

A Study on the Thermal Analysis of Fire-Resistance Cable using FEM

吳 鴻 錫* · 李 相 鎬**
(Hong-Seok Oh · Sang-Ho Lee)

Abstract - In general, the insulation and protective sheaths on electrical conductors are made of combustible substances like PVC, natural or synthetic rubbers, and other organic or synthetic materials. When an electrical fire starts due to overheating of conductors/joints or sparking/arcing, the first thing to ignite is usually the insulation on the cables. When the insulation burns, the produced fumes are very toxic. To solve the problem, we have surely need the fire resistance cable that doesn't burn in a high temperature and emit toxic fume for operating a disaster prevention installation. In this paper, we have simulated the thermal analysis for the fire resistance cable according to the values of current in a overload and a short, and the values of outside flame with the fire resistance cable of the L's company product(600 V, FR-8 : Four Core) using the finite element method(Flux2D).

Key Words : fire resistance cable, finite element method, thermal, Flux2D, FR-8

1. 서 론

지하철, 공항 등의 대규모 공공 이용 시설 및 방폭 지역의 산업플랜트 설비 등에서의 화재 발생시에 초기에 화재를 진압하거나 신속한 인원의 대피 등이 이루어지지 않을 경우 엄청난 규모의 인명 및 재산 피해를 가져올 수 있다.

최근 10년(1991년 ~2000년)간 화재발생 현황을 살펴보면, 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 발생은 전류의 발열작용으로써 줄열에 기인하는 것으로 볼 수 있으며, 특히 단락사고 발생시 전선에는 수 100[A]에서 수 1,000[A] 이르는 매우 큰 전류가 흐름으로 인해 발생하는 줄열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 일어난다. 또한 과부하시, 전선에 허용 전류보다 큰 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 도체에서 발생한 열에 의해 전선피복이 뜨거워지고, 그 후 전선피복에서 서서히 연기가 발생한다. 그리고 시간이 경과하면 연기가 매우 많이 발생하면서 피복 절연물이 팽창하여 부풀어 오르고, 또한 용융하여 아래 방향으로 처지며 전선도체와 접촉한 피복의 상부에서는 탄화가 진행된다. 더욱 과열되면 전선

도체는 붉게 발열하며 피복은 심하게 탄화, 용융하여 전선도체로부터 이탈하게 된다. 만일, 전선도체에 가연물이 닿아 있으면 착화할 수 있으며 허용전류의 수배에 이를 경우 전선도체는 붉게 적열한 후 용단하게 된다.[2][3]

그리고 전선의 절연체와 피복체(Sheath)들은 PVC, 천연 고무나 합성고무, 유기재료나 합성재료등과 같은 연소되기 쉬운 재료들로 이루어져 있기 때문에 전기화재 발생시, 일차적인 발화물질이 전선의 절연체와 피복체가 되며, 특히 절연체와 피복체가 연소할 때 유독가스들이 다량 방출되어지는 문제점이 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 고열에서도 연소되지 않음으로 인해 유독가스가 방출되지 않으며, 특히 화재시 각종 소방방재 설비를 정상 가동 시키는데 필수적인 내화전선(Fire Resistance Cable)에 관하여 정확한 열해석이 반드시 필요한 실정이다.[4]-[6]

따라서 본 논문에서는 유한요소해석 이론[7]-[11]을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 국내 L사 제품(600 V, FR-8 : Four Core)의 내화전선을 모델로 하여 과부하와 단락사고시의 전류 크기에 따른 내화전선의 열해석을 유한요소법(Flux2D)을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

2. 내화전선의 열해석 이론

2.1 지배방정식

일반적으로 비정상 열전도 문제의 지배방정식은 식(1)과 같이 나타내어질 수 있다.[7]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y})$$

* 正 會 員 : (주)이맥스하이테크 代表理事 · 工博
** 正 會 員 : 三尺大學校 방재技術傳聞大學院 副教授 · 工博
接受日字 : 2003年 11月 28日
最終完了 : 2004年 3月 7日

$$+ \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + Q \quad (1)$$

여기서, $T = T(x, y, z, t)$ 는 공간과 시간의 온도함수이며, ρ 는 밀도 [kg/m^3]이고, C_p 는 비열 [$kJ/kg \cdot ^\circ C$]을 나타내고 있다. 또한, k 와 Q 는 각각 열전도율 [$W/m \cdot ^\circ C$]과 단위시간에 단위 체적당 공급되는 열량 [$W/m^3 \cdot t$] 즉 발열율을 나타낸다.

그리고 열전도율이 물체내의 모든 곳에서 일정한 조건, 즉 $k_x = k_y = k_z = k$ 인 경우에 대하여 적용하면 식(1)은 식(2)와 같이 나타내어 질 수 있다.

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

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

첫째는 경계 Γ_1 상에서 온도가 규정되어 있는 경우이며, 식(3)과 같이 주어진다.

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

단, \bar{T} 는 규정온도이다.

둘째는 경계 Γ_2 상에서 열유속 q 가 유출입하는 경우이며, 식(4)와 같이 주어진다.

$$q = \bar{q} \quad (4)$$

셋째는 경계 Γ_3 상에서 열전달이 있는 경우이며, 식(5)와 같이 주어진다.

$$q = h_c (T - T_c) \quad (5)$$

단, h_c 는 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]이며, T_c 는 외부 온도이다.

넷째는 경계 Γ_4 상에서 열방사가 있는 경우이며, 식(6)과 같이 주어진다.

$$q = \sigma F (T^4 - T_r^4) \quad (6)$$

단, σ 는 Stefan-Boltzmann 정수 ($= 5.699 \times 10^{-8}$) [$W/m^2 \cdot K^4$]이며, F 는 수정형태 계수이고 T_r 은 방사원온도이다.

그러나 식(6)은 비선형 식이므로 계산이 어려운 문제점이 있기 때문에 식(7)과 같이 정의되는 복사 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$], 즉 h_r 을 사용하여 식(8)과 같은 선형의 식으로 변형해서 사용한다.

$$h_r = \sigma F (T + T_r)(T^2 + T_r^2) \quad (7)$$

$$q = h_r (T - T_r) \quad (8)$$

2.2 Galerkin법에 의한 정식화

해석대상을 유한한 요소로 분할하고, 요소내의 온도분포를 식(9)와 같이 나타낸다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{ \phi(t) \} \quad (9)$$

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

그리고 식(9)의 $[N]$ 을 가중치 함수로써 사용하여 Galerkin 법을 식(2)에 적용하면 식(10)이 얻어진다.

$$\int_{\Omega^e} [M]^T \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right\} d\Omega = 0 \quad (10)$$

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

식(10)에 벡터공식과 경계조건을 도입하여 정리하면, 식(11)과 같은 비정상 열전도 문제에 대한 요소행렬식이 얻어진다.

$$[k] \{ \phi \} + [c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{ f \} \quad (11)$$

여기서, $\{ \phi \}$ 는 요소 절점온도 벡터를 나타내며, $\{ f \}$ 는 요소 열유속 벡터로써 식(12)와 같이 주어진다. 또한, $[k]$ 와 $[c]$ 는 각각 요소 열전도 행렬과 열용량 행렬로써 식(13)과 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{ f \} = & \int_{\Omega^e} Q [M]^T d\Omega - \int_{\Gamma_2^e} \bar{q} [M]^T d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_3^e} h_c T_c [M]^T d\Gamma + \int_{\Gamma_4^e} h_r T_r [M]^T d\Gamma \end{aligned} \quad (12)$$

단, Γ^e 는 요소의 경계를 나타낸다.

$$\begin{aligned} [k] = & \int_{\Omega^e} \lambda \left(\frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Gamma_3^e} h_c [M]^T [M] d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_4^e} h_r [M]^T [M] d\Gamma \end{aligned} \quad (13)$$

$$[c] = \int_{\Omega^e} \rho C_p [M]^T [M] d\Omega \quad (14)$$

해석대상 전체의 행렬식은 식(11)을 모든 요소에 대해 합하여 조립함으로써 식(15)와 같은 전체행렬식이 얻어진다.

$$[K] \{ \Phi \} + [C] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right\} = \{ F \} \quad (15)$$

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 내화전선의 유한요소 모델

그림1은 내화전선의 열해석을 위한 유한요소 모델을 나타내고 있다. 그림1에서 과부하 및 단락사고 해석시, 고정경계조건은 내화전선 주위온도를 20 °C로 설정하였다. Table 1은 전선과 절연물의 특성치를 나타내고 있다.

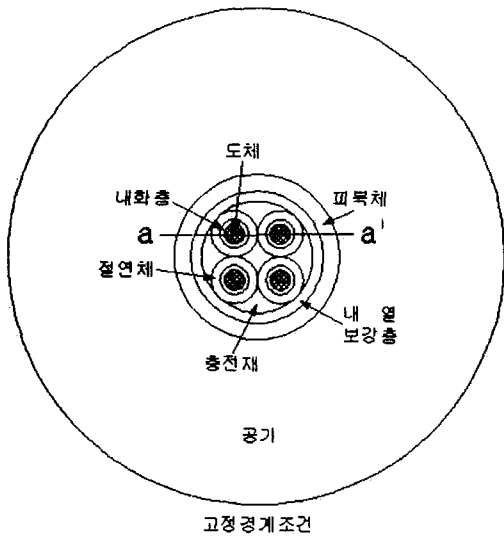


그림 1 내화전선의 유한요소 해석모델
Fig. 1 FE-analysis model of the fire resistance cable

그림1에서 도체의 발생 줄손실 P_i 은 도체에 흐르는 전류와 도체저항과의 관계에 의해 식(16)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.

$$P_i = I^2 \times R(T) \tag{16}$$

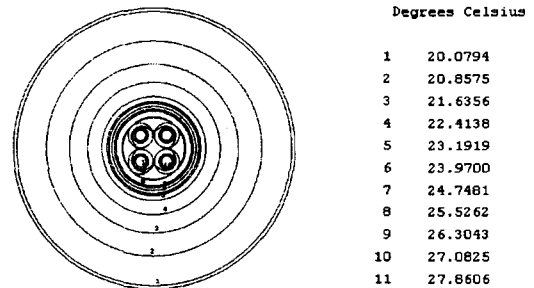
여기서, I 는 도체에 흐르는 전류를 나타내며, 또한 도체 저항 $R(T)$ 은 온도의 함수로써 식(17)과 같이 주어진다.

$$R(T) = \rho_e [1 + \alpha_e (T - 20)] \tag{17}$$

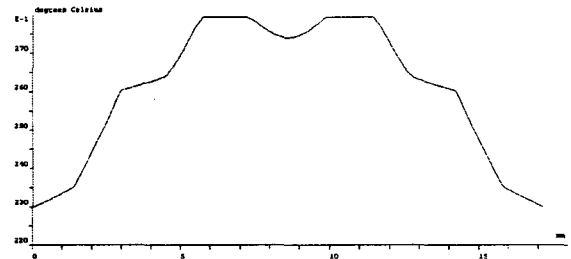
단, ρ_e 는 고유저항이고, α_e 는 고유저항 온도계수이다.

3. 전선의 온도해석

본 논문에서는 유한요소해석 프로그램인 Flux2D를 사용하였으며, 전선의 온도 해석에 중요한 계수인 대류 열전달계수 (h_c)와 복사 열전달계수 (h_r)를 각각 $60 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$ 과 $0.7 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$ 로 설정하였다. 그림2는 전선에 흐르는 전류가 18[A](허용전류)이고, 열화시간이 500초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있고, 그림3은 전선에 흐르는 전류가 50[A](허용전류의 277%) 이고, 열화시간이 500초 일 때의 등온선 및 온도분포(a-a')를 나타내고 있다. 그림4는 전선에 흐르는 전류가 200[A](허용전류의 1,111%) 이고, 열화시간이 500초 일 때의 등온선 및 온도분포(a-a')를 나타내고 있다.



(a) Equi-thermal lines

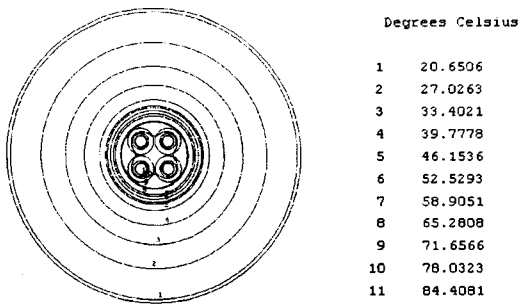


(b) temperature distribution(a-a')

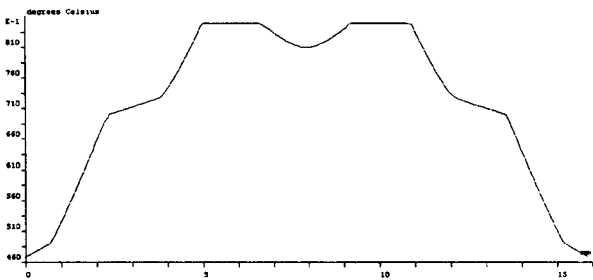
그림 2 18[A]에 대한 등온선 및 온도분포(t = 500 sec)
Fig. 2 Equi-thermal lines and temperature distribution for 18[A](t = 500 sec)

표 1 전선과 절연물의 특성치(20°C)
Table 1 The specification of cable and insulation materials (20°C)

재료	지름 [mm]	두께 [mm]	심당 가닥수	열전도율 [$W/m \cdot K$]	도체저항 [Ω/m]	고유저항 [Ωm]	고유저항 온도계수	밀도 [kg/m^3]	비열 [$kJ/kg \cdot K$]	전류량 [A]	허용온도 [$^\circ C$]
도체(CU)	1.8	-	7/0.6	398	9.42×10^{-3}	1.69×10^{-8}	0.00393	8300	0.419	18	1083.2
내화층(Mica Tape)	2.6	0.4	-	0.42	-	0.1×10^{11}	-	2500	0.5	-	400
절연체(LDPE)	4.2	0.8	-	0.3	-	0.1×10^{14}	-	930	2.2	-	75
충전재(Glass Fiber)	-	-	-	1.3	-	4.02×10^{10}	-	2550	0.81	-	540
내열보강층(Glass Fiber Tape)	12	0.9	-	1.3	-	4.02×10^{10}	-	2550	0.81	-	540
피복체(PVC)	15	1.5	-	0.15	-	0.1×10^{10}	-	1380	0.96	-	70
공기	-	-	-	0.025	-	-	-	1.205	1.006	-	-



(a) Equi-thermal lines



(b) temperature distribution(a-a')

그림 3 50[A]에 대한 등온선 및 온도분포(t = 500 sec)
 Fig. 3 Equi-thermal lines and temperature distribution for 50[A](t = 500 sec)

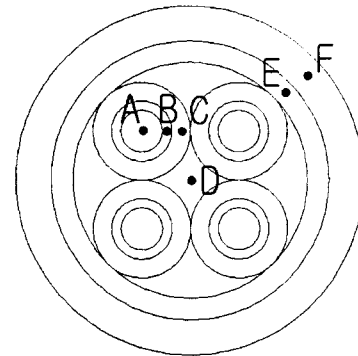
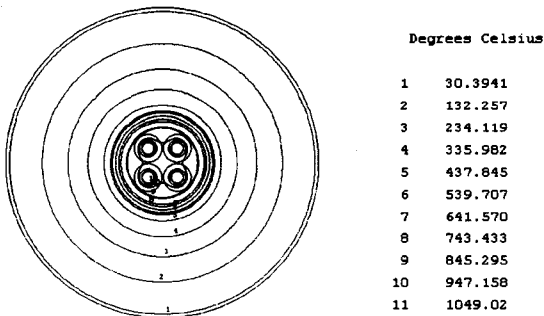
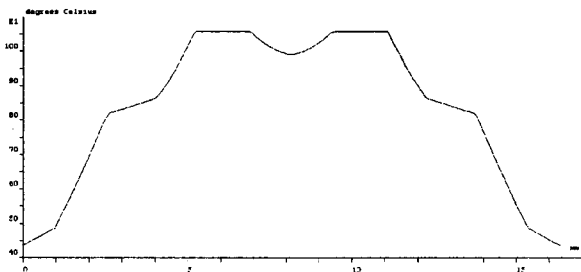


그림 5 계산지점
 Fig. 5 Calculating points

그림6은 전선에 흐르는 전류가 18[A](허용전류)일 때 C지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있고, 그림7은 전선에 흐르는 전류가 50[A](허용전류의 277%)일 때 C지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있으며, 그림8은 전선에 흐르는 전류가 200[A](허용전류의 1,111%)일 때 C지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 그림6과 그림7 및 그림8에서 알 수 있듯이, 전류크기가 클수록 열화시간에 따른 온도상승이 커짐을 알 수 있다.



(a) Equi-thermal lines



(b) temperature distribution(a-a')

그림 4 200[A]에 대한 등온선 및 온도분포(t = 500 sec)
 Fig. 4 Equi-thermal lines and temperature distribution for 200[A](t = 500 sec)

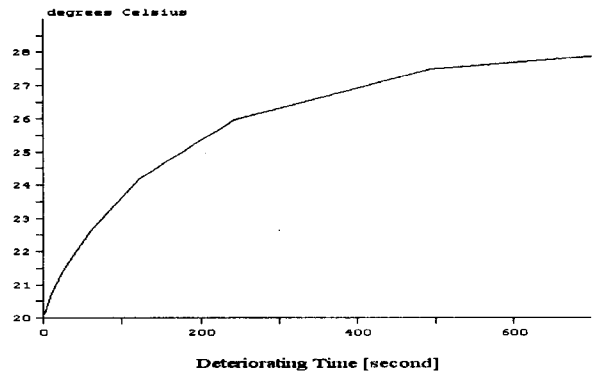


그림 6 열화시간에 따른 온도분포(18[A])
 Fig. 6 Temperature and deteriorating time(18[A])

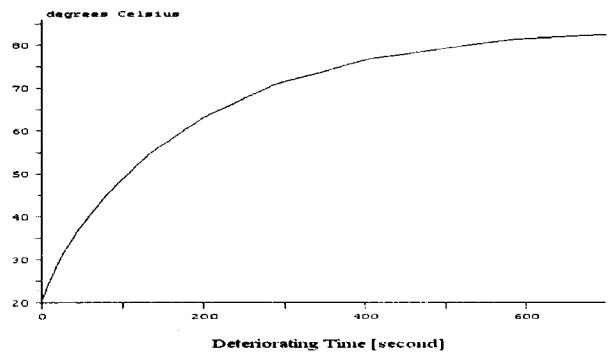


그림 7 열화시간에 따른 온도분포(50[A])
 Fig. 7 Temperature and deteriorating time(50[A])

그림5는 전선에 흐르는 전류크기 변화 및 시간에 따른 온도변화를 계산하기 위한 계산지점을 나타내고 있다.

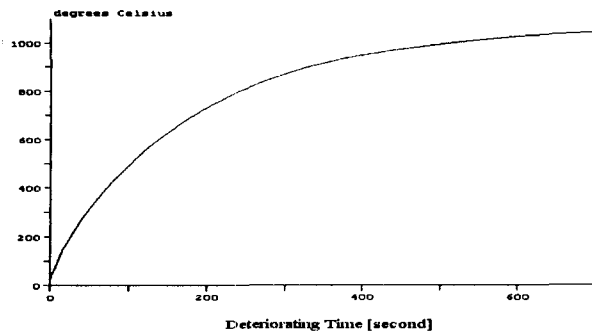


그림 8 열화시간에 따른 온도분포(200[A])
 Fig. 8 Temperature and deteriorating time(200[A])

그림9는 저압 배선선로 과부하시, 전선에 흐르는 전류크기 변화에 따른 각 지점(A, B, C, D, E, F)의 온도변화를 나타내고 있으며, 그림10은 저압 배선선로 단락사고시 발생하는 단락전류의 크기, 즉 100[A]~220[A]까지의 전류 크기에 따른 각 지점의 온도를 나타내고 있다. 그림9에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 45[A](허용전류의 250%) ~ 50[A](허용전류의 277%) 사이에서는 온도가 약 70℃ 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 절연체(LDPE)와 피복체(PVC)가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 60[A](허용전류의 333%) ~ 70[A](허용전류의 388%) 사이에서는 온도가 약 100℃ 이상이 됨으로써 절연체(LDPE)와 피복체(PVC)가 열화 및 용융될 것으로 사료된다.

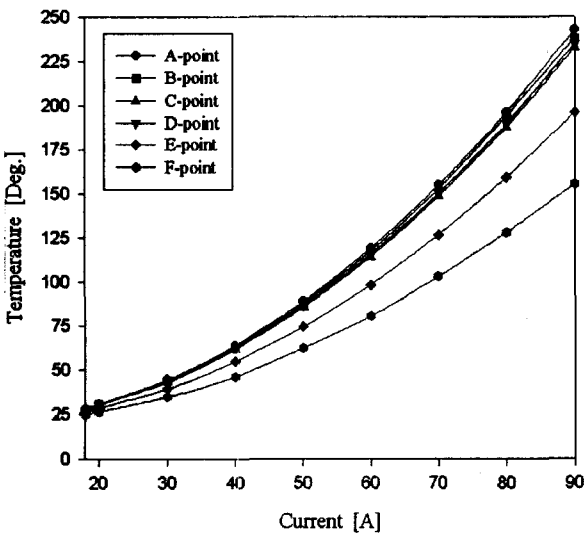


그림 9 과부하시 전류에 따른 온도(t = 800 sec)
 Fig. 9 Temperature and currents for overload(t = 800 sec)

그림10에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 120[A](허용전류의 666%) ~ 140[A](허용전류의 777%) 사이에서는 온도가 약 400℃ ~ 600℃ 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 내화층과 내열보강층이 서서히 열화될 것으로 생각되어진다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 170[A](허용전류의 944%) ~ 180[A](허용전류의 1,000%)

사이에서는 온도가 800℃ ~ 900℃ 부근임으로 인해 내화층 및 내열보강층이 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

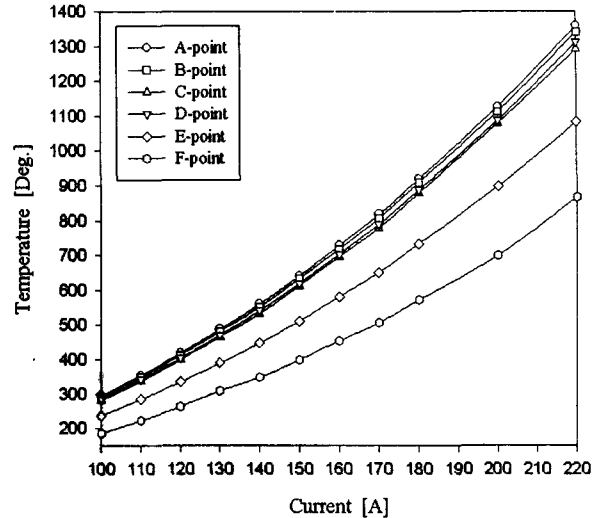


그림 10 단락사고시 전류에 따른 온도(t = 800 sec)
 Fig. 10 Temperature and currents for short(t = 800 sec)

4. 결 론

본 논문에서는 국내 L사 제품(600 V, FR-8 : Four Core)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기에 따른 전선의 온도해석을 유한요소법(Flux2D)을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저압 배선선로의 과부하시, 전선에 흐르는 전류가 45[A](허용전류의 250%) ~ 50[A](허용전류의 277%) 사이에서는 온도가 약 70℃ 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 절연체(LDPE)와 피복체(PVC)가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 60[A](허용전류의 333%) ~ 70[A](허용전류의 388%) 사이에서는 온도가 약 100℃ 이상이 됨으로써 절연체(LDPE)와 피복체(PVC)가 열화 및 용융될 것으로 사료된다.
2. 저압 배선선로 단락사고시, 전선에 흐르는 전류가 120[A](허용전류의 666%) ~ 140[A](허용전류의 777%) 사이에서는 온도가 약 400℃ ~ 600℃ 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 내화층과 내열보강층이 서서히 열화될 것으로 생각되어진다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 170[A](허용전류의 944%) ~ 180[A](허용전류의 1,000%) 사이에서는 온도가 800℃ ~ 900℃ 부근임으로 인해 내화층 및 내열보강층이 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

상기의 연구 자료는 전기화재의 정확한 원인분석과 조사에 유용한 자료가 될 것으로 사료되며, 향후 실험을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교·분석하는 것이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 행정자치부 소방국, 2000 화재 통계 연보, 2001.
 [2] 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.
 [3] 한국전기안전공사, “배선용 및 기기용 전선의 화재위험성에 관한연구”, pp. 25-32, 2001.
 [4] 박찬호, 정창기, 이복영, 김기욱, 정재희, “내화전선의 내화특성에 관한 실험적 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp. 54-59, 2002.
 [5] E. Thibert, B. Gautier, “Combustion of an electrical cable insulation : thermal study and modelling at EDF”, ELSEVIER, Polymer Degradation and Stability 64, pp. 585-593, 1999.
 [6] 윤현주, 홍진웅, 유동일, 윤재선, 곽동일, “조독성 내화전선 케이블의 성능평가에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 16, No. 1, pp. 18-23, 2002.
 [7] 홍준표, “열전도·확산의 수치해석”, 반도출판사, pp. 79-130, 1991.
 [8] 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.
 [9] S. W. Kim, H. H. Kim, S. C. Hahn, B. Y. Lee, K. Y. Park, Y. J. Shin, W. P. Song, J. B. Kim, I. H. Shin, “Coupled Finite-Element-Analytic Technique for Prediction of Temperature Rise in Power Apparatus”, IEEE Trans. on MAG., Vol. 38, No. 2, pp. 921-924, 2002.
 [10] Enrique J. Berjano, Javier Saiz, Jose M. Ferrero, “Radio-Frequency Heating of the Cornea : Theoretical Model and In Vitro Experiments”, IEEE Trans. on Biomed. Eng., Vol.49, No.3, pp. 196-205, 2002.

[11] 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, pp. 672-677, 1997.

저 자 소 개

오 홍 석 (吳 鴻 錫)



1969년 1월 9일생. 1992년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1994년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 (주)이맥스하이테크 대표이사.

Tel : 033-535-0593

Fax : 033-535-0594

E-mail : ohhong@dreamwiz.com

이 상 호 (李 相 鎭)



1959년 7월 13일생. 1982년 영남대 전기공학과 졸업(공학사). 1988년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 삼척대학교 방재기술전문대학원 부교수.

Tel : 033-570-6811

Fax : 033-570-6819

E-mail : shlee@samcheok.ac.kr