액체 전기방향제의 구성 및 화재 원인 해석

글 | 최충석 한국전기안전공사 전기안전연구원 재해예방연구그룹장, 공학박사

1. 머리말

전기에너지를 이용한 생활환경의 개선 제품은 매년 다양한 형태로 개발되고 있다. 대표적인 것 중의 하나가 액체 전기방향제이다. 액체 전기방향제는 생활환경의 쾌적함 증진을 위해 사무실, 거실, 침실, 화장실 등으로 사용 용도가 증가하고 있다. 그러나 그에 따른 제도 및 규정이 적절하게 보완되거나 제정되지 못하고 있다. 액체 전기방향제에 대한 한국산업규격(KS)은 없으나 '전기용품안전기준(K60335-2-101)에 가정용 및 이와 유사한 전기기기의 안전성' 의 제2부 제101절에 '전기훈증기의 요구 사항'에 유사한 내용이 언급되어 있다.

이 규격을 적용하는 기기의 범주에 속하는 예로는 방향제, 오일 등을 이용하여 상온에서 액체를 증발시키는(휘산) 전기훈증기와, 전열 장치에 의해 약제를 가열하여 살충기의 성분을 기체로 증발시켜 해충, 곤충을 퇴치하는 훈증살충기가 있다. 이러한 기기는 직접 콘센트에 플러그로 연결할 수도 있고, 또는 유연성 코드와 플러그를 이용해서 주 전원에 연결할 수 있다. 그러나 액체 전기방향제는 사용의 목적에만 차이가 있지 원리 및 구조가 전기훈증기와 매우 유사한 특징을 갖고 있다. 그런데 그에 대한 설계 및 제조, 설치 및 관리 요령 등을 제조자 또는 사용자가 자율적으로 제정하여 사용하고 있는 것이 현실이다.

따라서 본 논고에서는 주택 및 사무실 등에 일반적으로 사용되는 액체 전기방향제의 사고 사례를 바탕으로 시나리오를 설정하고 제품의 제원 및 특징에 대해 알아보며, 재현 실험을 통해 해석된 결과를 제시함으로서 향후 사고 원인 분석 및 예방을 위한 참고 자료로 활용하고자 한다.

2. 전기방향제의 구성

가. 제품의 제원

○ 품　　명 : 액체 전기방향제
○ 전　　압 : 110/220V 겸용
○ 소비전력 : 1.4W
○ 용　　량 : 20g(액체)
○ 성　　분 : 향료 및 식물 정유 성분
○ 용　　도 : 거실, 침실, 사무실 등

나. 제품의 구성

○ 전원 공급 : 꽂음식 전기 플러그 이용
○ 절연 재료 : 난연성 플라스틱
○ 발열부 제어 : PTC(Positive Temperature Coefficient)
○ 내부 배선 : 전원 플러그와 발열체 사이의 배선
○ 제어 : 조절링(슬라이드형)을 좌 · 우로 돌림.
○ 방향제 : 플라스틱 기밀 용기에 충전되어 있음.

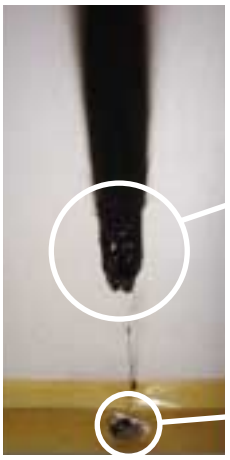
3. 사고 원인 분석

일반 사무실에 설치되어 사용 중인 액체 전기방향제에서 화재가 발생하였으나, 현장에 근무하고 있던 근로자가 화재를 발견하여 초기에 진압됨에 따라 원형이 비교적 잘 보존되어 있었던 제품에 대해 사고 원인을 밝히고자 한다.

[그림 1-(a)]는 사고 현장의 실체 사진으로, 소손된 벽면의 화염은 브이 패턴(V-pattern)을 형성하고 있다. 벽면은 일반 사무실에 사용하는 벽지이며, 화염의 확산이 매우 대칭적인 것으로 보아 제2의 화염이 외부에서 유입되지 않은 것으로 판단된다. 연소 시간은 정확히 추정할 수 없으나, 아래 방향으로 화염이 확산되지 않은 것으로 보아 액체와 같은 용매가 아래로 흘러내리지 않은 것으로 판단된다. 방향제 부품의 일부가 바닥에 떨어져 있으며, 바닥의 일부가 탄화된 곳이 확인된다. [그림 1-(b)]는 [그림 1-(a)]의 상부 부분을 확대한 사진을 나타낸 것이다. 아래 부분에 탄화 심도가 형성되었고, 중심부는 박리현상이 있는 것으로 보아 약한 화염에 의해 긴 시간 연소되었음을 추정할 수 있다. 또한 전형적인 V-pattern이 형성되었고 난류(Turbulent Flame)의

특징이 거의 없이 층류(Laminar Flame)가 지배하는 화염의 흔적으로 미루어 보아 화재 공간의 기류 변화는 매우 약했던 것으로 판단된다.

[그림 1-(c)]는 [그림 1-(a)] 하부 부분의 실체 사진이다. 소락된 물품의 주위에 탄화 흔적이 확인되며, 바닥의 군데군데 탄화 흔적이 있음을 알 수 있다. 소손된 방향제의 후면이 심하게 탄화되었으나, 전면은 비교적 탄화가 적게 발생했음을 알 수 있다.



(a) V-pattern

(b) 탄화 패턴

(c) 소손된 물품

■ 그림 1. 사고 현장의 실체 사진

[그림 2]는 방향제 전면의 실체 사진으로, 조절스위치는 최소 위치에 있음을 알 수 있고, 전면의 플라스틱 외함은 매우 깨끗한 것으로 보아 외부 화염에 의해 직접 노출되지 않았음을 의미한다. [그림 3]은 방향제 후면의 우측 실체 사진으로 비교적 약한 불에 노출된 것으로 판단되며, 아래 부분의 플라스틱이 용융되었음을 알 수 있다. [그림 4]는 방향제 후면의 좌측 실체 사진으로 심하게 소손되었고 탄화되었음을 알 수 있다.

그림 2. 정면 실체 사진

그림 3. 후면 우측 실체 사진

그림 4. 후면 좌측 실체 사진

[그림 5]는 수거품의 후면 실체 사진으로 중심부가 심하게 소손되었고, 탄화의 흔적도 확인된다. [그림 6]은 수거품의 상부 실체 사진으로 중심부의 탄화 흔적이 확인되며, 탄화 패턴은 내부에서 밖으로 확산되었음을 알 수 있다. [그림 7]은 수거품의 하부 실체 사진으로 심하게 소손되고 변형되었으며, 내부(가운데)의 탄화 흔적을 확인할 수 있다.

그림 5. 후면 실체 사진

그림 6. 상부 실체 사진

그림 7. 하부 실체 사진

[그림 8]은 현장에서 수거한 물품을 분해하여 나타낸 실체 사진으로 전면부 내부의 소손 정도가 적으나, 벽면 쪽에 위치한 부품들이 심하게 탄화되었다.

그림 8. 수거한 물품의 실체 사진

[그림 9]는 PTC(Positive Temperature Coefficient) 소자의 아래 실체 사진을 나타낸 것으로 탄화 흔적이 있다.

그림 9. PTC 실체 사진

[그림 10]은 정상 제품을 분해하여 나타낸 실체 사진으로 외함, 용기, 지지대, PTC 소자, 플러그, 연결선 등으로 구성되어 있다. 비교적 간단한 형태의 부품들로 구성되어 있으나 휘발성 유기용매를 플라스틱 용기에 담아 일정시간 방향 기능을 발현하도록 설

계되어 있다. 그러므로 물리적인 힘이 인가되어 용기의 균열이 생겨 용제가 흘러나올 경우 불완전한 접속에 의한 미소 아크에 노출되면 착화의 가능성이 있으므로 사용자의 주의가 요망된다.

그림 10. 정상 제품의 분해된 실체 사진

4. 재현 실험

가. 실험 조건

정상적으로 작동하고 있는 액체 전기방향제의 3곳에 [그림 11]과 같이 열전대(K-type)를 설치하고 시간에 따른 온도 변화를 측정하였다. 실험실의 주위 온도는 18±1℃ 정도로 유지하였다. 측정된 데이터는 기록계를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 실험은 3회 실시하였으며, 소손된 물품과 동일한 기종을 사용하였다.

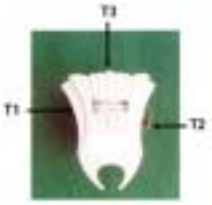


그림 11. 온도 센서의 설치 위치

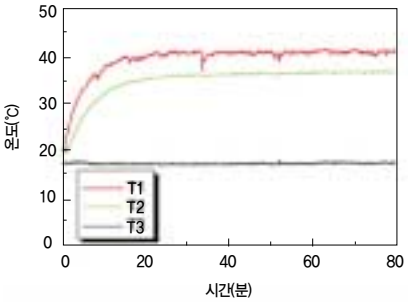


그림 12. 시간에 따른 온도 분포

T1은 뒤 중앙에 설치된 열전대의 온도 분포 곡선을 나타낸 것으로, 약 20분 후 40℃ 정도까지 상승하였으며 일정한 온도 특성을 나타낸다. T2는 옆에 설치된 열전대의 온도 분포 곡선을 나타낸 것으로 약 20분 후 35℃ 정도까지 상승하였으며 일정한 온도 특성을 나타낸다. T3은 상부에 설치된 열전대의 온도 곡선을 나타낸 것으로 시간의 경과에 따라 일정한 온도 분포를 나타내고 있다. 즉 전기설비기술기준 또는 전기용품안전관리법 등에서 제시하고 있는 온도 65℃ 또는 75℃ 등에 상당한 여유값을 보이고 있다.

나. 방향제의 시차열분석(DTA)

정상 제품 방향제의 시차열량분석기(DTA)를 이용하여 열 특성을 분석하였다. 170℃ 근처에서 반응은 방향제(액체)에 의한 것으로 판단되며, 410℃ 근처의 반응은 심지에 의한 것으로 판단된다. 심지의 탄화 온도는 536℃ 정도로 나타났다. 즉 3번의 발열반응과 단계별 흡열 반응이 발생함을 알 수 있다.

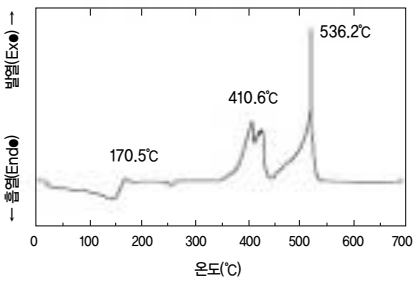


그림 13. 정상 제품 방향제의 DTA 분석

다. 방향제 용액의 연소 특성

[그림 14]는 방향제 용액에 일반 화염을 인위적으로 인가하였을 때의 연소 상태를 나타낸 것이다. [그림 14-(a)]는 정상 상태의 실체 사진을 나타내고 있고, [그림 14-(b)]는 외부 화염을 인가하여 약 10초 경과한 실체 사진이다. [그림 14-(c)] 및 [14-(d)]를 보면 알 수 있듯이 외부 화염을 제거했는데도 연속적으로 화염이 성장하고 있음을 알 수 있고, 촛불과 같은 층류 형태의 화염을 보이고 있다.

그리고 [그림 14-(e)]는 강제로 화재를 진압한 후의 실체 사진으로 심지의 탄화 흔적이 거의 없고 방향제 용액만이 연소되었음을 알 수 있다.

그림 14. 액체 전기방향제 용액의 연소 상태

라. 방향제 외함의 적외선 분광분석(FT-IR)

[그림 15]는 전기방향제 외함의 적외선분광분석(FT-IR) 곡선을 나타낸 것이다. 실선은 정상 제품 외함의 FT-IR 곡선으로 1,725cm^{-1} 정도에서 투과율 변화가 매우 크게 일어나고, 1,555cm^{-1} 에서도 약간의 특성 변화를 알 수 있다. 점선은 소손된 외함의 FT-IR 곡선으로 1,655cm^{-1}, 1,555cm^{-1}에서 투과율 변화를 일으킴을 알 수 있다.

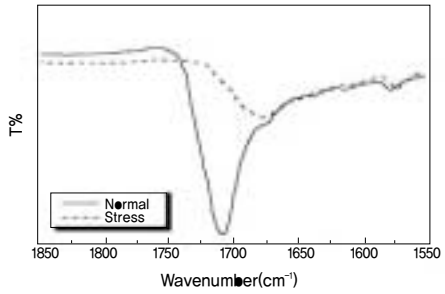


그림 15. 전기방향제 외함의 적외선 분광분석

마. 방향제 외함의 시차열분석(DTA)

[그림 16]은 전기방향제 외함의 시차열분석(DTA) 곡선을 나타낸 것이다. 실선은 정상 제품의 외함 플라스틱을 시차열분석기로 분석한 것으로 약 445℃에서 열량 변화를 나타내고 있다. 점선은 소손된 외함의 플라스틱을 동일한 방법으로 분석한 것으로 약 505℃에서 급격한 열량 변화가 관측된 것으로 보아 열적 스트레스를 받았던 물품으로 판단된다.

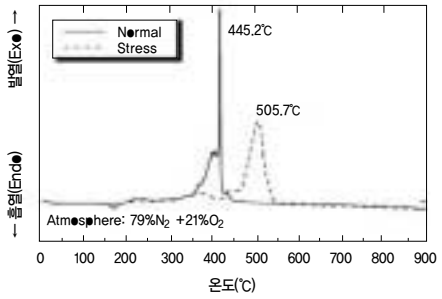


그림 16. 전기방향제 외함의 시차열분석

바. 전기방향제의 저항 특성

[그림 17]은 정상 제품의 전기 저항 특성을 측정한 실체 사진이다. 저항 값은 약 1,000Ω 정도로 관측되었다. 그러나 소손된 수거품의 경우 전원 연결 플러그, 전원과 발열부 연결 코드 등이 소실되었다.

그림 17. 전기방향제의 저항 특성

5. 맺음말

주택 및 사무실 등에서 사용되는 액체 전기방향제의 사고 사례를 바탕으로, 시나리오를 설정하고 제품의 제원 및 특징에 대해 알아본 후 재현 실험을 통해 해석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

가. 화재 패턴 분석

(1) 화재 현장의 화재 패턴을 분석한 결과 V-Pattern을 나타낸 것으로 보아 불꽃의 생성은 미약하고 연소는 장시간 되었던 것으로 판단된다. 또한 연소 진행 중에 기류의 이동은 미약한 것으로 나타나며 제2의 화염 확산은 없었던 것으로 분석된다.

⑵ 소손된 수거품의 탄화 패턴을 분석한 결과 발열체의 하단과 내부 벽쪽(케이스 안쪽) 사이에 탄화 심도가 형성된 것으로 판단된다.

나. 전기방향제의 특성 분석

⑴ 동일한 정상 제품의 발열체 주위 온도 분포를 분석한 결과 안전 온도 한계에서 작동하는 것으로 나타났다. 또한 심지를 시차열량분석기를 이용하여 분석한 결과 난연성 플라스틱 정도의 열 안전성이 있는 것으로 분석되었다.

⑵ 방향제 용액은 인화성이 있는 용매로 확인되었으며 외부 화염, 전기적인 불꽃 등이 있는 경우에 비교적 쉽게 착화될 것으로 판단된다. 소손된 수거품의 외함을 적외선분광기를 이용하여 분석한 결과 열적 스트레스를 받았던 물품으로 판단된다.

⑶ 액체 전기방향제 정상 제품의 전기저항은 약 1,000Ω으로 측정되었다. 수거품의 경우 전원 연결 플러그, 전원과 발열부 연결 코드 등이 소실되었고, 전원 플러그와 발열부를 연결한 전선은 난연성 재료로 확인되었다.

이상과 같은 분석에서 액체 전기방향제의 화재원인을 종합하면 화재는 외부 화염에 의해 발생한 근거를 확인할 수 없었으나, 각각의 분석 요소를 융합하여 분석한 결과 자체 결함에 의해 발생한 것으로 판단된다. 즉 플러그가 콘센트에 부적절하게 연결되어 발열된 상태에서 충전된 용액이 누출되어 착화로 이어진 것으로 추정된다. 또한 방향제 용액은 휘발성이 우수하여 매우 낮은 온도에서도 착화가 가능, 미소 아크에 의해서도 착화의 위험이 있으므로 적절한 사용자의 주의가 요망된다.