

할로겐 조명기구의 화재위험성



글 윤성렬 KFFA 화재조사센터 대리

1. 머리말

조명은 각종 광원을 이용하여 목적에 맞게 특정한 장소를 밝게 하는 행위나 기능을 말한다. 조명은 빛을 인간생활에 유용하게 사용하는 기술로서 자연광에 의한 조명인 주광조명과 전등 등 인위적인 광원에 의한 조명인 인공조명으로 나눌 수 있다.

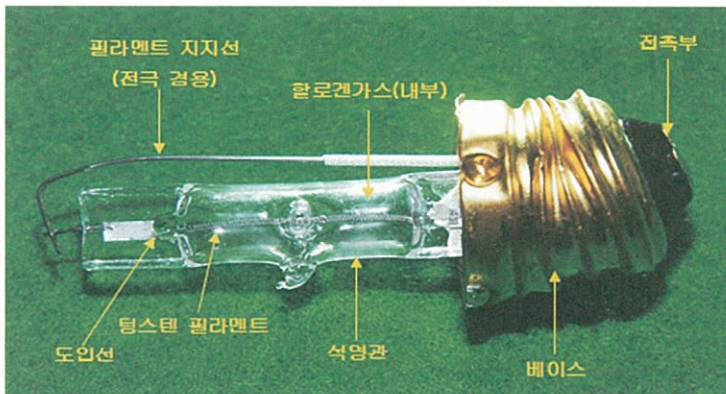
초기 인류에서는 인공광원으로서 물체가 연소할 때 발생하는 빛을 조명으로 이용하였으며, 연소물질로 나무, 식물유, 동물유, 광물유 등을 사용하였다. 인공조명에 있어서 획기적인 변화는 백열전구의 발명에서 시작되었다. 1879년 미국의 에디슨에 의해 발명된 백열전구는 위생적이며, 밝은 인공광원의 기초를 구축하는데 큰 역할을 하였다.

할로겐전구는 필라멘트의 저항을 높여 광효율을 높이고, 할로겐원소의 재생 순환 반응으로 필라멘트의 수명을 늘려 백열전구의 단점을 보완한 전구다. 본고에서는 할로겐 조명기구의 원리 및 화재위험성에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 할로겐전구의 구조 및 원리

가. 할로겐전구의 구조

할로겐전구는 석영관 내에 텅스텐 필라멘트가 전극에 연결되어 있고, 불활성가스(Ar, Kr) 및 할로젠가스(I+Br+Cl)가 주입되어 있으며, 석영관 내벽에는 적외선 반사 코팅이 되어있는 구조이다. 할로겐조명기구는 용도, 소비전력에 따라 여러 가지 형태가 있으나, 일반적인 구조는 [그림 1]과 같다.

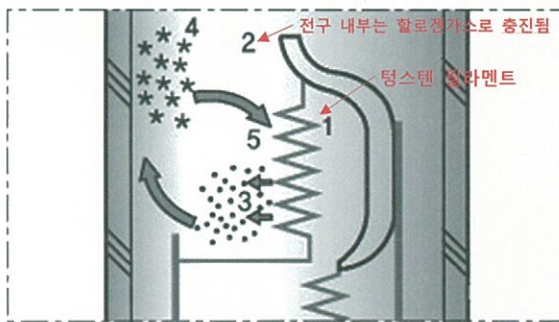


[그림 1] 할로겐전구(실험대상)의 구조

나. 할로겐전구의 원리

할로겐전구는 석영관에 할로젠 화합물을 봉입하고 할로젠과 텅스텐의 재생 순환 반응(Halogen Cycle)을 이용하여 필라멘트의 수명을 길게 하고 빛의 감쇠를 방지한 전구이다.

보통 전구는 불을 켜면 텅스텐이 증발하여 유리 내벽에 검게 달라붙지만, 할로겐전구에서는 증발한 텅스텐이 할로젠 원소와 화합한 뒤 고온에서 해리되어 필라멘트에 다시 붙는 반응을 되풀이 한다. 할로겐전구의 재생 순환 반응은 다음과 같다.



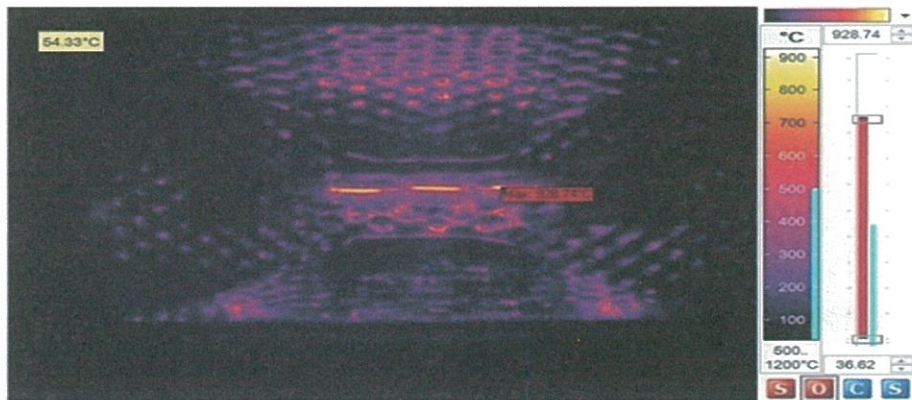
[그림 2] 할로겐전구의 재생 순환 반응(이미지 출처: 네이버캐스트)

①필라멘트에 전원이 인가되어 가열되면 필라멘트에서 텅스텐 원자가 증발([그림 2]의 3) ⇨ ②텅스텐 원자는 전구 내의 온도(약 600~1,400℃)에서 할로젠 물질과 화학적으로 결합하여 안정([그림 2]의 4) ⇨ ③할로겐화된 텅스텐 기체는 전구 내부에서 열운동에 의해 더 온도가 높은 필라멘트부분으로 이동하며, 필라멘트 직근에서 텅스텐과 할로겐으로 분리되어 텅스텐 원자는 다시 필라멘트에 흡착([그림 2]의 5)

3. 할로겐 조명기구의 화재위험

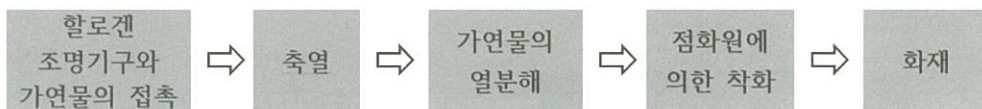
가. 발화위험

할로겐전구는 필라멘트의 저항을 높여 광효율을 높였으며, 할로겐원소의 재생 순환 반응으로 필라멘트의 수명을 늘려 백열전구의 단점을 보완하였다. 할로겐전구는 일정 온도 이상에서 광효율이 좋아지기 때문에 백열전구에 비해 필라멘트의 가열온도가 높으며, 전구 내부에 봉입된 할로겐의 가스압력이 높은 특징이 있다. 이러한 이유 때문에 백열전구에 비해 발열량이 많아 화재위험성이 더 크다고 할 수 있다. [그림 3]은 정격전압에서 10W 할로겐전구의 필라멘트온도를 열화상카메라로 측정한 것이다. 할로겐전구의 필라멘트 온도가 약 928℃까지 상승한 것을 보여주고 있다.



[그림 3] 10W 할로겐전구의 필라멘트 최대온도(이미지출처: 앤서테크)

나. 발화 메커니즘



[그림 4] 할로겐 조명기구의 가연물 접촉에 의한 화재발생 과정

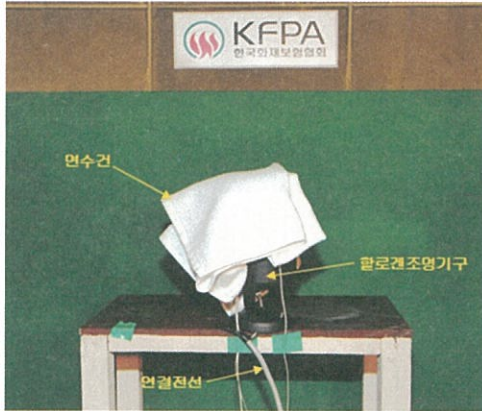
4. 실험

가. 면수건 접촉·축열 실험

(가) 실험방법

본 실험에서는 의류 등의 가연물이 전원이 인가된 할로겐 조명기구의 표면을 덮고, 가연물과 할로겐 조명기구 사이에 축열이 발생하여 가연물이 착화되는 상황을 가정하였다.

가연물로는 면수건을 사용하였으며, 할로겐 조명기구의 앞면유리 부분에 먼지가 쌓인 상황을 인위적으로 재현하였다. 온도측정은 앞면유리 표면중심부(A부분), 앞면유리 표면중심부에서 상부방향으로 4cm 떨어진 위치(B부분), 철제원통의 옆면 상부에서 1cm 떨어진 위치(C부분)의 온도를 측정하였다.



[그림 5] 면수건 접촉·축열 실험



[그림 6] 연기가 발생하기 시작하는 상황



[그림 7] 가연물(면수건)이 열분해되는 상황



[그림 8] 가연물(면수건)이 착화되는 상황

(나) 실험결과

할로겐 조명기구에 전원을 인가한 후 앞면유리 표면중심부(A부분)의 온도가 빠르게 상승하였으며, 착화되기 직전 최대 601℃까지 상승하였다. A부분에서 상부방향으로 4cm 떨어진 위치(B부분)의 온도는 최대 589℃, 철제원통의 옆면 상부에서 1cm 떨어진 위치(C부분)의 온도는 최대 270℃까지 상승하였다. 실험시작 후 7분 30초경부터 분해가스가 발생하기 시작하였으며, 15분 44초경에 면수건에 착화되었다.

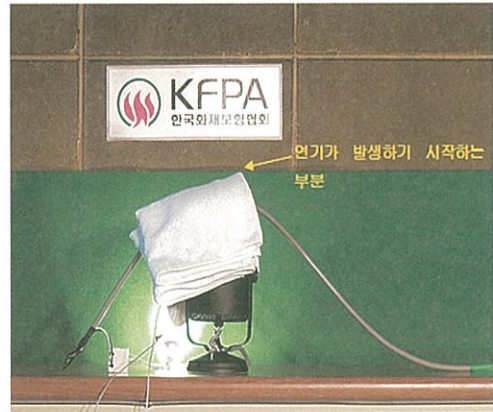
나. 전선 접촉·축열 실험

(가) 실험방법

‘전선 접촉·축열 실험’에서는 가연물이 전선을 덮어 축열되는 상황을 가정하였다. 이는 전류가 흐르는 전선의 절연파괴를 유도하여 아크가 발생하고, 이것이 점화원으로서 분해가스에 착화되는 상황을 고려하였다. 온도측정은 앞면유리 표면중심부(A부분) 및 앞면유리 표면중심부에서 상부방향으로 4cm 떨어진 위치(B부분)의 온도를 측정하였으며, 무풍상태로 실험하였다.



[그림 9] 전선 접촉·축열 실험



[그림 10] 면수건 안쪽에서 연기가 발생함



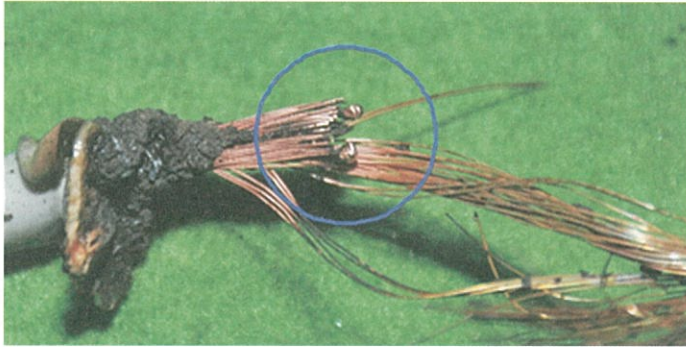
[그림 11] 아크발생 직전의 상황



[그림 12] 전선의 절연파괴로 아크가 발생하며 착화되는 상황

(나) 실험결과

실험시작 3분 03초경(A부분의 온도: 약 315 ℃)에 할로겐조명기구와 면수건 사이부분에서 연기가 발생하기 시작하였으며, 연기량이 지속적으로 증가하다가 12분 31초경 할로겐조명기구와 면수건 사이의 축열 부분에 위치한 전선에서 절연이 파괴되며 아크(Arc)가 발생하였다. 아크 발생 후 분해가스에 바로 착화가



[그림 13] 연소된 후, 전선에서 아크 흔적(○표지부분)이 보이는 상태

되었으며, 면수건으로 연소가 확대되었다.

실험시작부터 착화까지 걸리는 시간이 12분 31초로서, '면수건 접촉·축열' 실험의 15분 44초보다 3분 13초 가량 빠르게 착화되었다. 이는 면수건의 발화온도보다 절연피복이 파괴되는 온도가 더 낮기 때문이다.

6. 맺음말

할로겐 조명기구의 화재위험성 조사를 통해 할로겐 조명기구의 발열특성을 분석하였다. 사용상 발생할 수 있는 축열상황을 가정하여 부위별 온도특성을 분석하고, 아크발생 현상과 가연물의 착화 및 연소특성을 확인하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 할로겐 조명기구는 전원을 인가시키면, 텅스텐 필라멘트부분의 온도가 가장 높으며, 제품의 외부에서는 열복사 및 반사경에 의해 빛이 비추는 방향의 구조체온도가 다른 부분에 비해 가장 높다.

둘째, 할로겐 조명기구의 발열부위에 의류 등의 가연물이 놓여진다면, 축열과정을 통해 착화될 가능성이 높다. 정상작동 시 앞면유리의 온도가 242℃까지 상승했는데, 의류 등의 가연물에 의해 축열이 되면 최대 601℃까지 축열이 진행되었다. 이는 산소공급 등 조건이 충족되는 상황에서 충분히 가연물에 착화될 수 있다는 것을 보여준다.

셋째, 할로겐 조명기구의 발열부위에 전류가 흐르는 전선 등 배선기구가 놓여진다면, 절연파괴가 발생할 수 있다. 단락으로 인한 아크는 높은 에너지의 점화원으로 작용하여 가연물의 분해가스에 착화될 수 있으며, 가연물만 접촉하였을 때보다 착화까지 소요되는 시간이 짧다. ☹