

## BLEVE로 인한 과압 예측에 관한 연구

김 인 태 · 김 인 원\* · 송 희 열\*  
한국화재보험협회, \*건국대학교 화학공학과  
(2000년 3월 6일 접수, 2000년 3월 27일 채택)

### A Study on the Overpressure Estimation of BLEVE

In-Tae Kim · In-Won Kim\* · Hee-Oeul Song\*  
Korean Fire Protection Association  
\*Dept. of Chemical Engineering, KonKuk University  
(Received 6 March 2000 ; Accepted 27 March 2000)

#### 요 약

BLEVE로 인한 위험을 평가하기 위한 프로그램, BLEVE ESTIMATOR를 이용하여 온도에 따른 폭발량과 Flashing mass를 계산하였고, 부천 가스충전소의 사고를 모델로 피해를 예측하였으며, 상용프로그램인 Dupont의 SAFER 프로그램과 비교하였다.

폭발량과 Flashing mass는 폭발온도의 증가에 따라 지수함수로 증가하였으며, Propane이 n-Butane보다 상대적으로 높게 나타났다. 용기의 온도, 압력, 충전비가 높을 수록 Overpressure가 높게 나타났다.

**Abstract** - Explosion quantities and flashing mass resulting from the variation of temperature are calculated by a computer program, BLEVE ESTIMATOR, to carry out the risk assessment of BLEVE. The damages caused by the BLEVE are estimated under the explosion of the simulation condition similar to the Puchun LP gas station accident, and the results are compared with the commercial program SAFER of Dupont Co.

Explosion quantities and flashing mass increase exponentially with the increase of explosion temperature. These values for propane are relatively higher than those for n-butane. In conditions of higher vessel temperature, vessel pressure, and liquid ratio of containment, higher overpressures are calculated.

**Key words** : BLEVE, Explosion

#### 1. 서 론

에너지 사용이 급격히 증가함에 따라 건축물의 자동화, 대형화 등으로 인한 산업사고의 발생 빈도 및 이로 인한 피해가 상당히 증가하고 있는 실정이다.[1,2]

화학공장에서의 대표적인 폭발 사고형태는 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)과

비등액체팽창증기 폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)이 있다. 1974년 6월 영국 Flixborough의 화학공장사고는 VCE로 인한 대형사고로서 전세계 화학공장의 안전문제를 검토하는 계기가 되었다. BLEVE로 인한 대표적인 사고로는 1984년 멕시코시티에서 발생한 Propane 가스 폭발이 있었으며, 국내에서는 1992년 4월 광주 해양도시

가스의 LPG 저장탱크와 1998년 9월 부천 LPG 충전소의 LPG 탱크로리 사고가 있었다.

폭발 사고형태는 장소에 따라 증기운 폭발과 같이 개방된 공간에서의 폭발과 용기 폭발(Vessel explosion)과 같이 구획된 곳에서의 폭발로 구분할 수 있으며, 반응속도에 따라 물리적 폭발(Physical explosion)과 화학적 폭발(Cheical explosion)로 구분할 수 있다. 또한, 사고물질에 따라 기상폭발(Vapor explosion), 기-액상 폭발(Liquid-vapor explosion), 분진폭발(Dust explosion)로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 BLEVE와 관련한 폭발량과 Flashing mass를 예측하였으며, 1998년 9월 발생한 부천의 액화석유가스 탱크로리 폭발 사고 사례 분석을 통하여 인체 및 설비에 미칠 수 있는 피해효과로서 관심거리에 따른 Overpressure의 상관성을 분석하였다.

폭발사고로 발생하는 Overpressure를 정량적으로 예측함으로써 적절한 방호대책을 세울 수 있도록 하였으며, 본 연구의 예측결과를 위험시설의 설계과정에 반영함으로써 안전시설을 효율적으로 설치할 수 있게 되었다.

## 2. 이론적 배경

화재와 폭발에 대한 위험성평가 기법의 발달로 정량적인 사고피해 예측이 가능해짐으로써 과학적 근거를 바탕으로 경제적인 예방대책을 세우고 적절한 방호시설을 설치할 수 있게 되었다.

BLEVE는 용기폭발의 대표적인 사고로서 액체 혹은 가압하에서 액화된 다량의 물질이 순간적으로 방출되면서 2차 피해를 발생시키게 되는데, 용기 파열시 용기내 다량의 물질이 폭발적으로 증발하여 Overpressure를 형성하고 파편이 비산하게 된다. 이때, 액체는 순간적으로 기화되어 분출하고 가연성 물질인 경우 주위의 열원으로부터 점화되어 Fireball을 형성하게 된다.

Reid[3]는 액체 가열 현상에 근거하여 BLEVE 현상에 대해 이론적으로 기술한 바 있다.

Opschoor[4]는 Van der Walls 식을 이용하여 임계온도로부터 최대 가열 온도를 예측하였는데, 과열한계온도가 임계온도의 0.84배로 보았으며, Reid는 Redlich-Kwong식을 이용하여 임계온도의 0.895배로 예측하였다. Reid는

Fig. 1과 같이 Propane의 과열한계계곡을 나타내었는데, A에 있던 액체가 B점까지 온도가 상승한 후 대기압으로 압력이 강하되어 C점이 되면 액체는 증발에 의한 충격파를 생성하지 않으며 과열한계계곡과 만날 수 있는 D점까지 상승해야 액체가 폭발적으로 Flashing할 수 있다고 하였다.

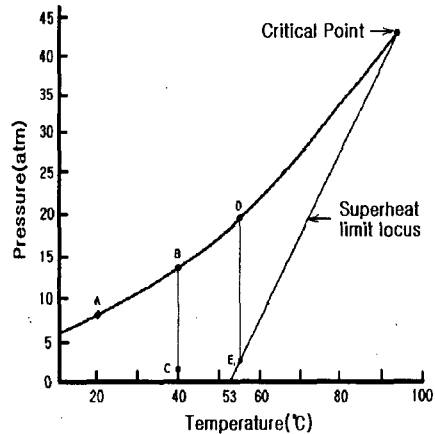


Fig. 1. Locus of superheat limit temperature.

### 2.1. 과압 영향평가 모델

폭발현상은 폭발내부의 반응 영역에서 에너지의 전달 상황에 따라 폭연(Deflagration)과 폭굉(Detonation)으로 구분한다. 폭연과 폭굉에 대한 압력구배를 Fig. 2에 나타내었다.

반응 영역에서 미반응 매체로의 에너지 전달이 일반적인 전달과정인 열전달 및 물질전달을 통해 일어나는 전파반응을 폭연, 반응 영역에서 미반응 매체로의 에너지 전달이 반응성 충격파를 경유하여 일어나는 전파반응을 폭굉이라 하는데 폭굉의 반응 속도는 반응물 내에서 음속을 초과한다.

폭발이 일어나면 Overpressure, Dynamic pressure, Blast wave, Fragment 등이 발생할 수 있으며, 가연성 물질인 경우 복사열로 인한 2차 피해가 발생된다.

폭발의 영향을 평가하기 위한 이론식으로는 1969년 TNT상당량 모델[5]이 주로 사용되는데 사용이 간편한 장점이 있으나 폭발원과 가까운 거리에서는 실제 값보다 과도한 결과를 나타내고 있다.

TNT와 같은 표준폭약에 대한 충격파 특성은 실험적으로 알려져 있으며 충격파의 특성은 식(1)에서와 같이 축적거리(Scaled distance)의 함수로 표시된다.

$$Z = R_s / W^{1/3} \quad (1)$$

### 2.2. 물리적 폭발 모델

비등액체팽창증기 폭발은 화학반응이 없거나 반응속도가 느린 경우에는 물리적 폭발 모델을 적용하며 반응속도가 빠른 경우 액체의 Flashing을 고려한 등온팽창(Isothermal expansion)모델이나 내부에너지 변화를 이용한 단열압축팽창(Adiabatic expansion)모델을 사용하여 평가한다. 본 논문에서는 등온팽창 모델을 사용하여 평가하였다.[6,7,8]

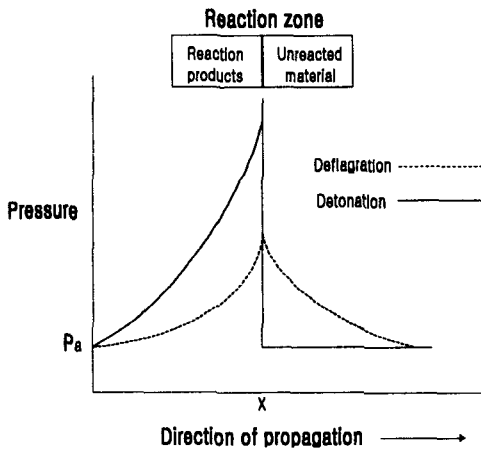


Fig. 2. Pressure profiles for deflagration versus detonation.

물리적 폭발은 화학반응이 없이 시스템 내부의 압력 상승에 의해 장치가 파손될 때 에너지가 외부로 유출되는 폭발형태이다. Baker[9] 등은 소규모의 실험으로 폭발량을 예측하였는바, 폭발 에너지는 용기내 액체가 Flashing 하지 않고 증기만이 폭발에 관여한다고 가정하여 식(2)에 의해 계산 할 수 있다.

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \left[ \frac{P_1}{P_0} \right] \left[ \frac{T_0}{T_1} \right] RT_1 \ln \left[ \frac{P_1}{P_2} \right] \quad (2)$$

### 2.3. 등온팽창 모델

과열 액체가 Flash될 때 Flash된 양만큼 폭발된다고 간주하고 식(3)과 같은 등온팽창 모델식을 사용한다.

$$W = 5 \times 10^{-4} n_v RT_{s1} \ln(P_{s1}/P_2) \quad (3)$$

### 2.4. 단열팽창 모델

압력용기 초기상태의 PV와 폭발직전의 PV를 계산 후, 이를 상호 비교하여 용기의 폭발 온도를 구한다. 이 때 폭발량은 식(4)~(7)에 의해 계산될 수 있다.

$$W = \frac{-\Delta U}{H_c \text{ TNT}} \quad (4)$$

$$\Delta U = m_{l,f} u_{l,f} + m_{v,f} u_{v,f} - m_{l,i} u_{l,i} - m_{v,i} u_{v,i} \quad (5)$$

Flash 발생 전후의 내부에너지 수치를 취하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta U = m_{l,f} U_{l,f} + m_{v,f} U_{v,f} - m_{l,i} U_{l,i} - m_{v,i} U_{v,i} \quad (6)$$

또는,

$$\Delta U = (1-f) m_{l,i} U_{l,i} + (f m_{l,i} + m_{v,i}) U_{v,f} - m_{l,i} U_{l,i} - m_{v,i} U_{v,i} \quad (7)$$

## 3. 위험평가

### 3.1. BLEVE로 인한 피해 예측

폭발로 인한 피해는 Overpressure와 파편의 비산과 같은 1차 피해와 폭발 후 위험물 누출로 인한 2차 피해가 예상된다. 본 연구에서는 Overpressure로 인한 피해를 다루었다.

BLEVE의 피해를 예측하기 위하여 BLEVE ESTIMATOR 프로그램[10]을 사용하였다. 실행방법은 초기화면에서 "물질정보"를 선택하여 데이터베이스에 입력되어 있는 물질을 클릭한 다음에 용기에 대한 조건을 설정하게되는데, 부피와 허용압력 등을 입력하면 원하는

Overpressure와 관심거리를 구할 수 있다.

BLEVE에 의한 피해를 예측하기 위하여 폭발량과 Flashing mass를 계산하고, 사고사례 피해결과를 예측하기 위하여 BLEVE ESTIMATOR 프로그램과 미국 Dupont사의 SAFER 프로그램 결과를 비교 분석하였다.

폭발로 인한 피해결과를 산출하기 위하여 Propane과 n-Butane을 저장하고 있는 탱크 체적은 35 m<sup>3</sup>로 하였으며, 탱크 압력은 14 Kg/cm<sup>2</sup>, 22 Kg/cm<sup>2</sup>, 탱크 온도는 25℃로 설정하여 폭발온도에 따른 폭발량과 Flashing mass를 등온팽창 모델로부터 계산하여 예측하였다.

Fig. 3은 상이한 Propane 용기압력과 n-Butane 용기압력에서 폭발온도에 따른 폭발량 변화를 BLEVE ESTIMATOR에 의해 나타낸 것으로, 폭발온도가 증가함에 따라 폭발량은 지수함수로 증가하였다. 과열한계 온도까지는 완만한 상승을 보였으나, 그 이상에서 급격히 상승함을 알 수 있다. Propane과 n-Butane의 경우 과열한계 온도는 각각 330.97 K와 380.55 K로 나타났다.

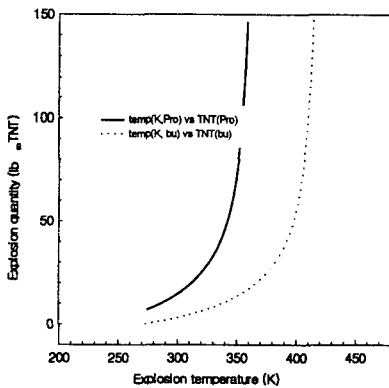


Fig. 3. Explosion quantity versus explosion temperature for the different vessel containment by BLEVE ESTIMATOR at 14 Kg/cm<sup>2</sup>.

Propane과 n-Butane을 14 Kg/cm<sup>2</sup>와 22 Kg/cm<sup>2</sup>의 조건에서 폭발온도에 따른 폭발량 변화를 BLEVE ESTIMATOR에 의해 계산하였는데 폭발온도가 증가함에 따라 폭발량은 증가하였고, Propane의 경우가 n-Butane의 경우

보다 폭발량이 많음을 알 수 있었다. 이는 그 물질의 과열한계 온도에 영향을 받는 것으로 판단되며, Reid의 이론에 부합된다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 압력 14 Kg/cm<sup>2</sup>에서 폭발온도에 따른 액상의 Flashing mass의 변화를 나타낸 것으로 폭발온도에 따라 Flashing mass가 증가하였다.

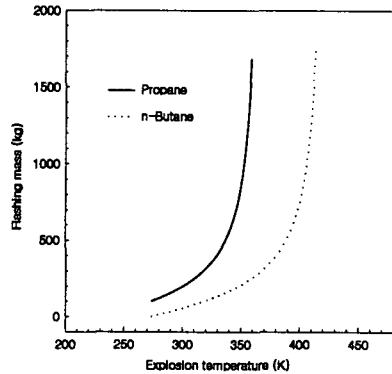


Fig. 4. Flashing mass versus explosion temperature for the different vessel containment by BLEVE ESTIMATOR at 14 Kg/cm<sup>2</sup>.

본 연구에서 Propane, n-Butane에 대하여 폭발온도에 따른 폭발량과 Flashing mass의 변화는 BTX에 대하여 예측한 결과[10]와 같은 경향을 나타내었다.

### 3.2. 사고사례 분석

사고사례는 1998년 9월 11일 경기도 부천시 에 위치한 LPG 충전소에서 발생한 BLEVE 사고를 모델로 하였다.

탱크로리 폭발 후 폭발압력으로 인하여 화염이 상승하면서 버섯모양의 화구를 형성하였으며 Propane 탱크로리가 폭발하여 3.7m 정도 길이의 탱크가 33도 방향으로 비산하면서 주유시설대 지붕을 뚫고 3층 건물 벽에 충돌하였다. Butane 탱크는 1.5m ~ 2.8m 길이로 절단된 후 차도를 넘어 60m 떨어진 곳까지 날아갔다. 사고 후 지하탱크에 남아 있는 가스는 약 2일간 계속하여 연소되었다.

가스폭발사고의 위험평가를 위한 조건을 Table 1에 나타내었다. Propane 4 ton의 경우,

용기용량 35 m<sup>3</sup>, 용기온도 59℃, 용기압력 18 Kg/cm<sup>2</sup> 조건에서 거리에 따른 Overpressure 변화를 BLEVE ESTIMATOR와 SAFER에 의한 계산 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 약 70 m 거리 이내에서는 SAFER에 의한 계산치가 BLEVE ESTIMATOR보다 Overpressure가 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Condition of risk assessment.

	Propane	n-Butane
Vessel volume	35m <sup>3</sup>	28m <sup>3</sup>
Vessel internal pressure	9.2 Kg/cm <sup>2</sup> at 25℃	2.1 Kg/cm <sup>2</sup> at 25℃
Design pressure	18 Kg/cm <sup>2</sup>	18 Kg/cm <sup>2</sup>
Vessel thickness	9.5 mm	9.5 mm
Temperature range	-10℃ ~ 40℃	-10℃ ~ 40℃
Relative humidity	65%	65%
Ambient temperature	25℃	25℃
Vessel temperature	25, 59, 85℃	25, 96, 134℃
Liquid ratio	10, 20, 40, 60, 80, 100%	10, 20, 40, 60, 80, 100%
Vessel weight	1, 10, 20 ton	1, 10, 20 ton

n-Butane 4 ton의 경우, 용기용량 28 m<sup>3</sup>, 온도 96℃, 압력 18 Kg/cm<sup>2</sup> 조건에서 Overpressure 변화 결과를 BLEVE ESTIMATOR와 SAFER에 의해 구한 것을 Fig. 6에 나타내었는데, 50 m 거리 이내에서는 Overpressure의 차이가 없는 것으로 나타났다.

용기온도를 달리하였을 때 거리에 따른 Overpressure 변화를 SAFER로 구하여 Fig. 7에 나타내었는데, 거리에 따른 Overpressure는 감소하였고, 용기온도가 높을수록 Overpressure가 큼을 알 수 있었다.

용기압력 18 Kg/cm<sup>2</sup>에서 Propane과 n-Butane을 각각 달리하였을 때 폭발원으로부터 거리에 따른 Overpressure를 BLEVE ESTIMATOR로 구하여 각각 Fig. 8 과 Fig. 9

에 나타내었다. 폭발원으로부터 거리가 멀수록 Overpressure는 감소하였고, Propane과 n-Butane의 양이 많을 수록 Overpressure가 큼을 알 수 있었다.

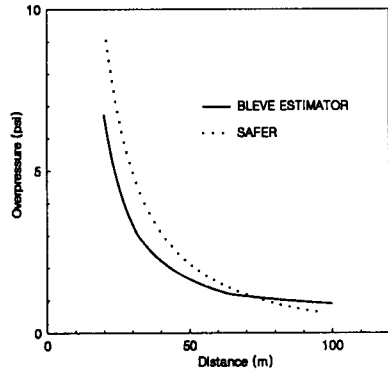


Fig. 5. Comparison of BLEVE ESTIMATOR and SAFER results of overpressure variation for 35 m<sup>3</sup>, 59℃, 18 Kg/cm<sup>2</sup> at 4 ton of propane.

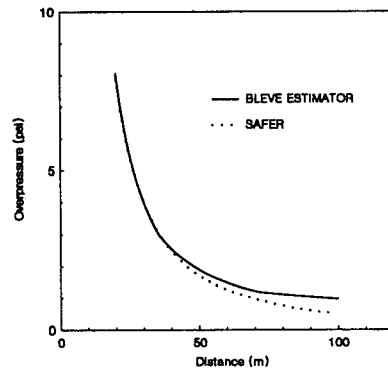


Fig. 6. Comparison of BLEVE ESTIMATOR and SAFER results of overpressure variation for 28 m<sup>3</sup>, 96℃, and 18 Kg/cm<sup>2</sup> at 4 ton of n-butane.

Propane 용기온도 59℃, 용기용량 35m<sup>3</sup>의 경우, 액체 충전비를 달리하였을 때 거리에 따른 Overpressure 변화를 SAFER에 의해 계산한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서와 같이 거리에 따른 Overpressure는 감소하였

고, 액체충전비가 높을수록 Overpressure는 상대적으로 큼을 알 수 있다. 발화원으로부터 거리가 17 m(10%)~23 m(100%)이내에서는 Overpressure가 급격히 감소하였으나, 그 이상의 거리에서는 완만히 감소하였다. 이때 Overpressure의 분기점은 11 psia 이었다.

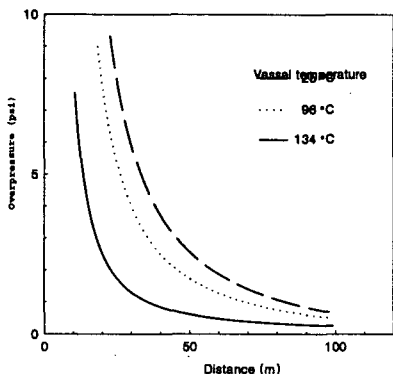


Fig. 7. Overpressure versus distance for different n-butane vessel temperature by SAFER.

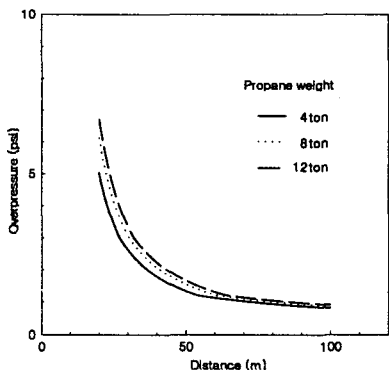


Fig. 8. Overpressure versus distance for different propane weight at 18 Kg/cm<sup>2</sup> by BLEVE ESTIMATOR.

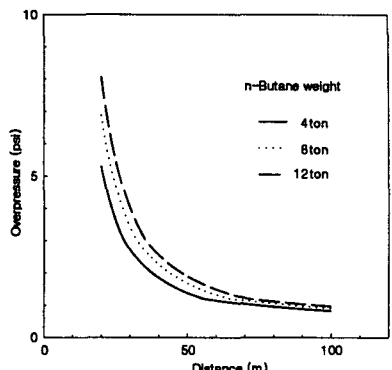


Fig. 9. Overpressure versus distance for different n-butane weight at 18 Kg/cm<sup>2</sup> by BLEVE ESTIMATOR.

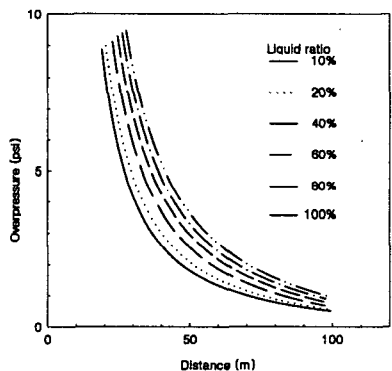


Fig. 10. Overpressure versus distance for different propane liquid ratio for 59°C, 35 m<sup>3</sup> by SAFER.

Fig. 11은 n-Butane 109°C, 28 m<sup>3</sup>의 경우, 액체충전비를 달리하였을 때 거리에 따른 Overpressure변화를 SAFER에 의해 구하였는데, Propane의 경우와 동일한 경향을 나타내고 있다.

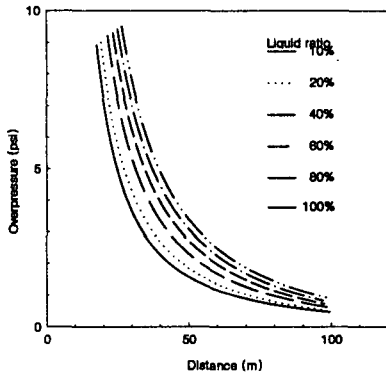


Fig. 11. Overpressure versus distance for different n-butane liquid ratio for 109°C, 28 m<sup>3</sup> by SAFER.

사고 지역의 실측 지도상에 폭발원으로부터 원주방향으로 Overpressure 분포를 Fig. 12에 나타내었는데, 원주방향으로부터 거리가 멀수록 Overpressure는 상대적으로 적어짐을 알 수 있다. 일반적으로 0.3 psi까지를 안전 허용치로서 설정하고 있는데 그림에서 내부 원주의 Overpressure는 2.3 psi로서 건물에 심각한 피해를 줄 수 있는 한계 허용치이며, 외부 원주는 1.0 psi로서 가옥을 부분적으로 파손시킬 수 있는 범위를 표시하고 있다.

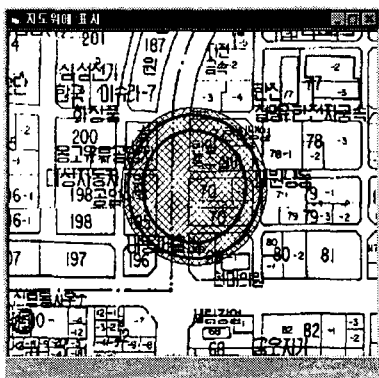


Fig. 12. Interesting distance on accident area.

#### 4. 결 론

BLEVE에 의한 피해를 예측하기 위하여 폭

발량과 Flashing mass를 계산하고, Propane과 n-Butane 액화가스의 폭발 사고사례를 모델로 위험을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BLEVE ESTIMATOR 프로그램을 이용하여 폭발량과 Flashing mass를 계산한 결과, 폭발온도가 증가함에 따라 폭발량과 Flashing mass는 지수함수로 증가하였고, 과열 한계 온도까지는 폭발량 상승률이 완만하였으나, 그 이상에서는 급격히 상승하였다.
2. 폭발온도에 따른 폭발량은 Propane이 n-Butane보다 많았는데, 이는 그 물질의 과열한계 온도에 영향을 받는 것으로 사료되며, 임계점과 과열한계 온도사이에서 급격히 증가하여 Reid 등의 이론과 일치함을 보였다.
3. 부친 가스폭발사례와 유사한 조건하에서 피해 결과를 예측하였는데, 폭발원으로부터 거리가 멀수록 Overpressure는 상대적으로 감소하였고, 용기온도, 압력, 액체 충전비 및 저장용량이 클수록 Overpressure는 상대적으로 큰 값을 나타내었다

#### 기 호 설 명

- $f$  : Fraction of liquid that flashes to vapor, (-)
- $H_{CTNT}$  : Heat of combustion of TNT,  $\approx 2000$ , (Btu/lb)
- $m_{l,f}$  : Mass of liquid present following the flashing process, (lb)
- $m_{l,i}$  : Mass of liquid present prior to the flashing process, (lb)
- $m_{v,f}$  : Mass of vapor present following the flashing process, (lb)
- $m_{v,i}$  : Mass of vapor present prior to the flashing process, (lb)
- $n_v$  : Number of moles of vapor that flashes, (lbmole)
- $P_0$  : Standard pressure, (psia)
- $P_1$  : Initial pressure of the compressed gas, (psia)
- $P_2$  : Final pressure of expanded gas, (psia)

$P_{sl}$  : Initial pressure of the superheated liquid, (psia)  
 $R$  : Gas constant, (Btu/lbmole R)  
 $R_s$  : Radius from the explosion source, (ft)  
 $T_0$  : Standard temperature, (R)  
 $T_1$  : Temperature of compressed gas, (R)  
 $T_{sl}$  : Temperature of the superheated liquid, (R)  
 $\Delta U$  : Change in the internal energy of the vessel contents, (Btu)  
 $u_{l,f}$  : Specific internal energy of the liquid following the flashing process, (Btu/lb)  
 $u_{l,i}$  : Specific internal energy of the liquid prior to the flashing process, (Btu/lb)  
 $u_{v,f}$  : Specific internal energy of the vapor following the flashing process, (Btu/lb)  
 $u_{v,i}$  : Specific internal energy of the liquid prior to the flashing process, (Btu/lb)  
 $V$  : Volume of compressed gas, (ft<sup>3</sup>)  
 $W$  : Equivalent mass of TNT, (lb)  
 $Z$  : Scaled distance, (ft/lb<sup>1/3</sup>)

"Prevention of Major Industrial Accident", ILO, Geneva, No. 174 (1993).  
 2. 韓國火災保險協會, "主要國家의 火災動向과 對策", KFPA (1997).  
 3. Reid, R. C., "Some Theories on Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions", Fire, March, 525-526 (1980).  
 4. Opschoor, I. G., "Investigation of the Explosive Vaporization of LNG Spreading on Water", TNO Central Technisch Ins., Ref. 74- 03386 (1974).  
 5. Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO), "Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials(Green Book)", TNO, Hague (1992).  
 6. JBF Associates Inc., "Consequence Analysis Methods", Process Safety Institute, Knoxville (1994).  
 7. Frank P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworth & Co., Ltd (1995).  
 8. CCPS, "Guideline for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs", CCPS of the AIChE (1994).  
 9. Baker, W. E., "Explosion Hazard and Evaluation", Oxford, N.Y. (1983).  
 10. 金炯錫, 金仁泰, 宋熙烈, 金仁元, "BLEVE 와 Fireball에 의한 피해 평가 프로그램의 개발", Theories and Applications of Chem. Eng., 4(1), 501-504 (1998).

참 고 문 헌

1. International Labor Organization(ILO),