

# 정온전선의 발화위험성에 관한 실험연구

A Study on the Risk for Self-regulating heating cable

윤성렬 화재조사센터

## 1. 서론

정온전선은 반도체성 고분자를 이용한 연속적 병렬회로 구조를 갖는 발열체로서 주위 온도변화에 따라 내부 저항을 스스로 제어하여 발열량을 자동적으로 증감 시키도록 설계된 자기제어 저항 발열 케이블(Self-Regulating Heating Cable)이다.

정온전선은 주로 겨울철 수도관, 수도계량기, 용수저장탱크 등 각종 배관 및 탱크의 동파방지용으로 사용되고 있다. 정온전선은 시공이 간단하고 유지비가 저렴하여 사용량이 증가하고 있으나 그에 비례하여 일반 가정 및 농가 등에서 정온전선에 의한 화재발생건수도 증가하고 있다.

정온전선에 의한 화재사고는 설치 및 시공불량 또는 미흡한 관리가 원인이 되는 경우가 많다. 정온전선 절단면부분의 절연처리 불량, 분진 및 수분 침입에 의한 트래킹 등이 그 예이다.

이에 본 화재위험성조사에서는 정온전선의 온도특성을 분석하고, 정온전선에서 발화될 수 있는 상황을 재현하여 발화메커니즘을 규명하며, 이를 화재조사 전문성 향상과 안전점검 연계업무에 활용하고자 한다.

## 2. 정온전선의 구조

정온전선은 [그림1]에서 보는 것처럼 두 평형 도체(Copper Bus Wire) 사이에 반도체성 고분자(Conductive Polymer)를 연속 압출 방식으로 충전시킨 후, 양 도체 사이에 전기를 흐르게 함으로써 고분자에

의한 전열(Electric Heat)을 이용하도록 한 특수한 발열 케이블이다.

반도체성 고분자는 플라스틱 절연체에 도전성 물질(Conductive Carbon)을 첨가하고 방사선 등의 조사를 통해 분자구조의 가교공정(Cross Linking)을 거친 물질이다. 이는 [그림2]에서 보는 것처럼 두 가닥의 도체(Bus Wire) 사이에 무수한 병렬 전기회로의 구조를 형성하고 있어 외부의 온도가 낮을 시 탄소결합 상태가 조밀해지면서 전류가 증가하여 발열량이 높아지고, 반면에 외부의 온도가 높아지면 발열체 분자구조의 팽창으로 부분적으로 탄소 결합을 끊음으로써([그림3] 참조) 전류의 흐름이 적어져 발열량이 줄어드는 특성을 가지고 있다.

일반적으로 정온전선에 규격 표기된 max, exposure temp. 65℃는 최고도달 온도 Tmax(T-rating)를 말하는 것으로 이것은 제품의 발열온도를 나타내는 것이 아니라 65℃ 정도의 온도 상황에서 사용해서는 안 된다는 일종의 규격 상황선을 나타내는 것이다. 그리고 최고 유지온도 65℃는 유지온도(maintenance temp.)로 그 이상의 온도에서 장시간 사용할 경우 plastic 재질에 문제가 발생된다는 것을 의미한다.

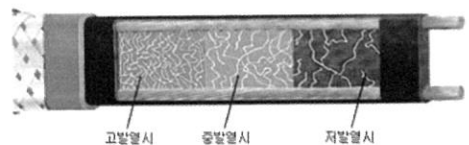


그림1. 정온전선의 온도변화에 따른 폴리머 정렬현상

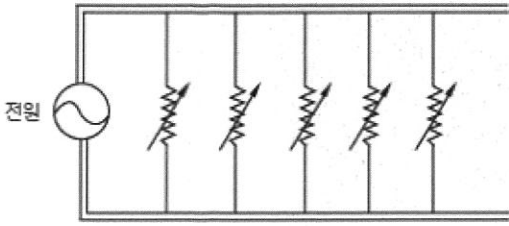


그림2. 정온전선의 회로도

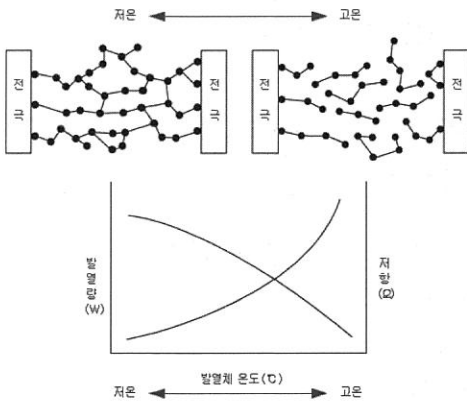


그림3. 정온전선의 온도변화에 따른 폴리머 정렬현상 및 온도-저항·발열량 그래프

### 3. 트래킹

트래킹은 전압이 인가된 이극도체(전선, 배선기구)간의 고체 절연물 표면에 수분을 많이 함유한 먼지, 오존 등 전해질의 미소물질이나 이를 함유하는 액체의 증기 또는 금속가루 등의 도체 성분이 부착되면, 오염된 개소의 절연체 표면에 누설전류가 흐르고, 줄(Joule)발열에 의해서 표면이 국부적으로 건조하여 전계부제(電界不齊)로 인한 절연물 표면에서 미소발광방전(scintillation)이 일어난다. 이것이 지속적으로 반복되면 절연물 표면의 일부가 분해되어 탄화되거나 침식(浸蝕)됨에 따라 도전성 물질이 생긴다. 일단 도전성 물질이 생겨나면 미세한 불꽃방전의 원인을 제공한 전해질이 소멸되어도 불꽃방전은 지속되며, 전극간에 도전성의 통로(track)가 형성되는데 이 현상을 트래킹

(tracking)이라고 한다.

트래킹 현상이 지속되면 지속적으로 발생한 불꽃에 의해 종이나 커튼과 같이 착화하기 용이한 가연물에 착화하거나, 단락 또는 지락으로 진행되어 발화에 이르게 되며, 이러한 화재를 트래킹 화재라 한다.

무기절연물의 경우에는 도전성 물질의 생성이 적기 때문에 트래킹 발생의 문제가 적지만, 유기절연물은 탄화하여 도전성 물질(黑鉛: Graphite)이 생기기 쉽기 때문에 트래킹의 발생이 문제가 된다.

트래킹 현상의 초기에는 전류가 작고 발열 범위도 적으므로 절연체가 독립 연소하는 경우는 없고 심부를 향하여 무염연소의 상태로 진행되나 일정한 단계에 이르게 되면 전류량이나 발열량이 커져서 발화 또는 독립연소로 이어질 수 있다.

### 4. 실험

정온전선은 시중에서 말단부분의 절연처리가 완료된 제품이 판매되기도 하지만 절연처리가 된 완제품은 1~2m의 짧은 길이인 경우가 대부분이고, 주로 30~100m 길이의 제품으로 판매되어 이를 사용자가 필요한 길이만큼 절단하여 사용하는 경우가 많다. 이때 절단면의 절연처리가 불량하면 단락이 발생하거나 절단면에 이물질 및 수분이 누적되어 트래킹(Tracking)이 발생할 수 있다.

표1. 실험조건

번호	실험조건	비고
1	정상작동	발열특성 확인
2	절단면부분 절연파괴	흑연가루, 수분

#### 가. 실험장치

- (1) 정온전선(max 85°C, 30W/m)
- (2) K-Type 열전대(KS C 1602, 직경 0.65mm)
- (3) PC Recorder(MSR128, MSYSTEM, Japan)
- (4) PVC파이프(직경 25mm)
- (5) 파이프보온재(발포 폴리스티렌, 직경 25mm)
- (6) 캠코더(SONY HDR-CX560) 및 카메라(NIKON D90)

**나. 실험방법**

정상작동 실험에서는 [그림4] 및 [그림5]에서 보는 것처럼 정온전선을 PVC파이프에 감아놓은 상태에서 전원을 인가시켜 일반적인 발열특성을 확인하였다.



그림4. 정온전선 설치상태



그림5. 파이프보온재 설치상태

열전대는 정온전선과 PVC파이프 사이, 정온전선과 파이프보온재 사이, 파이프보온재의 겉면에 설치하였다.

절단면부분 절연파괴 실험은 절연처리가 안된 절단면 부분에 흑연가루 약 30mg 및 수분을 이용하여 도전성 분진이 누적되어 착화되는 상황을 가정하였다. [그림6] 및 [그림7]에서 보는 바와 같이 파이프보온재의 착화 및 연소확대 특성을 확인하기 위하여 PVC파이프를 수평 및 수직으로 각각 설치하여 실험하였다.

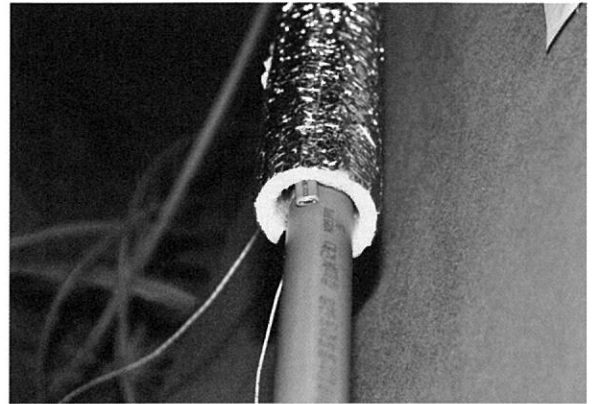


그림6. 정온전선 설치상태(수평)

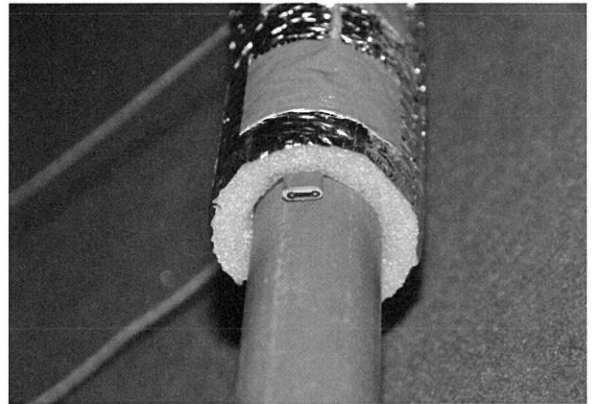


그림7. 정온전선 설치상태(수직)

**다. 실험결과**

정상작동 실험에서는 [그림8]에서 보는 바와 같이 정온전선에 전원을 인가하고 약 10분 동안 온도가 빠르게 상승하는 것으로 나타났으며, 정온전선과 파이프보온재 사이는 최고 70℃ 정도까지 상승하였다.

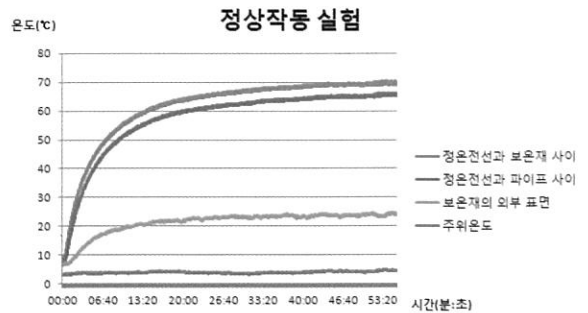


그림8. 정상작동 실험 시 각 부위별 시간-온도 그래프

절단면부분 절연과괴 실험에서는 이극도체 사이에 누설전류가 흐르고, [그림9]에서 보는 바와 같이 탄화도전로가 형성되었으며, [그림10]에서 보는 바와 같이 절연피복이 착화되고, PVC보온재로 연소가 확대되었다.

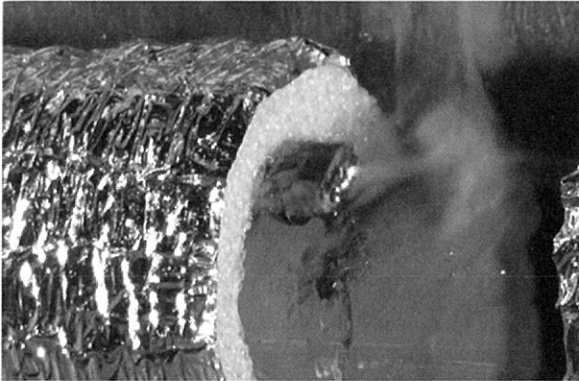


그림9. 절단면부분 탄화도전로 형성

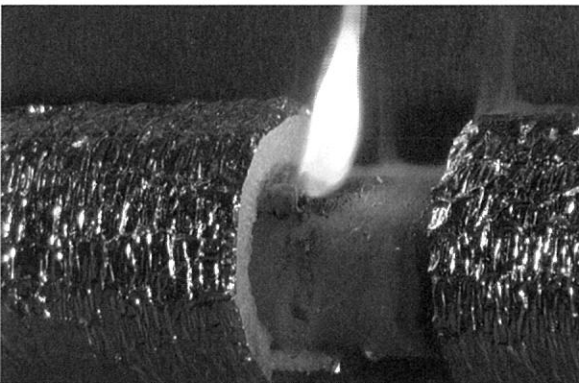


그림10. 절연피복 착화



그림11. 파이프보온재 연소확대

## 5. 결론

도전성 분진이 누적되는 가혹한 환경조건을 가정하여 정온전선의 화재위험성 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 정온전선 설치 상태에서의 여러 부위별 발열특성과 화재위험을 확인하였다.

- 가. 정온전선을 절단하여 사용할 경우 절단면부분에 분진 및 수분이 누적될 수 있으며, 이와 같이 오염물이 누적되는 경우 절연피복이 파괴되어 화재로 진행될 수 있다.
- 나. 정온전선을 절단하여 사용하거나 나사못 같은 도체로 고정하여 사용할 경우 누전으로 인해 화재가 발생할 수 있으므로 누전차단기를 설치하여 사용할 필요가 있다.
- 다. 정온전선은 사용 길이가 길수록 소비전력이 커지며, 동일 회로에 다른 제품과 병행하여 사용할 경우 과전류에 의한 화재위험이 있으므로 단일 부하 차단기를 전용으로 사용해야 한다.

## 참고문헌

1. 박영국, 이승훈, 이상준, 박종택, 송호림, “화재발생 이후 분전반 차단기에서의 트래킹현상 진행 가능성에 대한 사례연구”, 한국화재조사학회 논문지, 9권 1호, pp.47-53(2006).
2. 김진표, 김만건, “전기화재감식공학”, pp. 77-78, 성안당(2006).
3. 오재근, 이기태, 박찬성, 윤용문, “정온전선의 발화원 연구”, 국립과학수사연구소연보 제40권, pp.540-544(2008).