

# 휴즈 엘리먼트의 용단특성에 대한 수치해석적 모델링

•정광화\*, 이세현\*, 박두기\*, 김용락\*, 이종철\*, 구경환\*\*, 한상욱\*  
 \*충남대학교, \*\*영동공과대학

## The Numerical Modeling on the I-t Characteristic of the Fuse Element

• K.H.Jeong\*, S.H.Lee\*, D.K.Park\*, Y.L.Kim\*, J.C.Lee\*, K.W.Koo\*\*, S.O.Han\*  
 \*ChungNam National University, \*\*YoungDong Institute of Technology

**ABSTRACT** The paper is concerned with the pre-arcing behavior of rapid current limiting fuselink using copper as a melting element. The phenomenon is faced by a numerical simulation(especially, FDM is applied) of the melting element.

Through the results, we can know the trends of the I-t characteristics and temperature distribution along the x axis for different fuselink shapes with circular, rectangular, and skew restriction type respectively, to be good for designing the optimal element.

$E_{in}^*$ : 제어 체적면을 통하여 유입되는 에너지용  
 $E_g^*$ : 에너지 생성용  
 $E_{out}^*$ : 제어 체적 내에 축적되는 에너지 변화용

### 2.2 Fourier 법칙

온도구배가 존재하게 되면 고온부에서 저온부로 에너지가 전달된다는 것은 경험을 통해서 잘 알 수 있는 사실이다. 이 때 전도, 대류, 및 복사라는 세 가지 열전달 방식이 있으며 모두 불가역현상이다.<sup>2),3)</sup> 본 논문에서는 엘리먼트의 재료인 구리가 대단히 우수한 열전도체라는 점을 고려하여 모델링에 있어서 전도만을 취급하였다.

열전달 방식의 기본인 물리적인 기구를 이해하고 전달된 에너지의 양을 결정하는 속도방정식을 적용하는 일은 아주 중요하다. 열전도에 관한 속도방정식은 다음과 같은 Fourier 법칙으로 알려져 있다.<sup>2),3)</sup>

$$q'' = -\lambda \nabla T \dots \dots \dots (2)$$

여기서,  $q''$  : 열유속  
 $T$  : 공간과 시간 차원을 갖는 온도 함수  
 $\lambda$  : 열전도율

위의 두 법칙을 종합하여 휴즈 엘리먼트에 있어서의 열전도 현상을 다음과 같은 방정식으로 모델링하였다. 단, 휴즈 엘리먼트의 모양이 대칭적이기 때문에 여기에서는 공간적으로 x 축에 관한 1차원만을 고려하였다. 또한  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  는 온도의 함수로 주어지며  $q$ 는 공간 또는 시간의 함수로 주어지는데, 모델의 단순화를 위해서  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ 를 상수로 취급하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda} \dot{q} \right) \dots \dots \dots (3)$$

여기서,  $a = \lambda / \rho c$ : 열확산 계수  
 $\dot{q}$ : 에너지 생성량

## 1. 서 론

휴즈에 과전류가 흘렀을 때, 그 전류의 크기에 따라 휴즈가 용단될 때까지의 시간이 정해져 있어 각각의 휴즈는 고유 곡선을 그리게 된다. 이러한 전류와 시간의 관계를 나타낸 것을 전류-시간 특성(I-t 특성) 또는 용단 특성이라 하고 휴즈의 보호 특성 중 하나로서 중요한 것이다.<sup>1)</sup>

여기에서는 최적의 휴즈 엘리먼트 설계를 목표로 이러한 용단특성이 엘리먼트의 모양에 따라 어떻게 달라지는가 그리고 각각에 대한 온도분포를 시뮬레이션을 통해 알아보았다.

## 2. 휴즈 엘리먼트에서의 열전도(확산) 방정식

열전도 기초미분방정식은 에너지 보존의 법칙(열역학 제 1 법칙)과 Fourier 법칙에 의하여 유도될 수 있다.

### 2.1 에너지 보존의 법칙

열전달 해석에 있어서 기본이 되는 에너지 보존 법칙의 일반적인 형태는 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.<sup>2)</sup>

$$E_{in}^* + E_g^* - E_{out}^* = E_{st}^* \dots \dots (1)$$

여기서,  $E_{in}^*$ : 제어 체적면을 통하여 유입되는 에너지용

### 3. 유한차분법에 의한 열전도 해석

전도열전달 문제에 대한 수많은 해석적인 풀이가 지난 100여 년 간에 걸쳐서 얻어졌음에도 불구하고 실제로는 아직도 어떤 형태나 경계조건에 대해서는 해석적인 풀이를 구할 수 없는 경우가 많으며 비록 해를 구할 수 있다 하더라도 복잡한 급수로 표시된다든가 또는 수치를 구하기가 극히 어려운 경우가 많다. 이러한 경우에 가장 효과적인 방법은 유한차분법(FDM, finite-difference method)에 의한 수치해석이다.<sup>3),4)</sup>

식 (3)을 수치해석적으로 풀기 위해 이산화식으로 변환시켜 주면 다음과 같다.

$$T_i^{n+1} = T_i^n + r(T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{\lambda} q_i^n \quad (4)$$

여기서,  $r = \alpha \Delta t / (\Delta x)^2$ 이며,  $n$ 은 시간에 대한 첨자이고,  $i$ 는 공간에 대한 첨자이다. 또한, 미지수와 방정식의 갯수를 같게 하기 위해서는 2개의 식이 더 필요하게 되는데, 이들은 경계조건을 차분화함으로써 얻어진다.

따라서, 전 영역(절점)에 대한 차분식을 작성하여 다음과 같은 연립방정식을 해석함으로써 각 절점( $n$  개)에서의 온도 분포를 구할 수 있게 된다.

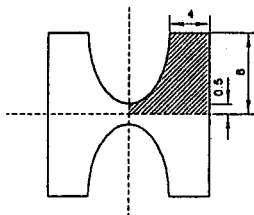
$$\begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = B \quad \dots \dots \dots (5)$$

### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

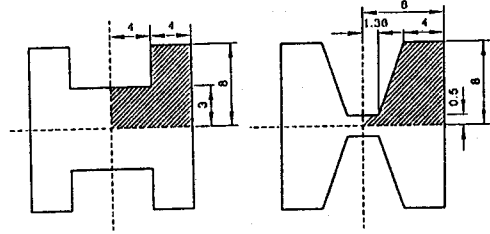
시뮬레이션을 실행한 대상은 속도형 한류 퓨즈의 구리 엘리먼트로서, 순수한 구리의 물질 특성 상수는 다음과 같다.

- 밀도( $\rho$ ) : 8954[kg/m<sup>3</sup>]
- 비열( $c$ ) : 0.3831[kJ/kg·°C]
- 전도도( $k$ ) : 386[W/m·°C]
- 용융온도 : 1085[°C]

또한, 엘리먼트의 모양은 크게 사각형·원형·마름모 형으로 대별하였으며, 아래에 각 엘리먼트의 모양을 그림 4-1에 나타냈다. 실제 시뮬레이션에서는 대칭성을 고려하여 엘리먼트의 1/4 부분만 해석하였다.



(a) Circular Type



(b) Rectangular Type (c) Skew Type  
Fig. 4-1 Restriction Types of the respective Elements

#### 4.1 엘리먼트 모양에 따른 용단 특성 비교

그림 4-2에서 가로축은 전류[A], 세로축은 시간[sec]을 나타내는데, 그림에서 알 수 있듯이 마름모형 엘리먼트에 대한 그래프가 가장 아래에 있고 원형, 사각형 순으로 용단특성 곡선이 첨예하게 되었다.

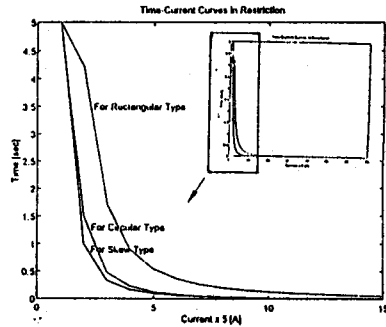


Fig. 4-2 Current-Time Character according to Restriction Types

#### 4.2 엘리먼트 모양에 따른 온도분포

그림 4-3은 엘리먼트에 5[A]의 전류를 가해주었을 때 5초 후의 온도분포를 나타내는데, 각각의 엘리먼트가 모두 대칭성을 가지고 있기 때문에 한쪽 방향에 대한 시뮬레이션 결과만 보였다. 여기에서 마름모 모양의 엘리먼트에서의 온도가 가장 높게 나타났다.

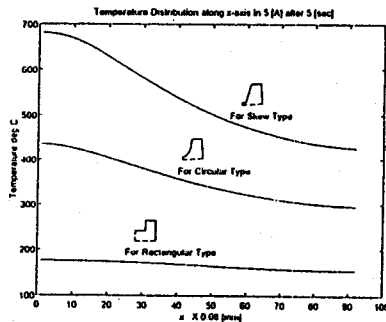


Fig. 4-3 Temperature Distribution along x-axis (current=5[A], time=5[sec])

위의 두 결과를 볼 때, 사각형 모양의 엘리먼트에 비해서 원형이나 마름모 모양의 엘리먼트가 용단특성에 있어서 속도형으로서의 우수성을 나타내었다. 특히 원형에 비해서 마름모 모양의 엘리먼트가 온도상승에 있어서 월등히 높아 좀더 나은 특성을 나타내었다. 이것은 실제로 많이 사용되고 있는 속도형 한류 퓨즈의 엘리먼트 모양이 마름모 모양인 것과 일치하는 결과였다. 앞으로 이 모양에 대한 시뮬레이션을 계속 해 나간다면 최적의 엘리먼트 모양을 찾아낼 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

엘리먼트의 모양에 따른 용단특성과 온도분포를 컴퓨터 프로그래밍을 통해서 시뮬레이션하여 보았다. 이를 통해서 각각의 모양에 대한 용단특성과 온도분포에 대한 경향을 알게 되었으며, 이것은 퓨즈 엘리먼트 최적 설계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이산화에 의한 모델링과 컴퓨터 자체의 라운드 오프 오차, 그리고 모델의 간소화 등에 기인한 실제치와의 차이가 있을 것으로 사료된다. 따라서, 실험치와의 비교를 통한 모델의 검증과 수정이 수반되어야 될 것이다.

## 참고문헌

1. "퓨즈핸드북", 일본 대동통신기주식회사, pp.27~34
2. 홍준표, "열전달, 확산의 수치해석", pp.11~29, pp.43~78
3. J.P.Holman, "Heat Transfer" 7th ed. pp.3~211
4. J.Alan Adams, D.F.Rogers, "Computer Aided Heat Transfer Analysis" pp.175~227
5. 이세현, "반도체 보호를 위한 속도형 한류 퓨즈 엘리먼트의 특성 개선", 석사학위논문, 1994.2
6. 이병성, "반도체 보호용 퓨즈 엘리먼트의 노치형태에 따른 차단특성 연구", 석사학위논문, 1995.2
7. O.Bottauscio, G.Crotti, G.Farina, "Non Adiabatic Process in Fuse Elements with Heavy Current Faults", pp.151~155, ICEFA 1991
8. M.Lindmayer, M.Luther, "Fusing and Short Circuit Interruption Behaviour of Metal Film Fuses", pp.107~113, ICEFA 1991
9. 이세현, 이병성, 한상욱, 김종석, 이덕출, "퓨즈엘리먼트의 노치형태에 따른 전기적 특성 연구", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(B), pp.1153~1155, 1993.7