

무거운 가스의 누출에 의한 플래쉬화재사고에서
 사고결과에 미치는 매개변수의 영향 분석
 - Analysis of Parameters Affecting the
 Consequence of the Flash Fire Accident by the
 Release of Heavy Gas -

김 태 옥 *

Kim Tae Ok

이 현 창 **

Lee Hern Chang

함 병 호 ***

Ham Byeong Ho

조 지 훈 ****

Cho Ji Hoon

신 동 일 *****

Shin Dong Il

장 서 일 *****

Jang Seo Il

Abstract

The effect of parameters on the consequence of the flash fire accident by the release of heavy gas (in this study, xylene vapor) was analyzed. Simulation results showed that the distance with the lower flammable limit (X_{LFL}) was increased with the increase of the release hole diameter. For the case of the elevated release, X_{LFL} was increased with the increase of the wind speed and the release height, but X_{LFL}

* 명지대학교 공과대학 화학공학과

** 한국안전이엔씨

*** 노동부 경기지방노동청 안산지청

**** 한국산업안전공단 교육원

***** 명지대학교 리서치파크

was not affected by the wind speed for the release on the ground level. Therefore, the accident in the elevated release was more dangerous than the release on the ground level. In this condition, the release height had more effect on X_{LFL} at the night time than the daytime and in the urban area than the rural area.

Keywords : Consequence Analysis, Flash Fire, Heavy Gas, Parameter Effect

1. 서 론

화학공장에서는 유해하거나 위험성이 큰 원료나 생산품을 대량으로 취급하기 때문에 화재, 폭발, 독성물질의 누출 등과 같은 사고발생의 잠재적 위험성이 클 뿐만 아니라 사고의 영향이 공장내부에만 국한되지 않고, 인근지역에 까지 치명적인 영향을 미치는 중대산업사고가 발생되기도 한다[1].

이와 같은 중대산업사고는 피해정도가 매우 클 뿐만 아니라 사고의 영향이 치명적이기 때문에 사전에 설비 상에 잠재하고 있는 모든 사고의 위험요소를 발굴하여 제거하거나 사고영향을 최소화하기 위한 공정 위험성 평가(process hazard assessment)가 선행되어야 한다. 공정 위험성 평가는 설비 상에 잠재하고 있는 위험의 형태를 발견하기 위한 정성적 위험성 평가와 위험요소들이 사고로 발전할 가능성을 확률적으로 산출하고, 사고결과를 사전에 예측하기 위한 정량적 위험성 평가로 구분된다[2,3]. 그리고 정량적 위험성 평가 중에서 사고 영향분석(consequence analysis)은 사고의 영향을 최소화하기 위한 완화대책을 마련하기 위한 방법이다.

사고 영향분석은 공정에 있는 화학물질의 누출을 가정하여 화재, 폭발 또는 독성물질의 누출로 인하여 발생하는 복사열, 과압, 독성 등의 영향을 평가하는 것으로, 이때 사용되는 모델로는 크게 누출원모델, 분산모델, 영향모델 등이 있다[4-6]. 특히, 사고의 영향을 평가하기 위해서는 사고 당시의 공정조건, 대기 및 환경조건, 안전장치의 상태 등과 같은 사고결과에 영향을 미치는 매개변수들을 고려하여야 한다.

지금까지 가스누출에 의한 사고결과에 영향을 평가하기 위한 연구는 가상 구조물에 의한 실험적 접근방법에 의한 모델 개발, 이론적 접근에 의해 사람 및 구조물 등에 미치는 사고영향 평가, 그리고 기존에 제시된 모델의 단점을 개선·보완하기 위한 연구가 주로 수행되고 있다.

그러나 국내에서는 설비를 신설하거나 공정을 변경하는 경우에 정량적 위험성 평가에 의한 비상조치계획의 수립이 법적으로 요구되고 있으나 이에 관한 학문적 기초연구가 부족한 상태에서 일부의 공정에서만 외국에서 개발된 컴퓨터 소프트웨어를 사용하여 사고영향을 평가하여 이를 현장에 적용하고 있다. 또한 지금까지 제시된 이론식을 사용하여 사고영향을 평가하는 경우에도 사고형태와 평가방법이 복잡·다양하여 적용 공정에 적합한 모델선정이 어려울 뿐만 아니라 사용된 이론모델에 대한 정확한 자료와 정보가 미흡하여 체계적인 평가방법을 알지 못하고 있다.

본 연구는 무거운 가스의 누출에 의한 화재사고의 영향을 평가하는 방법을 제시하고, 공정변수와 환경조건들이 사고결과에 미치는 영향을 분석하여 피해범위를 사전에 정확하게 예측함으로써 사고에 대비할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 이 론

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[4,5,7].

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

여기서 Q는 연속누출량(kg/s), C_D 는 누출계수(-), A는 누출공의 단면적(m^2), P_S 는 공정압력(Pa), γ 는 열용량비(C_p/C_v), M은 누출물질의 분자량(kg/kmol), R은 기체상수(J/kmol·K), 그리고 T_S 는 조업온도(K)이다. 이때, 누출기체의 흐름이 $(P_a/P_S) < (P/P_S)_c$ 인 경우를 음속흐름으로 판정하며 누출공을 통한 기체의 최대 흐름에서 얻어지는 압력비는 용기누출의 경우 식 (2)에 의해 산출한다[5].

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

여기서 P_a 는 대기압(Pa)이다.

2.2 분산모델

무거운 가스가 지표면에서 연속누출되는 경우에 기체의 분산현상을 해석하기 위하여 가장 일반적으로 사용되는 이론은 BM 모델로, Britter와 McQuaid[8]에 의해 제시된 그림에 의해 관심거리, X에서의 누출물질의 농도를 산출할 수 있다. 그러나 무거운 가스가 일정한 높이에서 누출되는 경우에는 Hoot 등[9]이 제시한 HMP 모델을 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 각각 식 (3)~식 (6)과 같이 표시된다.

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

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

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

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

여기서 X_m 은 플럼이 최대로 상승한 지점까지의 수평거리(m), d_s 는 누출공의 직경(m), U 는 누출지점에서 바람속도(m/s), u 는 누출물질의 출구속도(m/s), H_s 는 누출높이(m), H_5 는 누출높이(m), ρ_{rel} 과 v 는 누출물질의 밀도(kg/m³)와 부피유속(m³/s), U_{10} 은 10 m의 누출높이에서 바람속도(m/s), ρ_a 는 공기 밀도(kg/m³), T_a 는 대기온도(K), g 는 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 $X < X_c$ 인 경우에는 식 (9)로부터, 그리고 $X > X_c$ 인 경우에는 식 (10)으로부터 각각 산출할 수 있으며, 일반적으로 X_{TD} 가 X_c 보다 큰 경우에는 X_c 가 X_{TD} 와 동일하다고 가정한다.

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

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

그리고 플럼이 최대로 상승한 지점에서의 농도, C_m (kg/m³)과 플럼이 최대로 상승하는 지점까지의 바람방향거리(X_m)는 각각 식 (12) 및 식 (13)에 의해 산출할 수 있다.

$$C_m = 2.15 \left(\frac{v \rho_{rel}}{U d_s^2} \right) \left(\frac{\Delta h}{d_s} \right)^{-1.85} \quad (11)$$

$$X_m = d_s \left\{ \frac{u}{\left[g d_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \right\}^2 \left(\frac{U}{u} \right) \quad (12)$$

누출물질의 대기분산에 영향을 미치는 인자들은 여러 가지가 있으나 가장 중요한 인자는 바람속도이다[10]. 그러나 누출된 위치에서 실제속도를 정확하게 산출하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 10 m에서 측정된 바람속도, 즉 U_{10} (m/s)을 기준으로 식 (13)에 의해 산출한다.

$$U = \left(\frac{H_s}{H_R} \right)^{f_s} U_{10} \quad (13)$$

여기서 H_R 은 기준높이인 10 m이고, 대기안정도(atmosphere stability), f_s 의 값은 문헌 [11]에 수록되어 있다.

배관누출에서 기체 밀도는 배관 내의 압력에 따라 누출온도가 변하기 때문에 일반적으로 압력이 5 기압보다 낮은 경우에는 누출온도가 배관 내의 온도와 동일하고, 5 기압보다 큰 경우에는 등엔탈피 팽창과정으로 가정하여 기체 밀도를 산출한다[5].

2.3 플래쉬화재모델

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

플래쉬화재의 영향을 평가하기 위하여 1975년에 Eisenberg 등[12]은 Stefan-Boltzmann 식을 이용한 열 플럭스 산출식을 제시하였으나 매개변수로 화염의 온도가 필요하기 때문에 비현실적이다. 따라서 단순한 접근방법은 피해범위가 어떤 지역 내로 제한된다고 가정하고, 적절한 분산모델을 사용하여 LFL의 1/3거리 또는 LFL 거리를 산출하는 방법이다. 이 방법은 연소기간은 짧고, 연소과정은 강렬하지 않으며, 증기운의 열팽창은 부력으로 인하여 수직적으로 일어난다고 가정한다. 이 가정은 실제현상과 차이가 있으나 계산과정을 단순화할 수 있는 장점이 있으며, 계산과정에서 분산모델로부터 얻을 수 있는 증기운의 크기만을 요구하기 때문에 자주 사용되고 있다[4].

3. 누출 시나리오 및 매개변수 산출

3.1 누출 시나리오

무거운 가스 누출사고의 피해범위에 미치는 매개변수의 영향을 평가하기 위하여 윤활유 공장의 크실렌 증기 누출사고를 선택하였다. 이때, 누출사고가 일어난다고 가정한 윤활유 공장의 아로마이징공정에서는 아로마틱계로 전환된 원료가 증류탑으로 보내져서 155 °C에서 C_6 와 C_7 성분들은 상부로 빠져나가고, C_8 이상의 무거운 가스만이 펌프에 의해 클레이타워(clay tower)로 보내어 진다. 그 후 올레핀(olefine)계 성분들을 제거하고, 다시 크실렌 리턴컬럼에서 C_9 성분과 분리된 크실렌 성분들은 스팀제너레이터(steam generator)를 통과하여 컬럼리시버(column receiver)에서 정제된 다음 분리펌프에 의해 열교환기로 공급되어 온도를 낮춘 후 저장탱크로 보내어 진다. 따라서 정성적 위험성 평가방법인 HAZOP에 의하여 얻어진 결과 중에서 크실렌 리턴컬럼과 상부 배관사이에 설치된 압력조절 밸브의 고장으로 크실렌 증기의 누출로 인한 플래쉬화재사고의 영향을 평가하였다.

3.2 매개변수의 변화범위

크실렌 증기의 누출사고에서 피해범위에 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 사고결과에 영향을 미치는 누출공의 직경, 누출높이, 상대습도, 바람속도, 환경조건, 지리적 조건, 그리고 대기온도를 선택하였다.

<표 1> 사고 결과값 산출을 위한 매개변수의 변화범위

No.	Hole diameter (m)	Release height (m)	Relative humidity (%)	Wind speed at 10 m (m/s)	Weather conditions (-)	Environmental conditions (-)	Atmospheric temperature (K)
1	0.0508	5	10	0.5	D1(strong)	1(rural)	263
2	0.1016	10	20	1.0	D2(moderate)	2(urban)	268
3	0.1524	15	30	1.5	D3(slight)		273
4	0.2032	20	40	2.0	N1(low cloud)		278
5	0.2540	25	50	2.5	N2(high cloud)		283
6	0.3048	30	60	3.0			288
7	0.3556	35	70	3.5			293
8	0.4064	40	80	4.0			298
9	0.4572	45	90	4.5			303
10	0.5080	50		5.0			308
11							313
12							

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

3.3 사고 결과값 산출

연속누출에서는 누출공 직경이 사고결과에 가장 크게 영향을 미치므로, 누출공 직경이 0.2032 m인 경우를 기준으로 누출공 면적을 산출하였고, 누출계수(C_D)는 가장 큰 값인 1로 가정하였다[4]. 그리고 조업온도에서 누출된 증기의 γ 값은 이상기체로 가정하여 산출하였다. 또한 누출공에서 연속누출 흐름의 음속여부는 식 (2)에 의해 $(P/P_s)_c > P_a/P_s$ 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 (13)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 이상기체 상태방정식으로 산출하였다.

그리고 일정한 누출높이에서와 지표면 누출의 경우에 대하여 각각 무거운 가스의 분

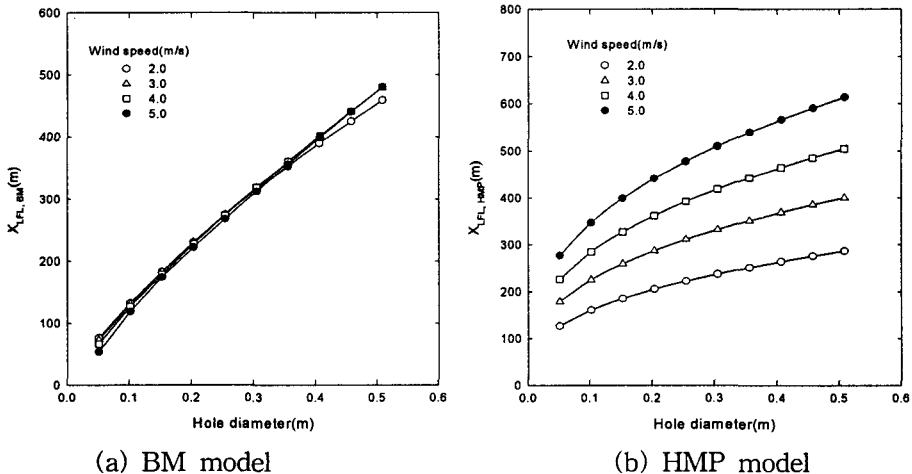
산모델인 BM모델과 HMP모델을 적용하였다. 즉, BM모델에서는 연소하한 및 상한농도에 도달하는 거리, $X_{LFL,BM}$ 및 $X_{UFL,BM}$ 을 각각 산출하였다. 그리고 HMP모델에서는 플럼의 최대 상승높이(Δh)와 플럼이 최대로 상승할 때의 바람방향거리와 그때의 농도, 그리고 플럼이 지표면에 닿을 때의 농도를 ppm단위로 환산하여 하강한 증기가 안정된 흐름을 갖기 위한 임계조건이 형성되는 거리를 산출한 후 크실렌 증기가 연소하한 및 상한농도에 도달하는 거리, $X_{LFL,HMP}$ 및 $X_{UFL,HMP}$ 를 각각 산출하였다.

플래쉬화재에서는 연소범위 내에 위치한 작업자 및 공정설비가 플래쉬화재에 의해 발산되는 복사열에 의해 치명적인 손상을 받게 된다고 가정하여 누출공을 통하여 증기가 연속누출되어 플래쉬화재가 발생하는 경우에는 BM모델과 HMP모델에 의해 산출된 연소범위 즉, $X_{LFL,BM}$, $X_{LFL,HMP}$ 및 $X_{UFL,BM}$, $X_{UFL,HMP}$ 이내의 거리를 피해범위로 하였다.

4. 결과 및 고찰

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

플래쉬화재에서는 관심거리는 고려되지 않으나 누출공의 크기와 바람속도의 변화에 따라 농도가 LFL이 되는 거리, 즉 X_{LFL} 의 변화는 <그림 1>과 같다.

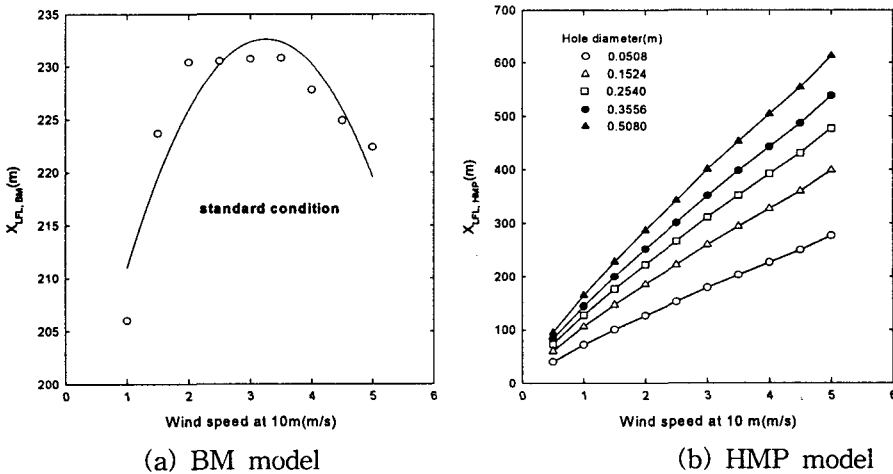


<그림 1> 연소하한거리(X_{LFL}) 미치는 누출공 직경의 영향

<그림 1>에서와 같이 누출공의 직경이 클수록 누출속도의 증가로 X_{LFL} 이 급격히 증가하였으며, 사고결과에 비교적 영향이 큰 바람속도는 BM모델에서는 거의 영향을 미치지 않았지만, 일정한 높이에서 누출되는 HMP모델에서는 바람속도가 증가할수록 X_{LFL} 이 증

가하고 있다. 이것은 바람속도가 기준조건인 1 m/sec인 경우에 HMP모델에서는 BM모델 보다 누출증기의 이동거리는 증가되지만 수평거리가 짧아지게 되고, 동시에 동일한 증기량에 대한 분산영역이 커서 일정한 수평거리에서의 농도가 낮아지게 되기 때문에 X_{LFL} 도 짧아지게 된다. 그러나 BM모델에서는 누출공의 크기 외에 다른 매개변수의 값의 크기에 따른 누출공의 크기영향은 거의 변화하지 않았으나 HMP모델에서는 외부의 환경 조건에 따라 X_{LFL} 에 미치는 누출공의 크기영향이 다소 변화하였다. 즉, HMP모델에서 X_{LFL} 은 바람속도가 클수록 증가하여 2 m/sec 이상의 바람속도에서는 오히려 BM모델에서보다 큰 값을 나타내었으며, 주간보다는 야간에서 X_{LFL} 에 미치는 누출공의 크기영향이 다소 증가하였다. 그러나 BM모델에서와 같이 HMP모델에서도 상대습도, 대기온도 등의 값에 따라 X_{LFL} 에 미치는 누출공의 크기영향은 거의 변화하지 않음을 알 수 있었다.

따라서 바람속도의 영향은 <그림 2>에서와 같이 사용된 분산모델에 따라 차이가 있다. 즉, BM모델에서 바람속도가 느린 경우에는 바람속도가 증가할수록 대류현상에 의한 증기의 이동효과로 X_{LFL} 이 급격히 증가하지만 약 3 m/sec 이상의 바람속도에서는 지표면의 특성과 방해물에 의한 난류형성으로 증기가 분산되어 오히려 X_{LFL} 이 감소하고 있다. 그러나 지상누출인 HMP모델에서는 바람속도의 증가에 따라 X_{LFL} 이 증가하는데, 이것은 대류에 의한 농도의 감소효과가 BM모델에서보다 적을 뿐만 아니라 누출지점에서부터 지면에 도달되는 거리가 증가되기 때문으로 생각된다.

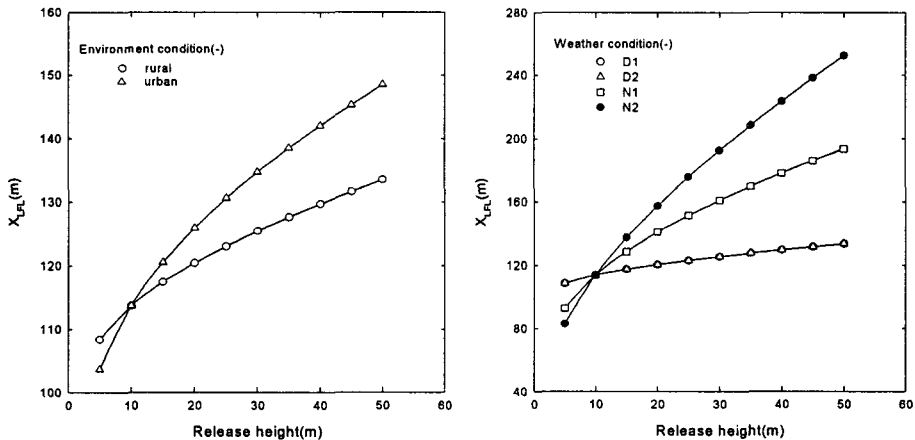


<그림 2> 연소하한거리(X_{LFL}) 미치는 바람속도의 영향

누출높이가 고려되지 않은 BM모델에서는 표준조건에서 X_{LFL} 이 약 235 m를 나타내었으나 HMP모델에서는 <그림 3>에서와 같이 누출높이가 증가할수록 X_{LFL} 이 증가하고, 주간보다는 야간에서, 그리고 시골보다는 도시에서 누출높이의 영향이 상당히 증가하고 있다.

이것은 식 (4)에서와 같이 누출높이가 증가함에 따라 증기가 지표면에 도달되는 거리 (X_{TD})는 증가하고, X_{TD} 에서의 농도(C_{TD})는 감소하지만 농도의 감소효과보다 거리의 증가효과가 상대적으로 크기 때문이다. 이와 같이 주위의 환경조건과 지리적 조건에 따라

X_{LFL} 에 미치는 영향이 변화하는 것은 대기안정도의 차이에 의해 실제의 바람속도가 변화되기 때문으로 보인다.



(a) Environmental condition

(b) Weather condition

<그림 3> 연소하한거리(X_{LFL}) 미치는 환경조건 및 지리적 조건의 영향

이밖에 상대습도와 대기온도는 X_{LFL} 에 거의 영향을 미치지 않았다.

따라서 이와 같은 결과를 바탕으로 누출조건(누출공 직경, 누출높이)과 환경 및 지리적 조건(바람속도, 주간 또는 야간, 시골 또는 도시)에 따른 플래쉬화재사고의 피해범위 예측을 통해 비상조치계획을 수립할 수 있다.

5. 결론

무거운 가스인 크실렌 증기의 누출에 의한 플래쉬화재에서 사고결과에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다. 그 결과, 연소하한거리(X_{LFL})는 누출공의 직경이 클수록 급격히 증가하였으며, 1 m/sec 이하의 바람속도에서는 일정한 높이에서 누출되는 경우가 지표면 누출보다 적은 연소범위를 나타내었다.

그러나 바람속도가 증가할수록 지표면 누출에서는 X_{LFL} 가 크게 변화하지 않았으나 일정한 누출높이에서는 바람속도와 누출높이가 증가할수록 X_{LFL} 가 증가하였다. 이때, 주간 보다는 야간에서, 그리고 시골보다는 도시에서 누출높이의 영향이 상당히 증가하였다.

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

6. 참고 문헌

- [1] International Labor Organization(ILO), "Prevention of Major Industrial Accident", International Labor Office, Geneva, No. 174(1993).
- [2] Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guidelines for Hazard Evaluation Procedure", AIChE, New York(1985).
- [3] CCPS, "Guidelines for Process Safety Fundamentals on General Plant Operations", AIChE, New York(1995).
- [4] CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York(1989).
- [5] Crowl, D.A. and Louvar, J.F., "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", Prentice-Hall Inc., New York(1990).
- [6] Process Safety Institute and JBF Associates Inc., "Consequence Assessment and Mitigation", AIChE, New York(1994).
- [7] Lees, F.P., "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, Botterworths-Heinemann Ltd., London and Boston(1991).
- [8] Britter, R.E., and McQuaid, J., "Workbook on the Dispersion of Dense Gases", Health and Safety Executive(HSE), No. 17, U. K.(1988).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Eisenberg, N.A., Lynch, C.J., and Breeding, R.J., "A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills", CG-D-136-75(NTIS ADA-015-245), Office of Research and Development of Coast Guard, June (1975).

저 자 소 개

김 태 옥 : 명지대학교 공과대학 화학공학과 교수(공학박사), 명지대학교 산업대학원장, 사회교육원장, 보육교사교육원장, 시스템안전센터 소장, 관심분야는 가스안전, 공정 위험성 평가 및 위험기반검사

이 현 창 : 한국안전이엔씨 대표 및 명지대학교 산업기술연구소 책임연구원(공학박사), 관심분야는 위험기반검사 및 정량적 위험성 평가

함 병 호 : 노동부 경기지방노동청 안산지청(공학박사), 관심분야는 안전관리제도 및 정량적 위험성 평가

조 지 훈 : 한국산업안전공단 교육원 교수(공학박사), 관심분야는 정량적 위험성 평가

신 동 일 : 명지대학교 공과대학 화학공학과 교수(공학박사), 관심분야는 초고속·대용량 컴퓨팅을 이용한 화재·폭발 시뮬레이션

장 서 일 : 명지대학교 리서치파크 전임연구원(공학박사), 관심분야는 안전관리 비용-편익분석 및 화학공정 위험성 평가

저 자 주 소

김 태 옥 : 경기도 용인시 처인구 남동 명지대학교 공과대학 화학공학과

이 현 창 : 경기도 용인시 처인구 김량장동 321-13 2층

함 병 호 : 경기도 군포시 재궁동 한성목화 APT 123-501

조 지 훈 : 인천광역시 부평구 기능대길 25 한국산업안전공단 교육원

신 동 일 : 경기도 용인시 처인구 남동 명지대학교 공과대학 화학공학과

장 서 일 : 경기도 용인시 처인구 남동 명지대학교 리서치파크