

기계식 시한 신관 KM577A1용 기폭관 저장수명 예측

장일호*·박병찬*·황택성**†·홍석환***·백승준****·손영갑*****

* 국방기술품질원

** 충남대학교

*** (주)한화 여수사업장

**** 안동대학교

Storage lifetime estimation of detonator in Fuse MTSQ KM577A1

Il-Ho Chang*·Byung-Chan Park*·Taek-Sung Hwang**†

Suk-whan Hong***·Seung-Jun Back****·Young-Kap Son*****

* Defense Agency for Technology and Quality

** Chungnam National University

*** Hanwha Co., Ltd.

**** Andong National University

Key Words : Lead Azide, Detonator, Fuze, Storage Lifetime, Accelerated Degradation Test, One-Shot System, MTSQ(Mechanical Time, Superquick)

Abstract

A fuze detonator comprising star shells is an important device so that its failure usually leads to failure of the shells. In this paper, accelerated degradation tests of RD1333 (lead azide) using temperature stress were performed, and then degradation data of explosive power for the detonator were analyzed to predict the storage lifetime of detonator. Degradation data analysis to estimate the storage lifetime is based on a distribution-based degradation process. Statistical distribution parameters of explosive power degradation measures at each time were estimated for each temperature level, and then reliability of the detonator for each accelerated temperature level was estimated using both time-varying distribution parameters and critical level of explosive power. Arrhenius model was applied to estimate storage lifetime of the detonator under the field temperature condition. Accelerated distribution-based degradation analysis to estimate storage lifetime is explained in detail, and estimation results are compared to field data of storage lifetime in this paper.

1. 서 론

소비자의 요구가 다양화, 복잡화되어 가는 현대 사회에서 우수 품질 제품(혹은 서비스)의 생산이 기업 경영의 결정적 요소가 되어 가고 있다. 민수분야에서의 우수 품질 생산능력이 기업 생존을 좌우한다면, 군수분야에서의 우수 품질 생산능력은 국가 존망에 중대한 영향을

을 준다고 할 수 있다. 무기체계를 비롯한 대부분의 군수품은 시장에서 품질과 가격의 경쟁을 통해 소비자에 의해 선택되는 민수품과는 달리 사용자가 제시하는 요구 조건에 의거 주문생산을 하는 계약적 특성을 갖고 있기 때문에 그 품질을 확인하고 보증하는 것이 필수 불가결한 특성을 갖고 있다.

또한 탄약은 전쟁 필수 및 긴요 물자로서 장기 저장 후 사용되는 특성으로 저장시 안전성(Safety), 신뢰성(Reliability) 및 성능(Performance) 확보가 매우 중요

† 교신저자 tshwang@cnu.ac.kr

하다고 할 수 있으며 이를 위해 저장수명(Shelf Life)에 대한 연구가 매우 절실하다. 현재 군이 보유하고 있는 탄약의 상당수가 제조 후 20년 이상 경과되어 매년 신관불발과 같은 탄약 약작용 발생이 증가되고 있는 추세이며, 탄약 성능에 대한 신뢰성 확보를 위해 ASRP (Ammunition Stockpile Reliability Program)를 실시하고 있으나, 저장수명을 예측하는 방안에는 아직 미흡한 실정이다. 본 연구는 155MM 조명탄용 신관 KM 577A1에서 가장 취약부품인 Lead Azide계 기폭관 KM94의 위력 저하에 대한 가속열화시험을 실시하여 저장수명을 예측하는 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

가. 기폭관 KM94

연구의 대상인 155MM 조명탄용 KM577A1 신관 형상은 <그림 1> 과 같으며, 신관 폭발 계열을 <그림 2> 에 나타내었다.

격침이 KM94 기폭관을 타격하면 기폭관이 폭발하고 이 폭발 에너지에 의해서 하부의 KPA510 연결관이 폭발하게 된다. 또한, 연결관의 폭발 에너지에 의해 전폭약이 폭발하는 구조이다. 따라서 기폭관 또는 연결관이 제 성능의 폭발 에너지를 전달하지 못 할 경우에는 전폭약까지의 폭발 계열이 정상적으로 이어지지 않아 반폭이 발생하는 것이다. 여기서 반폭이라 함은 격침에 의한 기폭관 폭발 후 연결관까지는 폭발이 되었지만 폭발 에너지의 부족으로 전폭약이 폭발하지 못하는 현상을 뜻한다. 이와는 달리 기폭관 자체가 폭발하지 않는 경우를 불폭으로 구분한다.

나. 기폭관 약작용 현상

KM94 기폭관의 구조는 <그림 3> 과 같이 구성되어 있으며 그 조성은 <표 1> 과 같다. 격침이 최상부의 민감한 화약인 NOL#130을 기폭시키면 이 에너지에 의해 RD1333이 폭발하게 되고 최종적으로 강한 폭발력을 가진 RDX가 폭발하면 하부의 KPA510 연결관으로 폭발 계열이 이어지는 구조이다. 참고로 KPA510 연결관 내부의 화약은 RDX계열에 소량의 첨가제가 추가된 것을 제외하면 기폭관 최하단의 RDX와 동일한 것으로서 강한 폭발력으로 인해 폭발 계열의 마지막인 전폭약을 기폭 시키는 역할을 한다. 그러나 각 구성품이 정상적

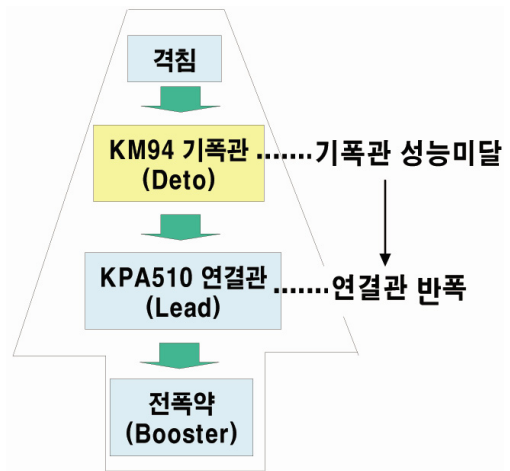
인 폭발력을 발생하지 못하게 되면 전폭약까지의 폭발 계열이 이어지지 못하는 반폭 현상이 발생하게 되며 소 요군에서 발생하는 신관불발의 주된 원인으로 지목되고 있다.



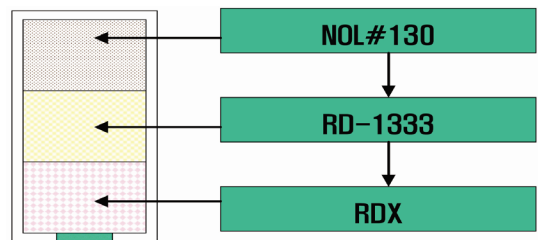
155MM 조명탄

신관 KM577A1

<그림 1> 155MM 조명탄 및 KM577A1 신관 형상



<그림 2> KM577A1 신관 폭발 계열

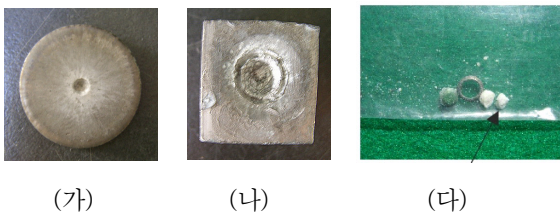


<그림 3> KM94 기폭관 구조

〈표 1〉 KM94 기폭관 화공품 조성

구분	원료	특성
상부 화약 NOL#130	·Lead Styphnate (KDS-1376-0011)	○혼합 기폭약 ○감도 및 위력 (Output)이 우수, 널리 쓰이는 기폭 약
	·Lead Azide (KDS-1376-0007)	
	·Ba(NO3)2 (KDS-6810-0109)	
	·Sb2O3 (KDS-6810-0108)	
	·Tetracene MIL-T-46938)	
중부 화약 RD1333	·Lead Acetate ·Sodium Azide (MIL-S20552) ·Sodium Carboxy Methyl ·Cellulose(Na-CMC) ·Sodium Hydroxide (96% up) ·Tween 20	○합성기폭약 ○기폭능력은 우수하 나 열분해 속도가 빠름 (위력저하 예상)
	$Pb(CH_3COO)_2 + 2NaN_3 \rightarrow Pb(N_3)_2 + 2CH_3COONa$	
하부 화약 RDX	·Hexamine	○저장 안정성 양호

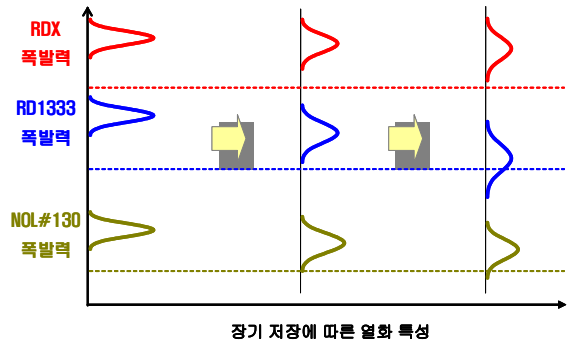
〈그림 4〉는 기폭관의 폭발상태를 나타내준 예로써 (가)는 KM94 기폭관이 정상으로 폭발하여 규격에서 요구하고 있는 Steel Disc에 0.14mm 이상 깊이의 Dent를 발생한 결과이며, (나)는 KM94 기폭관과 KPA510 연결관에 대한연결시험 시 정상적으로 기폭 되어 규격 요구 조건인 0.65mm 이상 깊이의 Dent를 생성한 것이다. 그러나 (다)는 반폭이 발생한 경우로 기폭관 내부의 최하단 화약인 RDX가 덩어리로 뭉쳐 폭발하지 않은 상태를 보이고 있고 Steel Disc에는 Dent 흔적을 남기지 않는다.



〈그림 4〉 기폭관 및 연결관의 위력시험 결과 비교

다. 기폭관 위력 저하에 대한 가설

〈그림 5〉에는 기폭관을 구성하는 화공품의 각 폭발 위력이 시간이 지남에 따라 감소함을 도식적으로 나타내었다.



〈그림 5〉 기폭관 구성 화공품의 시간에 따른 위력 저하 예상 추이

RDX는 위력이 가장 크며 KPA510 연결관을 기폭시키는 역할을 수행한다. NOL#130은 가장 작은 위력을 가지며 격침 타격에 의한 감도가 주된 특성으로서 중간 물질인 RD1333을 기폭시키는 위력만큼을 발생하게 된다. RD1333은 Lead Azide 화합물이며 에너지 전달의 가장 중요한 역할을 수행한다. RD1333과 같은 Lead Azide 물질은 75℃에서 4일 경과 후 약 0.8%의 중량 감소가 관찰되는 등「URBANSKI, 1967」 기폭관을 구성하는 화공품 중 상대적으로 가장 노화가 빠른 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 기폭관 내부에서 에너지 전달의 역할을 수행하는 RD1333의 노화를 반폭의 주 원인으로 판단하여 이에 대한 열화 시험을 수행하고 관측 주기별로 기술 시험을 수행하여 Steel Disk에 발생하는 Dent 깊이를 측정하여 위력 저하 현상을 관찰하였다.

라. 열화 모델 통계 분석

열화 모델(Degradation Model)이란 제품이나 부품이 신뢰성에서 정의하는 고장에 이르기까지의 본래의 기능 또는 성능이 변화되는 과정을 해석하는 방법론이다. 최근에는 가속수명시험이 활발히 적용되어 기존에 소요되던 시험기간을 단축하고는 있으나 제한된 시험기간 동안에 관측되는 고장의 수가 적어지는 문제점이 있고 이는 기술의 발전과도 무관하지 않은 현실이다.

따라서 최근에는 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 대용 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 변화하므로 열화 분포 모델을 적용하여 데이터 분석을 수행하고자 한다. 「Coit et al.,2005」 열화 분포모델은 각 측정 시점별로 얻어진 데이터를 확률표본으로 간주하여 열화량의 분포함수를 추정하고, 추정된 분포함수의 시간적 변화를 이용하여 열화특성을 결정하고 그 신뢰도를 해석하는 방법이다. 분포함수의 시간적 변화는 대부분 해당 분포함수의 모수의 변화를 이용하여 설명되어진다. 즉, 각 측정시점마다 추정된 분포함수의 모수를 시간을 독립변수로 하여 회귀식 등을 구해서 열화특성을 설명하고자 하는 것이다.

각 관측 시점에서의 열화량의 분포를 ALTA-6 또는 미니탭과 같은 상용 프로그램 등을 활용하여 결정할 수 있으며, 시간 t에서의 열화량(D(t)):본 연구에서는 dent 깊이의 측정값) 분포함수는 다음 식(1)~(3)과 같다.

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, 로그모형 등으로 식 (4) ~ (7)과 같이 표현된다.

$$\text{선형모형} : p(t) = a + bt \quad (4)$$

$$\text{지수모형} : p(t) = ae^{bt} \quad (5)$$

$$\text{로그모형} : p(t) = a + b \ln(t) \quad (6)$$

$$\text{제곱근모형} : p(t) = a + b\sqrt{t} \quad (7)$$

여기서 열화량 D(t)가 정규분포를 따르는 경우, 시간에 따른 평균 변화는 $\mu(t) = E[D(t)]$, 표준편차 변화는 $\sigma(t) = \sqrt{V[D(t)]}$ 이며, 대수정규분포를 따르는 경우 $\mu(t) = E[\ln(D(t))]$, $\sigma(t) = \sqrt{V[\ln(D(t))]}$ 이다.

온도에 대한 화학적 반응을 통해 열화가 발생할 때, 대부분의 경우 D(t)는 대수정규분포를 따르며, 식 (7)로 표현되는 모수의 함수가 가장 적은 fitting 오차를 제공한다[4,7]. 본 연구에서 시험 데이터의 열화량 분포는 식 (3)의 대수정규분포로, 대수정규분포의 모수인 평균과 표준편차의 시간에 대한 함수를 각각 식 (8)와 (9)로 표현함이 타당하였다.

$$\mu(t) = a_1 + a_2 \sqrt{t} \quad (8)$$

$$\sigma(t) = a_3 + a_4 \sqrt{t} \quad (9)$$

ti시점에서 j개의 열화데이터를 Dj(ti)라 두면, 식(8), (9)에서 추정해야 하는 a1, a2, a3, a4 를 구하기 위해 식 (10)으로 우도함수를 정의하고 최우추정법을 적용한다.

$$L(a_1, a_2, a_3, a_4 | D_j(t_i)) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^{n_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_j(t_i) (a_3 + a_4 \sqrt{t_i})} \times \left\{ \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\frac{\ln(D_j(t_i)) - (a_1 + a_2 \sqrt{t_i})}{(a_3 + a_4 \sqrt{t_i})} \right)^2 \right) \right\} \quad (10)$$

식 (10)에서 m은 관측 회수를 의미하며 ni는 관측 시점에서 측정된 특성치 값을 의미한다. 최우추정법을 통해 추정된 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ 로부터 각 시점에서의 시간에 따른 분포를 나타낼 수 있으며, 또한 규격(spec.) 대비 규

격을 만족시키지 못하는 확률을 평가할 수 있다. 망대 특성을 가지는 $D(t)$ 가 시간에 따라 감소하는 경우, 시점 t 에서의 누적고장확률 $F(\text{spec.})$ 은 식 (11)을 이용하여 평가한다.

$$F(\text{spec.}) = \Phi\left(\frac{\ln(\text{spec.}) - (\hat{a}_1 + \hat{a}_2\sqrt{t})}{(\hat{a}_3 + \hat{a}_4\sqrt{t})}\right) \quad (11)$$

3. 연구 결과

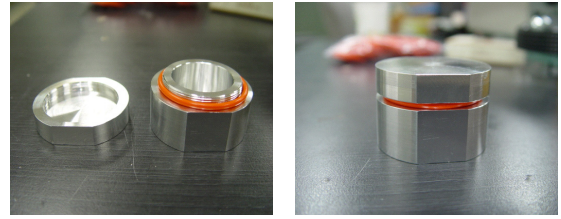
가. 가속열화시험 조건 선정

RD1333은 Lead Azide 화합물이며 화학식은 PbN_6 이다. 가속열화조건 선정을 위한 문헌 조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

- D) 100°C 시험 결과 96시간 후 중량 감소가 0.3% 수준이며 80°C 15개월 저장 후에도 특이한 변화 없음 [Military Explosives, 1984]
- ii) 100°C 이하에서 분해 속도 매우 낮으며 Lead Azide의 분해 온도는 190°C [Akhavan, 2004]
- iii) 120, 140°C 에서는 중량 감소가 상대적으로 적으며, 160, 180°C 에서는 중량 감소가 매우 큼 [Rouch, 1976]
- iv) 각 온도별 Aging 후 점화에 필요한 에너지 측정 결과 150°C까지는 큰 변화없음, 175°C 조건에서 Aging 시 점화에너지 증가, 200°C 조건 Aging 시료는 급격한 점화 에너지를 보임 [Johnson, 1967]

이상의 자료조사 결과 Lead Azide의 가속열화 메커니즘은 고온에서의 분해에 의한 중량 감소이다. 그리고 이에 따라 점화에 필요한 에너지의 증가에 대해 그간 많은 연구가 진행되어 온 것으로 조사되었다. 또한, 본 연구에서 진행할 가속열화시험은 고온 150°C 이하의 수준에서 진행하여야 할 것으로 판단되었다. 이는 150°C 이상에서 분해 속도가 매우 빨라지므로 실제 소오군에서 발생하는 악작용과 다른 열화 메커니즘이 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서의 가속열화시험 조건은 90°C와 130°C 조건으로 수행하였다. 또한 신관의 3중 방수구조를 모사하기 위하여 <그림 6>과 같은 내압용기를 제작하여 시험에 사용하였다. 공정에서 유입된 수분이 고온 시험 시 증발 되어 빠져나가지 못하도록 기밀성을 확보하기 위하여 황(S)을 포함하지

않는 불소고무를 사용하여 패킹하였고 용기의 재질은 기폭관 관체와 동일한 알루미늄을 가공하여 제작하였다.



<그림 6> 가속열화시험용 내압용기

나. 가속열화시험 결과

RD1333에 대한 고온 조건에서의 가속열화시험을 수행 후 KM94 기폭관을 제조하여 이에 대한 단품 위력시험과 KPA510 연결관과의 연결시험을 수행하여 열화시험 수행에 따른 위력 저하 추이를 Steel Disk에 발생하는 Dent 깊이로써 측정된 결과를 <표 2>와 <표 3>에 제시 하였다. 각 데이터 값은 Steel Disk의 Dent 깊이이다. <표 2>와 <표 3>에서 KM94 단품에 대한 위력 시험에서는 초기 대비 위력의 저하가 뚜렷하게 관측되지 않는다. 이는 다이얼게이지를 이용함에 따른 측정 오차가 포함되어 데이터의 추이가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 각 관측 주기별로 이전 관측 주기에서의 Dent 깊이와 비교한 t-Test 수행 결과 신뢰수준 95%에서 시간이 지남에 따라 Dent 깊이에 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나 KPA510과의 연결시험에서는 노화가 진행될수록 위력이 감소하는 경향이 관찰되었다. 각 관측 주기별로 이전 관측 주기에서의 Dent 깊이와의 t-Test 결과에서도 위력이 변해가는 것을 신뢰수준 95%에서 확인할 수 있었다.

다. 가속열화시험 데이터 분석

가속열화시험을 131일까지 수행하여 얻은 위력 감소 데이터로부터 위력저하 추이를 해석하였다. 즉, 각 시점별 Dent 깊이의 분포를 정규분포, 대수정규분포, 와이블분포 등 적합도 검증을 수행하였고 이중 대수정규분포가 가장 적합한 것(가장 많은 관측 시점에서 적합한 분포)으로 분석되었다. 표준편차의 경우, 각 시점별 표준편차에 대한 등분산 검정을 수행한 결과, 분산이 시간에 따라 변화함을 확인하였다. 대수정규분포의 모수(평균과 표준편차)가 시간에 따라 변해가는 추세는 식

(7)에 제시한 모형의 SSE 값이 가장 작음으로써 타 모형과 비교 결과 가장 적합한 것으로 분석되었다. 130℃ 조건의 시험 결과에 대하여 <그림 7>에 측정 데이터와 평균값 변화에 대한 각 모형별 예측 결과 및 각각의 SSE 값을 비교하였다. 90℃ 조건의 경우는 SSE 값에 큰 차이가 없었다.

<표 2> 가속열화시험(90℃)후 위력측정 결과

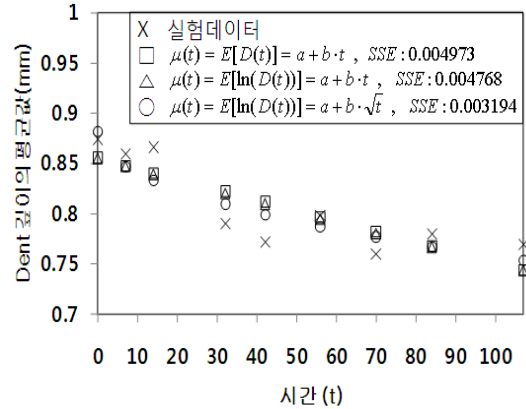
(단위 : mm)

시험일수 (日)	KM94dent시험		KM94+ KPA510 연결시험	
	평균	편차	평균	편차
0	0.21	0.02	0.87	0.04
5	0.21	0.03	0.89	0.02
10	0.21	0.02	0.90	0.02
15	0.22	0.03	0.90	0.02
20	0.21	0.02	0.89	0.02
27	0.21	0.03	0.88	0.02
33	0.20	0.03	0.88	0.01
44	0.20	0.03	0.85	0.03
54	0.20	0.02	0.84	0.02
68	0.20	0.02	0.84	0.02
94	0.23	0.04	0.75	0.03
110	0.22	0.03	0.80	0.05
131	0.18	0.03	0.80	0.08

<표 3> 가속열화시험(130℃)후 위력측정 결과

(단위 : mm)

시험일수 (日)	KM94dent시험		KM94+ KPA510 연결시험	
	평균	편차	평균	편차
0	0.21	0.02	0.87	0.04
7	0.21	0.02	0.86	0.03
14	0.20	0.02	0.87	0.02
32	0.22	0.03	0.79	0.03
42	0.21	0.03	0.77	0.05
56	0.22	0.03	0.80	0.02
70	0.18	0.04	0.76	0.09
84	0.24	0.04	0.78	0.06
107	0.21	0.03	0.77	0.05



<그림 7> 가속열화시간에 따른 위력 저하 추이의 모형별 비교 (130℃ 조건)

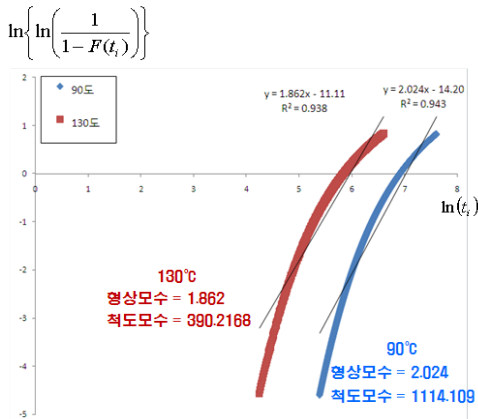
식(8)과 식(9)에 나타난 대수정규분포의 모수는 식(10)의 우도값을 최대로 하는 모수의 조합으로서 Matlab 코드를 이용한 수치해법으로 구하였다. 구해진 모수는 초기치 a1의 경우 -0.0861, a3는 0.0284 이며, 90℃ 시험 결과의 a2는 -0.0122, a4는 0.00288 이고 130℃ 시험 결과의 a2는 -0.0209, a4는 0.00537 이다. 이를 통하여 가속조건에서 열화시간에 따라 규격 0.65mm Dent 깊이를 만족하지 못하는 위력 저하 현상이 발생할 수 있는 확률을 기대 반쪽율로서 식(11)을 통하여 구한 후 그 결과를 <표 4>에 정리하였다. 시간에 따른 기대 반쪽율을 나타내는 수명분포를 선정하기 위하여 분포의 적합도 검증을 수행하였다. 수정된 Kolmogorov-Smirnov 검정을 이용하여 적합도 검정을 수행한 결과, 유의 수준 0.01에서 수명분포가 와이블 분포와 대수정규분포에 적합하였다. 일반적으로 대수정규분포의 경우, 시간에 따라 고장율이 증가한 후에 감소하는 경향을 나타내지만, 와이블 분포의 경우 형상모수가 1 이상일 때 시간에 따라 고장율이 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 물리적인 관점에서 열화로 인한 고장의 경우, 고장율이 대부분 시간에 따라 증가한다는 가정 하에 본 연구에서는 와이블 분포를 수명분포로 선정하였다. <표 4>의 기대 반쪽율을 가장 잘 묘사하는 와이블 수명분포의 모수를 계산하여 두 시험 조건에서의 가속성을 검증하고자 하였고, 그 결과를 <그림 8>에 나타내었다. 130℃ 조건의 시험 결과 형상모수는 1.862 그리고, 90℃ 조건 시험 결과의 형상모수는 2.024를 얻을 수 있었다. 가속성이 성립함을 확인하기 위하여 유의 수준 0.05에서 chi-square분포검정을 수행하여 형상모수가 동일함을 확인하였다.

〈표 4〉 가속열화시험 지속 시 기대 반폭을 예측 결과

시험일수 (日)	기대 반폭율 (규격 0.65mm 기준)	
	90℃	130℃
0	0%	0%
30	0%	0%
60	0%	0%
90	0%	3%
120	0%	9%
150	0%	17%
180	0%	26%
210	1%	35%
240	2%	43%
270	3%	50%
300	4%	56%
330	6%	61%
360	9%	66%
390	11%	69%
420	14%	73%
450	17%	76%
480	20%	78%

라. 상온 저장수명 예측

가속열화 조건에서 얻어진 수명 분포를 통하여 아레니우스 식을 이용한 상온 저장수명을 예측하였다. 아레니우스 모델은 온도 스트레스에 관한 실험식이며, 기체, 액체 및 고체의 화학반응에 폭넓게 적용 가능하다. 열화량을 x로, 반응속도를 K로 하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.



〈그림 8〉 가속 조건 별 와이블 수명분포 형상 모수 비교

$$\frac{dx}{dt} = K, K = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (12)$$

여기서, A : 재료 및 구조에 따른 상수

Ea : 활성화에너지 (eV)

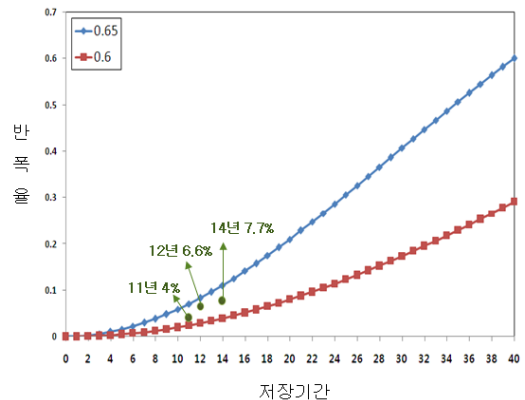
k : 볼츠만상수(8.6173×10⁻⁵ eV/K)

상기의 식으로부터 유도되는 아레니우스 모델의 수명은 식 (13)과 같은 형태로 표현된다.

$$L = A \cdot \exp (E_a / k \cdot T) \quad (13)$$

본 연구 결과 식(13)의 상수 A는 0.0285, Ea/k는 3840를 얻을 수 있었다. 상온 저장 조건을 18℃로 가정 시[9] 저장 기간이 경과함에 따라 규격 이상의 위력을 발생시키지 못할 확률인 기대 반폭율로써 저장 수명을 예측하고 이를 야전에서 발생한 약작용 이력과 비교한 결과를 〈그림 9〉에 나타내었다. 상온에서의 와이블 수명분포의 형상모수 값은 가속조건에서의 평균값인 1.943을 적용하였다.

〈그림 9〉에 표시한 3개의 점 데이터 4%, 6.6%, 7.7%는 각각 155MM 조명탄용 신관에서 발생한 약작용 이력이며 모든 약작용이 KM94 기폭관의 반폭현상에 의한 것은 아닌 것으로 판단된다. 이러한 약작용 이력과 비교 시 현재의 0.65mm Dent 깊이 규격을 적용 시는 실제 발생한 약작용 보다 짧은 저장 수명을 가지는 것으로 예측된다. 그러나 모든 규격은 여유치를 가지므로 규격보다 위력이 낮아진다고 하여 모두가 반폭이 발생하지는 않을 것이다. 따라서 이보다 낮은 규격인 0.6mm Dent 깊이를 반폭 발생 시점으로 고려한 결과를 〈그림 9〉에 동시에 나타내었다.



〈그림 9〉 상온 18℃기준 저장수명 예측 결과

0.6mm Dent 깊이가 반폭 발생을 유발하는 위력 하한치로 가정 시 실제 발생한 악작용 보다 긴 저장 수명을 예측할 수 있었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 실제 발생한 악작용이 모두 반폭에 의한 것이 아니기 때문에 보다 타당한 상온 저장 수명 예측 결과로 판단된다. 0.6mm Dent 깊이를 반폭 유발 위력 하한치로 가정한 결과 10% 수준의 반폭 발생 시점은 약 22.4년으로, 그리고 30년 저장 후 약 17.4% 수준의 반폭이 발생할 것으로 예측되었다. 참고로 Θ -degree 법칙으로 알려진 반감모델로도 상온 저장수명을 예측해본 결과 야전 데이터와 많은 차이를 보여 아레니우스 모델이 적합한 모델인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 기폭관 조명탄용 신관에 사용되는 기폭관에 대한 저장 수명을 예측한 결과를 제시하였다. 155MM 조명탄용 신관에 사용되는 KM94 기폭관과 KPA510 연결관 반폭 현상의 원인으로 지목되는 KM94 기폭관 내의 Lead Azide 화합물 RD1333을 고온 2조건 (90°C, 130°C)에서 가속열화시험을 수행한 후 기폭관을 제조하였다. 기폭시험을 수행하여 Steel Disk의 Dent 깊이 측정을 통해 위력의 저하를 관찰하고, 이러한 위력 저하 현상의 경향을 열화분포모델을 통하여 분석하였다. 실제 저장 온도를 18°C로 가정한 경우의 기폭관 저장 수명을 예측하고 이를 기존 악작용 이력과 비교하였다. 현재의 Dent 깊이 규격은 0.65mm 이지만 실제로 반폭을 유발하는 위력의 하한값은 0.6mm 수준으로 판단되었다. 0.6mm Dent 깊이를 위력의 하한값으로 고려한 경우의 저장수명은 10% 반폭 발생 시점이 약 22.4년일 것으로 예측되었다.

<감사의 글>

2010년 7월 5일 접수, 2010년 8월 9일 1차 수정, 2010년 9월 28일 2차 수정,
2010년 10월 13일 3차 수정, 2010년 10월 16일 채택

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

참고문헌

- [1] 박병찬, 장일호, 백승준, 손영갑, 정은진, 황택성 (2009) “충격신관 K510용 Zr-Ni계 지연관의 저장수명 예측”, 「한국군사과학기술학회지」, 제12권 제6호, pp.719- 726
- [2] Akhavan,J.(2004), *The Chemistry of Explosives*, 2nd Edition, pp. 72, 29
- [3] Coit, D.W., Evans, J. L. and Vogt, N. T.(2005),“A Method for Correlating Field Life Degradation with Reliability Prediction for Electronic Modules”, *Quality and Reliability Engineering International*, 21(7), pp.715-726
- [4] Escobar, L. A.,Meeker, W. Q., Kugler, D. L., and Kramer, L. L.(2003), *Accelerated destructive degradation tests: data, models, and analysis*, Chap.21, Mathematical and Statistical Methods in Reliability, World Scientific Publishing, Singapore, pp.319-337
- [5] Headquarters Department of the army, Washington D.C., (1984), *Military Explosives*, Department of the army technical manual, pp.7-2, 7-5
- [6] Johnson, L. B.(1967), “Detonation and Propagation of Lead Azide in Compacted Powder Trains”, *Industrial & Engineering chemistry product research and development*, Vol.6, NO1
- [7] Meeker, W. Q. and Escobar, L. A.(1998), *Statistical Methods for Reliability Data*, Wiley, New York
- [8] Rouch, L. L., and Maycock, J. N. (1976), “Explosive and Pyrotechnic Aging Demonstration”, *NASA Contractor Report*, pp. 33
- [9] URBANSKI, T.(1967), *Chemistry and Technology of Explosives*, Vol.3 , PERGAMON PRESS, LONDON, pp 141, 172