

81 mm 조명탄용 마그네슘계 조명제 저장수명 예측

백승준¹⁾ · 손영갑^{*,1)} · 임성환²⁾ · 명인호³⁾

¹⁾ 국립안동대학교 기계자동차공학과

²⁾ (주)한화 여수사업장

³⁾ 국방기술품질원 대전센터

Storage Life Estimation of Magnesium Flare Material for 81 mm Illuminating Projectile

Seungjun Back¹⁾ · Youngkap Son^{*,1)} · Sunghwan Lim²⁾ · Inho Myung³⁾

¹⁾ Department of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National University, Korea

²⁾ Quality Assurance 1 Team, Hanwha Co., Ltd., Korea

³⁾ Daejeon Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

(Received 17 November 2014 / Revised 2 April 2015 / Accepted 22 May 2015)

ABSTRACT

It is necessary to both analyze root-cause of non-conformance of effective illumination time to the specification, and estimate the storage lifetime for 81 mm illuminating projectile stockpiled over 10 years. In this paper, aging mechanism of magnesium flare material due to long-term storage was supposed, and two-stage tests, pre-test and main test based on accelerated degradation tests were performed. Field storage environment of moistureproof was set up, and illumination times in the accelerated degradation tests for temperatures 60 and 70 °C were measured. Then, storage reliability of the projectile was estimated through analyzing the measured data and applying distribution-based degradation models to the data. The B₁₀ life by which 10 % of a population of the projectiles will have failed at storage temperature of 25 °C was estimated about 7 years.

Key Words : Storage Lifetime(저장수명), Flare Material(조명제), Illuminating Projectile(조명탄), Degradation(열화), Reliability(신뢰성), Accelerated Degradation Test(가속열화시험)

기 호 설 명

α : 화학반응에서의 반응비율

$D(t)$: 시간 t 시점에서의 조명시간

k : 불쯔만 상수(8.6173×10^{-5} eV/K)

E_a : 활성화에너지(eV)

T : 절대온도(K)

n : 반응차수(reaction order)

$F(t)$: 시간 t 시점에서의 누적고장확률

* Corresponding author, E-mail: ykson@anu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

$\Phi()$: 표준정규분포의 누적분포함수
 $\mu(t)$: 시간 t 시점에서의 조명시간 평균
 $\sigma(t)$: 시간 t 시점에서의 조명시간 표준편차
 LSL : 규격 하한
 $L()$: 우도 함수

1. 서론

81 mm 조명탄 KM301A3을 10년 이상 장기 저장 후 사용 시 국방 규격에 명시된 유효조명시간 60초 이상을 만족하지 못하는 현상이 발생하여 이에 대한 근본 원인 분석과 저장 수명에 대한 예측이 필요하다. 운용 시스템과는 다르게, 탄약은 통상적으로 대기 또는 보관 상태에서 제품 수명의 대부분을 보내기 때문에 수명주기 동안 고장 데이터를 입수하기 어렵고 실제 사용될 시점을 정확하게 예측할 수 없다. 따라서, 저장 환경과 기간에 따라 실제 발사될 때의 임무 성공확률을 신뢰도 척도로 사용한다.

본 연구에서는 마그네슘계 조명제의 장기저장에 따른 노화메커니즘에 대한 가설을 수립하고, 가속열화시험을 예비시험과 본시험 2단계로 수행하였다. 가속열화 예비시험을 통하여 유효조명시간 감소를 유발하는 환경스트레스 인자와 수준을 확인하고 이를 바탕으로 가속열화 본시험을 수행하였다. 조명제 유효조명시간 감소의 관점에서 열화분포모형을 적용하여 시험 결과를 분석하여 조명탄의 저장 신뢰도를 예측하였다.



Fig. 1. 81 mm illuminating projectile KM301A3

2. 이론적 배경

2.1 마그네슘계 조명제

81 mm 조명탄 KM301A3에 적용되는 마그네슘계 조

명제는 주 에너지 원료인 마그네슘 분말(Magnesium Powder)과 산화제인 질산나트륨(Sodium Nitrate)으로 구성되어 있고 충진을 용이하게 하기 위해 결합제인 라미낙(Laminac)을 사용하며 세부 조성은 보안상 공개할 수 없다. Fig. 2에 조명제의 형상을 나타내었으며 좌측 2개 시료는 조명제 점화개시를 위한 상부의 착화제 도포면 형상이고, 우측 2개의 시료는 조명제 표면인 반대쪽면의 형상이다. 착화제가 도포된 면은 조명탄 신관 하부와 연결되어 신관으로부터 인가된 에너지에 의해 점화되어 조명제를 연소시키는 열에너지를 공급한다. 마그네슘은 일반적으로 알칼리 용액에는 침해되지 않으나 산이나 염류에 침해되기 쉽고 고온으로 용해되면 연소하기 쉬운 것으로 알려져 있다.

조명제의 유효조명시간 감소 현상은 장기 저장 시 화공품의 노화 특성 때문으로 판단되나 그 원인에 대해서는 그간 명확히 규명된 바가 없다. L. Ya. Kashporov^[1] 및 R. Bhaskara Rao^[2] 등의 연구에 따르면 조명제의 조성 중에서 연료인 마그네슘 대비 산화제인 질산나트륨 함량이 적어질수록 연소 속도가 증가하였다. 현재 조명제에 포함된 질산나트륨이 조해성이 있으므로 장기 저장에 따른 분해, 습기에 의한 용해 등으로 인하여 초기 대비 함량이 줄어드는 경우 연소 속도 증가의 원인이 될 수 있다고 판단된다. 조명제의 연소 속도 증가를 유발할 수 있는 다른 요인^[3]으로는 내부 균열 등에 의한 연소 표면적 증가, 장기 저장 시 유입된 수분이 조명제 연소 시 해리되면서 활성 산소를 제공하여 연소 속도를 촉진, 결합제인 라미낙 층의 노화로 일종의 지연 기능이 상실되어 연소 속도가 증가할 가능성도 배제할 수는 없을 것으로 사료된다.



Fig. 2. Shape of magnesium flare

2.2 열화데이터 분석 이론

저장 기간에 따라 유효조명시간이 감소하기 때문에 유효조명시간을 열화량으로 고려하여 저장수명을 추정할 수 있다. 초기 시료의 조명시간을 D_0 로, 임의 시점 t 에서의 조명시간을 $D(t)$ 라 정의하면 화학반응의 반응비율(reaction rate), α 는 식 (1)과 같이 표현된다⁴⁾.

$$\alpha(t) = \frac{D_0 - D(t)}{D_0} \quad (1)$$

반응비율은 유효조명시간이 시간에 따라 감소하면 양의 값을 가지며, 증가하는 경우 음의 값을 가진다. 또한, 초기 시료에 대한 반응비율은 화학 반응이 없기 때문에 0의 값을 가지며 초기 조명시간 대비 조명시간이 감소함에 따라 화학반응이 지속적으로 진행되어 반응비율의 절대 값은 증가한다.

열화속도는 반응비율의 시간에 대한 변화율로 정의되며, 온도가 증가할수록 반응속도(K)가 증가하기 때문에 열화속도 또한 증가한다. 따라서 열화속도를 온도(T)의 함수로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다⁵⁾.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\alpha(t) &= A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)(1-\alpha(t))^n \\ &= K(T)(1-\alpha(t))^n \end{aligned} \quad (2)$$

저장기간에 따른 반응비율을 결정하기 위하여 식 (2)의 양변을 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{(1-\alpha(t))^{1-n}}{n-1} = K(T)t + C \quad (3)$$

$t = 0$ 일 경우, 식 (1)에 의해 $\alpha = 0$ 이므로 $C = 1/(n-1)$ 가 되며, 시간에 따른 반응비율은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\alpha(t) = 1 - [(n-1)K(T)t + 1]^{\frac{1}{1-n}} \quad (4)$$

식 (1)과 (4)를 이용하여 $D(t)$ 를 정의하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} D(t) &= D_0(1-\alpha(t)) \\ &= D_0[(n-1)K(T)t + 1]^{\frac{1}{1-n}} \end{aligned} \quad (5)$$

대상 시료에 대한 복원추출이 가능한 경우, 열화데이터로부터 식 (5)로 표현되는 열화경로를 이용하여 K , n , D_0 값을 추정한다. 그러나 본 연구에서는 복원추출이 가능하지 않은 시료를 대상으로 하기 때문에 열화데이터로부터 각 시점에서의 열화분포에 대한 모수값 변화를 추정함으로써 K , n , D_0 값을 추정한다.

각 시점에서 조명시간에 대한 열화데이터가 평균과 표준편차가 $\mu(t)$, $\sigma(t)$ 인 대수정규분포를 따르며 감소할 때, 조명시간에 대한 규격을 LSL이라 두면, 임의 시점에서 누적고장확률은 식 (6)으로 표현된다⁶⁾.

$$F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu(t) - \log_e(\text{LSL})}{\sigma(t)}\right) \quad (6)$$

3. 연구 내용

조명제의 유효조명시간 규격 60초 이상을 기준으로 저장수명을 예측하고자 하였다. 가속열화시험을 수행하여 실제 저장 조건에서의 수명을 예측하기 위해서는 장기 저장 후 연소속도가 증가하는 노화메커니즘을 재현할 수 있는 가속열화조건을 우선 선정하여야 한다. 따라서, 다양한 조건에서의 예비 가속열화시험을 우선 수행하여 연소속도 증가를 유발하는 스트레스 조건을 확인 후, 이를 기반으로 본 시험을 수행하였다.

3.1 예비 가속 열화 시험

장기 저장 시 유효조명시간의 감소를 유발할 수 있는 스트레스 조건을 식별하기 위하여 예비 시험을 수행하였다. 고온, 고온고습 그리고 온습도싸이클 시험을 수행함으로써 각 스트레스 인자의 영향도를 확인하고자 하였다. 습도를 인가한 시험에서는 심한 부피팽창과 균열이 수반되어 실제 탄약고에 28년 저장된 시료에서도 물리적인 변화가 거의 없는 것과는 다른 결과를 보였다. 또한, 케이스에 과라핀 코팅 후 저장되는 조명탄의 저장 상태를 고려하여 습도를 배제한 고온시험을 60 °C와 70 °C에서 수행하였다. 또한 고온 조건에서 내부의 잔존 수분이 기화되어 사라지는 것을 방지하기 위하여 배리어백에 조명제를 투입하고 밀폐 처리함으로써 실제 저장 상태를 모사한 후 시험을 수행하였다. 시험 결과는 Table 1에 정리하였으며 초기 대비 유효조명시간의 감소여부를 통계적으로 확인하기 위하여 t-test를 수행하였다. 초기치 대비 70 °C 2주차

데이터 검정 결과 p-value가 0.033으로써 95 % 신뢰수준에서 조명시간이 감소된 것으로 판단할 수 있었다. 그러나, 60 °C 시험의 경우에는 p-value가 0.7 이상으로써 유효조명시간에 변화가 없는 것으로 판단되었다. 예비 시험을 수행한 결과 가속열화 본 시험은 60 °C와 70 °C 조건으로 수립하였으며 예비 시험의 결과도 본 시험에 추가하여 데이터 분석을 수행하였다.

Table 1. Burning time of each accelerated degradation pre-test conditions

순	초기치	60°C, 2주	60°C, 4주	70°C, 2주
1	68	68	71	69
2	67	68	67	69
3	66	74	69	60
4	70	65	76	66
5	71	70	62	69
6	68	64	71	63
7	63	71	76	63
8	69	67	73	65
9	74	68	72	66
10	63	72	73	61
평균	67.9	68.7	71	65.1
편차	3.414	3.093	4.216	3.315

3.2 가속 열화 시험

예비시험을 통하여 유효조명시간의 변화를 확인한 결과를 바탕으로 60 °C와 70 °C 조건에서 추가적으로 가속열화시험을 수행한 결과 조명시간 데이터를 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 온도 가속조건에 아레니우스 모델을 적용하기 위해서는 3수준 이상의 시험 조건이 권장되며, 시험데이터가 많을수록 추정 신뢰도의 정확도가 높아지고 신뢰구간은 좁아지게 된다. 그러나, 조명제 연소 시 방출되는 에너지가 매우 커서 시험 중 안전사고의 위험을 고려하여 시료 수 및 시험 조건을 최소화해야하는 제한 사항이 있었다. 따라서, 관측 주기별 시험 시료 수는 최소 5발에서 최대 10발까지 가변적으로 운용하였으며 관측 주기의 경우 시험 데이터 추이를 관찰하며 조정하였기 때문에 시험 수량과 관측 주기가 일정하지 않다.

Table 2. Burning time of accelerated degradation test at 60 °C conditions

순	가속열화시험 경과(day)							
	0	14	21	28	35	36	42	63
1	68	68	71	71	65	67.5	70	58.5
2	67	68	67	67	71.5	64.5	64	67.5
3	66	74	70	69	66.5	64	70	62
4	70	65	71.5	76	64	67.5	72	69
5	71	70	71.5	62	64.5	60	69.5	64.5
6	68	64	63	71	65	69	67	66.5
7	63	71	-	76	-	-	-	-
8	69	67	-	73	-	-	-	-
9	74	68	-	72	-	-	-	-
10	63	72	-	73	-	-	-	-
평균	67.9	68.7	69.0	71.0	66.1	65.4	68.8	64.7
편차	3.41	3.09	3.39	4.22	2.78	3.28	2.82	3.88

Table 3. Burning time of accelerated degradation test at 70 °C conditions

순	가속열화시험 경과(day)							
	0	7	11	14	17	24	30	37
1	68	62	67.5	69	71	61.5	65	59.5
2	67	71.5	70.5	69	68.5	63.5	65	65
3	66	68.5	75.5	60	65.5	69	73	77.5
4	70	68	69	66	67.5	59	69	61.5
5	71	62	72	69	69	65.5	68	65.5
6	68	-	72	63	78.5	-	78.5	64
7	63	-	-	63	-	-	-	-
8	69	-	-	65	-	-	-	-
9	74	-	-	66	-	-	-	-
10	63	-	-	61	-	-	-	-
평균	67.9	66.4	71.1	65.1	70.0	63.7	69.8	65.5
편차	3.41	4.23	2.78	3.31	4.54	3.82	5.21	6.30

3.3 시험 결과 분석

가속열화시험 결과분석은 열화분포모델을 적용하여 분석하기 때문에 각 시점 별 유효 조명시간 데이터에 대한 분포 적합도 검정을 Anderson-Darling test를 이용하여 수행하였다. Anderson-Darling test는 Minitab을 이용하여, 분포 적합도 검정 결과 AD값을 얻을 수 있다. 이때 AD는 Anderson-Darling test의 결과 값으로 데이터가 해당분포에 가까울수록 작은 값을 갖는다^[7]. 적합도 검정 결과 중 70 °C에 대한 결과를 Table 4에 나타내었으며, 시점 별 분포 적합도 검정 결과로부터 대부분 대수정규분포에 적합한 것을 알 수 있다.

Table 4. AD values for each distribution of 70 °C data

시간	대수정규	정규	와이블	지수
0	0.213	0.204	0.263	4.175
7	0.403	0.390	0.400	2.058
11	0.199	0.207	0.318	2.568
14	0.350	0.354	0.479	4.166
17	0.438	0.481	0.650	2.478
24	0.135	0.140	0.212	2.062
30	0.313	0.336	0.436	2.418
37	0.498	0.566	0.716	2.364

각 시점에서의 유효조명시간 데이터는 대수정규분포를 따르므로 조명시간 데이터(D(t))에 자연로그를 취한 값 d(t) = log_e(D(t))를 이용하여 반응비율을 추정하였다. 따라서 D(t)를 d(t) = log_e(D(t))로 변환한 후, 식 (5)로부터 열화분포의 시간에 따른 평균 및 표준편차를 식 (7)과 (8)로 표현하였다.

$$\mu_q(t) = \beta_{q,0}((\beta_{q,1} - 1)\beta_{q,2}t + 1)^{1/(1-\beta_{q,1})} \quad (7)$$

$$\sigma_q(t) = \beta_{q,3}(1 + \sqrt{\beta_{q,4}T_q t}) \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 q는 온도조건을 나타내며 T₁ = 273.16 + 60 °C, T₂ = 273.16 + 70 °C이고, 각 온도 조건에서의 추정할 변수는 $\beta_q = [\beta_{q,0}, \beta_{q,1}, \beta_{q,2}, \beta_{q,3}, \beta_{q,4}]$ 이다. 각 변수의 의미는 $\beta_{q,0} = \mu(t=0)$, $\beta_{q,1} = n$, $\beta_{q,2} = k$, $\beta_{q,3} = \sigma(t=0)$, $\beta_{q,4} =$ 표준편차 변화율이다. 각 온

도 조건에서 시간에 따른 등분산 검정결과, 분산이 동일하지 않기 때문에 표준편차의 변화를 고려할 필요가 있다. 따라서 Einstein relation과 역자승 법칙을 이용하여 식 (8)로 표현되는 표준편차를 이용한다^[8].

각 온도 조건에서의 평균과 표준편차 식의 변수들은 식 (9)로 표현되는 우도함수를 최대로 하여 구한다^[6]. 식 (9)에서 i는 조명시간 측정 시점, j는 측정된 시료수를 나타낸다.

$$L(\beta_q | D_{q,j}(t_i)) = \prod_{i=1}^{r_i} \prod_{j=1}^{n_i} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_{q,j}(t_i) \sigma_q(t_i)} \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(D_{q,j}(t_i)) - \mu_q(t_i)}{\sigma_q(t_i)}\right)^2\right) \right\} \quad (9)$$

우도함수를 이용하여 구한 변수 β_q 를 식 (7)과 (8)에 대입하여 시험조건 별 평균과 표준편차에 관한 식을 구하였다. 추정 결과, 2가지 온도 조건에서 $\beta_{q,1} \approx 2$ 로 동일한 값을 가지므로 시간에 따른 평균을 식 (10)으로 변경하여 식 (9)의 우도함수에 대입하였다.

$$\mu_q(t) = \beta_{q,0}(\beta_{q,2}t + 1)^{-1} \quad (10)$$

우도함수를 최대로 하는 평균값에 대한 추정결과와 데이터를 Fig. 3에 나타내었다. 온도 60 °C, 70 °C 조건에서의 반응속도값을 나타내는 $\beta_{q,2}$ 은 각각 1.5749 × 10⁴, 3.7363 × 10⁴이다. 또한 각 온도에서 추정된 변수 값들을 이용하여 시간에 따른 누적고장확률($\hat{F}(t)$)을 평가하였다. 식 (8)과 같이 시간 증가에 따라 대수정규분포의 표준편차가 변화하는 특성을 반영하고, 시간에 대한 수명분포함수로써 대수정규분포는 시간 증가에 따라 고장률이 증가하는 특성을 반영하지 못하기 때문에 고장률이 증가하는 특성을 반영할 수 있는 와이블 분포를 수명분포함수로 가정하여 누적고장확률 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 형상모수가 각각 1.8614, 1.9583이므로 가속성이 성립함을 알 수 있다.

Fig. 4로부터 온도에 대한 가속성을 확인하였으므로 아레니우스 모델을 이용하여 평균값과 표준편차 변화를 식 (11), (12)로 정의하였다.

$$\mu_q(t) = \mu_0(A \exp(-E_a/kT_q)t + 1)^{-1} \quad (11)$$

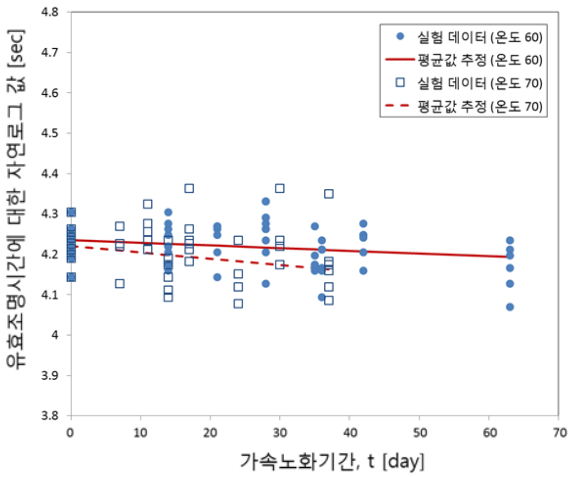


Fig. 3. Degradation data with the estimated nominal values

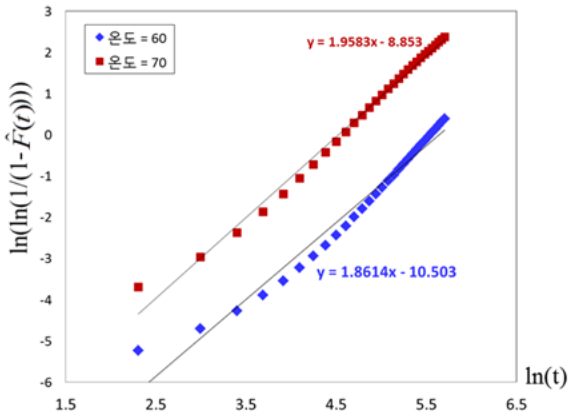


Fig. 4. Verification of life acceleration over stress

$$\sigma_q(t) = \sigma_0(1 + \sqrt{BT_q t}) \quad (12)$$

식 (11), (12)의 변수들을 추정하기 위하여 식 (13)으로 우도함수를 정의하고 우도함수를 최대로 하는 변수값들을 추정하였다.

$$L(\mu_0, A, E_a, \sigma_0, B | D_j(t_i)) = \prod_{q=1}^2 \prod_{i=1}^{r_i} \prod_{j=1}^{n_i} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_{q,j}(t_i) \sigma_q(t_i)} \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(D_{q,j}(t_i)) - \mu_q(t_i)}{\sigma_q(t_i)}\right)^2\right) \right\} \quad (13)$$

식 (13)의 우도값을 최대로 하는 변수값들 $[\mu_0, A, E_a, B]$ 는 $[4.2379, 1.18 \times 10^9, 0.8450, 7.3444 \times 10^9]$ 이다. 이 변수값들을 이용하여 각 온도 조건에서 유효 조명시간이 규격을 만족시키지 못하는 누적고장확률($\hat{F}(t)$)을 평가하였으며, Fig. 5에 나타내었다.

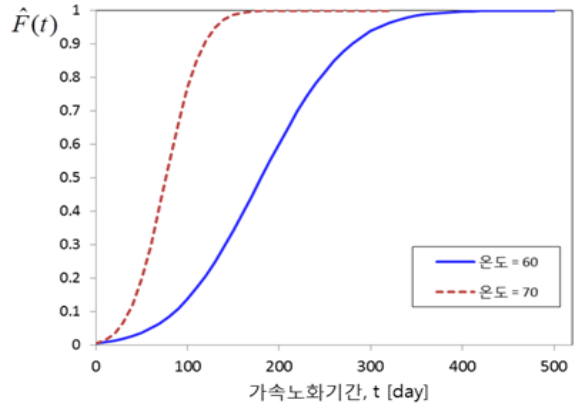


Fig. 5. Estimated cumulative failure probability

식 (10)을 적용하여 추정된 각 온도조건에서의 반응속도값과 식 (11)을 적용하여 추정된 A, E_a 값들로부터 정의되는 반응속도값을 이용하여 평가한 카이분포 통계량에 대한 p-value가 0.99이므로 온도에 대한 가속성이 있다고 평가할 수 있으며 식 (10)대신 식 (11)을 사용하는 것이 타당함을 확인하였다^{9,10}. 형상모수의 동일성을 검증하는 방법으로서 일반적으로 카이분포 통계량이 많이 이용된다. Fig. 5로 부터 시험조건 별 추정된 B_{10} 수명은 가속열화시험 조건에 따라 각각 약 86.5일(60 °C), 36.8일(70 °C)이다.

3.4 저장수명 예측

식 (11)과 (12)에 온도(T_q) = 273.16 + 섭씨온도(°C)를 대입하여 저장온도조건에 따른 누적고장확률을 Fig. 6에 나타내었다. 온도가 20, 23, 25 °C에서의 B_{10} 수명은 각각 약 12년, 9년, 7년으로 예측된다. 또한 25 °C에서 고려한 신뢰수준에서 보증할 수 있는 최소 신뢰도를 Fig. 7에 나타내었다. 신뢰수준에 대한 최소 신뢰도는 Fisher information 행렬을 이용하여 추정하였으며^{6,11}. 신뢰수준이 높아질수록 보증할 수 있는 최소 신뢰도가 매우 낮아짐을 확인할 수 있다. 참고로 저장온도 23 °C에서의 와이블 수명분포의 형상모수는 1.91, 척도모수 29.3년으로 추정되었다.

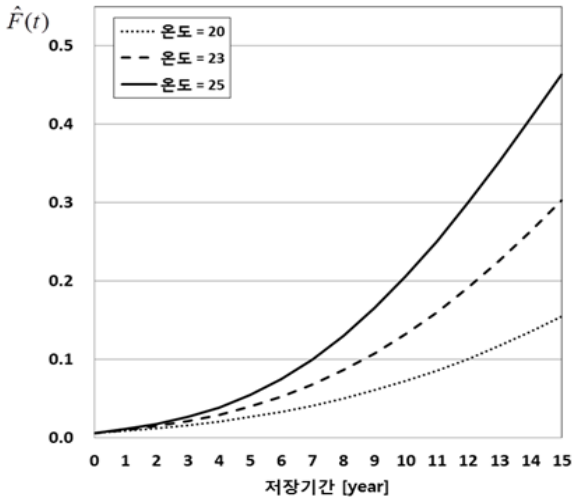


Fig. 6. Estimated cumulative failure probability

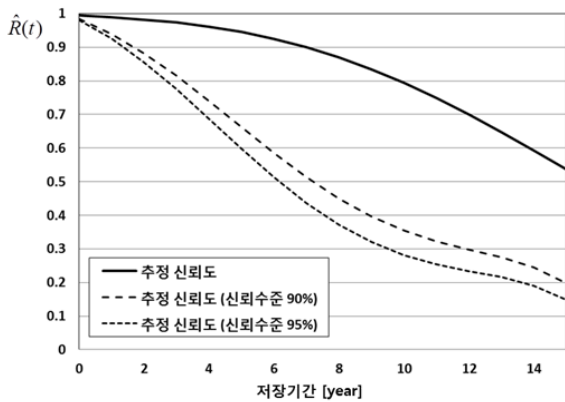


Fig. 7. Estimated Reliability for the confidence level

4. 결론 및 고찰

유효조명시간 감소 문제점이 발생한 군용 조명탄의 마그네슘계 조명제를 대상으로 60 °C와 70 °C 조건의 가속열화시험을 실시하여 저장수명을 예측하였다. 마그네슘계 조명제의 장기저장에 따른 노화메커니즘에 대한 가설을 수립하고, 가속열화시험을 예비시험과 본 시험 2단계로 수행하였다. 방습 상태인 실제 저장 환경을 구성하고 60 °C와 70 °C 조건에서 가속열화시험을 실시하여 조명시간을 측정하였다. 조명제 유효조명시간 감소의 관점에서 열화분포모델을 적용하여 시험 조건별 열화량을 평가하고 와이블 수명분포를 가정하

여 가속성이 성립함을 확인하였다. 조명제의 저장 신뢰도를 예측한 결과 25 °C 저장온도 기준으로 10 % 수준의 규격 불만족 발생 시점인 B₁₀ 수명은 약 7년으로 예측되었다. 또한, 20 °C와 23 °C에서의 B₁₀수명은 각각 약 12년, 9년으로 예측되었으며 신뢰수준을 고려 시 보증할 수 있는 최소 신뢰도는 Fisher information 행렬을 이용하여 추정하였다. 본 연구결과가 향후 신뢰도를 기반으로 한 탄약의 수명주기 관리제도 정착에 크게 기여할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 국방기술품질원과 (주)한화에서 추진하는 “화공품 노화기구 규명 및 저장수명 예측” 연구 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] Kashporov, L. Y., “Burning Velocity of Two-Component Mixtures of Magnesium With Sodium Nitrate,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 30, No. 5, pp. 608-616, 1994.

[2] Rao, R. B., “Agglomeration of Magnesium Particles in Magnesium-Sodium Nitrate Combustion,” *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 21, No. 6, pp. 319-324, 1996.

[3] Ellern, H., “Military and Civilian Pyrotechnics,” *Chemical Publishing Company Inc., USA*, 1968.

[4] Patekar, K. A., “Long Term Degradation of Resin for High Temperature Composites,” *Massachusetts Institute of Technology, USA*, 1998.

[5] Leterrier, Y., Singh, B., Bouchet, J., Manson, J., Rochat, G., Fayet, P., “Supertough UV-Curable Silane/Silica Gas Barrier Coating on Polymers,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 203, No. 22, pp. 3398-3404, 2009.

[6] Meeker, W. Q., Escobar, L. A., “Statistical Methods for Reliability Data,” *Wiley, USA*, 1998.

[7] Hines, W., Montgomery, D. C., “Probability and Statistics in Engineering and Management Science,” *Wiley, USA*, 1990.

- [8] Liao, H., Elsayed, A. E., "Reliability Inference for Field Conditions from Accelerated Degradation Testing," *Naval Research Logistics*, Vol. 53, No. 6, pp. 577-587, 2006.
- [9] Magaroi, R. T., Murphy, K. P., Fernandez, T., "Accelerated Stability Model for Predicting Shelf-Life," *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, Vol. 16, No. 5, pp. 221-226, 2002.
- [10] Wu, C. C., Lee, G., "Oxidation of Volatile Organic Compounds by Negative Air Ions", *Atmospheric Environment*, Vol. 38, No. 37, pp. 6287-6295, 2004.
- [11] Nachlas, J. A., "Reliability Engineering Probabilistic Models and Maintenance Methods," CRC Press, USA, 2005.