기상요소별 사고 시나리오에 따른 정량적 위험성평가 피해영향범위 분석

Analysis of Impact Zone of Quantitative Risk Assessment based on Accident Scenarios by Meteorological Factors

김현섭[†] · 전병한^{*}

Hyun Sub Kim[†] · Byeong Han Jeon^{*}

시흥화학재난합동방재센터 · *(주)원일화학엔환경

Siheung Joint Inter-agency Chemical Emergency Preparedness Center

*Wonil Chemical & Environment Co. Ltd.

(Received July 28, 2017; Revised December 8, 2017; Accepted December 14, 2017)

Abstract : Using ALOHA and PHAST Program, it was modeled assuming the leakage accident scenarios of chlorine which is designated as accident preparation chemical in chemical control act. End-point distances corresponding to ERPG-2 concentrations were calculated while varying annual mean temperature, wind speed, humidity, and atmospheric stability. The calculated endpoint distance values were compared and the correlation with each meteorological factor was analyzed. And we also investigated strengths and weaknesses of ALOHA and PHAST. The results show that ALOHA has little or no correlation with annual average temperature, humidity and it has a large correlation with wind speed and atmospheric stability. In the case of PHAST, the end-point distances were correlated with all the meteorological factors such as average annual temperature, wind speed, humidity, and atmospheric stability. Among them, the effect of atmospheric stability were the largest.

Key Words : ALOHA, PHAST, Chlorine, Off-site Risk Assessment

요약 : 장외영향평가의 정량적 위험성평가에 사용되는 ALOHA와 PHAST 프로그램으로 화학물질관리법상 사고대비물질로 지정하고 있는 염소의 누출 사고 시나리오를 가정하여 모델링 하였다. 연평균 기온, 풍속, 습도, 대기안정도를 변화시키면서 ERPG-2 농도에 해당하는 끝점거리를 산출하였으며, 산출된 끝점거리 값을 비교하여 각각의 기상요소와 끝점거리 간의 상관관계와 ALOHA와 PHAST의 장단점 분석하였다. 연구결과 ALOHA는 연평균 기온과 습도와의 상관관계는 없거나 작고, 풍속과 대기안정도와의 상관관계가 큰 것으로 조사되었다. PHAST의 경우 연평균 기온, 풍속, 습도, 대기안정도 모든 기상요소와의 상관관계가 있었으며, 그 중 대기안정도의 영향을 가장 크게 받는 것으로 조사되었다.

주제어 : ALOHA, PHAST, 염소, 장외영향평가

1. 서론

염소는 황록색의 산화력이 강한 가스로 화학물질관리법에 의한 사고대비물질, 산업안전보건법에서 작업환경측정 대상물질로 분류된 위험한 물질이다. 염소가스에 소량 노출될 경우 대부분 무증상이거나 경한 증상을 보이지만, 드물게 호흡기 자극성 물질에 노출된 후 수 분에서 수 시간 이내에 천식과 유사한 증상이 발생하는 반응성 기도과민 증후군(Reactive Airway Dysfunction Syndrome, RADS)이 나타난다고 보고가 있다.¹⁾ 눈, 코, 목의 점막에 다량의 염소가스 노출 시에는 피부가 짓무를 수 있고 폐에 염증을 일으켜 호흡 곤란과 사망에 이르기까지 한다.²⁾ 염소는 공업 분야에서 살균제(표백분, 차아염소산 등)의 원료가 되며, 우리나라의 대표산업인 반도체 및 전자산업에서 제품의 생산 시 유리 기판 및 산화규소 계 재질의 식각에 널리 사용되고 있어 염소가스 누출로 인한 사고발생의 가능성이 점점 더 높아지고 있다.

화학물질의 취급 및 사용량 증가로 2014년 기준 415종의

화학물질 중 하나 이상을 연간 1~10톤 이상 제조 또는 사용한 3,524개 사업장에서의 총취급량은 163,618,200톤, 총 배출량은 54,261톤에 달하는 것으로 조사되었다.³⁾ 화학물질의 사용 및 취급량이 급격하게 증가함에 따라 실제 사업장에서는 작업자의 관리미흡, 기계적 결함, 노후화된 설비 등 다양한 원인에 의한 누출사고 위험성 또한 높아지게 되었다. 이에 따라 사람의 건강 및 환경 위해성을 예방·저감하고 자국 내 화학 산업의 경쟁력을 강화하기 위해 기존의 화학물질 관리 제도의 개편 필요성이 대두되었고, 이러한 움직임 속에 기존 유해화학물질관리법을 화학물질관리법으로 전부개정하게 되었다.

2015년 1월 1일부터 시행된 화학물질관리법 제23조에 따르면 유해화학물질 취급시설을 설치·운영하려는 자는 사전에 화학사고 발생으로 사업장 주변 지역의 사람이나 환경 등에 미치는 영향을 평가한 유해화학물질 화학사고 장외영향평가서를 작성하여 환경부장관에게 제출하여야 한다.⁴⁾ 본 연구에서는 장외영향평가서 작성의 일환인 정량적 위험성평가에서 염소누출 사고 시 피해영향범위를 분석하기 위하

[†] Corresponding author E-mail: sakao@korea.kr Tel: 031-470-2418 Fax: 031-470-2449

여 미국환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)의 ALOHA (Areal Location of Hazardous Atmospheres)프로그램과 DNV Software에서 개발한 PHAST (Process Hazards Analysis Software Tool)프로그램의 ERPG-2 수치를 비교하여 피해영향범위를 조사하고 ALOHA와 PHAST의 기상요소와의 관계 및 장단점에 대해 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. ALOHA (Areal Location of Hazardous Atmospheres)

ALOHA는 미국 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 비상대응팀에서 자체적인 확산평가도구로 처음 개발되었으나 차츰 개선이 되어 현재와 같은 형태의 확산모델로서 미국 환경보호청(EPA)과 공동으로 활용하고 있는 확산모델이다. ALOHA에서는 CAMEO (Computer Aided Management of Emergency Operations)가 제공하는 약 5,600종의 화학물질 가운데 대기확산의 위험성이 인정되는 1,800여종의 화학물질 물성 정보와 500종이 넘는 순수 화학 물질 및 일반적인 화학물질에 대한 물리적, 화학적, 독성학적 특성과 솔루션을 포함한다. ALOHA는 가우시안 형태의 수동 확산과 증기운 확산을 GUI (Graphical user interface)를 이용하여 시뮬레이션을 할 수 있는 PC용 모델로서, 윈도우에서 순차적으로 자료를 입력하며 결과는 화면상에 그래프로 보여준다. 모델은 Chemical, Site data, Atmospheric, Source, Computational이라는 5개의 입력 모듈로 구성되어 있다.⁵⁾

2.2. PHAST (Process Hazards Analysis Software Tool)

DNV Software에 의하여 개발된 PHAST는 인명 및 재산의 손실과 환경에 대한 잠재적인 위험을 평가하고, 위험의 크기를 정량화하는데 사용되는 프로그램이다. PHAST는 최초 누출에서 확산으로 이루어지는 잠재적인 사고의 진행단계와 화재/폭발 및 독성에 의한 영향을 평가하도록 개발되었다. PHAST는 네덜란드의 Yellow book, 미국의 EPA 규정, 영국의 HSE 규정 등과 같은 세계주요 각국의 법적 요구사항에 따를 수 있도록 설계되었으며, 현재 위험성 평가와 관련하여 전 세계에서 가장 널리 사용되고 있는 모델링 툴이다.^{5,6)}

2.3. 기상조건

연구에서 임의의 사고지점은 인천 남동공단의 한 공장으로서 선정하였으며 기상자료는 기상청 국가기후데이터센터(National Climate Data Service System, NCDSS)의 2016년도 인천(관측지점 No.112) 지상기상관측자료를 사용하였다. 온도 차이에 따른 끝점 비교를 위해서는 인천에서 다소 남쪽에 위치하여 연평균 기온의 차이가 큰 여수(관측지점 No.168)의 2016년 연평균 기온을 선정하였다. 대기안정도는 장외영향평가의 사고시나리오 조건인 D를 기준으로 최악

Table 1. Annual average weather statistics in Incheon and Yeosu in 2016.

Month	Incheon				Yeosu
	T	H	WD	WS	T
1	-2.2	67	N	3.5	2.5
2	0.9	66	NNW	3.7	4.3
3	6.4	71	NNW	3.3	9
4	12.7	75	SW	3.1	14.5
5	18.3	76	SW	3.2	18.9
6	22.1	88	WSW	2.6	21.9
7	25.2	94	WSW	2.7	25.3
8	27.4	86	NNW	2.7	27.7
9	22.9	85	NNW	2.4	23
10	16.2	75	N	3.1	18.3
11	7.4	61	N	3.4	11.4
12	2.2	63	N	3.4	6.4
Mean	13.3	75	N	3.0	15.3

T : temperature, WD : wind direction, H : humidity, WS : wind speed

Table 2. Weather conditions for scenarios

	T (°C)	H (%)	WS (m/s)	AS
Scenario 1	13.3	75	3.0	D
Scenario 2	15.3	75	3.0	D
Scenario 3	13.3	75	2.0	D
Scenario 4	13.3	75	4.0	D
Scenario 5	13.3	10	3.0	D
Scenario 6	13.3	50	3.0	D
Scenario 7	13.3	90	3.0	D
Scenario 8	13.3	75	3.0	C
Scenario 9	13.3	75	3.0	F

T : temperature, WS : wind speed, H : humidity, AS : atmospheric stability

의 시나리오 조건인 F와 D보다 더 불안정한 C에서 비교분석을 하였으며, 습도는 10%, 50%, 70%, 90%에서 비교하였다. 풍속은 3.0 m/s를 기준으로 2.0 m/s일 때와 4 m/s일 때를 비교분석하였다. Table 1은 인천과 여수의 2016년 평균 기상통계 자료이며, 각각의 시나리오에서 설정한 기상조건은 Table 2와 같다.

2.4. 시나리오 운전조건

염소는 저장탱크에 액화상태로 보관하며, 저장량은 5 ton, 운전온도는 21℃, 운전압력은 0.6 Mpa로 가정하였다. 저장탱크와 연결된 배관의 파열로 염소가 전량 방출되었고, 대기의 역전현상은 고려하지 않으며 도심 지역에서 낮 시간에 누출된 것을 기본 조건으로 가정한다.

2.5. 비상대응계획지침(Emergency Response Planning Guideline, ERPG)

미국산업위생학회(American Industrial Hygiene Association

AIHA)에서 제시하는 기준으로 관심의 우선순위, 취급, 저장평가, 누출 시 확산지역의 파악 및 지역사회와의 비상대응 계획을 수립하는데 사용되는 지침을 말한다. 이 지침에서 사용되는 농도는 공기 중에서 특정 물질에 노출될 경우 인체에 미치는 결과를 다음과 같은 3가지 농도 범위로 제시하고 있다. 염소의 ERPG농도는 각각 1.0 ppm (ERPG-1), 3.0 ppm (ERPG-2), 20.0 ppm (ERPG-3)이며, 연구에서는 미국 EPA와 우리나라 장외영향평가에서 이용되는 ERPG-2 농도를 끝점으로 하여 분석하였다.^{5,7)}

- ERPG-1 : 거의 모든 사람이 한 시간 동안 노출되어도 오염물질의 냄새를 인지 못하거나

건강상 영향이 나타나지 않는 공기 중 최대 농도

- ERPG-2 : 거의 모든 사람이 한 시간까지 노출되어도 보호조치 불능의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상 영향이 나타나지 않는 공기 중 최대 농도
- ERPG-3 : 거의 모든 사람이 한 시간까지 노출되어도 생명의 위험을 느끼지 않는 공기 중 최대농도

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도차에 의한 끝점거리 변화

Table 3은 온도차에 의한 ERPG-2 끝점거리를 나타낸 것이다. Scenario 1(풍속 3.0 m/s, 대기안정도 D, 습도 75%, 연평균기온 13.3℃)은 임의로 선정된 사업장에서 가장 가까운 기상 관측지점인 인천의 16년 연평균 기상자료를 바탕으로 설정한 조건이며, Scenario 2는 연평균기온만 여수의 16년 연평균기온인 15.3℃를 사용한 비교조건이다. ALOHA 모델링 결과 Scenario 1과 Scenario 2 조건 모두에서 끝점거리는 7.7 km로 나타났다. PHAST 모델링 결과에서는 Scenario 1일 때 6.48 km, Scenario 2일 때 6.43 km를 나타냈다.

Table 3. End-point distance of ERPG-2 at various temperature

	Temperature	ALOHA	PAHAST
Scenario 1	13.3℃	7.7 km	6.48 km
Scenario 2	15.3℃	7.7 km	6.43 km

3.2. 풍속 차이에 의한 끝점거리 변화

Table 4는 풍속 차이에 따른 ERPG-2 끝점거리를 나타낸 것이다. Scenario 1과 비교를 위해서 Scenario 3과 Scenario 4에서는 풍속을 각각 2.0 m/s와 4.0 m/s로 설정하였다. ALOHA 모델링 결과 풍속이 2.0 m/s, 3.0 m/s, 4.0 m/s 순으로 증가함에 따라서 끝점거리는 7.8 km, 7.7 km, 7.5 km 순으로 감소하는 경향을 나타냈다. PHAST 모델링 결과에서는 풍속이 2.0 m/s일 때 끝점거리는 7.88 km, 3.0 m/s일

Table 4. End-point distance of ERPG-2 at various wind speed

	Wind speed	ALOHA	PAHAST
Scenario 1	3.0 m/s	7.7 km	6.48 km
Scenario 3	2.0 m/s	7.8 km	7.88 km
Scenario 4	4.0 m/s	7.5 km	5.60 km

Fig. 1. End-point distance at various wind speed (PHAST).

때 6.48 km, 4.0 m/s일 때 5.60 km로 조사되었다. Fig. 1은 풍속 차이에 따른 PHAST 결과 그래프이다. 두 프로그램 모두 바람의 세기가 강해질수록 ERPG-2 농도에 해당하는 끝점거리는 점차 짧아지는 경향을 나타냈으며, ALOHA에서는 약 0.1~0.3 km 정도의 차이를 보였고, PHAST에서는 약 0.8~1.4 km 정도의 차이를 보였다.

3.3. 습도 차이에 의한 끝점거리 변화

Table 5는 습도 차이에 의한 ERPG-2 끝점거리를 나타낸 것이다. Scenario 5, 6, 7에서는 습도를 각각 10%, 50%, 90%로 설정하여 Scenario 1(습도 75%)과 비교하였다. ALOHA 모델링 결과 10~90% 습도 변화에 관계없이 모든 조건에서 7.7 km의 끝점거리를 나타냈다. PHAST 모델링 결과에서는 습도가 10%일 때 끝점거리는 6.46 km, 습도 50%일 때 6.47 km, 습도 75%일 때 6.48 km, 습도 90%일 때 6.53 km 순이었으며, 습도가 증가함에 따라서 ERPG-2 농도에 해당하는 끝점거리도 조금씩 증가하는 것으로 조사되었다.

Table 5. End-point distance of ERPG-2 at various humidity

	Humidity	ALOHA	PAHAST
Scenario 1	75 %	7.7 km	6.48 km
Scenario 5	10 %	7.7 km	6.46 km
Scenario 6	50 %	7.7 km	6.47 km
Scenario 7	90 %	7.7 km	6.53 km

3.4. 대기안정도 차이에 의한 끝점거리 변화

Table 6은 대기안정도 차이에 따른 ERPG-2 끝점거리를 나타낸 것이다. Scenario 8과 Scenario 9에는 대기안정도를 각각 C와 F로 설정하여 Scenario 1(대기안정도 D)과 비교하였다. ALOHA 모델링 결과 대기안정도 차이에 의한 끝점거리는 대기안정도 C, D, F 조건일 때 순으로 짧게 나타났다. 대기안정도가 C일 때 끝점거리는 4.3 km, 대기안정

Table 6. End-point distance of ERPG-2 at various atmospheric stability

	Atmospheric stability	ALOHA	PHAST
Scenario 1	D	7.7 km	6.48 km
Scenario 8	C	4.3 km	3.99 km
Scenario 9	F	greater than 10 km	25.23 km

Fig. 2. Endpoint distance at various atmospheric stability (PHAST).

도가 D일 때 7.7 km로 나타났다. 대기안정도 F일 때는 greater than 10 km로 조사되었는데 이는 ALOHA의 특성상 10 km를 초과하는 영향범위는 표현할 수 없는 한계가 있기 때문이다.⁸⁾ Fig. 2는 대기안정도 차이에 따른 PHAST 결과 그래프이다. PHAST 모델링 결과에서는 대기안정도가 C일 때 끝점거리는 3.99 km로 가장 짧게 나타났으며, 대기안정도가 D일 때 끝점거리는 6.48 km로 나타났다. 대기가 가장 안정된 상태인 대기안정도 F일 때는 끝점거리가 25.23 km로 나타나 다른 두 조건에서 보다 월등하게 큰 값을 나타냈다.

4. 결론

ALOHA와 PHAST를 비교하여 연평균 기온, 풍속, 습도, 대기안정도에 따라 ERPG-2 농도에 해당하는 끝점거리를 비교분석하였다.

1) ALOHA 모델링 결과 연평균 기온과 습도의 차이는 끝점거리의 변화에 영향을 주지 않았다. 반면 풍속이 커질수록 끝점거리는 약 100~200 m 정도 작아지는 경향을 보였다. 대기안정도 차이에 따른 끝점거리 변화는 가장 큰 차이를 나타냈다. 이 결과를 바탕으로 ALOHA는 Gaussian 대기확산 모델을 사용하는 특성상 끝점거리가 연평균 기온과 습도와는 상관관계가 없거나 작고, 풍속과 대기안정도와는 상관관계가 큰 것으로 판단하였다.

2) PHAST 모델링 결과 연평균 기온 차이가 2℃일 때 끝점거리는 약 50 m 정도 차이가 있는 것으로 조사되었다. 습도를 변화시켰을 때에는 습도가 높아질수록 끝점거리가 커지는 것으로 나타났으며 약 10~50 m의 차이를 보였다. 풍속과 대기안정도 차이에 따른 끝점거리 비교분석에서는 각각

의 조건에서 산출된 끝점거리 값이 서로 큰 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 풍속 2.0~4.0 m/s 변화에 따라 끝점거리는 약 800 m에서 1.4 km 정도 차이가 있었다. 대기안정도 C 조건에서는 3.99 km의 끝점거리를 나타낸 반면 가장 안정한 대기상태인 대기안정도 F 조건에서는 25.23 km로 나타나 PHAST 모델을 이용한 끝점거리를 산출할 때 가장 큰 영향은 미치는 것은 대기안정도인 것으로 판단하였다.

3) ALOHA와 PHAST를 이용한 끝점거리 산출에서 ALOHA는 대부분의 조건에서 PHAST보다 끝점거리가 더 먼 것으로 나타났다. 즉, 누출사고 발생시 ALOHA가 더 보수적으로 누출피해 영향반경을 산출한다는 것으로 판단할 수 있다.

4) ALOHA는 사용이 간편하여 빠르게 결과를 산출할 수 있지만 누출조건 선정에 한계가 있고 온도차나 습도차에 의한 모사가 어려우며 10 km를 초과하는 영향범위는 표현하지 못하는 단점이 있다. PHAST의 경우 ALOHA보다 비교적 정밀한 결과를 산출할 수 있고, 10 km를 넘는 영향반경도 표현할 수 있으며 다양한 누출 및 폭발 시나리오 적용이 가능하다는 장점이 있으나 ALOHA가 freeware인 반면에 PHAST는 license가 필요하고 높은 비용이 발생한다는 단점이 있다.

KSEE

References

1. Kwon, H.-S., Sohn, Y.-D., Ahn, H.-C. and Ahn, J.-Y., "A one-year Follow-up Study of Patients Exposed to Chlorine Gas," *J. Korean Soc. Clinical Toxicol.*, **6**(2), 99~103(2008).
2. Cho, K.-H., Kim, S.-H., Cho, Y.-S., Lee, H.-S. and Park, J.-S., "Reactive Airways Dysfunction Syndrome (RADS) from Chlorine Gas Releasing Cleaning Agents," *J. Korean Soc. Clinical Toxicol.*, **3**(1), 60~62(2005).
3. National Institute of Chemical Safety, "Chemical Emissions Survey Results Report in 2014," National Institute of Chemical Safety(2014).
4. Ministry of Environment, "Chemical Control Act," Ministry of Environment(2016).
5. Kim, J.-H. and Jung, S.-H., "Offsite Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride (HF) Release Scenarios," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(4), 582~585(2016).
6. Park, S.-W. and Jung, S.-H., "Recommended Evacuation Distance for Offsite Risk Assessment of Ammonia Release Scenarios," *J. Korean Soc. Safety*, **31**(3), 156~161(2016).
7. Shin, C.-H. and Park, J.-H., "An Evaluation of the Off-site Risk of Spill from a Storage Tank of Nitric Acid," *Crisisonomy*, **12**(3), 187~200(2016).
8. Won, J.-H., Kim, B.-H., Ma, B.-C., Yoon, Y., Jo, A.-R., Chon, Y.-W. and Moon, J.-Y., "Development of the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis for Hydrogen Chloride and Hydrogen Fluoride," *Korean J. Hazard. Mater.*, **4**(2), 41~52(2016).