

가압 염소포화액체 저장탱크의 2상흐름 누출에 대한 유해위험거리의 예측을 위한 결과영향 모델링 방법론

송덕만
울산대학교 화학공학부

Consequence Modeling Methodology for Prediction of Hazard Distance for Two-phase Flow Release from the Pressurized Saturated Chlorine Liquid Storage Tank

D.M. Song
College of Chemical Engineering, University of Ulsan

1. 서론

본 연구는 화학장치설비 중 가압 염소포화액체 저장탱크의 2상흐름 누출에 대한 누출물의 물성자료들을 포함하는 누출원 모델과 기상 및 지형자료들을 분산모델에 입력시켜 유해독성물질인 염소가스의 연속누출시 유해독성물질의 유해위험거리(Hazard Distance) 및 흡입용량(Dose) 또는 치사율(% Fatality)을 예측하기 위한 결과영향 모델링 방법론을 개발하기 위한 것이다.

본 연구에서는 스크리닝 절차에 의하여 염소가스의 풍하거리에 따른 1시간 평균 최대 지표면 농도를 산출하였으며, 미환경청이 공인하는 정교한 해석 방법에 의하여 유해위험성 평가에 사용되는 법적규제농도인 STEL, IDLH 및 ERPGs 농도에 대한 염소가스의 풍하거리에 따른 농도분포 및 흡입용량(Dose) 또는 치사율(% Fatality)을 예측하였다.

2. 이론 : 결과영향 모델링 방법론의 개발

2-1. 모델의 선정

스크리닝 절차로는 현재 미환경청에서 유해위험성평가의 일환으로 유해 대기독성물질이 인체의 건강, 환경 및 안전에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 개발한 단기 최대 지표면 농도를 예측하는 TSCREEN 모델을 사용하였다. 또한, 정교한 해석(Refined Analysis) 방법에 의하여 유해 대기독성물질의 누출에 대한 『결과영향 분석(Consequence Analysis)』을 수행하기 위하여 미환경청이 공인하는 Arthur D Little, Inc.의 Superchems(V2.0) 모델과 미환경청과 NOAA가 공인하는 National Safety Council(NSC)의 ALOHA(V5.2.1) 모델을 사용하였다.

2-2. 누출원 모델링

직경이 30 inch(=0.762 m)이고 길이가 81.5 inch(=2.07 m)인 1 ton 용량의 수평형 저장탱크(Flat)는 대기의 온도(70°F)에서 6.86 atm(= 6.95×10⁵ Pa)으로 가압되어 있고, 염소포화액체 500 lb(=227 kg)를 포함하고 있다. 염소포화액체는 저장탱크의 하부에 부착된 길이가 3.281 ft(=1 m)이고, 내경이 0.2770 inch(=0.007036 m)인 연결배관을 통하여 냉각탑 하부의 급송부 Header로 공급되어 냉각탑에 공급되는 냉각수의 생화학적 조절을 위하여 사용된다. 저장탱크에 부착된 연결배관은 지상 2 m 지점에 위치해 있으며, 저장탱크의 액체속에는 Eductor가 설치되어 있어 같은 높이의 연결배관과 연결되어 있다. 저장탱크의 연결배관이 파열되어 저장탱크로부터 Cl₂ 액체가 누출되었으며, 저장탱크의 압력은 감압되면서 저장된 Cl₂ 액체의 일부가 배관내에서 순간증발하면서 완전히 발달된 2상흐름 누출로 수평방향으로 대기중으로 분산되었다. 최종 누출 후 저장탱크에는 30 lb(=13.6 kg)의 Cl₂ 액체가 남아 있다.

가압 염소포화액체 저장탱크의 2상흐름 누출시나리오에 대한 열역학적 자료 및 기상자료의 개요는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Thermodynamical and meteorological data summary for two-phase flow release from the pressurized saturated Cl₂ liquid storage tank.

Chemical Data	Meteorology
Molecular weight : 70.9 kg/kmol	Ambient temperature : 70°F (= 294.3 K)
Liquid heat capacity : 927.13 J/kg·K	Ambient pressure : 1 atm (= 101,325 Pa)
Critical temperature : 417.15 K	Relative humidity : 50%
Latent heat of vaporization : 2.876×10 ⁵ J/kg	Wind speed : 10 mph (= 4.47 m/s)
Boiling point : 239.12 K	Wind direction : South (180 °)
Liquid density at container : 1,562.19 kg/m ³	Measurement height : 32.81 ft (= 10 m)
	Surface roughness : 0.01 m
	Cloud cover : 4/8
	Stability class : C (Weakly unstable)
	Time : Mid-morning

본 스크리닝 절차에서는 포화액체 가압저장탱크 액체속에 설치된 Eductor의 영향을 고려할 수 없으므로 총 누출량은 저장량(Q=227 kg)이 전부 누출된 것으로 산출되었으며, 아울러 저장탱크에 부착된 연결배관으로부터의 2상흐름 누출을 해석하는 분산모델이 없어 연결배관의 길이를 무시하였으므로($L_p = 0$ m), 누출속도는 1.008 kg/s으로, 누출기간은 3.75 min로 산출되었다.

한편, 정교한 해석 방법에서는 액체 Eductor의 영향으로 총 누출량은 저장량(Q=227 kg)에서 액체 Eductor 밑에 남은 양(13.6 kg)을 뺀 213.4 kg이며, 연결배관의 길이($L_p = 1$ m)가 고려되었으므로 누출속도는 0.317 kg/s, 누출기간은 11.2 min로 산출되었다. 특히 관의 길이 영향에 따른 누출유량은 Fauske와 Epstein(1987)의 식에 의하여 산출되었다.

결론적으로, 누출원 모델링 결과로부터 저장탱크에 부착된 연결배관의 길이가 길면 길수록 누출물의 흐름저항은 증가하므로 배관의 길이를 무시할수록($L_p = 0$ m) 탱크에서 직접누출되는 것이 되어 누출속도는 최대가 되고 누출기간은 최소가 된다는 것을 알 수 있다.

2-3. 분산 모델링(Dispersion Modeling)

누출원 모델링 계산결과들은 분산모델의 입력자료로 사용되었다. 스크리닝 절차에서는 공기보다 무거운 가스의 거동을 보이면서 수직상승체트가 아니면 Britter-McQuaid(B-M) 모델을 사

용하였다.

한편, 정교한 해석 방법에서는 공기보다 무거운 가스의 거동을 보이면 Dense Gas Model을 적용한다. 정교한 해석 방법에서는 SuperChems 및 ALOHA 모델에 의한 결과영향 모델링을 수행하였다. 분산모델링을 수행하여 유해독성가스들의 법적 규정농도인 STEL, ERPG-2, ERPG-3 및 IDLH 농도에 따른 유해위험거리(Hazard Distance) 및 흡입용량(Dose) 또는 치사율(% Fatality)을 정량적으로 예측함으로써 유해독성가스의 인근 지역에 미치는 피해영향을 정량적으로 예측하는 결과영향 모델링 방법론을 개발하였다.

3. 결과 및 고찰

$L_p = 0$ m인 경우, 정교한 해석 방법에 의해 계산된 누출원모델링 결과와 SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산 결과를 분산모델의 입력자료로 각각 사용하여 SuperChems 모델에서 2상흐름 누출에 대한 연속 무거운 가스의 분산(Continuous Heavy Gas Dispersion) 모델로 분산 모델링을 수행한 결과를 비교하여 Table 2와 Fig. 1에 나타내었다.

Table 2. Source modeling and dispersion results for continuous 2-phase leak from the pressurized saturated Cl_2 liquid storage tank ($L_p=0$ m)

Items		Refined Analysis				SuperChems			
		STEL	ERPG-2	ERPG-3	IDLH	STEL	ERPG-2	ERPG-3	IDLH
Source Modeling	Release Temp.(K)	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12
	V/L Ratio	0.1779	0.1779	0.1779	0.1779	0.1899	0.1899	0.1899	0.1899
	Mass Flow Rate(kg/s)	1.008	1.008	1.008	1.008	0.1482	0.1482	0.1482	0.1482
	Release Duration(s)	225	225	225	225	1688	1688	1688	1688
Transition to Passive Dispersion	Time(s)	24.16	24.16	24.16	24.16	11.25	11.25	11.25	11.25
	Downwind Dist.(m)	78.69	78.69	78.69	78.69	34.66	34.66	34.66	34.66
	Semi-width(m)	13.36	13.36	13.36	13.36	4.35	4.35	4.35	4.35
	Concentration(ppm)	3236.5	3236.5	3236.5	3236.5	3234.0	3234.0	3234.0	3234.0
Dispersion Results	Time(s)	842.8	460.4	171.7	141.1	311.2	171.9	66.17	54.92
	Downwind Dist.(m)	2961	1615	598.1	490.5	1030	567.9	217	179.6
	Cloud Area(m ²)	970500	297800	41112	27487	129400	39966	5545	3717
	Time(s)	474.4	264.1	105.3	88.49	1762	99.6	41.45	37.45
	Semi-width(m)	224.3	128.0	49.39	40.52	86.77	49.74	19.3	15.91

수동적분산(passive dispersion)이 일어나는 전이지점(transition)은 정교한 해석 방법에서는 누출후 24.16초, 풍하거리 78.69 m, 지표면농도는 3236.5 ppm 으로 나타났으며, SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에서 분산모델링을 수행하는 경우에는 누출후 34.66초, 풍하거리 34.66 m, 지표면농도는 3234.0 ppm으로 나타났다.

또한, 법적 독성기준농도인 IDLH를 대기중에 적용할 때는 IDLH 농도(30 ppm)의 1/10 값을 적용하도록 추천하고 있으므로 염소가스의 경우 IDLH값의 1/10 값은 ERPG-2 농도(3 ppm)에 해당한다. 정교한 해석방법에서는 ERPG-2(3 ppm) 및 ERPG-3(20 ppm) 농도를 나타내는 풍하거리는 각각 1615 m, 598.1 m 지점에서 나타났으며 최대 Semi-Width는 각각 128.0 m, 48.39 m, 로 나타났다. 반면, SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에서 분산모델링을 수행한 경우에는 풍하거리는 각각 567.9 m, 217 m 지점에서 나타났으며 최대 Semi-Width는 각각 49.74 m, 19.3 m로 나타났다. 정교한 해석방법에 의하여 ERPG-2 및 ERPG-3 농도를 나타내는 풍하

거리 및 최대 Semi-Width는 SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에서 분산모델링을 수행하여 산출한 풍하거리 및 최대 Semi-Width보다 3배정도 크게 나타나고 있다.

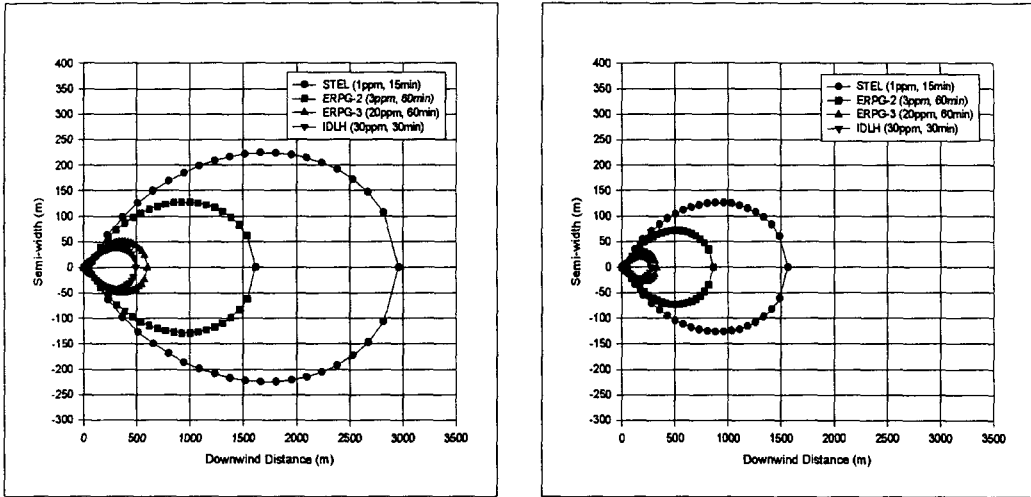


Fig. 1. Concentration Isoleth for (a) Refined Analysis Source Modeling and (b) SuperChems Source Modeling : $L_p = 0$ m

한편, $L_p = 1$ m인 경우에 대해서도 분산모델링을 수행한 결과를 비교하여 Table 3, Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)에 나타내었다. 수동적분산(passive dispersion)이 일어나는 전이지점 (transition)은 정교한 해석 방법에서는 누출후 14.78초, 풍하거리 46.45 m, 지표면농도는 3423.3 ppm 으로 나타났으며, SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에서 분산모델링을 수행하는 경우에는 누출 후 10.97초, 풍하거리 33.73 m, 지표면농도는 2953.3 ppm으로 나타났다.

Table 3. Source modeling and dispersion results for continuous 2-pahse leak from a pipe attached to the pressurized saturated Cl_2 liquid storage tank ($L_p=1$ m)

Items		Refined Analysis				SuperChems			
		STEL	ERPG-2	ERPG-3	IDLH	STEL	ERPG-2	ERPG-3	IDLH
Source Modeling	Release Temp.(K)	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12	239.12
	V/L Ratio	0.1779	0.1779	0.1779	0.1779	0.1899	0.1899	0.1899	0.1899
	Mass Flow Rate(kg/s)	0.3170	0.3170	0.3170	0.3170	0.1276	0.1276	0.1276	0.1276
	Release Duration(s)	672	672	672	672	1960	1960	1960	1960
Transition to Passive Dispersion	Time(s)	14.78	14.78	14.78	14.78	10.97	10.97	10.97	10.97
	Downwind Dist.(m)	46.45	46.45	46.45	46.45	33.73	33.73	33.73	33.73
	Semi-width(m)	6.64	6.64	6.64	6.64	4.17	4.17	4.17	4.17
	Concentration(ppm)	3423.3	3423.3	3423.3	3423.3	2953.3	2953.3	2953.3	2953.3
Dispersion Results	Time(s)	460.6	253.4	96.44	79.77	287	158.8	61.56	51.2
	Downwind Dist.(m)	1564	858.7	324.5	267.7	948.9	524	201.5	167.1
	Cloud Area(m ²)	287000	88450	12266	8209	110300	34110	4758	3201
	Time(s)	260.3	146.3	60.01	50.84	162.8	92.3	38.79	33.1
	Semi-width(m)	126.3	72.26	29.97	22.95	80.48	46.16	17.99	14.9

또한, 정교한 해석방법에서는 ERPG-2(3 ppm) 및 ERPG-3(20 ppm) 농도를 나타내는 풍하거

리는 각각 858.7 m, 324.5 m 지점에서 나타났으며 최대 Semi-Width는 각각 72.26 m, 29.97 m,로 나타났다. 반면, SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에서 분산모델링을 수행한 경우에는 풍하거리는 각각 524 m, 201.5 m 지점에서 나타났으며 최대 Semi-Width는 각각 46.16 m, 17.99 m,로 나타났다. 결과로부터, 정교한 해석방법에 의하여 ERPG-2 및 ERPG-3 농도를 나타내는 풍하거리 및 최대 Semi-Width는 SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에서 분산모델링을 수행하여 산출한 풍하거리 및 최대 Semi-Width보다 1.5배정도 크게 나타나고 있다.

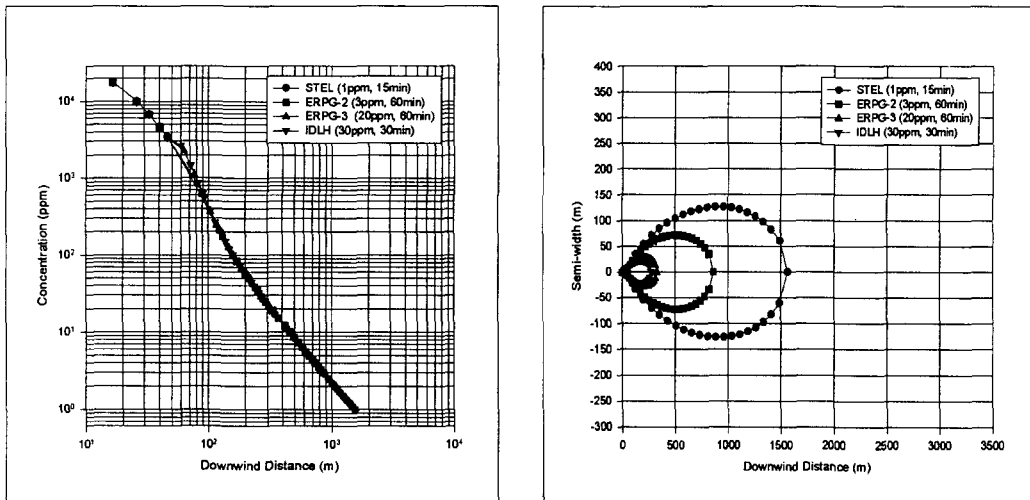


Fig. 2(a). Conc. vs. Downwind Distance for Refined Analysis Source Modeling($L_p=1m$)

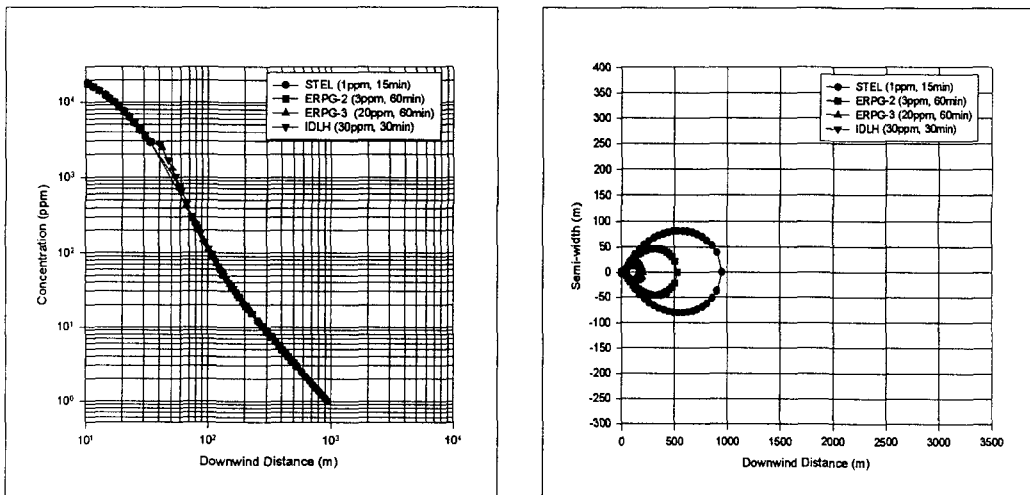


Fig. 2(b). Conc. vs. Downwind Distance for SuperChems Source Modeling($L_p=1m$)

한편, 정교한 해석 방법에 의한 누출원 모델링 결과를 분산모델의 입력자료로 사용하여 ALOHA 모델에서 2상흐름 누출에 대한 연속 무거운 가스의 분산모델로 분산모델링을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

법적규제농도인 IDLH 농도(30 ppm)에 해당하는 최대 위험지대에 대하여 SuperChems 모델의 누출원 모델링 자체계산에 의한 분산 모델링 결과와 정교한 해석방법에 의한 ALOHA 모델의 분산모델링의 결과를 비교하면, 각각 풍하거리 167.1 m와 428 m로 산출되었다. 또한, ALOHA 모델의 분산모델링의 결과로부터 428 m 지점에서 최대 Dose는 8,100 ppm²-min으로 산출되었다.

결론적으로, 유해위험거리가 과소평가되는 것을 보완하기 위해서는 분산모델의 입력자료인 누출원 모델링을 별도로 정교한 해석방법에 의하여 수행하고 분산모델링을 수행하는 것이 바람직하다고 사료된다.

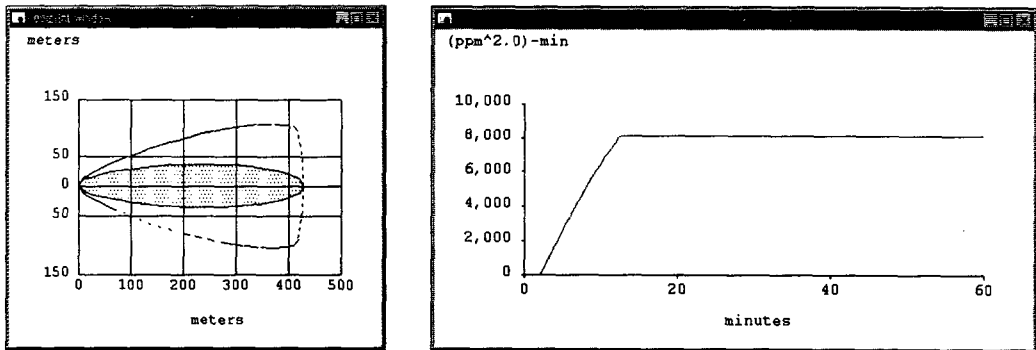


Fig. 3. ALOHA modeling results for concentration isopleth and dose : IDLH (30 ppm)

4. 결론

본 연구는 가압 염소포화액체 저장탱크에 부착된 배관의 파열로 인하여 저장탱크로부터 유해 독성물질인 염소의 2상흐름 연속누출시 유해위험거리 및 흡입용량 또는 치사율(%)을 예측하기 위하여 스크리닝 절차와 정교한 해석 방법을 조합하는 독특한 분산모델링 방법론을 개발하였다.

결국, 스크리닝 절차와 정교한 해석 방법의 조합에 의한 결과영향 모델링 방법론은 여러 가지 유해독성가스들에 대하여 보다 다종다양한 누출 시나리오들을 선정하여 보편적으로 적용할 수 있는 Sliding Scale 방법론을 개발함으로써 유해독성가스의 누출시 주위의 인체에 미치는 영향에 대한 정량적 평가시 예비 가이드라인으로 활용될 수 있으리라 사료된다.

REFERENCES

1. USEPA, "Workbook of Screening Technologies for Assessing Impacts of Toxic Air Pollutants (Revised)", EPA-454/R-92-024, 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. G.A. Melhem, "Advanced Consequence Analysis : Emission, Dispersion, Fire, and Explosion Dynamics", Arthur D. Little, Inc. August (1995).
4. USEPA/NOAA/NSC, "ALOHA User's Manual", June (1995) and Oct. (1996).