

## 비닐코드의 단락전류 및 용융흔 분석에 관한 연구

최종석\*, 류선희\*, 유재근\*, 송길목\*, 김향곤\*, 이경섭\*\*  
한국전기안전공사 전기안전시험연구원\*, 동신대학교 전기전자공학과\*\*

### A Study on the Short Circuit Current and Molten Mark Analysis of Polyvinyl Chloride Insulated Flexible Cords

Chung-Seog Choi\* · Sun-Hee You\* · Jae-Geun Yoo\* · Kil-Mok Shong\* · Hyang-Kon Kim\* · Kyung-Sup Lee\*\*  
KESCO ESLRI\* and Dongshin University\*\*

**Abstract** - In this paper, we studied the short circuit current and molten mark of polyvinyl chloride insulated flexible cords(VFF). The calory decreased remarkably with increase of current. The surface structure and composition of a strand wire were analyzed by stereoscope, scanning electron microscope(SEM), and energy dispersive x-ray spectroscopy(EDX). The surface of a strand wire showed columnar and void. The intensity of CuL spectrum increased in melted mark.

#### 1. 서 론

일반적으로 화재발생 요인 중 전기적인 원인에 의한 화재가 가장 높은 점유율을 나타내고 있으며, 특히 배선 계통에서 출화한 사례가 다수 보고되고 있다[1]. 이런 사고의 유형은 매입플러그에 의한 출화, 코드의 접촉개소에서 출화, 반단선(소선의 일부 단선)에 의한 출화 등이 많으며 콘센트 자체에서의 화재는 적다. 전원코드와 테이블 탭 등의 길이를 조절하기 위해 전선을 접어다 폈다 함으로서 소선(素線)의 열화(劣化)가 촉진된다[2]. 배선기구에서 출화되는 매커니즘은 도체간의 접속부에서 발생한 열에 의해 주위의 유기절연물이 미소방전(scintillation)에 의해 도전화되거나, 절연에 사용된 유기절연물이 열화(劣化)되어 단자간 또는 선간에 단락이 발생하여 주위의 가연물에 착화되어 화재로 이어진다. 화재가 진화되고 잔존물로 남은 전선의 용융흔(molten mark), 보이드(void), 표면구조, 조성 등의 변화를 분석함으로써 출화의 직접적인 원인을 규명하는 것이 가능하다[3,4].

따라서 본 연구에서는 일상생활에서 널리 사용되고 있는 비닐코드의 소선이 단락에 의해 용단될 때까지의 단락전류를 측정하고, 이 때 형성된 용융흔의 표면 및 단면구조, 조성 등의 변화를 실체현미경, 금속현미경, 주사전자현미경(SEM), 에너지분산분석기(EDX) 등으로 분석하여 전기화재의 원인을 밝히고자 한다.

#### 2. 실험방법

단락전류 및 용융흔 분석에 사용한 전선은 비닐평형코드 0.75mm<sup>2</sup>(30/0.18)이다. 소선의 단락전류 측정은 그림 1과 같은 회로를 구성하여 측정하였으며, 전선의 교차각은 직각이다. 일정한 전류공급을 위해서 전압조정기로 전압을 가감하여 조정하였다. 공급된 전류의 크기는 6.8A를 기준으로 하였을 때 전선의 허용전류 및 보호기기의 작동범위 값 등을 참고로 하여 설정하였다[5].

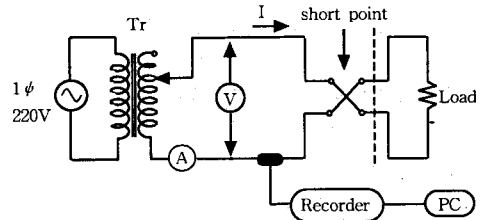


그림 1 단락전류 측정을 위한 개략도

Fig. 1 Schematic diagram for measurement of short circuit current

단락에 의해 형성된 용융 부분의 표면상태는 실체현미경(Steromicroscope, SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용했으며, 절단면의 조직변화를 밝히기 위해 금속현미경(Metallurgical microscope, Nikon, Japan)을 사용했다. 또한, 표면구조 및 조성변화는 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope, JEOL JSM-6400, Japan)과 에너지분산분석기(EDX: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Oxford, England)를 이용하여 해석하였다.

금속현미경을 이용한 표면구조분석은 다이아몬드 절단기(Cutting machine, Struers, Denmark)를 이용하여 절단하였으며, 절단된 전선은 성형기(Mounting press, Struers, Denmark)로 고정시킨 후 연마기(Polisher machine, Struers, Denmark)를 이용하여 연마하였다. 연마가 끝난 시료는 크로머지로 예칭

(etching)한 후 촬영하여 분석하였으며, 공정은 그림 2와 같다.

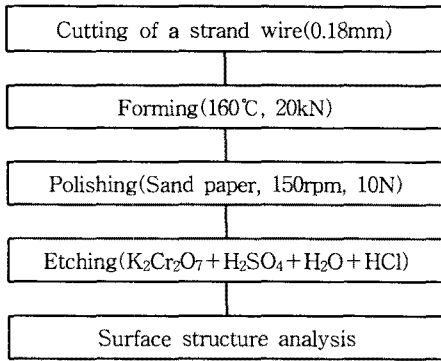


그림 2 소선의 표면구조 분석 과정  
Fig. 2 The process of surface structure analysis of a strand wire

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 용단된 소선의 실제현미경 사진으로 배율은 50배이다. 사진에 나타난 바와 같이 용융된 면은 망울 모양의 구조와 윤기를 갖고 있음을 알 수 있다. 즉, 순간 고열에 의한 용융과 재결합이 이루어 졌기 때문으로 생각된다. 그러나 이 모양만을 보고 외부화염에 의한 용융흔 인지, 단락에 의한 용융흔 인지의 식별은 불가능하다. 그러므로 전선의 표면구조, 단면구조, 조성변화 등의 분석이 병행되어야 한다.



그림 3 용단된 소선의 실제 사진  
Fig. 3 Stereoscopic photograph of melted a strand wire

그림 4는 전류변화에 따른 소선의 용단시간을 나타낸 것으로 6.8A를 기준으로 설정하여 1배, 1.1배, 1.25배, 1.3배, 1.6배, 2배를 흘렸다. 공급전류보다 큰 전류를 흘릴 경우 용단시간은 상대적으로 빠름을 알 수 있다. 그리고 각각의 조건에서 열량을 주열의 법칙( $H=I^2Rt$ )에 의해 계산하였을 때 이론치와 실험치의 차이가 거의 없었다.

그림 5는 전류에 따른 열량변화를 나타낸 것이다. 전류의 증가에 따라 급격한 열량 감소를 알 수 있다. 이것은 착화에너지(ignition energy)와 밀접한 관계를 갖고

있음을 의미한다. 일정한 전류 이상에서 단락이 발생하면 그때 흐르는 단락전류(short circuit current)보다 단락(short circuit)되어 있는 시간에 따라 화재의 발생이 좌우됨을 알 수 있다. 즉, 이것은 짧은 시간에 용융과 재결합이 이루어 졌기 때문에 열전달 시간을 확보하지 못했기 때문이다. 열량이 적더라도 장시간 열의 축적에 의한 열화(劣化)가 지속되면 재해의 발생빈도가 높음을 알 수 있다.

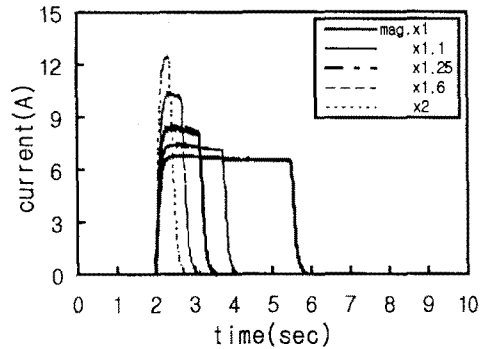


그림 4 전류변화에 대한 소선의 용단시간  
Fig. 4 Melting time of a strand wire vs. current variation

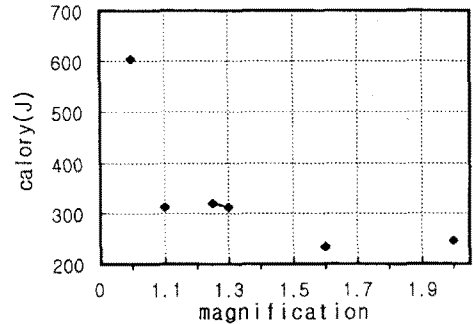


그림 5 전류에 대한 열량 변화  
Fig. 5 Calory variation vs. current

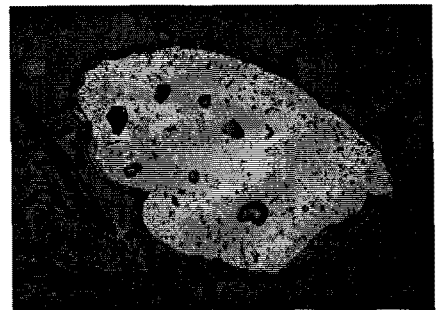
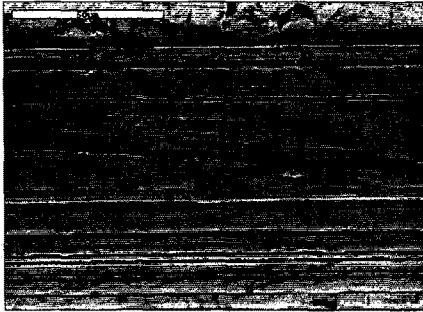
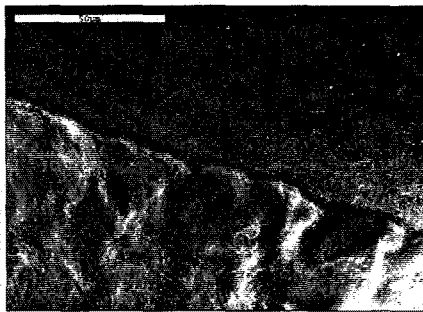


그림 6 비닐코드 소선의 금속현미경 사진  
Fig. 6 Metallographs of a strand wire

그림 6은 6.8A의 전류를 공급할 때 단락에 의해 생성된 단면의 금속현미경 사진이다. 배율은 200배이며 그림 2와 같은 공정을 거쳤다. 단면의 중심에 큰 구멍(void)이 생성되었으며 경계면 근처에 주상조직(columnar structure)이 성장했음을 알 수 있다. 외부 화염에 의해 변형된 구리입자의 변형과는 많은 차이가 있다.

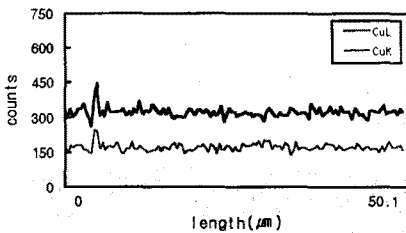


(a) normal

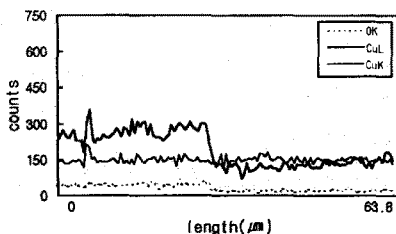


(b) short circuit

그림 7 비닐코드 소선의 주사전자현미경 사진  
Fig. 7 SEM photographs of a strand wire



(a) normal



(b) short circuit

그림 8 EDX에 의한 비닐코드 소선의 스펙트라  
Fig. 8 Spectra of a strand wire by EDX

그림 7은 비닐코드 소선의 표면사진으로 주사전자현미경을 이용했다. SEM의 조건은  $V_{acc}$ : 20kV,  $W_d$ : 20mm,  $Mag$ : 500이다. 그림 (a)는 normal 전선을 나타낸 것으로 연신(elongation)된 기본 성질을 잘 나타내고 있다. 그러나 그림 (b)의 좌측은 용융된 부분으로 연신된 구조가 없어지고 둥글고 완만한 형태를 보이고 있다.

그림 8은 소선의 표면을 linescan하여 조성변화를 나타낸 것이다. 전선의 조성변화를 지배하는 스펙트라는 CuL, CuK line이다. normal 전선의 경우 스캔길이에 관계없이 CuL 및 CuK lines이 비교적 일정하게 보이고 있으나, 단락전선의 line scanning에서는 경계면을 기점으로 CuL line이 심하게 변화하였다. 즉, CuL 및 OK 스펙트라의 생성유무 및 변화를 분석하여 에너지원을 유추할 수 있다.

#### 4. 결 론

일반용 비닐코드 소선의 단락에 따른 용단시간, 용융 흔의 표면구조 및 조성을 실체현미경, 금속현미경, 주사전자현미경(SEM), 에너지분산분석기(EDX) 등으로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 실체현미경사진 분석에서 용융된 부분은 망울모양의 구조와 윤기를 갖고 있음을 알 수 있었으나, 이것만으로 단락과 외부화염을 구별은 신뢰도가 떨어진다.
- 2) 전류의 증가에 따라 용단시간이 급격히 감소함을 알 수 있었으며, 주울의 법칙에 의해 열량을 계산했을 때 이론치와 실험치의 차이가 거의 없었다.
- 3) 용융된 표면을 SEM으로 분석한 결과 연신구조가 없어지고 둥글고 완만한 형태를 보였는데 이것은 짧은 시간에 용융과 재결합이 일어났기 때문이다.
- 4) EDX에 의한 전선의 스펙트라 분석에서 용융 부분은 CuL line이 심하게 변화하였으나 정상부분은 일정한 스펙트라 강도를 나타내고 있다. 즉, CuL 스펙트라의 강도를 분석하여 에너지원을 유추할 수 있게 되었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 허만엽, 황병표, "전기재해통계분석", 한국전기안전공사 전기안전시험연구원, pp. 7~16, 1997.
- [2] 小河 原明人, 土方 忠道, "ビニルコード捻回接続部における發熱に關する研究", 鑑識科學研究會, vol. 45, no. 4, pp. 58, 1992.
- [3] 三橋 信雄, 横井 良秀, 長田 正義, 伊坂 勝生, "絶緣被覆電線の劣化履歴と火災危險について", 火災, vol. 31, no. 1, pp. 11~19, 1981.
- [4] 石橋 良男, 岸田 順次, "電線の一次, 二次熔融痕鑑定 方法に關する研究(その1),(その2)", 日本火災學會研究發表會概要集, pp. 83~90, 1990.
- [5] KS C 3304, "한국산업규격", 1992.