

염소 저장탱크의 가스누출 예측 및 제어를 위한 스크리닝 방법론*

송덕만 · 박종규*
울산대학교 화학공학부

<요 약>

본 연구는 화학장치설비 중 염소 저장탱크의 누출유형에 따른 누출물의 물성자료들을 포함하는 누출원모델, 분산모델, 기상 및 지형자료들을 TSCREEN 모델에 입력시켜 염소 가스의 풍하거리에 따른 1시간 평균 최대 지표면 농도를 산출함으로써 유해독성가스의 누출 예측 및 제어를 위한 스크리닝 방법론을 개발하기 위한 것이다. 본 스크리닝 방법론에서는 저장탱크 및 압력방출장치로부터 누출되는 기상 및 2상 흐름의 연속 및 순간 누출에 대한 대기분산 모델링 절차가 고려되었다.

연구결과로부터, 공기보다 무거운 가스의 분산유형은 누출물의 상태(기상 및 2상 흐름), 누출 조건(온도, 압력), 누출물의 물리·화학적 특성, 누출유형(연속 및 순간누출)에 영향을 받고 있으며, 특히 누출물의 초기(감압) 밀도 및 누출속도 뿐만 아니라 풍속 및 대기안정도에 커다란 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 결론적으로, 지표면 농도는 풍속이 낮을수록 대기안정도가 안정할수록 증가하고 있음을 알 수 있었다.

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.

Screening Methodology for Prediction and Control of Gas Releases from the Chlorine Storage Tank

* 본 연구의 일부분은 1997년도 울산대학교 대학원 연구비에 의하여 수행된 연구결과임
* 영남이공대학 화학공학과 겸임교수

Duk-Man Song · Jong-Kyu Park
College of Chemical Engineering

<Abstract>

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. For this screening modeling, dispersion modeling procedures for continuous and instantaneous releases of the gas phase and two-phase flow from the storage tank and pressure relief valve were considered.

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(gas phase, two-phase flow), the released conditions(temperature, pressure), physical-chemical properties of released material, and the 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 and the atmospheric stability. Consequently, it was found that the maximum ground-level concentration increases as the wind speed is low and the atmospheric stability is stable.

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.

1. 서론

미국 등 선진국에서는 유해위험성평가의 일환으로, 유해독성가스가 인체의 건강, 환경 및 안전에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 많은 대기분산모델들을 개발하여 왔으며, 다양한 유해독성가스 누출이 대기질 농도에 미치는 영향을 가능한 정확하게 평가하기 위하여 대기분산모델을 적절하게 사용하는 방법을 모색하여 왔다.

1990년의 미국의 대기청정법(The Clean Air Act Amendments of 1990)은 유해 대기독성물질의 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, 이러한 스크리닝 목적으로 TSCREEN 모델을 개발하였다[1]. 이 Workbook은 18 가지의 다른 누출 시나리오로부터

야기되는 누출속도와 대기질 농도를 평가하기 위하여 적절한 스크리닝 기술의 선정과 적용방법에 대한 논리적 접근법을 제공하고 있다. 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 한 줄이기 위하여 근거있는 가정들이 설정된다. 또한, 미 환경청은 유해 대기독성물질의 복잡한 누출특성을 모사할 수 있는 정교한 모델 (Refined Model)에 대한 가이드라인을 제공하고 대기분산모델을 적절하게 적용하는 방법을 제시하기 위하여 1991년에 "Guidance on the Application for Air Toxic Releases"를 작성하였으며, 유해 대기독성물질의 누출에 대한 유해위험성평가를 위하여 ADAM 모델, ALOHA 모델, DEGADIS 모델, HGSYSTEM 모델 및 SLAB 모델 등을 개발하였다[2].

2. 이론 : 스크리닝 방법론의 개발

2-1. 모델의 선정

본 연구에서는 대기분산모델링을 개발함에 있어 스크리닝 절차로는 현재 미 환경청에서 유해대기독성물질이 인체의 건강, 환경 및 안전에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 유해위험성평가의 일환으로 개발한 단기 최대 지표면 농도를 예측하는 TSCREEN 모델을 사용하였다[1]. TSCREEN 모델은 유해 대기독성물질의 대기중 누출에 대한 단기 최대 지표면 농도를 평가하는 PC용 스크리닝 모델로서, 스크리닝 목적으로 TSCREEN 모델을 선정한 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[1].

2-2. 누출원 모델링

유해 대기독성물질의 누출에 대한 스크리닝 절차에서 첫 단계인 누출원 모델링은 누출원에서 유해 대기독성물질이 대기중으로 누출되는 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 염소 증기가 저장탱크 및 압력 방출장치로부터 누출될 때, 기상흐름 및 2상 흐름으로 연속 및 순간누출되는 경우의 스크리닝 절차를 고찰하였다.

공기보다 무거운 가스의 연속누출이나 순간누출의 경우, TSCREEN 모델은 자체 프로그램 내에서 누출이 수직상승제트(Vertically-Directed Jet)이면 RVD 모델을, 기타 다른 모든 유형의 누출에 대해서는 Britter-McQuaid(B-M) 모델을 사용한다[1]. 한편, 누출물이 공기

보다 가벼운 가스에 대해서는 TSCREEN 모델은 연속누출의 경우에 대해서는 SCREEN 모델을, 순간누출의 경우에 대해서는 PUFF 모델을 사용한다[1].

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 밀도차에 의존하게 된다. 이러한 메카니즘의 상대적 영향을 비교하는 척도는 대기안정도와 바람마찰속도(Wind Friction Velocity), u_* 의 함수로써 규정되는 Richardson Number, R_i 에 의하여 결정된다[1].

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

RVD 모델을 적용하는 경우, 모든 대기안정도에 대하여 $\left(\frac{u_*}{u_{10}} \right) = 0.06$ 이라고 가정한다.

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

(i) 공기보다 무거운 가스의 기타 다른 모든 누출유형 :

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

(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[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. 표면거칠기의 길이를 1 cm로 가정하고 대기안정도 중립조건하에서의 바람마찰속도 근사식은 다음과 같이 구해진다[1].

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

2-3. 분산 모델링 절차

TSCREEN 모델에 의한 스크리닝 방법론은 다음과 같이 2개의 가상 시나리오에 대하여 수행되었다 : 가상시나리오 #1은 저장탱크(6.8 atm, 320 K)의 파열로 생긴 구멍 (ϕ : 2.8 cm)을 통한 Cl_2 가스의 연속 및 순간누출의 경우이며, 가상 시나리오 #2는 압력이 2.586×10^6 Pa에서 개방되도록 설계된 압력방출장치(ϕ : 10.16 cm)를 통한 포화 Cl_2 가스의 연속 및 순간누출의 경우이다.

각 누출시나리오에 대한 입력자료는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Data entry(source parameters) for two hypothetical scenarios^[4]

| Hypothetical Scenario #1 | Hypothetical Scenario #2 |
|--|--|
| Area of Hole (A_o) : 6.158 cm ² | Area of Hole (A_o) : 81.07 cm ² |
| Gas Heat Capacity (C_p) : 489 J/kg·K | Gas Heat Capacity (C_p) : 489 J/kg·K |
| Reservoir Pressure (P_1) : 6.89×10 ⁵ Pa | Reservoir Pressure (P_1) : 2.586×10 ⁶ Pa |
| Molecular Weight (M_w) : 70.9 kg/kmol | Molecular Weight (M_w) : 70.9 kg/kmol |
| Ambient Pressure (P_a) : 101,325 Pa | Ambient Pressure (P_a) : 101,325 Pa |
| Reservoir Temperature (T_1) : 320 K | Reservoir Temperature (T_1) : 349.2 K |
| Critical Temperature (T_c) : 417.15 K | Critical Temperature (T_c) : 417.15 K |
| Latent Heat of Vaporization (λ) at T_b : 2.879×10 ⁵ J/kg | Latent Heat of Vaporization (λ) at T_b : 2.879×10 ⁵ J/kg |
| Boiling Point Temperature (T_b) : 239.05 K | Boiling Point Temperature (T_b) : 239.05 K |
| Density at Reservoir (ρ_1) : 18.36 kg/m ³ | Density at Reservoir (ρ_1) : 1,574 kg/m ³ |
| Ambient Temperature (T_a) : 293 K | Ambient Temperature (T_a) : 293 K |
| <Non-Vertically Directed Jet> | <Non-Vertically Directed Jet> |
| Total Released Amount (Q) : 400 kg | Total Released Amount (Q) : 400 kg |
| <Britter-McQuaid Model Inputs> | <Britter-McQuaid Model Inputs> |
| Relative Humidity (R_h) : 50 % | Relative Humidity (R_h) : 50 % |
| Averaging Time : 15 min (Continuous) 1 min (Instantaneous) | Averaging Time : 15 min (Continuous) 1 min (Instantaneous) |
| Receptor Location : Default | Receptor Location : Default |
| <Vertically Directed Jet> | <Vertically Directed Jet> |
| Total Released Amount (Q) : 400 kg | Total Released Amount (Q) : 400 kg |
| <RVD Model Inputs> | <RVD Model Inputs> |
| Release Height above the Ground : 10 m | Release Height above the Ground : 10 m |
| Exhaust Gas Exit Velocity : 97.38 m/s | Exhaust Gas Exit Velocity : 148.87 m/s |
| Pollutant Concentration (Vol.) : 100 % | Pollutant Concentration (Vol.) : 100 % |
| Pollutant Molecular Weight : 70.9 kg/kmol | Pollutant Molecular Weight : 70.9 kg/kmol |
| Urban/Rural Classification : Rural | Urban/Rural Classification : Rural |
| Averaging Time : 15 min (Continuous) 1 min (Instantaneous) | Averaging Time : 15 min (Continuous) 1 min (Instantaneous) |

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

(1) 가압 저장용기로부터의 Cl₂ 증기의 단일상 누출(Single-phase Release) : 가상 시나리오 #1

단일상 누출의 스크리닝 방법론을 개발하는데 있어서 분산 모델링의 절차는 다음과 같다.

<단계 1> 쇼크흐름의 여부를 판단하기 위하여 쇼크흐름 압력, P_* 를 산출한다.

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

$P_* \geq P_a$ 이면 초크흐름이며 <단계2>로 간다. 그러나, $P_* < P_a$ 이면 Subcritical Flow(Non-Choked Flow)이므로 <단계 3>으로 간다.

$$\therefore P_* = (6.89 \times 10^5) \cdot \left(\frac{2}{1.32+1}\right)^{\frac{1.32}{(1.32-1)}} = 3.74 \times 10^5 \text{ Pa}$$

<단계 2> 초크흐름압력, P_* 에서의 배출가스의 온도 T_* , 배출속도 Q_m , 배출온도 T_2 를 평가한다.

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

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

$$\therefore T_* = \left(\frac{2}{1.32+1}\right) \cdot (320) = 276.4 \text{ K}$$

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

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

$$\therefore P_v = (101,325) \cdot \exp\left[\frac{(2.879 \times 10^5)(70.9)}{8,314} \left(\frac{1}{239.05} - \frac{1}{276.4}\right)\right] = 4.06 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$P_v(T_*) > P_*$ 이므로 응축은 일어나지 않는다. 만약 $P_v(T_*) \leq P_*$ 이면, 감압과정 동안에 저장물질의 응축이 일어나므로 이 접근방법은 단일상 누출에는 더이상 유효하지 않게 되며, 2상 흐름으로 간주되어야 한다.

(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.

$$\begin{aligned} \therefore Q_m &= (0.75) \cdot (0.0006158) \left[(6.89 \times 10^5) \cdot (18.36) \cdot (1.32) \left(\frac{2}{1.32+1}\right)^{\frac{(1.32+1)}{(1.32-1)}} \right]^{1/2} \\ &= 1.10 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

(C) 감압후의 배출온도, T_2 의 평가 :

T_2 는 저장조건으로부터 초크흐름 조건까지의 팽창이 단열가역적으로 일어난다고 가정하며, 초크흐름 조건에서 대기압까지의 팽창은 단열적이지만 비가역적이라고 가정하여 평가된다. Lewitt(1953)의 연구결과로부터, 이러한 단열팽창은 85%의 효율을 가지고 있다고 가정한다.

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

$$\therefore T_2 = (320) [1 - (0.85) \left(\frac{1.32 - 1}{1.32 + 1} \right)] = 283 \text{ K}$$

$T_2 > T_*$ 이므로 흐름은 초크흐름이며, <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 :

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

여기에서, $K = C\sqrt{1 - \beta^4}$ 이고, $Y = 1 - \left(\frac{P_1 - P_a}{P_1 \gamma} \right) (0.41 + 0.35\beta^4)$ 이

다. 또한, 일반적으로 Reynolds Number는 10^4 보다 크며 $C=0.62$ 이나, Reynolds Number가 10^4 보다 작을 때는 C 값은 더욱 크다.

(B) 감압후의 배출온도, T_2 의 평가 : T_2 는 에너지수지식으로부터 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 단일 성분인 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, 감압과정 동안에 저장물질의 응축이 일어나므로 이 접근 방법은 단일상 흐름에는 더이상 유효하지 않으며 2상 흐름으로 간주되어야 한다.

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

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

$$\therefore \rho_2 = \frac{(101,325)(70.9)}{(8,314)(283)} = 3.05 \text{ kg/m}^3$$

초크흐름 조건에서, 구멍의 크기는 분산모델에서 정확한 적용이 필요하므로, 구멍과 개구부의 직경은 각각의 흐름조건에 따라 다음과 같이 수정되어야 한다.

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

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

만약에 모델이 초기에 공기에 희석될 때 제트나 모멘텀 효과가 있을 경우에는,

$$D_o (P_*/P_a)^{1/2} = (0.028) \left[\frac{(3.74 \times 10^5)}{(1 \times 10^5)} \right]^{1/2} = 0.0538 \text{ m}$$

이다. 따라서 흐름은 단일상이 되므로 적절한 분산모델을 선정하기 위하여 <단계 7>로 간다.

<단계 7> 부력 체크 :

(A) 공기의 밀도를 계산한다.

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

$$\therefore \rho_{air} = \frac{(101,325) \cdot (28.9)}{(8,314) \cdot (293)} = 1.20 \text{ kg/m}^3$$

(B) 부력을 체크한다.

$\frac{\rho_2}{\rho_{air}} > 1$ 이면, 음의 부력(Negative Bouyancy)을 갖는다. 음의 부력을 갖는 경

우, 누출이 수직상승제트(Vertically-Directed Jet)이면 RVD 모델이 사용되며, 수직상승 제트가 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 8> 누출기간 (Release Duration), T_d 의 평가 :

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

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

$$\therefore T_d(\text{min}) = \frac{400\text{kg}}{1.1(\text{kg/s}) \cdot 60(\text{s/min})} = 6.06 \text{ min}$$

이런 일련의 계산과정을 거쳐 수직상승제트가 없는 경우에는 Britter-McQuaid(B-M) 모델을 적용하여 모델링을 수행하며, 수직상승제트로서 배출되고 있는 경우에는 RVD 모델을 적용하여 모델링을 수행한다.

(2) 가압 저장용기로부터의 포화 Cl_2 증기의 2상 누출(Two-phase Release) : 가상 시나리오 #2

2상 누출의 스크리닝 방법론을 개발하는데 있어서 분산 모델링의 절차는 다음과 같다.

<단계 1> 초크흐름 압력, P_* 는 가상 시나리오 #1에서 구하는 방법과 동일하다.

$$\therefore P_* = (2.586 \times 10^6) \cdot \left(\frac{2}{1.32+1}\right)^{\frac{1.32}{(1.32-1)}} = 1.40 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$P_* > P_a$ 이기 때문에 흐름은 초크흐름이며, <단계 2>로 간다

<단계 2> 초크흐름 압력, P_* 에서의 배출가스의 온도 T_* , 배출속도 Q_m , 배출온도 T_2 를 평가한다.

(A) T_* 의 평가 : ($\gamma = 1.32$, $T_1 = 349.2$)

$$\therefore T_* = \left(\frac{2}{1.32+2}\right) \cdot (349.2) = 301.6 \text{ K}$$

T_* 는 임계온도, T_c 보다 작으므로 오염물질의 증기압은 Clausius-Clapeyron 식을 이용하여 구한다.

$$\therefore P_v = (101,325) \cdot \exp\left[-\frac{(2.879 \times 10^5) \cdot (70.9)}{8,314} \left(\frac{1}{239.05} - \frac{1}{301.6}\right)\right] = 8.53 \times 10^5 \text{ Pa}$$

301.6 K에서의 염소의 증기압은 포화압력보다 작으므로 응축이 일어나는 것으로 예측된다. 응축이 일어나 2상을 형성하고 있으므로 <단계 5>로 간다.

<단계 5> 2상 초크흐름(Two-phase Choked Flow)의 경우 :

(A) T_* 의 평가 :

순수한 성분의 경우, Clausius-Clapeyron 식으로부터 증기압, P_* 에 상당하는 T_* 를 산출한다.

$$P_* = (101,325) \cdot \exp\left[\frac{\lambda \cdot M_w}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_*}\right)\right] \quad (19)$$

$$T_* = \frac{1}{\left(\frac{1}{T_b}\right) - \left(\frac{R}{\lambda M_w}\right) \cdot \ln\left(\frac{P_*}{101,325}\right)} \quad (20)$$

$$\therefore T_* = \frac{1}{\left(\frac{1}{239.05}\right) - \frac{8,314}{(2.879 \times 10^5)(70.9)} \cdot \ln\left(\frac{2.586 \times 10^6}{101,325}\right)} = 321 \text{ K}$$

(B) 초크흐름 조건에서의 물성 평가 :

흐름은 등엔트로피 거동을 한다고 가정하여 초크흐름 조건에서의 증기분율, X_* 을 산출한다.

$$X_* = 1 + \frac{T}{\lambda \cdot M_w} [M_w C_p \ln\left(\frac{T_1}{T_*}\right) - R \ln\left(\frac{P_1}{P_*}\right)] \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \therefore X_* &= 1 + \frac{321.2}{(2.879 \times 10^5)(70.9)} [(70.9)(489) \ln\left(\frac{349.2}{321}\right) - (8,314) \ln\left(\frac{2.586 \times 10^6}{1.40 \times 10^6}\right)] \\ &= 0.966 \end{aligned}$$

X_* 를 이용하여 엔탈피변화, $(H_1 - H_*)$ 및 밀도, ρ_* 를 산출한다.

$$H_1 - H_* = C_p(T_1 - T_*) + \lambda(1 - X_*) \quad (22)$$

$$\rho_* = \frac{1}{[X_* \left(\frac{RT_*}{P_* M_w} \right) + \left(\frac{1 - X_*}{\rho_1} \right)]} \quad (23)$$

$$\therefore H_1 - H_* = (489)(349.2 - 321) + (2.879 \times 10^5)(1 - 0.966) = 2.36 \times 10^4 \text{ J/kg}$$

$$\therefore \rho_* = \left[(0.966) \left(\frac{(8,314)(321)}{(1.40 \times 10^6)(70.9)} \right) + \frac{(1 - 0.966)}{1,574} \right]^{-1} = 38.5 \text{ kg/m}^3$$

(C) 배출량, Q_m (kg/s)의 평가 :

$$Q_m = A_0 \rho_* [(2) \cdot (0.85) \left(\frac{H_1 - H_*}{1 + 4f \frac{L_p}{D_p}} \right)]^{1/2} \quad (24)$$

$$\therefore Q_m = (0.008107)(38.5) \left[(2)(0.85) \left(\frac{2.36 \times 10^4}{1} \right) \right]^{1/2} = 62.5 \text{ kg/s}$$

계수 0.85는 Lewitt의 이론(1953)에 근거한 흐름의 비가역성을 설명하기 위한 계수이다. Reynolds Number가 10^5 보다 크면 $f = 0.0045$ 를 적용하며, $4f \frac{L_p}{D_p}$ 은 1에 비하여 무시할만큼 작다.

(D) 감압후의 배출온도, T_2 및 배출밀도, ρ_2 의 평가 :

응축상이 존재하는 경우, Clausius-Clapeyron 식을 이용하여 T_2 를 산출한다.

$$P_a = (101,325) \cdot \exp \left[\frac{\lambda \cdot M_w}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (25)$$

$$T_2 = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{T_b} \right) - \left(\frac{R}{\lambda \cdot M_w} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_a}{101,325} \right) \right]} \quad (26)$$

T_2 조건에서의 증기분율, X_2 및 배출밀도, ρ_2 를 산출한다.

$$X_2 = X_* + \frac{C_p(T_* - T_2)}{\lambda} \quad (27)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{\left[X_2 \left(\frac{RT_2}{P_a M_w} \right) + \left(\frac{1 - X_2}{\rho_L} \right) \right]} \quad (28)$$

$$\therefore X_2 = 0.966 + \frac{(489)(321 - 239.05)}{(2.879 \times 10^5)} = 1.11$$

$X_2 < 0$ 또는 $X_2 > 1$ 이면, P_* 와 T_* 에서 더이상 응축상이 존재하지 않게 되어 이 계산은 유효하지 못하다. 이러한 경우의 배출온도와 배출밀도는 다음의 식을 이용하여 다시 산출한다.

$$T_2 = T_* + \frac{\lambda(1 - X_*)}{C_p} \quad (29)$$

$$\rho_2 = \frac{P_a M_w}{RT_2} \quad (30)$$

$X_2 > 1$ 이므로, 배출온도, T_2 및 배출밀도, ρ_2 를 다시 계산하면

$$\therefore T_2 = 321 + \frac{(2.879 \times 10^5)(1 - 0.966)}{489} = 341 \text{ K}$$

$$\therefore \rho_2 = \frac{(101,325)(70.9)}{(8,314)(341)} = 2.53 \text{ kg/m}^3$$

분산모델을 적절히 적용하기 위해서는 배출후 제트나 모멘텀에 의해 희석되는 경
우를 고려하여 구멍의 직경을 구하면, $D_o \left(\frac{\rho_*}{\rho_2}\right)^{1/2} = 0.1016 \left(\frac{38.5}{2.53}\right)^{1/2} = 0.396 \text{ m}$

가 된다. 만약에 이와같이 수정하지 않은 구멍의 직경을 적용하면, 초기의 가스 배출속
도는 과대평가될 수 있다. 이러한 경우 <단계 7>로 간다.

<단계 6> Two-Phase Subcritical(Nonchoked) Flow 의 경우 :

(A) 배출가스의 온도, T_2 의 평가 :

$$P_a = (101,325) \cdot \exp\left[\frac{\lambda \cdot M_w}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (31)$$

$$T_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{T_b}\right) - \left(\frac{R}{\lambda \cdot M_w}\right) \cdot \ln\left(\frac{P_a}{101,325}\right)} \quad (32)$$

(B) 초크흐름 조건에서의 물성치 평가 :

등엔트로피 거동을 한다고 가정하여 초크흐름 조건에서의 증기분율을 산출한다.

$$X_2 = 1 + \frac{T_2}{\lambda \cdot M_w} \left[(M_w \cdot C_p) \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right) - R \ln\left(\frac{P_1}{P_a}\right) \right] \quad (33)$$

X_2 를 이용하여 엔탈피변화, $(H_1 - H_2)$ 및 배출밀도, ρ_2 를 산출한다.

$$H_1 - H_2 = C_p(T_1 - T_2) + \lambda(1 - X_2) \quad (34)$$

배출밀도, ρ_2 는 식(28)을 이용하여 구한다.

(C) 배출량, Q_m (kg/s)의 평가 :

$$Q_m = (A_0 \cdot \rho_2) \left[(2) \cdot (0.85) \left(\frac{H_1 - H_2}{1 + 4f \frac{L_p}{D_p}}\right) \right]^{1/2} \quad (35)$$

<단계 7> 부력 체크는 가상 시나리오 #1에서 구한 절차와 동일하다.

$$\therefore \rho_{air} = \frac{(101,325) \cdot (28.9)}{(8,314) \cdot (293)} = 1.20 \text{ kg/m}^3$$

<단계 8> 누출기간, T_d 의 평가는 가상 시나리오 #1에서 구한 절차와 동일하다.

$$\therefore T_d(\text{min}) = \frac{400 \text{ kg}}{62.5(\text{kg/s}) \cdot 60(\text{s/min})} = 0.107 \text{ min}$$

이런 일련의 계산과정을 거쳐 수직상승제트가 없는 경우에는 Britter-McQuaid(B-M) 모델을 적용하여 모델링을 수행하며, 수직상승제트로서 배출되고 있는 경우에는 RVD 모델을 적용하여 모델링을 수행한다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 스크리닝 모델링 절차에 의한 누출원 특성 결과

각 누출시나리오에 대한 누출원 특성 계산결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Evaluated release characteristics for two hypothetical scenarios

| Hypothetical Scenario #1 | Hypothetical Scenario #2 |
|--|--|
| Critical Pressure (P_c) : 374,093.4 Pa → Flow Characteristic : Choked Flow | Critical Pressure (P_c) : 1,404,072 Pa → Flow Characteristic : Choked Flow |
| Gas Temperature (T_c) at P_c : 276.4043 K | Gas Temperature (T_c) at P_c : 301.6262 K |
| Vapor Pressure (P_v) at T_c : 405,986 Pa → Single Phase Flow | Vapor Pressure (P_v) at T_c : 853,262.5 Pa → Two-Phase Flow |
| Emission Rate (Q_m) : 1,100.1003 g/s | Emission Rate (Q_m) : 62,583.96 g/s |
| Discharge Temperature (T_2) : 282.9437 K | Discharge Temperature (T_2) : 341.572 K |
| Discharge Density (ρ_2) : 3.053886 kg/m ³ | Discharge Density (ρ_2) : 2.529709 kg/m ³ |
| Density of Air (ρ_{air}) : 1.20209 kg/m ³ → Bouyancy is negative | Vapor Fraction at Discharge (X_2) : 1.105221 Density of Air (ρ_{air}) : 1.20209 kg/m ³ → Bouyancy is negative |
| Release Duration (T_d) : 6.055085 min | Release Duration (T_d) : 0.106524 min |

누출시나리오 #1의 경우, 배출온도, $T_2(=282.3 \text{ K}) > T_c(=276.4 \text{ K})$ 이므로 흐름특성은 초크 흐름이며, $P_c(=405,986 \text{ Pa}) > P_a(=101,325 \text{ Pa})$ 이므로 단일상 흐름을 형성하며, 배출밀도, $\rho_2(=3.1 \text{ kg/m}^3) > \rho_{air}(=1.2 \text{ kg/m}^3)$ 이므로 음의 부력을 가지면서 공기보다 무거운 가스의 거동을 보이게 되며, 누출기간은 6.1 분으로 평가되었다.

저장탱크로부터 염소증기의 단일상 누출의 경우, 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 되며, 저장용기의 온도와 압력이 일정하지 않은 경우에는 누출속도는 시간에 따라 크게 변하게 된다(Spicer, 1992).

한편, 누출시나리오 #2의 경우에는 $P_{*}(=1,404,072 \text{ Pa}) > P_a(=101,325 \text{ Pa})$ 이므로 흐름특성은 초크흐름이며, $T_{*}(=301.6 \text{ K})$ 에서의 염소의 증기압, $P_v(=853,262.5 \text{ Pa}) < P_{*}(=1,404,072 \text{ Pa})$ 이므로 응축이 일어나 2상 흐름을 형성하며, 배출밀도, $\rho_2(=25 \text{ kg/m}^3) > \rho_{air}(=1.2 \text{ kg/m}^3)$ 이므로 음의 부력을 가지면서 공기보다 무거운 가스의 거동을 보이게 되며, 누출기간은 0.1 분으로 평가되었다.

포화상태 이하에서 저장된 가압저장탱크의 압력방출장치들을 통하여 포화증기가 누출되는 경우, 가압하에 저장된 물질은 누출물이 대기중에 누출될 때 감압하게 되면 이러한 감압현상으로 인하여 포화액체와 증기의 2상을 형성한다. 즉 감압과정 동안에 응축이 일어나도록 가스는 냉각되므로, 주위의 대기온도보다 낮은 고휘발성 액체는 전형적으로 대기압보다 높은 압력에서 저장된다. 저장용기에 증기와 액체가 포함되어 있는 경우에는 구멍은 저장용기의 증기공간에 위치하여야 하며, 모든 누출물은 누출원 근처에 액체의 Rain-out을 형성하지 않고 에어로졸로서 풍하거리를 이동한다고 가정한다.

3-2. 분산모델링 결과

각 누출시나리오에 대하여 Britter-McQuaid 및 RVD 모델을 적용하여 분산모델링을 수행하였다. 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 ,를 계산하면서 최악의 기상조건에 따른 최대 지표면 농도를 예측한다.

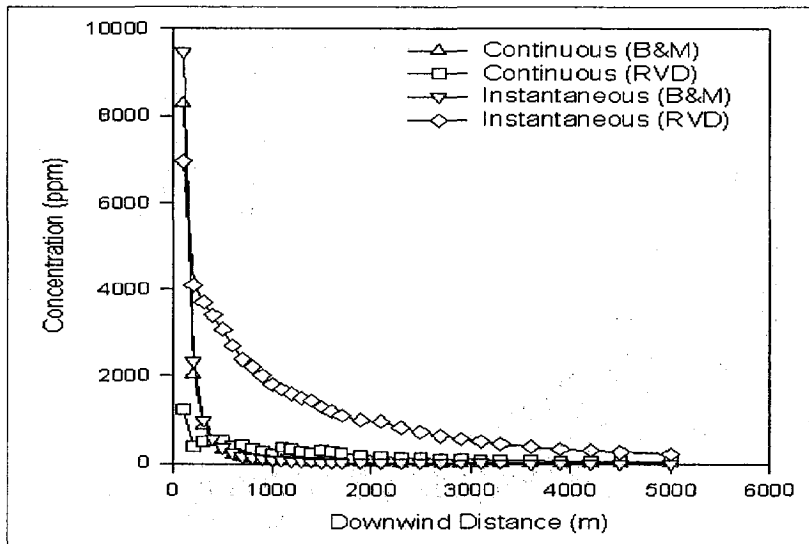


Fig. 1. Concentration Profile at Downwind Distances for Scenario #1.

누출시나리오 #1의 경우, Britter-McQuaid 및 RVD 모델을 적용하여 분산모델링을 수행하여 얻어진 풍하거리에 따른 단기(1-hr) 지표면 농도분포의 예측결과는 Fig. 1에 나타내었다.

누출시나리오 #1에서 Britter-McQuaid 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 8,280 ppm 및 9,481 ppm으로 산출되었다. 또한, 누출시나리오 #1에서 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 1,237.9 ppm 및 6,955.1 ppm으로 산출되었다.

누출시나리오 #1에서 연속누출이든 순간누출이든 공히 수직상승제트가 없는 Britter-McQuaid 모델의 경우가 수직상승제트로서 배출되고 있는 RVD 모델의 경우보다 같은 풍하거리에서 높은 지표면 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 누출이 수직상승제트로서 대기중으로 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 대기중에서 충분히 희석되지 못하여 단시간내에 다량의 유해독성가스가 지표면에 도달하므로 지표면 농도는 그만큼 증가함을 알 수 있다.

누출시나리오 #1의 경우, 연속 및 순간누출에 대하여 RVD 모델을 적용하여 분산모델링을 수행하여 얻어진 풍하거리에서의 지표면 농도에 미치는 풍속의 영향을 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다.

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

한편, 누출시나리오 #2의 경우, Britter-McQuaid 및 RVD 모델을 적용하여 분산모델링을 수행하여 얻어진 풍하거리에 따른 단기(1-hr) 지표면 농도분포의 예측결과는 Fig. 4에 나타내었다.

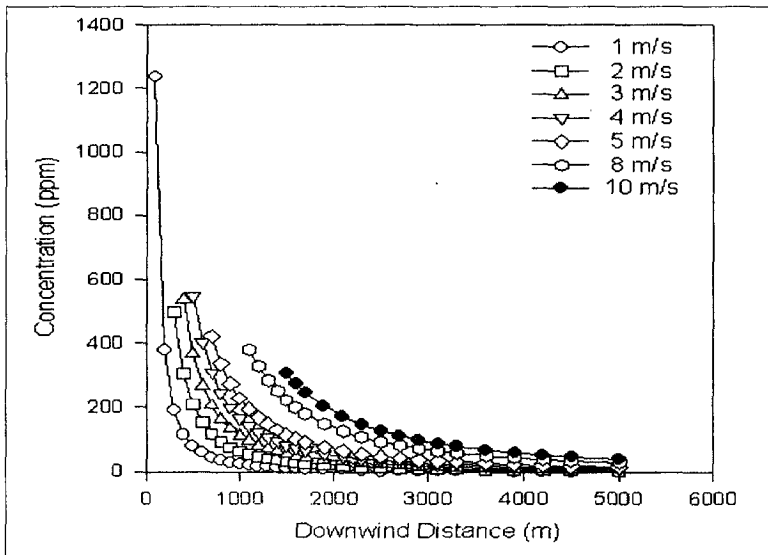


Fig. 2. The Effect of Wind Speed on Concentration for Scenario #1(Continuous; RVD).

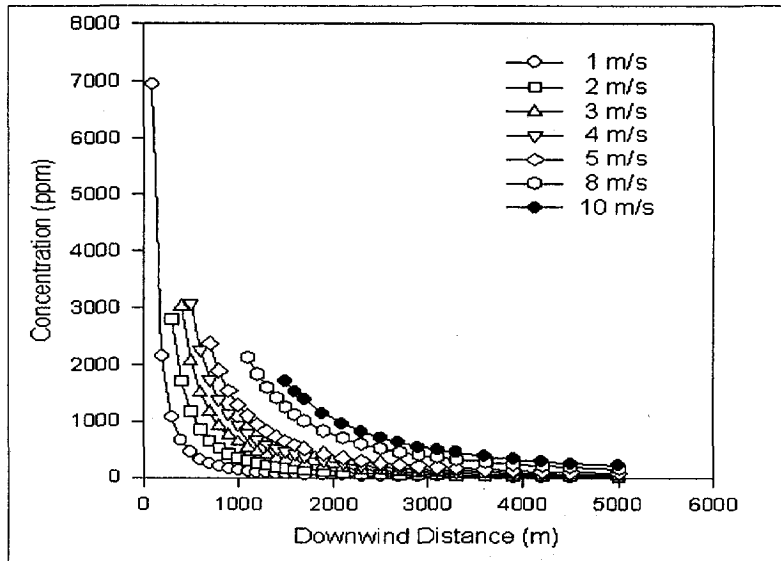


Fig. 3. The Effect of Wind Speed on Concentration for Scenario #1(Instantaneous; RVD).

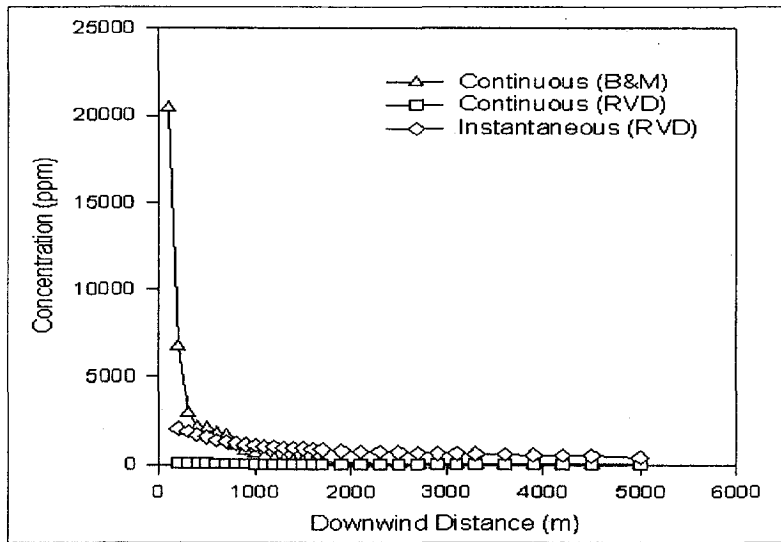


Fig. 4. Concentration Profile at Downwind Distances for Scenario #2.

누출시나리오 #2에서 RVD 모델을 수행한 결과, 연속누출 및 순간누출시 1-시간 평균 최대지 표면 농도는 공히 풍속 1 m/s, 대기안정도가 가장 안정할 때 조건에서 풍하거리 112.3m 지점에서 각각 201.4 ppm 및 3,021.7 ppm으로 산출되었다. 그러나 누출시나리오 #2에서 Britter-McQuaid 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 공히 2,041 ppm

으로 나타나고 있다. 결과로부터, 가압저장탱크의 압력방출장치로부터 누출되는 유해독성가스의 분산유형을 예측하는데는 RVD 모델이 Britter-McQuaid 모델보다 적절하다고 사료된다.

누출시나리오 #2의 경우, 연속 및 순간누출에 대하여 RVD 모델을 적용하여 분산모델링을 수행하여 얻어진 풍하거리에서의 지표면 농도에 미치는 풍속의 영향을 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

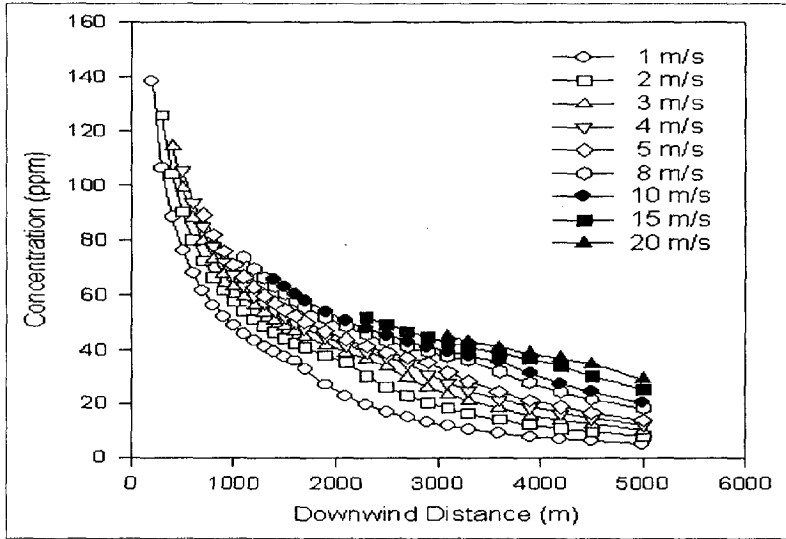


Fig. 5. The Effect of Wind Speed on Concentration for Scenario #2(Continuous; RVD).

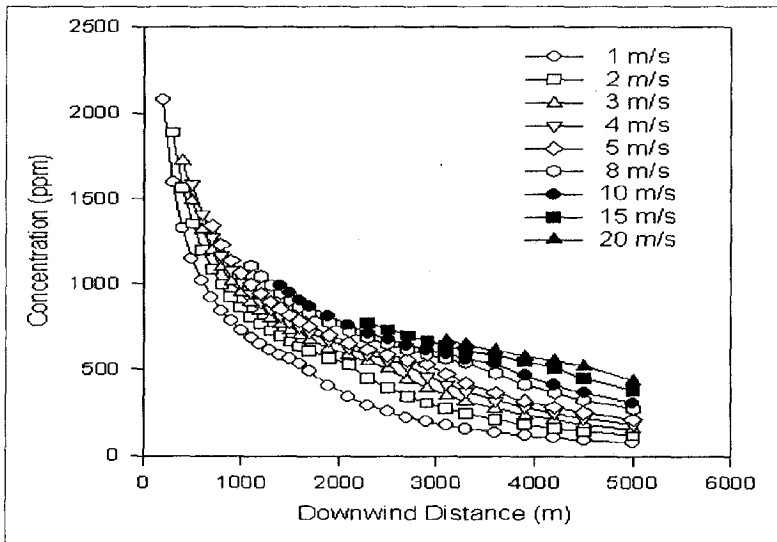


Fig. 6. The Effect of Wind Speed on Concentration for Scenario #2(Instantaneous; RVD).

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

결국, 공기보다 무거운 가스의 분산유형은 누출물의 초기(감압) 밀도 및 누출속도 뿐만 아니라 풍속 및 대기안정도에 커다란 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 풍속이 낮을수록 대기안정도가 안정할수록 대기중 분산에 의한 희석효과가 적어 지표면 농도는 증가하고 있음을 알 수 있다.

본 분산모델링을 위한 스크리닝 절차에서 기체 및 2상 흐름의 모든 누출원 특성 계산은 이상상태라고 가정하였기 때문에 공기보다 무거운 가스의 누출의 경우 누출후의 복잡한 열역학적 거동은 포함하고 있지 않아, 만약에 대기중에 분산된 누출물질의 밀도가 대기의 밀도에 근접함에 따라 공기보다 무거운 가스의 거동이 중요하지 않다고 예측되는 경우에는 정교한 해석 모델에 의한 수동적 대기분산모델링(Passive Atmospheric Dispersion Modeling)을 적용하여야 할 것이라 사료된다[4].

본 스크리닝 모델은 최악의 경우의 농도를 야기시키는 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 대기중에서 원활한 혼합으로 충분히 희석되어 낮은 대기질 농도를 나타낼 수 있으므로 본 스크리닝 모델의 특성상 최악의 경우의 농도를 야기시키는 기상조건들은 지표면 농도를 과대평가할 수 있음을 내포하고 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 액화염소 저장탱크의 균열 및 압력방출장치의 작동에 의하여 유해독성가스인 염소가스가 증기상 및 2상 흐름으로 연속 및 순간누출될 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 및 초기 분산속도 뿐만 아니라 풍속 및 대기안정도에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 풍속이 낮을수록 대기안정도가 안정할수록 대기중 분산에 의한 희석효과가 적어 지표면 농도는 증가하고 있음을 알 수 있다.

결국, 본 분산모델링을 위한 스크리닝 절차는 여러 가지 유해독성가스들에 대하여 보다 다양한 누출유형들을 선정하여 모델링을 수행하고 아울러 보편적으로 적용가능한 최적의 Sliding Scale 방법론을 개발함으로써 정교한 해석 모델에 의한 누출영향 평가시 예비 가이드라인으로 활용될 수 있으리라 사료된다.

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_o | (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_* | gas enthalpy at T_* or P_* ($J/kmol$) |
| 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/s) |
| R | ideal gas constant ($=8,314 J/kmol \cdot K$) |
| 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 (s) |
| T_* | gas temperature at P_* (K) |
| u | wind velocity at release height (m/s) |
| u_{10} | wind velocity at the anemometer height of 10 m (m/s) |
| u_* | wind frictional velocity (m/s) |
| 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)
- $\gamma \left(\frac{C_p}{C_v} \right) \propto \frac{1}{\left(1 - \frac{R}{C_p M_w} \right)}$ at T_1 (dimensionless)
- λ heat of vaporization at the normal boiling point (J/kg)

참 고 문 헌

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. USEPA, "Guidance on the Application of Refined Dispersion Models to Hazardous Air Pollutants Releases", EPA-454/R-93-002, April (1993).
3. D. Bruce Turner : "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates - Revised", Cincinnati, Ohio (1969).
4. "Superchems, Professional Edition Version 2.0 - User Guide", Arthur D. Little, Inc., Aug. (1996).