



부천 LPG 가스 충전소

1998년 9월 11일 금요일 오후 2시 14분경, 부천에 위치한 LPG 충전소에서 탱크로리가 폭발하여 74명의 사상자와 수십억원에 이르는 재산피해를 냈다.

이 사고는 부탄 탱크로리에서 지하탱크로 하역작업을 하던 중 발생하였다. 탱크로리 내의 액화가스가 주변 화염에 의해 가열되어 팽창하면서 내부의 압력이 상승하였고, 이 압력을 견디지 못한 탱크로리가 순간적으로 파열되면서 폭발한 것이다.

이 사고는 전형적인 용기폭발의 형태로서, 이러한 비등액체팽창 증기운폭발 (BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)은 연속하여 화구(Fireball)를 형성함으로써 과압 및 복사열로 인한 피해를 발생시키게 된다.



부천 LP가스 충전소

1 일반 사항

- 소재지: 경기 부천시 오정구
- 인명피해: 사망 1명, 부상 7명
- 사고일시: 1998. 9. 11 (금) 14시 14분
- 재산피해: 100억원 추정
- 사고장소: 충전소 하역장
- 사고원인: LP가스 누출

2 사고 현황

사고 당일 10시 30분경부터 13시 30분경까지 관련 공사에서 탱크로리 이송전배관의 기밀시험(약 18kg/cm²) 등 정기검사를 실시하였다. 이후 15톤 용량의 부탄 탱크로리 및 프로판 탱크로리 2대가 충전소에 도착하여 프로판 탱크로리는 대기하고, 부탄 탱크로리는 지하저장탱크에 기밀시험 완료 후 하역작업을 실시하던 중 14시 14분경 기계실 주변에서 화재·폭발이 발생하였다. 사고발생 수분 후에 소방서에서 출동하여 소화작업을 실시하였으나, 약 10여 분 후 부탄 탱크로리와 프로판 탱크로리가 1~2분 간격으로 폭발하였다.

이 사고는 비등한 액체가 팽창하면서 폭발하는 전형적인 용기폭발의 형태를 보였다. 또한 가연성 가스의 누출로 화구(Fireball)가 형성되면서 복사열로 인한 2차 피해가 발생하였다.

주변 화재는 17시 10분경 진압되었으나 지하저장탱크에 저장되어 있던 프로판 및 부탄 가스를 소진시키기 위해 의도적으로 연소시켜 6일 후 완전 소화하였다.

3 사고 원인

현재 원인에 대한 책임소재 때문에 정확한 규명이 보류되어 있는 상태이다. 다만 당시 상황을 근거로 다음과 같은 몇가지 원인을 추정할 수 있다. 여기서는 이송전 라인상의 문제로 인해 사고물질이 누출되었을 가능성과 점화원에 대해 가능성 있는 상황을 선정하였다. 그림 1은 탱크로리에서 지하 저장탱크로 저장하는 라인을 나타낸 것으로 각 라인에서 사고 가능성이 있는 부분을 표시하였다.

1. 누출원인

(1) 탱크로리 이송전 액체라인의 피지밸브(벤트 밸브)에서의 누출

- ① 기밀시험 완료 후 그림 1의 피지밸브(C)를 열어 벤트시키는 과정에서 밸브를 원위치로 복귀시키지 않았을 가능성이 있다. 이 경우 주밸브(D)와 안전밸브 전단 블록밸브(B)는 잠겨져 있고 피지밸브(C)는 열려진 상태로 있었을 것으로 가정할 수 있다.
- ② 탱크로리 기사는 이러한 기계실내의 밸브 개폐변동 사실을 모르고 평소대로 기계실 밖의 중간밸브(A), (E)에 호스를 체결한 후 이송전작업을 하기위해 밸브(A) 및 (E)를 개방하고, 사무실에서 기계라인의 압축기 스위치를 넣고 충전 작업이 끝날 때까지 기다리고 있었을 수 있다.
- ③ 탱크로리의 부탄이 2~3kg/cm²로 가압되면서 액체라인을 타고 개방된 피지밸브(C)를 통하여 기계실 내부로 대량 누출되면서 단시간에 기계실 공간 (6m×9m×3m)이 폭발범위 하한치인 1.5%이상의 농도를

형성하였을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 추정은 퍼지밸브 배출구가 기계실내에 있으며 탱크로리가 폭발하기 전 기계실쪽에서 먼저 폭발되었다는 목격자의 진술로 신뢰성을 갖는다.

(2) 탱크로리 연결호스 또는 호스 체결부에서의 누출

- ① 기밀시험 후 퍼지밸브(C)를 열어 벤트시키고, 벤트를 완료한 후 퍼지밸브(C)만 잠그고, 주밸브(D) 및 안전밸브 전단 블록밸브(B)를 개방하지 않았을 가능성이 있다.
- ② 탱크로리 기사는 평소대로 기체, 액체라인 호스체결 후 중간밸브(A) 및 (E)를 개방한 다음 사무실에 와서 압축기 스위치를 넣고 사무실에 있었을 수 있다. 한편, 호스체결 후 중간밸브(A)를 개방하지 않고 압축기 스위치를 넣었을 가능성도 있으나 밸브 위치가 기계실 밖에 있던 점으로 보아 가능성이 적을 것으로 판단된다.
- ③ 따라서 압축기에 의해 압력이 올라가면서 상대적으로 강도가 약한 탱크로리 호스부위가 파손되었거나 호스체결부에서 대량 누출되면서 폭발능도의 증가를 형성하였을 것으로 추정할 수 있다. 일반적으로 부탄가스 이송전시 압축기의 연로딩 설정치는 약 4kg/cm² 정도이고, 압축기 및 탱크로리 상부에는 11kg/cm²에서 작동되는 안전밸브가 설치되어 있다.

(3) 저장탱크와 충전설비 사이의 배관에 설치된 퍼지밸브에서의 누출

- ① 저장탱크에서 자동차 충전설비까지의 배관에 대한 기밀시험을 완료한 후 퍼지밸브(H)를 통해 벤트시킨 다음 퍼지밸브(H)를 잠그고, 주밸브(F, G) 및 안전밸브 전단 블록밸브(I)를 열어야 하나, 벤트만 시키고 밸브상태를 원상태로 복귀시키지 않았을 가능성이 있다. 차량 충전을 위해 주밸브(F, G)를 개방하자 열려진 퍼지밸브(H)로 부탄 가스가 대량 누출되어 기계실 내에 폭발범위를 형성하였을 것으로 추정할 수 있다.

(4) 이송전라인 밸브류에서의 누출

- ① 기밀상 시험 후 퍼지밸브(C)만 원상태로 잠근 후 주밸브(D)와 안전밸브의 전단블록밸브(B)는 열어 놓지 않고, 잠긴 상태로 있었을 것을 가정할 수 있다.
- ② 탱크로리 기사가 이송전작업을 위해 압축기 스위치를 넣자, 압축기에 의해 가압되면서 이송전라인 상에 설치된 밸브류 중 취약한 밸브에서 누출되어 기계실 내에 폭발범위를 형성하였을 것으로 추정할 수 있다.

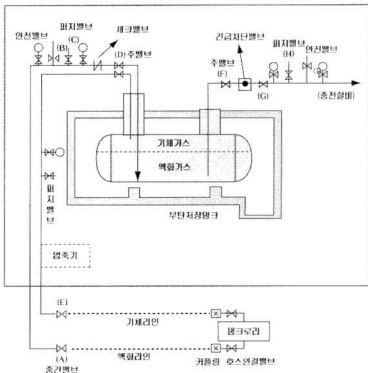


그림 1. LPG 저지저장탱크 이송전 라인 개략도



4가지 가능성 중 (3)은 주밸브가 기계실 내부에 설치되어 있어 주밸브를 개방할 때 인접하여 설치된 퍼지밸브에서 누출이 발생한 경우, 밸브 조작자가 누출사실을 쉽게 인지할 수 있으므로 가능성이 낮다고 판단된다. 또한, (4)의 경우도 사고 당일 18kg/cmg의 압력으로 기밀시험을 실시한 결과 이충전라인의 기밀에 이상이 없었던 것으로 보아 가능성이 적은 것으로 보인다.

따라서, 평상시 주밸브(D)는 항상 개방된 상태에서 탱크로리 기사가 중간밸브(A, E)만 조작하여 이충전하는 점, 기체라인 압축기 스위치를 사무실에서만 작동시켜야 하는 점, 사고 당일 탱크로리 기사가 기밀시험 내용을 알지 못한 점, 단시간에 LP가스가 대량 누출되어 폭발범위의 농도를 형성한 점, 탱크로리 폭발 전 대형폭발이 발생한 점 등을 고려해 보면 추정 (1)이나 (2)에 의해 누출되었을 가능성이 높다고 판단된다.

2. 점화원

(1) 가스 누출시 발생한 점전기

퍼지밸브를 통해 부탄가스가 대량 누출되면서 분출입자 상호간의 충돌에 의해 분출점전기가 최소착화에너지(약 0.25mJ) 이상이 되어, 폭발범위를 형성한 혼합 증기가 점화되었을 가능성이 있다. 배관설비가 접지되어 있는 경우에도 작은 분출구로 많은 양이 분출되는 경우에는 대전된 상태로 분출될 수 있다.

(2) LPG 택시의 시동

기계실 주변에 정차 중이었던 LPG 택시의 시동에 의한 스파크로 누출증기가 점화되었을 가능성이 있다.

(3) 기타 점화원

기계실 내에 설치되어 있는 전기 접속설비 등 전기설비의 절연불량, 전기 스파크 등에 의해 점화되었을 가능성이 있으며, 그 밖에 누출당시 호스 체결부분이 충전압(약 3kg/cmg)에 의해 바닥과 부딪히면서 마찰스파크가 발생하였을 가능성 등을 고려할 수 있다.



▲ 사진 1. 프로판 탱크 중량이 절단되어 날아가다 인근 건물 벽체에 맞고 떨어진다



▲ 사진 2. 충전소에 보관 중인 LPG 용기 - 용기에 LPG가스가 없어 더 큰 사고는 없었다.

4 피해 상황

BLEVE로 인하여 부탄 탱크로리 파편이 약 50m 비산하여 인근 도로공원에 떨어졌다. 또한, 프로판 탱크로리는 35~39m 길이로 중앙이 절단된 채 22° 각도로 날아가다가 62m 높이의 주유대 상판을 뚫고 지나간 후 25m 떨어진 맞은편에 있는 4층 건물의 2층 벽을 맞고 떨어졌다.(사진 1 참조) 충전소 내 야적된 가정용 LPG 20kg 용기가 간헐적으로 폭발되면서 60여 m를 비산하여 주변 공장에 떨어졌다. 또한 오토바이를 타고 사고현장을 지나가던 사람이 폭발압으로 인해 넘어져 부상을 입는 등 폭발로 인한 과압으로 몇명의 부상자가 발생하였다.

폭발 후 발생한 Fireball로 인한 피해가 더욱 많았는데 복사열로 인해 수십미터 떨어진 인근 공장에 화재가 발생하였으며, 공장 주변에 주차된 모든 차량이 전소되었다. 또한, 강렬한 복사열로 인해 주변에 있던 소방대원과 충전소 직원은 물론 70여 미터 떨어진 곳에 있던 노인을 비롯하여 시민 수십명이 화상을 입었다. 사진 2는 충전소 내부에 쌓아 놓은 LPG 용기가 불타고 있는 모습인데 좌측이 주유대, 정면에 있는 건물이 충전소 사무실이다. 주민들에 의하면 Fireball이 형성되었을때 500~600m 떨어진 곳에서도 열기를 느낄 수 있었다고 한다.

5 액화석유가스의 화재 및 폭발 특성

프로판과 부탄은 액화석유가스의 안전 및 사업관리법에 따라 관리되는데 가압상태로 저장되며 인화점이 낮아 위험성이 높다. 표 1에 화재와 관련한 프로판과 부탄의 물성값을 나타내었다.



표 1. 프로판과 부탄의 물성

명칭	화학적식	폭발한계 (V%)	최소착화 에너지 (mj)	인화점 (°C)	가스비중 (공기=1)	액체비중 (물=1, 15°C)
프로판	C ₃ H ₈	2.0-9.5	0.26	-105	1.55	0.508
부탄	C ₄ H ₁₀	1.9-8.5	0.25	-60	2.01	0.584

6 문제점 및 대책

액화석유가스는 사용이 편리한 반면 물질의 특성상 폭발이나 화재발생 위험이 높으므로 적절한 안전장치와 함께 사용자의 주의가 요구된다. 특히, 설비 및 배관 등을 사용하여 위험물을 취급하는 작업장에 대해서는 위험물의 특성 및 점검요령과 같은 일반적인 사항은 포함하여 사고발생시 응급처리 및 대피요령 등을 교육하고 이를 이행하여야 한다.

또한, 가연성 가스 또는 인화성물질을 호스나 배관 등을 사용하여 저장탱크 등에 주입할 때에는 결합부를 확실히 체결하고 누출이 없는 것을 확인한 후 안전하게 작업하여야 하며, 압축기 가동스위치는 작업자가 스위치 조작 후 가스 누출 등 이상유무를 현장에서 확인할 수 있도록 설치하는 것이 바람직하다.

참고 자료

■ 가스폭발사고 피해예측

비등액체평창증기 폭발(BLEVE)은 용기폭발의 대표적인 사고로서 용기에 저장된 액체 혹은 기압에서 액화된 물질이 가열되면 압력을 견디지 못한 용기가 파열하게 된다. 이때 가압된 물질은 용기 파열시 순간적으로 방출되면서 폭발적으로 증발하여 과압을 형성하며 정도에 따라 용기 파편이 비산하게 된다.

이때, 기화되어 분출한 물질은 압력으로 인해 상승하게 되는데 LPG와 같은 가연성물질인 경우 주위의 열원으로부터 점화되어 Fireball을 형성하게 된다.

최근 대표적인 사례로서 1998년 9월 11일 경기도 부천시에 위치한 LPG 충전소의 탱크로리가 폭발하여 사망 1명, 중경상 73명 등의 인명 피해와 막대한 물질 손실을 초래한 사고가 있었다. 다음에 폭발사고로 인한 피해를 예측할 수 있는 이론식을 제시하고, 몇가지 변수에 따른 과압의 변화를 측정하였다.

그림 2와 그림 3은 프로판 탱크에 대해 용기 압력 및 온도 변화에 따른 과압을 예측한 결과로서 폭발지점으로부터 멀어질수록 과압이 감소함을 보이고 있다.

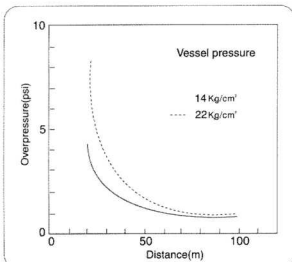
1. 과압 영향평가

폭발현상은 폭발내부의 반응영역에서 에너지의 전달 상황에 따라 폭연(Deflagration)과 폭공(Detonation)으로 구분한다. 폭연과 폭공에 대한 압력구배를 그림 4에 나타내었다. 반응 영역에서 미반응 매체로의 에너지 전달이 일반적인 전달과 정인 열전달 및 물질전달을 통해 일어나는 전파반응을 폭연, 반응영역에서 미반응 매체로의 에너지 전달이 반응성 충격파를 경유하여 일어나는 전파반응을 폭공이라 하는데 폭공의 반응 속도는 반응물 내에서 음속을 초과한다.

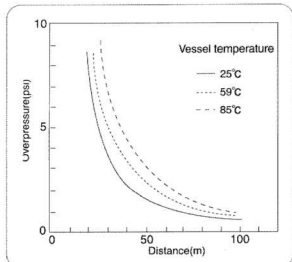
과압(Overpressure, +P)은 충격파의 (+)국면(Phase) 동안 발생하는 대기압 이상의 순압력(Net pressure)이고, 순간 최대 과압(Peak overpressure, Ps)은 충격파의 (+)국면과 관련한 대기압 이상의 순 최대압력이다. 부압(Under pressure, -P)은 충격파의 (-)국면 동안 발생하는 대기압 미만의 순 압력을 말하며, 팽창이나 이동중인 가스가 고체물질과 만날 때 생성된 압력인 동압(Dynamic pressure, Pd)은 식(1), (2)로 구할 수 있다.

$$P_d = \frac{1}{2} \frac{\rho u^2}{g_c} \quad (1)$$

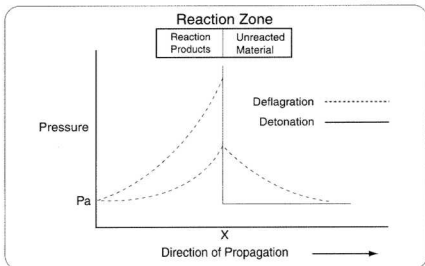
$$\rho = \left[\frac{2\gamma P_s + (\gamma + 1)P_a}{2\gamma P_s + (\gamma - 1)P_a} \right] \rho_a \quad (2)$$



▲ 그림 2. 프로판 압력변화에 따른 거리와 과압의 관계



▲ 그림 3. 프로판 온도변화에 따른 거리와 과압의 관계



▲ 그림 4. 폭연과 폭광의 압력 변화주파

폭발이 일어나면 Overpressure, Dynamic pressure, Blast wave, Fragment 등이 발생할 수 있으며, 가연성 물질인 경우 복사열로 인한 2차 피해가 발생된다. TNT와 같은 표준폭약에 대한 충격파 특성은 실험적으로 알려져 있으며 충격파의 특성은 식(3)에서와 같이 축적거리(Scaled distance)의 함수로 표시된다.



$$Z = R_s / W^{1/3} \quad (3)$$

여기서,

- Z : 충격거리, (ft/lbm^{1/3})
- R_s : 폭발지점으로부터의 반경, (ft)
- W : TNT 상당량, (lbm)

2. 비등액체팽창중기 폭발

BLEVE에 대한 영향 평가는 예상 시나리오에 따라 다음과 같은 모델식을 적용하여 평가할 수 있다.

(1) 물리적 폭발 모델

화학반응이 있거나 가압속도가 느린 경우는 물리적 폭발 모델을 적용하며, 가압이 급격히 상승하는 경우 등온팽창 모델식과 단열팽창 모델식으로부터 피해 결과를 예측할 수 있다.

물리적 폭발은 화학반응이 없이 시스템 내부의 압력 상승에 의해 장치가 파손될 때 에너지가 외부로 유출되는 폭발형태로 식(4)에 의해 계산할 수 있다.

$$W = 1.4 \times 10^4 V \left[\frac{P_1}{P_0} \right] \left[\frac{T_0}{T_1} \right] RT_1 \ln \left[\frac{P_1}{P_2} \right] \quad (4)$$

물리적 폭발 모델을 이용한 위험평가는 우선 V와 P₁을 구하여 식(4)에 의해 TNT 상당량으로 환산한 w를 계산한 후, w로부터 적합한 충격파 곡선을 이용하여 관심거리에서의 Overpressure나 impulse, k를 예측한다.

(2) 등온팽창 모델

과열 액체가 Flash될 때 Flash된 양만큼 폭발된다고 간주하고 식(6)와 같은 등온팽창 모델식을 사용한다.

$$W = 5 \times 10^4 n_v RT_1 \ln (P_1/P_2) \quad (5)$$

(3) 단열팽창 모델

압력용기 초기상태의 P_v와 폭발 직전의 P_v를 각각 계산 후, 이를 상호 비교하여 용기의 폭발온도를 구한다. 폭발량은 식(6),(7)로 계산할 수 있다.

$$W = \frac{-\Delta U}{H_{TNT}} \quad (6)$$

$$\Delta U = m_{1j} u_{1j} + m_{2j} u_{2j} - m_{1i} u_{1i} - m_{2i} u_{2i} \quad (7)$$

여기서,

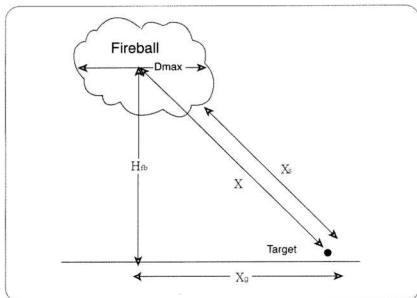
ΔU : 용기 내용물의 내부에너지 변화, (Btu)

H_{TNT} : TNT연소열, 약 2,000(Btu/lbm)

3. Fireball 모델

BLEVE 이후 Fireball에서 발생하는 복사열은 그림 5와 같이 설정될 수 있다. Fireball의 중심에서 대상물까지의 거리 X 는 지면에서부터 Fireball 중심까지의 높이 H_{fb} 와 Fireball 중심에서 대상물까지의 수평거리 X_0 로부터 구할 수 있다.

Fireball의 최대 지름, 연소지속시간, 중심높이, 초기지름은 각각 식(9)~식(11)로 구할 수 있다.



▲ 그림 5. Fireball의 형성시 대상물과 복사열의 관계

$$D_{max} = 6.48 M^{0.325} \quad (8)$$

$$t_{fb} = 0.825 M^{0.26} \quad (9)$$

$$H_{fb} = 0.75 D_{max} \quad (10)$$

$$D_{ini} = 1.3 D_{max} \quad (11)$$

복사 강도는 다음과 같이 식(12)로 평가할 수 있다.

$$I_{th} = r F E \quad (12)$$

여기서,

I_{th} : 거리 X 에서 받는 복사열(W/m^2)

r : 대기 투과도(atmospheric transmissivity) (-)

F : 화염표면에서 수체까지 시계인자(geometric view factor) (-)

E : 표면 방출(thermal flux) (W/m^2)