

(1) 물질의 열전도율

연소중인 물질이나 물질을 담고 있는 용기의 열전도율은 혼소에서 화염으로 전환되는 것에 있어서 매우 큰 영향을 미친다. 열전도율이 높다면 혼소 반응으로 생성된 열이 계속해서 주변으로 손실되기 때문에 화염전환에 필요한 온도까지 상승할 수 없다.

(2) 습도 및 가연물의 함수율

가연물의 함수율 및 대기 중의 습도는 연소를 유지하는 것 외 수분을 증발시키는데 필요한 시간과 열량이 소모되므로 혼소에서 발생하는 열의 손실이 되고 화염연소의 전환을 저해하는 요소가 된다.

(3) 공기의 흐름

공기의 흐름과 축열 조건은 상호 반비례 관계를 가진다. 공기의 흐름이 충분하면 산소의 공급측면에서는 긍정적인 조건이지만 공기의 흐름이 많을 경우 과도한 환기로 인해 발생된 열이 축적되기 어렵고, 냉각되기 때문에 공기의 흐름은 혼소의 화염전환에 있어서 무조건 긍정적이라고 볼 수 없다. [그림 7]의 그래프에서 보는 바와 같이 공기의 흐름이 온도 상승과 적절한 균형을 이루는 환경에서 화염연소가 가능해 진다.

면직류나 톱밥더미, 화장지 등의 다공성 가연물은 내부 공간에 충분한 공기를 함유할 수 있고, 내부에 열을 축적시키기에 좋은 조건을 가지고 있으므로 이와 같은 가연물에서는 화염연소로 전환되기에 비교적 용이한 구조이다.

(4) 보온성

축열은 보온과 밀접한 연관이 있다. 열전도율, 건조, 공기의 흐름 3가지 조건을 만족시키더라도 물질의 양이 소량이거나 별도의 보온물질로 덮여있지 않다면 방열되어 화염으로 전환될 수 없다. 단일 물질의 혼소라고 한다면 물질의 양이 혼소부위를 충분히 덮어 방열을 막을 수 있는 보온조건이 되어야 한다. 대부분 이 조건은 별도의 보온성 환경보다는 충분한 물질의 양에 의해 해결된다. 가연물의 보온효과는 화장지나 의류와 같은 다공질 또는 여러 층을 가지는 구조의 물질들이 유리한 조건을 가진다. ☞

# 정전기 화재사례 및 예방대책

글 최기욱 KFPA 화재조사센터 대리

## 1. 머리말

정전기란 전하가 정지 상태에 있어 전하의 분포가 시간적으로 변화하지 않는 전기를 말하며, 일상생활 및 산업현장에서 흔히 발생하는 자연현상 중 하나이다. 정전기는 복사기, 공기청정기 등에 활용되어 인간의 생활을 편리하게 해주기도 한다. 하지만 정밀함을 요하는 산업현장의 경우 정전기로 인한 오작동 등으로 인해 재산피해를 입기도 하고, 가연성가스 또는 인화성액체를 취급하는 산업현장의 경우 화재 또는 폭발재해의 원인이 되기도 한다. 이러한 정전기 및 그 위험성에 대해 깊이 이해할 수 있도록 화재사례를 통하여 구체적으로 살펴보고, 산업현장에서 실제로 행하고 있는 정전기에 의한 화재·폭발 방지 대책에 대해 알아보고자 한다.

## 2. 일반사항

### 가. 정전기 대전

#### (1) 마찰에 의한 대전

두 물체 사이에서 마찰이나 접촉 위치의 이동으로 전하의 분리 및 재배열이 일어나서 정전기가 발생하는 현상으로, 두 물체 사이의 마찰로 인한 접촉과 분리과정이 반복되면서 발생한다. 예를 들어 벨트 컨베이어에서 벨트가 롤러나 운반 물체와 마찰하는 과정에서 발생하는 것을 들 수 있다. 일반적으로 고체, 액체 또는 분체류에서 발생하는 정전기는 주로 이러한 마찰에 의해서 기인된다.

#### (2) 박리에 의한 대전

일정한 압력으로 서로 밀착되어 있던 물체가 떨어지면서 보유하고 있는 기계적 에너지에 의하여 자유전자가 이동되어 정전기가 발생하는 현상으로, 보통 마찰대전보다 더 큰 정전기가 발생한다. 접촉테이프나 필름으로 밀착되어 있던 물체를 떼어낼 때 발생하는 정전기를 예로 들 수 있다.

#### (3) 유동에 의한 대전

가솔린과 같은 액체류가 파이프 등의 내부에서 유동할 때 관벽과 액체 사이에서 발생하는 현상으로, 이때에는 액체의 유동속도가 정전기 발생에

가장 큰 영향을 미치게 된다. 배관 내에서 액체류가 유동할 때는 정전기 발생을 줄이기 위해서 물질에 따라 유속을 제한하게 된다.

(4) 분출대전

분체류, 액체류, 기체류가 단면적이 작은 분출구를 통해 공기 중으로 분출될 때 분출 물질이 분출구와 마찰, 분출 물질의 구성입자들 사이의 충돌에 의해 정전기가 발생하는 현상이며, 순수한 가스보다는 가스 내에 분진, 미스트 등이 혼입되어 분출시 대전효과가 크다.

(5) 충돌대전

분체류와 같은 입자들 상호간 또는 입자와 고체와의 충돌에 의해 빠른 접촉 및 분리가 이루어짐으로써 정전기가 발생하는 현상이다.

(6) 교반(진동)대전

액체의 교반, 수송 중 및 진동 시 액체류 상호간 및 액체와 고체 상호간의 마찰에 의해 정전기가 발생하는 현상으로서, 진폭이 클수록, 진동주기가 빠를수록 대전전압은 증가한다.

나. 방전

전위차가 있는 2개의 대전체가 특정거리 내에 접근하게 되면, 등전위가 되기 위하여 전하가 절연공간을 깨고 순간적으로 흐르면서 빛과 열을 발생하는데 이 현상을 방전이라 한다. 일반적으로 대전물체에 의한 정전계가 공기의 절연파괴 강도(직류의 경우 30kV)에 달한 경우에 일어난다. 이때 발생하는 에너지의 크기가 커지면 가연성 물질을 착화하는 등 재해나 장애의 원인이 된다. 대전물체에서의 방전은 대기 중에서 발생하는 기중방전과

대전체의 표면을 따라 발생하는 연면방전으로 구분되며, 기중방전에는 코로나방전, 브러쉬방전, 불꽃방전 등이 있다.

(1) 코로나방전

가는 전도체(직경이 5mm 이하)가 고전위로 축적되거나 접지 도체가 고 전계영역에 있을 때 발생하는 방전현상으로, 미약한 발광과 소리를 수반한다. 이 방전은 대전물체에 저장된 에너지의 크기와 관계없이 방전에너지가 적기 때문에 가스나 증기를 점화시키지 않는다. 코로나 방전 시의 에너지는 약 0.2mJ 이하가 되므로 프로판, 휘발유 등과 같은 물질은 점화가 되지 않으나, 아세틸렌이나 수소와 같이 아주 민감한 물질은 폭발할 수 있다.

(2) 브러쉬방전

곡률반경이 큰 도체(직경이 10mm 이상)와 절연물질(고체, 기체)이나 저전도율 액체사이에서 대전량이 많을 때 발생하는 수지상의 발광과 펄스상의 파괴음을 수반하는 방전을 브러쉬방전 또는 스트리머방전이라 하며, 일종의 코로나방전으로 방전 에너지가 크므로 재해나 장애의 원인이 될 수 있다. 브러쉬방전의 방전에너지는 4mJ까지도 될 수 있으므로 가스, 증기 또는 민감한 분진에서 화재 폭발을 일으킬 수 있으며, 이 위험도는 불꽃방전과 코로나방전의 중간위치에 있다.

(3) 불꽃방전

불꽃방전은 표면전하밀도가 아주 높게 축적되어 분극화된 절연판 표면 또는 도체가 대전되었을 때 접지된 도체사이에서 발생하는 강한 발광과 파괴음을 수반하는 방전이다. 불꽃방전은 방전에너지가 높아 재해나 장애의 원인이 되므로 폭발 분위기에

서는 방전현상이 일어나지 않도록 주의해야한다.

(4) 연면방전

연면방전은 드럼이나 싸이로 내의 분진이 높은 전하를 보유할 때와 대전이 큰 얇은 층상의 부도체의 박리 또는 얇은 층상의 대전된 부도체의 뒷면에 근접한 접지체가 있을 때 표면에 연한 복수의 수지상의 발광을 수반하여 발생하는 방전으로 불꽃방전과 마찬가지로 재해나 장애의 원인이 된다.

3. 정전기의 화재·폭발 위험성

물체가 대전되면 부근의 전계가 높아지며, 이것이 공기의 절연파괴강도(3kV/cm)를 초과하면 기중방전을 일으킨다. 이때 방전에너지가 가연성가스의 최소 착화에너지 이상이면 불이 붙어 화재 또는 폭발의 원인이 된다. 최소 착화에너지는 수소가 0.02mJ, 메탄이나 가솔린 등과 같은 가스가 0.2~0.4mJ, 알루미늄 등의 분진이 10~30mJ 정도이다. 분진을 착화시키는데 필요한 방전에너지는 가스·증기의 약 100배이나, 최근 토너나 반도

체 재료 중에 1mJ 이하에서도 불이 붙는 것이 있어 엄중한 대책이 필요하다.

4. 정전기의 화재사례

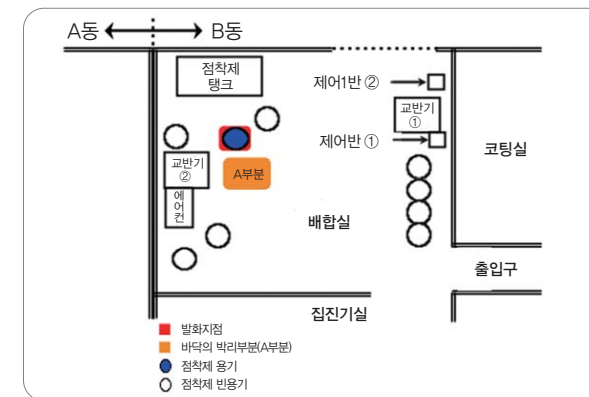
가. OO공장 화재사례

(1) 날짜 및 장소 : 2011년 7월, 경기 파주

(2) 화재발생 개요 및 발화원인 검토

본 화재는 화재공장의 B동 배합실 내에서 발생한 사고이며, 화재당시 배합실 내에서는 작업장 1명이 점착제에 고형제 및 용제 등을 주입하는 작업을 수행하고 있었다. 화재당시 촬영한 CCTV 영상자료를 확인한 결과 작업자는 배합실 내에서 점착제를 교반한 후 고형제와 용제를 교반하였으며, 고형제와 용제의 혼합물을 점착제 용기에 주입하던 중 발생한 정전기 방전에 의해 가연성유증기가 착화되어 화재로 진행되었다.

B동 배합실 내의 교반기에서 접지설비의 흔적이 보이지 않는 상태이며, 배합실 내에 비치된 점착제용기에는 접지클램프 등의 이동식 접지설비 또



[그림 1] 화재현장 발화장소(배합실)의 개략도





[사진 1] 화재건물 외부의 연소상황



[사진 2] B동 배합실 내부의 연소상황



[사진 3] 점착제 용기 및 그 주위의 연소상황



[사진 4] 점착제 용기 내부의 연소상황

한 설치되지 않은 상태이다([사진 1~4] 참조).

(3) CCTV 영상자료

(가) 화재당시 B동의 배합실 내부를 촬영한 CCTV 영상자료(2011년 07월 21일 22시 12분 12초부터 동일 22시 14분 50초까지 녹화영상)에 의하면 작업자는 최초 22시 12분 12초부터 동시 12분 55초 까지 약 43초 동안 점착제 용기 내부 용액(점착제)을 도구를 이용하여 휘젓고 있다([사진 5~6] 참조).



[사진 5] 2011년 07월 21일 22시 12분 12초, 작업자가 점착제용기 내부 용액(점착제)을 젓고 있는 상황



[사진 6] 2011년 07월 21일 22시 12분 55초, 작업자가 점착제용기 내부 용액(점착제)을 젓고 있는 상황

(나) 첨가물용기 측으로 이동하여 첨가물용기 내부의 용액(톨루엔)을 동일 도구를 이용하여 믹싱한 후, 첨가물용기 내부로 첨가물을 주입하고 있다 ([사진 7~8] 참조).

(다) 22시 13분 34초에 작업자는 첨가물용기 내부 용액을 점착제용기 내부로 붓기 위해 기울이기 시작하였으며, 동시 13분 41초에 최초 화염이 보였다([사진 9~10] 참조).



[사진 7] 첨가물용기 내의 용액(고형제, 톨루엔 등)을 젓고 있는 상황



[사진 8] 첨가물용기 내부로 첨가물을 주입하는 상황



[사진 9] 2011년 07월 21일 22시 13분 34초, 점착제용기 내부로 첨가물 용액을 주입하는 상황



[사진 10] 2011년 07월 21일 22시 13분 41초, 점착제용기 상부에서 발화되는 상황

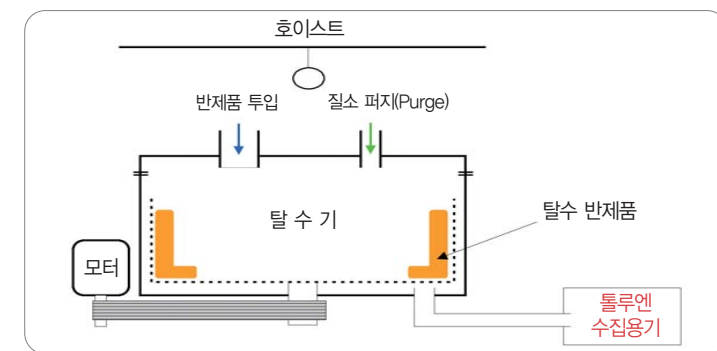
나. OO공장 화재사례

(1) 날짜 및 장소 : 2013년 1월, 경남 함안

(2) 화재발생 개요

본 화재는 공장의 작업장 내에 설치된 탈수기에 발생한 사고이다. 화재공장의 작업장은 LCD(Liquid Crystal Display)의 재료(반제품)를 제조하는 공장이며, 반제품을 생산하는 과정인 탈수과정에서 톨루엔을 사용하고 있다. 화재당시 작

업자는 탈수기 내부를 질소가스로 퍼지(purge)한 후 반제품 및 톨루엔을 주입하고, 탈수기를 작동하던 중 탈수기 내부에서 “뽕”하는 소리와 함께 화염을 목격하였다고 설명하고 있다. 탈수기 내부 및 탈수기 주위에 설치된 톨루엔 수집용기 내에는 톨루엔(인화점 4℃)이 저장되어 있어 상시 가연성 유증기가 체류하고 있으며, 정전기 방전 등의 점화에너지가 발생하는 경우 화재 또는 폭발의 위험이 있는 상태이다.



[그림 2] 화재장소 탈수기의 개략도

(3) 발화원인 검토

(가) 화재공장은 1층 작업장에 설치된 탈수기를 중심으로 연소가 확대된 상태이며, 탈수작업장 주위는 탈수작업 시 사용된 톨루엔(인화점 4℃)이 개방된 용기에 저장되어 있기 때문에 상시 가연성유증기가 채류하는 분위기이다(사진 11~12 참조).

(나) 탈수기의 외함에는 접지선이 설치되어 있으나, 동 접지선은 탈수기의 외함에 페인트가 칠해진 후 체결된 것으로 보이며, 탈수기와 톨루엔 수

집용기를 연결하는 배관에 설치된 본딩선은 플랜지 내측에 설치되어 그 위치가 부적합한 상태이다(사진 13~14 참조).

(다) 탈수기 및 톨루엔 수집용기 측면에서 접지클램프가 이탈된 상태로 놓여 있으며, 그 상태로 보아 접지클램프는 화재발생 전 탈수기 및 톨루엔 수집용기에서 이탈된 것으로 보이는 상태이다(사진 15~16 참조).



[사진 11] 화재현장 내부의 연소상황



[사진 12] 탈수기 주위의 연소상황



[사진 13] 접지선의 연소상황 (페인트 위에 접지선을 체결한 상황)



[사진 14] 탈수기와 톨루엔 수집용기를 연결하는 배관에 설치된 본딩선의 상황 (○ 표지는 본딩선)



[사진 15] [사진 12]의 ↓표지방향, 접지클램프가 이탈된 상황 (□ 부분은 접지클램프)



[사진 16] [사진 12]의 ↓표지방향, 접지클램프가 이탈된 상황 (□, □, 부분은 접지클램프)

5. 정전기 화재예방 대책

가. 본딩과 접지

물체에서 발생하는 정전기를 대지로 누설시켜 물체에 정전기가 축적되는 것을 방지하기 위해 접지설비를 설치하며, 금속 사이부분이 절연상태로 접속되어 있는 경우 두 금속의 전위차를 없애기 위해 접지설비를 설치해야 한다.

나. 가연성 분위기 제거

가연성유증기가 상시 채류하고 있는 공정설비 내부 등은 질소, 탄산가스와 같은 불활성가스를 이용하여 가연성분위기를 제거해야 한다.

다. 가습

종이, 섬유제품 등은 주위공기의 상대습도와 수분을 갖는데 일반적으로 60~70% 이상이 되면 정전기의 축적을 방지할 수 있다.

라. 제전에 의한 대전방지

제전은 물체에 발생 또는 대전하여 있는 정전기를 안전하게 제거하는 것으로 주로 정전기상의 부도체를 대상으로 한 대전방지 대책이며, 일반적으로 제전기가 사용되고 있다.

마. 배관 내 액체의 유속제한

불활성화 할 수 없는 탱크, 탱크로리, 탱크차 드럼통 등에 위험물 등을 주입하는 경우 관내의 위험물의 유속을 저하시켜 정전기 발생을 최소화시킬 필요가 있다.㉞