

전기화재의 감식에 관한 연구
-과전류 사고시 전선의 이격거리 분석을 통하여-
A Study on the Identification of Electrical Fire
-Focused on Distance Analysis of Electrical Wires by Overcurrent-

이상호[†] · 김준식* · 오홍석**

Sang-Ho Lee[†] · Joon-Sick Kim* · Hong-Seok Oh**

방재기술전문대학원, *방재기술대학원, **(주)이맥스하이테크 대표이사
(2004. 2. 4. 접수/2004. 5. 20. 채택)

요 약

본 논문에서는 비닐 캡타이어 전선(600 V, VCTFK, 2C×1.25 mm²)을 모델로 하여 과전류시 전류크기 및 이격거리에 따른 전선 상호간의 힘을 유한요소법(FEM)을 통하여 계산하며, 또한 직접 제작한 대전류 공급 장치(형명 : EHT_EFAD, Korea)를 사용하여 과전류시 전류크기와 공급시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리에 대하여 실험함으로써 과전류로 인한 전기화재 감식시 기초 자료로 활용하고자 한다.

ABSTRACT

In this paper, we have simulated the force between the two electrical wires using the finite element method(FEM) according to the value of current and distance when overcurrent flows in the vinyl-insulated vinyl-cabtyre cord(flat-type, 600 V, VCTFK, 2C×1.25 mm²). And we will present the basic data for the identification of electrical fire by experiment for maximum distance between the two wires according to current and time using large current supply device(Model : EHT_EFAD, Korea) in case of overcurrent.

Keywords : VCTFK, Overcurrent, Electrical fire, FEM

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 단락 사고 발생시 전선에는 매우 큰 전류가 흐름으로 인해 발생하는 줄열에 의하여 전선피복에 착화되어 전기화재가 일어난다. 또한 과부하시, 전선에 허용전류보다 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 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 된다.^{2,4)}

[†] E-mail: shlee@samcheok.ac.kr

그리고 현재 전기화재 원인분석 및 조사방법은 일반적으로 전선에 대한 용융흔의 육안검사와 금속학적 조직검사 등의 현장조사와 실험만으로 이루어짐으로써 다양한 전기화재 원인에 대한 예측과 분석이 다소 미흡한 실정이다.⁵⁾

따라서 본 논문에서는 상기의 상황에 기초해서 국내의 비닐 캡타이어 전선(600 V, VCTFK, 2C×1.25 mm²)을 모델로 하여 과전류시 전류크기 및 이격거리에 따른 전선 상호간의 힘^{6,10)}을 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)을 통하여 계산하고자 한다. 또한 대전류를 일정시간 동안 공급 가능한 장치를 사용하여 과전류시 전류크기와 공급시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리에 대하여 실험함으로써 과전류로 인한 전기화재 감식시 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 컴퓨터시뮬레이션

2.1 지배방정식의 도출

정자계에서 지배방정식을 도출하기 위한 맥스웰 방정식 및 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

여기서 \mathbf{H} 와 \mathbf{B} 는 각각 자계의 세기 및 자속밀도이고, \mathbf{J} 는 전류밀도이다. 또한 자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

식 (1)에서부터 식 (4)를 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (5)$$

식 (5)를 벡터이론에 의하여 정리하면 식 (6)과 같은 정자계에서의 지배방정식이 도출된다.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (6)$$

2차원장의 정자계를 해석하기 위해서 변분원리에 의한 유한요소법을 적용하는 경우, 우선 2차원 영역 S 에

서 식 (7)과 같은 범함수를 구해야 한다.

$$\chi = \iint_S \frac{1}{2\mu} \{(\nabla \times \mathbf{A}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A})\} dx dy - \iint_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} dx dy \quad (7)$$

식 (7)의 범함수를 최소로 하는 조건인 식 (8)로부터 미지의 자기 벡터포텐셜이 구해진다.

$$\frac{\partial \chi}{\partial A_{ie}} = \sum \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial A_{ie}} = 0 \quad (8)$$

또한, 각 요소에서의 자속밀도 $\mathbf{B}^{(e)}$ 는 식 (4)에 의하여 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{B}^{(e)} = \frac{\partial \mathbf{A}^{(e)}}{\partial y_x} - \frac{\partial \mathbf{A}^{(e)}}{\partial x_y} \quad (9)$$

따라서 요소내의 자속밀도의 크기는 식 (9)로부터 식 (10)과 같다.

$$B^{(e)} = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{A}^{(e)}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{A}^{(e)}}{\partial x}\right)^2} \quad (10)$$

본 논문에서는 전선 상호간의 힘을 계산하기 위하여 맥스웰 응력법을 이용하였으며, 전자기 밀도 \mathbf{f} 는 전류 밀도 \mathbf{J} 와 자속밀도 \mathbf{B} 에 의하여 식 (11)과 같이 표시된다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad [\text{N/m}^3] \quad (11)$$

따라서 체적 V 인 물체가 자기장에 의해 작용받는 힘은 식 (12)와 같다.

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} = \int_V \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} dv \quad [\text{N}] \quad (12)$$

식 (12)에 벡터정리와 Gauss-Green정리로부터 전선 상호간의 힘은 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \int_S \frac{1}{\mu_0} \left[\mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}^*) - \frac{1}{2} B^2 \mathbf{n}^* \right] ds \\ &= \int_S \mathbf{P} ds \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 \mathbf{P} 는 표면응력이며, \mathbf{n}^* 는 표면에 대한 수직의 향 단위벡터이다.

2.2 전선 상호간의 힘

Fig. 1은 배선선로의 과전류시 전선의 자계 및 전선 상호간의 힘을 계산하기 위한 유한요소 모델을 나타내고 있다. Table 1은 전선과 절연물의 특성 값을 나타내고 있다.

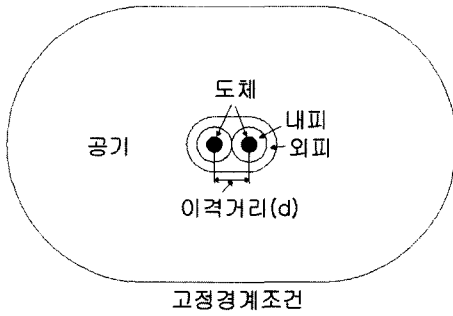
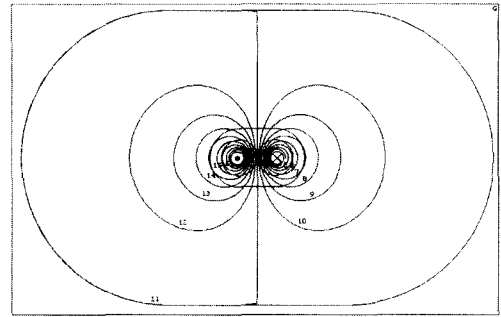
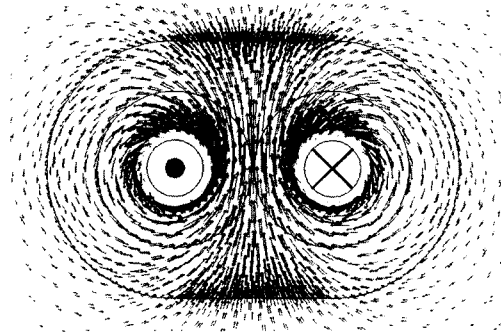


Fig. 1. The FE model of electrical wire.



(a) Magnetic flux lines



(b) Magnetic field direction

Table 1. The specification of electrical wire and insulation materials

	도체(CU)	절연피복(PVC)
단면적[mm ²]	1.25	-
두께[mm]	-	0.6(내피) 0.8(외피)
심당 가닥수	50	-
이격거리[mm]	2.5	-

Fig. 3. Magnetic flux lines for current(70 A).

부분의 매질을 구분하여 입력하게 되고 각 소구역을 자동요소 분할 방법을 이용하여 유한요소로 나누는 모듈이다. CSLMAT는 해석영역에 사용되는 각 재료의 물리적 특성을 선정하여 자료를 만들고 재료의 추가와 수정 및 저장을 다루는 모듈이다. PROPHY는 해석영역에서 사용되는 재료에 CSLMAT 모듈에서 저장한 물리적인 값을 부여하고 경계조건을 선택할 수 있는 모듈이다. 그리고 RESGEN은 시스템 행렬을 직접 푸는 모듈이며 EXPGEN은 계산된 결과를 사용자가 원하는 정보량(예: 자속밀도, 힘 등)으로 계산하여 보여주는 기능을 갖는 후처리 모듈이다.

Fig. 3은 70 A 전류(반대방향)인가시, 전선 상호간의 자속선과 자계방향을 나타내고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 전선 사이의 자계가 서로 같은 방향이기 때문에 전선 상호간에 척력이 작용될 것으로 기대된다.

Fig. 4는 전선에 흐르는 전류 값과 전선간의 이격거리에 따른 전선 상호간의 힘을 나타내고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 전선 상호간의 힘은 전선 상호간의 이격거리에 반비례하며, 전류가 클수록 전선 상호간의 힘도 클 수 있다.

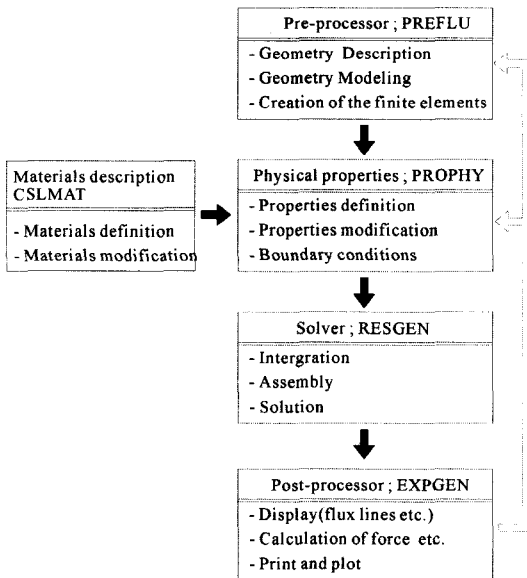


Fig. 2. Flow chart of Flux2D.

Fig. 2는 본 논문에서 사용한 정자계 유한요소 해석 프로그램(Flux2D)의 흐름도를 나타내고 있으며, Flux2D는 일반적으로 5개의 모듈(Module)로 구성되어 있다. PREFLU는 전처리로서 기하학적 구조자료와 각

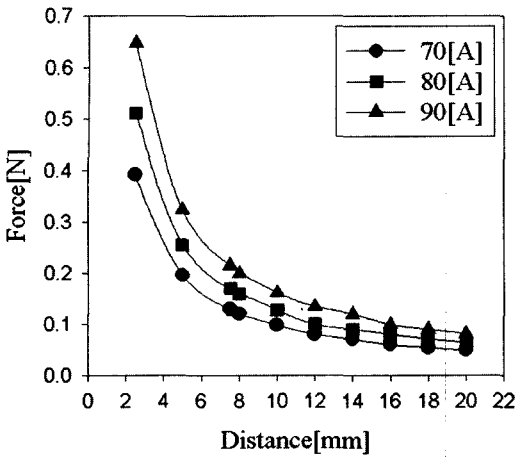


Fig. 4. Forces of wire by overcurrent and distance.

3. 실험 및 고찰

본 논문에서는 대전류를 일정시간 동안 공급 가능한 대전류 공급 장치(형명 : EHT_EFAD, Korea)를 사용하여 일정 전류크기와 공급 시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리에 대하여 실험하였다. Fig. 5는 일정 전류크기와 공급시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리를 측정하기위한 실험장치도를 나타내고 있다. Fig.

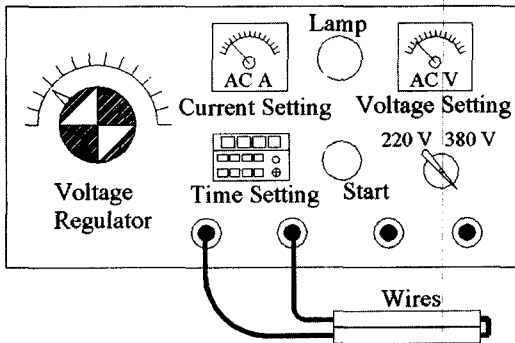


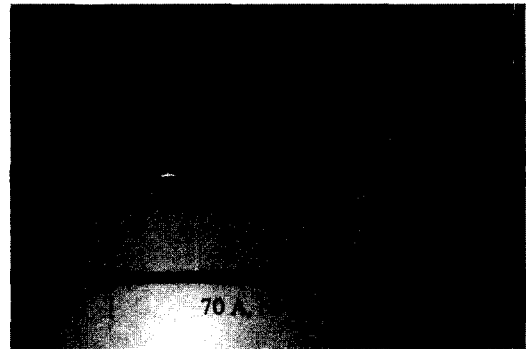
Fig. 5. Experimental block diagram for measuring distance between the two wires.

Table 2. The specification of experimental apparatus

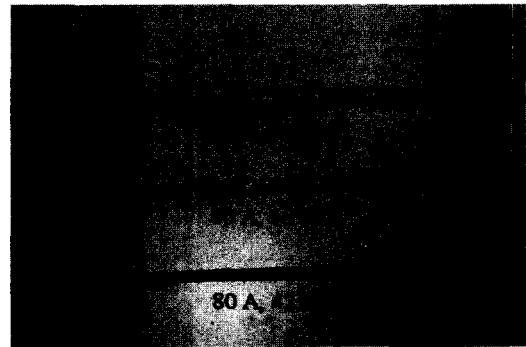
	사 양
입력전력	220 V (Max.), 6.8 A (Max.)
출력전력	10 V (Max.), 600 A (Max.)
시간설정	0~999.9 second
전압조정기	0~240 V

5에서, 전선을 단자에 연결하고 전류와 시간을 설정한 후, 시작 버튼을 누름으로써 전류와 공급시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리를 측정하였다. Table 2는 실험장치의 사양을 나타낸다.

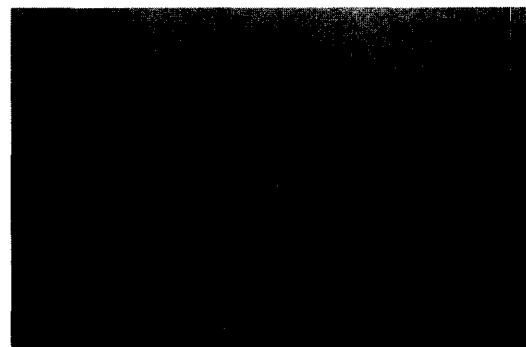
Fig. 6은 시간에 따른 일정 전류 값(70 A, 80 A, 90 A)을 공급 시 전선시료의 변형상태를 나타내고 있다. 전선에 과전류가 흐르면 전선 상호간의 힘이 작용하여 전선이 이격되어짐을 확인할 수 있었으며, 이는 전류



(a) 70 A



(b) 80 A



(c) 90 A

Fig. 6. The variety of wires according to overcurrent and time.

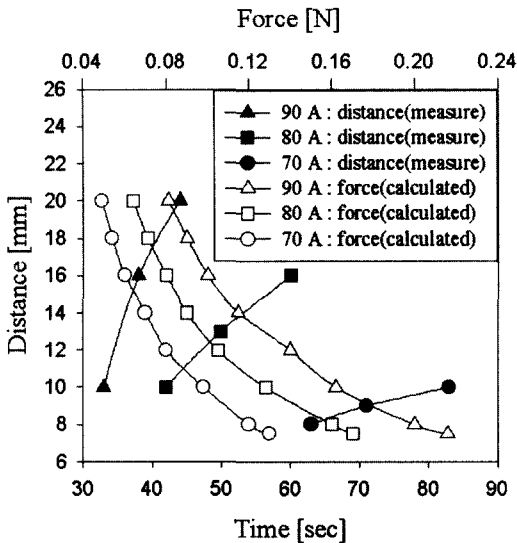


Fig. 7. The distance variety between the wires according to overcurrent and time.

값에 따른 전선 상호간의 힘과 피복의 열화시간에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 전선에 흐르는 전류 값과 공급시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리를 측정할 값을 나타내고 있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이, 전선 상호간의 최대 이격거리는 전류 값이 클수록 공급시간에 대한 기울기가 커짐을 확인하였다. 따라서 상기의 결과는 전기화재감식을 위한 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내의 비닐 캡타이어 전선(600 V, VCTFK, 2C×1.25 mm²)을 모델로 하여 전류크기 및 이격거리에 따른 전선 상호간의 힘을 유한요소법(FEM)을 통하여 계산하였다. 그리고 대전류 공급 장치를 사용하여 과전류시 전류크기와 공급시간에 따른 전선 상호간의 최대 이격거리에 대하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전선 상호간의 힘을 유한요소법(FEM)을 통하여 계산한 결과, 전선 상호간의 힘은 전선 상호간의 이격거리에 반비례하며 전류가 클수록 전선 상호간의 힘도

큼을 알 수 있다.

2. 전선 상호간의 최대 이격거리는 전류 값이 클수록 공급시간에 대한 기울기가 커짐을 확인하였으며 이는 전류 값에 따른 전선 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 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 행정자치부 소방국, 2000 화재 통계 연보(2001).
2. 최종석 외 5인, “전기화재공학”, 동화기술, pp.165-211(2000).
3. 오홍석, “전기화재의 발생원인 및 분석에 관한 연구 - 전선의 열해석을 통하여 -”, 한국화재소방학회지, 제16권, 4호, pp.72-76(2002).
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”, 한국화재소방학회추계학술대회 논문집, pp.100-108(2001).
6. K. Recherter *et al.*, “The Calculation of Forces and Torques within Numerical Magnetic Field Calculation Method”, Proc. of COMPUMAG, pp.64-73(1976).
7. 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).
8. S. Ratnajeevan H. Hoole, P. Ratnamahilan P. Hoole, “On Finite Element Force Computation from Two- and Three-dimensional Magnetostatic Fields”, J. Appl. Phys., Vol. 57, No. 1, pp.3850-3852(1985).
9. J. Penman and M. D. Grieve, “Efficient Calculation of Force in Electromagnetic Devices”, Proc. of IEE, Vol. 133, Pt. B, No. 4, pp.212-216(1986).
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).