

액화석유가스 충전소의 안전거리에 관한 연구

조 영 도

한국가스안전공사 연구개발실
(1999년 월 5일 17접수, 1999년 8월 28일 채택)

A Study on the Minimum Safe Separation Distance from LPG Filling Station

Young-Do Jo

R&D Center, Korea Gas Safety Corporation, 332-1, Daeya-dong,
Shihung-shi, Kyunggi-do, 429-712, Korea
(Received 17 May 1999 ; Accepted 28 August 1999)

요 약

충전소에서 일어난 사고를 1987부터 1998년까지 사고자료를 근거로 하여 사고 시나리오와 사고발생 초기의 피해거리를 살펴보고, 이를 바탕으로 국내·외 안전거리를 비교·검토하여 적절한 안전거리에 대하여 살펴보았다. 안전거리는 시설과의 최소한 이격거리를 두어 사고 발생시 점화가능성을 줄이고 원활한 방재활동과 피해확산을 방지하기 위한 것으로서 가스누출시 제트화재의 길이 또는 누출가스의 연소하한농도의 도달거리와 관계가 있으며, 안전장치 설치현황, 안전관리자의 의식수준, 그리고 경제성을 검토하여 안전거리를 결정할 수 있도록 저장량에 따른 안전거리의 범위를 제시하였다.

Abstract - The minimum safe separation distances from LPG filling station was discussed in this work based on the accident data from 1987 to 1998 in south korea, the initial damage of accident, and standards of countries. The safety distances are adequate to reduce ignition probability by released gas and provide space for implementation of emergency response after ignition. Therefore, the distances are related to the distance to LFL(Lower Flammable Limit) and the length of jet fire to prevent accident escalation. The range of the distance was suggested in this work to make standard with considering economic, culture, and safe guards.

Key words : separation distance, LPG, LPG station, jet fire, release rate

1. 서 론

안전거리는 사고 발생시 원활한 방재활동과 피해확산을 방지하기 위하여 시설과 최소한 유지하여야 할 일정한 이격거리를 말한다. 따라서 안전거리를 벗어난 지역은 사고시 안전한 지역을 의미하는 것이 아니라, 적절한 방재활

동에 의하여 인명과 재산피해를 방지할 수 있는 지역을 의미한다. 그러므로 안전거리는 사고 시나리오에 따라 이론적 계산에 의한 피해거리를 산정하는 방법과 지금까지 사고의 경험으로 결정하는 방법이 있지만, 후자의 경우가 일반적이다.

액화석유가스(LPG) 충전소는 도심 및 주택

가 등에 위치한 것과 가스의 특성에 의하여 사회적 문제를 야기할 정도의 대형사고에서 단순 누출사고까지 다양한 위험요소가 존재한다. '98년 부천시 LPG 충전소 폭발사고와 전북 익산 가스 충전소 사고와 같은 대형사고의 발생으로 인하여 정부 주도하에 충전소의 안전관리에 대하여 논의된 바가 있었고, 충전소의 안전거리와 가스사고 배상 책임보험의 보상한도가 조정되었다[1,2]. 국내 충전소의 LPG 저장탱크는 지상탱크가 1백62개소, 지하탱크가 8백41개소로 지하저장탱크가 압도적으로 많아 저장탱크의 폭발위험은 적으나, LPG를 운반하는 탱크로리는 사고 발생시 적절한 방재활동을 취하지 못할 경우 부천사고와 같이 폭발하여 대형사고로 확대될 가능성이 있다. 따라서 사고 시나리오에 대한 비상대응조치와 안전거리가 사고 발생시 피해확대 방지를 위하여 매우 중요하다. 안전거리는 방재활동을 위하여 필요한 최소의 거리로 대부분의 국가에서 NFPA58을 근거로 각 국가의 환경에 적합하도록 규정하고 있다[3].

본 연구에서는 1987부터 1998년까지 충전소에서 일어난 사고를 근거로 하여 사고 시나리오와 사고 발생초기의 피해거리를 살펴보고, 이를 바탕으로 국내·외 안전거리를 비교·검토하여 적절한 안전거리를 살펴보기로 한다.

2. 사고 시나리오별 피해거리

지금까지 LPG 충전소에 일어날 수 있는 사고 유형별로 보면 가스누출, 제트화재, 플래시화재, 증기운폭발, BLEVE 등이 있으며, 사고 원인은 플랜지에서 누출, 배관 파손, 이·충전 작업시 인적오류 및 호스파열 등이 있다.^[4] 안전거리 산출에 근본이 되는 최소연소한계(LFL) 도달거리와 화재 및 폭발 피해거리를 사고원인별로 분석하면 다음과 같다.

2.1. 누출에 의한 연소하한농도까지 거리

LPG의 누출은 크게 누출상의 관점에서 기상, 액상, 기/액상(2상) 누출로 분류할 수 있고, 누출경의 크기 관점에서 대, 중, 소로 구분할 수 있다. 누출직경은 일반적으로 배관 또는 고무호스가 완전히 파손되어 배관직경과 같은 구경으로 가스가 누출되는 경우와 일부 파손되어 배관직경의 1/2 및 1/4 정도의 구경으로 누출되는 경우로 나눈다. 그리고 누출상은 액체배

관이 탱크와 접합부에서 파손될 경우 액상누출이지만 어느 정도 떨어진 곳에 파손될 경우 2상 누출이다. 따라서 일반적으로 LPG 시설에서 완전한 액상누출은 매우 일어나기 어렵다.

누출에 의하여 형성되는 LFL까지 거리를 구하기 위하여 먼저 누출속도를 구하여야 한다. 기상, 기/액상, 액상 누출에 대한 누출속도 계산식을 살펴보면 다음과 같다.

LPG의 기상 누출속도는 내부압력에 크게 영향을 받으며, 대부분의 누출조건이 대기압보다 1기압 이상 높으므로 다음 식에 의하여 구할 수 있다[5].

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c M_W}{R_g T_s} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (1)$$

여기에서 방출계수(C_D)는 단면적이 연속적으로 서서히 변하는 venturi meter/ nozzle/ relief valve 의 경우는 방출계수가 거의 1에 접근하고, 단면적이 급격히 변하는 오리피스 의 경우 방출속도에 따라 0.61에서 0.84까지 변한다. 배관파손에 의하여 형성되는 누출구는 단면적이 급격히 변화하므로 대부분 누출속도계산에서 방출계수를 0.61로 한다.

액체배관에서 누출될 때에는 배관에서 마찰로 인한 압력강하로 배관내부의 압력이 증기압에 도달하면, 기화되어 기-액 공존상태로 누출된다. 이러한 기-액 공존상태의 누출에서 기체상의 비율이 누출속도에 매우 중요한 변수로 작용한다. 기-액 공존상태에서 누출(2상누출) 속도해석에 대한 많은 연구들이 최근까지 되고 있다. 지금까지 제시된 각각의 모델들은 무차원 변수들(배관길이/배관경, 기체분율, 온도변화/초기온도)의 특정한 조건에서만 적용이 가능하다. 일반적으로 가장 많이 사용하는 평형상태의 균일상 모델(homogeneous equilibrium model; HEM)에 대하여 간략히 살펴보면 다음과 같다. HEM에 의하여 계산한 누출속도가 실험치와 잘 일치한다는 것과 약 10%정도 적게 예측된다는 논란이 있다. 그러나 최근 연구결과에 의하면, 기체분율이 1%보다 큰 경우 적절한 예측이 가능하지만, 기체분율이 1%보다 적은 경우 실제 누출량 보다 적게 예측된다. 또한 저장탱크로부터 누출구까지 배관의 길이는 LPG가 배관내에서 완전히 기/액 평형상태로 발달할 수 있는 정도가 되어야 HEM을

적용할 수 있다. 일반적으로 완전히 열역학적 평형상태로 발달하기 위하여 필요한 배관의 길이는 약 0.1m이다. 열역학적 평형에 도달하는데 배관의 직경은 프레온12로 실험한 결과 거의 영향이 없는 것으로 밝혀졌다.

상변화에너지, 운동에너지, 마찰에 의한 에너지손실, 위치에너지 등을 고려하여 수치해석적으로 계산하는 소프트웨어들이 개발되어 있지만, 여기서는 저장탱크 내부압력이 증기압일 때 적용되는 식 (2)와

$$\dot{Q}_s = \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778g_c}{T_s C_{pl}}} \quad (2)$$

탱크로리 내부 압력이 증기압보다 높을 때 Fauske가 제시한 실험식은 다음과 같다.[6,7].

$$\dot{Q} \cong C_D \rho_l A \sqrt{\frac{2g_c(P_s - P_{sat})}{\rho_l} + 2gh + \left(\frac{\dot{Q}_s}{C_D \rho_l A} \right)^2} \quad (3)$$

액체누출의 경우 대부분 비압축성 유체이므로 배관에서 마찰에 의한 압력강하효과와 위치에너지 변화를 무시하면 에너지수지식에 의하여 다음과 같이 누출속도식을 나타낼 수 있다 [5].

$$\dot{Q} = C_D \rho_l A \sqrt{\frac{2g_c(P_s - P_{atm})}{\rho_l}} \quad (4)$$

충전소에서 액화 프로판 또는 부탄의 누출속도는 배관경을 50A로 가정하여 사고시나리오에 따라 계산하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 알 수 있듯이 누출속도는 누출경의 제곱에 비례하여 증가하고, 기상 누출에 비하여 액상 또는 2상 누출이 4배 이상 크다. 따라서 기체배관 파손에 의한 피해보다 액체배관 파손에 의한 피해가 심각할 것으로 예상된다.

연소하한농도(LFL)까지 거리는 Ricou and Spalding, Long and Cude가 제시한 모멘텀제트모델을 이용하여 구할 수 있다[8].

제트의 형상은 원추모양으로 가정할 수 있고, 누출지점에서 질량누출 속도는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 \rho_0 u_0 \quad (5)$$

위 식에서 밑첨자 0은 누출지점을 나타내고, u 는 누출지점에서 누출가스의 선속도를 나타낸다. 누출방향의 선상에 있는 가상의 누출점으로 부터 x 거리 떨어진 위치에서 질량속도는 식(6)과 같다.

$$m_x = \frac{\pi}{4} (2x \tan \beta)^2 \rho_x u \quad (6)$$

위 식에서 β 는 원추모양의 중심축으로부터 제트의 각을 나타내고, u 는 x 위치에서 선속도를 나타낸다. 모멘텀 보존법칙에 의하여 식(5)와 (6)으로부터 식(7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{m_x}{m_0} = \frac{u_0}{u_x} = k_1 \frac{x}{d_0} \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

위 식에서 $k_1 = 2 \tan \beta$ 로 일반적으로 사용하는 값은 0.32이다. 농도는 부피속도에 반비례하므로 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{c_x}{c_0} = \frac{u_0}{u_x (k_1 x)^2} = \frac{1}{k_1} \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

누출방향의 중심축으로부터 수직방향으로 농도를 가우스분포로 가정하면 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{c_{xr}}{c_0} = k_2 \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[- \left(\frac{k_3 r}{x} \right)^2 \right] \quad (9)$$

일반적으로 k_2 는 6, k_3 는 5로 하고, ρ_x 는 공기의 밀도(1.22 kg/m³)를 적용하므로 누출원에서 중심선의 농도가 LFL에 도달하는 길이(1)는 식(10)과 같이 표현된다.

$$l = 6d_0 \left(\frac{C_{LFL0}}{c_0} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{d_0}{0.32} \quad (10)$$

Table 1. Calculated Release Rates for LPG

Equivalent Hole Size	Mass Flow Rate Released(kg/s)					
	Propane			Butane		
	Liquid	2-Phase	Vapour	Liquid	2-Phase	Vapour
S(12.5mm)	2.31	0.91	0.21	1.37	0.99	0.09
M(25mm)	9.23	3.63	0.86	5.50	3.96	0.35
L(50mm)	36.93	14.53	3.43	21.98	15.86	1.42

* Tank contents at 30°C, 4atm for butane, and 11atm for propane

Table 2. Distance from Leak Point to LFL(m)

Equivalent Hole Size	Distance(m)			
	Propane		Butane	
	2-Phase	Vapour	2-Phase	Vapour
S	10.5	7.2	9.9	4.4
M	21.0	14.4	19.9	8.9
L	41.9	28.8	39.7	17.8

Table 3. Flame length(L) and width(W) of Jet Fire

Equivalent Hole Size	Flame Dimensions							
	Propane				Butane			
	2-Phase		Vapour		2-Phase		Vapour	
	L(m)	W(m)	L(m)	W(m)	L(m)	W(m)	L(m)	W(m)
S	8.7	2.9	4.2	1.4	9.1	3.0	2.7	0.9
M	17.3	5.7	8.4	2.8	18.1	6.0	5.4	1.8
L	34.7	11.5	16.9	5.6	36.2	11.9	10.8	3.6

배관에서 LPG가 누출될 때 여러 가지 경우에 따라 연소하한농도(LFL)까지 거리를 누출시 부피팽창 현상을 보정하여 식(10)으로 구하면 Table 2와 같다. 액상 누출의 경우는 앞에서 언급한 것과 같이 그 원인이 저장탱크의 파손이나 탱크와 접합부의 액체배관 파손 등으로서 충전소에서 매우 일어나기 어려운 사고일 뿐만 아니라, 액상 비등 물질의 누출시 LFL까지 거리를 구하기 위한 적절한 모델이 현재 제시되어 있지 않으므로 계산에서 제외하였다.

일반적으로 배관이 완전히 파손되는 경우는 거의 없기 때문에 중간정도의 누출경을 기준으로 충전소에서 가스누출시 연소하한농도의 도달거리는 약 20m 정도 된다.

2.2. LPG 화재 및 폭발

가스 누출 후 즉시 착화되면 제트화재 또는 플 화재가 발생하지만, LPG는 대기 중에서 증발속도가 매우 빠르기 때문에 화재 발생한 다음 수 십초가 경과할 동안 복사열에 의하여 플

을 형성한 LPG가 증발하므로 플 화재의 가능성은 매우 적다. 또한 가스누출 후 어느 정도 시간이 경과한 다음 착화되면 증기운 폭발 또는 플래시 화재가 일어난다.

플래시 화재의 피해범위는 증기운 형상에 따라 큰 영향을 받지만 증기운 폭발에 의한 피해범위보다 일반적으로 적기 때문에 안전거리 검토를 위하여 해석할 필요가 없을 것으로 사료된다. 따라서 충전소에서 사고발생 초기의 피해거리로 증기운 폭발과 제트화재에 대하여 살펴보기로 한다.

제트화재의 화염이 탱크로리 또는 인근시설에 도달하면 피해확산 가능성이 매우 크기 때문에 제트화재의 길이와 폭이 안전거리 기준에 매우 중요할 것으로 사료된다. Considine과 Grint가 제시한 제트화재의 크기를 예측하기 위한 간단한 식은 다음과 같다[9].

$$L = 9.1m^{0.5} \quad (11)$$

$$W = 0.33L \quad (12)$$

위 식을 이용하여 제트화재 형성시 화염의 길이와 폭을 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3을 Table 2의 결과와 비교해 보면 제트화재의 길이는 가스누출시 LFL까지 도달거리보다 약간 짧은 것으로 나타나고, 중간 정도의 누출경을 기준으로 충전소에서 제트화재 형성시 화염의 길이는 약 18m 정도이고, 폭은 약 6m 정도이다. 소구경의 가스누출로 형성되는 LFL까지 거리와 제트화재의 길이는 약 10m 정도이다.

일반적으로 가스 누출에서 증기운 폭발이 일어나기까지는 불과 수분의 시간에 지나지 않으므로 건물내부에 있는 사람을 안전한 지역으로 대피시키기에 시간은 부족하다. 따라서 건물내부의 사람이 폭발압에 의하여 건물이 완전히 파손(0.54 기압)되어 치명상을 입는 거리는 안전거리의 산출에 중요한 변수가 될 수 있다. 대부분 폭발에 의한 피해범위는 TNT상당량 모델을 이용하여 구하지만, 계산결과는 실제 가스폭발 사고와 비교하면 과대 평가된 것으로 최대의 피해거리로 볼 수 있다.

충전소에서 가스 누출시 직원이 인지하고 비상조치를 취할 때까지 시간을 3분으로 가정하여 누출시간을 3분 기준으로 총 누출량을 구하

고, TNT 상당량은 다음식을 이용하여 구할 수 있다[10].

$$W_{TNT} = \frac{\eta M_f H_c}{H_{cTNT}} \quad (13)$$

여기서, H_{cTNT} 는 4650 kJ/kg, 연소열(H_c)은 부탄이 45860 kJ/kg, 프로판이 46013 kJ/kg이며, 폭발계수(η)는 0.03이다.

건물이 완전파손(0.54 기압)되는 거리는 TNT폭발 특성곡선으로부터 구하면 식(14)와 같다.

$$L = (10.5)(0.3048) \left(\frac{M_f (kg)}{0.454} \right)^{1/3} \quad (m) \quad (14)$$

따라서 증기운 폭발에 의한 피해거리를 3분 동안 가스누출이 있었다고 가정하여 TNT상당량 모델로 구하면 Table 4와 같다.

Table 4를 기준으로 안전거리를 산출하면 적어도 25m 정도이지만, TNT상당량으로 계산한 결과는 실제 피해거리보다 과대 평가될 뿐만 아니라 국외 안전거리 기준을 나타낸 Table 6을 보면 증기운 폭발이 안전거리 산정 기준은 아닌 것으로 사료된다.

2.3. LPG 탱크의 BLEVE

LPG 탱크의 폭발은 수 십분 동안 여러 가지 사건이 연계되어 일어나는 것으로 적절한 방재 활동을 통하여 막을 수 있는 사고로 안전거리 기준과는 무관하지만 피해범위가 매우 크기 때문에 검토할 필요가 있다. LPG탱크가 폭발할 때 화염에 휩싸이는 거리는 화구의 크기와 거의 동일하고, 미국 CPQRA(석유화학공장 정량적 위험성평가)에서 추천하는 식으로 계산하여 보면 Table 5와 같다[5].

$$D_{fireball} = 5.8M_{fireball}^{1/3} \quad (14)$$

따라서 LPG탱크가 폭발하면 반경 50m 이상이 화염에 휩싸여 피해를 입게된다. 일반적으로 탱크의 폭발이 일어날 가능성이 매우 희박하지만, 그 가능성을 배제할 수 없으므로 사고 발생 초기 안전한 지역으로 대피할 수 없는 병원, 극장 등의 보호시설과는 충분한 이격거리를 유지하여야 할 것으로 사료된다.

Table 4. Calculated Distance for Complete Destruction of Houses by VCE

Equivalent Hole Size	Dimensions(m)					
	Propane			Butane		
	Liquid	2-Phase	Vapour	Liquid	2-Phase	Vapour
S	21	15	9	17	16	7
M	33	24	15	28	25	11
L	52	38	24	44	39	18

Table 5. Fireball Diameter with Mass of Fuel in Fireball

Mass of LPG(ton)	Fireball Diameter(m)
5	99
10	125
20	157
30	180
40	198
50	214

Table 6. Minimum Separation Distance for LPG Storage(Underground Containers)

(unit : m)

Capacity of Storage(ton)	Korea	Japan	U. S. A.	Italy	
	LPG Filling Station	LPG Filling Station	Storage Tank	Storage Tank	Tank lorry
10	17(8.5)	17	15(15)	25	15
20	21(11.5)	20.8	15(15)	25	15
30	24(12)	24	15(15)	30	15
40	27(13.5)	26.9	15(15)	30	15
50	30(15)	29.4	23(15)	30	15
100	30(15)	30	30(15)	30	25
200	30(15)	30	38(-)	40	25
400	30(15)	30	122(-)	40	25

Table 7. The Number of Accidents in LPG Filling Station(1987.1~1998.12)

Equivalent Hole Size	S(12.5mm)	M(25mm)	L(50mm)	sum
Number of Accidents	20	11	4	35

Table 8. Effective Distance form Liquid Pipeline Holes

Material	Propane	Butane
Events		
Distance to LFL(m)	21.0	19.9
Length of Jet Fire(m)	17.3	18.1

Table 9. Minimum Separation Distance with Capacity of Storage

Capacity of Storage(ton)	Range of Separation Distance* ($6.37 + 1.49\sqrt{m} \sim 19.69 + 3.29\sqrt{m}$)	Before Revision	After Revision
10	15 ~ 30.1	17	24
20	15 ~ 34.4	21	27
30	15 ~ 37.7	24	30
40	15.8 ~ 40.5	27	33
50	16.9 ~ 43.0	30	36

* Minimum separation distance shall be not less than 15m.

3. 충전소의 안전거리

안전거리는 오랜 경험과 실험을 토대로 규정된 NFPA 58에 근거를 두고, 경제성 등을 고려하여 각 국가의 환경에 적합하게 규정하고 있다. 국가별로 규정하고 있는 안전거리를 앞에서 근사적으로 계산한 피해거리와 비교하여 보면, 20톤 저장능력을 갖는 시설에서 액체 배관 파손으로 중간정도 크기의 구경을 통하여 LPG가 누출될 때 LFL거리(21m) 또는 제트화재의 길이(18m)와 유사하다.

국내 LPG 충전소에서 일어난 사고를 1987년도부터 1998년까지 살펴보면, 사고건수는 모두 35건으로 폭발사고가 9건, 화재사고가 12건, 가스누출이 14건이다. 사고형태별 원인과 가스

누출구경의 크기를 개략적으로 12.5mm[S], 25.0mm[M], 50mm[L]로 나타내어 살펴보면 다음과 같다[4].

- 폭발사고(9건)
- 이충전중 압축기에서 누출가스 폭발[S]
- 용기 충전중 누출가스 폭발[S]
- 압력계 연결부에서 누출가스 폭발[S]
- 용기 스커트 수리중 잔가스 폭발[S]
- 충전기 밸브 오개방으로 누출가스 폭발[M]
- 이충전 호수 체결불량으로 누출가스 폭발[S]
- 보수공사중 충전용 디스펜서에 부착된 호스 내 잔가스 방출에 의한 폭발[S]
- 이충전 호스 이탈로 누출가스 폭발[L]
- 차량충전소의 파손된 쿼카플러에서 누출가

스 폭발[M]

- 화재사고(12건)
 - 지하매설배관 균열로 누출가스 화재[S]
 - 탱크로리 충전호스 부착상태에서 출발로 호스파열 및 누출가스 화재(2건)[L]
 - 이충전중 연결호스 접속불량으로 누출가스 화재[S]
 - 택시가 커플링 부착상태에서 출발하여 호스파열로 누출가스 화재(2건)[M]
 - 탱크로리 과충전으로 압축기 안전밸브로 누출가스 화재[S]
 - 액라인 밸브를 잠그지 않은 상태에서 작업중 실수로 누출가스 화재[M]
 - 충전 용기밸브를 연상 상태에서 가스주입기 탈착으로 누출가스 화재[S]
 - 충전기와 차량 추돌로 누출가스 화재[M]
 - 차량용기 밸브개방 상태에서 측도판 분리로 누출가스 화재[M]
 - 부탄용기 밸브 탈착으로 누출가스 화재[S]
- 가스누출(14건)
 - 기계실 액펌프 O-링의 손상으로 가스누설[S]
 - 저장탱크 드레인포트의 액봉에 의한 파손으로 가스누설(2건)[S]
 - 배관 압력계용 중간밸브에서 가스누설[S]
 - 택시가 가스 주입후 커플링 부착상태에서 출발하여 호스파열로 가스누설[M]
 - 차량의 사이드 브레이크가 풀려 충전소 기계실 파손으로 가스누설[M]
 - 배관 파손에 의한 가스누설(동파)[S]
 - 이물질에 의하여 밸브를 완전히 잠기지 않아 가스누설(2건)[S]
 - 사람이 넘어져 안전밸브 연결배관 파손으로 가스누설[M]
 - Y형밸브 연결부의 로리호스 파열로 가스누출[L]
 - 저장탱크의 슬립튜브게이지의 가스배출캡 이탈로 가스누설[M]
 - 매물배관 부식으로 가스누설[S]
 - 안전밸브 시트이탈로 가스누설[S]

Table 7에서 대량의 가스누출 가능성이 있는 4건의 사고는 탱크로리의 이충전 작업 시작 또는 종료 시점에 일어난 사고로서, 안전관리자가 즉시 긴급조치를 취했을 경우에는 대형사

고로 발전하는 것을 방지 할 수 있었으나, 적절한 초기 조치를 취하지 못했을 경우에는 부천사고와 같이 막대한 피해가 발생할 수 있다. 그러나 안전거리는 경제성 등을 고려하여야 하기 때문에 가능성이 희박한 경우, 즉 대량의 가스누출을 기준으로 안전거리를 산정하는 것은 부적절한 것으로 사료된다. 따라서 소구경의 호스 완전파손, 밸브의 오개방, 액체배관 파손 등에 의해 중간정도의 누출경을 기준으로 제트화재의 길이 또는 LFL까지 거리를 나타내면 Table 8과 같다.

위 거리는 국외 안전거리 기준과 비교하면 약 20톤의 저장능력에 대한 안전거리와 유사하다. 저장능력이 클수록 일일 처리 가스량이 증가하기 때문에 배관파손으로 인한 가스누출량은 저장능력에 비례하고, LFL까지 거리 또는 제트화재의 길이는 가스누출속도의 제곱근에 비례한다. 따라서 안전거리는 저장능력의 제곱근에 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 저장능력 10톤에서 50톤 사이 각국의 안전거리를 저장능력에 대한 근사식으로 나타내면 식(15)에서 (18)와 같다. 그러나 앞에서 분석한 피해거리를 살펴보면, 액체배관(50A) 직경 1/2정도의 구경을 통하여 LPG가 누출될 때 연소하한농도 도달거리와 제트화재의 길이는 각각 약 21m, 약 18m 이고 미국화재방재협회(NFPA 58)에서 규정하는 최소안전거리가 15m 임으로, 충전소의 저장량과 관계없이 최소한 15m 이상 안전거리를 유지하여야 할 것으로 사료된다.

$$\text{한국} : L \sim 6.37 + 3.29\sqrt{m} \text{ ----- (15)}$$

$$\text{일본} : L \sim 6.75 + 3.18\sqrt{m} \text{ ----- (16)}$$

$$\text{미국} : L \sim 8.68 + 1.49\sqrt{m} \text{ ----- (17)}$$

$$\text{이탈리아} : L \sim 19.69 + 1.57\sqrt{m} \text{ -- (18)}$$

여기서 L은 안전거리(m), m은 저장능력(톤)이다.

위 식에 나타나 있듯이 저장능력에 따른 안전거리 증가는 한국과 일본에 비하여 구미가 작게 산정되어 있는 것을 알 수 있다. 식(15)에서 (18)의 절편과 기울기를 조합하여 저장능력에 따라 안전거리의 범위와 국내기준을 나타내면 Table 9와 같다.

조영도

충전소의 안전거리는 액체배관 파손에 의하여 가스누출시 LFL까지 거리 또는 제트화재의 화염이 도달하는 거리로서 Table 9에 나타난 안전거리 범위에서 경제성, 안전장치의 설치현황 그리고 안전관리자의 의식수준 등을 고려하여 국내 환경에 적합하게 설정되어야 하고 탱크의 폭발가능성은 매우 희박하지만 사고시 대피가 어려운 병원, 학교, 극장 등의 보호시설은 반경 50m 이상 이격거리를 두는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

4. 결 론

안전거리는 가스누출시 제트화재의 길이 또는 누출가스의 최소연소한계농도 도달거리까지 시설과의 최소한 이격거리를 두어 사고 발생시 원활한 방재활동과 피해확산을 방지하기 위한 것으로서 안전장치 설치현황, 안전관리자의 의식수준 그리고 경제성을 검토하여 저장량에 따라 $6.37 + 1.49\sqrt{\text{저장량(톤)}}$ ~

$19.69 + 3.29\sqrt{\text{저장량(톤)}}$ 의 범위에서 안전거리(m)를 결정하는 것이 바람직한 것으로 사료되며, 최소한 15m 이상이 되어야 하고, 안전한 지역으로 대피가 어려운 병원, 극장 등의 보호시설과는 50m 이상 이격거리를 두는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

사 용 기 호

A	: 누출단면적
C_D	: 방출계수
C_{pl}	: 액체의 비열
D_{fireball}	: 파이어볼의 직경
H_c	: 연소열
L	: 제트화염의 길이, 폭발에 의한 건물 이 파손되는 거리
M_w	: 분자량
M_f	: 총 가스 누출량
M_{fireball}	: BLEVE 직전에 저장탱크에 남아있는 가스량(톤)
P_{atm}	: 대기압력
P_s	: 저장탱크의 압력
\dot{Q}_s	: 증기압에서 질량누출속도
\dot{Q}	: 질량누출속도
Rg	: 기체상수

T_s	: 저장탱크의 온도
W	: 제트화염의 폭
W_{TNT}	: TNT 상당량
c	: 누출가스의 농도
d	: 누출구의 직경
g_c	: 중력가속도
l	: 누출원에서 연소하한농도까지 도달 거리
m	: 가스 저장능력(톤)
m	: 질량속도
u	: 선속도

Greek Letters

ΔH	: 증발잠열
γ	: 비열비
η	: 폭발효율
ρ_l	: 액체밀도
ρ_v	: 기체밀도

참 고 문 헌

- 1) 한국가스신문, "충전소 신규허가 지역제한 추진", 9월 10일(1998)
- 2) 한국가스신문, "충전소 안전거리 확대안 재조정", 1월 20일(1999)
- 3) 한국가스신문, "국내 충전소 안전거리 적당하다.", 10월 28일(1998)
- 4) 한국가스안전공사, "사고사례연감", (1987-1999)
- 5) Frank, P.L., "Loss Prevention in the Process Industries" 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 15/1(1996)
- 6) Fauske, H.K., "A Quick Approach to Reactor Vent Sizing", Plant/Operations Progress, 3, 3(1985)
- 7) Fauske, H.K., "Flashing Flows or: Some Practical Guideline for Emergency Releases", Plant/Operations Progress, 4, 3, 132(1985)
- 8) Frank, P.L., "Loss Prevention in the Process Industries" 2nd edition, Butterworth-Heinemann, p15/139(1996)
- 9) Considine, M. and Grint, G.C. "Rapid assessment of the consequences of LPG releases." GASTECH 84, November(1984)

액화석유가스 충전소의 안전거리에 관한 연구

- 10) Baker, W.E., Cox P.A., Westine, P.S., Kulesz J.J. and Strehlow, R.A., "Explosion Hazards and Evaluation" Elsevier, 200(1983)