

동파방지열선 화재 흔적분석과 발화원인 연구

이정일 · 하각천*

소방청 · *유원대학교

(2018. 3. 13. 접수 / 2018. 4. 20. 수정 / 2018. 5. 21. 채택)

A Study for the Fire Analysis and Igniting Cause of Freezing Protection Heating Cables

Jung Il Lee · Kag Cheon Ha**

National Fire Agency · *U1 University

(Received March 13, 2018 / Revised April 20, 2018 / Accepted May 21, 2018)

Abstract : There have been a number of major fatal fire accidents in Korea recently. The number of fires in 2017 were 44,178, which is not only increasing number of fires but also increasing in casualties. Particularly, the fire at Jecheon Sports Center, which suffered many casualties, is expected to have a huge impact. The cause of the fire has not been determined yet, but heat waves on the ceiling have also been pointed out. As such, the copper heating waves, which are used as a preventive measure against damage of pipes due to freezing of pipes, etc., always have a fire hazard. To determine the possibility of a flame-resistant heated fire, a positive electric cable product was used to artificially ignite and analyze the results. In case of a short circuit, the external covering of the positive electric cable is damaged, but not short circuit unless the heating material surrounding the wire is damaged. Due to the characteristics of heating cable for preventing copper waves, the chances of insulation becoming more severe due to moisture and temperature changes are higher than normal wires. If the internal heating system is carbonized by insulating deterioration without damage to the outer coating, it is likely to cause trekking, to form a winding loop in the heating materials, and to cause short circuit in the heated materials. For the positive temperature line, if the middle is shorted, the current continues to flow to the short circuit unless the breaker disconnects. Consequently, a heated fire that does not cut off the power immediately may leave multiple marks or cuts.

Key Words : heating cable, anti-freezing heating coil, short circuit, heating coil fire

1. 서론

최근 국내에서 대형 인명피해 화재사고가 많이 발생하고 있다. 2017년도 화재건수는 44,178건으로 전년대비 1.8% 증가하였고, 최근 5년 평균 43,019건 대비 2.6% 증가하였다. 인명피해는 총 2,197명 중 사망자 345명, 부상자 1,852명이 발생하여 전년대비 사망자는 8.5%, 부상자는 18.1% 증가하였다¹⁾. 전년대비 인명피해의 증가는 많은 인명피해가 있었던 2017년 12월 21일 충북 제천의 스포츠센터 화재의 영향도 큰 것으로 보인다. 화재원인이 아직 정확히 규명되지는 않았지만 천장의 열선 공사가 지목되기도 했다.

이와같이 수도관 등의 결빙으로 인한 생활의 불편과 배관의 파손 방지 대책으로 동파방지열선을 사용하고 있으나 동파방지열선에 의한 화재 위험도 있다.

동파방지열선에 대한 화재발생 가능성은 이미 여러 화재사례나 연구사례에서 충분히 입증되어 있는 사실이나, 발화원인에 있어서는 발화가능성에 근거하여 주로 열축적 혹은 단락에 의한 화재로 추론하고 있다.

이에 본 연구에서는 일반 가정에서 가장 흔히 사용하고 있는 동파방지열선 중 정온전선 제품으로 인위적 발화 조건을 부여 후 나타난 결과물을 토대로 화재 가능성 및 화재원인 판정을 위한 근거를 제시하여 과학적으로 추론 가능한 결과를 도출하고자 한다.

2. 본론

2.1 동파방지열선의 구조 및 화재 가능성

동파방지열선의 종류는 제조사마다 많은 종류의 열선이 있지만 구조적 특징에 따라 정온전선, 벨트히터

* Corresponding Author : Kag Cheon Ha, Tel : +82-043-740-1576, E-mail : hkc723@naver.com

Department of Police and Fire Safety, U1 University, 310 Daehak-ro, Yeongdong-eup, Yeongdong-gun, Chungcheongbuk-do 29131, Korea

및 정전력 히터로 나눌 수 있으며 가장 많이 사용된다. 이러한 제품들의 각각의 구조적 특성에 따라 동파방지 열선의 구조 및 원리를 살펴보면 다음과 같다²⁾.

정온전선은 발열체가 일반 열선(니크롬선 등)이 아니고 특수 반도체성 폴리머로 구성되어 있어서, 도체에 전압을 인가하면 무한병렬회로로 구성되어 있는 반도체성 폴리머가 주변온도 상승에 따라 발열체의 전기 저항이 자동적으로 상승하여 히터의 발열량이 자동 감소하는 자기 제어형 히터다.

정온전선은 별도의 온도조절기가 필요 없고 어느 일정 온도 이상을 넘어서지 않으며, 주위온도의 변화에 따라 발열량이 증감되기 때문에 에너지 절감 효과가 탁월하며 히터가 켜져서 설치되어도 국부 과열이나 소손 현상이 발생하지 않는 특성을 가지고 있다. 또한 설계가 용이하고 임의로 길이를 절단하여 사용하는 장점과 유연성이 뛰어나 설치가 편리하고 수명이 반영구적(저가 제품은 1~2년)이어서 수요가 증가하고 있다.

정온전선의 작동 원리는 주위온도가 낮은 상태에서 초기의 전류유입 단계에는 플라스틱 폴리머 분자가 수축되어 반도체성 층에 전류의 흐름이 많아져 발열량이 증가되고, 시간이 지나 주위온도가 상승되면 플라스틱 폴리머 분자가 팽창되어 전류의 흐름을 적게 하여 자동적으로 발열량을 조절하게 된다(Fig. 1).

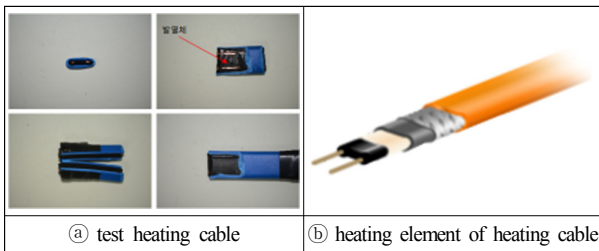


Fig. 1. Test heating cable and heating element of heating cable.

벨트히터는 유리섬유 코어위에 니크롬선 또는 철크롬선을 원주방향으로 감아 발열인 열선 두가닥을 실리콘 고무로 절연한 것으로 벨트모양과 비슷하여 벨트히터라 하며 업체에 따라 실리콘히터, 전열선, 수도동파방지열선 등 다양한 이름으로 불리우며 두가닥 끝이 서로 연결된 직렬히터 방식이다(Fig. 2).

벨트히터는 제품에 따라 온도센서형과 일반형이 있으며 완제품 형식으로 임의로 잘라 사용하는 것을 금지하고 있다. 벨트히터에 사용되는 발열선이 매우 얇아 이를 전원선에 연결시 약하게 결합하면 접촉저항에 따른 이상발열이 나타날 수 있으며 너무 강하게 조이면 단선으로 작동이 되지 않을 수 있기 때문이다.

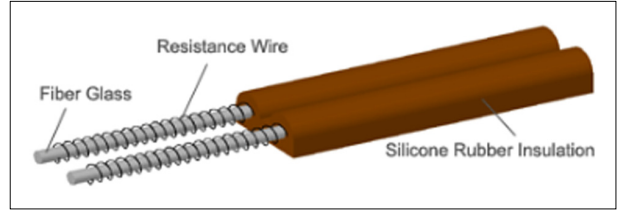


Fig. 2. Structure of belt heater.

정전력 히터는 구간별 병렬회로를 갖는 것으로 도체에 절연체로 감싸고 열선을 나선형으로 감아 일정구간마다 열선과 도체를 병렬로 연결하고 다시 2차 절연체로 절연된 구조로 되어있다. 주로 고온이 필요한 산업용 배관에 사용되며 50 cm 또는 100 cm마다 병렬회로로 되어 있어 일정구간에서 단선이 되더라도 단선된 구간 외에는 전류가 공급된다. 정전력 히터는 사용 온도범위에 따라 절연체의 사용이 달라지며, 실리콘고무에 비하여 불소수지가 내열성이 우수하여 높은 온도범위에서 사용된다(Fig. 3).

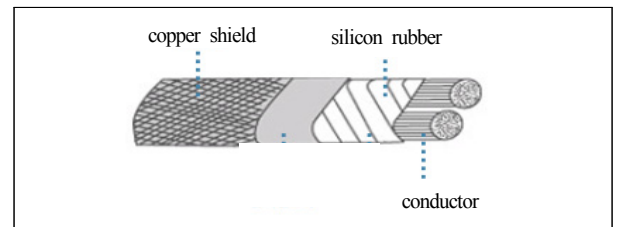


Fig. 3. Structure of heater.

동파방지열선은 배관에 일정간격의 나선형으로 감은 후 보온재로 감싸고 배관테이프로 감아 사용한다. 단, 정온전선의 끝단은 연결하면 합선이 되어 화재의 위험이 있으므로 끝을 절대로 연결시키지 않아야 하며 전기 테이프를 감아 물이 닿지 않도록 사용해야 한다.

동파방지열선은 절연피복의 손상으로 누설전류가 밖으로 흐르게 되면 누전에 의한 감전 및 발화가능성이 있으며 부직포 및 스티로폼 등으로 필요 이상 보온을 할 경우 축열로 절연체의 열화로 인한 화재가 발생할 수 있다. 동파방지열선에 설치된 온도조절기 또는 온도감지센서는 배관의 내부 온도가 아닌 설치 주변의 외부온도를 감지하므로 보온재로 감싸진 동파방지열선의 축열 방지와는 무관하다³⁾.

열선의 절단 부위에 수분이 침투하여 불꽃방전을 일으킬 수 있으며, 난연성능이 없는 절연피복이 용융되어 착화할 가능성이 크다. 그러므로 열선의 절단부위는 수분 침투 방지조치를 철저히 해야 하며 필요이상으로 동파방지열선을 겹쳐 감거나 보온을 하게 되면 열축적으로 인한 화재의 위험성은 커지게 되므로 주의해야 한다.

2.2 동파방지열선 화재사례

2.2.1 ○○아파트(화재사례 1)

- 일시 : 2014. 11. 17. 11:40경(자체진화)
- 장소 : 서울시 동작구 보라매로 ○○
- 구조 : 철근콘크리트조, 슬라브지붕, 18/2층, 연면적 54,202 m²
- 인명피해 : 없음
- 재산피해 : 108천원(동산 108천원)
 - 동파방지열선, 배관 보온재, 통신선 케이블

최초 목격자인 아파트 관리과장 ○○○은 수도배관 동파방지를 위해 아파트 전체 열선의 전원을 올렸고 잠시 뒤에 화재경보기가 작동되어 확인해 본 결과, 화재현장 천정 부분에서 화염과 연기를 발견하고 열선 전원을 차단하고 자체 진화한 화재로 배관의 동파방지 열선의 단락에 의한 원인으로 주변 가연물에 착화·발화된 화재로 추정된다(Fig. 4).

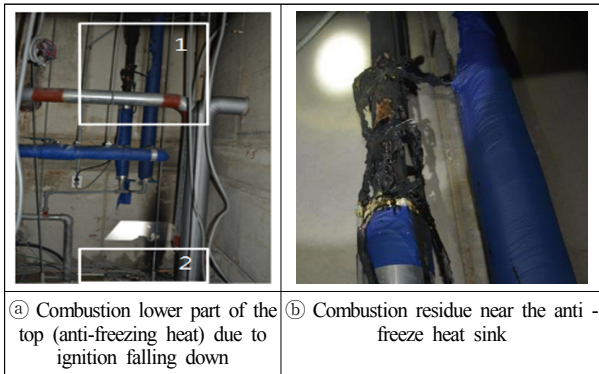


Fig. 4. Identification of hazards in pile head cutting.

2.2.2 간이창고(화재사례 2)

- 일시 : 2014. 2. 6. 05:05경
- 장소 : 서울시 동작구 사당로 ○○
- 구조 : 조립식판넬 구조, 조립식판넬 지붕, 1층, 연면적 10 m²
- 인명피해 : 없음
- 재산피해 : 300천원(부동산 190천원, 동산 110천원)
 - 부동산 : 2 m² 소실, 3 m² 그을림
 - 동 산 : 공구류 및 적재 비품 소실

최초 목격자는 지나가는 행인으로 주유소 옆 간이창고에서 불꽃을 보고 119로 신고한 화재로 간이창고를 통과하는 수도배관의 보온을 위해 설치해 놓은 열선에서 절연열화에 의한 단락으로 피복에 최초 착화·발화된 화재로 추정된다(Fig. 5).

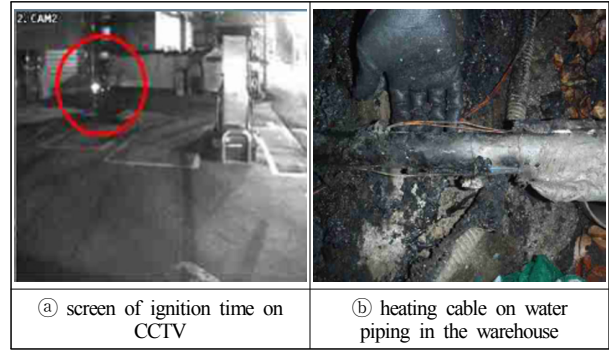


Fig. 5. Screen of ignition time on CCTV and heating cable on water pipe the warehouse.

2.3 열선의 화재재연 실험

2.3.1 실험개요

실험시료는 Fig. 6처럼 동파방지열선과 보온재 그리고 배관을 준비하였으며, 측정 및 실험장비로는 스톱워치, 디지털온도계, 열화상카메라 등을 준비하였고, 실험세트를 구성하였다.

- 동파방지열선 : 정온전선 10개(1 m)
- 보온재료 : 가연성 보온재 및 배관테이프
- 사용배관 : 금속관 5개
- 시간측정 : 스톱워치, 전자시계
- 온도측정 : 디지털온도계, 열화상카메라(플리어)
- 영상사진 : 디지털카메라, 비디오카메라(캐논)
- 전류측정 : 전류전압측정계(후크온메타)
- 실험환경 : 온도(27℃), 습도(55%)
- 전원인가 : 220 V 상용전원

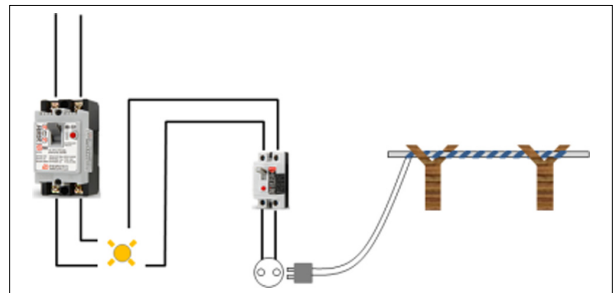


Fig. 6. Unit of test set.

실험은 D소방서 차고에서 진행하였고, 9명 인원이 참가하였다. 본 실험은 동파방지열선의 발화가능성과 동파방지열선과 관련하여 발화 후 나타난 흔적을 통해 정확한 화재원인을 밝히는데 주안점을 두어 정온전선을 실험대상으로 기존에 밝혀진 동파방지열선의 주된 발화원인을 중심으로 인위적 발화조건을 부여 후 강제 발화로 진행하였다.

2.3.2 열축적에 의한 발화가능성 실험

먼저 열축적에 의한 발화가능성을 알아보기 위해 배관에 Fig. 7.처럼 정온전선을 정상설치(일정 간격을 유지하여 감음) 후 온도변화를 측정하였다(Table 1).

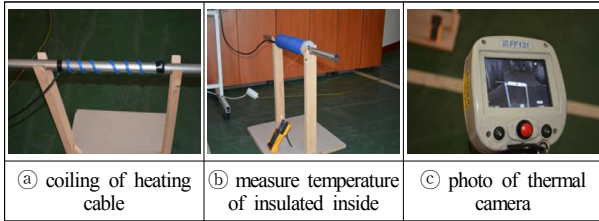


Fig. 7. Normal installation.

Table 1. Temperature at normal installation

Time	Temp(°C)	State
start	36.1	inside temp
10min	52.8	temp increase
20min	57.1	temp increase
30min	57.9	temp increase
40min	58.0	keep(no change)

그리고 Fig. 8.처럼 정온전선을 3번 겹쳐 감은 후 온도변화를 측정하여 열축적에 의한 발화가능성을 검증하였다(Table 2).

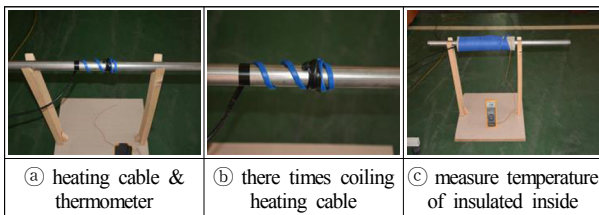


Fig. 8. Three times coiling heating cable and measure temperature.

Table 2. Temperature at three times coiling electric cable

Time	Temp(°C)	State
start	36.2	inside temp
20min	57.2	temp increase
30min	64.7	temp increase
40min	69.6	temp increase
50min	70.0	keep(no change)

실험결과 정온전선은 일정온도를 유지하는 특성상 정상적인 설치 또는 겹쳐 감아 사용하는 경우에도 온도 증가는 최종적으로 12°C 차이는 보이지만 70°C 정도를 지속적으로 유지하고 더 이상의 변화가 없어 발화가능성은 낮은 것으로 판단된다. 다만, 설치된 파이프의 가열과 단열재를 매립한 경우에 대한 화재 가능성 여부에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2.3.3 외부 화염에 의한 발화 실험

본 실험은 먼저 배관에 정온전선을 정상설치 후 외부 화염 접촉에 의한 흔적 분석을 위해 보온재 외부에서 화염을 접촉 강제발화 후 흔적을 분석하였다(Fig. 9).

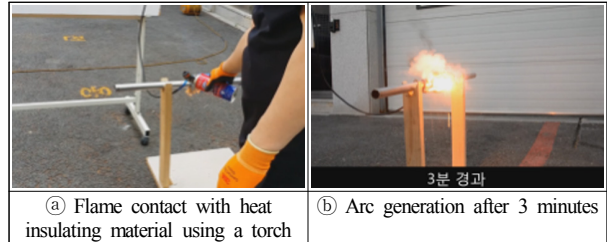


Fig. 9. Flame contact with heat insulating material using a torch.

실험결과 보온재에 불이 붙은 뒤 3분정도 경과 후에 스파크와 함께 화염이 분출하였고 정온전선의 피복은 탄화되고 전선에서 단락흔이 확인되었다(Fig. 10).

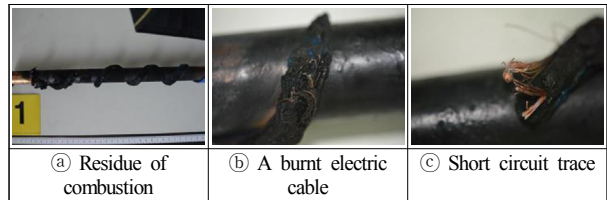


Fig. 10. A burnt electric cable, short circuit trace.

2.3.4 단락에 의한 발화실험

단락에 의한 발화실험은 절연열화를 가정한 발화실험으로서 두 가지로 구분하여 실시하였다. 한 가지는 피복을 벗기고 발열체를 탄화 후에 실시하는 방법과, 다른 한 가지는 피복을 벗기고 전선을 배관에 접하게 하여 전원을 인가하는 방법이다.

먼저, 피복을 벗기고 발열체를 탄화시킨 후에 실시하는 방법이다. 본 실험은 피복의 경년열화 혹은 취급상의 부주의로 인한 발열체 손상을 가정하여 열선 중간 부분에 피복을 벗기고 발열체를 탄화시킨 후 전원을 인가하여 발화과정과 흔적을 분석하였다. 실험은 발열체 내의 변화의 정밀 관찰을 위해 금속관에 감지 않고 진행했으며, 이동 보관시 손상을 방지하기 위해 금속관에 감아 보관하였다(Fig. 11).

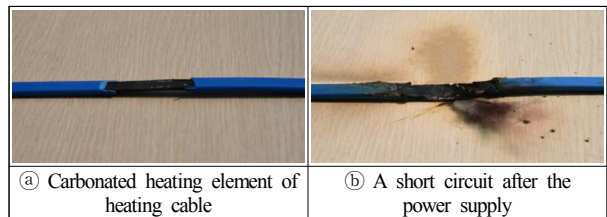


Fig. 11. A short circuit after the power supply.

실험결과 전원을 인가하자 9초 후 발열체에 실금이 가듯 도전로가 형성되고 연기와 함께 화염을 분출하면서 정온전선이 단락되었다. 정온전선이 발열체의 절연 열화로 절연이 파괴되면 화재가 진행될 위험이 높음을 확인하였다(Fig. 12).

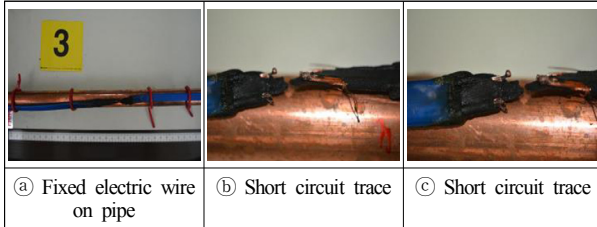


Fig. 12. Fixed heating cable on pipe, and short circuit trace.

발열체 저항측정 테스트기로 저항값을 측정한 결과 탄화되지 않은 발열체의 경우 30 kΩ을 나타내었고, 탄화된 발열체의 저항값 측정치는 15 kΩ을 나타내었다(Fig. 13).

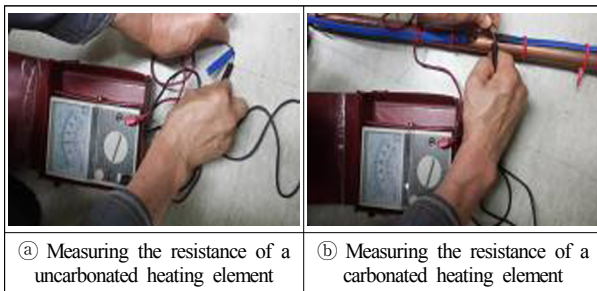


Fig. 13. Measuring the resistance of a uncarbonated and carbonated heating element.

절연열화를 가정한 발화실험의 다른 한 가지로서, 본 실험은 피복의 경년열화 혹은 취급상의 부주의로 인한 발열체 손상을 가정하여 열선 중간 부분에 피복을 벗기고 전선을 배관에 접하게 하여 전원을 인가 후 발화과정과 흔적을 분석하였다(Fig. 14).

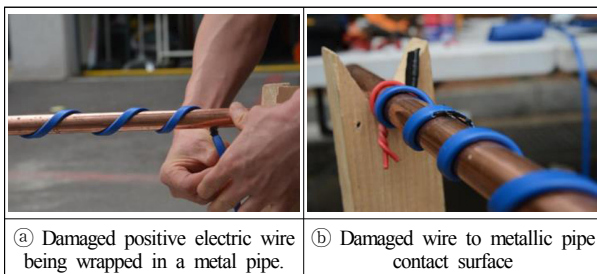


Fig. 14. Damaged wire to metallic pipe contact surface.

실험결과 전원 인가 후 바로 약간의 연기와 함께 펍

하는 소리와 함께 열선이 금속관의 접촉면에서 이탈하여 이후에는 변화가 없었다. 금속관에는 두 개의 아크흔, 열선에는 소선 일부에 단락흔이 나타났다. 금속관과 접하는 부분의 열선 손상은 누전 혹은 합선으로 인한 화재의 가능성이 높음을 확인하였다(Fig. 15).

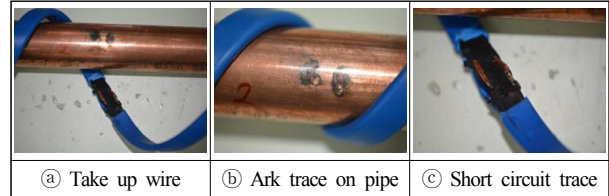


Fig. 15. Ark trace on pipe and short circuit trace.

2.3.5 철선 고정 열선 발화실험

본 실험은 절연열화된 열선에 철선으로 묶어 고정된 것을 가정하여 손상된 열선을 금속관에 감고 위로 구리선으로 고정시켜 전원을 인가 후 발화과정과 흔적을 분석하였다(Fig. 16).



Fig. 16. Fixed by copper wire to damaged positive temperature wire, burn the thermos with spark.

실험결과 전원인가 후 바로 스파크가 발생하였고 연기와 함께 보온재에 불이 붙었다. 설치된 누전차단기가 차단되지 않아 전원은 들어왔다 나갔다가 반복하면서 전원이 들어올 때 마다 스파크가 발생하였다.

금속물질로 손상된 정온전선을 고정하거나 금속물질로 정온전선을 고정하기 위해 정온전선 위로 감아 사용시 합선의 위험성이 있으며 만일 차단기가 작동하지 않은 상황이라면 다수의 아크흔과 단락흔이 발견될 수 있음을 확인하였다(Fig. 17).

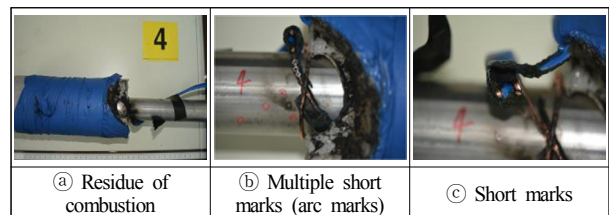


Fig. 17. Residue of combustion and short marks.

4. 결론

이번 동파방지열선 화재실험은 동파방지열선 중 정온전선을 중심으로 발화가능성과 화재흔적 분석을 중심으로 실험을 진행하였다.

발화가능성 실험의 결과는 일정온도를 유지하는 정온전선 열선의 특성상 열축적으로 인한 발화가능성은 다른 열선에 비해 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있었고, 외부 화염에 의한 발화, 단락에 의한 발화의 결과물은 육안 상으로 발화원인을 판정하기 어려움이 있을 정도로 유사함을 보였다.

세부적으로 단락의 경우 정온전선의 외부피복이 손상을 입더라도 전선을 둘러싼 발열체에 이상이 없으면 합선되지 않는다. 주로 수도배관에서 사용하는 동파방지열선의 특성상 습기와 온도변화가 심한 환경에 노출되어 절연열화될 가능성이 일반전선보다 높다. 만일 외부피복의 손상 없이 내부 발열체가 절연열화로 탄화된 경우라면 트레이킹현상을 일으켜 발열체에 도전로가 형성되어 단락될 가능성이 있으며, 열선을 고정시키기 위한 철선의 피복 손상으로 단락이 일어날 수 있다⁴⁾.

정온전선은 중간 부분이 단락되더라도 차단기가 차단되지 않으면 전류는 단락된 부분까지 계속 전류는 흐르게 된다. 따라서 전원이 바로 차단되지 않은 열선 화재의 경우 여러 개의 단락흔 내지는 아크흔이 남게 될 수 있다.

외부화염에 의한 것이든 동파방지열선 자체 문제로 인한 발화든 전원이 인가된 상황에서는 단락흔이 나타나게 된다. 단락흔이 형성되는 과정은 정온전선이 외부화염 또는 자체 문제(주로 절연열화)로 발열체가 탄화되어 도전로가 형성되어 양전선의 합선으로 단락되게 된다⁵⁾. 단락흔이 형성되는 원인은 다를지라도 형성되는 과정 및 단락흔의 형태가 유사하여 구별하기 어려워 동파방지열선과 관련한 화재원인을 단락흔만을 근거로 열선 자체 문제로만 판단할 것이 아니라 다음 사항에 대한 사전 조사 후 판단하여야 할 것이다.

첫째, 주변가연물 연소 상태와 외부 화염 접촉 가능성을 확인하는 것이다.

둘째, 전원 인가 상태와 발열체 저항 측정치 변화를 관찰하는 것이다. 주의할 사항은 발열체의 저항 측정은 정상 발열체와 탄화된 발열체를 비교하여 판단하여야 한다. 동파방지열선의 발열체는 전선 피복과 달리 발열체 자체의 저항값을 가지고 있기 때문이다.

셋째, 동파방지열선의 최초 설치일과 미연소된 열선 부분의 열화(劣化) 상태를 확인하는 것이다.

References

- 1) National Fire Emergency Management Agency, "National Fire Data", National Fire Information System, 2017.
- 2) J. H. Lee and J. R. Park, "A Study on the Potential of the Fire Resistance of the Hot Heat Storage System", Buan Fire Station in Jeonbuk Province, 2018.
- 3) H. I. Lee, "An Experimental Study on the Evaluation of the Risk and cause of Fire in the Heat Electric Cable", Daejeon Fire Station, 2017.
- 4) Korea Electrical Safety Corporation's Institute, "Electrical Safety Education", Korea Electrical Safety Corporation's Institute, 2017.
- 5) Kirk, "Kirk's Fire Investigation(6th edition) Chapter 10 Electric fire", 2017.