

감마과정 모델을 적용한 포구속도 저하량에 따른 저장수명 예측기법 연구

A Study on the Storage Life Estimation Method for Decrease of Muzzle Velocity using Gamma Process Model

박 성 호* 김 재 훈**
Sung-Ho Park Jae-Hoon Kim

ABSTRACT

The aim of the study is to investigate the method to estimate a storage life of propelling charge on the decrease of muzzle velocity by stochastic gamma process model. It is required to establish criterion for state failure to estimate the storage life and it is defined in this paper as a muzzle velocity difference between reference value and maximum allowable standard deviation multiplied by 6. The relationship between storage time and muzzle velocity is investigated by nonlinear regression analysis. The stochastic gamma process model is used to estimated the state distribution and the life distribution for storage time for 155mm propelling charge KM4A2 because the regression analysis is a deterministic method and it can't describe the distribution of life for storage time.

Keywords : Propelling Charge(추진장약), Muzzle Velocity(포구속도), Storage Life(저장수명), Distribution of Life(수명 분포), Gamma Process(감마과정)

1. 서론

탄약은 화기에 의하여 사격되어 목표점까지 정확하고 정밀하게 보내어져 적 또는 적지를 무력화하기 위한 무기이다. 따라서, 탄약의 성능은 정확도(accuracy)와 정밀도(precision) 측면에서 사거리의 평균과 분산

도로 평가한다. 사거리에 가장 큰 영향을 주는 요소는 포구속도이며 추진장약의 성능에 크게 좌우된다.

탄약은 원샷 시스템(one-shot system)으로 일반적으로 로트(lot) 단위로 생산되어 대부분의 기간을 탄약고에 저장된 상태로 지내다 1회성으로 소멸되어 임무를 다한다¹⁾. 특히, 추진장약은 화공품으로 저장기간이 지남에 따라 열화되어(deterioration) 포구속도가 저하된다. 따라서, 장기 저장된 탄약은 탄약저장신뢰성평가(ASRP) 계획에 따른 사격시험으로 기능등급을 부여한다. Fig. 1은 155mm 추진장약의 기능등급 곡선에 의한 성능평가의 예이다. 사격시험으로 얻어진 포구속도

† 2013년 6월 3일 접수~2013년 8월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

책임저자 : 김재훈(kimjhoon@cnu.ac.kr)

의 평균과 표준편차로 기능등급을 결정하며 가로축은 포구속도의 기준값과 평균의 차이이며 세로축은 표준편차이다. 로트별 시험결과와 평균과 표준편차로 결정되는 곡선상의 위치로 기능등급을 결정하며 실제로는 Grade B와 Grade C의 구분없이 Grade B로 적용한다. 등급곡선과 가로축이 만나는 점은 수락시험 자료로부터 얻은 총 표준편차의 3배로 적용^[2]하나 수락시험 자료를 얻기가 불가능한 경우 일반적으로 국방규격에서 허용하는 최대 표준편차의 3배로 적용하고 있다. 그러나, 기능등급곡선에 의한 성능평가 방법은 현재의 상태에 기반한 평가방법으로 수명예측이 불가능하다.

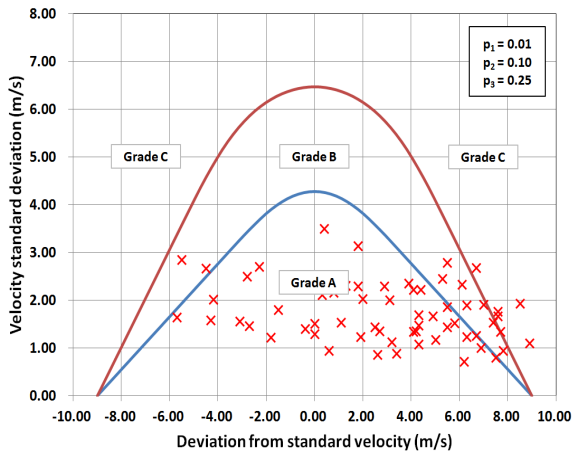


Fig. 1. Evaluation of functional grade by curve

신뢰성(reliability)은 아이템이 주어진 기간동안 주어진 조건에서 요구 성능을 만족할 수 있는 가능성을 의미하며 요구 성능을 만족하지 못하게 되는 사건을 고장(failure)라고 정의한다^[3]. 일반적으로 고장은 구조적고장(structural failure)을 의미하나, 화공품과 같이 요구기능은 수행하지만 상태가 고장수준 미만으로 저하될 경우 상태고장(conditional failure)을 적용하는 것이 적절하다. 포구속도는 저장기간에 따라 저하되나 포술 측면에서 구조적 고장으로 볼 수는 없다. 즉, 포구속도의 저하량을 상태(condition)로 볼 때 특정한 수준 미만으로 저하된 경우 상태고장으로 볼 수 있는 임계 수준의 설정이 필요하다.

저장수명을 예측하는 방법으로 저장기간에 따라 열화경로가 이미 결정된 결정론적(deterministic) 방법이 주로 적용되어 왔다. 대표적인 방법으로는 회귀분석에

의한 수명예측 방법이다. 회귀식의 기울기는 열화율(rate of deterioration)이며 스트레스(stress)에 대한 저항력(strength)의 저하율이다. 그러나, 실제로 스트레스(온도, 습도 등)가 일정하게 작용하지 않으며 저항력 역시 구조적 성질의 변화로 변동하여 열화경로는 불확실성(uncertainty)을 가진다. Fig. 2는 저장기간에 따른 다양한 열화경로를 보여준다. 회귀분석 또는 가속노화시험 등의 방법으로 저장기간에 따른 상태의 열화경로가 p_1 으로 결정되었다고 하자. 하지만 스트레스(stress)의 차이, 로트별 특성(strength) 등의 이유로 p_2 및 p_3 와 같이 서로 다른 열화율을 가지는 경로를 따를 수도 있다. 실제로는 실시간 상태검사가 불가능하기 때문에 저장기간 t_1 에서 검사한 상태는 다음 검사시점까지 유지되며 외부조건에 따라 열화율이 변동하여 p_4 와 같은 열화경로를 가지게 될 것이다. 즉, Fig. 2에서와 같이 특정 저장기간에서 상태분포를 가지고 특정 상태수준에 있어서 수명분포를 가질 것이다. 즉, 열화경로는 결정론적이지 않으며 확률론적(stochastic)이다. 확률과정론 모델인 감마과정(gamma process) 모델을 이용하여 추진제 안정제(stabilizer)의 저장기간에 따른 함량저하에 대한 수명예측 연구는 수행되었으나^[4] 탄약의 포구속도 감소량과 관련한 수명예측은 이제까지 시도되지 않았다.

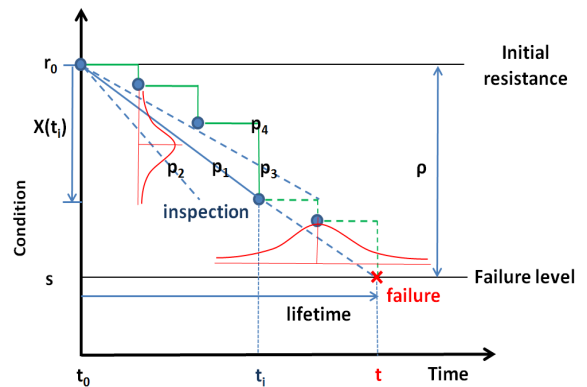


Fig. 2. Various deterioration paths as storage time

본 논문에서 탄종별 저장기간에 따른 포구속도 저하특성을 분석하였으며 상태고장으로 판단할 수 있는 기준을 제시하였다. 또한, 제시된 기준으로부터 저장기간에 따른 포구속도 저하량에 관한 감마과정 모델의 적용으로 상태분포와 수명분포로 저장수명을 예측하였다.

2. 자료의 획득 및 분석방법

가. 자료의 획득

본 연구의 분석대상은 박격포탄, 함포탄 그리고 포병탄용 추진장약이다. 일반적으로 박격포탄은 탄두와 추진장약을 결합하여 지환통내에 보관하며 함포탄은 금속 약협내에 추진제를 충전한 후 탄두를 결합하여 철제용기에 보관한다. 또한, 포병탄용 추진장약은 추진제를 섬유질 약포 또는 소진용기 내에 충전하고 호수별로 패키지화하여 철제용기에 보관한다. 탄약저장 신뢰성평가(ASRP) 연간 계획에 따라 선정된 탄종별 시험로트에 대한 샘플링된 시료에 대한 기능시험으로 포구속도를 측정하였다. 측정된 값을 저장기간별로 분류하였으며 양산수락시험 당시의 포구속도의 평균 값을 알기 어렵기 때문에 기준 포구속도값에서의 저하량을 계산하였다. 실제로 155mm K676 추진장약 33개 로트의 양산수락시험에 관한 통계분석 결과 평균 928.4m/s로 기준값인 928.0m/s와 큰 차이가 없다^[5].

나. 분석방법

저장기간별 획득된 시험로트별 포구속도의 평균값으로부터 포구속도 저하량의 추세를 분석하였다. 상태고장으로 판단할 수 있는 포구속도 저하량 하한수준을 설정하였으며 포병탄용 추진장약인 155mm 추진장약 KM4A2의 저장기간별 포구속도 저하량에 대하여 저장수명을 예측하였다. 비선형 회귀분석으로 저장수명(storage life)으로 예측하였으며, 감마과정 모델을 이용한 확률론적 방법으로 저장수명을 수명분포(distribution of life)로 예측하였다.

다. 감마과정 모델

관측시점이나 위치에 따라 확률분포가 변하는 확률 현상을 모형화하기 위하여 이들을 매개변수로 하는 확률변수들의 모임을 확률과정(stochastic process)이라고 한다. 일반적으로 성능열화는 시간이 경과함에 따라 증가하며, 동일 기간의 열화량이라도 저장 조건 및 환경 등에 따라 불확실하므로 열화과정을 확률과정으로 보는 것이 적합하다^[6]. 확률과정 모델로는 마르코 프과정, 감마과정, 포아송과정이 있으며 Abdel-Hameed는 감마과정이 마모, 부식, 침식, 크리프와 같이 시간이 지남에 따라 누적되면서 점진적으로 손상을 입는 과정을 모델링하기에 가장 적합한 모형임을 처음으로

제안하였다^[7]. 감마과정 모델은 확률변수가 비음수(non-negative)인 독립증분이며 시간에 따라 척도모수($\beta = const$)는 일정한 값이며 형상모수($\lambda(t) > 0$)는 시간에 따라 증가하며 감마분포를 따른다. 즉, 단조롭게(monotonic) 한 방향으로만 증가하는 현상을 모형화하기에 적합하다. van Noortwijk과 Pandey^[8]는 형상모수와 척도모수를 추정하기 위하여 기존의 최우추정법보다 모멘트법의 계산식이 간단하고 계산도 쉽게 할 수 있음을 제시하였다. Pandey 등^[9]은 구조재의 열화에 관하여 기존의 랜덤변수 모델과 감마과정 모델을 비교하였으며 최적 교체주기를 설정하는 방법을 제시하였다. 감마과정 모델과 관련한 확률밀도함수(PDF), 평균, 분산, 변동계수(COV), 누적분포함수(CDF), 신뢰도 계산식은 Table 1과 같다. 여기서, 확률변수 $X(t)$ 는 포구속도의 저장기간에 따른 저하량이다.

Table 1. Equations for gamma process model

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

식 (1)과 식 (2)는 van Noortwijk과 Pandey^[8]이 제안한 모멘트법을 이용한 확률모수(\hat{c} , $\hat{\beta}$)의 추정식이다.

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

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

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

3. 저장수명 평가결과

가. 포구속도 저하 추세분석

박격포탄(81mm 고폭탄 KM374, 기준 : 264.0m/s, 최대 허용 표준편차 : 2.00m/s)과 포병탄용 추진장약(155 mm 추진장약 KM4A2, 기준 : 563.9m/s, 최대 허용 표준편차 : 1.51m/s)에 관한 저장기간별 포구속도 저하 추세는 각각 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 포구속도의 평균 값은 저장기간에 따라 박격포탄은 약 28년, 포병탄용 추진장약은 36년까지 큰 차이를 보이지 않다가 저하율이 증가한다.

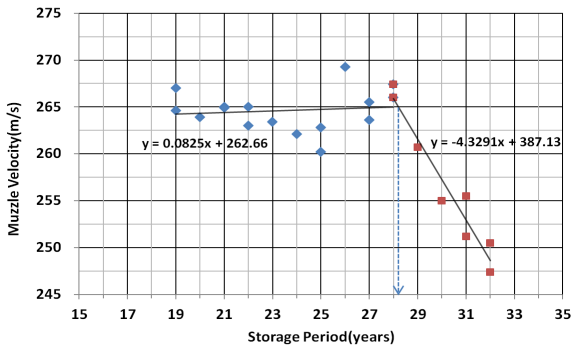


Fig. 3. Trend of M.V. for mortar munition

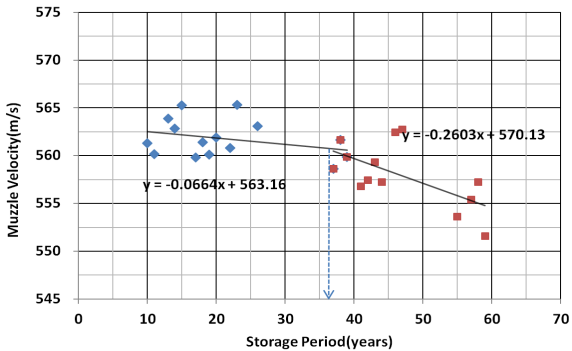


Fig. 4. Trend of M.V. for artillery propelling charge

함포탄(76mm 고폭탄 K243, 기준 : 910.0m/s, 최대 허용 표준편차 : 4.57m/s)은 Fig. 5와 같이 지속적인 저하 경향을 보이고 있다. 박격포탄 및 포병탄용 추진장약의 포구속도 저하경향과 비교해볼 때 함포탄의 포구속도 저하시점이 12년 이전으로 상대적으로 빠른 것으로 판단된다.

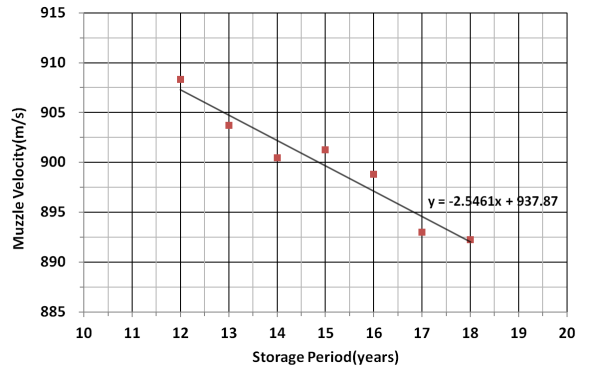


Fig. 5. Trend of M.V. for naval gun munition

나. 비선형 회귀분석 결과

Fig. 6은 155mm 추진장약 KM4A2의 저장기간별 포구속도의 저하 추세이다. 1952년~1999년 생산된 25개 로트에 대한 기능시험시 측정한 포구속도 측정결과와 로트별 평균값이다. 저장기간과 포구속도와와의 관계식을 구하기 위하여 식 (3)의 1차 지수감소모델(First-order Exponential Decay Model)에 대하여 비선형 회귀 분석을 실시하였으며 Table 2의 결과를 얻었다.

$$y = A_1 * \exp(-x/t_1) + y_0 \quad (3)$$

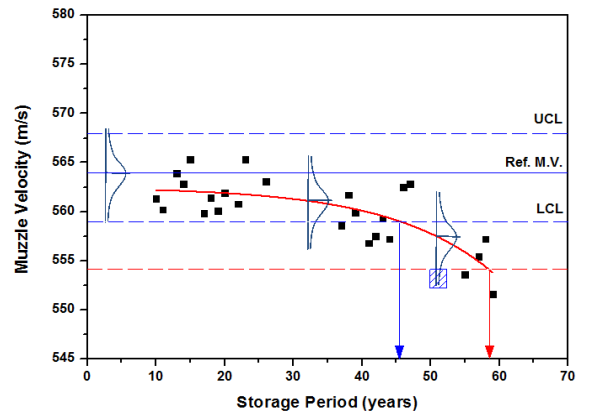


Fig. 6. Decrease of M.V. as storage time

Table 2. Results of nonlinear regression analysis

Parameters	Results	Standard Errors
y_0	562.53061	1.24104
A_1	-0.16503	0.33026
t_1	-14.87351	7.35362

다. 상태고장 판단기준 설정

장기저장에 따른 포구속도의 저하량과 관련하여 상태고장으로 판단하는 하한치 규정은 이제까지 없다. 본 논문에서는 관리도(control chart)의 3σ법 개념을 도입하여 고장판단 기준을 설정하고자 한다. 공정의 상태를 나타내는 특성치에 관한 그래프인 관리도는 한 개의 중심선과 두 개의 관리한계선에 의하여 관리상태에 있는지 여부를 판단한다. 일반적으로 3σ법에 의하여 관리한계선을 선택하는데 관리한계선을 어떤 통계량의 표준편차의 3배에 해당하는 폭으로 잡는다.

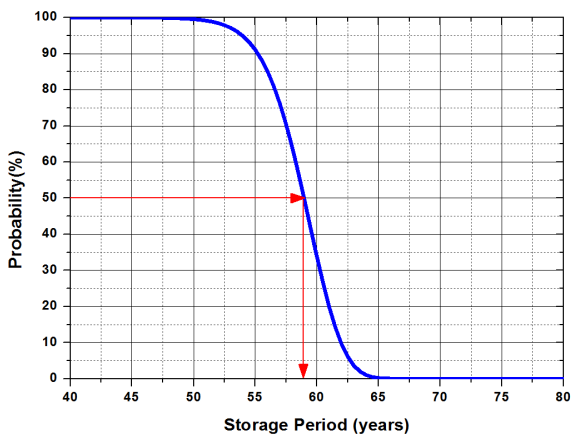


Fig. 7. Decrease of reliability as storage time

Fig. 6에서 155mm 추진장약 KM4A2 7호장약의 기준 포구속도인 563.9m/s를 중심선(Ref. M.V.)으로 최대 허용 표준편차(σ)인 1.51m/s의 3배에 해당하는 상한과 하한은 각각 UCL과 LCL이다. 이때 하한 관리한계선은 558.4m/s에 해당하며 비선형 회귀분석식과 만나는 점인 저장수명은 식 (3)에서 $y = 558.4$ 일 때 $x = 48.0$ 년으로 예측할 수 있다. 하지만 포구속도는 저장기간이 경과함에 따라 한방향으로 저하되는 것이 일반적이므로 기준 포구속도를 상한 관리한계선으로 정하고 최대 허용 표준편차의 6배(553.8m/s)를 성능과 관련된

고장기준인 하한 관리한계선으로 정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. Fig. 6에서 비선형 회귀분석식과 고장기준인 하한 관리한계선이 만나는 점인 저장수명은 식 (3)에서 $y = 553.8$ 일 때 $x = 59.0$ 년으로 예측할 수 있다.

Fig. 7은 포구속도의 평균이 Fig. 6의 비선형 회귀식 상에서 저장기간에 따라 저하하고 표준편차가 최대 허용값인 1.51m/s인 정규분포를 따를 때 임계 하한수준인 553.8m/s보다 낮을 확률(신뢰도)을 보여준다. 신뢰도 50%는 누적고장률 50%로 B_{50} 수명에 해당한다. 실용적 관점에서 B_{50} 수명을 평균수명으로 사용하는 것이 적절하며^[10] Fig. 7에서 59년이다.

라. 감마과정 모델에 의한 저장수명

비선형 회귀분석에 의한 결정론적 저장수명 예측방법은 외부 스트레스(온도, 습도 등) 및 내부 저항력(화학적 변화에 의한 물성변화 등)의 변동을 고려하지 않았기 때문에 현실과 다르다. 155mm 추진장약 KM4A2 7호장약의 저장기간별 포구속도 저하량에 관하여 확률과정 모델인 감마과정 모델을 적용하여 저장수명을 예측하였다. Fig. 8은 저장기간별 포구속도 저하량의 확률밀도함수 곡선이다. 일반적으로 시간함수인 형상모수는 $\lambda(t) = ct^b$ 와 같이 멱함수로 표현되는데 계산의 편의상 $b = 1.0$ 인 정상감마과정(Stationary Gamma Process)으로 보았다. 모멘트법을 이용하여 식 (1)과 식 (2)로부터 형상모수의 c 값과 척도모수 β 값이 각각 $\hat{c} = 0.4313$, $\hat{\beta} = 2.5196$ 로 추산되었다. 추산된 형상모수와 척도모수를 Table 1의 각 식에 적용하면 Fig. 8~ Fig. 10을 얻을 수 있다.

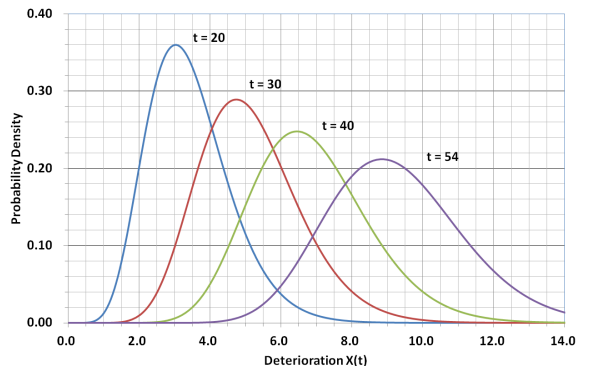


Fig. 8. PDF curve for muzzle velocity decrease as storage time

Fig. 8은 저장기간별 포구속도 저하량의 확률밀도함수(PDF) 곡선이다. 저장기간이 각각 20년, 30년, 40년 그리고 54년일 때 포구속도 저하량($X(t)$)의 상태분포를 설명하고 있다. 즉, 저장기간 $t = 40$ 년일 때 포구속도 저하량은 3.0m/s에서 12.0m/s로 분포하며 6.5m/s만큼 저하될 확률이 가장 크다. 동일한 저장기간이라도 상태(포구속도 저하량)분포를 이루고 있음을 확률분포 곡선으로 볼 수 있으며 저장기간이 경과할수록 저하량이 커지고 분포곡선의 폭이 넓어진다.

Table 3은 저장기간이 각각 20년, 30년, 40년 그리고 54년일 때 포구속도 저하량($X(t)$)의 평균, 분산 그리고 변동계수이다. 분산대 평균비(RVA)는 척도모수(β)의 역수로 저장기간에 관계없이 일정하다.

Table 3. Statistics of decrease of M.V. as storage time

	20years	30years	40years	54years
Average	3.4237	5.1356	6.8475	9.2441
Variance	1.3588	2.0383	2.7177	3.6689
COV	0.3405	0.2780	0.2408	0.2072
RVA	0.3969	0.3969	0.3969	0.3969

Fig. 9는 저장기간에 따른 누적분포함수(CDF)와 신뢰도 곡선이다. 신뢰도 50%는 누적고장률 50%로 B_{50} 수명에 해당하며 Fig. 9에서 54년이다.

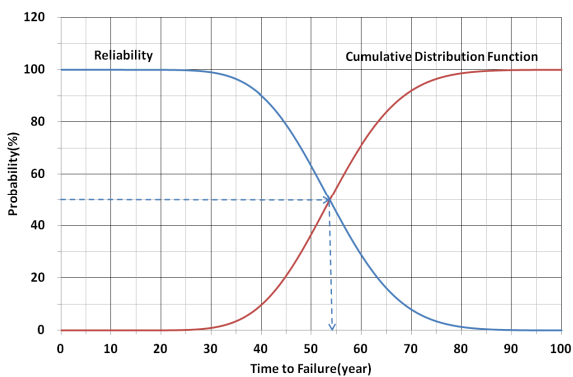


Fig. 9. CDF($F_T(t)$) and reliability($R(t)$) curve as storage time

Fig. 10은 저장수명의 확률밀도함수 곡선이다. 저장기간별 포구속도 저하량이 본 논문에서 상태고장 수

준으로 설정한 하한 관리한계선 이하로 저하될 확률 분포곡선이다. 저장기간 54년에 상태고장 수준으로 저하될 확률이 가장 크며 약 30년 이후 부터 상태저하 증가가 커짐을 알 수 있다.

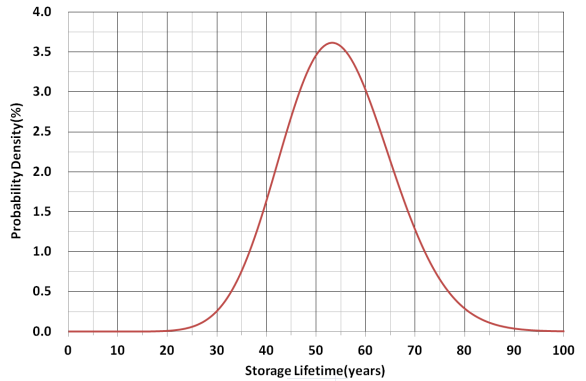


Fig. 10. PDF curve for life distribution

4. 결론

저장기간에 따른 포구속도의 저하율은 박격포탄은 약 28년, 포병탄용 추진장약은 약 36년 이후 급격히 증가하는 경향을 가지고 있는 것으로 보인다. 저장기간과 포구속도의 관계는 1차 지수감소 모델에 의한 비선형 회귀식으로 표현할 수 있다. 포구속도의 저하량을 상태고장으로 간주할 수 있는 하한수준은 포구속도의 기준값에서 규격서에서 허용하는 최대 표준편차의 6배만큼 차이값이 적절할 것으로 판단된다. 감마과정 모델을 이용하여 포구속도 저하량에 관한 상태분포와 수명분포를 확률분포곡선으로 표현할 수 있다. 비선형 회귀분석 및 감마과정 모델을 적용한 수명예측 방법을 155mm 추진장약 KM4A2의 예로 설명하였다.

References

[1] 장현정, 손영갑, “미소한 신뢰도 감소율을 가지는 원샷 시스템의 가부반응 데이터를 이용한 저장 신뢰도 추정방법 개발”, 대한기계학회논문집 A권, 제35권, 제10호, pp. 1291~1298, 2011.
 [2] 서완석, “저장탄약 시험절차서 작성을 위한 연구”,

- DSTC-519-93750(ADD TR), pp. 19~33, 1993.
- [3] 기술표준원, “신뢰성용어 해설서,” pp. 10-14, 2003.
- [4] 박성호, 김재훈, “감마과정 모델을 이용한 KM6 추진제의 저장수명 예측”, 한국추진공학회지, 제16권, 제4호, pp. 33~41, 2012.
- [5] 박성호, 박노석, 최병두, 김재훈, “155mm 추진장약 포구속도의 확률분포 특성 연구”, 한국추진공학회 추계학술대회, pp. 1~4, 2009.
- [6] 권영일, 김승진, “건설자재의 사용수명 예측모형에 관한 연구”, 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계 공동학술대회, pp. 640~644, 2007.
- [7] Abdel-Hameed, M., “A Gamma Wear Process”, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 24, No. 2, pp. 152~153, 1975.
- [8] J. M. van Noortwijk and M. D. Pandey, “A Stochastic Deterioration Process for Time-Dependent Reliability Analysis”, Proceedings of the 11th IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization Structural Systems, pp. 259~265, 2004.
- [9] M. D. Pandey, X.-X. Yuan, and J. M. van Noortwijk, “Gamma Process Model for Reliability Analysis and Replacement of Aging Structural Components”, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), pp. 2439~2444, 2005.
- [10] 박태근, 이영주, 정희석, 김정수, 김진선, 천석희, “고압방전램프의 신뢰도 모형과 분석”, 한국경영과학회 춘계학술대회, pp. 665~668, 2005.