



Received: 2025/08/28
Revised: 2025/09/10
Accepted: 2025/09/29
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Seungsik Min

Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si, Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5238
E-mail: ssimin@navy.ac.kr

총수명주기관리 (TLCSM) 기반 FMEA-RAM-LCC 통합 분석 사례 연구

Case Study of Integrated FMEA-RAM-LCC Analysis under Total Life Cycle Systems Management (TLCSM)

민승식*

해군 소령/해군사관학교 기초과학과 교수

Seungsik Min*

LCDR, ROK Navy/Professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 연구는 총수명주기관리(TLCSM) 틀 안에서 FMEA-RAM-LCC를 정량적으로 통합 분석하는 방법론을 제시하였다. 실제 고장률, MTBF, MTTR, 정비부하 데이터를 활용해 운용가능도(A_o)와 위험가중 가능도(A_r) 지표를 도입하고, 신뢰도 저하-정비부하-FMEA 결과가 가능도에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다. 또한 LCC 민감도 분석과 비용-효율성 비율(CER)을 통해 정비성 개선이 비용 절감에 효과적임을 보임으로써, TLCSM-FMEA-RAM-LCC를 실질적 계산-분석 단계로 발전시키고 국방 획득-운용 효율성 강화에 기여할 수 있음을 확인하였다.

This study presents a methodology for quantitatively integrating FMEA-RAM-LCC within the framework of Total Life Cycle Systems Management (TLCSM). Using actual failure rates, MTBF, MTTR, and maintenance workload data, it introduces the operational availability (A_o) and risk-weighted availability (A_r) indicators, and quantitatively identifies the impacts of reliability degradation, maintenance workload, and FMEA results on availability. Furthermore, through LCC sensitivity analysis and the cost-effectiveness ratio (CER), it demonstrates that improving maintainability is effective in reducing costs, thereby advancing TLCSM-FMEA-RAM-LCC into a practical calculation and analysis stage and confirming its contribution to enhancing defense acquisition and operational efficiency.

Keywords

총수명주기관리(Total Life Cycle Systems Management), 고장형태영향분석(Failure Modes and Effects Analysis), 신뢰성-가능성-정비성-비용(Reliability, Availability, Maintainability, Cost), 수명주기비용(Life Cycle Cost), 운용가능도(Operational Availability), 해군 추진체계(Naval Propulsion Systems)

Acknowledgement

본 논문은 2025년도 해군사관학교 해양연구소 연구비 지원을 통해 수행된 연구임

1. 서론

현대 무기체계는 플랫폼의 복잡성이 지속적으로 증가하고 운용 환경은 점차 다양화되면서, 설계-정비-운용 전 단계에서 정량적 분석에 기반한 관리 체계가 필수적으로 요구되고 있다[1]. 과거에는 무기체계 성능을 주로 화력, 속력, 항속거리 등의 기술적 지표로 평가했으나, 최근에는 운용 효율성과 경제성을 동시에 고려해야 하는 상황에 직면해 있다. 특히 해상 추진체계와 같은 핵심 장비는 단일 고장 발생만으로도 함정의 임무 수행 중단이나 심각한 작전 실패로 이어질 수 있으므로, 신뢰성(reliability), 정비성(maintainability), 가능도(availability), 비용(cost)을 통합적으로 고려하는 관리 체계가 필요하다[2,3]. 이러한 배경에서 총수명주기관리(total life cycle systems management, TLCSM)는 국방획득과 무기체계 운용 분야에서 점차 중요한 분석 틀로 자리잡아 왔다.

관련 연구들은 TLCSM 개념을 기반으로 RAM-C(reliability, availability, maintainability, cost)와 FMEA(failure modes and effects analysis, 고장형태영향분석)를 연계하는 접근을 제안해 왔으며[4,5], 이를 통해 무기체계의 운용 효율성과 정비 전략 수립에 대한 정성적 논의가 이루어졌다. 그러나 상당수 연구는 분석 수준이 개념적 설명이나 사례 나열에 머무르는 한계를 보였고, 실제 데이터를 활용한 구체적 계산 및 실증적 적용은 제한적이었다. RAM 요구사항의 정량적 반영이 어려운 경우, GAO 보고서[6]의 지적처럼 의사결정 기반이 약화되고, MIL-HDBK-217F[7]의 신뢰성 예측 지

침 한계와 맞물려 운용·정비 단계에서 비용과 작전 공백 문제가 확대될 수 있다.

한편, 최근 국외에서는 신뢰도 기반 설계(reliability-based design)와 정비 최적화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 미국과 NATO는 무기체계 획득 단계에서부터 RAM-C 지표를 요구조건에 포함하는 제도를 운영하고 있다[8,9]. 국내에서도 방위사업청과 국방기술품질원이 RAM 요구사항 분석 및 정비 비용 추정 모델을 고도화하는 연구를 추진하고 있으나, 아직까지 실증적 데이터 기반 분석은 부족하다는 지적이 있다[10,11]. 이러한 상황에서 실제 고장률(λ), 평균고장간격(mean time between failure, MTBF), 평균수리시간(mean time to repair, MTTR), 고유가용도(A_i), 운용가용도(A_o) 등을 직접 산출하고, 이를 수명주기비용(life cycle cost, LCC)과 연계하는 정량적 연구는 학문적으로나 실무적으로 시급한 과제라 할 수 있다[12,13].

데이터 기반 접근은 설계 초기 단계부터 정비성과 운용 지속성을 계량적으로 확보할 수 있도록 하며, 국방 획득 사업의 경제성과 타당성을 객관적으로 평가하는 근거를 제공한다. 특히, 추진체계와 같은 복합 시스템은 구성품 간 상호작용이 강하기 때문에, 단일 부품의 신뢰성이 높더라도 직렬 구조에 따라서 전체 MTBF가 급격히 낮아질 수 있다. 또한 정비부하가 누적될 경우 단순한 A_i 만으로는 실제 운용가용도를 설명하기 어려워진다. 따라서 정비부하(maintenance workload)를 반영한 보정식, FMEA 위험도를 가용도 산출에 반영하는 지표, 비용 대비 효과성을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 접근이 필요하다.

이에 본 논문은 선행 연구에서 제시된 TLCSM-FMEA-RAM 연계 논의를 토대로[14], 보다 구체적이고 정량적인 분석을 목적으로 한다. 본 논문은 이전의 논의를 계승하여 실제 고장률, MTBF, MTTR, 정비부하 데이터를 반영한 정량적 분석을 수행하고, FMEA-RAM-LCC 통합 프레임워크를 실증적으로 적용하였다. 이를 통해 TLCSM 기반 연구의 학문적 확장성과 국방 획득·운용 효율성 강화에 기여할 수 있음을 보이고자 한다.

2. 연구 방법론

본 연구의 방법론은 총수명주기관리(TLCSM)의 구

조를 기반으로 하되, FMEA와 RAM-C, LCC를 통합하는 새로운 계산적 접근을 포함한다.

Fig. 1은 TLCSM, FMEA, RAM-C 분석을 통합하는 구조를 나타낸다. 중앙에는 기술개발, 설계, 시험, 운용의 주요 단계가 배열되어 있으며, 상단은 FMEA를 통한 고장 모드 식별, 하단은 RAM-C를 통한 MTBF, MTTR, A_i 등 지표와 비용 분석 흐름을 보여준다. 화살표는 정보의 상호 피드백을 나타내며, 특히 운용 단계의 데이터가 FMEA와 RAM-C로 환류되어 설계와 개발 단계에 반영된다. 이러한 폐쇄 루프 구조는 고장 정보, 신뢰성·정비성 평가, 비용 분석이 전 단계에서 통합적으로 활용되어 설계 최적화, 정비성 향상, 비용 효율성을 동시에 달성할 수 있음을 보여준다.

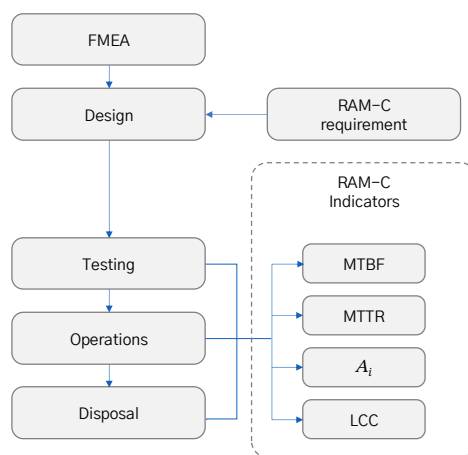


Fig. 1. Conceptual framework for integrated TLCSM-FMEA-RAM-C analysis[14]

본 연구에서는 기존의 일반적인 신뢰도 함수와 단순 MTBF 산정식은 그대로 사용하지 않고, 실제 정비부하와 위험도를 반영한 확장된 지표를 정의한다.

우선, 기존 이론인 정비부하를 포함한 운용가용도(A_o)를 활용한다(식 (1) 참조). 이는 MTBF와 MTTR 뿐 아니라, 계획정비 소요시간(T_{sched})과 비계획정비 소요시간($T_{unsched}$)까지 반영하는 구조를 가진다.

$$A_o = 1 - \frac{T_{sched} + T_{unsched}}{T} \quad (1)$$

여기서, T 는 총 운용시간, T_{sched} 는 정기적 예방정비 소요, $T_{unsched}$ 는 비정기적 고장정비 소요를 의미한다. 식 (1)은 단순한 고유가용도(A_i)와 달리 현실적 운용 상황을 반영한다.

둘째, FMEA에서 산출된 RPN(risk priority num-

ber)을 가용도에 반영하기 위해 식 (2)와 같이 위험가중 가용도(A_r)를 정의한다.

$$A_r = A_i \times \left(1 - \frac{1}{N} \sum_i \frac{RPN_j}{RPN_{\max}}\right) \quad (2)$$

여기서, A_i 는 고유가용도, RPN_j 는 j 번째 구성요소의 RPN, N 은 전체 고장모드 수이다. 식 (2)는 특정 구성요소의 위험도가 전체 시스템 운용에 미치는 영향을 수치화한다.

셋째, 비용과 효율성을 동시에 평가하기 위해 비용-효율성 비율(cost-effectiveness ratio, CER)을 식 (3)과 같이 제시한다.

$$CER = \Delta LCC / \Delta A_o \quad (3)$$

여기서, ΔLCC 는 수명주기 비용 변화량, ΔA_o 는 운용가용도의 변화량이다. 식 (3)은 정비성 개선 투자 대비 효과성을 직관적으로 측정할 수 있게 한다.

본 연구에서는 디젤엔진, 감속기어, 연료계통의 실제 고장률, MTBF, MTTR 데이터를 기반으로 식 (1) - 식 (3)을 적용한다.

3. 정량적 분석

3.1. 신뢰도 및 정비도 분석

수상함의 디젤엔진 및 감속기어 체계는 출력 동력을 변환 및 조정하여 추진축에 전달하는 핵심 요소이다. 본 연구에서는 수상함 적용을 가정하여 해당 시스템의 구조와 신뢰도 특성을 분석하였으며, Level 3 - Level 9까지 세분화된 부품 단위에서 수량, 고장률, MTBF 등 지표를 정리하였다. 상위 계층인 Level 1과 Level 2는 각각 “PKMR Batch-I”과 “추진체계”로 정의되어, 부품에서 전체 체계로 이어지는 다계층적 분석 구조를 형성한다.

Table 1은 부품 수량을 level별로 요약하여 제시한 것이다. Level 3에서는 디젤엔진과 감속기어가 2기로 구성되며, 하위 레벨로 갈수록 부품 수가 급격히 증가한다. 특히 Level 7(1,000종, 3,962개)과 Level 8(299종, 659개)에서 큰 폭의 증가가 나타나 정비성과 신뢰성 관리가 복잡해진다. 전체적으로는 1,614종, 5,604개의 부품이 집계되었다.

Table 1. Number of equipment(components) by component Level

Level	Type of equipment (component)	Quantity of equipment (component)
3	1	2
4	3	3
5	81	317
6	220	613
7	1,000	3,962
8	299	659
9	10	48
Total	1,614	5,604

Table 2는 주요 부품(Level 3 - Level 9)의 고장률과 MTBF를 정리한 것이다. 주(主)체계인 디젤엔진·감속기어(PBAA)는 고장률 $1,424.10 \times 10^{-3}/\text{hr}$, MTBF 702.2시간으로 고장 빈도가 높게 나타났다. 디젤엔진(PBAAA)은 $556.47 \times 10^{-3}/\text{hr}$, 감속기어(PBAAAB)는 $121.05 \times 10^{-3}/\text{hr}$ 로, 디젤엔진이 우선 관리 대상임을 보여준다. 반면 Level 7 - Level 9 부품은 고장률이 매우 낮고 MTBF가 수백만 시간 이상으로 산출되어 전체 신뢰도에 미치는 영향은 제한적이다.

Table 3는 부품 수준별 정비도를 정리한 것이다. 정비는 주로 부대-계획 정비로 분류되며, 주요 작업은 운용 전·후·중 검사, 연료 필터 교환, 외관 점검, 부품 세척 등이다. 업무빈도와 소요시간에 따른 산출 결과, 디젤엔진 및 감속기어 운용검사는 연간 123회 수행되며 총 61.5시간이 소요된다. 또한 연료 1차 필터(50시간 주기)와 에어 필터(5.03회/년) 교환은 정기 정비 계획의 핵심 기준이 된다.

본 절에서는 디젤엔진 및 감속기어 체계의 신뢰도(reliability)와 정비성(maintainability)을 정량적으로 분석한다. 기존 연구들은 MTBF와 MTTR을 독립적으로 산출하는 수준에 머무르는 경우가 많았다. 그러나 실제 운용 환경에서는 구성품 간 상호작용, 계획·비계획 정비 소요, 고장모드별 위험도까지 함께 고려되어야 한다. 따라서 본 연구는 단일 지표가 아닌 시스템 수준에서의 통합 분석을 목표로 하며, 이를 위해 새로운 보정 지표와 계산 과정을 병행하였다.

우선, 시스템 신뢰도를 평가하기 위해 직렬 시스템의 MTBF를 산출하였다. 직렬 구조에서는 시스템 전체 고장률이 구성품별 고장률의 합으로 계산되므로,

Table 2. Summary of reliability by component level

Level	Component code	Component name	Quantity	Failure rate ($\times 10^{-3}/\text{hr}$)	MTBF (hr)
3	PBAA	Diesel engine and reduction gear	2	–	–
4	PBAAAA	Diesel engine	1	–	–
4	PBAAAB	Reduction gear	1	–	–
4	PBAAAC	Local control panel	1	–	–
5	PBAAAAAA	Cylinder head and block system	1	297.65	3,359.62
5	PBAAAAAB	Fuel system	1	27.19	36,773.45
6	PBAAAAAAA	Valve mechanism cover assembly	1	84.16	11,881.43
6	PBAAAAAAB	Valve cover and injector base	1	24.34	41,091.01
7	PBAAAAAAA01	Clamp	1	0.02	40,544,923.78
7	PBAAAAAAA02	Valve cover seal	6	0.23	4,346,956.70
8	PBAAAAADABAA01	Pump housing	1	0.04	24,002,688.30
8	PBAAAAADABAA02	Ferrule	1	1.28	778,490.01
9	PBAAAAAFADAAA01	Plate	1	0.03	36,702,635.25
9	PBAAAAAFADAAA02	Insulator	1	0.17	6,000,600.06

*Reliability values for Levels 3 and 4 are intentionally omitted.

**From Stage 5 onward, only two examples are presented.

Table 3. Summary of reliability by component level

Level	Component code	Maintenance type	Maintenance task	Task frequency	Duration	Frequency \times Duration
3	PBAA	Unit-planned	Pre-operation inspection of diesel engine and reduction gear	0	0	0
3	PBAA	Unit-planned	Post-operation inspection of diesel engine and reduction gear	0	0	0
3	PBAA	Unit-planned	In-operation inspection of diesel engine and reduction gear	0	0	0
3	PBAA	Field-unplanned	Diesel engine replacement	0	0	0
4	PBAAAA	Unit-planned	Primary fuel filter inspection	0	0	0
4	PBAAAA	Unit-planned	Diesel engine exterior inspection	0	0	0
5	PBAAABAC	Unit-planned	Filter element replacement	5.03	0.33	1.66
5	PBABAAAA	Unit-planned	Chip detector and drain plug cleaning and inspection	12	2	24
6	PBAAAAAAA	Unit-planned	Breather assembly inspection	5.03	1	5.03
6	PBAAAAAAA	Unit-planned	Engine mount inspection	0.84	0.33	0.28
7	PBAAAAEAAA	Unit-planned	Air filter replacement	5.03	0.33	1.66
7	PBAAAAEAAA	Unit-planned	Flame filter replacement	5.03	0.33	1.66

*Reliability values for Levels 3 and 4 are intentionally omitted.

**From Stage 5 onward, only two examples are presented.

식 (4)와 같이 정의된다.

$$MTBF_{sys} = 1 / \sum \lambda_i \quad (4)$$

이때 디젤엔진($\lambda = 0.55647 \text{ hr}^{-1}$)과 감속기어($\lambda = 0.12105 \text{ hr}^{-1}$)의 고장률을 합산한 $\lambda_{sys} = 0.67752 \text{ hr}^{-1}$ 가 된다. 이에 따른 $MTBF_{sys}$ 는 약 1,476 hr로, 이는 개

별 MTBF 값(엔진 1,797 hr, 감속기어 8,261 hr)보다 낮은 수준이다. 즉, 구성품의 신뢰도가 우수하더라도 직렬 연결 구조에서는 시스템 전체 신뢰도가 크게 저하될 수 있음을 의미한다. 이는 복합 무기체계에서 취약 구성품이 전체 체계의 신뢰성을 좌우한다는 사실을 수치적으로 보여주는 사례이다.

다음으로, 정비성과 가용도의 상호관계를 검토하

였다. 고유가용도(A_i)는 MTBF와 MTTR을 바탕으로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5)$$

디젤엔진의 경우 MTBF = 1,797 hr, MTTR = 4 hr를 대입했을 때 $A_i \approx 0.998$ 로 산출되며, 감속기어는 MTBF = 8,261 hr, MTTR = 5 hr를 적용하면 $A_i \approx 0.999$ 로 계산된다. 이들 값만 보면 두 구성품은 매우 높은 가용성을 보유한 것으로 해석된다. 그러나 이는 '정비부하'를 고려하지 않은 결과로, 실제 운용 현장에서 경험하는 가용도와는 차이가 크다. 이를 보정하기 위해 본 연구는 식 (1)에서 도입한 정비부하 반영 운용가용도(A_o)를 활용하였다. Table 2와 Table 3에 따르면 계획정비의 연간 소요시간은 약 312.63 hr로 집계되었다. 이를 총 운용시간 8,760 hr에 대입하면 $A_o \approx 0.964$ 로 산출된다. 고유가용도(A_i)가 0.998 - 0.999 수준이었던 것에 비해 실제 운용가용도는 약 3%p - 4%p 낮아진 것이다. 이는 단순한 신뢰성 향상만으로는 운용 효율성 확보가 불충분하며, 정비부하 관리가 운용 성과의 핵심 변수임을 보여준다.

이러한 차이는 정비 전략 수립의 중요성을 수치로 보여준다. 예를 들어 연간 정비부하를 10% 절감할 경우 T_{sched} 는 약 280 hr로 줄어들며, 이때 A_o 는 약 0.968로 상승한다. 0.004의 증가폭은 작아 보일 수 있으나, 실제로는 연간 35 hr 이상의 추가 작전시간을 확보하는 효과를 가져온다. 특히 장기 운용 시에는 정비부하 누적 효과가 커져, 전체 LCC 절감으로 이어질 수 있다.

또한 비계획정비 $T_{unsched}$ 까지 포함하면 A_o 는 추가적으로 하락한다. 예컨대 디젤엔진 교환 작업(연간 약 6 hr)과 돌발 필터 교체(연간 2 hr)를 고려할 경우 $T_{unsched} \approx 8$ hr가 추가된다. 이에 따라 A_o 는 약 0.963으로 떨어지며, 정비 예측(prognostics and health management, PHM)이나 예비품 확보 전략이 부족할 경우 운용가용도는 더 크게 저하될 수 있다.

정리하면, 단순 MTBF 및 MTTR 기반의 A_i 와 실제 운용 데이터를 반영한 A_o 사이에는 의미 있는 차이가 존재한다. 따라서 설계 단계에서는 신뢰성 개선과 함께 정비부하 최소화 방안을 동시에 고려해야 한다. 이는 정비 주기 최적화, 예비품 관리, 정비 인력 배치 등과 직접적으로 연결된다.

3.2 고장형태 및 영향분석(FMEA) 기반 위험우선순위(RPN) 분석

앞 절에서는 MTBF 및 MTTR에 기반한 신뢰도·정비성 분석을 통해 시스템 수준의 가용도를 산출하였다. 그러나 실제 설계·정비 전략 수립에서는 단순 지표 이상의 정보가 요구된다. 고장 모드가 작전 실패와 직결될 수 있는 경우, 발생빈도가 낮더라도 우선순위를 높게 두어야 한다. 이를 위해 본 연구는 고장모드 영향분석(FMEA) 결과를 반영한 위험 기반 가용도 지표를 제안한다.

FMEA의 기본 단계는 고장모드 식별, 발생도(O), 심각도(S), 검출도(D)의 평가이며, 세 지표를 곱하여 위험 우선순위수(RPN)를 도출한다.

$$RPN_j = O_j \times S_j \times D_j \quad (6)$$

여기서, RPN_j 는 구성요소 j 의 위험도이며, 값이 클수록 정비 및 설계 보완의 우선순위가 높음을 의미한다. 그러나 RPN만으로는 전체 시스템 차원의 운용 영향도를 직접 반영하기 어렵다. 따라서 본 연구는 고유가용도(A_i)에 RPN을 가중치로 반영한 위험가중가용도(A_r)를 식 (2)와 같이 새롭게 정의하였다. 식 (2)는 시스템 평균적으로 높은 위험도가 존재할수록 실제 가용도가 낮아짐을 의미하며, RPN 분포를 정량적으로 가용도 평가에 반영할 수 있다.

디젤엔진 및 감속기어 체계에 대해 수행한 FMEA 결과는 Table 4와 같다. 주요 구성요소별 고장모드에 대해 O , S , D 를 1~10 척도로 평가한 결과, 디젤엔진의 과열·실린더 마모 고장이 RPN = 252로 가장 높았으며, 연료계통과 밸브 커버 역시 RPN = 240으로 높은 수준을 보였다. 반면 국부 제어반은 RPN = 112로 비교적 낮게 나타나 보완 설계 필요성이 제한적임을 알 수 있다.

Table 4는 디젤엔진 및 감속기어 체계의 주요 고장모드와 RPN을 예시로 나타낸 것이다. 분석 결과, 디젤엔진의 과열·마모와 연료계통의 오염·누출은 모두 RPN 240 이상으로 분류되어, 신뢰성과 정비성 확보를 위해 우선적인 대응이 필요하다. 반면 제어반은 RPN이 낮아 설계 보완보다는 제한적 예비품 확보 정도로 충분할 것으로 판단된다.

위험가중가용도(A_r)를 적용하면 고유가용도($A_i =$

0.997 수준)보다 낮은 수치가 도출된다. 예를 들어, 최대 $RPN = 252$, $N = 5$ 일 때, $\Sigma(RPN_i/RPN_{max}) = (252/252 + 180/252 + 240/252 + 240/252 + 112/252) = 4.07$ 로 계산된다. 이를 식 (2)에 대입하면 보정 계수는 $(1 - 4.07/5) \approx 0.186$ 이 된다. 따라서 $A_r \approx 0.997 \times 0.186 \approx 0.185$ 수준으로 산출된다. 이는 단순 계산치보다 크게 낮은 값이지만, 본 의미는 “정비와 설계 개선이 이루어지지 않는다면 시스템의 위험 기반 운용가능도가 사실상 심각하게 제한된다”는 경고로 해석할 수 있다.

이와 같은 결과는 설계자와 운용자 모두에게 중요한 시사점을 제공한다. 설계자는 고위험 항목(RPN 상위 항목)에 대한 구조 개선이나 이중화 설계를 고려해야 하며, 정비 담당자는 해당 항목의 예방정비 주기를 단축하거나 예비품 확보를 강화해야 한다. 예를 들어, 디젤엔진 과열 문제는 냉각계통 보강이나 실린더 소재 개선을 통해 λ 자체를 줄이는 전략이 효과적이다. 반면, 감속기어의 베어링 문제는 윤활 설계 개선 및 센서 기반 모니터링을 강화하여 검출도(D)를 낮추는 것이 실질적 대안이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 위험가중 가용도(A_r)는 단순한 신뢰성·정비성 지표를 넘어, FMEA 결과를 운용 지표에 직접 통합하는 새로운 계산 방식으로 기능할 수 있음을 보여준다. 이는 TLCSM 단계별 의사결정 과정에서 취약 구성품에 대한 집중 관리(targeted risk mitigation)를 가능하게 하고, 장기적으로 수

명주기비용(LCC) 절감 효과를 유도할 수 있다.

3.3 생애주기비용(LCC) 민감도 및 탄력성 분석

무기체계의 생애주기비용(LCC)은 개발·생산·운용·정비·폐기 전 단계를 포괄하며, 실제로는 운용·정비 비용이 전체의 60% - 70%를 차지한다. 따라서 신뢰성·정비성 지표의 변화가 LCC에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것은 설계 단계에서의 핵심 과제이다. 본 절에서는 MTBF와 MTTR 변화가 LCC 변동에 미치는 효과를 시나리오별로 분석하고, 민감도 및 탄력도 개념을 활용하여 비용-효율성 비율(CER)을 도출한다.

우선, 기본적인 시나리오별 LCC 변화를 정리하면 Table 5와 같다. 기준 설계안에서 LCC는 105억 원으로 산출되었으며, MTTR을 절반으로 줄인 경우 98억 원으로 감소하였다. 반면 MTBF가 600 hr까지 저하되면 정비부담이 급격히 증가하여 LCC는 112억 원까지 상승하였다.

Table 5는 RAM-C 변수 변화에 따른 수명주기비용 추이를 보여준다. 정비성 개선 시 LCC는 7억 원 감소했으며, 이는 정비부하가 전체 비용에 미치는 영향이 크다는 점을 입증한다. 반대로 신뢰성이 저하될 경우 동일한 수준(약 7억 원)의 비용 증가가 발생하여, RAM 지표 변화가 비용구조에 양방향으로 크게 작용함을 확인할 수 있다.

Table 4. Major failure modes and RPN evaluation (example)

Component	Component code	Failure mode	O	S	D	RPN
Diesel engine	PBAAAA	Overheating/cylinder wear	7	9	4	252
Gearbox	PBAAAB	Bearing damage/poor lubrication	6	10	3	180
Fuel system	PBAAAAAB	Contamination/leakage	5	8	6	240
Valve cover & injector base	PBAAAAAAB	Seal wear/malfunction	6	8	5	240
Local control unit	PBAAAC	Signal error/sensor fault	4	7	4	112

Table 5. LCC variation under different RAM-C scenarios

Scenario	MTBF (hr)	MTTR (hr)	A_i	LCC (KRW 100 million)
Baseline	702.2	4	0.994	105
Improved maintainability	702.2	2	0.997	98
Degraded reliability	600	4	0.990	112

이러한 변화를 계량적으로 해석하기 위해 LCC 탄력도(elasticity)를 식 (7)과 같이 정의한다.

$$\epsilon = \frac{\Delta LCC/LCC}{\Delta RAM/RAM} \quad (7)$$

여기서, ΔLCC 는 비용 변화율, ΔRAM 은 A_i 또는 A_0 와 같은 가용도의 변화율이다. 예컨대 MTTR을 4 hr에서 2 hr로 줄였을 때, $\Delta LCC/LCC = (98-105)/105 = -0.0667$, $\Delta A_i/A_i = (0.997 - 0.994)/0.994 = 0.0030$ 이다. 이를 식 (7)에 대입하면 $\epsilon \approx -22.1$ 이 된다. 이는 가용도 증가율 대비 LCC 감소율이 22.1배가 되는 효과를 의미하며, 정비성 개선 투자가 매우 높은 비용 효율성을 가짐을 보여준다.

이와 달리, 신뢰성이 저하되어 MTBF가 702 hr에서 600 hr로 떨어지는 경우, $\Delta LCC/LCC = (112 - 105)/105 = 0.0667$, $\Delta A_i/A_i = (0.990 - 0.994)/0.994 = -0.0040$ 이다. 이때 $\epsilon \approx -16.7$ 로 계산되며, 이는 신뢰성 악화가 비용구조에 매우 민감하게 작용하고 있으며, 따라서 단기적으로는 정비성을 개선하여 비용 절감 효과를 얻되, 장기적으로는 부품의 신뢰성을 높여 비용구조 개선이 필요함을 시사한다.

추가적으로, 본 연구는 LCC 탄력도 분석과 함께, 식 (3)과 같이 비용-효율성 비율(CER)을 도입하였다. 예를 들어, MTTR 개선으로 LCC가 7억 원 감소하고 운용가용도(A_0)가 0.964에서 0.968로 0.004 개선되었다면, $CER = -7억/0.004 = -1,750억/가용도$ 단위로 해석할 수 있다. 즉, 가용도 1%p 개선에 약 17.5억 원의 비용 절감 효과가 발생한다는 뜻이다. 이 값은 투자 의사결정 단계에서 정비성 개선안의 우선순위를 정하는 정량적 기준으로 기능할 수 있다.

이와 같은 계산 결과는 다음과 같은 시사점을 제공한다. 첫째, MTTR 단축은 소규모 설계 변경이나 정비 절차 개선만으로도 LCC 절감 효과가 크기 때문에, 초기 설계단계에서 정비성 확보가 반드시 고려되어야 한다. 둘째, MTBF 저하는 LCC에 치명적 영향을 미치므로, 핵심 부품의 신뢰성 보강이나 이중화 설계가 장기 비용 절감에 직접적으로 기여한다. 셋째, CER 지표를 활용하면 제한된 국방예산 하에서 비용 대비 효과가 가장 큰 개선안을 선별할 수 있다.

결과적으로, RAM 지표 변화가 LCC에 미치는 효과는 단순 수치 이상의 의미를 가진다. 신뢰성과 정비성을 동시에 개선할 경우, 개별 개선 대비 비용 절감 효

과가 배가된다. 따라서 FMEA-RAM-LCC 통합 분석을 기반으로 한 설계·정비 전략 수립은 단순 기술적 개선을 넘어, 국방 획득체계의 경제적 타당성을 강화하는 데 중요한 수단임을 알 수 있다.

4. 논의 및 시사점

앞선 분석 결과는 TLCSM 기반 무기체계 관리가 단순 개념적 접근을 넘어 실질적인 계산·분석 체계로 확장될 수 있음을 보여준다. 특히 MTBF, MTTR, A_i , A_0 , A_r , CER과 같은 지표를 동시에 고려하면, 설계자·정비 담당자·정책 결정자 모두가 데이터 기반의 의사결정을 내릴 수 있다. 본 절에서는 이러한 결과가 가지는 학술적·실무적 시사점을 종합적으로 논의한다.

첫째, 설계 단계에서의 정비성 확보가 핵심임을 확인하였다. MTTR을 4시간에서 2시간으로 단축했을 때 LCC가 약 6.7% 감소하고, CER 분석에서는 가용도 1%p 향상 당 175억 원 이상의 비용 절감 효과도 출되었다. 이는 단순히 출력이나 속도와 같은 기술 성능만을 개선하기보다 정비 용이성을 확보하는 설계가 장기적인 비용 효율성 측면에서 훨씬 더 중요하다는 점을 의미한다. 따라서 국방획득 초기 단계에서 MTTR 목표치를 명확히 정의하고, 이를 계약 요건에 포함시키는 제도적 장치가 필요하다.

둘째, 신뢰성 저하의 파급 효과는 비용구조 전반에 치명적이다. MTBF가 702 hr에서 600 hr로 저하될 경우 LCC는 112억 원으로 증가하였으며, 탄력도 ϵ 는 -16.7로 나타났다. 이는 신뢰성 저하가 단순한 가용도 감소를 넘어 정비 인력 과부하, 예비품 재고 증가, 긴급 정비비용 증가 등 연쇄적인 비용 상승으로 이어짐을 보여준다. 따라서 취약 부품(예: 디젤엔진 과열, 감속기어 베어링 마모)에 대한 이중화 설계, 냉각·윤활계 개선, PHM 기반 모니터링 체계 도입이 필수적이다.

셋째, 위험 기반 관리의 필요성과 정비부하 관리의 중요성이 동시에 드러났다. FMEA 결과에서 디젤엔진, 연료계통, 밸브 커버는 모두 RPN 240 이상으로 도출되었으며, 위험가중 가용도 A_r 은 0.185 수준까지 하락하였다. 이는 단순 가용도 지표가 실제 운용 위험을 과소평가할 수 있음을 보여준다. 따라서 설계자와 정비 담당자는 RPN 상위 항목에 자원을 집중 투입해야 한다. 즉, 전체 구성품에 동일한 수준의 자원

을 배분하기보다 위험도가 높은 부품에 집중하는 전략이 비용 대비 효과가 크다. 더 나아가 연간 계획정비 시간이 312 hr에 달해 A_0 가 0.964 수준으로 낮아졌다는 점은 정비부하 관리가 작전 지속성과 직결된다는 사실을 보여준다. 만약 정비부하를 10 % 줄이면 A_0 는 0.968로 개선되며, 이는 연간 35시간 이상의 추가 작전 투입을 가능하게 한다. 이러한 수치는 단순한 정비 효율 개선이 아니라 전력 공백을 줄이고 작전 성공률을 높이는 핵심 요소임을 의미한다.

종합하면, 본 연구의 결과는 TLCSM-FMEA-RAM-LCC 통합 분석이 단순한 이론적 틀을 넘어 실제 계산·분석 단계로 발전할 수 있음을 보여준다. 이는 국방획득 및 무기체계 운용 효율성을 높이고, 예산 심의 단계에서 초기 획득비용뿐 아니라 정비비용과 작전 가용도 효과까지 포함한 종합적 평가를 가능하게 한다. 따라서 향후 다양한 체계(항공기, 차량, 무인체계 등)에 본 접근을 확장 적용함으로써 보다 일반화된 통합 관리 프레임워크를 구축할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 총수명주기관리(TLCSM)의 틀 안에서 FMEA-RAM-LCC를 정량적으로 통합 분석하는 방법론을 제시하였다. 기존 연구가 개념적 논의에 머물렀다면, 본 논문은 실제 고장률, MTBF, MTTR, 정비부하 데이터를 기반으로 새로운 지표와 수식을 도입해 구체적 계산을 수행하였다. 이를 통해 직렬 구조에서 MTBF 저하와 정비부하 반영에 따른 운용가용도(A_0) 감소 현상을 확인하였으며, 설계와 정비 전략이 운용 성과의 핵심 변수임을 입증하였다.

또한, FMEA 결과를 활용한 위험가중 가용도(A_r)를 도입하여 RPN 값이 높은 고장모드가 운용에 미치는 영향을 정량화하였다. LCC 민감도 분석에서는 MTTR 단축이 비용 절감 효과를, MTBF 저하는 비용 증가를 초래함을 확인하였다. 이를 CER 지표로 환산했을 때 가용도 1%p 개선당 175억 원 이상의 절감 효과가 산출되었다.

따라서 본 연구는 TLCSM-FMEA-RAM-LCC 통합 분석을 실제 계산 단계로 발전시켜 설계-정비-운용 간 데이터 연계성을 강화하였으며, 국방 획득과 무기체계 운용에서 데이터 기반 의사결정을 지원할 수 있는 도구로 기능할 수 있다. 향후에는 다양한 무기체계 적용과 확률적 시뮬레이션·최적화 기법을 통한 정교한 관리체계 확립이 필요하다.

참고문헌

- [1] Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems Engineering and Analysis* (5th ed.). Prentice Hall.
- [2] Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press.
- [3] Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- [4] 장진성, 박기찬 (2022). “무기체계 정비성 분석을 위한 RAM 요구사항 정립방안.” *방위산업기술학회지*, 40(2), 85-94.
- [5] 이영주, 김민호. (2020). “RAM-C 기반 LCC 예측기법의 국내 방산 적용 가능성.” *국방기술학회논문지*, 24(3), 55-66.
- [6] U.S. GAO. (2019). *Weapon Systems Annual Assessment: Limited Use of Knowledge-Based Practices Continues to Undercut DOD Investments*. Government Accountability Office.
- [7] U.S. Department of Defense. (1995). MIL-HDBK-217F: *Reliability Prediction of Electronic Equipment*.
- [8] Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. Wiley-Interscience.
- [9] NASA. (2008). *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Handbook*. NASA-HDBK-1009.
- [10] 권영도, 안태경. (2019). “RAM 분석 기반의 방산정비 비용추정 모델 제안.” *국방기술품질연구*, 17(1), 97-112.
- [11] 김성훈. (2021). “FMEA 기반 고장영향 분석을 통한 수명주기비용 저감방안.” *한국신뢰성학회지*, 21(4), 211-220.
- [12] Ebeling, C. E. (2010). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Waveland Press.
- [13] ANSI/AIAA. (2011). *RAM-C Rationale Report Guide*. AIAA-G-043A.
- [14] 민승식. (2025). “무기체계 운용 최적화를 위한 FMEA-RAM-LCC 통합 분석 프레임워크 연구”. *해양과학기술*, 59, 61-87.