

A-03

전기화재의 발생원인 및 분석에 관한 연구 - 전선의 열해석을 통하여 -

오홍석, 이상호, 김풍래*
삼척대학교 소방방재공학과, *동화정밀

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

Hong-Seok Oh, Sang-Ho Lee, Pung-Rai Kim*
Dept. of Fire & Disaster Prevention Engineering, Samcheok National University
*Donghwa Precision

1. 서론

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 36%이고, 평균증가율은 8.1%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 발생은 전류의 발열작용으로써 줄열에 기인하는 것으로 볼 수 있으며, 특히 단락사고 발생시 전선에는 수 100A에서 수 1,000A에 이르는 매우 큰 전류가 흐름으로 인해 발생하는 줄열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 일어난다.^{2,3)} 또한 과부하시, 전선에 허용 전류보다 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 의한 체계적인 연구가 진행되고 있으나, 매우 미흡한 실정이다.^{6,7)} 따라서 본 논문에서는 상기의 상황에 기초해서 국내 L사 제품(600V, VVF : Three Core)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기에 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 ρ 는 밀도이며, C_p 는 비열이고, λ 와 Q 는 각각 열전도율과 단위시간에 단위 체적당 공급되는 열량, 즉 발열율이다.

해석대상을 유한한 요소로 분할하고, 요소내의 온도분포를 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, Ω^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.

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

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

그림 1은 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 열해석을 위한 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 또한 전선의 주위온도를 20[°C]로 설정하였다.

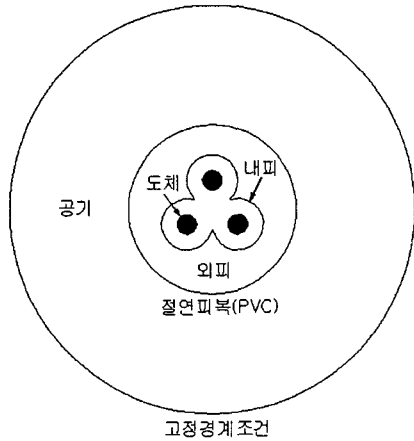


그림 1. 전선의 유한요소 모델

그림 1에서 도체의 발생 줄손실 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 열전달 되어진다.

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

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

$$R(T) = \rho_e [1 + \alpha_e (T - 20)] \quad (7)$$

단, ρ_e 는 고유저항이고, α_e 는 고유저항 온도계수이다.

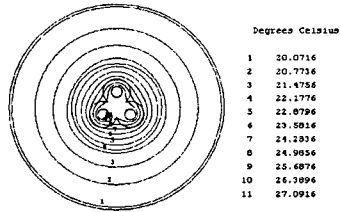
표1은 전선과 절연물의 특성치를 나타내고 있다.

	도 체(CU)	절연피복(PVC)	공 기
지 림[mm]	1	-	-
두 께[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^{-4}	-	-
고유저항 [Ωm]	1.69×10^{-8} (20°C일때)	0.1×10^{10}	-
고유저항 온도계수	0.00393(20°C일때)	-	-
정격전류[A]	10	-	-

표 1. 전선과 절연물의 특성치

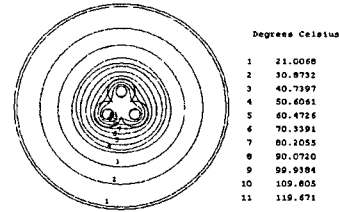
3. 전선의 열해석 분석 및 결과

본 논문에서는 전계-열계 유한요소 해석프로그램인 Flux2D를 사용하였으며, 그림2는 전선에 흐르는 전류가 8[A](정격전류)이고, 열화시간이 10초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있다. 또한 그림 3은 전선에 흐르는 전류가 30[A](정격전류의 375%) 이고, 열화시간이 10초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있다.



(t = 10 sec)

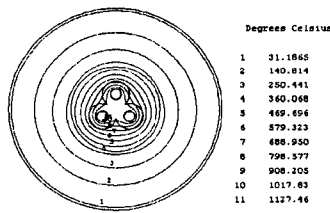
그림 2. 정격전류시 등온선 분포



(t = 10 sec)

그림 3. 30[A] 전류시 등온선 분포

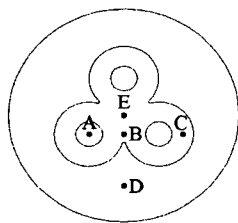
그림 4는 전선에 흐르는 전류가 100[A](정격전류의 1,250%) 이고, 열화시간이 10초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있다.



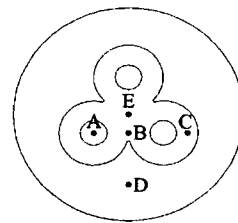
(t = 10 sec)

그림 4. 100[A] 전류시 등온선 분포

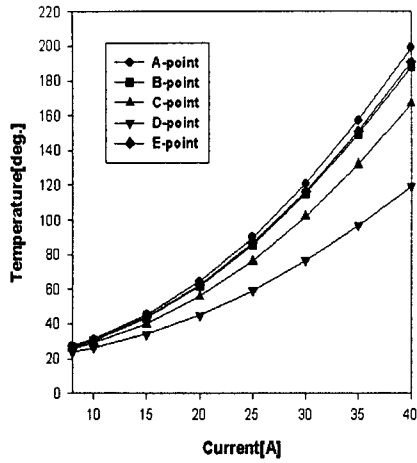
그림 5는 저압 배선선로 과부하시, 열화시간이 10초 일 때의 전선에 흐르는 전류크기 변화에 따른 각 지점(A, B, C, D)의 온도변화를 나타내고 있으며, 그림 6은 저압 배선선로 단락사고시 발생되는 단락전류의 크기, 즉 수 100A~수1,000A 가운데 60A~160A까지의 전류 크기에 따른 각 지점(A, B, C, D)의 온도를 나타내고 있다.



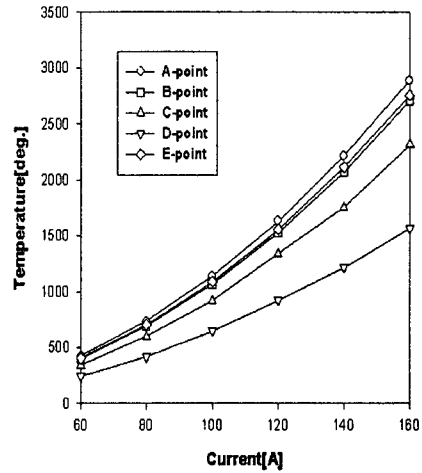
(a) Calculating points



(a) Calculating points



(b) Temperature curve(t = 10 sec)
그림 5. 과부하시 온도곡선



(b) Temperature curve(t = 10 sec)
그림 6. 단락시 온도곡선

그림 5에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 20A (정격전류의 250%) ~ 22A (정격전류의 275%) 사이에서는 온도가 약 60℃ 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 30 A (정격전류의 375%) 부근에서 온도가 약 110℃ 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다. 또한 그림 6에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 약 100A(정격전류의 1,250%) 부근에서 온도가 약 1,100℃가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 용점온도(약 1080℃) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 줄열에 의하여 전선 피복재에 착화되어 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

4. 결론

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℃ 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 30 A (정격전류의 375%) 부근에서 온도가 약 110℃ 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 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. 최충석외 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, “단면결합 전선에서의 화재 발생 메카니즘 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp.61~67, (2001)
5. 이의평, etc., “電氣溶融痕에 의한 火災 原因 鑑定法에 관한 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp.100~108, (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, pp.170-174, (1999)
7. H. Huh, 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)