

열적 피로에 의한 전원코드의 발화 특성과 전기화재 분석에 관한 연구

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

A Study on the Electrical-Fire Analysis and Firing Characteristics of Power Cord by Thermal Stress

Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyang-Gon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim
Electrical Safety Research Institute(ESRI) attached to KESCO

[Abstract]

In this paper, we studied on the firing characteristics and electrical fire analysis of power cord deteriorated by thermal stress. The cross section of PVC insulating cord deteriorated by indirect flame decreased through heat convection. PVC insulating cord deteriorated by direct flame was bumpy shape. The exothermic peak of normal cord was shown at 526.7[°C], but the peaks of HTT(heat treatment temperature) 150[°C] cord was shown at 299.6[°C] and 502.2[°C]. The exothermic peaks according to high temperature were similar to those of amorphous carbon. In the FT-IR analysis, the absorption peak of normal cord indicated double bond of oxygen and carbon in benzene ring at 1720.0cm⁻¹. As the HTT was high, the height of characteristic peak decreased and the peak of carbonyl group was shown at about 1625.7cm⁻¹. The characteristic peak of single bond(O-H) was shown at about 3479.2cm⁻¹. In case of the internal part of wire covering deteriorated by over current, the characteristic peak were shown at about 3417.3cm⁻¹ and 1600.2cm⁻¹. The above results show that we can distinguish the differences according to the fire pattern through the internal · external analysis of wire covering deteriorated by heat

1. 서론

다변화되고 있는 사회생활은 인간의 욕구에 맞추어 편리성과 안전성을 추구하고 있지만, 산업발달에 따른 도시집중화 현상으로 화재, 전기안전 등 밀집된 지역에서의 최소 안전 확보가 중요한 문제로 제기되고 있다. 도심지에서의 화재는 진압의 어려움이 많고

다양한 위험요소가 많이 내포되어 있다. 그 중 매년 전체화재의 약 30%를 상회하는 전기화재는 관리가 소홀해지는 늦은 밤에 다수 발생하고 열화의 조건이 오랫동안 지속되어 오다 주변 가연물이나 자체의 방전 특성에 의해 발화되는 것으로 화재진압 후 잔존물이 거의 소실되고 훼손되어 판정이 쉽지 않다[1].

해외 화재통계에 따르면, 필리핀, 마닐라, 자카르타, 방콕, 한국 등은 전기화재가 화재원인의 가장 많은 비율을 차지하고 있지만 일본이나 뉴욕의 경우는 방화로 인한 화재발생이 가장 많이 차지하고 있는 것으로 조사되고 있다. 이러한 통계자료에 의한 분석으로 볼 때 선진외국의 경우 화재를 근본적으로 분석하기 위한 시스템이 잘 갖추어진 반면, 국내의 경우 언론보도나 초동조사에서 조사자의 판단만으로 결론짓는 경우가 많다. 이는 화재의 근본적 원인을 과학적으로 접근하기 보다 현상적인 관점에서 접근하기 때문에 많은 오류를 불러일으킬 수 있다[2].

따라서, 본 연구는 전기화재 중 가장 많은 원인패턴을 가진 전원코드에 대한 열적인 영향의 발화특성과 그 원인을 분석하였다. 열화조건은 열적인 factor를 간접과 직접의 형태로 가하고 과전류에 의해 내부에서 열적인 피로를 받은 절연피복의 특성을 실체현미경(OM; Optical Microscope, CarlZeiss, Germany)을 통해 외형을 분석하고 화학적 표면구조는 적외선분광기(FT-IR; Infra Red Spectrometer, PerkinElmer Ins., USA)를 이용하여 분석하였고 흡열, 발열반응 등의 비교는 열분석기(DTA, TA Ins., USA)를 이용하여 분석하였다. 이렇게 하여 취득된 자료의 입증을 통해 화재원인과 그 발화원인을 찾는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다[3].

2. 이 론

전원선의 주재료로 이용되는 PVC(poly vinyl chloride)는 높은 저항과 유연성이 뛰어나 저압기기용 절연재료로 많이 이용되고 있다.

표 1은 전원선의 절연피복으로 이용되는 플라스틱과 저전압용으로 많이 이용되는 플라스틱의 인화 및 발화온도를 나타낸 것으로 PVC의 인화온도는 391℃이며 발화온도는 454℃이다. 따라서, 전선의 경우 약 400℃ 이전에서 열적인 영향으로 변색과 탄화가 이루어져 발화하게 된다. 이러한 플라스틱의 온도에 대한 영향은 발화원을 식별하는데 중요한 근거가 된다. 또한, 금속의 융점(melting point)을 나타내는 것과 같이 화재가 발생하였을 때, 금속의 종류에 따라 용융된 형태로서 화재 당시 고온에서의 상황을 추정할 수 있다.

표 1. 각종 재료의 열적 특성

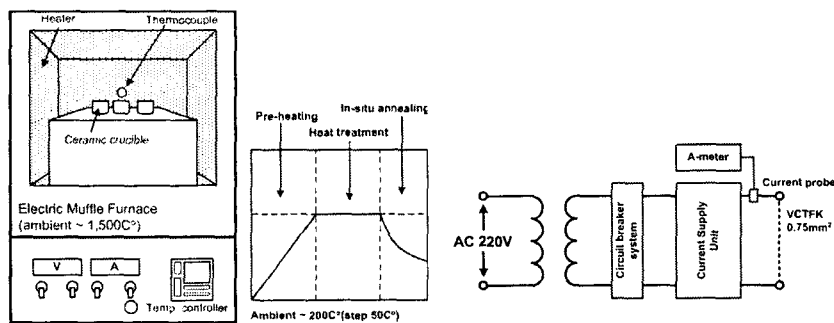
(a) 플라스틱의 인화(I.P.) 및 발화온도(B.P.) (b) 금속의 용점(M.P.)

Matter	I.P.(°C)	B.P.(°C)
PE(poly ethylene)	341	349
PP(poly propylene)	-	570
PVC(poly vinyl chloride)	391	454
PS(poly styrene)	345~3	488~4
	60	96
Acryl	141	141
Phenolic resin	-	532
Wood	260~3	400~4
	00	50

Metal	M.P.(°C)
Fine Gold	1,06
	3
F i n e Silver	961
	1,53
Iron	5
	1,06
Bronze	0
	1,08
Copper	3
	954
Aluminium	660

3. 실험방법

열적인 영향만을 고려한 것으로 가열형태에 따라 그 외형을 분석하고 화재현장에서 수거한 상태를 빠르게 비교 분석할 수 있도록 재현하였다. 가열형태는 크게 전선의 외부적 요인에 의한 화염과 내부적 요인(과전류)에 의한 화염으로 구분하였으며 외부 열의 경우 간접적인 영향과 직접적인 영향의 형태로 구분하였다. 외부 열에서 간접적인 영향은 밀폐전기로(Electric Muffle Furnace, ShinSung Heating Co., Korea)를 이용하여 실험하였으며, 특히 열류가 흐르면서 생길 수 있는 온도편차의 영향을 최소화하기 위해 세라믹 도가니(ceramic crucible)를 이용하여 이중으로 차폐하였다. 그림 2는 외부 열에 의한 영향과 내부적인 원인을 가진 과전류의 실험장치를 구성한 것이다.



(a) External flame modeling (b) Internal flame modeling

그림 2. 열적 원인 패턴별 실험장치 구성

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열적 영향에 의한 외형 분석

전선의 절연재료로 이용되는 절연피복의 외적 영향과 내적 영향을 각각 분석한 결과 화염의 패턴에 따라 차이점을 발견할 수 있었다.

그림 3은 단지 외부 열에 의한 영향을 비교 분석한 것으로 (a)에서 실험에 이용된 PVC 절연피복의 경우 150℃에서 200℃의 열대류에 의한 영향으로 피복의 소손이 가장 심하게 발생한 것을 확인하였고 절연피복의 표면이 기화 및 탄화되면서 단면(cross section)이 줄어드는 형태를 확인하였다. 또한, (b)는 직접 가열된 경우로 급격한 열이 절연 피복 표면에 공급되어 표면이 탄화 소손되고 1차적으로 탄화된 부분이 피복 안쪽으로 이동하는 열의 일부를 차단하는 효과가 있어 불균일한 형태의 소손상태를 확인할 수 있다.

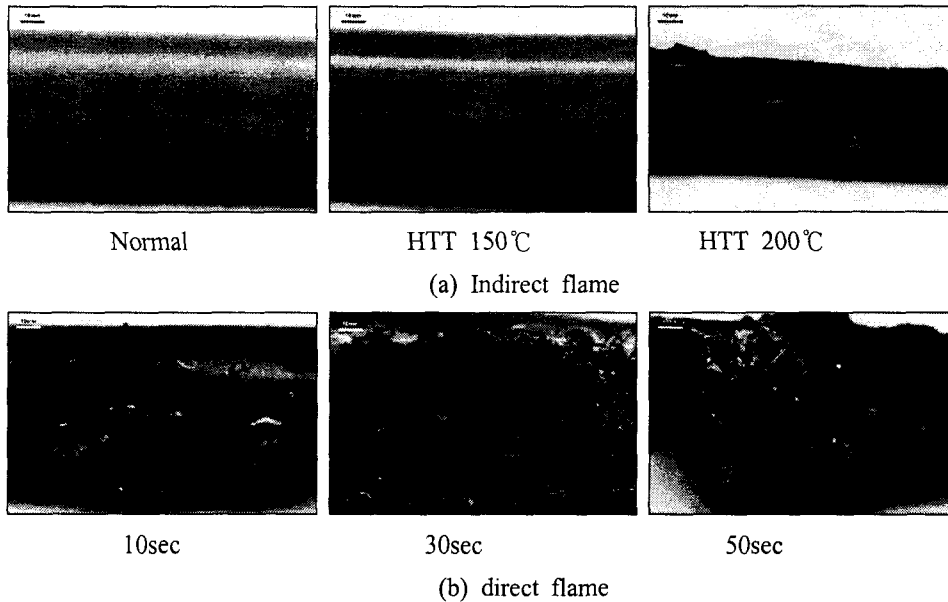


그림 3. 외부 열에 의한 외형 변화

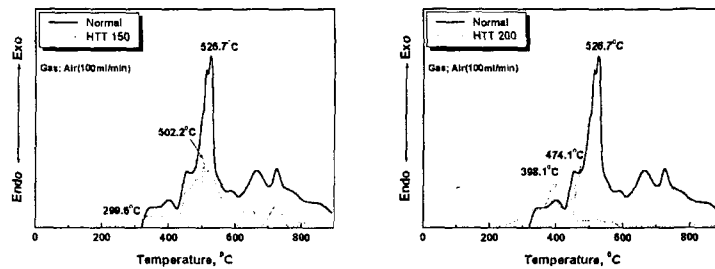
그림 4는 대전류 공급장치에 의해 동선 자체가 발열하여 절연피복이 탄화되는 과정을 촬영한 것으로 연기와 유독가스가 발생되면서 내부에서 불규칙하게 부풀어오르는 형태의 절연피복을 확인할 수 있고 더 많은 전류가 공급되면 절연피복이 내부에서 외부로 소손된 형태를 알 수 있다.



그림 4. 내부 열에 의한 외형 변화

4.2 시차열 분석

열분석기(Thermal analyzer, TA Ins., USA)를 이용하여 밀폐형 전기로에서 열처리된 절연피복의 흡열, 발열반응을 분석하여 그 결과를 보면 그림 5에서와 같은 형태의 발열피크를 보인다. 정상인 절연피복의 경우 526.7°C에서 강한 발열피크가 나타나고 150°C 열처리된 절연피복은 299.6°C에서와 502.2°C에서 발열피크를 확인할 수 있다. 발열된 양을 비교할 때 정상 피복에서 많은 발열피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 200°C에서 열처리된 피복의 발열피크를 (b)에서 보면 398.1°C와 474.1°C에서 각각 발열피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 발열피크의 경향이 고온으로 갈수록 탄화되어 일반 무정질 탄소의 발열반응이 나타나는 약 470°C에서 발열피크가 형성되는 것으로 알 수 있다.



(a) Normal & HTT 150°C (b) Normal & HTT 200°C

그림 5. 흡열·발열반응 곡선의 비교

4.3 화학적 표면구조 분석

그림 6은 정상적인 절연성능을 가진 절연피복과 열적 피로에 의해 소손된 피복의 흡광스펙트럼을 나타낸 것으로 (a)의 정상 절연피복은 1720.0cm⁻¹에서 벤젠고리(benzene ring)에서의 산소(Oxygen)와 탄소(Carbon)의 이중 결합을 가진 특성피크가 검출되었다. 열처리 온도가 높아갈수록 특성피크가 줄어들고 벤젠고리에서 이중 결합이 열에 의해 분해되었다가 약 1625.7cm⁻¹에서 재결합형태의 카아보닐기(Carbonyl group)의 특성피크가 검출되었다. 또한, 열화가 진행되면 발수성(hydrophobicity)에서 친수성(hydrophilicity)의 형태로 되어 약 3479.2cm⁻¹에서 산소와 수소의 단일결합형태인 특성피크가 검출된다. 이 피크는 일반적으로 절연피복이 경년변화나 일시적인 형태의 충격을 받아 그 발수특성을 잃는 것으로 판단된다. (b)는 과전류에 의해 소손된 절연피복의 안쪽과 바깥쪽 부분을 분석한 것으로 열의 진행이 내부에서 외부로 확산되어 열화되므로 특성피크의 형태도 내부에서 약

3417.3cm⁻¹와 약 1600.2cm⁻¹에서 특성피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 절연 피복을 분석하여 전기화재의 원인해석이 가능하다.

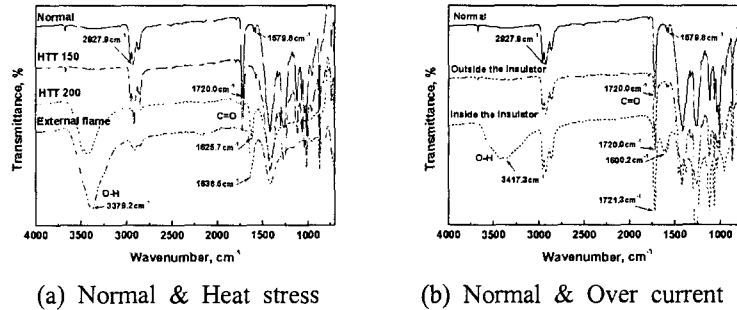


그림 6. 정상 및 열적 피로요인에 의한 절연피복의 흡광스펙트럼 비교

5. 결 론

화재현장에서 가장 많은 소손이 발생하는 절연피복의 분석은 화재당시의 흔적을 확인할 수 있는 매우 중요한 자료로서 그 열적인 열화패턴을 열분석기와 적외선분광기로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 외부 열에 의한 영향을 외형적으로 비교 분석하면 PVC 절연피복의 경우 150℃에서 200℃의 열대류에 의한 영향으로 피복의 소손이 가장 심하게 발생한 것을 확인하였고 절연피복의 표면이 기화 및 탄화되면서 단면(cross section)이 줄어드는 형태를 확인하였다.

(2) 직접 가열된 경우는 급격한 열이 절연피복 표면에 공급되어 표면이 탄화 소손되고 1차적으로 탄화된 부분이 피복 안쪽으로 이동하는 열의 일부를 차단하는 효과가 있어 불균일한 형태로 소손되었다.

(3) 정상인 절연피복의 경우 526.7℃에서 강한 발열피크가 나타나고 150℃ 열처리된 절연피복은 299.6℃에서와 502.2℃에서 발열피크가 나타났다.

(4) 200℃에서 열처리된 피복의 발열피크는 398.1℃과 474.1℃에서 각각 발열피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 발열피크의 경향이 고온으로 갈수록 탄화되어 일반 무정질 탄소의 발열피크와 유사한 형태를 나타내었다.

(5) 적외선분광분석에서 정상의 절연피복은 1720.0cm⁻¹에서 벤젠고리(benzene ring)에서의 산소(Oxygen)와 탄소(Carbon)의 이중 결합을 가진 특성피크가 검출되었지만, 열처리온도가 높아갈수록 특성피크가 줄어들고 벤젠고리에서 이중 결합이 열에 의해 분해되었다가 약 1625.7cm⁻¹에서 재결합형태의 카아보닐기(Carbonyl group)의 특성피크가 검출되었다. 또한, 열화가 진행되면 발수성(hydrophobicity)에서 친수성(hydrophilicity)의 형태로 되어 약 3479.2cm⁻¹에서 산소와 수소의 단일결합형태인 특성피크가 검출되었다.

(6) 과전류에 의해 소손된 절연피복의 안쪽과 바깥쪽 부분을 분석하면 열의 진행이 내부에서 외부로 확산되어 열화되므로 특성피크의 형태도 내부에서 약 3417.3cm⁻¹와 약 1600.2cm⁻¹에서 특성피크가 나타나는 것을 확인하였다.

위의 결과를 종합하여 절연피복의 열적 피로를 분석하여 전선의 절연재료로 이용되는 절연피복의 외적 영향과 내적 영향을 각각 해석하여 화염의 패턴에 따른 차이점을 발견할 수 있었다. 또한, 이러한 발화특성 분석을 통해 전기화재의 원인해석이 가능하였다.

참고문헌

- [1] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyung-Rae Kim, Dong-Woo Kim, "A Study on the Characteristics of Tracking Deterioration between Electrodes on Phenolic Resin used for Low Voltage", ICEE 2002 conference
- [2] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyung-Rae Kim, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, "A Study on the Flame Pattern and Electrical Properties of Electric Outlet Fired at Standby Mode", KIFSE Trans. Vol. 16, No. 1, pp.39~44, 2002
- [3] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyung-Rae Kim, Dong-Woo Kim, Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electric Fire Analysis of Insulating Materials Due to the Tracking Deterioration", 2002 ACED & K-J Symposium, pp.606~609, 2002