

전기화재의 발생원인 및 분석에 관한 연구  
- 전선의 열해석을 통하여 -

A Study on the Causes and the Analysis of Electrical Fires  
- Focused on Heat Analysis for Electrical Wires -

오 흥 석<sup>†</sup>

Hong-Seok Oh<sup>†</sup>

삼척대학교 소방방재학부  
(2002. 11. 6. 접수/2002. 11. 28. 채택)

요 약

오늘날 전기화재의 정확한 원인분석과 조사가 전계-열해석 소프트웨어의 발전에 힘입어 전계-열해석 이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 체계적으로 연구되고 있으나, 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 상기의 상황에 기초해서 국내 L사 제품(600V, VVF : Three Core)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기 및 열화시간에 따른 전선의 열해석을 전계-열해석 유한요소법(Flux2D)를 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

ABSTRACT

Nowaday, with the growth of software for electro-thermal analysis, it has been studied the precise analysis and investigation of cause for the electrical fire using computer simulation on the basis of theory for electro-thermal analysis. But it is very lacking for the precise analysis and investigation of cause for the electrical fire. In this paper, we have simulated the thermal analysis for electrical wire according to the value of current and deteriorating time in a overload and a short with the electrical wire of the L's company product(600 V, VVF : Three core) using the electro-thermal finite element method(Flux2D).

**Keywords :** Electro-thermal analysis, Deteriorating time, Finite element method

1. 서 론

오늘날 급속한 산업사회의 발전과 생활수준의 향상으로 전기에너지의 증가 및 가전기기의 대형화가 지속적으로 진행되고 있는 추세이다. 이에 따른 부하의 급격한 증가로 인해 최근 10년(1991년~2000년)간 전체 화재 발생건수 가운데 전기화재 점유율은 약 36%이고, 평균증가율은 8.1%의 높은 비율을 나타내고 있다. 특히 2000년도의 전기화재 발생건수 11,796건 가운데 단락에 의한 전기화재가 전체의 74.3%인 8,770건이었고, 다음으로 과부하에 의한 전기화재가 880건으로 7.5%를 차지하였다.<sup>1)</sup> 일반적으로 전기화재의 발생은 전류의 발열작용으로써 주열원에 기인한다. 특히 단락사고

발생시 전선에는 수 100A에서 수 1,000A에 이르는 매우 큰 전류가 흐름으로 인해 발생하는 주열원에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 일어난다.<sup>2,3)</sup> 또한 과부하시, 전선에 허용전류보다 큰 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재의 온도 상승으로 열화가 진행되며, 최종적으로 전선피복재가 용융되어 전기배선선로의 단락사고를 일으켜 전기화재가 발생하는 것으로 분석되고 있다.<sup>4)</sup> 대개의 전기화재 원인분석 및 조사방법은 전선에 대한 용융흔의 육안검사와 금속학적 조직검사 등의 현장조사와 실험에 의해 이루어짐으로써 정확한 원인 분석과 조사가 매우 어려운 실정이다.<sup>5)</sup> 여기에 대응하기 위해, 소프트웨어의 개발에 힘입어 전계-열해석 이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 체계적인 연구가 진행되고 있으나, 매우 미흡한 실정이다.<sup>6,7)</sup> 따라서 본 논문에서는 국내 L사 제품(600V,

<sup>†</sup>E-mail: ohhong@dreamwiz.com

VVF : Three Core)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기 및 시간에 따른 전선의 열해석을 전계-열계 유한요소법(Flux2D)를 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

## 2. 유한요소법에 의한 전선의 열해석 이론

### 2.1 유한요소법의 정식화

비정상 열전도 문제의 지배방정식은 일반적으로 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

여기서,  $T=T(x, y, z, t)$ 는 온도로써 공간과 시간의 함수이다. 또한  $\rho$ 는 밀도이며,  $C_p$ 는 비열이고,  $\lambda$ 와  $Q$ 는 각각 열전도율과 단위시간에 단위 체적당 공급되는 열량, 즉 발열율이다.

해석대상을 유한한 요소로 분할하고, 요소내의 온도 분포를 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$T(x, y, z, t)=[N(x, y, z)]\{\phi(t)\} \quad (2)$$

여기서,  $[N]$ 은 절점온도와 요소내 온도를 결합시키는 내삽함수 행렬이며,  $\{\phi\}$ 는 시간  $t$ 에 있어서 요소의 절점온도 벡터를 나타낸다.

그리고, 식 (2)의  $[N]$ 을 가중치 함수로써 사용하여 Galerkin 법을 식 (1)에 적용하면 식 (3)이 얻어진다.

$$\int_{\Omega^e} [N]^T \left\{ \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right\} d\Omega = 0 \quad (3)$$

여기서, 상부첨자  $T$ 는 전치행렬을 나타내며,  $\Omega^e$ 는 요소영역을 나타낸다.

식 (3)에 벡터공식과 경계조건을 도입하여 정리하면, 식 (4)와 같은 비정상 열전도 문제에 대한 요소행렬식이 얻어진다.

$$[k]\{\phi\} + [c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{f\} \quad (4)$$

여기서,  $\{\phi\}$ 는 요소 절점온도 벡터를 나타내며,  $\{f\}$ 는 요소 열유속 벡터를 나타낸다. 또한,  $[k]$ 와  $[c]$ 는 각각 요소 열전도 행렬과 열용량 행렬을 나타낸다.

해석대상 전체의 행렬식은 식 (4)를 모든 요소에 대해 합하여 조립함으로써 식 (5)와 같이 얻어진다.

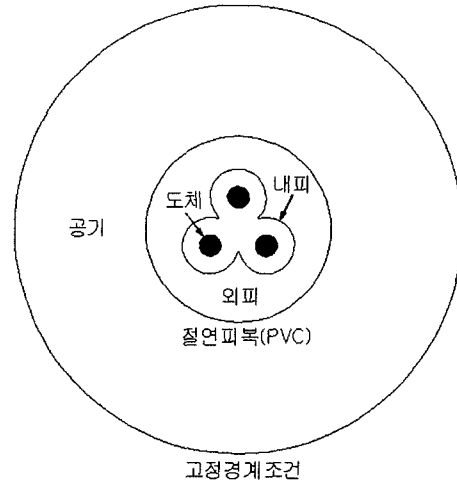


Fig. 1. The FE model of electrical wire.

$$[K]\{\Phi\} + [C] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right\} = \{F\} \quad (5)$$

여기서,  $\{\Phi\}$ 는 전체의 절점온도 벡터를 나타내며,  $\{F\}$ 는 전체의 열유속 벡터를 나타낸다. 또한,  $[K]$ 와  $[C]$ 는 각각 전체의 열전도 행렬과 열용량 행렬을 나타낸다.

### 2.2 전선의 유한요소 모델

Fig. 1은 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 열해석을 위한 유한요소 모델을 나타내며, 전선의 주위온도를 20[°C]로 설정하였다.

Fig. 1에서 도체의 발생 주열손실  $P_I$ 은 도체에 흐르는 전류와 도체저항과의 관계에 의해 식 (6)과 같으며,  $P_I$ 로 인해 발생한 열  $Q$ 는 방사에 의해 절연피복(PVC)으로 열이 전달된다. 또한, 절연피복에서의 열은 대기중으로 방사 및 대류에 의해 전달되어진다.

$$P_I = I^2 \times R(T) \quad (6)$$

여기서,  $I$ 는 도체에 흐르는 전류를 나타내며, 또한 도체 저항  $R(T)$ 는 온도의 함수로써 식 (7)과 같이 주어진다.

$$R(T) = \rho_{20} [1 + \alpha_{20}(T - 20)] \quad (7)$$

단,  $\rho_{20}$ 는 고유저항이고,  $\alpha_{20}$ 는 고유저항 온도계수이다. Table 1은 전선과 절연물의 특성치를 나타내고 있다.

## 3. 전선의 열해석 분석 및 결과

본 논문에서는 전계-열계 유한요소 해석프로그램인 Flux2D를 사용하였으며, Fig. 2는 전선에 흐르는 전류

Table 1. The specification of electrical wire and insulation materials

	도 체 (CU)	절연피복 (PVC)	공기
지 름[mm]	1	-	-
두 께[mm]	-	0.8(내피) 1.5(외피)	-
심당 가닥수	1	-	-
열전도율 [W/m · K]	398	0.15	0.025
도체저항 [ $\Omega$ /m]	$22.8 \times 10^{-3}$	-	-
고유저항 [ $\Omega$ m]	$1.69 \times 10^{-8}$ (20일 때)	$0.1 \times 10^{10}$	-
고유저항 온도계수	0.00393 (20일 때)	-	-
밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	8300 (20°C일 때)	1380 (20°C일 때)	1.205 (20°C일 때)
비열 [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]	0.419 (20°C일 때)	0.96 (20°C일 때)	1.006 (20°C일 때)
정격전류[A]	8	-	-

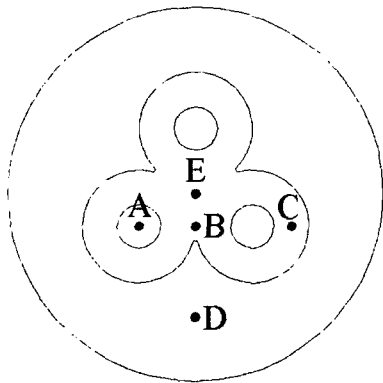


Fig. 2. Calculating points.

크기 변화 및 시간에 따른 온도변화를 계산하기 위한 계산지점(A, B, C, D, E)을 나타내고 있다.

Fig. 3은 전선에 흐르는 전류가 8[A](정격전류)일 때, B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있으며, Fig. 4는 전선에 흐르는 전류가 30[A](정격전류의 375%)일 때, B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 또한 Fig. 5는 전선에 흐르는 전류가 100[A](정격전류의 1,250%)일 때, B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다.

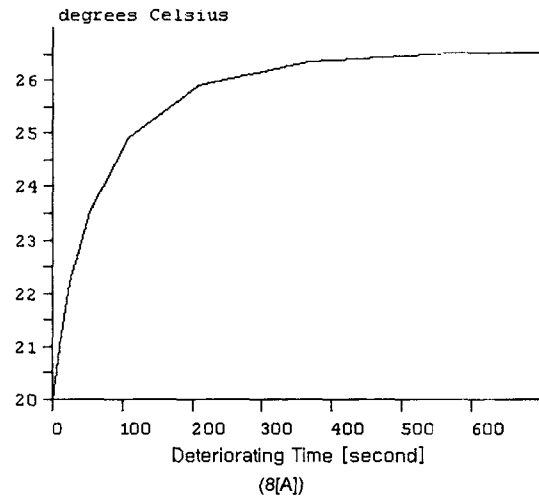


Fig. 3. Temperature & deteriorating time.

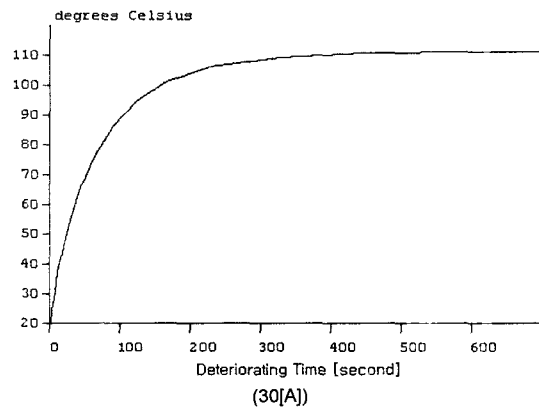


Fig. 4. Temperature & deteriorating time.

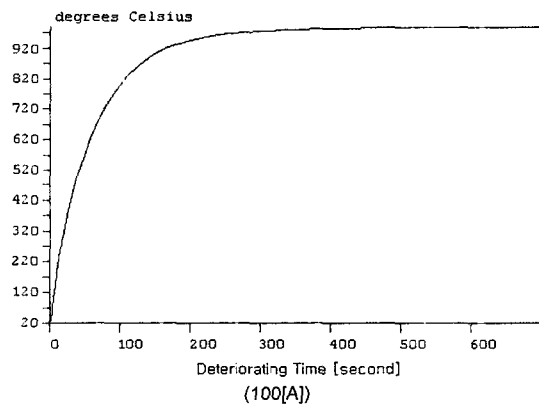


Fig. 5. Temperature & deteriorating time.

Fig. 3과 Fig. 4 및 Fig. 5에서 알 수 있듯이, 전류 크기가 클수록 열화시간에 따른 온도상승이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 저압 배선선로 과부하시, 전선에 흐르는 전류크기 변화에 따른 각 지점(A, B, C, D, E)의 온도변화를 나타내고 있으며, Fig. 7은 저압 배선선로 단락사고시 발생하는 단락전류의 크기, 즉 수 100 A~수 1,000 A 가운데 60 A~160 A까지의 전류 크기에 따른 각 지점(A, B, C, D, E)의 온도를 나타내고 있다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 20 A(정격전류의 250%)~22 A(정격전류의 275%) 사이

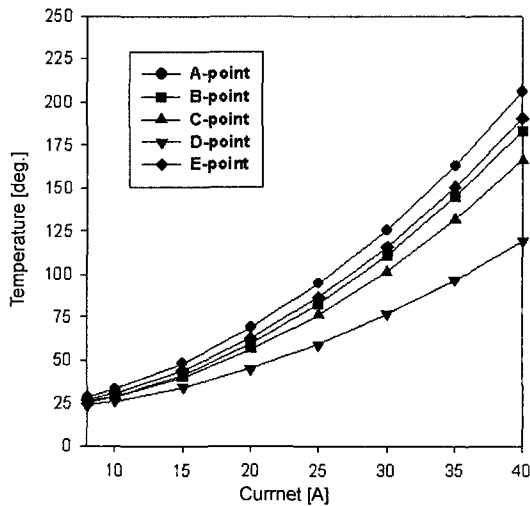


Fig. 6. Temperature & currents for overload.

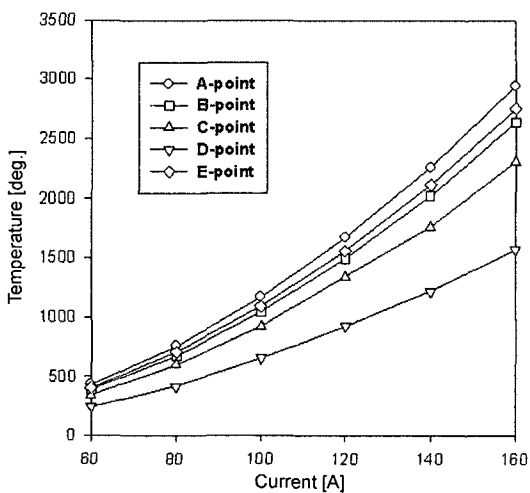


Fig. 7. Temperature & currents for short.

서는 온도가 약 60°C 부근임으로 인해 전류가 약 300 초 이상 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 30 A(정격전류의 375%) 부근에서 온도가 약 110°C 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 약 100 A(정격전류의 1,250%) 부근에서 온도가 약 1,100°C가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 용점온도(약 1080°C) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 주울열에 의하여 전선 피복재에 착화되어 전기화재가 발생할 것으로 판단된다

#### 4. 결 론

본 논문에서는 국내 L사 제품(600 V, VVF : Three Core)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기에 따른 전선의 열해석을 전계-열계 유한요소법(Flux2D)을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저압 배선선로의 과부하시, 전선에 흐르는 전류가 20 A(정격전류의 250%)~22 A(정격전류의 275%) 사이에서는 온도가 약 60°C 부근임으로 인해 전류가 약 300초 이상 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 30 A(정격전류의 375%) 부근에서 온도가 약 110°C 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 최종적으로 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

2. 저압 배선선로 단락사고시, 전선에 흐르는 전류가 약 100 A(정격전류의 1,250%) 부근에서 온도가 약 1,100°C가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 용점온도(약 1080°C) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 주울열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

상기의 연구자료는 전기화재의 정확한 원인분석과 조사에 매우 유용한 자료가 될 것인 바 향후 실험을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교·분석하는 것이 필요하다고 사료된다.

#### 참고문헌

1. 행정자치부 소방국, 2000 화재 통계 연보(2001).
2. 최충석 외 5인, "전기화재공학", 동화기술, pp.165-211

- (2000).
3. 李聖一, 成樂晉, “電氣災害 防止工學”, 연학사, pp.269-274(2000).
  4. 박용환, 양승용, “단면결함 전선에서의 화재 발생 메카니즘 연구”, 한국화재·소방학회 추계학술대회 논문집, pp.61-67(2001).
  5. 오흥석, etc., “저압 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 열해석에 관한 연구”, 한국화재·소방학회 논문지, Vol. 16, No. 3, pp.56-60(2002).
  6. Bok-ki Kim, Kuo-Ta Hsieh, Francis X, and Bostick, “A Three-Dimensional Finite Element Model for Thermal Effect of Imperfect Electric Contacts”, IEEE Trans. on MAG., Vol. 35, No. 1, pp.170-174(1999).
  7. H. Huh and W. J. Kang, “Electrothermal Analysis of Electric Resistance Spot Welding Processes by a 3-D Finite Element Method”, Journal of Materials Processing Technology 63, pp.672-677, (1997).