

외부화염에 의해 단락된 비닐코드 및 고무코드의 화재 패턴

김동우, 송길목, 김동욱, 김영석, 최충석  
한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

The fire patterns of vinyl and rubber cords shorted by external flame

Dong-Woo Kim, Kil-Mok Shong, Dong-Ook Kim, Young-Seok Kim, Chung-Seog Choi  
Electrical Safety Research Institute attached to Korea Electrical Safety Corporation

**Abstract** - The electrical fire frequently happens through carelessness of a vinyl and rubber cords such as a poor contact, a mechanical stress and so on. Electrical fire occupies the greater part(about 30%) of all fires in Korea. In this paper, we compared to the fire dispersive patterns of vinyl and rubber cords according to the external flame in the wall-model. The fire progress and dispersive patterns were measured by a high speed imaging system(HIG-100K, REDLAKE, USA). From the results, short-circuit of the vinyl cords are easy to happen than the rubber cords by the external flame. The pattern of fire was progressed a flashover, scattering and disconnection. The fire progress on the vinyl cord is not observed because the ignition energy decreases. However, the fire was progressed continuously on the rubber cord.

2. 실험장치 및 방법

비닐코드 및 고무 코드의 화재 패턴을 규명하기 위해 220[V], 비점지형 0.75[mm]×2C, 1.25[mm]×2C, 2.0[mm]×2C 등 3종류의 비닐코드와 0.75[mm]×2C, 1.25[mm]×2C의 고무 코드를 사용하였으며, 표 1에 특성들을 나타낸다.

표 1. 비닐코드 및 고무코드 재질 특성  
Table 1. The material properties of vinyl and rubber cords

재료	비중	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	화학구조
비닐코드	1.35-1.45	3.6-6.5	CH <sub>2</sub> = CHCl
고무코드	1.4-1.6	1.2-1.6	CH <sub>2</sub> = C · CH <sub>3</sub> - CH = CH <sub>2</sub>

1. 서 론

우리나라 전체의 화재사고 중 전기화재가 차지하고 있는 비율은 약 30[%]정도이며, 그 중에서도 단락에 의한 화재가 78[%]를 차지하고 있다. 또한 저압용 기기에 사용되는 일체형 코드의 접촉 불량, 기계적 충격, 전기적 피로 등의 부주의한 사용에 의해 전기화재가 빈번하게 일어나고 있으며, 이에 대한 화재 원인분석과 예방대책이 필요한 실정이다[1-5].

일체형 코드에서 전기화재의 발생 메커니즘은 전선에 과부하가 발생하여 허용 전류 이상의 높은 전류가 도선에 흘러 줄열에 의해 발열되어 발생하는 화재와 기계적 피로, 물리적인 힘에 의한 과부하 형태로 화재가 발생한다[6]. 또한 단락 등에 의한 전기화재와 주변 화염에 의한 전기화재로의 원인분석은 어려우며, 전기화재 분석은 주변 상황 및 금속현미경과 같은 분석기기의 이용과 벽면 모델과 같은 재현모델을 선정하여 화염 패턴을 분석하고 있다.

일체형 코드는 300V 이하의 옥내 이동용 소형 전기기구에 사용되는 것으로 비닐코드(vinyl cords)는 성형성, 내수성, 내약품성 등이 우수하고 고무코드(rubber cords)는 충격, 마찰, 굴곡 등의 기계적 내성이 높고 내수, 내열, 내산 및 내알카리성 등의 화학적 내성이 우수하여 널리 이용되고 있다. 이들 코드의 전기화재 모의실험은 벽면에 설치된 콘센트를 중심으로 재현하며, 모델을 통한 재현실험은 다양한 형태의 실험을 할 수 있어 화재원인에 따른 결과를 축적함으로써 전기화재를 근본적으로 예방할 수 있다.

따라서 본 실험은 저압기기용 비닐코드 및 고무코드의 화재 원인분석과 예방을 위해 벽면 모델을 선정하여 인위적으로 외부화염을 인가하여 전기화재로 이어지는 과정을 분석하였다. 일체형 코드의 단락 시, 화재 진행과정과 확산 패턴을 고속카메라 이미지 시스템을 이용하여 측정하였다.

그림 1에서는 실험에 사용된 벽면 모델의 개략도를 나타낸 것이다. 벽면의 구성은 가로, 세로 각각 1800[mm], 1500[mm]의 철 구조로 한 후, 가로 600[mm], 세로 300[mm]의 베이크라이트를 각각 부착하여 구성하였다. 콘센트는 바닥면에서 30[cm] 높은 위치에 부착하였다. 제어부에서는 저압용 보호장치인 배선용차단기(MCCB) 및 누전차단기(RCD)와 물리적 용단특성을 가진 커버나이프스위치(CKS)를 순차적으로 설치하였으며, 화재 진전 및 단락 현상을 고속카메라(HIG-100K, REDLAKE, USA)로 취득하였다.

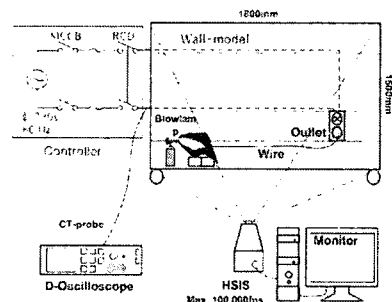


그림 1. 벽면 모델 구성  
Fig. 1. Wall-model set-up

벽면의 콘센트에 일체형 코드를 설치하고 전원을 인가하였으며, 토치로 일체형 코드에 인위적으로 화염을 가하였다. 화염을 가한 위치는 일체형 코드의 길이를 고려하여 콘센트에서 약 80[cm] 떨어진 부분에 화염을 가하였으며, 화염과 일체형 코드의 거리는 5[cm]로 하였다. 이때 주위환경은 온도 15[°C], 습도 50[%]로 유지하였으며, 무부하 상태에서 실험하였다. 또한 분석은 실험현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany), FT-IR(Spectrum GX, Perkin-Elmer, USA) 등을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

그림 2는 비닐코드(0.75[mm]×2C)가 외부화염에 의해 단락되어 나타나는 화염패턴을 순차적으로 배열한 것이다. 그림 2(a)에서 비닐 코드에 화염을 가하게 되면, 비닐코드의 피복은 열화 되어 착화되며, 그림 2(b)와 같이 평균 20초 후에 단락에 의한 섬락이 발생하였다. 이후 그림 2(c)에서는 연속적인 단락과 함께 코드 주변으로 비산되고 용단되는 과정으로 이어졌으며, 이때 제어부의 차단기는 동작하지 않았다. 또한 비산방향은 화염을 가하고 있는 방향으로 많이 비산되었으며 이는 화염을 가하는 쪽의 절연피복이 먼저 소손되어 취약부위가 노출된 것으로 사료된다. 그림 2(d)와 같이 용단된 후에는 2차 단락은 일어나지 않고, 착화에너지가 작아짐에 따라 화재진전은 이루어지지 않았으며 자연 소화되었다. 섬락의 크기는 일정하지 않았으나 직경이 약 500[mm]에서 600[mm]인 것으로 계산되었고 비산된 용융방울은 단락되는 지점을 중심으로 반경 200[mm] 주변으로 흩어졌으며 일부는 2,000[mm] 이상 진전되는 것을 확인할 수 있었다.

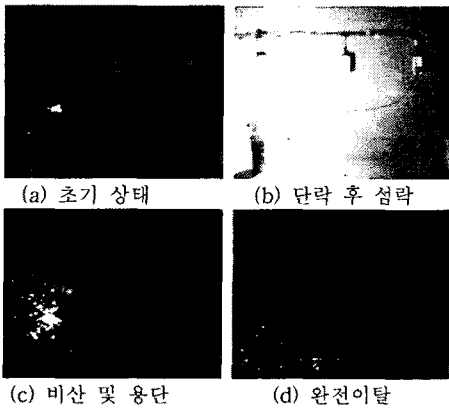


그림 2. 외부화염에 의한 화염패턴(비닐코드, 0.75[mm])  
Fig. 2. The flame pattern of vinyl cords according to the external flame

그림 3은 고무(0.75[mm]×2C) 코드의 외부화염에 의해 단락이 발생하는 과정을 보여준다. 고무코드도 그림 2의 비닐 코드와 동일하게 단락이 발생한 후, 섬락과 비산 그리고 용단되는 과정으로 진행하였다. 또한 외부화염에 의해 단락이 되어도 이에 따른 차단기의 차단동작은 일어나지 않았다. 하지만, (d)에서와 같이 용단된 후에는

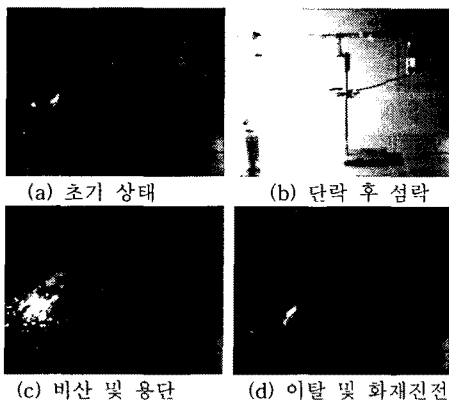


그림 3. 외부화염에 의한 화염패턴(고무코드, 0.75[mm])  
Fig. 3. The flame pattern of rubber cords according to the external flame

2, 3차에 걸친 단락과정은 발생되지 않았으나 불꽃은 자연 소화되지 않고 계속 진행되는 형태를 나타내었다. 이는 비닐 코드가 외부화염에 의해 단락되어 용단된 후, 화재 진전이 이루어지지 않았던 것과는 다른 결과를 보여주는 것이다. 고무코드의 경우는 단락 후 용단이 되었으나 화재가 계속 진전함에 따라 실제 아크에 의한 피해를 감소할 수 있는 조건은 충족시키지만, 화재가 이미 발생한 곳에서는 화재를 지속적으로 유지하는 것을 알 수 있다.

그림 4는 다양한 굵기의 비닐코드 및 고무코드에 외부 화염을 인가하여 착화된 후, 단락이 발생할 때까지의 시간을 나타낸다. 여기서, 직선은 코드 굵기에 대한 시간을 나타내고 점선은 각 코드의 직경에 대한 시간 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 착화 후 단락까지의 시간이 고무코드의 경우가 비닐코드 보다 많이 소요되는 것을 알 수 있다. 또한 비닐코드 및 고무코드 모두 코드가 굵어짐에 따라 시간은 늘어나는 것을 알 수 있다. 비닐코드의 0.75[mm]의 경우 착화에서 단락까지 이어지는 시간은 약 20초 전후로 나타났으며, 1.25[mm]의 경우는 30초 전후, 2.0[mm]의 경우는 40초 전후에서 단락이 발생하였다. 한편, 고무코드의 0.75[mm]의 경우 착화에서 단락까지 이어지는 시간은 약 65초 전후로 나타났으며, 1.25[mm]의 경우는 80초 전후에서 단락이 발생하였다. 또한 코드 굵기에 따라 코드의 직경은 증가하기 때문에 단락까지의 시간이 증가하는 것을 알 수 있다.

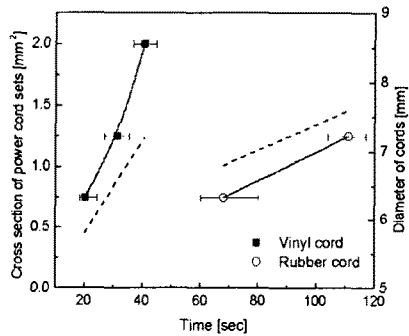


그림 4. 외부화염에 의한 일체형 코드의 단락 시간  
Fig. 4. The short-circuit time of power cord sets according to the external flame

고무코드와 비닐코드의 단락시간이 다른 것은 그림 5와 6에 나타난 외부화염의 인가시간에 따른 비닐코드 및 고무코드의 탄화사진을 비교해 보면 알 수 있다.

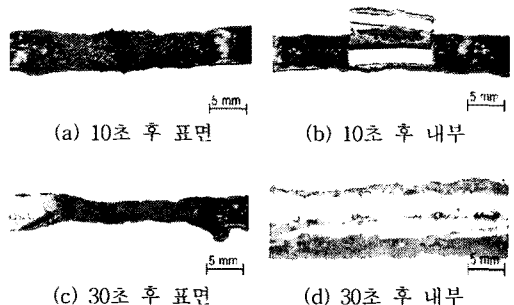


그림 5. 시간에 따른 비닐코드(0.75[mm])의 소손  
Fig. 5. The damage of vinyl cords according to time

그림 5(a)는 10[sec] 동안 외부화염을 가하였을 때, 비닐 코드의 피복이 탄화된 것을 보여주는 것으로 표면에 탄화된 흔적이 나타나고 있지만, 그림 5 (b)의 내부를 살펴보면, 내부 두 전선은 화염에 의한 영향이 전혀 보이지

않는 것을 알 수 있다. 그림 5 (c)에 30[sec] 동안 외부 화염을 가하였을 때는 탄화된 비닐코드의 직경은 줄어들고 그림 5 (d)와 같이 내부의 두 전선은 거의 접촉해 있는 것을 알 수 있다. 비닐 코드는 표 1에서 나타낸 화학구조를 보면, 염화비닐의 부가중합체로서, 일반적으로 결정성이 낮고 C-C의 극성기를 함유하기 때문에 분자간 인력이 비교적 강하다. 따라서 외부 화염을 가하게 되면 0.75[mm]의 비닐코드는 녹게 되고 직경이 감소하여 내부의 두 전선이 서로 접촉하게 되어 단락으로 진행되는 것을 알 수 있다.

그림 6(a)은 20[sec] 동안 외부 화염을 가하였을 때, 고무코드의 피복이 탄화된 것을 보여주는 것으로 비닐 코드와는 약간 다르게 탄화된 표면에 크랙(crack)이 많은 것 알 수 있다. 그림 6(b)의 경우 내부의 두 전선에는 화염에 대한 영향이 거의 나타나지 않았다. 그림 6(c)에 70[sec] 동안 외부 화염을 가하였을 때는 표면은 거의 탄화되었으며, 그림 6 (d)와 같이 내부의 두 전선은 거의 탄화되지 않고 약간 부풀어 있는 것을 알 수 있다. 고무 코드는 표 1에서 나타낸 화학구조를 보면, 이소프렌의 중합체로서 분자간 인력이 약하고 결정성이 낮으며 분자간의 가교반응이 용이하다는 특징이 있다. 따라서 외부 화염을 가하게 되면 0.75[mm]의 고무 코드 표면은 탄화되지만 코드 속의 무기질 충전제에 의해 내부 전선으로의 열 전달이 쉽지 않아 많은 시간이 소요되었으며, 중력에 따른 하중으로 단락이 발생하는 것으로 생각된다.

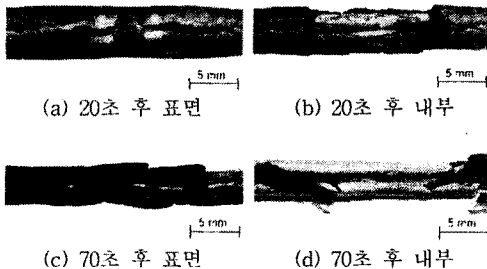


그림 6. 시간에 따른 고무코드(0.75[mm<sup>2</sup>])의 손상  
Fig. 6. The damage of rubber cords according to time

그림 7은 적외선 분광기(FT-IR)로 분석한 비닐 코드의 흡광피크를 나타낸다. (a)는 정상상태를, (b)는 탄화된 흡광피크를 나타낸다. 정상상태에서의 흡광피크는 1720.3[cm<sup>-1</sup>], 1425.0[cm<sup>-1</sup>], 1273.2[cm<sup>-1</sup>], 874.9[cm<sup>-1</sup>]에서 흡광피크가 나타나는 것을 확인하였다. (b)은 외부 화염에 의해 소손된 것으로 3367.9[cm<sup>-1</sup>]에서 나타난 흡광피크는 정상상태의 (a)에서는 나타나지 않았던 것으로 이는 유기질이 탄화되어 내부의 탄소 가 공기 중에 있는 수분과 결합한 일반적인 흡광피크이다. 따라서 열에 의해 절연피복이 소손되었음을 확인할 수 있고, (a)에서는 1720.5[cm<sup>-1</sup>]의 흡광피크가 나타나지만, (b)에서는 그 흡광피크가 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나 탄화물이 산소와 재결합한 것으로 추정되는 1637.8[cm<sup>-1</sup>]에서 흡광피크가 나타나는 것을 확인하였다. 이외에 1272.5[cm<sup>-1</sup>]에서의 흡광피크도 (b)에서는 나타나지 않았다.

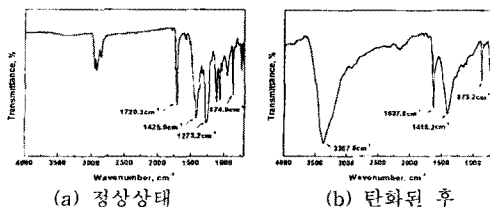


그림 7. 비닐 코드의 흡광피크  
Fig. 7. The absorption peak of vinyl cord

그림 8은 고무 코드의 흡광피크를 나타낸다. 고무코드에서는 정상상태와 탄화된 상태의 흡광피크 차이가 크게 나타나지 않았다. 정상상태에서 1594.41[cm<sup>-1</sup>]에 흡광피크가 나타나지만, 탄화된 후의 흡광피크에서 이 부분의 피크가 나타나지 않았다.

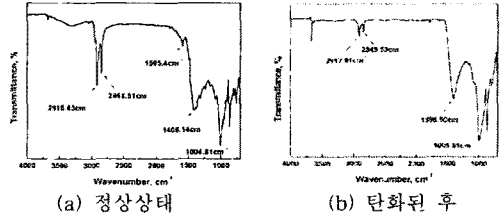


그림 8. 고무 코드의 흡광피크  
Fig. 8. The absorption peak of rubber cord

### 3. 결 론

외부 화염에 의한 비닐코드 및 고무코드의 단락화에 관한 특성을 비교하였다. 비닐코드 및 고무코드의 화염 패턴은 단락, 섬락, 용융망울 비산 그리고 용단의 순서로 진행되었다. 단락에 따른 용융망울은 전선 주변으로 비산되고 비산된 용융망울은 단락되는 지점을 중심으로 반경 200[mm] 주변으로 흩어졌으며 일부는 2,000[mm] 이상 전진되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 비닐코드의 경우 용단에 의한 완전히탈과 함께 착화에너지의 감소로 자연 소화 되었지만, 고무코드의 경우는 자연소화 되지 않고 화재가 계속 전진되는 것을 알 수 있었다.

외부 화염에 의한 비닐코드 및 고무코드의 단락되는 시간은 전선의 굵기에 따라 선형관계가 있음을 확인하였으며, 고무코드는 무기질 충전제 및 화학적 구조에 의해 내부 전선으로의 열전달이 쉽지 않아 단락까지의 시간이 많이 소요됨을 알 수 있었다.

이상으로 벽면모형에서 발생한 비닐코드 및 고무코드의 화재 확산 패턴을 정량적으로 분석이 가능하였으며, 이 결과는 전기화재의 원인분석 및 예방에 크게 도움에 될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 최충석, "전기화재공학", 동화기술, 2000.
- [2] C. S. Choi et al, "The analysis of dendrite structure of electric wire melted by fusing current", 2003 J-K Joint Symp. on ED&IVE, pp.145-148, 2003.
- [3] V. Babrauskas, "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing ", Fire and Materials, pp.189-201, 2003.
- [4] 한국전기안전공사, "전기재해 통계분석", pp.10-50, 2003.
- [5] C. S. Choi et al, "The Scattering Patterns Analysis of Particles by Varying Short-Circuit Angles between Electric Wires", Fire Science and Technology, Proceeding of the sixth Asia-Oceania Symp., pp. 717-722, 2004.
- [6] Sheera knecht et al, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp.329-333, 1996.