
PGM&Ammunition Center,
Defence Agency for Technology
and Quality

남준식, Junsik Nam

국방기술품질원, 유도탄약센터,
연구원
Researcher, PGM&Ammunition
Center, Defence Agency for
Technology and Quality

김효섭, Hyosub Kim

미래엠텍, 생산기술팀, 부장
Department Manager,
Production Technology Team,
Mirae M-Tech

최재훈, Jaehun Choi

LIG Nex1, C41STAR 생산기술실
기계기술팀, 선임연구원
Research Engineer, Mechanical
Engineering(C41STAR), LIG Nex1

Abstract

This study aims to solve the quality problem of communication outage identified after performing a wet test. Based on an analysis performed using the OTDR method and an image of an optical connector section, the cause of the problem is attributed to impurities penetrating the A/B-spool optical connector during the wet test, which adhere to the contacting surface as they dry. Therefore, an improved method for applying an index-matching gel to the contact surface is derived to prevent the penetration of impurities.

The result of repeated flooding tests show a failure rate of 12.5% in a sample without any improvement measures, whereas no single failure is identified in a sample with improvement measures, thereby proving the effectiveness of the improvement measure. Furthermore, by analyzing the components of the adhered impurities, the cause is confirmed to be the adherence of salt to the core of the optic fiber cable.

keywords : Wire-guided Underwater Guidance Weapon, Optical Communication, Optical Wire Spool, Optical Connector, Index Matching Gel

† Corresponding Author : Sanghoon Lee

Tel : +82-042-580-0085, email : lsh1202@dtaq.re.kr

Defence Agency for Technology and Quality, 72, Hyecheon-ro, Seo-gu, Daejeon, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 7th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

유도무기체계는 가용한 센서로부터 획득된 정보를 활용해 표적지역으로 유도하고 확보한 표적정보를 바탕으로 지상, 해상 및 공중의 다양한 목표물을 정밀하게 타격하는 무기체계이다[1]. 그중 수중 유도무기는 잠수함, 수상함 및 항공기 등의 플랫폼으로부터 발사된 후 수중에서 유도되어 적 수상함이나 잠수함을 공격하는 무기체계로 정밀타격 능력을 갖춰 현대 해상전력에서도 활용성과 중요성이 증대되고 있다[2].

유도무기를 표적에 명중시키기 위한 기술을 유도방법 또는 유도기법이라 하는데 기본적으로 지령유도(Command guidance), 호밍유도(Homing guidance), 항법유도(Navigational guidance)로 구분하며[3], 현대에는 두 가지 이상의 유도기법을 사용하는 복합유도를 이용한다. 이러한 유도방법은 대부분 지상 환경에서 전파를 이용하나 수중 유도무기는 수중환경에서 물이란 매질 특성으로 인해 현저한 전파 감쇠 현상이 발생하여 전파 활용에 제한이 있기에 수중에서는 주로 음파를 사용한다[4-5]. 그러나 음파 속도는 지상에서 사용하는 전파 속도보다 매우 느리며, 낮은 대역폭, 전송 대역폭의 제한, 높은 지연 시간, 보안 취약성 등의 한계가 존재한다. 게다가 외부 환경 요소(바람, 일조량, 유속 등)에도 쉽게 영향을 받아 전파를 대체하기 어렵다[6-9].

따라서 수중 유도무기는 중기유도(Midcourse guidance)까지 관성항법 위주로 수행하며, 종말유도(Terminal guidance)에서는 음향센서(Sonar sensor)나 항적센서(Wake sensor) 등 정밀센서를 바탕으로 이동한다. 표적지역에 도달 이후 주변소음에 반응하는 수동 유도 또는 발사체에서 송신한 음향신호를 수신하여 탐색하는 능동 유도 등을 통해 정밀하게 타격한다[10].

하지만 원거리에서 수중 유도무기를 발사하고 유도하여 표적에 접근하는 과정에서 표적 또한 수중 유도무기를 인지하고 침로와 속력을 변경해 회피하

기 때문에 발사 후 망각방식(Fire and Forget)보다는 유선유도 방식을 적용하여 중기유도까지 운용자가 표적을 계속 추적하여 유효 탐지거리를 향상시킬 뿐만 아니라 기만기 또는 가짜 표적과 구별할 수 있도록 유도한다[11-12].

과거 국내 도입된 유선유도 수중 유도무기는 동축케이블을 연결하여 운용하였으나 최근 개발되는 유선유도 수중 유도무기는 침로 및 속도를 제어할 뿐만 아니라 탑재된 음향탐지장치로 수집되는 많은 청음 자료를 통해 음향탐지 및 항적 추적을 하는 등 더 빠른 데이터 전송 및 보다 많은 정보처리를 위해 광섬유케이블을 활용한 광통신시스템을 운용하고 있으며 이러한 추세에 따라 플랫폼과 수중 유도무기와 통신 신뢰성의 중요도도 같이 증가하고 있다.

본 논문에서는 수중 플랫폼에서 발사하는 유선유도 수중 유도무기의 사격시험 준비 중 식별한 통신 불량 문제에 대해 분석하였다. 원인 분석 결과, 수중 플랫폼 내 발사관에 있는 광섬유케이블과 수중 유도무기 내부에 있는 광섬유케이블을 연결하는 광연결기(Optical connector) 사이에 염분으로 판단되는 이물질이 고착된 것으로 추정하였다. 그리하여 광연결기 사이에 이물질이 침투하는 현상을 개선하는 방안을 연구하고 추정된 원인 분석과 개선방안을 각각 재현시험과 검증시험을 통해 광통신 두절 현상이 해소되었음을 입증하고자 한다.

2. 원인 분석

2.1. 연구 배경

물속에서 수중 유도무기의 안전이나 기능을 점검하기 위해 사격시험 전 정박한 상태에서 유도무기를 장입하고 발사관에 물을 채운 후 상태 점검을 수행하는 절차(이하, Wet Test)를 거친다. 이후 출항하여 사격시험을 수행해야 하나 사격시험 일정이 순연되어 다시 수중 유도무기를 하역하게 되었다.

4주 후 순연된 사격시험 일정이 도래해 하역했던

3발의 수중 유도무기를 재장입하기 위해 상태 점검을 하는 중 1발에 대해 통신이 되지 않는 현상이 발생하였다.

Wet Test 수행 후 미발사한 유도무기를 충수탄이라고 한다. 이 충수탄을 다시 운용할 경우 정비 및 운용 교범상 8주 이내에는 별도의 창정비 없이 불출 및 재장입하도록 되어 있다. 그렇기에 이번 충수탄 3발 중 1발에서 나타난 통신 두절 현상이 앞으로도 계속 발생할 경우, 유도무기의 운용 계획보다 많은 부품 교체 및 정비비용이 발생하며, 무엇보다 정비 기간이 추가되면 한정된 유도무기 수량과 훈련 일정을 고려했을 때 원활한 작전 운용이 되지 않아 원인 분석 및 개선이 필요하였다.

2.2. 고장 위치 분석

고장 위치를 분석하기에 앞서 이번 연구에서 다룬 수중 유도무기의 형상은 Figure 1(a)와 같다. 이 유도무기는 여러 부체계로 구성되어 있는데, 이들 중 외부 통신과 직접적인 연관이 있는 부분이 유도제어부와 고정장치 키트이다. 수중 유도무기 발사 시 Figure 1(b)와 같이 고정장치 키트는 수중 플랫폼의 발사관에 고정되며 나머지 부분이 발사된다. 발사관과 고정장치 키트 사이는 A-Cable, Comm-Cable로 연결한다.

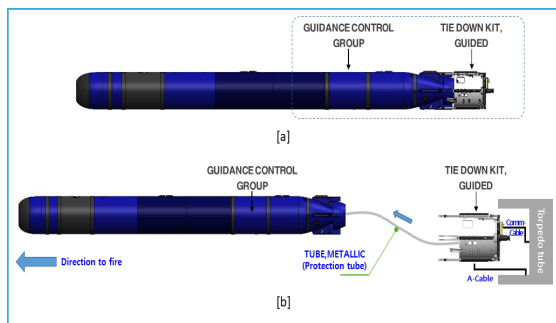


Figure 1. The configuration of underwater guidance weapon [a] before and [b] after launch

하역한 수중 유도무기를 체계 점검장비를 통해 확인한 결과 A-Cable을 이용한 통신은 정상이나,

Comm-Cable을 이용한 통신이 불량임을 확인하였다. Figure 2에서 보는 바와 같이 발사관과 연결되는 Comm-Cable은 고정장치 키트의 광신호 송수신기 B에 연결되고 광신호 송수신기 B는 B-Spool, A-Spool, 광신호 송수신기 A, 유도조종장치 순으로 연결되어 광통신을 하는 구조이다. 각각 연결되는 장치의 외관과 기능을 확인한 결과 특이사항이 없어 통신 불량 원인을 광케이블 경로상의 문제로 추정하였다.

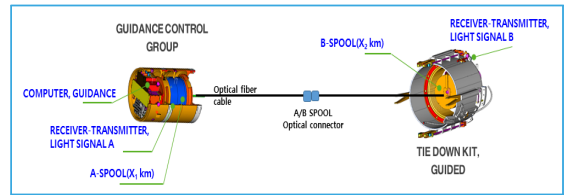


Figure 2. The communication structure between guidance control group and the guided down kit

광케이블 경로 중 어느 위치에서 문제가 발생하였는지 고장점을 찾기 위해 광신호 송수신기 B에 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) [13-14] 테스트기를 Figure 3과 같이 연결하여 광감쇠량을 측정하였고, 그 결과 Figure 4와 같이 거리에 따른 광감쇠량을 확인할 수 있었다.

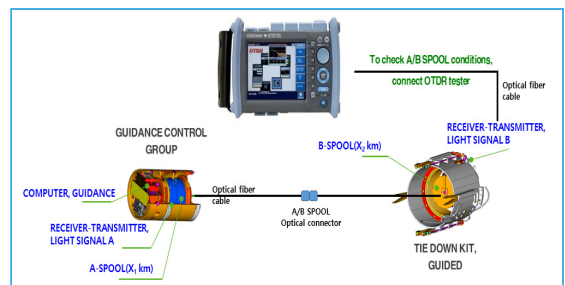


Figure 3. The configuration of OTDR test

통신상태가 정상인 수중 유도무기에서는 Figure 4(a)와 같이 B-Spool 길이(X_2 km) 부근에서 삽입 손실(insertion loss) 0.409 dB가 식별될 뿐(파란색 원), 전체 길이는 A-Spool 길이(X_1 km)를 더한 거리($X_1 + X_2$ km)가 측정되었다. 반면, 통신상태가 불량인 수중 유도무기에서는 Figure 4(b)와 같이

B-Spool 길이(X_2 km)에서 파이버 종단이 식별되었다. 즉, A/B-Spool 광연결기 내부에서 광신호가 막혀 통신 두절 현상이 나타남을 확인하였다.

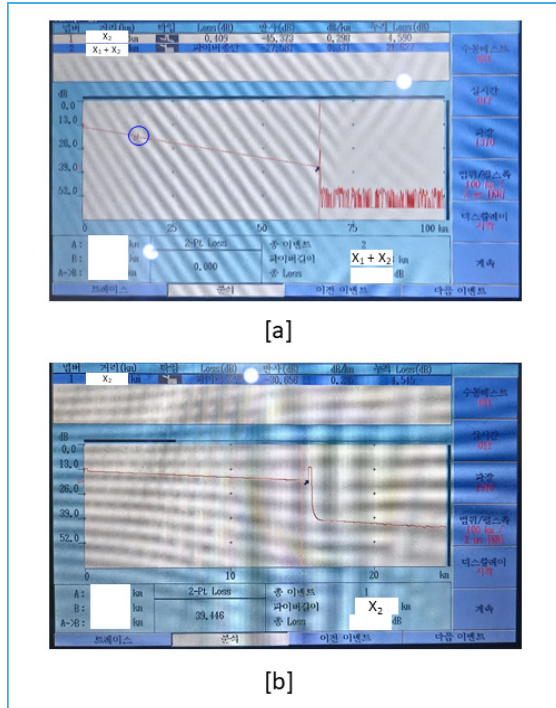


Figure 4. The result from OTDR test in [a] good status and [b] poor status

2.3. 원인 추정

광섬유케이블은 일반적으로 Figure 5와 같이 광신호가 전달되는 코어와 코어 위에 광반사를 위한 클래딩, 이를 보호하기 위해 코팅으로 구성되어 있다.

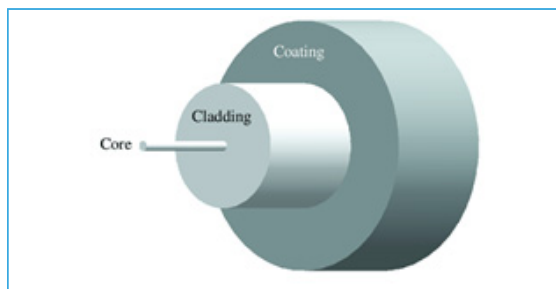


Figure 5. The structure of optical fiber cable

A/B-Spool 광연결기를 분리하여 광케이블 단면을 촬영한 결과, Figure 6과 같이 이물질(Impurity)이 식별되었다. 이물질이 코어 부분에 고착되어 광신호의 경로를 차단하였고 이는 광신호의 세기에 영향을 주어 통신 불량 원인이 되었다.

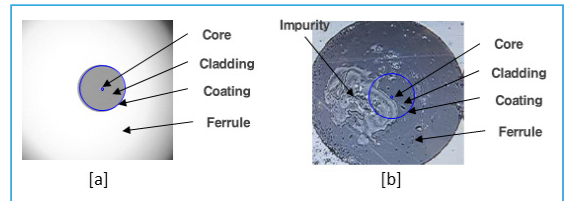


Figure 6. The cross sectional view of optical fiber cable in [a] good status and [b] poor status

이는 Wet Test를 위해 수중 유도무기가 있는 발사관에 충수할 때 물탱크에 있는 청수로 수행하지만 발사관 내부는 해수가 유입되는 구조이기 때문에 염분 및 기타 이물질이 존재할 수 있으며, 이러한 이물질이 방수 구조가 아닌 A/B-Spool의 광연결기를 통해 침투 및 접촉 부위에 고착된 것으로 추정한다.

3. 개선방안 고찰

앞서 추정한 침수에 의한 이물질 고착이 통신 불량 원인이 맞다 가정하면 A/B-Spool의 광연결기 구조를 방수 구조로 변경하면 쉽게 해결될 것으로 보이나 그렇게 쉽지만은 않은 문제이다.

수중 유도무기가 발사되면 유도제어부와 고정장치 키트에 연결되어 있는 A/B-Spool의 광섬유케이블이 풀리는데, 이때 발사 초기에 광섬유케이블의 끊김이나 광연결기의 파손을 방지하기 위해 Figure 7과 같이 보호튜브 내부를 통해서 광케이블이 풀리게 되어 있다.

따라서 보호튜브와 간섭없이 풀리기 위해서는 광연결기의 물리적 형상 변화를 최소화해야 하는 첫 번째 제약사항이 식별된다. 두 번째는 외형의 변화가

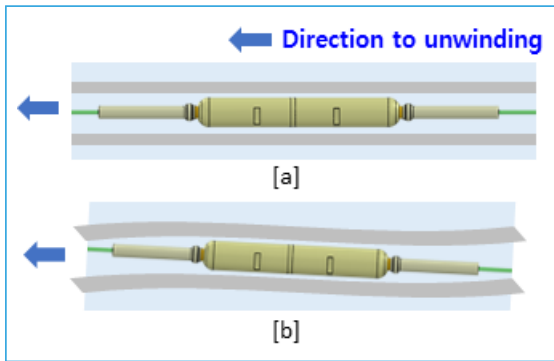


Figure 7. The configuration of A/B-Spool Optical connector in the protection tube [a] having no curvature and [b] having curvature

없이 보호튜브를 통과하더라도 정비를 위해 A/B-Spool의 광연결기가 분리 가능해야 한다.

위 제약사항들을 고려하여 방수 구조 적용과 굴절을 정합액 적용, 두 가지 방안에 대해 분석하였다.

3.1. 방수 구조 적용 방안

우선적으로 검토한 방안은 광연결기에 방수 구조를 적용하여 오염원인 이물질 침투를 근본적으로 차단하는 것이다.

방수 구조를 검토하기 전에 현재 A/B-Spool의 광연결기 형상 및 물리적 특성을 각각 Figure 8과 Table 1에서 정리하였다.

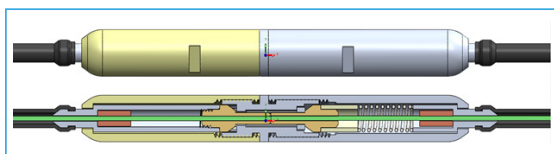


Figure 8. The configuration of A/B-Spool Optical connector

Table 1. Physical properties of A/B-Spool Optical connector

Mass (g)	Volume (mm ³)	Outer diameter (Max)(mm)	Center of gravity(mm)
2.92	1017.37	∅ 5.0	(1.10, 0.22, 0)

이러한 현재 A/B-Spool의 광연결기를 방수 구조로 변경하기 위해서는 Figure 9와 같이 A 커넥터, B 커넥터, A/B 커넥터의 연결나사부에 대해 오링을 적용해야 한다.

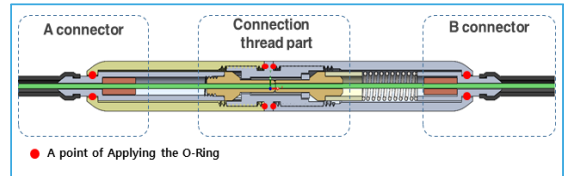


Figure 9. The O-ring application location to change waterproof structure

첫 번째로 Table 1에서 식별한 물리적 특성의 변경 없이 오링을 적용할 경우를 고려하였으나, 고정부싱의 원통형 하우징과 고정뿔개의 살 두께가 각각 0.12mm, 0.1mm로 가공이 불가할뿐더러 가공이 되더라도 사용 전 또는 사용 중에 터짐이 발생할 가능성이 크므로, 강건성이 없어 제외하였다.

두 번째로 Table 1에서 식별한 물리적 특성의 변경을 최소화하여 오링을 적용할 경우, A/B-Spool의 광연결기 형상과 물리적 특성을 각각 Figure 10과 Table 2로 정리하였다.

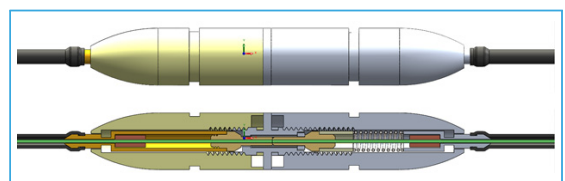


Figure 10. The configuration of A/B-Spool Optical connector(After applying waterproof structure)

Table 2. Physical properties of A/B-Spool Optical connector(After applying waterproof structure)

Mass (g)	Volume (mm ³)	Outer diameter (Max)(mm)	Center of gravity(mm)
6.37	2294.92	∅ 8.0	(5.07, -0.47, -0.31)

기존 형상대비 질량/부피/외경 모두 1.6 ~ 2.2배 증가하며 무게중심 또한 4mm 이상 변경됨에 따라 A/B-Spool 풀림 성능이 제한된다.

마지막으로 A/B-Spool의 광연결기를 열수축 슬리브를 적용하여 침수를 원천적으로 차단하는 방안을 고려했으나 두 번째 제약사항인 분리가 불가능해지며, 소요군에서 전용 설비를 확보하여 슬리브 열압착 공정 수행 필요하기에 제한된다.

3.2. 굴절률 정합액 적용 방안

민수에서는 광커넥터 내부 광섬유의 후퇴현상이나 외부 페룰 접속 면 경사 연마 불량 등으로 인한 현장조립 광커넥터(Field Installable Optical Connector)의 반사손실을 개선하기 위한 방법 중 하나로 굴절률 정합액(Index Matching Gel)을 적용하는 방안을 활용한다[15-16].

본 논문에서 다루는 수중 유도무기의 A/B-Spool 광연결기 또한 체계 운용 및 정비 절차상 분리할 경우를 고려하여 현장조립 광커넥터가 적용되었으나 민수 제품에 비해 훨씬 정밀하여 지금까지 굴절률 정합액 없이도 체계에서 요구하는 반사손실을 만족하였다. 그럼에도 불구하고 2장에서 추정한 광섬유 코어에 이물질 흡착 방지를 위해 A/B-Spool 광연결기 접촉면 사이에 굴절률 정합액을 적용하는 방안을 채택하고자 한다. 굴절률 정합액은 광섬유 코어의 비중과 유사하게 제작되어 굴절률에 의한 광신호의 손실을 최소화하고, 커넥터 접촉면 사이에 빈공간을 채움으로써 이물질 유입을 차단하는 역할이 기대되기 때문이다[17].

단, 젤 상태의 특성상 습기와 온도 요인에 대해서는 다소 취약한 점을 고려하여[17-18], 굴절률뿐만 아니라 넓은 온도 범위에서 화학적으로 안정적이고 주기 정비 기간 이상 수명을 가지고 있는 실리콘 재료의 굴절률 정합액을 선정하여 적용하였다. 그리고 고장이 발생했던 Wet Test 환경을 모사하여 반복 시험을 통해 굴절률 정합액 적용 방안의 효과성을 입증하고자 한다.

4. 추정원인 및 개선방안 검증

4.1. 시험 설계

Wet Test 수행 후 A/B-Spool 광연결기 사이 이물질의 침투 및 고착에 의한 통신 불량이라는 추정원인 확인과 이물질 유입을 차단하기 위해 A/B-Spool 광연결기 사이에 굴절률 정합액을 적용하는 개선방안 검증을 위해서 Figure 11, Table 3 과 같이 A/B-Spool을 모사한 시료를 준비하였다.

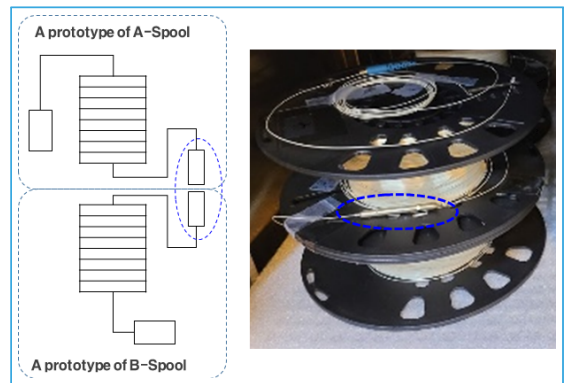


Figure 11. The concept drawing and picture of A/B-Spool prototype

Table 3. Sample No.1 ~ No.4 conditions for reconstruction test and verification test

Category	No.1	No.2	No.3	No.4
Applying index matching gel	X	X	O	O
Flooding	O	O	O	O
Purpose	To reconstruct communication outage		To verify the improvement measure	

제한된 기간과 시료 개수를 고려하여 시험을 설계하였다. 굴절률 정합액 적용 여부를 변량인자로 선정하여 굴절률 정합액을 적용하지 않은 시료 2개 (No.1, No.2)와 굴절률 정합액을 적용한 시료 2개 (No.3, No.4)를 준비하였다.

시료 1, 2번은 지난 사격시험 당시 통신 두절이 발생한 수중 유도무기를 모사한 것으로 만약 시료 1, 2번에서 통신 두절 현상이 나타나고 단면을 촬영했을 때 Figure 6(b)와 같이 코어 부근에 이물질이 고착된 것이 확인된다면, 지난 사격시험의 현상이 재현된 것으로 판단할 수 있다. 그리고 시료 3, 4번은 개선방안이 적용될 수중 유도무기를 모사한 것으로 통신 두절 현상 발생 여부로 개선방안의 효과 여부를 판단할 수 있다.

정해진 기간 내에 최대한 많은 시험 횟수를 얻기 위해 시험 1회당 1주 단위로 시험하고 광연결기 세척 및 재작업하여 총 8주 동안 수행하여 개선방안 적용/미적용을 각각 비교할 수 있는 16번의 데이터를 확보하였다.

다음 Wet Test 당시 발사관 내 환경을 최대한 모사하기 위해서 해수를 1:10으로 희석한 물을 사용했으며, 수중 유도무기의 운용 환경을 고려하여 60분간 6bar의 압력을 가해 시료 4개 모두 침수하였다.

마지막으로 건조 조건을 결정하였다. 실제 상황은 상온 조건에서 4주간 보관한 수중 유도무기에서 통신 두절 현상이 식별되었으나 시험 1 cycle인 일주일 내 조기 건조와 굴절률 정합액의 온도 취약성을 검증할 목적으로 50℃, 12시간으로 결정하였다.

A/B-Spool 광연결기에 개선방안 적용/미적용 시료를 비교하여 분석하기 위해서 시험 절차별로 다음과 같은 데이터를 측정하였다.

첫째, Wet Test가 이물질 고착의 원인이 맞는지, 굴절률 정합액 적용이 이물질 고착을 방지하는지 확인하기 위해 시료 제작 후, 굴절률 정합액을 적용하는 시료의 경우 굴절률 정합액 적용 후, 시험 종료 시까지 광연결기 단면 사진을 촬영하였다.

둘째, 광연결기 단면 사진을 촬영하는 시료 제작 후, 메칭젤 적용 후, 시험 종료 시점을 포함하여 50℃, 12시간으로 건조 직후 및 이후 1일 주기로 삽입 손실을 측정하여 개선방안 적용/미적용 시료 간 차이가 있는지, 굴절률 정합액을 적용하는 개선방안이 통신 불량 개선에 효과가 있는지 검증하였다.

4.2. 추정원인 재현

굴절률 정합액을 적용하지 않은 16번의 시험 중 2번 통신 이상 현상이 발생하여 해당 시료의 광연결기 단면 사진을 같은 시험 차수 내 개선방안을 적용한 시료와 비교하여 분석하였다.

Figure 12와 같이 첫 번째 통신 두절 현상이 발생한 7번째 시험의 시료 2번의 광연결기 단면 사진을 시료 4번과 비교 분석하였다.

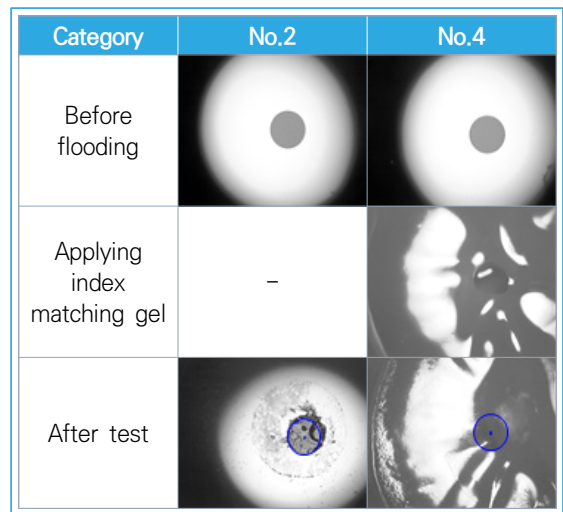


Figure 12. Comparison pictures of B connector section between sample No.2 and sample No.4 of test number #7

분석 결과, 시료 2번의 시험 후 단면 사진은 Figure 6(b)와 같이 코어 부근에 이물질이 고착된 것이 재현되었음을 확인할 수 있었으며 시료 4번의 경우 연결기 단면 전반에 유막이 형성되어 이물질 고착으로부터 보호한 것을 볼 수 있었다.

이와 같은 현상은 두 번째 통신 두절 현상이 발생한 8번째 시험의 시료 1번과 시료 3번에서도 Figure 13과 같이 재현되었음을 확인할 수 있었다.

이어서 광섬유케이블 코어에 고착된 이물질이 침수에 의해 발생한 것인지 입증하기 위해 세척하지 않은 8번째 시험의 시료 1번과 시료 3번의 광연결기 단면에 대한 에너지 분산형 분광분석(SEM-EDS)을

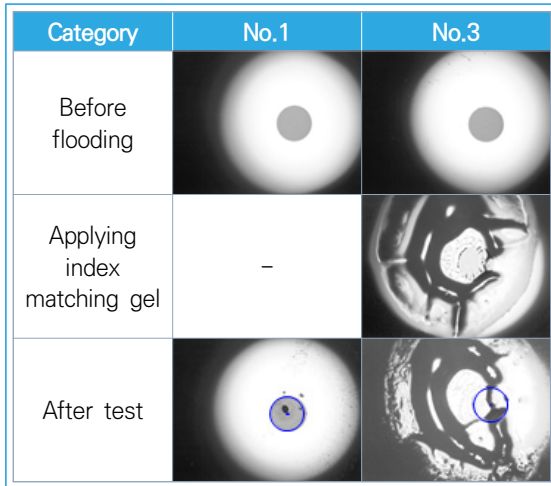


Figure 13. Comparison pictures of B connector section between sample No.1 and sample No.3 of test number #8

공인시험기관에 의뢰하였다.

분석 결과, Figure 14와 같이 A/B-Spool 광연결기 단면에 흡착된 성분을 확인하였다. 굴절률 정합액을 적용한 시료 3번에서는 실리콘의 원소인 규소와 산소가 식별되었다. 반면에 굴절률 정합액을 적용하지 않은 시료 1번에서는 염분의 원소인 나트륨과 염

소가 식별되었다. 즉, 2장에서 추정했던 해수가 유입되는 발사관 환경에서 수행하는 Wet Test로 인해 A/B-Spool 광연결기에 이물질이 침투 및 고착됨을 입증할 수 있었다.

4.3. 개선방안 효과

굴절률 정합액 적용 개선방안이 통신 불량 개선에 효과가 있는지 확인하기 위하여 각 시험 차수별 시료 1번부터 4번까지 삽입 손실을 측정된 결과를 Table 4에서 보는 바와 같다. 시기별로 측정된 많은 데이터 중 시료 제작 후와 시험 종료 후 측정된 값을 비교하여 정리하였다.

굴절률 정합액을 적용하지 않은 16번의 시험 중 7번째 시험의 시료 2번, 8번째 시험의 시료 1번에서 각각 통신 두절 및 광신호 감쇠가 발생하였다. 체계 요구사항을 고려했을 때 허용 삽입 손실이 1dB/contact이므로 8번째 시험의 시료 1번 또한 통신 불량으로 분류하였다. 반면, 굴절률 정합액을 적용한 16번의 시험에서는 한 건의 통신 두절이나 불량이 발생하지 않았다.

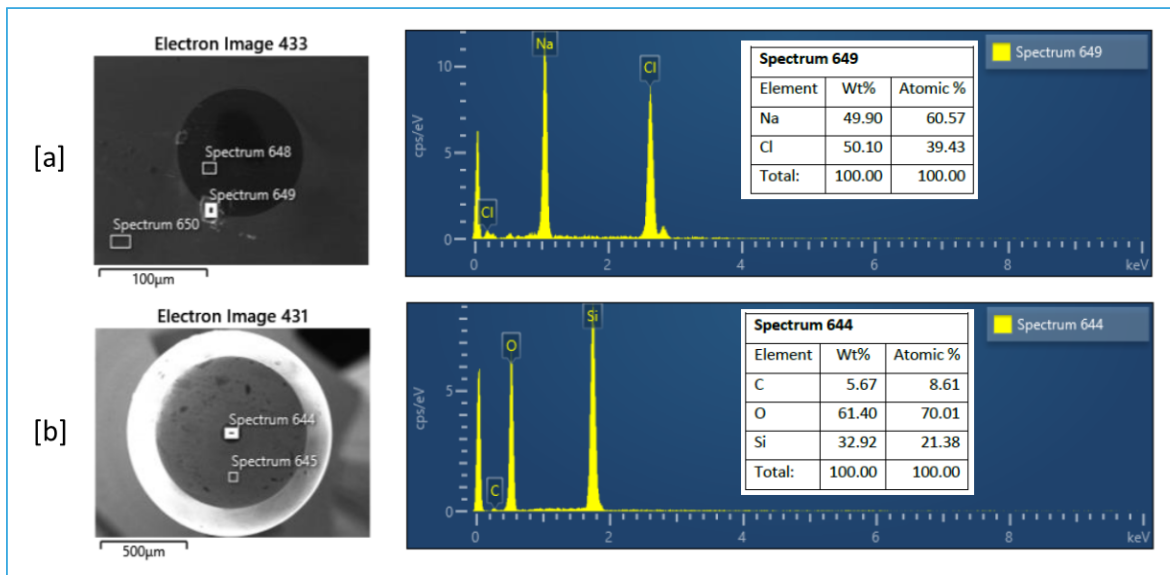


Figure 14. Comparison SEM-EDS results of B connector section between [a] sample No.1 and [b] sample No.3 of test number #8

Table 4. The result of reconstruction test and verification test

Category	Test number	Measurement point	Sample No.1		Sample No.2		Sample No.3		Sample No.4	
			1310nm	1550nm	1310nm	1550nm	1310nm	1550nm	1310nm	1550nm
Contact loss (dB)	#1	BEF	0.245	0.265	0.041	0.026	0.194	0.072	0.154	0.013
		AFT	0.282	0.270	0.035	0.026	0.101	0.103	0.074	0.051
	#2	BEF	0.103	0.160	0.186	0.146	0.184	0.083	0.304	0.251
		AFT	0.112	0.139	0.228	0.129	0.085	0.088	0.254	0.230
	#3	BEF	0.166	0.142	0.121	0.084	0.137	0.083	0.159	0.134
		AFT	0.029	0.027	0.177	0.207	0.133	0.134	0.114	0.131
	#4	BEF	0.264	0.303	0.278	0.311	0.169	0.023	0.03	0.031
		AFT	0.298	0.252	0.306	0.276	0.100	0.080	0.073	0.015
	#5	BEF	0.111	0.154	0.309	0.252	0.147	0.109	0.343	0.205
		AFT	0.090	0.186	0.233	0.293	0.135	0.115	0.316	0.258
	#6	BEF	0.183	0.252	0.188	0.183	0.103	0.035	0.295	0.167
		AFT	0.169	0.245	0.181	0.155	0.147	0.060	0.244	0.189
	#7	BEF	0.061	0.025	0.170	0.047	0.168	0.168	0.353	0.283
		AFT	0.201	0.036	Outage	Outage	0.227	0.067	0.378	0.224
	#8	BEF	0.143	0.222	0.233	0.235	0.061	0.066	0.267	0.288
		AFT	1.512	1.173	0.201	0.176	0.067	0.038	0.293	0.252
Failure rate			12.5% (2/16)				0.0% (0/16)			

산술적으로 고장률을 계산해 보면 개선방안을 적용하기 전엔 12.5%, 개선방안을 적용 후엔 0%이다. 물론 사격시험 준비 간 발생한 통신 불량 3발 중 1발이라 고장률 33.3%라고 정의할 수 없는 것처럼 이번에 연구한 유선유도 수중 유도무기의 광통신 시스템의 고유 고장률을 산출했다고 보기는 어렵지만, 이번 시험을 통해 Wet Test 환경에서 간헐적인 통신 두절 현상이 재현된다는 것을 확인했다는 점과 무엇보다 개선방안을 적용한 시료에서는 통신 두절 현상이 한 번도 나타나지 않아 개선방안의 효과를 입증했다는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 최초 생산된 유선유도 수중 유도무기의

사격시험 순연 이후, 재장입 간 Wet Test를 수행했던 유도무기의 상태 점검에서 식별한 통신 품질문제를 해결하고자 시작하였다.

고장 위치를 찾기 위해 단계별로 확인한 결과, 먼저 Comm-Cable을 이용하는 광통신이 불량임을 확인하였고 광통신 경로 내 고장점을 찾기 위해 OTDR 방식을 적용하여 광감쇠량을 측정하고 광연결기 단면을 촬영한 결과, A/B-Spool 광연결기 내부에 Wet Test 당시 이물질 침투 및 고착되어 발생한 것으로 추정하였다.

이물질 침투를 근본적으로 방지하기 위해 A/B-Spool 광연결기의 방수 구조를 우선적으로 연구했으나 발사 시 광섬유케이블 플림 성능과 정비를 위한 플림을 고려했을 때, 물리적 형상의 변경이 제한되어 방수 구조 대신 접촉면에 굴절률 정합액을

적용하여 이물질 유입을 차단하였다.

추정원인과 개선방안을 검증하기 위해 Wet Test 를 모사한 침수시험을 반복해 수행한 결과, 광신호 감쇠가 발생한 시료에서는 광섬유케이블의 코어에 모두 이물질이 고착되었으며, 고착된 이물질의 성분을 분석한 결과 염분이 고착된 것을 식별하여 추정했던 Wet Test로 인한 이물질 고착이 원인임을 입증하였다.

또한, 개선방안을 적용하지 않은 시료에서는 12.5%의 고장률이 나타났으나, 개선방안을 적용한 시료에서는 고장이 한 건도 식별되지 않아 개선방안의 효과성을 입증하였다.

본 연구를 통해 도출한 개선방안을 통해 충수탄의 예상치 못한 통신 불량 위험을 사전에 제거하여 품질과 신뢰성을 향상할 수 있으며, 수만 원과 10여 분의 시간으로 수천만 원의 교체 비용 또는 수백만 원의 수리 비용 및 약 4주의 시간이 절감되어 소요군의 운용성에 크게 도움이 될 것으로 판단한다.

참고문헌

- 1 Y. H. Song, "Development Trends of Ship-to-ship Guided Weapons", *Defense & Technology*, (423), pp. 90-99, 2014.
- 2 M. S. Kim, "Development Trends of Underwater Guided Weapons", *Defense & Technology*, (387), pp. 56-67, 2011.
- 3 I. H. Hwang, "Current Status and Prospects of Guidance Control Technology", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 15(3), pp. 26-30, 2009.
- 4 I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks : Research Challenges", *Ad Hoc Networks*, 3(3), pp 257-279, 2005.
- 5 D. S. You, C. H. Kim, "Comparison Analysis of Integrated MAC Design Approaches for Multiple Media Communication in Underwater Environments", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 1219-1220, 2019.

- 6 T. G. Chung, H. T. Lim, and T. H. Im, "Performance Analysis of Real Sea Area according to OFDM Parameters in the Underwater Channel Environment of the West Sea and South Sea of Korea", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 24(8), pp. 1086-1094, 2020.
- 7 J. E. Kim, "Introduction to Underwater Acoustic Wave Environment Modeling and Simulation for Analyzing the Effectiveness of Underwater Surveillance and Reconnaissance Weapon Systems", *Defense & Technology*, (468), pp. 140-145, 2018.
- 8 D. H. Kwak, S. I. Jeon, J. R. Choi, and M. S. Han, "Experimental Analysis to Derive Optimal Wavelength in Underwater Optical Communication Environment", *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, 16(6), pp. 478-488, 2023.
- 9 R. H. Park, K H. Cho, T. G. Chung, S. Y. Kim, and H. L. Ko, "A Study on the Analysis of Technology Requirements for the Navy and Application Fields of Underwater Communication Systems", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 1083-1084, 2021.
- 10 Y. W. Kim, S. H. Lee, Y. T. Jung, and B. R. Kim, "A Study on Enhancing the Mobile Mine's Target Accuracy by Improving the Transfer Alignment Error", *Journal of Defence Quality Society*, 4(1), pp. 85-92, 2022.
- 11 J. H. An, "A Study on Improvement of Multitarget Tracking and Classification using LM-DIPDA for High Speed Underwater Vehicle", Hanyang University Graduate School, 2016.
- 12 J. M. Lee, "Development Direction of Maritime Weapon Systems according to Changes in Future Battlefield Environment", *Defense & Technology*, (312), pp. 36-51, 2005.
- 13 H. S. Park, Y. H. Kim, S. K. Oh, I. S. Kim, S. K. Yang, and Y. J. Kim, "A Study on the OTDR System for Diagnosis of Optical Fiber", *The Korean Institute of Electrical Engineers Conference*, pp. 1844-1846, 2001.
- 14 S. J. So, Y. G. Kim, H. Y. Choi, R. S. Chung, and J. B. Kim, "A Study on the Design of OTDR for Maintenance of

Single Mode Optical Cable”, *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 1408-1411, 2000.

- 15 B. C. Park, C. S. Rim, and J. H. Jung, “A Reliable Low-Loss Field-Installable Optical Connector Design by Splicing Angle Adjustment”, *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea – Semiconductor and Devices*, 48(9), pp. 6-12, 2011.
- 17 S. H. An, M. Y. Jung, O. G. Jeon, and T. G. Choi, “Technology Trends of Optical Connection Components”, *ETRI Electronics and Telecommunications Trends*, 7(3), pp. 121-128, 1992.
- 17 B. G. Kim, Y. W. Lee, “Study on the Quality of Index Matching Gel for Field Assembly Connector”, *Proceeding of the ITFE Summer Conference*, pp. 130-132, 2013.
- 18 B. C. Park, S. H. Seo, “A Study of Field-assemblable Fiber Optic Connector for Fiber Splicing”, *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 59(8), pp. 15-21, 2022.

AS6171 기반 무기체계 위조 전자부품 관리 방안에 관한 연구

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

Management of Counterfeit Electronic Components of Weapon Systems Based on AS6171

공혜원, Haewoon Kong

국방기술품질원, 성능개량연구실, 연구원
Researcher, Weapon System Improvement
Program Team, Defense Agency for
Technology and Quality

서한울, Hanul Seo

국방기술진흥연구소, 유도화력선행연구팀, 연구원
Researcher, Precedent Study Team for
Guided Weapon & Firepower Systems,
Korea Research Institute for Defense
Technology Planning and Advancement

박장식†, Jangsik Park

경성대학교, 전자공학과, 교수
Professor, Department of Electronics Eng.,
Kyungshung University

Abstract

The application of electric and electronic components in high level weapon systems has increased. The functions of electronic components have become more advanced and their reliability has become more difficult to verify because of the complexity of the supply chain. In particular, counterfeit electronic components can result in catastrophic consequences when used in military fields, critical infrastructures, automobiles, and medicine. In this study, cases of counterfeit electronic components and state-of-the-art technologies are surveyed and analyzed to avoid and manage counterfeits. International cooperation is required to manage the electronic-component supply chain. We propose an efficient management system for counterfeit electronic components that includes human resources, facilities, and information infrastructure. As electronic components are distributed throughout the international supply chain, they must be managed and tested in accordance with international standards. A procedure for testing electronic components based on SAE AS6171 is proposed.

keywords : Suspect and Counterfeit Parts, Electrical and Electronic Parts, Counterfeit Mitigation, Counterfeit Detection, Test and Inspection

† Corresponding Author : Jangsik Park

Tel : +82-051-803-6198, email : jsipark@ks.ac.kr

Kyungshung University, 124, 309, Suyeong-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

Received April 9th. 2024 Revised May 13th. 2024 Accepted June 10th. 2024 Published June 30th. 2024

1. 서론

최근 무기체계의 첨단화, 정밀화 추세에 따른 부품의 중요성과 함께 위조부품의 위험성이 증가하고 있다. 스트레이츠 리서치(Straits research)에 따르면, 2022년 세계 전자부품 시장 규모는 1,863억 8천만 달러로 평가되었으며, 2023~2031년 예측 기간 동안 연평균 성장률(CAGR)은 6.5% 성장하여 2031년까지 3,285억 달러에 이를 것으로 예상된다[1].

ERA(Electronic Resellers Association International)의 2023년 위조부품에 대한 연차보고서에 따르면 786건의 위조 또는 부적합 의심부품이 보고되었고 이는 전년 대비 소폭 증가한 수치이다. ERA에 보고된 제조업체 브랜드를 조사한 결과 텍사스 인스트루먼트(Texas Instruments)가 신고된 부품의 9%로 위조품의 가장 큰 표적이 되고 있으며, 자일링스(Xilinx)가 두 번째로 규모가 큰 표적이 되었다[2].

위조 전자부품으로 인하여 각종 시스템의 오작동과 더불어 인명 피해를 유발할 수 있으며, 부품의 변조로 중요한 정보를 유출하거나, 의도적인 시스템 운영을 방해할 수 있다. 전자부품의 평균 수명 주기가 5~7년에 불과하지만 무기체계는 20년 이상의 긴 제품 수명으로 요구되고 있어 제조 자원, 자재 부족 및 노후화 문제로 이어지기 때문에 방위 및 항공우주 산업을 포함한 다양한 산업이 위협해질 수 있다. 주요 전자부품 위조는 중고 PCB(Printed Circuit Board)를 수집하여 새 제품이나 다른 제품으로 수리 및 재판매하는 사례도 있으며, 불법적으로 지적재산권(IP, Intellectual property right)을 획득하거나 역공학(Reverse engineering) 또는 기능 에뮬레이션(Functional emulation)을 통하여 구성 요소를 복제하기도 한다.

위조 전자부품에 유입 방지 및 관리를 위하여 위조부품 검사 장치(Devices), 검사 기법(Algorithm), 검사 절차 및 체계(System) 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 위조부품 검사 장치에 대해서는 Ahi 등은 위조 전자부품에 대한 비파괴 검사를 위하여 X-

선과 테라헤르츠(THZ, Terahertz) 영상을 결합하여 분석함으로써 보다 효과적인 검사 방법을 제안하였다[3]. 종래의 X-선 영상 분석에 의한 부적합품 검사는 해상도가 높아 정교한 검사가 가능하지만 시간이 많이 소요되고, 직관적인 분석에 어려움이 있으나, THZ 영상은 해상도가 X-선 영상에 비해서 떨어지지만 정품과 부적합품의 차이를 직관적으로 표현할 수 있기 때문에 보다 효율적인 검사가 가능함을 보였다.

위조부품 검사 기법으로 Liu 등은 위조 전자부품의 검사 속도를 빠르게 하고 비용을 절감하기 위하여 디지털트윈 기반의 펄스 열화상 스크리닝 기술을 제안하였다[4]. 특징 추출에 주성분을 분석(PCA, Principle Component Analysis)을 사용하고 기계학습 방법을 적용하였다.

위조부품 검사 절차 및 체계 분야에서 Guin 등은 위조부품을 검출하고 방지하기 위하여 위조부품의 종류, 결합 그리고 각 결합별 검출 방법을 제시하였다[5]. 제시된 검출 방법은 이후 SAE의 AS6171 표준 제정에 근간이 된다. Huang 등은 전자부품의 수명주기 모든 단계에서 위조 전자부품 특히 IC의 이상을 검출하기 위해서 블록체인(Blockchain)을 기반으로 검증하는 프레임워크를 제안한다[6]. Aniello 등은 IC 집적회로 공급망의 복잡성으로 인하여 조달되는 IC의 이력과 무결성을 평가하기 어려운 점을 악용하여 위조 또는 백도어 삽입과 같은 악의적인 회로 또는 코드가 삽입되는 것을 방지하기 위해서 블록체인과 물리적인 복제방지 기능을 구현하였다[7]. SAE에서는 위조부품 또는 위조가 의심스러운 전기, 전자부품을 검출하기 위한 시험 및 검사 기준, 절차, 시험검사 인력의 교육과 수준을 포함한 인증요구 사항을 정의한 AS6171 표준을 제정하고 위조 부품에 대한 관리를 하고 있다[8]. Heo와 Cho는 전자부품의 입고검사와 사용검사를 할 때, 위조 또는 변조 부품에 대한 검사 방법을 제안하였다[9]. Kim 등은 국내외 위조부품 현황을 조사하고, 위조부품 관리 방안을 제안하였다[10]. 위조부품 관리를 위하여 제도개선 방안, 공급망 관리, 품질보증 방안 등의 일반

적인 사항을 제안하였다.

현재 우리나라는 품질관리 규정에 일부 위조부품 관련 조항이 반영되어 있으나, 구체적인 위조품 방지 정책이 없는 상황이고 위조부품의 위험에 노출되고 있다. 특히, 부품 위조로 인한 수명주기 비용 및 불가동 시간의 증가는 무기체계 운영에 있어 악영향이 크기 때문에 위조 전자부품 유입 방지 및 관리 방안 수립이 필요하다.

본 논문에서는 위조부품 발생 사례, 유통 환경, 위조부품 관리 방안에 대한 국내외 동향을 분석한다. 위조 전자부품 유입 방지 및 관리 체계와 AS6171에 부합하는 시험검사 절차 및 방법 제안한다. 위조부품 관리를 위하여 관리체계 방안으로는 인프라, 인력, 시험검사 설비 구축 방안을 제시하고, AS6171 시험 절차를 효율적으로 수행하기 위하여 입고 관리, 검사 분석, 조치 및 DB화로 세부적인 방안을 제시한다.

2. 위조부품 및 관리 기술 현황

2.1. 위조품 정의 및 분류

위조 전자부품에 대하여 가장 포괄적인 표준은 SAE의 AS6171이다. Guin 등이 제안하고 AS6171에서 채용한 위조부품 종류는 7가지 유형으로 정의하고 Figure 1과 같다. 위조부품의 7가지 유형에 대한 정의는 다음과 같다.

- ① 재사용(Recycled): 시스템에서 재생, 복원된 후 제조업체의 새 부품 또는 정품 부품으로 수정된 부품
- ② 재표기(Remarked): 불법 부품이 아닌 것으로 표시하기 위하여 합법적인 부품 표시를 위조 표시로 교체한 공인 제조업체의 부품
- ③ 과잉생산(Overproduced): 허가 또는 승인받은 시설 또는 허가받지 않은 시설에서 계약 이외의 부품을 초과 생산한 부품
- ④ 규격 미달/불량(OOS, Out-of-specification/Defective): 공인 제조업체의 규격 또는 사양에 의거하여 부적합으로 식별한 후 규격에 미달되거나 불량인 부품
- ⑤ 복제(Cloned): 설계 또는 제작을 허가 또는 승인받지 않은 제조업체가 승인된 제조업체의 부품으로 복제한 부품
- ⑥ 위조문서/부품 대체(Forged documentation): 부품에 대한 정보가 잘못 전달되도록 대체 또는 수정된 부품
- ⑦ 변조(Tampered): 일반적으로 복제된 칩에 적용되는 변조 부품은 방해 행위나 오작동을 위하여 칩을 수정한 부품

2.2. SAE의 AS6171 표준

미국에서는 무기체계에 대한 위조 전자부품 유입 사례가 다양하게 발생하여 위조 전자부품에 대한 관

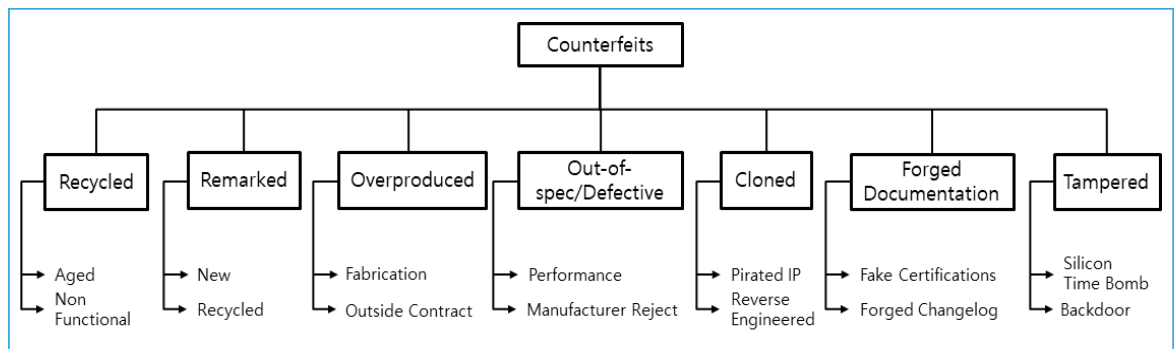


Figure 1. Taxonomy of counterfeit types

리를 선도적으로 실시하였다. 국방, 항공우주, 자동차 등에서 위조부품 유입 방지 및 관리를 위하여 관련 분야 대학과 연구소에서 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 SAE의 표준화 그룹 G19와 G21에서 2009년부터 제조업체, 공급망 관리와 시험검사 표준을 제정하여 체계적인 방안을 수립하고 적용하고 있다.

AS6171은 위조부품에 대한 시험검사 방법을 제시하고 있다. Table 1은 AS6171 표준을 통한 시험검사항목 및 방법을 나열한 것이다.

AS6171에서 크게 물리적 검사, 화학적 검사, 그리고 전기적 검사를 수행한다. 물리적 검사는 육안에 의한 외관 검사, IC에 대한 디캡(Decapsulation) 검사, 전자현미경과 음향현미경 그리고 X-선 검사를 수행한다. 화학적 검사는 위조에 의한 화학적 조성의 변화를 화학물질로 활용한 검사, 라만분광기 검사 그리고 열중량 검사를 수행한다. 전기적 검사는 시료 전자부품의 전기적 특성적 즉, 저항, 전압, 전류를 정품의 특성과 비교 분석한다.

Table 1. Tests of AS6171

Standards	Inspections
AS6171/2	External Visual Inspection
AS6171/3	X-Ray Fluorescence
AS6171/4	Delid/Decapsulation
AS6171/5	X-ray Imaging
AS6171/6	Acoustic Microscopy
AS6171/7	Electrical Test
AS6171/8	Raman Spectroscopy
AS6171/9	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
AS6171/10	Thermogravimetric Analysis
AS6171/11	Design Recovery

2.3. 국내 위조 전자부품 관리 현황

국내에서는 일부 민간의 자동차, 의료 분야에서도 위조부품이 적발되기도 하였지만 위조부품에 대한 관리가 다소 미흡한 실정이다. 국내 위조부품에 대한

관리 현황을 정리하면 다음과 같다.

신뢰성 시험인증은 민간 분야에서도 체계적으로 이루어지고 있다. 자동차 부품 및 모듈에 대한 환경 시험(온도, 스트레스 시험)과 전기적 특성 위주의 신뢰성 시험을 수행하고 있다. 위조부품에 대한 시험검사 체계는 최근 일부 도입되고 있으나 국제 표준에 부합하는 시험검사 체계를 갖추고 있지 못한 실정이다.

시험검사 장비 및 설비가 분산되어 있다. 위조부품 시험검사에 활용할 수 있는 시험검사 장비들은 기관별로 분산되어 있어 일관성 있는 시험검사에 어려움이 있다.

위조부품은 자동차산업, 원자력발전소 등에 유입되었을 때, 인적·물적 피해가 큼에도 불구하고 위조부품에 대한 시험검사는 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다. 위조부품이 유입된 PCB 보드 또는 시스템이 발생하면 의심 또는 위조 여부에 대한 검사를 요청하기 때문에 민간 시험기관에서는 상시 고가의 시험검사 장비와 설비를 갖추고 시험검사 전문인력을 유지하는 데 어려움이 있다.

국방 무기체계를 개발 생산하는 민간 기업에서는 간단한 외관 검사 위주의 시험검사를 수행하고 있어 정교한 위조 전자부품에 대한 탐지는 다소 어려움이 있다.

따라서 군수 분야는 고도의 신뢰성이 요구되기 때문에 효율적인 위조부품 관리 체계를 수립할 필요가 있다. 민간기관에서 구축하기 어려운 시험검사 장비 및 설비를 도입하여 국제 표준에 부합하는 위조부품 시험검사 체계를 수립하고 안정적인 운영을 통하여 안전하고 효율적인 무기체계 운영을 지원할 필요가 있다.

3. 위조 전자부품 관리 방안

위조 전자부품 유입 방지 및 관리를 위한 업무는 위조부품 회피(Avoidance), 검출(detection), 경감(mitigation), 처리(Disposition)로 나눌 수 있으며,

본 논문에서는 위조부품 유입 방지를 위한 검출 및 처리 방안을 제시한다.

검출은 위조부품이 이미 공급망으로 유입되었을 때, 부적합품으로 검출하는 과정이다. 품질검사, 시험, 역공학, 부품 이력 추적 및 공급망을 감시함으로써 효율적으로 검출할 수 있다. AS6171을 기반으로 부품의 위조 또는 변조 여부를 판별하기 위한 시설 및 장비와 인력 그리고 운영 방안을 제안한다.

처리는 검출된 위조부품을 어떻게 다룰 것인지 결정하여 해당 부품의 처리 및 처분에 대한 규정 및 정책을 수립하고 준수하도록 한다. 위조 전자부품을 파기, 재검사, 재인증하거나 협력 또는 공급업체와의 협의도 진행한다. 또한 보고, 법적조치, 신고 등에 대한 방안을 수립할 필요가 있으며, 위조부품에 대한 데이터베이스를 축적하고 협력 및 공급업체에 대한 이력을 갱신하는 것이 필요하다.

3.1. 위조부품 관리 체계

위조부품 유입 방지를 위한 관리 체계는 인프라, 인력, 설비로 구성하는 방안을 제안한다.

인프라는 위조부품 공급망 관리, 검출 그리고 처리를 위한 전반적인 지원을 위한 정보 시스템, 시험 및 검사실(Lab, Laboratory) 구축, 데이터베이스 및 문서화로 구성한다. 시험 및 검사실 구축, 데이터베이스 및 문서화는 정보 시스템으로 통합 연동되도록 한다. 인프라의 주요 기능은 다음과 같다.

- 정보 시스템: 부품 정보를 관리하고 통합함. 부품의 원산지, 공급업체 정보, 품질 인증서 등을 관리하고 갱신함
- 시험 및 검사실 구축: 정교한 시험 및 검사를 위한 시설과 장비를 구비하여 부품의 신뢰성과 안전성을 평가함
- 데이터베이스 및 문서화: 위조부품에 대한 데이터베이스를 구축하고 문서화하여 위조부품 검출 및 처리에 활용함

인력 즉, 위조부품 관리 체계를 운영할 인력은 품질관리팀, 공급망 관리팀, 시험 및 분석팀으로 구성한다. 품질관리팀은 전반적인 체계 관리 업무를 수행한다. 공급망 관리는 협력 또는 공급기업과 협력하여 신뢰성 있는 공급망 관리 업무를 수행한다. 시험 및 분석팀은 AS6171에 따라 위조 또는 변조 의심 부품에 대한 위험도 평가(Risk assessments)를 진행하고, 이에 대응하는 시험검사 계획을 수립하고, 시험검사를 수행함으로써 위조부품 여부를 판별하여 위조부품을 검출하는 업무를 수행한다. AS6171의 각 검사 방법에 활용되는 장비 및 설비 운용 능력을 갖추어야 한다. 다음은 인력 구성 방안을 정리한 것이다.

- 품질관리팀: 품질관리 시스템을 구축하고 전반적인 운영 및 관리함
- 공급망 관리팀: 신뢰할 수 있는 공급망을 구축하고 외부 업체들과 협력을 강화함
- 시험 및 분석팀: 부품의 시험 및 분석 담당하고 위조부품을 식별하고 평가함

설비는 AS6171 시험검사를 수행할 수 있는 사양의 장비와 설비로 구축한다. 위조부품을 검출할 수 있는 물리적, 화학적 특성을 분석할 수 있는 장비, 설비 그리고 재료를 구비한다. Table 2는 위조부품 시험검사를 위한 설비를 정리한 것이다.

- 시험장비: 정교한 시험 및 분석을 수행하는 데 적합한 장비와 보조설비와 재료를 구비함. 부품의 물리적, 화학적 특성을 분석할 수 있어야 함 (* AS6171 표준에 부합하는 장비 및 설비 구축)

3.2. 위조부품 시험검사 절차

위조 전자부품의 관리를 위해서 위조 전자부품을 판별하는 시험검사 절차가 필요하다. 제안하는 시험검사 절차는 Figure 2와 같다. 시험검사 절차는 국제적인 공급망을 통하여 전자부품이 공급되고 있는

Table 2. Counterfeit parts test and inspection standards, test and inspection equipment and auxiliary equipment

No	Standards	Equipments	Auxiliary Devices
1	AS6171/2	Digital optics/scanning electron microscopy	Ion Sputte, Cutter, Polishing, Water supply, Drainage device, Air compressor
2	AS6171/3	ED-X-ray fluorecence spectroscopy	Independent Lab., Air compressor
3	AS6171/4	Delid/Decapsulation Device	Ventilation device, waste collection, Air compressor
4	AS6171/5	X-ray diffraction analyzer	Independent Lab, Air compressor, Dedicated specimen storage stand
5	AS6171/6	Acoustic microscope	Water supply, Drainage device, Waste collector Air compressor
6	AS6171/7	Electrical function test device	ESD prevention equipment, UPS, Air compressor DMM, Chip Mount
7	AS6171/8	Raman spectroscopy	Air compressor, Independent analysis table (vibration, interference avoidance)
8	AS6171/9	Fourier transform infrared spectroscopy	Air compressor, Independent analysis table (vibration, interference avoidance)
9	AS6171/10	Thermogravimetric analyzer	Air compressor, Independent analysis table (vibration, interference avoidance)
10	AS6171/11	Design recovery Delid/Decapsulation Device	Ventilator/balance table

상황을 고려하여 AS6171 표준 시험검사와 부합하도록 한다. 위조부품의 시험검사 절차는 크게 입고 관리, 검사 분석, 조치 및 DB화로 구분한다.

입고 관리는 입고, 검수, 입고 DB화, 그리고 시험 분석을 위한 분석 출고 단계로 나눈다. 입고는 제조사 또는 공급사 즉, 시험검사 요청기관에서 직접 방

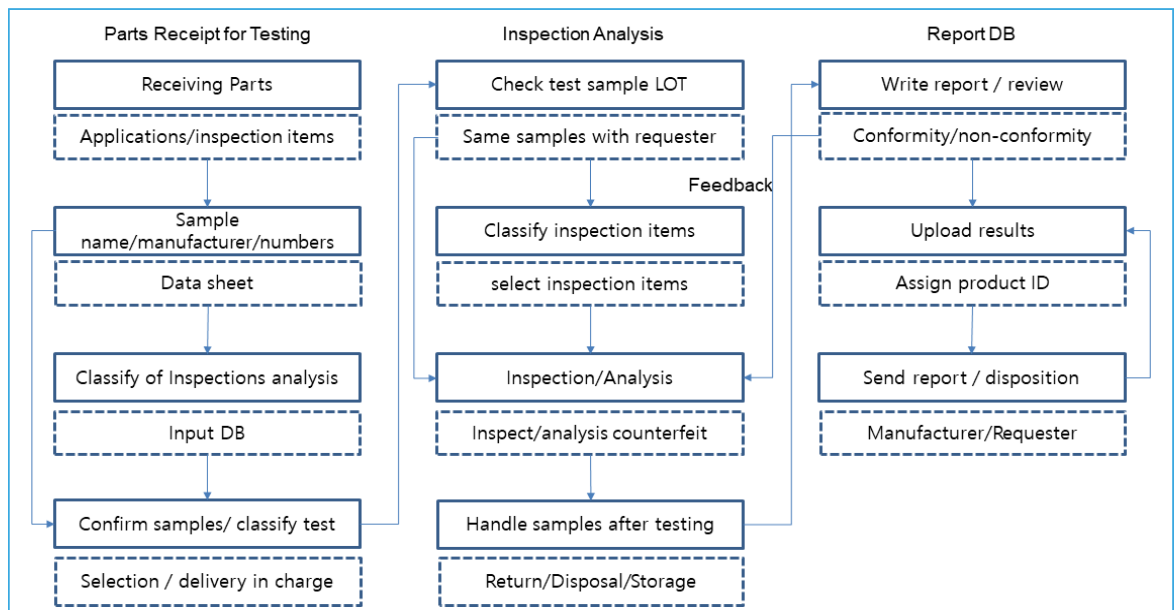


Figure 2. Test procedure of counterfeit parts.

문하여 시험검사를 신청하고 검사항목을 협의한다. 검수는 시험검사 의뢰 부품에 대한 시료명, 제조사, 수량, 데이터쉬트와 함께 접수 확인한다. 입고 DB화 단계는 시료와 관련 정보에 대하여 DB 입력하고 관리한다. 시험검사 및 분석을 위하여 시료를 확인하고 시험 항목을 분류하여 시험검사 및 분석을 위하여 출고한다.

검사 분석은 검사시료 LOT 확인, 검사항목 분류, 검사 분석, 검사 후 시료 처리를 단계별로 수행한다. 검사시료 LOT 확인 단계에서는 시험검사 요청기관에서 제조 또는 공급하는 부품과 동일한 부품임을 확인한다. 검사항목 분류 단계에서는 시료의 위험도 평가를 하고 위조 여부를 판별하는 데 있어 적절한 항목을 선정한다. 검사 분석 단계에서는 위조 전자부품 검사 자격을 갖춘 담당자가 선정된 검사항목에 따라 물리적 검사, 화학적 검사, 전기적 검사를 단계별로 수행한다. 검사 후 시료 처리는 의뢰 기관으로의 반납, 폐기 또는 보관으로 나누어 처리한다.

조치 및 DB화는 보고서 작성 및 검토, 결과 DB 등재, 보고서 발송 및 조치 단계를 순차적으로 수행한다. 보고서 작성 및 검토 단계는 시험검사 결과를 바탕으로 적합 또는 부적합 결정을 하고 보고서를 작성한다. 부적합품인 경우에는 부적합 항목에 대하여 7종의 위조부품 유형, 시험검사 데이터, 사진을 포함한 상세한 내용을 기록하고 검토한다. 필요에 따라서는 관련 전문가 위원회를 통하여 보고서 내용을 검토한다. 결과 DB 등재 단계에서는 시험검사 시료에 대해서 고유 번호를 부여하고 정보시스템에 등록 관리한다. 시험검사 요청 기관으로 보고서를 발송하고 시험검사 결과에 대한 조치를 한다.

4. 결론

무기체계의 지능화 및 정밀화에 따른 고도화에 따라 반도체 및 전자부품의 채용이 확대되고 있다. 국방뿐만 아니라 항공우주, 자동차, 가전, 의료 등의 다양한 분야에서 반도체 및 전자부품의 활용이 많아

지면서 위조 전자부품의 위험은 그 범위와 규모 면에서 지속적으로 증대하고 있다. 위조 전자부품의 문제는 국가 안보, 안전 위협 그리고 경제적인 손실을 초래한다.

본 논문에서는 위조제품과 전자부품의 국내외 현황을 조사 분석하고, 위조 전자부품을 회피하기 위한 최신 기술과 표준을 조사 분석하고, AS6171 국제표준을 바탕으로 위조 전자부품 유입 방지 및 관리 방안을 제안한다. 제안하는 위조 전자부품 관리 방안은 위조 전자부품 시험 및 검사 절차, 조직 구성을 포함한다. 다양한 무기체계에서 요구되는 세부적인 위조 부품 시험 및 검사 체계를 구축하기 위해서는 위조 전자부품의 위험도 분석이 요구되어 향후 무기체계별 위험도 분석을 하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2023년 국방기술품질원의 재원으로 “무기체계 위조부품 유입방지 방안 연구” 연구용역 과제 지원을 받아 수행된 연구 결과임

참고문헌

- 1 Electronic Components Market, <https://straitresearch.com/report/electronic-components-market>, 2022
- 2 ERAI, https://www.era.com/era_blog/3183/2023_annual_report, 2023, 11, 30
- 3 Ahi, K., Asadizangjani, N., Shahbazmohamadi, S., Tehranipoor, M., & Anwar, M., “Terahertz Characterization of Electronic Components and Comparison of Terahertz Imaging with X-ray Imaging Techniques”, *Proc. of SPIE*, 2015.
- 4 Liu, H., Tinsely, L., Lam, W., Addepalli, S., Liu, X., Starr, A., & Zhao, Y., “A Novel Inspection Technique for Electronic Components Using Thermography (NITECT)”, *Sensors*, 20(17), 2020.
- 5 Guin, U., DiMase, D., & Tehranipoor, M., “Counterfeit Integrated Circuits: Detection, Avoidance, and the Challenges Ahead”, *Journal of Electronic Testing*, 30,

pp. 9-23, 2014.

- 6 Huang, C., Njilla, L., & Geng, T., "Detecting Counterfeit ICs with Blockchain-based Verification Framework", *2020 IEEE International Smart Cities Conference*, 2020.
- 7 Aniello, L., Halak, B., Chai, P., Dhall, R., Mihalea, M., & Wilczynski, A., "Anti-BIUff: towards counterfeit mitigation in IC supply chains using blockchain and PUF", *International Journal of Information Security*, 20, pp. 445-460, 2021.
- 8 Test Methods Standard: General Requirements, Suspect/Counterfeit, Electrical, Electronic and Electromechanical Parts(AS6171), SAE International, 2016.
- 9 Heo, K. Y., & Cho, S. Y., "Study on Receiving and Counterfeit Inspection for Electronic Parts", *Proc., Fall Conference of Society for Aerospace System Engineering*, pp. 485-486, 2017.
- 10 Kim, S. K., Kim, Paik, W. C., Kim, D. G., & Kim, H. G., "A Study on Quality Assurance to Prevent Applying Foreign-components Procurement Counterfeit Items of Weapon System", *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 15(4), pp. 625-636, 2020.

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 군수품분임대회 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	학술행사	산학협동	교류협력
 국방품질 경영 이론, 정책/제도 연구	 종합학술대회, 분임 경진대회, 전문학술지/ 매거진 발간	 DQS 전문 분과위원회 운영/기술지원	 국내 학술단체 및 기관과의 교류

DQS 주요 추진업무

주요업무	내용	시기
<input checked="" type="checkbox"/> 국방품질연구논집 정기 발간 <KCI 등재후보학술지>	국방품질경영 전문학술지	6월, 12월
<input checked="" type="checkbox"/> 군수품 현장 품질기술 분임 혁신대회	3개 그룹별 분임조 대회 (중소·벤처기업 / 소요군 / 대·중견기업)	매년 1회
<input checked="" type="checkbox"/> 국방품질종합학술대회	국방품질 정책 / 제도 발전방향	매년 1회
<input checked="" type="checkbox"/> DQS Magazine 발간	국방품질경영 Web 기고지	연중 매월 게재
<input checked="" type="checkbox"/> 전문 분과 학술활동	분과별 간담회· 학술세미나 등	3월 ~ 12월

전문 분과 학술활동

분과	주요활동
<input checked="" type="checkbox"/> 국방품질경영제도연구	<input checked="" type="checkbox"/> 국방품질 정책/제도 및 기법 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 국방인증제도연구	<input checked="" type="checkbox"/> 국방품질인증 경영체제 구축방안 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 국방소프트웨어연구	<input checked="" type="checkbox"/> 국방 SW 정책/제도, 시험관련 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 국방신뢰성연구	<input checked="" type="checkbox"/> 국방신뢰성 정책/제도, 저장신뢰성, RAM 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 항공·감항연구	<input checked="" type="checkbox"/> 항공 무기체계 최신기술·품질 및 감항인증 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 소음진동연구	<input checked="" type="checkbox"/> 소음진동 기준 및 평가제도 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 단종·위조부품 대응연구	<input checked="" type="checkbox"/> 부품 단종 및 위조부품 관련 대응방안 연구
<input checked="" type="checkbox"/> C5ISR 연구	<input checked="" type="checkbox"/> 지휘정찰 신기술 개발 동향/ 품질보증 방안 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 유도탄약안전품질연구	<input checked="" type="checkbox"/> 유도탄약 무기체계 품질안전 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 표준화연구	<input checked="" type="checkbox"/> 국방 표준화 정책/제도 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 빅데이터 기반 운용성연구	<input checked="" type="checkbox"/> 데이터분석 기반 운용성 개선 연구
<input checked="" type="checkbox"/> 우주위성연구	<input checked="" type="checkbox"/> 우주무기체계 품질, 표준, 제품인증, 시험방안 연구
<input checked="" type="checkbox"/> AI·사이버연구	<input checked="" type="checkbox"/> AI·사이버 적용 무기체계 품질관리 방안 연구

가입안내

- 방법 1**
• <https://www.dtaq.re.kr:8084/dqs/> ➡ 회원가입(우측상단)
- 방법 2**
• 국방기술품질원 홈페이지(우측상단) ➡ DTaQ 정보서비스
➡ 국방품질연구회 ➡ 회원가입(우측상단)

회원
가입
(무료)

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<KCI등재후보학술지>

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(3.31.), 매년 2호(9.30.)

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(055-751-5274)

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

제6권 1호 2024년 6월

Vol.6 No.1 Jun 2024