

# Zr-Ni계 지연관 결합체(K1) 저장수명 향상

## Storage Lifetime Improvement of Zr-Ni K1 Delay System

장 일 호\*            백 승 준\*\*            정 은 진\*\*\*            손 영 갑\*\*\*\*  
 Il-Ho Chang        Seung-Jun Back        Eun-Jin Jung        Young-Kap Son

### Abstract

The burning interruption between the initiator and the delay column in a Zr-Ni K1 delay system used for a K510 fuze occurs with long-time storage. About 10 % failure probability of 15-years stored delay systems shows the failure mode in open literature. This paper shows storage lifetime improvement results for the delay system through changing the single-base delay column into double-base ones and controlling the manufacturing processes especially the initial inclusion of humidity. The double-base delay columns was implemented by inserting one delay column of fast burning rates between the initiator and the previous delay column of slow burning rates. Accelerated aging tests of the delay systems with double-base columns, and then the firing tests were performed to evaluate the improved lifetime. The double-base delay columns shows improved storage lifetime of the delay system through preventing the failure mode.

Keywords : Delay System(지연구조), Fuze(신관), Storage Life(저장수명), Storage Reliability(저장신뢰도), Accelerated Life Testing(가속수명시험), One Shot System(일회성 시스템)

### 1. 서론

탄약은 전투 시 긴급 보급한 물자로 장기간 저장하는 특성을 가지고 있다. 탄약의 저장수명은 탄종 및 저장조건에 따라 차이가 있으나 약 5~20년 이상으로 보고되고 있으며 저장연수가 증가할수록 구성품의 경

시변화(시간에 따른 화공품 내부 화학 반응 등)가 가속화되어 불발 등 탄약 악작용 발생이 증가하고 있는 추세이다.

탄약의 구성은 일반적으로, 뇌관, 추진제, 탄체, 주 장약, 신관 등으로 구성되며, 이 중 탄체에 충전된 주 장약을 기폭시키는 것이 신관이다. 신관의 구성은 다양한 화공품과 기계적 또는 전자적 결합체로써 매우 복잡한 메카니즘을 가지고 있으며 탄착지 불발의 주 원인이기도 하다. 특히, 신관의 구성품 중 화공품은 장기저장 시 경시변화로 인한 저장수명을 단축시키는 취약점을 갖고 있는 반면, 현재까지 탄약 개발은 개발 및 제조 시 성능 평가에 역점을 두어 저장수명에 대한 연구는 다소 미흡하였다. 따라서, 본 연구는 60MM

† 2010년 1월 29일 접수~2010년 3월 19일 게재승인  
 \* 국방기술품질원(Defense Agency for Technology and Quality)  
 \*\* 한양대학교(Hanyang University)  
 \*\*\* (주)한화 여수공장(Hanwha Co., Ltd.)  
 \*\*\*\* 안동대학교(Andong National University)  
 책임저자 : 백승준(sjback@naver.com)

/81MM 박격포탄용 충격신관 K510 및 K516 저장수명을 향상시키는데 있어 가장 취약 부품인 지연관 결합체 K1을 대상으로 조성 및 경시변화를 지연시킬 수 있는 수분 관리방안을 통해 저장수명을 향상시키고자 하였으며, 가속노화시험을 통하여 그 결과를 검증하였다.

## 2. 이론적 배경

### 가. 지연관 결합체의 작동원리

지연관 결합체 K1의 작동 원리는 고폭탄이 발사되는 순간의 관성력에 의하여 격침핀이 뇌관을 타격하면 민감한 화약인 점화제가 착화되고 이후 지연제가 서서히 연소되면서 마지막의 Lead Styphnate 계 파이로테크닉혼합물의 폭발력에 의해 장진핀이 방출된다. 뇌관 타격 후 지연제의 연소속도에 의해 1.8~6.0초 후 파이로테크닉혼합물이 폭발하면 장진핀이 방출되면서 고폭탄 주장약의 폭발계열이 정렬된다. 그러므로 장진핀이 방출되지 못하면 폭발계열이 정렬되지 못해 탄착지에서 불발이 된다.

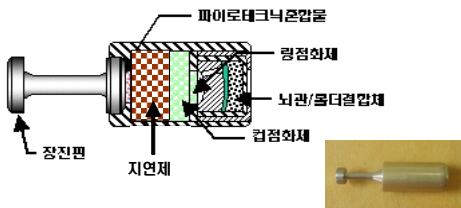


Fig. 1. Zr-Ni계 지연관의 구조

### 나. 지연관 결합체 경시 변화 및 약작용 발생원인

지연관 결합체 K1의 구성은 Fig. 1과 같이 뇌관, 점화제, 지연제, 파이로테크닉(Pyrotechnic)로 구성되어 있으며 점화제 및 지연제의 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Zr-Ni계 지연관 결합체(K1)의 조성

구분	점화제(K1)	지연제(K1)
조성	Zr powder	BaCrO <sub>4</sub>
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	KClO <sub>4</sub>
	SiO <sub>2</sub>	Zr-Ni (7:3)
	VAAR	Zr-Ni (3:7)
		Rareox #14

지연관 결합체 K1의 경시변화는 점화제 및 지연제의 조해성 조성이 장기저장에 따라 산화되어 열량 감소가 주원인인 것으로 알려져 있다. 즉, 점화제의 Zr과 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 산화되어 ZrO<sub>2</sub> 및 FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>로 변화되어 변화된 에너지 만큼 감소함으로써 다음 폭발계열인 점화제에 충분한 에너지를 공급하지 못하기 때문이며, 지연제 또한 장기저장으로 인해 발생 열량이 감소하여<sup>[1]</sup> 보다 큰 점화에너지를 필요로 하기 때문이다. 한편, Zr-Ni계 지연관 결합체(K1)의 약작용 원인조사 및 저장수명 예측을 위한 선행 연구결과, 지연관 결합체의 연소특성은 시간이 지남에 따라 Fig. 2와 같이 변화하여 점화제와 지연제 사이에서 연소중단이 발생한 것으로 판단되었으며 저장수명은 약 15년 후 10% 수준의 연소 중단현상을 보일 것으로 추정되었다<sup>[2]</sup>.

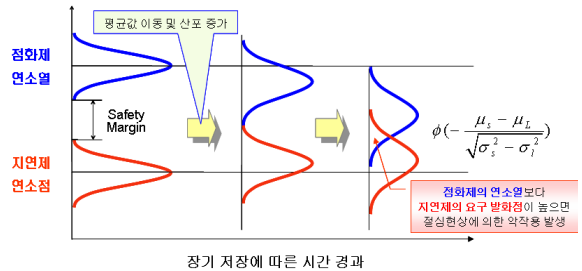


Fig. 2. 시간에 따른 점화제와 지연제 연소특성 변화

### 다. 저장수명 예측

수명분포 함수는 2-모수 와이블 분포를 가정하고 이의 파라미터인 형상모수( $\beta$ )와 척도모수( $\alpha$ )를 가부반용 데이터 해석법을 적용한 모수추정법<sup>[3]</sup>으로 구할 수 있다.

와이블 분포에서의 누적고장률 함수는 식 (1)과 같고,

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

최우추정법을 이용하기 위한 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

$\alpha$  : 와이블분포의 척도모수  
 $\beta$  : 와이블분포의 형상모수  
 $\theta$  : 추정하고자 하는 파라미터 값  
 본 연구에서는  $\alpha, \beta$ 를 의미함

가속조건에서의 노화시험 데이터 분석 결과를 바탕으로 상온 저장 조건에서의 저장수명을 추정하기위한 수명-스트레스 관계식은 활성화에너지 이론을 바탕으로 한 아레니우스 모델식으로부터  $\theta$ 도(반감) 모델식을 유도하였고 이를 식 (3)~(6)으로 정리하였다.

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( $8.6173 \times 10^{-5}$  eV/K)

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

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

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,  $\theta$  : 반감온도(°C)

식 (6)에서  $\theta$ 값은 온도의 차원을 가지며 수명이 절반으로 줄어드는 저장온도 상승분의 개념인 반감온도이다. 본 연구에서는 내압용기를 적용한 온/습도 영향에 의한 가속 시험을 수행하였으므로 단순 온도 가속 조건만을 가정하는 아레니우스 모델식 보다는 실험식의 성격에 보다 가까운  $\theta$ 도(반감) 모델식을 적용하여 데이터를 해석하였다.

### 3. 연구 결과 및 고찰

#### 가. 연구 방향

장기 저장에 따라 지연관 결합체 내부 점화제와 지연제의 금속연료 표면의 산화가 진전되어 각각의 연소 특성이 경시변화를 일으키더라도 점화제와 지연제 사이에 민감한 속성(Fast)지연제를 추가하여(Fig. 3참조) 연소중단 현상이 발생하지 않도록 보완한 것으로 이는 미군 탄약의 지연 시스템 장기 저장성 개선 사례를 참조하였다<sup>4)</sup>. 또한, 내재된 수분에 의한 내부 화공품 표면 산화를 늦추기 위해 수분함량에 대한 관리를 강화하는 방안을 고려하였고 점화제의 초기 열량을 관리하여 장기저장성에 대한 신뢰도를 확보하는 방향으로 설정하였다.

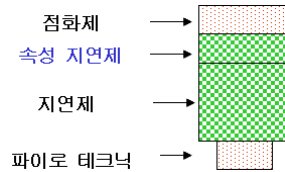


Fig. 3. 이중지연 시스템 Zr-Ni계 지연관 결합체의 설계구조

#### 나. 이중 지연시스템 도입을 위한 조성별 특성 연구

지연관 결합체 K1의 장기저장 시 발생하는 연소중단 현상을 개선함에 있어 제조 초기 지연관 결합체의 규격 요구조건을 만족하기 위해서는 민감한 속성(Fast) 지연제 조성(1차 지연제) 및 2차(Slow) 지연제의 조성 개발이 필수적이며 이들 조성을 개발하기 위해서는 성분함량에 따른 특성조사 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 성분함량별 연소 특성에 미치는 영향을 조사한 결과 산화제인 BaCrO<sub>4</sub>, KClO<sub>4</sub> 및 바인더가 증가하면 지연시간이 증가하고 연료인 Zr-Ni가 증가하면 지연시간이 감소하는 특성을 알 수 있었으며 이는 Taylor 등의 연구 결과<sup>4,5)</sup>와 잘 일치하고 있다.

지연제의 성분함량별 연소특성을 바탕으로 속성(Fast) 지연제의 지연초시를 1.22초, 2차(Slow) 지연제 지연초시를 1.15초로 하는 배합비를 개발, 전체의 지연초시가 2.3~3.5초, 편차를 0.18이하로 하여 초기 규격요구 조건(1.8~6.0초)을 만족하는 조성을 개발하여 기술변경을 실시하였다. Table 2는 이중지연시스템 조성에 대한 규격요구조건 변경 및 시험 결과를 나타내고 있다.

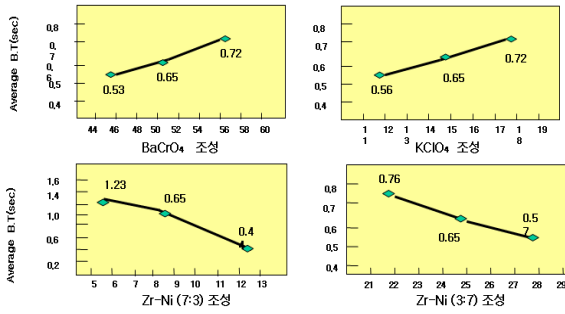


Fig. 4. 지연제 조성비별 연소 특성

Table 2. 이중지연 시스템의 조성 비 및 시험 결과

구분	속성	속성(Fast) 및 2차(Slow) 지연제 조성 (% by weight)					지연초시	
		BaCrO <sub>4</sub>	KClO <sub>4</sub>	Zr-Ni (7:3)	Zr-Ni (3:7)	Rare -ox	평균	편차
기존	단일	52.0	12.3	3.0	23.0	9.7	-	
개선 규격	Fast	50~53	14~16	7~10	24~26	6% 추가	2.3 ~	0.18
	Slow	56~59	12~13	3~3.5	21.5~24	3~5	2.5	
시험 결과	Fast	52.7	15.7	7.3	24.3	5.0	2.37	0.15
	Slow	56.8	13.0	3.2	24.0	3.0		

\*지연초시 : batch 승인시험으로 관리 강화된 추가 내용임

다. 공정 관리 강화 및 기타

지연관 결합체 K1의 경시변화의 주원인이 조해성 성분의 표면산화에 따른 에너지 감소로, 표면 산화에 필요한 내부 산소를 최소화하기 위하여 제조 시 수분을 0.5%에서 0.1%이하로 강화하고, 장기저장 시 흡수에 의한 산화방지를 위해 관체와 장진편이 크립핑 되는 부위에 락카를 도포하여 외부로부터 습기침투를 방지하였다. 또한, 점화제 품질의 신뢰도를 확보하기 위하여 초기 열량을 규제하여 일정 이상의 열량이 유지되도록 관리하였다. Table 3은 장기저장 수명향상을 위한 주요 공정개선 내용을 요약한 것이다.

라. 가속노화 시험

이중지연 시스템 도입 및 공정관리 강화 지연관에 대한 시제품에 대하여 규격이 요구하고 있는 초도품 시험을 실시한 결과 모든 요구조건을 만족하여 장기

저장성 측면의 저장 수명을 예측하기 위한 가속노화 시험을 수행하였다. 가속노화 시험은 자체 제작한 내압용기를 활용하여 고온 노화 시험 중에도 내부 수분이 화공품 내에 유지되는 현상을 모사하였다. 고온 조건은 이전 연구<sup>[2]</sup>와 유사하게 170℃와 195℃의 2수준으로 설정하였다. 노화 진행에 따라 관측 주기별로 기술시험을 실시하여 연소 중단에 의한 불폭 발생률에 대한 데이터를 수집하였다. 노화 기간에 따른 연소중단(절심) 발생률은 Table 4 및 Fig. 5와 같다.

Table 3. 공정 개선 주요 내용

항목	세부내용	
공정 개선	수분함량 규제	수분관리 강화(0.1% 이하)
	점화제	링 점화제 미충전 (컵에만 점화제 충전) - 열량관리 : 440~475cal/gr
	장진편/관체	락카 도포

Table 4. 가속 노화시험 결과 연소중단 발생률

경과일(日)	170℃ 조건	195℃ 조건
4	-	5%
12	-	16%
24	11%	21%
28	-	37%
32	-	47%
36	-	58%
40	21%	74%
44	-	89%
48	-	100%
60	37%	
67	42%	
74	58%	
81	68%	
88	84%	
95	89%	
102	95%	
109	100%	

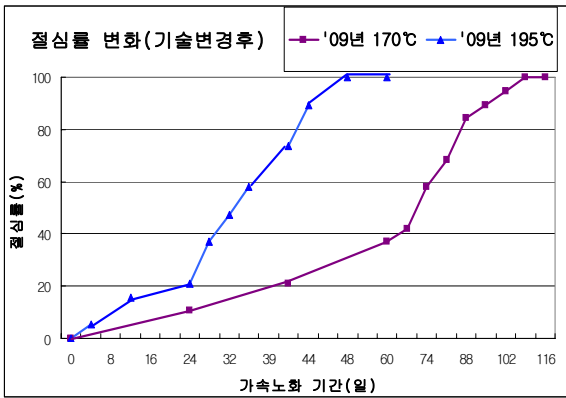


Fig. 5. 개선 후 지연관 결합체의 노화기간별 절실률

앞서 설명한 식 (2)의 우도함수를 최대로 하는 2-모수 와이블 분포를 가정하고, 이의 파라미터인 형상모수( $\beta$ )와 척도모수( $\alpha$ )를 수치해법을 이용하여 170°C 시험 결과로부터 와이블 수명분포의 파라미터를 추정한 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

$$[\alpha, \beta] = [78.4746, 2.922]$$

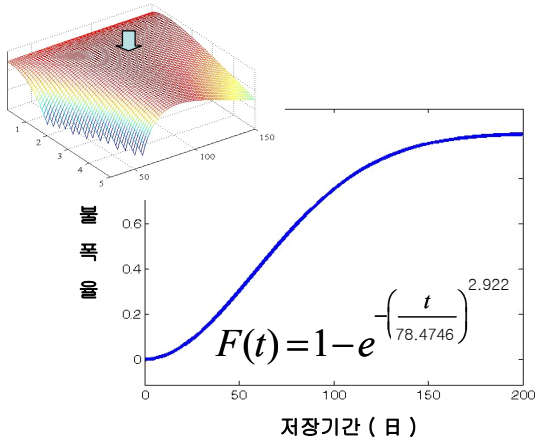


Fig. 6. 170°C 시험 Data의 와이블 모수추정 결과

170°C 시험 Data로부터 구한 와이블 수명분포에서의 파라미터는 Fig. 6과 같이 형상모수 2.922 척도모수 78.4746이며, 195°C 시험 결과로부터는 형상모수 2.812 척도모수 31.1011을 얻을 수 있었다. 두 조건의 시험 결과에서 형상모수값이 유사한 점으로 미루어 가속성이 성립함을 알 수 있었고 이는 Fig. 7에 나타난 와이블 확률지상에 타점된 결과에서 추정값의 그래프 기울기가 거의 동일함을 확인할 수 있다.

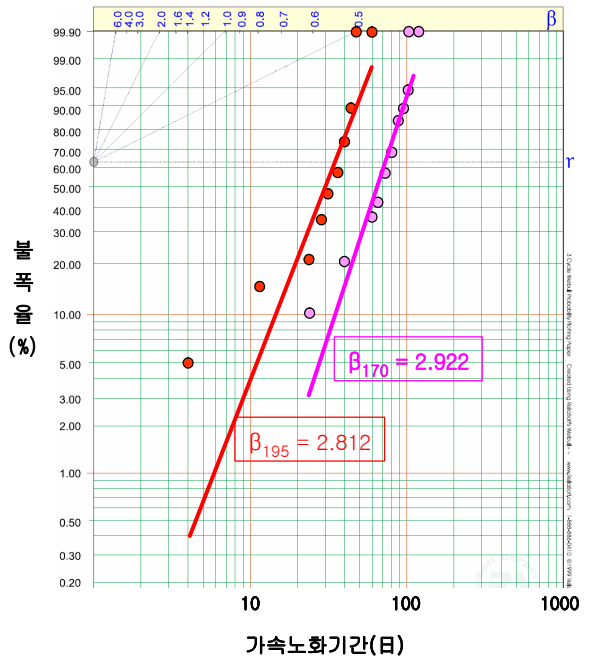


Fig. 7. 와이블 확률지에 타점한 가속노화시험 결과

마. 상온 저장 수명 예측

고온조건에서의 가속노화시험 Data 분석 결과를 바탕으로 상온 저장 조건에서의 저장수명을 추정하였다. 수명-스트레스 관계식은 앞서 설명한 바와 같이  $\theta$ 도 (반감) 모델식을 적용하였고 식 (4)의 결과를 간략히 표현하면 식 (7)과 같다.

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

95% 절실 발생 시점에 해당하는 170°C 조건의 수명은 114.24日이며, 195°C 조건의 수명은 45.94日 로서 상기 수식에 대입하면 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{114.24}{45.94} = 2^{\frac{195 - 170}{\theta}} \tag{8}$$

계산 결과 지연관 결합체의 수명 특성을 결정하는 파라미터인  $\theta$ 는 19.02°C 이다. 참고로 선행 연구 시 개선 전 지연관 결합체의 경우는 16.083°C로 분석<sup>[2]</sup>되었다.  $\theta$ 값의 크기가 기술 변경 후 큰값을 가진다는 의미는 좀더 높은 온도에서 보관하여도 저장 수명의

단축 관점에서는 개선 전과 동일하다는 의미이다. 따라서, 기술 변경 후 저장 수명 관점에서 저장온도 스트레스에 대한 둔감설계(Robust Design)의 효과가 있는 것으로 판단할 수 있다.

상기에서 기술한 파라미터를 이용하여 상온 저장 수명을 예측하고 이를 선행 연구 결과에서 추정된 개선 전 저장 수명 예측결과<sup>[2]</sup>와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 식 (8)로부터 구한  $\theta$ 값을 이용하여 식 (7)로부터 170℃에서의 수명으로부터 상온 저장 온도를 18℃로 가정하여 실 저장조건에서의 수명을 계산하였다. 이는 개선 전 지연관의 실 저장조건에서의 수명과 정량적으로 비교하기 위함이었으며 개선 전과 후의 지연관 결합체 K1에 대하여 각각 저장 수명을 비교한 결과 10% 절심이 발생하는 시점을 비교 시 개선 전에는 15년, 개선 후에는 25.3년으로 추정되었다.

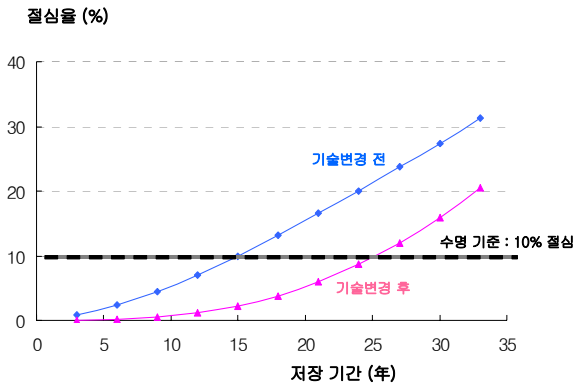


Fig. 8. 개선 전/후 지연관 결합체 K1의 저장수명 비교

#### 4. 결론

장기 저장된 60MM/81MM 고폭탄 사용 시 지연관 결합체 K1 내부 화공품의 연소중단에 의한 불발이 빈번하였고 이에 대한 개선을 위하여 기존의 단일 지연체를 이중 지연체로 변경, 수분관리 강화, 점화제 열

량 관리 등을 적용하였다. 개선 설계안을 찾기 위하여 각 화공품과 첨가제의 조성 비율 및 함량에 대한 다양한 공정능력 분석을 통하여 최적의 원료 조성을 찾아 설계 개선에 반영하였다. 이의 결과로 기존의 15년 저장 수명(10% 절심 발생 기준)이 25.3년으로 연장된 것을 가속노화 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 주된 원료 물질의 변경이 없이 속성 지연체를 추가하는 방법만으로 얻을 수 있는 최대의 개선 효과로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 국방기술품질원과 (주)한화에서 추진하는 “충격신관 K510 저장수명 예측 및 화공품 노화기구 연구” 사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] 박병찬 외, “노화에 따른 Zr-Ni계 지연관의 열특성 및 화학적 구조변화에 관한 연구”, 한국분석과학회, Vol. 22, No. 4, pp. 285~292, 2009.
- [2] 박병찬 외, “충격신관 K510용 Zr-Ni계 지연관의 저장수명 예측”, 한국군사과학기술학회지, 제12권 제6호, pp. 719~726, 2009.
- [3] 손영갑 외, “One-shot Device의 신뢰성 예측”, 제16회 지상무기학술대회, 2008.
- [4] Taylor F. R., Farnell P. L., “Study of the Storage Stability of a Zr/Ni Delay System using Ampoule Microcalorimetry”, 15회 IPS 논문
- [5] Taylor F. R., Lopez L. R., “Development of a Reliable Miniature Delay System using Zirconium/Nikel Alloy-potassium Perchlorate-barium Chromate”, 16회 IPS 논문.