

불화수소 누출사고 시 대피밀도에 따른 사망확률 산출에 관한 연구

A Study on the Calculation of the Probability of Death according to Evacuation Density in Case of Hydrogen Fluoride Leakage Accident

박병선*, 이동호**

Byeong Seon Park*, Dong Ho Rie**

ABSTRACT

In this study, the evaluation of the probability of death according to the evacuation density in case of a hydrogen fluoride leak accident was studied. In this study, Hydrogen Fluoride, which is the background of the enactment of the Chemical Control Act, was selected as the target material. The study method used DNV GL's PHAST to modeling Hydrogen Fluoride for Hydrogen Fluoride leak accidents. Next, the evacuation speed was calculated according to the Evacuation Density using SIMULEX, an IES program. Then, using the probit analysis formula, the prediction of casualties in the event of a hydrogen fluoride leak accident was quantified. In this study, a toxicity evaluation methodology was presented. Based on the method of this study, if the actual evacuation space and evacuation density are applied at each industrial site and applied to various chemical substances, it is expected that a more quantitative evaluation of human casualties can be expected.

Key Words : Hydrogen Fluoride Leakage(불화수소 누출), Evacuation Density(대피밀도), Probit(프로빗)

1. 서론

현대 사회는 과학기술이 발달하면서 다양한 화학제품들이 생산되고 있다. 화학물질안전원의 화학물질종합정보시스템에 따르면 2014년

부터 2018년까지 화학물질을 취급하는 사업장의 수는 지속해서 증가하고 있다. 이에 따라 국내 화학사고는 매년 발생하고 있으며 화학사고 발생 건수는 2014년 105건, 2015년 113건, 2016년 78건, 2017년 87건, 2018년 66건,

* 인천대학교 공학대학원 안전환경시스템공학전공(nexus747@naver.com)

** 인천대학교 소방방재연구소 안전공학과 교수 - 1 -

2019년 57건, 2020년 75건으로 집계되었다.⁽¹⁾

화학사고의 발생은 사업장 내의 근로자뿐만 아니라 사업장 인근 지역에 거주하는 주민들에게까지 피해가 발생하고 있다. 2012년 구미에서 발생한 휴브글로벌의 사의 불화수소 누출사고는 사망 5명, 입원치료 12명, 건강검진 7,162명, 농작물 237.9ha, 가축 3,209두, 차량 1,138대 등의 피해를 입혔다.⁽²⁾

휴브글로벌 사의 불화수소 누출사고를 배경으로 화학물질사고에 대한 국민적 불안이 심화되면서 화학물질관리법이 2015년부터 시행되었다. 화학물질관리법이 시행됨에 따라 유해화학물질을 취급하는 사업장에 대해서 장외영향평가서 및 위해관리계획서를 화학물질 안전원에 제출하도록 하였으며, 현재 2021년부터는 장외영향평가서와 위해관리계획서를 통합한 화학사고예방관리계획서를 제출하도록 하고 있다. 화학사고예방관리계획서의 주된 내용은 사업장에서 취급하고 있는 유해화학물질 시설에서 발생 가능한 사고에 대한 사업장 외부의 피해영향범위 평가와 유해화학물질 사고 발생에 따른 비상대응계획 및 주민대피계획 수립 등이 있다.⁽³⁾

국내의 선행연구에서 유해화학물질 사고에 대한 피해 영향범위 산정과 주민대피 및 인명피해에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 그러나 주민대피 시 대피로의 대피밀도에 따른 대피속도 및 대피시간을 고려한 인명피해의 연구는 아직까지 부족한 실태이다. 화학사고가 발생하여 대피를 실시하게 되면 대피로의 대피밀도는 대피시간에 영향을 주게 되며 대피시간에 따라 인명피해의 정도 또한 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 화학물질관리법의 배경이 된 불화수소를 대상물질로 선정하여 DNV GL사의 장외영향평가 프로그램인 PHAST(Process Hazard Analysis Tool) ver 7.11를 사용하여 불화수소 확산 모델링을 하였으며 IES사의 대피시물레이션 프로그램인

SIMULEX를 사용하여 인구밀도에 따른 대피속도를 산출 후 Probit 기법을 사용하여 불화수소 누출 시 대피밀도에 따른 사망확률을 산출하여 불화수소 누출 사고 시 대피밀도에 따른 인명피해의 영향을 분석하였다. 본 연구의 결과는 불화수소 누출사고 발생 시 대피로의 대피밀도에 따른 인명피해를 계산하는 방법론을 제시함으로써 화학물질 누출 사고에 대한 사업장 및 지자체의 화학사고의 비상대피계획 수립에 있어 충분한 대피로의 확보 및 대피소 선정을 통한 인명피해를 감소시키는데 목적이 있다.

2. 본론

2.1 화학사고 개요

2.1.1 국내 화학물질 개요 및 관리체계

화학물질관리법에 따른 화학사고는 시설의 교체 등 작업 시 작업자의 과실, 시설 결함·노후화, 자연재해, 운송사고 등으로 인하여 화학물질이 사람이나 환경에 유출·누출되어 발생하는 모든 상황을 말한다.⁽³⁾ 화학물질은 매년 3천여 종의 신규 화학물질이 개발되고 있으며 전 세계적으로 유통되어지고 있는 화학물질은 20만 종에 이른다. 국내에서는 4만 4천 종 이상의 화학물질이 유통되어지고 있으며 매년 2천여 종의 신규 화학물질이 진입되는 등 화학물질의 사용이 계속해서 증가하고 있다. 이에 따라 화학사고의 발생 증가 또한 우려되는 상황이다.⁽⁴⁾

국내 화학물질의 관리 체계는 유해화학물질(유독·제한·금지 및 사고대비물질 등, 1,012여 종), 공정안전보고서 작성대상 유해·위험물질(50여 종), 고압독성가스(40여 종), 위험물(3,000여 종) 등으로 구분되어 있으며 이를 정부 부처별로 관리대상 물질을 정하여 관리하

고 있다.⁽⁴⁾ 환경부의 화학물질관리법에서는 유해화학물질을 취급하는 사업장에 대해 화학사고예방관리계획서를 작성·제출하도록 함으로써 사업장의 화학사고 예방·대응 관리를 하고 있다.⁽³⁾ 고용노동부의 산업안전보건법은 산업재해를 예방하고 근로자를 보호하기 위해 유해·위험물질을 제조·취급 저장하는 경우 공정안전보고서를 작성·제출하도록 하고 있다.⁽⁵⁾ 산업통상자원부의 고압가스안전관리법은 고압가스 등으로 인한 위해를 방지하고 공공의 안전을 확보하기 위해 고압가스를 제조·저장 판매하는 사업장에 대해 안정성향상계획서를 작성·제출하도록 하고 있다.⁽⁵⁾ 소방청의 위험물안전관리법은 위험물로 인한 위해를 방지하고 공공의 안전을 확보하기 위해 위험물을 저장하거나 취급하는 경우 예방규정을 제출하도록 하였다.⁽⁶⁾ 국내 화학물질은 정부 부처별 관련법령에 따라 화학물질에 대한 사고를 예방하고 관리하고 있다.

2.1.3 국내 화학사고 대응 및 주민소산계획

화학사고가 발생하게 되면 환경부, 소방청, 산업통상자원부, 고용노동부 등 각 부처별로 관리물질 및 역할에 따라 소관이 구분되어 있지만 구미 불화수소 누출사고와 같이 소관이 중첩되는 경우 주관부처가 모호한 사례가 발생하였다. 화학사고 발생 시 부처 간 이견조정, 필요한 자원 동원 등 적극적인 컨트롤 타워가 필요하다고 판단하여 모든 화학사고에 대한 주관부처를 환경부로 일원화하고, 현장 수습조정관 제도를 도입하여 신속하고 정확한 화학사고의 대응 및 수습이 가능하도록 화학사고 표준매뉴얼 개정을 추진하는 등 관련 제도를 정비하였다.⁽⁴⁾

정부는 화학물질안전원을 신설하여 화학사고·테러 발생에 대비하여 지원·연구·교육을 전담하게 하였고 화학물질안전원은 사고대응

정보시스템 구축, 사고현장 대응 및 복구지원, 화학물질 취급자 및 대응자에 대한 전문교육을 실시함으로써 화학물질 사고·테러를 예방하고, 유사시 신속하게 대응할 수 있는 위기관리대응 지원센터의 역할을 수행하고 있다. 부처별로 분산된 화학사고 인력과 각종 시스템을 공유·연계하기 위해 관계 부처 합동으로 화학재난합동방재센터를 신설하여 화학사고에 대한 효과적인 대응이 이루어지도록 하였다.⁽⁴⁾

주민소산 계획은 주민 협의체 구성, 주민고지, 주민대피 경보, 사고발생시 주민행동 요령, 응급조치 요령, 주민대피 경로 및 장소 등의 내용으로 구성되어 있으며 사고발생 시 주민행동 요령에는 독성물질 누출 시 대피, 인화성 물질 누출 시 대피, 독성·인화성 일 경우 대피, 실내 대피 시 유의사항, 소산 시 유의사항으로 세부 구성되어 있다.⁽⁸⁾

주민을 보호하는 방법은 실내대피와 실외대피인 소산방법으로 구분되며 실내대피와 소산을 결정하기 위해서 사고 물질, 사고 유형 및 사고 지속시간을 고려한다. Table 1은 실내대피 및 소산을 결정하기 위해 고려해야 하는 항목에 대해서 나타내었다.⁽⁸⁾

Table 1 Determination Criteria for Indoor Evacuation and Outdoor Evacuation

Indoor evacuation
If the pollutant leaks at one time
If the vapor disappears rapidly
If the atmospheric condition (atmosphere stability is A or B) in which the cloud is rapidly
If you can control the leak quickly
In the affected area but with very short exposure times

Outdoor evacuation
If large quantities leak continuously
If there is additional leakage potential
Insufficient building for evacuation
Atmospheric condition where vapor is difficult to disappear
Residents residing in areas that are continuously affected

2.2 소프트웨어 및 독성평가 기법 선정

2.2.1 장외영향평가 프로그램 선정

본 연구에서는 불화수소의 누출사고의 확산 모델링의 결과로 시간경과에 따른 확산거리와 불화수소의 농도 값을 도출하기 위해 DNV GL사에서 개발한 프로그램인 PHAST를 사용하였다. PHAST는 전 세계적으로 사용되고 있는 화학사고 시뮬레이션 소프트웨어이며, 프로세스에 대한 위험 분석 소프트웨어로서 초기 누출에서 liquid pool의 전개 및 기화, 가연성 및 독성 영향을 포함한 원거리까지의 확산 분석에 이르는 잠재적 사고의 진행을 평가하기 위해 개발되었다. PHAST는 독자적인 통합 분산 모델인 UDM(Unified Dispersion Model)을 사용하며, 지표면 또는 대기 상에서의 기상(vapor phase) 누출 또는 2상(two-phase) 고압 누출에 대한 확산(dispersion)을 모델링한다.⁽⁹⁾

2.2.2 대피 시뮬레이션 프로그램 선정

본 연구에서는 대피밀도에 따른 대피자의 대피시간에 및 대피속도를 산출하기 위해 CAD file을 이용하여 쉽게 사용할 수 있으며 국내에서의 인지도가 높은 IES사에서 개발한 대피 시뮬레이션 프로그램인 SIMULEX를 사용하였다. SIMULEX는 50,000㎡ 미만의 지하학적인 복잡한 건물과 15,000명 이하 사람들을

대피 시뮬레이션에 적용 할 수 있으며 사람의 위치, 방향, 걷는 속도 등이 매 0.1초 단위로 계산되므로 화면상으로 피난하는 모습, 사람들이 문 쪽으로 몰리는 병목현상에 대하여 확인 할 수 있다. 또한 보행속도, 피난경로, 재실자의 특성 및 신체의 크기, 필요안전 피난시간의 결정의 적용 값에 따라 실제 피난을 예측하여 피난안전에 관하여 예측할 수 있다.⁽¹⁰⁾

2.3 연구방법

본 연구는 PHAST를 활용한 불화수소 확산 모델링, SIMULEX를 활용한 대피밀도에 따른 대피시간 및 속도 산출, Probit 분석법을 통한 독성부하 및 사망확률 산출 순으로 진행하였으며 연구방법의 순서를 Fig 1에 나타내었다.

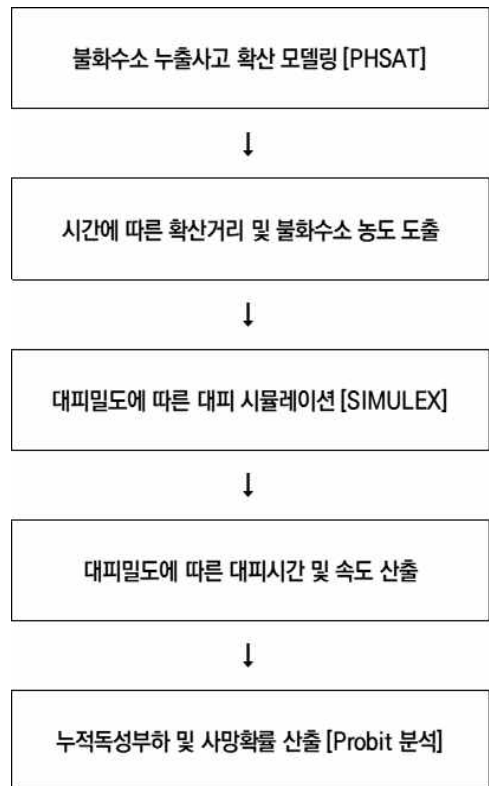


Fig 1 Oder of research methods

2.3.1 불화수소 누출 시나리오 모델링 방법

불화수소 누출 시나리오의 공정변수는 화학물질안전원의 사고시나리오 선정에 관한 기술지침을 참고하여 선정하였다. 불화수소 누출 용량은 10t, 대기안정도는 D로 선정하였다. 피해영향범위를 평가하기 위한 끝점은 ERPG-2 끝점농도에 도달하는 지점으로 선정하였다. 누출공 사이즈는 누출공 선정기준에서 가장 큰 값인 4인치로 선정하였다. 압력은 5.5bar로 하였으며 대기온도는 25℃, 풍속은 3m/s로 선정하였다. 불화수소 누출시나리오에 대한 공정변수를 Table 2에 나타내었다.⁽¹¹⁾

Table 2 PHAST Scenario Data

Classification	Data
Material	HF
Mass inventory	10 (ton)
Orifice diameter	4 (in)
Tank pressure (gauge)	5.5 (bar)
Stability class	D
End Point (ERPG-2)	20 (ppm)
Temperature	25 (°C)
Wind speed	3 (m/s)

2.3.2 대피밀도에 따른 대피속도 산출 방법

SIMULEX에서 대피자의 보행속도는 전방의 대피자와 간격에 영향을 받으며 일반적으로 방해받지 않는 사람들의 속도는 0.8~1.7m/s 사이에서 결정된다. Fig 2는 대피자와 전방 대피자의 직선거리에 따른 속도분포를 나타낸 그래프이다. SIMULEX에서 나타나는 사람의 형상은 Fig 3과 같이 반경 R(t)의 'Torso Circle'과 반경 R(s)의 두 개의 'Shoulder Circle'로 구

성되어있다. 몸 중심으로부터 어깨 원의 중심까지의 거리는 Sm(meter)이다. SIMULEX에서 정의할 수 있는 Body Type과 각각의 신체 치수는 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서는 대피자 Group으로 office staff를 선정하였으며 office staff의 Body Type별 구성비는 Table 4에 나타내었다.⁽¹²⁾

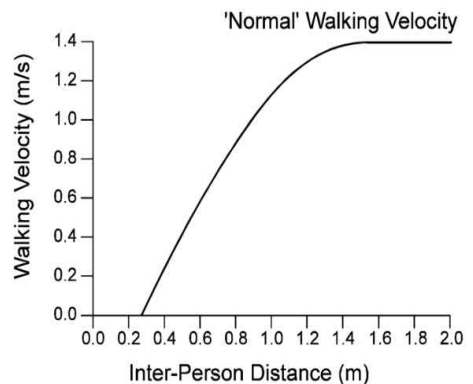


Fig 2 The relationship between walking velocity and inter-person distance

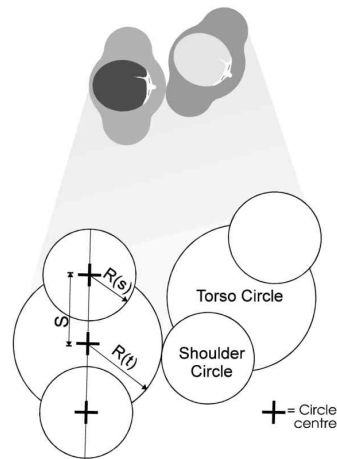


Fig 3 The definition of a 'body' within simulex

본 연구에서 대피밀도는 0.3m²/Person, 0.6m²/Person, 1.0m²/Person, 3.0m²/Person 4종으로 선

정하였으며 대피공간은 1500m³(3m x 1,000m)로 설정하였다. Table 5는 대피 시뮬레이션에 대한 공정 변수를 나타내었다.

Table 3 Body Dimensions for the Body Types in Simulex

Body Type	R(t)	R(s)	Sm
Average	0.25	0.15	0.10
Male	0.27	0.17	0.11
Female	0.24	0.14	0.09
Child	0.21	0.12	0.07

Table 4 Body Types ratio of office staff

Average (%)	Male (%)	Female (%)
30	40	30

Table 5 Simulex Scenario Data

Classification	Data
Occupant Type	Office staff
Evacuation Density	0.3 (m ³ /person) 0.6 (m ³ /person) 1.0 (m ³ /person) 3.0 (m ³ /person)
Escape area	3,000 (m ²)

2.3.3 프로빗 분석 및 사망확률 산출 방법

프로빗 분석식은 누적 독성부하에 대한 식(1)과 프로빗 값에 대해 식(2)을 적용하였으며 프로빗 분석식을 계산하기 위해 Table 6의 US coast Guard(1980)의 상수값을 적용하였다. 사망확률은 식(2)의 프로빗 값을 Table 7를 활용하여 백분율로 환산한다.⁽¹³⁾

$$\sum_{i=1}^m C_i^n t_{ei} \dots \dots \dots (1)$$

T_L = 독성부하(ppm · 분)

C = 폭로시간(t_e)동안 독성물질 농도(ppm)

n = 특정 독성물질의 상수, (Table 2.11)

t_e = 폭로시간(분)

$$P_r = A_t + B_t \ln T_L \dots \dots \dots (2)$$

P_r = 프로빗 값(Probit variable)

A_t, B_t = 특정 독성물질의 상수(ppm) (Table 2.9)

Table 2.11 Constant of Probit's Formula for Hydrogen fluoride

A_t (ppm)	B_t (ppm)	n
-25.87	3.354	1.00

불화수소 누출에 따른 사망확률 산출은 PHAST에서 도출한 시간에 따른 불화수소 농도와 확산거리를 바탕으로 SIMULEX를 활용하여 도출한 대피밀도에 따른 이동속도 값을 적용하여 구간별 독성 값을 계산 후 합산한 누적 독성 값을 산출하여 프로빗 분석을 통해 사망확률을 도출한다.

불화수소 누출 사고 대피에 있어 사고 발생 60초 후 주민대피 경보에 의해 대피를 시작하는 대피 지연시간을 도입하였으며 대피거리는 1,000m 지점에 대피소가 있다고 가정하였다.

따라서 구간별 대피시작부터 불화수소에 Cloud에 영향을 받는 경우와 대피시작 후 일정 시간 경과 후 불화수소 Cloud에 영향을 받는 경우로 구분하여 계산하였다.

Table 7 Correlation Table between Probit Variable and Percentage

Pr (%)	0	1	2	3	4
	0	-	2.67	2.95	3.12
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55
%	0	0.1	0.2	0.3	0.4
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51
Pr (%)	5	6	7	8	9
	0	3.36	3.45	3.52	3.59
10	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.58	7.65	7.65	7.88	8.09

3. 연구결과

3.1 불화수소 누출 시나리오 모델링 결과

PHAST의 확산모델링 결과로 약 200개 구간의 시간에 따른 농도 및 확산거리가 계산되며 사망확률이 100%에서 0%로 변화가 나타나는 구간을 선정하여 시간 변화에 따른 불화수소 Cloud의 확산거리 및 농도 값에 대한 모델링 결과 값을 Table 8에 나타내었다.

Table 8 PHAST Modeling Result

Section	Time (s)	Conc (ppm)	Distance (m)
1	149	21,263.2	356.4
2	165	13,490.6	393.2
3	185	7,101.1	443.8
4	209	3,868.4	512.7
5	237	2,571.4	603.4
6	271	1,934.3	719.2
7	312	1,529.9	863.9
8	362	1,203.6	1,043.0
9	421	939.0	1,265.2
10	492	725.8	1,540.9
11	577	555.4	1,882.6
12	677	422.5	2,297.1
13	777	332.3	2,723.5
14	877	267.9	3,160.1
15	977	220.3	3,605.6

3.2 대피밀도에 따른 대피속도 산출 결과

SIMULEX를 활용하여 대피공간에서 대피밀도에 따른 시뮬레이션을 통해 대피시간을 도출하였으며 대피시간을 바탕으로 대피속도를 계산하였다. 대피 시뮬레이션 결과 값은 연구방법의 Table 9에 나타내었다.

Table 9 Simulex Results

Classification	Evacuation Density (m ² /person)			
	0.3	0.6	1.0	3.0
Evacuation speed (m/s)	0.43	0.81	0.97	1.01
Evacuation time (Second)	2,314	1,236	1,032	992

3.3 불화수소 누출에 따른 사망확률 산출 결과

PHAST 및 SIMULEX 결과를 바탕으로 대피 밀도에 따른 구간별 누적 독성부하를 계산하였으며 계산 결과는 Table 10에 나타내었다. 구간별 누적 독성부하 결과 값을 바탕으로 프로빗 분석을 하였으며 프로빗 값 및 사망확률에 대한 결과 값은 Table 11 및 Table 12에 나타내었다.

Table 10 Calculation of Cumulative Toxic Load by Evacuation Density

Section	Cumulative Toxic Load	
	0.3	0.6
1	9.04E+04	3.52E+04
2	7.14E+04	3.02E+04
3	6.51E+04	2.76E+04
4	5.49E+04	2.35E+04
5	4.65E+04	1.97E+04
6	3.91E+04	1.60E+04
7	3.28E+04	1.28E+04
8	2.66E+04	9.73E+03
9	2.15E+04	7.22E+03
10	1.67E+04	4.89E+03
11	1.26E+04	3.29E+03
12	9.20E+03	2.12E+03
13	6.85E+03	1.31E+03
14	5.18E+03	7.31E+02
15	3.96E+03	3.13E+02

Section	Cumulative Toxic Load	
	1.0	3.0
1	2.98E+04	2.82E+04
2	2.52E+04	2.39E+04
3	2.00E+04	1.87E+04
4	1.82E+04	1.61E+04
5	1.51E+04	1.42E+04
6	1.21E+04	1.13E+04
7	9.59E+03	8.92E+03
8	7.11E+03	6.57E+03
9	5.11E+03	4.68E+03
10	3.27E+03	2.93E+03
11	1.99E+03	1.71E+03
12	1.05E+03	8.25E+02
13	1.27E+03	-
14	-	-
15	-	-

Table 11 Probit values by Evacuation Density

Section	Probit values			
	0.3	0.6	1.0	3.0
1	12.41	9.25	8.69	8.50
2	11.61	8.73	8.12	7.94
3	11.30	8.43	7.35	7.13
4	10.73	7.89	7.02	6.61
5	10.17	7.29	6.40	6.19
6	9.60	6.60	5.67	5.45
7	9.01	5.86	4.88	4.64
8	8.31	4.93	3.88	3.61
9	7.59	3.93	2.77	2.47
10	6.74	2.62	1.27	0.90
11	5.80	1.29	-0.40	-0.90
12	4.74	-0.18	-2.54	-3.35
13	3.75	-1.80	-1.90	-
14	2.82	-3.75	-	-
15	1.91	-6.60	-	-

Table 12 Death probability by Evacuation Density

Section	Death probability (%)			
	0.3	0.6	1.0	3.0
1	100.0	100.0	100.0	100.0
2	100.0	100.0	100.0	99.8
3	100.0	100.0	99.0	98.0
4	100.0	99.8	97.0	94.0
5	100.0	98.0	91.0	88.0
6	100.0	94.0	75.0	67.0
7	100.0	80.0	45.0	35.0
8	100.0	47.0	13.0	8.0
9	99.5	14.0	1.0	0.0
10	95.0	0.0	0.0	0.0
11	78.0	0.0	0.0	0.0
12	39.0	0.0	0.0	0.0
13	10.0	0.0	0.0	0.0
14	1.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0

4. 결론

본 연구에서는 불화수소 누출사고 시나리오를 대상으로 시간 변화에 따른 거리별 불화수소 Cloud의 농도를 대피밀도 4종(0.3m³/Person, 0.6m³/Person, 1.0m³/Person, 3.0m³/Person)에 따른 대피속도를 반영하여 누적 독성 값을 계산하였으며 프로빗 분석을 통한 사망확률을 산정하 불화수소 누출사고에 대한 인명피해예측을 사망확률로 정량화하였으며 실제 사고 발생 시 대피공간에 대한 평가는 공장마다 조건이 상이하므로 구체적인 대피공간을 적용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 단순한 모형의 대피공간을 설정하여 4종의 대피밀도에 대

한 사망확률에 대해 평가하였으며 대피밀도에 변화에 대한 사망확률의 변화를 확인하였으며 인명피해에 대한 정량적 독성평가의 방법론을 제시하였다.

본 연구의 방법을 참고로 산업현장에서 현실의 대피공간 및 대피밀도를 적용하여 다양한 화학물질에 적용한다면 인명피해에 대한 보다 정량적인 평가를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구의 내용을 바탕으로 화학물질 누출사고에 대한 사업장 및 지자체의 비상대응체계 수립에 있어 인명피해 감소대책으로 본 연구의 활용을 기대한다.

참고문헌

1. 화학물질정보시스템, <https://icis.me.go.kr/main.do>
2. 한국산업안전보건공단(2013) “불화수소 누출사고 사례연구”
3. 환경부(2021). 화학물질관리법
4. 환경부(2020). 환경백서
5. 고용노동부(2021). 산업안전보건법
6. 산업통상자원부(2021). 고압가스 안전관리법
7. 소방청(2021). 위험물안전관리법
8. 화학물질안전원(2015). “주민소산계획 작성 안내서”
9. DNV GL, PHAST Quick Start Guide
10. 서동구, 황은경, 황금숙, 조정훈, 권영진 (2008). “EXODUS, SIMULEX를 활용한 피난모델 분석에 관한 연구”, 한국화재소방학회 학술대회 논문집, 춘계, 33-36.
11. 화학물질안전원(2019). “사고시나리오 선정에 관한 기술지침”
12. IES, Simulex User Guide
13. 한국산업안전보건공단(2012). “사고피해영향 평가에 관한 기술지침”, KOSHA GUIDE P-88-2012, P.1~8