

일회성 시스템의 저장신뢰도 결정 모델에 관한 연구

김동규* · 강운석*[†] · 강성진*

A Study on the Storage Reliability Determination Model for One-shot System

Dong-Kyu Kim* · Wun-Seok Kang* · Sung-Jin Kang*

■ Abstract ■

Some systems such as missiles and ammunitions are used only one time in combat or emergency situation. Predicting correct storage reliability is very important for those systems which are inspected periodically. Many researches have been done for predicting the storage reliability using generally exponential or Weibull failure distribution. However, recent studies show the hazard functions follow various types of failure distributions. So in this paper, we proposed a generalized model that measures the storage reliability regardless of type of failure distributions. And this model reflects inspection error and failures that might be occurred during periodical check and within storage term as well.

Keyword : Storage Reliability, Inspection Error, One-shot System, Martinez Model

1. 서 론

일회성 시스템이란 에어백, 비상발전기, 우주발사체, 탄약, 미사일 등에 나타날 수 있는 장기간 저장 상태로 있다가 단지 한 번만 사용되는 체계를 의미

한다. 이러한 시스템은 장기간 저장상태로 있어야 하기 때문에 원래 의도된 목적대로 사용되지 않고 그 수명(Shelf Life)을 다하는 경우가 많다.

저장신뢰도는 일회성 시스템처럼 장기간 저장되는 시스템이 특정한 시간이 경과된 후 정상적으로 작

논문접수일 : 2012년 08월 16일 논문게재확정일 : 2012년 11월 14일

논문수정일(1차 : 2012년 09월 16일, 2차 : 2012년 10월 23일)

* 국방대학교 국방관리대학원 군사운영분석

[†] 교신저자, midship72@gmail.com

동될 확률을 의미한다. 저장신뢰도는 장기간 저장되는 시스템의 저장환경, 저장시간 등에 따른 저장고장률과 계획된 정책에 의거하여 검사장비를 활용하여 주기적인 점검을 실시할 때 시스템의 운용시 발생하는 운용고장률에 의해서 결정된다[21, 22].

일회성 시스템은 특성상 필요한 시점에 필요한 요구기능을 수행할 수 없다면, 매우 큰 손실을 발생시킬 수 있다. 따라서 일회성 시스템에 대한 목표 저장신뢰도를 설정하고, 이를 달성하기 위한 노력을 개발 단계에서부터 지속적으로 기울여야 한다. 그리고 운영단계에서도 저장상태의 시스템을 주기적으로 검사·정비함으로써 목표 저장신뢰도를 유지하는 것이 무엇보다 중요하다.

기존 연구에서는 일회성 시스템의 저장신뢰도를 측정하기 위해 주로 지수분포 혹은 와이블 분포를 고장함수로 적용하고 있다. 그러나 최근 다양한 분야에서의 기술 발달로 과거와 달리 고장의 분포가 지수 및 와이블 분포에 국한되지 않고 다양하게 나타나고 있다[13, 14, 20]. 그리고 일회성 시스템의 목표 신뢰도를 유지하기 위해 지속적인 주기검사를 실시하게 된다. 그런데 이러한 검사시 사용되는 검사장비의 오류를 다양한 분포에 복합적으로 적용한 연구사례는 없었다.

따라서 본 연구에서는 모든 종류의 고장 분포에 공통적으로 적용이 가능하고, 동시에 검사오류를 반영할 수 있는 저장신뢰도 결정모델을 제안한다.

2. 이론 및 기존연구 고찰

2.1 신뢰도 정의

신뢰도(Reliability)는 제품이나 서비스가 온도 또는 전압과 같은 설계 운영 환경 하에서 설계된 수명의 특정 기간 동안 고장없이 정상적으로 작동될 확률이다. 그러므로 신뢰도는 시스템의 기능이 정상적으로 작동하는지에 대한 척도로 사용된다[13].

따라서 설계 운영 환경 시험을 받는 동일한 부품들을 n_0 , $[t - \Delta t, t]$ 시간동안 발생하는 고장부품을 $n_f(t)$,

생존부품을 $n_s(t)$ 라 정의하면, 신뢰도 $R(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (1)$$

where, $n_f(t) + n_s(t) = n_0$

이때 T 가 고장 시간을 의미하는 임의 확률변수(Random Variable)라고 하면, 시간 t 에서의 신뢰도 함수 $R(t)$ 와 불신뢰도 함수 $F(t)$ 는 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$R(t) = P(T > t) \quad (2)$$

$$F(t) = 1 - R(t)$$

고장 시간 T 가 확률 밀도 함수(Probability Density Function) $f(t)$ 를 따르면, 식 (3)은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (4)$$

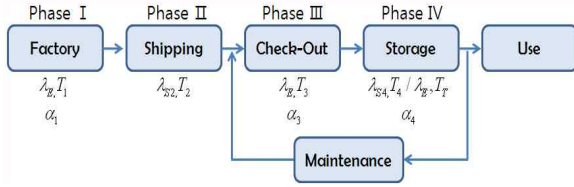
2.2 기존연구 고찰

과거 연구문헌 고찰에서는 우선 현재 국내에서 일회성 시스템의 저장신뢰도 분석시 가장 많이 활용되는 Martinez의 검사주기 결정모델에 대해 살펴보았다. 그리고 이어서 기타 국외 및 국내에서 저장신뢰도와 관련된 연구에 대하여 고찰하였다.

2.2.1 Martinez 검사주기 결정모델

Martinez[12]는 고장분포가 지수분포를 따르는 시스템에 대하여 검사주기에 따른 신뢰도의 변화를 분석하여 최적 검사주기 결정 모델을 제시하였다. 국내에서는 김대익, 이종문, 조용석 등[1, 5, 7]이 Martinez 검사주기 결정모델을 적용하여 유도탄의 최적 검사주기를 결정하는 모델에 대해 연구를 수행하였다.

[그림 1]은 Martinez의 검사주기 결정모델로서 모델의 유도과정은 다음과 같다.



[그림 1] Martinez의 검사주기 결정모델

- λ_{S_i} : i번째 단계에서 저장고장률
- λ_c : 전기·전자장비의 On-Off에 의한 고장률
- C : 전기·전자장비의 On-Off 횟수
- T_i : i번째 단계의 소요시간
- * T_T : 검사시 장비 운영시간
- α_i : i번째 단계 검사장비의 정확도
- F_3 : 저장 전 단계 기대 고장개수
- F_p : 한 주기 저장간 기대 고장개수
- $R_{k(MIN)}$: k번째 주기점검 직전의 신뢰도
- $R_{k(MAX)}$: k번째 주기점검 직후의 신뢰도
- k : 주기점검 횟수

$$\lambda_E : \text{검사시 장비의 운용고장률}$$

$$F_3 = (1 - \alpha_1)\lambda_E T_1 + (1 - \alpha_3)[\lambda_{S_2} T_2 + \lambda_E T_3] \quad (5)$$

$$k\text{번째 검사 직전의 기대 고장개수}$$

$$= F_3 + (k-1)(1 - \alpha_4)F_p + \lambda_{S_4} T_4 \quad (6)$$

$$k\text{번째 검사 직후의 기대 고장개수}$$

$$= F_3 + k(1 - \alpha_4)F_p \quad (7)$$

$$R_{k(MIN)} = e^{-[(k-1)(1 - \alpha_4)F_p + F_3]} e^{-\lambda_{S_4} T_4} \quad (8)$$

$$\text{where, } F_p = \lambda_{S_4} T_4 + \lambda_E T_T + \lambda_c C$$

$$R_{k(MAX)} = e^{-[k(1 - \alpha_4)F_p + F_3]} \quad (9)$$

먼저, 저장 전 단계에 예상되는 고장개수는 식 (5)와 같이 Phase I~Phase III까지 발생하는 고장에 검사장비의 오류를 반영하여 산출하였다.

다음으로, k번째 검사 직전에 예상되는 고장개수는 저장전 단계의 고장개수(F_3), 첫 번째 주기점검부터 k-1번째 주기점검까지의 매 주기기 잔존 고장개수와 k-1번째에서 k번째 주기점검 사이에 저장기간 동안의 예상되는 고장개수의 합으로 식 (7)과 같다.

끝으로, k번째 검사 직후에 예상되는 고장개수는 저장전 단계의 고장개수(F_3)와 첫 번째 주기점검부터 k번째 주기점검까지의 매 주기기 잔존 고장개수의 합으로 식 (8)과 같다.

따라서 k번째 주기검사 직전 및 직후의 신뢰도는 식 (10), 식 (11)과 같다.

Martinez는 저장소에 도착한 직후의 고장개수를 식 (5)에서 보는 것과 같이 1~3단계에서 검사장비의 오류로 인해 발견되지 못하는 고장의 단순 합으로 계산하였다.

하지만 2~3단계에서의 고장은 1단계 직후의 고장장비를 제외한 정상 장비에 대해서만 발생되므로 식 (5)는 다소 현실성이 떨어질 수 있다.

또한, 식 (6)과 식 (7)에서처럼 k번째 검사 직전 및 직후의 고장은 k-1번째 검사 직후 잔존 고장과 상관없이 1회의 검사주기($T_4 + T_T$) 동안에는 같은 수의 고장(F_p)이 발생된다고 가정하고 있다.

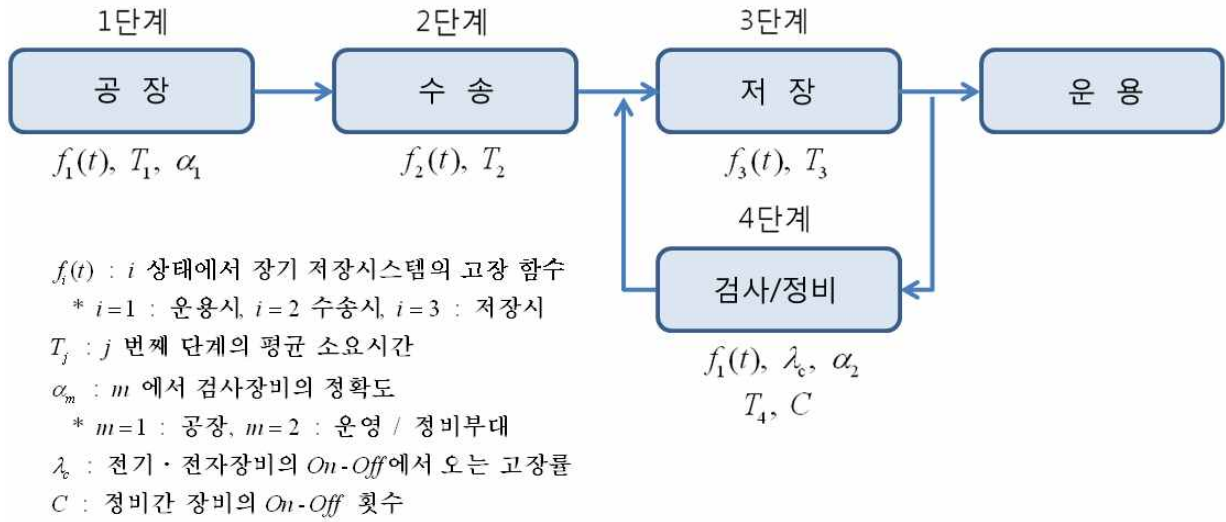
그러나 k-1번째와 k번째 사이에서는 k-1번째 검사 직후 검사장비의 오류로 인해 발견하지 못한 고장장비를 제외한 정상 장비에서만 고장이 발생된다. 따라서 정상 장비에 대해서만 추가 고장이 발생하는 모델이 보다 현실적이라고 볼 수 있다.

2.2.2 저장신뢰도 관련 기타 연구

일회성 시스템의 저장신뢰도 추정과 관련된 기타 국외 및 국내의 기존 연구는 다음과 같다.

Chen et al.[10, 11, 22]은 장비의 수명이 와이블 분포를 따를 때, 몬테카를로 시뮬레이션 기법(Monte Carlo Simulation)을 이용하여 와이블 분포의 모수를 추정하였다. 그리고 저장기간이 정해져 있을 때 오차를 최소화하는 검사횟수를 결정하였다. Rooney [23]는 지수분포를 따르는 장비의 저장고장률을 추정하는 방법을 제시하였다.

Ito et al.[15-19]은 고장발견 가능성에 따라 시스템을 2~3개의 종류로 구분하였다. 그리고 고장발견이 가능한 구성요소는 주기적인 검사 및 보전 후에 신뢰도와 신뢰도가 같아지고, 고장발견이 불가능한 구성요소는 검사 및 보전을 하지 않는다는 가정



[그림 2] 일회성 시스템의 운영체계

하에 보전 후 저장신뢰도를 산출하였다.

국내에서는 조용석 등[6]이 지수 및 와이블 분포를 따르는 고장분포에 대해 장기간 저장되는 장비의 신뢰도를 유지하기 위한 최적 2단계 주기 검사모형을 비용요소를 고려하여 제안하였다.

김병수 등[2]은 M&S 기법을 통하여 유도탄의 주기 검사방법 및 저장신뢰도 결정모형을 제시하였다. 그리고 손영갑 등[4]은 일회성 시스템의 저장신뢰도 평가방법으로 비모수 추정법, 모수 추정법, 베이지안 접근법을 적용하고 사례연구를 하였다.

이러한 기존 연구의 공통적인 특징은 고장 분포를 지수 또는 와이블 분포로 한정하여 모델을 제시하였다. 그리고 일부 연구에서는 검사장비의 오류를 고려하지 않았다.

3. 저장신뢰도 결정 모델

본 장에서는 장기 저장되는 일회성 시스템에 대한 저장신뢰도를 결정하는 모델을 제안한다.

일반적인 일회성 시스템의 운영체계는 공장에서 생산되어 수송 및 저장되고 일정한 주기에 따라 검사 및 정비를 실시하고, 필요시 운용한다. 이때 각 단계에서 고장이 발생할 수 있으며, 검사장비의 정

확도에 따라 검사 및 정비 후에도 잔존고장이 있을 수 있다. 이를 요약하면 [그림 2]와 같다.

여기서 각 단계별 고장함수 $f_i(t)$ 는 단계별 상태에 따라 발생하는 고장에 따른 확률변수로서 세부적인 내용은 다음과 같다.

- ◆ 공 장 : 장비의 출하 전 검사간 장비 운용시 고장확률
- ◆ 수 송 : 수송간 수송환경에 의한 고장확률
- ◆ 저 장 : 장비의 저장환경에 따른 고장확률
- ◆ 검사/정비 : 주기검사간 장비 운용시 고장확률

각 단계별 시간 T_j 는 공장 및 검사/정비단계에서는 검사장비를 통한 장비를 운용하는 시간, 수송 및 저장 단계에서는 수송 및 저장에 소요되는 시간을 의미한다. 검사장비의 정확도 α_m 는 공장에서 출하 전 검사시 사용하는 검사장비와 운영 및 정비부대에서 검사 및 정비시 사용하는 검사장비의 정확도를 의미한다. 그리고 λ_c 는 검사를 위해 시스템을 운용할 경우 전기·전자장비의 On-Off에서 오는 고장률이고, 이러한 주기검사를 실시할 때 시행하는 장비의 On-Off 횟수는 C 로 정의한다.

3.1 모델 가정사항

일회성 시스템의 저장신뢰도 결정모델에 대한 가정사항은 다음과 같다.

- ① 일회성 시스템의 고장은 운용간, 수송간, 저장간 각각 특정한 고장함수($f_i(t)$)를 따른다. 이러한 고장함수는 유사 장비의 과거 데이터 분석, 연구개발 중 신뢰성 실험을 통한 고장함수의 추정이 가능하다.
- ② 매 검사시(검사횟수에 상관없이) 검사장비의 정확도(α_m)는 일정하다. 단, 공장 및 운영/정비부대에서 동일한 검사장비를 사용하면 검사장비의 정확도는 모두 동일하며 α 로 한다($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$).
- ③ 각 단계에서의 소요시간(T_j)은 일회성 시스템에 대한 평균 소요시간이다. 이는 유사장비의 연구 또는 연구개발시 군수지원계획서에 의거하여 산출이 가능하다.
- ④ 일회성 시스템은 정상 또는 고장의 두 가지 상태를 가지며, 고장 발생시 정비(수리 또는 교환)를 통해 신제품과 같은 상태를 유지한다.
- ⑤ 일회성 시스템은 저장간에 발생하는 고장과 장비의 운용에 의해 발생하는 고장으로 구분된다. 전기·전자장비의 경우 On-Off시에도 고장이 발생되고, 전기·전자장비의 On-Off에서 오는 고장률 λ_c 는 “270×(저장간고장률)”로 설정한다. 이는 RA DC[8]의 연구결과를 반영한 것으로 λ_c 는 장비에 따라 저장고장률의 약 165~375배의 값을 가지며, 평균적으로 270배의 값을 가진다.
- ⑥ 최초 공장에서 양산시의 모든 시스템은 정상이다.

3.2 저장신뢰도 결정모델

일회성 시스템의 운영체계는 크게 저장소에 보관되기 전 장비의 생산 및 이동 단계(저장 전 단계)와 보관된 이후 저장 및 검사/정비 단계(저장 후 단계)로 나눌 수 있다.

3.2.1 저장 전 단계

일회성 시스템이 공장에서 생산되어 저장소에 보관되기 전에 발생하는 장비의 잔존 고장개수는 수송(2단계)까지 발생된 고장과 저장소에 도착시 실시하는 최초 검사시 운용간 고장, 그리고 검사장비 오류를 반영한 것이 된다.

Φ_i 를 N 개의 일회성 시스템을 생산하여 i 단계 직후의 잔존 고장개수라고 했을 때, 생산(1단계) 직후의 잔존 고장개수(Φ_1)는 장비 출하검사시 장비의 운용에 의해 발생하는 고장과 검사장비의 오류를 반영한 식 (10)과 같다.

$$\Phi_1 = N \times \{F_1(T_1) + \lambda_c C\} \times (1 - \alpha_1) \quad (10)$$

수송(2단계)까지의 평균 소요시간은 T_2 이다. 이때 정상적으로 작동되는 시스템에서 추가적으로 고장이 발생되고, 저장소에 도착시 α_2 의 정확도를 가지는 검사장비로 T_4 시간동안 최초 검사를 실시할 때 운용간 고장($\lambda_c C + F_1(T_4)$)이 발생된다. 그러므로 수송(2단계) 및 최초 검사가 종료되었을 때 잔존 고장개수(Φ_2)는 식 (11)과 같다.

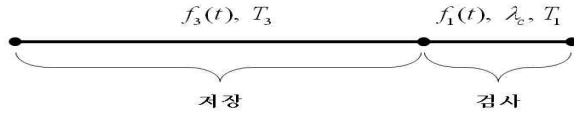
$$\Phi_2 = (1 - \alpha_2) \times [\Phi_1 + (N - \Phi_1) \{F_2(T_2) + \lambda_c C + F_1(T_4)\}] \quad (11)$$

따라서 저장 전 단계의 신뢰도는 식 (1)과 식 (11)에 의해 식 (12)와 같이 표현된다.

$$R(\text{저장 전 단계}) = 1 - \frac{\Phi_2}{N} \quad (12)$$

3.2.2 저장 후 단계

일회성 시스템이 한 저장 주기 동안 발생하는 고장개수는 [그림 3]에서 보는 것처럼 저장간에 발생하는 고장함수($f_3(t)$)와 검사간 장비를 운용함에 따라 발생하는 고장함수($f_1(t)$), 그리고 전기·전자장비의 경우 검사간 장비의 On-Off에 의해서 발생하는 고장률(λ_c)에 의해서 결정이 된다.



[그림 3] 저장 후 단계에서 발생하는 고장

일회성 시스템이 공장에서 수송되어 저장된 직후의 잔존 고장개수는 ϕ_2 이므로 정상인 일회성 시스템(N_s)은 식 (13)과 같다.

$$N_s = N - \phi_2 \quad (13)$$

n 을 검사 횟수, X_n 을 n 번째 검사시 예상되는 총 고장개수, Y_n 을 α_2 의 신뢰도를 가지는 검사장비를 이용하여 n 번째 검사시 발견되어 수리되는 개수, Z_n 을 검사장비가 발견하지 못하여 n 번째 검사 직후의 잔존 고장개수라고 정의한다. 그러면 첫 번째 검사시 즉, $n=1$ 일 때, 총 고장개수 X_1 은 저장소에 도착할 때부터 가지고 있는 잔존 고장개수 ϕ_2 와 저장 및 주기검사로 인해 추가로 발생하는 고장개수의 합으로 나타낼 수 있다.

먼저 저장 단계(3단계) 종료시 즉, 저장시간(T_3) 직후의 잔존 고장개수(ϕ_3)는 식 (14)와 같다.

$$\phi_3 = \phi_2 + N_s \times F_3(T_3) \quad (14)$$

다음으로 검사를 위해 장비를 T_4 동안 운용할 경우 검사 및 정비단계(4단계) 직후 잔존 고장개수(ϕ_4)는 저장단계 직후의 잔존 고장개수(ϕ_3)와 검사 직전에 정상인 시스템($N - \phi_3$)이 검사 중에 추가로 발생하는 고장개수($F_1(T_4) + \lambda_c C$)의 합이다. 이는 첫 번째 검사시 예상되는 총 고장개수이고 식 (15)와 같다. 또한 식 (15)는 식 (13)과 식 (14)를 활용하여 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_1 &= \phi_4 = \phi_3 + (N - \phi_3)(F_1(T_4) + \lambda_c C) \\ &= \{\phi_2 + N_s \times F_3(T_3)\} \\ &\quad + \{(N_s - N_s \times F_3(T_3))(F_1(T_4) + \lambda_c C)\} \\ &= \phi_2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &+ N_s \times [F_3(T_3) + \{(1 - F_3(T_3))(F_1(T_4) + \lambda_c C)\}] \\ &= \phi_2 + N_s \times F_a(T_{3,4}) \end{aligned} \quad (16)$$

Where,

$$\begin{aligned} F_a(u T_{3,4}) &= F_3(u T_3) \\ &\quad + (1 - F_3(u T_3))(F_1(u T_4) + \lambda_c C), \end{aligned} \quad (17)$$

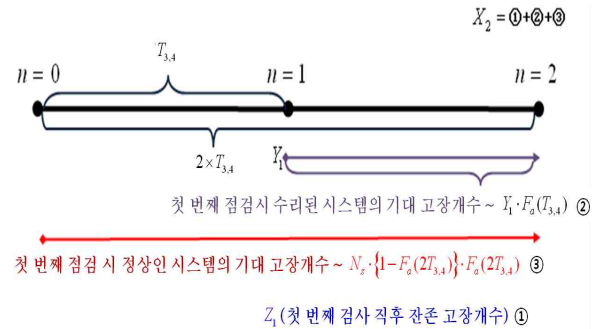
$$u = 1, 2, \dots, n$$

이때 Y_1 및 Z_1 은 총 고장개수에 검사장비의 정확도를 반영한 수리 개수 및 검사 직후 잔존 고장개수로서 식 (18), 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_1 = X_1 \times \alpha_2 \quad (18)$$

$$Z_1 = X_1 \times (1 - \alpha_2) \quad (19)$$

$n=2$ 일 때, 총 고장개수(X_2)는 [그림 4]에서 보는 것과 같이 $n=1$ 일 때 발견하지 못한 잔존 고장개수 ①, $n=1$ 에서 수리된 시스템의 두 번째 주기간 발생하는 고장개수 ②, 그리고 $n=1$ 까지 정상이었던 시스템이 두 번째 주기간 추가로 발생하는 고장개수 ③의 합으로 나타낼 수 있다.

[그림 4] $n=2$ 일 경우 기대 고장개수

따라서 X_2 , Y_2 , Z_2 는 식 (20), 식 (21), 식 (22)로 표현된다.

$$\begin{aligned} X_2 &= Z_1 + Y_1 F_a(T_{3,4}) \\ &\quad + N_s \{1 - F_a(T_{3,4})\} \times F(2T_{3,4}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$Y_2 = X_2 \times \alpha_2 \quad (21)$$

$$Z_2 = X_2 \times (1 - \alpha_2) \quad (22)$$

이와 같은 방법으로 $n=3$ 일 때는 식 (23), 식 (24), 식 (25)와 같다.

$$X_3 = Z_2 + Y_2 F_a(T_{3,4}) + Y_1 \{(1 - F_a(T_{3,4})) \times F_a(2T_{3,4}) + N_s \{(1 - F_a(T_{3,4}))(1 - F(2T_{3,4})) \times F_a(3T_{3,4})\} \quad (23)$$

$$Y_3 = X_3 \times \alpha_2 \quad (24)$$

$$Z_3 = X_3 \times (1 - \alpha_2) \quad (25)$$

따라서 $n=k$ 일 때, 총 고장개수 X_k , 수리되는 개수 Y_k , 검사 및 정비 직후의 잔존 고장개수 Z_k 는 식 (26), 식 (27), 식 (28)과 같이 일반화하여 표현할 수 있다. 이때 ξ_i 는 k 번째 검사 및 정비를 $k-i$ 번째에 수리된 시스템의 검사 직후까지 고장확률을 의미한다.

$$X_k = Z_{k-1} + Y_{k-1} F_a(T_{3,4}) + Y_{k-2} \{(1 - F_a(T_{3,4})) \times F_a(2T_{3,4}) + \dots + Y_1 \{(1 - F_a(T_{3,4})) \times \dots \times (1 - F_a((k-2)T_{3,4}))\} \times F_a((k-1)T_{3,4})\} + N_s \{(1 - F_a(T_{3,4})) \times \dots \times (1 - F_a((k-1)T_{3,4}))\} \times F_a(kT_{3,4}) = Z_{k-1} + \sum_{h=1}^k Y_{h-1} \times \xi_{k-(h-1)} \quad (26)$$

where,

$$\xi_i = F_a(iT_{3,4}) \times \prod_{j=0}^{i-1} (1 - F_a(jT_{3,4})),$$

$$Y_0 = N_s, Z_0 = \Phi_2, F_a(0) = 1$$

$$Y_k = X_k \times \alpha_2 \quad (27)$$

$$Z_k = X_k \times (1 - \alpha_2) \quad (28)$$

k 번째 주기점검 직전의 총 고장개수는 $k-1$ 번째 점검 직후의 잔존 고장개수(Z_{k-1})와 k 번째 검사 직전 한 주기 저장간 고장함수($f_3(t)$)에 의해서 결정된다. 그러므로 주기 점검 직전의 총 고장개수(X_{k-})는 식 (29)와 같다. 이때 ψ_i 는 k 번째 검사 및 정비를 $k-i$ 번째에 수리된 시스템의 k 번째 점검 직전 한 주기 저장간 고장확률을 의미한다.

$$X_{k-} = Z_{k-1} + Y_{k-1} F_3(T_3) + Y_{k-2} \{(1 - F_a(T_{3,4})) \times F_3(2T_3) + \dots + N_s \{(1 - F_a(T_{3,4})) \times \dots \times (1 - F_a((k-1)T_{3,4}))\} \times F_3(kT_3)\} = Z_{k-1} + \sum_{h=1}^k Y_{h-1} \times \psi_{k-(h-1)} \quad (29)$$

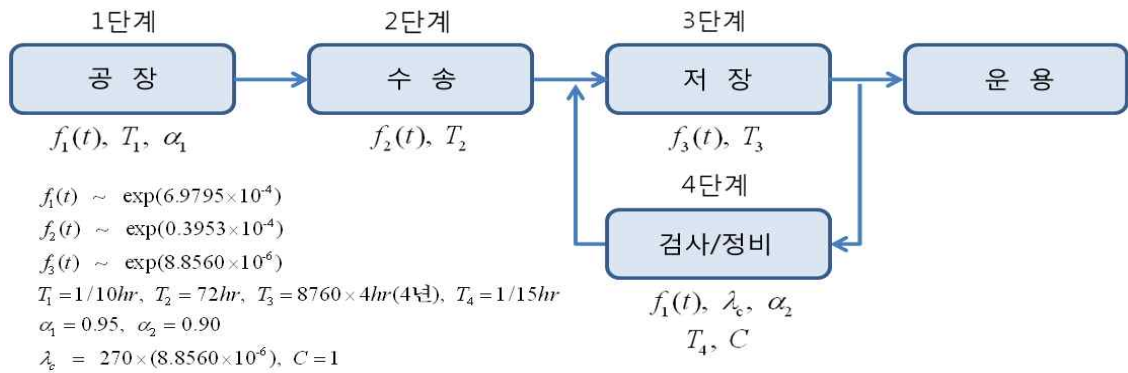
$$\text{where, } \psi_i = F_3(iT_3) \times \prod_{j=0}^{i-1} (1 - F_a(jT_{3,4})), Y_0 = N_s$$

따라서 k 번째 주기 점검 직전 신뢰도($R(kT_-)$) 및 직후 신뢰도($R(kT_+)$)는 식 (1)에 의거하여 식 (30), 식 (31)과 같다.

$$R(kT_-) = \frac{N - X_{k-}}{N} = 1 - \frac{X_{k-}}{N} \quad (30)$$

$$R(kT_+) = \frac{N - Z_k}{N} = 1 - \frac{Z_k}{N} \quad (31)$$

결국 식 (30), 식 (31)은 일회성 시스템의 운영체제에서 단계별로 발생하는 장비의 고장과 시험장비의 오류를 고려한 일반화된 일회성 시스템의 저장



[그림 5] 대함유도탄 검사주기 결정모델 예

신뢰도 결정 모델이라고 할 수 있다.

$$X_k = Z_{k-1} + (N - Z_{k-1}) \times F_3(T_3) \quad (32)$$

4. 저장신뢰도 결정모델의 활용

본 장에서는 제 3장에서 제안된 일회성 시스템 저장 신뢰도 결정모델을 지수분포, 와이블 분포, 감마분포의 고장함수를 가지는 일회성 시스템에 대해 적용하였다. 추가로 본장에서 예를 들지는 않았지만 제안된 모델은 유사체계의 분석 또는 연구개발간 신뢰성 실험을 통해 고장분포를 정의할 수 있는 경우 정규분포, 선형증가분포, 로그정규분포 등 모든 분포에 일반적으로 적용이 가능하다.

4.1 고장함수가 지수분포를 따를 경우

고장함수가 지수분포를 따를 경우에 대한 저장 신뢰도 결정모델은 국내에서는 유도탄 개발시 신뢰도 측정 및 검사주기 결정을 위해 주로 사용되어 왔던 Martinez 모델과 비교하여 제안된 모델의 타당성 및 적절성을 제시한다.

4.1.1 제안 모델

제안 모델은 Martinez 모델에서 반영되지 않았던 검사 직후 잔존 고장 장비를 고려하여 한 주기 동안 실제 정상 장비에서만 고장이 발생되도록 하였다.

Martinez 모델과 비교하기 위하여 제안된 일반화 모델의 고장함수를 지수분포로 정의한다. 제안모델에 Martinez의 모델에서 사용하는 확률변수를 적용하면, 저장소에 저장하기 직전에 예상되는 고장개수 및 신뢰도는 식 (11)과 식 (12)를 활용하여 구할 수 있다.

저장소 도착 이후 k 번째 검사 직전의 고장개수 및 신뢰도는 지수분포의 무기역성(Memoryless property)에 의해서 $k-1$ 번째 이전에 언제 수리되었는지는 중요하지 않으며, 한 점검 주기 동안의 시간에만 영향을 받는다. 따라서 고장함수가 지수분포일 경우 k 번째 검사 직전의 고장개수는 식 (29)를 활용하여 식 (32)와 같이 나타낼 수 있고, 식 (30)을 활용하여 k 번째 검사 직전의 저장 신뢰도를 구할 수 있다.

k 번째 검사 직후의 고장개수는 동일하게 지수분포의 특성을 반영하게 되면 식 (26)을 식 (33)과 같이 나타낼 수 있고, 이 때 저장 신뢰도는 식 (31)을 활용하여 구할 수 있다.

$$X_k = Z_{k-1} + (N - Z_{k-1}) \times F_a(T_{3,4}) \quad (33)$$

4.1.2 두 모델의 비교

[그림 5]는 김대익 등[1]이 Martinez의 모델을 활용하여 대함유도탄 검사주기 결정모델에 사용된 예제이다.

예제에서 사용된 확률변수로 $f_i(t)$ 는 일회성 시스템의 운용, 수송, 저장상태에서 고장함수를 의미한다. T_j 는 각 단계에서 장비의 운용, 수송, 저장하는데 소요되는 시간을 의미하며, 검사 주기는 4년(저장기간)으로 설정하였다. 검사장비는 정확도(성능)가 다른 2개(공장에 배치된 검사장비와 운영 및 정비부대에 배치된 검사장비)를 운용하고, 검사장비를 활용한 주기검사시 장비의 On-Off는 1회만 실시하는 것으로 가정한다.

저장소 저장 직전의 고장개수는 Martinez 모델에서는 식 (5)를 활용하여 직접 계산할 수 있으며, 제안 모델의 경우 식 (11)과 식(12)를 이용하여 다음과 같이 도출할 수 있다.

i) Martinez 모델

$$F_3 = 2.9274 \times 10^{-4}$$

ii) 제안 모델

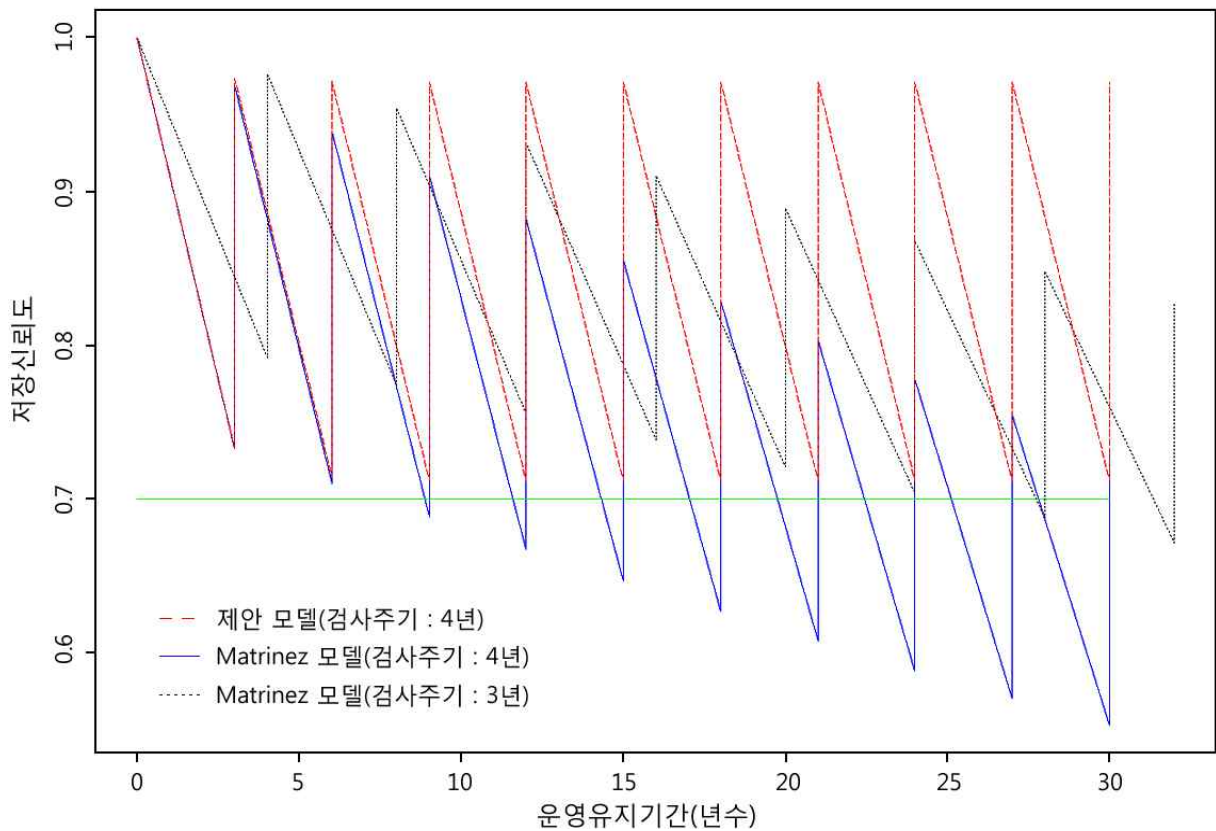
$$\phi_1 = 1.2305 \times 10^{-4}$$

$$\phi_2 = 5.4019 \times 10^{-4}$$

저장소 저장 후 단계에서의 저장신뢰도는 Martinez의 모델에서는 식 (8), 식 (9)를 이용하여, 제안 모델에서는 식 (32), 식 (33)을 식 (30), 식 (31)에 적용하여 산출할 수 있으며, 두 모델의 저장 신뢰도 비교는 [그림 6]과 같다.

검사횟수	Martinez 모델(검사주기 : 3년)		Martinez 모델(검사주기 : 4년)		제안 모델(검사주기 : 4년)	
	검사 직전	검사 직후	검사 직전	검사 직후	검사 직전	검사 직후
저장 직전	0.9997073		0.9997073		0.9994598	
1	0.7330019	0.9689251	0.7921311	0.9764712	0.7328204	0.9731034
2	0.7104319	0.9390908	0.7737196	0.9537751	0.7134955	0.9711756
3	0.6885569	0.9101751	0.7557361	0.9316065	0.712082	0.9710346
4	0.6673554	0.8821497	0.7381705	0.9099532	0.7119786	0.9710243
5	0.6468067	0.8549873	0.7210133	0.8888032	0.7119711	0.9710236
6	0.6268908	0.8286612	0.7042548	0.8681448	0.7119705	0.9710235
7	0.6075881	0.8031458	0.6878858	0.8479666	0.7119705	0.9710235

고장률 함수가 지수분포일때 저장신뢰도



[그림 6] Martinez의 모델과 제안 모델의 저장신뢰도 비교

[그림 6]에서 보는 것처럼 Martinez 모델은 검사 횟수가 증가함에 따라 저장신뢰도가 일정하게 감소되지만, 제안 모델은 저장신뢰도가 지속적으로 감소하나 특정 시점 이후에는 수렴한다.

이는 한 주기검사 기간 동안 고장의 발생을 어떻게 정의하는가에 따라 차이가 발생하게 되는데 Martinez는 $k-1$ 번째의 잔존 고장과 상관없이 한 주기 검사동안 동일한 고장이 발생된다고 가정하였다. 하지만 제안 모델에서는 현실성을 반영하여 $k-1$ 번째

의 잔존 고장을 제외한 정상 장비에서만 추가로 고장이 발생되게 하였다. 따라서 제안모델에서는 주기 검사시 기대 고장개수는 $k-1$ 번째 잔존 고장 장비와 정상 장비에서 추가로 발생된 고장 장비를 합한 것으로 식별되는 고장 장비는 기존 모델보다 더 많다. 하지만 식별된 고장 장비는 수리나 교환을 통해 신제품과 같은 상태를 유지하게 되므로 고장으로 인한 정비 활동량은 증가하는데 반해 저장 신뢰도는 Martinez 모델에 비해 높게 나타난다.

또한 검사주기 결정을 위한 예로서 대함유도탄에 대한 신뢰도 요구수준이 10년 저장시 0.7 이상이고, 이러한 요구수준을 만족하면서 비용을 최소화하는 최적의 검사주기를 결정해야 하는 상황을 고려해 볼 수 있다.

[그림 6]에서 운영유지기간(저장기간)이 10년인 경우, Martinez 모델을 활용하여 검사주기를 결정하면, 검사주기가 3년이 되어야 요구조건을 만족할 수 있다. 하지만 제안 모델에서는 검사주기를 4년으로 설정하여도 요구되는 신뢰도를 만족할 수 있다.

따라서 제안된 모델을 활용하여 최적의 검사주기를 식별할 경우에 사용자가 요구하는 조건을 만족하면서 Martinez 모델보다 효과적인(비용이 저렴한) 최적의 검사주기를 설정할 수 있다.

4.2 고장함수가 와이블 또는 감마분포를 따를 경우

고장의 분포가 와이블 분포를 따를 경우의 고장함수는 식 (34)와 같이 나타낼 수 있고, 시간 T 까지의 누적 고장함수($F(T)$)는 식 (35)와 같다.

$$f(t; \gamma, \theta) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad (34)$$

where, γ : shape, θ : scale

$$F(T) = \int_0^T \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} dt = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\theta}\right)^\gamma} \quad (35)$$

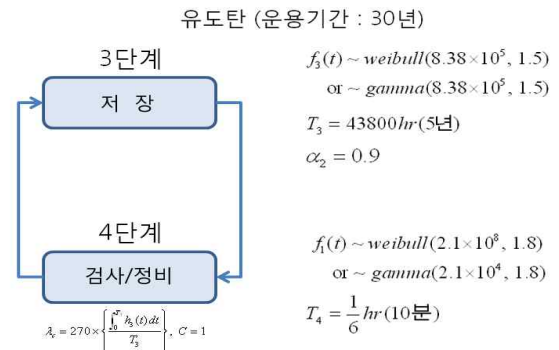
저장소에 저장되기 직전에 예상되는 고장개수 및 신뢰도는 식 (11)과 식 (12)를 활용하여 지수분포일 때와 동일한 방법으로 구할 수 있으므로 생략하고, 저장소 도착 전 단계의 신뢰도는 '1'로 가정하였다.

[그림 7]에서 보는 것처럼 과거 유사장비의 데이터 분석 또는 연구개발시 신뢰도 분석을 통해 새로 개발되는 유도탄의 고장함수가 와이블 분포를 따르고 검사주기가 5년(43800시간)일 경우, Martinez 주기결정 모델은 지수분포에만 적용되므로 저장 신뢰도 또는 검사주기 결정시 사용할 수 없다. 반면 제

안 모델은 고장함수의 종류에 상관없이 모두 적용이 가능하므로 식 (26)과 식 (29), 식 (30)과 식 (31)을 활용하여 저장 신뢰도를 산출할 수 있다.

[그림 7]의 예제를 제안 모델에 적용하기 위해 먼저 첫 번째 검사주기 동안 발생하는 고장함수는 식 (17)을 활용하면 식 (36)과 같이 구할 수 있다.

다음으로 λ_c 를 구해야 하는데, 와이블 및 감마분포인 경우 시간에 따라 고장률이 변화한다. 하지만 RADC의 연구결과는 고장함수의 종류와 상관없이 저장간 발생하는 평균 고장률(단위 시간당 고장횟수)과 $On-Off$ 에 의해서 발생하는 평균 고장률($On-Off$ 1회당 고장횟수)의 관계를 수집된 자료 및 실험을 바탕으로 분석한 것이다. 따라서 장비의 고장함수가 와이블 및 감마 분포를 따를 경우에도 전자장비의 $On-Off$ 에 의해서 발생하는 고장률은 가정사항 5번에 의거하여 식 (37)과 같이 표현할 수 있다.



[그림 7] 와이블/감마 분포 적용 예제

$$F_a(T_{3,4}) = F_3(T_3) + (1 - F_3(T_3))(F_1(T_4) + \lambda_c C) \quad (36)$$

$$= (1 - e^{-\left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^{\gamma_3}}) + (e^{-\left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^{\gamma_3}}) \left(1 - e^{-\left(\frac{T_4}{\theta_1}\right)^{\gamma_1}} + \lambda_c C\right)$$

$$= 1 - e^{-\left\{\left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^{\gamma_3} + \left(\frac{T_4}{\theta_1}\right)^{\gamma_1}\right\}} + e^{-\left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^{\gamma_3}} \cdot \lambda_c C$$

$$= 1 - e^{-\left\{\left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^{\gamma_3} + \left(\frac{T_4}{\theta_1}\right)^{\gamma_1}\right\}} + e^{-\left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^{\gamma_3}} \cdot \left\{270 \times \left(\frac{T_3}{\theta_3}\right)^\gamma\right\}$$

where, $\lambda_c = 270 \times \frac{T_3 \text{ 동안 발생하는 고장개수}}{T_3}$

$$= 270 \times \left\{ \frac{\int_0^{T_3} h_3(t) dt}{T_3} \right\}$$

$$= 270 \times \left\{ \frac{\int_0^{T_3} \left\{ \frac{\gamma_3}{\theta_3} \left(\frac{t}{\theta_3} \right)^{\gamma_3-1} \right\} dt}{T_3} \right\}$$

$$= 270 \times \frac{1}{\theta_3} \left(\frac{T_3}{\theta_3} \right)^{\gamma_3-1} \quad (37)$$

그러므로 고장함수가 와이블 분포를 따를 경우 검사주기별 유도탄의 저장신뢰도는 식 (26), 식 (29), 식 (30), 식 (31)을 활용하면 구할 수 있다. 그리고 고장함수가 식 (38)과 같은 감마분포를 따를 경우도 와이블분포를 따를 경우와 동일한 방법으로 산출할 수 있다.

[그림 8]은 [그림 7]의 예제에 대한 검사주기별 저장신뢰도를 산출한 결과이다.

$$f(t; \gamma, \theta) = \frac{t^{\gamma-1}}{\theta \Gamma(\gamma)} e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (38)$$

where, γ : shape, θ : scale

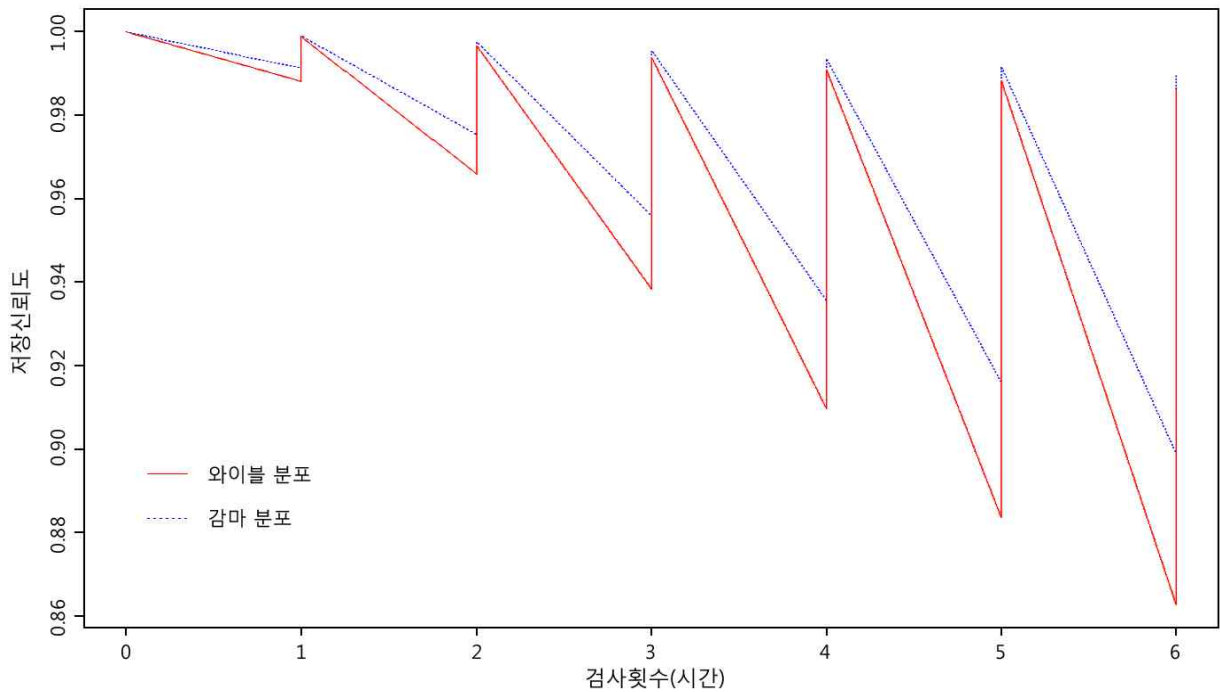
[그림 8]에서 보는 바와 같이 고장함수가 감마분포 및 와이블 분포를 따를 경우, 각 분포의 특성에 따라 저장 시간(T)이 길어질수록 고장이 급격히 증가된다. 그러므로 주기검사 횟수가 증가됨에 따라 신뢰도의 감소폭은 점점 커지고 수리되는 수량도 점점 많아진다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

보다 정확하고 현실적인 저장신뢰도의 예측은 필요시(비상시) 장비의 즉각적인 사용을 보장할 수 있도록 최적의 정비주기를 결정하게 한다. 또한 운

검사 횟수	와이블 분포					감마분포				
	$F_0(t; T_{3A})$	ξ_i	ψ_i	검사 직전 신뢰도 $R(kT_i)$	검사 직후 신뢰도 $R(kT_i)$	$F_0(t; T_{3A})$	ξ_i	ψ_i	검사 직전 신뢰도 $R(kT_i)$	검사 직후 신뢰도 $R(kT_i)$
1(5년)	0.011951	0.011951	0.011878	0.988122	0.998805	0.008785	0.008785	0.008712	0.991288	0.999122
2(10년)	0.033304	0.032906	0.032836	0.965841	0.996577	0.023960	0.023749	0.023678	0.975375	0.997530
3(15년)	0.060272	0.057568	0.057502	0.938356	0.993829	0.042621	0.041234	0.041166	0.955984	0.995591
4(20년)	0.091235	0.081890	0.081830	0.909709	0.990964	0.063598	0.058907	0.058843	0.935551	0.993548
5(25년)	0.125123	0.102061	0.102008	0.883515	0.988345	0.086185	0.074750	0.074692	0.916031	0.991596
6(30년)	0.161124	0.114982	0.114938	0.862679	0.986262	0.109889	0.087095	0.087043	0.898987	0.989892

고장률 함수가 와이블/감마분포일때 저장신뢰도



[그림 8] 고장함수가 와이블 또는 감마분포를 따를 때 검사주기별 저장신뢰도

영유지를 위해 소요되는 고장개수를 산출함으로써 총 소요비용(Total Ownership Cost) 측면에서 효율적인 의사결정을 가능하게 한다.

본 연구에서 제안된 일회성 시스템의 저장신뢰도 결정 모델은 네 가지 측면에서 중요한 의미를 지닌다.

첫째, 과거 연구되었던 모형은 지수 모형은 고장함수가 지수분포를 따를 때만, 와이블 모형은 고장함수가 지수 또는 와이블 분포를 따를 때만 적용이 가능하였다. 하지만 기술의 발달 및 자료의 축적으로 인해 장비의 고장함수가 과거와 달리 다양한 형태의 분포를 보이고 있는 것을 감안할 때, 선형증가 등 모든 고장함수에 대해 일반적으로 적용할 수 있는 저장 신뢰도 모델은 일회성 시스템의 신뢰도 추정시 폭넓게 활용이 가능하다.

둘째, 국내에서 개발되는 유도탄의 신뢰도 추정 및 검사주기 결정시 일반적으로 사용되고 있는 Martínez 모델의 제한사항을 식별하고 보완함으로써 보다 객관적이고 정확한 저장 신뢰도 추정이 가능하게 하였다.

셋째, 검사장비의 오류를 반영하였을 뿐만 아니라 일회성 시스템의 운영체계상(생산-수송-저장-검사/정비) 이루어지는 모든 고장을 반영하여 보다 현실적인 신뢰도 예측을 하였다.

넷째, 제안 모델은 검사 직전 및 직후의 신뢰도뿐만 아니라 정비를 위해 예상되는 수리부속품의 예상 소요수량을 식별할 수 있어 장기 저장체계의 수리부속비 추정 등에 활용이 가능하다.

본 연구는 일회성 시스템에 대한 자료 수집의 제한으로 인해 이론적인 측면에서 일반화된 모델을 제시하였다. 향후 지속적인 고장 자료 수집 및 분석을 통한 실적 자료를 축적할 경우 모델의 검증 및 활용성을 더욱 높일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김대익, 전건욱, “신뢰도 분석모델을 이용한 대함유도탄 검사주기 결정에 관한 연구”, 「한국국방경영분석학회지」, 제32권, 제2호(2006), pp. 92-113.
- [2] 김병수, 이계신, 김동석, 문기성, “M&S를 활용한 유도탄 검사주기 및 수량 설정 방안”, 「한국시물레이션학회지」, 제18권, 제4호(2009), pp.95-105.
- [3] 배도선, 전영록, 「신뢰성 분석」, 아르케, 1999.
- [4] 손영갑, 장현정, “미소한 신뢰도 감소율을 가지는 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 이용한 저장 신뢰도 추정방법 개발”, 「대한기계학회논문집」, 제35권, 제10호(2011), pp.1145-1353.
- [5] 이종문, 권기상, 이학표, “유도탄 예방점검 주기 및 수명 설정 방안에 대한 연구”, 「대한산업공학회 추계학술대회」, 2011.
- [6] 조용석, 이주호, “저장신뢰도 유지를 위한 최적 2단계 주기적 검사정책”, 「Communications of the Korean Statistical Society」, 제15권, 제3호(2008), pp.387-402.
- [7] 조용석, 박대현, 이동욱, “유도탄 저장신뢰도 유지를 위한 검사주기 결정모델”, 「제12차 유도무기 학술대회」, (2003), pp.13-16.
- [8] AD-768 619(RADC-TR-3-248), *Dormancy and Power ON-OFF Cycling Effects on Electronic Equipment and Part Reliability*, Martin Marietta Aerospace for Rome Air Development Center, 1973.
- [9] Bierbaum, R.L., “Reliability Assessment Methodology for 1-shot Systems,” *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, (2002), pp.536-541.
- [10] Chan, L.Y., L.M. Mui, and C.N. Woo, “Reliability analysis and maintenance policy of radiators for a large fleet of buses,” *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.13(1997).
- [11] Chen, Y.S., C.C. Pan, and W.N. Yang, “Optimum inspection policies of reliability analysis for quantal-response product with Weibull Lifetime components,” *International Journal*

- of Quality and Reliability Management*, Vol. 25, No.4(2008), pp.436-450.
- [12] Eugene, C. M., "Storage Reliability With Periodic Test," *Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1984.
- [13] Elsayed, E.A., *Reliability Engineering*, Addison Wesley Longman INC, 1996.
- [22] Harrington, R., *How to Install a Simple, Effective Reliability-Centered Maintenance(RCM) Program*, SMRP solutions, 2000.
- [15] Ito K. and T. Nakagawa, "An Optimal Inspection Policy for a Storage System with High Reliability," *Microelectronics and Reliability*, Vol.36, No.6(1995), pp.875-882.
- [16] Ito, K. and T. Nakagawa, "An Optimal Inspection Policy for a Storage System with Tree Types of Hazard Rate Function," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol.38, No.4(1995), pp.423-431.
- [17] Ito, K., T. Nakagawa, and K. Nishi, "Extended Optimal Inspection Policies for a System in Storage," *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.22, No.10(1995), pp.83-87.
- [18] Ito, K., T. Nakagawa, and K. Nishi, "Optimal Inspection Policies for a Storage System with Degradation at Periodic Tests," *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.31(2000), pp.191-195.
- [19] Ito, K. and T. Nakagawa, "Optimal Inspection Policies for a system in storage," *Computer and Mathematics with Applications*, Vol.24, No.1/2(1992), pp.87-90.
- [20] Kapur, K.C. and L.R. Lamberson, *Reliability in Engineering Design*, John Wiley and Sons Inc, 1977.
- [21] MIL-STD-721C, *Definitions of terms for reliability and maintainability*, Department of Defence, 1981.
- [22] 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 (2010), pp.596-610.
- [23] Rooney, J.P., "Storage Reliability," *Proceedings Annual Reliability And Maintainability Symposium*, 1989.