



Received: 2024/08/13
Revised: 2024/08/26
Accepted: 2024/09/25
Published: 2024/09/30

***Corresponding Author:**

Jong-Han Cha

Future Warfare IPS R&D, LIG Nex1
21, Pangyo-ro 255beon-gil, Bundang-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9370
Fax: +82-31-288-9123
E-mail: jonghan.cha@lignex1.com

Abstract

본 논문에서는 열, 충격, 진동 프로파일을 활용 신뢰성물리학 방법을 적용하여 고장물리 측면에서의 신뢰성을 예측하고, 그 결과로 도출된 취약 부위의 설계변경을 통한 신뢰성 향상 사례를 제시하였다. 설계 단계에서 설계자료를 활용한 시뮬레이션을 통해 신뢰성 예측을 확인할 수 있어 보드 제작 전에 신뢰성이 향상된 보드를 제작하므로 추후 환경시험이나 신뢰성 시험 시 리스크를 최소화하고 가용도를 높일 수 있다.

This study presents a case of reliability improvement through design changes in identified vulnerable areas, by applying Physics of Failure methodology using thermal, shock, and vibration profiles to predict reliability from a failure physics perspective. Reliability prediction is validated through simulations utilizing design data during the design phase, allowing for the production of boards with enhanced reliability before manufacturing. This approach minimizes risks during subsequent environmental or reliability testing and increases availability.

Keywords

신뢰성물리학(Reliability Physics),
고장물리학(Physics of Failure),
신뢰성 향상(Reliability Improvement),
신뢰성 설계(Design for Reliability)

신뢰성물리학 기반 수중무기체계 연동처리보드의 신뢰성 향상 사례 연구

Case Study on Reliability Improvement of IP Boards in Underwater Weapon Systems Base on Reliability Physics

차종한^{1*}, 임선호², 이창민³, 박경덕¹, 신다미⁴, 이광민⁴

¹LIG넥스원 미래전장IPS연구소 수석연구원

²LIG넥스원 해양기술개발단 수석연구원

³LIG넥스원 C5ISR기계융합연구소 수석연구원

⁴LIG넥스원 미래전장IPS연구소 연구원

Jong-Han Cha^{1*}, Seonho Lim², Chang-Min Lee³, Kyoung-Deok Park¹,
Dami Shin⁴, Gwang-Min Lee⁴

¹Chief research engineer, Future Warfare IPS R&D, LIG Nex1

²Chief research engineer, Maritime Sensor Systems, LIG Nex1

³Chief research engineer, Mechanical R&D, LIG Nex1

⁴Research engineer, Future Warfare IPS R&D, LIG Nex1

1. 서론

최근 국내 무기체계 연구개발 사업에서 신뢰성·정비성 설계의 중요성이 지속적으로 요구되고 있다. 무기체계 RAM 업무지침, 총수명주기관리업무훈령에서도 신뢰성 설계를 수행하도록 되어 있다. 신뢰성 설계란, 무기체계의 신뢰도값 달성을 위해 발생할 수 있는 고장의 원인 및 형태를 식별하여 개선 방안을 설계 단계에 적용하는 것을 말한다[1].

현재 국방 분야에서 첨단 무기체계 연구개발이 진행되고 있는 가운데 다양한 전자구성품 개발도 발전하고 있다. 각 무기체계는 요구되는 기능을 달성하기 위해 다양한 전자구성품을 탑재하고 있으며, 단 하나의 핵심 전자부품 고장만으로도 기능 장애 및 고장을 발생시켜 결과적으로 무기체계의 임무 수행 불가를 야기할 수 있다. 따라서 신뢰성 및 정비성 설계를 반영하여 고장 발생 및 유지비용을 감소시키는 것이 현대 무기체계 연구개발 사업의 당면 과제라고 할 수 있다[2].

이에 따라 본 연구에서는 수중에서 운용되는 무기 체계 내에 장착되는 전자구성품인 연동처리보드에 대해 기존의 전통적인 통계적 신뢰성 예측보다 더 정확하고 제품의 설계, 제조 및 운영 조건을 고려한 신뢰성물리학 방법론을 통한 신뢰성물리학 방법론을 적용하여 분석한다. 이를 통해 다양하고 가혹한 환경조건 하에서 보드의 신뢰성을 예측, 고장에 취약한 부위를 식별하여 신뢰성을 향상시킬 수 있는 대안을 제시한다.

2. 연구배경 및 필요성

해군의 기뢰전(mine warfare)은 현대 해양전의 핵심 요소 중 하나로, 그 중요성과 필요성은 다양한 측면에서 강조될 수 있다. 해상이나 수중에 부설되는 기뢰는 상대적으로 저렴하면서도 매우 효과적인 해상 무기체계로, 적의 해상 활동을 제한하고 해상 교통로를 통제하는 데 핵심적인 역할을 한다. 이는 전략적, 기술적, 경제적인 이유에서 모두 중요한데, 이를 통해 해군은 적의 해양 접근을 차단하고, 해군의 함대와 해상 자원을 보호할 수 있다.

제1·2차 세계대전 당시 함정이 적 함포 공격보다는 기뢰 피격으로 피해를 입은 경우가 더 많다고 알려져 있으며, 1980년대 이란-이라크 전쟁 당시, 이란은 기뢰를 이용하여 유조선 항로인 호르무즈 해협 봉쇄를 시도하여 세계경제를 위협하기도 하였다. 최근 약 30년 간 기뢰는 세계 분쟁에 크게 등장한 적도 없고, 재래식 무기라는 인식 때문에 관심에서 다소 멀어져 있는 듯하다. 그러나 기뢰는 항만 입구나 주요 해로에 은밀하게 부설되어 치명적인 위력으로 큰 위협을 주는 전략무기이며, 전형적인 비대칭 무기체계로 볼 수 있다. 더군다나 우리나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여져 있고, 수출입 물동량의 90% 이상을 해양 운송에 의존하며, 유사시 대외 군수지원도 바다를 통하여 이루어진다는 사실을 고려해 보면, 기뢰는 양적·질적으로 북한의 SLBM보다 더 치명적일 수 있기 때문에 이에 대한 대비를 한시도 소홀히해서는 안 되는 상황이다[3].

반대로 해상이나 수중에 부설되어 있는 기뢰를 제거하는 기뢰소해(mine countermeasures)도 중요하다. 기뢰소해는 해군 작전에서 필수적인 역할을 하여 해양 안전과 전략적 우위를 확보하는 데 중요한

기여를 한다. 기뢰소해는 기뢰의 탐지, 제거, 무력화를 포함하는 일련의 작업으로, 이를 통해 해군은 안전한 항로를 확보하고 해상 작전의 자유를 보장할 수 있다.

해상이나 수중에 매설되어 있는 각종 기뢰들을 제거하기 위해 함정의 소해임무에서는 다양한 방법을 동원한다. 이중 ○○을 발생시켜 기뢰를 소해하는 소해무기체계는 항상 일정한 수심 아래에서 운용된다. 또한 작동 시 수중에 있지만 내부에 엄청난 열이 발생하고, 기뢰 제거 시 발생하는 폭발 및 수심 압력을 받는 등 가혹한 환경 속에서 운용된다.

앞서 언급한 바와 같이 국내 무기체계 연구개발 사업에서는 신뢰성 설계 및 향상을 위한 방법으로 신뢰도 예측, 신뢰도 할당, 설계고장영향분석(D-FMEA), 가속수명시험(HALT), 고장보고 분석 및 조치업무체계(FRACAS) 등을 수행하고 있다. 설계단계에서는 특히 보드의 각 전자부품에 대한 전기적 특성을 고려한 경험적 데이터 기반의 MIL-STD-217F를 기준으로 신뢰도 예측을 수행하고, 개선을 위한 설계 변경을 하고 있다. 하지만 이는 전기적인 특성에 한하여 전자부품 단위의 신뢰도를 예측하여 합한 방식으로 실제 보드의 전체, 각각의 물리적인 특성 및 다양한 운용환경 등을 고려하는 데에는 한계가 있다[4].

최근 보드의 신뢰성물리학을 적용한 분석과 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. PCB, 뿔납, 각종 소자 등이 결합되어 있는 상태에서 물리적 특성을 고려하여 신뢰성을 예측하는 방법이다. 이를 바탕으로 취약한 부위를 개선하여 신뢰성 향상을 이끌어낼 수 있다. 신뢰성물리학 분석(RPA, reliability physics analysis)은 고장물리학(PoF, physics of failure)이라고도 하며, 최근 SAE J3168(전기, 전자, 전자 기계 장비, 모듈 및 부품의 신뢰성물리학 분석) 표준으로 제정되었다.

본 연구에서는 소해무기체계가 수중에서 작동 및 임무 수행 시 처하게 되는 내/외부 환경조건을 대입하여 무기체계 내 장착되어 있는 전자장치인 연동처리보드에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 취약한 부분에 대해서 신뢰성 향상을 위한 설계 대안을 제시하고자 한다. 이러한 신뢰성 설계는 기본 및 상세설계 과정에서 수행되어야 한다. 설계 단계에서 신뢰성이 확보되면 신뢰성 및 환경시험을 진행함에 있어 리스크가 사전에 제거되고, 소요군의

운용유지 단계에서 신뢰성이 확보된 무기체계를 운용함에 따라 가동률을 상승시킬 수 있을 것으로 판단한다.

3. 관련 연구 동향

본 연구와 관련한 연구 동향은 아래와 같다.

이경택 등(1999)은 BGA 패키지에 대한 사례 연구를 중심으로 고장물리와 수명분석을 이용한 제품 신뢰도 개선에 대해 연구하였다. 신뢰성 설계를 위해서는 제품의 기획에서부터 설계, 생산, 사용의 전 과정 동안 제품의 신뢰도를 예측·평가하는 작업이 필요하고, 신뢰도 실증시험이나 신뢰도 보증시험 등에는 많은 시간과 비용이 발생한다. 이러한 신뢰성 설계에 고장물리 방법론을 이용한다면 시제품 제작 이전에도 제품의 신뢰도를 예측할 수 있으며, 특히 실제 제품 대신 부품의 특성을 시험함으로써 검사 시간 및 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대하였다[5].

Pecht, M. 등(2010)은 전자 제품의 신뢰성을 예측하기 위해 고장물리학 기반의 접근법을 연구하였다. PoF 접근법은 전통적인 통계적 신뢰성 예측보다 더 정확하고 제품의 설계, 제조 및 운영 조건을 고려한 맞춤형 예측이 가능하다고 하였다. 또한 PoF 기반 PHM(prognostics and health management)의 원리와 절차, 장점, 그리고 실제 적용사례를 제시하였고, 이를 통해 전자 제품의 수명 예측과 신뢰성 향상에 기여할 수 있다고 하였다[6].

전수현 등(2016)은 신뢰성 수명 예측을 위한 도구인 Sherlock을 이용하여 큐브위성용 임무보드의 고장 메커니즘별 수명 예측을 시도하였다. 큐브위성의 전자보드의 신뢰성과 수명을 분석하여 신뢰성을 보장하기 위한 방안으로 솔더 접합부의 두께를 향상시켜 기존보다 높은 신뢰도를 만족시킬 수 있음을 확인하였다[7].

김지영 등(2017)은 고장물리 기반 수중 매설형 PBA(printed board assembly)에 대한 신뢰성 설계 연구를 수행하였다[6]. 솔더 피로 및 PTH(plated through hole) 피로를 분석하여 수명과 신뢰성 개선 설계를 검증하였으며, 랜덤 진동에 대한 피로 분석을 수행하여 지진 프로필에 대한 신뢰성을 검증하였다[8].

차중한 등(2019, 2020, 2022)은 해양에서 수상함

및 무인체계와 야전에 항시 배치되어 있는 유도탄의 보드에 신뢰성을 예측하고 취약한 영역을 개선하는 설계 대안을 도출하였다. 결과적으로 신뢰성 목표를 달성할 수 있는 설계 방안을 제시했으며, 이 방법론은 무기체계의 신뢰성과 위험을 보장하고 무기체계의 가용성을 높이기 위해 설계 초기부터 적용될 수 있다는 결론을 도출하였다[4,9,10].

전동주 등(2023)은 신뢰성물리학 분석기법을 활용한 함정탐재 전자 구성품의 신뢰성 설계 개선 방안을 연구하였다. 신뢰성물리학 분석을 활용하여 신뢰성 설계 개선을 수행하고 결과를 비교함으로써 무기체계 총 수명주기 비용 절감을 위한 방법론을 제시하였다[2].

4. 시뮬레이션 수행

4.1 방법 및 절차

본 연구에서는 신뢰성물리학 방법론이 적용된 Sherlock(ANSYS) 도구를 활용하여 항시 수중의 가혹한 환경에 노출되어 있는 무기체계의 제어 및 연동 기능을 수행하는 연동처리보드에 대해 열, 진동, 충격 등의 환경을 모사하여 신뢰성 예측을 수행한다. Fig. 1에 나타난 절차를 거쳐 수행한 예측 결과를 베이스라인으로 취약 부위를 식별, 신뢰성을 개선할 수 있는 다양한 방안들을 검토하여 신뢰성 향상을 위한 설계 대안을 제시하고자 한다.

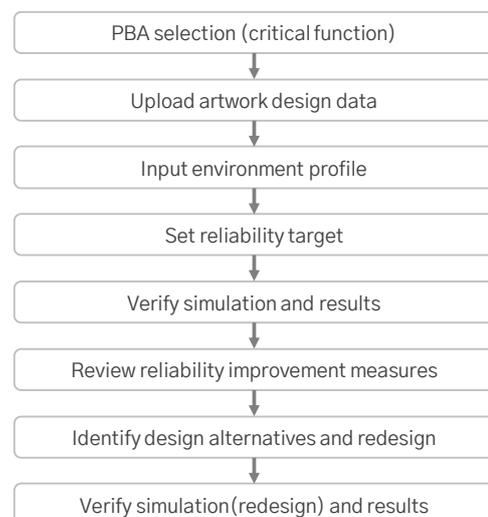


Fig. 1. Procedure of reliability physics analysis

4.2 분석 고장 유형

물리적 고장 메커니즘에 의한 주요 고장유형으로는 열, 진동, 충격에 의한 유형이 있다. 열이 가해지면 솔더 피로 및 PTH 피로를 초래하게 되고, 고조파 진동, 랜덤 진동, 기계적 충격에 따라 보드에 고장이 발생하게 된다. 그리고 보드의 고유주파수를 분석하여 기구물과의 공진위험을 판단, 공진위험을 회피할 수 있도록 설계에 반영할 수 있다. 솔더 피로는 PBA가 열 프로파일에 따라 PCB 및 전자소자 간 열팽창계수의 차이로 수축과 팽창을 지속적으로 반복하게 되면서 기계/전기적 연결을 하는 솔더에 균열이 발생하는 고장유형이다. PTH 피로는 내/외층 간 도통 접속을 위한 홀에 입혀진 구리도금과 PCB 간의 열팽창계수 차이로 솔더 피로와 동일하게 수축과 팽창을 지속적으로 반복하게 되면서 구리도금에 균열이 발생하는 고장유형이다. 또한 내/외부에 의한 고조파/랜덤 진동, 기계적 충격에 의한 보드의 파손 등이 발생한다. 더불어 시뮬레이션을 통해 보드의 고유주파수를 획득하여 보드를 지지하는 기구물과의 공진위험을 판단, 회피 설계를 할 수 있다[4].

본 연구에서는 실제로 무기체계가 운용되는 수중에서 보드의 운용환경을 모사하고 열, 충격, 진동에 대한 프로파일을 입력하여 시뮬레이션을 수행한다.

4.3 분석 대상 선정

본 연구의 분석 대상은 소해무기체계 내 탑재되는 연동처리보드이다. 소해함정을 활용한 기뢰전에서 소해무기체계는 기뢰 제거에 중요한 역할을 하는데, 그 중 연동처리보드는 제어와 장비들 간의 신호를 송수신 기능을 하는 매우 중요한 구성품이다. 보드의 신뢰성이 저하되면 소해장비뿐만 아니라 소해함정이 수행하는 기뢰전 작전 능력에 큰 영향을 미치게 되므로, 고장 가능성을 사전에 분석하고 예방하는 것이 매우 중요하다. 수중에서 작동되는만큼 높은 수중 및 폭발압력, 급격한 온도 변화, 진동, 습기 등 극한 환경은 보드의 성능과 수명에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 소해무기체계의 신뢰성을 유지하기 위해서는 보드가 가혹한 조건을 견딜 수 있도록 설계되고 제조되어야 한다. 설계자료를 분석도구에 입력한 후 생성한 3차원 가상모델은 Fig. 2와 같다.

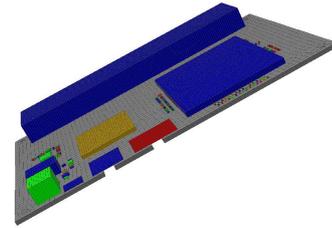


Fig. 2. PBA 3D-modeling

4.4 신뢰성 목표 설정

분석 대상의 신뢰성 목표는 통상적인 운용수명인 20년 기준에 신뢰성 90 %로 가정하여 설정하였다.

5. 분석 조건

5.1 입력 자료

본 연구의 분석 대상인 연동처리반에 대한 설계 기초자료는 artwork 설계자료, 성적서, BOM 등이 있으며, 주요 정보는 Table 1과 같다.

Table 1. Design information for Sherlock analysis

Category	Description
PCB size	134 mm × 88 mm × 1.6 mm
Component	IC, inductor, resistor, capacitor, transceiver, etc, 409 ea
Layer	6 layers
Laminate	Isola 185HR(FR-4)
Solder	SAC305(lead-free)

5.2 열 프로파일 설정

최근 전자기기들의 크기가 소형화됨에 따라 전자장치인 보드도 소형화되고 있으며, 이에 따라 열이 많이 발생하여 신뢰성을 관리할 필요가 있다. 실제 미 공군 필드데이터 분석결과에 따르면 운용 시 고장 발생의 절반 이상인 55 %가 온도에 의한 고장임을 알 수 있다[11].

소해무기체계 운용 시 내/외부 열에 의한 열 프로파일은 총 13시간 중 운용 중 열이 실제 발생하는 시간을 5시간으로 가정하여 적용하였다.

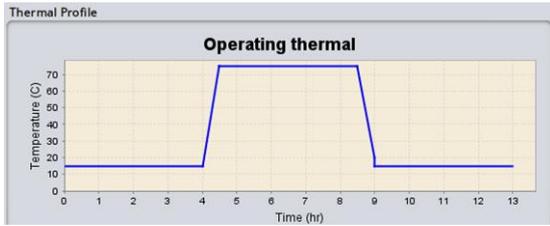


Fig. 3. Thermal profile

5.3 진동 프로파일 설정

진동 프로파일은 랜덤 및 고조파 프로파일로 나누어 적용하였다. 랜덤 진동은 MIL-STD-810G CHG-1 514.7C-V 규격을 기준으로 x, y, z축에 대하여 Fig. 4와 같이 적용하였으며, 고조파 진동은 MIL-STD-167-1A Type I 규격을 기준으로 x, y, z축에 대하여 Fig. 5와 같이 적용하였다.

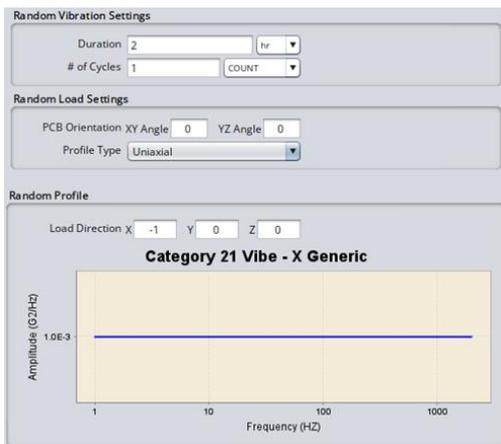


Fig. 4. Random vibration profile

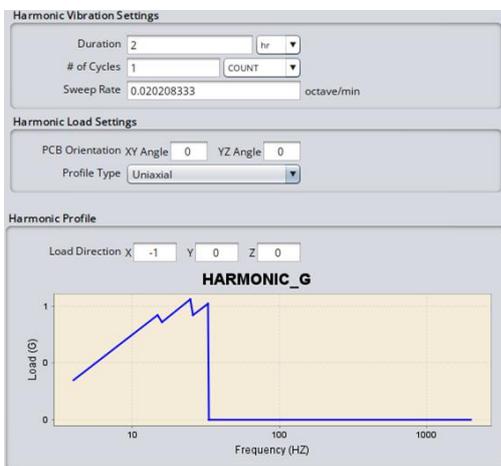


Fig. 5. Harmonic vibration profile

5.4 충격 프로파일 설정

충격 프로파일은 임무 수행 중 기뢰의 수중폭발 시 충격을 모사하기 위해서 독일의 BV 043 규격을 기준으로 x, y, z축에 대하여 Fig. 6와 같이 적용하였다.

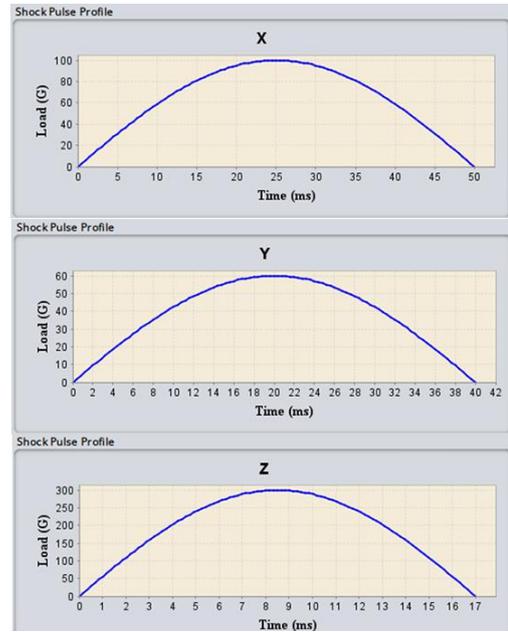


Fig. 6. Mechanical shock profile

6. 시뮬레이션 결과

6.1 결과 종합

환경 프로파일 기준으로 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 Table 2와 같으며, 신뢰성 목표인 20년 기준 90%에 조금 미치지 못하는 17년으로 예측되었다. 5개의 고장유형 중 열에 의한 솔더 피로에 대해 신뢰성 향상이 필요한 것으로 확인되었다.

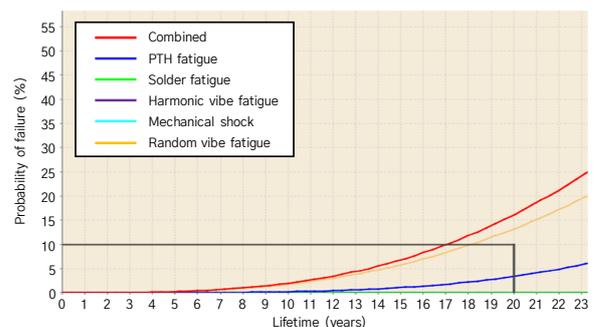


Fig. 7. Life prediction result graph

Table 2. Life prediction result

Failure mode	Simulation result
Combined	NOK (17 y)
Solder fatigue	NOK (18 y)
PTH fatigue	OK
Harmonic vibration	OK
Resonance risk	OK

그 외 랜덤 및 고조파 진동과 충격 프로파일에 노출되었을 때 목표 수명 이상으로 신뢰성이 확보되는 것을 확인하였으며, 고유주파수의 경우 3개의 1~3 차 모드에 대해 시뮬레이션 결과가 도출되었다.

6.2 열 프로파일에 의한 시뮬레이션 결과

열 프로파일에 따른 신뢰성 분석 결과는 Fig. 7과

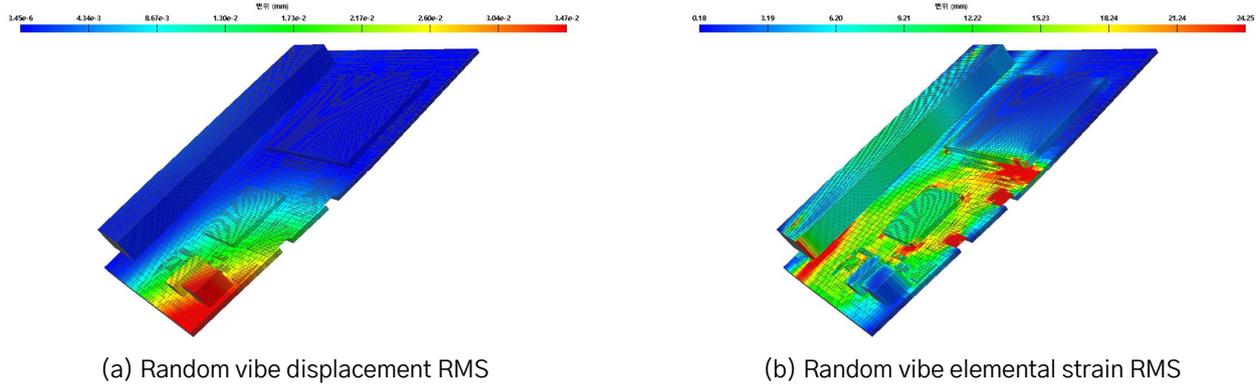
같이 신뢰성 90 % 기준 종합결과가 약 17년, 그중 솔더 피로는 약 18년으로 목표 20년을 만족하지 못하는 결과가 도출되었다. Table 3의 risky item list에 따르면 총 409개 부위 중 열 프로파일에 취약한 상위 7개 부위(U15, L2/L3/L4, R213/R259, C104)의 4종 부품으로 확인하였다.

6.3 진동 프로파일에 의한 시뮬레이션 결과

랜덤 및 고조파 진동 프로파일에 대해 displacement map(RMS/460.97 Hz) 및 strain map(RMS/460.97 Hz)을 통해 확인한 결과 Figs. 8, Fig. 9과 같이 좌측 부분이 상대적으로 많이 휘어질 수 있다는 것을 확인할 수 있지만, risky item list(Tables 4-5 참조)를 보면 위험한 부분이 없는 것으로 결과가 도출되어 진동 프로파일에 노출되었을 때 구조 건전성이 확보된 것을 확인하였다.

Table 3. Solder fatigue risky item

RefDes	Package	Part type	Model	Side	Material	Solder	Max dT°C	Damage	TTF (years)	Circles to fail	Score
U15	QFN-32 (MO-208FFEA-H)	IC	QFN	TOP	OVERMOLD-QFN	SAC305	66.0	3.4E-1	59.26	21,646	4.2
L2	SRN3015	INDUCTOR	CC	BOTTOM	FERRITE	SAC305	66.0	2.7E-1	74.01	27,030	7.1
L3	SRN3015	INDUCTOR	CC	BOTTOM	FERRITE	SAC305	66.0	2.7E-1	74.01	27,030	7.1
L4	SRN3015	INDUCTOR	CC	BOTTOM	FERRITE	SAC305	66.0	2.7E-1	74.01	27,030	7.1
C104	1206	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.7E-1	75.19	27,462	7.3
R213	0603	RESISTOR	CC	TOP	ALUMINA	SAC305	66.0	2.6E-1	75.54	27,590	7.4
R259	0603	CAPACITOR	CC	TOP	ALUMINA	SAC305	66.0	2.6E-1	75.54	27,590	7.4
C13	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C14	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C19	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C20	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C22	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C23	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C46	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C47	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C48	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C49	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C50	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C51	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C52	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C53	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C54	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C55	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C66	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C76	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C79	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C80	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C83	0603	CAPACITOR	CC	BOTTOM	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1
C84	0603	CAPACITOR	CC	TOP	BARIUMTITANATE	SAC305	66.0	2.5E-1	80.15	29,276	8.1



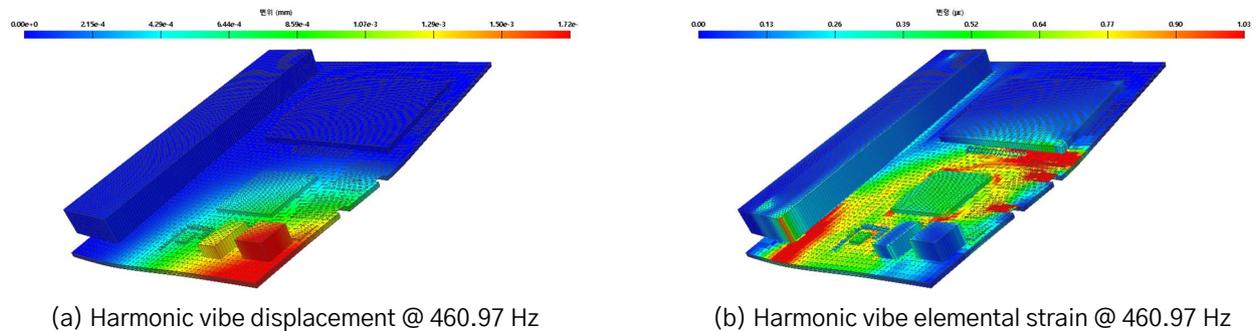
(a) Random vibe displacement RMS

(b) Random vibe elemental strain RMS

Fig. 8. Random vibe life prediction result

Table 4. Random vibe fatigue risky item

RefDes	Package	Part type	Side	Max. displacement	Variation	Damage	TTF (years)	Failure probe	Score
CN6	PRPC007DBAN-M71RC	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	5.6E-4	47.46	1.0E-6	>200	0.0
U5	QFP-176	IC	TOP	63SN37PB	8.3E-4	44.47	1.0E-6	>200	0.0
CN8	HDASF202YV-000	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	4.2E-5	37.62	1.0E-6	>200	0.0
CN5	PRPC005DBAN-M71RC	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	1.2E-3	35.30	1.0E-6	>200	0.0
U1	AC7200-2FGG484I	IC	TOP	63SN37PB	1.7E-5	28.38	1.0E-6	>200	0.0
CN2	AXK680337YG	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	1.7E-5	21.48	1.0E-6	>200	0.0
R217	603	RESISTOR	BOTTOM	63SN37PB	1.8E-4	19.80	1.0E-6	>200	0.0
R217	402	RESISTOR	TOP	63SN37PB	3.3E-5	19.80	1.0E-6	>200	0.0
R10	402	RESISTOR	TOP	63SN37PB	3.3E-5	18.18	1.0E-6	>200	0.0
R18	402	RESISTOR	TOP	63SN37PB	3.3E-5	17.40	1.0E-6	>200	0.0



(a) Harmonic vibe displacement @ 460.97 Hz

(b) Harmonic vibe elemental strain @ 460.97 Hz

Fig. 9. Harmonic vibe life prediction result

Table 5. Harmonic vibe fatigue risky item

RefDes	Package	Part type	Side	Max. displacement	Max. variation	Damage	TTF (years)	Failure probe	Score
U1	AC7200-2FGG484I	IC	TOP	63SN37PB	1.7E-5	3.02	1.0E-6	>200	0.0
CN8	HDASF202YV-000	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	4.2E-5	1.53	1.0E-6	>200	0.0
CN6	PRPC007DBAN-M71RC	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	5.6E-4	1.42	1.0E-6	>200	0.0
R217	603	RESISTOR	BOTTOM	63SN37PB	1.8E-4	1.41	1.0E-6	>200	0.0
U5	QFP-176	IC	TOP	63SN37PB	8.3E-4	1.40	1.0E-6	>200	0.0
CN2	AXK680337YG	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	1.7E-5	1.37	1.0E-6	>200	0.0
R217	402	RESISTOR	TOP	63SN37PB	3.3E-5	1.37	1.0E-6	>200	0.0
R10	402	RESISTOR	TOP	63SN37PB	3.3E-5	1.33	1.0E-6	>200	0.0
R18	402	RESISTOR	TOP	63SN37PB	3.3E-5	1.33	1.0E-6	>200	0.0
CN5	PRPC005DBAN-M71RC	CONNECTOR	TOP	63SN37PB	1.2E-3	1.28	1.0E-6	>200	0.0

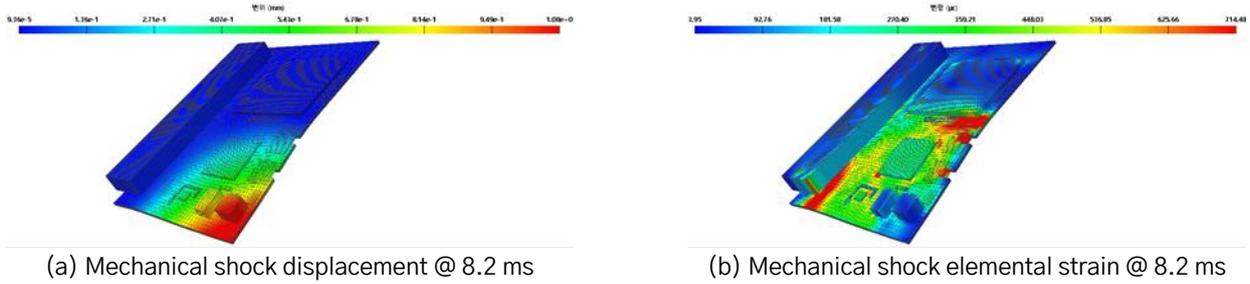


Fig. 10. Mechanical shock life prediction result

Table 6. Mechanical shock overstress/fatigue risky item

RefDes	Package	Side	Max. displacement	Max. variation	TTF (years)	Failure probe	Overstress score	Fatigue score	Failure
U5	QFP-176 (MS-026AFC)	TOP	5.7E-1	779.89	>200	0.0	0.0	10.0	Fatigue
CN2	AXK680337YG	TOP	2.3E-2	995.48	>200	0.0	0.0	10.0	Fatigue
CN6	PRPC007DBAN-M71RC	TOP	3.8E-1	914.48	>200	0.0	0.0	10.0	Fatigue
CN5	PRPC005DBAN-M71RC	TOP	7.7E-1	731.70	>200	0.0	2.0	10.0	Fatigue
R206	0603	BOTTOM	2.7E-1	318.07	>200	0.0	10.0	10.0	Fatigue
R207	0603	BOTTOM	1.9E-1	475.45	>200	0.0	10.0	10.0	Fatigue
R204	0603	BOTTOM	2.7E-1	408.63	>200	0.0	10.0	10.0	Fatigue
R205	0603	BOTTOM	1.8E-1	424.26	>200	0.0	10.0	10.0	Fatigue
R202	0603	BOTTOM	2.1E-1	456.31	>200	0.0	10.0	10.0	Fatigue
R203	0603	BOTTOM	1.1E-1	433.60	>200	0.0	10.0	10.0	Fatigue

6.4 충격 프로파일에 의한 분석 결과

충격 프로파일에 대해 displacement map(8.3 ms) 및 strain map(8.3 ms)을 통해 확인한 결과 Fig. 10 과 같이 좌측 부분이 상대적으로 많이 휘어질 수 있음을 확인할 수 있지만, risky item list(Table 6 참조)를 보면 위험한 부분이 없는 것으로 결과가 도출되어 충격 프로파일에 노출되었을 때 구조 건전성이 확보된 것을 확인하였다.

6.5 고유주파수 및 공진위험

연동처리보드의 고유주파수 해석 결과 1~3차 모드별 고유주파수는 Table 7, Fig. 11과 같이 해석 결과가 도출되었다. 추후 장착되는 기구물조립체의 고유주파수 해석 결과와 비교하여 공진위험 여부를 확인하고, 공진위험에 대해 회피 설계를 할 수 있다.

Table 7. Natural frequency I

Mode	Frequency (Hz)
1	459.93
2	902.79
3	1,098.81

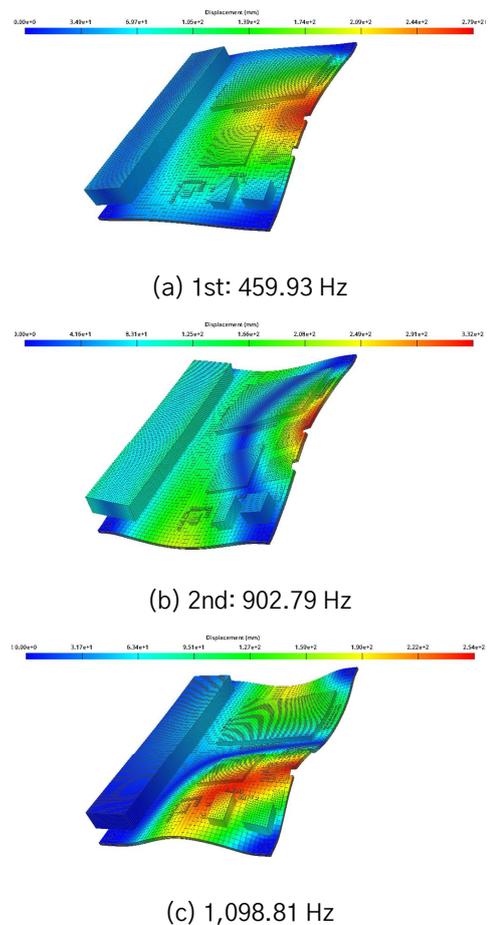


Fig. 11. Natural frequency II

7. 신뢰성 설계 연구 결과

시뮬레이션 결과를 토대로 열 프로파일에 노출되었을 때 솔더에 크랙이 발생할 가능성이 있는 것으로 확인되었는데, 이는 PCB와 전자부품 간 열팽창계수(CTE, coefficient of thermal expansion)가 서로 다르기 때문에 보드가 반복적인 수축과 팽창을 통해 접합의 기능을 하고 있는 솔더에 크랙이 발생할 확률이 높아짐을 의미한다. 본 연구의 시뮬레이션 결과를 베이스라인으로 정하고, 신뢰성 취약 부위에 대한 신뢰성 향상 방안을 검토한 결과를 바탕으로 설계 대안을 제시한다.

5.1 신뢰성 향상 방안

열 프로파일에 따른 온도 변화에 의해 PCB와 전자부품은 수축과 팽창을 반복한다. 각각 열팽창계수가 다르기 때문에 이 차이로 인해 솔더 접합부에 피로가 누적되어 Fig. 12와 같이 크랙이 발생하게 된다.

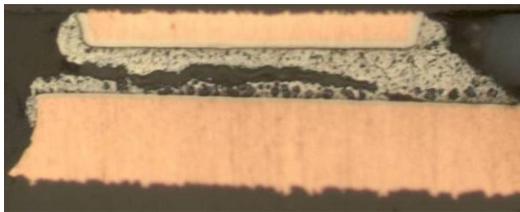


Fig. 12. Example of solder fatigue crack

따라서 열 프로파일에 대하여 솔더 접합부의 취약점을 개선하기 위해서는 전자부품의 열팽창계수 간 차이가 적은 PCB 재질로 변경하거나 솔더 접합부의 두께를 증가시키는 방법, 패드의 크기를 변경하는 방법, 고성능 솔더로 변경하는 방법, 그리고 전자부품 자체를 변경하는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 능동소자인 DP83822HRHBR(U15)를 변경하는 방법을 선택하였다. 요구성능 등을 만족하는 범위 내에서 시뮬레이션의 장점을 이용하여 물리적 고장에 대해 신뢰성이 높은 부품들로 변경하여 신뢰성을 예측하였다. 취약한 부위의 해당 부품은 Texas Instruments에서 제조된 트랜시버로 32개의 핀을 가지고 있는 QFN-32 패키지 타입이며, 사이즈는 5×5×1이다(Fig. 13 참조).

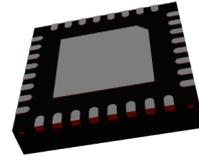


Fig. 13. Shape of U15(transceiver)

첫 번째, 동일한 패키지 타입 중 기존 부품 대비 가로 및 세로의 길이는 동일하지만 두께가 0.15 얇은 Broadcom의 BCM5241XA1KMLG로 변경하였다. 해당 전자부품으로 변경하였을 때 신뢰성 목표 20년 기준 종합결과가 17.3년, 솔더 피로가 18.4년으로 신뢰성 예측결과를 확인하였다.

두 번째, QFN-24 타입으로 전체적으로 사이즈가 작은 Microchip의 LAN8720A로 변경하였을 때 종합결과가 기존 대비 약 0.5년이 증가한 17.5년, 솔더 피로는 0.7년 증가한 18.7년으로 확인하였다.

마지막으로, QFN-24 타입으로 더 소형화된 기존 설계된 전자부품과 동일 제조사(Texas Instrument)의 DP83825I로 변경하였을 때 종합결과가 신뢰성 목표 90 % 기준으로 기존 대비 약 1.1년 증가한 18.1년으로 목표값을 만족하지 못했다. 하지만 솔더 피로 수명은 기존 대비 1.6년 증가한 19.6년으로 확인할 수 있었다.

추가로 DP83825I로 설계 변경한 상태에서 패드 크기를 조금 늘렸을 때 신뢰성이 증가하는 것을 확인하였다. 패드 크기를 증가시키면 열 방출과 기계적 강도가 개선되어 솔더 피로에 대한 신뢰성을 높일 수 있다. 기본적으로 제조사에서 권장하는 패드 크기를 따르되 해당 설계에 맞게 적절히 패드 크기를 조절하면 물리적 고장으로부터 신뢰성을 높일 수 있다.

Table 9. Result of transceiver component change

Case	Pack. size	Pad size	Combined result (year)	Solder fatigue result (year)
DP83822HRHBR (base-line)	5×5×1	0.25×0.25	17	18
BCM5241XA1KMLG	5×5×0.85	0.25×0.25	17.3	18.4
LAN8720A	4×4×0.9	0.25×0.25	17.5	18.7
DP83825I	3×3×0.8	0.25×0.25	18.1	19.6

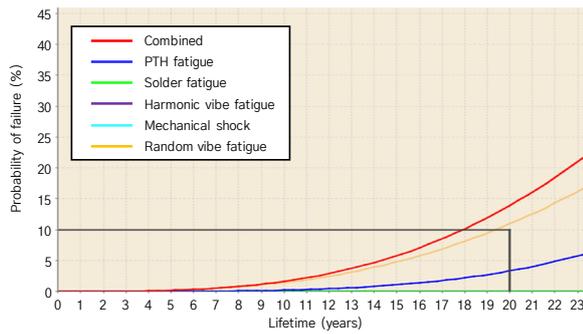


Fig. 14. Design prediction result of reliability

8. 결론

본 연구에서는 신뢰성물리학 방법론을 적용하여 실제 프로토타입으로 제작한 보드에 대한 신뢰성 예측을 수행하였다. 열, 충격, 진동 프로파일에 대한 예측을 수행한 결과 열 프로파일에 대해서 솔더 피로 고장에 일부 취약한 부위를 확인할 수 있었고, PTH 피로 고장에 대해서는 안전한 것을 확인할 수 있었다. 그 외 충격 및 진동 프로파일에 대해서는 구조 건전성을 확인하였다.

다음으로 열 프로파일에 가장 취약한 부위에 대해 개선 방안을 검토하였다. 능동소자 트랜시버에 대해 부품을 변경하면서 각각 신뢰성 예측 결과를 실시간으로 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었으며, 그중 패키지 사이즈가 작고 두께가 얇은 트랜시버가 상대적으로 열 프로파일에 대한 신뢰성이 높은 것으로 시뮬레이션 결과 확인하였다.

향후 더 높은 신뢰성을 확보하기 위하여 열 프로파일에 대하여 취약한 것으로 도출되었던 부위 중 수동소자(L2/L3/L4, R213/R259, C104) 부분에 대해서도 신뢰성 향상 방법을 연구가 필요하다. 신뢰성 향상 방법은 앞서 언급한 것과 같이 전자부품의 열팽창계수 간 차이가 적은 PCB 재질로 변경, 솔더 접합부 두께 증가, 패드 크기 변경, 고성능 솔더로 변경 등을 설계에 적용하여 시뮬레이션 결과로 그 결과를 확인할 수 있도록 연구할 계획이다. 그리고 본 연구 결과와 추후 연구 결과에서 신뢰성 향상 방안으로 검토 및 연구한

방안을 조합하여 설계자에게 선택할 수 있는 설계 방안을 제시할 예정이다.

참고문헌

- [1] RAM Guide, Defense Acquisition Program Administration, 1, 2021.
- [2] D. J. Jeon, Y.W. Seo, J.T. Kim, & C.S. Um, Reliability Design Improvement Plan for Warship Electronic Components Using RPA Method, *Journal of the KNST*, 6(2), 190-194, 2023.
- [3] U.D. Park, H.W. Kwak, Is Our Mine Warfare as Good as it is?, *Defense & Technology*, (464), 126-133, 2017.
- [4] J.H. Cha, Y.H. Lee, H.J. Koh, Y.A. Yoon, S.H. Jo, & G.W. Kim, A Case Study on the Reliability Design of Missile CPU-board with Reliability Physics, *Journal of Applied Reliability*, 22(2), 164-177, 2022.
- [5] K. T. Lee, C. H. Shin, H. S. Hahn, Evans, J. W., S. W. Kim, & H. J. Lee, An Approach of Combining Failure Physics and Lifetime Analysis for Product Reliability Improvement: An Application to BGA(Ball Grid Array) Package, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 25(2), 204-216, 1999.
- [6] Pecht, Michael, Physics-of-failure-based Prognostics for Electronic Product, *Microelectronics Reliability*, 50(1), 17-29, 2010.
- [7] S.H. Jeon, Y.H. Kwon, H.A. Kwon, Y.G. Lee, I.O. Lim, & H.U. Oh, Life Prediction of Failure Mechanisms of the CubeSat Mission Board Using Sherlock of Reliability and Life Prediction Tools, *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 44(2), 172-180, 2016.
- [8] J.-Y. Kim, K.-W. Lee, H.-W. Yoon, S.-J. Lee, J.-K. Heo, & H.-A. Kwon, Reliability Design Analysis for Underwater Buriend PBA Based on PoF, *Journal of Applied Reliability*, 17(4), 280-288, 2017.
- [9] J.H. Cha, K.D. Park, K.W. Lee, B.H. Bak, H.E. Kim, & H.A. Kwon, 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), 535-545, 2019.
- [10] J.H. Cha, H.P. Lee, K.D. Park, & K.W. Lee, A Study on Design for the Printed Board Assembly of Unmanned Systems based on Reliability Physics Analysis, *Journal of Applied Reliability*, 20(3), 235-245, 2020.
- [11] Steinberg D. S. *Vibration Analysis for Electronic Equipment* (3rd Ed.), John Wiley & Sons, Preface 18, 2000.