



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

구리 전선의 전기단락흔과 열용융흔 의 특성에 관한 연구



2022年 2月

釜慶大學校 産業大學院

消 防 工 學 科

金 文 坤

工學碩士 學位論文

구리 전선의 전기단락흔과 열용융흔 의 특성에 관한 연구

指導教授：崔 載 旭

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2022年 2月

釜慶大學校 産業大學院

消 防 工 學 科

金 文 坤

金文坤의 工學碩士 學位論文을 認准함

2022年 2月 25日



委員長 工學博士 具 玟 成 (印)



委 員 工學博士 崔 俊 鎬 (印)



委 員 工學博士 崔 載 旭 (印)



목 차

1. 서 론	1
2. 이론적 배경	3
2-1. 전선 용융흔의 생성과정	3
2-1-1. 줄열의 발생	3
2-1-2. 전선의 단락	4
2-1-3. 용융흔의 생성	5
2-2. 전선 용융흔의 구별	6
2-2-1. 주상 조직	6
2-2-2. 수지상 조직	6
2-2-3. 주상 경계면	7
2-2-4. 전선 용융흔의 외형과 금속조직	7
2-3. 전기 용융흔의 개요 및 특성	8
3. 화재사례 및 용융흔의 특성	10
3-1. 화재사례(A)	10
3-2. 화재사례(B)	13
3-3. 화재사례(C)	19
3-4. 화재사례(D)	23
3-5. 화재사례(E)	29
4. 실험장치 및 시편제작	36
4-1. 실험구성	36
4-1-1. 실험세트	36
4-1-2. 실험조건	39
4-2. 시편제작	40
4-2-1. 절단	40

4-2-2. 성형	40
4-2-3. 연삭	40
4-2-4. 정밀연마	41
4-2-5. 부식	41
5. 실험결과 및 고찰	42
5-1. 연선·단선 1차 단락선 분석	42
5-2. 연선·단선 2차 단락선 분석	46
5-3. 연선·단선의 수열된 용융흔(3차 열용융흔) 분석	50
6. 결 론	54
참고 문헌	57
Abstract	59



List of Figures

- Fig. 1.** Process of growth of dendrite7
- Fig. 2.** The layout of the building where the fire occurred 14



List of Photos

- Photo 1.** Identification of the spark on the damaged connection wiring of hand drill charger 11
- Photo 2.** Separated wires of the wall-mounted fan found at the restaurant 12
- Photo 3.** Melt marks generated from the power line in the direction of the electric heater 15
- Photo 4.** Melting marks are identified at the three-wire end of the disconnected part of the electric heater power line 16
- Photo 5.** Melt trace No. 1 shows gloss, but spherical bulbs are not identified. In No. 2 and No. 3 melt marks, spherical bulbs with spherical luster were identified 17
- Photo 6.** Irregular voids are observed in the melted part of the melt trace No. 3, and the heat-affected zone and Observation of columnar tissue and columnar boundary at the boundary of the parent material 18

Photo 7. A 2-prong wall outlet and a T-shaped 3-prong multi-outlet are combined lost in state	20
Photo 8. Appearance of bead by short-circuit on the solid wire separated wires of the wall-mounted fan found at the restaurant	21
Photo 9. Metal structure of bead by short-circuit on the solid wire separated wires of the wall-mounted fan found at the restaurant	22
Photo 10. Short circuit and melted appearance in the power line that supplies electricity to the electric blanket	24
Photo 11. Temperature controller power line(power side) 3-①(x10)	25
Photo 12. Temperature controller power line(power side) 3-①(x50)	26
Photo 13. Temperature controller power line (power side) 3-(x40)	27
Photo 14. Temperature controller power line (power side) 3-② Void(x50)	28

Photo 15.	Melt traces are observed on the power supply line of the water purifier, and the location of the molten marks is located on the load side	30
Photo 16.	For location identification, the power line close to the power source is numbered 1 and 2. Apply No. 3 or 4 to the power line close to the load side	31
Photo 17.	No. 1 stereo microscope on the power supply side of the water purifier power line(x20)	33
Photo 18.	No. 2 stereo microscope on the power supply side of the water purifier power line(x20)	33
Photo 19.	No. 3 stereo microscope on the load side of the water purifier power line(x20)	35
Photo 20.	No. 4 stereo microscope on the load side of the water purifier power line(x20)	35
Photo 21.	Whole view of the laboratory	37
Photo 22.	Configuration of experimental set	38
Photo 23.	Appearance of primary short circuit traces of stranded	

and disconnected wires($\times 20$)	43
Photo 24. Metal structure of bead by short-circuit on the solid wire($\times 100$)	45
Photo 25. Appearance of secondary short circuit traces of stranded and disconnected wires($\times 20$)	47
Photo 26. Metal structure of bead by short-circuit on the solid wire($\times 100$)	49
Photo 27. Appearance of fusion traces(tertiary thermal fusion traces) of stranded and disconnected wires	51
Photo 28. Metal structure of the solid wire melted by heat($\times 50$)	53

1. 서 론

현대사회는 환경오염 및 화석연료의 고갈의 영향으로 청정에너지원인 전기에너지에 대한 의존도가 높아지고 있으며, 보다 편리한 생활을 영위하기 위한 필수 에너지원으로 우리 삶에서 많은 부분을 차지하고 있다. 그러나 전기 에너지는 잘못된 전자제품의 사용 습관 등으로 인해 인명피해와 재산피해를 발생시키는 화재의 위험을 가지고 있다. 잘 다룬 전기는 우리에게 정말 고마운 존재이나, 잘못 다루면 생명과 재산을 앗아가는 무서운 존재로 바뀌게 된다.

소방청 국가화재정보시스템에 따르면 최근 5년간(2014~2018년) 전국에서 216,499건의 화재가 발생하였고, 주요 발화요인은 부주의(111,422건), 전기적 요인(47,127건), 기계적 요인(22,865건) 순인 것으로 확인되었다. 여러 가지 요인 중 전기적 요인에 의한 화재가 47,127건이 발생하여 전체 화재의 비율에서 21.8%를 차지하고 있으며, 재산피해의 경우에는 전기적 요인으로 인한 피해액(4,513억원)이 부주의로 인한 피해액(4,362억원)보다 많은 것으로 확인되었다.

전기적 요인에 의한 세부 요인을 살펴보면 절연열화에 의한 단락이 12,095건으로 전체 전기적 요인의 25.7%를 차지하고 있으며, 미확인 단

락(11,664건), 접촉 불량에 의한 단락(4,955건)이 뒤를 잇고 있다. 전원이
인가된 배선 상에서 단락에 의해서 생성된 용융흔을 1차단락흔, 통전
중 외부의 화염에 의해 피복이 소실되어 단락으로 생성된 용융흔인 2차
단락흔, 그리고 통전되지 않은 배선이 외부화염에 의해 용융된 경우를
3차 열용융흔으로 분류하며, 그 외 과전류, 반단선에 의한 용융흔이 있다.

본 연구에서는 화재현장에서 발견되는 전선 용흔이 통전상태에서 전
기적 아크열로 인하여 생성된 용흔(1차 단락흔)인지, 통전 중 화염으로
인해 단락이 되어 생성된 용흔(2차 단락흔)인지, 통전되어 있지 않은 배
선이 화염에 의해 녹아서 생성된 용흔(3차 열용융흔)인지 식별기준을 검
토하고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 전선 용융혼의 생성과정

2-1-1. 줄열의 발생

전기는 물질의 안에 있는 전자 또는 공간 안에 있는 자유전자나 이온의 움직임으로 인하여 생기는 에너지의 한 형태이다. 이와 같은 움직임은 전류로 표현되는데 전류가 흐를 경우 자유전자가 도선 속을 이동하면서 원자와 충돌하여 저항이 발생한다. 저항으로 인하여 열 진동에너지가 발생되고 그 열에너지를 줄열이라 한다.

줄열은 다음과 같이 나타낸다.

$$H=0.238 \times I^2 \times R \times T [cal]$$

I : 전류(A), R : 저항(Ω), T : 시간(sec)

2-1-2. 전선의 단락

단락은 전위차가 있는 전로사이에 절연이 파괴되는 현상을 말하며, 일반적으로 합선이라는 정의와 혼용하여 사용되고 있다.

단락은 노후화로 인한 절연피복이 연화 또는 손상되거나 화염·외력으로 인한 피복 손상, 과부하로 인한 줄열 발생 등이 원인이 될 수 있다.



2-1-3. 용융혼의 생성

흔히 접할 수 있는 전선의 경우 경제성을 고려하여 구리를 사용한다. 구리는 약 1,083 ℃에서 용융되며 그 이상의 수열을 받았을 경우 금속조직이 용융되어 액체화되었다가 냉각과 함께 재결합이 된다. 전선의 용융혼은 전선의 단락이나 외부 열에 의해서도 생성된다.

전선 용융혼은 3가지로 구분된다.

- ① 전기단락으로 생성되는 전기 단락혼(1차 용융혼)
- ② 전원이 인가된 전선이 화재로 인하여 절연피복이 타거나 녹아서 단락되어 생긴 화재 단락혼(2차 용융혼)
- ③ 통전되지 않은 전선이 화재로 인하여 녹은 것을 열용융혼(3차 용융혼)이라고 한다.

특히 1차 용융혼과 2차 용융혼을 전기적 용융혼이라 한다.

2-2. 전선 용융혼의 구별

2-2-1. 주상 조직

응고에 의한 결정입자의 모양과 크기는 핵이 생기는 수와 핵의 성장속도에 좌우되고, 열의 전도방향에도 영향을 받으며, 냉각속도가 빠를수록 큰 영향을 미친다. 따라서 결정입자는 이웃의 결정의 방해 때문에 발달하지 못하고 성장하기 쉬운 중심방향으로 발달하여 중심 쪽으로 가늘고 긴 기둥과 같은 주상조직이 생성된다¹⁾.

2-2-2. 수지상 조직

순금속은 일정한 온도에서 용해를 하는데 용점은 금속의 성질에 따라 특정값을 가지고 있다. 용해된 액체의 금속을 구성하고 있는 각 원자는 평상시에 활발한 운동을 하고 있으나, 온도가 강하할 때 응고점(Freezing point)에 가까워지면 원자는 고체 특유의 원자 배열에 가까운 소집단을 형성한다. 이 집단은 성장할수록 핵을 생성하게 되는데 이와 같이 발생한 결정핵은 응고잠열을 방출하면서 성장하게 된다.

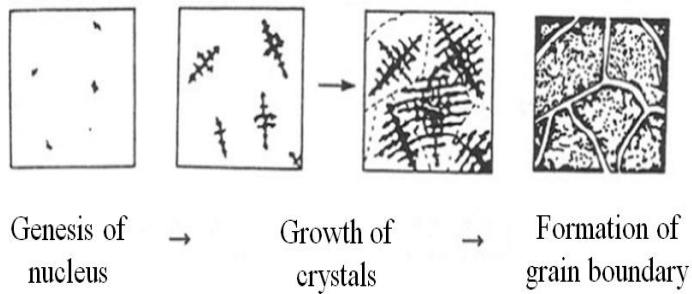


Fig. 1. Process of growth of dendrite.

Fig. 1과 같이 1개의 결정핵이 발달하여 금속원자 고유의 결정격자를 이루고 나뭇가지 모양으로 결정을 이룬다. 이러한 현상을 수지상 결정 (Dendrite)이라고 한다²⁾.

2-2-3. 주상 경계면

용융된 금속의 냉각속도에 따라 경계면이 나타나는데 급속한 냉각이 이루어지는 주상조직의 경우에 원조직과 경계를 형성한다.

2-2-4. 전선 용융흔의 외형과 금속조직

1차 용융흔과 2차 용융흔은 전기적 요인으로 발생하는 단락흔으로 외형상 용융부분이 구형으로 윤기와 광택이 있다. 금속조직상 주상조직이 관찰되고 주상조직과 원조직과의 경계인 주상경계면이 관찰된다.

열흔(3차 용융흔)은 외부 열로 인하여 발생하는 용융흔으로 외형상 광택이 관찰되지 않고 금속조직상 주상조직 및 주상경계면이 관찰되지 않으며 수지상 조직이 관찰된다³⁾.

2-3. 전기 용융흔의 개요 및 특성

화재가 발생하고 성장하는 과정에서 주변온도가 상승하면 도체인 구리를 용융시키게 된다. 구리는 약 1,083 ℃에서 용융되며 이 과정에서 금속 특유의 조직상을 생성하게 된다. 단락 발생 시 전선 금속부의 녹은 흔적을 용흔이라 하며, 이 용흔의 조직구조 및 기공(Void) 등은 발화원인을 판단하는데 중요한 역할을 한다.

대부분의 전기화재 현장의 배선, 코드류에는 용흔이 남아있으며 화재감식의 목적은 이 용흔에서 출화에 직접적 영향을 준 용흔과 그렇지 않은 용흔을 구별해 내는 것이다.

화재현장에서 채취하는 단락흔은 전기적 아크열로 생성된 1차 단락흔, 통전 중 화염에 의해 발생한 2차 단락흔, 비통전 상태의 전선이 화염에 의해 용융된 3차 열용흔으로 압축할 수 있으며, 이를 구분하는 방법은 3가지 방법을 경우에 따라 달리 사용하고 있다.

첫째, DAS(Dendrite Arm Spacing)법이 있다. 이는 단락흔에 Cu 또는

Cu_2O 가 Dendrite(수지상)로 확인되었을 경우 사용하는 방법이다. Dendrite 조직의 나뭇가지 모양 가지간 폭에 의해 1차 단락흔, 2차 단락흔을 구별할 수 있다. 구별 원리는 형성시의 온도에 기인하는데, 1차 단락흔과 2차 단락흔은 냉각 시간에 차이가 생기므로 Dendrite 가지의 폭에 차이가 발생한다. 이러한 가지의 폭을 DAS라고 하고, 냉각속도가 빠를수록 DAS의 간격(폭)은 좁아진다^{3,4)}. 비교적 낮은 온도에서 생성된 1차 단락흔은 폭이 좁고, 2차 단락흔은 폭이 넓다.

둘째, CS(Cell Size)법이다. 이는 단락흔에서 Dendrite조직을 관찰할 수 없을 경우 이용하는 방법이다. 금속의 결정립계 크기는 냉각속도의 영향을 받는데, 이 결정립계(Grain boundary)의 크기에 의해 1차흔, 2차흔을 구별하는 방법이다.

세 번째로, Void 관찰법이 있다. 이는 단락흔 내부에 생긴 기공을 관찰하여 1차흔, 2차흔을 구별하는 방법이다. 동경소방청에서 고안한 방법이다. 이 Void 관찰법에 따르면 1차흔의 경우 대체로 Void 혹은 Blow hole이 작고 전체적으로 넓게 분포되어 있고, 2차흔의 경우 주변온도가 높기 때문에 냉각이 완만하여 중심부에 큰 Void가 생기기 쉽다⁵⁾.

3. 화재사례 및 용융흔의 특성

3-1. 화재사례(A)

대부분 전기화재의 발생은 전류의 발열작용으로 발생하며, 줄열에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 특히 전기화재의 경우에는 단락사고가 발생하는 경우에 전선에는 100 A에서 1,000 A에 이르는 매우 큰 전류가 흐름이 발생하게 되는데 이때 전선피복재에 착화되어 발생하게 된다⁶⁾.

화재사례(A)는 2016. 4. 9. 20:07경 부산광역시 수영구 민락동에 위치한 음식점에서 화재가 발생하여 1,175천원의 재산피해가 발생하였다. 화재조사 결과 벽걸이 선풍기 전원선 중간부분이 용단되고, 용단지점의 부하측과 전원측에서 각각 다수의 불규칙 보이드 및 주상경계면이 식별된 점 등으로 미루어 벽걸이 선풍기 전원선이 전기적 영향을 받은 것으로 보인다.

Photo 1에는 화재조사를 실시하면서 화염이 최초 생성되어 주위로 전기가 일어난 곳을 바탕으로 확인한 결과, 이곳에서 화염이 생성되어 가연물이 있는 방향으로 연소가 진행된 것으로 판단되어 촬영한 것이다.



Photo 1. Identification of the spark on the damaged connection wiring of hand drill charger.

Photo 2에 나타난 전선에서는 Photo 1에서 채집한 2가닥의 전선에서 용융현상과 스파크 현상이 나타나 있다. 이것은 전원이 인가되어 있는 상태에서 양극 소선에서 과부하가 생성됨으로서 단락이 발생한 것으로 판단되며, 전선에서는 둥글고 광택이 생성된 것으로 보아 이 부분에서 직접적인 원인에 의해서 최초 발화가 발생한 것으로 보인다.



Photo 2. Separated wires of the wall-mounted fan found at the restaurant.

3-2.화재사례(B)

화재사례(B)는 2019. 1. 14. 10:51경 부산광역시 연제구 세병로 24번길에 위치한 상진기계와 동진섬유에서 화재가 발생하여 41,455천원의 재산피해가 발생하였다. 화재조사 결과 상진기계 사무실 입구 부근의 전열기구 전원선과 냉장고 부근 전원선에서 용융흔이 관찰되고, 부하측 용흔에서 병렬아크와 직렬아크로 인해 형성된 주상경계면이 모두 식별되고, 주상조직들이 관찰된 점 등으로 미루어 전열기구 전원공급선 피복의 절연이 손상되어 선간 아크가 발생된 것으로 보인다.

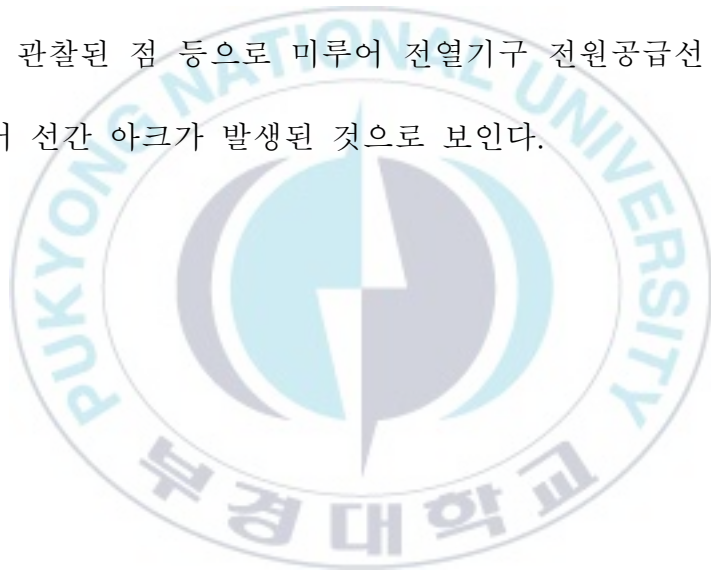


Fig. 2는 화재가 발생된 곳으로 추정되는 OO기계와 옆 사무실인 OO
 점유의 평면도를 나타내었다.

OO기계의 건물에는 선반 및 드릴기계가 설치되어 있고, 간이 칸막이
 로 된 사무실이 내부에 설치되어 있었다.



Fig. 2. The layout of the building where the fire occurred.

Photo 3에는 OO기계 사무실 입구부근에서 발견된 전열기구 전원선과 냉장고 부근에 있던 전원선에서 나타나 있는 화재조사 전에 촬영한 모습이다.



Photo 3. Melt marks generated from the power line in the direction of the electric heater.

Photo 4는 전열기구 전원선의 3선 끝단 부분에 단락과 용융현상이 생성되어 있는 것을 나타내었다. 3선 끝단 이외에도 전원측의 소선에는 일부 단락과 용융현상이 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 부하측인 1번, 2번 및 3번 선에서 1차적으로 과부하가 발생되어 단락과 용융현상이 발생된 것으로 판단된다.

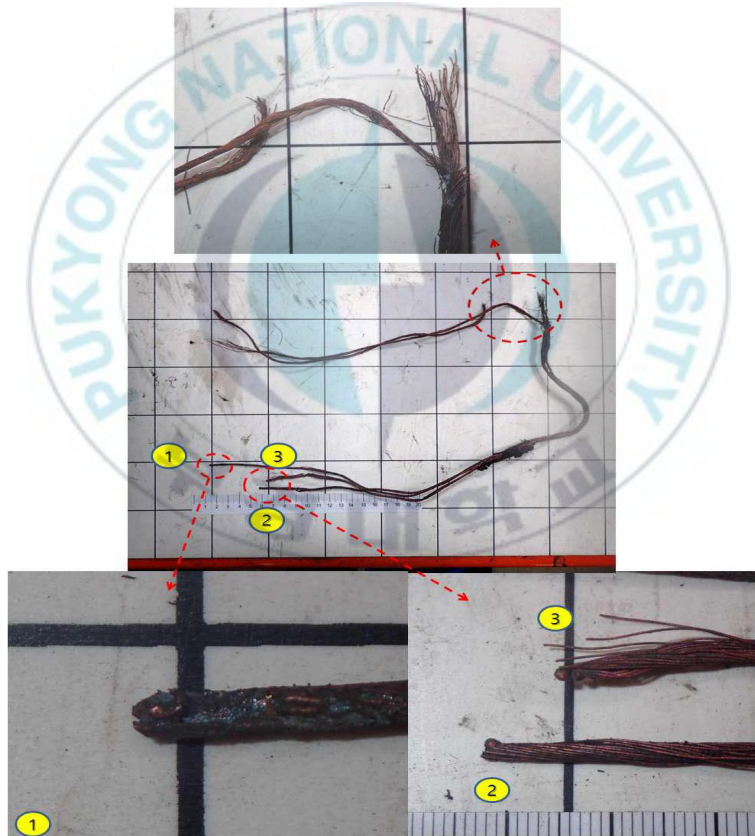


Photo 4. Melting marks are identified at the three-wire end of the disconnected part of the electric heater power line.

Photo 5에는 화재조사로 정리된 단락된 전선들을 Photo 4에 확대하여 나타내었다. 1번의 전선은 용융흔과 광택은 발생되어 있으나, 구형의 망울이 생성되어 있지 않은 것을 볼 수 있다. 그러나 2번과 3번의 전선은 용융흔에는 구형의 망울이 형성된 모습과 광택이 나타나 있다.



Photo 5. Melt trace No. 1 shows gloss, but spherical bulbs are not identified. In No. 2 and No. 3 melt marks, spherical bulbs with spherical luster were identified.

Photo 6에는 전열기구 전원선인 3번의 전선에서 발생되어 있는 용융흔에 대하여 금속현미경으로 촬영한 것으로서 열용융흔의 용융부에 불규칙 보이드(Voids)가 관찰되며, 열영향부와 모재부의 경계에 주상조직 및 주상경계면이 관찰되었다.

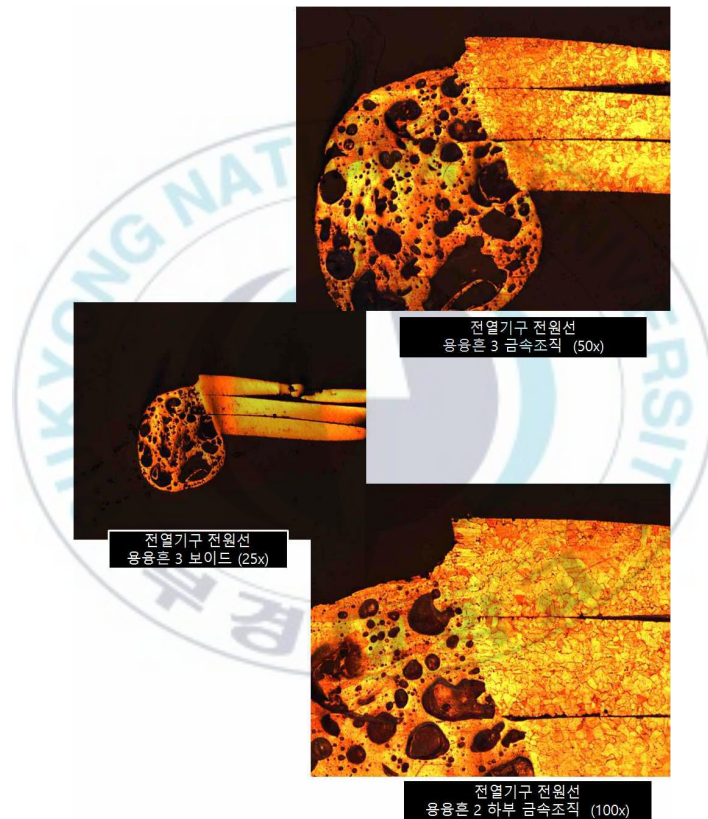


Photo 6. Irregular voids are observed in the melted part of the melt trace No. 3, and the heat-affected zone and observation of columnar tissue and columnar boundary at the boundary of the parent material.

3-3. 화재사례(C)

화재사례(C)는 2019. 1. 19. 09:46경 부산광역시 남구 수영로 322번길 20에 위치한 지상4층 지하1층의 근린생활시설의 3층에서 화재가 발생하여 10,517천원의 재산피해가 발생하였다. 화재조사 결과 발화지점으로 추정되는 테이블 상단 위에 설치된 2구형 벽면콘센트에 결속되어져 있던 2개의 T자 3구형 콘센트에 미상의 전기제품 전원공급선에서 단락이 발생되어 있는 사고이다.



Photo 7은 근린생활시설 3층에서 발생한 화재의 조사 시에 발견된 2구형 벽면콘센트와 T자형 3구 멀티콘센트가 함께 결속되어 있는 것을 원인조사를 위하여 분해하기 전 촬영을 한 것이다.



Photo 7. A 2-prong wall outlet and a T-shaped 3-prong multi-outlet are combined lost in state.

Photo 8에는 2구형 멀티콘센트 전원측 1번 선에서 용단되어 있는 전선을 촬영하였으며, Photo 9에는 용단흔의 금속조직을 나타내었다.

Photo 8을 살펴보면 끝부분에 달걀모양의 용융흔이 생성되어 있으며, 약간의 광택이 발생되어 있다. 그러나 Photo 9에 금속현미경으로 금속의 조직을 촬영하여 나타낸 것을 보면 용융부의 중심에 큰 기공()이 생성되어 있는 것으로 보아 2차적인 원인에 의해 생성되어 있는 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.



Photo 8. Appearance of bead by short-circuit on the solid wire separated wires of the wall-mounted fan found at the restaurant.

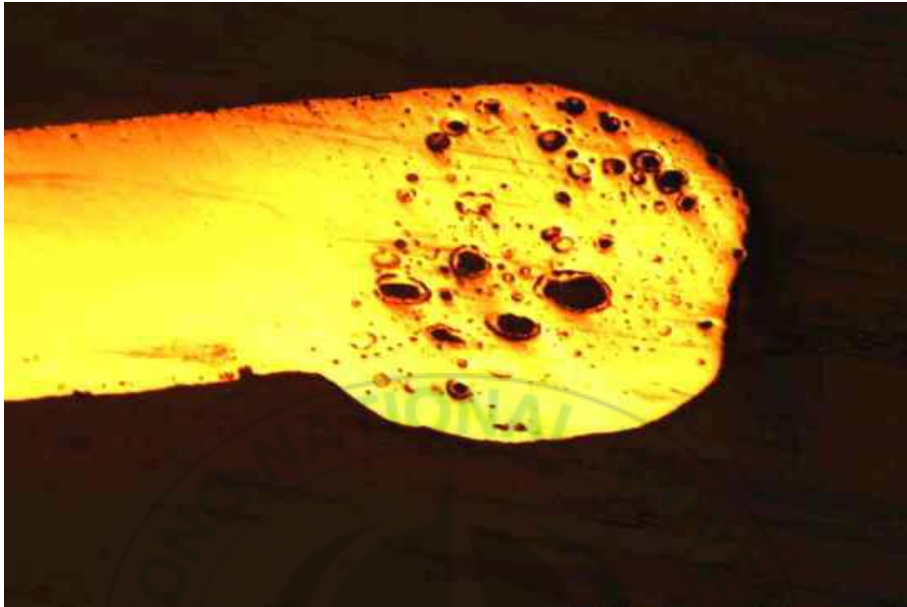


Photo 9. Metal structure of bead by short-circuit on the solid wire separated wires of the wall-mounted fan found at the restaurant.

3-4. 화재사례(D)

화재사례(D)는 2019. 3. 9. 13:16경 부산광역시 기장군 장안읍 좌동2길 9에 위치한 단독주택에서 화재가 발생하여 11,514천원의 재산피해가 발생하였다. 화재조사 당일 거주자의 진술에 의하면 화재발생 전 주방에서 설거지를 하고 있었고, 안방의 침대 위의 전기장판은 온도조절기가 1단으로 켜져 있었다고 진술하였다.

화재조사 결과 당시 사용중이던 전기장판의 전원선에서 단락흔이 발생된 것이 확인되었으며, 발생한 단락 불꽃이 전선피복 및 침대 매트리스 등에 연소되어 발생한 사고이다.

Photo 10은 전기장판에 전기가 공급되는 전원선에서 발생되어 있는 단락과 용융된 모습을 나타내었다.

전선의 1번과 2번으로 표시된 2가닥의 전선에서 용융되어 있는 것을 확인하였다.

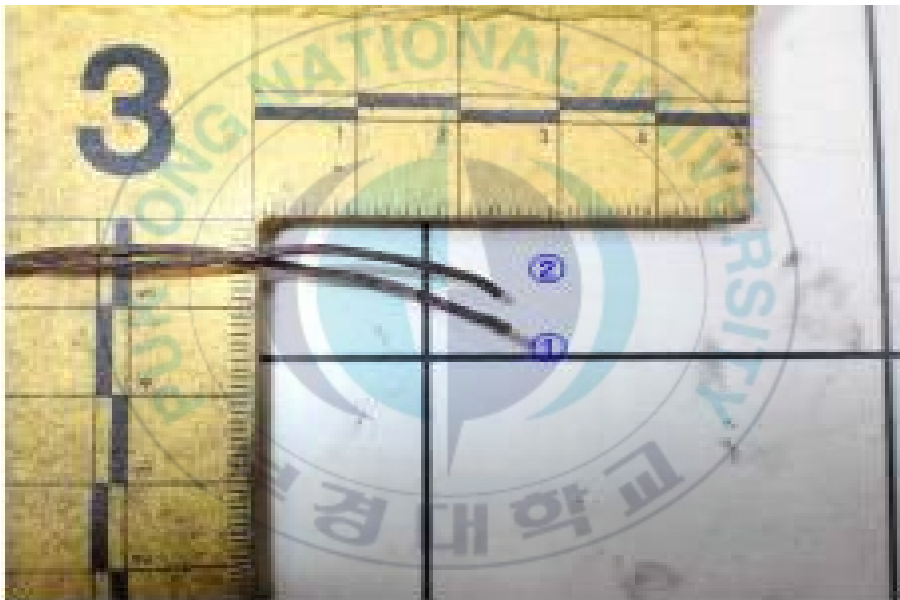


Photo 10. Short circuit and melted appearance in the power line that supplies electricity to the electric blanket.

Photo 11에는 1번 전원선을 확대 촬영한 것으로서, 둥글고 광택이 뚜렷하게 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 전선의 과부하로 인한 1차적으로 발생한 단락흔인 것으로 판단된다.



Photo 11. Temperature controller power line(power side) 3-① (x10).

Photo 12는 1번 전선의 단락흔을 금속현미경으로 50배의 배율로 촬영하였다.

금속조직을 분석한 결과 용융부 금속조직은 작고, 기공이 전체적으로 넓게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 용융부와 모재부의 경계가 뚜렷하게 발생되어 있다.



Photo 12. Temperature controller power line(power side) 3-① void (x50).

Photo 13은 전기장판에 공급되는 전선의 2번 전선의 단락과 용융된 모습을 나타내고 있다.

1번 전선과 동일하게 둥글고 광택이 발생되어 있는 것은 1번 전선과 붙어있던 이곳에서 과부하로 인하여 1차적으로 발생된 것으로 판단된다.



Photo 13. Temperature controller power line(power side) 3-②(x40).

Photo 14에는 2번 전선의 단락흔을 금속현미경으로 50배의 배율로 촬영하였다.

금속조직을 분석한 결과, 1번의 전선과 동일하게 용융부 금속조직이 작고, 기공이 전체적으로 넓게 분포되어 있으며, 용융부와 모재부의 경계가 뚜렷하게 발생되어 있다.

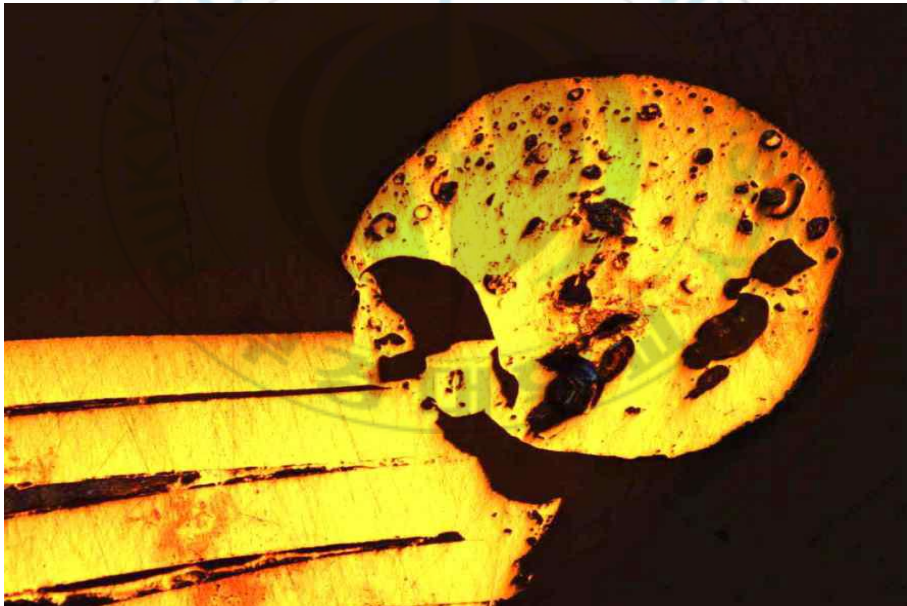


Photo 14. Temperature controller power line(power side) 3-② void (x50).

3-5.화재사례(E)

화재사례 (E)는 2019. 04. 18. 02:37경 부산광역시 부산진구 양지로 5번 길에 위치한 5층 건물 중 1층의 중식당에서 화재가 발생하여 10,006천원의 재산피해가 발생하였다. 화재조사 결과 주방입구 부근에 있던 정수기 뒤편의 인입선에서 외형상 단락흔으로 추정되는 용융흔이 관찰되었으며, 절연열화에 의한 단락 또는 압착손상에 의한 단락으로 인해 화재가 발생한 사고인 것으로 판단된다.



Photo 15는 화재가 발생된 중식당에 설치되어 있던 정수기, 커피자판기, 전기밥솥 등에 연결되어 있던 전원선을 복원한 것을 나타내고 있으며, 여러 곳에서 전선의 용융현상이 관찰되나, 정수기 전원선이 부하측에 가장 가까운 지점에서 용융흔이 관찰됨으로서, 이곳에서 최초 발화가 발생된 것으로 추측된다.

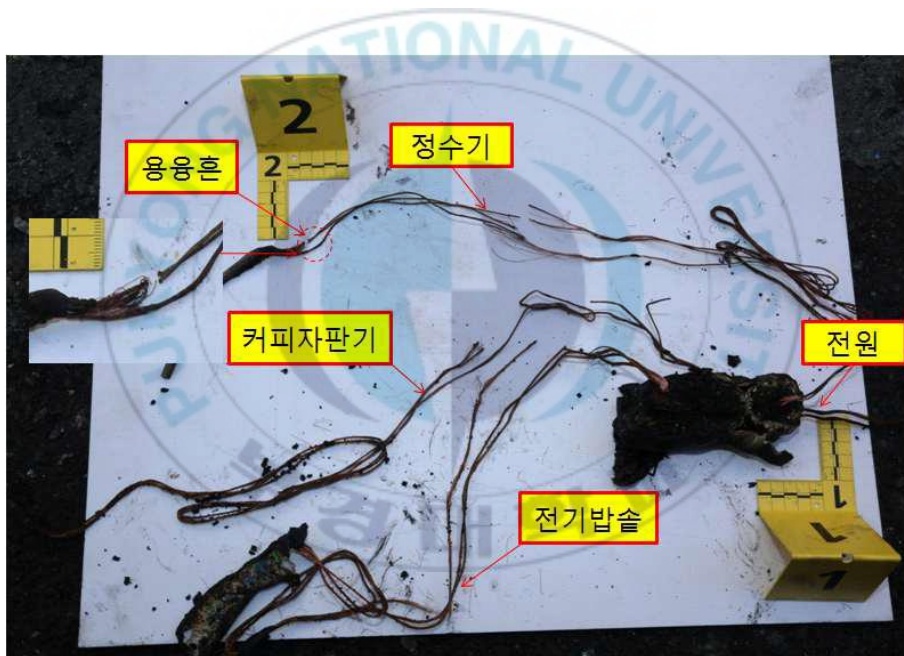


Photo 15. Melt traces are observed on the power supply line of the water purifier, and the location of the molten marks is located on the load side.

Photo 16은 Photo 15에 나타난 정수기 부근의 부하측에서 발생되어 있는 단락과 용융흔을 촬영하였다.

번호 1, 3번의 전선은 한 전선이고, 번호 2, 4번은 한 전선이다. 이 전선을 보면 4곳 모두의 전선에서 용융현상이 뚜렷하게 생성되어 있는 것을 볼 수 있다.

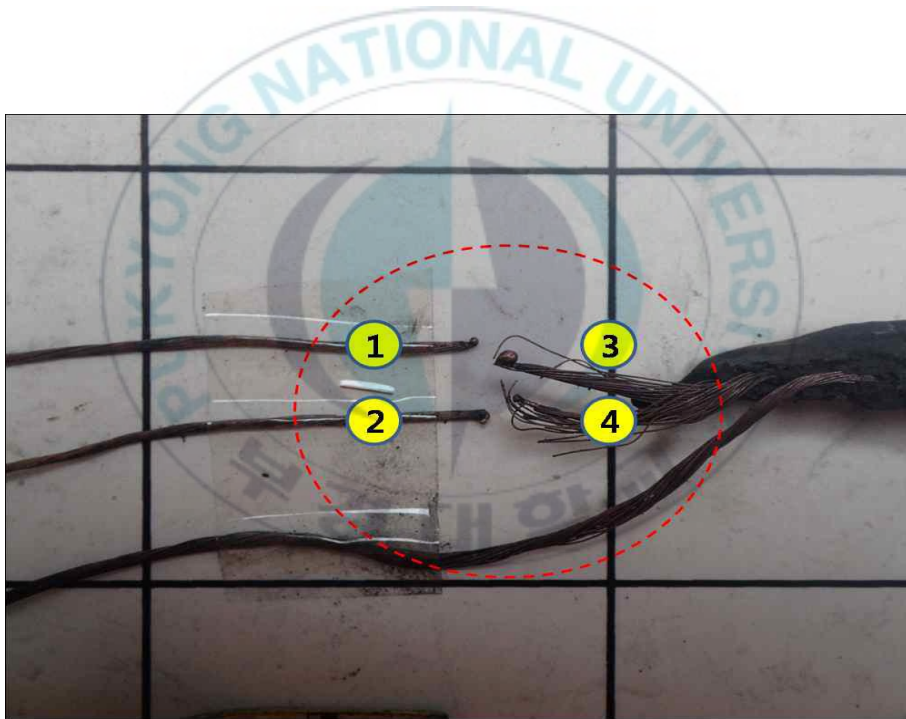


Photo 16. For location identification, the power line close to the power source is numbered 1 and 2. Apply No. 3 or 4 to the power line close to the load side.

Photo 17과 18은 정수기에 연결되었던 전선의 전원측에서 단락된 전선을 실체현미경으로 20배의 배율로 촬영하였다.

용융된 부위의 조직이 촘촘하고, 작고 둥근 망울이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

1차적으로 발생된 용융현상은 전선의 굵기가 굵으면 단락부 옆에 용융흔의 망울이 붙어있는 것과 동일한 현상을 볼 수 있다.





Photo 17. No. 1 stereo microscope on the power supply side of the water purifier power line(x20).



Photo 18. No. 2 stereo microscope on the power supply side of the water purifier power line(x20).

Photo 19와 Photo 20에는 정수기 전선의 부하측에 생성된 3번과 4번의 전선을 실체현미경으로 20배의 배율로 촬영하였다.

단락 시 발생하는 아크로 인하여 용융흔의 비산은 전원측에서 부하측으로 비산됨으로 용융의 부위가 바늘처럼 가늘고 뾰족한 모양으로 생성되어 있다.





Photo 19. No. 3 stereo microscope on the load side of the water purifier power line(x20).



Photo 20. No. 4 stereo microscope on the load side of the water purifier power line(x20).

4. 실험장치 및 시편제작

4-1. 실험구성

대형 화재 등 최성기 화재의 수열 조건에서 만들어 질 수 있는 전선 용융흔을 생성할 수 있게 하였다.

4-1-1. 실험세트

안전한 실험을 위한 철제함과 전선을 고정할 수 있는 스탠드를 준비하고 단락흔 생성을 위하여 전원인가 장치를 설치한 것을 Photo 21에 나타내었다.

시료는 옥내 배선용으로 사용하는 단선(1.5S Qmm)과 연선(0.75 SQmm)을 준비하였다.

전선의 용융온도를 측정하기 위하여 열전대를 철제함에 설치하여 가열하는 온도를 측정하였다.

용융흔을 분석하기 위한 장비로 실체현미경과 시편 성형기, 시편 연마기, 금속현미경을 사용하였다.

Photo 22에는 시료를 1,200~1,300 ℃로 가열하기 위하여 부탄가스 버너(토치)를 준비하였다.

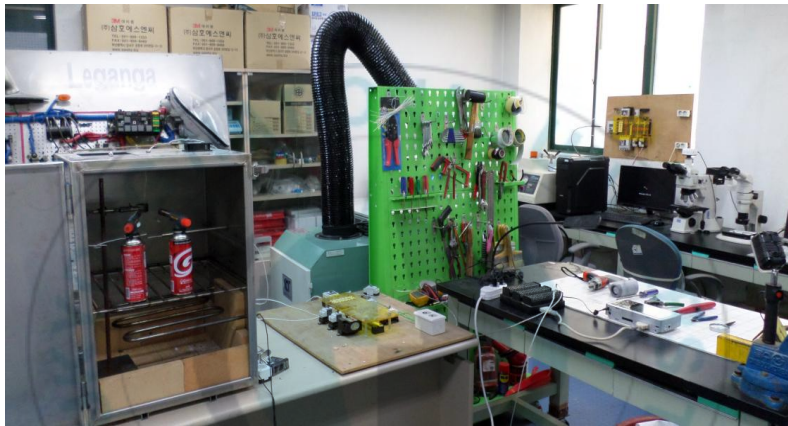


Photo 21. Whole view of the laboratory.

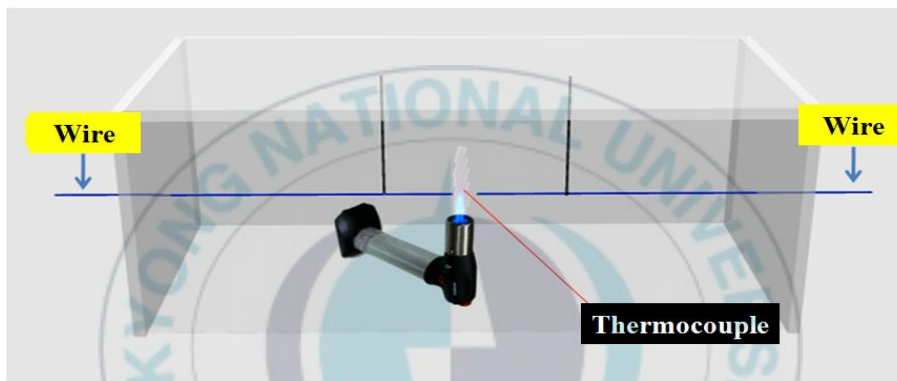


Photo 22. Configuration of experimental set.

4-1-2. 실험조건

첫 번째 조건은 연선·단선을 단락시켜 전기적 용융흔(1차 단락흔)의 외형과 금속조직을 분석한다.

두 번째 조건은 연선·단선을 피복이 있는 상태로 가열하여 녹아서 단락되는 2차 단락흔의 외형과 금속조직을 분석한다.

세 번째 조건은 비통전 상태의 연선·단선을 가열한 3차 열용흔의 외형과 금속조직을 분석한다.

단락은 화재현장 상황을 고려하여 피복이 있는 상태로 단락시켜 용융흔을 생성하였다.

가열은 1200~1,300 ℃로 2~5분간 실시한다.

4-2. 시편 제작

실험조건에 따른 전선 용융흔을 실체현미경으로 외형을 관찰한 후 절단 → 성형 → 연삭 → 정밀연마 → 에칭의 절차를 걸쳐 금속현미경을 통한 금속조직 분석 단계로 진행하였다.

4-2-1. 절단(Cutting)

절단은 시편 형성기에 들어갈 수 있을 정도인 2 cm로 절단하여 준비하였다.

4-2-2. 성형(Mounting)

합성수지를 사용하여 Hot Mounting 방법으로 제작하였으며, 가열온도 및 냉각시간, 시편성형기의 적정압을 설정하여 성형하였다.

4-2-3. 연삭(Grinding)

자동시편 연마기를 이용하여 #1000 사포로 연마하였고 연마기 하부 회전속도는 300 rpm 상부 회전속도는 150 rpm 정방향으로 연마 시 발생할 수 있는 마찰열에 대비하여 지속적으로 냉각수를 주입하면서 연마하였다.

4-2-4. 정밀연마(Polishing)

자동시편 연마기에 1 μm 연마지(Polishing cloth)를 넣고 지속적으로 연마제(3 μm 다이아몬드)를 분사하여 연마하였고, 마찰에 따른 금속조직의 변형을 방지하기 위하여 윤활유를 7초마다 1.2 mm를 주입하였다.

4-2-5. 부식(Etching)

시편의 금속조직을 보다 뚜렷하게 관찰하기 위하여 [ASTM Standard, Part I-B, 1946]의 조건에 따라 증류수(100 ml), 염산(30 ml), 염화제이철(10 g)을 혼합하여 에칭 용액을 만들고 에칭 용액에 5초간 1~2회 함침 후 증류수로 세척하여 시료를 완성하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5-1. 연선·단선 1차 단락흔 분석

전원이 인가된 상태에서 전선의 피복손상으로 양극 소선의 단락 등 스스로 발열하여 화재가 발생할 때 생기는 용융흔을 1차 단락흔이라 한다.

Photo 23에 1차 단락흔을 실체현미경으로 외형 분석한 결과를 나타낸 것으로서 단락과 동시에 국부적으로 짧은시간 내 2,000~3,000 ℃의 온도가 발생하면서 금속이 녹기 때문에 녹은 부위의 조직은 치밀하며, 작고 둥근 망울형태의 용융흔을 확인할 수 있으며, 용융망울의 끝부분이 둥글고 매끄러우며 광택이 나타나고, 기공(Void)으로 인하여 표면이 거친 현상도 관찰되었다. 전선의 굽기가 굽으면 단락부 옆에 용융 비산된 작은 망울이 붙어 있는 경우가 많다. 단락 시 발생하는 아크로 인하여 용융흔이 비산되었으며 대체적으로 전원측에서 부하측으로 용융흔이 비산되고, 단락되는 각도에 따라 해당 부위가 바늘처럼 가늘고 뾰족한 모양을 하고 있는 경우도 관찰되었다. 연선의 경우에는 단락부위가 덩어리로 뭉쳐있으며, 망울이 반구형으로 둥글고 광택이 나타남이 관찰되었다.

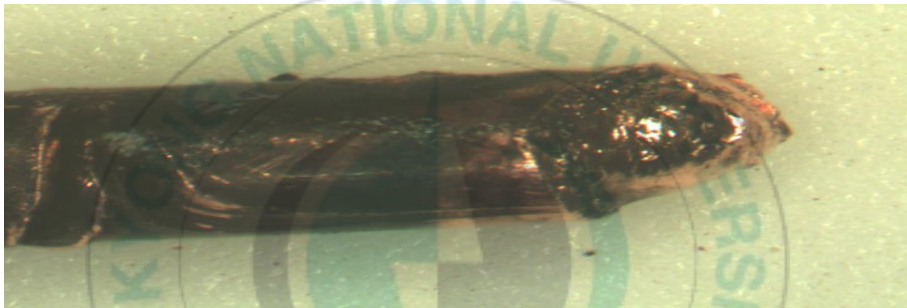


Photo 23. Appearance of primary short circuit traces of stranded and disconnected wires($\times 20$).

Photo 24에 나타낸 1차 단락흔을 금속현미경으로 금속조직을 분석한 결과, 용융부 금속조직에서 작고 원형인 기공이 전체적으로 넓게 분포되어 있으며, 용융부와 모재부의 뚜렷한 경계가 관찰되었다. 용융부 바깥쪽으로 길게 뻗는 주상조직과 주상경계면이 관찰되었고, 용융부에 점상조직이 관찰되나, 전체적인 명암은 밝은 편이다. 모재부에서는 원조직과 원조직이 비대화된 조직이 관찰되었다.



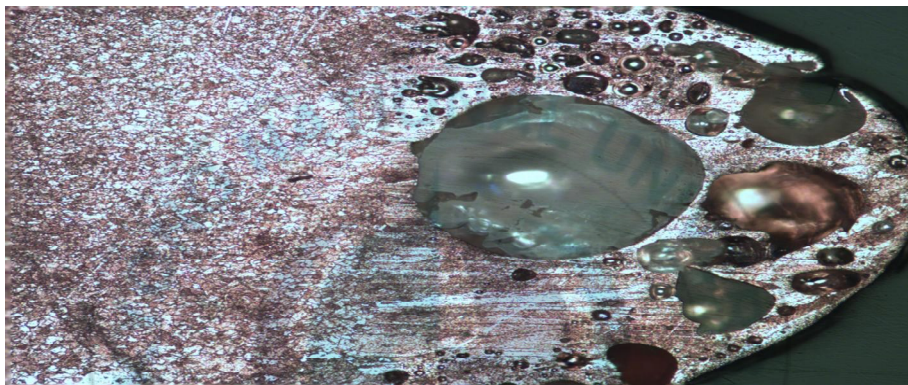


Photo 24. Metal structure of bead by short-circuit on the solid wire($\times 100$).

5-2. 연선·단선 2차 단락흔 분석

전원이 인가된 상태에서 화재열에 의해 절연피복이 소실되어 단락될 때 생기는 용융흔으로 금속이 화염에 의해 무르게 된 상태에서 단락하게 된다.

Photo 25에는 2차 단락흔을 실체현미경으로 외형 분석한 결과로서 전선의 끝에 생긴 용융 망울이 타원형으로 형성되고, 망울에 작은 구멍이 있으며 색상은 검은 회색을 띤 적갈색이 관찰되었다. 소선사이에 탄화 잔유물이 늘어 붙어있고, 용융망울의 광택은 있으나 1차 단락흔보다 비교적 적었다. 여러 가닥의 소선으로 된 연선의 경우에는 용융되어 엉겨 붙어 있는 경우가 많았으며, 끝부분에서 달걀모양의 용융흔이 형성되고 약간의 광택이 관찰되었다. 화재발생 후 몇일이 지나면 용융망울은 물론 용융되지 않은 부분의 금속도 산화되어 검푸른색으로 변화됨이 관찰되었다.

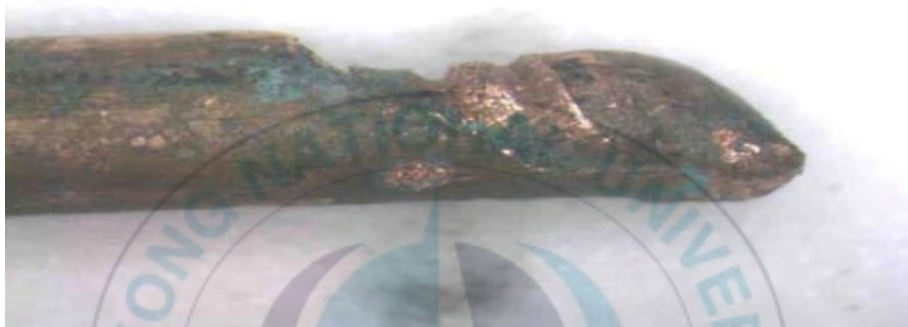
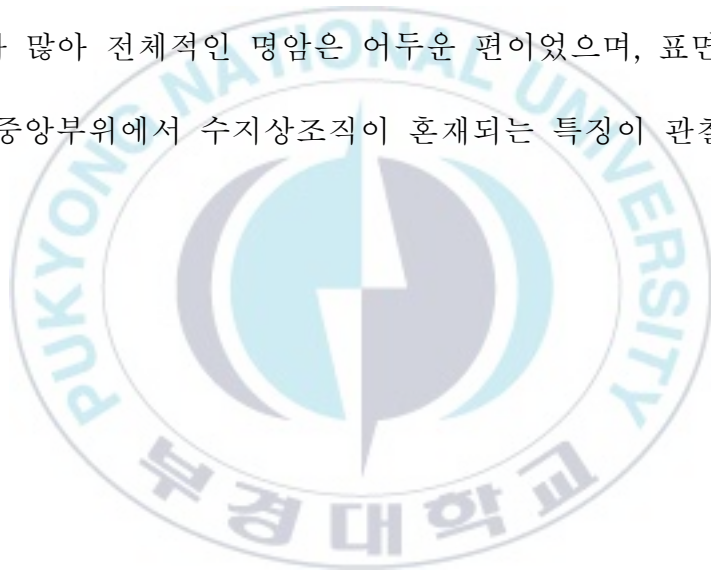


Photo 25. Appearance of secondary short circuit traces of stranded and disconnected wires($\times 20$).

Photo 26에는 2차 단락흔을 금속현미경으로 금속조직을 분석한 결과로서 단락 용융흔의 금속조직에서 1차 단락흔 보다 미세한 기공이 다수 관찰되고⁷⁾ 기공의 모양도 비교적 원형인 1차 단락에 비해 타원형이나 비정형의 기공이 관찰되었다. 주변온도가 1차 단락보다 높아 냉각이 완만하여 용융부의 중심에는 큰 기공이 생기기 쉬움을 확인하였다. 1차 단락흔과 같이 주상조직과 주상경계면이 관찰되었으며, 점상조직이 1차 단락흔 보다 많아 전체적인 명암은 어두운 편이었으며, 표면부위에서 주상조직이, 중앙부위에서 수지상조직이 혼재되는 특징이 관찰되었다.



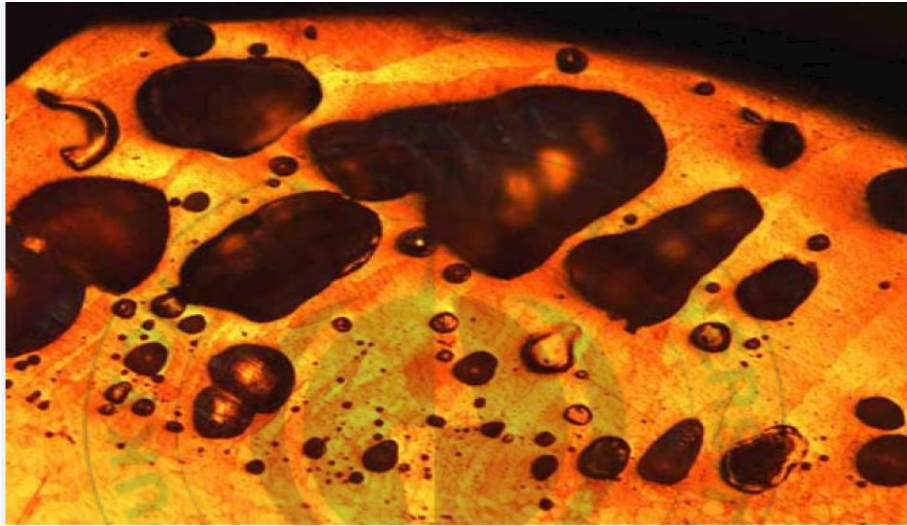


Photo 26. Metal structure of bead by short-circuit on the solid wire($\times 100$).

5-3. 연선·단선 수열된 용융흔(3 차 열용흔) 분석

전원이 차단된 상태에서 화재로 인해 금속이 녹아서 생기는 용융흔을 3차 열용흔이라 한다.

Photo 27에는 3차 열용흔을 실체현미경으로 외형 분석한 결과를 나타낸 것으로서, 전체적으로 용해된 범위가 넓고 거칠며, 표면에는 광택이 발생되지 않는 것이 관찰되었다⁸⁾. 화염에 의해 가장 오랜시간 녹기 때문에 전선망울의 크기는 단락흔(1·2차)의 경우 보다 크고, 전선의 중간에서 녹아서 흘러내리는 형태의 결정체가 덮여 있으며, 전선 끝부분에는 물방울이 떨어지기 직전의 모양이 관찰되었다. 용융부와 모재부의 경계부분은 열에 의해 녹아서 가늘어진 모양이 관찰되었다.

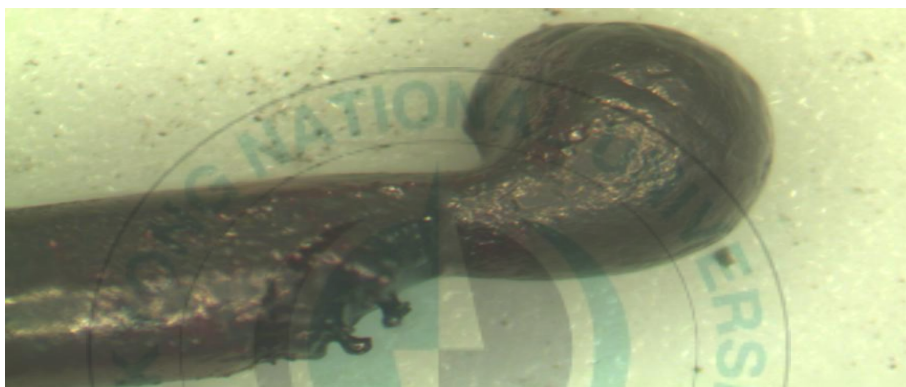


Photo 27. Appearance of fusion traces(tertiary thermal fusion traces) of stranded and disconnected wires.

Photo 28에는 3차 열용혼을 금속현미경으로 금속조직을 촬영한 것으로서, 단락혼에서 관찰되는 주상조직은 관찰되지 않는 반면, 나뭇가지모양의 수지상조직(Dendrite structure)이 관찰되었다. 또한 고온에 노출될 경우 수지상조직이 확장된 창자나 뇌모양의 변형된 수지상조직도 확인되었다. 기공은 없거나 단락혼(1·2차)에 비하여 현저히 적은 기공이 관찰되었으며, 점상조직의 수가 많아 전체적인 명암은 매우 어두운 편으로 관찰되었다. 용융부에 수지상조직 및 원조직이 비대화된 조직이 관찰되었으며, 모재부에는 원조직과 비대화된 조직이 혼재되어 있는 것이 관찰되었다.

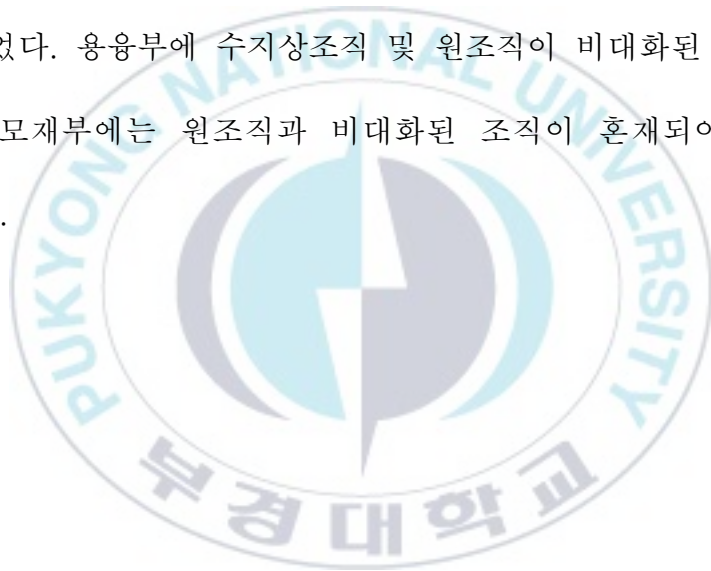




Photo 28. Metal structure of the solid wire melted by heat($\times 50$).

6. 결 론

전기적 원인으로 화재가 발생되었을 경우 단락흔과 열용융흔이 생성되는 특성을 관찰하기 위하여 화재가 발생된 현장을 조사한 결과와 실험을 통하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 전기 단락흔(1차 단락흔 및 2차 단락흔)과 열용융흔(3차 열용융흔)은 외형 특성 및 금속현미경을 통하여 구분이 가능한 반면 통전 중 단락으로 인한 1차 단락흔과 화염으로 인해 단락이 발생한 2차 단락흔은 외형 특성 및 금속현미경을 통해서도 명확한 구분이 쉽지 않음을 확인하였다.
- 2) 1차 단락흔의 외형상 특성으로는 용융망울의 끝부분이 대부분 둥글고 매끄러우며 광택이 나고, 외부 공기가 혼입되면서 생기는 기공(Void)으로 인하여 표면의 거친 현상을 관찰할 수 있었다.
- 3) 아크열에 의한 용융부와 모재부의 경계를 명확하게 확인할 수 있었으며, 금속현미경으로 관찰된 1차 단락흔의 특성으로는 비교적 작고

원형인 기공이 전체적으로 넓게 분포되고 있음이 관찰되었다.

4) 용융부 바깥쪽 방향으로 길게 뻗는 주상조직과 주상경계면이 확인되었다.

5) 2차 단락흔의 외형상 특성으로는 용융부분은 완만하고 부드러운 표면으로 1차 단락흔과 비슷하였으나 광택은 비교적 적었다.

6) 용융망울은 타원형으로 형성되어 있으며, 소선사이에 탄화된 불순물이 관찰되었다.

7) 금속현미경으로 관찰된 2차 단락흔 특성으로 기공은 1차 단락흔에 비해 많은 수가 관찰되고, 기공의 모양은 타원형이거나 비정형의 기공이 많이 관찰되었으나, 1차 단락흔과 구분이 쉽지 않은 시료가 다수 있었으며, 주상조직과 주상경계면을 확인할 수 있었다.

8) 3차 열용융흔의 외형상 특성으로는 전체적으로 용해된 범위가 넓고 거칠며, 표면에는 광택이 없고, 전선 끝부분에는 물방울이 떨어지기

직전의 용융망울의 모양이 관찰되었으며, 기공은 관찰되지 않았다.

9) 용융부와 모재부의 경계부분은 열에 의해 녹아서 가늘어진 모양이 관찰되었으며, 금속현미경으로 관찰된 3차 열용융혼의 특성으로는 기공은 없거나 단락혼에 비해 현저하게 적었으며, 주상조직과 주상 경계면은 관찰되지 않았으나 나뭇가지모양의 수지상조직은 관찰되었다.

10) 전기화재의 원인조사에서 1차 단락혼과 2차 단락혼의 구분방법은 중요하지만, 아직까지 명확한 구분이 정립되어 있지 않다. 하지만 그 차이는 분명히 있을 것이며, 소방기관을 포함한 전기화재를 다루는 기관에서 인력과 장비를 투입하여 보다 심도있는 연구와 실험을 통해 꾸준히 비교 분석을 한다면 1차 단락혼과 2차 단락혼의 차이점을 발견할 수 있을 것이라 생각한다.

참고 문헌

1. J. G. Kim, G. Y. Kim and H. W. Park, “Metallography by Metallurgical Microscope”, Node Media, Korea, pp. 147-185, 2012.
2. S. W. Nam, “An Experimental Study on the Discrimination Criteria of the Fire Cause by Analysis Marks on Electric Wire”, Ph. M.A. Dissertation, University of Kyonggi, 2014.
3. NITE, “Identifying the Causes of Home Appliance Ignition Accidents Manual 2010”, NITE (National Institute of Technology and Evaluation), pp. 5-6, 2010.
4. M. C. Flemings, “Solidification Processing”, Mcgraw-Hill, pp. 146-154, 1974.
5. S. H. Lee and H. S. Oh, “A Study on the Thermal Analysis for Electrical Wire in Overload and Short of Low Voltage Wiring”, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 16, No. 3, pp. 56-60, 2002.
6. J. K. Lee, H. M. Lee, H. J. Kim and J. G. Yun. “A Study on the melting Characteristics of CCA(Copper Clad Aluminum) Wire”, The Journal of Fire Investigation Society of Korea, Vol. 9, No. 2,

pp. 1-13, 2010.

7. C. S. Choi, H. K. Kim and K. M. Shong, “A Study on the Short-Circuit Characteristics of Vinyl Cords Damaged by External Flame”, T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 18, No. 4, pp. 72-77, 2004.
8. C. S. Choi, “Study of the Method to Examine the Cause of Damage to a Flat-Type Vinyl Cord(VFF) According to the Type of Energy Source”, J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 25, No. 6, pp. 83-88, 2011.



Electrical Short Circuit Traces and Thermal Melting Traces of Copper Wiresresearch on Characteristics

Mun-Gon Kim

*Dept. of Fire Protection Engineering,
The Graduate School of Industry, Pukyong National University*

Abstract

In order to observe the characteristics of short-circuit traces and heat melting traces when a fire occurs due to electrical causes, the following conclusions were drawn as a result of comparison and analysis through experiments.

- 1) It was confirmed that the electrical short-circuit traces (primary short-circuit traces and secondary short-circuit traces) and the thermal melt (third short-circuit traces) can be distinguished through external characteristics and a metal microscope, whereas the primary short-circuit traces due to short-circuit and flame

during current flow are not easy to distinguish.

- 2) As for the external characteristics of the primary short-circuit mark, it may be observed that the end part of the molten net is mostly round, smooth, and glossy, and the surface is rough due to the voids generated when external air is mixed.
- 3) The boundary between the melted part and the base material part by arc heat could be clearly confirmed, and as for the characteristics of the primary short-circuit mark observed with a metal microscope, it was observed that relatively small and are widely distributed throughout.
- 4) Columnar tissue and columnar interface extending long in the outer direction of the molten portion were identified.
- 5) As for the appearance characteristics of the secondary short-circuit mark, the melting part was gentle and soft, similar to the primary short-circuit mark, but the gloss was relatively small.
- 6) The molten bulb was formed in an elliptical shape, and carbon-

ized impurities were observed between the wires.

- 7) As the characteristics of the secondary short-circuit traces observed with a metallographic microscope, a larger number of voids were observed compared to the primary short-circuit traces, and the shape of the voids was oval or atypical. and columnar tissue and columnar boundary were confirmed.
- 8) As for the external characteristics of the tertiary heat fusion trace, the overall melting range is wide and rough, the surface is not glossy, the shape of the molten bulb just before the water droplet is observed at the end of the electric wire, and no voids are observed.
- 9) The boundary between the melted part and the base material was melted and tapered by heat, characteristics of the tertiary heat melt observed with a metal microscope were significantly smaller than those of no voids or short-circuit traces, and columnar tissue and columnar boundary were not observed, but branch-shaped dendritic structure was observed.

10) In investigating the cause of electric fire, a method of distinguishing between the primary short-circuit mark and the secondary short-circuit mark is important, but a clear distinction is not yet established. However, there must be a difference, and I think the difference between the first and second paragraph traces can be found if manpower and equipment are put in from institutions dealing with electric fires, including firefighting agencies, and continuous comparative analysis through in-depth research and experiments.

