

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.2.043>

격벽착화기 노화특성 연구

강원규^a · 장승교^{b,*}

Study on Aging Characteristics of Thru-Bulkhead Initiator

Wonkyu Kang^a · Seung-gyo Jang^{b,*}

^aDefense R&D Center, Hanwha, Korea

^bAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: jsg4580@add.re.kr

ABSTRACT

After the accelerated aging, the bulkhead initiator using high explosives was carried out to verify aging characteristics. The Thru-Bulkhead Initiator operates by transmitting shock-wave generated from micro-initiator to the acceptor and the ignition explosives through the bulkhead. In order to evaluate the life-time of the product, the accelerated aging condition was set according to the life-time, and the ignition performance of the sample was measured every 10 cycles by measuring the delay time and the maximum pressure through the 10cc closed bomb test. In addition, variance analysis was used to determine aging.

초 록

고폭화약을 이용한 격벽형 착화기를 가속노화 후 성능시험을 수행하여 노화특성을 확인하였다. 격벽형 착화기는 마이크로 착화기에서 발생한 충격파가 격벽을 통해 액셉터 화약과 점화 화약에 전달되어 동작한다. 제품에 대한 수명평가를 위해 수명연한에 따른 가속노화 조건을 설정하고, 매 주기마다 시료에 대한 점화 성능을 10cc 밀폐용기 시험을 통해 작동지연시간과 최대압력을 측정하여 요구 규격 만족여부를 확인하였고, 분산분석을 통해 노화여부를 판단하였다.

Key Words: Thru-Bulkhead Initiator(격벽착화기), Analysis of Variance(분산분석), Accelerated Aging(가속노화), Closed-Bomb Test(밀폐용기시험)

Nomenclature

B : Constant value(characterized value according to test-requirements)
E_a : Constant value(activation energy, eV)
k : Boltzmann constant(=0.00008617 eV)

Lu : Service life
La : Accelerated aging test time
Tu : Operating temperature(K)
Ta : Accelerated aging-test temperature (K)
t_a : Accelerated aging-test time
t_u : Normal condition aging time
x : Observations
μ : Grand mean of the observations
a_i : Error of group i of A

$\epsilon_{i,j}$: Total error
S_i	: Sum of n data at experimental level A_i
\bar{y}_i	: Average of n data at experimental level A_i
S	: Total data sum
\bar{y}	: Total data average

1. 서 론

격벽착화기(Thru-Bulkhead Initiator)는 고풍화약과 점화화약을 이용하여 추진기관에 점화에너지를 공급하는 파이로테크닉형 착화기로서 도너(donor) 화약과 역셉터(acceptor) 화약 사이의 금속 격벽에 의해 작동 후 기밀이 유지된다. 이러한 장점 때문에 장시간 연소시간을 갖는 유도무기의 점화안전장치 및 위성발사체의 추진기관 점화장치에 많이 활용되고 있다[1].

격벽착화기(Fig. 1)는 도너화약이 기폭될 때 발생하는 충격파가 격벽을 통과하여 역셉터 화약을 기폭시키고 이어서 점화화약(igniter)이 연소되어 점화에너지를 발생시킨다. 고에너지 충격파를 이용한 착화기의 특성상 격벽착화기 관련 연구는 주로 화약에 의해 발생하는 충격파의 특성에 대해 다루어져 왔다. 즉, 도너 화약의 양과 격벽의 두께에 따른 충격파의 감쇄특성과 이에 따른 격벽의 두께 설계와 신뢰도 등이 주안점을 이루었다. 격벽착화기에서 도너 화약량과 격벽의 재질 및 두께는 본 착화기의 작동 신뢰성을 결정짓는 매우 중요한 설계 인자이기 때문이다 [2,3].

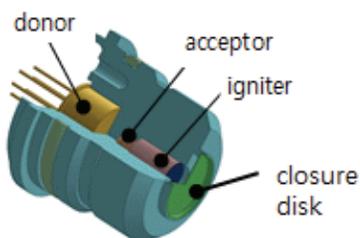


Fig. 1 Thru-Bulkhead Initiator.

반면에 격벽착화기에는 다양한 종류의 화약이 사용되기 때문에 노화특성에 관한 연구 또한 중요한 이슈 중 하나이다. 이를 위하여 최근까지도 화약 자체에 대한 노화특성 연구와 함께 착화기 시스템에 관한 노화특성 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 이에 따라 본 연구에서도 신뢰성을 증대시키기 위해 새롭게 개발된 소형 격벽착화기 [4]의 노화특성을 다루고 있다.

격벽착화기는 주로 전기식 기폭관을 이용하여 작동시키는데 본 연구에서는 고전압 기폭관을 사용하여 기폭관과 도너 화약의 역할을 동시에 수행할 수 있도록 하였다. 이와 같이 고전압 기폭관을 사용할 경우 우발 기폭 우려가 적어지고, 작동시간이 짧아 점화에너지 공급에 따른 지연 시간을 줄일 수 있다[5]. 또한 도너 화약이 고전압 기폭관의 금속케이스 내부에 충전되어 있기 때문에 외부의 습기 침투 등을 배제할 수 있고 장기 보관에 유리한 장점을 가지고 있다.

또한 격벽착화기에 사용되는 점화화약은 연소 속도가 빠르고 최대압력 형성이 균일하다는 장점이 있으나 보관 방법이나 기간에 따라 점화효율이 저하되는 경향이 있다. 이에 따라 점화화약의 안정적인 사용을 위해 점화제의 특성에 대한 명확한 이해가 필요하며 가속노화, 시차주사 열량계(Differential Scanning Calorimetry)등을 이용한 노화특성 및 수명 예측 연구들이 꾸준히 진행되고 있다[6-10]. 본 연구에 사용된 격벽착화기는 점화화약의 노화를 방지하기 위하여 금속 박막 마개를 설치하였다.

일반적으로 화약은 주로 수분과 반응하여 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 격벽착화기는 내장된 화약이 금속 박막에 의해 기밀되어 있어 오랜 기간 동안 보관하더라도 외부에서 수분이 침투할 가능성이 희박하지만 제작 공정에서 침투한 수분이 화약과 반응하여 성능저하를 유발할 가능성을 전혀 배제할 수 없으므로 노화 특성을 살펴볼 필요가 있다. 또한 장기간 보관 후에 사용할 경우 화약에 포함되어있는 바인더도 경화되어 연료와 산화제의 결합력을 떨어뜨릴 뿐 아니라 충전된 화약내에 미소 크랙 등을 발생시켜 성능에 변화를 초

래할 수도 있으므로 이에 대한 영향을 살펴보아야 한다.

이러한 연구 목적에 따라 고전압기폭관을 도너로 사용하고 점화화약을 주장약으로 사용하는 격벽착화기의 노화 특성 및 경향을 알아보기 위해 가속노화 시험을 수행하였다. 내장된 모든 화약이 밀봉(Hermetic Seal)되어 있으므로 가속조건은 온도만 고려하였다. 아레니우스 식을 사용하여 노화 모델을 정하고[5], HFC(Heat Flow Calorimetry)를 적용하여 활성화 에너지를 계산하여 시험 기간 및 계획을 수립하였다. 시험 시간을 단축시키기 위하여 스텝 스트레스 기법을 적용하여 온도별 주기를 나눠 가속노화 챔버에 보관하였고, 가속 노화 후 밀폐용기 시험을 통해 착화기의 성능을 확인하였으며, 시료별 데이터를 취합하여 분산분석을 통해 노화 특성 및 경향을 분석하였다.

2. 시험 및 분석 방법

2.1 가속노화시험

가속노화시험은 정상조건보다 가혹한 스트레스(온도, 습도, 진동 등) 수준에서 시험하여 구성품의 노화를 촉진시키고, 노화특성이 사전에 정의된 고장판정기준까지 저해하는 시점을 고장시간으로 정의한다. 일반적으로 사용자는 가속조건에서 노화로 인해 획득된 고장 데이터를 분석하여 정상조건에서의 수명을 정확하게 예측할 수 있다. 제품의 고장 메커니즘은 대부분 연쇄적인 물리, 화학적인 반응으로 이루어지는데 격벽착화기의 경우는 화약의 산화로 인한 성능 변화가 이에 해당한다. 동일한 제품에 동일한 형태의 스트레스를 인가하더라도 스트레스 수준에 따라 서로 다른 고장 메커니즘이 발생할 수 있는데, 이 때문에 스트레스를 가혹하게 인가하더라도 고장 메커니즘이 변하지 않고 실 사용조건에서 발생하는 동일한 고장 메커니즘을 재현하는 것이 가속노화시험의 기본 원칙이다.

사전 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 온도 스트레스에 의한 영향을 고려하였고 실제 저장 조건에서 발생할 수 있는 고장 메커니즘을

재현 한다는 측면에서 온도 가속 조건을 90℃ 이하로 제한하였다.

2.2 가속계수 및 등가 저장기간 산출

격벽착화기에 적용되는 화약에 대하여 활성화 에너지(E_a)를 이용하여 아레니우스 수명 식과 가속계수 수식을 통해 각 화약에 대한 실사용 수명 모사를 위한 가속시험 시간을 산정하였다. 하지만, 2가지 화약 상호간에 반응이 없을 때, 보다 낮은 활성화 에너지를 갖는 화약이 제품 수명을 결정하게 된다[6].

Table 1과 같이 격벽착화기에 사용된 고폭화약은 기존연구결과[10]와 HFC(Heat Flow Calorimetry)를 통해 활성화 에너지를 확인하였고, 점화화약은 HFC를 적용하여 활성화 에너지를 계산하였다. HFC는 물리적, 화학적 노화반응을 통해 나타나는 시간당 열량을 측정/분석하여 미세한 열 흐름 특성을 분석하는 시험방식이다. 이러한 HFC의 열 감지특성은 추진제와 점화제 등의 에너지 물질들이 저장온도 조건에 보다 가까운 온도조건하에서의 노화특성 분석과 오링, 라이너 등 열 방출량이 적은 시효성 품목의 노화성 평가에 사용되기 때문에 많은 효율성을 가진다.

아레니우스 모델은 화학반응에 의한 노화 고장을 모형화하는 수명과 스트레스 간의 관계식으로 온도 요인에 의한 가속노화시험을 예측하는데 가장 많이 사용된다. 온도에 따른 수명온도를 나타내는 아레니우스 모형은 Eq. 1과 같다.

$$L = B \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

Eq. 1의 아레니우스 모형을 기반으로 정상 온

Table 1. Activation Energy by Explosives.

Explosive	Activation Energy (E_a , eV)	Test Temp.
high exp.	1.119	30℃ ~ 450℃
ignition exp.	0.6954	80℃ ~ 130℃

도조건과 가속 온도조건 간의 가속계수 (Accelerated Factor, AF)를 계산하면 Eq. 2와 같다.

$$AF = \frac{Lu}{La} = \exp\left\{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{Tu} - \frac{1}{Ta}\right)\right\} \quad (2)$$

계산된 가속계수를 Eq. 3에 적용하여 온도에 따른 가속노화기간을 계산한다.

$$t_a = \frac{t_u}{AF} \quad (3)$$

격벽착화기는 단 기간 내에 노화특성을 도출하는 것이 어렵고 시료의 개수 및 시험 기간의 제약으로 일반 가속노화시험이 아닌 스텝 스트레스 시험을 통해 가속노화시험을 실시하였다.

화약 중에서 저장기간이 더 오래 걸리도록 활성화 에너지를 보수적으로 선택하였고, 저장기준 온도, 가속노화 온도 등의 조건에 따라 등가가속 노화시간을 산출한 결과는 Table 2와 같다. Eq.

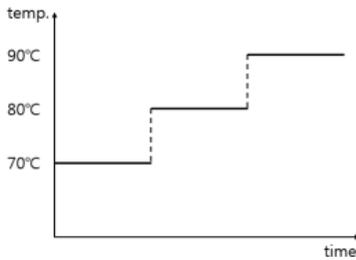


Fig. 2 Step Stress Test(period).

Table 2. Equivalent storage period with accelerated Aging.

Sample No. (each point)	Act. energy	days					
		35 (1)	70 (2)	105 (3)	140 (4)	175 (5)	210 (6)
5	0.953	20°C equivalent storage period (year)					
		5.3	10.6	20.9	31.3	42.9	50.6

3에 의해 계산된 일반 요구 저장기간 20년에 해당되는 가속노화 일수는 약 103일이다. 그러나, 본 연구에서는 온도별 데이터를 확보하여 변화 추이를 확인하고, 보다 많은 데이터를 통해 신뢰도를 증가시키기 위해 가속노화 일수를 210일까지 연장하여 시험을 수행하였다.

2.3 분산분석을 통한 노화 특성 분석

격벽착화기는 점화에너지를 공급하는 역할을 하기 때문에 밀폐용기 시험을 통해 압력이 생성되는 시점, 즉 작동지연시간과 최대압력이 주요한 작동성능 특성값이다. 가속노화를 통해 주기별 작동지연시간과 최대압력을 측정하고, 분산분석(Analysis of Variance)을 수행하여 노화여부를 판단할 수 있다. 분산분석은 일원분산분석(one-way ANOVA), 이원분산분석(two-way ANOVA), 다원변량분산분석(MANOVA) 등으로 분류되는데, 본 연구에서는 가속노화 주기별로 시험을 수행하였으므로, 일원분산분석을 이용하여 분석을 수행하였다.

일원분산분석은 인자가 하나인 분석법으로 다른 인자는 측정치에 경미한 영향으로 무시할 수 있거나 또는 영향이 일정할 때, 인자의 집단 수가 3개 이상일 때 그에 대한 평균 사이의 차를 검증하며 실험순서는 임의적이다.

시험에서 인자 A의 수준(집단)수가 k개 (A₁, A₂, ..., A_k)이며, 각 수준마다 n번씩 동일하게 반복 실험을 할 경우, 일원분산분석의 데이터는 다음과 같이 배열된다. 여기서 N=kn은 총 실험 횟수이다. 이를 통해 일원분산분석의 구조모형을 구축하면 다음과 같다.

$$x_{ij} = \mu + a_i + \epsilon_{ij} \quad (4)$$

본 연구에서는 분산분석을 통해 수준 간의 평균의 차이를 검증하기 위해 총 변동을 집단간 변동과 집단내 변동으로 분해하여, 두 변동의 비율이 통계적으로 유의한지를 검증하였다. i번째 노화기간 동안 n_i개의 시료에 대하여 가속노화를 실시하여 산출된 노화특성을 y_{ij}라고 한다면 다

음과 같이 귀무가설과 대립가설을 설정할 수 있다.

- 귀무가설 : 노화기간에 따라 노화특성 차이가 없다고 판단

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

- 대립가설 : 노화기간에 따라 노화특성 차이가 있다고 판단

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ for at least one pair}(i,j)$$

가설 설정이 완료되면 검정통계량 F_0 및 유의 확률 p-value를 계산하고, 이에 따라 노화 특성의 차이를 판단한다.

$$SST(\text{총변동}) = SSA + SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Table 3. Analysis of variance(ANOVA).

	lists of Group Observations						total
	A ₁	A ₂	...	A _i	...	A _k	
number of Groups of samples (n)	y ₁₁	y ₂₁	...	y _{i1}	...	y _{k1}	
	y ₁₂	y ₂₂	...	y _{i2}	...	y _{k2}	
	⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	
	y _{1j}	y _{2j}	...	y _{ij}	...	y _{kj}	
	⋮	⋮	...	⋮	...	⋮	
mean [sum]	$\bar{y}_1[S_1]$	$\bar{y}_2[S_2]$...	$\bar{y}_i[S_i]$...	$\bar{y}_k[S_k]$	$\bar{y}[S]$

Table 4. ANOVA table.

source of variation	sum of squares	degree of freedom	mean square	F _t
between group	SSA	$\phi_A = k - 1$	$MS_A = \frac{S_A}{\phi_A}$	$F_t = \frac{V_A}{V_E}$
within group	SSE	$\phi_E = k(n - 1)$	$MS_E = \frac{S_E}{\phi_E}$	
total	SST	$\phi_T = kn - 1$		

$$SSA(\text{급간변동}) = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$SSE(\text{급내변동}) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (7)$$

- 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 p-value가 0.05보다 클 경우 : 귀무가설을 기각할 만한 충분한 근거가 없기 때문에 노화기간에 따라 노화특성의 차이가 없음
- 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 p-value가 0.05보다 작을 경우 : 귀무가설을 기각하여 노화기간에 따라 노화특성의 차이가 있음[12]

2.4 고장판단

격벽착화기는 점화기에 점화에너지를 지연없이 공급하는지, 충분한 에너지를 공급하는지를 확인하기 위해 작동지연시간과 최대압력을 측정하여 작동조건을 만족하는지 판단해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 시료에 대한 성능시험 결과를 작동 요구조건 Table 5와 비교함으로써 사용여부를 판단하였다. 즉, 작동 요구조건을 고장판단의 기준으로 채택하였다.

3. 성능 시험

3.1 시험 개요

가속노화시험으로 인한 격벽착화기의 노화 여부를 판단하기 위해 밀폐용기 시험(Closed Bomb Test)을 수행하였다. 밀폐용기 시험은 착화기류의 점화 성능을 검증하기 위해 수행하는 방법이며 고전압 전기에너지가 도너 역할을 하는 마이크로 착화기에 인가되어 격벽착화기에 기폭에너지를 전달하고, 밀폐용기 내부에 발생하는 압력을 계측함으로써 점화 에너지 발생 여부

Table 5. Operating Requirements.

Item	d.t.(μsec)	Pmax(psi)
Thru-bulkhead Initiator	≤ 500	800 ≤

를 확인할 수 있다. 가속노화 챔버에서 불출한 시료는 5분내에 성능시험을 수행하였고, 밀폐용기, 압력센서, 계측장비는 데이터의 통일성을 유지하기 위해 동일하게 적용하였다.

가속노화 후 시료의 노화특성 변화를 확인하기 위해 가속노화 시험을 하지 않은 시료에 대해 성능시험 결과와 비교하였다.

3.2 시험 결과

시험결과 격벽착화기의 성능특성과 노이즈가 함께 측정되었다. 노이즈는 격벽착화기에서 발생한 충격파가 밀폐용기 내부에서 난반사되어 발생된 노이즈로 분석된다. 정확한 데이터 분석을 위해 Low-Pass Filter를 적용하였고, 이때 최대압력 부근에서 노이즈가 다소 포함되어 있어 측정 정확도를 높이기 위해 커브피팅을 추가 적용하였다.

Fig. 4는 가속노화 전 시료에 대한 압력선도를 나타낸다. 밀폐용기 내에서 압력이 생성되는 시점을 작동지연시간(Delay Time), 압력선도의 최대치를 최대압력(Max. Pressure)으로 설정하였다. 5개 시료에 대한 성능시험 결과 상당히 유사한 압력선도를 나타내며, 작동지연시간과 최대압력의 평균값은 28.3 μ sec, 923psi로 계측되었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 주기별 작동지연시간과 최대압력 분포를 나타내는 그래프이다. 그래프상에서는 주기별 측정값의 변화가 다소 있는 것으로 보이나 격벽착화기의 규격치와 비교하고, 통계적

분석을 고려하여 가속노화에 따른 성능 특성치 변화를 확인할 필요가 있다.

각 주기별로 5개의 시료를 가속노화 처리하여 성능시험을 수행하였으나, 4주기 2개의 시료는 계측실패로 데이터 분석에서 제외하였다.

작동지연시간의 경우 가장 큰 값이 5주기 3번째 시료로 33.2 μ sec로 측정되어 규격치를 만족하였고, 최대압력의 경우도 3주기 3번째 시료에서 823psi가 측정되었으나 규격치를 만족함을 확인하였다. 측정된 데이터와 규격치를 비교했을 때 가속노화에 따른 변화는 제품의 성능을 좌우하지 않는 것을 확인할 수 있다.

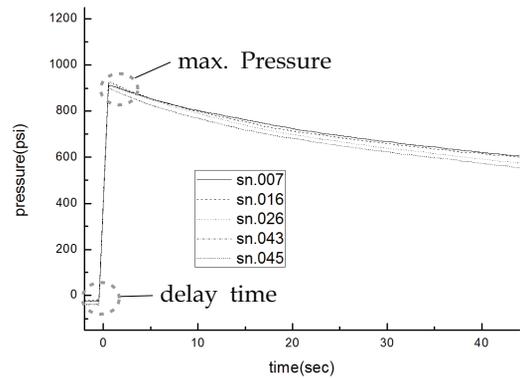


Fig. 4 Pressure Histories before treatment.

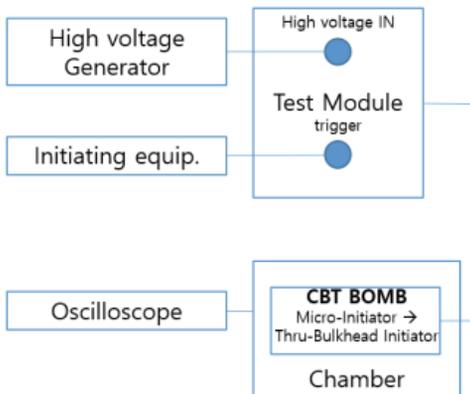


Fig. 3 Test-device configuration.

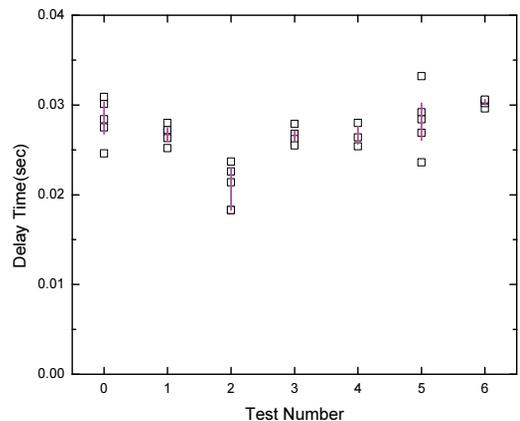


Fig. 5 Delay time at each test point (Solid lines are interval between the 1st and 3rd quantiles of the normal distribution for ANOVA).

4. 분산 분석

가속노화에 따른 성능시험 결과 데이터에 대해 분산분석을 수행하여 주기에 따라 노화경향이 나타나는지 확인하였다. 격벽착화기의 성능에 있어 가장 중요한 요소라 할 수 있는 작동지연시간과 최대압력에 대해서 분산분석을 수행하였다.

작동지연시간에 분산분석 결과 Table 7에서 보는 바와 같이 P값이 0.05보다 작고, F값이 F기각치보다 크기 때문에 귀무가설을 기각하여 노화기간에 따라 노화특성의 차이가 있다고 할 수 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 2주기 시험까지는 작동지연시간이 다소 감소하는 것과 같이 나타났으나 3주기 이후부터는 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 각 주기별 분산 값도 Table 6에 나타난 바와 같이 크게 차이하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 분석 결과를 통해 작동지연시간은 의미있는 변화가 관측되었고 노화가 진행될수록 조금씩 길어진다는 결론을 도출할 수 있다. 그러나, 본 착화기의 경우 작동지연시간이 약 5msec인 일반착화기에 비해 짧고, 규격치(500µsec 이하)를 만족하므로 성능에 영향이 미비할 것으로 판단된다.

최대압력의 경우에는 3주기의 데이터가 매우 큰 편차를 보이는 것을 확인할 수 있으나, 이후

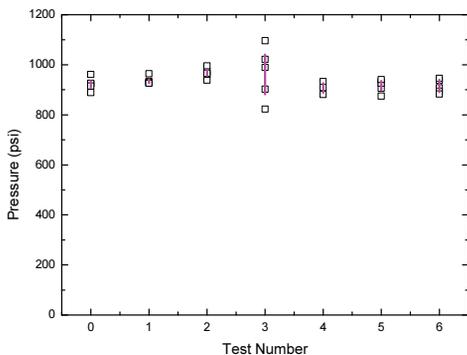


Fig. 6 Maximum pressure at each test point (Solid lines are interval between the 1st and 3rd quantiles of the normal distribution for ANOVA).

주기에서는 편차가 이전 주기와 큰 차이를 보이지 않아 3주기 편차에 큰 의미를 두지 않아도 된다고 판단하였다.

최대압력에 대한 분산분석 결과 Table 9에서 보는 바와 같이 P값이 0.05보다 크고, F값이 F기각치보다 작기 때문에 귀무가설을 기각할만한 충분한 근거가 없어 노화기간에 따라 노화는 발생하지 않은 것으로 판단된다. P값이 0.05보다 크다는 것은 시험간 최대압력의 변화 또는 변화의 경향성이 없다는 것을 의미하므로 노화에 따른 성능 변화가 미미한 것으로 판단된다.

Table 6. Data analysis for delay time.

test point		0-point	1-point	
delay time	mean(µsec)	28.30	26.74	
	standard dev.	2.47	1.05	
2-point	3-point	4-point	5-point	6-point
20.86	26.46	26.60	28.26	30.3
2.47	0.93	1.31	3.50	0.42

Table 7. Results of variance analysis using ANOVA for delay time.

F	F-crit	P-value
10.27	2.474	7.6*10 ⁻⁶

Table 8. Data analysis for max. Pressure.

test point		0-point	1-point	
max. Pressure	mean(psi)	923	936	
	standard dev.	25.86	15.85	
2-point	3-point	4-point	5-point	6-point
967	966	908	916	914
20.68	106.19	26.03	26.43	27.37

Table 9. Results of variance analysis using ANOVA for max. Pressure.

F	F-crit	P-value
1.284	2.474	0.299

5. 결 론

- 격벽착화기의 점화화약과 고폭화약에 대하여 활성화에너지를 논문자료 조사와 HFC (Heat Flow Calorimetry) 결과를 통해 산출하고, 각 화약에 대해 활성화 에너지를 보수적으로 산정하였다.
- 가속노화시험을 스텝스트레스 법으로 수행하고 6번에 걸쳐 시료를 채취하여 성능시험을 수행하여 가속노화 전/후 작동지연시간과 최대압력을 측정하였다.
- 성능시험 결과, 가속노화 전/후 제품의 위력저하가 발생하지 않아 요구년한 20년 이상의 수명을 가지는 것으로 예상된다.
- 격벽착화기의 작동지연시간에 대한 분산분석 결과 노화특성의 차이가 있는 것으로 나타났다으나, 일반착화기의 작동시간에 비해 상당히 짧고 규격범위를 만족하므로 성능에 영향이 미비하므로 고장으로 판단하기 어렵다.
- 결국 격벽착화기 성능에 가장 큰 영향을 미치는 특성치는 최대압력인데 분산분석 결과 노화가 진행되지 않은 것으로 나타나 저장 온도 20℃ 저장 기준으로 50.6년까지 수명이 보장될 것으로 판단된다.

격벽착화기와 같은 파이로장치는 성능예측이 힘든 화약류가 주 구성품이고, 한번의 작동으로 임무를 수행하며, 반복시험이 어렵기 때문에 다양한 방법으로 노화특성 연구가 진행되어야 한다. 현재 무기체계 개발 시 노화특성에 따른 수명예측이 지속적으로 요구되므로 본 연구결과를 기반으로 보다 심화되고, 확장된 연구가 진행된다면 파이로장치 개발 및 수명평가에 있어 큰 기여를 할 수 있으리라 판단한다.

References

1. Jang, S.G., Kang, W.K. and Cha, H.S., "Design and Reliability Analysis of the Through-Bulkhead Initiation Module Using CH-6," *Proceeding of the 32nd Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, pp. 327-330, May., 2009.
2. Kang, W.K., Kim, D.S., Jung, W.S. and Jang, S.G., "Study on miniaturizing Thru Bulkhead Initiator," *Proceeding of the 49th Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Busan, Korea, pp. 106-107, Nov., 2017.
3. Kim, B.H., Kang, W.K., Jang, S.G. and Yoh, J.L., "Hydrodynamic Analysis on Shock-induced Detonation in Pyrotechnic Initiator," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 5, pp. 19-30, 2016.
4. Jang, S.G., Hwang, J.M. and Lee, M.H., "THROUGH BULKHEAD INITIATOR," 1020160017445, 15 Feb. 2016.
5. Kim, K.H., Kang, W.K., Lee, C.M., and Jang, S.G., "Initiator Development using LEEFI," *Proceeding of the 51th Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Busan, Korea, pp. 146-147, Dec., 2018.
6. Jang, S.G., Kim, J.H., Ryu, B.T., and Hwang, J.M., "Arrhenius Kinetic Constants Analysis of BKNO₃ under Accelerated Aging," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 34-39, 2016.
7. Paik, J.G., Ryu, B.T., Kim, J.H., Ahn, G.H. and Lee, S.B., "Characterization of Long Term Stored BKNO₃," *Proceeding of the 44th Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Busan, Korea, pp. 388-390, May, 2015.
8. Jang, S.G., and Ryu, B.T., "Evaluation of the Aging Effects on the Performance of the Pyrotechnic Igniter," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 1, No. 2, pp. 91-102, 1997.
9. Paik, J.G., Ryu, B.T. and Kwon, M.R., "A Study on Acceleration Aging Characteristics of B-KNO₃ Igniter," *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 52, No. 2, pp. 166-174, 2014.

-
10. Dr. Barry T. Neyer, Lloyd Cox, Terry Stoutenborough and Robert Tomasoski, "HNS-IV Explosive Properties and Characterization Tests," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit Huntsville, AIAA-2003-5138, July 20-24, 2003.
 11. Kim, Y.C., Park, J.S., Kwon, K.T. and Yoh, J.I., "An Extraction of Detailed Isoconversional Kinetic Scheme of Energetic Material using Isothermal DSC," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 2, pp. 46-55, 2016.
 12. "chap.12. Analysis of Variance: ANOVA," retrieved 29 Aug. 2019 from <http://contents.kocw.net/kocw>