J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng Vol. 42, No. 2 : 28-35, June 2019
https://doi.org/10.11627/jkise.2019.42.2.028
ISSN : 2005-0461(print)
ISSN : 2287-7975(online)

# A Method of Failure Detection Rate Calculation for Setting up of Guided Missile Periodic Test and Application Case

In-Duck Choi†

ILS Center, Defense R&D Center, Hanwha Corporation

# 유도탄 점검주기 설정을 위한 고장 탐지율 산출 방안 및 적용 사례

최 인 덕†

㈜한화 종합연구소 ILS센터

Since guided missiles with the characteristics of the one-shot system remain stored throughout their entire life cycle, it is important to maintain their storage reliability until the launch. As part of maintaining storage reliability, period of preventive test is set up to perform preventive periodic test, in this case failure detection rate has a great effect on setting up period of preventive test to maintain storage reliability. The proposed method utilizes failure rate predicted by the software on the basis of MIL-HDBK-217F and failure mode analyzed through FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) using data generated from the actual field. The failure detection rate of using the proposed method is applied to set periodic test of the actual guided missile. The proposed method in this paper has advantages in accuracy and objectivity because it utilizes a large amount of data generated in the actual field.

Keywords : Failure Detection Rate, Reliability, Storage Reliability, Periodic Test, Guided Missile

## 1. 서 론

현대 무기체계는 과학기술이 발전하고 다양한 전장의 환경과 사용자 요구 조건에 따라 많은 기능과 부품의 시스템으로 이루어지면서 고밀도, 고성능, 고비용의 첨단 무기체계로 변화하고 있다. 따라서 최종 사용자인 소요군이 이러한 무기체계를 운용하기 위해서는 경제성과 운용 안정성 확보 측면에서 해당 무기체계의 신뢰도, 즉 무기체계의 입고부터 폐기까지 얼마나 고장이 날 것인가를 정확히 예측하여 어떻게 정비를 할 것인지 판단하는 것이 중요하다.

한편, 현대 무기체계 중에서 One-shot 시스템의 특성을 갖는 유도탄은 전 수명주기동안 저장 상태에 있기 때문에 발사 전까지의 저장 신뢰도가 보증되어야 한다. 저장 신뢰도를 보증하기 위해서 설계 단계에서부터 높은 신뢰도의 부품을 사용하거나 지속적인 품질 보증 활동 등의 노력을 하며 하드웨어의 중복 설계 기술을 활용하여 신뢰도를 향상하기도 한다. 또한 종합군수지원(ILS) 관점에서는 저장 시의 주기적인 예방점검을 통하여 신뢰도를 유지하기도 하는데 E. C. Martinez는 시간이 지남에 따라 지수 분포 형태로 감소하는 저장 신뢰도를 개선하기 위해 주기적인 점검을 통하여 발생할 수 있는 고장을 탐지하고 점검함으로써 신뢰도를 유지할 수 있는 모형을 제시하였으며[8], 최근에 여러 사례가 이 모형을 사용하거나 응용하여 One-shot 시스템의 신뢰도를 유지하는 것을

Received 26 March 2019; Finally Revised 7 May 2019; Accepted 21 May 2019
† Corresponding Author : idchoi916@hanwha.com

보여준다. Kim et al.[5]은 2013년에 지수 분포뿐만 아니라 와이블 분포, 감마 분포를 Martinez에 적용하여 제시하였고, Kim et al.[6]은 2015년에 Martinez 모형의 수정 모형을 제시하여 기존 모형과의 비교 분석을 통해 모형의 적절성을 검증하였다. 또한 2017년에 Jeong et al.[4]은 One-shot 시스템의 상태를 초기로 돌리는 비용 총 네 가지를 고려한 비용 모형을 기반으로 One-shot 시스템의 검사 주기와 횟수를 결정하는 모형을 연구하였다. 또한 2017년에 Jeong et al.[3]은 이론적 접근인 Martinez 모형 적용방법의 단점을 보완하기 위해 실제 고장데이터를 통해 모수적 접근방법을 이용하여 유도탄의 저장 신뢰도와 검사주기를 제시하였다. 본 논문에서는 Martinez 모형의 주요 요소 중 하나인 고장 탐지율 산출 방안을 제안하였다. 본 논문 제 2장에서는 Martinez 모형에 대해 살펴보고 제 3장에서는 본 논문을 이해하기 위한 고려사항에 대하여 서술하였다. 제 4장에서는 고장 탐지율 산출 방안을 제안하며 제 5장에서는 제안된 고장탐지율을 적용하여 XX 유도탄의 점검주기를 산출하였다. 마지막 제 6장에서는 본 연구에 대한 결론 및 추후 계획을 기술하였다.

본 연구는 군에서 운용할 체계에 대한 개발 내용을 다루고 있어 보안 사항에 대해서는 XX로 처리하였다.

## 2. Martinez 저장 신뢰도 모형

Martinez는 1984년 지수 분포를 갖는 시스템의 저장 신뢰도 모형 식을 제시하였다. Martinez의 모형 식에 따르면 시스템은 주기적인 검사를 통해 고장을 탐지할 수 있으며 해당 고장의 수리를 통해 다시 저장 상태, 즉 저장 신뢰도 100%에 근접한 상태로 되돌릴 수 있다. Martinez는 <Figure 1>과 같이 시스템의 공장 출고 시부터 사용 시까지의 과정을 5단계로 나누어 설명하였다. 각 시스템의 신뢰도는 지수 분포를 따르며 단계별 고장률을 갖는다. 특히 단계 4에서는 주기 검사를 통해 고장을 탐지하며 검사를 위한 전원 On-off시에도 고장이 발생한다고 가정하였다.

<Table 1> Notation of Martinez Model

| Notation | Definition |
|---|---|
| $\alpha_i$ | $i_{th}$ probability of detecting a failure |
| $\lambda_E$ | Operating failure rate |
| $\lambda_{si}$ | $i_{th}$ Storage failure rate |
| $\lambda_M$ | Use or mission failure rate |
| $\lambda_C$ | Power On-Off failure rate |
| $C$ | The number of test cycles in test interval |
| $T_T$ | Operating time during periodic tests |
| $F_3$ | The number of failures through preacceptance checkout |
| $F_P$ | The number of failures during one periodic test interval |

고장 개수는 고장률($\lambda$)과 시간($t$)의 곱으로 나타내며 지수 분포를 갖는 시스템의 신뢰도는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

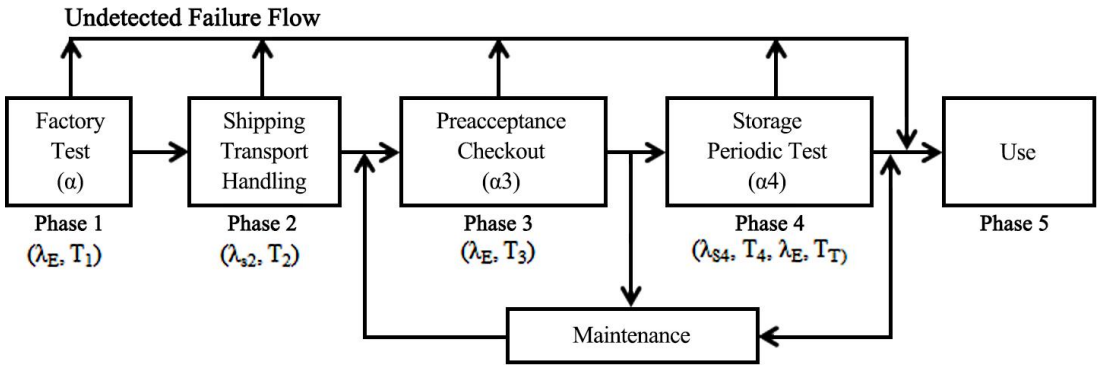
$$R = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

저장 전 단계인 단계3까지의 고장 개수는 식 (2)와 같이 각 단계의 고장의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F_3 = (1-\alpha_1)\lambda_E T_1 + (1-\alpha_3)(\lambda_{s2} T_2 + \lambda_E T_3) \tag{2}$$

이때 $(1-\alpha_1)$과 $(1-\alpha_3)$은 각각 단계 1에서의 공장 검사와 단계3에서의 수락 검사에서 고장 탐지를 100% 하지 못했을 때의 확률을 의미한다. 따라서 저장되기 전인 단계3까지의 신뢰도는 식 (1)과 식 (2)를 고려한 식 (3)과 같다.

$$R = e^{-F_3} \tag{3}$$




<Figure 1> Storage Reliability with Periodic Test Model

저장 단계인 단계 4에서는 $T_4$시간 동안 저장 상태로 있으면서 주기 검사를 수행하며, 주기 검사 시간인 $T_T$시간 동안 전원을 켜는 것이 주기적으로 반복된다. 점검 시의 고장률을 $\lambda_E$, 전원을 On-off 할 때의 고장률과 시간을 각각 $\lambda_C$와 $C$ 라고 했을 때 단계 3에서의 고장 개수는 식 (4)과 같다.

$$F_P = \lambda_{S4} T_4 + \lambda_E T_T + \lambda_C C \tag{4}$$

이때 전원 On-off 시의 고장률은 저장 시의 고장률의 165배에서 375배의 값을 가지며 평균값인 270배를 적용한다.

결과적으로 $N$번째 검사 직전과 검사 직후의 신뢰도는 각각 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$R_{N(MIN)} = e^{-[(N-1)(1-\alpha_4)F_P + F_3]} \times e^{-\lambda_{S4} T_4} \tag{5}$$

$$R_{N(MAX)} = e^{-[(N-1)(1-\alpha_4)F_P + F_3]} \tag{6}$$

이처럼 Martinez가 제시한 저장 신뢰도 모형에서 중요한 요소 중의 하나는 단계4에서의 고장 탐지율($\alpha_4$)이다. 고장 탐지율의 차이에 따라 주기 검사 직후의 신뢰도가 회복하는 정도에 상당한 차이를 보이고 이는 시스템의 목표 신뢰도와 직결되기 때문이다. 특히 높은 위험성을 지닌 유도탄의 경우처럼 정확한 임무 수행을 필요로 하는 시스템의 경우에는 신뢰도를 정확히 예측하는 것이 더욱 중요하다.

## 3. 고려 사항

### 3.1 유도탄 특성

유도탄의 고장 탐지율과 신뢰도를 이해하기 위해서는 장기간 저장 상태로 있는 유도탄의 특성을 이해할 필요가 있다. 유도탄은 전자부품, 기계부품 및 화약류 등의 시효성 품목으로 구성되어 있다. 그중에서 화약류 등의 시효성 품목은 저장 기간 노화되는 특성을 갖고 있으며 일정 기간이 지나면 효과를 발휘 할 수 없는 품목이다. 따라서 저장 기간 동안 고장이 발생하여 점검 장비를 통해 고장을 식별해야 하는 대상이 아니다.

2018년 탄약지원사령부에서 발간한 탄약 ILS 실무지침서에 따르면 유도탄 저장 신뢰도의 경우 전자부품의 신뢰도만 분석하며 기계부품은 탄약고 저장간 고장 소요가 거의 없기 때문에 저장 신뢰도 분석에서 제외한다. 또한 시효성 품목에 대해서는 시료 통계 분석, 저장 시간 경과에 따른 수명 특성치 변화량의 회귀 분석 등을 통해 저장 수명을 별도로 산출하도록 하였다[9]. 따라서 본 논문에서 제시하는 유도탄의 모든 고장 탐지율, 고장률 및 신뢰도는 기계 및 시효성 품목을 제외하였다.

### 3.2 고장률 분석

본 논문에서 고장 탐지율 산출과 점검 주기 분석을 위해 언급하는 고장률은 MIL-HBDK-217F의 전자부품 고장률 산출 모형 식을 기준으로 한다[10].

MIL-HDBK-217F는 1991년에 미국 국방성에서 전자장비의 신뢰도 예측 모형에 대해 발간한 규격으로 운용 환경, 온도, 스트레스 인자 등으로 구성된 전자부품의 신뢰도 산출 모형 식이 제시되어 있으며, 모형 식을 통해 산출된 각각의 개별 부품들은 직렬로 구성되어 모두 합산하는 방식으로 시스템 단위의 고장률을 산출한다.

MIL-HDBK-217F는 아직 방위산업 분야에서 신뢰도 산출 기준으로 사용하고 있으며 XX 유도탄의 신뢰도 산출 시에도 군의 요구 사항에 따라 MIL-HDBK-217F를 적용하였다.

또한 MIL-HDBK-217F는 전원이 인가될 시의 운용 신뢰도에 대한 규격이기 때문에 저장 고장률 산출의 경우 미국 공군에서 발행한 The Rome Laboratory Reliability Engineer's Toolkit의 Dormant Conversion Factor를 적용하였다[12]. Dormant Conversion Factor는 운용 고장률에 곱해져 비운용 시 또는 저장 시의 고장률로 변경할 때 쓰이는 값이다. 예를 들어 MIL-HDBK-217F를 통해 산출된 지상 환경의 $0.5\times10^{-6}$의 운용 고장률을 갖는 집적회로의 경우 Dormant Conversion Factor 0.08을 곱하여 $0.04\times10^{-6}$의 저장 고장률로 변환할 수 있다.

### 3.3 고장 유형 분석

본 논문에서는 고장 탐지율을 산출하기 위해 부품의 고장 유형을 분석하였으며, 유형 분석을 위해 Failure Mode/Mechanism Distribution(FMD)-2013의 데이터를 활용하였다[1]. FMD-2013은 미국 국방성 산하 단체인 RIAC(Reliability Information Analysis Center)에서 발행한 데이터 책으로 정기간행물, 기술보고서 등의 출판 정보와 미국 정부 후원 기관의 정비 데이터, 자체 고장 분석 데이터로 이루어져 있는 빅데이터이다. FMD-2013에서는 이러한 백분율 형태의 수많은 데이터를 양으로 변환하기 위하여 아래와 같은 수식을 사용함으로써 데이터의 신뢰도를 높였다.

$$\text{(Quantity of lowest percentage)} \times \frac{\%_i}{\%_1} \tag{7}$$

이때 $\%_1$은 데이터에서 가장 낮은 백분율에 해당하고 $\%_i$는 $i$번째 고장 유형에 해당하는 백분율이다.

## 4. 유도탄 고장 탐지율 산출 방안

### 4.1 고장 탐지율 산출 방안 개선 필요성

유도탄에서의 고장 탐지율은 유도탄 점검 장비가 유도탄에 발생한 고장을 탐지할 수 있는 능력을 의미하며 시스템 전체 고장에 대한 고장을 탐지할 수 있는 비율로 나타낸다. 이를 산출하기 위해서 2011년 Lee et al.[7]은 분석 대상 고장률의 합과 탐지 가능 고장률 합의 비로 계산하여 예방 점검 주기에 대한 연구를 진행하였고 2015년 Seo et al.[11] 또한 항공 전자 장비에 대한 BIT(Built-in Test)의 고장 탐지율을 분석 대상 고장률의 합과 탐지 가능 고장률 합의 비율로 제시하였다. 방위산업 분야에서 고장 탐지율을 산출하기 위해 위 논문과 같은 방법을 주로 사용한다. 이러한 방법을 수식으로 표현하면, 시스템의 하부 구성품의 품목별 각 고장률을 $\lambda$라고 하고 점검 장비가 탐지할 수 있는 각 구성품의 고장률을 $\lambda_d$, 각 구성품의 개수를 $n$이라고 했을 때 고장 탐지율($\alpha$)은 아래와 같다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_{di}}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} \tag{8}$$

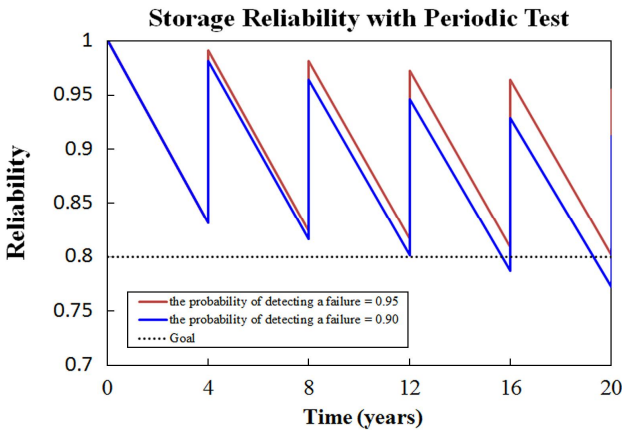
대부분의 유도탄 점검 장비의 경우 구성품이나 모듈 단위로 고장을 탐지한다. <Table 2>는 직렬로 구성된 모듈 단위의 고장 탐지율 산출 예시를 보여준다. 총 5개의 모듈을 가진 시스템의 전체 고장률은 모듈 A에서 모듈 E까지의 총 고장률 합인 0.86으로 산출되고, 그중 점검 장비가 고장률 0.06인 모듈 A를 탐지하지 못한다고 할 때 시스템에서 점검 장비가 탐지할 수 있는 고장률은 모듈 A를 제외한 고장률의 합인 0.80으로 산출할 수 있다. 따라서 식 (8)에 의해 고장 탐지율은 93%가 된다.

이러한 방식의 경우 모듈 단위의 고장률이 크고 모듈 단위의 수가 적기 때문에 모듈에 대한 고장 탐지 여부에 따라 고장 탐지율의 변화가 커서 시스템의 신뢰도와 점검 주기 산출에 영향을 미친다.

<Figure 2>는 Martinez 모형 수식 (4)~수식 (6)을 통해 산출한 20년 저장 시 저장 신뢰도 80% 이상을 요구 조건으로 갖는 유도탄의 저장 신뢰도를 보여준다. 고장 탐지율이 100%가 아니기 때문에 주기 점검 시 저장 신뢰도가 100%가 되지 않으며 고장 탐지율이 낮아질수록 점검 시에 보상되는 저장 신뢰도가 낮아진다. 고장 탐지율을 95%로 산출할 경우에는 4년 주기 점검 시 요구 조건을 만족하지만, 고장 탐지율을 5% 낮춘 90%로 산출할 경우에는 같은 4년 주기 점검 시 요구 조건을 만족하지 못한다. 고장 탐지율 5%의 차이가 점검 주기를 1년 이상 바꿀 수 있는 것이다.

<Table 2> Example of Failure Detection Rate

| Classification | | Failure Rate($\times 10^{-6}$) | | Detection Rate ($\alpha$) |
|---|---|---|---|---|
| | | System($\lambda$) | Detectable($\lambda_d$) | |
| System | | 0.86 | 0.80 | 0.93 |
| | Module A | 0.06 | - | |
| | Module B | 0.22 | 0.22 | |
| | Module C | 0.35 | 0.35 | |
| | Module D | 0.12 | 0.12 | |
| | Module E | 0.11 | 0.11 | |

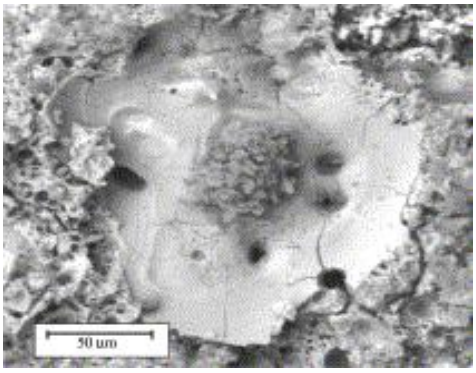



<Figure 2> Storage Reliability with 4 year Periodic Test

<Table 3> Failure Mode of Digital IC in FMD-2013

| Failure Mode | Data Details | Distribution |
|---|---|---|
| Parametric Failure | Channel degradation, Excessive current, External current leakage, etc | 58.3% |
| Induced Failure | CMOS Latch-up, Voltage transient, Current overstress, etc | 23.4% |
| Mechanical Failure | Cracked dice or substrates, cracked die, Degradation, etc | 10.5% |
| Vendor Defect | Bond full failure, Bonding failure, Bond wire separation fault, etc | 4.3% |
| Functional Failure | Data bit failure, Data word incorrect, Electromigration, etc | 1.8% |
| Short | Electrical overstress, Gold wire short, Grounded, etc | 1.0% |
| Stuck High | Electrical overstress, Logic 1, Short high, etc | 0.6% |

유도탄 시스템의 주요 모듈 중 하나인 회로카드조립체의 경우 통상적으로 여러 개의 전자부품으로 이루어져 있으며 각각의 전자 부품은 다양한 고장 유형을 갖는다. <Table 3>은 FMD-2013에서 분석한 디지털 IC(Digital IC)의 고장 유형이다. Digital IC의 경우 7개의 고장 유형을 가지며 발생 분포를 나타낸다.




<Figure 3> SEM Analysis of The Breakdown Spot of Tantalum Capacitor[13]

회로카드조립체의 전자 부품은 사용 위치와 방법에 따라서 고장 유형별로 시스템에 영향을 미치는 정도가 상이하다. <Figure 3>은 탄탈룸 커패시터의 분해점을 주사전자현미경(SEM)으로 분석한 사진이다. 이 커패시터는 시간이 지나 단락되어 제 기능을 하지 못한다. 만약 이 커패시터가 DC차단 커패시터로 사용되었다면 DC 차단 기능을 상실하여 해당 회로카드조립체에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러나 DC 차단 커패시터로 사용된 커패시터의 용량이 점차 감소하는 고장의 경우에는 커패시터의 용량이 일정 수준 감소하여도 감소한 용량이 회로에 영향을 미치지 않기 때문에 점검 장비가 해당 고장을 탐지할 수 없다. 커패시터 용량이 점차 감소하여 <Figure 3>과 같이 제 기능을 하지 못하게 되면 R. Gallay가 금속화 커패시터의 수명과 고장분석에 대한 연구의 결과에서 언급한 대로 회로카드조립체 전체 비용의 매우 작은 비용을 차지하는 커패시터의 고장이 회로카드조립체 전체에 큰 영향을 미칠 수 있다[2].

따라서 점검 장비가 탐지할 수 없는 고장 유형이라고 하여도 시스템의 고장으로 이어질 수 있기 때문에 기존 시스템의 고장률과 탐지 가능 고장률의 비로 산출하는 분석 방법에서 벗어나 각 전자 부품들의 고장 유형, 시스템 영향성, 발생 빈도 및 고장 탐지여부 등을 고려한 고장 탐지율을 산출할 필요가 있다.

## 4.2 산출 방안

FMD-2013을 통해 각각의 부품의 고장 유형과 유형 비율을 파악하게 되면 각 유형의 고장이 발생 했을 때 시스템의 점검 장비가 고장을 탐지할 수 있는지를 파악하여야 한다. 앞서 4.1장에서 언급한대로 부품의 고장 탐지 여부는 부품의 종류와 사용 위치 및 방법에 따라 달라진다. 예를 들어 <Table 4>와 같이 2개의 부품이 직렬로 연결된 극단적인 시스템이 있다고 가정하자. <Table 4>는 고장 탐지율 산출 과정을 설명하기 위한 극단적으로 간단한 시스템으로 실제 존재하는 시스템은 아니다. 1번 부품인 커패시터의 경우 이 시스템에서는 AC 커플링 커패시터로 쓰이고 총 6개의 고장 유형을 가지며 고장 유형 중 단락과 용량 변화는 해당 모듈이 고장이 나기 전까지는 점검 장비가 고장 탐지를 하지 못한다. 또한 2번 부품인 저항의 경우 각각 기계적인 고장, 퇴화일 때 점검 장비가 고장 탐지를 하지 못한다. 이 고장 유형들은 더 치명적으로 되어 시간이 지남에 따라 시스템 영향을 줄 확률이 높다. 이때 시스템의 고장 탐지 여부는 설계자가 시스템과 점검 장비, 시스템과 모듈, 모듈과 부품 사이의 관계를 파악하여 고장 유형별 고장 탐지 여부를 파악해야 한다. 부품별 고장 유형에 대한 고장 탐지 여부 파악이 완료되면 각 고장 유형에 대해 고장률을 할당할 수 있다. 이때 각 고장 유형에 대한 고장률($\lambda_m$)은 품목별 고장률($\lambda$)과 고장 유형 분포($f_r$) 곱으로 나타낼 수 있다.

<Table 4> Example of System Consisting of Two Parts

| No. | Parts | Type of Use | Failure Rate ($\lambda$) | Failure Mode | Distribution ($f_r$) | Detectable (1 or 0) ($D$) | Failure Rate of Failure Mode ($\lambda_m$) | Detectable Failure Rate |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Capacitor, Fixed, Ceramic | AC Coupling Capacitor | 0.1 | Drift | 62.6% | 1 | 0.0626 | 0.0626 |
| | | | | Shorted | 26.9% | 0 | 0.0269 | 0 |
| | | | | Opened | 6.0% | 1 | 0.006 | 0.006 |
| | | | | Change in Capacitance | 2.0% | 0 | 0.002 | 0 |
| | | | | Induced Failure | 2.0% | 1 | 0.002 | 0.002 |
| | | | | Voids | 0.6% | 1 | 0.0006 | 0.0006 |
| 2 | Resistor, Fixed, Film | Voltage Divide | 0.2 | Drift | 33.6% | 1 | 0.0336 | 0.0336 |
| | | | | Induced Failure | 22.1% | 1 | 0.0221 | 0.0221 |
| | | | | Shorted | 14.8% | 1 | 0.0148 | 0.0148 |
| | | | | Mechanical Failure | 12.1% | 0 | 0.0121 | 0 |
| | | | | Opened | 11.4% | 1 | 0.0114 | 0.0114 |
| | | | | Degraded | 6.0% | 0 | 0.006 | 0 |
| Sum of failure rate | | | 0.3 | Sum of detectable failure rate | | | | 0.1531 |

$$\lambda_m = \lambda \times f_r \tag{9}$$

최종적으로 앞서 분석한 고장 탐지 가능 여부 분석 결과에 따라 탐지가 불가능할 때에는 탐지 가능 고장률에서 제외하여야 한다. 즉, 탐지 가능 여부를 $D$라고 할 때, 탐지 가능할 시에는 1, 탐지 불가능할 시에는 0으로 표현하여 고장 유형에 대한 고장률($\lambda_m$)에 곱함으로써 제외한다. 따라서 총 품목의 개수를 $n$이라고 할 때 최종적인 고장 탐지율은 식 (10)과 같이 시스템 전체 고장률과 탐지 가능 고장 모드의 고장률 비로 산출할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\lambda_m \times D)_i}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i} \tag{10}$$

결과적으로 <Table 4> 예제의 고장 탐지율은 약 51%로 산출할 수 있다.

## 5. 고장 탐지율 적용 사례

제 4장에서 제안한 고장 탐지율 산출 방법을 사용하여 실제 개발 중인 XX 유도탄에 적용하여 해당 시스템의 저장 신뢰도 요구 조건에 따라 점검 주기를 산정하였다.

### 5.1 유도탄 운용 프로파일

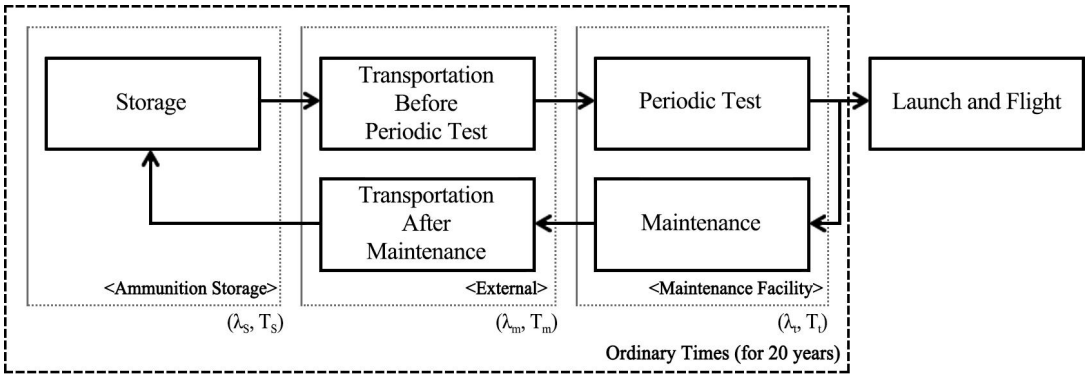
XX 유도탄은 20년 저장 기간 동안 저장 신뢰도 80%의 요구 조건을 갖는 개발 중인 유도탄이다. <Figure 4>는 XX 유도탄의 운용 프로파일을 보여준다. 20년 동안 탄약고에 탄을 저장하고 있다가 주기 점검 기간이 도래하면 정비고에서 주기 검사를 한 후 필요 정비를 수행한다. 이후 다시 탄약고에 와서 저장되며, 유사시에는 정비고에서 주기 검사를 한 후 발사한다. 이때 저장기간에 비해 매우 짧은 입고 검사 등의 저장 이전 환경과 발사 후 비행 시 환경은 운용 프로파일에서 제외 하였다.

### 5.2 고장 탐지율 산출

XX 유도탄은 총 800여 개의 부품으로 이루어져 있으며 4장에서 제시한 방법을 통해 고장 탐지율을 산출하였다. 이중에서 기계 및 시효성 품목을 제외한 전자부품은 총 537개, 해당 부품이 속하는 모듈 단위 개수는 31개이며, 각 부품의 고장 분석을 통한 고장 유형의 수는 총 2,037개이다. 또한 시스템의 총 저장 고장률은 $3.91\times10^{-6}$이고 탐지 가능한 모듈 단위의 고장률은 $3.83\times10^{-6}$, 탐지 가능한 고장 모드의 고장률은 $3.66\times10^{-6}$이다. <Table 5>는 모듈 단위의 고장 탐지율과 제안된 방식의 고장 탐지율을 산출한 결과를 보여준다. 결과적으로 제안된 방식의 고장 탐지율은 93.7%, 같은 시스템을 모듈 단위로 분석했을 때는 98.1%로 고장 탐지율이 약 4.4% 낮게 산출되었다. 이때 2,037개의 고장 유형 수준까지 고장 탐지율의 분석한 방법이 31개의 모듈 수준까지 고려한 방법 보다 객관적이라고 할 수 있다. 또한 탐지가능 개수(Detectable Quantity)가 각각 28개, 1,957개로 탐지 가능 개수 변화에 따른 고장 탐지율 값의 변동성이 작으며, 전체 부품의 고장 유형에 따른 시스템 영향성 고려했다는 측면에서 더 정확하다고 볼 수 있을 것이다. 본 논문에서는 93.7%의 고장 탐지율을 적용하여 점검주기를 산출하였다.

<Table 5> Failure Detection Rate of XX Guided Missile

| Classification | Module Level | Failure Mode Level (This Work) |
|---|---|---|
| Quantity | 31 | 2,037 |
| Detectable Quantity | 28 | 1,957 |
| Total Failure Rate | $3.91\times10^{-6}$ | $3.91\times10^{-6}$ |
| Detectable Failure Rate | $3.83\times10^{-6}$ | $3.66\times10^{-6}$ |
| Failure Detection Rate | 98.1% | 93.7% |




<Figure 4> Operation Profile of XX Guided Missile

## 5.3 점검주기 산출

XX 유도탄의 요구 조건에 적합한 점검 주기를 산출하기 위해 2장에서 서술한 Martinez의 모형을 적용하였으며 Martinez 모형 식은 다음과 같은 이유로 대략화 하였다.

- Martinez의 연구에서 제시한 공장 검사(단계 1) 및 입고 운송 과정(단계2) 과정은 전 운용 기간 단 1번만 이루어지므로 생략하였다.
- XX 유도탄의 특성상 저장고와 정비고의 거리 차이가 있으므로 주기 점검 시 저장고와 정비고 사이의 운송이 반복되어 해당 단계의 고장률을 고려하였다.

따라서 운용 기간 내에 총 고장 개수와 검사 전후의 저장 신뢰도 값은 다음과 같다.

$$F = \lambda_t T_t + \lambda_m T_m + \lambda_s T_s + \lambda_c C \tag{11}$$

$$R_{N(MIN)} = e^{[-(N-1)(1-\alpha)F]} \times e^{-\lambda_m T_m} \times e^{-\lambda_s T_s} \tag{12}$$

$$R_{N(MAX)} = e^{-N(1-\alpha)F} \tag{13}$$

$R_{N(MIN)}$은 $N$번째 주기 검사 전 저장 신뢰도의 최소치를 의미하며, $R_{N(MAX)}$는 $N$번째 주기 검사 후 저장 신뢰도의 최대치를 의미한다. 이때 $N$은 주기 검사 횟수를 의미하고 $\lambda_m$ 및 $T_m$은 각각 탄약고에서 정비고로 이동할 때의 이동 고장률과 이동 시간을 의미한다. 또한 $\lambda_s$ 및 $T_s$는 각각 저장 고장률과 검사 주기를 의미하며 $\lambda_t$ 및 $T_t$는 각각 점검 고장률과 점검 시간을 의미한다. $C$는 주기 점검 기간의 전원 인가 사이클 수로 $\lambda_c$는 이때의 고장률을 의미하며 본 논문에서는 Martinez 모형 식에서 제시한 저장 신뢰도의 270배 값을 적용하였다. 이동 시간($T_m$)과 점검 시간($T_t$)은 각각 해당 무기 체계의 요구 조건인 30분과 5분을 적용하였다. 이렇게 산출한 각 점검주기 산출 요소들의 값은 <Table 6>과 같다.

결론적으로 20년 후 저장 신뢰도 80% 이상이 되는 $R_{N(MIN)}$값을 주목해야 하며 값이 만족하는 범위 내에서 검사 주기($T_s$)를 가져가야 한다. 검사 주기($T_s$)는 1년에서부터 6년까지의 수치를 대입하였고 그에 따라 저장 신뢰도 값이 어떻게 변화하는지를 관찰하였다. <Table 7>은 검사 주기($T_s$) 변화 시 20년 운용 시의 저장 신뢰도 산출 결과를 보여준다. 6년마다 주기 점검을 수행할 시 약 79.4%로 20년 후 저장 신뢰도 80%를 만족하지 못한다.

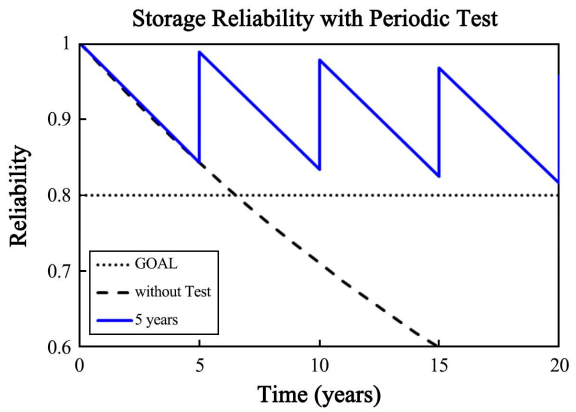
<Figure 5>와 <Figure 6>은 각각 5년 주기 점검 시와 6년 주기 점검 시의 신뢰도 변화를 보여준다. 5년 주기 점검의 그래프가 목표 요구 조건인 20년간 80%를 웃도는 반면 6년 주기 점검의 그래프는 20년이 도래하기 전

<Table 6> Calculation Results of Each Factors

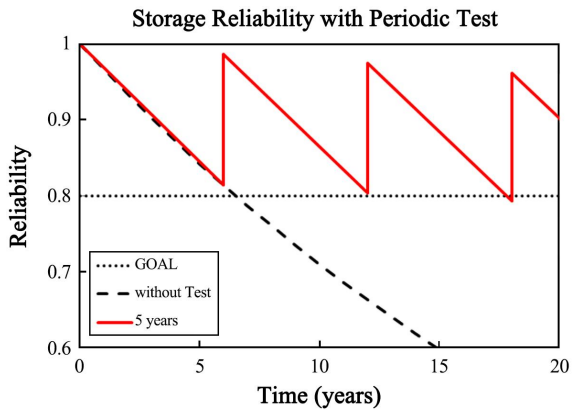
| Notation | Definition | Value |
|---|---|---|
| $\alpha$ | Failure Detection Rate | 93.7% |
| $\lambda_s$ | Storage Failure Rate | $3.9\times10^{-6}$ |
| $T_s$ | Test Period(Storage Time) | Variable |
| $\lambda_m$ | Mobile Failure Rate | $14.2\times10^{-6}$ |
| $T_m$ | Mobile Time | 0.5 hour |
| $\lambda_t$ | Test Failure Rate | $4.2\times10^{-6}$ |
| $T_t$ | Test Time | 0.083 hour |
| $\lambda_c$ | On-Off Cycle | $1053\times10^{-6}$ |
| $C$ | Number of Test cycles | 1 |

<Table 7> Storage Reliability After 20 Years

| Test Period | $R_{N(MIN)}$ after 20 years |
|---|---|
| without Test | 0.504958(50.5%) |
| every 1 year | 0.926506(92.6%) |
| every 2 years | 0.897916(89.8%) |
| every 3 years | 0.873613(87.3%) |
| every 4 years | 0.842512(84.3%) |
| every 5 years | 0.816023(81.6%) |
| every 6 years | 0.793777(79.4%) |




<Figure 5> Storage Reliability with 5 year Periodic Test




<Figure 6> Storage Reliability with 6 year Periodic Test

<Table 8> Results of 5 year Periodic Test

| Number of Test | Cumulated Year (Year) | Cumulated Time (Hour) | Reliability | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $R_{N(MIN)}$ | $R_{N(MAX)}$ |
| 1 | 5 | 43,800 | 0.842967 | 0.98923 |
| 2 | 10 | 87,600 | 0.833889 | 0.978576 |
| 3 | 15 | 131,400 | 0.824907 | 0.968037 |
| 4 | 20 | 175,520 | 0.816023 | 0.957611 |

80% 아래로 떨어지는 모습을 보인다. 짧은 주기로 점검하는 것이 신뢰도 측면에서는 가장 좋지만, 신뢰도 요구 조건을 만족하는 범위 내에서 가장 큰 주기 검사 간격을 가져가는 것이 운용 측면에서 좋다고 볼 수 있다. 따라서 요구 조건을 만족하기 위해서는 5년마다 주기 점검을 해야 한다. 결과적으로 5년 주기 점검 시 20년까지의 저장 신뢰도는 <Table 8>과 같다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 One-shot 시스템의 특성을 갖는 유도탄의 고장 탐지율을 산출하는 방법을 제안하였다. 고장 탐지율은 Martinez의 주기 점검 모형의 주요 요소 중 하나로 고장 탐지율의 변화에 따라 신뢰도의 변화가 크기 때문에 최대한 정확하게 산출하는 것이 중요하다. 제안된 고장 탐지율 제시하는 방법은 빅데이터를 분석하여 모든 전자 구성품의 고장 유형과 발생률을 분석하는 방법이다. 본 방법은 본론에 기술된 대로 관련 빅데이터를 사용하기 때문에 데이터의 정확성과 보편성 측면에서 장점이 있다.

본 논문에서는 실제 개발 중인 유도탄의 고장 탐지율을 제안된 고장 탐지율 산출 방식으로 산출하였으며 이를 기존의 모듈 수준의 고장 탐지율 산출하는 방법과 비교하였다. 최종적으로 산출한 고장 탐지율을 Martinez의 저장 신뢰도 모형에 대입하여 해당 유도탄의 점검 주기를 산출함으로써 해당 고장 탐지율 산출 방법의 적절성을 검증하였다.

본 고장 탐지율 산출 방식은 각 전자 부품 단위의 물리적인 고장 유형에 대한 탐지 여부를 개발자가 모두 판단해야 한다는 점에서 한계점 또한 존재한다. 향후 연구에서는 고장 유형 탐지 여부에 대한 객관화 등의 발전 방안을 제시함으로써 본 연구에 대한 객관성을 확장할 수 있을 것이다.

## References

[1] Failure Mode/Mechanism Distributions 2013, Reliability Information Analysis Center (RIAC), 2012.

[2] Gallay, R., Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis, Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School Power Converters, Baden, Switzerland, 2014.

[3] Jeong, S.H. and Lee, S.B., Analysis of △△ Guided Missile Inspection Period Based on Storage Reliability, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 2017, Vol. 18, No. 4, pp. 592-598.

[4] Jeong, S.W. and Chung, Y.B., Optimal inspection policy for one-shot systems considering reliability Goal, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 4, pp. 96-104.

[5] Kim, D.K., Kang, W.S., and Kang, S.J., A study on the storage reliability determination model for one-shot system, *The Journal of The Korean Operations Research and Management Science Society*, 2013, Vol. 38, No. 1, pp. 1-13.

[6] Kim, H.W. and Yun, W.Y., Reliability Analysis for One-Shot Systems with Periodic Inspection, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2015, pp. 1-10.

[7] Lee, J.M., Kwon, K.S., and Lee, H.P., The study on estimating preventive maintenance period and life cycle of missile system, *Proceedings of Korea Institute of Industrial Engineers Autumn Academic Conference*, 2011, pp. 1172-1176.

[8] Martinez, E.C., Storage reliability with periodic test, *Reliability and Maintainability Symposium*, 1984, pp. 181-185.

[9] Practice Guidelines of Ammunition ILS, Ammunition Support Command, 2018.

[10] Reliability Prediction of Electronic Equipment(MIL-HDBK-217F), U.S. Department of Defense, 1991.

[11] Seo, J.H., Ko, J.Y., and Park, H.J., Built-In-Test Coverage Analysis Considering Failure Mode of Electronics Components, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2015, Vol. 43, No. 5, pp. 449-422.

[12] The Rome Laboratory Reliability Engineer's Toolkit, U.S Air Force Materiel Command (AFMC), 1993.

[13] Vasina, P., Zednicek, T., Sikula, J., and Pavelka, J., Failure modes of tantalum capacitors made by different technologies, *Microelectronics Reliability*, 2002, Vol. 42, Issue 6, pp. 849-854.

**ORCID**

In-Duck Choi | http://orcid.org/0000-0002-5465-2966