

염소가스의 소규모 연속누출에서 분산특성 및 독성영향 해석

장 서 일 · 이 영 재 · † 김 태 옥
명지대학교 공과대학 화학공학과
(2004년 2월 19일 접수, 2004년 3월 9일 채택)

Analysis of Dispersion Characteristics and Toxic Effect in the Small-Scale Continuous Release of Chlorine Gas

Seo-Il Jang · Young-Jae Lee and Tae-Ok Kim
Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University
(Received 19 February 2004 ; Accepted 9 March 2004)

요 약

본 연구는 염소가스의 소규모 연속누출에서 분산특성과 독성영향을 해석하였다. 염소 농도의 실험값과 이론값을 비교한 결과, Briggs의 분산계수와 유효누출높이를 사용한 가우시안 모델이 BM 모델보다 적용성이 우수하였다. 또한 가우시안 모델에 의해 염소농도를 산출하고 해석한 결과, 염소분산은 누출속도 보다 대기안정도와 바람속도에 크게 영향을 받으며, 독성영향은 염소분산에 미치는 매개변수의 영향과 유사한 경향을 나타내었다. 이때, 여러 독성기준에 의해 산출된 피해범위로부터 인명을 보호하기 위한 위험지역을 파악할 수 있었다.

Abstract - This study analyzed dispersion characteristics and toxic effect in the small-scale continuous release of chlorine gas. We found that the Gaussian model using the Briggs' dispersion coefficient and the effective release height was better predicting experiments than the BM model. From chlorine concentrations calculated by Gaussian model, simulation results showed that the dispersion of chlorine was more affected by atmospheric stability and wind speed than release rate and that the toxic effect of chlorine gas was similar to the effect of parameters on chlorine dispersion. From effected areas with toxic criteria, damaged areas could be estimated to protect human.

Key words : Gaussian model, BM model, gas dispersion, toxic effect, chlorine, small scale

1. 서 론

독성물질의 누출사고는 인체에 치명적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 장기적으로는 환경에까지 심각한 피해를 미치기 때문에 중대산업사고(major industrial accident)로 분류되며, 이들

사고의 영향평가는 주로 결과분석(consequence analysis, CA)에 제시되어 있는 여러 모델들에 의해 평가되고 있다.

CA 중에서 분산모델(dispersion model)은 기상학적 특성과 누출특성을 고려하여 누출물질의 분산특성을 평가하는 것으로서, 현재 가

벼운 가스는 가우시안(Gaussian) 모델이 대표적으로 사용되고 있고, 무거운 가스는 BM (Britter & McQuaid) 모델, HMP(Hoot, Meroney & Peterka) 모델, DEGADIS(dense gas dispersion) 모델, SLAB 모델 등이 주로 사용되고 있다. 이 중에서 가우시안 모델은 평탄지형에서 가벼운 가스분산에 적용되고 있으나, 최근에는 무거운 가스분산에도 적용한 연구[1-3]가 발표되고 있다. 그리고 독성영향모델(toxic effect model)은 누출물질의 독성기준(toxic criteria)을 바탕으로 부상 또는 사망 가능성과 같은 독성영향을 평가하는 것으로써, 대표적인 독성기준은 ERPG(emergency response planning guidelines for air contaminants), IDLH(immediately dangerous to life or health), EELGs(emergency exposure guidance levels), SPEGL(short-term public emergency guidance levels), TLV(threshold limit values), PEL(permissible exposure limits), TEEL(temporary emergency exposure limits) 등이 있으며, 우리나라는 산업안전보건법에서 독성기준을 명시하고 있다.

독성물질의 분산에 따른 독성영향 연구는 화재 및 폭발사고에 비해 매우 미흡할 뿐만 아니라 대부분 독성물질의 누출실험은 Deaves[4]와 같이 대규모에서 수행되었고, 상대적으로 사고 강도가 낮고 사고빈도가 높은 소규모 누출실험은 거의 수행되지 못하였다. 따라서 대규모 누출실험에서 검증된 분산모델을 소규모 독성물질의 누출사고의 영향평가에 적용할 경우, 관심거리가 매우 짧기 때문에 평가를 원활히 수행되지 못하는 문제점이 발생된다.

본 연구는 Dandrieux 등[2]이 수행한 염소가스 소규모 연속누출 실험을 바탕으로 가우시안 분산모델의 적용성을 해석한 전보[3]의 결과와 무거운 가스 분산모델인 BM 모델의 적용성을 비교·해석하고, 이를 바탕으로 독성물질의 분산에 영향을 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다. 또한 염소의 독성영향에 미치는 매개변수의 영향과 여러 독성기준에 의해 피해범위를 산출하고 해석하였다.

II. 이 론

2.1. 분산모델

2.1.1. 가우시안 모델

가우시안 연속누출에서 분산된 증기의 평균

농도는 누출속도, 대기조건, 누출높이, 그리고 거리의 함수이며, 평균농도는 식 (1)과 같다.

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

여기서 G는 누출물질의 누출속도(kg/s)이고, σ_y 와 σ_z 는 각각 y 및 z 방향의 분산계수(m), H는 누출높이(m), y는 crosswind 방향 거리(m), 그리고 z는 지표면에서 높이(m)이다.

특히, 전보[3]에서 여러 연구자들이 제시한 분산계수 중에서 Briggs[5]의 분산계수와 유효 누출높이로 누출높이를 보정한 경우가 적용성이 가장 우수하였으므로 본 연구에서는 이를 적용하여 농도를 산출하였다.

2.1.2. BM 모델

BM 모델은 무거운 가스분산에 대한 실험자료의 상관성과 차원해석으로 개발된 것으로 식 (2)와 식 (3)에 의해 연속누출과 순간누출에서 무거운 가스누출 여부를 판정한다. 본 연구에서는 주어진 조건이 연속누출임을 확인하여 문헌상 그래프[6]를 이용하여 관심거리에서 농도를 산출하였다.

$$\left(\frac{g_o q_o}{u_{10}^3 D_c}\right)^{1/3} \geq 0.15 \quad \text{for plume} \quad (2)$$

$$\frac{(g_o V_o)^{1/2}}{u_{10} D_i} \geq 0.20 \quad \text{for puff} \quad (3)$$

여기서 g_o 는 초기 부력인자(m/s^2), q_o 는 초기 부피유속(m^3/s), u_{10} 은 10 m 높이에서의 바람속도, V_o 는 누출된 초기부피(m^3), 그리고 D_c 와 D_i 는 각각 연속누출과 순간누출에서 누출차원 특성(m)이다.

2.2. 독성영향모델

2.2.1. 독성기준

염소가스의 허용농도는 ACGIH[7]에서 15분 이하의 폭로한계(TLV-STEL)로 3 ppm, 1일 8

시간 작업시 가중평균농도(TLV-TWA)로 0.5 ppm을 권장하고 있으며, 우리나라는 산업안전보건법에서 이를 기준으로 하고 있다. Table 1은 여러 독성기준에 의한 염소가스의 허용농도를 나타내었다.

Dandrieux 등[2]의 실험값과 Briggs의 분산계수와 유효누출높이를 고려한 가우시안 모델의 적용성 결과[3], 그리고 무거운 가스 분산모델인 BM 모델의 이론값을 비교하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Toxic criteria of chlorine

[Unit : ppm]

IDLH ^{a)}	ERPG			EEGL		PEL ^{b)}	TLV-TWA ^{b)}
	1 ^{b)}	2 ^{c)}	3 ^{d)}	1 hr ^{e)}	24 hr ^{f)}		
10	1	3	20	3	0.5	0.5	0.5

- ^{a)} IDLH : Immediately dangerous to life and health concentration.
- ^{b)} ERPG-1 : The maximum airborne concentration below which it is believed that nearly all individuals could be exposed for up to 1 hr without experiencing any symptoms other than mild transient adverse health effects or without perceiving a clearly defined objectionable odor.
- ^{c)} ERPG-2 : The maximum airborne concentration below which it is believed that nearly all individuals could be exposed for up to 1 hr without experiencing or developing irreversible or other serious health effects or symptoms that could impair their abilities to take protective action.
- ^{d)} ERPG-3 : The maximum airborne concentration below which it is believed that nearly all individuals could be exposed for up to 1 hr without experiencing or developing life-threatening health effects (similar to EEGL-1 hr)
- ^{e)} EEGL-1 hr : A concentration of a gas, vapor, or aerosol will allow healthy military personnel to perform specific tasks during emergency conditions lasting 1 hr.
- ^{f)} EEGL-24 hr : A concentration of a gas, vapor, or aerosol will allow healthy military personnel to perform specific tasks during emergency conditions lasting 24 hr.
- ^{g)} PEL : The permissible exposure limits (similar to TLV-TWA).
- ^{h)} TLV-TWA : 8 hr time-weighted average exposed concentration.

2.2.2. 독성영향모델

독성영향모델에서 제시된 probit는 식 (4)와 같으며, 독성물질의 노출로 인한 사망의 피해 범위는 폭로시간과 농도에 의존한다[8].

$$Y = a + b \ln(C^n t_e) \quad (4)$$

여기서 Y는 probit, C는 농도(ppm), 그리고 a, b, n은 화학물질들에 대한 probit 상수[9,10]이고, probit와 probability(%)의 관계는 문헌[11]에 수록되어 있다. 이러한 probit 방법은 사고 결과의 가능성을 나타낼 수 있고, 결과분석에서 모든 사고유형에 적용이 가능한 장점이 있지만 probit 계수가 알려진 화학종으로 제한되는 단점이 있다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 분산특성

3.1.1. 분산모델의 적용성

염소가스의 소규모 연속누출 실험에서 얻은

Table 2와 같이 BM 모델은 실험값보다 상당히 큰 값을 갖거나 산출범위를 벗어나고 있다. 이것은 BM 모델이 대규모 누출실험에 대한 차원해석적인 방법으로 개발된 모델이므로 본 연구와 같은 소규모 누출의 경우에는 적용이 불가능한 것으로 판단된다. 따라서 전보[3]의 결과와 같이 가우시안 모델이 독성가스의 소규모 연속누출에서 분산특성을 평가하는데 적당한 모델로 판단된다.

3.1.2. 염소가스의 분산특성

3.1.1절의 결과에서 적용성이 우수한 가우시안 모델을 사용하여 염소농도를 산출하고, 가스 분산에 미치는 영향이 큰 매개변수인 누출속도, 대기안정도, 그리고 바람속도의 영향을 해석하였다. 이때, 기준조건은 누출온도 26℃, 누출높이 0.3 m, 평균시간 2.5분, 누출속도 0.33 kg/min, 2 m 높이의 바람속도 1.7 m/s, 대기안정도 A등급, 그리고 관심거리 10 m로 하였다.

가스분산에 미치는 관심거리의 영향은 Fig. 1과 같이 관심거리가 증가할수록 염소농도는

Table 2. Comparisons of experimental and theoretical concentrations of chlorine gas [unit : ppm]

Classification		Distance[m]		
		5	10	15
Dandrieux et. al[2]	Experiment	488	54	17
This study	Gaussian A	419	117	53
	Gaussian B	732	251	118
	BM	33,876	-	-

A, B : Pasquill atmospheric stability.

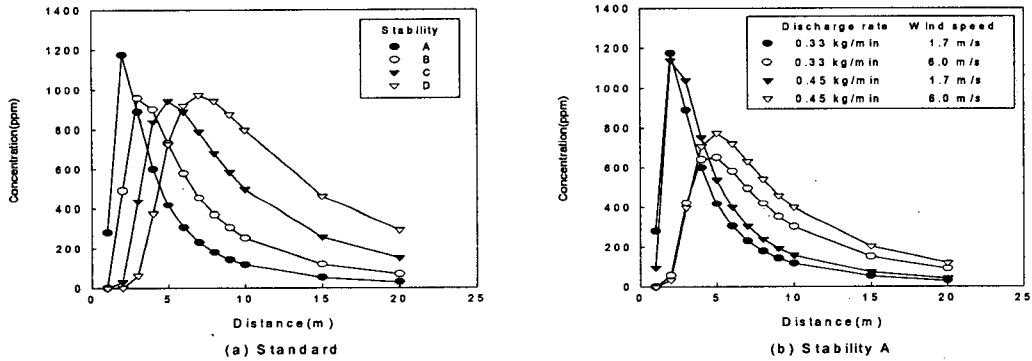


Fig. 1. Effects of distances on chlorine concentrations.

급격히 증가하여 최고 농도를 나타내고, 그 이후에는 지수감소 형태로 서서히 감소하는 분포 함수를 나타내고 있다. 관심거리가 짧은 경우에는 plume의 상승효과로 plume이 지표면에 도달하기 이전이기 때문에 지표면에서의 농도는 낮은 것으로 판단된다. 또한 Fig. 1의 (a)와 (b)를 비교하면, 염소농도는 대기안정도에 민감하게 변화하고, 누출속도보다 바람속도의 변화에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

또한 Fig. 2와 같이 대기안정도가 난류혼합이 큰 A등급에서 상대적으로 난류혼합이 적은 D등급으로 갈수록 분산정도가 감소되어 염소농도는 크게 증가하였다. 특히, Fig. 2의 (a)에서 관심거리가 5 m인 경우 대기안정도 D등급의 농도가 C등급 보다 낮은 것은 Fig. 1의 (a)에서와 같이 plume이 지표면에 도달되기 이전이기 때문으로 판단된다.

바람속도의 영향은 Fig. 3과 같이 바람속도가 증가할수록 염소농도는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 본 연구조건에서는 6 m/s에서 최대농도를 나타내고, 그 이후에서는 바람속도의 증가에 따라 농도가 오히려 감소하고 있다. 이것은 바람속도가 증가할수록 대기안정도도 안정한 상태로 변화하기 때문이지만 6.0 m/s 이상의 바람속도에서는 동일한 대기안정도 등급에서 바람속도가 증가할수록 난류가 형성하기 때문으로 판단된다.

염소가스의 분산에 미치는 누출속도의 영향은 Fig. 4와 같이 누출속도가 증가할수록 염소농도가 증가하였으며, 특히 가까운 거리에서는 누출속도가 증가할수록 농도의 증가경향이 다소 크지만 관심거리가 멀어질수록 농도가 매우 낮기 때문에 누출속도의 영향은 매우 적어짐을 알 수 있었다.

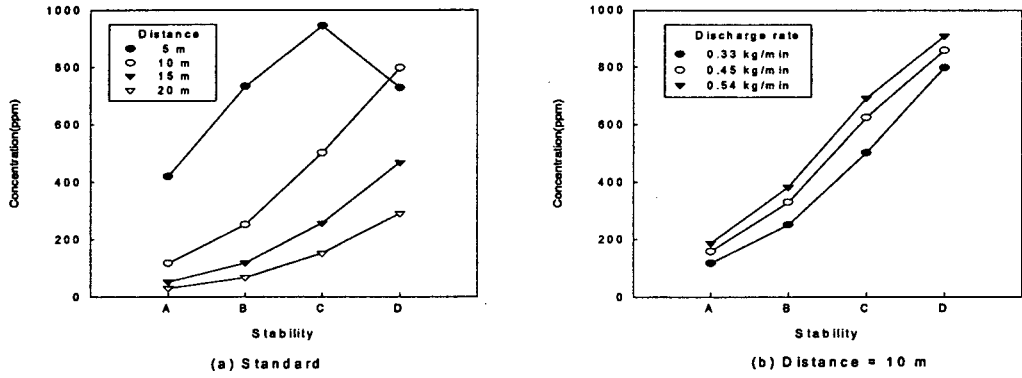


Fig. 2. Effects of atmospheric stabilities on chlorine concentrations.

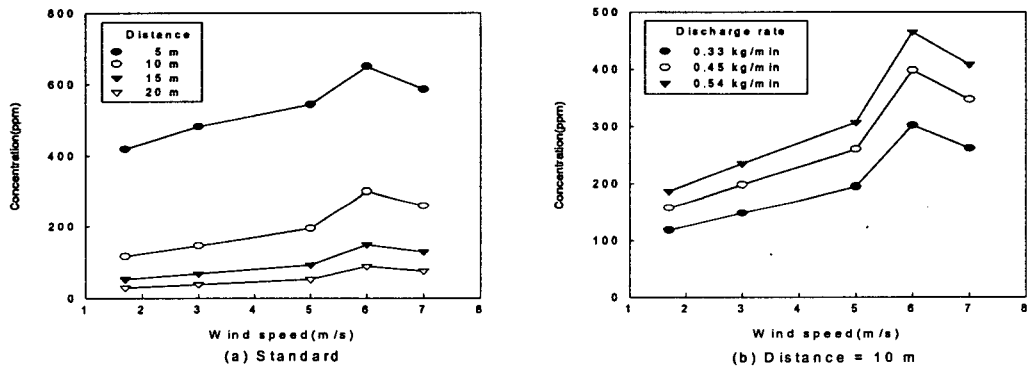


Fig. 3. Effects of wind speeds on chlorine concentrations.

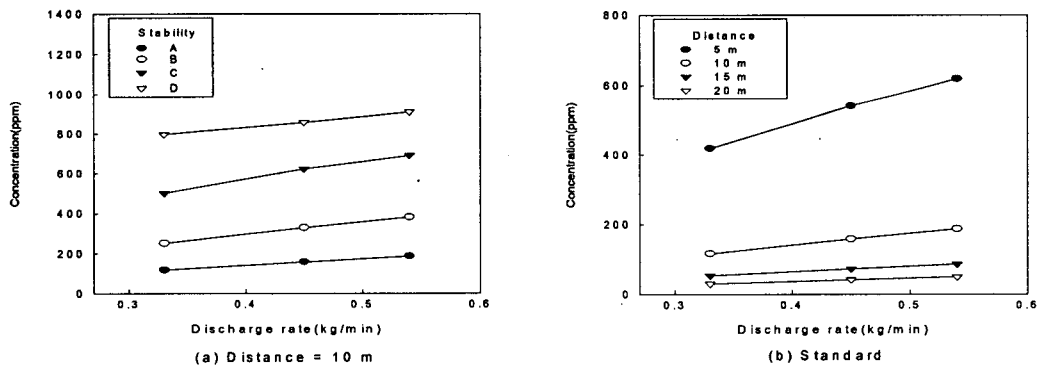


Fig. 4. Effects of discharge rates on chlorine concentrations.

3.2. 독성 영향평가

Fig. 5는 사망 가능성을 관심거리에 대하여 나타낸 대표적인 그림으로 probability의 변화는 Fig. 1과 거의 유사한 경향을 나타내고 있으며, 사망 가능성은 관심거리가 증가할수록 증가하여 최대 약 60-80 %를 나타내었고, 그 이후에는 급격히 감소하여 대기안정도가 A등급은 10 m, B등급은 15 m, C등급은 20 m, 그리고 D등급은 약 25 m 이상에서 사망 가능성이 거의 없는 것으로 평가되었다. 또한 다른 매개변수의 영향도 3.2절의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

록 증가하였다.

따라서 본 연구범위에서는 최대 약 78 m이 내가 노동자를 보호하기 위해 대책을 수립하여야 할 지역임을 알 수 있었으며, 이 지역에서 약 1시간 이상 노출되는 경우에는 생명에 위험을 줄 것으로 판단되었다. 또한 노출시간에 따라 독성영향이 차이가 있으나 150 m이내에서 오랫동안 노출되는 경우에는 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 최대 약 270 m까지는 건강에 일시적인 영향을 줄 수 있는 지역임을 알 수 있었다.

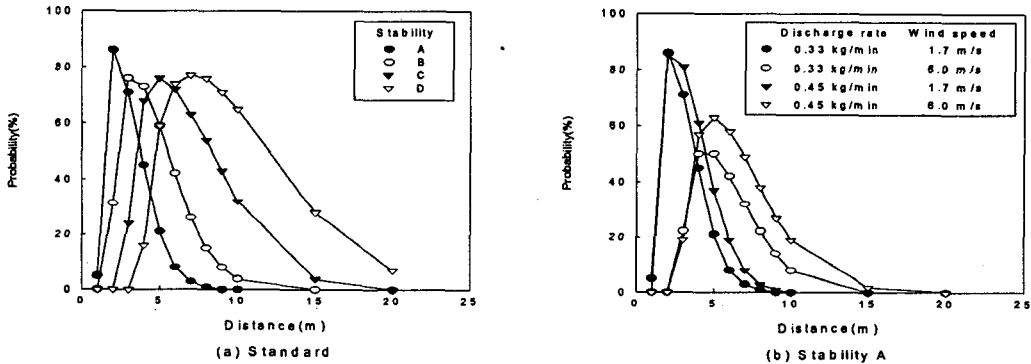


Fig. 5. Effects of distances on chlorine toxicities.

Table 3. Toxic criteria of chlorine by IDHL and ERPG

[unit : m]

Discharge rate [kg/min]	Wind speed : 1.7 m/s				Wind speed : 6.0 m/s			
	IDLH	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3	IDLH	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
0.33	34.9	110.7	63.8	24.6	62.0	206.3	115.6	43.4
0.45	40.7	129.3	74.5	28.8	72.7	243.7	135.9	50.9
0.54	44.6	141.7	81.7	31.5	77.8	268.9	149.6	55.8

독성영향에 의한 피해범위를 독성기준인 IDLH(10 ppm)와 ERPG-1,2,3(각각 1, 3, 20 ppm)에 의해 산출하고 평가하였다. 특히, 3.1절에서 최소 및 최대 피해범위는 바람속도가 1.7과 6.0 m/s이고, 대기안정도가 D등급인 경우이므로 이와 같은 대기조건에서 독성기준 농도를 갖는 거리를 시행오차방법으로 산출하였다. 그 결과, Table 3과 같이 IDLH와 ERPG-1,2,3에 의한 피해범위는 동일한 독성기준에서 바람속도가 증가할수록, 그리고 누출속도가 증가할수

IV. 결 론

염소가스의 소규모 연속누출에서 가우시안 모델과 BM 모델에 의해 염소농도를 비교하여 분산모델의 적용성을 판단한 결과, Briggs의 분산계수와 유효누출높이를 사용한 가우시안 모델의 적용성이 우수하였다. 또한 가우시안 모델에 의해 산출된 염소농도는 바람속도가 증가할수록 증가하였으나, 동일한 대기안정도 등급에서는 감소하였으며, 누출속도 보다 대기안

정도와 바람속도에 크게 영향을 받았다. 그리고 독성영향은 염소분산에 미치는 매개변수의 영향과 유사한 경향을 나타내었으며, 여러 독성기준에 의해 산출된 피해범위로부터 인명을 보호하기 위한 위험지역을 파악할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Duijm, N. J., Ott, S., and Nielsen, M., "An Evaluation of Validation Procedures and Test Parameters for Dense Gas Dispersion Models", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **9**, 323-338(1996).
- [2] 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).
- [3] 장서일, 김태욱, " 염소가스의 소규모 누출에 대한 Gaussian 연속모델의 분산계수 적용성", *한국가스학회지*, **8**(1), 13-17 (2004).
- [4] Deaves, D. M., "Gas Dispersion: Applications and New Approaches", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **2**, 39-44(1989).
- [5] 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).
- [6] Britter, R. E. and McQuaid, J., "Workbook on the Dispersion of Dense Gases", Health and Safety Executive, No. 17, U.K.(1988).
- [7] American Conference of Governmental Industrial Hygienists, "Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indies", Cincinnati, OH(1996).
- [8] AIChE/CCPS, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York(1999).
- [9] U.S. Coast Guard, "Study to Modify the Vulnerability Model of the Risk Management System-Report CG-D-22-80", U.S. Department of Transportation, Washington DC(1980).
- [10] World Bank, "Technical Report No. 55: Techniques for Assessing Industrial Hazards", The World Bank, Washington DC(1988).
- [11] Clancey, V. J., "Diagnostic Features of Explosion Damage", 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland(1972).