

# 외부화염에 의해 손상된 비닐 코드의 단락 특성에 관한 연구 A Study on the Short-Circuit Characteristics of Vinyl Cords Damaged by External Flame

최충석<sup>†</sup> · 김향곤 · 송길목

Chung-Seog Choi<sup>†</sup> · Hyang-Kon Kim · Kil-Mok Shong

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)  
(2004. 9. 21. 접수/2004. 11. 22. 채택)

## 요 약

본 연구에서는 외부화염에 의한 비닐코드의 손상에 따른 단락 진행과정, 외형 및 표면 구조, 조성 변화 등 단락 특성을 연구하였다. 초고속이미지시스템(HSIS)을 이용하여 단락과정을 분석한 결과, 열적피로에 의해 피복이 소실되면서 전선 도체가 닿아 수회에 걸쳐 단락이 발생하였으며, 실체현미경과 SEM을 이용하여 외형과 표면구조를 분석한 결과, 전원 측 전선은 두 가닥 모두에 용융흔이 형성되었으며 V자형의 홈을 나타냈다. 부하 측 전선의 용융흔은 전원 측 보다 크을 알 수 있었다. EDX에 의한 조성분석 결과, 전원 측에서는 Cu와 O가 검출되었으며 부하 측에서는 Cu와 O 이외에 피복재료인 Cl과 Ca를 검출할 수 있었다. 이와 같은 실험과 분석결과를 바탕으로 전기화재의 원인을 규명하는데 많은 도움이 될 것으로 기대한다.

## ABSTRACT

In this paper, we studied on the short-circuit process, surface structure, and component variation of vinyl cords. In the results of high speed imaging system (HSIS) analysis, as soon as wire covering was damaged by heat, the conductor of wire came in contact with the other conduct of wire, and the short-circuit occurred. Stereomicroscope and SEM analysis indicated that the source part of wire showed V-type form. The molten beads of load part were bigger than those of source part. In the results of EDX analysis, Cu and O were detected in the source part, whereas covering material (Cl, Ca), Cu and O were detected in the load part. The results will help us to find out the cause of electrical fire.

**Keywords :** Short-circuit, Vinyl cord, SEM, EDX, HSIS, External flame

## 1. 서 론

국민의 삶의 질 향상과 산업화에 따라 전기기계기구의 사용증가로 해마다 전력수요는 큰 폭으로 늘어가고 있다.

전기에너지가 우리의 생활을 편리하게 해주는 반면 사용자의 부주의, 제품 결함, 시공·유지관리의 부적절로 매년 전기화재가 급증하고 있으며, 많은 인명과 재산피해를 가져오고 있다.<sup>1,2)</sup>

국내에서 발생한 전체 화재 중 전기에너지를 사용하는 설비에 의해 발생한 전기화재가 매년 30% 정도를 점유하고 있다. 이 수치는 경제협력개발기구(OECD; Organization for Economic Cooperation and Development)

가입 국가 중에서 가장 높은 재해율을 나타내고 있으며, 이로 인하여 국가의 신뢰도 하락은 물론 기업의 경쟁력 저하를 가져오고 있다. 또한, 국민의 삶의 질 향상을 위한 의식 제고에도 부정적인 영향을 주고 있는 것이 현실이다.

저압용 전기설비의 전원선으로 많이 사용되고 있는 일체형 코드는 접촉 불량, 기계적 충격, 전기적 피로 등에 의해 전기화재, 감전사고, 전기설비사고 등이 빈번하게 일어나고 있다.<sup>3,4)</sup>

일체형 코드에서의 전기화재 발생 메커니즘을 살펴 보면 전선에 과부하가 발생하여 허용 전류 이상의 높은 전류가 도체에 흘러 줄열(Joule's heat)에 의해 발열되어 발생하는 화재와 기계적 피로, 물리적인 외력에 의한 단락과 접촉 불량에 의한 국부적인 발열로 화재가 발생한다.<sup>5-8)</sup> 일체형 코드의 전기화재 원인분석은 화

<sup>†</sup> E-mail: enetek@naver.com

재 당시의 상황과 동일한 조건에서 재현 실험하여 원인을 규명하는 것이 가장 좋은 방법이지만 재현모델을 정확하게 설정하기 어렵고, 시간 및 비용적인 측면에서 많은 제약이 따른다.

따라서 본 연구에서는 일반 사용 환경과 유사한 벽면 모델을 설정하고 전원대기 상태(standby mode)에서 외부화염이 설비의 전선선에 가해졌을 경우를 모델링한 것으로 일체형 비닐코드 절연물이 소손되고 단락이 발생하면서 화재가 확산되는 과정을 초고속 이미지 시스템을 도입하여 해석하였다. 또한, 소손된 전선의 물리·화학적 특성을 입체 분석하여 전기장애 원인 분석의 과학화에 기여하고자 한다.

## 2. 실험방법

Fig. 1은 실험에 사용된 벽면 모델의 개략도를 나타낸 것이다. 일체형 비닐 코드의 화재 확산 과정 및 소손 원인을 규명하기 위해 220 V, 비접지형 비닐코드(VCTFK, 1.25 mm<sup>2</sup>×2C)를 사용하였다. 비닐 코드는 콘센트에 수직방향으로 설치하였다. 실험장치는 벽면, 제어부, 데이터 취득부 등으로 구성되었다. 벽면은 가로 1,800 mm, 세로 1,500 mm이며 철 구조로 되어 있다. 벽면은 가로 600 mm, 세로 300 mm의 단위 블록으로 나누어 베크라이트를 각각 부착하여 구성하였다. 콘센트는 바닥 면에서 110 cm 위치에 설치하였으며, 제어부에는 배선용차단기(MCCB), 커버나이프스위치(CKS), 누전차단기(RCD)를 순차적으로 설치하였다.

실험은 벽면의 콘센트에 일체형 비닐 코드를 설치하고 전원 대기 상태에서 실험전선에 외부에서 화염을 인가하였다. 일체형 비닐 코드에 화염을 인가한 위치는 코드의 길이를 고려하여 플러그에서 약 80 cm 떨

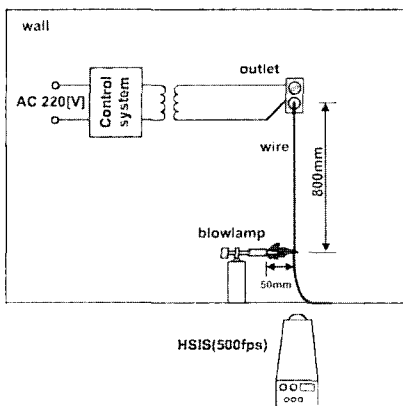


Fig. 1. Schematic diagram of wall model experiment.

어진 부분에 가했으며, 토치와 비닐 코드의 이격거리는 5 cm로 하였다. 이때 실험조건은 온도 15~18°C, 습도 50~55%였다. 또한, 화재 진행 및 단락 현상은 초고속 이미지 시스템(HSIS, HG-100K, Redlake, USA)으로 취득하였으며, 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용하여 외형을 분석하였으며, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, JSM-6400, JEOL, Japan)과 에너지 분산형 X선 분석기(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, ISIS, Oxford, England)를 이용하여 표면 구조와 조성변화 등을 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 외부화염에 의한 단락 메커니즘

Fig. 2는 외부화염에 의한 저압 일체형 비닐코드의

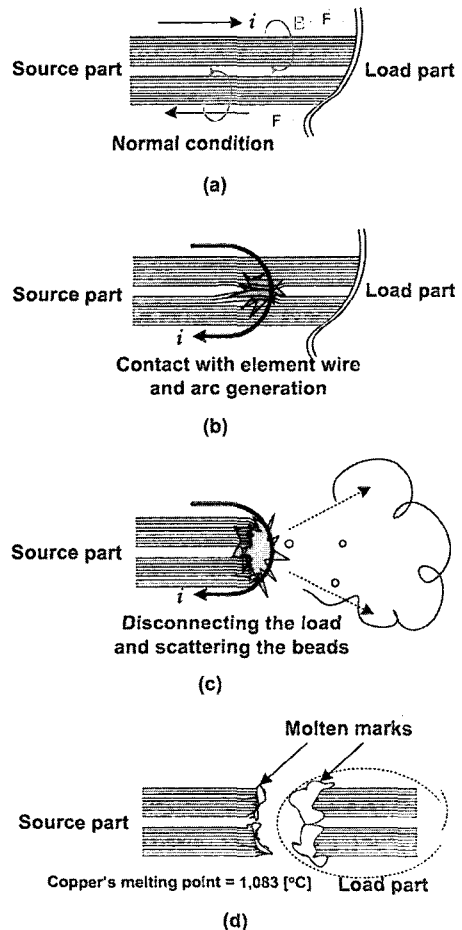


Fig. 2. Short-circuit mechanism of power cord sets.

단락 메커니즘을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 부하가 연결된 전선에 전압이 인가되면 전류가 흐르게 된다. 전선에 기계적 피로나 외부 열적 피로 등이 가해지면 피복 내 연선이 서로 닿아 단락으로 이어지고 단락에 의한 아크로 용융흔이 비산되는데 로렌츠의 힘에 의해 전류가 흐르는 방향을 중심으로 법선 벡터의 방향으로 비산하게 되어 전원 측에서 부하 측 방향으로 비산되는 것을 알 수 있다.

**3.2 외부화염에 의한 단락 과정 분석**

Fig. 3은 일체형 비닐코드가 외부화염에 의해 단락되는 과정을 HSIS로 분석한 것이다. 실험에 사용된 누전차단기는 정격전압 220 V, 정격전류 30 A, 정격차단전류 1.5 kA, 정격감도전류 30 mA, 동작시간 0.03 sec이다. Fig. 3(a)와 같이 비닐 코드에 화염이 가해지면, 비닐코드의 피복은 열화되어 착화되며, 약 30 sec 후에 Fig. 3(b)와 같이 두 전선의 단락에 의한 섬광이 발생하였다. 이후 Fig. 3(c)에서와 같이 2~3회 정도 2차 단락이 단속적으로 일어나고 용융망울은 주변으로 비

산되고 용단되었으며, 이때 벽면 제어부의 차단기는 동작하지 않았다. 그 이유는 단락전류가 흐르는 시간이 차단기의 동작시간 이내이기 때문으로 판단된다. 또한, 비산 방향은 화염을 가하고 있는 토치 방향으로 많이 비산되었는데 이는 화염을 가하는 쪽의 절연피복이 먼저 소손되어 취약 부위가 노출되었기 때문으로 판단된다. Fig. 3(d)와 같이 용단된 후에는 전기적인 회로 구성이 되지 않아 더 이상 전기에너지의 공급은 이루어지지 않았으며 피복재료의 화재도 진행되지 않고 자연 소화되었다. 따라서 화재 진행의 가능성은 단락 후 섬광이 나타난 시점에서 비산되는 용융 망울에 의해 주변 가연물로 확산될 때 가능할 것으로 판단된다.

**3.3 외형 및 표면구조 분석**

Table 1은 전기에 의한 단락흔 및 외부화염에 의한 단락흔의 특징을 나타낸 것이다.

전기적인 단락 용흔 및 외부화염에 의한 단락 용흔을 육안으로 식별하는 경우 일반화된 오류를 범하기 쉬우므로 표면의 용융형태, 표면 및 단면구조, 에너지 및 열특성 등을 종합적으로 분석하여 판정하는 것이 바람직하다.

Fig. 4는 외부화염에 의해 절연물이 소손되어 단락이 발생한 일체형 비닐 코드의 외형을 실체현미경으로 12배 확대하여 분석한 것이다. Fig. 4(a)는 전원 측 전

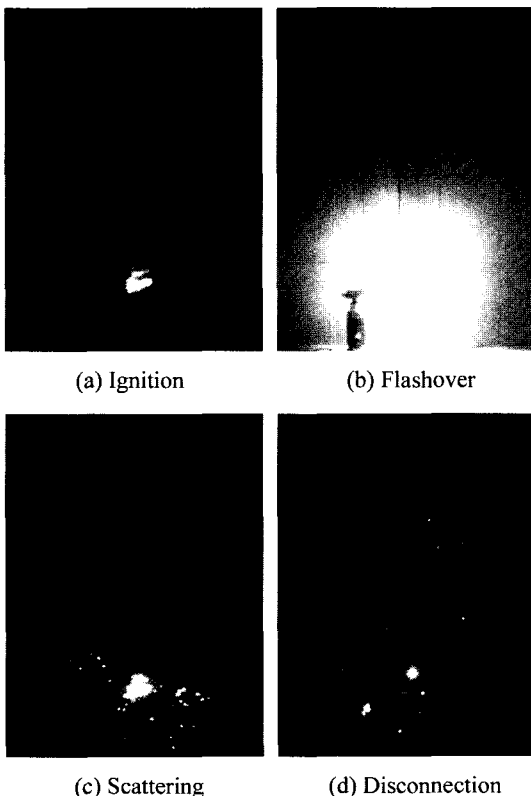


Fig. 3. Flame patterns of vinyl cord by external flame.

Table 1. 전기에 의한 단락과 외부화염에 의한 단락의 비교

구분	금속조직	void분포
전기에 의한 단락	용흔 전체가 미세한 동과 산화제1동의 공유결합조직으로 점유하고 있고, 동의 초기결정 성장은 없음	큰 구형 보이드가 용흔의 중앙에 생기는 경우가 많음
외부화염에 의한 단락	동의 초기결정 성장이 보이지만, 동의 초기결정 이외의 금속결정으로 변형됨	일반적으로 미세한 보이드가 많이 생김

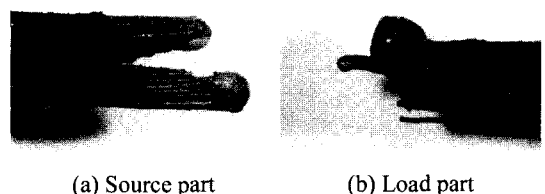


Fig. 4. Shapes of molten vinyl cords.

선으로 용융 망울이 두 전선에 각각 형성되었으며 V 자형의 용융흔 형태를 보여준다. 두 전선 사이는 심하게 탄화되어 절연물은 남아 있지 않았으며 외부화염에 의해 단락현상이 일회만 발생하는 것이 아니고 단속적으로 수회에서 수십회에 걸쳐 발생하였다. 두 전선 사이의 절연물은 완전히 탄화되고 두 전선 사이에 틈이 생겼다. 이는 비산 및 용단된 후 전원 측의 비닐 코드는 화제가 자연소화 되지 않고 계속 진행되고, 차단기가 동작하지 않아 계속 전원이 공급되어 단락 현상이 여러 번 발생했음을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 부하 측 전선으로 용융 망울은 전원측 보다 크고 두 전선 사이의 절연물은 완전히 탄화되지 않은 형태를 나타냈다. 이는 초고속 이미지 시스템(HSIS)에 의한 분석에서도 알 수 있듯이 비산 및 용단이 발생된 후 전선 분리로 부하 측의 전원 공급은 차단되어 전기에너지의 공급이 더 이상 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

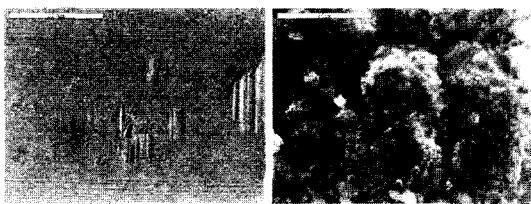
Fig. 5는 정상소선과 외부화염에 의해 용단된 일체형 비닐코드 소선의 표면구조를 SEM을 이용하여 분석한 것이다. Fig. 5(a)는 정상상태의 소선(strands) 표면구조로 전선 제조시 생성된 가로방향의 연신구조를 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 외부화염에 의해 용단된 소선의 표면구조로 용융되어 조직이 부풀어 오른 불규칙한 형태를 볼 수 있다.

Fig. 6은 전원이 공급된 상태에서 외부화염에 의해 피복이 탄화되어 전기적으로 단락된 비닐코드의 전원

측과 부하 측 용융흔 단면의 표면구조를 SEM을 이용하여 분석한 것이다. Fig. 6(a)는 전원측으로 보이던(void)의 크기가 크고 열적인 소손이 큰 것으로 나타났고, Fig. 6(b)는 부하 측으로 작은 void들이 전체적으로 퍼져 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 외부화염에 의해 단락되었을 때 부하 측은 단락에 의해 끊어지면서 전체적인 화염을 받아 작은 void들이 형성된 것으로 판단되며 전원 측은 수회 내지 수십 회의 단락과 돌입전류에 의해 높은 줄열이 발생하여 직경이 큰 void들이 성장한 것으로 판단된다.

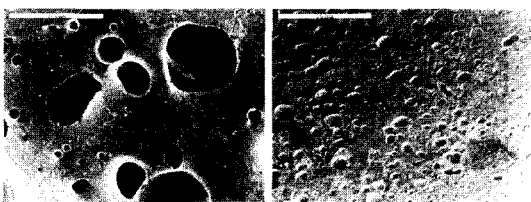
### 3.4 단락에 의한 조성분포 분석

Fig. 7은 EDX를 이용하여 정상상태의 소선과 외부화염에 의해 용단된 소선 표면의 조성분포를 분석한 것이다. Fig. 7(a)는 정상상태의 일체형 코드 소선으로 전선의 주성분인 구리(Cu; copper)의 에너지 밴드가 나타남을 볼 수 있다. (b)는 외부화염에 의해 용융된 소



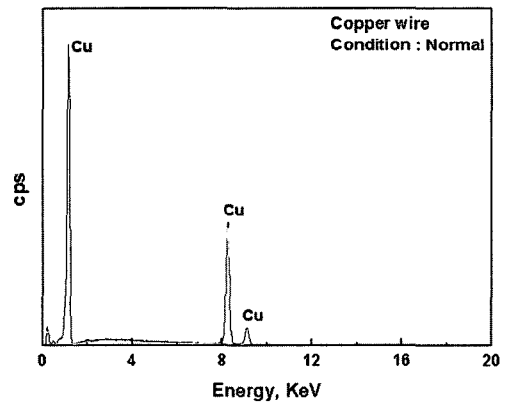
(a) Normal (b) External flame

Fig. 5. SEM images of strands.

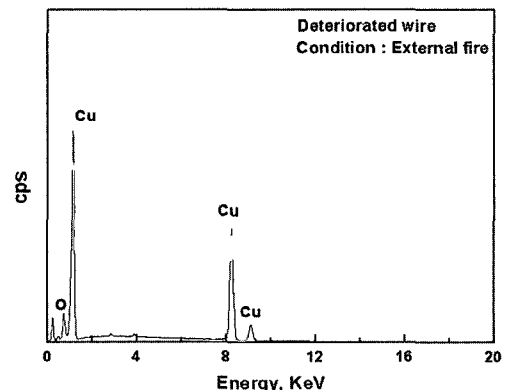


(a) Source part (b) Load part

Fig. 6. Molten strands by external flame.

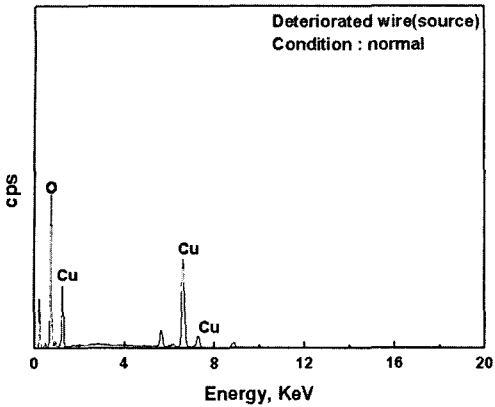


(a) Normal

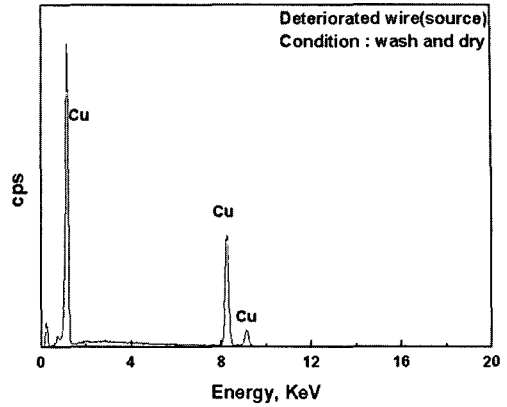


(b) External flame

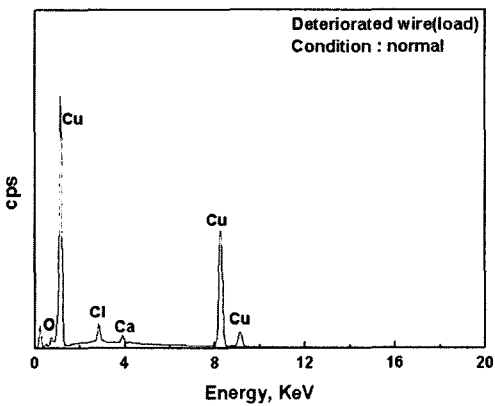
Fig. 7. Component analysis by EDX.



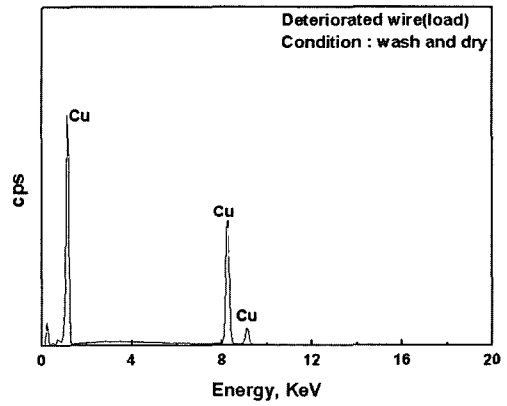
(a) Source part



(a) Source part



(b) Load part



(b) Load part

Fig. 8. Component analysis of molten wire (before cleaning).

Fig. 9. Component analysis of molten wire (after cleaning).

선으로 Cu와 O의 에너지 밴드가 검출되는 것으로 보아 Cu와 공기 중의 O가 결합한 것을 확인할 수 있다. 이는 열적인 요소가 지속적으로 가해져 전선의 표면에서부터 용융되면서 산소와 결합한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 일체형 코드가 외부화염에 의해 전기적으로 단락되었을 때 세척하지 않고 실험이 끝난 직후 표면의 조성을 분석한 것이다. Fig. 8(a)는 전원 측의 전선 표면의 조성분포를 나타낸 것으로 Cu 이외에 O가 검출되는 것을 확인할 수 있었으며 산소는 약 15.9%가 포함된 것을 알 수 있었다. 대부분 공기 중의 산소가 단락시 용단된 구리의 표면에 부착된 것으로 판단된다. Fig. 8(b)는 부하 측 전선표면의 조성분포를 나타낸 것으로 구리 이외에 O:12.1%, Cl:3.1%, Ca:3.8%로 구성되었다. 부하 측 전선은 단락될 때의 아크와 섬광, 열에 의해 주변의 산소와 절연피복이 녹으면서 일부 전선도체의 표면에 부착된 것으로 판단된다.

Fig. 9는 외부화염에 의해 전기적으로 단락된 전선을 세척한 후 표면의 조성을 분석한 것이다. Fig. 9(a)는 전원 측의 전선 표면으로 정상상태의 전선과 거의 유사한 형태의 성분분포를 확인할 수 있었고, Fig. 9(b)의 부하측에서도 전원 측과 유사한 성분분포를 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

일반 사용 환경과 유사한 벽면모델을 설정하고 외부화염이 인가하여 일체형 비닐코드의 절연물이 소손되고 전기적인 단락이 발생하면서 화재로 확산되는 과정을 종합적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초고속이미지 시스템에 의한 분석결과, 외부화염에 의해 비닐코드 피복이 용융, 탄화하여 전기적 단락으로 이어졌으며 화재발생 가능성이 높은 것으로 나타

났다. 또한 외부화염에 의한 전기적 단락과정은 매우 규칙적이며 단락 후 섬광, 용단 및 비산, 부하 측 전선의 이탈 순으로 진행되었다.

2) 외부화염에 의한 단락시 전원 측과 부하 측 전선에 나타난 용융흔의 V패턴과 두 전선이 용융형태를 통하여 전원 측과 부하 측의 구분이 가능하였다. 외부화염에 의해 절연물이 소손되고 단락된 전선의 부하 측(load part)은 날카롭게 되어 있는 것을 확인할 수 있었고, 전원 측(source part)은 용융 망울이 연선의 표면에 부착되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

3) 전원 측 전선에 형성된 용융단면에 형성된 보이드 크기가 부하 측에 비해 컸으며 이는 부하 측과 달리 수회에서 수십 회의 단락현상에 의해 전원 측이 소손이 큰 것으로 판단된다.

4) 표면의 조성분석 결과, 단락시 공기 중의 산소가 용융흔의 표면에 남아 있었으며 세척 후에는 산소가 표면에서 검출되지 않음을 확인하였다.

5) 세척하지 않은 단락된 전원 측과 부하 측 전선 표면의 조성분석 결과, 전원 측에는 구리와 산소가 검출되었으며, 부하 측에는 구리와 산소 이외에 절연피복에서 분해된 것으로 판단되는 염소와 질소가 검출되었다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 한국전기안전공사, “전기재해 통계분석”, pp10-50 (2003).
2. 최충석, “전기화재공학”, 동화기술, pp195-265(2004).
3. V. Babrauskas, “Fires due to Electric Arcing: Can ‘Cause’ Beads be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing”, *Fire and Materials*, pp189-201(2003).
4. C. S. Choi *et al.*, “The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current”, 2003 J-K Joint Symposium on ED&HVE, pp145-148(2003).
5. E. Cadirli *et al.*, “Investigation of the Structure Parameters According to the Solidification Parameters for Pivalic Acid”, *Material Science*, 34, pp5533-5541(1999).
6. Sheera Knecht *et al.*, “Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire”, 1996 Inter-Society Conference on Thermal Phenomena, pp329-333(1996).
7. P. Opaprakasit *et al.*, “Intramolecular Hydrogen Bonding and Calixarene-like Structures in P-Cresol/Formaldehyde Resins”, *J. of Molecular Structure*, pp25-35(2001).
8. Maitland Jones Jr., “Organic Chemistry”, Norton & Company, pp528-541(2000).