

서 이의 신뢰성 분석을 위해서는 필히 다(多)학제적 접근을 요구하게 된다. 그러나 현재까지 탄약 개발 시에는 개발 완료된 탄약에 대한 기능 구현상의 “품질” 평가 개념의 시험을 중점적으로 검토하였고 보존 환경 및 시간에 따른 각 Unit/Interface/Material의 열화특성에 대한 평가는 미진하였던 것으로 밝혀져 있어 그 간의 사용수명 예측에 대한 근거가 다소 미흡한 것으로 인식되어 있다. 본 연구에서는 60mm 고폭탄에 적용되는 충격신관 K510에 있어 불발의 주된 원인으로 추정되는 Zr-Ni계 금속원료 표면의 산화에 의한 연소 중단 현상에 대해 이를 재현할 수 있는 내압용기를 이용한 고온노화 시험법을 개발하였다. 또한 이러한 재현시험법을 바탕으로 고온조건의 가속노화시험을 추진하고 노화 기간에 따른 연소중단 발생을 데이터를 분석하는 가부반응 데이터 해석방법을 개발하였다. 마지막으로 고온조건에서의 시험결과로부터 수명-스트레스 관계적인 Θ 도(반감) 모델식을 이용하여 상온 저장수명을 예측하고 이를 Field 약작용 데이터와 비교하였다.

2. 본 론

본 연구의 대상인 지연관은 Fig. 1과 같이 뇌관, 점화제, 지연제, 파이로테크닉(Pyrotechnic) 순으로 충전되어 폭파계열을 형성한다. 고폭탄이 발사되는 순간의 관성력에 의하여 격침핀이 뇌관을 타격하면 민감한 화약인 점화제가 착화되고 이후 지연제가 서서히 연소되면서 마지막의 파이로테크닉 혼합물의 폭발력에 의해 장전핀이 방출된다. 뇌관 타격 후 지연관의 연소 속도에 의해 1.8~6.0초 후 파이로테크닉이 폭발하면 장전핀이 방출되면서 고폭탄 주장약의 폭발계열이 정렬된다. 그러므로 장전핀이 방출되지 못하면 탄약이 목표물에 명중하여도 주장약을 기폭시키지 못해 불발이 된다. 현재 군에서 발생하는 주된 약작용의 형태는

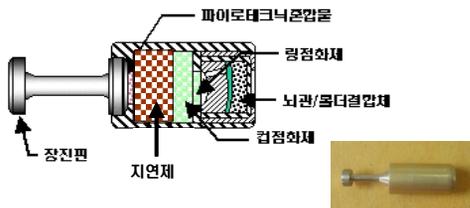


Fig. 1. Zr-Ni계 지연관의 구조

이러한 지연관의 장전핀이 방출되지 못하는 것이고 선행 검토 결과 지연관 내부에서 지연제가 연소 중단 되는 현상임이 밝혀졌다. 이는 K1 지연관의 모체라 할 수 있는 미국의 M53 지연관 에서도 동일한 문제가 보고되었다^{1,2)}.

가. 약작용 재현 시험

지연관 내부 지연제의 연소 중단 현상에 대한 가설을 수립하기 위하여 다양한 문헌조사를 실시한 결과 저장수명을 단축시키는 최대 인자는 수분인 것으로 결론내릴 수 있었다. 이는 금속 연료 표면의 산화로 인한 비활성화가 초기의 발화 특성치를 변화시킴으로써 발생¹⁻³⁾한다는 것이다. 즉 점화제의 연소열 또는 지연제가 스스로 연소되기 위해 요구되는 연소점 등의 초기 특성치의 평균값/산포가 시간이 지남에 따라 변화하는 특성을 보여 절심현상을 유발한다고 볼 수 있으며 이를 Fig. 2에 도식화 하였다. Fig. 2에서 초기에 점화제가 연소하면서 발생하는 연소열은 지연제가 스스로 연소되기 위해 필요한 연소점보다 충분히 큰 분포를 가지고 있었으나 시간이 경과함에 따라 두 가지 특성치 중 하나 또는 모두가 평균값과 산포가 변화하면서 점화제의 연소열이 지연제를 점화시키지 못하는 경우 절심에 의한 약작용이 발생한다고 판단된다.

그러나 이러한 약작용을 재현하기 위한 고온다습 시험(71°C, 60%)은 뇌관에 직접적인 흡습발생으로 뇌관 미기폭이 발생하였고, MIL 규격의 운습도 Cycle 시험(-62~71°C, 95%)에서는 관체의 부식 및 크랙을 수반하여 야전에서 발생하는 장기 저장에 따른 연소중단 현상과는 다른 결과를 얻었다.

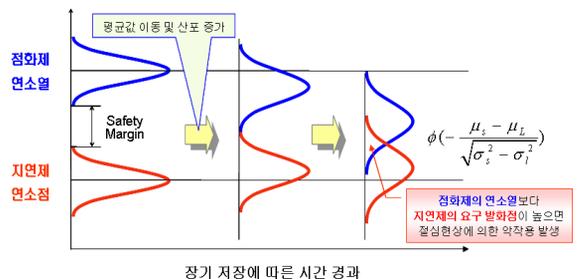


Fig. 2. 시간에 따른 점화제와 지연제 연소특성 변화

습기의 뇌관 침투 및 관체 부식 유발에 따른 문제점으로 인해 고온(71°C) 시험만을 실시한 결과 내부의

수분이 증발하여 연소속도가 오히려 증가하는 현상을 보여 악작용 재현에 실패하였다.

따라서, 본 연구에서는 내부 수분이 고온에서도 증발하지 않는 조건을 구현하여 악작용을 재현하고 재현된 악작용을 유발하는 스트레스를 이용하여 가속노화시험을 수행하였다. 지연관을 동관 내에 보관 시 고온에서도 수분은 동관 내부에서 활성화된 상태로 포화될 것이라는 가정하에, 지연관 내부의 수분이 고온(200℃)에서도 증발하지 못하도록 Fig. 3과 같이 두께 1mm의 동관 양 끝을 밀폐 처리한 내압용기를 제작하였다. 내압용기는 한 끝을 브레이징 처리하였으며 나머지 한 끝은 니플 구조를 적용하였다. 용기의 밀폐 성능을 확인하기 위하여 물 5cc를 주입하고 250℃ 온도에 15시간을 방치한 후 시료를 꺼내어 구조물의 파손 및 내부 수분 유지 여부를 확인하였다. 시험 결과 내부 수분량이 변화하지 않았기 때문에 내압 상승에 대한 기밀성을 확보할 수 있었다. 또한, 고온 조건에서 뇌관화약이 기폭될 가능성이 있어 시험에 사용될 시료는 뇌관 및 장진편을 결합하지 않은 반제품 상태로 투입하였고 시험 종료 후 뇌관과 장진편을 조립 후 기폭 시험을 수행하였다.



Fig. 3. 내부수분 유지를 위한 내압용기

악작용 재현 시험은 고온시험과 온도 Cycle 시험을 수행하였으며, 고온시험의 경우에는 Dr. Eric R. Bixon의 연구^[4]를 참조하여 총 40발을 195℃조건에서 15일 동안 수행하였고, 이 중에서 20발은 추가로 245℃조건으로 온도를 높여 15일을 시험하였다. 온도 Cycle 시험은 -54~71℃ 조건으로 MIL 규격^[5]에 따라 28일 동안 수행하였다. 악작용 재현 시험 결과를 Table 1에 나타내었다.

재현 시험 결과 초기에는 갈색인 점화제가 고온조건에서 검은색으로 변색되면서 연소중단 현상이 발생하며 이는 온도와 노화 기간에 따라 점차 증가하는 것으로 판단할 수 있었다. 그러나 온도 Cycle 시험에서는 연소중단 현상이 발생하지 않아 수명예측을 위

한 노화시험은 고온조건으로 계획하였다. 재현 시험에서 발생한 연소중단 현상을 가시화하기 위하여 3차원 X-ray 장비를 이용하여 내부를 관측하였고 이 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Table 1. 악작용 재현시험 결과

구분	노화 조건	노화 기간	점화제 색상	시료수 (발)	연소중단
고온	195℃	15일	갈색	13	5발(38%)
			검은색	7	6발(86%)
	195℃ ~ 245℃	30일	갈색	5	전량 연소중단
			검은색	15	
온도 cycle	-54 ~ +71℃	14일	갈색	20	없음
		28일	갈색	20	

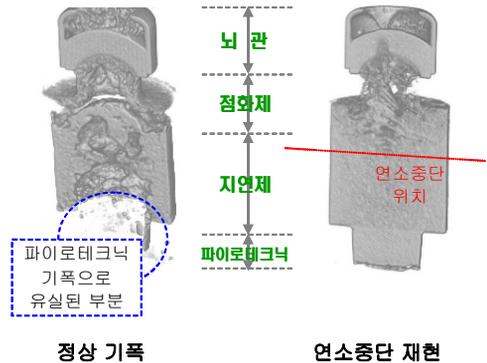


Fig. 4. 정상기폭과 연소중단의 X-ray 관측결과

Fig. 4에서 보인 것처럼 정상 기폭의 경우에는 지연관 최하단의 파이로테크닉 혼합물까지 연소 되어 장진편을 정상적으로 방출한 반면, 우측의 연소중단 시료는 지연제 내부에서 연소가 중단된 현상을 명확히 비교해 볼 수 있었다. 연소중단이 발생한 시료는 지연제 연소 중 또는 점화제와 지연제의 경계면에서 연소중단 현상이 발견되었으며 이는 야전에서 악작용 발생한 시료를 분석한 결과와 일치하였다.

나. 노화시험 방안

절심현상을 재현한 시험 조건인 온도 195℃를 기준으로 노화시험 계획을 수립하였다. 노화시험의 온도 조건은, 각 온도 조건별 약 50% 절심 발생을 4개월

Table 2. 노화시험 계획

시험 조건	시료 용도	총시료수	시험일수(日)																					
			초기	4	8	12	16	20	24	28	32	39	46	53	60	67	74	81	88	95	102	109	116	
150℃	기폭시험	316	12		19		19		19		19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	
	화학분석	54	9				9				9			9				9					9	
170℃	기폭시험	152			19		19		19		19	19	19	19										
	화학분석	27					9				9			9										
195℃	기폭시험	114		19	19	19	19	19	19															
	화학분석	27			9		9		9															

이내에 확인할 수 있도록 아레니우스 가속모델을 이용하여 설정하였다. 아레니우스 가속모델의 활성화 에너지 값은 마그네슘화합물의 경우 0.6~1.0[eV]이므로 중간값 수준인 0.8로 설정하였다. 아레니우스 가속모델을 적용한 결과, 170℃ 조건에서는 약 50% 절심 발생 소요 기간이 1,103시간으로 약 46일이며 150℃ 노화조건에서는 2,970시간으로 약 124일 소요될 것으로 예측되었다. 최종적으로 Table 2와 같이 관측 주기 및 시료 수를 결정하였다.

각 관측 주기별로 기폭시험을 실시하고 내부 화공품의 화학적 특성의 변화를 관측할 목적으로 화학분석용 시료를 별도로 투입하여 시험을 진행하였다.

3. 연구결과

가. 노화시험 결과

고온 조건 3수준에서의 노화시험 결과 Table 3 및 Fig. 5와 같이 노화기간에 따른 불폭률 상승 추세를 얻을 수 있었고 앞서 설명한 바와 같이 지연제 내부 또는 점화제와 지연제 경계면에서의 연소중단 현상을 관측할 수 있었다. 노화 시험 결과 발생한 연소중단의 원인으로는 재현시험 시에도 관측되었던 갈색 점화제의 흑화 현상으로 사료된다. 점화제와 지연제의 경계면에 발생한 흑화 현상이 노화가 진행될수록 점화제 표면까지 확산되는 것을 관찰 할 수 있었다. 노화 초기에 점화제와 지연제의 경계면에서만 흑화가 발생한 경우 점화제 반대편은 정상적으로 갈색을 유지하였으며 흑색면은 점화되지 않았지만 갈색을 유지한 면은 점화에 성공하였다. 화학분석 결과 화공품 내부에 금

속 산화물이 생성된 것을 확인하였고 이에 대한 정밀 화학분석이 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. 노화시험 결과 연소중단(절심율) 추이

경과일(日)	150℃ 조건	170℃ 조건	180℃ 조건
4	-	-	19 %
8	0 %	19 %	74 %
12	-	-	84 %
16	0 %	28 %	100 %
20	-	-	/
24	11 %	42 %	
32	11 %	53 %	
39	11 %	74 %	
46	42 %	84 %	
53	37 %	95 %	
60	42 %	95 %	
67	47 %		
74	58 %		
81	63 %		
88	74 %		
95	68 %		
102	53 %		
109	79 %		
116	95 %		

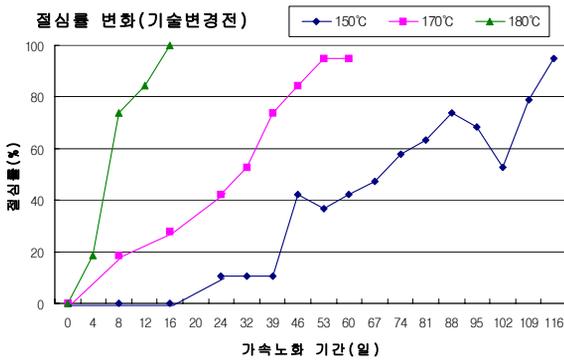


Fig. 5. 노화시간에 따른 불폭률 추이

일반적으로 지연관의 기폭시험 데이터는 일회성 시스템(One Shot System)의 특성, 즉 가부반응(Quantal Response) 데이터 특성을 나타내기 때문에 현재까지 공개된 상용 S/W로는 신뢰도를 추정할 수 없다는 문제가 있다. 가부반응 데이터는 성공(Pass) 혹은 실패(Fail)만을 나타내며, 가부반응 데이터 특성을 가지는 시료는 한 시점에서 추출한 시료를 다른 시점에서 평가할 수 없는 비복원 추출의 특성을 나타내고 있다.

이러한 비복원 추출을 가지는 시료는 무기체계에서 많은 사례를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 상기의 불폭률 데이터를 이용하여 저장수명을 예측하기 위해 수명 분포로서 와이블분포를 가정하였고, 형상모수와 척도모수를 추정하는 방법은 우도함수(Likelihood Function)를 활용한 모수추정법^[6]을 이용하여 수치계산법인 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 활용하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램의 알고리즘을 Fig. 6에 Flow chart로 도식화 하였다.

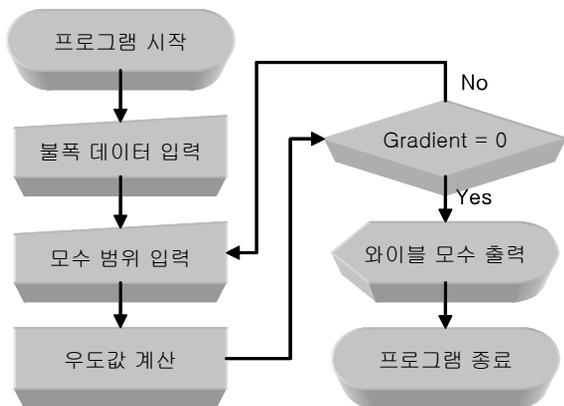


Fig. 6. 모수추정 프로그램 Flow chart

Fig. 6의 Flow chart에 나타난 프로그램의 알고리즘에 대해 이론적 배경 및 방법론을 설명하면 다음과 같다.

와이블 분포에서의 누적고장률 함수는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$F(t_i, \Theta) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

또한, 시간 t_i 시점에서 m_i 개를 시험하여 n_i 개의 불량률이 발생한 경우에 최우추정법을 이용하기위한 우도함수는 식 (2)와 같다.

$$L(\Theta) = \prod_{i=1}^k m_i C_{n_i} \{F(t_i, \Theta)\}^{n_i} \{1 - F(t_i, \Theta)\}^{m_i - n_i} \quad (2)$$

여기서, $F(t_i, \theta)$: 시간 t_i 에서의 누적고장률

α : 와이블분포의 척도모수

β : 와이블분포의 형상모수

Θ : 추정하고자 하는 파라미터 값
본 연구에서는 α, β 를 의미함

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 SQP를 활용한 최우추정 결과는 Fig. 7과 같고 3수준의 온도조건에 대한 불폭률 시험 데이터에 대한 최종 분석 결과는 Fig. 8과 같다.

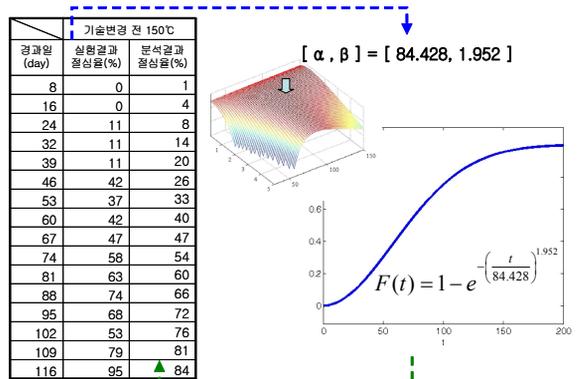


Fig. 7. 150°C 노화시험 데이터 분석 결과

Fig. 8과 같이 노화시험 데이터를 분석한 결과 3수준의 온도 조건에서 와이블 수명분포의 형상모수값이 150°C 시험 결과는 1.952, 170°C 시험결과에서는 1.6135,

180℃ 시험결과는 1.9968 로 추정되었다. 온도에 대한 가속성 성립여부를 Chi-Square를 이용한 검정통계량으로 부터 유의 수준 0.05에서 형상모수는 동일하기 때문에 가속성이 성립함을 확인할 수 있었다. 따라서 고온 조건에서의 노화시험 결과를 바탕으로 상온 저장시의 수명을 예측할 수 있었다.

절심을 (%)

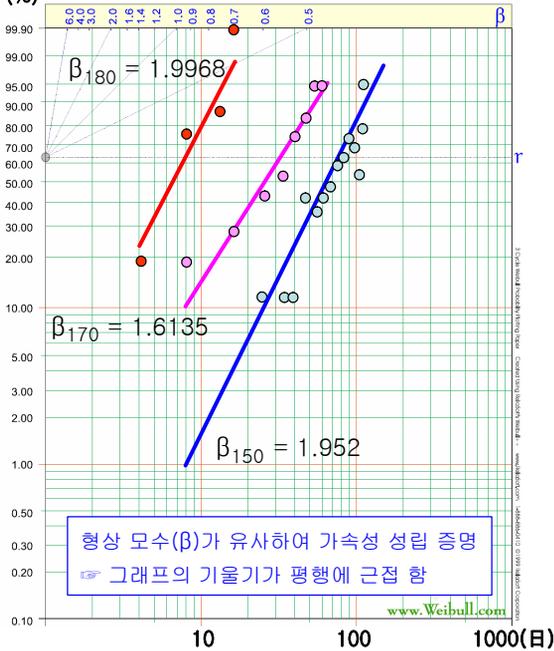


Fig. 8. 노화시험 결과 와이ابل 분포 비교

나. 지연관 저장수명 예측

고온 노화시험 결과를 바탕으로 상온에서의 저장수명을 평가하고 이 결과를 ASRP 평가 이력과 비교하여 검증하였다. 일반적으로 알려진 아레니우스 모델과 θ 도(반감) 모델식은 온도에 의한 가속 시험 결과를 해석하는 방법이며 두 모델식간의 관계는 다음과 같이 아레니우스 모델의 활성화 에너지와 θ 도(반감) 모델식의 반감온도인 θ 사이에 다음과 같은 유도가능하다.

아레니우스 모델식의 수명은 다음과 같으므로

$$L = A \cdot \exp(Ea / k \cdot T) \tag{3}$$

여기서, A : 재료 및 구조에 따른 상수

Ea : 활성화에너지(eV)

k : 볼츠만상수(8.610^5 eV/K)

온도 T_N 에서의 수명(L_N)과 T 에서의 수명(L)의 관계는 다음과 같은 θ 도(반감) 모델식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{L_N}{L} &= \frac{A \cdot \exp(Ea / k \cdot T_N)}{A \cdot \exp(Ea / k \cdot T)} = \frac{\exp(\alpha / T_N)}{\exp(\alpha / T)} = \exp[\alpha(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T})] \\ &= \exp[\alpha(\frac{T - T_N}{T \cdot T_N})] = 2^{\frac{T - T_N}{\theta}} \end{aligned} \tag{4}$$

위 식에서 활성화 에너지 관련 항과 온도의 항은 다음과 같이 치환되었다.

$$\alpha = Ea / k \tag{5}$$

$$\theta = \frac{T \cdot T_N \cdot \ln 2}{\alpha} \tag{6}$$

여기서, θ : 반감온도(℃)

두 모델식이 두 개의 온도조건에서 시험한 결과를 해석하는 데 동일한 파라미터를 이용하지만 가속 조건으로부터 정상 사용조건에서의 수명을 예측한 결과는 일반적으로 다르다는 것이 많은 연구를 통해 나타나고 있다. 본 연구에서는 내압용기를 적용한 온/습도 영향에 의한 가속 시험을 수행하였으므로 단순 온도 가속조건만을 가정하는 아레니우스 모델식 보다는 실험식의 성격에 보다 가까운 θ 도(반감) 모델식을 적용하여 데이터를 해석하였다.

지연관의 150℃와 170℃ 노화 시험 데이터 분석 결과로부터 식 (4)의 유도 결과를 식 (7)과 같이 간략화하여 데이터 분석을 수행하였다.

$$\frac{L_N}{L} = 2^{\frac{T - T_N}{\theta}} \tag{7}$$

95% 절심 발생 시점에 해당하는 150℃ 조건의 수명은 148.11日이며, 170℃ 조건의 수명은 62.55日로서 상기 수식에 대입하면 식 (8)과 같다.

$$\frac{148.11}{62.55} = 2^{\frac{170 - 150}{\theta}} \tag{8}$$

계산 결과 지연관의 수명 특성을 결정하는 파라미터인 Θ 는 16.083°C 이다. 이 값이 가지는 물리적 의미는 저장 온도가 약 16°C 상승할 때마다 수명이 절반으로 줄어든다는 의미이며, 반대로 170°C 조건으로부터 16°C 온도 하강 시 마다 170°C에서의 수명보다 두 배씩 수명이 증가한다는 것을 의미한다. Θ 값을 활용하여 상온 저장 조건을 18, 20, 22, 24°C로 가정한 경우에 저장 기간에 따른 절심 발생을 예측 결과는 Fig. 9와 같다.

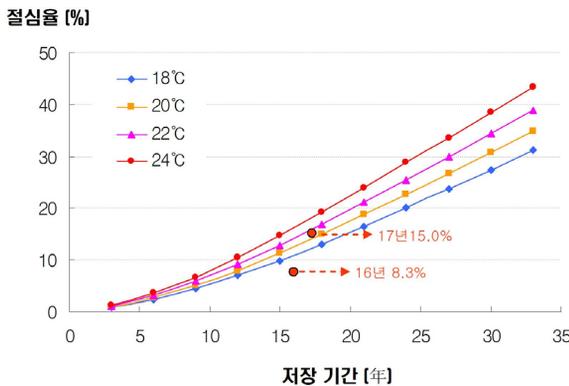


Fig. 9. 지연관의 수명예측 결과와 야전 Data 비교

야전에서 발생하는 악작용 추이를 파악하기 위하여 2006년에 수행된 ASRP^[7] 결과에서 신관 불발 건수를 발췌하여 이용하였다. 발췌된 ASRP데이터는 생산 시점 및 생산 lot, 탄약고 형태에 따른 여러 가지 변량이 혼합되어 있기 때문에 혼합된 변량이 포함된 ASRP데이터를 이용하여 수명 예측을 수행하는 것은 많은 오차를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 변량에 의한 영향을 제외하고자, 노화시험을 실시한 지연관과 동일한 제조일을 가지는 6월 생산분 지연관의 신관불발 데이터를 이용하여 수명 예측 결과를 검증하였다.

충격신관 K510 지연관의 다양한 저장온도(18, 20, 22, 24°C)별 수명예측을 수행하고 90% 신뢰수준에서 저장온도별 절심 발생율을 예측한 결과, 저장온도 18°C에서 추정된 절심발생율이 90% 신뢰수준에서 악작용 Data로부터 구한 불발율을 포함하였지만 다른 저장온도에서는 90% 신뢰수준에서 악작용 Data로부터 구한 불발율을 포함하지 못하였다. 따라서 ASRP 평가 시 불발발생 10% 시점을 B등급 판정하는 규정을 참조하여 수명으로 정할 경우 생산 시점 및 생산 lot, 탄

약고 형태에 따른 수명의 영향을 제외한 제한된 조건하에 저장온도 18°C를 기준으로 지연관의 저장수명은 약 15년임을 예측하였다.

4. 결론

본 연구를 통하여 기존에 재현하지 못하였던 K1 지연관의 Field 악작용인 점화제와 지연제 사이 또는 지연제의 연소중단 현상을 내압용기를 이용한 고온노화 시험을 통해 재현하였다. 또한 3차원 엑스레이를 이용하여 절심발생 위치를 확인하였다. 이를 바탕으로 시험 계획을 수립하여 3수준 온도조건의 가속노화 시험을 실시하였다. 지연관의 기폭시험 데이터는 일회성 시스템(One Shot System)의 특성을 가지므로 공개된 상용 S/W로는 수명분포를 추정할 수 없기 때문에 최우추정법을 적용한 프로그램을 개발하여 와이블 분포의 파라미터를 추정하였다. 추정 결과 와이블 수명 분포의 형상모수값이 150°C 시험 결과는 1.952, 170°C 시험결과에서는 1.6135, 180°C 시험결과는 1.9968로 추정되었고, 척도모수는 150°C 시험 결과에서 84.428일, 170°C 시험결과에서는 31.69 03일, 180°C 시험결과는 7.8466일로 추정 되었다.

고온에서의 노화기간 대비 절심 발생을 데이터 해석 결과를 바탕으로 Θ 도(반감)법칙을 적용하여 상온에서의 저장수명을 예측하였다. 지연관의 상온조건에서의 저장수명은 18°C 저장온도를 기준으로 추정된 결과가 ASRP 신관불발 데이터와 가장 유사하였다. 그러므로 ASRP 규정을 근거로 10% 불량 발생 시점을 기준으로 제한된 조건하에 저장수명을 예측한 결과, 지연관의 저장 수명은 약 15년으로 예측되었다. 향후 생산 시점 및 생산 lot, 탄약고 형태에 따른 수명의 영향을 고려한 지연관의 저장 수명 예측 연구를 수행할 예정이다.

본 연구에서 제안한 저장수명예측 방법을 응용하여 지연관 뿐 만 아니라 유도탄과 같은 무기체계의 저장수명평가에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 국방기술품질원과 <주>한화에서 추진하는 “충격신관 K510 저장수명 예측 및 화공품 노화기

구 연구” 사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Taylor F. R., Farnell P. L., “Study of the Storage Stability of a Zr/Ni Delay System using Ampoule Microcalorimetry”, 15회 IPS 논문.
- [2] Taylor F. R., Lopez L. R., “Development of a Reliable Miniature Delay System using Zirconium/Nikel Alloy-Potassium Perchlorate-Barium Chromate”, 16회 IPS 논문.
- [3] Headquarters Department of the Army, Washington D.C., “Military Explosives, Department of the Army Technical Manual”, 25. Sep. 1984.
- [4] Dr. Eric R. Bixon, Michael J. Cassiello, John D. McEwan, Jr., Technical Report ARQES-TR-06001, Armament Research, Development And Engineering Center, “M5491 Projectile Delay Assembly Predictive Engineering Analysis in Support of the Ammunition Stockpile Reliability Program”, 2006.
- [5] MIL-STD-331C Appendix C, Test C1 : Temperature And Humidity.
- [6] 손영갑 외, “One-shot device의 신뢰성 예측”, 제16회 지상무기학술대회, 2008.
- [7] 나상언 외, “2006년 ASRP 결과보고서”, 국방기술품질원 기술보고서, pp. 7~33, 2007.