

## LPG 저장탱크에서의 화재 · 폭발에 관한 정량적 영향 평가에 관한 연구

배 성 진 · 김 병 직

승실대학교 화학공학과

(1999년 1월 4일 접수, 1999년 5월 4일 채택)

### The Study on the Quantitative Analysis in LPG Tank's Fire and Explosion

Sung-Jin Bae and Byung-Jick Kim

Department of chemical Engineering, Soongsil University

(Received 4 January 1999 ; Accepted 4 May 1999)

#### 요 약

화학공장에서 발생하는 사고는 공장 자체의 손실을 가져 올 뿐만 아니라 주위 지역에도 영향을 미친다. 그리고 사고로 인한 피해는 대형화할 가능성이 크다. 이에 따라 화학 공장의 안전 관리의 중요성이 부각되고 있다. 사고의 정량 평가는 사고의 규모를 미리 예측하는 것으로 이를 통해 공정 장치의 layout, 주위와의 최소 안전거리 예측, 대피 시설의 설치 등과 같은 대책을 세울 수 있다. 본 연구에서는 화학공장의 3대 사고형태 중 화재와 폭발의 피해 예측을 용이하게 하기 위한 프로그램을 작성하였다. 화재의 경우에는 Pool Fire와 Fireball로 인한 피해를 예측할 수 있도록 하였고, 폭발의 경우에는 UVCE와 BLEVE로 인한 손실을 예측할 수 있도록 하였다. 화재는 화염에서 나오는 복사열을 피해 정도를 예측하는 기준으로 사용하였고, 폭발은 과압을 기준으로 하였다. 특히, BLEVE의 경우에는 파편의 예상 비산 거리도 추정할 수 있도록 하였다. 각각의 결과를 이용해 Probit 분석을 할 수 있도록 하였다. 그리고 이를 기준에 발생했던 부천의 LPG 폭발 사고에의 분석에 사용해본 결과 노출 허용 거리가 800m이었다. 그리고 Probit 분석 결과 1도 화상, 2도 화상, 화재 사망은 각각 450m, 280m, 260m 이상일 경우 직접적인 피해가 없을 것으로 예측되었다. 사고 분석 결과는 이를 한국산업안전공단에서 DuPont의 SAFER 프로그램을 사용하여 얻어낸 예측치와 3%이내의 같은 결과를 얻었다.

**Abstract** - Chemical plant's fire and explosion does not only damage to the chemical plants themselves but also damage to people in or near of the accident spot and the neighborhood of chemical plant. For that reason, Chemical process safety management has become important. One of safety management methods is called 'the quantitative analysis', which is used to reduce and prevent the accident. The results of the quantitative analysis could be used to arrange the equipments, evaluate the minimum safety distance, prepare the safety equipments.

In this study we make the computer program to make easy to do quantitative analysis of the accident. The output of the computer program is the magnitude of fire(pool fire and fireball) and explosion(UVCE and BLEVE) effects. We used the thermal radiation as a measure of fire magnitude and used the overpressure as a measure of explosion magnitude. In case of BLEVE, the fly distance of fragment can be evaluated. Also probit analysis was done in every case. As the case study, Buchun LPG explosion accident in

Korea was analysed by the program developed. The simulation results showed that the permissible distance was 800m and probit analysis showed that 1st degree burn, 2nd degree burn, and death distances are 450, 280, 260m, respectively. the simulation results showed the good agreement with the results from SAFER PROGRAM made by DuPont.

**Key words** : fire and explosion, UVCE, BLEVE, pool fire, fireball

### 1. 서 론

화학공장에서 발생할 수 있는 사고의 피해 범위를 예측하는 방법으로 정량분석이 있다. 정량분석의 결과는 주변의 건축물이나 공공시설과 화학 공장간의 위치, 화학공장의 배치(layout), 안전 장치의 배치 등에 참고 자료로 활용될 수 있다. 또한 사고 후의 결과를 예측할 수 있기 때문에 사고가 발생할 경우 이에 대한 적합한 대비책을 세우는데 도움을 줄 수 있고, 주변 주민의 대피 등을 결정하는데 활용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 사고의 정량분석을 좀 더 용이하게 하기 위한 프로그램을 작성하고 이를 실제 사고 사례에 적용하여 보고자 한다.

### 2. 프로그램 개발

본 프로그램은 한글 비주얼 베이직 5.0을 사용하여 작성하였다. 이 프로그램은 화재 및 폭발의 영향을 예측할 수 있도록 작성하였다. 화재는 Pool Fire와 Fireball이 영향을 미치는 범위를 구할 수 있도록 하였으며, 폭발은 개방계 증기 폭발(Unconfined Vapor Cloud Explosion, UVCE)과 비등액체 팽창 증기 폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)의 영향을 평가할 수 있도록 하였다. 사고의 영향 범위는 화재의 경우는 화염에서 발생하는 복사열을 피해 산정의 기준으로 하였고, 폭발의 경우는 폭발 과압을 피해 산정 기준으로 하였다. 또한 Probit 분석도 가능하도록 하였다. 프로그램의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

프로그램은 먼저 적용 대상 공정의 주위 환경에 관한 자료를 입력한 뒤, 누출 모델을 사용하여 누출량을 계산할 수 있도록 하였다. 누출량에 관한 자료가 있을 경우에는 누출 모델을 사용하지 않고 각각의 사고 모델에 누출량을 적용할 수 있도록 하였다. 그 다음 예상되는 사고를 결정한 뒤 그 사고에 해당하는 모델을 사용하여 사고의 영향 범위를 구할 수 있도록 하였다. 화재의 경우에는 거리와 복사량과의 관계를 구할

수 있고, 폭발의 경우에는 거리와 과압과의 관계를 구할 수 있다. 또한 이들 사고에 대해 Probit 분석을 할 수 있도록 하였다.

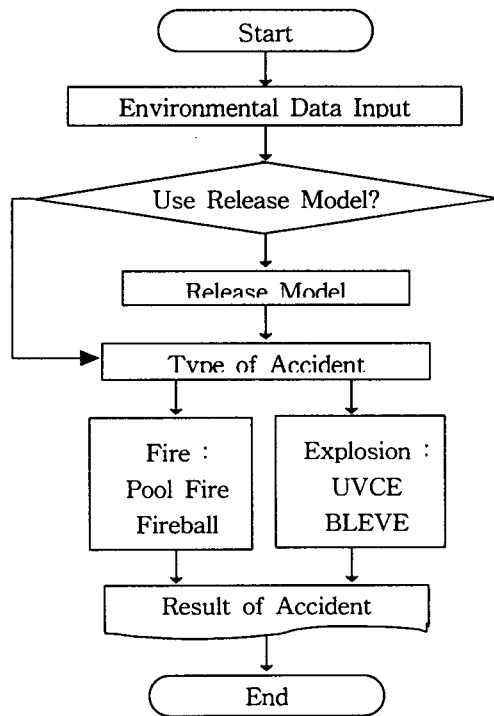


Fig. 1. Schematic Diagram of the Accident Effect Evaluation Program.

#### 2.1. 누출 모델

누출 모델의 경우 기계적 에너지 식을 기본으로 하여 액체와 기체가 누출될 때의 누출 속도를 구하는 식을 유도하였다. 이 식을 이용하여 누출 속도식을 구한 뒤 이를 근거로 예상 누출 시간을 대입하면 누출량을 구할 수 있도록 하였다. 액체가 누출될 때 누출량을 구하는 식은 액체가 상압 상태에 있으면 (1)식을 가압 상태에 있으면 (2)식을 사용하였다.

$$Q = \left( 2\rho A C_0 \sqrt{2gh_L} - \rho g C_0^2 \frac{A^2}{A_t} t \right) \frac{t}{2} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = \left( 2\rho A C_0 \sqrt{2gh_L + 2g_c \frac{P_g}{\rho}} - \rho g C_0^2 \frac{A^2}{A_t} t \right) \frac{t}{2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 Q는 누출량, ρ는 누출 물질의 밀도, A는 누출구의 지름, A<sub>t</sub>는 저장용기의 지름, C<sub>0</sub>는 마찰계수, g는 중력가속도, h<sub>L</sub>는 구멍에서 저장용기 상단까지의 거리, P<sub>g</sub>는 저장압, t는 누출 시간을 나타낸다.

기체의 경우에는 저장압과 대기압의 관계에 따라 초크 흐름과 일반적인 흐름으로 나누어 다루었다. 입력된 저장압과 대기압의 관계에 따라 식 (3)을 이용하여 흐름의 종류를 결정한 다음 초크 흐름이면 (4)식을 일반적인 흐름이면 식 (5)를 사용하여 누출 속도를 구하고 이를 이용하여 누출량을 계산하도록 하였다.

여기에서 I<sub>th</sub>는 화염에서 방사되는 복사열, τ는 대기의 투과성, F는 기하학적 인자, E는 표면 방출 플럭스, ṁ는 연소속도, β는 전체 복사열의 비율, H<sub>c</sub>는 액체의 순연소열, b는 액면의 지름, P<sub>w</sub>는 포화수증기압, X는 화염 표면에서 대상까지의 거리, x는 화염 중심에서 대상까지의 거리이다.

여기서 연소속도( ṁ)는 주위 온도와 액의 끓는점과의 관계에 따라 구하는데 주위 온도이상의 끓는점을 가진 액체의 경우는 식 (10)을, 주위 온도이하의 끓는점을 가진 액체의 경우는 식 (11)을 이용하여 구한다.

$$\frac{P_{choked}}{P_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_m = C_0 A \rho_0 \sqrt{\frac{2g_c M}{r_g T_0} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \dots\dots\dots (4)$$

$$(Q_m)_{choked} = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_0} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 P<sub>choked</sub>는 초크압, P<sub>0</sub>는 대기압, γ는 열용량비, M은 누출물질의 분자량을 말하며, 나머지 기호들은 액체 저장시 사용했던 기호들의 의미와 같다.<sup>(11),(4),(5),(7)</sup>

$$\dot{m} = \frac{0.001 H_c}{C_p (T_b - T_a) + \Delta H_v} \dots (10)$$

$$\dot{m} = \frac{0.001 H_c}{\Delta H_v} \dots\dots\dots (11)$$

**2.2. 화재의 영향 모델**

화재 중 Pool Fire의 영향을 구하는 데는 다음의 식들을 사용하였다.

$$I_{th} = \tau F E \dots\dots\dots (6)$$

$$E = \beta \dot{m} H_c (\pi b^2) \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau = 2.02 (P_w X)^{-0.09} \dots\dots\dots (8)$$

$$F = \frac{1}{4 \pi x^2} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 ΔH<sub>v</sub>는 액체의 증발잠열, T<sub>b</sub>는 액체의 끓는점, T<sub>a</sub>는 액체의 온도이다.

Fireball은 다음과 같은 식을 사용하여 사고의 영향 범위를 구할 수 있도록 하였다.

$$I_{th} = \tau F E \dots\dots\dots (12)$$

$$D_{max} = 6.48 M^{0.325} \dots\dots\dots (13)$$

$$t_{fireball} = 0.825 M^{0.26} \dots\dots\dots (14)$$

$$H_{\text{fireball}} = 0.75 D_{\text{max}} \dots\dots\dots (15)$$

$$\tau = 2.02 (P_w X)^{-0.09} \dots\dots\dots (16)$$

$$E = \frac{\beta M H_c}{\pi D_{\text{max}}^2 t_{\text{fireball}}} \dots\dots\dots (17)$$

$$F = \frac{D_{\text{max}}^2}{4 x^2} \dots\dots\dots (18)$$

여기서  $D_{\text{max}}$ 는 화구의 최대 직경,  $t_{\text{fireball}}$ 은 화구의 지속시간,  $H_{\text{fireball}}$ 은 화구의 높이,  $M$ 은 누출량을 말하며, 다른 기호는 Pool Fire에서 사용한 기호와 같은 의미로 사용하였다.<sup>[1],[3],[4],[5],[7],[9],[10],[11]</sup>

**2.3. 폭발의 영향 모델**

폭발은 해당 지역에 미치는 과압의 크기가 그 지역의 피해 강도를 예측하는 기준이 된다. UVCE의 영향을 계산에는 TNT모델과 TNO모델을 이용할 수 있도록 하였다. TNT모델은 다음과 같다.

$$W = \frac{\eta M H_c}{H_{c, \text{TNT}}} \dots\dots\dots (19)$$

$$R = Z W^{1/3} \dots\dots\dots (20)$$

여기에서  $W$ 는 TNT의 상당질량,  $\eta$ 는 경험적 폭발 효율,  $M$ 은 누출된 가연성 물질의 질량,  $H_c$ 는 가연성 물질의 순연소열,  $H_{c, \text{TNT}}$ 는 TNT의 연소열,  $R$ 은 실제거리,  $Z$ 는 환산거리이다. 환산거리와 과압과의 관계는 Fig. 2와 같다.

TNO모델식은

$$R(S) = C(S) [\eta E]^{1/3} \dots\dots\dots (21)$$

이다. 여기서  $R(S)$ 는 손상(S)의 특정한 형태에 따른 반경,  $C(S)$ 는 손상(S)의 특정한 형태에 따른 경험적 상수,  $\eta$ 는 경험적 폭발효율(지수),  $E$ 는 증기운의 가연성 부분에 관련된 전체에너지이다. 각각의 손상에 대한  $C(S)$ 값을 Table 1에 나타내었다.

BLEVE의 경우 BLEVE폭발로 인한 과압과 폭발에 이은 Fireball로 인한 피해를 예측할 수 있도록 하였다. Fireball은 화재의 Fireball모델을 사용하며 폭발 과압은 다음의 물리적 폭발식을 이용하였다.

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \left( \frac{T_0}{T_1} \right) R T_1 \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \dots (22)$$

여기서  $W$ 는 TNT의 상당질량,  $V$ 는 압축된 가스의 부피,  $P_1$ 은 압축된 가스의 초기압력,  $P_2$ 는 압축된 가스의 최종압력,  $T_1$ 은 압축된 가스의 온도,  $T_0$ 는 표준 상태의 온도,  $R$ 은 기체상수(=1.987)이다.<sup>[3],[4],[5],[6],[7],[9]</sup>

이상의 식들을 사용하여 피해 정도를 예측할 수 있는 프로그램을 작성하였다.

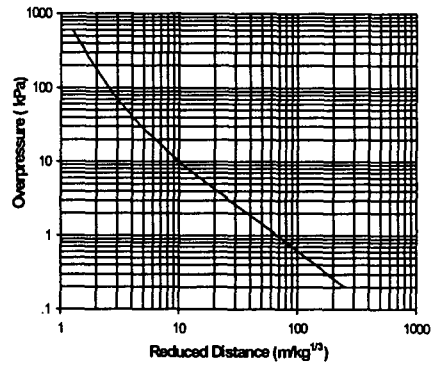


Fig. 2. Overpressure vs. Reduced distance.

Table 1. C(S) for TNO model

C(S) (m/J <sup>1/3</sup> )	Type of Damages
0.03	Damage of building and process unit
0.06	Damage of building that must reconstruction
0.15	Glass break that can injury people
0.40	Glass break (about 10%)

**3. 사례 연구**

여기서 작성한 프로그램을 사용하여 1998년 부천의 LPG 충전소에서 발생한 가스 폭발 사고에 적용하여 보았다. 이 사고가 발생할 당시 사고 지역에는 하역작업을 위해 15ton 용량의 부탄 탱크로리와 프로판 탱크로리가 각각 1대씩 충전소에 있었다. 기계실 주변에서 작은 규모의 화재·폭발이 발생하였고, 10여분 후 부탄 탱크로리가 복사열에 의해 2차 폭발하였다. 그리고

그 주변에 있던 프로판 탱크로리가 3차 폭발(BLEVE)을 일으켰다. 사고는 Fireball로 전이되었고 폭발로 인해 발생한 탱크로리 파편이 약 30m 밖으로 비산되었다. 화재·폭발의 충격으로 충전된 가정용 LPG통이 폭발하여 인근 지역으로 화재가 번져나갔다. 이 사고로 60여명이 중화상을 입었다. 사고를 분석하기 위해 사용한 자료는 다음과 같다.<sup>[8][13]</sup>

- 사고 형태 : Fireball
- 재해 형태 : 복사열
- 누출량 : 15ton
- 누출 물질 : LPG
- 대기온도 : 25°C
- 대기압 : 1atm

이 프로그램의 적용 결과는 그림 3과 4와 같고, DuPont의 SAFER와 비교한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. The results of safer program and the accident evaluation program

Observed effect	Evaluation Program	Safer Program
Pain threshold reached after 8s, second degree burns after 20s	345m	350m
Must escape in a few minutes	480m	480m
Will cause no discomfort for long exposure	800m	820m

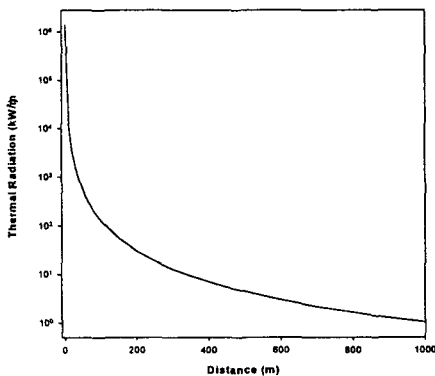


Fig. 3. Thermal radiation vs. Distance in Buchun LPG explosion case.

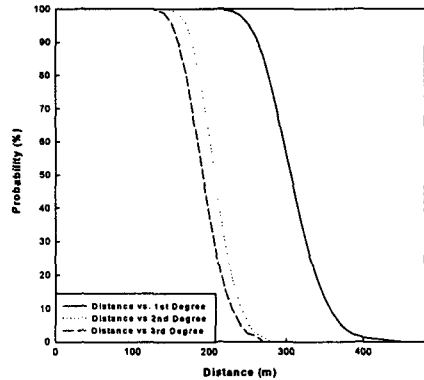


Fig. 4. Probit analysis in Buchun LPG explosion case.

#### 4. 결 과

사고의 정량평가를 위한 프로그램을 작성하였다. 프로그램은 비주얼 베이직을 이용하여 작성하였으며, 화재와 폭발의 영향을 평가할 수 있도록 작성하였다. 결과는 화재의 경우 거리와 복사열, 폭발의 경우는 거리와 과압의 관계로 얻을 수 있으며, Probit 분석도 가능하게 하였다. 이 프로그램을 실제 발생했던 부천의 LPG충전소 폭발 사고에 적용하여 보았다. 그리고 그 결과를 DuPont의 SAFER를 이용하여 얻은 결과와 비교하여 최대 3%내외에서 같은 결과를 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 포항공과대학의 공정산업의 지능자동화 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수 연구센터 지원금 및 숭실대 교내연구비 지원에 의한 것입니다.

#### 참 고 문 헌

1. Daniel A. Crowl, Josph F. Louven, 이영순, "화공안전공학", 대영사 (1994).
2. 김용욱, "(최신)화학 안전 공학", 형설 출판사 (1994).
3. 조지훈, 주종대, 이근원, "화학공정 위험성 평가II", 한국 산업 안전 공단 (1995).
4. 김구희, "화재, 폭발 및 독극물 누출 재해의 강도 산정 방법에 관한 비교 연구", 광운대학교(1993)
5. 백중배, "화학공정에서의 정량적 위험성 평

- 가를 위한 기반구조 구축에 관한 연구”, 광운대(1996)
6. 이근원, 주종대, 조진원, “화재 · 폭발 영향 평가 프로그램 개발”, 화학공학의 이론과 응용(1996)
  7. J. R. Taylor, “Risk Analysis for Process Plant, Pipelines, and Transports”, E & F N SPON(1994)
  8. Robert H. Perry, Don Green, “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”, 6th Edition, McGraw-Hill(1984)
  9. CCPS, “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”, AIChE-CCPS, New York(1989)
  10. D. F. Bagster, S. A. Schubach, J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 9, No. 3, 241(1996)
  11. W. P. Croker, D. H. Napier, “Thermal Radiation Hazards of Liquid Pool Fires and Tank Fires”, I. Chem. E. Symposium Series NO. 97, 159
  12. F. P. Lees, “The Assessment of Major Hazards : A Model for Fatal Injury from Burns”, Trans. IChemE. Vol 72., 127(1994)
  13. 한국산업안전공단, “중대산업사고조사속보”, 한국산업안전공단(1998)