

## 研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.4.033>

## 감마과정 모델을 이용한 KM6 추진제의 저장수명 예측

박성호\* · 김재훈\*\*†

## Estimation of Shelf Life for Propellant KM6 by Using Gamma Process Model

Sungho Park\* · Jaehoon Kim\*\*†

## ABSTRACT

The aim of the study is to investigate the method to estimate a shelf life of KM6 single base propellant by stochastic gamma process model. The state failure level is assumed that the degradation content of stabilizer is below 0.8%. The constant of time dependent shape function and the scale parameter of stationary gamma process are estimated by moment method. The state distribution at each storage time can be shown from probability density function of deterioration. It is estimated that the  $B_{10}$  life, a time at which the cumulative failure probability is 10%, is 25 years and the  $B_{50}$  life is 36 years from cumulative failure distribution function curve. The  $B_{50}$  life can be treated as the average shelf life from the practical viewpoint and the lifetime can be expressed as distribution curve by using stochastic process theory.

## 초 록

KM6 단기추진제의 저장수명을 감마과정 이론을 이용한 확률론적 방법으로 추산하였다. 장기 저장에 따른 안정제 함량의 저하량이 0.8%일 때를 상태고장으로 보았으며 정상감마과정으로 가정하였을 때 형상함수의 상수와 척도모수를 모멘트법으로 추정하였다. 저장기간별 확률밀도함수로부터 각 저장기간에서의 상태분포를 확인할 수 있으며 누적고장분포함수 곡선에서 누적고장확률이 10%인  $B_{10}$  수명은 25년이며  $B_{50}$  수명은 36년으로 추산되었다. 실용적 관점에서 볼 때  $B_{50}$  수명을 평균저장수명으로 볼 수 있으며 확률과정론을 이용하면 저장수명을 분포곡선으로 표현할 수 있다.

Key Words: Propellant(추진제), Gamma Process(감마과정), Stabilizer(안정제), State Failure(상태고장), Moment Method(모멘트법), Shelf Life(저장수명)

접수일 2012. 5. 10, 수정완료일 2012. 7. 12, 게재확정일 2012. 7. 19

\* 정회원, 국방과학연구소 종합시험단

\*\* 종신회원, 충남대학교 기계설계공학과

† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

## 1. 서 론

수명과 관련된 열화과정(deterioration process)을 모델링하기 위한 시간의존형 신뢰성 분석방

법의 선정은 획득, 운용, 검사주기, 폐기를 위한 계획의 수립과 최적화를 위하여 매우 중요하다. 신뢰성은 아이템이 주어진 기간동안 주어진 조건에서 요구기능을 수행할 수 있는 가능성을 의미하며, 아이템이 요구기능을 수행하지 못하게 되거나 요구성능을 만족하지 못하게 되는 사건을 고장(failure)으로 정의한다. 고장이 발생할 때까지의 기간을 고장시간 또는 수명(lifetime)이라고 한다[1]. 일반적으로 기능이 중요한 기계, 전기/전자 부품류의 경우 의도된 기능을 제공하지 않는 경우를 고장이라고 판단하지만 화공품의 경우 고유 물성이나 성능, 상태가 특정 수준이하로 저하되는 것을 고장으로 판단한다. 수명은 설계단계에서 계산으로 정한 설계수명(design life)과 운용환경을 고려한 운용수명(service life)으로 나눌 수 있으며 1회 사용으로 소멸되는 제품의 경우 저장기간을 의미하는 저장수명(storage life)과 저장수명에 운용환경을 고려한 내구연한(shelf life)으로 구분할 수 있다. 본 논문에서 다루고 있는 화포추진제는 용기에 보관되어 장기 저장되고 1회 사용으로 소멸되는 특성이 있다. 또한, 시간이 지남에 따라 화학반응으로 인하여 성능 및 상태가 저하되는 특성을 가지고 있기 때문에 보관, 운용시간의 경과에 따라 성능 또는 안전성과 관련된 상태(condition) 변수가 특정수준 이하로 열화되는 것을 고장으로 보고 그 시점을 내구연한으로 보는 것이 적절하다. 본 논문에서는 내구연한을 탄약관리 분야에서 일반적으로 사용하는 용어인 저장수명으로 칭하였다. 일반적으로 보전관리는 구조적(structural) 고장 보다는 상태(condition) 고장을 주로 다룬다. 즉, 검사(inspection)를 통하여 현 상태를 확인하고 고장이 발생하기 이전에 상태과정에 대한 예방수리를 하며 이를 위한 검사주기와 비용 및 수명의 예측이 중요시되고 있다.

추진장약은 추진제가 약포 또는 소진용기에 포장된 형태이다. 추진장약은 로트단위로 생산되어 장기 저장된 후 ASRP(Ammunition Stockpile Reliability Program) 계획에 따라 저장신뢰성을 평가하며 기능시험과 비기능시험을 로트단위로 수행한다. ASRP사업은 국내 저장중인 탄약의 전

탄종을 대상으로 하기 때문에 사업기간, 예산, 시험능력의 한계로 제한된 탄종과 로트에 대하여 시험을 수행할 수 밖에 없다. 따라서, 금년도 ASRP 평가 결과 저장성 및 성능이 보증된 로트라 하더라도 계속 저장 가능한 상태를 언제까지 유지할 수 있는지 예측이 불가능하다. 또한, 탄약 로트별로 부여된 상태코드는 다음 시험까지 계속 유지되므로 저장조건과 운용조건에 따른 불확정성(uncertainty)에 의한 열화속도의 변동으로 잔여수명을 확정적으로 예측하는 것은 비합리적이며 확률론적 예측방법의 도입이 필요하다. 수명예측 방법론으로 확률과정(stochastic process) 이론이 다양한 분야에서 적용되고 있다. 하지만 이제까지 화약류의 경우 주로 고온고속 노화시험으로 수명을 결정론적으로 예측하였으며 저장수명 예측에 확률과정 이론의 적용은 시도되지 않았다.

본 논문은 155 mm 추진장약에 사용되는 KM6 추진제의 저장기간별 안정제 함량의 감소량으로부터 확률과정 이론의 하나인 감마과정 모델을 이용하여 저장기간에 대한 상태분포와 상태고장이 발생하는 시점인 저장수명을 수명분포로써 예측하고 저장기간에 따른 신뢰도를 예측하는 방법에 관하여 논하였다.

## 2. 추진제 저장수명 평가 방법

### 2.1 추진제의 자연분해와 안정제

고체추진제의 하나인 무연추진제는 에너지원으로 사용되는 주요 원료에 따라 단기추진제, 복기추진제, 다기추진제의 3종류로 나눌 수 있으며 단기추진제는 NC(Nitrocellulose)를 주원료로 사용한다. 저장단계에 있어서 NC는 2가지 형태의 열분해반응을 일으킨다. 질산에스테르기(-O-NO<sub>2</sub>)로부터 NO<sub>2</sub>를 유리시켜 자유라디칼(RO·)과 NO<sub>2</sub>가 생성되는 반응이 첫 번째 반응이며, 첫 번째 반응에서 생성된 자유라디칼이 추진제 내의 다른 유기물질과 반응하여 더 많은 질소화합물과 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 등의 저분자 기체를 발생시키는 자동촉매반응이 두 번째 반응이다. 이 때 추진제

의 온도가 더욱 상승하고 추진제의 자연발화를 유발할 수도 있다. 또한, 자유라디칼 또는 다른 물질과 반응하여 더 많은 질소화합물과 산 등을 생성한다. 저장단계에 있어서 또 다른 화학반응은 가수분해 반응으로 수분과 반응하여 NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> 등의 질소화합물과 질산을 생성시키는 발열 반응으로 이때 발생한 온도의 증가는 추진제의 열분해 반응으로 이어져 분해반응을 더욱 촉진시킨다. 즉, 추진제의 자연분해는 온도와 습도에 직접적인 영향을 받는다.

추진제의 자동촉매반응을 억제하기 위하여 NC보다 질소산화물과 훨씬 친화력이 큰 안정제를 추진제에 첨가하는데 DPA(Diphenylamine)가 단기추진제에 주로 사용된다[2-3]. DPA는 NC의 분해에 의하여 생성된 질소산화물과 반응하여 다양한 DPA 유도체를 생성하며 시간이 경과함에 따라 함량이 감소하게 된다. KM6 추진제는 NC가 주성분인 단기추진제로 75 mm, 155 mm, 175 mm, 105 mm Gun 및 곡사포탄용 추진장약에 사용되며 Table 1의 조성으로 이루어져 있으며 약 1.0±0.3%의 DPA가 안정제로 첨가된다[4].

2.2 추진제의 저장수명 평가

추진제의 저장안전성은 잔류 안정제 함량으로 판단한다. 미육군 보급회보 SB 742-1300-94-895의 추진제 안정제 프로그램(PSP)에 따르면 추진제의 안정제 함량에 따라 A, C, D의 3개 카테고리로 나누고 0.20% 미만인 D등급에 해당할 경우 60일 이내에 해당 로트를 폐기하도록 규정하고 있다. A등급은 0.30% 이상으로 계속저장이 가능하며 C등급은 0.20 ~ 0.29%로 1년 이내에 D등급

Table 1. The percentage of KM6 single-base propellant ingredients

Chemicals	Contents (%)	Function
Nitrocellulose	87.00	Fuel, Oxidizer, Binder
Dinitrotoluene	10.00	Plasticizer
Dibutylphthalate	3.00	Plasticizer
Diphenylamine	1.00	Stabilizer

으로 저하될 가능성이 있는 등급으로 0.20% 미만으로 저하될 때까지 주의를 요해야 하며 1년 이내에 폐기한다[5]. 잔류 안정제 함량 0.2%는 상태고장으로 판단할 수 있는 임계수준으로 저장안전성에 심각한 문제가 있는 상태이며 저장수명을 판단하기 위한 기준이다. 국내의 경우도 미육군 보급회보의 기준을 동일하게 적용하여 추진제 저장안전성을 평가, 관리하고 있다.

3. 확률론적 감마과정 열화모델

3.1 결정론적 열화모델

결정론적 과정(deterministic process)은 관측하는 시점에 관계없이 초기조건 또는 상태에 따라 항상 동일한 결과를 얻으며 미래의 상태를 결정짓는데 있어서 어떠한 임의성(randomness)을 고려하지 않는다. 일반적으로 시간의존적 신뢰도 분석에 있어서 열화모델은 Eq. 1으로 표현된다.

$$R(t) = r_0 - X(t) = r_0 - At^b \tag{1}$$

여기서,  $r_0$ 는 초기상태,  $A$ 는 열화율,  $t$ 는 경과시간,  $b$ 는 열화모델의 비선형성을 반영하는 상수이다. Fig. 1은 시간에 따른 상태의 변화를 보여주는 열화모델로 가로축은 경과시간, 세로축은 시간에 따라 변화하는 상태(condition)이다. 본문에서 경과시간은 저장시간, 상태는 추진제의 안정제 함량을 의미한다. 일반적으로 상태는 시

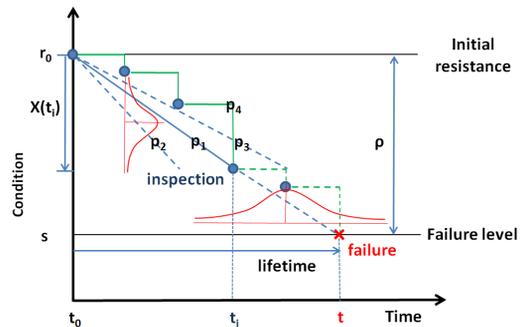


Fig. 1 Various deterioration paths and distribution of level of condition and lifetime

간에 따라 한 방향으로 감소하며 예방수리(preventive repair) 후 상태수준이 상승한 후 시간에 따라 다시 감소한다.

경로  $p_1 \sim p_3$ 은 시간에 따라 선형으로 열화하는 선형열화모델에 해당하며 Eq. 1에서  $b=1$ 인 경우이다.  $s$ 는 고장으로 판단할 수 있는 임계수준,  $t_i$ 는 경과시간(검사시점)을 의미하며 열화량이 임계수준  $s$ 를 통과하는 시간  $t$ 는 수명에 해당한다. 보전관리 측면에서 고장은 상태고장을 의미하는데, 시간에 따른 상태의 변화가 임계치에 도달하는 시점의 누적시간을 수명으로 본다. 결정론적 선형열화모델에서 수명은  $t=(r_0-s)/A$ 로 구할 수 있으며 Fig. 1에서  $\rho$ 는 설계여유(design margin)이다. 결정론적 열화모델은 검사시점( $t_i$ )에서 수명을 확정적으로 알 수 있다. 즉, 경로  $p_1$ 으로 열화할 때 검사시점  $t_i$ 에서의 상태확인만으로 수명이  $t$ 로 확정되는 것이다. 하지만, 로트에 따른 제품특성 차이와 환경차이에 의하여 가해지는 스트레스 수준의 차이 등의 원인으로 열화경로는  $p_2$  또는  $p_3$ 가 될 수 있다.

추진제의 저장수명을 추정하기 위한 다양한 방법이 연구되어 왔으며[3, 6] 온도를 변수로 하는 가속노화시험으로 얻은 온도별 열화계수를 이용하거나 저장시간에 따른 안정제 함량 측정값을 회귀분석하는 방법이 있다. 하지만 기존의 연구방법들은 결정론적 열화모델로 열화경로의 다양성에 의한 변동을 설명할 수 없다. Fig. 1에서 동일한 검사시점이라도 상태분포를 가지며 동일한 상태수준이라도 수명분포를 가지고 있기 때문이다. 이는 로트 샘플에 따른 변동과 시간경과에 따라 저장 및 운용시 발생하는 외부조건(온도 및 습도 등)의 다양성에 따른 열화속도의 변동으로 발생하며 확률론적인 접근방법이 필요한 이유이다.

### 3.2 확률론적 열화모델

열화경로는 로트별 샘플에 따른 경로의 다양성( $p_1, p_2, p_3$  등)으로 상태분포 및 수명분포를 가진다. 또한, 실제로는  $p_1$ 와 같은 경로를 가지고 열화할 것이다. 정기적 또는 비정기적 검사로

상태가 결정되며 현재 결정된 상태는 다음 검사시점까지 유지된다. 따라서, 현 검사시점에서 미래의 상태는 과거 상태변화의 경로와는 무관하며 현재 상태에서의 변화율과 지속시간에 따라 달라진다. 물론 이와 관련한 잔여수명도 달라진다. 즉, 열화과정 모델에 있어서 샘플에 따른 불확실성과 시간에 따른 열화의 진행과 관련한 불확실성으로 열화속도 및 상태변화가 변동하므로 검사시점에서의 성능과 상태수준에서의 수명은 분포를 가진다. 관측하는 시점이나 장소에 따라 확률분포가 변하는 확률현상을 모형화하기 위하여 관측시점이나 위치 등을 매개변수로 하는 확률변수들의 모임을 확률과정(stochastic process)이라고 한다. 일반적으로 성능열화는 시간이 경과함에 따라 증가하며, 동일 기간의 열화량이라도 단위제품이나 경과시간에 따라 불확실하므로 열화과정을 확률과정으로 보는 것이 적합하다 [7, 8].

본 논문은 추진제 저장수명 평가방법에 관한 연구결과이며 저장시간에 따른 안정제 함량의 열화량을 확률과정 이론의 하나인 감마과정(gamma process) 모형을 이용하여 분석하였다. 확률과정 이론에는 마르코프과정, 감마과정, 포아송과정이 있으며 Abdel-Hameed는 감마과정이 마모, 부식, 침식, 크리프와 같이 시간이 지남에 따라 누적되면서 점진적으로 손상을 입는 과정을 모델링하기에 가장 적절한 모형임을 처음으로 제안하였다[9]. 누적 열화량에 대한 감마과정 모델의 확률변수는 비음수(non-negative)인 독립증분(independent increment)이며 시간에 대하여 일정한 척도모수( $\beta=const$ )와 시간의존적 형상모수( $\lambda(t) > 0$ )를 가지는 감마분포를 따른다. 감마과정은 시간에 대하여 열화량이 단조롭게(monotonic) 한 방향으로만 증가하는 현상을 모형화하기에 적합하며 이를 반영하기 위하여 형상모수함수  $\lambda(t)$ 는 시간에 대하여 증가함수이어야 한다.

감마과정은 연속시간 확률과정으로 시간  $t$ 에서의 누적열화량  $X(t)$ 에 대하여 다음과 같은 특성을 가지며 Eq. 2 ~ Eq. 5는 문헌 [7]의 내용을 참조하였다.

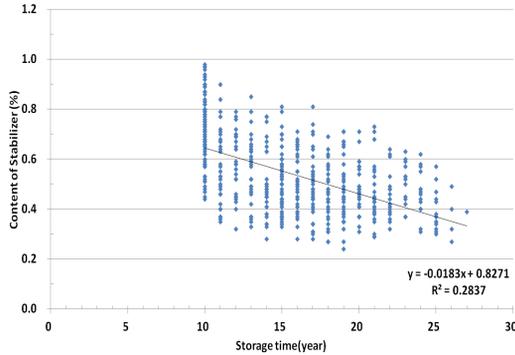


Fig. 2 Content of stabilizer as storage time

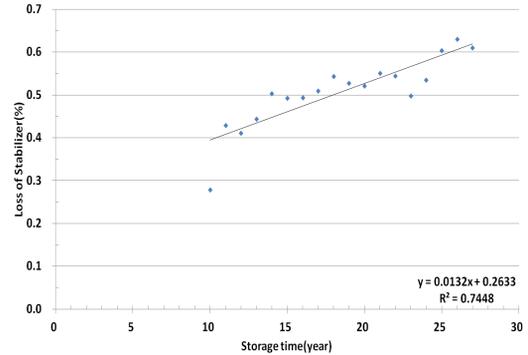


Fig. 3 Mean loss of stabilizer as storage time

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

누적열화량에 대한 감마과정의 확률밀도함수(pdf)는 Eq. 2와 같다.

$$f_{X(t)}(x) = \frac{\beta^{\lambda(t)}}{\Gamma(\lambda(t))} x^{\lambda(t)-1} e^{-\beta x} \quad (2)$$

$$= Ga(x|\lambda(t), \beta)$$

여기서,  $\lambda(t) > 0$ 는 형상함수이며  $\beta = const$ 는 척도모수이다. 시간  $t$ 에서 누적열화량의 평균( $\mu_{X(t)}$ ), 분산( $\sigma_{X(t)}^2$ ) 및 변동계수( $\nu_{X(t)}$ )는 Eq. 3과 같다.

$$\mu_{X(t)} = \frac{\lambda(t)}{\beta}, \quad \sigma_{X(t)}^2 = \frac{\lambda(t)}{\beta^2}, \quad \nu_{X(t)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda(t)}} \quad (3)$$

수명(lifetime)은 Eq. 4와 같이 저장시간에 대한 누적분포함수(cdf)로 표현되며 시간구간  $[0, t]$  동안 고장날 확률을 의미한다.

$$F_T(t) = P[X(t) > \rho] = 1 - P[X(t) < \rho] \quad (4)$$

$$= 1 - GA[\rho|\lambda(t), \beta]$$

특정 시점에서의 신뢰도(reliability)는 시스템 혹은 부품이 작동을 시작하여 그 시점까지 고장나지 않고 여전히 작동하고 있을 확률이며 Eq. 5로 표현된다. 시간구간  $[0, t]$ 동안 고장나지 않을

확률로 생존함수라고도 부른다.

$$R(t) = 1 - F_T(t) \quad (5)$$

#### 4. 분석 방법

##### 4.1 데이터 수집

육군 탄약사령부의 협조로 155 mm 추진장약 000개 로트에 대한 잔류 안정제 함량 측정자료를 제공받아 분석하였다. 육군 탄약사령부는 검사계획에 따라 선정된 로트에 대하여 5발정도의 샘플로부터 잔류 안정제 함량을 MIL-STD-286에 따라 측정하고 있다. 본 논문에서는 동일한 로트라도 각 검사시점시 측정된 결과의 평균값을 별개의 자료로 보고 Fig. 2와 같이 저장기간별 안정제의 잔류 함량을 표현하였다. KM6 추진제의 제조시 안정제(DPA)의 조성은 전체함량의  $1.0 \pm 0.3\%$ 로 조절되며 생산당시의 평균 안정제 함량인 1.0%를 초기 안정제 함량으로 정하고 저장기간에 대한 안정제의 감량을 계산하였으며 Fig. 3과 같다. 저장기간은 추진장약 로트의 생산연도와 안정제 함량 측정연도로부터 계산하였다.

현재 군에서 보유하고 있는 탄약은 3가지 형태의 탄약저장시설에서 보관하고 있다. 블록식 지상형 탄약고는 양호한 통풍으로 습기발생을 억제할 수 있으나 화재, 파편의 위험과 폭발 안전측면에서 취약하고 계절별 일정온도 유지가 곤란하여 저장온도 차이의 범위가 크다. 지하탄

약고는 탄약의 성능유지와 안전측면에서 우수하나 과도한 운영유지 예산이 소요된다. 탄약 저장시설의 57.3%를 차지하고 있는 콘크리트 이글루 탄약고는 은폐, 엄폐의 장점을 가지고 있으며 내구연한이 길며 폭발 안전성과 경계 용이성이 우수하며 낮은 온도로 일정하게 유지된다. 하지만, 여름철 고온다습한 외기 유입으로 결로현상이 발생하여 탄약의 상태, 성능을 크게 저하시킬 수 있는 단점을 가지고 있다[10]. 탄약의 저장중 정비탄 발생비율은 탄약 저장량의 약 5%인데 결로에 의한 불량탄 발생은 전체 불량탄의 약 83%에 달하는 실정이다[11]. 본 연구에서 다루고 있는 추진제는 155 mm 곡사포에 사용되며 대부분 블록식 사상형 탄약고 또는 콘크리트 이글루 탄약고에 저장되어 있다. 따라서, 온도의 변화 또는 결로로 인한 습기의 영향을 받았다고 볼 수 있다. 추진제의 자연분해는 온도와 습도에 직접적으로 영향을 받기 때문에 고온가속 온도시험으로 예측한 수명과 크게 다를 수 있으며, 탄약저장시설의 형태와 저장위치, 관리방법 등에 따라 로트별 온도와 습도에 서로 다른 영향을 받으므로 저장기간에 따른 상태저하에 대한 확률론적 분석이 필요하다.

Figure 2는 저장기간별 안정제 함량의 추이이다. 선형회귀분석 결과 연간 0.0183(%)의 비율로 안정제 함량이 감소된다고 추산해 볼 수 있다. 고장으로 간주할 수 있는 상태수준은 잔류 안정제 함량 0.2%이며 누적 열화량  $X(t)=0.8$ 임을 의미한다. Fig. 2에서 얻은 선형회귀식  $y=-0.0183x+0.8271$ 에서 고장으로 간주할 수 있는 상태( $y=0.2$ )일 때의 저장기간( $x$ )인 저장수명을 약 34년으로 예측할 수도 있다. 기존에 연구된 대부분의 논문들도 고온가속노화시험 또는 저장분석시험법으로 얻어진 자료의 선형회귀분석으로 추진제의 수명을 예측하였다. 하지만 Fig. 2와 같이 저장기간별 안정제 함량의 분산이 매우 크며 로트별 제품특성의 차이와 열화경로의 다양성으로 단순히 선형회귀분석에 의하여 열화률을 추산하는 것은 불확정성(uncertainty)이 고려되지 않아 비현실적이다. Fig. 1에 표현된 상태분포와 수명분포를 설명할 수 없다.

Figure 3은 각 저장년도별 안정제 함량의 평균값을 취하고 최초 1.0%로부터 안정제 함량의 감량을 저장기간별로 나타낸 그림이다. 저장기간이 증가함에 따라 선형으로 증가하여야 하나 감소하는 부분이 있는 이유는 로트별 특성 및 저장고 환경의 차이에 의한 안정제 감량속도의 차이로 발생한 것으로 판단된다.

#### 4.2 확률모수의 추정

확률분포의 모수를 추정하기 위하여 일반적으로 최대우도법을 이용하지만 van Noortwijk은 Eq. 6 및 Eq. 7과 같이 훨씬 수식적으로 간단하여 다루기 쉬운 모멘트법(moment method)을 제시하였다[12].

검사시점  $t_i, i=1, \dots, n$ 에 해당하는 누적열화량  $x_i(x_1=0)$ 으로부터 형상함수  $\lambda(t)$ 의  $c$ 값과 척도모수  $\beta$ 의 추정값  $\hat{c}, \hat{\beta}$ 를 모멘트법을 이용하여 Eq. 6 및 Eq. 7로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\hat{c}}{\hat{\beta}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{x_n}{t_n} = \bar{\delta} \quad (6)$$

$$\frac{x_n}{\hat{\beta}} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2}{\left[ \sum_{i=1}^n w_i \right]^2} \right) = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta} w_i)^2 \quad (7)$$

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

Figure 3의 저장기간별 안정제의 평균 감량 자료로부터 모멘트법을 적용하여 확률모수를 추정하였다. 시간에 대한 열화량은  $\lambda(t) = ct^b$ 과 같이 멱함수로 표현할 수 있다.  $b$ 값은 이미 알고 있거나 분석자가 지정한 일정한 값으로 확률과정에 따라 다양한 값을 취하며[13-15]  $b > 0, c > 0$ 이다.  $b=1$ 인 경우 상태변화가 시간에 대하여 선형인 정상감마과정(stationary gamma process)이다. 본 논문에서는  $b=1$ 일 때 Eq. 6 및 Eq. 7의 모멘트법으로 확률모수를 추정하였으며 각각  $\hat{c}=0.4061, \hat{\beta}=17.9768$ 이다.

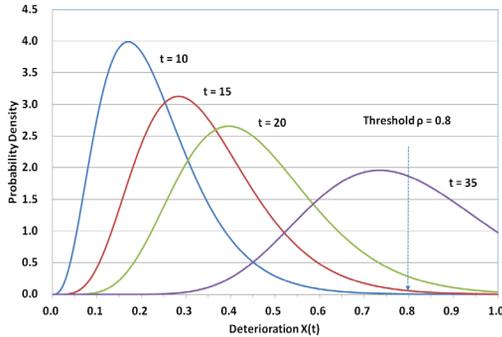


Fig. 4 Probability density functions of deterioration at various storage times

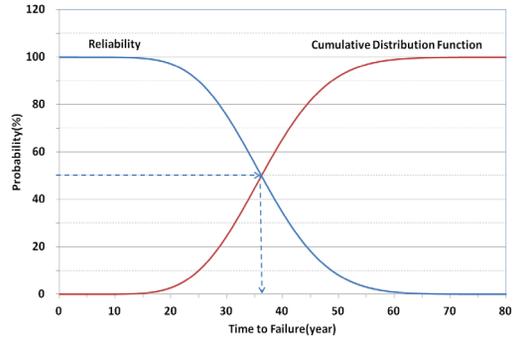


Fig. 5 Cumulative distribution function,  $F_T(t)$ , and reliability,  $R(t)$ , as storage time

Table 2. Mean, variance and coefficient of variation at various storage times

	10years	15years	20years	35years
$\mu_{X(t)}$	0.2259	0.3389	0.4518	0.7907
$\sigma_{X(t)}^2$	0.0126	0.0188	0.0251	0.0440
$\nu_{X(t)}$	0.4962	0.4052	0.3509	0.2652

Table 3. Cumulative failure probability(C.F.P.) and reliability at various storage time

Storage time(years)	C.F.P.(%)	Reliability(%)
10	0.0	100.0
15	0.5	99.5
20	2.8	97.2
25	10.0	90.0
30	24.5	75.5
35	44.7	55.3
40	65.4	34.6
50	92.5	7.5
60	99.0	1.0

### 5. 분석 결과

#### 5.1 누적열화량의 확률밀도함수와 평균수명

형상함수  $\lambda(t)$ 와 척도모수  $\beta$ 의 추정값으로 부터  $b=1$ 일 때 저장기간  $t$ 별 누적열화량의 확률 밀도함수를 Fig. 4와 같이 표현하면 각 저장기간  $t$ 별 상태분포 곡선이 된다. Eq. 2로부터 저장기간이 각각  $t=10,15,20,35$ (단위:years)일 때 평균, 분산 및 변동계수는 Table 2와 같다. 시간  $t$ 에서 누적열화량의 평균은  $\mu_{X(t)} = \lambda(t)/\beta$ 이고  $\lambda(t) = ct^b$ 로부터 누적열화량의 평균이 고장율 의미하는 임계수준인  $\mu_{X(t)} = 0.8$ 이며 정상감마과정 ( $b=1$ )일 때 모멘트법으로 추정된  $\hat{c}$ 와  $\hat{\beta}$ 로부터  $t = \mu_{X(t)}(\hat{\beta}/\hat{c})$ 에서 평균수명을 35.4135년으로 추정할 수 있다. 이때 분산은  $\sigma_{X(t)}^2 = 0.0445$ 이며 변동계수는  $\nu_{X(t)} = 0.2637$ 이다.

#### 5.2 저장기간별 누적분포함수와 신뢰도

저장기간별 누적분포함수( $F_T(t)$ )는 Eq. 4와 같

이 표현되며 각 저장기간 동안의 누적고장률을 의미한다. 신뢰도( $R(t)$ )는 Eq. 5로 표현된다. 임계수준  $\rho=0.8$ 일 때 각 저장기간별 누적분포함수와 신뢰도는 Fig. 5 및 Table 3과 같다. 백분위 수명은 누적분포함수 즉 누적고장률이  $p$ 가 되는 시점으로 전체의  $100p\%$ 가 고장나는 시점을 나타낸다. Table 3에서 누적고장률이 10%에 해당하는 저장기간인  $B_{10}$ 수명은 25년이다. 즉, 전체의 90%가 고장나지 않는 시점이 25년임을 의미한다. 실용적인 관점에서 고장률이 50%인 시점인  $B_{50}$ 수명을 평균수명으로 사용하며[16] KM6 추진제의  $B_{50}$ 수명은 약 36년이다. Fig. 2에서 저장기간별 안정제 함량의 추이에 관한 선형회귀 분석 결과로 계산한 평균수명(약 34년), 누적 열

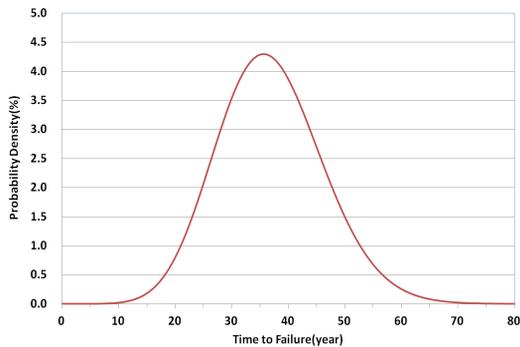


Fig. 6 Lifetime probability density function

화량의 평균식과 추정된 확률모수로부터 계산한 평균수명(약 35년)과 비교할 때  $B_{50}$  수명을 평균수명 사용하는 것이 타당성이 있을 것으로 판단된다.

### 5.3 저장수명의 확률밀도함수

저장수명의 확률밀도함수는 저장시간에 대한 누적분포함수 Eq. 4를 미분하여 얻어지며 Fig. 6와 같이 수명분포 곡선으로 표현된다. 즉, 안정제 함량이 임계수준  $\rho=0.8$  이하로 저하될 확률은 앞에서 예측된 평균고장시간(평균수명)인 약 36년 주변으로 Fig. 6의 수명분포 곡선에서 최빈값을 보이는 저장시간이다. 평균수명은 약 36년으로 예측되었지만 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 저장기간 20년에도 잔류안정제 함량이 0.2%에 도달하여 상태고장에 이를 수 있음을 Fig. 6에서 알 수 있다. 즉, 결정론적 수명예측의 한계를 확률론적 수명예측방법으로 보완할 수 있음을 보여주고 있다.

## 6. 결 론

단기추진제인 KM6 추진제의 저장수명을 감마과정 이론을 이용하여 확률론적 방법으로 추산하였다. 장기 저장에 따른 안정제 함량의 저하량이 0.8%일 때를 상태고장으로 보았으며 정상감마과정이라고 가정하였을 때 확률모수를 모멘트법으로 추정하였다. 저장기간별 누적열화량의 확

률밀도함수로부터 각 저장기간에서의 상태분포를 확인할 수 있으며, 저장기간별 누적분포함수와 신뢰도를 계산한 결과 평균 저장수명(shelf life)은 약 36년,  $B_{10}$  수명은 25년으로 추산되었다. 저장수명에 관한 확률밀도함수 곡선으로부터 저장기간별 수명분포를 확인할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Korean Agency for Technology and Standards, Handbook of reliability terminology, 2003, pp.10-14
2. Lindblom, T., Reactions in the system nitro-cellulose/diphenylamine with special reference to the formation of a stabilizing product bonded to nitro-cellulose, ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS UPPSALA, 2004, pp.3-8
3. 조기홍, 김의용, "고온가속노화시험법과 저장 분석시험법을 이용한 추진제 KM10의 기대수명 평가," 한국화학공학회지, 제48권, 제6호, 2010, pp.695-699
4. 임유진, 황갑성, "고체추진제의 종류와 선택," 한국항공우주학회지, 제22권, 제6호, 1994, pp.147-154
5. Headquarters, Department of the Army, "Propellant and Propelling Charges Ammunition Surveillance Procedures," SB 742-1300-94-895, 1998, pp.9-11
6. 이종찬, 윤근식, 김용화, 조기홍, "가속노화시험을 이용한 단기추진제의 저장수명예측에 관한 연구," 품질경영학회지, 제36권, 제2호, 2007, pp.45-52
7. van Noortwijk, J. M. and Pandey, M. D., "Gamma process model for time-dependent structural reliability analysis," Proceedings of the second international conference on bridge maintenance, safety and management(IABMAS), 2004, pp.18-22
8. 권영일, 김승진, "건설자재의 사용수명 예측

- 모형에 관한 연구,” 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회, 2007, pp.640-644
9. Abdel-Hameed, M., “A gamma wear process,” IEEE Transactions on Reliability, Vol. 24, No. 2, 1975, pp.152-153
  10. 이종찬, 김석봉, 이필재, 김병선, “파형강판 이글루탄약고 결로 감소 방안 연구,” 대한건축학회논문집, 제27권, 제6호, pp.85-92
  11. 이종찬, 박상현, 김병선, “이그루 탄약고 저장 탄약의 표면결로 감소 방안,” 대한건축학회논문집, 제23권, 제3호, pp.215-222
  12. 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, 2003, pp.259-265
  13. Ellingwood, B. R. and Mori, R., “Probabilistic methods for condition assessment and life prediction of concrete structures in nuclear power plants,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 142, No. 2-3, 1993, pp.155-166
  14. Cinlar, E., Bazant, P. and Osman E., “Stochastic process for extrapolating concrete creep,” Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 103, No. 6, 1977, pp.1069-1088
  15. van Noortwijk, J.M. and Klatter, H. E., “Optimal inspection decisions for the block mats of the Eastern-Scheldt barrier,” Reliability Engineering and System Safety, Vol. 65, No. 3, pp.203-211
  16. 박태근, 이영주, 정희석, 김정수, 김진석, 천석희, “고압방전램프의 신뢰도 모형과 분석,” 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회, 2005, pp.674-678