

기-액흐름 연속누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고의 영향평가

- The Consequence Analysis for Unconfined Vapor Cloud Explosion Accident by the Continuous Release of Gas-Liquid Flow -

장 서 일*

Jang Seo Il

이 헌 창*

Lee Hern Chang

김 태 옥*

Kim Tae Ok

Abstract

For the unconfined vapor cloud explosion accident by the continuous release of gas-liquid flow of various saturated liquids in a vessel at ground level, overpressures were estimated and analyzed with various release conditions and materials by TNT equivalency model with vapor dispersion.

We found that at same release conditions, overpressure showed n-heptane > xylene > n-hexane > toluene > n-heptane > benzene, respectively and that overpressure was increased with increasing the hole diameter and the storage pressure, but it was increased with decreasing the wind speed, the interested distance, and the vessel thickness.

1. 서 론

위험성 화학물질을 대량으로 저장하거나 취급하고 있는 화학공장은 설비의 노후화 등으로 인하여 화재, 폭발, 독성물질 누출 등과 같은 중대산업사고의 발생 가능성이 매우 높다[1,2]. 따라서 정부에서는 1995년부터 중대산업사고를 체계적으로 예방하기 위하여 유해·위험설비에 대한 공정 위험성 평가를 주요 내용으로 하는 공정안전관리제도를 도입하여 시행하고 있다[3-5].

화학설비에 잠재하고 있는 사고의 위험성을 사전에 발굴·제거하기 위한 공정 위험성 평가의 한 분야인 사고 영향평가는 중대산업사고로 인하여 예상되는 피해정도를

* 명지대학교 공과대학 화학공학과

사전에 산출하기 위한 피해예측기법[1,2,6]으로 다양한 방법이 제시되었으며, 누출조건에 따라 누출량을 산출하는 누출원모델, 증기의 분산정도를 산출하는 분산모델, 그리고 사고결과를 평가하는 영향모델, 즉 화재모델, 폭발모델 등이 주로 사용되고 있다.

가연성 물질에 대한 분산모델은 대부분 무거운(heavy) 가스 분산모델이 사용되고 있으며[7,8], 대표적인 모델로는 Britter와 McQuaid[9]가 제시한 BM모델, Hoot, Meroney와 Peterka[10]가 제시한 HMP모델, 네덜란드 TNO연구소에서 제시한 TNO모델, 그리고 DIGADIS모델, SLAP모델 등이 있으나[11,12], 지표면 누출의 BM모델과 지상누출의 HMP모델이 입력하는 매개변수가 상대적으로 단순하여 현재 가장 많이 사용되고 있다[9].

개방공간 증기운 폭발(unconfined vapor cloud explosion, UVCE)은 대기 중에 누출된 가연성 증기가 공기와 혼합하여 분산된 후 점화되어 개방공간에서 발생하는 것으로, 이때 폭발사고의 영향은 사용이 편리한 TNT 당량모델(TNT equivalency model)이 가장 많이 사용되고 있다[13].

이와 같은 사고 영향평가는 사용된 모델의 특성, 매개변수의 산출방법, 그리고 누출조건과 환경조건에 따라 사고결과가 크게 차이가 나기 때문에 적절한 누출조건을 사용하여 보다 간단한 방법에 의해 사고결과를 비교적 정확하게 예측할 필요가 있다.

본 연구는 용기 내에 있는 가압으로 저장되어 있는 액체가 지표면에서 기-액흐름으로 연속누출되어 개방공간 증기운 폭발사고가 발생하는 경우에 누출조건에 따른 사고결과를 산출하고, 사고결과에 미치는 누출조건의 영향을 해석하였다.

2. 이 론

2-1. 누출원모델

대기압보다 높은 과압상태로 용기에 저장된 포화액체가 대기 중에 기-액흐름으로 비평형 누출될 때 초기누출속도, \dot{Q} [kg/s]는 Fauske[14]에 의해 제시된 식 (1)로부터 산출할 수 있다.

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

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_S는 저장온도[K], C_{PL}은 저장온도에서 액체의 비열[kJ/kg · K], g_c는 전환인자[-], 그리고 N은 보정인자[-]로 식 (2)와 같다.

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

여기서 C_D는 누출계수[-], P_S와 P_a는 각각 저장온도에서 저장압력과 대기압[Pa], L_e는

경험적인 상수(0.1 m), 그리고 L_p 는 용기의 두께[m]이다.

가압된 포화액체가 누출되어 기상으로 순간증발되는 분율은 Crowl와 Louvar[6]가 제시한 식 (3)에 의해 산출할 수 있다.

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

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 Richardson수, Ri_o 가 0.003보다 큰 경우에만 무거운 가스 분산모델을 적용한다 [9,10].

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

여기서 g 는 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 누출시간이 식 (5)에 의해 산출한 임의의 지점까지 누출기체의 이동시간, t_r 보다 큰 경우에 연속누출로 판정한다 [2,15].

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

여기서 X 는 관심거리[m]이고, U 는 누출지점에서 바람속도[m/s]이다.

2-3. 개방공간 증기운 폭발모델

개방공간 증기운 폭발의 영향을 평가하기 위하여 제시된 모델 중에서 가장 널리 사용되고 있는 TNT 당량모델에서 UVCE 의해 방출되는 에너지, 즉 TNT 당량, W [kg]는 식 (6)과 같다[13].

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

여기서 η 는 폭발계수[-], M 은 증기의 총 누출량[kg], ΔH_c 는 증기의 연소열[kJ/kg], 그리고 ΔH_{cTNT} 는 TNT의 연소열로 4680 kJ/kg을 사용한다[16].

따라서 식 (6)에 의해 산출된 TNT 당량을 사용하여 식 (7)에 의해 환산거리, Z (m)

를 산출하고, 문헌[6,17]의 실험자료에 의해 관심거리, X에서 과압(kPa)을 산출할 수 있다.

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

3. 매개변수 산출

여러 가지 누출물질과 누출조건에서 기-액흐름 누출에 의한 개방공간 증기운 폭발 사고의 영향을 평가하기 위한 사고 시나리오는 외부 충격에 의해 저장용기의 표면에서 누출공이 발생하여 가압되어 있던 9가지의 가연성 포화액체가 일정한 속도로 기-액 2상흐름으로 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, 누출물질의 물리화학적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical and physical properties of release materials.

Material	ΔH_c [kJ/mol]	T_b [K]	LFL[%]	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
<i>o</i> -Xylene	4596.3	417.6	1.0	7.6
<i>m</i> -Xylene	4594.5	412.3	1.1	7.0
<i>p</i> -Xylene	4595.3	411.5	1.1	7.0

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

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)~식 (3)에 의해 산출하였다. 이때 대기온도와 누출계수는 각각 298 K와 1로 가정하였고, 증기밀도는 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. 이때 지표면에서 바람속도는 측정할 수 없으므로 본 연구에서는 10 m 누출높이의 바람속도를 사용하였다.

UVCE에 의한 사고결과는 TNT 당량모델을 사용하여 각 누출물질과 누출조건에서 TNT 당량과 환산거리를 계산하고, 관심거리에서 과압을 실험자료[6]로부터 산출하였다. 이때 증기의 총 누출량은 증기의 누출속도와 식 (5)에 의해 산출한 X_{UFL} 에서 X_{LFL} 까지 증기의 이동시간으로부터 산출하였고, 연소범위 내에 있는 증기는 100%가 폭발된다고 가정하였다[2].

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

Table 3. Calculated parameters at standard conditions.

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

4. 사고 영향평가 및 누출조건의 영향

4-1. 누출물질에 따른 사고 영향평가

Table 3에서와 같이 일반적으로 휘발성 물질일수록 증발잠열이 적고 끓는점이 낮기 때문에 누출속도는 적으나 증기화 분율이 커서 증기 누출속도가 큰 값을 나타내었다. 또한 X_{UFL} 은 누출물질에 따라 크게 차이가 나지 않으나 휘발성 물질은 증기의 분산정도가 크고, Table 1과 같이 연소범위가 높기 때문에 X_{LFL} 이 짧게 나타났다. 그러나 UVCE에 의한 사고결과, 즉 과압은 식 (6)과 같이 누출물질의 연소열에 크게 영향을 받기 때문에 동일한 누출조건에서는 n-헵탄 > 크실렌 > n-헥산 > 톨루엔 > n-펜탄 > n-부탄 > 벤젠의 순서를 나타내었다.

4-2. 사고결과에 미치는 누출조건에의 영향

과압에 미치는 누출공의 크기영향은 누출물질이 n-헵탄, 톨루엔 및 벤젠에 대하여 대표적으로 나타난 Fig. 1의 (a)에서와 같이 모든 누출물질에 대하여 과압이 누출공의 직경에 거의 비례적으로 증가하였는데, 이것은 식 (1)과 같이 누출공의 크기가 클수록 누출속도가 증가하기 때문이다. 또한 톨루엔의 경우에 변수인 누출공 직경, 저장압력, 바람속도 외에는 표준조건에서 산출한 결과를 나타낸 Fig. 1의 (b)와 같이 누출조건에 따라 과압의 크기와 과압에 미치는 누출공의 크기영향은 다소 차이가 있었다.

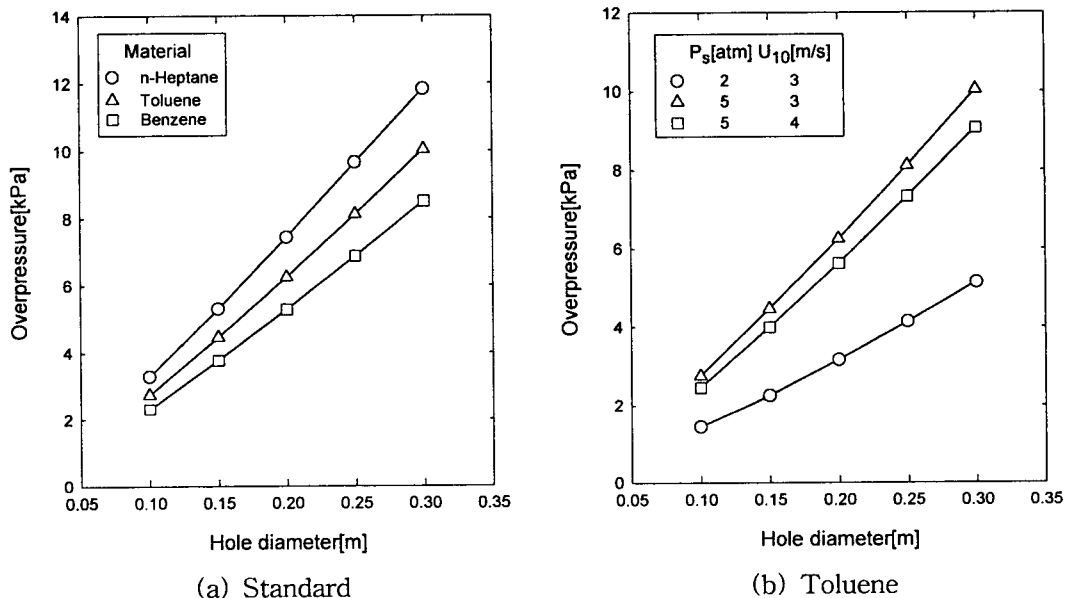


Fig. 1. Effects of hole diameters on overpressures.

Fig. 2는 과압에 미치는 저장압력과 바람속도의 영향을 나타낸 대표적인 그림으로, 이때 나머지 누출조건은 표준조건을 사용하였다. Fig. 2의 (a)와 같이 누출물질과 누출공 직경 등의 누출조건에 따라 과압에 미치는 저장압력의 영향이 차이가 있으나, 저장압력이 증가할수록 과압이 증가하고 있다. 이것은 저장압력의 증가에 따라 저장온도, 즉 끓는점이 상승하지만 압력에 크게 영향을 받는 연속 누출량의 증가와 온도상승에 따른 증기압 분율이 증가하기 때문이다. 또한 Fig. 2의 (b)에서와 같이 바람속도가 증가할수록 증기의 분산정도가 증가하지만, 증기의 이동시간 감소로 총 누출량이 감소하기 때문에 과압이 다소 감소하였다.

과압에 미치는 관심거리의 영향은 Fig. 3의 (a)와 같이 누출물질과 누출조건에 따라 과압의 크기는 다소 차이가 있었으나, 과압은 관심거리가 증가할수록 약 400 m이내에서는 급격히 감소하고, 약 400 m 이상에서는 서서히 감소하여 약 1000 m 이상에서는 거의 영의 값을 나타내었다. 이것은 누출증기의 농도가 분포함수 형태를 갖기 때문에 누출지점에서 멀어질수록 급격히 감소하기 때문으로 생각된다. 또한 Fig. 3의 (b)와 같

이 용기 두께가 증가할수록 과압이 다소 감소하였는데, 이것은 누출공에서 배출되는 증기의 마찰손실이 증가되기 때문으로 판단된다.

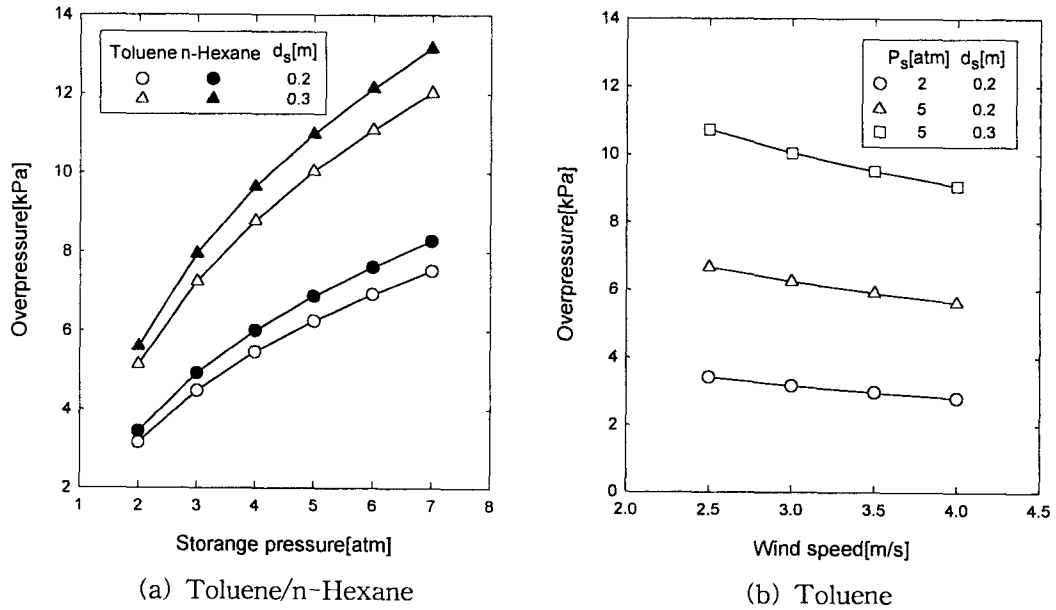


Fig. 2. Effects of storage pressures and wind speeds on overpressures.

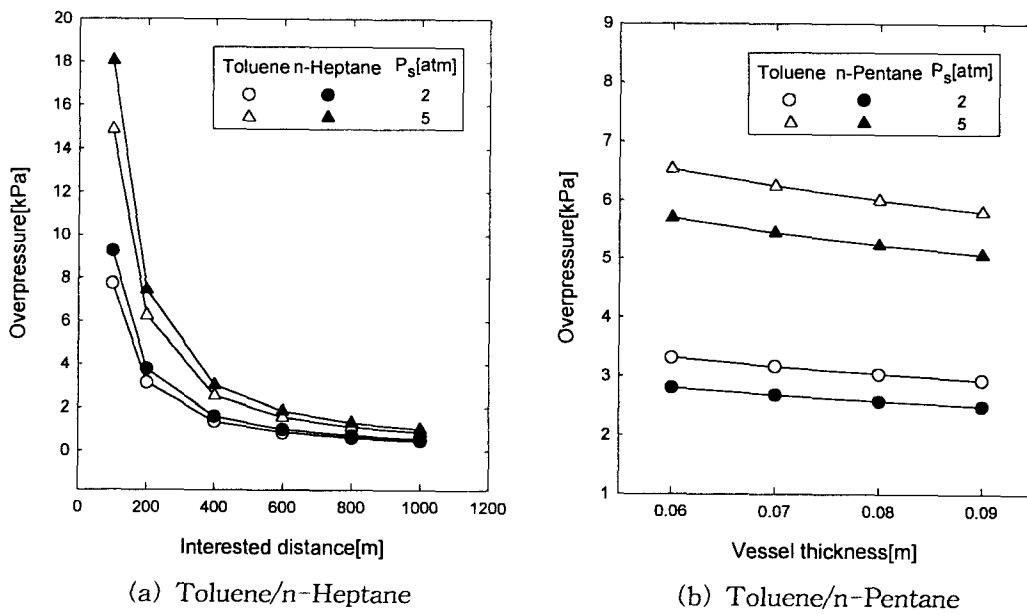


Fig. 3. Effects of interested distances and vessel thicknesses on overpressures.

4. 결 론

용기 내에 가압으로 저장되어 있는 포화액체가 지표면에서 연속으로 누출되고, 그 일부가 기상으로 순간증발되어 증기운을 형성하여 발생하는 개방공간 증기운 폭발사고에 대하여 TNT 당량모델을 사용하여 사고결과(과압)를 산출하고, 사고결과에 미치는 누출조건에 영향을 해석하였다. 그 결과, 동일한 누출조건에서는 과압이 n-헵탄 > 크실렌 > n-헥산 > 톨루엔 > n-펜탄 > n-부탄 > 벤젠의 순서를 나타내었다.

또한 산출된 과압은 누출공의 직경과 저장압력이 증가할수록 증가하였으나, 바람속도, 관심거리 및 용기 두께가 증가할수록 오히려 감소하였다. 이때 누출물질과 누출조건에 따라 과압의 크기는 차이가 있었으나, 과압에 미치는 누출조건에 영향을 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

감 사

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

5. 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] KISCO, "Safety Planning in Chemical Industry", The Korea Industrial Safety Co.(KISCO), Korea, pp.8-28, 1993.
- [4] 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.
- [5] ILO, "Prevention of Major Industrial Accident", International Labor Office(ILO), Geneva, No. 174, 1993.
- [6] D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", Prentice-Hall Inc., New York, 1990.
- [7] S. R. Hanna, D. Strimaitis, and J. C. Chang, "Hazard Response Modeling Uncertainty(A Quantitative Method) - Volume II. Evaluation of Commonly-Used Hazardous Gas Dispersion Models", F08635-89-C-0136, The American Petroleum Institute(API), Westford, MA 01886, Sept., 1991.
- [8] J. A. Havens, "Prediction of Atmosphere Dispersion for Accident Consequence Assessment and Mitigation: Safety Analysis and Risk Assessment for

- Chemical Process Industry Practitioners - Course 3. Consequence Assessment and Mitigation", CCPS of AIChE, May, 1992.
- [9] R. E. Britter and J. McQuaid, "Workbook on the Dispersion of Dense Gases", Health and Safety Executive(HSE), No.17, U. K., 1988.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] H. G. Fisher, "Emergency Relief System Design Using DIERS Technology: The Design Institute for Emergency Relief Systems(DIERS) Project Manual", DIERS of AIChE, 1992.
- [13] 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.
- [14] H. K. Fauske, "Flashing Flows or : Some Practical Guidelines for Emergency Releases," Plant Operations Prog., Vol. 4, pp. 132-134, 1985.
- [15] 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.
- [16] Industrial Risk Insurers(IRI), "Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide", IRInformation, IM 8011, 1992.
- [17] F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworths-Heinemann Ltd., Vol. 2, London and Boston, 1991.

저 자 소 개

장서일 : 명지대학교 가스안전센터 전임연구원(공학박사), 관심분야는 공정 위험성 평가 및 안전관리 비용-편익 분석

이현창 : 명지대학교 화학공학과 박사과정 재학, 관심분야는 위험기반 검사기법 개발

김태욱 : 명지대학교 화학공학과 교수/명지대학교 공과대학장/가스안전센터 소장, 관심분야는 가스안전 및 공정 위험성 평가