

전기화재 감정

(전선피복의 소손흔과 용흔의 육안식별)

한국전기안전공사 김 만 건

1. 들어가는 말

최근 5년 화재통계를 분석한 결과 매년 34,100건의 화재가 발생하여 2,330명의 귀중한 인명피해와 1,583억원을 재산피해를 발생하였다. 1일(日) 평균 93.4건의 화재가 일어나 6.4명의 인명피해와 4억3천만의 재산손실을 초래하는 화재는 시설의 대형·다양화, 건축물의 고층화, 인구의 밀집화 등과 함께 발화요인의 종류도 점차 많아지고 있다.

화재가 발생한 후 화재원인을 규명하기 위해 현장에 흩어져 있는 수많은 증거물을 수거하여 과학적으로 화인을 밝히기 위해서는 화재원인을 조사하는 분야별 전문가와 증거물을 분석할 수 있는 첨단분석장비 및 그것을 운용할 수 있는 전문 인력과 정밀분석을 위한 많은 시간이 필요하다.

그러나 우리나라는 분야별 전문가와 첨단장비가 절대 부족한 현재의 상황에서 현장에서 다양한 증거물을 짧은 시간에 많은 수량(數量)을 정확하게 수거한 후 분석해야 하므로 증거물을 모양과 형태에 따라 분류하면서 적의(適意)의 수량을 단시간에 채취(採取)해야 하는 당면 과제를 안고 있다.

따라서 “화재현장에서 전선(電線)의 피복 등에 생기는 소손흔과 용흔(鎔痕)의 육안식별”에 대하여 기술한다.

2. 화재조사 중 전기배선 등에 생기는 용흔(鎔痕)을 찾는 목적

전기화재란 전기에너지가 열에너지로 변환되어 발화원이 되는 것을 통틀어 일컫는 것으로 발화원, 발화형태, 착화물의 3요건으로 구성된다. 화재가 발생한 후 현장조사를 실시할 때 발화 당시 배선이 통전상태(전압인가) 여부를 조사하는 것은 화재조사과정 중의 하나로 대부분의 화재조사 전문가들은 전

기배선 등을 세밀하게 관찰하여 용흔의 생성여부를 확인한 것을 기본적으로 시행하고 있다.

전선이나 전기제품 등에 생성된 용흔을 찾는 목적은 조사자의 현장 상황 판단에 따라 다를 수 있으나 화재조사 대상물이 반소되었거나 전소되었을 경우 벽면이나 천장 등의 가연물이 모두 불에 타서 없어지고 불연재인 바닥과 연소 잔유물만 남아 있을 때, 건축 구조물에 거미줄 같이 설치되어 있는 전기배선을 조사함으로써 최초 발화 장소인 출화부를 일정범위로 축소할 수 있는 과학적인 증거로 삼을 수 있기 때문이다.

우리나라의 옥내 전기배선방식은 배·분전반으로부터 가장 멀리 떨어진 조명기구나 콘센트까지의 배선은 가지형태이고 보통 15~30A 회로차단기로 회로를 보호하도록 설치되어 있다.

그러한 배선계통에서 어떤 부분에 용흔이 나타난 현상은 그 부분이 동일 배선상태에서 가장 먼저 연소되었거나 또는 화염이 도달된 것으로 볼 수 있기 때문에 초기 출화부위 판별 기준의 도구로 사용되고 있다.

화재현장에서 쉽게 볼 수 있는 용흔(鎔痕)은 대부분 화재시 발생한 연소열에 의해 전선피복이 불에 탈 때 전선과 전선이 접촉되면서 아크가 발생하여 생성된 것으로 화재가 먼저 발생하고 나서 2차적으로 생성되는 용흔이 대부분을 차지하고 있기 때문이다.

따라서 배선 등에서 전기용융망울(鎔痕)의 발견은 발화부를 일정범위로 축소할 수 있는 근거가 됨은 물론 화재원인을 밝힐 수 있는 귀중한 단서를 찾는 것이기 때문에 초기화재조사에서 반드시 필요한 과정이다.

3. 전선용흔의 발견은 화재원인 조사의 시작점

전기에너지에 의한 발화원은 다른 모든 발화원과 동일하게 고려되어야 하지만, 화재의 원인을 입증할만한 불증이 대부분 소실된 후에 원인규명 하기가 곤란한 경우, 목격자의 진술을 듣고 현장조사나 화재감정에 입할 때 가장 먼저 눈에 띄는 것은 현장에 어지럽게 흩어져 있는 전선과 화염에 그슬린 전기 관련제품중 금속 잔유물이므로, 일부 초심 조사요원은 전선에서 용융망울이라도 발견하면 마치 그것이 화재의 원인인양 선입감과 고정관념에서 전기화재의 원인으로 추정한 후 단정하고 확인조사를 중단하는 우(愚)를 범하는 경우도 있으나, 대부분의 노련한 화재조사요원은 화재 대상물이 모두 소훼(燒燬)되고 바닥에 연소 잔유물만 남아 있는 경우에는 건축물에 방사상(放射狀)으로 설치되어 있던 불연재인 전기배선이나 금속 등의 용흔을 조사함으로써 화재의 연소방향성과 발화부를 찾을 수 있기 때문이다.

따라서 용흔의 발견은 초기 화재의 출화지점과 연소(延燒)의 진행방향을 판단할 수 있는 귀중한 과학적인 단서를 제공하므로 화재조사의 끝이 아니라 시작점이라 할 수 있다.

4. 전선용흔(鎔痕)은 출화장소를 일정범위로 축소하는 증거

화재현장에서 찾는 전선의 단락흔적(Arc Marks)은 발화원인이나 출화개소를 규명하는 데 있어서 매우 중요한 증거가 된다. 아크(Arc)나 스파크(Spark)에 의해 전선이 녹아서 생기는 구슬형태(Bead)의 전기용흔(電氣鎔痕)은 출화지점과 연소확대 방향의 판단에 중요한 정보를 제공하고 있다.

전기배선에 형성되는 구슬형태 용흔(鎔痕:Copper Beads)의 위치는 통전중인 전기배선에 최초로 화재에 영향을 받아 남겨진 증거물로서 출화장소를 일정한 범위로 축소하는데 결정적인 증거로 삼고 있다.

이와 같은 용흔현상은 아크로 인해 전선 등에 손상형태로 나타난 것으로 전기적인 사고가 화재전이나 화재 중에 발생하였다는 것을 나타내는 것이다. 즉, 통전상태에서 어떤 원인으로 합선 등의 이상현상이 발생하면 배선용차단기나 퓨즈는 차단 또는 용단되면서 용흔을 남기고 전원을 차단(遮斷)하게 된다.

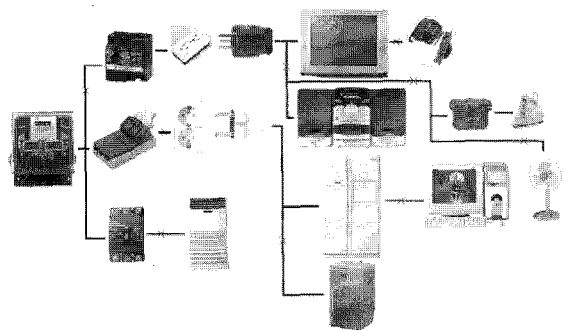
따라서 전원이 차단(遮斷)된 이후에는 전선 상호간에 접촉하여도 전기적용흔이 발생하지 않으므로 화재의 영향을 최초로 받았다는 증거로 사용된다. 이와 같이 전기화재감정에서

는 통전을 입증하는 것이 전기화재의 원인을 규명하는 관건이라 할 수 있다.

5. 통전입증(通電立證)

전기화재감정에서 대상건물이나 전기제품의 감정은 우선 당해 건물이나 전기제품 등에서 화재가 일어나는 원인이 전기에너지에 의한 것인가를 결정하는 것이다. 감정대상을 발화원으로 판정하기 위한 최초 작업은 그 대상이 통전상태(전압인가된 경우 포함)에 있었는가를 조사하는 것이다. 즉, 전기화재원인조사는 화재발생 전에 전기가 통전되고 있었음을 입증하는 것부터 시작하는데, 발화원으로 판정하기 위해서는 전로(電路)나 전기제품이 출화 당시에 사용상태이었거나 통전되었던 것을 증명해야 한다. 통전상태임을 증명하기 위해서는 배선용차단기가 투입되어 있고, 플러그가 콘센트에 접속되어 있어야 하며, 중간스위치나 전원스위치가 "On"이 되어 있어야 한다. 아래 그림의 단락흔적과 통전입증의 범위에서 x표 부분에서 단락용흔 등의 흔적이 발견된 경우는 거기로부터 전원측의 차단기까지 전로 전체가 통전 중이었다는 것이 입증된다. 또한, 통전 입증을 위한 조사는 부하측으로부터 전원측으로 조사해 간다.

전선접속기구들의 접속상태에 대해서는 소화활동, 낙화물 등에 의해 반드시 출화시의 상태가 진화가 된 후 조사할 때까지 남아 있다고 단정하지는 않지만 현장을 조사할 때 세심한 주의를 기울여 그 흔적발견에 노력하여야 한다.



〈그림1〉 x부분의 단락흔적과 통전입증의 범위

1) 플러그의 칼날

전기기구 코드 등의 플러그 "칼날" 표면에는 출화시 벽체 콘센트나 멀티 탭, 테이블 탭 등의 "칼날받이"의 접촉면의 경계를 나타내는 변색현상 등이 나타난다. 이는 "칼날"과 "칼날

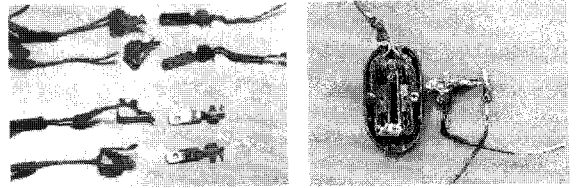
받이”와의 접촉면은 다른 부분에 비하여 상대적으로 열을 받기 어려우므로 산화 정도가 약하여 진화 후에도 비교적 광택이 남아있기 때문이다. 이와 같은 광택의 상태, 그을음의 부착이나 변색 상태로부터 “칼날”이 “칼날받이”에 꽂혀 있었는가를 판별한다.

- 플러그의 한 쪽 극만 용융되어 있는 경우에는 접촉부 과열을 생각할 수 있으며, 이 경우에는 통전상태이어야 한다.
- 플러그 양극이 용융되어 있는 경우에는 트래킹현상을 생각할 수 있으며, 플러그가 꽂혀있어야 한다.
- 플러그가 콘센트에 꽂혀진 상태에서 연소되는 것은 사진과 같이 콘센트날받이는 열려 있었던 그대로의 상태로 된다. 이것은 콘센트 칼날받이에 플러그가 들어가 있으면 콘센트 칼날받이 부분에 생기는 응력이 열을 받음으로써 콘센트 칼날받이의 금속의 결정 구조 변화에 의해 소멸되기 때문에 생기는 것이다.
- 플러그가 콘센트에 꽂혀있지 않고 연소된 경우는 콘센트 날받이가 사진과 같이 닫혀 있으므로 플러그가 콘센트에 꽂혀져 있는 경우와는 확실하게 다르다.

2) 콘센트의 칼날받이

벽체 콘센트나 멀티 탭의 “칼날받이”는 평상시 “닫혀”있다. 그러나 출화시에 플러그가 꽂혀 있는 “칼날받이”는 소화 활동 등으로 플러그가 빠져도 “열려있는 상태”를 유지하고 있는 경우가 많다. 이는 플러그가 꽂혀 있는 상태에서 탄력성을 잃을 정도로 열을 받아 그 후 주수활동 등으로 인해 플러그가 빠졌기 때문이다. 그러나 본래 “완전히 닫혀 있지 않은” 제품이 있으므로 주의를 요한다. 이 경우에는 “칼날받이”의 극간(隙間)이 “칼날”의 두께와 같은가를 주의 깊게 관찰하여 판단한다. 꽂혀있었던 칼날은 부분적으로 광택을 띠고 있으며, 칼날이 꽂힌 자리는 열려있다.

- 콘센트의 칼받이가 넓게 열린 상태는 플러그가 콘센트에 꽂혀 있다고 본다. 그 이유는 플러그가 꽂힌 채로 강한 열을 받으면 콘센트 등의 칼받이도 그대로 풀림상태가 되기 때문에 복원성을 잃어 칼받이가 벌어지게 된다. 즉, 콘센트의 날받이는 탄성을 잃게 되므로 원상태로 복원이 되지 않아 날의 두께만큼 날받이가 벌어진 상태로 된다. 예를 들면 아래 사진의 경우 꽂혀 있던 날받이의 넓이는 5.2mm, 꽂혀 있지 않았던 날받이는 4.85mm로 약 0.6mm 차이가 남.



〈사진1〉 플러그가 꽂힌 경우와 꽂혀있지 않은 형태. 〈사진2〉 콘센트와 플러그

3) 중간스위치, 기구스위치

불에 타서 없어진 경우에는 손잡이 등의 정지위치, “On”, “Off” 표시로 판단한다. 소손된 수지(樹脂) 등으로 덮여 가려져 있는 경우에는 건조시킨 다음 회로시험기 등으로 도통시험을 하거나 감정시에 X선 촬영을 한 후에 분해하여 접점면(接點面)을 확인한다.

- 접점용착의 유무, 스파크 요인(재질, 연수, 접촉상태, 정격전류 등) 확인.
- 접점용착에 의해 전원차단기능이 없어지게 되고, 이로 인한 히터과열 등의 파급 검토.
- 바이메탈 등은 헤어드라이어로 가열(온도측정)하여 작동상황 확인.

4) 배선

① 용융흔

전기제품에 붙어 있는 일체형 코드나 연장코드는 끈선(線)을 사용하고 있으며, 다른 부분으로 연소가 확대 진행되는 연소화재(延燒火災)의 경우에는 단선되어 콘센트로부터 기구까지 연결되어 있지 않는 경우가 많다. 이 경우에는 발굴위치나 소선수(素線數) 등으로 배선상황을 추측한다.

단선된 선단(先端)에는 꺾인 흔적이나 용융된 흔적(溶融痕)이 관찰되는데, 이들은 다음과 같이 분류하고 있다.

- 통전되어 있지 않은 배선이 화재열로 인해 녹은 것을 “열흔(熱痕)”이라 한다.
- 통전(通電)되어 있는 배선이 화재열로 인해 배선의 절연피복이 탄화된 후 단락되어 생긴 것으로 2차적으로 생긴 것을 “2차용흔”이라고 한다.
- 통전(通電)되어 있는 배선의 절연피복이 손상되어 전선 상호간(양극)에 단락되어 스스로 발열하여 화재에 이른 것을 “1차용흔”이라고 한다.
- 1차용흔, 2차용흔을 총칭하여 “전기적용흔”이라고 한다.(6. 용융흔의 종류 참조)

전기기기의 통전입증에 관계되는 판정은 기기내부에 발생되어 있는 전기용융혼으로 출화원인과 함께 판정할 수 있는 경우도 있지만 우선 전원코드의 단락혼으로부터 관찰하는 것이 일반적이다.

② 전기적용혼의 위치와 순서

전기적용혼이 관찰되면 우선 그 용혼이 전기제품 내 어느 위치에서 발생되어 있는가를 파악해야 하며 그러기 위해서는 전기용융혼의 발생위치를 당해 기기의 구조도 등 관계자료를 참고로 하여 소손된 코드나 부품 등의 위치를 복원해야한다.

코드의 2개소 이상에서 전기용융혼이 발생되어 있는 경우에는 일반적으로는 부하측이 먼저 단락되었다고 볼 수 있다. 또한 이와 같은 경우에는 배선이 연결되어 있지 않으므로 결선도를 참고하면서 접속되어 있는 단자의 위치, 절연피복의 색, 소선의 굵기, 소선의 수 등을 관찰하여 용단된 상태 및 단락된 상태를 보고 판정한다.

③ 전기적용혼과 출화개소의 관계

옥내배선에 사용되고 있는 600V 비닐절연 평형케이블(VVF cable)은 단락되면 그 회로에 설치되어 있는 배·분전반의 배선용차단기(MCCB)가 작동하여 “전로를 끊거나(斷)”, “커버나이프스위치”의 퓨즈가 용단되어 차단되므로 용단된 후에 부하측 다른 개소에서 배선거리 접촉되어도 통전되지 않으므로 전기용융혼은 발생하지 않는다. 따라서 “600V 비닐절연평형케이블(VVF cable) 등에서 전기용융혼이 나타난 개소는 출화개소이든지 또는 그 부근이다”라고 말할 수 있으며, 배선의 전기용융혼은 출화개소판정상의 근거가 된다.

한편, 이를 비닐코드에 적용해 보면 비닐코드는 단락되어도 배선용차단기(MCCB)가 작동하여 차단(trip)되거나 퓨즈가 끊어지지 않는 경우가 있으므로 1회로 계통에 2개소 이상에서 전기용융혼이 발생되는 경우가 있다.

그러나 출화되어 비닐코드에 전기용융혼이 발생한 후에 화재가 전장으로 확대되어 옥내배선이 단락되어 전원이 차단되면 그 후에는 다른 개소에 전기용융혼이 발생되지 않으므로 1회로에 2개소 이상에서 전기용융혼이 발생되어도 그 범위가 한정되어 있으면 출화개소 판정근거로 할 수 있다.

또한 비닐코드는 건물의 바닥을 따라 노출 배선하여 사용되는 경우가 많고, 화재는 바닥면부터 발생하는 경우가 많으므로 비닐코드의 전기용융혼은 화재 초기에 발생하기 쉽다. 이 때문에 비닐코드의 전기용융혼의 발생범위가 한정되어 있

으면 건물 내 위쪽에서 사용되고 있는 케이블 등의 배선보다 신뢰성이 높은 출화개소의 판정근거가 된다.

5) 배선용차단기와 퓨즈

① 배선용차단기

배선용차단기는 일정 전류 이상의 과전류에 대해 자동적으로 전로를 차단해 배선이나 전기기기를 보호하기 위한 안전장치로 차단방식에 따라 완전전자식, 열동식, 반도체식이 있는데 과전류 등으로 차단될 경우에는 손잡이 버튼이 중간에 의하여 있으므로 통전유무를 식별할 수 있다.

② 커버나이프스위치

커버나이프스위치, 금속상자 내장형 개폐기 등도 금속판의 그늘음의 부착이나 날받이의 열린 상태, 변색 여부 등을 관찰하여 개폐 유무 즉, 통전상태를 식별할 수 있다. 즉, OFF상태로 열을 받으면 판은 똑같이 그늘음이 부착되어 있지만 ON의 상태로 있었다면 날받이와의 맞물린 부분과 다른 부분과의 오손정도가 다르다.

- 칼받이가 균등하게 그늘음이 부착하고 있으면 OFF상태이고 칼과 맞물린 부분이 다른 부분 보다 열에 의한 변색이 약하거나 그늘음이 적으면 ON상태로 본다.
- 칼받이가 벌려져 있으면 칼날이 맞물린 상태에서 열을 받아 복원력을 잃어 열린상태를 보아 ON상태로 판정한다.
- 개폐기 부하측에 붙은 퓨즈 중앙부근이 국부적으로 녹아 있으면 전기적 과부하로 용단된 것으로 보아 통전상태로 본다.
- 개폐기의 원형이 없어질 정도로 녹아있으면 판정이 곤란하므로 부하측 회로의 단락혼 발생상태 등을 종합적으로 판단하여 개폐상태를 판정 할 필요가 있다.

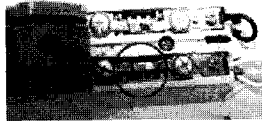
③ 퓨즈

커버나이프 스위치의 통전 유무의 식별은 퓨즈의 용융상태에 따라

- 단락 ⇒ 퓨즈부분이 넓게 용융 또는 전체가 비산되어 커버 등에 부착함
- 과부하에 의한 퓨즈 용단상태 ⇒ 퓨즈 중앙부분 용융
- 접촉불량으로 용융되었을 경우 ⇒ 퓨즈 양단 또는 접합부에서 용융 또는 끝부분에 겹게 탄화된 흔적이 나타남
- 외부화염에 의한 퓨즈의 용융상태 ⇒ 대부분 용융되어 흘러내린 형태로 나타남



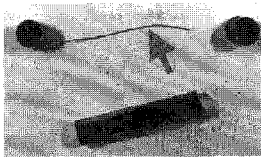
〈사진3〉 퓨즈 중앙용단



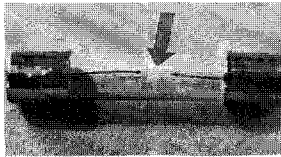
〈사진4〉 퓨즈 접합부 용융

- 유리관퓨즈

유리관에 사용하는 실퓨즈는 동선에 은도금한 것으로 용융온도는 1083℃로 유리의 용융온도(소다유리 550℃, 소다석회유리 750℃)보다 높아 유리관이 녹아도 유리관 실퓨즈는 그 형태를 유지하고 있다.



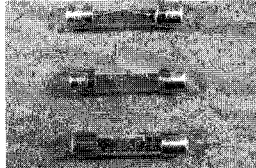
〈사진5〉 외부화염에 노출된 형태



〈사진6〉정격전류 2배 과전류 용단된 형태



〈사진7〉단락전류 용단된 퓨즈 형태



〈사진8〉과·단락전류 용단된 퓨즈 형태

- 유리관 퓨즈에 단락전류를 흘렸을 때의 것으로 실퓨즈는 거의 비산되어버렸고 둥근 구슬모양으로 되어 관 내벽에 부착되어 있다.
- 유리관 퓨즈인 경우에는 과전류의 대소에 따라 용단의 차이가 생긴다. 단락시 과전류가 흐르면 안개상으로 비산하는 특징이 있다. 이상의 것을 종합하면 유리관 퓨즈가 원형을 유지하고 있으면서 퓨즈가 용단되었다면 과전류가 흐른 것으로 통전을 입증할 수 있다.
- 정품퓨즈와 비규격품의 퓨즈는 잔존부분을 식별하여 판별한다.
- 일반퓨즈는 유리관퓨즈와는 달리 납을 주성분으로 하고 납(327.4℃)과 주석(231.9℃) 또는 아연(419.5℃)과 주석의 합금으로 제조하여 용단온도가 낮아 화염에 노출되면 쉽게 녹는다.

6. 용융흔(鎔融痕 또는 鎔痕)의 종류

전기적인 아크(arc)나 스파크(spark)로 전선(電線)이나

금속부분에 생기는 녹은 흔적을 용흔이라 하며 용흔의 식별은 초기 화재조사시 출화장소를 일정범위로 축소하거나 전기화재의 원인을 입증하는데 매우 중요하다.

단락용흔(短絡痕迹)의 형성과정은 배선피복이 절연열화나 물리적인 외력 등에 의해 단락되어 화재로 이어지는 1차 용흔(1次 鎔痕)과 화재의 열로 전선 피복이 불에 타서 단락되는 2차 용흔(2次 鎔痕) 및 전기가 통전되지 않는 즉, 전원이 차단된 상태에서 화재열에 의해 전선이 용융된 열용흔(熱鎔痕 혹은 3次 鎔痕 또는 其他 鎔痕), 화학적인 작용으로 생성되는 화학적인 용흔, 기계적인 손상형태로 분류하며, 특히 1차 용흔과 2차 용흔을 전기적용흔(電氣的鎔痕)이라 한다.

1) 1차 용흔(1次 鎔痕: Primary Arc Marks)의 형태와 식별

1차 용흔의 대표적인 형태



〈사진10〉1차 용흔 외형 〈사진11〉1차 용흔 외형(비산) 〈사진11〉1차 용흔 금속조직



〈사진12〉1차 용흔 외형 〈사진13〉1차 용흔 외형 〈사진14〉1차 용흔 외형

전선이 단락할 때에 생성되는 1차용흔과 2차용흔은 분위기 조건이 다르다. 특히 단락시의 열영향이 크게 다르며, 이 영향이 전기적용흔의 금속조직과 깊은 관계를 갖게 된다. 따라서 전기적용흔의 금속단면조직을 관찰하기 위해 정밀하게 용흔을 연마한 후 금속조직을 에칭에 의해 명확히 하여 금속현미경으로 관찰 평가한다.

가) 외관관찰

육내배선 등의 전기설비는 화인과 발화지점을 확인하기 위해 조사하는데, 전선에 나타난 구슬형태의 용융흔으로부터 화재 당시의 온도를 추정할 수 있다. 화재시 용융 및 화학적 효과는 전기적 아크지점을 일부 변화시킬 수 있지만 이러한 효과는 화재조사 중 고려할 수 있는 대상이며, 아크에 의한 손상은 용흔이라고 하며 다음과 같은 경우에 발생한다.

- 3상 배선에서 전선상호간의 단락
- 상전선과 중성선의 단락
- 전압측 전선이 접지축에 지락

화재현장에서 채취(採取)한 전기적용흔에 대하여 금속단면조직관찰과 동시에 외관관찰도 행하여 용흔을 평가한다.

① 광택

전기적용흔의 표면은 동(銅) 고유의 색깔이 나와 있는 부분(동색)과 산화동이 되어 있는 부분(회색)이 혼재되어 있다. 이를 1차용흔과 2차용흔으로 구분하여 관찰하면 1차용흔 쪽이 광택이 있는 것이 많다.

② 평활도(平滑度)

표면의 상태를 움푹 파인 수(數)와 평활도로 구분하면 1차용흔 쪽이 평활하며, 2차용흔은 표면이 거친 것이 많다.

③ 형상(形狀)

전기적용흔의 형상을 구형(球形), 반구형(半球形), 루상(淚狀; 눈물, 촛농) 등의 불정형(不定形) 3개로 분류하면 1차용흔은 반구형(半球形)의 것이 많다.

④ 금속에 생긴 용흔의 육안 식별

○ 1차용흔

- 코드나 여러 가닥의 소선으로 구성된 전선의 경우에는 단락부위가 하나의 덩어리로 뭉쳐 있으며, 망울이 반구형으로 등글고 광택이 난다.
- 전선의 굵기가 굵은 것은 단락되는 각도에 따라 단락부위가 바늘처럼 가늘고 뾰족한 모양을 하고 있는 경우도 있다.
- 전선의 굵기가 굵으면 단락 부분의 일부가 비산 또는 용융침식되어 무딘 송곳같이 둥그스름한 형태, 또는 대각선으로 잘려나간 모양이 형성되며 동(금속)고유의 색을 나타내고 윤(潤)이 나며, 용융 비산 된 작은 망울이 단락부 옆에 붙어 있는 경우가 많다.
- 용융 망울의 끝 부분이 대부분 등글고 매끄러우며, 광택이 난다.
- 과전류(약 정격전류의 4~5배)가 흘러 용단된 경우의 용융 망울은 코드의 경우에는 거의 조성되지 않고 일직선 형태로 용단되고 끝 부분만 뭉쳐있고, 굵은 동선의 경우에는 타원형의 망울이 생기고 아래로 흘러내리는 형태로 망울에만 광택이 나고 나머지 부분은 산화되어 검은 회색을 나타낸다.
- 화재발생 이전에 생긴 합선에 의한 용흔이 또 다시 화재열에 의해 표면이 녹은 경우에는 화재발생 이후에 생긴

합선에 의한 용흔과 비슷한 모양을 나타내므로 세밀하게 관찰하여야 한다. 이때에는 망울 끝 부분에 작은 구멍이 생성된 경우가 많다.

- 전선 등이 용단되기 전에 목재와 같은 가연물과 접촉된 경우에는 닿는 부분이 빨리 용융되어 촛-농 같은 망울이 생긴다.

나) 금속단면 관찰

전기용융흔 내부관찰에서는 공극(空隙), 이물의 혼입상태를 관찰한다.

전기용융흔 내부에 생긴 공극이 외기(外氣)와 연결되는 “블로우 홀(blow hole)”과 외기와 연결되어 있지 않은 “보이드(void)” 2타입의 공극이 있다.

- 보이드(void)와 블로우 홀(blow hole)은 1차용흔의 쪽이 발생률이 높다.
- 2차용흔은 내부에 이물을 많이 혼입하고 있다.

다) 금속단면조직 관찰

관상(管狀)의 노(爐) 중에 10cm 정도의 길이로 직경이 가는 전선을 넣고 과전류를 흘려 단락시켜 전기용융흔을 만든다. 그 때의 관내 상태를 1차용융흔을 가상하여 보통의 대기 조건과, 2차용융흔을 가정하여 고온에서 저산소하의 조건에서 행한 결과

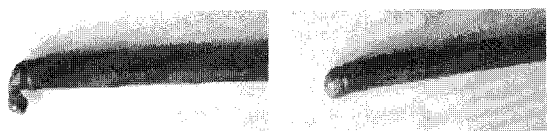
1차용흔 : 대체적으로 보이드(void)가 작으며 용융흔 전체에 퍼져 있고 금속조직은 미세한 공정조직이 되어 있다.

2차용흔 : 분위기온도가 높아서 냉각이 완만하여 중심부의 보이드(void)가 커져 있으며 구리(Cu)와 산화구리(Cu₂O)의 초기결정이 많고 대기 중의 그을음을 혼입하는 경향이 있다.

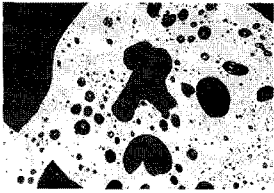
이러한 사실로부터 전기용융흔 내부의 현미경관찰에 의해 보이드(void)의 상태와 금속결정상태로부터 전기용융흔 발생시의 분위기 상태를 미루어서 살필(推察) 수 있어 1차용흔과 2차용흔의 판별이 어느 정도 가능하게 되었다.

2) 2차 용흔(2次 熔痕: Secondary Arc Marks)

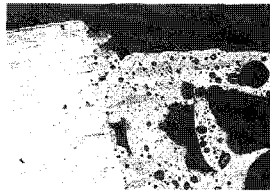
2차 용흔의 대표적인 형태



<사진15>(左), <사진16>(右) 외부 화염에 의해 발생한 2차 용흔



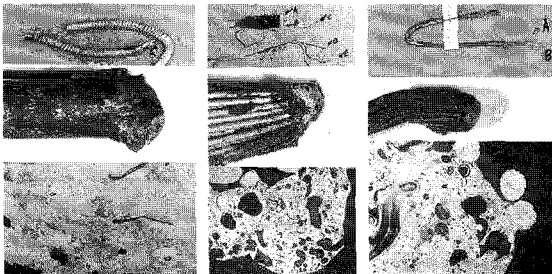
〈사진17〉 2차용흔 금속조직



〈사진18〉 좌측 확대사진



〈사진19〉 2차 용흔 외형 〈사진20〉 2차 용흔 외형 〈사진21〉 2차 용흔 외형



〈사진22〉 2차 용흔 〈사진23〉 2차 용흔 〈사진24〉 2차 용흔
2차 용흔의 외형(上) 실체현미경에 의한 확대사진(中) 용흔의 금속조직(下)

금속에 생긴 용흔의 육안 식별

○ 2차용흔

- 전선 또는 코드의 끝에 생긴 용융 망울이 타원형으로 형성되고, 망울에 작은 구멍이 있으며 색상은 검은 회색을 띠는 적갈색이다.
- 코드나 여러 가닥의 소선으로된 연선의 경우에는 끝 부분에서 달걀 모양의 용융점이 형성되고 용흔에는 약간의 광택이 있다
- 화재발생 후 며칠이 지나면 용융 망울은 물론 용융되지 않았던 동선도 산화되어 검푸른 빛으로 변화한다.
- 전선 또는 코드의 중간 부분에 생긴 용융 망울은 끝부분이 둥글고 용융되지 않는 부분의 전선과 전반적으로 비슷한 색상을 가지고 있으며, 소선 사이에 탄화된 불순물이 붙어 있다.
- 여러 가닥의 소선으로 구성된 굵은 전선의 경우에는 끝부분의 일부 또는 중간 부분에 탁구공 형상의 용융 망울이 생기며, 윤이 난다.

- 전선의 중간 부분에서 절연피복이 소실되어 합선된 경우의 용융망울은 고드름형상으로 생기고 부분적으로 전선 피복이 탄화되어 시꺼멓게 늘어붙어 있고 일부분에서 윤이 난다.
- 소형 전동기의 전원코드에서 단락된 경우에는 단락 부위가 하나의 덩어리로 뭉쳐 있으며, 망울의 표면이 울퉁불퉁한 모양의 둥근 형태를 이루고 있다.

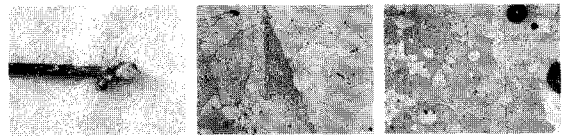
3) 열 용흔(熱 鎔痕 : Molten Marks or 3次 鎔痕, 其他 鎔痕)

열적손상 열 용흔(熱 鎔痕)

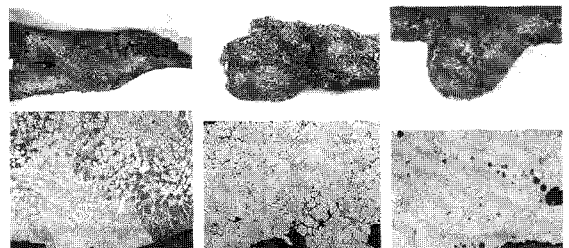
열 용흔(熱 鎔痕)



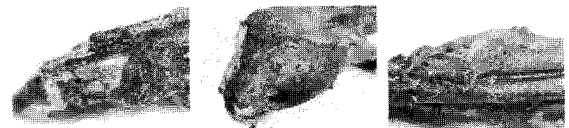
〈그림2〉 열적손상에 의한 열 용흔(熱 鎔痕)



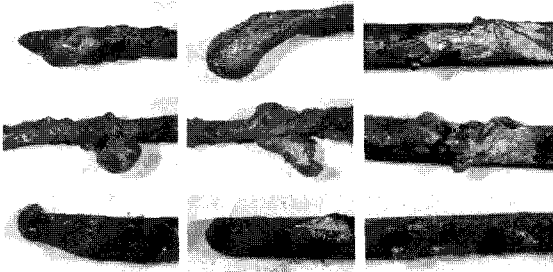
〈사진25〉 열 용흔 외형(용흔) 〈사진26〉 열 용흔 금속조직① 〈사진27〉 열 용흔 금속조직②



〈사진28〉 3차 용흔 〈사진29〉 3차 용흔 〈사진30〉 3차 용흔
3차 용흔 실체현미경에 의한 확대사진(上)과 용흔의 금속조직(下)



〈사진31〉 3차 용흔 〈사진32〉 3차 용흔 〈사진33〉 3차 용흔



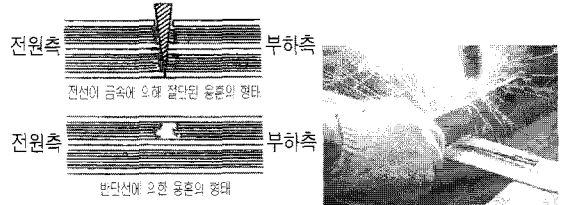
〈사진34〉 열 용혼의 대표적인 형태

금속에 생긴 용혼의 육안 식별

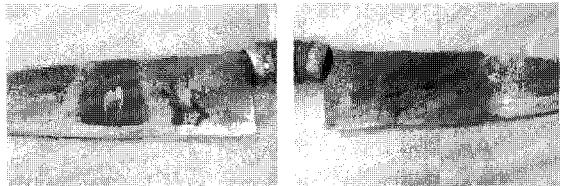
○ 열용혼(3차용혼 또는 기타용혼)

- 전반적으로 금속의 용해 범위가 넓고 표면에 요철(凹凸)이 있어 거칠며 광택이 없다.
- 전선의 중간에서 녹아 흘러내리는 형태의 결정체가 덮여 있으며, 전선의 끝부분은 물망울이 떨어지기 직전의 모양이다.
- 전선의 일부가 외부화염에 연화되어 녹으면 장력을 받는 쪽(보통 아래방향)으로 길게 늘어나며, 끝 부분은 가늘고 절단된 자리의 표면은 거칠고 여러 형상이 나타난다.

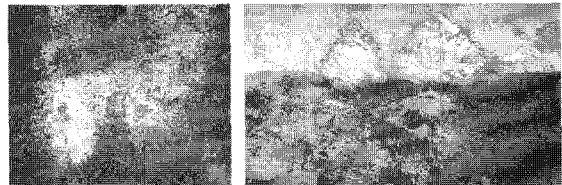
- 한 쪽 소선에만 전기적용혼이 있는 경우에는 지락, 금속 등으로 절단된 경우로 단선 부분의 한쪽 부분, 즉 전원측에서만 생겨 있는 것이 육안으로 식별된다. 부근 금속에 용융혼적이 있는 경우에는 지락을 검토한다.
- 단선 부분의 양쪽에 용혼이 있는 경우는 반단선, 접촉불량에 의한 가능성이 크다.



〈그림4〉 전선의 용혼형태 〈사진35〉 전원측으로 아크가 발생함



〈사진36〉 식칼 전원측 아크혼(2개소) 〈사진36-1〉 부하측에는 아크혼 식별되지 않음



〈사진37, 38〉 식칼 전원측에 생성된 단락혼을 실체현미경으로 확대한 사진

4) 화학적·기계적 손상

기계적 손상

- ㉠ 늘어짐
- ㉡ 부서짐
- ㉢ 끊어짐

화학적 손상

- 황동색(아연함금)
- 침식에 의한 은색(알루미늄함금)

〈그림3〉 열적·화학적·기계적 손상

7. 합선 또는 지락시의 용혼의 특징

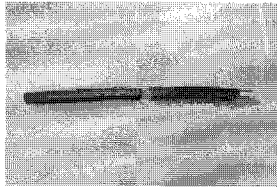
전원용 차단기가 고장 난 콘센트회로(코드)에서 합선되면 회로에 과전류가 흘러 연속적으로 전원측으로 타들어 가면서 과전류에 의한 단락현상이 일어나게 된다. 이때 생성된 단락혼의 형상은 전원측과 부하측을 구분할 수 있는 정형화(定刑化)된 특징을 갖는데 전원측의 용융방울은 부하측용융방울보다 형태가 크게 나타난다. 또한 누전과 같이 접지된 금속과 지락이 발생할 경우에는 전선이 움푹 패여 나간 V자형 파임(Notch)형태로 나타난 경우가 많다.

- 1) 백열전구 100W(약 0.5A) 1등을 사용하고 있던 600V 비닐절연 비닐시즈 평형케이블을 식칼로 단락시킬 때 절단된 상태.

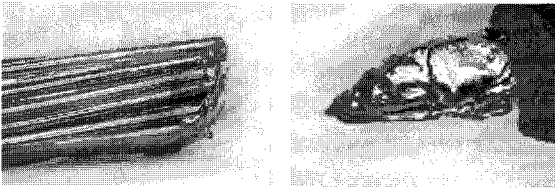


〈사진39〉식칼로 절단된 WF케이블 〈사진40〉전원측 용혼 〈사진41〉부하측 용혼
(디지털카메라 촬영) (실체현미경 촬영) (실체현미경 촬영)

- 2) 전기스토브(5A)를 사용하고 있던 원형고무절연 캡타이어 코드가 칼로 절단된 상태.



〈사진42〉식칼로 절단된 CTF코드(디지털카메라 촬영)



〈사진43〉전원축 옹흔(실체현미경 촬영) 〈사진44〉부하축 옹흔(실체현미경 촬영)

※ 재현실험에 사용한 코드와 케이블 재료
비닐코드(PVC Insulated Flexible Cord; 적용규격 KS C 3304, 3319)
비닐캡타이어타원형코드(VCTFK; Vinyl-Insulated Vinyl Cab-tyre cord Flat-type)

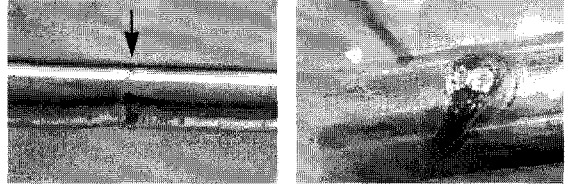
3) 전기배선이나 배선기구의 단자 등에서 지락 혹은 누전 되어 전기통로 중에 나사못이나 볼트(Bolt) 또는 금속 등의 도체를 통해 접지점으로 이어질 때 불완전하게 연결된 곳에서 접촉불량에 의한 출화는 전류의 발열작용에 따른 것이기 때문에 출화개소에 전류가 흐르고 있는 것이 전제조건이며, 지락전류나 누설전류가 없으면 출화원인에서 누전에 의한 발화원인은 배제할 수 있다.

- 철제의 못, 나사못과 같이 좁은 전기통로를 통하여 0.3~0.5[A] 정도의 전류가 흐르더라도 접촉저항에 의한 발열로 출화의 가능성이 있으며, 접촉불량에 의한 출화 유무는 못이나 나사못의 풀림, 접촉면과 닿는(맞물림) 부분의 거친 상태 등으로부터 판단할 수 있다.

4) 지락이 일어나면 충전부의 접촉점에서 단락의 경우와 마찬가지로 지락에 의한 지락흔이 생기며 단락흔은 양(兩)선에 생기는데 대하여 지락흔은 1차적으로 비접지축 충전부에만 생긴다. 지락을 일으키는 주 원인은,

- 가공배전선에 수목접촉
- 금속관 내에서의 케이블 피복 손상
- 전기설비 충전부에 누수, 공구, 인체의 접촉
- 전선의 건물 접촉부 손상 등이 있다.
- 지락에 의한 전기흔의 특징은 전선의 비접지축과 전선이 접촉된 접지도체의 양방에 생긴다. 그러나 지락에 의하여 큰 전류가 흐른 경우는 통상 전선과 접촉 도체의 접

촉점에서 발열에 의하여 양 소선간의 절연피복이 용융하여 단락해서 단락흔이 생기는 경우도 있다.



〈사진45, 46〉인입선 절연피복 파손으로 생성된 지락흔(左), 우측은 확대

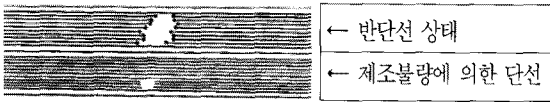
5) 누전에 의한 화재를 입증하기 위해서는 출화점과 누전점 및 접지점을 발견하는 것이 필요하다.

8. 반단선(半斷線)에 의한 옹흔의 특징

1) 반단선(半斷線: Partial Disconnection)이란 ?

여러 개의 소선으로 구성된 전선이나 코드의 심선이 10% 이상 끊어졌거나 전체가 완전히 단선된 후에 일부가 접촉상태로 남아 있는 상태를 반단선이라 한다. 반단선 상태에서 통전시키면 도체의 저항치는 그 단면적에 반비례하므로 반단선된 개소의 저항치가 커져서 국부적으로 발열량이 증가하거나 스파크가 발생하여 전선의 피복 등 주위의 가연물이 타기 시작한다. 기구용 비닐평형코드의 경우 꺾이거나 구부러지는 외력이 가해져 소선이 끊어진 경우에 단선율이 10%를 넘으면 그 후에는 급격히 단선율이 증가하는 현상으로 이어지며, 반단선에 의한 발열이 발생하면 전선이나 코드의 소선은 결국 1선이 용단하거나 접촉·단속(接觸·斷續)을 반복하여 옹흔이 생기고, 다른 한쪽 선의 피복까지도 소손되면 결국 양선간에서 단락현상(短絡現象)이 발생한다.

반단선은 코드와 플러그의 접속·접촉부 부근 등의 꺾여지고 구부러지거나 끌어당기는 등 비교적 강한 외력이 걸리기 쉬운 개소에서 발생하기 쉽다. 이 때문에 위와 같은 장소에서 전기용융흔의 발생개소에 단락을 발생할 원인이 없으면 반단선일 가능성이 높다. 통상 소선의 10% 이상 단선되면 반단선상태라 하고 이와 같이 닿았다 떨어졌다 반복적으로 접속·접촉되는 현상이 나타나면 많은 열이 발생되어 화재의 원인이 될 수 있다. 이 같은 반단선현상은 통전(通電)하는 단면적(斷面積)의 감소(減少)를 뜻하며 이는 곧 과부하상태를 의미한다.



<그림5> 반단선상태

2) 반단선용흔과 도체 등의 금속으로 절단된 용흔의 특징

반단선에 의한 용흔과 금속에 의해 절단된 경우의 용흔과의 결정적인 차이는 육안(肉眼)으로 식별할 때 대부분 아래의 그림 같이 단선 부분의 어느 쪽에 많은 용흔이 크게 생겨 있는가 여부로 판단한다. 즉 반단선의 경우는 단선 부분의 양쪽에, 금속 등의 도체로 절단된 경우는 단선 부분의 전원측의 한쪽 부분에 집중적으로 생겨 있다.



<사진47, 48> 비닐코드(PVC Insulated Flexible Cord) 전원측(左)과 부하측(右)

비닐코드 피복을 벗기고 관찰한 형태로 소선 선단에 여러 개의 용흔이 보이고 반단선에 의한 용흔의 특징이 잘 나타나 있다. 도체 등을 사용하여 방화하기 위한 고의적인 행위나 또는 실수로 인해 물리적인 외력으로 절단된 전선이나 코드에 생기는 용흔의 특징은 사진(6. 합선 또는 지락시의 용흔의 특징) 참조

9. 아산화동에 의한 용흔의 특징

1) 아산화동(亞酸化銅:Copper Suboxide)이란?

아산화구리라고도 하며 화학식은 Cu_2O 이고 산화제일구리(Cu_2O)와 구리(Cu)의 혼합물로 순수한 것은 얻지 못하고 있다. 아산화동의 용융점은 $1,232^{\circ}C$ 이며, 건조한 공기 중에서 안정하고 습한 공기 중에서 서서히 산화되어 산화동으로 변한다.

아산화동은 통상의 도체와는 다르게 부의 저항온도계수를 갖는데, $950^{\circ}C$ 를 전후로 저항은 급격히 감소하고, $1,050^{\circ}C$ 부근에서 최소가 된다. 아산화동의 조성비는 동(Cu) 89.93%, 산소(O) 10.07%로 이루어져 있으며, 아산화동의 외관적 특징은 표면에 산화동의 막이 있어, 덩어리의 외관을 육안으로 식별하는 것은 어려우나 아산화동은 물러서 송곳 등으로 가볍게 찌르면, 쉽게 부서지며, 분쇄물의 표면은, 은회색의 금

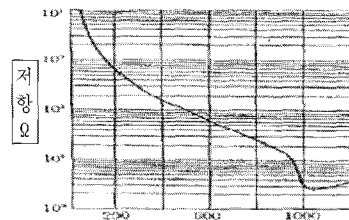
속광택을 가지고 있다.

이것을 현미경으로 20배 정도로 확대하면, 진홍색(ruby)과 비슷한 유리(glass)형의 결정이 보인다. 이 중, 특히 적색(赤色)의 결정은, 아산화동 특유의 것으로, 출화개소에 대응하는 도체 접촉부에서 이것을 볼 수 있으며, 출화원인을 결정하는데 있어 매우 중요한 물적 증거가 된다. 한편 아산화구리를 산화구리 I (산화제일구리: Cu_2O)라고도 하였는데, 정식 명칭이 아니기 때문에 현재는 거의 사용되지 않는다.

2) 아산화동의 저항특성과 발열온도 (亞酸化銅-抵抗特性-發熱溫度)

아산화동은 반도체로 통상의 도체와는 다르게 부(-)의 저항 온도계수를 갖는 것으로, 예를 들면 직경 2mm, 길이 7mm의 아산화동(Cu_2O)은 전기저항의 온도변화는 상온 부근에서는 큰 저항치(수십 Ω)를 가지고 있지만, 온도의 상승과 동시에 저항은 현저히 감소하여, $950^{\circ}C$ 전후부터 급격한 감소를 보이기 시작하고, $1,050^{\circ}C$ 부근에서 매우 적게(2~3 Ω)되며, 아산화동증식 발열현상은, 극부적인 발열현상으로 $1,000^{\circ}C$ 를 초과하여 발열하는 경우가 있어 배선기구 등에 사용되는 합성수지 제품의 절연물 또는 주변의 가연물이 발열부에 닿아 있으면 출화한다.

아산화동증식 발열현상이 생기기 위해서는, 도체의 굵기가 일정한 범위 이상의 것으로 도체의 굵기에 따라 전류치에도 한계가 있다. 또한, 경험적 또는 실험적인 현상의 발생이 확인되어 있다고 해도, 그 조건의 범위 내에 있으면 반드시 발생하는 것이 아니고, 접촉저항에 의한 발열과 비교하여 오히려 희귀한 현상으로 단순한 줄열(joule's heat)만으로는 설명되지 않고, 미소전류라도 출화할 수 있다는 것이 이 현상의 특징이다.



<그림6> 아산화동의 저항-온도특성곡선

3) 아산화동증식발열현상(亞酸化銅增殖發熱現象)

아산화동(화학식 Cu_2O)은 산화제일구리(Cu_2O)나 구리(Cu)가 대기중의 산소와 결합하여 만들어지는 혼합물로, 도

체 접촉부의 접촉저항이 증가하여 접촉부가 과열하게 되면 접촉부의 표면에 산화막이 형성된다. 이 산화막은 도체의 표면에만 일어나고, 내부로 진행되는 경우는 거의 없다.

도체가 동금인 경우, 동재의 도체가 스파크 등에 의해 고온이 되면, 동금의 일부가 산화하여 도체의 표면에는 아산화동(Cu₂O)이 생기는 경우가 있는데, 이와 같이 아산화동을 발생시키면서 높은 온도로 발열하는 현상을 아산화동증식발열현상이라 한다.

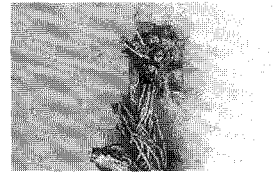
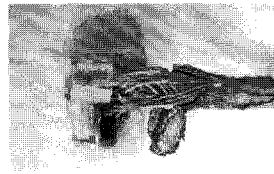
아산화동은 P형 반도체의 성질을 가지고 있어 정류작용을 함과 동시에 고유저항이 크기 때문에 국부적으로 발열한다. 아산화동의 국부적인 발열현상은 1,000°C를 초과하여 발열하는 경우가 있어 배선기구 등에 사용되는 합성수지 제품의 절연물이나 주변의 가연물이 발열부에 닿아 있으면 가연물을 착화시켜 전기화재를 일으키는 원인이 된다.

아산화동증식 발열현상은 최초에는 접촉부에서 빨간 불이 희미하게 나타나면서 흑색의 물질이 생성되며 이것이 서서히 커져, 띠형을 형성한다. 이 검은 덩어리 부분이 아산화동이며, 흑색 때문에 겉보기에는 산화동과 같이 보이지만 표면만 그렇고, 내부는 아산화동으로 되어 있다. 즉, 띠형의 붉은 아산화동의 층은 전류의 통로이고 양단의 전극을 연결하는 형태로 발열한다. 동선의 접속부에서의 아산화동증식은 교류의 경우, 양극과 음극에서 동시에 생성되며, 직류의 경우에는 양극에서만 증식이 일어난다.

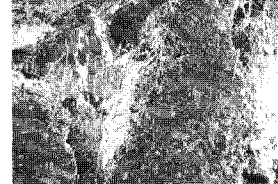
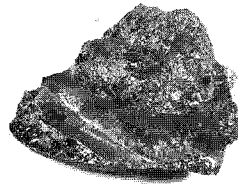
화재현장에서 수거할 때의 아산화동의 외관적 특징은 표면에 탄화물이 많이 부착하고 있기 때문에, 덩어리의 외관을 육안으로 식별하는 것은 어렵지만 간단한 회로 시험기나 도구를 사용하면 쉽게 구별할 수 있다.

아산화동으로 식별되는 증거물을 수거하여 저항을 측정할 수 있는 시험기로 증거물의 양단에 대고 저항이 0(Zero) 또는 무한대가 아니면 라이터 등을 사용하여 증거물을 가열할 경우 저항이 수천~수만 옴에서 수십~수백 옴으로 빠르게 변화하면 아산화동으로 판정하여 수거한다.

또한 아산화동은 매우 물러서 송곳 등으로 가볍게 찌르면, 쉽게 부서지며, 분쇄물의 표면은, 은회색의 금속광택을 가지고 있고, 이것을 휴대용 확대경으로 보면 진홍색(ruby)의 유리(glass)형의 결정이 보인다. 이 중, 특히 적색(赤色)의 결정은, 아산화동 특유의 것으로, 출화개소에 대응하는 도체 접촉부에서 이것을 볼 수 있으며, 출화원인을 결정하는데 있어 매우 중요한 물적 증거가 된다.



〈사진49, 50〉 아산화동이 생성된 전선터미널과 전선



〈사진51, 52〉 전선터미널과 전선에 생성된 아산화동 실제현미경 확대한 사진

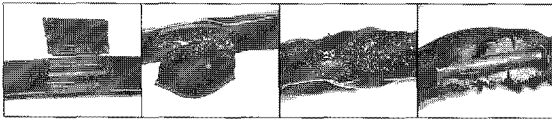
10. 과전류에 의한 전선피복의 소손흔과 용단흔의 특징

1) 과전류에 의한 전선피복의 상태변화 소손흔의 특징

일반적으로 가정이나 사무실 등에서 사용되는 전선은 염화비닐수지(PVC)를 주재로 한 콤파운드(compound)로 절연된 것을 사용하며, 모든 전선은 최대허용전류와 최고허용온도를 가지고 있다. 규정 이상의 과부하의 사용이나 규격 미달의 전선 굵기의 것을 사용하게 되면, 전선 절연물의 최고허용온도를 초과하게 되고, 과열현상이 발생하게 된다.

전선에 과전류가 흐르게 되면, 전류의 크기와 인가시간에 따라 다소 차이가 있으나 전선 절연물의 열화 진행과정은 다음과 같다. 전선에 과전류가 흐를 경우, 피복 절연물의 표면이 뜨거워지고, 그 후 전선피복에서 전체적으로 연기와 가스가 발생하며, 시간이 경과하면 절연물이 팽창하고, 피복이 용융하게 되어 아래 방향으로 절연물이 처지고, 윗부분에서는 탄화가 진행된다. 더욱 과열되면 전선도체가 발열하여 피복이 탄화하거나 용융하여 전선 도체로부터 탈락 또는 녹아서 흘러내리게 된다.

과열된 전선도체가 외부에 노출되면, 이로 인하여 주위의 도체와 전선도체가 접촉하게 되어, 아크에 의한 화재가 발생할 우려가 있으며, 순간단락 등에 의해 주위의 가연물에 착화되어 화재로 이어질 수 있다. 또한 전선에 가연물이 닿아 있으면 착화(着火)하게 되고, 전류가 더욱 많이 흐르면 전선도체는 용단하게 된다.



〈사진53〉 1단계 〈사진54〉 2단계 〈사진55〉 3단계 〈사진56〉 4단계
600V 비닐절연전선(IV)에 과전류를 흘릴 경우 전선피복의 변화현상

2) 과전류에 따른 전선피복의 변화현상

① 과전류(200%)를 흐르게 하면 초기에는 전선피복에서 연기가 발생하는 현상(약 110°C)이 나타나고 전선피복의 외부 표면에는 뚜렷한 변화가 없으며 전선도체와 접촉하는 피복 절연물의 내부에 작은 구멍이 생기는 탈염화현상이 나타난다.

〈표1〉 600V 비닐절연전선(IV 1.6mm)의 열화진행 과정

구분	피복의 변화 형태
정상상태	전선피복 내·외부 모두 매끄러운 상태
1단계	전선피복 내부에 작은 구멍이 생성(탈 염화작용)
2단계	두개로 나뉘, 내부는 그물모양의 구조
3단계	피복이 용융되고, 윗부분은 그물모양
4단계	피복이 도체로부터 탈락되고, 내부 절연물 변색

② 300%과전류가 2분 이상 지속적으로 흐르면 온도가 약 165°C 이상으로 되어 전선이 부풀어 오르고 연기가 발생하며, 전선피복은 2개의 층으로 나누어져 전선과 접촉하는 피복 절연물이 그물모양을 변화한다. 이어서 피복이 내부에서부터 용융되며, 심한 연기가 발생하는 현상으로 진행된다. 약 3분이 경과 하면 210°C 이상으로 온도가 상승하여 피복의 탄화가 확대된다.

③ 300%의 과전류에서 약 5분 이상 지속되면 온도는 약 230°C 이상으로 상승하여 피복이 흘러내리는 열화 단계를 지나 피복이 전선도체에서 탈락하기 시작하며 도체와 닿은 부분은 연녹색으로 변색된다.

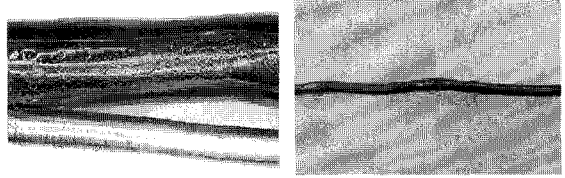
④ 과전류에 의해 전선피복이 소손되거나 손상될 때에는 해당되는 전선은 전반적으로 비슷한 양상을 나타낸다.

⑤ 손상된 부분과 손상되지 않은 부분의 경계선이 명확하지 않다.

⑥ 전선절연 피복의 내부에서 외부로 탄화가 진행된 것을 식별할 수 있다.

위와 같은 현상이 나타날 때는 과전류에 의해 전선 등의 절연피복 재료가 소손된 후 전기적인 원인으로 합선이 진행된 현상으로 판단한다.

3) 500%의 과전류가 약 1분간 통전되었을 때 동선과 절연피복 상태



〈사진57〉 IV 2.0mm 전선 내측(주변온도 28°C) 〈사진58〉 IV 2.0mm 전선 외측

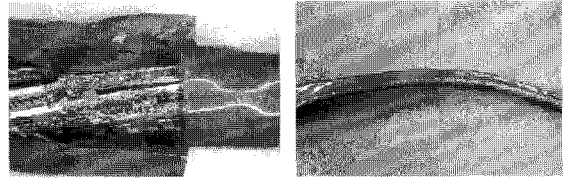


사진59 IV 5.5mm 전선(주변온도 28°C) 사진60 IV 5.5mm 전선 외측

① 사진57은 500%의 과전류를 약 1분간 통전된 전선(IV 2.0mm)으로 심선인 동선과 접촉되어 있는 절연피복 안쪽에서부터 절연물체가 부풀어 오르고, 도체와 접촉하는 피복 절연물에 크고 작은 구멍(hole)이 많이 생겨 있으며 그물모양으로 변해가고 있다.

② IV 2.0mm 전선의 외형상태는 약간 울퉁불퉁한 것 이외에는 외부 표면에는 특별한 변화가 없다.

③ 이와 같은 현상은 전선에 전반적으로 나타나는 현상으로 구분할 수 있는 경계가 없는 것이 특징이다.

2) 과전류에 의한 전선 용단흔의 특징

전선에 허용전류 이상의 전류가 흐를 때 전선은 용단하게 되는데 이때 전선의 선단에는 용융 망울이 생성되게 된다. 이 용흔은 일반적인 외부화염에 의해 녹은 용흔과는 다른 특징을 가진다.

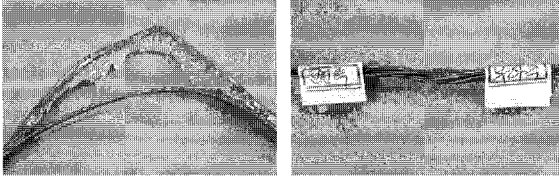
① 외부화염에 의한 용융형태는 광범위 한데 반하여 과전류에 의해 용융된 망울은 국부적으로 정상적인 전선의 표면을 감싸고 있는 형태가 많다.

② 용융되지 않은 전선의 표면은 산화작용에 의해 변색·산화되어 있으며, 구부리면 표면의 일부가 박리되어 떨어진다.

③ 과전류에 의한 용단은 통전전류가 클수록 짧은 시간에 용단된다.

④ 용단된 선단에는 용융 망울이 생성되며 이 용흔은 일반적인 외부화염에 의해 녹은 용흔과는 다른 양상을 나타낸다.

- 연선의 경우에는 용단된 부분이 대부분 가늘어지면서 끊어지고,
- 단선인 경우는 용단된 선단이 함몰형태 또는 뭉툭하게 끊어지는 양상을 나타낸다.

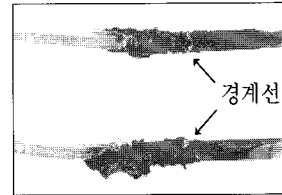


〈사진61〉 5.5mm IV전선 〈사진62〉 5배 과전류 용단흔 전원측(左) 부하측(右)

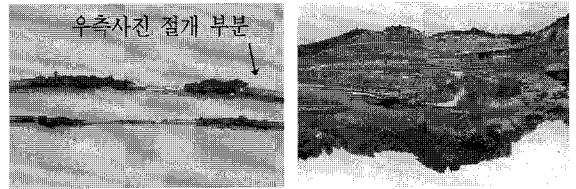


〈사진63, 64, 65〉 1.6mm 전선 5배 과전류 용단흔 전원측(左) 부하측(右)

한계는 55~75℃이다. 250℃ 정도에서 탈염화수소 반응이 가장 강하게 일어나고 수증기와 작용하여 주위 금속을 부식(腐蝕)시킨다. 한냉시(寒冷時)의 경화(硬化)를 방지하기 위하여 초산비닐과 공중합시키거나 가스체를 혼합함으로써 원래의 내열성(耐熱性)이나 난연성(難燃性)이 떨어지게 된다.



〈사진66〉 외부화염에 노출된 600V 비닐절연전선(IV)의 피복 상태 변화



〈사진68, 69〉 외부화염에 노출된 2.0mm, 5.5mm IV전선의 피복 상태 변화

11. 외부화염에 의한 전선피복과 동(銅) 전선의 표면 형태식별

1) 외부화염에 의한 전선피복 소손흔

절연전선의 피복재질은 대부분 열가소성수지인 염화비닐수지를 주원료로 하여 만들어지고 있으며, 내열성을 높이기 위하여 첨가제를 넣는다. 이 절연전선은 주위의 온도와 태양광선 등에 의해 피복이 열화되어 변색하게 되며, 열화가 가속되면 수축·팽창을 한다. 또한 화재가 발생하여 높은 열에 노출되면 절연물의 특성에 따른 변화가 발생하는데 그중 충전제의 배합에 따라 난연재료나 불연재료를 사용하면 스스로 자연소화될 수 있도록 제조되어 있다.

일반적으로 저압에서 사용되고 있는 절연전선의 대부분은 폴리염화비닐수지(polyvinyl chloride resin, PVC)를 주원료로 하여 사용하고 있으며 이 수지의 성분 중에는 염소(Cl)를 많이 함유하고 있기 때문에 자기소화성(自己消火性)을 가지고 있다. 보통 230~280℃부터 급격한 분해가 일어나며 400℃ 정도에서 인화(引火)한다. 발화하기 전에 탄화하여 스폰지상(狀)으로 팽창(膨脹)하며 연소시 짙은 연기(濃煙)가 발생하고 열분해 진행 상황은 색변화에 의해 처음 옅은 황색(淡黃)에서 황등(黃橙), 등(橙), 적등(赤橙), 적갈(赤葛), 흑갈(黑褐)의 순으로 변하고 연속사용에 견딜 수 있는 온도

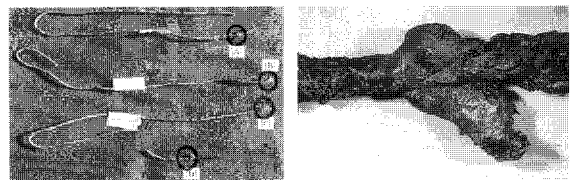
① 외부화염에 노출되어 불에 탄부분과 타지 않은 부분의 경계선이 명확하다.

② 화염이 직접 노출된 전선의 외부피복에서 내부로 탄화가 진행된 것을 식별할 수 있다.

위와 같은 현상이 나타날 때는 외부화염에 의해 전선 등의 절연피복 재료가 소손된 후 2차적으로 합선이 진행된 현상으로 판단한다.

2) 외부화염에 의한 동(銅)전선의 표면 형태 변화 주변온도식별

동(銅)으로 된 전선이나 케이블 등이 외부화염에 노출되면 전선의 표면은 온도가 상승함에 따라 절연피복이 소실되고, 400℃~900℃에서는 동(銅) 전선의 표면이 산화되어 박리현상이 일어나고 온도가 더욱 높아지면 전선은 용융된다.



〈사진70, 71〉 외부화염에 의해 용융된 형태

① 전반적으로 금속의 용해 범위가 넓고 표면에 요철(凹凸)이 있어 거칠며 광택이 없다.

② 전선의 중간에서 녹아 흘러내리는 형태의 결정체가 덮여 있으며, 전선의 끝부분은 물방울이 떨어지기 직전의 모양이다.

③ 전선의 일부가 외부화염에 연화되어 녹으면 장력을 받는 쪽(보통 아래방향)으로 길게 늘어나며, 끝 부분은 가늘고 절단된 자리의 표면은 거칠고 여러 형상이 나타난다.

3) 외부화염에 노출된 동(銅) 전선의 형태와 화재현장의 온도식별

화재가 발생하여 화염에 의해 전선이 불에 타게 되면 외부에서 내부로 산화가 진행되고, 온도에 따라 독특한 형태가 나타나며, 1,000°C와 1,100°C로 장시간 과열되면 구리전선의 전체가 산화되어 성분과 형태가 변화한다.

■ 참고문헌

1. 전기화재원인분석 및 예방대책연구(1994 한국전기안전공사)
2. 배선용 및 기기용 전선의 화재위험성에 관한 연구(2001. 12 산업자원부 주관기관: 한국전기안전공사)