Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.3.017

감마과정 모델에 의한 장약포의 저장수명 예측

박성호[a] · 김재훈[b,*]

Estimation of Storage Life for Propellant Bag by Using Gamma Process Model

Sungho Park[a] · Jaehoon Kim[b,*]
[a]*Defense Systems Test Center, Agency for Defense Development*
[b]*Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr*

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present a method to estimate the storage life of propellant bag for degradation of breaking load with storage time by using gamma process model. The nitrogen compound generated by natural decomposition of propellants degrades the breaking load of propellant bag with time. The statistical distributions of condition and lifetime with time were shown from the results of accelerated life test of propellant bag cloth at 80℃. It was found that the use of median for life was highly appropriate and the B_1 or B_5 life should be selectively applied to the quality assurance policy.

초 록

본 논문은 장약포의 저장기간에 따른 파단하중 저하에 관하여 감마과정 모델을 이용하여 저장수명을 예측하는 방법에 대한 연구결과이다. 추진제의 자연분해로 발생하는 질소화합물과 장약포의 화학반응은 파단하중을 저하시킨다. 장약포의 가속수명시험 결과에 감마과정 모델을 적용하여 시간의 경과에 따른 상태와 수명을 확률분포로 표현하였다. 저장수명은 중위수로 표현하고 품질보증을 위한 정책결정 기준으로 B_1 또는 B_5 수명을 활용하는 것이 적절하다.

Key Words: Propellant Bag(장약포), Gamma Process(감마과정), State Failure(상태고장), Shelf Life(저장수명), Percentile Life(백분위 수명)

1. 서 론

구형 견인포용 추진장약은 약포 또는 소진용기에 사거리 조정이 가능하도록 호수별로 구분

Received 12 April 2014 / Revised 29 April 2014 / Accepted 6 May 2014
Copyright ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

하여 포장한 것으로 섬유질 약포가 주로 사용되어 왔다. 일반적으로 화포용 추진장약에는 니트로셀룰로스에 기반한 추진제가 사용되며 장기간 저장시 자동촉매반응으로 발생하는 질소화합물(NO, NO_2 등)이 수분 또는 잔류용매와 반응하여 아질산 또는 질산이 되며 장약포의 섬유질과 산화반응하여 인장강도를 저하시켜 파손의 원인이 된다. 장약포의 파손은 장약 호수의 분리 및 장전시 추진제의 유실과 포강내 장전의 어려움 등 운용성 측면에서 신뢰도를 저하시킨다.

국내에 저장된 탄약의 대부분은 하절기 습도에 취약한 이글루형 탄약고에 또는 고온에 취약한 지상형 탄약고에 저장되고 있다[1]. 추진제의 자연분해 속도는 온도와 습도의 함수[2]이므로 장기간 저장에 의한 장약포의 인장강도 저하율은 확정적이지 않다. 즉 저장조건의 변화로 인장강도의 저하율이 시간 경과에 따라 연속적으로 변화하는 추계적 열화특성을 보인다. 따라서 수명예측에 있어서 회귀분석 모델에 의한 결정론적 방법과 통계분석으로 적합한 확률분포를 적용하는 통계적 방법은 샘플링 불확실성 또는 시간적 불확실성(Temporal uncertainty)의 모형화에 제한이 있다.

확률과정 모델은 시간종속적 확률분포의 변화를 다루므로 샘플링 불확실성뿐만 아니라 시간적 불확실성을 모형화하기에 적합하다. 마르코프 체인 모델은 열화과정을 시간 계단 동안 한가지 상태 이상으로 전이하지 않는다고 본다. 전이확률이 시간에 대하여 불변이며 현 상태에서 다른 상태로 이동할 때 각 상태에 머무는 시간을 고려하지 않기 때문에 시간 변동성을 고려할 수 없다[3]. 복합포아송과정 모델은 유한시간 간격내에서 유한개의 도약(Jump)을 가지므로 산발적으로 작용하는 쇼크에 의한 손상의 모델링에 적합하다. 유한시간 간격내에서 무한개의 도약을 가지는 감마과정 모델은 시간 경과에 따라 열화량의 증분이 연속적이며 비감소적으로 누적되면서 고장에 이르는 마모, 부식, 침식, 크리프와 같은 현상을 모형화하기에 적합하다[4-6]. 즉, 추진장약의 장기간 저장에 의한 장약포의 인장강도 저하는 연속적이며 비감소적으로 저하량의 증분이 누적되는 특성을 보이므로 감마과정 모델을 적용하여 수명특성을 모형화하기에 적합하다. 추진장약의 장기간 저장에 따른 저장안전성 측면에서 안정제의 함량 저하와 성능 측면에서 포구속도의 저하에 감마과정 모델을 적용한 저장수명의 예측기법에 관한 연구가 진행되었다[7-10]. 하지만 추진장약의 운용성 측면에서 장약포의 인장강도 저하에 관한 수명예측 기법에 관한 연구는 이루어지지 않았다.

본 논문은 감마과정 모델을 적용하여 추진장약의 장기간 저장에 따른 섬유질 장약포의 인장강도 저하에 관한 상태분포와 수명분포를 예측하고 예측결과를 활용하기 위한 방법에 관하여 논하였다.

2. 장약포의 재질과 파손원인

2.1 장약포의 재질

본 논문의 연구대상은 화포용 추진장약에 사용되는 비스코스레이온으로 취화되는 반응을 억제하기 위하여 요소-포름알데히드 및 멜라민-포름알데히드 용액으로 수지가공이 되어 있다. 수지가공을 통하여 섬유의 셀룰로오스 분자내 수산기(-OH)와 수소(-H)가 축합반응을 하여 가교를 생성하면서 망상 고분자화되어 수산기가 적어지기 때문에 파손이 지연된다.

2.2 장약포의 파손

니트로셀룰로스에 기반한 추진제는 저장단계에서 자동촉매반응으로 질소산화물(NO, NO_2)과 수분이 발생한다. 자동촉매반응은 발열반응으로 자연발화될 수 있으며 온도와 습도에 직접적인 영향을 받는다. 자동촉매반응 속도를 억제하기 위하여 안정제로서 디페닐아민(DPA)을 첨가하는데 질소산화물과 결합하여 Nitro-DPA를 형성하므로 추진제의 분해에 따라 함량이 저하된다[2]. 추진제 분해 시 발생한 질소화합물은 이때 발생한 수분, 추진제 제조 시 미제거된 잔류수분 또는 잔류용매와 반응하여 아질산 또는 질산이 되며 장약포의 섬유소와 산화반응하여 인장강도를

저하시켜 파손에 이르게 된다.

장약포의 파손은 장약의 호수간 접촉하는 부위인 윗면과 아랫면에서 집중적으로 발생하고 있다. 장약포의 파손을 가속시키는 환경적 요인으로 추진제의 자체함유 수분과 잔류용매에 의한 분해의 촉진 외에 장약포의 종류와 수지처리 기술수준, 보관용기의 방수특성, 약협의 표면처리 상태, 포장상태에 따른 건조 및 제습조건 등이 있으나 탄약고의 통풍상태와 실내 온도 및 습도에 의한 원인이 가장 크다[11].

3. 추진제 및 장약포의 가속수명시험 결과

3.1 추진제의 가속수명시험

이전의 연구[8]에서 고온(70℃, 80℃, 90℃)에서의 가속수명시험으로 북대서양 조약기구에서 제정한 동적모델인 AOP-48 2nd Ed.[12]을 적용하여 시간에 따른 안정제 함량의 저하 관계를 예측하였다. 각 가속온도에서의 가속수명시간(t_{acc}, 단위 : day)에 따른 안정제 함량($C_S(t,T)$)과 운용온도 25℃에서의 자연노화시간(t_{nat}, 단위 : year)은 Table 1과 같다. 자연노화시간은 동적모델 AOP-48 2nd Ed.을 변형한 Eq. (1)로 예측하였으며 초기 안정제 함량인 $C_S(0)$는 1.04, 차수 n은 0.8319 그리고 운용온도 25℃에서 반응속도상수 $k_n(T)$는 1.05753×10^{-4}이다. Fig. 1은 운용온도 25℃에서의 자연노화시간과 그때의 안정제 함량과의 관계를 보여주고 있다.

$$t_{nat} = \frac{1}{(1-n)\,k_n(T)}\left[1-\left(\frac{C_S(t,T)}{C_S(0)}\right)^{(1-n)}\right] \quad (1)$$

3.2 장약포의 가속수명시험

Fig. 2와 같은 질산환경에서 수지처리된 비스코스레이온 장약포에 대하여 가속수명시험을 수행하였다. 데시케이터에 추진제 1 kg을 두고 80℃를 유지하였으며 비이커에는 물을 담아두었다. 추진제의 자연분해로 발생하는 질소화합물이 비이커에서 증발되는 수분과 결합하도록 장약포 시편의 주변에 질산환경을 조성하였다.

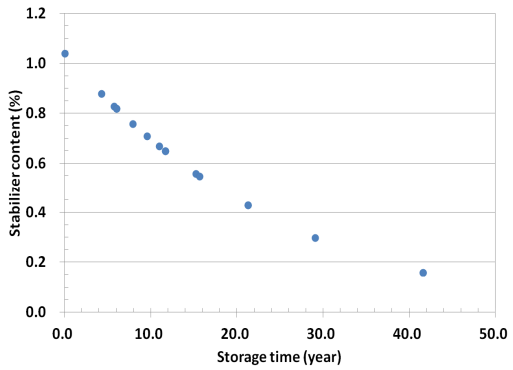

Fig. 1 Estimated stabilizer content vs. natural aging time at 25℃.

Table 1. Stabilizer consumption at accelerated high temperatures.

70℃			80℃			90℃		
t_{acc} (day)	$C_S(t,T)$ (%)	t_{nat} (year)	t_{acc} (day)	$C_S(t,T)$ (%)	t_{nat} (year)	t_{acc} (day)	$C_S(t,T)$ (%)	t_{nat} (year)
0	1.04	0.0	0	1.04	0.0	0	1.04	0.0
5	0.88	4.3	2	0.82	6.0	1	0.83	5.7
10	0.82	6.0	4	0.67	11.0	2	0.65	11.7
15	0.76	7.9	6	0.56	15.2	3	0.43	21.3
20	0.71	9.6	8	0.43	21.3	4	0.16	41.6
25	0.65	11.7	10	0.30	29.1			
30	0.55	15.7	12	0.16	41.6			

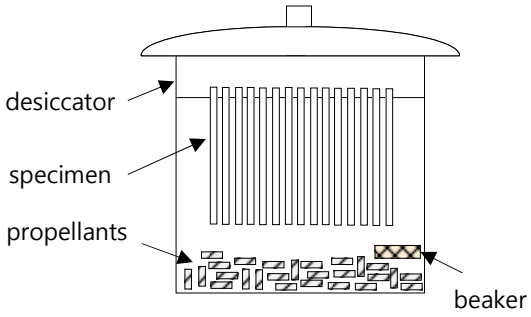

Fig. 2 Aging test equipment for propellant bag cloth.

Table 2. Breaking loads with accelerated aging time (accelerated test temperature = 80℃).

Accelerated aging time (day)	Breaking load (kgf)
0	41.04
3	39.64
6	35.40
9	30.65
12	21.35
15	2.05

가속수명시험에 사용된 시편은 15개이며 KS K 0520[13]에 의거하여 길이 6인치, 폭 4인치의 크기를 가지는 시편을 3일 간격으로 3개씩 인장시험하여 Table 2와 같이 파단하중(단위 : kgf)을 측정하였다.

3.3 가속수명시간과 자연노화시간의 관계

Table 2는 가속시험 온도 80℃에서 가속노화시간에 따른 파단하중의 측정결과이다. Fig. 3은 Table 1의 가속시험 온도 80℃에서 추진제 안정제 함량의 가속수명시간과 운용온도 25℃에서의 자연노화시간의 관계이며 회귀분석 결과 Eq. (2)로 표현된다. Table 2의 가속수명시간을 Eq. (2)로부터 자연노화시간으로 환산하였을 때 파단하중의 저하량은 Fig. 4와 같이 표현된다.

$$t_{nat} = 0.123960\, t_{acc}^2 + 1.840860\, t_{acc} \qquad (2)$$

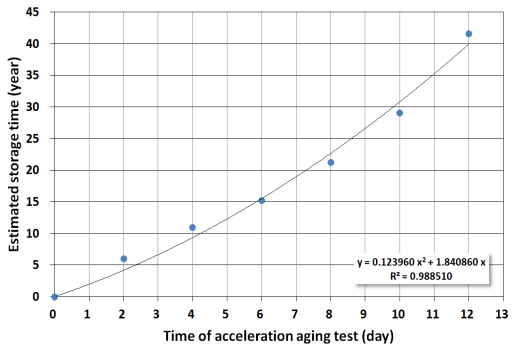

Fig. 3 Relation between accelerated aging time and estimated storage time.

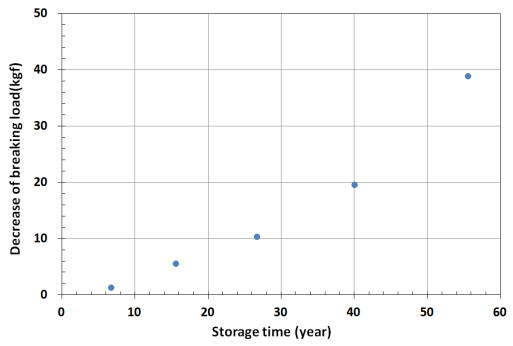

Fig. 4 Degradation of breaking load vs. storage time.

3.4 고장기준의 설정

장약포의 파단하중 측정으로 잔여수명을 판단하기 위하여 고장 판단기준의 설정이 필수적이다. 수지가공된 비스코스레이온의 미군사규격서 MIL-C-43157에서 파단강도는 85 lbf(38.6 kgf) 이상이 요구된다. 양산시 평균 파단하중 41.04 kgf의 20% 수준인 8.21 kgf을 고장수준으로 설정하였으며 손으로 잡아당겼을 때 쉽게 파단된다.

4. 감마과정 모델에 의한 수명예측

4.1 감마과정 모델

감마과정 모델은 연속시간 확률과정 모델로 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

- $X(0) = 0$이며 확률값은 1이다.

- $X(\tau)-X(t) \sim Ga(\alpha(\tau)-\alpha(t),\lambda), \tau > t \geq 0$
- $X(t)$는 독립증분을 가진다.

여기서, $X(t)$는 경과시간 t에서의 누적 열화량을 의미하므로 $X(\tau)-X(t)$는 임의의 연속한 두 시점($\tau > t \geq 0$)에서 열화량의 증분이다. 감마과정 모델은 임의의 연속한 두 시점에서 열화량의 증분이 시간에 따라 증가하는 형상모수($\lambda(\tau)-\lambda(t)$)와 고정된 값인 척도모수(β)를 가지는 감마분포이다.

감마과정 모델의 확률밀도함수(PDF), 평균, 분산, 변동계수(COV), 누적분포함수(CDF) 및 신뢰도 함수는 Table 3과 같이 형상모수가 시간의 함수로 표현되는 감마분포의 수식과 동일하다. 각 경과시간에 대한 상태분포는 확률밀도함수로 표현된다. 여기서 상태분포는 시간 경과에 따라 파단하중의 누적 저하량이 변동을 가짐을 의미한다. 수명은 시간 경과에 대한 누적분포함수로 표현되며 시간구간 [0, t]동안 고장날 확률을 의미한다. 반면에 신뢰도는 시간구간 [0, t]동안 고장나지 않은 확률로 생존함수라고도 한다.

Table 3. Equations for gamma process model.

Statistics	Equations
PDF	$f_{X(t)}(x) = \frac{\beta^{\lambda(t)}}{\Gamma(\lambda(t))} x^{\lambda(t)-1} e^{-\beta x} = Ga(x\|\lambda(t),\beta)$
Mean	$\mu_{X(t)} = \frac{\lambda(t)}{\beta}$
Variance	$\sigma^2_{X(t)} = \frac{\lambda(t)}{\beta^2}$
COV	$\nu_{X(t)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda(t)}}$
CDF	$F_T(t) = 1-P[X(t) < \rho] = 1-GA(\rho\|\lambda(t),\beta)$
Reliability	$R(t) = 1-F_T(t)$

4.2 확률모수의 추정

시간경과에 따른 확률분포의 모수를 추정하기 위하여 일반적으로 최대우도법을 이용하지만 van Noortwijk은 Eq. (3) 및 Eq. (4)와 같이 간단한 형태의 수식이며 계산이 쉬운 모멘트법을 제시하였다[14]. 시간의 함수인 형상모수 함수는 $\lambda(t) = ct^b$와 같이 멱함수로 표현할 수 있다. b값은 이미 알고 있거나 분석자가 지정한 일정한 값으로 확률과정에 따라 다양한 값을 취할 수 있으며 $b > 0$, $c > 0$이다.

본 논문에서는 $b = 1$일 때 검사시점 t_i, $i = 1,...,n$에 해당하는 누적 열화량 $x_i (x_1 = 0)$에 관한 Fig. 4의 자료로 부터 모멘트법을 이용하여 형상함수 $\lambda(t)$의 c값과 척도모수 β의 추정값 $\hat{c}$, $\hat{\beta}$을 추정하였다.

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

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

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

4.3 상태분포 및 수명분포 예측

Fig. 4의 저장기간 경과에 따른 누적 파단하중 저하량에 모멘트법을 적용하여 확률모수를 추정한 결과 추정된 확률모수는 각각 $\hat{c} = 0.2286$, $\hat{\beta} = 0.3254$이다.

상태고장으로 판단되는 파단하중 저하량의 임계수준인 $\mu_{X(t)} = 32.83$에서 평균 수명식이 $\mu_{X(t)} = \lambda(t)/\beta$이고 $\lambda(t) = ct^b$에서 $b = 1$일 때 $t = \mu_{X(t)}(\hat{\beta}/\hat{c})$이므로 46.7년이다. 이때 변동계수는 0.3059이며 분산/평균은 척도모수의 역수로 경과시간과 상관없이 동일한 값인 3.0729이다.

모멘트법으로 추정된 확률모수로부터 확률밀도함수(PDF)를 계산하면 Fig. 5와 같이 상태분포

곡선을 얻을 수 있다. 저장기간이 증가할수록 확률분포 곡선의 폭이 넓어짐을 알 수 있으며 현 시점에서 미래의 상태를 예측함에 있어서 불확실성이 반영된 것이라고 볼 수 있다.

저장기간에 따른 누적분포함수(CDF)와 신뢰도 곡선은 Fig. 6과 같다. 누적분포함수 곡선으로부터 누적고장률이 50%인 B_{50}수명은 48.2년, B_{10}수명은 31.2년 그리고 B_5수명은 26.8년이다.

저장수명에 관한 확률밀도함수는 누적분포함수를 미분하여 얻어지며 Fig. 7과 같이 수명분포 곡선으로 표현된다. 수명분포 곡선은 장약포의 누적 파단하중 저하량이 32.83 kgf이상으로 고장수준인 8.21이하가 될 확률이다. 수명분포 곡선의 정점은 최빈수로 47.0년이며 평균값과 동일하다. Fig. 7에서 평균수명이 47.0년으로 예측되었으나 저장기간 20년에도 파단하중의 누적 저하량이 임계수준에 도달하여 상태고장에 이를 수 있음을 알 수 있다.

손상상태 수준별 저장기간에 대한 5%, 50%, 95% 백분위수 곡선은 Fig. 8과 같다. 자연노화시간에 대한 파단하중을 보조축으로 함께 도시하였으며 저장기간 경과에 따른 파단하중의 저하량을 보수적으로 예측하고 있음을 알 수 있다. 파단하중이 8.21 kgf일 때와 손상상태가 100%일 때 상태고장에 해당하며 이때 5%, 50%, 95% 백분위수는 각각 26.8년, 48.0년, 73.4년이다. 50% 백분위 수명인 48.0년은 수명분포곡선의 중위수에 해당한다.

4.4 각 확률분포 곡선간의 관계

Fig. 5 ~ Fig. 8의 각 확률분포 곡선간의 관계는 Fig. 9와 같다. (a)는 저장기간별 손상상태와

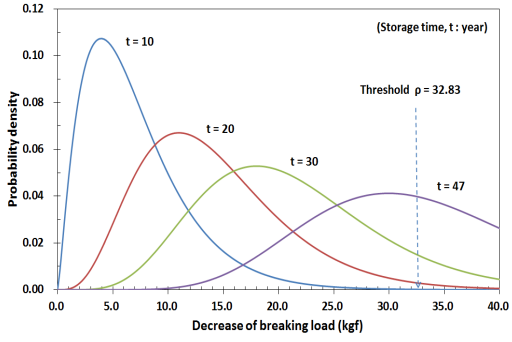

Fig. 5 Probability density vs. decrease of breaking load.

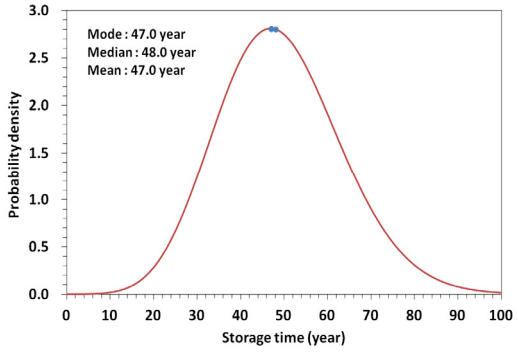

Fig. 7 Storage life distribution curve vs. storage time.

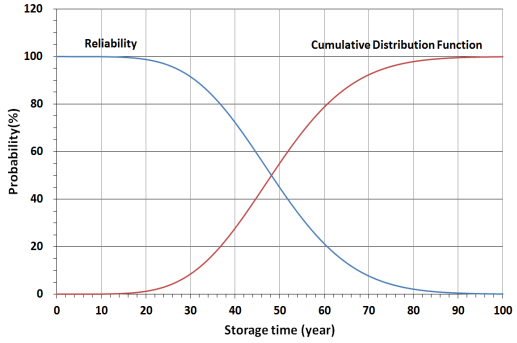

Fig. 6 Cumulative distribution function and reliability curves vs. storage time.

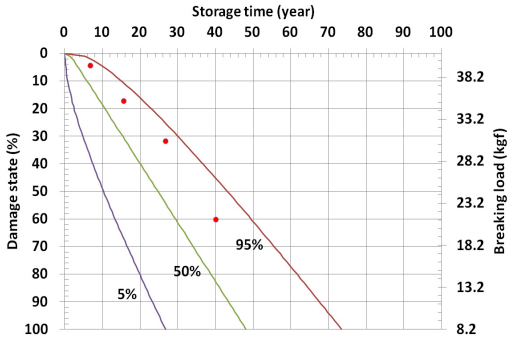

Fig. 8 Percentile curves for damage state vs. storage time.

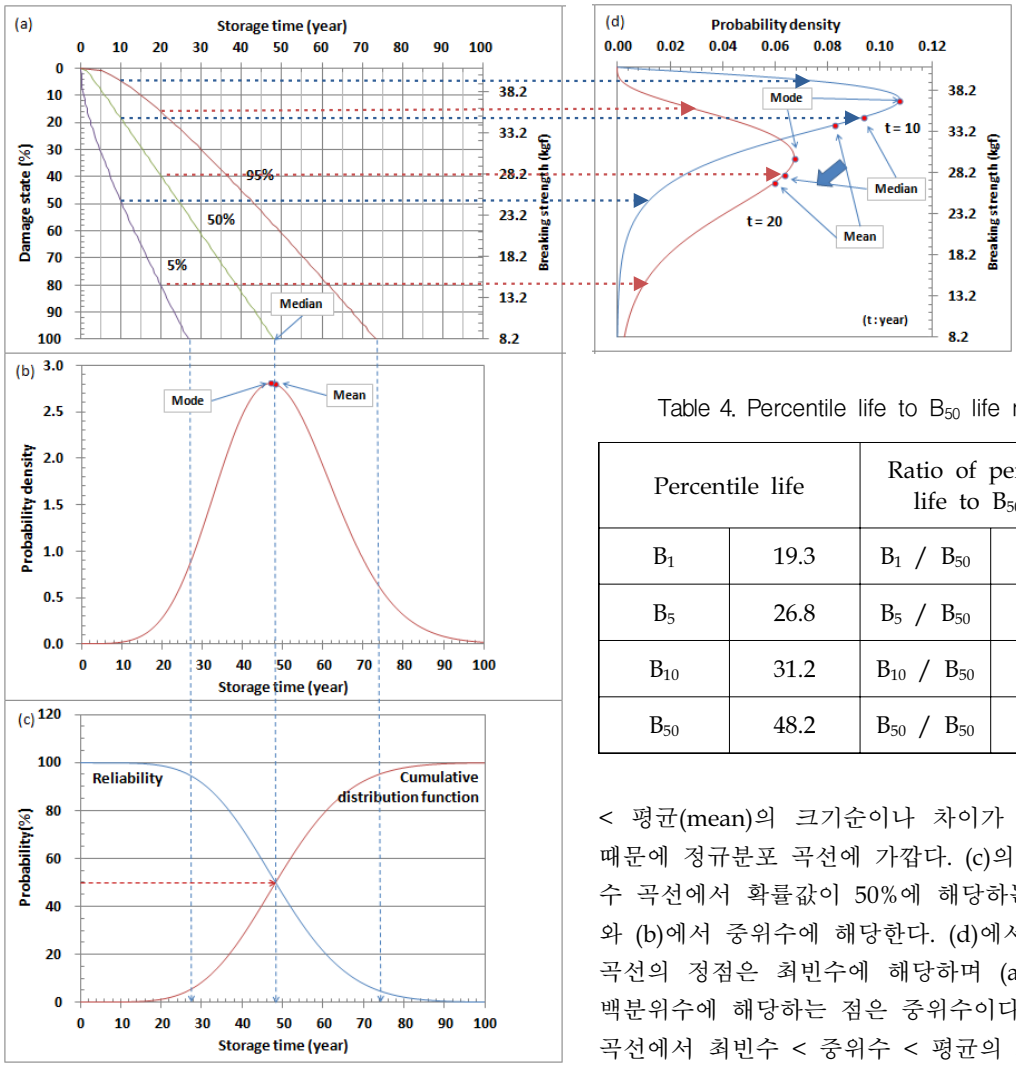

Fig. 9 Comprehensive gamma process model plots (a) Expected condition including the 5th and 95th percentile; (b) Probability density function of time to failure(storage life); (c) Cumulative distribution function of the lifetime and reliability; (d) Probability density functions of breaking load at t=10 and t=20 years.

장약포의 파단하중에 관한 5%, 50%, 95% 백분위수 곡선이다. 손상상태 100%는 파단하중이 8.21 kgf인 고장상태이며 (b)의 수명분포 곡선에 해당한다. 손상상태 100%에서 50% 백분위 수명은 수명분포 곡선에서 중위수에 해당한다. 수명분포 곡선에서 최빈수(mode) < 중위수(median) < 평균(mean)의 크기순이나 차이가 매우 작기 때문에 정규분포 곡선에 가깝다. (c)의 신뢰도 함수 곡선에서 확률값이 50%에 해당하는 값은 (a)와 (b)에서 중위수에 해당한다. (d)에서 상태분포 곡선의 정점은 최빈수에 해당하며 (a)에서 50% 백분위수에 해당하는 점은 중위수이다. 상태분포 곡선에서 최빈수 < 중위수 < 평균의 크기순이며 확률곡선의 꼬리가 우측으로 길고 첨단이 좌측으로 치우친 형상을 가짐을 의미한다.

Table 4. Percentile life to B_{50} life ratio.

Percentile life		Ratio of percentile life to B_{50} life	
B_1	19.3	B_1 / B_{50}	0.40
B_5	26.8	B_5 / B_{50}	0.56
B_{10}	31.2	B_{10} / B_{50}	0.65
B_{50}	48.2	B_{50} / B_{50}	1.00

4.5 백분위 수명의 활용

백분위 수명은 보증수명 또는 설계기준을 결정하기 위하여 활용되며 위험정도 또는 시장환경 등을 고려하여 결정한다. 수명분포에서 중위수는 B_{50}수명이며 평균의 차이가 매우 작고 정규분포 곡선과 유사하므로 기대수명으로 볼 수 있다.

Table 4는 각 백분위 수명의 B_{50}수명에 대한 비율이며 B_1수명인 19.3년은 Fig. 6의 신뢰도 곡선에서 본격적으로 신뢰도가 저하되는 시점에

해당한다. 품질보증을 위한 정책결정의 기준으로 군 운용성을 고려할 때 B_{50}수명 보다는 B_1수명 또는 B_5수명의 선택적 적용이 적절하다.

5. 결 론

본 연구로 장약포의 가속수명시험 자료로부터 감마과정 모델을 적용하여 저장수명을 예측하는 방법을 제시하였다. 감마과정 모델을 적용함으로써 저장기간별 장약포의 파단하중 저하량에 관한 상태분포와 수명분포를 확률곡선으로 표현하였다. 상태분포 곡선은 첨단이 좌측으로 치우친 형상을 가지며 수명분포 곡선은 정규분포와 비슷한 형상으로 중위수를 기대수명으로 볼 수 있다. 품질보증을 위한 정책결정의 기준으로 B_{50}수명 보다는 B_1수명 또는 B_5수명의 선택적 적용이 적절하다.

References

1. Lee, J.C., Park, S.H. and Kim. B.S., "The reform measure for reduce to surface condensation of ammunition in igloo magazine," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 3, pp. 215-222, 2007.
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*, pp. 3-8, 2004.
3. Lee, O.S., *Introduction to Stochastic Process Theory*, 3rd ed., Kyungmoonsa, Seoul, Korea, 2008.
4. Singpurwalla, N.D. and Wilson, S.P., "Failure models indexed by two scales," *Advances in Applied Probability*, Vol. 3, No. 4, pp. 1058-1072, 1998.
5. van Noortwijk, J.M., "A survey of the application of gamma processes in maintenance," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, pp. 2-21, 2009.
6. Abdel-Hameed, M., "A gamma wear process," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 24, No. 2, pp. 152-153, 1975.
7. Park, S.H. and Kim, J.H., "Estimation of shelf life for propellant KM6 by using gamma process model," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 33-41, 2012.
8. Park, S.H. and Kim, J.H., "A study on the storage life estimation method for applying gamma process model to accelerated life test data," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 30-36, 2013.
9. Park, S.H. and Kim, J.H., "A study on the storage life estimation method for decrease of muzzle velocity using gamma process model," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 16, No. 5, pp. 639-645, 2013.
10. Park, S.H. and Kim, J.H., "The stockpile reliability of propelling charge for performance and storage safety using stochastic process," *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vo. 41, No. 1, pp. 135-148, 2013.
11. Kim, H.S., Woo, S.H. and Lee, H.S., "Minute analysis of the KM67 Propelling charge bag deterioration," ADD TR. GWDS-519-950106, 1995.
12. Military Agency for Standardization, "Explosives, nitrocellulose based propellants – stability test procedures and requirements using stabilizer depletion," NATO, AOP-48 Ed. 2, 2008.
13. KS K 0520, Textiles – Tensile properties of fabrics – Determination of strength and

elongation : Grab method, 2009.
14. 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*, pp. 259-265, 2004.