과열에 의한 정온전선의 발화 가능성에 관한 연구

유영천 · 지승욱^{*†}

강원대학교 소방방재공학전공 대학원생, *강원대학교 소방방재공학전공 조교수

Investigation on the Ignition of Self-Regulating Heating Cables due to Overheating

Young-Cheon Yu · Seung-Wook Jee^{*†}

Graduate Student, Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Korea,

*Assistant Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Korea

(Received October 19, 2021; Revised December 2, 2021; Accepted December 6, 2021)

요 약

동파방지를 목적으로 많이 설치되는 정온전선으로 인해 매년 수백 건의 화재가 발생되고 있다. 소방청에서 제공하는 화재통계연감에 따르면, 2020년도에 계절용 기기를 원인으로 하여 발생한 화재는 총 2,245건이 발생되었고, 이 중에서 열선으로 인한 화재는 240건이 발생되었다. 정온전선 화재는 주로 단락, 축열, 접촉 불량, 누전 등에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다. 본 연구는 정온전선이 과열로 인해 발화될 수 있음을 규명하고자 시도하였다. 이를 위해 먼저 IEC 60738 기준에 따라 시험시료를 제작한 후, 온도별 저항 특성과 표면 상태 분석이 수행되었다. 그 결과 특정온도에서 정온전선의 자기온도조절기능이 소실되었다. 또한, 이 온도로 화재재현실험을 수행하여 정온전선이 발화되는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

Owing to the self-regulating heating cables installed to prevent freeze-up, hundreds of fires are reported annually. According to the Fire Statistical Yearbook of 2020, provided by the National Fire Agency of Korea, a total of 2,245 fires occurred due to seasonal equipment, of which 240 were caused by heating wires. It is reported that the fires due to the self-regulating heating cables are mainly caused by short circuit, heat storage, poor contact, and electric leakage. Herein, the possibility of ignition in self-regulating heating cables owing to overheating is investigated. Test samples were prepared according to the IEC 60738 standard, and the resistance characteristics and surface conditions were analyzed at varying temperatures. It was found that the self-temperature control function of these cables was lost at a specific temperature. In addition, the ignition of self-regulating heating cables was confirmed through a fire reproduction test at the experimental temperature.

Keywords : PTC, Self-regulating heating cable, Overheating, Heating cable

1. 서 론

매년 수많은 장소에 설치되고 있는 정온전선으로 수백 건의 화재가 발생하고 있다⁽¹⁾. 동파 방지를 목적으로 사용되는 열선으로는 정온전선(self-regulating heating cable), 벨트히터(belt heater), 정전력히터(constant wattage heating cable) 등이 있다. 3가지 동파방지열선 중 정온전선은 다양한 수도배관과 물탱크의 동파방지를 위해 많이 사용되고 있다.

가격이 저렴하고 사용자가 원하는 길이로 절단할 수 있어 시공이 편리하고 유지비가 저렴하기 때문이다⁽²⁾.

소방청에서 제공하는 화재통계연감에 따르면, 2020년도에 계절용 기기를 원인으로 하여 발생한 화재는 총 2,245건 이고, 이중 열선을 원인으로 하여 발생한 화재는 240건이다. 정온전선 화재는 주로 단락, 축열, 접촉 불량, 누전 등에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다^(1,3). PTC 히터(positive temperature coefficient heater)를 발열 소자로 하는 정온전선

[†] Corresponding Author, TEL: +82-33-540-3123, FAX: +82-33-540-3129, E-Mail: SWJee@kangwon.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Figure 1. Structural of the self-regulating heating cable.

은 KS 표준규격 및 전기용품안전 관리법의 인증 항목에도 포함되어 있지 않다⁽⁴⁾.

이에 본 논문에서는 주변 구조물의 영향 및 시공 오류로 인해 발생할 수 있는 과열에 의한 화재를 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 정온전선의 특성을 파악하고 정온전선의 발화 가능성을 재현실험을 통해 수행하였다.

2. 정온전선의 구조 및 PTC 히터 특성

2.1 정온전선의 구조

정온전선의 구조는 Figure 1과 같다. 동선(copper bus wire), 발열 소자(self-regulating heating element), 내부 피복(inner jacket), 외부 피복(outer jacket) 등 3부분으로 이루어져 있다.

발열 소자는 주로 PTC 히터를 사용하며, 서로 평행을 이루고 있는 동선 사이에 배치되어 있으며, PTC 히터에 전기가 흐르면서 발열한다.

내부 피복의 주요 성분은 열가소성 엘라스토머(thermoplastic elastomer)이다. 열가소성 엘라스토머는 고무의 탄성과 플라스틱의 가소성을 겸비하고 있다. 제품에 따라 내부 피복이 생략된 제품도 있다.

외부 피복의 주요 성분은 불소수지(fluoropolymer)를 사용한다. 불소수지는 내열성, 내약품성, 내후성, 전기절연성이 뛰어난 장점을 가지고 있다.

2.2 PTC 히터의 특성

정온전선의 발열 소자로 사용되는 PTC 히터는 카본이 함유된 전도성 페이스트 조성물로 결정성 고분자이다⁽⁵⁾. PTC 히터의 고온과 저온에서의 분자구조는 Figure 2와 같다. 결정성 고분자는 온도가 상승하면 결정구조에 변형이 발생하여 부피가 팽창하고, 이로 인해 전도성 입자 간 거리가 멀어지게 되어 저항값이 상승한다^(6,7). 온도가 낮아지는 경우에는 결정성 고분자는 재결정을 형성하며, 전도성 입자 간 거리가 가까워지며 저항값이 낮아진다. 이러한 특성으로 인해 정온전선의 정상 동작 온도는 최소 60 °C 이상으로 상온보다 높기 때문에 입자 간 거리가 가까운 상온에서 정온전선을 동작시키는 경우, 전원 투입 초기에는 정적 전류보다 매우 큰 전류(이하, 돌입전류)가 나타난다.

Figure 2. Polymer arrangement change of PTC heater by temperature.

Figure 3. Property of self-regulating heating cables by temperature.

3. 정온전선의 특성분석 및 발화실험

3.1 시료

본 실험에서는 국내 S 회사에서 판매하는 15 W/m, 연속 사용온도 65 °C 순간 최고 허용 온도 80 °C인 정온전선을 사용하였으며, 이는 일반 가정 및 공장에서 보편적으로 사용하고 있는 정온전선이다.

실험에 앞서 오차를 줄이기 위해 정온전선의 발열 소자로 사용되는 PTC 히터의 입자 거리를 균질화하여 시료별 저항값 편차를 줄였다. 이를 위해 직접 가열 PTC 시험 및 측정 절차를 제시하는 국제전기기술위원회(international electrotechnical commission) IEC 60738의 절차에 따라 항온챔버(hanbeak, HB-501M)로 55 ± 2 °C에서 24 ± 4 h 동안 전처리를 하였다⁽⁸⁾.

3.2 PTC 히터 특성분석

IEC 60738의 절차에 따라 전처리가 완료된 정온전선 시료 1 m를 Figure 3과 같이 항온챔버에 넣고 온도를 상승시켜 가며 저항을 측정하였다. 실험은 상온 25 °C에서 멀티테스터(fluke, 8846A)로 정온전선 시료의 저항을 측정하였고, 상온 약 25 °C부터 10 °C씩 온도를 상승시켜 가면서 저항값을 측정하였다.

3.3 정온전선 표면분석

온도에 따른 정온전선 표면 상태를 확인하기 위해 전처리가 완료된 정온전선을 5 cm 길이로 잘라 시편을 제작한다. Figure 4와 같이 시편들은 각 구조가 노출될 수 있도록 제작하였으며, Figure 4(a)는 PTC 히터 시료, Figure 4(b)는

Figure 4. Types of specimens to analyze the surface condition of each part of the self-regulating heating cable according to the temperature.

Figure 5. Experimental diagram for ignitability test of the self-regulating heating cable by overheating.

내부 피복 시료 Figure 4(c)는 외부 피복 시료이다. 실험에 사용하는 정온전선 시료의 순간 최고 허용 온도가 80 °C 임을 고려해 90 °C부터 20 °C씩 높인 온도로 24 h 항온챔버에 보관한 정온전선 시편의 표면을 현미경(omax, OMB-RH1500E)으로 100배 확대하여 촬영하였다.

3.4 정온전선 과열

과열로 인한 정온전선의 발화 실험을 위해 Figure 5와 같이 회로를 구성하였다. 최대 450 °C까지 온도 상승이 가능한 소형 가열로(mtops, MS-A202)를 열원으로 사용하였다. 가열로(heating furnace)의 발열부 지름은 8.5 cm이다. 온도조절 모듈(samwon, SU-105)에 연결된 K-TYPE 열전쌍을 통해 소형 가열로의 온도를 측정하고, 무접점 릴레이로 소형 가열로의 전원을 ON/OFF 제어하여 온도를 조절하였다. 가열 온도는 3.2절 및 3.3절의 결과로부터 정온전선이 self-regulating 특성을 잃는 온도로 설정하여 실험을 진행하였다.

4. 실험결과

4.1 PTC 히터의 온도별 저항값

전처리를 완료한 1 m 정온전선 시료 10개의 저항값을 측정한 결과, 상온 25 °C에서 평균 저항값은 약 59 kΩ, 표준편차는 약 4.7 kΩ으로 나타났다. Figure 6은 시료들을 항온챔버에서 상온 23 °C부터 10 °C 간격으로 온도를 높여가며 저항값을 측정한 그래프이다. 100 °C까지 10 MΩ 이하의 저항값이 측정되었으나, 110 °C에서 멀티 테스트의 측정 범위를 초과하였다. 온도를 계속 상승시켜 160 °C에 이르러 10개 중 1개의 시료에서 저항값이 25 kΩ으로 낮아졌고, 나머지 9개 시료의 경우 170 °C에 이르자 22 kΩ까지 낮

Figure 6. Resistance value by temperature of the self-regulating heating cable.

아졌다. 23 °C부터 계측기가 측정 가능한 범위 내의 저항값을 로그로 나타낸 결과 Figure 6과 같이 1차 함수 형태로 나타낼 수 있었다.

온도와 저항값의 상관관계를 산출한 결과 식 (1)을 구하였다.

$$\log R_T = 0.0274 T + 1.7298 \quad (1)$$

여기서 T 는 항온챔버의 온도, R_T 는 정온전선의 저항값이다.

4.2 정온전선의 온도별 표면상태변화

Figure 7은 PTC 히터 시료의 온도별 표면 상태를 현미경으로 100배 확대하여 촬영한 사진이다. 추가로 Figure 6에서 급격한 저항값 변화를 나타낸 160 °C의 표면도 촬영하였다.

Figures 7(a)~7(d)와 같이 90 °C부터 150 °C까지는 온도 변화에 대한 외관상 뚜렷한 차이는 보이지 않았지만, Figures 7(e), 7(f)와 같이 160 °C부터 170 °C에서 표면에 변화가 나타난 것을 확인할 수 있었다. 160 °C와 170 °C에서 시료 표면의 굴곡이 적어지고 균일한 표면으로 변화하였고 이는, PTC 히터가 4.1절 실험 결과 160 °C와 170 °C에서 저항이 급격하게 하락하면서 표면에도 변화가 나타난 것으로 보인다.

Figure 7. 100X magnification photo of the PTC heater surface specimen.

Figure 8. 100X magnification photo of the inner jacket surface specimen.

Figure 8은 내부 피복 시료의 온도별 표면 상태를 보여준다. Figures 8(a)~8(c)와 같이 90 °C부터 110 °C까지 외관상 변화가 없었으나 Figure 8(d) 130 °C부터 내부 피복 시료 표면이 용융되어 표면의 굴곡이 적어지는 것을 확인할 수 있었고, Figure 8(e) 160 °C에서부터 균일한 표면으로 변화한 것을 확인할 수 있다.

Figure 9는 외부 피복 시료의 온도별 표면 상태를 현미경으로 100배 확대하여 촬영한 사진이다. 90 °C부터 170 °C까

Figure 9. 100X magnification photo of the outer jacket surface specimen.

Figure 10. 40X magnification photo of the surface of the self-regulating heating cable ignited by overheating.

지 외관상 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다. 이는 외부 관찰로는 정온전선의 이상을 판단할 수 없음을 의미한다.

4.3 정온전선 발화

정온전선의 온도별 저항값과 표면 상태 변화 실험을 통해 사용된 모든 시료가 170 °C에서 self-regulating 특성을 잃는 것을 확인하였다. 정상 동작 중인 정온전선에 대해 가열로를 사용하여 170 °C의 과열을 인가하였다. 정온전선에 전원을 투입함과 동시에 가열로를 동작시켜 170 °C에 도달한 이후 평균 15 min 이내에 화재가 발생하였다. Figure 10은 과열을 통해 화재가 발생한 정온전선 일부를 보여준다. 정온전선의 외부 피복과 내부 피복은 PTC 히터에서 발생

Figure 11. Change of current value according to event of the self-regulating heating cable.

한 화염으로 인해 녹아내렸고, 동선 사이의 PTC 히터는 탄화되었다. 탄화된 PTC 히터는 Figure 10과 같이 현미경을 통해 40배 확대하여 촬영한 결과이다.

과열로 인해 발화하는 정온전선을 Figure 5와 같이 전력 분석기(tektronix, PA1000)로 분석한 결과 Figure 11과 같은 전류값의 변화를 얻을 수 있었다.

전류값을 보면 처음 전원 투입 후 약 100 s 동안 정온전선에 전원이 공급되면서 발생하는 돌입전류로 인해 전류가 0.1 A까지 증가했다가 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이후 약 1,300 s까지 안정된 전류값을 보였으나 발화전 약 60 s 동안 전류가 0.03 A에서 최대 0.6 A 까지 상승하였다. 이어서 약 1,350 s에서 정온전선이 발화되었다. 즉 이 지점에서 전류가 갑자기 커진 것은 저항값이 작아진 것을 의미하는데 이는 그림 5에서 온도가 170 °C에 이를 경우 PTC 히터의 저항값이 급격히 작아진 것과 일치한다.

5. 결 론

본 연구는 과열로 인한 정온전선의 발화 가능성을 확인하였다. 정온전선의 발열 소자인 PTC 히터의 특성을 파악하였으며, 실험을 통해 과열로 인한 정온전선 화재를 재현하였다. 그 결과 아래와 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

첫째 정온전선의 PTC 히터에 대해 온도별 저항 특성 분석 실험을 통해 PTC 히터의 저항값을 로그로 표현한 결과 온도와 저항값의 관계는 선형으로 나타났으며, 110 °C부터

측정 범위를 넘어설 만큼 큰 저항값을 유지하다가 일부 시료의 경우 160 °C부터 저항값이 감소하였고 170 °C에 이르러 모든 시료의 저항값이 급격히 감소하였다.

둘째, 정온전선의 온도별 표면 상태 분석 실험을 통해 PTC 히터 시료는 160 °C부터 변형이 발생하였고, 내부 피복은 130 °C부터 변형이 일어나는 것을 확인하였다. 그러나 외부 피복은 170 °C까지 외관상 변화를 관찰할 수 없었다. 이는 정온전선의 외관 관찰로는 내부에서 발생하는 이상 현상을 감지할 수 없음을 확인하였다.

셋째, PTC 히터에서 온도별 저항값 특성의 급격한 변화를 보였던 170 °C에서 화재 재현실험을 진행한 결과, 과열 상태에서 정온전선의 전류가 20배 이상 급격히 증가하면서 발화하였다.

이상의 연구결과를 차후 데이터 분석을 통해 정온전선 화재를 판단하는 연구의 참고 자료로 활용할 수 있을 것이다.

References

1. National Fire Agency, "Fire statistic Yearbook" (2020).
2. D. H. Kim and H. S. Lee, "Fire Cause Reasoning of Self-Regulating Heating Cable by a Fire Investigation Applying the Scientific Method and Fault Tree Analysis", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 73-81 (2016). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.4.073>.
3. J. H. Lee and J. Y. Park, "Research for the Igniting Possibility of Preventing Freeze and Burst Heat Rays", *Proceeding of 2011 Fall Conference, Korean Institute Fire Inverstigation*, Vol. 2011, No. 11, pp. 213-252 (2011).
4. C. S. Kim, B. H. Cho, J. H. Kim and G. H. Lim, "An Experimental Study on the Ignition Probability of the Electric Heating Cable", *Magazine of Fire Investigation Society of Korea*, Vol. 6, No. 4, pp. 19-25 (2015).
5. S. R. Yun, "A Study on the Risk for Self-regulating heating cable", *Fire Protection Technology*, No. 54, pp. 10-13 (2013).
6. D. W. Kang and S. S. Kim, "Preparation and PTC Characteristics of Poly (dimethylsiloxane) Modified EPDM/HDPE Composite", *Polymer (Korea)*, Vol. 32, No. 4, pp. 353-358 (2008).
7. D. W. Kang and S. W. Park, "Preparation and PTC Characteristics of Silicone Modified Maleated PE/HDPE/CNT", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 109-113 (2011).
8. International Electrotechnical Commission, "IEC-60738-1 Thermistors-Directly heated positive temperature coefficient" (2009).