

무거운 가스의 누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고에서 사고결과에 미치는 매개변수의 영향

김태옥* · 함병호** · 조지훈***

*명지대학교 화학공학과 · **노동부 · ***한국산업안전공단

Parameters Affecting the Consequences of the Unconfined Vapor Cloud Explosion Accident by the Release of Heavy Gas

Tae Ok Kim* · Byeong Ho Ham** · Ji Hoon Cho***

*Dept. of Chemical Engineering, Myongji University,

Ministry of Labor · *Korea Occupation Safety Healthy and Agency

Abstract

This paper analyses the effect of parameters on the consequences of the unconfined vapor cloud explosion accident (UVCE) by the release of heavy gas (xylene vapor). Simulation results showed that the overpressure was increased with the increase of the release hole diameter and with the decrease of the interested distance and the wind speed. While, the overpressure was not nearly affected by the release height, weather and environmental conditions. From the results of the consequence analysis and analysis of affecting the consequences of UVCE, the emergency plan should be established taking into account these parameters.

Keywords : Consequence Analysis, Vapor Cloud Explosion, Heavy Gas, Parameter Effect

1. 서론

최근 화학공장에서는 다양한 방법에 의해 안전관리를 수행하고 있음에도 불구하고, 설비의 노후화와 위험물질의 취급량 증가 등으로 인해 화재, 폭발, 독성물질의 누출 등과 같은 중대산업사고의 발생 가능성이 그 어느 때보다 증가하고 있다. 따라서 이와 같은 사고의 위험요소를 발굴하여 제거하거나 사고영향을 최소화하기 위한 공정 위험성 평가(process hazard assessment)가 수행되고 있다.

공정 위험성 평가에는 설비 상에 잠재하고 있는 위험형태를 발견하기 위한 정성적 위험성 평가와 위험요소들이 사고로 발전할 가능성을 확률적으로 산출하고,

사고결과를 사전에 예측하기 위한 정량적 위험성 평가가 있다[1,2]. 특히, 정량적 위험성 평가 중에서 사고영향분석(consequence analysis)은 사고의 영향을 최소화하기 위한 완화대책을 마련하기 위해 사용되는 방법이다.

사고 영향분석은 공정에 있는 화학물질의 누출에 의해 발생하는 화재, 폭발 또는 독성물질의 누출과 같은 사고에 의해 발생하는 복사열, 과압, 독성 등의 영향을 평가하는 것으로, 이때 사용되는 모델로는 크게 누출원 모델, 분산모델, 사고영향모델 등이 있다[3-5]. 이때, 사고의 영향을 평가하기 위해서는 사고 당시의 공정조건, 대기 및 환경조건, 안전장치의 상태 등과 같은 사고결과에 영향을 미치는 매개변수들을 고려하여야 한다.

본 연구는 무거운 가스의 누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고(unconfined vapor cloud explosion, UVCE)의 영향을 평가하는 방법을 제시하고, 공정변수와 환경조건들이 사고결과에 미치는 영향을 분석하여 피해범위를 사전에 정확하게 예측함으로써 피해완화대책 및 비상조치계획 수립 등 사고에 대비할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 누출원모델

가연성, 인화성 및 폭발성 가스가 배관의 누출공(release hole)을 통하여 연속적으로 누출되는 경우에 누출기체의 유속이 음속인 경우에는 식 (1)에 의해 초기 누출속도를 산출할 수 있다[3,4,6].

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

여기서 Q는 연속 누출량(kg/s), CD는 누출계수(-), A는 누출공의 단면적(m²), Ps는 공정압력(Pa), γ 는 열용량비(Cp/Cv, -), M은 누출물질의 분자량(kg/kmol), R은 기체상수(J/kmol·K), 그리고 Ts는 조업온도(K)이다. 이때, 누출기체의 흐름이 (Pa/Ps) < (P/Ps)^c인 경우에 음속흐름으로 판정하며, 누출공을 통한 기체의 최대 속도에서 압력비는 용기누출의 경우 식 (2)에 의해 산출한다[4].

$$\left(\frac{P_a}{P_s} \right)_c = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2)$$

여기서 Pa는 대기압(Pa)이다.

2.2. 무거운 가스 분산모델

무거운 가스가 지표면에서 연속적으로 누출되는 경우에 기체의 분산현상을 해석하기 위하여 가장 널리 사용되는 분산모델(dispersion model)은 BM 모델로, Britter와 McQuaid(1988)[7]에 의해 제시된 그림에 의해 관심거리, X(m)에서 누출물질의 농도를 산출할 수 있다. 그러나 무거운 가스가 일정한 높이에서 누출되는 경우에는 Hoot 등(1973)[8]이 제시한 HMP 모델을 주로 사용하는데, 누출된 증기가 플럼(plume)을 형성하고, 그 플럼이 지면에 도달하게 되는 거리, XTD(m)와 그때의 농도, CTD(kg/m³)와 ppm 농도, CTD,ppm, 그리

고 하강한 증기가 안정된 흐름을 갖기 위한 임계조건이 형성되는 거리, Xc는 각각 식 (3)~식 (6)과 같이 표시된다.

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

$$C_{TD} = 3.1 \left(\frac{v \rho_{rel}}{U d_s} \right) \left(\frac{H_s + 2 \Delta h}{d_s} \right)^{-1.95} \quad (4)$$

$$C_{TD, ppm} = C_{TD} \left(\frac{RT_a \times 10^6}{M P_a} \right) \quad (5)$$

$$X_c = X_{TD} \left(\frac{5,000}{C_{TD, ppm}} \right)^{-1.538} \quad (6)$$

여기서 Xm은 플럼이 최대로 상승한 지점까지의 수평거리(m), ds는 누출공의 직경(m), U는 누출지점에서 바람속도(m/s), u는 누출물질의 출구속도(m/s), Hs는 누출높이(m), ρ_{rel} 과 ρ_a 는 누출물질의 밀도(kg/m³)와 부피유속(m³/s), U10은 10 m의 누출높이에서 바람속도(m/s), ρ_a 는 공기의 밀도(kg/m³), Ta는 대기온도(K), g는 중력가속도(m/s²)이며, 플럼이 최대로 상승하는 높이(m), Δh (m)는 식 (7) 및 식 (8)에 의해 산출한 값 중에서 적은 값을 사용한다.

$$\Delta h = 1.32 d_s \left(\frac{u}{U} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_{rel}}{\rho_a} \right)^{1/3} \left\{ \frac{u}{\left[g d_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \right\}^{2/3} \quad (7)$$

$$\Delta h = 2.96 \times \frac{u d_s}{\left[g d_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \quad (8)$$

산출하고자 하는 관심거리, X(m)에서 누출물질의 농도, C(kg/m³)는 X < Xc인 경우에는 식 (9)로부터, 그리고 X > Xc인 경우에는 식 (10)으로부터 각각 산출할 수 있으며, 일반적으로 XTD가 Xc보다 큰 경우에는 Xc가 XTD와 동일하다고 가정한다.

$$C = C_{TD} \left(\frac{X}{X_{TD}} \right)^{-0.65} \quad (9)$$

$$C = C_{TD} \left(\frac{X_C}{X_{TD}} \right)^{-0.65} \left(\frac{X}{X_C} \right)^{-1.7} \quad (10)$$

누출물질의 대기분산에 영향을 미치는 인자들은 여러 가지가 있으나 가장 중요한 인자는 바람속도이다[9]. 그러나 누출위치에서 실제 바람속도를 정확하게 산출하기는 매우 어렵기 때문에 일반적으로 10 m에서 측정된 바람속도, U10(m/s)을 기준으로 식 (11)에 의해 산출한다.

$$U = \left(\frac{H_s}{H_R} \right)^{fs} U_{10} \quad (11)$$

여기서 HR은 기준높이인 10 m이고, 대기 안정도 (atmosphere stability), fs의 값은 문헌[10]에 수록되어 있다.

2.3 개방공간 증기운 폭발모델

휘발성을 갖는 많은 양의 가연성 물질이 대기 중에 갑자기 누출되면 이 증기는 증기운을 형성하여 분산되며, 증기운이 연소하한농도(LFL) 이하로 희석되기 전에 점화가 일어나면 플래쉬화재(flash fire) 또는 개방공간 증기운 폭발이 일어난다.

개방공간 증기운 폭발사고의 영향을 평가하는데 가장 널리 사용되고 있는 모델은 TNT 상당모델(TNT equivalency model)로, 증기운 폭발에 의해 방출되는 에너지를 TNT 상당량으로 환산한 값, W(kg)는 식 (12)와 같다[11].

$$W = \frac{nM_w H_c}{H_{cTNT}} \quad (12)$$

여기서 n는 폭발계수로, 석유화학물질의 경우에는 0.03으로 가정하며, TNT의 연소열, HcTNT는 2,000 Btu/lbm(4680 kJ/kg)를 사용한다[12]. 또한 연소지역 내에 존재하는 증기의 질량, Mw는 식 (13)에 의해 산출할 수 있다.

$$M_w = t_{tr} Q \quad (13)$$

따라서 식 (13)에 의해 산출된 TNT 상당량을 사용하여 식 (14)에 의해 환산거리, Z(m)를 산출하고, 문헌 [4,12]에 제시된 그래프에 의해 관심거리에서 과압(kPa)

을 산출할 수 있다.

$$Z = \frac{X}{W^{1/3}} \quad (14)$$

3. 누출 시나리오 및 매개변수 산출

3.1 누출 시나리오

무거운 가스의 누출에 의한 UVCE에서 사고결과에 미치는 매개변수의 영향을 평가하기 위한 누출 시나리오로는 플래쉬화재사고의 영향을 평가한 전보[13]와 같이 윤활유 공장의 크실렌 증기 누출사고를 선택하였다.

즉, 윤활유 공장의 아로마이징공정에서는 아로마틱계로 전환된 원료가 증류탑으로 보내져서 155 °C에서 C6과 C7 성분들은 상부로 빠져나가고, C8 이상의 무거운 가스만이 펌프에 의해 클레이타워(clay tower)로 보낸다. 그 후 올레핀(olefine)계 성분은 제거하고, 다시 크실렌 리턴컬럼에서 C9 성분과 분리된 크실렌 성분은 스팀 제너레이터(steam generator)를 통과하여 컬럼 리시버(column receiver)에서 정제된 다음 분리펌프에 의해 열교환기로 공급되어 온도를 낮춘 후 저장탱크로 보낸다.

따라서 정성적 위험성 평가방법인 HAZOP에 의해 얻어진 결과로부터 크실렌 리턴컬럼과 상부 배관사이에 설치된 압력조절 밸브의 고장으로 크실렌 증기가 누출되어 개방공간 증기운 폭발사고가 발생한다고 가정하였다.

3.2 매개변수의 변화범위

크실렌 증기의 누출에 의한 UVCE에서 사고결과인 과압에 미치는 매개변수의 영향을 분석하기 위하여 실제 운전조건과 환경조건을 표준조건으로 설정하고, 매개변수들의 변화범위는 표준조건을 기준으로 실제조업에서 일어날 수 있는 범위를 결정하였다. 이때, 매개변수는 <표 1>과 같이 누출지점에서 대상물이 존재하는 지점까지의 거리, 즉 관심거리와 누출공의 직경, 누출 높이, 상대습도, 바람속도, 환경조건, 지리적 조건, 그리고 대기온도를 선택하였다.

3.3 사고결과값 산출

연속누출에서는 누출공 직경이 사고결과에 가장 크

계 영향을 미치므로, 누출공 직경이 0.2032 m인 경우를 기준으로 누출공 면적을 산출하였고, 누출계수(CD)는 가장 큰 값인 1로 가정하였다[3]. 그리고 조업온도에서 누출된 증기의 γ 값은 이상기체로 가정하여 산출하였다. 또한 누출공에서 연속누출 흐름의 음속여부는 식 (2)에 의해 $(P/P_s)C > Pa/P_s$ 임을 확인하여 음속흐름인 식 (1)을 사용하여 실제 누출량을 산출하였다.

누출된 증기의 분산정도를 산출하기 위하여 10 m의 높이에서 바람속도는 1 m/s로 가정하고, 누출지점에서 바람속도를 식(11)에 의해 산출하였다. 이때, 설정한 표준조건은 누출된 지점의 대기안정도를 시골(rural)과 B의 조건으로, 그리고 대기온도를 298 K로 가정하였다. 또한 누출증기의 밀도는 누출 시의 온도가 파이프 내의 온도와 같다고 가정하여[4] 이상기체 상태방정식으로 산출하였다.

그리고 기체분산은 각각 무거운 가스의 분산모델인 BM 모델과 HMP 모델을 적용하여 해석하였다. 즉, BM 모델에서는 연소하한 및 상한농도에 도달하는 거

리(XLFL 및 XUFL)를 각각 산출하였다. 그리고 HMP 모델에서는 플럼의 최대 상승높이(Δh)와 플럼이 최대로 상승할 때의 바람방향거리와 그때의 농도, 그리고 플럼이 지표면에 닿을 때의 농도를 ppm 단위로 환산하여 하강한 증기가 안정된 흐름을 갖기 위한 임계조건이 형성되는 거리를 산출한 후 크실렌 증기의 XLFL 및 XUFL을 각각 산출하였다.

TNT 상당모델에 의한 개방공간 증기운 폭발사고의 영향평가는 먼저 누출원모델로부터 누출된 증기의 양을 산출하고, TNT 상당량과 환산거리를 산출한 다음에 관심거리에서 증기운 폭발로 인하여 받게 되는 과압을 산출하였다. 이때, 총 누출량은 XLFL 및 XUFL에 도달한 시간을 기준으로 산출하였으며, 연소범위 내에서는 누출된 증기의 100%가 연소한다고 가정하고, 폭발효율인자(η)를 1로 하였다[3].

<표 1> UVCE 사고결과값 산출을 위한 매개변수의 변화범위

No	Interested distance (m)	Hole diameter (m)	Release height (m)	Wind speed at 10 m (m/s)	Relative humidity (%)	Weather conditions (-)	Environmental conditions (-)	Atmospheric temperature (K)
1	50	0.0508	5	0.5	10	D1(strong)	1(rural)	263
2	100	0.1016	10	1.0	20	D2(moderate)	2(urban)	268
3	200	0.1524	15	1.5	30	D3(slight)		273
4	300	0.2032	20	2.0	40	N1(low cloud)		278
5	400	0.2540	25	2.5	50	N2(high cloud)		283
6	500	0.3048	30	3.0	60			288
7	600	0.3556	35	3.5	70			293
8	700	0.4064	40	4.0	80			298
9	800	0.4572	45	4.5	90			303
10	900	0.5080	50	5.0				308
11	1000							313

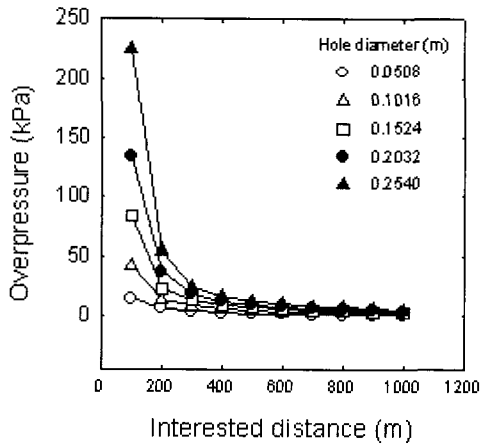
[Note] Values of parameters in shaded area are ones at standard conditions.

4. 결과 및 고찰

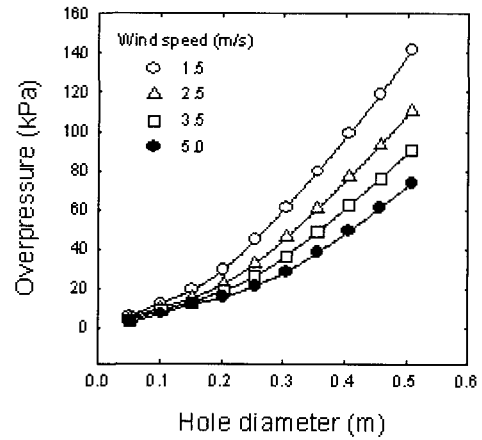
<표 1>과 같은 매개변수의 변화범위에서 각 이론모델로부터 산출된 사고결과값인 과압의 변화를 비교하여 사고결과에 미치는 매개변수들의 영향을 평가하였다. 이때, 영향을 평가하는 매개변수들을 제외한 나머지 변수들은 표준조건에서의 값을 사용하였다.

<그림 1>은 다양한 누출공 직경에서 관심거리의 변화에 따른 과압 변화를 나타낸 것으로, 분산모델의 중

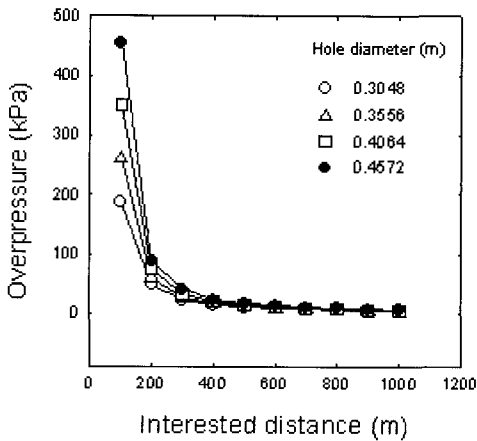
류에 무관하게 과압은 관심거리에 대해 지수함수 형태로 감소하며, 약 400m 이상의 관심거리에서는 과압이 거의 영의 값을 나타내고 있다. 그러나 누출공의 크기가 클수록 관심거리가 약 400m이내에서는 관심거리의 증가에 따라 과압이 급격히 감소하고, 관심거리가 짧을수록 누출공의 크기가 증가함에 따라 과압이 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 환산거리가 TNT 상당량에 반비례하고, 과압이 관심거리에 반비례하여 이들 두 조건이 서로 상승효과를 일으키기 때문으로 생각된다.



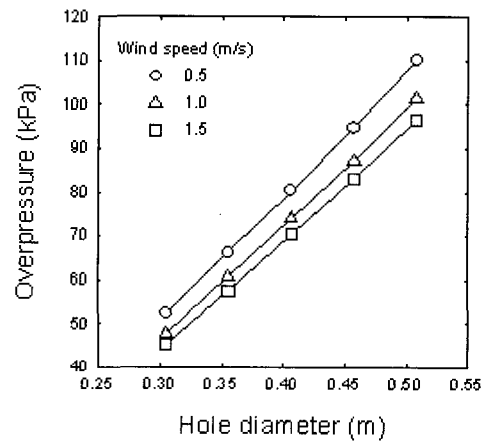
(a) BM Model



(a) BM Model



(b) HMP Model



(b) HMP Model

<그림 1> 다양한 누출공 직경에서 과압에 미치는 관심거리의 영향

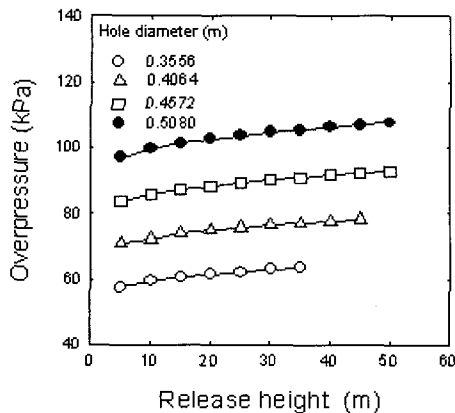
<그림 2> 다양한 바람속도에서 과압에 미치는 누출공 직경의 영향

또한 동일한 누출공 직경과 관심거리에서 BM 모델과 HMP 모델로 산출된 과압의 변화를 비교하면 BM 모델이 HMP 모델의 경우보다 과압이 다소 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 무거운 가스누출에 의한 플래쉬화재에서 XLFL의 변화경향과 같이[13] 지표면 누출에서는 지상누출의 경우보다 증기의 분산효과가 적어서 XLFL에 도달하는 거리가 멀어지고, 이로 인해 폭발에 관여하는 누출량이 많아지기 때문이다.

<그림 2>는 과압에 미치는 누출공 직경의 영향을 나타낸 것으로, 누출공의 크기가 클수록 누출량 증가로 과압이 급격히 증가하였으며, BM 모델에서는 바람속도가 느릴수록 과압에 미치는 누출공의 크기영향은 증가하고 있다. 이것은 바람속도가 빠를수록 XLFL과 XUFL에 도달되는 시간이 짧아져서 과압은 감소되고, 또한 누출공의 크기가 클수록 과압의 증가경향이 크기 때문으로 생각된다.

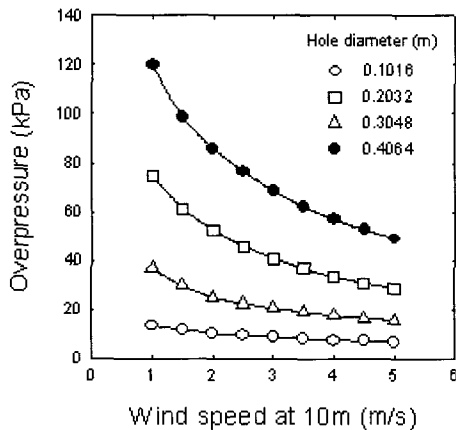
특히, HMP 모델의 경우에는 주간보다 야간에서 누출공의 크기영향이 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 누출공의 크기, 관심거리, 그리고 바람속도 이외의 나머지 매개변수의 값에 따라 누출공 크기의 영향은 거의 변화하지 않았다.

증기운 폭발에서 분산모델을 적용하지 않은 경우에는 누출높이가 과압에 영향을 미치지 않으며, 분산모델을 적용하는 경우에도 BM 모델은 지표면 누출에 적용하는 분산모델이므로, 누출높이의 영향을 해석할 수 없다. 그러나 <그림 3>에서와 같이 HMP 모델에서는 식 (4)에서와 같이 누출높이가 증가할수록 지면에 도달할 때의 농도가 증가되기 때문에 과압은 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

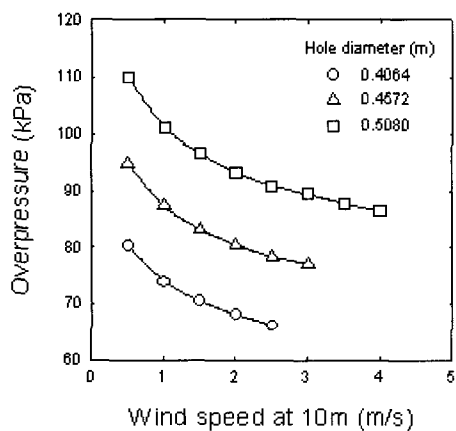


<그림 3> HMP 모델에서 과압에 미치는 누출높이의 영향

<그림 4>는 과압에 미치는 바람속도의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 바람속도가 증가할수록 과압은 급격히 감소하고 있는데, 이것은 바람속도가 빠를수록 강한 난류가 형성될 뿐만 아니라 XLFL과 XUFL에 도달되는 시간이 짧아지기 때문이다.



(a) BM Model



(b) HMP Model

<그림 4> 다양한 누출공 직경에서 과압에 미치는 바람속도의 영향

이밖에 상대습도, 대기온도와 환경과 지리적 조건은 과압에 거의 영향을 미치지 않았으나, HMP 모델의 경우에만 주간보다 야간에서 과압이 다소 큰 값을 나타내었다.

따라서 이와 같은 결과를 바탕으로 누출조건(누출공 직경, 누출높이)과 환경 및 지리적 조건(바람속도, 주간 또는 야간, 시골 또는 도시)에 따른 개방공간 증기운 폭발사고의 피해범위 예측을 통해 비상조치계획 수립에 도움을 줄 수 있었다.

5. 결론

무거운 가스인 크실렌 증기의 누출에 의한 개방공간 증기운 폭발사고에서 사고결과에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다. 그 결과, 과압은 관심거리가 짧을수록, 누출공 직경이 클수록, 그리고 바람속도가 느릴수록 큰 값을 가지나, 누출높이, 대기조건 및 지리적 조건은 과압에 크게 영향을 미치지 않았다.

따라서 이와 같은 결과를 바탕으로 누출조건과 환경 및 지리적 조건에 따른 개방공간 증기운 폭발사고의 피해범위 예측을 통해 비상조치계획을 수립할 수 있다.

6. 참고 문헌

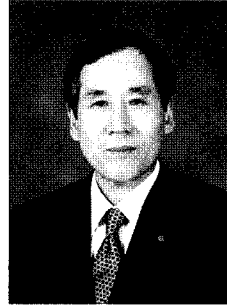
- [1] Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guidelines for Hazard Evaluation Procedure", AIChE, New York(1985).
- [2] CCPS, "Guidelines for Process Safety Fundamentals on General Plant Operations", AIChE, New York(1995).
- [3] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York (1989).
- [4] Crowl, D. A. and Louvar, J. F., "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", Prentice-Hall Inc., New York(1990).
- [5] Process Safety Institute and JBF Associates Inc., "Consequence Assessment and Mitigation", AIChE, New York(1994).
- [6] Lees, F P., "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, Butterworths-Heinemann Ltd., London and Boston(1991).
- [7] Britter, R. E., and McQuaid, J., "Workbook on the Dispersion of Dense Gases", Health and Safety Executive(HSE), No. 17, U.K.(1988).
- [8] 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).

- [9] Holzworth, G. C., “Mixing Heights, Wind Speeds, and Potential for Urban Air Pollution throughout the Continuous”, Offices of Air Programs Publication No. AP-101, Environmental Protection Agency(EPA), Jan.(1972).
- [10] Grelecki, C., “Consequence Assessment of Flammable Releases”, Safety Analysis and Risk Assessment for Chemical Process Industry Practitioners Course 3: Consequence Assessment and Mitigation, AIChE, New York(1992).
- [11] 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).
- [12] Industrial Risk Insurers(IRI), “Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide”, IRInformation, IM 8011(1992).
- [13] 김태옥, 이현창, 함병호, 조지훈, 신동일, 장서일, “무거운 가스의 누출에 의한 플래쉬화재사고에서 사고결과에 미치는 매개변수의 영향 분석”, 대한안전경영과학회지, 8(6),29-39(2006).

저 자 소개

김 태 옥



명지대학교 공과대학 화학공학과 교수(공학박사), 명지대학교 사회교육원장(인문, 자연), 보육교사교육원장, 시스템안전센터 소장, 관심분야는 가스안전, 공정 위험성 평가 및 위험기반검사

주소: 경기도 용인시 처인구 남동
명지대학교 공과대학 화학공학과

함 병 호



노동부(공학박사), 관심분야는 안전관리제도 및 정량적 위험성 평가

주소: 경기도 군포시 재궁동 한성목화 APT 123-501

조 지 훈



한국산업안전공단 교육원 교수(공학박사), 관심분야는 정량적 위험성 평가

주소: 인천광역시 부평구 기능대길 25
한국산업안전공단 교육원