

전기적 용융흔과 발화요인의 상관관계에 관한 연구

이주현, 최정열, 권경희[†]

강원도소방본부 광역화재조사(강릉권역)

A Study on the Correlation between Electric Melting and ignition factors

Ju-hyun Lee, jung-yeol Choi, Gyeong-hui Kwon[†]

Gangwon Fire Headquarter, wide area fire survey(Gangneung area)

요약

화재현장에서 화재조사관들은 원인조사에 있어 대상처의 환경, 연소패턴 등 여러 가지 상황을 종합적으로 고려하여 조사하고 있으며, 불타버린 현장에서 그 흔적으로 조사를 진행하는 것이므로 원인규명을 하는 것이 간단하지 않다. 그 중 전기적 용융흔은 화재 원인판정에 있어 결정적인 증거로 작용하는 매우 중요한 요소 중에 하나이다.

본 연구는 화재현장에서 발견되는 전기적 용융흔의 외형과 발화요인과의 상관관계를 연구하였고, 전기의 일반 사용 환경에서 발화요인별 용융흔의 외형적 특성을 분석하였다. 실험결과 과전류 및 선간 접촉 등과 같이 전류의 흐름이 원활할 때 비교적 용융흔이 크고, 연선일 경우 전선이 오므라지는 형태, 전선의 비산이 식별되는 경향성이 보였다. 트래킹, 절연열화 등 전류의 흐름이 원활하지 않을 때는 비교적 용융흔이 작게 나타나고, 연선의 오므라지는 현상과 비산이 적은 경향성을 확인하였다. 또한 과부하에 의하여 한 극선에서만 발생한 용단흔은 양극이 만나는 단락¹⁾에 의한 용융흔과 구별되는 외형적 특성을 확인 할 수 있었다.

ABSTRACT

Fire inspectors at fire sites are investigating various situations, including the environment and combustion patterns of the target site, in a comprehensive manner in investigating the cause, and it is not easy to identify the cause as it is to identify the cause of the marks at the site of the fire. Among them, electrical melting is one of the very important factors acting as conclusive evidence in determining the cause of the fire.

This study studied the correlation between the appearance and the ignition factors of electrical melting stains found at the fire site, and analyzed the appearance characteristics of melting stains by firing factors in the general use environment of electricity. The experimental results showed a tendency to identify the tendency of relatively large melting stains when current flow is smooth, the shape of the wire being hollowed out when it is connected, and the scattering of the wires. When the current flow is not smooth, such as tracking and insulation deterioration, the molten rock appears relatively small, and the solidification of the twisted wire is checked for phenomena and low scattering tendency. In addition, Yongdan Spots, which occurred only at one extreme line due to overload, could identify the apparent characteristics that distinguish them from molten wounds caused by the short circuit in which the anode meets.

1) 단락(short-circuit, 短絡) : 단락전기 회로 중 전원의 양 극이 도중에 부하 없이 직접 연결되는 것

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

화재는 다양한 원인으로 인해 발생하고 있지만 그중에서도 전기화재는 화재 발생원인 중에서 가장 높은 비율을 차지하는 원인 중의 하나이다. 최근 5년간의 전기화재의 원인을 분석해보면 전체 전기화재 중에서 미확인단락을 제외하면 절연열화에 의한 단락, 과부하/과전류, 접촉 불량, 트래킹, 압착 손상 순으로 전기화재가 발생함을 알 수 있다. 전기화재 중 특히 전자제품에서 발생하는 화재의 경우는 제조물책임법(PL) 등으로 논란의 여지가 많으므로 정확한 화재원인의 판단이 중요하다. 화재현장에서 발견되는 전기적 용융흔은 다른 증거에 비해 남아 있을 확률이 높지만 그것이 화재의 직접적인 원인이 아님에도 화재의 원인으로 특정하는 오류를 줄이고자 본 연구를 수행하게 되었다.

기존 전기화재 연구의 경우 실험실에서 실험환경을 구성하고 연구를 진행하여 일률적 모형의 전기적 용융흔을 만들어서 발생 메커니즘, 조직분석, 성분분석 등의 연구가 수행되어 왔으나 이는 실제 화재현장에서의 다양한 조건과 발화요인별 변수를 반영하지 못하는 한계가 있어, 본 실험에서는 실험실이 아닌 실제 현장과 유사한 환경에서 실험을 진행하였다.

실험은 VCTF²⁾ 0.75[mm²], 1[mm²], CV³⁾ 1.5[mm²] 전선을 사용하여 발화요인별 과전류, 과부하, 외부화염, 불완전접촉, 트래킹 등의 실험을 통하여 발화요인별 용융흔의 외형과 전선의 탄화형태 등을 관찰하여, 발화요인을 구분해 보고자 이 실험을 수행하였다.

본 연구결과를 바탕으로 향후 현장 활동 시 수집된 화재감식 정보를 바탕으로 옥내배선 용융흔의 외형과 발화요인과의 상관관계를 종합적으로 고려하여 원인을 판정함으로써 전기화재 발생 시 좀 더 논리적이고 명확한 화재 원인을 도출하는 데 도움이 되고자 한다.

1.2 이론적 배경

1.2.1 옥내배선 및 물리적 손상

옥내배선이란 전기설비기술기준에 따라 옥내의 전기사용 장소에 고정시켜 시설하는 전선을 말한다. 2006년 이전의 건물에는 IV(Indoor wiring)전선 1.6[mm²]을 주로 시공하였으며, 2006년 이후에는 IV 전선의 생산이 중단되어 대부분 KS C IEC 60227-3에 의한 HIV 2.5[mm²]를 일반적으로 시공하고 있다.

전선에 물리적 손상이 발생되면 국부적 열이 발생하는데, 이 열은 줄열(Joul heat)과 관련이 있으며, 인가전류의 크기, 인가 시간 및 저항(전선의 단선율 및 길이)에 영향을 받는다.

도체에 발생하는 줄열은 도체의 절연피복(PVC)으로 열을 전달시키며 장시간 방치하게 되면 화재의 위험이 커지게 된다.

1.2.2 줄열(Joul heat)

전류가 흐르기 쉬운 전선에서도 전류가 흐르면 줄열이 발생한다. 따라서 줄열에 의하여 화재가 발생하는 원인은, 전기기기에 고장이 발생하여 다량의 줄열을 발생시키는 경우와

2) VCTF(충진형 전선) : 주로 공장, 광산, 농장 등에서 AC 600V 또는 DC 800V 이하의 전압을 사용하는 이동용 전기기기 또는 배선용 및 이와 비슷한 용도에 사용 (연동선을 집합하여 PVC로 절연한 전선)

3) CV(충진형 전선) : CV 케이블 절연에 사용되는 가교 폴리에틸렌은 절연성, 내열성, 내수성과 내화학약품성이 뛰어나며 주로 큐비클에서 전등 분전반/동력 제어반 등의 간선으로 사용되거나 분전반에서 대형 전기기기로의 전원 공급용 배선으로 사용됩니다.

전기풍로 등, 전열기구의 취급을 잘못하는 경우로 크게 나눌 수 있다. 즉, 전자는 전기적 원인에 의한 줄열 화재이며, 후자는 전기기기의 부적절한 취급에 의한 화재이다.

전기적인 원인에 의한 줄열의 화재에서, 출화시점으로부터 단위시간 당 줄열이 증가하는 과정을 보면, 줄의 범칙에 의하여 회로의 전류치가 증가하거나, 저항이 증가하는 현상이 발생되고 있다는 것을 의미한다.

일반적인 경우, 일상생활에서 사용하는 전원전압은 일정하기 때문에, 옴의 법칙으로부터 저항치가 감소하면, 전류치가 증가하고, 그 전류치의 제곱에 비례하는 줄열이 증가하는 과정을 거쳐 실제로 많은 전기화재가 발생하고 있다.

또한, 옴의 법칙으로 보아, 저항치가 증가하면, 전류는 감소하고, 줄열은 그 제곱에 비례하여 감소하기 때문에 전체 회로의 줄열은 감소하므로, 회로의 일부분이 기타 부분에 비하여 현저히 높은 저항치를 갖게 되고, 그 부분에 전류가 흐르면 국부적으로 많은 줄열이 발생하는 일련의 과정을 거쳐 전기화재가 발생하고 있다.(출처)⁴⁾

1.3 연구범위 및 실험기자재

1.3.1 연구범위

본 연구의 실험시료는 시중에서 시판되는 옥내배선 VCTF 0.75[mm²], 1[mm²], CV 1.5[mm²] 전선을 사용하였으며, 실험의 범위는 발화요인 중 과전류/과부하, 외부화염, 불안전접촉, 트래킹에 의한 용융흔 외형 관찰 실험으로 한정하였다. 전원은 220V 상용 교류전원과 12V 배터리 직류전원을 사용하여 실험을 수행하였다. 발화요인별 용융흔의 외형을 비교 분석하여 화재원인 조사에 도움이 되고자 하였다.

1.3.2 실험장비

- 실험장치 : 교류전기 실험장치, 직류전기 실험장치(Fig 1, 2, 3)

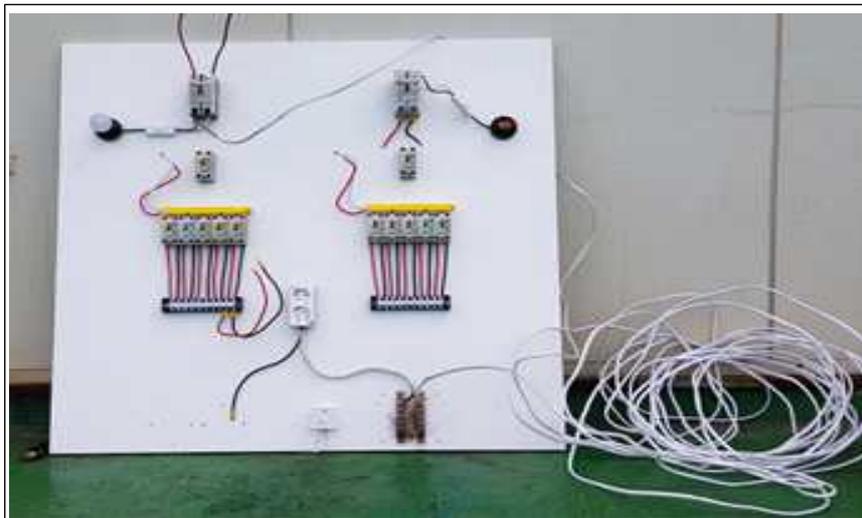


Fig 1. 교류전기 실험장치

4) 출처 : 화재조사기술교본(제3권) - 사단법인 동경방재지도협회



Fig 2. 직류전기 실험장치

※ 공구 및 부속부품 : 이지 스트리퍼, 니퍼(大), 케이블클램프, 고정식 단자대, 접지 단자대, 쇼트바, 압착단자(O형, Y형), 사각스위치(2P2단, 4P2단), 전구(30W), 예비콘센트(2구-30EA), 배선연결용 커넥터(듀얼-60EA), 전선(0.7, 1.0, 1.5 각 200M)등 (Table 1)

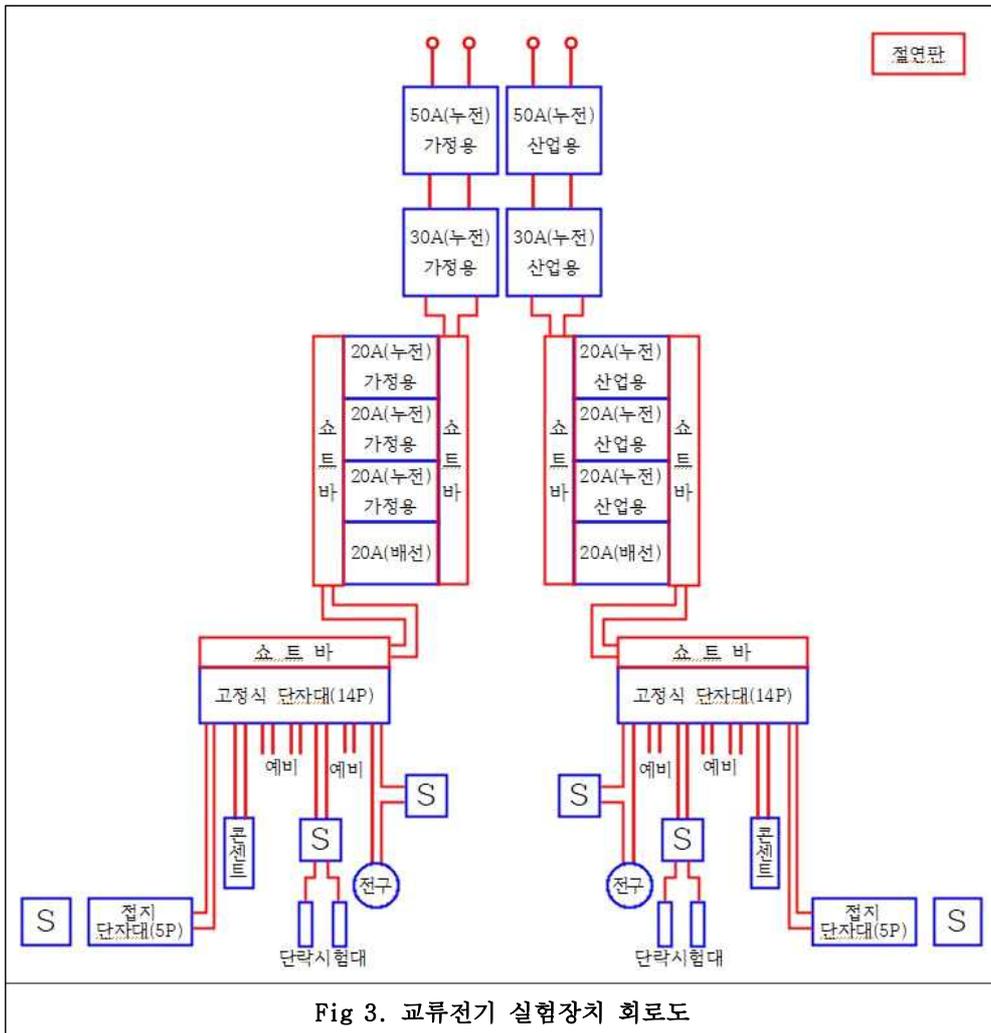


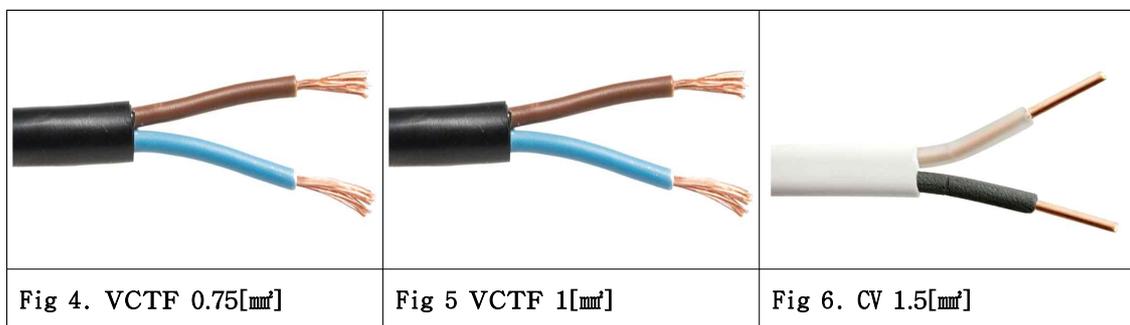
Fig 3. 교류전기 실험장치 회로도

계	재현실험용	19	-	
전기실험set	재현실험용	1	-	구입
발전기	배터리 전기 공급	1	-	환동해 대여
배터리 충전기	배터리 충전용	1	-	동해소방서 대여
배터리 12V	전기실험판 전기 공급	2	-	구입
인버터 8K	배터리 직류→교류변환	1	-	구입
보호안경	시력보호용	3	-	기자재 활용
안전장갑	안전장비	-	-	“
마스크	안전장비	-	-	“
온도기록계	재현실험 용	1	-	“
열화상카메라	온도 측정	1	-	“
비디오카메라	실험현장 촬영	1	-	“
카메라	실험현장 촬영	1	-	“
토치	가열 실험용	1	-	“
전선릴	전원연결	1	-	“
초음파세척기	감식용	1	-	“
실체현미경	감식용	1	-	“
기타 공구류	실험용	-	-	“
후크메타	진류 측정	1	-	“
노트북	기록용	1	-	“

(Table 1. 공구 및 부속부품)

1.3.3 실험시료

옥내배선 :VCTF 0.75[mm²], 1[mm²], CV 1.5[mm²] 전선 각 200M(Fig 4, 5, 6)



2. 본론

2.1 화재재현실험

2.1.1 과전류 단락실험(교류, 직류)

2.1.1.1 실험방법

- 전원공급(220v 교류, 12v 직류) → 전기실험세트(교류, 직류) → 단락실험 → 실제현미경 (외형관찰)(Fig 7)
- 교류 : 연선(0.75mm², 1mm²), 단선(1.5mm²)전선의 부하측 말단에 부하를 주지 않고 전선의 양극 선을 접촉시켜 과전류 유도하여 전선의 용단 또는 차단기가 작동할 때 까지 20회 실험
- 직류 : 연선(0.75mm², 1mm²), 단선(1.5mm²)전선의 부하측 말단에 부하를 주지 않고 배터리의 양극(+, -) 단자를 60cm 전선의 양 끝단에 집게로 연결시켜 과전류 유도, 부하측 말단의 전선이 용단 될 때 까지 20회 실험(Fig 9)
- 실험시료 : 옥내배선 VCTF 0.75[mm²], 1[mm²] 연선 2P, CV 1.5[mm²] 1P

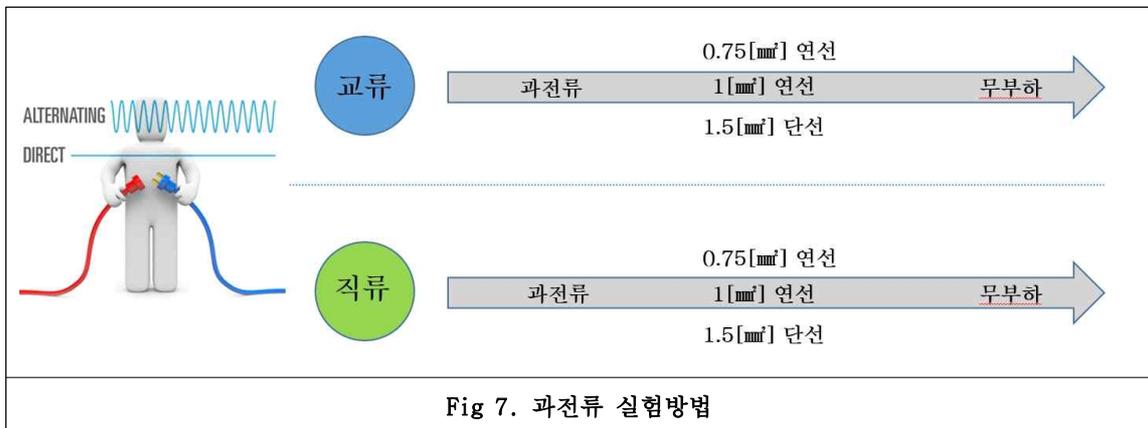


Fig 7. 과전류 실험방법



Fig 8. 과전류 단락실험(교류)



Fig 9. 과전류 단락실험(직류)

2.1.1.2 실험결과

- 교류실험 : 0.75mm² 및 1.5mm² 전선 용단, 용융흔이 비교적 크게 나타나며, 구리선이 오르라지며 전선 심선 일부가 비산되어 없어지거나, 비산된 구리 구슬 식별. (Fig 10, 11)

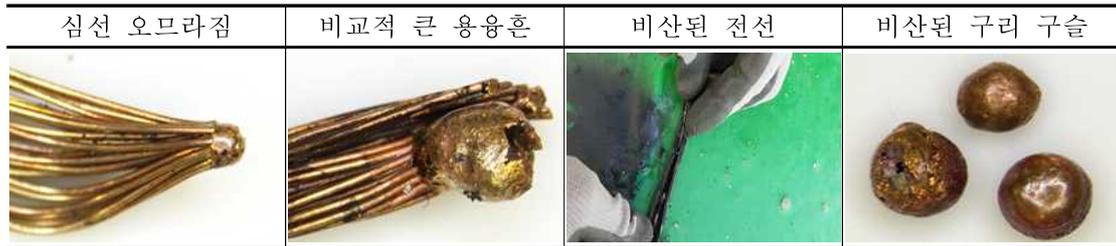


Fig 10. 과전류 단락실험(교류, 연선 0.75mm² 2P)



Fig 11. 과전류 단락실험(교류, 단선 1.5mm² 2P)

- 직류실험 : 0.75mm², 1.5mm² 전선 용단, 용융흔이 교류보다 작게 나타나며, 전선 오므라지는 현상이 약하고, 전선 심선 일부가 비산 또는 비산되어 구리 구슬이 식별되지 않으며, 모재부의 용융이 식별된다.(Fig 12, 13)

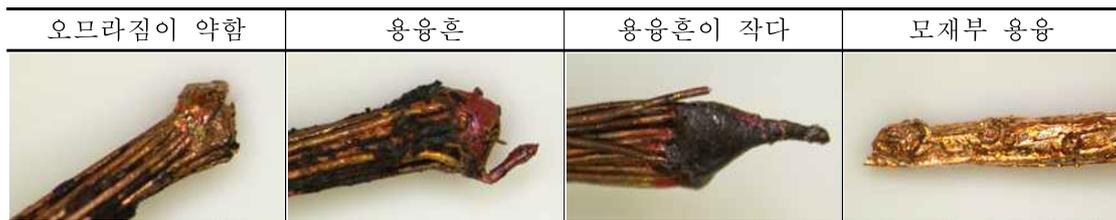


Fig 12. 과전류 단락실험(직류, 연선 0.75mm² 2P)



Fig 13. 과전류 단락실험(교류, 단선 1.5mm² 2P)

2.1.1.3 실험결과분석

- 직류 전원 12V 보다 교류 전원 220V에서 전선의 용융흔이 비교적 크게 나타나며, 전선의 오프라지는 현상 또한 뚜렷하게 나타난다.
- 직류 전원 12V 1.5mm² 단선 실험에서 Fig 14 와 같은 용융흔이 나타났다. 이는 화재현장에서 종종 식별되는 용융흔이며, 이 실험을 통하여 단락으로 인한 용단이 비교적 늦게 일어났을 때 용융흔이 규칙적으로 다수 형성되는 것이 관찰되었으며, 화재감식현장에서 종종 발견되는 이 용융흔은 전기적 요인에 의해 발생하는 용융흔임을 확인 할 수 있었다.



Fig 14. 과전류 단락실험(직류, 단선 1P)

2.1.2 과부하 실험 (교류 220V)

2.1.2.1 실험방법

- 전원공급(220v 교류) → 전기실험세트(교류) → 과부하 → 실체현미경(Fig 15)
- 연선(0.75mm²) 1P 전선의 부하측에 시즈히터, 드라이기 등을 작동시켜 14,000W의 부하를 운전하는 조건을 주고 통전상태에서 한 가닥, 심선전체의 용단 또는 누전차단기(50A)가 작동할 때 까지 각각 10회, 5회 실험



Fig 15. 과부하 실험

2.1.2.2 실험결과

- 1P 연선 한 가닥 실험결과 : 심선에 잘라진 듯 한 용단이 식별되며, 모재부에 심선이 용융되어 붙은 형태가 식별.(Fig 16, 위)
- 1P 연선 심선전체 실험결과 : 심선이 용단되어 절단면의 뒷부분에 용착⁵⁾흔이 식별되며, 초음파 세척 과정에 용착되었던 용융흔이 이탈되는 현상이 식별된다.(Fig 16, 아래)



Fig 16. 과부하 실험(30A 누전차단기)

2.1.2.3 실험결과분석

- 1P 심선 한 가닥으로 실험한 것은 절단된 듯 한 흔적이 일부 식별 됨.
- 1P 심선 전체로 실험한 것은 용단되면서 절단면에 용융흔이 없는 경우, 뒷부분에 용착되는 용융흔이 식별되는 경우가 많으며, 초음파 세척과정에서 이탈되는 시료가 많은 것으로 보아 용착되었던 용융흔과 모재부의 결합력이 약한 것으로 판단된다.

2.1.3 통전 중 외부화염에 의한 단락실험(교류 220V)

2.1.3.1 실험방법

- 전원공급(220v 교류) → 전기실험세트(교류) → 외부화염 → 실체현미경(Fig 17)
- 연선(1mm² 2P)전선의 부하측 말단에 무부하, 부하, 부하운전(드라이기 2,000W)의 조건을 주고 통전상태에서 전선의 단락 또는 2종의 누전차단기(20A, 30A)가 작동할 때 까지 각각 5회 실험
- 실험시료 : 옥내배선 VCTF 1[mm²] 연선 2P, 누전차단기(20A, 30A)

5) 용착[鎔着] : 쇠붙이 따위가 녹아서 붙음.



Fig 17. 통전 중 외부화염에 의한 단락실험

2.1.3.2 실험결과

- 무부하 30A 누전차단기 실험 : 심선의 용단과 여러 가닥의 소선에서 용융흔이 식별.(Fig 18)
- 부하(드라이기 운전) 30A 누전차단기 실험 : 심선의 용단과 비교적 큰 용융흔, 심선의 오므라지는 것이 무부하에 비해 비교적 많이 식별.(Fig 19)
- 무부하 - 부하 - 부하운전 20A누전차단기 : 심선이 용단되지 않으며, 무부하 → 부하 → 부하운전 순으로 용융흔이 크게 생겼다.(Fig 20)



Fig 18. 무부하 외부화염 단락 실험(30A 누전차단기, 연선2P)



Fig 19. 부하 외부화염 단락 실험(30A 누전차단기, 연선2P)



Fig 20. 무부하 - 부하 - 부하운전 외부화염 단락 실험(20A 누전차단기, 연선2P)

2.1.3.3 실험결과분석

- 통전 중 외부화염 실험에서 부하운전 시 비교적 많은 소선의 용단과 큰 용융흔이 관찰
- 심선의 오프라지는 현상도 더 많이 식별됨.
- 누전차단기의 20A일 때 전선의 용단의 정도가 약하다.

그러므로 부하운전 시 더 많은 소선의 용단, 큰 용융흔, 오프라지는 현상이 크게 나타나는 것으로 분석된다.

2.1.4 불완전접촉 실험

2.1.4.1 실험방법 : 통전중인 전선에 부하운전(드라이기 2,000W), 부하, 무부하의 조건을 각각 부여하여 연선(1mm², 1P)의 같은 극을 접촉시켜 전기적 반응관찰 10회 실험(Fig 21)



Fig 21. 불완전접촉 실험

2.1.4.2 실험결과 : 부하를 주지 않은 상태에서는 전기적 반응(아크)이 일어나지 않으며, 부하운전 시(드라이기) 더 많은 전기적 반응을 일으켜 심선의 용융흔이 더 많이 식별된다.(Fig 22)

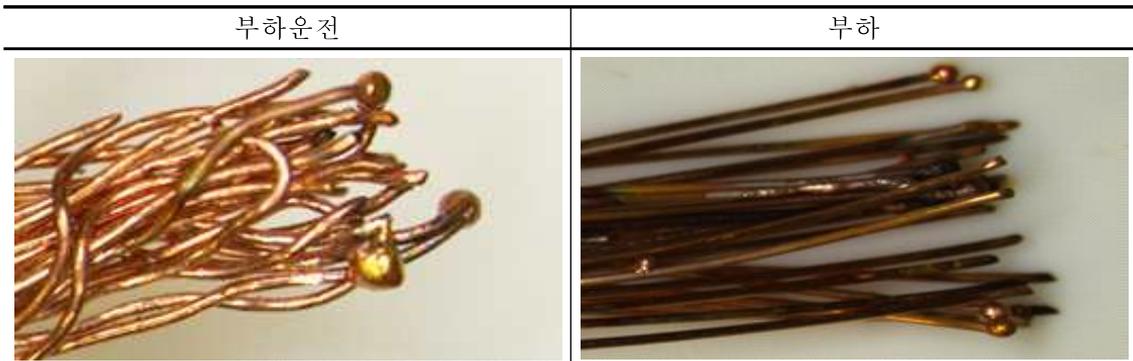


Fig 22. 불완전접촉 실험(1mm² 연선 1P)

2.1.5 트래킹 실험

2.1.5.1 실험방법 : 연선(1mm², 2P) 전선을 가까이 근접시켜(이격거리 1cm, 3cm) 소금물로 도전로를 형성하여 전기적 반응이 관찰될 때 까지 각 5회 실험(Fig 23)



Fig 23. 트래킹 실험(이격거리 : 3cm)

2.1.5.2 실험결과 : 미소방전만 일어난 전선은 심선의 변색흔이 식별되나 용융흔은 식별되지 않았으며, 미소방전 후 아크로 진행된 전선은 용융흔이 식별되었다.(Fig 24)

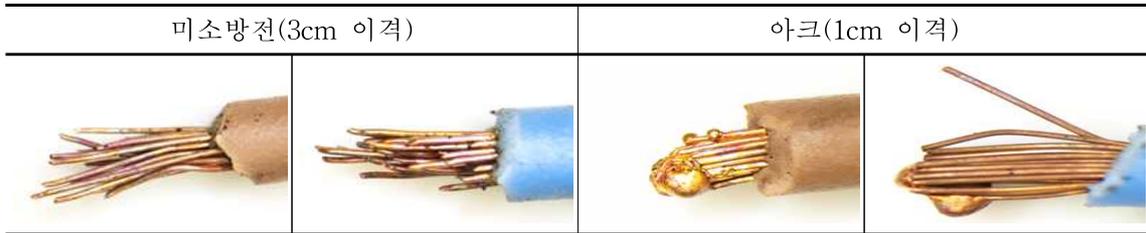


Fig 24. 트래킹 실험(20A 누전차단기, 1mm² 연선 1P)

2.2.1 전선의 탄화정도 관찰 실험

2.2.1.1 실험방법 : 통전 중인 연선(1mm², 2P) 전선에 외부화염과 과전류를 주어 전기적 용융흔이 식별될 때 까지 5회 실험

2.2.1.2 실험결과

- 전선 피복 외부화염 : 외부 피복이 부풀어 오르고, 외부 피복이 먼저 녹는다.(Fig 25, 좌측)
- 전선 피복 과전류 : 내·외부 피복이 꼬인 형태로 오므라들어 녹으며, 내부 피복이 먼저 녹는다. 또한 단락으로 내부 절연물이 분출되면서 바닥에 스프레이를 뿌린 자국을 남긴다.(Fig 25, 우측)



Fig 25. 전선 피복의 탄화정도 관측 실험(1mm² 연선 1P)

2.3 실험결과 분석 및 화재감식 착안사항

- 과전류/과부하와 같이 전류의 흐름이 많은 발화요인에 따른 용융흔은 비교적 크기가 크고, 심선의 오므라진 정도가 크며, 전선의 비산 및 전선이 닿는 바닥부에 스프레이를 뿌린 것 같은 흔적, 전선의 피복 내부가 전체적으로 탄화되는 현상이 비교적 많이 식별되는 경향성이 보인다.(Fig 26)
- 전선의 절연열화, 트래킹과 같이 전류의 흐름이 적은 발화요인에 따른 용융흔은 비교적 크기가 작고, 심선의 오므라진 현상이 적으며, 심선의 비산 및 전선이 닿는 바닥부에 스프레이를 뿌린 것 같은 흔적이 드물고, 크기는 작게 나타나며, 외부화염을 받지 않는다면 국부적으로 전선이 탄화되는 경향성이 보인다.(Fig 27)



Fig 26. 과전류/과부하 실험결과



Fig 27. 절연열화, 트래킹 요인에 의한 단락

결론

본 연구는 전기적 요인에 의한 화재 여부를 판별하기 위한 발화요인별 용융흔의 외형에 대한 실험을 실시하여, 최초 화재발생 원인으로 추정되는 전선 용융흔의 발화요인별 외형분석을 통한 정확한 화재 원인의 규명을 위해 실시하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 최초 발화지점의 추정과 화재 유발 인자의 발굴과 채취, 분석 등 일련의 과정을 거쳐 화재의 원인이 밝혀지게 된다. 전기적 요인에 의해 생성된 증거물은 화재 시 발생한 열에 의해 용융, 탄화, 변형된다. 이러한 증거물로 인하여 정확한 화재원인을 밝히는데 상당한 어려움이 있다. 전기화재 발생 시, 최초 발화지점에서 화재 원인이라고 추정되는 증거물에 대한 분석에 있어 가장 먼저 행하는 것이 외형 분석이다.

2. 외형 분석에서 도체나 절연물 등에 용융, 탄화, 변색, 침식 등 물리적인 변형이 관찰된 경우에는 그 부분을 실체현미경 등을 이용하여 확대 분석하게 된다. 이러한 확대 분석을 통하여 도체의 경우에는 용융흔의 생성 형태나 크기, 변색 등을 분석하며 절연물의 경우에는 탄화, 용융, 절연열화 등의 특징을 분석하여 화재원인을 규명한다.
3. 향후 현장 활동 시, 용융흔의 외형과 발화요인과의 상관관계를 종합적으로 고려하여 화재현장에 대입해 봄으로써 전기 화재 시 논리적이고 명확한 화재 원인을 도출하는 데 본 연구가 도움이 되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] 국가화재정보시스템 (www.nfds.go.kr)
- [2] 심사문, 전선단락흔의 미소경도 측정에 의한 화재원인 감정기법
- [3] 김영석, 김동욱, 송길목, 최충석 (2005). 직류 과전류 인가상태에서 저압용 나전선의 전기적 특성. 한국화재소방학회 학술대회 논문집, 259-265
- [4] 김성철 외, 전기배선에서 과전류와 포화시간을 입력변수로 갖는 퍼지기반 전기화재가능성 분석, 충북대학교 안전공학과, (2015)
- [5] 박진영 외, 과전류에 의해 단락된 전선의 결정성장 특성에 관한 연구, 한국전기안전공사, 전북대학교
- [6] “화재조사전문교육과정교재 I”, 중앙소방학교, (2013)
- [7] [화재조사(감식) 알고리즘], 강원소방본부, (2007),
- [8] John D. Dehaan, (2011), “Kirk’s Fire Investigation”, 두양사
- [9] 최충석 외, “과전류에 의해 용단된 전선의 수지상 조직분석 및 전기화재 판정기법”, 한국법과학회, (2003)
- [10] 김효범, (2013). “전기화재 원인규명을 위한 단락흔 감식 및 시험 시스템 개발에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울과학기술대학교, 서울
- [11] 화재조사기술교본(제3권) - 사단법인 동경방재지도협회

 †E-mail : green119@korea.kr