

열화데이터를 이용한 자색 연막수류탄(KM18)의 저장수명 평가

Storage Life Evaluation of a Violet Smoke Hand Grenade(KM18) using Degradation Data

장 일 호*	홍 석 환**	장 현 정***	손 영 갑***
Il-Ho Chang	Suk-Hwan Hong	Hyun-Jeung Jang	Young Kap Son

Abstract

A violet smoke hand grenade(KM18) is used to generate signals. The grenade is considered to fail when its smoke emission time is longer than the specified one so that its smoke concentration becomes lighter. Accelerated degradation test for the grenade was performed, and then failure in smoke emission time was reproduced from the test. Stress for the degradation test was selected as temperature/humidity from the pre-test results. Degraded data of emission time from the accelerated test were analyzed through applying a distribution-based degradation model. Then, Peck Model was applied to predict the storage life under field conditions. In addition, the predicted storage life was compared with that of ASRP(Ammunition Stockpile Reliability Program).

Keywords : Reliability(신뢰성), Storage Life(저장수명), Storage Reliability(저장신뢰도), Accelerated Degradation Testing(가속열화시험), Smoke Hand Grenade(연막수류탄)

1. 서론

저장탄약 신뢰성평가는 탄약의 신뢰성 확보를 통하여 항상 불출 및 사용이 가능하며 탄약을 안전하게 저장·관리할 수 있고 장기 저장 탄약의 악작용을 해소시킬 수 있다. 따라서 사용이 불가능한 탄약을 사전에

색출하고, 성능이 저하되고 있는 탄을 조기에 사용하도록 유도함으로써 군 전투력 지수를 향상시킬 수 있는 중요한 연구이다.

일반적으로 시스템은 수리계(repairable system)인 운용시스템(operational system), 그리고 비수리계(irreparable system)인 비운용시스템으로 구분된다. 탄약류와 같은 비수리계 시스템은 1회 사용 후 시스템이 용도를 마무리하는 원샷 시스템(one-shot system, 일회성 시스템)의 특성을 지니고 있기 때문에 파괴적인 시험평가를 통해서만이 신뢰성 평가가 가능하다.

원샷 시스템은 크게 시간에 따른 원샷 시스템의 성공/실패로 표현되는 가부반응 데이터를 이용하는 방법

† 2011년 12월 15일 접수~2012년 2월 10일 게재승인

* 국방기술품질원(Defense Agency for Technology and Quality)

** (주)한화 여수사업장(Hanwha Co., Ltd.)

*** 안동대학교(Andong National University)

책임저자 : 손영갑(ykson@andong.ac.kr)

과 원샷 시스템의 시간에 따른 성능값 변화를 나타내는 열화(degradation) 또는 노화(aging) 데이터를 이용하는 방법으로 구분된다^{11,12}.

본 논문의 연구대상인 자색 연막수류탄(KM18)의 저장수명 예측은 원샷 시스템의 연막 방출시간에 열화데이터를 이용하였으며 연막 방출시간에 대한 효율적인 가속열화조건을 설정하기 위하여 예비시험을 수행하였다. 예비시험을 토대로 선정된 가속열화조건을 이용, 가속열화시험을 수행하였으며, 열화된 데이터 분석을 통하여 항온 항습(20℃, 60%) 조건에서의 저장수명을 예측하고자 하였다. 또한 예측된 저장수명을 검증하기 위하여 군보유 탄약의 연막 방출시간 데이터와 비교하였다.

발생유형을 살펴보면 유색 연막수류탄 생산초기에는 신관 기능이상 현상이 주로 발생하였으며, 90년대 이후 군 수요가 급증하여 생산물량이 증가되면서 장기저장에 따른 연막 방출시간 초과 현상이 많이 발생되었다.



Fig. 1. Violet smoke hand grenade

2. 이론적 배경

가. 자색 연막수류탄

유색 연막수류탄(colored smoke hand grenade)은 녹색(green), 적색(red), 자색(violet), 황색(yellow)의 4종류가 있으며, 본 연구에서는 자색 연막수류탄(KM18)을 대상으로 한다. 유색 연막수류탄은 규격에 규정된 일정 시간 동안 유색의 연막을 형성하여 신호의 목적으로 사용되는 탄약이다. 본 연구의 대상인 유색 연막수류탄의 외관 형상 및 구조를 Fig. 1에 나타내었으며, 연막수류탄 내부에 충전 되어 있는 화공품인 연막제와 착화제의 조성을 Table 1에 나타내었다. 또한 연막제의 주요 성분 및 기능을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Material compositions of smoke and complexing agents

연막제 조성 (%)	착화제 조성 (%)
자색 염료 : 00 ± 00	염소산칼륨 : 00 ± 00
중 조 : 00	유 황 : 00 ± 00
염소산칼륨 : 00	중 조 : 00 ± 00
자 당 : 00	전 분 : 00 ± 00
NC(결합제) : 00	NC(결합제) : 00 ± 00
동일 착화제에 색상별 연막제 조성에 차이가 있음	

연막수류탄의 제조방식은 용제형(solvent type)과 무용제형(solventless type)이 있다. 용제형 제조방식은 유황(sulfur)을 연료로 한 연막제 원료를 용제인 아세톤(acetone)에 녹여 슬러리(slurry) 상태로 탄에 충전 한 후 건조(경화)하여 제조하는 방식이다. 이 방법의 단점은 제조 후 소량의 용제가 잔존하며 이를 정량적으로 관리하기가 어려운 데에 있다. 반면에 무용제형 제조방식은 아세톤에 녹인 연막제 및 착화제 원료를 먼저 건조시켜 용제를 제거한 후 건조된 연막제를 일정한 압력으로 압착시켜 탄에 충전 하는 방식이다. 용제를 먼저 건조시킴으로 잔류용제의 관리가 용이하며, 현재는 무용제형 제조방식으로 변경하여 연막수류탄을 생산하고 있다.

Table 2. Main components of smoke with each function

구분	종류	기능
연료 (Fuel)	유황(Sulfur) 또는 자당(Sucrose)	산화제로부터 산소를 공급받아 연소하여 열과 가스를 생성
산화제 (Oxidizer)	염소산칼륨(Potassium Chlorate, KClO ₃)	열에 의해 분해되어 발생된 산소(O ₂)를 연료에 공급
냉각제 (Coolant)	중탄산나트륨(Sodium Bicarbonate, NaHCO ₃)	자체 분해시 흡열 분해반응을 일으켜 반응속도를 조절
염료 (Dyes)	벤잔스론 등 5종	반응열을 흡수하여 상변화 후 대기 중에 확산되어 유색의 연막을 형성
결합제 (Binder)	면약(NC) 또는 아세톤(Acetone, CH ₃ COCH ₃)	무용제형은 면약이 각 성분들을 결속시키는 역할을 하며, 용제형은 아세톤이 휘발되면서 연막제를 성형(경화)시킴

유색 연막수류탄의 악작용 발생현황은 1978년 규격화 후 현재까지 12건의 악작용이 보고되었다. 악작용

나. 기존 연구결과 고찰

유색 연막수류탄에 대하여 다양한 문헌조사를 실시하였고 그 결과 연막탄이 장기 저장됨에 따라 연막 방출시간이 증가될 수 있는 내부의 화학적 변화에 대한 가설을 수립할 수 있었다.

생산공정에서 잔류하는 아세톤이 장기 저장 시 연막제를 열화시키고, 연막수류탄 연소 시 연소 반응을 방해한다^[3]. 따라서 잔류 아세톤으로 인한 연소 반응 방해 때문에 연막 방출시간이 증가 될 것이라고 판단되었다.

반응속도는 연료에 대한 산화제의 함량비에 따라 달라지며, 연료에 대한 산화제의 함량비가 높을수록 최고 0.3Kcal/g의 반응열량이 증가하여 반응속도가 빨라진다^[4]. 따라서 염소산칼륨의 분해 또는 비활성화로 산화제의 상대적 함량이 줄어 연소속도가 늦어진다.

냉각제 중탄산나트륨은 연막제 혼합물에서 산화제와 연료의 연소반응 시 과량으로 발생된 열을 제거하여 연막제와 산화제의 연소반응 속도를 조절하는 역할을 한다^[4]. 따라서 연료 물질의 분해 또는 비활성화로 인해 냉각제가 상대적으로 증가 할 수 있다. 이와 유사한 내용으로 비금속 연료로서 황을 사용할 경우 특히, 산화제로 염소계열을 사용하는 경우 수분 침투에 의해 자체 분해가 지속적으로 발생할 수 있다고 밝히고 있다^[5]. 따라서 연료물질의 분해현상이 연막 방출시간 증가 현상의 원인으로 판단되었으나 중화제를 사용하는 경우 이를 방지할 수 있다고 언급되어 있어 이후에 개선되었을 가능성이 높다고 판단하였다.

유색 연막수류탄에 대한 내부의 화학적 경시변화에 대한 조사와 병행하여 그간 연막수류탄에 대하여 수행한 환경시험과 가속열화시험의 조건들을 조사하였다. M18 연막수류탄 개발 당시 12주간 155°F(68.3°C)에서 시험 후 연막 방출시간이 상승되는 결과를 확인한 이력이 있었다. 이후로 바인더 변경 등 연구 시 70°C 조건에서 열화시험을 실시하였다. 따라서 고온 70°C 조건의 스트레스가 적합하다고 사료된다. 온도 cycle(-54°C ~ 21°C ~ 71°C) 시험조건은 무용제형 제조방식 검토 시 환경 시험조건을 참조하였으며 24일 열화시험 후 연막 방출시간 +2.9초를 확인할 수 있었다. 또한 온습도 cycle(32.2°C ~ 71.1°C, 30 ~ 85%) 시험조건은 기존 연구 결과를 참조하였다^[6]. 고온고습 시험조건은 기존 시험 사례는 없으나 온습도 cycle 시험 대비 고온고습의 영향을 효율적으로 평가 가능하다. 따라서 stress 범위는 기존 시험 결과 자료를 참조하여 온도는 -50°F

(-45.5°C) ~ 160°F(71°C), 습도는 10 ~ 85% 수준으로 적용 가능하다.

다. 열화데이터 분석 이론

연막 방출시간의 변화는 방출시간에 영향을 미치는 인자의 질량 감소 또는 증가로 판단할 수 있기 때문에 방출시간의 변화량을 이용한다. 초기 시료의 방출시간을 D_0 로, 임의의 시점 t 에서의 방출시간을 $D(t)$ 라 정의하면 화학반응의 반응비율(reaction rate), α 는 식 (1)과 같이 표현된다^[7].

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

반응비율은 연막 방출시간이 시간에 따라 감소하면 양의 값을 가지며, 증가하는 경우 음의 값을 가진다. 또한, 초기 시료에 대한 반응비율은 화학 반응이 없기 때문에 0의 값을 가지며 초기 연막 방출시간 대비 연막 방출시간이 증가함에 따라 화학반응이 지속적으로 진행되어 반응비율의 절대 값은 증가한다.

열화속도는 반응비율의 시간에 대한 변화로 정의되며, 온도와 습도가 증가할수록 반응속도가 증가하기 때문에 열화속도 또한 증가한다. 따라서 열화속도를 온도(T)와 습도(RH)의 함수로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) (RH)^n (1-\alpha)^n \\ &= K(T, RH)(1-\alpha)^n \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 n 은 반응차수(reaction order)를 나타낸다. 반응비율을 결정하기 위하여 식 (2)의 양변을 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{(1-\alpha)^{1-n}}{n-1} = Kt + C \tag{3}$$

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

$$\alpha = 1 - \left[\frac{1}{(n-1)Kt + 1} \right]^{1-n} \tag{4}$$

또한 식 (4)에서 (n-1)K는 a로 1/(1-n)는 b로 정의하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현되며, 식 (1)과 (5)를 이용하여 D(t)를 정의하면 식 (6)과 같다.

$$\alpha = 1 - [at + 1]^b \quad (5)$$

$$D(t) = D_0(1 - \alpha) = D_0(at + 1)^b \quad (6)$$

3. 연구 결과

가. 시험조건 설정 및 예비시험 결과

장기 저장 후 연막 방출시간이 증가하는 현상을 재현하는 시험조건을 수립하기 위하여 예비시험을 실시하였으며, 이를 통해 수립한 시험조건으로 가속열화시험을 수행하였다. 시험에 사용된 연막수류탄은 무용제형 제조방식으로 생산된 것을 이용하였다. 예비시험의 조건은 고온, 온습도 cycle, 고온고습으로 세 가지이며 1차와 2차로 나누어 수행하였다. 1차와 2차의 시험조건은 수준을 달리하여 각 시험/차수 당 10발 씩 시료를 이용하였으며, 1차 시험조건으로 15일 시험 후 2차 시험을 15일간 실시하였다. 표기를 간단히 하기위해 총 6가지의 시험조건을 1차 시험 부터 순서대로 A, B, C, D, E, F로 표기하였으며 시험조건을 Table 3에 나타내었다.

예비시험 결과는 초기 값과 함께 신뢰수준 95%의 구간그래프로 나타내었으며 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 가로축의 A, B, C, D, E, F는 1차와 2차 시험에서의 6가지 시험조건을 나타내며 세로축은 연막 방출시간을 나타낸다. 구간그래프를 통해 초기 값 대비 A, B, C, E, F의 연막 방출시간이 증가했다고 할 수 있으며 D는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 1차와 2차 시험의 결과를 비교해 보면, A-D 조건은 연막 방출시간이 감소했으며 B-E, C-F 조건은 연막 방출시간이 증가했음을 알 수 있다.

구간그래프를 통해 확인한 결과들이 얼마나 통계적으로 유의한지 알아보기 위해 t-test와 차분(differenc)을 이용하였다^[8]. t-test는 Minitab을 이용하여 95% 신뢰수준으로 수행하였으며 연막 방출시간의 증가 여부에 대한 검정이므로 단측 검정을 수행하였다. 또한 t-test는 초기데이터를 이용하여 초기데이터 대비 1차 시험, 1차 시험 대비 2차 시험, 초기데이터 대비 2차 시험 결과에 대해 수행하였다. 검정 결과는 Table 4에 나타나

Table 3. Pre-test conditions

	1차 (15일)	2차 (30일)
고온 70℃ → 90℃	A: 고온 70℃, 15일	D: 고온 70℃ 15일 이후 고온 90℃ 15일
온습도 cycle 32.2℃ ~ 71.1℃ 30~85% → 90℃, 85%	B: 온습도 cycle 32.2℃ ~ 71.1℃ 30~85% 24시간/cycle, 총 15cycle	E: 온습도 15cycle 이후 고온고습 90℃, 85% 15일
고온고습 71℃, 85% → 90℃, 85%	C: 고온고습 71℃, 85%, 15일	F: 고온고습 71℃, 85% 15일 이후 90℃, 85%, 15일

초기, A, B, C, D, E, F의 구간 플롯

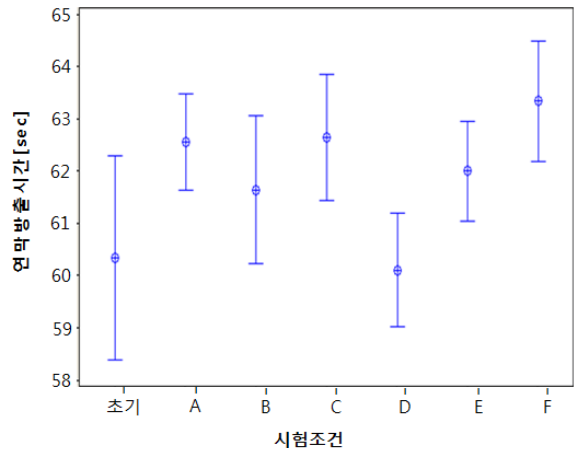


Fig. 2. Interval plots of emission time from the pre-test results

Table 4. P-value for each t-test result

a)	초기-고온(1)	0.017
	초기-온습도 cycle(1)	0.108
	초기-고온고습(1)	0.017
b)	고온(1)-고온(2)	0.999
	온습도 cycle(1)-고온고습(2)	0.320
	고온고습(1)-고온고습(2)	0.179
c)	초기-고온(2)	0.599
	초기-온습도 cycle(1) & 고온고습(2)	0.046
	초기-고온고습(2)	0.005

있으며 p-value가 0.05 이상이면 두 시험결과 연막 방출시간의 차이는 없다고 할 수 있다.

Table 4에서 초기는 초기시험데이터를 나타내며, (a)는 초기데이터 대비 1차 시험, (b)는 1차 시험 대비 2차 시험, (c)는 초기데이터 대비 2차 시험에 대한 t-test 결과를 나타낸다. 또한 (1)과 (2)는 각각 1차와 2차 시험결과를 나타낸다.

초기데이터 대비 1차 시험의 t-test 결과 초기데이터-온습도 cycle(1)의 p-value가 0.05이상으로 초기데이터와 차이가 없으며 고온(1), 고온고습(1)의 연막 방출시간은 초기데이터 보다 증가하였다. 1차 시험 대비 2차 시험의 t-test 결과 p-value가 모두 0.05이상으로 1차 시험과 2차 시험의 차이는 없다. 초기데이터 대비 2차 시험의 t-test 결과 초기데이터 대비 1차 시험의 t-test 결과와는 다른 경향을 나타내며, 초기데이터 대비 온습도 cycle(1) & 고온고습(2), 고온고습(2)의 연막 방출시간이 증가했음을 알 수 있다.

t-test 결과로부터 어느 시험조건에서 초기데이터 대비 연막 방출시간이 증가하였는지 알 수 있었다. 또한, 어느 조건에서 가장 큰 변화를 나타냈는지 확인해보기 위해 차분을 이용하였다. 차분은 Minitab을 이용한 t-test 수행 시 알 수 있는 값으로 Table 5에 나타내었다. A-B의 차분이 양의 값을 가지면 A 조건 시험 결

Table 5. Difference and the p-value for each pair

시험조건 pair	차분	p-value
A-B	0.909	0.247
A-C	-0.091	0.896
A-D	2.445	0.001
A-E	0.545	0.367
A-F	-0.788	0.242
B-C	-1.000	0.247
B-D	1.536	0.070
B-E	-0.364	0.640
B-F	-1.697	0.051
C-D	2.536	0.003
C-E	0.636	0.367
C-F	-0.697	0.359
D-E	-1.900	0.009
D-F	3.233	0.000
E-F	-1.333	0.058

과의 값이 B 조건 보다 큼을 의미하며 A-B의 차분이 음의 값을 가지면 A 조건 시험 결과의 값이 B 조건 보다 작음을 의미한다.

따라서 차분을 이용하여 연막 방출시간이 큰 순서대로 나열하면 $F > C > A > E > B > D$ 이다. 이것은 F 조건, 고온고습(2) 시험결과 연막 방출시간이 초기데이터와 비교하였을 때 가장 많이 증가하였음을 의미한다.

나. 군 보유 탄약 분석

군 보유 탄약 분석은 저장기간이 용제형 10년, 14년, 20년, 26년, 무용제형 2년, 3년, 4년, 5년인 연막탄을 이용하였으며 저장기간 별 연막 방출시간에 대한 구간 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 군 보유 탄약 저장기간 별 연막 방출시간 데이터는 열화분포모델을 적용하여 분석하였으며, 이를 통해 규격을 만족하지 못하는 누적고장확률을 평가하여 저장수명을 예측하였다. 누적고장확률 값으로부터 수명분포의 적합도를 알아보았으며, 수명분포로는 와이블분포와 대수정규분포를 고려하였다. 누적고장확률 값과 고려한 수명분포로부터 추정된 누적고장확률 값은 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 4를 통해 용제형과 무용제형 모두 수명분포가 와이블분포에 더 적합함을 알 수 있다. 와이블분포의 형상모수와 척도모수는 용제형 3.61, 28.65, 무용제형 5.26, 29.06이며, 저장수명(B₁₀수명)은 용제형 14년, 무용제형 18년이다.

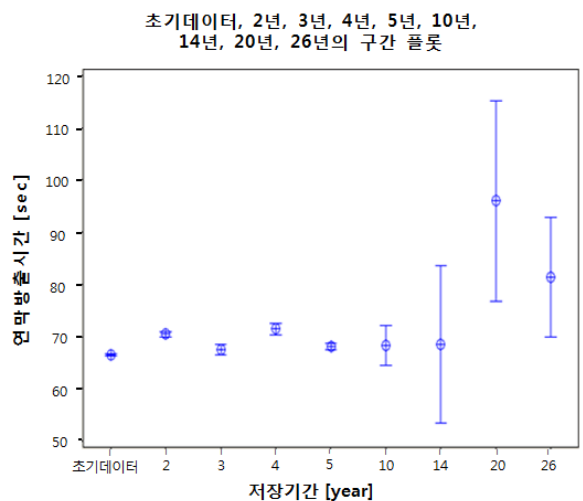


Fig. 3. Interval plots of smoke emission time for grenades in field over storage time

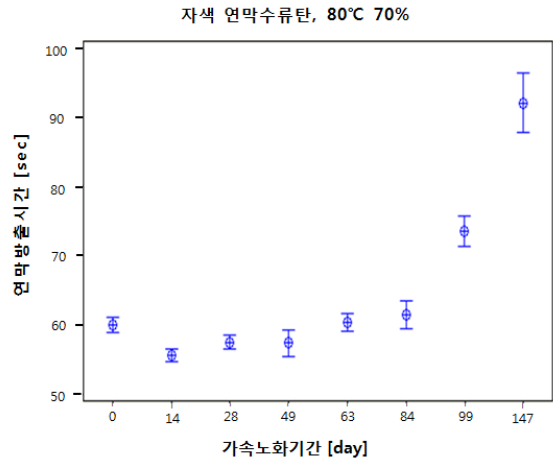
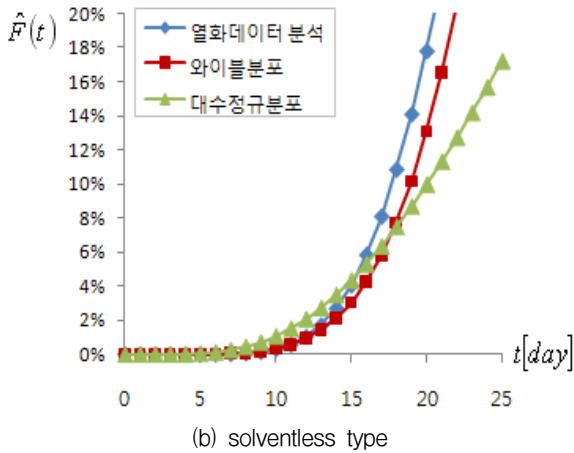
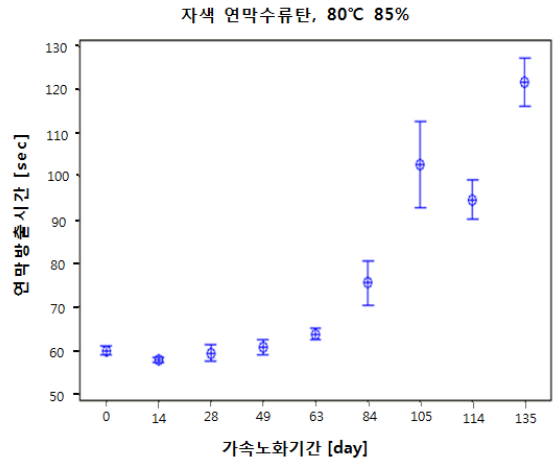
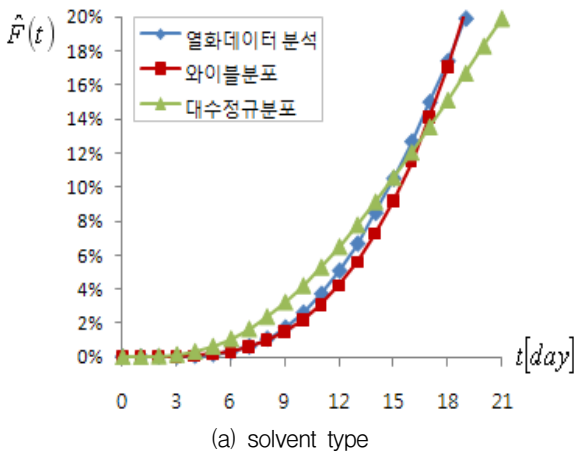


Fig. 4. Estimated cumulative failure probability of grenade in field

다. 가속열화시험 결과 분석

예비시험 결과를 통계적으로 분석한 결과 고온고습 조건에서 연막 방출시간이 가장 크게 증가하였음을 알 수 있었다. 그러나 예비시험 2차 조건이었던 90°C, 85% 시험을 15일간 수행한 결과 일부 시료에서 탄체 내부 압력이 급격히 상승하였다고 판단할 수 있는 테이프 부위 부풀어 오름이 관찰되었다. 따라서 가속열화시험조건을 3조건, A - (80°C, 85%), B - (80°C, 70%), C - (65°C, 70%)로 수립하였다. 관측 주기는 초기 2주로 고정하여 계획을 수립하였으며 최초 3차 및 이후의 관측 결과에 따라 추가 관측 주기를 조정하는 방식으로 진행하였다. 가속열화시험 결과 연막 방출시간은 Fig. 5에 나타내었다.

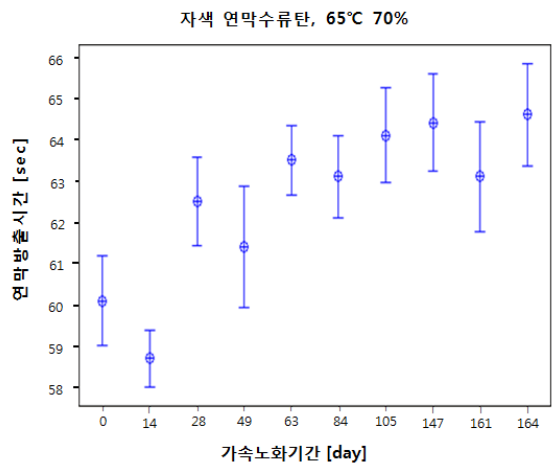


Fig. 5. Interval plots of smoke emission time for grenades in the degradation test

가속열화시험 결과분석은 열화분포모델을 적용하여 분석하기 때문에 각 시점 별 연막 방출시간 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. 적합도 검정 결과 중 80℃, 70%에 대한 결과를 Table 6에 나타내었으며, 시점 별 분포 적합도 검정 결과로부터 대부분 대수정규분포에 적합한 것을 알 수 있다. 가속열화시험 결과 각 시점에서의 연막 방출시간 데이터는 대수정규분포를 따르므로 연막 방출시간 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 (6)으로부터 열화분포의 시간에 따른 평균 및 표준편차를 식 (7)과 (8)로 표현하였다.

$$\mu(t) = u_1(u_i t + 1)^{u_{i+1}} \quad (7)$$

$$\sigma(t) = u_8 + u_j t \quad (8)$$

A 조건의 경우 $i = 2, j = 8$ 이며, B 조건의 경우 $i = 4, j = 9$, C 조건의 경우 $i = 6$ 이다. u_j 는 시간에 대한 표준편차의 변화율을 나타내며 등분산 검정결과 C 조건은 등분산이기 때문에 표준편차의 변화율을 고려하지 않았다. 또한 u_1 과 u_8 은 $d(t = 0)$ 에 대한 평균과 표준편차를 나타내며 3 조건에 대해서 같은 값을 가진다. 따라서 A, B, C 조건의 평균과 편차 식에 포함된 변수는 총 10개이다.

Table 6. AD values for each lifetime distribution of 80℃, 70% data

시간	대수정규	정규	와이블	지수
0	0.910	0.915	1.038	4.398
14	0.659	0.644	0.584	4.398
28	0.463	0.460	0.551	4.402
49	0.218	0.226	0.348	4.203
63	0.737	0.759	0.974	4.364
84	0.849	0.878	1.076	4.256
99	0.258	0.281	0.522	4.253
147	0.349	0.347	0.392	4.056

평균과 편차 식의 변수들은 식 (9)로 표현되는 우도함수를 최대화 하여 구한다. 식 (9)에서 i 는 방출시간 측정 시점, j 는 측정된 시료 수를 나타낸다.

$$L(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10} | D_j(t_i)) = \prod_{i=1}^{10} \prod_{j=1}^{n_i} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_j(t_i) \sigma(t_i)} \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(D_j(t_i)) - \mu(t_i)}{\sigma(t_i)}\right)^2\right) \right\} \quad (9)$$

우도함수를 이용하여 구한 변수를 식 (7)과 (8)에 대입하여 시험조건 별 평균과 편차에 관한 식을 구하였다. 이를 이용하여 연막 방출시간이 규격을 만족시키지 못하는 누적고장확률($\hat{F}(t)$)을 평가하였으며, Fig. 6에 나타내었다. 또한, 가속성을 검증하기 위하여 수명분포가 대수정규분포인 경우에 대하여 시간에 따른 누적고장확률 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

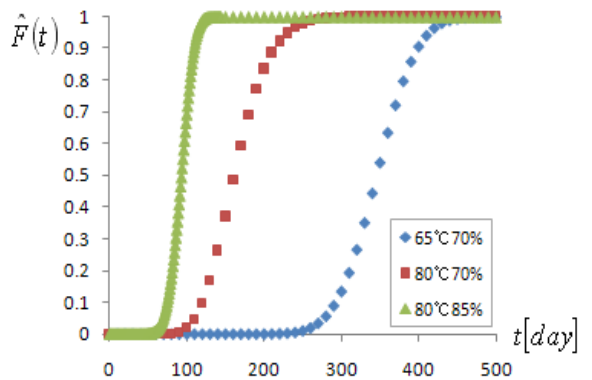


Fig. 6. Estimated cumulative failure probability

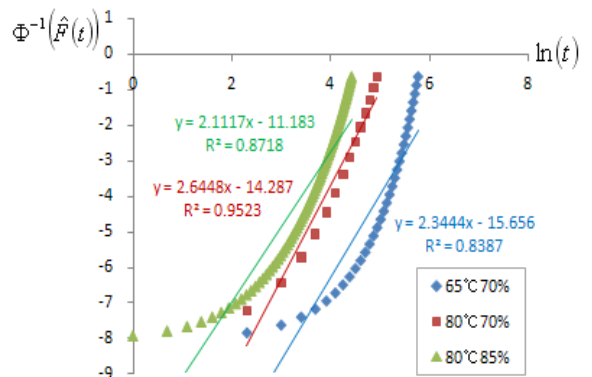


Fig. 7. Verification of life acceleration over stress

Fig. 7에서 형상모수가 각각 2.11, 2.64, 2.34로 가속성이 성립함을 알 수 있다. 또한 Fig. 6으로 부터 시험 조건 별 추정된 B_{10} 수명은 가속열화시험 조건에 따라 각각 293일(65℃, 70%), 121일(80℃, 70%), 75일(80℃, 85%)이다.

라. 항온항습 조건에 대한 저장수명 예측

가속된 스트레스 조건에서 추정된 수명을 이용하여 정상 조건에서의 수명을 예측하는데 수명과 스트레스의 관계식을 나타내는 가속수명모델식이 사용된다. 이러한 가속수명모델식 중, 2가지 스트레스인 온도와 습도에 대한 수명과의 관계식을 나타내는 모델식이 식 (10)으로 표현되는 펙(Peck) 모델^[9]이다.

$$L = A \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) (RH)^{-n} \quad (10)$$

여기서, T는 절대온도, RH는 상대습도, k는 볼츠만 상수, A와 n은 각각 재료 및 구조에 따라 결정되는 상수, E_a 는 활성화 에너지를 나타낸다.

식 (10)은 온도와 습도가 증가함에 따라 수명(L)이 감소되는 관계를 나타내며, 정상조건인 임의 온도 T와 상대습도 RH에서의 수명을 예측하기 위해서는 식 (10)에서 A와 n, 그리고 E_a 에 대한 값이 우선 정의되어야 한다. 식 (10)의 양변에 자연로그값을 취하면 식 (11)로 표현된다.

$$\ln(L) = \ln(A) + \frac{E_a}{k} \frac{1}{T} - n \ln(RH) \quad (11)$$

따라서 3가지 이상의 가속조건에서 추정된 각각의 수명을 이용하여 스트레스를 반응변수로, 수명을 종속변수로 하는 다중회귀분석을 적용하여 상수값인 A와 n, 그리고 E_a 를 추정한다. 최종적으로 정상조건인 임의 온도 T와 상대습도 RH에서의 수명은 식 (10)과 추정된 상수값을 이용하여 추정한다. 가속시험조건이 수가 많을수록 상수값 추정의 정확성이 높아지지만 제한된 시험기간과 시험 시료수를 고려하여 본 연구에서는 3가지 가속열화시험을 수행한 결과만을 이용하여 상수값들을 추정하였다.

본 연구에서는 항온항습 저장조건을 온도 20℃, 상대습도 60%로 가정하였으며 이러한 저장조건에서의 저장수명(B_{10} 수명)을 예측하고자 한다. 따라서 3가지

가속열화시험 조건과 추정된 각 조건에서의 B_{10} 수명인 293일, 121일, 75일을 이용하여 다중회귀분석을 수행하였으며 식 (10)의 상수 A는 0.0054, E_a/k 는 7035, n은 2.3로 추정하였다. 고려한 항온항습 저장조건과 추정된 상수값들을 식 (10)에 적용한 결과, 항온항습 저장조건(온도 20℃, 상대습도 60%)에서의 저장수명은 25.99년으로 예측된다.

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 자색 연막수류탄(KM18)을 대상으로 장기 저장 시 연막 방출시간이 증가하는 현상에 대한 연구를 수행하였다. 기존 연구결과 조사를 통하여 연막 방출시간이 증가하는 원인에 대한 가설을 수립하고 이를 재현할 수 있는 가속열화시험을 수행하였다. 열화분포모델을 적용하여 가속열화시험 결과를 분석하여 가속조건에서의 수명을 평가하였다. Peck 모델에 각각의 가속조건에서 평가된 수명값들을 적용하여 항온항습 조건에서의 저장수명을 예측하였다. 예측한 항온항습 저장수명은 25.99년이며, 군 보유 탄약의 저장기간에 따른 연막방출시간에 대한 분석결과로부터 추정된 저장수명은 18년이다. 항온 항습으로 가속열화시킨 시험과 군에서 보유한 실질적인 저장 수명이 약 8년 정도 차이를 보이고 있는데 이는 사계절이 뚜렷한 국내 저장조건에 계절적 온도 충격, 또는 일교차 등 다양한 인자에 변동될 수 있음을 의미한다. 실험실적 수명과 실질적인 저장수명과의 차이를 줄이기 위해서는 실험방법의 조건 설정 및 환경 인자의 변동을 고려한 수명 추정방법 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 국방기술품질원과 <주>한화에서 추진하는 “연막수류탄 저장수명 및 노화메커니즘 연구” 사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] Son, Y. K. and Jang, H. J., “Comparison of Reliability Estimation Methods for One-shot Systems

- using Accelerated Life Tests”, Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol. 36, No. 4, pp. 212~218, 2010.
- [2] Chang, I.-H., Park, B.-C., Hwang, T.-S., Hong, S.-W., Back, S.-J., and Son, Y. K., “Storage Lifetime Estimation of Detonator in Fuse MTSQ KM577A1”, Journal of the Korean Society for Quality Management, Vol. 38, No. 4, pp. 504~511, 2010.
- [3] Kim, G.-H., “The Report on the Malfunctioning Status and Quality Improvement Case of Colored Smoke Hand Grenade, KM18”, Defense Quality Assurance Agency, pp. 23~30, 2005.
- [4] Ko, S.-I., “A Study on the Alteration of Fuel and Loading Method for Smoke Mixture in the Smoke Hand Grenade KM18”, Defense Quality Assurance Agency, pp. 10~12, 2000.
- [5] Ellern, Herbert, “Military and Civilian Pyrotechnics”, Chemical Publishing Company INC. New York 1968.
- [6] Renfroe, D. W., “Development of a Floating Smoke Grenade Air and Surface to Surface”, U. S. Army Land Warfare Laboratory, 1972.
- [7] Kaustubh, A. “Patekar, Long Term Degradation of Resin for High Temperature Cposites”, Massachusetts Institute of Technology 1998, September 1998.
- [8] Hines, W. and Montgomery, D. C., Probability and Statistics in Engineering and Management Science, Wiley, 1990.
- [9] Nachlas, Joel A., Reliability Engineering Probabilistic Models and Maintenance Methods, Taylor & Francis Group(CRC), 2005.