

가-액흐름 연속누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고를 중심으로 중·소규모 사업장을 위한 사고 영향평가 방법

장서일 · 이현창 · 조지훈* · 김태옥†

명지대학교 공과대학 화학공학과

*한국산업안전공단 산업안전교육원

(2002. 10. 30. 접수 / 2003. 2. 7. 채택)

The Method of Consequence Analysis of the Unconfined Vapor Cloud Explosion Accident by the Continuous Release of Gas-Liquid Flow for the Small and Medium Size Enterprises(SMS)

Seo-Il Jang · Hern-Chang Lee · Ji-Hoon Cho* · Tae-Ok Kim†

Department of Chemical Engineering, Myongji University

*Industrial Safety Training Institute, Korea Occupational Safety & Health Agency

(Received October 30, 2002 / Accepted February 7, 2003)

Abstract : For the unconfined vapor cloud explosion(UVCE) accident by the continuous release of gas-liquid flow of various saturated liquids in a vessel at ground level, overpressures were estimated by TNT equivalency model with two estimation methods, such as UVCE I model based on a constant release time and UVCE II model based on a real travel time of vapor by dispersion and analyzed with various release conditions. As a simulation result, the simple, easy, and correct method of evaluation of consequences of the UVCE accident was proposed by using consequences of UVCE I model and correlation equations for differences of overpressures between UVCE models, so that this evaluation method could be used easily in the small and medium size enterprises without using the dispersion model.

Key Words : consequence analysis, unconfined vapor cloud explosion, two phase, SMS

1. 서 론

화학공장은 유해 또는 위험성 화학물질을 대량으로 저장하거나 취급하고 있을 뿐만 아니라 설비의 노후화 등으로 인하여 화재, 폭발, 독성물질 누출 등과 같은 중대산업사고, 즉 사고의 영향이 공장내부에만 국한되지 않고 인근지역의 주민과 환경에까지 치명적인 영향을 미치는 사고의 발생 가능성이 매우 높다^{1,2)}.

따라서 국제노동기구(ILO)와 미국, 영국 등의 선진국에서는 화학설비에 잠재하고 있는 사고의 위험성을 사전에 발굴·제거하기 위하여 공정 위험성 평가를 주요 내용으로 하는 공정안전관리제도를 시

행하고 있으며^{3,4)}, 우리나라에서도 1995년부터 이 제도를 도입하여 시행하고 있다.

공정 위험성 평가의 한 분야인 사고 영향평가(consequence analysis)는 중대산업사고로 인하여 예상되는 피해정도를 사전에 산출하기 위한 피해예측 기법^{1,2,5)}으로 다양한 방법들이 제시되었으나^{6,9)}, 대기업에 비해 자금과 전문인력 및 기술 등이 상대적으로 열악한 중·소규모 사업장에서는 사고 영향평가를 수행하는 것이 복잡하고 어려운 일로 인식되어 활성화되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 용기 내에 가압으로 저장되어 있는 액체가 지표면에서 가-액흐름으로 연속누출되어 개방공간 증기운 폭발사고가 발생하는 경우에 누출 조건에 따른 사고 영향평가를 실시한 전보¹⁰⁾에 이어, 여러 가지 사고영향 평가모델을 사용하여 사고결과

†To whom correspondence should be addressed.
kimto@mju.ac.kr

를 산출하고, 각 모델간의 상관관계를 비교·해석하여 중·소규모 사업장에서도 증기운 폭발사고의 영향평가를 손쉽게 수행할 수 있도록 단순화하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 누출원모델

대기압보다 높은 과압상태로 용기에 저장된 포화 액체가 대기 중에 가액흐름으로 비평형 누출될 때 초기누출속도, \dot{Q} [kg/s]는 Fauske¹¹⁾에 의해 제시된 식 (1)에 의해 산출할 수 있다.

$$\dot{Q} = \left(\frac{A \Delta H_v}{\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L}} \right) \left(\frac{g_c}{T_S C_{PL} N} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 A는 누출공의 면적[m²], ΔH_v 는 저장온도에서 누출물질의 증발잠열[kJ/kg], ρ_G 와 ρ_L 은 각각 저장온도와 압력에서 증기와 액체의 밀도[kg/m³], T_S 는 저장온도[K], C_{PL} 은 저장온도에서 액체의 비열[kJ/kg·K], g_c 는 전환인자[-], 그리고 N은 보정인자[-]로 식 (2)와 같다.

$$N = \frac{\Delta H_v^2}{2(P_S - P_a) \rho_L C_D^2 \left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right)^2 T_S C_{PL}} + \frac{L_p}{L_e} \quad (2)$$

여기서 C_D 는 누출계수[-], P_S 와 P_a 는 각각 저장온도에서 저장압력과 대기압[Pa], L_e 는 경험적인 상수(0.1 m), 그리고 L_p 는 용기의 두께[m]이다.

가압된 포화액체가 누출되어 기상으로 순간증발되는 분율은 Crowl와 Louvar⁵⁾가 제시한 식 (3)에 의해 산출할 수 있다.

$$f = 1 - \exp \left[- \frac{\overline{C_{PL}}}{\Delta H_v} (T_S - T_b) \right] \quad (3)$$

여기서 $\overline{C_{PL}}$ 는 저장온도와 표준 끓는점(T_b)의 평균온도에서 비열[kJ/kg·K]이고, $\overline{\Delta H_v}$ 는 평균온도에서 증발잠열[kJ/kg]이다.

2.2. 분산모델

용기로부터 가연성 또는 폭발성 증기가 연속으로 누출되는 경우에 식 (4)에 의해 산출한 Richardson

수, Ri_o 가 0.003보다 큰 경우에만 무거운(heavy) 가스 분산모델을 적용한다^{8,12)}.

$$Ri_o = \frac{g(\rho_{rel} - \rho_a) \dot{V}}{\rho_a U_{10}^3 d_S} \quad (4)$$

여기서 g는 중력가속도[m/s²], ρ_{rel} 과 \dot{V} 는 누출물질의 밀도[kg/m³]와 부피유속[m³/s], U_{10} 은 10 m 높이에서 바람속도[m/s], ρ_a 는 공기 밀도, 그리고 d_S 는 누출공의 직경[m]이다.

따라서 무거운 가스가 지표면에서 연속으로 누출되는 경우에 증기의 분산현상은 가장 일반적인 분산모델인 BM모델을 사용하여 관심거리에서 누출물질의 농도를 산출할 수 있다. 이때 연속누출과 순간누출을 구분하는 방법은 총 누출시간인 식 (5)에 의해 산출한 누출기체의 이동시간, t_r [s]보다 큰 경우에 연속누출로 판정한다^{2,13)}.

$$t_r = \frac{2X}{U} \quad (5)$$

여기서 X는 관심거리[m]이고, U는 누출지점에서 바람속도[m/s]이다.

2.3. 개방공간 증기운 폭발모델

개방공간 증기운 폭발(unconfined vapor cloud explosion, UVCE)의 영향을 평가하기 위하여 제시된 모델 중 가장 널리 사용되고 있는 TNT 당량모델에서 UVCE에 의해 방출되는 에너지, 즉 TNT 당량, W[kg]는 식 (6)과 같다¹⁴⁾.

$$W = \frac{\eta M \Delta H_c}{\Delta H_{cTNT}} \quad (6)$$

여기서 η 는 폭발계수[-], M은 증기의 총 누출량[kg], ΔH_c 는 증기의 연소열[kJ/kg], 그리고 H_{cTNT} 은 TNT의 연소열로 4680 kJ/kg을 사용한다¹⁵⁾.

따라서 식 (6)에 의해 산출된 TNT 당량을 사용하여 식 (7)에 의해 환산거리, Z[m]를 산출하고, 문헌^{5,16)}의 실험자료에 의해 관심거리에서 과압[kPa]을 산출할 수 있다.

$$Z = \frac{X}{W^{1/3}} \quad (7)$$

3. 매개변수 산출

여러 가지 누출물질과 누출조건에서 기-액흐름 누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고의 영향을 평가하기 위한 사고 시나리오는 외부 충격에 의해 저장용기의 표면에서 누출공이 발생하여 가압되어 있던 9가지의 가연성 포화액체가 일정한 속도로 2상(기-액)흐름으로 누출되고, 일정시간이 지난 후 증기운을 형성하여 UVCE가 발생하는 경우로 가정하였다. 그리고 2장에서 제시된 이론식을 토대로 Delphi 5.0 Visual Tool을 사용하여 작성한 컴퓨터 프로그램에 의해 사고결과를 산출하였다.

3.1. 누출물질과 누출조건

누출물질은 가압용기에서 대기 중에 기-액흐름으로 누출되어 UVCE가 발생할 가능성이 큰 9가지 물질을 선택하였으며, 물리·화학적 및 폭발 특성치는 Table 1에 나타내었다^{17,18)}.

또한 누출조건은 사고결과에 미치는 영향이 비교적 큰 누출공의 직경, 저장압력, 바람속도, 사고피해의 관심거리, 그리고 용기 두께로 하였으며, 이들의 표준조건과 변화범위는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical and physical properties and explosive limits of release materials

Material	ΔH_c [kJ/mol]	T_b [K]	LEL[%]	UFL[%]
n-Butane	2878.5	272.7	1.6	8.4
n-Pentane	3536.2	309.2	1.5	7.8
n-Hexane	4194.8	341.9	1.1	7.5
n-Heptane	4853.5	371.6	1.1	6.7
Benzene	3301.5	353.3	1.3	7.9
Toluene	3947.9	383.8	1.2	7.1
o-Xylene	4596.3	417.6	0.9	6.7
m-Xylene	4594.5	412.3	1.1	7.0
p-Xylene	4595.3	411.5	1.1	7.0

Table 2. Standard release conditions and simulation ranges of release conditions

Parameter	Hole diameter [m]	Storage pressure [atm]	Wind speed [m/s]	Interested distance [m]	Thickness [m]
Standard condition	0.2	5	3.0	200	0.07
Range	0.1 ~ 0.3	2 ~ 7	2.5 ~ 4.0	100 ~ 1000	0.06 ~ 0.09

3.2. 매개변수 산출

9가지 누출물질에 대하여 다양한 누출조건에서 초기누출속도와 증기화 분율, 그리고 증기의 누출속도를 식 (1)~(3)에 의해 산출하였다. 이때 대기온도와 누출계수는 각각 298 K와 1로 가정하였고, 증기 밀도는 이상기체법칙을 사용하여 산출하였다.

또한 각 누출물질에 대하여 주어진 누출조건에서 식 (4)에 의해 Richardson 수를 산출하고 0.003보다 큼을 확인하여 지표면 누출에 대한 무거운 가스 분산모델인 BM모델을 사용하여 연소하한농도와 연소상한농도에 도달하는 거리, 즉 X_{LFL} 과 X_{UFL} 를 각각 산출하였다.

UVCE에 의한 사고결과는 TNT 당량모델을 사용하여 각 누출물질과 누출조건에서 TNT 당량과 환산거리를 계산하고, 관심거리에서 과압을 실험자료⁵⁾로부터 산출하였다. 이때 증기의 총 누출량은 분산모델을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 2가지 방법으로 산출하였다. 즉, 분산모델을 사용하지 않고 일정한 시간동안 연속적으로 누출되는 경우로 가정한 UVCE I 모델에서는 누출시간을 CCPS²⁾에서 제시한 600초로 가정하고, 초기누출속도와 증발분율에 의해 총 누출량을 산출하였으며, 이때 폭발계수는 0.03을 사용하였다^{17,19)}. 그러나 UVCE I 모델은 바람의 분산을 고려하지 않았기 때문에 산출 방법은 간단하지만 정확하지는 않다.

비교적 정확한 산출방법인 UVCE II 모델, 즉 분산모델을 사용한 연속누출에서는 증기의 누출속도와 식 (5)에 의해 산출한 연소하한거리(X_{LFL})에서 연소상한거리(X_{UFL})까지 증기의 이동시간으로부터 증기의 총 누출량을 산출하였으며, 이때 연소범위 내에 있는 증기는 100%가 폭발된다고 가정하였다²⁾.

이상과 같은 방법으로 표준조건에서 산출된 대표적인 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Calculated parameters at standard conditions

Material	Total release rate [kg/s]	Flash fraction [-]	Gas release rate [kg/s]	X_{LFL} [m]	X_{UFL} [m]	Overpressure [kPa]	
						UVCE I	UVCE II
n-Butane	193.958	0.2691	52.193	138.342	56.287	3.233	5.221
n-Pentane	197.315	0.2533	49.972	130.730	53.594	3.468	5.450
n-Hexane	183.671	0.3068	56.346	153.714	54.672	3.934	6.872
n-Heptane	174.967	0.3508	61.375	151.792	57.381	4.347	7.434
Benzene	224.163	0.1931	43.285	141.383	52.555	3.163	5.286
Toluene	198.078	0.2598	51.462	148.878	56.622	3.684	6.248
o-Xylene	183.820	0.3170	58.275	161.669	55.001	4.154	7.485
m-Xylene	177.849	0.3212	57.121	152.835	56.455	4.117	7.104
p-Xylene	187.361	0.3096	58.005	154.170	56.945	4.145	7.178

4. 결과 및 고찰

화학공장에서 비교적 간단하게 사용할 수 있는 UVCE I 모델과 UVCE II 모델보다는 정확하지만 중·소규모 사업장에서 전문가가 아니면 사용하기 어려운 UVCE II 모델과의 상관관계를 해석하기 위하여 9종류의 누출물질들에 대하여 UVCE 모델간의 사고결과(과압) 차이에 미치는 누출조건들의 영향을 해석하고, UVCE 모델간의 상관성을 모사하였다.

4.1. 사고결과에 미치는 누출조건들의 영향

Fig. 1은 누출물질이 톨루엔인 경우에 다양한 UVCE 모델과 누출조건에서 사고결과(과압)와 UVCE

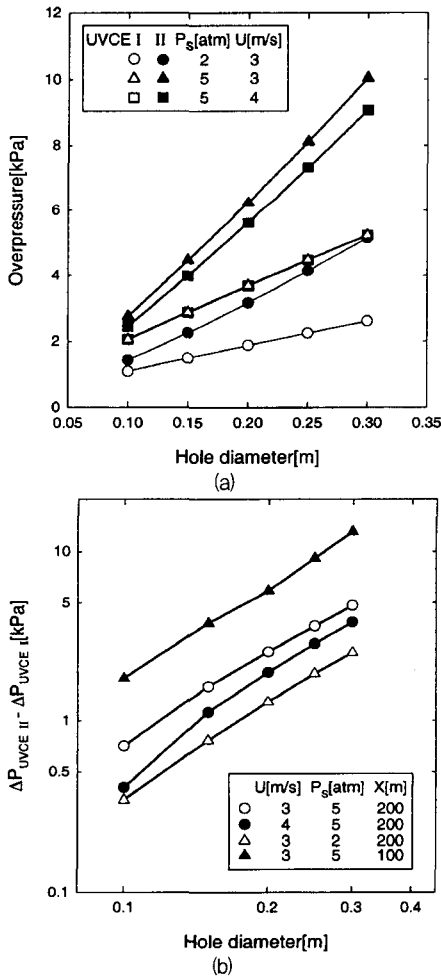


Fig. 1. Effects of hole diameters on overpressures and differences of overpressures between UVCE II model and UVCE I model for toluene.

모델간의 과압차이에 미치는 누출공의 크기영향을 나타낸 대표적인 그림이다. Fig. 1의 (a)와 같이 UVCE II 모델의 과압이 UVCE I 모델보다 크며, 누출공의 크기가 증가할수록 과압과 과압차이가 증가하고 있다. 이것은 연속누출의 경우 증기분산으로 폭발에 관여하는 증기량이 600초 동안 누출량으로 산출한 양보다 상당히 큼을 의미하며, 또한 누출공의 직경이 증가할수록 초기누출속도가 증가할 뿐만 아니라 UVCE II 모델에서는 증기분산에 의한 이동시간의 증가로 증기의 총 누출량이 UVCE I 모델보다 상대적으로 증가폭이 크기 때문이다.

Fig. 1의 (b)는 UVCE 모델간의 과압차이에 미치는 누출공의 크기영향을 로그좌표계에 나타낸 것으로 과압차이는 누출공의 크기함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 UVCE I, II 모델에서 과압 및 UVCE I, II 모델간의 과압차이는 누출공의 직경과 저장압력이 증가할수록 증가하였으나, 관심거리와 용기두께가 증가할수록 오히려 감소하였다. 특히 바람속도는 UVCE I 모델에서 과압에 무관하였고, UVCE II 모델에서는 바람속도가 증가할수록 과압이 감소하였다.

따라서 UVCE 모델간의 과압차이에 미치는 누출조건들의 영향을 나타낸 톨루엔의 경우에 대하여 나타낸 Fig. 2에서와 같이 누출조건들의 종류와 크기에 따라 다소 차이가 있었으나, 본 연구범위 내에서는 누출조건에 대한 과압차이의 변화경향이 거의 일정하였으며, 이와 같은 경향은 다른 8개의 누출물질에서도 유사하였다. 이때, UVCE 모델간의 과압차이에 미치는 누출조건들의 영향을 최소화승법에 의해 얻은 결과는 Table 4와 같다.

Table 4의 결과와 같이 UVCE 모델간의 과압차이에 미치는 누출조건들의 영향은 누출물질에 따라 다소 차이가 있으나 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

Table 4. Constant(a) for differences of overpressures between the UVCE II model and the UVCE I model as a function of parameters such as $\Delta P \propto (\text{parameter})^a$

Material	Hole diameter [m]	Storage Pressure [atm]	Wind speed [m/s]	Interested distance [m]	Vessel thickness [m]
n-Butane	1.766	0.418	-1.166	-1.250	-0.468
n-Pentane	1.847	0.606	-1.284	-1.255	-0.488
n-Hexane	1.590	0.598	-0.937	-1.276	-0.428
n-Heptane	1.595	0.565	-0.926	-1.287	-0.444
Benzene	1.786	0.676	-1.148	-1.251	-0.453
Toluene	1.677	0.595	-1.050	-1.266	-0.447
o-Xylene	1.566	0.567	-0.888	-1.287	-0.420
m-Xylene	1.610	0.564	-0.955	-1.282	-0.434
p-Xylene	1.604	0.564	-0.947	-1.289	-0.433
Average	1.671	0.572	-1.033	-1.271	-0.446

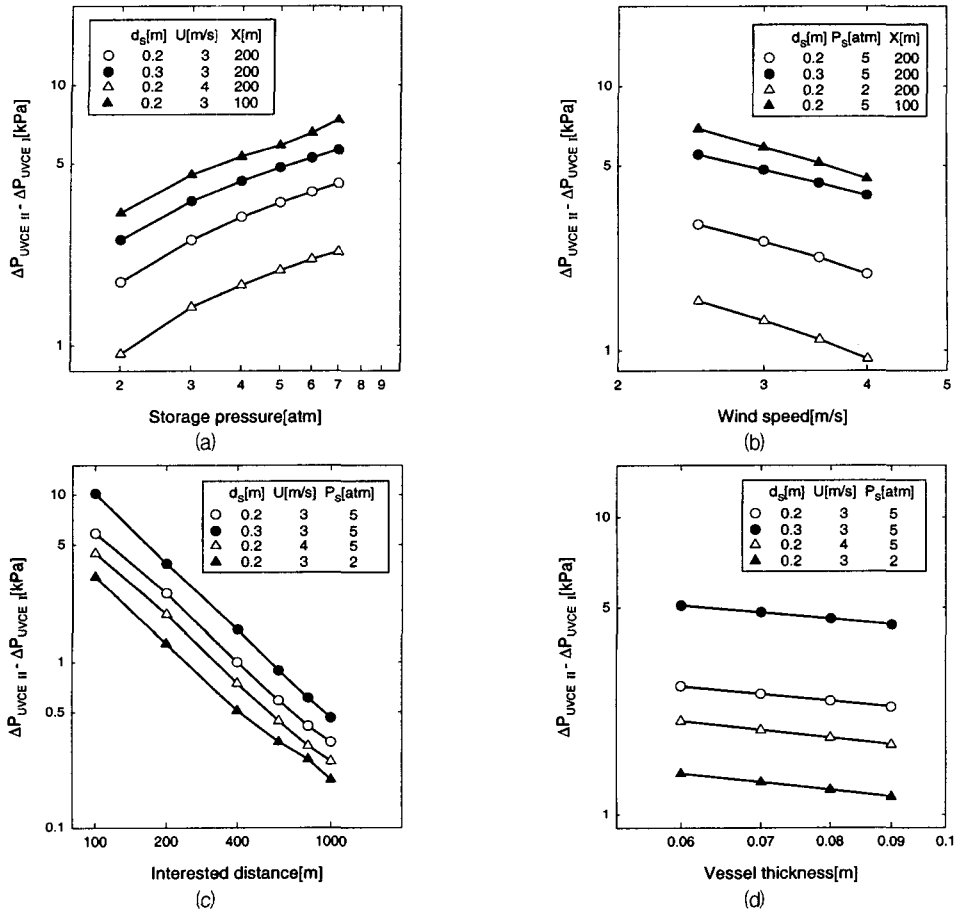


Fig. 2. Variations of differences of overpressures between UVCE II model and UVCE I model with release conditions for toluene.

4.2. UVCE 모델의 상관성 해석

4.1절의 결과로부터 개방공간 증기운 폭발사고에서 증기분산을 고려하지 않은 UVCE I 모델에 대한 UVCE II 모델의 과압차이는 총 2880 개의 과압자료를 사용하여 모사한 결과, 식 (8)과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었으며, 누출물질이 n-부탄, 벤젠, 톨루엔, p-크실렌인 경우에 대하여 대표적으로 나타낸 Fig. 3에서와 같이 제시된 상관식은 모든 누출물질과 모사범위에서 약 ±15% 이내에서 일치하였다. 이때 최소자승법에 의해 산출된 상수 b의 값은 Table 5와 같다.

Table 5. Constant(b) in Eq. (8)

n-Butane	n-Pentane	n-Hexane	n-Heptane	Benzene	Toluene	o-Xylene	m-Xylene	p-Xylene
12.715	12.930	16.177	18.525	12.901	15.061	20.044	47.468	17.867

$P_S^{0.572} X^{1.271} L_p^{-0.446}$ for various release materials.

$$\Delta P_{UVCE II} - \Delta P_{UVCE I}$$

$$= b d_S^{1.957} P_S^{0.564} U^{-1.380} X^{-1.263} L_P^{-0.531} \quad (8)$$

여기서 L_p 는 용기의 두께[m]이다.

이상과 같이 여러 가지 물질들이 2상(기-액)흐름으로 누출되어 개방공간 증기운 폭발사고가 발생하는 경우에 복잡한 분산모델을 사용하지 않고도 간단한 방법으로 과압을 산출할 수 있었다. 즉, 여러 가지 누출조건들을 사용하여 일정한 누출시간(600초)에서 TNT 상당량으로부터 산출한 과압과 식 (8)의 상관식을 사용하여 증기의 분산을 고려한 UVCE II 모델에 의해 정확한 과압을 산출할 수 있었다. 따라서 이와 같은 방법을 사용하여 전문가의 도움이 없이 중·소규모 사업장에서도 증기운 폭발사고의 영

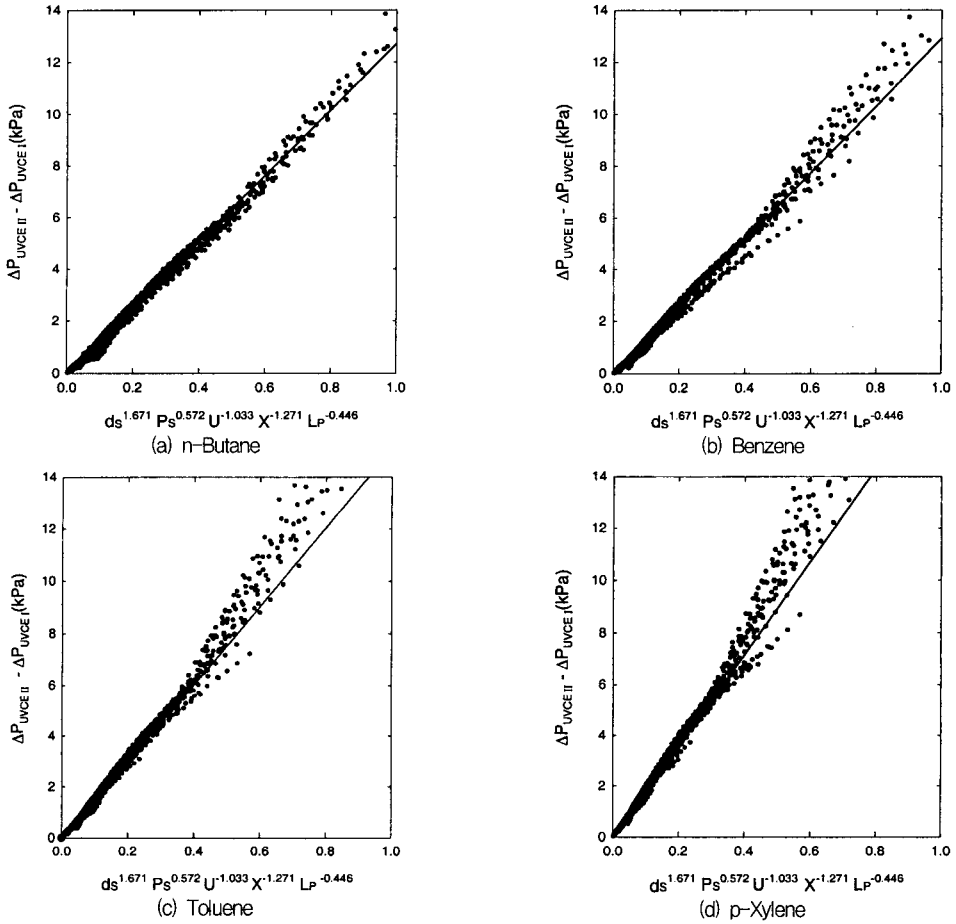


Fig. 3. Differences of overpressures between UVCEII model and UVCE I model as a function of $ds^{1.671}U^{-1.033}$ for various release materials.

향평가를 손쉽게 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결론

용기 내에 있는 가압으로 저장되어 있는 액체가 지표면에서 연속으로 누출되고, 그 일부가 기상으로 순간증발되어 증기운을 형성하여 발생하는 개방공간 증기운 폭발사고(UVCE)에 대하여 TNT 당량모델을 사용하여 산출방법에 따른 사고결과(과압)를 산출하고, 사고결과에 미치는 누출조건의 영향과 UVCE 모델간의 상관관계를 해석하였다. 그 결과, 9 종류의 누출물질에 대한 UVCE 모델간의 과압차이는 누출조건에 대한 상관관계식으로 나타낼 수 있었으며, 중·소규모 사업장에서도 손쉬운 방법으로

UVCE의 사고결과를 정확하게 산출할 수 있도록 단 순화하였다.

감사의 글 : 본 연구는 2002년도 명지대학교 산업기술연구소의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) AIChE/CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedure," Center for Chemical Process Safety (CCPS) of the American Institute of Chemical Engineers(AIChE), New York, 1985.
- 2) AIChE/CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis," CCPS of AIChE,

- New York, 1989.
- 3) Council of the European Communities, "Council Directive on the Major Accident Hazards of Certain Industrial Activities," Official J. of the European Communities, No. L230, 1982.
 - 4) ILO, "Prevention of Major Industrial Accident," International Labor Office(ILO), Geneva, No. 174, 1993.
 - 5) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications," Prentice-Hall Inc., New York, 1990.
 - 6) D. L. Ermak, "User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases," UCRL-MA-105607, Lawrence Livermore National Laboratory, CA, Jun., 1990.
 - 7) H. G. Fisher, "Emergency Relief System Design Using DIERS Technology: The Design Institute for Emergency Relief Systems(DIERS) Project Manual," DIERS of AIChE, 1992.
 - 8) T. G. Hoot, R. N. Meroney, and J. A. Peterka, "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.
 - 9) A. C. Vandenberg and H. G. the TNO Prins Maurits Lab., "Current Research at TNO on Vapor Cloud Explosion Modelling," TNO Prins Maurits Laboratory, Netherlands, 1994.
 - 10) 장서일, 이현창, 김태욱, "기-액흐름 연속누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고의 영향평가," 안전경영과학회지, 제4권, 제3호, pp. 35-43, 2002.
 - 11) H. K. Fauske, "Flashing Flows or : Some Practical Guidelines for Emergency Releases," Plant Operations Prog., Vol. 4, pp. 132-134, 1985.
 - 12) R. E. Britter and J. McQuaid, "Workbook on the Dispersion of Dense Gases," Health and Safety Executive(HSE), No. 17, U. K., 1988.
 - 13) D. N. Blewitt, S. T. Chan, and H. C. Rodean, "Conduct of Anhydrous Hydrofluoric Acid Spill Experiments, International Conference on Vapor Cloud Modeling," CCPS of AIChE, Cambridge Univ., Massachusetts, pp. 1-38, 1987.
 - 14) W. K. Crowley, "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.
 - 15) Industrial Risk Insurers(IRI), "Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide," IRInformation, IM 8011, 1992.
 - 16) F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries," Butterworths-Heinemann Ltd., Vol. 2, London and Boston, 1991.
 - 17) 한국산업안전공단, "사고결과 분석(CA)," 한국 산업안전공단, 산업안전교육원, 2001-29-86, pp. 214-215, Korea, 2001.
 - 18) 한국산업안전공단, 산업안전보건 DB(www.kosha.net), MSDS 자료, 2002.
 - 19) Health and Safety Executive, "The Effects of Explosions in the Process Industries," Loss Prevention Bulletin, Vol. 68, pp. 37-47, 1986.