탱크 및 배관 등 작업에 의한 폭발

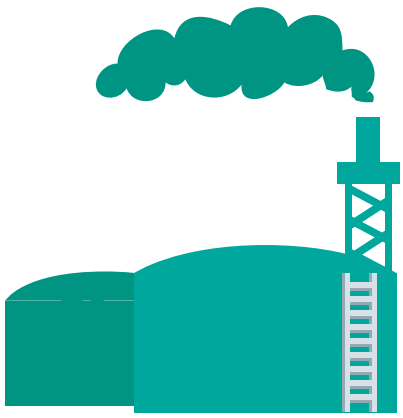
글 **이승훈** 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발조사팀

1. 머리말

탱크 작업 시 빈번히 발생하는 폭발사고는 탱크 내부에 남아있던 잔류 물질이 작업 시 사용되는 화기에 의해 점화되어 화학적으로 폭발하는 사고가 일반적이다. 보통 연료탱크와 같이 가연성 물질을 담아 보관하던 용기도 개방된 상태로 장시간 방치하였다면 내부의 가연성물질이 환기 또는 증발에 의해서 모두 확산되어 잔류물질이 남아있지 않은 것으로 생각하기 쉬운데, 후각을 통해 연료의 취향이 감지된다고 하여도 단순히 잔향으로 간주하며 폭발이 가능한 정도의 연료가 남아있다는 생각을 하지 않는 경우가 많다. 이러한 안전불감증으로 내부를 충분히 환기시키려는 노력을 하지 않은 상태로 화기를 사용하여 작업이 이루어지기 때문에 주로 발생한다.

■ 탱크 및 배관의 작업
- 사용 정지되었던 용기를 재사용하기 위해서 보수하는 경우
- 사용 중이던 용기의 하자를 보수하는 경우
- 용기에 밸브 또는 파이프 등 추가 시설을 설치하기 위해 보수하는 경우
- 용기를 다른 용도로 사용하기 위해 보수하는 경우
- 용기를 철거하기 위해 절단하는 경우

■ 작업 시 발생할 수 있는 점화원
- 용접, 절단토치 등 화기 작업
- 그라인딩에 의한 스파크
- 작업자의 정전기
- 작업자의 흡연행위 등
- 철제 공구의 충격, 마찰
- 전동공구에서의 전기적 아크 및 스파크

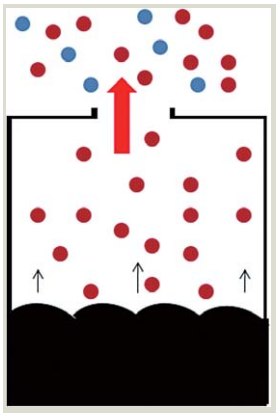


2. 탱크 내 액상이 남아있는 경우와 모두 증발한 경우

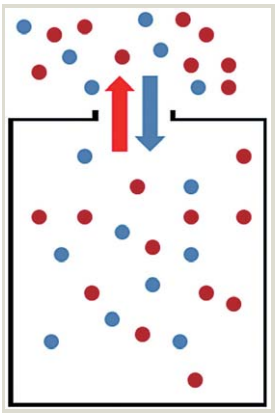
탱크 내부에 액상이 남아있는 경우와 모두 증발한 경우 점화원이 주어졌을 때 어떻게 다를지 떠올려 보자. 용기가 개방된 상태로 있다고 하더라도 액상이 조금 남아있는 상태에 점화원이 주어진다면 어떻게 될까? 탱크 내부에서는 남아있는 액상의 물질로부터 계속해서 증발이 발생하고 있는 상태이기 때문에 큰 차

이는 아니지만 용기 내부의 압력은 외부의 대기압 보다 높다. 대기압 보다 높은 상태이기 때문에 용기가 개방되어 있다고 하여도 외부의 공기가 탱크 내부로 침투하는 것은 어려운 조건이 된다. 따라서 이 경우 별도의 환기가 이루어지지 않는 이상은 용기 내부에는 유증이나 가스로 가득 차게 되고, 연소하기 위해서는 산소가 부족한 상태이다. 점화원이 주어졌을 때 폭발이 가능한 연료-공기 혼합기는 대기의 흐름에 의해서 개구부 주변에서만 부분적으로 형성될 것이다. 여기에 점화원이 주어진다면 부분적으로 형성된 혼합기는 급격히 연소할 것이지만 그 혼합기의 양이 크지 않으므로 짧은 급격한 연소 이후에 나머지 유증들은 확산연소를 할 것이다. 따라서 큰 폭발은 발생하지 않는다. 점화당시 폭발이 가능한 혼합기의 양이 비교적 적기 때문에 비교적 위험성이 크다고 볼 수 없다. 다만 점화에 의해 잔류물질에 착화되는 화재의 위험성이 있다.

탱크 내부에 유증이 완전히 증발한 이후에 점화원이 주어진다면 어떻게 될까? 액상이 완전히 증발한 후에 탱크의 내부는 외부의 대기압과 평형을 이루는 상태가 되는데 이때는 외부의 공기도 자연스럽게 탱크의 내부로 침투가 가능해진다. 내부가 연료-공기 혼합기로 가득 차게 되고, 이 때 점화원이 주어진다면 위에 설명하였던 액상이 일부 남아있을 때와는 비교할 수 없을 정도로 큰 폭발을 이루게 될 것이다. 대부분의 사람들은 연료가 많이 남아있을 수록 폭발의 위력이 크다고 생각할 수 있겠지만 사실 상 폭발의 위력은 단순히 연료의 양과는 큰 관계가 없으며 연소범위 내로 혼합되어 있는 연료-공기 혼합기의 양에 따라서 그 크기가 비례하기 때문에 액상의 연료가 많이 남아있는 경우에 비하여 액상이 모두 증발된 이후의 폭발 위력이 더욱 크다고 볼 수 있다.



[그림 1] 용기 내 액상이 남아 있는 경우 증발에 의해 내부는 대기압보다 약간 높은 압력을 유지하게 되며 외부의 공기는 내부로 침입하기 어렵다.



[그림 2] 용기 내 액상이 완전히 증발된 경우 용기 내부의 압력은 대기압과 같아져 외부의 공기의 이동이 자유로워진다. 용기 내부에 연료-공기 혼합기가 조성된다.

3. 용기 내 가연성 기체의 잔류

공기보다 비중이 높은 물질은 용기의 상부를 개방시킨다고 하여도 충분히 환기되지 않는다. 실제 사고의 사례를 살펴보면 입구를 개방한 상태로 2~3년이 경과된 탱크에서 남아있던 잔류 가연물질에 의해서 폭발이 발생하는 경우도 있었다. 공기보다 비중이 낮은 수소, LNG 같은 물질은 상부의 해치를 개방한 상태로 방치한다면 자연스럽게 개구부를 통해 확산될 것이다. 그러나 현재 주로 연료로 사용하고 있는 LPG 또는

석유, 등유, 벙커C유, 휘발류 등 액체가연성물질의 유증은 공기보다 비중이 높기 때문에 상부의 해치를 개방해 둔다고 하여도 좀처럼 확산되지 않고, 탱크 내부에 남아 있게 된다. 별도의 환기조치를 취하지 않은 이상은 오랫동안 방치되었다고 하여도 자연스럽게 확산되어 사라지는 것을 기대할 수 없다. 특히 실내에 설치된 용기의 경우는 더욱 그러할 것이다.

해치가 개방된 탱크 내부에서 가연성 물질이 확산되어 가는 상황을 떠올려보자.

개방된 상태로 탱크가 보관되었을 때 탱크 내부는 해당 온도의 포화증기압 이하로 낮아질 것이다. 따라서 액체상태의 연료는 액면에서 지속적인 증발이 일어날 것이며, 증발된 유증은 개방된 해치를 통해서 계속 대기로 확산될 것이다. 만일 비점이 낮은 시너 같은 경우에는 잔류량에 따라 다르겠지만 수 시간 내에 모두 증발하여 내부에는 육안으로 관찰하였을 때 마치 연료가 남아있지 않은 것처럼 보일 수 있다. 그러나 이곳에는 기상의 연료가 남아있는데, 이는 대부분 공기보다 비중이 낮기 때문에 탱크 상부의 해치가 개방되어 있다고 하여도 자연스럽게 탱크의 외부로 확산되지 못하고, 낮은 곳에 고여 고립된 채로 오랜 시간 동안 남아 있게 된다.

용기 내부의 기체가 용기의 윗부분에 설치된 개구부로 확산될 수 있는 방법은 오직 대기압 변화에 의해 탱크의 개구부에서 이루어지는 미미한 호흡(용기 외부의 기압차에 의해 미량의 대기가 개구부를 통해 내?외부로 이동 및 교환된다.)뿐인데 이것마저도 상단부에서만 이루어지기 때문에 탱크의 낮은 부분에 채류하고 있는 비중이 높은 물질은 오랫동안 남아있을 수 있으며, 이 때문에 2~3년 동안 개방된 상태로 있던 탱크에서도 고립되어 오랫동안 남아있던 기체 연료에 의해 화학적 폭발 사고가 종종 발생한다.

이와 같이 작업 중 발생하는 사고를 예방하기 위해서는 작업 전 탱크내의 인화성물질의 제거, 불활성 가스 치환을 실시해야 하는데, 이러한 조치를 취한 이후에도 탱크 내부의 유분, 슬러지 등에 흡착되어 있던 유증이나 가스가 지속적으로 발생할 수 있으므로 작업 중간에도 지속적인 확인과 예방 조치를 취해야 한다. 실제로 탱크 내에 가연물과 불활성가스 치환작업을 모두 마친 후 산소 및 가스의 농도를 측정하여 안전을 확인 한 후 내부에서 작업을 시작하였으나 작업 중 유분이나 슬러지로부터 발생한 유증이 다시 발생하여 폭발사고가 발생하였던 사례도 있다.

가. 사례 1

2012. 10. 30. 10:15경 경북 경산시 ○○공단로 ○○정밀화학 옥외에 설치된 유류저장탱크(높이 10.9m, 직경 5.9m의 원형 탱크)로 제1석유류(휘발류, 벤젠, 톨루엔 등)를 보관해 왔으며, 사고 전 1년 이상 탱크를 비우고 해치를 개방해 둔 상태로 방치하였던 시설이다. 사고 당일 새로이 사용하기 위해 하부에 설치된 배관을 교체하면서 용접작업을 하던 중, 유류저장탱크가 폭발하여 용기 하부경판이 파열되고, 상부경판이 약 300m를 비행하여 인근 들판에 착지하였다.

이 사례는 현장을 조사할 때 장시간 개방된 상태로 방치되었다는 것만을 이유로 내부에 인화성 연료가 모두 확산되어 없었을 것으로 단정한다면 실제로 폭발원인에 대하여 미상이라는 견론을 내릴 수밖에 없었을 것이다. 그러나 개방된 상태에서는 단순히 절단 토치나 용접기를 가져다 댄다는 것만으로는

[그림 3] 원통형 유류 저장 탱크의 폭팔, 상부경판은 300m 비행 후 인근 들판에 착지

[그림 4] 유류저장탱크 하부 경판의 파열모습

[그림 5] 사고현장으로부터 약 300m 비행 후 인근 들판에 착지한 상부경판, 개구부의 크기는 직경 50cm의 원형임.
1년 이상 개방된 상태로 방치되었다는 관계자들의 진술임.

물리적 폭발이 발생할 수 없기 때문에 물리적인 폭발 가능성이 배제되며, 탱크 내부에 별도의 가연성 가스나 유증이 발생할 수 있는 조건이 없었다면 이는 1년 전부터 잔류하고 있던 유증에 의해 화학적 폭발을 일으킨 것을 입증할 수 있다.

이 사례는 위에 설명하였던 인화성물질의 기체가 탱크 내부에서 고립된 상태로 장시간 보존될 수 있다는 것을 단적으로 보여주는 사례가 될 것이다. 이 경우 개구부의 조건이 직경 50cm로 비교적 큰 형태이며, 내부의 물질 또한 제1석유류로 비점이 비교적 낮은 물질이었음에도 불구하고, 약 1년 이상이 경과된 시점에도 여전히 기상의 연료가 완전히 확산되지 않았고 폭발이 가능한 연료-공기 혼합기를 형

성하고 있었다는 점을 알 수 있다. 본 사건의 경우 탱크 외부의 배관을 작업하던 중이었기 때문에 탱크 내부에서 직접적인 점화원이 주어진 것은 아니지만 금속 배관의 열전도 현상에 의해 가열된 탱크 또는 배관내부의 온도가 상승하면서 그 열이 점화원으로 작용한 것이다.

이와 유사한 사고를 예방하기 위해서는 가연성 연료를 담았던 탱크의 사용을 정지하는 경우, 가연성 물질을 완전히 제거한 상태로 보존하며 기상의 연료가 남아있을 수 있으므로 탱크는 상부개구부뿐만 아니라 하부에 부착된 드레인 밸브(Drain valve)까지도 개방한 상태로 보존해야 한다. 또한 작업을 할 때에는 시작하기 전 가연성 기체의 잔류여부를 검사하고, 작업 시작 직전 또는 작업과정 중 지속적으로 가연성 기체가 내부에서 체류할 수 없도록 마땅한 환기조치가 이루어져야 할 것이다.

위에서 액상이 남아 있는 경우와 완전히 증발된 경우를 비교한 내용은 탱크 내에 액상이 남아있는 경우 폭발이 발생할 수 없다는 것을 말하고 있는 것은 아니다. 물질의 증발속도 및 입구측의 환기나 대기압 등에 의해 영향을 받을 수 있다. 또 여기에 설명한 내용은 증발한 기체연료가 공기보다 비중이 낮은 경우에만 해당되는 논리라는 점을 명확히 인식해주길 바란다. 기체연료의 비중이 공기보다 높은 연료의 일반적인 경우 액상이 남아있는 경우에 비하여 유증이 완전히 증발된 이후의 폭발 위험성이 더욱 크다는 것을 설명하기 위한 것이므로 이 구절을 통해 액상이 남아 있는 경우는 화학적 폭발이 발생하지 않는다는 단정적인 판단은 오류를 범할 위험성이 있다는 점을 인식하는 것이 필요하다.

비중이 높은 기체의 두 경우에서 폭발 위력과 점화원에 의한 착화가능성을 비교해 본다면 후자인 액상이 모두 증발한 경우에서 더욱 크고, 높게 나타날 것이라는 점을 설명한 것이며, 이것은 실제 실험을 해보지 않아도 기존의 연구를 통해 충분히 설명될 수 있을 것이다. 위 설명과는 조금 다른 사례를 추가적으로 소개한다.

나. 사례 2

2013. 8. 2. 오전 11시 55분께 경기도 화성시 팔탄면에 있는 폐수정화약제 생산공장에서 용접작업 중 폭발사고가 발생했다. 탱크 상부경판 위에서 용접작업을 하던 2명의 작업자는 탱크 내부에서 폭발이 발생한 압력으로 상부 경판이 분리되면서 튕겨져 나가, 폭발지점으로부터 1명은 10m, 다른 1명은 100m를 비행하여 다른 건물의 벽면과 땅바닥을 충격 후 사망하였다. 작업 중이던 옥외탱크(6만ℓ 규모 · 높이 5m) 내부에는 폐수정화약제인 솔디움 알루미네이트 2만ℓ 가 담겨있었다. 솔디움 알루미네이트는 열이 가해지면 수소가스가 발생해 불꽃이 튈 경우 폭발이 일어날 수 있다고 경찰은 설명했으며, 최근의 높은 기온으로 인해 탱크 내부에서 수소가스가 발생한 것으로 추정하고 있다.

이 사례의 폭발 위력을 살펴보면 탱크 내부의 연료가 혼합된 상태에서 화학적으로 폭발한 것을 의심해 볼 수 있다. 그렇다면 지속적으로 증발 또는 기체연료가 발생하고 있는 상황에서 어떻게 탱크 내부에 폭발 가능한 연소범위를 이룰 정도로 공기가 침투할 수 있었는가에 대하여 생각해 보아야 하는데, 여기서는 발생가스가 수소라는 점에 주목할 필요가 있다.

[그림 6] 폐수정화약제 생산공장 폭발사고 장면

수소는 공기보다 비중이 낮기 때문에 생성되었을 때 상부에 환기구가 있다면 이곳을 통해 대기로 배출된다. 또 배출되는 수소의 부피만큼 탱크의 내부는 저기압상태가 되므로 그 공간을 채울만한 정도의 기체가 추가적으로 생산되지 않는다면 외부의 공기가 탱크의 내부로 침투하게 되며 자연스럽게 탱크 내부에도 혼합기를 형성할 수 있게 된다. 또 이미 탱크 내부에 공기가 있는 상태에서 수소와 같이 비중이 낮은 물질이 생성되었을 때 그 생성속도가 매우 빠르다고 하여도 넓은 공간에 분포되어 있는 생성가스보다 비중이 높은 공기의 전부를 밀어 올려 밖으로 배출시키는 것은 불가능할 것이다. 위 사례를 고려해 본다면 공기보다 가벼운 수소는 공기를 밀어 올려 배출시키기 보다는 무거운 공기 입자의 틈사이로 새어나오듯이 빠져나와 공기는 그대로 탱크 내부에 체류하며, 수소만 개구부를 통해 배출될 것이다. 따라서 탱크의 내부는 물론 개구부를 통해 확산되는 수소까지 전부 폭발이 가능한 연소범위 내에 존재할 가능성이 높다.

4. 맺음말

폭발성 기체연료의 확산폭발 사고에 대하여 원인을 분석하거나 현장을 조사할 때에는 해당 물질의 비중을 고려하는 것은 기본적인 과정이며 다른 분석보다 우선적으로 고려되어야 한다. 비중을 고려하지 않는다면 정확한 원인을 찾는 것은 어려움이 따를 것이며, 원인을 결정한다고 하더라도, 결론에 대하여 스스로 자신을 가질 수 없기 때문에 결론에 대한 확신을 나타낼 수 없고, '가능성을 배제할 수 없음' 정도로 매우 낮은 수준으로 나타낼 수밖에 없을 것이다.

실제로 전자의 사례는 모 기관에서 현장을 조사한 후에 기상연료의 체류 가능성을 인식하지 못하고 폭발원인에 대하여 미상의 결론을 내렸던 적이 있다. 단순히 개방된 상태로 장시간이 지났다고 해서 모두 확산되었을 거라고 생각하거나, 액체가 남아있을 경우에도 연료가 더 많은 것이기 때문에 비어있는 것보다 폭발의 위력이 더욱 클 것이라고 생각하는 것, 액체가 모두 증발한 상태이기 때문에 폭발의 위험성이 없을 것이라고 생각하는 것 모두 사고를 초래할 수 있으며, 폭발의 원인을 조사하는 업무에서도 그 원인을 찾는데 있어서 부적절하며 비과학적인 선입견일 수 있다.