

염소가스의 소규모 누출에서 독성영향 해석

김소미, 장서일, 김태옥*
 명지대학교 공과대학 화학공학과
 (kimto@mju.ac.kr*)

Analysis of Toxic Effect in the Small Scale Release of Chlorine Gas

So-Mi Kim, Seo-Il Jang, Tae-Ok Kim*
 Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University
 (kimto@mju.ac.kr*)

서론

독성물질의 누출사고는 인체에 치명적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 장기적으로는 환경에까지 심각한 피해를 미치기 때문에 중대산업사고로 분류하고 있다[1]. 이러한 독성물질의 누출사고에 대한 영향평가는 독성영향모델(toxic effect model)에 의해 평가하고 있으며, 이를 바탕으로 비상대응대책을 수립하고 있다. 그러나 독성영향평가를 수행하는데 필요한 물질의 독성반응 자료는 충분하지 않기 때문에 현재 여러 기관에서 제시된 독성기준을 사용하여 부상 또는 사망 가능성을 예측하고 있다. 대표적인 독성기준은 ERPG(emergency response planning guidelines for air contaminants), IDLH(immediately dangerous to life or health), EEGLs(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[2], 우리나라는 산업안전보건법에서 독성기준을 명시하고 있다. 그러나 독성물질의 분산에 의한 독성영향 연구는 화재 또는 폭발사고에 비해 매우 미흡할 뿐만 아니라 대부분의 연구가 Deaves 등[3]과 같이 대규모 누출에서 수행되었으며, 사고의 발생빈도가 큰 소규모 누출에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 염소가스의 소규모 누출에 대한 분산특성 연구결과[4]를 바탕으로 여러 독성기준에 의해 독성영향을 해석하고, 독성영향에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다.

이론

독성영향모델에서 제시된 probit는 식 (1)과 같으며, 독성물질의 노출로 인한 사망의 피해범위는 폭로시간과 농도에 의존한다[2].

$$Y = a + b \ln(C^n t_e) \quad (1)$$

여기서 Y는 probit, C는 농도(ppm), 그리고 a, b, n은 화학물질들에 대한 probit 상수[5,6]이고, probit와 probability(%)의 관계는 문헌[7]에 수록되어 있다. 이러한 probit 방법은 사고 결과의 가능성을 나타낼 수 있고, 결과분석에서 모든 사고유형에 적용이 가능한 장점이 있지만 probit 계수가 알려진 화학종으로 제한되어 있는 단점이 있다.

결과 및 고찰**3-1. 염소의 독성**

염소가스의 허용농도는 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)[8]에서 15분 이하의 폭로한계(TLV-STEL)로 3 ppm, 1일 8시간 작업시 가중평균농도(TLV-TWA)로 0.5 ppm을 권장하고 있으며, 우리나라의 경우 산업안전보건법에서 허용농도는 이를 기준으로 하고 있다. Table 1은 염소의 독성기준에 의한 허용농도를 나타내었다.

Table 1. Toxic criteria of chlorine

IDLH	ERPG			EEGL		PEL	TLV-TWA
	1	2	3	1 hr	24 hr		
10	1	3	20	3	0.5	0.5	0.5

[unit : ppm]

3-2. 독성 영향평가

본 연구진[4]이 수행한 염소가스의 소규모 누출에서 분산특성의 연구결과를 바탕으로 대표적으로 사용되는 IDLH와 ERPG-1,2,3 기준을 적용하여 독성영향모델에 의해 사망이 일어나는 정도(probability, %)를 산출하고, 염소가스의 독성영향에 미치는 매개변수들의 영향을 해석하였다.

Fig. 1은 사망 가능성을 관심거리에 대하여 나타낸 대표적인 그림으로 대기안정도가 D등급이고 관심거리가 5-10 m를 제외하고는 관심거리가 증가할수록 독성영향은 5 m에서 최대 약 70-80%에서 급격히 감소하여 대기안정도가 A등급은 10 m, B등급은 15 m, C등급은 20 m, 그리고 D등급은 약 25 m 이상에서 사망 가능성이 거의 없는 것으로 평가되었다.

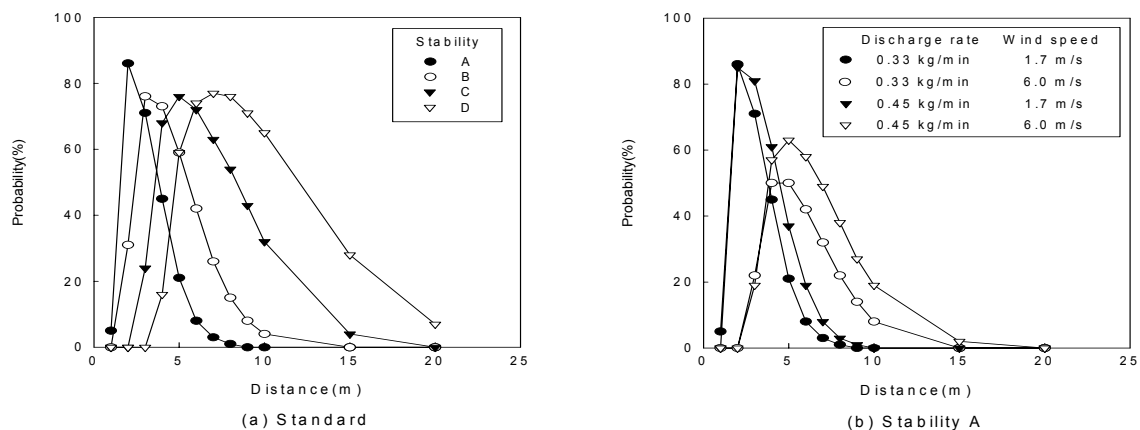


Fig. 6. Effects of distances on chlorine toxicities at various release conditions.

Fig. 1. Effects of distances on chlorine toxicities.

관심거리에 대한 probability의 변화범위는 Fig. 2에서와 같이 5 m에서는 약 20-80%, 10 m에서는 약 0-70%, 15 m에서는 약 0-30%, 그리고 20 m에서는 약 10% 이하를 나타내었다. 또한 동일한 관심거리에서도 대기안정도가 D등급일 때 최대의 독성영향을 나타내었으며(5 m의 거리는 제외), 대기안정도의 변화에 따라 probability는 약 0%에서 약 80%까지 변화하였다. 그리고 바람속도는 Fig. 3에서와 같이 염소농도가 높은 영역, 즉 거리가 짧은 영역일수록 probability에 미치는 영향이 증가하였고, 대기안정도가 D등급인 6 m/s에서 최대 독성영향을 나타내었으며, 특히 본 실험범위에서는 바람속도에 따른 probability의 변화범위가 약 30% 이내 이었다. 또한 Fig. 4와 같이 누출속도가 증가할수록 사망 가능성도 증가하고, 약 2배의 누출속도에 대해 약 20% 이상의 독성영향이 증가하였다.

독성기준인 IDLH(10 ppm)와 ERPG-1,2,3(각각 1, 3, 20 ppm)을 만족하는 거리를 산출하여 독성영향을 평가하였다. 특히, 동일한 독성기준에 대한 최소와 최대 피해범위는 바람속도가 1.7과 6.0 m/s이고, 대기안정도가 D등급인 경우이므로 이와 같은 대기조건에서 독성기준 농도를 갖는 거리를 시행오차방법으로 산출하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다

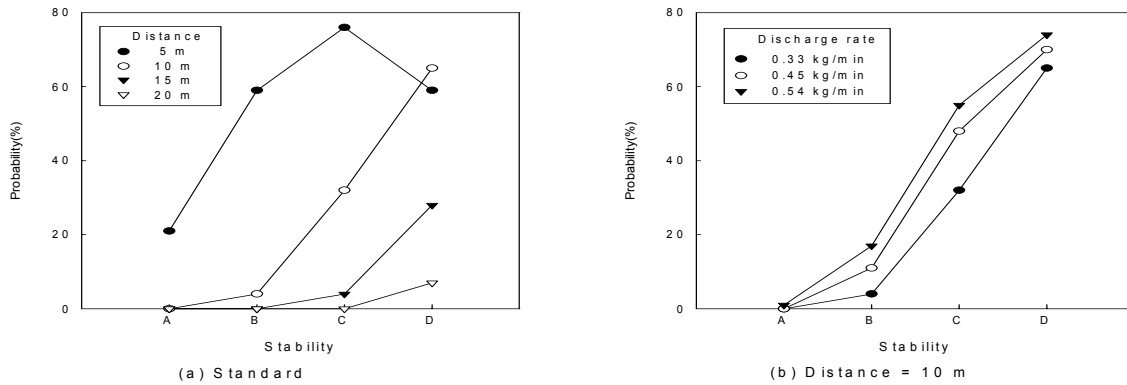


Fig. 7. Effects of atmospheric stabilities on chlorine toxicities at various release conditions.

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

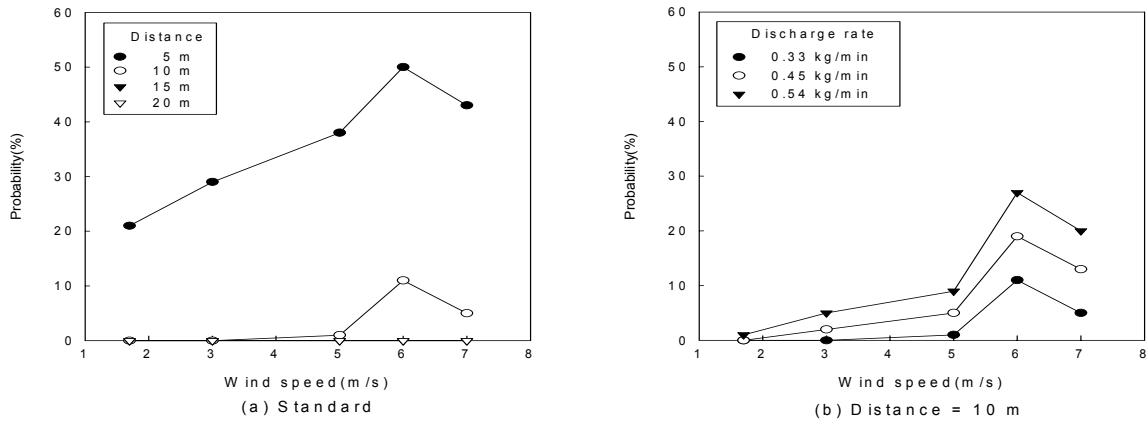


Fig. 8. Effects of wind speeds on chlorine toxicities at various release conditions.

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

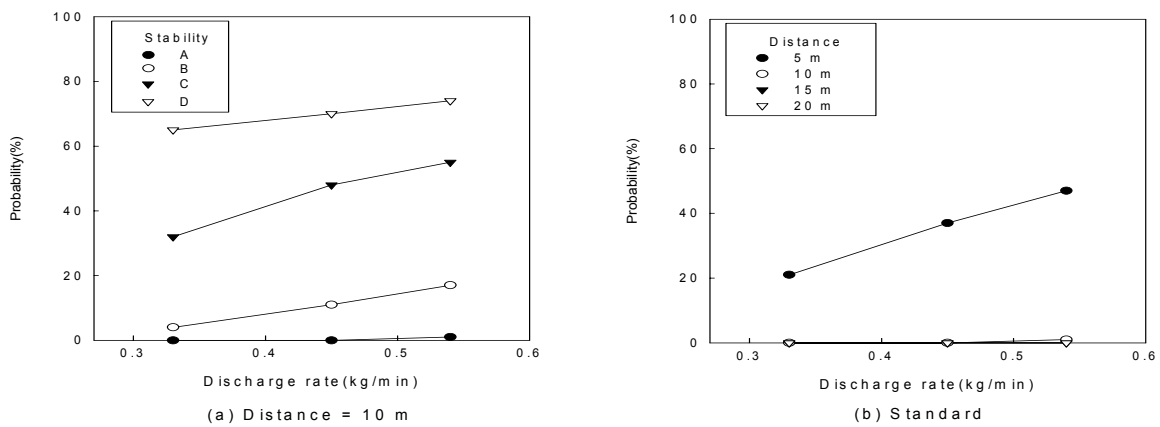


Fig. 9. Effects of discharge rates on chlorine toxicities at various release conditions.

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

Table 2. Toxic criteria of chlorine by IDHL and ERPG

[unit : m]

Wind speed [m/s] Discharge rate[kg/min]	1.7				6.0			
	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

Table 2에서와 같이 IDLH와 ERPG-1,2,3에 의한 피해범위는 동일한 독성기준에서 바람 속도가 증가할수록, 그리고 누출속도가 증가할수록 증가하였다. 즉, 누출속도가 0.33 kg/min인 경우 IDLH는 약 35-62 m, ERPG-1,2,3는 각각 111-206 m, 64-116 m 및 25-43 m 로 바람속도에 따라 피해범위가 약 2배까지 증가하였다.

따라서 본 연구범위에서는 최대 약 78 m 이내가 노동자를 보호하기 위한 대책을 수립 하여야 할 지역임을 알 수 있었으며, 이 지역에서 약 1시간 이상 노출되는 경우에는 생명에 위험을 줄 것으로 판단되었다. 또한 노출시간에 따라 독성영향이 차이가 있으나 150 m 이내에서 오랫동안 노출되는 경우에는 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있고, 최대 약 270 m까지는 건강에 일시적인 영향을 줄 수 있는 지역임을 알 수 있었다.

결론

염소가스의 소규모 누출에 대한 분산특성 연구결과를 바탕으로 여러 독성기준으로 독성영향을 해석하고, 독성영향에 미치는 매개변수의 영향을 해석한 결과, 사망이 일어나는 정도는 누출속도가 클수록, 거리가 짧을수록, 그리고 대기가 안정할수록 증가하였고, 동일한 대기안정도에서는 바람속도가 빠를수록 오히려 감소하였다. 또한 IDLH와 ERPG-1,2,3의 독성기준에 의한 피해범위를 산출하여 인명을 보호하기 위한 위험지역을 파악할 수 있었다.

참고문헌

1. International Labor Organization(ILO), "Prevention of Major Industrial Accident", ILO, Geneva, No. 174(1993).
2. AIChE/CCPS, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", New York(1999).
3. Deaves, D.M., "Gas Dispersion: Applications and New Approaches", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **2**, 39-44(1989).
4. 이영재, 장서일, 김태옥, "염소가스의 소규모 누출에서 분산특성", *화학공학의 이론과 응용*, **9**(2), 인쇄중(2003).
5. 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).
6. World Bank, "Technical Report No. 55: Techniques for Assessing Industrial Hazards", The World Bank, Washington DC(1988).
7. Clancey, V.J., "Diagnostic Features of Explosion Damage", 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland(1972).
8. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, "Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices", Cincinnati, OH(1996).