

기상조건에 따른 유해독성염소가스의 기상흐름누출에 관한 예측 및 제어론

김 종 식[†] · 박 종 규

계명대학교 화학공학부

(1999년 8월 2일 접수, 1999년 11월 18일 채택)

The Methodology for Prediction and Control of Hazardous Chlorine Gas Flow Releases as Meteorological Data

Jong-Shik Kim[†] and Jong-Kyu Park

Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Teagu 704-701, Korea

(Received August 2, 1999; accepted November 18, 1999)

요약: 본 스크리닝 방법론에서는 저장탱크 및 압력방출장치로부터 누출되는 기상흐름의 누출에 대한 대기분산 모델링 절차가 고려되었다. 본 연구는 화학장치 설비 중 염소 저장탱크의 누출유형에 따른 누출물의 물성자료들을 포함하는 누출원모델, 분산모델, 기상 및 지형자료들을 TSCREEN 모델에 입력시켜 염소가스의 풍하거리에 따른 1시간 평균 최대 지표면 농도를 산출함으로써 유해독성가스의 누출 예측 및 제어를 위한 스크리닝 방법론을 개발하기 위한 것이다. 연구결과로부터, 공기보다 무거운 가스의 분산유형은 누출물의 상태, 누출 조건, 누출물의 물리·화학적 특성, 누출유형(연속 및 순간누출)에 영향을 받고 있으며, 특히 누출물의 초기(감압) 밀도 및 누출속도 뿐만 아니라 풍속에 커다란 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히, 기상조건(대기안정도 및 풍속)에 따른 유해물질의 대기중 누출을 살펴보았다. 본 스크리닝 방법론은 보다 다종다양한 시나리오들을 선정하여 보편적으로 적용할 수 있는 Sliding Scale 방법론을 개발함으로써 정교한 해석 모델의 적용시 예비 가이드라인으로 활용될 수 있으리라 사료된다.

Abstract: The screening methodology modeling, dispersion modeling procedures for continuous and instantaneous releases of the gas phase flow from the storage tank and pressure relief valve were considered. This study was performed to develop the screening methodology for prediction and control of hazardous/toxic gas releases by estimating the 1-hr average maximum ground-level concentration of Cl₂ gas vs. downwind distance by incorporating source term model including the general/physical properties of released material and release mode of the Cl₂ storage tank of the chemical plant facilities, dispersion model, and meteorological/topographical data into the TSCREEN model. As the results of the study, it was found that dispersion modes of the dense gas were affected by the state of the released material, the released conditions, physical-chemical properties of released material, and the released modes (continuous and instantaneous releases), and especially largely affected by initial (depressurized) density of the released material and release emission rate as well as the wind velocity. Especially, this study was considered to release hazardous material as meteorological data. It was thought that this screening methodology can be useful as a preliminary guideline for application of the refined analysis model by developing the generic sliding scale methodology for various scenarios selected.

Keywords: screening methodology, Cl₂ gas, TSCREEN model, analysis model, sliding scale

1. 서 론

미국의 대기 청정법(the Clean Air Act Amendments of 1990)은 유해 대기독성물질을 목록화하여 누출사고 방지 및 누출영향 극소화를 위한 규제 설정을 요구하고 있다. 여러 가지의 많은 잠재 누출 시나리오로부터 유해 대기독성물질의 누출영향을 정확하게 평가하기 위하여 수학적 모델을 적절하게 적용하는 체계적인 접근방법을 개발할 필요가 있다.

이에 미환경청(USEPA)은 "Workbook of Screening Technologies for Assessing Impacts of Toxic Air Pollutants(Revised)"를 발간하였으며[1,9], 이러한 스크리닝 목적으로 TSCREEN 모델을 개발하였다. 이 workbook은 18가지의 다른 누출 시나리오로부터 야기되는 누출속도와 대기질 농도를 평가하기 위하여 적절한 스크리닝 기술의 선정과 적용방법에 대한 논리적 접근법을 제공하고 있다

[3]. 이러한 스크리닝 기술은 유해위험성평가의 일환으로 안전 및 건강 수준을 위반하는 누출 시나리오들을 개발하기 위하여 고안되었으며, Britter-McQuaid 모델(1989) 및 RVD 모델(1989)들을 포함하고 있다. 유해 대기독성물질의 누출에 대한 스크리닝 기술을 가장 적절하게 선정하기 위해서는 스크리닝에 대한 문제를 규정하는 물리적 상태, 공정 및 누출 조건, 분산특성 등이 고려되어야 하며, 사용자가 필요로 하는 정보, 계산시간, 관련 식들의 양을 가능한 줄이기 위하여 근거 있는 가정들이 설정된다. 또한, 미 환경청은 유해 대기독성물질의 복잡한 누출특성을 모사할 수 있는 정교한 모델(refined model)[7,8]에 대한 일반적인 가이드라인을 제공하고 대기분산모델을 적절하게 적용하는 방법을 예시하기 위하여 1991년에 "Guidance on the Application for Air Toxic Releases"를 작성하였으며[2], 유해 대기독성물질의 누출에 대한 유해위험성 평가를 위하여 ADAM 모델, ALOHA 모델, DEGADIS 모델, HGSYSTEM 모델 및 SLAB 모델 등을 개발하였다.

본 연구에서는 대기분산모델링을 개발함에 있어 스크리닝 절차로는 현재 미 환경청에서 유해대기독성물질의 인체의 건강, 환경

[†] 주 저자 (e-mail: jongskim@kmucc.keimyung.ac.kr)

및 안전에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 유해위험성 평가의 일환으로 개발한 최대 단기 지표면 농도를 예측하는 TSCREEN 모델을 사용하였다. TSCREEN 모델은 유해 대기독성 물질의 대기중 누출에 대한 단기, 지표면 농도를 평가하는 PC용 스크리닝 모델로서, 스크리닝 목적으로 TSCREEN 모델을 선정하는 이유는 TSCREEN 모델이 현재 미 환경청에서 사용하고 있는 3개의 스크리닝 모델인 SCREEN 모델, RVD 모델, PUFF 모델과 Britter-McQuaid 모델(B-M 모델)을 자체 내에 포함하고 있어 유해독성가스의 사고영향 평가시 스크리닝 절차로는 가장 적절한 모델이라고 사료되었기 때문이다.

2. 이론: 스크리닝 방법론의 개발

2.1. 모델의 선정

본 연구에서는 화학공장의 화학장치설비에서 누출될 가능성이 있는 다양한 유해독성가스의 누출영향을 가장 적절하게 평가할 수 있는 모델을 검토하여 저장탱크나 파이프라인에서 유해독성가스의 누출시 사고영향을 평가하기 위한 가상적인 누출 시나리오들을 설정하고, 여러 가지의 누출 시나리오들에 따른 누출원 주위 인근에 미치는 피해영향을 정량적으로 평가하는 분산모델링 방법론을 개발함으로써 화학공장의 저장탱크나 파이프라인에서 누출된 대기독성가스의 저감대책 및 안전관리방안을 수립하기 위한 것이다.

TSCREEN Model은 유해독성 대기오염물의 대기중 누출에 대한 단기, 지표면 농도를 평가하는 모델이며 또한, SCREEN Dispersion Model은 지표면 농도를 산출하기 위하여 TSCREEN Model 내에서 선정된다.

TSCREEN Model의 Screening 기술은 다음과 같은 가정과 제한성을 갖는다.

- i) 제공되는 Screening 기술은 소규모에서 중규모의 Non-accidental Release에 대해 사용하기 위하여 고안되었다.
- ii) 모든 Screening Technique은 유해독성 대기오염물들이 Non-reactive이고 Non-depositing하다고 가정한다. 그러므로 이러한 Screening Technique은 반응성 가스나 분진입자의 침적에는 적용할 수 없다.
- Two-phase Flow인 경우, 모든 누출액은 Aerosol로 풍하방향으로 이동한다고 가정한다.
- iii) 공기보다 무거운 가스의 거동은 초기(감압) 밀도뿐만 아니라 누출속도 및 풍속의 영향을 받는다. 만약에 공기보다 무거운 가스의 거동이 중요하지 않다고 예측되는 경우, 수동적 대기분산모델링(Passive Atmospheric Dispersion Modeling)이 적용된다.
- iv) 최악의 경우의 농도를 야기시키는 조건들은 기상조건이 오염원 평가에 영향을 주는 것으로 독특하게 정의될 수 없다. 예를 들면, 액체증발의 경우, 최대 누출속도는 높은 풍속과 유관하며, 결국 많은 희석을 통하여 낮은 대기질 농도를 나타낸다.
- v) 시간에 따라 변하는 누출량은 이러한 Screening Technique을 통하여 모사될 수 없다. 이 Screening Technique은 규정된 주어진 시간 동안의 연속누출이라고 가정한다.
- vi) 기체 및 액체의 모든 누출계산은 이상상태라고 가정한다.
- vii) 공기보다 무거운 가스의 누출이나 지표면에 근접한 누출에 건물이나 지형과 같은 장애물의 미치는 영향은 포함하지 않는다.
- viii) 공기보다 무거운 가스의 누출에 대한 복잡한 Post-release 열역학적 거동은 포함하지 않는다.

2.2. 누출원 모델링

유해 대기독성물질의 누출에 대한 스크리닝 절차에서 첫 단계인 누출원 모델링은 누출원에서 유해 대기독성물질의 대기 중으로 누

Table 1. The Selection of the Model Used for TSCREEN Model

| 연속누출 (Continuous release) | 순간누출 (Instantaneous release) |
|--|--|
| <Step 1> 부력체크 • $\rho/\rho_{air} > 1$, Negative Bouyancy (→ Go to Steps 2. or 3.) • $\rho/\rho_{air} \leq 1$, Neutral or Positive Bouyancy (→ SCREEN 모델) | <Step 1> 부력체크 • $\rho/\rho_{air} > 1$, Negative Bouyancy (→ Go to Steps 2. or 3.) • $\rho/\rho_{air} \leq 1$, Neutral or Positive Bouyancy (→ PUFF 모델) |
| <Step 2> 수직상승계트 • $Ri > 30$: Dense (→ RVD 모델) • $Ri < 30$: Non-Dense (Passive) (→ SCREEN 모델) | <Step 2> 수직상승계트 • $Ri > 30$: Dense (→ RVD 모델) • $Ri < 30$: Non-Dense (Passive) (→ PUFF 모델) |
| <Step 3> 기타 누출유형 • $Ri < (1/6)^3$ Dense (→ B-M 모델) • $Ri > (1/6)^3$ Non-Dense (Passive) (→ SCREEN 모델) | <Step 3> 기타 누출유형 • BM Criteria > 0.2 , Dense (→ B-M 모델) • BM Criteria ≤ 0.2 , Non-Dense (Passive) (→ PUFF 모델) |

출되는 누출속도를 평가하며, 누출유형, 누출물의 상태(기상, 액상, 2상) 및 조건(온도, 압력), 누출물의 물리·화학적 특성, 지형 및 기상조건에 따라 다양하게 수행될 수 있다. 유해 대기독성물질인 염소증기가 저장탱크 및 압력방출장치로부터 누출될 때, 기상흐름 및 2상 흐름으로 연속 및 순간 누출되는 경우의 스크리닝 절차를 고찰하였다.

공기보다 무거운 가스의 연속누출이나 순간누출의 경우, TSCREEN 모델은 자체 프로그램 내에서 누출이 수직상승계트 (Vertically-Directed Jet)이면 RVD 모델을 사용한다[5,6], 기타 다른 모든 유형의 누출에 대해서는 Britter-McQuaid(B-M) 모델을 사용한다[1, 9]. 한편, 누출물이 공기보다 가벼운 가스에 대해서는 TSCREEN 모델은 연속누출의 경우에 대해서는 SCREEN 모델을, 순간누출의 경우에 대해서는 PUFF 모델을 사용한다[2].

TSCREEN 모델 자체 프로그램 선택 사용 방법은 Table 1에 나타내었다.

염소와 같이 공기보다 무거운 가스가 저장탱크나 압력방출장치로부터 누출될 때, 분산유형은 누출물의 초기밀도 및 초기분산 속도에 영향을 받게 되며, 유효평균증기밀도(effective mean vapor density)와 공기의 밀도 차에 의존하게 된다. 이러한 메카니즘의 상대적 영향을 비교하는 척도는 대기안정도와 바람마찰속도(Wind Friction Velocity), u_* 의 함수로써 규정되는 Richardson Number, R_i 에 의하여 결정된다.

$$R_i = \frac{g \left(\frac{\rho_2}{\rho_{air}} - 1 \right) Q_m}{u D_0 \rho_2 u_{10}^2 \left(\frac{u_*}{u_{10}} \right)^2} \tag{1}$$

여기에서, RVD 모델을 적용하는 경우, $\left(\frac{u_*}{u_{10}} \right) = 0.06$ 이다.

한편, Britter-McQuaid(B-M) 모델은 다음의 각 경우에 적용된다.

- (i) 공기보다 무거운 가스의 기타 다른 모든 누출유형 :

$$\frac{u_{10}}{\left(\frac{\rho_2 - \rho_{air}}{\rho_{air}}\right) \frac{gQ_m}{\rho_2 D u_{10}^3}} < 0.05 \text{인 경우} \quad (2)$$

(ii) 공기보다 무거운 가스가 아닌 기타 다른 모든 누출유형 :

$$\left[\left(\frac{\rho_2 - \rho_{air}}{\rho_{air}}\right) \frac{g\left(\frac{Q}{\rho_2}\right)^{1/3}}{\rho_2 D u_{10}^2}\right]^{1/2} > 0.2 \text{인 경우} \quad (3)$$

한편, 대기안정도는 태양상승각, 구름층, 구름정상높이 및 풍속 자료 등을 이용한 Turner(1970)[3]가 제안하는 방법에 의하여 평가되며, 누출원에서의 풍속은 Deacon's Power Law[3]를 이용하여 구한다. 또한, 지표면 위의 바람흐름에 기인하는 역학적 난류를 표현하는 바람마찰속도, u_* 는 대기안정도의 함수이며, 대기안정도가 안정화될수록 감소한다. 표면 거칠기의 길이를 1 cm로 가정하고 대기안정도 증립조건하에서의 바람마찰속도 근사식은 다음과 같이 구해진다.

$$u_* = 0.06 u \quad (4)$$

2.3. 분산 모델링 절차

TSCREEN 모델에 의한 스크리닝 방법론은 다음과 같이 가상 시나리오에 대하여 수행되었다: 가상시나리오는 저장탱크(6.8 atm, 320 K)의 파열로 생긴 구멍(ϕ 2.8 cm)을 통한 Cl_2 가스의 연속 및 순간누출의 경우이다.

각 누출시나리오에 대한 입력자료는 Table 2에 나타내었다.

TSCREEN 모델에 의한 각 누출 시나리오에 대한 스크리닝 방법론 절차는 다음과 같다[1].

(1) 가압 저장용기로부터의 Cl_2 증기의 누출: 가상 시나리오 스크리닝 방법론을 개발하는데 있어서 분산 모델링의 절차는 다음과 같다.

<단계 1> 초크흐름의 여부를 판단하기 위하여 초크흐름 압력, P_* 를 산출한다.

$$P_* = P_1 \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

<단계 2> P_* 압력에서의 가스의 온도 T_* , 배출속도 Q_m , 배출 온도 T_2 를 평가한다.

(A) 가스의 온도, T_* 의 평가: ($\gamma=1.32$, $T_1=320K$)

$$\frac{T_*}{T_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right) \quad (6)$$

누출물질이 단일성분의 경우에는 Clausius-Clapeyron 식을 이용하여 T_* 에서의 증기압, $P_v(T_*)$ 을 추산한다.

$$P_v = (101,325) \cdot \exp\left[\frac{\lambda \cdot M_w}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_*}\right)\right] \quad (7)$$

$P_v(T_*) > P_*$ 이므로 응축은 일어나지 않는다.

만약 $P_v(T_*) \leq P_*$ 이면, 감압과정 동안에 저장물질의 응축이 일어나므로 이 접근방법은 더 이상 유효하지 않게 되며, 이러한 경우에는 2상 흐름으로 간주되어야 한다.

Table 2. Data Entry(Source Parameters) for Hypothetical Scenarios

| Hypothetical scenario | |
|--|--|
| Area (A_0) of Hole | 6.158 cm ² |
| Gas Heat Capacity (C_p) | 489 J/kg·K |
| Reservoir Pressure (P_1) | 6.89 × 105 Pa |
| Molecular Weight (M_w) | 70.9 kg/kmol |
| Ambient Pressure (P_a) | 101325 Pa |
| Reservoir Temperature (T_1) | 320 K |
| Critical Temperature (T_c) | 417.15 K |
| Latent Heat of Vaporization (λ) at T_b | 2.879 × 105 J/kg |
| Boiling Point Temperature (T_b) | 239.05 K |
| Density at Reservoir (ρ_1) | 18.36 kg/m ³ |
| Ambient Temperature (T_a) | 293 K |
| <Non-Vertically Directed Jet> | |
| Total Released Amount (Q) | 400 kg |
| <Britter-McQuaid Model Inputs> | |
| Relative Humidity (R_h) | 50% |
| Averaging Time | 15 min (Continuous) 1 min (Instantaneous) |
| Receptor Location | Default |

(B) 배출속도, Q_m 의 평가 :

$$Q_m = (C \cdot A_0) \left[(P_1 \cdot \rho_1) \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{1/2} \quad (8)$$

여기에서, $P_a = P_*$ 일 때 $C=0.75$ 이다. 그러나 $P_* > P_a$ 이면 C 는 이 값보다 더 크게 된다.

(C) 감압후의 배출온도, T_2 의 평가 :

저장조건으로부터 초크흐름 조건까지의 팽창은 단일 가역적으로 일어난다고 가정한다. 초크흐름 조건에서 대기압까지의 팽창은 단열적이지만 비가역적이라고 가정한다(Lewitt, 1953).

$$T_2 = T_1 \left[1 - (0.85) \frac{(\gamma-1)}{(\gamma+1)} \right] \quad (9)$$

흐름은 초크흐름이며 $T_2 > T_*$ 이므로 <단계 4>로 간다.

<단계 3> Subcritical Flow (Non-Choked Flow)의 경우 :

P_* 압력에서의 가스의 온도 T_* , 배출속도 Q_m , 배출온도 T_2 를 평가한다.

(A) 배출속도, Q_m 의 평가 :

$$Q_m = (K \cdot Y \cdot A_0) \left[2 \rho_1 \cdot (P_1 - P_a) \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기에서, $K = C\sqrt{1-\beta^4}$ 이고, $Y = 1 - (P_1 - \frac{P_a}{P_1\gamma})(0.41 + 0.35\beta^4)$ 이다. 또한, $C=0.62$ 이며, 일반적으로 Reynolds Number는 10^4 보다 크다.

(B) 감압후의 배출온도, T_2 의 평가 : T_2 는 에너지 수지 식으로부터 산출된다.

$$T_2 = \frac{2T_1}{[1 + \sqrt{(1 + 4aT_1)}]} \quad (11)$$

$$\text{여기에서, } a = \frac{1}{(2 \cdot \gamma \cdot C_p)} \left(\frac{Q_m \cdot R}{P_a \cdot M_w \cdot A_0} \right)^2 \quad (12)$$

$T_2 > T_c$ (Pseudo Critical Temperature)이면, 식 (11)이 적용된다. 저장물질이 단일성분의 경우에는 Clausius-Clapeyron 식을 이용하여 T_2 에서의 증기압, $P_v(T_2)$ 을 추산한다.

$$P_v = (101,325) \exp \left[\frac{\lambda \cdot M_w}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (13)$$

$P_v(T_2) \leq P_a$ 이면, 감압 과정 동안에 저장물질의 응축이 일어나므로 이 접근방법은 더 이상 유효하지 않게 되며, 이러한 경우에는 2상 흐름으로 간주되어야 한다.

<단계 4> 배출밀도, ρ_2 의 평가: 이상기체법칙을 적용하여 T_2 에서의 배출밀도, ρ_2 를 평가한다.

$$\rho_2 = \frac{P_a M_w}{RT_2} \quad (14)$$

구멍과 개구부의 직경은 각각의 흐름조건에 따라 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\text{Choked Flow: } D_0 \left(\frac{P_* T_2}{P_a T_*} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$\text{Non-Choked Flow: } D_0 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} \quad (16)$$

초크흐름 조건에서, 구멍의 크기는 분산모델에서 정확한 적용이 필요하다. 따라서 만약에 모델이 초기에 공기에 희석될 때 제트나 모멘텀 효과가 있을 경우에는, $D_0(P_*/P_a)^{1/2} = (0.028) \left[\frac{(3.74 \times 10^5)}{(1 \times 10^5)} \right]^{1/2} = 0.0538 \text{ m}$ 이다. 따라서 흐름은 단일 상이 되므로 적절한 분산모델을 선정하기 위하여 <단계 5>로 간다.

<단계 5> 부력 체크:

(A) 공기의 밀도를 계산한다.

$$\rho_{air} = \frac{P_a M_a}{RT_a} \quad (17)$$

(B) 부력을 체크한다.

$\frac{\rho_2}{\rho_{air}} > 1$ 이면, 음의 부력 (Negative Bouyancy)을 갖는다. 음의 부력을 갖는 경우, 누출이 수직상승제트(Vertically-Directed Jet)이면 RVD 모델이 사용되며, 수직상승제트가 아니면 Britter-McQuaid (B-M) 모델이 사용되어야 한다. 양의 부력(Positive Bouyancy)을 갖는 경우에는 점누출원(Point Source)에 대한 PUFF 모델이 사용되어야 한다.

<단계 6> 누출기간 (Release Duration), T_d 의 평가:

누출기간은 RVD 모델 및 Britter-McQuaid 모델의 입력자료로 사용되며, 아울러 누출이 연속누출인지 순간누출인지의 여부를 판단하게 해준다.

Table 3. Evaluated Release Characteristics for Hypothetical Scenarios

| Hypothetical scenario |
|--|
| Critical Pressure (P_*) : 37,409.34 Pa → Flow Characteristic : Choked Flow |
| Gas Temperature (T_*) at P_* : 276.4043 K |
| Vapor Pressure (P_v) at T_* : 405,986 Pa → Single Phase Flow |
| Emission Rate (Q_m) : 11,001.003 g/s |
| Discharge Temperature (T_2) : 282.9437 K |
| Discharge Density (ρ_2) : 3.053886 kg/m ³ |
| Density of Air (ρ_{Air}) : 1.20209 kg/m ³ → Bouyancy is negative |
| <Non-Vertically Directed Jet> |
| Release Duration (T_d) : 6.055085 min |

$$T_d (\text{min}) = \frac{Q (\text{kg})}{Q_m (\text{kg/s}) \cdot 60 (\text{s/min})} \quad (18)$$

이런 일련의 계산과정을 거쳐 수직상승제트가 없는 경우이므로 Britter-McQuaid(B-M) 모델을 적용하여 스크리닝 모델링을 수행한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 스크리닝 모델링 절차에 대한 사례연구

각 누출시나리오에 대한 누출원 특성 계산결과는 Table 3에 나타내었다.

단 일상 증기누출에서의 누출속도는 저장용기의 압력이 비교적 높을 때 발생하는 초크흐름 현상 때문에 제한된다. 누출이 초크흐름 조건하에서 제한되면 주어진 저장용기 내의 구멍을 통하여 누출속도 또한 제한되지만 압력에는 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 질량유속은 초크흐름 조건 이상에서는 저장용기의 압력에 따라 변하므로 누출물의 밀도는 저장용기의 압력에 따라 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 특히, 스크리닝 방법론을 적용할 때 저장용기의 구멍이나 개구부의 크기는 충분히 작아야 한다. 만약에 충분히 작지 않은 경우에는 저장용기의 온도와 압력이 일정하지 않게 된다. 저장용기의 온도와 압력이 일정하지 않는 경우에는 누출속도는 시간에 따라 크게 변하게 된다(Spicer, 1992).

3.2. 분산모델링에 대한 사례연구

각 누출시나리오에 대하여 Britter-McQuaid 및 RVD 모델을 적용하여 분산모델링을 적용하여 분산모델링을 수행하여 얻어진 풍하거리에 따른 단기(1-hr) 지표면 농도분포의 예측결과는 Figure 1에 나타내었다.

분산모델링에서 기상조건은 대기안정도의 6등급(A, B, C, D, E, F)에 따라 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 8.0, 10.0, 15.0, 20.0 m/s의 풍속자료가 각 모델에 입력되며, 대기안정도와 풍속의 조합에 따라 Richardson Number, R_i 를 계산하면서 최악의 기상조건에 따른 최대 지표면 농도를 예측한 결과를 Figure 2에 나타내었다.

Britter-McQuaid 모델을 수행한 결과, 연속누출 및 순간누출시 1-시간 평균 최대 지표면 농도는 공히 풍속 1 m/s, 대기안정도가

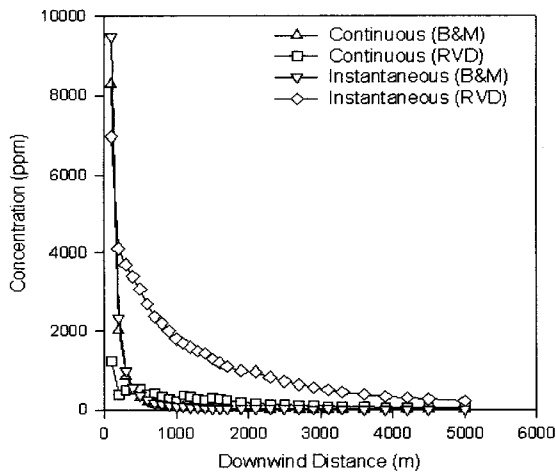


Figure 1. Concentration profile at downwind distances.

가장 안정할 때 풍하거리 100 m 지점에서 각각 8280 ppm 및 9481 ppm으로 산출되었다. 또한, RVD 모델을 수행한 결과, 연속누출 및 순간누출시 1-시간 평균 최대 지표면 농도는 공히 풍속 1 m/s, 대기안정도가 가장 안정할 때 풍하거리 100 m 지점에서 각각 1237.9 ppm 및 6955.1 ppm으로 산출되었다.

연속누출이든 순간누출이든 공히 수직상승세트가 없는 Britter-McQuaid 모델의 경우가 수직상승세트로서 배출되고 있는 RVD 모델의 경우보다 같은 풍하거리에서 높은 지표면 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 누출이 수직상승세트로서 대기 중으로 높이 분출될수록 상대적으로 지표면에 도달하는 유해독성가스의 농도는 그만큼 감소함을 알 수 있다. 또한, 연속누출인 경우에 비하여 순간누출인 경우가 풍하거리에서 높은 지표면 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 순간누출인 경우가 누출기간이 작아 대기 중에서 충분히 희석되지 못하여 단시간 내에 다량의 유해독성가스가 지표면에 도달하므로 지표면 농도는 그만큼 증가함을 알 수 있다.

결과로부터, 풍속이 작을수록 대기안정도가 안정할수록 지표면 농도는 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 풍속이 작을수록 대기안정도가 안정할수록 누출가스가 대기 중에서 원활히 분산되지 못하여 충분히 희석되지 못하기 때문에 지표면 농도는 증가하고 있음을 알 수 있다.

본 스크리닝 모델은 최악의 경우의 농도를 야기 시키는 기상조건들이 고정되어 있어 어떤 특정지역의 실제 기상조건에 의한 오염원 평가 영향을 독특하게 정의할 수는 없다. 최대 지표면 농도는 풍속과 대기안정도에 유관하므로, 결국 풍속이 빠를수록, 대기안정도가 불안정할수록 누출가스가 대기 중에서 원활한 혼합으로 충분히 희석되어 낮은 대기질 농도를 나타낼 수 있으므로 본 스크리닝 모델의 특성상 최악의 경우의 농도를 야기시키는 기상조건들은 지표면 농도를 과대평가 할 수 있음을 내포하고 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 액화염소 저장탱크의 균열 및 압력방출장치의 작동에 의하여 유해독성가스인 염소가스가 증기 상으로 연속 및 순간 누출될 때, 유해독성가스의 누출 예측 및 제어를 위한 분산모델링을 위하여 스크리닝 모델링 절차를 개발하였다. 유해독성가스의 누출시 풍하거리에 따른 최대 지표면 농도는 누출유형(연속누출, 순간누출), 누출물의 상태(기상, 액상, 2상) 및 조건(온도, 압력), 누출물의 물리·화학적 특성, 지형 및 기상조건에 따라 영향을 받고 있으며, 특히 공기보다 무거운 가스의 분산유형은 누출물의 초기밀도

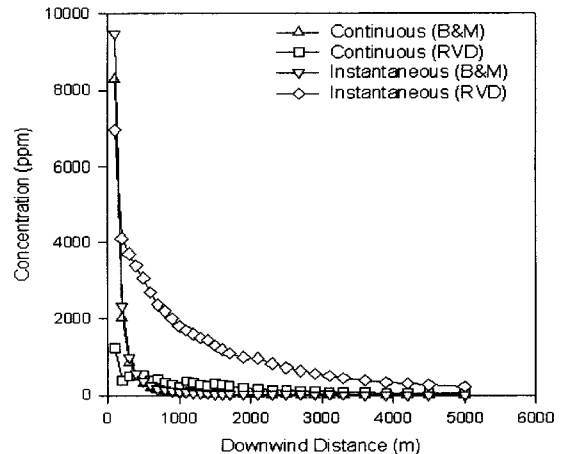


Figure 2. The effect of wind speed on concentration

및 초기 분산속도뿐만 아니라 풍속에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 결국, 본 분산모델링을 위한 스크리닝 절차는 보다 다종·다양한 누출유형에 대하여 모델링을 수행하고 아울러 보편적으로 적용 가능한 최적의 Sliding Scale 방법론을 개발함으로써 정교한 해석 모델에 의한 누출영향 평가시 예비 가이드라인으로 활용될 수 있다.

향후, 유해독성가스의 누출에 대한 보다 더 정교한 해석을 위하여 Trinity Consultants Inc.의 BREEZE AIR(ISCST3), BREEZZE HAZ(AFTOX, DEGADIS+, TRPUF, INPUFF) 모델 및 Arthur D. Little, Inc.의 Superchems™ 등을 이용하여 모델링 예측결과들을 비교·검토함으로써 보다 정교한 영향평가를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 1999학년도 2학기 계명대학교 대학원 학술연구 장학금에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

사 용 기 호

- A_0 area of reservoir hole or opening (m^2)
- A_1 flow area representing reservoir conditions (m^2)
- C_p gas (contaminant) heat capacity at T_1 ($J/kg \cdot K$)
- D diameter of a storage tank (m)
- D_0 (equivalent) diameter of release hole (as appropriate) (m)
- D_p pipe diameter (as appropriate) (m)
- f friction factor (dimensionless)
- H_1 gas enthalpy at reservoir conditions ($J/kmol$)
- H_2 gas enthalpy at discharge conditions ($J/kmol$)
- H_s gas enthalpy at T_s or P_s ($J/kmole$)
- K discharge coefficient (dimensionless)
- L_p pipe length (as appropriate) (m)
- M_a molecular weight of air ($kg/kmol$)
- M_w gas (contaminant) molecular weight ($kg/kmol$)
- P_1 pressure at reservoir conditions (Pa)
- P_a ambient pressure (Pa)
- P_v vapor pressure as a function of temperature (Pa)
- P^* choked flow pressure (Pa)
- Q total released amount (kg)
- Q_m emission rate (kg/sec)
- R gas constant ($8314 J/kmol \cdot K$)

| | |
|--------------|--|
| R_i | Richardson number (dimensionless) |
| T_1 | temperature at reservoir conditions (K) |
| T_2 | discharge temperature (K) |
| T_a | ambient temperature (K) |
| T_b | contaminant normal boiling point (K) |
| T_c | critical temperature (K) |
| T_d | release duration |
| T_* | gas temperature at P_* (K) |
| u | wind velocity at release height (m) |
| u_{10} | wind velocity at the anemometer height of 10 m (m) |
| u_* | wind frictional velocity (dimensionless) |
| X_2 | vapor fraction at discharge condition (dimensionless) |
| X_* | vapor fraction at T_* or P_* (dimensionless) |
| β | $\sqrt{A_0/A_1}$ (dimensionless) |
| ρ_1 | contaminant density at the normal boiling point (kg/m^3) |
| ρ_2 | contaminant density at the discharge condition (kg/m^3) |
| ρ_{air} | density of air (kg/m^3) |
| ρ_L | density of liquids in the reservoir (kg/m^3) |
| γ | $\left(\frac{C_p}{C_v}\right) \propto \frac{1}{\left(1 - \frac{R}{C_p M_w}\right)}$ at T_1 (dimensionless) |
| λ | heat of vaporization at the normal boiling point (J/kg) |

참고 문헌

1. USEPA, "Workbook of Screening Technologies for Assessing Impacts of Toxic Air Pollutants (Revised)", EPA-454/R-92-024, 1-1~5-34, Dec. (1992).
2. D. Bruce Turner, "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates-Revised," Cincinnati, Ohio (1969).
3. J. F. Bowers, J. R. Borklund, and C. S. Cheney, "ISC Dispersion Model User's Guide - Volume I", Dec. (1979).
4. Trinity Consultants, "User's Manual for ISCST", August (1988).
5. USEPA, "Guidance on the Application of Refined Dispersion Models to Hazardous Air Pollutants Releases", EPA-454/R-93-002, April (1993).
6. "Superchems, Professional Edition Version 2.0-User Guide", Arthur D. Little, Inc., Aug. (1996).
7. R. Mallet, "Evaluate the Consequence of Incident", *Chem. Eng. Prog.*, **69**, Feb. (1993).
8. R. Mallet, "Evaluate the Consequence of Incident-Part 2", *Chem. Eng. Prog.*, **74**, Feb. (1993).
9. AIChE/CCPS, "Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models", Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York (1987).