Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.3, pp. 142~148 May 2004 논문 18-3-22

저압 배선선로의 과전류 사고시 전기화재분석에 관한 연구

(A Study on the Electrical fire Analysis in Overcurrent of Low Voltage Wiring)

이상호* · 오홍석
(Sang-Ho Lee · Hong-Seok Oh)

요 약

최근 전자계-열계 해석 소프트웨어의 발전에 힘입어 전자계-열계 해석 이론을 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 전기화재의 정확한 원인분석과 조사가 체계적으로 연구되고 있으나, 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 비닐 평형 코드(600 V, VFF, 2C×1.25㎟)을 모델로 하여 과전류시 전류크기에 따른 전선의 온도분포 및 이격거리에 따른 도체 상호간의 힘을 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)을 통하여 계산하며, 또한 직접 제작한 대전류 공급장치(형명 : EHT_EFAD, Korea)를 사용하여 과전류시 전류크기와 공급시간에 따른 도체 상호간의 이격거리에 대하여 실험함으로써 과전류로 인한 전기화재 원인분석 방법에 대하여 제안하고자 한다.

Abstract

Recently, with the growth of software for electromagnetic-thermal analysis, it has been studied that the precise analysis and investigation for cause of the electrical fire using computer simulation is on the basis of theory for electromagnetic-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 temperature distribution of wire to current and the force between the two conductors according to the current and the distance of the vinyl flat-type electrical wire(600 V, VFF, 2C×1.25㎟) using the finite element method(Flux2D) in a overcurrent. And we will present the cause analysis method of electrical fire by experiment for distance between the two conductors according to current and time using large current supply device(Model : EHT_EFAD, Korea) in a overcurrent.

Key Words : electrical fire, overcurrent, Flux2D, finite element method

1. 서 론

오늘날 지하철, 공항 등의 대규모 공공 이용 시설 및 방폭 지역의 산업플랜트 설비 등의 급속한 산업의 발전과 생활수준의 향상으로 전기에너지의 증가 및 가전기기의 대형화가 지속적으로 진행되고 있는 추세이다. 이에 따른 부하의 급격한 증가로 인해 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 과부하와 단락에 의한 전기화재가 전체의 81.8%인 9,650건을 차지하고 있는 실정이다[1].

상기와 같이 전기화재의 발생 건수가 지속적으로

* 주저자 : 삼척대학교 소방방재학부 부교수
Tel : 033-570-6811, Fax : 033-570-6819
E-mail : shlee@samcheok.ac.kr
접수일자 : 2004년 2월 13일
1차심사 : 2004년 2월 16일, 2차심사 : 2004년 4월 12일
심사완료 : 2004년 5월 14일

크게 증가하고 있으나, 전기화재 발생 원인의 명확한 분석과 조사는 여전히 규명하기 어려운 실정이다. 전기화재는 국민의 생명과 재산에 막대한 피해를 주는 재해이며, 특히 연소 확대에 의하여 사회에 영향을 미치고 혼란을 가중시키게 된다. 이러한 전기화재의 억제 및 예방을 위해서는 정확한 전기화재 원인 분석 및 조사를 통하여 동종 · 유사 재해를 방지하는 것이 최상의 대책인 것으로 사료된다[2]~[5].

그러나 현재 전기화재 원인분석 및 조사방법은 일반적으로 전선에 대한 용융흔의 육안검사와 금속학적 조직검사 등의 현장조사와 실험만으로 이루어짐으로써 다양한 전기화재 원인에 대한 완벽한 분석과 조사가 매우 미흡한 실정이다[6].

따라서 본 논문에서는 상기의 상황에 기초해서 국내의 비닐 평형 코드(600 V, VFF, 2C×1.25mm^2)을 모델로 하여 과전류시 전류크기에 따른 전선의 온도분포[7][8] 및 이격거리에 따른 도체 상호간의 힘[9][10]을 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)을 통하여 계산하며, 또한 대전류를 일정시간 동안 공급 가능한 대전류 제어 시스템 즉, 대전류 공급 장치를 사용하여 과전류시 전류크기와 공급시간에 따른 도체 상호간의 이격거리에 대하여 실험함으로써 과전류 사고시 전기화재 원인분석과 조사방법의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션

2.1 전선의 온도분포 해석이론

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

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

여기서, $T = T(x, y, z, t)$는 온도로써 공간과 시간의 함수이다. 또한 ρ는 물질밀도이며, C_p는 비열이고, λ와 Q는 각각 열전도율과 단위시간에 단위 체적당 공급되는 열량, 즉 발열율이다.

또한, 해석대상을 유한한 요소로 분할하고, 요소내의 온도분포를 식(2)와 같이 나타낸다.

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

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.

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

여기서, 상부첨자 Ts는 전치행렬을 나타내며, Ω^e는 요소영역을 나타낸다.

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

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

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.

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

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.

그리고 식(1)의 Q를 계산하기 위한 전선도체의 발생 주울 손실 P_l은 도체에 흐르는 전류와 도체저항과의 관계에 의해 식(6)과 같으며, P_l로 인해 발생한 열 Q는 방사에 의해 절연피복(PVC)으로 열이

전달된다. 또한, 절연피복에서의 열은 대기중으로 방사 및 대류에 의해 열전달 되어진다.

$$P_l = I^2 \times R(T) \tag{6}$$

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

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

단, ρ_e는 고유저항이고, α_e는 고유저항 온도계수이다.

2.2 전선 상호간의 힘 해석이론

정자계에서 맥스웰 방정식과 보조 방정식 및 벡터이론에 의하여 정리하면 식(8)과 같은 정자계에서의 지배방정식이 도출된다.

$$\nabla^2 A = -\mu J \tag{8}$$

여기서, J는 전류밀도이며 A는 자기벡터포텐셜을 나타낸다.

2차원장의 정자계를 해석하기 위해서 변분원리에 의한 유한요소법을 적용하는 경우, 우선 2차원 영역 S에서 식(9)와 같은 범함수를 구해야 한다.

$$\chi = \int\int_s \frac{1}{2\mu}\{(\nabla \times A)\cdot(\nabla \times A)\}\,dx\,dy - \int\int_s J \cdot A\,dx\,dy \tag{9}$$

식(9)의 범함수를 최소로 하는 조건인 식(10)으로부터 미지의 자기 벡터포텐셜이 구해진다.

$$\frac{\partial \chi}{\partial A_{ie}} = \sum \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial A_{ie}} = 0 \tag{10}$$

또한, 각 요소에서의 자속밀도 $B^{(e)}$는 $B^{(e)} = \nabla \times A^{(e)}$ 에 의하여 식(11)과 같이 주어진다.

$$B^{(e)} = \frac{\partial A^{(e)}}{\partial y_x} - \frac{\partial A^{(e)}}{\partial x_y} \tag{11}$$

본 논문에서는 도체 상호간의 힘을 계산하기 위하여 맥스웰 응력법을 이용하였으며, 전자력 밀도 fw는 전류밀도 J 와 자속밀도 B 에 의하여 식(12)와 같이 표시된다.

$$f_W = J \times B \qquad [N/m^3] \tag{12}$$

따라서 체적 V인 물체가 자기장에 의해 작용받는 힘 Fw는 식(13)과 같이 주어진다.

$$F_W = \int_v f_W = \int_v \frac{1}{\mu_0}(\nabla \times B) \times B\,dv \tag{13}$$

식(13)에 벡터이론과 Gauss-Green정리로부터 전선 상호간의 힘은 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$F_W = \int_s \frac{1}{\mu_0}[B(B\cdot n^*) - \frac{1}{2}B^2 n^*]\,ds = \int_s P\,ds \tag{14}$$

여기서 P는 표면응력이며, n^* 는 표면에 대한 수직외향 단위벡터이다.

2.3 전선 온도분포 및 상호간의 힘

그림 1은 배선선로의 과전류시 전선의 온도분포 및 도체 상호간의 힘을 계산하기 위한 유한요소 모델을 나타내고 있으며, 표 1은 전선과 절연물의 특성치를 나타내고 있다.

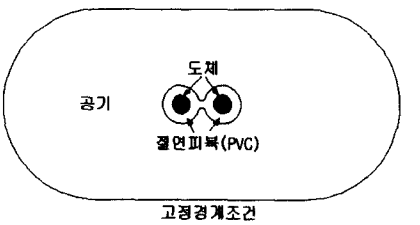
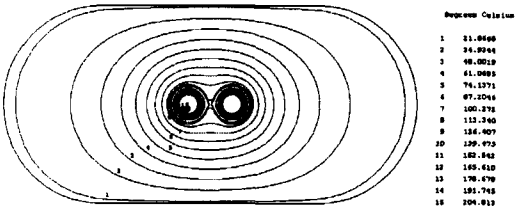


그림 1. 전선의 유한요소 모델
Fig. 1. The FE model of electrical wire

표 1. 전선과 절연물의 특성치
Table 1. The specification of electrical wire and insulation materials

	도 체	절연피복	공 기
단면적 [mm2]	1.25	-	-
두 께 [mm]	-	0.8	-
열전도율 [W/m · K]	398	0.15	0.025
물질밀도 [kg/m3]	8300	1380	1.205
도체저항[Ω/m]	14.7×10-3	-	-
고유저항[Ωm]	1.69×10-8 (20℃일 때)	0.1×1010	-
고유저항 온도계수	0.00393 (20℃일 때)	-	-
심당가닥수	50	-	-
이격거리 [mm]	3.5	-	-
정격전류 [A]	12	-	-

그림 2는 도체에 100[A]의 전류를 20초간 흘렸을 때, 전선의 등온선 분포를 나타내고 있다.



(t=20[sec])

그림 2. 등온선의 분포도(100[A])
Fig. 2. The distribution of equi-thermal lines for 100[A]

그림 3은 도체에 흐르는 전류크기의 변화에 따른 각 지점(A, B, C)의 온도를 나타내고 있다.

그림 3에서 알 수 있듯이, 도체에 흐르는 전류가 40[A](정격전류의 333[%]) 부근에서 피복온도(B지점, C지점)가 약 60[℃]임으로 인해 전류가 장시간 계속 흐르게 되면 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 도체에 흐르는 전류가 약 60[A](정격전류의 500[%]) 부근에서 피복온도(B지점, C지점)가 약 100[℃] 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융될 것으로 사료되며, 이로 인해 전기배선선로가 단락을 일으켜 전기화재가 발생할 것으로 판단된다. 그리고 전류가 약 175[A] (정격전류의 1458[%]) 부근에서 도체온도(A지점)가 약 1,100[℃]가 된다. 따라서 도체의 발생온도가 융점온도(약 1080[℃]) 이상이 됨으로 인해 도체는 용융될 것으로 기대되며, 이때 발생하는 주울열에 의하여 전선피복재에 착화되어 전기화재가 발생할 것으로 판단된다.

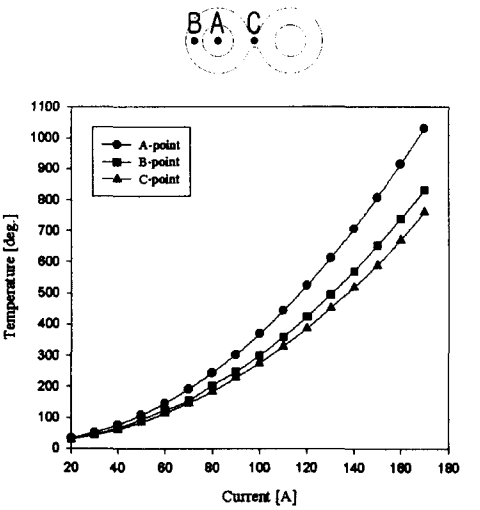


그림 3. 전류에 따른 온도곡선
Fig. 3. Temperature curve for current

그림 4는 100[A] 전류(반대방향) 인가시, 전선 상호간의 자속선을 나타내고 있다. 그림 4에서 구한 자속밀도 값으로부터 도체 상호간의 힘을 계산할 수 있다.

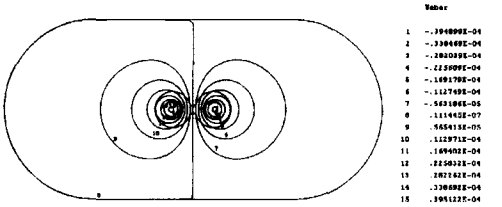


그림 4. 자속선(100[A])
Fig. 4. Magnetic flux lines for 100[A]

그림 5는 도체에 흐르는 전류 값과 도체간의 이격거리에 따른 도체 상호간의 힘을 나타내고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 도체 상호간의 힘은 도체 상호간의 이격거리에 반비례하며, 전류가 클수록 도체 상호간의 힘도 큼을 알 수 있다.

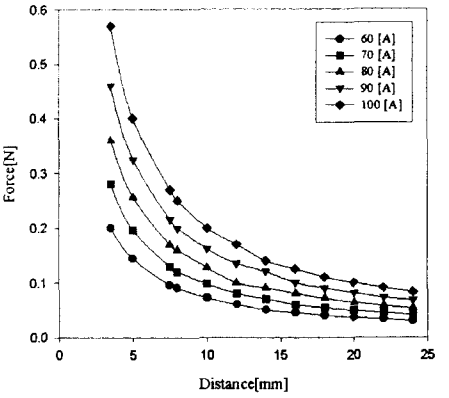


그림 5. 전류와 이격거리에 따른 힘
Fig. 5. Forces of conductor by current and distance

3. 실험 및 고찰

본 논문에서는 대전류를 일정시간 동안 공급 가능한 대전류 제어 시스템 즉, 대전류 공급 장치(형명 : EHT_EFAD, Korea)를 사용하여 일정 전류크기와 공급 시간에 따른 도체 상호간의 이격거리에 대하여 실험하였다. 그림 6은 일정 전류크기와 공급시간에 따른 도체 상호간의 이격거리를 측정하기위한 실험 장치도를 나타내고 있다.

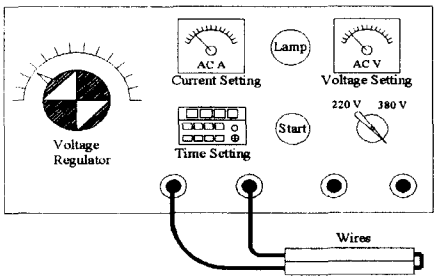
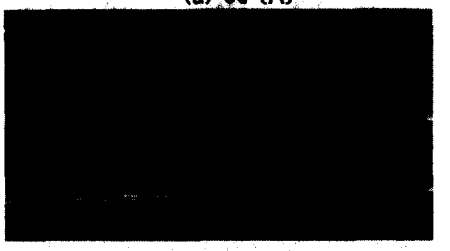


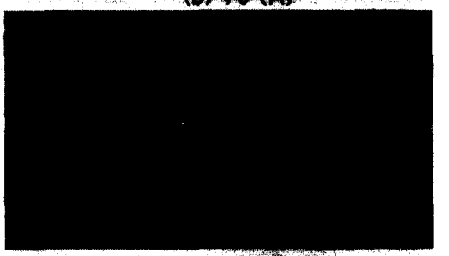
그림 6. 실험장치도
Fig. 6. Experimental apparatus

그림 7은 시간에 따른 일정 전류 값(60[A], 70[A], 80[A], 90[A], 100[A])을 공급시 전선시료의 변형상태를 나타내고 있다. 도체에 과전류가 흐르면 도체 상호간의 힘이 작용하여 도체가 이격되어짐을 확인할 수 있었으며, 이는 전류 값에 따른 도체 상호간의 힘과 피복의 열화시간에 기인하는 것으로 사료된다.

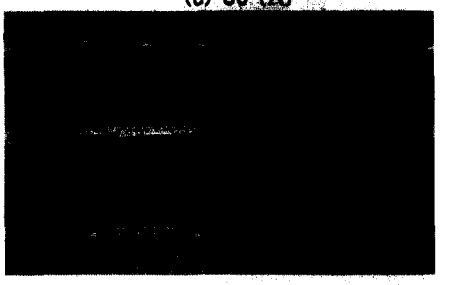
(a) 60 [A]



(b) 70 [A]



(c) 80 [A]



(d) 90 [A]

(e) 100 [A]

그림 7. 전류와 공급시간에 따른 전선시료
Fig. 7. Wires for current and time

그림8은 공급시간에 따른 A 지점의 온도 특성을 나타내고 있으며, 그림9는 도체에 흐르는 전류 값과 공급시간에 따른 도체 상호간의 이격거리를 측정한 값을 나타내고 있다. 그림8과 그림9에서 알 수 있듯이, 도체 상호간의 이격거리는 전선의 온도특성과 매우 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있었으며, 또한 전류 값이 클수록 공급시간에 대한 도체 상호간의 이격거리의 기울기가 커짐을 확인하였다. 따라서 상기의 결과는 전기화재 원인분석 및 조사를 위한 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

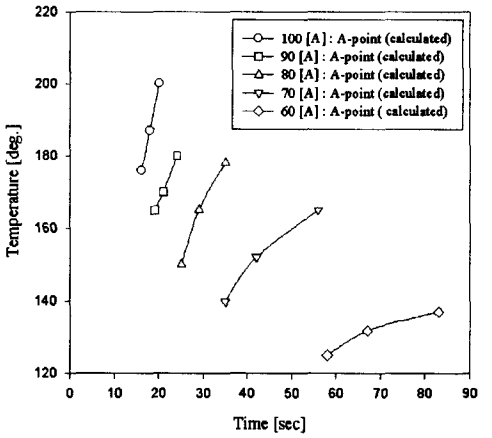


그림 8. 공급시간에 따른 전선의 온도
Fig. 8. Temperature of conductor for time

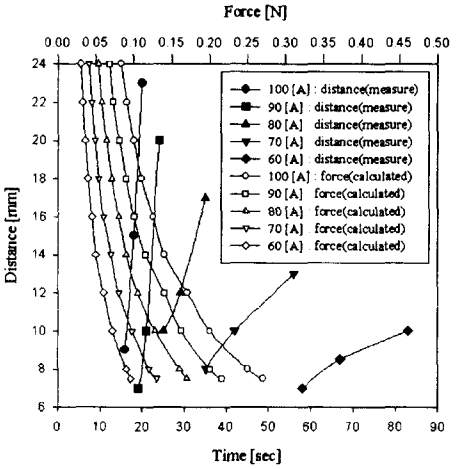


그림 9. 전류와 공급시간에 따른 이격거리
Fig. 9. Distance for current and time

4. 결 론

본 논문에서는 과전류시 전류크기에 따른 전선의 온도분포 및 이격거리에 따른 도체 상호간의 힘을 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)을 통하여 계산하였으며, 또한 대전류를 일정시간 동안 공급 가능한 대전류 제어 시스템 즉, 대전류 공급 장치를 사용하여 과전류시 전류크기와 공급시간에 따른 도체 상호간의 이격거리에 대하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 도체 상호간의 힘을 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)을 통하여 계산한 결과, 도체 상호간의 힘은 도체 상호간의 이격거리에 반비례하며, 전류가 클수록 도체 상호간의 힘도 큼을 알 수 있다.

2. 도체 상호간의 이격거리는 전선의 온도특성과 매우 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있었으며, 또한 전류 값이 클수록 공급시간에 대한 도체 상호간의 이격거리의 기울기가 커짐을 확인하였고 이는 전류 값에 따른 도체 상호간의 힘과 피복의 열화시간에 기인하는 것으로 사료된다.

상기의 연구결과는 전기화재의 정확한 원인분석과 조사에 매우 유용한 기초 자료가 될 것으로 사료되며, 향후 다양한 종류의 전선에 대한 실험을 통하여 종합적인 분석이 이 필요할 것으로 사료된다.

References

[1] 행정자치부 소방국, 2000 화재 통계 연보, 2001.
[2] 최충석외 5인, "전기화재공학", 동화기술, pp.165~211, 2000.
[3] 이상호, "전기화재의 발생원인 및 분석 - 누전차단기의 동작특성을 중심으로 -", 한국화재소방학회지, 제17권, 2호, pp.1~5, 2003.
[4] 오홍석, "전기화재의 발생원인 및 분석에 관한 연구 - 전선의 열해석을 통하여 -", 한국화재소방학회지, 제16권, 4호, pp.72~76, 2002.
[5] 박용환, 양승용, "단면결함 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", 한국화재소방학회추계학술대회 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] 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.
[9] K. Rechertert, et.al, "The Calculation of Forces and Torques within Numerical Magnetic Field Calculation Method", Proc. of COMPUMAG, pp.64-73, 1976.
[10] J. Mizia, K. Adamiak, A.R. Eastham and G.E. Dawson, "Finite Element Force Calculation : Comparison of Methods for Electric Machines", IEEE Trans. on MAG, Vol.24, No.1, pp.447-450, 1988.

◇저자소개◇

이상호 (李相鎬)
1959년 7월 13일생. 1982년 영남대 전기 공학과 졸업(학사). 1988년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 삼척대 제2공학부 소방방재학부 부교수.

오용석 (吳鴻錫)
1969년 1월 9일생. 1992년 영남대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주)이맥스하이테크 대표이사.