

## 유도무기체계 적외선 탐색기 PHM 적용방안 연구

박준수\*, 한승규, 이원, 문경민  
LIG넥스원 IPS연구소

### Research on The Application of PHM for Guided Weapon System Infrared Seeker

Jun Su Park\*, Seung Kyu Han, Won Lee, Kyung Min Moon  
LIG Nex1 IPS Department

**요약** 유도무기체계는 발사를 하기전까지 장기간 저장상태를 유지하는 특성을 가지고 있다. 장기간 저장에서는 항상 전원이 들어가 있지 않기 때문에 고장 유무를 파악할 수 없다. 고장 상태를 확인하기 위해서는 주기적으로 주요구성품을 분해하고 점검하는 과정에서 시간, 비용, 정비간 고장 등이 발생한다. 이를 보완하기 위해서는 주요성능 지표의 변화를 관찰하고 이 결과를 바탕으로 잔존 수명을 예측하여 정비주기를 확대하거나 축소하여 최적화 시키는 방안이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 PHM(건전성 예측 및 관리) 전략을 적용하고자 한다. 탐색기는 전원을 넣지 않는 상태에서 장기간 보관할 경우 핵심 노화 인자는 온도이다. 본 연구에서 획득한 평균 10년 노화된 검출기의 성능을 확인한 결과 약 0.55% 정도의 픽셀손실률을 확인할 수 있었다. 검출기 저장 온도와 시간을 기반으로 도출한 와이블-아르니우스 식을 통해 검출기 픽셀손실률을 예측할 수 있다. 획득한 데이터를 기반으로 운용 및 정비 전략을 계획하여 운용유지비용 감소와 운용가능도 상승을 기대할 수 있다.

**Abstract** A guided weapon system is stored for a long time before use. In long-term storage, the power is not always turned on, so it is not possible to determine the presence or absence of a failure. A process of periodically disassembling and inspecting major components is used to check the failure state, but time and cost are needed, and failures during maintenance occur. Therefore, it is necessary to observe changes in key performance indicators, predict the remaining life based on the results, and expand or reduce the maintenance cycle to optimize it. To this end, a prudential prediction and management (PHM) strategy was applied. If an explorer is stored for a long time without the power on, the key aging factor is temperature. The performance of an average 10-year-old detector was checked in this study. As a result, the pixel loss rate was about 0.55%. The detector's pixel loss rate can be predicted through the Weibull-Arnus equation derived based on the detector storage temperature and time. Based on the acquired data, operation and maintenance strategies can be planned to reduce costs and increase operation availability.

**Keywords** : Guided Weapon System, Prognostics and Health Management, Maintenance, Focal Plane Array, Life Time

---

\*Corresponding Author : Jun Su Park(LIGNex1)

email: junsu.park@lignex1.com

Received July 11, 2023

Accepted September 1, 2023

Revised August 2, 2023

Published September 30, 2023

## 1. 서론

유도탄은 목표물을 타격하기 위해 추진기관, 유도항법 장치, 탄두 등으로 구성되어 있는 유도기능을 탑재한 로켓 무기이다. 유도무기는 상대표적에 따라 항공기를 목표물로 할 경우 대공, 배를 목표로 할 경우 대함, 지상 목표물인 경우에는 대지 유도탄으로 분류할 수 있다. 비행 방식에 따라서는 토마호크 미사일이나, 하푼 미사일 같이 소형엔진의 추진력을 가지고 정해진 비행경로를 가지고 날아가 목표를 타격하는 크루즈 미사일이 있다. 스킵드 미사일은 화약 추진체의 힘으로 점화하여 위로 솟구친 다음에 포물선을 그리며 자유낙하하며 중력의 힘으로 높은 속도로 가속하여 목표를 타격하는 탄도 미사일도 있다.

정밀한 목표물 타격을 위해서는 유도기능이 필수적이며 이를 위한 유도기술 또한 다양하다. 유도기술은 목표물의 적외선 열영상 정보를 활용하여 유도하는 열추적 미사일, 레이더를 통해 유도하는 레이더 유도 미사일, 목표물 형상을 파악한 후 유도하는 미사일 등이 있다. 유도탄은 다양한 목표물을 설정할 수 있는 기술적 특징 때문에 다양한 플랫폼에서도 운용이 가능하게 개발하였다. 플랫폼은 지상발사대, 항공기, 수상함, 수중함에서 발사가 가능하게 개발되었다.

유도탄 운용유지란 유도탄 운용주기 관리, 계획정비 계획 수립, 비계획정비 시스템 구축, 정비를 위한 지원장비 운용, 정비 및 저장 시설 구축, 정비요원 육성 및 관리, 수리부속 확보 등 다양한 분야를 망라한다. 운용유지 단계에서는 필연적으로 많은 예산이 소요되고 전장환경에 변화 및 군의 새로운 요구에 부합하기 위한 무기체계는 지속적으로 개발되고 있다. 이에 운용유지비용을 최적화 하는 것이 현재 국방에서의 이슈이다. 하나의 무기체계를 개발/운용/폐기하는 전주기 관점에서 보았을 때 통상적으로 하나의 무기체계의 전주기비용은 개발비용이 20~30%, 운용유지비용이 70 ~ 80%를 차지한다. 군의 전력은 유지하면서 운용유지를 최소화하는 기술에 대한 요구가 많아 지고 있다. 이를 위해 현재 AI(Artificial Intelligence), Bigdata, 운용기술자료, 센서, 데이터 등 IT 기술을 활용한 시스템 상태 실시간 진단 기술인 CBM+(Condition Based Maintenance Plus), 상태정보를 수집하여 시스템 이상 상황을 감지 분석 및 예지하는 PHM(Pronostics Health Management) 등 다양한 기술을 활용하고자 시도하고 있으며 본 논문에서도 이러한 기술을 활용하여 운용유지비용을 최적화하는 방안에

대해서 서술하고자 한다.

운용유지비 최적화는 군의 전력은 유지하면서 운용유지비용은 최소화하는 방법을 말한다. 이를 달성할 수 있는 방법은 개발단계에서는 고장률이 낮은 부품을 선정, 호환성을 고려한 설계, 표준화된 부품적용, 수리부속 확보, 정비성 향상 설계, 정비인력 최적화, 다 빈도 고장품목 고장탐지방안 개발 등 다양한 방법을 적용할 수 있다. 운용단계에서는 고장실적을 기반으로 다 빈도 고장품목의 설계개선, 무기체계 가동률 달성을 위한 수리부속 사전 확보, 인력 최적화 유지 등의 방법이 있다. 운용유지비용 최적화의 키(Key)로 국방에서는 RAM(Reliability, Availability, Maintainability) 분석 기술을 활용하여 무기체계의 신뢰성, 가용도, 정비도를 예측하고 환류하고 있다. 개발단계에서 산출한 고장률은 평균 고장빈도를 산출할 수 있고 이를 기반으로 수리부속 확보, 인력소요 예측을 수행하고 운용단계에서는 필드데이터를 기반으로 최신화 할 수 있다.

하지만 전통적인 운용유지방법은 개발단계에서 산출한 신뢰도 예측 값이 실제 필드에서 동일하게 작동할 것인가에 대한 의문이 항상 존재하기 때문에 실제 환경을 예측하기가 쉽지 않다. 그리고 최근의 무기체계는 1, 2차 세계대전에서 주력전차, 주력비행기만 대량으로 생산하는 체제에서 벗어나 목표에 따라 수많은 종류의 무기체계가 개발되고 개발된 무기체계도 10년, 20년이 지나면 신규무기체계로 대체되어 고장데이터를 누적할 시간적 여건이 부족하다. 따라서 운용유지비용을 최적화 하기 위해서는 새로운 방법이 필요하다.

본 저자는 새로운 기술 중 PHM 기술을 주요 대안으로 판단하고 있다. PHM은 운용중 상태 정보를 수집하여 시스템의 이상을 감지하고, 건전성분석 및 고장 예측을 통하여 고장시점을 사전에 예측하여 선제적으로 대응하며 최종적으로는 운용비용 최적화 및 관리의 효율성을 향상하는 기술이다. 기존 방산 및 산업계에서는 고장 예방을 위해 예방정비를 통상적으로 사용하였다. 예방정비는 주기 선정에 있어 실험적 데이터가 부족하여 유사사업의 사례를 주로 준용하여 고장률 감소의 효과를 보증하기 어렵고, 과도한 운용유지비용을 야기하였다. 이를 보완하기 위해 나온 이론은 신뢰도중심정비(RCM, Reliability Centered Maintenance)으로 조금더 체계적이고 공학적인 기법을 활용하여 정비 업무를 도출하고 주기를 선정하는 방법으로 발전하였다. 한국PHM 학회에서는 신뢰도중심정비(RCM)의 분류를 사후정비, 예방정비, 예측정비로 분류하였다[1]. 사후정비는 고장이 발

생한 이후에 수리 및 복구하는 방법이고, 예방정비는 필터청소, 오일 주유 등 주기적인 정비를 말한다. 그리고 예측정비는 자산, 시스템, 기기, 부품 등의 수명 또는 원하는 기능이 상실될 때까지의 시간을 추정하고, 이에 기반한 의사결정을 유도하는 것을 골자로 한다. 이를 실현하기 위한 핵심기술로는 장비의 상태를 모니터링하는 기술과 고장을 예측하는 정교한 기술이 있다. 미국 국방부는 운용유지비용 최적화를 위해 DoD 5000.2-R에 PHM 의무화 내용을 삽입하여 PHM 기술을 보유하지 않을 경우 미국 국방부에 납품할 자격이 없음을 강조하였다. F-35와 같이 첨단 고정익 항공기에도 PHM 기술이 적용되었다. F-35에는 엔진, 항전장비 뿐만 아니라 비행기 동체의 이상여부를 실시간으로 확인하기 위해 주요 골격부위에 변형 게이지 센서와 부식센서를 설치하여 상태정보를 수집한다[2]. 이와 같이 방산분야에 PHM 적용이 가속화 되고 있으며 국내에서도 방산분야에 PHM, CMB+ 기술을 활용하여 고장을 정밀하게 예측하는 방향으로 발전하고 있다.

본 논문에서는 무기체계 중 유도탄에서의 PHM 적용 전략에 대해 제시하고, 유도탄 체계 중 고장률이 높은 적외선 탐색기를 기반으로 고장을 예지할 수 있는 방안에 대하여 제시하고자 한다. 특히 적외선 탐색기의 수명노화 요인을 연구하고 잔존수명에 따른 정비전략 설정을 위한 연구를 진행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 유도탄 특성고려 PHM 적용 전략

최근 국방분야에서 PHM 적용을 위한 연구가 활발히 일어나고 있으며 진동, 열감지 센서 등을 활용한 기계분야에서는 많은 연구와 데이터를 쌓아가고 있다. 전자분야는 주로 레이더, 전자전 기술분야에서 소자의 열화, 소비전력 변화 등을 활용한 연구가 시작되고 있다. ‘전자전 무기체계 PHM 적용방안 연구(2020, 현도경)’에서는 RF 모듈의 고장을 예측하기 위해 RF 모듈에 공급되는 전류량과의 상관관계를 분석하여 잔존수명을 예측하는 연구를 수행하였다[3].

PHM 기법은 기계분야에서 많이 사용하는 물리모델 기반 방식과 위의 연구처럼 데이터를 기반으로 수명을 예측하는 데이터 기반 방식으로 구분된다. 물리모델 기반 방식은 분석대상의 고장특성 모델을 적용하여 예측한다. 데이터기반 방식은 실제 장비에서 발생한 데이터를

수집하여 고장과의 상관관계를 분석하여 잔여 수명을 예측한다. 데이터기반 방식은 실제 발생데이터만 가지고 있으면 적용가능하여 물리모델 기반보다 다양한 분야에 적용이 가능하다. 그리고 획득한 데이터가 많아질수록 그 정확도가 높아진다는 장점이 있다. 유도탄 분야는 탐색기, 엔진, 신관, 항법장치, 로켓 등 다양한 분야의 기술이 집합된 복합무기체계로 물리모델 기반보다는 데이터기반 방식을 적용함이 유리하다.

PHM 적용에 있어 유도탄에서 고려해야 하는 주요 특성은 One-shot 디바이스로 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 장기간 저장환경에서 놓여 있다. 유도탄은 발사직전까지 장기간 저장고 및 발사체에 보관되어 있다. 보관은 통제된 환경에서 수행하며 주기적인 점검을 제외하고는 전원을 인가하지 않는다. 따라서 PHM 적용에 있어 실시간 데이터 수집은 제한이 있고 주기적인 점검을 통해 수명 저하를 측정해야 한다. 둘째, 고장의 형태가 대부분 장기간 보관에 따른 열화로 인한 고장유형이 많다. 특히 반도체소자, 로켓연료 및 점화기 등 다양한 화약류, 고무구성품 등 시간에 따라 특성이 변화는 성분에 의한 고장이 주로 발생한다. PHM 적용을 위해서는 소재별 열화특성을 파악하고 이를 데이터화 하는게 중요하다. 셋째, 점검 시 잔여수명을 예측하고 다음 점검주기 도래전까지 수리 및 교환을 수행해야 한다. 주기 점검 기간이 3~5년 단위로 길기 때문에 잔여 수명이 점점 주기보다 작다고 예측될 경우 선제적인 교환을 통한 예측정비가 필요하다.

아래 Fig. 1과 같이 유도탄은 배치이후 저장상태에서 보관되며 4년 주기로 예방정비를 수행하여 유도탄 정상유무를 확인한다. 저장기간에는 전원을 인가하지 않기 때문에 고장을 인지할 수 없다. 따라서 다음 정비주기 도래전까지 고장이 발생할 수 있는 인자를 모니터링하여 선제적으로 고장을 조치해주는 PHM 개념을 적용하여야 한다. 가령 4년 주기의 예방점검 주기를 가지는 무기체계의 경우 4년 이내에 고장이 발생할 것이 예상되는 부품은 선제적으로 정비를 하여 임무성공률을 올리는 방법을 적용할 수 있다.

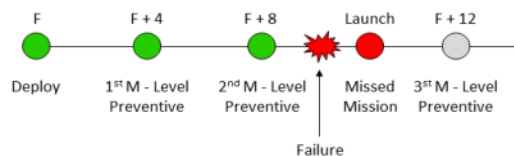


Fig. 1. Guided Missile maintenance concept with PHM

## 2.2 선행 연구

### 2.2.1 적외선 탐색기 고장 특성

적외선 탐색기의 주요 구성품은 검출기, 냉각기, 인터페이스보드로 구성되어 있다. 적외선 탐색기의 검출기는 주로 안티몬화 인듐(Indium Antimonide)을 감지재료로 한 2차원 초점 배열면 소자이다. 그리고 냉각기는 적외선검출기를 저온으로 냉각시키는 기능을 수행하며, 검출기와 냉각기는 진공된 상태를 유지한다. 그리고 제어 및 획득 신호를 통신하기 위한 인터페이스보드로 구성되어 있다. 적외선 탐색기의 고장은 냉각기, 진공기, 배열소자(FPA), 커넥터에서 발생하며 저장, 운송, 운용단계에서 다양한 고장유형(Failure Mode)이 발생한다. Table 1은 구성 및 단계, 고장유형을 나타낸다[4].

Table 1. Failure modes and acceleration factors

| Part        | Phase       | Failure Mode                                      | Factor                                 |
|-------------|-------------|---|--|
| Cooler      | Storage     | Leakage   | Hot Temperature<br>Temperature Cycle   |
|             |             | Outgassing  | Hot Temperature                        |
|             | Transport   | Leakage   | Vibration, Shocks                      |
|             |             | Bearings and moving parts wear or break           | Vibration, Shocks                      |
|             | Operational | Bearings and moving parts wear or break           | FPA Temperature                        |
|             |             |   | High ambient temperature               |
|             |             |   | Dewar heat load                        |
| Vacuum      | Storage     | Leakage   | Temperature Cycle                      |
|             |             | Outgassing  | Hot Temperature                        |
|             | Transport   | Mechanical wear(Leakage)                          | Vibration, Shocks                      |
|             |             | Mechanical Break                                  | Vibration, Shocks                      |
|             | Operational | Leakage   | Temperature Cycle<br>Vibration, Shocks |
|             |             | Outgassing  | Hot Temperature                        |
| FPA         | Storage     | Diodes degradation (Increase of defective pixels) | Hot Temperature                        |
|             | Transport   | None  | None                                   |
|             | Operational | Loss of connections                               | Number of Cooldown Cycles              |
| Connections | Storage     | Bonding aging                                     | Hot Temperature                        |
|             | Transport   | Bondings break                                    | Vibration, Shocks                      |
|             | Operational | Bondings break                                    | Vibration, Shocks                      |

유도탄은 배치이후 저장상태에 놓여있기 때문에 Table 1에서 저장(Storage)단계의 고장유형을 보인다. 냉각기(Cooler)의 경우 저장 시 높은 주변온도, 급격한 냉각과 냉각종료 후의 온도변화에 따른 스트레스로 누수(Leakage)의 문제를 야기한다. 유도탄의 검출기는 운용 개념에 따라 빠른 시간에 냉각을 요구함으로써 이로 인한 스트레스가 야기될 가능성이 높다. 그리고 높은 온도는 냉각기의 냉매유출을 야기할 수 있다. 진공기의 경우 냉각 사이클의 급격한 온도 변화로 물이 유입 되거나 공기가 유입 될 수 있다. 검출기(FPA)는 높은 온도에서 배열소자 내 다이오드의 고장이 발생할 수 있다. 이는 장시간에 걸쳐 발생하고 픽셀단위로 고장이 발생한다. 저장온도가 높을수록 배열소자의 고장이 더 많이 발생하는 경향을 보인다. 연결자(Connection)의 경우 주변 온도에 의해 연결자의 본딩이 떨어져 고장을 유발하기도 한다.

### 2.2.2 고장정의

10년 이상 장기간 저장하는 유도탄의 특성상 고장을 유발할 수 있는 요인은 높은 저장온도(Hot Temperature)와 온도 주기(Temperatur Cycle)이다. 냉각기의 경우 내부 진공이 깨지거나, 냉매가 유출되면 고장으로 판단할 수 있다. 진공기의 경우 접합부가 열화로 인해 외부 공기가 유입될 경우 고장으로 판단한다. 검출기의 경우는 열화로 인한 픽셀 손실이 발생하고 체계가 요구하는 성능 이상의 픽셀 손실률에 도달하게 되면 고장으로 판단한다.

본 연구에서는 잔존 수명이 점진적으로 감소하는 경향을 보여주는 검출기(FPA)를 중심으로 PHM 적용을 위한 수명예측 모델을 연구해 보고자 한다. 검출기(FPA)의 고장 판단기준에는 주로 픽셀손실률을 사용한다. 픽셀 손실이란 검출기 배열소자를 이루는 수많은 픽셀 중 하나의 픽셀이 고장남으로써 해당 픽셀의 신호 획득 기능을 상실한 경우를 말한다. 그리고 주변 픽셀보다 과도하게 신호를 획득하거나 과하게 적은 신호를 검출할 경우에도 고장 픽셀로 정의한다. 그리고 고장판단 기준으로 활용하는 지표는 잡음등가온도차(NETD, Noise Equivalent Temperature Difference)이다[5]. 잡음등가온도차(NETD)는 적외선 검출기가 분해할 수 있는 최소 가능한 온도차이에 대한 성능지표이다. 값이 낮을수록 적외선 검출기의 해상도가 높음을 의미한다. 앞선 연구에서는 픽셀의 잡음등가온도차(NETD)가 픽셀 평균의 값보다 2배를 초과하면 고장으로 판단하였다. 검출기 수준에서

고장은 체계에서 요구되는 픽셀 손실률로 정의 할 수 있다. 본 연구에서는 검출기 성능 점검을 등가잡음온도차 측정장비로 수행하였다.

### 2.2.3 시간, 온도와 검출기 수명의 관계

저장온도에 따른 픽셀손실률을 관측한 실험은 검출기 고장 경향이 온도와 시간과 관련있다는 것을 보여준다 [6]. 해당 실험에서는 검출기를 각각 70℃, 80℃, 90℃, 100℃ 환경에 저장하여 픽셀의 고장경향을 확인하였다. 시간의 경과에 따라 고장 픽셀의 증가는 Eq. (1)과 같이 와이불 분포를 따른다.

$$O_{loss}(t, T_j) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha_j}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$O_{loss}$ 는 실험온도  $T_j(70^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 90^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C})$ 에서  $t$  시간 경과 후 가용한 픽셀의 손실률을 뜻한다.  $\beta$ 는 형상모수이고,  $\alpha$ 는 척도모수로 실험 온도에 영향을 받는다. 본 실험에서 Fig. 2와 같이 90℃와 100℃에서 고장 픽셀의 증가가 짧은 시간에 관측되었으며, 회귀 기울기도 상당히 일관되게 관측되었다. 따라서 90℃, 100℃에서 획득한 데이터를 바탕으로 형상모수를 설정하였다.

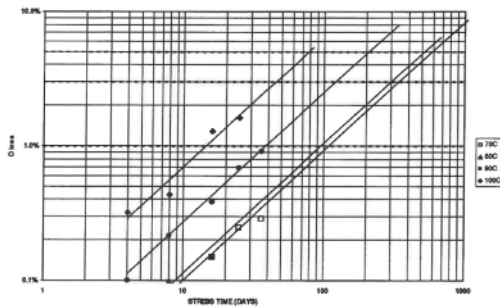


Fig. 2. Operability loss or CDF versus stress time for four different test temperatures

온도의 영향성을 확인하기 위해 Eq. (2)와 같이 Arrhenius 모델을 활용하였다.

$$\alpha(T) = \alpha_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

반응에 따른 수명감소는  $\alpha(T)$ 로 표현할 수 있고,  $E_a$ 는 활성화 에너지(activation Energy),  $T$ 는 절대온도,  $k$ 는 볼츠만상수( $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$ ),  $\alpha_0$ 는 상수이다.

$\alpha(T)$  대신에 Eq. (1)을 대신 넣게 되면 Eq. (3)과 같이

와이불-아르니우스식(Weibull-Arrhenius equation)을 만들 수 있다.

$$O_{loss}(t, T_j) = 1 - \exp\left\{-\left[t \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) / \alpha_0\right]^\beta\right\} \quad (3)$$

해당 모델에서 형상모수  $\beta$ 는 0.97을 가진다. 해당식에서 미지수인  $\alpha_0$ 와  $E_a$ 는 온도시험에서 측정한 시간에 따른 픽셀손실률을 2개 포인트 값을 통해 산출 할 수 있다. 산출한 결과  $\alpha_0$ 는  $2.63 \times 10^{-10}$ ,  $E_a$ 는 0.76 eV 값을 획득할 수 있다.

해당 실험을 통해 저장 온도와 시간에 따른 검출기 픽셀 손실을 계산할 수 있는 수식을 얻을 수 있다. 해당 수식을 활용하면 저장 온도( $T$ )가 25 ℃이고 저장 기간( $t$ )이 20년이 경과할 경우  $O_{loss}$ 는 약 1%가 산출된다. 즉 25 ℃에 20년간 저장할 경우 픽셀손실률이 1%에 도달한다는 뜻이다. 픽셀손실률 1%가 검출기의 고장기준이라 하였을 때 예상수명은 20년으로 유추할 수 있다.

앞선 다른 연구에서는 다른 모델의 검출기로 유사한 방법으로 실험을 실행하였다. 동일한 검출기 15개를 90 ℃ 환경에서 90일간 실험한 결과 30℃ 환경에서 약 30년의 수명을 예측할 수 있었다[4]. 실험간 특이한 부분은 Fig. 3과 같이 고장 경향이 초기 30일간 상당한 수준으로 증가하다가 이후에는 일정한 증가율을 보인다. 이는 금속의 열화가 초기에 많이 발생하고 이후 금속의 열화는 일정한 수준으로 관리됨을 알 수 있다.

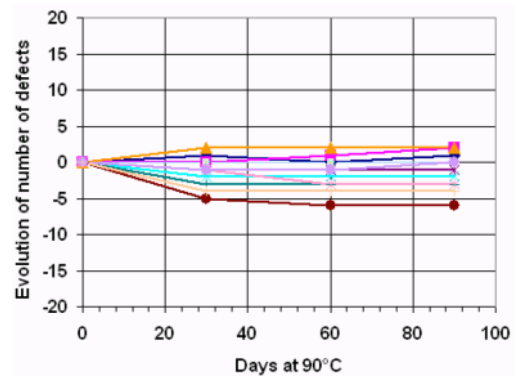


Fig. 3. Reliability test results in storage

### 2.3 실험데이터 획득 및 유사성 확인

본 연구에서는 평균 10 년간(개별로 7년 ~ 12년 사이) 저장한 유도탄 검출기 15대를 대상으로 성능측정을 수행하였다. 저장환경은 평균 25 ℃를 유지할 수 있는 실

내환경이다. 성능측정은 콜리메이터를 통해 일정한 온도 영상을 생성하여 이를 촬영한 검출기데이터의 잡음 수준을 측정하는 균일도점검 시험 방법을 통해 수행하였다. 고장 기준은 앞선 연구에서처럼 1%의 픽셀손실을 고장으로 가정하였다.

전체 픽셀 중 앞선 연구에서처럼 1%의 픽셀손실을 고장으로 가정하였을 때, 균일도점검의 방법에서는 전체적인 노이즈를 평가하는 방법으로 검출기 기본성능을 고려하였을 때 100 mK 이상의 값이 산출될 경우 고장으로 판단하였다. 15대의 검출기의 균일도 점검 결과 평균 55 mK이 산출되었다.

Eq. (3)을 통해 도출한 수식을 활용할 때 25 °C 환경에서 저장할 경우 10년 후 0.62% 손실, 20년 후 1.22% 손실, 30년 후 1.81% 손실을 도출할 수 있다. 따라서 20년이 경과할 경우 고장기준인 1%에 도달하여 고장이라 판단 할 수 있다. 그리고 10년을 경과한 시점은 약 60%의 수명에 도달했다고 판단할 수 있다. 실제 15대의 검출기를 10년간 저장한 실험데이터의 평균인 55 mK 고장기준인 100 mK에 55%에 도달한 값으로 전체 수명에서 약 55 %의 수명에 도달했다고 판단 할 수 있다. 20년, 30년 이후에도 측정을 하여 유사한 경향을 보이는지 추가 연구가 필요하지만 10년 데이터를 바탕으로 판단했을 때 유사한 흐름으로 간다는 것을 확인할 수 있다.

## 2.4 유도탄 검출기 PHM 적용 절차

### 2.4.1 저장 환경 분석

유도탄 검출기 노화 특성과 무기체계 운용개념을 결합하였을 때 Fig. 4와 같이 저장 환경 분석, 창정비 주기 결정, 고장기준 설정, 잔존수명별 전략설정의 순서로 PHM 적용 전략을 설정할 수 있다.

먼저 저장 환경 분석은 유도탄을 운용하는데 있어 한 장소에서 지속적으로 보관하여 운용하는 것이 아니라 유도탄 발사 플랫폼(지상 발사대, 수상함 등)에 저장하고 운용계획에 따라 임무가 끝나면 지상저장고에 하역하여 저장하게 된다. 따라서 저장되는 온도가 변화하게 되고 이에 따라 잔존수명을 예측할 필요가 있다. 예를 들어 1년중 50%는 함상에 적재하여 저장하고, 나머지 50%는 지상 저장고에 저장한다고 가정할 수 있다. 함상환경은 일반적으로 지상보다 높은 저장온도를 예상할 수 있으며 대략 35°C로 가정하고, 지상저장고는 항온시설을 보유하고 있기 때문에 25°C를 가정할 수 있다.

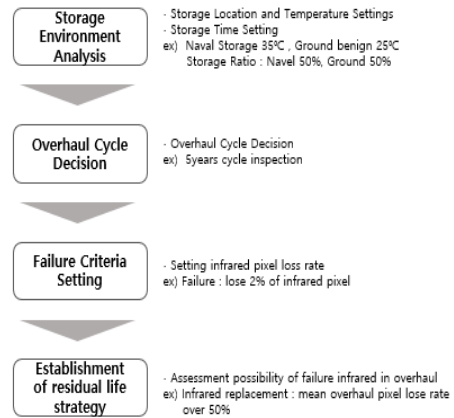


Fig. 4. PHM Application Process of Guided Weapon Seeker

### 2.4.2 창정비 주기 결정

검출기의 성능을 측정하기 위해서는 주기적으로 유도탄에서 검출기를 분해한 이후에 전용 점검장비를 통해서 성능을 측정할 수 있다. 기본적으로 유도탄은 5년 ~ 20년 주기 창정비업무를 수행한다. 본 예시에서는 5년 주기로 창정비를 수행한다고 가정하였다. 배치가 된 이후 5년이 도래하게 되면 검출기를 유도탄에서 분해한 이후 창에 입고하여 성능점검 및 정비를 수행할 수 있다.

### 2.4.3 고장기준 설정

창정비 시설에 입고된 검출기는 전용장비를 통해 성능점검을 수행할 수 있다. 검출기 고장 판단의 대표적인 방법이 픽셀 손실률이다. 유도무기의 체계 성능을 기반으로 검출기에 요구되는 성능기준이 할당된다. 이를 기반으로 검출기 픽셀 손실률 기준을 산출할 수 있다. 이는 유도무기 체계마다 다르게 설정된다. 본 예시에서는 2% 손실을 고장기준으로 가정하였다.

Eq. (3)은 적외선 검출기의 저장온도와 시간에 따른 픽셀 손실률을 유도할 수 있는 수식이다. 이를 설정한 시

Table 2. Scenario-based Life Expectancy

|                          | Period    | Loss of Pixel at Depot Maintenance (F + 5 years) | Sum of Loss | Expected Cycle | Expected Life |
|--------------------------|-----------|--|-------------|----------------|---------------|
| Store at Ground (25 °C)  | 2.5 Years | 0.16 %   | 0.57 %      | 3.5 Cycle      | 17.5 Years    |
| Store at Warship (35 °C) | 2.5 Years | 0.41 %   |             |                |               |

나리오에 대입하여 잔존수명을 예측한 결과는 Table 2와 같다.

25 °C 환경에서 2.5년 저장한 검출기의 픽셀 손실률을 계산하기 위해서는 Eq. (3)에  $t = 2.5$  년,  $T_j = 298$  K,  $E_a = 0.76$  eV,  $k = 8.62 \times 10^{-5}$  eV K<sup>-1</sup>,  $\alpha_0 = 2.63 \times 10^{-10}$ 를 입력하여 산출할 수 있다. 산출결과로 픽셀 손실률은 0.16 %가 산출된다. 같은 방식으로 온도 35°C, 기간 2.5년을 삽입하면 픽셀 손실률 0.41 %로 산출된다. 5년간 예상되는 픽셀 손실률은 합으로 산출할 수 있고 그 값은 0.57 %이다. 설정한 고장기준 2 %에는 도달하지 않기 때문에 계속 사용이 가능하다.

이후 고장경향도 동일하다고 가정하였다. 이는 Xavier BRENIERE 연구[4]에서 저장 수명 시험에서 초기에 픽셀 손실률이 높고 시간에 따라서 점점 감소하는 경향을 고려하였을 때 보수적인 판단으로 적용하였다.

5년 주기로 0.57 % 감소를 보인다고 가정하였을 때 3번째 창정비(15년 차) 시 1.71 % 손실률, 4번째 창정비(20년차) 시 2.28 % 손실률을 달성하게 되며 고장으로 판단하게 된다. 이를 활용하면 예상수명 17.5년으로 산출할 수 있다.

### 2.4.4 잔존수명별 전략설정

창정비 입고시 성능시험을 통해 산출된 픽셀손실률이 고장기준을 초과할 경우 신규 검출기로 교환하게된다. 하지만 고장기준에는 도달하지 않았지만 다음 창정비 주기 도래 시 고장이 날 확률이 높은 품목을 계속 운용하는 것은 유도탄 발사 시 탐색기 문제로 신뢰도 하락에 기여할 수 있다. 잔여 픽셀 손실률을 기반으로 다음 창정비 주기까지 생존유무를 판단하여 정비전략을 수립하여야 한다. 앞서 산출한 결과에서 3번째 창정비(15년차) 시 1.71 % 손실률을 보이며 고장 기준이 2 %에 0.29 % 차이를 확인 할 수 있다. 연간 0.57 % 감소한다고 보았을 때 다음 주기 도래 시 까지 50% 이내의 수명을 보여준다. 이때 정비전략에서 이를 계속 운용할 것인지 교체할 것인지 전략 수립이 필요하다. 교체를 하지 않을 경우 창정비 주기를 3년으로 줄여서 성능을 확인하는 방법이나 신규 탐색기로 교환한 후 기존 노후화된 탐색기를 수리 부속화 하여 사용하는 방법이 있을 수 있다.

잔여 픽셀이 다음 창정비 도래 시 까지 충분히 보유한 경우(100 % 이상) Table 3과 같이 성능점검 정상으로 판단하고 잔여 픽셀 손실률에 따라 창정비 순환 주기를 확대 할 수 있다. 100 % ~ 80 % 사이의 값일 때는 야전 단계에서 할 수 있는 성능점검을 추가적으로 수행하여

조기 고장을 판단하는 방식으로 운용할 수 있다. 80 % ~ 30 %에서는 운용간 고장확률이 높아짐에 따라 항상 저장에서 후순위로 배치하는 운용적 전략이 필요하다. 그리고 30 % ~ 0% 이내에서는 성능은 정상이지만 고장 확률이 매우 높기 때문에 순환창정비 주기를 단축하거나 교환이 추천된다. 0% 이하일 경우 성능점검결과는 고장으로 판정되고 즉시 교환을 하여야 한다.

Table 3. Meintenance Strategy According to Margin Pixel Rate(Example)

|  |               | Maintenance Stragege  |
|--|---------------|---|
| Residual Pixel Rate at Depot Maintenance | 100 % or More | No abnormality at check. Extend Maintenance Period (5 Years → 7 Years). |
|  | 100 % ~ 80 %  | No abnormality at check. Collect Field Data More.                       |
|  | 80 % ~ 30 %   | No abnormality at check. Allocate Posteriorly.                          |
|  | 30 % ~ 0 %    | No abnormality at check. Reduce Maintenance Period (5 Years → 3 Years). |
|  | 0% or less    | abnormality at check. Change the Seeker.                                |

## 3. 결론

본 연구에서는 유도탄에 적용하는 적외선 탐색기의 노화 수명특성을 활용하여 PHM 기술을 적용하는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 탐색기의 핵심부품인 검출기의 노화에 가장 영향을 미치는 요소는 운용 및 저장하는 온도이다. 온도와 시간에 따른 검출기 픽셀 손실률을 와이블-아르니우스식(Weibull-Arrhenius equation)을 통해 유도하였다. 유도무기 특성상 발사전까지 저장된 상태로 장기간 보관된다. 따라서 급격한 온도변화가 없으며 예측된 운용계획에 따라 운용되는 특징을 가지고 있다. 노화 특성과 운용 특성을 반영하여 주기적인 순환창정비 시 성능 지표를 통해 잔존 수명을 예측하고 이를 기반으로 운용 능력을 극대화 하는 전략을 제시하였다. 과거 보수적인 주기적인 계획정비보다 성능지표를 확인하여 정비주기를 연장하여 정비비용을 줄이거나, 잔여 성능 지표가 낮을 경우 운용가용도를 높이기 위해 점검 주기를 단축하거나 탄 발사 후순위로 지정하는 등의 방법을 전략적으로 적용할 수 있다.

연구의 한계로는 획득한 데이터가 평균 10년차에 1회를 측정된 데이터로서 경향을 확인하기 위해서는 추가적

인 데이터 측정이 필요하다. 동일한 검출기를 장기적으로 관찰하여 잔여 픽셀들의 경향을 확인한다면 더 정확한 잔여 수명예측을 위한 모델을 만들 수 있을 것으로 기대 한다.

유도무기체계는 전파, 관성, 구동, 탐색기 등 다양한 분야를 아우르는 기술이 집약된 무기체계이다. 본 연구에서는 탐색기에 한정하여 PHM 적용전략을 연구하였지만 유도탄 주요구성품의 노화 수명특성을 추가로 연구한다면 유도무기 체계에 대한 정밀한 수명예측이 가능할 것으로 예상된다. PHM 기술을 점진적으로 확대 적용한다면 유도탄 무기체계의 운용유지비용을 최소화 할 수 있고, 운용 가용도는 최대로 올릴 수 있는 방법이 될 것이다.

## References

- [1] D. I. Kwon, Prognostics and Health Management Body of Knowledge, Guide Book, Korea Society for Prognostics and Health Management, Korea, pp.5-6.
- [2] Tim Fallon, Devinder Mahal, Iain Hebden, "F-35 Joint Strike Fighter Structural Prognostics and Health Management An Overview", *2009 ICAF Conference Rotterdam*, 2009.
- [3] Dokyung Hyun, Sunghwan Kim, Younh Lee, Hyewon Lee, Seunghyun Lee, "A Study of PHM Technology Application to and Electronic Weapon System", *International Journal of Reliability and Applications*, Vol.20, No.3, pp.246-253, Oct. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.33162/JAR.2020.09.20.3.246>
- [4] Xavier Breniere, Philippe Tribolet, "IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance", *Proc.SPIE6940, Infrared Technology and Applications XXXIV*, 69400H, 2 May 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.780048>
- [5] Li jianlin, Zhang Shaoyu, Sun Juan, Xie Gang, Zhou Jiading "Evaluating its storage life using thermal stress accelerated HgCdTe FPA performance degradation", *Infrared and Laser Engineering*, Vol.48, No.10, pp.1004003-1 - 9 , Oct 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1004003>
- [6] R.K.Asatourian, "INFRARED FOCAL PLANE ARRAY STORAGE LIFE ASSESSMENT BY ACCELERATED AGING", *Quality and Reliability Engineering international*, 14, pp.425-432, 1998.  
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1638\(199811/12\)14:6<425::AID-QRE226>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1638(199811/12)14:6<425::AID-QRE226>3.0.CO;2-J)

박 준 수(Jun-Su Park)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한양대학교 산업경영공학 (학사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 IPS연구소 선임연구원

<관심분야>

국방/과학, PHM, 광학, 데이터분석

한 승 규(Seung-kyu Han)

[정회원]



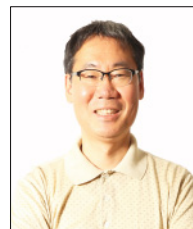
- 2022년 2월 : 단국대학교 산업공학과 (산업공학 학사)
- 2022년 4월 ~ 현재 : LIG넥스원 연구원

<관심분야>

국방/과학, 신뢰성, PHM

이 원(Won Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (전자공학 학사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야>

국방/과학, 신뢰성



문 경 민(Gyeong-Min Moon)

[정회원]



- 2020년 2월 : 아주대학교 산업공학과 (산업공학 학사)
- 2022년 6월 ~ 현재 : LIG넥스원 연구원

〈관심분야〉

국방/과학, 신뢰성, PHM