

# 주기적 검사가 실시되는 원샷 시스템의 신뢰도 분석

김하원 · 윤원영<sup>†</sup>

부산대학교 산업공학과

## Reliability Analysis for One-Shot Systems with Periodic Inspection

Ha Won Kim · Won Young Yun

Department of Industrial Engineering, Pusan National University

This paper considers one-shot systems such as missiles, air bags of automobiles that are stored for a long time and are used at most once. One shot systems are inspected periodically to detect system failures and repair the system because we do not know whether the system will work or not on demand. Thus, we can keep high availability of the system by periodic inspection. Martinez (1984) obtained the system reliability approximately. In this paper, we obtain the exact system reliability under periodic inspection. Finally, we compare the system reliability from our formula with one of Martinez (1984) by numerical examples.

**Keywords:** One-Shot System, Storage Reliability, Periodic Inspection

### 1. 서론

미사일, 소화기, 자동차 에어백 같이 사용되기 전에는 저장 상태로 있다가 필요 시 주어진 임무를 수행하고, 폐기되는 특성을 가지는 시스템을 원샷 시스템이라고 한다. 원샷 시스템은 임무를 수행하기 전까지 저장 상태로 유지되다가, 필요 시 사용되며 안전과 밀접한 임무를 수행하는 경우가 많으므로 성공적으로 임무를 수행하기 위해 높은 저장 신뢰도가 요구된다. 그리고 저장 상태에서의 시스템 고장유무는 검사에 의해서만 확인할 수 있기 때문에 저장 기간 동안 적절한 주기로 검사 및 정비를 통해 요구되는 저장 신뢰도를 만족시켜야 한다.

하지만 검사를 자주 수행하게 되면 그 만큼 검사비용이 많이 발생하게 되고, 비용을 줄이기 위해 검사 횟수를 줄이면 고장이 늦게 확인될 수 있기 때문에 필요한 시기에 임무를 성공적으로 수행하지 못할 확률이 커지게 된다. 그러므로 최적의 검사 주기를 결정하는 문제는 매우 중요한 문제이다. 주기적인 검사가 주어진 상황에서 시스템의 저장 신뢰도를 구하는 모형이

Martinez(1984)에 의해 제시되었다. Kim *et al.*(2013)은 Martinez (1984)가 제시한 저장 신뢰도 산출식을 바탕으로 하여 저장 신뢰도 모형을 제안하여, 고장시간이 지수분포를 따를 경우 Martinez 모형과 비교하였고, 고장시간이 와이블 분포와 감마 분포를 따를 경우에 검사주기에 따른 저장 신뢰도를 산출하였다. Kim and Jeon(2006)와 Rhee *et al.*(2011)은 실제 무기체계의 고장자료를 활용하여 Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형을 이용하여 최적의 검사주기를 결정하기 위한 대안을 제시하였다. 또한, 많은 연구자들은 비용을 고려하여 최적의 검사주기를 결정하고자 하였다. Ito and Nakagawa(1992, 1995)은 시스템은 주기적인 시점에 완전 수리를 수행하는 부품과 검사를 수행하지 않는 부품 등의 두 가지 품목으로 이루어져 있으며, 시스템의 신뢰도가 미리 주어진 값보다 같거나 작아질 때 오버홀(Overhaul)을 수행하는 시스템을 고려하여, 비용을 최소화하는 최적 검사주기를 결정하였다. Ito *et al.*(1995)은 주기적인 시점에 교체하는 부품과 정비 및 교체를 수행하지 않은 부품으로 이루어진 시스템을 고려하며, 비용을 최소화하는 최적 검사

이 논문은 2013년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2013R1A1A2060066).

<sup>†</sup> 연락저자 : 윤원영 교수, 46241 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2 부산대학교 산업공학과, Tel : 051-510-2421, Fax : 051-512-7603,

E-mail : wonyun@pusan.ac.kr

2015년 5월 27일 접수; 2015년 8월 11일 수정본 접수; 2015년 9월 11일 게재 확정.

주기 및 최적 교체주기를 결정하였다. Yun *et al.*(2012, 2013, 2014)은 원샷 시스템을 구성하는 부품을 특성에 따라 주기적인 검사를 수행하는 부품과 부품의 수명을 주어서 그 수명에 도달하면 새 것으로 교환하는 부품 등 크게 두 가지로 구분하여, 원샷 시스템의 최적의 검사주기를 결정하였다. Cho and Lee (2008)는 검사 시스템의 오류가 있다는 가정 하에 불완전한 간이검사와 완전한 정밀검사를 단계적으로 사용하여 오버홀 때까지의 단위시간 당 기대비용을 최소화하는 검사주기를 결정하였다. 본 논문에서는 Martinez(1984) 모형을 기반으로 하여 수정된 원샷 시스템의 저장 신뢰도 모형을 제안한다. 제 2장에서는 원샷 시스템의 검사주기를 결정할 때 가장 많이 참고가 되는 Martinez(1984) 검사주기 모형에 대해 살펴본다. 제 3장에서는 Martinez(1984) 검사주기 모형을 활용하여 수정된 검사주기 모형을 제안하며, 제 4장에서는 실험을 통해 Martinez(1984) 모형과 비교한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 추후 계획을 기술한다.

## 2. Martinez(1984) 저장 신뢰도 모형

Martinez(1984)가 고려한 시스템과 원샷 시스템이 가지는 특성이 유사하기 때문에 원샷 시스템의 검사주기를 결정하는 문제를 다루었을 때 많은 연구자들은 Martinez(1984)가 제안한 모형을 참고하고 있다. Martinez(1984)는 시스템의 고장시간이 지수분포를 따른다는 가정 하에 저장 신뢰도를 산출하였다. 고려되는 시스템은 검사에 의해 고장이 발생된 부품을 찾을 수 있으며, 수리 후 다시 저장 상태로 돌아간다. <Figure 1>은 공장에서 시스템이 생산된 후 사용 전까지의 시스템의 저장 신뢰도를 결정하는 모형을 표현한 것이다. Martinez(1984)가 고려한 시스템은 사용 전까지 공장에서 생산된 후 검사하는 단계(Factory test, 단계 1), 수송 단계(Shipping transportation handling, 단계 2), 저장 전 검사 단계(Preacceptance checkout, 단계 3) 그리고 저장 단계(Storage, Periodic test, 단계 4)로 나누어지며, 저장 단계의 경우 주기적인 검사를 수행한다.

Martinez(1984)는 시스템의 저장 신뢰도를 산출하기 위해

아래와 같은 가정 사항을 고려하였다.

- (1) 시스템의 고장시간은 지수분포를 따른다.
- (2) 시스템은 공장/수송/저장/정비 간 각각의 고장률을 가지고 있다.
- (3) 검사를 통해서만 시스템의 고장 유무를 확인할 수 있다.
- (4) 검사 장비의 오류가 있다.
- (5) 검사를 위해 전원을 On-off될 때에도 시스템의 고장이 발생한다.
- (6) 시스템의 On-off에 의해 발생하는 고장률은 저장 고장률 보다 작다.
- (7) 검사 시 고장을 발견하지 못한 경우는 추후의 검사에도 고장을 발견하지 못한다.

Table 1. Notation

Notation	Definition
$\lambda_E$	Operating failure rate
$\lambda_{S_i}$	$i^{th}$ storage failure rate
$\lambda_C$	Power on-off cycling failure rate
$C$	Number of test cycles in test interval
$T_i$	$i^{th}$ operating time
$T_T$	Operating time during periodic tests
$\alpha_i$	$i^{th}$ test effectiveness(The probability of detecting a failure)
$F_3$	Expected number of failures through phase 3
$F_P$	Expected number of failures during one periodic test interval

Martinez(1984)는 저장 전 단계의 기대 고장 개수를 검사 시스템의 오류를 고려하여 식 (1)와 같이 단계 1에서 3까지 발생하는 기대 고장의 합으로 계산하였다.  $((1-\alpha_1)$ 은 단계 1에서 고장이 발생하였지만 검사장비가 고장을 발견하지 못한 확률이고,  $\lambda_E T_1$ 은 단계 1에서의 고장 개수를 의미한다. 따라서  $(1-\alpha_1)\lambda_E T_1$ 은 단계 1에서 고장이 발생했지만, 검사장비의 오류로 고장이 발견하지 못한 기대고장 개수를 의미한다.  $(1-\alpha_3)$ 은 단계 3에서 고장이 발생하였지만 검사장비가 고장

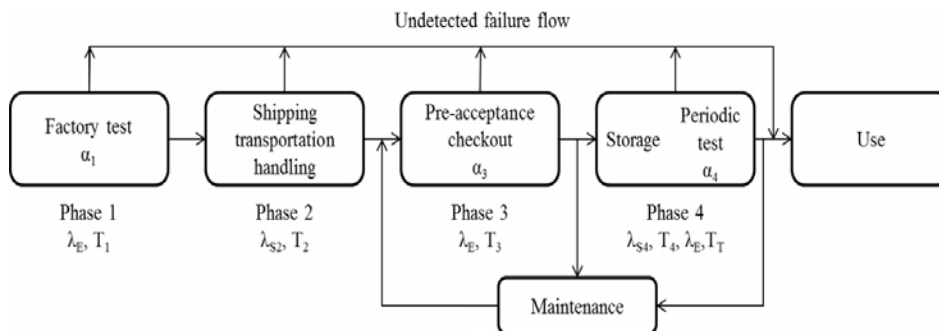


Figure 1. Storage Reliability with Periodic Inspection Model

을 발견하지 못하는 확률이고,  $(\lambda_{S2}T_2 + \lambda_{E}T_3)$ 은 단계 2와 단계 3에서의 기대고장 개수를 의미한다. 여기서 단계 2는 이동하는 단계로써, 검사를 수행하지 않고, 단계 3에서 검사를 수행하게 된다. 따라서  $(1 - \alpha_3)(\lambda_{S2}T_2 + \lambda_{E}T_3)$ 은 단계 2와 단계 3에서 고장이 발생했지만, 검사장비의 오류로 고장이 발견하지 못한 기대고장 개수를 의미한다.

$$F_3 = (1 - \alpha_1)\lambda_{E}T_1 + (1 - \alpha_3)(\lambda_{S2}T_2 + \lambda_{E}T_3) \quad (1)$$

따라서 저장되기 전 시스템의 신뢰도는 식 (2)와 같다.

$$R = e^{-F_3} \quad (2)$$

하지만 이는 식 (1)을 보면 각 단계에서 발생한 고장 수는 전 단계의 고장과 독립으로 보고 있으므로 포아송 과정을 따르는 경우의 고장 개수가 된다. 그리고 신뢰도는 가용도와 같이 검사 전/후의 시스템이 작동 상태일 확률과 같은 개념으로 식 (2)의 근거는 미흡하다.

저장 단계에는 시스템이 사용되기 전까지 주기적으로 검사를 수행한다. 한 개의 주기는 <Figure 2>에서 보듯이  $T_4 + T_T$ 으로 저장 단계와 시스템을 운용하는 시간의 합으로 정의된다.

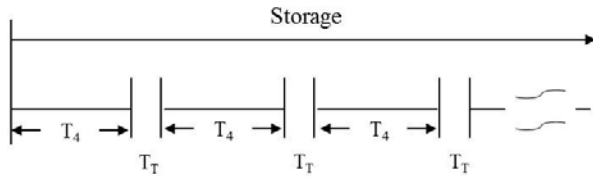


Figure 2. Periodic Inspection Interval After Storage

$T_4$  기간 동안 시스템은 저장 상태로 있으며,  $T_T$  기간에 시스템을 검사를 수행하기 위해 전원을 켜며, 검사를 마친 후에는 전원을 끈 후 다시 저장 상태로 보관하게 된다. 그러므로, 검사를 위해 시스템을 On-off하는 시간이 저장 기간 동안에 시스템이 작동되는 시간이 된다. 또한, 저장 상태일 때와 운용 상태일 때 시스템의 고장률 그리고 시스템의 On-off에 의한 고장률이 존재한다. 이 때 검사 장비의 오류가 발생하는데, 검사 장비의 오류는 시스템이 고장이 났으나 검사 장비가 이를 확인하지 못하는 경우에 해당된다. 이러한 사항들을 고려했을 때 저장 상태에서 한 주기 동안의 기대 고장 개수는 식 (3)과 같다.

$$F_P = \lambda_{S1}T_4 + \lambda_{E}T_T + \lambda_C C \quad (3)$$

여기서, 검사를 수행하기 위해 시스템을 On-off 할 때 발생하는 고장률은 저장 시의 고장률의 약 165~375배의 값을 가지며, 평균적으로 270배의 값을 가진다.

N번째 검사 직전과 직후 신뢰도는 (1)~(3)을 이용하여 식 (4)와 식 (5)와 같이 산출하였다.

$$R_{N(Mfn)} = e^{-[(N-1)(1-\alpha_4)F_P + F_3]} \times e^{-\lambda_{S1}T_4} \quad (4)$$

$$R_{N(Mex)} = e^{-[N(1-\alpha_4)F_P + F_3]} \quad (5)$$

이와 같이 Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형은 시스템의 고장분포가 지수분포를 따를 때 검사주기에 따른 시스템의 신뢰도를 산출하였다. 하지만 현재의 시스템 고장시간은 지수분포에만 국한되지 않고 다양하게 나타나고 있기 때문에 Martinez(1984) 모형은 현재의 시스템에 그대로 적용하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 특히 국방 분야에서의 원샷 시스템 운용 환경과 같이 갑작스러운 임무를 성공적으로 수행하기 위해서 저장 기간 동안 주기적으로 검사를 하고, 고장 발견 시 정비할 필요가 있다. 본 논문에서는 원샷 시스템의 고장시간이 지수분포 뿐만 아니라 와이블 분포를 따를 경우의 저장 신뢰도 모형을 추가적으로 제시함으로써 좀 더 현실에 적합한 원샷 시스템의 저장 신뢰도 모형을 제시한다.

### 3. 수정된 저장 신뢰도 모형

본 논문에서 고려하는 원샷 시스템들은 Martinez(1984)가 고려한 운용 형태와 동일하게 공장/수송/저장/정비의 4가지 단계로 운용되고 있으며, 시스템의 고장은 지수분포, 와이블분포 등 다양한 확률분포에 따라 발생할 수 있다. 그 중 지수 분포는 다른 분포들에 비해 수학적으로 다루기가 쉬어 가장 광범위하게 사용되는 고장 분포로서, 주로 전기 및 전자 부품 고장의 모형화에 많이 쓰이고 있다. 국내에서는 다수 논문들에서 원샷 시스템의 검사 주기 결정을 위해 Martinez(1984)가 제안한 모델이 주로 사용되고 있으며, 본 논문에서는 원샷 시스템의 고장이 지수분포를 따를 경우와 와이블분포를 따를 경우의 2가지 경우로 저장 신뢰도 모형을 산출한다.

#### 3.1 시스템 고장이 지수분포인 경우

식 (6)~식 (8)은 시스템의 고장시간이 지수분포를 따를 때의 단계별 신뢰도를 산출한 식이다.

$$R_1 = e^{-\lambda_{E}T_1} + \alpha_1(1 - e^{-\lambda_{E}T_1}) \quad (6)$$

$$R_2 = e^{-\lambda_{S2}T_2 - \lambda_{E}T_3} + \alpha_3(1 - e^{-\lambda_{S2}T_2 - \lambda_{E}T_3}) \quad (7)$$

$$R_3 = e^{-\lambda_{S1}T_4 - \lambda_{E}T_T}(1 - \lambda_C)^C + \alpha_4 \left\{ (1 - e^{-\lambda_{S1}T_4}) + e^{-\lambda_{S1}T_4}(1 - e^{-\lambda_{E}T_T}) + e^{-\lambda_{S1}T_4 - \lambda_{E}T_T} \sum_{k=0}^{C-1} \lambda_C(1 - \lambda_C)^k \right\} \quad (8)$$

$R_1$ 은 공장에서 검사 후 시스템이 고장이 나지 않을 확률로써 검사를 하면서 고장이 나지 않은 확률과 검사를 통해 고장을 발견하였지만, 검사 장비가 이를 확인하여 새 것으로 된 확률

을 포함한다.  $R_2$ 는 시스템이 운송이 되고, 저장 장소에 도착하여 검사를 수행한 시점 후에 시스템이 고장이 나지 않을 확률로써 해당 시간동안 고장이 나지 않을 확률과 그 시간동안 고장이 발생하였지만 검사 장비로 이를 확인하여 새 것으로 된 확률을 포함하여 산출하였다. 그리고  $R_3$ 는 시스템이 저장된 후 주기적으로 검사를 수행하여 검사 직후의 고장이 나지 않을 확률로써 저장 시간과 운용 시간동안 고장이 발생되지 않을 확률, 검사구간 동안 검사 장비의 C번 on-off 시 시스템의 신뢰도로써 고장이 발생되지 않을 확률 그리고 그 기간사이에 고장이 발생하였지만 이를 검사를 통해 발견하여 새 것으로 된 확률을 포함하여 산출하였다.

이러한 단계별 신뢰도 산출식을 이용하여 시스템의 고장시간이 지수분포를 따를 경우 검사 직전과 직후의 신뢰도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{N(Min)} = R_1 \times R_2 \times R_3^{N-1} \times e^{-\lambda_{st}t} \quad (9)$$

$$R_{N(Max)} = R_1 \times R_2 \times R_3^N \quad (10)$$

### 3.2 시스템의 고장시간이 와이블 분포인 경우

시스템 고장이 와이블 분포를 따르는 경우에 시스템 신뢰도를 구하기 위해서는 추가적인 가정이 필요하다. 첫째, 형상 모수는 동일하고 척도 모수는 다르다. 둘째, 서로 다른 단계에서의 고장 분포에 대해 누적노출모형(Cumulative exposure model)을 따른다(Bai and Chun, 1999). 셋째, 또한 검사 시점에 시스템의 고장유무를 판단할 수 있으므로 고장 난 시스템의 수명은 검사를 수행한 시점의 수명과 같다. 마지막으로 수리효과는 최소 수리를 따른다. <Figure 3>과 같이  $T_1$  기간 동안  $F_1$ 의 고장 확률을 따르는 원샷 시스템이 있다고 하자.  $T_1$  기간 동안 고장이 발생한 경우 정비를 수행하지만 원샷 시스템이 해당 구간에서 고장이 발생하지 않은 경우 정비를 수행하지 않기 때문에 정확한 저장 신뢰도를 산출하기 위해서는  $T_1$  기간 동안의 노후화를 고려해야 한다. 이 경우 이미 노후화가 진행되었기 때문에 고장이 나지 않은 시스템은 다음 구간에서  $T_1^*$ 의 수명을 가진 상태에서 다음 구간의 고장 확률  $F_2$ 에 따라 다음 구간에서의 고장이 발생하게 된다.

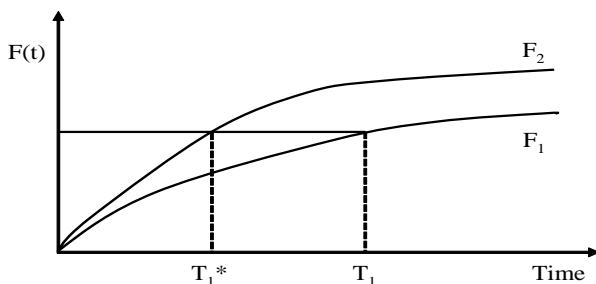


Figure 3. System Age According to  $F_i$  of System

Table 2. Notation

Notation	Definition
$T_a$	Operating time prior to shipment
$T_b$	Non-operating time through receipt at storage site
$T_c$	Operating time during pre-acceptance checkout
$T_{si}$	Storage time between $i^{th}$ periodic tests ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ )
$T_{Ti}$	Operating time during $i^{th}$ periodic tests ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ )

시스템의 고장시간이 와이블 분포를 따를 경우의 저장 신뢰도 산출식은 식 (12)~식 (15)와 같다.

$$R_1 = e^{-(\lambda_E T_a)^\beta} + \alpha_1 \{1 - e^{-(\lambda_E T_a)^\beta}\} \quad (12)$$

식 (12)의 경우  $R_1$ 은 공장에서 검사 직후의 신뢰도로써 검사를 하면서 고장이 나지 않은 확률과 검사를 통해 고장을 발견하였지만, 검사 장비가 이를 확인하여 새 것으로 된 확률을 포함한다.

$$R_2 = \frac{e^{-\{\lambda_{s2}(T_a^* + T_b)\}^\beta - \{\lambda_E(T_a^* + T_c)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{s2} T_a^*)^\beta - (\lambda_E T_b)^\beta}} + \alpha_3 \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_{s2}(T_a^* + T_b)\}^\beta - \{\lambda_E(T_b + T_c)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{s2} T_a^*)^\beta - (\lambda_E T_b)^\beta}} \right\} \quad (13)$$

여기서,

$$F_1(T_a) = F_2(T_a^*)$$

$$\{1 - e^{-(\lambda_E T_a)^\beta}\} = \{1 - e^{-(\lambda_{s2} T_a^*)^\beta}\} \Rightarrow \lambda_E T_a = \lambda_{s2} T_a^* \text{이므로,}$$

$$T_a^* = \frac{\lambda_E}{\lambda_{s2}} T_a \text{이다. 그리고}$$

$$F_1(T_a^* + T_b) = F_2(T_b^*)$$

$$\{1 - e^{-\{\lambda_{s2}(T_a^* + T_b)\}^\beta}\} = \{1 - e^{-(\lambda_E T_b^*)^\beta}\}$$

$$\Rightarrow \lambda_{s2}(T_a^* + T_b) = \lambda_E T_b^* \text{이므로,}$$

$$T_b^* = \frac{\lambda_{s2}}{\lambda_E} (T_a^* + T_b) \text{이다.}$$

식 (13)의 경우  $R_2$ 는 시스템이 공장에서 저장 장소로 운송되고, 저장 장소에 도착 후 시스템을 검사한 직후의 신뢰도로써, 이는 단계 1에서 고장이 나지 않은 시스템 중 단계 2와 단계 3에서 고장이 나지 않은 확률과 고장이 발생하였지만 검사장비가 고장을 발견하여 정비된 확률을 포함한다. 고장이 나지 않은 시스템이 공장에서 출발하여 저장 장소에 도착했을 때 노후화를 고려한 시스템 수명은  $T_a^*$ , 공장 그리고 운송 단계에서 고장이 나지 않은 시스템이 저장 장소에 도착한 후 검사 전 시

점에서의 노후화를 고려했을 때의 시스템 수명은  $T_b^*$ 가 된다. 따라서  $R_2$ 는 공장에서 고장이 나지 않은 시스템 중 운송되는 시간( $T_a^* + T_b$ ) 동안 고장이 나지 않은 확률, 공장에서 저장 장소로 운송되는 동안 고장이 나지 않은 시스템 중 저장 장소로 들어가기 전 검사하는 시간( $T_b^* + T_c$ ) 동안 고장이 나지 않은 확률, 그리고 저장 전 단계에서 고장이 발생하였지만 검사 장비가 고장을 발견하여 정비된 확률을 포함한다.

$$R_3 = \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_s)\}^\beta - \{\lambda_E(T_s^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta - (\lambda_E T_s^*)^\beta}} \times (1 - \lambda_C)^C \quad (14)$$

$$+ \alpha_4 \left\{ \begin{aligned} & \left[ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_s)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta}} \right] \\ & + \left[ \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta}} \times \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_s^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_s^*)^\beta}} \right\} \right] \\ & + \left[ \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_s)\}^\beta - \{\lambda_E(T_s^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta - (\lambda_E T_s^*)^\beta}} \times \sum_{k=0}^{C-1} \lambda_C (1 - \lambda_C)^k \right] \end{aligned} \right\}$$

여기서,  $T_c^* = \frac{\lambda_E}{\lambda_{SI}}(T_b^* + T_c)$ 이고,  $T_s^* = \frac{\lambda_{SI}}{\lambda_E}(T_c^* + T_s)$ 이다.

식 (14)의 경우  $R_3$ 는 저장 전 단계까지 살아있는 시스템 중에 첫 번째 저장 주기가 지나고 검사를 수행한 직후의 신뢰도를 의미한다. 시스템은 저장 상태에 있으면서 주기적인 검사를 수행하는데 저장 전 단계까지 고장이 나지 않은 시스템이 저장되는 시점에서의 노후화가 고려된 시스템 수명은  $T_c^*$ , 첫 번째 저장 주기에서 검사 전 시점의 노후화를 고려했을 때의 시스템 수명은  $T_s^*$ 가 된다. 따라서 저장 장소로 도착하여 검사 수행 후 고장이 나지 않은 시스템의 수명에서 첫 번째 저장 시간( $T_c^* + T_s$ ) 동안 고장이 나지 않은 확률, 첫 번째 저장 시간 동안 고장이 나지 않은 시스템 중 검사하는 시간( $T_s^* + T_T$ ) 동안 고장이 나지 않은 확률, 그리고 각 단계에서 고장이 발생하였지만 검사 장비가 고장을 발견하여 정비된 확률을 포함한다.

$$R_{si} = \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_n^* + T_s)\}^\beta - \{\lambda_E(T_{si}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_n^*)^\beta - (\lambda_E T_{si}^*)^\beta}} \times (1 - \lambda_C)^C \quad (15)$$

$$+ \alpha_4 \left\{ \begin{aligned} & \left[ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_n^* + T_s)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_n^*)^\beta}} \right] \\ & + \left[ \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_n^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_n^*)^\beta}} \times \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_{si}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_{si}^*)^\beta}} \right\} \right] \\ & + \left[ \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_n^* + T_s)\}^\beta - \{\lambda_E(T_{si}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_n^*)^\beta - (\lambda_E T_{si}^*)^\beta}} \times \sum_{k=0}^{C-1} \lambda_C (1 - \lambda_C)^k \right] \end{aligned} \right\}$$

여기서,  $T_n^* = \frac{\lambda_E}{\lambda_{SI}}(T_{si}^* + T_T)$ 이고,  $T_{si}^* = \frac{\lambda_{SI}}{\lambda_E}(T_{T(i-1)}^* + T_s)$ 이다.

식 (15)의 경우  $R_{si}$ 는 첫 번째 저장 주기 이후 시스템이  $i$ 번째 저장 주기에 검사를 수행한 직후의 시점에서 신뢰도를 의미한다. 전 단계에서 고장이 나지 않은 시스템 중  $i$ 번째 저장 주기가 시작되는 시점에서 노후화를 고려한 시스템 수명은  $T_n^*$ , 전 단계에서 고장이 나지 않은 시스템 중  $i$ 번째 검사가 시작되는 시점에서의 노후화가 고려되었을 때 시스템 수명은  $T_{si}^*$ 가 된다. 따라서 검사 수행 후 고장이 나지 않은 시스템의 수명에서  $i$ 번째 저장 시간( $T_n^* + T_s$ ) 동안 고장이 나지 않은 확률,  $i$ 번째 저장 시간 동안 고장이 나지 않은 시스템 중 검사하는 시간( $T_{si}^* + T_T$ ) 동안 고장이 나지 않은 확률, 그리고 각 단계에서 고장이 발생하였지만 검사 장비가 고장을 발견하여 정비된 확률을 포함한다.

이러한 단계별 신뢰도 산출식을 이용하여 시스템의 고장시간이 와이블 분포를 따를 경우 검사 직전과 직후의 신뢰도를 구할 수 있다.

$$R_{N(Min)} = R_2 \times \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_s)\}^\beta - \{\lambda_E(T_s^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta - (\lambda_E T_s^*)^\beta}}, N=1 \quad (16)$$

$$+ \left\{ \begin{aligned} & \left[ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_s)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta}} \right] \\ & + \left[ \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_c^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_c^*)^\beta}} \times \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_s^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_s^*)^\beta}} \right\} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$R_{N-1} \times \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_{N-1}^* + T_s)\}^\beta - \{\lambda_E(T_{s_{N-1}}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_{N-1}^*)^\beta - (\lambda_E T_{s_{N-1}}^*)^\beta}}, N \geq 2$$

$$+ \left\{ \begin{aligned} & \left[ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_{N-1}^* + T_s)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_{N-1}^*)^\beta}} \right] \\ & + \left[ \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_{N-1}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{SI}T_{N-1}^*)^\beta}} \times \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_{s_{N-1}}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_{s_{N-1}}^*)^\beta}} \right\} \right] \end{aligned} \right\}$$

식 (16)은 저장 단계에서 검사 직전의 신뢰도를 나타낸다. 직전의 단계가 다르기 때문에 첫 번째 저장 주기 때의 검사 직전의 신뢰도와 그 이후의 저장 주기 때의 검사 직전의 신뢰도를 구분하여야 한다. 첫 번째 저장 주기 때의 검사 직전의 신뢰도를 구하기 위해서는 저장 전 단계에서의 검사 직후 고장이 나지 않은 확률( $R_2$ )에서 첫 번째로 저장 주기가 지나가고, 검사를 수행하기 직전의 수명 동안 노후화를 고려하여 고장이 나지 않을 확률을 포함한다. 그리고 두 번째 저장 주기 때의 검사 직전 신뢰도를 구하는 것부터는 그 직전의 저장 주기( $R_{N-1}$ )에서의 수명 동안 노후화를 고려하여 고장이 나지 않은 시스템에서 확률을 포함한다.

$$R_{N(Max)} = R_3, N=1 \quad (17)$$

$$R_{sN}, N \geq 2$$

식 (17)은 저장 단계에서 검사 직후의 신뢰도를 나타낸다. 검사 직후의 신뢰도 역시 첫 번째 검사 직후의 신뢰도 산출식과 그 이후의 검사 직후의 신뢰도 산출식을 구분하여야 한다. 첫 번째 검사 직후의 신뢰도 산출식은 식 (14)의  $R_3$ , 그 이후의 검사 직후 신뢰도 산출식은 식 (15)의  $R_{si}$ 와 동일하다.

#### 4. 실험 예제

본 장에서는 시스템의 고장시간이 지수 분포를 따를 경우에는 Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형과 수정된 저장 신뢰도 모형을 이용하여 각각의 검사주기 때의 저장 신뢰도 값을 비교한다. 또한, 수정된 저장 신뢰도 모형을 이용하여 시스템의 고장시간이 와이블 분포를 따를 경우 검사주기 변화에 따른 저장 신뢰도 값을 구한다.

Martinez(1984)가 제안한 수리 모형과 본 논문에서 제안한 수리 모형의 실험은 <Figure 4>와 같이 동일한 입력 정보를 가진다. 원샷 시스템의 수명은 10년이라고 가정하였고, 검사 간격은 주기적으로 1년과 2년 다 수행하도록 하였다.

<Figure 5>와 <Figure 6>은 시스템의 고장시간이 지수분포를 따를 경우 Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형과 수정된 저장 신뢰도 모형을 적용한 경우 검사주기의 변화에 따른 저장 신뢰도 변화를 보여주며, 시간이 흐를수록 저장 신뢰도 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 고장이 난 시스템이 생긴 경우 어떠한 단계에서도 검사 시스템으로 그 고장을 식별할 수 없기 때문에 고장이 식별된 시스템이 새 것으로 된다고 하여도 고장의 수는 시간이 흐를수록 증가하기 때문이다. 또한, Martinez (1984) 저장 신뢰도 모형의 경우 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 간의 차이가 시간이 지나도 큰 차이가 나지 않았지만 수정된 저장 신뢰도 모형의 경우 시간이 지날수록 검사 직전의 저장

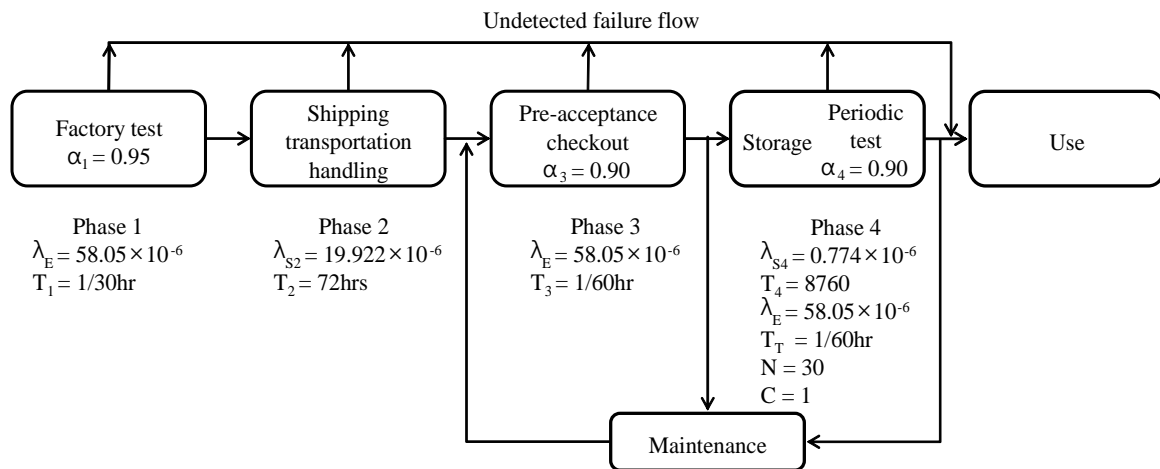


Figure 4. Input Data

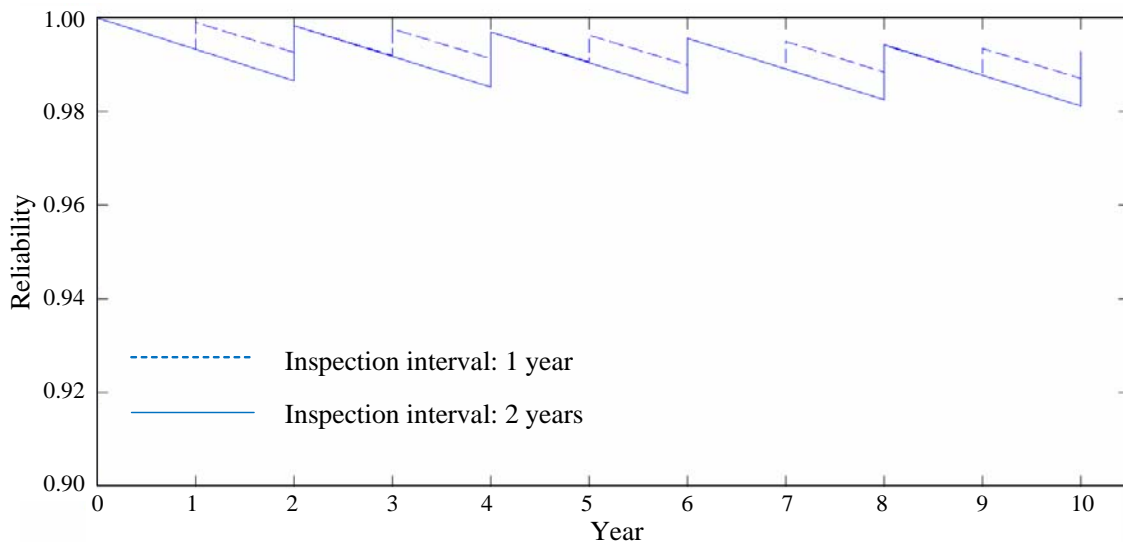
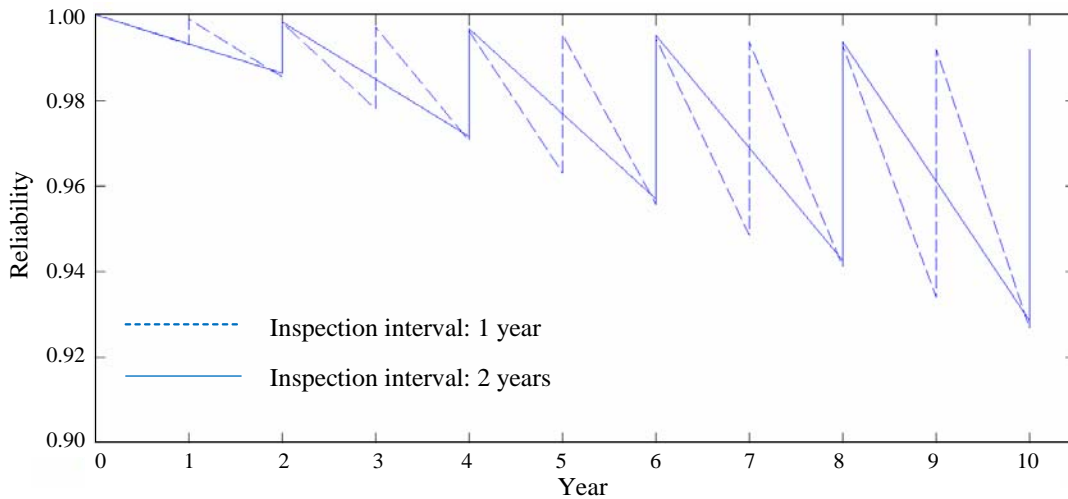


Figure 5. Comparison for Different Inspection Interval(Martinez Storage Reliability Model)

**Table 3.** Inspection Interval : 1 Year

Inspection year	Before inspection			After inspection		
	Martinez storage reliability model	Modified storage reliability model	Difference	Martinez storage reliability model	Modified storage reliability model	Difference
1	0.9934	0.9931	0.0003	0.9992	0.9990	0.0002
2	0.9927	0.9855	0.0072	0.9985	0.9981	0.0004
3	0.9920	0.9780	0.0140	0.9978	0.9972	0.0006
4	0.9913	0.9705	0.0208	0.9971	0.9963	0.0007
5	0.9906	0.9631	0.0275	0.9964	0.9954	0.0009
6	0.9899	0.9558	0.0342	0.9957	0.9946	0.0011
7	0.9892	0.9485	0.0408	0.9950	0.9937	0.0013
8	0.9885	0.9412	0.0473	0.9943	0.9928	0.0015
9	0.9878	0.9340	0.0538	0.9936	0.9919	0.0017
10	0.9872	0.9269	0.0602	0.9929	0.9911	0.0018



**Figure 6.** Comparison for Different Inspection Interval(Modified Storage Reliability Model)

신뢰도와 직후의 저장 신뢰도 간의 차이가 더 커졌다. 예를 들어 매년 검사를 하는 경우 Martinez(1984) 저장 신뢰도 모형의 경우 시간이 지나도 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이가 약 0.58% 정도로 유지하고 있지만, 수정된 저장 신뢰도 모형의 경우 1년째 검사 때의 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 0.59%, 2년째는 약 1.2%, 3년째는 약 1.9% 그리고 10년째에는 약 6.4%가 차이가 났다. 그리고 Martinez(1984) 저장 신뢰도 모형을 통해 산출된 저장 신뢰도 값이 수정된 저장 신뢰도 모형의 통해 산출된 저장 신뢰도 값보다 더 컸으며, 시간이 지날수록 그 차이가 커짐을 알 수 있다.

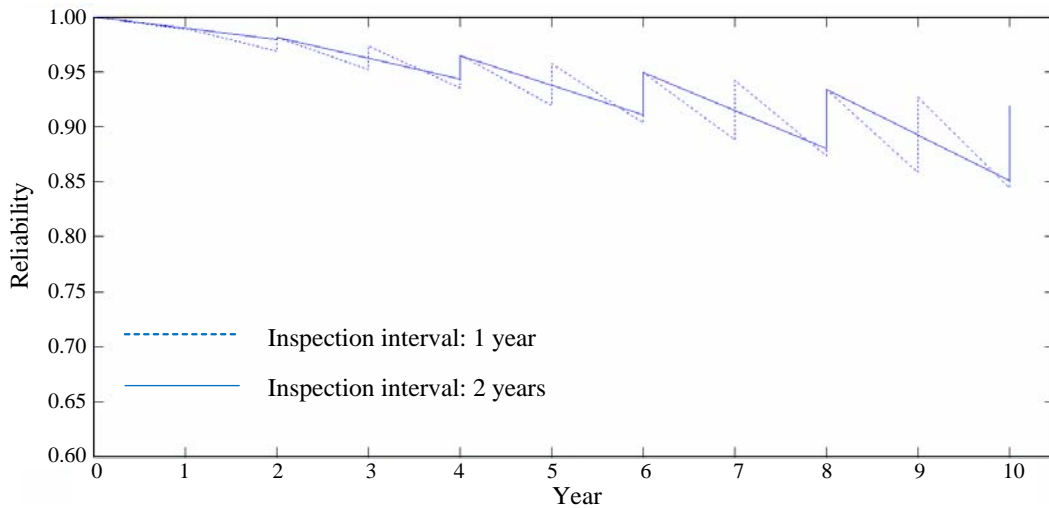
Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형과 수정된 저장 신뢰도 모형을 사용하여 저장 신뢰도 값을 산출하였을 때 저장 신뢰도 값이 차이가 나는 것은 다음과 같은 차이점이 있기 때문이다. Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형의 경우 각 단계에서 발생한 고장은 전 단계의 고장과 독립으로 보고 있다. 하지만 원샷 시스템은 특성 상 가용도를 척도로 성능을 평

가하므로 해당 시점에 작동유무를 판단하는 것이 더 실제 상황에 가깝다고 볼 수 있다. 수정된 저장 신뢰도 모형의 경우 각 단계에서의 검사 전/후의 원샷 시스템 작동 상태를 고려하였기 때문에 운용 중인 원샷 시스템에 적용하여 Martinez(1984)가 제시한 저장 신뢰도 모형보다 더 정확한 저장 신뢰도를 산출할 수 있다.

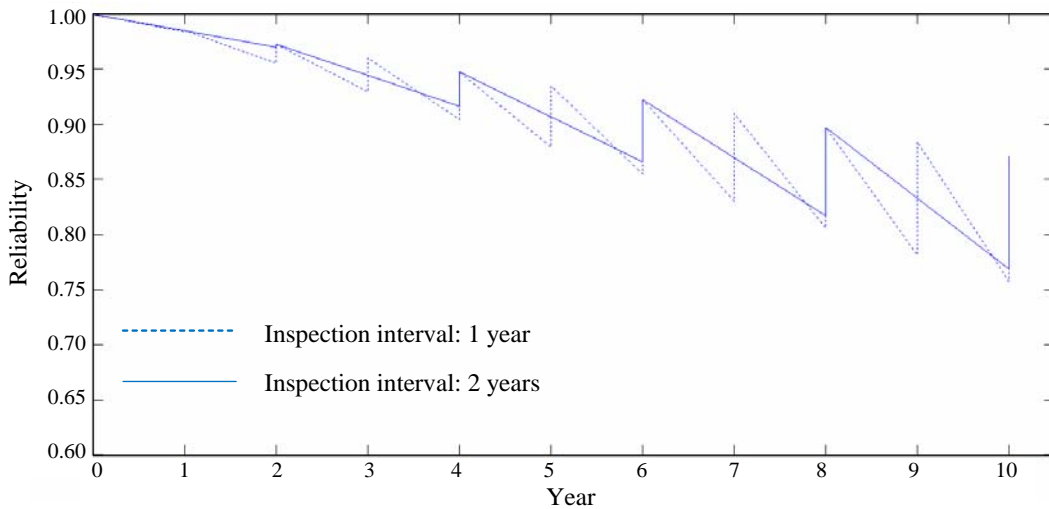
시스템의 고장시간이 와이블 분포를 따를 경우 수정된 저장 신뢰도 모형을 적용하여 저장 신뢰도를 산출하였다. <Figure 7>~<Figure 9>는 와이블 분포의 형상모수가 1.5, 2.0 그리고 2.5일 때 검사주기의 변화에 따른 저장 신뢰도 변화를 나타낸다. <Table 5>와 같이 형상모수가 클수록 저장 신뢰도가 낮아지며, 시간이 지날수록 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이가 커졌다. 예를 들어 매년 검사를 하는 경우 형상모수가 1.5일 때 첫 번째 구간의 직전 저장 신뢰도와 직후 저장 신뢰도는 각각 약 98.83%, 98.92%, 형상모수가 2.0일 때 첫 번째 구간의 직전 저장 신뢰도와 직후 저장 신뢰도는 각각 약 98.34%, 98.49%,

**Table 4.** Inspection Interval : 2 Year

Inspection year	Before inspection			After inspection		
	Martinez storage reliability model	Modified storage reliability model	Difference	Martinez storage reliability model	Modified storage reliability model	Difference
2	0.9867	0.9864	0.0003	0.9985	0.9983	0.0002
4	0.9853	0.9716	0.0137	0.9971	0.9968	0.0004
6	0.9840	0.9570	0.0269	0.9957	0.9952	0.0005
8	0.9826	0.9427	0.0399	0.9944	0.9937	0.0007
10	0.9813	0.9285	0.0527	0.9930	0.9921	0.0009



**Figure 7.** Comparison for different inspection interval(Weibull distribution,  $\beta = 1.5$ )



**Figure 8.** Comparison for Different Inspection Interval(Weibull Distribution,  $\beta = 2.0$ )

그리고 형상모수가 2.5일 때 첫 번째 구간의 직전 저장 신뢰도와 직후 저장 신뢰도는 각각 약 97.92%, 98.11%이 나왔다. 그리고 시간이 지날수록 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도가 커짐을 알 수 있는데 형상모수가 1.5일 때 1년째 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 0.09%이고, 마지막 10년째 검사 직

전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 7.53%가 되었다. 형상모수가 2.0일 때 1년째 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 0.14%이고, 마지막 10년째 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 11.34%이다. 그리고 형상모수가 2.5일 때 1년째 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 0.19%이고, 마지막 10년



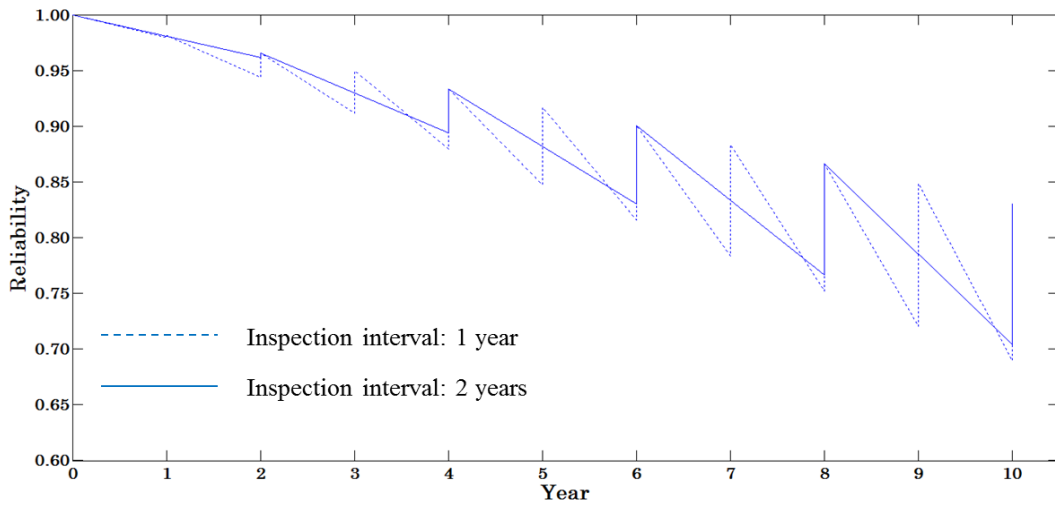


Figure 9. Comparison for Different Inspection Interval(Weibull Distribution,  $\beta = 2.5$ )

Table 5. Inspection Interval : 1 Year

Inspection year	Weibull( $\beta = 1.5$ )		Weibull( $\beta = 2.0$ )		Weibull( $\beta = 2.5$ )	
	Before inspection	After inspection	Before inspection	After inspection	Before inspection	After inspection
1	0.988346	0.989238	0.983498	0.984933	0.979250	0.981115
2	0.968581	0.980891	0.955166	0.972575	0.943656	0.965426
3	0.951609	0.972769	0.929766	0.960146	0.911475	0.949491
4	0.935138	0.964801	0.904551	0.947641	0.879361	0.933309
5	0.919094	0.956962	0.879532	0.935060	0.847340	0.916881
6	0.903427	0.949235	0.854716	0.922405	0.815442	0.900207
7	0.888105	0.941609	0.830112	0.909678	0.783692	0.883287
8	0.873102	0.934074	0.805730	0.896879	0.752119	0.866122
9	0.858398	0.926625	0.781578	0.884010	0.720750	0.848711
10	0.843978	0.919256	0.757664	0.871073	0.689614	0.831054

Table 6. Inspection Interval : 2 Years

Inspection year	Weibull( $\beta = 1.5$ )		Weibull( $\beta = 2.0$ )		Weibull( $\beta = 2.5$ )	
	Before inspection	After inspection	Before inspection	After inspection	Before inspection	After inspection
2	0.979120	0.980826	0.969782	0.972572	0.961822	0.965428
4	0.942877	0.964674	0.916257	0.947619	0.894125	0.933309
6	0.910809	0.949124	0.866237	0.922395	0.830070	0.900214
8	0.880224	0.933990	0.817066	0.896889	0.766564	0.866141
10	0.850897	0.919206	0.768814	0.871114	0.703829	0.831093

제 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 차이는 약 12.73%으로 산출되었다.

### 5. 결론

본 논문은 미사일 같이 장기간 저장되면서 수명동안 한 번 이하

의 임무를 수행하는 원샷 시스템의 저장 신뢰도를 산출하는 방법에 대하여 연구하였다. 시스템의 고장시간이 지수분포와 와이블 분포를 따를 경우 Martinez(1984)와 동일한 운용 형태를 고려하여, 수정된 저장 신뢰도 모형을 통해 검사주기 별 저장 신뢰도를 산출하였다. 그리고 지수분포의 경우 두 모형을 비교하여서 기존 모형이 신뢰도를 초과 추정함을 수치 예제를 통해 확인하였다. 와이블 분포의 경우는 신뢰도 분석을 위해

검사에서의 수리에 대해 최소 수리를 가정하여 분석하였다.

본 논문에서는 시스템 단위로 시스템의 환경(공장, 운송, 저장)마다 고장률을 달리 주어 검사 횟수에 따라 저장 신뢰도를 산출하였지만, 실제로 원샷 시스템은 대부분을 저장 상태로 수명을 다한다. 그리고 원샷 시스템은 많은 구성품들로 이루어져 있는데, 구성품의 고장 특성에 따라 검사를 수행하는 부품과 교체를 하는 부품이 있으며, 검사도 운용 장소가 아닌 정비 장소로 이동하여 수행하는 등의 다양한 고려사항들이 존재하고 있다. 그리고 검사를 수행할 때 검사 장비의 오류를 고려하였지만, 추후에 이러한 오류를 시스템이 고장이지만 고장을 발견하지 못하는 오류와 고장이 아니지만 고장으로 판단하는 경우로 구분하여 저장 신뢰도 모형을 제시할 수 있을 것이다. 또한, 원샷 시스템 운영 시 현실성이 있는 저장 신뢰도를 구하기 위해서는 정비 환경(정비 계단, 정비원 수, 정비 장비 수, 수리 부속 수 등)을 고려하여야 한다. 하지만 이와 같은 환경을 고려한 저장 신뢰도 산출은 수리적으로 해결하기에는 복잡성으로 인하여 해결하기가 어렵다. 따라서 RAM 시뮬레이션을 이용하여 현실적인 운용 형태를 적용할 경우 원샷 시스템의 검사주기를 결정하는 문제를 다룰 때 활용성이 클 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Bai, D.-S. and Chun, Y.-R. (1999), Reliability Analysis, Arche, Seoul, Korea.
- Cho, Y.-S. and Lee, J.-H. (2008), Optimal two-stage periodic inspection policy for maintaining storage reliability, *Communications of the Korean Statistical Society*, **15**(3), 387-402.
- Ito, K. and Nakagawa, T. (1995), An optimal inspection policy for a storage system with high reliability, *Microelectronics Reliability*, **35**(6), 875-882.
- Ito, K. and Nakagawa, T. (1992), Optimal inspection policies for a system in storage, *Computers and Mathematics with Applications*, **24**(1/2), 87-90.
- Ito, K. and Nakagawa, T. (2000), Optimal inspection policies for a storage system with degradation at periodic tests, *Mathematical and Computer Modeling*, **31**(10~12), 191-195.
- Ito, K., Nakagawa, T., and Nishi, K. (1995), Extended optimal inspection policies for a system in storage, *Mathematical and Computer Modeling*, **22**(10~12), 83-87.
- Kim, D.-K., Kang, W.-S., and Kang, S.-J. (2013), A study on the storage reliability determination model for one-shot system, *The Journal of The Korean Operations Research and Management Science Society*, **38**(1), 1-13.
- Kim, D.-I. and Jeon, G.-W. (2006), A study on determining the periodic inspection for anti-ship missile by using reliability analysis model, *Journal of the Military Operation Research Society of Korea*, **32**(2), 92-113.
- Martinez, E.-C. (1984), Storage reliability with periodic test, *Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 181-185.
- Nakagawa, T., Mizutani, S., and Chen, M. (2010), A summary of periodic and random inspection policies, *Reliability Engineering and System Safety*, **95**(8), 906-911.
- Rausand, R. and Hoyland, A. (2004), *System reliability theory*, 2ed Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.
- Rhee, J.-M., Kwon, K.-S., and Lee, H.-P. (2011), The study on estimating preventive maintenance period and life cycle of missile system, *Proc. Conf. on Korean Institute of Industrial Engineers*.
- Yun, W.-Y., Han, Y.-J., and Kim, H.-W. (2013), Optimal inspection policies for a one-shot system with two types of units, *Proc. 9th Int. Conf. on Intelligent Manufacturing and Logistics Systems*, 136-141.
- Yun, W.-Y., Han, Y.-J. and Kim, H.-W. (2014), Simulation-based inspection policies for a one-shot system in storage over a finite time span, *Communications in Statistics-simulation and Computation*, **43**(8), 1979-2003.
- Yun, W.-Y., Kim, H.-W. and Han, Y.-J. (2012), Simulation-based inspection policies for a one-shot system, *Proc. 5th Asia-Pacific Int. Symposium*, 621-628.
- Yun, W.-Y., Liu, L., Han, Y.-J., Rhee, D.-W. and Han, C.-G. (2013), Optimal inspection schedules for one-shot systems with two types of units, *Proc. Int. Conf. on Quality, Reliability, Risk, Maintenance and Safety Engineering*, 631-635.
- Yun, W.-Y., Liu, L., Han, Y.-J., Rhee, D.-W., and Han, C.-G. (2013), Simulation-based optimal inspection schedules for one-shot systems with two types of units, *Proc. 17th Int. Conf. on Industrial Engineering : Theory, Application and Practice*, 314-320.