

## BLEVE와 Fireball의 매개변수 민감도분석 및 피해 산정

김형석, 김인태\*, 송광호\*\*, 고재욱\*\*\*, 김인원

건국대학교 화학공학과, 한국화재보험협회\*, LG화학 기술연구원, 광운대학교 화학공학과\*\*\*  
(1998년 9월 16일 접수, 1998년 10월 13일 채택)

### Parametric Sensitivity Analysis and Damage Estimation for BLEVE and Fireball

Hyung Seok Kim, In Tae Kim\*, Kwang Ho Song\*\*, Jae Wook Ko\*\*\*, In Won Kim

*Dept. of Chemical Eng., Kon-Kuk University*

*\*Korean Fire Protection Association*

*\*\*Chemical Process & Catalysis Research Institute*

*\*\*\*Dept. of Chemical Eng., Kwangwoon University*

*(Received 16 September 1998; Accepted 13 October 1998)*

#### 요 약

석유화학산업에서는 많은 복잡한 공정과 고온, 고압으로 가연성과 반응성을 가진 화학물질을 사용·저장하고 있기 때문에 화재 및 폭발 사고의 가능성이 잠재하고 있다. 화학공장은 특성상 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)와 Fireball이 일어날 가능성이 높다.

본 연구에서는 BLEVE와 Fireball에 의한 폭발 영향평가를 위하여 모델을 제시하고 피해를 예측할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. BLEVE는 단열 팽창 모델, 등온 팽창 모델, 물리적 폭발모델을 Fireball은 Solid 모델을 사용하였으며 모델의 매개변수의 민감도를 분석하였다. 또한, 벤젠, 톨루엔, 메타-자일렌의 BLEVE와 Fireball에 의한 폭발량 등의 피해를 산정하였다.

**Abstract** - Explosion and fires can occur in all segments of chemical and petroleum industries because of complexity of process, usage and storage of flammable and reactive chemicals, and operating conditions of high pressure and temperatures. Especially chemical plants have high possibility of the occurrence of BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)and Fireball.

In this study, a computer program was developed for the effect assessment of BLEVE and Fireball. BLEVE was analysed by three explosion models of physical explosion model, isothermal expansion model and adiabatic expansion model and Fireball using solid model. The parametric sensitivity analysis has been done for the models of BLEVE and Fireball. The damage by BLEVE and Fireball of Benzene and Toluene and m-Xylene were estimated.

**Key words** : BLEVE, Fireball, Damage estimation

#### 1. 서 론

화학공업은 고도의 기술 집약적 장치산업으로서 기술의 발달에 따른 산업의 성장은 산업과 우리 생활에 많은 유용한 제품들을 제공하고 있

다. 중화학공업 육성 정책에 따른 생산위주의 경영은 상대적으로 안전관리에 대한 투자를 소홀히 함은 물론 안전문화 정착에도 역작용을 해왔다. 공장 내에는 여러 가지 고성능의 복잡한 공정을 포함하고 있을 뿐만 아니라 고온·고압 하에서 다루어지는 가연성 물질과 반응성이 매

우 높은 물질 그리고 독성 물질 등과 같이 위험한 화학물질들을 원료, 중간체, 제품의 형태로 사용·저장하고 있어서 화재 및 폭발 사고의 가능성이 늘 잠재하고 있다. 특히 공정의 특성상 취급하는 대부분의 물질이 유체상태의 위험성 물질이며 고온·고압의 반응공정을 거쳐 제품을 생산하게 되므로 누출에 대한 잠재위험이 많아서 누출 시에는 화재·폭발이나 독극물에 의한 피해를 일으킬 가능성이 매우 높다. 그리고 화재·폭발이 갖는 보유에너지는 매우 크고 독성 물질이 누출되는 경우에는 매우 넓은 지역까지 영향을 주어 대형사고로 발전할 수 있어서 공장 내에서 일하고 있는 근로자는 물론 공장 인근 주민의 사상과 제 3자에게 막대한 재산피해를 가져다 줄 것이다.

용기폭발모델은 크게 물리적 폭발과 화학반응 폭발모델로 구분할 수 있으며 화학반응모델은 조건에 따라 Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE), Vapor Cloud Explosion (VCE)로 구분할 수 있다. 이중 VCE 모델은 TNT 등가 모델과 TNO Correlation, Multi-Energy Model에 의하여 모사할 수 있고 BLEVE 모델은 용기 폭발 모델(Vessel Explosion Model)을 사용하여 모사가 가능하다.

BLEVE는 가압된 액화 가연성 가스를 저장하고 있는 용기가 외부의 화염으로부터 열을 받아 용기의 온도가 상승하고 그에 따라 포화증기압이 상승하여 용기 안에 저장된 액체가 끓는점 이상에서 조압자의 조작 실수나 파열로 인한 용기 재질의 약화와 같은 원인에 의하여 용기가 파열한 후 액체가 인화하여 기화되는 것이다. 폭발시 누출물질이 고속 유출로 인한 정전기나 마찰열, 고온 표면, 나화(裸火) 등의 점화원에 의해 즉시 착화되는 경우 폭발적으로 화염이 발생하여 구형의 모양을 이루고 공기 중으로 상승하는 Fireball을 동반한다. 대부분의 경우 BLEVE는 Fireball, 파편(fragmentation), 폭발효과(blast)와 동반하여 발생한다.

BELVE로 인한 대형사고로는 1984년 멕시코 시티에서 발생한 프로판가스 폭발사고와 1988년 미국 일리노이주에서 발생한 수소가스 폭발사고 등이 있었으며 그 규모 역시 VCE에 버금가는 피해가 발생하였으며 국내에서는 1992년 광주에서 발생한 광주해양도시가스 사고가 BLEVE로 인한 대표적인 사례이다.

국내에서도 정량적 위험성 평가를 실시하기 위한 프로그램 개발에 대한 시도가 진행되고 있으나, 폭발과 화재를 연계한 프로그램은 없었다. 따라서 본 연구에서는 BELVE와 BELVE 발생 이후 나타날 수 있는 Fireball을 대상으로 정량적 위험성 평가를 실시하기 위한 프로그램을 개

발하고 폭발과 화재 모델을 모사하였다. 과거 화재·폭발사고와 관련된 약 30여 개의 물질에 대한 물성 데이터 베이스를 사용하여 BLEVE 및 Fireball로 인한 폭발량 및 폭발과압과 열 복사량을 물리적 폭발 모델과 등은 팽창 모델, 그리고 단열 팽창 모델로서 해석하여 BLEVE와 Fireball이 발생할 때, 그것들이 인체와 건물에 미치는 효과를 모사하고 피해를 예측할 수 있도록 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 BLEVE 메카니즘

BLEVE는 끓는점 이상의 온도로 유지되는 액체가 들어있는 탱크가 파열될 때 일어난다. 용기가 파열되면 탱크 내용물 중 상당한 부분이 폭발적으로 증발한다.

발생단계는 다음과 같다.

1. 액체가 들어있는 탱크의 주위에서 화재가 발생한다.
2. 화재에 의한 열에 의하여 탱크의 벽이 가열된다.
3. 액체와 접촉하고있는 탱크의 벽 부분의 온도는 서서히 상승하나 기체와 접촉하고 있는 부분의 온도는 빠르게 상승한다.
4. 액체가 증발하여 증기만 존재하는 탱크의 벽이나 천장이 계속 가열되면 화염과 접촉하는 부위의 금속의 온도는 상승하여 구조적 강도를 잃게 된다.
5. 탱크는 파열되고 탱크 안의 유체는 폭발적으로 팽창한다.

만약 액체가 가연성이고 화재가 BLEVE의 원인이라면 탱크가 파열되면서 점화될 것이다. 가끔 폭발이 일어날 때의 충격으로 용기의 파편이 상당히 먼 거리까지 날아가기도 한다. BLEVE가 화재에 기인한 것이 아닐 때에는 증기운이 형성될 수 있고 그 결과 VCE를 일으킬 수 있다. 누출 증기는 피부에 화상이나 독성효과를 주어서 사람에게 위험하게 될 수 있다.

BLEVE는 Board[1], Reid[5], Venart[7] 등에 의하여 제시된 이론에 의하여 설명할 수 있다. 그러나 BLEVE 현상을 설명하는 이론은 아직 만족할 만한 것이 없다. 그 중 Reid의 이론이 BLEVE로 인한 충격파를 잘 설명하는 것으로 보인다. 그러나 어떤 경우에는 액체가 파열 온도 이하일지라도 압력이 떨어지고 나서 몇 초 안에 액체는 급격히 팽창하여 충격파, Fireball, 폭발파편들을 만들어 낼 수 있다.

### 2.2 폭발량과 과압 및 방출 열량 모델



여기서, 초기에 증기는 없는 것으로 가정하였으므로  $m_{v,i} = 0$  이다. 이것을 식(5)에 대입하면 식(9)로 정리할 수 있다.

$$\Delta U = (1-f)m_{l,i}U_{l,f} + fm_{l,i}U_{v,f} - m_{l,i}U_{l,i} \quad (9)$$

내부에너지와 엔탈피 그리고 PV Work과의 관계식은 식(10)와 같다.

$$U = H - PV \quad (10)$$

이것을 플래쉬 전, 후에 적용하면 다음과 같다.

$$U_{l,f} = H_{l,f} - P_{l,f}V_{l,f} \quad (11)$$

$$= H_l^0 + C_p^l m_{l,i} (T - T_0) + H^R - 1atmC \cdot V_{l,i}(1-f)$$

$$U_{l,i} = H_{l,i} - P_{l,i}V_{l,i} \quad (12)$$

$$= H_l^0 + C_p^l m_{l,i} (T - T_0) + H^R - P_{l,i} \cdot V_{l,i}$$

$$U_{v,f} = H_{v,f} - P_{v,f}V_{v,f} \quad (13)$$

$$= H_v^0 + C_p^v m_{v,i} (T - T_0) + H^R - 1atm \cdot V_{v,f}$$

가정 1로부터  $PV = RT$  이므로  $V_{total} = \frac{RT}{P}$  이다.

또한, 비체적  $V_{v,f}$ 은 아래와 같다.

$$V_{v,f} = \frac{V_{total}}{M_i \times \text{flash fraction}} \quad (14)$$

### 2.2.4 Fireball

BLEVE에서 발생하는 복사열에 대한 피해는 BLEVE와 동시에 발생하는 Fireball로부터 기인한다. Fireball은 Pitablado[3]에 의해 방출된 물질량의 함수식이 유도되었다. 특히, Fireball의 최대 지름이나 존속시간의 관계식은 연소에 대하여 산소의 부피를 포함하지 않으며 초기 지름은 부력이 Fireball을 안정된 높이까지 끌어올리는데 걸리는 짧은 시간을 설명하는데 사용된다. 복사량을 측정하기 위해서는 몇 가지 알아야 할 매개변수들이 있는데 그것은 Fireball로 소비되는 연료의 무게, Fireball의 최대 지름, Fireball의 연소시간, 방출 열량 등이다.

Fireball을 설명하는데 쓰이는 관계식들은 다음과 같다.

Maximum Diameter of Fireball:

$$D_{max} = 6.48 M^{0.325} \quad (15)$$

Combustion Duration of Fireball:

$$t_{fireball} = 0.825 M^{0.26} \quad (16)$$

Center Height of Fireball:

$$H_{fireball} = 0.75 D_{max} \quad (17)$$

Initial Ground Level Hemisphere Diameter:

$$D_{initial} = 1.3 D_{max} \quad (18)$$

Heat Radiation of Fireball:

Fireball이 발생하는 동안 복사 강도(Intensity)는 다음과 같은 Solid Model을 사용한 식으로 주어진다.

$$I_{th} = \tau FE \quad (19)$$

이중 대기 투과도  $\tau$ 는 중요한 인자이다. 복사량은 대기에 의하여 흡수되거나 분산되는데 투과도는 복사체의 위치에서 복사량이 감소하는 원인이다. 몇몇 복사모델에서는 투과도를  $\tau=1$ 으로 효과적으로 가정하여 이 효과를 무시한다. 그 경우에 흡수율이 20~40%인 20m 이상의 거리에 대하여 과도한 양의 복사량을 예상하게 되는 오차를 가져오게 된다.

투과도에 대하여 Pietersen과 Huerta[4]은 현재 대기 상에 존재하는 수증기의 절대량과 거리에 대한 함수 관계식을 제시하였다.

$$\tau = 2.02 (P_w \cdot RH \cdot x)^{-0.09} \quad (20)$$

복사량은 불꽃의 온도를 알아내야 하는 Stefan-Boltzman 식보다는 표면방출강도, E가 종종 쓰인다. Fireball에서의 전형적인 열류량(200-350 kW/m<sup>2</sup>)은 불꽃에 연기가 없기 때문에 Pool Fire의 경우보다 훨씬 큰 양이다.

전체 연소열의 복사 분율을 기초로 하여 표면 열류량(E)을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

$$E = \frac{\beta MH_c}{\pi D_{\max}^2 t_{\text{fireball}}} \quad (21)$$

Fireball의 영향은 주로 인체의 상해에 관련되므로 구면과 구면 사이의 보통 표면에 대하여 기하학적 시각인자가 사용되어야 한다.

$$F = \frac{D^2}{4X^2} \quad (22)$$

### 2.3 피해량 산정 모델

#### 2.3.1 폭발과압의 특성

충격파가 고체에 닿을 때 팽창·이동하는 가스의 운동에너지에 의해 발생하는 압력을 동적 압력(dynamic pressure),  $P_d$  라고 한다.

$$P_d = \frac{1}{2} \frac{\rho u^2}{g_c} \quad (23)$$

$$\rho = \left[ \frac{2\gamma P_a + (\gamma+1)P_s}{2\gamma P_a + (\gamma-1)P_s} \right] \rho_a \quad (24)$$

실제로 목적 물체에 가해지는 압력은 반사압력(reflect pressure)라 하고, 그것은 목적 물체의 형태에 따라 몇 가지로 나뉜다.

목적 물체가 바닥에 붙어있을 경우,

$$P_r = P_s \quad (25)$$

목적 물체가 개방 평면에 있을 경우,

$$P_r = P_s + P_d \quad (26)$$

평면의 벽에 폭발파가 부딪치는 경우,

$$P_r = 2P_s + (\gamma+1)P_d \quad (27)$$

일반적으로 실의폭발의 경우는 개방 평면으로 간주하여 식(26)의 관계를 사용한다. 또 용기 표면의 압력  $P_s$ 로부터 용기의 폭발압력  $P_b$ 를 예측할 수 있다.

$$P_b = P_s \left\{ 1 - \frac{3.5(\gamma-1)(P_s-1)}{[(\gamma T/Mw)(1+5.9P_s)]^{0.5}} \right\}^{-2\gamma/(\gamma-1)} \quad (28)$$

#### 2.3.2 폭발량과 과압의 피해관계

BLEVE가 일어났을 때 그 폭발로 생기는 폭발과압이 인체에 미치는 효과는 다음과 같이 확률을 재는 단위인 Probit의 형태로 구할 수 있다.

폐손상으로 인한 치사 :

$$\text{Pr} = 5.0 - 5.74 \log \left( \frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \right) \quad (29)$$

고막파열 :

$$\text{Pr} = -12.6 + 1.524 \ln P_s \quad (30)$$

여기서,

$$\bar{P} = \frac{P_s + P_d}{P_a}, \quad \bar{I} = \frac{I_s}{P_a^{1/2} m_b^{1/3}} \text{이다.}$$

폭발과압이 건물에 미치는 효과는 핵폭발 결과에 기초하여 다음과 같이 Probit으로 정리되어 있다.

구조적 피해 :

$$\text{Pr} = -23.8 + 2.92 \ln P_s \quad (31)$$

유리 손상 :

$$\text{Pr} = -18.1 + 2.79 \ln P_s \quad (32)$$

각 경우에 맞는 Probit을 구하고 그 값을 해당하는 실제 probability(%)를 도표에서 구한다.

#### 2.3.3 복사량 피해 특성

복사열로 인한 개인적 상해는 사고 발생시의 열류량과 열원에 노출된 시간에 영향을 받는다. FEMA(Federal Emergency Management Agency, 1989)는 통증의 시작점과 2도 화상에 대하여 Data Sheet를 제시하였다.

Tsao와 Perry[6]는 화상예측을 위하여 식(33), (34), (35)를 제시하였다.

1도 화상을 예측하기 위해서,

$$\text{Pr} = -39.83 + 3.0186 \ln(t I_{\text{th}}^{4/3}) \quad (33)$$

2도 화상을 예측하기 위하여,

$$\text{Pr} = -43.17 + 3.0186 \ln(t I_{\text{th}}^{4/3}) \quad (34)$$

화상으로 인한 치사를 예측하기 위하여

$$Pr = -36.36 + 2.56 \ln(t I_{up}^{4/3}) \quad (35)$$

주어진 자료로부터 Probit을 결정하고, 그 값을 도표에 대입하여 probability(%)를 구한다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 피해예측 프로그램 개발

폭발·화재의 여러 형태 중에서 BLEVE와 Fireball의 피해를 예측하기 위해 새로이 프로그램을 개발하였고, 「BLEVE Estimator」라 명명하였다. 「BLEVE Estimator」를 실행시키기 위한 운영체제를 Windows95나 Windows NT로 사용할 수 있도록 하였으며, Pentium이나 486DX Processor를 장착한 16MB 이상의 메모리를 가진 컴퓨터에서 작동할 수 있다. 한글 Visual Basic 5.0 Enterprise 버전을 사용하여 active X control을 사용할 수 있게 하여 앞으로 프로그램의 확장이 용이하게 하고 현재의 계산 환경에 최적화 되도록 하였다. 폭발에 관련된 여러 가지 계산 값을 구하기 위한 수학 처리 루틴을 모듈화 하여 중복사용이 가능하게 하여 효율을 높이고 프로그램을 최소화하였다.

프로그램 처리과정은 크게 다음 Fig. 2의 계산방법에 따라 처리가 되는데 BLEVE가 발생 시에 생성되는 효과인 충격파, 파편, 복사열로 나누어 생각하게 된다. 먼저 BLEVE자체를 세 가지 모델을 사용하여 크게 모사한 후, 충격파는 식(23)부터 식(32)까지 기술된 방법에 의하여 폭발량에 따른 과압을 계산하여 폭발 시에 과압이 미칠 효과를 산정하며 복사열은 식(33)부터 식(35)까지 기술된 방법을 사용하여 표면 방출열을 산정하고 시각인자와 투과도를 적용한 값에 폭발 모델에서 결정된 노출시간을 조합하여 열에 의한 피해를 산정 하였다. BLEVE에 의한 파편 효과는 아주 좁은 영역에 한정되므로 관심에서 제외하였다.

「BLEVE Estimator」를 실행했을 때 초기 화면의 모습을 Fig. 3에 나타내었다. 화면에서 보이는 물리적 폭발 모델, 등온 팽창 모델, 단열 팽창 모델의 세 가지 폭발 모델과 30여 종류의 유기화합물이 어떤 운전조건에 있는지를 나타내는 물질정보와 그 물질이 담겨있는 용기의 크기와 재질에 관한 탱크정보에 필요한 값을 입력하여 주어진 상황에서의 발생 가능한 BLEVE의 폭발량과 그것으로 인한 과압을 계산하고 BLEVE에 동반하여 일어날 수 있는 Fireball의 복사열을 산정하고 그것들로 인한 건물과 인체

의 피해를 예측한다. 또 매개변수가 변함에 따라 다른 변수의 변화를 기록한다. 여기서 산정 대상이 되는 유기화합물의 종류는 데이터베이스를 외부에서 수정함으로써 추가할 수 있다.

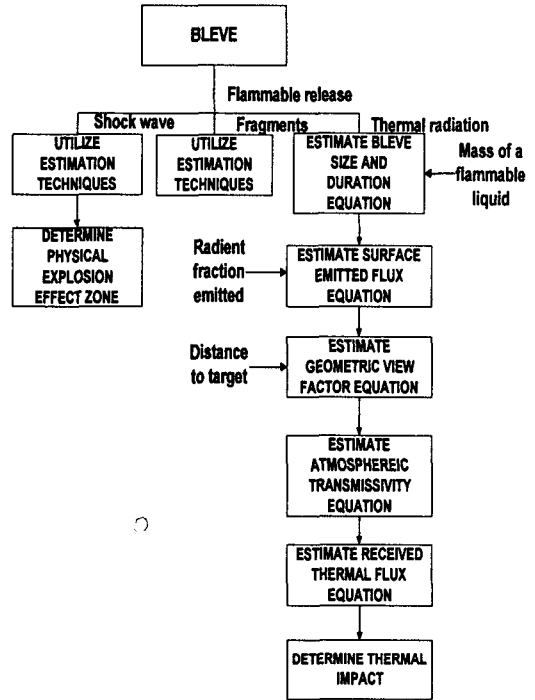


Fig 2. Logic diagram for the calculation of BLEVE and thermal intensity.



Fig 3. Initial screen of 「BLEVE Estimator」

「BLEVE Estimator」를 이용하여 BLEVE의 폭발량을 비롯하여 거리에 따른 폭발 과압을 계산하고 사고시 발생하는 Fireball의 크기와 특성을 예측한다. 그리고 BLEVE와 Fireball로 인한 인적·물적 피해를 산정하고 그 범위를 도출할 수 있다. 이러한 산정 프로그램으로써의 역할뿐만 아니라 매개변수가 변화 가능한 영역에서 매개변수의 변화를 예측하여 정리할 수 있는 자료를 제공함으로써 적절한 안전대책을 세울 수 있는 도구로 사용 할 수 있는 기능을 가졌다.

### 3.2 폭발 사고 시나리오

6000 gallon의 옥외 볼 탱크(ball tank)에 벤젠이 90% 저장되어 있다. 탱크는 1.8 bar의 압력으로 충전(padding)되어 있다. 탱크의 저장온도는 15°C로 유지되고 있으며 탱크 주위의 최대 풍속은 10m/s이다. 탱크에 화재가 발생하여 BLEVE와 Fireball이 발생했을 때, 폭발지점에서 80m 떨어진 곳의 건물과 사람들에게 미칠 피해는 얼마나 될 지 예측하라. 그리고 탱크 안에 담겨있는 물질이 톨루엔이거나 메타-자일렌일 경우 폭발과 Fireball로 인한 피해를 계산하라.

### 3.3 매개변수의 민감도 분석

BLEVE의 폭발량과 증발량, Fireball의 변화량을 분석하기 위하여 3.2절에서 기술한 사고 시나리오를 기반으로 하여 벤젠, 톨루엔, 메타-자일렌의 세 가지 물질에 대하여 BLEVE의 세 가지 모델을 사용하여 매개변수를 변화시켜 조사하였다.

매개변수는 폭발온도, 거리, 저장압력을 변화시켰으며 BLEVE 매개변수의 대부분은 온도에 대한 함수로 표현할 수 있으므로 주로 폭발온도에 대한 관계로 해석하였다.

#### 3.3.1 온도에 따른 폭발량의 변화

Fig. 4에서 단일 팽창 모델에서 끓는점부터 임계점까지의 온도 변화에 따른 폭발량의 변화를 살펴보았다. 일반적으로 분자량이 작아 가벼운 물질일수록 쉽게 비등하며 쉽게 비등하는 물질일수록 같은 온도에서 더 큰 폭발량을 나타내었다. 무거운 물질은 같은 크기의 폭발량을 내기 위하여 더 높은 온도까지 폭발온도가 올라가야 하는데, 이것은 같은 증발량을 만들어 내는데 더 많은 에너지가 필요함을 의미한다.

벤젠은 520K, 톨루엔은 550K, 메타-자일렌은 580K 부근에서 급격히 폭발량이 상승하였다. 이것은 온도가 급격히 상승하는 부분이 각 물질의 과열한계온도(Superheat Limit Temperature)이며, 이 값은 1.8bar의 압력 하에서 벤젠은 504.2K, 톨루엔은 530.8K, 메타-자일렌은 553.7K

이며, 이 온도 이상에서 액체는 급격히 비등했다.

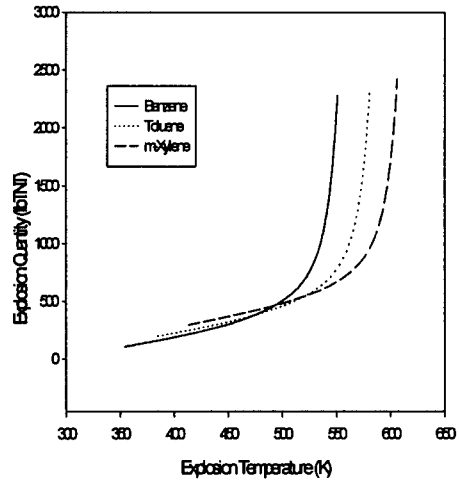


Fig 4. TNT explosion quantity vs. Explosion temperature.

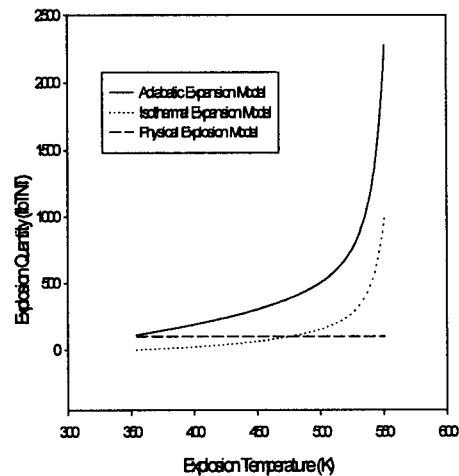


Fig 5. Explosion quantities vs. Explosion temperature.

Fig. 5에서는 벤젠을 선택하여 모델별로 온도에 따른 폭발량의 변화를 살펴보았다. 등은 팽

창 모델과 물리적 폭발 모델의 경우 과열한계온도를 지나면서 급격한 폭발량의 증가를 보였다. 그러나 물리적 폭발 모델은 온도변화에 거의 일정한 값을 보였다.

등온 팽창 모델과 물리적 폭발 모델은 폭발량이 온도에 따른 증발 분율에 의존하므로, 그 크기에는 차이가 있었으나, 전체적인 온도에 따른 변화는 동일하였다. 두 모델의 차이가 생기는 것은 등온 팽창 모델은 실험식을 기초로 하여 주위 환경에 의하여 소실되는 부분이 감안되었으나 단열 팽창 모델은 이론적으로 계산된 전체 내부 에너지를 주위의 환경요소에 대한 고려 없이 계산했기 때문인 것으로 보인다.

이 결과로 볼 때 폭발할 수 있는 최저온도인 끓는점 부근에서는 물리적 폭발 모델로써 폭발량을 계산할 수 있으나 폭발온도가 상승할수록 폭발량에 대한 오차가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 오히려 끓는점 부근에서는 등온 팽창 모델의 폭발량이 더 작게 나타났다.

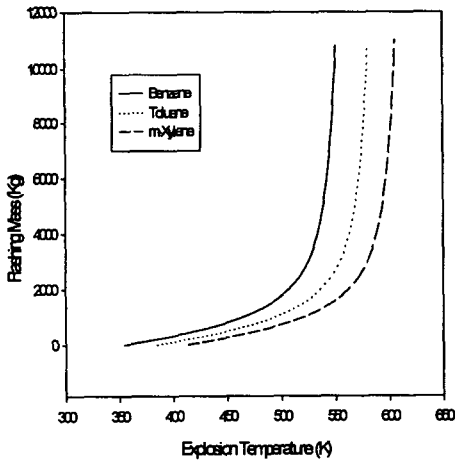


Fig 6. Flashing mass vs. Explosion temperature.

### 3.3.2 온도에 따른 증발량의 변화

Fireball의 특성은 주로 증발된 양에 대한 함수로 정의되고 증발된 양은 각 온도마다 다르게 계산된다. Fig. 6에서 Fireball의 특성을 예측하기 위하여 폭발모델에서 계산되는 온도에 따른 증발된 양의 변화를 알아보았다. 이 결과 역시 탱크 내 저장물질의 증발량은 과열한계온도이상

에서 급격히 증가하였다. 벤젠, 톨루엔, 메타-자일렌의 세가지 물질 중 가장 가벼운 물질인 벤젠이 같은 온도에서 더 많은 양이 증발하여 Fireball에 크게 영향을 주는 초기 증발 물질의 양은 늘어나는 결과를 보였다.

### 3.3.3 거리에 따른 폭발과압의 변화

BLEVE가 발생하여 충격파로 인한 과압이 발생하면 폭발 과압의 크기는 폭발원점으로부터 큰 편차를 보인다. 세 가지 모델에 대하여 거리에 대한 변화량을 Fig. 7에 보였다. 관심 거리가 짧을 때는 거리가 멀어짐에 따라 과압이 크게 줄어들고 관심 거리가 멀어짐에 따라 폭발 과압이 0으로 접근하여 약 70 ft부터 0으로 수렴하였다. 폭발 과압은 거리에 대하여 대수함수의 역으로 줄어드는 모습을 보였다.

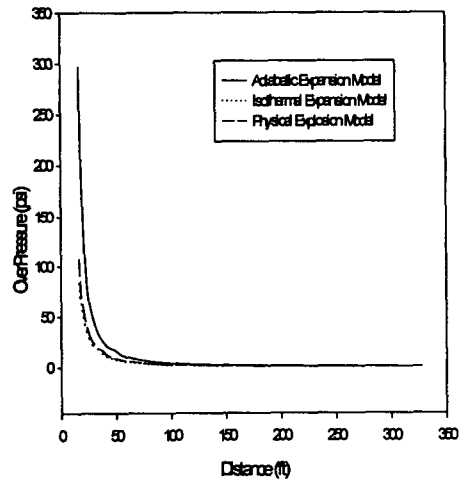


Fig 7. Overpressure vs. Distance.

### 3.3.4 충전 압력에 따른 폭발 온도의 변화

Fig. 8에서 탱크에 폭발물질을 저장할 때 탱크내의 압력이 몇 기압으로 저장하는가에 대한 BLEVE 발생시의 폭발온도를 물질별로 알아보았다. 세 가지 물질 공히 저장압력이 증가할수록 폭발온도는 낮게 계산되었다. 이것은 높은 압력으로 저장할수록 탱크 안의 내부에너지가 높아져서 낮은 온도에서도 폭발이 가능할 정도로 내부에너지가 높아지기 때문이다. 또한 물질의 분자량이 커질수록 끓는점이 높아지기 때문에 폭발하는데 필요한 온도는 더 높아졌다.



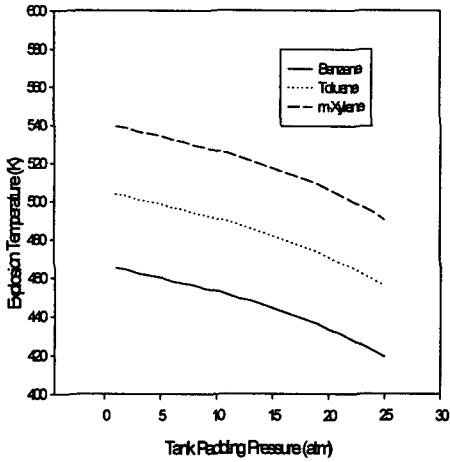


Fig 8. Explosion temperature vs. Filling pressure.

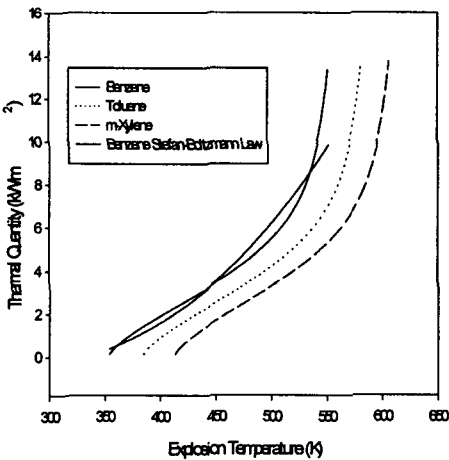


Fig 9. Fireball thermal radiation vs. Explosion temperature.

3.3.5 폭발 온도에 따른 복사량의 변화

실제 Fireball이 발생하였을 경우 복사체가 받는 열량을 알아보기 위하여 폭발 온도에 따라 복사체가 받는 열량을 Fig. 9에 나타내었다. 그리고 Fireball의 또 다른 특성치인 Fireball의 최대직경, 지속시간, 높이를 폭발 온도에 따른 변화를 살펴보았다. 모두 BLEVE의 중발량에 관

련된 함수식으로 표현 할 수 있는 이 값들은 넓은 영역에 대하여 조사하였을 때 비슷한 거동을 보였다. 그중 복사체가 받는 열량을 열전달에 관한 또 하나의 관계식인 Stefan-Boltzman 식으로 분석하여보았다. Stefan-Boltzman 식은 아래와 같다.

$$W_b = 1.237^{-10} \times T - 1.589 \quad (36)$$

식(36)과 같이 분석할 수 있었으나 과열한계 온도 이상의 온도에서 복사량이 급격히 상승하는 변화를 따르지 못하는 못하였다.

이것은 과열한계온도 이상에서 일어나는 BLEVE의 복사량은 따로 나누어 분석해야 함을 의미한다. 그리고 나머지 특성치들인 Fireball의 최대지름, 지속시간, 높이 등의 변화 경향으로부터 폭발 온도와 여러 특성치들 간에 서로 비례 관계가 있음을 확인 할 수 있었다.

3.4 폭발사고의 피해 영향평가

「BLEVE Estimator」를 이용하여 3.2절에서 제시한 사고 시나리오에 대한 폭발량과 피해량 산정결과를 Table 1과 2에 정리하였다. 폭발 후 안전거리에 따라 지도 위에 피해범위를 도시한 것을 Fig. 10에 보였다. 이 그림에서 가장 바깥쪽까지 펼쳐져 있는 모눈으로 칠해져 있는 영역이 사용자가 제시한 관심 영역의 한계이며 그 영역에 있는 두 개의 원 중에서 바깥쪽에 위치한 원은 폭발 과압이 3.5 psi로 유류 저장탱크가 파괴되는 압력이 미치는 한계이며 안쪽에 위치한 원은 폭발 과압이 5.3psi로 가속이 거의 전파되는 압력이 미치는 한계이다.

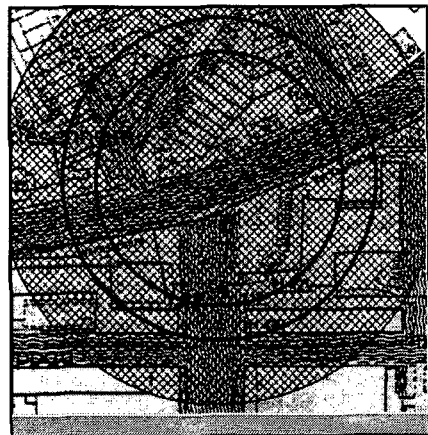


Fig 10. The results of damage estimation on the map.

피해결과를 산정하는데 있어서 벤젠의 경우 폭발량은 단일 팽창 모델을 사용하여 계산했을 때 231.8 lbTNT로 다른 두 모델을 사용했을 때에 비해 가장 큰 폭발량을 보였다. 그 다음이 물리적 폭발 모델을 사용했을 때 99.1 lbTNT이며 등은 팽창 모델을 사용하여 계산했을 때 78.6 lbTNT로 가장 작은 폭발량을 보였다. 일반적으로는 단일 팽창 모델, 등은 팽창 모델, 물리적 폭발 모델의 순서로 폭발량의 크기가 계산된다. 이 크기의 순서는 벤젠뿐만 아니라 톨루엔이나 메타-자일렌의 경우에도 똑같이 적용되었다.

Table 1. Estimated explosion quantities and overpressures

	Explosion Quantity (lbTNT)			Overpressure (psi)		
	Benzene	Toluene	m-Xylene	Benzene	Toluene	m-Xylene
Physical Explosion Model	99.1	99.1	99.1	0.96	1.0	0.96
Isothermal Expansion Model	78.6	84.3	90.3	0.9	0.9	0.9
Adiabatic Expansion Model	231.8	269.4	312.9	1.1	1.1	1.3

Table 2. Comparison of the properties of Fireball

	Benzene	Toluene	m-Xylene
Flashing Mass (kg)	981.8	1144.2	1319.0
Maximum Diameter (m)	60.8	63.9	66.9
Fireball Duration (sec)	4.9	5.1	5.3
Fireball Height (m)	45.6	47.9	50.2
Thermal Radiation (kW/m <sup>2</sup> )	3.9	4.3	4.7

Fig. 5에서 타원으로 표시한 470 K이하의 부분에서 폭발이 발생하였을 경우에는 폭발량 크

기의 순서는 등은 팽창 모델, 물리적 폭발 모델, 단일 팽창 모델의 순서를 유지하다가 등은 팽창 모델을 사용해서 폭발량을 계산했을 때의 값이 물리적 폭발 모델을 사용해서 폭발량을 계산했을 때의 값과 같아지는 472 K를 초과하여야만 앞서 예측하였던 단일 팽창 모델, 등은 팽창 모델, 물리적 폭발 모델 순의 폭발량 크기 차이를 보이게 된다

그리고 폭발물질의 부피에만 의존하여 폭발량을 계산하는 물리적 폭발 모델의 경우는 99 lbTNT의 고정된 값을 보이나 증발 분율에 의존하여 폭발량을 구하는 단일 팽창 모델과 등은 팽창 모델의 경우는 폭발물질로 선정된 벤젠의 과열한계온도인 520 K가 넘으면서 급격히 폭발량이 증가한다. 이는 탱크 안의 과열한계온도 이상의 증기가 용기 파열에 의해 상압으로 압력이 떨어졌을 때 폭발이 일어나는 BLEVE의 메카니즘을 잘 설명해 주고 있다.

저장 물질에 따른 폭발량과 Fireball의 특성치의 차이는 주로 폭발이 일어나는 온도에 따라 큰 차이를 보였다. 물질별로 폭발한 온도는 벤젠이 463.2K, 톨루엔이 502.8K, 메타-자일렌이 538.3 K에서 폭발하였다. 이 때의 Fireball의 특성치를 Table 2에 정리하였다. 그 결과는 같은 부피의 물질이 폭발할 때, 물질의 분자량과 끓는점이 높은 물질일수록 폭발온도가 높았고 폭발 온도가 높을수록 폭발량, 증발 물질량, Fireball의 특성치가 컸다.

Fireball의 특성치 역시 각 물질의 끓는점 부근과 과가열 온도한계 부근에서 급격한 증가를 보였다.

#### 4. 결 론

BLEVE와 Fireball에 의한 폭발 영향평가 및 인체와 건물의 피해 평가를 위하여 BLEVE와 Fireball에 관한 모델을 제시하고 피해를 예측할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. BLEVE는 물리적 폭발 모델, 등은 팽창 모델과 단일 팽창 모델의 세 가지 모델을 사용하여 평가하고 Fireball의 경우에는 Solid Model을 사용하여 적용하였다.

BLEVE로 인한 피해를 예측하기 위해 「BLEVE Estimator」를 개발하여 대표적 휘발성 유기 물질인 벤젠, 톨루엔, 메타-자일렌을 대상으로 공정조건에 따른 데이터를 입력하여 폭발과 Fireball의 피해량을 산정하고 결과를 지도 위에 출력하고 인적·물적 피해와 매개변수들의 영향과 민감도를 분석하였다. 폭발량과 과

압의 변화는 폭발온도가 470K 이하에서는 단열 팽창 모델, 물리적 폭발 모델, 등은 팽창 모델의 순서로 크기가 나타났으며, 470K 이상에서는 단열 팽창 모델, 등은 팽창 모델, 물리적 폭발 모델의 순서로 크기가 나타났다.

본 연구의 적용대상인 BLEVE는 용기 폭발 모델로 분석하였을 때 폭발 온도에 따라서 차이가 큰 피해량을 나타낸다. 그러므로 BLEVE를 분석하기 위해서는 폭발량을 산정하기 이전에 폭발 순간의 온도를 구해내는 분야의 많은 연구가 요구된다. 또한 외부의 열원으로부터 시간에 따라 받은 열량으로 용기 안의 물질이 가열되는 양상을 모사 하는 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

### 감 사

본 연구는 포항공과대학 지능자동차센터의 지원에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

### 인 용 부 호

- $Cp_{mh}^{ig}$  : mean heat capacity of ideal gas
- $Cp_{mh}^l$  : mean heat capacity of liquid
- $D$  : sphere diameter (m)
- $D_{initial}$  : fireball hemispheric diameter (m)
- $D_{max}$  : maximum fireball diameter (m)
- $E$  : surface emitted flux (kW/m<sup>2</sup>)
- $f$  : flash fraction (dimensionless)
- $F$  : view factor between sphere and target surface (dimensionless)
- $g_c$  : 32.2 (lbm-ft/lbf-sec<sup>2</sup>)
- $H_c$  : heat of combustion (kJ/kg)
- $H_1^0$  : standard enthalpy
- $H_{1,f}$  : after flash liquid internal enthalpy
- $H_{1,i}$  : initial liquid internal enthalpy
- $H^R$  : reduced enthalpy(J)
- $H_{v,f}$  : after flash vapor internal enthalpy
- $H_{v,i}$  : initial vapor internal enthalpy
- $I_{th}$  : radiation received by a black body target (kW/m<sup>2</sup>)
- $I_s$  : shock wave for positive phase (N-sec/m<sup>2</sup>)
- $I_{th}$  : thermal radiation intensity (W/m<sup>2</sup>)

- $M$  : mass of combustion material in BLEVE (kg)
- $m_b$  : mass of human body (kg)
- $M_i$  : initial mass of flammable liquid (kg)
- $m_{l,f}$  : after flash liquid internal mass
- $m_{l,i}$  : initial liquid internal mass
- $m_{v,f}$  : after flash vapor internal mass
- $m_{v,i}$  : initial vapor internal mass
- $Mw$  : molecular weight
- $n_v$  : number of moles of vapor that flashes (lbmole)
- $P_0$  : standard pressure (14.7 psia)
- $P_a$  : atmosphere pressure  $1.013 \times 10^5$  (N/m<sup>2</sup>)
- $P_b$  : burst pressure of vessel (bar)
- $P_{blv1}$  : initial pressure of the superheated liquid (psia)
- $P_{blv2}$  : final pressure of the superheated liquid (psia)
- $P_d$  : dynamic pressure
- $P_{l,f}$  : after flash liquid internal pressure
- $P_{l,i}$  : initial liquid internal pressure
- $P_{phe1}$  : initial pressure of the compressed gas (psia)
- $P_{phe2}$  : final pressure of the compressed gas (psia)
- $Pr$  : probit (dimensionless)
- $P_r$  : reflected pressure (N/m<sup>2</sup>)
- $P_s$  : maximum overpressure (N/m<sup>2</sup>)
- $P_{v,f}$  : after flash vapor internal pressure
- $P_{v,i}$  : initial vapor internal pressure
- $P_w$  : saturated vapor pressure of water
- $R$  : gas constant (1.987 Btu/lbmole- °R)
- $RH$  : relative humidity
- $t$  : duration of exposure (sec)
- $T$  : burst temperature (K)
- $T_0$  : standard temperature (492 °R)
- $T_{blv1}$  : initial temperature of the superheated liquid ( °R)
- $t_{fireball}$  : fireball duration (sec)
- $T_{phe1}$  : temperature of compressed gas ( °R)
- $u$  : peak wind velocity behind the shock front (particle velocity) (ft/sec)
- $U_{l,f}$  : after flash liquid internal energy
- $U_{l,i}$  : initial liquid internal energy
- $U_{v,f}$  : after flash vapor internal energy

$U_{v,i}$	: initial vapor internal energy	(BLEVE)", 24th Annual Loss Prevention Symposium. New Orleans, May (1990).
$\nabla U$	: difference between initial and final internal energy	
$V$	: volume of compressed gas (ft <sup>3</sup> )	
$V_{l,f}$	: after flash liquid internal volume	
$V_{l,i}$	: initial liquid internal volume	
$V_{total}$	: initial volume of compressed gas (ft <sup>3</sup> )	
$V_{v,f}$	: after flash vapor internal volume	
$V_{v,i}$	: initial vapor internal volume	
$W$	: equivalent mass of TNT (lbm)	
$X$	: distance from sphere center to target (m)	

### Greek Letters

$\beta$	: radiation fraction, typically 0.25-0.40
$\gamma$	: $\frac{C_p}{C_v}$ , ratio of specific heats for air (1.4, dimensionless)
$\rho_a$	: ambient air density ahead of the shock wave (lbm/ft <sup>3</sup> )
$\rho$	: density of air behind the shock front (lbm/ft <sup>3</sup> )
$\tau$	: transmissivity (dimensionless)

### 참 고 문 헌

1. Board, S. J., Hall, R. W. and R. S. Hail; *Nature*, 254, 319 (1975).
2. Perry, R. H.; "*Perry's Chemical Engineer's Handbook*", 6<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill (1988).
3. Pitblado, R. M.; "*Consequence Models for BLEVE Incidents*", Warren Center for Advanced Engineering. University of Sydney, Australia (1986).
4. Piterson, C. M. and Huaerta, S. C.; "*Analysis of the LPG Incident in San Juan Ixhuatpec, Mexico City*", TNO Report B4-0222 (1984).
5. Reid, R. C.; *Amer. Scientist*, 64, 146 (1976).
6. Tsao, C. K. and Perry, W. W.; "Modifications to the Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills", U.S. Coast Guard Office of Research and Development, Report No. CG-D-38-79 (1979).
7. Venart, J. E. S.; "The Anatomy of a Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion