

전기히터의 온도특성과 발화위험성에 관한 화재재현실험

김성제 KFPA 부설 방재시험연구원 화재조사센터 주임

1. 머리말

전기히터는 겨울철 난방기구로서 주거용 및 비주거용 할 것 없이 가장 많이 보급된 가전제품 중 하나로, 성능과 사용상의 유용함을 인정받은 제품이라 할 수 있다. 하지만 선풍기형 세라믹 히터를 비롯한 대부분의 히터는 열풍의 지속적인 발생을 위하여 장시간 사용하거나 전기적인 이상회로가 발생할 경우 발열로 인해 화재로 이어질 수 있는 위험이 존재한다. 이에 전기히터 발열체로 많이 사용되고 있는 니크롬선과 철크롬선의 용량별 발열특성을 확인하고, '고정 접촉계 파손 시 층간 단락에 의한 발화 위험성'에 관한 재현실험을 하였다. 또한 각 실험별로 나타난 발열온도는 검출장치를 통해 기록하고 분석하였다.

2. 합금발열체의 성질

가. 기계적 성질

Ni-Cr계(기호: NCH), Fe-Cr계(기호: FCH) 합금의 고온에서의 기계적 성질은 600℃ 이상에서 차이가 생기기 시작한다. 인장강도는 Ni-Cr계에 비해서 Fe-Cr계가 급격히 저하하고, 연신율은 Fe-Cr계가 급격히 증가한다. 여기서 Fe-Cr계는 고온이 되면 강도가 약해지는 반면 연신이 잘되므로 발열체는 변형이 크게 된다. 그리고 1,100℃ 부근의 온도에서는 Ni-Cr계, Fe-Cr계의 강도가 모두 큰 차이가 없으나, Fe-Cr계의 연신율은 매우 크므로 Fe-Cr계 발열체의 지지방법을 충분히 고려해야 한다.

나. 화학적 성질

사용온도에서 주변 물질에 의해 화학적으로 침식되지 않고 안정하다는 것이 금속 발열체에서 중요하다. Ni-Cr계, Fe-Cr계 합금이 사용온도에서 주변 물질에 의해서 잘 침식되지 않는 것은 이들 금속의 표면에 생기는 산화피막이 내부 금속을 보호해 주기 때문이다. Ni-Cr계의 산화피막은 주로 NiO, CrO₃이고, Fe-Cr계의 산화피막은 1,000℃에서는 γ -Al₂O₃와 α -Al₂O₃이고, 다시 가열되어 1,200℃에 이르면 α -Al₂O₃로 된다. 이들 산화피막이 안정하게 금속합금의 표면에 고착되어 있다면 주변 물질에 침식되지 않고 발열체의 기능을 발휘한다.

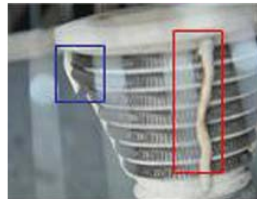
3. 발화 메커니즘

선풍기형 세라믹 히터를 비롯한 대부분의 히터는 열풍의 지속적인 발생을 위하여 장시간 사용하게 되고, 이로 인하여 대다수 니크롬선 재질의 히터코일은 특성상 인장강도가 저하되어 길게 늘어지게 된다.

이러한 상태에서 사람이 보행 중 코드선 줄에 발이 걸려 히터가 넘어지거나 이동 중에 떨어뜨리는 등 외부충격이 가해지는 경우 고정접착제 또는 세라믹 보빈이 파손되어 늘어난 니크롬선간 층간 단락이 발생되고, 전류는 니크롬선의 최단 경로를 따라 흐르기 때문에 니크롬선의 전체 저항값은 줄어들게 된다. 전압은 220V로 동일하기 때문에 옴의 법칙에 의해 줄어든 저항만큼 전류가 증가하게 되고, 증가된 전류의 제곱에 비례하여 줄열(Joule Heat)이 증가하게 되고, 증가된 줄열에 의해 니크롬선이 녹아서 끊어지게 된다. 하부에 가연물이 존재할 경우, 이 때 발생한 니크롬선 소락물(燒落物)에 의해 착화되어 화재로 이어지게 된다.



[그림 1] 화재현장 내 전기히터



[그림 2] 전기히터 내 고정접착제 및 니크롬선 코일 모습



[그림 3] □ 표시부분, 코일간 층간 단락(○ 부분)



[그림 4] □ 표시부분, 접착제가 금이 간 사항(○ 부분)

4. 실험 및 결과

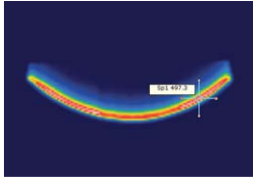
가. 발열체의 용량별 발열 특성

(1) 실험방법

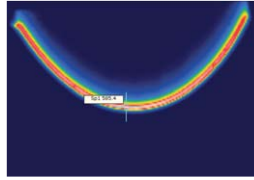
용량 1kW, 1.5kW의 니크롬선 및 철크롬선을 세라믹 판(90cm×60cm)에 고정시킨 후 발열체의 최고 발열온도를 열화상카메라(FLIR사 T-400)를 사용하여 측정하였다. 또한 니크롬선 및 철크롬선의 원래 길이(전원 투입 전), 최고 길이(전원 투입 후), 수축된 길이(1시간 냉각 후)를 각각 측정하였다.

(2) 실험결과

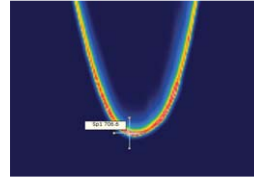
열화상카메라(FLIR사 T-400)를 사용하여 1kW, 1.5kW의 니크롬선 및 1kW, 1.5kW의 철크롬선의 최고 발열온도를 표시하였으며, 니크롬선에 비해 철크롬선의 최고온도가 상대적으로 높음을 실험을 통해 알 수 있었다.



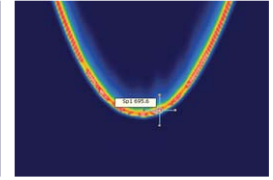
[그림 5] 니크롬선 1kW 최고 발열온도(497.3°C)



[그림 6] 니크롬선 1.5kW 최고 발열온도(585.4°C)



[그림 7] 철크롬선 1kW 최고 발열온도(706.6°C)



[그림 8] 철크롬선 1.5kW 최고 발열온도(695.6°C)

발열체의 연신율[$\frac{\text{수축된 길이} - \text{원래길이}}{\text{원래길이}}$]은 니크롬선에 비해 철크롬선이 급격히 증가한다는 것을 <표>의 결과를 통해 알 수 있었다. 연신율이 증가한다는 것은 그만큼 고온이 되면 인장강도가 저하되어 발열체의 길이가 쉽게 늘어난다는 것을 의미하므로, 니크롬선 보다 철크롬선 발열체를 사용할 경우 지지방법에 대해 각별한 주의가 필요하다.

<표> 니크롬선 및 철크롬선의 용량별 발열특성 측정

구분	용량[kW]	최고온도[°C]	길이변화[m]			연신율(%)
			원래길이	최고길이	수축된 길이	
니크롬선	1.0	497.3	4.75	6.33	6.01	26.53
	1.5	585.4	6.75	9.41	9.02	33.63
철크롬선	1.0	706.6	4.33	13.07	12.75	194.46
	1.5	695.6	6.00	13.15	12.80	113.33

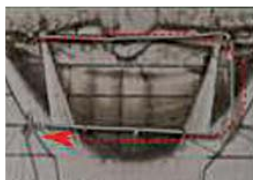
나. 직렬 및 병렬회로에서 층간 단락이 발생하였을 때 발화위험성 비교

(1) 실험방법

니크롬선(2kW) 1개를 세라믹 판(90cm×60cm)에 ‘ㄷ’ 모양으로 고정시킨 후 상부의 니크롬선을 인위적으로 늘려 하부의 니크롬선에 접촉시켰을 때 현상들을 기록한 실험 1과, 2개의 니크롬선(2kW)을 세라믹 판(180cm × 60cm)에 나란한 모양으로 고정시킨 후 상부의 니크롬선을 인위적으로 늘려 하부의 니크롬선에 접촉시켰을 때 현상들을 기록한 실험 2를 수행하였다. 이 때 2개의 니크롬선은 병렬로 연결하였다.

(2) 실험결과(직렬회로)

[그림 9~16]은 니크롬선(2kW) 1개에서 층간 단락이 발생하였을 때의 과정을 보여주고 있다. 층간 단락이 발생하였을 때 전류는 최단 경로를 따라 흐른다는 것을 [그림 13]에서 확인할 수 있었다. 니크롬선의 밝기는 시간이 흐를수록 점점 증가하다가 11~12초 후에 니크롬선이 급속히 늘어지면서 스파크가 발생하였고, 1초 후에 니크롬선이 끊어지는 것을 확인할 수 있었다.



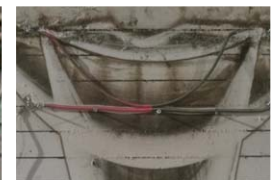
[그림 9] 전원 투입 (점선방향으로 고정시킴)



[그림 10] 30초 후 (특이사항 없음)



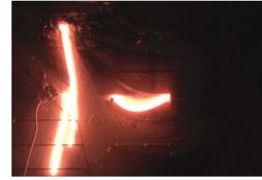
[그림 11] 상부의 니크롬선을 인위적으로 늘린 후(전원 투입)



[그림 12] 2초 후

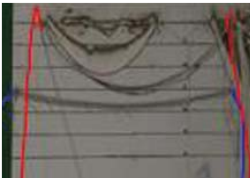
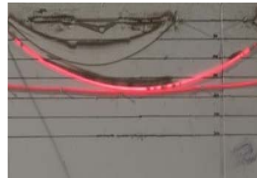
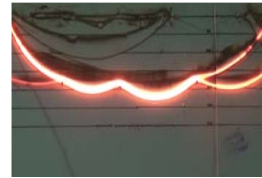


[그림 13] 5초 후

[그림 14] 10초 후
(점점 밝아짐)[그림 15] 12초 후(급속히 늘어
지면서○표지부분에서 스파크 발생)[그림 16] 13초 후
(니크롬선이 끊어짐)

(3) 실험결과(병렬회로)

[그림 17~20]에서 보는 것처럼, 2개의 니크롬선을 병렬로 연결하여 층간 단락을 시켰을 때는 전류가 분산되어 니크롬선이 끊어질 정도에 줄열은 발생하지 않았고 니크롬선이 꺾이는 부분은 다른 부분보다 저항이 늘어나 밝기가 증가함을 알 수 있었다. 그 이외 특이사항은 발생하지 않았다.

[그림 17] 빨간색 전선과 파란색
전선은 상호 병렬로 연결됨.[그림 18] 13초 후(늘어지면서
층간 단락이 발생)[그림 19] 27초 후 (○ 표시
부분, 국부적으로 니크롬선의
밝기가 증가함)[그림 20] 1분 25초 후(층간
단락된 부분이 전체적으로
밝아짐)

다. 선풍기형 세라믹 히터코일(니크롬선)의 층간 단락 시 발화위험성

니크롬선을 고정시키기 위해 사용된 접착제가 파손된 경우 세라믹 보빈 홈에서 늘어난 니크롬선이 이탈되어 층간 단락이 발생하고, 증가된 줄열에 의해 끊어져 생긴 니크롬선 소각물(燒落物)에 의해 히터 하부에 적치되어 있는 가연물질의 착화여부를 확인하고자 실험하였다.

(1) 실험방법

니크롬선 코일의 사용된 고정접착제를 모두 제거한 후, 정상운전일 때, 2개 층간 단락이 발생하였을 때, 3개 층간 단락이 발생하였을 때, 4개 층간 단락이 발생하였을 때, 5개 층간 단락이 발생하였을 때, 6개 층간 단락이 발생하였을 때 현상들을 기록하였으며, 히터 하부에 가연물질(스펀지)을 적치하였다. 전원/온도조절 스위치는 '강'으로 설정하고, 시간선택 스위치는 '연속', 회전 스위치는 '정지모드'로 실험하였다.

(2) 실험결과(정상운전 ~ 4개 층간 단락이 발생하였을 때)

니크롬선 코일간 층간 단락 수가 증가할수록 니크롬선의 밝기는 정상 운전할 때보다 점점 더 증가하였다. 그 이유는 니크롬선 코일간 층간 단락이 발생하였을 때, 전류는 니크롬선의 최단 경로를 따라 흐

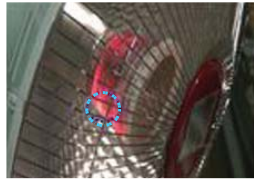
르기 때문에 니크롬선의 전체 저항 값은 줄어들게 되고, 줄어든 저항 대비 전류가 증가하여 니크롬선의 밝기가 증가하였기 때문이다.



[그림 21] 정상운전(전원투입)



[그림 22] 20분 경과 후
(특이사항 없음)



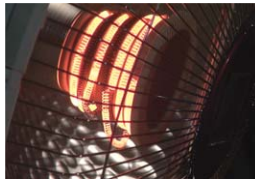
[그림 23] 2개 층간 단락이
발생하였을 때



[그림 24] [그림 23]의 ○ 부분,
층간 단락 부분은 기타 부분보
다 밝음.



[그림 25] 3개 층간 단락이
발생하였을 때



[그림 26] 20분 경과 후
(특이사항 없음)



[그림 27] 4개 층간 단락이
발생하였을 때



[그림 28] 20분 경과 후
(특이사항 없음)

(3) 실험결과(5개 층간 단락이 발생하였을 때)

[그림 29~36]에서 보는 것처럼, 5개 층간 단락이 발생하였을 때부터 전원 투입과 거의 동시에 순간적인 스파크가 발생하였고, 니크롬선 소라물에 의해 가연물질이 착화되어 화재로 이어지는 현상을 2번의 실험(측면, 정면)을 통해 확인하였다.



[그림 29] 0.5초 후(○ 표시
부분, 순간적인 스파크 발생)



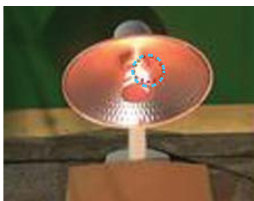
[그림 30] 2초 후
(니크롬선이 끊어짐)



[그림 31] 8초 후
급속히 냉각)



[그림 32] 25초 후
(히터 하부의 연소상황)



[그림 33] 2초 후(○ 표시부분,
순간적인 스파크 발생)



[그림 34] 6초 후
(○ 표시부분, 점점 늘어짐.)



[그림 35] 7.5초 후
(○ 표시부분, 끊어짐.)



[그림 36] 16초 후
(실험종료)

(4) 실험결과(6개 층간 단락이 발생하였을 때)

[그림 37~40]에서 보는 것처럼, 6개 층간 단락이 발생하였을 때는 니크롬선 소라물이 생성되는 시간이 단축됨을 알 수 있었다.



[그림 37] 0.6초 후
(○ 표시부분, 점점 늘어짐)



[그림 38] 1초 후
(니크롬선 끊어짐)



[그림 39] 12초 후(실험종료)



[그림 40] ○ 부분, 용단흔

5. 맺음말

본 연구를 통해 발열체로 많이 사용되고 있는 니크롬선과 철크롬선의 발열 특성을 비교 분석하였고, 시중에서 판매되고 있는 전기히터의 '고정 접착제 파손 시 층간 단락에 의한 발화 위험성'에 관한 재현 실험 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

가. 최고온도 및 연신율은 니크롬선에 비해 철크롬선이 상대적으로 높으므로 니크롬선 보다 철크롬선 발열체를 사용할 경우 지지방법 및 취급에 각별한 주의가 필요하다.

나. 전기히터 발열체를 직렬로 연결하였을 때보다 병렬로 연결하였을 때 층간 단락에 의한 발화 위험성으로부터 더 안전함을 알 수 있었다. 니크롬선(2kW) 1개에서 층간 단락이 발생하였을 때 전류는 최단 경로를 따라 흘러 늘어난 줄열에 의해 스파크 발생 후 니크롬선이 끊어지는 것을 확인하였지만, 2개의 니크롬선을 병렬로 연결하여 층간 단락을 시켰을 때는 전류가 분산되어 니크롬선이 끊어질 정도에 줄열은 발생하지 않았고 니크롬선이 겹치는 부분은 다른 부분보다 저항이 늘어나 밝기가 증가함을 알 수 있었다.

다. 전기히터의 니크롬선 코일간 층간 단락의 개수가 5개(제조사별, 사용 경과년수에 따라 상이함.)일 때부터 니크롬선 소락물이 발생하여 전기히터 하부에 적치된 가연물질을 착화시키므로 불연재질의 끈 또는 고정접착제 등으로 니크롬선 코일을 세라믹 보빈에 단단하게 고정 시킬 필요가 있음을 알 수 있었다.

라. 발열체의 층간 단락으로 인한 화재사고를 방지하기 위해 다음 사항을 확인한다.

- (1) 외부 충격에 의해 고정 접착제 또는 세라믹 보빈이 파손되었는지 확인
- (2) 장시간 사용으로 발열체가 길게 늘어져 있는 상태인지 확인
- (3) 가정이나 업소(특히 노래방) 등에서 벽걸이 선풍기형 히터를 사용할 때, 하부에 가연물질(소파 등)이 적치되어 있는지 여부 확인 (㉸)

[참고문헌]

1. 천성달 외 1명, 열처리 설비, 도서출판 동학, 192-194(2000)