

저압 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 열해석에 관한 연구 A Study on the Thermal Analysis for Electrical Wire in Overload and Short of Low Voltage Wiring

이상호[†] · 오홍석*

Sang-Ho Lee[†] · Hong-Seok Oh*

삼척대학교 소방방재공학과 부교수
*삼척대학교 소방방재공학과 겸임교수
(2002. 8. 9. 접수/2002. 9. 18. 채택)

요 약

최근 전계-열계해석 소프트웨어의 발전에 힘입어 전계-열계 해석 이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 전기화재의 정확한 원인분석과 조사가 체계적으로 연구되고 있으나, 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 국내 L사 제품(600 V, VVF)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기에 따른 전선의 열해석을 전계-열계 유한요소법(Flux2D)을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

ABSTRACT

Recently, 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 in a overload and a short with the electrical wire of the L's company product(600 V, VVF) using the electro-thermal finite element method(Flux2D).

Keywords : Electro-thermal analysis, Simulation, Finite element method

1. 서 론

오늘날 급속한 산업사회의 발전과 생활수준의 향상으로 전기에너지의 증가 및 가전기기의 대형화가 지속적으로 진행되고 있는 추세이며, 이에 따른 부하의 급격한 증가로 인해 최근 10년(1991년~2000년)간 전체 화재 발생건수 가운데 전기화재 점유율은 약 35.5%이고, 평균증가율은 9.0%의 높은 비율을 나타내고 있으며, 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.¹⁾ 일반적으로 전기화재의 발

생은 전류의 발열작용으로써 줄열에 기인하는 것으로 볼 수 있으며, 특히 단락사고 발생시 전선에는 수 100 A에서 수 1,000 A에 이르는 매우 큰 전류가 흐름으로 인해 발생하는 줄열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 일어난다.^{2,3)} 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.⁴⁾ 그리고 종래의 전기화재 원인분석 및 조사방법은 전선에 대한 용융흔의 육안검사와 금속학적 조직검사 등의 현장조사와 실험에 의해 이루어짐으로써 정확한 원인 분석과 조사가 매우 어려운 실정이다.⁵⁾ 여기에 대응하기 위해, 최근 전계-열계해석 소프트웨어의 발전에 힘입어 전계-열계 해석 이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에

이윤용 박사 정년퇴임 기념논문

[†]E-mail: shlee@samcheok.ac.kr

의한 체계적인 연구가 진행되고 있으나, 매우 미흡한 실정이다.^{6,7)} 따라서 본 논문에서는 상기의 상황에 기초해서 국내 L사 제품(600 V, VVF)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기에 따른 전선의 열해석을 전계-열계 유한요소법(Flux2D)을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

2. 유한요소법에 의한 전선의 열해석 이론

2.1 지배방정식의 도출

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 ρ 는 밀도이며, C_p 는 비열이고, λ 와 Q 는 각각 열전도율과 단위시간에 단위 체적당 공급되는 열량, 즉 발열율이다.

그리고, 비정상 열전도 문제에서 일반적으로 주어지는 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

첫째는 경계 Γ_1 상에서 온도가 규정되어 있는 경우이며, 식 (2)와 같이 주어진다.

$$T = \bar{T} \quad (2)$$

단, \bar{T} 는 규정온도이다.

둘째는 경계 Γ_2 상에서 열유속 q 가 유출입하는 경우이며, 식 (3)과 같이 주어진다.

$$q = \bar{q} \quad (3)$$

셋째는 경계 Γ_3 상에서 열전달이 있는 경우이며, 식 (4)와 같이 주어진다.

$$q = h_c(T - T_c) \quad (4)$$

단, h_c 는 열전달 계수이며, T_c 는 외부온도이다.

넷째는 경계 Γ_4 상에서 열방사가 있는 경우이며, 식 (5)와 같이 주어진다.

$$q = \sigma F(T^4 - T_r^4) \quad (5)$$

단, σ 는 Stefan-Boltzmann정수이며, F 는 수정형태 계수이고 T_r 은 방사원온도이다.

그러나, 식 (5)는 비선형식이므로 계산이 어려운 문제점이 있기 때문에 식 (6)과 같이 정의되는 h_r 을 사용하여 식 (7)과 같은 선형의 식으로 변형해서 사용한다.

$$h_r = \sigma F(T + T_r)(T^2 + T_r^2) \quad (6)$$

$$q = h_r(T - T_r) \quad (7)$$

2.2 유한요소법의 정식화

해석대상을 유한한 요소로 분할하고, 요소내의 온도 분포를 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{\phi(t)\} \quad (8)$$

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

그리고, 식 (8)의 $[N]$ 을 가중치 함수로써 사용하여 Galerkin 법을 식 (1)에 적용하면 식 (9)가 얻어진다.

$$\int_{\Omega^e} [N]^T \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right\} d\Omega = 0 \quad (9)$$

여기서, 상부첨자 T 는 전치행렬을 나타내며, Ω^e 는 요소영역을 나타낸다.

식 (9)에 벡터공식과 경계조건을 도입하여 정리하면, 식 (10)과 같은 비정상 열전도 문제에 대한 요소행렬식이 얻어진다.

$$[k]\{\phi\} + [c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{f\} \quad (10)$$

여기서, $\{\phi\}$ 는 요소 절점온도 벡터를 나타내며, $\{f\}$ 는 요소 열유속 벡터로써 식 (11)과 같이 주어진다. 또한, $[k]$ 와 $[c]$ 는 각각 요소 열전도 행렬과 열용량 행렬로써 식 (12)와 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{f\} = & \int_{\Omega^e} Q[N]^T d\Omega - \int_{\Gamma_2^e} \bar{q}[N]^T d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_3^e} h_c T_c [N]^T d\Gamma + \int_{\Gamma_4^e} h_r T_r [N]^T d\Gamma \end{aligned} \quad (11)$$

단, Γ^e 는 요소의 경계를 나타낸다.

$$\begin{aligned} [k] = & \int_{\Omega^e} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Gamma_3^e} h_c [N]^T [N] d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_4^e} h_r [N]^T [N] d\Gamma \end{aligned} \quad (12)$$

$$[c] = \int_{\Omega^e} \rho C_p [N]^T [N] d\Omega \quad (13)$$

해석대상 전체의 행렬식은 식 (10)을 모든 요소에 대

해 합하여 조립함으로써 식 (14) 같은 전체행렬식이 얻어진다.

$$[K]\{\Phi\} + [C]\left\{\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (14)$$

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.

2.3 전선의 유한요소 모델

Fig. 1은 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 열해석을 위한 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 또한 전선의 주위온도를 20°C로 설정하였다. Table

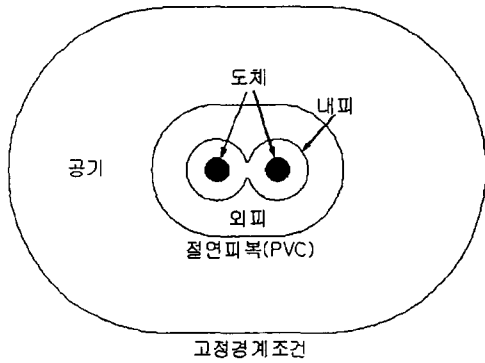


Fig. 1. The FE model of electrical wire.

Table 1. The specification of electrical wire and insulation materials

	도체(CU)	절연피복(PVC)	공기
지름[mm]	1	-	-
두께[mm]	-	0.8(내피) 1.5(외피)	-
심당 가닥수	1	-	-
열전도율 [W/m-K]	398	0.15	0.025
도체저항 [Ω/m]	22.8×10^{-3}	-	-
고유저항 [Ωm]	1.69×10^{-8} (20°C일 때)	0.1×10^{10}	-
고유저항 온도계수	0.00393 (20°C일 때)	-	-
정격전류[A]	10	-	-

1은 전선과 절연물의 특성치를 나타내고 있다.

Fig. 1에서 도체의 발생 줄손실 P_i 은 도체에 흐르는 전류와 도체저항과의 관계에 의해 식 (15)와 같으며, P_i 로 인해 발생한 열 Q 는 방사에 의해 절연피복(PVC)으로 열이 전달된다. 또한, 절연피복에서의 열은 대기중으로 방사 및 대류에 의해 열전달 되어진다.

$$P_i = I^2 \times R(T) \quad (15)$$

여기서, I 는 도체에 흐르는 전류를 나타내며, 또한 도체저항 $R(T)$ 는 온도의 함수로써 식 (16)과 같이 주어진다.

$$R(T) = \rho_e [1 + \alpha_e (T - 20)] \quad (16)$$

단, ρ_e 는 고유저항이고, α_e 는 고유저항 온도계수이다.

3. 전선의 열해석 분석 및 결과

Fig. 2는 본 논문에서 사용한 전계-열계 유한요소 해석프로그램(Flux2D)의 흐름도를 나타낸다.

Fig. 3은 정격 전류시, 열화시간이 10초 일때의 등온선 분포를 나타내고 있다.

Fig. 4는 저압 배선선로 과부하시, 열화시간이 10초 일 때의 전선에 흐르는 전류크기 변화에 따른 각 지점(A, B, C, D)의 온도변화를 나타내고 있다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 22 A(정격전류의 220%) ~28 A(정격전류의 280%) 사이에서는 온도가 약 60°C 부근임으로 인해 전류가 장시

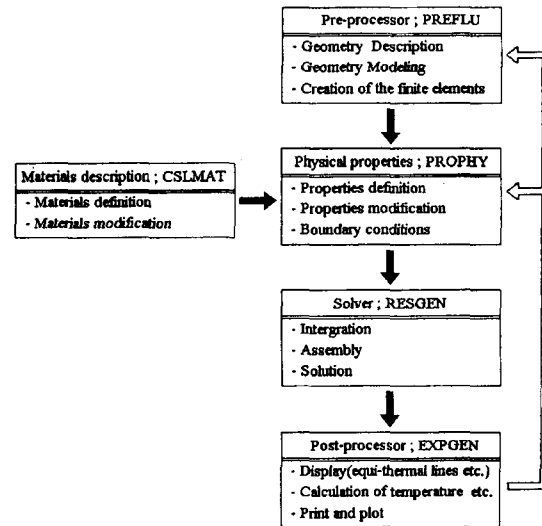


Fig. 2. Flow chart of Flux2D.

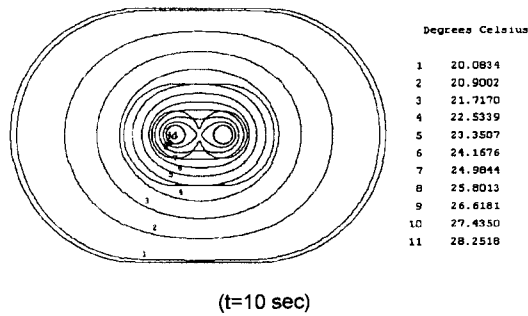


Fig. 3. Equi-thermal lines for rated current.

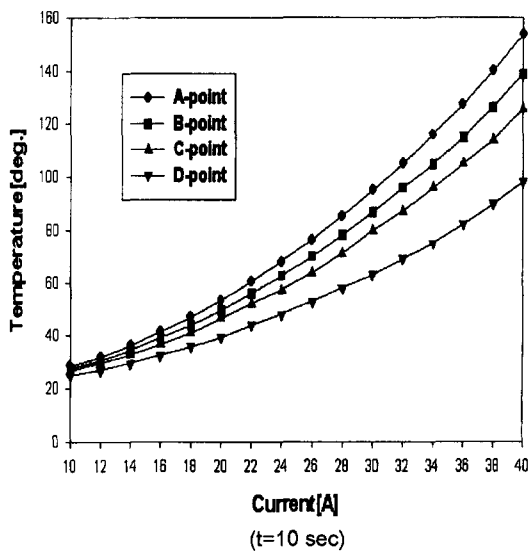
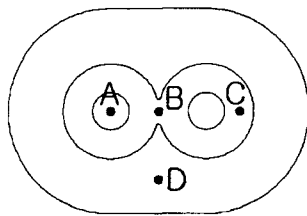


Fig. 4. Temperature curve for overload.

간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 34 A (정격전류의 340%) 부근에서 온도가 약 100°C 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 저압 배선선로 단락사고시 발생하는 단락 전류의 크기, 즉 수 100 A~수1,000 A 가운데 60 A

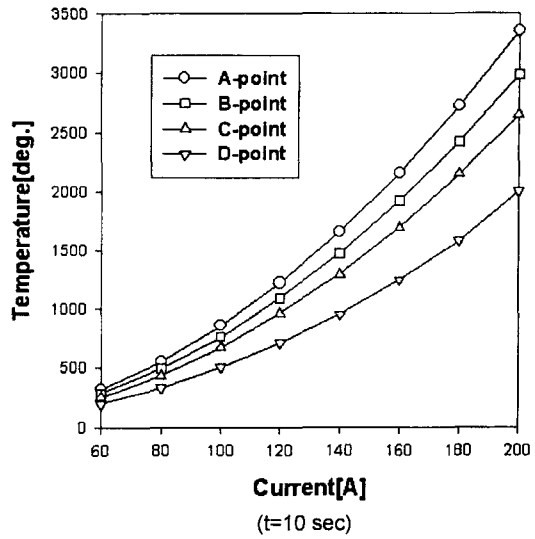


Fig. 5. Temperature curve for short.

~200 A까지의 전류 크기에 따른 각 지점(A, B, C, D)의 온도를 나타내고 있다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 약 110 A(정격전류의 1,100%) 부근에서 온도가 약 1,100°C가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 용점온도(약 1080°C) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 줄열에 의하여 전선 피복재에 착화되어 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내 L사 제품(600 V, VVF)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 22 A(정격전류의 220%) ~28 A(정격전류의 280%) 사이에서는 온도가 약 60°C 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 34 A (정격전류의 340%) 부근에서 온도가 약 100°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 110 A(정격전류의 1,100%) 부근에서 온도가 약

1,100°C가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 융점온도(약 1080°C) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 줄열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

상기의 연구자료는 전기화재의 정확한 원인분석과 조사에 매우 유용한 자료가 될 것으로 사료되며, 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, pp165-211(2000).
3. 李聖一, 成樂晉, “電氣災害防止工學”, 연학사, pp.269-274(2000).
4. 박용환, 양승용, “단면결합 전선에서의 화재 발생 메카니즘 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp61-67(2001).
5. 이의평, etc., “電氣溶融痕에 의한 火災原因 鑑定法에 관한 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp100-108(2001).
6. Bok-ki Kim, Kuo-Ta Hsieh, Francis X, Bostick, “A Three-Dimensional Finite Element Model for Thermal Effect of Imperfect Electric Contacts”, IEEE Trans. on MAG., Vol. 35, No. 1, pp170-174(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, pp672-677(1997).