

염소가스의 소규모 누출에 대한 Gaussian 연속모델의 분산계수 적용성

장 서 일 · † 김 태 옥
명지대학교 공과대학 화학공학과
(2003년 9월 22일 접수, 2004년 1월 29일 채택)

Suitability of Dispersion Coefficients of the Gaussian Plume Model for the Small Scale Release of Chlorine Gas

Seo-II Jang and Tae-Ok Kim

Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University
(Received 22 September 2003 ; Accepted 29 January 2004)

요 약

무거운 독성가스의 소규모 누출에 대한 가우시안 연속모델의 적용성을 평가하기 위하여 염소가스의 소규모 누출에서 염소농도의 실험값과 여러 가지 분산계수를 사용한 가우시안 연속모델에 의해 산출한 이론값을 비교하였다. 그 결과, 염소가스 분산은 분산계수와 대기 안정도에 따라 상당히 차이가 있었으며, 염소농도는 Briggs의 분산계수와 유효 누출높이를 사용한 가우시안 연속모델에 의해 비교적 정확하게 산출할 수 있었다.

Abstract - To evaluate suitability of the Gaussian plume model for the small scale release of a dense toxic gas, experimental concentrations of the small scale release of chlorine were compared with theoretical concentrations calculated by the Gaussian plume model using various dispersion coefficients. As a result, we found that the dispersion of chlorine gas was fairly varied with dispersion coefficient and atmospheric stability and that chlorine concentrations were well estimated by the Gaussian plume model using Briggs' dispersion coefficient and the effective release height.

Key words : suitability, dispersion coefficient, Gaussian plume model, small scale release, chlorine gas

1. 서 론

염소가스와 같은 독성물질의 누출에 의해 발생하는 사고는 인체에 미치는 독성영향이 치명적이기 때문에 사고를 사전에 예방하는 것이 매우 중요하며, 사고예방을 위한 사고 영향평가는 위험성 평가방법 중에서 결과분석(consequence analysis)을 주로 사용하고 있다. 이 방법은 분산모델(dispersion model)을 이용

하여 관심거리에서 독성물질의 농도를 산출하고, 독성영향모델(toxic gas effect model)에 의해 인체에 미치는 독성영향을 평가하고 있다. 이와 같이 독성영향을 평가하기 위해서는 적절한 분산모델을 사용하여 독성가스의 농도를 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다.

가스분산을 평가하는데 사용되고 있는 분산 모델에는 가우시안(Gaussian) 모델, BM(Britter & McQuaid) 모델, HMP(Hoot. Meroney & Peterka) 모델, DEGADIS(dense

†주저자 : kimto@mju.ac.kr

gas dispersion) 모델, SLAB 모델 등이 있으며, 이들 모델들은 누출가스의 종류(가벼운/무거운 가스), 누출특성(지표면/지상) 및 누출흐름(순간/연속)에 따라 구분하여 적용하고 있다. 이 중에서 일반적으로 사용되고 있는 가우시안 분산모델의 매개변수로는 누출속도 또는 누출량, 대기 안정도, 바람속도, 누출높이, 분산계수 등이 있다.

지금까지 독성가스에 대한 누출실험들은 대부분 사고빈도가 낮고, 사고강도가 매우 큰 대규모 누출에서 수행되었으나, 상대적으로 사고강도가 낮고 사고빈도가 높은 소규모 누출실험은 거의 수행되지 못하였다. 따라서 대규모 누출실험에서 검증된 분산계수를 사용하여 소규모 독성가스 누출사고에 대해 사고 영향평가를 수행하는 것은 문제점이 있을 수 있다.

본 연구에서는 무거운 독성가스의 소규모 누출에 대한 분산특성을 평가하는 방법을 제시하기 위하여 최근 Dandrieux 등[1]에 의해 수행된 염소가스의 소규모 누출 실험결과를 바탕으로 가우시안 모델을 사용하여 여러 연구자들이 제시한 분산계수들의 적용성을 평가하였다.

II. 이 론

2.1. 대기 안정도와 바람속도

가스분산에 영향을 미치는 주요 기상조건은 대기 안정도와 바람속도이다[2]. 일반적으로 대기조건은 Pasquill-Gifford 안정도[3]에 의해 최저 안정상태인 A등급에서 가장 안정된 상태인 F등급까지 분류되고 있으며, Pasquill-Gifford 안정도는 태양의 각도를 고려하였으나 Pasquill-Mohan-Siddiqui 안정도[4]는 태양의 복사열을 고려하고 있다.

또한 높이변화에 따른 바람속도는 Hanna 등[5]이 제시한 식 (1)을 사용하고 있다.

$$u_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (1)$$

여기서 u_z 는 z 높이에서 바람속도(m/s), u_{10} 은 10 m 높이에서 바람속도이고, p 는 지수계수(power coefficient, -)로 대기 안정도와 표면 거칠기의 함수이다.

2.2. 가우시안 모델

연속누출에서 분산된 증기농도는 누출속도, 대기조건, 누출높이, 그리고 누출지점으로부터 거리의 함수로 나타나며, 평균농도는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \langle C \rangle(x, y, z) = & \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \\ & \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right. \\ & \left. + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 G 는 누출물질의 누출속도(kg/s)이고, σ_y 와 σ_z 는 각각 y , z 방향의 분산계수(m), H 는 누출높이(m), y 는 crosswind 방향의 거리(m), 그리고 z 는 지표면에서 높이(m)이다.

또한 본 연구에서는 누출높이를 식 (3)과 같이 실제 누출높이(H_S)를 보정한 유효 누출높이(H_E)를 사용하였다[6].

$$H_E = H_S + \Delta H_{DW} + [\Delta H_B \text{ or } \Delta H_M] \quad (3)$$

여기서 ΔH_{DW} 는 하강영향에 따른 조정높이(m), ΔH_B 는 부력영향에 따른 조정높이, 그리고 ΔH_M 은 운동량 영향에 따른 조정높이이다.

식 (2)의 분산모델에 사용되는 분산계수는 다양하게 제시되어 있으나, 본 연구에서는 현재 널리 알려진 경험적인 식인 Briggs[7], Pasquill-Gifford[8], Burt[9], Vogt[10]의 식을 사용하였다. 이때 연속(plume) 모델의 경우에 분산계수는 평균시간을 3분(Briggs의 경우는 10분)으로 기준하였으므로 기준시간 이외의 평균시간에서는 다음과 같이 보정하여 사용하였다[6].

$$\sigma_y(t_a) = \left[\frac{t_a}{t_{ref}} \right]^{0.2} \sigma_y(t_{ref}) \quad \text{for } t_a \leq t_e \quad (4)$$

$$\sigma_y(t_e) = \left[\frac{t_e}{t_{ref}} \right]^{0.2} \sigma_y(t_{ref}) \quad \text{for } t_a > t_e \quad (5)$$

여기서 t_e 는 폭로시간(s)이고, $\sigma_y(t_a)$ 와

$\sigma_y(t_{ref})$ 는 각각 입의의 평균시간(t_a)과 기준 평균시간(t_{ref})에서 측면분산계수이다.

III. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 Dandrieux 등[1]이 1999년 5월에 Champclauson(Gard, France)에서 수행한 염소가스의 소규모 연속누출 실험결과를 사용하였다. 실험에서 사용된 액화염소의 저장용기(bottle B20 of L'Air Liquide)는 용량이 6.77 m³, 최대압력이 4.9 bar, orifice 직경이 4 mm 이었고, 염소의 양은 24 kg이며, 용기내의 액화염소는 포화증기 상태이었다. 그리고 실험은 지표면으로부터 30 cm 높이에서 염소를 기상으로 4.5분 동안 누출시키면서 바람방향에 대해 세 지점에서 2.5분 동안 평균농도를 측정하였다고 보고하였다[1]. 또한 실험조건은 누출속도 0.33 kg/min, 온도 26°C, 상대습도 30%, 바람속도 1.7 m/s, 복사열 570 W/m²이었으며, 누출지점으로부터 5, 10, 15 m 지점에서 측정된 염소농도는 각각 488, 54, 20 ppm이었다고 보고하였다. 이때 상대습도, 대기온도, 바람속도와 같은 기상자료는 2 m 높이에서 측정하였다.

본 연구에서 Dandrieux 등[1]의 실험조건으로부터 Pasquill-Mohan-Siddiqui 안정도 분류에 의해 평가한 결과, 대기 안정도는 A 또는 B등급이었으며, 시골지형에서 대기 안정도가 A, B등급일 때 식 (1)의 지수계수 0.07을 사용하여[5] 산출한 실제 누출높이에서 바람속도는 1.59 m/s로 산출되었다. 또한 한국산업안전공단에서 제시한 절차[6]대로 식 (3)에 의해 산출한 유효 누출높이는 0.55 m이었다.

분산계수는 Briggs, Vogt, Pasquill-Gifford, 그리고 Pasquill-Gifford와 Burt를 조합[11]한 총 4가지를 사용하여 식 (2)로부터 거리별 평균농도를 산출하였다. 이때 실험 평균시간이 2.5분이므로 식 (4) 및 식 (5)에 의해 분산계수를 보정하였다.

IV. 결과 및 고찰

본 연구는 Dandrieux 등[1]의 염소가스 누출 실험결과와 가우시안 연속모델에서 Briggs[7] 등의 4가지 분산계수를 사용하여 산출된 염소 농도를 비교하여 소규모 염소가스 누출에 대한

분산계수의 적용성을 평가하였다.

Dandrieux 등[1]은 가우시안 연속모델에서 분산계수로 Union des Industries Chimiques[12](이하 UIC)와 Doury의 계수(Doury's parameterization for normal diffusion, 이하 DN)를 사용하여 염소농도를 계산하였으며, 또한 DEGADIS 모델을 사용한 ALOHA 상용 프로그램으로 산출하였다.

Table 1에는 본 연구결과와 Dandrieux 등의 연구결과를 나타내었으며, 이 결과는 분산계수의 선택에 따라 산출된 농도가 크게 다르다고 보고한 Carrascal 등[13]의 보고와 일치하고 있다.

Table 1에서 ALOHA와 가우시안 연속모델의 경우 Pasquill-Gifford, Pasquill-Gifford & Burt, UIC의 분산계수를 사용한 경우는 매우 적용성이 나쁘게 나타났으며, 이를 제외한 분산계수들의 적용성은 Fig. 1에 나타내었다.

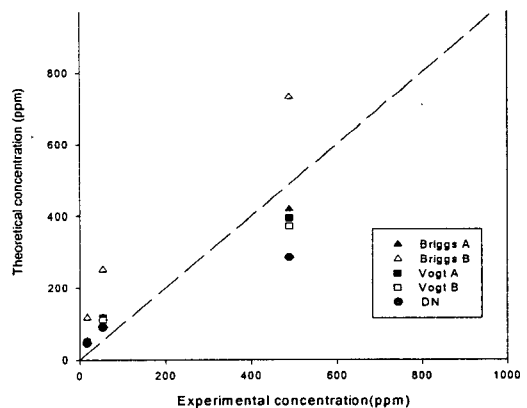


Fig. 1. Comparisons of experimental and theoretical concentrations of chlorine.

분산계수의 적용성을 나타낸 Fig. 1에서 대기 안정도의 변화에 대해 Briggs의 분산계수가 Vogt의 분산계수보다 민감한 것으로 나타내었는데, 이것은 대기 안정도에 대한 Briggs의 분산계수 식의 계수값의 변화가 Vogt의 계수값의 변화보다 민감함으로 각각의 분산계수 식의 특성이 반영된 것으로 판단된다. 또한 누출지점에서 거리가 멀수록 본 연구결과인 Briggs와 Vogt의 분산계수와 Dandrieux 등의 DN의 분산계수에 의해 산출된 염소농도가 적용성이 거의 비슷할 뿐만 아니라, 대부분의 결과가 이론값이 실험값보다 다소 높은 값을 나타내고 있

다. 이것은 분산모델의 특성상 농도곡선의 꼬리부분에서는 거리의 증가에 따라 농도가 지수 함수 형태로 서서히 감소하지만, 실제경우는 대기의 난류혼합으로 이론값보다 농도가 낮아지기 때문에 판단된다. 그리고 누출지점에서 거리가 가까울수록 유효누출높이에서 분산되는 가스가 지표면에 도달하는 지점 이내의 거리에서는 낮은 농도가 예측되나 실제적으로는 대기의 난류혼합 효과에 의해 예측된 값보다도 더 높은 농도가 측정된 것으로 판단되어진다.

이상의 결과와 같이 가우시안 연속모델에서 여러 가지 분산계수들 사용하여 산출한 이론값과 실험값을 비교한 결과, 분산계수, 그리고 대기 안정도에 따라 가스 분산정도가 상당히 차이가 있음을 알 수 있었으며, 염소와 같이 무거운 독성가스의 소규모 누출에서는 Briggs의 분산계수가 대기 안정도 A등급에서 전 농도범위에서 가장 잘 일치함을 알 수 있었다.

교하였다. 그 결과, 염소가스 분산은 분산계수와 대기 안정도에 따라 상당히 차이가 있었으며, 염소농도는 Briggs의 분산계수와 유효 누출높이를 사용한 가우시안 연속모델에 의해 비교적 정확하게 산출할 수 있었다.

기 호 설 명

- A : Pasquill atmospheric stability at extremely unstable conditions[-]
- B : Pasquill atmospheric stability at moderately unstable conditions[-]
- <C> : time-average concentration[mg/m³, ppm]
- G : continuous release rate[kg/s]
- H : release height[m]

Table 1. Comparisons of experimental & theoretical concentrations of chlorine gas

Concentration[ppm]		Distance[m]		
		5	10	15
Experimental[1]		488	54	17
Dandrieux et. al[1]	UIC A	13	7	5
	UIC B	754	189	84
	DN	284	90	46
	ALOHA A	233,000	54,000	27,000
	ALOHA B	218,000	50,500	25,400
This study	Briggs A	419	117	53
	Briggs B	732	251	118
	Vogt A	394	118	51
	Vogt B	372	111	51
	Pasquill-Gifford A	15,354	7,755	3,677
	Pasquill-Gifford B	29,073	10,362	5,131
	Pasquill-Gifford & Burt A	15,747	5,167	2,515
	Pasquill-Gifford & Burt B	29,163	10,429	5,161

*A, B : Pasquill atmospheric stability

V. 결 론

무거운 독성가스의 소규모 누출에 대한 가우시안 연속모델의 적용성을 평가하기 위하여 염소가스의 소규모 누출에서 염소농도의 실험값과 Briggs, Vogt, Pasquill-Gifford, Pasquill-Gifford & Burt의 분산계수를 사용한 가우시안 연속모델에 의해 산출한 이론값을 비

- H_E : effective release height[m]
- H_S : actual release height[m]
- ΔH_B : height considered the buoyant effect[m]
- ΔH_{DW} : height considered the descent effect[m]
- ΔH_M : height considered the momentum effect[m]
- p : power coefficient defined in Eg. (1)[-]
- t_a : average time[s]

t_d : duration time of the release material[s]
 t_e : exposure time[s]
 t_{ref} : average time for reference[s]
 u : wind speed at the release height[m/s]
 u_{10} : wind speed at the height of 10 m[m/s]
 x : downwind direction distance[m or km]
 y : crosswind direction distance[m]
 z : distance above the ground[m]
 σ_y : dispersion coefficient in the y direction[m]
 σ_z : dispersion coefficient in the z direction[m]

참 고 문 헌

- [1] Dandrieux, A., Dusserre, G., and Ollivier, J., "Small Scale Field Experiments of Chlorine Dispersion", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 5-10(2002).
- [2] American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases, New York(1999).
- [3] Slad, D. H., "US Air Resources Laboratory and Division of Reactor Development and Technology", US Atomic Energy Commission, TID-24190: Methodology and Atomic Energy, Washington D.C.(1968).
- [4] Mohan, M. and Siddiqui, T. A., "Analysis of Various Schemes for Estimation of Atmospheric Stability Classification", *Atmospheric Environment*, **32**, 3775-3781(1998).
- [5] Hanna, S. R., Briggs, G. A., and Jr. Hosker, R. P., "Handbook on Atmospheric Diffusion", Oak Ridge, TN. : Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. DOE/TIC 11223(1982).
- [6] Korea Occupational Safety & Health Agency(KOSHA), "Consequence Analysis(CA)", Industrial Safety Training Institute of KOSHA, ISTI-2001-29-86(2001).
- [7] Briggs, C. A., "Diffusion Estimation for Small Emissions", In Environ. Res. Lab., Air Resources Atmos. Turbulence and Diffusion Laboratory, NOAA, Oak Ridge, Tennessee, Annual Rep., ATDL-106, USCOD-NOAA(1973).
- [8] Cramer, H. E., "Industrial Source Complex(ISC) Dispersion Model-User's Guide", NTIS PB80-133044, H. E., U. S. Dept. of Commerce, pp. 2-26~2-29(1979).
- [9] Burt, E. W., "VALLEY Model User's Guide. U.S.E.P.A.", EPA-450/2-77-018. Research Triangle Park, N. C., pp. 2-8~2-9(1977).
- [10] Vogt, K. J., "Empirical Investigations of the Diffusion of Waste Air Plumes in the Atmosphere", *Nuclear Technol.*, **34**, 43-49(1977).
- [11] Carrascal, M. D., Puigcerver, M., and Puig, P., "Sensitivity of Gaussian Plume Model to Dispersion Specifications", *Theoretical and Applied Climatology*, **48**, 147-157(1993).
- [12] Union des Industries Chimiques. "Cahier de sécurité no61 Groupe de travail risques technologiques majeurs". Dispersion Atmosphérique, French(1995).
- [13] Carrascal, M. D., Puigcerver, M., and Puig, P., "Sensitivity of Gaussian plume model to dispersion specifications", *Theoretical and Applied Climatology*, **48**, 147-157(1993).