

LPG 저장탱크의 폭발에 의한 주변 저장탱크의 도미노 효과를 고려한 위험성분석

이주영, 김구희^{*1}, 윤인섭
 서울대학교 응용화학부, 서울대학교 화학공정신기술 연구소¹
 (kimkh@pslab.snu.ac.kr*)

Risk analysis of storage tank near the exploded LPG storage tank in consideration of the Domino Effect

Joo Young Lee, Ku Hwoi Kim^{*1}, En Sup Yoon
 School of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
 Seoul National University Institute of Chemical Processes¹
 (kimkh@pslab.snu.ac.kr*)

서론

화학산업은 그 특성상 잠재적으로 사고의 위험을 고려하지 않을 수 없다. 특히 석유관련 저장시설의 경우 그 규모가 크고, 원료의 특성상 사고의 위험으로부터 어떤 경우에도 안전하지 않다. 인화성 물질이 관련된 경우 대형 폭발 사고로 이어질 수 있음에도 우리의 안전 불감증은 이러한 위험을 방치하고 있는 경우가 많다. 저장탱크의 폭발이 일어날 경우 그 폭발의 규모에 따라 주변의 피해규모가 달라지게 되는데 여기에는 크게 세가지의 위험요인이 연관된다. 첫째는 화염에 의한 2차 발화이고, 둘째는 폭발파에 의한 시설물의 파괴, 셋째는 비산물에 의한 피해이다. 본 연구에서는 LPG 저장탱크의 일차폭발을 가정하여, 일차폭발이 주변에 위치한 LNG저장탱크에 영향을 미쳐 이차폭발로 이어질 수 있는지의 여부를 도미노효과를 고려하여 알아보았다. 이 경우 화염에 의한 피해는 상대적으로 적고 폭발파와 비산물에 의한 피해가 커, 두가지 피해원인을 고려하여 이차폭발 가능성을 알아보았다.

본론

1. 이론적배경

1-1 개방계 증기운폭발(UVCE; Unconfined Vapor Cloud Explosion)

액화가스등을 보관하는 장치의 밸브가 파손되거나 노후되면 그 부분으로 저장되어 있던 물질이 누출된다. 누출된 물질은 증기운을 형성하며 대기의 안정도와 바람의 세기에 따라 그 크기와 농도가 달라지게 된다. 이때 농도가 폭발하한계에 도달하기 전에 착화될 경우 화재가 일어나며 폭연(deflagration)이 주로 일어나게 된다. 이때 피해를 예측하는 방법으로 TNT당량모델과 TNO당량모델이 있으며 본 연구에서 사용된 TNT당량모델은 폭발물질을 TNT당량으로 환산하여 피해를 예측하는 방법이다. 1톤의 LPG는 0.42톤의 TNT에 해당하며 M톤의 LPG의 TNT당량에 의한 환산거리(Z)는 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{R}{(0.42 \times M)^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

또한 여기서 구한 환산거리를 이용하여 Fig.1-1로부터 거리 R에서의 피크과압을 얻을 수 있다.

1-2. 폭발에 의한 비산물

저장탱크가 폭발하면 파편이 비산하게 되는데 이를 계산하는 식은 많은 연구가 이루어져

왔다. 그중에 보편적인 방법이 폭발 총 에너지를 이용하여 운동에너지 식에서 속도를 계산하여 파편에 의한 피해를 산정하는 방법이다.

$$E_{tot} = k \frac{P_{ex} V}{r-1}, \quad k = 1 - \left(\frac{P_0}{P_{ex}}\right)^{\frac{r-1}{r}} + \left(\frac{P_0}{P_{ex}}\right) \left(1 - \left(\frac{P_0}{P_{ex}}\right)^{-\frac{1}{r}}\right) \quad (2)$$

위 식에서 폭발에 의한 총 에너지를 구하여 다음의 식을 이용하면 비산물의 초기속도를 구할 수 있다.

$$v_i = \left(\frac{2E_{eff}}{M_{frag}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

비산물의 초기속도는 총 에너지의 0.5배를 이용하게 된다.

2. 장치 세부사항 및 입지상태

본 연구에서 대상으로 한 시설은 지역의 LPG, LNG저장시설이다. 3기의 LPG저장시설의 약 162.5m 거리에 LNG저장탱크 8기가 Fig.2-1과 같이 위치해 있다.

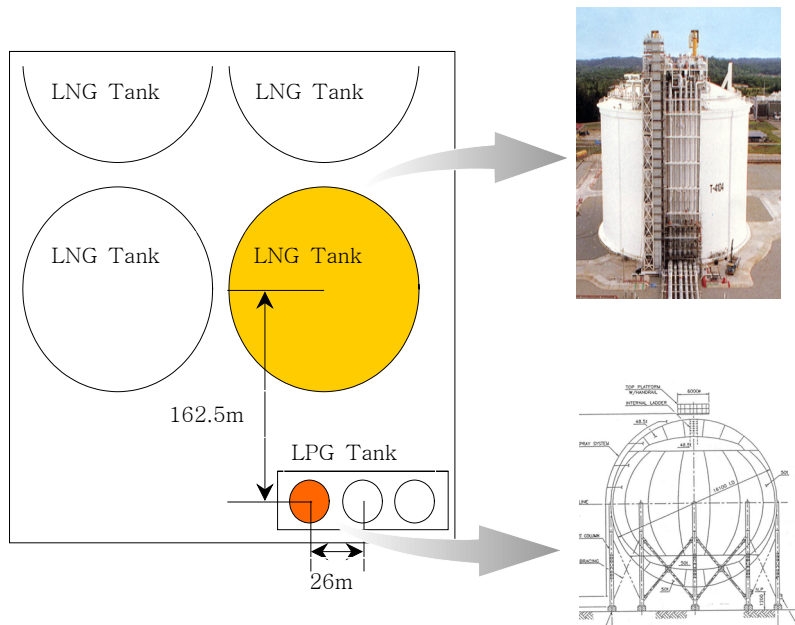


Fig.2-1 LPG, LNG 저장탱크의 입지상태

본 연구에서는 LPG저장탱크에서의 누출로 인한 일차 개방계 증기운 폭발을 가정하여 162.5m 떨어진 곳에 위치한 LNG 저장탱크의 이차 폭발 가능성을 다음과 같은 가정하에 알아보았다.

- (1) 진하게 표시된 LPG탱크 의 밸브누출로 인한 탱크 폭발
- (2) 대기가 안정하여(F Class)증기운이 탱크 주위에 정체되어 있음
- (3) 탱크의 폭발로 인한 영향중 상대적으로 크기가 작은 화염에 의한 피해를 제외하고 과압에 의한 피해와 파편의 비산에 의한 피해만을 고려

3. 폭발에 의한 과압 산정

LPG 저장탱크를 폭원으로 하여 그 중심에서 162.5m 떨어진 LNG탱크에 미치는 과압을 식(1)을 이용하여 LPG누출량에 따라 다음 Fig.3-1과 같이 나타낼 수 있다.

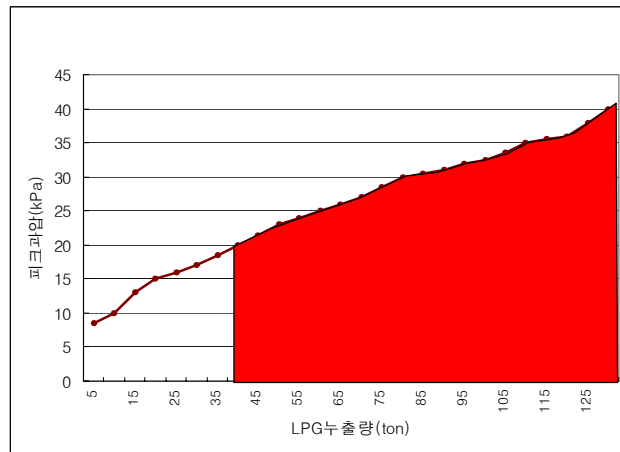


Fig.3-1 LPG누출량에 따른 피크과압

과압이 20kPa이상이 되면 KOSHA CODE에 의해 “지지대가 없는 철제 건축물 또는 기름저장탱크가 파손”하기 시작한다. 따라서 과압에 의한 피해만을 고려할 때 누출량이 40ton 이상이 될 경우 LNG탱크에 치명적인 피해를 입힐 수 있음을 알 수 있다.

4. 비산물에 의한 피해예측

폭발에 의해 파편이 비산할 경우 비산물은 거리에 따라 정규분포를 나타내는 것으로 알려져 있다. 여기서 고려해야 할 인자는 파편의 초기속도와 파편의 수이다.

식(2), (3)에서 $P_{ex}=20\text{kPa}$, $P_0=101.325\text{kPa}$, 용기의 체적 $V=2185\text{m}^3$, $r=1.39$ 일때 $k=0.785$ 이므로 $E_{tot}=8.80 \times 10^7\text{J}$ 이다. 이때 유효에너지 $E_{eff}=E_{tot}/2$ 이므로 $E_{eff}=4.40 \times 10^7\text{J}$ 이 된다.

이를 이용하여 초기속도를 구하면 $v_i = \left(\frac{2E_{eff}}{M_{frag}}\right)^{\frac{1}{2}}$ 이고 총 중량이 340ton인 LPG탱크가

균일한 파편으로 분리되어 비산할 때 파편수에 따른 비산 초기 속도를 도시하면 Fig.4-1과 같다.

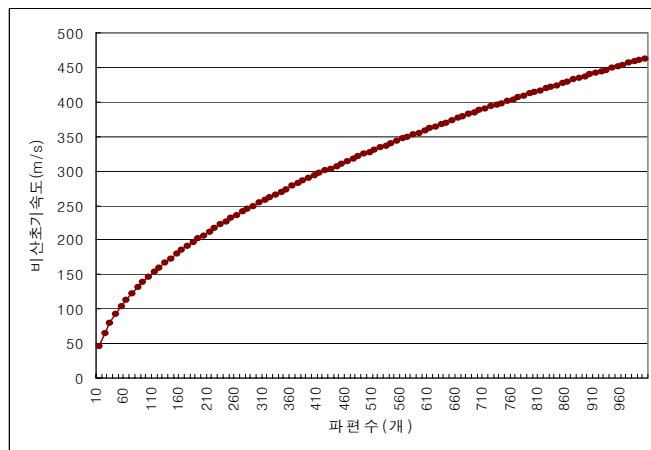


Fig.4-1 파편수에 따른 비산초기속도

Cox와 Saville(1975)는 “고압안전코드”에서 폭발시 파편이 침투하는 깊이를 다음식으로 표시하고 있다.

$$t = Km^{n_1}V^{n_2} \tag{4}$$

재질별 상수값을 이용하여 식(4)를 통해 파편에 의한 침투깊이를 계산하면 Fig.4-2와 같다. LNG탱크 파편의 두께는 0.037mm로 일정하다.

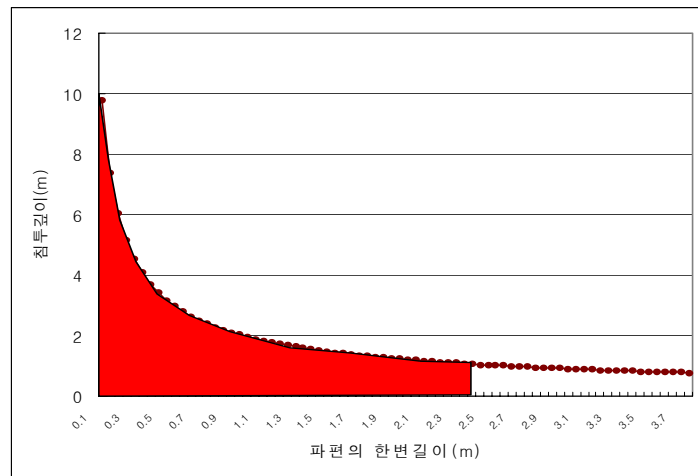


Fig.4-2 파편한변의 길이에 따른 파편의 침투깊이

LNG저장탱크의 경우 약 1m 두께의 콘크리트 외벽으로 만들어져 있으므로 Fig.4-2에 의해 약1963kg보다 가벼운 파편에 의해 LNG저장탱크가 손상을 입어 이차폭발의 가능성이 있음을 알 수 있다.

결론

LPG 저장탱크의 누출로 인해 생기는 폭발에 의해 과압과 비산물이 발생하게 되며 이로 인해 주변에 위치한 LNG 저장탱크가 도미노 효과에 의한 이차폭발의 피해를 입을 수 있다. 본 연구에서 살펴본 바에 따르면 다음과 같이 결론을 얻을 수 있다.

- (1) LPG탱크에서 40ton 이상의 가스가 누출되어 폭발이 일어날 경우 과압은 20kPa 이상이 되어 162.5m 거리에 있는 LNG탱크가 파손될 가능성이 있다.
- (2) 폭발시 생긴 1963kg이하의 파편에 의해 LNG탱크의 외벽이 손상을 입어 누출에 이은 폭발과 같은 이차 피해의 가능성이 있다.

감사의 글

이 연구는 교육인적자원부의 Brain Korea21과 산업자원부의 “웹기반 지능형 통합 안전, 보건, 환경 품질관리시스템 개발”과제, 서울대학교 화학공정신기술 연구소의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 정윤주, 박미진, 안성준, 김용하, 김구희, 박진원, 윤인섭, 화학산업에서의 폭발로 인한 최대과압 변화와 비산물의 영향에 관한 연구, 화학공학의 이론과 응용, 8(1), (2002)
2. Lees, F. P., 장치산업에서의 손실방지공학, 한국산업안전공단, 509-570(1995)
3. 사고피해 예측기법, KOSHA CODE, 한국산업안전공단(2001)
4. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth & Co, (1986.)
5. F. I. Khan, S. A. Abbasi, An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect(chain of accidents)in a typical cluster of industries, J. of Loss Prevention, Elsevier, No.14, 283-306(2001)
6. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed. CCPS, New York, 153-220(2000)