

독성물질 누출 시 대피 속도 차이에 따른 고령자의 상대적 위험도 산정

이학태* · 곽종범* · 박제혁* · 류지성** · 이진선** · 정승호***†

Estimation of the Relative Risk of the Elderly with Different Evacuation Velocity in a Toxic Gas Leakage Accident

H. T. Lee* · J. Kwak* · J. Park* · J. Ryu** · J. Lee** · S. Jung***†

†Corresponding Author

Seungho Jung

Tel : +82-31-219-2401

E-mail : processsafety@ajou.ac.kr

Received : April 19, 2019

Revised : September 29, 2019

Accepted : December 9, 2019

Abstract : Leakage accidents in businesses dealing with hazardous chemicals can have a great impact on the workers inside the workplace, as well as residents outside the workplace. In fact, there were cases where hazardous chemicals leaked from many businesses. As a result, the Chemicals Control Act(CCA) was enacted in 2015, the Ministry of Environment introduced an Off-site Risk Assessment(ORA). The purpose of the ORA is to secure safety from the installation of the design of the workplace facilities so that chemical accidents of hazardous chemical handling facilities do not cause human or physical damage outside the workplace. In general, the ORA qualitatively determines where a protected facility is within the scope of the accident scenario. However, elderly who belong to the sensitive group is more sensitive than the general group under the same chemical accident effect, and the extent of the damage is serious. According to data from the Korea National Statistic Office, the number of elderly people is expected to increase steadily. Therefore, a quantitative risk analysis considering the elderly is necessary as a result of a chemical accident. In this study, accident scenarios for 14 locations were set up to perform emergency evacuation due to toxic gas leakage of Cl₂(Chlorine) and HF(Hydrogen Fluoride), and the effects of exposure were analyzed based on the evacuation velocity difference of age 20s and 60s. The ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres) program was used to calculate the concentration for assessing the effects. The time of exposure to toxic gas was calculated based on the time it took for the evacuation to run from the start point to the desired point and a methodology was devised that could be applied to the risk calculation. As a result of the study, the relative risk of the elderly, the sensitive group, needs to be determined.

Key Words : hazardous chemicals, off-site risk assessment, toxic gas leakage, elderly, evacuation velocity, relative risk

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

최근까지 국내 사업장에서 다루고 있는 유해화학물질의 누출 사고가 많이 일어났다. 대표적인 사례로는 2012년 경북 구미, 2013년 경기 화성 소재 사업장, 2016년 충남 금산군에서 일어난 불산 누출사고가 있다¹⁾. 최근 2018년에는 울산에서 염소 가스가 누출되는 사고가 발생하는 등 현재까지 유해화학물질에 대한 사

고는 끊이지 않고 있다. 이러한 누출사고는 사업장 내부의 근로자뿐만 아니라 사업장 주변 지역의 인명과 재산피해를 야기할 수 있다²⁾. 위의 사고사례를 배경으로 유해화학물질을 체계적으로 관리하기 위한 화학물질관리법이 2015년에 시행되면서 장외영향평가제도가 도입되었다.³⁾ 장외영향평가는 유해화학물질 취급시설의 화학사고 발생으로 사업장 외부에 있는 인적, 물적 피해를 일으키지 않도록 취급시설의 설계·설치부터

*아주대학교 환경안전공학과 석사과정 (Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University)

**화학물질안전원 사고예방심사과 (Accident Prevention and Assessment Division, National Institute of Chemical Safety)

***아주대학교 환경안전공학과 교수 (Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University)

안전성을 확보하는 것을 그 목적으로 한다. 화학물질 관리법 제23조제1항에 의하면 취급설비를 설치하여 운영하려는 경우 착공 30일 전에 화학사고 발생으로 사업장 주변의 사람이나 환경에 미치는 영향을 평가한 유해화학물질의 화학 사고에 대한 장외영향평가서를 작성하여 제출한 후 적합을 받아야 설비를 설치할 수 있다. 장외영향평가를 실시하는 화학사고 중 가스의 화재, 폭발에 대해서는 가스기술기준 코드가 존재하고 있다. 가스기술기준 코드 중 한 예로 “가스도매사업 제조소 및 공급소 밖의 배관의 시설·기술·검사·정밀 안전진단 기준”인 KGS FS 451 2018은 국내 가스공급 시설의 제조소 및 공급소 밖의 배관설치·운영 및 검사·감리·진단의 경우에 적용된다. 이 코드의 본문에는 도시가스사업법 제2조제2호 및 제5호를 따르고 있는데 배관을 설치할 경우에는 안전을 확보하기 위해 주택·학교·병원 등 민감 시설에 대해 수평거리 유지 기준이 제시되고 있다. 학교, 복지시설, 병원, 주택 등은 30 m의 수평거리를 유지할 것으로 제시되어 있으나, 상용압력이 1 MPa 미만 혹은 이상인 배관 중 전용 공업지역 및 일반 공업지역 안에 설치하는 배관에 대해서는 15 m의 수평거리를 제시하고 있다. 이처럼 가스의 화재·폭발에 대해서는 코드를 제시함으로써 위험성 평가에 대한 안전 기준을 마련하고 있다.⁴⁾ 하지만 화학사고 중 독성물질 누출에 대한 민감 대상을 고려한 연구가 부족하여 위험성 및 안전성 평가 기준은 존재하고 있지 않기 때문에 누출에 대한 기초적인 연구가 필요한 상황이다.

현재 화학사고의 장외영향평가에서 종합위험도를 결정할 때 개별 취급설비의 위험도는 다음의 수식에서 보이는 것과 같이 사고영향범위 내 인구수와 사고발생 빈도의 조합으로 결정된다⁵⁾.

$$\text{Risk} = \text{Consequence} \times \text{Frequency}^5)$$

위 수식에서 위험도를 결정하는 요인으로 사고영향 범위 내 인구수(Consequence)가 있다. 이는 화학사고 발생 시 독성영향의 범위를 결정하는 기준농도 ERPG (Emergency Response Planning Guidelines)-2를 적용하는 과정에서 인구집단에 대한 노출 민감도를 고려하지 않는다. 하지만 동일한 노출이어도 연령이나 체질 등에 따라 다른 민감도를 보일 수 있다⁵⁾.

특히 민감 계층이라 할 수 있는 고령자는 화학사고에 있어서 악영향을 더 많이 받을 수 있다. 국내 고령자는 사회적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 2018

년 통계청에서 발표한 자료에 의하면 65세 이상 인구가 738만 1천명으로 전체 인구 중 14.3%를 차지하고 있으며, 2026년에는 초고령사회(20.8%)로 진입할 것으로 전망하고 있다. 이처럼 고령자 인구는 지속적인 증가 추세를 보이고 있다^{6,7)}.

이런 사회적 변화를 고려하여 위험도 분석의 사고영향범위 내 인구수에 노출 민감도를 현재보다 더 정밀하게 분석할 필요가 있다. 즉, 화학사고 시나리오에서 젊은 성인층인 20대(19~29세)와 60대(60세 이상)의 사망확률(%)을 비교하고 정량화하는 것이다.

본 연구에서는 화학사고 중 독성물질 누출이 발생했을 때, 20대와 60대의 신체적 능력인 대피 속도 차이를 이용하여 독성물질에 대한 노출 분석을 진행하고 이를 정량화하여 고령자의 상대적 위험도를 산출할 수 있는 방법론을 제안하는 것에 목적을 두고 있다.

2. 연구방법

본 연구 목적인 고령자의 상대적 위험도를 산출하기 위한 방법론을 Fig. 1에 간략히 도식화 하였다. 먼저 20대(19~29세)와 60대(60세 이상)의 대피 속도를 산정하고, 물질에 따라 사고 및 위치 시나리오를 정의한다. 그리고 미국 EPA(Environmental Protection Agency, 이하 EPA)에서 제공하는 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres, 이하 ALOHA)를 이용하여 농도를 산출하고 노출 분석인 Probit 분석을 통해 20대와 60대의 사망확률을 도출한다. 각 단계에 대한 방법론은 하위 항목에서 추가적으로 설명하였다.

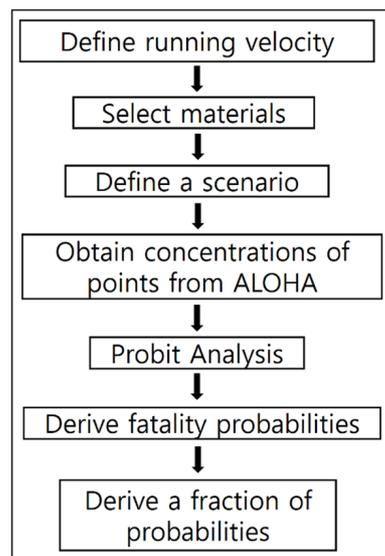


Fig. 1. A flow chart of a methodology.

2.1 대피 속도 산정

20대와 60대의 연령별 대피 속도를 산정하기 위해 통계청에서 제공하고 있는 자료 중 문화체육관광부에서 실시한 2015년 국민체력실태조사를 참고하였다⁸⁾. 이는 통계청에서 가장 최신 자료로 제공하고 있는 것으로 연령별 50 m 달리기 기록을 통계적으로 보여주고 있다. 20대(19~29세)와 60대(60세 이상)에 대한 50 m 달리기 기록을 남녀로 구분하고 각 기록에 대한 평균 값으로 달리기 속도를 구하여 대피 속도를 산정하였다. 이 과정에 대한 대피 속도 산정의 결과는 Table 1~Table 3과 같다.

Table 1. 50 m running records for adult males⁸⁾

Age	Time(second)	
19~24	8.0	8.2
25~29	8.3	
60≤	11.6	

Table 2. 50 m running records for adult females⁸⁾

Age	Time(second)	
19~24	9.9	10.2
25~29	10.5	
60≤	13.8	

Table 3. 50 m average running velocity for adults

Age	Time(second)	Velocity(m/s)
19~29	9.2	5.45
60≤	12.7	3.94

2.2 물질 선정

본 연구의 시나리오 대상 물질은 화학물질관리법 제 39조에 따른 사고대비물질 97종 중 화학물질관리법이 제정·시행되도록 한 배경물질인 43번 HF(Hydrogen fluoride)와 국내에서 많이 사용되고 누출 사례가 있었던 49번 Cl₂(Chlorine)로 하였다⁹⁾.

2.3 사고 및 위치 시나리오 선정

시나리오는 Fig. 2에서 보이는 것처럼 독성물질이 누출된 상황에서 누출원로부터 100 m 지점에 있는 사람이 특정 지점까지 대피하는 상황을 가정하였다. 여기서 특정 지점이란 100 m부터 50 m 단위로 증가시킨 지점을 말하며 이 거리를 800 m까지 증가시켜 14개의 위치 시나리오를 지정하였다. 보수적인 접근을 위해 각 지점에서의 물질 농도는 누출 후 최대 농도로 가정하였으며 50 m 단위 각 지점 이하에서는 최대 농도

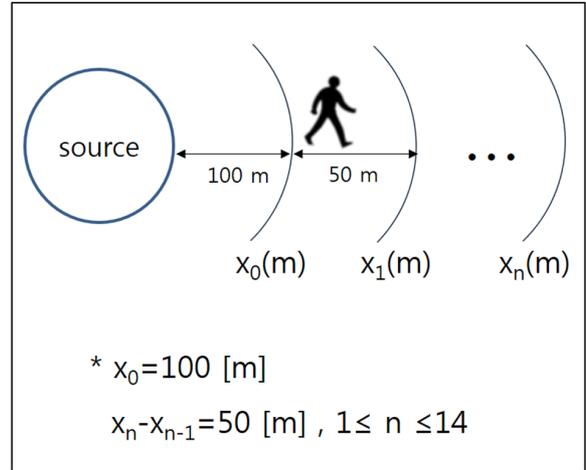


Fig. 2. Accident & position scenario.

Table 4. Scenario conditions

The alternative-case scenario	
Wind velocity(m/s)	3
Atmosphere stability	D
Temperature(°C)	25
Roughness	Urban
Relative humidity(%)	50
The worst-case scenario	
Wind velocity(m/s)	1.5
Atmosphere stability	F
Temperature(°C)	25
Roughness	Urban
Relative humidity(%)	50

의 끝점 거리로 보고 노출 분석을 진행하였다. Table 4는 사고시나리오에서 사용되는 조건을 정리한 것이다.

사고시나리오 선정은 장외영향평가서에서 사용하는 풍속(m/s), 대기안정도, 온도(°C), 상대습도(%) 등의 조건을 맞추기 위해 환경부의 화학물질안전원에서 공시한 사고시나리오 선정에 관한 기술지침의 최악 및 대안의 사고시나리오 조건을 일부 인용하였다. 위 기술지침에 따르면 시나리오 조건 중 대안의 사고시나리오 대기온도와 습도 부분은 위험성 평가를 실시하고자 하는 지역의 최소 1년간 평균값을 적용한다. 하지만 현지 기상을 적용하지 않는 경우, 대기온도 25°C, 대기습도 50%를 적용한다. 이 연구는 특정 지역을 대상으로 한 것이 아니기 때문에 현지기상을 적용하지 않는 경우의 조건을 적용하였다¹⁰⁾.

표면저질기는 대부분의 사람들이 공업단지 혹은 도시지역에서 상주하고 있다는 가정으로 urban and forest를 설정하였다.

2.4 거리별 농도 산출

앞에서 설정한 위치 시나리오 14개의 각 특정 지점인 x_n 의 농도를 측정하기 위해 미국 EPA에서 제공하는 ALOHA 프로그램을 이용하였다. Source model은 Direct source를 이용하였으며 누출원 높이는 1 m, 누출 시간 10분, 누출률(D_r , Discharge rate)은 0.5~10 kg/s 범위에서 0.5 kg/s 단위로 증가시켰다. 특정 지점 x_n 의 농도는 프로그램의 Display-Threat at point 탭에 있는 concentration location에서 풍하방향(Downwind direction) X를 150~800 m까지 50 m 단위로 증가시켜 산출하였다. 14개의 위치 시나리오 기반으로 농도를 산출하는 과정은 물질당 560번의 시뮬레이션을 실행하여 두 가지 물질에 대하여 총 1120번의 시뮬레이션을 진행하였다.

2.5 Probit analysis

Probit analysis는 화재, 폭발, 누출 등의 여러 가지 노출에 대한 투여 반응 곡선을 S형에서 선형으로 전환시켜 정량적인 노출 분석을 할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 독성물질 누출에 대한 시나리오를 기반으로 진행되었기 때문에 독성물질 노출에 대한 probit analysis를 진행하였다.

수식 (1)~(4)는 확률단위변수(Y), probit과 확률변환식으로 노출 분석에서 사용된다. 식 (1)의 확률단위변수(Y)에서 사용되는 k_1, k_2, n 은 probit 상수로서 물질마다 실험적으로 정해진다. 이 값들은 Table 5에 정리하여 제시하였으며 네덜란드 왕립 연구소인 RIVM에서 발간한 ‘Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2’에서 인용하였다.¹¹⁾ V는 dose 값으로 개체에 노출되는 농도를 probit 상수 n의 지수승하여 식 (3)의 노출시간(t_{exp})을 곱해주는 것으로 정의한다. 여기서 위치 시나리오의 거리가 증가함에 따라 해당 지점의 농도만큼 노출시간(t_{exp})을 곱하여 합산해주어야 한다. 위치 시나리오를 설정할 때 50 m 단위로 시나리오 수를 나누었기 때문에 t_{exp} 는 Table 6에 나타난 것과 같다. t_r 은 사람이 사고 발생을 인식하고 대피를 시작하기까지 걸리는 시간이다. TNO Greenbook에서 Hymes는 Spain의 Los Alfaques에서 일어난 사고를 분석했을 때 사람이 행동을 개시하기까지 5초의 시간이 걸린다고 하였다.^{12,13)} 이 시간은 화재에 대한 복사열을 기준으로 조사를 한 것이지만 독성물질의 경우도 화재와 같이 비상경보를 울렸다는 가정을 설정하였기 때문에 이것을 인용하여 t_r 을 5 s로 설정하였다.

식 (2)와 (3)을 이용하여 식 (1)로부터 확률단위변수(Y), probit 값을 구하게 되면 식 (4)를 이용하여 사망확

Table 5. Probit parameters for the toxicity of a substance¹¹⁾

Substance	k_1	k_2	n
Cl ₂	-4.81	0.5	2.75
HF	-8.62	1	1.5

Table 6. 50 m exposure time for adults

Age	t_{exp} (minute)
19~29	0.236
60≤	0.295

률(%)을 도출할 수 있다.^{14,15)} 이렇게 나온 사망확률(%)을 20대와 60대로 나누어 P_1, P_2 로 놓고 식 (5)에 대입하여 구한 f_r 을 60대의 상대적 위험도 비 혹은 factor로 정의한다.

$$Y = k_1 + k_2 \cdot \ln V \tag{1}$$

$$V(Dose) = \sum C^m \cdot t_{exp} \tag{2}$$

$$t_{exp} = \frac{1}{60} \left[t_r + \frac{(x_n - x_{n-1})}{u} \right] \tag{3}$$

- Where, k_1, k_2, n : Probit parameters
- C : Concentration(ppm)
- t_{exp} : Exposure time(min)
- t_r : Reaction time(s) = 5 s
- $x_n - x_{n-1}$: Running distances(m) = 50 m
- u : Running velocity(m/s)

$$P = 50 \left[1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf} \left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{4}$$

$$f_r = \frac{P_2}{P_1} \tag{5}$$

- Where, Y : Probit factor
- P_n : The probability of a fatality
- f_r : The fraction of a relative risk

3. 연구결과 및 고찰

본 연구결과는 방법론에서 제시한 순서대로 노출 분석을 하여 대안 및 최악의 사고시나리오 조건에서 Cl₂와 HF의 누출률(D_r)에 따른 상대적 위험도 비(f_r) 함수식을 도출하였다. Table 7~8은 4개의 대표적인 거리의 사망확률을 보여준다. 이는 결과에 대한 이해를 높이

Table 7. A fatality of a Cl₂ exposure depending on a desired distance

Discharge rate (kg/s)	Alternative-case scenario								Worst-case scenario							
	200 m		400 m		600 m		800 m		200 m		400 m		600 m		800 m	
	Age 20	Age 60	20	60	20	60	20	60	20	60	20	60	20	60	20	60
0.5	0.30	0.42	0.38	0.53	0.39	0.54	0.39	0.54	5.63	7.01	6.30	7.79	6.36	7.86	6.37	7.87
1.0	2.03	2.64	2.44	3.15	2.49	3.20	2.50	3.22	26.61	30.37	28.21	32.06	28.32	32.19	28.35	32.21
1.5	5.22	6.51	6.07	7.51	6.16	7.62	6.18	7.65	49.02	53.44	50.75	55.16	50.87	55.27	50.89	55.30
2.0	9.39	11.39	10.68	12.86	10.81	13.01	10.85	13.05	66.34	70.29	67.83	71.69	67.92	71.78	67.94	71.79
2.5	14.14	16.77	15.81	18.63	15.98	18.82	16.02	18.87	77.99	81.13	79.15	82.18	79.22	82.24	79.23	82.26
3.0	19.24	22.42	21.21	24.57	21.41	24.78	21.46	24.83	85.59	87.96	86.45	88.72	86.50	88.76	86.51	88.76
3.5	24.09	27.67	26.32	30.06	26.54	30.29	26.59	30.35	90.42	92.17	91.06	92.72	91.09	92.75	91.10	92.75
4.0	29.14	33.05	31.54	35.57	31.77	35.82	31.82	35.87	93.55	94.83	94.02	95.22	94.04	95.24	94.04	95.25
4.5	34.10	38.25	36.61	40.85	36.84	41.09	36.90	41.15	95.56	96.51	95.91	96.79	95.93	96.81	95.93	96.81
5.0	38.54	42.84	41.12	45.48	41.36	45.72	41.42	45.78	96.89	97.59	97.16	97.80	97.17	97.82	97.17	97.82
5.5	42.74	47.12	45.36	49.77	45.61	50.02	45.66	50.07	97.80	98.32	98.00	98.48	98.01	98.48	98.01	98.48
6.0	46.97	51.38	49.55	53.97	49.79	54.20	49.84	54.26	98.41	98.80	98.56	98.92	98.57	98.93	98.57	98.93
6.5	51.02	55.42	53.55	57.93	53.78	58.15	53.84	58.20	98.85	99.14	98.97	99.23	98.97	99.24	98.97	99.24
7.0	54.40	58.76	56.90	61.20	57.13	61.42	57.18	61.47	99.13	99.36	99.22	99.43	99.23	99.43	99.23	99.43
7.5	57.72	62.00	60.17	64.38	60.39	64.59	60.44	64.64	99.35	99.53	99.42	99.58	99.43	99.59	99.43	99.59
8.0	60.55	64.75	62.97	67.07	63.18	67.27	63.22	67.31	99.49	99.63	99.55	99.67	99.55	99.68	99.55	99.68
8.5	63.45	67.53	65.76	69.73	65.96	69.92	66.01	69.97	99.60	99.71	99.65	99.75	99.65	99.75	99.65	99.75
9.0	66.03	69.99	68.29	72.13	68.48	72.31	68.53	72.35	99.68	99.78	99.73	99.81	99.73	99.81	99.73	99.81
9.5	68.43	72.26	70.59	74.29	70.78	74.46	70.82	74.50	99.74	99.82	99.78	99.84	99.78	99.85	99.78	99.85
10	70.64	74.34	72.72	76.27	72.89	76.43	72.93	76.47	99.80	99.86	99.82	99.88	99.83	99.88	99.83	99.88

Table 8. A fatality of a HF exposure depending on a desired distance

Discharge rate (kg/s)	Alternative-case scenario								Worst-case scenario							
	200 m		400 m		600 m		800 m		200 m		400 m		600 m		800 m	
	Age 20	Age 60	20	60	20	60	20	60	20	60	20	60	20	60	20	60
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1.68	2.85	3.55	5.67	4.10	6.45	4.32	6.77
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	13.92	19.43	22.21	29.34	24.20	31.62	24.99	32.52
1.5	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.05	0.02	0.05	31.73	39.99	43.80	52.61	46.38	55.21	47.38	56.19
2.0	0.03	0.06	0.08	0.18	0.10	0.21	0.11	0.22	48.41	57.21	60.95	69.13	63.43	71.39	64.36	72.23
2.5	0.10	0.20	0.25	0.49	0.30	0.57	0.32	0.61	61.39	69.53	72.87	79.68	74.99	81.48	75.77	82.14
3.0	0.23	0.46	0.57	1.05	0.67	1.21	0.71	1.28	71.34	78.37	81.14	86.54	82.86	87.90	83.48	88.40
3.5	0.47	0.88	1.07	1.89	1.24	2.16	1.31	2.27	78.64	84.51	86.71	90.89	88.06	91.92	88.55	92.29
4.0	0.82	1.47	1.78	3.01	2.04	3.41	2.15	3.57	84.00	88.80	90.55	93.76	91.61	94.53	91.98	94.80
4.5	1.32	2.28	2.71	4.43	3.08	4.97	3.23	5.19	87.97	91.85	93.22	95.67	94.03	96.24	94.32	96.44
5.0	1.96	3.28	3.87	6.12	4.36	6.83	4.56	7.11	90.81	93.95	95.04	96.93	95.68	97.36	95.90	97.51
5.5	2.75	4.48	5.24	8.06	5.86	8.93	6.11	9.27	92.95	95.49	96.34	97.79	96.83	98.12	97.01	98.23
6.0	3.69	5.86	6.79	10.21	7.56	11.24	7.86	11.64	94.57	96.61	97.28	98.40	97.66	98.65	97.80	98.73
6.5	4.75	7.38	8.49	12.49	9.40	13.67	9.75	14.14	95.75	97.41	97.94	98.82	98.25	99.01	98.35	99.07
7.0	5.96	9.07	10.35	14.91	11.39	16.24	11.80	16.76	96.67	98.01	98.44	99.12	98.68	99.27	98.76	99.32
7.5	7.29	10.88	12.34	17.45	13.52	18.93	13.98	19.50	97.37	98.46	98.80	99.34	98.99	99.45	99.06	99.49
8.0	8.73	12.80	14.44	20.07	15.75	21.68	16.26	22.30	97.90	98.80	99.07	99.50	99.22	99.59	99.27	99.62
8.5	10.27	14.81	16.61	22.72	18.05	24.45	18.60	25.11	98.33	99.06	99.28	99.62	99.40	99.69	99.44	99.71
9.0	11.91	16.91	18.86	25.42	20.41	27.24	21.01	27.94	98.65	99.25	99.43	99.70	99.53	99.76	99.56	99.78
9.5	13.58	19.01	21.11	28.06	22.76	29.97	23.40	30.70	98.91	99.40	99.55	99.77	99.63	99.81	99.66	99.83
10	15.34	21.17	23.40	30.71	25.15	32.70	25.82	33.46	99.11	99.52	99.64	99.82	99.71	99.85	99.73	99.87

고 각 시나리오에 따른 연령별 사망확률의 경향을 보여주기 위해 제시되었다. Fig. 3~6의 그래프는 모든 위치 시나리오에 대하여 어떠한 값을 읽거나 구분하기보다 위치 시나리오의 유사한 경향성을 보이기 위하여 제시되었다. 14개의 위치 시나리오의 수식에 대한 결과는 Table 9~10에 정리하여 나타내었다.

3.1 Chlorine : 대안 및 최악의 사고시나리오

대안의 사고시나리오 조건에서 위치 시나리오 결과인 Fig. 3을 보면 Cl₂의 누출률(D_r)에 따른 상대적 위험도 비(f_r)가 거의 겹쳐지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4를 보면 최악의 사고시나리오 조건에서 위치 시나리오 결과인 Cl₂의 누출률(D_r)에 따른 상대적 위험도 비(f_r)가 Fig. 3과 유사한 경향을 보인다. Fig. 3~4에서 350 m

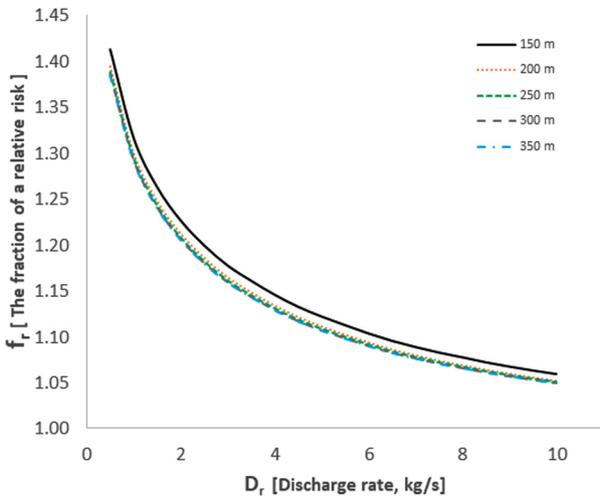


Fig. 3. A graph of a relative risk of Cl₂ in the alternative-case scenario.

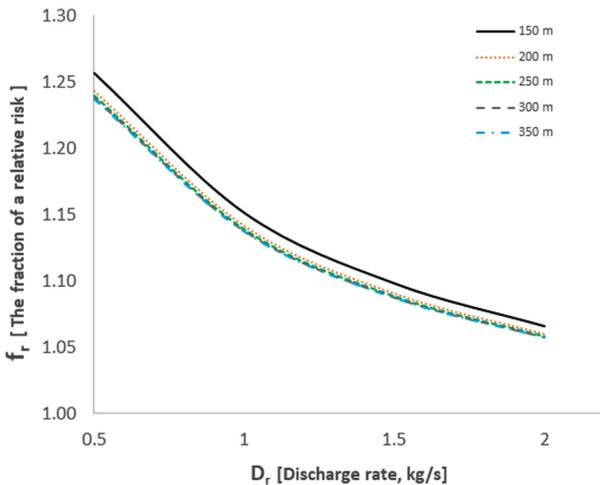


Fig. 4. A graph of a relative risk of Cl₂ in the worst-case scenario.

Table 9. A function of a relative risk of Cl₂

A desired distance (m)	Function : $f_r = a \cdot D_r^b$					
	Alternative-case scenario			Worst-case scenario		
	a	b	R ²	a	b	R ²
150	1.314	-0.096	0.998	1.154	-0.12	0.998
200	1.297	-0.094	0.998	1.145	-0.116	0.998
250	1.291	-0.093	0.997	1.142	-0.115	0.998
300	1.289	-0.092	0.997	1.141	-0.114	0.998
350	1.287	-0.092	0.997	1.141	-0.114	0.998
400	1.287	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
450	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
500	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
550	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
600	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
650	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
700	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
750	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
800	1.286	-0.092	0.997	1.140	-0.114	0.998
Average	1.289	-0.093	0.997	1.142	-0.115	0.998

이상은 거의 동일한 그래프를 보이기 때문에 생략하였으며 14개의 위치 시나리오 경향성은 Table 9에 수식으로 제시하였다.

Table 9는 대안 및 최악의 사고시나리오 조건에서 각 특정 지점의 위치 시나리오에 대한 그래프를 거듭 제곱의 함수식으로 표현하고 평균값을 도출한 것이다.

대안의 사고시나리오 조건에서는 식 (4)를 통해 노출분석을 하면 누출률(D_r)이 1 kg/s 미만일 경우, 사망확률(%)이 연령에 상관없이 1% 미만이다. 따라서 누출률(D_r)이 1 kg/s 이상인 범위에서 식 (6)을 적용하는 것이 적합하다.

$$f_r = 1.289 \cdot D_r^{-0.093} \tag{6}$$

[Range : 1 ≤ D_r]

최악의 사고시나리오 조건에서는 누출률(D_r)이 2 kg/s를 초과할 때, 노출 분석을 하면 20대와 60대 모두 유사한 사망확률(%)을 보여 상대적 위험도 비(f_r)가 1로써 수렴한다. 따라서 1로 수렴하는 부분을 제외하고 약 1.1부터 나타나는 지점부터 정밀한 차이를 보기 위해 누출률(D_r)이 0.5 kg/s~2.0 kg/s인 범위에서 식 (7)을 적용하는 것이 적합하다.

$$f_r = 1.142 \cdot D_r^{-0.115} \tag{7}$$

[Range : 0.5 ≤ D_r ≤ 2.0]

3.2 Hydrogen fluoride: 대안 및 최악의 사고시나리오

Fig. 5는 대안의 사고시나리오 조건에서 위치 시나리오 결과인 HF의 누출률(D_r)에 따른 상대적 위험도 비(f_r)를 나타내는 그림이다. 결과를 보면 가장 위쪽에 존재하는 150 m 위치 시나리오가 조금 떨어져 있지만 대체로 겹쳐지는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 최악의 사고시나리오 조건에서 위치 시나리오 결과인 HF의 누출률(D_r)에 따른 상대적 위험도 비(f_r)를 나타내는 그림이다. 대안의 사고시나리오 결과와 유사하게 가장 위쪽에 존재하는 150 m 위치 시나리오가 조금 떨어져 있는 경향이 있지만 대체로 그래프가 서로 근접한 것을 볼 수 있다. Fig. 5~6에서 400 m 이상은 거의 동일한 그래프를 보이기 때문에 생략하였으며 14개의 위치 시나리오 경향성은 Table 10에 수식으로 제시하였다.

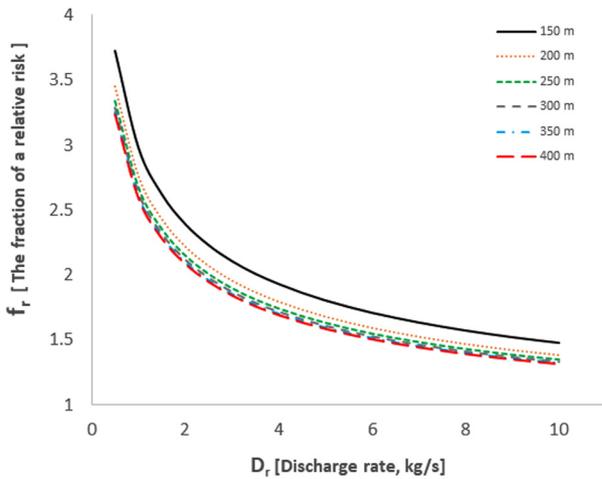


Fig. 5. A graph of a relative risk of HF in the alternative-case scenario.

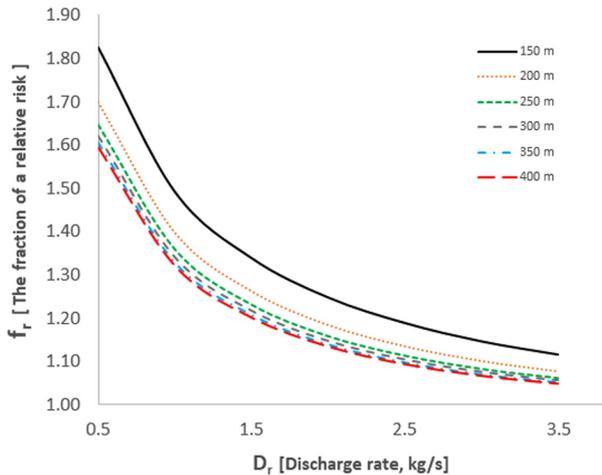


Fig. 6. A graph of a relative risk of HF in the worst-case scenario.

Table 10. A function of a relative risk of HF

A desired distance (m)	Function : $f_r = a \cdot D_r^b$					
	Alternative-case scenario			Worst-case scenario		
	a	b	R ²	a	b	R ²
150	2.966	-0.308	1	1.506	-0.254	0.994
200	2.747	-0.304	0.999	1.412	-0.236	0.989
250	2.663	-0.301	0.999	1.377	-0.227	0.987
300	2.620	-0.300	0.999	1.358	-0.222	0.985
350	2.594	-0.299	0.999	1.347	-0.218	0.984
400	2.578	-0.299	0.999	1.340	-0.216	0.983
450	2.566	-0.299	0.999	1.335	-0.215	0.982
500	2.558	-0.298	0.999	1.331	-0.214	0.982
550	2.552	-0.298	0.999	1.329	-0.213	0.982
600	2.547	-0.298	0.999	1.327	-0.212	0.981
650	2.543	-0.298	0.999	1.325	-0.211	0.981
700	2.540	-0.298	0.999	1.323	-0.211	0.981
750	2.538	-0.298	0.999	1.322	-0.211	0.981
800	2.535	-0.298	0.999	1.321	-0.210	0.981
Average	2.610	-0.300	0.999	1.354	-0.219	0.984

Table 10은 대안 및 최악의 사고시나리오 조건에서 각 특정 지점의 위치 시나리오에 대한 그래프를 거듭 제곱의 함수식으로 표현하고 평균값을 도출한 것이다.

대안의 사고시나리오 조건에서는 식 (4)를 통해 노출 분석을 하면 누출률(D_r)이 4 kg/s 이상일 때, 대부분의 위치 시나리오에서 사망확률(%)이 1%를 초과하게 된다. 따라서 누출률(D_r)이 4 kg/s 이상인 범위에서 식 (8)을 적용하는 것이 적합하다.

$$f_r = 2.610 \cdot D_r^{-0.3} \quad (8)$$

[Range : $4 \leq D_r$]

최악의 사고시나리오 조건에서는 누출률(D_r)이 3.5 kg/s일 때, 14개의 위치 시나리오 중 50% 이상이 상대적 위험도 비(f_r)가 약 1.1이상인 결과가 도출된다. 따라서 염소의 결과와 마찬가지로 정밀한 차이를 보기 위해 누출률(D_r)이 0.5 kg/s~3.5 kg/s인 범위에서 식 (9)를 적용하는 것이 적합하다.

$$f_r = 1.354 \cdot D_r^{-0.219} \quad (9)$$

[Range : $0.5 \leq D_r \leq 3.5$]

3.3 사고시나리오 결과에 따른 응용 및 해석

본 연구에서는 장외영향평가 제도의 선행연구에서 지적인 개별 취급설비의 위험도 결정 시 사고 영향범

위 내 인구수 산정의 불확실성을 현재보다 정밀하게 보완할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이 방법론에서는 민감계층이라 할 수 있는 고령자를 60대(60세 이상)로 분류하고 젊은 층이라 할 수 있는 20대(19~29세)와 신체적 능력의 차이에 따른 상대적 위험도 비 혹은 factor를 도출하는 목적을 가지고 있다.

Table 7~8에서 나타난 것과 같이 누출률에 따라 특정 지점에 대한 사망확률(%), P가 달라지는 것을 알 수 있다. 이런 이유로 결과에서 누출률에 따른 상대적 위험도 비를 도출할 수 있는 함수식을 물질과 시나리오 별로 도출하였다.

함수식 (6)~(9)은 Cl₂와 HF의 대안 및 최악의 사고시나리오 조건에 따라 위험도 계산에 응용할 수 있다. 이를테면 사고빈도가 10⁻²/yr이고, 대안의 사고시나리오 누출률이 D₁인 Cl₂를 취급하는 A 설비의 위험도를 평가할 때, 사고영향 범위 내 인구수(N₁)를 일반 성인을 기반으로 한다면 Risk₁ = N₁ × 10⁻²으로 계산이 될 것이다.

여기서 식 (6) $f_r = 1.289 \cdot D_r^{-0.093}$ 을 적용할 경우 $f_{r1} = 1.289 \cdot D_1^{-0.093}$ 이 도출이 되며, 사고영향 범위 내 인구수, N₁에 f_{r1} 을 곱함으로써 새로운 사고 영향범위 내 인구수, N₂가 나오게 된다. 이것을 식으로 정리하면 Risk₂ = N₂ × 10⁻²와 같이 새로운 위험도를 구할 수 있는데 이를 상대적인 최종 위험도로 볼 수 있다. 이러한 방식으로 다른 식 (7)~(9)도 적용한다면 상대적인 위험도 분석을 더욱 정밀하게 할 수 있을 것이다.

위와 같은 방식으로 연구결과에서 도출된 함수식을 적용할 수도 있다. 그러나 20대 대비 60대의 상대적 위험도를 Table 11에서 제시한 수치적인 평균값으로써 나타낸다면 대안 및 최악의 사고시나리오의 각 물질별 상대적 위험도 비의 범위를 정리해볼 수 있다. Cl₂의 대안의 사고시나리오에서 상대적 위험도 비는 1.05~1.32의 범위를 나타내고, 최악의 사고시나리오에서는 1.06~1.26의 범위를 나타낸다. HF의 대안의 사고시나리오에서 상대적 위험도 비는 1.30~1.92의 범위를 나타내고 있으며, 최악의 사고시나리오에서는 1.04~1.83의 범위를 나타낸다. 각 범위에 대한 수치적인 값들은 하나의 factor로 적용될 수 있는데 사고시나리오에 관계

Table 11. A factor of a relative risk

Substance	Scenario	Factor [Range]	Maximum value
Cl ₂	Alternative-case	1.05~1.32	1.3
	Worst-case	1.06~1.26	
HF	Alternative-case	1.30~1.92	1.9
	Worst-case	1.04~1.83	

없이 위험성을 평가할 때, 보수적인 결과를 도출하려면 가장 높은 값을 인용하여 사고 영향범위 내 인구수를 보정할 수 있다.

4. 결론

고령자는 일반 젊은 층에 비해 세월이라는 시간이 흐를수록 신체적 능력이 감퇴된다는 것은 누구나 알고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 신체적 능력의 차이는 달리기 속도의 차이를 바탕으로 하였으며 이를 노출 분석에 적용시킨 결과, 정밀한 차이까지 보면 1배 수를 조금 넘는 소숫점 배수의 차이부터 약 2배 수까지의 차이가 나타남을 알 수 있었다. 이를 응용하기 위한 방법은 함수식 이용, 범위에 따른 최댓값 이용이 있는데 정밀·정확한 결과를 보기 위해서는 함수식을 이용하는 것이 적절하고, 보수적인 위험성 평가를 위해서는 최댓값 인용이 적합한 것으로 판단한다.

하지만 이 연구에서 제안된 방법론은 두 가지 한계점을 가지고 있으며 해결방안이 필요하다.

첫 번째로 누출률(D_i)에 따른 특정 지점과 농도를 불연속적으로 구하여 dose 값으로 합산한 것이다. 실제로 누출이 일어난다면 어느 지점의 농도는 주변 기상조건과 환경에 따라 연속적으로 변할 것이기 때문에 이에 맞는 dose 값을 연속함수의 적분으로 계산해야 한다는 것이다. 이를 좀 더 보완하는 첫 단계로서 Fig. 7에서 제시하는 방식의 알고리즘을 프로그래밍하여 노출 분석을 하는 것이다.

알고리즘은 위험성 평가를 실시할 물질 입력을 시작으로 물질의 비중이나 누출 특성에 따라 누출·확산 모델을 continuous(plume) 모델 혹은 instantaneous(puff) 모델 중 선택하게 된다. 다음으로 누출에 따른 노출평가를 실시할 관심 지점을 선택하여 해당 지점의 농도를 연속적으로 산출하고 개체의 신체적 능력을 입력하게 되면 특정 지점 간 간격에 국한되는 것이 아닌 상대적인 노출평가를 할 수 있게 된다. 이처럼 기본 알고리즘을 바탕으로 원하는 물질과 그에 해당하는 probit parameter만 데이터베이스로 구축해 놓는다면 기존의 정량적 위험성 평가 프로그램에서 사용하는 농도 산출 방식으로 상대적인 노출 분석을 할 수 있을 것이다.

두 번째로 민감 계층의 노출을 좀 더 정밀하게 분석하기 위해서는 신체적 능력 중 달리기 속도 외에도 호흡률, 병력, 물질에 대한 인체 유해성 등의 통계적 자료를 종합적으로 고려해야 한다는 것이다. 이러한 종합적인 연구를 위해서는 화학물질에 대한 생물학적 실험 데이터와 인체의 건강실태 및 그 작용기전 등의 복

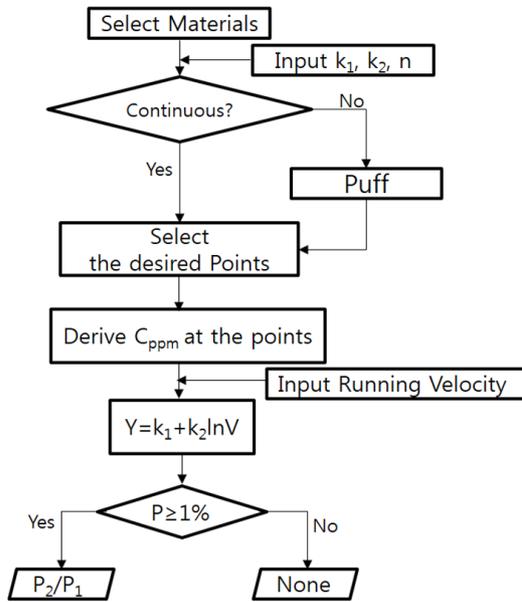


Fig. 7. A flow algorithm of a relative risk estimation.

합적인 선행연구들이 진행될 필요가 있다고 본다.

이 연구 의의는 동일한 독성물질 누출 상황 하에서 신체적 능력의 차이를 바탕으로 상대적인 노출 분석을 진행한 것에 있다. 따라서 본 연구의 접근법에서 민감 계층 중 고령자를 고려한 화학물질 사고의 위험도를 정밀 분석할 수 있는 연구의 또 다른 발판이 될 수 있다.

References

- 1) W. S. Choi and J. B. Back, "Risk Analysis of Off-site Risk Assessment using Vulnerability by Environmental medium", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 5, pp. 150-156, 2018.
- 2) S. Park and S. Jung, "Recommended Evacuation Distance for Off-site Risk Assessment of Ammonia Release Scenarios", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 3, pp. 156-161, 2016.
- 3) M. S. Kim, J. Y. Kim, E. B. Lee, J. Yoon, J. H. Park, "Effect of Proof Test of Protective System on Securing Safety of Off-site Risk Assessment", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 6, pp. 46-53, 2017.

- 4) KGS Committee, "Facility/Technical/Inspection/Safety Diagnosis/Safety Assessment Code for Pipelines outside Manufacturing Plants outside Manufacturing Plants and Supply Stations for Wholesale Gas Business", KGS Code, pp. 1-33, 2018.
- 5) W. Choi, T. Ryu, S. Kwak, H. Lim, J. Jung, J. Lee, J. Kim, J. Baek, J. Yoon, J. Ryu, "Discussion for Improvement of Decision System of Total Risk in Off-site Risk Assessment", Journal of the Korean Society of Environmental Health, Vol. 44, No. 3, pp. 217-226, 2018.
- 6) H. R. Hong, D. G. Seo, Y. Hasemi, Y. J. Kwon, "A Study on the Walking Speed of Crowd for Safety Evacuation Design of the Elderly", Journal of the Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 19-26, 2011.
- 7) KOSTAT, "2018 Elderly Statistics", p. 21, 2018.
- 8) KOSTAT, "50 m Running : Male, Female", 2015.
- 9) National Institute of Chemical Safety, "Criteria for Application of Accident Related Substances and Calculation of Quantity", p. 8, 2017.
- 10) National Institute of Chemical Safety, "Technical Guidelines for Selecting Accident Scenarios", pp. 3-7, 2014.
- 11) RIVM, "Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2 - Introduction", National Institute for Public Health and the Environment of Netherlands, p. 26, 2009.
- 12) TNO, "Methods for the Determination of Possible Damage CPR 16E", pp. 32-34, 1992.
- 13) I. J. M. Trijssenaar Buhre, I. M. E. Raben, T. Wiersma and S. I. Wijnant, "Self-rescue in Quantitative Risk Analysis", TNO, Apeldoorn, the Netherland, 2009.
- 14) RIVM, "Guideline for Quantitative Risk Assessment CPR 18E", Netherland, pp. 112-116, 2005.
- 15) D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", Pearson Higher Education, pp.76-80, 2012.