Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 9 pp. 249-256, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.9.249
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

RAM-C 분석을 통해 무기체계에 CBM+ 적용 효과도에 관한 연구

엔드하르타 알폰수스 주란토[1*], 김영선[1], 김종운[1], 조일훈[2], 박연경[2]
[1]네모시스 주식회사, [2]LIG넥스원

Study on Effectiveness of CBM+ in Weapons Systems through RAM-C Analysis

Alfonsus Julanto Endharta[1*], Young-Seon Kim[1],
Jongwoon Kim[1], Il-Hoon Cho[2], Yun-Kyung Park[2]
[1]Nemosys Co., Ltd.
[2]LIG Nex1

요 약 본 논문은 RAM-C(신뢰성 기반 비용 관리) 분석을 통해 무기체계에서 상태기반정비(Condition-Based Maintenance, CBM+) 적용의 효과에 대한 연구를 제시한다. 연구의 목적은 RAM-C 지표에 대한 CBM+ 적용 효과를 평가하고 CBM+ 적용에 의한 잠재적인 장점을 식별하는 것이다. 고려하는 주요 지표는 운용 가용도와 같은 핵심성능지표(Key Performance Parameter, KPA)와 O&S(운용 및 지원) 비용과 같은 핵심시스템속성(Key System Attribute, KSA)이다. 무기체계의 성능, 신뢰성, 가용성, 유지보수 비용을 평가하기 위해 모델링 및 시뮬레이션(Modelling and Simulation, M&S) 접근 방식을 사용한다. 레이더 시스템이 사례 연구로 사용한다. 본 연구에서 제시된 결과는 CBM+ 적용을 통해 무기체계의 유지보수 프로세스를 최적화하는 데 관련된 방위 산업 전문가, 시스템 설계자 및 의사 결정자에게 실질적인 시사점을 제공할 수 있다.

Abstract This paper presents a study on the effectiveness of "condition-based maintenance plus" (CBM+) implementation in weapon systems through RAM-C (reliability, availability, maintainability, and cost) analysis. The aim of this study was to assess the effect of CBM+ application on RAM-C parameters and identify the potential benefits and challenges associated with its adoption. The key parameters considered in the study are key performance parameters, such as operational availability, and key system attributes , such as operating and support cost. The study employed modeling and simulation to assess the performance, reliability, availability, and maintenance cost of weapon systems. A radar system was used as a case study. The results presented in this study have practical implications for defense industry professionals, system designers, and decision-makers involved in optimizing the maintenance processes of weapon systems through CBM+ adoption.

Keywords : Reliability, Availability, Cost, Simulation, CBM

1. 서론

신뢰성 기반 비용 관리(Reliability, Availability, Maintainability, and Cost, RAM-C) 분석은 방위 산업의 복잡한 무기체계를 평가하고 최적화하는데 중요한 역할을 하게 된다. 신뢰성, 유지보수성 및 군수 체계가 시스템에 적절하게 설계되지 않으면 수정 조치 비용으로 인해 개발 또는 획득 비용이 상당히 높아지고 운용 및 지

본 논문은 'LIG넥스원 데이터 기반의 PBL 성과지표' 연구과제로 수행되었음.
*Corresponding Author : Alfonsus Julanto Endharta(Nemosys Co., Ltd)
email: alfon@nemosys.kr
Received July 27, 2023 Revised August 28, 2023
Accepted September 1, 2023 Published September 30, 2023

원 비용이 예상보다 많이 들거나, 체계에 요구되는 가용도를 만족하지 못할 위험이 있다[1]. 총 수명주기 비용 중 운영유지비용의 대부분은 체계 운용 중 고장으로 인한 정비비용, 수리부속 구매비용, 운송비용 등 군수지원 비용이 차지한다. 이러한 비용을 절감하기 위해서 체계 설계 단계에서 RAM-C 분석을 통해 시스템의 신뢰성과 유지보수성을 최적화할 필요가 있다. RAM-C 분석은 운용 및 지원(Operating ad Support, O&S) 비용을 최소화하고 체계 RAM을 향상 시킬 수 있는 최적의 체계 설계를 얻는데 주요 지표로 활용할 수 있다. RAM-C분석을 통해 체계 개발/설게 단계에서 체계를 정량적으로 평가하여 제작 또는 운용·유지 단계 전에 문제점을 미리 파악할 수 있고 맞는 개선 또는 대책을 수립하며 체계 운용 시 고장빈도를 줄일 수 있고 위험성을 최소화될 수 있다.

이전부터 무기체계에 대한 RAM-C 분석과 관련된 많은 연구가 수행되고 있다. K. Kim et al.(2021)은 RAM-C 분석을 위해 시뮬레이션을 제안하였는데, 시뮬레이션을 통해 운용 시간, 수리부속 소모량을 추정하여 운영 및 정비 비용 산정에 활용하고, 시뮬레이션을 통해 추정된 값을 기반으로 RAM 향상 효과를 산출하였다[2]. H. Kim and J. Hur(2020)은 RAM-C 분석을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 마르코프 프로세스를 고려하였으며, 헬기 시스템의 하위 시스템을 사례로 상용 S/W의 결과를 통해 시뮬레이션 결과를 검증하였다[3]. S.-J. Jung et al.(2023)은 RAM-C 분석은 총수명주기관리(Total Life Cycle System Management, TLCSM)를 통해 RAM-C 분석 결과와 성과기반군수지원(PBL) 분석 결과 간의 관계를 연구하여 제시하였다[4]. A. M. Jung et al.(2022) RAM-C 분석이 수행되었으며, 연구의 초점은 RAM-C 분석의 비용 추정에서 수명주기 비용 (Life Cycle Cost, LCC) 분석에 중점을 두었다. 비용을 추정하고 전체 RAM-C 분석 결과를 비교하기 위해 여러 가지 계산 도구를 고려하였다[5]. C.H. Choi et al.(2015)은 RAM-C 분석은 무인항공기 시스템의 고장 시간 데이터를 활용하여 수행하였다. 고장 시간 분포를 추정하기 위해 통계적 와이블 분석을 고려하였으며, 그 결과를 RAM-C 분석의 M&S 방법에 사용하였다[6].

RAM-C분석과 관련된 연구에서 주기적인 정비 및 고장 정비와 같은 일반적인 유지보수 전략을 고려하였다. 최근 유지보수 전략의 발전으로 실시간 데이터 측정 및 수집, 고도화된 분석을 활용하여 사전 예방적 유지보수를 가능하게 하는 상태기반정비(Condition-Based Maintenance, CBM+) 개념이 등장하였으며 이를 고려하고 있는 RAM-C분석 연구는 없다. CBM+의 개념이 등장하기는 했지만, CBM+ 적용 사례는 아직 미비한 수준이다. B. S. Oh et al.(2023)은 수소 충전 시스템에 CBM+ 적용 사례 연구를 수행하였으며, 시스템 안전 관리에 중점을 두었다[7]. B. S. Oh et al.(2023)은 수소 충전소의 압축기에 CBM+ 적용 방안을 연구하였으며, 진단 모델에서 소리, 진동 및 전류 데이터를 고려하는 이상 감지 방법으로 Long Short-Term Memory (LSTM) Autoencoder가 사용되었다[8]. H. Kim et al.(2023)은 해군 전투체계의 전자광학추적체계(Electro-Optical Tracking System, EOTS)에 CBM+를 적용한 사례 연구를 수행한 결과, CBM+ 적용 시 시스템 유지보수 비용을 절감하고 시스템 가용성을 향상시킬 수 있는 것으로 언급하였다[9]. M. Son et al.(2022)은 열상감시체계의 열상관측장비에도 CBM+를 적용하였다. 운용시간과 온도를 기반으로 이상 상태를 측정하고 CNN, LSTM과 같은 딥러닝 모델을 고려하였다[10]. B. C. Shin et al.(2022)은 설계 초기 단계에서 디젤 엔진 터보 차저에 대한 CBM+ 적용 타당성 조사를 수행하였다[11]. CBM+의 효과를 향상시킬 수 있는 센서 장치 선정에 중점을 두었으며, 시스템 설계의 유효성을 평가하기 위해 Design Failure Mode and Effect Analysis (D-FMEA)를 수행하였다.

복잡한 시스템에 CBM+를 통합하면 체계 비가동시간을 최소화하고 비용을 절감하며 시스템 가용성을 향상시켜 유지보수 프로세스를 혁신할 수 있다. 본 논문에서는 레이더 체계에서 CBM+를 구현하고 RAM-C 분석에 미치는 영향을 분석한다. KPA와 KSA를 추정하기 위해 M&S 방법을 고려하였으며 고장 이력 데이터를 통해 CBM+가 적용될 세 가지 하위 시스템과 진단 및 예측 모델에서 고려할 센싱 데이터를 선정하였다. 본 논문의 목적은 CBM+ 적용 전후의 RAM-C 분석 결과를 비교하여 CBM+ 적용의 개선점을 정량화하는 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장 본론에서는 RAM-C 분석에 대해 간략히 설명하고 RAM-C 분석에 사용되는 M&S 방법론을 제시한다. 또한, 비교 분석 결과를 제공한다. 마지막으로 3장에서 결론을 제시한다.

2. 본론

2.1 RAM-C분석

미국 국방부의 RAM-C 보고서 매뉴얼에 따르면 RAM-C 분석은 신뢰성 기반 비용 관리를 의미하며, 체

계의 RAM 목표를 충족하면서 수명주기비용을 최소화 대안을 제공하는 공학적 분석 기법을 뜻한다[1]. 신뢰성, 가용성 및 비용 등은 다양한 산업에서 시스템 엔지니어링과 관련된 일반적인 용어로 사용되고 있지만, RAM-C 분석은 주로 군방 분야의 무기체계에 대한 총수명주기관리 관점에서 정의되고 분석되고 있다.

RAM-C는 신뢰성, 가용성, 정비성 및 비용으로 구분되며 신뢰성은 특정 기간 동안 시스템이나 장비가 고장 없이 의도된 기능을 수행할 수 있는 능력을 말한다. 가용성은 시스템이나 장비가 필요할 때 의도된 기능을 수행할 수 있는 비율을 의미하며 정비성은 시스템이나 장비가 고장 또는 정비 후에 운용 상태로 복구되는 시간을 나타낸다. 비용 분석은 시스템이나 장비와 관련된 총 수명주기 비용을 평가하는 것으로, 초기 획득 비용, 운영 비용, 유지보수 비용 및 폐기 비용을 포함한다. 이를 통해 시스템의 비용 효율성을 평가하고, 다양한 설계 옵션을 비교하며, 시스템 업그레이드, 교체 또는 개선에 관한 결정을 내리는 데 도움이 된다.

미국 국방부의 RAM-C 보고서 매뉴얼에 따르면 시스템 지속 가능성 요건에는 주로 신뢰성, 가용성, 정비성 및 비용 조건과 관련된 지표인 KPP 및 KSA가 포함된다[1]. RAM-C 분석의 KPP 지표에는 물자 가용도(Materiel Availability) 및 운용 가용도(Operation Availability)가 포함된다.

물자 가용도는 물자 상태에 따라 주어진 시간에 할당된 임무를 수행할 수 있는 시스템 총 재고의 백분율을 측정한 값이다. 이 측정값은 수학적으로 운용 가능한 최종 품목 수를 총 물자 규모로 나눈 값으로 표현할 수 있다. 물자 가용도는 작전에 투입된 후 일시적으로 비작전 상태에 있는 자재를 포함하여 작전용으로 계획된 최종 품목의 총 개체수를 나타낸다. 운용 가용도는 부대 내 시스템 또는 시스템 그룹이 할당된 임무를 수행할 수 있는 운용 가능 시간의 비율을 나타내며 다음과 같이 표현한다.

$$A_o = \frac{Total\ Uptime}{Total\ Lifetime} \quad (1)$$

여기서,

$Total\ Uptime = Total\ Lifetime - Total\ Downtime$,

$Total\ Downtime = CM\ MDT + PM\ MDT$,

CM MDT는 CM 정비에 의한 CM 비가동 시간 평균이고 PM MDT는 PM 정비에 의한 PM 비가동 시간 평균이다.

KSA 지표 중 하나는 임무 신뢰도이다. 임무 신뢰도는 지정된 운용 조건에서 지정된 임무 시간 동안 시스템이 고장 없이 임무를 수행할 확률을 측정한다. 신뢰성 지표는 확률 값을 고려하지만 평균 무고장 시간(Mean Time Between Failures, MTBF)도 측정 값으로 고려할 수 있다.

또 다른 KSA 지표는 운용 및 지원 (Operating and Support, O&S) 비용이다. O&S 비용은 시스템의 수명주기 동안 시스템 가용성을 보장하기 위한 총 유지비용을 추정한다. O&S 비용은 유지보수 관련 비용, 수리부속 구매 및 재고 유지비용, 연료 및 전기와 같은 에너지 관련 비용 등을 포함할 수 있다.

본 연구에서 CBM+ 적용이 주로 유지보수 관련 비용에 영향을 미치며, 이는 고장정비 (CM) 및 예방정비 (PM) 작업 중 발생하는 비용 등을 활용한다. CM 비용을 추정하기 위해 산출 수식은 다음과 같다.

$$CM\,Labor\,Cost = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} N_{CM}(i,j) \times T_{CM}(j) \times C_{MH} \quad (2)$$

$$CM\,Part\,Cost = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} N_{CM}(i,j) \times MC_{CM}(j) \quad (3)$$

여기서, N_{CM}(i, j)는 i년차에 발생한 부품 j의 고장 횟수이고, MC_{CM}(j)는 부품 j의 CM 작업 당 수리부속과 소모품을 구매하는 비용이고, I는 체계의 수명 연수이다. 부품 j의 고장 시간이 고장률 λj에 따라 지수 분포를 따른다면, i년차에 발생한 부품 j의 고장 횟수는 다음과 같이 추정한다.

$$N_{CM}(i,j) = n_j \lambda_j t_i \quad (4)$$

여기서, N_{CM}(i, j)는 i년차에 발생한 부품 j의 고장 횟수이고 nj는 체계 당 부품 j 개수이다. λj는 부품j의 고장률이고 tj는 i년차에 해당하는 부품 j의 운용 시간(가동 시간)을 의미한다.

PM 비용을 추정하기 위해 수식은 다음과 같다.

$$PM\,Labor\,Cost = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} N_{PM}(i,j) \times T_{PM}(j) \times C_{MH} \quad (5)$$

$$PM\,Part\,Cost = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} N_{PM}(i,j) \times MC_{PM}(j) \quad (6)$$

여기서, N_{PM}(i, j)는 i년차에 발생한 부품 j의 고장 횟수를 의미하고 MC_{PM}(j)는 부품 j의 PM 작업 당 수리부속과 소모품을 구매하는 비용을 의미한다.

따라서, 체계의 O&S 비용은 CM 비용과 PM 비용의 합으로 계산된다. 각각의 비용은 다음과 같이 정비인건비용과 수리부속 구매비용으로 구분된다.

$$Total\ Cost = C_{CM} + C_{PM} \quad (7)$$

여기서

$$C_{CM} = CMLaborCost + CMPartCost \quad (8)$$

$$C_{PM} = PMLaborCost + PMPartCost \quad (9)$$

2.2 CBM+ 적용 사례 연구

CBM+는 적절한 프로세스와 기술, 기반 지식 능력을 적용하고 통합하여 시스템과 부품의 신뢰성과 유지보수 효과를 개선하는 것이다[12]. CBM+는 신뢰성 중심 정비(Reliability Centered Maintenance, RCM) 분석과 다른 지원 프로세스 및 기술을 통해 필요성에 대한 증거가 제공될 때 수행되는 유지보수를 의미한다. CBM+는 실시간 데이터와 상태 모니터링 기술을 활용하여 유지보수 활동을 최적화하며, 시스템의 신뢰성을 향상시키고 가용성을 높이며, 유지보수 비용을 감소시키기 위해 유지보수 작업을 시스템의 실제 상태와 건전성에 중점을 둔다. 기존의 시스템 상태를 알지 못한 채로 고정된 시간(또는 거리) 간격으로 유지보수 작업을 수행하는 것이 아니라 실제 상태를 기반으로 유지보수를 수행하는 것이 CBM+의 주요 목표이다.

CBM+는 장치 상태 저하를 나타내는 P-F 곡선 (P-F Curve) 개념을 고려한다. Fig. 1에서 P-F Curve를 표시하며, P는 잠재적 고장 조건이 감지 가능한 지점이며 F는 장치 기능을 수행하지 못하고 고장 발생하는 지점이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 P와 F 사이의 구간을 P-F 구간 (P-F interval)이라고 하며, 이는 잠재적 고장이 감지된 후 고장 발생까지 얼마나 오랜 시간이 걸리는지를 의미한다.

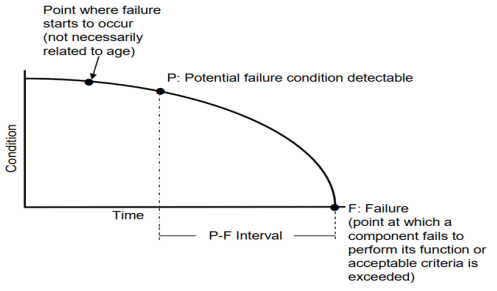

Fig. 1. P-F curve (source: CBM+ DoD Guidebook [12])

현재 CBM+에 관한 연구들은 대부분 시스템 상태를 진단하는 방법에 초점을 맞추고 있다. 즉, 잠재적 고장 상태를 감지하는 것이다. 대부분의 경우 지속적으로 수집되는 센싱 데이터는 기계 학습과 빅 데이터 분석을 통해 분석되고, 진단 결과는 실시간으로 표시되며, 이로 인해 지속적인 모니터링이 이루어진다.

그러나 CBM+를 적용할 때 유지보수 조치를 최적으로 계획하는 방법이나 특정 조건 임계값에 도달했을 때 어떤 종류의 유지보수 조치를 수행해야 하는지를 최적으로 결정하는 방법에 대한 연구는 거의 없다.

부품 고장이 체계 안전성에 영향을 미치지 않는 경우에는 부품 수명의 대부분을 사용하고 고장 발생할 때 고장정비 수행하는 것이 적절하다. 본 논문에서는 잠재 고장 감지할 때 예방정비를 수행하지 않고, 갑작스러운 고장 발생 시 정비 시간을 줄이기 위해 수리부속을 즉시 준비하여 기능 고장 발생 시 해당 부품을 고장정비 수행하는 것으로 가정한다. 본 논문에서 레이더 체계의 송수신부의 하위 장치를 사례 연구로 활용한다.

2.2.1 분석 가정사항

다음과 같은 가정사항이 분석에서 고려된다.

1) CBM+ 대상 장치는 전력증폭모듈, 압축공기용 압축기조립체, 냉매압축기이다.
2) 모든 부품에 대해서 실제 부품 고장이력이 없으므로 체계 설계 문서 기반으로 부품 고장률이 일정하고 고장 시간이 지수분포로 따른다고 가정한다.
3) 모든 부품에 대해서 실제 정비 시간 이력이 없으므로 체계 개발자 또는 설계자 정의에 따라 평균 정비(교환, 수리 등) 소요시간은 일정 값으로 가정한다.
4) 잠재 고장이 즉시 감지 가능하고 수리부속을 준비하지만 기능고장 발생할 때 정비한다.
5) 이상상태를 즉시 알 수 있어 행정 시간이 더 작으며 CBM+적용 후에 정비 소요시간은 CBM+적용 전 정비 소요시간 보다 적다.
6) 체계 수명 연수는 10년이다.
7) 연간 운용 시간은 8,760시간으로 가정한다.
8) 시간당 인건비는 4만원으로 가정한다.
9) CBM+ 대상 장치 정보는 Table 1과 같다.

2.2.2 RAM-C 분석 방안

본 논문에서 RAM-C 분석을 통해 CBM+ 적용 효과를 평가하는 것을 목표로 하며, CBM+를 적용 전 후에 시뮬레이션을 실행하고, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 시스템 가용도와 O&S 비용을 비교한다.

CBM+가 적용하기 전에 시스템 및 하위 부품은 고장이 발생할 때 정비가 수행하고 수리부속은 준비되며 주기적인 예방정비(PM)가 수행한다. CBM+ 적용한 후에 시스템 및 하위 부품은 고장이 발생할 때 정비가 수행하

Table 1. Information on CBM+ target devices

Information name		Power Amplifier Module	Refrigerant Compressor	Air Compressor Assembly
Quantity per system		64	2	2
Unit price		3,500,000	2,722,572	1,400,000
Replacement rate		0.9	0.9	0.9
Repairable rate		0.9	0.9	0.9
MTTF		91,048.11	158,874.6	194,293.9
Without CBM+	Replacement time (hr)	2.6	38.4	38.4
	Direct repair time (hr)	3.9	57.6	57.6
	Item repair time (hr)	34.4	720	720
With CBM+	Replacement time (hr)	0.6	4	4
	Direct repair time (hr)	0.9	6	6
	Item repair time (hr)	34.4	720	720
PM / Inspection		RF signal receiver check	Refrigerant leakage check	Dry air leakage check
PM interval (hour)		4,380 (6 months)	4,380 (6 months)	4,380 (6 months)
PM time		0.33	0.33	0.33

Table 2. Mean downtime (MDT) and availability (Ao) estimation results from simulation

Indicator	Without CBM+	With CBM+			
		Power Amplifier Module	Refrigerant Compressor	Air Compressor Assembly	All 3 devices
CM MDT	1,648.39	1,480.28	1,603.92	1,612.03	1,399.46
PM MDT	1,387.67	1,381.00	1,381.00	1,381.00	1,367.67
Ao	96.53%	96.73%	96.59%	96.58%	96.84%

Table 3. Mean downtime (MDT) and availability (Ao) difference from without CBM+ application

Indicator	Value difference from without CBM+			
	Power Amplifier Module	Refrigerant Compressor	Air Compressor Assembly	All 3 devices
CM MDT	-168.1	-44.46	-36.36	-248.92
PM MDT	-6.67	-6.67	-6.67	-20
Ao	0.20%	0.06%	0.05%	0.31%

Table 4. Cost estimation results from simulation (in million KRW)

Cost	Without CBM+	With CBM+			
		Power Amplifier Module	Refrigerant Compressor	Air Compressor Assembly	All 3 devices
CM labor cost	1,057.47	1,052.30	1,055.88	1,056.17	1,049.41
PM labor cost	55.51	55.24	55.24	55.24	54.71
CM repair parts cost	348.24	348.24	348.24	348.24	348.24
PM repair parts cost	44.07	44.07	44.07	44.07	44.07
Total cost	1,505.29	1,499.85	1,503.43	1,503.72	1,496.42

Table 5. Cost difference from without CBM+

Cost	Cost difference rate from without CBM			
	Power Amplifier Module	Refrigerant Compressor	Air Compressor Assembly	All 3 devices
CM labor cost	-0.49%	-0.15%	-0.12%	-0.76%
PM labor cost	-0.48%	-0.48%	-0.48%	-1.44%
CM repair parts cost	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
PM repair parts cost	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Total cost	-0.36%	-0.12%	-0.10%	-0.59%

지만, 주기적인 PM은 더 이상 수행하지 않으며, 잠재적 고장 감지되면 즉시 수리부속이 준비되어 비가동 시간이 줄어든다.

분석에서는 네 가지 시나리오가 고려한다.

1) 전력증폭모듈에 CBM+를 적용하기 전후의 RAM-C 분석
2) 압축기조립체에 CBM+를 적용하기 전후의 RAM-C 분석
3) 냉매압축기에 CBM+를 적용하기 전후의 RAM-C 분석
4) 세 가지 CBM+ 대상 장치 전체에 CBM+를 적용하기 전후의 RAM-C 분석

2.3 CBM+ 적용 RAM-C 분석 결과

Table 2에 시뮬레이션을 통해 CM 정비에 의한 CM 비가동 시간 평균 (CM Mean Downtime, CM MDT)과 PM 정비에 의한 PM 비가동 시간 평균 (PM Mean Downtime, PM MDT)과 시스템 가용도 (Ao)를 산출한다.

Table 3에서 보는 바와 같이 CBM+ 적용된 경우, 평균 비가동 시간이 줄이고 시스템 가용도가 높아진다. 시스템 가용도 측면에서 세 개 장치에 CBM+ 적용하는 경우 가용도가 0.31% 높아지며 CBM+ 적용 효과가 제일 크다. 세 가지 중 하나만 CBM+ 적용 대상으로 선택해야 하는 경우, 전력증폭모듈에 CBM+를 적용하여 시스템 가용도는 0.20% 높일 수 있다.

시뮬레이션을 통해 체계 수명 주기 동안의 관련 비용 정보는 Table 4과 같다. CM에 의한 인건비용과 수리부속 구매비용 및 PM에 의한 인건비용과 수리부속 구매비용은 별도로 산출하여 비용의 합으로 총 비용으로 산출한다.

Table 5에서 보는 바와 같이 CBM+ 적용하면, 정비 인건비용이 줄일 수 있다. CBM+ 적용할 때 교환 시간과 직접 수리시간이 짧고 PM 작업이 없기 때문이다. 가정사항으로 CBM+ 적용 시 잠재 고장이 발생하더라도 사전 정비없이 부품 고장 발생 시 고장정비를 진행하므로 수리부속 구매 비용의 변화는 없다. 분석 결과 모두 3개 장치에 CBM+를 적용하면 비용은 0.59% 줄일 수 있다. 3개 장치 중 1개 장치에 CBM+ 적용해야 하는 경우에 전력증폭모듈에 CBM+ 적용 시 비용을 0.36% 줄일 수 있다.

3. 결론

본 논문은 RAM-C 분석을 통해 무기 시스템에 CBM+ 적용의 효과를 정량적으로 평가하여 제시하였다. M&S 방식을 사용하여 시스템 운용 가용도와 O&S 비용을 추정하였다. 시뮬레이션을 통해 CBM+ 적용 전후에 대해 수행되었으며, CBM+ 대상 구성품은 전력증폭장치, 냉매압축기, 압축공기용 압축기조립체로 선정하였다. CBM+가 적용된 경우 다음과 같은 정책을 고려하여 분석하였다. 잠재 고장이 감지되면 수리부속이 준비되거나 주문되어 교체 시간 또는 직접 수리 시간을 최소화하고, 이로 인해 최소한의 시스템 비가동 시간을 유발할 수 있도록 하였다. 또한 CBM+ 적용된 경우 주기적인 점검(PM)은 수행되지 않으며 CBM+ 적용 전과 마찬가지로 시스템은 고장 발생 시 정비하는 것으로 정비 개념을 수립하였다.

대상 장치 간에 CBM+ 적용의 효과를 평가하기 위해 RAM-C 비교 분석을 수행하였다. 분명히, 세 개의 장치 모두에 CBM+ 적용된 경우, 시스템 가용도가 가장 크게 증가하고 O&S 비용이 가장 낮아지는 효과가 가장 뛰어난 것으로 산출하였다. 그러나 하나의 장치만 선택해야 할 때 전력증폭모듈에 CBM+ 적용하는 것이 최적의 선택으로 판단하였다.

CBM+ 적용 개념은 P-F 구간이다. 본 연구에서 P는 특정 상태에서 즉시 감지될 수 있었다. 그러나 실제 문제에서 인공지능 모델의 높은 정확도로 잠재적인 고장 P를 감지하더라도 잘못 된 진단 결과를 제시할 수 있다. 오검

출률(false alarm rate)이 높은 경우에 CBM+ 적용하면 이상신호는 자주 발생하고 점검또는 정비 빈도는 높아지며 운용가용도는 작아진다. 따라서 추후 연구를 위해 CBM+ 적용의 효과도 평가를 위해 분석 모델에서 오검출률(false alarm rate)을 고려하고 보다 현실적인 운영 시나리오를 평가할 수 있다.

References

[1] Department of Defense Reliability, Availability, Maintainability, and Cost Rationale Report Manual. 2009. Washington, DC: Office of the Secretary of Defense.

[2] K. Kim, K. Lee, J. Jeong, J. Cha, "A study on RAM-C growth management by calculating operation and maintenance cost of weapon system", *Journal of Applied Reliability*, Vol. 21, No. 2, pp. 155-163, Jun. 2021.
DOI: https://doi.org/10.33162/JAR.2021.6.21.2.155

[3] H. Kim, J. Hur, "Verification of the RAM-C analysis tool using the OPUS suite", *Journal of Applied Reliability*, Vol. 20, No.1, pp. 9-18, Mar. 2020.
DOI: https://doi.org/10.33162/JAR.2020.3.20.1.9

[4] S.-J. Jung, J.-S. Ha, H.-J. Do, J.S. Kim, "PBL system linkage plan using RAM-C analysis tool according to the total life cycle management task enactment", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 24, No. 2, pp. 67-73, Feb. 2023.
DOI: http://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.2.67

[5] A. M. Jung, H.-J. Kim, H. J. Kim, S. B. Park, "A study on the RAM-C analysis for optimization of life cycle cost of weapon system", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 9, pp. 185-192, Sep. 2022.
DOI: http://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.9.185

[6] C.H. Choi, J. K. Bang, S. S. Park, "A research of applying RAM-c to analyze the design service life for unmanned aerial vehicle", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 23, No. 4, pp. 117-124, Dec. 2015.
DOI: http://doi.org/10.12985/ksaa.2015.23.4.117

[7] B. S. Oh, D. S. Shin, Y. H. Lee, J. S. Jang, "Study on using CBM+ for the commercialization of the safety management of hydrogen refueling stations", *Journal of Applied Reliability*, Vol. 23, No. 1, pp. 18-31, Mar. 2023.
DOI: http://doi.org/10.33162/JAR.2023.3.23.1.018

[8] B. S. Oh, D. S. Shin, Y. H. Lee, J. S. Jang, "Development of technology for CBM+ data acquisition of hydrogen refueling station compressor", *Journal of Applied Reliability*, Vol. 23, No. 1, pp. 51-72, Mar. 2023.
DOI: http://doi.org/10.33162/JAR.2023.3.23.1.051

[9] H. Kim, J. Kim, S. Park, "A study on the application of Electro-Optical Tracking System (EOTS) CBM+ based on mission criticality of naval combat system", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 24, No. 1, pp. 270-279, Jan. 2023.
DOI: http://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.1.270

[10] M. Son, Y.-G. Kim, S.-C. Noh, M. Kim, K. Kim, "Exploring the Application of CBM+ in an ISR weapon system, thermal observation device", *Journal of Applied Reliability*, Vol. 22, No. 3, pp. 240-247, Sep. 2022.
DOI: https://doi.org/10.33162/JAR.2022.9.22.3.240

[11] B.-C. Shin, J.-W. Hur, "A study of sensor reasoning for the diesel engine Turbocharger CBM+ application in the early design stage", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 7, pp. 121-126, Jul. 2022.
DOI: http://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.7.121

[12] Condition Based Maintenance Plus DoD Guidebook. 2008. Washington, DC: Office of the Secretary of Defense.

Alfonsus Julanto Endharta [정회원]

- 2011년 2월 : Sepuluh Nopember Institute of Technology 통계학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 부산대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 2017년 2월 : 부산대학교 산업공학과 연구원
- 2017년 3월 ~ 2019년 2월 : 포항공과대학교 산업경영공학과 연구교수
- 2019년 3월 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 책임연구원

〈관심분야〉
RAMS, 통계분석, 신뢰성분석, CBM/PHM

김 영 선(Young-Seon Kim) [정회원]

- 2018년 2월 : 경기대학교 산업경영공학과 학사
- 2020년 2월 : 경기대학교 산업경영공학과 석사
- 2021년 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 재직

〈관심분야〉
RAMS, CBM+/PHM

김 종 운(Jongwoon Kim) [정회원]

- 1997년 2월 : 부산대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 부산대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2003년 4월 ~ 2005년 12월 : 현대로템 과장
- 2005년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2016년 2월 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 대표

〈관심분야〉
철도, RAMS

조 일 훈(Il-Hoon Cho) [정회원]

- 2011년 2월 : 고려대학교 산업시스템정보공학과 (공학학사)
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 산업 및 시스템공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : LIG 넥스원 IPS 연구소

〈관심분야〉
정보경영, 정보통신, IPS

박 연 경(Yun-Kyung Park) [정회원]

- 2006년 8월 : 고려대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2019년 8월 : 고려대학교 소프트웨어 공학과 (공학석사)
- 2006년 7월 ~ 현재 : LIG 넥스원 IPS 연구소

〈관심분야〉
Machine Learning, IPS