

저장수명 연구를 통한 백색 연막수류탄(KM8)의 공정관리 효율화

Efficient Process Control Through Research on Storage Lifetime of a White Smoke Hand Grenade, KM8

장 일 호*
Il-Ho Chang

홍 석 환**
Suk-Hwan Hong

백 승 준***
Seung-Jun Back

손 영 갑***
Young Kap Son

Abstract

A white smoke hand grenade, KM8 is used to make smoke screen in order to provide visual field interceptions or signals. The grenade fails when its time to emit smoke is longer than the specified emission time so that the smoke concentration becomes lighter. This paper considered failure in smoke emission time, and evaluated its storage lifetime. The main objective of this paper is to modify the present specification limits of smoke emission time for the efficient process control in manufacturing, through analyzing effect of its specification change on the storage lifetime, based on the lifetime evaluation results. Accelerated degradation test was performed and then failure in smoke emission time was reproduced from the test. And estimated storage lifetimes from the accelerated test results was compared to evaluated lifetimes of grenades using the ASRP data. Past process testing results of the grenade in manufacturing were analyzed in this paper. Then, each storage lifetime for the specifications, ± 3 and ± 5 in seconds, extended from the current specification in manufacturing were estimated using the past testing results, and compared to one another.

Keywords : Smoke Hand Grenade(연막수류탄), Storage Lifetime(저장수명), Accelerated Degradation Testing(가속열화시험), Process Control(공정관리)

1. 서 론

무기체계를 비롯한 대부분의 군수품은 사용자가 제시하는 요구조건에 의거 주문생산을 하는 계약적 특성을 가지고 있으며 그 품질을 확인하고 보증하는 것이 필수 불가결한 특성을 갖고 있다. 또한, 탄약은 전쟁 필수 및 긴요물자로서 장기저장 후 사용되는 특성으로 저장시의 안전성(safety), 신뢰성(reliability) 및 성능(performance) 확보가 매우 중요하다고 할 수 있으며 이를 위해 저장수명(storage lifetime)에 대한 연구가 중

† 2011년 7월 11일 접수~2011년 9월 16일 게재승인
* 국방기술품질원(Defense Agency for Technology and Quality)
** (주)한화 여수사업장(Hanwha Co., Ltd.)
*** 안동대학교(Andong National University)
책임저자 : 손영갑(ykson@andong.ac.kr)

요하다.

저장탄약 신뢰성평가는 탄약을 안전하게 저장·관리할 수 있고 언제나 사용이 가능하도록 유지관리하기 위한 목적으로 수행되며 저장수명예측은 순환주기가 빠른 품목에 대한 경제적 제조, 사용주기 설정, 개 보수 주기 설정을 가능하게 함으로써 제조자에게는 경제적 제조 조건을 제시하고 사용자에게는 효율적인 탄약 관리 방안을 제공 할 수 있는 매우 중요한 연구이다.

차장 및 신호의 목적으로 사용되는 연막수류탄의 사용주기는 2년 이내로 매우 빠른데도 불구하고 25년 이상 장기 저장된 탄약이 존재하고, 장기저장에 따른 연막 방출시간이 길어져 이에 따른 사용자 불만이 제기되었다. 제조업체에서는 장기저장 시 연막 방출시간이 길어지는 것을 지연시키기 위하여 규격 요구조건보다 엄격한 공정관리 규격을 적용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 백색연막수류탄(KM8)을 대상으로 장기저장 후 연막 방출시간이 규격을 초과하는 기간 및 수명을 예측하여, 사용자에게는 선입선출을 위한 객관적인 자료를 제공함으로써 효율적인 탄약 관리 방안을 제시하고 제조업체에는 최적의 공정관리 방안을 도출하여 효율적인 공정관리 방안을 마련하고자 한다.

2. 이론적 배경

가. 백색 연막수류탄

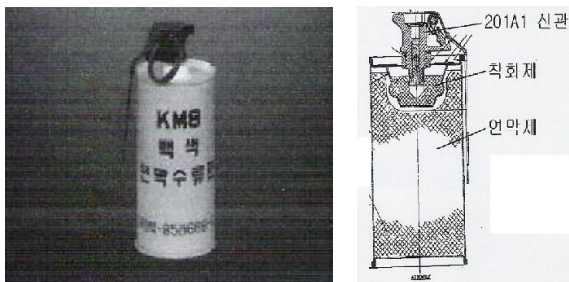


Fig. 1. White smoke hand grenade

백색 연막수류탄(white smoke hand grenade, KM8)은 규격이 요구한 일정 시간 동안 연막을 형성하여 차장 및 신호 등의 목적으로 사용되는 탄약이다. 본 연구의 대상인 백색 연막수류탄의 형상 및 구조를

Fig. 1에 나타내었으며, 연막수류탄 내부에 충전되어 있는 화공품인 연막제와 착화제의 조성을 Table 1에 나타내었다. 현재 국방 규격에서 요구하는 연막 방출시간은 90~135초 이며 이보다 연막 방출시간이 긴 경우는 연막의 농도가 옅은 것으로 판단하고 있다.

Table 1. Material compositions of smoke and complexing agents

연막제 조성 (%)	착화제 조성 (%)
헥사클로로에탄(HCE) : 00 ± 00	규 소 : 00 ± 00
산화아연(ZnO) : 00 ± 00	질 산 칼 륨 : 00 ± 00
알루미늄 분말 : 00	목 탄 : 00 ± 00
* HCE/ZnO 비율로 연소시간 조절 가능	산 화 철 : 00 ± 00
	알루미늄분말 : 00 ± 00

나. 연소시간 증가요인 및 시험조건 고찰

백색 연막수류탄에 대하여 다양한 문헌조사를 실시한 결과, 연막탄이 장기저장 됨에 따라 화학적, 물리적 요인으로 연막 방출시간이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 백색 연막수류탄 조성 중 알루미늄(Al, aluminum) 함량이 적을수록 연막 방출시간이 증가^[1] 하는 것으로 알려져 있으며, 산화아연 또한, 연막 방출시간에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^[2]. 따라서 연막수류탄을 장기저장 시 알루미늄 함량 감소로 인한 방출시간 증가를 예상 할 수 있다. 장기저장에 따른 백색 연막수류탄의 알루미늄 함량감소는 흡수에 의한 산화물 생성 또는 조성 중 포함된 산화아연이나 헥사클로로에탄에 포함된 불순물인 염소성분이 수용액을 형성, 형성된 수용액으로 인해 알루미늄을 비활성화 시킨다는 연구결과도 발표되고 있다. 이러한 메커니즘은 이론적으로 발생 가능하지만 아직까지 증명되지는 않았다^[3]. 헥사클로로에탄(C₂Cl₆, hexachloroethane, HCE)은 수분에 대해서 매우 안정적이며 50℃ 지하수에 대해 반감기는 365일인 것으로 알려져 있다^[4]. 연막제에 포함된 바인더 성분 중에서 XF-4018L 경화제 때문에 72℃ 12주 열화시험 후 연소 시간이 변화되었다는 연구 결과도 알려져 있다^[5].

백색 연막수류탄에 대한 가속열화시험 조건을 설정하기 위해서 환경시험 및 가속열화시험의 조건들을 조사한 결과, 온도 -50F(-45.5℃)~160F(71℃), 습도 10~85%의 수준에서 주로 행하여 졌으며, 온습도 cycle 시험에 대한 조건은 32.2℃~71.1℃, 30~85% 수준에서 수행되어^[7] 기존 연구조건과 유사한 조건으로 설정이 가능하였다.

다. 열화데이터 분석 이론

초기 연막 방출시간을 D_0 로, 임의 시점 t 에서의 방출시간을 $D(t)$ 라 정의하면 화학반응의 반응비율(reaction rate) α 는 식 (1)과 같이 표현된다^[6].

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

식 (1)에서 초기 시료의 반응비율은 화학 반응이 없기 때문에 0의 값을 가진다. 연막 방출시간이 시간에 따라 감소하면 반응비율은 양의 값을 가지게 되며, 증가하면 음의 값을 가진다. 즉, 장기저장에 따른 연막 방출시간이 증가함에 따라 화학반응은 지속적으로 진행되며 반응비율의 절대 값은 증가하게 된다.

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.

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

여기서 n 은 반응차수(reaction order)를 나타낸다.

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

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

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

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

또한 식 (4)에서 a 를 $(n-1)K$ 로, b 를 $1/(1-n)$ 라 두면 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\alpha = 1 - [at + 1]^b \tag{5}$$

식 (1)과 (5)를 이용하여 $D(t)$ 를 정의하면 식 (6)과 같다.

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

3. 연구 결과

가. 시험조건 설정 및 예비시험 결과

가속열화시험 조건을 수립하기 위한 예비시험(pre-test)을 실시하였으며 예비시험 조건은 앞서 기술한 기존 연구결과를 참조하여 고온 70℃, 온습도 cycle 32.2℃~71.1℃/30~85%, 고온고습 71℃/85%로 세 가지로 선정하였다. 예비시험은 조건을 달리한 1차와 2차로 나누어 수행하였으며 시료 수는 각 시험/차수 당 10발씩 수행하였다.

1차와 2차 시험조건은 Table 2에 나타내었으며, 편의상 1차 시험부터 순서대로 A, B, C, D, E, F로 표기하였다. 1차 시험 조건에 비해 가혹한 온도 조건을 적용한 2차 시험에서는 연막 방출구 밀봉 테이프(tape)가 부풀어 오른 현상이 발생하였으며 1발의 시료는 연소 중단이 발생하는 등 비정상적인 열화가 진행된 것으로 판단되었다. 백색 연막수류탄의 예비시험 결과를 초기 값과 함께 신뢰수준 95% 구간플롯으로 Fig. 2에 나타내었다. 가로축에 나타낸 A, B, C, D, E, F는 1차와 2차 시험에서의 6가지 시험조건을 나타내며, 세로축은 연막 방출시간을 나타낸다. 초기 값 대비 A, C, E 조건의 연막 방출시간이 증가하였으며 B, F 조건은 초기 값과 차이가 없고 D 조건은 연막 방출시간이 감소했음을 알 수 있다. 1차와 2차 시험의 결과를 비교해 보면 B-E 조건은 연막 방출시간이 증가하였으며 A-D, C-F 조건은 연막 방출시간이 오히려 감소하였다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 2차 시험 시의 가혹한 온도 조건에 의해 비정상 연소가 발생한 것으로 판단하였다.

Table 2. Pre-test conditions

	1차 (15day)	2차 (30day)
고온 70℃ → 90℃	A: 고온 70℃, 15day	D: 고온 70℃ 15day 이후 고온 90℃, 15day
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% 15day
고온고습 71℃85% → 90℃, 85%	C: 고온고습 71℃, 85%, 15day	F: 고온고습 71℃, 85% 15day 이후 90℃, 85%, 15day

초기, A, B, C, D, E, F의 구간 플롯

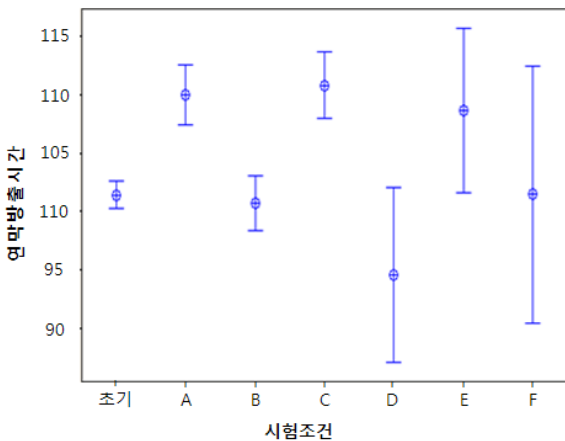


Fig. 2. Interval plots of emission time over time from the pre-test results

예비시험 조건이 연막 방출시간에 미치는 영향을 평가하기 위하여 연막 방출시간 데이터에 대한 t-test와 차분값(difference)을 이용하였다. t-test는 Minitab을 이용하여 95% 신뢰수준으로 시행하였다. 연막 방출시간이 증가하였는지를 확인하기 위해 초기데이터 대비 1차 시험, 1차 시험 대비 2차 시험, 초기데이터 대비 2차 시험 결과 데이터에 대해 t-test를 시행하였으며 연막 방출시간의 증가여부에 대한 단측검정을 수행하였다. 검정 결과는 Table 3에 나타내었으며 p-value가 0.05이상이면 두 시험결과에 차이는 없다고 할 수 있다. Table 3에서 초기는 초기시험데이터를 나타내며,

(a)는 초기데이터 대비 1차 시험, (b)는 1차 시험 대비 2차 시험, (c)는 초기 대비 2차 시험에 대한 t-test결과를 나타낸다. 또한 (1)과 (2)는 각각 1차와 2차 시험을 나타낸다. 초기데이터 대비 1차 시험의 t-test 결과, 초기데이터-온습도 cycle(1)의 p-value가 0.05이상으로 연막 방출시간의 차이는 없으며 고온(1), 고온고습(1) 실험의 연막 방출시간이 초기데이터 보다 증가하였다. 1차 시험 대비 2차 시험의 t-test 시행결과 온습도 cycle(1)-고온고습(2)의 p-value 만이 0.05이하이며 그 외 모든 p-value가 0.05이상이다. 따라서 온습도 cycle(1) 보다 고온고습(2)의 연막 방출시간이 증가했음을 알 수 있다. 초기데이터 대비 2차 시험의 t-test 결과, 초기데이터-온습도 cycle(1)-고온고습(2)의 p-value가 0.05이하로 연막 방출시간이 증가했음을 알 수 있으며 이는 초기데이터 대비 1차 시험 t-test 결과와는 다른 경향을 나타낸다. t-test 결과 어느 시험조건에서 초기데이터 대비 연막 방출시간이 증가하였는지 알 수 있었다.

어느 조건에서 가장 큰 연막 방출시간의 변화를 나타냈는지 확인해보기 위해 차분값을 이용하였다. Minitab을 이용하여 평가한 차분을 Table 4에 나타내었다. A-B의 차분이 양의 값을 가지면 A 조건 시험 결과의 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 C > A > E > F > B > D 이다. 이것은 71℃/85% 고온고습(C 조건) 시험결과 연막 방출시간이 초기데이터와 비교하였을 때 가장 많이 증가하였음을 의미한다.

Table 3. t-test results

		p-value
(a)	초기-고온(1)	0.000
	초기-온습도 cycle(1)	0.712
	초기-고온고습(1)	0.000
(b)	고온(1)-고온(2)	0.999
	온습도 cycle(1)-고온고습(2)	0.018
	고온고습(1)-고온고습(2)	0.955
(c)	초기-고온(2)	0.964
	초기-온습도 cycle(1)-고온고습(2)	0.025
	초기-고온고습(2)	0.498

Table 4. Difference and the p-value for each pair

시험조건 pair	차분	p-value
A-B	9.273	0.000
A-C	-0.818	0.637
A-D	15.400	0.000
A-E	1.400	0.666
A-F	8.556	0.071
B-C	-10.091	0.000
B-D	6.127	0.082
B-E	-7.873	0.022
B-F	-0.717	0.874
C-D	16.218	0.000
C-E	2.218	0.503
C-F	9.374	0.052
D-E	-14.000	0.006
D-F	-6.844	0.246
E-F	7.156	0.217

나. 가속열화시험

예비시험 결과를 토대로 가속열화시험의 조건은 고온고습 조건으로 수립하였으며 시료 수의 제한으로 시험 수준은 한 수준으로 하였다. 예비시험 결과, 2차 조건이었던 90°C/85% 시험을 15일간 수행한 결과 일부 시료에서 탄체내부 압력이 급격히 상승하였다고 판단할 수 있는 테이프 부위가 부풀어 오름이 관찰되었기 때문에 시험 수준은 65°C/70%로 수립하였다. 가속열화시험의 열화량 관측 주기는 초기 2주로 고정하여 계획을 수립하였으며 최초 3차 및 이후의 관측 결과에 따라 추가 관측 주기를 조정하는 방식으로 진행하였다. 궁극적으로 백색 연막수류탄의 가속열화시험은 65°C/70% 조건에서 147일 동안 시험하였으며, 연막 방출시간 평가시점은 0일, 14일, 28일, 35일, 49일, 56일, 63일, 84일, 105일, 147일이다.

다. 데이터 분석 및 검증

저장기간이 2년, 4년, 5년, 6년, 10년, 14년, 17년, 18년, 20년, 25년인 군 보유 연막탄의 저장기간 별 연막 방출시간에 대한 95% 신뢰수준에서의 구간 플롯을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 가로축은 저장기간이며 세로축은 연막 방출시간이다. Fig. 3에 제시한 연막 방출시간에 열화분포모델을 적용하여 연막 방출시간이

규격을 만족시키지 못하는 누적 고장확률을 평가하였다. 평가한 누적 고장확률값으로부터 수명분포를 추정하기 위하여 와이블분포와 대수정규분포를 고려하였다. Fig. 4는 누적 고장확률값과 고려한 수명분포로부터 추정된 누적 고장확률값을 나타낸다. 군 보유 연막탄의 열화데이터에 대한 수명분포가 와이블분포와 대수정규분포 중 어느 분포에 더 적합한지 통계적으로 확인하기 위하여 Minitab을 이용하여 95% 신뢰수준으로 분포식별을 수행하였다. 와이블분포에 대한 p-value는 0.229, 대수정규분포에 대한 p-value는 0.040으로 수명분포가 와이블분포에 적합하다. 추정한 와이블분포의 형상모수와 척도모수는 각각 2.08, 23.1472이며 B_{10} 수명은 8년이다.

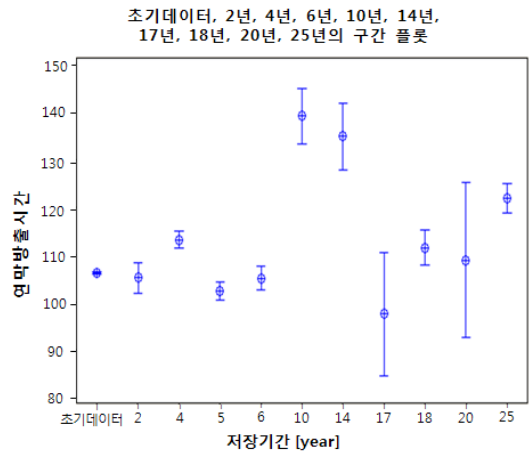


Fig. 3. Interval plots of smoke emission time for grenades in field over storage time

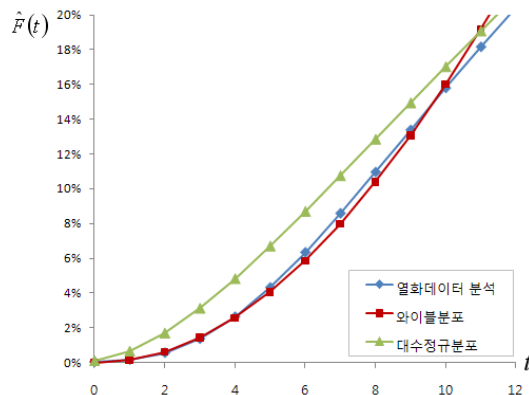


Fig. 4. Estimated cumulative failure probability of grenades in field

가속열화시험을 수행하면서 평가한 각 시점에서의 연막방출시간 데이터에 대한 95% 신뢰수준에서의 구간플롯을 Fig. 5에 제시하였다. 각 시점 별 연막 방출시간 데이터에 대해 분포 적합도 검정을 Minitab을 이용하여 수행하였다. Minitab을 이용한 분포 적합도 검정 결과, 각 분포에 대한 AD값을 Table 5에 나타내었다.

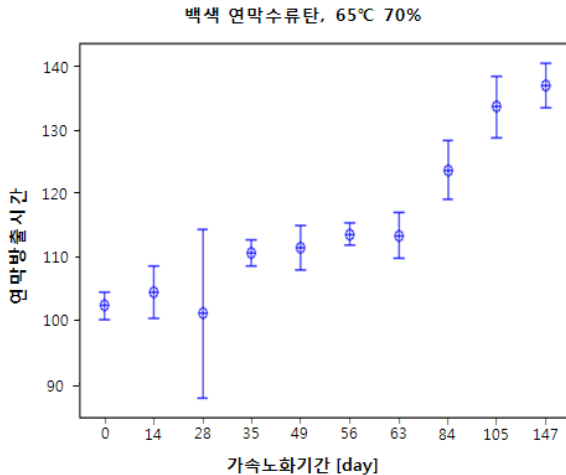


Fig. 5. Interval plots of smoke emission time for grenades in test

Table 5. AD values for each lifetime distribution

시간	대수정규	정규	와이블	지수
0	1.227	1.276	1.652	4.400
14	0.382	0.378	0.478	4.385
28	0.365	0.394	0.729	4.309
35	0.528	0.504	0.312	4.373
49	0.306	0.292	0.305	4.219
56	0.321	0.325	0.444	4.415
63	0.667	0.705	1.043	4.265
84	0.741	0.703	0.573	4.168
105	0.535	0.517	0.504	4.179
147	0.592	0.551	0.290	4.316

일반적으로 AD는 Anderson-Darling test의 결과 값으로 데이터가 해당분포에 가까울수록 작은 값을 갖

는다. 시점 별 분포 적합도 검정 결과, 대수정규분포와 와이블분포에 적합한 것을 알 수 있었다. 따라서 대수정규분포를 이용하여 각 시점에서의 연막 방출시간(D(t)) 데이터에 자연로그를 취한 값, 즉 $d(t) = \log_e(D(t))$ 를 이용하여 반응비율을 추정하였다. 연막 방출시간은 비복원추출 데이터이기 때문에 열화분포모델을 이용하였다. 또한 시험 데이터의 등분산 검정 결과 이분산으로 판단되어 시간에 따른 분산의 변화를 고려하였다.

식 (1)의 D(t)를 d(t)로 변환한 후, 식 (6)으로 부터 열화분포에 대한 시간에 따른 평균값 및 표준편차를 식 (7)과 (8)로 각각 표현하였다.

$$\mu(t) = u_1(u_2t + 1)^{u_3} \quad (7)$$

$$\sigma(t) = u_4 + u_5t \quad (8)$$

여기서 u_1 과 u_4 는 $d(t = 0)$ 에 대한 평균값과 표준편차를 나타내며, u_5 는 시간에 대한 표준편차의 변화율을 나타낸다. 식 (7)과 (8)에서 $u_i, i = 1, 2, \dots, 5$ 는 각 시점별 연막 방출시간을 이용하여 추정할 변수를 나타낸다.

식 (2)의 열화속도에서 E, a, n 값은 고려한 온도 및 상대습도 조건에서 고유의 값을 가지지 때문에 식 (7)과 (8)에서 u_2 와 u_3 는 초기값인 u_1 과 u_4 에 무관한 상수 값을 갖는다. 그러나 u_5 를 포함하여 u_1 과 u_4 는 초기값에 따라 변화하기 때문에 공정시험 결과를 이용하여 저장수명을 예측할 때 이러한 값들을 보정하였다.

i가 방출시간을 측정된 시점을, n_i 가 시점 i에서 측정된 방출시간을 측정된 연막탄의 시료 수를 나타낸다고 정의하면 변수(u_i) 추정을 위한 우도함수는 식 (9)로 표현할 수 있다.

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

따라서 식 (9)의 우도함수를 최대로 하는 변수들을 구하여 식 (7)과 (8)을 평가하고 연막방출시간에 대한 누적 고장확률을 추정하였다.

라. 공정관리 현황분석

국방규격에 명시된 연막 방출시간 규격은 90~135 초이나 장기저장 시 이를 초과하는 현상이 발생하기 때문에 제조 시에는 공정관리 규격을 98~118초로 엄격히 관리하고 있다. 이러한 엄격한 관리로 인하여 연막제 제조 시 재작업비율이 높아져 비용부담이 가중된다. 본 연구에서는 이러한 엄격한 공정관리 규격 변화 시 저장수명에 미치는 영향도를 분석하기 위하여 초기 평균값과 표준편차는 2010년 생산된 백색 연막 수류탄의 공정시험 결과를 이용하였으며 이를 Table 6에 제시하였다.

Table 6. Mean and standard deviation of process test results for grenades manufactured in 2010

	규격변경 전		±3초		±5초	
	평균	편차	평균	편차	평균	편차
A	105.35	6.58	105.46	6.65	105.48	6.71
B	106.11	7.07	106.33	7.24	106.43	7.34
C	104.34	5.71	104.43	5.73	104.44	5.75
D	106.78	7.29	106.78	7.29	106.78	7.29
E	104.60	5.79	104.60	5.79	104.60	5.79
F	105.69	6.67	105.69	6.67	105.69	6.67
G	105.41	4.22	105.83	5.40	106.21	6.28
H	105.03	5.14	105.03	5.15	104.94	5.24
I	105.22	4.70	105.43	5.29	105.58	5.82

공정시험 결과는 크게 혼화시험과 공정시험으로 나뉘며 총 9가지 경우에 대해 분석하였다. A는 혼화시험과 공정시험 결과 모든 데이터에 대한 결과이며, B와 C는 혼화시험 결과와 공정시험 결과 각각에 대한 모든 데이터의 결과이다. D는 혼화시험 결과 1차 시험에서 규격을 벗어나 재시험한 데이터를 제외한 1차 시험 데이터만을 이용한 결과이며 마찬가지로 E와 F는 각각의 경우에 대해 1차 데이터만을 이용한 결과이다. G, H, I는 2차, 3차 등 재시험을 시행한 경우 최종적으로 시험한 데이터만을 이용한 결과로 만약 3차까지 재시험을 한 경우 1차와 2차 데이터는 사용하지 않는다. 공정관리 규격이 ±3초, ±5초로 변화되는 경우 시행되지 않았을 것으로 판단되는 재시험 결과는 삭제하여 앞서 정의한 Case 별로 평균과 편차를 재평가하였다. 따라서 규격이 변경됨에 따라 재시험율이 감

소하는 효과를 Table 7에 나타내었다.

Table 6에 제시된 초기 평균과 편차값, 그리고 식 (7)과 (8)로 표현되는 열화모델을 이용하여 열화에 따른 누적 고장확률값을 평가하였다. 초기 평균과 편차가 달라짐에 따라 와이블분포의 모수값이 달라지며 그 중 군 보유탄과 가장 유사한 경향을 나타내는 4가지 Case에 대한 모수값들을 Table 8에 나타내었다. 또한 누적 고장확률값을 Fig. 6에 나타내었다.

Table 7. Evaluated re-test ratio for the process tests for grenades manufactured in 2010

재 시험율	규격변경 전		±3초		±5초	
	비율	배치 당 재시험 수	비율	배치 당 재시험 수	비율	배치 당 재시험 수
A	91/179	0.5084	55/179	0.3073	38/179	0.2123
B	75/179	0.4190	43/179	0.2402	28/179	0.1564
C	16/179	0.0894	12/179	0.0670	10/179	0.0559

Table 8. Estimated parameters of weibull distribution

Case	형상모수	척도모수
A	3.169	16.438
B	2.687	18.369
D	2.419	20.496
F	3.044	16.727
군 보유탄	2.080	23.147

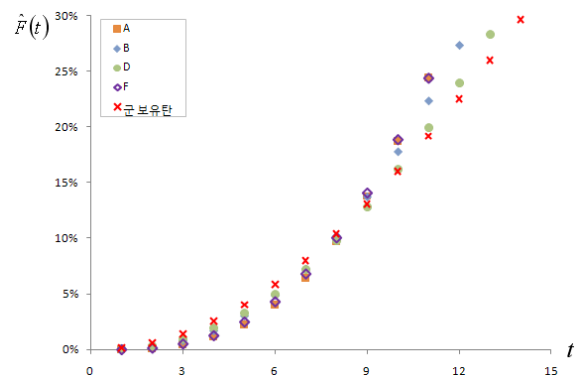


Fig. 6. Estimated cumulative failure probability

마. 공정관리 규격 변경에 따른 효과

현재 백색 연막수류탄의 공정관리 규격은 98~118

이며, 이 공정관리 규격을 ± 3 초, ± 5 초로 변경시켰을 때 상온/상습 저장수명의 변화를 통해 규격 변경의 효과를 보고자 한다. 상온/상습 조건은 20°C/60%이며 이는 이글루탄약고의 경우 연평균온습도 관리 목표값을 기준하였다.

공정관리 규격 변경 시 데이터 분석에 사용될 평균과 편차는 Table 6에 나타내었으며 이를 이용하여 예측된 상온/상습에서의 저장수명을 Table 9에 나타내었다. 상온/상습 저장수명(B₁₀)은 현재 약 7.506년에서 규격이 ± 3 초, ± 5 초로 변경됨에 따라 약 7.387년, 7.283년으로 감소된다.

Table 9. Estimated storage lifetime according to specification change for process control

B10 수명	변경 전	규격 ± 3	규격 ± 5
A	7.506년	7.410년	7.410년
B	7.595년	7.387년	7.283년
D	7.630년	7.630년	7.630년
F	7.530년	7.530년	7.530년

바. 완전연소 기준 품질보증 연한

국방규격에 명시된 135초를 기준으로 B₁₀ 수명이 6.935~7.630년으로 예측되었다. 그러나 군 보유탄 시험결과 170초까지 모두 완전연소가 되었으며 최대 177초까지도 연막 방출에는 문제가 없었다. 따라서 연막 방출이 중단되지 않아 실제 사용에 큰 지장이 없는 완전연소 가능유무를 기준으로 품질보증(quality assurance) 연한(term of lifetime)을 평가하였다. 연막 방출시간 170초를 기준으로 품질보증 연한을 평가하였으며 규격이 변경됨에 따른 품질보증 연한도 평가하였다. 그 결과를 Table 10에 나타내었으며, 품질보증 연한은 15.160~19.440년에서 규격이 ± 3 초, ± 5 초로 변경됨에 따라 14.646년, 14.218년으로 감소된다. 본 결과의 의미는 연막 방출시간이 170초에 이르게 되어도 연소 중단이 발생할 가능성이 있다는 기준이 아니므로 최소한의 품질보증 연한으로 제시할 수 있다. 즉, 국방규격 연막 방출시간 135초는 만족하지 못하더라도 완전연소 가능한 품질보증 연한은 최소 15년 이상이며 공정관리 규격을 ± 5 초로 변경하여도 최소 14년 이상의 품질보증 연한을 가지는 것으로 판단할 수 있다. 본 연구의 대상인 백색 연막수류탄은 연간 납품량

이 약 0000발이며, 연간 사용량은 0000발로 납품 당해 연도에 93% 이상 사용되고 있다. 따라서 선입선출관리가 잘 시행된다면 2년 이내로 모두 사용 가능하므로 공정관리 규격을 ± 5 초 수준으로 변경하는 경우 완전연소 가능한 품질보증 연한은 큰 차이가 없지만, 관리 규격 하한이 국방 규격 하한에 근접하기 때문에 추가 로트 분석을 통한 불량율을 감안한 공정관리 규격 설정이 필요하다.

Table 10. Quality-assured term of lifetime based on complete combustion

품질보증연한 (B10)	변경 전	규격 ± 3	규격 ± 5
A	17.725년	17.619년	17.619년
B	18.725년	18.609년	18.494년
C	16.585년	16.490년	16.490년
D	19.440년	19.440년	19.440년
E	16.835년	16.835년	16.835년
F	18.055년	18.055년	18.055년
G	15.160년	14.646년	14.218년
H	16.230년	16.230년	16.230년
I	15.565년	15.298년	15.031년

4. 결론 및 고찰

장기저장 시 연막 방출시간이 증가하는 현상에 대해 연구를 수행한 결과 상온/상습 저장수명(B₁₀)은 현재 약 7.5년이며 완전연소를 기준으로 한 저장수명은 15.160~19.440년이다. 따라서 사용주기인 2년과 비교하여 긴 저장수명을 가지며 완전연소를 기준으로 한 품질보증 연한은 사용주기의 7배 이상이다. 또한, 규격이 ± 3 초, ± 5 초로 변경됨에 따라 저장수명은 약 7.4년, 7.3년으로 감소하며 완전연소를 기준으로 한 품질보증 연한도 14.646년, 14.218년으로 감소된다. 이 결과를 토대로 공정관리 규격이 ± 3 초, ± 5 초로 변경된다 하더라도 사용주기와 비교하여 긴 저장수명 및 품질보증 연한을 가지는 것으로 판단된다.

본 연구결과를 토대로 순환 주기가 빠른 연막수류탄 등의 군수물자는 선입선출에 의한 재고관리를 효율적으로 시행하여 저장탄약에 대한 성능신뢰성을 확보

하고 공정관리 규격을 최적화함으로써 공정관리 효율화를 할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국방기술품질원과 (주)한화에서 추진하는 “연막수류탄 저장수명 및 노화메카니즘 연구” 사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Cichowicz, J. J., “Programmatic Life Cycle Environmental Assessment For Smoke/Obscurants”, Vol. 4., HC Smoke : Environmental Technology Division For Project Manager For Smoke/Obscurants, 1983.
- [2] Ellem, H., “Military and Civilian Pyrotechnics”, Chemical Publishing Company INC, New York 1968.
- [3] Katz, S., Snelson, A., Farlow, R., Welker, R., and Mainer, S., “Physical and chemical Characterization of fog oil and hexachloroethane smokes Part 1”, 1980.
- [4] “Military Smokes And Obscurants Fate And Effects”, U.S. Army Corps of Engineers, December 2004.
- [5] “Proceedings Third International Pyrotechnics Seminar”, 21 August 1972.
- [6] Patekar, K. A., “Long Term Degradation of Resin for High Temperature Composites”, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [7] Renfroe, D. W., “Development of a Floating Smoke Grenade Air and Surface to Surface”, Northrop Carolina, INC., February 19, 1972.