

신뢰성 물리학 분석을 활용한 수출형 K2전차 전자제품 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 : seongmmoon@hyundai-rotam.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 고장유형에 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 설계임을 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, 체계개발 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 환경조건에서의 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.

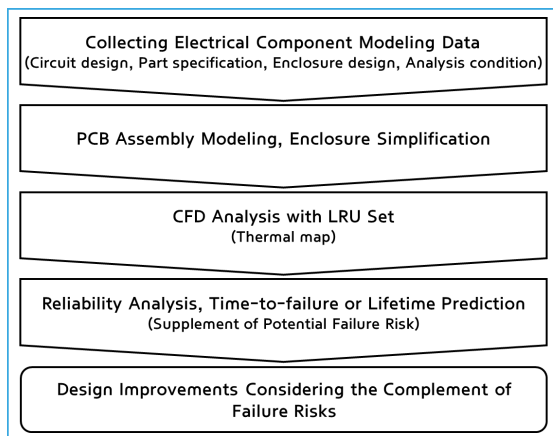


Figure 1. RPA Procedure

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.

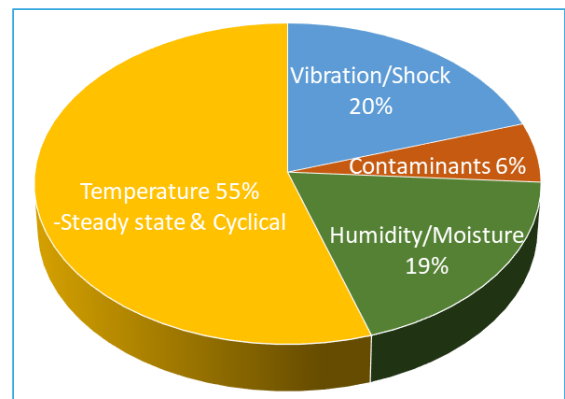


Figure 2. Sources of Stress for Electronic Equipment[10]

2.2.1. Solder Fatigue 분석

전자부품과 보드를 연결하는 Solder Joint는 주위 온도가 변화하면 접촉부위의 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].

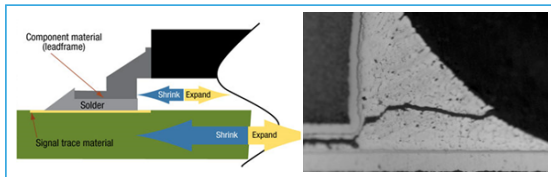


Figure 3. Failure Mechanisms by Solder Fatigue[11]

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].

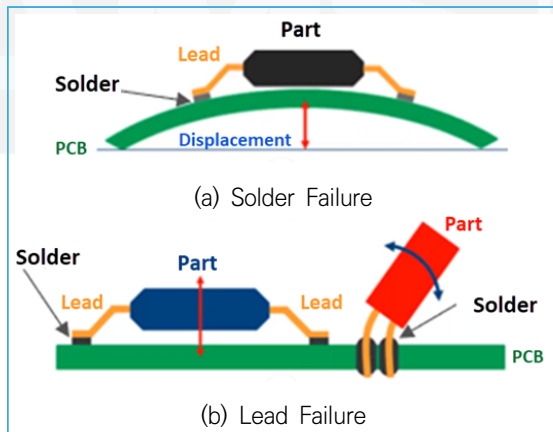


Figure 4. Two Failure Mechanisms by Vibration[11]

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].

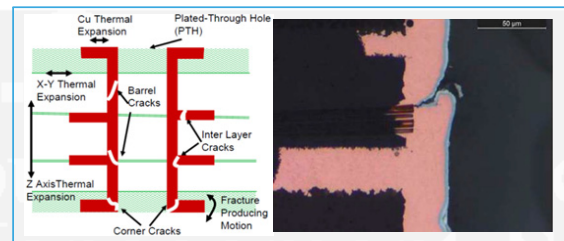


Figure 5. Failure Mechanism by PTH Fatigue[12]

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.

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

결합된 신뢰도는 각각의 분석 신뢰도들의 곱으로 구한다.

$$\begin{aligned}
 R &= R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_n \\
 &= (1 - PoF_1)(1 - PoF_2) \cdots (1 - PoF_n)
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

위의 식으로부터 결합된 고장확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 PoF &= 1 - R \\
 &= 1 - (1 - PoF_1)(1 - PoF_2) \cdots (1 - PoF_n)
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

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 설계를 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 진동조건에서의 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

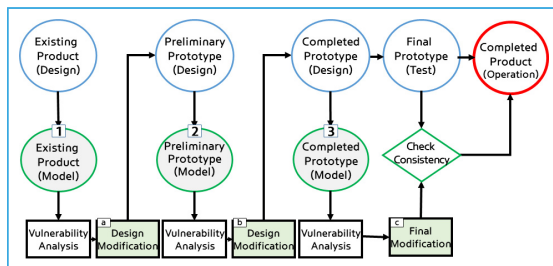





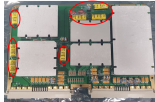

Figure 6. RPA Procedure for K2 Main Battle Tank

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.

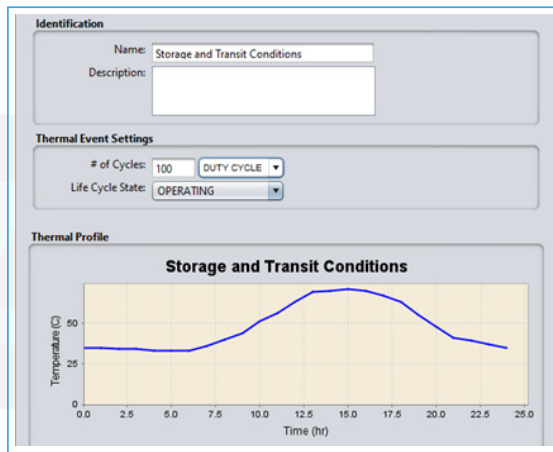


Figure 7. Temperature Profile for RPA

- 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

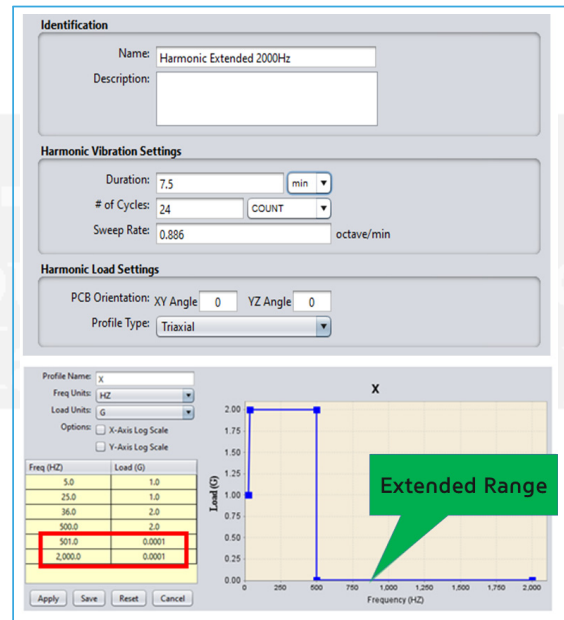


Figure 8. Vibration Profile for RPA

- 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.

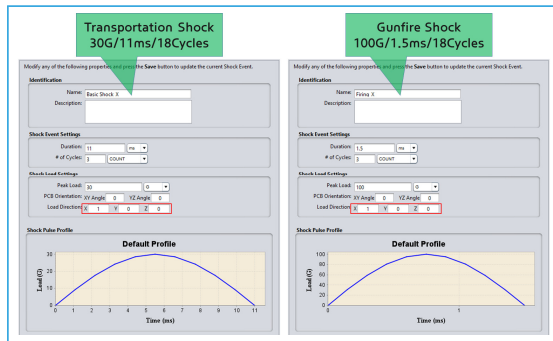


Figure 9. Shock Profile for RPA

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℃ 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℃)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℃ 범위이며, 이를 통하여 K2전차 승무원실 내에서의 전장품 주변온도 평가에 대한 사전 검증과정을 거쳤다.

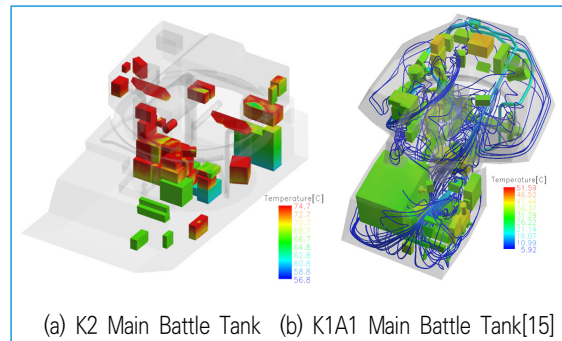


Figure 10. Surface Temperature Contours for Electronic Equipment of Main Battle Tank[℃]

• 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℃)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℃인 것으로 나타났다. 이것은 RPA 수행을 위하여 중동 환경조건에서의 PCB 소자의 온도정보를 얻기 위해 87.4℃의 가혹한 주변 온도조건이 적용되었음을 의미한다. Figure 12는 현수제어기 RPA 수행을 위하여 적용된 4가지 PCB에 대한 Thermal Map을 보여주고 있다.

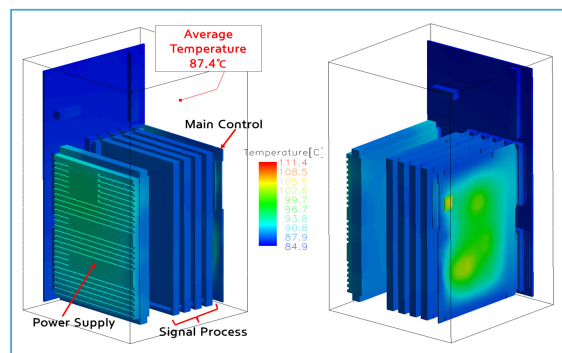


Figure 11. Surface Temperature Contours for PBA of Suspension Controller[℃]

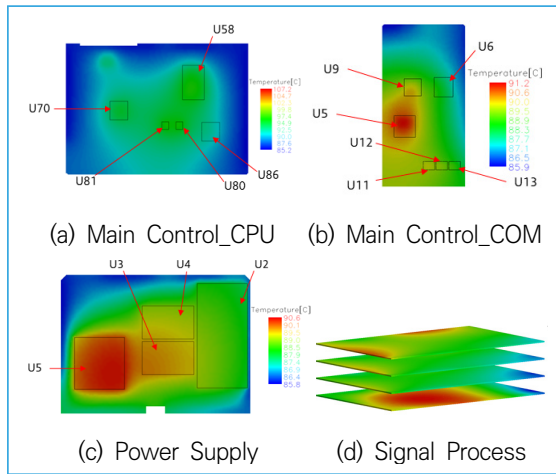


Figure 12. Thermal Map for PCB of Suspension Controller[°C]

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.

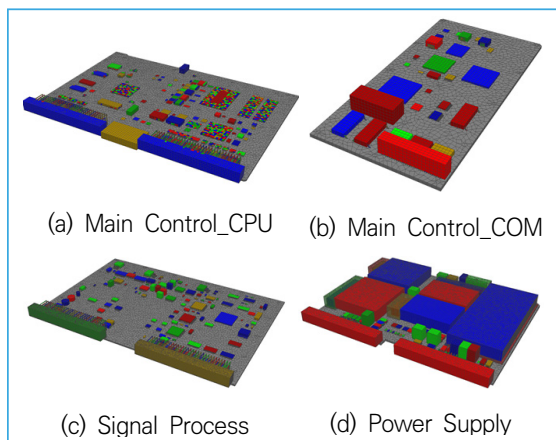


Figure 13. RPA Model for PCB of Suspension Controller

현재 K2전차에서 운용 중인 현수제어기 기존제품에 대하여 가혹한 중동 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 고장확률 100%의 심각한 신뢰성 수준을 보여주고 있다.

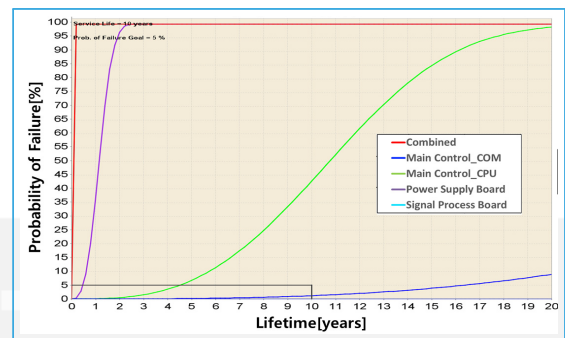


Figure 14. Probability of Failure for PCB of Existing Product

Table 3. Results of RPA for Existing Product

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

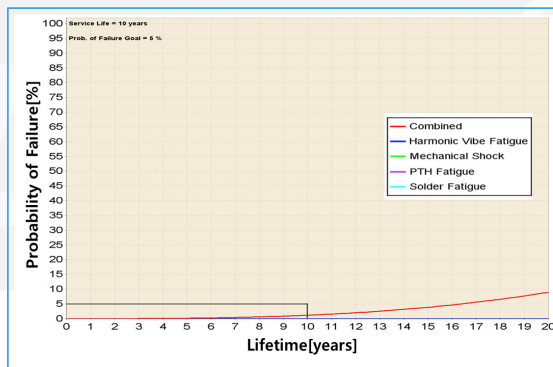


Figure 15. Probability of Failure for Main Control_COM of Existing Product

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	GFP-44 (MO-108A)	IC	TOP	63SN37PB	6.8E-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
U36	GFP-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
U38	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	7.6E0	1.3	100.0
U42	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	1.5E-1	1.6E-3	6.8E0	1.5	100.0
U40	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	8.4E-2	1.6E-3	6.4E0	1.5	100.0
U37	GFP-44 (MO-108A)	IC	TOP	63SN37PB	4.7E-1	1.6E-3	5.7E0	1.8	100.0
U44	TSSOP-48 (MO-1)	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-1)	IC	TOP	63SN37PB	1.5E-1	1.4E-3	1.3E0	7.4	91.3
U41	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	2.8E-1	1.4E-3	1.1E0	9.2	72.5
U45	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	4.5E-2	1.4E-3	1.0E0	9.7	67.1
U47	TSSOP-48 (MO-1)	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-28 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	4.3E-1	1.2E-3	2.6E-1	38.0	1.8
U10	SSOP-28 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	3.4E-1	1.2E-3	2.0E-1	50.3	0.8
U11	SSOP-28 (MO-15)	IC	TOP	63SN37PB	2.1E-1	1.2E-3	1.7E-1	58.4	0.5
U48	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	3.3E-2	1.2E-3	1.7E-1	60.2	0.5
U14	SSOP-28 (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	4.4E-1	9.2E-4	9.0E-3	>100	0.0
U21	SSOP-16 (MS-13)	IC	TOP	63SN37PB	1.4E-1	9.1E-4	8.3E-3	>100	0.0
U7	PDP-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	6.8E-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	4.0E-3	6.2E-4	>100	0.0	3.7E-5
CM2	AVX-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	AVX-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	8.0E-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
C45	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	3.0E-3	2.9E-5	>100	0.0	1.1E-14
CMF3	DIP IND	INDUCTOR	TOP	6.8E-3	2.8E-4	>100	0.0	2.9E-7

3.2. 예비시제 분석결과

3.2.1. 분석결과 종합

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

으로 나타났다. 심지어 입출력신호처리보드는 고장확률을 100%의 심각한 신뢰성 수준을 보여주고 있다. 이를 통하여 도출된 잠재된 문제점들에 대해 충실히 보완책을 마련하였고, 그 다음 단계에서 예비시제 상세 설계안에 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.

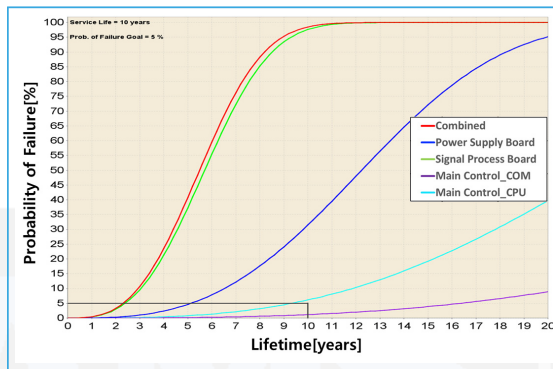


Figure 16. Probability of Failure for PCB of Preliminary Prototype

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	Fail	U19, U7
	Vibration		
	PTH Fatigue		
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 음영 부분을 서로 비교해 보면 결과적으로 입출력신호처리보드의 진동분석결과는 기존제품에 비해 크게 개선된 것으로 나타났으며, U19소자를 제외하고 수명 10년간 고장확률 5% 이하를 모두 충족하는 것으로 확인되었다.

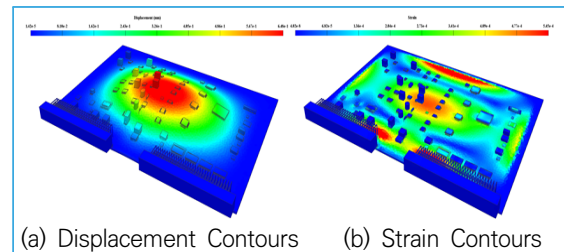


Figure 17. RPA Results for Signal Process of Preliminary Prototype

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	1.5E2	5.5	97.5
U7	QFP-48	IC	TOP	63SN37PB	4.8E-1	1.2E-3	2.1E-1	47.8	0.9
U43	QFP-64 (MS-026B)	IC	TOP	63SN37PB	2.3E-1	1.2E-3	1.4E-1	69.1	0.3
U1	BGA324_P0_3MM	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	6.8E-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	QFP-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	9.6E-4	1.6E-2	>100	0.0
U23	TSSOP-48 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	6.7E-2	9.5E-4	1.5E-2	>100	0.0
U38	SOIC-8 (MS-012BA)	IC	TOP	63SN37PB	7.3E-2	9.5E-4	1.4E-2	>100	0.0
U13	QFP-48	IC	TOP	63SN37PB	5.8E-1	9.3E-4	1.1E-2	>100	0.0
U47	TSSOP-16 (MO-13)	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-046)	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
U29	MSOP-48 (MO-18)	IC	TOP	63SN37PB	6.9E-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-012AA)	IC	TOP	63SN37PB	2.0E-1	8.4E-4	3.6E-3	>100	0.0
U24	SOIC-8 (MS-012AA)	IC	TOP	63SN37PB	6.9E-1	8.3E-4	2.9E-3	>100	0.0
U16	TSSOP-14 (MO-1)	IC	TOP	63SN37PB	5.8E-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

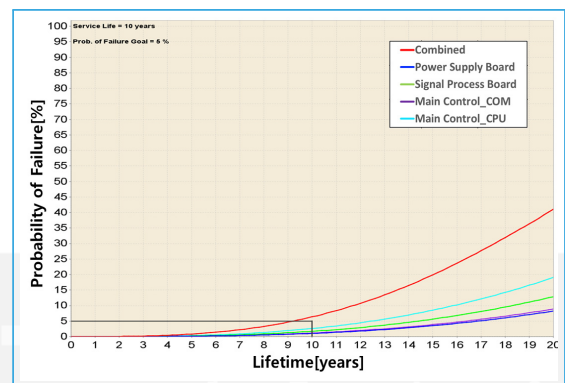
RefDes	Package	Part Type	Side	Max Disp	Max Strain	TTF (years)	Failure Prob	Failure Prob / Cycle
C1	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	1.3E-2	8.0E-3	14.4	50.1	5.9E2
C31	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	2.0E-2	7.4E-3	31.8	27.0	5.1E2
C4	RADIAL-10X25	CAPACITOR	TOP	9.8E-3	6.9E-3	>100	5.3	8.9E-1
C29	RADIAL-10X25	CAPACITOR	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	1.6E-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	6.5E-5	>100	0.0	3.6E-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	0.0E2
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	0.0E2
CMF7	DIP IND	INDUCTOR	TOP	5.5E-3	2.3E-4	>100	0.0	6.0E-8
C45	1206	CAPACITOR	TOP	1.7E-3	2.0E-5	>100	0.0	0.0E2
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	3.0E-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	0.0E2

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-837	IC	TOP	3.7E-2	7.4E-4	>100	0.0	1.6E-3
U7	259-FTBGA	IC	BOT	2.5E-2	4.2E-4	>100	0.0	1.3E-3
U13	78-FTBGA	IC	BOT	2.1E-2	4.2E-4	>100	0.0	2.5E-4
U8	90+46L-MCM-8S...	IC	BOT	2.2E-2	3.0E-4	>100	0.0	1.8E-4
U46	78-FTBGA	IC	TOP	2.1E-2	3.9E-4	>100	0.0	1.7E-4
U12	78-FTBGA	IC	BOT	1.1E-2	3.8E-4	>100	0.0	1.4E-4
U47	78-FTBGA	IC	TOP	1.1E-2	3.8E-4	>100	0.0	1.3E-4
U85	SOIC-12 (MO-226)	IC	TOP	2.4E-2	5.1E-4	>100	0.0	1.2E-4
U73	SOIC-12 (MO-226)	IC	TOP	1.4E-2	5.1E-4	>100	0.0	1.2E-4
U16	78-FTBGA	IC	BOT	2.5E-2	3.5E-4	>100	0.0	9.9E-5
U52	78-FTBGA	IC	TOP	2.5E-2	3.2E-4	>100	0.0	4.8E-5
U67	78-FTBGA	IC	TOP	1.2E-2	3.1E-4	>100	0.0	4.0E-5
R448	0402	RESISTOR	BOT	1.4E-4	7.2E-5	>100	0.0	0.0E0
R449	0402	RESISTOR	BOT	1.4E-4	6.6E-5	>100	0.0	0.0E0
R446	0402	RESISTOR	BOT	8.3E-3	9.3E-5	>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	9.9E-3	3.2E-5	>100	0.0	0.0E0
R450	0402	RESISTOR	BOT	2.4E-2	9.2E-5	>100	0.0	5.8E-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.

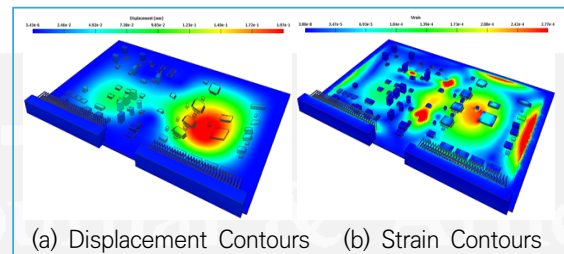


Figure 19. RPA Results for Signal Process of Completed Prototype

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-7360-38	INDUCTOR	TOP	9.2E-3	2.6E-3	>100	3.0	3.6E-1
U1	BGA-188	IC	TOP	2.1E-1	1.3E-3	>100	0.4	7.4E-2
L4	C-BEND-7360-38	INDUCTOR	TOP	2.2E-2	1.9E-3	>100	0.4	6.8E-2
L3	C-BEND-7360-38	INDUCTOR	TOP	2.2E-2	1.9E-3	>100	0.4	6.4E-2
L1	C-BEND-7360-38	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-64 (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	4.4E-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	3.3E-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	5.0E-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	1.5E-8
C44	2220	CAPACITOR	TOP	2.0E-4	1.9E-4	>100	0.0	2.5E-9
CMF9	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
CMF8	DIP IND	INDUCTOR	TOP	7.4E-3	2.4E-4	>100	0.0	8.0E-8
C45	1206	CAPACITOR	TOP	2.2E-3	2.7E-5	>100	0.0	0.0E0
CMF7	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
CMF6	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
CMF5	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
CMF4	DIP IND	INDUCTOR	TOP	2.1E-3	2.0E-4	>100	0.0	2.9E-8
CMF3	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
CMF2	DIP IND	INDUCTOR	TOP	3.4E-3	3.5E-4	>100	0.0	1.1E-6
CMF1	DIP IND	INDUCTOR	TOP	1.7E-3	2.4E-4	>100	0.0	9.9E-8
C51	2220	CAPACITOR	TOP	5.0E-3	3.8E-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	3.6E-5	>100	0.0	5.0E-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 검증을 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.

후 기

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 Buried 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.