

# BLEVE를 고려한 LPG 시설 Siting 분석

김태범 · 이경림 · 이주희 · 정승호<sup>†</sup> · 이건모

아주대학교 환경안전공학과

(2015. 12. 24. 접수 / 2016. 3. 17. 수정 / 2016. 3. 18. 채택)

## Analysis of LPG Facility Siting Considering BLEVE

Taebeom Kim · Kyounglim Lee · Juhee Lee · Seungho Jung<sup>†</sup> · Kunmo Lee

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

(Received December 24, 2015 / Revised March 17, 2016 / Accepted March 18, 2016)

**Abstract :** In previous studies on LPG siting in Korea, the scope have not included the probability of the secondary events of adjacent LPG tanks or structures from an explosion source. Therefore, it is essential to first identify the phenomenon which can be caused by BLEVE and then, properly assess their effects to each target including secondary event. In this study, we calculated the effects from a potential BLEVE of 15 ton LPG tank causing damages of storage tanks (LPG), structures and human using Phast ver. 6.7 and then suggested three risk zones (Zone I, II, III) assuming the consequences such as overpressure, heat radiation and missile effect by fragments. Zone I and II are divided at the line of 50% occurrence of the secondary event. Zone II and III are divided by Individual Risk(IR). The zone approach in this study can be used for more effective and safer Land Use Planning (LUP) for the future.

**Key Words :** BLEVE, LPG siting, QRA, consequence analysis, risk-based zoning

### 1. 서론

LPG는 Mexico city disaster(1984)나 국내 부천 LPG 폭발사고(1998) 등으로 알 수 있듯이 사고 발생 시 치명적인 피해 결과를 야기할 수 있어 각별한 주의가 요구되는 물질이다. 이에 따라, 국내에서는 고압가스 안전 관리법 및 주택 건설 기준 등에 관한 규정으로 이격 거리를 지정하고 있지만 15톤 LPG 저장용기 기준으로 탱크 간격이 약 1.25 m, 주택과의 거리는 50 m 이하로서 상황에 따라 위험할 수 있으므로 그에 따른 분석이 필요하다.

BLEVE 관련 선행연구를 보면, Leem<sup>1)</sup>은 20톤의 LPG 저장용기 폭발과압에 대한 위험거리를 연구하였고 Cha<sup>2)</sup>는 관심거리 별 폭발과압, 복사열, 파편이 미치는 거리를 계산하였다. Lee<sup>3)</sup>가 BLEVE의 발생 조건 및 메커니즘을 연구하여 탱크 표면, 내부 액 온도, 액 충전 량에 따른 BLEVE 발생 가능성을 파악한 바 있다. LPG의 이격거리가 권고되어 있는 국외 표준으로는

NFPA 58: 1989 Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases, HSE 178: The storage of flammable liquids in tanks, API의 Std 2510: 1989 and 2510A: 1989 등 다수 존재 한다<sup>4)</sup>.

이러한 선행연구에서의 안전거리는 구조물 손상 및 사람의 부상을 고려하였으나 타 LPG 저장용기와 그에 대한 2차 피해는 포함하지 않아 LPG Siting에 있어서 한계점을 가진다. 첫 번째 사건의 영향으로 발생 가능한 두 번째 사건들의 위험성 평가는 반드시 이루어져야 한다는 것이 증명된 사례로 중국 텐진항 폭발사고(2015)가 대표적이다. 특히, 파편 같은 경우, 비행거리에 대해 연구되었을 뿐 그것이 발생시킬 수 있는 2차 피해에 대해서는 분석된 자료가 미비한 실정이며 시설의 적절한 배치를 위해 어떠한 요소들을 고려해야 할지 부정확하다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구는 BLEVE로 발생하는 모든 영향들에 대하여 식별하고 그 중, LPG Siting에 고려해야 할 요인들이 무엇인지 분석하려 한다. 최종적으로는 프로

<sup>†</sup> Corresponding Author : Seungho Jung, Tel : +82-10-6303-8635, E-mail : processsafety@ajou.ac.kr

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16499, Korea

관 가스가 저장된 LPG 저장용기를 대상으로 위험성 수준을 분류하여 신뢰성 있는 LPG Siting 지침을 제시하는 것을 연구의 목적으로 한다.

## 2. 방법론

BLEVE로 발생할 수 있는 영향은 크게 폭발과압(Overpressure), 복사열(Heat radiation), 파편(Fragment)으로 구분되는데, 본 연구는 DNV-GL 사(社)의 PHAST v6.7의 피해영향분석(Consequence analysis)으로 각 영향 거리를 산출했으며 파편은 선행연구에서 유도된 식들을 검토하여 최적의 것을 적용하였다. 분석은 저장능력 15,000 kg (내용물: 프로판), 내경 2,500 mm, 동체길이 5,460 mm, 설계압력 1.8 MPa의 LPG 저장용기를 대상으로 수행하였다.

### 2.1 피해영향분석

#### 2.1.1 폭발과압

BLEVE의 폭발과압을 계산하기 위해서는 해당 압력용기의 폭발하기 직전 과압을 정의하여 입력하는 것이 필요한데, CCPS의 가이드라인과 유럽에서는 Pressure Vessel Burst(PVB)의 경우 통상적으로 최대허용운전압력(MAWP)의 약 2.4배에서 4배의 압력까지를 절대적으로 사고가 발생하는 지점으로 잡고 있다<sup>5)</sup>. BLEVE는 외부 화재로 인한 사고일 경우 안전밸브 분사개시압력(Opening pressure)의 1.21배, 안전밸브의 고장과 결합한 과충전 및 과열로 인한 사고는 설계압력의 2.5배를 적용한다<sup>6)</sup>. 본 연구에서는 LPG의 임계점을 감안하여 해당 저장용기의 설계압력의 약 2.2배인 40 bar를 입력하였다. 또한, LPG 저장용기의 지반으로부터 거리는 일반적으로 1 m 이하이므로 지상 폭발(Ground burst)로 판단하였다.

#### 2.1.2 복사열

본 연구에서 복사열 영향의 중요점은 사람의 사망확률과 LPG 저장용기 2차사건 발생 여부이다. 이에 따라 복사열의 영향거리 계산 및 폭발과압과의 비교가 필요하다. 화구(Fireball) 모델은 부천 LPG 폭발사고 등을 참고하여 TNO 모델을 적용하였으며 복사열 계산은 지상으로부터 1 m를 기준으로 하였다.

#### 2.1.3 파편

파편의 영향평가를 위해서는 우선 파편의 생성 확률, 개수, 초기 속도, 파편의 모양과 질량, 항력 효과(Drag effect)를 도출하는 것이 필요하다.

파편의 초기 속도는 CCPS 방법 1, 2로, 파편의 범위는 W.E Baker의 Scaled maximal range을 사용하여 계산하였다<sup>5)</sup>.

$$E_k = 0.2 \frac{P_1 V_1}{r_1 - 1} * 2 \quad [1],$$

$$V_i = \left( \frac{2E_k}{M_c} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\bar{R} = \frac{p_0 C_{DAD} R}{M_f}, \quad \bar{V}_i = \frac{p_0 C_{DAD} V_i^2}{M_f * g}$$

액체 및 증기 상태의 파편 초기 속도 산정에서는 우선 내부 에너지 총량을 계산하는 것이 필요한데 이를 위해 식[1]을 적용하였고 지상 폭발임을 고려하여 에너지의 양을 2배로 산출하였다. 각 변수들의 의미는  $E_k$  = 내부 에너지 총량,  $M_c$  = 저장용기의 질량,  $P_1$  = 폭발 직전의 압력,  $V_1$  = 폭발 직전의 부피이다.

### 2.2 빈도분석

폭발과압이 인근 저장용기, 구조물, 사람에게 미치는 영향과 복사열이 사람에게 미치는 영향의 빈도분석을 위해 다음의 확률단위식(Probit equation)과 계수들(Table 1)을 사용하였다.

$$Y = k_1 + k_2 \ln(p^0 \text{ or } D)$$

Table 1. Probit correlations and parameters

Type	Target	Causative variable	Probit parameters	
			k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Overpressure	LPG tank <sup>7)</sup>	p <sup>0</sup> (Pa)	-42.44	4.33
	Structural damage		-23.8	2.92
	Human	J (Ns/m <sup>2</sup> )	<sup>a</sup> -77.1	6.91
		p <sup>0</sup> (Pa)	<sup>b</sup> -46.1	4.82
Heat radiation	Human <sup>6)</sup>	D	<sup>c</sup> -15.6	1.91
			-36.38	2.56

<sup>a</sup>Deaths from lung hemorrhage, <sup>b</sup>Deaths from impact (Impulse), <sup>c</sup>Eardrum ruptures

여기서 복사열이 미치는 영향을 구하기 위해서는 인체에 가해지는 노출용량을 계산하는 것이 요구되며 해당 과정에서 사용되는 식은 다음과 같다.

$$\text{복사열 노출용량}(D) = I^{\frac{4}{3}} \times t$$

I: 복사열(kW/m<sup>2</sup>), t: 노출시간(sec)

파편에 의한 LPG 저장용기의 파손확률은 다음의 식으로 계산 가능하다.

$$P_{FL} = P_{g,F} \times P_{imp,F} \times P_{dam,F}$$

$P_{FL}$  = 파편에 의한 저장용기 최종손상확률  
 $P_{g,F}$  = 파편의 생성확률,  $P_{imp,F}$  = 파편의 적중확률  
 $P_{dam,F}$  = 파편이 적중되었을 때의 손상확률

### 3. 결과

#### 3.1 폭발과압

BLEVE 발생 지점부터의 거리에 따른 폭발과압과 그에 따른 영향은 다음과 같다.

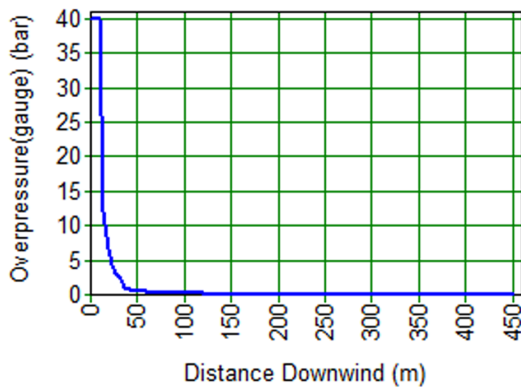


Fig. 1. BLEVE Overpressure vs distance.

폭발과압의 강도는 최대허용운전압력인 최대 40 bar에서 점차적으로 감소하게 되는데 약 10 m 정도부터 급감하여 36 m 이후로 1 bar 이하로 내려가게 되는 것으로 분석되었다. 폭발과압의 사람에 대한 영향은 크게 폐출혈과 충격에 의한 사망으로 볼 수 있으며 거리에 따른 영향계산결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Impact analysis of human for overpressure

Distance (m)	Overpressure (kPa)	Deaths from lung hemorrhage (%)	Deaths from impact (%)	Eardrum ruptures (%)
0~9.11	4000	100	<11	100
32	225	99.9	0	99.8
32~35	175	90	0	99.3
	145	50	0	98
35~36	103	<1	0	92
50~54	48.5	-	0	50
111~113	14.2	-	0	<1

\*Maximum impulse value : 31,300.72 Ns/m<sup>2</sup> (0 m from BLEVE)

Table 3. Impact analysis of structure for overpressure

Distance (m)	Overpressure (kPa)	Structural damage (%)	Expected damage <sup>a</sup>
50	54	99.9	Brick panels, not reinforced, fail by shearing or flexure (48.3~55.2 kPa)
68~69	30	90.4	Cladding of light industrial buildings ruptured (27.6 kPa)
92~95	19.3	50.6	Concrete or cinder block walls, not reinforced, shattered (13.8~20.7 kPa)
145~155	8.6	<1	Steel frame of clad building slightly distorted (9 kPa)

<sup>a</sup>Lees loss prevention in the process industries, table 17.43

폐출혈에 의한 사망의 가능성은 높은 반면, 충격에 의한 사망확률은 최대 임펄스 값인 31,300.72 Ns/m<sup>2</sup>에서도 약 11% 미만으로 계산되었다. 여기서 폐출혈로 인한 사망확률은 32 m 이상을 기준으로 급감하여 36 m 정도에서 1% 미만으로 분석되었다. 그러므로 해당 거리 이상에서의 주요 피해결과는 사망보다는 비가역적 손상(Irreversible injury) 특히, 고막파열이 예상된다. 사람이 고막파열을 입을 확률은 50~54 m를 기준으로 50% 미만으로 감소한다.

Table 3은 폭발과압에 의한 구조물 손상의 확률단위식 결과 값을 백분율로 나타내고 기존 문헌에서 예상 데미지를 추출 및 비교한 것이다.

인근 저장용기에 대한 영향으로는 Table 4와 같이 분석되었으며 2차 사건발생에 대한 확률은 수평 실린더 형태의 LPG 압력용기(Pressurized vessel)로 가정하고 산출한 결과이다.

Table 4. Impact analysis of LPG tank for overpressure

Distance(m)	Overpressure(kPa)	Probability of secondary event(%)
34~36	117	99.9
41	77.1	90
48~50	57.3	50
64~67	33.4	<1

#### 3.2 복사열

복사열은 최대 74.78 kW/m<sup>2</sup>로 화구 지속시간 10.38 초 동안 가해지는 것으로 분석되었다.

Cozzani<sup>8)</sup>는, 화구의 단순 복사열로 인한 저장용기의 파손은 75 kW/m<sup>2</sup>기준으로 400초 정도의 균일한 복사열이 필요하다고 분석한 바 있는데, 이에 따라 LPG 탱크(15톤)를 기준으로 복사열에 의한 인근 저장용기의 파손은 가능성이 매우 낮다고 볼 수 있다.

Table 5에서 복사열의 확률단위식 결과 값을 보게

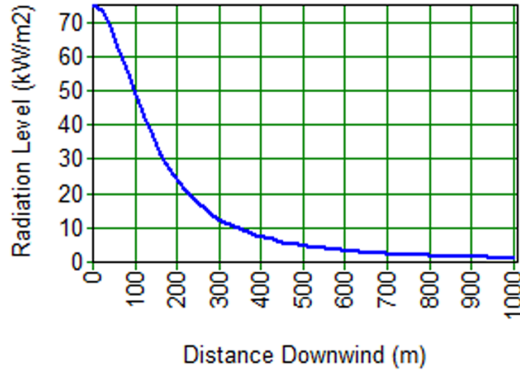


Fig. 2. BLEVE Heat radiation vs distance.

Table 5. Impact analysis of human for heat radiation

Distance(m)	Heat radiation(kW/m <sup>2</sup> )	Probability of death(%)
0	74.78	99.8
104~107	47.7	90
160~162	32.75	50
183	26.9	25
250~263	16.55	<1

되면, 복사열  $32.75 \text{ kW/m}^2$ 부터  $47.7 \text{ kW/m}^2$ 까지의 구간 동안 사망확률 증가가 40% 이상으로, 약  $32.75 \text{ kW/m}^2$  이상부터 급격한 증가를 보인다는 것을 확인하였다.

### 3.3 파편

미사일 형태(Oblong end-cap)의 파편 2개 또는 띠 형상 판(Strip) 형태의 파편 1~4개가 생성되는 것을 가정하여 파편 초기 속도와 최대 비행범위를 도출하였다.

각 인덱스는  $p_0=1.3$ ,  $C_D=1.2$ (Right circular cylinder), 1.98(Narrow strip),  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 로 하여 Scaled maximal range를 계산했고 그에 따른 결과는 Table 6과 같다.

파편의 도달거리는 미사일 형태 기준 최대 2501.9 m 이고 띠 형상 판의 파편이 저장용기 내부 물질의 누출을 야기할 수 있는 최소 거리는 362.56 m에서 561.98 m

Table 6. Consequence analysis for fragment

Type of fragment	Number of Fragment	Fragment mass (kg)	Velocity of fragment (m/s)	Drag area (m <sup>2</sup> )	Range of fragment (m)
Oblong end-cap	2	5000	222.32	4.9	2501.9
	1	10000	157.2	42.8	362.56
Strip-shaped	2	5000	222.32	21.4	435.08
	3	3333	272.28	14.2	471.33
	4	2500	314.41	10.7	561.98

로 도출되었다. 이러한 파편의 영향거리는 그동안의 선행연구에서도 언급했듯이 다수 과대평가된 부분이 있어 최대 비행거리만으로 위험도를 산정하는 것은 무리가 있다고 판단되며 그에 따라 적중확률을 고려하는 것이 필요하다.

Cozzani<sup>9)</sup>, Holden et al<sup>10)</sup>에 따르면, 파편의 적중확률은 최대 10% 이하, 발생확률은 실린더 형 기준으로 80%로 분석된 바 있다. 여기에, 인근 저장용기에 대한 관통확률을 100%로 가정하였을 때 그 위험은 0 m 기준 약 8%, 100 m 기준으로 0.08% 이하로 추정된다. 해당 확률은 피해대상의 크기에 따라 가변적일 수 있다.

### 3.4 BLEVE를 고려한 안전거리 범위 산정

네덜란드를 비롯하여 국외에서는 개인적 위험도 (Individual Risk)를 사용하여 경계를 규명하고 그 안에 설치될 수 있는 시설을 명시하고 있다<sup>11)</sup>. 인구 밀집 지역과 유해위험활동 사이의 경계를 설정하여 시민의 안전을 보증하는 방법 중 하나인 이 위험기반 안전범위 설정(Risk-based safety zoning)은 국외 적용 사례를 비추어 보았을 때 국내 시설 배치에 있어서도 가장 적절한 기법이라 사료된다. 따라서 본 연구에서는 그러한 위험 기준을 바탕으로 하여 위험 수준을 세 가지 Zone(Zone I-III)으로 제시하였다. 개인적 위험도 계산에서 BLEVE 발생빈도는  $2.4 \times 10^{-5}/\text{year}$ 로 Lee<sup>12)</sup>의 연구에서 도출된 값을 적용하여 계산하였다.

Zone I 은 BLEVE 발생 시 99% 확률로 인근 LPG 저장용기를 파손시키는 거리부터(0 m), 50%의 손상확률 거리까지를 범위로 하여 산정하였다. 이 범위에서 구조물과 사람에 대한 영향은 매우 치명적으로 90% 이상의 구조물 붕괴 가능성과 95% 이상의 사람 사망확률을 보였다. 복사열의 경우 15톤 LPG 탱크 기준으로 화구 지속시간이 인근 저장용기 손상을 일으키는데 충분하지 않았으며, 파편 같은 경우 최대 영향범위는 가장 넓었지만 최종 손상확률이 매우 낮았으므로 2차 사건 발생 범위 산정에는 폭발과압만 고려하였다.

Zone II는 BLEVE 발생빈도와 복사열에 의한 사망확률을 산정했을 때 개인적 위험도가  $10^{-5}/\text{year}$  이하인

Table 7. Final criteria for risk zone

Risk Level	Distance(m)	Target object	Description
Zone I	0~50	LPG Tank, Structure, Human	Occurrence of secondary event above 50%
Zone II	50~160	Human	Individual Risk(IR) above $10^{-5}/\text{year}$
Zone III	160~220	Human	Individual Risk(IR) above $10^{-6}/\text{year}$

Table 8. Objects needed to be avoided in each risk zone

Risk Level	Distance (m)	Overpressure (kPa)	Heat radiation ( $kW/m^2$ )	Objects
Zone I	0~50	4000 to 54	74.78 to 65	Storage tank and Control room
Zone II	50~160	54 to 7	65 to 30.78	Shops, Department buildings and restaurant
Zone III	160~220	< 7	30.78 to 19.7	Residual object, Hospital, Cultural properties

범위로, 허용 가능한 위험(Acceptable risk)의 최소 기준을 만족하는 구간이다. 이 범위에서 폭발과압에 의한 폐출혈 및 충격에 의한 사망 범위는 복사열과 비교하여 확연히 좁아 복사열만으로 범위를 산정하였다. BLEVE 발생 시 해당 구역 경계점에서 사람의 사망확률은 41.67%이다. 여기서, LPG 저장용기의 2차 사건발생 범위(50% 미만) 또한 Zone II에 일부 해당하지만 Zone II의 고려 대상에서는 제외하였다.

Zone III는 BLEVE의 복사열 영향에 의한 사망확률이  $10^{-6}/year$  이하인 범위로 경계점에서의 사람의 사망확률은 약 4.2%이며 해당 범위를 넘어선 구역은 무시 가능한 위험으로 평가하였다. Zone II와 III의 기준이 되는 개인적 위험도는 위험성 평가의 중요 척도 중 하나로 영국과 네덜란드에서  $10^{-5}/year$ 를 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 최대기준,  $10^{-6}/year$ 을 최소 기준으로 하고 있으며<sup>13)</sup> 본 연구에서도 해당 기준을 적용하여 거리를 산출하였다.

세 가지의 범위(Zone I-III) 내에서의 Siting 권장사항은 Table 8과 같다.

Zone I의 범위에서는 폭발과압에 의한 인근 저장용기 손상의 가능성이 매우 높아 그에 따른 조치가 요구된다. 특히, LPG 같은 경우 지상 형보다는 매설 형으로 설치하는 등의 2차 사건발생을 고려한 안전설계가 필요하다고 보인다. 실제로, 부천 LPG 충전소 폭발사고(2001)에서 지상 탱크로리 2기가 BLEVE로 폭발했을 때 지하 저장탱크는 전혀 손상을 입지 않아 그 안전성을 입증한 바 있다<sup>14)</sup>. 여기서 중요점은 지상 탱크로리와 지하 저장탱크 간 연료 이 충전 시의 누출방지와 탱크자체의 부식 등에 의한 사고빈도 상승을 방지하는 것이 선행되어야 한다는 것이다<sup>15)</sup>.

Zone II에서는 사람의 사망 방지에 중점을 두어 대처해야 하는 구간이다. 이 범위에서는 복사열에 의한 사람의 사망확률(실외)이 100 m에서 90%, 160 m에서 50%로 그에 따라 주거지역이나 병원 등 상시 인원이

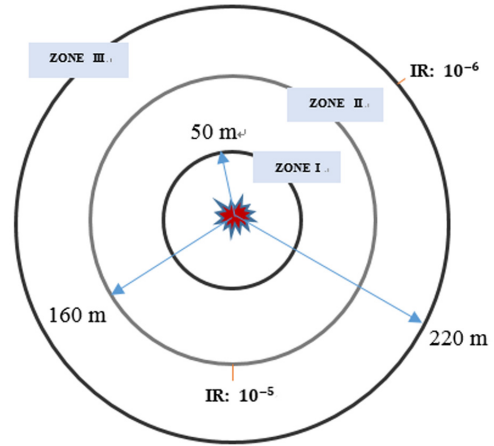


Fig. 3. Range of each risk zone.

많은 시설의 설치가 지양되어야 한다고 사료된다. 또한 구조물 붕괴확률도 약 100 ~ 110 m 이전까지 상당히 높아(50%) 건물 내부인원에 대한 고려도 필요하다.

Zone III에서는 사람의 사망확률은 41.67% 미만이며 구조물의 경우, 폭발과압에 의한 영향은 크지 않지만 목재건물 등에 대한 복사열 영향은 존재한다. 이에, 기존 문헌에서는 목재가 연소하는 복사열 범위를  $12.5 kW/m^2 \sim 37.5 kW/m^2$  정도로 보고 있어 목재 재질의 유형문화재 등은 손상될 여지가 있다. 하지만, 이 범위에서는 구조물의 전소나 붕괴 등의 가능성은 매우 적다고 계산되었다.

#### 4. 고찰

본 연구에서 최악의 경우(Worst scenario)의 영향범위를 산정하고 위험성 수준에 기반을 두어 범위를 구획한 것은 각 시설별로 적합한 위험 관리 방법을 도출하기 위한 기초자료로서 그 필요성이 높다. 실제 이와 관련한 사례로, 인근 거주자의 개인적 위험도를 초과시키는 유해시설을 조사하여 그 개수를 사전 파악했던 국외 사례가 존재한다<sup>11)</sup>. 또한, 앞서 언급했던 중국의 텐진항 폭발사고는 출동 중이던 소방공무원 12명이 2차 사건발생으로 사망하는 등의 치명적인 결과를 야기한 바 있어 위험에 대한 사전인지 중요성이 얼마나 큰지 보여 주고 있다.

앞서 도출된 연구결과를 보면 15톤 LPG 저장용기를 대상으로 하였을 때 폭발과압에 의한 탱크파손확률이 50% 내외로 감소되는 거리는 약 50 m로, 해당 거리 내 인근 저장용기의 파손 및 2차 사건발생 가능성은 다소 큰 것을 확인할 수 있었다. 따라서 50 m 이상의 LPG 간 이격거리 설치가 경제성 등 애로사항으로 어려울

경우 각 시설 현황에 맞게 BLEVE 빈도 감소를 위한 예방과 피해 확산 방지를 위한 비상 대응방법을 체계적으로 구축하는 등의 위험성 수준 경감 활동이 필수적이라 사료된다. 그 예로 냉각용 물 분무 설비 및 저장용기 바닥 경사면 설치 등의 조치를 들 수 있다. 파편 같은 경우, 최대 비행거리는 매우 길지만 인근 저장용기에 적중될 수 있는 확률을 보았을 때 파편에 의한 2차 사건발생은 LPG Siting에 고려하지 않는 것이 타당하다 사료된다.

본 연구에서는 LPG의 임계점, 지상 폭발, 국외 기준 등을 검토하는 등의 과정으로 실제에 가까운 영향거리를 산출하려 하였다. 하지만 모델링 툴 및 수식으로 계산한 폭발과압의 강도는 보다 정확한 안전거리 정립을 위해 지속적인 비교 연구가 필요하다 판단된다. 이에 거리에 따른 폭발과압의 감소 및 모델링 결과와 실제 피해 정도와의 차이를 Roh<sup>16)</sup>가 일부 밝힌 바 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 BLEVE에 의한 2차 사건발생거리 산정과 구조물 및 사람에 대한 장 내외 영향평가결과를 3가지의 위험 범위로 제시하여 LPG Siting에 도움을 주려 하였다. 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

Zone I (0 ~ 50 m)의 거리에 인근 저장용기가 배치되어 있을 때, 폭발과압에 의한 2차 사건발생 가능성이 50% 이상으로 이에 따른 조치가 요구된다. 그 예로 지하형 저장탱크 설치 등의 예방책과 소방 활동 표준작전절차(SOP) 및 주민 대피 등 비상 대응을 위한 규정 마련이 권장된다. 본 연구의 대상인 15톤 LPG 저장용기를 기준으로 복사열에 의한 2차 사건발생은 낮은 가능성을 보였다. 하지만 Zone I 과 II(0 ~ 160 m)의 거리에서 복사열에 의한 구조물 및 사람의 사망확률은 치명적으로 해당 범위내의 다중이용시설의 설치는 지양해야 할 것이며 Zone III(160 ~ 220 m)에서도 사람에 대한 영향은 일부 존재하였고 목재건물을 대상으로 손상 확률이 있는 것으로 평가되었다.

본 연구는 Jet fire의 영향거리를 LPG 이격거리 설정 기준으로 하고 있는 NFPA 58 및 국내 고압가스 안전관리법과 다르게 BLEVE를 기준으로 위험 수준을 산정하였다. 이는 위험에 대한 사전인지를 넘어서 위험성 평가에 기반을 둔 토지이용계획에 있어서도 그 필요성이 높을 것으로 예상된다.

앞으로 본 연구를 통한 후속 연구로 LPG 저장용기의 피해 범위 및 영향이 다각적으로 고려된 실용적인 안전거리 기준이 정립되는 것을 기대한다.

**감사의 글:** 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2015R1C1A1A02037491)

## References

- 1) S. H. Leem, "A Study on the Quantitative Analysis for Explosion of LPG Storage Tank", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 17, No. 3, pp. 1-7, 2013.
- 2) S. C. Cha, "A Study on Design Improvement using Quantitative Risk Assessment in Propane Storage Facilities", Doctor thesis, pp. 1-116, 2006.
- 3) S. L. Lee, "A Study on the Probability of BLEVE of Above-ground LPG Gas Storage Tanks Exposed to External Fire", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 7, No. 1, pp. 19-23, 2003.
- 4) F. P. Lees, "Loss prevention in the Process Industries: Hazard Identification Assessment and Control", Butterworths, Vol. 1, Third edition, pp. 10/15, 1980.
- 5) Center for Chemical Process Safety (CCPS), "Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards", Second edition, pp. 232-310, 2010.
- 6) P. A. M. Uijt de Haag, B. J. M. Ale, "Guidelines for quantitative Risk Assessment (Purple book)", Ministry of Netherlands, pp. 4.45, 2005.
- 7) V. Cozzani, "The Quantitative Assessment of Domino Effects Caused by Overpressure Part I. Probit Models", Journal of Hazardous Materials, Vol. 107, No. 3, pp. 76, 2004.
- 8) V. Cozzani, "Escalation Thresholds in the Assessment of Domino Accidental Events", Journal of Hazardous Materials, Vol. 129, No. 1-3, pp. 5-6, 2005.
- 9) V. Cozzani, "A Simplified Model for the Assessment of the Impact Probability of Fragments", Journal of Hazardous Materials, Vol. 116, No. 3, pp. 184, 2004.
- 10) P. L. Holden and A. B. Reeves, "Fragment Hazards from Failures of Pressured Liquefied Gas Vessels", IChemE Symposium Series, Vol. 93, pp. 208-209, 1985.
- 11) P. H. Bottelberghs, "Risk Analysis and Safety Policy Developments in the Netherlands", Journal of Hazardous Materials, Vol. 71, No. 1-3, pp. 68-73, 2000.
- 12) J. H. Lee, "Accidental Frequency Variations on the Capabilities of Safety Devices Installed in the LPG Refuelling Stations", Theories and Applications of Chem. Eng, Vol. 12, No. 1, pp. 1150-1151, 2006.

- 13) J. LaChance, "Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards", pp. 48, 2009.
- 14) J. K. Yoon, "Discussions on the Cause of Bucheon LPG Station Accident", Journal of the Korea Institute for Industrial Safety, Vol. 16, No. 3, pp. 32, 2001.
- 15) S. H. Leem, "A Study on the Optimal Installation Technology of LPG Storage Tank through Taguchi Method", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 25, No. 6, pp. 99, 2010.
- 16) S. K. Roh, "A Study on Damage Effect from Major Accident of LPG Charging Facility - A case study of an LPG Charging and Automotive Outlet ", Korean Security Science Review, No. 2, pp. 93, 1999.