

확률과정론을 이용한 추진장약의 성능과 저장안전성에 관한 저장신뢰성평가

박성호* · 김재훈**†

* 국방과학연구소 종합시험본부

** 충남대학교 기계설계공학과

The Stockpile Reliability of Propelling Charge for Performance and Storage Safety using Stochastic Process

Sung-Ho Park* · Jae-Hoon, Kim**†

* Defense Systems Test Center, Agency for Defense Development

** Department of Mechanical Design Engineering, Choongnam National University

Abstract

Purpose: This paper presents a method to evaluate the stockpile reliability of propelling charge for performance and storage safety with storage time.

Methods: We consider a performance failure level is the amount of muzzle velocity drop which is the maximum allowed standard deviation multiplied by 6. The lifetime for performance is estimated by non-linear regression analysis. The state failure level is assumed that the content of stabilizer is below 0.2%. Because the degradation of stabilizer with storage time has both distribution of state and distribution of lifetime, it must be evaluated by stochastic process method such as gamma process.

Results: It is estimated that the lifetime for performance is 59 years. The state distribution at each storage time can be shown from probability density function of degradation. It is estimated that the average lifetime as B_{50} life is 33 years from cumulative failure distribution function curve.

Conclusion: The lifetime for storage safety is shorter than for performance and we must consider both the lifetime for storage safety and the lifetime performance because of variation of degradation rate.

Key Words : Performance, Storage Safety, Degradation, Gamma Process, Stockpile Reliability

• Received 9 October 2012, revised 10 February 2013, accepted 27 February 2013

† Corresponding Author(kimjhoon@cnu.ac.kr)

© 2013, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

추진장약(propelling charge)은 화포에 장전된 탄두를 추진체의 연소 시 발생하는 고압가스로 의도된 위치에 도달하도록 고안된 화공품이다. 추진제(propellant)는 고정식 또는 반고정식 탄약의 경우 금속약협(또는 소진용기)에 그대로 충전되거나 섬유질 약포에 충전되어 금속약협 내에 결합되며, 분리장전식 탄약의 경우 섬유질 약포 또는 소진용기에 충전되어 철제용기에 보관된다. 즉, 연소가 가능한 약포 또는 소진용기에 추진체를 충전하고 사거리 조절이 가능하도록 호수별로 구분하여 패키지화한 형태가 추진장약이다. 신뢰성(reliability)은 아이템이 주어진 기간 동안 주어진 조건에서 요구기능을 수행할 수 있는 가능성을 의미하며, 아이템이 요구기능을 만족하지 못하게 되는 사건을 고장(failure)으로 정의한다(신뢰성용어 해설서, 2003). 또한, 고장이 발생할 때까지의 기간을 고장기간 또는 수명(lifetime)이라고 한다. 일반적으로 기계, 전기, 전자부품의 신뢰성평가는 요구된 기능을 발휘하지 못하는 구조적 고장(structural failure)을 다루나 플라스틱, 도료 등과 같은 화공품 및 금속 등 소재의 경우 고유물성이나 성능이 특정수준 이하로 저하되는 상태 고장(condition failure)으로 평가한다. 화포추진체는 용기에 충전되어 보관, 운용되어 1회 사용으로 소멸되는 특징이 있으며 보관, 운용시간의 경과에 따라 성능 또는 안전성과 관련된 상태변수가 특정수준 이하로 열화되는 상태 고장이 신뢰성평가의 기준이다. 김재한(1967)은 구조적 고장과 관련한 수명을 절대수명으로, 상태 고장과 관련된 수명을 기술수명으로 구분하였다.

추진장약은 로트(LOT) 단위로 생산되어 저장, 운용되며 저장탄약신뢰성평가(ASRP, Ammunition Stockpile Reliability Program) 계획에 따라 저장신뢰성을 평가하며 로트 단위로 샘플링한 시료에 대하여 기능시험과 비기능 시험을 수행한다. 기능시험 계획에 따라 사격시험 시 측정된 포구속도의 저하정도에 따라 등급곡선(grading curve)을 적용하여 성능(performance)을 평가하며, 비기능시험 계획에 따라 추진체의 잔류 안정도 함량에 의한 안전성 검사와 추진장약 용기부식, 약포상태 등 육안검사에 의하여 상태(condition)를 평가한다. 즉, 추진장약의 성능과 안전성 측면을 함께 고려하여 저장신뢰성이 평가되어야 한다. 최근에는 기존의 로트별 평가에서 품목별 평가로의 전환도 검토되고 있다(윤근식 외, 2012). 이종찬 외(2007)와 조기홍과 김의용(2010)은 단기추진체에 대한 가속노화시험과 저장분석시험 자료의 단순회귀분석으로 저장수명을 예측하였다. 가속노화시험 결과는 STANAG 4527 규격의 0차 및 1차 반응모델을 사용하였으며 저장수명 예측을 위하여 Arrhenius식과 Berthelot식을 적용하였다. 이정우 외(2011)는 안정제 함량 변화에 따른 시계열분석으로 저장수명을 예측하였다. Ljiljana(2010)는 Serbian 규격과 NATO 규격(STANAG 4527 및 AOP-48 Ed.2)을 이용하여 저장기간에 따른 복기추진체의 안정제 함량 저하에 관한 저장수명을 예측하였다. 국내외에서 수행된 기존의 연구들은 대부분 안정제 함량의 저하에 관한 수명예측에 주목하고 있으며 추진장약의 성능과 관련된 포구속도 저하에 관한 수명예측 연구는 전무한 것으로 보인다. 또한, 국내에서 연구된 가속노화시험에 의한 수명예측 모델은 대부분 STANAG 4527 모델을 적용하고 있어서 AOP-48 Ed.2의 적용도 고려되어야 한다. 게다가 국내외에서 저장탄약의 수명예측과 관련된 대부분의 연구는 예정된 노화경로에 의한 결정론적 수명예측 방법으로 저장기간별 상태분포와 상태수준별 수명분포를 설명할 수 없다.

본 논문은 국내에 저장된 155mm 추진장약(DODIC : (K)D541)을 대상으로 ASRP 사업수행으로 얻어진 자료로부터 저장기간별 추진장약의 포구속도 변화 및 추진체의 안정제 함량의 변화에 의한 신뢰성평가 방법을 다루고 있다. 추진장약의 성능과 안전도의 저하는 저장수명과 관련되어 있으며 비선형 회귀분석 방법과 확률과정론(stochastic process)을 이용하여 상태분포와 수명분포를 확률분포로 설명하였다.

2. 신뢰성평가 방법

2.1 추진장약의 구조와 성능평가

화포용 추진장약인 (K)D541는 <Figure 1>과 같이 기본장약(3호)과 각기 크기가 다른 4개의 증가장약(4~7호)로 구성되어 있으며 점화패드와 섬광감소제가 같이 결합되어 있다. 발사 시 기본장약의 바닥에 결합되어 있는 점화패드의 무연점화제가 뇌관에 의하여 점화되고 그 화염에 의하여 추진제가 점화되어 연소된다. 추진제 연소로 발생하는 고압가스는 포강내 압력을 증가시켜 탄두를 추진한다. 기본장약의 위쪽에 결합된 섬광감소제(K_2SO_4)는 포구 섬광, 과압 폭발 및 포구 후미의 화염을 감소시킨다(TM 43-001-28, 1994).

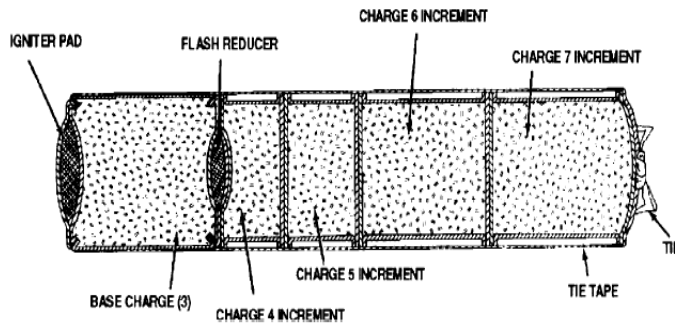


Figure 1. Configuration of propelling charge

M.A Guelta, et al(2006)의 보고서에 의하면 추진장약 (K)D541의 추진제는 NC(Nitrocellulose)가 주원료인 (K)M1으로 총중량의 84.0%이며, 가소제인 Dinitrotoluene이 9.0%, Dibutylphthalate가 5.0%, 안정제인 DPA(Diphenylamine)가 1.0% 그리고 Lead carbonate이 1%의 조성으로 이루어져 있다. 성능평가를 위하여 1952년~1999년간 국내 및 외국에서 생산된 시험대상 로트에 대하여 1999년~2010년의 기간 중 6년간 수행된 ASRP 기능 시험 수행결과로부터 로트별 저장기간을 연단위로 계산하였다. 최대사거리를 얻을 수 있는 7호장약에 대한 포구속도의 평균값을 정리하였으며 기준 포구속도는 563.9m/s이다. 저장기간과 포구속도와의 관계식은 통계계산 S/W인 Origin ver. 8을 이용하여 회귀분석으로 구하였다.

2.2. 가속노화시험에 의한 저장수명 예측

NC기반 추진제는 저장단계에 있어서 열분해반응을 일으켜 질소화합물을 생성하는 자동촉매반응을 한다. 이때 추진제의 온도가 상승하고 추진제의 자연발화를 유발할 수 있다. 또한, 가수분해반응으로 질소화합물과 질산이 생성되며 이 때 발생하는 온도의 증가는 열분해 반응으로 이어져 분해반응을 더욱 촉진시킨다. 추진제의 자동촉매반응을 억제하기 위하여 NC보다 질소화합물과 훨씬 친화력이 큰 안정제(stabilizer)를 추진제에 첨가하는데 단기추진제의 경우 DPA가 주로 사용된다. DPA는 NC의 분해에 의하여 생성된 질소화합물과 반응하여 다양한 DPA 유도체를 생성하므로 시간의 경과에 따라 함량이 감소하게 된다. 본 연구에서 다루고 있는 추진장약은 (K)M1 추진제가 충전되며 $1.0 \pm 0.3\%$ 의 DPA가 안정제로 첨가된다. 안정제 함량의 감소는 자연발화로 이어질 수 있기 때문에 저장안전성을 판

단하기 위한 기준으로 사용된다. 미육군 보급회보 SB 742-1300-94-895(1998)의 추진제 안정제 프로그램(PSP)에 따르면 추진제 안정제 함량에 따라 A, C, D의 3개 카테고리로 나누어 0.20% 미만인 D등급에 해당할 경우 60일 이내에 해당 로트를 폐기하도록 규정하고 있다.

서순근 외(2011)의 저서에 따르면 가속수명시험은 시험기간을 단축하기 위한 목적으로 정상적인 사용환경보다 가혹한 조건을 부가하여 고장을 조기에 유발시키는 시험으로 적절한 모형의 선택이 중요하다. 가속수명시험은 정성적, 정량적 시험으로 구분되며 정량적 시험은 사용조건에서의 수명추정이 목적이다. 수명-스트레스 관계식을 이용하는 것이 특징이며 일정형 스트레스 시험법을 사용하고 시험대상은 주로 부품류이다. 예기된 고장모드에 대하여 가속모형을 토대로 외삽에 의하여 사용조건하에서의 수명을 추정한다. 추진제 안정제의 가속수명시험은 정량적 가속수명시험이며 정상 사용조건에서의 수명을 예측하기 위하여 고온에서 가속시간에 대한 안정제 함량의 저하율을 측정한다. 고온 환경에서 추진제 안정제 함량의 시간에 따른 저하율은 반응속도상수(k)로 표현되며 온도에 관한 함수로 저하 경향에 따라 <Table 1>과 같이 나토(NATO) 국방표준국에서 작성한 표준규격서 STANAG 4527(2004)의 동적모델(kinematic model)이 적용되어 왔으며 최근에는 AOP-48 Ed. 2(2008)도 적용되고 있다. $C_s(0)$ 는 초기 안정제 함량(단위 : %), $C_s(t, T)$ 는 경과시간 및 온도 함수로서의 안정제 함량(단위 : %), $k_n(T)$ 는 가속온도 T (단위 : °K)에서 n 차 안정제 함량 감소 반응속도상수(단위 : 1/day)이며 t 는 가속시간(단위 : days)이다. Y_s 는 가속온도 T 일 때 가속시간 t 에서의 안정제 함량 감소율이며 $Y_s = C_s(t, T)/C_s(0)$ 과 같이 표현된다.

Table 1. Kinetic models of the stabilizer consumption and the life-time prediction

Kinetic models	Order	Equations of kinetic model	Life-time prediction
STANAG 4527	1st	$\ln \frac{C_s(0)}{C_s(t, T)} = k_1(T)t$	$t_{YS}(T) = \frac{1}{k_1(T)365} \ln \left(\frac{1}{Y_s} \right)$
	0th	$C_s(t, T) = C_s(0) - k_0(T)t$	$t_{YS}(T) = \frac{C_s(0)(1 - Y_s)}{k_0(T)365}$
AOP-48, Ed. 2	nth	$C_s(t, T) = C_s(0)[1 - (1 - n)k_n(T)t]^{(1/1-n)}$	$t_{YS}(T) = \frac{1 - (Y_s)^{1-n}}{k(1 - n)365}$

STANAG 4527 0차 모델은 가속시간(t)에 대하여 안정제의 감소량($C_s(0) - C_s(t, T)$)이 선형으로 변화하는 모델이며, 1차 모델은 가속시간(t)에 대하여 안정제의 대수감소율($\ln(C_s(0)/C_s(t, T))$)이 선형으로 변화하는 모델이다. 가속시간과 안정제 감소량의 관계를 가장 잘 표현할 수 있는 동적모델을 선택하여야 하며 회귀분석시 결정계수(R^2) 값이 클수록 해당 동적모델에 적합하다. 적합한 동적모델을 선택하여 각각의 고온조건에서 반응속도상수 값을 계산한 후 온도와 반응속도상수의 관계식으로부터 정상 온도에서의 반응속도상수를 구하여 저장수명을 예측할 수 있다. 일반적으로 식 (1)의 Arrhenius 모형이 이용되며 각 온도에 따른 반응속도상수 k 에 대하여 $1/T$ 를 가로축에, $\ln k$ 를 세로축에 도시하면 식 (2)의 Arrhenius식을 얻을 수 있다. 반면에 T 를 가로축에 $\ln k$ 를 세로축에 도시하면 식 (3)의 Berthelot식을 얻을 수 있다. 여기서, A 는 전지수인자(pre-exponential factor), E_a 는 활성화에너지(cal/mol), R 은 기체상수(1.987 cal/mol K) 그리고 T 는 절대온도(K)이다.

$$k_A = A_n \cdot \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \tag{1}$$

$$\ln k = \ln A - E_a/RT \tag{2}$$

$$\ln k = \ln A \cdot T - E_a/R \tag{3}$$

<Figure 2>는 시간에 따른 상태의 변화를 보여주는 열화모델로 가로축은 경과시간(저장시간), 세로축은 시간에 따라 변화하는 상태(추진제 안정제 함량)이다. 경로 $p_1 \sim p_3$ 은 시간에 따라 선형으로 열화하는 선형열화모델에 해당하며 s 는 고장으로 판단할 수 있는 임계수준, t_i 는 경과시간(검사시점)이다. 열화량이 임계수준 s 를 통과하여 상태 고장이 발생하는 시간 t 가 수명이며 ρ 는 설계여유에 해당한다. 결정론적 열화모델에 의한 수명은 $t = (r_0 - s)/A$ 로 구할 수 있으며 A 는 열화율이다. 즉, 경로 p_1 으로 열화할 때 검사시점 t_i 에서의 상태 확인만으로 잔여수명을 확정적으로 알 수 있다. 여기서, A 는 단위 저장기간당 상태의 변화율을 의미하며 안정제 함량의 저하율로 직선으로 표현된 각 열화경로의 기울기이다. r_0 는 초기 저항력 즉, 양산시 초기 안정제 함량을 의미하며 s 는 고장 수준으로 잔류 안정제 함량 0.20%에 해당한다. 따라서, 열화율 A 만 실험적으로 구하면 저장수명이 확정되며 로트에 따른 제품특성 차이와 환경차이로 인한 스트레스 수준 차이 등의 원인으로 열화율이 달라지므로 열화경로는 p_2 또는 p_3 가 될 수 있다. 반면에 안정제 함량의 시간에 따른 열화량을 실시간으로 측정하는 것은 불가능하므로 열화경로는 p_4 와 같이 관측된다. 즉, 실제로는 상태열화가 열화경로 p_3 의 열화율 A 로 점진적으로 진행되었지만 다음 검사시점까지 현재의 측정상태가 유지되고 있는 것이다. 또한, 검사시점 t_i 이전에 열화경로 p_3 의 열화율을 따르더라도 온도 또는 습도와 같은 환경변화에 의한 열화율 변동으로 검사시점 t_i 이후부터 열화경로 p_1 또는 p_2 의 열화율을 따를 수 있으므로 저장수명은 확정적이지 않다. 즉, 미래시점에서의 상태는 과거시점에서의 상태와 무관하게(독립적) 현재시점에서의 상태에만 의존한다. 다시 말하면 열화경로와 상관없이 미래의 상태에 의해 결정되는 수명은 현재의 상태에만 의존하는 마르코프 성질을 가지며 열화경로의 불확실성(uncertainty)은 확률론적 접근방법이 필요함을 의미한다.

<Figure 3>은 MIL-STD-286의 방법으로 측정된 저장기간별 잔류 안정제 함량으로 <Figure 2>에 도시한 상태 분포와 수명분포를 확인할 수 있다. 예를 들면, 저장기간이 15년일 때 상태(안정제 함량)수준은 약 0.5%에서 0.9%의 범위로 분포되어 있고, 상태수준 0.4%가 되는 저장기간은 약 17년에서 26년의 범위로 분포되어 있으며 상태수준 0.2%가 되는 저장기간도 분포를 이룰 것이다. 즉, 동일한 저장기간이라도 상태분포를 가지며 동일한 상태라도 수명 분포를 가진다.

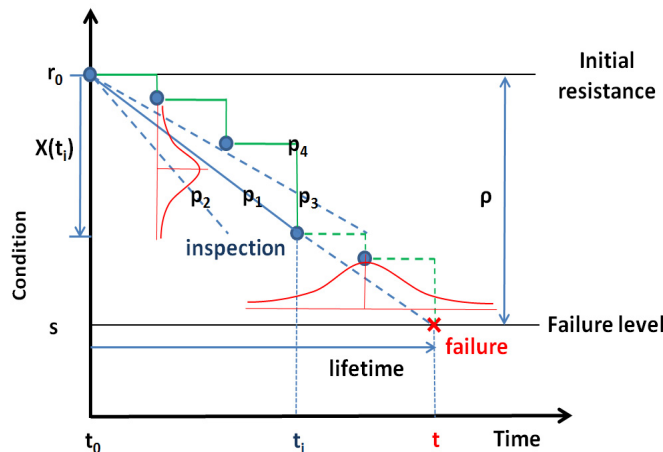


Figure 2. Degradation paths and distribution of condition & lifetime

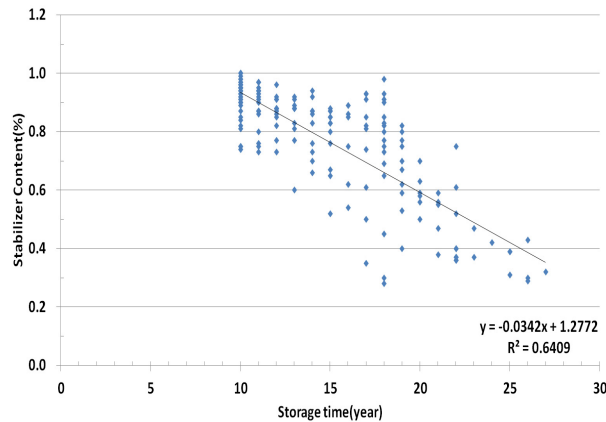


Figure 3. Content of stabilizer with storage time

2.3. 감마과정론에 의한 저장수명 예측

육군 탄약은 대개 지상형 탄약고 및 이글루형 탄약고에 저장되고 있다. 이종찬 외(2007)의 연구에 의하면 지상형 탄약고는 습기발생 억제에 장점이 있으나 일정온도 유지가 곤란하여 저장온도 차이의 범위가 크다. 반면에 이글루형 탄약고는 낮은 온도로 일정한 유지가 가능하나 결로 발생의 문제점이 있다. 4계절이 구분된 한국의 기후 특성상 저장된 탄약은 탄약고 형태, 계절, 일교차, 운영 및 보관위치에 따라 온도와 습도의 영향을 일정하게 받지 않기 때문에 가속노화시험으로 예측된 저장수명이 실제와 차이를 보인다. 이는 안정제 함량 감소율이 온도와 습도에 큰 영향을 받기 때문이다. 따라서, <Figure 3>과 같이 선형회귀분석으로 저장수명을 예측할 경우 추계적(stochastic)으로 변동하는 불확실성이 고려되지 않아 상태분포 및 수명분포를 표현할 수 없기 때문에 확률과정론(stochastic process)의 방법을 적용하여 확률분포로 설명되어야 한다. 추진제 안정제 함량의 저장시간에 따른 감소과정은 확률과정론인 마르코프 과정의 일종인 감마과정(gamma process)으로 잘 설명될 수 있다. 감마과정은 연속시간 확률과정으로 시간 t 에서의 누적열화량 $X(t)$ 에 대하여 다음과 같은 특성을 가진다. 여기서, $Ga(\lambda(t_2) - \lambda(t_1), \beta)$ 는 형상모수가 $\lambda(t_2) - \lambda(t_1)$ 이고 척도모수가 β 인 감마분포의 확률밀도함수이다. 즉, 시간 $t_2 > t_1 \geq 0$ 에서 열화량의 증분 $X(t_2) - X(t_1)$ 는 형상모수가 $\lambda(t_2) - \lambda(t_1)$ 이고 척도모수가 β 인 감마분포를 따른다.

- $X(0) = 0$ 이며 확률값은 1이다.
- $X(t_2) - X(t_1) \sim Ga(\lambda(t_2) - \lambda(t_1), \beta)$, $t_2 > t_1 \geq 0$
- $X(t)$ 는 독립증분을 가진다.

<Figure 4>는 척도모수(β) 값을 1.5로 고정하고 형상모수(λ) 값을 0.5~3.0으로 변화시켰을 때 감마분포의 확률밀도함수 곡선이다. 일반적으로 제품의 고장률은 시간이 지남에 따라 증가하며 감마분포의 형상모수가 1이상이면 고장률이 증가하는 IFR형에 해당한다. 감마과정은 척도모수(β)는 변화하지 않고 형상모수가 시간에 따라 증가($\lambda(t_2) - \lambda(t_1)$, $t_2 > t_1 \geq 0$)하므로 시간경과에 따른 고장률 증가의 표현에 적절하다. 감마과정에서 시간에 대한 열화량은 비감소형이며 연속적이고 실수인 함수는 어떠한 형태도 허용되나 일반적으로 $\lambda(t) = ct^b$ ($b > 0, c > 0$)로 표현한다. b 값은 대상물질의 열화특성에 따라 다양한 값을 가질 수 있으며 $b=1$ 일 때 시간증분에 따른 열화량이 일정한 정상감마과정(stationary gamma process)이다.

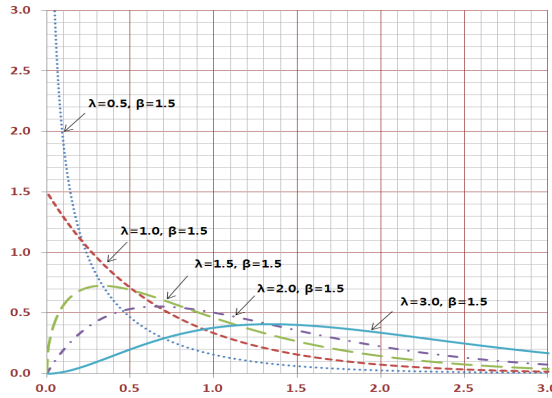


Figure 4. Probability density function curves for gamma distribution at various parameters

누적열화량에 대한 감마과정의 확률밀도함수(pdf)는 식 (4)와 같다. 여기서, $\lambda(t) > 0$ 는 시간의 함수인 형상모수이며 $\beta = const$ 는 척도모수이다. 시간 t 에서 누적열화량의 평균($\mu_{X(t)}$), 분산($\sigma_{X(t)}^2$) 및 변동계수($\nu_{X(t)}$)는 식 (5)와 같다. 수명은 식 (6)과 같이 저장시간에 대한 누적분포함수(cdf)로 표현되며 시간구간 $[0, t]$ 동안 고장날 확률을 의미한다. 여기서, $GA[\rho|\lambda(t), \beta]$ 는 형상모수가 $\lambda(t)$ 이고 척도모수가 β 인 감마분포의 누적분포함수를 의미한다. 특정 시점에서의 신뢰도는 시스템 혹은 부품이 작동을 시작하여 그 시점까지 고장나지 않고 여전히 작동하고 있을 확률이며 식 (7)로 표현된다. 시간구간 $[0, t]$ 동안 고장나지 않을 확률로 생존함수라고도 부른다.

$$f_{X(t)}(x) = \frac{\beta^{\lambda(t)}}{\Gamma(\lambda(t))} x^{\lambda(t)-1} e^{-\beta x} = Ga(x|\lambda(t), \beta) \tag{4}$$

$$\mu_{X(t)} = \frac{\lambda(t)}{\beta}, \quad \sigma_{X(t)}^2 = \frac{\lambda(t)}{\beta^2}, \quad \nu_{X(t)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda(t)}} \tag{5}$$

$$F_T(t) = P[X(t) > \rho] = 1 - P[X(t) < \rho] = 1 - GA[\rho|\lambda(t), \beta] \tag{6}$$

$$R(t) = 1 - F_T(t) \tag{7}$$

식 (4) ~ 식 (7)을 계산하기 위하여 시간의 함수인 형상모수 $\lambda(t) = ct^b$ 와 척도모수 β 를 추정하여야 하며 일반적으로 최대우도법을 이용하지만 van Noortwijk, et al(2003)은 훨씬 수식적으로 간단한 모멘트법(moment method)을 제시하였다. 검사시점 $t_i, i = 1, \dots, n$ 에 해당하는 누적열화량 $x_i(x_1 = 0)$ 에서 형상모수 $\lambda(t)$ 의 c 값과 척도모수 β 의 추정값 $\hat{c}, \hat{\beta}$ 를 모멘트법을 이용하여 식 (8) 및 식 (9)로부터 구할 수 있다. 여기서, $\delta_i = x_i - x_{i-1}$ 이며 $w_i = t_i^b - t_{i-1}^b$ 이다.

$$\hat{c}/\hat{\beta} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \sum_{i=1}^n w_i = x_n / t_n^b = \bar{\delta} \tag{8}$$

$$\left(x_n / \hat{\beta} \right) \left(1 - \sum_{i=1}^n w_i^2 / \left[\sum_{i=1}^n w_i \right]^2 \right) = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta} w_i)^2 \tag{9}$$

3. 신뢰성평가 결과

3.1. 추진장약 성능평가

저장기간에 따른 포구속도는 <Figure 5>와 같이 비선형적으로 성능이 저하되며 식 (10)으로 표현되는 1차 지수 감소 모델(First-order Exponential Decay Model)의 비선형 회귀분석 모델로 경향을 분석하였다.

$$y = A_1 * \exp(-x/t_1) + y_0 \tag{10}$$

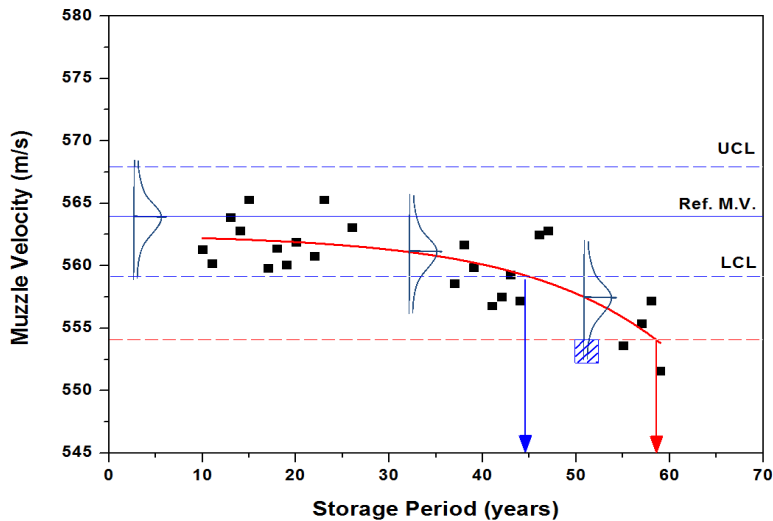


Figure 5. Decrease of muzzle velocity for storage time

장기저장에 따른 추진장약 성능의 저하량과 관련하여 신뢰도 개념에서 고장으로 판단할 하한치 규정은 없지만, 본 논문에서 관리도(control chart)의 3σ법 개념을 도입하여 성능저하 시기를 통계적으로 검증하였다. 관리도는 공정의 상태를 나타내는 특성치에 관한 그래프로 공정을 관리상태(안정상태)로 유지하기 위하여 또는 제조공정이 잘 관리된 상태에 있는가를 조사하기 위하여 사용된다. 관리도는 한 개의 중심선과 그 선의 상하에 두 개의 관리한계선을 그려 그 안에 있으면 관리상태에 있음을 의미한다. 일반적으로 3σ법에 의한 관리한계선을 채택하는데, 어떤 통계량의 표준편차의 3배에 해당하는 폭으로 잡는다. <Figure 5>에서 Ref. M.V.는 국방규격서에서 요구하는 7호 장약의 기준 포구속도(563.9m/s)를 의미한다. LCL은 기준 포구속도 값에서 국방규격에서 허용하는 최대 표준편차인 1.51m/s의 3배를 뺀 하한 관리한계치(559.37m/s)이고 UCL은 상한 관리한계치(568.43m/s)이다. 식 (10)으로 표현되는 비선형 회귀분석 결과는 <Table 2>와 같다. <Figure 5>에서 비선형 회귀식과 하한 관리한계치가 만나는 점의 가로축 값은 43.9년이다. 하지만 포구속도는 저장기간이 경과함에 따라 한방향으로 저하되는 것이 일반적이므로 기준 포구속도를 상한 관리한계선으로 정하고 최대 허용 표준편차의 6배인 553.8m/s를 성능과 관련된 고장기준인 하한 관리한계선으로 정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 즉, <Figure 5>에서 비선형 회귀분석식과 고장기준인 하한 관리한계선이 만나는 점인 저장수명은 식 (10)에서 $y = 553.8$ 일 때 $x = 59.0$ 년으로 예측되었다. 즉, 추진장약 성능에 대하여 신뢰도가 유지되는 기간인 저장수명이다.

Table 2. Result of non-linear regression analysis

Parameter	Result	Standard error
y_0	562.53061	1.24104
A_1	-0.16503	0.33026
t_1	-14.87351	7.35362

3.2. 가속노화시험에 의한 안전도평가

추진제의 저장안전도는 잔류 안정제 함량으로 평가하며 저장수명으로 간주되어 왔다. 저장기간에 따른 추진제의 잔류 안정제 함량 저하는 점진적으로 이루어지기 때문에 측정에 매우 오랜 시간이 소요된다. 따라서, 일반적으로 고온에서 가속노화시험을 통하여 얻은 저장기간과 안정제 함량 관계로부터 운용온도인 25℃에서 저장기간에 대한 안정제 함량 관계식을 도출하여 잔류 안정제 함량이 0.20% 미만으로 저하되는 시점을 저장수명으로 판단한다.

<Figure 6>은 70℃, 80℃, 90℃의 고온에서 수행된 가속노화시험 결과로부터 운용온도인 25℃에서 예측된 저장기간별 안정제 함량 저하 추세이다. 반응속도상수를 얻기 위한 동적 모델별로 큰 차이를 보이며, 동일한 동적 모델이라도 반응속도상수와 온도와의 관계를 얻기 위한 Arrhenius식(Arr)과 Berthelot식(Btl)간에 큰 차이가 있다.

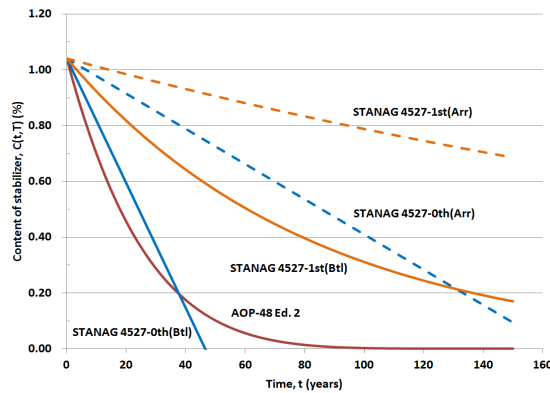


Figure 6. Content of stabilizer estimation curves at 25℃ for various kinetic models

<Table 3>은 동적모델별 가속노화시험 온도에서 노화시간에 따른 자료의 적합도를 보기 위한 결정계수(COD)이다. 3가지 동적모델에서의 결정계수를 비교해보면 AOP-48에서 자료의 결정계수가 가장 크다. 즉, AOP-48 Ed. 2 모델이 가속노화시험에서 가속시간에 따른 잔류 안정제 함량을 가장 잘 설명한다.

Table 3. COD for kinetic models at various temperatures

Kinetic models	70℃	80℃	90℃
STANAG(0th)	0.8529	0.9627	0.9886
STANAG(1st)	0.9418	0.9123	0.8117
AOP-48(nth)	0.9687	0.9918	0.9919

3.3. 확률과정론에 의한 안전도평가

육군 탄약사령부에서 자체 검사계획에 따라 선정하여 측정한 155mm 추진장약(K)D541 로트별 잔류 안정제 함량 측정 결과로부터 추계적 확률분포와 저장수명을 예측하였다. <Figure 7>은 저장기간별 안정제의 평균 감소량이며 상태변화가 시간에 대하여 선형($b=1$)인 정상감마과정으로 볼 수 있다. 식 (8)과 식 (9)로부터 $b=1$ 일 때 감마과정의 확률모수는 각각 $\hat{c}=0.3771$, $\hat{\beta}=14.9744$ 로 추산되었다. 형상모수 $\lambda(t)$ 와 척도모수 β 의 추정값으로부터 $b=1$ 일 때 저장기간 t 별 누적열화량의 확률밀도함수는 <Figure 8>과 같이 각 저장기간 t 별 상태분포 곡선이 된다.

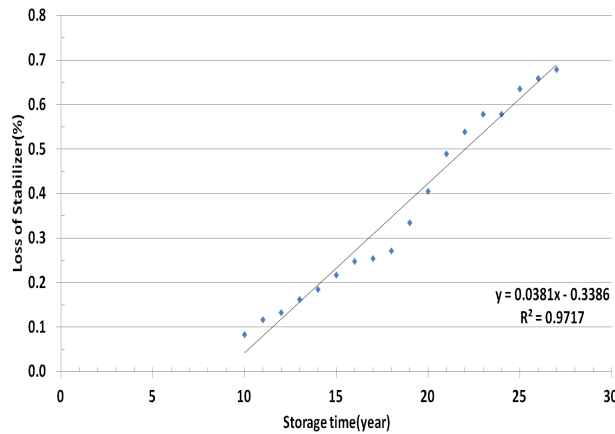


Figure 7. Decrease of average loss of stabilizer with storage time

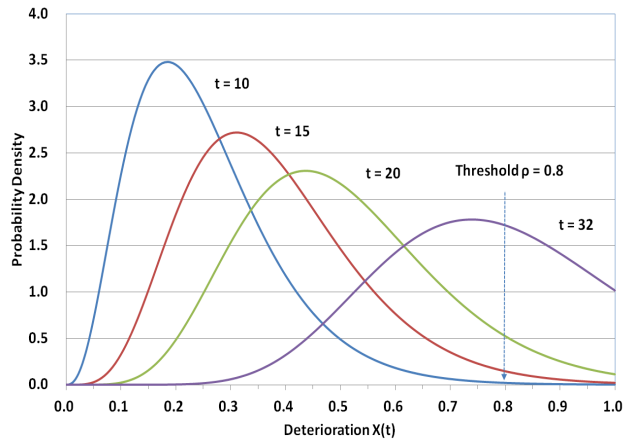


Figure 8. PDF curves for deterioration at various storage times

식 (5)에서 저장기간이 각각 $t = 10, 15, 20, 32$ 일 때 평균, 분산 및 변동계수(COV)는 <Table 4>와 같다. 시간 t 에 서 누적열화량의 평균은 $\mu_{X(t)} = \lambda(t)/\beta$ 이고 $\lambda(t) = ct^b$ 이므로 누적열화량의 평균이 고장을 의미하는 임계수준인 $\mu_{X(t)} = 0.8$ 이며 정상감마과정($b=1$)일 때 모멘트법으로 추정된 \hat{c} 와 $\hat{\beta}$ 로부터 $t = \mu_{X(t)}(\hat{\beta}/\hat{c})$ 이므로 평균수명은 31.7675년으로 추정할 수 있다. 이때 분산은 $\sigma_{X(t)}^2 = 0.0534$ 이며 변동계수는 $\nu_{X(t)} = 0.2889$ 이다.

Table 4. Mean, variance and COV for deterioration with storage time

	10 years	15 years	20 years	32 years
$\mu_{X(t)}$	0.02518	0.3777	0.5037	0.8059
$\sigma_{X(t)}^2$	0.0168	0.0252	0.0336	0.0538
$\nu_{X(t)}$	0.5150	0.425	0.3641	0.2879

식 (6)의 저장기간별 누적분포함수($F_T(t)$)는 저장기간 동안의 누적고장확률을 의미하며 식 (7)은 신뢰도($R(t)$)이다. 임계수준 $\rho = 0.8$ 일 때 저장기간별 누적분포함수와 신뢰도는 <Figure 9>와 같다. 백분위수명은 누적분포함수 즉 누적고장확률이 p 가 되는 시점으로 전체의 100p%가 고장나는 시점이다. 식 (6)에서 누적고장확률이 10%에 해당하는 저장기간인 B_{10} 수명은 약 22년이며 누적고장확률이 50%인 시점인 B_{50} 수명은 약 33년이다. <Figure 3>의 저장기간별 안정제 함량에 관한 선형회귀분석으로 계산한 저장수명(약 32년)과 누적 열화량의 평균식과 추정된 확률모수로부터 계산한 평균수명(약 32년)을 비교할 때 B_{50} 수명(약 33년)은 평균수명과 유사하다.

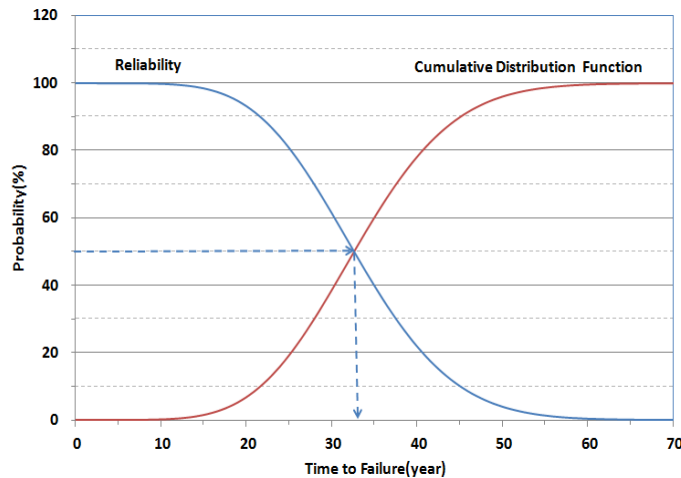


Figure 9. CDF curve($F_T(t)$) and reliability curve($R(t)$) with storage time

저장수명의 확률밀도함수는 저장시간에 대한 누적분포함수 식 (6)을 미분하여 <Figure 10>와 같이 수명분포 곡선으로 표현된다. 안정제 함량이 임계수준 $\rho = 0.8$ 이하로 저하될 확률은 앞에서 예측된 B_{50} 수명인 약 33년 주변으로 <Figure 10>의 수명분포 곡선에서 최빈값을 보이는 저장기간이다. B_{50} 수명이 약 33년으로 예측되었지만 저장기간이 20년에 불과하더라도 잔류안정제 함량이 0.2%에 도달하는 상태고장에 이를 수 있음을 볼 수 있으며 이 때 누적고장확률(CDF)은 6.8%이다. 즉, 기존의 결정론적 수명예측의 한계를 확률론적 수명예측 방법으로 보완할 수 있다.

이제까지 시간에 대한 열화량 모형 $\lambda(t) = ct^b$, ($b > 0, c > 0$)을 시간증분에 따라 열화량이 일정한($b = 1$) 정상감마과정으로 가정하였다. Ellingwood 등(1993)은 해양구조물용 콘크리트에 해수에 의한 황산염 침식과정에 있어서 $b = 2.0$ 을 적용하였으며, Çınlar 등(1977)은 크리프(creep) 문제에 있어서 $b = 1/8$ 을 적용하였다. b 값은 대상물체의 물리적 열화과정에 관한 지식에 기반하여 경험적으로 선정되어야 한다. 하지만 시간증분에 따른 안정제 함량의 변화율과 관련한 연구는 이제까지 수행되지 않았다.

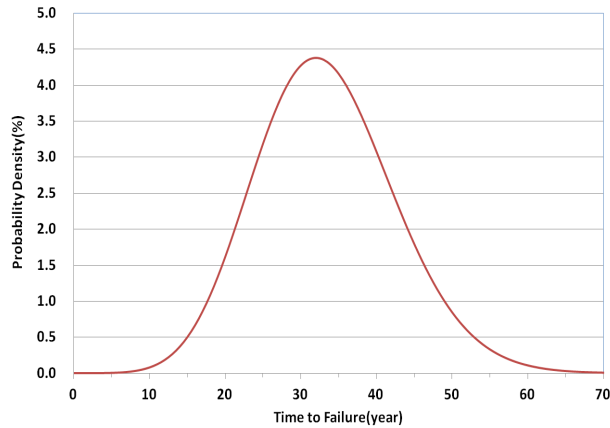


Figure 10. PDF curve with storage lifetime

정상감마과정인 아닐 경우 수명분포의 차이를 보기 위하여 <Figure 11>과 같이 b 값을 각각 0.8, 1.0, 1.2로 변화하여 수명분포 곡선을 도사하였다. b 값이 0.7이하에서 곡선의 형태가 정상적이지 않아 포함하지 않았다. <Figure 11>에서 b 값의 차이에 따른 B_{50} 수명은 차이가 거의 없으며 b 값이 커질수록 수명분포의 폭이 작아진다. b 값이 1.0보다 작을 경우 수명분포의 폭이 너무 크고 <Figure 7>에서 저장시간에 따라 안정제 함량의 저하량의 관계가 직선으로 잘 표현되어 시간증분에 따라 일정한 감소율을 가지고 있다고 볼 수 있으므로 $b = 1$ 인 정상감마분포로 가정할 수 있다고 판단된다.

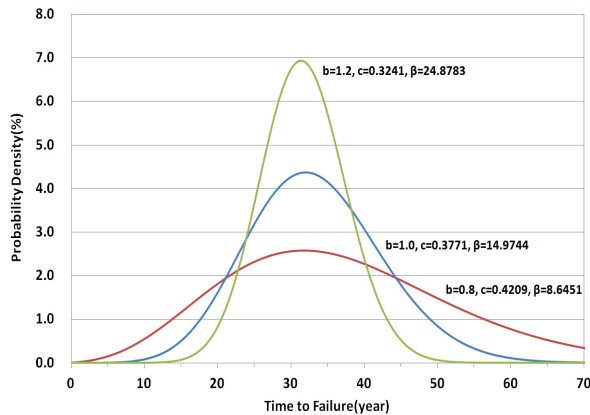


Figure 11. PDF curves with lifetime for various b -values

3.4. 확률과정론에 의한 로트별 수명예측

<Figure 10>은 다수의 추진장약 로트에 대한 수명분포이다. 그러나, 탄약관리 입장에서 현재 측정 상태에서 잔여 수명의 예측이 관심사이므로 특정 로트의 현재까지 측정된 상태에서의 수명분포 예측이 더욱 의미가 있다. 예를 들어, 특정 로트에 대하여 저장기간별 측정된 안정제 함량 저하량 <Figure 12>와 같이 <Figure 7>의 처음 6년간 측정된 자료와 같다고 할 때 감마과정론 방법을 이용하여 저장기간별 수명분포를 계산하면 <Figure 13>과 같다.

<Figure 10>에서 저장수명은 33년으로 예측되었으나 <Figure 13>에서 56년으로 저장수명이 훨씬 길게 예측된 것을 볼 수 있다. 즉, 저장 및 운용환경에 따라 안정제 함량 저하율이 달라지기 때문에 저장수명은 과거의 열화경로에 의하여 확정되는 것이 아니라 과거의 열화경로와 무관하게 오직 현재의 상태에 따라서만 확률과정론적으로 예측될 뿐이다. 현재 상태에 의하여 로트별 예측 수명이 다르며 저장 및 운용환경의 변화에 따라 예측 수명은 변화할 수 있다.

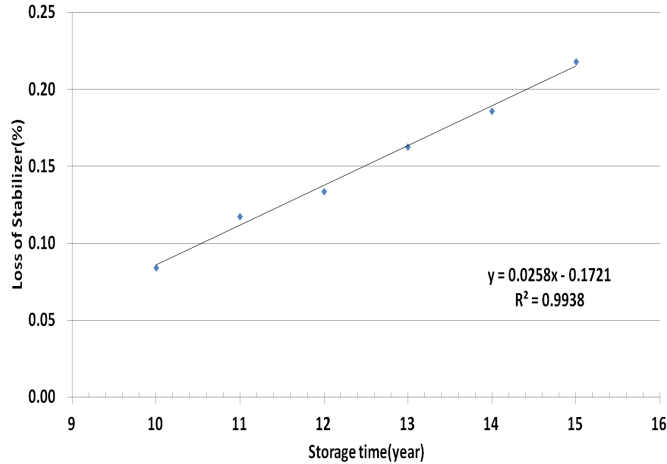


Figure 12. Example: Loss of stabilizer with storage time

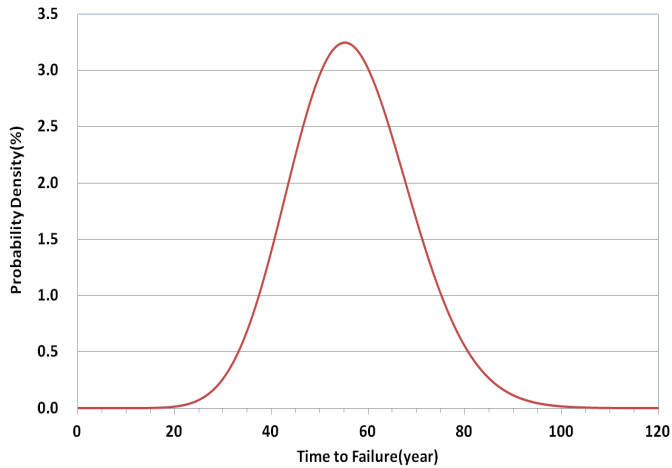


Figure 13. Example: PDF curve with lifetime

4. 결 론

이제까지 155mm 화포용 추진장약의 장기 저장에 따른 성능과 저장안전성 측면을 모두 고려한 신뢰성평가 방안에 관하여 논하였다. 추진장약의 성능은 포구속도의 저하량이 허용 표준편차의 6배 이하로 저하될 때 성능고장으로 보았으며 추진장약의 저장안전성은 잔류안정제 함량이 0.2% 이하로 저하될 때 상태고장으로 보았다. 추진장약의 성

능 측면에서 비선형 회귀분석 방법으로 저장수명을 추정하였으며, 저장안전성 측면에서 감마과정 방법으로 상태분포와 수명분포를 모두 고려하여 저장수명을 확률분포로 표현하였다. 분석결과 추진장약의 성능이 유지되는 기간은 약 59년이며 저장안전성이 유지되는 기간은 평균적으로 약 33년이다. 추진제 안정제 함량의 저하속도가 성능의 저하속도보다 크며, 추진장약의 저장 및 운용환경에 따른 안정제 함량 저하율의 변화를 반영하기 위하여 정기적인 로트단위 수명예측으로 관리되어야 한다.

REFERENCES

- Cho, K. H., and Kim, E. Y. 2010. "Life expectancy estimation of the propellants KM10 using high temperature acceleration aging tests and stockpile analysis test." *Korean Chemical Engineering Research* 48:695–699.
- Çınlar, Erhan, Bažant, Zdeněk P., ASCE, M., and Osman, ElMamoun. 1977. "Stochastic process for extrapolating concrete creep." *Journal of the Engineering Mechanics Division* 103:1069–1088.
- Department of the Army. USA. 1994. "Army Ammunition Data Sheets – Artillery Ammunition." TM 43-0001-28.
- Department of the Army. USA. 1998. "Propellant and Propelling Charges Ammunition Surveillance Procedures." SB 742-1300-94-895:9-11.
- Ellingwood, Bruce R., and Mori, Yasuhiro. 1993. "Probabilistic methods for condition assessment and life prediction of concrete structures in nuclear power plants." *Nuclear Engineering and Design* 142:155–166.
- Guelta, Mark A., DeFrank, Joseph J., and Haley, Mark V. 2006. "Treatment of M1 and M8 Propellant Hydrolysates with Immobilized Cell Bioreactors." ECBC-TR-457, ARDEC(US).
- Jelisavac, Ljiljana. 2010. "Life-time prediction of double-base propellants in accordance with Serbian and NATO standards." *Scientific Technical Review* 60:12–18.
- Korean Agency for Technology and Standards. 2003. A handbook of reliability terms 10–14.
- Kim, J. H. 1967. "On the lifetime of quality and reliability." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 2:10–11.
- Lee, J. C., Park, S. H., and Kim, B. S. 2007. "The reform measure for reduce to surface condensation of ammunition in Igloo magazine." *Journal of the Architectural Institute of Korea* 23:215–222.
- Lee, J. C., Yoon, K. S., Kim, Y. H., and Cho, K. H. 2007. "A study on the shelf-life prediction of the single base propellants using accelerated aging test." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 35:45–52.
- Lee, J. W., Kim, H. B., Kim, Y. I., and Hong, Y. G. 2010. "Prediction of the shelf-life of ammunition by time series analysis." *Journal of the Military Operations Research Society of Korea* 37:39–47.
- Military Agency for Standardization. NATO. 2004. "Explosive, chemical stability nitrocellulose based propellants, procedure for assessment of chemical life and temperature dependence of stabilizer consumptions rates." STANAG 4527 (Edition 1)
- Military Agency for Standardization. NATO. 2008. "Explosives, nitrocellulose based propellants – stability test procedures and requirements using stabilizer depletion." AOP-48 Ed. 2.
- Park, T. K., Lee, Y. J., Jeong, H. S., Kim, J. S., and Chun, S. H. 2005. "Reliability modeling and analysis on the high intensity discharge(HID) lamps." *Proceedings of the Spring Conference of Korean Academic Society of Business Administration* 674–678.
- Seo, S. K., Kim, H. K., Kwon, H. M., Cha, M. S., Yun, W. Y., and Cha, J. H. 2011. *Reliability Engineering*. Kyobo Books. 341–347.
- Van Noortwijk, J. M., and Pandey, M. D. 2003. "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* 259–265.
- Yoon, K. S., and Lee, J. C. 2012. "A case study on the reliability assessment of stockpile ammunition." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 40:259–269.