



## LPG 저장탱크의 폭발에 대한 정량적 영향평가에 관한 연구

†임사환 · 허용정\*

한국가스안전공사 해외사업지원처, \*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부  
(2012년 10월 12일 투고, 2013년 4월 25일 수정, 2013년 6월 19일 채택)

### A Study on the Quantitative Analysis for Explosion of LPG Storage Tank

†Sa Hwan Leem · Yong Jeong Huh\*

Overseas Business Division, Korea Gas Safety Corporation

\*School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

(Received October 12, 2013; Revised April 25, 2013; Accepted June 19, 2013)

#### 요 약

LPG 충전소에서 발생하는 폭발의 피해를 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 건물과 인체에 미치는 영향을 프로비트 모델에 적용하여 피해예측을 평가하였다. 현재 국내에서 가장 많이 운용하는 20ton 저장탱크를 대상으로 누출량 10%를 프로비트 모델에 적용하여 계산하면 LPG 충전소에서의 안전거리는 각각 건물(손상)은 260m이며, 인체(폐출혈 사망)는 30m이다.

**Abstract** - The influence of the over-pressure caused by Explosion in gas station was calculated by using the Hopkinson's scaling law and injury effect by accident to buildings and human bodies was estimated by applying the probit model. As a result, the injury estimation was conducted by using the probit model for leakage 10% of 20ton storage tank. The separate distances from LPG station for building(damage) and human(lung hemorrhage to death) are 260 and 30 meters, respectively.

**Key words** : BLEVE, VCE, LPG Filling Station, Explosion

#### 1. 서 론

최근 가스의 수요는 녹색성장이라는 새로운 패러다임을 기치로 내세우고 있는 우리의 현실을 반영하듯이 해마다 증가하는 추세이며, 특히 환경 친화적인 연료로서 LPG는 자동차 연료로서 빠르게 확산되어 년 9.0%씩 증가하고 있다[1].

최근 5년 동안의 LPG의 소비동향으로 가정에서 사용하는 가스의 소비되는 양은 점차적으로 줄어드는 반면, 자동차 연료로 사용되는 가스소비량은 점진적

으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다[2,3].

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

LPG 충전소에서 발생한 사고에 대한 연구분석은 박교식(2006) 등이 연구하였고, 노삼규(1999) 등은 저장탱크에서 발생하는 BLEVE 현상에 따른 피해에 대하여 연구하였으며, 배성진(1999) 등은 화재와 폭발에 관한 정량적 영향 평가에 대한 연구, 이수경(1999) 등은 화재와 폭발에 대한 피해영향분석을 연구하였다[4-7].

최근 5년 동안의 국내 LPgas에 의한 사고현황이다. 이처럼 가스의 수요가 증가하면서 인명손실과 재산손실이 큰 폭발과 화재가 대부분이며, 2011년 LP

†Corresponding author: leemsahwan@kut.ac.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

가스 사고를 형태별로 분류하면 폭발 54.1%, 화재 37.8%의 점유율을 보이고 있다[3].

국내 LPG 충전시설에 설치되어 있는 저장탱크의 설치형태는 지상형, 지하격납형, 지하매몰형으로 구성되어 있다.

국내 LPG충전시설에 설치되어 있는 저장탱크에서 자동차 충전소에 설치되어 있는 저장탱크가 전체 65% 정도에 해당된다. 또한, 저장용량 20ton이 약 53%, 저장용량 30ton이 약 26%로 전체 설치수의 80%정도를 차지하고 있다[8].

고재욱(1999) 등은 저장시설에 대한 위험성 평가에 관한 연구를 실시하였으며, 그의 연구에 따르면 지상저장탱크의 경우 VCE와 외부 열원에 의한 BLEVE 그리고 Pool fire에 의한 thermal effect가 가장 큰 피해발생요인으로 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 나타났[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].

기존의 연구에서는 LPG 충전시설에서의 안전사고와 안전사고를 예방하기 위한 연구를 수행하였으나, 실제 현장에 설치되어 있는 대부분의 저장탱크에서의 안전사고에 대한 연구는 미비하여 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 경험산출화한 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.

LPG충전소에서 발생한 폭발 사고형태는 증기운 폭발(VCE)과 비등액체팽창증기폭발(BLEVE)이 대표적이다.

증기운폭발(VCE : Vapor cloud explosion)은 가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성혼합 가스를 형성하고 방출되는 가스의 단일 팽창에 의한 온도의 저하로 공기와 혼합하여 증기운 형태를 갖는다. 이때 착화원에 의하여 폭발하는 것을 말한다[20].

비등액체팽창증기폭발(BLEVE : Boiling liquid expanding vapor explosion)는 용기폭발의 대표적인 사고로서 액화된 다량의 물질이 순간적으로 방출되면서 2차 피해를 발생시키게 되는데, 용기 파열시 용기 내 다량의 물질이 폭발적으로 증발하여 과압을 형성하고 파편이 비산하게 된다[21-23].

### 2.2. 누출량 산정

국내 LPG 충전소의 배관라인은 액체라인은 50A, 기체라인은 25A로 구성되어 있다. 따라서 사고피해 규모를 최대로 파악하기 위하여 누출시나리오를 액체라인에 국한하였다.

액체라인에서의 누출은 비압축성 유체가 대부분이므로 배관에서의 에너지 변화와 압력강하효과를 무시하면 에너지방정식에 의하여 다음과 같이 누출식을 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

$\rho_L$  : 액체밀도(kg/m<sup>3</sup>)

A : 누출단면적(m<sup>2</sup>)

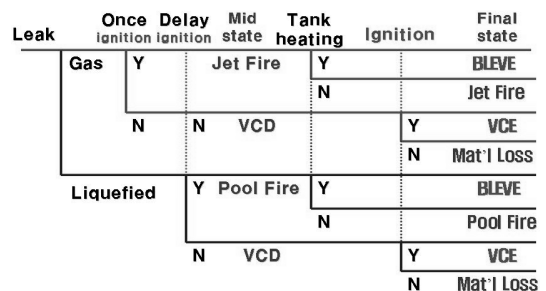


Fig. 1. Event tree analysis of LPG filling system.

$g$  : 중력가속도(9.81 m/sec<sup>2</sup>)  
 $P_0$  : 저장탱크의 압력(Pa)  
 $P_{atm}$  : 대기압력(Pa)

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

### 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[26,27].

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

$W_{TNT}$ : TNT 상당량(kg)  
 $W_C$  : 가연성가스의 질량(kg)  
 $H_C$  : 가연성가스의 연소열(kcal/kg)  
 $H_{TNT}$ : TNT의 연소열(1000kcal/kg)  
 $\eta$  : 폭발효율(개방계에서는 1~10%)

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

**Table 1.** Explosion efficiency for explosiveness vapor

| $\eta$      | Material          |                    |
|-------------|-------------------|--------------------|
| $\eta=0.03$ | Acetone           | <b>Methane</b>     |
|             | Benzene           | Methanol           |
|             | 1,3-Butadiene     | 3-Methyl-Butene-1  |
|             | <b>Butene-1</b>   | Methyl Mercaptan   |
|             | Carbon Monoxide   | Naphthalene        |
|             | Dimethyl Ether    | N-Butane           |
|             | Ethane            | N-Pentane          |
|             | Ethanol           | Petroleum Ether    |
|             | Ethyl Benzene     | Phthalic Anhydride |
|             | Furfural Alcohol  | <b>Propane</b>     |
|             | <b>Hydrogen</b>   | 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 1은 가연성 가스의 폭발효율에 대한 요목 표이다.

### 2.4. PROBIT 분석

인체에 미치는 영향은 아래 식을 이용하였다[28].

#### 2.4.1. 구조물의 손상

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

#### 2.4.2. 구조물의 손상

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

#### 2.4.3. 폐출혈로 인한 사망

$$Probit = -77.1 + 6.91 \ln(P_s) \quad (6)$$

#### 2.4.4. 고막파열의 경우

$$Probit = -15.6 + 1.93 \ln(P_s) \quad (7)$$

$P_s$  : 피크과압(Pa)

## III. 계산결과

국내에 설치되어 있는 LPG저장탱크는 20Ton 규모의 저장탱크가 약 53%정도로 가장 많이 설치되어 있다. 따라서 사고피해 규모를 최대로 하기 위하여 액체라인에서의 누출을 대상으로 저장용량의 10%인 2000kg으로 계산하였다[29,30].

Table 2는 누출량 산정에 관한 식(1)에 의하여 LPG 충전시설에서 운용하고 있는 프로판과 부탄의 이·충전 시설의 배관의 환경에 대하여 계산한 결과이다.

Table 3은 피크과압에 따른 피해형태를 나타낸 것이다. 또한 이를 이용하여 과압에 의한 인체의 피해

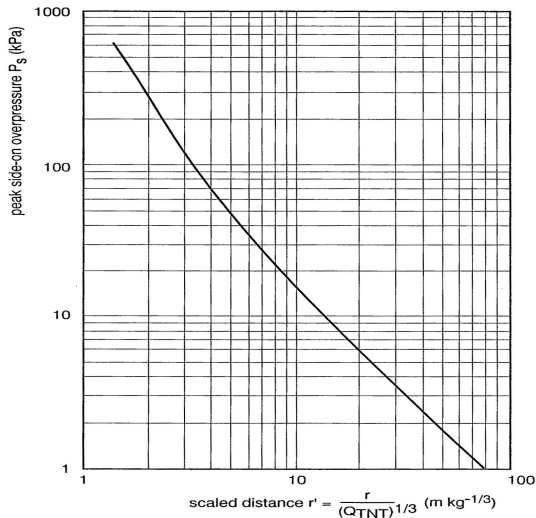
**Table 2.** Calculated release rates for LPG

| 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 3.** Blast damage by overpressure

| Overpressure(kPa) | Form of damage                         |
|-------------------|--|
| 0.21              | Partial damage of window made of glass |
| 1.03              | Glass bursting pressure                |
| 2.07              | 10% of glass window is broken          |
| 2.76              | Small damage limitation of building    |
| 4.83              | House small breakage                   |
| 8.96              | Building steel frame flexure           |
| 13.8              | Weak concrete wall fracture            |
| 15.86             | Serious structural damage low-level    |
| 20.68             | Steel frame building flexure           |
| 27.58             | Oil storage tank explosion             |
| 41.37             | House whole breakage                   |
| 68.95             | Whole destruction of building          |

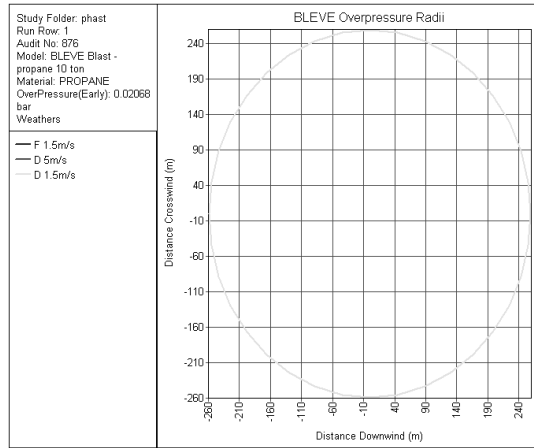


**Fig. 2.** Peak overpressure by TNT explosion.

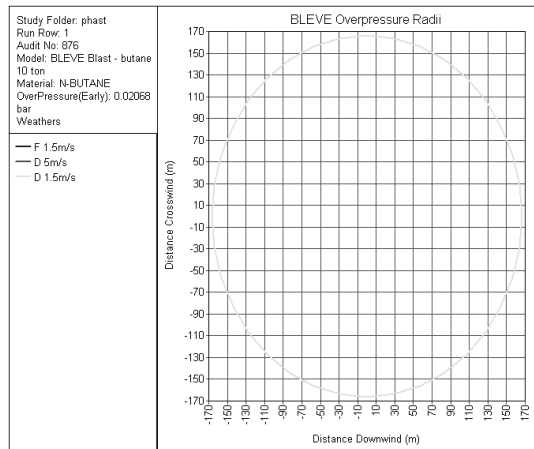
분석에 대하여 비교 · 검토하는데 활용하고자 한다.

Fig. 2는 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.

본 연구에서는 과압의 영향에 대하여 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 폭발장소 주변의



**Fig. 3.** BLEVE overpressure radius for Propane.



**Fig. 4.** BLEVE overpressure radius for Butane.

인체에 미치는 영향을 Probit 모델에 적용하여 피해 예측을 평가하였으며, LPG의 이론연소열 12,564kcal/kg을 적용하여 계산하였다.

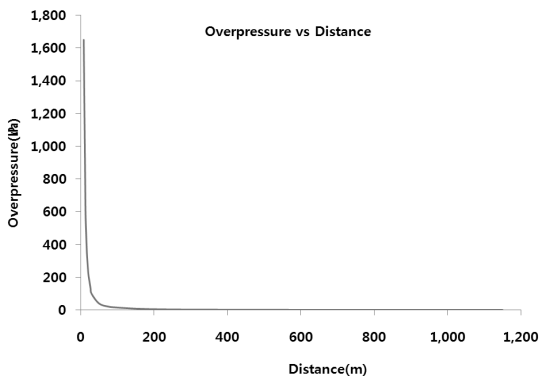
Fig. 3은 프로판에 대한 BLEVE 과압의 영향 거리를 나타낸 것으로 LPG 충전소 옆 운용하는 프로판에 의한 폭발 위험 반경은 약 259m까지로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4는 부탄에 대한 BLEVE 과압의 영향 거리를 나타낸 것으로 LPG 충전소 옆 운용하는 부탄에 의한 폭발 위험 반경은 약 166m까지로 나타남을 알 수 있다.

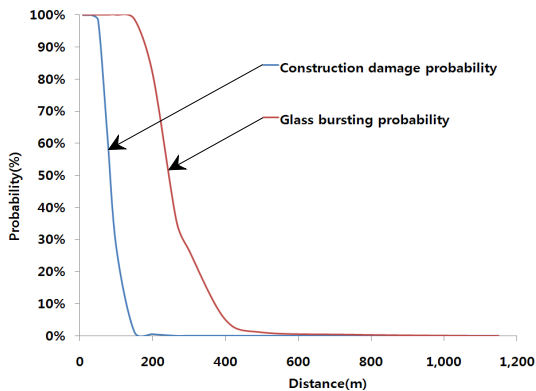
Table 4는 프로판과 부탄의 과압 영향 거리로 유리창이 10% 파괴되는 거리는 프로판이 259m, 부탄은

**Table 4.** The overpressure effects : BLEVE

| Overpressure(kPa) | Distance(m) |         |
|-------------------|-------------|---------|
|                   | Propane     | Butane  |
| 2.07              | 258.937     | 166.332 |
| 13.8              | 65.6355     | 42.1619 |
| 20.68             | 50.5221     | 32.4536 |



**Fig. 5.** Overpressure vs. distance caused by VCE (factor 0.03).



**Fig. 6.** Damage probability for building caused by VCE(factor 0.03).

166m이며, 약한 콘크리트 벽이 부서지는 거리는 프로판이 65m, 부탄은 42m로 1.5배 정도 먼 거리까지 영향을 미친다.

또한, 철골 구조물이 휘는 정도는 프로판이 50m, 부탄은 32m로 나타났다.

Fig. 5은 VCE에 의한 과압에 대한 영향거리를 나

**Table 5.** 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             |       |

타낸 것이다.

본 논문에서는 LPG 충전소의 안전성 평가를 위하여 위험성을 최대한으로 파악하기 위하여 프로판을 20ton 저장하는 탱크를 대상으로 계산하였다.

Table 5는 VCE에 의한 과압의 영향거리를 나타내는 것으로 철골구조물에 손상을 유발시키는 거리는 약75m까지임을 알 수 있다.

Fig. 6은 폭발에 의해 건축물에 미치는 영향을 Probit 분석 모델에 적용하여 계산한 것이다. 과압에 의해 거의 모든 건물이 피해가 발생하는 거리는 50m 정도까지 나타났으며, 손상이 50% 정도 되는 거리는 80m 정도이고, 건축물에 영향이 없는 안전거리는 260m 정도로 계산되었다. 유리창 피해거리는 폭발 장소로부터 150m 떨어져 있는 모든 유리창은 완전

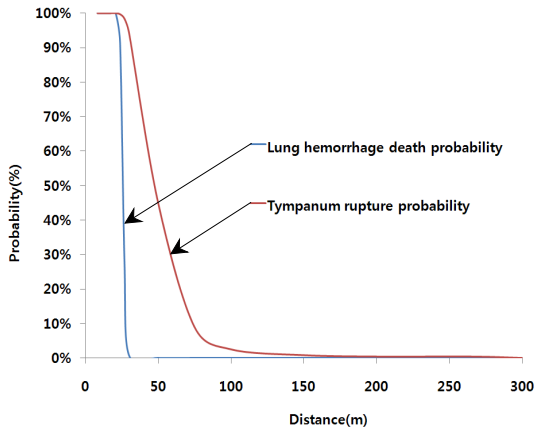


Fig. 7. Injury probability for human caused by VCE(factor 0.03).

히 파괴됨을 알 수 있으며, 피해가 전혀 없는 장소는 1200m 정도 이격되어야 안전함을 알 수 있다.

Fig. 7은 폭발효율 3%를 적용할 경우 인체에 미치는 영향 거리를 Probit 분석 모델에 적용하여 계산한 것이다. 과압에 의한 폐출혈 가능성은 30m 정도 이격하면 안전한 것으로 계산되었으며, 고막파열까지는 265m 이격되면 안전하게 나타났다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 국내 가장 많이 설치되어 사용되고 있는 20ton 저장탱크를 대상으로 하였으며, 누출 시나리오는 저장능력의 10%로 계산하였다.

폭발효율을 가연성가스에 적용하는 3%를 적용하여 이론에 의한 계산결과로 피해영향을 예측하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폭발에 의한 건물에 미치는 피해 영향이 발생하지 않는 안전거리는 260m로 계산되었으며, 유리창이 파손되지 않는 안전거리는 1200m 정도 이격되어야 안전하게 나타났다.

2) 인체에 미치는 영향으로 폐출혈로 인한 사망에 대한 손상확률은 관심거리 36.5m 부터, 고막파열에 대한 손상확률은 관심거리 290m부터 0%로 나타났다.

결과로 도출된 것들은 이론식에 근거하고 있으나, 연구에 인용된 계산식은 실험식을 근간으로 하였기에 피해영향을 판단하기에는 충분하다.

#### 참고문헌

- [1] <http://www.keei.re.kr>.
- [2] Korea Gas Safety Corporation, "2007 Gas Accident Yearbook", Taein, (2008)
- [3] Korea Gas Safety Corporation, "2011 Gas Accident Yearbook", Samgi printing, (2012)
- [4] Kyoshik Park, M.S. Mannan, Y-D. Jo, J-Y. Kim, N. Keren, and Y. Wang, "Incident Analysis of bucheon LPG Filling Station Pool Fire and BLEVE", J. of Hazardous Materials, 137(1), 62-67, (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] High-pressure Gas Statistics, Korea Gas Safety Corporation, 2009.
- [9] Myung-Seop Park, Jae-Min Seo, Jung-Woo Lee, Ky-Soo Kim, Sung-Bin Kim, Jae-Wook Ko and Dong-Il Shin, "A Study for Risk Assessment of LPG Storage Facilities," KIGAS, 3(3), 9-16, (1999)
- [10] Seung-Lim Lee and Young-Soon Lee, "A Study on the Probability of BLEVE of Above-ground LP Gas Storage Tanks Exposed to External Fire," KIGAS, 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] Leem, S. H. and Huh, Y. J., "A Development of Intelligent Decision System by Safety Distance of Gas Storage Tank," Journal of the Korea Academic Industrial Society, 7(4), 721-726, (2006)
- [13] Kyu-Hyung Oh, Youn-Ok Kang and Sung-Eun Lee, "A Study on the Flame Behavior of Whirl Fire and Pool Fire", Journal of the Korean Society of Safety, 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)
- [29] Sa-Hwan Leem and Yong-Jeong Huh, "A Study on the Quantitative Analysis and Estimation for Surround Building Caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station," KOSOS, 25(1), 44-49, (2010)
- [30] Leem Sa-hwan, "A Study on the Hazard and Economic Analysis of LPG Storage Tank and TRIZ Applied Design", Korea University of Technology and Education, Thesis for Doctor's Degree, (2010)