

효과적인 건전성 관리를 위한 유도탄 CBM+ 적용 방안 연구

이연호¹⁾ · 김성목²⁾ · 김지원¹⁾ · 정재우¹⁾ · 박정원²⁾ · 김용수^{*,2)}

¹⁾ LIG넥스원(주) PGM IPS연구소

²⁾ 경기대학교 산업시스템공학과

A Study on Method for Applying CBM+ in Missile for Effective Health Management

Youn-Ho Lee¹⁾ · Seong-Mok Kim²⁾ · Ji-Won Kim¹⁾ · Jae-Woo Jung¹⁾ ·
Jung Won Park²⁾ · Yong Soo Kim^{*,2)}

¹⁾ PGM IPS R&D, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

²⁾ Industrial and Systems Engineering, Kyonggi University

(Received 31 August 2023 / Revised 16 January 2024 / Accepted 5 February 2024)

Abstract

The objective of condition-based maintenance plus(CBM+) is to improve the availability and maintenance efficiency of missiles, bolstering national defense capabilities. This study proposes an application of CBM+ to enhance the reliability and the safety of missiles, which are the devices typically stored for long durations. CBM+ does not only contribute to defense capabilities, but it also aims to reduce maintenance costs. This study focuses particularly on the dormant stage of the missile life-cycle, in which various failure modes and environmental impacts on failure mechanisms are investigated. The effectiveness of maintenance strategies and the implementation of CBM+ is evaluated using simulation data.

Key Words : Missile(유도탄), Fault Diagnosis(고장 진단), Health Monitoring(건전성 모니터링), CBM+(상태기반정비), PHM(고장 예지 및 건전성 관리)

1. 서론

유도탄은 정밀한 목표 타격과 함께 군사적 우위 확보에 기여하여 현대전에서 매우 중요한 무기이다. 이

러한 유도탄은 위험한 작전 환경에서 신속하고 안정적인 작동이 요구되지만 기계·전자적 요소들이 집약적으로 구성되어 있어 다양한 유형의 고장 위험이 존재한다. 일반적인 국내 개발 유도탄의 경우 수명주기 동안 일정 시간 간격으로 점검하는 시간기반정비(TBM, Time-Based Maintenance)를 수행하고 있다. TBM은 유도탄의 고장 분포가 요구되며, 이는 종종 비현실적인

* Corresponding author, E-mail: kimys@kgu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

가정을 필요로 한다^[1]. 고장 분포가 부정확한 경우 적절한 상태에서의 잦은 검사 또는 고장이 발생한 후 검사가 수행될 수 있다^[2]. 이에 따라 과도한 인건비, 부품비, 재고 비용 등이 발생하고 있다.

기존의 TBM 방법은 직관적이라는 장점을 가지고 있지만, 유도탄의 실제 상태를 반영하지 못하므로 고장을 방지하기에 충분하지 않다^[3]. 유도탄은 기존보다 발전된 유지보수 방안의 도입이 필요하며, 유도탄의 성능 유지 및 수명 연장은 국가의 국방 능력을 확보하는 데 있어 필수적인 요소이자 군사 작전의 성공 여부를 결정짓는데 중요한 역할을 수행한다. 장비의 상태정보 변화를 고장과 결함의 징후로 식별하는 상태기반정비(CBM, Condition-Based Maintenance) 개념에 고장 예지 및 건전성 관리(PHM, Prognostics and Health Management) 기술을 더한 정비전략이 CBM+이다^[4,5]. 최근 4차 산업혁명 시대의 무기체계 유지보수 전략은 이러한 CBM+를 적용함으로써 구체화 및 진보화되고 있다. 전반적으로 CBM+에 대한 연구 및 적용은 헬기, 항공기, 차량 등 지속적으로 운용되는 시스템에 대하여 집중되어 있으며, 유도탄, 로켓 등과 같은 일회성 장비(one-shot device)에 대해서는 미진한 상태이다^[6]. 따라서, 본 연구에서 유도탄에 적용 가능한 CBM+ 방안을 연구하고자 하며, CBM+ 적용을 통한 유도탄의 고장 예지 및 건전성 관리를 바탕으로 가용도 및 신뢰성과 안전성을 확보하고, 효율적인 유지보수 관리와 유지보수와 관련된 비용을 절감하여 국방력 향상에 기여하고자 한다.

그러나, 유도탄은 일회성 장비로 일반적으로 발사 시 전원이 인가되어 전자 시스템이 동작하게 된다. 문헌 또는 무기체계마다 유ힴ(dormant) 상태의 정의가 상이하나, 본 연구에서는 발사 시 전원이 인가된 상태를 제외한 모든 비운용(non-operating) 형태(저장, 취급, 수송 등)를 유ힴ 상태로 정의한다. 유도탄의 주요 특징은 장기 보관 및 일회성이며, 수명 주기의 대부분이 유ힴ 상태이다. 따라서, 유도탄이 성공적으로 특정 전투 임무를 수행하기 위해서는 유ힴ 상태의 건전성 평가가 이루어져야 하며 이에 따라 본 연구에서는 유도탄의 모든 운용 프로파일에 대하여 CBM+를 적용하는 것이 아닌 유ힴ 유도탄에 한정하여 CBM+를 적용하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서 유도탄의 고장 메커니즘과 고장 모드를 확인하며, 유도탄의 건전성 관리 관련 문헌을 조사한다. 3절에서는 유ힴ 유

도탄의 CBM+ 방안에 대해 제안한다. 4절에서는 시뮬레이션을 통해 생성된 데이터를 바탕으로 유ힴ 유도탄의 건전성을 평가하고 마지막 5절에서는 결론을 제시한다.

2. 관련 문헌 연구

국내 개발 유도탄의 경우 TBM 형태의 주기검사와 습도지시계 확인 등의 육안 검사에 의존한 유도탄 건전성 관리를 수행하고 있다. 특히 주기검사의 경우 수개월에서 수년 간격으로 진행됨에 따라 유ힴ 상태의 유도탄이 해당 시간 간격 사이에 고장이 발생할 경우 다음번 주기검사 또는 사격절차 진행 전까지 확인할 수 있는 방법이 존재하지 않는다. 그러나, Marotta et al.^[7]은 유ힴ 상태에서 유도탄이 외부 환경에 장기간 노출됨에 따라 급격한 신뢰도 저하를 경험하며, 다양한 환경에 노출됨에 따라 다양한 고장 모드가 발생할 수 있으므로 유ힴ 상태에서의 건전성 평가를 강조하였다. 이에 따라, 본 절에서는 환경적 요소에 의한 유도탄의 고장 메커니즘과 고장 모드를 확인하였으며, 유ힴ 유도탄에 CBM+를 적용하기 위해 유도탄의 건전성 관리 관련 문헌을 조사하였다.

유도탄의 고장은 대부분 최종 조립 부품이나 유도 시스템과 같은 전자 부품에 집중되어 있음을 확인하였으며, 이전 연구에서 수행된 유도탄의 고장 메커니즘 및 고장 모드는 Table 1에 정리하였다^[8,9,10]. 온도, 습도에 의한 영향으로 발생하는 고장 모드가 대부분을 차지하였으며 진동 또는 충격에 의한 고장 모드도 일부 확인할 수 있었다.

유도탄의 건전성 관리 관련 문헌은 Table 2에 정리하였다. 이전 연구에서는 유도탄의 수명을 예측하고 건전성을 관리하기 위해 유도탄 운영 및 환경의 다양한 측면을 고려하였으며, 이를 위해 GM(Grey Model), SVM(Support Vector Machine), AHP(Analytic Hierarchy Process), GM-BPNN 모델, 마코프 체인 몬테 카를로 방법 등을 활용하였다. 대부분 데이터 기반 모델을 사용하였으며, 그중 시계열 모델 중 하나인 GM(1,1)의 활용 빈도가 높았다. GM(1,1) 모델은 Deng^[11]이 개발한 회색 시스템 이론(grey system theory)에 기반하며, 시계열 데이터를 분석하여 추세 정보를 추정하고 이를 바탕으로 미래값을 예측하는 시계열 예측 모델이다.

Table 1. Analysis of degradation factors in missile systems

Component	Failure cause	Failure Mechanism and Mode
Body structure	Shock, Temperature, Humidity	The structural integrity of the missile can be damaged by tensile forces applied to the structure during handling, transport, and hoisting.
		The aging of the missile's O-ring seal components is accelerated by long-term exposure to high-temperature and high-humidity environments, resulting in reduced air-tightness, corrosion, and rust on internal and surface paint layers, connection screws, etc.
Warhead	Temperature, Humidity	High-temperature and high-humidity environments induce the chemical decomposition of ammunition, leading to ignition, damage, and defects in the missile.
Engine	Temperature, Humidity, Vibration	The structural integrity, sealing, flight range of the explosive, and guidance of the missile are affected by temperature, humidity, and vibration.
Guidance System	Temperature, Vibration, Shock	Optical fiber materials degrade due to external shocks and pressure, and adhesive drift effects occur due to temperature and vibration, thereby affecting the guidance precision.
Servo Mechanism	Temperature, Friction, Vibration	The accuracy of the machine decreases due to the missile's storage, power unit performance testing, temperature, friction, and resonance.
Electronic instrument	Temperature, Humidity, Vibration	Temperature, humidity, and vibration cause open circuits and short circuits in the computer and control circuits mounted on the missile, resulting in digital circuit failure.
		The resistance increases due to long-term thermal degradation of battery chemical materials.

Table 2. Summary of health management studies for missiles

Title	Author	Year	Summary
Applications of Service Life Prediction for US Army Ammunition	J. Cook ^[12]	2010	Used ARDEC's integrated approach to determine and forecast the health index of the ammunition system, then employed CBM and PHM technologies for enhancement.
A Concept for PHM System for Storage and Life Extension of Tactical Missile	L. Jun et al. ^[8]	2014	Analyzed degradation factors of the tactical missile components and predicted the lifespan using the GM(1,1).
A Method Study of Missile PHM Based on Analytic Hierarchy Process	Y. Lin et al. ^[13]	2015	Set the failure model weight of the missile's life through AHP (analytic hierarchy process) and predicted it using Metabolism GM(1,1).
Study of Key Technology and Architecture of Health Management for Missile Equipment	R. Zhao et al. ^[6]	2017	Performed comprehensive analysis of the missile's environmental, inspection, and recorded data to evaluate its health. Used SVM for failure prediction and a combined GM-BPNN model for lifespan prediction.
Missile Health Status Assessment Method Based on Hierarchical Model	Y. Liu ^[14]	2021	Established health indicators based on the impact of the missile's components on its overall function, and assessed the missile's health through these indicators.
Life Prediction Method of Missile Based on Environmental Load Spectrum of Shipborne Tilt Launching	X. Shan ^[15]	2021	Conducted a simulation using the collected temperature and humidity load spectrum to derive the missile's reliability function via the markov chain monte carlo method, and predicted its lifespan.

3. 유휴 유도탄의 CBM+ 방안

본 절에서는 유휴 유도탄의 환경 및 과거 성적서 데이터를 통한 CBM+ 방안을 제안한다. 제안하는 유휴 유도탄의 CBM+ 절차는 Fig. 1과 같다. 과거 성적서 데이터는 공장 검사 및 종합 점검 데이터를 포함한 유도탄의 모든 검사 이력을 의미하며, 과거 성적서 데이터를 기반으로 유도탄의 수명 모델을 수립한다. 환경 데이터는 센서를 통해 수집된 유도탄의 환경 정보를 의미한다. 센서는 유도탄 발사관에 장착되어 발사관 내부 환경을 측정하며, 물리 모델을 이용하여 수집된 환경 데이터로부터 가속 계수를 추정한다. 이를 통해 유도탄에 가해진 환경 스트레스를 반영한 잔여 유효 수명(remaining useful life, RUL)을 예측한다. 건전성 지표(HI, health index)를 수립하고, 예측된 RUL과 수립된 HI에 기반하여 현재 시점의 유도탄 건전성을 “Good”, “Normal”, “Attention”, “Failure”로 구분하여 평가한다.

3.1 유도탄 데이터 수집

일반적으로, 유도탄의 경우 일부 핵심 요소에 대해 데이터 수집이 어렵거나 불가능하여 데이터 수집에 한계가 존재한다. 데이터 수집이 가능한 데이터로는 센서 기반의 환경 데이터와 연결 저항 검사, 자체 점검 등을 포함하는 과거 성적서 데이터 등이 존재한다.

환경 데이터는 실제 환경에서 발생하는 데이터로, 유도탄이 외부 요인에 의해 직간접적으로 받는 영향은 파악할 수 있으나, 유도탄 자체의 데이터가 아니므로 유도탄 상태를 나타내기에는 제한적이다. 과거 성적서 데이터는 유도탄의 특성 및 고장 패턴 등을 통해 유도탄의 상태를 나타낼 수 있지만, 외부 요인에 의해 과대 평가되거나 과소 평가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 환경 및 과거 성적서 데이터를 모두 활용하여 외부 요인에 의한 영향이 반영된 유도탄의 상태와 수명을 예측하고, 이를 통해 보다 정확하게 유도탄의 건전성을 평가하고자 한다.

환경 데이터에는 온도, 습도, 압력, 진동 등 다양한 센서 데이터가 포함될 수 있다. 그러나, 2절에서 정리한 유도탄 고장 메커니즘 및 RADC-TR-88-110^[16]에서 Fig. 2와 같이 식별된 유휴 상태의 주요 환경 요소를 고려하여 온도 및 습도 센서 데이터를 본 연구에서의 환경 데이터로 정의한다.

과거 성적서 데이터는 대상 유도탄의 전체 검사 이력을 포함한다. 만약 대상 유도탄의 과거 성적서 데이터가 없거나 불분명한 경우, 유사 유도탄에 대한 과거 성적서 데이터를 활용한다. 이와 같은 유도탄 데이터 수집을 통해 CBM+ 접근 방식을 적용할 수 있으며, 데이터 분석 및 수명 모델 개발을 통해 상태를 모니터링하고 예측 유지보수 및 결함 진단을 수행한다.

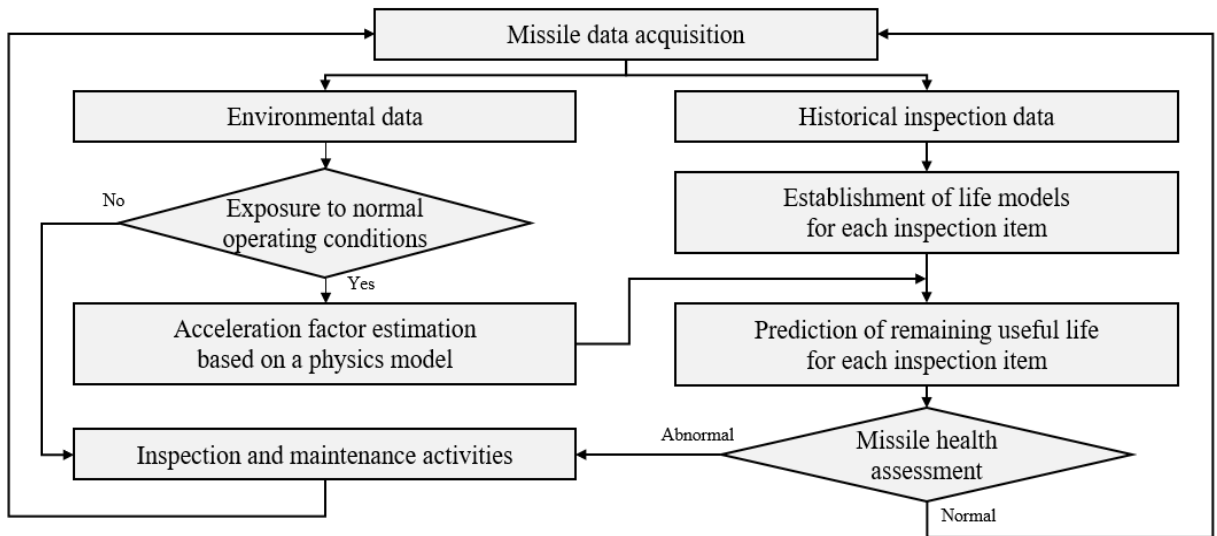


Fig. 1. CBM+ process for missile

Equipment Life Cycle Stage	Temperature	Humidity	Pressure	Solar radiation	Rain	Solid precipitation	Fog	Wind	Salt	Fungus	Atmospheric pollutants	Sand and dust	Vibration	Shock	Acceleration	Acoustics	Electromagnetic radiation	Nuclear radiation
Dormant Storage	A	A	C	O	O	O	O	O	C	B	C	C	C	B	O	O	O	O
A : Major Importance B : Important C : Minor O : Absent																		

Fig. 2. Association of factor importance with military equipment at the dormant stage

3.2 환경 데이터 기반 가속 계수 추정

제품 또는 시스템은 가혹한 환경에 노출될수록 열화가 가속화된다는 점을 고려하여, 유휴 유도탄의 환경 데이터를 통해 가속 계수를 추정하고자 한다. 이를 위해, 유도탄의 정상 환경 조건에 대한 정의와 물리 모델 중 유도탄의 주요 환경 요소에 적합한 가속 모델을 제시하고 이를 통해 가속 계수를 추정한다. Lee et al.^[17]은 이전 연구에서 유도탄의 환경 데이터를 기반으로 가속 계수를 산출하였고, 이를 통해 유도탄의 상태를 바로 진단하였다. 본 연구에서는 과거 성적서 데이터에 기반한 RUL 예측에 활용하고자 환경 데이터를 통해 가속 계수를 산출하며, 가속 계수를 추정하는 과정은 유사하나 적용 방법에서 이전 연구와의 차이가 있다.

3.1절에서 식별한 유휴 유도탄의 주요 환경 요소는 온도, 습도이므로 유휴 유도탄의 정상 환경 조건 또한 온도, 습도에 대하여 정의한다. 유휴 유도탄은 발사 시 전원이 인가된 상태를 제외한 모든 비운용 형태의 유도탄으로 정의하였으며, 모든 비운용 형태 유도탄의 환경에 의한 열화 기준은 동일해야 한다. 따라서 유도탄이 가장 안정적으로 보관 및 저장되는 환경으로 가정하여 항온, 항습이 가능한 유도탄 저장 시설 환경을 정상 환경 조건으로 정의한다. 만일, 대상 유도탄 저장시설에 대한 정보가 없거나 불명확할 경우에는 지상 탄약고 표준 저장조건^[18] 또는 각종 규격에서 권고하는 표준 대기 조건을 적용할 수 있다. 권고하는 저장 및 대기 조건은 Table 3과 같다.

일반적으로 온도 및 습도 노출에 가장 많이 사용되는 가속 모델은 Hallberg-Peck 모델^[19]이며, 기본식은 식 (1)과 같다. AF 는 가속 계수, RH 는 상대 습도, n 은 상수, E_a 는 활성화 에너지, k 는 볼츠만 상수 (8.617×10^{-5} eV/K), T 는 절대 온도를 의미한다.

Table 3. Normal environmental condition

Index	Temperature	Relative humidity (%)
Storage magazines standard (domestic)	298.15 K (25 °C)	60
ISO 554	296.15 K (23 °C)	50
MIL-STD-810	298.15 ± 10 K (25 ± 10 °C)	50 ± 30
IEC 60068-1	298.15 ± 10 K (25 ± 10 °C)	50 ± 25

$$AF = \left(\frac{RH_{field}}{RH_{test}} \right)^n \exp \left(\frac{E_a}{k} \left[\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right] \right) \quad (1)$$

식 (1)을 통해 가속 계수를 산출하기 위해서는 유도탄 특성을 고려한 활성화 에너지(E_a)와 습도 지수(n)를 설정해야 한다. 이를 위해 유도탄의 가속수명시험을 진행하고 그 결과를 바탕으로 파라미터를 설정하는 것이 가장 효과적이지만, 비용과 시간 등의 실질적인 제약사항으로 인해 유도탄 수준에서의 시험수행이 어려운 경우가 존재한다. 이러한 경우 관련 문헌 연구를 통한 파라미터 설정 또는 유도탄의 구성 부품별 활성화 에너지를 활용하여 조립체 및 유도탄 레벨의 활성화 에너지를 추정할 수 있다. 구성 부품별 활성화 에너지는 제조사에서 신뢰성 보고서를 배포하는 경우, 해당 신뢰성 보고서에 제시된 활성화 에너지를 활용할 수 있다.

이와 같은 방법으로 도출된 활성화 에너지와 습도 지수를 바탕으로 환경 데이터를 통해 가속 계수 산출이 가능하다. 가속 계수는 마지막 검사 이후 현재까지

의 환경적 요인으로 인해 가속된 시간을 계산하고자 사용되므로 마지막 검사 시점에서부터 현재까지 수집된 환경 데이터에 기반하여 산출한다. 단, 비운용 장비에 대한 저온 및 건조 환경에서의 전자 부품 열화 메커니즘은 알려진 바가 없기 때문에, 가속 계수는 정상 환경 조건 대비 고온 및 고습 환경에 대해서만 계산하도록 한다. 즉, 배치 환경이 정상 환경 조건보다 저온 및 건조인 경우에는 정상 환경 조건 데이터로 계산한다. 환경 데이터는 유도탄이 배치된 장소의 주변 온도와 습도를 센서로 수집하며, 이때 수집 간격은 배치 장소의 환경 특성을 고려하여 적절한 시간 주기로 설정한다. Fig. 3은 동일 시간 간격으로 마지막 검사 이후 현재까지 수집된 환경 데이터를 통해 가속 계수를 산출하고, 산출된 가속 계수를 활용하여 환경적 요인으로 인해 가속된 시간(accelerated time)을 계산하는 과정을 나타낸다. t 는 환경 데이터 수집 시점, I 는 수집 시간 간격을 의미한다.

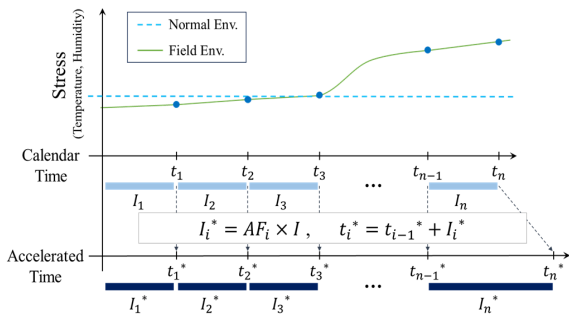


Fig. 3. Effect of environmental data on missile aging

환경적 영향을 고려했을 때 저장시설에 보관된 지 1년이 된 유도탄보다 실제 군(軍)에 배치되어 취급된 지 1년이 된 유도탄의 열화가 더욱 진행되었을 수 있다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 정상 환경 조건에서의 유도탄보다 열화 된 정도를 정량적으로 나타냄으로써 각 유도탄의 환경 데이터에 따른 가속된 시간을 개별적으로 고려할 수 있다.

3.3 과거 성적서 데이터 기반 수명 모델 수립

전체 시스템의 성능이나 신뢰성이 가장 약한 부분 또는 가장 취약한 구성 요소에 의해 결정되는 최약 연결의 법칙에 기반하여 과거 성적서 데이터의 검사 항목별로 수명 모델을 수립하고, 수립된 수명 모델에 기반한 RUL 예측을 통해 가장 열화된 구성 요소를

유도탄의 건전성으로서 평가하고자 한다. 수명 모델의 성능 향상을 위해 과거 성적서 데이터가 수집된 유도탄의 환경 조건을 특정 조건으로 통일시킬 필요가 있다. 이를 위해 저장시설에서 보관 및 저장된 유도탄의 과거 성적서 데이터 기반 검사 항목별 수명 모델을 수립한다. 다른 조건, 즉 저장 시설보다 가혹한 야전 환경 조건에서의 RUL은 환경 데이터에 기반하여 추정된 가속 계수를 활용하여 예측한다.

검사 항목별 RUL을 예측하는 방법에는 크게 물리 모델 기반 방법론, 데이터 기반 방법론으로 구분할 수 있다. 과거의 유도탄 고장 데이터 분석 결과에 따르면, 유도탄 구성 요소의 열화 추세는 복잡하게 변화하며 구성 요소에 따라 차이는 있으나 추세와 주기성이 관찰된다¹⁰⁾. 이를 바탕으로, 본 연구에서는 검사 항목 특성별로 시계열 모델(time series model), 곡선 적합(curve fitting), 비모수 회귀 모델(nonparametric regression model) 등의 데이터 기반 방법론을 통해 검사 항목별 수명 모델을 수립한다.

수립된 수명 모델에 기반하여 검사 항목별 RUL을 예측하기 위해서는 검사 항목별 임계값 정보를 활용하며, 시간에 따라 변화하는 데이터를 수명 모델에 기반하여 추정한다. 현재 시점의 성적서 데이터는 유도탄이 유휴 상태이므로 얻을 수 없다. 따라서 과거 성적서 데이터에 기반한 수명 모델을 통해 현재 시점의 검사 항목별 측정값을 추정해야 한다. 수명 모델은 저장시설에서 보관 및 저장된 유도탄의 과거 성적서 데이터에 기반하여 수립되었으므로 환경에 대한 열화를 반영하기 위해 환경 데이터를 통해 산출된 가속 계수를 적용하여 가속된 시점에서의 측정값을 추정한다.

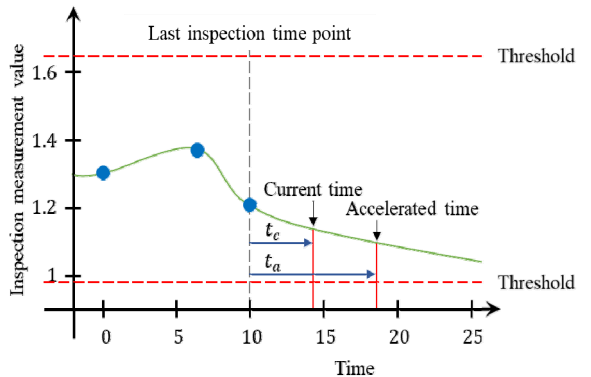


Fig. 4. Graph of measurements at accelerated time

Fig. 4는 과거 성적서 데이터 중 임의의 검사 항목을 통해 가속된 시점의 측정값을 구하는 예시 그래프이다. 여기서 t_c 는 마지막 검사 이후 현재까지의 시간, t_a 는 t_c 와 가속 계수를 곱하여 계산되며 가속된 시간을 의미한다.

수립된 수명 모델을 통해 예상 고장 시간의 예측이 가능하며, 이를 통해 환경에 의한 영향이 고려된 RUL 계산이 가능하다. 예상 고장 시간은 수립된 수명 모델이 임계값에 도달하는데 소요되는 시간이다. RUL은 식 (2)와 같이 계산된다. 여기서 t_f 는 예상 고장 시간, t_l 은 마지막 검사 시간을 의미한다.

$$RUL = t_f - (t_l + t_a) \quad (2)$$

3.4 건전성 지표 수립

3.3절에서 언급한 것과 같이 전체 시스템의 성능이나 신뢰성은 가장 약한 부분 또는 가장 취약한 구성 요소에 의해 결정되며, 검사 항목별 RUL 중 최소 RUL 값을 갖는 검사 항목을 가장 열화된 구성 요소로 판단하고 건전성을 평가하고자 한다. 건전성은 상대적인 척도이므로 정상 기준 설정이 필요하다. 여기서의 정상 기준은 유지보수 목표 시점으로 설정하며, 최소 RUL을 통한 100점 척도 점수 변환 식은 식 (3)과 같다. RUL_{min}은 최소 RUL이며, α 는 유지보수 목표 시점을 의미한다. 점수는 최소 RUL이 유지보수 목표 시점과 같은 경우 50점, 긴 경우 50점 초과, 지난 경우 50점 미만의 점수를 나타낸다.

$$g(RUL_{min}) = 2^{-\frac{\alpha}{RUL_{min}}} \times 100 \quad (3)$$

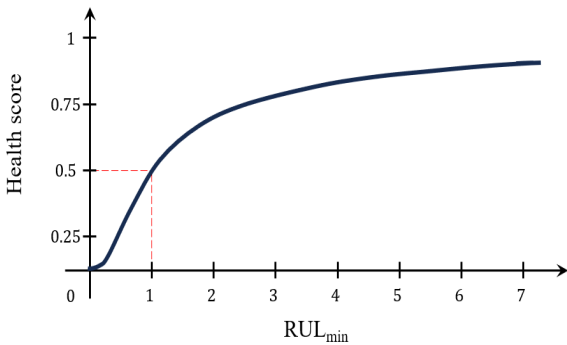


Fig. 5. Graph of health score

Fig. 5는 유지보수 목표 시점이 1년인 경우의 건전성 점수에 대한 예시 그래프이다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 제안된 식 (3)은 유도탄의 상태가 양호한 경우 점수의 변화가 적으나, 그렇지 못한 경우에는 점수의 변화가 커 위험도가 높은 영역일수록 더 많은 주의가 기울일 수 있다. 이러한 점수에 따른 유도탄의 건전성을 평가하기 위해서는 건전성 지표를 수립해야 한다. 본 연구에서의 건전성 지표 및 조치 사항은 Table 4와 같이 제안한다.

Table 4. Health index for dormant missiles

Index	Range	Actions
Good	$100 \geq \text{Score} \geq 70$	The missile is maintained in an optimal operational condition, thereby necessitating no further action.
Normal	$70 > \text{Score} \geq 50$	The missile, being in a standard operational state, necessitates scheduled maintenance activities.
Attention	$50 > \text{Score} \geq 25$	The missile has exhibited a degree of deterioration, which warrants its inclusion as a target in future inspections.
Bad	$25 > \text{Score} \geq 0$	The missile, found in a severely deteriorated state, requires immediate inspection.

“Good” 및 “Normal”의 경우 정상 범위로 판단하고, 기준 역할을 이어서 수행하나, “Attention” 및 “Bad”의 경우 정상 범위 밖으로 판단하고 사용자에게 경고 알림을 주며 검사를 수행한다. 검사 결과가 정상인 경우, 기존 데이터에 반영하고 역할을 이어서 수행하며, 고장인 경우에는 유지보수를 수행한다.

4. 유도탄 건전성 평가 시뮬레이션

실제 군에 배치된 △△유도탄을 대상으로 시뮬레이션을 통해 유도탄 1발에 대한 환경 및 과거 성적서 데이터를 생성하였다. 환경 데이터는 마지막 검사 시

점부터 1.2년 동안 수집되었으며, 해당 유도탄이 위치한 장소의 온도, 습도를 1시간 단위로 수집한 데이터이다. 과거 성적서 데이터는 10년 동안 수집되었으나 검사는 0, 5, 7, 10년 차에 한 번씩 수행되었으며, 항목 특성을 가진 133개의 검사 항목에 대한 검사를 수행하였다. 보안의 이유로 검사 항목에 대한 명칭은 x_1, x_2, \dots, x_{133} 으로 명명하였으며, 검사 항목별 측정값 및 기준값에 대해서는 명시하지 않았다.

수집된 환경 데이터를 기반으로 Hallberg-Peck 모델에서 제안하는 파라미터($n = -3, E_a = 0.9$)를 활용하여 가속계수를 산출하였으며, 1.2년 동안의 가속 계수는 2.1로 계산되었다. 10년 차까지는 과거 성적서 데이터가 존재하며, 이는 환경에 대한 열화가 이미 반영되어 있다. 그러나 10년 차 이후인 1.2년 동안의 성적서 데이터는 존재하지 않으며, 정상 환경 조건에 기반한 수명 모델을 사용하므로 환경 데이터를 통해 산출된 가속 계수를 적용하여 가속된 시점에서의 측정값을 추정해야 한다. 따라서, 유도탄의 상태는 11.2년 차가 아닌 12.52(=10+1.2×2.1)년 차로 추정하였다.

유도탄의 과거 성적서 데이터를 통해 검사 항목 특성별 수명 모델을 수립하였으며, RUL은 12.52년 차에 해당하는 값으로 계산하였다. 시뮬레이션 된 해당 데이터에서 검사 항목 x_{10} 이 12.52년 차에서 RUL이 0.19로 모든 검사 항목 중 최솟값을 나타냈다. 이는 Fig. 6에 나타나며, x_{10} 이 가장 열화된 구성 요소임을 의미한다.

유도탄의 건전성을 평가하기 위해서는 유지보수 목표 시점이 필요하며, 본 절에서는 유지보수 목표 시점을 0.5 년으로 설정하였다. x_{10} 의 열화 정도를 점수로 변환하는 과정은 식 (4)와 같다.

$$h(RUL_{min}) = 2^{-\frac{0.5}{0.19}} \times 100 = 16.137 \quad (4)$$

가속된 시간 기준에서 해당 검사 항목의 건전성 평가 결과, 16.137점으로 HI 대입 시 ‘Bad’에 해당하여 유도탄이 심각한 열화 상태임을 알 수 있다. 따라서, 해당 유도탄은 반드시 정비가 수행되어야 하는 상태이다.

5. 결론

국내 개발 유도탄의 경우 TBM만을 수행하고 있으나, 이 방법은 유도탄의 실제 상태는 반영하지 못하여 고장을 방지하기에 충분하지 않으므로 유도탄은 기존보다 발전된 유지보수 방안의 도입이 필요하다. 특히, 유도탄의 주요 특징은 장기 보관 및 일회성이며, 수명 주기의 대부분이 유휴 상태이므로 유도탄이 성공적으로 임무를 수행하기 위해서는 유휴 유도탄에 CBM+ 적용이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유휴 유도탄에 적용 가능한 CBM+ 방안을 제안하였다.

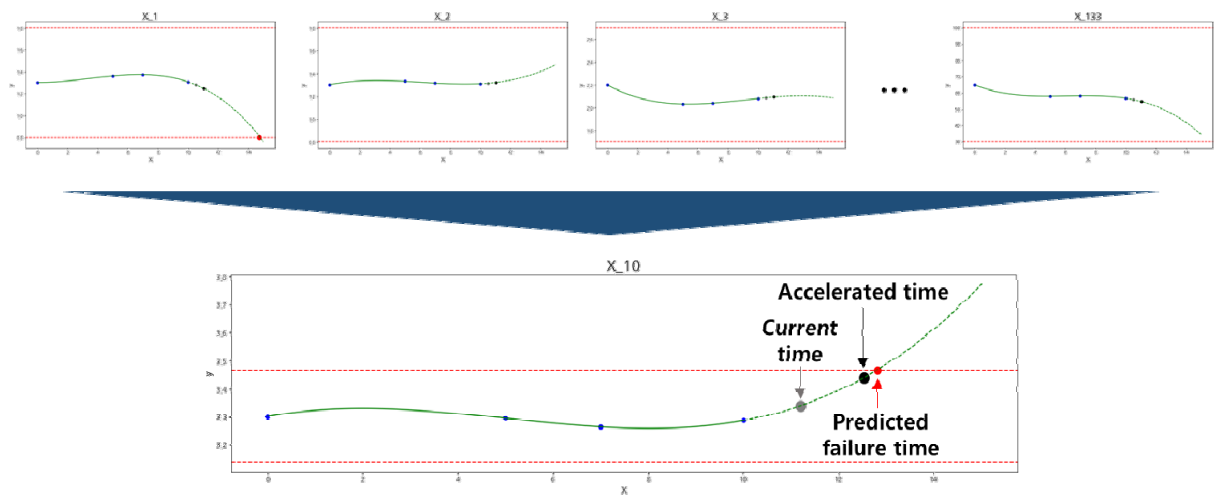


Fig. 6. Infographic of selecting the most degraded component

유휴 유도탄에 CBM+를 적용하기 위해 먼저 환경적 요소에 의한 유도탄의 고장 메커니즘과 고장 모드를 확인하였으며, 유도탄의 건전성 관리 관련 문헌을 조사하였다. 이를 바탕으로 유휴 상태의 주요 환경 요소를 선정하였고, 유도탄의 정상 환경 조건에 대한 정의와 물리 모델 중 유도탄의 주요 환경 요소에 적합한 가속 모델을 제시하였다. 정상 환경 조건 및 제시된 가속 모델을 통해 환경 데이터를 기반으로 가속 계수를 산출하였으며, 이는 수명 모델을 통한 RUL 예측에 활용하였다. 수명 모델은 과거 성적서 데이터의 검사 항목별 특성에 따라 수립하였으며, 수립된 모델과 산출된 가속 계수를 통해 검사 항목별 RUL을 계산하였다. 계산된 RUL은 100점 척도의 점수로 변환하며, HI에 기반하여 상태를 진단하고 상태별 조치사항에 따라 유지보수를 수행하였다.

4절에서는 이러한 과정을 실제 군에 배치된 △△유도탄 1발에 대하여 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 유휴 유도탄에는 다양한 비운용 형태가 존재하나, 모두 전원이 미인가된 상태이며 각 형태마다 노출되는 환경의 차이만 존재한다. 환경의 차이는 유도탄의 주요 환경 요소에 적합한 Hallberg-Peck 모델을 통해 고려할 수 있다. 따라서 제안된 CBM+ 방안은 4절에서 확인한 △△유도탄 이외의 저장, 취급, 수송 등 다양한 비운용 형태의 유도탄에도 적용할 수 있다.

본 연구에서 제안한 유휴 유도탄의 CBM+ 방안은 수명 대부분을 전원 미인가 상태로 존재하는 유휴 유도탄 중 점검 대상을 식별하여 검사하고, 검사 결과를 상태진단 예측에 다시 활용하여 수명주기간 정확도를 지속 향상시킬 수 있다. 이러한 방안은 유지 및 운영에 관한 의사 결정에 중요한 정보를 제공할 수 있으며, 이를 통해 정비 요원 또는 운용 요원이 배치 현장에서 즉각적으로 유도탄의 건전성을 평가할 수 있다. 또한 해당 방안을 통해 유도탄의 성능 유지와 수명 연장을 제공할 수 있으며, 궁극적으로 군사 작전의 효율성과 신뢰성을 향상시켜 국방력 강화에 중요한 역할을 수행할 것이다.

단, 본 연구에서 제안한 방안은 환경 요인 중 온도, 습도만을 고려하고 있으나 실제 유도탄이 배치되는 환경의 경우 진동, 충격 등을 포함한 다양한 환경 요인들로 구성되어 있다. 또한 환경 데이터의 장기간 안정적 수집을 위해 고 신뢰성 확보 및 소모 전력 최적화 설계가 고려된 환경 센서가 요구된다. 따라서, 향후 연구에서는 이러한 외부 환경 요인을 추가로 식별

하고, 식별된 환경 요소와 적합한 수명-스트레스 관계에 대하여 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-081, 무기체계 CBM+ 특화연구센터).

References

- [1] R. Ahmad and S. Kamaruddin, "An Overview of Time-Based and Condition-based Maintenance in Industrial Application," *Computers & Ind. Eng.*, Vol. 63, No. 1, pp. 135-149, 2012.
- [2] B. de Jonge, R. Teunter, and T. Tinga, "The Influence of Practical Factors on the Benefits of Condition-based Maintenance Over Time-Based Maintenance," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, Vol. 158, pp. 21-30, 2017.
- [3] S. J. Bae, J. H. Tae, C. S. Chung, Y. Cho, H. S. Oh, and S. G. Chae, "A Condition-Based Maintenance Method Through Control Charts Based on the Wavelet Energy Spectrum of Generators in Thermal Power Plants," *J. of Appl. Rel.*, Vol. 22, No. 4, pp. 363-373, 2022.
- [4] O. Serradilla, E. Zugasti, C. Cernuda, A. Aranburu, J. R. de Okariz, and U. Zurutuza, "Interpreting Remaining Useful Life Estimations Combining Explainable Artificial Intelligence and Domain Knowledge in Industrial Machinery," in *Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, pp. 1-8, 2020.
- [5] X. Li, Q. Ding and J. Q. Sun, "Remaining Useful Life Estimation in Prognostics using Deep Convolution Neural Networks," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, Vol. 172, pp. 1-11, 2018.
- [6] R. Zhao, M. Qian, and L. Zhang, "Study of Key Technology and Architecture of Health Management for Missile Equipment," in *Proc. 2nd Int. Conf. Rel. Syst. Eng.(ICRSE)*, pp. 1-4, 2017.
- [7] S. A. Marotta, A. Kudiya, T. K. Ooi, H. A. Toutanji,

- and J. A. Gilbert, "Predictive Reliability of Tactical Missiles using Health Monitoring Data and Probabilistic Engineering Analysis," in Proc. of the 1st Int. Forum on Integr. Syst. Health Eng. and Manage., pp. 7-10, 2005.
- [8] L. Jun, M. Ling, Z. Lixin, and W. Chunhui, "A Concept for PHM System for Storage and Life Extension of Tactical Missile," in Proc. Prognostics Syst. Health Manage. Conf.(PHM-Hunan), pp. 689-694, 2014.
- [9] A. J. Kudiya and S. A. Marotta, "Tactical Missile Health Management," Syst. Health Manage.: With Aerosp. Appl., pp. 555-564, 2011.
- [10] W. Pan, T. Li, H. Wan, Y. Chen, and Y. Zhang, "The Effect and Countermeasures on the Missile Equipment in High Temperature and Damp Environment," in Proc. Int. Conf. on Energy, Power and Elect. Eng., 2016.
- [11] D. Julong, "Grey Control System," J. Huazhong Univ. Sci. Technol., Vol. 3, No. 9, pp. 9-18, 1982.
- [12] J. L. Cook, "Applications of Service Life Prediction for US Army Ammunition," Saf. and Rel., Vol. 30, No. 3, pp. 58-75, 2010.
- [13] Y. Lin, D. Quan, P. Jin, and W. Guo, "A Method Study of Missile PHM based on Analytic Hierarchy Process," in Proc. 1st Int. Conf. Rel. Syst. Eng. (ICRSE), pp. 1-6, 2015.
- [14] Y. Liu, T. Liu, R. Lin, H. Wang, and J. Liu, "Missile Health Status Assessment Method based on Hierarchical Model," in Proc. 3rd Int. Conf. on Artif. Intell. and Adv., pp. 3077-3080, 2021.
- [15] X. Shan, W. Zhang, Y. Cao, and X. Li, "Life Prediction Method of Missile based on Environmental Load Spectrum of Shipborne Tilt Launching," J. of Phys: Conf. ser., Vol. 1852, No. 3, p. 032061, 2021.
- [16] R. M. Seman, J. M. Ettl, and A. Purnell, Reliability /Maintainability/Testability Design for Dormancy, RADC-TR-88-110, Rome Air Development Center Air Force Systems Command, 1988.
- [17] Y. Lee, H. Yong, J. Jung, and J. Kim, "Development of Dormant Missile Health Monitoring Methodology based on Environmental Data," J. of Appl. Rel., Vol. 22, No. 3, pp. 219-228, 2022.
- [18] Ammunition ILS practical Guidebook I, Ammunition Support Command, Korea, ch3 - p. 6, 2017.
- [19] O. Hallberg and D. S. Peck, "Recent Humidity Accelerations, a Base for Testing Conditions," Qual. Reliab. Eng., Vol. 7, pp. 169-180, 1991.
- [20] K. Teng, J. Han, F. Ge, and G. Zhang, "Research on Missile Weapons Health Management and Storage Life Prediction Methods based on PHM Technology," in Proc. Prognostics Syst. Health Manage. Conf.(PHM-Chongqing), pp. 993-997, 2018.