

상태기반정비 요구도 국방규격 반영에 관한 연구

손민정[†] · 김영길

국방기술품질원 개발품질연구센터 지휘정찰개발품질팀

A Study on the Reflection of Condition-Based Maintenance Requirement in the Defense Specification

Minjeong Son[†] · Young-Gil Kim

C4ISR Systems Development Quality Team, Development Quality Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study was to suggest weapon system specifications for requirements of Condition-Based Maintenance(CBM/CBM⁺).

Methods: The military documents and case studies with regard to condition-based maintenance were reviewed. Representative Korea defense specifications of weapon system such as an aircraft, a C4ISR etc. were analyzed and investigated the level of requirement for maintainability was.

Results: Condition-based maintenance was defined in both U.S. instruction and Korean directive. While department of defense(U.S.) provide a guidebook for CBM⁺, detailed instruction was not sufficient for Korean. Ministry of national defense(ROK) define the CBM⁺ by means of IPS element which should be developed along with the system development. The maintainability was barely included in Korean defense specifications, except for BIT(Built-in test) function. As a first step for defining the condition-based maintenance requirement in defense specification, this study suggests a standard form for data needed to acquire according to types of system, fault, failure, and so on.

Conclusion: The empirical researches on CMB/CBM⁺ with domestic weapon systems are not enough, and a logic which leads the maintenance strategy to CMB/CBM⁺ is not solved. Through technical researches and institutional improvements including this study, we hope that condition-based maintenance would be fully established in the Korean defense field.

Key Words: Condition-Based Maintenance(CBM/CBM⁺), Defense Specification Requirement, Development Phase, Maintainability, Total Life Cycle Systems Management(TLCSM)

● Received 6 August 2021, 1st revised 31 August 2021, accepted 9 September 2021

† Corresponding Author(minjeongson@dtaq.re.kr)

© 2021, Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

무기체계는 기계·전자적 요소들이 집약적으로 구성되어 고장 발생 유형이 다양하고 발생 가능성이 높다. 또한 고장에 의한 전력 공백의 결과가 치명적이기 때문에 일반적으로 무기체계는 높은 신뢰도가 요구된다. 무기체계의 정비 계획은 신뢰성 기반 분석을 통해 수립되며, 대부분 고장이 발생한 후 품목을 수리 혹은 교체 하거나 일정 시간 간격의 점검을 통해 정비활동을 수행하고 있다. 그러나 이러한 정비활동은 체계의 사전적 고장 특성 분석이 곤란할 뿐만 아니라 체계 운용 실정과 상이한 부분이 있어 무기체계 운용효율성 향상에 기여하는 바는 미비하다.

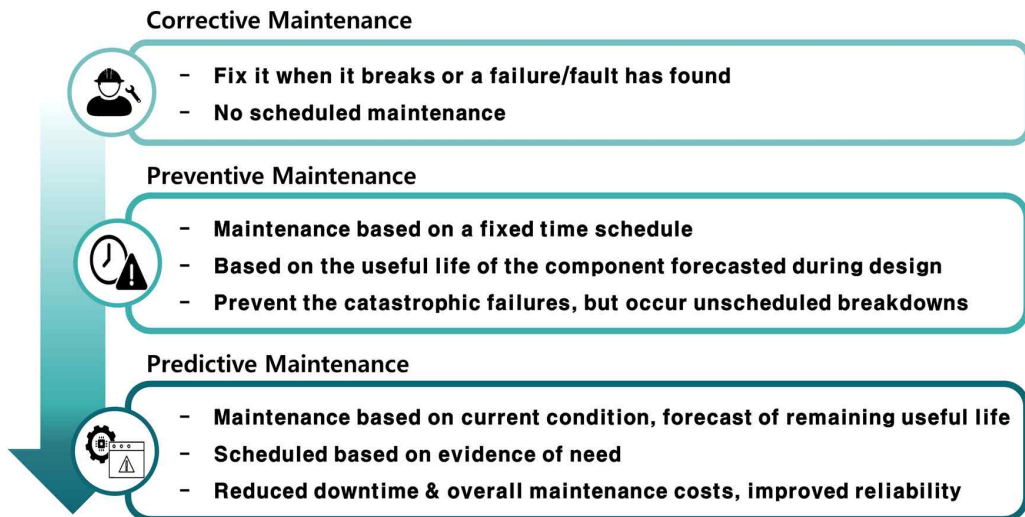


Figure 1. Evolution of maintenance strategy(DoD 2008)

정비전략은 사후정비(corrective maintenance), 예방정비(preventive maintenance)를 거쳐 예측정비(predictive maintenance)로 발전하고 있으며, 각 정비 전략의 특성은 그림 1과 같다. 예측정비는 상태기반정비(CBM/CBM⁺, condition based maintenance)라고도 불리며, CBM⁺는 장비의 상태정보 변화를 고장과 결함의 징후로 식별하는 CBM 개념에 잔존유효수명(RUL, remaining useful life) 예측 기술을 더한 정비전략이다. 이러한 예측정비의 핵심은 고장예지 및 건전성 관리(PHM, prognostics and health management) 기술으로, 최근 인공지능, 기계학습 등 4차 산업혁명 기술을 접목한 잔존유효수명 예측 기술에 대한 관심이 높다(Serradilla et al., 2020; Wang et al., 2020; Xiang et al., 2016).

상태기반정비는 발생하기도 전에 고장을 해소하기 때문에 소모적 정비 비용을 절감할 수 있으며 운용 중단 없이 효율적인 장비 운용이 가능하게 한다(Kumar et al., 2018; Teixeira et al., 2021). 이러한 장점으로 인해 현재 상태기반정비는 국방 분야 정비전략 패러다임 전환의 중심에 있다. 상태기반정비를 무기체계에 적용하기 위해서는 상태 데이터를 지속적으로 습득하는 모니터링 시스템을 부가적으로 구축해야 하므로, 체계 연동성, 총 수명비용, 확장성 등을 고려하면 체계개발단계에서부터 체계와 함께 개발되어야 함이 타당하다(Jung et al., 2017; Seo et al., 2020). Yu et al.(2016)은 정비 전략과 체계설계의 상호관계를 반영하여 설계 최적화 모델을 제시하며 체계개발단계에서 정비성 고려가 필요함을 강조하기도 했다.

본 논문에서는 상태기반정비 업무를 규정한 국방 분야 규정, 지침 및 적용 사례 검토와 국내 무기체계 규격의 정비성 요구수준 분석을 통하여 상태기반정비에 대한 요구도를 국방 규격에 반영할 수 있는 방안에 대해 연구하고자 한다. 연구 프로세스를 정리하면 그림 2와 같다.

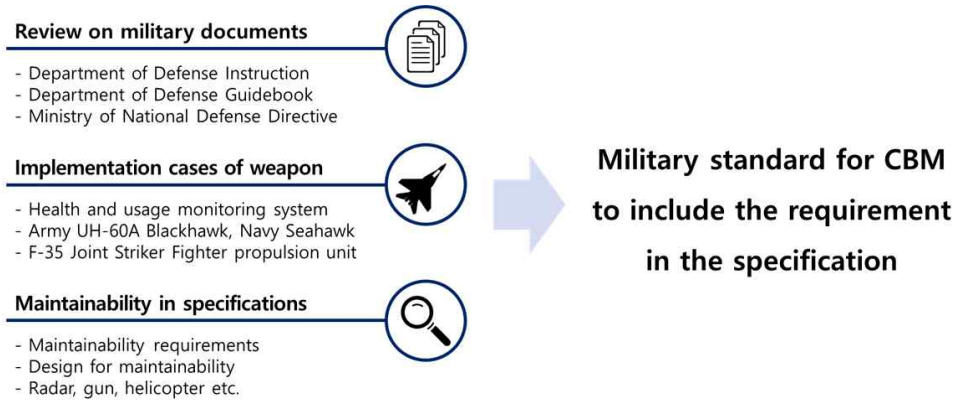


Figure 2. Summary of research progress

2. 이론적 고찰 및 선행연구

상태기반정비를 가스배관, 터빈 등 산업설비에 실제 적용한 사례가 보고되고 있으며(Kim et al., 2017; Seo et al., 2019), 산업 분야에서는 상태기반정비의 적용 범위를 구성품뿐만 아니라 제조 공정까지 확대하고 있다(Seo et al., 2019). 민수산업의 경우, ISO 17359, ISO 13381-1 등 국제표준에서 기계의 상태 감시와 진단, 예측 진단 과정의 개발과 적용 및 정비 업무 결정에 대한 세부적 지침을 제공하고 있다(표 1). 국방 분야에서 상태기반정비 관련 규정 및 지침은 국외(미국)와 국내로 구분하여 검토하고자 한다. 미 국방부는 무기체계 상태기반정비(CBM⁺) 적용을 위한 과정, 절차 등을 규정하고, 상태기반정비의 효과적 정착을 위한 지침서를 제공하고 있다. 반면 국내 국방 분야에서 예측정비를 기반한 상태기반정비(CBM⁺) 업무를 정의하는 규정은 다소 미흡한 실정이다. 본 장에서는 국내외 상태기반정비 관련 규정, 지침과 상태기반정비 적용 현황에 대해 검토하여 상태기반정비 업무에 대해 파악하고자 한다.

Table 1. International standard on CBM/CBM⁺

SPEC.	Title	Contents
ISO 17359	Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines	Overview
ISO 13373-1	Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring	Measurement techniques
ISO 13374-1	Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing communication and presentation	Data Management
ISO 13379-1	Condition monitoring and diagnostics of machines - Data interpretation and diagnostics techniques	Diagnostics and prognostics
ISO 13381-1	Condition monitoring and diagnostics of machines - Prognostics	Diagnostics and prognostics

2.1 국방 분야 상태기반정비(CBM/CBM+) 관련 규정

2.1.1 미 국방부 규정 및 관련 지침

미 국방부는 DoD Instruction 4151.22, “Condition-Based Maintenance Plus for Materiel Maintenance”에서 상태기반정비(CBM⁺)를 신규 및 기존 무기체계에 적용하기 위한 방침, 절차 등을 규정하고 있으며, DoDI 4151.22에 규정된 상태기반정비의 성공적인 적용을 위해 업무 가이드북(DoD 2008)을 제공하고 있다. 상태기반정비 관련한 군사표준, 핸드북 등은 표 2를 참고한다.

무기체계 획득 단계에 상태기반정비를 적용하도록 하는 핵심 방침은 다음과 같다. 먼저 대상 무기체계의 신뢰도 중심 정비(RCM, reliability centered maintenance) 분석 결과, 상태기반정비(CBM⁺)가 가용성 및 비용 측면에서 가장 적합한 정비형태라고 평가되면 합동능력통합개발체계(JCIDS, Joint Capabilities Integration and Development System)¹⁾에 상태기반정비 개념을 포함시켜야 한다(DoD 2020). 이는 개발단계를 포함한 무기체계 수명주기 동안 상태기반정비에 대한 요구도가 무기체계의 성능요건으로서 기능함을 시사하고 있다. DoD 가이드북 또한 상태기반정비(CBM⁺) 요소를 전력획득주기의 초기 단계에서 부터 고려해야 하며, 총수명주기관리(TLCSM)²⁾ 개념 아래 체계 요구도, 체계지원전략, 설계검토 성능인자 등과 같은 체계공학 요소에 상태기반정비를 반영하도록 제안하고 있다. DoD 가이드북은 소요군, 연구개발주관기관 등 이해관계자들의 깊이 있는 이해와 성공적인 상태기반정비의 적용을 위해 위의 개발단계 상태기반정비 적용 방침 외 상태기반정비의 정의, 사업관리요소와 기술적 요소 간 관계, 구현, 관리 및 성과 측정 등에 대한 내용 또한 포함하고 있다.

Table 2. Military documents(standard, handbook, etc.) on CBM/CBM⁺

SPEC.	Title	Contents
DoDI 4151.22	Condition-Based Maintenance Plus(CBM ⁺) for Materiel Maintenance	Overview
DoD Guidebook	Condition Based Maintenance Plus(CBM ⁺) DoD Guidebook	Overview
MIL-STD-3034A	Reliability Centered Maintenance(RCM) Process	CBM for RCM policy
OPNAVINST 4790.16A	Chief of Naval Operations CBM Policy	Policy
ADS 79 HDBK	Condition Based Maintenance System for US Army Aircraft	Overview(aircraft)

2.1.2 한국 국방부 훈령 및 관련 지침

국방부는 국방개혁2.0 계획 아래 4차 산업혁명의 첨단과학기술을 적극 활용한 스마트 국방혁신을 추진하고 있다. 첨단기술을 적용한 효율적인 국방자원 관리는 ‘4차 산업혁명 스마트 국방혁신’의 국방운영 혁신 분야 목표 중 하나로, 주요 무기체계 및 전력지원체계 총수명주기관리 추진을 위해 국방부 「국방전력발전업무훈령」의 체계 개편 및 개정을 시행하면서 국방부 「총수명주기관리업무훈령」을 제정했다. 그 결과 국방 RAM 업무, 부품국산화 등과 같은 총

1) 합동능력통합개발체계(JCIDS, Joint Capabilities Integration and Development System) : 신규 무기체계 소요기획에 적용하는 미 국방부의 공식적인 절차로서, 무기체계의 획득요구조건, 평가기준 등을 정의한다.
 2) 총수명주기관리(TLCSM, Total Life Cycle Systems Management) : 체계 및 장비의 소요, 획득, 운영 및 처분에 이르는 전체 수명주기 과정에서 성능, 비용, 기술, 정보 등을 통합적 관점에서 관리하는 것(MND 2021).

수명주기관리업무는 「국방전력발전업무훈령」에서 「총수명주기관리업무훈령」으로 이관되었으며, 각 훈령에 상태기반정비체계가 반영되었다.

「국방전력발전업무훈령」(MND 2021)은 상태기반정비를 소요기획단계에 반영할 것을 규정하고 있다. 본 훈령 제 15조(작전운용성능 결정)에 따르면 장비 고장 및 사고 예방을 위한 고장진단 및 예측 관련 사항으로서 센서 데이터를 활용한 상태기반정비(CBM⁺)를 고려하여 무기체계의 기술적·부수적 성능을 결정해야하며, 제87조(전력화지원요소 확보지침)에 근거하여 소요군은 상태기반정비(CBM⁺)에 대한 소요를 제기할 수 있고 방위사업청은 선행연구 및 탐색개발 단계에서 소요군과 협의해 체계개발 단계에 해당 소요를 반영할 수 있다. 「총수명주기관리업무훈령」 제38조(체계지원관리) 및 제39조(연구 및 설계반영)에는 상태기반정비(CBM⁺)가 통합체계지원(IPS, Integrated Product Support)요소 개발에 반영되어 수명주기단계별 활동에 포함된다(MND 2021). 상태기반정비(CBM⁺)가 직접적으로 언급된 통합체계지원요소 수명주기단계별 활동은 표 3과 같다.

「국방전력발전업무훈령」와 「총수명주기관리업무훈령」은 수명주기단계에 따라, 소요제기에 근거하여 체계지원전략 수립 시 상태기반정비 적용 여부를 결정하여 탐색개발, 체계개발 및 양산 단계에서 정비성 설계에 반영함으로써 상태기반정비 성능을 개발·관리하도록, 상태기반정비 업무를 정의하고 있다. 즉, 무기체계 획득과정 중 상태기반정비 체계 개발은 작전운용성능(ROC)의 기술적·부수적 성능으로부터 파생되어, 정비성 설계로 반영하여, 대상 체계의 성능요건으로서 구체화되어야 한다.

Table 3. Life cycle step actions of IPS element for CBM/CBM⁺(MND 2021)

IPS element	Phase	Actions
Product support management	Requirement institution & determination	Establish the integrated product support(IPS) requirements - Development of system support strategy including which an appropriate maintenance applied to a system, whether and what to apply PBL (performance based logistics) and CLS(contractor logistics support), whether and what to apply self failure diagnosis and condition based maintenance (CBM ⁺), etc.
Research and design reflection	System development / Production	Design for reliability and maintainability which improves the ability and reduces the total life-cycle cost of weapon system - Maintainability reflected design · Maintainability analysis result reflected design · Failure diagnosis and prognosis reflected design for early failure identification * Expansion of self failure diagnosis ability and of condition based maintenance(CBM ⁺) application · Improvement of maintenance accessibility and ease of use : Design consideration of modularization, human engineering, etc.
Maintenance plan and management	Exploratory development	Establish the development plan for diagnostics and prognostics function(BIT, test instrument, CBM ⁺) to identify cause items of failure, to predict remaining life, and to take follow-up actions
	System development / Production	Manage the development for diagnostics and prognostics function(BIT, test instrument, CBM ⁺) to identify cause items of failure, to predict remaining life, and to take follow-up actions

2.2 국방 분야 상태기반정비 적용 사례

HUMS(Health and Usage Monitoring System)는 상태 정보로부터 정비의 필요가 판단될 때 정비한다는 상태기반정비(CBM) 개념을 내포하는 상태감시 및 안전진단 시스템으로, 주로 운송수단에 적용된다. Kilby et al.(2011)은 미 육군 전술차량(TWV, Tactical Wheeled Vehicle)에 HUMS를 적용하기 위해 데이터수집장치가 운용환경 조건을 만족할 수 있도록 개량했다. 또한 야전에 흔히 발생하는 고장사례를 HUMS에 테스트해, 냉각수 온도와 그 변화를 데이터 기반으로 과열 고장을 유발하는 요인을 구분하는 알고리즘을 개발했다.

미 육군 UH-60A Blackhawk 헬리콥터와 미 해군 Seahawk 헬리콥터의 변속기 유성기어캐리어(planetary carrier)에서 균열이 발견되었고, 이로 인해 육군 UH-60A 헬기의 비행이 상당수 금지되었다. 기어의 균열 성장과 진동 신호 특징 중 하나인 sideband ratio(SBR)가 상관관계를 가지기 때문에, HUMS(Health and Usage Monitoring System)로부터 측정된 변속기 기어 발생 진동을 측정하여 균열의 크기를 간접적으로 추정했다. 또한, 균열 성장 모델(Paris model)을 바탕으로 물리기반 고장예측 방법인 파티클 필터 알고리즘을 적용하여 기어에서 발생할 균열의 크기를 예측하기도 했다(Vachtsevanos et al., 2006).

이 외에 F-35 Joint Striker Fighter 추진기관 내 파편(debris)에 의한 열화 추정 및 진단(Powrie and Novis 2006) 등 무기체계 개발단계에 상태기반정비를 적용한 사례가 또한 보고되기도 하지만, 예측정비를 포함하여 상태기반정비를 무기체계에 적용하기 위한 기술적 방법, 제도적 절차 등에 대한 산·학계의 연구가 활발하다(Adhikari and Buderath, 2016; Choi, 2019; Jo et al., 2021; Kim et al., 2019; Park et al., 2019; Rabeno and Bounds, 2009; Tinga, 2013).

3. 상태기반정비 국방규격 요구도 반영 방안

3.1 정비성 관련 국방규격 반영 현황

3.1.1 국내 주요 무기체계 규격서 필요조건 현황

국방규격은 국내에서 연구개발이 완료된 무기체계의 기술적 필요조건과 검증방안을 기술한 문서이다. 감시정찰, 항공, 기동화력 분야 대표적인 무기체계의 국방규격서 검토를 통해 현재 규격화된 무기체계의 정비성 요구수준을 파악하고자 한다. 국지방공레이더(TPS-880), 열상장비(TAS-815K), 회전익 항공기(KUH-1), 차륜형대공포(K-30W) 등 무기체계 분류별로 정비성 필요조건 여부, 자체진단(BIT, Built-In Test)기능 혹은 자체진단시스템 보유 여부, 통합적 상태감시시스템 구축 여부 등을 검토한 결과는 표 4와 같다(DAPA 2017, DAPA 2020, DAPA 2021, DAPA 2021).

규격서 내 기술요건을 설명하는 방식에 다소 차이가 있으나 대부분의 무기체계, 체계단위에 없다면 부체계단위에, 자체진단 기능 혹은 자체진단 시스템을 보유하고 있다. 단, 여기서 말하는 자체진단 기능은 고장을 예측하는 관점이 아닌 고장 발생 관찰 관점의 진단이다. 반면 정비성과 상태감시시스템이 규격서 필요조건에 규정된 사례는 찾아보기 힘들었고, 항공 무기체계의 경우 일반적으로 정비성과 상태감시시스템이 필요조건으로 포함되어 있음을 확인했다. 항공무기체계의 상태감시시스템(HUMS)에 BIT 기능이 포함되어 있으나, 상태기반정비(CBM⁺)에서 의미하는 잔여수명 예측을 수행하지는 않는다. 그러나 2.2의 상태기반정비 적용 사례와 같이 기존에 구축된 HUMS에서 수집한 진

동, 온도, 압력 등과 같은 운용 데이터 정보를 바탕으로 상태기반정비로 확장 가능성이 높다는 점에서 의미가 크다.

Table 4. Review of Weapon system specifications for maintainability

	Requirement for maintainability	Built-In Test(BIT) system	Condition monitoring system
Local air defense radar (TPS-880)	-	Must have self-diagnosis function	-
Thermal imaging system (TAS-815K)	-	Must be able to independently check the function of component	-
Utility helicopter (KUH-1)	Maintainability - The extent that can be returned to the specified state within the specified period - MTTR(Mean Time To Repair), Maintenance Man- Hour per Flight Hour, etc.	Included in HUMS	HUMS - Condition monitoring for engine, transmission, rotor, rotor brake etc. - BIT included
Wheeled air defense artillery gun (K-30W)	-	Must be a function to execute periodic inspection and a function to display the failure based on the inspection for each component	-

3.1.2 개발단계 정비성 설계 반영 현황

2.1.2에서 언급된 통합체계지원(IPS)은 기존의 종합군수지원(ILS, Integrated Logistics Support)을 확장한 개념으로 무기체계의 성능과 운용능력 유지에 필요한 지원기능의 통합을 의미한다. ‘연구 및 설계 반영’은 통합체계지원 요소 중 하나로, 주장비 운용가용도(가동률) 향상과 수명주기비용 감소를 목적으로 신뢰성, 정비성 설계반영을 포함하고 있다. 다만, 방위사업청 「방위사업관리규정」, 국방부 「국방전력발전업무훈령」 등에 정비성 설계반영은 고장진단 및 정비 접근성을 용이하게 하고 인간공학적 요소를 반영하는 설계라고 규정되어 있으며, 실제 ILS 개발 산출물인 정비성 분석 보고서에도 정비 작업 공간 확보, 고장 유발 인자 제거, 정비시간 단축 등의 설계 변경 사례를 확인할 수 있었다. 다만, 이러한 사례들은 정비 접근성 위주의 정비성 설계 반영 사례들로 고장진단 중심의 설계 변경 및 반영은 3.1.1에서 살펴본 것과 같이 BIT(Built-In Test) 외에는 찾아보기 힘들다.

국방부 「국방전력발전업무훈령」에 정의된 통합체계지원 요소(표 3 참조)에서 말하는 ‘고장진단 및 고장예지를 통한 조기고장 식별을 위한 설계반영’ 및 ‘자체고장진단 능력 확대 및 상태기반정비(CBM+) 적용 확대’를 실현하기 위해서는 체계 운용효율성 관점의 정비성 설계로서, 상태기반정비에 대한 요구도가 개발단계에서부터 반영되는 것이 필요하다. 다음 절에서 이러한 상태기반정비 요구도에 관한 국방규격 표준안을 제시하고자 한다.

3.2 상태기반정비 요구도 국방규격 반영 방안

상태기반정비시스템의 기술적 핵심은 상태 감시(CM, condition monitoring)와 고장진단 및 잔여수명예측에 있다. 상태 모니터링은 체계 내 발생 결함과 상관관계를 가지는 신호(외관, 진동, 음향, 온도, 전류, 전압, 압력, 유량 등)를 감시함으로써 결함 발생을 판단 및 예측할 수 있는 과정이다. 진동 분석 기술은 가장 대표적인 상태모니터링 기술로, 특히 베어링 관련하여 결함의 심각도(seriousness), 발생위치(source), 성장(growth) 등을 추정할 수 있다(Kumar et al., 2018). Seo et al.(2018)은 단일 신호가 아니라 대상 품목의 열화수준을 나타내는 진동, 온도, 토크 등을 모두 고려한 다중변수 상태지수를 선정하여 수명예측모델을 제안하기도 했다. 고장진단과 잔여수명예측에 적용되는 기술은 인공신경망, SVM(Support Vector Machine), 베이지안(Bayesian) 분석, HMM(Hidden Markov Model), 퍼지논리(Fuzzy logic) 등이 있다(Shin and Jun, 2015; Gang et al., 2010). 예측방법에 대한 기술은 어떠한 결함(고장)에 대해 데이터를 어떻게 수집하는가에 따라 결정된다. 그러므로 상태기반정비 시스템에 대한 요구도는 상태 모니터링과 관련한 설계 가이드라인을 기반으로 상태모니터링과 진단 및 예측 알고리즘을 개발함으로써 기술적 필요조건을 구체화하여 국방규격에 반영할 수 있을 것이다.

상태 모니터링은 데이터 실시간 수집 여부, 데이터 수집 주기, 임계값 고정 여부, 수집 데이터 종류를 결정해야한다(표 5). 데이터의 실시간 수집 여부는 소요군과의 협의를 통해, 데이터 수집 주기 및 임계값 고정 여부는 고장·결함과의 관계와 진단 및 예측 알고리즘에 따라 결정되므로 상태기반정비 시스템 개발에 따라 확정될 것이다.

Table 5. Guideline for condition monitoring system design

	Type of design	
	Data acquisition	On-line(Real-time)
Monitoring period	Periodic monitoring	Continuous monitoring
Warning Limit	Static limit	Dynamic limit
Data	Vibration, temperature, current, voltage etc.	

상태 데이터와 고장유형 간의 상관관계는 시스템 개발 간에 구체화되기도 하며, 2.2에 소개한 사례와 같이 체계 개발 이후 기준에 구축한 상태 모니터링 시스템을 이용하여 상태기반정비를 적용하기도 한다. 수집 데이터 종류 또한 체계개발 간 구체화되지만 수집해야하는 데이터에 대한 표준안이 필요하다. 포괄적으로 ‘상태기반정비가 구현될 수 있어야한다’는 요구도 아래 연구개발주관기관의 자율에 맡길 수도 있지만, 상태기반정비 유의미한 구현과 확장성을 고려한다면 상세한 데이터 목록을 기반으로 개발 간 수정하는 것이 더 적절하다고 판단된다. 그러므로 체계 혹은 다빈도 고장유형 및 품목을 기준으로 수집이 필요한 데이터를 분류한 표준안을 바탕으로 대상 체계, 품목 등에 따라 테일러링하면 효율적인 상태 모니터링 및 상태기반정비 시스템 개발을 기대할 수 있다.

4. 결론 및 발전방향

본 연구는 상태기반정비(CBM/CBM+) 관련하여 국내외 국방 관련 규정과 기술 적용 사례 등을 분석함으로써 상태기반정비에 대한 요구도를 국방 규격에 반영할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 상태기반정비 수요가 개발계획에

반영되면 체계가 지니는 고장유형과 체계 상태와의 연관관계를 정의하여 상태모니터링을 포함한 상태기반정비 시스템의 기술적 필요조건을 국방 규격에 포함시킬 수 있다. 그러나 고장유형과 상태신호 간 관련성이 명확히 규명되지 않는 경우가 많으므로, 본 논문에서는 체계의 고장유형과 구성품에 따른 상태기반정비체계에서 수집해야 하는 상태 데이터(condition data)에 대한 표준안을 제안하였다. 수집 데이터 표준안은 개발 간 구체화한 체계 고장유형에 따라 상태기반정비 체계 설계에 기여할 수 있으며, 나아가 체계개발과정에서 식별되지 않은 치명적인 고장이 체계 운용 중에 발생했을 때 상태기반정비를 확장 적용할 수 있는 기반으로 기대할 수 있다. 본 논문에서는 체계개발을 계획할 때 상태기반정비를 고려하기 위한 가이드라인으로 수집 데이터 표준안을 제안했으나, 체계 특성, 고장유형, 품목 등에 따라 필요한 데이터 종류를 세부적으로 분류하지는 않았다. 향후 수집 데이터 표준안이 체계개발단계에서 실효적으로 적용될 수 있도록 다빈도 고장 유형과 품목에 대한 분석, 국내 무기체계의 건전성(health)을 나타낼 수 있는 상태 데이터에 관한 연구를 통해 본 논문에서 제안한 수집 데이터 표준안을 보완해나갈 예정이다. 여전히 국내 무기체계를 대상으로 하는, 상태기반정비 체계운용 측면의 효용성과 비용 측면의 효과성에 관한 실증적 연구가 부족하고, 상태기반정비와 관련하여 정비방법을 결정하는 논리 프로세스가 확립되지 않아 현재 무기체계 개발 사업에 상태기반정비의 타당성 확보에 한계가 있다. 본 연구를 비롯하여 상태기반정비를 무기체계에 적용하기 위한 기술적 및 제도적 연구와 개선을 통해 국내 국방 분야에 상태기반정비가 완전히 정착되기를 기대한다.

REFERENCES

- Adhikari PP and Buderath M. 2016. A framework for aircraft maintenance strategy including CBM. Proceedings of European Conference of the Prognostics and Health Management 3(1):1-10.
- Choi CH. 2019. A case study on application of R&D quality assurance to secure high quality for military supplies. Journal of the Korean Society for Quality Management 47(1):151-162.
- DAPA(Defense Acquisition Program Administration). 2017. Korean defense specification: radar set, local air defense.
- DAPA(Defense Acquisition Program Administration). 2020. Korean defense specification: helicopter, utility.
- DAPA(Defense Acquisition Program Administration). 2021. Korean defense specification: gun, air defense artillery, 30mm, wheeled, self-propelled.
- DAPA(Defense Acquisition Program Administration). 2021. Korean defense specification: thermal imaging system.
- DoD(Department of Defense). 2008. Condition Based Maintenance Plus DoD Guidebook.
- DoD(Department of Defense). 2020. Instruction 4151.22 Condition-Based Maintenance Plus for Materiel Maintenance.
- Gang Niu, Yang BS, and Pecht M. 2010. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. Reliability Engineering and System Safety. 95(7). 786-796.
- Jo G, Cho Y, and Jang J. 2021. An experimental study on CBM+ of trasmission in depot maintenance for missile vehicle system. Journal of the Military Operations Research Society of Korea 47(1):46-62.
- Jung IH, Seo S, and Jang BK. 2017. A case study on the quality control strengthening in development phase of weapon systems. Journal of the Korean Society for Quality Management 45(3):349-364.
- Kilby TS, Rabeno E, and Earvey J. 2011. Enabling condition based maintenance with health and usage monitoring systems. Proceedings of 7th DSTO international conference on Health and Usage Monitoring; 2011 Feb 28 - Mar 2; Melbourne Australia.
- Kim GY, Hwang JK, Im YK, and Ha SW. 2019. Roadmap configuration for technical elements acquisition of military fixed wing aircraft parts PHM and verification of parts selection phase. Journal of the Korean Society for

- Aeronautical & Space Sciences 47(9):665–677.
- Kim SJ, Choe BH, and Kim W. 2017. Prognostics for Industry 4.0 and its application to fitness-for-service assessment of corroded gas pipelines. *Journal of the Korean Society for Quality Management* 45(4):649–664.
- Kumar S, Goyal D, Dang RK, Dharni SS, and Mabla BS. 2018. Condition based maintenance of bearing and gears for fault detection—a review. *Materials today: Proceedings* 5(2):6128–6237.
- MND(Ministry of National Defense). 2021. Directive on defense force development.
- MND(Ministry of National Defense). 2021. Directive on total life cycle management.
- Park YM, Kim BU, Kim SH, and Noh SW. 2019. A study on durability life improvement of blower for military armored vehicle and self-propelled artillery. *Journal of the Korean Society for Quality Management* 47(3):453–465.
- Powrie H and Novis A. 2006. Gas path debris monitoring for F-35 Joint Striker Fighter propulsion system PHM. *Proceedings of aerospace conference IEEE; 2006 Mar 4–11; MT USA.*
- Rabeno E and Bounds M. 2009. Condition based maintenance of military ground vehicles. *Proceedings of aerospace conference IEEE; 2009 Mar 7–14; MT USA.*
- Seo BS, Hwang TW, Jang BC, Song JH, Sohn YH, Lee DG, and Yoon BD. 2019. Introduction of the 4th industrial revolution and success stories through PHM technology. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers* 59(1):32–37.
- Seo BW, Yim SO, Choi YH, and Kim BH. 2020. A methodology research on development stage of submarine vessel through QMST/QCG system. *Journal of the Korean Society for Quality Management* 48(3):521–534.
- Seo MK and Yun WY. 2019. Condition monitoring and diagnosis of a hot strip roughing mill using an autoencoder 47(1):75–86.
- Seo YH, Kim SR, Kim BK, and Ma PS. 2018. Life prediction of bearing by statistical estimation of state index. *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 28(3):339–347.
- Serradilla O, Zugasti E, Cernuda C, Aranburu A, Okariz JR, and Zurutuza U. 2020. Interpreting remaining useful life estimations combining explainable artificial intelligence and domain knowledge in industrial machinery. *Proceedings of IEEE international conference on Fuzzy Systems; 19–42 July 2020; Glasgow UK.*
- Shin JK and Jun HB. 2015. On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering* 2(2):119–227.
- Teixeira HN, Lopes I, and Braga, AC. 2020. Condition-based maintenance implementation: a literature review. *Procedia Manufacturing* 51:228–235.
- Tinga T. 2013. Predictive maintenance of military systems based on physical failure models. *Chemical Engineering Transactions* 33:295–300.
- Vachtsevanos G, Lewis F, Roemer M, Hess A, and Wu B. 2006. *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems*. 1st ed. Hoboken, New Jersey; John Wiley and Sons Inc..
- Wang Y, Zhao Y, and Addepalli S. 2020. Remaining useful life prediction using deep learning approaches: a review. *Procedia Manufacturing* 49:81–88.
- Xiang L, Qian D, and Jian-Qiao S. 2018. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. *Reliability Engineering and System Safety* 172:1–11.
- Yu BY, Honda T, Zubair SM, Sharqawy MH, and Yang MC. 2016. A maintenance-focused approach to complex system design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 30(3):263–276.

저자소개

손민정 KAIST 기계공학과를 졸업하고, 동대학원에서 석사학위를 취득했으며, 현재 국방기술품질원에 연구원으로 재직 중이다.

김영길 광운대학교 전자공학과를 졸업하여 광주과학기술원 전자공학 석사학위를 취득했으며, 현재 국방기술품질원에 연구원으로 재직 중이다. 관심 분야는 레이더, 안테나, 통계 등이다.