

# VCTF와 IV전선의 반단선에 의한 화재위험성 평가를 위한 열적특성 해석

김두현<sup>†</sup> · 김성철 · 이종호 · 박종영 · 박영호\* · 이형준\*\*  
충북대학교 안전공학과 · \*동양대학교 · \*\*한국전기안전공사  
(2008. 2. 20. 접수 / 2008. 7. 30. 채택)

## Analysis of Thermal Characteristics for the Fire Risk Assessment According to Partial Disconnection on the VCTF and IV Electric Wire

Doo Hyun Kim<sup>†</sup> · Sung Chul Kim · Jong Ho Lee · Jong Young Park · Young Ho Park\* · Hyung Jun Lee\*\*

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

\*Dongyang University

\*\*KESCO

(Received February 20, 2008 / Accepted July 30, 2008)

**Abstract :** Many researches on fire risk for normal electric wiring have been pursued in advanced countries such as the USA and Japan, but comparative studies of the partial disconnection and normal state of electric wires have not been conducted. Detection system for the cause of partial disconnection is not developed and prevention countermeasure for electrical fire by the cause is not effective. Therefore, in this paper, partial disconnection characteristics on electric wires were derived and analyzed by experiment and electrical-thermal finite element method(Flux 3D) on the model wires which consist of VCTF(PVC insulated PVC sheathed Cap Tyre Flexible Cord, KS C 3304) and IV(Indoor-wire PVC, KS C 3302). VCTF is used in wiring portable electric appliances and the IV is used indoors. Interrelationships between partial disconnection premonitory symptom and current were derived and analyzed by the characteristics based on experiments and thermal analysis for electric wire according to current under normal state and 200% overload state of rated current.

**Key Words :** partial disconnection, premonitory symptom, thermal analysis, flux 3D

### 1. 서론

국내 전기화재 통계를 살펴보면 주된 전기적 원인으로 합선(단락), 과부하, 누전 등이다. 여기서 합선의 유형을 살펴보면 절연열화에 의한 단락, 접촉불량에 의한 단락, 압착손상에 의한 단락 등이다<sup>1)</sup>. 반면에 전선이나 코드가 완전하게 단선된 후 단면의 일부가 접촉상태로 남아있거나, 완전히 단선하지 않더라도 일부가 잘라져있는 상태 즉 통전로의 단면적 감소를 반단선이라 하며, 이 둘 중 접촉불량과 전선의 압착손상은 반단선의 원인임을 알 수 있다<sup>2)</sup>. 반단선은 대부분 전기배선 및 기구의 접속부에서 발생되며 국부적 저항 상승으로 인한 열적 변화를 초래한다. 전기배선에 대하여 정상상태(일반

적인 상태)에서의 열적 특성 연구와 전선에 구부림 피로에 대한 연구는 지속적으로 진행중에 있으며<sup>3-5)</sup> 반단선 연구는 실험적 논문으로 국내의 전기화재의 종류 및 원인 분석 등<sup>6-8)</sup>을 중심으로 실제실험을 통하여 기초데이터를 확보하였으나 실험과 시뮬레이션을 병행한 연구는 다소 부진하다고 할 수 있다.

도체 파손으로 나타나는 특징적 신호를 감지하기 위해서는 다양한 실험과 전기적 신호해석이 필요하다. 이를 위해 전선 도체부분을 인위적으로 단선하여 정상상태와 반단선상태를 모의하고 전류신호를 통한 과부하 정도를 분석하고 온도변화추이를 통한 열적 변화를 분석한다. 이러한 개념을 이용한 선행연구<sup>9)</sup>에 상용전선으로 주로 사용되고 있는 VCTF 전선에서 정상상태와 반단선 상태의 온도적 특성을 시뮬레이션하여 열적특성을 분석하고 그 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 VCTF 전선과 IV 전

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
dhk@chungbuk.ac.kr

선을 중심으로 실험을 추가하였고 실험값과 시뮬레이션 값을 상호 비교하여 반단선 상태의 특징적 데이터의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 전선으로는 300V 범용 비닐평형시스코드(VCTF wire : PVC insulated PVC sheathed Cap Tyre Flexible cord, KSC 3304)<sup>10)</sup>와 600V의 옥내배선용 전선(IV wire: Indoor-wire PVC, KSC 3302)<sup>11)</sup>을 선정하였으며 시뮬레이션 프로그램은 Flux 3D를 이용하였다. 반단선 실험은 가정용 주택의 차단기 능력을 감안하여 20A까지의 전류 크기 및 시간에 따른 전기배선에서의 온도변화를 측정할 열해석을 통하여 정상상태와 1/2 반단선상태에서의 물리적 특성을 비교하였고 20A 이상의 경우와 반단선의 다양한 형태인 1/3, 1/2, 2/3에 대하여 시뮬레이션하였으며 전선의 도체파손에 대한 부분을 집중 연구하였다. 또한 두 전선 모두 허용전류 이내의 온도 변화와 허용전류의 200%까지의 전류에 대한 온도변화를 분석하여 반단선과 전류, 온도특성에 대한 상관성을 도출하였다<sup>2)</sup>.

## 2. 전기배선의 반단선

반단선 상태에서는 불꽃이 발생하거나 극심한 과부하 상태로 되어 발열하게 되며 절연피복의 비닐이 녹고 주위 착화물에 의해 발화된다.

이렇게 발생된 열을 주울열이라 하며, 도체에 발생된 주울열을 식으로 표현하면 전체 주울열의 손실  $H_T$ 는 도체에 흐르는 전류와 저항과의 관계로 식 (1)과 같으며, 여기서  $H_T$ 로 인해 발생한 열은 방열전도 과정을 통하여 도체의 절연피복(PVC)으로 열이 전달된다<sup>1,12,13)</sup>.

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

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

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

여기서,  $\rho(\Omega \cdot m)$ 은 동선의 고유저항이고,  $A(mm^2)$ 는 동선의 단면적,  $l(mm)$ 은 전선의 길이이다.

일반적으로 가정이나 빌딩, 사무실, 공장 등에서 사용되는 전선은 염화비닐수지(PVC)를 주체로 한 콤파운드(compound)로 절연된 것을 사용하며, 모든 전선은 허용전류와 허용온도를 가지고 있다. 규정

이상의 과부하의 사용이나 규격 미달의 전선을 사용하게 되면, 전선 절연물의 허용온도를 초과하게 되고, 과열현상이 발생하게 된다.

과열된 전선의 도체가 외부에 노출되어 주변의 다른 도체나 금속 등에 접촉하게 되면 아크에 의한 화재가 발생할 우려가 있으며, 선간단락 등에 의해 주위의 가연물에 착화되어 화재로 이어질 수 있다<sup>3,13)</sup>.

## 3. 실험 및 유한요소 해석

반단선 실험의 목적은 시뮬레이션과의 비교 분석을 통하여 반단선 데이터의 신뢰성을 확보하기 위함이다. 본 실험에서는 VCTF 전선( $2 \times 1.25mm^2$ )과 IV 전선( $1 \times 1.6mm$ )을 실험대상으로 선정하였다.

실험장치 구성은 Fig.1에 제시하였으며 상용전원에 독일 D사의 3kW와 G사의 3kW의 두 전열기를 부하로 이용하고 부하전류는 5, 10, 15, 20A로 인가하였다. 분석장치로는 전류값을 측정하기 위해서는 일본의 H사의 클램프메타를 이용하였고 스위덴 A사의 열화상 측정기를 이용하여 전선피복(PVC)의 온도를 측정하였다. 전선의 길이는 100mm로 하였으며 반단선의 길이는 10mm로 설계하였다. 반단선 방법은 정상적인 전선에 끌 도구를 이용하여 1/2 정도를 손상시킨 후 분리된 피복을 다시 덮었다. 주위온도는 20℃였으며 Table 1 및 Table 2에 VCTF 전선 및 IV 전선의 물리적 특성을 각각 나타내었다.

시뮬레이션을 위한 유한요소모델은 2가지로 가정하였으며 첫째는 정상상태 전선에 대한 부하증가에 따른 열적 해석모델이며 두 번째로는 물리적 손상, 즉 반단선 상태에서의 열적 해석모델이다. 이 두 모델에 대하여 10A의 전류부터 각각 전선의 허용전류 200%까지 전류에 대한 열적 분석을 수행하였다. 주위온도는 20℃로 가정하였으며, 전류 증가로 인하여 도체에 발생한 전체 주울열의 손실은 식 (1)과 (2)를 적용하였고, 기타 전선의 물리적 특성들은 한국산업규격(KS)의 데이터를 바탕으로 Table 1과 Table 2를 통하여 입력하였다.

VCTF 전선과 IV전선의 시뮬레이션 형상은 한가닥의 동선부분을 1/3, 1/2, 2/3의 3가지로 절단하여 전선의 단면적을 변화시켰고, IV 전선의 반단선은 1/2로 전선의 형상을 설계하였다. 측정 지점인 피복(PVC)의 물리적 특성 값들을 입력하였고 매질의 크기에 따라 메쉬를 나누었다<sup>4,15)</sup>. VCTF 전선의 경우 메쉬 크기를 1mm, 0.1mm, 0.05mm로 3가지 형태

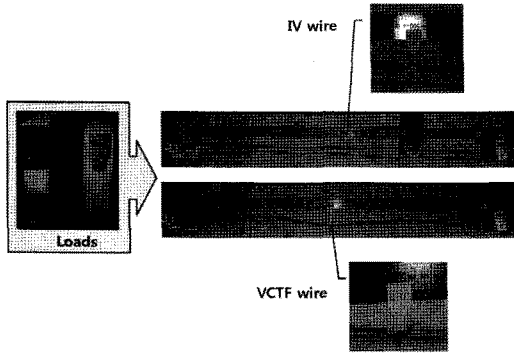


Fig. 1. Experimental setup.

Table 1. Specifications of VCTF electric wire

	Wire(Cu)	Cover(PVC)
Nominal cross sectional area[mm <sup>2</sup> ]	2 × 1.25	-
Construction[No./mm]	50/0.18	-
Thickness[mm]		0.6(Insulation)
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]	13.58	-
Allowable temp.[°C]		70
Approx. outer diameter[mm]		7.4

Table 2. Specifications of IV electric wire

	Wire(Cu)	Cover(PVC)
Construction[No./mm]	1/1.6	-
Thickness[mm]		0.8
Resistance[Ω/m]	8.92 × 10 <sup>-3</sup>	-
Specific resistance[Ω · m]	1.69 × 10 <sup>-8</sup>	0.1 × 10 <sup>-10</sup>
Allowable current[A]	27	-
Allowable temp.[°C]		60

로 분류하였고, 이를 IV 전선의 경우에도 동일하게 적용하였다. 이에 대한 3차원적 그림은 참고문헌 9)에 제시되어 있다.

#### 4. 결과 및 열적특성 분석

VCTF 전선에서 전류값에 따른 정상상태와 반단선상태의 열적특성을 분석하였다. 특히 허용전류에서의 정상상태와 반단선상태의 온도차, 전선의 허용온도인 70°C에 해당되는 정상상태와 반단선 상태의 전류값, 과부하상태의 전선의 온도를 중점적으로 분석하였다. VCTF의 분석지점으로 Fig. 2의 B 지점을 선택하여 분석하였다.

Fig. 3은 15A에서의 실험 및 시뮬레이션 결과값을 나타낸다. 실험에서 정상상태의 경우 실험과 시

뮬레이션 모두 비슷한 열적 특성을 보였으나 반단선의 경우 실험과 시뮬레이션 데이터 모두 열화시간 5분 정도에서 포화되는 경향을 보였다. Fig. 3의 (a)는 실험의 경우로 정상상태와 1/2상태에서 열화상으로 분석한 데이터이며, Fig. 3의 (b)는 B지점으로 정상상태에는 허용온도 이하였으나, 1/2 반단선의 경우 15A에서 이미 허용온도를 초과하는 현상을 보였다.

Fig. 4는 20A일 때 실험과 시뮬레이션을 나타낸 그래프로 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터 모두 정상상태의 경우 거의 동등한 결과를 보였고, 반단

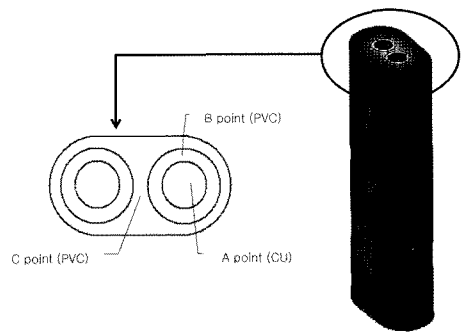
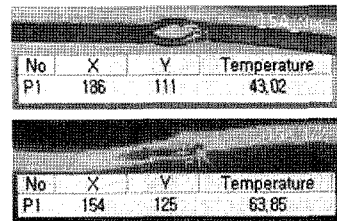


Fig. 2. Analyzing points of VCTF electric wire.



(a) Thermal imaging pictures

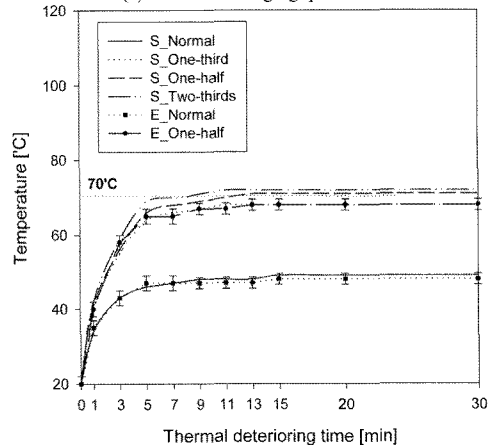
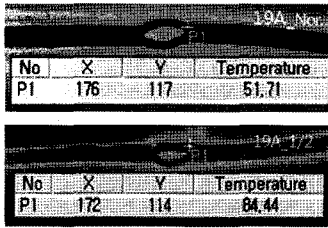
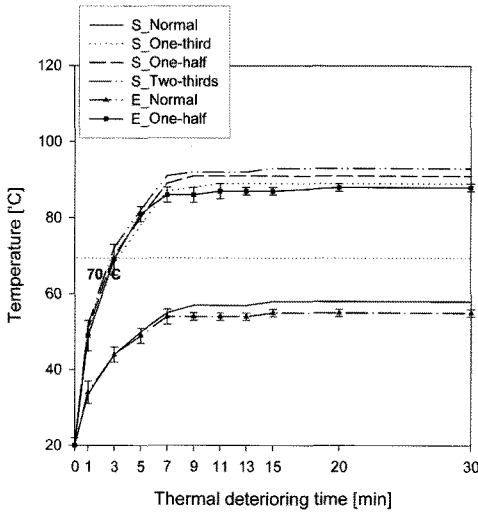


Fig. 3. Thermal analysis for normal and partial disconnection state according to deterioration time(15A, VCTF).



(a) Thermal imaging pictures



(b) Simulation and experiment date

Fig. 4. Thermal analysis for normal and partial disconnection state according to deterioration time(20A, VCTF).

선의 경우는 실험 데이터가 시뮬레이션보다 다소 낮은 차이를 보였다. Fig. 4의 (b)는 B지점으로 정상 상태에서는 전선의 온도가 56°C로 허용온도 이하의 값을 보이나 반단선의 경우 열화시간 3분에 허용온도 70°C로 초과하였다. 열화시간이 지속됨에 따라 90°C 이상으로 지속적인 전류값이 인가된다면 전선의 탄화가 촉진되어 절연파괴로 진전될 것으로 판단된다.

Fig. 5는 VCTF 전선의 B지점을 분석한 데이터로 20A까지는 실험과 시뮬레이션 데이터를 상호 비교하여 보수적인 값을 선정하였고 20A 이상의 값은 시뮬레이션을 바탕으로 작성한 그래프이다. 정상 상태의 경우 부하전류에 대해 허용온도 이하의 값을 보였으나 반단선의 1/3의 경우는 16~18A 사이에 허용온도를 초과하였고, 1/2의 경우는 15A 정도에 허용온도를 초과하였다. 반단선은 전선피복(PVC)에 상당한 물리적 손상이 가해진 상태이며 이러한 상태가 지속적으로 유지된다면 피복의 탄화현상으로 인한 단락으로 쉽게 이를 수 있을 것으로 판단된다. 또한 반단선의 경우 전류가 약 20A 부근에서 온

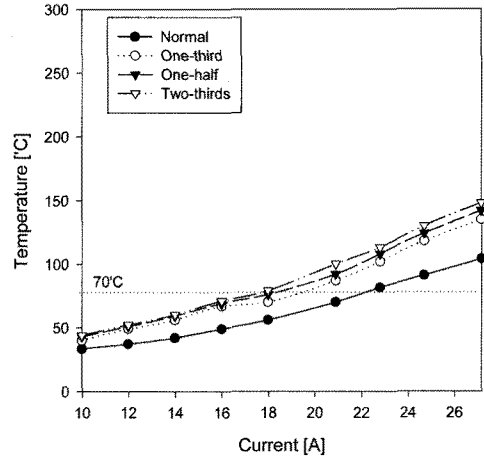


Fig. 5. Thermal analysis for normal and partial disconnection state according to current value of VCTF electric wire (point B).

도가 약 100°C 이상이 됨으로써 전선피복재가 열화 및 용융이 가속화되며, 전기화재의 발생가능성이 있는 것으로 나타났다. 특히 주목할 만한 것은 B지점 20A에서 반단선의 경우 98°C로 나타났고 정상 상태의 전선에서는 62°C로 36°C의 높은 온도차를 보였다. 또한 정상상태의 전선에서는 23A에서 허용온도를 초과하였고 1/3 반단선의 경우 이미 100°C를 초과하였다. 특히 정상상태와 반단선상태의 전구간에 대한 온도차를 분석하면 최소 30°C에서 최대 50°C의 온도차를 보였음을 알 수 있다. 이는 이 동용 전기설비의 전선인 VCTF 전선에서 반단선이 발생될 경우 기존의 허용온도와 다른 반단선에서의 온도변화를 고려한 위험성에 대한 자료가 절실히 필요함을 알 수 있었다.

IV 전선의 경우 10A에서 허용전류의 200%인 54A까지의 전류를 흐르게 하여 각 지점별로의 열적 특성을 분석하였다. 여기서 IV 전선은 VCTF 전선과 마찬가지로 허용 전류에서의 정상상태와 1/2 반단선상태의 열적 변화, 전선의 허용온도인 60°C에 해당 되는 정상상태와 반단선 상태의 전류값, 과부하 상태의 전선의 온도를 중점적으로 분석하였다.

Fig. 6에서 IV 전선의 분석지점으로 B 지점을 집중 분석하였다. Fig. 7은 15A일 때 온도변화를 나타낸 것으로 실험데이터가 1~3분 전후의 열화시간에서 시뮬레이션 데이터보다 다소 높은 온도특성을 보였으나 다른 구간에서는 거의 동등한 결과가 나타났다. Fig. 7의 (a)는 실험데이터로 열화상측정에 의해 분석된 데이터를 나타내고, Fig. 7의 (b)는 실험값과 시뮬레이션값을 비교하였으며 정상상

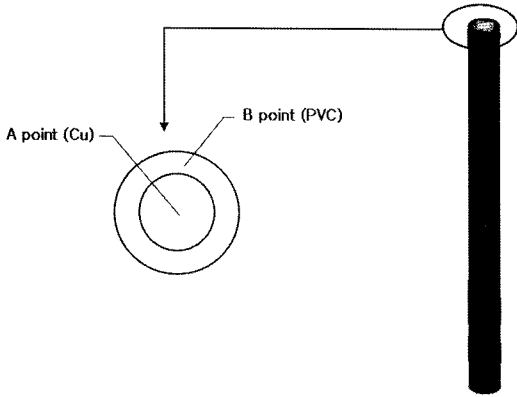
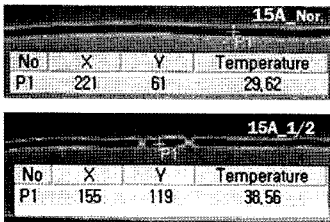
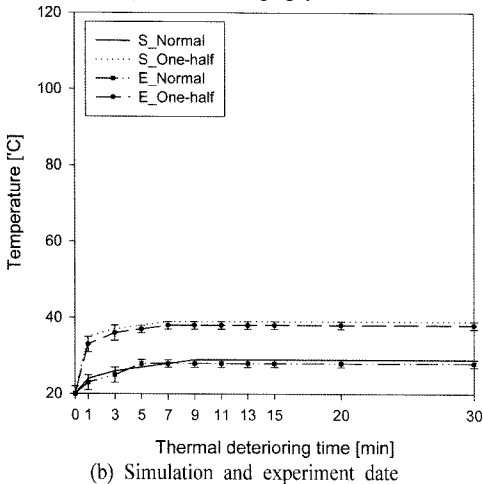


Fig. 6. Analyzing points of IV electric wire.



(a) Thermal imaging pictures

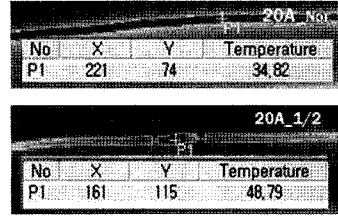


(b) Simulation and experiment date

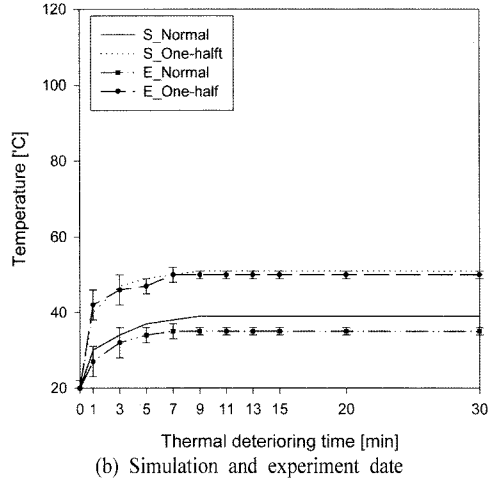
Fig. 7. Thermal analysis for normal and partial disconnection state according to deterioration time(15A, IV).

태는 29°C, 반단선은 38°C로 반단선에서 9°C로 약간 높은 온도를 보였으나, IV 허용온도인 60°C 미만의 온도를 보였다.

Fig. 8은 20A일 때 온도변화로 열화시간 1~5분 구간에서 실험값이 시뮬레이션 데이터 보다 4~5°C 정도의 차를 보이고 있으나 열화시간이 지속됨에 따라 전선의 포화온도 2~3°C의 차를 보였다. Fig. 8의 (a)는 B지점의 20A 실험에서 전선의 포화된 온도값을 나타내었다. Fig. 8의 (b)는 B지점에서 정상



(a) Thermal imaging pictures



(b) Simulation and experiment date

Fig. 8. Thermal analysis for normal and partial disconnection state according to deterioration time(20A, IV).

상태로 실험은 33~35°C의 온도를 보였고, 시뮬레이션의 경우 39°C로 나타났으며 4°C차이로 다소 높은 차이를 보였고 반단선의 경우 시뮬레이션은 53°C 실험은 52~55°C를 보였다.

Fig. 9는 VCTF 전선과 마찬가지로 실험과 시뮬레이션 값을 비교 분석하여 보수적인 값을 선정하여 분석하였다.

Fig. 9는 B지점을 분석한 그래프로 정상상태의 경우 27A에서 53°C로 허용온도를 미만의 값을 보였고, 반단선의 경우 23A에서 허용온도를 초과함을 보였다. 허용전류인 27A의 정상상태는 허용온도 미만이나 반단선의 경우 75°C로 허용온도 15°C를 초과하는 열적 특성이 나타났다. 이는 시간이 증가함에 따라 전선피복재가 서서히 열화될 것으로 기대된다. 또한 정상상태에서는 29.5A(허용전류 115%)에서 허용 온도를 초과하였다. 54A(허용전류 200%)에서는 정상상태에서는 171°C를 초과하였고 1/2 반단선의 경우는 이미 235°C를 초과하였다. 특히 정상상태와 반단선상태의 전 구간에 대한 온도차를 분석하면 최소 20°C에서 최대 60°C의 온도 차를 보였음을 알 수 있다.

IV 전선의 경우 신속시 적합한 부하용량으로 전

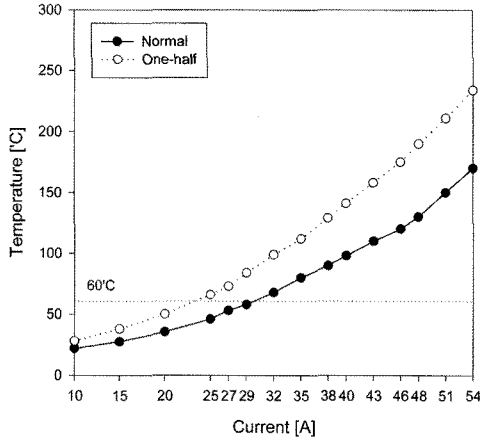


Fig. 9. Thermal analysis for normal and partial disconnection state according to current value of IV electric wire (point B).

기설비 검사에서 합격하더라도 VCTF 전선의 증설과 스테이플이나 기타 기계적 압력으로 인한 전선에 물리적 영향으로 반단선이 형성되는 경우도 쉽게 나타나므로 이에 대한 주의가 필요하다. 또한 IV 전선에 누전차단기나 배선용 차단기가 설치되어 있는 경우 배선차단기 및 누전차단기의 부하 접속부의 이상으로 인해 발생할 수 있는 접속불량에 의한 반단선에 대한 주의도 필요하다. 차단기가 부동작하여 고장열이 계속적으로 반복된다면 절연체의 탄화현상을 초래할 우려가 있고, 순간적인 온도 변화로 절연체에 강한 충격을 동반하므로 전선의 수명 단축 및 전기화재로 진전될 것으로 판단된다.

### 5. 결론

VCTF 전선과 IV 전선에 대한 정상상태와 반단선 상태에서 유한요소해석과 실험을 통하여 온도특성을 비교분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반단선의 경우 전선의 허용전류가 흘러도 정상상태와 비교하였을 때 30°C 정도의 높은 온도차를 나타내었으며 이는 허용전류 이하의 값에서도 반단선 상태의 전선은 열화가 가속될 수 있음을 의미한다.
- 2) 반단선의 정도에 따라 동일한 전류에 대해 온도상승의 폭은 다소 차이가 있으나 온도상승 패턴은 반단선의 정도에 무관하게 일관된 경향을 나타내었다.
- 3) VCTF 전선과 IV 전선에서의 발열과 전류값을 고려하여 반단선과의 상관성을 도출하였고 이

를 통하여 반단선 취약장소나 배전반 내부의 특정 장소에서의 반단선 감지에 활용될 수 있을 것이다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) National Emergency Management Agency, "http://www.nema.go.kr/", (electrical fires statistics), 2007.
- 2) 東京消防, "新火災調査教本 (電氣火災編)", pp. 8, 2004.
- 3) Hong-Seok Oh, "A Study on the Causes and Analysis of electrical fires", Korea Institute of Fire Sce. & Eng., Vol. 16, No. 4, 2002.
- 4) Korea Electrical Safety Corp., "A Study for Fire Hazard of Electric Wiring and Wire using Electrical equipment", 2001.
- 5) 金点鎬, "A Study on the Fire Cause Analysis of the HIV", 2004.
- 6) Chung-Seog Choi, "Analysis of electrical fire type and causes", Electrical journal, Vol. 300, pp. 27~36, 2001.
- 7) Kil-Mok Shong, Chung-Seog Choi, Dong-Woo Kim, and Hee-Ro Kwak, "Analysis on the characteristics of the standed wire disconnected by bending stress", KIEEME, pp. 464~467, 2003.
- 8) Young-Seok Kim, Kil-Mok Shong, Dong-Ook Kim, Ki-Yeon Lee, and Chung-Seog Choi, "The analysis of metallurgical structure and arc properties of copper wire due to over-current", KIEEME, pp. 554~555, 2005.
- 9) Sung-chul Kim, Doo-hyun Kim, "Analysis for the thermal properties of the electrical wire according to overload and Disconnection", Journal of KOSOS, Vol. 22, No. 4, August, 2007.
- 10) Korean Industrial Standard, "KSC 3304".
- 11) Korean Industrial Standard, "KSC 3302".
- 12) Michael R, Yencheck "Thermal Modeling of Portable Power Cables", IEEE, 1997.
- 13) Myoung-Soo, Han, "A Study on the Electrical Fire due to the Weakness of the Contact of Wiring Utensil", Seoul National Unvi. of Tech., Master's thesis, pp. 19, 2004.
- 14) Jeawoo Tech. Co., "http://www.jeawoo.co.kr", 2007.
- 15) Korea Institute of Patent Information, "Electric Wiring Monitoring System", US 6801133.