

벽면 모델링을 이용한 저압용 일체형 코드의 화재 확산 패턴

(The Fire Dispersive Patterns of the Power Cord Sets for Low Voltage Appliances in Wall-modeling)

송길목* · 김향곤 · 김동욱 · 김동우 · 김영석 · 최충석

(Kil-Mok Shong · Hyang-Kon Kim · Dong-Ook Kim · Dong-Woo Kim · Young-Seok Kim · Chung-Seog Choi)

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

(Electrical Safety Research Institute attached to Korea Electrical Safety Corporation)

Abstract

In this paper, we studied on the fire dispersive patterns and the fire progress at the power cord sets for low voltage appliances in the wall-model. For the experiment, we manufactured a wall-model and applied the external flame at the power cord sets. From the results, short-circuit of the power cord sets was happened by the external flame, it was disconnected with the flashing and the scattering. The fire progress on the polyvinyl chloride insulated flexible cords is not observed because the ignition energy decreases. In case of rubber insulated flexible cords, however, the fire was progressed continuously. Molten marks were formed at a two electric wire by continuous electric discharge in power source part. A large molten mark was formed in load part. And the columnar structure and voids were observed in molten wire.

1. 서 론

전기관련 화재에 있어서 110/220[V]의 저압용 기기의 일체형 코드에서 출화한 사고 사례가 다수 발생하고 있다[1][2]. 일반적인 가전제품인 냉장고, 텔레비전, 세탁기, 선풍기 등의 저압용 전기기기는 대부분 일체형 코드를 사용하고 있으나, 실생활에서 일체형 코드의 부주의한 사용, 콘센트와 일체형 코드의 접촉 불량, 콘센트의 탈착 등 부주의한 사용에 따른 단단선 열화, 일체형 코드의 외부화염 노출, 기계적 충격, 묶음 사용 등에 의해 전기화재로 발생할 수 있다[3][4].

일체형 코드의 전기화재에 대한 분석은 화재 당시와 유사한 상황에서 재현 실험하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 재현모델을 정확하게 선정하기 어렵고, 시간 및 비용적인 측면에서 제약이 따른다. 전기화재는 그 주변 상황 즉 실내 및 실외에서의 온도, 습도, 날씨 상황 등 변수가 다양하게 존재하여 화재발생을 정확하게 유추하기 힘들다. 또한, 벽면 모델링을 통한 일체형 코드의 화재 재현 실험과 일체형 코드의 전기화재 화염 패턴에 대한 국내외의 연구내용은 미비한 실정이다.

이에 전기화재를 모의한 실험으로서 일반적으로 벽면에 설치된 콘센트를 중심으로 전기화재를 재현하며, 모델링을 통한 재현실험의 경우는 다양한 형태의 실험을 통해 화재원인에 따른 결과를 축적함으로써 전기화재를

근본적으로 예방할 수 있다[5][6].

따라서 본 실험은 저압용 일체형 코드의 화재 모델링으로 벽면 모델을 설정하여 인위적으로 외부화염을 인가하여 전기화재로 이어지는 과정을 분석하였다. 일체형 코드는 가장 많이 사용하고 있는 비닐 코드(polyvinyl chloride insulated flexible cords) 및 고무 코드(rubber insulated flexible cords)를 사용하였으며 단락 사고에 대한 화재 위험성을 연구하였다. 또한 일체형 코드의 단락 시, 화재 진행과정과 확산 패턴을 고속카메라 이미지 시스템을 이용하여 측정하였으며, 단락된 일체형 코드는 실체현미경 및 금속현미경을 이용하여 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

저압용 일체형 코드의 화재 위험성을 규명하기 위해 220[V], 비접지형 0.75[mm]×2C, 1.25[mm]×2C, 2.0[mm]×2C 등 3종류의 비닐코드와 0.75[mm]×2C의 고무코드를 사용하였으며, 실험에 사용된 벽면 모델링의 개략도를 그림 1에 나타낸다. 실험은 벽면의 콘센트에서 일체형 코드의 방향이 수평한 구조로 하였으며, 실험장치의 구성은 크게 벽면모델과 제어부 그리고 데이터 취득부로 나누었다.

벽면의 구성은 가로, 세로 각각 1800[mm], 1500[mm]의 철 구조로 한 후, 가로 600[mm], 세로 300[mm]의 베이

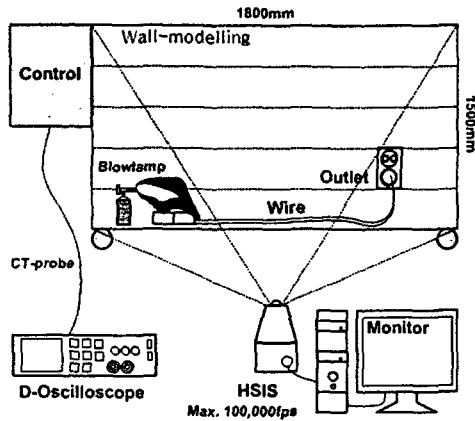


그림 1. 일체형 코드의 벽면 모델링 구성
Fig. 1. Wall-modeling set-up of power cord sets

크라이트를 각각 부착하여 구성하였다. 콘센트는 수평 구조의 실험을 위하여 바닥 면에서 30[cm] 높은 위치에 부착하였으며, 상하로 부착하였다. 제어부에서는 배선용 차단기, 커버나이프스위치, 누전차단기를 순차적으로 설치하였다.

실험은 순차적으로 벽면의 콘센트에 일체형 코드를 설치한 후, 전원을 인가하였으며, 토오치를 이용하여 일체형 코드에 인위적으로 화염을 가하였다. 일체형 코드에 화염을 가한 위치는 일체형 코드의 길이를 고려하여 플러그에서 약 80[cm] 떨어진 부분에 화염을 가하였으며, 토오치와 일체형 코드의 거리는 5[cm]로 하였다. 이때 주위환경은 온도 15[°C], 습도 50[%]로 유지하였으며, 무부하 상태에서 실험하였다. 또한, 화재 진전 및 단락 현상을 고속카메라(HG-100K, REDLAKE, USA)로 취득하였으며, 시료의 분석은 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany), 금속현미경(Epihot, Nikon, Japan), FT-IR(Spectrum GX, Perkin-Elmer, USA) 등을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

저압용 일체형 코드의 열 특성으로 전원이 인가된 상태(standby mode)에서 다양한 굵기의 비닐코드에 토오치를 이용하여 가열을 시켜, 단락이 발생할 때까지의 시간을 측정하여 그림 2에 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이, 비닐코드의 전선 굵기가 굵어짐에 따라 착화 후 단락까지 이어지는 시간은 늘어나는 것을 알 수 있다. 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. 비닐코드 0.75[mm]는 0.18[mm] 전선이 30가닥으로 구성되어 있고 1.25[mm]는 0.18[mm] 50가닥 그

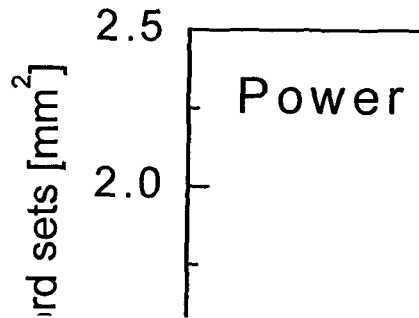


그림 2. 외부화염에 의한 일체형 코드의 단락 시간
Fig. 2. The short-circuit time of power cord sets (vinyl) according to external flame

리고 2.0[mm]은 0.26[mm]의 전선이 37가닥으로 구성되어 있다. 이에 각 전선의 내부피복 직경은 각각 1.1[mm], 1.5[mm], 1.8[mm]로서 전선이 굵어짐에 따라 직경이 늘어났다. 따라서 일체형 코드 속의 두 전선의 피복이 외부 화염에 의해 녹는 시간은 다르고 단락까지의 시간이 각각 달라지는 것을 알 수 있다. 절연피복이 같은 재질에서의 외부화염에 의한 단락까지의 시간은 전선의 굵기에 따른 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있었으며 피복 재질이나 피복 두께의 상향조정으로도 화재에 의한 인명, 재산피해를 어느 정도 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 피복의 두께가 늘어남에 따른 화재 시 다량의 유독가스 발생을 최소화할 수 있는 무독성 난연재료의 사용이 요구된다.

위의 실험을 통해 일체형 코드는 외부화염에 일정시간 노출되면 단락으로 진행되는 것을 확인할 수 있었으며 외부화염이 가해졌을 때 절연피복이 탄화되고 내부 도체가 맞닿아 상호 접촉되는 과정을 거친다.

그림 3은 비닐코드(0.75[mm]×2C)가 외부화염에 의해 단락이 진행되어 나타나는 화염패턴을 순차적으로 배열한 것이다. (a)에서 일체형 코드에 토오치를 이용하여 화염을 가하게 되면, 비닐코드의 피복은 열화 되어 착화되며, 그림 (b)과 같이 평균 20초 후에는 단락에 의한 섬락이 발생하였다. 이후 (c)에서와 같이 일체형 코드에서 단락과 함께 비산되고 용단되는 과정으로 이어졌으며, 이때 벽면모델링 제어부의 차단기는 동작하지 않았다. 또한 비산방향은 화염을 가하고 있는 토오치 방향으로 많이 비산되었으며 이는 토오치를 가하는 쪽의 절연피복이 먼저 소손되어 취약부위가 노출된 것으로 사료된다. (d)와 같이 용단 된 후에는 2차 단락은 일어나지 않고, 착화에너지가 작아짐에 따라 화재진전은 이루어지지 않았으며 자연 소화되었다.

따라서 화재진전의 가능성은 단락 후 섬락이 나타난

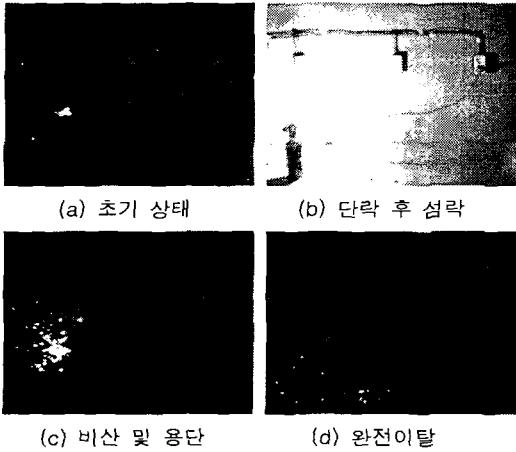


그림 3. 외부화염에 의한 화염패턴(비닐코드, 0.75[mm])
 Fig. 3. The flame pattern of power cord sets(vinyl) according to external flame

시점에서 비산되는 용융망울에 의해 주변가연물로 확산될 때 가능할 것으로 추정된다. 섬락의 크기는 일정하지 않았으나 직경이 약 500[mm]에서 600[mm]인 것으로 계산되었고 비산된 용융망울은 단락되는 지점을 중심으로 반경 200[mm] 주변으로 흩어졌으며 일부는 2,000[mm] 이상 진전되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 화재현장의 조건에 따라 달라질 수는 있겠으나 선간단락이 발생하는 지점에서 가장 화재가 발생하기 쉬운 취약한 범위는 반경 300[mm]에 위치하는 것이고 2,000[mm] 이상 위치하였을 경우에도 가연성 물질이 존재하고 있다면 위험한 결과를 초래할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 4는 고무(0.75[mm]×2C) 코드의 외부화염에 의해 단락이 발생하는 과정을 보여준다. 고무코드도 그림 3

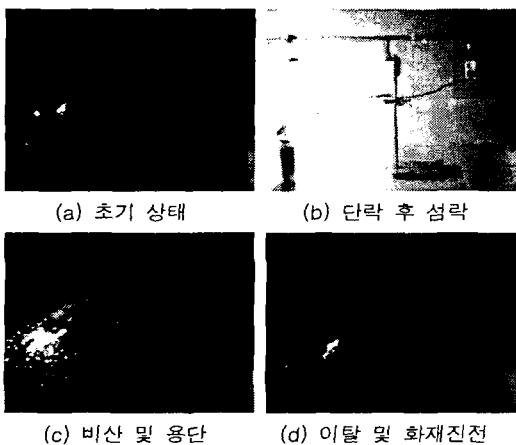


그림 4. 외부화염에 의한 화염패턴(고무코드, 0.75[mm])
 Fig. 4. The flame pattern of power cord sets(rubber) according to external flame

의 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 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 5는 화염이 진행되고 있는 고무 코드를 근접하여 촬영한 것이다. 이 고무 코드는 화염이 가해진 이후 플러그에 근접될 때까지 소화되지 않고 지속적으로 화염이 타 들어가는 것을 확인할 수 있었다.



그림 5. 용단된 후, 고무 코드의 화재 진행
 Fig. 5. The fire progress of power cord sets(rubber) after the wire is disconnected

그림 6은 외부화염에 의해 단락된 비닐 코드(0.75[mm])를 실제 현미경으로 확대하여 분석한 것이다. (a)는 전원 측으로 용융 망울은 두 전선에 각각 형성되고, 전선은 동색을 띄었으며, 두 전선 사이는 완전히 탄화되어 절연물은 남아 있지 않은 것을 확인할 수 있다. 전원 측의 경우는 외부화염에 의해 1회의 단락에 의한 섬락이 일어나는 것이 아니라 연속으로 단락이 일어났으며, 두 전선 사이의 절연물은 완전히 탄화되고 두 전선 사이에 약간의 틈이 생겼다. 이는 그림 4에서 비산 및 용단이 된 후 전원 측 비닐 코드는 화재가 자연소화되지 않고 계속 진전되고 있으며, 차단기가 동작하지 않아 계속 전원이 공급되고 있는 상태에 의한 것으로 단락 현상이 여러 번 발생하는 것을 확인하였다. 반면에 (b)의 부하 측에서는 용융 망울은 크고 두 전선 사이의 절연물은 완전히 탄화되지 않은 형태를 나타내었다. 이는 고속카메라에 의한 분석에서 알 수 있듯이 비산 및 용단된 후, 부하 측의 전원공급은 차단되어 에너지의



(a) 전원 측

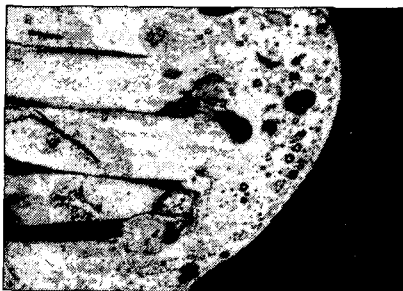


(b) 부하 측

그림 6. 비닐코드 0.75[mm]의 실제현미경 사진
Fig. 6. The stereoscopic picture of power cord sets(vinyl) melted by external flame

공급은 더 이상 이루어지지 않기 때문에 두 전선 사이의 탄화물이 남아 있는 것으로 판단된다. 또한, (a)과 같이 용융망울의 비산 방향은 부하 측의 용융형태를 보고 추정이 가능하고 반대로 선간 단락의 진행방향은 선간 가장 인접한 부분으로부터 전원 측 방향으로 진행되었음을 확인할 수 있다. 전원 측 용단전선에서 용융 부분은 대부분 단락이 발생할 때 용융망울이 되어 비산되고 일부는 전선에 부착되어 있는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 용단된 비닐 코드의 금속 단면 사진을 나타낸다. (a)와 (b)는 각각 전원 측 및 부하 측 용단부분의 단면조직으로 외부화염에 의해 피복이 소실되고 단락될 때 생성되는 여러 형태의 구멍(void)과 주상조직이 나타났다. 또한 외부화염에 의한 단락은 주위의 온도가



(a) 전원 측

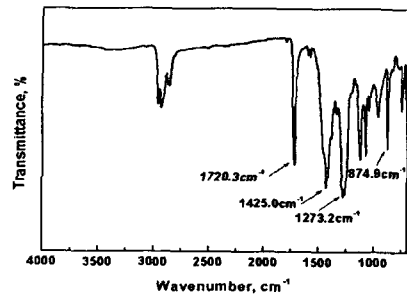


(b) 부하 측

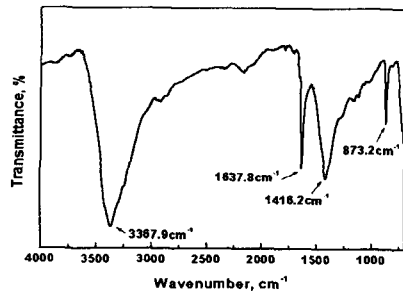
그림 7. 비닐코드 0.75[mm]의 금속단면 사진
Fig. 7. The metallurgical picture of power cord sets(vinyl) melted by external flame

높아 냉각 속도가 느리기 때문에 구멍이 전체적으로 나타나 있다. 2차 단락흔의 주 특징은 경계선이 거의 없고 주상조직이 방향성을 가지고 있지 못하다는 데 있다. 비닐코드의 절연피복은 열에 약한 특성을 가진다. 따라서 외부화염으로 내부로 화재가 진행될 경우 일반적으로 먼저 소손되는 외피에서부터 흡열피크의 변화가 나타나며, 적외선분광기를 이용하여 분석을 실시하였다.

그림 8은 비닐 코드의 절연피복 흡광피크를 나타낸다. 그림 (a)은 정상상태의 흡광피크를 나타내며, 그림 (b)은 외부화염에 의해 두 전선 사이의 탄화된 절연피복의 흡광피크를 나타낸다. 정상상태에서의 흡광피크는



(a) 정상상태



(b) 탄화된 절연피복의 흡광피크

그림 8. 비닐 코드의 흡광피크
Fig. 8. The absorption peak power cord sets(vinyl)

1720.3[cm⁻¹], 1425.0[cm⁻¹], 1273.2[cm⁻¹], 874.9[cm⁻¹]에서 흡광피크가 나타나는 것을 확인하였다.

그림 (b)은 외부 화염에 의해 소손된 것으로 3367.9[cm⁻¹]에서 나타난 흡광피크는 정상상태의 (a)에서는 나타나지 않았던 것으로 이는 유기질이 탄화되어 내부의 탄소가 공기 중에 있는 수분과 결합한 일반적인 흡광피크이다. 따라서 열에 의해 절연피복이 소손되었음을 확인할 수 있다. 이때 (a)에서는 1720.5[cm⁻¹]의 흡광피크가 나타나지만, (b)에서는 그 흡광피크가 없는 것을 확인할 수 있다. 대신 탄화된 재료가 공기 중의 산소와 재결합한 것으로 추정되는 1637.8[cm⁻¹]에서 흡광피크가 나타나는 것을 확인하였다. 이외에 1272.5[cm⁻¹]에서의 흡광피크도 (b)에서는 나타나지 않았다.

4. 결 론

벽면 모델링을 이용하여 실제화재와 유사한 조건에서의 화재 재현이 가능하였으며, 화염의 확산 패턴 및 진행과정을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 외부화염에 의한 일체형 코드의 단락되는 시간은 전선의 굵기에 따라 선형관계가 있음을 확인하였다.

2) 일체형 코드에 외부화염을 가하면 단락, 섬락, 용융망을 비산, 용단의 순서로 진행되었으며, 주변 가연물질의 존재에 의해 화재로 이어질 수 있다.

3) 단락된 일체형 코드의 외형을 보면 부하 측의 용단부분은 날카롭게 되어 있는 것을 확인할 수 있고 전선 측 부분의 용융망이 전선의 일부에 있는 것을 확인할 수 있다.

4) 고무 코드의 경우 외부화염에 의한 단락 후 용단이 되면 불꽃이 소화되지 않고 유지되는 것을 확인하였다.

5) 외부화염에 의해 피복이 소실되고 단락 될 때 생성되는 여러 형태의 구멍(void)과 주상조직이 나타났다.

이상으로 벽면모델에서 발생한 일체형 코드의 화재 확산 패턴을 정량적으로 분석이 가능하였으며, 이 결과는 전기화재의 원인분석 및 예방에 크게 도움에 될 것으로 판단된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 최충석, "전기화재공학", 동화기술, 2001.
- [2] 한국전기안전공사, "전기화재 통계분석", pp.10~50, 2003.
- [3] Chung-Seog Choi, "The analysis of dendrite structure of

- electric wire melted by fusing current", 2003 J-K Joint Symp. on ED&HVE, pp.145-148, 2003
- [4] 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
- [5] Sheera knecht et al, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 InterSociety Conference on Thermal Phenomena, pp.329-333, 1996.
- [6] E. Cadiri, N. Marasli, B. Bayender and M. Gunduz, "Investigation of the structure parameters according to the solidification parameters for pivalic acid", Material science, Vol.34, pp.5533-5541, 1999