



## LPG 판매소에서 가스 폭발이 주위 아파트에 미치는 영향 평가

†이수경 · 배용범 · 오정규

서울 산업대학교 안전공학과

(2006년 7월 4일 접수, 2006년 9월 20일 채택)

### Consequence Analysis of Gas Explosion in LPG Vessel Retail Store Which is Located around Apartment Complex

†Su-Kyung Lee · Young-Bum Bae · Jeong-Gyu Oh

Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received 4 July 2006, Accepted 20 September 2006)

#### 요 약

본 연구에서는 LPG용기를 취급판매 하는 소매상점에서의 화재 및 폭발 상황시 인근 아파트 단지에 얼마나 영향을 주는지에 관한 피해 분석을 하였다. 위험성 평가는 피해분석과 빈도분석으로 이루어지는데 여기서는 피해분석에 중점을 두고 수행하였다. 피해분석을 위하여 두 개의 최악시나리오를 Event Tree Analysis를 통하여 선정하였다. 선정된 시나리오를 바탕으로 TNT equivalent Method와 컴퓨터 모델링을 통하여 과압과 비산정도를 예측하였다. 이를 바탕으로 소매상점으로부터 거리별 영향분석을 실시하여 폭발사고 발생시 실제 얼마만큼의 위험 영향이 미치는지를 정량적 분석으로 표현하였다.

**Abstract** – In case of fire and explosion which resulted from LP gas release of LPG vessel retail store, the populated area such as apartment complex is supposed to be damaged either partially or totally. To estimate the damage of LP gas explosion, we conducted quantitative risk analysis procedure as has been recommended by AIChE/CCPS. For incident scenario selection, event tree analysis was proposed. TNT equivalent method, SAFER Trace v.8.0 and probit model were also used for consequence analysis. The various methods and analyses which were performed in this study are presented with the effect zones in the layout.

**Key words** : TNT equivalent, Quantitative risk analysis, Consequence analysis, Probit

#### I. 서 론

우리나라의 LPG의 수요는 주로 산업용, 도시가스 및 화학연료로 사용되고 있으며 그 공급경로는 정유회사 또는 LPG 수입회사가 연안선, 탱크로리, 배관을 통하여 벌크로 공급되나, 가정·상업용은 대부분 용기충전소(容器充塲所: Bottling or Cylinder filling)에서 이동식 소형용기에 충전된 다음 판매점을 통하여 수요자에게 배달되고, 또 수송용은 자동차 충전소(Auto gas station)에서 직접 자동차에 실린 용기에 충전된다. 이렇게 가정·상업용 프로판 또는 부탄을 충전한 용기는 용기충전소, 판매점, 수요자로 배달되고 있다.

최고층이 2층인 상가건물의 1층에 위치한 LPG용기

판매소에서 LPG 누출에 의한 폭발 또는 화재가 발생할 시에 주위의 아파트에 얼마만큼의 피해영향을 치는가를 수치화, 시각화하여 그 위험성을 정량적으로 분석하여 아파트의 안전성을 평가하는데 그 목적이 있다.

LPG용기 판매소부터 LPG(Liquefied Petroleum Gas) 누출로 인한 폭발 및 화재가 아파트단지에 미치는 인적, 물질적 피해분석 및 안전성을 평가한다.

#### II. 시나리오 선정

##### 2.1. 판매소 위치 및 Layout

LPG 가스용기 판매소는 최고층이 2층인 상가건물의 1층에 위치해 있다. 판매소는 전방으로 8 m 도로에 접해있으며 후방으로는 2.873 m 떨어진 곳에 최고층이 7층인 오피스텔이 있다. LPG가스용기 판매소 양쪽에

†주저자:lsk@snut.ac.kr

는 식당과 창고가 각각 있다. 판매소는 LPG 용기 저장고와 사무실로 구성되어 있으며, 저장고는 20개 정도의 LPG용기들이 저장되어 있다. 저장고의 입구는 철문으

로 되어있고 사무실입구 옆에 바로 연결되어 있다. 창고 내부는 콘크리트 벽에 철판을 덮은 구조로 되어 있다. 재건축아파트의 위치는 LPG 판매소로 부터 약 34 m 정도 떨어져 있으며 중간에 7층 오피스건물이 위치해 있다. 오피스텔이 LPG판매소를 재건축단지 방향으로 가로막고 있다.

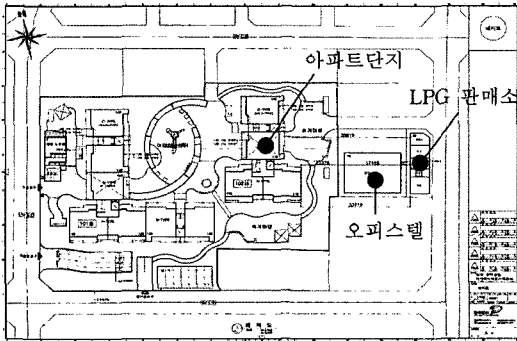


Fig. 1. LPG retail store and surroundings.

2.2. 최악의 시나리오 선정

최악의 시나리오선정은 Fig. 2의 Event Tree Analysis[1]와 같이 LPG저장용기 판매소의 상황과 조건을 고려하여 선정되었다. 증기운 폭발(UVCE)은 가장 큰 피해를 줄 수 있는 것으로서 최악의 시나리오(ABCDE)로 선정하였다[3].

그리고 고려해야 할 또 하나의 시나리오로서 한개의 LPG 가스용기 누출에서 발생한 Jet Fire가 다른 LPG 용기에 영향을 미쳐 BLEVE(ABCE)가 일어나는 경우이다[4].

III. 피해영향의 분석

3.1. Vapor Cloud Explosion의 결과 분석

최악의 시나리오를 바탕으로 LPG가스용기 판매소에서 누출된 가연성가스가 개구부를 통해 판매소 밖으로 충분한 양이 나가서 커다란 증기 구름을 형성할 경우 Vapor Cloud Explosion이 일어난다. 이 경우 주된 개구부가 될 수 있는 경우는 판매소 입구뿐이다. 그러므로 입구를 중심으로 하는 반경내에서 VCE가 일어난다고 볼 수 있다.

피해결과 분석을 위해 아래 수식 (1)의 TNT equivalent Method[2]와 컴퓨터 모델링(SAFER Trace v.8)을 사용하였다.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \tag{1}$$

W : TNT 상당량 [kg]

η : 폭발효율 [-]

M : Hydrocarbon 질량 [kg]

E<sub>c</sub> : 가연기체 연소열 [kJ/kg]

E<sub>TNT</sub> : TNT 연소열 [kJ/kg]

3.1.1 40 kg 누출 가정 시

프로판의 경우 η는 5%이고, 가연성가스의 누출질량은 40 kg으로 가정한다.

문헌으로부터 E<sub>c</sub>는 46,000 kJ/kg, E<sub>TNT</sub>는 4,680 kJ/kg이다.

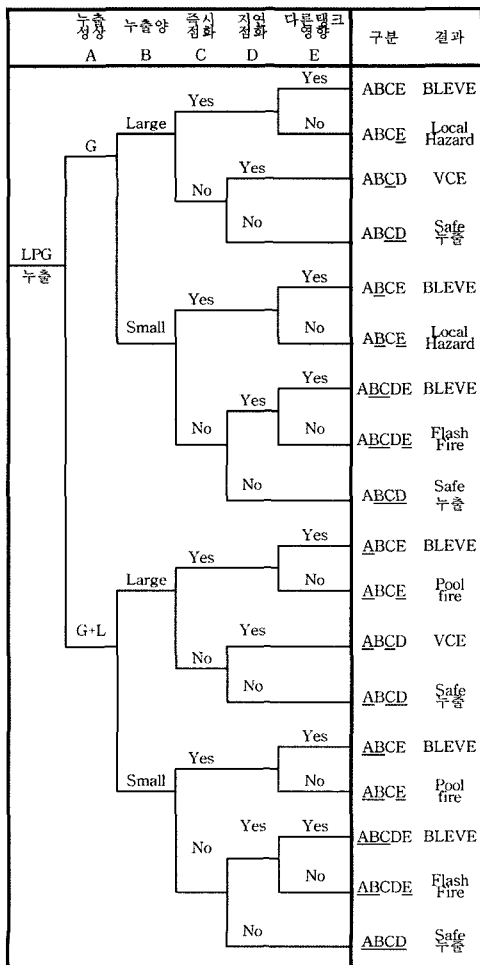


Fig. 2. ETA for LPG release.

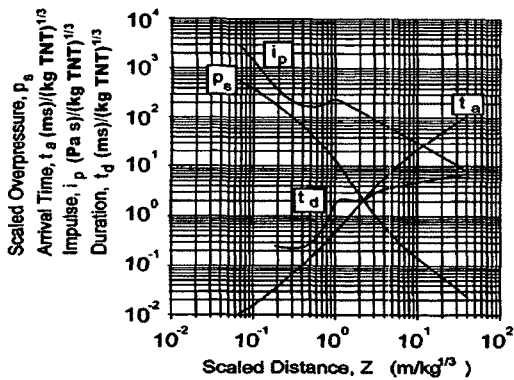


Fig. 3. Shock wave parameters for a spherical TNT explosion on a surface at sea level[2].

$$W = \frac{0.05 \times 40 \times 46000}{4680} = 19.65 \text{ kg}$$

아래 수식 (2)와 Fig. 3을 이용하여 거리별 과압과 충격파 등을 구한다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

R : 반경[m]

Z : Scaled Distance[m/kg<sup>1/3</sup>]

2) 150 kg 누출가정 시  
프로판의 경우 η는 5%이고, 가연성가스의 누출질량은 150 kg으로 가정한다.

증기운 폭발사고를 시나리오로 한 LPG판매소의 안전성평가는 LPG의 40 kg 누출 시와 150 kg 누출 시 두 가지의 증기운 형성 시나리오를 가지고 실시하였다. 각

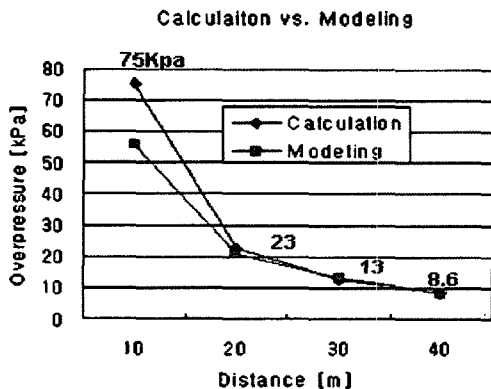


Fig. 4. TNT equivalent method and computer modeling at 40 kg release.

각의 경우에 대하여 증기운 폭발로 인한 영향 범위와 강도를 TNT equivalent 방식과 Safer Trace program을 이용하여 얻을 수 있었다.

TNT equivalent 방식에 의한 결과는 40 kg의 경우 증기운 폭발시(VCE) 증기운으로부터 10 m 떨어진 곳에

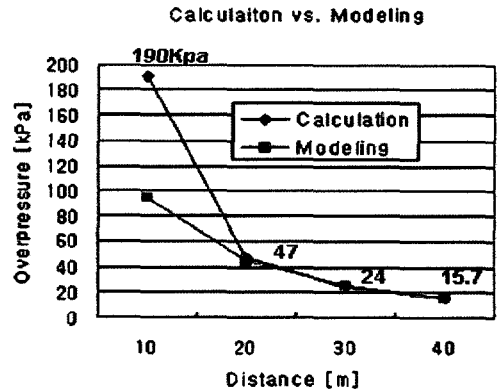


Fig. 5. TNT equivalent method and computer modeling at 150 kg release.

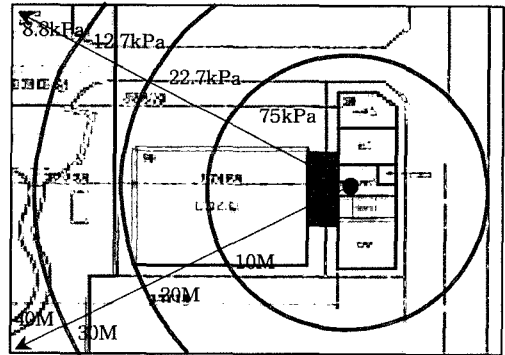


Fig. 6. Effect zone for 40 kg release from both front and back of retail store.

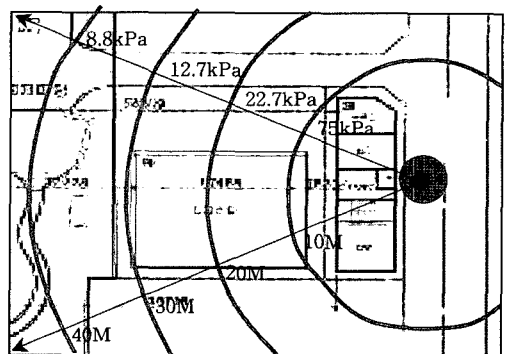


Fig. 7. Effect zone for 40 kg release in front of retail store.

서 집 실은 화물차의 전파, 20m에서는 빌딩 강철 Frame을 약간 휜, 30m 떨어진 곳에서는 벽이나 지붕 등의 부분적 파손, 증기운으로 부터 40m 거리에서는 크고 작은 창 의 부서짐 현상이 일어났다.

150 kg의 경우 증기운으로 부터 10m 떨어진 곳에서는 빌딩의 전파, 20m 떨어진 곳에서는 가옥의 전파, 30m 떨어진 곳에서는 유류탱크의 파괴, 40m 떨어진 곳에는 비강화 콘크리트벽 파괴정도의 과압이 발생하였다. 시뮬레이션을 통한 피해범위와 강도도 20m 이후부터는 비슷한 수치를 보여주었다.

3.2. 용기폭발사고 결과분석

용기폭발의 주된 피해요인은 과압, 충격파와 파편의 결과이다. 그러므로 각각의 거리에서 AICHE/CCPS에서 2000년도에 제안한 방법을 이용하여 과압, 충격파와 파편의 위치를 계산하였다.

Table 1. Overpressure from 40m.

40m 떨어진 곳에서 과압(Overpressure)	
폭발 에너지	81.12 MJ
유효 폭발에너지	162.24 MJ
TNT equivalent	34.59 kg TNT
Scaled Distance (R)	3.42
과압(Overpressure)Ps	0.03
형태에 따른 과압계수	1.6
실제과압(Actual Pressure)	0.048 bar = 4.80 kPa
결 과	크고 작은 창 의 부서짐

- 1) 용기폭발에 의한 과압 추정  
각각 10m, 20m, 30m에서 과압 및 충격파를 추정

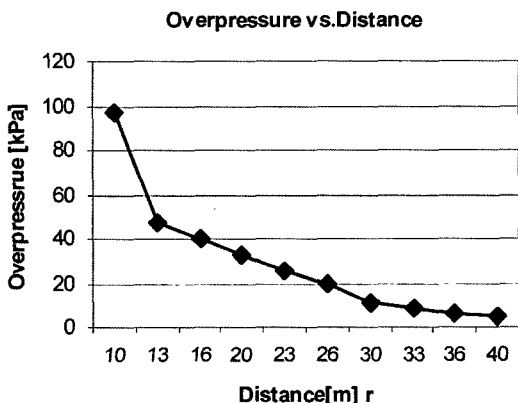


Fig. 8. Overpressure estimation using Excel program.

하였다. 용기 폭발압력은 551 bar이며, 5개의 LPG용기가 동시에 가열 그 후 폭발한다고 가정하고 118인 LPG용기를 5개 사용하였다. 폭발후의 최종 압력은 대기압과 같다고 하였다. 그리고 상온에서 저장하기 때문에 298 K를 가스온도로 설정하였다.

2) Computer Simulation을 통한 과압 추정

Simulation 결과는 약 8m 두께의 15.8 kPa, 5m 두께 정도의 6.9 kPa, 25m 정도 두께의 2.1 kPa의 과압이 형성되었다(반경 기준). 40kg 누출시 보다는 강력한 과압이 생성됨을 볼 수 있다. 여기에서 Fire Ball의 형성도 짐작하게 한다.

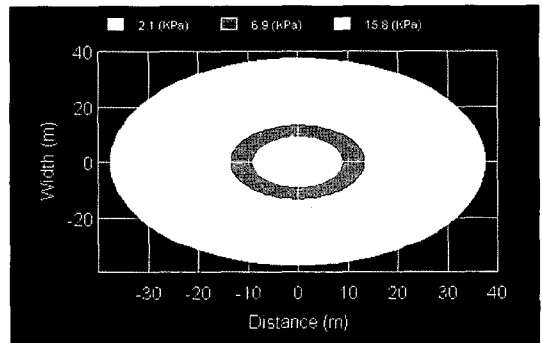


Fig. 9. Overpressure estimation using SAFER Trace.

용기폭발을 시나리오로 한 안전성평가는 LPG용기 5개가 동시 가열되어 용기폭발을 일으키는 경우의 Baker가 제안한 방법[2]과 SAFER Trace program을 이용하여 피해 범위 및 강도를 예측하였다.

가) Baker 방법[2]

판매소로부터 10m 떨어진 곳에서 빌딩의 전파, 20m에서 유류저장탱크 파열, 30m에서 벽이나 지붕의 부분적 파손, 40m에서 크고 작은 창 의 부서짐의 현상이 일어났다.

나) 모델링 방법

10m내에서는 상당한 과압이 발생하지만 10m 이상 떨어진 경우 안전범위(2 kPa)내에서 과압이 발생하였다. 밀폐된 LPG 판매소 내에서 용기폭발이 발생하였으므로 자체 판매소의 건물적인 제한과 오피스건물의 방호벽의 역할에 의해 과압 피해는 아파트에 영향을 미치지 못한다. 모델링에 의한 결과 폭발사고에서 10m 전후에서는 계산한 과압이 모델링에 의한 결과 보다 상당히 높게 나타났으며 나머지 범위에서는 비슷한 과압

결과를 얻었다.

**3.3. 비산물의 평가 및 Probit 분석**

1) 비산물의 평가

가) 시나리오 #1

증기운 폭발은 누출 확산된 가연성 기체의 급격한 화재확산에 의한 것으로서 저장용기나 주위물체의 등의 비산물에 의한 피해는 잘 고려되지 않는다. 비산물에 의한 직접적인 피해 보다 과압에 의한 피해가 중점이기 때문이다[2].

나) 시나리오 #2

용기폭발의 경우 폭발과 동시에 저장용기의 파편에 의한 피해를 고려해야 한다.

개방형 공간에서 수평 최대비산거리는 TNT 상당량 34.59 kg은 76.25 lb TNT이므로 Fig. 10로 부터 수평 최대비산거리는 3000 ft(914 m) 정도이다.

그러나 본 연구는 건물내 공간이고(밀폐), 판매소로부터 2.87 m 떨어진 곳에 7층 오피스건물이 방호벽 역할을 하여 실질적인 비산효과는 없는 것으로 사료된

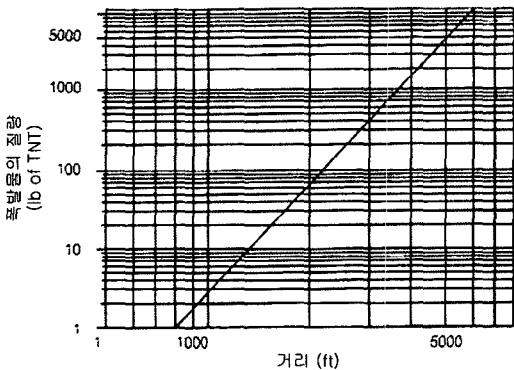


Fig. 10. Estimated distance of fragment along with the mass of TNT [6].

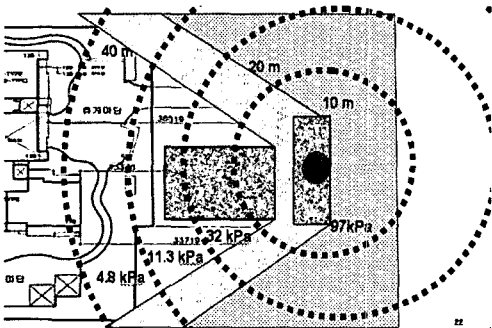


Fig. 11. Estimated effect zone of fragment at 150 kg release.

다. 만약에 비산물이 확산될 경우 Fig. 11과 같은 각도로 비산될 것이다.

파편의 수는 대략 용기 크기에 의한 함수이다. LPG 저장용기는 250 psig의 사용압력에 맞게 설계 되었다 탱크의 안전계수는 4이기 때문에 사용압력의 4배에서 정상 파열이 예상된다. 많은 사망과 도미노 피해효과 는 파편의 원인이 크다. 파편수의 계산은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{파편 수} &= -3.77 + (0.0096 \times \text{용기의 체적}(\text{m}^3)) \\ &= -3.77 + (0.0096 \times 0.118(\text{m}^3)) \\ &= -3.768 \text{ (거의 없다)} \end{aligned}$$

(LPG용기규격 -50 kg의 용기 118 / (0.118 m<sup>3</sup>))

2) Probit 함수에 의한 폭발영향평가[5]

Eisenberg 등이 제안한 Probit 함수를 이용하여 영향 평가(Effect Model)[10]를 하였다.

① 과압피해의 산출

- 고막파열
- 뇌출혈

② Probit의 계산

뇌출혈  $Y_{\text{death}} = -77.1 + 6.9 \ln P$

고막파열  $Y_{\text{eardrum}} = -15.6 + 1.93 \ln P$

③ 평가 방법

가) 시나리오 #1

· 40 kg 누출 시

계산결과 10 m에서 뇌출혈 사망은 1% 이하이고 고막파열은 86% 정도가 발생된다. 20 m 이상에서는 뇌출혈 사망은 없고 고막파열은 20 m에서는 11%, 30 m에서는 11%, 40 m에서는 1% 이하로 발생된다.

Table 2. Probit in 40 kg LPG release.

거리[m]	$Y_{\text{death}}$	$Y_{\text{eardrum}}$	압력P[kPa]
10	0.373	6.070	75.2
20	-7.892	3.758	22.7
30	-11.899	2.637	12.7
40	-14.589	1.885	8.6

· 150 kg 누출 시

계산결과 10 m에서 뇌출혈 사망은 97%이고 고막파열은 98% 정도가 발생된다. 20 m 이상에서는 뇌출혈 사망은 없고 고막파열은 20 m에서는 56%, 30 m에서는 13%, 40 m에서는 3% 이하로 발생된다.

**Table 3.** Probit in 150 kg LPG release.

거리[m]	$Y_{death}$	$Y_{eardrum}$	압력P[kPa]
10	6.785	7.863	190.46
20	-2.884	5.159	46.91
30	-7.502	3.867	24.02
40	-10.414	3.053	15.75

나) 시나리오 #2

150 kg의 누출 용기 폭발 시에는 계산결과 10 m에서 뇌출혈 사망은 1% 이하이고 고막파열은 94% 정도가 발생된다. 20 m 이상에서는 뇌출혈 사망은 없고 고막 파열은 20 m에서는 29%, 30 m에서는 1%, 40 m에서는 1% 이하로 발생된다.

**Table 4.** Probit in 150 kg LPG BLEVE.

거리[m]	$Y_{death}$	$Y_{eardrum}$	압력P[kPa]
10	2.129	6.561	97.0
20	-5.459	4.439	32.3
30	-12.705	2.412	11.3
40	-18.613	0.759	4.8

### 4. 결 론

컴퓨터를 이용한 방법과 계산방법 모두 주위에 장애물이 없는 개방된 곳에서의 피해영향결과이다. 증기운 폭발(VCE)의 경우 LPG 150 kg 누출의 경우 10 m 떨어진 곳에서 오피스 빌딩의 완전 파손이 일어나는 190 kPa(계산), 100 kPa(모델링) 과압이 발생하였다. 용기폭발의 경우 빌딩이 전파 되는 97 kPa 정도의 과압이 발생한다. 또한 LPG 40 kg 누출시 반경 10m내 거주인구

의 85%가 고막파열을 일으킬 수 있으며, 150 kg 누출시는 거주인구의 97%가 폐출혈을 일으킬 수 있는 것으로 추정되었다. 오피스 빌딩을 포함한 반경 20 m 내에서는 각각의 40 kg, 150 kg LPG 누출이 폭발에 의한 과압과 비산물의 영향으로 심각한 인명피해를 예상할 수 있었으나, Fig. 11에서와 같이 LPG판매소 주위의 오피스 빌딩의 현존 때문에 실제 과압 혹은 비산물에 의한 아파트 단지에 미치는 영향은 미비하다고 예상할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] CCPS/AICHe, Guidelines for Hazard Evaluation Procedures.
- [2] CCPS/AICHe, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd Ed., (2000).
- [3] 한국가스공사, “실내 가스 폭발시 피해예측에 관한 연구”, (1998).
- [4] 한국가스안전공사, “97년도 가스사고 모의실험 결과 보고서”, KGS 97-195, (1997)
- [5] D.J. Finney, Probit Analysis, Cambridge University, (1971)
- [6] Daniel A. Crowl/Joseph F. Louvar, Chemical Process Safety 2 edition.
- [7] Archibald Tewarson, “Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires”, SFPE Handbook of Fire Protection Engineer 2nd edition, (2000)
- [8] Robert G. Zalosh, “Explosion Protection”, SFPE Handbook of Fire Protection Engineer, 2nd edition, (2000)
- [9] CCPS, Guideline for Process Equipment Reliability Data With Data Table, (1989)
- [10] Crowl, D.A., Simplified Process Risk Assessment : Layer of Protection Analysis, CCPS, (2001)