

구미 불산사고 사례연구를 통한 예측모델 피해영향범위 비교

김진형 · 정창모* · 강석민 · 용종원 · 유병태** · 서재민†

(주)세이프티아 기술연구소
13560 경기도 성남시 분당구 정자로 2
*광운대학교 화학공학과
01897 서울특별시 노원구 광운로 20
**환경부 화학물질안전원
34111 대전광역시 유성구 가정북로 90
(2016년 8월 22일 접수, 2016년 12월 6일 수정본 접수, 2016년 12월 12일 채택)

Comparison Study for Impact Range of Prediction Models Through Case Study about Gumi Hydrogen Fluoride Accident

Jin Hyung Kim, Changmo Jeong*, Seok Min Kang, Jong-Won Yong, Byungtae Yoo** and Jae Min Seo†

SafeTia Co., Ltd., 2, Jeongja-ro, Bundang-gu, Seongnam, Gyeonggi, 13560, Korea

*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 20, Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul, 01897, Korea

**National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment, 90, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34111, Korea

(Received 22 August 2016; Received in revised form 6 December 2016; accepted 12 December 2016)

요 약

유독물 취급업체수가 증가하고 취급업체들이 다루는 물질의 종류가 다양해지고, 그 양도 증가함에 따라 국내 화학 사업장 사고의 심각성을 보여준 대표적인 사례로 2012년 구미 불산 사고를 들 수 있다. 화학사고 발생 시 화학물질 특 성과 주변 환경에 따라 효과적으로 대응책을 마련하기 위해서는 예측모델의 활용이 반드시 필요하다. 현재 존재하는 다양한 예측모델들은 실험을 통해 그 정확도를 검증된 적은 있지만, 예측모델들간의 계산 결과 비교를 통해 어떠한 경 우에 어떤 모델이 가장 적합한지에 대한 활용성 부분이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 구미 불산 사고를 사례연구로 선정하고 불화수소의 누출과 확산에 가장 정확하다고 알려진 HGSYSTEM을 이용하여 농도를 계산하였다. ERPG-2 기준농도 기준으로 사고 지점으로 부터 1 km 이상 확산됨을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 ALOHA와 CARIS의 결 과를 비교하여, 가장 대표적인 예측 모델들의 활용성을 분석하였다.

Abstract – Since the number and the amount of toxic substances handled by domestic companies have been increased, the possibility of serious chemical accidents has become severe. According to Chemistry Safety Clearing-house (CSC), the number of chemical accidents for the last five years has been rapidly raised. A representative example which shows the serious impact of a chemical accident is HF (Hydrogen Fluoride) accident generated in Gumi in 2012. In order to make effective responses for mitigating losses of accidents, the most suitable consequence model has to be selected and implemented throughout the considerations of chemical properties and environments. Even if each consequence model has been verified by the results of experiments, it is necessary to analyze and compare the usability of them according to various scenarios. In this study, the Gumi HF accident is simulated by HGSYSTEM, which is the most specialized model for the release and dispersion of HF. It is found that the ending point of ERPG-2 is about 1 km from the accident point. In order to investigate the usability of the most representative consequence models (ALOHA and CARIS), the results of them are compared with one of HGSYSTEM.

Key words: HGSYSTEM, ALOHA, Consequence Analysis, Hydrogen Fluoride, Chemical Accident

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: drsafety@safetia.com

‡ 이 논문은 광운대학교 한 준 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 환경 및 화학사고 관련 제도

20세기 초 화학산업의 급속한 발달로 대기오염과 관련된 많은 사건 및 사고가 발생하면서 대기 환경의 중요성이 인식되기 시작하였으며, 대기 중의 오염물질 농도와 대기확산을 평가하기 위하여 선진국뿐만 아니라 국내에서도 환경영향평가, 유해화학물질 관련 법령 및 제도를 기반으로 건설, 도로, 화학사업 등의 타당성을 결정하고 있다.

환경을 중심으로 수질, 소음, 교통, 주택지구 조성 등에 초점을 맞춘 환경영향평가제도는 미국의 경우 1970년에 제정된 국가환경정책법을 시작으로 모든 사업 및 계획에 대해 인간 및 주변 환경에 미치는 영향 등의 평가대상여부 결정을 통하여 환경영향평가서 작성을 공시하고 있고, 일본의 경우 1972년에 환경영향평가 제도가 도입되어 1999년에 환경영향평가법이 본격적으로 시행되었으며 대기 환경, 물환경, 토양환경 등 여러 평가대상항목들을 반영하여 운영 및 관리하고 있다. 국내 또한 1977년 환경보전법을 시작으로 제도의 통합 및 개정을 통해 현행 환경영향평가법을 시행하고 있다[1].

화학사업장의 사고예방과 관리를 목적으로 위험도를 제어하기 위한 제도로써 미국의 경우 PSM, RMP 제도를, EU의 경우 Seveso-II 제도를 시행하고 있고, 국내의 경우 고용노동부의 PSM 제도, 산업통상자원부의 SMS제도와 2015년 시행된 환경부의 장외영향평가, 위해관리계획을 통해 유해화학물질을 다량 취급하는 사업장들을 체계적으로 관리하여 국민과 국토의 안전확보에 노력하고 있다[2].

2. 국내 화학사고 취약성 및 위험성

화학산업은 모든 산업에 직간접적으로 관련되어 있을뿐만 아니라 산업규모면에서도 매우 큰 비중을 차지하고 있으며 국내 화학산업 생산액은 2006년 기준 약 89조원으로 제조업 총 생산의 9.8%, 수출액은 249억 달러로서 국내 총 수출의 11%를 점유하고 있어 국내 경제에서 매우 중요한 위치의 산업이다.

2010년 국가 전체 화학물질 유통량은 2006년 대비 3.5% 증가한 433백만 톤으로 조사되었고, 제조량 289백만 톤, 수입량 231백만 톤, 수출량 88백만 톤으로 2006년 대비 각각 0.97%(288만 톤), 22.05%(3,516만 톤), 52.84%(2,985만 톤) 증가한 것으로 조사되었다[3].

특히 2013년 유해화학물질 중에서도 유독물의 유통량은 제조 39,964천 톤, 수입 7,389천 톤이며, 유독물 영업자는 7천 2백여 개

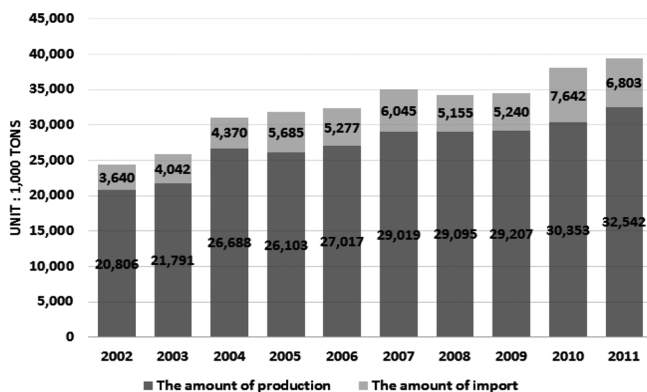


Fig. 1. Present state of distribution for toxic materials [4].

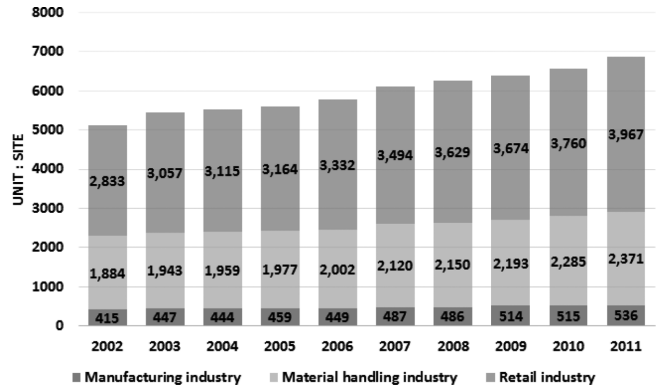


Fig. 2. Registration status of toxic materials concessionaire [4].

Table 1. Current status of chemical accidents for the last five years [7]

	Human error	Lack of facilities management	Chemical transportation vehicle accident	Total
2011	4	4	4	12
2012	5	3	1	9
2013	35	31	20	86
2014	51	33	22	106
2015	41	54	22	117

업체에 달하는 등 유독물 취급업자 등록수와 취급량이 매년 증가하고 있는 추세이다[5].

화학사고의 예방과 대비를 위해 국가에서는 여러 제도들을 통해 화학사업장들을 관리하고 있지만, 2013년 정부합동 전수조사 결과 발표에 따르면, 사고 발생 시 그 피해영향이 치명적인 유독물 취급업체 3,846개소 중, 시설 노후화나 배관 연결상태 등의 화학사고 위험 항목에 대해 취약한 사항이 1건 이상 발견된 업체가 전체 42%에 이르는 등 유독물 취급현장의 화학사고 취약성이 확인되었다[6].

이러한 유해화학물질 취급업체뿐만 아니라 전체 화학사업장의 시설이 노후화되고 화학사고의 가장 큰 원인인 작업자 부주의로 인하여 최근 5년간 화학물질관련 사고가 큰 폭으로 증가했음을 확인할 수 있다.

화학사고는 일반적으로 누출, 화재, 폭발 3가지 형태로 발생하며, 화학안전정보공유시스템 조사결과 누출사고가 최근 5년간 발생한 사고 중, 72%로 가장 많은 비율을 차지하고 있다.

화학물질이 누출되면 운전압력, 저장량, 누출공의 크기 등 조건에 의해 누출물질이 모멘텀을 가지게 되고 근거리로 뿔어나가게 되는데, 액상인 경우 풀(Pool)을 형성하게 되며 기상인 경우 증기운(Vapor cloud)을 형성하게 된다. 풀을 형성한 경우 화학물질의 증기압, 태양의 복사열, 지열 등을 반영하여 증발률을 계산하고, 증발된 양에 따라 확산범위 및 관심거리의 화학물질 농도가 달라진다. 증기운을 형성한 경우 자체적으로 가지고 있는 에너지로 거리를 이동하게 되며 주변 대기의 운동에너지보다 클 경우 희석되지 않고 수평으로 이동하게 된다. 일반적으로 증기운이 에너지를 잃어 대기와 혼합되기 전 시점까지를 근거리확산이라고 지칭하며, 오염물질이 주변 대기에 희석되어 수동 확산(Passive dispersion)되는 것을 장거리 확산이라고 한다.

화재와 폭발사고는 화학물질의 농도가 가연농도범위 이내일 때

Table 2. Source and dispersion models in HGSYSTEM

Source term models	SPILL	Transient liquid release from a pressurized vessel
	HFSPILL	SPILL version specifically for hydrogen fluoride (HF)
	LPOOL	Evaporating multi-compound liquid pool model (Unpressurised release)
Near-field dispersion models	AEROPHUME	High-momentum jet model
	HFPLUME	AEROPHUME version specifically for hydrogen fluoride (HF)
	HEGABOX	Dispersion of instantaneous heavy gas releases
Far-field dispersion models	HEGADAS	Heavy gas dispersion (Steady-state and transient version)
	PGPLUME	Passive Gaussian dispersion

발생하기 때문에 화재 복사열과 폭발 과압으로 인한 인명 및 재산 피해는 치명적이지만, 대부분 주변 대기에 희석되기 전에 점화원으로 인하여 발생하므로 피해범위가 사업장 내에 그치는 제한적인 형태를 보인다. 하지만 독성물질의 누출, 근거리, 장거리 확산으로 이어지는 피해범위는 매우 넓고, 치명적인 인명피해가 발생할 수 있으며 풍속, 풍향, 대기안정도 등 기상조건에 따라 확산거동이 변화하기 때문에 범위를 예측하기도 힘들고 환경오염으로 인한 2차적인 피해도 발생하기 때문에 독성물질을 취급하는 사업장에서는 각별한 안전관리가 필요하다. 대표적인 독성물질의 누출사고 사례는 1984년 인도 보팔사고로써 이로 인해 500,000여명 가스 노출, 3,800여명 사망, 20,000여명이 조기 사망하는 등 최악의 화학재난으로 30여년이 지난 현재까지 독성물질의 누출 및 확산사고의 위험성을 경고하고 있다. 이에 환경영향평가 선진국들 중 하나인 미국 환경청(Environmental Protection Agency)에서도 인체 및 환경에 유해한 오염물질들의 농도, 확산범위를 예측하거나 이를 감소시킬 수 있는 효과적인 전략을 설계하기 위하여, 대기 중에서 확산되거나 반응하는 대기 오염물질로 인한 영향들의 화학적 및 물리적인 과정을 시뮬레이션 할 수 있는 대기질 모델(Air quality models)들을 제시하고 있다.

3. EPA 예측모델 개요 및 대상모델 선정

3-1. EPA 예측모델 개요

EPA에서는 누출률 및 스택높이와 같은 누출원의 정보나 기상데이터의 입력 등을 기반으로 하여 대기 중에 직접적으로 누출되는 오염물질들을 특성화하기 위하여 설계된 확산모델(Dispersion modeling), 대기 중에서 복잡한 화학물질 반응의 결과로서 형성되는 2차 오염물질들의 특성을 위해 설계되어 있는 광화학 모델(Photochemical modeling)과 오염물질의 상세한 평가에 앞서 그 필요성을 입증하기 위한 개략적인 평가를 할 수 있는 스크리닝 툴(Screening tools)들이 있다. 본 연구에서는 누출원으로부터 누출되는 오염물질들의 대기 중 확산 거동을 특성화하기 위하여 수학적인 공식을 사용하고 기상데이터를 기반으로 수용체 위치에서 설정된 풍하방향에서의 화학물질 농도를 예측할 수 있는 확산모델 위주로 다루고자 한다[8].

EPA에서 제시하고 있는 여러 확산모델들은 National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), New Source Review (NSR), Prevention of Significant Deterioration (PSD) 법령과 같은 다른 규제 요구사항 준수를 결정하는데 주로 사용되며 규제용 권장모델 7종과 해안선 지형 등 특수한 사례에 따라 사용할 수 있는 모델인 대안모델 17종이 있다. 24개의 모델 중, HGSYSTEM은 불화수소(Hydrogen fluoride)와

육불화우라늄(Uranium hexafluoride)에 대하여 특징적으로 모사할 수 있으며, 1995년에 개발된 모델이지만 불화수소를 특징적으로 모사할 수 있다는 장점으로 2012년 구미 불산사고 이후에 관심을 받고 있는 모델이다.

3-2. HGSYSTEM

HG (Heavy-Gas)SYSTEM은 화학사고의 누출원과 누출 이후 확산을 예측하기 위해 설계된 모델이며 고밀도가스의 거동에 중점을 맞추고 있다. 이 모델은 불화수소, 물, 대기 혼합물의 복잡한 열역학 모델링을 할 수 있으며, 넓은 범위의 지표면 거칠기 조건들을 처리할 수 있다. 또한 불화수소의 가압 누출에 의한 제트흐름 및 대기 침투와 그 후 지표에서 고밀도 가스의 확산 계산이 가능하다[9].

HGSYSTEM은 특정 대기 확산 상황에 대한 독립적인 시뮬레이션 모듈들을 포함하고 있으며, 이는 누출원, 액상 풀의 증발, 제트 확산 그리고 고밀도가스의 확산을 계산할 수 있다. 모듈들은 개별적으로 구동될 수 있는 구조를 가지고 있으나 누출부터 근거리확산, 장거리 확산에 이르는 완벽한 시나리오를 모사해야 유용하다. HGSYSTEM에 포함된 모듈들은 Table 2와 같다[10].

HGSYSTEM은 다양한 입력자료들을 요구하는 상세한 모델이고 불화수소에 대해 특징적으로 모사할 수 있다는 장점을 가진 모델이지만 한편으로 모듈들을 연속적으로 구동할 때 자료가 자동으로 연동되지 않기 때문에 사용자가 개별적으로 입력해야한다는 어려움이 있으며, 사용자가 세부적인 사고시나리오나 입력조건들을 이해하고 활용할 수 있어야만 효율적으로 구동할 수 있는 전문성이 요구되는 모델이다. 이러한 이유들로 국내에서는 HGSYSTEM을 중점적으로 다루는 연구가 전무하여 모델의 성능이나 신뢰도를 판단할 수 있는 자료가 부족한 상황이다. 개발된 지 20년이 지난 구식모델이긴 하나, 국내 화학사고 역사에서 최악의 사고로 손꼽히는 구미 불산사고의 실제 피해범위 추정과 피해복구가 진행되고 있는 시점에서 불화수소에 특화된 모델의 모사를 통해 실제 사고 사고피해범위와 유사 프로그램의 결과를 비교하고, 피해범위 예측과 모델의 성능을 확인하여 모델의 활용성과 신뢰도를 판단하는 것은 충분한 가치가 있는 연구라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 구미 불산사고 사례연구를 통해 HGSYSTEM을 활용하여 국립환경과학원에서 수행한 CARIS 결과, 사고 피해예상범위, ALOHA 예측 결과와 비교 연구를 수행하여 대상 모델의 활용성을 판단하고자 한다.

4. 사례연구

4-1. 구미 불화수소 누출 사고[11,12]

2012년 9월 27일 오후 3시 43분경 구미 제4국가산업단지에서

Table 3. Input data for HFSPILL

Reservoir temperature	21.8°C
Reservoir pressure	3.5 kg/m ²
Storage volume	22 m ³
Stored mass of HF liquid	18 ton
Release orifice diameter	0.02 m

Table 4. Input data for HFPLUME

Mass-fraction HF in reservoir	99%
Mass (discharge) flow-rate	4.59 kg/s
Release orifice diameter	0.04 m
Height of release above level ground	3 m
Angle of release to horizontal	90°
Release duration	1,800 s
Reference height for measurements	10 m
Wind-speed at reference height	1.6 m/s
Air temperature at reference height	21.8°C
Relative humidity at release height	64%
Ground surface roughness	0.01 m
Pasquill/Gifford stability class	B

50, 55% 유수불산을 생산하기 위해 무수불산을 희석설비로 수송하는 공정의 작업 중, 작업자의 실수로 밸브가 열려 불화수소가 누출되는 사고가 발생하였다. 불화수소의 누출량은 조사한 기관에 따라 약 8~12톤으로 다양하며, 정확한 누출량은 제시된 바가 없지만 대부분의 자료에서 약 8톤을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서 불화수소는 약 8~9 톤이 2 cm 직경의 밸브를 통해 누출된 것으로 가정하였다. 탱크로리의 밸브가 완전히 차단되기 까지 약 8시간이 소요되었는데, 사고 초기 불화수소의 수송을 위해 3.5 kg/cm²의 압력으로 가압된 상태였으며 밸브가 열린 후 현장의 안전담당자가 가압펌프의 전원을 차단하기 까지 약 30분이 소요되었다[13]. 가압펌프 차단 이후 탱크로리 내의 압력은 대기압과 동일해 지면서 불화수소의 증발만 발생하였으며 이 증발량은 매우 미미하여 약 7시간 30분 동안에는 사실상 누출이 중단되었을 것이라고 판단된다.

사고 당시 기상조건은 대기온도 21.8°C, 풍속 1.6 m/s였으며, 기상청의 과거데이터를 조사한 결과 상대습도는 약 64%였다.

4.2. HGSYSTEM 결과

구미 불산사고의 모사를 위해서 불화수소의 가압누출의 HFSPILL 모듈, 근거리 확산의 HFPLUME 모듈, 장거리 확산의 HEGADAS-S (Steady state) 모듈을 순차적으로 연계하여 사용하였으며, HFSPILL의 입력자료는 다음과 같다.

HFSPILL 계산 후 HFPLUME에 필요한 입력자료를 포함하고 있는

Table 5. Input data for HEGADAS-S

Averaging time for concentration	3,600s
Post-flash liquid mass fraction	0.9092
Fixed-size output step length	50 m
X at which calculations are stopped	10,000 m
Concentration at which calculations are stopped	0.1E-6
Downwind x-coordinate of breakpoint	301 m
Cloud half-width	-110 m
Center-line ground-level molar HF fraction	8.559E-04

연결과일이 생성되는데, HFSPILL 모듈에서 누출률이 4.59 kg/s로 계산되었다. 이 누출률을 직접 HFPLUME에 입력 시, 동결평형(Frozen equilibrium)관련 오류가 발생하여 구동이 되지 않는 문제점이 있었기 때문에 이를 해결하고자 누출공의 크기를 4 cm로 수정하고 누출률을 입력하여 모듈을 구동하였다. 지면거칠기(Ground surface roughness)의 경우 사고지역 주변이 농경지임을 반영하여 0.01 m로 설정하였다.

HFPLUME 계산이 완료되면 사용자는 HEGADAS-S, HEGADAS-T (Transient), PGPLUME를 선택하여 장거리확산을 계산할 수 있는데, 불화수소 모사의 경우 시스템에서 HEGADAS를 위한 연결과일을 생성하였고, 정상상태를 가정하여 HEGADAS-S로 확산을 계산하였다. 장거리확산을 계산하기 위해서는 근거리확산의 중지점(Breakpoint), 중지점에서 증기운의 반치폭(Half width) 등이 반드시 필요하며 이 정보들은 HFPLUME 구동 후 생성된 연결과일에서 얻을 수 있다. HGSYSTEM의 입력자료는 Fig. 3와 같이 정리하였다. 30분 동안 누출량은 8,262 kg으로 HGSYSTEM에서의 계산 값과 구미 불산사고의 실제 누출량이 유사함을 확인할 수 있었으며, 거리에 따른 불화수소의 농도 값은 Fig. 4와 같다.

불화수소의 확산거리에 따른 독성농도를 비상대응계획 수립지침(Emergency Response Planning Guideline, ERPG)에 따라 구분하여 정리하였으며, 불화수소 증기운은 소멸될 때까지 약 6,657 m를 이동한 것으로 계산되었다. 미국 산업안전보건연구원(NIOSH)의 기준에 따르면 근로자의 건강보호를 위한 8시간 평균 노출권고기준(TWA)은 3 ppm으로 약 1,930 m 까지 피해범위가 예측되었고 한순간이라도 넘어서는 안되는 기준인 천장값(Ceiling)은 6 ppm으로 약 1,530 m로 예측되었다[14].

HEGADAS-S INPUT DATA			
OUTPUT CODE	ICNT = 0	(no output of cumulative cloud data)	CONTROL data block: c
SURFACE-TRANSFER CODE	ISURF = 3	(only heat transfer, no water vapour)	DISP data block: disp
AIR TEMP. AT HEIGHT	ZAIRTEMP	21.800 CELSIUS	AMBIENT data block: a
REF. HEIGHT FOR AIR TEMP.	ZAIRTEMP	0.00000E+00 M	
RELATIVE HUMIDITY	RHPERC	64.000 %	
WIND VELOCITY AT HEIGHT	Z0	1.6000 M/S	
REFERENCE HEIGHT FOR WIND VEL.	Z0	10.000 M	
EARTH-S SURFACE TEMPERATURE	TGROUND	TAP (see below for value of TAP)	
SURFACE ROUGHNESS PARAMETER	ZR	1.00000E-02 M	DISP data block: disp
PASQUILL STABILITY CLASS	PQSTAB	B	
AVERAG. TIME FOR CONC. MEAS.	AVTIME	3600.0 SECONDS	
MONIN - OBUKHOV LENGTH	OBUKL	-11.789 M	
TYPE OF FORMULA FOR SIGMA_Y	MODSY	2 (Briggs formula)	
with parameters:	DELTA	0.22896	
	BETA	1.00000E-04 M**(-1)	
CONST. IN GRAV. SPREADING LAW	CE	1.1500	
CONST. IN GRAV. SPREADING LAW	CD	5.0000	GASDATA data block: p
POLLUTANT COMPOSITION:			
- HF (equivalent HF monomer)		0.99304 (molar fraction)	
- extra ideal gas	EXGASPOL	6.95800E-03 (molar fraction)	
- water	WATERPOL	0.00000E+00 (molar fraction)	
DATA FOR DRY POLLUTANT:			
- evaporation rate	GASFLOW	4.5900 KG/S	
- specific heat	CPGAS	29.120 J/MOLE/CELSIUS	
- molecular weight	MWGAS	20.010 KG/KMOLE	
- heat group in heat flux	HEATR	24.000	
POLLUTANT TEMPERATURE	TEMPGAS	19.550 CELSIUS	
THERMODYNAMIC MODEL	THERMOD	2 (HF thermodynamics)	
INITIAL LIQUID IN HF	HFLIQR	0.90920 (mass fraction of basic HF)	
NR. OF SOURCE OUTPUT STEPS	NSOURCE	4	CLOUD data block: con
FIXED OUTPUT STEP	DXFIX	50.000 M	
NUMBER OF FIXED STEPS	NFIX	5	
INCREASE FACTOR FOR VAR. STEPS	XGEOM	1.2000	
X AT WHICH CALC. IS STOPPED	XEND	10000. M	
CONC. AT WHICH CALC. STOPS	CAMIN	1.00000E-07 KG/M3	
UPPER CONCENTRATION LIMIT	CU	4.96700E-05 KG/M3	
LOWER CONCENTRATION LIMIT	CL	1.00000E-07 KG/M3	
DISPERSION CALCULATIONS DOWNWIND OF BREAKPOINT	DISTS	301.00 M ONLY	TRANSIT data block(s):
BREAKPOINT SPECIFIED AT	DISTS	301.00 M	
- half-width of cloud	WS	110.00 M	
- molar fraction "FRAMOL"	CONCS	8.55900E-04	

Fig. 3. Summary of HGSYSTEM input data.

DISTANCE (M)	CONC (% VOL.)	SZ (M)	SY (M)	MIDP (M)
- breakpoint at DIST = 301. m				
301.	8.559E-02	19.1	0.000E+00	110.
361.	5.821E-02	22.1	72.2	73.4
433.	3.441E-02	30.9	113.	58.7
519.	1.873E-02	48.2	151.	42.0
623.	1.018E-02	73.9	190.	30.3
747.	5.593E-03	111.	232.	21.9
897.	3.111E-03	162.	280.	15.8
1.076E+03	1.756E-03	234.	336.	11.4
1.291E+03	1.004E-03	332.	400.	8.29
1.549E+03	5.804E-04	465.	474.	5.98
1.859E+03	3.391E-04	646.	561.	4.30
2.230E+03	2.001E-04	890.	661.	3.09
2.676E+03	1.191E-04	1.218E+03	778.	2.18
3.211E+03	7.139E-05	1.660E+03	913.	1.45
3.853E+03	4.312E-05	2.251E+03	1.069E+03	0.930
4.623E+03	2.623E-05	3.042E+03	1.246E+03	0.547
5.548E+03	1.605E-05	4.101E+03	1.449E+03	0.136
6.657E+03	9.887E-06	5.515E+03	1.678E+03	0.000E+00

Fig. 4. Concentration result of HF according to distances.

Table 6. Dispersion distances for each ERPG criteria

ERPG 3~50 ppm	About 776 m
ERPG 2~20 ppm	About 1,025 m
ERPG 1~2 ppm	About 2,230 m

5. 결론 및 고찰

구미 불산사고의 실제 피해범위는 조사한 기관들에 따라 차이를 보이고 있으며, 사고 당시 국립환경과학원에서는 CARIS로 계산 시 결과가 Table 7과 같이 도출되었다.

식품의약품안전처 자료에서는 반경 2.5 km에서 채취한 농작물에서도 불소 성분이 검출되었다는 조사결과가 있고 또한 환경시료를 수집하여 대기 중 불산 농도를 예측한 연구에서는 사고지역으로부터 약 2.5 km 거리의 식물에서 불소 성분이 검출되었으며 대기 중 불산농도를 약 0.31 ppm으로 추정하는 연구가 있다[15]. 이는 매우 미미한 농도로 ERPG 독성농도 기준과 대조하여 확산거리를 비교하기에는 어려움이 있다. 또한 이러한 식물시료 채취연구는 식물들의 생물학적 요인들과 다양한 기상조건들에 의하여 많은 불확실

성이 존재하므로 시료채취연구를 통해 추정된 대기 중의 불산 농도 수치가 사고 당시 실제 불산 농도와 일치한다고 할 수는 없다[16]. 정확한 평가를 위해서는 공기 중의 농도를 직접 측정하는 것이 우선적으로 수행되어야 하지만 사고지점으로부터 거리에 따른 공기 중의 불산농도를 측정할 자료가 없는 실정이므로 사고 발생 후 실제 사고피해범위를 예측하기 위하여 참고자료로서 활용하였다. 또한 HGSYSTEM과 결과비교를 위해 ALOHA를 활용하였으며, HGSYSTEM의 계산 시 입력조건과 최대한 동일하게 입력하였다.

ALOHA의 결과는 HGSYSTEM 결과보다 더 보수적인 확산거리를 보였으며, ERPG 2 기준인 20 ppm 농도로 약 1.9 km까지 확산되는 것으로 계산되었다.

사고 시점에서 대기 중 불산의 농도를 예측하기 위해 HGSYSTEM과 ALOHA의 구동 조건은 30분 누출 후, 1시간 동안의 평균농도를 계산하였고, 국립환경과학원 CARIS 결과는 독성농도 선정을 ERPG 기준에 따라 위험, 준위험, 안전지역을 선정하였다. 또한 대기 중 불산 농도 예측 연구의 경우에도 2.5 km 거리의 식물시료의 불소성분이 검출된 것을 기반으로 1일 노출기간을 계산한 연구이기 때문에 사고 1시간 후의 대기 중 농도를 정확하게 추정하기에는 어렵다.

현존하는 자료들로는 입력 조건과 사고피해 결과의 상세한 비교는 어렵지만 제시된 범위들을 ERPG 2 기준으로 정리하면, 실제 사고 범위(약 1 km 내외), HGSYSTEM 결과(약 1 km), CARIS 결과(약 1.4 km), ALOHA 결과(약 1.9 km) 순으로 구미 불산 사고의 피해 거리가 나타났고 HGSYSTEM의 확산거리가 유사 프로그램들에 비하여 작게 나오는 결과를 보인다. 이는 불화수소 혼합물의 중합 반응을 반영한 특화된 누출모델(HFSPILL)과 근거리 확산모델(HFPLUME) 그리고 고밀도 가스의 장거리 확산모델(HEGADAS)들을 기반으로 하는 상세한 입력조건 및 불화수소의 화학적, 열역학적 특징을 반영한 복잡한 계산과정으로 인하여 도출된 것이라고 판단된다. 실제 사고예상 범위와 비교했을 때, 누출량과 확산거리의 결과가 유사하게 도출되었기 때문에 불화수소 사고에 특화된 피해거리를 산정하는데 있어서 참고할 수 있는 모델이지만, 단독적으로 HGSYSTEM 활용여부에 대해서는 본 논문을 시작으로 타 예측 모델들과의 직접적인 사례연구 수행 그리고 기 연구된 논문[17]들을 통한 계산결과 분석 등의 연구가 필요하다.

Table 7. Dispersion distances calculation by CARIS [13]

Hot zone (ERPG 3)	About 1,000 m
Warm zone (ERPG 2)	About 1,400 m
Cold zone (ERPG 1)	About 4,000 m

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)	
Wind: 1.6 meters/second from W at 10 meters	
Ground Roughness: 1 centimeters	Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 21.8°C	Stability Class: B
No Inversion Height	Relative Humidity: 64%
SOURCE STRENGTH:	
Direct Source: 4.59 kilograms/sec	Source Height: 3 meters
Release Duration: 30 minutes	
Release Rate: 275 kilograms/min	
Total Amount Released: 8,262 kilograms	
Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.	
Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.	
THREAT ZONE:	
Model Run: Gaussian	
Red : 1.2 kilometers --- (50 ppm = ERPG-3)	
Orange: 1.9 kilometers --- (20 ppm = ERPG-2)	
Yellow: 6.0 kilometers --- (2 ppm = ERPG-1)	

Fig. 5. Calculation result of ALOHA input data.

감 사

본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발사업에서 지원 받았습니(No. 2015001950002).

References

1. Ministry of Environment : Research and Analysis about Foreign Environmental Impact Assessment Legislation and Institutional (2008).
2. Ministry of Environment : Korean Environmental Impact Assessment(2012).
3. Ministry of Environment : The 4th Investigation report for circulation amount of chemicals(2013).
4. Ministry of Environment, Environment White Paper(2012).
5. Ministry of Environment, Environment White Paper(2014).

6. Ministry of Environment, Result of complete enumeration for toxic chemical plant(2013).
7. <http://csc.me.go.kr/main.do>.
8. https://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_alt.htm.
9. Hanna, S. R. and Chang, J. C., "Modeling Accidental Releases to the Atmosphere of a Dense Reactive chemical(Uranium Hexafluoride)," *Atmospheric Environment*, **31**(6), 901-908(1997).
10. Post, L., HGSYSTEM 3.0 : User's Manual, Shell Research Limited(1994).
11. Lee, M. R., Koo, S. and Sim, J. H., "Assessment of Estimated Damage Area by CCTV Images : Case Study of Gumi Hydrofluoric Acid Gas Leakage," *J. Korean Soc. Hazard Mitig*, **13**(6), 223-229(2013).
12. Park, K. S., Kim, T. O. and Kim, J. Y., "A Study on Consequence Analysis of Hydrofluoric Acid Release Accident in Gumi Industrial Area," *Korean Journal of Hazardous Materials*, **1**(1), 15-21 (2013).
13. Korea Environmental Institute : A study on the Improvement of Environmental Impact Assessment of Industrial Complexes Based on Risk Assessment of Chemical Leakage Accidents(2013).
14. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) : Immediately Dangerous To Life or Health(1994).
15. Koh, D. H., Kim, J. S. and Choi, K. H., "Defining Area of Damage of 2012 Hydrofluoric Acid Spill Accident in Gumi, Korea," *J. Environ. Health. Sci.*, **40**(1), 27-37(2014).
16. Gu, S. G., Choi, I. J. and Kim, W., "Study on the Distribution of Fluorides in Plants and the Estimation of Ambient Concentration of Hydrogen Fluoride Around the Area of the Accidental Release of Hydrogen Fluoride in Gumi," *J Environ Health Sci.*, **39**(4), 346-353(2013).
17. 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).