

계획정비와 CBM+를 활용한 무기체계 운용가용도 개선 방안

이종문*, 전동주, 김용근, 김소정
LIG넥스원 PGM IPS 연구소

The Operational Availability Improvement based on PMS & CBM+ Strategy

Jong-Moon Rhee*, Dong-Ju Jeon, Yong-Geun Kim, So-Jung Kim
Precision Guided Munition Integrated Product Support R&D Lab, LIG Nex1

요약 상태기반정비(Condition Based Maintenance, 이하 CBM)+는 무기체계 장비 상태 정보를 실시간으로 모니터링하는 것에서 시작한다. 그 정보에 기반하여 장비의 이력과 정비 수행 자료를 수집 및 분석 후 최적의 정비 소요를 도출해 필요한 정비를 시행하는 최신 정비 형태이다. 한국군 정비에 CBM+를 적용하여 무기체계 장비 상태를 분석하고 수명을 예측하여 사전 대응할 수 있는 전략을 적용할 수 있다면, 무기체계 가용도 향상과 정비 운용 비용 절감 효과를 기대할 수 있다. 이와 같은 효과를 기대하여 한국군은 CBM+를 활용한 무기체계 정비형태를 고려하고 있으며, 구체적인 적용 기준이 필요한 상황이다. 본 논문에서는 무기체계의 개발 과정에서 CBM+ 적용 범위를 결정할 때, 무기체계 운용 가용도를 향상시키는 것을 목표로 CBM+ 대상 업무 선정의 정량적 접근 방안과 현재 진행 중 사업에 적용한 결과를 제시한다. 본 논문의 연구 결과를 기반으로 신규 무기체계의 기획 및 개발 과정에서 CBM+적용 범위 판단에 대한 정량적 판단 기준을 준비할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract Condition Based Maintenance (CBM)+ begins with real-time monitoring of weapon system equipment status information. It is the latest form of maintenance that collects and analyzes the equipment history and maintenance performance data based on that information, derives optimal maintenance requirements, and performs necessary maintenance. Suppose CBM+ can be applied to the maintenance of the Korean military to analyze the status of weapon system equipment, predict its lifespan, and apply a proactive response strategy. In that case, the effect of improving weapon system availability and reducing maintenance and operation costs can be expected. In anticipation of such effects, the Korean military is considering a form of weapon system maintenance using CBM+, and specific application standards are needed. This study determined the scope of CBM+ applications in the development process of a weapon system. This paper presents a quantitative approach to selecting CBM+ target tasks to improve the operational availability of the weapon system and the results of applying it to ongoing projects. Based on the research results of this paper, quantitative judgment standards were prepared to determine the scope of CBM+ application during the planning and development process of new weapon systems.

Keywords : PMS, CBM+, Operational Availability, ALDT, RCM

*Corresponding Author : Jong-Moon Rhee(LIG Nex1)

email: jongmoon.rhee2@lignex1.com

Received March 28, 2024

Revised April 25, 2024

Accepted June 7, 2024

Published June 30, 2024

1. 서론

CBM+는 무기체계 및 구성요소의 신뢰성과 유지관리의 효율성을 향상시키기 위해 필요한 프로세스, 기술 및 지식 기반 기능을 적용하고 통합한 것으로 신뢰도 중심 정비(Reliability Centered Maintenance, 이하 RCM) 분석 및 기타 지원 프로세스와 기술을 통해 제공되는 필요성 증거를 기반으로 수행되는 유지 관리이다[1].

CBM은 정비가 필요하다는 증거가 있을 때만 정비를 수행하는 접근 방식인 반면, CBM+는 고장 발생 시 예정 없이 대응하던 정비 접근에서 상태감지, 통합 분석 기반의 결정을 통해 주도되는 사전 예방적이고 예측 가능한 접근 방식으로 전환하려는 의식적인 노력이다[1].

무기체계를 개발하는 과정에 CBM+를 적용하는 것에 대한 의사결정 과정에서는 시기, 적용 방안, 범위에 대해서는 많은 고려 요인들이 있으며, 의사결정 결과를 정량적으로 설명할 수 있는 명확한 적용 기준들이 필요하다.

기존의 연구 내용들 중에서는, 국내 무기체계에 CBM+를 적용하기 위해 CBM+의 요구도를 국방규격에 반영하기 위한 방안이 연구되었고[2], 한국형 CBM+를 적용확대를 위한 제도, 교육 및 기술 발전의 방향과 세부방안을 제시하기도 했다[3]. 개발하는 관점에서의 접근 방안에서는 설계초기 단계에서 CBM+ 적용에 필요한 센서를 선정하기 위한 추론 및 접근 방안에 대한 연구가 진행되었다[4].

본 연구에서는 무기체계 개발 과정 중에 무기체계의 가용도를 향상하기 위해 선정되는 계획정비와 함께 CBM+ 업무를 선정하는 의사결정 과정에서 필요한 정량적 대상 업무 선정 방안에 대해 제시한다. 또한 현재 진행 중인 사업에 적용한 정량적 결과를 제시하여, CBM+ 업무의 선정의 결과로 무기체계의 운용가용도의 향상을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 미 국방부 규정 및 관련 지침

미 국방부는 DoD Instruction 4151.22, "Condition Based Maintenance Plus for Materiel Maintenance"에서 CBM+를 신규 및 기존 무기체계에 적용하기 위한 방침, 절차 등을 규정하고 있다. 수명주기 관리자는 가장 비용 효율적인 방식으로 무기 시스템 준비 상태를 유지하기 위한 DoD 전략으로 CBM+를 수용하고 채택할

것을 표현하고 있다[5].

유지 관리 요구 사항은 무기 시스템 비용 및 가용성의 주요 동인이므로 수명 주기 관리자는 정확한 상태 정보를 통해 오류 발생 시 예정되지 않은 대응 작업에서 정확한 데이터 및 분석을 기반으로 한 의사결정을 기반으로 사전 예방적 예측 노력으로 초점을 전환되는 것을 중요한 요구사항으로 강조하고 있다. 또한, 수명 주기 유지 인력은 수명 주기의 모든 단계에서 품목의 유지를 지원하는 계획과 프로세스의 지속적인 개선을 위해 RCM, CBM 및 CBM+의 원칙을 이해해야 하는 것을 요구하고 있다[5].

미군의 CBM+ 가이드북에 따르면, CBM+는 CBM과 RCM 활동의 조합으로 정의하고 있으며, Fig. 1에 나타난 바와 8개 주요 영역들로 구성되며, 정비 대상품목들에 대해, 구성품 상태의 시각화 등 통합된 상태 정보시스템을 구축하여 군수품 유지보수의 최적화를 추구하고 있으며 적용 가능한 기술 기준들을 제시하고 있다. 이를 통해 미군은 시스템 또는 구성품의 가용도와 정비도를 기술 및 지식에 기반해 최적화하고, 고장발생 이전에 정비를 실시하여 가동률 향상 및 수명주기비용 절감을 달성할 수 있을 것으로 기대하고 있다[1].

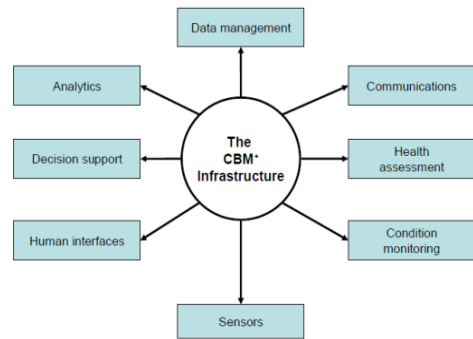


Fig. 1. CBM+ Infrastructure Areas[1]

2.2 한국 국방부 훈령 및 관련 지침

국방전력발전업무훈령은 CBM+를 소요기획단계에 반영할 것을 규정하고 있다. 본 훈령 제4조(총수명주기 관리 업무)에서는 창성능 개선, CBM+, RAM-C 기반의 수명주기비용 등 총수명주기 관리 업무의 세부 기준, 절차 등은 총수명주기 관리 업무 훈령을 따를 것을 요구한다. 제15조(작전운용성능 결정)에 따르면 장비 고장 및 사고 예방을 위한 고장진단 및 예측 관련 사항으로서 센서 데이터를 활용한 CBM+를 고려하여 무기체계의 기술적·부수적 성능을 결정해야 한다. 제88조(전력화지원요소 확보

지침)에서는 소요군은 소요제기 시 무기체계 센서 부착 및 데이터 자동 수집 장치 확보 등 센서 데이터를 활용한 CBM+에 대한 소요를 제기할 수 있으며 방사청은 CBM+와 관련된 소요를 선행연구 및 탐색개발 단계에서 소요군과 협의하여 확정하고, 체계개발단계에서 반영할 수 있다고 한다[6].

총수명주기 관리 업무 훈령 제38조(체계지원관리)에서는 CBM+를 기반으로 하는 정비방안에 대한 체계지원 전략 수립을 요구한다. 제39조(연구 및 설계반영)에는 고장진단 및 고장예지를 통한 조기고장 식별을 위한 설계 반영(자체고장진단(BIT) 능력 확대 및 CBM+적용 확대)을 요구한다[7].

국방전력발전업무훈령과 총수명주기 관리 업무 훈령은 수명주기단계에 따라, 소요제기에 근거하여 체계지원 전략 수립 시 CBM+ 적용 여부를 결정하여 탐색개발, 체계개발 및 양산 단계에서 정비성 설계에 반영함으로써 상태기반정비 성능을 개발·관리하도록 정의하고 있다.

이상의 CBM+에 대한 국내외 규정과 지침의 주요 내용을 Table 1에 정리하였다.

2.3 계획정비와 CBM+ 대상 업무 선정 방안

2.3.1 계획정비의 식별

무기체계 개발 과정에서 고장이 발생한 후 수행하는 정비의 불합리성을 개선 하고자 개발된 것이 계획정비이며, 미군의 RCM 업무 규정인 MIL-STD-2173을 따른다. RCM은 무기체계 구성품별로 MIL-STD-1629에 따

라 수행된 고장 유형 및 영향 평가 결과를 활용한다[3]. RCM 로직에 따라 고장유형별 접근하여 필요한 계획 정비를 선정하게 된다.

MIL-STD-2173에서 제시하는 계획정비 업무의 종류는 다음과 같다[8].

- Servicing: 정상적인 운용상의 소모되는 품목(연료, 오일, 질소 등)의 재보충
- Lubrication: 윤활이 필요한 부품의 주기적 윤활제 보충. 윤활제의 수명에 따라서 보충이 되며, 보통은 제조사의 권고에 따라 주기를 선정한다.
- On Condition (OC): 고장이 발생하기 전에 고장을 유발할 수 있는 잠재적인 고장(potential failure)을 탐지하기 위하여 주기적으로 확인하는 업무. 잠재적인 고장이 관측된 후로 실제 고장이 발생하기 전까지 부품의 수명을 최대한으로 사용할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하며, 이를 위하여 OC업무를 수행하는 주기를 적절하게 수립하는 것이 중요하다.
- Hard Time (HT): 수명이 정해져 있는 부품을 고장이 발생하기 전에 계획된 시점에 교환하거나 복구하는 업무. 사용되는 시간에 따라 고장율이 증가하는 마모(Wear out) 특성을 가진 품목에 적합하다. HT 업무를 수행하는 시점은 와이불(Weibull)분석, 피로도 검사 및 분석 등으로 판단한다.
- Failure Finding (FF): 숨겨진 고장을 주기적으로 확인하는 업무. 숨겨진 고장이 다른 고장을 유발하

Table 1. Standards and Guidance for CBM+

Contents	DoD Instruction 4151.22	CBM+ Guide Book	Directive on defense force development	Directive on total life cycle management development.
CBM+ polices and Procedures	• Weapon syetem application polices and procedures	• Link with RCM	• Compliance with total life cycle management development directive • Reflected in the Preceding/Exploration /System development stage	-
Technical requirement	• Life cycle management perspective	• Present applicable technical standards	• Need to determine technical /collateral performance • Raise a requirement against CBM+	• Expanding design reflection capabilities • Expansion of CBM+ application
Maintenance strategy	• Reflection of maintenance strategy	• Improved operation rate and reduced life cycle cost through Maintenance strategy	-	• Request for establishment of system support strategy
Maintaining manpower	• Understanding RCM, CBM, and CBM+	-	-	-

지 않도록 정비주기가 설정되어야 한다.

MIL-STD-2173 은 1999년 취소되었으며 미 해군의 NAVAIR 00-25-403으로 대체되었다. NAVAIR 00-25-403에서는 CBM+가 OC업무에서 적용하는 것이 타당하다고 언급하고 있다[9].

2.3.2 운용가용도 분석 방안

체계 운용가용도(A_o)를 산정하는 수식은 다음과 같다.

$$A_o = \frac{OT+AT+ST}{OT+AT+ST+TCM+TPM+TALDT} \quad (1)$$

Where,

- OT : Operating Time,
- AT : Attention Time,
- ST : Standby Time,
- TPM : Total Planned Maintenance time,
- TCM : Total Corrective Maintenance time, and
- TALDT : Total Administrative Logistic Delay Time.

무기체계의 운용가용도를 산정하는 과정에서 OT, AT, ST는 체계에 대한 운용 요구사항으로 고객 요구사항에 의해 결정 된다 따라서 정비업무 및 CBM+를 설계하는 과정에서는 영향을 미치는 요소는 계획정비시간, 비계획 정비시간, 행정 및 군수지원 시간이다.

행정 및 군수지원시간(Administrative Logistic Delay Time, 이하 ALDT)은 고장 발생시 해당 구성품을 구매하고 수령하여 장비에 대체하기까지 소요되는 전체적인 군수 및 행정 소요 시간이다. 해외도입 품목의 경우, 제품 공급자의 특성으로 국내개발 품목에 비교할 때 비교적 커다란 ALDT를 요구하게 된다.

2.3.3 CBM+대상 업무 선정 방안

기존연구에서는 FMEA에서 치명 품목을 선정하고 해당센서를 선정하는 절차로 접근 하였다. 여기에서 CBM+대상 품목이 되는 정비대상 구성품의 선정기준은 품목치명도 값이었다[4].

본 연구에서는 RCM 절차에 따라 선정된 계획정비업무들 중 CBM+를 선정하는 기준을 제시한다. 체계 운용가용도를 향상시키는 측면에서 CBM+의 적용 대상 구성품의 선정 기준은 다음과 같다.

- 단계1 : 계획정비 대상 품목 중 해당 품목 가중치를 다음과 같이 구한다.

$$W_i = F_i \times ALDT_i \quad (2)$$

Where,

- F_i : Failure frequency and
- ALDT_i : Administrative Logistic Delay Time.

- 단계2 : 산정된 W_i의 값이 큰 것을 우선으로 CBM+를 적용한다.

2.3.4 적용 사례

본 연구의 적용 사례1(Table 2)에서는 정비업무 설계에 의해 영향을 받지 않는 체계 운용가용도 구성요소 중에서 OT+AT+ST=900 시간으로 가정한다. 여기서 FF는 고장빈도(Failure Frequency), MT는 정비시간(Maintenance Time), 그리고 PMT는 예방정비시간(Planned Maintenance Time)을 의미한다.

사례에서 구성품들은 고장유형 및 영향 분석의 결과로 계획정비가 필요하다고 분석이 되었고, 구성품별로 각각의 가중치 W_i를 산정한 결과는 Table 2와 같다. 분석 결과, 대상 체계에서 전원공급기가 10시간으로 가장 긴 ALDT를 가졌다. 산정된 W_i도 5개중 가장 큰 값으로 10이었다.

Table 2. CBM+ Application Example-1

System-1	Before applying CBM+						After applying CBM+			Check
	FF	MT	PMT	ALDT	W _i	A _o	PMT	ALDT	A _o	
Control unit	11	33	0	40	40	92%	1.2	30	93%	
Power supply	1	3	0	10	10		1.2	0		Step-1
Communication linker	2	3	0	3	6		0	3		Step-3
Analyzer	2	3	0	3	6		0	3		Step-3
Commander	3	3	0	3	9		0	3		Step-2
Controller	3	3	0	3	9		0	3		Step-2

Table 3. CBM+ Application Example-2

System-2		Before applying CBM+					After applying CBM+			Check	
		FF	MT	PMT	ALDT	Wi	A _o	PMT	ALDT		A _o
Operator station		7	13	0	20	20	96%	1.2	10	97%	
	Controller	3	2	0	2	6		0	2		Step-2
	Manager	2	2	0	5	10		1.2	0		Step-1
	Processor	1	1	0	2	2		0	2		Step-3
	Interlocker	1	2	0	2	2		0	2		Step-3

전원공급기에 상태감시를 위한 센서와 CBM+ 체계를 연동하는 것을 가정하였다. 적용결과 상태 감시를 위한 예방정비 시간이 연간 1.2시간이 추가되고, CBM+ 적용 결과로 고장을 예측하고 미리 대체 구성품 확보활동이 진행되어 고장이 발생하기 전 구성품이 확보되고, ALDT가 10시간에서 0시간으로 변경되었다.

CBM+를 적용 후 추가되는 예방정비시간은 센서 측정 데이터를 모니터링하고 판단을 하는 과정이 주된 내용이며, 그 소요시간은 고장 수리 시간이나 행정 및 군수 지연시간에 비해 극히 작은 것으로 식별된다.

CBM+를 적용하기 전 체계 운용가용도는 92%였으나 개선된 체계 운용가용도는 93%였다. 추가적으로 CBM+를 적용하게 될 구성품은 산정된 Wi 값에 따라 명령기와 제어기, 그리고 통신연동기와 분석기가 순차적으로 선정된다.

적용 사례2(Table 3)에서는 고장유형 및 영향 분석의 결과로 계획정비가 필요하다고 분석이 되었고, 구성품별로 각각의 가중치 Wi를 산정한 결과는 Table 3와 같다. 분석 결과, 대상 체계에서 전원공급기가 5시간으로 가장 긴 ALDT를 가졌다. 산정된 Wi도 4개중 가장 큰 값으로 10이었다.

관리기에 상태감시를 위한 센서와 CBM+ 체계를 연동하는 것을 가정하였다. 적용결과 상태 감시를 위한 예방정비 시간이 연간 1.2시간이 추가되고, ALDT가 5시간에서 0시간으로 변경되었다. CBM+를 적용하기 전 체계 운용가용도는 96%였으나 개선된 체계 운용가용도는 97%였다. 추가적으로 CBM+를 적용하게 될 구성품은 산정된 Wi 값에 따라 통제기 그리고 처리기와 연동기가 순차적으로 선정된다. 이러한 접근 방안으로 무기체계 운용가용도 개선 상황과 CBM+ 적용 대상 구성품에 대한 범위를 절충 분석하여 결정할 수 있게 된다.

2.3.5 계획정비와 CBM+ 선정 및 운용가용도 개선 방안

센서의 선정, 측정된 데이터에 따라 잔존 수명을 예측하고 사전 정비활동을 선정하고 적용하는 것이 CBM+의 핵심 요인이다. 또한 그러한 기술들의 성숙도에 따라 CBM+의 효과는 크게 영향을 받을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 CBM+의 체계 적용 방안을 준비하는 입장에서 적용 대상 품목을 선정하는 판단하는 기준을 체계의 가용도 측면에서 가장 효과적인 대상 품목을 우선적으로 선정하는 기준을 제시 하였다. 여기에서 제시한 가중치(2)는 체계운용가용도(1)에서 TALDT에 해당하는 것으로, 가중치가 클수록 큰 대상 업무들이 CBM+ 대상이되면 TALDT가 줄어들고 체계운용가용도를 개선하는 효과가 더 커지게 된다.

RCM에서 계획정비로 선정된 계획정비 대상 업무들 중에서 본 연구에서 제시한 업무별 가중치를 산정하여 가중치가 큰 업무들을 우선적으로 CBM+를 적용함으로써 해당 무기체계의 운용가용도 개선을 우선적으로 달성할 수 있다.

무기체계 운용가용도에 영향이 큰 구성품들을 우선적으로 CBM+적용 대상으로 선정함으로써 변화되는 운용가용도의 정량적 개선을 기대할 수 있었다.

3. 결론

무기체계에 CBM+ 적용을 고려하는 입장에서는 대상 품목의 선정, 센서의 종류, 센서 장착방안, 데이터 분석에 의한 잔존 수명의 예측, 예측된 결과에 따른 예방정비 업무의 선정 및 적용 등이 고려될 필요가 있다.

본 연구에서는 무기체계 운용가용도를 개선하는 것을 중심으로 적용 가능한 CBM+ 대상품목의 선정 방안을

제시하였다. 본 논문에서 제시한 접근 방안으로 CBM+ 적용방안에 대한 분석 결과를 기반으로 계획정비와 CBM+ 적용 방안에 대한 의사결정에 정량적 판단 기준을 제공할 것으로 예상된다.

제시된 선정 기준과 함께 구성품들의 계획정비 결정 및 수리부속의 관리 및 유지 방안에도 함께 고려한다면 무기체계운용 가용도의 개선에 도움이 될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 CBM+의 적용 범위를 고려하는 주요 인자로 무기체계 운용가용도를 고려하였으나, 관련된 소요 비용 및 운용 유지 비용등에 대한 접근에는 어려움이 있었다. 향후 연구에서는 가용도와 추가적인 비용요소들을 고려하는 의사결정 지원 방안들의 연구가 이루어지기를 기대한다.

References

- [1] USDoD(Department of Defense). Condition Based Maintenance Plus DoD Guide Book. 2008.
- [2] M. J. Son, Young-Gil Kim, "A Study on the Reflection of Condition-Based Maintenance Requirement in the Defense Specification", J Korean Soc Qual Manag Vol. 49, No.3: 269-279, September 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2021.49.3.269>
- [3] H. S. Jeong, "A Study on the Condition Based Maintenance Development for the Expansion of CBM Adoption in Weapon Systems", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 22, No. 8 pp. 631-638, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.8.631>
- [4] 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, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.7.121>
- [5] USDoD(Department of Defense). Introduction 4151.22 Condition-Based Maintenance Plus for Material Maintenance. 2020.
- [6] MND(Ministry of National Defense). Directive on defense force development. 2023.
- [7] MND(Ministry of National Defense). Directive on total life cycle management development. 2023.
- [8] MIL-STD-2173, "Reliability-centered maintenance requirements for NAVAL aircraft, weapons systems and support equipment", Department of Defense, 1986.
- [9] NAVAIR 00-25-403, "Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process", Naval Air System Command, 2005.

이 종 문(Jong-Moon Rhee)

[정회원]



- 1993년 2월 : 경성대학교 산업공학 (공학석사)
- 1995년 6월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야>

신뢰성 공학, 인지공학

전 등 주(Dong-Ju Jeon)

[정회원]



- 2012년 2월 : 한성대학교 산업경영공학과 (공학학사)
- 2014년 2월 : 연세대학교 정보산업공학과 (공학석사)
- 2015년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

신뢰성 공학

김 용 근(Yong-Geun Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한양대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

신뢰성 공학

김 소 정(So-Jung Kim)

[정회원]



- 2018년 2월 : 아주대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2020년 2월 : 아주대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 연구원

〈관심분야〉

품질, 신뢰성