



Received: 2023/11/01
Revised: 2023/11/14
Accepted: 2023/12/23
Published: 2023/12/31

***Corresponding Author:**

Gyunghyun Choi

Graduate School of Technology & Innovation Management, Hanyang University

222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763 Republic of Korea

Tel: +82-2-2220-0471

Fax: +82-2-2220-2255

E-mail: ghchoi@hanyang.ac.kr

CBM 프로세스 분석을 통한 국방 CBM 운영 KPI 도출에 관한 연구

A Study on the Derivation of KPIs for Defense CBM Operations through CBM Process Analysis

정진은¹, 최경현^{2*}

¹한양대학교 기술경영전문대학원 박사과정/LIG넥스원 MRO사업부 수석매니저

²한양대학교 기술경영전문대학원 교수

Jin Eun Jeong¹, Gyunghyun Choi^{2*}

¹Ph.D. candidate, Graduate School of Technology & Innovation Management, Hanyang University/Chief manager, MRO Business Department, LIG Nex1

²Professor, Graduate School of Technology & Innovation Management, Hanyang University

Abstract

예방 유지보수는 고장을 감소시켜, 장비의 효율성과 불가동시간 최소화에 기여하고 있다. 그러나 불필요한 유지보수 활동으로 높은 비용을 지불하는 큰 단점이 부각되었다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 CBM을 적용하기 시작했다. 이러한 상황에서 국방 CBM의 체계적인 운영과 무기체계 준비태세를 극대화하기 위하여 국방 CBM 프로세스와 KPI 도출이 필요하게 되었다. 민간 분야에서는 CBM 성과측정 연구가 다양하게 진행되고 있지만, 국방 분야에서는 거의 연구되지 않고 있는 것이 현실이다. 본 연구는 국방 CBM 프로세스 단계 구조화, 단계별 액티비티(activity) 도출 및 액티비티 관련 KPI 항목을 설정 및 제시하였다. 이는 한국군 첨단 무기체계 CBM 확대 측면에서 효과적인 운영 극대화가 될 것으로 기대된다.

Preventive maintenance (PM) has been used to reduce equipment failures and minimize downtime. However, it has been criticized for its high cost due to unnecessary maintenance activities. To address this issue, condition based maintenance (CBM) has been adopted. In this context, it is necessary to develop a defense CBM process and key performance indicators (KPIs) to ensure the systematic operation of defense CBM and maximize the readiness of weapon systems. In the private sector, research on CBM performance measurement is being conducted in various ways, but it is rarely studied in the defense sector. This study proposes a defense CBM process, identifies activities for each step, and sets KPIs for each activity. It is expected that this will lead to the effective operation of defense CBM for advanced weapon systems in the Korean military.

Keywords

상태기반 유지보수(Condition Based Maintenance), 국방 CBM 프로세스(Defense CBM Process), 액티비티(Activity), 핵심성과지표(Key Performance Indicators)

1. 서론

오늘날 유지보수의 중요성이 증가함에 따라 시스템 신뢰성 향상을 위한 최적의 유지보수 전략 개발과 구현에 대한 관심이 높아지게 되었다. 즉 유지보수를 보다 효과적으로 계획함으로써 효율과 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 사실을 인지하게 되었다[1]. 유지보수 전략 중 대표적인 예방 유지보수(preventive maintenance, PM)는 시스템 고장률을 감소시켜 장비의 효율성을 향상시킴으로써 불가동시간(downtime)을 최소화하는 데 기여하고 있다. 그러나 때때로 불필요한 유지보수를 유발하여 이로 인한 높은 수명주기비용이 큰 단점으로 부각되었다[2]. 이러한 약점을 극복하기 위하여 비용 절감과 장비 안전성 유지에 적합한 상태기반 유지보수(condition based maintenance, CBM)가 제조산업 등 많은 분야에 적용되기 시작했다.

백색 가전, 석유 시추, 자동차·철강·항공 산업 등에서 CBM을 수행한 다양한 산업의 경험들을 제시하고 있다[3]. 즉 여러 산업 분야에서 CBM을 적용하거나 그 적용범위를 확대하고 있음을 확인할 수 있다. 한국 국방 분야도 CBM과 관련하여 예외가 될 수 없다. 무기체계가 첨단화될수록 운영유지비 절감과 가동률 향상이라는 이슈가 지속적으로 거론되고 있다. 즉 전력화 이후 운영유지단계에서 재고와 혁신이 요구[4]되고 있다는 의미이다.

현재 한국군 CBM의 적용 실태를 살펴보면, 해군에서 2006년 최초로 함정무기체계인 세종대왕급 이지스 구축함에 CBM과 유사한 통합상태평가시스템을 적용하였다. 그러나 구축함 통합상태평가시스템은 해군에 CMB이 불완전하게 정착된 상태에서 도입되어 CBM 수행이 제한되었다[5]. 이 사례와 같이 한국군 무기체계에 CBM을 적용하였지만 신규 시스템을 실질적으로 운영하기 어렵다는 것을 볼 수 있다. 이러한 상황을 극복하기 위하여 본 연구는 국방 CBM 운영을 위한 국방 CBM 프로세스, 프로세스별 액티비티, 액티비티 관련 KPI에 초점을 두었다. 현재까지 CBM의 성과측정에 초점을 둔 문헌은 드물며, 체계적인 연구 역시 없는 상태이다[6].

특히 한국 국방 분야에 CBM 성과측정을 위한 연구가 부재한 현재 첨단 무기체계에 CBM 적용 확대가 추진되고 있다. CBM 대상 무기체계의 준비태세 향상과 실질적인 운영유지비 절감으로 이어질 수 있도록 하려면 국방 CBM 도입단계부터 KPI 연구가 필요하다.

2. 유지보수와 핵심성과지표의 이해

일반적으로 유지보수(maintenance)는 제품 또는 자산의 필요한 기능을 수행할 수 있는 상태로 유지하거나 복원하기 위하여 수명주기 동안 수행되는 모든 기술적·행정적·관리적 활동의 조합으로 정의한다[7]. 국방 분야에서도 무기체계를 임무수행이 가능한 상태로 유지하여 전투부대의 준비태세와 지속 가능성을 보장하는 데 필요한 활동으로 유지보수를 설명하고 있다[8]. 유지보수 전략은 크게 사후(reactive) 유지보수와 사전(proactive) 유지보수로 구분된다. 사후 유지보수는 고장 발생 후 활동하는 고장 유지보수(corrective maintenance, CM)와 긴급 유지보수로 구성되며, 사전 유지보수는 PM과 CBM으로 분류한다[9].

2.1 상태기반 유지보수 및 프로세스

CBM은 고장 발생 전에 고장을 해소하므로 유지보수비를 절감할 수 있으며, 무중단으로 효율적인 시스템 운용을 가능하게 한다[10]. 일반적으로 CBM은 실시간 기반 유지보수 활동을 수행하므로, 불확실성을 감소시켜 주는 장점이 있으며[11], 시스템 장애를 사전에 감지하여 PM보다 신속하게 대응할 수 있다.

CBM은 진단과 예지로 분류한다. CBM 진단은 고장을 탐지하는 개념이고, CBM 예지는 잔존유효수명(remaining useful life, RUL) 기능을 CBM 진단에 추가한 개념이다[12]. 국방·자동차·항공우주 분야는 CBM을 채택한 주요 산업이며, 미 육·해·공군 및 해병대와 더불어 제너럴 모터스, 제너럴 일렉트릭, 하니웰 등의 대기업들이 CBM을 적용하고 있다[13].

일반적인 CBM 프로세스는 데이터 획득, 데이터 전처리, 특성 추출, 건전성 평가, 진단, 예지로 구성된다. 장비 상태는 성능 데이터, 테스트 등을 통해 측정된다. 측정된 데이터를 기반으로 장비 상태를 파악한 후, CBM 프로세스는 고장 발생 전 유지보수를 효율적으로 의사결정한다[14]. 그러나 응집력 있는 CBM 프로세스가 정의되어 있지 않으며, Table 1과 같이 연구 분야별로 다양한 프로세스가 존재하는 것을 알 수 있다.

Table 1. CBM 프로세스 비교

CBM 프로세스	참고문헌
모니터링 → 감지 → 진단 → 예지	Ayo-Imoru and Cilliers(2018)[15]
데이터 획득 → 상태 모니터링 → 고장 진단 → RUL 예측 → 건전성 관리	Chen et al.(2012)[16]
데이터 → 모니터링/감지 → 진단 → 예지 → 조치	Coble(2010)[17]

2.2 핵심성과지표

성과는 임무 또는 성능의 실행과 관련된 물리적 또는 기능적 속성을 특정짓는 정량적 척도로 정의되고 있다[18]. 운영유지비에 민감한 산업이 있지만, 성과 달성을 최우선으로 하는 산업들도 많다. 예를 들어, 자본 집약산업인 방위 및 항공우주 산업에서는 시스템 준비태세, 임무 성공률 등을 포함한 주요 성과물을 더욱 더 중요시하고 있다[19]. 이와 같이, 점점 더 복잡해지고 최첨단으로 진보하는 시스템에서 성능을 유지하기 위한 노력의 일환으로 성과관리가 강조되고 있다[20]. 또한 성과관리 실행은 시스템에 영향을 끼치고 있으므로 도입 초기에 시작하는 것이 중요하다[21].

성과지표 또는 핵심성과지표(key performance indicator, KPI)는 시스템의 성과를 반영하여 품질 목표를 계량적으로 평가하는 데 활용하는 척도이다. 특히

Juuso & Lahdelma[22]는 KPI를 정확하게 정의하고 중요한 성공 요인과 목표를 측정할 수 있는 방법이 있어야 한다고 주장했다.

3. 국방 CBM 전략 설계

3.1 국방 CBM 프로세스

국방 CBM 프로세스는 문헌연구를 기반으로 Fig. 1과 같이 CBM의 목적과 기능에 따라 상태 모니터링, 감지, 진단, 예지, 의사결정, 유지보수 등 여섯 단계로 설정하였다.

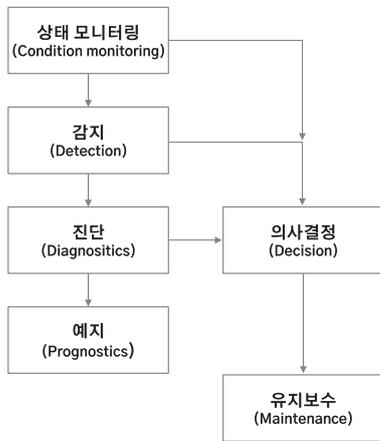


Fig. 1. 국방 CBM 프로세스

첫 번째 단계인 상태 모니터링은 무기체계 고장을 검출하는 기법으로 임박한 고장을 발견하기 위해 물리적 특성과 관련된 장비의 상태를 감시하는 단계이다.

두 번째 단계인 감지는 모니터링되는 무기체계 구성 요소에서 이상 여부를 나타내며, 조기 고장감지는 장비의 성능을 높이고 무기체계 불가동시간을 단축하기 위한 단계이다.

세 번째 단계인 진단 단계는 측정 공간에서 얻은 특정 정보를 결합 부위로 특성화하여 무기체계의 고효율 성과 사고 원인인 인적 오류를 최소화한다.

네 번째 단계인 예지는 현재 운용 조건과 정상/비정상 데이터 이력을 기반으로 운용능력 저하를 평가하여 무기체계의 건전성 상태를 결정하고, RUL 예측 및 미래 고장 유형을 예측한다.

다섯 번째는 예지로부터 데이터를 획득하고 시스템 상태를 고려하여 지속 운용 또는 최적의 유지보수를 결정하는 단계이다.

마지막 단계는 유지보수로서 시스템 상태를 고려하여 적시에 의사결정 후 문제 발생 여부를 검사하여 교환 등과 같은 유지보수 업무를 수행한다.

3.2 국방 CBM 프로세스 단계별 액티비티 및 KPI

본 연구에서 정의한 국방 CBM 프로세스는 프로세스별 목적과 고유 기능에 따른 액티비티를 설정하였으며 Fig. 2와 같이 도식화할 수 있다. 또한 KPI는 성과 측정의 일환으로[17], 국방 CBM의 효과적인 구현을 위하여 액티비티 관련 KPI를 도출하였다.

- (1) 상태 모니터링: 상태 모니터링의 액티비티는 센서 모니터링, 자체진단 모니터링, 데이터 수집으로 설정하였다. 센서 모니터링은 장치를 활용하여 무기체계 구성요소 작동을 모니터링하는 액티비티이다. 자체진단 모니터링은 무기체계 고장 징후에 대해 자체적으로 모니터링한다. 데이터 수집은 무기체계 고장 가능성의 식별 상태를 나타내는 신호 데이터 수집 액티비티이다. 상태 모니터링의 액티비티별 KPI 항목은 Table 2와 같이 도출되었다.

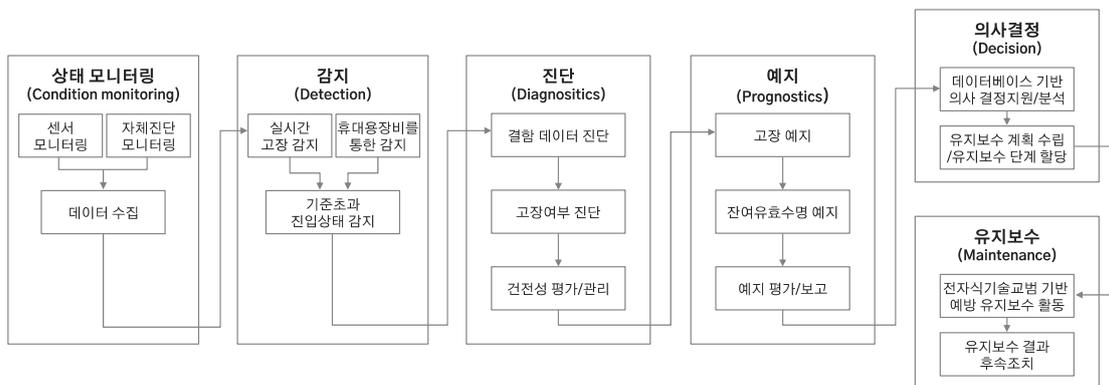


Fig. 2. 국방 CBM 프로세스 액티비티

Table 2. 상태 모니터링 KPI

액티비티	KPI 항목
센서 모니터링	① 무기체계 대상 구성요소의 센서 설치율 ② 센서 요구사항과 장착사양의 일치율 ③ 센서를 통한 무기체계 대상 구성요소의 상태 측정 정확도
자체진단 모니터링	① 무기체계 대상 구성요소의 자체진단 하드웨어 탑재율 ② 무기체계 대상 구성요소의 자체진단 소프트웨어 탑재율 ③ 자체진단을 통한 무기체계 대상 구성요소의 상태측정 정확도
데이터 수집	① 모니터링을 통한 무기체계 상태에 대한 데이터 수집률 ② 데이터 분석에 대한 결과 정확도 ③ 데이터 분석에 대한 사용 편의성

(2) 감지: 감지 액티비티는 실시간 고장 감지, 휴대용 장비를 통한 감지, 기준초과 진입상태 감지로 설정할 수 있다. 실시간 고장 감지는 무기체계 상태를 실시간으로 감지하고 경고 신호를 전송, 장비 고장을 조기 파악하여 피해를 최소화한다. 휴대용 장비를 통한 감지는 무기체계 상태를 야전에서 직접 측정 및 분석하여 고장을 감지한다. 기준초과 진입상태 감지는 설정된 기준치를 초과하는 경우 고장으로 이어질 수 있는 상태에 진입했음을 감지하고 경고를 발생한다. 감지의 액티비티별 KPI 항목은 Table 3와 같이 도출되었다.

Table 3. 감지 KPI

액티비티	KPI 항목
실시간 고장 감지	① 장비 특성/성능에 따른 적합성 ② 무기체계 고장 또는 고장 가능성 감지 정확도 ③ 무기체계 고장 감지 후 경고 신속 전송률
휴대용 장비를 통한 감지	① 무기체계 특성에 따른 적합성 ② 야전에 적합한 휴대 용이성 ③ 무기체계 고장 또는 고장 가능성 감지 정확도
기준초과 진입상태 감지	① 무기체계 기준값 진입상태 감지율 ② 무기체계 진입상태 감지 정확도 ③ 무기체계 진입상태 감지 시점

(3) 진단: 진단 액티비티는 결함 데이터 진단, 고장여부 진단, 건전성 평가/관리로 설정하였다. 결함 데이터 진단은 무기체계로부터 수집한 데이터를 통하여 벗어난 데이터 지점을 식별한다. 고장여부 진단은 무기체계 상태를 파악하고, 기준 데이

터와 비교하여 고장 발생 여부를 판단한다. 건전성 평가/관리는 모니터링에서 획득한 정보를 기반으로 무기체계의 운용 상태를 평가하여, 진단의 정확성을 확보한다. 진단의 액티비티별 KPI 항목은 Table 4와 같이 도출되었다.

Table 4. 진단 KPI

액티비티	KPI 항목
결함 데이터 진단	① 결함 데이터를 정확하게 탐지하는 탐지율 ② 이결함 무기체계를 고장으로 판단하는 민감도 ③ 정상 무기체계를 오판하지 않는 특이도
고장여부 진단	① 고장 판단 능력인 고장여부 판단율 ② 고장 진단 대비 실제 고장 무기체계 비율인 양성 예측도 ③ 정상 진단 대비 실제 정상 무기체계 비율인 음성 예측도
건전성 평가/관리	① 무기체계 운용상태 전전 대비 건전성 비율 ② 무기체계 운용상태 평가를 위한 평균 가동시간 ③ 무기체계 운용상태 평가를 위한 평균 중단시간

(4) 예지: 예지 액티비티는 고장 예지, RUL 예지, 예지 평가/보고로 설정할 수 있다. 고장 예지는 무기체계에서 수집한 데이터 기반으로 고장 패턴을 식별하여 고장 시점 예측을 통해 장비 고장을 조기에 예방하는 액티비티이다. RUL 예지는 무기체계 고장 발생 전에 남아 있는 작동 시간을 예측, 결함 완화 등과 같은 의사결정을 지원하는 액티비티이다. 예지 평가/보고는 현재 운용 조건과 정상/비정상 데이터를 기반으로 운용 능력 저하를 평가하여, 무기체계 운영유지 결정을 위한 평가 결과를 보고하는 액티비티이다. 예지의 액티비티별 KPI 항목은 Table 5와 같다.

Table 5. 예지 KPI

액티비티	KPI 항목
고장 예지	① 무기체계 대상 구성요소의 고장 예측 정확도 ② 무기체계 대상 구성요소의 고장 예측 신뢰성 ③ 무기체계 대상 구성요소의 고장 예측 활용성
잔여유효수명 예지	① 잠재적 고장 추세율 ② 무기체계 대상 구성요소의 잔여유효수명 예측 정확도 ③ 예측 잔여유효수명과 실제 잔여유효수명 간 일치성
예지 평가/보고	① 무기체계 고장 발생 전 예지정비 수행 효과성 ② 무기체계 상태 평가를 통한 예지 정확도 ③ 무기체계 예지 보고를 통한 예지 만족도

4. 조사설계 및 분석결과

본 연구는 리커트 척도를 이용한 설문 조사방법을 적용하였으며, 설문 문항은 Table 6와 같이 총 36개로 구성하였다. 신뢰성의 문제를 훼손하지 않은 상태에서 민감도를 높이는 5점 척도(1점: 전혀 그렇지 않다, 2점: 그렇지 않은 편이다, 3점: 보통이다, 4점: 대체로 그렇다, 5점: 매우 그렇다)를 적용하였다[23]. 또한 수집된 설문자료에 대한 통계처리는 IBM SPSS Statistics

Version 22를 활용하여 분석하였다.

전문가 설문 대상은 군, 산업계 및 학계로 분류하였다. 군은 육군 항공과 해군 정비창, 산업계는 국내 주요 방산기업과 중소기업업을 포함한 글로벌 반도체 제조사의 유지보수 전문가로 선정하였다. 또한 학계의 경우 해군사관학교를 포함한 정비공학, 군사학 전공 대학 교수진이 설문에 참여하였다. 설문에 응한 전문가는 관련 해당 분야에서 평균 20년 이상의 경력을 보유하고 있는 전문가 38명으로 선정하였다. 군 전문가의

Table 6. KPI 설문항목

프로세스	액티비티	KPI 설문항목	참고문헌
상태 모니터링	1. 센서 모니터링	Q1.1. 무기체계 대상 구성요소의 센서 설치율이 필요하다. Q1.2. 센서 요구사항과 장착사양의 일치율이 필요하다. Q1.3. 센서를 통한 무기체계 대상 구성요소의 상태 측정 정확도가 필요하다.	(Yamada et al., 2021)[24] (Roh et al., 2018)[25] (Prisacaru et al., 2019)[26]
	2. 자체진단 모니터링	Q2.1. 무기체계 대상 구성요소의 자체진단 하드웨어 탑재율이 필요하다. Q2.2. 무기체계 대상 구성요소의 자체진단 소프트웨어 탑재율이 필요하다. Q2.3. 자체진단을 통한 무기체계 대상 구성요소의 상태 측정 정확도가 필요하다.	(Pecht et al., 1999)[27] (Pecht et al., 1999)[27] (Bhatheja et al., 2022)[28]
	3. 데이터 수집	Q3.1. 모니터링을 통한 무기체계 상태에 대한 데이터 수집률이 필요하다. Q3.2. 데이터 분석에 대한 결과 정확도가 필요하다. Q3.3. 데이터 분석에 대한 사용 편의성이 필요하다.	(Sarteshnizi et al., 2022)[29] (Boyle et al., 2021)[30] (Doi, 2021)[31]
감지	4. 실시간 고장 감지	Q4.1. 무기체계 고장 발생 정확 감지율이 필요하다. Q4.2. 무기체계 고장 또는 고장 가능성 감지 정확도가 필요하다. Q4.3. 무기체계 고장 감지 후 경고 신속 전송률이 필요하다.	(Ma et al., 2021)[32] (Prisacaru et al., 2019)[26] (Shen et al., 2021)[33]
	5. 휴대용 장비를 통한 감지	Q5.1. 무기체계 특성에 따른 적합성이 필요하다. Q5.2. 야전에 적합한 휴대 용이성이 필요하다. Q5.3. 무기체계 고장 또는 고장 가능성 감지 정확도가 필요하다.	(He et al., 2023)[34] (Daniel & Panetta, 2019)[35] (Prisacaru et al., 2019)[26]
	6. 기준초과 진입상태 감지	Q6.1. 무기체계 기준값 진입상태 감지율이 필요하다. Q6.2. 무기체계 진입상태 감지 정확도가 필요하다. Q6.3. 무기체계 진입상태 감지 시점이 필요하다.	(Mishra et al., 2021)[36] (Song et al., 2019)[37] (Lawal., 2021)[38]
진단	7. 결함 데이터 진단	Q7.1. 결함 데이터를 정확하게 탐지하는 탐지율이 필요하다. Q7.2. 결함 무기체계를 고장으로 판단하는 민감도가 필요하다. Q7.3. 정상 무기체계를 오판하지 않는 특이도가 필요하다.	(Tulbure et al., 2022)[39] (Chen et al., 2023)[40] (Lite et al., 2020)[41]
	8. 고장여부 진단	Q8.1. 고장 판단 능력인 고장여부 판단율이 필요하다. Q8.2. 고장 진단 대비 실제 고장 무기체계 비율인 양성 예측도가 필요하다. Q8.3. 정상 진단 대비 실제 정상 무기체계 비율인 음성 예측도가 필요하다.	(Ghoneim et al., 2021)[42] (Tostmann et al., 2020)[43] (Tostmann et al., 2020)[43]
	9. 건전성 평가/관리	Q9.1. 무기체계 운용상태 전년 대비 건전성 비율이 필요하다. Q9.2. 무기체계 운용상태 평가를 위한 평균 가동시간이 필요하다. Q9.3. 무기체계 운용상태 평가를 위한 평균 중단시간이 필요하다.	(김상동 · 이상근, 2015)[44] (Sudheesh et al., 2019)[45] (Mousavi et al., 2023)[46]
예지	10. 고장 예지	Q10.1. 무기체계 대상 구성요소의 고장 예측 정확도가 필요하다. Q10.2. 무기체계 대상 구성요소의 고장 예측 신뢰성이 필요하다. Q10.3. 무기체계 대상 구성요소의 고장 예측 활용성이 필요하다.	(Huang and Liu, 2019)[47] (Melnikova et al., 2021)[48] (Biasielli et al., 2020)[49]
	11. 잔여유효 수명 예지	Q11.1. 잠재적 고장 추세율이 필요하다. Q11.2. 무기체계 대상 구성요소의 잔여유효수명 예측 정확도가 필요하다. Q11.3. 예측 잔여유효수명과 실제 잔여유효수명 간 일치성이 필요하다.	(Nayak et al., 2023)[50] (Liu et al., 2021)[51] (Liu et al., 2021)[51]
	12. 예지 평가/보고	Q12.1. 무기체계 고장 발생 전 예지정비 수행 효과성이 필요하다. Q12.2. 무기체계 상태 평가를 통한 예지 정확도가 필요하다. Q12.3. 무기체계 예지 보고를 통한 예지 만족도가 필요하다.	(Krawczyk & Szuba, 2023)[52] (Huang & Liu, 2019)[47] (Sánchez-Barroso & García Sanz-Calcedo, 2019)[53]

경우 보안을 고려하여 대면 설문, 산업계와 학계는 온라인 설문을 2023년 10월 1일부터 30일까지 30일간 실시하였다.

상술한 바와 같이 군, 산업계, 학계를 대상으로 설문 조사를 실시한 결과는 Table 7과 같이 나타났다. 본 설

문조사에 따르면 산업계가 23명(60.5%)로 가장 많았고 군 9명(23.7%), 학계 6명(15.8%) 순으로 나타났다. 36개 KPI 빈도를 분석한 결과는 평균 4.17로 나타나 국방 CBM 프로세스에 필요한 KPI 항목임을 알 수 있다.

Table 7. 빈도분석 결과

단계	KPI	응답범주 [명(%)]					합계	평균	표준편차
		전혀	별로	보통	약간	매우			
상태 모니터링	설치율	-	4(10.5)	2(5.3)	17(44.7)	15(39.5)	38	4.13	.93
	일치율	-	2(5.3)	1(2.6)	20(52.6)	15(39.5)	38	4.26	.75
	정확도	1(2.6)	-	3(7.9)	14(36.8)	20(52.6)	38	4.36	.85
	HW탐재율	-	3(7.9)	5(13.2)	15(39.5)	15(39.5)	38	4.10	.92
	SW탐재율	-	2(5.3)	4(10.5)	17(44.7)	15(39.5)	38	4.15	.82
	정확도	-	1(2.6)	5(13.2)	15(39.5)	17(44.7)	38	4.26	.79
	수집률	-	1(2.6)	1(2.6)	18(47.4)	18(47.4)	38	4.39	.67
	백업률	-	2(5.3)	7(18.4)	13(34.2)	16(42.1)	38	4.13	.90
	편의성	-	-	4(10.5)	11(28.9)	23(60.5)	38	4.50	.68
감지	감지율	-	2(5.3)	4(10.5)	12(31.6)	20(52.6)	38	4.31	.87
	정확도	-	1(2.6)	4(10.5)	12(31.6)	21(55.3)	38	4.39	.78
	전송률	-	3(7.9)	5(13.2)	11(28.9)	19(50)	38	4.21	.96
	적합성	-	-	4(10.5)	14(36.8)	20(52.6)	38	4.42	.68
	용이성	-	-	6(15.8)	14(36.8)	18(47.4)	38	4.31	.73
	정확도	-	-	4(10.5)	13(34.2)	21(55.3)	38	4.44	.68
	감지율	1(2.6)	2(5.3)	3(7.9)	13(34.2)	19(50)	38	4.23	.99
	정확도	-	2(5.3)	2(5.3)	14(36.8)	20(52.6)	38	4.36	.81
	감지시점	-	2(5.3)	4(10.5)	14(36.8)	18(47.4)	38	4.26	.86
진단	탐지율	-	-	1(2.6)	14(36.8)	23(60.5)	38	4.57	.55
	민감도	-	1(2.6)	5(13.2)	14(36.8)	18(47.4)	38	4.28	.80
	특이도	-	1(2.6)	6(15.8)	12(31.6)	19(50)	38	4.26	.86
	판단율	-	-	3(7.9)	18(47.4)	17(44.7)	38	4.36	.63
	예성예측도	-	1(2.6)	6(15.8)	14(36.8)	17(44.7)	38	4.23	.81
	음성예측도	-	1(2.6)	7(18.4)	15(39.5)	15(39.5)	38	4.15	.82
	건전성비율	-	1(2.6)	6(15.8)	16(42.1)	15(39.5)	38	4.18	.80
	가동시간	-	-	3(7.9)	19(50)	16(42.1)	38	4.34	.62
	중단시간	-	-	7(18.4)	15(39.5)	16(42.1)	38	4.23	.75
예지	정확도	-	1(2.6)	2(5.3)	16(42.1)	19(50)	38	4.39	.71
	신뢰성	-	-	4(10.5)	13(34.2)	21(55.3)	38	4.44	.68
	활용성	-	2(5.3)	3(7.9)	15(39.5)	18(47.4)	38	4.28	.83
	추세율	-	2(5.3)	8(21.1)	13(34.2)	15(39.5)	38	4.07	.91
	정확도	-	1(2.6)	4(10.5)	18(47.4)	15(39.5)	38	4.23	.75
	일치성	-	1(2.6)	7(18.4)	14(36.8)	16(42.1)	38	4.18	.83
	효과성	-	2(5.3)	4(10.5)	14(36.8)	18(47.4)	38	4.26	.86
	정확도	-	1(2.6)	5(13.2)	13(34.2)	19(50)	38	4.31	.80
	만족도	-	2(5.3)	6(15.8)	15(39.5)	15(39.5)	38	4.13	.87

5. 결론

본 연구는 국방 분야 무기체계를 대상으로 CBM을 적용하였을 때 가동률 향상과 운영유지비 절약을 위한 국방 CBM 프로세스, 프로세스 단계별 액티비티와 액티비티별 해당 KPI를 도출하기 위하여 수행되었다. 본 연구의 결과를 분석 및 요약하면 다음과 같다.

첫째, CBM의 다양한 이론연구를 통하여 국방 분야 특성에 맞는 국방 CBM 프로세스를 도출하였다. 프로세스는 상태 모니터링, 감지, 진단, 예지, 의사결정 및 유지보수 단계로 구성되었다. 둘째, 설정된 국방 CBM 프로세스 액티비티별 목적과 기능을 분석하여 각 액티비티별 KPI 항목 36개를 도출하였다. 생성된 KPI 항목에 대해 군, 산업계 및 학계 전문가를 대상으로 설문 을 실시하고 빈도 분석을 수행하여 국방 CBM 프로세스 KPI 항목을 객관화하였다.

본 연구에서 다룬 KPI 항목은 국방 CBM 프로세스에 적용될 것이므로 산업계와 학계보다 군 대상의 설문이 필요하다고 식별된 것이 본 연구의 한계점이라 할 수 있다. 더불어 계층분석법(analytic hierarchy process, AHP)을 기반으로 한 KPI 항목 가중치 연구와 KPI를 통한 성과평가체계 구축 연구 두 가지 방향으로 향후 연구를 진행할 것이다.

현재 한국군은 레이더 등 최첨단 무기체계에 CBM을 시범 적용하기 위해 연구개발을 진행 중이다. 또한 운영유지단계에서 운용 중인 함정과 같은 복합 무기체계에 CBM 적용 사업들을 추진하고 있다. 이러한 국방 분야 무기체계에 국방 CBM 성과측정을 위한 KPI가 적용됨으로써 해당 장비의 운영유지비 절감과 준비태세(가동률)가 극대화될 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] de Jonge, B. & Scarf, P. A. (2020) A Review on Maintenance Optimization. *European Journal of Operational Research*, 285, 805–824.

[2] Çınar, Z. M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., & Safaei, B. (2020) Machine Learning in Predictive Maintenance towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4.0. *Sustainability*, 12(19), 1–42.

[3] Bousdekis, A., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2020) Predictive Maintenance in the 4th Industrial Revolution: Benefits, Business Opportunities, and Managerial

Implications. *IEEE Engineering Management Review*, 48(1), 57–62.

[4] Petrillo, A., De Felice, F., & Zomparelli, F. (2018) Performance Measurement for World-class Manufacturing: A Model for the Italian Automotive Industry. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30(7–8), 908–935.

[5] Oh, K. (2016) Development of Korean Condition Based Maintenance Systems to Monitor Naval Weapon Systems. *Journal of Aerospace System Engineering*, 10(4), 67–74.

[6] Glas, A. H., Henne, F. U., & Essig, M. (2018) Missing Performance Management and Measurement Aspects in Performance-based Contracting. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(11), 2062–2095.

[7] Shin, J. H., & Jun, H. B. (2015) On Condition Based Maintenance Policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), 119–127.

[8] DOD (2022) Audit of the Department of Defense's Implementation of Predictive Maintenance Strategies to Support Weapon System Sustainment.

[9] Kothamasu, R., Huang, S. H., & VerDuin, W. H. (2006) System Health Monitoring and Prognostics – A Review of Current Paradigms and Practices. *The International of Advantage Manufacturing Technology*, 28, 1012–1024.

[10] Teixeira, H. N., Lopes, I., & Braga, A. C. (2021) Condition-based Maintenance Implementation: A Literature Review. *30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Athens, Greece.

[11] Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. J. (2010) Current Status of Machine Prognostics in Condition-based Maintenance: A Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1–4), 297–313.

[12] DOD (2008) Condition Based Maintenance Plus DoD Guidebook. Department of Defense.

[13] Prajapati, A., Bechtel, J., & Ganesan, S. (2012) Condition Based Maintenance: A Survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 384–400.

[14] Ishak, S., Yaw, C. T., Koh, S. P., Tiong, S. K., Chen, C. P., & Yusaf, T. (2021) Fault Classification System for Switchgear CBM from an Ultrasound Analysis Technique Using Extreme Learning Machine. *Energies*, 14(6279), 1–21.

[15] Ayo-Imoru, R. M., & Cillier, A. C. (2018) A Survey of the State of Condition-Based Maintenance (CBM) in the Nuclear Power Industry. *Annals of Nuclear Energy*, 112, 177–188.

[16] Chen, Z. S., Yang, Y. M., & Hu, Z. (2012) A Technical Framework and Roadmap of Embedded Diagnostics and Prognostics for Complex Mechanical Systems in Prognostics and Health Management Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 61(2), 314–322.

[17] Coble, J. B. (2010) Merging Data Sources to Predict Remaining Useful Life – An Automated Method to Identify Prognostic Parameters. University of Tennessee, 11–12.

[18] INCOSE (2015) INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and

Activities (4th ed.). Wiley.

- [19] Kim, S. H., Cohen, M. A., & Netessine, S. (2007) Performance Contracting in After-Sales Service Supply Chains. *Management Science*, 53, 1843-1858.
- [20] Jablokowa, K. W., & Booth, D. E. (2006) The Impact and Management of Cognitive Gap in High Performance Product Development Organizations. *Journal of Engineering and Technology Management*, 23, 313-336.
- [21] Roth, N., Prieto, J., Lettice, F., Dvir, R., Penev, I., Tsanev, M., Evans, S., Young, K., & Schulte, T. (2001) A Performance Management System for New Product Development from a Reuse and Invention Perspective. IOS Press.
- [22] Juuso, E. K., & Lahdelma, S. (2013) Intelligent Performance Measures for Condition-based Maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19, 278-294.
- [23] Cummins, R. A., & Gullone, E. (2000) Why We Should not Use 5-point Likert Scales: The Case for Subjective Quality of Life Measurement. *Proceedings, Second International Conference on Quality of Life in Cities*.
- [24] Yamada, Y., Sasaki, K., Imura, T., & Hori, Y. (2021) Design Method of Coils for Dynamic Wireless Power Transfer Considering Average Transmission Power and Installation Rate 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC).
- [25] Roh, J., Park, H. J., Lee, K. J., Hyeong, J., Kim, S., & Lee, B. (2018) Sitting Posture Monitoring System Based on a Low-Cost Load Cell Using Machine Learning. *Sensors (Basel)*, 18(1).
- [26] Prisacaru, A., Palczynska, A., Gromala, P., Wu, B., Han, B., & Zhang, G. (2019) Accuracy of CMOS-Based Piezoresistive Stress Sensor for Engineering Applications of Thermal Loading Condition: Theoretical Review and Experimental Validation. *IEEE Sensors Journal*, 19(20), 9139-9148.
- [27] Pecht, M., Dube, M., Natishan, M., Williams, R., Banner, J., & Knowles, I. (2001) Evaluation of Built-In Test. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37, 266-271.
- [28] Bhatheja, K., Chaganti, S., Chen, D., Jin, X. R., Dao, C. C., Ren, J., Kumar, A., Correa, D., Lehmann, M., Rodriguez, T., Kingham, E., Knight, J. R., Dobbin, A., Herrin, S. W., & Garrity, D. (2022) Low Cost High Accuracy Stimulus Generator for On-chip Spectral Testing 2022 IEEE International Test Conference (ITC).
- [29] Sarteshnizi, I. T., Tavakkoli Khomeini, F., Khedri, B., & Samimi, A. (2022) Sensitivity Analysis of Driving Event Classification Using Smartphone Motion Data: Case of Classifier Type, Sensor Bundling, and Data Acquisition Rate. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 1-18.
- [30] Boyle, R. S. J., & Body, R. (2021) The Diagnostic Accuracy of the Emergency Department Assessment of Chest Pain (EDACS) Score: A Systematic Review and Meta-analysis. *Ann Emerg Med*, 77(4), 433-441.
- [31] Doi, T. (2021) Usability Textual Data Analysis: A Formulaic Coding Think-Aloud Protocol Method for Usability Evaluation. *Applied Sciences*, 11(15).
- [32] Ma, Y., Oslebo, D., Maqsood, A., & Corzine, K. (2021) DC Fault Detection and Pulsed Load Monitoring Using Wavelet Transform-Fed LSTM Autoencoders. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(6), 7078-7087.
- [33] Shen, T., Liang, X., Zhang, B., Yang, G., Li, D., Zu, J., & Pan, S. (2021) Transmission Line Safety Early Warning Technology Based on Multi-Source Data Perception. 2021 2nd International Conference on Big Data & Artificial Intelligence & Software Engineering (ICBASE).
- [34] He, C., Chen, Y. Y., Phang, C. R., Stevenson, C., Chen, I. P., Jung, T. P., & Ko, L. W. (2023) Diversity and Suitability of the State-of-the-Art Wearable and Wireless EEG Systems Review. *IEEE J Biomed Health Inform*, 27(8), 3830-3843.
- [35] Daniel, D. F., & Panetta, J. (2019). On Applying Performance Portability Metrics 2019 IEEE/ACM International Workshop on Performance, Portability and Productivity in HPC (P3HPC),
- [36] Mishra, A., Gupta, N., & Gupta, B. B. (2021) Defense Mechanisms against DDoS Attack Based on Entropy in SDN-cloud Using POX Controller. *Telecommunication Systems*, 77(1), 47-62.
- [37] Song, H., Liang, H., Li, H., Dai, Z., & Yun, X. (2019) Vision-based Vehicle Detection and Counting System Using Deep Learning in Highway Scenes. *European Transport Research Review*, 11(1).
- [38] Lawal, M. O. (2021) Tomato Detection Based on Modified YOLOv3 Framework. *Sci Rep*, 11(1), 1447.
- [39] Tulbure, A. A., Tulbure, A. A., & Dulf, E. H. (2022) A Review on Modern Defect Detection Models Using DCNNs - Deep Convolutional Neural Networks. *J Adv Res*, 35, 33-48.
- [40] Chen, Y., Wang, M., Yao, Y., Zeng, C., Zhang, W., Yan, H., Gao, P., Fan, L., & Ye, D. (2023) Research on the Ozone Formation Sensitivity Indicator of Four Urban Agglomerations of China Using Ozone Monitoring Instrument (OMI) Satellite Data and Ground-based Measurements. *Sci Total Environ*, 869, 161679.
- [41] Lite, T. V., Grant, R. A., Nosedal, I., Littlehale, M. L., Guo, M. S., & Laub, M. T. (2020) Uncovering the Basis of Protein-protein Interaction Specificity with a Combinatorially Complete Library. *Elife*, 9.
- [42] Ghoneim, S. S. M., Farrag, T. A., Rashed, A. A., El-Kenawy, E.-S. M., & Ibrahim, A. (2021) Adaptive Dynamic Meta-Heuristics for Feature Selection and Classification in Diagnostic Accuracy of Transformer Faults. *IEEE Access*, 9, 78324-78340.
- [43] Tostmann, A., Bradley, J., Bousema, T., Yiek, W. K., Holwerda, M., Bleeker-Rovers, C., Ten Oever, J., Meijer, C., Rahamat-Langendoen, J., Hopman, J., van der Geest-Blankert, N., & Wertheim, H. (2020) Strong Associations and Moderate Predictive Value of Early Symptoms for SARS-CoV-2 Test Positivity Among Healthcare

Workers, the Netherlands, March 2020. *Euro Surveill*, 25(16).

[44] 김상동, & 이상근 (2015) 지방재정 건전성지표의 개발 및 적용 : 경상북도 사례로. 지방정부연구, 18, 269–292.

[45] Sudheesh, K. K., Asha, G., & Jagathnath Krishna, K. M. (2019) On the Mean Time to Failure of an Age–Replacement Model in Discrete Time. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 50(11), 2569–2585.

[46] Mousavi, M., Pourshaghghi, H. R., Kumar, A., & Corporaal, H. (2023) MTTR Reduction of FPGA Scrubbing: Exploring SEU Sensitivity. *Microprocessors and Microsystems*, 101.

[47] Huang, M., & Liu, Z. (2019) Research on Mechanical Fault Prediction Method Based on Multifeature Fusion of Vibration Sensing Data. *Sensors (Basel)*, 20(1).

[48] Melnikova, E., Kabanov, A., Nikitin, S., Somova, M., Kharitonov, S., Otradnov, P., Kostyunina, O., Karpushkina, T., Martynova, E., Sermiyagin, A., & Zinovieva, N. (2021) Application of Genomic Data for Reliability Improvement of Pig Breeding Value Estimates. *Animals (Basel)*, 11(6).

[49] Biasielli, M., Cassano, L., & Miele, A. (2020) An

Approximation–based Fault Detection Scheme for Image Processing Applications. 2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE).

[50] Nayak, S., Kumar, C., & Tripathi, S. (2017) Enhancing Efficiency of the Test Case Prioritization Technique by Improving the Rate of Fault Detection. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 3307–3323.

[51] Liu, J., Pan, C., Lei, F., Hu, D., & Zuo, H. (2021) Fault Prediction of Bearings Based on LSTM and Statistical Process Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 214.

[52] Krawczyk, S., & Szuba, M. (2023) Utilizing Simulation to Enhance Predictive Maintenance in Power Rails of Switch Gears by Analyzing Temperature Changes Under Varying Current Loads 2023 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE).

[53] Sánchez–Barroso, G., & García Sanz–Calcedo, J. (2019) Application of Predictive Maintenance in Hospital Heating, Ventilation and Air Conditioning Facilities. *Emerging Science Journal*, 3(5), 337–343.