

페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯의 발화위험성

The Hazard of Ignition on the Bimetal Type Thermostat Molded by Phenol Resin

한국화재안전연구소 박영국 · 서울지방경찰청 과학수사계 이승훈*

Y. G. Park · S. H. Lee*

요약

페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯의 반복적인 동작에 의한 발화위험성을 검토하기 위하여 발화된 것으로 판정된 사례의 연구와 동작 횟수를 가속시킨 실험을 행하였다.

사례연구 및 실험결과, 페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯(이하 ‘바이메탈식 서모스탯’이라 칭함)은 반복적인 동작에 의하여 내측의 고정접점과 가동접점 부분 사이에서 몰딩재료인 페놀수지가 국부적으로 탄화되는 트래킹 현상이 발생되며, 이로 인한 전기적인 발열 및 용융 등에 의하여 내측으로부터 발화될 수 있다는 사실을 입증하였다.

Abstract

In this paper, we discussed the hazard of ignition on the bimetal type thermostat molded by phenol resin with case study and accelerated aging test.

We experimented three type thermostats molded by phenol resin which are used on hot/cold water

dispenser. On the case study, the thermostat was origin of fire and dry tracking⁽¹⁾ occurred around it's moveable contactor.

On the accelerated aging test, the more thermostat was switched, the more damaged it become. One of the A-type thermostats that is similar type on the case study fired around moveable contactor.

We therefore confirmed that the tracking around the moveable contactor of bimetal type thermostat molded by phenol resin could be origin of fire and it is available to reduce of fire that using noncombustible material for molding of bimetal type thermostat.

Key Words : dry tracking, thermostat, moveable contactor, water dispenser

1. 서 론

바이메탈식 서모스탯은 전기히터를 사용하는 전기기기의 온도를 바이메탈의 온도특성을 이용하여 자동으로 일정하게 유지시키기 위한 장치이다.

바이메탈식 서모스탯은 감열부(바이메탈), 몰딩(절연체), 가동접점 및 고정접점, 단자부분 및 연결전선 등으로 구성되며, 설정된 온도 이상으로 온도가 상승하면, 감열부의 바이메탈이 굴곡되어 가동접점을 밀어내어 접점을 분리시켜, 전기히터로 공급되는 전원을 차단하여 설정온도 이상으로의 온도 상승을 방지하며, 설정온도 미만으로 온도가 하락하고, 감열부 바이메탈이 냉각되면, 바이메탈이 제 위치로 복귀되고 접점을 접촉시켜 전기히터로 전원을 공급하는 과정을 거쳐, 전기기기의 온도를 자동으로 일정하게 유지시킨다.

바이메탈식 서모스탯은 전기기기의 온도가 설정온도 이상으로 온도가 상승하는 것을 방지하므로, 일종의 과열방지장치로서의 역할도 겸하며, 바이메탈식 서모스탯에서 고장이 발생하는 경우, 전기기기는 온도가 일정하게 유지되기 어려우며, 과열이 발생될 수 있고, 과열로 인하여 자체의 절연물이나 주위 가연물에 착화되고 발화에 이를 수도 있다⁽¹⁾.

바이메탈식 서모스탯은 전기기기의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 반복적인 동작을 할 수 밖에 없으며, 반복적인 동작으로 인한 바이메탈식 서모스탯의 가동접점 및 고정접점 간의 반복적인 스파크 발생으로 인한 열변형, 접점의 열변형 및 국부적인 용융으로 인한 접점에서의 전기적인 발열량 증가, 접점 주위 절연체의 탄화 및 도전화, 절연체의 도전화 진행,

절연체에서의 누설전류 증가 및 전기적인 발열량의 증가, 절연체에서의 트래킹(건식트래킹)⁽²⁾ 발생 및 진행, 바이메탈식 서모스탯의 절연 파괴, 절연체와 단자부분 및 전원선 등에 착화 등의 단계를 거쳐 발화에 이르게 된다⁽¹⁻³⁾.

바이메탈식 서모스탯은 냉온수기, 약탕기, 비데, 커피포트, 1회용 물수건 제조기 등에 사용되고 있으며, 냉온수기의 온수탱크에 설치되어 온수의 온도를 일정하게 유지시키는 기능을 하고 있는 바이메탈식 서모스탯에서 발화된 사례가 수십 건에 이르고 있는 실정이며, 바이메탈식 서모스탯의 발화위험성을 연구해야할 필요성이 있다.

이 논문에서는 냉온수기에 사용되는 바이메탈식 서모스탯의 발화사례 연구 및 가속열화실험을 통하여 페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯의 발화위험성을 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 사례연구

냉온수기에 사용되는 바이메탈식 서모스탯은 대부분 페놀수지로 몰딩된 제품을 사용하고 있으며, 바이메탈식 서모스탯에서 고장이나 이상이 발생하게 되면, 전기적인 발열 및 용융 등으로 인하여 바이메탈식 서모스탯의 외함인 페놀수지에 착화되어 화재에 이를 수 있는 위험성이 있다.

Figure 1은 화재가 발생한 냉온수기를 분해한 사진으로서, 냉온수기 내측의 연소형태를 나타낸 것이다. 냉온수기는 상단부분의 냉수탱크가 설치된 부분에 단열재인 스티로폼이 있으며, 상단의 덮개부분이 플라스틱 재질로 구성되기 때문에 발화개소에 관계없이 냉수탱크가 설치된 부분의

연소정도가 심하게 나타나는 것이 일반적이다.

Figure 2는 Figure 1의 □부분에 설치된 온수탱크의 연소형태를 나타낸 것이다. 히터는 밴드형 히터가 사용되었으며, 온수탱크 전면 상단부분에 바이메탈식 서모스탯 2점이 설치되어있다. 온수탱크에는 단열재가 설치되는 경우도 있지만, 근래의 제품에는 단열재가 없는 것이 더 많다.

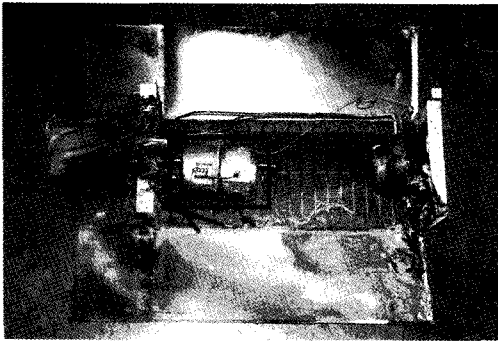


Figure 1. 화재가 발생한 냉온수기 내측의 연소형태.



Figure 2. Figure 1의 □부분, 온수탱크 및 바이메탈식 서모스탯의 연소형태.

Figure 3은 바이메탈식 서모스탯 2점의 연소형태를 나타낸 것이다. 하단부분에 설치된 바이메탈식 서모스탯으로부터 연소상승된 형태가 식별된다. 열경화성 수지는 열가소성 수지에 비하여 연소로 인한 열변형이 작기 때문에 발화원인으

로 작용한 바이메탈식 서모스탯이라도 외부에는 열변형 형태가 크지 않다는 점에 주의가 요구된다.

Figure 4는 바이메탈식 서모스탯을 분해한 사진으로, 가동접점의 모서리 부분에서 국부적인 탄화형태가 식별된다. Figure 4와 Figure 5의 x-ray 사진, Figure 6의 분해사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 바이메탈식 서모스탯은 외측에 비하여 내측의 열변형 형태가 심한 상태이며, 특히 가동접점의 모서리 부분의 몰딩부분은 국부적으로 탄화되어 도전성을 띠고 있으며, 전극 부분에서 전기적 용융흔이 식별된다.

냉온수기의 연소형태, 바이메탈식 서모스탯의 내측이 외측에 비하여 탄화 및 연소정도가 심한 상태인 점, 바이메탈식 서모스탯 내측의 가동접점 모서리 부분에서 식별되는 국부적인 탄화형태 및 전기적인 용융흔이 식별되는 점, 동 가동접점 모서리 부분 주위의 페놀수지 몰딩부분이 국부적으로 탄화되고 도전성을 띠는 점 등으로 보아, 바이메탈식 서모스탯 내측의 가동접점 모서리 부분과 고정접점 단자간에서 발생한 트래킹으로 인한 전기적인 발열 및 용융 등으로 바이메탈식 서모스탯의 페놀수지 몰딩부분이 착화되어 발화에 이른 것으로 판단된다.

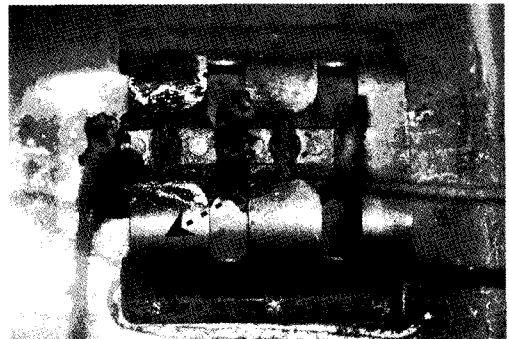


Figure 3. Figure 2의 □부분, 바이메탈식 서모스탯에서 식별되는 연소상승형태.

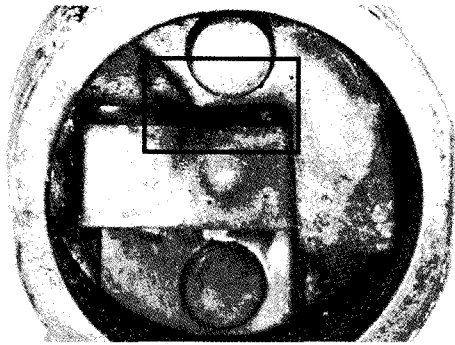


Figure 4. 바이메탈식 서모스탯 내측의 형태(국부적 탄화형태).

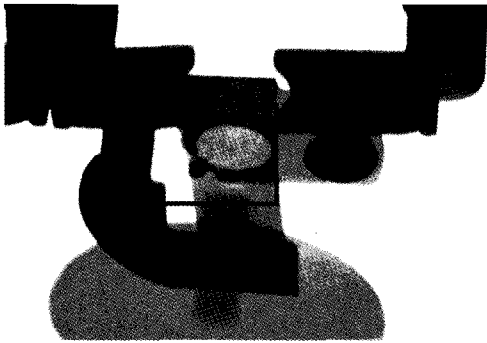


Figure 5. Figure 4의 x-ray 사진, 국부적인 전기적 용융흔이 식별됨.

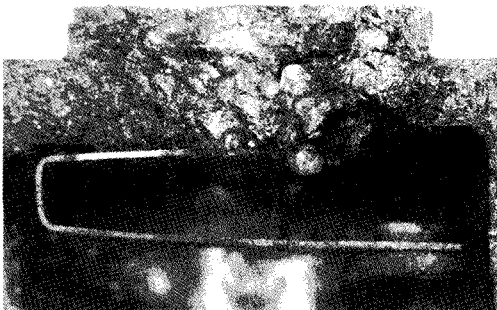


Figure 6. Figure 4의 □, Figure 5의 □부분, 국부적 탄화형태 및 용융형태.

2.2. 실험

2.2.1. 실험방법

시료는 냉온수기에 사용되는 바이메탈식 서모스탯을 선택하였으며, 냉온수기에 가장 일반적으로 사용되는 정격전압 250V, 정격전류 7.5A, 작동온도 $85 \pm 5^\circ\text{C}$ 규격의 3개 제조사의 제품을 선정하였다. 바이메탈식 서모스탯이 제어할 히터는 냉온수기에 사용되고 있는 정격 소비전력 430W의 밴드형 히터를 사용하였다.

냉온수기에 설치되는 바이메탈식 서모스탯은 대부분 약 400W~800W의 정격 소비전력을 갖는 히터를 제어하며, 이와 같은 전력을 반복적으로 스위칭하면, 접점부분의 점진적인 성능저하로 인하여 스위칭이 정상적으로 동작하지 않을 가능성이 있으며, 고장 및 과열 등으로 인하여 발화에 이를 개연성을 배제할 수 없게 된다.

따라서, 바이메탈식 서모스탯의 동작횟수는 매우 중요하다고 할 수 있으며, 동작횟수가 증가할수록 고장 및 화재가 발생할 가능성이 커진다고 보는 것이 가능하다. 일례로 사무실에서 사용되는 냉온수기의 바이메탈식 서모스탯의 동작횟수를 측정된 결과 시간당 약 2회 이상의 on/off 동작을 하는 것으로 나타났다.

실험은 바이메탈식 서모스탯을 시간당 약 25회 on/off 동작시키는 가속열화시키는 방법으로 진행하였으며, 각각의 시료를 1만회와 5만회 동작시켰다. 1만회와 5만회 동작은 일반적인 냉온수기의 바이메탈식 서모스탯이 1일 평균 50회 동작하는 것으로 볼 때, 각각 200일과 1000일의 동작횟수와 같다.

Figure 7, Figure 8, Figure 9는 각각 시료A, 시료B, 시료C의 내측 구조를 나타낸 것이다. 시료A는 내측의 형태 등이 시료B와 시료C와 다르며,

시료B와 시료C는 내측 구조물의 치수에서 약간의 차이를 보이지만 유사한 형태를 가지고 있다.

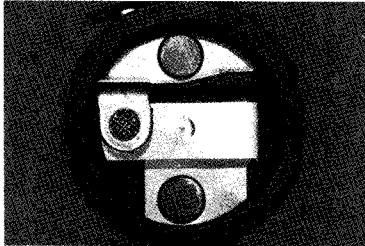


Figure 7. 시료A 내측의 형태

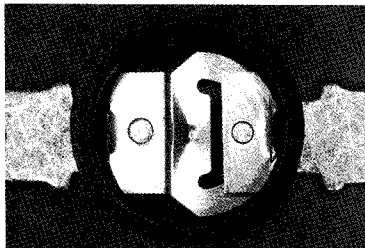


Figure 8. 시료B 내측의 형태.

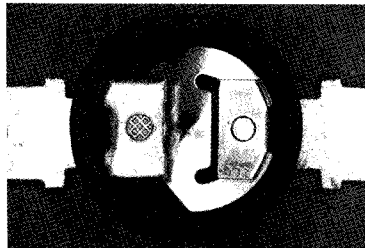


Figure 9. 시료C 내측의 형태.

2.2.2. 실험 결과

(1) 시료A의 가속열화실험

Figure 10, Figure 12, Figure 14는 1만회 동작한 시료A의 내측 상태를 나타낸 사진이며, Figure 11, Figure 13, Figure 15는 5만회 동작한 시료A의 내측 상태를 나타낸 사진이다. 1만회 동작한

시료에 비하여 5만회 동작한 시료에 그을음의 부착정도가 상대적으로 심하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 1만회와 5만회 동작한 시료 모두가 가동접점과 고정접점 주위 부분에 그을음이 집중적으로 부착된 상태이다.

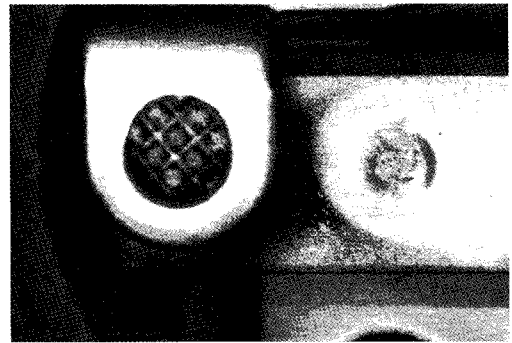


Figure 10. 시료A, 1만회 동작한 상태의 접점부분 주위의 상황.

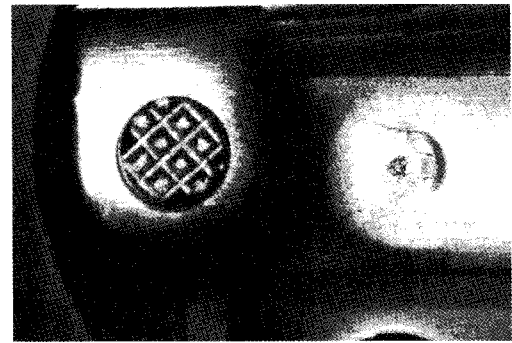


Figure 11. 시료A, 5만회 동작한 상태의 접점부분 주위의 상황.

Figure 13은 시료A의 가동접점 모서리 부분을 확대한 사진이다. 사진의 □부분은 Figure 5의 □부분과 동일한 부분이다. 사진에서 알 수 있듯이 가동접점 모서리 부분은 페놀수지의 몰딩부분 중에서 가장 많은 열변형을 나타내고 있다. 바이메탈식 서모스택의 동작횟수가 증가함에 따라

동 부분의 열변형 및 탄화는 점차 증가될 것으로 사료된다.

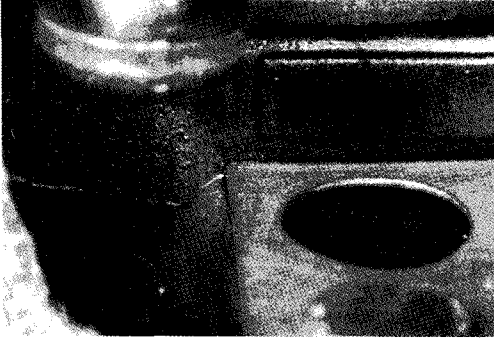


Figure 12. Figure 10의 일부, 가동접점 모서리 부분 주위의 형태.

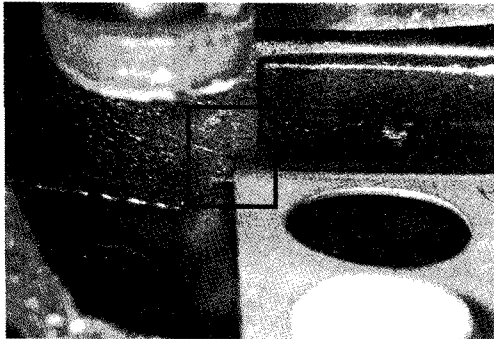


Figure 13. Figure 11의 일부, 가동접점 모서리 부분 주위의 형태.

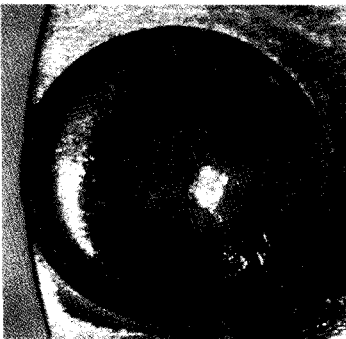


Figure 14. 시료A, 1만회 동작한 상태의 접점의 상황.

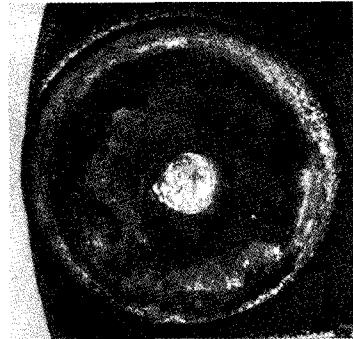


Figure 15. 시료A, 5만회 동작한 상태의 접점의 상황.

(2) 시료B의 가속열화실험

Figure 16, Figure 18, Figure 20은 1만회 동작한 시료B의 내측 상태를 나타낸 사진이며, Figure 17, Figure 19, Figure 21은 5만회 동작한 시료B의 내측 상태를 나타낸 사진이다. 시료B와 시료C는 시료A와 구조 및 형태가 다르며, 가동접점 모서리 부분이 고정접점의 페놀수지 몰딩부분과 접하여 있지 않다. Figure 18과 Figure 19의 사진을 보면, 1만회 동작한 바이메탈식 서모스탯에 비하여 5만회 동작한 바이메탈식 서모스탯의 고정접점의 단자부분(가동접점 모서리 부근)에 그을음 부착정도가 상당히 심한 상태임을 알 수 있으며, 이는 바이메탈식 서모스탯의 동작횟수가 증가함에 따라 그을음의 부착 등이 심해지고 절연성능의 저하를 초래할 가능성이 높아진다는 것을 의미한다.

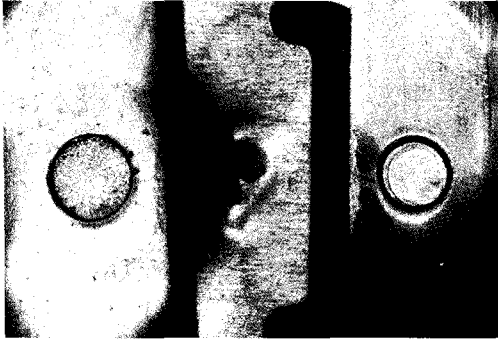


Figure 16. 시료B, 1만회 동작한 상태의 접점부분 주위의 상황.



Figure 19. Figure 17의 ←부분, 가동접점 모서리(고정접점) 부분 주위의 형태.

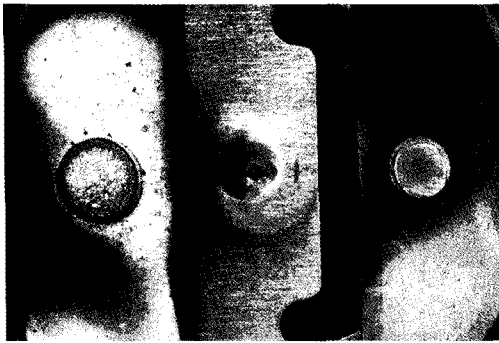


Figure 17. 시료B, 5만회 동작한 상태의 접점부분 주위의 상황.

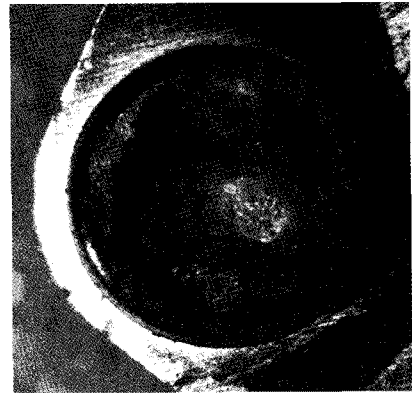


Figure 20. 시료B, 1만회 동작한 상태의 접점의 상황.

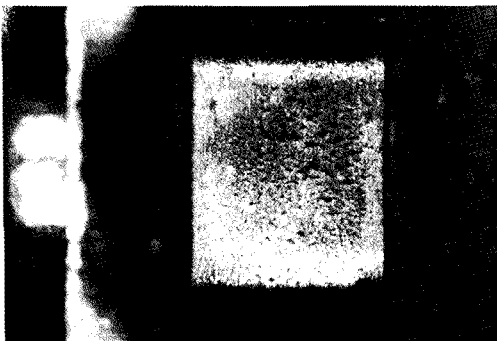


Figure 18. Figure 16의 ←부분, 가동접점 모서리(고정접점) 부분 주위의 형태.

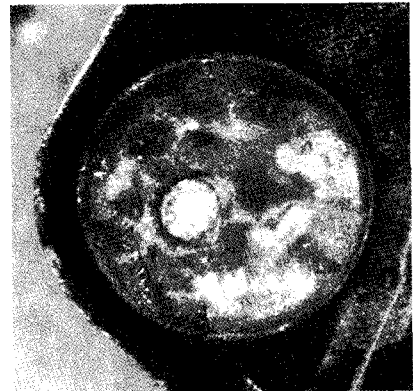


Figure 21. 시료B, 5만회 동작한 상태의 접점의 상황.

(3) 시료C의 가속열화실험

Figure 22, Figure 24, Figure 26은 1만회 동작한 시료C의 내측 상태를 나타낸 사진이며, Figure 23, Figure 25, Figure 27은 5만회 동작한 시료C의 내측 상태를 나타낸 사진이다. 시료C는 시료B와 구조가 유사하며, 가속열화실험에 따른 형태도 유사하게 나타났지만, 시료C는 시료B에 비하여 그을음의 부착정도가 심하지 않은 것으로 나타났다.



Figure 24. Figure 22의 ←부분, 가동접점 모서리(고정접점) 부분 주위의 형태.

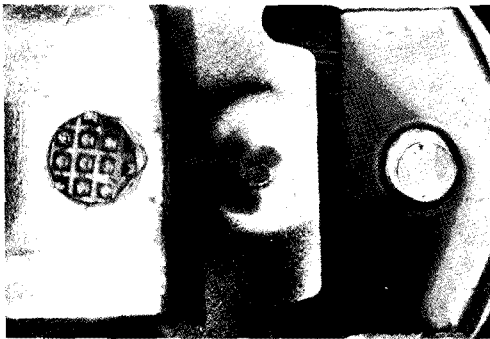


Figure 22. 시료C, 1만회 동작한 상태의 접점부분 주위의 상황.

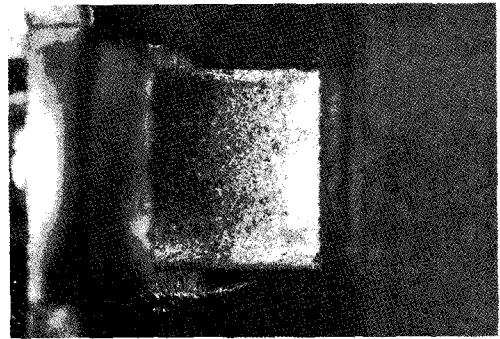


Figure 25. Figure 23의 ←부분, 가동접점 모서리(고정접점) 부분 주위의 형태.

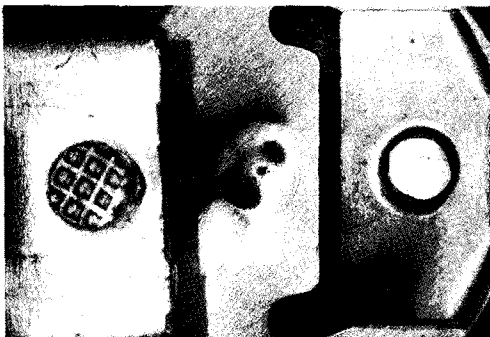


Figure 23. 시료C, 5만회 동작한 상태의 접점부분 주위의 상황.

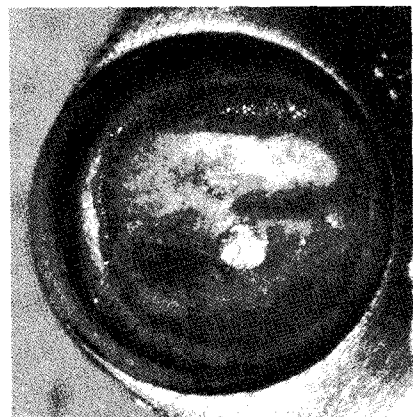


Figure 26. 시료C, 1만회 동작한 상태의 접점의 상황.



Figure 27. 시료C, 5만회 동작한 상태의 접점의 상황.

(4) 화재가 발생한 시료

가속열화실험 과정에서 시료A의 1점이 약 29,400회 동작한 상태에서 트래킹으로인한 전기적인 발열 용융 등으로 인하여 발화되어 전소되었다. 29,400회는 냉온수기의 바이메탈식 서모스탯이 1일 50회 동작하는 것으로 볼 때, 약 1년 7개월 동안 사용된 것에 해당한다.

Figure 28은 화재가 발생한 시료A의 사진으로 백화연소된 상태이며, 전소로 인하여 일부가 형태를 상실하였다. Figure 5의 □부분, Figure 13의 □부분에 해당되는 가동접점 모서리 부분의 연소정도가 가장 심한 상태이며, 동 부분을 중심으로 연소된 형태가 식별된다. Figure 29는 화재가 발생한 시료A의 x-ray 사진이다. 사진의 □부분은 가동접점의 모서리 부분으로 전기적인 발열 및 용융흔이 식별된다.

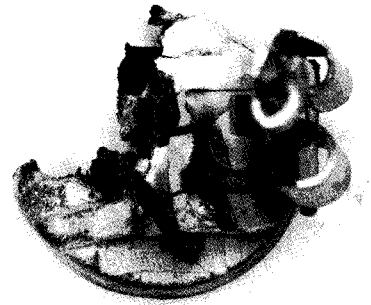


Figure 28. 화재가 발생한 시료A의 연소형태.

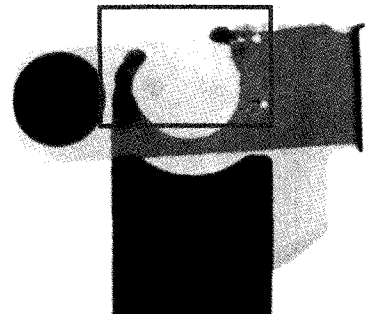


Figure 29. 화재가 발생한 시료A의 가동접점 부분의 x-ray 사진.



Figure 30. 화재가 발생한 시료A, 내측의 연소형태.



Figure 31. 화재가 발생한 시료A의 내측, 가동접점 모서리 부분의 연소형태.



Figure 32. Figure 31 ↑부분의 확대사진

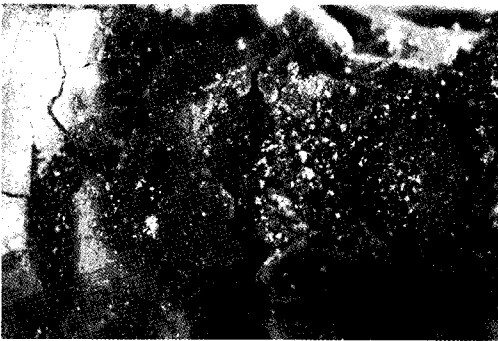


Figure 33. Figure 32 □부분의 확대사진

Figure 30, Figure 31, Figure 32, Figure 33은 화재가 시료A 내측의 연소상황을 나타낸 사진이다. 가동접점의 모서리 부분 주위의 절연재는 탄화되어 도전성을 띠는 상태이며, Figure 33에서 보이는 바와 같이 동부분을 중심으로 연소상승

한 형태가 식별된다.

2.4. 고찰

2.4.1. 사례연구

화재가 발생된 것으로 판정된 냉온수기의 바이메탈식 서모스탯은 내측이 외측에 비하여 탄화 및 연소정도가 심한 상태인 점, 바이메탈식 서모스탯 내측의 가동접점 모서리 부분에서 식별되는 국부적인 탄화형태 및 전기적인 용융흔이 식별되는 점, 동 가동접점 모서리 부분 주위의 페놀수지 몰딩부분이 국부적으로 탄화되고 도전성을 띠는 점 등으로 보아, 바이메탈식 서모스탯 내측의 가동접점 모서리 부분과 고정접점 단자간에서 발생한 트래킹으로 인한 전기적인 발열 및 용융 등으로 발화된 것으로 판단된다. 이 사례는 시료A와 유사한 구조를 갖고 있으며, 바이메탈식 서모스탯의 고정접점 단자와 근접되어 있는 가동접점의 모서리 부분이 취약한 것으로 사료된다.

2.4.2. 가속열화실험

바이메탈식 서모스탯 3종의 가속열화 실험결과 접점 부근에 그을음이 다량 부착됨을 알 수 있었으며, 동작횟수가 증가함에 따라 그을음의 부착정도가 심해지고, 접점의 일부분이 손상을 입는 것으로 나타났다. 이는 실험에 사용된 시료 모두가 동작횟수가 증가함에 따라 성능저하 및 절연특성의 악화로 과열 또는 발화에 이를 수 있다는 것을 의미한다.

3종의 시료 중에서 구조가 다른 시료A가 탄화 및 열변형 형태가 가장 심하게 나타났으며, 시료A의 1점이 실험과정 중에서 트래킹 현상이 발생하여 발화에 이르렀다.

시료A는 사례연구와 마찬가지로 바이메탈식 서모스탯의 고정점점 단자와 근접되어 있는 가동점점의 모서리 부분 주위에서 국부적인 탄화 형태가 식별되고, 도전성을 띠는 등의 트래킹 현상이 발생하였으며, 가동점점 모서리의 일부분에서 전기적인 발열흔 및 용융흔이 식별되었다. 또한 바이메탈식 서모스탯의 페놀수지 몰딩은 백화연소되었으며, 전소되어 형체를 상실한 상태로 서, 동 바이메탈식 서모스탯의 연소로 인하여 바이메탈이 설치된 전기기기를 착화시키는 것이 가능한 것으로 사료된다.

따라서, 바이메탈식 서모스탯의 반복적인 동작으로 인하여 트래킹 현상이 발생되고 이로 인하여 바이메탈식 서모스탯의 연소는 물론이고 바이메탈식 서모스탯이 설치된 전기기기에 화재가 발생할 수 있다는 결론을 도출하였다.

바이메탈식 서모스탯은 필연적으로 반복적인 동작을 할 수 밖에 없으며, 고장의 발생을 완전히 제거하기는 어려울 것으로 보인다. 그러나 바이메탈식 서모스탯이 착화되고 연소확대되어 전기기기에서 발화되는 것은 바이메탈식 서모스탯의 몰딩을 에폭시 수지나 자기(磁器)를 사용한다면 효과적으로 억제될 수 있을 것이다. 에폭시 수지나 자기로 몰딩한 바이메탈식 서모스탯은 이미 출시되어 있기 때문에 페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯의 사용을 규제하는 것만으로도 화재의 발생을 저감시키는데 유효할 수 있을 것이다.

3. 결 론

페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯의 발화위험성을 검토하기 위하여 사례연구와 가속열

화실험을 행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 바이메탈식 서모스탯은 동작횟수가 증가할수록 점점이 열변형되는 등의 성능저하가 발생하며, 점점부근에 집중적으로 그을음이 부착된다.
- (2) 시료A의 바이메탈식 서모스탯은 시료B와 시료C에 비하여 열변형이 더 심하게 나타나며, 점점부근의 가동점점 모서리 부분에서 페놀수지의 열변형, 탄화, 도전로형성 등의 트래킹 현상이 발생할 수 있고, 이로 인한 전기적인 발열과 용융 등으로 인하여 바이메탈 서모스탯에 착화될 수 있다.
- (3) 바이메탈식 서모스탯에 착화되는 경우, 바이메탈식 서모스탯을 사용하는 전기기기에 연소확대될 수 있으며, 몰딩재료로서 불연재를 사용하므로써 이를 억제할 수 있을 것으로 사료된다.
- (4) 페놀수지로 몰딩된 바이메탈식 서모스탯의 사용제한 등의 규제를 위해서는 성능평가, 수명예측 등의 구체적인 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. R. A. Yereance, "Electrical fire analysis", pp.92-96, TOMAS BOOKS(1995).
2. 동경소방청화재조사연구회, "화재조사기술교본<제3권>", pp.7-12, 재단법인 동경방재지도협회(1987).
3. 국립과학수사연구소 화재연구팀, "화재수사길라잡이", pp.9-10, 경찰청(2004).