

# LPG충전소에서 증기운폭발이 주변건물에 미치는 영향의 정량적 해석 및 평가에 관한 연구

임사환<sup>†</sup> · 허용정<sup>\*</sup>

한국기술교육대학교 기계공학과 · \*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부  
(2009. 12. 17. 접수 / 2010. 2. 8. 채택)

## A Study on the Quantitative Analysis and Estimation for Surround Building caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station

Sa-Hwan Leem<sup>†</sup> · Yong-Jeong Huh<sup>\*</sup>

School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education  
<sup>\*</sup>School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education  
(Received December 17, 2009 / Accepted February 8, 2010)

**Abstract** : This paper is estimation of structure damage caused by Explosion in LPG(Liquefied Petroleum Gas) filling station. As we estimate the influence of damage which occur at gas storage tank in filling station. We can utilize the elementary data of safety distance. In this study, the influence of over-pressure caused by VCE(Vapor Cloud Explosion) in filling station was calculated by using the Hopkinson's scaling law and the accident damage was estimated by applying the influence on the adjacent structure into the probit model. As a result of the damage estimation conducted by using the probit model, both the damage possibility of explosion overpressure to structures of max 265 meters away and to glass bursting of 1150 meters away was nearly zero in open space explosion.

**Key Words** : quantitative analysis, VCE(Vapor Cloud Explosion), LPG filling station

### 1. 서론

환경문제의 심각성은 환경보존과 경제발전을 조화롭게 추구하는 ‘지속가능한 발전(sustainable development)’이란 새로운 패러다임을 요구하고 있으며, 에너지의 변화는 ‘삶의 질’ 향상을 넘어 ‘생존’의 문제로 다가왔다<sup>1)</sup>.

녹색성장을 새로운 패러다임으로 삼고 있는 모든 국가에서 환경 친화적인 연료로서 LPG(Liquefied Petroleum Gas) 활용도가 증가하고 있으며, 대기오염을 줄이기 위해서 자동차 연료로서 가스의 사용이 빠르게 확산되고 있다<sup>2,3)</sup>.

Table 1은 최근 5년 동안의 가스연료의 소비현황이다. Table 1을 살펴보면 LPG가 운송용으로 12% 정도 증가하였음을 알 수 있다<sup>4)</sup>.

이처럼 가스의 수요가 증가하면서 가스로 인한 사고도 해마다 증가하고 있으며, 2007년 LP가스 사

Table 1. Consumption of fuel gas (Units : 1,000ton)

Year	2007	2006	2005	2004	2003	
Total	35,059	31,673	30,846	29,029	26,137	
L N G	city gas	144,449	13,957	14,032	12,504	11,979
	Power	12,118	9,548	8,821	8,818	6,468
L P G	home	1,973	2,150	2,280	2,140	2,192
	transport	4,366	4,069	3,968	3,860	3,914
	other	2,153	1,949	1,745	1,707	1,584
energy consumption	234,065	231,516	229,600	220,797	215,067	

고를 형태별로 분류하면 폭발 52.5%, 화재 34.3%의 점유율을 보이고 있다<sup>5,6)</sup>.

Table 2는 최근 5년 동안의 LP가스 사고에 대한 현황이다. Table 2를 살펴보면 대부분의 사고는 폭발과 화재로 인한 사고이며, 전체 사고의 90% 정도를 점유하고 있음을 알 수 있다.

특히 LPG 충전소와 같이 대량의 가스를 저장하고 있는 시설에서의 가스누출로 인한 증기운 폭발 사고는 사회적으로 막대한 손실을 초래함을 지난 1998년도 익산충전소의 사고로 알 수 있다<sup>7)</sup>.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
leemsahwan@kut.ac.kr

Table 2. Type by LPgas accident (Units : case)

Section	2003	2004	2005	2006	2007
Explosion	49(-)[1]	37(3)[5]	39(1)[-]	50(5)[8]	52(5)[10]
Fire	28(6)[2]	15(4)[1]	18(2)[2]	15(4)[11]	34(2)[11]
Leakage	6(4)[5]	5(8)[1]	2(7)[-]	2(5)[9]	2(4)[9]
CO Toxicosis	1(5)	2(6)	6(6)	4(2)	2(1)
Oxygen Deficiency	-[1]	2	1	-[1]	1[2]

(-) : City gas, [ ] : High-pressure gas

자동차 연료로서 가스의 수요가 급증하면서 LPG 충전소의 설치도 점진적으로 늘어나고 있으므로 지난 1998년도의 사고와 같은 안전사고가 발생하지 않도록 경계하여야 할 것이다.

국내 LPG충전시설에 설치되어 있는 저장탱크는 1788기이며, 20ton이 946기, 30ton이 465기로 전체 설치수의 80% 정도를 차지하고 있다.

박명섭<sup>8)</sup> 등은 저장시설에 대한 위험성 평가에 관한 연구를 실시하였으며, 그의 연구에 따르면 지상저장탱크의 경우 VCE(Vapor Cloud Explosion)와 외부 열원에 의한 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 그리고 Pool fire에 의한 열 영향(thermal effect)이 가장 큰 피해 발생요인으로 밝혀졌다. 또한, FTA(fault tree analysis) 방법을 이용한 빈도분석 결과 LPG 누출사고가 발생할 빈도(frequency)는 약  $5.42 \times 10^{-2}/\text{yr}$  정도로 나타났으며, ETA(Event Tree Analysis) 결과 LPG 누출사고가 VCE 형태로 폭발사고로 발전될 수 있는 빈도는 약  $2.19 \times 10^{-2}/\text{yr}$  정도로 나타났다.

이승립과 이영순<sup>9)</sup>은 지상식 LPG 저장탱크의 외부화재에 의한 BLEVE 가능성 해석에 대하여 연구하였으며, 기타 연구에서는 저장탱크의 폭발 등에 대한 안전성평가, 폭발에 의한 안전거리 및 안전성 등에 대한 연구를 진행하였다<sup>10-12)</sup>.

따라서 본 논문에서는 국내 LPG 충전소에 설치되어 있는 저장탱크의 53%에 해당되는 20ton 용량의 저장탱크에서의 누출로 인한 폭발사고가 발생할 경우 주변의 건축물에 미치는 피해영향을 예측하고자 한다.

본 연구에서는 폭발에 의한 영향범위 산정은 Scaling 법칙을 사용<sup>13,14)</sup>하고, 과압에 의한 건물의 영향은 Probit 모델을 적용하여 평가하였다<sup>15-18)</sup>.

## 2. 이론적 배경 및 계산식

### 2.1. 누출량 산정

국내 LPG 충전소의 배관라인은 액체라인은 50A, 기체라인은 25A로 구성되어 있다. 따라서 사고피해규모를 최대로 파악하기 위하여 누출시나리오를 액체라인에서 누출이 발생하는 것으로 계산하였다.

액체라인에서의 누출은 비압축성 유체가 대부분이므로 배관에서의 에너지 변화와 압력강하효과를 무시하면 에너지수지식에 의하여 다음과 같이 누출속도식을 나타낼 수 있다<sup>19,20)</sup>.

$$Q = C_p L A \sqrt{\frac{2g(P_0 - P_{atm})}{\rho_L}} \quad (1)$$

- Q : 질량누출속도(kg/s)
- C : 방출계수(Friction Coefficient)
  - Sharp orifice 0.6, Round orifice 0.99
- $\rho_L$  : 액체밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- A : 누출단면적(m<sup>2</sup>)
- g : 중력가속도(9.81 m/sec<sup>2</sup>)
- P<sub>0</sub> : 저장탱크의 압력(Pa)
- P<sub>atm</sub> : 대기압력(Pa)

### 2.2. 폭발이론

가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성인 증기운(Vapor cloud)을 형성하고 이때 착화원에 의하여 화구(Fire ball)형태로 착화 폭발하는 것을 증기운폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)이라 한다<sup>21)</sup>.

Fig. 1에서 보여주는 것처럼 연소범위는 초기온도가 증가하면 넓어질 것이다. 초기압력의 변화에 의한 연소범위는 공기중 탄화수소에 대하여 LFL(Lower Flammable Limit)은 그다지 변화가 적으나 UFL(Upper Flammable Limit)은 증가할 것이다<sup>22)</sup>.

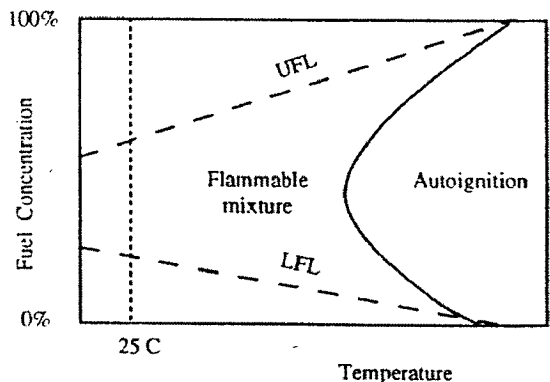


Fig. 1. The effect of temperature on LFL and UFL.

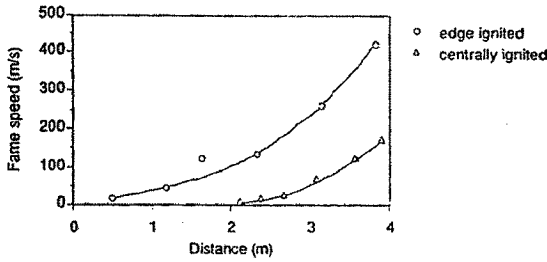


Fig. 2. Flame speed vs. distance for centrally and edge ignited explosions in a double configuration(i.e. solid top plate) with obstacles.

Table 3. Explosion limits of some flammable gases in mixtures with air\*

Flammable gas	Explosion limit	
	lower mol%	upper mol%
Propane	1.7	10.9
n-Butane	1.4	9.3

\* The values are measured at BAM according to German standard DIN 51649-1(BAM annual report 1986).

또한 Fig. 2에서 보듯이 증기와 공기와의 난류혼합 또는 방출점으로부터 먼 지점에서의 증기운 점화는 폭발의 충격을 가중시킨다<sup>23)</sup>.

Table 3은 대기압 조건에서 가연성가스의 폭발 범위<sup>24)</sup>이며 CHEMSAFE<sup>25)</sup>에서 발췌한 내용이다.

### 2.3. TNT 상당량 계산

$$W_{TNT} = \frac{\eta \times H_C \times W_C}{H_{TNT}} \quad (2)$$

- $W_{TNT}$  : TNT 상당량(kg)
- $W_C$  : 가연성가스의 질량(kg)
- $H_C$  : 가연성가스의 연소열(kcal/kg)
- $H_{TNT}$  : TNT의 연소열(1,000kcal/kg)
- $\eta$  : 폭발효율(개방계에서는 1~10%)

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (3)$$

- $Z$  : 환산거리(m/kg<sup>1/3</sup>)
- $R$  : 폭발중심으로부터의 관심거리(m)

### 2.4. PROBIT 분석

구조물에 미치는 영향은 아래 식을 이용하였다.

#### 2.4.1. 구조물의 손상

$$Probit = -23.8 + 2.92 \ln(P_s) \quad (4)$$

#### 2.4.2. 유리의 파손

$$Probit = -18.1 + 2.79 \ln(P_s) \quad (5)$$

$P_s$  : 피크과압(Pa)

## 3. 계산결과

국내 LPG 자동차 충전소에서 운용중인 20ton 저장탱크를 선정하였으며, 사고피해 규모를 최대로 하기 위하여 액체라인에서의 누출을 대상으로 저장용량의 10%인 2,000kg으로 계산하였다.

Table 4는 누출량 산정에 관한 식 (1)에 의하여

Table 4. Calculated release rates for LPG

Equivalent Hole Size	Mass Flow Rate Released(kg/s)			
	Propane		Butane	
	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
25mm	9.23	0.86	5.5	0.35
50mm	36.93	3.43	21.98	1.42

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

Table 5. Damage by blast overpressure

Overpressure (kPa)	Form of damage
0.14	Disagreeable noise by low frequency(10~15Hz)
0.21	Partial damage of window made of glass
0.28	Big noise and glass is broken
0.69	Small transformed window made of glass is broken
1.03	Glass bursting pressure
2.07	10% of glass window is broken
2.76	Small damage limitation of building
3.45	Big and small window fracture
4.83	House small breakage
6.89	House portion breakage
8.96	Building steel frame flexure
13.79	Weak concrete wall fracture
15.86	Serious structural damage low-level
20.68	Steel frame building flexure
27.58	Oil storage tank explosion
34.47	Wood pillar is crash and explosion of tympanum
41.37	House whole breakage
48.26	Overthrow of freight car
62.05	Whole destruction of freight car
68.95	Whole destruction of building

계산한 결과이며, 긴급차단밸브가 차단되는 시간을 약 5초로 산정하여 위기대응시간을 1분으로 가정하여 계산하면 약 2,200kg이다. 이 값은 저장용량의 10% 정도에 해당하는 누출량이다.

또한 사고피해규모를 최대한으로 파악하기 위하여 충전소에서 사용하는 LPG(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)보다 상대적으로 압력이 높은 LPG(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)를 대상으로 실시하였다.

Table 5는 피크과압에 따른 피해형태를 나타낸 것이다. 또한 이를 이용하여 과압에 의한 건물의 피해분석에 대하여 비교·검토하는데 활용하고자 한다.

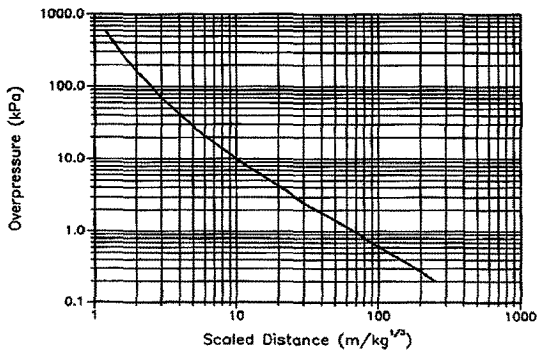


Fig. 3. Peak overpressure by TNT explosion.

Table 6. Overpressure with distance caused by VCE

Z(m)	R(m)	WTNT(kg)	Over pressure(kPa)	X(m)
0.93	8.5	753.84	1650.0	0.70
1.26	11.5		990.0	0.97
1.32	12.0		890.0	1.04
1.48	13.5		589.0	1.36
1.65	15.0		472.0	1.57
1.87	17.0		352.0	1.89
2.31	21.0		222.0	2.55
2.64	24.0		176.0	2.96
2.97	27.0		133.00	3.54
3.30	30.0		99.0	4.29
5.49	50.0		40.5	7.62
8.24	75.0		21.55	11.45
10.99	100		15.0	14.06
16.48	150		15.66	20.45
21.98	200		5.44	27.79
29.12	265		3.46	37.19
32.96	300		3.25	39.48
54.94	500		1.72	58.41
82.41	750		0.95	85.86
109.88	1000		0.69	105.15
126.36	1150	0.66	108.63	

\* X(m) : Damage distance

LPG 자동차 충전소에서의 VCE에 의한 과압의 피해예측을 위하여 식 (2)을 적용하여 TNT상당량을 계산하였다. 보편적으로 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 폭발에 적용되는 폭발효율은 개방계에서는 0.03을 적용한다<sup>26,27)</sup>.

본 연구에서는 폭발효율을 일반적으로 활용하고 있는 0.03과 여러 가지 안전사항을 복합적으로 판단하기 위하여 폭발효율 1.0에 대하여 적용하였다.

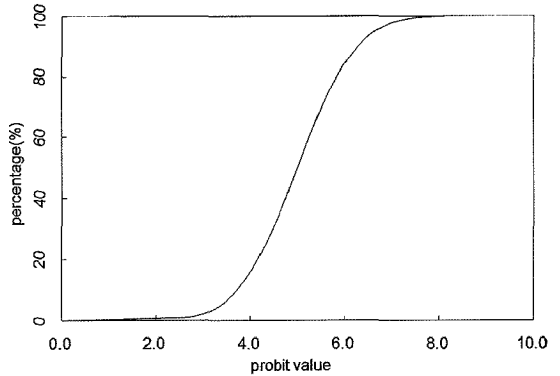


Fig. 4. Relationship with probability value(probit) and percentage.

Table 7. Damage probability with distance caused by VCE

R(m)	Structure damage probit value	Structure damage probability(%)	Glass bursting probit value	Glass bursting probability(%)
8.5	18.004	100.0%	21.842	100.0%
11.5	16.512	100.0%	20.417	100.0%
12.0	16.201	100.0%	20.12	100.0%
13.5	14.996	100.0%	18.968	100.0%
15.0	14.349	100.0%	18.351	100.0%
17.0	13.492	100.0%	17.532	100.0%
21.0	12.146	100.0%	16.246	100.0%
24.0	11.468	100.0%	15.598	100.0%
27.0	10.65	100.0%	14.817	100.0%
30.0	9.788	100.0%	13.993	100.0%
50.0	7.178	98.4%	11.499	100.0%
75.0	5.336	63.2%	9.739	100.0%
100	4.404	27.5%	8.848	100.0%
150	2.708	1.1%	7.227	98.6%
200	1.316	0.5%	5.898	81.5%
265	-0.003	0.0%	4.637	35.9%
300			4.378	26.6%
500			2.682	1.1%
750			1.015	0.4%
1000			0.137	0.1%
1150			-0.004	0.0%

Fig. 3은 과압력(Overpressure)과 환산거리(scaled distance)와의 관계를 나타낸 것으로, 식 (3)을 이용하여 실제 영향거리를 계산한다.

Table 6은 식 (2)에서 구한 TNT당량을 이용하여 식 (3)에 적용하여  $W_{TNT}$ 상당량에 해당하는 환산거리를 구한 수치이며, 이를 이용하여 Fig. 4에 적용하여 폭발장소에서의 이격거리별 피크과압을 구한 수치이다. 또한 이러한 수치를 이용하여 과압으로 인한 영향거리를 구하여 보았다.

Fig. 4는 확률값(Probit value)과 백분율과의 관계를 도식화한 것이다. Fig. 4를 이용하여 Probit 분석<sup>28)</sup> 계산식에서 구한 수치를 적용하여 거리별로 건축물에 미치는 사고피해를 예측하고자 한다.

Table 7은 과압이 미치는 거리별로 건축물에 미치는 영향을 Fig. 4에 적용하여 백분율로 나타낸 것이다. Fig. 5는 Table 7을 도식화한 것이다.

본 연구에서는 과압의 영향에 대하여 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 폭발장소 주변의 건축물에 미치는 영향을 Probit 모델에 적용하

여 피해예측을 평가하였으며, LPG의 이론연소열 12,564kcal/kg을 적용하여 계산하였다.

Fig. 5는 폭발효율 0.03을 적용하였을 경우 거리에 따른 손상확률을 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 6은 폭발효율 1.0을 적용한 거리별 손상확률이다.

본 연구에서 누출량 계산에 사용한 응급대응시간 60초는 기존의 이승림과 이영순<sup>9)</sup>의 연구결과에서 일반적으로 적용하는 누출시간 180초에 비하여 화재의 면적, 직경, 높이가 더 많기 때문에 안전성을 위하여 최대값으로 나타나는 60초로 선정하여 계산하였다.

또한 부천 LPG 충전소 사고조사와 PHAST 분석에 대한 노삼규<sup>29)</sup> 등의 연구결과와 비교하여 보면 90% 유리창 파괴거리가 실제조사치는 90m, PHAST MODELING 결과는 550m인데 비하여 본 연구에서 계산된 값은 폭발효율 10%로 적용시 565m로 계산되었다. 기존 연구결과치와 2%차이를 나타내고 있다. 또한 폭발효율을 3%로 적용시 175m로 실제조사치와 약 50% 정도의 차이를 나타내고 있다. 이는 저장탱크의 폭발에 의한 과압과 개방된 공간에서의 증기운폭발에 의한 차이로 추정한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 폭발효율을 가연성가스에 적용하는 3%와 안전성을 고려하여 100%를 적용하여 이론에 의한 계산결과로 피해영향을 예측하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구조물에 대한 손상확률은 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우 관심거리 270m부터, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 관심거리 850m부터 0%로 나타났다.

2) 유리에 대한 손상확률은 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우 관심거리 1150m부터, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 관심거리 3610m부터 0%로 나타났다.

이러한 모든 결과는 이론에 근거하였다. 물론 연구에 인용된 계산식은 실험식을 근간으로 하였으므로 피해예측에 충분하다고 할 것이다. 피해한계 거리보다 이격된 곳에서의 사고피해는 발생하지 않을 것으로 판단한다.

추후 실제피해거리와 이론계산에 의한 거리차이에 대하여 건물에 의한 충격파 저감효과 등을 고려한 지역별 폭발효율 적용에 대한 연구를 진행코자

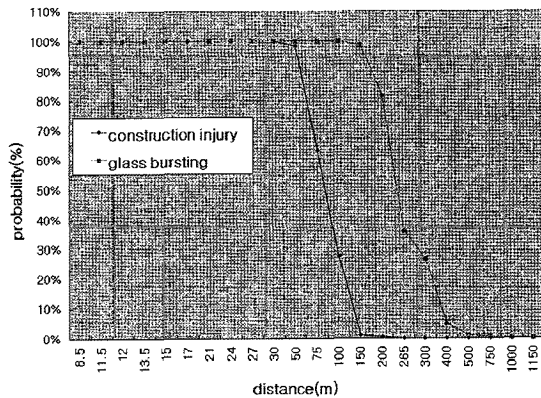


Fig. 5. The distance for damage effect at factor 0.03.

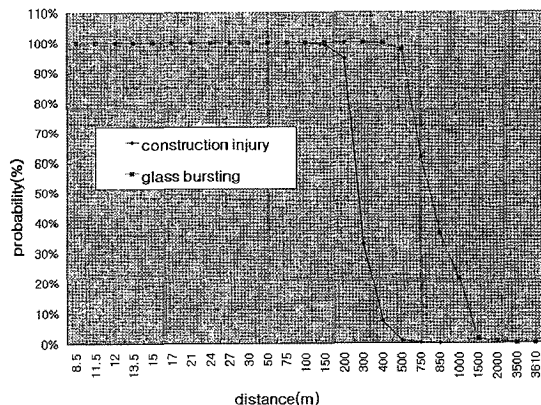


Fig. 6. The distance for damage effect at factor 1.0.

하며, 또한 화염의 거동에 의한 건축물에 미치는 피해영향분석과 과압 및 화염에 의한 인체에 미치는 피해영향을 계속 연구코자 한다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2008년도 한국기술교육대학교 연구제 파견연구비 지원에 의해 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) <http://www.keei.re.kr>
- 2) OECD, Integrating Environment and Economy, Progress in the 1990s, 1996.
- 3) 강광규, “저공해차량의 균형보급방안 연구-LPG/CNG 차량을 중심으로”, 한국환경정책평가연구원, 2002.
- 4) 국가통계포털-국내통계-광공업 · 에너지-에너지. <http://www.kosis.kr>
- 5) 한국가스안전공사, “2006 가스사고연감”, (주)선진상사, 2007.
- 6) 한국가스안전공사, “2007 가스사고연감”, 태인, 2008.
- 7) 한국가스안전공사, “2005 가스사고연감”, (주)오성프린팅, 2006.
- 8) 박명섭, 서재민, 이정우, 김기수, 김성빈, 고재욱, 신동일, “LPG 저장시설에 대한 위험성 평가에 관한 연구”, 한국가스학회지, 제3권, 제3호, pp. 9~16, 1999.
- 9) 이승림, 이영순, “지상식 LPG 저장탱크의 외부화재에 의한 BLEVE 가능성 해석”, 한국가스학회지, 제7권, 제1호, pp. 19~23, 2003.
- 10) 임사환, 허용정, “가스 저장탱크 안전거리의 지적 결정 시스템 개발”, 한국산학기술학회논문지, 제7권, 제4호, pp. 721~726, 2006.
- 11) 오규형, 강연욱, 이성은, “Whirl Fire와 Pool Fire의 화염 거동에 관한 연구”, 한국안전학회지, 제19권, 제3호, pp. 45~50, 2004.
- 12) Sa-Hwan Leem, Yong-Jeong Huh, Seong-Joo Choi, Jong-Rark Lee and Dong-Yeon Lim, “A Study on Estimation of Human Damage caused by Rupture of Butane Can”, Journal of the Korean society of safety, Vol.22, No.3, pp.98~104, 2007.
- 13) W.E. Baker, P.A. Cox, P.S. Wetine, J.J. Kulesz and R.A. Strehlow, “Explosion Hazards Evaluation”, Elsevier Science, 1983.
- 14) W.K. Crowl, “Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300”, U.S. Army, Navy and Air Force, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1969.
- 15) CCPS, “Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE”, AIChE, New York, 1994.
- 16) R.J. Harris, M.R. Marshall and D.J. Moppett, “The Response of Glass Windows to Explosion Pressure”, Symp. Series No. 49. ICJemE, 1977.
- 17) Frank P and Lees, M.I. Ang, “Safety Cases”, Butterworth & Co. Ltd., 1989.
- 18) Korea Industrial Safety Corporation, “Effecting Method of Accident Damage”, KOSHA CODE P-09-1999, 1999.
- 19) Frank, P.L., “Loss Prevention in the Process Industries”, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 15/1, 1996.
- 20) Yonng-Do Jo, “A Study on the Minimum Safe Separation Distance from LPG Filling Station”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.3, No.2, July, 1999.
- 21) CCPS, “Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE”, AIChE, New York, 1994.
- 22) H.P. Niepenberg von, Rick Oppenberg, “Zusammenstellung sicherheitstechnischer Daten zur Vermeidung von Explosionen in Feuerraumen, (Ger)”, Industrie-feuerung 11, 1978.
- 23) C.J.M. van Wingerden. J.P. Zeeuwen, “Explosions in pipe-rack-like obstacle array”, 10th International Colloquium of Explosion and Reactive Systems. 1985. Berkeley. California. AIAA Progress in astronautics and aeronautics. 106, 1986.
- 24) Hattwig, M., Steen, H., “Handbook of Explosion Prevention and Protection”, Wilet-VCH verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 276~282, 2004.
- 25) CHEMSAFE : Datenbank fur bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen, erstellt von BAM, Berlin, DECHMA, Frankfurt und PTB, Braunschweig.
- 26) Truax, Barry(ed), “A Handbook for Acoustic Ecology”, Vancouver, A.R.C. Publication, p. 1261, 1978.
- 27) CCPS, “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”, CCPS of the AIChE, 1989.
- 28) Finney, D. J., “Probit Analysis”, Cambridge, 1947.
- 29) 노삼규, 김태환, 함은구, “LPG 충전소의 BLEVE 현상에 따른 피해효과 분석”, 한국가스학회지, 제3권, 제3호, pp. 45~50, 1999.