

나프타분해플랜트의 부탄추출공정에서 부탄증기의 연속누출에 의한 화재사고의 영향평가

The Consequence Analysis for Fire Accidents
by the Continuous Release of Butane Vapor
in the Debutanizing Process of Naphtha Cracking Plant

윤 대 건*
Yoon, Dae-Keon
이 현 창*
Lee, Hern-Chang
함 병 호**
Ham, Byeong-Ho
조 지 훈***
Cho, Ji-Hoon
김 태 옥****
Kim, Tae-Ok

Abstract

The consequence analysis for jet and flash fire accidents by the continuous release of butane vapor was performed and effects of process variables on consequences were analyzed in standard conditions.

For the 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 for the jet fire accident, shape and size of the flame could be predicted and thermal radiation estimated by API model at 200 m distance from release point was 1.5 kW/m², and that for the flash fire accident, effect range was 11.2~120.2 m.

Also, 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, effects of operating pressures on X_{UFL} were smaller

* 명지대학교 대학원 화학공학과
** 노동부 산업안전국 전문위원, 공학박사
*** 한국산업안전공단 산업안전연구원 조교수, 공학박사
**** 명지대학교 공과대학 화학공학과 교수

내장재의 연소 및 독성가스 발생 특성

(about 1/10) than those on XLFL for the flash fire accident.

Key words : Consequence analysis, Fire accidents, Continuous release, Butane vapor

국문요약

나프타분해플랜트의 부탄추출공정에서 부탄증기의 연속누출에 의한 제트화재와 플래쉬화재의 사고 결과에 대한 영향을 평가하고 사고결과에 미치는 공정변수들의 영향을 해석하였다.

877 kPa과 346.75 K의 공정조건에서 부탄증기가 87.8 kg/s의 속도로 8 m의 높이에서 연속누출되는 경우에 표준조건으로 설정한 대기 및 환경조건에서 사고결과를 해석한 결과, 제트화재에서는 화염의 형태와 크기를 예측할 수 있었으며 누출지점으로부터 200 m에서 API모델로 산출한 복사열은 약 5 kW/m²이었고 플래쉬화재가 일어날 수 있는 연소범위는 11.2~120.2 m이었다.

그리고 사고결과에 미치는 조업압력의 영향은 조업온도보다 크며 압력이 증가할수록 사고결과 값이 증가하였다. 이때 플래쉬화재에서 X_{UFL}에 미치는 공정압력의 영향은 XLFL에서보다 약 1/10이하를 나타내었다.

1. 서 론

화학공장에서는 유해하고 위험성이 큰 원료나 생산품을 많이 취급하기 때문에 화재, 폭발, 독성물질의 누출 등과 같은 사고발생의 잠재 위험성이 클 뿐만 아니라 사고의 영향이 공장내부에만 국한되지 않고 인근지역에 까지 치명적인 영향을 미치는 중대산업사고로 발생하기도 한다.

중대산업사고는 사고의 영향이 치명적이고 피해도도가 매우 크기 때문에 사전에 설비상에 잠재하고 있는 모든 사고의 위험요소를 발굴하여 제거하거나 사고의 영향을 최소화하기 위한 공정 위험성 평가가 선행되어야 한다. 위험성 평가에는 설비상에 잠재하고 있는 위험의 형태를 발견하기 위한 정성적 평가와 위험요소들이 사고로 발전할 가능성을 확률적으로 산출하고 사고결과를 사전에 예측하기 위한 정량적 평가가 있다^{1~3)}. 그리고 정량적 위험성 평가 중에서 사고영향분석(consequence analysis)은 사고의 영향을 최소화하기 위한 완화대책을 마련하기 위한 것이다.

사고영향분석은 공정내에 있는 화학물질의 누출을 가정하여 화재, 폭발, 독성물질의 분산 등으로 인하여 발생되는 복사열, 과압, 독성 등의

영향을 평가하는 것으로 이때 사용되는 모델로는 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 변수들을 고려하여야 한다.

가스누출에 의한 사고결과에 영향을 평가하기 위한 연구는 가상 구조물에 의한 실험적 접근방법에 의한 모델의 개발, 이론적 접근에 의해 사람 및 구조물 등에 미치는 사고영향을 평가하는 방법, 그리고 기존에 제시된 모델의 단점을 개선·보완하기 위한 연구가 주로 수행되고 있다⁷⁾. 그러나 국내에서는 설비의 신설이나 공정을 변경하는 경우에 정량적 위험성 평가에 의한 비상조치계획의 수립이 법적으로 요구되고 있으나 이에 관한 학문적 기초연구가 부족한 상태에서 일부의 공장에서만 외국에서 개발된 컴퓨터 소프트웨어를 사용하여 사고영향을 평가하고 이를 현장에 적용하고 있다. 또한 지금까지 제시된 이론식을 사용하여 사고영향을 평가하는 경우에도 사고형태와 평가방법이 다양하고 복잡하여 적용하고자 하는 공정에 적합한 모델을 선정하기가 어려울 뿐만 아니라 사용된 모델에 대한 정확한 자료와 정보가 미흡하여 체계적인 평가방법을 알지 못하고 있다.

중대산업사고 중의 하나인 화재에는 공정의 파이프에서 누출된 가스가 점화되어 길고 좁은 형태의 화염을 형성하는 제트화재(jet fire), 저장탱크에서 가연성 액체가 누출되어 형성되는 풀화재(pool fire), 누출된 가스가 분산되어 점화원과 빠르게 접촉되어 연소하는 플래쉬화재(flash fire), 그리고 화재와 폭발의 복합형태를 갖는 비등액체 증기팽창폭발(BLEVE) 등이 있다.^{8~10)}

제트화재의 영향평가는 주로 미국 석유화학협회에서 규정하는 API모델을 사용하여 해석하는데 이 모델은 Cook 등¹¹⁾이 제시한 복사열의 분율과 Brzustowski 등⁶⁾이 제시한 관심거리에서 복사열을 산출하여 해석하는 방법이다. 또한 네덜란드의 응용과학연구소(TNO)에서는 누출증기와 공기가 양론비로 혼합되어 실린더 형태의 화염을 형성한다고 가정한 TNO제트화재모델을 제시하였으나¹²⁾ 이 모델은 바람속도가 매우 느린 경우에 적용이 가능하다.

지금까지 증기누출에 의한 화재의 영향을 평가한 연구로는 Moorhouse 등¹³⁾이 프로판가스 탱크에서 가스가 누출되어 화구화재(fireball)가 발생하는 경우에 대해, 그리고 Shaw 등¹⁴⁾이 n-헵탄의 누출에 의해 풀화재가 발생하는 경우에 대하여 각각 관심거리에 따른 복사열의 변화를 해석하였다. 그리고 함 등¹⁵⁾은 BTX플랜트의 아로미제이트공정에서 크실렌 증기의 누출사고에 의한 화재와 폭발사고에 대한 사고결과를 다양한 이론모델을 사용하여 해석하였다.

본 연구는 heavy가스의 누출에 의한 화재사고의 영향을 평가하는 방법을 제시하고 실제공정에서 공정변수의 변화에 따른 사고결과를 평가하여 피해범위를 사전에 정확하게 예측함으로써 사고에 대비할 수 있도록 하고자 하였다. 이를 위하여 대부분의 석유화학공장에서 보유하고 있는 나프타분해플랜트에 있는 부탄추출공정에서 부탄증기가 연속적으로 일정한 높이에서 누출되는 경우에 대하여 제트화재와 플래쉬화재의 사고결과에 대한 영향평가를 실제공정에 대하여 수행하고, 이를 바탕으로 사고결과에 미치는 공정변수들의 영향을 해석하였다.

2. 매개변수의 산출이론

Heavy가스인 부탄증기의 연속누출에 의한 제트화재와 플래쉬화재의 사고영향을 평가하기 위하여 누출원모델로부터 누출량을 산출하고 일정한 높이에서 누출된 증기의 분산이론, 그리고 각 사고들의 결과값들을 산출하기 위한 이론을 해석하였다.

2.1 누출원모델

화학공정에서 가연성, 인화성, 폭발성 가스가 연속적으로 누출공을 통하여 누출되는 경우에 누출기체의 유속이 음속인 경우에는 식 (1)에 의해 초기 누출속도를 산출할 수 있다.^{5,16)}

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

여기서 Q는 연속 누출량(kg/s), C_D는 누출계수(-), A는 누출공의 단면적(m²), P_S는 공정압력(Pa), γ 는 열용량비, M은 누출물질의 분자량(kg/kmol), R은 기체상수(J/kmol·K), 그리고 T_S는 조업온도(K)이다. 이때 누출기체의 흐름이 (P_a/P_S) < (P/P_S)_c인 경우에 음속흐름으로 판정하며 누출공을 통한 기체의 최대흐름에서 얻어지는 압력비는 용기누출인 경우에 식 (2)와 같다.⁵⁾

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

여기서 P_a는 대기압이다.

2.2 분산모델

가연성 증기의 연속누출에서는 식 (3)에 의해 산출한 Richardson수(Ri₀)가 0.003보다 클 때 heavy가스 분산모델이 적용된다.^{6,17)}

$$Ri_0 = \frac{g(\rho_a - \rho_v)v}{\rho_a U_{10}^3 d_S} \quad (3)$$

여기서 g는 중력가속도(m/s²), v는 부피유속

(m³/s), U₁₀은 10 m의 누출높이에서 바람속도 (m/s), ρ_{rel}과 ρ_a는 누출물질과 공기의 밀도 (kg/m³), 그리고 d_s는 누출공의 직경(m)이다.

Heavy가스가 일정한 높이에서 연속누출되는 경우에는 주로 Hoot 등¹⁸⁾이 제시한 HMP모델을 사용하는데 누출된 증기가 플럼(plume)을 형성하고 그 플럼이 지면에 도달하게 되는 거리, X_{TD}(m)와 그때의 농도, C_{TD}(kg/m³)는 각각 식 (4) 및 식 (5)와 같이 표시된다.

$$X_{TD} = X_m + 0.56d_s \left\{ \frac{U}{\left[gd_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_a} \right) \right]^{1/2}} \right\} \left(\frac{U}{u} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\left\{ \left(\frac{\Delta h}{d_s} \right)^3 \left[\left(2 + \frac{H}{\Delta h} \right)^3 - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

$$C_{TD} = 3.1 \left(\frac{u \rho_{rel}}{U d_s^2} \right) \left(\frac{H + 2\Delta h}{d_s} \right)^{-1.95} \quad (5)$$

여기서 X_m은 플럼이 최대로 상승한 지점까지의 수평거리(m), U는 누출지점에서 바람속도, u는 누출물질의 출구속도, H는 누출높이이며 누출물질이 플럼을 형성하여 최대로 상승하는 높이(Δh)는 식 (6)과 식 (7)에 의해 산출한 값 중에서 적은 값을 사용한다.

$$\Delta h = 1.32 d_s \left[\frac{u}{U} \right]^{1/3} \left[\frac{\rho_{rel}}{\rho_a} \right]^{1/3} \left\{ \frac{u}{\left[gd_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \right\}^{2/3} \quad (6)$$

$$\Delta h = 2.96 \times \frac{u d_s}{\left[gd_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \quad (7)$$

또한 플럼이 지면에 도달할 때의 ppm농도 (C_{TD,ppm})와 하강한 증기가 안정된 흐름을 갖기 위한 임계조건이 형성되는 거리(X_C)는 각각 식 (8)과 식 (9)에 의해 산출할 수 있다.

$$C_{TD,ppm} = C_{TD} \left(\frac{RT_a \times 10^6}{MP_a} \right) \quad (8)$$

$$X_C = X_{TD} \left(\frac{5,000}{C_{TD,ppm}} \right)^{-1.538} \quad (9)$$

여기서 T_a는 대기온도(K)이다.

산출하고자 하는 관심거리(X)에서 누출물질의 농도, C(kg/m³)는 X < X_C인 경우에는 식 (10)으로부터, 그리고 X > X_C인 경우에는 식 (11)로부터 각각 산출할 수 있으며 일반적으로 X_{TD}가 X_C보다 큰 경우에는 X_C가 X_{TD}와 동일하다고 가정한다.

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

$$C = C_{TD} \left(\frac{X_C}{X_{TD}} \right)^{-0.65} \left(\frac{X}{X_C} \right)^{-1.7} \quad (11)$$

또한 플럼이 최대로 상승한 지점에서의 농도 (C_m)와 플럼이 최대로 상승하는 지점까지의 바람방향 거리는 각각 식 (12)와 식 (13)에 의해 산출할 수 있다.

$$C_m = 2.15 \left(\frac{v \rho_{rel}}{U d_s^2} \right) \left(\frac{\Delta h}{d_s} \right)^{-1.85} \quad (12)$$

$$X_m = d_s \left\{ \frac{u}{\left[gd_s \left(\frac{\rho_{rel} - \rho_a}{\rho_{rel}} \right) \right]^{1/2}} \right\}^2 \quad (13)$$

$$\left(\frac{U}{u} \right)$$

누출물질의 대기분산에 영향을 미치는 인자들은 여러 가지가 있으나 가장 중요한 인자는 바람속도로¹⁹⁾ 누출된 위치에서의 실제속도를 사용하는 것이 가장 정확하지만 산출하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 10 m에서 측정된 바람속도(U₁₀)를 기준으로 식 (14)에 의해 산출한다.

$$U = \left(\frac{H}{H_R} \right)^{f_s} U_{10} \quad (14)$$

여기서 H_R은 기준높이인 10 m이고 대기안정도,

f_s 의 값은 문헌²⁰⁾에 수록되어 있다.

연속누출과 순간누출을 구분하는 방법은 임의의 지점까지 누출기체가 이동한 시간(t_r)이 누출 시간(t_d)보다 클 때 연속누출로 판정하며 이때 이동시간은 식 (15)에 의해 산출할 수 있다.^{6,21)}

$$t_r = \frac{2X_r}{U} \quad (15)$$

여기서 X_r 은 이동거리이다.

파이프에서 누출되는 기체의 밀도는 파이프내의 압력에 따라 누출온도가 변하기 때문에 일반적으로 파이프내의 압력이 5 기압보다 낮은 경우에는 누출온도가 파이프내 물질의 온도와 동일하고 5 기압보다 큰 경우에는 등엔탈피 팽창으로 가정하여 산출한다.⁵⁾

2.3 제트화재모델

제트화재 현상을 특성화하기 위하여 가장 일반적으로 사용되는 API RP-521 모델²²⁾은 일정한 누출속도로 지표면의 수직방향으로 누출되어 완전연소되는 경우에 적용되며 대기중의 매연과 CO₂ 등에 의한 전도도의 감소, 그리고 불꽃충돌로 인한 열전달속도의 변화는 고려하지 않는다. 이때 수직방향으로 발산되는 복사열, I_{th} (kW/m²)는 1973년에 Brzustowski 및 Sommers^{6,22)}에 의해 제시된 식 (16)에 의해 산출할 수 있다.

$$I_{th} = \frac{\tau \beta Q_{th}}{4\pi D_j^2} \quad (16)$$

여기서 Q_{th} 는 제트화재에 의한 총 방출열(kW), D_j 는 불꽃중심으로부터 관심지점까지의 거리이며 제트화재의 불꽃에 의해 발산되는 열의 대기 투과도, τ 는

$$\tau = 2.02 (P_w \cdot X_s)^{-0.09} \quad (17)$$

이다. 여기서 P_w 는 수증기의 분압(Pa)이고 X_s 는 불꽃표면으로부터 관심지점까지의 직선거리이다. 그리고 식 (16)에서 복사열의 분율(β)은 일반적으로 Cook 등¹¹⁾이 출구속도를 사용하여 실험적인 방법에 의해 제안된 식 (18)을 사용하

여 산출한다.

$$\beta = 0.321 - 0.000418u \quad (18)$$

여기서 누출물질의 출구속도는 누출할 때의 제트마하수(jet Mach number), Ma_j 와 음속, u_{sonic} (m/s)을 이용한 식 (19)에 의해 산출할 수 있다.

$$u = Ma_j u_{sonic} \quad (19)$$

여기서

$$Ma_j = 11.61 \times 10^{-2} \times \frac{Q}{P_s T_s^2} \left(\frac{T_s}{\gamma M} \right)^{0.5} \quad (20)$$

$$u_{sonic} = 91.2 \left(\frac{\gamma T_s}{M} \right)^{0.5} \quad (21)$$

또한 식 (16)에서 Q_{th} 는 식 (22)와 같이 표시되며

$$Q_{th} = Q H_c \quad (22)$$

여기서 H_c 은 누출물질의 순연소열(kJ/kg)이다.

그리고 불꽃의 길이, L (m)은 다음과 같이 표시되며

$$L = (X_t^2 + Y_t^2)^{1/2} \quad (23)$$

여기서 X_t 및 Y_t 는 제트화재에 의한 불꽃끝점(flame tip)의 좌표로 1976년 Brzustowski에 의해 제시되어 미국연방화재협회(NFPA)의 기준에 규정된 절차에 따라 식 (24)~식 (29)에 의해 산출할 수 있다.²²⁻²⁴⁾

$$X_t = \bar{X}_t d_s \left(\frac{\rho_{rel}}{\rho_a} \right)^{1/2} \left(\frac{u}{U} \right) \quad (24)$$

$$Y_t = 2.04 \bar{X}_t^{0.28} d_s \left(\frac{\rho_{rel}}{\rho_a} \right)^{1/2} \left(\frac{u}{U} \right) \quad (25)$$

$$\bar{S}_t = 1.04 \bar{X}_t^2 + 2.05 \bar{X}_t^{0.28} \quad \text{for } \bar{S}_t \leq 2.35 \quad (26)$$

$$\bar{X}_i = \bar{S}_i - 1.65 \quad \text{for } \bar{S}_i > 2.35 \quad (27)$$

$$\bar{S}_i = 2.04 C_{LP}^{-1.03} \quad \text{for } C_{LP} \leq 0.5 \quad (28)$$

$$\bar{S}_i = 2.17 C_{LP}^{-0.625} \quad \text{for } C_{LP} > 0.5 \quad (29)$$

여기서 C_{LP} 는 연소하한 농도인자로 식 (30)에 의해 산출할 수 있으며

$$C_{LP} = C_L \left(\frac{u}{U} \right) \left(\frac{M}{M_a} \right) \quad (30)$$

식 (30)에서 C_L 는 누출물질의 연소하한 농도이고 M_a 는 공기의 분자량이다.

그리고 불꽃 중심점의 위치, 즉 누출지점에서부터 수평방향 거리(X_o)와 수직방향 거리(Y_o)는 식 (31) 및 식 (32)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$X_o = \frac{X_i}{2} \quad (31)$$

$$Y_o = \frac{Y_i}{2} \quad (32)$$

2.4 플래쉬화재모델

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

증기운의 연소과정을 완벽하게 해석하기는 어려우나 일반적으로 적은 양의 증기가 누출되는 경우에는 거대한 과압이 생성되지 않고 플래쉬화재를 일으키며 이와 같은 플래쉬화재는 초기에 모든 방향으로 급격히 팽창되고 초기 연소후에는 부력으로 인하여 상방향으로 팽창이 일어난다²⁵⁾. 그러나 제한된 실험결과와 경험적인 자료에 의하면 과압에 의한 충격이 발생하기 위해서는 초기에 일정한 크기를 갖는 증기운이 난류를 형성함과 동시에 제한이 필요한 것으로 알려져 있다⁴⁾.

플래쉬화재의 영향을 평가하기 위하여 1975년

Eisenberg 등²⁵⁾이 Stefan-Boltzmann식을 사용하여 복사열을 기준으로 한 모델을 제시하고 열플럭스의 산출식을 제시하였으나 열플럭스를 산출하기 위해서는 매개변수로 화염의 온도가 필요하기 때문에 비현실적이다.

따라서 단순한 접근방법은 피해범위가 어떤 지역내로 제한된다고 가정하고 적절한 분산모델을 사용하여 LFL의 1/2 거리 또는 LFL 거리를 산출하는 방법이다. 이 방법은 연소기간이 짧고 연소과정은 강렬하지 않으며 증기운의 열팽창은 부력으로 인하여 수직적으로 일어난다고 가정한 것으로 이 가정은 실제현상과 차이가 있으나 계산과정을 단순화할 수 있는 장점이 있고 분산모델로부터 얻을 수 있는 증기운의 크기만을 요구하기 때문에 흔히 사용된다⁴⁾.

3. 화재사고의 영향평가

3.1 누출 시나리오

본 연구에서 화재사고의 영향평가를 수행한 나프타분해플랜트는 원유를 상압증류하여 얻어진 나프타를 원료로 사용하여 내부온도가 820℃인 열분해탑에서 열분해한 다음에 가열, 냉각, 압축공정을 거쳐 1차로 수소를 분리한다. 그리고 디메타나이저(demethanizer)에서 C_1 성분을 분리하고 디에타나이저(deethanizer)와 디프로파나이저(depropanizer)에서 각각 C_2 와 C_3 성분을 분리하며 C_4 이상의 성분은 디부타나이저(debutanizer)로 공급된다.

부탄증기의 누출사고가 발생한다고 가정한 부탄추출공정의 전형적인 공정 및 배관 계장도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 디프로파나이저의 하부 생성물인 C_4 이상의 성분들은 펌프에 의해 액체상태로 디부타나이저에 공급되고 346.75 K와 6.7 기압의 조업조건에서 분별증류되어 C_5 이상의 성분들은 디부타나이저의 하부로 나오고 거의 순수한 C_4 증기는 상부로 나온다. 그리고 C_4 증기는 응축기를 통과하면서 액상으로 전환되어 환류드럼(reflux drum)에 저장한 후 불순물(C_5 이상의 성분)은 펌프에 의해 디부타나이저로 재공급되고 추출된 C_4 성분은 다른 공정(주로 BTX

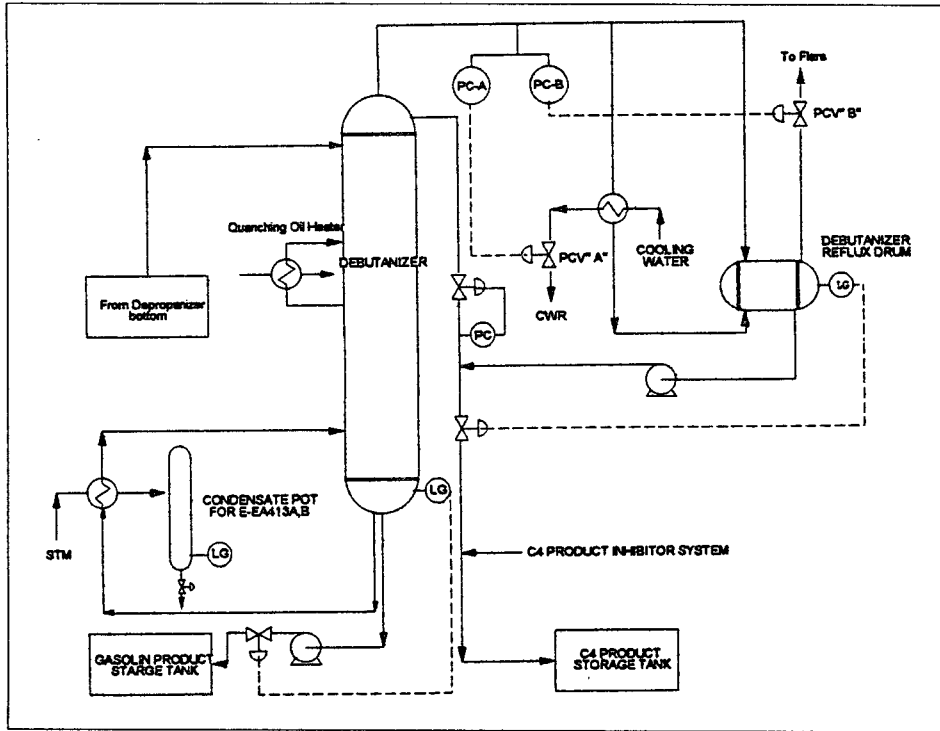


Fig. 1. Typical debutanizing process in the naphtha cracking plant.

공정)에서 얻어진 C₄성분과 함께 부탄 저장탱크로 공급된다. 이때 배관내의 압력을 제어하기 위하여 압력조절기(PC-A, B)가 설치되어 있으며 콘트롤 밸브 A는 응축기의 냉각수 공급라인에 흐르는 냉각수를 조절하기 위하여, 그리고 콘트롤 밸브 B는 플래어스택으로 압력을 방출하기 위하여 각각 설치되어 있다.

따라서 디부타나이저에 대한 정성적 위험성 평가방법인 HAZOP(hazard and operability study)을 수행한 결과, 디부타나이저에서 분리된 C₄성분이 환류드럼으로 공급되는 배관에 설치된 압력조절기 B에 오염물질이 침착되어 정상적인 성능을 발휘하지 못하여 이상압력이 상승하는 경우에 증기를 플래어스택으로 방출하기 위해 설치한 콘트롤 밸브가 작동하지 않아서 배관 내부의 압력이 9.7 기압으로 상승하게 되고 추출된 부탄을 디부타나이저 환류드럼으로 공급하기 위한 배관이 디부타나이저에 용접된 연약 부분에서 누출공이 발생하여 부탄증기의 누출에 의한 제트화재, 플래쉬화재, 그리고 개방공간 증

기운 폭발사고를 예상할 수 있었다.

3.2 매개변수의 산출

부탄증기 누출사고의 영향을 평가하는데 필요한 매개변수들을 산출하기 위하여 본 연구에서는 디부타나이저 상부에서부터 환류드럼 전단과 응축기까지 설치된 파이프내에는 부탄증기만이 존재하고 누출로 인한 파이프 내부에 있는 주흐름의 압력변화는 무시할 수 있으며 부탄증기는 누출후에도 상변화가 일어나지 않는다고 가정하였다.

연속누출에서는 누출공의 직경이 사고결과에 가장 크게 영향을 미치므로¹⁹⁾ 누출공의 직경을 전체 관직경(18 in)의 50%인 0.2286 m로 가정하여 누출공의 면적을 계산하였고 누출계수(C_D)는 가장 큰 값인 1로 가정하였다. 그리고 누출증기를 이상기체로 가정하여 조업조건에서 산출한 γ 값은 1.089이었으며 부탄증기의 물리·화학적 성질들은 문헌값²⁶⁾을 사용하였다.

따라서 누출공에서 연속누출흐름의 음속여부

를 식 (2)에 의해 계산한 결과, $(P/P_s)_c$ 가 0.587로 $P_a/P_s(=0.1066)$ 보다 커서 음속흐름임을 확인하였고 음속흐름의 질량유속을 산출하는 식 (1)을 사용하여 실제 누출량을 산출하였다.

누출된 부탄증기의 분산정도를 산출하기 위하여 10 m의 기준높이에서 바람속도는 1 m/s로 가정하였으나 실제공정에서는 파이프가 지상으로부터 8 m의 높이에 설치되어 있으므로 누출지점에서 바람속도는 식 (14)에 의해 산출하였다. 이때 누출된 지점의 환경조건은 시골(rural)과 대기안정도 B의 조건으로 가정하여 0.07을 사용하였고²⁷⁾ 대기온도는 298 K로 가정하였다. 또한 연속누출을 판단하기 위하여 표준조건인 누출시간 10 분과 관심거리 200 m에서 증기의 이동시간을 식 (15)에 의해 산출한 결과는 406.3 초로 누출시간이 이동시간보다 커서 연속누출임을 확인하였다. 그리고 식 (3)에 의해 산출한 Ri_0 는 1404.96으로 0.003보다 큼을 확인하여 일정한 높이에서 연속누출되는 경우에 대하여 heavy가스 분산모델인 HMP모델을 적용하였다. 이때 누출증기의 밀도는 실제로 누출될 때의 온도가 파이프내의 온도와 같다고 가정하여 이상기체 상태방정식으로 산출하였으며 그 값은 2.368 kg/m^3 이었다.

HMP모델에서는 플럼이 최대로 상승할 때의 높이(Δh), 바람방향거리(X_m)와 그때의 농도

(C_m), 그리고 플럼이 지표면에 닿을 때의 농도를 ppm단위로 환산하여 하강한 증기가 안정된 흐름을 갖기 위한 임계조건이 형성되는 거리(X_c)를 산출하고 산출된 X_{TD} 와 비교한 결과, X_c 가 큰 값을 나타내어(산출된 X_c 와 X_{TD} 의 값은 각각 724.569와 91.853 m이었음) 식 (10)을 이용하여 부탄증기가 연소하한농도(1.8 %) 및 연소상한농도(8.4 %)에 도달하는 거리(X_{LFL} 및 X_{UFL})를 각각 산출하였다.

제트화재에서는 관심거리에서 수직방향으로 방출되는 복사열, 불꽃꼭지점의 위치, 불꽃중심의 좌표값, 그리고 불꽃의 길이를 각각 산출하였다. 이때 불꽃중심에서 대상물까지의 거리를 200 m로, 그리고 상대습도를 70%로 가정하고 수증기 분압은 문헌값²⁶⁾을 사용하였다.

플래쉬화재에서는 피해범위가 연소범위내로 제한되고 이 연소범위내에 위치한 작업자 및 공정설비가 플래쉬화재에 의해 발산되는 복사열에 의해 치명적인 손상을 받게 된다고 가정하여 HMP모델에 의해 산출된 연소범위(X_{LFL} 및 X_{UFL})를 각각 피해범위로 산출하였다.

3.3 사고결과의 영향평가

3.2절에 의해 부탄증기의 연속누출 사고에 대한 매개변수들의 산출결과는 Table 1과 같으며 8 m의 높이에서 누출된 부탄증기가 분산되기 시

Table 1. Results of the consequence analysis for fire accidents by the continuous release of butane vapor.

Model	Specifications			Units	Remarks
Source term	Continuous	Mass flow rate	87.765	kg / s	
Dispersion	Concentration	C_{TD}	0.04552	kg / m ³	10min
		C_{200}	0.02745		
	Distance	X_{TD}	91.853	m	
		X_{LFL}	120.2		
		X_{UFL}	11.2		
Jet fire	Flame	Length		38.567	n
		Tip	X_t	3.8936	
			Y_t	38.370	
		Center	X_o	1.9468	
			Y_o	19.165	
	Thermal radiation	I_{th}	1.4864	kW / m ²	200m
Flash fire	Thermal effect area	X_{LFL}	120.2	m	
		X_{UFL}	11.2		

작하여 200 m지점에 도달할 때의 농도는 0.02745 kg/m^3 으로 연소하한 농도값($0.018 \times 2.368 = 0.042624 \text{ kg/m}^3$)보다 적기 때문에 연소 범위를 벗어났음을 알 수 있었다. 그러나 실제로 연소가 가능한 범위는 누출지점에서부터 11.2~120.2 m의 범위로 누출지점을 중심으로 반경 120.2 m이내의 지역은 1내지 2종의 방폭지역으로 구분하여 관리하여야 할 뿐만 아니라 적절한 안전상의 조치가 필요한 것으로 평가되었다.

제트화재에서는 누출지점에서 바람속도가 0.985 m/s 이었고 지표면에 대하여 48° 의 각도와 38 m의 길이를 갖는 불꽃을 형성함을 알 수 있었다. 그리고 불꽃중심으로부터 수직방향으로 200 m의 거리, 즉 누출지점의 지표면에서 31.8 m의 수평거리에서 받게 되는 복사열은 1.4686 kW/m^2 로 미국연방비상관리청(FEMA)에서 제시한 자료²⁸⁾에 따르면 일반적으로 1 kW/m^2 의 복사열에 115초 정도가 노출되는 경우를 고통한계시간으로 규정하고 있음을 고려할 때 누출지점으로부터 200 m이내의 지역은 위험하다고 생각된다.

따라서 누출된 부탄중기가 UVCE로 전이되지 않고 피해범위가 연소범위내로 제한된다고 가정한 플래쉬화재에서는 8 m 높이의 누출지점을 중심으로 120.2 m이내의 지역이 피해범위가 됨을 알 수 있었다.

4. 사고결과에 미치는 공정변수의 영향

3.1절과 같이 가정한 누출사고는 비정상상태의 공정조건에서 발생하므로 본 연구에서는 나프타분해플랜트의 실제 조업조건하에서 부탄가스의 누출사고의 영향을 평가한 3절의 결과를 바탕으로 공정변수인 조업압력과 온도를 변화시키면서 이들 공정변수가 각 사고결과에 미치는 영향을 평가하여 증기 누출사고의 영향평가에 활용할 수 있도록 하였다. 이때 사고결과에 영향을 미치는 대기조건과 환경조건은 3절에서 선택한 기준조건을 사용하였다. 즉, 기준조건으로 설정한 대기 및 환경조건은 누출공의 직경이 0.22 m, 관심거리가 200 m, 상대습도가 70%, 대기온도

가 298 K, 누출높이가 8 m, 10 m의 높이에서 바람속도가 1 m/s, 시골, 그리고 대기안정도가 B 이었다.

연속누출에 의한 제트화재에서 복사열에 미치는 조업압력과 온도의 영향은 Fig. 2와 같이 조업압력이 증가할수록, 그리고 조업온도가 감소할수록 복사열이 증가할 뿐만 아니라 조업온도보다 압력이 복사열에 크게 영향을 미치고 있다. 이것은 식 (16)에서와 같이 불꽃의 형태변화에 의해 불꽃중심에서부터 관심거리까지의 거리가 변화하는 것보다 복사열의 분율과 방출열의 변화에 의해 복사열이 크게 변화되기 때문으로 생각된다. 즉, 복사열의 분율은 식 (18)~식 (21)에서와 같이 조업압력과 온도의 증가에 따라 각각 감소 또는 증가하고 누출량에 비례하는 총 방출열량은 식 (1)에서와 같이 공정압력에 정비례하고 온도의 $-1/2$ 승에 비례하기 때문이다

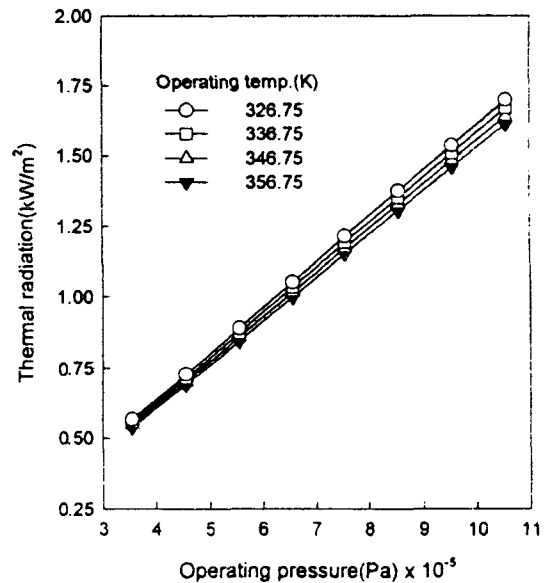


Fig. 2. Effects of operating pressures and temperatures on thermal radiations for the jet fire model.

따라서 제트화재에서 사고결과를 모사한 결과, 복사열은 30°C 의 온도증가에 대하여 약 0.03 kW/m^2 가 감소하지만 압력에 대해서는 거의 비례적으로 증가하여 약 1 기압의 압력증가에 대해 약 0.15 kW/m^2 이 증가하였다. 따라서 누출이

진행됨에 따라 공정압력은 다소 감소하고 공정 온도는 화재의 영향으로 다소 증가할 것으로 예상되기 때문에 최초 누출시의 조건에서 산출된 최대의 복사열을 사용하여 피해를 예측하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

플래쉬화재에서 연소하한거리(X_{LFL})에 미치는 조업압력과 온도의 영향은 Fig. 3에서와 같이 조업온도보다 압력의 증가에 따라 X_{LFL} 이 상당히 증가하고 있다. 이것은 2.2절에서와 같이 공정조건에 따라 누출속도와 누출량, 누출증기의 밀도, 플럼형성의 높이 등의 변화가 복잡다양하게 변화하지만 누출증기의 분산이 바람속도에 크게 영향을 받기 때문에 지상누출의 경우에는 조업온도보다 압력의 증가에 따라 일정한 지점에서의 증기농도가 증가되어 분산지역도 증가되는 것으로 생각된다. 이때 공정압력이 높을수록 X_{LFL} 에 미치는 조업압력과 온도의 영향이 증가하였고 1 기압의 압력변화에 대하여 연소범위가 약 10 m 증가하였다.

이와 같은 현상은 연소상한거리(X_{UFL})에 미치는 공정변수의 영향을 나타낸 Fig. 4에서도 매우 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 X_{UFL} 에서는 X_{LFL} 에서보다 증기의 농도가 매우 높기 때문

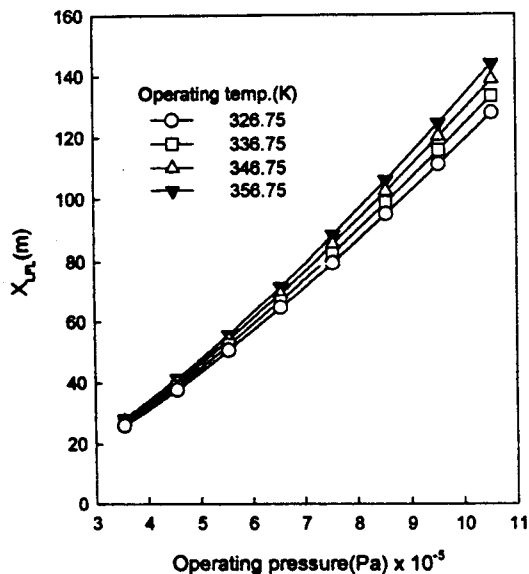


Fig. 3. Effects of operating pressures and temperatures on X_{UFL} for the flash fire model.

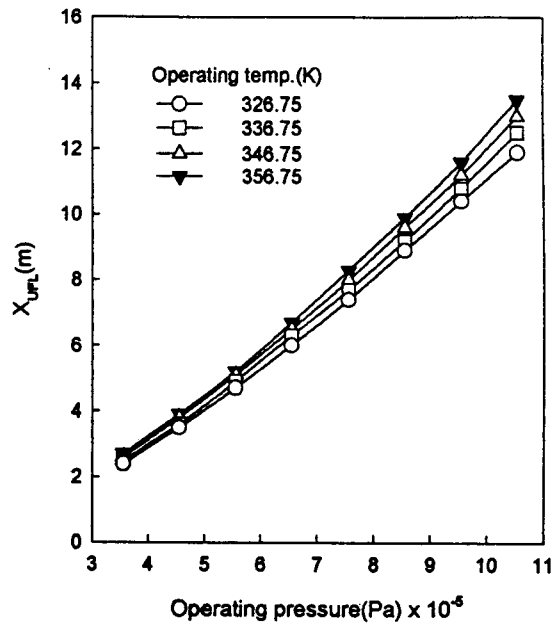


Fig. 4. Effects of operating pressures and temperatures on X_{LFL} for the flash fire model.

에 공정변수의 영향이 감소되어 공정변수의 변화에 따른 X_{UFL} 의 민감도가 X_{LFL} 에서보다 약 1/10이하를 나타내었다.

이상의 결과와 같이 heavy가스 누출에 의한 화재사고에서 사고결과에 미치는 조업압력과 온도의 영향은 사고의 형태에 따라 다소 차이가 있었으며 누출공의 크기에 따라 누출량, 그리고 바람속도와 대기의 환경조건에 따라 증기의 분산이 변화할 뿐만 아니라 누출지점에서부터 관심거리에 따라 피해정도가 크게 변화하므로¹⁹⁾ 산출조건에 따라 사고결과에 미치는 공정변수의 영향과 민감도는 차이가 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

Heavy가스의 연속누출에 의한 화재사고의 영향을 평가하는 방법을 제시하고 공정변수의 변화에 따른 사고결과를 평가하여 피해범위를 사전에 정확하게 예측하기 위하여 실제공정에서 부탄증기의 연속누출에 의한 제트화재와 플래쉬화재의 사고결과에 대한 영향을 평가하고 사고결과에 미치는 공정변수의 영향을 해석하였다.

877 kPa과 346.75 K의 공정조건으로 운전되는 나프타분해플랜트의 부탄추출공정에서 부탄 증기가 87.8 kg/s의 속도로 8 m의 높이에서 누출되는 경우에 기준조건으로 설정한 대기 및 환경조건에서 사고결과를 해석한 결과, 제트화재에서는 화염의 형태와 크기를 예측할 수 있었으며 누출지점으로부터 200 m에서 API모델로 산출한 복사열은 약 1.5 kW/m²이었고 플래쉬화재가 일어날 수 있는 연소범위는 11.2~120.2 m이었다.

그리고 사고결과에 미치는 조업압력의 영향은 조업온도보다 크며 조업압력이 증가할수록 사고 결과 값이 증가하였다. 이때 플래쉬화재에서 X_{UFL}에 미치는 조업압력의 영향은 X_{LFL}에서보다 약 1/10이하를 나타내었다.

NOMENCLATURES

A : Cross sectional area of the release hole, m²
 C : Downwind concentration of the plume touchdown point, kg/m³
 C₂₀₀ : Downwind concentration at 200 m, kg/m³
 C_D : Discharge coefficient, -
 C_L : Concentration at lower explosive limit, vol. %
 C_{LP} : Concentration parameter at lower explosive limit, -
 C_m : Concentration at the maximum plume rise, vol. %
 C_{TD} : Concentration at the plume touchdown point, kg/m³
 d_s : Diameter of the release hole, m
 D_j : Distance from the flame center to the object, m
 f_s : Function of atmospheric stability, -
 g : Gravitational acceleration, m/s²
 Δh : Height of the maximum plume rise, m
 H : Height of the release point, m
 H_c : Net heat of combustion of the re-

leased material, kJ/m³
 H_R : Reference height of the release point, m
 I_{th} : Thermal radiation, kW/m²
 L : Flame length, m
 M : Molecular weight of the released gas, kg/kgmol
 M_a : Molecular weight of air, kg/kgmol
 M_{aj} : Mach number of jet fire, -
 P_a : Absolute ambient pressure, Pa
 P_S : Operating pressure, Pa
 (P/P_s)_c : Critical flow pressure ratio,
 Q : Rate of mass out flow, kg/s
 Q_{th} : Total heat of radiation by jet fire, kJ/s
 R : Gas constant, J/kgmol.K
 R_{io} : Richardson number, -
 t_d : Duration of the release, s
 t_r : Travel time of released material, s
 T_a : Ambient temperature, K
 T_S : Operating temperature, K
 u : Exit velocity of the release gas, m/s
 u_{sonic} : Sonic velocity of the release gas, m/s
 U : Wind speed at a release point, m/s
 U₁₀ : Wind speed at 10 m height, m/s
 X : Distance to the downwind location of interest, m
 X_o : Horizontal distance from the hole of the jet release to the flame center of the jet release, m
 X_{LFL} : Downwind distance to LFL concentration, m
 X_m : Downwind distance to maximum plume rise, m
 X_r : Travel distance, m
 X_S : Distance from the flame surface to the object, m
 X_t : Distance of X axis of the flame tip, m
 X_{TD} : Downwind distance to plume touchdown, m
 X_{UFL} : Downwind distance to UFL concen-

tration, m
 Y_t : Distance of Y axis of the flame tip, m
 Y_o : Vertical distance from the hole of the jet release to the flame center of the jet release, m
 β : Fraction of heat radiated, -
 γ : Ratio of specific heats equal to C_p/C_v , -
 ρ_a : Density of the ambient air, kg/m³
 ρ_{rel} : Density of the released material following any depressurization, kg/m³
 τ : Atmospheric transmissivity, -

참고 문헌

- Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guidelines for Hazard Evaluation Procedure", CCPS(AIChE), New York(1985).
- Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guidelines for Process Safety Fundamentals on General Plant Operations", CCPS(AIChE), New York(1995).
- International Labor Office(ILO), "Prevention of Major Industrial Accident", ILO, Geneva, No. 174(1993).
- Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", CCPS(AIChE), New York(1989).
- Crowl, D. A. and Louvar, J. F., "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", Prentice-Hall Inc., New York(1990).
- Process Safety Institute and JBF Associates Inc., "Consequence Assessment and Mitigation", American Institute of Chemical Engineer(AIChE), New York(1994).
- Vandenberg A. C. and H. G. the TNO Prins Maurits Lab., "Current Research at TNO on Vapor Cloud Explosion Modelling", TNO Prins Maurits Laboratory, Netherlands(1994).
- Yuen, W. W. and Tien, C. L., "Calculation of Emissivity of Luminous Flames", Vol. 7, Combustion Science Technology, pp. 25-31(1973).
- Bagster, D. F. and Pitblado, R. M., "Thermal Hazards in the Process Industry", Chem. Eng. Prog., 33, 69(1989).
- National Fire Protection Association(NFPA), "NFPA Code 325M: Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, and Volatile Solids", NFPA(1991).
- Cook, D. K., Fairweather, M., and Hammonds, J., "Sizing and Radiative Characteristics of Natural Gas Flares: Part 2 - Empirical Model", Chem. Eng. Res., 65, 318(1987).
- Vandenbosch, C. J. H. and H. G. the TNO Prins Maurits Lab., "Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials(TNO Green Book), Chapter 1, Damage Caused by Heat Radiation", 2nd ed., CPR 16E, Netherlands Organization of Applied Scientific Research(TNO), Hague(1992).
- Moorhouse, J. and Pritchard, M. J., "Thermal Radiation Hazards from Large Pool Fires and Fireballs- A Literature Review", Assessment of Major Hazard Symposium, Manchester, England(1982).
- 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).
- 함병호, 조지훈, 이영순, 김태욱, "BTX플랜트의 아로메이스트공정에서 크실렌 증기누출사고의 영향평가", 한국 Risk관리학회지, 6, 237(1996).
- Lees, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 2, Butterworths-Heinemann Ltd., Vol. 2, London and Boston(1991).
- Britter, R. E., and McQuaid, J., "Workbook on the Dispersion of Dense Gases", Health and Safety Executive(HSE), No. 17, U. K.(1988).
- 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).
19. 함병호, "크실렌증기 누출사고의 영향평가 및 사고결과에 미치는 매개변수의 민감도 분석", 박사학위 논문, 명지대학교 대학원(1996).
 20. 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).
 21. Blewitt, D. N., Chan, S. T., and Rodean, H. C., "Conduct of Anhydrous Hydrofluoric Acid Spill Experiments", International Conference on Vapor Cloud Modeling, Center for Chemical Process Safety of AIChE, Cambridge Univ., Massachusetts, pp. 1-38(1987).
 22. American Petroleum Institute(API), "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems : Recommended Practice 521", 3rd ed., API, Washington, D.C., Nov.(1990).
 23. National Fire Protection Association(NFPA), "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 1st. ed., NFPA, Massachusetts (1990).
 24. National Fire Protection Association(NFPA), "The SAFE Handbook of Fire Protection Engineering", NFPA No. SAFE-88, NFPA and Society of Fire Protection Engineering(1988).
 25. 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).
 26. Perry, R. H., Green, D. W., and Maloney, J. O., "Perry's Chemical Engineer's Handbook", 6th ed., McGraw-Hill, New York(1984).
 27. Gugan, K., "Unconfined Vapor Cloud Explosion", Gulf Publishing Co., Houston(1979).
 28. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures", USGPO-1989-626-095-10575, FEMA, DOT, and EPA(1989).