

가스 폭발시 피해 발생 위험 정도

— 광주 해양도시가스 화재 폭발을 중심으로 —

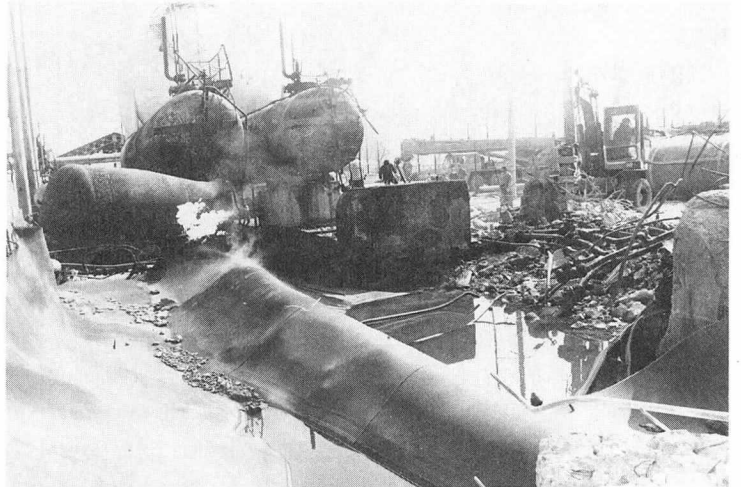
1. 위험도 평가의 필요성

광주 해양도시가스의 화재 폭발이 발생한 후 여러 관련 기관에서 사고 사례에 대한 소개가 있었으며 또한 정부에서 국내 석유화학 공장, 도시가스 사업소 및 화약공장등에 대한 전반적인 안전점검을 현재 실시중 이다. 그러나 재해란 아무리 시설이 잘되어 있어도 작업자의 오조작, 천재지변 등으로 인하여 발생할 가능성을 내포하고 있으므로 사고가 발생하더라도 인근 지역에 최소한의 피해만 미치도록 근본적인 대책 수립이 필요하나, 기존 공장의 경우에는 시설 재보수가 사실상 어려운 형편임은 주지의 사실이다.

따라서 재해 발생시 인근 지역에 막대한 피해를 줄 가능성이 있는 신설 공장에 대해서는 사전에 위험도를 검토하여 근본적인 안전설계와 안전거리를 유지하여야 할 것으로 생각되며, 본 원고에서는 광주 해양도시가스의 사고시 어느 정도의 피해 발생 위험이 있었는가를 기 발표된 사고 사례를 토대로 위험도를 평가하고자 한다.

2. 가스 저장탱크의 사고시 위험

가스 저장탱크의 대표적인 중대재해는 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion, 자유 공간



증기운 폭발)와 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, 비등 액체 팽창 폭발)로 대별할 수 있다.

UVCE는 저장탱크에서 유출된 가스가 구름을 형성하여 떠 다니다가 점화원(나화, 스파크, 기계 마찰열 및 고온표면)과 접촉시 발생할 수 있는 폭발 사고로 가장 위험한 사고 유형이며, BLEVE는 가스 저장탱크 지역의 화재 발생시 저장탱크가 가열되어 탱크내 액체가 급격히 증발하여 탱크내 압력이 저장탱크의 설계 압력을 초과하여 탱크가 폭발하는 형태이다. BLEVE의 경우에는 대부분 탱크내 체적이 200배 정도로 증대되어 압력이 급격하게 증가하므로 탱크에 설치된 안전밸브(Rupture Disk, Vent Stack, Relief

Valve)가 아무리 잘되어 있어도 소용없다. 또한 불연성 물질의 저장탱크(예, 물탱크)는 BLEVE 발생 후 다른 2차적인 위험 조건이 계속 일어나지 않으나, 인화성 액체 저장탱크는 BLEVE와 동시에 Fierball이 형성되므로 그 위험성이 증대된다.

UVCE로 인한 심한 위험성은 폭발압이고, BLEVE는 복사열이 피해를 가중시키는 중요 요소이다. 광주 해양도시가스의 사고가 화재로 인한 BLEVE이므로 여기에서는 BLEVE로 인한 위험의 정도가 어느 정도인가를 평가하였다.

3. BLEVE로 인한 위험도 산정

BLEVE 발생시 인적 및 물적

손실이 일어날 수 있는 요소는 폭발로 인한 폭발압과 탱크의 파열 시 비산되는 파열 물질 및 Fireball 복사열의 영향이다. 가장 피해가 우려되는 것이 복사열로 인한 주변 화재 발생과 소사 및 화상이다. 특히 BLEVE로 인하여 발생하는 Fireball의 지속시간 및 규모에 따라 인근 지역의 피해 크기가 결정된다. 여기에서는 BLEVE로 인한 복사열이 인근지역에 미치는 위험 정도를 CPQRA(Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChE/CCPS, 1989)의 자료를 이용하여 산출하였다.

- 조건 -

저장탱크내 LPG량 : 30 톤(엄밀하게는 BLEVE전에 안전변을 통하여 방출되거나 일부 유출되어 30 톤보다는 적은 량임)

기후조건 : 20°C (대기중 수증기 분압 2810 N/m²)

가. Fireball의 최대 직경

$$D_{max} = 6.48M^{0.325} \dots \dots \dots (1)$$

여기에서 D_{max} : Fireball의 직경(m)

M : 가스저장량(kg)

(1) 식의 M에 30,000kg을 대입하면,

$$D_{max} = 6.48(30,000)^{0.325} = 184.77m$$

나. Fireball의 지속시간

$$t = 0.825 M^{0.26} \dots \dots \dots (2)$$

여기에서 t : BLEVE로 인하여 발생한 Fireball의 지속시간(초)

M : 가스저장량(kg)

(2) 식의 M에 30,000kg을 대입하면,

$$t = 0.825(30,000)^{0.26} = 12sec$$

다. Fireball의 중심부 높이

$$H = 0.75 D_{max} \dots \dots \dots (3)$$

$$= 0.75 \times 184.77 = 138.58m$$

라. 복사열

공장에서 약 200미터 거리에

용봉현대아파트가 있으므로 사고 지점을 기준으로 반경 200m에 어느 정도의 복사열이 미칠 수 있는가를 계산하였다.

1) Fireball의 화염 표면에서 복사열 수체까지의 최단 거리(X)

(그림1)에서 최단 거리는

$$X = [H^2 + L^2]^{0.5} - R_{max} \dots \dots \dots (4)$$

여기서 L : Fireball중심에서 복사열 수체까지의 거리(m)

R_{max} : Fireball의 최대반경(m)

(4) 식에 $H=138.58$, $L=200$,

$$R_{max} = 0.5 \times D_{max}$$

$$= 0.5 \times 184.77 \text{을 대입하면,}$$

$$X = [138.58^2 + 200^2]^{0.5} - 0.5 \times 184.77 = 150.94m$$

2) 열전달률(τ)

복사 열전달은 대기중의 수분함량과 거리에 따라 결정된다.

즉 대기중의 수분 함량이 많으면 복사열의 빛에너지는 산란에 의해 전달되는 열량이 감소하고 또한, 거리가 멀어질수록 열 전달은 작아진다.

$$\tau = 2.02(P_w X)^{-0.09} \dots \dots \dots (5)$$

여기서 P_w : 대기중의 수증기 분압(N/m²)

(5) 식에 P_w 를 대입하면

$$\tau = 2.02(2,810 \times 150.94)^{-0.09} = 0.629$$

3) 시계인자(F_{21})

열 전달은 열원의 표면적과 복사열을 받는 수체의 면적에 따라 달라지며 Fireball 표면(거리 0)에서는 시계인자가 1이되나, 거리가 멀어지면 멀어질수록 시계인자는 1보다 작은 값에서 0으로 수렴한다.

시계인자는 복사 열원의 면적을 복사열 수체의 면적으로 나눈 값으로서 (그림 2)에서 보면 시계인자

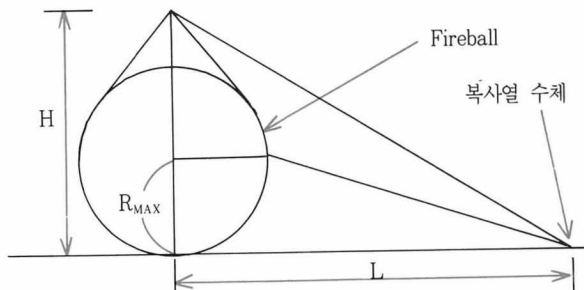
$$F_{21} = \frac{\pi/4 \times D_{max}^2}{\pi L^2} = D_{max}^2 / 4L^2 \dots \dots \dots (6)$$

(6) 식에 $D_{max}=184.77$,

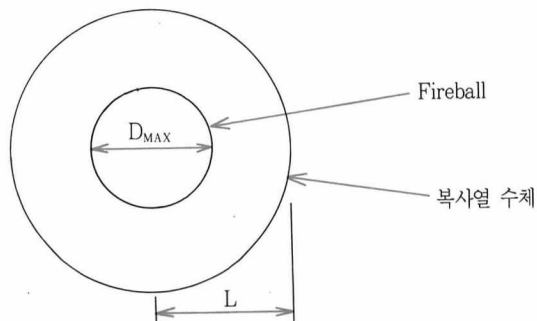
$L=200$ 을 대입하면,

$$F_{21} = 184.77^2 / 4 \times 200^2 = 0.21$$

4) Fireball 표면에서의



<그림 1> Fireball과 복사열 수체거리



<그림 2> 시계인자

열 방출량(E)

$$E = \frac{F_{rad} \times H_c \times M}{\pi D_{max}^2 \times t} \dots (7)$$

여기서 F_{rad} : Fireball 전체 발생열 중 복사열의 비율

0.25(Hymes, 1983; Roberts, 1981)

H_c : 연소열(LPG=46,350 kJ/kg)

(7) 식에 $F_{rad}=0.25$,

$M=30,000\text{kg}$,

$H_c = 46,350\text{kJ/kg}$

$D_{max}=184.77\text{m}$, $t=12\text{ sec}$ 를

대입하면,

$$\begin{aligned} E &= \frac{0.25 \times 30,000 \times 46,350}{\pi \times 184.77^2 \times 12} \\ &= 270.33\text{KJ/s.m}^2 \\ &= 270.33\text{kW/m}^2 \end{aligned}$$

5) 200미터 떨어진 지역에서 받는 복사열(Q_R)

BLEVE가 발생한 부분에서 임의의 지점에서 복사열 수체가 받는 복사열은 Fireball 표면에서의 열 방출량 크기와 열전달률 및 시계인자에 따라 결정되며, 200미터 떨어진 지역에서 받는 복사열, $Q_R = \tau \times E \times F_{21} \dots \dots \dots (8)$

여기서 τ : 열전달율

E : Fireball 표면에서의 열 방출량

F_{21} : 시계인자

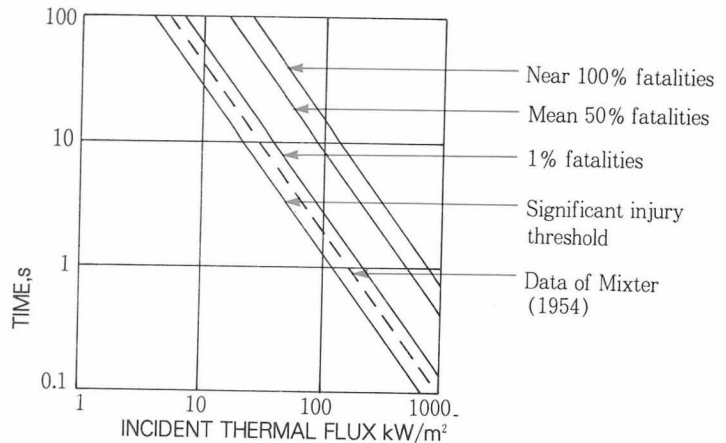
(8) 식에 τ , E , F_{21} 을 대입하면

$$\begin{aligned} Q_R &= 0.629 \times 270.33 \times 0.21 \\ &= 35.71\text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

6) 복사열의 위험성

복사열의 위험성은 복사열 수체에 전달되는 복사열의 크기와 노출된 시간에 따라 그 위험성이 결정된다.

BLEVE가 발생한 지점에서 반경 200미터의 거리에서 받는 복사열(35.71 kW/m²)과 복사열에 노출된 시간(12초)을 이용하여 <도표 1>에서 인적 위험 정도를 알아 볼 수 있으며, 그 위험성은 사망률 1%선에 거의 일치한다.



따라서 BLEVE 발생 지점의 반경 200m에서 12초간 노출되면 100명중 1명은 사망하게 된다는 결론이 도출된다.

4. 결과 평가

가. 조기 대피로 인명 피해 감소

공장에서 반경 1km내 주민(1천세대)대피가 개시된 것이 18시 20분경부터이므로 BLEVE(30톤 LPG저장탱크) 발생(18시 50분)전에 반경 200m부근의 대부분의 주민들은 대피하여 인명 피해를 줄일 수 있었다. 만약 주민 대피가 BLEVE 발생전에 이루어지지 않았더라면, 30톤 LPG탱크 중심으로 반경 200미터까지 많은 사상자가 발생하였으리라 판단된다.

나. BLEVE 발생 지연으로

인명 및 재산 피해 줄임

대부분의 인화성 액체의 탱크화재시 BLEVE 액체를 위한 탱크의 냉각 조치(물분무장치 등)를 취하지 않으면, 화재 발생 10여분 경과후 통상 BLEVE가 발생하나, 소방대의 살수 조치로 화재 발생 55분 경과후 BLEVE가 발생하였다. 따라서 탱크의 냉각 조치를 취하지 않았다면 BLEVE는 인근 주민의 대피전(18시 20분 전)에 발생하여 인명 피해는 더

많았을 것으로 판단된다. 또한 BLEVE 발생전에 LPG는 어느 정도 연소 소진되어 폭발시 관여한 LPG량은 다소 줄어들었다.

따라서 피해 규모와 비례하는 BLEVE의 크기는 위에서 산정한 것보다는 작은 규모였다(목격자에 의하면 Fireball의 높이가 약 100미터 정도였으나, 위에서 산출한 것은 138.58미터임. 이는 BLEVE 발생시 LPG량이 30톤보다 작았음을 의미함).

다. 적극적 소화 활동으로

심각한 중대 재해를 막음

소방대의 적극적인 소화 활동으로 300톤 LPG 저장탱크의 BLEVE를 막은 것은 불행중 다행한 일이다. 만약 탱크저장 지역에 위치한 300톤 LPG 저장탱크에서 BLEVE가 발생하였더라면, 반경 457미터 이내에 있었던 사람들의 사망확률은 Considine and Grint (1984)가 제안한 수식을 이용할 경우 약 50퍼센트(2명중 1명 사망)에 달하는 중대한 재해가 발생하였을 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 방화정보 제 63 호(1992.4)
2. Chemical Process Quantitative Risk Analysis(CCPS/AIChE,1989)