

LPG 저장탱크 화재 폭발



대규모 LPG 저장탱크가 불길에 휩싸여

— 다행이 주변탱크의 연쇄폭발은 막아 —

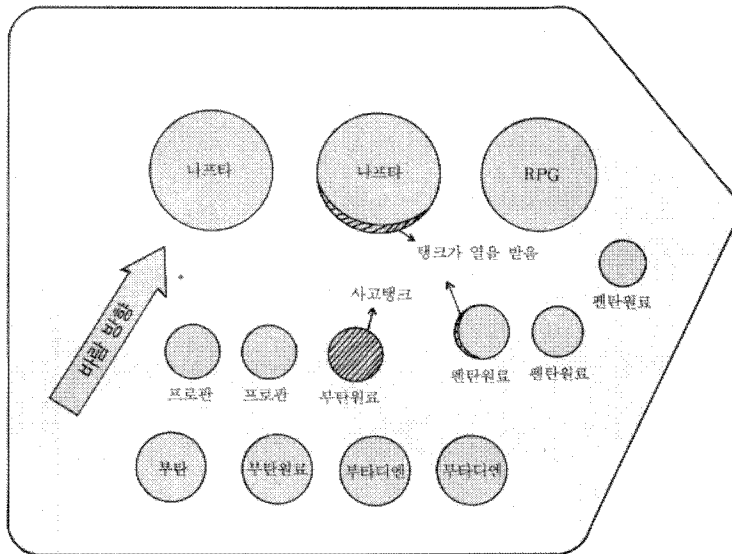
7천여 인근주민 대피소동

1. 일반사항

- 사고일시 : 1990년 7월 22일(일요일) 12시 25분 경
- 사고장소 : Ethylene Plant의 Tank Area
- 화재원인 : LPG Tank의 Drain Pot 용접부위 파손으로 누출된 LP가스에 인화
- 피해상황 : 인명피해 - 없음
재산피해 - 1만배럴 LPG 탱크 1기 및 인근배관 파손
나프타탱크 1기 및 LPG 탱크 1기 열손

2. 화재상황

화재는 12시 25분 경 교대계장에 의하여 처음으로 목격되었다. 현장점검 중 사고의 탱크지역에 도착하는 순간 평하는 소리를 듣고 화재를 발견하였다. 부탄원료탱크에서 화재가 발생한 것을 확인한 후 다른 근무자와 함께 사고탱크와 인접탱크의 물분무설비 밸브를 개방하였다.



탱크 배치도

사고는 탱크 밑바닥에 연결되어 있던 드레인포트 용접 부위가 절단되어 탱크 안에 저장된 LP가스가 급격히 누출, 기화되면서 발생하였다. 이 탱크는 C₄계열의 탄화수소 저장탱크로서 1만 배럴 용량이었으나 사고 당시에는 1,500배럴 정도가 저장되어 있었으며 사고의 탱크지역에는 13개의 탱크가 상호 인접하여 설치되어 있었다.(탱크 배치도 참조)



〈사고탱크와 주변의 탱크 배치 상태〉
사고탱크의 상하 및 좌우에 30m 정도의 간격으로 가스탱크 및 나프타탱크가 설치되어 있었다.

탱크 밑부분에서 액화가스가 누출되면서 발생한 화재는 탱크 내부의 가스가 계속적으로 분출되면서 검붉은 화염을 내뿜으며 사고탱크를 가열시키는 한편 불어오는 바람을 타고 인접하여 설치된 나프타탱크와 펜타원료탱크를 손상시켰다.

화제가 나자 자체소방차, 소방서 소방차 등 38대가 출동하여 진화작업에 나섰으나 폭발위험 및 고열로 인하여 사고탱크로의 접근이 어려워 고압으로 분출되는 탱크화재에 적절히 대응하지 못하였다. 탱크의 폭발을 방지하기 위하여 탱크자체에 설치된 물분무설비를 작동시키고 탱크지역에 설치된 소화전을 사용하여 사고탱크와 인접탱크를 계속 냉각시켰다.

탱크지역에 약 30m 간격으로 배치된 LPG탱크의 연쇄폭발에 대비하여 인근 주민 7천 여명이 대피하는 소동을 벌였으나 인명피해는 없었다.

2인치의 드레인 배관에서 유출되는 가스가 장시간 연소하는 동안에 사고탱크가 고열을 받아 탱크높이 2/3부분이 30cm정도 파열되었다. 파열과 동시에 탱크 내부의 가스가 다량 유출되면서 폭발현상이 일어난 것으로 보이나 폭발위력은 크지 않았으며 폭발 이후에 탱크내부 압력이 급격히 감소되어 화세가 약화되었다. 화재는 탱크내의 가스를 전부 연소시킨 14시 50분에 진화되었다.

화제가 진화된 후 잔류가스에 의한 재연 위험에 대비하여 탱크내부에 질소가스를 소량 주입하고, 증기가 새어나오는 탱크의 Crack 부분에 스티프호스로 증기를 회색시키는 등의 안전조치를 취하였다.

3. 피해상황

이 화재로 사고탱크는 재사용이 불가능한 상태이며, 바람 방향에 인접 설치된 나프타탱크와

팬탄원료탱크도 장시간 동안 열을 받아 손상을 입었다. 사고탱크의 취득원가는 2억 여원이었다.

또한 사고탱크내에 있던 부탄원료 1,500배럴이 완전히 소실되었으며 방액제 외부의 인근 배관이 장시간 동안 열을 받아 압력이 상승되어 폭발 파손되었다.



〈나프타 탱크의 열손 모습〉
바람부는 방향에 설치 되어 장시간 열을 받았다.

- 두께 : 6mm
- 연결배관 : 2" 1개
- 재질 : 탄소강(보온 됨)
- 중량 : 약 110kg

○ 부속설비

- Relief Valve : 8" 1set
- 긴급차단설비 : 2set
- 물분무설비 : 1set
- 가스탐지 및 경보설비 : 1set

○ 탱크 중량

- Content : 954,300kg
- Empty : 181,200kg
- Operating : 1,135,500kg
- Testing : 1,948,300kg

○ 운전 및 설계 조건

- Operating : 압력 3.5kg/cm²
온도 40℃
- Design : 압력 6.3kg/cm²
온도 68℃

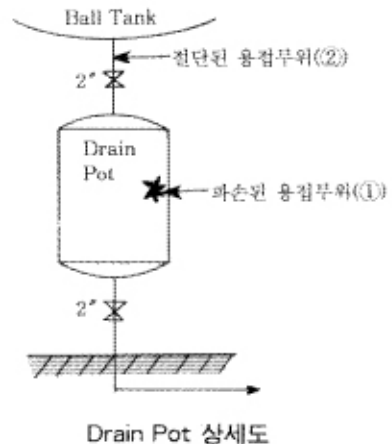
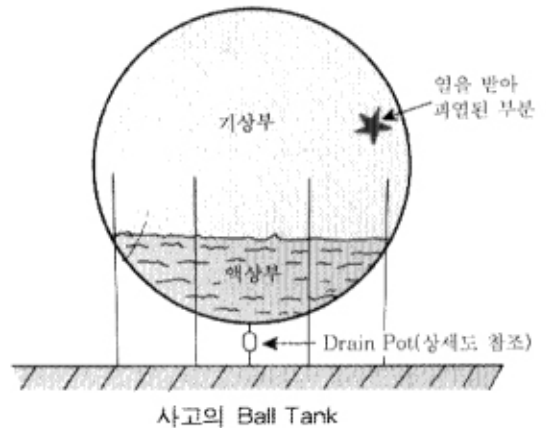
4. 사고의 Ball Tank 구조

○ Ball Tank

- 용량 : 1만 배럴
- 높이 : 17.2m
- 내경 : 15m
- 두께 : 25.5mm
- 재질 : 탄소강(단열 안됨)

○ Drain Pot

- 크기 : φ 250 × 500L



5. 화재원인 검토

가연성가스의 화재, 폭발에 대한 원인조사는 일반적으로 다음과 같은 단계로 실시된다.

- 누설가스의 판정
- 누설원인의 규명
- 착화원의 판정

이번 화재, 폭발사고의 직접적인 원인은 부탄원료탱크의 밑바닥에 연결된 드레인포트 용접 부위가 파손되면서 가스가 새어나와 발생하였다. 그러므로 누설가스는 C₄계열의 탄화수소인 것이 분명하다. 그러나 최초로 파손되어 가스가 누설된 원인에는 2가지의 가정이 있다.(Drain Pot 상세도 참조)

-가정①: ①부분이 먼저 파손되고 그 폭발충격과 열로 ②부분이 절단되었다.

-가정②: ②부분이 먼저 파손, 절단된 후에 ①부분이 파손되었다.

①의 가정이 성립되기 위해서는 ②부분에 있는 밸브가 개방되어 Drain Pot에 압력이 가해져야 하며 ①부분 파손으로 인한 폭발력이 ②부분을 절단시킬 수 있을 만큼 강해야 한다.

또한 ②의 가정이 성립되는 데는 ①부분의 파손이 왜 일어났는지의 의문이 남는다(Drain Pot내의 가스폭발로 ①부분이 파손될 수 있음)

여기에서는 파손의 원인으로 2가지의 가능성을 같이 검토하고 착화원을 판정하도록 한다.

가. 용접부위 파손원인

(1) 용접 불량(가정 ①, ②)

2가지의 가정 모두 용접부위와 관련되어 있다. 실제로 배관이나 저장용기의 파손문제는 용접과 관련된 것일 때가 많다. 이번 사고도 용접부위가 파손되어 발생하였으므로 가장 가능성이 많은 원인으로 추정된다. 용접 불량으로 인한 파손은

- 용접시 형성된 균열
- 용접잘못으로 인한 殘留應力
- 熔加材의 불충분한 침투
- 용접설계의 불량에 기인한다

탱크를 설치하는 과정에서 Ball Tank 부분은 설계, 시공 및 검사가 완벽하게 이루어졌으나 Drain Pot부분은 별도의 관리가 이루어지지 않아 제작, 시공하는 과정에서 용접부위에 이상이 생긴 것을 발견하지 못하고 사용하다 사고를 일으켰을 가능성이 많다.

(2) 탱크의 지지기반 약화(가정 ②)

사고의 Ball Tank는 8개의 기둥으로 지지되고 있는 상태였다. 사고 전까지 1개월 이상 계속된 장마와 폭우로 지반의 약화를 예상할 수 있으며 이러한 경우 탱크의 하중이 밑 부분에 연결된 배관에 전달되어 용접부분 ②가 절단될 수 있다. 그러나 사고 탱크의 주변상태나 사고의 사례로 보아 그 가능성은 매우 희박할 것으로 판단된다.

(3) 드레인 포트의 자체 중량(가정 ②)

드레인 포트는 자체 중량이 약 110kg이었으나 별도로 지지되어 있지 않은 상태이므로 부리한 힘이 용접부분②에 가해져 이 부위가 절단될 수 있다.

(4) 물리적 충격(가정 ①, ②)

드레인포트 부분에 외부의 물리적 충격이 가해져 파손이 일어날 수도 있지만 현장상황으로 미루어 그 가능성은 배제될 수 있을 것이다.

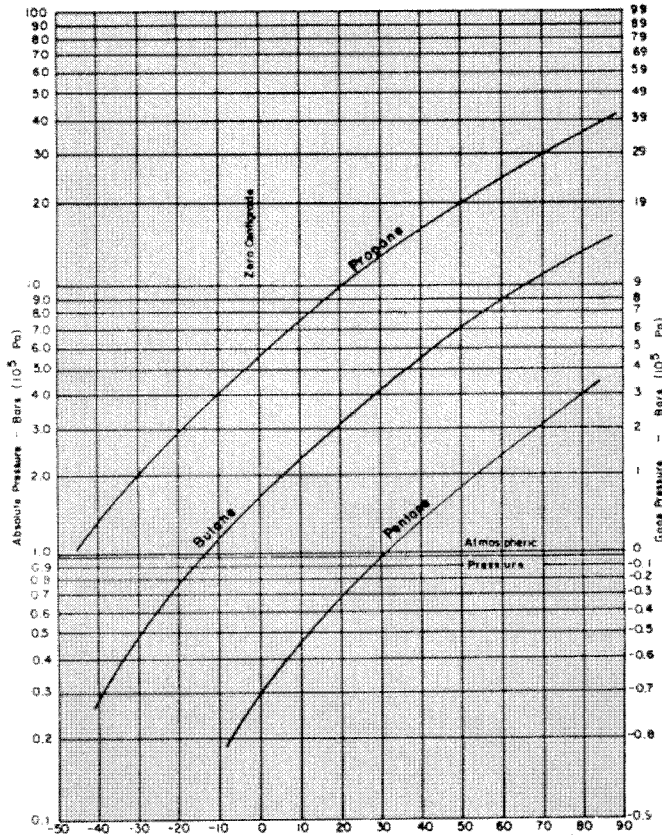
(5) 탱크의 내부압력 증가(가정 ①, ②)

탱크의 내부압력이 과도하게 증가하여 높은 압력을 견디지 못하고 용접부위가 파손되는 경우를 가정할 수 있다. 사고 당일의 높은 외부기온 또는 운전상의 이상으로 탱크내부의 증기압이 상승할 수도 있다. 그러나 아래 그림에서와 같이 부탄의 증기압은 낮은 편이며, 내부압력이 설계압력을 초과할 때 안전발브가 작동하도록 되어 있어 탱크내압이 급격히 상승했을 가능성은 매우 적다.

나. 착화원

가스화재의 착화원을 결정하는 것은 어렵다. 왜냐하면 어떤 특정 착화원에 누설가스가 착화됐다는 확실한 증거를 발견하기 곤란하기 때문이다. 따라서 가스의 누설량, 기류의 흐름, 확산 상태 등의 요인을 참작하여 가스의 누설범위내에 있는 모든 착화원을 고려해야 한다.

이번 화재의 누설가스는 공기보다 무거우므로 확산범위는 사고탱크의 Dike내로 한정할 수 있다.



LP가스의 압력-온도 특성



〈사고탱크의 일부분〉 Ball Tank와 Drain Pot의 연결배관 용접부위가 절단, 탈락되었다. Drain Pot는 보이지 않는다.



〈사고탱크와 동일유형의 탱크 일부분〉 Drain Pot가 보존되어 있는 상태로 보이고 있다.

착화원을 결정하는데 있어서 착화의 시점이 중요한 의미를 갖는다. 이 화재의 착화는 가스의 누설과 동시(또는 직후)에 이루어진 것으로 보인다. 왜냐하면 누설 후 상당시간이 경과해서 착화되었다면 큰 폭발(중기운 폭발) 현상이 일어났을 것이기 때문이다.

위와 같은 상황을 종합하여 다음과 같은 착화원에 대하여 그 가능성을 추론한다.

(1) 정전기

가연성가스 또는 액체가 배관내를 흐를 때, 탱크내에서 교반할 때, 분무 또는 용기내로 주입할 때 등과 같이 심한 운동으로 마찰(또는 교란)되면 정전기를 다량으로 발생시킨다.

$$\text{정전기의 방전에너지는 } E = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV$$

이다.

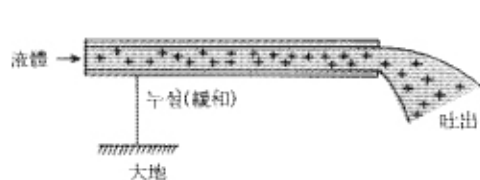
V: 대전전압

C: 정전용량

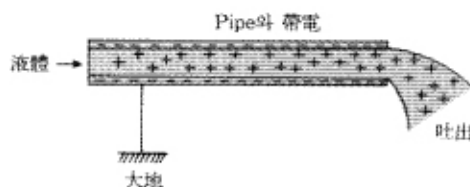
Q: 정전기량

방전에너지는 정전기량이 같아도 상태에 따라 대전전압이 높아지며, 물체간의 접촉면의 거리가 가까우면 정전용량은 커지고 멀리하면 작아진다.

이 방전에너지가 물질의 최소착화에너지 이상이 되면 쉽게 발화한다. 일반적으로 정전기에 의한 방전에너지는 고체가연물을 착화시킬 정도로 크지는 않다. 그러나 가연성 또는 인화성액체의 최소착화에너지는 대체로 $0.2 \times 10^{-4} \sim 0.3 \times 10^{-4}$ [Joule] 정도에 불과하여 정전기에 의한 착화가 용이하다.



(a) 金屬製 Pipe의 緩和



(b) 絶緣 Pipe와 帶電

靜電氣의 緩和와 帶電

고압용기에서 가연성가스 또는 액체가 분출하는 경우 분출유체와 용기출구와의 마찰에 의해 발생하는 정전기에 의해서 착화한 사례가 있다.

이번 화재는 드레인포트 용접부위 파손으로 액상의 부탄원료가스가 빠른 속도로 외부로 분출, 기화되면서 발생한 정전기에 의하여 착화됐을 가능성이 많은 것으로 판단된다.

(2) 전기스파크

전기회로의 개폐, 전기배선의 단선, 접촉불량, 전구의 파괴 등이 일어날 때 순간 스파크가 발생하는데 이 스파크는 가연성가스를 착화시킬 수 있는 에너지를 가지고 있다.

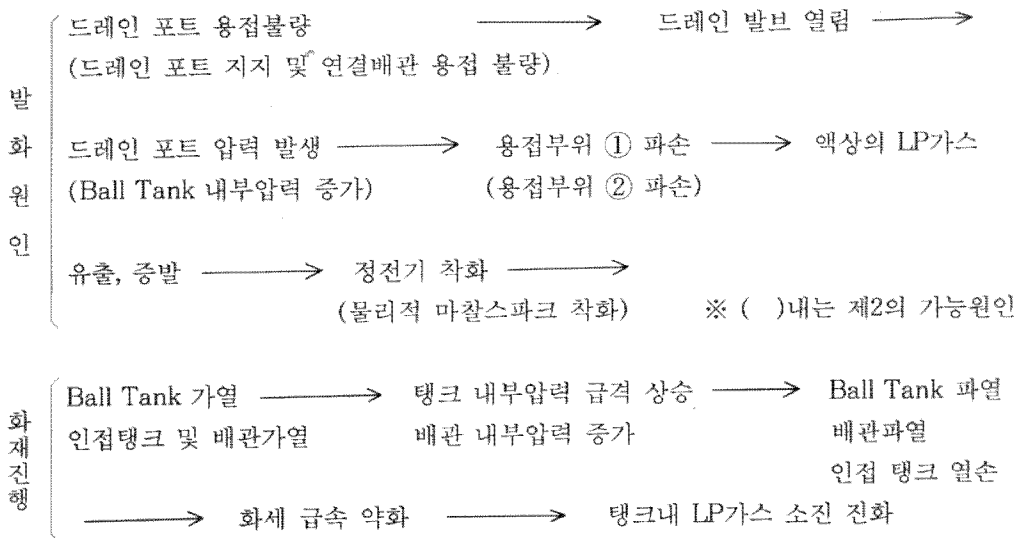
그러나 본 사고는 현장의 작업상황 또는 전기기기의 설치 상태 등으로 보아 그 가능성은 매우 희박하다.

(3) 물리적 마찰 스파크

드레인 포트가 파손되어 바닥에 떨어질 때, 또는 파손 조각에 다른 물체와 부딪쳐서 발생한 스파크에 의한 착화를 예상할 수 있다. 미소한 마찰 스파크에 의해 가연성가스가 착화할 수 있는 것이다. 실제로 석유화학공장에서 금속공구를 바닥에 떨어뜨릴 때 발생한 스파크에 의해서 발화한 사례도 있어 그 가능성을 배제할 수는 없다.

다. 결론

상기의 검토 내용을 토대로 이번 탱크화재, 폭발사고의 화재원인 및 화재진행과정을 다음과 같이 정리할 수 있다.

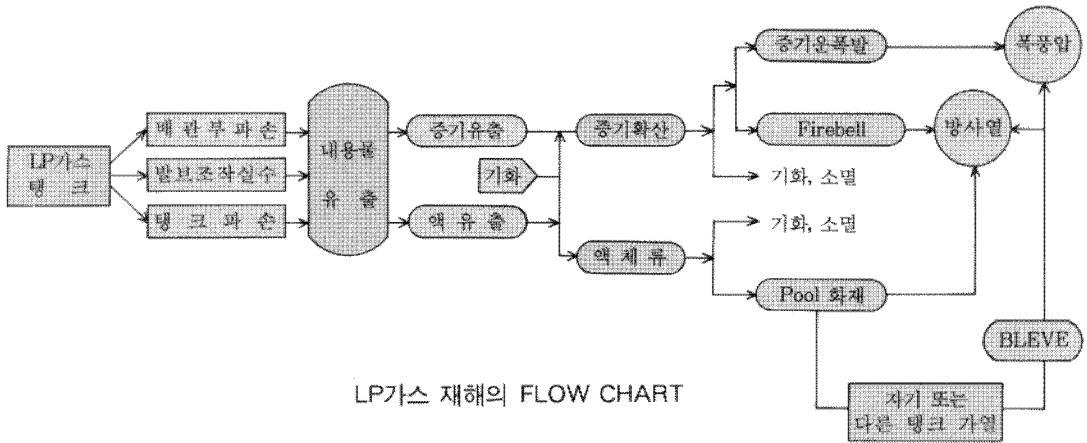


6. 탱크의 폭발위험

탱크화재에 있어 가장 최악의 경우는 사고탱크가 폭발하고 이어서 탱크지역에 설치된 이웃 탱크들이 연쇄폭발을 일으키는 것이다. 이번 화재에서는 다행히 경미한 폭발현상 밖에는 일어나지 않았지만 이 기회에 LP가스의 폭발위험성을 진단하고 본 화재시 탱크가 대폭발을 일으키지 않은 요인을 분석, 정리한다.

가. LP가스의 재해과정

LP가스에 의한 재해과정을 탱크를 예로 들어 설명한 진행도를 아래에 나타냈다. LP가스에 의한 재해는 파손 또는 조작실수에 의해서 내용물이 유출되어 증기화산(또는 액체류)의 과정을 거쳐 증기운폭발, Fireball 또는 Pool화재를 일으키고 최악의 경우 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, 비등액체-팽창증기 폭발)에 도달하여 강한 폭풍압과 방사열을 발생시킨다.

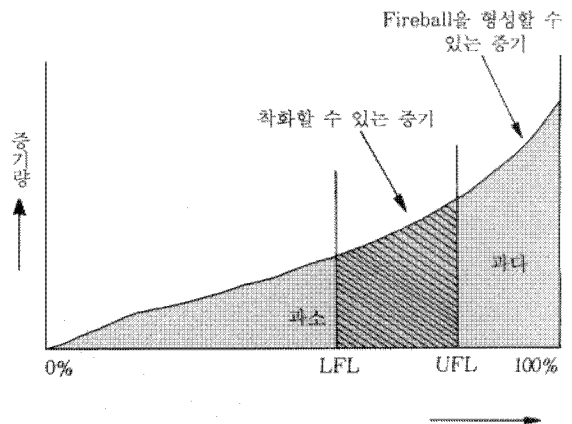


LP가스 재해의 FLOW CHART

나. 증기운 폭발(BLEVE시의 증기운 폭발 제외)

밀폐된 탱크 또는 배관내의 가연성가스나 액체가 대기중으로 급격히 유출되면, 그 파손부위에서 유출되는 가스와 액체가 대기 중의 공기와 혼합하여 가연성 혼합기체가 형성되어 착화원이 주어지면 격렬한 폭발현상을 일으키게 되는데 이를 증기운 폭발이라 하며, 특히 이중에서 밀폐된 공간이 아닌 자유공간에서의 폭발을 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion, 자유공간 증기운 폭발)이라고 한다.

아래 그림은 유출증기와 공기혼합물의 조성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 증기농도가 너무 높거나 너무 낮아도 착화되지 않는다. 폭발에너지는 폭발범위내에 있는 증기-공기의 혼합물에 의해서 결정되며 전체 증기량과는 관계가 없다. 물론 폭발범위 하한(LEL 또는 LFL)이상인 모든 증기는 최초의 폭발현상이 일어난 후에 착화되어 연소하게 되지만 이 때는 비교적 장시간에 걸쳐 에너지가 분출되므로 강력한 폭발효과는 없다. 그림에도 불구하고 가열된 풍부한 증기운은 자체의 상승력에 의하여 위로 올라가 버섯구름 모양의 Fireball을 발생시킨다. 넓은 폭발범위, 낮은 증기밀도 및 높은 연소열이 Fireball형성에 영향을 미친다.



증기농도의 분포예측도

다. Pool 화재

대량 유출이 일어나 최초로 지면으로 부터 열을 받아 격렬하게 증발한 LP가스도 시간이 경과함에 따라 점차적으로 평형상태에 이르게 된다. 방액제와 같은 장소에 담겨져 여기에 착화한 것이 Pool화재이다.

화재의 강도는 단위시간당 연소량, 즉 연소속도 및 밀도와 밀접한 관계가 있다. 속도가 커지면 영향력도 커진다.

라. BLEVE와 Fireball

용기내에 저장되어 있는 LP가스가 외부의 열원(화재등)에 의하여 가열되면 용기내의 액체는 비등하고 용기의 내부압력(증기압)이 상승한다. 열에 의해서 용기의 강도가 저하되고 어떤 시점에 이르게 되면 용기는 파괴된다.

용기파손으로 탱크의 내부압력이 대기상태로 감소되면 증기상의 고압가스는 급격히 팽창하고, 비등액체는 용기파손시 외부로 분출되어 액체의 온도와 비점 사이의 온도차에 비례하여 급속하게 증발하여 다량의 증기운을 형성한다. 여기에 착화하면 증기운폭발을 일으킴과 동시에 거대한 Fireball을 생성한다. 이와 같이 비등상태의 액화가스가 기화, 팽창하여 폭발하는 현상을 BLEVE라고 한다.

일반적으로 대부분의 LP가스는 용기파손시 용기내 액체의 $\frac{1}{3}$ 정도를 순간증발시킬 수 있으며 폭발위력은 1km까지 미치는 것으로 알려지고 있다.

마. 폭발요인 분석

이번 화재사고는 탱크 밑부분에 연결된 드레인포트 용접부위가 파손되어 LP가스가 누출되어 발생하였다. 만약 누출이 시작되고 상당기간이 경과한 후에 착화가 일어났다면 누출가스가 주위에 다량의 증기운을 형성하여 증기운폭발이 일어났을 것이다. 그러나 이 사고는 누출과 동시에(또는 직후에) 발생하였기 때문에 증기운폭발과 Pool화재는 발생할 수 없었다.

본 사고에서의 폭발위험은 BLEVE와 관련된 것이다. 여기에서는 BLEVE를 일으키는 요인



(Ball Tank의 파열부분)
사진의 우측 상단부분이 30cm정도 L자형으로 파열되었으나 사진상에는 잘 나타나지 않고 있다. 파열시 폭발현상이 있었으나 폭발력이 약했으며 이후 화재가 급격히 약화되었다. 탱크 주위의 Ring배관은 물론무실비로서 탱크의 폭발방지에 기여하였다.

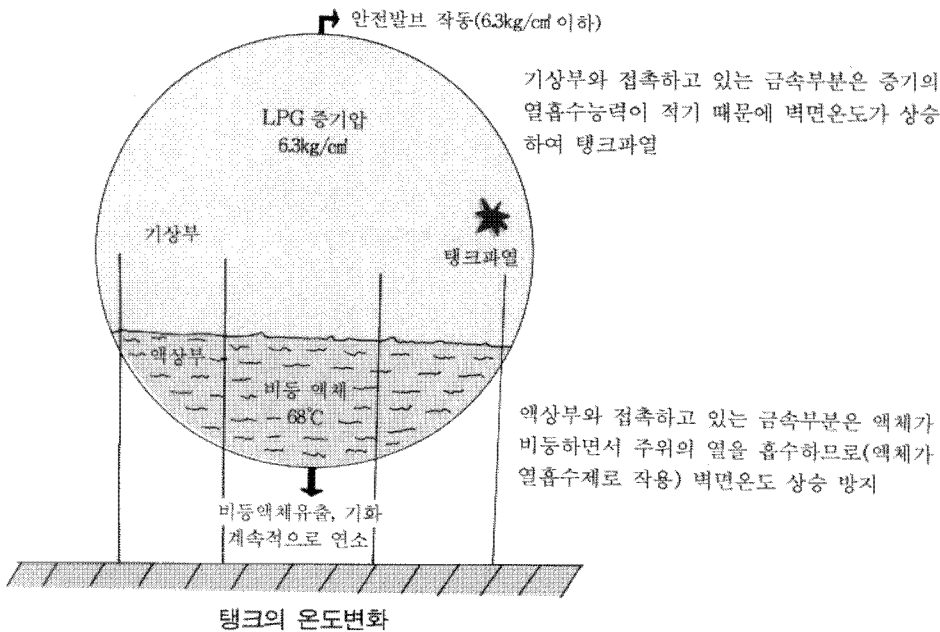
을 이번 사고와 관련하여 검토함으로써 대폭발이 발생하지 않은 요인을 간접적으로 규명한다.

(1) 화재시 탱크의 온도변화

우선 화재로 인하여 탱크가 가열되었을 때 탱크의 온도가 어떻게 변화하는지 고찰해 보자.

LP가스탱크 내에는 액상부와 기상부가 존재하는데 액체와 접촉하고 있는 금속부분은 높은 온도로 가열되지 않는다. 액체가 비등하면서 주위의 열을 흡수하므로(액체가 열흡수체로 작용) 탱크의 벽면온도는 상승하지 않는다. 이 탱크는 안전발브가 최소 6.3kg/cm²(설계압력)이하에서 작동되었을 것이므로 탱크 벽내의 온도는 그 압력에서의 온도인 68℃를 크게 초과하지 않았을 것이다.

이와 같은 액상부의 온도변화와는 달리 기상부의 금속온도는 크게 상승한다. 그것은 증기가 열전도가 낮고 열흡수 능력이 적기 때문이다. 그러므로 용기파열은 대부분 기상부분에서 금속이 확장되어 벌어지면서 발생한다.



(2) 탱크내의 가스량

LP가스의 경우 BLEVE는 일반적으로 탱크내에 액체가 $\frac{1}{2}$ 보다 약간 작게서 부터 약 $\frac{3}{4}$ 까지 차있을 때 발생한다. 본 사고 탱크에는 1만배럴 용량에 1,500배럴이 저장되어 있었으므로 BLEVE 폭발 방지의 결정적 요인으로 판단된다.

(3) 안전발브

안전발브가 작동함으로써 탱크내부압력의 과도한 상승을 방지할 수 있다. 그러나 안전발브가 BLEVE를 방지할 수는 없다. 스프링식 안전발브는 내부압력을 대기압까지 감소시키지 못하므로 액체는 항상 비점 이상의 온도에 있게 되고 용기내부에 압력이 걸리며 용기는 응력을 받게된다. 본 사고에서는 안전발브가 작동하여 탱크내부압력은 낮은 수준으로 유지할 수 있었

으므로 탱크파열시 폭발위력을 크게 감소시켰을 것이다.

(4) 탱크의 단열

단열된 탱크에서는 화재노출시 BLEVE 발생시간을 크게 지연시킬 수 있다. LPG탱크의 화재시험에 의하면 BLEVE발생시간이 비단열탱크는 25분인데 비하여 단열탱크는 93분이나 소요되었다.

(5) 물분무설비 및 소화전

액화가스탱크의 BLEVE를 방지하기 위하여는 탱크 기상부분을 수막으로 보호하는 것이다. 이 탱크에는 고정식 물분무설비와 소화전이 설치되어 있어 BLEVE 방지에 크게 기여하였다.

(6) BLEVE 발생시간

화염에 최초 노출된 후 BLEVE가 발생하는 시간까지는 용기의 재질, 화염의 강도와 같은 여러가지의 변수에 의하여 영향을 받으므로 시간차이가 매우 크다. 실험적 연구와 사례에 의하면, 단열조치가 안된(냉각 살수 없음) 소규모 탱크에서는 불과 수 분 후 발생하고 대형 탱크에서는 수 시간 후에 BLEVE가 일어나기도 한다.

한 예로 38~113m³ 규모의 LPG용기에서는 BLEVE발생시간이 8~30분이며 15분 이하에서 58%가 발생하였다.

본 화재, 폭발 사고에서는 탱크내 가스량이 $\frac{1}{7}$ 정도 밖에 저장되지 않은 것이 BLEVE방지의 주 요인이다. 물분무설비와 소화전을 이용한 탱크의 냉각과 안전발브 작동으로 탱크내부압력의 급격한 증가를 방지한 것이 BLEVE방지에 크게 기여하였으므로 사고의 Drain 부분도 비등액체를 계속적으로 연소시켜 일종의 안전발브 역할을 하였으리라고 생각된다.

만일 BLEVE가 일어났다면 그 발생시간은 탱크가 파열되는 시점이었을 것이다. 그러나 이 때는 탱크내 비등액체가 조금밖에 남아 있지 않아 경미한 폭발을 일으키며 소진, 진화되었다.