

수시점검 및 정기검사 시 고장의 중복을 배제한 유도탄 저장신뢰도 예측 모델

조보람^{1*}, 안장근^{1,2}

¹국방과학연구소 제기술본부

²아주대학교 대학원 시스템공학과

Storage Reliability Prediction Model for Missile subjected to Non-periodic Test and Periodic Inspection excluding Overlapped Failures

Boram Jo^{1*}, Jangkeun Ahn^{1,2}

¹The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development

²Department of Systems Engineering, AJOU University

요약 유도무기체계에서 특히 유도탄은 높은 신뢰도 및 가용도의 유지와 함께 경제적인 정비가 매우 중요한 무기체계이다. 대한민국 소요군에서는 야전에 배치된 모든 유도탄에 대해 정기적인 검사를 필수적으로 수행하고 있다. 정기적인 주기마다 야전에 배치된 모든 유도탄은 정비부대로 보내져 검사되고 혹은 검사 시 고장이 발견된다면 수리된다. 그리고 유도탄은 수시적으로 수행 가능한 자체점검의 기능을 보유하고 있다. 유도탄이 보유한 자체점검으로 유도탄이 발사대에서 운용될 동안이나 저장되어 있는 동안에 고장을 발견해 낼 수 있다. 그러므로 유도탄의 신뢰도와 정비 비용은 검사주기의 기간과 자체점검 및 정기검사의 수준에 매우 영향을 받을 수 있다. 본 논문에서는 수시점검과 정기검사를 받는 유도탄의 저장신뢰도를 예측하는데 있어 기존에 연구된 모델을 수정하여 고장의 중복을 배제한 새로운 유도탄 저장신뢰도 예측 모델을 제시하였다. 그리고 수치적 예시를 들어 새롭게 제시한 모델의 특성을 분석하였다. 또한, 제시된 모델은 검사주기 기간을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있다.

Abstract For missile systems, sustaining high reliability and ensuring economical maintenance are very important. In the Republic of Korea, for most missiles, periodic inspection is mandatory for missiles in the field. Every fixed number of years, they are returned to the ordnance depot to be tested and repaired if faults are found. Almost all missiles have a built-in test (BIT) capability. With the BIT, faulty missiles can be isolated anytime during operations or storage in the launchers. So the reliability and the maintenance costs of the missiles greatly depend on the length of the inspection cycle and the BIT/inspection quality. In this paper, we suggest a model for predicting the storage reliability of missiles subjected to non-periodic tests and periodic inspections, excluding overlapping failures. Some numerical examples are given. This model will be useful for determining the length of the periodic inspection cycle.

Keywords : Missile, BIT(Built-In-Test), Periodic Inspection, Reliability Prediction Model, Periodic Inspection Cycle

1. 서론

유도탄은 장기간 저장상태로 있다가 일회 발사를 통

해 임무수행을 마치고 소모되는 무기체계로서 소위 One-Shot-Item으로 부른다. 따라서 배치 이후 중요한 품질 특성은 저장신뢰도이다. 높은 저장신뢰도를 유지하기

본 논문은 국방과학연구소 연구과제로 수행되었음.

Corresponding Author : Boram Jo(Agency for Defense Development)

Tel: +82-42-821-2191 email: talktoboram@add.re.kr

Received February 22, 2018

Revised March 14, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

위해서는 평시 운용 간에 유도탄에 내장된 BIT(Built-In-Test) 기능을 활용하는 수시점검(Non-periodic Test)이나 일정기간을 정해놓고(예: 3년~5년) 이 시기가 도래한 모든 유도탄을 의무적으로 점검하게 하는 정기검사(Periodic Inspection)를 통해 은닉된 결함을 찾고 정비하는 활동이 대단히 중요하다[1]. 여기서 유도탄의 저장신뢰도는 구성품 복잡도, 운용조건 등에 따라 기간이 지나면서 급속히 낮아질 수 있는바, BIT를 활용한 수시점검을 통해 결함이 발생한 유도탄을 발견해내고 정비하게 함으로써 급속한 신뢰도 저하를 어느 정도 방지하게 되고 BIT로 발견할 수 없는 고장은 일정 주기의 정기검사 시점에 별도의 유도탄 점검장비를 활용한 정밀진단을 통해 식별해내고 적절한 정비조치를 함으로써 크게 상승하게 된다[2, 3]. 그러나 운용기간이 지나면서 다시 신뢰도는 감소하게 되는데 이렇게 신뢰도는 등락을 거듭하면서 진행된다. 그런데 정기검사를 한다고 해서 모든 결함이 식별되는 것은 아니므로 매 정기검사 직후 성취되는 신뢰도 최고수준도 매번 조금씩 하락하게 되며 이런 현상은 수명주기 동안 계속 진행된다.

이 때 일정한 기간(예: 20년, 30년 등의 수명주기 기간) 동안을 놓고 볼 때 평균적인 신뢰도 수준을 목표치에 만족할 수 있도록 유지하기 위해서는 고장 점검률이 높은 BIT 기능과 유도탄 점검 장비의 개발/획득이 우선적으로 중요하며 이들 기능과 장비가 이미 획득되어 있을 경우에는 정기검사 주기 결정이 가장 중요한 문제가 된다. 본 논문에서는 기존의 모델 중 BIT 및 정기검사를 받는 신뢰도 산출모델을 바탕으로 일부 기능을 확장하였다. 이 모델은 정기검사 주기 결정에도 쉽게 활용할 수 있다.

2. 신뢰도 예측 모델

BIT에 의한 수시점검과 주기적인 정기검사를 고려하여 유도탄 신뢰도를 예측하는 기존 모델들을 소개하고, 이를 기반으로 수정한 모델을 제시한다.

2.1 기존 모델

기존 모델의 경우 Martinez는 유도탄에 대해 주기적인 검사를 할 때 시간이 지나면서 유도탄의 저장신뢰도가 어떻게 감소해 가는지를 산출할 수 있는 모델을 제시

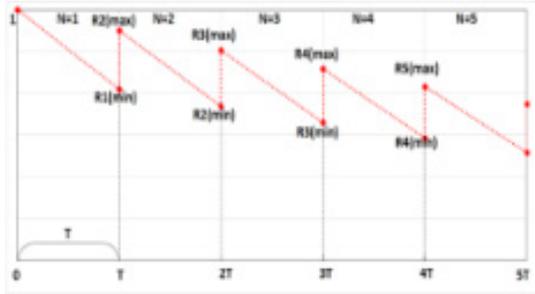
하였다[4]. 여기서 정기검사 시 사용하는 점검 장비의 고장식별능력에 제한이 있다는 것을 고려하여 주기마다 검사 및 정비 후 모든 유도탄이 100%로 회복되는 것이 아니라 점검이 불가능한 부위의 고장은 일부 유도탄에 은닉된 채로 계속해서 운용되므로 이로 인한 신뢰성 저하 효과를 모델에 반영하였다. 이렇게 은닉된 형태의 고장은 매 주기마다 여러 유도탄에서 발생 가능하며 주기가 여러 번 진행되면서 고장 유도탄이 증가하는 모습을 보인다. 해당 모델을 이용하여 이종문&권기상&이학표는 유도탄의 저장신뢰도를 예측하고 적정 예방점검 주기를 설정하기도 하였다[5]. 그리고 김대익&전건욱은 Martinez 모델을 한국 해군의 하푼 유도탄에 적용한 사례를 제시하였다[6]. 한편 김석근은 Martinez 모델을 확장하여 매 정기검사 사이에 평소 운용 시 수시로 이루어지는 자체 점검(BIT) 장치의 고장 점검률을 추가로 고려하여 신뢰도를 산출하는 모델을 제시하였다[7].

그런데, 기존 모델[4,5,6,7]에서는 주기마다 전체 유도탄 중에서 추가로 고장 나는 유도탄 개수의 기댓값을 의미하는 기대고장(유도탄) 개수가 변동이 없다고(줄어들지 않는다고) 가정하였으며 이로 인해 정기검사 후 고장이 발견되지 않고 은닉된 유도탄의 개수가 주기마다 동일한 개수만큼 발생하고 이들이 계속 누적되어 증가해가더라도 매주기마다 새로 고장 나는 기대고장(유도탄)개수는 동일한 것으로 보고 이를 신뢰도 산출에 적용하였다. 이렇게 하면 이미 고장 난 유도탄이 그다음 주기에든 매번 고장 날 수 있다는 것이고 이 중 일부는 고장이 은닉된 유도탄 개수에 추가된다는 개념이고 실제보다 중복으로 산출되는 것이므로 수정이 필요하다. 이를 수정하기 위해서는 고장이 은닉된 유도탄은 다음 주기의 고장 발생 가능 유도탄에서 제외하고 정상 유도탄에서만 고장 발생 가능한 것으로 하여 이를 신뢰도 산출에 적용하여야 한다. 아래 내용은 이러한 개념으로 기존 모델을 수정하고 확장한 과정을 설명한 것이다.

2.2 제안 모델

Fig 1. 에서 $N = 1$ 이면 $R_{1(\max)} = 1$, $R_{1(\min)} = e^{-\beta\lambda T}$ 이다. 최초에 총 m 개의 유도탄이 있었다면 첫 번째 구간 $[0, T]$ 기간 동안 평균 $m\lambda T$ 개($m =$ 유도탄 전체개수, $\lambda =$ 유도탄 한 개의 저장고장률, $T =$ 정기검사주기)가 고장 난다. 그리고 BIT 점검이 가능한 구성품에 고장이 났을 경우에는 고장 탐지가 가능하므로 $\beta m \lambda T$ 개(β

= BIT 점검률)의 유도탄은 정비를 통해 정상으로 복구되고, $\bar{\beta}m\lambda T$ 개의 유도탄은 고장이 내재된 상태로 운용하게 된다. 따라서 T시점에서 첫 번째 구간에서 신뢰도는 최저가 되고 [0, T]구간의 유도탄 1개에 대한 고장 개수 기대치는 $\bar{\beta}m\lambda T/m = \bar{\beta}\lambda T$ 가 된다. 따라서 $R_{1(\min)} = e^{-\bar{\beta}\lambda T}$ 가 된다.



Annotation)

$R_{1(\max)}$: Maximum Reliability in the first cycle[0,T] = 1

$R_{1(\min)}$: Minimum Reliability in the first cycle[0,T]

$R_{2(\max)}$: Maximum Reliability in the second cycle[T,2T]

...

$R_{N(\max)}$: Maximum Reliability in the N cycle[(N-1)T,NT]

$R_{N(\min)}$: Minimum Reliability in the N cycle[(N-1)T,NT]

Fig. 1. Example of storage reliability

T 시점에서 정기검사시점이 도래함에 따라 m 개의 유도탄 전체가 정밀검사를 받게 되고, 이때 정비시설에서는 고도의 정밀 점검 장비와 숙련된 정비요원을 활용하여 최대한 유도탄의 결함을 식별해 내려고 노력하므로 BIT로 점검 불가한 고장도 발견해 낼 수 있다. 전체 고장 중에 이렇게 정기검사를 통해 고장식별을 해내는 비율을 점검 효율(Test Effectiveness)[1]이라 부르기도 하지만 여기서는 점검률이라 하기로 하며, 이를 α 라 하기로 한다. α 는 유도탄 구성품 중 정기검사로 고장을 식별해낼 수 있는 구성품들의 고장률 합계를 구하여 이를 유도탄 전체 고장률로 나눈 값으로 적용하면 된다. 그러면 정기검사를 통해 밝혀내지 못하는 고장의 비율은 $\bar{\alpha}(=1-\alpha)$ 가 되고 정기검사 때 마다 이러한 고장이 존재하게 되며, 실제 운용하는 유도탄 중에 고장이 내재/은닉된 유도탄이 섞여 있게 된다.

그러면 두 번째 구간 [T, 2T]에서 볼 때, T 시점에서 정기검사를 마친 직후 신뢰도 수준은 [T, 2T]에서 최대

값이 되며 $R_{2(\max)} = e^{-\bar{\alpha}\lambda T}$ 가 된다. 그리고 2T 시점에서 최소값이 되는데 이는 $R_{2(\min)} = e^{-\{\bar{\alpha}+\bar{\beta}R_{2(\max)}\}\lambda T}$ 가 된다.

그리고 세 번째 구간 [2T, 3T]에서는

$$R_{3(\max)} = e^{-\{\bar{\alpha}+\bar{\alpha}R_{2(\max)}\}\lambda T} = e^{-\bar{\alpha}\{1+R_{2(\max)}\}\lambda T}, \text{ 여기서}$$

$R_{1(\max)} = 1$ 이므로 이 식은 $e^{-\bar{\alpha}\{R_{1(\max)}+R_{2(\max)}\}\lambda T}$ 로 표현할 수 있다. 그리고

$$R_{3(\min)} = e^{-\{\bar{\alpha}\{R_{1(\max)}+R_{2(\max)}\}+\bar{\beta}R_{3(\max)}\}\lambda T} \text{가 된다.}$$

이와 같은 방법으로 계산하면 N번째 구간 [(N-1)T, NT]에서는

$$R_{N(\max)} = e^{-\bar{\alpha}\left\{\sum_{k=1}^{N-1} R_{k(\max)}\right\}\lambda T} \text{ for } N \geq 2, R_{1(\max)} = 1$$

$$R_{N(\min)} = e^{-\left\{\bar{\alpha}\left(\sum_{k=1}^{N-1} R_{k(\max)}\right) + \bar{\beta}R_{N(\max)}\right\}\lambda T} \text{ for } N \geq 2$$

가 된다.

이 결과를 기존 모델[3]과 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of models

	Existing Model	Suggested Model
$R_{N(\max)}$	$e^{-\bar{\alpha}(N-1)\lambda T}$	$e^{-\bar{\alpha}\left\{\sum_{k=1}^{N-1} R_{k(\max)}\right\}\lambda T}$
$R_{N(\min)}$	$e^{-\{\bar{\alpha}(N-1) + \bar{\beta}\}\lambda T}$	$e^{-\left\{\bar{\alpha}\left(\sum_{k=1}^{N-1} R_{k(\max)}\right) + \bar{\beta}R_{N(\max)}\right\}\lambda T}$

3. 모델 적용

기존 모델과 제안 모델에 Table 2의 수치(*)를 적용하여 두 모델 간의 차이를 살펴보았다. 여기에 적용한 수치 데이터는 순항 유도탄에 적용되는 값들과 유사한 범위의 값을 임의로 제시한 것이다. 두 모델 간에 적용된 기준값은 유도탄 저장 MTBF = 70,000시간, 정기검사 점검률(α) = 95%, BIT 점검률(β) = 80%, 정기검사주기(T) = 4년이고, Fig 2를 통해 두 모델간의 매 정기검사 주기별로 유도탄의 저장신뢰도를 비교할 수 있다. Fig 2를 통해 시간이 지날수록 제안 모델에 적용된 유도탄의 신뢰도가 기존 모델에 적용된 신뢰도보다 더 높음을 알 수

있다. 신뢰도를 산출 시 매주기마다 이미 고장 난 유도탄을 제외함으로써 보다 정확한 유도탄의 신뢰도를 구할 수 있는 것이다. 그리고 이는 유도탄의 목표 신뢰도를 설정하고 검사 주기를 결정하는데 적지 않은 영향을 미칠 수 있다. 그리고 제안한 모델에 대해 Table 2의 다양한 수치를 적용해보았다.

Table 2. Numerical example

Missile Storage MTBF	50,000 hours	70,000 hours*	90,000 hours
Periodic Inspection Coverage Percent (α)	97%	95%*	93%
BIT Coverage Percent (β)	90%	80%*	70%
Periodic Inspection Cycle (T)	3 years	4 years*	5 years

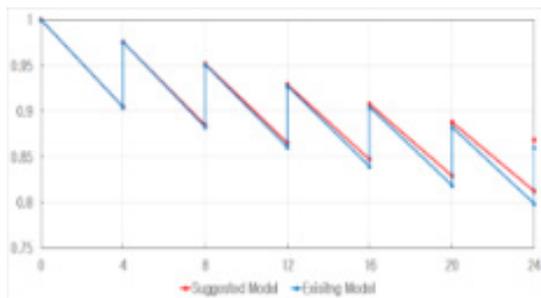


Fig. 2. Reliability level by newly suggested model and the existing model

Fig 3은 유도탄 저장 MTBF를 50,000(시간), 70,000(시간), 90,000(시간)으로 변화된 값을 주고, 정기검사 점검률(α), BIT 점검률(β), 정기검사주기(T)는 앞에서 정한 기준값을 그대로 적용하여 신뢰도를 산출한 그래프이다. 이 그래프를 통해 시간이 지남에 따라 MTBF가 높을수록 점검 주기 경과에 따른 저장신뢰도 감소폭이 적고 평균 저장신뢰도가 높음을 알 수 있다.

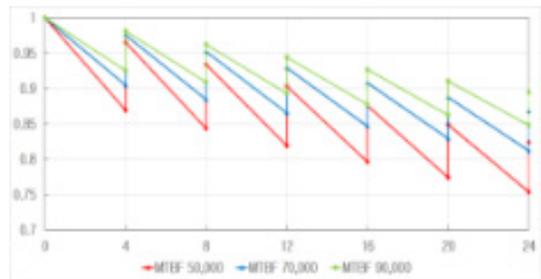


Fig. 3. Variation of MTBF

Fig 4는 정기검사 점검률(α)을 93%, 95%, 97%로 변화된 값을 주고, BIT 점검률(β)과 유도탄 저장 MTBF 및 정기검사주기(T)는 기준값을 그대로 적용하여 신뢰도를 산출한 그래프이다. 이 그래프를 통해 정기검사 점검률(α)이 높을수록 정기 점검 시 유도탄 저장신뢰도 복구수준이 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다.

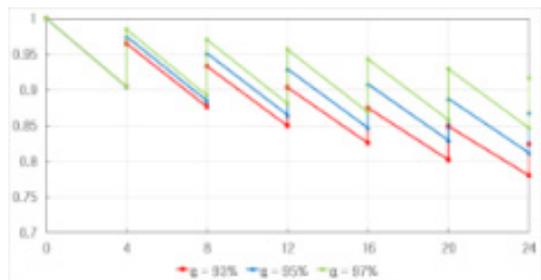


Fig. 4. Variation of periodic inspection coverage percent (α)

Fig 5는 BIT 점검률(β)는 70%, 80%, 90%로 변화된 값을 주고, 정기검사 점검률(α), 유도탄 저장 MTBF, 정기검사주기(T)는 기준값을 적용하여 신뢰도를 산출한 그래프이다. 이 그래프를 통해 BIT 점검률(β)이 높은 유도탄일수록 매 주기 내에서 저장신뢰도 감소폭이 적음을 알 수 있다.

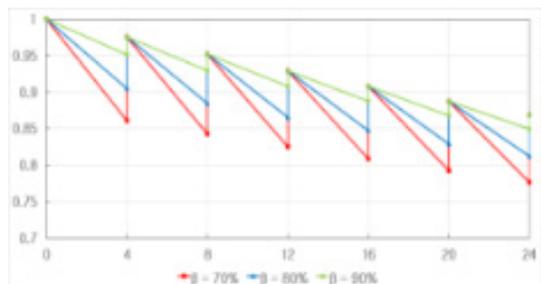


Fig. 5. Variation of BIT coverage percent (β)

Fig 6은 정기점검주기(T)를 3년, 4년, 5년으로 변화된 값을 주고, 유도탄 저장 MTBF, 정기검사 점검률(α), BIT 점검률(β)은 기준값을 그대로 적용하여 신뢰도를 산출한 그래프이다. 이 그래프를 통해 정기검사주기(T)가 짧을수록 저장신뢰도 평균값이 높아짐을 알 수 있다.

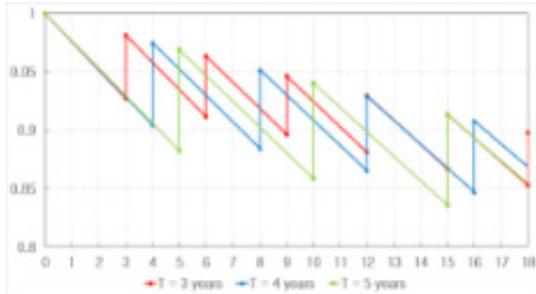


Fig. 6. Variation of periodic inspection cycle(T)

3. 결론

본 논문에서는 유도탄에 대한 기존의 저장신뢰도 산출모델을 확장하여 제안하였다. 유도탄은 장기간 저장상태로 있기 때문에 높은 신뢰도가 유지되어야 하므로 수시점검기능인 BIT에 의한 점검과 정밀 점검장비를 활용한 정기검사를 수행하게 된다. 이런 점검을 통해 시간이 지남에 따라 감소하게 되는 저장신뢰도를 주기마다 상승시킬 수 있고, 이런 등락 과정이 수명주기동안 반복하게 된다. 이렇게 시간이 지나면서 감소하는 유도탄의 저장신뢰도를 산출하는 모델을 제시하였는데 이는 기존 모델을 바탕으로 일부 기능을 수정하여 확장한 것이다.

기존 모델의 경우 점검하는 주기마다 새로이 고장난 유도탄 개수의 기대값이 동일하다고 가정하였으나 이는 한번 고장난 유도탄이 다음 주기에도 중복해서 고장날 수 있다는 것이므로 이러한 가정을 수정하여 모델을 제시하였다. 그리고 수치를 적용하여 기존 모델과 제안 모델을 비교하였다. 신뢰도 산출 시 매주기마다 이미 고장난 유도탄을 제외했기 때문에 시간이 지날수록 제안 모델로 산출된 신뢰도가 기존 모델로 산출한 신뢰도보다 더 높음을 알 수 있었다.

제안한 모델을 통해서 수명주기 동안에 시간이 지날수록 감소하는 유도탄의 평균 신뢰도를 산출할 수 있고, 이를 통해 해당 유도탄이 정해진 수명주기동안의 목표신뢰도 수준에 도달할지 여부를 알 수 있을 것이다. 그리

고 목표신뢰도를 만족할 수 있는 정기검사주기(T)를 결정한다든지, BIT 점검률(β) 및 정기검사 점검률(α)을 결정하는데 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] Dong-Kyu Kim, Wun-Seok Kang, Sung-Jin Kang, "A Study on the Storage Reliability Determination Model for One-shot System", *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, vol. 38, No 1, pp. 1-13, March 2013. DOI: <https://doi.org/10.7737/JKORMS.2013.38.1.001>
- [2] MIL-STD-721C, "Definitions of terms for reliability and maintainability", Department of Defence, 1981.
- [3] Pan, C.C. and L. Chu, "Reliability assesment for one-shot product with Weibull lifetime components," *International Journal of Quality and Reliability Management*, vol. 27, no. 5, pp. 596-610. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1108/02656711011043553>
- [4] Martinez , E. C, "Storage reliability with periodic Test", *In Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1109/RAMS.1984.764288>
- [5] Jong-Moon Lee, Ki-Sang Kwon, Hak-Pyo Lee. "The Study on Estimating Preventive Maintenance period and Life cycle of Missile system", 2011 Fall Conference of the Korean Institute Of Industrial Engineers, pp. 1172-1176. 2011.
- [6] Dae-Ik Kim and Geon-Wook Jeon, "A Study on Determining the periodic inspection for Anti-Ship Missile by using Reliability Analysis Model", *Journal of the Military Operations Research Society of Korea*, vol. 32, No 2, pp. 92-113. 2006.
- [7] Seok-Kon Kim, "A study on the application of RCM for improving anti-ship missile reliability under TLCSM", Ph.D diss., Kwangwoon University. 2011.

조 보 램(Boram Jo)

[정회원]



- 2011년 2월 : 포항공과대학교 일반대학원 (산업공학 석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

<관심분야>
종합군수지원, RAM

안 장 근(Jang-Keun Ahn)

[정회원]



- 2002년 2월 : 아주대학교 일반대학원 시스템공학과(시스템공학석사)
- 2002년 3월 ~ 2016년 1월 : 국방과학연구소 연구원/선임연구원
- 2014년 2월 ~ 현재 : 아주대학교 일반대학원 시스템공학과(박사과정)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야>

기능분석, 프로세스 재설계, ILS