

시즈히터의 발화위험성에 관한 연구

최기욱 화재조사센터 대리

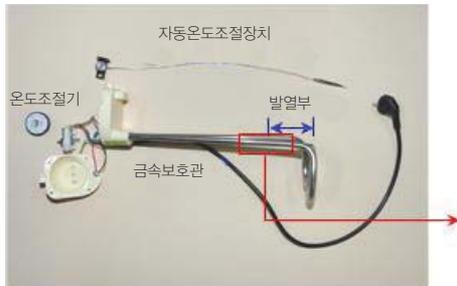
1. 머리말

시즈히터는 금속보호관 속에 니켈-크롬 소재의 전열선을 삽입하고 산화마그네슘(MgO)을 충전한 구조로서 일명 “돼지꼬리히터”라는 명칭으로 시중에서 판매되고 있으며, 액체 등을 가열하는 공정설비 등에 설치되기도 한다. 시즈히터는 구조적으로 튼튼하고 가격이 저렴하며 사용방법이 간단하여 다양한 장소에서 사용되고 있으나, 사용자가 사용 중인 것을 망각한 상태에서 용기 내부의 액체가 시즈히터의 발열부의 하부까지 증발하는 경우 가연성 용기를 착화시켜 화재로 진행될 가능성이 매우 높다. 이에 본 연구에서는 시즈히터의 과열현상 및 온도특성을 확인하고, 가연성용기를 이용한 화재재현을 통하여 발화위험성에 대해 분석하고자 한다.

2. 시즈히터 구조 및 발화 매커니즘

가. 구조

시즈히터의 발열부는 스테인리스 소재의 금속보호관 내에 니켈-크롬(Ni-Cr) 계열의 전열선을 삽입하고, 절연특성이 우수하고 열전도도가 높은 산화마그네슘(MgO)을 충전한 상태에서 양쪽을 밀봉한 구조이다. [그림 1, 2]에서 보는 바와 같이 자동온도조절장치가 설치된 시즈히터는 온도조절기, 자동온도조절장치(벨로우즈식 서모스탯), 발열부, 금속보호관으로 구성되어 있다.



[그림 1] 시즈히터(1.5 kW, 안전장치 설치)의 구조



[그림 2] 단자 접속부의 구조

나. 발화 메커니즘

시즈히터는 안전장치가 있는 제품과 안전장치가 없는 제품으로 구분할 수 있다. 시즈히터에 설치된 안전장치인 자동온도조절장치에 고장이 발생하는 경우에는 자동온도조절장치가 설치되지 않는 제품과 동일하게 작동하며, 이러한 고장이 발생하는 원인으로서는 벨로우즈식 서모스탯의 감열액 누출, 세관의 막힘, 점접에 이물질 침입 등이 있을 수 있다. 시즈히터 발열부의 표면온도는 제품에 따라 차이가 있지만 1.5kW~5kW인 경우 530℃~850℃ 정도이다. [도표]에서 보는 바와 같이 일반적인 시즈히터에 의한 화재 발생 과정은 피가열물(액체 등)을 데우기 위해 시즈히터를 작동시킨 상태에서 피가열물이 증발한 후 발열부와 가연물(가연성 용기 등)이 접촉하고, 가연물이 착화되어 화재로 진행되는 것이다.



[도표] 시즈히터에 의한 화재발생 과정

3. 실험 및 결과

가. 실험 1

(1) 실험방법

본 실험에서는 20±2℃의 실내에서 용량 1.5kW, 3kW, 5kW 시즈히터를 사용하여 안전장치가 있는 제품과 안전장치가 없는 제품으로 구분하여 실험을 실시하였으며, <표 1>과 같이 피가열물이 없는 대기 중에서

시즈히터의 온도조절기를 최고온도인 120℃로 설정한 후 발열부 중심, 금속보호관의 2개소, 감열부 하단의 온도를 측정하였다.

〈표 1〉 시즈히터의 종류별 온도측정위치

시즈히터	구분	용량	온도 측정위치			
			발열부	하부 9cm	하부 20cm	감열부
안전장치 설치	A	1.5kW	○	○	○	○
	B	3kW	○	○	○	○
	C	5kW	○	○	○	○
안전장치 미설치	D	1.5kW	○	○	○	-
	E	3kW	○	○	○	-
	F	5kW	○	○	○	-

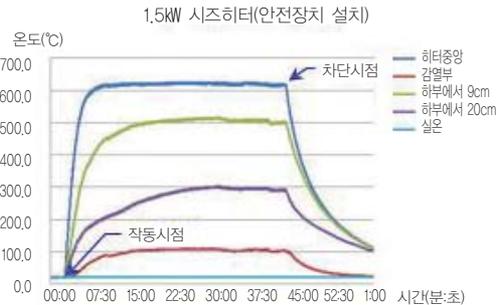
(2) 실험결과

(가) 실험1-A (안전장치 설치된 1.5kW 시즈히터)

발열부는 작동 후 약 6분 만에 최고온도인 약 610℃에 도달하였으며, 발열부에서 금속보호관 용융 등의 과열현상은 보이지 않았다. 또한 자동온도조절장치는 작동하지 않았는데, 이는 발열부에서 방출되어 감열부로 전달되는 복사에너지의 양이 적었기 때문으로 해석된다.



[그림 3] 1.5kW 시즈히터 작동상황



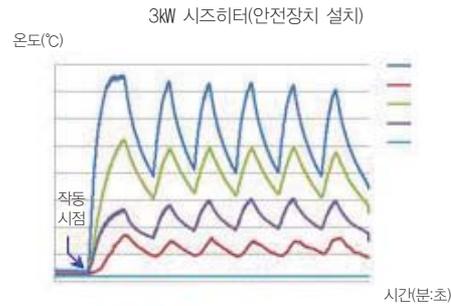
[그림 4] 1.5kW 시즈히터 시간-온도 그래프

(나) 실험1-B (안전장치 설치된 3kW 시즈히터)

발열부는 작동 후 약 5분 20초 만에 최고온도인 약 750℃에 도달하였으며, 이때 감열부 표면의 온도는 약 160℃로 측정되었다. 이후 온도조절장치가 작동하여 발열부의 온도는 약 750℃~720℃와 약 400℃에서 반복적으로 상승 및 하강하는 것으로 나타났다. 또한 온도조절기를 120℃로 설정하였으나, 실제 자동온도조절장치는 감열부 표면이 약 140℃~160℃에서 작동하는 것으로 나타났다.



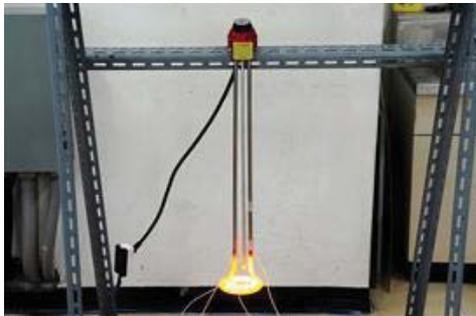
[그림 5] 3kW 시즈히터 작동상황



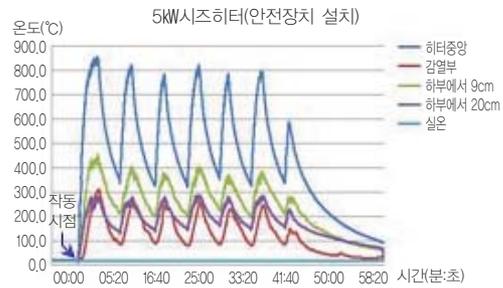
[그림 6] 3kW 시즈히터 시간-온도 그래프

(다) 실험1-C (안전장치 설치된 5kW 시즈히터)

발열부는 작동 후 약 3분 30초 만에 최고온도인 약 850°C에 도달하였으며, 이때 감열부 표면의 온도는 약 300°C로 측정되었다. 이후 온도조절장치가 작동하여 발열부의 온도는 약 800°C와 약 320°C에서 반복적으로 상승 및 하강하는 것으로 나타났다.



[그림 7] 5kW 시즈히터 작동상황



[그림 8] 5kW 시즈히터 시간-온도 그래프

(라) 실험1-D (안전장치 없는 1.5kW 시즈히터)

본 실험에서 사용한 시즈히터는 자동온도조절장치가 없기 때문에 전원을 투입한 순간 최고온도로 설정된다. 발열부는 작동 후 약 5분 30초 만에 최고온도인 약 530°C에 도달하였으며, 전원을 차단할 때까지 최고온도 부근의 온도를 유지하는 것으로 나타났다.



[그림 9] 1.5kW 시즈히터 작동상황



[그림 10] 1.5kW 시즈히터 시간-온도 그래프

(마) 실험1-E (안전장치 없는 3kW 시즈히터)

발열부는 전원을 투입한 후 약 4분 만에 최고온도인 약 720°C에 도달하였다. 약 50분 경과 후 백색 빛을 내면서 산화마그네슘이 연소되기 시작했고, 곧 금속보호관의 수 개소에서 용융되는 것이 관찰되었으며, 용융부의 온도는 최고 약 950°C까지 상승하는 것으로 나타났다.



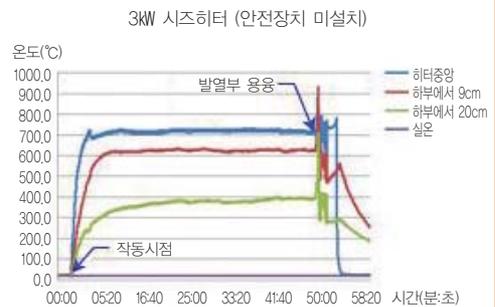
[그림 11] 3kW 시즈히터 작동상황



[그림 12] 발열부 금속보호관의 용융흔



[그림 13] 발열부 금속보호관의 X-ray 사진



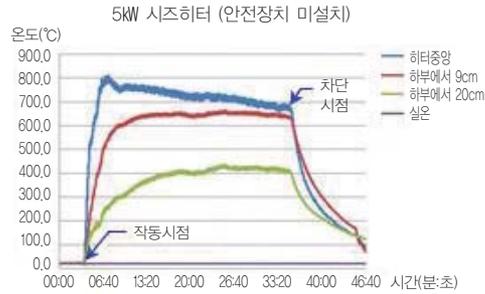
[그림 14] 3kW 시즈히터 시간-온도 그래프

(바) 실험1-F (안전장치 없는 5kW 시즈히터)

발열부는 전원을 투입한 후 약 3분 10초 만에 최고온도인 약 800℃에 도달하였으며, 이후 발열부 표면 온도가 서서히 낮아지는 것으로 나타났다.



[그림 15] 5kW 시즈히터 작동상황



[그림 16] 5kW 시즈히터 시간-온도 그래프

나. 실험 2

(1) 실험방법

본 실험에서는 <표 2>와 같이 안전장치인 자동온도조절장치를 벨로우즈식 서모스탯으로 사용하는 시즈히터 3kW, 5kW 각각 1개와 안전장치가 없는 3kW 시즈히터 1개를 사용하였다. 각각의 실험에서 시즈히터를 가연성용기(고무대야)에 피가열물(물)을 발열부까지 채우고, 시즈히터를 최고온도(120℃)로 설정한 후 가연성용기가 착화되는 과정을 관찰하였다.

<표 2> 시즈히터의 종류별 온도측정위치

시즈히터	구분	용량	온도 측정위치			
			발열부	하부 9cm	하부 20cm	감열부
안전장치 설치	A	3kW	○	○	○	○
	B	5kW	○	○	○	○
안전장치 미설치	C	3kW	○	○	○	-

(2) 실험결과

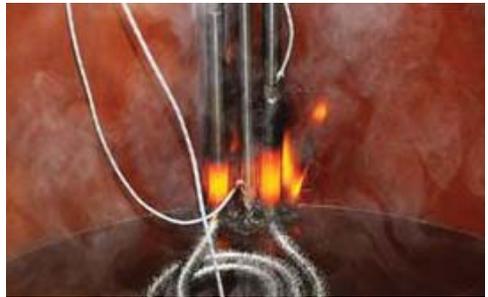
(가) 실험2-A(안전장치 설치된 3kW 시즈히터)

시즈히터는 접촉단자부와의 접촉에 의해 가연성용기를 착화시키고, 착화되어 발생한 화염에 의해 온도조절장치가 작동하여 전원이 차단되었으며, 공기 및 수증기에 의해 냉각되면서 다시 전원이 인

가되는 현상이 반복되었다. 이 과정이 7차례 반복된 후 가연성용기가 착화되었고, 가연성용기를 따라 화염이 확대되었다.



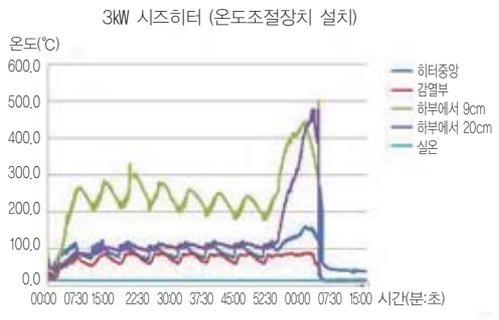
[그림 17] 3kW 시즈히터(안전장치 설치)에 의한 가연성용기 착화 실험



[그림 18] 3kW 시즈히터(안전장치 설치)에 의한 가연성용기 착화 실험



[그림 19] 3kW 시즈히터(안전장치 설치)의 전원코드에 발생된 단락흔



[그림 20] 3kW 시즈히터(안전장치 설치) 시간-온도 그래프

(나) 실험2-B (안전장치 설치된 5kW 시즈히터)

시즈히터를 작동한지 약 2분 5초 만에 가연성용기가 착화되었다. 이는 자동온도조절장치의 말단부가 수면 아래에 위치하여 물에 의해 냉각되었으며, 그로 인해 자동온도조절장치가 작동되지 않아 초기에 시즈히터의 전원을 차단시키지 못한 것으로 보인다.



[그림 21] 5kW 시즈히터(안전장치 설치)에 의한 가연성용기 착화 실험



[그림 22] 5kW 시즈히터(안전장치 설치)에 의한 가연성용기 착화 실험



[그림 23] 5kW 시즈히터(안전장치 설치)의 연소흔



[그림 24] 5kW 시즈히터(안전장치 설치) 시간-온도 그래프

(다) 실험2-C(안전장치 없는 3kW 시즈히터)

본 실험은 시즈히터의 발열부가 가연성용기 내부 바닥부분에 놓인 상태에서 피가열물인 물이 증발된 후 가연성용기를 착화시키는 것을 시나리오로 하였다. 물의 양이 극히 적거나 대부분 증발한 상태에서는 수 분 내에 가연성용기가 착화되는 것으로 나타났다.



[그림 25] 3kW 시즈히터(안전장치 미설치)에 의한 가연성용기 착화 실험



[그림 26] 3kW 시즈히터(안전장치 미설치)에 의한 가연성용기 착화 실험



[그림 27] 3kW 시즈히터(안전장치 설치)의 연소흔



[그림 28] 3kW 시즈히터(안전장치 설치) 시간-온도 그래프

4. 맺음말

본 연구를 통해 피가열물이 없는 상태에서 나타나는 시즈히터 발열부의 현상 및 화재재현실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 가. 시즈히터에 설치된 벨로우즈식 서모스탯을 사용하는 자동온도조절장치는 사용 시 설정온도보다 감열부 표면이 높은 온도에서 작동하는 것으로 나타났다. 이는 기계적 구조인 접점부에 오차가 발생할 수 있음을 의미하며, 그로 인해 실제 설정온도보다 피가열물이 높은 상태로 유지될 수도 있다.
- 나. 시즈히터가 설치된 화재현장의 발화원인 규명 시 시즈히터 발열부에 나타난 과열흔적만으로 발화원인으로 판단해서는 안되며, 시즈히터 발열부에 남아있는 가연물(가연성 용기 등)의 용착형태, 시즈히터 전원코드에 생성된 단락흔의 상황, 시즈히터 전원측 전선과 연결된 차단기의 상황 등을 종합하여 판단하여야 한다.

다. 시즈히터의 발열부에 나타나는 스테인리스 소재 금속보호관의 용융흔은 전열선의 자체 열량에 의해 발생된 흔적이 아닌 산화마그네슘의 연소로 인해 생성된 흔적이며, 시즈히터가 피가열물이 없는 상태에서 지속적으로 발열되었음을 의미하는 것이다. 동 용융흔은 화재현장조사 과정에서 시즈히터를 발화원으로 추정할 수 있는 근거로 활용할 수 있다.

라. 시즈히터는 안전인증을 받지 못한 전기제품으로서 사용을 자제하는 것이 바람직하며, 부득이하게 사용하는 경우에는 피가열물(액체)이 증발하여도 발열부와 가연물(가연성 용기 등)이 접촉하지 않도록 별도의 장치가 필요하다. ☞

