

전계-열계 유한요소해석을 이용한 저압 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 온도해석에 관한 연구

A Study on the Temperature Analysis for Cable in Overload and Short of Low Voltage Wiring using Electro-Thermal FEA

오홍석*
Hong-Seok Oh*

<Abstract>

Overloading of electrical equipment results in excessive currents. As the heat developed in the cables is proportional to square of the current, they get overheated. The insulation on cables is generally made of materials which are damaged easily by excessive temperature. They may therefore lose their insulating properties and lead to short circuits. Since many insulating materials are combustible, they may even catch fire if the temperature rises to their ignition temperature. In this paper, we have simulated the thermal analysis for cable according to the value of current in a overload and a short with the cable of the L's company product(600 V, VV : Four Core) using the electro-thermal finite element method(Flux2D).

Key words: FEM, overload, short, electro-thermal, Flux2D

1. 서론

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 차지하였다¹⁾.

발전소, 변전소 등 전원설비에서 사무실, 공장, 가정 등 부하설비에 이르기까지 전기의 운반을 위해 다양한 종류의 전선들이 사용되고 있다. 전선의 도체재료로 구리, 알루미늄 등이

일반적으로 사용되고 있고 전선의 절연재료로는 천연고무, 합성수지, 에나멜 등이 사용되고 있으며 보호피복은 전선의 사용 장소 및 목적에 따라 전선도체와 절연체를 보호하기 위해 사용된다. 저압 배선선로에 사용되는 대부분의 절연전선은 폴리염화비닐(PVC)을 사용한 전선이 주로 사용되고 있다²⁾.

일반적으로 전기화재의 발생은 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 일어난다³⁾⁴⁾. 또한

* 정회원 : (주)이맥스하이테크 대표이사/工博
240-807/강원도 동해시 천곡동 1009-17번지
email : emacsh@dreamwiz.com

* CEO, Emacs High-Tech Co., Ltd.

과부하시, 전선에 허용전류보다 큰 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 도체에서 발생한 열에 의해 전선피복이 뜨거워지고, 그 후 전선피복에서 서서히 연기가 발생한다. 시간이 경과하면 연기가 매우 많이 발생하면서 피복 절연물이 팽창하여 부풀어 오르고, 또한 용융하여 아래 방향으로 처지며 전선도체와 접촉한 피복의 상부에서는 탄화가 진행된다. 더욱 과열되면 전선도체는 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 된다⁵⁾.

그리고 종래의 전기화재 원인분석 및 조사방법은 전선에 대한 용융흔의 육안검사와 금속학적 조직검사 등의 현장조사와 실험에 의해 이루어짐으로써 정확한 원인 분석과 조사가 매우 어려운 실정이다⁶⁾. 여기에 대응하기 위해, 최근 전계-열계 해석 소프트웨어의 발전에 힘입어 전계-열계 해석 이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 체계적인 연구가 진행되고 있다⁷⁾⁻⁹⁾.

본 논문에서는 상기의 상황에 기초해서 국내 L사 제품(600 V, VV : Four Core)의 전선을 모델로 하여 과부하 및 단락사고시 발생하는 전류 크기에 따른 전선의 온도해석을 전계-열계 유한요소법(Flux2D)을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

2. 전선의 온도해석 이론

2.1 지배방정식

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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

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.

간단히 취급하기 위하여, 열전도율이 등방성으로

물체내의 모든 곳에서 일정, 즉 $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ 인 경우에 대하여 생각한다. 이때 식(1)은 식(2)와 같이 된다.

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

그리고, 비정상 열전도 문제에서 일반적으로 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 열전달 계수이며, T_c 는 외부온도이다.

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-Boltzmann정수이며, F 는 수정형태 계수이고 T_r 은 방사원온도이다.

그러나, 식(6)은 비선형식이므로 계산이 어려운 문제점이 있기 때문에 식(7)과 같이 정의되는 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.

$$\{ f \} = \int_{\Omega^e} Q [M]^T d\Omega - \int_{\Gamma_2^e} \bar{q} [M]^T d\Gamma + \int_{\Gamma_3^e} h_c T_c [M]^T d\Gamma + \int_{\Gamma_1^e} h_r T_r [M]^T d\Gamma \quad (12)$$

단, Γ^e 는 요소의 경계를 나타낸다.

$$[k] = \int_{\Omega^e} \lambda \left(\frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Gamma_3^e} h_c [M]^T [M] d\Gamma$$

$$+ \int_{\Gamma_1^e} h_r [M]^T [M] d\Gamma \quad (13)$$

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

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 유한요소 모델

Fig.1은 배선선로의 과부하 및 단락사고 발생시 전선의 온도해석을 위한 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 또한 전선의 주위온도를 20℃로 설정하였다.



Fig. 1. The FE model of electrical wire

Fig.1에서 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.

$$P_l = I^2 \times R(T) \quad (16)$$

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

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

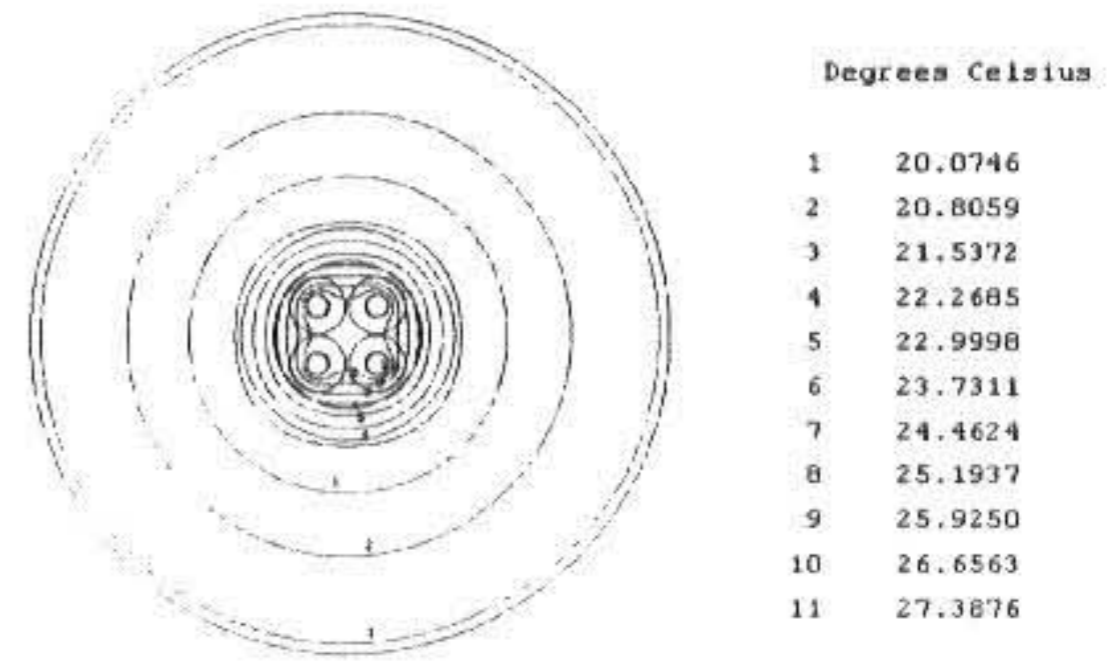
단, ρ_e 는 고유저항이고, α_e 는 고유저항 온도계수이다. Table 1은 전선과 절연물의 특성치를 나타내고 있다.

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	-	-
Core수	4	-	-
열전도율 [W/m · K]	398	0.15	0.025
도체저항 [Ω/m]	23.3×10^{-3}	-	-
고유저항 [Ω/m]	1.69×10^{-8} (20°C일때)	0.1×10^{10}	-
고유저항 온도계수	0.00393 (20°C일때)	-	-
밀도 [kg/m ³]	8300 (20°C일때)	1380 (20°C일때)	1.205 (20°C일때)
비열 [kJ/kg · K]	0.419 (20°C일때)	0.96 (20°C일때)	1.006 (20°C일때)
정격전류 [A]	8	-	-

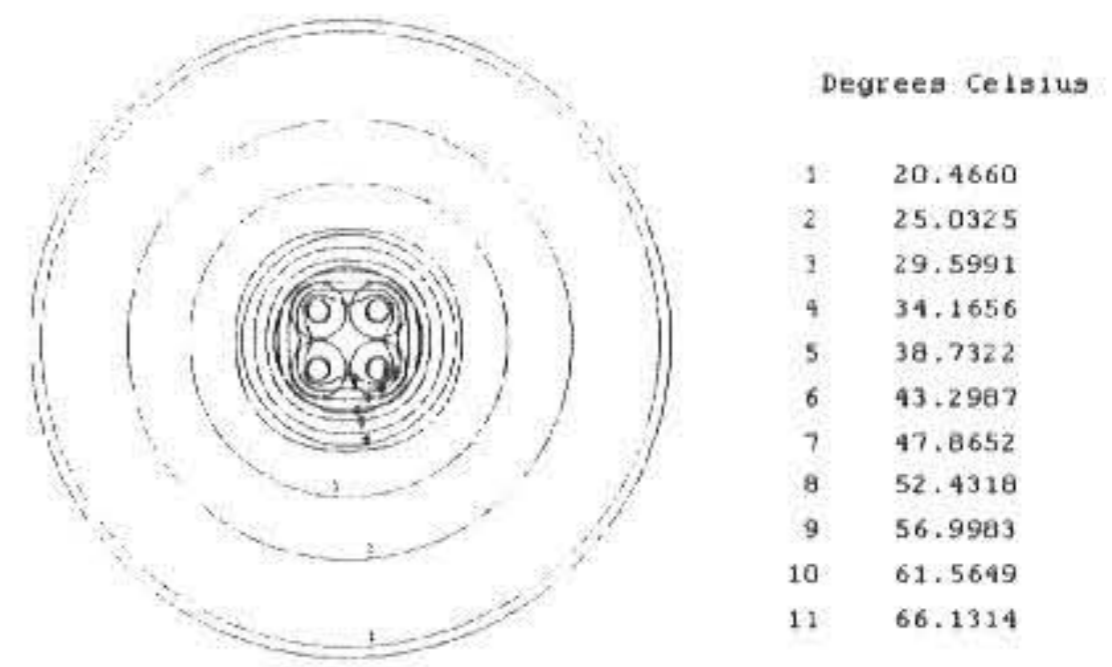
3 전선의 온도해석

본 논문에서는 전계-열계 유한요소 해석프로그램인 Flux2D를 사용하였으며, Fig.2는 전선에 흐르는 전류가 8[A](정격전류)이고, 열화시간이 200초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있고, Fig.3은 전선에 흐르는 전류가 20[A](정격전류의 250%) 이고, 열화시간이 200초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있다. Fig.4는 전선에 흐르는 전류가 90[A](정격전류의 1,125%) 이고, 열화시간이 200초 일 때의 등온선 분포를 나타내고 있다.



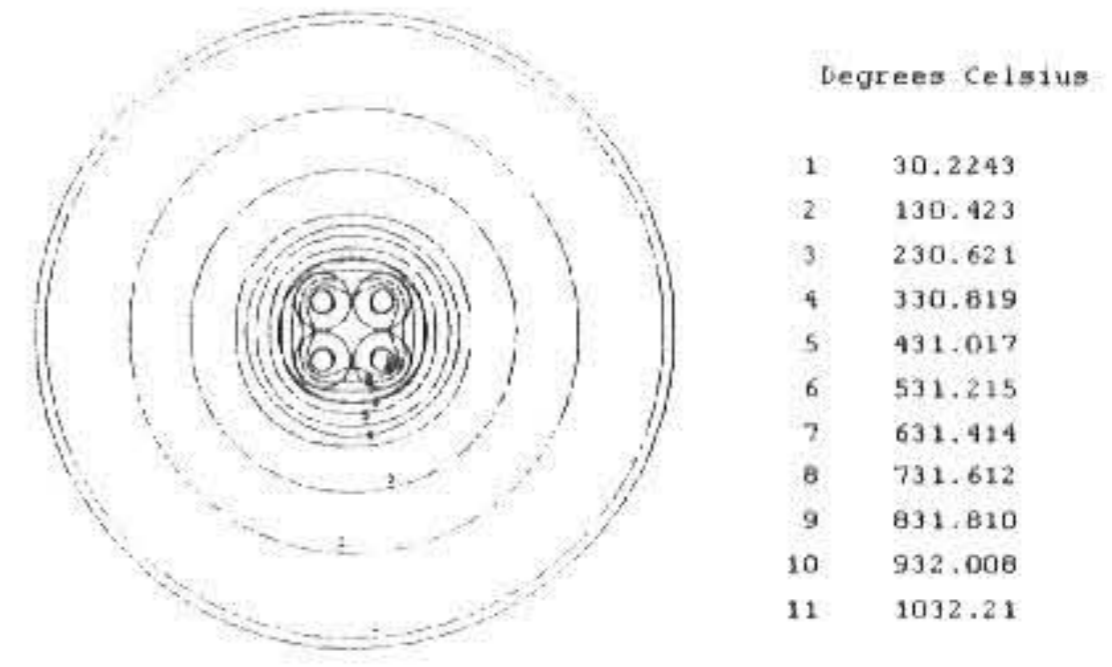
(t = 200 sec)

Fig. 2. Equi-thermal lines for rated current



(t = 200 sec)

Fig. 3. Equi-thermal lines for 20[A]



(t = 200 sec)

Fig. 4. Equi-thermal lines for 90[A]

Fig.5는 전선에 흐르는 전류크기 변화 및 시간에 따른 온도변화를 계산하기 위한 계산지점을 나타내고 있다.

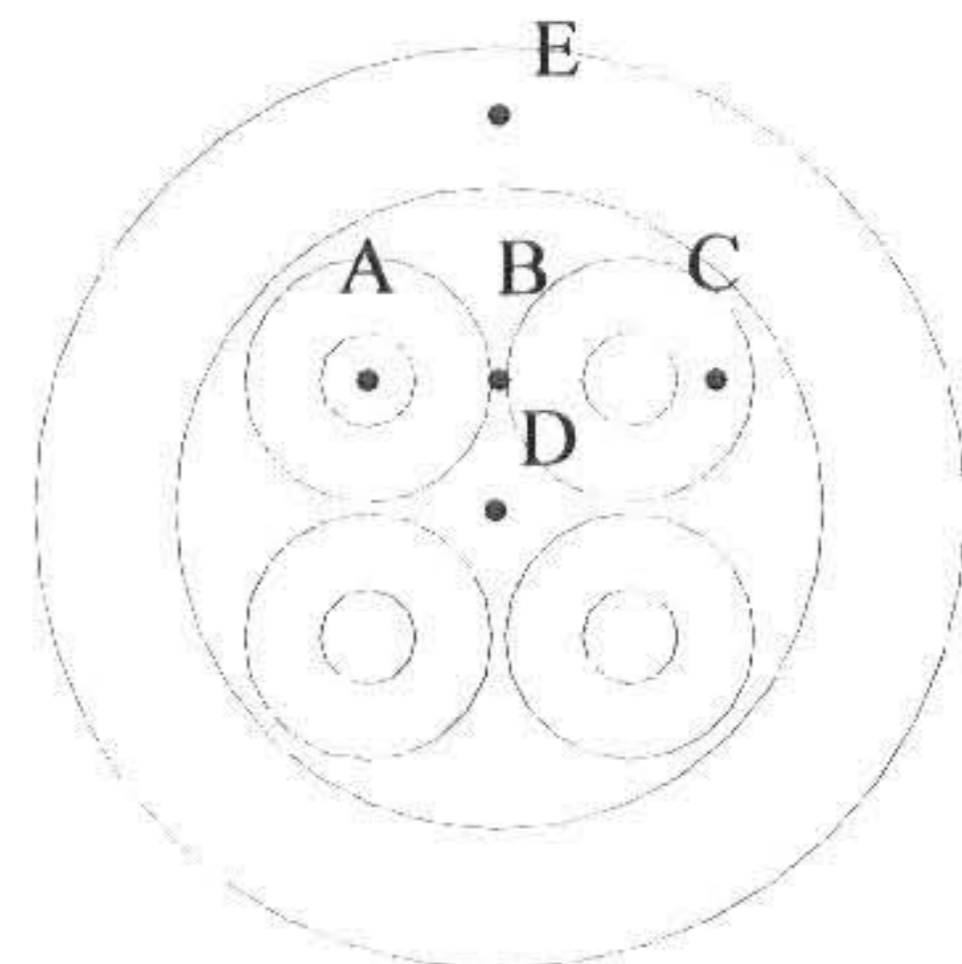
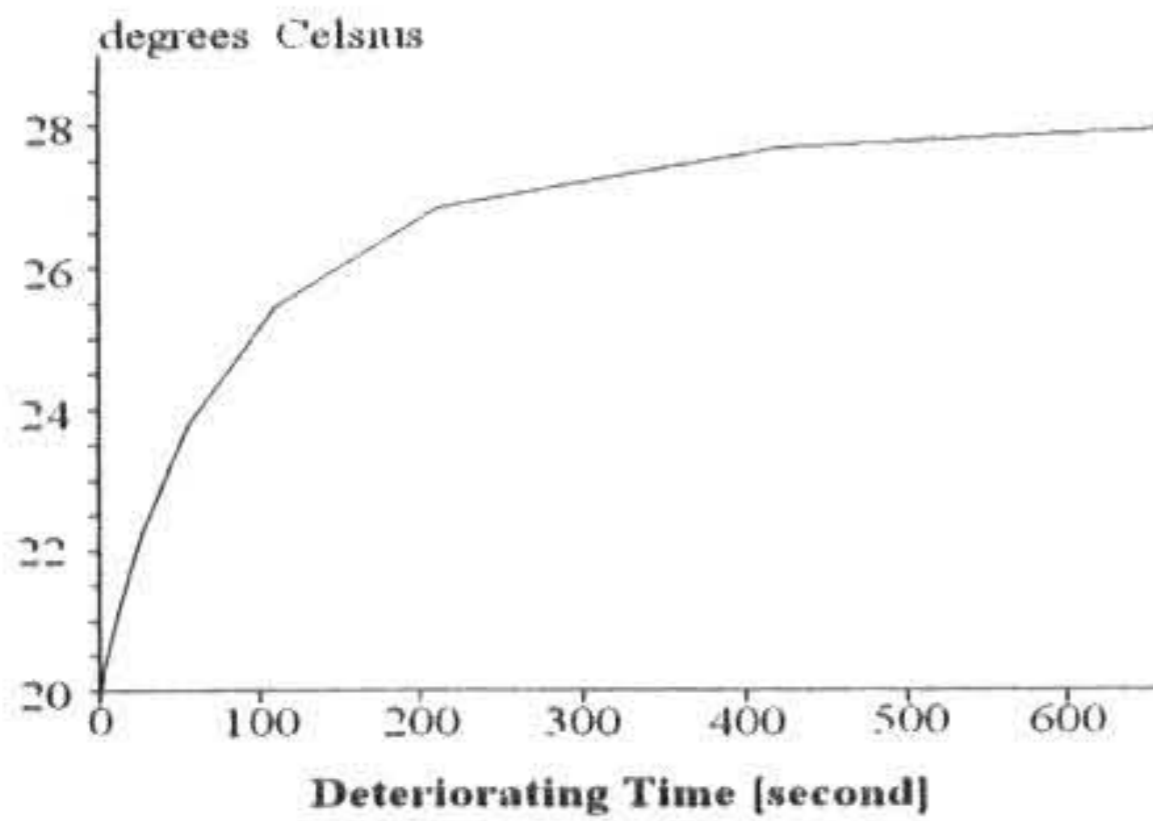


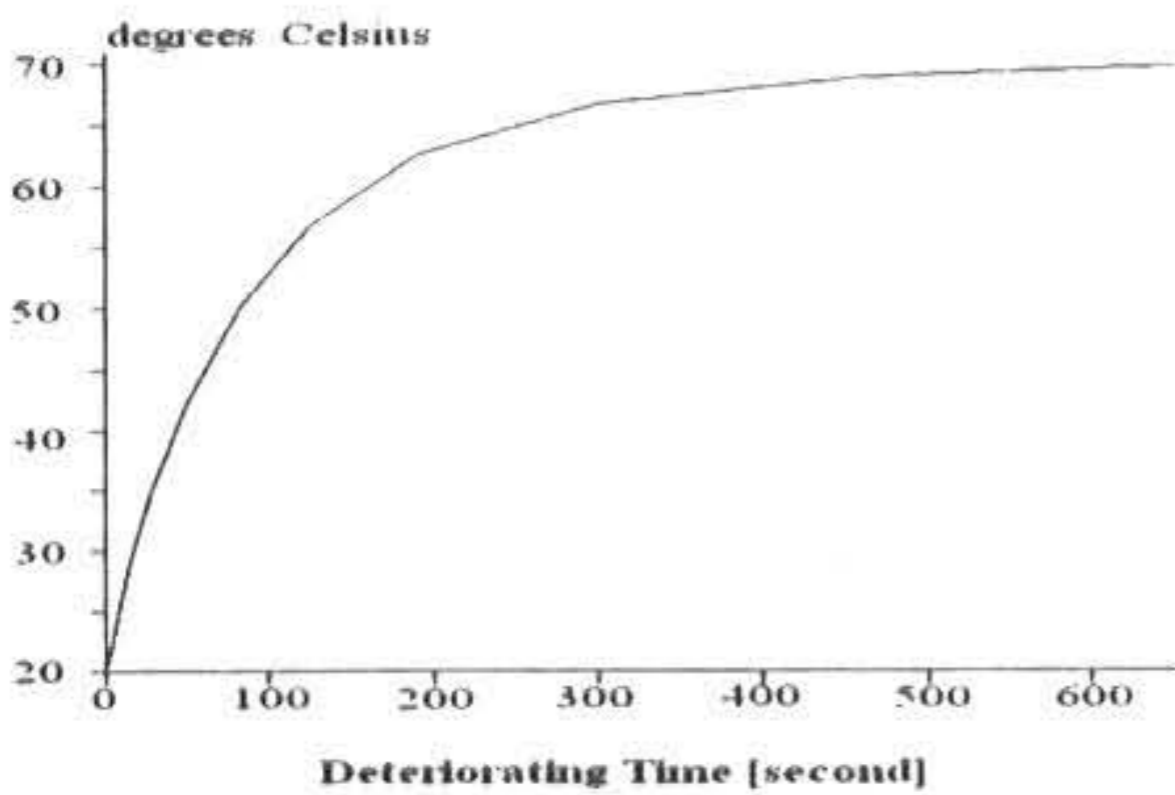
Fig. 5. Calculating points

Fig.6은 전선에 흐르는 전류가 8[A](정격전류)일 때 B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있고, Fig.7은 전선에 흐르는 전류가 20[A](정격전류의 250%)일 때 B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있으며, Fig.8은 전선에 흐르는 전류가 90[A](정격전류의 1,125%)일 때 B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다. Fig.6과 Fig.7 및 Fig.8에서 알 수 있듯이, 전류크기가 클수록 열화시간에 따른 온도상승이 커짐을 알 수 있다.



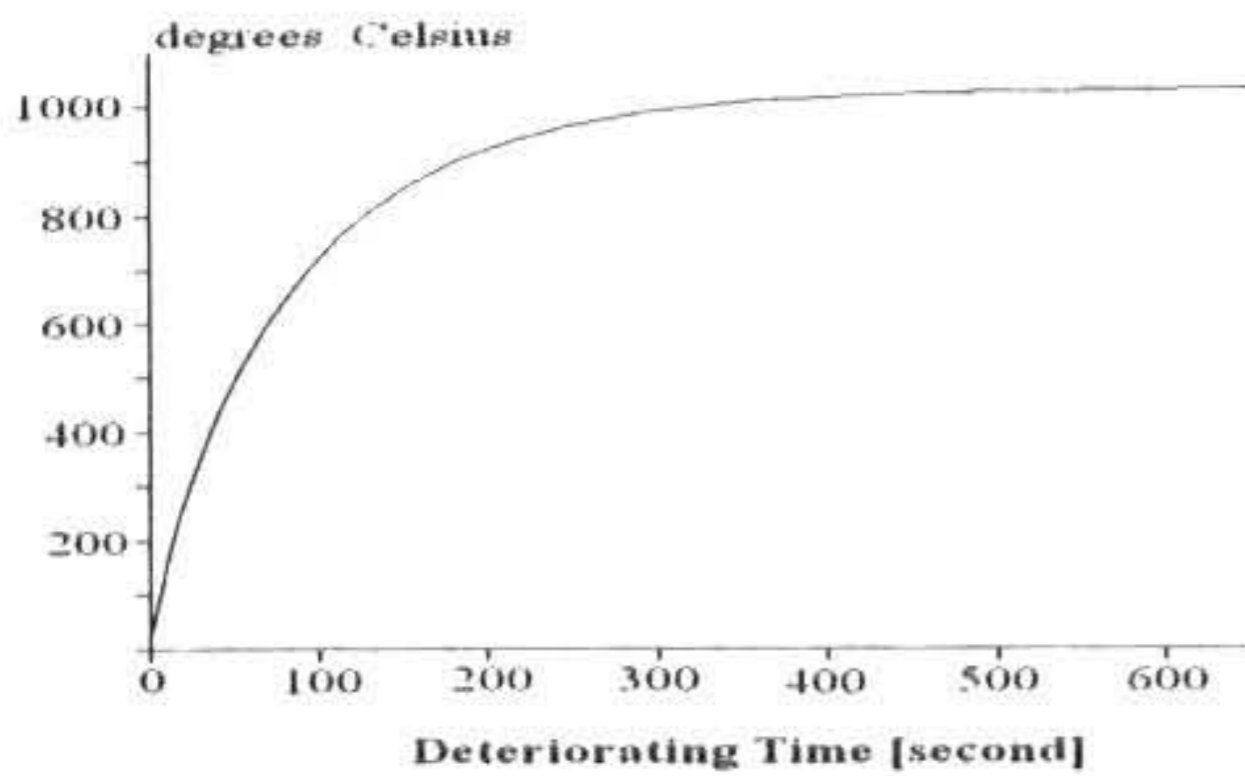
(8[A])

Fig. 6. Temperature and deteriorating time



(20[A])

Fig. 7. Temperature and deteriorating time



(90[A])

Fig. 8. Temperature and deteriorating time

Fig.9는 저압 배선선로 과부하시, 전선에 흐르는 전류크기 변화에 따른 각 지점(A, B, C, D, E)의 온도변화를 나타내고 있으며, Fig.10은 저압 배선선로 단락사고시 발생하는 단락전류의 크기, 즉 60[A]~100[A]까지의 전류 크기에 따른 각 지점의 온도를 나타내고 있다.

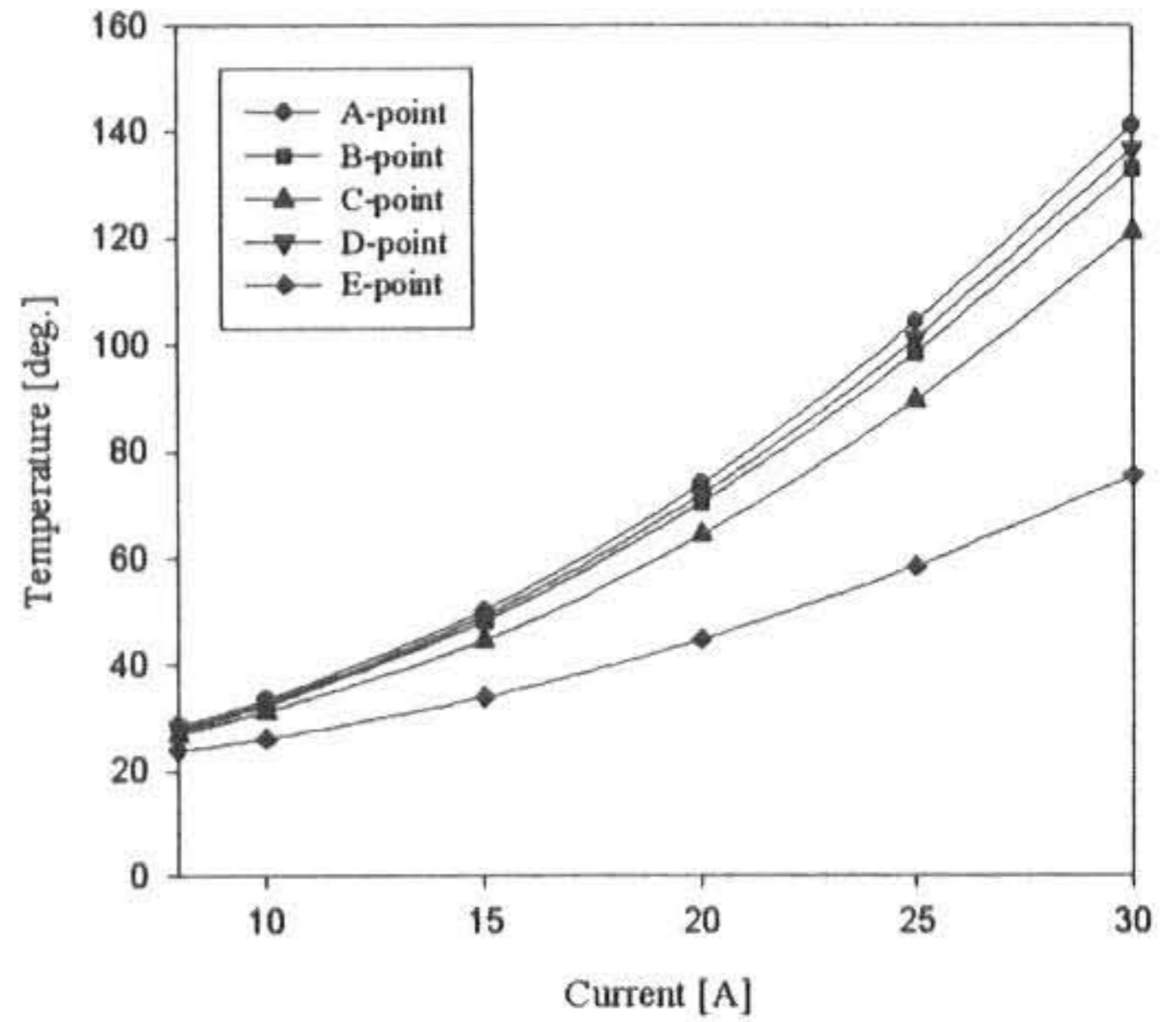


Fig. 9. Temperature and currents for overload

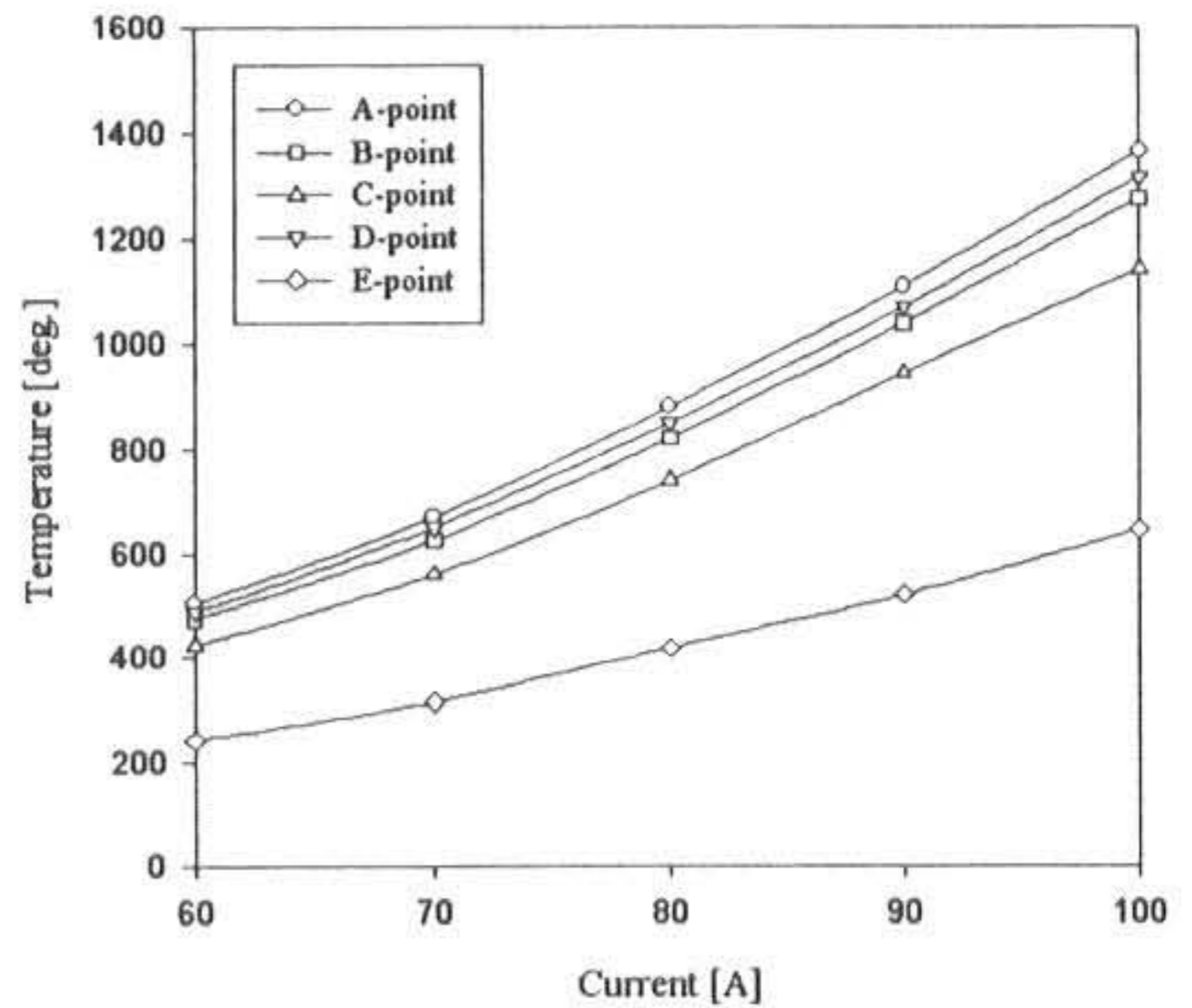


Fig. 10. Temperature and currents for short

Fig.9에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 18[A](정격전류의 225%)~20[A](정격전류의 250%) 사이에서는 온도가 약 60°C 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 전선에 흐르는 전류가 약 25[A](정격전류의 312%) 부근에서 온도가 약 100°C 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으

켜 전기화제가 발생할 것으로 판단된다. Fig.10에서 알 수 있듯이, 전선에 흐르는 전류가 약 90[A](정격 전류의 1,125 %) 부근에서 온도가 약 1,110 °C가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 용점온도(약 1080 °C) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 줄열에 의하여 전선 피복재에 착화되어 전기화제가 발생할 것으로 판단된다.

4. 결 론

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

1. 저압 배선선로의 과부하시, 전선에 흐르는 전류가 18[A](정격전류의 225 %) ~ 20[A](정격전류의 250 %) 사이에서는 온도가 약 60 °C 부근임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다.

또한 전선에 흐르는 전류가 약 25[A](정격전류의 312 %) 부근에서 온도가 약 100 °C 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 최종적으로 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화제가 발생할 것으로 판단된다.

2. 저압 배선선로 단락사고시, 전선에 흐르는 전류가 약 90[A](정격전류의 1,125 %) 부근에서 온도가 약 1,110 °C가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 용점온도(약 1080 °C) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 줄열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화제가 발생할 것으로 판단된다.

상기의 연구 자료는 전기화제의 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) 한국전기안전공사, “배선용 및 기기용 전선의 화재위험성에 관한연구”, pp.25-32, 2001.
- 3) 최충석외 5인, “전기화제공학”, 동화기술, pp.165-211, 2000.
- 4) 李聖一, 成樂晋, “電氣災害 防止工學”, 연학사, pp.269 -274, 2000.
- 5) 박용환, 양승용, “단면결합 전선에서의 화재 발생 메카니즘 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp.61-67, 2001.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

(2003년 10월25일 접수, 2004년 2월20일 채택)