

Optimal Inspection Policy for One-Shot Systems Considering Reliability Goal

Seung-Woo Jeong · Young-Bae Chung[†]

Department of Industrial and Management Engineering, Incheon National University

목표 신뢰도를 고려한 원-샷 시스템의 최적검사정책

정승우 · 정영배[†]

인천대학교 산업경영공학과

A one-shot system (device) refers to a system that is stored for a long period of time and is then disposed of after a single mission because it is accompanied by a chemical reaction or physical destruction when it operates, such as shells, munitions in a defense weapon system and automobile airbags. Because these systems are primarily related with safety and life, it is required to maintain a high level of storage reliability. Storage reliability is the probability that the system will operate at a particular point in time after storage. Since the stored one-shot system can be confirmed only through inspection, periodic inspection and maintenance should be performed to maintain a high level of storage reliability. Since the one-shot system is characterized by a large loss in the event of a failure, it is necessary to determine an appropriate inspection period to maintain the storage reliability above the reliability goal.

In this study, we propose an optimal inspection policy that minimizes the total cost while exceeding the reliability goal that the storage reliability is set in advance for the one-shot system in which periodic inspections are performed. We assume that the failure time is the Weibull distribution. And the cost model is presented considering the existing storage reliability model by Martinez and Kim et al. The cost components to be included in the cost model are the cost of inspection c_1 , the cost of loss per unit time between failure and detection c_2 , the cost of minimum repair of the detected breakdown of units c_3 , and the overhaul cost c_4 of $R_s \leq R_g$. And in this paper, we will determine the optimal inspection policy to find the inspection period and number of tests that minimize the expected cost per unit time from the finite lifetime to the overhaul. Compare them through numerical examples.

Keywords : One-shot System(Device), Storage Reliability, Reliability Goal, Inspection Policy, Optimal Inspection Policy

1. 서론

원-샷 시스템이란 국방 무기체계에서의 포탄, 장약 그리고 자동차의 에어백과 같이 장기간 저장되었다가 기능을 할 때, 화학적 반응이나 물리적 파괴가 동반되어 단 한

번의 임무 수행 후 폐기되는 시스템을 말한다. 이러한 시스템은 주로 안전과 생명에 연관 되어있기 때문에 높은 수준의 저장 신뢰도를 유지하는 것이 요구된다. 저장신뢰도란 저장 이후 특정 시점에서 작동할 확률 값으로, 저장 고장률과 운용고장률에 의해 결정된다[8-10, 13]. 저장 상태인 원-샷 시스템의 고장의 유무는 검사를 통해서만 확인이 가능하기 때문에, 높은 수준의 저장 신뢰도를 유지하기 위해서는 주기적으로 검사와 정비를 실시해야 한다.

Received 23 August 2017; Finally Revised 29 September 2017;
Accepted 10 October 2017

[†] Corresponding Author : ybchung@inu.ac.kr

주기적인 검사와 정비를 자주 실시하면 높은 수준의 저장 신뢰도를 유지할 수 있지만 이에 따른 검사 비용이 많이 든다. 반대로 검사 비용을 줄이기 위해 검사 횟수를 너무 적게 하면 고장 유무를 파악하는 것이 늦어져 목표로 하는 저장 신뢰도 수준의 유지가 어렵다. 원-샷 시스템은 특성상 기능해야 할 상황에서 고장인 경우의 손실이 막대하기 때문에 저장 신뢰도를 목표 신뢰도 이상으로 유지하기 위한 적절한 검사 주기의 결정이 요구된다[9].

주기적인 검사와 관련된 연구 중 저장 신뢰도와 관련된 연구로는 1984년 Martinez[11]는 고장 시간이 지수분포인 경우에서 장기간 저장되는 전자장비에 대해 저장 신뢰도 모형을 제시하였다. 또한, 2006년 Kim et al.[7]은 Martinez의 모형을 실제 국방무기체계에 활용해 보았고, 2013년 Kim et al.[8]는 Martinez 모형을 고장 함수가 지수분포, 와이블분포 그리고 감마분포인 경우 저장 신뢰도 모형을 연구하였다. 2016년 Kim et al.[9]은 Martinez 모델을 이용하여 좀 더 현실적인 부분을 고려한 고장 시간이 지수분포와 노후화를 고려할 수 있는 와이블분포를 따르는 경우로 나누어 수정된 저장 신뢰도 모형을 제시하였다. 그리고 비용과 저장 신뢰도를 미리 설정해 둔 목표 값 이상으로 유지하는 검사 정책에 관한 연구로는 1992년과 1995년 Ito et al.[4, 5]은 주기적인 검사를 실시하는 시스템의 부품을 완전수리와 비수리 두 가지 경우로 나누어 검사 직후 미리 정해둔 신뢰도보다 작거나 같을 시 Overhaul을 실시하는 검사 정책을 연구했다. 또한 1995년 Ito et al.[6]은 주기적인 검사를 거치는 시스템의 부품을 교체+정비, 교체, 그리고 비수리의 세 가지 경우로 나누어 저장 신뢰도가 검사 직후 목표 신뢰도보다 작거나 같을 시 오버홀을 실시하는 검사 정책을 연구하였다. 2008년 Cho et al.[2]은 저장 신뢰도를 목표 값 이상으로 유지하기 위해 주기적인 검사시점에서 간이검사와 정밀검사를 실시하는 2단계 주기적 검사 정책에 관한 연구를 하였다.

이러한 기존의 저장 신뢰도 모형과 관련된 연구들에서는 저장 신뢰도를 목표 신뢰도 이상으로 유지하기 위한 검사주기결정에만 초점을 둔 채 관련 비용을 고려하지 못한 한계점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 저장 신뢰도 모형을 기반으로 원-샷 시스템의 저장 신뢰도를 목표 값 이상으로 유지하는 것과 동시에 단위시간당 기대비용을 최소화 하는 최적검사정책 모형을 제안하고자 한다. 그리고 제안하는 모형의 효과를 입증하고자 한다.

2. 이론적 배경

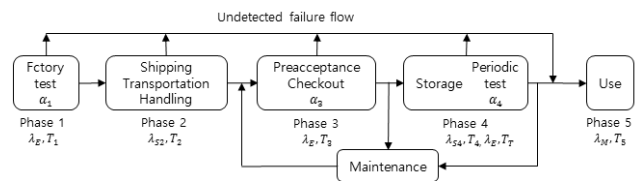
2.1 Martinez 저장 신뢰도 모형[11]

Martinez는 장기간 저장 상태나 휴면기에 있다가, 단

한 번 기능을 수행하는 하나의 전자장비에 대해 연구를 했다. 이 때, 전자장비의 라이프 사이클 중 대부분의 시간이 저장단계에서 소요되고 임무성공확률은 높은 것을 발견했다. 이를 통해 저장단계에서 주기적으로 에너지를 공급 및 검사를 진행하는 주기적인 검사를 고려한 저장 신뢰도 모형을 제안하였다. <Table 1>은 Martinez의 저장 신뢰도 모형에서 사용하는 기호이고, <Figure 1>은 저장 신뢰도 모형을 표현한 것이다.

<Table 1> Notations[11]

Notations	Definition
α_i	i^{th} phase test effectiveness, $0 \leq \alpha \leq 1$ The probability of detecting a failure
λ_E	Operating failure rate
λ_{Si}	i^{th} phase storage failure rate
T_i	Time during i^{th} phase
T_T	Time during periodic inspection phase
T_4+T_T	Total periodic test interval
λ_C	Power on/off cycling failure rate
C	The number of test cycles in the interval



<Figure 1> Storage Reliability with Periodic Test Model[11]

Martinez 저장 신뢰도 모형의 가정은 다음과 같다.

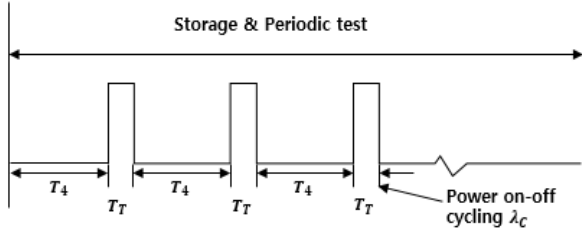
- ① 고장은 검사를 통해서만 알 수 있다
- ② 전자장비는 지수분포를 따른다.
- ③ 검사 장비에 오류가 있는데, i^{th} 에서 발견하지 못한 고장은 $(i+1)^{th}$ 에서도 발견하지 못한다.
- ④ 전자장비의 On/off에도 고장이 발생한다.
- ⑤ λ_C 는 λ_{Si} 들에 비해 165~375배 크고, 평균적으로는 270배 크다.

<Figure 1>의 Phase 3에서 기대고장개수와 이때의 신뢰도는 식 (1)~식 (2)와 같다.

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

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

<Figure 2>는 <Figure 1>의 phase 4를 좀 더 세분화 한 것이다.



<Figure 2> Periodic Test Interval[11]

$T_4 + T_T$ 에서 발생하는 기대고장개수와 N번째 주기적 검사 직전과 직후의 신뢰도는 식 (3)~식 (5)와 같다.

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

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

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

Martinez의 주기적인 검사를 고려한 저장 신뢰도 모형은 현재의 원-샷 시스템의 라이프사이클과 유사하여 관련 연구로써 많이 참고가 되고 있다. 하지만 지수분포만을 고려해 현실을 반영하지 못한다는 한계점이 있다.

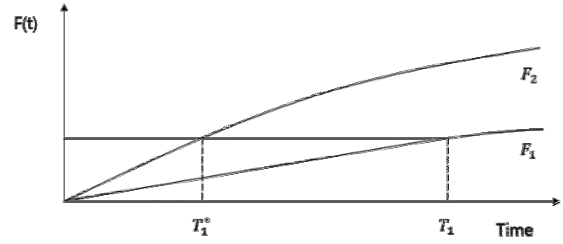
2.2 Kim et al.[9]의 수정된 모형

Kim et al.은 Martinez의 저장 신뢰도 모형에서 지수분포만을 고려해 현실을 반영하지 못하는 한계점을 지적하고, 이를 보완한 모형을 제시하였다. 본 연구에서는 수정된 모형 중 시스템 고장이 와이블분포를 따르는 경우만을 고려하고자 한다.

Kim et al.의 추가된 가정은 다음과 같다.

- ① 각 Phase에서 형상모수 β 는 동일하고, 척도모수 λ 는 다르다.
- ② 검사 시점에 시스템의 고장 유무를 판단할 수 있으므로, 고장 난 시스템의 수명은 검사를 수행한 시점의 수명과 같다.
- ③ 수리 효과는 최소 수리를 따른다.
- ④ 고장 분포에 대해 누적노출모형을 따른다.
- ⑤ 이 외에도 노후화를 고려한다.

T_1 기간 동안 F_1 의 고장 확률을 따르는 원-샷 시스템이 T_1 기간 동안 고장이 발생하지 않을 경우, 정비를 수행하지 않기 때문에 정확한 저장 신뢰도의 산출이 어렵다. 이를 구하기 위해 T_1 기간 동안의 노후화가 고려되고, 다음 구간에서 노후화된 시스템의 T_1^* 의 수명을 가진 상태에서 고장 확률 F_1 에 따라 고장이 발생한다. <Figure 3>는 이러한 원-샷 시스템의 노후화를 표현한 것이다.



<Figure 3> System Age According to F_i of System[9]

<Table 2>는 Kim et al.의 저장 신뢰도 모형에서 사용하는 기호이다.

<Table 2> Notations[9]

Notations	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 $i = 1, 2, \dots, N$
T_{Ti}	Operating time during i^{th} periodic test $i = 1, 2, \dots, N$

식 (6)은 고장시간이 와이블분포를 따를 때의 <Figure 1>의 Phase 3 직후의 저장 신뢰도이다.

$$R_2 = \frac{e^{-\{\lambda_{S2}(T_a^* + T_b)\}^\beta - \{\lambda_E(T_c^* + T_c)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{S2}T_a^*\}^\beta - \{\lambda_E T_b\}^\beta}} + \alpha_3 \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_{S2}(T_a^* + T_b)\}^\beta - \{\lambda_E(T_b^* + T_c)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{S2}T_a^*\}^\beta - \{\lambda_E T_b\}^\beta}} \right\} \quad (6)$$

<Figure 1>의 Phase 4에서 1회 주기적인 검사 직후의 저장 신뢰도 R_3 는 식 (7)과 같다.

$$R_3 = \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_S)\}^\beta - \{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{S1}T_C^*\}^\beta - \{\lambda_E T_S^*\}^\beta}} (1 - \lambda_C)^C + \alpha_4 \left\{ \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_S)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{S1}T_C^*\}^\beta}} \right] + \left[\frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_S)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{S1}T_C^*\}^\beta}} \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_E T_S^*\}^\beta}} \right\} \right] + \left[\frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_S)\}^\beta - \{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{S1}T_C^*\}^\beta - \{\lambda_E T_S^*\}^\beta}} \right] \sum_{k=0}^{C-1} \lambda_C (1 - \lambda_C)^k \right\} \quad (7)$$

i^{th} ($i > 1$) 주기적인 검사 직후의 저장 신뢰도 R_{Si} 는 식 (8)과 같다.

$$R_{Si} = \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T(i-1)}^* + T_S)\}^\beta - \{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T(i-1)}^*)^\beta - (\lambda_E T_S^*)^\beta}} (1 - \lambda_C)^C$$

$$+ \alpha_4 \left\{ \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T(i-1)}^* + T_S)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T(i-1)}^*)^\beta}} \right] + \left[\frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T(i-1)}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T(i-1)}^*)^\beta}} \right] \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_S^*)^\beta}} \right] \right\}$$

$$\left[\frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T(i-1)}^* + T_S)\}^\beta - \{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T(i-1)}^*)^\beta - (\lambda_E T_S^*)^\beta}} \sum_{k=0}^{C-1} \lambda_C (1 - \lambda_C)^k \right] \quad (8)$$

N번째 검사 직전과 직후의 저장 신뢰도 $R_{N(Min)}$ 과 $R_{N(Max)}$ 는 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$R_{N(Min)} = R_2 \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_S)\}^\beta - \{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_C^*)^\beta - (\lambda_E T_S^*)^\beta}}$$

$$+ \left\{ \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_S)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_C^*)^\beta}} \right] + \left[\frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_C^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_C^*)^\beta}} \right] \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_S^*)^\beta}} \right] \right\}$$

$N=1$

$$R_{N-1} \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T_{N-1}}^* + T_S)\}^\beta - \{\lambda_E(T_{S_{N-1}}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T_{N-1}}^*)^\beta - (\lambda_E T_{S_{N-1}}^*)^\beta}}$$

$$+ \left\{ \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T_{N-1}}^* + T_S)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T_{N-1}}^*)^\beta}} \right] + \left[\frac{e^{-\{\lambda_{S1}(T_{T_{N-1}}^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_{S1}T_{T_{N-1}}^*)^\beta}} \right] \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_S^* + T_T)\}^\beta}}{e^{-(\lambda_E T_{S_{N-1}}^*)^\beta}} \right] \right\}$$

$N \geq 2$

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

$$= R_{sN}, N \geq 2 \quad (10)$$

Kim et al.의 수정된 모형 중 와이블분포를 따르는 경우, 형상모수가 1일 때를 적용할 수 없는 것을 확인하였다.

3. 연구 설계

본 연구에서는 와이블분포를 따르는 원-샷 시스템을 가정하여 진행되므로, Kim et al.의 와이블분포를 가정한 검사 후 저장 신뢰도 모형을 사용한다.

본 연구에서의 가정은 다음과 같다.

- ① <Figure 1>의 Pre-acceptance checkout(Phase 3) 직후 Phase 4를 시작으로 한다.
- ② 시스템의 부품 고장의 여부는 검사를 통해 확인이 가능하다.
- ③ 검사, 최소 수리, 오버홀의 시간은 저장 시간에 비해 무시할 만큼 짧다.
- ④ 모든 보전 활동은 검사 직후 진행되며, 최소 수리의 경우 고장률에 영향을 주지 않는다.
- ⑤ 오버홀 이후 저장 신뢰도는 Phase 4에 처음 진입했을 때와 동일하다.

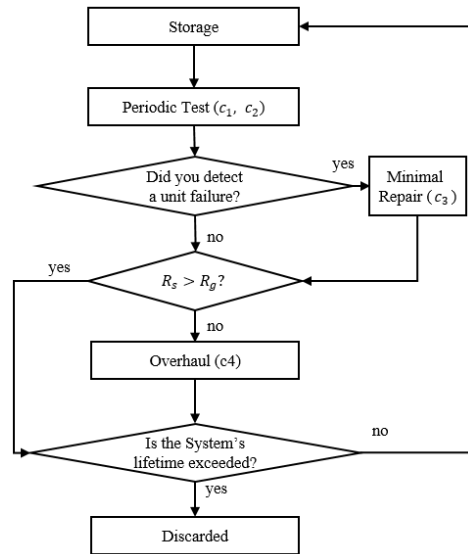
<Table 3>는 본 연구에서 사용하는 기호이다.

<Table 3> Notations

Notations	Definition
c_1	Cost of periodic tests
μ_1	Mean time of periodic tests
c_2	Cost of loss per unit time between inspection and detection
c_3	Cost of minimal repair
μ_3	Mean time of minimal repair
c_4	Cost of overhaul
μ_4	Mean time of overhaul

3.1 검사 모형

<Figure 4>는 <Figure 1>의 Phase 4에서 이루어지는 일련의 과정을 앞에서의 가정을 고려하여 표현한 원-샷 시스템의 주기적인 검사에 대한 Flow chart다.



<Figure 4> Flow Chart of Periodic Test

본 연구에서는 원-샷 시스템의 수명이 유한하다는 가정을 하고, 주기적인 검사를 진행한다. 이 때, 부품의 고장이 발견되면 최소 수리를 실시하고 만약 저장 신뢰도가 목표 신뢰도 이하로 떨어지는 경우 오버홀을 실시한다. 원-샷 시스템은 시스템이 기능을 하거나 유한한 시스템 자체의 수명까지의 시간이 지났을 때 폐기가 진행된다.

이러한 과정에서의 단위시간당 기대 비용은 식 (11)과 같다.

$$EC(T) = \frac{C_S(T)}{I(T)} \tag{11}$$

여기에서 $C_S(T)$ 는 저장 상태에 처음 들어온 시스템이 오버홀을 할 때까지의 한 주기당 기대 비용이고, $I(T)$ 는 이 한 주기 동안의 기대시간간격이다. 본 연구의 목적은 유한한 수명에서 단위시간당 기대 비용 $EC(T)$ 을 최소화 시키는 최적검사주기와 횟수를 결정하는 것이다.

3.2 비용 함수

목표 신뢰도와와의 비교를 위해 Kim et al.[9]의 저장 신뢰도 모형에 몇 가지 가정을 추가한다.

- ① 각 단계에서의 검사시간 T_a 와 T_c 그리고 T_T 를 T_I 로 동일하게 부여한다($T_I = T_{Inspection}$).
- ② 검사 시 원-샷 시스템의 On/off 횟수 C를 1회로 가정한다.

이 가정을 통한 $(i+1)$ 번째 주기적인 검사 직후의 저장 신뢰도 모형의 일반식은 식 (12)와 같다.

$$R_{(i+1)(Max)} = R((i+1)T_s) = \frac{e^{-\{\lambda_E(T_{Si+1}^* + T_I)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{SI}T_h^*\}^\beta}}(1-\lambda_C) + \left\{ \begin{aligned} & \left[1 - \frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_h^* + T_s)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{SI}T_h^*\}^\beta}} \right] + \\ & \left[\frac{e^{-\{\lambda_{SI}(T_h^* + T_s)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{SI}T_h^*\}^\beta}} \left\{ 1 - \frac{e^{-\{\lambda_E(T_{Si+1}^* + T_I)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_E T_{Si+1}^*\}^\beta}} \right\} \right] \\ & \left[\frac{e^{-\{\lambda_E(T_{Si+1}^* + T_I)\}^\beta}}{e^{-\{\lambda_{SI}T_h^*\}^\beta}} \lambda_C \right] \end{aligned} \right\}, \tag{12}$$

식 (12)에서 저장 신뢰도가 목표 신뢰도 R_g 이하로 내려가지 않는다는 제약조건을 이용하여 오버홀 전까지 실시되는 검사회수 N을 다음 식 (13)을 통해 구할 수 있다.

$$R_{N(Max)} > R_g \geq R_{(N+1)(Max)}, N=1, 2, \dots \tag{13}$$

원-샷 시스템의 수명을 (0,S)인 경우, N번째 주기적인 검사까지의 기대 비용 $C_1(N)$, 최소수리비용 $C_2(N)$, 오버홀 비용 $C_3(N)$ 는 식 (14)~식 (16)과 같다.

$$C_1(N) = \sum_{i=0}^{N-1} \int_{iT}^{(i+1)T} \{c_1[i+1] + c_2[(i+1)T-t]\} dF(t) + c_1NR(NT) = \left(c_1 + \frac{c_2S}{N} \right) \sum_{i=0}^{N-1} R\left(\frac{iS}{N}\right) - c_2 \int_0^S R(t)dt, N=1, 2, \dots \tag{14}$$

$$C_2(N) = c_3 \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{R}_{(i+1)(Max)}, N=1, 2, \dots \tag{15}$$

여기에서 $\tilde{R}_{(i+1)(Max)}$ 는 $(i+1)$ 번째 주기적 검사로 고장이 발생한 부품을 발견하고 수리할 확률이다.

$$C_3(N) = c_4 + \mu_4 \tag{16}$$

세 가지 비용의 합으로 구성된 총 기대 비용 $C_S(N)$ 는 식 (17)과 같다.

$$C_S(N) = \left(c_1 + \frac{c_2S}{N} \right) \sum_{i=0}^{N-1} R\left(\frac{iS}{N}\right) - c_2 \int_0^S R(t)dt + c_3 \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{R}_{(i+1)(Max)} + c_4 + \mu_4 \tag{17}$$

이 때, N이 무한인 경우와 1인 경우의 비용 함수는 식 (18), 식 (19)이다.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} C_S(N) = \infty, N = \infty \tag{18}$$

$$C_S(1) = c_1R_{1(Max)} + c_2 \left(SR_{1(Max)} - \int_0^S R(t)dt \right) + c_3 \tilde{R}_{1(Max)} + c_4 + \mu_4, N=1 \tag{19}$$

두 식이 존재하면 $C_S(N)$ 을 최소화하는 N^* 가 존재한다고 할 수 있다[12]. N^* 을 찾기 위해서 주기 $T = \frac{S}{N}$ 로 하여 식을 전개하면 식 (20)과 같이 된다.

$$C_S(T) = \left(c_1 + c_2 \frac{S}{N} \right) \sum_{i=0}^{N-1} R(iT_s) - c_2 \int_0^S R(t)dt + c_3 \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{R}_{(i+1)(Max)} + c_4 + \mu_4 \tag{20}$$

여기서 오버홀까지의 시간간격은 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} I(T) &= \mu_1 + \sum_{i=0}^{N-1} \int_{iT}^{(i+1)T} [(i+1)T-t]dF(t) + \mu_3 + \mu_4 \\ &= \mu_1 + T \sum_{i=0}^{N-1} R(iT_s) - \int_0^S R(t)dt + \mu_3 + \mu_4 \end{aligned} \quad (21)$$

3.3 최적검사정책

최적검사주기 T^* 를 구하기 위해 Barlow, Proschan이 제안한 방법을 실시한다[1].

$$D(\omega, T) = C_S(T) - \omega I(T) \quad (22)$$

본 연구에서의 최적검사주기가 의미 있기 위해서는 주기적으로 검사 및 수리를 진행한 뒤 오버홀을 실시하는 것이 검사 및 수리를 진행하지 않고 오버홀을 실시하는 것보다 시간당 비용이 적어야 한다. 이를 표현한 것이 식 (23)이다.

$$\frac{c_1 + c_3}{\mu_1 + \mu_3} \leq c_2 \quad (23)$$

Cho and Lee의 연구를 바탕으로 최적검사주기와 검사 횟수가 결정되는 보조 정리와 알고리즘 그리고 알고리즘에 대한 증명은 다음과 같다[2].

<보조정리>

최적검사주기 T^* 가 $EC(T) = C_S(T)/I(T)$ 를 최소화하는 유의미한 검사주기이면 $D(1, T^*) < 0$ 이 성립한다. 다음의 보조정리를 통해 최적검사정책이 존재하면 그 때의 단위시간당 기대 비용 $EC(T) = C_S(T)/I(T)$ 는 항상 1 이하라는 것을 알 수 있다.

<알고리즘>

1. 매개변수 ω 가 주어졌을 때, $D(\omega, T)$ 를 최소화 하는 $T^*(\omega)$ 를 찾는다.
2. $D(\omega^*, T^*(\omega^*)) = 0$ 인 $\omega = \omega^*$ 를 찾는다. $T^*(\omega^*)$ 는 $EC(T)$ 를 최소화시킨다.

<증명>

모든 양의 $T > 0$ 에 대해서,

$$\begin{aligned} D(0, T^*(0)) &= C_S(T) - 0 \times I(T) = C_S(T) > 0 \\ \therefore D(0, T^*(0)) &> 0 \end{aligned} \quad (24)$$

이 성립된다. 그리고 알고리즘의 1. $T^*(\omega)$ 의 정의와 보조 정리로부터

$$D(1, T^*(1)) \leq D(1, T^*) < 0 \quad (25)$$

이 성립한다.

$D(\omega, T)$ 는 $0 \leq \omega \leq 1$ 에서 ω 의 연속형함수이기 때문에, 위의 두 식으로부터 $D(\omega^*, T^*(\omega^*)) = 0$ 인 ω^* 가 0과 1 사이에 존재한다.

알고리즘의 2. $T^*(\omega^*)$ 의 정의에 의해, 모든 양의 $T > 0$ 에 대해서 $D(\omega^*, T^*(\omega^*)) \leq D(\omega^*, T)$ 가 성립하므로

$$D(\omega^*, T) = C_S(T) - \omega^* \times I(T) \geq 0 \quad (26)$$

이 되고, $EC(T) = C_S(T)/I(T) \geq \omega^*$ 이 성립한다.

그러나 $D(\omega^*, T^*(\omega^*)) = 0$ 은 $\omega^* = C_S(T^*(\omega^*)) / I(T^*(\omega^*))$ 를 의미하므로 모든 양의 $T > 0$ 에 대하여

$$EC(T) = \frac{C_S(T)}{I(T)} \geq \frac{C_S(T^*(\omega^*))}{I(T^*(\omega^*))} = EC(T^*(\omega^*)) \quad (27)$$

이 성립한다.

위의 증명된 알고리즘을 이용한 최적검사주기와 검사 회수를 찾는 절차는 다음과 같다.

- 절차 1. 식 (13)을 만족하는 N 에 대한 T_S 의 집합을 구한다.
- 절차 2. 오버홀까지의 검사 회수 N 과 매개변수 ω 가 주어졌을 때, $D(\omega, T)$ 를 최소화시키는 T_N^* 를 집합 내에서 찾는다.
- 절차 3. 주어진 ω 에 대해, N 를 변화시키면서 $D(\omega, T_N^*)$ 가 최소가 되는 $N = N^*$ 과 $T_{N^*(\omega)}^* = T^*(\omega)$ 를 찾는다.
- 절차 4. ω 를 변화시키면서 $D(\omega, T^*(\omega)) = 0$ 이 되는 $\omega = \omega^*$ 를 찾으면 $N^*(\omega^*)$ 와 $T^*(\omega^*)$ 는 각각 최적검사회수와 최적검사주기이다.

4. 수치 예제

본 장에서는 Kim et al.[9]의 저장 신뢰도 모형을 고려한 비용 모델과 최적검사정책 결정 방법을 수치를 이용해 확인해보고자 한다. <Table 4>는 앞에서 설명한 기호들과 모수들에 수치를 입력한 표이다. 원-샷 시스템의 기대수명은 현실적으로 유한한 수명인 15년으로 가정을 해두었다. 저장 신뢰도 모형에서 사용할 척도모수 λ 들은 기존의 문헌인 Kim et al.[5]에서 사용한 값이 너무 작기 때문에 목표 신뢰도까지의 저장 시간이 너무 길어져 수정을 하였고, 검사시간 T_7 을 제외하고는 그대로 따랐다. 형상

모수 β 의 경우, 본 연구에서의 수정된 저장 신뢰도 모형은 와이블분포인 경우만을 고려할 수 있기 때문에 지수분포인 $\beta=1$ 를 경우를 제외하고 1.1, 1.2 그리고 정규분포인 $\beta=3.5$ 로 설정했다. 그리고 오버홀 실시의 조건인 목표 신뢰도의 경우, 높은 수준의 저장 신뢰도를 유지해야 하는 원-샷 시스템의 특성을 고려해 $R_g = 0.99$ 로 설정하였다. 비용요소에서의 시간은 $\mu_1 = \mu_3 = 10$ 시간으로 $\mu_4 = 336$ 으로 2주일로 설정했다. 비용 모형에서 쓰일 각 비용요소들은 식 (23)을 만족하도록 비율을 세 가지로 나누었고, 각 비율에 대응하게 Phase 4에서의 검사 유효성 α_4 를 0.9, 0.85 그리고 0.8로 설정했다.

<Table 5>는 <Table 4>에서의 변수들의 수치를 적용한 비용 함수를 최적검사정책 결정방법으로 구한 결과값이다. 나온 결과로는 최적검사주기 T^* 와 검사 회수 N^* 그리고 오버홀까지의 기대 비용 $C_s(T^*)$ 와 시간간격 $I(T^*)$ 이다. <Table 5>을 형상모수의 동일 여부에 따라 해석하면 다음과 같다.

<Table 4> Input Data

Notation	Input value
S	131,400h
λ_E	$58.05 \times 10^{-5}/h$
λ_{\emptyset}	$19.922 \times 10^{-5}/h$
λ_{SI}	$0.774 \times 10^{-5}/h$
λ_C	0.0279396/h
C	1time
T_I	1/30h
T_b	72h
β	1.1, 1.2, 3.5
R_g	0.99
$C_1: C_2: C_3: C_4$	15 : 1 : 3 : 100 10 : 1 : 3 : 100 5 : 1 : 3 : 100
α_4	0.9, 0.85, 0.8
μ_1	10h
μ_3	10h
μ_4	336h

<Table 5> Optimal Inspection Period, Number, Cost and Interval

Shape Parameter	$C_1: C_2: C_3: C_4$	α_4	T^*	N^*	ω^*	$C_s(T^*)$	$I(T^*)$
$\beta = 1.1$	15 : 1 : 3 : 100	0.90	9,020	14	0.162724	860.01086	5,285.09508
			8,760	15	0.104147	517.56251	4,969.55313
			17,520	-	0.187261	668.30740	3,568.84742
	10 : 1 : 3 : 100	0.85	4,846	22	0.138643	1,192.81957	8,603.50627
			8,760	-	0.149964	934.67491	6,232.66551
			17,520	-	0.160173	828.94111	5,175.27113
	5 : 1 : 3 : 100	0.80	2,731	40	0.127094	1,550.47095	12,199.36687
			8,760	-	0.137955	1,130.06655	8,191.55401
			17,520	-	0.145847	989.088140	6,781.69484
$\beta = 1.2$	15 : 1 : 3 : 100	0.90	8,193	16	0.151627	982.42918	6,479.22862
			8,760	11	0.152808	946.17369	6,191.92353
			17,520	-	0.186131	674.05250	3,621.38422
	10 : 1 : 3 : 100	0.85	4,341	30	0.131580	1,418.62358	10,781.47075
			8,760	-	0.150253	931.08459	6,196.77287
			17,520	-	0.159271	836.81996	5,254.076335
	5 : 1 : 3 : 100	0.80	2,454	53	0.121843	1,880.04241	15,430.07096
			8,760	-	0.138178	1,125.27945	8,143.69715
			17,520	-	0.145147	999.59327	6,886.76845
$\beta = 3.5$	15 : 1 : 3 : 100	0.90	6,041	15	0.128436	1,503.90949	11,709.38355
			8,760	9	0.129016	1,440.38748	11,164.41623
			17,520	3	0.135387	1,204.83622	8,899.21444
	10 : 1 : 3 : 100	0.85	5,535	13	0.118616	2,060.9526	17,375.06487
			8,760	7	0.119576	1,938.91923	16,214.92742
			17,520	3	0.123796	1,630.49504	13,170.82166
	5 : 1 : 3 : 100	0.80	2,905	26	0.113376	2,742.16115	24,186.49775
			8,760	6	0.114872	2,420.94893	21,075.201
			17,520	2	0.121771	1,741.81302	14,304.03672

- 같은 형상모수인 경우
 - ① 검사유효성이 떨어질수록 저장 신뢰도 모형의 저장 시간이 감소하면서, 오버홀까지의 검사 횟수가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.
 - ② 검사의 횟수가 증가함에 따라 기대 비용이 증가하는 것을 볼 수 있다.
 - ③ 검사유효성이 같은 경우 검사의 주기가 길어질수록 단위시간당 기대 비용이 점점 커지는 경향을 확인할 수 있다.
 - ④ 검사 유효성이 다른 경우에는 검사유효성이 작을수록 단위시간당 기대 비용값도 작아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 검사의 주기가 짧아지면서 고장-발견 사이의 비용이 상대적으로 줄어들면서 따라오는 결과로 볼 수 있을 것이다.
 - ⑤ 처음 검사부터 오버홀까지의 기대 비용과 시간간격은 검사의 주기가 길어지면 목표 신뢰도를 충족하기가 어려워지기 때문에 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다.
- 형상모수 간 차이가 있는 경우
 - ① 형상모수 β 가 커지면 최적 검사의 주기가 짧아지는 것을 확인 할 수 있다. 그 이유로는 형상모수의 값이 증가할수록 시간에 따른 고장 빈도가 높아져 검사 후의 저장 신뢰도가 낮아지게 되므로, 목표 신뢰도보다 저장 신뢰도를 높게 유지하기 위해 검사 주기가 짧아져야 하기 때문인 것 같다[2].
 - ② ①에 대한 결과로 β 가 커지면 단위시간당 기대 비용이 작아지는 것을 확인할 수 있다.
 - ③ 검사의 유효성이 같은 경우, 동일한 주기로 1년 혹은 2년의 주기로 검사를 실시하면 단위시간당 기대 비용이 작아지는 것을 볼 수 있다.

주기적인 검사를 고려하는 원-샷 시스템을 대상으로 Kim et al.[9]의 저장 신뢰도 모형을 이용해 검사의 주기와 횟수에 따른 저장 신뢰도를 확인하고, 목표 신뢰도 0.99 초과인 주기와 횟수를 찾아 비용 모형에 적용해본 결과 같은 검사장비의 성능인 검사의 유효성에서 최적 검사인 경우가 단위시간당 기대 비용이 가장 작게 나타나는 것을 확인하였다. 하지만 형상모수가 1.1인 경우, 검사의 주기를 1년으로 설정한 경우에는 비용 모형을 통해 구한 최적 검사주기보다는 단순히 가정한 1년이 더 단위시간당 기대 비용이 작게 나오는 것이 확인이 되었다. 이 결과는 오류가 아닌 1년을 검사 주기로 하였을 때, 15년인 유한한 수명에 대해서 저장 신뢰도가 목표 신뢰도보다 항상 초과하여 오버홀을 진행하지 않기 때문에 오버홀과 관련된 시간과 비용을 고려하지 않음으로써 나온 결과이다. 이

결과를 통해 오버홀이 비용 모형에서 무시하면 안 되는 부분이 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 시스템 중 운용시스템이 아닌 저장되었다가 기능을 할 때, 화학적 반응이나 물리적 파괴가 동반되어 단 한 번의 임무 수행 후 폐기되는 원-샷 시스템을 대상으로 검사의 주기와 검사의 회수를 결정하는 의사결정 모형에 관한 연구이다.

해당 비용 모형은 검사 비용, 검사를 통한 고장-발견 사이의 단위시간당 손실비용, 부품의 고장을 최소수리하는데 드는 비용, 저장 신뢰도가 목표 신뢰도보다 작거나 같을 시 전체적인 보수인 오버홀(Overhaul)을 통해 원-샷 시스템의 상태를 초기로 돌리는 데 드는 비용 총 네 가지를 고려한 모형이다.

본 연구에서 운용할 때와 저장기간동안 고장시간이와 이블분포인 경우에 대해 수치 예제를 실시했다. 다양한 형상모수와 비용의 비율을 조합하여 비용 모형을 통해 최적검사주기와 검사 횟수를 구했다. 형상모수가 1.1, 검사유효성이 0.9, 검사의 주기를 1년으로 설정했을 때, 저장 신뢰도가 항상 목표 신뢰도 이상으로 유지되어 오버홀 관련 시간과 비용이 고려되지 않는 경우를 제외하고는 제한한 비용 모형을 통해 구한 최적의 검사정책결정이 타당한 것을 확인하였다. 이는 높은 수준으로 저장 신뢰도를 유지해야 하는 원-샷 시스템이라는 대상에 대해 검사정책결정에 있어, 예상이 가능한 범위에서 단위시간 동안 기대 비용을 최소화하는 최적검사주기와 검사 횟수를 결정해주어 원-샷 시스템 관련분야에서 효과적인 의사결정을 가능케 해줄 것이라 생각한다.

추후 연구사항으로는 오버홀 까지가 아닌 유한한 수명까지 포용할 수 있는 폐기 비용과 재검사비용과 같은 좀 더 현실적인 비용 요소를 고려하여 적용이 더욱 효과적인 모형을 확장하여 제안하고자 한다.

References

- [1] Barlow, R.E. and Proschan, F., *Mathematical Theory of reliability*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996.
- [2] Cho, Y.S. and Lee, J.H., Optimal two-stage periodic inspection policy for maintaining storage reliability, *Communications of the Korean Statistical Society*, 2008, Vol. 15, No. 3, pp. 387-402.
- [3] Chung, Y.B., Age replace policy for a system consider-

- ing failure characteristic of components, *Journal of the KSQC*, 1993, Vol. 21, No. 2, pp. 109-120.
- [4] Ito, K. and Nakagawa, T., Optimal inspection policies for a system in storage, *Computers & Mathematics with Applications*, 1992, Vol. 24, No. 1/2, pp. 87-90.
- [5] Ito, K. and Nakagawa, T., An optimal inspection policy for a storage system with high reliability, *Micro-electronics Reliability*, 1995, Vol. 36, No. 6, pp. 875-882.
- [6] Ito, K., Nakagawa, T., And Nishi, K., Extended optimal inspection policies for a system in Storage, *Mathematical and Computer Modelling*, 1995, Vol. 22, No. 10-12, pp. 83-87.
- [7] Kim, D.I. and Jeon, G.W., 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*, 2006, Vol. 32, No. 2, pp. 92-113.
- [8] 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.
- [9] Kim, H.W. and Yun, W.Y., Reliability analysis for one-shot systems with periodic inspection, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 20-29.
- [10] Kim, Y.S. and Chung, Y.B., A Study on Reliability Prediction of Product with Dormant Phase, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2012, Vol. 35, No. 3, pp. 173-179.
- [11] Martinez, E.C., Storage reliability with periodic test, *Reliability and maintainability symposium*, 1984, pp. 181-185.
- [12] Nakagawa, T., *Maintenance theory of reliability* 1st ed., Springer-Verlag, 2005.
- [13] Pan, C.C. and Chu, L., Reliability assessment for one-shot product with weibull lifetime components, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2010, Vol. 27, No. 5, pp. 596-610.

ORCID

Seung Woo Jeong | <http://orcid.org/0000-0002-5828-9869>

Young Bae Chung | <http://orcid.org/0000-0003-4259-6677>