

고압 LPG 저장탱크의 BLEVE 발생에 대하여

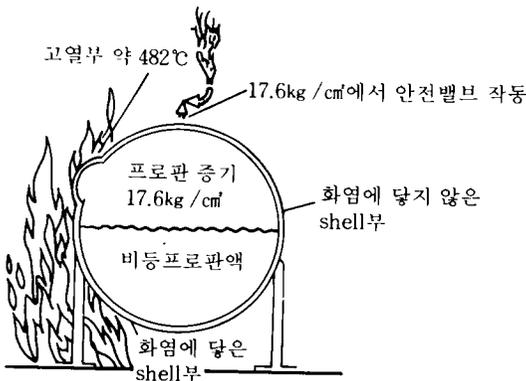
1. BLEVE란

프로판과 같은 고압 액화가스용기(탱크, 로리, 탱크) 등이 외부 화재에 의해 가열되면 용기 내부의 액체는 증기압이 높아져 압력이 상승한다.

액체가 없는 탱크 상부는 화염으로 강하게 열을 받아 연성 파괴를 일으키고 구멍이 뚫리게 된다.

탱크 내부의 액상 부분은 고압의 gas와 평형을 유지하여 탱크 외곽에 화염이 접촉되어도 그런 대로 평형을 유지하고 있다가 탱크가 뚫어지면 기상부는 바로 대기압 가까이로 떨어지기 때문에 과열되어 있던 액체는 갑작스런 비등을 일으키고, 원래 체적의 약 200배 이상으로 팽창되면서 외부로 분출, 급속히 기화하여 대량의 증기운을 만든다. 이 팽창력은 탱크 파편을 멀리까지 비산시킨다.

이 현상은 액체가 비등하고, 증기가 팽창하면서 폭발을 일으키는 현상이므로 Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion이라고 하며, 줄여서 BLEVE(블레비)라고도 한다. (그림1 참조)



【그림1】 화염에 쌓인 LPG 볼 탱크

2. 파이어볼(Fire Ball)이란

파이어볼이라는 것은 액화가스 탱크가 폭발하면서 플래시(Flash) 증발을 일으켜 가연성 액체 및 기체 혼합물이 대량으로 분출한다.

이것이 발화하면 지면에서 반구상으로 화염을 형성한 후 부력으로 상승함과 동시에 주변의 공기를 맡아 올려 화염은 구상으로 되면서 버섯형태의 화재를 만드는 것을 말한다.

파이어볼의 특징은 불꽃온도가 아주 높아서 보통의 석유화재시 화염온도가 800-1000℃인데 비하여 1500℃ 정도이고, 방출열은 절대온도의 4승에 비례하기 때문에 그 차이는 상당히 크며, 실제로 대형용기로부터 76m 떨어진 위치에서 화상으로 사망한 사례가 있다.

탱크에 설치된 스프링식 릴리프밸브는 이러한 형태의 BLEVE를 방지할 수 없다. 그것은 릴리프밸브의 특성상 압력을 대기압까지 감소시킬 수는 없고 단지 방출개시 압력보다 약간 낮은 압력까지만 감소시킨다.

그러므로 액체는 항상 비점 이상의 온도에 있게 되고, 압력은 여전히 용기 내부에 걸리게 되며 용기는 응력을 받게 된다.

직화가 용기에 직접 접촉되고 있다면 이 응력을 견디지 못하고 파열되기 때문이다.

3. BLEVE의 크기, 계속시간 및 방사열

BLEVE의 크기는 근본적으로 용기가 파괴될 때 얼마나 많은 액체가 증발되느냐에 달려있으며 대부분의 액화가스 BLEVE는 용기에 액체가 1/2에서 3/4까지 차 있을 때 많이 발생된다.

지금까지의 실측치로부터 파이어볼의 직경(D)과 계속시간(t)에 대하여 다음과 같은 실험식이 주어졌다.

$$D(m) = 3.77W^{0.325}$$

$$t(\text{초}) = 0.258W^{0.340}$$

여기서 W는 연료와 산화제를 합계한 중량(kg)이다.

이 식은 연소를 위한 산소량을 포함하지 않는다. 이는 연료의 종류에 따라 당연히 변화하고 파이어볼의 크기에도 영향을 미치게 된다.

파이어볼로부터의 방사열은 방사율을 1(완전 흑체)로 하면,

$$Q_R = \tau E F_{21} \text{이 된다.}$$

여기서 Q_R 은 흑체로 본 수열면에서의 수열량 (kW/m^2)

τ 는 에너지 전도율(0-1)

E는 표면방사열류속(kW/m^2)

F_{21} 은 파이어볼의 형태계수(화염과 수열면의 위치관계계수)이다.

τ 의 계산식은

$$\tau = 2.02 (PwX)^{-0.09}$$

여기서 Pw는 수증기 분압(N/m^2)

X는 화염표면으로부터 수열면까지의 거리(m)이다.

$$E = \frac{Frad M \Delta Hc}{\pi (Dmax)^2 t}$$

여기서 M은 BLEVE에 관여하는 물질의 질량(kg)

ΔHc 는 연소열(kj/kg)

Dmax는 파이어볼의 최대직경(m)

Frad는 방사분율(보통 0.25-0.4)

t는 파이어볼의 지속시간이다.

$$\text{또한, } F_{21} = \frac{Dmax}{4x^2}$$

여기서 x는 파이어볼의 중심으로부터 수열면까지의 거리이다.

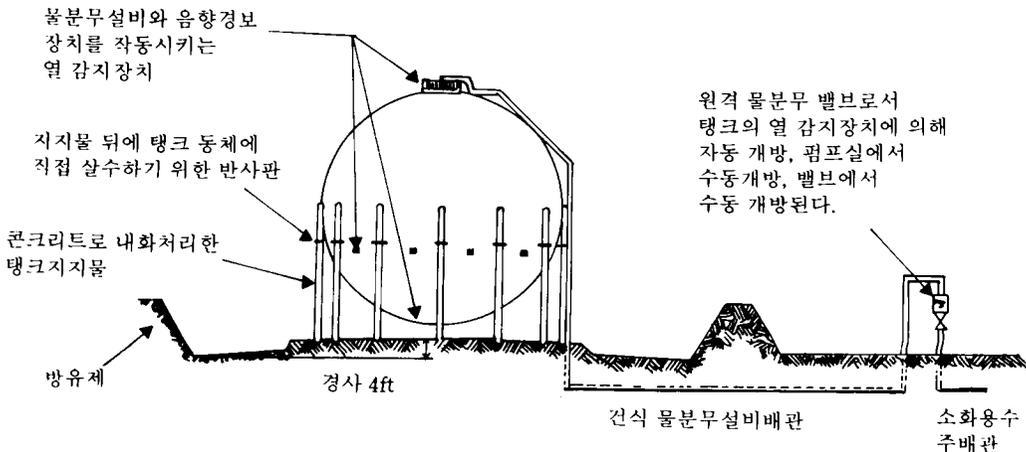
4. BLEVE를 일으키는 화재시간과 대책

최초 화염접촉과 BLEVE 사이의 시간은 용기 자체 뿐만 아니라 화재 크기와 성상과 같은 변수에 따라 크게 좌우되기 때문에 일정하지 않다.

냉각용 물분무설비가 없는 비단열 용기는 소규모 용기의 경우, 수 분에서부터 대형용기의 경우, 수 시간 후에 BLEVE를 일으킬 수 있다.

4~113m³의 LPG 저장탱크에서 BLEVE 발생시간은 8-30이며, 15분 이하에서 58%가 발생하였다는 연구결과가 나와 있다.

단열용기에 대한 자료는 통상 저온탱크와 약간의 반응성가스 용기만을 단열조치하기 때문에 자료가 불



【그림2】 LPG 탱크의 BLEVE 방호설비

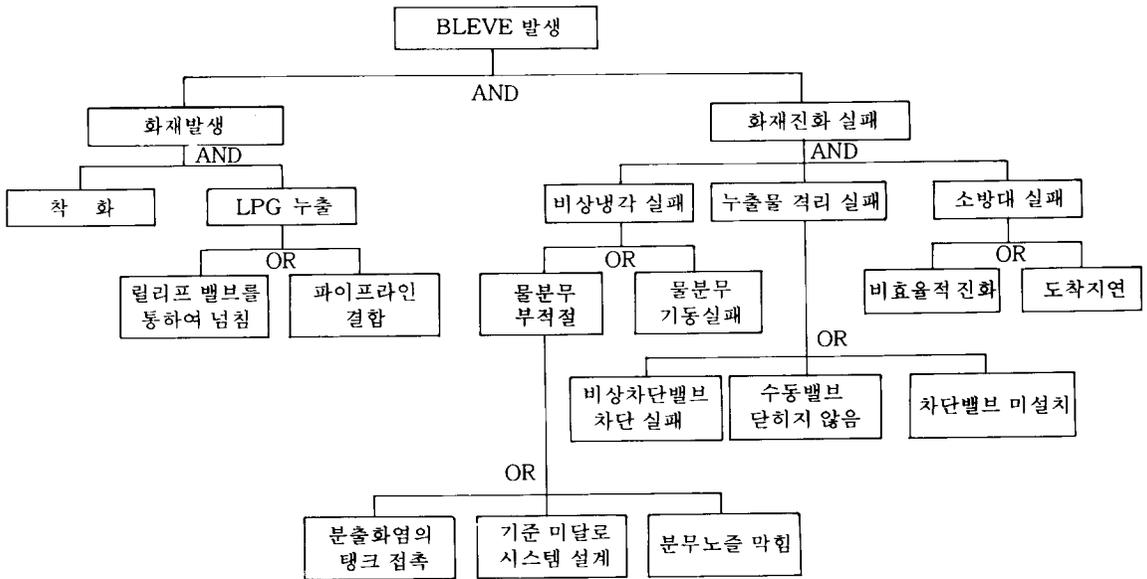
충분하나 단열은 BLEVE 시간을 크게 지연시킬 수 있다는 것은 확실하다.

BLEVE 보호대책은 화재에 노출될 수 있는 비단열 용기에 대하여 소화전이나 고정식물분무설비를 사용하여 용기를 수막으로 보호하는 것이다.

또한, BLEVE를 일으키는 요인이 되지 않도록 탱크 아래 바닥과 탱크 외면으로부터 최소 5m까지의 바닥은 경사도 1.5도 이상인 콘크리트로 경사(Sloped Berm)지게 하여 누설물이 저장소 내에 체류하지 않도록 하는 것이다.(그림2 참조)

5. 고압 LPG 저장탱크의 BLEVE 발생 Fault Tree

고압 LPG 저장탱크의 BLEVE 발생 Fault Tree는 다음 그림과 같다.



【그림3】 고압 LPG 저장탱크의 BLEVE 발생 Fault Tree