

외부화재시 LPG 소형저장탱크의 안전성에 관한 연구

임지표 · 마병철* · 정창복***

한국산업안전보건공단 · *화학물질안전원 · **전남대학교 응용화학공학부
(2015. 3. 11. 접수 / 2015. 6. 3. 수정 / 2015. 6. 17. 채택)

A Study on the Safety of Small LPG Storage Tanks at External Fires

Ji-Pyo Yim · Byung-Chol Ma* · Chang-Bock Chung***

Korea Occupational Safety & Health Agency

*National Institute of Chemical Safety

**School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University

(Received March 11, 2015 / Revised June 3, 2015 / Accepted June 17, 2015)

Abstract : The purpose of this study is to study the safety of a small LPG storage tank with a capacity less than 3 ton when it is exposed to an external fire. First, simulation studies were carried out using ASPEN Plus and PHAST to demonstrate that overpressurization in the tank can be relieved by discharging the LPG through an adequately sized safety valve, but the release may lead to the secondary risk of fire and explosion around the tank. Next, the temporal variations of the temperatures of the lading and tank wall were obtained using AFFTAC, which showed that the tank wall adjacent to the vapor space could be overheated in about 11 min to such a point that the weakened strength might cause a rupture of the tank and subsequent BLEVE. The consequences of the BLEVE were estimated using PHAST. Finally, several practical measures for preventing the hazards of overheating were suggested, including an anti-explosion device, sprinkling system, insulation, heat-proof coating, and enhanced safety factor for tank fabrication. The effectiveness of these measures were examined by simulations using AFFTAC and ASPEN Plus.

Key Words : small LPG storage tank, external fire, safety valve, BLEVE

1. 서론

LPG(Liquefied Petroleum Gas)는 도시가스보다 더불러 가정에서나 사업장에서 없어서는 안 되는 중요한 물질이지만 누출될 경우 화재나 폭발이 발생할 수 있는 위험한 가스이다. Table 1에 LPG의 주요 성분인 프로판과 부탄의 물성을 나타내었다.

LPG는 저압에서 쉽게 압축되므로 주로 액화상태로 탱크에 저장한 후 기화시켜 사용한다. 특히 아파트 단

지, 고속도로 휴게소, 중소규모 사업장 등에서는 폭발 방지장치나 살수장치 등의 설치를 피하기 위하여 C3-LPG를 3톤 미만의 소형탱크에 저장하거나 합계 5톤 미만의 소형저장탱크를 복수로 설치하여 사용하고 있다. 이는 액화석유가스의 안전관리 및 사업법(액화석유가스법)에서 3톤 이상의 저장탱크에는 폭발방지 장치를 설치하거나 물분무장치(살수장치) 또는 소화전을 설치하여 외부화재시 안전을 확보하도록 의무화하고 있으나 소형저장탱크에는 안전밸브 외에는 특별한 안전조치를 규정하고 있지 않기 때문이다. Fig. 1은 사업장에 설치된 일반적인 소형저장탱크를 보여주고 있다.

C3-LPG 소형저장탱크는 보통 설계압력이 1.8 MPa로 55℃일 때의 증기압에 해당되므로 주변의 온도가 그 이상으로 상승하지 않을 경우에는 안전하다고 할

Table 1. Properties of LPG

Material	Vapor pressure (15℃)	Boiling point (ATM)	Gas SG (15℃)	Explosion range
Propane	0.7MPa	-42.1℃	1.52	2.1~9.5%
n-Butane	0.1MPa	-0.5℃	2.00	1.8~8.4%

* Corresponding Author : Chang-Bock Chung, Tel : +82-62-530-1884, E-mail : chungcb@jnu.ac.kr

School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

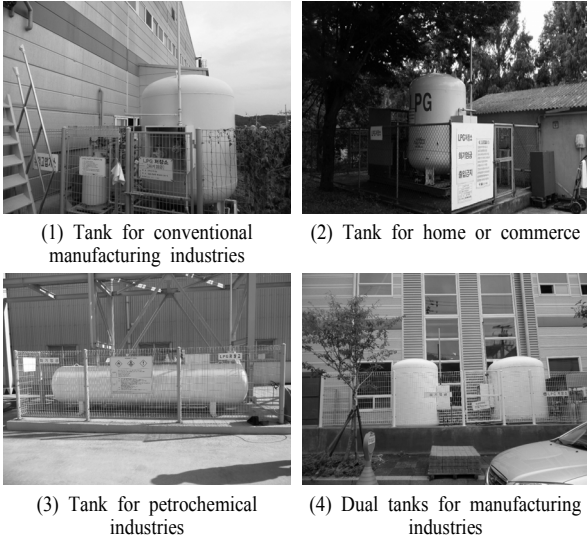


Fig. 1. Small LPG storage tanks.

Table 2. Specification of LPG storage tank

Material	Design pressure (MPa)	Design temp. (°C)	Material	PSV set pressure (MPa)	Calculation thickness (mm)
C3-LPG	1.80	55	SPPV355	1.80	10.95
C4-LPG	0.66	55	SPPV490	0.66	3.42

수 있다. 또한 외부화재 등에 의해 탱크의 압력이 상승하여도 안전밸브가 저장탱크의 설계압력 이하에서 작동하여 과압에 의한 파열을 방지할 수 있다. Table 2는 소형저장탱크의 설계압력 등의 주요 명세를 보여주고 있다.

하지만 Fig. 1에서와 같이 주변건물, 나무 등에 의한 화재나 옆에 설치된 다른 소형저장탱크의 파열 등에 의한 화재에 취약한 상태가 된다. 외부화재가 10분 이내에 진화되지 않고 장시간 진행될 경우 LPG 소형저장탱크는 압력 상승에 의한 위험 외에 추가적인 위험이 존재한다. 첫째, 외부화재에 의해 작동한 안전밸브에서 방출되는 LPG에 의한 위험성이다. 대부분의 석유화학공장에서는 안전밸브에서 배출되는 인화성가스를 플래어스택에서 소각처리하고 있지만, 아파트단지나 일반 제조업 등에서는 대기로 방출하고 있다. 대기로 방출된 LPG는 화염이나 주변 건물 내의 점화원에 의해 2차적인 화재나 폭발을 일으킬 수 있다. Lee 등¹⁾에 의하면 안전밸브의 방출구를 지면으로부터 5 m 이상 또는 탱크 상부로부터 2 m 이상의 높이에만 설치하도록 되어 있을 뿐 방출되는 LPG의 안전성에 대해서는 어떠한 규정도 없다. 둘째, 화재가 10분 이상 장시간 지속될 경우 탱크의 강도 저하에 의한 파열로

분출화재(Jet fire) 또는 비등액체팽창증기폭발(BLEVE, Boiling-Liquid Expanding-Vapor Explosion)이 발생할 수 있다.²⁾ 대표적인 사례가 1998년 발생한 부천 LPG 충전소 폭발사고이다.³⁾ 마지막으로, 탱크에서 외부화재에 의한 BLEVE 등이 발생할 경우 주변의 근로자 또는 주민이나 설비에 막대한 영향을 미칠 수 있다.

지금까지 외국에서는 다수의 LPG 탱크를 탑재한 기차의 전복에 의한 화재로 BLEVE가 자주 발생하여 외부화재시 LPG 탱크의 파열가능성에 대한 실험 및 연구를 많이 수행하였다.^{9~13)} 반면 국내에서는 유사한 사고가 많이 발생하지 않아 관련 연구가 소홀하였으며 부천 사고 결과를 바탕으로 역으로 입열량 등을 계산한 사례³⁾는 있지만 외부화재시 LPG 탱크의 압력, 온도, 파열가능성 등을 구체적으로 연구한 사례는 없었다.

이 연구에서는 LPG 소형저장탱크 주변에서 화재가 발생할 경우 과압에 의해 안전밸브에서 방출되는 LPG의 위험성과 과열로 발생할 수 있는 저장탱크의 파열가능성을 PHAST, AFFTAC 및 ASPEN Plus를 이용한 모사를 통해 확인하고, BLEVE 등에 의한 피해 크기를 예측하고자 한다. 아울러 LPG 소형저장탱크 주변에서 화재 발생시 피해를 최소화 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 외부화재시 LPG 소형저장탱크의 위험성

2.1 과압에 의한 위험성

외부화재가 발생할 경우 안전밸브의 배출용량 W (kg/hr)는 총입열량 Q (kcal/hr)와 증발잠열 λ (kcal/kg)에 따라 다음과 같이 계산된다.⁴⁾

$$W = Q / \lambda \tag{1}$$

총입열량은 적절한 배유설비 또는 소화설비(살수설비와 같이 즉각적인 소화가 가능한 설비)가 있을 때에는 식 (2)를 사용하고 그 외에는 식 (3)을 사용한다.⁴⁾

$$Q = 37,000 F A_w^{0.82} \tag{2}$$

$$Q = 61,000 F A_w^{0.82} \tag{3}$$

여기서,

F : 환경변수(-)

A_w : 내부액체에 접촉하는 탱크의 면적(m²)

환경변수는 열전도도 및 분출 유체의 온도로부터 다

음 식으로 계산한다.

$$F = \frac{k(904 - T_f)}{57,000t} \quad (4)$$

여기서,

k : 열전도도(kcal/hr·m²·°C/mm)

T_f : 분출 유체의 온도(°C)

t : 보온재의 두께(mm)

370°C에서 열전도도가 101.7 kcal/hr·m²·°C/mm인 규산칼슘으로 제작된 보온재의 두께가 10 mm일 경우 환경변수는 0.15이다. Table 3은 산업현장에서 주로 사용하는 보온재의 열전도도와 이를 통해 계산된 환경변수를 나타내고 있다.

Table 3. Thermal conductivity and environment factor
unit(k) : kcal/hr · m² · °C/mm @370°C

Material Variable	Calcium silicate	Mineral fiber	Glass fiber	Perlite
k	101.7	139.7	80.6	109.1
F	0.15	0.21	0.12	0.16

소화설비 설치 유무와 10 mm 두께의 보온재 설치 유무에 따른 4개 시나리오에 대해 안전밸브의 배출용량을 계산한 결과를 Table 4에 나타내었다. 배출용량의 계산은 지름과 높이가 각각 1.8 m와 2 m인 수직형 탱크를 가정하였으며 액체상태의 LPG와 저장탱크의 접촉면적은 초기 액체의 액위를 1.6 m로 하여 9.0 m²를 적용하였다.

Table 4. Required capacity of safety valve

Firefighting	Factor	F = 1.0	F = 0.15
No firefighting		5,915 kg/hr	887 kg/hr
With firefighting		3,588 kg/hr	538 kg/hr

소화설비 설치와 보온재의 설치에 따른 배출용량은 최대값과 최소값이 약 10배의 차이가 난다. 즉, LPG 저장탱크 주변에서 화재가 발생할 경우 10 mm 두께의 보온재가 설치된 저장탱크에 즉각적으로 사용할 수 있는 소화설비가 설치되어 있으면 소화설비와 보온재가 설치되지 않은 경우에 비해 훨씬 적은 양만 대기로 방출하여도 압력 상승을 막을 수 있다.

LPG 저장탱크에 설치하여야 하는 안전밸브 규격은

오리피스 면적으로 나타내는데, 이 면적은 임계흐름일 경우 다음 식으로 구한다.⁶⁾

$$A = \frac{131.6 W \sqrt{TZ}}{CK_d P_1 K_b K_c \sqrt{M}} \quad (5)$$

여기서, A : 필요한 오리피스 면적(m²)

T : 인입측에서 배출 유체의 온도(K)

Z : 유체의 압축계수(-)

C : 비열용량계수(-)

K_d : 분출계수(-)

P_1 : 인입측 배출압력; 설정압력+초과압력 (Bara)

K_b : 배압용량계수(-)

K_c : 결합보정계수(-)

앞서 언급한 4개 시나리오에 대해 구한 오리피스의 면적과 그에 따라 선정된 표준화된 안전밸브의 규격을 Table 5에 나타내었다. Table 6은 표준화된 안전밸브 규격 별로 오리피스의 면적 및 내경과 토출측 배관의 공칭 직경 및 정격용량을 나타낸다. 오리피스의 면적 즉, 안전밸브의 크기는 적절한 소화설비 설치 유무와 보온재 시공 유무에 따라 상당한 차이를 보임을 알 수 있다.

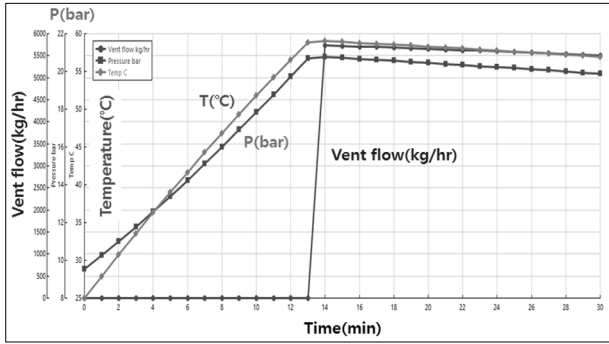
Table 5. Orifice Type of safety valve

Firefighting	Factor	F = 1		F = 0.15	
		No firefighting	290 mm ²	G	43 mm ²
With firefighting		176 mm ²	F	26 mm ²	D

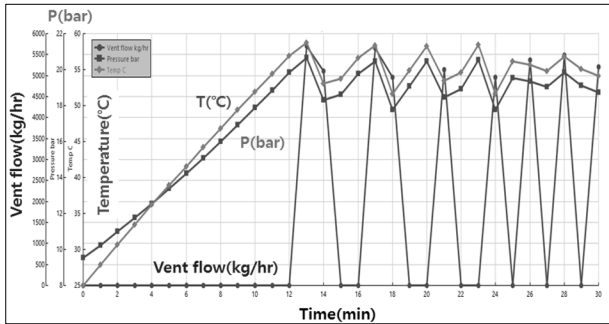
Table 6. Specification of safety valve

Orifice	Area (mm ²)	Diameter (mm)	Pipe ID (mm)	Rated (kg/hr)
D	71	9.5	52.5	1,398
E	125	12.6	52.5	2,462
F	198	15.9	52.5	3,900
G	325	20.3	62.7	6,401

안전밸브가 설치된 LPG 저장탱크 주변에 화재가 발생할 때 탱크 내부의 압력 및 온도가 보이는 동적 거동을 ASPEN Plus를 이용하여 모사하였다. 안전밸브로는 2.1절에서 설정한 오리피스 G를 사용하였고, 80%와 20%로 각각 충전된 두 개의 탱크 주변에서 30분 동안 화재가 일어나는 것으로 가정하였다.



(1) 80% Fillage



(3) 20% Fillage

Fig. 2. Dynamic simulation results(F=1.0, Orifice G).

Fig. 6은 이러한 동적모사의 결과를 보여주고 있다. 80% 충전된 경우에는 화재 발생 10분 만에 저장탱크의 설계압력(1.8 MPa)에 이른 후 14분 만에 안전밸브가 작동하고, 탱크 내부는 초과압력(설계압력의 121%, 2.178 MPa)과 그에 해당하는 온도(60°C) 이하로 유지된다. 반면 20% 충전된 경우에는 안전밸브의 크기가 배출용량에 비해 커서 안전밸브는 12분 만에 작동하기 시작한 후 차단과 작동이 반복되나, 탱크 내부의 압력과 온도는 80% 충전된 경우와 마찬가지로 안전밸브의 초과압력과 해당 온도를 유지한다. 즉, LPG 저장탱크 주변에서 화재가 발생할 경우 적당한 크기의 안전밸브가 설치되어 있으면 과압에 의해 탱크는 파열되는 않는다는 것을 알 수 있다.

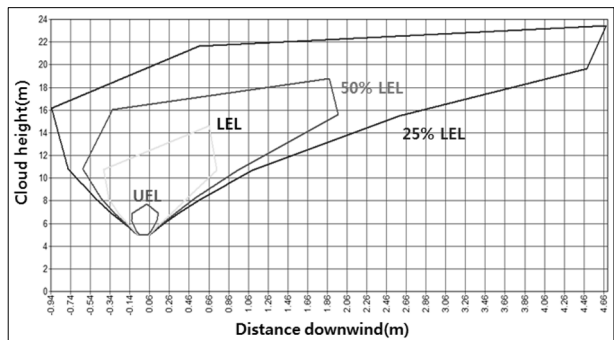
하지만 안전밸브에서 배출되는 LPG를 안전하게 처리하지 않고 대기로 방출할 경우 화염 등에 의해 2차적인 화재나 폭발이 발생할 수 있으므로 배출용량이 작을수록 위험성은 작아진다. 안전밸브 방출구에 대해 높이 외에 다른 규정은 없으며 일부 방출구는 지면을 향하는 경우도 있다¹⁾. 지면을 향하는 방출구 뿐만 아니라 방출구가 수직 또는 수평으로 설치되어 있어도 2층 이상인 주변 건물의 높이는 방출구의 높이인 5 m를 초과하므로 화재나 폭발로 이어질 수 있다. 지상으로부터 5 m에 설치한 안전밸브(오리피스 G)를 통해 C3-LPG(propane)

Table 7. PHAST Analysis for orifice G

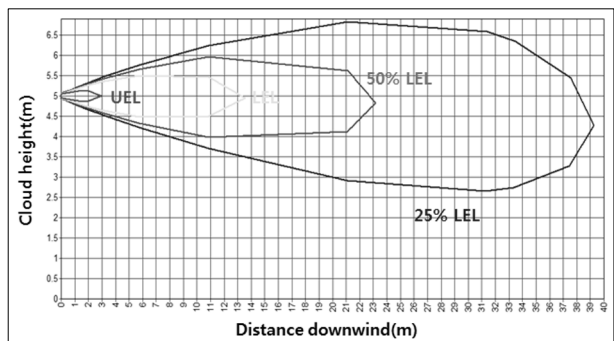
Direction	Vertical(m)	Horizontal(m)
Vertical	10.0	1.0
Horizontal	1.0	14.0

가 수직 및 수평 방향으로 배출될 때 폭발하한계(LEL)로 확산되는 수직 및 수평거리를 피해예측프로그램인 PHAST를 활용하여 구한 결과를 Table 7에 나타내었다.

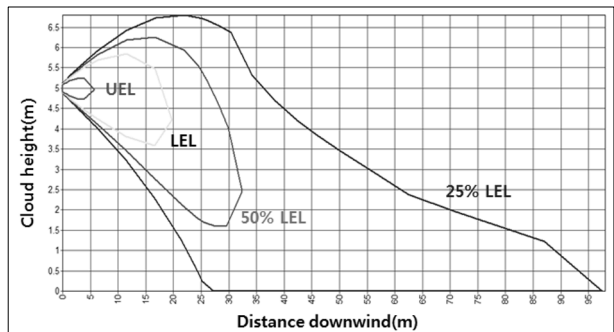
Fig. 2는 적절한 안전밸브 방출구가 수직, 수평 및 장애물이 있는 수평을 향하고 있을 때의 피해예측 결과이다. 그림에서 가장 안쪽 선부터 각각 폭발상한계(UEL), 폭발하한계(LEL), 폭발하한계의 50%(50% LEL)



(1) Vertical



(2) Horizontal



(3) Horizontal Impingement

Fig. 3. Consequence analysis for orifice G.

Table 8. PHAST Analysis for orifice D

Direction	Vertical(m)	Horizontal(m)
Vertical	5.0	1.0
Horizontal	1.0	9.5

및 25%(25% LEL)를 나타내고 있다. 이 확산 결과에서 보듯이 소형저장탱크에 적절한 소화설비나 보온재를 시공하지 않을 경우에는 안전밸브에서 배출되는 LPG의 양이 많아 주변 건물 등에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

반면 Table 8은 소형저장탱크에 구산칼슘으로 제작된 보온재를 시공하였을 경우 폭발하한계로 확산되는 수직 및 수평거리를 나타낸다. 열전도도에 의해 계산된 환경변수(0.15)를 사용함으로써 배출용량이 5,915 kg/hr에서 887 kg/hr로 감소하며, 따라서 안전밸브의 크기도 G에서 최소 오리피스인 D로 바뀌어 확산 거리가 크게 줄어들을 알 수 있다. 이 결과를 통해, 보온재를 사용하더라도 폭발범위를 형성하지만 그렇지 않은 경우에 비해 그 크기가 훨씬 작아지며, 10 m 이상의 안전거리를 유지하면 다른 점화원에 의해 폭발할 가능성은 낮아짐을 알 수 있다.

2.2 과열에 의한 위험성

LPG 소형저장탱크 주변에서 화재가 발생할 경우 상승되는 압력은 안전밸브를 통해서 방출함으로써 해결이 가능하다. 하지만 외부화재시 압력만 상승하는 것이 아니라 온도도 함께 올라간다. 액상의 LPG와 접촉하고 있는 아래 부분은 LPG의 증발에 의해 온도 상승이 제한적이지만 상부의 가스와 접촉하고 있는 부분은 급격한 온도 상승으로 강도가 떨어져 파열될 수 있다. 액체와 접촉하지 않은 다양한 두께의 탄소강 판(plate)이 외부화재에 노출될 때 시간에 따른 온도 상승 경향을 보여주는 API STD 521⁵⁾에 의하면, 소형저장탱크의 두께와 비슷한 12.7 mm의 판이 화재에 노출될 때 7분 이내에 649°C까지 오를 수 있다. 또한 과열에 따른 탄소강(A-515 Gr. 70)의 강도를 보여주는 그래프에 의하면 649°C에서 138 MPa의 응력을 받을 때 6분 이내에 파열될 수 있다. 또한 Landucci 등⁷⁾에 의하면 화재보호조치가 되어 있지 않은 LPG 탱크는 액면화재시 5~25분정도만 견딜 수 있다. 하지만 Son⁸⁾에 의하면 국내에서 119에 신고 후 현장 도착까지의 시간은 10분 이내가 72.6%이나 10~30분 이내는 23.7%이며 30분 이상 지연된 경우도 3.7%나 된다. 즉, LPG 저장탱크 주변에서 화재가 발생했을 때 소방차가 도착하는 데 10분 이

상 걸리는 약 27%의 경우에는 탱크가 파열될 수 있다.

Zamejc⁹⁾에 의하면 외부화재시 과열에 의한 강도 저하 때문에 저장탱크의 설계에 사용된 과압 대비용 안전율(3.5)을 초과하여 저장탱크의 파열을 가져올 수 있다. 예를 들면 상온에서 탄소강(A-515 Gr.70)의 인장강도는 482.6 MPa이므로 허용응력은 482.6/3.5에 의해 138 MPa이다. 그러나 이 탄소강으로 제작된 저장탱크가 649°C로 가열되면 인장강도가 138 MPa로 떨어져 재질의 강도에 안전율을 주지 않은 셈이 되므로 저장탱크의 압력이 이 허용응력을 초과할 때 파열됨을 의미한다.

API STD 521⁵⁾ 등의 자료는 대부분 100% 액면화재나 분출화재(Jet fire)에 따른 결과를 나타낸다. 하지만 Birk¹⁰⁾ 등에 의하면 25% 액면화재 의해서도 저장탱크는 파열될 수 있다. 특히 Heymes¹¹⁾ 등은 액면화재나 분출화재가 아닌 주변 건물의 화재(Remote wall fire)에 의해서 저장탱크가 파열되는 실험결과를 발표하였다. 비록 25%의 액면화재나 주변 건물의 화재에 의해서는 직접적으로 탱크 본체가 파열되지 않더라도 부속품의 파열이 본체의 파열로 이어질 수 있다. 국내에 설치된 대부분의 LPG 소형저장탱크는 주변에는 위험물을 보관하지 않아 액면화재나 분출화재가 발생하지 않을 수 있지만 주변 건물의 화재나 산림의 화재는 일어날 수 있다. 또한 소형저장탱크 2기(2.9톤 및 2톤 각 1기) 이상을 설치한 후 5톤 미만 저장하는 경우에는 하나의 탱크에서 분출화재가 발생하여 다른 탱크에 영향을 줄 수 있다.

LPG 저장탱크 주변에서 화재 발생시 과열에 의한 위험성을 AFFTAC(Analysis of Fire Effects on Tank Cars)을 이용하여 검토하였다. AFFTAC은 미국연방철도국(United States Federal Railroad Administration)이 탑재된 탱크 주변에서 발생한 화재의 영향을 예측하기 위하여 개발한 컴퓨터 프로그램이다. AFFTAC은 위험물의 온도, 탱크 벽면의 온도, 탱크 내부의 압력, 탱크의 파열 등을 예측할 수 있으며 다음과 같은 단순화 가정을 포함하고 있다.

- ① 탱크 내부의 액상과 기상의 온도(T_{LPG})는 동일하며 시간에 따라서 변하지만 공간적으로는 균일하다.
- ② 액상과 접촉하고 있는 탱크 안쪽 벽면의 온도는 액상의 온도와 동일하다.
- ③ 탱크는 화재의 복사열에 의해서만 가열되고 주변 공기와의 대류는 무시된다.
- ④ 탱크 벽의 열은 다음 세 가지 방식으로 내부의 LPG에 전달된다.

- 탱크 벽을 통한 액상으로 전도
- 탱크 벽면으로부터 기상으로 대류
- 기상과 접촉하고 있는 탱크 벽면으로부터 액상 표면으로 복사

Fig. 3은 AFFTAC에서 정의하는 온도와 열흐름을 나타내고 있다.

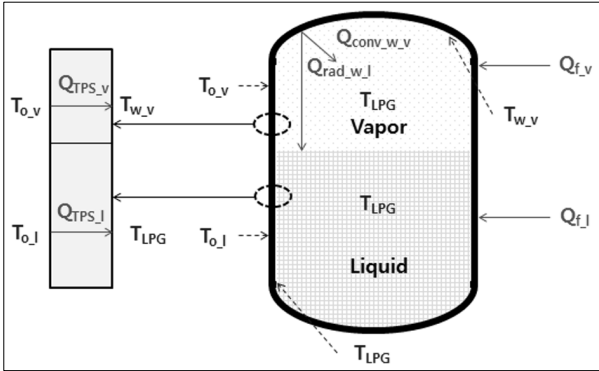


Fig. 4. Temperature definitions & heat flows.

다음 식은 열흐름에 대한 정의와 탱크 내부 기상과 접촉하고 있는 탱크 벽면의 온도와 탱크 내부 LPG의 온도 변화를 산출하기 위한 에너지수지식이다.

$$Q_{f,l} = \sigma f_{f,w} (\epsilon_f T_f^4 - \epsilon_w T_{o,l}^4) \quad (6)$$

$$Q_{f,v} = \sigma f_{f,w} (\epsilon_f T_f^4 - \epsilon_w T_{o,v}^4) \quad (7)$$

$$Q_{TPS,l} = k(T_{o,l} - T_{LPG})/l \quad (8)$$

$$Q_{TPS,v} = k(T_{o,v} - T_{w,v})/l \quad (9)$$

$$Q_{rad,w,l} = \sigma f_{w,l} (T_{w,v}^4 - T_{LPG}^4) \quad (10)$$

$$Q_{conv,w,v} = h(T_{w,v} - T_{LPG}) \quad (11)$$

$$m_{w,v} C_p \frac{dT_{w,v}}{dt} = Q_{TPS,v} - Q_{rad,w,l} - Q_{conv,w,v} \quad (12)$$

$$m_{(liquid+w,l)} C_p \frac{dT_{LPG}}{dt} = Q_{TPS,l} + Q_{rad,w,l} + Q_{conv,w,v} + W_{flow} - m_v H_v \quad (13)$$

여기서,

$Q_{f,l}, Q_{f,v}$: 화염에서 탱크에 전달되는 복사열 (kcal/m²/hr)

$Q_{TPS,l}, Q_{TPS,v}$: 탱크 벽을 통한 전도열(kcal/m²/hr)

$Q_{rad,w,l}$: 기상 벽을 통한 복사열(kcal/m²/hr)

$Q_{conv,w,v}$: 기상 벽을 통한 대류열(kcal/m²/hr)

σ : 스테판볼츠만 상수(4,878 kcal/hr/m²/K⁴)

$f_{f,w}$: 불꽃과 탱크의 배치계수(-)

$f_{w,l}$: 탱크내부 벽과 액상의 배치계수(-)

ϵ_f : 불꽃의 복사능(-)

ϵ_w : 탱크 벽의 복사능(-)

k : 탱크 벽의 열전도도(kcal/m/K)

l : 탱크 벽의 두께(m)

h : 탱크 내부 기상에서의 열전달계수(kcal/m²/K)

$m_{w,v}$: 기상과 접촉하고 있는 탱크벽의

단위면적당 질량(kg/m²)

$m_{(liquid+w,l)}$: 액상과 접촉하고 있는 탱크벽의

질량과 액상 LPG의 단위면적당 질량(kg/m²)

C_p : 탱크벽 또는 LPG의 열용량(kcal/kg/K)

W_{flow} : 안전밸브 작동시 수행되는 일(kcal/m²/hr)

m_v : 증발량(kg/m²/hr)

H_v : 증발잠열(kcal/kg)

위험성 검토시 LPG 소형저장탱크는 실제 탱크와 유사하게 탄소강으로 제작된 것을 가정하였으며 안지름과 체적 및 두께는 각각 1.8 m와 6.8 m³ 및 12.7 mm를 사용하였다. 또한 불꽃과 저장탱크 벽의 복사능(0.9) 등은 API STD 521⁵⁾, F.Heymes 등¹¹⁾, T.A.Roberts 등¹³⁾을 참고하여 선정하였다. 다만 배치계수, 열전도도, 열전달계수, 열용량, 증발잠열 등은 AFFTAC 내부에서 계산된 값을 사용하였다.

Fig. 4는 LPG의 온도(T_{LPG})와 기상과 접촉하고 있는 탱크 벽면의 온도($T_{w,v}$)를 나타내며 Fig. 5는 탱크 내부의 압력 상승과 탱크 벽면의 인장강도 저하에 따른 탱크 파열시간을 보여준다. AFFTAC을 이용하여 LPG 저장탱크 주변에서 화재가 발생할 경우 탱크의 영향을 모사하면 화재가 발생한 후 약 11분이 경과하여 탱크는 파열되며 이때 탱크 벽면의 온도와 탱크 내부의 압력은 각각 593℃와 2.4 MPa이었다. 참고로 AFFTAC은

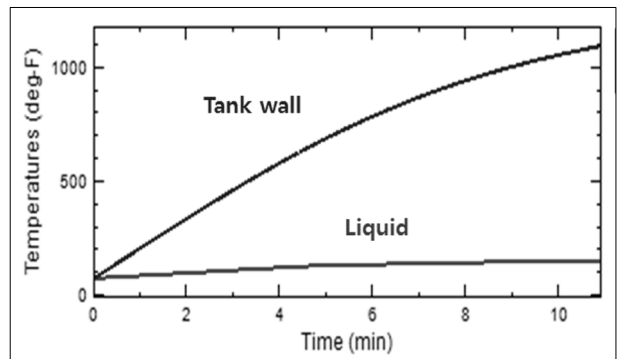


Fig. 5. Liquid phase and tank wall temperatures.

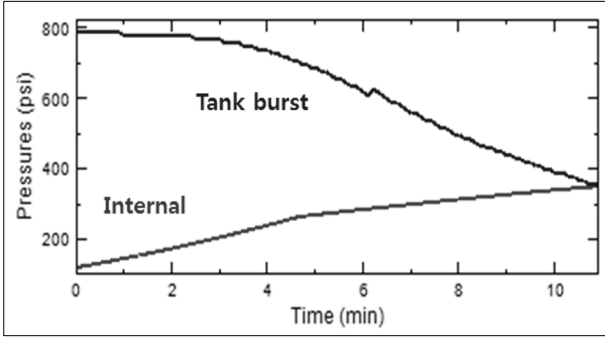


Fig. 6. Tank pressure and tensile stress.

미국에서 사용되는 프로그램으로 SI 단위계가 아닌 미국단위계를 사용하므로 그래프에서도 미국단위계로 표현되었다.

2.3 탱크 파열에 따른 피해예측 결과

LPG 소형저장탱크 주변에서 화재가 발생하여 10분 이내에 소화가 되지 않을 때에는 저장탱크 파열에 의한 분출화재나 BLEVE가 발생할 수 있다. 여기서는 KOSHA Guide에서 제시한 최악의 누출 시나리오 선정지침¹⁴⁾과 화학공장의 피해최소화대책에 관한 기술지침¹⁵⁾에 의해 시나리오를 선정한 후 PHAST를 이용하여 피해결과를 예측하였다.

Fig. 7은 저장탱크의 부속품에서 5 mm의 핀홀이 발생하여 분출화재가 발생할 경우 거리에 따른 복사열을 나타낸다. 7~10 m 거리에서 최대 122 kw/m²의 복사열이 가능하며, 이는 장치 및 설비가 파손되는 복사열 37.5 kw/m²을 훨씬 초과한다¹⁶⁾. Fig. 8은 액체와 접촉하지 않은 탱크 벽이 파열되어 BLEVE가 발생할 경우 거리에 따른 폭발과압을 나타낸다. 5 m 거리에서 12 bar, 10 m 거리에서 3 bar의 폭발과압을 발생시킬 수 있으며, 이는 대부분의 건축물이 전파되는 0.7 bar를 초과하는 과압이다.¹⁵⁾

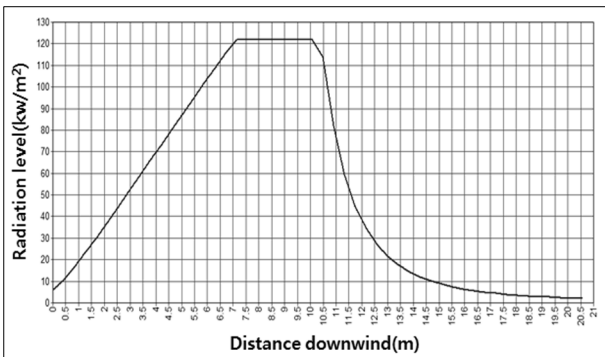


Fig. 7. Jet fire at small storage tank.

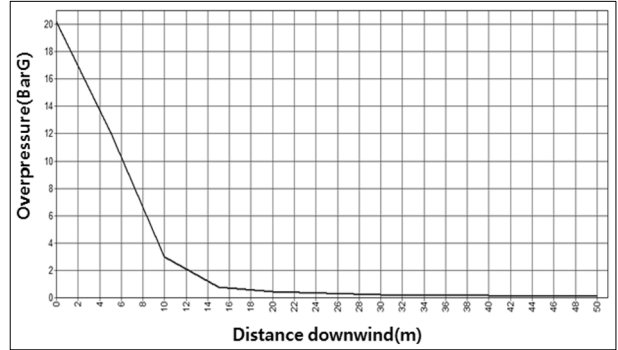


Fig. 8. BLEVE at small LPG storage tank.

3. LPG 소형저장탱크의 안전성 향상 방안

LPG 소형저장탱크 주변에서 화재가 발생할 경우 탱크를 보호할 수 있는 가장 좋은 방법은 지하에 매설하는 것이다. 지하 매설은 화재의 영향을 사전에 차단하는 최선의 방법이지만 저장탱크의 유지관리가 어렵다는 단점이 있다. 차선택으로 탱크에 다공성 벌집형 알루미늄 합금박판으로 제작된 폭발방지장치를 부착하거나 물분무설비(살수장치)를 설치할 수 있으나, 기존 탱크에 폭발방지장치를 설치하는 것도 쉽지 않으며 가정이나 소규모 사업장에서 물분무설비를 갖추는 것 역시 쉽지 않으므로 적절한 보온재나 내열코팅을 시공하는 것이 효과적일 것이다. 이때 보온재의 외피는 화재에 견딜 수 있도록 알루미늄이나 함석이 아닌 스테인레스강으로 시공하여야 한다. 마지막으로, 안전율을 3.5가 아닌 4 이상을 적용하여 탱크를 두껍게 제작하거나 탄소강이 아닌 고온에 강한 재질(스테인레스강 등)로 탱크를 제작함으로써 외부화재시 119가 도착할 때까지 강도를 유지하는 것도 고려할 수 있다. 하지만 스테인레스강으로 탱크를 제작하는 것은 경제적인 측면을 감안할 경우 바람직하지는 않다.

이러한 LPG 탱크의 안전성 향상 방안에 따른 탱크 파열 시간 연장 효과를 알아보기 위하여 AFTTAC을

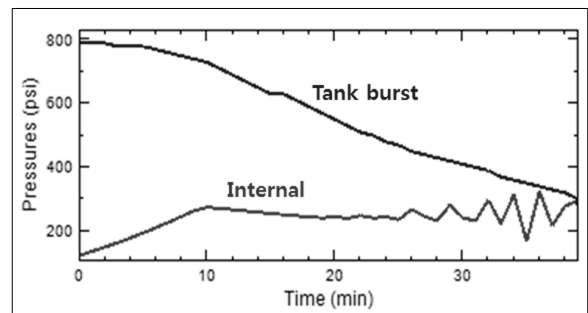


Fig. 9. Results for fireproof coating.

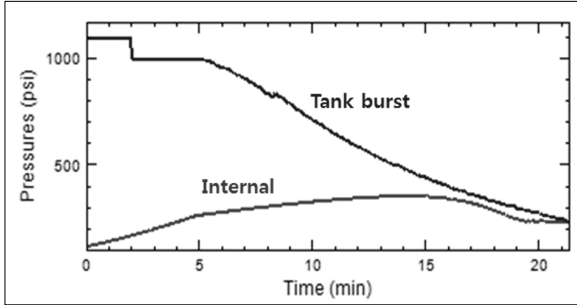


Fig. 10. Results for safety factor = 4.

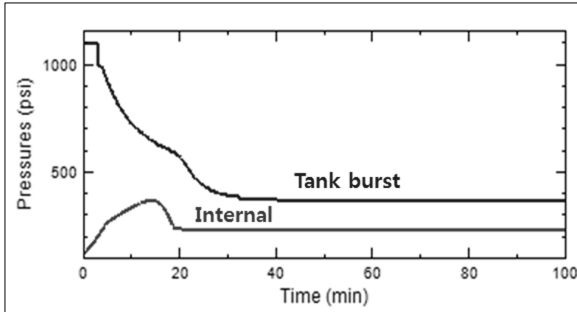
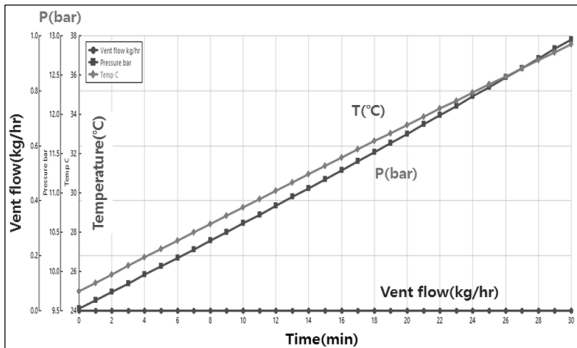
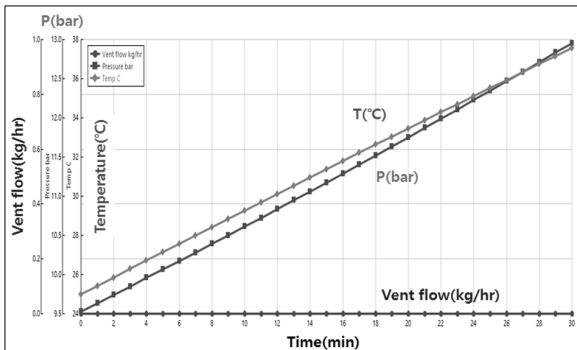


Fig. 11. Results for stainless steel tank.



(1) 80% Fillage



(2) 20% Fillage

Fig. 12. Dynamic simulation results(F=0.15, Orifice D).

이용한 모사를 수행하였다. Fig. 9는 0.1 kcal/m²·hr·°C의 열전도율을 갖는 내열코팅(1 mm)을 실시한 경우, Fig.

10은 안전율을 3.5에서 4로 높일 경우, Fig. 11은 탱크 재질을 탄소강에서 스테인레스강으로 바꿀 경우에 예상되는 파열 시간을 각각 나타내는 그래프이다. 세 가지 방법 모두 119가 도착할 수 있는 20분 이상 동안 탱크가 파열되지 않고 충분히 견디는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 소형저장탱크에 10 mm 두께의 규산칼슘 보온재(F : 0.15)를 시공할 경우 탱크 내부의 압력 및 온도가 외부화재에 대해 보이는 거동을 Aspen plus를 이용하여 모사한 것이다. 탱크 내부에서 액상 LPG의 증발이 억제되어 30분 이내에는 안전밸브가 작동하지 않아 배출량(Vent flow)이 없으며, 압력은 조금씩 증가하지만 30분 후에도 설계압력 보다 낮음을 보여준다.

위에서 언급한 다양한 방법 중에서 경제성 등을 고려하여 가정이나 사업장의 특성에 맞는 방법을 선정하여 LPG 소형저장탱크 주변에서 화재 발생시 탱크 파열 등을 예방하여야 할 것이다. 아울러 LPG 소형저장탱크는 사무실 등과의 충분한 안전거리를 확보하거나 저장탱크 주변에 방호벽을 설치하여 최악의 경우에 대비하여야 할 것이다.

4. 결론

가정용이나 사업장으로 많이 사용되고 있는 3톤 미만의 LPG 소형저장탱크 주변에서 화재 발생시 탱크의 안전성에 대해 조사하였다. 먼저, 1차적으로 탱크에 설치된 안전밸브가 작동하여 과압을 해소할 수 있지만, 방출되는 LPG로 인한 2차적인 화재나 폭발을 가져올 수 있음을 ASPEN Plus와 PHAST 모사를 통해 보였다. 다음, AFFTAC을 이용하여 탱크 내부와 벽면의 온도를 동적모사한 결과, 액체와 접촉하지 않는 벽이 과열에 따른 강도저하로 파열되어 분출화재나 BLEVE로 이어질 수 있음을 보였다. 이어, PHAST를 이용하여 분출화재에 따른 복사열을 계산한 결과 7~10 m 거리에서 최대 122 kw/m²이며 BLEVE에 따른 폭발과압은 5 m 거리에서 12 bar 등 거리별 분포가 매우 위험한 수준을 보였다.

이 연구를 통해 외부화재에 대비하여 소형 LPG 저장탱크에도 폭발방지장치나 살수설비를 설치하는 것을 권장하였다. 기존 저장탱크나 소규모 사업장에서 이런 설비가 곤란한 경우, 보온재나 내열코팅, 탱크 설계시 안전율 제고 등을 대안으로 제시하였다. 마지막으로, 이런 방안 에 따른 안전성 향상 효과를 AFFTAC과 ASPEN Plus를 이용한 모사를 통해 제시하였다.

감사의 글 : 이 논문은 2014년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) J. -H. Lee, S. -H. Um and R. -H. Kim, "Reform Method for Installation Criterion of Pressure Safety Valve Discharge Pipe for LPG", Journal of the Korea Institute of Gas, Vol. 16, No. 4, pp. 59-64. 2012.
- 2) L. -S. Lee and Y. -S. Lee, "A Study on the Proability of BLEVE of Above-ground LPG Storage Tanks Exposed to External Fire", Journal of the Korea Institute of Gas, Vol. 7, No. 1, pp. 19-23. 2003.
- 3) J. -G. Yoon, "The Study for Cause of Boo-choon LPG Station Accident", Journal of the Korean Institute Industry of Safety, Vol. 16, No. 3, pp. 31-34. 2001.
- 4) KOSHA Guide D-18, "Technical Guideline for Design and Installation of Safety Valve", KOSHA, pp. 7-10, 2012.
- 5) API STD 521, "Pressure-relieving and Depressuring Systems", API, pp. 36-223. 2014.
- 6) KOSHA Guide D-26, "Technical Guideline for Pocess Safety Valve", KOSHA, pp. 1-32. 2012.
- 7) Gabriele Landucci, Menso Molag & Valerio Cozzani, "Modeling the Performance of Coated LPG Tanks Engulfed in Fires", Journal of Hazardous Material, Vol. 172, pp. 447-456. 2009.
- 8) C. -W. Son, "The Way to Shorten Response Time for Fire Damage Reduction", DAEGU's Administrative Hard Study, Vol. 22, pp. 979-994. 2010.
- 9) Edward Zamejc, "API Standard 521 New Alternative Method to Evaluate Fire Relief for Pressure Relief Device Sizing and Depressuring System Design", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 27, pp. 21-31. 2014.
- 10) A.M. Birk, D. Poirier and C. Davison "On the Responce of 500 Gal Propane Tanks to a 25% Engulfing Fire", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 19, pp. 527-541, 2006.
- 11) F. Heymes, L. Aprin, A.M. Birk, P. Slangen, J.B. Jarry, H. Francois and G. Dusserre, "An Experimental Study of an LPG Tank at Low Filling Level Heated by a Remote Wall Fire", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 26, pp. 1484-1491. 2013.
- 12) R. R. Scott, "Users Manual for AFFTAC 4.00 Beta 06", The Railway Progress Institute and the Association of American Railroads, pp. 11-159. 2013.
- 13) T. A. Rpberts, I. Buckland, L.C Shirvill, B. J. Lowesmith and P. Salater, "Design and Protection of Pressure Systems to Withstand Severe Fires", Process Safety and Environment Protection, Vol. 82, pp. 89-96, 2004.
- 14) KOSHA Guide P-107, "Guideline for Selection of the Worst Leak Scenario", KOSHA, pp. 1-14. 2012.
- 15) KOSHA Guide P-110, "Technical Guideline for Damage Minimization Measure of Chemical Factory", KOSHA, pp. 1-22. 2012.
- 16) KOSHA Guide P-102, "Technical Guideline for Consequence Analysis", KOSHA, pp. 12-14. 2012.