

전기장판 열선 결함에 의한 화재원인 분석

글 김진표 국립과학수사연구원 화재연구실

우리나라 주거문화는 아파트를 중심으로 한 서구식으로 빠르게 옮겨 가고 있는 추세이다. 그러나 온돌문화에 익숙한 국민 정서 상, 서구적 생활 문화 속에서 과거 정서를 만족시켜주는 전기장판의 사용이 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 문화적 양상을 반영하듯 다양한 전기장판이 사용되고 있으며, 일부는 의료기용으로 등록되어 보급되는 것 또한 적지 않다. 이러한 추세에 따라 전기장판 사용 과정에서 사용자의 과실이나 제조상의 결함 등으로 인해 전기장판으로 인한 전기화재는 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 또한 전기장판의 다양성을 반영하듯 전기장판에 사용되는 열선의 종류도 다양하며, 열선 종류에 따른 발열 메커니즘, 열선의 연결 방법 및 제어방식 또한 다양하게 적용되고 있다.

현재까지 전기장판의 열선은 구리-카드뮴 계열의 열선이 대다수 사용되고 있지만 전자파 등의 영향을 저감할 수 있는 무자계 열선 및 카본열선의 사용이 급증하고 있는 추세이다. 이와 더불어 카본열선을 사용하는 전기장판에서는 구조상 과거의 열선과 감열선을 동시에 설치하는 방법을 적용할 수 없기 때문에 온도센서 및 온도 스위치를 사용하는 방식으로 온도제어를 수행하고 있으며, 일부 원칩 마이크로컨트롤러를 적용한 시간 제어방식을 적용하기도 한다. 이러한 전기장판의 구조적인 변화 및 온도제어 방식 변화 등에 따라 화재가 발생하는 양상도 다양하게 변화하고 있다.

1. 전기장판 열선의 구성

가. 무자계 열선 방식

현재까지 사용되는 전기장판의 열선은 구리-카드뮴 합금 계열의 일반열선이 가장 널리 사용되며, 일반적으로

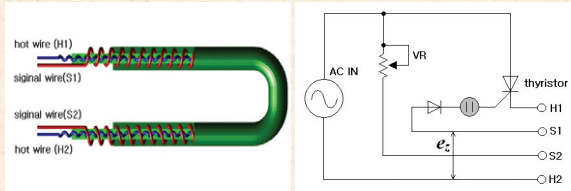
PVC 피복을 사용한다. 일반열선의 내열성 및 내구성 향상을 위해 실리콘 피복을 사용하게 되는데 이를 실리콘 열선이라 한다. 무자계열선 방식은 <그림 1>(a)에 나타낸 바와 같이 열선(hot wire)과 감열선(signal wire)에 동일한 전류를 반대방향으로 흘려주어 전류 흐름에 따른 자기장을 상쇄시키는 작용으로 자기장을 차폐하는 방식이다. 이러한 방식에서는 설정 온도에 따라 열선에 전류의 크기가 변화하는데, 이때 발생하는 자기장을 상쇄하기 위하여 감열선에도 열선과 동일한 크기의 반대 방향 전류가 흐르고, 이에 따라 감열선에서는 전기장판을 고온으로 설정할수록 많은 전류가 흐르게 된다. 감열선에 흐르는 전류의 크기가 증가함에 따라 감열선에서는 자기장 상쇄를 목적으로 흘려주는 전류에 의해 줄열이 발생하고, 이 줄열에 의해 국부적인 발열이 발생할 가능성이 있다.

일반적으로 무자계열선 방식의 전기장판은 감열선에 의한 온도제어 방식을 이용하며, 설정온도에 따라 위상제어 소자(SCR이나 TRIAC)를 제어하는 방식으로 적용된다. 감열선에 의한 온도제어 방식은 <그림 1>(b)와 같이 온도 조절기 가변저항과 감열선의 임피던스에 의해 분압회로가 구성되고, 분압전압의 위상 지연이 발생되는데 이때 분압된 전압의 차이에 의해 위상제어소자에 트리거 신호가 전달되고, 전기장판 열선에 공급되는 에너지를 가변시킨다. 감열선은 일반적으로 온도변화에 따라 저항이 변화하는 형태로서 온도변화에 따른 감열선의 저항 변화는 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = R_0 \times (1 + \alpha t)$$

일반적인 열선을 사용하는 전기장판에서는 감열선의 온도변화에 의한 임피던스 변화에 의해 위상제어소자의 위

상각을 조절하는 것으로 온도제어가 이루어지는데 무자계 열선 방식의 전기장판에서도 동일한 방식으로 광범위하게 적용되고 있다.



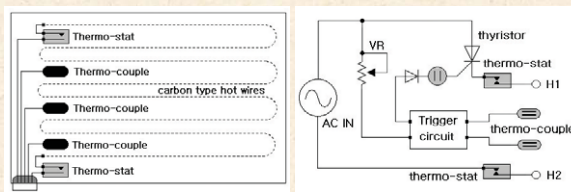
(a) 무자계 열선의 개략도

(b) 온도제어 방식

〈그림 1〉 무자계 열선의 개략도 및 온도제어 방식

나. 카본열선 방식

카본열선을 사용하는 전기장판의 경우, 카본열선 위에 감열선을 설치할 수 없는 구조이므로 열동식 온도스위치를 적용한 방식을 일반적으로 적용한다. 또한 열선 주변에 온도센서를 설치하여 온도변화를 직접 검출하고, 원칩 마이크로 컨트롤러 등을 적용하여 열선에 전원공급을 제어하는 방식이 적용되는 것도 있다. 이와는 달리 온도조절기의 가변 저항값에 따라 열선에 전원이 공급되는 시간을 조절함으로써 온도가 설정 레벨에 적합하도록 시간제어 방식을 적용하기도 한다.



(a) 카본열선의 개략도

(b) 온도제어 방식

〈그림 2〉 카본열선의 개략도 및 온도제어 방식

이러한 온도제어 방식 중, 〈그림 2〉와 같이 저가로 구현할 수 있는 온도스위치 및 온도센서를 이용하는 방식이 일반적으로 사용된다. 온도센서와 온도스위치를 사용하는 온도제어방식에서는 온도센서는 열선 주변에 설치할 수밖에 없는 구조로 온도센서와 일정거리 이상 떨어진 부분에서 국부적인 발열이 발생하는 경우에는 온도 변화를 검출할 수 없는 문제점이 존재한다. 결국 열선 연결 접속부 또는 일부 열선이 손상되어 있는 경우에는 국부적 발열이 발생되더라도 온도제어 및 전원공급 차단 기능이 불

가능하게 된다.

2. 전기장판 열선 결함에 의한 화재 사례 분석

가. 무자계열선 방식

무자계 열선 방식의 전기장판의 온도제어는 열선과 감열선으로 구성되는 온도제어방식을 그대로 적용하고 있다. 무자계 열선 방식의 전기장판에 이와 같은 온도제어 방식을 적용하는 경우, 감열선에 흐르는 전류에 따라 발생하는 줄열 및 열선에서 발생하는 발열량의 합에 의해 감열선의 저항 값을 결정된다. 이러한 경우, 정확한 온도제어가 이루어지지 못할 가능성이 있으며, 상대적으로 전기장판의 발열량이 크게 되는 효과를 발생시키고, 일반 열선 방식과 비교할 때 높은 온도에서도 전원공급이 차단되지 않는 문제점을 가지고 있다. 특히, 열선 피복이 상대적으로 취약한 부분에서는 감열선에서의 국부적 발열에 의해 열선피복이 용융되는 현상을 초래한다. 열선피복의 용융이 진행되는 경우, 전기장판 열선과 감열선이 최종적으로 절연파괴에 이르며, 열선과 감열선 사이에서 단락이 발생되어 화재로 이어지게 된다.

〈그림 3〉은 무자계 열선 방식의 전기장판 화재사고의 예를 나타낸 것으로 중앙 부분이 연소 천공된 형상이고, 동부위 열선은 연소 과정에서 일부 유실된 상태로서 남아 있는 부분에서 발화와 관련지를 만한 특이점은 식별되지 않는 상태이다. 동 전기장판의 열선 배치는 〈그림 3〉(b)와 같으며, 연소되지 않은 열선의 끝부분이 일부 탄화되고, 열선 피복이 열변형된 형상이 관찰된다.

〈그림 3〉(c)에 나타난 열선의 열변형 부분은 주연소 부분과 상당히 떨어져 있는 부분으로 연소 확대와는 무관하게 형성된 것으로 볼 수 있다. 동 부분에 대한 외부 열선 피복을 벗겨내면 〈그림 4〉(a)에 나타난 바와 같이 열선과 감열선 부분이 노출되는데 열선은 내부피복이 설치되어 있으며, 내부피복 위에 감열선이 감겨져 있는 구조이다. 내부피복은 감열선이 감겨진 경로를 따라 용융 변형된 형상이 관찰되는데 이러한 현상은 자기장을 상쇄시키기 위하여 감열선에 흘려준 전류에 의한 줄열 및 열선의 발열량이 합해지면서 내부피복이 손상되는 것으로 판단된다.



(a) 소화된 전기장판 (b) 전기장판 열선의 구성 (c) 탄화된 열선

〈그림 3〉 무자계 열선을 적용하는 전기장판의 화재 사례



(a) 열선피복 용융형상 (b) 열선과 감열선의 단락형상 (c) 단락형상의 확대 모습

〈그림 4〉 무자계 열선 피복의 용융형상 및 열선과 감열선 사이의 단락형상

내부피복이 감열선을 따라 용융 변형되고 이러한 현상이 지속되어 내부피복이 유실되면 최종적으로 〈그림 4〉(b)에 나타난 것과 같이 감열선과 열선 사이에서 절연과 파괴가 발생한다. 감열선과 열선에는 자기장 상쇄 효과를 위하여 서로 다른 방향의 전류가 흐르게 되는데 이러한 원인으로 단락회로가 구성되면 상대적으로 큰 단락전류가 발생하게 된다.

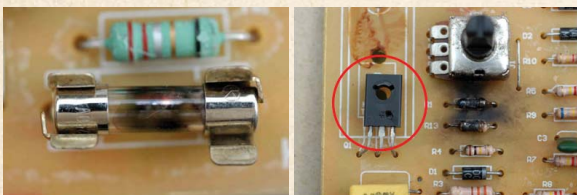
〈그림 4〉(c)는 열선과 감열선에 단락흔이 형성된 것을 나타낸 것으로 단락에 의한 절연과 파괴가 발생하는 경우, 전기적 발열 및 불꽃이 수반되고, 이는 열선의 내부피복이나 주변 가연물을 착화시키는 발화원인으로 작용한다. 전기장판 열선에서 절연과 파괴가 발생되어 발화되는 경우, 큰 단락전류가 흐르게 되는데 이때 〈그림 5〉에 나타난 바와 같이 온도조절기의 내부기판에서는 전원퓨즈가 용단

되고, 심한 경우, 스위칭 소자가 파괴되는 양상을 보이기도 한다.

나. 카본열선 방식

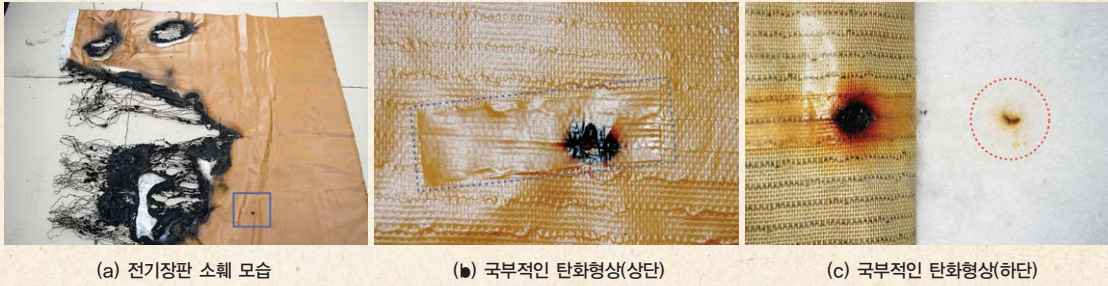
〈그림 6〉에 나타난 전기장판은 카본열선을 사용하는 것으로 전기장판을 저온 켜짐 상태에 두고 외출한 사이 화재가 발생되었다. 화재가 발생한 전기장판의 열선 부분을 떼어내어 관찰한 결과, 〈그림 6〉(a)와 같이 연소 중심부와 떨어진 부분에서 국부적으로 탄화된 흔적이 식별되었다. 특히, 〈그림 6〉(b)에 표시한 부분에서 탄화된 부분은 극히 일부인 12×9mm에 해당되며, 탄화된 부분을 중심으로 약 40×18mm의 테이프로 고정되어 있는 형상이 관찰되었다. 또한 열선 부분과 인접한 보온재 부분에서 일부 탄화된 흔적이 식별되는데 화재가 발생한 전기장판은 열선을 기준으로 상부 4중 보온 구조 및 하부 2중 보온 구조로 구성되어 어느 정도의 국부적 발열이 발생되더라도 전기장판의 외관상 탄화 흔적이나 화재 징후는 관찰되지 않는 것으로 추정된다.

〈그림 6〉에서 탄화된 부분을 확대하면 〈그림 7〉에 나타난 바와 같이 탄화 중심부가 천공된 형상이 식별된다. 천공된 부분에서 열선의 용단 형상 및 열선을 접속했던 것



(a) 전원퓨즈 용단 (b) 스위칭 소자의 파손형상

〈그림 5〉 전기장판 온도조절기 전원퓨즈의 용단 및 스위칭 소자의 파손형상

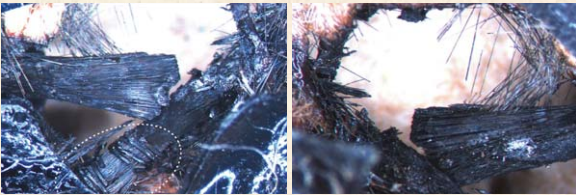


(a) 전기장판 소취 모습

(b) 국부적인 탄화형상(상단)

(c) 국부적인 탄화형상(하단)

〈그림 6〉 카본열선을 적용한 전기장판 화재 사례



(a) 카본열선 접합부(상단)

(b) 카본열선 접합부(하단)

〈그림 7〉 카본열선 접합부의 열선 용융형상

으로 보이는 카본재질의 접속용재가 식별되는데 전기적 용접이나 납땀이 불가하여 열선과 같은 카본재질의 접속용재를 사용한 것으로 추정된다. 천공된 부분에서의 열선 용융 형상은 외부 장력 등에 의해 단선된 형상과는 상이한 특징을 나타낸다. 외부 장력에 의해 열선이 단선되는 경우에는 단선된 부분에서 열선이 늘어진 흔적 또는 불규칙한 단선 흔적을 나타내는데 비해 〈그림 7〉에 나타난 열선의 단선 형상은 국부적인 전기적 발열에 의해 용단된 전형적인 특징을 보이고 있다. 용단된 부위는 열선의 묶음 접속을 위해 동일한 카본재질의 접속용재를 사용한 것으로 추정된다.

이와 같이 묶음 또는 꼬임 접속이 이루어지는 개소에서 불완전 접속의 가능성이 있으며, 불완전 접속된 개소에서는 접속저항이 커지게 되고, 국부적인 전기적 발열이 발생된다. 국부적인 전기적 발열이 발생하는 과정에서 열선이 일부 손상되고, 손상된 열선에 의해 불완전 접속 개소에서의 발열이 증대되어 최종적으로 열선의 용단 및 화재사고로 이어지게 된다.

3. 전기장판 화재원인 분석

화재가 발생한 전기장판에 대한 검사결과, 무자계열선

의 경우, 자기장을 상쇄시키기 위해 감열선에 흘러주는 전류에 의한 줄열 발생으로 열선피복이 용융 변형되고, 최종적으로 감열선과 열선 사이에 절연파괴가 발생되면서 화재로 이어지는 것으로 볼 수 있다. 특히, 무자계 열선 방식의 전기장판은 전통적인 감열선의 저항 변화에 의한 온도제어 방식을 적용하는데, 감열선에 흐르는 전류의 영향으로 정확한 온도제어가 이루어지지 못하는 것으로 추정된다. 따라서 동일한 화재사고의 방지를 위해서는 무자계 열선 방식의 전기장판의 온도제어 방식이 개선되어야 할 것으로 판단된다.

카본열선을 사용하는 전기장판은 접속부분에서 국부적인 전기적 발열에 의해 용단된 형상이 식별되었으며, 이러한 접속개소에서 발생한 국부적 발열에 의해 화재사고로 진전된 것으로 화재원인을 추정하였다. 카본열선을 사용하는 전기장판의 경우, 용접이나 납땀 등의 전기적 방법 적용이 불가하여 동일한 카본재질의 접속재를 사용하는데 접속과정에서 열선 사이의 불완전 접속이 발생되면서 국부적인 발열이 발생되고, 점차 발열량이 확대되어 최종적으로 화재사고로 이어지는 것으로 보인다.

특히 카본열선을 사용하는 방식에서는 열선 부위에 직접적으로 감열선 등을 사용할 수 없어 온도센서 및 온도스위치를 사용하지만, 일부 열선 부근에만 사용함에 따라 국부적 발열이 발생하더라도 온도센서 설치위치에서 벗어나는 경우에는 온도변화 검출 및 전원공급의 차단 동작이 원활하게 이루어지지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 화재사고 방지를 위해서는 최대한 접속 개소를 줄이고, 온도센서 등을 보다 많은 부분에 설치하는 방식으로 개선되어야 할 것이다. ☹