

STS 304 발열선 착화기의 열전이 특성

윤기은* · 류병태* · 최창선*

Thermal Transient Characteristics of Initiator with SUS 304 Bridgewire

Ki-Eun Yoon* · Byung-Tae Ryu* · Chang-Sun Choi*

ABSTRACT

Thermal transient tests were performed on the electric initiator with STS 304 bridgewire(diameter 2.3 mil) and Zr-KClO₄ primary charge. Analysing the test data using Fitted Wire Model shows that the thermal characteristic parameter related to primary charge is changed sharply around 300 °C. It is determined that this phenomenon is due to endothermic reaction from phase transition of KClO₄, which is a component of the primary charge.

초 록

STS 304 발열선과 Zr-KClO₄ 기폭화약을 사용한 전기식 착화기에 대한 열전이 특성을 시험하고 Fitted Wire Model로 분석한 결과, 약 300 °C 부근에서 기폭화약과 관련된 열전이 특성 파라미터가 급격하게 변화되었다. 이 현상은 기폭화약에 사용된 KClO₄의 상변화로 인한 흡열반응에 의해 발생된 것으로 판단된다.

Key Words: Electric Initiator(전기식 착화기), Bridgewire(발열선), Primary Charge(기폭화약), Thermal Transient Test(열전이 특성 시험), No-Fire Test(비점화 시험)

1. 서 론

전기식 착화기는 군 및 민수용으로 많이 사용되는 기폭 장치로 전원이 공급되면 열을 발생시키는 일종의 에너지 변환 장치이다. 착화기는 용도상, 우발 작동되면 상당한 자원의 손실과 전략적 차질을 야기할 수 있기 때문에 높은 신뢰성과

안전성을 필요로 한다[1]. 따라서 착화기의 안전성을 규명하기 위한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있지만, 대부분 착화기의 파괴 시험 결과를 통계적으로 분석한다.

전기식 착화기 성능에 영향을 미치는 주요 인자는 발열선과 기폭화약 사이의 열전이 특성이다. 발열선과 기폭화약 사이의 열전달 현상은 3차원적으로 모델링하여 유한요소법 등으로 해석할 수는 있지만 기하학적인 구조와 제작의 불균일성으로 인해 실험적으로 평가하는 것이 일반

† 2006년 6월 21일 접수 ~ 2006년 10월 29일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 기4-7

연락처, E-mail: kkc@hanafos.com

화 되어 있다.

전기식 착화기의 열전이 특성을 분석하기 위한 대표적인 실험 방법으로 Rosenthal Model[2, 3]이 사용되었으나, 열전달 현상을 매우 단순화시켰기 때문에 정확성이 부족하다. 이를 보완하기 위해 제시된 Fitted Wire Model[4]은 발열선과 기폭화약의 열전이 특성을 동시에 고려하고 있기 때문에 비교적 정확하지만, 열전이 특성 파라미터가 급격히 변화되지 않는 온도 범위에서만 제한적으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 직경 0.058 mm인 STS 304 발열선과 Zirconium-Potassium Perchlorate(ZPP) 기폭화약을 사용한 전기식 착화기로 열전이 특성 파라미터를 구하였고, Fitted Wire Model이 유용한 온도 범위를 제시하였다. 또한 착화기의 안전성을 비파괴적으로 확인하는 방법도 제시하였다.

2. 열전이 특성 해석

발열선과 기폭화약 계면의 열전이 특성 해석을 위한 형상을 Fig. 1에 나타냈다. 발열선의 온도를 T_1 , 열용량을 C_{p1} , 열손실 계수를 γ_1 이라고 하고, 기폭화약의 온도를 T_2 , 열용량을 C_{p2} , 열손실 계수를 γ_2 , 공급전력 $P_0 = I^2 R_0$ 라 하면, Fitted Wire Model은 Eq. 1, 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 I 는 공급전류, R_0 는 발열선의 초기 저항이다.

$$\gamma_1(T_1 - T_2) + C_{p1} \frac{dT_1}{dt} = P_0(1 + \alpha(T_1 - T_0)) \quad (1)$$

$$\gamma_1(T_1 - T_2) - C_{p2} \frac{dT_2}{dt} = \gamma_2(T_2 - T_0) \quad (2)$$

이때, 초기 조건이 $T_1 = T_2 = T_0$, $\frac{dT_1}{dt} = \frac{P_0}{C_{p1}}$,

$\frac{dT_2}{dt} = 0$ 이므로 T_1, T_2 의 해는 Eq. 3, 4와 같다.

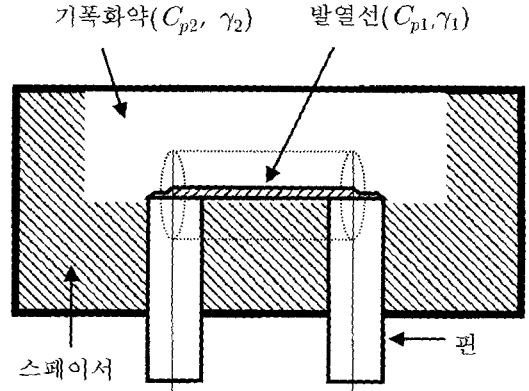


Fig. 1 Analytical model of the initiator

$$T_1 = T_0 + A_1 \{1 - B_1 e^{-k_1 t} - (1 - B_1) e^{-k_2 t}\} \quad (3)$$

$$T_2 = T_0 + A_2 + C_1 e^{-k_1 t} + C_2 e^{-k_2 t} \quad (4)$$

여기서, 각 상수는 다음과 같다.

$$A_1 = \frac{P_0(\gamma_1 + \gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2 - \alpha P_0(\gamma_1 + \gamma_2)},$$

$$B_1 = \frac{-k_2 C_{p1} + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} - \alpha P_0}{C_{p1}(k_1 - k_2)},$$

$$k_1 = \frac{C_{p1}(\gamma_1 + \gamma_2) + C_{p2}(\gamma_1 - \alpha P_0)}{2C_{p1}C_{p2}} \frac{\sqrt{(C_{p1}(\gamma_1 + \gamma_2) - C_{p2}(\gamma_1 - \alpha P_0))^2 + 4\gamma_1^2 C_{p1}C_{p2}}}{2C_{p1}C_{p2}}$$

$$k_2 = \frac{C_{p1}(\gamma_1 + \gamma_2) + C_{p2}(\gamma_1 - \alpha P_0)}{2C_{p1}C_{p2}} + \frac{\sqrt{(C_{p1}(\gamma_1 + \gamma_2) - C_{p2}(\gamma_1 - \alpha P_0))^2 + 4\gamma_1^2 C_{p1}C_{p2}}}{2C_{p1}C_{p2}}$$

$$A_2 = \frac{\gamma_1 P_0}{\gamma_1 \gamma_2 - \alpha P_0(\gamma_1 + \gamma_2)},$$

$$C_1 = \frac{-k_2(T_0 + A_2)}{k_2 - k_1},$$

$$C_2 = \frac{k_1(T_0 + A_2)}{k_2 - k_1}$$

위식으로 부터 구한 각 열전이 특성 파라미터는 다음과 같다.

$$Cp_1 = \frac{P_0}{A_1(B_1(k_1 - k_2) + k_2)},$$

$$\gamma_1 = Cp_1(k_1 + k_2) + \alpha P_0 - \frac{A_1}{P_0} k_1 k_2 Cp_1^2,$$

$$Cp_2 = -\frac{\gamma_1}{k_1 k_2 Cp_1} \left(\alpha P_0 - \gamma_2 + \frac{\alpha P_0 \gamma_2}{\gamma_1} \right),$$

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 P_0 (1 + \alpha A_1)}{A_1 \gamma_1 - P_0 (1 + \alpha A_1)}$$

Rosenthal Model은 열전이 특성 파라미터들을 Lumped System으로 생각하고 시스템의 열용량을 C_p , 열손실 계수를 γ 로 놓고 해석하였다. Eq. 5는 Rosenthal Model을 나타낸 식이다.

$$\gamma T_1 + Cp \frac{dT_1}{dt} = P_0 \{1 + \alpha(T_1 - T_0)\} \quad (5)$$

Eq. 5의 해는 다음과 같다.

$$T_1 = T_0 + \frac{P_0}{(\gamma - \alpha P_0)} [1 - e^{-(\gamma - \alpha P_0)t/C_p}] \quad (6)$$

3. 실험 및 결과

직경 0.058 mm인 발열선과 70 mg의 기폭화약으로 제작한 Plug형 착화기의 열전이 특성을 측정하였다. 본 연구에 사용한 착화기 부품의 주요 소재는 Table 1과 같다. 열전이 특성 시험 장치(제작사 및 모델명 : Pasadena Model 305B)는 휘스톤 브리지로 발열선의 저항 변화에 따른 전압변동(ΔV)을 측정하는 것으로, 개략적인 회로의 구성은 Fig. 2와 같다.

발열선 저항의 온도계수를 α , 상온에서 저항을 R_0 라 하고, 온도가 $\Delta T_1 (= T_1 - T_0)$ 만큼 상승되었을 때의 저항을 $R_0 + \Delta R$ 이라 하면, 온도에 따른 저항변화는 Eq. 7과 같다.

Table 1. Materials of the Initiator

Item	Materials
Primary Charge	Zr/KClO ₄ /Viton A
Bridgewire	STS 304
Pin	Ni-52
Spacer	Boron Nitride (>94%, B+N)

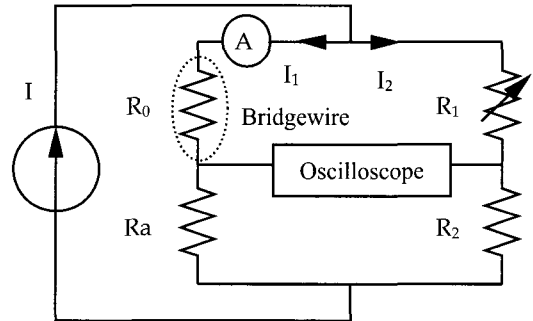


Fig. 2 Block scheme of the thermal transient tester

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta T_1 \quad (7)$$

브리지 회로의 평형을 맞추기 위하여 10 mA 이하의 적은 전류를 공급하여 Eq. 8을 만족하도록 R_1 을 조절한다.

$$R_0 R_2 = R_1 R_a \quad (8)$$

R_1 조절 후에, 시험전류를 공급하면 발열선 저항이 가열되어 $R_0 + \Delta R$ 이 되고, 오실로스코프 상에서 측정되는 전압을 $\Delta V'$ 라 하면 Eq. 9가 된다.

$$\Delta V' = I_1 \frac{\{R_2 (R_0 + \Delta R) - R_1 R_a\}}{(R_1 + R_2) \{1 + \Delta R / (R_1 + R_2 + R_0 + R_a)\}} \quad (9)$$

$R_1 + R_2 + R_0 + R_a \gg \Delta R$ 이기 때문에 발열선에 흐르는 전류 I_1 은 Eq. 10으로 나타낼 수 있다.

$$I_1 \approx \frac{R_1 + R_2}{(R_2 \Delta R)} \Delta V' \quad (10)$$

발열선의 저항 변화에 의한 실제 전압을 ΔV 로 놓으면 Eq. 8, 10으로부터 Eq. 11을 구할 수 있다.

$$\Delta V = I_1 \Delta R \approx \Delta V' \left(1 + \frac{R_0}{R_a}\right) \quad (11)$$

따라서 발열선의 상승온도는 다음과 같다.

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta V'}{\alpha I_1 R_0} \left(1 + \frac{R_0}{R_a}\right) \quad (12)$$

착화기에 0.4 ~ 2.0 A의 전류를 공급하여 전압 변동을 계측하고, 계측 데이터를 처리한 결과를 Curve Fitting하여 Eq. 3, 4에서 A_1 , B_1 , k_1 , k_2 의 값을 얻었고, 이로부터 C_{p1} , γ_1 , C_{p2} , γ_2 를 구하였다. 실제로 측정된 데이터를 Rosenthal Model과 Fitted Wire Model로 해석한 결과와 비교하면, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Fitted Wire Model이 보다 정확하였다. Fig. 4는 발열선 저항을 온도별로 계측한 결과이다. 그림의 결과를 Linear Fitting하여 구한 발열선 저항의 온도 계수(α)는 약 $0.001 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ 이다.

Figure 5와 6은 동일 로트의 착화기 중 무작위로 5개를 선정하여 구한 발열선의 온도별 열전이 특성 파라미터이다. Fig. 5 ~ 8의 그래프에 나타낸 표시 "31, 94, 102, 104, 313"은 각각 착화기의 제작 일련번호를 의미한다. Fig. 6에서 발열선 온도가 약 300°C 부근에 도달하기까지, 온도상승에 따라 발열선의 열손실 계수는 상승하는 경향을 보이고 있다. 이 원인은 온도가 상승하면 발열선의 팽창으로 접촉면이 변화되어, 기폭화약 과 스페이서 방향으로 열전달이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. STS 304 발열선

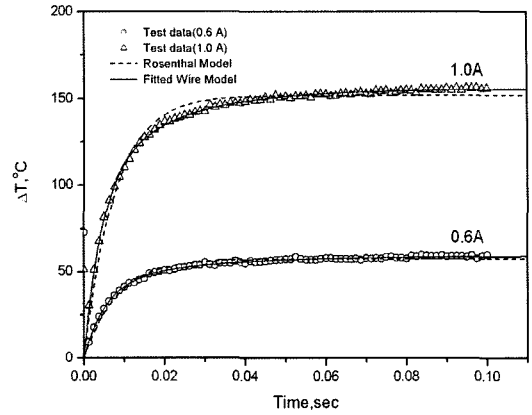


Fig. 3 The temperature changes of the STS 304 bridgewire

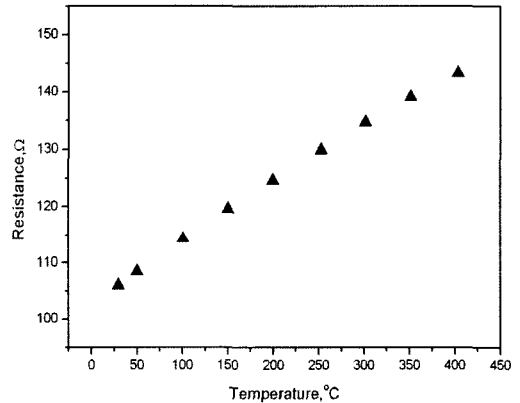


Fig. 4 The resistance changes of the STS304 bridgewire

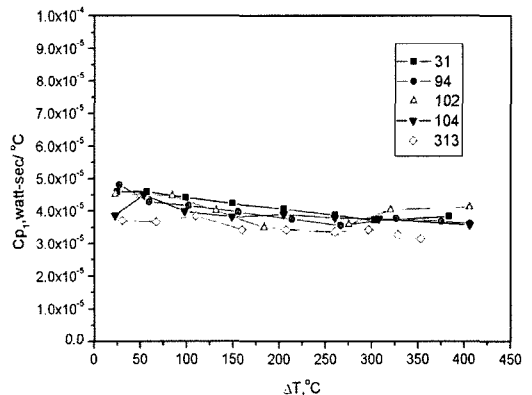


Fig. 5 Heat capacity of bridgewire, C_{p1}

의 온도에 따른 열팽창계수는 제작사(California Fine Wire Co.)에서 9.6×10^{-6} in/in/°C로 제시하고 있다.

Figure 7과 8에 나타난 바와 같이 기폭화약의 열용량(C_{p2})과 열손실 계수(γ_2)는 약 300 °C 부근에서 급격한 변화 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 ZPP의 흡열반응으로 인해 나타난 것으로 판단된다. Fig. 9는 ZPP 혼합물을 열분석한 결과로, 온도 상승 속도에 따라 다소의 차이는 있었지만 $KClO_4$ 결정구조 변화로 인한 흡열피크가 300 °C 근처에서 나타났다. 그러나 기폭화약의 바인더로 사용한 Viton A의 경우, 300 °C 부근에서는 열 변화가 없고 459 - 508 °C에서 발열반응이 있는 것으로 알려져 있다[5].

Figure 10은 착화기에 공급한 전류변화에 따른 발열선의 온도를 구한 결과이다. 1.4 A까지는 시간에 따라 온도가 지수적으로 상승한 후 안정화되었지만, 1.6 A 이상에서는 상승 후에 하락하는 경향이 나타났다. 이 원인은 앞에서 설명한 바와 같이 $KClO_4$ 의 상변화로 발생한 흡열 반응에 따른 것으로 판단된다. 또한, 온도 상승으로 발열선이 팽창되어 외부로 열전달이 증가된 영향도 일부 반영되었을 것으로 생각된다.

미 군사 규격[6-9]에서 요구하는 비점화 기준을 만족시키기 위해 착화기는 1 A - 1 W를 5분간 공급하여도 점화되지 않아야 한다. 일반적으로 비점화 수준을 규명하기 위하여 착화기에 1 A 이상의 전류를 직접 공급하여 시험하는 파괴적 방법이 사용된다. 그러나 이와 같은 샘플링 분석 결과는, 착화기 제작 로트마다 변화가 있을 수 있다. 또한 동일 로트에서도 착화기마다 열전이 특성의 차이가 있기 때문에, 특정 착화기의 성능이 통계적 분석 결과와 일치할 것인가 하는 의문이 남게 된다. 통계학자들도 이러한 문제점을 제기한 바 있다[6]. 따라서 1 A - 1 W 비점화 안전성 확인은 기폭화약의 성능에 영향을 미치지 않는 수준의 전류를 공급하여 구한 열전이 특성 파라미터를 이용하여, 1 A에서의 발열선 온도를 예측하고, 예측된 온도가 기폭 화약의 열

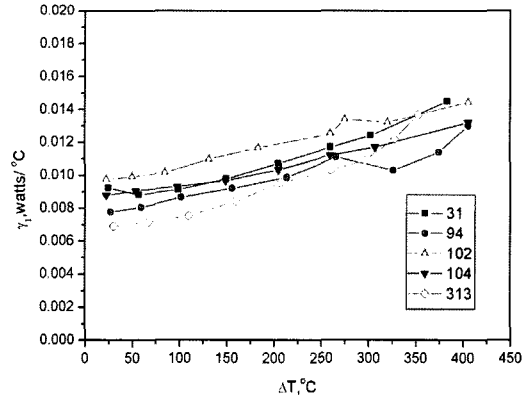


Fig. 6 Heat loss factor of bridgewire, γ_1

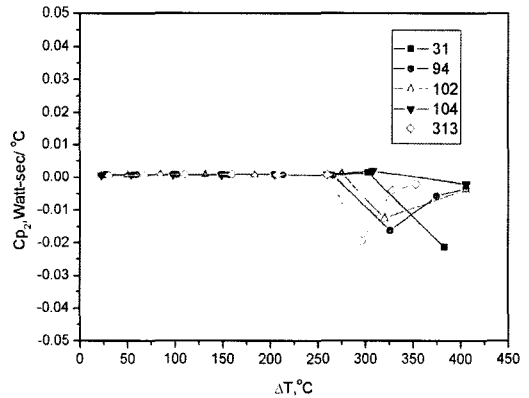


Fig. 7 Heat capacity of primary charge, C_{p2}

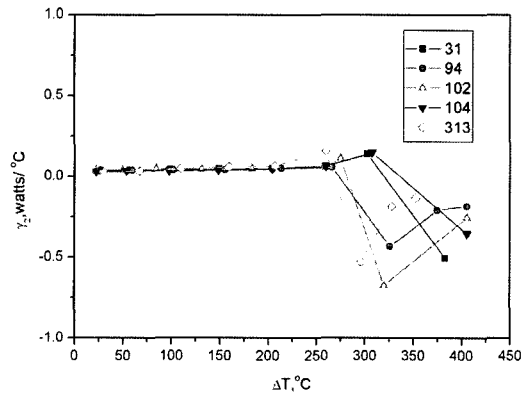


Fig. 8 Heat loss factor of primary charge, γ_2

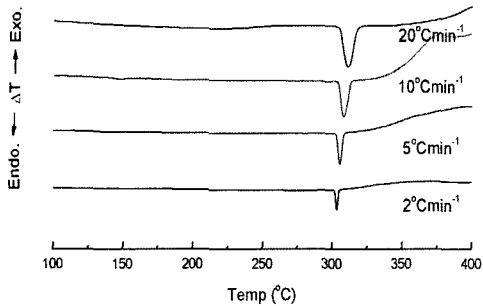


Fig. 9 DSC curves of ZPP in a static air atmosphere

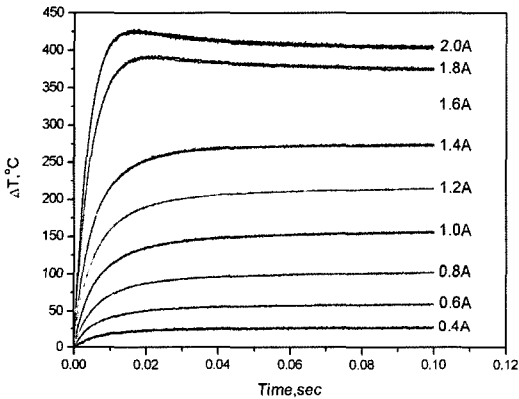


Fig. 10 Typical thermoelectrical response curves of initiator at various currents

변화가 최초로 나타나는 온도(ZPP의 경우, 300 °C 부근)이하임을 확인하는 단계적 비파괴 시험이 실용적이라고 판단된다.

일정한 전류를 공급하여 평형에 도달한 발열선의 온도는 Eq. 3으로부터 Eq. 13과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_{eq} = \frac{P_0(\gamma_1 + \gamma_2)}{\gamma_1\gamma_2 - \alpha P_0(\gamma_1 + \gamma_2)} \quad (13)$$

위 식에서 알 수 있듯이, 발열선 온도에 영향을 미치는 파라미터는 열손실 계수 γ_1 과 γ_2 이며, 그 값이 증가할수록 발열선 온도는 감소한다. 또한 열손실 계수는 전류가 증가할수록 커지기 때문에 낮은 전류에서 구한 열손실 계수를 적용하여 발열선 온도를 계산하면 실제 값보다 크게

된다.

Table 2. The comparisons between the tested and the calculated temperature of bridgewire at 1A.

SN	$\Delta T_{test}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{calc0.8}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{calc0.6}, ^\circ\text{C}$
31	149.3	163.6	172.2
94	155.7	169.4	180.9
102	131.3	140.1	148.9
104	148.6	159.8	162.5
313	159.5	182.8	208.4

Table 2는 1 A에서 시험한 결과로부터 구한 발열선 온도(ΔT_{test})와 0.8 A 및 0.6 A에서 구한 열손실 계수를 Eq. 13에 적용하여 계산한 1 A에서의 발열선 온도($\Delta T_{calc0.8}$, $\Delta T_{calc0.6}$)이다. 표에서 알 수 있듯이, 발열선의 온도는 $\Delta T_{calc0.6}$, $\Delta T_{calc0.8}$, ΔT_{test} 순으로 높게 나타났다. 따라서 비점화 규격 만족 여부는 낮은 전류에서 구한 열손실 계수를 적용하여 계산한 값으로 판단할수록 더 안전한 평가가 될 것이다. 그러나 시험전류가 낮을수록 정확성이 떨어지기 때문에, 양면을 고려하여 적절한 시험전류를 선정하는 것이 중요하다. 분석결과 0.8 A 시험에서 발열선의 상승온도는 84 ~ 110 °C 이었고, 0.6 A 시험에서 발열선의 상승온도는 43 ~ 67 °C 이었다. 본 착화기의 경우 전류 유입에 따른 착화기 내부의 물리적 변화를 가능한 억제하기 위하여 0.6A 정도를 시험 전류로 선정하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 이 방법은 각 착화기의 개별적 비점화 안전성을 확인할 수 있어 통계적 해석 방법에서 나타난 문제점을 해결할 수 있다는 장점이 있다.

4. 결 론

1) 직경 0.058 mm인 STS 304 발열선을 사용한 전기식 착화기에 대한 열전이 특성 시험을

하고 Fitted Wire Model로 구한 발열선과 기폭화약의 열전이 특성 파라미터는, 300 °C 부근에서 급격하게 변화되는 현상을 보였다. 이 원인은 기폭화약 원료인 $KClO_4$ 의 결정구조가 변화되어 나타난 흡열 반응으로 인해 나타난 현상으로 판단된다.

- 2) 본 열전이 특성 연구 결과를 적용하면, 1 A - 1 W 비점화 안전 규격시험을 비파괴적으로 신뢰성 있게 수행할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 윤현걸, 류병태, 최창선, "고체추진기관의 탄환 충격시험", 한국추진공학회지, 제4권 제4호, 2000, pp.114-122
2. L. A. Rosenthal, "Electro-Thermal Equations for Electro-Explosive Devices", Naval Ord. Lab. NAVORD-R-6684, Aug., 1959
3. L. A. Rosenthal, "Electro-Thermal Measurement of Bridgewires Used in Electroexplosive Devices", IEEE Transactions on Instrument & Measurement, Vol. 1M-12, No. 1, Jun., 1963, pp.17-21
4. W. C. Prinse, M. W. Leeuw, "Analysis of the Functioning of Bridgewire Igniters", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 13, 1988, pp.120-125
5. Jinn-Shing Lee, "Thermal Properties and Firing Characteristics of The Zr/ $KClO_4$ /Viton A Priming Compositions", Thermochemica Acta, 392-393, 2002, pp. 147-152
6. MIL-DTL-23659D "Detail Specification Initiators, Electric, General Design Specification For", 3 Mar. 2003, pp.5-12
7. MIL-HDBK-1512 "Electroexplosive Subsystems, Electrically Initiated, Design Requirements And Test Methods ", 30 Sepl. 1997, pp.5-13
8. MIL-STD-1576 "Electroexplosive Subsystem Safety Requirements And Test Methods For Space Systems", 31 Jul. 1984, pp.10-23
9. MIL-HDBK-83728 "Criteria For Explosive Systems And Devices Used On Space Vehicles", 01 Jan. 1999, pp.22, 55-62