

# 과부하 및 물리적 손상(반단선)에 의한 전선의 열적특성 해석

김성철<sup>†</sup> · 김두현

충북대학교 안전공학과

(2007. 5. 1. 접수 / 2007. 7. 30. 채택)

## Analysis for the Thermal Properties of the Electrical Wire according to Overload and Disconnection

Sung-chul Kim<sup>†</sup> · Doo-hyun Kim

Department of Safety Engineering Chungbuk National University

(Received May 1, 2007 / Accepted July 30, 2007)

**Abstract** : According to the statistical analysis on the electrical fire of 2005 years, most of electrical fire is generated from short circuit(4,985 cases), overcurrent(755 cases) leakage current(391 cases), poor contact(378 cases), disconnection(36 cases) on the electrical wiring device. The researches for the fire hazard about normal electric wiring have already been progressing in the advanced country such as USA and Japan, but Comparative study of the disconnection has not been conducted. Therefore, in this paper, we have simulated the thermal analysis for electrical wire according to deteriorating time in a normal state and disconnection with electrical wire using the electrical-thermal finite element method(Flux 3D). This paper acquire basis data of electricity fire signal by disconnection and wish to help for electrical fire cause diagnosis business.

**Key Words** : electrical fire, disconnection, deteriorating time, electrical fire cause diagnosis, Flux 3D

### 1. 서 론

'05년도 전기화재 발생건수를 원인별로 분석하면 총 8005건 중에 합선(4,985건), 과부하(755건), 누전(391건), 접촉불량(378건), 반단선(36건)순으로 화재 사고가 발생했으며 발화기인물별 발생현황으로는 전기배선 및 기구(48.39%), 가전기기(29.19%), 전기장치(10.42%) 순으로 전기배선 및 기구가 압도적으로 높다. 특히 전기배선에서의 열적변화는 과부하로 인한 것과 물리적 손상(반단선(半斷線))으로 인한 접촉면적의 불량 등이 대부분이다. 과부하로 인한 전기배선에서의 전기화재 진행은 노후화된 옥내배선의 비교체로 인하여 정격용량 초과사용, 전기기계·기구 등을 임시로 사용할 때 규격전선이 아닌 비닐코드를 사용하거나, 노후화된 전기설비와 배선 등에 전기지식이 없는 사람이 임의로 전기기구에 연결·사용함으로써 발생된다. 물리적 손상의 경우는 전기기술자나 일반사용자의 안전의식 결여로 전기배선

에 기계적인 스트레스와 책상이나 다른 물건들의 직접적 접촉에 의해 발생하고 있으며, 과부하상태가 아니더라도 전기배선의 접촉면적의 불량을 초래하게 되고 이로 인하여 국부적인 온도상승을 동반하여 화재로 이어지는 경우가 종종 발생된다<sup>1)</sup>. 대부분의 전기배선의 열적현상은 용융혼의 육안 검사와 금속학적 조직검사 등의 현장조사와 실험에 의해 이루어져 왔고, 또한 전기배선의 정상 상태(일반적인 상태)에서의 연구는 진행중에 있으나<sup>2,4)</sup> 전기배선의 정상 상태와 물리적 손상상태에서의 비교연구가 수행되지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 자체-열계 해석용 3차원 Flux 3D를 이용하여 국내 가정에서 증설이나 멀티탭 및 기계장치용 전선으로 주로 사용되고 있는 300/500V 범용 비닐평형 시스코드(vctf, KSC IEC 60227-55))를 전선용 모델로 하였고, 이에 발생하는 전류 크기 및 시간에 따른 전기배선의 열해석을 통하여 정상상태와 물리적 손상(반단선)상태에서의 물리적 특성을 비교 분석하고, 취급부주의로 인한 위험성과 전기화재 원인추정에 기초자료를 제공하고자 한다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
sasmikal@naver.com

## 2. 본 론

### 2.1. 전기화재의 발생현상

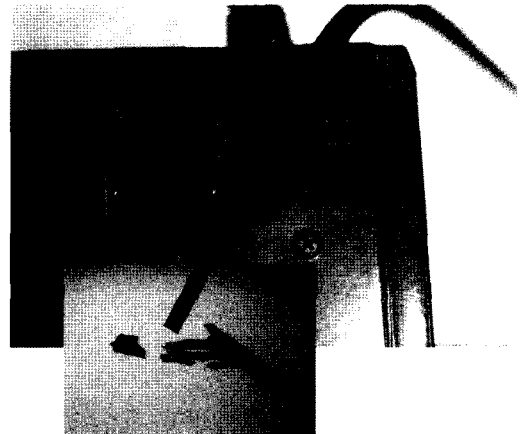
전기화재의 발생현상은 전기에너지가 변환하여 발생한 열이 발화원으로 되어 발생한 화재와 고장(안전장치의 부작동 등)이나 사용자의 사용방법이 부적절한 요인으로 발생한 화재로 나누어진다. 전기에너지가 변환하여 발생하는 열의 종류에는 주울열(joule heat)이나 방전스파크에 의한 열 등이 있고, 주울열이 발생하는 요인으로서의 첫째로, 단락이나 지락 등과 같이 전기회로 외의 누설에 의한 충전부분의 도체 접촉 등이 있다. 둘째로, 중선선 단선과 같은 배선의 1선단선이나 모터의 과부하 운전 등의 부하증가, 물리적 손상에 의한 국부적인 저항치 증가 등의 전기적 조건 변화가 발생한다. 본 연구에서는 과부하로 인한 주울열과 물리적 손상에 의한 국부적인 저항치 증가에 대한 열적변화를 분석하고자 한다<sup>6-8)</sup>.

#### 1) 주울열

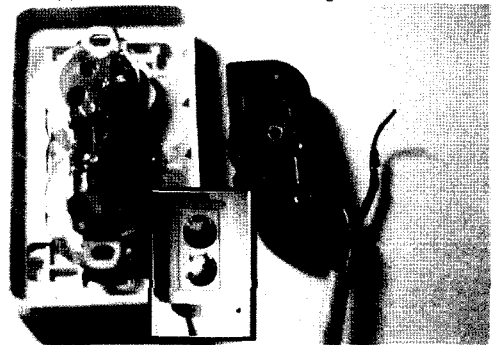
전류가 흐르기 쉬운 전선이라도 저항은 존재한다. 전선(저항체)에 전류가 흘러 전자가 저항체를 따라 이동하면 전자가 원자와 충돌하기 때문에 생기는 열 진동 에너지에 의해 주울열이 발생한다. 발화개소에서 단위시간당 주울열이 증가하는 경과로는 주울 열의 법칙에 의하면, 회로의 전류값, 또는 저항값 중 어느 것의 증가가 생기게 되는 것이다. 보통의 경우 일상생활에서 사용하는 전원전압은 일정하기 때문에, 오옴의 법칙에서 저항값이 감소하면 전류가 증가하고, 그 전류치의 2승에 비례하여 주울열이 증가한다. 이러한 경과를 거쳐서 실제 많은 전기화재가 발생하고 있다.

#### 2) 물리적 손상 (반단선 :통전로 단면적의 감소)

전선이나 코드가 완전하게 단선된 후 단면의 일부가 접촉상태로 남아있거나, 완전히 단선되지 않더라도 일부가 단선된 상태를 물리적손상 즉 반단선이라 한다. 반단선 상태로 통전시킨 경우 발화메카니즘은 도체의 저항치는 그 단면적에 반비례하기 때문에, 그 개소의 저항치가 높아지고, 국부적으로 발열량이 증가하거나 스파크가 발생하여 피복주위의 가연물로 연소가 이루어진다. 반단선은 코드와 접속플러그의 접속부근 등의 구부러짐이나 장력 등, 비교적 강한 외력이 걸리기 쉬운 개소에서 발생하기 쉬워진다. 이 때문에, 전기혼의 발생개소에 단락을



(a) Disconnection of electric heating instrument



(b) Disconnection of connector

Fig. 1. Disconnection of heat electrical wire.

발생하는 원인이 없으면 반단선의 가능성이 강하다. Fig. 1은 전열기의 이동으로 인한 전선의 물리적 충격에 의한 반단선 상태를 나타낸 그림이다.

### 2.2. 과부하 및 물리적 손상 유한요소 모델

본 연구의 전기배선의 유한요소모델은 2가지로 가정하였으며 정상상태 전선에 대한 부하증가에 따른 열적 해석과 물리적 손상 즉 반단선 상태의 한 동선의 결합에 의한 열적 해석모델로 대별되며 이에 부하조건을 동등하게 부여한 상태에서 열적변화를 분석하여 전기화재의 발화가능성을 평가하는데 목적을 두고 있다. 실험에 사용된 전선은 실생활에서 비전문가들이 증설을 목적으로 가장 많이 사용되고 있는 VCTF 비닐시스평형코드( $2 \times 1.25\text{mm}^2$ )를 연구대상으로 선정하였고, 전기배선의 주위온도는  $20^\circ\text{C}$ 를 입력하였으며, 도체에 발생한 전체 주울열의 손실  $H_T$ 는 도체에 흐르는 전류와 도체저항과의 관계는 식 (1)과 같으며  $H_T$ 로 인해 발생한 열은 방열과정에서 절연피복(PVC)으로 열이 전달된다. 또

한 절연피복의 열은 대기중으로 방열 및 대류에 의해 전달되어 진다<sup>2)</sup>.

$$H_T = I^2 R(t) \quad (1)$$

여기서  $I$ 는 도체에 흐르는 전류를 나타내며, 도체 저항  $R(t)$ 는 시간에 따른 온도의 함수로써 식 (2)와 같이 주어진다.

$$R(t) = \rho \frac{l}{A}(t) \quad (2)$$

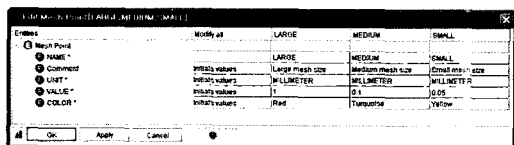
단,  $\rho$ 은 동선의 고유저항이고,  $A$ 는 동선의 단면적,  $l$ 은 전선의 길이이다<sup>2,9)</sup>. Table 1은 VCTF(300/500V) 비닐시스평형코드의 물리적 특성을 나타내었다.

Fig. 2는 매질의 크기에 따라 메쉬 크기를 large = 1mm, medium = 0.1mm, small = 0.05mm로 3가지 형태의 메쉬로 분류하였고, 전기배선에 적용한 상태를 보이고 있다.

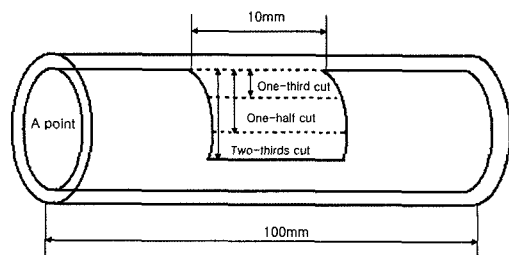
Fig. 3의 경우 VCTF 두가닥의 전선중 한가닥의 동선부분(Cu)을 반단선 시뮬레이션을 위해 1/3, 1/2, 2/3의 3가지 크기로 절단하여 분석하였고 반단선의 길이는 10mm로 전선의 길이는 100mm로 설계하였다.

**Table 1.** The specifications of electrical wire and PVC(Poly-Vinyl Chloride) materials

	Wire (Cu)	Cover (PVC)
Nominal cross sectional area [mm <sup>2</sup> ]	2×1.25	-
Construction [No./mm]	50/0.18	-
Thickness [mm]	1.5	0.6(Insulation) 1.0(Sheath)
Resistance [Ω/m]	14.7×10 <sup>-3</sup>	-
Specific resistance [Ω · m]	1.69×10 <sup>-8</sup>	0.1×10 <sup>-10</sup>
Allowable current [A]	10	-
Approx. outer diameter [mm]	3.9×6.6	



**Fig. 2.** Mesh point input of electric wire.



**Fig. 3.** Disconnection design.

### 3. 과부하 및 반단선 결과 및 분석

본 논문에서는 열계 유한요소 해석프로그램인 Flux 3D를 사용하였으며, Fig. 4는 전기배선에 흐르는 전류의 크기 변화 및 시간에 따른 온도변화를 계산하기 위한 계산지점(A, B, C)을 나타내고 있다. 세 지점 중 A지점의 정상상태와 반단선상태의 온도변화를 통하여 절연피복에 열이 전달되어 나타나는 온도특성을 분석하고자 B와 C의 지점을 설정하였다. Fig. 5는 전기배선에 흐르는 전류가 10A(정격전류)일 때 A지점에서 120분의 열화시간 동안 정상상태일 경우는 34.7°C가 나타났고 전기배선의 1/3단선된 경우 45.9°C로 나타났다. 특히 기구용 평형비닐코드의 경우, 구부러짐 외력이 가해져 소선(素線)이 잘라졌을 때, 단선률이 10%를 넘으면 그 후 급격히 단선률(斷線率)이 상승하는 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 이는 결과값에서도 알 수 있듯이 반단선(1/3 단선)일 경우 정상상태의 전구간에서 11.2°C로 상당히 높은 온도차를 보이고 있고, 열화진행 속도도 상당히 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 또한 반단선의 경우에는 1/3부분과 1/2부분에서는 약 1.8°C정도의 차를 보였고, 2/3정도 단선된 경우와 1/2부분은 2.1°C정도의 온도차를 보였다. 반단선의 1/3, 1/2, 2/3의 경우는 다소 낮은 차이를 보이고 있으나 정상상태와는 급격한 차이를 보이고 있음을 알 수 있고 열화시간이 계속 진행될 경우 반단선에 의한 발열로 전선이나 코드의 소선은 처음 1선이 용단하거나, 接·斷을 반복하여, 다른 쪽 선의 피복이 소손되면 결국 두선간에서 단락으로 진행된다. Fig. 6은 B지점의 온도 변화로 정상상태는 33°C이고 반단선 1/3부분 소선의 경우 43°C로 10°C의 차로 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 A지점의 온도 변화에 따라 B지점의 열화온도가 좌우된다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 20A(정격전류 200%)일 때 A지점 동선의 열적변화이다. 반단선의 경우 12분에 60°C로 나타났고 정상상태의 전기배선의 경우 120분으로 거의 10배 정도의 시간

차를 보이고 있으며 특히 100℃는 반단선의 경우 60분전후에 모두 나타났다.

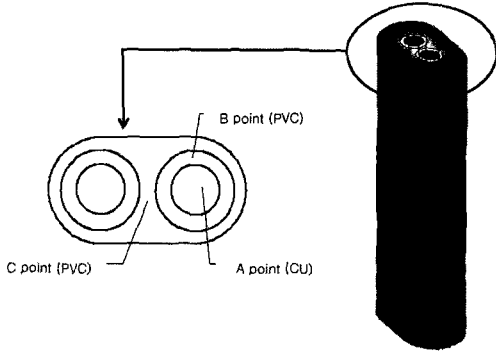


Fig. 4. Analyzing points of electric wire.

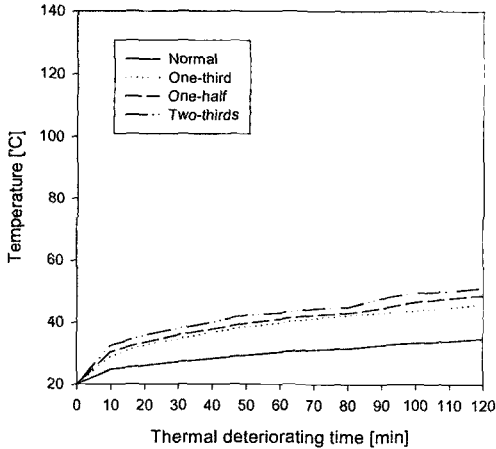


Fig. 5. Thermal analysis for normal and disconnection state according to deteriorating time(10A A point : 100%).

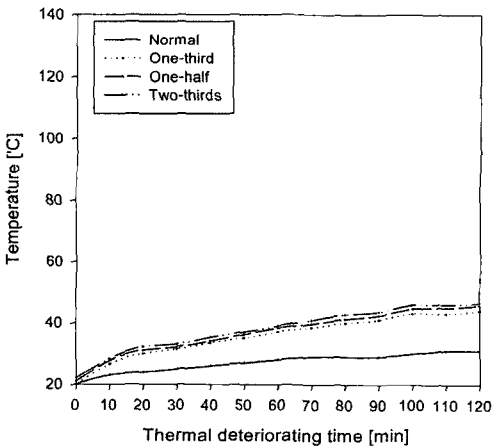


Fig. 6. Thermal analysis for normal and disconnection state according to deteriorating time(10A B point : 100%).

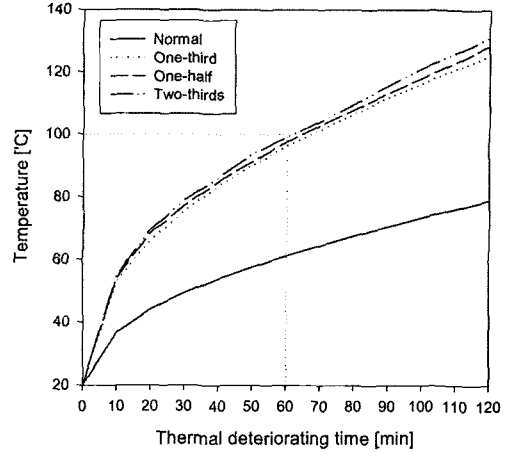


Fig. 7. Thermal analysis for normal and disconnection state according to deteriorating time(20A A point : 200%).

Fig. 8은 B지점의 열화시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 9는 전류크기 변화에 따른 반단선 및 정상상태의 A지점의 온도 특성을 보이고 있다. Fig. 10의 경우는 B지점을 분석한 그래프로 반단선의 경우 전류가 12A(정격전류의 120%)~13A(정격전류의 130%)사이에서 약 60℃로 시간이 증가함에 따라 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 정상상태의 경우는 17A(170%)~17.5(175%)에서 같은 온도 값을 보였다. 또한 반단선의 경우 전기배선에 흐르는 전류가 약 17A(정격전류의 170%) 부근에서 온도가 약 100℃ 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융이 우려되며, 이로 인한 전기배선에서 단락이 발생되어 전기화재가 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 특히 주목할 만한 것은 B

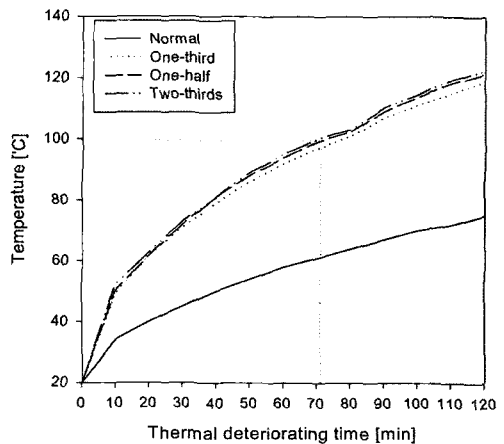


Fig. 8. Thermal analysis for normal and disconnection state according to deteriorating time(20A B point : 200%).

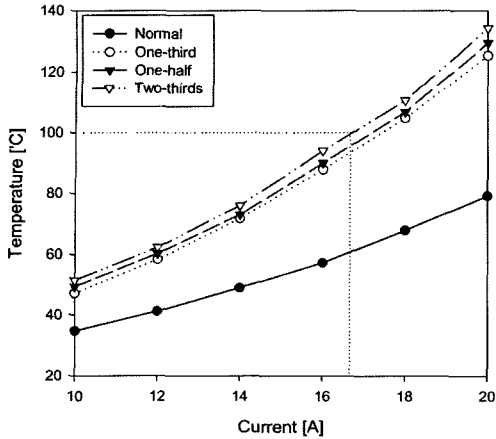


Fig. 9. Thermal analysis for normal and disconnection state according to overload(A point).

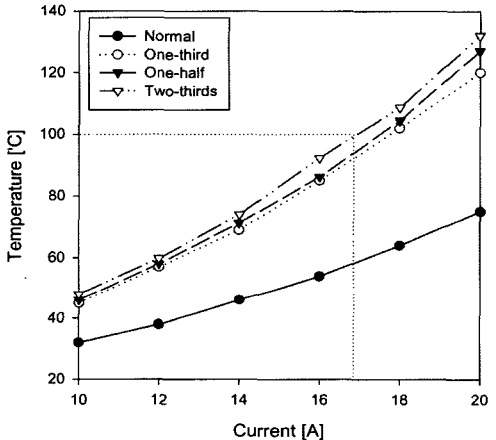


Fig. 10. Thermal analysis for normal and disconnection state according to overload(B point).

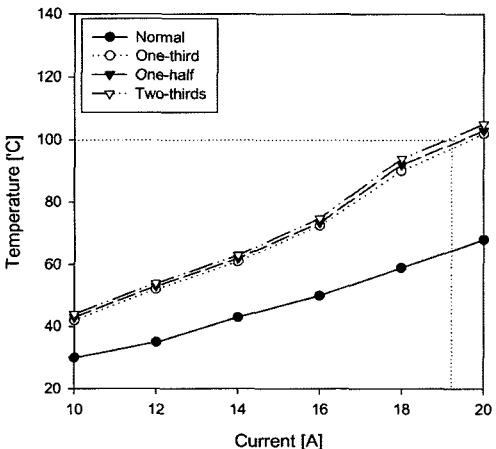


Fig. 11. Thermal analysis for normal and disconnection state according to overload(C point).

지점 17A 지점에서 반단선의 경우 100°C로 나타났고 정상상태의 전선에서는 60°C로 40°C의 온도차를 보였다. Fig. 11은 C지점의 온도특성을 보이고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 취급부주의와 기계적 결합으로 인하여 전기배선의 접촉면적불량은 전기화재를 초래하는 위험한 결과를 가져온다는 것을 알 수 있었다. 따라서 전기설비종사자나 기타 관련 종사자는 안전의식과 전기배선에서의 규격을 준수하여 전기화재를 방지할 수 있을 것이다.

### 5. 결 론

VCTF 비닐시스핑형코드(2×1.25mm<sup>2</sup>)에 대한 정상상태와 반단선 상태에서 유한요소해석을 통하여 온도특성을 비교분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 10A(정격전류 100%)의 전류를 흘렸을때 B지점의 온도는 정상상태시 33°C, 반단선 1/3부분 소실의 경우 43°C로 10°C의 온도차가 나타났다.
- 2) 전류크기 변화에 따른 반단선시 B지점의 온도를 분석한 결과, 전류가 12A(정격전류의 120%)~13A(정격전류의 130%)사이에서 약 60°C로 시간이 경과함에 따라 전선 피복재의 열화가 예상되는 것으로 나타났으며 정상상태의 경우는 17A(170%)~17.5A(175%)의 전류가 통전되었을때 같은 온도값을 보였다.
- 3) 통전전류가 17A(정격전류의 170%)인 경우 정상상태는 56°C, 반단선의 경우 약 100°C이상으로 같은 부하상태에서 44°C의 온도차가 나타났으며 반단선의 경우 전선피복재가 열화 및 용융이 우려되어 이로 인한 전기배선에서 단락이 발생되어 화재로 진행될 가능성이 있는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- 1) 한국전기안전공사, “<http://www.kesco.or.kr/>” (전기통계)
- 2) 오홍석, “전기화재발생원인 및 분석에 관한 연구(전선의 열해석을 통하여)”, 한국화재·소방학회, 제16권, 제4호, 2002.
- 3) 한국전기안전공사 전기안전연구원, “배선용 및 기기용전선의 화재위험성에 관한 연구”, 2001.
- 4) 金点鎬, “HIV 전선의 화재원인 분석에 관한 연구”, 2004.

과부하 및 물리적 손상(반단선)에 의한 전선의 열적특성 해석

- 5) 한국산업규격, “KSC IEC 60227-5” Power Cables”, IEEE, 1997.
- 6) 東京消防, “新火災調査教本 (電氣火災編)”, 2004.
- 7) Michael R, Yenchek “Thermal Modeling of Portable 8) Rob Bradley, “Cable Temperature monitoring”, NGC.
- 9) 재우기술, “<http://www.jaewoo.co.kr>”