

## 나프타분해플랜트의 부탄추출공정에서 부탄증기의 연속누출에 의한 증기운 폭발사고의 영향평가

The Consequence Analysis for Unconfined Vapor Cloud Explosion Accident by the Continuous Release of Butane Vapor in the Debutanizing Process of Naphtha Cracking Plant

손 민 일\*

Min-Il Son\*

이 헌 창\*

Hern-Chang Lee\*

장 서 일\*

Seo-Il Jang\*

김 태 옥\*

Tae-Ok Kim\*

### Abstract

The consequence analysis for the unconfined vapor cloud explosion(UVCE) accident by the continuous release of butane vapor was performed and effects of process parameters on consequences were analyzed in standard conditions.

For the case of continuous release(87.8 kg/s) of butane vapor at 8 m elevated height in the debutanizing process of the naphtha cracking plant operating at 877 kPa & 346.75 K, we found that combustion ranges of dispersed vapor estimated by HMP model were 11.2~120.2 m and overpressures estimated by TNT equivalency model at 200 m were about 37.35~55.1 kPa. Also, overpressures estimated by Model UVCE I based on advective travel time to  $X_{LFL}$  were smaller than those estimated by Model UVCE II based on real travel time between  $X_{UFL}$  and  $X_{LFL}$ . At the same time, damage intensities at 200 m and effect ranges by overpressure could be predicted. Furthermore, simulation results showed that effects of operating pressures on consequences were larger than those of operating temperatures and results of accidents were increased with increasing operating pressures. At this time, sensitivities of overpressures for UVCE accident by the continuous release were about 5 kPa/atm.

\* 명지대학교 공과대학 세라믹화학공학부

## 1. 서 론

최근 화학공장에서는 설비의 노후화 및 대형화와 유해·위험성 물질의 취급량 증가 등으로 인하여 화재, 폭발 및 독성물질의 누출과 같은 중대산업사고가 자주 발생하고 있다. 특히, 폭발 중에서 증기운 폭발은 누출된 가연성 증기가 분산된 후 점화되어 발생하는 것으로 대형 사고를 일으킬 수 있으며[11], 용기 또는 파이프와 건물 등과 같이 밀폐된 공간에서 발생하는 밀폐공간 증기운 폭발과 개방된 공간에서 일어나는 개방공간 증기운 폭발(unconfined vapor cloud explosion, UVCE)로 구분된다. 이때 폭발사고의 영향을 평가하는데 가장 많이 사용되는 이론은 TNT 당량모델(TNT Equivalency Model)로 이 모델은 1969년에 미국 해군과 공군에서 최초로 개발되었다. TNT 당량모델은 누출된 가연성 물질의 연소열을 산출하고 이 연소에너지와 동등한 폭발에너지를 갖는 TNT질량과 수율로 환산하여 폭발지점으로부터 일정한 거리에서 과압을 산출하는 방법으로 사용이 편리하여 현재까지도 널리 사용되고 있다.

정량적 위험성 평가방법 중의 하나인 사고영향 분석은 공정상에 있는 화학물질의 누출을 가정하여 화재, 폭발, 독성물질의 분산 등으로 인하여 발생하는 복사열, 과압, 독성 등의 영향을 평가하는 것으로, 이때 사용되는 모델로는 크게 누출원모델, 분산모델, 영향모델 등이 있다[3,4,13]. 특히, 사고영향을 평가하는 경우에는 사고 당시의 공정조건, 대기 및 환경조건, 안전장치의 상태 등과 같은 사고결과에 영향을 미치는 매개변수들을 고려하여야 한다. 이 중에서 분산모델은 대기중에 누출된 유해·위험성 물질의 분산정도를 산출하기 위한 이론으로 가연성 물질의 경우에 메탄, 에틸렌 등과 같은 일부 물질을 제외하면 대부분 heavy 가스 분산모델이 사용되고 있으며[2,11], 지금까지 제시된 모델로는 Britter와 McQuaid[2]가 제시한 BM모델과 Hoot, Meroney와 Peterka [10]가 제시한 HMP모델, 네덜란드 TNO연구소에서 제시한 TNO모델, 그리고 DIGADIS모델, SLAP모델 등이 있다[9,14]. 현재 heavy 가스의 경우 가장 많이 사용되는 모델은 입력하는 매개변수가 상대적으로 단순한 지표면 누출의 BM모델과 지상 누출의 HMP모델이다.

본 연구는 나프타분해공장에 있는 부탄추출공정에서 부탄증기가 연속적으로 일정한 높이에서 누출되는 경우에 대하여 분산모델 중에서 HMP모델을 사용하여 개방공간 증기운 폭발의 사고결과에 대한 영향평가를 실제 공정에 대하여 수행하고, 이를 바탕으로 사고결과에 미치는 공정변수들의 영향을 해석하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 분산모델

가연성 증기가 연속적으로 누출되는 경우에 식 (1)에 의해 산출한 Richardson수,  $Ri_0$ 가 0.003보다 클 때 heavy 가스 분산모델을 적용한다[2,13].

$$Ri_o = \frac{g(\rho_{rel} - \rho_a) \dot{V}}{\rho_a U_{10}^3 d_s} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $\rho_{rel}$ 과  $\dot{V}$ 는 누출물질의 밀도( $kg/m^3$ )와 부피유속( $m^3/s$ ),  $U_{10}$ 은 10 m의 누출높이에서 바람속도( $m/s$ ),  $\rho_a$ 는 공기 밀도( $kg/m^3$ ), 그리고  $d_s$ 는 누출공의 직경( $m$ )이다.

Heavy 가스가 지면으로부터 일정한 높이에서 누출되는 경우에는 Hoot 등이 제시한 HMP모델을 주로 사용하는데 누출된 증기가 플럼(plume)을 형성하고 그 플럼이 지면에 도달하게 되는 거리,  $X_{TD}(m)$ 와 그때의 농도,  $C_{TD}(kg/m^3)$ 와 ppm농도,  $C_{TD,ppm}$ , 그리고 하강한 증기가 안정된 흐름을 갖기 위한 임계조건이 형성되는 거리,  $X_c$ 는 식 (2)~식 (5)와 같이 표시된다[10].

$$X_{TD} = X_m + 0.56d_s \left\{ \frac{U}{\left[gd_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_a}\right)\right]^{1/2}} \right\} \left(\frac{U}{v}\right)^{1/2} \left\{ \left(\frac{\Delta h}{d_s}\right)^3 \left[2 + \frac{H_s}{\Delta h}\right]^3 - 1 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{TD} = 3.1 \left(\frac{\dot{V}\rho_{rel}}{Ud_s^2}\right) \left(\frac{H_s + 2\Delta h}{d_s}\right)^{-1.95} \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{TD,ppm} = C_{TD} \left(\frac{RT_a \times 10^6}{MP_a}\right) \dots\dots\dots (4)$$

$$X_c = X_{TD} \left(\frac{5,000}{C_{TD,ppm}}\right)^{-1.538} \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $X_m$ 은 플럼이 최대로 상승한 지점까지의 수평거리( $m$ ),  $U$ 는 누출지점에서 바람속도( $m/s$ ),  $v$ 는 누출물질의 출구속도( $m/s$ ),  $\Delta h$ 는 플럼이 최대로 상승하는 높이( $m$ ),  $H_s$ 는 누출높이( $m$ ),  $R$ 은 기체상수( $J/kmol \cdot K$ ),  $T_a$ 는 대기온도( $K$ ),  $Pa$ 는 대기압( $Pa$ ),  $M$ 은 분자량( $kg/kmol$ )이다[10].

산출하고자 하는 관심거리,  $X(m)$ 에서 누출물질의 농도,  $C(kg/m^3)$ 는  $X < X_c$ 인 경우에는 식 (6)으로부터, 그리고  $X > X_c$ 인 경우에는 식 (7)로부터 각각 산출할 수 있으며 일반적으로  $X_{TD}$ 가  $X_c$ 보다 큰 경우에는  $X_c$ 가  $X_{TD}$ 와 동일하다고 가정한다[10].

$$C = C_{TD} \left(\frac{X}{X_{TD}}\right)^{-0.65} \dots\dots\dots (6)$$

$$C = C_{TD} \left(\frac{X_c}{X_{TD}}\right)^{-0.65} \left(\frac{X}{X_c}\right)^{-1.7} \dots\dots\dots (7)$$

특히 식 (2)와 식 (3)에서  $\Delta h(m)$ 는 식 (8) 및 식 (9)에 의해 산출한 값 중에서 적은 값을 사용한다[10,13].

$$\Delta h = 1.32d_s \left[ \frac{v}{U} \right]^{1/3} \left[ \frac{\rho_{rel}}{\rho_a} \right]^{1/3} \left\{ \frac{v}{\left[ gd_s \left( \frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \right\}^{2/3} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta h = 2.96 \times \frac{vd_s}{\left[ gd_s \left( \frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \dots\dots\dots (9)$$

또한 플럼이 최대로 상승한 지점에서의 농도,  $C_m(\text{kg/m}^3)$ 과 플럼이 최대로 상승하는 지점까지의 바람방향 거리,  $X_m$ 은 각각 식 (10)과 식 (11)에 의해 산출할 수 있다.

$$C_m = 2.15 \left( \frac{\dot{V}\rho_{rel}}{Ud_s^2} \right) \left( \frac{\Delta h}{d_s} \right)^{-1.85} \dots\dots\dots (10)$$

$$X_m = d_s \left\{ \frac{v}{\left[ gd_s \left( \frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \right\}^2 \left\{ \frac{U}{v} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

누출물질의 대기분산에 영향을 미치는 인자들은 여러 가지가 있으나 가장 중요한 인자는 바람속도로[8] 누출된 위치에서의 실제 속도를 사용하는 것이 가장 정확한 방법이나 산출하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 10 m에서 측정된 바람속도, 즉  $U_{10}(\text{m/s})$ 을 기준으로 식 (12)에 의해 산출한다.

$$U = \left( \frac{H_s}{H_R} \right)^{f_s} U_{10} \dots\dots\dots (12)$$

여기서  $H_R$ 은 기준높이인 10 m이고 대기안정도(atmospheric stability),  $f_s$ 의 값은 문헌 [6]에 수록되어 있다.

연속누출과 순간누출을 구분하는 방법은 총 누출된 시간과 누출기체의 이동시간을 비교하여 임의의 지점까지 이동한 시간,  $t_r(\text{s})$ 이 누출된 시간,  $t_d(\text{s})$ 보다 큰 경우에 연속누출로 판정하며 이때 이동시간은 식 (13)에 의해 산출할 수 있다[1,3,13].

$$t_r = \frac{2X_r}{U} \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $X_r$ 은 이동거리(m)이다.

파이프에서 누출되는 기체의 밀도는 파이프내의 압력에 따라 누출온도가 변하기 때문에 일반적으로 파이프내의 압력이 5 기압보다 낮은 경우에는 누출온도가 파이프내 물질의 온도와 같고, 5 기압보다 큰 경우에는 등엔탈피 팽창으로 가정하여 누출되는 기체의 밀도를 산출한다[4].

## 2.2 개방공간 증기운 폭발모델

누출된 물질이 개방공간에서 공기와 혼합되어 형성된 증기운이 점화되는 경우에 발생하는 개방공간 증기운 폭발의 영향을 평가하기 위해 제시된 모델 중에서 가장 널리 사용되고 있는 모델이 TNT 당량모델이며 폭발에 의해 방출되는 에너지를 TNT 당량, W(kg)로 나타내면 식 (14)와 같다[5].

$$W = \frac{\eta M_w H_c}{H_{c_{TNT}}} \dots\dots\dots (14)$$

여기서 Hc는 누출물질의 연소열(kW/kg), η는 폭발계수(-), HcTNT는 TNT의 연소열로 2,000 Btu/lbm(4680 kJ/kg)를 사용한다[11]. 그리고 폭발지역내에 존재하는 증기의 질량, Mw는 식 (15)에 의해 산출할 수 있으며 파이프에서 초기 연속누출량, Q는 음속 흐름인 경우에 식 (16)에 의해 산출할 수 있다[4,12].

$$M_w = t_r Q \dots\dots\dots (15)$$

$$Q = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma M}{RT_s} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}} \dots\dots\dots (16)$$

여기서 Cd는 누출계수(-), A는 누출공의 단면적(m<sup>2</sup>), Ps는 공정압력(Pa), γ는 열용량(-), Ts는 조업온도(K)이다.

따라서 식 (14)에 의해 산출된 TNT 당량을 사용하여 식 (17)에 의해 환산거리, Z(m)를 산출하고 문헌[4,12]에 의한 실험자료에 의해 관심거리에서의 과압(kPa)을 산출할 수 있다.

$$Z = \frac{X}{W^{1/3}} \dots\dots\dots (17)$$

## 3. 매개변수 산출

### 3.1 누출 시나리오

본 연구에서 사고영향 평가를 수행한 나프타분해공장은 원유를 상압증류하여 얻어진 나프타를 원료로 사용하여 내부온도가 820℃인 열분해탑에서 열분해한 다음에 가열, 냉각, 압축공정을 거쳐 1차로 수소를 분리한다. 그리고 디메타나이저(demethanizer)에서 C1성분을 분리하고 디에타나이저(deethanizer) 및 디프로파나이저(depropanizer)에서 C2와 C3성분을 각각 분리하며 C4이상의 성분은 디부타나이저(debutanizer)로 공급된다.

부탄증기의 누출사고가 발생한다고 가정한 부탄추출공정의 전형적인 공정 및 배관 계장도는 Fig. 1에 나타내었다.

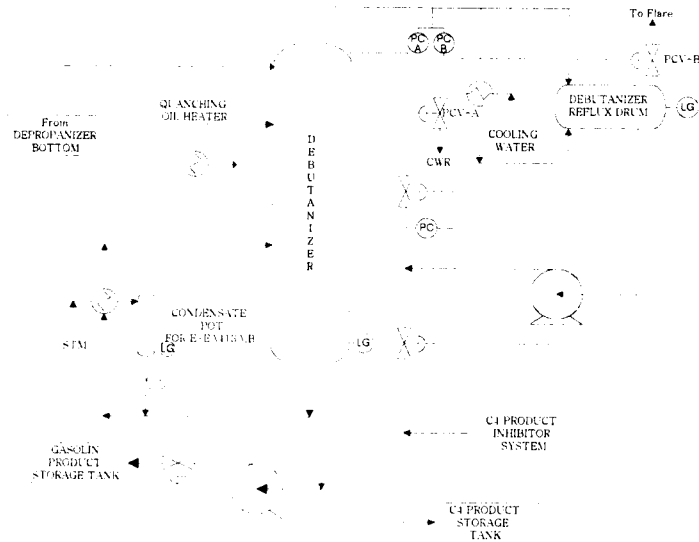


Fig. 1. Typical debutanizing process in the naphtha cracking plant.

Fig. 1과 같이 디프로파나이즈의 하부 생성물인 C<sub>4</sub>이상의 성분들은 펌프에 의해 액체상태로 디부타나이즈에 공급되고 346.75 K와 6.7 atm의 조업조건에서 분별증류되어 C<sub>5</sub>이상의 성분들은 디부타나이즈의 하부로 나오고 거의 순수한 C<sub>4</sub>증기는 상부로 나온다. 그리고 C<sub>4</sub>증기는 응축기를 통과하면서 액상으로 전환되어 환류드럼(reflux drum)에 저장한 후 불순물(C<sub>5</sub>이상의 성분)은 펌프에 의해 디부타나이즈로 재공급되고, 추출된 C<sub>4</sub>성분은 다른 공정(주로 BTX공정)에서 얻어진 C<sub>4</sub>성분과 함께 부탄 저장탱크로 공급된다. 이때 배관내의 압력을 제어하기 위하여 압력조절기(PC-A,B)가 설치되어 있으며 컨트롤 밸브 A는 응축기의 냉각수 공급라인에 흐르는 냉각수를 조절하기 위하여, 그리고 컨트롤 밸브 B는 플래어스택으로 압력을 방출하기 위하여 각각 설치되어 있다.

따라서 디부타나이즈에 대한 정성적 위험평가 방법인 HAZOP을 수행한 결과, 환류드럼으로 공급되는 배관에 설치된 압력조절기 B에 오염물질이 침착되어 정상적인 성능을 발휘하지 못하여 이상압력이 상승하는 경우에 증기를 플래어스택으로 방출하기 위해 설치한 컨트롤 밸브가 작동하지 않아서 배관 내부의 압력이 9.7 기압으로 상승하게 된다고 가정할 수 있다. 따라서 추출된 부탄을 부타나이즈 환류드럼으로 공급하기 위한 배관이 디부타나이즈에 용접된 연약부분에서 누출공이 발생하여 부탄증기의 누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고를 예상할 수 있었다.

### 3.2 매개변수의 산출

본 연구에서는 디부타나이즈 상부에서부터 환류드럼 전단과 응축기까지 설치된 파이프내에는 부탄증기만이 존재하고 누출로 인한 파이프 내부에 있는 주 흐름의 압력

변화는 무시할 수 있으며, 부탄증기는 누출후에도 상변화가 일어나지 않는다고 가정하였다. 또한 누출공의 직경은 전체 관직경(18 in)의 50%인 0.2286 m이고 10 m의 기준높이에서 바람속도는 1 m/s, 누출지점의 환경조건은 시골(rural)과 대기안정도 B의 조건(0.07)[7], 대기온도는 298K로 각각 가정하였다. 또한 표준조건인 누출시간 10분과 관심거리 200 m에서 증기의 이동시간을 식 (13)에 의해 산출한 결과(406.3 초)로 연속 누출임을 확인하였고, 식 (1)에 의해 산출한  $Ri_0$ 는 1404.96으로 0.003보다 크므로 HMP 모델을 적용할 수 있었다. 이때 이상기체 상태방정식으로 산출한 증기의 밀도는  $2.368 \text{ kg/m}^3$ 이었다

HMP모델을 사용하여 산출한  $X_c$ 와  $X_{TD}$ 의 값은 각각 724.569 m와 91.853 m로  $X_c$ 가 큰 값을 나타내어 식 (6)을 이용하여 부탄증기가 연소하한농도(1.8 %) 및 연소상한농도(8.4 %)에 도달하는 거리( $X_{LFL}$  및  $X_{UFL}$ )를 각각 산출하였다.

이상의 결과로 본 연구에서 설정한 기준조건에서 분산모델에 의해 산출된 매개변수들의 값을 Table 1에 나타내었다. 이때, 누출계수를 1로 가정하고 산출한 부탄증기의 누출속도는 87.765 kg/s이었다.

Table 1. Parameters calculated by the Dispersion Model.

Parameters		Results	Units
Wind speed at the release point		0.98450	m/s
Density		2.1232	$\text{kg/m}^3$
Plume rise		41.2286	m
Downwind distance to max. plume rise		25.331	m
Concentration at the point of max. plume rise		0.2457	$\text{kg/m}^3$
Downwind distance to plume touchdown		91.853	m
Concentration	plume touchdown point	0.04552	$\text{kg/m}^3$
	200(m)	0.02745	$\text{kg/m}^3$
Distance	UFL	11.2	m
	LFL	120.2	m

TNT 당량모델에 의한 개방공간 증기운 폭발사고의 영향을 다양한 방법에 의하여 평가하기 위하여 LFL에 도달한 시간을 기준으로 누출량을 산출한 모델 UVCE I와 LFL과 UFL에 도달한 시간을 기준으로 누출량을 산출한 모델 UVCE II로 구분하였다. 즉, 모델 UVCE I에서는 누출지점에서부터 연소하한농도의 거리( $X_{LFL}$ )까지 누출된 부탄증기가 수평으로 이동하는데 소요되는 시간과 누출물질의 질량유속으로부터 폭발에 참여한 부탄증기의 양을 계산하였다. 또한 모델 UVCE II에서는 연소상한거리와 연소하한거리를 이용하여 순수 연소범위의 거리를 이동하는 부탄증기의 이동시간과 연소량을 산출하였다. 그리고 각 모델에서 TNT 당량과 환산거리를 산출하고 관심거리에서 개방공간 증기운 폭발에 의해 받게 되는 과압을 산출하였다. 이때 연소범위 내에서는 부탄증기의 100%가 연소한다고 가정하고 폭발계수( $\eta$ )를 1로 가정하였으며 [3], 매개변수들의 계산결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Parameters calculated by the Model UVCEs.

Model	Advection time(s)	Quantities of release gas(kg)	Equivalent mass of TNT(kg)	Scaled distance(m)	Overpressure at 200 m(kPa)
UVCE I	122.1	10711	112968	4.14	37.35
UVCE II	-	19419.1	204813	3.393	55.097

#### 4. 사고결과의 영향평가 및 공정변수의 영향

누출된 부탄증기가 분산되어 기준조건으로 가정한 200 m지점에 도달할 때의 농도는 Table 1에서와 같이  $0.02745 \text{ kg/m}^3$ 로 연소하한 농도( $0.018 \times 2.368 = 0.042624 \text{ kg/m}^3$ )보다 적기 때문에 연소범위를 벗어났음을 알 수 있었다. 그러나 실제로 폭발이 가능한 범위는 누출지점에서 11.2~120.2 m로 나타나 디부타나이지 상부 배관의 누출지점을 중심으로 반경 120.2 m이내의 지역은 1내지 2종의 방폭지역으로 구분하여 관리하여야 할 뿐만 아니라 적절한 안전상의 조치가 필요한 것으로 평가되었다.

개방공간 증기운 폭발에 의하여 200 m가 떨어진 거리에서 받게 되는 과압은 Table 2에서와 같이 약 37.35~55.1 kPa를 나타내었다. 또한 연소하한농도와 연소상한농도의 범위에서 과압을 산출한 모델 UVCE II은 누출지점에서부터 연소하한농도를 유지하는 범위에서 산출한 모델 UVCE I의 경우보다 과압이 다소 크게 나타났었는데 이것은 모델 UVCE I에서는 누출증기가 직선으로 이동한다고 가정하여 경험적인 자료를 사용한 모델 UVCE II보다 산출거리는 크지만 산출시간이 짧기 때문으로 생각된다.

일반적으로 폭발에 의해 발생하는 과압이 약 7 kPa정도에서는 사람이 넘어지거나 구조물의 부분적인 붕괴를 일으키게 되고 약 38 kPa에서는 사람의 고막이 파열되거나 구조물 전체가 파괴되며 또한 약 3톤정도의 중량을 가지는 설비들이 충격을 받거나 이동될 수 있다고 보고되어 있다[12].

Table 3에서와 같이 87.8 kg/s의 속도로 부탄증기가 연속적으로 누출되는 경우에는 과압에 의한 피해가 3~4 km까지 존재함을 알 수 있으며 이를 바탕으로 누출지점으로부터 일정한 거리에 있는 구조물의 종류에 따라 이들의 피해정도를 산출할 수 있었다.

Table 3. Effect analysis of overpressure by the Model UVCEs.

Model	Glass breakage	Partial collapse of walls & roofs of houses	Flameless steel panel building demolished & rupture of oil storage tank	Nearly complete destruction of houses	Probable total destruction of building
UVCE I	3072 m	370.5 m	277.4 m	190.1 m	146.2 m
UVCE II	3746 m	451.7 m	338.2 m	231.8 m	178.2 m



증기운 폭발사고의 사고결과에 미치는 공정변수, 즉 조업압력과 온도의 영향은 Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같이 두 모델에서 조업온도의 증가에 따라 과압이 다소 증가하였지만 그 영향이 매우 적음을 알 수 있다. 그러나 조업압력의 영향은 압력이 증가할수록 누출량이 증가할 뿐만 아니라 모델 UVCE I의 경우는  $X_{LFL}$ 에 도달되는 시간의 증가로, 그리고 모델 UVCE II의 경우는  $X_{UFL}$ 의 증가보다  $X_{LFL}$ 의 증가가 커서  $X_{LFL}$ 과  $X_{UFL}$ 에 도달되는 시간의 차이가 증가되어 과압이 상당히 증가하고 있다. 이때, 1기압의 압력변화에 대하여 과압의 민감도는 약 5 kPa이었다.

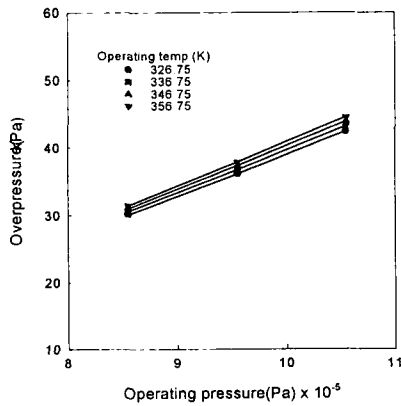


Fig. 2 Effect of operating pressures and temperatures on overpressures for the Model UVCE I.

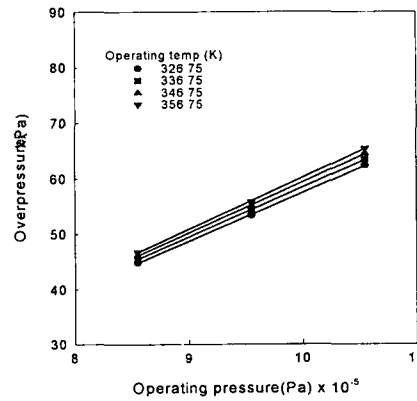


Fig. 3 Effect of operating pressures and temperatures on overpressures for the Model UVCE II.

이상의 결과와 같이 연속누출 사고의 경우에 사고결과에 미치는 공정변수인 압력과 온도의 영향은 매개변수의 산출방법에 따라 다소 차이가 있었으며, 또한 누출공의 크기에 따라 누출량, 그리고 바람속도와 대기의 환경조건에 따라 증기의 분산이 변화할 뿐만 아니라 누출지점에서부터 관심거리에 따라 피해정도가 크게 변화하므로[8] 이들 대기조건과 환경조건 등에 따라 각 사고결과에 미치는 공정변수의 영향과 민감도는 다소 차이가 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

877 kPa과 346.75 K의 공정조건으로 운전되는 나프타분해공장의 부탄추출공정에서 부탄증기가 87.8 kg/s속도로 8 m 높이의 파이프에서 누출되는 경우에 본 연구에서 설정한 대기 및 환경조건에서 HMP 분산모델에 의해 산출한 폭발범위는 11.2~120.2 m이었으며, TNT 당량모델에 의해 200 m거리에서 산출한 과압은 약 37.35~55.1 kPa이었다. 이때 연소하한농도를 갖는 거리( $X_{LFL}$ )에 도달되는 시간을 기준(모델 UVCE I)으로 산출한 과압은 연소상한농도를 갖는 거리( $X_{UFL}$ )와  $X_{LFL}$ 를 기준(모델 UVCE II)으로 산출한 경우보다 다소 적은 값을 나타내었다. 또한 200 m의 거리에 있는 공정설비들이 과압에 의해 받는 피해정도와 피해정도에 따른 피해범위를 예측할 수 있었다.

사고결과에 미치는 공정변수의 영향을 해석한 결과, 조업압력이 조업온도보다 사고 결과, 즉 과압에 크게 영향을 미치며 압력이 증가할수록 과압이 증가하였다. 이때 1기압의 압력변화에 대하여 과압의 민감도는 약 5 kPa이었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Blewitt, D. N., Chan, S. T., and Rodean, H. C., "Conduct of Anhydrous Hydro-fluoric Acid Spill Experiments", *International Conference on Vapor Cloud Modeling*, Center for Chemical Process Safety of AIChE, Cambridge Univ., Massachusetts pp.1~38, 1987.
- [2] Britter, R. E., and McQuaid, J., "Workbook on the Dispersion of Dense Gases", Health and Safety Executive(HSE), No. 17, U. K., 1988.
- [3] Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", Center for Chemical Process Safety of AIChE, New York, 1989.
- [4] Crowl, D. A. and Louvar, J. F., "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", Prentice-Hall Inc., New York, 1990.
- [5] Crowley, W. K., "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.
- [6] Grelecki, C., "Consequence Assessment of Flammable Releases", Safety Analysis and Risk Assessment for Chemical Process Industry Practitioners Course 3:Consequence Assessment and Mitigation, American Institute Chemical Engineer(AIChE), New York, 1992.
- [7] Guban, K., "Unconfined Vapor Cloud Explosion", Gulf Publishing Co., Houston, 1979.
- [8] Ham, B. H., "The Consequence Analysis for Xylene Vapor Release Accident and the Sensitivity Analysis of Parameters affecting the Consequence", Ph.D. Dissertation, Myongji University, 1996.
- [9] Havens, J. A. and Spicer, T. O., "LNG Vapor Dispersion Prediction with the DEGADIS Dense Gas Dispersion Model", GRI-89/0242(NTIS PB 91-220111), Gas Research Institute, Arkansas, Sept., 1990.
- [10] Hoot, T. G., Meroney, R. N., and Peterka, J. A., "Wind Tunnel Tests of Negatively Buoyant Plumes", EPA-650/3-74-003(NTIS PB 231590), The Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory of Colorado State University and Environmental Protection Agency, Oct., 1973.
- [11] Industrial Risk Insurers(IRI), "Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide", IRI Information, IM 8011. 1992.

- [12] Lees, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, Butterworths-Heinemann Ltd., Vol. 2, London and Boston, 1991.
- [13] Process Safety Institute and JBF Associates Inc., "Consequence Assessment and Mitigation", American Institute of Chemical Engineer(AIChE), New York, 1994.
- [14] Shaw, P. and Briscoe, F., "Vaporization of Spills of Hazardous Liquids on Land and Water", SRDR 100, United Kingdom Atomic Energy Authority, Warrington, May, 1978.

### 저 자 소 개

- 손민일 : 명지대학교 대학원 화학공학과 졸업(공학박사), 현재 명지대학교 세라믹화학공학부 겸임교수, 관심분야는 환경보건 및 화학공정의 위험성 평가
- 이현창 : 명지대학교 세라믹화학공학부 박사과정 재학, 관심분야는 화학공정의 안전 및 전문가 시스템 개발
- 장서일 : 명지대학교 세라믹화학공학부 박사과정 수료, 관심분야는 안전관리 및 화학공정의 위험성 평가
- 김태욱 : 현재 명지대학교 세라믹화학공학부 정교수, 명지대학교 교육지원처장 및 가스안전센터 소장, 관심분야는 가스안전 및 화학공정의 위험성 평가