



Received: 2024/08/29
Revised: 2024/09/06
Accepted: 2024/09/27
Published: 2024/09/30

***Corresponding Author:**

Hojin Koh

Future Warfare IPS R&D, LIG Nex1
21, Pangyo-ro 255beon-gil, Bundang-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9267
Fax: +82-31-326-9123
E-mail: hojin.koh@lignex1.com

Abstract

신뢰성물리학 분석(RPA, reliability physics analysis)은 reliability 설계 및 개발 기법으로 수명을 예측하고 성능을 향상시키기 위한 과학적인 접근 방식이다. 본 논문에서는 해군 함정 무기체계에 탑재/운영되는 회로카드조립체에 신뢰성물리학을 적용하는 방안을 제시하였다. 우선, 운영되는 주변 환경을 분석하고 회로카드조립체 기초 정보를 기반으로 PoF 분석 툴인 Sherlock SW를 활용하여 수명을 예측하는 프로세스를 제시하였다.

Reliability physics analysis(RPA) is a scientific approach to predict lifespan and improve performance with Reliability design and development techniques. In this paper, a process of applying Physics of Failure to Printed board assemblies(PBA) mounted and operated on naval ships was presented. First, it analyzed the ambient environment in which PBA are operated in ships, obtained basic information on PBA necessary for POF analysis, and presented a process of predicting lifespan using Sherlock SW, a POF analysis tool.

Keywords

고장물리학(Physics of Failure),
신뢰성물리학 분석(Reliability Physics Analysis)
회로카드조립체(Printed Board Assembly),
셜록(Sherlock),
회로카드조립체 수명(Lifespan of PBA)

함정 탑재장비 PBA의 신뢰성물리학 적용 방안

Application of Reliability Physics for Printed Board Assembly of Ship Mounted Equipment

고호진^{1*}, 차종한¹, 박경덕¹, 정준¹, 이광민², 신다미²

¹LIG넥스원 미래전장PS연구소 수석연구원

²LIG넥스원 미래전장PS연구소 연구원

Hojin Koh^{1*}, Jong-han Cha¹, Kyoung-deok Park¹, Jun Jeong¹, Gwang-Min Lee²,
Dami Shin²

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

²Research engineer, Future Warfare IPS R&D, LIG Nex1

1. 서론

최근 회로카드조립체(PBA, printed board assembly)의 신뢰성을 향상시키기 위한 설계 방안으로 신뢰성물리학 분석을 적용한 연구가 증가하고 있다. 신뢰성물리학(reliability physics)은 고장물리학(PoF, physics of failure)과 같은 의미이며, '고장물리'라는 용어는 분석을 수행하는 기관이나 회사가 고장을 용인하는 것을 의미할 수 있어 본 연구에서는 '신뢰성물리학'이란 용어를 사용하고자 한다[1].

함정 무기체계에 탑재되는 회로카드조립체는 해양 함상이라는 가혹한 환경 조건에서 운용된다. 따라서 임무 수행의 중요성과 정비의 어려움 등을 고려할 때 높은 신뢰성 확보가 요구된다[2]. 함정 탑재장비에서 높은 신뢰성 설계가 이루어졌는지 여부는 신뢰성 시험을 실시하여 신뢰성 목표가 달성되었는지 확인할 수 있으며, 또는 신뢰성 예측을 통해서도 확인할 수 있다.

신뢰성 예측의 목적은 제안한 설계에 대하여 신뢰도 요구사항을 달성할 수 있는지를 판단하는 것이다[3]. 이에 본 연구에서는 함정에서 운용되는 회로카드조립체에 대하여 PoF 이론이 적용된 Ansys 사의 Sherlock SW를 활용한 프로세스를 제안하고자 한다. 이를 바탕으로 함정 무기체계에 탑재된 회로카드조립체에 대하여 신뢰성물리학을 적용하여 신뢰성 향상 설계를 수행하는 데 도움이 되고자 한다.

2. 연구 배경 및 필요성

2.1 정의

고장물리학은 신뢰성물리학이라고도 불리는 신뢰성 설계기법으로 대상품목의 고유특성과 구조적/환경적 특성에서 기인하는 고장메커니즘을 식별하고 이에 따라 신뢰성을 분석·예측하는 기법이다[4].

2.2 역사적 배경

신뢰성물리학 방법론은 전자업계에서 최근에야 비로소 영향력을 발휘하기 시작했지만, 신뢰성물리학 개념은 60년 전 미군에 의해 처음 도입됐다. 그 목표는 2차 세계대전 당시 무기와 전자기기의 성능 저하 문제를 해결하는 것이었다. 그 발의안의 역사는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 매우 복잡하다.

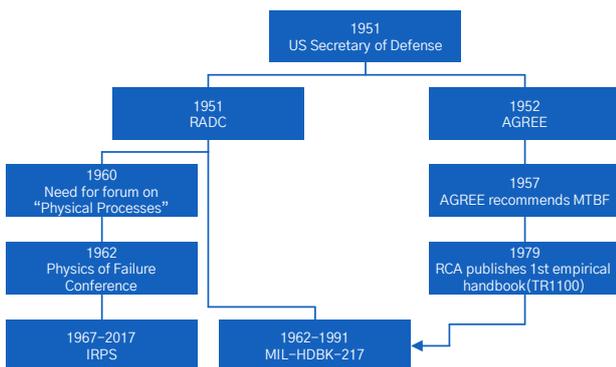


Fig. 1. History of reliability prediction analysis[1]

미 국방장관은 1950년대에 두 개의 보완적인 발의안을 지지했다. 하지만, 신뢰성을 물리학에 기반하는 것이 너무 복잡하다는 결론을 내렸다. 대신 경험적 핸드북(empirical handbook)에 기반한 통계적 접근방식으로 군사 공급망을 조정했다. 어떤 이유에서인지 RADC(Rome Air Development Center)는 이러한 전제에 동의했으며 최초의 경험적 핸드북인 MIL-HDBK-217이 탄생했다. 하지만 RPA(reliability physics analysis, 신뢰성물리학 분석)는 결코 사라지지 않았다. RPA가 강력한 반도체 설계 툴임이 명확해지자, 벨연구소의 엔겔마이어(Engelmaier), 리톤 인더스트리의 스테인버그(Steinberg), 록웰 오토메이션의 가스페리(Gasper)를 비롯한 여러 조직

의 혁신적인 엔지니어들이 보드 수준에서 RPA 기술을 개발하기 위해 부단히 노력했다.

2.3 신뢰성물리학 분석 이점

신뢰성물리학 분석은 다음과 같은 이점을 가지고 있다[1].

- (1) 시간 경과에 따른 실제 고장을 정확하게 예측
- (2) 이전에 사용하지 않았던 기술의 성능 예측
- (3) 신뢰성이 설계 프로세스의 일부가 될 수 있음
- (4) 사전 대비형 유지관리 전략을 적용 가능

2.4 함정 탑재장비 신뢰성물리학 프로세스의 필요성

신뢰성물리학을 적용하여 분석을 수행하면 신뢰성이 요구되는 회로카드조립체에 대하여 신뢰성 시험을 제한 없이 수행하는 효과를 얻을 수 있으나, 과거에는 타성, 분석 도구 부족 등으로 수행하지 못하였다. 이러한 문제 해결을 위해 신뢰성물리학 분석을 위한 도구와 방법론이 필요한 상황이었다.

함정 무기체계에 탑재되는 회로카드조립체는 해양 함상이라는 가혹한 환경 조건에서 운용되기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다. 이에 회로카드조립체에 대한 신뢰성 시험이 필요하나 개발 기간, 예산 부족의 이유로 시험 수행이 제한되고 있다. 반면 신뢰성물리학을 적용하여 분석을 수행하면 신뢰성이 요구되는 회로카드조립체에 대하여 신뢰성 시험을 제한 없이 수행하는 효과를 얻을 수 있다. 그렇기 때문에 이러한 분석을 수행할 수 있는 도구와 이를 적용하기 위한 방법론이 필요하게 되었다.

최근에는 신뢰성물리학 분석을 수행할 수 있는 도구인 Sherlock(ANSYS)이 개발되어 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 Sherlock SW를 활용한 함정 탑재장비 회로카드조립체의 RPA 분석 프로세스를 제안하고 관련 사례를 소개하고자 한다.

3. 신뢰성물리학 적용 프로세스

함정 탑재장비의 신뢰성물리학 적용 프로세스는 함정의 운용 특성과 운용 환경에 따라 Fig. 2와 같이 제안한다.

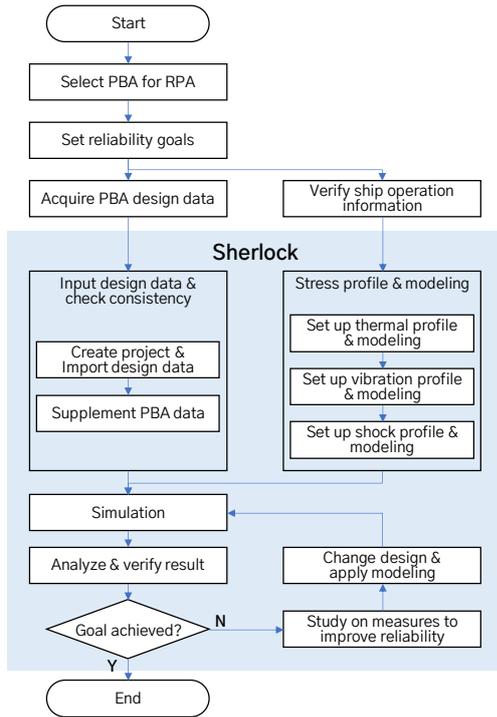


Fig. 2. RPA process with Sherlock SW

3.1 RPA 적용 대상 PBA 선정 (Select PBA for RPA)

신뢰성물리학 분석을 수행할 대상품목은 해당 무기체계에서 주요 기능을 하거나 고장율이 높은 품목 또는 핵심부품·구성품 선정 논리에 따른 회로카드조립체로 선정할 수 있다. 핵심부품·구성품 선정은 방위사업관리규정(훈령 제864호, 제79조 1항)에 따르면 “고장유형영향 및 치명도 분석 결과, 창정비 대상 품목 및 부품단종 등을 고려”해야 한다고 기술되어 있다. 이와 관련하여 김지영 등(2019)[5]은 고장유형영향 및 치명도 분석 결과를 활용하여 핵심부품 구성품 선정방안에 대한 사례 연구를 수행하였다.

3.2 신뢰성 목표 설정(Set reliability goals)

신뢰성 목표는 두 가지를 설정해야 한다. 첫째는 장비가 운용될 수명이다. 국내 무기체계는 무기체계 요구사항에 명기되어 있는 수명을 따른다. 특별한 언급이 없으면 일반적으로 20~30년의 수명 연한을 가정하여 설정한다. 두 번째로 정해진 수명 연한 동안 확보해야 할 신뢰성 목표를 설정한다. 신뢰성 목표는 각 무기체계 요구사항에 맞도록 정하나 일반적으로 60 % 혹은 90 %로 설정한다[6].

3.3 PBA 설계 데이터 확보(Acquire PBA design data)

Sherlock SW를 활용한 분석을 위해서는 Table 1 과 같이 상세한 설계 데이터가 필요하다. PBA 내부품의 레이아웃 뿐 아니라 stackup, 재질 및 드릴 정보 등을 통해 설계 내용을 3D 모델링화하고 모델링 자료를 기반으로 필요한 피로 해석 모델을 적용하여 분석을 수행하는 것이다. 상세한 설계 데이터는 PBA를 설계/제작하는 과정에서 산출되는데 Gerber 파일, ODB++ 파일, EDB 파일, IPC-2581 등이 있다. 이 중 ODB++는 PBA 설계 툴에서 사용되는 CAD-to-CAM data exchange format[7] 형태이며, Sherlock SW를 활용한 신뢰성물리학 분석을 수행하기 위해서는 ODB++ 형태의 PBA 설계 데이터를 입수하는 것이 매우 효과적이다.

Table 1. Required data list for Sherlock SW analysis[2]

Item	Description
Layout	Layer of parts in board
Board stackup	Each layer and material composition of PCB board
Laminated material	Laminate material properties
Pick and place file	Location for circuit or component connections within board
Mounting configuration	Mounting number, location, method
Heatsinking	Heat handling method
Bill of material (BOM)	Part number/manufacturer, physical specifications
Stiffness	Support strength and shape of parts
TS/PTC characterization	Physical test measurement data
Drill	Drill information for each layer

또한, PBA 고장 유형에 따른 분석을 위해서는 추가로 ODB++ 이외의 PBA에 부품 설치 시 필요한 solder 정보와 PCB(printed board assembly) 기판의 laminate 정보 등 설계 데이터가 필요하다. 이러한 데이터는 PBA를 제작한 업체의 시험 데이터에서도 입수할 수 있다.

3.4 함정 운용 정보 확인(Verify ship operation information)

PBA 설계 데이터를 확보하는 동시에 회로카드조립체를 탑재할 함정의 운용 정보를 파악해야 한다. 특히, 함정탑재장비의 power on/off 상태, standby 상태, 비운용 상태에 대한 정보를 확보해야 한다. 이렇게 함으로써 회로카드조립체가 스트레스를 받을 환경을 모델링할 수 있게 된다. 하성철 등(2012)[8]은 함정에 대한 운용시간 연구를 수행하였고, 이형민 등(2018)[9] 등은 수상함에 탑재된 장비의 운용시간을 연구하였다. 이러한 연구의 방법을 기반으로 해당 PBA의 운용 시간에 대한 운용 프로파일을 만들 수 있다.

3.5 설계 데이터 입력 & 정합성 확인(input design data & check consistency)

3.5.1 프로젝트 생성 & 설계 데이터 import(Create project & Import design data)

Sherlock SW에 프로젝트를 생성하고 설정된 신뢰성 목표값을 입력한다. PBA 설계 데이터 형태는 ODB++, Gerber, EDB, IPC-2581 등이 있으나 여기서는 ODB++ 파일을 기준으로 제시한다.

ODB++ 파일을 불러올 시 확인해야 할 항목은 다음과 같다. Sherlock SW의 “Files” 리스트에 Comp, Copper, Drill, Silk, Sm가 있어야 하고, “Inputs” 리스트에 “Part list”, “Stackup”, “Layers”, “Pick & place”, “Drill holes”, “Net list”가 정상적으로 입력되어 있어야 한다. 참고로 ODB++ 파일의 구조는

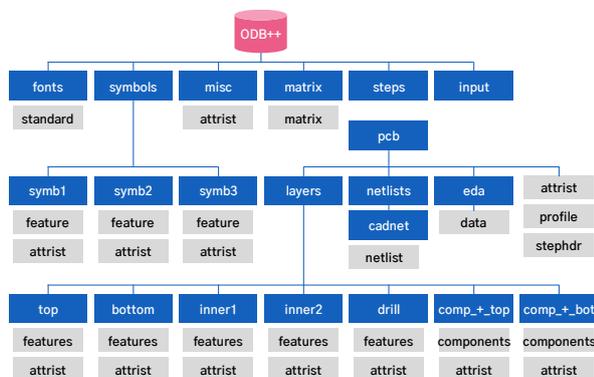


Fig. 3. ODB++ file structure

Fig. 3[10]와 같이 구성된다.

3.5.2 PBA 데이터 보완(Supplement PBA data)

입력된 설계 데이터에서 실제 부품목록이 정확한 지 도면 혹은 BOM(bill of material)을 기준으로 확인한다. 이때, Sherlock SW library에 없는 품목은 부품 catalogue를 활용하여 값을 수정 입력해야 한다. 또한, 부품의 lead 길이가 PBA 수명에 영향을 미칠 수 있으므로, 설계된 값이 입력되었는지 확인하거나 필요 시 lead 길이를 제외하고 분석을 수행할 수도 있다.

3.6 스트레스 프로파일 & 모델링(Stress profile & modeling)

함정 연간 운용 정보를 확보하면 이를 기준으로 PBA의 운용 프로파일에 따른 스트레스를 분석하고 이를 Sherlock SW에 모델링한다. 스트레스 모델링은 1년 기준으로 하는 것이 보통이나 상황에 맞게 수명연한 전체에 대하여 모델링하여도 무방하다. 함정 탑재 PBA는 물리적 특성 고장유형에 영향을 주는 열, 진동, 충격에 대한 스트레스 프로파일을 모델링할 수 있다. 각 프로파일은 MIL 규격을 기준으로 설정하거나 무기체계별 환경시험 규격을 적용하여 스트레스를 모델링할 수 있다.

3.6.1 열 프로파일 설정 & 모델링(Set up thermal profile & modeling)

열 프로파일은 다른 스트레스에 비해 PBA 피로도에 많은 영향을 미친다. 실제 미 공군 필드데이터 분석결과에 따르면 운용 시 고장 발생의 절반 이상인 55%가 온도에 의한 고장임을 알 수 있다[11]. 열 프로파일 설정 시 함정 연간 운용 정보를 기준으로 1년 동안의 온도 cycle을 모델링하여 적용한다. 탑재장비의 측정된 실제 운용/비운용 시 주변 온도를 적용하거나, MIL-STD-810H의 Part One Annex C, Table C-I.[12]를 적용하여 온도 cycle을 설정한다. 우리나라는 계절마다 온도가 많은 차이가 있어 봄/가을, 여름, 겨울로 열 cycle을 다르게 설정하여 적용할 필요가 있다.

3.6.2 진동 프로파일 설정 & 모델링(Set up vibration profile & modeling)

진동 프로파일은 랜덤 및 하모닉 프로파일로 나누어 적용한다. 랜덤 진동은 watercraft-marine vehicles에 적용되는 MIL-STD-810H Method 514.8, Annex D[11]을 적용하거나 요구된 무기체계 환경시험 규격을 적용한다. 하모닉 진동은 MIL-STD-167-1A Type I[13]을 적용한다.

3.6.3 충격 프로파일 설정/모델링(Set up shock profile & modeling)

충격 프로파일 적용은 육상 해머충격 시험으로 수행하며, 탑재장비 PBA가 탑재된 캐비닛 중량에 따라서 MIL-S-901D Grade A, Class II, Type A[14]를 적용한 경량(light weight) 충격시험 및 중간 중량(medium weight) 충격시험을 모델링한다. 경량과 중간 중량은 아래와 같이 구분한다.

- 경량 충격 시험: 총중량 550 파운드(250 kg) 이하
- 중간 중량 충격 시험: 총중량 550~7,400 파운드(250 kg – 3,357 kg)

3.7 시뮬레이션(simulation)

차중환 등(2019)[2]은 신뢰성물리학 시뮬레이션을 위해 PBA 물리적 특성 고장에 속하는 대표적인 고장 유형을 연구하였고 그 결과로 PTH fatigue와 solder fatigue를 주요 고장유형으로 확인하였다. 따라서, 함정 탑재장비 PBA의 시뮬레이션은 모델링을 기준으로 열 스트레스에 해당하는 “PTH fatigue”와 “solder fatigue”를 시뮬레이션한다. 또한, 진동 스트레스에 대해서는 “random vibe”, “harmonic vibe”를 수행하며, 충격 스트레스는 “mechanical shock” 분석을 수행한 후 수명 예측(life prediction) 그래프가 생성되는지 확인한다.

3.8 결과분석 및 확인(Analyze and verify result)

수명 예측 그래프가 수명 연한 내 신뢰성 목표값을

만족하는지 여부를 확인한다. 각각의 분석 그래프와 “combined” 수명 그래프가 정해진 수명 연한 동안 신뢰성 목표값을 만족하면 분석은 종료된다. 신뢰성 목표값을 만족하지 못하는 경우는 각 분석에 따른 “life prediction” 그래프와 고장 확률이 높은 부품을 확인한다.

PTH fatigue는 부품 품질, PTH의 도금 두께, PTH 지름, PCB의 라미네이트와 관련이 있다. “solder fatigue”는 부품 품질, 솔더 종류, 라미네이트, 솔더볼 높이, 패드 크기와 관련이 있다. “mechanical shock”, “random vibe”, “harmonic vibe” 분석도 부품 품질 외에 위에 언급한 항목과 연관이 있다.

3.9 신뢰성 향상 방안 연구(Study on measures to improve reliability)

목표값을 만족하지 못할 경우 PBA의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방안을 검토해야 한다. 이러한 방법 중 수명에 많은 영향을 미치는 부품을 찾아 MTBF (mean time between failure)가 높은 MIL 규격 부품을 변경하는 방법, laminate 재질 및 솔더 재질을 변경하는 방법, PTH 도금 두께 변경, 몰딩 추가 등의 신뢰성 향상 방안을 Sherlock SW에 적용하여 시험할 수 있다.

3.10 설계 변경 & 반영(Change design & apply modeling)

신뢰성 향상 방안이 결정되면 Sherlock SW 내 설계 데이터를 변경하고 모델링을 적용한다. 부품 변경, PCB에 대한 laminate 변경, solder 변경 등 실제 환경에서는 많은 시간과 노력, 비용이 필요한 사항을 Sherlock SW에서는 적은 시간과 노력, 비용으로 민감도 분석을 다양하게 시험하여 신뢰성 목표를 달성할 수 있는지 확인할 수 있다.

4. 사례 적용

4.1 RPA 적용 대상 PBA 선정

함정 탑재장비에 적용될 수 있는 sample PBA의 정보가 포함된 ODB++ 파일을 활용한다.

4.2 신뢰성 목표 설정

신뢰성 목표는 “신뢰성 90%” 목표인 “probability of failure” 10 %로 설정하고 수명 service life는 30 년으로 설정한다.

4.3 PBA 설계 Data 확보

Sample ODB++ 데이터를 활용한다(example.tgz).

4.4 함정 운용 정보 확인

PBA가 함정에 탑재되어 운용되는 형태를 운용자를 통해 확인하거나 유사체계의 함정 운용 실적을 확인하여 운용 프로파일을 작성한다.

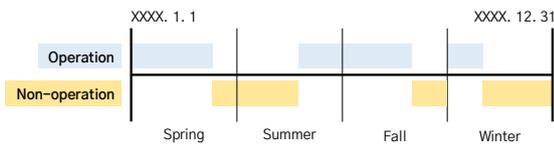


Fig. 4. Annual operating hours of a ship

4.5. 설계 데이터 입력 & 정합성 확인

4.5.1 프로젝트 생성 & 설계데이터 import

Sherlock SW에서 프로젝트를 생성하고 ODB++ 파일을 불러온 결과는 Fig. 5와 같다.

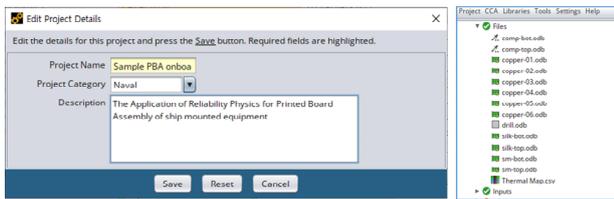


Fig. 5. Project creation screen & import result

4.5.2 PBA 데이터 보완

불러온 ODB++ 파일의 part list와 실제 도면 및 BOM의 정보가 맞는지 확인하고 보완한다. Fig. 6는 불러온 부품에 대한 수정 화면으로, 부품 lead까지 분석을 수행한다면 각 소자별 lead 길이를 확인해야 한다.

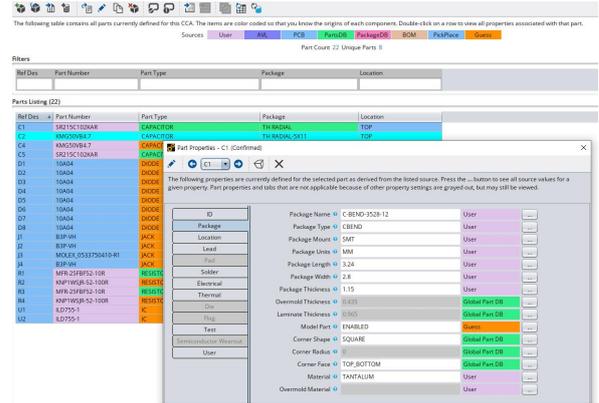


Fig. 6. Part supplement screen

4.6 스트레스 프로파일 & 모델링

열 프로파일은 봄, 여름, 가을, 겨울로 구분하고 각각 운용과 비운용으로 구분하여 적용하였다. 랜덤 진동 프로파일, 하모닉 진동 프로파일, 충격 프로파일을 MIL 규격을 기준으로 모델링하였다.

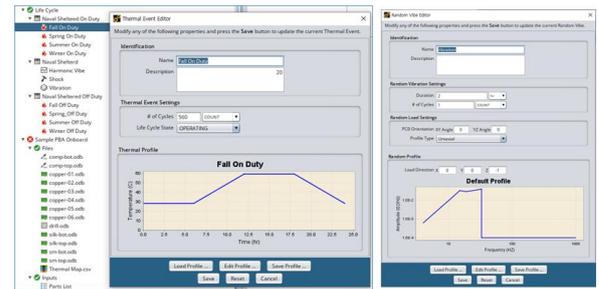


Fig. 7. Stress profile modeling screen

4.7 시뮬레이션

각 모델링 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 적용되는 스트레스에 대한 항목은 실제 운용 환경에 맞추어 선택하였다.

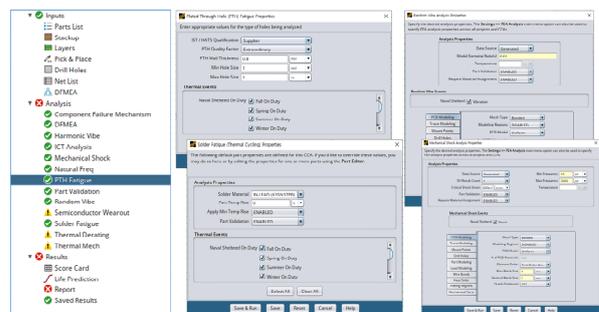


Fig. 8. Simulation screen

4.8 결과 분석 및 확인

각 분석결과에 대한 “life prediction” 그래프는 Fig. 9, 고장확률 상위 부품 결과 및 Laminate는 Fig. 10과 같으며, 분석 결과, 신뢰성 목표를 달성하지 못하였다. 수명에 영향을 미치는 요인 중 z축 열팽창계수(CTEz)가 수명에 영향을 많이 끼친 것으로 확인하였다[15].

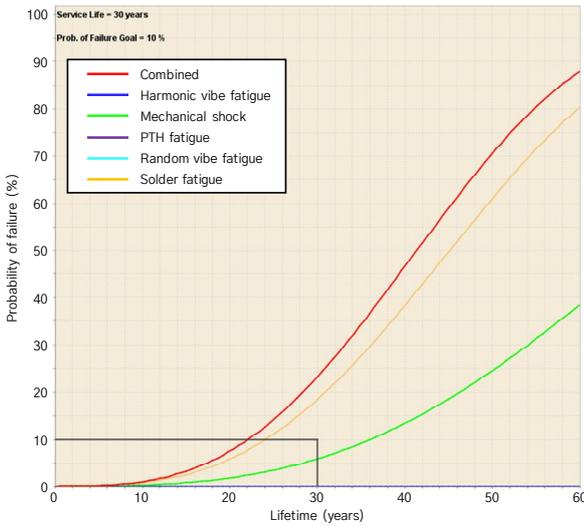


Fig. 9. Life prediction graph

Table with columns: RefDes, Package, Part Type, Model, Side, Material, Solder, Max # of, Damage, TTF (years), Score. It lists various components and their properties.

Fig. 10. Parts List & Laminate

4.9 신뢰성 향상 방안 연구

신뢰성을 높이기 위해 solder 변경, laminate 변경, 고장확률 상위부품에 대한 부품 변경, 몰딩 추가 등 다양한 방법으로 PBA에 대한 신뢰성 향상 방안을 고려하였다.

4.10 설계 변경 & 반영

설계 변경 방안 검토 결과 z축 열팽창 계수를 감소시키기 위해 z축 열팽창 계수에 영향이 큰 laminate를 변경하였다. Laminate를 Hitachi CEM-3, MCL-e-630 제품에서 isola FR-4, 185HR 제품으로 변경하여 분석한 “life prediction” 그래프는 Fig. 11과 같고, 부품 고장확률이 낮아진 것을 Fig. 12와 같이 확인할 수 있다. 즉, 설계 변경을 수행한 후 분석한 결과 요구된 신뢰성 목표를 달성하였다.

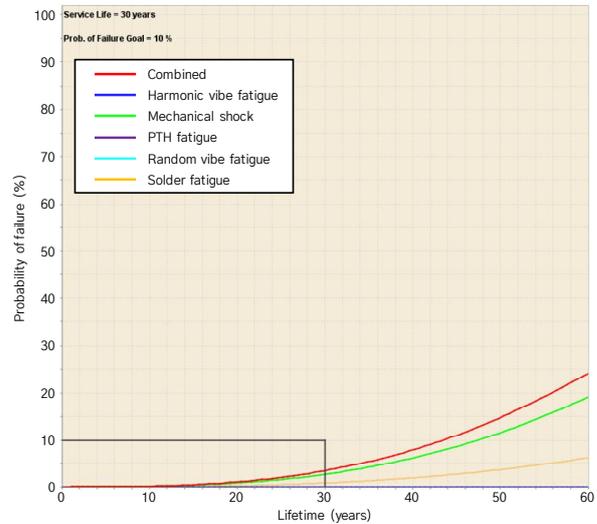


Fig. 11. Life prediction graph after design modification

Table with columns: RefDes, Package, Part Type, Model, Side, Material, Solder, Max # of, Damage, TTF (years), Score. It lists components after design modifications.

Fig. 12. Parts List & Laminate after design modification

5. 결론

본 연구에서는 함정에 탑재되는 회로카드조립체 (PBA)에 대하여 신뢰성물리학을 적용하기 위한 프

로세스를 Sherlock SW를 바탕으로 제시하였다. 이를 통해 신뢰성 예측 및 시험에 신뢰성물리학을 연구 및 적용하는 데 있어 도움이 되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] The Brave New World of Reliability Physics, Automotive Magazine, September–October 2018, pp. 72–75.
- [2] Jong-Han Cha, Kyoung-Deok Park, Ki-Won Lee, Byeong-Ho Bak, Hee-Earn Kim, Hyeong-Ahn 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, Vol. 20, No.12, 2019, pp. 535–545.
- [3] MIL STD 785B, “Reliability Program for System & Equipment Development & Production,” Department of Defense, Task 203: Reliability Predictions, p. 1, 1980.
- [4] DOD Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability, 2005. 8.
- [5] Kim Ji-young, Kim Geun-hyung, & Kim Ji-seop (2019-10-31). A Case Study on the Selection of Key Components for Reliability Testing, Proceedings of the Korean Reliability Society Conference, Gyeonggi.
- [6] US DOD, MIL-STD-690D, “Failure Rate Sampling Plans and Procedures,” 10 June 2005, p. 11.
- [7] Santarini, Mike (January 22, 2002). “ODB++ Spec Tapped for CAD-to-CAM Data Exchange,” EE Times. Archived from the original on January 22, 2013. Retrieved 29 September 2011.
- [8] Ha, Sungchul, & Kook, Jungho (2012). “A Wartime-Peacetime OMS/MP Analysis Model for a Naval Ship and Case Study,” Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 15, No.5, pp. 660–666.
- [9] Lee Hyeong-min, Min Seung-sik, Jeong Yeon-hwan, Yoo Jae-woo, Jang Jeong-mu, “RAM Analysis of the Sonar System of a Ship,” BSNK, Vol. 55, No. 1, March 2018, pp. 12–14.
- [10] “ODB++ Overview.” Artwork.com. Artwork Conversion Software Inc. Archived from the original on 6 December 2011. Retrieved 25 September 2011.
- [11] Steinberg D. S. “Vibration Analysis for Electronic Equipment, 3rd”, John Wiley & Sons, Preface, p. 18, 2000.
- [12] US DOD, MIL-STD-810H, “Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests,” 31 January 2019, pp. Part One-C-2-C-8, pp. 514.8D-23-D-24.
- [13] US DOD, MIL-STD-167-1A, “Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment”, USA, Nov, 2005.
- [14] US DOD, MIL-S-910D, “Military Specification: Shock Tests. H.I. Shipboard Machinery Equipment, and Systems, Requirements for,” USA, Jan, 1989.
- [15] Koh, Ho-Jin, Cha, Jong-Han, Jeong, Jun, Jo, Si-Hyeon, Kim, Geon-Woo, & Yoon, Yeon-Ah (2022-07-06). Study on the Influence of PBA Reliability and PTH Plating Thickness According to Thermal Expansion Coefficient. Proceedings of the Korean Reliability Society Conference, Jeju.