

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.3.030>

## 가속수명시험 자료에 감마 과정 모델을 적용한 저장 수명 예측 기법 연구

박성호\* · 김재훈\*\*†

### A Study on the Storage Life Estimation Method for Applying Gamma Process Model to Accelerated Life Test Data

Sungho Park\* · Jaehoon Kim\*\*†

#### ABSTRACT

This paper presents a method to estimate a storage life for loss of stabilizer content as storage periods using accelerated life test data. The estimate of storage life based on deterministic accelerated life test and degradation data cannot describe a condition distribution and storage life distribution. Previously, the method to show the condition distribution and storage life distribution by using gamma process has been studied. But it has limitation because it is impossible to collect the deterioration data at initial production phase. The estimated storage life presented by this study shows the similar value to previous studies and the method can describe the condition distribution and storage life distribution. So, the estimation method studied in this paper can be used for a life cycle management about deterioration of propellant for propulsion unit or components of missile, too.

#### 초 록

추진장약의 저장 기간에 따른 안정제 함량의 저하에 관하여 가속수명시험 자료를 활용한 수명 예측 기법을 제시하였다. 결정론적 가속수명시험 및 저장분석 시험자료를 단순회귀분석으로 계산한 수명 예측값은 상태 분포와 수명 분포를 표현할 수 없다. 기존의 연구에서 감마분포를 이용하여 저장분석 시험자료에 대한 상태 분포 및 수명 분포를 보여주고 기대 수명을 계산하는 방법이 제시되었으나, 양산 초기 실제 자료를 수집하는 것이 불가능한 한계를 가지고 있다. 본 연구에서 제시된 예측 방법에 의한 기대 수명은 기존의 연구와 유사한 값을 보이며 상태 분포와 수명 분포를 설명할 수 있고, 유도무기 추진기관의 추진제 또는 부품류의 노화와 관련한 수명 주기 관리에도 활용할 수 있다.

Key Words: Stabilizer(안정제), Accelerated Life Test(가속수명시험), Gamma Process(감마 과정), Storage Life(저장 수명)

접수일 2012. 11. 30, 수정완료일 2013. 3. 27, 게재확정일 2013. 4. 1

\* 정회원, 국방과학연구소 종합시험본부

\*\* 종신회원, 충남대학교 기계설계공학과

† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### 1. 서 론

밀봉된 의약품, 식품류, 우주발사체, 탄약, 유도탄 등은 1회성 시스템(One-shot system)으로써

사용 후 완전히 파괴하거나 광범위한 수리 혹은 재작업(Rebuild)해야 한다. 특히, 탄약 및 유도탄 등의 무기 체계는 일반적으로 수명 주기(Life Cycle) 동안 장기간 저장하거나 대기 상태로 있어야 하므로 원래 의도된 목적대로 사용되지 않고 그 수명(Storage Life)을 다하는 경우가 대다수이다. 따라서, 배치 시점의 품질뿐만 아니라 시간에 따른 품질 척도인 신뢰성이 중요한 설계 인자로 적용되고 있으며, 수명 주기 동안 고장 데이터를 입수하기 어려운 특징을 가지고 있다 [1].

추진장약의 저장 수명은 추진제의 안정제(Stabilizer) 함량 저하량이 임계 수준 이하로 저하되는 시점으로 정한다. 안정제는 추진제가 작동 촉매 반응에 의하여 자연 발화되는 것을 억제하기 위한 첨가물로 Nitrocellulose(NC) 기반 단기 추진제에는 Diphenylamine(DPA)을 주로 사용한다. DPA는 NC의 분해에 의하여 생성된 질소 화합물과 반응하여 다양한 DPA 유도체를 생성하므로 기간이 경과함에 따라 함량이 감소하게 된다[2]. 하지만 안정제 함량의 저하율이 매우 작기 때문에 고온 조건에서 (정량적) 가속 수명시험을 실시하고, 운용 온도 조건에서의 저장 수명을 예측하는 방법이 대부분이었다. 일정한 수준의 스트레스(온도)를 시험 종료 시점까지 유지하는 일정형 스트레스 시험법을 사용하며, 저장 수명을 예측하기 위하여 온도와 반응속도가 밀접한 관계를 갖는 경우에 적합한 Arrhenius 모형을 적용한다[3]. 하지만, 가속수명 시험에 의하여 예측된 수명은 실제와 다른데, 그 이유는 국내 대부분의 탄약을 이글루형 또는 지

상형 탄약고에 저장하고 있으며, 각각 습기 및 온도 변화에 취약하기 때문에[4-5] 저장 기간에 따른 안정제 함량 저하율이 일정하게 유지되지 않고 변화한다. 최근 박성호 등[6]은 감마 과정 모델을 이용하여 화포 추진제인 KM6의 저장 수명 예측방법을 연구하였으나, 양산 초기 단계에서 실제 자료의 수집이 불가능하여 초기에 저장 수명을 예측할 수 없었다.

본 논문에서는 화포용 추진장약에 대하여 기존의 저장 수명시험 방법을 고찰하고, 저장 수명 시험 결과로부터 감마 과정(Gamma Process) 모델을 이용하여 상태 분포와 수명 분포를 예측하는 방법에 관하여 논하였다.

## 2. 저장 수명 평가 방법

### 2.1 가속수명시험에 의한 평가 방법

추진제의 가속수명시험법은 국내외 많은 연구자들이 연구하였다. 추진제 안정제 함량의 시간에 따른 저하율은 반응 속도 상수(Reaction Rate Constant)로 표현되며, 온도에 관한 함수로 저장 경향에 따라 Table 1과 같이 나토(NATO) 국방 표준국에서 작성한 표준 규격서인 STANAG 4527[7] 또는 AOP-48 Ed. 2[8]의 동적모델(Kinematic Model)을 주로 사용하고 있다. 국내에선 NC 기반 화포 추진제의 저장 수명 예측방법으로 STANAG 4527 모델을 주로 적용하였다 [9-10]. Table 1에서  $C_s(0)$ 는 초기 안정제 함량(단위 : %),  $C_s(t, T)$ 는 경과 시간 및 온도에 따른 안정제 함량(단위 : %),  $k_n(T)$ 는 가속 온도  $T$ (단

Table 1. Kinematic model and storage life estimation for contents of stabilizer degradation

Standard specification	Order	Kinematic models	Storage life estimation
STANAG 4527	0 <sup>th</sup>	$C_s(t, T) = C_s(0) - k_0(T)t$	$t_{YS}(T) = \frac{C_s(0)(1 - Y_s)}{k_0(T)365}$
	1 <sup>st</sup>	$\ln \frac{C_s(0)}{C_s(t, T)} = k_1(T)t$	$t_{YS}(T) = \frac{1}{k_1(T)365} \ln \left( \frac{1}{Y_s} \right)$
AOP-48 Ed. 2	n <sup>th</sup>	$C_s(t, T) = C_s(0)[1 - (1-n)k_n(T)t]^{(1/1-n)}$	$t_{YS}(T) = \frac{1 - (Y_s)^{1-n}}{k(1-n)365}$

위 :  $K$ )에서 안정제 함량 감소에 따른  $n$ 차 반응 속도 상수(단위 :  $\text{day}^{-1}$ )이며,  $t$ 는 가속노화시간(단위 : days)이다.  $Y_S$ 는 가속 온도  $T$ 일 때 가속시간  $t$ 에서의 안정제 함량 감소율이며,  $Y_S = C_S(t, T)/C_S(0)$  이다.

적절한 동적 모델을 선택하여 각각의 온도 조건에서의 반응 속도 상수를 계산한 후, 온도와 반응 속도 상수와의 관계식으로부터 운용 온도에서의 반응 속도 상수를 구하여 저장 수명을 예측할 수 있다. 일반적으로 Eq. 1의 Arrhenius 모형을 이용하며 각 온도( $T$ )에 따른 반응 속도 상수( $k$ )에 대하여  $1/T$ 를 가로축에,  $\ln k$ 를 세로축에 도시하면 Eq. 2의 Arrhenius 식을 얻을 수 있다.

$$k_n = A_n \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,n}}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서,  $A_n$  : Pre-exponential factor

$E_{a,n}$  : 활성화 에너지(J/mol)

$R$  : 기체 상수(8.3143 J/mol K)

$T$  : 가속수명시험 온도(K)

$$\ln k = \ln A - E_a/RT \quad (2)$$

## 2.2 감마 과정 모델을 이용한 평가 방법

저장 시간이 지남에 따라 저장 환경(온도, 습도 등 스트레스)이 동일하지 않기 때문에 저장 수명에 이르기까지 신뢰도는 저장 기간에 따라 불확실성(Uncertainty)을 가지게 된다. 즉, 시간 의존 신뢰도 예측 모델이 필요하다. 열화 정도의 불확실성은 확률 과정(Stochastic Process)으로 간주할 수 있으며, 관련된 불확실성은 정규 분포로 표현할 수 있다.

이러한 특성을 잘 반영한 확률 과정 모델이 브라운 운동 모델(Brownian Motion with Drift)이다. 하지만 이 모델은 단조롭게(Monotonic) 열화하는 모델에는 적합하지 않다. 왜냐하면, 구조 신뢰성 공학의 응력-강도 신뢰도 모델 측면에서 추진체의 안정제 함량과 관련하여 상태 고장인 임계 수준을 강도라고 볼 때, 브라운 운동 모델

은 증가, 감소를 반복하는 특징을 보이기 때문이다[11]. 그러므로 저장 기간 중 열화량이 단조롭게 증가하는 열화과정은 감마 과정 모델이 적합하다. 감마 과정은 연속 시간 확률 과정으로서 시간  $t$ 에서의 누적 열화량  $X(t)$ 에 대하여 다음과 같은 특징을 가지고 있으며, Abdel-Hameed[12]에 의하여 처음 제안되었다.

- $X(0) = 0$ 이며 확률값은 1이다.
- $X(\tau) - X(t) \sim Ga(\lambda(\tau) - \lambda(t), \beta)$ ,  $\tau > t \geq 0$
- $X(t)$ 는 독립 증분을 가진다.

감마 과정에서 척도 모수( $\beta$ )는 고정값이며 형상모수( $\lambda(\tau) - \lambda(t)$ )가 시간에 따라 증가한다. 저장 기간에 따른 열화량은 형상 함수  $\lambda(t) = ct^b$ 로 표현할 수 있으며,  $b = 1$ 일 때 상태 변화가 시간에 따라 선형인 정상 감마 과정이다. 누적 열화량에 관한 감마 과정의 확률 밀도 함수, 평균, 분산 및 변동 계수, 수명으로 표현되는 누적 분포 함수, 신뢰도(또는 생존 함수)는 Table 2의 각 수식과 같다. Table 2의 각 수식을 계산하기 위하여 시간에 따른 변수인 형상 모수( $\lambda(t)$ )와 고정값인 척도 모수( $\beta$ )를 측정된 자료로부터 추정하여야 한다. 일반적으로 최대우도법을 이용하지만, J. M. van Noortwijk 등[13]은 Eq. 3과 Eq. 4와 같이 수식적으로 간단한 모멘트법을 제안하였다.

Table 2. Equations for gamma process

Values	Equations
Probability density function	$f_{X(t)}(x) = \frac{\beta^{\lambda(t)}}{\Gamma(\lambda(t))} x^{\lambda(t)-1} e^{-\beta x}$ $= Ga(x \lambda(t), \beta)$
Mean	$\mu_{X(t)} = \frac{\lambda(t)}{\beta}$
Variance	$\sigma_{X(t)}^2 = \frac{\lambda(t)}{\beta^2}$
Coefficient of variation	$\nu_{X(t)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda(t)}}$
Cumulative distribution function	$F_T(t) = P[X(t) > \rho] = 1 - P[X(t) < \rho]$ $= 1 - GA[\rho \lambda(t), \beta]$
Reliability	$R(t) = 1 - F_T(t)$

$$\frac{\hat{c}}{\hat{\beta}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{x_n}{t_n^b} = \bar{\delta} \quad (3)$$

$$\frac{x_n}{\hat{\beta}} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2}{\left[ \sum_{i=1}^n w_i \right]^2} \right) = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta} w_i)^2 \quad (4)$$

여기서,  $\delta_i = x_i - x_{i-1}$  이며,  $w_i = t_i^b - t_{i-1}^b$  이다.

### 3. 감마 과정 모델을 이용한 수명 예측

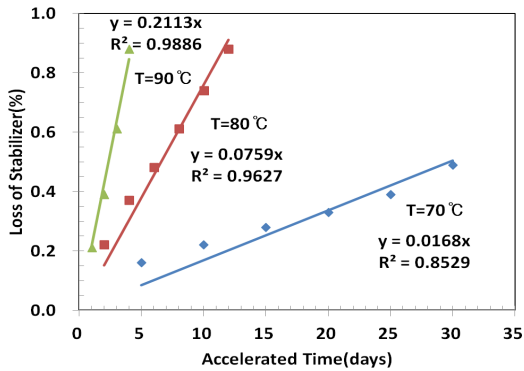


Fig. 1 Loss of stabilizer as accelerated time for STANAG 4527(0th order)

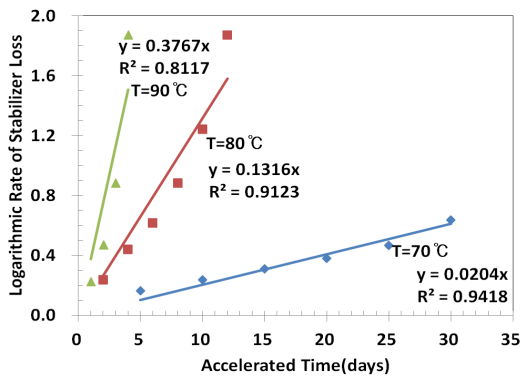


Fig. 2 Logarithmic rate of stabilizer loss with accelerated time for STANAG 4527(1st order)

### 3.1 가속수명시험 결과 분석

155 mm 추진장약 KM4A2(DODIC : KD541)용 KM10 추진제에 첨가되는 안정제에 대하여 고온 (70, 80, 90°C)에서 가속수명시험을 수행하였다. 초기 안정제 함량( $C_s(0)$ )은 1.04%이며, Table 1 의 3가지 동적 모델에 대하여 분석하였다.

Figure 1은 STANAG 4527의 0차 모델이며, 가속 시간( $t$ )에 대하여 안정제의 감소량 ( $C_s(0) - C_s(t, T)$ )은 선형이다. Fig. 2는 STANAG 4527의 1차 모델이며, 가속 시간( $t$ )에 대하여 안정제의 대수 감소율 ( $\ln(C_s(0)/C_s(t, T))$ )은 선형이다. Fig. 3은 AOP-48 Ed. 2 모델이며, 각 온도에서 수행한 고온 가속수명시험 결과를 상용 S/W인 Origin v.8 로 비선형 회귀분석하였다. Fig. 1과 Fig. 2에서 각 온도에 대한 회귀식의 기울기가 반응 속도 상수( $k_0, k_1$ )이다. Fig. 3에서 AOP-48 Ed.2 모델의 반응 속도 상수( $k_n$ )와 차수( $n$ )는 비선형 회귀 분석으로 추정하였다. 활성화 에너지(Activation Energy)는 절대 온도로 표현된 가속수명시험 온도의 역수( $1/T$ )와 각 온도에서의 반응 속도 상수의 대수값( $\ln k$ ) 간에 얻어진 선형 회귀식의 기울기에 기체 상수( $R=8.3143 \text{ J/mol K}$ )를 곱한 값이다. 운용 온도를 25°C라고 할 때, 반응 속도 상수는 Eq. 2의 Arrhenius식으로 구하며, 저장 수명을 추정하기 위한 직선의 기울기이다 (최초 1.04%, 고장 0.2%).

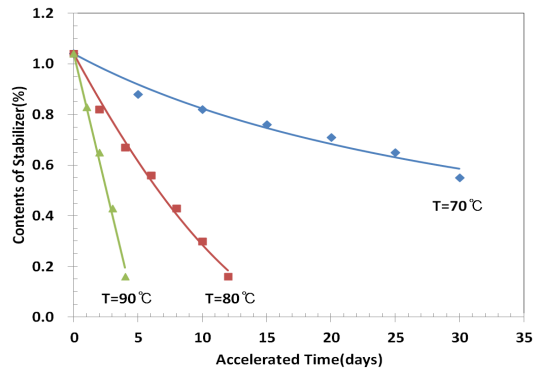


Fig. 3 Non-linear regression equations with accelerated time for AOP-48 Ed. 2

Table 3. Estimation results for kinematic models

Kinematic Model	Order	Reaction Rate Constants(day <sup>-1</sup> )				Activation Energy (kJ/mol)	Storage Life (years)
		70°C	80°C	90°C	25°C		
STANAG 4527	0	0.0168	0.0759	0.2113	1.72598E-05	131.22	133.3
	1	0.0204	0.1316	0.3767	7.61896E-06	151.29	302.1
AOP-48 Ed. 2	0.8319	0.0266	0.0903	0.2032	1.05753E-04	105.45	37.3

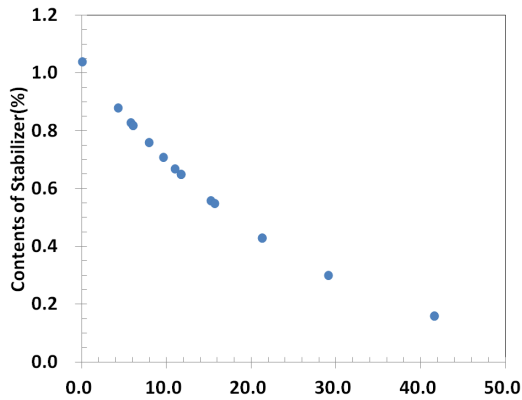


Fig. 4 Conversion of accelerated data to natural aging data at 25°C

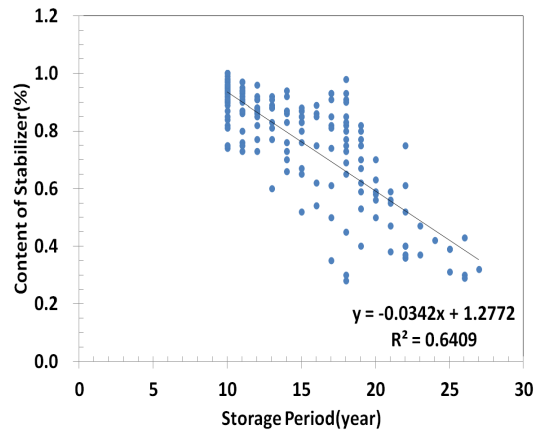


Fig. 5 Content of stabilizer with storage time

각 동적 모델에 관하여 추정된 값은 Table 3과 같다. AOP-48 Ed.2 모델에서 차수( $n$ )는 각 온도에서의 차수값에 대한 평균이다. 조기홍 등 [10] 과 이정우 등 [14]의 연구 결과와 비교할 때 운용 온도 25°C에서 AOP-48 Ed. 2에 의한 예측이 가장 적절하다고 사료된다.

### 3.2 가속수명시험 결과의 감마 과정 응용

Table 1의 AOP-48 Ed. 2 모델의 저장 수명 예측식을 이용하여 각각의 고온 가속수명시험 결과값을 운용 온도(25°C)에서의 값으로 Fig. 4와 같이 변환할 수 있다. 즉,  $C_S(t, T)$  은 각 온도에서의 가속노화시험 결과값이며,  $C_S(0)$  는 가속노화시험의 초기 안정제 함량(1.04%)이다.  $n$  값은 평균 차수값(0.8319)을 적용하였으며,  $k_n$  은 운용 온도(25°C)에서의 반응 속도 상수(1.05753E-04 day<sup>-1</sup>)이다. Fig. 4의 데이터로부터 모멘트법을 이용하여 감마 과정의 모수값을 추정하면 척도 모수( $\hat{\beta}$ )는 31.6144, 형상 모수( $\hat{c}$ )는 0.6687이다.

Figure 5는 1979년~2000년 기간 중 국내에서 생산된 155 mm 추진장약(DODIC : KD541) OO 개 로트의 추진제 안정제 함량을 MIL-STD-286에 따라 측정한 결과이다. 가로축은 저장 기간이며, 세로축은 안정제 함량이다. 동일한 저장 기간이라도 상태(안정제 함량) 분포를 보이며, 폐기 수명 수준인 0.2% 수준에서 수명 분포를 보이고 있다.

모멘트법으로 추정된 확률 모수로부터 확률 밀도 함수 곡선을 그리면 Fig. 6과 같이 운용 온도(25°C)에서 저장 기간별 상태 분포를 얻을 수 있다. 누적 분포 함수 곡선은 Fig. 7과 같으며, 운용 온도(25°C)에서 저장 기간별 수명 분포이다. Fig. 6과 7은 Fig. 5의 상태 분포와 수명 분포를 적절하게 설명하고 있다. 추정된 척도 모수와 형상 모수로부터 평균( $\mu_{X(t)}$ ), 분산( $\sigma_{X(t)}^2$ ), 변동 계수( $\nu_{X(t)}$ ) 및 분산(V)/평균(M)는 저장 기간별로 Table 4와 같다. 분산(V)/평균(M)은 척도 모수( $\hat{\beta}$ )의 역수로 저장 기간에 상관없이 동일하다.

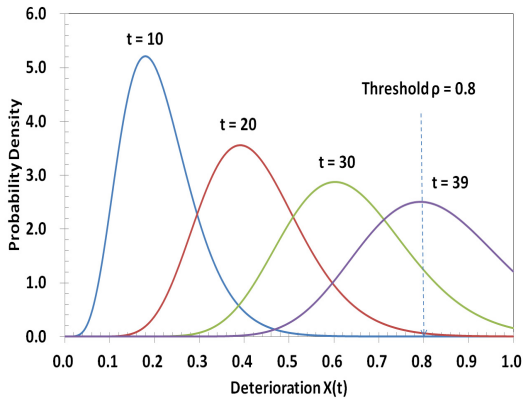


Fig. 6 Probability density functions of loss of stabilizer at various storage periods

시간  $t$ 에서 누적 열화량의 평균은  $\mu_{X(t)} = \lambda(t)/\beta$  이고, 형상 모수는  $\lambda(t) = ct^b$ 에서  $b=1$ 인 정상 감마 과정이라고 할 때 평균 수명은  $t = \mu_{X(t)} (\hat{\beta}/\hat{c})$  이다. 상태 고장인 경우  $\mu_{X(t)} = 0.8$  이며, 모멘트 법으로 추정된  $\hat{\beta}$ 와  $\hat{c}$ 로부터 평균 수명은 37.8년이다. 이 때 분산은  $\sigma_{X(t)}^2 = 0.0253$ 이며, 변동 계수는  $\nu_{X(t)} = 0.1989$ 이다.

Figure 5에서 실제 자료에 대한 단순 회귀 분석으로 상태 고장 수준( $y=0.2$ )에서 수명은 31.5년으로 추정할 수 있다. 또한, 기존에 발표된 가속수명시험법[10]에 의한 기대 수명과 시계열분석(time series analysis)[14]에 의한 기대 수명 결과도 본 연구 결과와 유사하다. 하지만, 실제 자료에 대한 단순 회귀 분석 결과 및 기존의 연구 결과는 자료의 상태 분포와 수명 분포를 설명하지 못하는 한계가 있다.

#### 4. 결 론

화포용 추진장약의 저장 신뢰도를 예측하기 위하여 저장 수명시험 결과를 감마 과정의 방법으로 저장 기간에 따른 상태 분포와 수명 분포를 예측하였다. 평균 저장 수명은 37.8년으로 예측되었으며, 기존의 연구 결과 및 실제 자료의 회귀 분석 결과와 유사한 기대 수명이다.

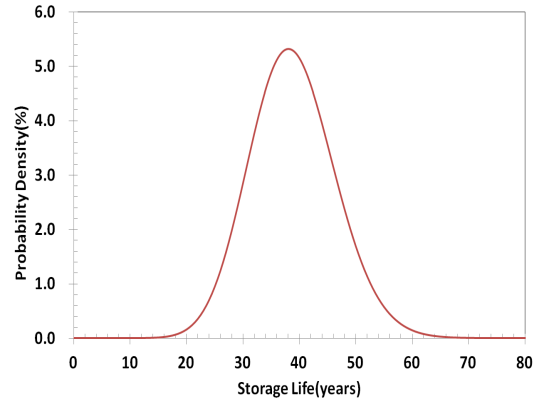


Fig. 7 Storage life distribution

Table 4. Mean, variance and coefficient of variation at various storage periods

Storage Life	10year	20year	30year	39year
Mean( $\mu_{X(t)}$ )	0.2115	0.4230	0.6345	0.8249
VAR( $\sigma_{X(t)}^2$ )	0.0067	0.0134	0.0201	0.0261
COV( $\nu_{X(t)}$ )	0.3867	0.2734	0.2233	0.1958
V/M	0.0316	0.0316	0.0316	0.0316

본 논문에서 제시된 연구 방법은 탄약 분야 뿐 만 아니라, 유도탄 추진기관의 추진제 저장 안전성 평가 및 부품의 노화와 관련한 수명 예측 등의 분야에도 적용이 가능하며 탄약의 보급 및 정비 계획 수립, 폐기 시기의 결정 등의 분야에서 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 최인상, 천리민, 백승준, 손영갑, "Operating System과 One-Shot System의 신뢰도 분석 방법론 비교," 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회, 2009, pp.981-985
2. Lindblom, T., Reactions in the System Nitrocellulose/Diphenylamine with Special Reference to the Formation of a Stabilizing Product Bonded to Nitrocellulose, ACTA

- UNIVERSITATIS UPSALIENSIS UPPSALA, 2004, pp.3-8
3. 서순근, 김호균, 권혁무, 차명수, 윤원형, 차지환, 신뢰성공학, 개정판 2쇄, 교보문고, 2011, pp.341-367
  4. 이종찬, 김석봉, 이필재, 김병선, "과형 강판 이글루 탄약고 결로 감소 방안 연구," 대한건축학회논문집, 제27권, 제6호, 2011, pp.85-92
  5. 이종찬, 박상현, 김병선, "이그루 탄약고 저장 탄약의 표면결로 감소 방안," 대한건축학회논문집, 제23권, 제3호, 2007, pp.215-222
  6. 박성호, 김재훈, "감마 과정 모델을 이용한 KM6 추진제의 저장 수명 예측," 한국추진공학회지, 제16권, 제4호, 2012, pp.33-41
  7. Military Agency for Standardization, Explosive, Chemical Stability Nitrocellulose Based Propellants, Procedure for Assessment of Chemical Life and Temperature Dependence of Stabilizer Consumptions Rates, NATO, STANAG 4527 (Edition 1), 2004
  8. Military Agency for Standardization, Explosives, Nitrocellulose Based Propellants - Stability Test Procedures and Requirements Using Stabilizer Depletion, NATO, AOP-48 Ed. 2, 2008
  9. 이종찬, 윤근식, 김용화, 조기홍, "가속 노화 시험을 이용한 단기 추진제의 저장 수명 예측에 관한 연구," 품질경영학회지, 제35권, 제2호, 2007, pp.45-52
  10. 조기홍, 김의용, "고온 가속노화시험법과 저장분석시험법을 이용한 추진제 KM10의 기대 수명 평가," 한국화학공학회지, 제48권, 제6호, 2010, pp.695-699
  11. Pandey, M. D. and Noortwijk, J. M., "Gamma Process Model for Time-Dependent Structural Reliability Analysis," Proceedings of the International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS), 2004
  12. Abdel-Hameed, M., "A Gamma Wear Process," IEEE Transactions on Reliability 24(2), 1975, pp.152-153
  13. Van Noortwijk, J. M. and Pandey, M. D., "A Stochastic Deterioration Process for Time-Dependent Reliability Analysis," Proceedings of the eleventh IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, 2004, pp.259-265
  14. 이정우, 김희보, 김영인, 홍윤기, "시계열분석을 적용한 저장 탄약 수명 예측 기법 연구 - 추진장약의 안정제 함량 변화를 중심으로," 한국국방경영분석학회지, 제37권, 제1호, 2011, pp.39-47