

# SUS 304 발열선을 사용한 전기식 착화기의 열특성 분석

윤기은\* · 류병태\* · 최홍석\*\*

## Thermal Transient Analysis of Electric Initiator Used SUS 304 Bridgewire

Ki-Eun Yoon\* · Byung-Tae Ryu\* · Hong-Seok Choi\*\*

### ABSTRACT

Performing thermal transient test on electric initiator with SUS 304 bridgewire(diameter 2.3mil) and Zr-KClO<sub>4</sub> primary charge and 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 KClO<sub>4</sub>, which is used as primary charge, and to physical change of thermal transient interface between bridgewire and primary charge. With this results, useful temperature range for the parameter obtained from thermal transient test can be suggested.

### 초 록

SUS 304 발열선(직경 2.3mil)과 Zr-KClO<sub>4</sub> 기폭화약을 사용한 전기식 착화기에 대한 열특성을 시험하고 Fitted Wire Model로 분석한 결과, 약 300°C 부근에서 기폭화약과 관련된 열특성 파라미터가 급격하게 변화되었다. 이 현상은 기폭화약에 사용된 KClO<sub>4</sub>의 상변화로 인한 흡열과 발열선과 기폭화약 계면의 물리적 변화로 발생된 것으로 판단되며, 결과로 열특성 시험으로 구한 파라미터가 유용한 온도 범위를 제시하였다.

Key Words: Electric Initiator(전기식 착화기), Bridgewire(발열선), Primary Charge(기폭화약), Thermal Transient Test(열특성 시험), 1A-1W No-Fire Test(1A-1W 비점화 시험)

### 1. 서 론

전기식 착화기는 군용 및 민수용으로 가장 많이 사용되는 기폭 장치로 외부에서 전기에너지

를 받으면 열이 발생하는 일종의 에너지 변환 장치이다. 착화기가 우발 점화되면 자원손실과 전략적 차질을 야기할 수 있기 때문에 고도의 신뢰성과 안전성을 확보해야한다. 따라서 신뢰성과 안전성을 명확하게 규정하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 대부분 통계적 방법으로 결과가 제시된다.

\* 국방과학연구소, 기-4-7

\*\* (주)한화 중앙연구소, 화약실 1팀  
연락처자, E-mail: kkc@hanafos.com.

발열선과 기폭화약 사이의 열전달 현상은 전기식 착화기의 신뢰성과 안전성에 영향을 주는 가장 중요한 인자이다. 전기식 착화기의 열특성을 분석하기 위한 대표적인 실험적 방법인 Rothensal Model[1, 2]은 현상을 매우 단순화시켰기 때문에 정확성이 떨어진다. 이를 보완하기 위해 제시된 Fitted Wire Model[3]은 발열선과 기폭화약의 열 특성을 동시에 고려하고 있기 때문에 Rothensal Model에 비하여 정확성이 향상되었다. 그러나 이 모델도 열특성 파라미터가 일정하게 유지되는 범위에만 적용이 가능하다.

본 연구에서는 직경 2.3mil인 SUS 304 발열선과 Zr-KClO<sub>4</sub> 기폭화약을 사용한 전기식 착화기로 열특성을 시험하여 각종 파라미터를 구하고, Fitted Wire Model에 적용 가능한 온도 범위를 제시하였다.

## 2. 열특성 해석

발열선과 기폭화약 계면의 열특성 해석을 위한 모델을 Fig. 1에 나타냈다. 발열선의 온도를  $T_1$ , 열용량을  $C_{p1}$ , 열손실 계수를  $\gamma_1$ 이라 하고, 기폭화약의 온도를  $T_2$ , 열용량을  $C_{p2}$ , 열손실 계수를  $\gamma_2$ , 공급전력  $P_0 = I^2 R_0$ 라 하면, Fitted Wire Model은 Eq. 1, 2가 되고, 그 해는 Eq. 3, 4와 같다. 여기서  $I$ 는 공급전류,  $R_0$ 는 발열선의 초기저항이다.

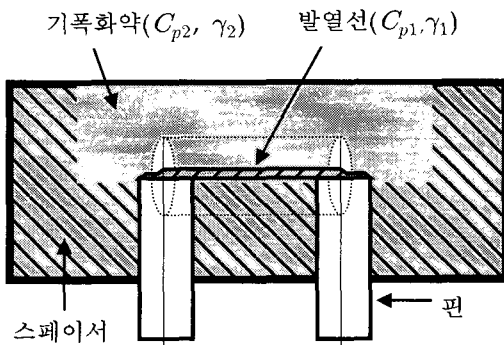


Fig. 1 Analytical model of the initiator

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

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

초기조건은

$$T_1 = T_2 = T_0, \quad \frac{dT_1}{dt} = \frac{P_0}{C_{p1}}, \quad \frac{dT_2}{dt} = 0$$

이므로 Eq. 1과 2의 해를 구하면 다음과 같다.

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

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

여기서, 각 상수는 다음과 같다.

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

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

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

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

$$A_2 = \frac{\gamma_1 P_0}{\gamma_1 \gamma_2 - \alpha P_0(\gamma_1 + \gamma_2)}, \quad C_1 = \frac{-k_2(T_0 + A_2)}{k_2 - k_1},$$

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

각 상수로 구한 열특성 파라미터는 다음과 같다.

$$C_{p1} = \frac{P_0}{A_1(B_1(k_1 - k_2) + k_2)},$$

$$\gamma_1 = C_{p1}(k_1 + k_2) + \alpha P_0 - \frac{A_1}{P_0} k_1 k_2 C_{p1}^2,$$

$$C_{p2} = -\frac{\gamma_1}{k_1 k_2 C_{p1}} \left( \alpha P_0 - \gamma_2 + \frac{\alpha P_0 \gamma_2}{\gamma_1} \right),$$

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

## 3. 실험 및 결과

직경이 2.3mil인 SUS 304 발열선과 ZPP 혼합물(Zr/KClO<sub>4</sub>/Viton A)의 기폭화약으로 제작한

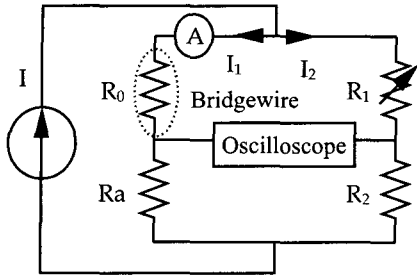


Fig. 2 Block scheme of the thermal transient tester

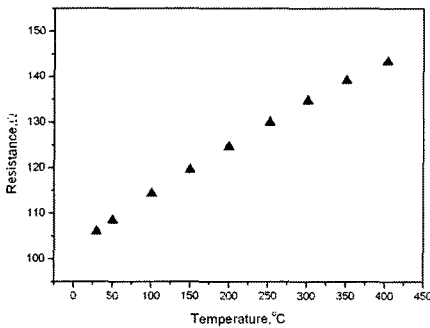


Fig. 3 The resistance changes of the SUS304 bridgewire

Plug 형태의 착화기를 열특성 시험기(Pasadena Model 305B)를 사용하여 측정하였다. 본 시험 장치는 휘스톤 브리지를 이용하여 발열선 저항 ( $R_0$ ) 변화에 따른 전압변동 ( $\Delta V$ )을 측정하는 것으로, 개략적인 회로의 구성은 Fig. 2와 같으며 발열선의 온도는 Eq. 5로 구한다.

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta V}{\alpha I_1 R_0} \quad (5)$$

착화기에 0.4A~2.0A의 전류를 공급하여 전압 변동 값을 측정하고, 데이터를 처리하여 열특성 파라미터를 구하였다. 계속된 데이터를 Curve Fitting하여 Eq. 3, 4의  $C_{p1}$ ,  $\gamma_1$ ,  $C_{p2}$ ,  $\gamma_2$ 를 구하였다. 발열선의 온도에 따른 저항 변화는 Fig. 3과 같이 측정되었다. 이로부터 구한, SUS 304 발열선의 온도 저항 계수( $\alpha$ )는 약  $0.001\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ 이다. Fig. 4는 대표적인 착화기의 열특성 곡선이

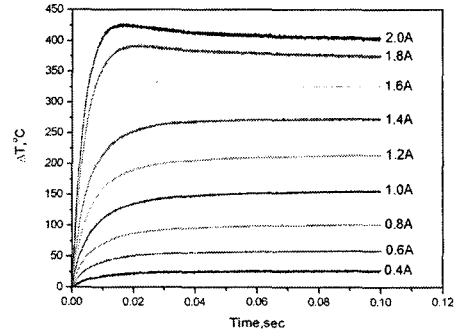


Fig. 4 Typical thermo-electrical response curves of initiator at various currents

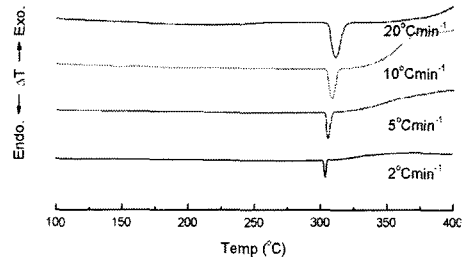
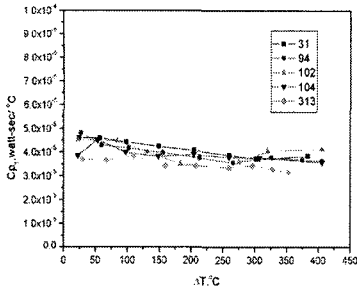
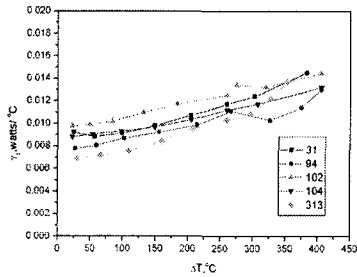


Fig. 5 DSC curves of ZPP in a static air atmosphere

다. 또한, Fig. 5는 ZPP 혼합물의 DSC 결과로 온도 상승 속도에 따라 다소의 차이는 있었지만  $\text{KClO}_4$  결정 구조 변화로 인한 흡열피크가  $300^\circ\text{C}$  부근에서 나타났다. Viton A의 경우,  $300^\circ\text{C}$  부근에서는 변화가 없고  $459\text{--}508^\circ\text{C}$ 에서 발열반응이 있는 것으로 알려져 있다[4]. Fig. 6과 7은 착화기 5개를 시험하여 구한 온도별 열특성 파라미터이다. Fig. 4의 전류 1.6A, 1.8A 및 2.0A에서는 발열선 온도가 시간이 경과됨에 따라 하락하는 경향을 보이고 있다. 이 현상으로 Fig. 7의  $C_{p2}$ 와  $\gamma_2$ 가  $300^\circ\text{C}$  부근에서 급격히 변화된 것으로 나타났다. 이 원인은 앞서 설명한 바와 같이  $\text{KClO}_4$ 의 상변화로 발생한 흡열이 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한, 온도 증가에 따른 발열선 팽창으로, 접촉 계면이 변화되어 화약으로 열 전달이 향상된 영향도 있을 것으로 생각된다.

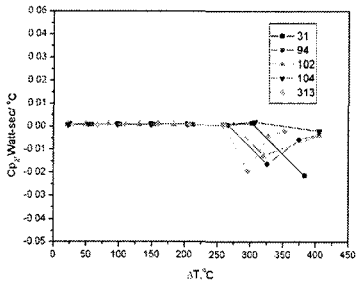


a)  $C_{p1}$

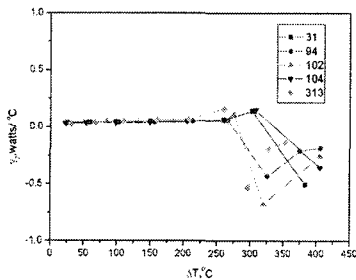


b)  $\gamma_1$

Fig. 6 Thermal transient parameters of bridgewire



a)  $C_{p2}$



b)  $\gamma_2$

Fig. 7 Thermal transient parameters of primary charge

SUS 304 발열선의 온도에 따른 선형 팽창계수는  $9.6 \times 10^{-6} \text{in/in/}^\circ\text{C}$ 로 제작사(California Fine Wire Co.)에서 제시하였다.

#### 4. 결론

전기식 착화기를 열특성 시험하여 Fitted Wire Model로 발열선 및 기폭화약의 온도를 구하였다. 그러나 300°C 부근에서 발열선 및 기폭화약의 물리화학적 변화로, 파라미터가 급격히 변화되는 현상이 나타났다.

- 1) 기폭화약의 열적 변화가 최초로 나타나는 온도 이하까지 Fitted Wire Model을 적용하여 착화기의 성능을 예측할 수 있다.
- 2) 본 연구 결과로, 전기식 착화기를 파괴하여 결과를 통계 처리하는 1A-1W 비점화 안전성 규격시험을 비 파괴적으로 대신할 수 있다.
- 3) 향후, 열특성 시험을 이용하여 착화기의 개별적 비점화 수준을 제시하는 연구를 수행하고자 한다.

#### 참고 문헌

1. L. A. Rosenthal, "Electro-Thermal Equations for Electro-Explosive Devices", Naval Ord. Lab. NAVORD-R-6684, Aug., 1959.
2. 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.
3. W. C. Prinse, M. W. Leeuw, "Analysis of the Functioning of Bridgewire Igniters", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 13, 1988, pp. 120-125.
4. Jinn-Shing Lee, "Thermal Properties and Firing Characteristics of The Zr/KClO<sub>4</sub>/Viton A Priming Compositions", Thermochemica Acta, 392-393, 2002, pp. 147-152.