

# 과전류에 의해 용단된 소선의 특성해석에 관한 연구

최충석<sup>†</sup> · 김향곤 · 김동욱

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)  
(2003. 9. 1. 접수 / 2003. 11. 25. 채택)

## A Study on the Characteristics Analysis of Strands Melted by Over Current

Chung-Seog Choi<sup>†</sup> · Hyang-Kon Kim · Dong-Ook Kim

Electrical Safety Research Institute(attached to KESCO)  
(Received September 1, 2003 / Accepted November 25, 2003)

**Abstract :** The PVC insulated flexible cords are used mainly as power supply cords of electric appliance. This electric wire is a stranded wire consisted of dozens of strands. In case stranded wires are disconnected by mechanical stress, it weakens electrically. Finally, the over current flows through stranded wires, and electrical fire occurs. In this study, we analyzed the melting properties of strands by over current, such as melting process, melting current and melting time. And we analyzed that quantity of heat for melting, a cross sectional structure, and surface structure by optical microscope and SEM.

As analysis results, melting time decreased as melting current increased. And quantity of heat for melting was low, too. From the cross sectional structure of melted wire, when a melting current low and melting time long, it was found that the dendrite structure grew. However, the dendrite structure is hard to grow because growing time is not enough when a melting current high and melting time short.

**Key Words :** stranded wire, melting current, melting time, dendrite structure

### 1. 서 론

매년 화재사고로 인하여 귀중한 생명과 막대한 재산피해를 입고 있다. 지난 대구지하철 역사의 방화로 수백명의 무고한 생명들이 목숨을 잃고 있어 안전과 재해 예방에 대한 국민적 관심이 높아지고 있다. 현재, 선진국형의 재난 및 방재를 위한 대책 기구 및 조직이 갖춰지고는 있으나 아직도 화재에 무방비 상태로 노출된 곳이 많다.

최근 발표된 행정자치부 자료<sup>1)</sup>에 의하면 2002년도 발생한 총화재는 32,966건으로 전년도에 비해 3,203건이 줄어든 것으로 나타났으며 인명피해는 부상을 포함하여 2,235명, 재산피해는 약 1,434억원으로 집계되었다. 한국전기안전공사의 자료<sup>2)</sup>에 의하면 2001년 총화재 36,169건중 전기화재가 12,300건

으로 34.0%의 점유율을 나타냈으며, 그 다음으로 담배에 의한 화재, 방화, 불티에 의한 화재 순으로 집계되었다. 전기화재의 원인으로 합선 9,325건(75.8%), 과부하 961건(7.8%), 누전 897건(7.3%), 접촉부과열 167건(1.4%)의 순으로 나타났으며, 설비별 화재발생 유형을 조사한 결과 전기배선에서의 화재가 절반이 넘는 55.2%를 나타냈다. 이는 설계나 시공불량이 주원인으로 전문가에 의한 시공과 관리가 필요함을 입증한다.

전선은 도체, 피복의 종류 등에 따라 허용전류와 최고 허용온도가 정해져 있다. 그러나, 전선 선정이 부적절하거나 전문가에 의한 시공이 아닌 비전문가에 의한 임의 판단에 의해 규격 및 용도가 적절하지 못한 전선을 허용전류 이상으로 사용하는 경우에 전기화재의 발생가능성이 높다. 또한, 연선의 경우 한가닥의 전선에는 수십 가닥의 소선이 들어 있는데 외부의 잦은 구부림, 인장, 압축, 뒤틀림 등에 의해 소선의 일부 또는 전부가 끊어지는 경우가 발생

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
ccseog@netian.com

한다. 이와 같이 외부의 기계적인 스트레스에 의해 연선 중 소선의 일부 또는 전부가 끊어지는 것을 단선 현상이라고 하며 이것은 진공청소기나 모발건조기, 선풍기 등 이동용 전기기기의 전원선, 전기장판의 전원연결부, 선풍기의 회전부분 등에서 발생하게 된다<sup>3,4)</sup>.

본 연구에서는 연선 내 소선의 과전류에 의한 용단특성을 해석하기 위하여 전기제품의 전원선으로 주로 사용되고 있는 VCTF (2.0mm<sup>2</sup>×2C) 전선의 0.26mm 소선을 대상으로 전류의 크기에 따른 용단시간과 용단에 소요된 열량, 용단된 소선의 외형, 단면구조 및 표면구조 등을 분석하였다.

### 2. 이론적 배경

도체에 전류가 흐르게 되면 전류의 제곱에 비례하는 줄열(Joule's heat)이 발생하며 발생한 열에 의해 열화가 가속된다. 전선의 허용온도 이상으로 발열하게 되면 피복의 열화가 촉진되어 피복 내부에서부터 열화가 시작되어 피복의 용융으로 연기가 발생하게 되며 시간이 경과하면 피복은 용융, 탄화하고, 전선도체는 적열한 후 용단된다. 이 때 흐른 전류를 용단전류라 한다<sup>5,6)</sup>.

1888년 영국의 W.H.Preece는 도체의 용단전류에 대하여 식 (1)과 같은 실험식을 발표하였다. 이 식은 공기 중에서의 도체 용단전류를 나타낸다.

$$I = ad^{1.5} [A] \tag{1}$$

여기서,  $I$ : 용단전류(A),  $a$ : 도체 재질에 따른 정수,  $d$ : 도체의 직경(mm)을 나타낸다.

Table 1은 도체의 재질에 따른 정수( $a$ )를 나타낸 것이다. Table에서 알 수 있듯이 전선의 도전재료로 주로 사용되고 있는 구리(copper)와 알루미늄(aluminum)을 살펴보면 구리는 정수( $a$ )가 80이며, 알루미늄은 59.3이다.

Table 1. Constant with conductor material

Material	Constant(a)
Copper (Cu)	80
Aluminum (Al)	59.3
German Silver	40.9
Platinum (Pt)	40.4
Iron (Fe)	24.6
Tin (Sn)	12.8
Lead (Pb)	11.8

Table 2. Melting current by diameter of copper

직경 [mm]	용단전류 [A]	직경 [mm]	용단전류 [A]	직경 [mm]	용단전류 [A]
0.1	2.5	0.60	37.2	3.5	520
0.12	3.3	0.65	42	4	640
0.14	4.2	0.70	47	4.5	760
0.16	5.1	0.80	57	5	890
0.18	6.1	0.90	68	5.5	1,030
0.2	7.2	1.0	80	6	1,170
0.23	8.8	1.2	105	6.5	1,320
0.26	10.6	1.4	132	7	1,480
0.29	12.5	1.6	162	8	1,810
0.32	14.5	1.8	193	9	2,160
0.35	16.5	2.0	226	10	2,530
0.4	20.2	2.3	279	12	3,320
0.45	24.1	2.6	335		
0.5	28.3	2.9	395		
0.55	32.6	3.2	460		

Table 2는 동전선의 지름에 따른 용단전류를 식 (1)을 통해 얻은 결과를 나타낸 것이다. Table에서 알 수 있듯이 0.26mm 소선의 용단전류는 10.6A이며, 1.6mm 전선의 경우에는 용단전류가 162A, 2.0mm의 경우에는 226A임을 알 수 있다.

### 3. 실험방법

소선의 용단특성을 규명하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험회로를 구성하였으며, 1ø 220V 60Hz의 상용전압 하에서 단락 및 과부하 겸용 실험장치(ES&OL-10, KESCO, Korea)를 이용하여 길이 10cm의 0.26mm 소선에 과전류를 인가하였으며 소선에 흐르는 전류는 실험장치의 부하조정기를 이용하여 제어하였다. 소선이 용단되는 시간과 전류는 누설전류계(3263, Hioki, Japan)와 기록계(AR1100A, Yokogawa, Japan)를 사용하여 실시간 측정, 기록하였다<sup>7,8)</sup>. 또한, 소선의 과전류에 의해 용단되는 과정을 초고속카메라(HG-100K, Redlake, USA)를 이용하여 분석

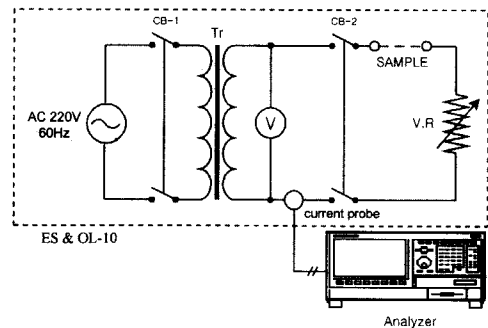


Fig. 1. The schematic diagram of experiment

하였으며, 용단시 소요되는 열량을 계산하였다. 과전류에 의해 용단된 소선은 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)을 이용하여 외형과 단면구조 변화를 정상상태와 비교, 분석하였으며, SEM(JSM- 6400, Jeol, Japan)를 이용하여 용융된 소선의 표면구조를 분석하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1. 소선의 용단 과정 분석

Fig. 2는 초고속카메라를 이용하여 과전류에 의해 소선이 용단되는 과정을 분석한 것이다.

(a)의 step 1은 과전류를 통전시키기 전의 정상적인 결선상태이다.

(b)의 step 2는 과전류에 의한 줄열로 소선이 발열되고 있으며 중앙부분은 황색, 그 주위는 적색으로 발열하고 있다.

(c)의 step 3은 백색으로 발열하던 선이 용단되면서 섬광(flash)이 발생하였다.

(d)의 step 4는 섬광이 발생된 후로 불꽃과 화염의 확산패턴을 나타내는 용융망울의 비산을 볼 수 있다.

##### 4.2. 소선의 용단 특성

0.26mm 소선의 용단전류를 식 (1)에 의해 계산하면 10.6A가 된다. 실험의 효율성과 제어의 적정성을 높이기 위하여 본 실험에서는 이 보다 높은 전류를 흘렸으며 전류에 따른 소선의 용단시간을 측정하였다.

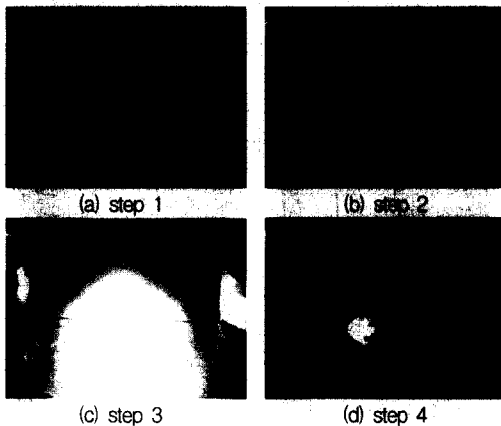


Fig. 2. Melting process of strands by over current

Table 3. The relation of melting current and melting time

No.	melting current [A]	melting time [sec]	applied voltage [V]
1	15.16	5.086	223
2	18.83	2.623	222
3	22.52	1.866	221
4	26.15	1.450	220
5	29.63	1.216	219

Table 3은 전류변화에 따른 소선의 용단시간을 측정된 결과를 나타낸 것이다.

No.1은 15.16A의 전류일 때로 5.086sec에 용단되었으며, No.2는 18.83A의 전류일 때로 2.623sec에 용단되었다. 또한, No.3은 22.52A의 전류일 때로 1.866sec에 용단되었으며 No.4는 26.15A의 전류에서는 1.450sec에 용단되었다. No.5는 29.63A의 전류일 때로 1.216sec에 소선이 용단되었다. 측정된 결과에서 알 수 있듯이 전류가 커짐에 따라 용단시간은 전류 증가분에 제곱을 한 값보다 크게 감소함을 알 수 있다.

Table 3의 실측데이터를 토대로 0.26mm 소선의 각각의 전류에서 용단되는데 소요된 열량을 식 (2)을 이용하여 계산하면

$$H = 0.24 VIt = 0.24 I^2 Rt [cal] \quad (2)$$

No.1은 4,126.5[cal], No.2는 2,631.5[cal], No.3은 2,228.8[cal], No.4는 2,002.0[cal], No.5는 1,893.7[cal]의 열량 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 용단전류에 따른 용단시간과 용단에 소요된 열량과의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 전류가 커짐에 따라 용단되는 시간과 용단에 소요된 열량이 감소함을 알 수 있다.

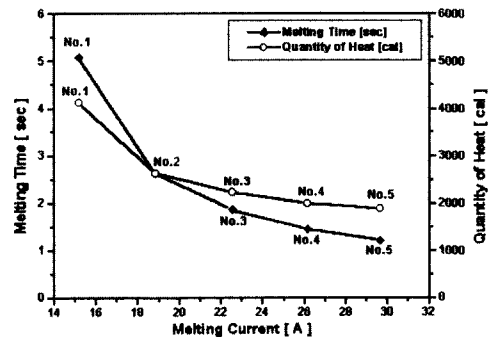


Fig. 3. The curves of melting time and quantity of heat vs. melting current

또한, No.2의 전류 18.83A에서 용단시간과 열량이 거의 일치함을 알 수 있으며 No.3~No.5에서는 용단전류의 증가보다 용단시간의 감소폭이 커서 용단에 소요된 열량보다 값이 작음을 알 수 있다.

#### 4.3. 용단된 소선의 외형 및 단면 분석

Fig. 4는 실체현미경을 이용하여 정상 소선과 용단된 소선의 외형을 분석한 것이다.

(a)는 정상 소선으로 광택이 있으며 매끄러움을 알 수 있다.

(b)는 15.16A의 전류에서 용단된 소선으로 용단시 비산된 용융망울이 도체 중간에 부착하였으며 도체 외부는 산화막이 형성되었고 일부는 도체에서 이탈하였다.

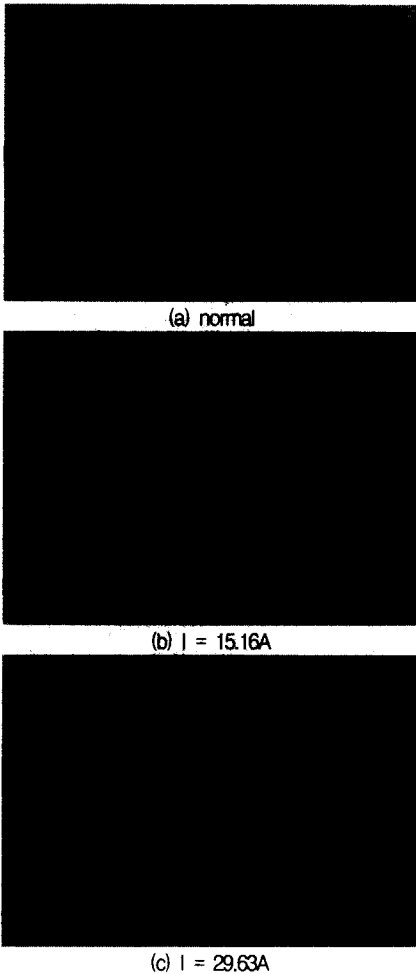


Fig. 4. Optical micrographs of surface structure (a) normal and (b, c) melted wires

(c)는 29.63A의 전류에서 용단된 소선으로 끝부분에 표면에 굴곡이 있는 등근형태의 용융흔이 형성되었으며, 도체 외부는 산화막이 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 5는 금속현미경을 이용하여 정상소선과 과전류에 의해 용단된 소선 단면의 결정구조를 분석한 것이다.

(a)는 정상 소선으로 전선 고유의 비정질 구조와 전선 제조시 생성된 연신구조를 볼 수 있다.

(b)는 15.16A의 전류에서 용단된 소선으로 전선이 과전류에 의해 용단될 때 나타나는 전형적인 특징인 나뭇가지 모양의 수지상 조직과 보이드(void)를 관측할 수 있었다.

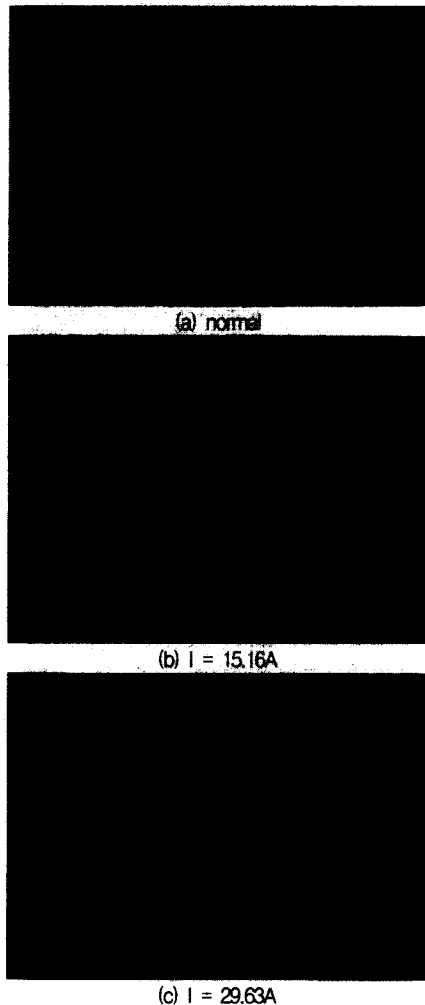


Fig. 5. Optical micrographs of cross section structure (a) normal and (b, c) melted wires

(c)는 29.63A의 전류에서 용단된 소선으로 15.16A에서 볼 수 있었던 수지상 조직의 성장은 볼 수 없었으며 타원형의 변형된 결정구조가 관측되었다.

#### 4.4. SEM에 의한 표면구조 분석

Fig. 6은 SEM을 이용하여 정상 소선과 과전류에 의해 용단된 소선 외부의 표면구조를 2,000배 확대하여 분석한 것이다.

(a) 정상전선으로 전선 제조시 생성된 가로방향의 연신구조를 볼 수 있다.

(b)는 15.16A에서 용단된 소선으로 고유의 연신구조가 사라지고 둥근모양의 결정들이 용융된 부분

에 불규칙적으로 분포해 있다.

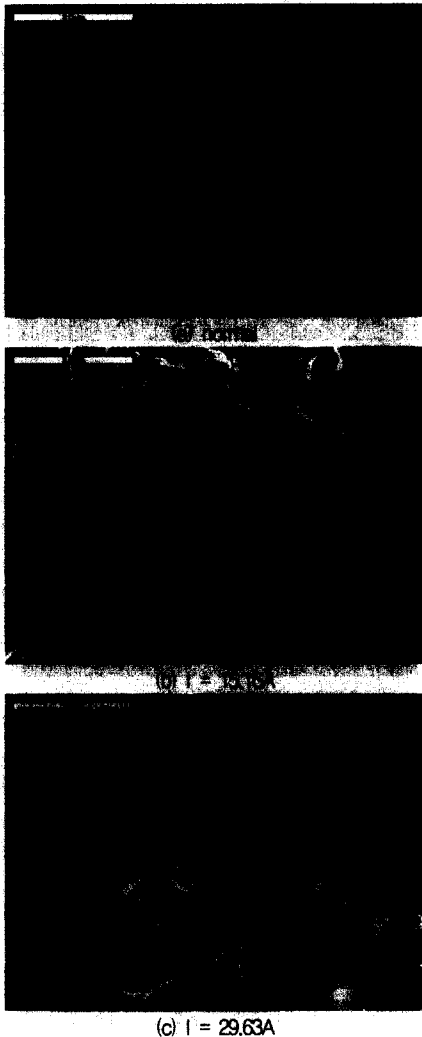
(c)는 29.63A에서 용단된 소선의 외부로 산화피막이 형성되었으며, 그 내부는 입자들이 적층된 형태를 보였다.

Fig. 7은 SEM을 이용하여 정상소선과 과전류에 의해 용단된 소선의 단면구조를 비교한 것이다.

(a) 정상전선으로 전선 고유의 비정질 구조를 보이며, 가로방향의 연신구조를 볼 수 있다.

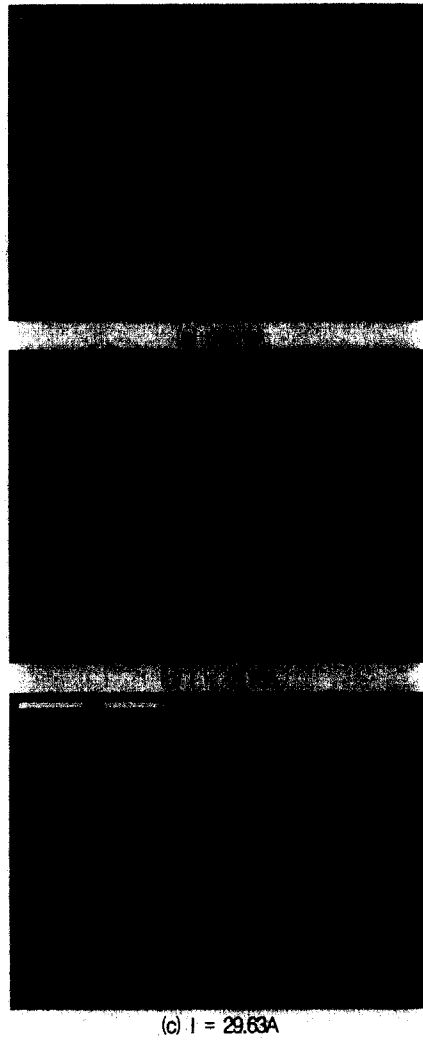
(b)는 15.16A에서 용단된 소선으로 나뭇가지모양의 수지상 조직이 미세하게 성장함을 볼 수 있다.

(c)는 29.63A에서 용단된 소선으로 타원형의 변형된 조직이 성장하였으며, 그 주위로 무수히 많은 작



(c) I = 29.63A

Fig. 6. SEM micrographs of surface structure (a) normal and (b, c) melted wires



(c) I = 29.63A

Fig. 7. SEM micrographs of cross section structure (a) normal and (b, c) melted wires

은 소혈(小穴)이 확인되었다.

광학현미경과 SEM을 이용하여 단면의 결정구조와 표면구조를 분석한 결과, 어느 정도의 시간이 경과한 후 용단됐을 때에는 수지상조직이 관측되었으나 짧은 시간에 용단된 경우에는 변형된 구조를 볼 수 있었다. 따라서, 수지상 조직이 성장하기 위해서는 최소한도의 시간이 필요하며 향후, 이부분에 대한 중점적인 연구가 이루어져야 하겠다.

### 5. 결 론

이상과 같이 과전류에 의한 용단된 소선의 특성을 분석한 결과 다음과 같았다.

1) 0.26mm 소선의 용단전류는 10.6A로 소선에 이 전류이상으로 과전류가 흐르게 되면, 줄열에 의해 소선이 적열하고 황색 발열 후 백색으로 발열하고 용단되었다. 용단시 섬광과 용융망울이 비산하였다.

2) 소선의 과전류에 의한 용단 특성을 분석한 결과, 15.16A의 전류에서는 5.086sec에 용단되었으며, 29.63A의 전류에서는 1.216sec에 용단되었다. 용단 전류가 커짐에 따라 용단시간은 용단전류의 증가분의 제곱 값보다 크게 감소하였으며 이에 따라 용단에 소요된 열량도 점차 작아짐을 알 수 있었다.

3) 용단된 소선의 외형, 단면구조 및 표면구조를 분석한 결과, 소선 끝과 중간부분에서 용융흔을 볼 수 있었으며, 15.16A에서 용단된 소선에서는 수지상 조직의 성장이 확인되었으나, 29.63A 용단된 소선에서는 변형된 조직이 관측되었다. 따라서 수지상 조직의 성장에는 용단시간이 크게 좌우함을 알 수 있다.

이상과 같은 실험과 분석결과는 과전류에 의한 전선의 전기화재 원인규명에 많은 도움을 줄 것으로 기대한다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부 전력산업기반 기금에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 1) 행정자치부 소방국, “소방행정자료 및 통계”, 행정자치부, pp. 167~168, 2003.
- 2) 임의빈 외 5, “전기화재 통계분석”, 한국전기안전공사, pp. 7~23, 2002.
- 3) Norimichi Watanbe, “電源コードの半斷線箇所における放電形態と發火危險性”, 日本火災學會研究發表會 概要集, pp. 202~203, 1994.
- 4) Nasayoshi Nagata, “Firing Current and Energy Input of Polyvinyl Chloride Covered Cords Having Disconnected Element Wires”, Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 1~2, 1983.
- 5) Atila Mertol, “Estimation of Aluminum and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time”, IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 18 No. 1, pp. 210~214, 1995.
- 6) Eugene Loh, “Physical Analysis of Data on fused-Open Bond Wires”, IEEE Trans. on Component, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-6 No. 1, pp. 209~217, 1983.
- 7) 최충석 외 5, “과부하에 의해 변형된 비닐절연전선의 구조변화 분석”, 한국전기전자재료학회 하계학술대회, pp. 398~401, 2002.
- 8) 송길목 외 3, “Over-current에 의한 PVC insulated flexible cord의 전기화재 해석에 관한 연구”, 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 131~133, 2003.