Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 12 pp. 535-545, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.535
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

신뢰성 물리학 분석 기반 함정탑재 PBA 신뢰성 설계에 대한 연구

차종한[1*], 박경덕[1], 이기원[1], 박병호[1], 김희언[1], 권형안[2]
[1]LIG넥스원(주), [2](주)엑슬리트엣지

A Study on Design for Reliability for the PBA of Warship based on Reliability Physics Analysis

Jong-Han Cha[1*], Kyoung-Deok Park[1], Ki-Won Lee[1], Byeong-Ho Bak[1], Hee-Earn Kim[1], Hyeong-Ahn Kwon[2]
[1]LIG Nex1, [2]Exleet Edge

요 약 함정 무기체계에 탑재되는 회로카드조립체(Printed Board Assembly, 이하 PBA)는 해양 함상이라는 가혹한 환경 조건에서 운용되기 때문에 임무 수행의 중요성과 정비의 어려움 등을 고려하여 높은 신뢰성 확보가 요구된다. 운용 중 PBA 고장 발생 시 신속한 수리부속 보급이 어렵고 임무수행에 영향을 미친다. 개발단계에서 신뢰성 시험이 시제품 제작 이후에 수행되며, 시험 수행을 위해 시간, 장소, 시료, 비용의 확보와 고장부위 식별 등에 많은 노력과 어려움이 따른다. 그리고 MIL-HDBK-217F 규격 등을 토대로 한 신뢰도 예측은 부품단위 고장률에 근거하고 있어 설계(PCB층/재질, 전자부품 배치/상호관계), 사용 환경과 방법, 접합부 구조와 특성(패드 크기/솔더 재질) 등 부품 외적인 고장요인을 고려하고 있지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 고장물리(Physics of Failure, 이하 PoF) 기반 도구를 활용, 신뢰성 물리학 분석(Reliability Physics Analysis, 이하 RPA)을 수행하여 시제품 제작 전 열-기계적 측면의 신뢰성을 향상시키는 방안을 제시한다. RPA 수행과 적용을 통해 PBA의 특화된 다양한 고장메커니즘을 고려한 신뢰성 점검, 신뢰성 취약부위 식별, 설계대안 도출, 설계반영 및 시험계획 수립 등 사전 검증을 수행하여 높은 신뢰성을 확보할 수 있다.

Abstract The PBA of ship weapon system should be installed and operated under harsh environmental conditions and so it should be highly reliable to endure the mission profiles during its entire lifetime. In the case of PBA failure during operation, rapid maintenance is highly likely to be difficult due to problems such as supply of parts, which can have a devastating effect on the mission. In order to validate the reliability of PBA, a series of tests are performed with PBA samples, but they require time, testing facilities, samples, expenses and failure analysis if failed. The reliability of PBA is predicted on the basis of specifications such as MIL-HDBK-217F, but this specification does not take into account failure mechanisms for specific design details, environment and usage, interconnects and its characteristics that drive many failures of PBA in the field. Therefore, this study predicts the reliability of PBA using an RPA tool and proposes the RPA methodology as a validation process at the design stage. With RPA, it is now possible to achieve design validation including inherent failure mechanism, identification of weakest link, alternative design options, and test plan development.

Keywords : Reliability Design, Reliability Physics Analysis, Physics of Failure, Sherlock, Design for Reliability

*Corresponding Author : Jong-Ha Cha(LIG Nex1)
email: jonghan.cha@lignex1.com
Received August 7, 2019 Revised August 23, 2019
Accepted December 6, 2019 Published December 31, 2019

1. 서론

함정 무기체계는 출항 이후 해양 함상이라는 가혹한 조건 하에서 오랜 기간 임무를 수행한다. 함정탑재 PBA는 운용 중 고장 발생 시 수리부속 보급 등의 문제로 신속 정비가 어렵고, 임무 수행에 치명적인 영향을 끼칠 수 있어 높은 신뢰성이 요구된다. 또한, 신뢰성 점검은 개발 초기단계에 수행하면 Fig. 1과 같이 설계변경 시 다양한 설계 대안 적용이 가능하며, 설계비용이 절감된다[1].

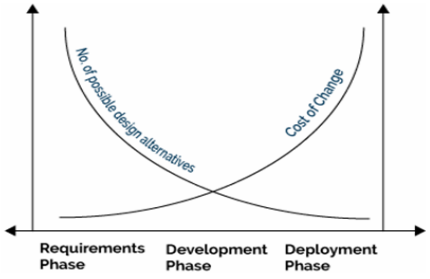


Fig. 1. Cost of Change

무기체계 구성품 신뢰성 검증방법인 신뢰성 시험은 시제품 제작 이후에 수행할 수 있을 뿐만 아니라 시험 수행을 위한 시간, 장소, 시료, 비용의 확보와 고장부위 식별 등에 어려움이 따른다. 시제품 제작 전 설계 단계에서는 MIL-HDBK-217F 등 규격에 의한 신뢰도 예측이 가능하지만, 최하위 부품별 고장률을 단순 합산하기 때문에 PCB층과 재질, 전자부품 배치/상호관계, 열사이클링, 솔더 재질 특성 등 부품 외적인 고장요인을 고려하지 못한다. 이러한 기존 신뢰성 점검 방법의 한계를 극복하기 위하여 신뢰성 시험 기간 단축, 필드데이터를 이용한 신뢰도 예측 정확성 향상 방안 등 다양한 연구가 이루어지고 있다[2-7].

본 연구에서는 PoF 이론이 적용된 DFR Solutions 사의 Sherlock 소프트웨어를 활용하여 RPA 기반 함정탑재 PBA 신뢰성 설계방안을 제시한다. RPA 기반 신뢰성 설계를 수행하면 시제품 제작 전 PBA에 가해지는 실질적 환경부하 적용, 고장부위와 유형을 결정하는 고장메커니즘을 고려한 열-기계적 신뢰성 점검, 취약부위 식별, 설계변경에 이르는 일련의 과정을 단시간/저비용으로 반복 수행하여 충분한 사전 검증을 할 수 있다. 결과적으로 한정된 비용과 개발기간 하에서 높은 신뢰성을 달성할 수 있다.

RPA 적용 및 연구 사례로 해외 자동차, 항공우주산업 등 전자부품이 사용되는 분야에서 RPA 기반 신뢰성 시험을 수행하고 있다. 그리고 미국 자동차 회사 GM은 2004년부터 RPA를 적용하여 도로주행 시험이 줄어들어 시험부지 판매 및 약 1,200명의 시험 인력 감축 등으로 관련 비용을 크게 절감하였다. 국내에서도 자동차 및 IT 업계에서 RPA 기반 시험을 수행하고 있으며, 국내 무기체계에서는 운용 특성 상 지진 등에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 고장물리 기반 수중 매설형 PBA에 대한 신뢰성 설계 연구를 하였다[8]. 본 연구에서는 해양에서 임무를 수행하는 함정의 운용 환경 특성(열, 진동, 충격)을 고려한 신뢰성 물리학 기반 신뢰성 설계 연구를 한다.

본 논문은 2장 연구 절차, 3장 분석 개요, 4장 신뢰성 물리학 분석, 5장 결론으로 구성된다.

2. 연구 절차

앞서 언급한 바와 같이 신뢰성 예측 방법 개선을 위해 다양한 방법론 연구 및 4차 산업혁명 기술을 접목한 연구가 이루어지고 있다. 하지만 실제 고장메커니즘을 고려하지 못하고, 즉시 적용하기에는 현실적으로 수용되기 힘들다.

서양우(2018)등은 필드데이터 기반의 유도탄 신뢰도 예측에 대한 연구를 하였다[6]. 함정용 유도탄 고장 현황을 수집 및 신뢰도를 예측하여 개발기간 신뢰도 예측결과와 비교를 하였는데 필드데이터 기반의 평균수명이 5배가 좋은 결과의 연구 결과가 도출되었다. 이처럼 경험적 데이터 기반의 신뢰도 예측은 실제 필드에서의 수명과 괴리가 있다.

김근형(2018)등은 무기체계 신뢰도 예측 프로세스 현황과 후속군수지원 데이터 적용 방안에 대한 연구를 하였다[7]. 이 연구에서는 경험적 데이터 기반의 신뢰도 예측의 문제점 현황과 원인을 분석하였다. 그래서 후속군수지원 단계에서 데이터를 축적하여 빅데이터 기반의 새로운 신뢰도 예측방법을 제안하였다. 이런 새로운 기술 적용을 한 방법론도 바람직하다 생각된다. 그러나 데이터 축적에 상당한 기간이 소요되고 신규 전자부품에 대한 예측에 제한이 있는 것이 단점이다.

Fig. 2는 미 국방부에서 무기체계 개발단계에서의 신뢰성 설계를 위한 활동 업무를 보여준다[9]. 설계단계에서의 신뢰성 활동은 그 이후 단계에의 신뢰성 활동보다 비용 절감과 신뢰성 향상 측면에서 중요하다고 강조하고 있다. 국내 무기체계 설계단계에서는 신뢰성 향상 활동으

로 고장물리를 제외한 모든 활동을 하고 있다. 그래서 국내 무기체계 개발단계에도 RPA를 적용하여 신뢰성 설계 활동을 수행해야 한다.

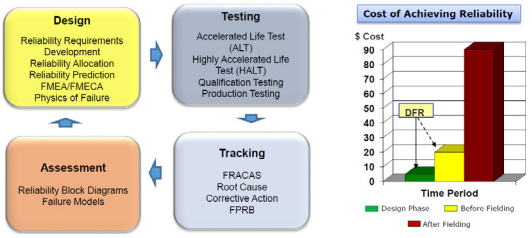


Fig. 2. Design for Reliability Activities

설계 초기 단계부터 설계와 RPA 기반 도구를 활용하여 상시 검증을 통한 신뢰성 설계를 수행할 수 있다. 그리고 이러한 활동을 통하여 신뢰성 시험의 여러 위험 감소를 통한 기간 및 비용 측면에서 큰 이점을 확보 할 수 있다.

본 연구 절차는 Fig. 3과 같이 분석 대상 PBA를 선정하고, 필요한 PBA 설계 자료를 식별하였다. 이후 신뢰성 목표 및 실제 운용환경을 고려한 온도, 진동, 충격 프로파일을 설정하여 Table 1의 6개의 고장유형에 대한 신뢰성 분석을 수행하였다. 그리고 분석 결과로 신뢰성 취약부위를 도출하여 신뢰성 목표 만족을 위한 설계 대안을 제시하였다. 또한, 각 대안을 설계에 반영 후 신뢰성 분석을 재수행한 결과를 비교분석하여 최적 설계 대안을 제시하였다.

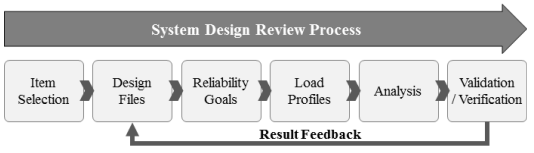


Fig. 3. Procedure of the Study

Table 1. Failure Mode of Physics

No.	Failure Mode
1	PTH Fatigue
2	Solder Fatigue
3	Resonance Risk
4	Harmonic Vibration
5	Random Vibration
6	Mechanical Shock

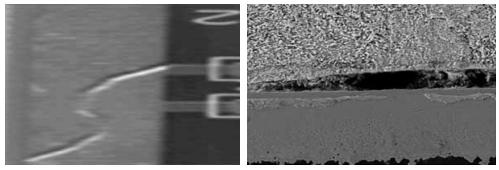
3. 분석 개요

3.1 RPA 대상 PBA 고장유형

PBA의 고장유형은 크게 2가지로, 제조 중 실수 등에 의한 공정상 불량과 구성품 자체 특성에 의한 물리적 특성 고장으로 구분된다.

PBA 공정상 불량에 속하는 대표적인 고장유형은 Fig. 4의 Winkle과 Delamination이며, 이수일(2014)등은 PCB 공정상의 불량유형 분석에 대한 연구를 하였다[10]. 실제 3개 제조업체의 각 공정별 불량유형을 6개월간 수집한 결과 공정상 불량률은 평균 3% 이하로 확인되었다.

Failure Mode	Description
Wrinkle	Occurs due to insufficient pressure during lamination molding
Delamination	Adhesion of Inner Layer-Prepreg, Prepreg-Prepreg and Prepreg-Copper Foil is weak and it is not completely bonded.

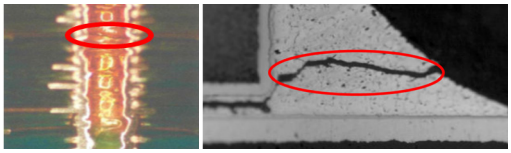


〈Wrinkle〉 〈Delamination〉

Fig. 4. Major Failure Mode in PBA Manufacturing Process

PBA 물리적 특성 고장에 속하는 고장유형은 Fig. 5와 같으며, 대표적인 고장유형은 PTH피로와 솔더피로이다. PBA가 열 사이클링에 노출될 때 PCB 기판, 도금, 부품, 솔더가 팽창과 수축을 반복하는 과정에서 각 구성품의 열팽창계수의 차이로 균열이 발생할 수 있다. PTH피로는 Via의 도금 균열에 대한 고장유형이며, 솔더피로는 PCB와 부품 사이의 솔더 균열에 대한 고장유형이다. PBA 물리적 특성 고장에 속하는 다른 고장유형으로 PBA와 프레임 간의 공진, 하모닉/랜덤진동, 기계적 충격에 의해 발생하는 PBA의 변형에서 기인하는 PBA 구성품 파손에 대한 고장유형이 있다.

Failure Mode	Description
PTH Fatigue	Fatigue life of Plated through holes
Solder Fatigue	Fatigue life of PBA Solder
Resonance Risk	Analysis of Resonance risk with frame assembly
Harmonic Vibration	Fatigue life of Harmonic vibration
Random Vibration	Fatigue life of Random(non-Harmonic) vibration
Mechanical Shock	Fatigue life of Mechanical shock



〈PTH Fatigue〉 〈Solder Fatigue〉

Fig. 5. Description for Failure Mode of Physics

본 연구에서는 PBA 공정상 불량에 대해 신뢰성이 확보된 상태로 가정하고, PBA 물리적 특성 고장에 속하는 고장유형에 대하여 RPA를 수행한다.

3.2 분석 대상

본 연구의 분석 대상 선정은 중요 기능 수행 여부와 수량이 많은 것을 기준으로 설정하였다. 함정 격실 내 캐비닛이 위치해 있고, 캐비닛 내부 랙조립체에 장착되는 FPGA보드로 선정하였다. 이 보드는 장비 상태, 전원제어정보 및 온/습도정보 등의 신호를 수신 받아 운용자가 장비를 제어할 수 있도록 하는 역할을 수행한다. RPA 분석을 위해 Table 2의 설계정보가 필요하며, 분석 대상 PBA의 간략한 설계정보는 Table 3과 같다.

Table 2. Required Data List for Sherlock Analysis

No.	Item	Description
1	Layout	Layout of pars in board
2	Board stackup	Each layer and material composition of PCB board
3	Laminated material	Laminate material properties
4	Pick and place file	Location for circuit or component connections within board
5	Mounting configuration	Mounting number, location, method
6	Heatsinking	Heat handling method
7	Bill of material (BOM)	Part number/manufacturer, physical specifications
8	Stiffness	Support strength and shape of parts
9	TS/PTC Characterization	Physical test measurement data
10	Drill	Drill information for each layer

Table 3. Design data information for Sherlock Analysis

Classification	Description
PCB size	180 mm × 100 mm × 1.8 mm
Component	IC, Semiconductor, Osilator, Resistor, Capacitor, Inductor, etc. total 102 types, 841 ea
Layer	16 layers
Laminate	Generic FR-4
Solder	SAC305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5)

3.3 분석 조건

3.3.1 신뢰성 목표

분석 대상 PBA의 신뢰성 목표는 함정탑재 장비의 통상적인 운용수명인 20년간 신뢰성 70 %로 설정하였다[11,12]. 연간 임무수행 비율은 30 %, 그 외 70 %는 정박, 수리 등 비가동상태로 가정하였다.

3.3.2 온도 프로파일

필드데이터 분석 결과, 무기체계 운용 시 고장 발생에 가장 큰 영향을 끼치는 환경 조건은 온도로, Fig. 6과 같이 55 %를 차지한다[13]. RPA에서도 환경 조건 중 열에 의한 부하가 고장 발생과 가장 밀접한 관련이 있다.

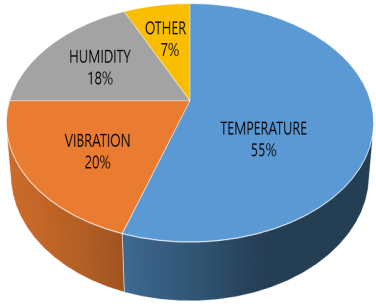


Fig. 6. Field Failures Related to Operating Environments

온도 프로파일은 MIL-STD-810G w/Change 1 PART ONE ANNEX C를 토대로 한국 주변국의 온도를 계절별로 구분하여 Fig. 7과 같이 정의하였다[14].

Duty	Season	Temperature			Hours	Utill (30%)	Life		Profile(Hours)				Count
		Duration (M)	Daily Low	Daily High			Design (20Y)	%	L Dwell	Ramp up	H Dwell	Ramp Down	
30% Duty	Winter	2	-37	-21	1,464	30%	8,784	5%					366
	Spring/Fall	8	28	39	5,832	30%	34,992	20%	6	6	6	6	1,458
	Summer	2	30	53	1,464	30%	8,784	5%					366
	SubTotal	12	-	-	8,760	30%	52,560	30%	-	-	-	-	2,190
70% Off Duty	Winter	2	-32	-25	1,464	30%	20,496	12%					854
	Spring/Fall	8	28	58	5,832	30%	81,648	46%	6	6	6	6	3,402
	Summer	2	30	63	1,464	30%	20,496	12%					854
	SubTotal	12	-	-	8,760	30%	122,640	70%	-	-	-	-	5,110
TOTAL							175,200	100%	-	-	-	-	7,300

Fig. 7. Temperature Profile

3.3.3 진동 프로파일

진동 프로파일은 하모닉 진동과 랜덤 진동으로 구분하여 정의한다. 하모닉 진동은 Fig. 8과 같이 MIL-STD-167-1A Type I 기준 3축의 가변주파수를, 랜덤 진동은 Fig. 9와 같이 MIL-STD-810G w/Change 1 Method 514.7, ANNEX D 기준 노이즈 주파수를 프로파일로 적용하였다[14,15].

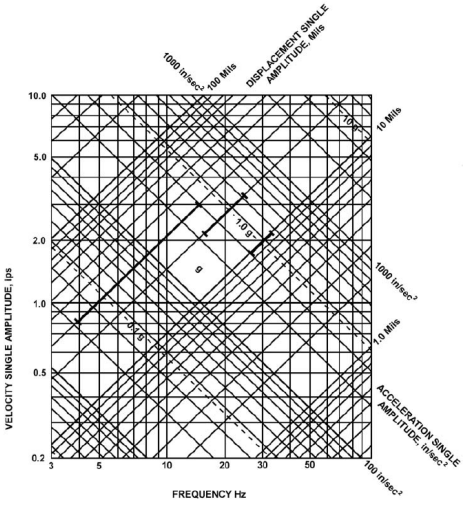


Fig. 8. Harmonic Vibe Profile

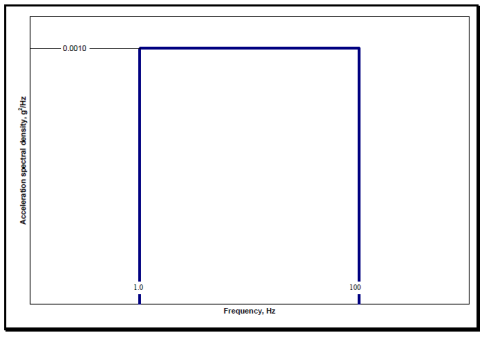


Fig. 9. Random Vibe Profile

3.3.4 충격 프로파일

충격 프로파일은 MIL-S-901D를 기준으로, 주어진 충격이 외부 프레임과 완충기에 의해 감쇠되어 보드에 전달되는 것을 고려하여 Fig. 10과 같이 정의하였다[16].

Fig. 10. Mechanical Shock Profile

4. 신뢰성 물리학 분석

4.1 분석 결과

분석 대상 PBA의 설계 정보와 분석 조건 기준으로 분석 결과 Fig. 11과 Table 4와 같이 총 6개 고장유형 중 PTH피로와 솔더피로 2개 항목에서 신뢰성 목표를 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.

그러나 타 구성품과의 공진위험이 매우 안정적인 것으로 분석되었고, 하모닉/랜덤진동 및 충격 결과에서도 각 입력 프로파일 기준 대비 분석 대상 PBA 고장에 영향을 미치지 않아 안정적인 것으로 분석되었다.

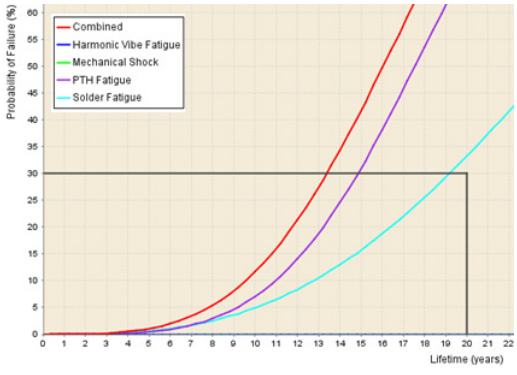


Fig. 11. Life Prediction Result of Each Failure Mode

Table 4. Life Prediction Result of Each Failure Mode

Failure Mode	RPA Result
PTH Fatigue	Fail
Solder Fatigue	Fail
Resonance Risk	Pass
Harmonic Vibration	Pass
Random Vibration	Pass
Mechanical Shock	Pass

4.1.1 PTH피로 분석 결과

PTH피로 신뢰성 분석 결과 Fig. 12와 같이 신뢰성 70 %의 기대수명이 약 15년으로, 신뢰성 목표를 만족하지 못한다. PTH피로에 특히 취약한 Via 상위 10개소는 Fig. 13과 같다.

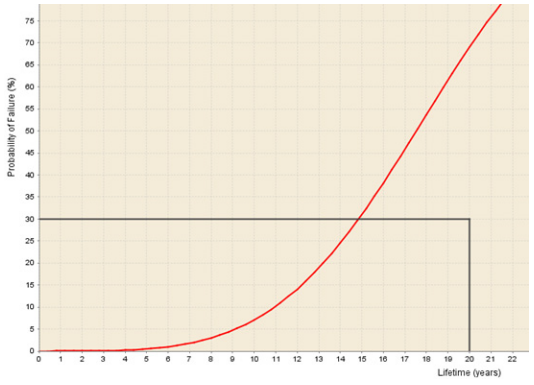


Fig. 12. PTH Fatigue Life Prediction Result

X (in)	Y (in)	Diameter (in)	Max dT (C)	Damage	TTF (years)	Failure Prob	Score
2.2055	1.695	0.00787	90	0.76876512	26.01574849	29.48048983	0.038626394
2.235	1.695	0.00787	90	0.76876512	26.01574849	29.48048983	0.038626394
2.2645	1.695	0.00787	90	0.76876512	26.01574849	29.48048983	0.038626394
3.1055	4.05	0.00787	90	0.76876512	26.01574849	29.48048983	0.038626394
3.135	4.05	0.00787	90	0.76876512	26.01574849	29.48048983	0.038626394
3.1645	4.05	0.00787	90	0.76876512	26.01574849	29.48048983	0.038626394
2.695	1.9793	0.01	90	0.733942231	27.25010112	25.18611272	0.418947477
2.64	1.9793	0.01	90	0.733942231	27.25010112	25.18611272	0.418947477
2.64	2.0107	0.01	90	0.733942231	27.25010112	25.18611272	0.418947477
2.695	2.0107	0.01	90	0.733942231	27.25010112	25.18611272	0.418947477

Fig. 13. PTH Fatigue Risky Via Table

4.1.2 솔더피로 분석 결과

솔더피로 신뢰성 분석 결과 Fig. 14와 같이 신뢰성 70 %의 기대수명이 약 19년으로, 신뢰성 목표를 만족하지 못한다. 솔더피로에 취약하여 신뢰성 개선이 필요한 위험 부품은 Fig. 15와 같이 총 9개 품목으로, 1206타입 저항 8 개 (R 6 1 / R 5 2 2 / R 4 5 1 / R 4 5 4 / R457/R621/R622/R623)와 BGA타입 집적회로 1개 (U4)가 도출되었다.

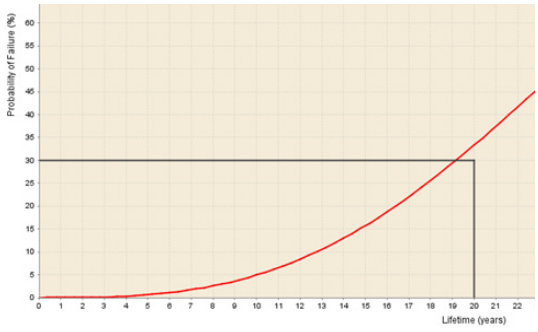


Fig. 14. Solder Fatigue Life Prediction Result

RefDes	Package	Part Type	Side	Solder	Max dT (C)	Max TSF	Damage	TTF (years)	Fail Prob	Score
R61	1206	RESISTOR	TOP	SAC305	90	1	0.459626241	43.51361657	9.253377421	5.108209784
R522	1206	RESISTOR	TOP	SAC305	90	1	0.459626241	43.51361657	9.253377421	5.108209784
R451	1206	RESISTOR	BOTTOM	SAC305	90	1	0.45221423	44.22682583	8.83296153	5.310149157
R454	1206	RESISTOR	BOTTOM	SAC305	90	1	0.45221423	44.22682583	8.83296153	5.310149157
R457	1206	RESISTOR	BOTTOM	SAC305	90	1	0.45221423	44.22682583	8.83296153	5.310149157
R621	1206	RESISTOR	BOTTOM	SAC305	90	1	0.45221423	44.22682583	8.83296153	5.310149157
R622	1206	RESISTOR	BOTTOM	SAC305	90	1	0.45221423	44.22682583	8.83296153	5.310149157
R623	1206	RESISTOR	BOTTOM	SAC305	90	1	0.45221423	44.22682583	8.83296153	5.310149157
U4	900-FCBGA	IC	TOP	SAC305	90	1	0.417680308	47.88351194	7.02756981	6.303160862
U17	484-BBGA	IC	TOP	SAC305	90	1	0.316855851	63.12018528	3.131091131	9.814255467

Fig. 15. Solder Fatigue Risky Part Table

4.1.3 고유진동 분석 결과

고유진동 분석 결과 1~3차 모드별 PBA 고유진동수가 Fig. 16과 같이 도출되었다. PBA가 장착되는 프레임의 고유진동수와 비교 시 Table 5와 같이 각 모드별로 6~9배 이상의 주파수 차이가 확보되었다.

프레임 대비 2배를 상회하는 고유진동수를 확보하였으므로, Rule of the Octave에 따라 공진위험에 대하여 매우 안전한 것으로 판단되었다[17].

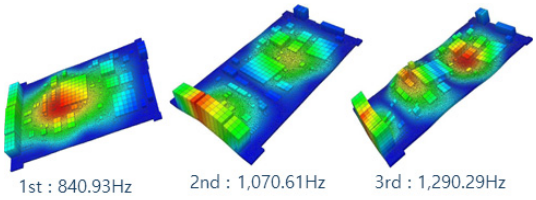


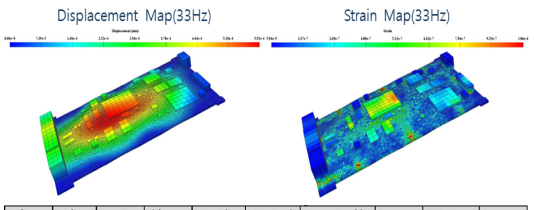
Fig. 16. Natural Frequency Analysis Result

Table 5. Natural Frequency Comparison

Mode	Frame Assembly	FPGA Board
1st	127 Hz	841 Hz
2nd	137 Hz	1,071 Hz
3rd	142 Hz	1,290 Hz

4.1.4 하모닉/랜덤진동 분석 결과

하모닉진동의 Displacement map과 Strain map을 통한 확인 결과 가운데 부분이 상대적으로는 많이 휘어지는 것을 확인할 수 있지만 Fig. 17과 같이 결과적으로 하모닉 진동에 안전한 것으로 판단되었다.



RefDes	Package	Part Type	Side	Max Disp	Max Strain	Comp Cracking	Damage	TTF (years)	Score
R448	402	RESISTOR	TOP	7.11E-05	3.36E-07	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R446	402	RESISTOR	BOTTOM	4.19E-04	1.08E-07	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R447	402	RESISTOR	TOP	6.94E-05	1.65E-07	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R444	402	RESISTOR	BOTTOM	7.57E-05	7.53E-08	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R445	402	RESISTOR	TOP	4.13E-04	6.17E-08	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R442	402	RESISTOR	TOP	4.46E-04	1.88E-07	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R443	402	RESISTOR	BOTTOM	6.99E-05	2.33E-07	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R451	1206	RESISTOR	BOTTOM	4.59E-04	4.06E-07	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R452	402	RESISTOR	BOTTOM	6.65E-05	7.48E-08	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R437	402	RESISTOR	BOTTOM	3.83E-04	8.63E-08	N	1.00E-06	2.00E+07	10

Fig. 17. Harmonic Vibration Fatigue Life Prediction Result

랜덤진동의 Displacement RMS map과 Strain RMS map을 확인 결과 랜덤 노이즈 주파수(10 Hz ~ 100 Hz)에 노출되었을 때 Fig. 18과 같이 랜덤 진동에 안정적인 것으로 판단되었다.

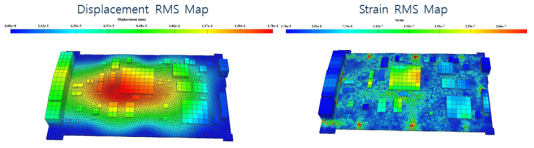
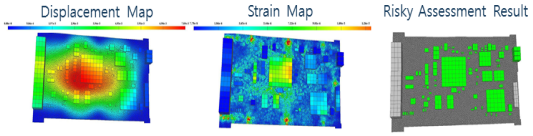


Fig. 18. Random Vibration Fatigue Life Prediction Result

4.1.5 기계적 충격 분석 결과

기계적 충격에 따른 피로도는 Steinberg Methodology를 활용한 Displacement 기반 변형률을 통해 기계적 충격에 의한 안전도 평가 결과 Fig. 19와 같이 기계적 충격에 안정적인 것으로 판단되었다.



RefDes	Package	Part Type	Side	Material	Max Disp	Max Strain	Fracture Strain	Comp Cracking	Damage	TTF (years)	Score
U4	900-FCBGA	IC	TOP	EPOXYENC	0.169684582	3.39E-04	0.001282051	N	3.55E-06	5636488.2	10
R448	402	RESISTOR	TOP	ALUMINA	0.019165917	8.85E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R446	402	RESISTOR	BOTTOM	ALUMINA	0.114781063	3.08E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R447	402	RESISTOR	TOP	ALUMINA	0.018674308	4.39E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R444	402	RESISTOR	BOTTOM	ALUMINA	0.020489107	1.97E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R445	402	RESISTOR	TOP	ALUMINA	0.112899684	1.73E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R442	402	RESISTOR	TOP	ALUMINA	0.121993958	5.26E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R443	402	RESISTOR	BOTTOM	ALUMINA	0.018859569	6.18E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R451	1206	RESISTOR	BOTTOM	ALUMINA	0.124632194	1.05E-04	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10
R452	402	RESISTOR	BOTTOM	ALUMINA	0.017898494	2.00E-05	0.00115	N	1.00E-06	2.00E+07	10

Fig. 19. Mechanical Shock Fatigue Life Prediction Result

4.2 신뢰성 향상 방안

분석 결과로 도출된 신뢰성 목표 불만족 고장유형별 신뢰성 취약점에 적용 가능한 설계 대안을 식별 및 반영하고 각 대안별 신뢰성 분석 결과를 비교하여 신뢰성 향상을 위한 최적 설계 대안을 선정하였다.

4.2.1 PTH피로 개선 방안

PTH피로 신뢰성 개선을 위한 설계 대안은 2가지로, Via 도금 두께 증가와 PCB 라미네이트 변경이다.

첫 번째로 Via 도금 두께를 증가시키면 도금에 가해지는 부하가 분산되므로 기존 설계 값 35 micron인 Via 도금의 두께를 5 micron 씩 증가시켰다. 신뢰성 분석 결과 Fig. 20과 같이 신뢰성 목표를 만족하지 못한다. Via 홀 크기의 제한으로 두께 증가에 한계가 있지만 92 micron까지 증가 시키면 신뢰성 목표를 만족하였다.

Classifi-cation	Thickness Size	PTH Fatigue Life Prediction	Result
Baseline	35 micron	14.9 년	NOK
Case1	40 micron	15.5 년	NOK
Case2	45 micron	16.1 년	NOK
Case3	92 micron	20 년	OK

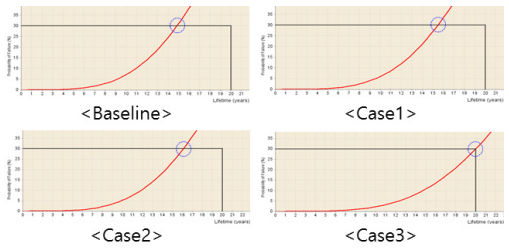


Fig. 20. Plating Thickness Hole Size Increase Result

두 번째로 Via 도금과 PCB 라미네이트의 열팽창계수가 유사할수록 도금에 가해지는 부하가 감소되므로 라미네이트 재질을 변경하였다. 신뢰성 분석 결과 Table 6과 같이 Case3 ~ 5 적용 시 PTH피로에 대한 신뢰성 목표를 만족한다.

Table 6. Laminate Material Change Result

Classification	PCB Grade	Laminate Material	PTH Fatigue Life Prediction	Result
Baseline	FR-4	Generic	14.9 years	NOK
Case1	FR-4	DS-7402H(GP)	19.8 years	NOK
Case2	FR-4	DS-7409D	19.8 years	NOK
Case3	FR-4	LG-E(B)-451H	27.5 years	OK
Case4	FR-4	NP-155FR	27.5 years	OK
Case5	FR-4	44N DataSheet	41 years	OK

4.2.2 솔더피로 개선 방안

솔더피로 신뢰성 개선을 위한 설계 대안은 4가지로, 패드 크기 증가, 솔더 볼 높이 증가, PCB 라미네이트 변경 및 솔더 변경이다.

첫 번째로 패드 크기를 증가시키면 솔더에 가해지는 부하가 분산되므로 솔더피로 위험부품인 1206타입 저항 8개의 패드 크기를 기존 설계값 0.90 mm에서 설계 한계치인 1.20 mm까지 0.05 mm씩 증가시켰다. 신뢰성 분석 결과 Fig. 21과 같이 Case1 부터 솔더피로에 대한 신뢰성 목표를 조금 상회한다.

Classification	Pad Size (Length)	Solder Fatigue Life Prediction	Result
Baseline	0.90 mm	19.2 years	NOK
Case1	0.95 mm	20.1 years	OK
Case2	1.00 mm	20.4 years	OK
Case3	1.20 mm	21.5 years	OK

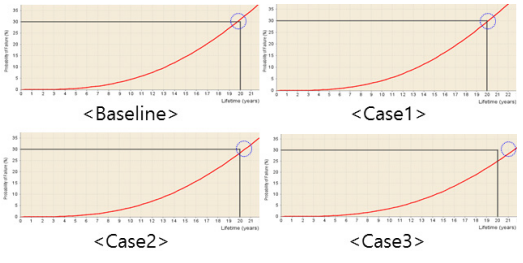


Fig. 21. Resistor Pad Size Increase Result

두 번째로 솔더피로 위험부품인 BGA타입 집적회로 U4의 솔더 볼 높이를 증가시켰다. BGA타입 집적회로는 공 모양의 솔더로 PCB와 접합하는데, 이 솔더의 양을 증가시키면 솔더에 가해지는 부하가 분산된다. 신뢰성 분석 결과, Fig. 22와 같이 기준설계 대비 0.1 mm 증가 시 솔더피로에 대한 신뢰성 목표를 조금 상회한다.

Classification	BGA Ball Height	Solder Fatigue Life Prediction	Result
Baseline	0.60 mm	19.2 years	NOK
Case1	0.65 mm	20.1 years	OK
Case2	0.70 mm	20.4 years	OK
Case3	0.75 mm	20.6 years	OK

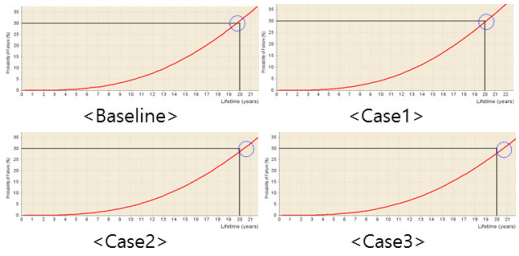


Fig. 22. BGA Ball Height Increase Result

세 번째로 PTH피로 신뢰성 향상에 적용했던 라미네이트 재질 변경을 동일하게 적용하였다. 솔더와 PCB 라미네이트의 열팽창계수가 유사할수록 솔더에 가해지는 부하가 감소되기 때문이다. 신뢰성 분석 결과 Table 7과 같이 Case2 ~ 5 모두 솔더피로에 대한 신뢰성 목표를 만족하였다. 그러나 PTH피로에서 목표를 만족하였던 NP-155FR의 경우 솔더피로에서는 목표를 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.

Table 7. Laminate Material Change Result

Classification	PCB Grade	Laminate Material	Solder Fatigue Life Prediction	Result
Baseline	FR-4	Generic	19.8 years	NOK
Case1	FR-4	NP-155FR	19.8 years	NOK
Case2	FR-4	DS-7402H(GP)	23.5 years	OK
Case3	FR-4	LG-E(B)-451H	23.5 years	OK
Case4	FR-4	44N DataSheet	26.0 years	OK
Case5	FR-4	DS-7409D	29.2 years	OK

마지막 네 번째는 기존 솔더 대비 고신뢰성 솔더로 변경하였다. 솔더를 구성하고 있는 성분과 비율에 따라 PCB 및 전자부품 간 열팽창이 일어날 때 견딜 수 있는 내구성이 달라진다. 신뢰성 분석 결과 Table 8과 같이 Case1, Case2 모두 솔더피로에 대한 신뢰성 목표를 만족하는 것으로 분석되었다.

Table 8. Solder Change Result

Classifi -cation	Solder Name (Solder Type)	Solder Fatigue Life Prediction	Result
Baseline	SAC305 (LEAD-FREE)	19.8 years	NOK
Case1	63SN37PB (TIN-LEAD)	22.4 years	OK
Case2	SENJU M794 (LEAD-FREE)	40.0 years	OK

4.3. 설계 대안

PTH피로와 솔더피로 개선 방안 따라 신뢰성 목표 만족을 위해서 최소한 PCB 라미네이트 재질을 변경하는 것은 필수적이다.

그 이후 설계변경에 따른 제작비용과 PBA 신뢰성 향상에 따른 유지비용 감소 등을 종합적으로 고려하여 Via 도금 두께, 패드 크기 증가 등을 변경하여야 한다. 앞서 언급한 개선 방안을 종합하여 최종 3가지 설계 대안을 제시한다.

첫 번째 대안으로 PCB 라미네이트와 솔더를 NP-155FR과 63SN37PB로 변경하면 Fig. 23과 같이 신뢰성 목표를 충족한다.

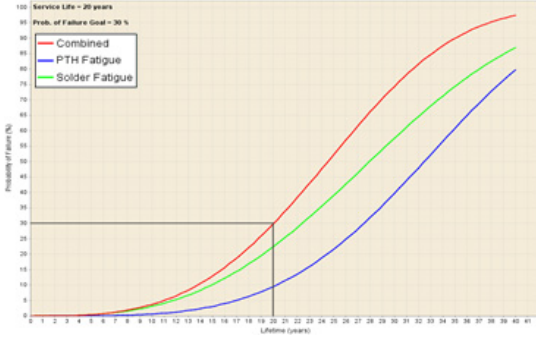


Fig. 23. Design Alternative 1

두 번째 대안으로는 PCB 라미네이트와 Via 도금 두께를 DS-7409D와 50 micron으로 변경하면 Fig. 24와 같이 신뢰성 목표를 충족한다.

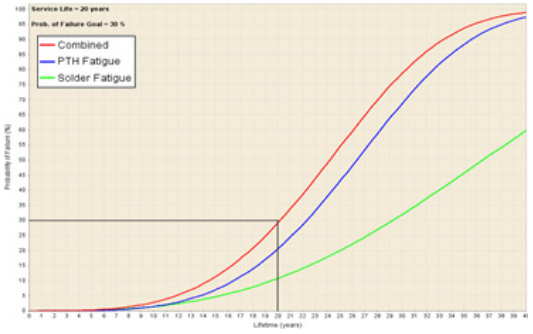


Fig. 24. Design Alternative 2

세 번째 대안으로는 PCB 라미네이트, 저항 패드 크기 및 BGA 솔더 볼 높이를 NP-155FR, 1.2 mm 및 0.7 mm으로 변경하면 Fig. 25와 같이 신뢰성 목표를 충족한다.

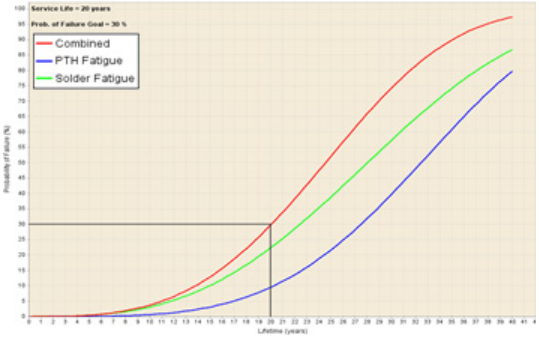


Fig. 25. Design Alternative 3

제시한 3개 대안은 20년 기준 70%의 신뢰성 목표를 동일하게 만족시키는 조건하에서 각 설계 대안 기준 1개 제작 시 기존 설계 대비 추가로 소요되는 비용을 Table 9와 같이 가중치로 추정하였다. 첫 번째 대안이 타 대안 대비 최소 비용으로 신뢰성 목표를 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

Table 9. Comparison Result of Design Alternative

Classification	Reliability Goal(20yr)	Add Cost Weight than Initial Design	Priority (for Cost)
Design Alternative 1	70 %	1.3	1
Design Alternative 2	70 %	2.1	3
Design Alternative 3	70 %	1.8	2

그러나 설계 변경에 따른 단순한 비용 추정을 통한 결과이며, 본 연구에서 제시한 것처럼 다양한 대안을 수립한 후에 각 무기체계 및 구성품 특성, 보드 설계 기준/제원, 설계변경 소요기간, 비용 등 다양한 요소를 종합적으로 고려하여 최적 솔루션을 선택 및 설계에 반영하는 것이 중요하다.

5. 결론

본 연구에서는 여러 고장요인에 따른 고장메커니즘이 반영된 Sherlock을 활용하여 함정 무기체계에 탑재되는 PBA를 대상으로 RPA를 수행하였다. 환경 프로파일을 정의하고, 물리적 특성에 속하는 고장 유형별 신뢰성 분석을 통해 신뢰성 취약점을 도출하였다. 또한 신뢰성 향상 방안을 식별, 적용하고 신뢰성 재분석을 통해 신뢰성 목표를 만족하기 위한 설계 대안을 제시하였다.

본 연구에서 수행한 신뢰성 분석 방법은 무기체계 개발단계에서 기존 신뢰성 예측 방법과 병행 적용해야 한다. 이를 통해 시제품 제작과 신뢰성 시험 수행 전 설계 단계에서 사전 검증과 설계변경을 통해 높은 신뢰성을 확보하고 무기체계 개발에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 다양한 신뢰성 개선 방안 도출, 개선 방안 적용에 따른 비용 분석, 그리고 신뢰성 물리학 분석 결과, 신뢰성 시험 결과, 실운용 고장실적 비교분석에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단한다.

References

[1] Randolph G. Bias and Deborah J. Mayhew, “Cost-Justifying Usability”, Morgan Kaufmann Publishers, United States, pp. 23, 2005.

[2] Jin-Woo Lee, Dae-Il Kwon, “Study on Shortening Reliability Test of Lithium-Ion Battery Using PHM Technology”, *Journal of the KSME*, 59(1), pp.38-40, Jan, 2019.
Available From:
http://www.dbpia.co.kr/article=NODE07591210

[3] Seung Hyuk Choi, “Flight Environment Simulation Test for Reliability Improvement of Precise Guided Missile”, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering,* 33(10), pp.781-787, Oct, 2016.
DOI: https://doi.org/10.7736/kspe.2016.33.10.781

[4] Seung Yong Choi, “Reliability Test Method and Future Direction of Electronic Package”, *Journal of the KSME,* 48(5), pp.34-38, May, 2008.
Available From:
http://www.dbpia.co.kr/article=NODE01000803

[5] Huisung Yun, DaUn Jeong, Eunhak Lee, Taewon Kang, Seunghun Lee, Manog Hur, “Methodologies of Duty Cycle Application in Weapon System Reliability Prediction”, *Journal of Applied Reliability,* 11(4), pp.433-445, DEC, 2011.
Available From:
http://www.dbpia.co.kr/article=NODE02202653

[6] Yangwoo Seo, Kyeshin Lee, Younho Lee, Jeyong Kim, “Reliability Prediction Based on Field Failure Data of Guided Missile”, *Journal of Applied Reliability,* 18(3), pp.250-259, SEP, 2018.
DOI: https://doi.org/10.33162/jar.2018.09.18.3.250

[7] Geun-Hyung Kim, Kang-Taek Lee, Jeong-Ah Yoon, Yang-Woo Seo, Seung Hwan Park, “A Study on the Examination of Reliability Prediction Process and the Application of PLS data in Weapon System”, *Korea Academy Industrial Cooperation Society,* 19(1), pp.566-576, Jan, 2018.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.1.566

[8] Ji-Young Kim, Ki-Won Lee, “Reliability Design Analysis for Underwater Buriend PBA Based on PoF”, *Journal of Applied Reliability,* 17(4), pp.280-288, Dec, 2017.
Available From:
http://www.dbpia.co.kr/article=NODE07283816

[9] N. Jenny Lee, US DOD&ARMY RAM POLICIES &MANAGEMENT, Technical Report, CCDC Ground Vehicle Systems Center, USA, pp.37, 2018.

[10] Soo-Il Lee, Sung-Wook Shin, Dae-Sik Ko, “A Study on Failure pattern in PCB Manufacturing Process”, *The Society of Convergence Knowledge Transactions*, pp.1-6, Jan, 2014.
Available From:
http://www.dbpia.co.kr/article=NODE02376292

[11] Army Regulation 702-19, Reliability, Availability, and Maintainability, Department of the Army, USA, pp.8-9, 2018.

[12] Jong-Jae Park, Study on proper life of weapon system and utilization plan, Technical Report, Institute of Future Security Industry Strategy, ROK, p.66, 2018.
Available From:
http://www.prism.go.kr/homepage/lately/retrieveLatelyDetail.do;jsessionid=E85E3CA7CAF0532BA618D122A4655787.node02?research_id=1290000-201700087

[13] Yvon Mori, “Mechanical Vibrations: Applications to Equipment,” John Wiley & Sons, USA, p.175-176, 2017.

[14] US DOD “MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests”, USA, Oct, 2008.

[15] US DOD “MIL-STD-167-1A, Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment”, USA, Nov, 2005.

[16] US DOD, “MIL-S-910D, Military Specification: Shock

Tests. H.I. Shipboard Machinery Equipment, and Systems, Requirements for", USA, Jan, 1989.

[17] Dave S. Steinberg, "Vibration Analysis for Electronic Equipment", John Wiley&Sons, pp.150, 2000.

차 종 한(Jong-Han Cha) [정회원]

- 2010년 2월 : 단국대학교 전자공학 (공학학사)
- 2010년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

〈관심분야〉
신뢰성공학, 신뢰성물리학, 전자공학

박 경 덕(Kyoung-Deok Park) [정회원]

- 2006년 2월 : 성균관대학교 시스템 경영공학부 (공학학사)
- 2006년 11월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

〈관심분야〉
시스템공학, 신뢰성공학, 시뮬레이션

이 기 원(Ki-Won Lee) [정회원]

- 2001년 2월 : 성균관대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2001년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

〈관심분야〉
시스템공학, 신뢰성공학, 인간공학

박 병 호(Byeong-Ho Bak) [정회원]

- 2015년 2월 : 성균관대학교 시스템경영공학과 (공학학사)
- 2015년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

〈관심분야〉
시스템공학, 신뢰성공학, 시뮬레이션

김 희 언(Hee-Earn Kim) [정회원]

- 1997년 2월 : 아주대 전자공학과 (공학학사)
- 1997년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
- 2012년 8월 : 아주대 전자공학과 (공학석사)

〈관심분야〉
FPGA, DSP, Embedded system, SONAR

권 형 안(Hyeong-Ahn Kwon) [정회원]

- 1984년 2월 : 서울대학교 계산통계학과 (공학석사)
- 1984년 2월 ~ 2012년 4월: ㈜한국컴퓨터(연구원, 대표이사)
- 2012년 5월 ~ 현재 : ㈜엑슬리트엣지 대표이사
- 2016년 2월 ~ 현재 : ㈜엑슬리트바이오 대표이사

〈관심분야〉
신뢰성물리학, 리스크시뮬레이션, 생명데이터사이언스