Journal of the KIMST, Vol. 19, No. 3, pp. 311-318, 2016
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2016.19.3.311

Research Paper 시험평가 부문

차기 적외선 섬광제 저장수명 예측

백승준[1] · 손영갑[*,1] · 김남진[2] · 권태수[2]

[1] 국립안동대학교 기계자동차공학과
[2] ㈜풍산 기술연구원

Storage Life Estimation of Next Infrared Flare Material

Seungjun Back[1] · Youngkap Son[*,1] · Namjin Kim[2] · Taesoo Kwon[2]

[1] *Department of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National University, Korea*
[2] *R&D Institute, Poongsan Co., Korea*

(Received 7 October 2015 / Revised 3 February 2016 / Accepted 29 April 2016)

ABSTRACT

This paper shows storage life estimation of next IR(infrared) flare material through accelerated degradation tests. Three temperature conditions for the accelerated degradation tests are 55, 65 and 75 ℃. Six performances of IR flare material are burning time, IR peak/continuous Intensity, total energy of near/mid-IR and color ratio, and they were measured after the tests. Storage life of the IR flare material was estimated through both analyzing the degradation data of those performances and applying distribution-based degradation models to the data. Over 30 years of storage life at 20 ℃ is estimated in terms of IR peak intensity with reliability 0.99 and confidence level 99 %. Additionally, 10 years of storage period at 21 ℃ would be equivalent to 68 days of accelerated test at 65 ℃ from the activation energy in Arrhenius model.

Key Words : Storage Lifetime(저장수명), Flare Material(섬광제), Reliability(신뢰성), Degradation(열화), Accelerated Degradation Test(가속열화시험)

기 호 설 명

α : 화학반응에서의 반응비율
$D(t)$: 시간 t 시점에서의 특성치 측정 값
k : 볼쯔만 상수(8.6173×10^{-5} eV/K)
E_a : 활성화 에너지(eV)
T : 절대온도(K)
K : 화학 반응 속도
n : 화학 반응 차수
$F(t)$: t 시점에서의 누적고장확률
$\Phi(\,)$: 표준정규분포의 누적분포함수
$\mu(t)$: t 시점에서의 성능에 대한 평균
$\sigma(t)$: t 시점에서의 성능에 대한 표준편차

* Corresponding author, E-mail: ykson@anu.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

LSL / *USL* : 규격 하한 / 규격 상한
E[ ] : 기대 값
V[ ] : 분산

1. 서 론

섬광탄은 아군의 전투기 등에 장착하여 적군의 유도무기 공격을 기만하는 용도로 사용되며, 전투기의 생존을 좌우하는 매우 중요한 무기체계이다. 적군의 유도무기를 기만하기 위하여 섬광제는 니트로셀룰로스(nitrocellulose, NC)와 니트로글리세린(nitroglycerine, NG)이 주성분인 더블 베이스 추진약(double base propellant)의 조성을 기반으로 한다.

추진제 계열의 저장수명은 주로 안정제 함량의 저하를 중요한 열화 특성으로 기준하였으며 이 외에 열량 또는 중량의 감소 관점에서 연구가 수행되어왔다[1]. 본 연구에서는 적외선 섬광제의 잠재 열화메커니즘을 조사하고 섬광제의 기본 특성치(Performance)로서 연소시간, 중적외선 강도 및 에너지, 근적외선 에너지 변화 등을 정의한 후에 가속열화시험을 통하여 저장수명을 예측하였다. 가속열화시험은 가속 온도 수준의 선정과 시험의 안전성 확인을 위한 예비 시험(Pre-Test)과 예비시험 결과를 토대로 실제 저장수명 예측을 위한 본 시험(Main-Test)으로 2단계에 걸쳐 수행하였다. 예비 시험 결과로 부터 55, 65 및 75 ℃ 조건의 본 시험 계획을 수립하여 시험을 수행하였으며 시험 결과 각 특성치 데이터를 대상으로 열화분포모델 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 적외선 섬광제

서론에 기술한 바와 같이 차기 적외선 섬광제는 NC, NG 계열의 더블 베이스 추진약 조성을 기반으로 안정제 등이 포함된다. 섬광제가 알루미늄 관체에 충진된 후 이의 발사를 위한 전기식 폭관이 조립되어 최종 섬광탄 체계가 완성된다. 전기식 폭관은 기 양산품으로서 장기 저장성 측면에서 그간 신뢰성을 인정받은 부품이다. 차기 전력화 예정인 본 섬광탄의 제원 및 조성은 보안상 공개할 수 없다. 가속열화시험 조건을 수립하기 위하여 더블 베이스 추진약에 대한 저장수명 연구 사례를 조사하였다. 열량측정이나 안정성 시험의 경우는 120 ℃까지의 온도를 적용하고 중량 감소 등의 관점에서 저장수명 평가를 위해서는 40 ~ 90 ℃까지의 온도를 적용함을 알 수 있었다[2]. Bohn은 다양한 종류의 추진제에 대하여 중량 감소 3 % 및 에너지 감소 3 %를 판정 기준으로 하는 경우 온도별 저장 수명을 제시하였다.[1,3] Lieb의 연구에 따르면 차기 적외선 섬광탄의 조성과 가장 유사한 JA2 추진제의 경우 60 ℃에서 약 16.6시간 시험 후 13.5 %의 중량 감소가 발생하였다[4]. Stenson은 화학적 열화, 자체발열, 기계적 특성 저하 등의 관점에서 저장 온도별 추진제의 수명을 제시하였다[5]. 본 연구에서는 다양한 문헌 조사 결과를 바탕으로 가속열화시험의 온도조건을 설정하여 예비시험 단계에서 특성치의 열화 특성을 관측하고 본 시험을 수행하여 저장 수명을 예측하였다.

2.2 열화데이터 분석 이론

가속열화시험 경과에 따라 특성치가 감소하거나 증가하는 현상을 수학적으로 표현하기 위하여 열화데이터 분석 이론을 적용한다. 탄약과 같은 일회성 시스템(one shot system)은 비복원 추출이므로 일반적으로 열화 분포모델 분석을 수행한다. 초기 시료의 특성치를 D_0로, 임의 시점 t에서의 특성치를 D(t)라 정의하면 특성치가 감소하는 경우의 화학반응의 반응비율(reaction rate), α는 식 (1)과 같이 표현되며, 특성치가 증가하는 경우에는 식 (2)와 같이 표현된다[6].

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

$$\alpha(t) = \frac{D(t) - D_0}{D_0} \tag{2}$$

초기 시료에서의 반응비율은 화학 반응이 없기 때문에 0의 값을 가지며, 열화속도는 반응비율의 시간에 대한 변화율로 정의되므로 온도가 증가할수록 반응속도(*K*) 및 열화속도는 증가한다. 따라서 열화속도를 온도(T)의 함수로써 식 (3)과 같이 표현할 수 있다[7].

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\alpha(t) &= A.\exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)[1-\alpha(t)]^n \\ &= K(T)[1-\alpha(t)]^n\end{aligned} \tag{3}$$

저장기간에 따른 반응비율을 결정하기 위하여 식 (3)의 양변을 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\alpha(t) = A.\exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)[1-\alpha(t)]^n \quad (4)$$
$$= K(T)[1-\alpha(t)]^n$$

t = 0일 경우, α = 0이므로 C = 1/(n-1)가 되며, 시간에 따른 반응비율은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\alpha(t) = 1-[(n-1)K(T)t+1]^{\frac{1}{1-n}} \quad (5)$$

식 (1)과 (5)를 이용하여 특성치가 감소하는 경우에 대한 D(t)를 정의하면 식 (6)과 같으며, 식 (2)와 (5)를 이용하여 특성치가 증가하는 경우에 대한 D(t)를 정의하면 식 (7)과 같다. 섬광제는 추진제와 유사한 조성을 가지며, 식 (6)은 최종적으로 추진제 열화와 관련한 AOP-48, Ed. 2의 n^{th}-order kinetic model과 동일하다.

$$D(t) = D_0(1-\alpha(t))$$
$$= D_0[(n-1)K(T)t+1]^{\frac{1}{1-n}} \quad (6)$$

$$D(t) = D_0(1+\alpha(t))$$
$$= D_0\left[2-\{(n-1)K(T)t+1\}^{\frac{1}{1-n}}\right] \quad (7)$$

또한 반응차수가 1인 경우, 식 (3)으로부터 α는

$$\alpha = 1-\exp(-K(T)t) \quad (8)$$

따라서 식 (8)로 정의되는 α를 식 (6)에 대입하여 정리하면 D(t)는

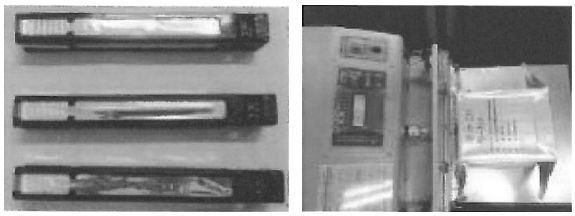
$$D(t) = D_0\exp(-K(T)t) \quad (9)$$

본 연구는 비복원추출의 경우에 해당하므로 열화데이터로부터 각 시점에서의 열화분포에 대한 모수값 변화를 추정함으로써 *K*, *n*, D_0값을 추정한다. 각 시점에서 특성치의 열화데이터가 평균이 $\mu(t)$이고 표준편차가 $\sigma(t)$인 대수정규분포를 따르는 경우, 특성치가 감소하는 경우의 규격 하한을 LSL이라 두면, 임의 시점에서 성능에 대한 규격을 만족하지 못하는 규격 부적합 확률은 식 (10)으로 표현된다[8].

$$F(t) = 1-\Phi\left(\frac{\mu(t)-\log_e(\mathrm{LSL})}{\sigma(t)}\right) \quad (10)$$

3. 연구 내용

섬광제를 대상으로 가속열화시험을 실시하여 가속열화 기간에 따른 연소시간, 중적외선 강도 및 에너지, 근적외선 에너지 등의 열화 특성을 분석하여 저장수명을 예측하고자 하였다. 시험 시 안전사고의 발생 가능성 점검을 위한 예비 시험을 우선 수행하고, 예비 시험의 결과를 기반으로 실제 저장수명 예측을 위한 본 시험 조건을 수립하여 실시하였다. 양산 배치 후에 섬광탄의 저장 조건은 방습 밀폐 구조이므로 섬광제를 대상으로 한 가속열화시험에는 Fig. 1과 같이 배리어백을 이용한 밀폐 포장을 적용하였다.



<시료 형상> <밀폐 포장>

Fig. 1. Preparation of accelerated degradation test

3.1 사전 안전성 확인 예비 시험(Pre-Test)

본격적인 열화시험의 착수에 앞서 섬광제 조립체를 대상으로 예비 시험을 수행하였다. 시험의 주된 목적은 고온의 가속열화시험을 수행함에 따른 안전사고의 위험성을 소수의 시료로써 사전에 확인하고, 초기 성능 대비 연소속도 등 특성치의 변화 유무를 관찰하기 위함이다. 시험 방법은 섬광제 3발을 배리어백으로 개별 밀봉한 후 챔버에 투입하여 60 ℃ 조건으로 1주간 환경처리 후 1발을 꺼내고, 이후 온도를 높여 70 ℃ 조건으로 2주간 환경처리 후 1발을 꺼내었다. 그리고 마지막으로 남은 1발을 대상으로는 80 ℃ 조건으로 1주간 환경처리를 추가 시행하였다.

시험 결과 자연 발화 또는 가스 발생으로 인한 밀폐 포장의 부풀어 오름 등이 관측되지 않아 안전사고의 위험은 없는 것으로 확인되었으며, 연소 시간 및 적외

선 강도 등의 감소 또는 증가 추이는 관측 되지 않았다. 이는 적은 시료 수와 짧은 시험 기간으로 인하여 변화가 관측되지 않은 것으로 판단되며, 예비 시험 결과 안전성이 확인된 80 ℃ 이하의 온도 범위를 고려하여 장기간의 가속열화 본 시험 조건을 55 ℃, 65 ℃, 75 ℃ 세 조건에서 수행하기로 하였다.

3.2 가속 열화 본 시험(Main-Test)

본 시험은 Table 1의 관측 주기에 따라 수행하였다. 55 ℃ 조건의 시험은 3주, 65 ℃ 조건의 시험은 2주의 관측 주기를 설정하였다. 75 ℃ 조건의 시험은 예비 시험 결과를 바탕으로 14일차 부터 1주 간격의 관측주기를 운용하였다. 시험데이터가 많을수록 추정 신뢰도의 정확도가 높아지고 신뢰구간은 좁아지게 되나, 시험 중 안전사고의 위험을 고려하여 시료 수 및 시험 조건을 최소화해야하는 제한 사항이 있었다. 따라서, 각 관측 주기별 시료 수는 10발씩 배치하였으며 배리어 백 밀폐 시 1회 관측에 소요되는 10발 단위로 개별 포장하였다. 섬광제의 특성치 측정 시 온습도 등 주위 환경의 영향을 최소화하기 위하여 모든 환경처리 완료 후에 일괄 시험하였다.

Table 1. Test plan of accelerated degradation tests

시험 조건	관측 주기(day)						
	1회차	2회차	3회차	4회차	5회차	6회차	7회차
55 ℃	초기치	21	42	63	84	105	126
65 ℃		14	28	42	56	70	84
75 ℃		14	21	28	35	42	49

섬광제의 주요 특성치로서 연소 시간(Burning time), 중적외선 최대 강도(IR Peak Intensity) 및 유지 강도(IR Continuous Intensity), 중적외선 총 에너지(Total Energy of Mid-IR) 및 근적외선 총 에너지(Total Energy of Near-IR) 그리고 Color ratio(중적외선과 근적외선 에너지 총량의 비율) 등 총 6가지 항목을 측정한 결과를 Fig. 2로부터 Fig. 7에 나타내었다. 섬광탄은 적군의 유도 무기를 기만하기 위한 용도이므로 각 성능의 수치나 이를 유추할 수 있는 정보는 보안 관계로 그래프상에 표기할 수 없다. 측정 결과 연소시간은 시험 기간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며 중적외선 최대 강도와 유지강도는 감소, 근적외

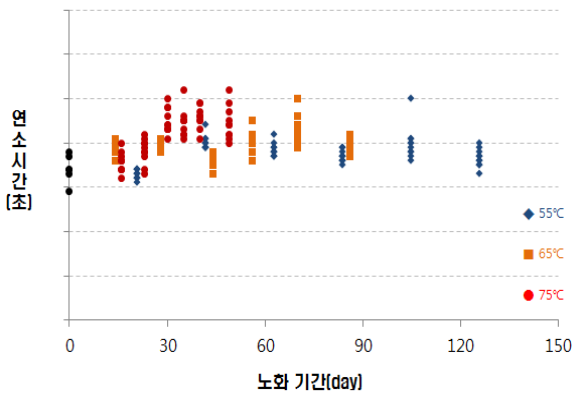


Fig. 2. Results of accelerated degradation tests (Burning time)

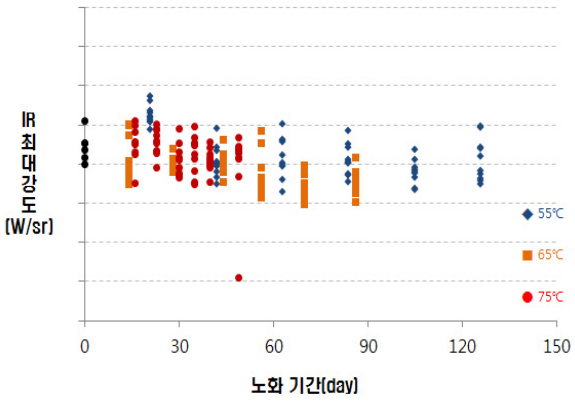


Fig. 3. Results of accelerated degradation tests (IR peak intensity)

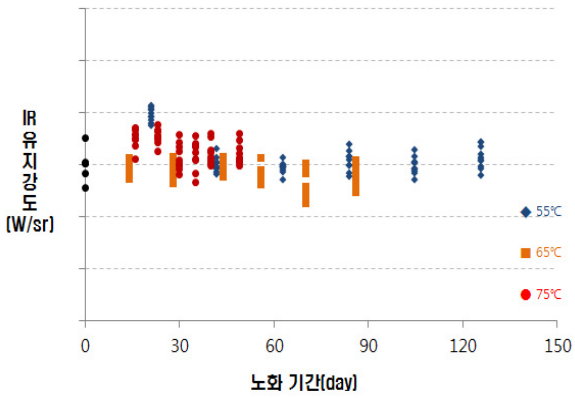


Fig. 4. Results of accelerated degradation tests (IR continuous intensity)

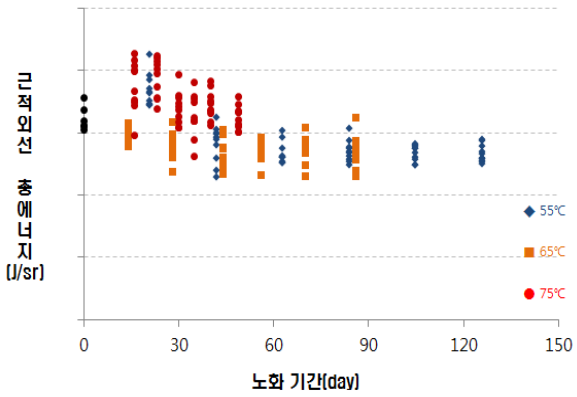


Fig. 5. Results of accelerated degradation tests (Total energy of Near-IR)

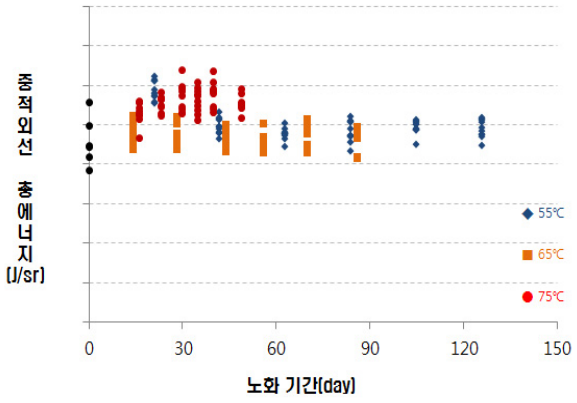


Fig. 6. Results of Accelerated degradation tests (Total energy of Mid-IR)

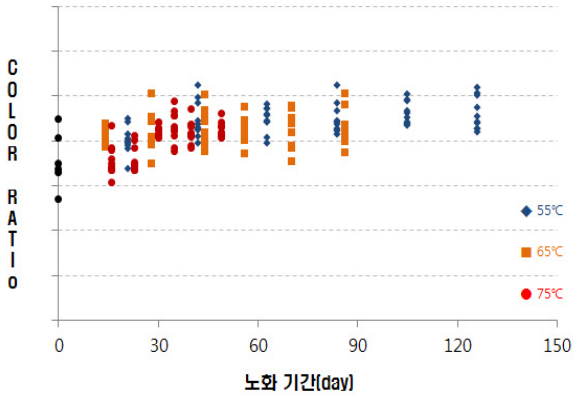


Fig. 7. Results of accelerated degradation tests (Color ratio)

선과 중적외선 총 에너지는 증가 후 감소하는 경향을 보이고 있다. Color Ratio는 시험 기간에 따라 증가하는 경향을 Fig. 7로부터 확인할 수 있으며 이로부터 중적외선 에너지 감소가 근적외선 에너지 감소율 보다 적다는 것을 알 수 있다.

3.3 저장 수명 예측

섬광제 조립체를 대상으로 3수준 온도 조건에서 가속열화시험을 실시한 후 총 6가지 특성치를 측정하였다. 이 중 관리 항목에 해당하는 연소 시간 ○○초 이상, 중적외선 최대 강도 ○○ W/sr 이상 그리고 Color ratio ○○ 이상을 기준으로 저장수명을 예측하고자 하였다. 그러나, 중적외선 최대 강도를 제외한 연소 시간 및 Color ratio는 증가하는 추이를 보여 규격 하한을 기준으로는 저장 수명에 영향도가 없을 것으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 중적외선 최대 강도의 규격 하한인 0,000 W/sr을 기준으로 저장수명을 예측하고자 한다. Fig. 3에 나타낸 중적외선 최대 강도는 미니탭을 이용한 각 관측 시점 별 데이터의 분포 식별 결과 대수정규분포를 가장 잘 따르고 분산이 동일하지 않음이 식별되었다. 강도 값, $X(t,T)$의 저하 추이에 반응비율 모델을 적용한 결과 3수준의 온도 조건에 대해 가장 적합한 평균 값 모델 식은 식 (6)으로부터 식 (11)과 같고, 표준 편차의 경우에는 식 (12)와 같다[9,10]. 실험 결과와 모델에 의한 추정 결과의 적합도 평가 결과 시간 척도는 $\sqrt{t}$로 모델링 하였다.

$$\mu(t,T) = E[X(t,T)] = u_1\left(1+u_2(T)u_3\sqrt{t}\right)^{-1/u_3} \quad (11)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{V[X(t,T)]} = u_4(1+\sqrt{u_5\times T\times\sqrt{t}}) \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)의 각 계수의 의미와 추정 값을 Table 2에 나타내었으며 보안 관계 상 평균의 초기 값은 ○○○으로 표기하였다.

3수준 온도 조건 별 임의 시점에서의 평균과 표준편차 추정 값을 기반으로 해당 시점에서의 규격 부적합확률을 시험기간에 따른 대수정규 수명분포의 누적고장 F(t)로써 Fig. 8에 비교하였다.

Fig. 8에서 시간 t에 따른 누적고장 F(t)의 선형성 확인을 위하여 각각의 축은 대수정규분포 확률지의 스케일을 사용하였다. 3 수준 온도조건 모두 선형성이 확인되므로 그래프의 기울기로부터 가속성 성립여부를

확인할 수 있다. 75 ℃ 조건의 경우 시험 기간에 따른 규격 부적합 증가 기울기가 55 ℃ 및 65 ℃와 큰 차이를 보여 가속성이 없는 것으로 판단된다. 즉, 55 ℃ 및 65 ℃ 조건은 동일한 열화메커니즘이, 75 ℃ 조건에서는 상이한 열화메커니즘이 진행된 것임을 추론할 수 있다. 이는 NC 추진제의 안정제 및 중량 감소에 대한 반응 속도상수가 65 ℃를 기준으로 달라진다는 기존의 연구 결과[3]에 부합되는 것으로 판단된다. 따라서, 상온 저장수명의 예측에는 55 ℃ 및 65 ℃ 시험 결과만을 이용하였으며 시험 결과 평균값에 대한 추정 결과 선도를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

Table 2. Estimation values and meanings of coefficients in equation (10) and (11)

	55°C	65°C	75°C	계수의 의미
u1	○○○	○○○	○○○	평균의 초기 값
u2	0.00204	0.00311	0.00220	반응속도 K
u3	0.00138	0.00143	0.00000	반응 차수(n) - 1
u4	0.10000	0.08606	0.10000	산포의 초기 값
u5	0.00002	0.00002	0.00010	산포의 변화율

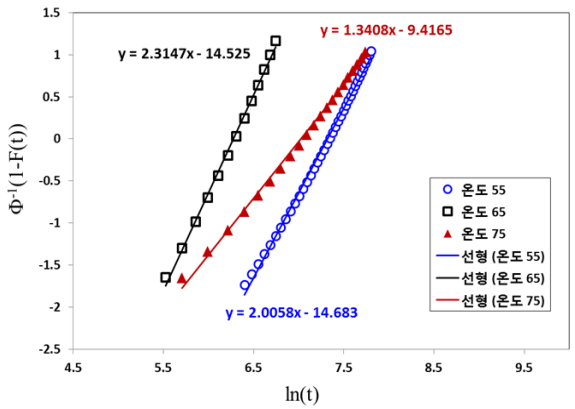


Fig. 8. Cumulative faliure of log-normal distribution

임의의 온도에서 저장 수명을 예측하기 위한 모델식은 아레니우스 모델을 기반으로 하여 수식화할 수 있다. 식 (13)은 온도에 따른 아레니우스 모델의 반응속도 상수에 대한 정의이다. Fig. 9 및 10에 나타낸 중적외선 최대 강도의 평균값은, Table 2에 나타낸 반응차수(n)가 1이므로 식 (9)로 부터 임의의 저장 온도(T) 및 저장 기간(t)에 대하여 식 (14)의 형태로 나타나며, 표준편차는 식 (15)와 같다.

$$K(T) = -\beta_1 \exp\left(-\frac{E_a}{k}\frac{1}{T}\right) \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\mu(t,T) &= E[X(t,T)] \\ &= \mu_0\left(\exp\left(-\beta_1 \times 10^7 \times \exp\left(-\frac{E_a}{k}\frac{1}{T}\right)\sqrt{t}\right)\right)\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}\sigma(t,T) &= \sqrt{V[X(t,T)]} \\ &= \sigma_0(1+\sqrt{\beta_2 \times 10^{-5} \times T \times \sqrt{t}})\end{aligned} \tag{15}$$

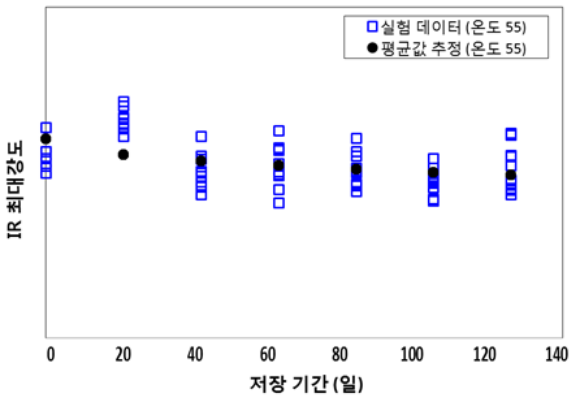


Fig. 9. Estimation result for mean values of Mid-IR peak at 55 ℃

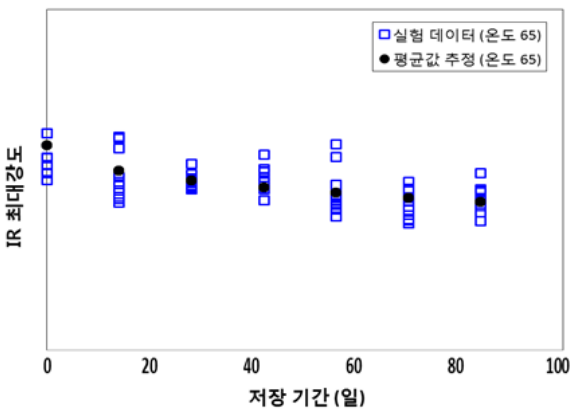


Fig. 10. Estimation result for mean values of Mid-IR peak at 65 ℃

식 (14)와 (15)의 계수 값들은 우도함수 추정법을 통하여 결정하였으며, 수치계산에는 MATLAB S/W를 이용하였다. 계수 $[\hat{\mu}_0,\ \hat{\beta}_1,\ \widehat{E_a/k}\ ,\ \hat{\sigma}_0,\ \hat{\beta}_2]$의 추정 결과는 [○○○, 35.307, 8620.752, 0.083, 2.855]이며, 보안 관계상 평균의 추정치를 ○○○으로 표기하였다. 임의의 온도 별 저장수명 예측 결과에 신뢰수준을 고려하기 위하여 추정된 계수들 각각에 대한 분산을 평가한 결과는 아래와 같다.

$$V[\hat{\mu}_0]=7.1895\times10^{-4},\quad V[\hat{\beta}_1]=4.9829\times10^{4},\quad V\left[\frac{\hat{E}_a}{k}\right]=4.6337\times10^{6},$$
$$V[\hat{\sigma}_0]=5.22\times10^{-4},\quad V[\hat{\beta}_2]\approx 58.0340$$

상기의 모델 식 및 계수 값들이 시험 데이터에 적합함을 확인하기 위하여 오차분석을 실시하였다. 모델 식에 의해 예측한 평균과 열화 시험 결과 개별 데이터들과의 오차는 평균이 0인 정규분포를 따르는 것을 확인할 수 있었으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

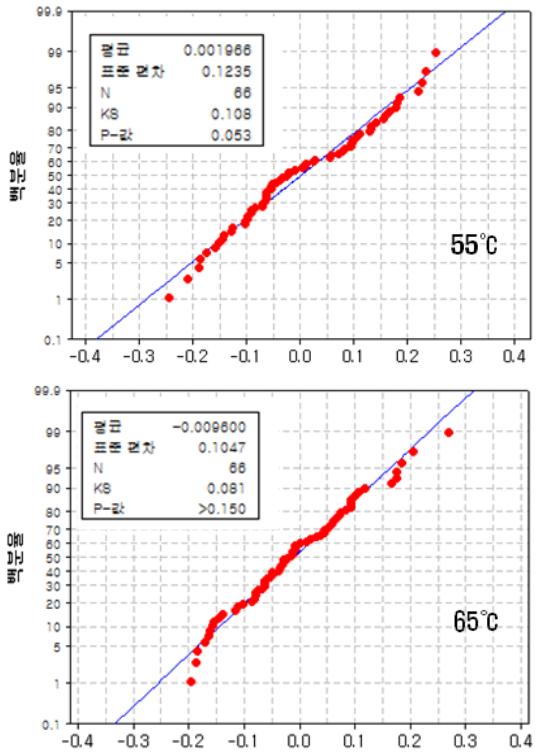


Fig. 11. Analysis of errors between estimation and experiment results about individual data

또한, 모델 식에 의해 예측한 평균과 열화 시험 결과 각 관측 시점의 평균과의 오차도 평균이 0인 정규분포를 따르는 것을 확인할 수 있었으며 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 따라서, 식 (14)와 식 (15)로 표현된 열화 모델 식과 각 계수들이 열화 시험 결과를 가장 잘 표현하는 모델임을 검증할 수 있었다.

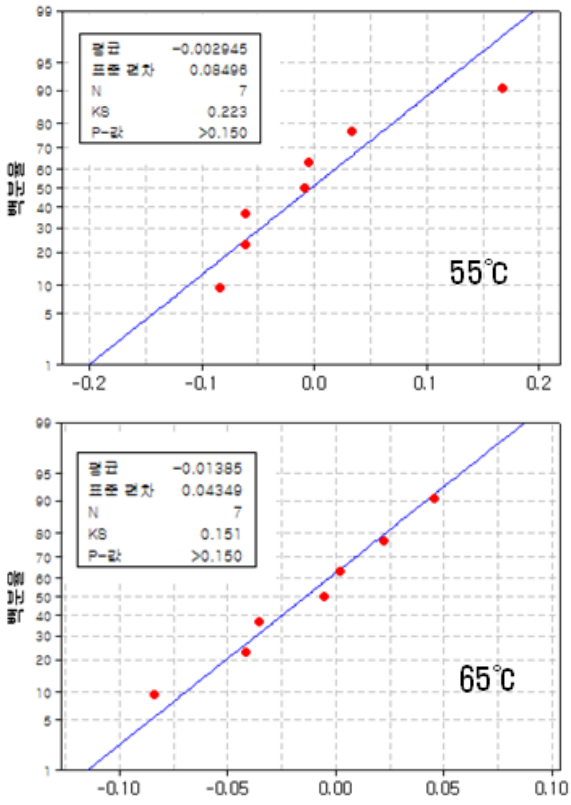


Fig. 12. Analysis of errors between estimation and experiment results about mean value

3.4 저장수명 예측

중적외선 최대 강도의 평균 및 표준편차에 대한 열화 모델 식 (14)과 식 (15), 추정된 각 계수 및 분산의 평가 결과를 기반으로 임의의 온도에서 저장기간에 따른 신뢰도를 예측하고자 한다. 신뢰도 예측의 기준은 규격 하한 ○○ W/sr에 대한 순응도이며, 식 (14)와 식 (15)의 추정된 계수들 각각에 대한 분산을 평가한 결과를 기반으로 저장수명 예측 결과로부터 신뢰수준 99 %에서의 최소 신뢰도를 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Estimation results of storage reliability at confidence level 99 %

저장 온도	저장 기간에 따른 최소 신뢰도						
	1년	5년	10년	20년	30년	50년	100년
65 ℃	0.595	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
55 ℃	0.994	0.357	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000
40 ℃	1.000	0.996	0.97	0.835	0.633	0.276	0.015
30 ℃	1.000	1.000	0.998	0.988	0.971	0.92	0.738
20 ℃	1.000	1.000	0.999	0.997	0.994	0.985	0.953

4. 결론 및 고찰

차기 적외선 섬광탄에 적용되는 섬광제 조립체를 대상으로 55 ℃, 65 ℃, 75 ℃ 조건의 가속열화시험을 수행하여 상온 저장 수명을 예측하였다. 중적외선 최대 강도 ○○ W/sr 이상을 만족하는 규격 순응도 관점의 신뢰도는 Table 3의 결과로부터 20℃ 저장 온도에서 신뢰수준 99 %, 신뢰도 99 % 기준으로 30년 이상 이며, 30 ℃ 기준 약 10년 그리고 40 ℃ 저장 온도 기준 약 5년 수준으로 예측되었다. 연구 결과 아레니우스 수명 식의 활성화 에너지는 약 0.776[eV]이며, 이를 기반으로 가속계수를 고려한 결과 21 ℃ 조건에서 10년 저장조건은 65 ℃에서 68일 저장조건으로 모사될 수 있음을 제시할 수 있다. 본 연구의 저장 수명 예측 결과 및 신뢰수준 99 %의 의미는 확보된 시험 데이터만의 산포를 분석한 결과이며, 현재의 공정관리 수준이 유지되지 못하고 평균의 초기값이 줄어들거나 산포가 증가하는 경우에는 본 연구의 예측 결과보다 저장 수명이 감소할 수 있다. 본 연구 결과는 차기 적외선 섬광탄의 양산 배치 시에 수락시험 규격화 및 정비 정책의 수립에 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 풍산기술연구원에서 추진하는 “차기 적외선 섬광탄 체계 개발” 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] Manfred A. Bohn, “Insensitivity Aspects of NC Bonded and DNDA Plasticizer Containing Gun Propellants,” 37th International Annual Conference of ICT, 2006.

[2] Stephan Wilker, “Triphenylamine - a New Stabilizer for Nitrocellulose Based Propellants - Part I,” Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 32, No. 2, pp. 135-148, 2007.

[3] Manfred A. Bohn, “NC-based Energetic Materials - Stability, Decomposition, and Ageing”, Presentation on the Meeting, Mitrocellulose - Supply, Aging and Characterization, 2007.

[4] Robert J. Lieb, “Characteristics of JAX Gun Propellant,” Army Research Lab., Aberdeen Proving Ground MD, 1994.

[5] R. Stenson, “Factors Governing the Storage Life of Solid Propellant Rocket Motors,” Explosives Research and Development Establishment Waltham Abbey, 1972.

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

[7] 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.

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

[9] Back, S. Son, Y., Lim, S., Myung, I., “Storage Life Estimation of Magnesium Flare Material for 81 mm Illuminating Projectile,” Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology, Vol. 18, No. 3, pp. 267-274, 2015.

[10] 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.