

# 81mm 조명탄용 신관 KM84A1E1 지연제의 저장수명 예측 연구

장일호\* · 김지훈\* · 이우철\*\* · 백승준\*\*\* · 손영갑\*\*\*†

\* 국방기술품질원  
 \*\* (주)한화 여수사업장  
 \*\*\* 안동대학교

## A Study of Storage Life Estimation for Delay System in the Fuse of 81mm Illuminating Projectile

Il-Ho Chang\* · Ji-hoon Kim\* · Woo-Chul Lee\*\* · Seung-Jun Back\*\*\* · Young-Kap Son\*\*\*†

\* Defense Agency for Technology and Quality  
 \*\* Hanwha Co., Ltd.  
 \*\*\* Andong National University

**Purpose:** In this paper, storage lifetime of delay system in the fuse of 81MM illuminating projectile is estimated.  
**Methods:** Accelerated degradation testings of tungsten delay system using both temperature and humidity stresses were performed, and then delay time increase of the systems were analyzed as degradation data based on distribution-based degradation processes.  
**Results:** The estimated storage lifetime of detonator is between 11.8 years and 17.6 years with each stress-life relationship.  
**Conclusion:** Comparing with field data, storage lifetime of 90% reliability is about 12 years.

Key Words : Tungsten, Delay system, Fuze, Storage Life, Accelerated Degradation Test, One Shot System

### 1. 서 론

탄약은 개발 및 생산 후 장기간 저장되다 사용되는 품목으로 다른 장비와는 다르게 운용에 대한 신뢰도(내구성)보다 장기간 저장에 따른경시변화에 의한 저장신뢰도의 개념을 적용 하는 것이 타당하다. 저장신뢰도는 구성 물질 저장조건 등 구성물질의 특성과 환경조건에 따라 좌우 될 수 있으며 모든 조건들을 고려한 신뢰도를 예측하는 것은 많은 어려움이 있다.

탄약과 같은 폭발물의 경우, 특수 업무 종사자만 가능한 연구인력 인프라 및 관심 부족, data 확보를 위한 취급 안전성, 장기저장 후 사용한Field 자료 확보 애로 등으로 저장 수명예측에 대한 연구는 초보단계 수준이다. 다행히, 최근에 개발되는 고가의 유도무기 탄약의 경우 개발 당시부터 저장신뢰도 확보를 위한 저장수명 예측 연구를 병행하는 경우도 있으나 재래식 탄약은 연구실적은 매우 미미한 실정이다. 따라서, 저장탄약에 대한 저장수명 예측 및 신뢰도 향상을 위한 연구가 매우 중요하다 하겠다. 특히, 장기저장 시 경시변화에 의해 기능 저하가 빠른 화공품의 대한 수명연구는 우선적으로 수행되어야 할 분야이다.

따라서 본 연구에서는 10년 이상 장기 저장된 81MM 조명탄용 신관 KM84A1E1에서 설정된 지연 시간 초과로 원하는 목표지점에서 조명기능이 발휘되지 못하는

† Corresponding Author

Department of Mechanical & Automotive Engineering,  
 Andong National Univ., 1375 Gyeongdong-Ro, Andong,  
 Gyeongbuk 760-749, South Korea,  
 Tel: +82.54.820.5907 Fax: +82.54.820.5044  
 E-mail: ykson@andong.ac.kr

문제점이 발생되고 있는 텅스텐계 지연제를 대상으로 발생 원인을 추정하고 저장수명을 예측하여 효율적인 탄약관리 방안의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 연구 대상 제품

본 연구의 대상인 텅스텐계 지연제는 81MM 조명탄 KM301A3에 사용되는 시한신관 KM84A1E1에 적용되는 화공품이다. 시한신관 KM84A1E1의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 조명탄이 발사되는 순간의 관성 후퇴력으로 플랜저 결합체(공이)가 뇌관을 타격하게 되고 뇌관의 화염이 뇌관 홀더결합체 내부의 틈새를 통하여 헤드펠릿(Head Pellet)을 점화시킨다. 이때 헤드펠릿은 충전 두부결합체를 회전시켜 설정한 신관 작동 시간에 해당하는 위치에서 연소되어 텅스텐계 지연제의 해당 위치를 점화시킨다.

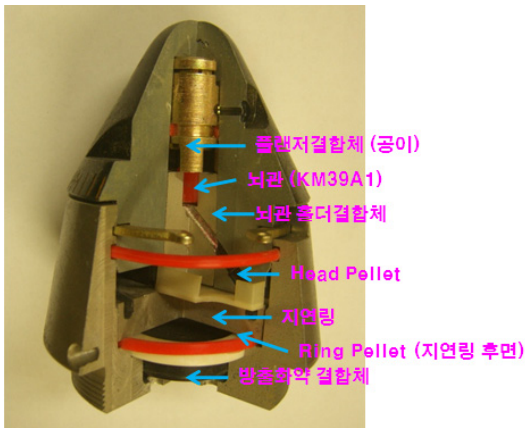
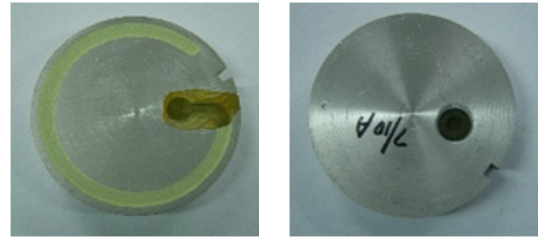


Fig. 1. Structure of KM84A1E1 Fuse

Fig. 2에 지연링의 형상을 나타내었다. 지연링 결합체의 원형 때 부분이 텅스텐계 지연제이며 해당 위치가 점화되면 화염전이 홀(Hole)까지 설정된 신관 작동 시간동안 연소가 진행된다. 정상적으로 연소가 진행된다면 화염전이 홀을 통하여 연소열이 하부로 전달되고 이 연소열에 의하여 지연링 후면의 링펠릿(Ring Pellet)이 점화되면 최종적으로 방출화약 결합체가 연소된다. 결합체 연소 후 조명통이 분리되면서 내부의 발화제와 조명제가 연소되고 낙하산이 산개되어 일정 시간동안 조명기능을 발휘한다.



지연링 (상부)                      지연링 (하부)

Fig. 2. Shape of delay system

시한신관 KM84A1E1에 적용되는 텅스텐계 지연제는 Table 1과 같은 조성으로 이루어져 있으며 각 성분의 함량은 보안관계로 기재하지 않았다. 텅스텐 분말이 연료로 사용되고 크롬산바륨과 과염소산칼륨은 텅스텐 분말이 지속적으로 연소하기 위해 필요한 산소를 공급하는 산화제로 사용된다.

KM84A1E1 신관을 장기 저장 후 사용 시 설정한 지연 시간을 벗어나서 조명기능이 작동하는 현상이 발생하고 있다. 이는 “신관 작동 시간 범위 이탈” 결점으로 분류되며 기능시험 항목에서 신관 불발 등과 같이 중결점으로 구분된다. 이에 대한 기능시험은 신관 작동 시간을 20초 설정한 경우 17.85~21.15초

Table 1. Composition materials of delay system

성분	역할	규격
텅스텐 분말 (W)	연료	MIL-T-48140, 2형
크롬산 바륨 (BaCrO <sub>4</sub> )	산화제	MIL-B-550, C급
과염소산 칼륨 (KClO <sub>4</sub> )	산화제	MIL-P-217, A급, 4종
VAAR	결합제	MIL-V-50433

범위 내에서, 30초로 설정한 경우는 27.25~ 30.75초 범위 내에서 신관이 작동해야 조명탄의 적정 고도(약 지상 600M 상공)가 유지 되어 후속 폭발 계열의 작동이 가능하고 원하는 작전지역을 조명할 수 있으나, 그렇지 못한 경우는 적정 고도를 유지하지 못해 조명시간 부족 또는 지상으로 자유낙하 후 신관작동으로 인한 조명불능 등 작전 수행에 큰 차질을 초래하기 때문이다. 이러한 현상은 텅스텐계 지연제가 장기 보관 시 화학적 또는 물리적으로 노화됨으로써 연소속도가 느려지는

현상으로 판단되어 문헌 조사를 통한 노화메커니즘 가설을 수립하고 고온, 고온고습 및 온습도 cycle 조건의 검증 시험을 수행하였다.

### 2.2 노화메커니즘 가설

텅스텐이 주성분이며 Table 1과 유사한 조성을 가지는 지연제의 연소 특성에 대하여 조사 하였다. Raymond H. Comyn의 연구[4]에 따르면 혼합물 내의 텅스텐 함량이 줄어들면 연소 속도가 늦어지는 것으로 알려져있다. 따라서 장기 저장 중 텅스텐이 표면 산화 등으로 인하여 비활성화 되면 혼합물 내의 함량이 감소하는 효과로 인하여 연소속도가 늦어진다는 가설을 세울 수 있다. S. J. Salter의 연구[8]에 따르면 텅스텐입자 크기가 클 수록, 텅스텐 함량이 적을수록 연소속도가 늦어진다. 또한 미 국방성의 DESIGN HANDBOOK[3]에 따르면 충전 압력의 변화도 연소속도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이로부터 장기 저장 중 텅스텐입자의 물리적인 조대화 또는 부피변화로 인한 충전 압력 상승 등이 발생하면 연소속도가 늦어질 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.3 가속 열화 모델

열화 모델(Degradation Model)이란 제품이나 부품의 초기 기능 또는 성능이 변화되어 정의된 고장판단 기준에 이르기까지의 과정을 해석하는 방법론이다. 최근에는 가속수명 시험 중 제한된 시험 기간 동안에 관측되는 고장의 수가 적어지는 문제점이 있어 새로운 수명평가 기법으로서 가속열화시험을 도입하는 사례가 늘고 있다. 가속열화시험은 제품이나 부품의 고장발생 시점까지 시험을 하지 않고도 해당 제품이나 부품이 고장에 이르게 하는 기능/성능적 특성치 또는 대응 특성치를 수명시험 중 관측주기별로 측정하여 이러한 특성치의 변화 추이를 통계 분석하여 고장에 이르는 시점을 추정하는 방법이다. 이러한 열화 시험의 데이터를 분석하기 위해서 시험 대상 부품의 특성에 따라 통상적으로 비파괴시험의 경우에는 열화 경로모델(Degradation Path Model)을 적용하고, 파괴시험의 경우에는 열화 분포모델(Degradation Distribution Model)을 적용한다. 화공품과 같은 One Shot System(일회성 시스템)의 경우는 파괴시험이며 본 연구의 경우 관측 시점별로 분산이 변화 하므로 열화 분포모델을 적용하여 데이터 분석을 수

행하고자 한다[6].

각 관측 시점에서의 열화량의 분포를 ALTA-6 또는 미니탭과 같은 상용 프로그램 등을 활용하여 결정할 수 있다. 시간 t에서의 열화량(D(t))에 대한 분포함수는 다음 식(1)~(3) 등이 주로 적용되며 본 연구의 경우 지연 시간의 측정값은 대수정규분포를 따르는 것으로 확인되었다.

와이블:

$$f(D(t)) = \left( \frac{m(t)}{\eta(t)} \right) \left( \frac{D(t)}{\eta(t)} \right)^{m(t)-1} \times \left\{ \exp \left( - \left( \frac{D(t)}{\eta(t)} \right)^{m(t)} \right) \right\} \quad (1)$$

정규분포:

$$f(D(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(t)} \times \left\{ \exp \left( - \frac{1}{2} \left( \frac{D(t) - \mu(t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right) \right\} \quad (2)$$

대수정규:

$$f(D(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(t) D(t)} \times \left\{ \exp \left( - \frac{1}{2} \left( \frac{\ln(D(t)) - \mu(t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right) \right\} \quad (3)$$

시간에 따른 분포함수의 변화는 분포함수 모수의 시간의 함수로 표현할 수 있다. 시간에 따른 모수의 변화는 크게 증가형과 감소형으로 나눌 수 있다. 시간의 변화에 따른 모수의 변화를 함수(p(t))로 정의하는 경우는 크게 선형, 지수, 로그, 열화비율모형 등으로 식 (4) ~ (8)과 같이 표현된다[2].

선형모형:  $p(t) = a + bt$  (4)

지수모형:  $p(t) = ae^{bt}$  (5)

로그모형:  $p(t) = a + b \ln(t)$  (6)

제곱근모형:  $p(t) = a + b \sqrt{t}$  (7)

열화비율모형:  $p(t) = p_o(at + 1)^b$  (8)

여기에서 열화량 D(t)가 정규분포를 따르는 경우에는, 시간에 따른 평균의 변화는  $\mu(t) = E[D(t)]$ , 표준편차의 변화는  $\sigma(t) = \sqrt{V[D(t)]}$  로, 대수정규분포를 따르는 경우 평균의 변화는  $\mu(t) = E[\ln(D(t))]$ ,

표준편차의 변화는  $\sigma(t) = \sqrt{V[\ln(D(t))]}$  로 정의된다. 본 연구에서 시험 데이터의 열화량 분포는 식 (3)의 대수정규분포로, 대수정규분포의 모수인 평균과 표준편차의 시간에 대한 함수를 식 (8)로 표현함이 타당하였다.

가속 조건에서 실험한 결과의 수명을 바탕으로 실제 저장조건에서의 수명을 예측하는 방법론으로는 인가한 스트레스의 종류에 따라 다양한 모델식이 사용된다. 본 연구에서는 온습도 복합 스트레스를 인가하였으므로 이에 해당하는 다음의 식(9) ~ (11) 모델식과 그 변형식을 사용하여 실 저장조건에서의 수명을 예측하고 그 결과를 Field 자료와 비교, 검증하였다.

$$\text{팩모델: } L = A \cdot \exp\left[\frac{E}{kT}\right] \cdot (RH)^{-n} \quad (9)$$

$$\text{인텔모델: } L = A \cdot \exp\left[\frac{E}{kT}\right] \cdot \exp\left[\frac{B}{RH}\right] \quad (10)$$

$$\text{클링거모델: } L = A \cdot \exp\left[\frac{E}{kT}\right] \cdot \left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{-n} \quad (11)$$

### 3. 노화시험을 통한 저장 수명예측

#### 3.1 연소 속도 저하 재현 시험

가속 노화 시험을 수행하여 각 가속 조건에서의 수명 분포를 예측하고 최종적으로 실 저장 조건에서의 수명을 예측하기 위해서는 장기 저장 후 연소속도가 저하되는 노화메커니즘을 재현할 수 있는 가속 노화 조건을 선정하여야 한다. 문헌 조사를 통하여 텅스텐계 지연제의 연소속도가 느려지는 노화 메커니즘을 유발할 수 있는 시험 조건을 선정하였다. James E. Rose의 연구[7]에 따르면 텅스텐계 지연제를 71℃, 95%조건에서 5일 시험한 결과 3/10발은 연소속도가 늦어지고 7/10발은 연소 중단이 발생하였다. 또한 Raymond H. Comyn의 연구[4]에서도 74℃, 100% 조건에서 72시간 시험한 결과 연소 시간의 변화를 확인 할 수 있어 고온고습 조건이 연소속도를 저하시킨다는 것을 알 수 있다. Raymond H. Comyn의 연구에서는 또한 74℃ 조건에서 4주간 시험 시 연소속도의 변화는 없지만 116℃ 조건에서 2시간 시험 시 변화가 발생하는 것으로 기술하고 있어 고온조건도 연소속도를 저하시킬 수 있을 것으로 사료되었다. 문헌 조사를 통하여 텅스텐계 지연제의 연소 속도 저하를 유발할 수 있는 가장 유력한 환경조건은

고온고습조건이며 100℃ 이상의 고온조건도 연소속도 저하에 영향을 줄 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 따라서 실제로 연소속도 저하에 가장 영향도가 큰 시험 조건을 우선적으로 확인해 보고자 Table 2 와 같은 Pre-test를 수행하였다. 본 Pre-test 결과를 분석하고 그 결과를 바탕으로 향후 본격적인 가속노화시험 조건을 수립하고자 하였다.

Pre-test 조건은 고온, 고온고습, 온습도 Cycle로 세 가지이며 1차와 2차로 나누어 시험하였다. 1차와 2차의 시험조건은 수준을 달리하여 총 78발의 시료를 이용하였으며, 1차 시험조건으로 20일 시험 후 39발을 이용하여 9발은 화학분석, 30발은 지연초시 측정 기술시험을 수행하였고 나머지 39발은 20일간 2차 시험에 이용하였다. 총 시험기간은 40일이며 1차 시험조건은 고온 110℃, 고온고습 85℃ 95%, 온습도 Cycle -54 ~ 71℃ 95% 이다. 2차 시험조건은 1차 시험 결과를 확인 후 지연초시에 변화가 없는 110℃ 조건 고온시험을 160℃로 온도를 높였으며, 온습도 Cycle 시험도 Table 2 와 같이 온도 조건을 높여 시험하였다. 실제 저장 조건과 동일한 조건에서 노화시험을 수행하기 위하여 조명탄의 신관재질과 오링사양을 참조하여 방수구조를 모사한 밀폐용기를 제작하여 시험에 적용하였다.

Table 2. Pre-test Conditions

시험조건 \ 차수	1차 (20day)	2차 (40day)
고온	110℃	160℃
고온고습	85℃, 95%	85℃, 95%
온습도 cycle	-54℃~71℃, 95% 각 4시간 유지	-54℃~85℃, 95% 각 4시간 유지

Pre-test 결과 미니랩을 이용하여 30초 세팅 시의 지연초시 측정 결과를 평균에대한 95% 신뢰구간으로써 Fig. 3 에 비교하여 나타내었다. 공동 연구수행 기관에서는 각 시험 조건별 시료에 대해 화학분석을 실시하였고 고온고습 시험 후 텅스텐 입자의 표면에 산화막이 생성되어 초기대비 텅스텐 유효함량이 적어짐으로써 연소속도가 느려진다는 가설이 노화 메커니즘이었음을 확인할 수 있었다.

시험 결과 고온고습 조건에서 지연초시의 증가가 뚜렷이 관측되었고 다른 조건의 시험에서는 t-test 확인

시 통계적으로도 유의한 변화가 없었다. 따라서 가속노화시험 조건은 고온고습 조건으로 결정하였다.

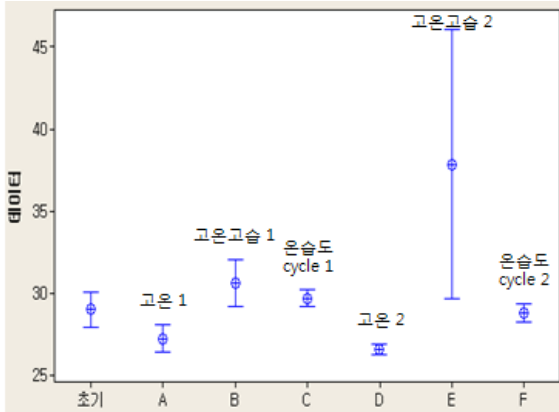


Fig. 3. 95% CIs for delay time at each condition

### 3.2 가속노화시험

가속노화시험의 조건을 Table 3 에 정리하였으며 시험 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 4가지 시험 조건 모두 시험이 진행됨에 따라 지연초시가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 50°C, 50% 조건의 경우 초기 시점 이후로 노화 속도가 저하되어 관측 주기를 늘려가며 지연초시를 측정하였다.

Table 3. Accelerated degradation test conditions

시험조건	관측 주기별 소요 발수		관측 주기	소계
	기술시험	화학분석		
50°C 50%	10	2	기술 시험 8~12회	90
65°C 50%	10	2		100
65°C 75%	10	2		130
80°C 75%	10	2	화학 분석 5회	120
소계	40	8		440

각 시점 별 데이터가 어떤 분포에 더 적합한지 식별하기 위해 Minitab을 이용하여 분포식별을 수행하였다. 분포 식별 결과 AD값을 얻을 수 있으며, 이때 AD는 Anderson-Darling test의 결과 값으로 데이터가 해당 분포에 가까울수록 작은 값을 갖는다. 분포식별 결과 시험조건 모두 대수정규분포에 더 적합한 것을 확인할 수 있었다. 또한 열화분포모델 적용에 앞서 Minitab을 이용하여 등분산 검정을 수행하였으며 검정 결과 네 시험조건 모두 등분산이라고 할 수 없었다. 따라서 데이터 분석 시 시간에 따라 분산에 변화가 있기 때문에 분

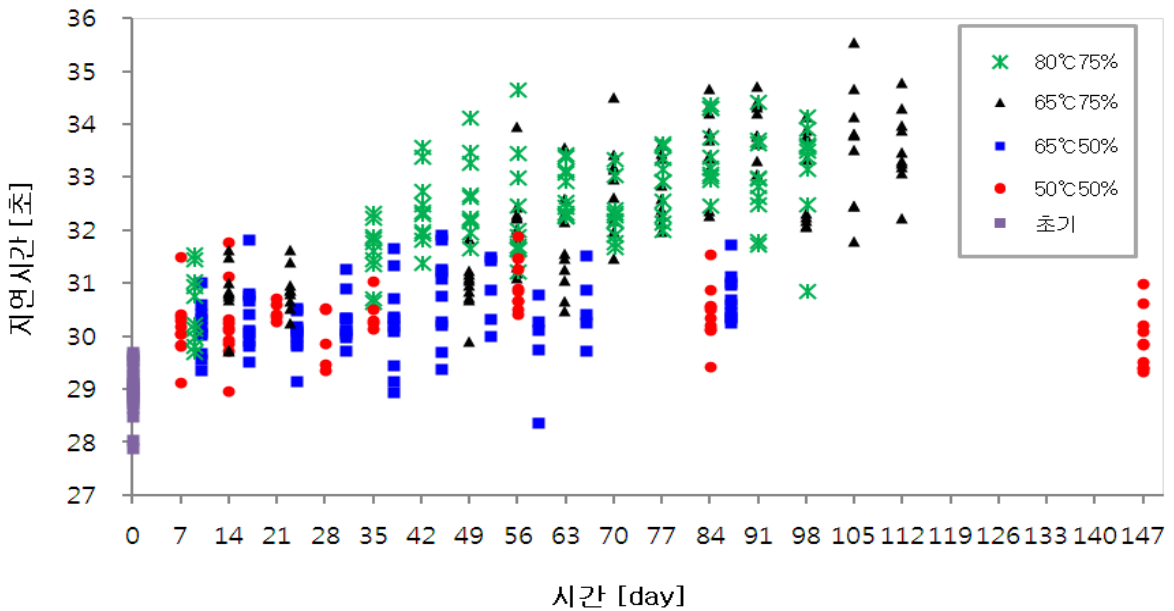


Fig. 4. Results of accelerated degradation test

산을 시간의 함수로 고려하였다. 평균과 분산이 시간에 따라 모두 변하는 식(8)의 열화비율모형 등을 사용하여 지연초시 평균값의 시간에 따른 변화를 예측한 결과를 시험결과와 비교하여 Fig. 5 에 나타내었다. 시험 데이터와 각 모형을 이용하여 추정한 값과의 차이를 나타내는 오차의 제곱합을 비교 시, 시간이 경과함에 따라 지연시간의 증가속도가 감소하는 열화비율모형이 시험결과를 가장 잘 묘사한다고 할 수 있었다.

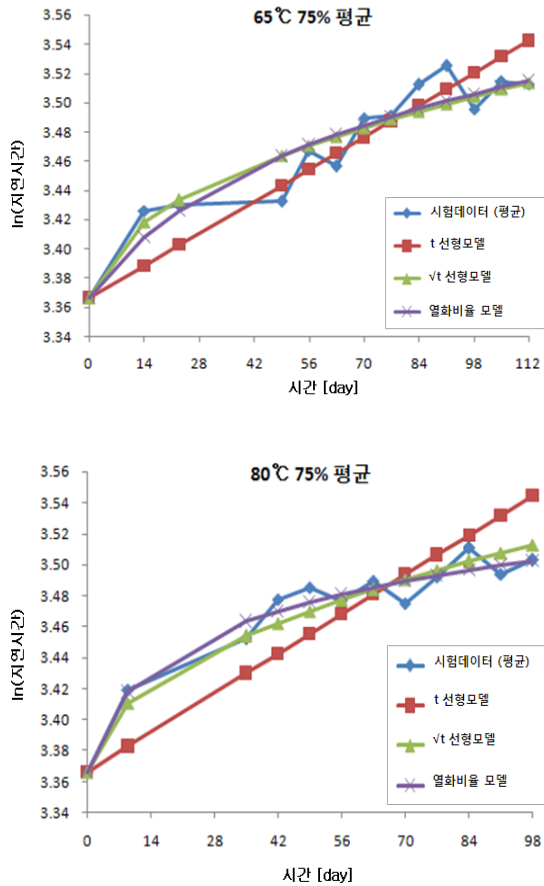


Fig. 5. Comparison of estimated degradation models with experimental results

각 시험 조건간에 가속성이 성립하는 지를 확인하기 위하여 대수정규 수명분포에서 시간 대비 누적고장의 비율 기울기를 비교하여 Fig. 6 에 나타내었다. 시험조건별로 기울기가 유사함을 확인할 수 있으나 초기 이후 노화속도가 감소한 50°C, 50% 조건의 경우 기울기가 약간 다르게 보인다. 그러나 카이제곱 검정 결과 유의수준 5%에서 다른 시험 조건과 기울기가 다르다고 볼

수 없으므로 가속성이 성립함을 통계적으로 확인할 수 있었다.

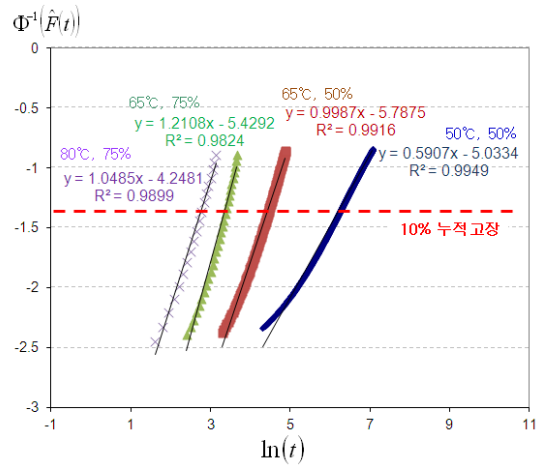


Fig. 6. Cumulative failure over time for each test condition

### 3.3 저장수명예측 및 검증

가속 조건에서의 시험 결과를 분석한 결과 각 조건에서의  $B_{10}$  수명(지연초시 규격 30.75초를 초과할 가능성이 10%에 이르는 시점)은 Fig. 6 의 10%누적고장 기준에 해당하는 시간으로써 Table 4 와 같다. 이 결과를 바탕으로 실제 저장조건에서의 수명을 예측하기 위해 식 (9)~(11)의 모델식과 Table 5 에 나타낸 각 모델식의 변형식을 적용하였다[5]. 실제 저장 조건은 20°C, 60%로 가정하였으며 이는 이글루 탄약고 온습도 관리 목표치를 기준으로 설정하였다. 각 모델식 및 변형식을 적용하여 예측한 저장 수명을 Table 5 에 제시하였다. 각 모델식에 따라 지연초시가 규격을 만족하지 못할 확률이 10%에 이르는 저장 수명은 최소 11.8년에서 최대 17.6년으로 예측되었다.

Table 4.  $B_{10}$  life for each test condition

시험조건	$\ln(B_{10}$ 수명)	$B_{10}$ 수명(day)
50°C 50%	6.36	581
65°C 50%	4.52	92
65°C 75%	3.38	30
80°C 75%	2.77	16

**Table 5.** Estimation results of B<sub>10</sub> life for different stress-life relationships

수명-스트레스 모델 및 변형 식		B <sub>10</sub> (年)
팩(Peck)	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times (RH)^{-n}$	15.2
	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times (RH)^{\left(\frac{B}{kT}\right)}$	14.4
	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times (RH)^{-n} \times (RH)^{\left(\frac{B}{kT}\right)}$	11.8
인텔(Intel)	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times e^{\frac{B}{RH}}$	16.1
	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times e^{\frac{C \cdot RH}{kT}}$	15.4
	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times e^{\frac{B}{RH}} \times e^{\frac{C \cdot RH}{kT}}$	15.1
클링거(Klinger)	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times e^{\frac{B \cdot RH}{1-RH}}$	16.6
	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times e^{\frac{C \cdot RH}{kT} \cdot \frac{RH}{1-RH}}$	16.0
	$L = A \times e^{\frac{E}{kT}} \times e^{\frac{B \cdot RH}{1-RH}} \times e^{\frac{C \cdot RH}{kT} \cdot \frac{RH}{1-RH}}$	17.6

연구 결과를 실제 저장 조건에서의 수명과 비교 검증하기 위하여 그간 군에서 시험한 결과를 입수하고 저장기간 27년인 84년도 생산 시료를 추가로 시험하여 데이터를 분석하였다. 군에서 보유한 데이터는 지연초시의 규격만족 여부만을 확인한 Pass/Fail 데이터이므로 윌샷 시스템의 가부반응 데이터 해석법[1] 중 모수추정법을 적용하였다. Table 6 에 군에서 시험한 데이터와 본 연구에서 추가로 시험한 결과를 나타내었으며 모수추정법 적용 결과 저장 수명은 B<sub>10</sub> 수명 기준 11.2년임을 알 수 있었다. 따라서 Table 5 의 모델 식 중 팩모델의 3번째 식인 온습도 복합인자를 고려한 변형식(수명: 11.8년)이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

**Table 6.** Field data (pass/fail) over storage time

저장기간	시료수	Fail	Pass	불량률
11	118	5	113	0.042
12	115	11	104	0.096
13	40	27	13	0.675
14	40	4	36	0.100
16	38	4	34	0.105
27	13	12	1	0.923

## 4. 결 론

텅스텐계 지연제가 적용된 지연링을 대상으로 장기 저장 시, 신관 작동 시간 범위 이탈 에 따른 지연시간이 규격을 벗어나는 현상에 대해 연구를 수행하였다. 문헌 조사 및 분석을 바탕으로 Pre-Test 조건을 수립하고 시험 후 결과를 분석하여, 신관 작동 시간 범위 이탈 현상을 재현할 수 있는 가속노화시험 조건을 선정하였다. 선정된 온습도 복합 가속 조건을 기반으로 4수준의 가속노화시험을 수행하였다. 시험 결과 지연시간의 증가 추이는 모델별 적합성 검정 결과 열화비율모델을 적용하여 분석하였으며 지연초시 측정 데이터는 대수정규분포를 따른다. 지연초시 규격을 초과하는 확률이 10%인 시점을 기준으로 각 가속조건에서의 B<sub>10</sub> 수명을 계산하였고 이를 바탕으로 다양한 수명-스트레스 모델식을 적용하여 실제 저장조건에서의 B<sub>10</sub>수명을 예측하였다. 저장수명예측결과는 모델식별로 최소 11.8년에서 최대 17.6년으로 예측되었고 실제 필드데이터에 모수추정법을 적용하여 분석한 결과 저장 수명은 11.2년으로 추정되었다. 따라서 온습도 복합인자를 고려한 변형식(수명: 11.8년)이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

<감사의 글>

본 연구는 국방기술품질원과 <주>한화에서 추진 하는 “화공품 노화기구 규명 및 저장수명 예측” 연구 사업으로 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

### 기호설명

D(t)	시간 t에서의 열화량
m(t)	시간 t에서의 와이블 분포의 형상모수
n(t)	시간 t에서의 와이블 분포의 척도모수
μ(t)	시간 t에서의 평균
σ(t)	시간 t에서의 표준편차
L	수명
k	볼츠만 상수, 8.6173× 10 <sup>-5</sup> eV/K
E	활성화 에너지
B <sub>10</sub>	누적 고장 10%에 이르는 시간

### 참고문헌

[1] Son, Y. K., Jang, H. J.(2010), “Comparison of

- Reliability Estimation Methods for One-shot Systems Using Accelerated Life Tests”, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 36(4), pp. 212-218.
- [2] Chang, I. H., Hong, S. H., Jang, H. J., Son, Y. K.(2012), “Storage Life Evaluation of a Violet Smoke Hand Grenade (KM18) using Degradation Data”, *Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology*, Vol. 15, pp. 215-223.
- [3] Stanley J. Sawicki(1967), *Engineering Design Handbook Military Pyrotechnics Series Part I*. HEAD-QUARTERS, U.S. ARMY MATERIEL COMMAND.
- [4] Raymond H. Comyn(1962), *Pyrotechnic Research At DOFL Part II. Pyrotechnic Delays*, DIAMOND ORDNANCE FUZE LABORATORIES, WASHINGTON 25, D. C.
- [5] Meeker, W. Q. and Escobar, L. A.(1998), *Statistical Methods for Reliability Data*, Wiley, New York.
- [6] Coit, et al.(2005), “A Method for Correlating Field Life Degradation with Reliability Prediction for Electronic Modules”, *Quality and Reliability Engineering International*, 21(7), pp. 715-726.
- [7] James E. Rose(1977), “STABILITY OF DELAY COMPOSITIONS”, *Journal of Hazardous Materials*, 2, pp. 97-112.
- [8] Salter, S. J., et al.(1975), “SBASI - ACTUATED PYROTECHNIC TIME DELAY INITIATOR”, *NASA, WASHINGTON, D.C. 20546*.

2012년 8월 1일 접수, 2012년 8월 16일 수정, 2012년 8월 18일 채택