



Received: 2025/08/08
Revised: 2025/08/20
Accepted: 2025/09/19
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Woo-Jae Park

5th R&D Institute, Agency for Defense Development
Jinhae P.O. Box 18, Changwon-si,
Gyeongsangnam-do, 51678, Republic of Korea
Tel: +82-55-540-6836
Fax: +82-55-542-3737
E-mail: wjpark@add.re.kr

Abstract

함정에 탑재되는 무기체계의 경우 개발된 시제가 함정에 설치되기 때문에 연구개발 초기 단계부터 신뢰성 설계 개선 활동을 수행하는 것이 중요하다. 이를 위해 국내 연구개발사업에서는 통합체계지원 요소 중 하나인 연구 및 설계 반영 활동을 수행함으로써 설계 개선 활동을 수행하고 있다. 이 연구에서는 신뢰성 설계 개선 활동에 필요한 설계반영 점검항목과 점검표를 제시하였다. 그리고 A체계 사례를 통해 신뢰성 설계 활동을 통해 개선된 신뢰도(예측값)를 확인함으로써 제시한 설계 개선 활동의 실효성을 확인하였다.

In this study, because the developed prototype is installed on the ship, it is important to carry out reliability design improvement activities from the early stages of R&D in the case of weapon systems mounted on ships. It is carried out by design improvement activities in the domestic R&D project, conducting research and design improvement activities, which are one of the elements of integrated system support. In this study, it is presented with the design reflection items and checklist necessary for reliability design improvement activities. In addition, the effectiveness of the proposed activity is confirmed by showing the improved reliability (predicted) values on the A system.

Keywords

통합체계지원(Integrated Product Support),
연구 및 설계반영(Design Interface),
신뢰도 개선(Reliability Improvement),
신뢰성 설계(Design for Reliability),
점검항목(Checklist)

개발단계 설계 개선 활동을 통한 신뢰도 개선 방안 연구

Study on the Reliability Improvement through Design Improvement Activities in the Development Stage

박우재^{1*}, 이광민², 정준³, 차종한³

¹국방과학연구소 제5기술연구원 제2체계개발단 선임연구원

²LIG Nex1 미래전쟁IPS연구소 선임연구원

³LIG Nex1 미래전쟁IPS연구소 수석연구원

Woo-Jae Park^{1*}, Gwang-Min Lee², Jun Jeong³, Jong-Han Cha³

¹Senior researcher, 2nd PMO, 5th R&D Institute, Agency for Defense Development

²Research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

³Chief research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

1. 서론

무기체계의 신뢰도 저하로 인해 발생하는 반복적인 고장은 가용도 및 전투준비태세를 야기하며 운용유지 비용 상승에 영향을 미치게 된다. 무기체계 연구개발사업 초기의 설계 개선 활동을 통한 신뢰도 개선은 결국 운용유지 단계에서의 고장 감소로 이어지게 되며, 이는 전투력 보장과 수명주기비용 절감 등에 영향을 줄 수 있다. 특히 연구개발사업 초기에 신뢰성 문제가 고려되지 않으면 이후 제작, 시험평가 단계뿐만 아니라 운용유지 단계에서 다수의 결함이 발생할 수 있으며, 이러한 단계에서는 결함 원인 파악, 시정조치 및 설계 개선에 높은 비용과 많은 시간이 소요되게 된다. Fig. 1은 개념설계에서 시제품 제작 단계로 갈수록 가능한 설계 대안 및 설계 변경 기회가 감소하며 설계변경을 위한 비용이 증가하는 것을 보여준다.

국내 연구개발사업에서 수행된 신뢰성 설계 개선 활동 관련 연구를 살펴보면 다음과 같다. 서재현 등(2014)은 K 계열 무기체계를 사례로 하여 위험관리 기반의 품질 및 신뢰도 향상에 대한 방안 및 효과를 설명하였다. 특히 신규 개발 및 양산 무기체계에 구분하

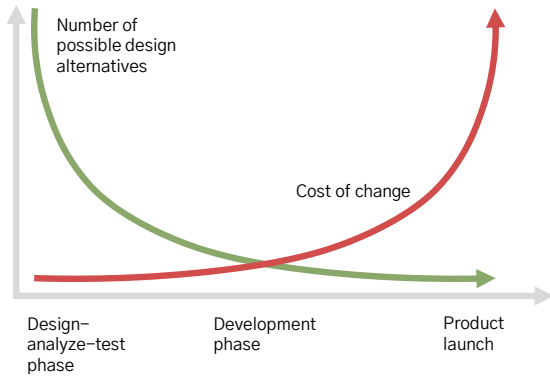


Fig. 1. Cost vs. design changes graph

여 위험 식별을 수행하는 방법을 제시하였다[1]. 송일호(2018)는 소요군에서 운용 간 발생한 고장사례 분석을 통하여 이를 개선하기 위한 설계 측면, 종합군수지원(integrated logistics support, ILS) 측면의 개선방안을 제시하였다. 해군 무기체계를 대상으로 야전 운용 간 실제 발생한 고장사례에 대하여 수집하여 분석하였으며, 고장 원인별 분류된 결과를 사전 예방 가능한 고장과 불가능한 고장으로 분류하여 사전 예방 가능한 고장이 어느 정도 차지하는지 정도와 사전 예방 가능한 고장 최소화를 위한 대책과 제안사항을 각 고장별로 제시하였다[2]. 이주승 등(2019)은 K56 탄약운반장갑차에 장착되는 서보제어기 통신오류를 제거하여 신뢰성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 서보제어기 통신신호 분석 및 고장 원인 분석을 통해 회로카드조립체의 각 통신회선 간의 이격거리 조정, 위치 변경 등의 신호간섭을 회피하는 재설계를 수행하여 통신오류 현상을 해소하였다. 또한 서보제어기 단품시험과 체계장비 부착시험을 통해 개선된 신뢰성을 입증하였다[3].

조정호 등(2020)은 국방 무기체계의 전(全) 수명주기에 걸쳐 FRACAS(failure reporting, analysis, and corrective action system)를 효과적으로 적용하기 위하여 체계 수명주기 단계와 FRACAS closed-loop 프로세스, FRACAS 필수 요소 등을 고려한 통합 아키텍처 구축에 대해 연구하였다[4]. 신상희 등(2020)은 FMECA(failure modes, effects, and criticality analysis)와 초가속수명시험(highly accelerated life test, HALT)을 통하여 분석과 시험이라는 방법을 같은 장비에 각각 수행했을 때, 도출된 신뢰성 성장 활동 내용과 그로 인한 설계변경/검토 결과가 두 방법에서 어떠한 차이를 보이는지 비교/분석하고 신뢰성

성장 활동을 강화하기 위한 방안을 제시하였다[5]. 김상갑 등(2021)은 미 국방부의 무기체계 신뢰도에 대한 문제점 인식과 개선 방안을 살펴보고 현재 함정에서 운용되고 있는 탑재 장비에 대한 신뢰도 분석사례를 통해 해군 함정 무기체계 신뢰도 향상을 위한 개선 방안을 제시하였다[6]. 전동주 등(2023)은 함정 탑재 전자 구성품을 대상으로 설계 단계부터 수명주기 비용을 고려한 설계 개선 방안으로 D-FMEA(design failure mode effect analysis) 방법에 수량 및 비용을 고려한 지표를 추가함으로써 개선 대상 구성품의 우선순위를 선정하고 신뢰성물리학을 통한 신뢰성 설계 개선 방법을 제안하였다. 그리고 개선 결과를 비교함으로써 총 수명주기 간 비용 절감을 위한 예측을 수행하였다[7]. 이광민 등(2023)은 인명 손상, 부품 및 구성품의 고장이 체계에 미치는 영향 등 중요 고려 사항을 확인하여 D-FMEA 대상 품목 선정 절차를 포함한 D-FMEA 수행 방안을 제안하였다. 또한 이를 국내 함정 무기체계 연구개발사업에 적용하여 D-FMEA를 수행함으로써 설계 초기 단계에서 설계 개선을 통해 신뢰성을 향상시켰다[8].

봉한울 등(2024)은 천무 발사대에서 식별된 비정상적인 신호처리에 대한 결함 고찰 및 원인 분석을 수행하고 신호형태 개선을 통해 발사대의 전반적인 구동과 제어 수행에 대해 신뢰성 및 안정성을 확보하였다[9]. 차종한 등(2024)은 수중에서 운용되는 무기체계 내에 장착되는 전자구성품인 연동처리보드에 대해 신뢰성 물리학 방법론을 적용하여 분석하였다. 다양하고 가혹한 환경조건에서 보드의 신뢰성을 예측, 고장에 취약한 부위를 식별하여 설계 개선을 통해 신뢰성을 향상시킬 수 있는 대안을 제시하였다[10].

상술한 신뢰성 설계 개선 활동 관련 연구 결과를 종합하여 보면 신뢰도 개선을 위해 고장 원인 분석 및 검증, FMECA, D-FMEA, 신뢰성물리학 등을 통해 개선 활동을 수행한 것을 볼 수 있다.

국내 무기체계 연구개발 사업 역시 초기 단계에서부터 군수지원 요구사항을 설계에 반영하여 설계변경을 최소화하는 것이 중요하다. 특히 함정에 탑재되는 무기체계의 경우 개발된 시제품이 함정에 설치되기 때문에 연구개발 초기 단계부터 신뢰성 설계 활동을 수행하는 것이 중요하다. 통합체계지원(integrated product support, IPS) 분야에서는 연구 및 설계 반영 활동을 통해 신뢰도를 포함한 여러 가지 설계 개

선 활동을 수행하고 있으며, 특히 신뢰도를 높이기 위한 활동을 조기에 수행한다면 장비 운용가용도 향상을 통해 운용유지비용을 포함한 총 수명주기비용 절감에 기여할 수 있을 것이다.

따라서 이 연구에서는 국내 무기체계 연구개발 사업 초기에 체계적인 신뢰성 설계 개선 활동에 필요한 설계반영 점검항목과 점검표를 제시하고자 한다. 그리고 A체계 사례를 통해 신뢰성 설계 활동으로 개선된 신뢰도(예측값)를 확인함으로써 제시한 설계 개선 활동의 실효성을 검증하였다.

2. 개발단계 신뢰도 개선 방안

무기체계 개발 초기 단계에서 설계반영 지침 및 설계반영 점검항목을 설정하여 설계 단계에서 설계반영 점검항목을 기준으로 장비 설계를 검토하고 장비의 신뢰성 향상을 위한 설계 개선 및 설계 환류를 통해 신뢰도 개선에 대한 추적관리를 수행하고자 한다.

2.1 설계반영 점검항목 설정

“System Engineering Management 4th Edition Appendix D. ‘Design Review Checklist’”[11]를 바탕으로 중복되거나 신뢰성과 관련 없는 항목을 제외하였다. 그 결과 신뢰성 관련 설계반영 점검항목은 ① 신뢰성을 고려한 부품 선정 여부, ② 이중화 설계 및 2차 고장 예방 여부, ③ 과열 방지를 위한 냉각 관련 설계 여부, ④ 치명적인 구성품 식별 및 대책 수립 여부, ⑤ 신뢰도 예측 분석 여부 등 총 다섯 가지 세부 항목으로 구분된다(Table 1 참조).

Table 1. Reliability subcategories

Categorize	Description
Reliability	① Select parts considering reliability
	② Redundancy design and secondary failure prevention
	③ Cooling related design to prevent overheating
	④ Identification of critical components and establishment of countermeasures
	⑤ Reliability prediction analysis

2.2 설계반영 점검표 제안 방안

선정된 설계반영 점검항목을 기준으로 설계반영 여부를 추적관리하기 위해서는 개발단계별 점검 이력을 작성해야 한다. 이를 위해 필요한 설계반영 점검표를 제안하고자 하며 그 내용은 Fig. 2와 같다. 설계반영 점검표 좌측에는 30개의 설계반영 점검항목과 각각에 따른 세부항목을 나타내고 있으며, 장비 검토 사항과 식별되는 해당 문제점을 작성한다. 설계반영 점검표 우측에는 좌측에 작성한 문제점에 대한 설계반영 대안 및 적용 결과를 작성한다.

Details of equipment design reflection			
Design reflection guidelines		Design reflection results	
Category	Reliability - 1	Reflection	Others
Sub category	Reliability prediction analysis	O or X	

Fig. 2. Design reflection checklist

2.3 설계반영 지침 적용

설계반영 지침 적용은 Fig. 3와 같이 크게 설계반영 지침서의 개발과 배포, 배포된 지침서를 활용한 설계/검토/확인, 검토사항 반영 여부 확정, 설계반영 여부 추적관리로 이루어진다. 이때 개발단계별 설계반영 지침서를 기준으로 설계반영 점검항목을 확인하고 설계반영 현황 및 반영사항을 확인한다. 무기체계 개발단계별 상세한 내용은 다음과 같다.

체계요구사항검토(system requirement review) 및 체계기능사항검토(system functional review) 단계에서 설계반영 지침서를 작성한다. 기본설계검토회의(preliminary design review) 단계에서 작성된 설계반영 지침서의 설계반영 점검항목을 고려하여 설계를 수행하고 설계반영 점검표를 작성한다. 도출된 검토사항은 기본설계검토회의 전에 검토하여 반영 여부를 결정하고 설계반영 점검표를 보완한다. 상세

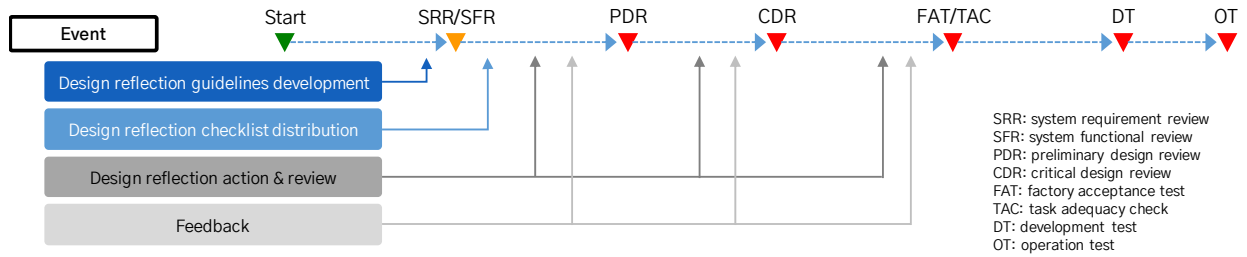


Fig. 3. Design reflection guidelines plan

설계검토회의(critical design review) 단계에서 이전에 확정된 검토사항과 설계반영 지침서의 설계반영 점검항목을 고려하여 설계를 수행하고 설계반영 점검표를 작성한다. 도출된 검토사항은 상세설계검토회의 전에 검토하여 반영 여부를 결정하고 설계반영 점검표를 보완한다. 임무적합성점검(task adequacy check) 단계는 개발시험평가(development test & evaluation) 이전에 소요군 요구조건 충족 여부를 점검하는 활동이다. 이 단계에서는 이전 단계에서 확인된 검토사항과 임무적합성점검 기간 동안 설계반영 점검표를 활용하여 설계반영 내용을 확인하고 설계반영 점검표를 보완한다. 임무적합성점검 이후에는 확정된 설계반영 사항에 대한 반영 내역 및 설계변경 사항에 대해 지속적으로 추적관리를 수행한다.

3. 설계 개선 활동 사례 - 적용 대상: A 체계

본 연구에서는 실제 개발 중인 무기체계에 설계반영 지침 및 설계반영 점검항목을 적용하여 설계반영 점검표를 작성하고 이를 통해 설계 개선 활동을 수행하여 신뢰도를 개선하였다. A 체계는 함정에 탑재되어 적 잠수함을 탐지하는 체계이며 콘솔, 캐비닛, 조립체, 케이블 등으로 구성되어 있다. 제시한 신뢰성 관련 설계반영 점검항목을 A 체계에 개발단계별로 적용한 결과, 신뢰성을 고려한 부품 선정 여부, 이중화 설계 및 2차 고장 예방 여부, 신뢰도 예측 분석 여부에 대한 활동으로 신뢰도 개선을 확인하였다.

첫째, 신뢰성을 고려한 부품 선정 여부 관련 활동은 다음과 같다. A 체계의 운용환경을 고려하여 비교적 운용온도 범위가 높은 부품과 동일 규격 및 운용환경에서 MTBF(mean time between failures)가 높은 부품으로 변경하였다. 그 결과 총 0개 품목이 선정되었으며 대표적인 부품은 Table 2와 같다.

Board A는 운용온도 범위가 $-35\text{ }^{\circ}\text{C} - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 부품을 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 부품으로 변경하여 MTBF가 12,135,185시간에서 13,120,776시간으로 개선되었다. Board B는 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 부품으로, Board C는 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 부품으로 변경하였으며, MTBF는 각각 22,642,876시간에서 29,863,226시간, 2,497,727시간에서 2,636,664시간으로 개선되었다. Fan은 동일한 규격 및 운용환경이지만 MTBF가 높은 부품으로 변경하여 40,000시간에서 60,000시간으로 개선되었다.

Table 2. Results of selecting parts considering reliability

Parts	Before improvement		After improvement	
	MTBF (hours)	Operational temperature ($^{\circ}\text{C}$)	MTBF (hours)	Operational temperature ($^{\circ}\text{C}$)
Fan	40,000	-	60,000	-
Board A	12,135,185	-55 - 85	13,120,776	-40 - 105
Board B	22,642,876	-30 - 85	29,863,226	-40 - 105
Board C	2,497,727	-40 - 95	2,636,664	-40 - 105

둘째, 이중화 설계 및 2차 고장 예방 여부 관련 활동은 다음과 같다. A 체계 주요 구성품을 이중화(redundancy) 설계하여 특정 부품에 고장이 발생하더라도 다른 동일한 부품으로 하여금 고장 발생 부품의 기능을 대체 수행 및 보완하도록 설계 개선하였다. 그 결과 총 0개 품목이 도출되었으며 대표적인 부품은 Table 3와 같다.

콘솔은 4대 중 3대 정상 동작할 경우 주어진 기능 수행에 영향이 없도록 설계에 반영하였으며 이때 콘솔의 MTBF는 2,330시간에서 5,438시간으로 개선되었다. Rack A는 18대 중 12대, Rack B는 3대 중 2대,

Board D는 2대 중 1대가 정상 동작할 경우 주어진 기능 수행이 가능하며, MTBF는 각각 2,349시간에서 20,098시간, 7,039시간에서 17,597시간, 79,191시간에서 237,575시간으로 개선되었다. 설계 개선된 부품들의 신뢰도 블록선도(reliability block diagram)은 Fig. 4와 같다.

Table 3. Results of redundancy design and secondary failure prevention

Parts	Before improvement	After improvement
	MTBF (hours)	MTBF (hours)
Console	2,330	5,438 (3 out of 4)
Board A	2,349	20,098 (12 out of 18)
Board B	7,039	17,597 (2 out of 3)
Board C	79,191	237,575 (1 out of 2)

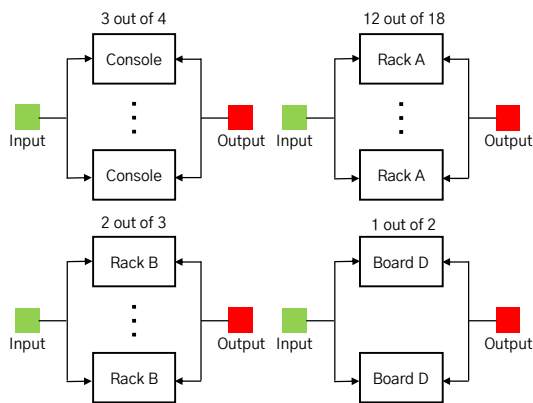


Fig. 4. RBD of Console, Rack A/B, and Board D

셋째, 신뢰도 예측 분석 여부 관련 활동은 다음과 같다. 회로카드조립체 소자별 정격부하 대비 인가되는 부하가 높을 경우 급격한 고장률 상승을 초래할 수 있으므로, 부품의 전기, 열 및 기계적 부하를 기능 구현에 필요한 최소 요구조건 외에 여유 부하를 확보하여 구성품의 고장률을 감소시키고자 하였다. A 체계는 기본적으로 최초 설계 및 부품 선정 시 고(高)정격 부품을 적용하였으며, 상세설계 기준 부품부하분석(parts stress analysis) 시 인가부하 대비 정격부하 여유가 충분하지 못한 소자를 식별하고 정격부하가

높은 소자로 변경하는 설계반영 활동을 수행하였다. 그 결과 총 0개 품목이 확인되었으며 대표적인 부품은 Table 4와 같다. Board E와 Board F 하부의 소자 중 인가부하 대비 여유가 충분하지 않은 소자를 선별하여 정격부하가 높은 소자를 적용하였다. 그 결과 고장률이 각각 8.78(27.62 % 개선), 24.65(4.61 % 개선)로 감소하였다. Board G와 Board H 또한 정격부하가 높은 소자로 적용하여 고장률이 각각 18.46(10.31 % 개선), 19.94(2.74 % 개선)로 감소하였다.

Table 4. Results of reliability prediction analysis

Parts	Before improvement		After improvement	
	Item	Failure rate (10 ⁻⁶)	Item	Failure rate (10 ⁻⁶)
Board E	06036R3CT (rating: 6.3 V)	12.14	1206500CT (rating: 50 V)	8.78
	12066R3CT (rating: 6.3 V)		1206100CT (rating: 10 V)	
	08056R3CT (rating: 6.3 V)		0805100CT (rating: 10 V)	
Board F	06036R3CT (rating: 6.3 V)	25.84	0603100CT (rating: 10 V)	24.65
	080536R3CT (rating: 6.3 V)		0805100CT (rating: 10 V)	
	0805160CT (rating: 6.3 V)		0805500CT (rating: 50 V)	
	12066R3CT (rating: 6.3 V)		1206100CT (rating: 10 V)	
Board G	06036R3CT (rating: 6.3 V)	20.58	0603100CT (rating: 10 V)	18.46
	080536R3CT (rating: 6.3 V)		08053100CT (rating: 10 V)	
	12066R3CT (rating: 6.3 V)		1206100CT Rating : 10 V	
Board H	06036R3CT (rating: 6.3 V)	21.08	0603K100CT (rating: 10 V)	19.94
	080536R3CT (rating: 6.3 V)		08053K100CT (rating: 10 V)	
	12066R3CT (rating: 6.3 V)		1206100CT (rating: 10 V)	

4. 결론

국방 분야 함정 무기체계 개발 시 신뢰도 개선을 위해 이 연구에서는 IPS 요소개발 중 하나인 연구 및 설계반영 활동 및 사례를 통해 신뢰성 관련 설계 개

선 활동을 수행하기 위한 설계반영 지침 및 설계반영 점검항목을 제시하였다. 또한, A 체계 사례를 통해 개발단계별로 신뢰성 설계 개선 활동을 수행한 결과, 고(高)신뢰도 부품 선정, 이중화 설계 적용, 높은 정격 부하를 가진 소자 변경을 통해 신뢰도가 개선됨을 확인하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 함정 무기체계 연구개발사업의 경우 제작된 시제품이 전력화 시제로 함정에 탑재되기 때문에 설계반영 활동을 통해 설계 변경하는 활동을 수행하기에는 시간 및 비용상의 제한사항이 많지만, 이 연구에서 제시한 활동을 보다 초기 단계에서부터 적극적으로 수행한다면 운용유지단계에서의 가용도 및 운용유지비용 절감에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] Jaehyun Seo, Ilhan Chung & Heungbin Kim. Development of Effective Risk Management for Improving Quality and Reliability of Weapon Systems: Focusing on Case Study of K-series Weapon System. *Korean Journal of Military Art and Science*, 70(2), 211-229, 2014.
- [2] Il-Ho Song. Reliability Improvement Method in Weapon Systems Through Field Failure Data Analysis. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 19(12), 110-117, 2018.
- [3] Ju-Seung Lee, Seong-Jin Kim, Gong-Myeong Bae, Soon-Mo Kwon, Hyeon-Jo Park, & Jun-Sok Choi (2019). The Study on Design of Circuit Card Assembly on Servo Control Unit for Automated Resupply Vehicle K56. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 20(12), 102-109.
- [4] Jeong-Ho Jo, Hyeon-Su Song, & Bo-Hyeon Kim. Development of TLCSM Based Integrated Architecture for Applying FRACAS to Defense Systems. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 21(1), 190-196, 2020.
- [5] Sang-Hee Shin, Joo-Hyun Jung, Tae-Ho Kang, & Jong-Sin Lee. A Comparative Study on the Reliability Growth Enhancement Activities Using "ANALYSIS" and "TEST" through FMECA and Highly Accelerated Life Tests. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 21(7), 406-418, 2020.
- [6] Sang-Gab Kim, Kyung-Won Kim, Young-Hoon Seo, Ki-Young Lee, & Yong Kim. A Study on the RAM Analysis and Reliability Development Method of the Ship Weapon System. *Defense & Technology*, (504), 104-109, 2021.
- [7] Dong-Ju Jeon, Yang-Woo Seo, Jung-Tae Kim, & Chun-Sup Um. Reliability Design Improvement Plan for Warship Electronic Components Using RPA Method. *Journal of the KNST*, 6(2), 190-194, 2023.
- [8] Gwangmin Lee, Ki Won Lee, Kyoung Deok Park, Jun Jeong, Jonghan Cha, & Dami Shin. Implementation Plan for Defense Design Failure Mode and Effect Analysis and System Case Study. *Journal of Applied Reliability*, 23(4), 345-354, 2023.
- [9] Hanul Bong, Hyeon Kim, Hyesun Ham, & Chulsoon Park. A Study on Signal Format Conversion for Ensuring Operational Performance and Reliability of Artillery System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 25(4), 207-213, 2024.
- [10] Jong-Han Cha, Seonho Lim, Chang-Min Lee, Kyoung-Deok Park, Dami Shin, & Gwang-Min Lee. Case Study on Reliability Improvement of IP Boards in Underwater Weapon Systems Base on Reliability Physics. *Journal of the KNST*, 7(3), 384-393, 2024.
- [11] System Engineering Management 4th Edition. 2008.