



LPG자동차충전소에서 증기운폭발로 인한 인명피해예측에 관한 연구

임사환 · 허용정

한국기술교육대학교 기계공학과, *한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
(2009년 12월 18일 접수, 2010년 4월 7일 수정, 2010년 4월 7일 채택)

A Study on the Estimation of Human Damage Caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station

Sa Hwan Leem · Yong Jeong Huh

School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education
**School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education*
(Received 18. December. 2009, Revised 7. April. 2010, Accepted 7. April. 2010)

요 약

환경친화적인 에너지원으로서 가스의 수요가 날로 급증하고 있다. 이와 함께 LPG 자동차 충전소가 점진적으로 늘어나고 있다. 본 연구에서는 LPG 충전소에서 발생하는 증기운폭발 과압의 피해를 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 인체에 미치는 영향을 프로빗 모델에 적용하여 피해예측을 평가하였다. 현재 국내에서 가장 많이 운용하는 20ton 저장탱크를 대상으로 누출량 10%를 프로빗 모델에 적용하여 계산하면 LPG 충전소에서의 이격 거리는 각각 인체에 손상가능거리는 36.5m, 고막파열 손상가능거리는 290m이다.

Abstract - The demand of gas as an eco-friendly energy source has been increased. With increasing the LPG demand, the number of LPG filling station. In this work, the influence on over-pressure caused by Vapor Cloud Explosion in gas station was calculated by using the Hopkinson's scaling law and injury effect by the accident to a human body was estimated by applying the probit model. As a result of the injury estimation conducted by using the probit model for leakage 10% of 20ton storage tank. The distances from LPG station for death and tympanum rupture are 36.5 and 290 meters, respectively.

Key words : VCE(Vapor Cloud Explosion), LPG Filling Station

1. 서 론

최근 가스의 수요는 녹색성장이라는 새로운 패러다임을 기치로 내세우고 있는 우리의 현실을 반영하듯이 해마다 7.3%씩 증가하는 추세이며, 특히 환경 친화적인 연료로서 LPgas는 자동차 연료로서 빠르게 확산되어 년 8.4%씩 증가하고 있다[1].

Table 1은 최근 5년 동안의 LPgas의 소비동향으로 가정에서 사용하는 가스의 소비되는 양은 점차적으로 줄어드는 반면, 자동차 연료로 사용되는 가스소비는 점진적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다[2,3].

또한 가스의 수요증가와 함께 안전사고도 계속하여 발생하고 있으며, 대단위 저장시설에서의 사고는 사회적 피해가 심각하게 나타나고 있다.

특히, 1998년도 전북 익산에서 발생한 LPG충전 시설에서의 사고는 막대한 재산상 손실과 인명피해를 유발하였다[4].

LPG 충전소에서 발생한 사고로 노삼규(1999) 등은 저장탱크에서 발생하는 BLEVE 현상에 따른 피해에 대하여 연구하였고, 배성진(1999) 등은 화재와 폭발에 관한 정량적 영향 평가에 대한 연구, 이수경(1999) 등은 화재와 폭발에 대한 피해영향분석을 연구하였다[5-7].

Table 2는 최근 5년 동안의 국내 LPgas에 의한 사고현황이다. 이처럼 가스의 수요가 증가하면서

*주저자:leemshwan@kut.ac.kr

Table 1. Consumption of Fuel Gas.
(Units : 1000ton)

Year		2008	2007	2006	2005	2004
L	home	1,857	1,973	2,150	2,280	2,140
P	transport	4,379	4,366	4,069	3,968	3,860
G	other	2,695	2,153	1,949	1,745	1,707

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

Section	2003	2004	2005	2006	2007
Explosion	49	37	39	50	52
Fire	28	15	18	15	34
Leakage	6	5	2	2	2
CO Toxicosis	1	2	6	4	2
Oxygen Deficiency	-	2	1	-	1

Table 3. Construction Status of LPG Station.(Units : Ea)

Section	Storage Tank(Construction Type)		
	above ground	underground	
		burial	containment
Total	173	1,703	110
Vessel	29	38	3
Vehicle	33	1,219	36
Vessel and Vehicle	70	420	70
Other	41	26	1

가스로 인한 사고도 해마다 증가하고 있으며, 2007년 LPG가스 사고를 형태별로 분류하면 폭발 52.5%, 화재 34.3%의 점유율을 보이고 있다[3].

Table 3은 국내 LPG 충전시설에 설치되어 있는 저장탱크의 설치형태이다.

국내 LPG충전시설에 설치되어 있는 저장탱크는 1788기이며, 자동차 충전소에 설치되어 있는 저장탱크가 전체 65%정도에 해당된다. 또한, 20ton이 946기, 30ton이 465기로 전체 설치수의 80%정도를 차지하고 있다[8].

Table 4는 최근 5년 동안의 충전·저장·집단공급시설에서 발생한 사고현황이다.

고재욱(1999) 등은 저장시설에 대한 위험성 평가에

Table 4. Type by LPGas business.
(Units : case)

Section	Filling facilities	Collective Supply	Storage	Other
2003	-	4	-	2
2004	2	1	-	1
2005	1	2	1	1
2006	1	3	1	2
2007	-	3	1	-

관한 연구를 실시하였으며, 그의 연구에 따르면 지상 저장탱크의 경우 VCE와 외부 열원에 의한 BLEVE 그리고 Pool fire에 의한 thermal effect가 가장 큰 피해 발생요인으로 밝혔다. 또한, FTA 방법을 이용한 빈도분석 결과 LPG 누출사고가 발생할 빈도(frequency)는 약 $5.42 \times 10^2/\text{yr}$ 정도로 나타났으며, ETA 결과 LPG 누출사고가 VCE 형태로 폭발사고로 발전될 수 있는 빈도는 약 $2.19 \times 10^2/\text{yr}$ 정도로 나타났다[9].

이승림과 이영순(2003)은 지상식 LPG 저장탱크의 외부화재에 의한 BLEVE 가능성에 대해서 연구를 실시하였으며, 기타 연구에서는 저장탱크의 파열 등에 대한 안전성평가, 폭발에 의한 피해영향 안전거리 등에 대한 연구를 진행하였다[10-14].

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

TNT 상당량으로 계산하는 것은 실제와 차이가 있으나, 다년간의 폭발실험을 경험산술화한 것으로 안전성을 확인하기 위하여 가스폭발에 적용하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 폭발에 의한 영향범위 산정은 Scaling 법칙을 사용[15,16]하고, 과압에 의한 인명피해 영향은 Probit 모델을 적용하여 평가하였다[17-19].

II. 이론배경 및 계산식

2.1. 폭발이론

액화석유가스를 대량으로 저장·취급하고 있는 충전·집단·저장시설에서 발생하는 대표적인 사고의 형태는 Fig. 1과 같은 누출원과 점화원 등에 의하여 여러 가지 형태로 발생한다.

가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성혼합 가스를 형성하고 방출되는 가스의

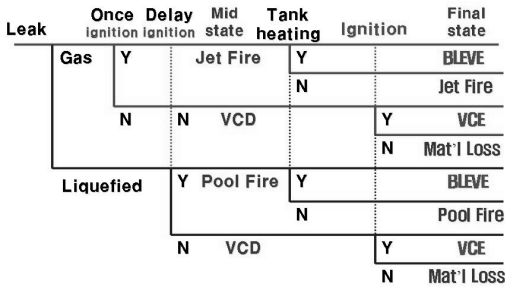


Fig. 1. Event Tree Analysis of LP Gas Filling System.

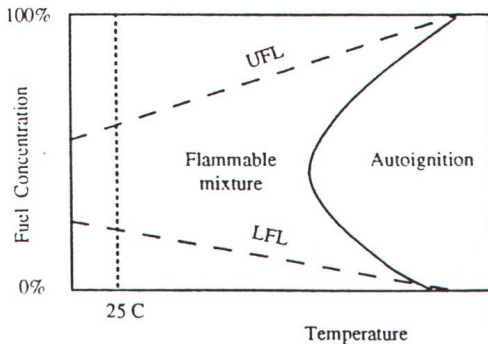


Fig. 2. The effect of temperature on LFL and UFL.

단열 팽창에 의한 온도의 저하로 공기와 혼합하여 증기운 형태를 갖는다. 이때 착화원에 의하여 폭발하는 것을 증기운폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)이라 한다[20].

특히 LPG충전소에서 발생한 폭발 사고형태는 증기운폭발(VCE)과 비등액체팽창증기폭발(BLEVE)이 대표적이며, BLEVE(Boiling liquid expanding vapor explosion : 沸騰液體膨脹蒸氣爆發)는 용기폭발의 대표적인 사고로서 액화된 다량의 물질이 순간적으로 방출되면서 2차 피해를 발생시키게 되는데, 용기 파열시 용기내 다량의 물질이 폭발적으로 증발하여 과압을 형성하고 파편이 비산하게 된다[21,22].

Fig. 2에서 보여주는 것처럼 연소범위는 초기온도가 증가하면 넓어지며 초기압력에 의한 영향은 가스에 따라 다르며 LFL은 그다지 변화가 없으며 UFL은 대체로 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 증기운 폭발은 BLEVE보다 폭발효율이 적으며, 가스폭풍의 경우 폭발효율이 40%를 초과할 수 있다. 그러나, 폭발효율의 경우 실험과 많은 증기운폭발 사고에서 관측된 피해로부터 유도되는데 대부

분의 주요 증기운폭발 사고의 경우 폭발효율은 누출된 연료 전량의 연소열에 기초하여 1%~10% 정도로 추정된다[23].

2.2. 누출량 산정

국내 LPG 충전소의 배관라인은 액체라인은 50A, 기체라인은 25A로 구성되어 있다. 따라서 사고피해 규모를 최대도 파악하기 위하여 누출시나리오를 액체라인에 국한하였다. 따라서 본 논문에서는 액체라인의 누출식만 다루어 계산하였다.

액체라인에서의 누출은 비압축성 유체가 대부분이므로 배관에서의 에너지 변화와 압력강하효과를 무시하면 에너지수지식에 의하여 다음과 같이 누출속도식을 나타낼 수 있다[24,25].

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

Q : 질량누출속도(kg/s)

C : 방출계수(Friction Coefficient)

- Sharp orifice 0.6, Round orifice 0.99

ρ_L : 액체밀도(kg/m³)

A : 누출단면적(m²)

g : 중력가속도(9.81 m/sec²)

P₀ : 저장탱크의 압력(Pa)

P_{atm} : 대기압력(Pa)

2.3. TNT 상당량 산정

TNT 상당량 모델은 연소가능한 가스의 질량을 예측하여 가연성 물질에 대한 연소열을 결정하고, 폭발효율에 대한 값을 결정 TNT 상당질량을 계산한다. 이러한 계산은 식(2)을 이용하고, 영향거리는 Hopkinson 환산거리를 통하여 스케일화 될 수 있으며, 식(3)을 적용한다.

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

W_{TNT} : TNT 상당량(kg)

W_C : 가연성가스의 질량(kg)

H_C : 가연성가스의 연소열(kcal/kg)

H_{TNT} : TNT의 연소열(1000kcal/kg)

η : 폭발효율(개방계에서는 1~10%)

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

Z : 환산거리(m/kg^{1/3})

R : 폭발중심으로부터의 관심거리(m)

Table 5. Explosion efficiency for explosive-ness vapor.

η	Material	
$\eta=0.03$	Acetone	Methane
	Benzene	Methanol
	1,3-Butadiene	3-Methyl-Butene-1
	Butene-1	Methyl Mercaptan
	Carbon Monoxide	Naphthalene
	Dimethyl Ether	N-Butane
	Ethane	N-Pentane
	Ethanol	Petroleum Ether
	Ethyl Benzene	Phthalic Anhydride
	Furfural Alcohol	Propane
	Hydrogen	Propionaldehyde
	Iso-Butyl Alcohol	Propylene
	Isobutylene	Toluene
Iso-Octane	Water Gas	
$\eta=0.06$	Acrolein	Diethyl Ether
	Carbon Disulphide	Divinyl Ether
	Cyclohexane	Ethylene
	Ethyl Nitrate	Propylene Oxide
$\eta=0.19$	Acetylene	Hydrazine
	Ethylene Oxide	Isopropyl Nitrate
	Ethyl Nitrate	Methyl Acetylene
	Vinyl Acetylene	Nitromethane

Table 5는 가연성 가스의 폭발효율에 대한 요약 표이다.

2.4. PROBIT 분석

인체에 미치는 영향은 아래 식을 이용하였다.

2.4.1. 폐출혈로 인한 사망

$$Probit = -77.1 + 6.91 \ln(P_s) \quad (4)$$

2.4.2. 고막파열의 경우

$$Probit = -15.6 + 1.93 \ln(P_s) \quad (5)$$

P_s : 피크과압(Pa)

III. 계산결과

국내에 설치되어 있는 LPG저장탱크는 20Ton 규모의 저장탱크가 약 1000여개로써 가장 많이 설치되어 있다. 따라서 국내 LPG 자동차 충전소에서 운용중인 20ton 저장탱크를 선정하였으며, 사고피해 규모를 최대로 하기 위하여 액체라인에서의 누

Table 6. 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 7. Blast damage by 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

출을 대상으로 저장용량의 10%인 2000kg으로 계산하였다.

Table 6은 누출량 산정에 관한 식(1)에 의하여 계산한 결과이다.

Table 7은 피크과압에 따른 피해형태를 나타낸 것이다. 또한 이를 이용하여 과압에 의한 인체의 피해분석에 대하여 비교·검토하는데 활용하고자 한다.

LPG 자동차 충전소에서의 VCE에 의한 과압의

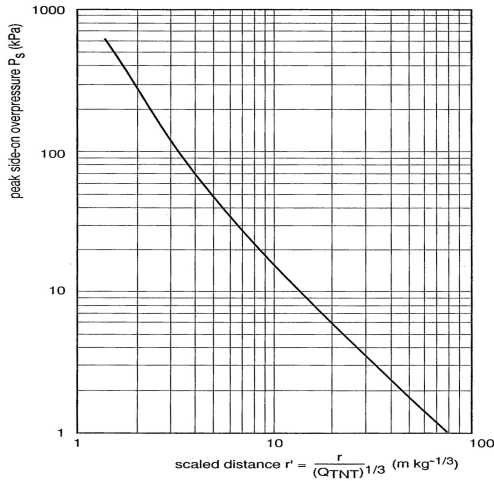


Fig. 3. Peak overpressure by TNT explosion.

Table 8. 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		890.0	1.04
1.48	13.5		589.0	1.36
1.65	15		472.0	1.57
1.87	17		352.0	1.89
2.31	21		222.0	2.55
2.64	24		176.0	2.96
2.97	27		133.0	3.54
3.30	30		99.0	4.29
4.01	36.5		69.5	5.41
5.49	50		21.55	11.45
8.24	75		15.0	14.06
10.99	100		15.66	20.45
16.48	150		5.44	27.79
21.98	200		3.46	37.19
31.86	290		3.25	38.73

피해예측을 위하여 식(2)을 적용하여 TNT상당량을 계산하였다. 보편적으로 C₃H₈의 폭발에 적용되는 폭발효율은 개방계에서는 0.03을 적용한다[26,27].

본 연구에서는 폭발효율을 일반적으로 활용하고 있는 0.03과 여러 가지 안전사항을 복합적으로 판

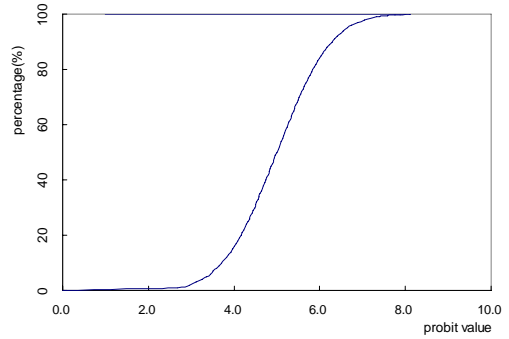


Fig. 4. Relationship with probability value(probit) and percentage.

Table 9. Injury probability with distance caused by VCE.

R(m)	Lung hemorrhage death probit value	Lung hemorrhage death probability(%)	Tympanum rupture probit value	Tympanum rupture probability(%)
8.5	21.83	100%	12.03	100.0%
11.5	18.296	100%	11.045	100.0%
12	17.56	100%	10.839	100.0%
13.5	14.71	100%	10.042	100.0%
15	13.18	100%	9.615	100.0%
17	11.15	100%	9.049	100.0%
21	7.97	99.9%	8.159	100.0%
24	6.36	91.3%	7.711	99.7%
27	4.42	28.0%	7.17	98.4%
30	2.38	0.9%	6.601	94.6%
36.5	-0.11	0%	5.904	81.6%
50			4.875	45.2%
75			3.658	9.0%
100			3.042	2.5%
150			1.92	0.8%
200			1.001	0.4%
290			0.007	0%

단하기 위하여 폭발효율 1.0에 대하여 적용하였다.

Fig. 3은 과압력(Overpressure)과 환산거리(scaled distance)와의 관계를 나타낸 것으로, 식(3)을 이용하여 계산된 거리를 x축에 대입하여 수직연장선에 해당하는 y축의 과압을 읽으면 실제피해 영향을 알 수 있다.

Table 8은 식(2)에서 구한 TNT당량을 이용하여 식

(3)에 적용하여 W_{TNT} 상당량에 해당하는 환산거리를 구한 수치이며, 이를 이용하여 Fig. 3에 적용하여 폭발 장소에서의 이격거리별 피크과압을 구한 수치이다. 또한 이러한 수치를 이용하여 과압으로 인한 영향 거리를 구하여 보았다.

Fig. 4는 확률값(Probit value)과 백분율과의 관계를 도식화한 것이다. Fig. 4를 이용하여 Probit 분석[28] 계산식에서 구한 수치를 적용하여 거리별로 인체에 미치는 사고피해를 예측하고자 한다.

Table 9는 과압이 미치는 거리별로 건축물에 미치는 영향을 Fig. 4에 적용하여 백분율로 나타낸 것이다. Fig. 5는 Table 9를 도식화한 것이다.

본 연구에서는 과압의 영향에 대하여 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 폭발장소 주변의 인체에 미치는 영향을 Probit 모델에 적용하여 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.

IV. 결 론

본 연구에서는 국내 가장 많이 설치되어 운용되고 있는 20ton 저장탱크를 대상으로 누출시나리오는 저장능력의 10%로 계산하였으며, 폭발효율을 가연성 가스에 적용하는 3%와 안전성을 고려하여 100%를 적용하여 이론에 의한 계산결과로 피해영향을 예측하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폐출혈로 인한 사망에 대한 손상확률은 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우 관심거리 36.5m부터, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 관심거리 118m부터 0%로 나타났다.

2) 고막파열에 대한 손상확률은 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우 관심거리 290m부터, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 관심거리 932m부터 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 화염의 거동에 의한 건축물에 미치는 피해 영향분석과 화염에 의한 인체피해영향을 계속 연구코자 한다.

참고문헌

- [1] <http://www.keei.re.kr>.
- [2] 한국가스안전공사, "2006 가스사고연감", (주) 선진상사, (2007)
- [3] 한국가스안전공사, "2007 가스사고연감", 태인, (2008)
- [4] 한국가스안전공사, "2005 가스사고연감", (주) 오성프린팅, (2006)
- [5] Sam-Kew Roh, Tae-Hwan Kim and Eun-Gu Ham, "A Study on Damage Effect from Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion(BLEVE) of LPG Charging Facility", KIGAS, 3(3), 45-50, (1999)
- [6] Sung-Jin Bae and Byung-Jick Kim, "The Study on the Quantitative Analysis in LPG Tank's Fire and Explosion", KIGAS, 3(1), 21-26, (1999)
- [7] Su-Kyung Lee and Chang-Wook Lee, "Consequence Analysis of the Fire & Explosion on the Flammable Liquid Handling Facility and LPG Station", KIGAS, 3(2), 77-84, (1999.)
- [8] 고압가스통계, 한국가스안전공사, 2009.
- [9] 박명섭, 서재민, 이정우, 김기수, 김성빈, 고재욱, 신동일, "LPG 저장시설에 대한 위험성 평가에 관한 연구", 한국가스학회지, 3(3), 9-16, (1999)
- [10] 이승립, 이영순, "지상식 LPG 저장탱크의 외부 화재에 의한 BLEVE 가능성 해석", 한국가스학회지, 7(1), 19-23, (2003)
- [11] In-Tae Kim, In-Won Kim, Hee-Oeul Song, "A Study on the Overpressure Estimation of BLEVE", KIGAS, 4(1), 69-76, (2000)
- [12] 임사환, 허용정, "가스 저장탱크 안전거리의 지적결정 시스템 개발", 한국산학기술학회논문지, 7(4), 721-726, (2006)
- [13] 오규형, 강연옥, 이성은, "Whirl Fire와 Pool Fire의 화염 거동에 관한 연구", 한국안전학회지, 19(3), 45-50, (2004)
- [14] 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, 22(3), 98-104, (2007)

- [15] W.E. Baker, P.A. Cox, P.S. Wetine, J.J. Kulesz and R.A. Strehlow, "Explosion Hazards Evaluation", Elsevier Science, (1983)
- [16] 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)
- [17] CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE", AIChE, New York, 1994.
- [18] R.J. Harris, M.R. Marshall and D.J. Moppett, "The Response of Glass Windows to Explosion Pressure" Symp. Series No. 49. ICJemE, (1977)
- [19] Frank P and Lees, M.I. Ang, "Safety Cases", Butterworth & Co. Ltd., (1989)
- [20] CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE", AIChE, New York, (1994)
- [21] Reid, R. C., "Some Theories on Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions", Fire, March, 525-526, (1980)
- [22] A. M. Bisk and M. H. Cunningham, "The boiling Liquid Expanding Vapor Explosion", J. Loss Prev. Process Ind., 7(6), 474-480, (1994)
- [23] Korea Industrial Safety Corporation, "Effecting Method of Accident Damage", KOSHA CODE P-09-1999, (1999)
- [24] Frank, P.L., "Loss Prevention in the Process Industries", 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 15/1, (1996)
- [25] Yongng-Do Jo, "A Study on the Minimum Safe Separation Distance from LPG Filling Station", KIGAS, 3(2), 24-33 (1999)
- [26] Truax, Barry(ed), "A Handbook for Acoustic Ecology", Vancouver, A.R.C. Publication, 1261, (1978)
- [27] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", CCPS of the AIChE, (1989)
- [28] Finney, D. J. "Probit Analysis", Cambridge, (1947)