

220V/100W 백열전구의 온도특성에 따른 화재분석에 관한 연구 A Study on Fire Analysis According to Temperature Characteristics of an Incandescent Electric Lamp at 220V/100W

송길목[†] · 한운기 · 김영석 · 최충석

Kil-Mok Shong[†] · Woon-Ki Han · Young-Seok Kim · Chung-Seog Choi

한국전기안전공사 전기안전연구원
(2006. 1. 17. 접수/2006. 3. 10. 채택)

요 약

본 논문은 조명설비 중 220V/100W 백열전구의 온도특성과 화재분석에 관하여 연구하였다. 백열전구의 발열에 의한 발화가능성을 실험한 결과 정상상태에서는 최고 161.9°C로 측정되었다. 밀폐된 공간에서 축열이 되면 약 538.1°C까지 상승하는 것으로 나타났다. 유리구를 파손하였을 경우 필라멘트는 공기 중에서 용단되었다. 외부 열에 의한 경우 전구 내부의 가스가 약한 부분으로 분출되었다. 따라서 백열전구는 산소의 공급이 원활하면서 폐쇄된 공간에서 화재의 가능성이 높으며, 가연성 물질 등이 주변에 있다면 화재 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. 백열전구의 외형변화, 재료특성의 변화 등을 통해 화재원인을 규명하는 중요한 자료로 이용될 것이 기대된다.

ABSTRACT

In this paper, we are studied on the temperature characteristics and fire progress of an incandescent electric lamp at 220V/100W. In the case of stationary state, the ignition possibility of the incandescent electric lamp due to the heat generation was low because the temperature was measured at 161.9°C. the temperature was increased at 538.1°C in the airtight chamber, but it does not generated the fire because the oxygen was not exist in the airtight chamber. When the lamp is broken, the filament of lamp was melted in the air. The gas of lamp interior sputtered to the weakest part by external flame. Thus, the incandescent electric lamp is high possibility of fire when oxygens from airtight space. Also, it is known that the possibility of ignition is very high if combustion materials(sawdust) exists on surrounding. These experimental results will be utilized for the data in the investigation electrical fire cause.

Keywords : Incandescent electric lamp, Filament, Sawdust, Electrical fire

1. 서 론

전기에너지는 저장, 이동이 가능한 요소를 가지고 있어서 산업발달을 주도적으로 이끄는 에너지의 역할을 수행해 왔다. 최근 도시화 등에 의한 공해물질, 분진, 환경오염 등으로 환경의 중요성이 높아지고 있어서 이에 따른 청정에너지로서의 전기는 향후 다양한 변화를 거듭하며 발전될 것으로 기대된다. 다양한 에너지로서의 변화가 가능한 전기에너지는 왕복 또는 회전 운동을 하는 운동에너지의 변환이 가능하고, 줄열에 의한

열에너지로서의 이용도 가능하다. 전자 및 산업정보기술(IT)이 발달함에 있어서 전기에너지의 이용이 더욱 중요하게 이용되는 게 현실이다. 이러한 전기에너지는 설치 및 관리기준에 준해 사용이 되면, 재해의 문제가 없으나 전기설비 또는 제품의 원초적 결함이나 관리소홀 등에 의해 매년 인적 물적 피해를 발생시키고 있다.

전기재해는 크게 감전사고, 설비사고, 전기화재로 나누어 볼 수 있다. 감전사고의 경우 충전부에 닿거나 누설전류에 의한 경우, 접촉되지는 않았으나 정전유도에 의한 경우 등 다양하다. 설비사고의 경우 전기설비별로 그 특성에 따라 달라지며, 변압기의 경우 절연유의

[†]E-mail: natasder@kesco.or.kr

열화에 의한 절연성능저하로 층간단락에 이르는 경우 정전으로 진전된다든지 전기화재로 이어진다. 전선의 경우 단락, 과부하에 의한 과전류가 흘러 줄열이 발생하는 경우 화재로 이어진다. 전기화재는 설비의 성능 저하나 부주의, 제작 불량 등에 의해 전기에너지가 열 에너지로 변환되면서 인접가연물에 전이되어 화재로 이어진다.

국내 전기화재의 발생건수는 2004년도 행정자치부 통계자료에 의하면, 8,560건으로 집계되어 1일 평균 23.5건에 이르고 있다. 전기화재 중 조명기구에 의한 화재는 1,181건으로 전기화재의 13.8%를 점유하고 있다. 따라서 전기화재의 메커니즘 해석과 다양한 분석 기법을 이용한 원인규명으로 예방대책을 수립하는 것은 매우 중요하다.¹⁾

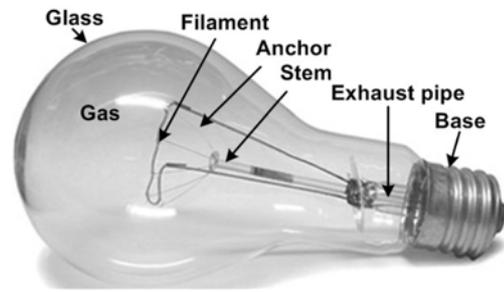
본 연구는 조명설비로서 가장 많이 사용되고 있는 백열전구의 화재 가능성에 대해 분석한 것이다. 백열전구의 일반적인 상태에서 발생하는 발열특성과 주변 환경 영향 등에 의해 나타날 수 있는 다양한 영향 등을 실험을 통해 검증하였다. 분석방법으로는 실험에서의 온도 측정은 물론, 시차열 및 열중 분석에 의해 흡열반응과 발열반응에 대한 평가, 열중량 변화에 대한 분석을 실시하였다. 본 실험을 통해 화재사고시 백열전구에 나타나는 외형적 변화와 물리적 변화를 분석하여 원인 규명에 중요한 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.^{2,3)}

2. 백열전구의 특성

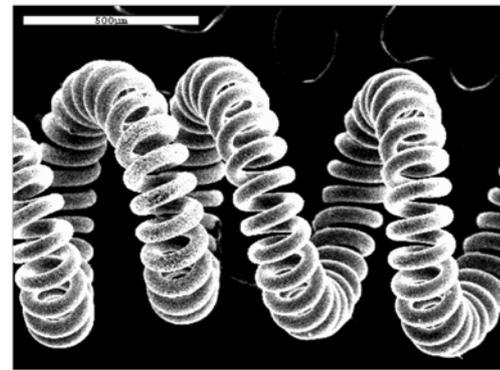
백열전구는 장시간 사용되는 곳보다 임시로 사용하거나 이동이 가능하도록 제작되어 많은 장소에서 이용되고 있다. 필라멘트(filament)에 전기를 통전하여 고온으로 열을 발생(온도 방사)시켜 빛을 발생시키는 것이 가장 큰 특징인 광원이다. 일반적으로 알려져 있는 백열전구의 경우 일정전압에서 사용할 때의 필라멘트의 온도가 2,000°C에서 2,500°C까지이다. 또한, 60W 이상의 백열전구의 경우 통상 신문에 말아 백열전구를 켜면 약 10시간이 지나 발화가능성이 높은 것으로 보고되고 있다. 이는 40W의 백열전구의 경우 70°C에서 90°C의 표면온도가 발생하고, 60W에서 100W의 경우 80°C에서 110°C까지의 온도가 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 100W 이상인 경우에는 약 100°C에서 130°C까지의 표면온도분포가 있는 것으로 나와 있다.^{4,5)}

Fig. 1은 백열전구의 실물을 보여주는 것으로 유리구에서 베이스까지의 전체를 볼 수 있다.

가장 핵심이 되는 것은 필라멘트로서 열이 발열되



(a) 각 부의 명칭



(b) 필라멘트의 이중코일구조

Fig. 1. 백열전구의 형태와 구조.

어 빛을 발산하는 것으로 점등온도가 높을수록 반사되는 가시광의 비율이 높아지므로, 전구효율이 향상된다. 그러므로 용점이 높고 고온에서 될 수 있는 한 증발되지 않아야 하므로 고온에 강한 텅스텐을 많이 이용하고 있다.

전구 내부에는 가스가 봉입되어 있는데 가스의 종류로는 질소와 아르곤(Ar)이 15:85 정도의 비율로 섞여 있다. 봉입 가스는 필라멘트가 고온의 백열 상태이므로 산화되어 증발되는 것을 억제하는 역할을 한다.

유리구는 필라멘트로부터 방사되는 빛을 투과시키는 역할을 한다. 약 680°C에서 920°C에 이르는 온도에 견뎌야하므로 소다석회유리 또는 붕규산 유리가 쓰인다. 필라멘트의 고휘도로 인한 눈부심을 부드럽게 하기 위해 실리카 등으로 백색코팅을 하는 것도 있다. 베이스는 전구를 소켓에 접속하기 위하여 유리구에 부착시킨 부분으로 재료는 황동이나 알루미늄을 사용한다.

절연 유리는 베이스 밑 부분에 절연역할을 담당하기 위해 설치된 것이다. 스템의 재료는 납유리이고, 도입선 및 배기관을 지지 및 보호하는 역할을 담당한다. 배기관은 전구를 만드는 과정에서 가스가 주입되는 곳이

다. 도입선은 베이스로부터 필라멘트까지 전류를 운반하는 역할을 담당하고 있으며, 철-니켈 합금에 동을 피복한 듀우릿선을 사용한다. 앵커는 몰리브덴(Mo; molybdenum)이라는 금속으로 되어 있어서 필라멘트를 지지하는 역할을 담당한다.

백열전구의 특징이자 단점으로는 발광체의 열에 의해 화재 또는 화상의 위험을 가지고 있으며, 외부의 충격에 약해 쉽게 파손된다는 것이다. 따라서 국내의 전기화재에 있어서 조명기구 화재가 2004년도에 1,181건이 발생하여 많은 인적 물적 피해를 주었다는 것이다. 최근 형광등과 같은 저열의 고효율 조명기구가 많이 사용되고 있으나 산업현장, 임시 시설장소 등에서는 간편하게 시설이 가능한 백열전구의 사용이 이루어지고 있다. 특히 분진(dust) 발생지역에서 이용되는 경우 화재의 위험성은 높다 하겠다.

3. 실험방법 및 구성

실험대상물로는 국내에서 생산된 백열전구 중 220V의 전압에서 사용되며, 소비전력 100W에 이르는 것을 선택하였다. 분진으로 이용된 것은 톱밥(sawdust)으로서 이론상 350°C에서 450°C의 열에서 발화하는 것으로 되어 있다.

주변온도 및 습도는 백열전구의 발열 영향을 최소화하기 위해 상대습도 50%, 온도 5°C에서 10°C의 범위를 유지하였다.

Fig. 2는 백열전구에 대한 온도특성과 화재위험성에 대해 객관적 자료를 얻기 위한 실험과정을 나타내었다.

백열전구 표면 및 소켓에 대한 온도를 측정하고, 톱밥의 발화점은 열분석기(thermal analyser)를 이용하여

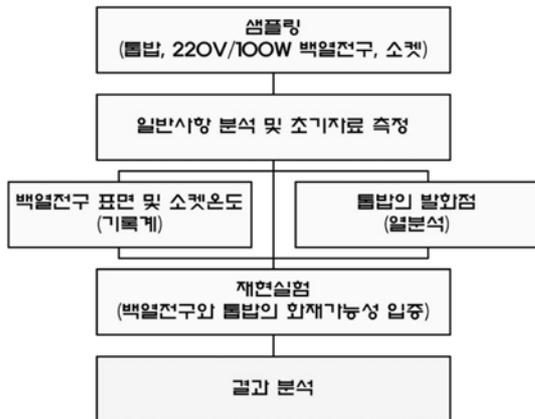


Fig. 2. 실험과정의 개략도.

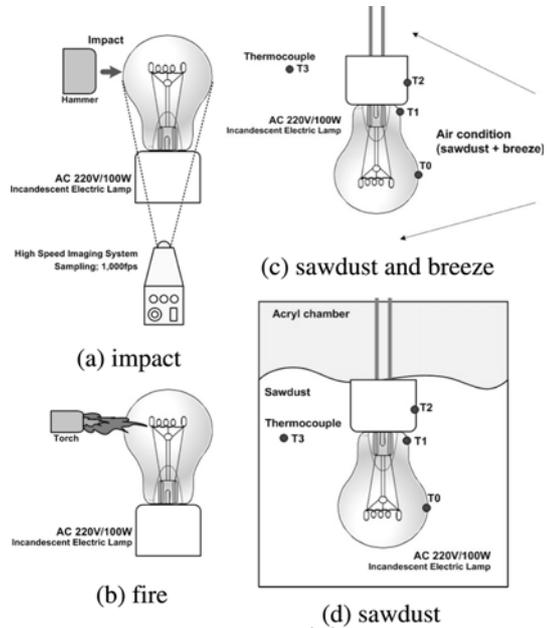


Fig. 3. 실험구성의 개략도.

측정하였다. 분석 및 실험을 통해 자료를 구축하고 각각의 분석결과를 종합하여 판단하였다.

Fig. 3은 사고재현(incident reconstruction)을 위한 실험 구성을 개략화하여 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 해머 등에 의해 백열전구가 사용 도중 소손되었을 때 발열 부분인 필라멘트의 영향에 대해 모의한 것이다. 고속 카메라에 의해 시차적으로 촬영되었으며, 초당 1,000장의 이미지를 추출하였다. Fig. 3(b)는 외부 열에 의해 백열전구가 미치게 되는 영향과 외형 상태를 확인하기 위해 실험하였다. 백열전구의 특정부위에 토오치로 가열하여 이때의 백열전구가 변형된 형태를 촬영하였다. Fig. 3(c)는 가장 일반적인 형태로서 백열전구에 일정한 방향으로 톱밥을 날려서 이때의 백열전구의 온도 및 상태변화를 모니터링 하였다. 온도의 측정은 열발산이 가장 클 것으로 예상되는 T₀, T₁, T₂, T₃의 지점에 열전대(thermocouple K type)을 부착하여 측정하였다. 온도가 안정된 상태를 지속시키기 위하여 톱밥이 날렸을 때의 상태와 미풍이 없을 때의 자연 열발산에 의한 온도를 측정하였다.

Fig. 3(d)는 관형 아크릴 실험조에 톱밥을 넣어 그 안에 백열전구를 사용했을 경우를 모의한 것이다. 이는 가장 축열이 잘 되도록 한 것으로 백열전구에서 온도가 가장 높을 때를 측정하기 위한 것으로 산소의 공급을 일부 차단한 상태에서 실험하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 물리적 파괴에 의한 영향

Fig. 4는 해머를 이용하여 백열전구를 파손시켰을 때 필라멘트의 발열상태를 고속카메라에 의해 촬영한 것이다.

그림에서 보이는 것과 같이 15ms에서 외부의 파손된 백열전구 내부로 공기 중의 산소가 유입해 들어가 필라멘트에 영향을 주면서 발광하는 상태를 나타낸 것이다. 이후 필라멘트가 용단되었으며, 전원공급이 중단되었다.

4.2 외부 열에 의한 백열전구 소손특성

백열전구가 외부화염에 의해 가열되었을 경우 Fig. 5에서와 같이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

토오치에 의한 열로 인해 가열된 부분은 내부에서 외부로 유리구가 돌출한 것을 확인할 수 있으며, 이는 가열시 내부의 가스가 열에 의해 팽창되다가 가장 약한 부분으로 가스가 분출되어 굳어진 형태로 판단된다. 이는 대부분 화재현장에서 화염이 진행되어 백열전구에 열을 미치는 방향으로 가스가 분출된 형태가 발견되므로 이를 통한 화염 진행방향을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 5. 열에 의한 백열전구의 외형변화.

4.3 백열전구 표면의 온도특성

Fig. 6은 백열전구 및 소켓에 열전대를 부착한 형태를 나타낸 것이다.

약 20분간 측정하여 Fig. 8과 같은 온도를 확인하였다. 약 5분 정도가 지난 후에는 축열과 방열이 같아져 일정한 온도상태를 보였으며, T1 부분의 온도가 161.90°C

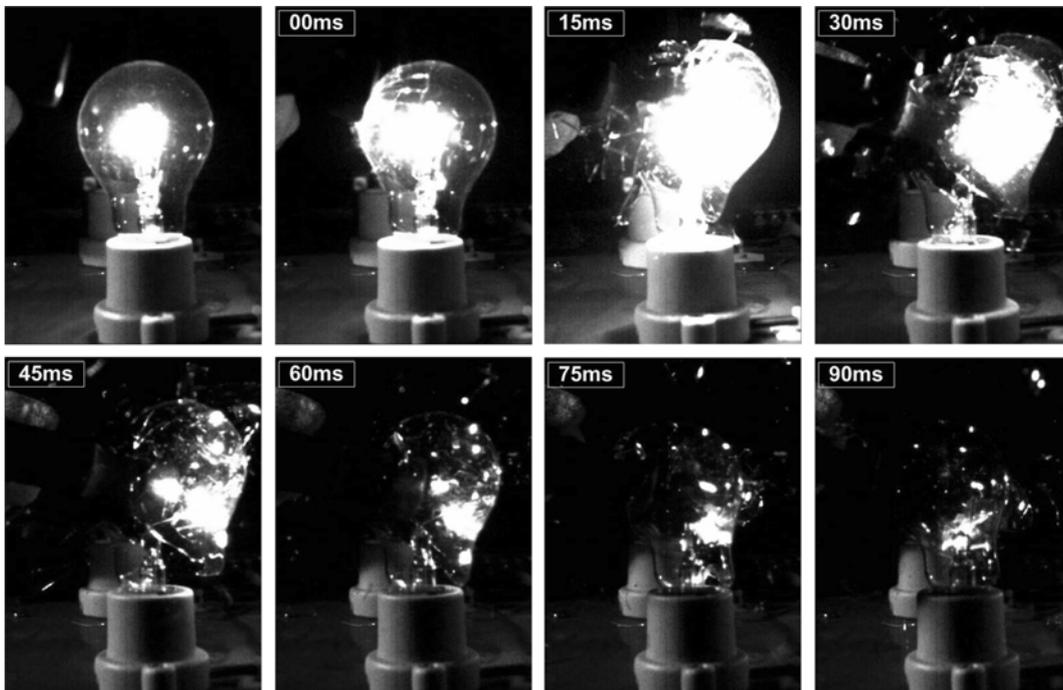


Fig. 4. 해머를 이용한 백열전구의 파손변화(HSIS 500fps).

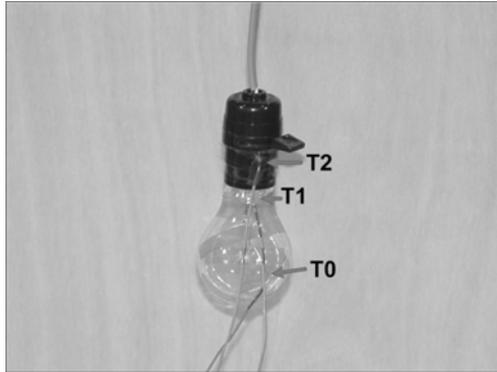


Fig. 6. 열전대를 부착한 상태.



Fig. 8. 백열전구 및 소켓에 부착된 톱밥.

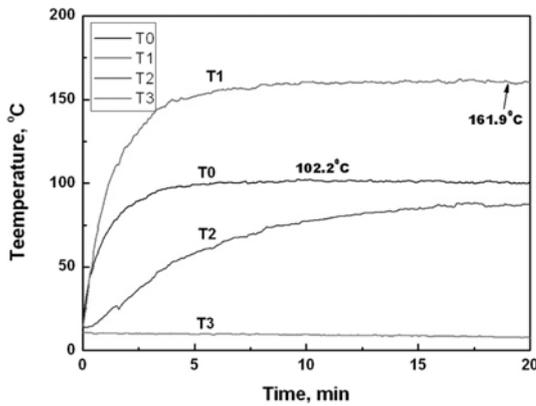


Fig. 7. 백열전구 및 소켓의 시간에 따른 온도곡선.

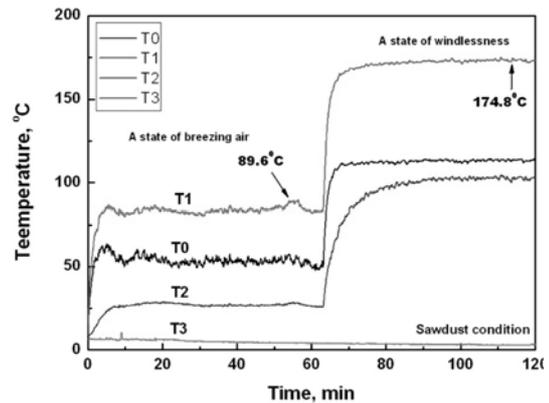


Fig. 9. 톱밥 부유에 의한 발열특성 곡선.

로 가장 높은 것을 알 수 있었다. 그리고 T3의 온도는 주변의 환경온도이다.

4.4 톱밥 분진에서의 온도특성

백열전구에 톱밥(sawdust)을 날리면서 화재가 발생할 수 있는지의 여부를 측정하였다. 이때의 조건으로는 1시간 동안 미풍으로 톱밥을 일정하게 부유시켰으며, 이후 1시간 동안 미풍(breezing air)을 정지시켜 온도변화를 측정하였다. 습도는 상대습도 약 50%를 유지하였다.

열전대의 위치는 Fig. 6에서와 같은 위치에 부착하여 온도기록 장치에 데이터를 저장하였다. Fig. 8은 백열전구에 톱밥이 부유하여 부착된 상태를 촬영하여 나타내었다. 미풍이 맞닿은 반대방향으로 목분(톱밥)이 부착되는 것을 확인할 수 있었다. 일반상태에서 온도가 높았던 T1 부분에서 약간의 변색된 흔적을 발견할 수 있었다.

Fig. 9는 실험결과 측정된 온도곡선을 나타낸 것이

다. 그림에서 나타난 온도곡선에서 알 수 있듯이 T1 부분의 온도가 가장 높은 것을 확인할 수 있으며, 미풍이 지속적으로 불면서 톱밥이 부착될 때의 온도는 약 89.6°C에 이르며, 이는 일반상태에서 기류가 안정될 때 보다 낮은 온도임을 알 수 있다. 따라서 미풍을 정지한 상태에서 온도를 측정하면 약 174.8°C의 온도가 측정되어 일반상태보다 약 12.9°C 높은 것을 확인하였다. 이는 톱밥이 백열전구에 부착되어 축열 역할을 하는 것으로 판단된다.

4.5 밀폐된 공간에서의 온도특성

Fig. 3(d)의 조건으로 실험한 결과 Fig. 10, Fig. 11와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 시간에 따른 온도를 측정하였다. Fig. 10은 일정 공간 내에 톱밥 속에 위치한 백열전구가 방열이 정상적으로 이루어지지 않아 백열



Fig. 10. 백열전구의 외형 변화.

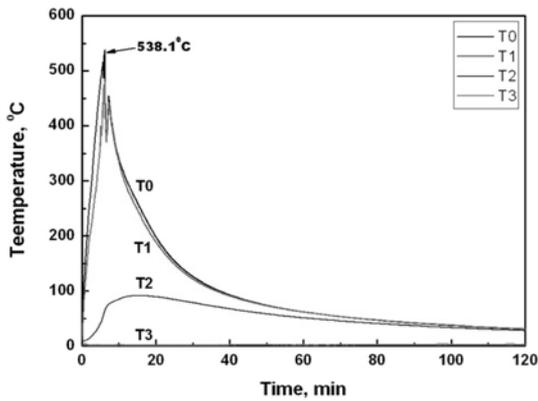


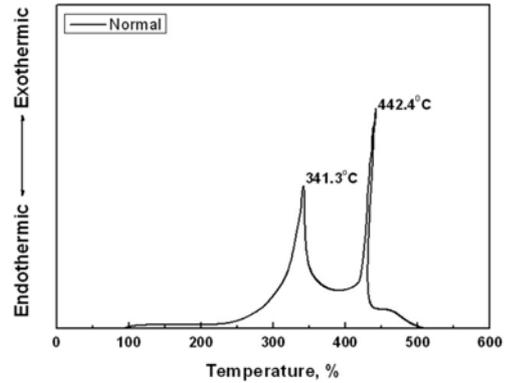
Fig. 11. 밀폐공간에서의 발열특성 곡선.

전구 표면이 툽밥이 탄화되어 검게 된 것을 확인할 수 있다.

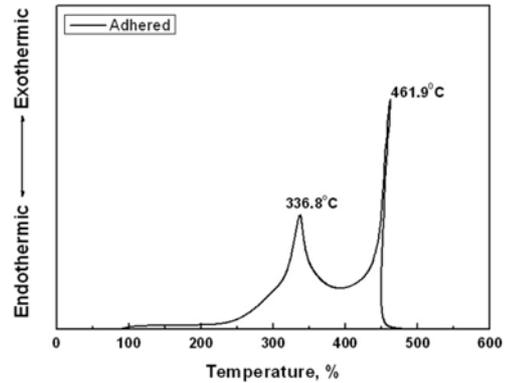
Fig. 11은 가혹한 조건에 실험한 경우의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 약 10분 정도 경과하여 538.1°C의 가장 높은 온도가 측정되었으나 이후 필라멘트가 용단되어 급격히 온도가 떨어지는 경향을 보였다.

4.6 주변 재료의 열특성 분석

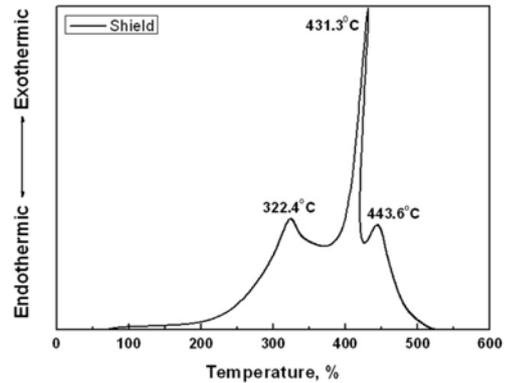
툽밥의 흡열 및 발열반응을 확인하여 발화점을 판단하였다. Fig. 12(a)는 정상적인 툽밥의 흡열 및 발열반응을 측정된 시차열분석(DTA)의 곡선이다. 실험조건은 분당 10°C씩 상승하여 900°C까지 측정되었으며, 전기로의 가스는 산소 21%, 질소 79%의 순수 공기혼합가스를 이용하였다. 공기혼합가스의 배출량은 분당 100 ml로 하였다. 1차 발열피크는 341.3°C로 나타났다. 이는



(a) normal



(b) adhered sawdust



(c) sawdust of shield condition

Fig. 12. 툽밥의 흡열 및 발열곡선 비교.

툽밥 내부에 있던 가스가 발생하여 주변의 높은 온도에서 발열피크가 나타난 것으로 추정된다. 2차 발열피크는 442.4°C로서 툽밥의 대부분이 외부의 열에 의해 발화된 것으로 판단된다. 실험 후 백열전구 주변에 부

착(adhesion)되거나 차폐(shield)되었던 톱밥을 채취하여 열분석을 실시한 결과 Fig. 12(b)와 Fig. 12(c)와 같았다. 그림에서 알 수 있듯이 정상상태의 톱밥과 비교하여 2차 발열피크의 차이가 일부 다른 것을 확인할 수 있었다. 부착된 경우는 발열피크가 461.9°C에서 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 밀폐되었던 톱밥의 경우는 431.3°C에서 급격한 발열피크가 나타나는 것을 확인하였다. 이는 밀폐된 경우 톱밥이 백열전구에 의해 탄화되어 그 성분이 발열될 때 나타나는 피크로 인식된다. 또한 원래의 톱밥의 성질로 남아 있는 잔량의 발열피크가 443.6°C에서 나타나는 것을 확인하였다.

5. 결 론

연소의 3요소로서 발화원, 가연물과 산소가 필요하다. 따라서 본 실험의 조건은 이러한 다양한 조건을 실험대상물인 백열전구에 적용하여 상태변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 톱밥의 발열피크는 1차 341.3°C에서 나타났으며, 2차는 442.4°C로 나타났다. 1차는 톱밥 내부에 있던 가스가 발생하여 주변의 높은 온도에 의해 발열된 것이며, 2차는 톱밥의 대부분이 외부의 열에 의해 발화된 것으로 판단된다.

(2) 백열전구 및 소켓의 정상상태에서 최고온도는 161.9°C였으며, 위치는 백열전구와 소켓의 경계부분에 있는 백열전구 부분으로 일반적으로 열기류가 상승하므로 열전달이 쉬운 부분에서 온도가 가장 높은 것으로 판단된다.

(3) 미풍으로 톱밥을 백열전구에 부착시키면서 온도를 측정할 결과, 최고온도는 89.6°C 정도였으며, 미풍을 정지한 상태에서 톱밥이 백열전구에 부착된 경우는 174.8°C인 것으로 나타났다. 미풍을 정지한 경우 부착된 톱밥에 의해 백열전구가 축열되어 정상상태보다 더 높은 것으로 판단된다.

(4) 부착되었던 톱밥의 발열피크는 정상상태와 비교하여 발열피크의 위치가 변하였으나 거의 유사한 형태

였으며, 이는 백열전구 표면의 온도에 의해 톱밥 내부의 가스가 일부 발생하였던 것으로 판단된다.

(5) 밀폐 구조내에서의 백열전구표면은 탄화된 흔적이 있으며, 톱밥의 경우 정상상태와는 다른 발열피크를 보였다.

(6) 미풍에 의해 톱밥을 부착한 경우 화재로 이어지는 않았다.

(7) 밀폐된 경우 온도는 538.1°C까지 상승하였으나 필라멘트가 용단되어 화재로 이어지지 않았으며 이는 밀폐된 경우 지속적인 열공급이 이루어지지 않은 점과 산소가 희박하여 톱밥이 탄화되는 정도에서 용단된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국전기안전공사, “전기제해 통계분석 제14호”, pp. 17-24(2005. 11).
2. 송길목, 최충석, 김윤희, 김상현, 박남규, “전선의 단면분석을 통한 단락특성에 관한 연구”, 한국조명전기설비학회 춘계학술대회, pp.51-56(2005. 5).
3. 송길목, 최충석, 노영수, 곽희로, “트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화특성”, 대한전기학회논문지, 53C-1-1, pp.1-7(2004. 1).
4. IEC Standard 1000-3-7, “Limitation of Voltage Fluctuation and Flicker for Equipments Connected to Medium and High Voltage Power Supply Systems”, CEI(1995).
5. R. C. Seebald, J. F. Buch, and D. J. Ward, “Flicker Limitations of Electric Utilities”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 9, pp.2627-2631, September 1985.