



Received: 2023/03/31  
Revised: 2023/04/12  
Accepted: 2023/05/11  
Published: 2023/06/30

**\*Corresponding Author:**

**Dong-Ju Jeon**

PGM Integrated Product Support R&D Lab,  
LIG Nex1  
255, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,  
Gyeonggi-do, 13486, Republic of Korea  
Tel: +82-31-326-3266  
Fax: +82-31-326-9001  
E-mail: dongju.jeon2@lignex1.com

# 신뢰성물리학분석 기법을 활용한 함정탑재 전자 구성품의 신뢰성 설계 개선 방안

## Reliability Design Improvement Plan for Warship Electronic Components Using RPA Method

전동주<sup>1\*</sup>, 서양우<sup>2</sup>, 김정태<sup>1</sup>, 엄천섭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIG넥스원 PGM IPS연구소 선임연구원  
<sup>2</sup>LIG넥스원 PGM IPS연구소 수석연구원

Dong-Ju Jeon<sup>1\*</sup>, Yang-Woo Seo<sup>2</sup>, Jung-Tae Kim<sup>1</sup>, Chun-Sup Um<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research engineer, PGM Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1  
<sup>2</sup>Chief research engineer, PGM Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

**Abstract**

무기체계의 전체 수명주기 측면에서 효율적인 운용, 유지 및 관리를 위해 설계 단계에서부터 신뢰성 있는 설계에 대한 노력이 요구되고 있다. 본 논문에서는 함정탑재 회로카드조립체를 대상으로 일반적인 D-FMEA 분석 방법에 수량 및 비용 분석을 고려한 CEI 지표를 추가하여 개선대상 우선순위를 선정하였다. 그리고 RPA도구인 Sherlock을 활용하여 신뢰성 설계 개선을 수행하고, 결과를 비교함으로써 무기체계 총수명주기 비용 절감을 위한 방법론을 제시하였다.

Efforts on reliable design are required from the design stage for efficient operation, maintenance and management in terms of the entire life cycle of the weapon system. In this paper, the priorities for improvement were selected by adding the CEI index considering quantity and cost analysis to the general D-FMEA analysis method targeting the circuit card assembly mounted on the warship. In addition, the design improvement was performed using Sherlock, an RPA tool, and the methodology for cost reduction during the total life cycle of the weapon system was presented by comparing the improvement results.

**Keywords**

설계고장영향분석(D-FMEA),  
신뢰성물리학분석(RPA),  
신뢰성 설계(DfR),  
회로카드조립체(PBA),  
비용효과지표(CEI)

### 1. 서론

현대 무기체계는 요구되는 기능의 달성을 위해 다양한 전자구성품을 탑재하는 방향으로 발전하고 있으며, 이는 전자 구성품 중 단 하나의 핵심 소자 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.

국내 무기체계 연구개발 사업에는 관련내용이 규정으로 명문화되고 있는데, 획득단계 수명주기관리규정(방위사업청 훈령 제754호, 2022년)에는 무기체계 운영유지비 절감 및 가용도 향상을 위한 설계 개선 소요 식별, 고장원인(유형) 제거 및 내고장성 향상을 위한 강건 설계, 고장 영향 최소화 등 신뢰성 설계 활동을 요구하고 있다[1]. 무기체계 RAM 업무 지침(방위사업청 예규 제 726호, 2021년)에는 설계고장영향분석(D-FMEA)을 적용하여 고장모드 및 고장원인을 식별하고, 이를 신뢰성-정비성 설계에 반영할 것을 명시하고 있다[2].

본 논문에서는 함정탑재 전자 구성품을 대상으로 설계 단계부터 수명주기 비용을 고려한 설계 개선 방안으로 D-FMEA 분석 방법에 수량 및 비용을 고려한 CEI 지표를 추가함으로써 개선대상 구성품의 우선순위를 선정하고, 신뢰성물리학분석(RPA)으로 신뢰성 설계 개선

방법을 제안한다. 그리고 개선 결과를 비교함으로써 총 수명주기 비용 절감을 위한 예측을 수행한다.

## 2. 연구 배경 및 방법

### 2.1 D-FMEA

D-FMEA(design-failure mode and effective analysis)는 설계단계에서 잠재적 고장모드를 식별하고 체계에 미치는 영향을 분석하여 개선 및 보완하기 위한 도구로, 자동차·항공 등 다양한 산업에서 널리 쓰이는 분석 도구이다.

국내 무기체계 연구개발 사업에서는 ‘무기체계 RAM 업무지침’ 및 ‘무기체계 RAM 업무편람’에 Table 1과 같이 D-FMEA 적용방법 및 양식을 제공하고 있다. 그러나 기존의 D-FMEA 방식은 각 부품 및 기능에 대하여 산출되는 RPN(risk priority number,  $RPN = \text{심각도}(S) \times \text{발생도}(O) \times \text{검출도}(D)$ ) 값을 기준으로 고장영향 완화 활동을 수행하므로, 구성품의 수량이나 비용을 고려하지 않는다. 이는 무기체계 총수명주기의 관점에서 보다 효율적인 관리 및 운용을 위한 최근의 흐름을 반영하지 못한다는 한계점이 있다. 따라서 본 논문에서는 D-FMEA에 분석 대상품목의 비용과 수량을 고려하기 위해 CEI(cost effectiveness index) 개념을 적용한다.

### 2.2 RPA(신뢰성물리학분석)

전자 구성품의 고장은 온도, 습도, 진동, 충격 등의 메커니즘과 실장 부품 불량, 설계요인 등 다양한 원인으로 발생할 수 있다. 미국에서는 1960년대부터 PoF(physics of failure, 고장물리)의 개념으로 고장의 물리적 프로세스와 메커니즘을 이해하기 확인하기 위한 과학 기반의 다양한 연구가 진행되었다. 미 국방성의 RAM 관련 가이드인 DOD Guide For Achieving Reliability, Availability, and Maintainability(2005)에서는 신뢰

성 설계(DfR)의 한 기법으로 PoF를 포함하고 있다[3]. 하지만 실험을 기반으로 한 일반적인 PoF 분석 방법은 많은 자원의 투입이 필요하다는 점과, 특정 사례의 고장 분석에 한정된다는 한계점이 있다. 이는 소품종을 대량 생산하는 분야에는 큰 효과를 볼 수 있으나, 무기체계와 같이 다품종을 소량생산하는 프로젝트 형태의 산업 분야에는 적절하지 않다. 최근에는 이러한 이유로 Fig. 1 처럼 Sherlock과 같이 전문 SW를 활용해 효율적으로 고장 메커니즘을 분석하고 설계 대안을 찾는 방법을 많이 사용하고 있으며, PoF에 대한 정의도 RPA(reliability physics analysis, 신뢰성물리학분석)으로 변화되고 있다. 국제자동차기술협회에서도 RPA의 정의와 절차를 포함한 민수 규격인 SAE J3168을 공식 발간함으로써 RPA의 활용이 확대되고 있다[4].



Fig. 1. Sherlock 분석 프로세스

국내 무기체계 연구개발 사업과 관련해서는 Kim 등이 수중에 매설되는 센서 체계의 회로카드조립체에 대한 설계 분석 및 개선활동을 수행하였고[5], Cha 등이 함정탐재 PBA의 신뢰성 설계 개선활동을 수행한 사례가 있다[6]. 또 중동수출형 K2전차의 전장품 신뢰성 평가 및 개선을 위해 Sherlock을 활용한 사례도 있다[7]. RPA를 무기체계 개발 사업에 적용할 때에는 Fig. 2 및 Table 2처럼 사업 단계별 특성에 따라 그 목적과 고려해야 할 사항이 상이한데, 본 논문에서는 연구개발 단계에서 적용한다.

Table 1. D-FMEA 양식(무기체계 RAM 업무편람, 2018)

고장모드 및 영향분석 (설계 FMEA)														
부품/기능	잠재고장모드	고장의 영향	심각도(S)	고장원인/메커니즘	발생도(O)	설계 관리	검출도(D)	RPN	권고조치 사항	책임 및 완료 예정일	조치결과			
											조치 내용	심각도(S)	발생도(O)	검출도(D)
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Table 2. 무기체계 개발 단계별 RPA 적용 목적

구분	사업단계	RPA 적용 목적	고려사항
설계확정 이전	연구개발 CDR 이전	설계변경 최소화 및 신뢰성 강화를 위한 선제적 분석 수행	회로카드조립체 협력 개발시 분석을 위한 설계자료 제공을 계약서에 명시하여 자료 확보
	연구개발 CDR 이후	주요 고장 발생품목/다빈도 고장 품목의 고장원인 분석 및 개선을 위한 설계변경	고장 품목의 정확한 자료 관리 (고장일시, 원인, 증상, 처리 방법 등)
운용/개선단계	양산		
	수출	수출 국가의 운용환경 고려한 신뢰성 예측 및 설계변경	RPA 분석을 통한 신뢰성 설계 개선 업무를 SOW 등에 포함 여부 검토

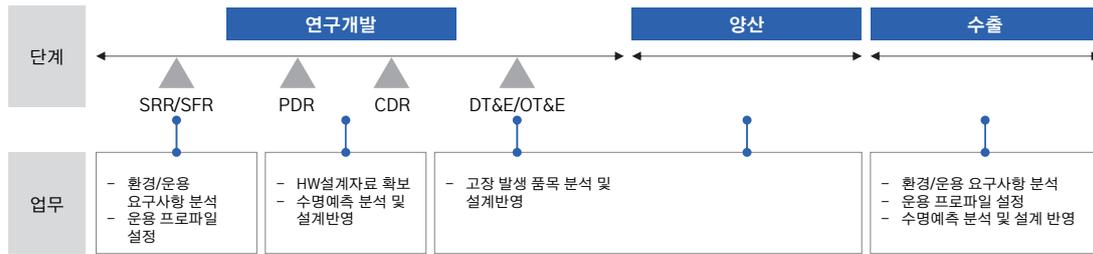


Fig. 2. 무기체계 개발 단계별 RPA 적용 workflow

2.3 연구 방법

무기체계 신뢰성 설계 및 개선을 위한 RPA(신뢰성물리학분석) 기법 적용 절차는 다음과 같다. RPA 분석 대상 회로카드 선정을 위해 1단계에서 PBA(회로카드조립체, printed board assembly) 단위로 D-FMEA를 수행한다. 이때 기존의 D-FMEA template를 활용하되, 시스템에 소요되는 각 PBA의 수량, 단가를 고려한 CEI 지표를 추가하여 계산한다. 2단계에서는 개선대상 품목을 선정한다. 1단계에서 도출된 CEI 값을 기준으로 개선의 우선순위를 산정하고, rank가 높은 순서대로 개선 활동을 수행한다. 3단계에서는 Sherlock SW를 활용하여 RPA를 수행한다. 현재 설계된 PBA가 목표 수명을 만족하는지 여부를 분석하고, 솔더링, 재질변경 등을 고려하여 설계를 개선한다. 4단계에서는 RPA를 수행한 결과를 바탕으로 수명주기 예측되는 비용의 효율성(cost effectiveness)을 계산하여 평가한다.

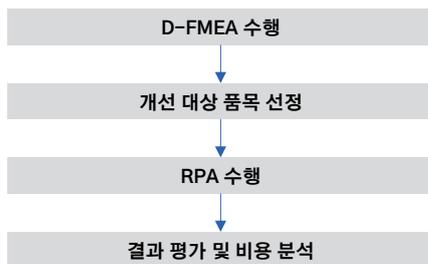


Fig. 3. 연구 수행 절차

3. 사례 연구

3.1 D-FMEA 수행

본 연구에서는 함정 무기체계에 소요되는 전자 구성품 중에서 PBA 6종에 대하여 사례 분석을 수행하였다. D-FMEA의 고장 영향성을 판단하는 지표인 RPN은 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)의 곱으로 계산되며, 이들 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D)에 대한 판단 기준은 개발 사업별로 상이할 수 있다. 본 연구에서는 자체적으로 수립한 기준을 적용하였으며 계산된 RPN 값은 Table 3와 같다.

Table 3. D-FMEA 결과

부품	심각도(S)	발생도(O)	검출도(D)	RPN
PBA 1	6	7	3	126
PBA 2	7	8	3	128
PBA 3	6	9	5	270
PBA 4	6	6	3	108
PBA 5	6	5	4	120
PBA 6	6	10	3	180

3.2 개선대상 품목 선정

D-FMEA에서는 RPN 값이 높은 품목에 대한 설계 개

선활동을 권고하지만, RPA 활용과 같이 설계 개선에 비용·시간·인력 등의 자원이 많이 투입되는 활동을 수행하기 위해서는 설계 개선 대상 품목을 한정할 필요가 있다.

본 연구에서는 D-FMEA에서 도출된 RPN 값에 각 PBA의 수량과 단가를 곱하여 CEI를 산출함으로써 설계 개선 rank를 도출하였고 결과는 Table 4와 같다. 일반적인 D-FMEA 기준으로 구성품의 위험영향성을 판단할 경우 PBA 3의 RPN이 가장 높게 나타나지만, 총수명주기비용 관점에서 CEI 값을 비교하면, PBA 1이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으므로 PBA 1에 우선순위를 두고 설계개선 활동을 수행한다.

D-FMEA와 관련된 민수규격인 SAE J1739에서는 recommended action으로 심각도(S)가 9등급 및 10등급인 경우 품목의 고장이 시스템에 치명적인 영향을 미치게 되므로 RPN 값과 상관없이 설계 개선활동 대상에 포함할 것을 요구하지만[8], 본 사례연구에서는 심각도가(S)가 9등급 및 10등급인 경우가 없으므로 배제한다.

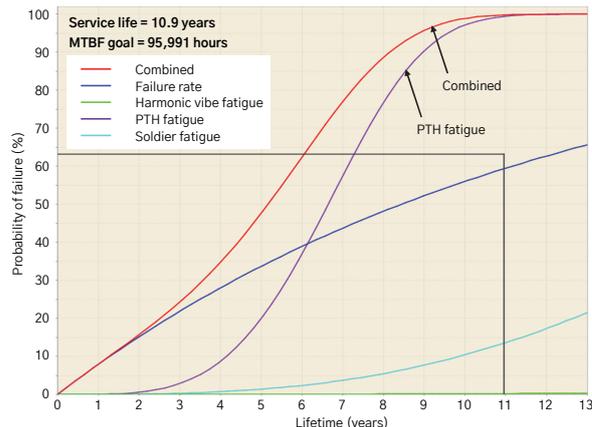
**Table 4.** CEI를 고려한 설계개선 우선순위(RANK) 산출 결과

부품	RPN	수량	단가 (100만)	CEI	Rank
PBA 1	126	42	7	37,044	1
PBA 2	128	9	4.6	6955	3
PBA 3	270	9	10	24,300	2
PBA 4	108	2	14.6	3,153	5
PBA 5	120	1	41.2	504	6
PBA 6	180	1	30.5	5,490	4

3.3 RPA 수행

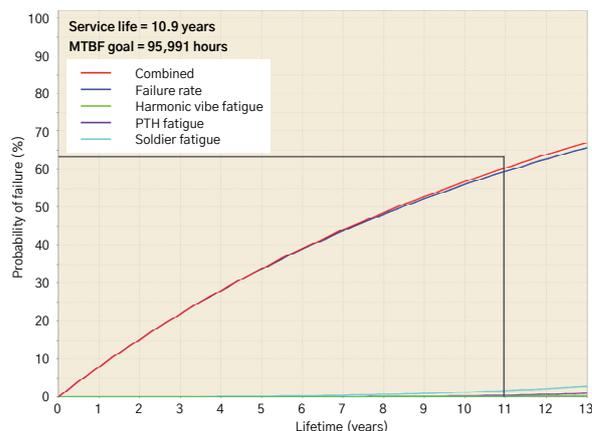
설계 완료된 PBA 1의 RPA 수행을 위해 온도, 진동, 충격 등 정의가 필요한 운용환경에 대한 기준은 Cha 등이 연구한 함정탑재 PBA 설계 개선과 관련된 연구 내용을 참조하였다[6]. 운용프로파일은 연간 4,800시간으로 20년간 운용하는 것을 목표로 하므로, 96,000(4,800시간 × 20년)시간의 목표 MTBF 및 10.95년((4,800시간/8,760시간) × 20년)의 lifetime을 설정하였다.

Sherlock SW를 활용한 분석 결과는 다음의 Fig. 4와 같으며, PTH fatigue로 인해 결과적으로 PBA 1의 combined 고장률은 0.9979로 목표를 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.



**Fig. 4.** Sherlock 분석 결과

PTH fatigue의 설계를 개선하기 위해 대안분석을 실시한 결과, solder material parameter를 SAC305에서 SENJU M794로 변경할 경우 Fig. 5와 같이 목표 수명시간에서 combined 고장률 0.6025로 개선되어 목표 MTBF를 달성하는 것을 확인하였다.



**Fig. 5.** Sherlock을 활용한 설계 개선 시뮬레이션 결과

3.4 결과 평가 및 비용 분석

무기체계 연구개발 단계에서 RPA를 활용하여 전자 구성품의 설계 개선활동 수행 시, 기대되는 비용 효과는 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$C_{eff} = N \times C \times (F1_{(t)} - F2_{(t)}) \tag{1}$$

여기서,  $C_{eff}$ : 기대비용효과,

$N$ : 구성품 수량,

$C$ : 구성품의 단위 비용,

$F1(t)$ : 설계 개선 전, 목표 수명시간  $t$ 에서 누적 고장률,

$F2(t)$ : 설계 개선 후, 목표 수명시간  $t$ 에서 누적 고장률.

PBA 고장 발생 시 해당 품목을 신제품으로 교체하는 것을 가정하면, 본 사례연구의 경우 PBA 1의 수량은 42개이며 단위비용은 700만원, 개선 활동 전의 고장률은 0.9979, 개선 후의 고장률 0.6025이므로 20년 시점에서 약 1.1624억원의 비용을 절감할 수 있다.

#### 4. 결론

무기체계 연구개발 사업에서 요구하고 있는 신뢰성 설계를 위해 사용되는 도구인 D-FMEA는 총수명주기 비용관리 관점에서 부품의 수량과 비용을 고려할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 함정 탐재 무기체계를 대상으로 연구개발 단계부터 총수명주기 비용을 고려한 신뢰성 설계 개선 활동을 수행하기 위하여, D-FMEA에 수량과 원가를 반영한 CEI 지표를 추가하여 전자 구성품의 설계 개선 대상을 선정하였다. 그리고 선정된 PBA(회로카드조립체)를 대상으로 RPA(신뢰성 물리학분석) SW인 Sherlock을 사용하여 설계 분석을 수행하였다.

초기 분석 결과 해당 회로카드조립체는 목표 MTBF인 96,000시간을 달성하지 못하는 것으로 분석되었고,

이에 따라 목표 MTBF를 달성할 수 있도록 설계 개선을 수행하였다. 이로 인해 목표 수명기간 동안 비용절감 효과가 있을 것으로 분석되었다.

#### 참고문헌

- [1] "Aquisition Stage Life Cycle Management Regulations," Defense Acquisition Program Administration, 2022.
- [2] "RAM Guide Book," Defense Acquisition Program Administration, 2018.
- [3] "DOD Guide For Achieving Reliability, Availability, And Maintainability," Department of Defense, 2005.
- [4] SAE J3168, "Reliability Physics Analysis of Electrical, Electronic, and Electromechanical Equipment, Modules, and Component," SAE International, 2021.
- [5] 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," Vol. 17. No. 4, Journal of Applied Reliability, pp. 280-288, 2017.
- [6] 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, Vol. 20, No. 12, pp. 535-545, 2019.
- [7] S.M. Mun, I.S. Kim, H.J. Kim, H.A. Kwon, "A Study on the Reliability Evaluation of Electric Parts of K2 Tanks Exported to the Middle East," Fall Conference of the Korean Reliability Society, Vol. 2022, No. 11, 2022.
- [8] SAE J1739, "Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Including Design FMEA, Supplemental FMEA- MSR, and Process FMEA," SAE International, 2002.