

화학사고 피해 판정에서 건강위해성평가의 역할과 한계에 대한 소고

정지윤¹ · 박시현¹ · 최재원¹ · 이철민¹ · 윤성원^{1*}

¹서경대학교 환경화학공학과

A Review on the Role and Limitations of Health Risk Assessment in Determining Damages from Chemical Accidents

Ji-Yun Jung¹ · Si-Hyun Park¹ · Jae-Won Choi¹ · Cheol-Min Lee¹ · Sung-Won Yoon^{1*}

¹*Department of Environmental & Chemical Engineering, Seokyeong University*

ABSTRACT

Objectives: This review examined the current status and limitations of chemical accident damage determination systems and explored the potential role of health risk assessment in supporting more scientific and objective damage determination. Particular attention was given to personal-oriented exposure modeling (POEM), multimedia and multi-route exposure assessment, and aggregate risk assessment.

Methods: A narrative literature review was conducted using domestic and international databases, including PubMed, Web of Science, Google Scholar, KISS, and DBpia, together with relevant guidelines and government reports. The literature was reviewed with a focus on existing chemical accident damage determination approaches, individual exposure assessment, health risk assessment, and multimedia and multi-route exposure assessment.

Results: Conventional damage determination approaches are useful for rapid emergency response and identification of potentially affected populations; however, they have limitations in reflecting individual exposure characteristics, spatial and temporal variability, and cumulative exposure through multiple pathways. Integrating atmospheric dispersion modeling, environmental monitoring data, and personal location and activity information through POEM may improve the estimation of individual exposure levels and help identify highly exposed individuals and prioritize further investigation. Multimedia and multi-route exposure assessment may also complement acute exposure assessment by evaluating potential health risks associated with residual contamination and longer-term exposure.

Conclusions: Health risk assessment should be considered a scientific decision-support tool rather than a single criterion for chemical accident damage determination. Because uncertainties exist in exposure models and input data, health risk assessment alone cannot establish individual damage, causality, or eligibility for compensation. Therefore, health risk assessment should be integrated with environmental monitoring, clinical and epidemiological evidence, and administrative judgment to support the identification of highly exposed individuals, prioritization of further investigations, health impact assessment, and post-accident health management.

Key words: Chemical accident, damage determination, health effects, risk assessment

*Corresponding author: Sung-Won Yoon, Tel: 02-940-2913, E-mail: ss5372@skuniv.ac.kr
Department of Environmental & Chemical Engineering, Seokyeong University, 124, Seogyong-ro, Seongbuk-ku, Seoul, Republic of Korea, Seokyeong Univ. Yudam Building, Rm# 1504

Received: August 2, 2026 Revised: August 20, 2026, Accepted: August 20, 2026

 Ji-Yun Jung <http://orcid.org/0009-0004-8455-3442>

 Jae-Won Choi <http://orcid.org/0009-0004-3659-0070>

 Sung-Won Yoon <http://orcid.org/0000-0003-2276-2463>

 Si-Hyun Park <http://orcid.org/0000-0001-8578-9060>

 Cheol-Min Lee <http://orcid.org/0000-0003-2276-2463>

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.

I. 서론

산업화와 화학물질 사용의 증가에 따라 화학사고의 발생 빈도와 규모는 지속적으로 증가 및 확대되고 있으며, 이러한 사고는 단기간에 광범위한 지역에 영향을 미치면서 인체 건강과 환경에 중대한 위해를 초래하고 있다(Michele & Catherine, 2024; Lunn et al., 2025). 특히, 화학사고는 고농도의 유해화학물질의 노출을 동반하는 경우가 많아 사고 발생 직후의 신속한 비상대응과 더불어, 노출 인구에 대한 정확한 범위와 피해 수준의 판정이 중요한 사회적·정책적 과제로 대두되고 있다(Michele & Catherine, 2024; Moon et al., 2025).

현재 화학사고 피해 판정은 주로 사고 지점으로부터의 거리, 주민 신고, 임상증상 여부 및 건강영향 여부, 또는 환경 중 오염물질 농도와 같은 행정적·경험적 기준에 기반하여 이루어지고 있다. 이러한 접근은 사고 초기 신속한 대응과 관리에는 유용하지만, 실제 개인의 노출 수준과 건강 위해를 정밀하게 반영하는 데에는 한계가 있다(Vandenberg et al., 2022; Michele & Catherine, 2024). 특히, 동일한 사고 영향권 내에서도 기상조건, 지형, 건물 구조, 개인의 활동패턴 및 체류 시간 등에 따라 노출 수준이 크게 달라질 수 있음에도 불구하고, 기존의 판정 방식은 이러한 시·공간적 변동성과 개인 간 차이를 충분히 고려하지 못하고 있는 실정이다(Vandenberg et al., 2022).

또한 화학사고로 인한 유해화학물질의 인체 노출은 사고 직후의 일시적인 단기 노출에 국한되지 않고, 환경 매체 내 잔류 및 매체 간 전이, 오염된 식수 및 식품 섭취 등을 통해 장기간 지속적으로 누적될 수 있고, 만성적인 건강 위해로 이어질 가능성이 있다. 그러나 기존 피해 판정 체계는 주로 단기간의 단일 노출경로, 특히 흡입 노출 중심으로 이루어지는 경우가 많아, 경구 및 경피 노출을 포함한 다경로에 따른 장기간 누적 총 노출량을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다(Hong et al., 2020).

특정 화학물질 노출에 따른 건강영향을 정량적으로 평가하는 과학적이며 체계적인 방법으로 제기된 건강위해성평가는 다양한 노출경로를 통합하고 개인별 노출 특성을 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다(Kalyva et al., 2024). 만성 건강위해성평가는 장기간 노출에 따른 누적 위해를 평가할 수 있어, 화학사고 이후의 지속적인 노출 상황을 보다 현실적으로 반영하는 유용한 접근

법이 될 수 있다(Nikolopoulou et al., 2023). 최근에는 위치정보, 환경 모니터링 자료 및 확산 모델링 결과 등을 활용하여 개인 단위의 노출을 정밀하게 추정하려는 시도가 증가하고 있으며, 이를 기반으로 과학적인 피해 판정 체계를 구축하려는 연구가 수행되고 있다(Hong et al., 2020; Shilnikova et al., 2025).

이에, 본 고에서는 화학사고 피해 판정의 현황과 기존 판정 방식의 구조적 한계를 분석하고자 한다. 또한, 건강위해성평가 기반 접근의 필요성과 적용 가능성을 검토하고, 특히 개인 단위 노출평가와 다중 노출경로를 고려한 만성 건강위해성평가의 관점에서 향후 피해 판정 체계의 발전 방향을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

II. 연구 방법

본 고에서 화학사고 피해 판정에서 건강위해성평가의 역할과 적용 가능성을 고찰하기 위한 서술적 문헌고찰로 수행하였다. 본 고의 목적은 특정 중재 또는 노출과 건강영향 간 효과 크기를 통합하거나 메타분석을 수행하는 체계적 문헌고찰이 아니라, 화학사고 피해 판정, 개인 노출평가, 건강위해성평가 및 다매체·다경로 평가에 관한 국내·외 연구와 관련 지침을 종합하여 기존 평가체계의 한계를 분석하고 향후 적용 방향을 제시하는데 있다.

문헌 검색은 국외 데이터베이스인 PubMed, Web of Science 및 Google Scholar와 국내 데이터베이스인 한국학술정보(KISS) 및 DBpia를 이용하였으며, 환경부, 화학물질안전원, OECD 등 국내·외 정부기관 및 국제기구가 발간한 관련 법령, 기술지침 및 보고서를 추가적으로 검토하였다. 학술문헌의 검색기간은 데이터베이스 검색일을 기준으로 2026년 5월까지로 설정하였다.

국외 문헌의 검색에는 ‘chemical accident’, ‘chemical incident’, ‘exposure assessment’, ‘health risk assessment’, ‘multimedia exposure’ 등을 사용하였으며, 국내 문헌은 ‘화학사고’, ‘건강위해성평가’, ‘노출평가’, ‘개인노출’, ‘피해 판정’ 등을 사용하였다.

검색된 문헌 중 1) 화학사고 또는 화학물질의 비의도적 누출 및 방출을 다룬 연구, 2) 사고 후 인체 노출 또는 건강영향 평가방법을 다룬 연구, 3) 화학물질 건강위해성평가, 개인노출평가, 다매체·다경로 노출평가와 직접적인 관련성이 있는 연구, 4) 화학사고 대응 및 피해 조사에 활용되는 정부 또는 국제기구의 지침을 포함하

였다. 반면, 1) 화학사고 또는 사고성 노출과 직접적인 관련이 없는 연구, 2) 환경 또는 인체 노출 평가와 관련성이 낮은 연구, 3) 원문 확인이 불가능한 자료, 4) 동일한 내용을 중복하여 보고한 자료는 제외하였다.

검색된 문헌은 제목과 초록을 우선 검토하여 연구목적과 관련성이 낮은 문헌을 제외하였으며, 중복 검색된 문헌은 저자, 제목 및 발행연도를 기준으로 확인하여 하나의 문헌으로 처리하였다. 이후 원문 검토를 통해 연구목적에 부합하는 문헌을 최종 선정하였다. 선정된 문헌은 화학사고 피해 판정체계, 건강위해성평가, 개인 단위 노출평가, 다매체·다경로 노출평가 및 건강영향조사 관련 문헌으로 분류하고, 각 평가방법의 적용 특성, 활용 가능성 및 한계를 중심으로 비교·분석하였다.

III. 결 과

1. 화학사고 피해 판정의 현황 및 한계

1) 공간 및 집단 기반 판정 및 한계

국외에서는 미국 교통부(United States Department of Transportation, US DOT)의 Emergency Response Guidebook(ERG)의 경우 사고 시 일정 거리 내 대피 범위를 제시하고 있으며(US DOT, 2024), 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)과 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 화학사고 대응 과정에서 영향권 내 인구 규모와 취약집단 분포를 고려한 공중보건 대응의 중요성을 제시하고 있다(US EPA, 2009; WHO, 2009).

국내에서는 「화학물질관리법」 및 「화학사고예방관리계획서 작성 등에 관한 규정」에 따라 화학사고 예방관리계획을 통해 사고 시 유해화학물질의 장외 확산 범위를 예측하고 관리하도록 하고 있으며, 이는 기존 장외영향평가(Off-site Consequence Analysis, OCA) 개념을 포함하는 형태로 운영되고 있다(MCEE, 2026; NCIS, 2026). 또한, 유해물질 대기확산 모델(Areal Location of Hazardous Atmospheres, ALOHA) 및 한국형 장외영향평가 지원 프로그램(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool, KORA)과 같은 OCA 및 대기확산모델은 화학물질 누출 시 영향범위와 threat zone을 예측하고, 이를 기반으로 초기 영향권을 설정하는데 활용된다(US EPA, 2009; Kim & Byeon, 2017; NOAA, 2026). 이렇게 설정된 영향권 내 주민을 대상으로 건강영향조사, 주민 설명회 및 피해 현황 조

사가 수행되고 있다(NCIS, 2022).

이와 같이 현재 화학사고 피해 판정에서는 사고 시점으로부터의 거리 또는 일정 반경을 기준으로 영향을 받는 지역을 정의하고 영향권 내 주민 집단을 대상으로 피해 여부를 평가하는 공간 및 집단 기반 접근이 활용되고 있다(Bowen et al., 2000). 이러한 접근은 사고 초기 단계에서 제한된 시간과 정보 내에서 신속하게 대응 대상을 설정하고, 대피·보호조치 및 건강영향조사를 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나 이러한 공간 및 집단 기반 접근은 초기 대응과 보호조치 설정에는 효과적이지만, 실제 개인의 노출 수준 및 건강영향을 정량적으로 평가하기에는 한계가 있다. 실제 대기 확산은 기상조건, 방출조건, 지형 및 도시 구조 등에 따라 특정 방향으로 집중되는 Plume 형태로 나타날 수 있으며, 동일한 거리 내에서도 유해 화학물질의 농도는 공간적으로 불균일하게 분포할 수 있다(Kim & Byeon, 2017; Zhang & Wang, 2022). 따라서 사고 지점으로부터의 거리와 실제 노출 수준이 반드시 비례한다고 볼 수 없다(Figure 1). 또한, 거리 기반 판정은 개인의 체류시간, 실내·외 활동 여부, 행동양식 등 실제 노출 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다(Figure 2). 개인의 노출은 시간활동 양상

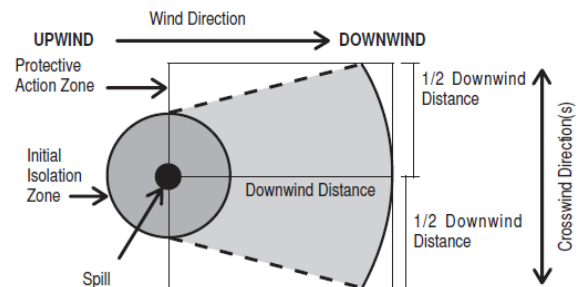


Figure 1. Distance-based influence range and actual atmospheric plume distribution(US DOT, 2024)

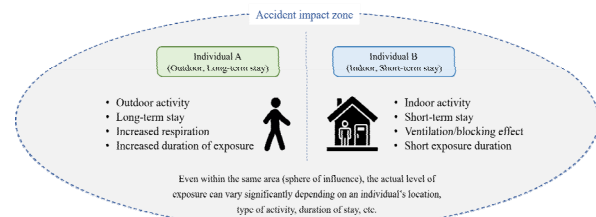


Figure 2. Differences in exposure levels based on individual activity characteristics within the same region (Vandenberg et al., 2022; Kalyva et al., 2024)

General Survey

Form Approved
OMB No. 0923-0051
Exp. Date 10/31/2024

Interviewer _____ Household ID _____ Participant ID _____
 Date _____ Start time _____ End time _____
 Participant Name: _____

SECTION I: ADULT SURVEY

GENERAL SURVEY MODULE: LOCATION/EXPOSURE

From now on, I will refer to the [Description of Incident] on [Date] as "the incident."

1. I would like to know about your exposure inside the highlighted area on the map between [Incident Date] at [Time] and [End Date/Time].

Public reporting burden of this collection of information is estimated to average 28 minutes per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing this collection of information. An agency may not conduct or sponsor, and a person is not required to respond to a collection of information unless it displays a currently valid OMB control number. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information including suggestions for reducing this burden to CDC/ATSDR Reports Clearance Office, 1600 Clifton Road NE, MS E-11 Atlanta, Georgia 30333; ATTN: PRA (0923-0051).

Interviewer _____ Start time _____
 Date of interview _____ End time _____

Form Approved
OMB No. 0923-0051
Exp. Date 10/31/2024

**Hospital Survey
Module: Surveys**

[Introductory statement that includes description of the incident.]

1. How many beds are in your hospital? _____
 2. How many beds are in your ED? _____
 3. What is the average number of patients seen in your ED daily? _____

I'm going to ask you some questions about patients that presented to your ED because of the incident. I will ask you about the number of patients within 24 hours of the incident and the total number of patients since the incident occurred up to today. Fill out the table provided below. Insert part a into the [timeframe] and write down the respondent's answer. Then repeat the question, inserting part b into the [timeframe]. For example, for A4, you will first ask "How many patients presented to your ED within 24 hours after the incident?" for part a. "You would then ask "How many patients presented to your ED total, since the incident?" for part b, before continuing to 5.

	a. within 24 hours after the incident?	b. total, since the incident? This will be the total number from when the incident occurred to the present.
4. How many patients presented to your ED [timeframe]		
5. How many symptomatic patients requested evaluation [timeframe]		
6. How many patients were admitted to the hospital from the ED [timeframe]		
7. How many patients left the ED without being seen [timeframe]		

8. Are you still seeing patients because of this incident?
☐ Yes ☐ No → [Go to next module](#)

9. Are you still admitting patients?
☐ Yes ☐ No

ATSDR estimates the average public reporting burden of this collection of information as 25 minutes per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing this collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information including suggestions for reducing this burden to CDC/ATSDR Information Collection Review Office, 1600 Clifton Road NE, MS E-11 Atlanta, Georgia 30333; ATTN: PRA (0923-0051).

Figure 3. Assessment of chemical exposures(ACE) toolkit of ATSDR(ATSDR, 2024)

과 미세환경에 따라 달라질 수 있으며, 이러한 요인을 고려하지 않을 경우 동일 지역 내에서도 개인 간의 노출 수준 차이를 설명하기 어렵다(Vandenberg et al., 2022; Kalyva et al., 2024).

2) 증상 및 신고 기반 판정 및 한계

화학사고 발생 이후 피해 대상자를 판정하는 과정에서는 주민의 자각 증상, 민원 신고, 의료 기관 방문 기록 등을 활용한 증상 및 신고 기반 접근이 활용되고 있다. 국내에서는 화학사고 발생 이후 화학물질안전원 및 지방자치단체를 중심으로 주민 건강영향조사, 민원 조사, 역학조사 등이 수행되고 있으며, 주민의 건강 이상 사례가 피해 현황 파악을 위한 기초자료로 활용되고 있다(NCIS, 2022). 국외에서도 화학사고 및 유해화학물질 누출 사고 이후 주민의 증상 보고, 의료기관 방문 기록 등을 활용한 공중보건 조사 및 역학평가가 수행되고 있다. 독성물질 질병 등록청(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR)의 Assessment of Chemical Exposure(ACE) Toolkit은 화학물질 사고 이후 지역 보건 당국이 신속한 역학평가를 수행할 수 있도록 설문도구와 조사 양식을 제공하고 있으며(Figure 3) (Nakayama et al., 2023; ATSDR, 2024), WHO는 화학사고 이후 주민 건강영향 파악과 공중보건 감시의 중요성을 제시하고 있다(WHO, 2009). 이러한 접근은 사고 직후 비교적 신속하게 건강영향 사례를 수집할 수 있으며, 실제 주민이 경험한 증상을

직접 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나 증상 및 신고 기반 판정은 개인의 주관적 인식에 크게 의존한다는 한계를 가진다. 동일한 농도에 노출되더라도 연령, 기저질환, 민감도 및 심리적 상태 등에 따라 증상 발현 양상이 다르게 나타날 수 있으며, 일부 주민은 실제 노출이 있었음에도 증상을 인지하지 못하거나 신고하지 않을 수 있다. 반대로 사고에 대한 불안감이나 위험 인식에 의해 실제 노출 수준보다 증상이 과대 보고될 가능성도 있다(Andersson et al., 2013; Nakayama et al., 2023; Gerbecks et al., 2024). 민원 및 신고 자료는 지역별 정보 접근성, 사회적 관심도, 언론 보도 및 행정 대응 수준 등에 영향을 받을 수 있어 실제 노출 수준과 반드시 일치한다고 보기 어렵다. 또한 증상 자료는 대부분 사고 이후 수집되므로 실제 노출 시점과의 시간 차이가 존재하며, 노출농도 및 노출량과의 정량적인 연계가 어렵다는 한계를 가지고 있다(ATSDR, 2024). 따라서 증상 및 신고 기반 판정만으로는 객관적인 개인 노출 수준을 평가하기 어렵고, 피해 규모를 과소 또는 과대평가할 가능성이 존재한다(Table 1).

3) 단일 노출경로 기반 평가 및 한계

화학사고로 인한 건강영향을 평가하는 과정에서는 일반적으로 대기 중 유해화학물질의 농도를 기반으로 한 흡입 노출평가가 활용되고 있다. AEGL(Acute Exposure Guideline Levels), ERPG(Emergency Response

Table 1. Characteristics and limitations of symptom and complaint-based damage assessment(NCIS, 2021; ATSDR, 2024)

Category	Approach	Characteristics	Limitations
Symptom-based assessment	Identification of affected individuals based on reported health symptoms (e.g., headache, respiratory irritation)	Reflects potential health effects directly	Subject to individual sensitivity and psychological factors
Complaint-based assessment	Use of public complaints, reports, and healthcare visit records to identify affected populations	Enables rapid identification of potentially affected individuals	Potential for under-reporting or over-reporting (reporting bias)
Domestic impact investigation	Use of resident interviews, symptom surveys, and complaint data in post-accident investigations	Provides field-based and context-specific information	Limited ability to quantify exposure and objective risk

Planning Guidelines) 등과 같은 급성 흡입 노출 기준이 활용되고 있으며(AIHA, 2026; US EPA, 2026; US DOE, 2026), 확산모델을 이용한 대기 중 농도 예측 결과를 기반으로 건강영향 범위를 설정하는 방식이 일반적으로 적용된다(Boone et al., 2025).

국내에서는 화학사고 예방관리계획서 작성 과정에서 사고시나리오의 영향범위를 산정하기 위하여 독성 끝점(endpoint) 기준이 활용된다. Endpoint를 사람이나 환경에 영향을 미칠 수 있는 독성 농도 등에 도달하는 지점으로 정의하고, 이를 바탕으로 영향범위를 산정하도록 제시하고 있다(Yoon, 2016; NCIS, 2021). 특히, 영향범위 산정을 위하여 ERPG, AEGL, PAC(Protective Action Criteria) 등과 같은 급성 흡입 노출 기준을 활용하고 있

며, 해당 기준은 사고 이후 영향권 설정 및 건강영향 판단 과정에서도 참고자료로 활용된다. 이러한 접근은 사고 직후 단시간 내 건강영향 가능성을 평가하고 대피, 보호조치 및 비상대응 의사결정을 지원할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Boone et al., 2025; US EPA, 2026). 흡입 노출은 화학사고 발생 시 가장 직접적이고 주요 노출경로로 간주되며, 실제 독성가스 노출 사고 사례에서도 호흡기 영향이 주된 건강영향으로 보고되고 있다. 또한, 대부분의 급성 노출 기준은 단기 흡입 노출을 중심으로 개발되어 있으며(Prussia et al., 2020), 주요 급성 흡입 노출 기준의 목적 및 특징을 Table 2에 정리하였다.

그러나 실제 화학사고가 발생하는 경우 흡입 노출 외에도 다양한 노출경로가 존재하며, 사고 후 환경매체 간 유해

Table 2. Characteristics of major acute inhalation exposure guidelines used in chemical accident response(Yoon, 2016; NCIS, 2021)

Guideline	Organization	Objective	Characteristics
AEGL (Acute Exposure Guideline Levels)	US EPA*	To evaluate potential health effects associated with short-term exposure of the general public to hazardous chemicals and support emergency response actions	Provides exposure limits for multiple exposure duration (10 min to 8 hr) and is designed for protection of the general population during acute inhalation exposure
ERPG (Emergency Response Planning Guidelines)	AIHA**	To support emergency response planning and evacuation decision-making during chemical accidents	Widely used in industrial emergency planning; classified into ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3 according to severity of health effects
PAC (Protective Action Criteria)	US DOE†	To provide integrated protective action criteria for emergency response and public protection during hazardous material releases	Integrates AEGL, ERPG, and TEEL values for rapid emergency decision-making and impact zone determination
IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health)	NIOSH‡	To identify airborne concentrations that pose immediate threats to life or health for worker protection	Used for respirator selection and emergency escape planning in high-concentration exposure situations

*US EPA : United States Environmental Protection Agency **AIHA : American Industrial Hygiene Association

†US DOE : United States Department of Energy ‡NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health

화학물질의 전이에 의해 노출 특성이 더욱 복잡해질 수 있다. 사고 시 대기 중으로 방출된 유해화학물질은 대기확산 이후 건·습식 침적(dry and wet deposition)을 통해 토양이나 수계로 이동할 수 있으며, 일부 물질은 토양과 지표수 또는 지하수 사이에서 이동하거나 퇴적물 및 생물체에 축적되는 등 여러 환경 매체를 거쳐 장기간 잔류할 수 있다(Su et al., 2019). 이와 같은 다매체간 전이(multimedia transfer)는 오염된 식수 및 식품의 섭취에 의한 경구 노출, 오염된 토양이나 표면과의 접촉에 의한 경피 노출 등을 유발하며, 사고 이후에도 지속적인 노출 가능성을 증가시킨다(Andersson et al., 2013; Park et al., 2020). 또한 동일한 유해화학물질에 대해 흡입, 경구 및 경피 노출이 동시에 발생하는 다경로 노출은 각 노출경로를 통한 위해를 통합적으로 고려할 필요가 있으며, 실제 건강 위험은 단일 노출경로보다 총 노출량에 의해 결정될 가능성이 크다(Jung et al., 2024). 그럼에도 불구하고 기존 화학사고 피해 평가는 급성 흡입 노출을 중심으로 수행되는 경우가 많아 환경매체 간 유해화학물질의 이동과 다경로 노출에 따른 총 노출량 및 장기적인 건강영향을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다(Nikolopoulou et al., 2023).

2. 건강위해성평가의 역할

현재 화학사고 피해 판정은 공간 및 집단 기반 접근, 증상 및 신고 기반 판단, 단일 노출경로 중심 평가 등에 의존하고 있으며, 실제 개인의 노출 수준과 건강영향을 정밀하게 반영하는 데 한계가 있다. 이러한 한계를 보완할 수 있는 대안적 접근으로, 유해화학물질에 대한 인체 노출량 및 건강 위험을 정량적으로 규명하는 건강위해성평가(health risk assessment) 방법의 도입을 고려할 수 있다.

건강위해성평가는 유해화학물질에 대한 인체 노출과 건강영향 발생 가능성을 정량적으로 평가하는 방법으로, 일반적으로 유해성 확인(hazard identification), 용량-반응평가(dose-response assessment), 노출평가(exposure assessment), 위험도 결정(risk characterization)의 4단계 절차에 따라 수행된다(NRC, 1983; US EPA, 1989). 그러나 화학사고는 단기간에 대량의 유해화학물질이 환경 중으로 방출되고 시간과 공간에 따라 노출농도가 급격히 변화하는 특성을 가지므로 일반적인 환경매체의 장기 노출에 따른 건강위해성평가와는 달리, 화학사고의 특성을 반영한 평가방법이 요구된다. 최근 화학사고 기인 유해화

학물질을 대상으로 한 건강위해성평가(이하 '화학사고 건강위해성평가'라 함)는 사고물질의 확산 특성, 환경 중 거동 및 개인의 노출 특성을 함께 고려하는 방향으로 발전하고 있으며, 사고 발생 이후 실제 노출수준을 보다 정량적으로 평가하기 위한 다양한 방법들이 제안되고 있다(Park, 2023).

최근 화학사고 건강위해성평가에서는 사고물질의 누출량, 기상조건 및 물리·화학적 특성을 이용한 대기확산모델과 환경동태모델을 통해 시간별·공간별 환경농도를 산정하고, 이를 개인의 활동 특성 및 체류 시간과 연계하여 노출량을 평가하는 방법이 적용되고 있다. 이러한 방법은 사고 당시의 단기 고농도 노출뿐만 아니라 사고 이후 농도 변화와 장기 노출을 함께 고려할 수 있으며, 급성 위해성평가와 만성 위해성평가를 통합하여 사고로 인한 건강영향을 평가할 수 있다(Hong et al., 2020; Park et al., 2020; Jung et al., 2024).

또한, 화학사고로 방출된 유해화학물질은 대기 중 확산뿐만 아니라 침적과 환경매체 간 이동을 통해 토양 및 수계로 전이될 수 있으므로, 최근 다매체 및 다경로 노출을 고려한 총 노출 기반 건강위해성평가의 필요성이 강조되고 있다(WHO, 2010; Hong et al., 2020; Nikolopoulou et al., 2023; Park, 2023). 이러한 평가 체계는 화학사고의 동적인 노출 특성과 다양한 노출 경로를 반영할 수 있어 사고 발생 이후 건강영향을 현실적으로 평가할 수 있는 방법으로서의 적용 가능성을 가진다.

건강위해성평가와 화학사고 피해 판정은 목적과 판단 근거가 서로 구분될 필요가 있다. 건강위해성평가는 유해성 정보, 노출수준 및 용량-반응 관계를 바탕으로 특정 노출에 따른 건강영향의 발생 가능성 또는 위해수준을 정량적·정성적으로 특성화하는 과학적 평가과정이다(WHO, 2010; US EPA, 2026). 그러나 화학사고 피해 판정은 사고물질에 대한 노출 가능성뿐만 아니라 사고 발생과 개인의 노출 사이의 시간적·공간적 관련성, 임상증상 또는 질환의 발생, 기존 질환의 변화, 의학적 및 역학적 근거와 행정적·법적 판단기준 등을 종합하여 피해 여부와 지원 또는 관리의 필요성을 판단하는 의사결정 과정이다(ATSDR, 2025).

따라서 건강위해성평가에서 산출된 위험도 또는 기준 초과 여부만으로 특정 개인의 건강피해가 사고로 인해 발생하였다는 인과관계를 확정하거나 피해 인정 및 보상 여부를 직접 결정하는 것은 적절하지 않다. 건강위

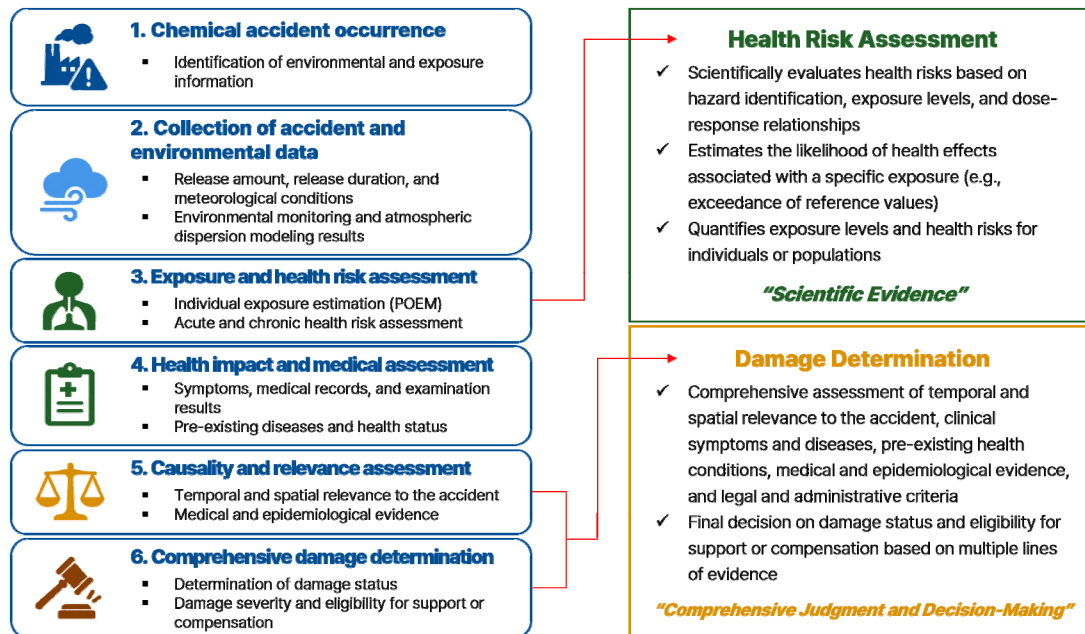


Figure 4. The relationship between health risk assessment and chemical accident damage determination

해성평가 결과는 피해 판정을 구성하는 여러 근거 가운데 노출 가능성과 건강 위해수준을 정량화하는 과학적 근거의 하나로 활용되어야 하며, 임상·역학적 평가 및 행정적 판단과 통합하여 해석할 필요가 있다(WHO, 2010; ATSDR, 2025)(Figure 4).

3. 건강위해성평가 기반 피해 판정의 적용 가능성

기존의 화학사고 피해 판정 체계가 가진 시·공간적 변동성의 미반영, 다중 노출경로에 대한 고려 부족 및 주관적 증상과 신고에 대한 높은 의존성을 보완하기 위해서는 건강위해성평가를 기반으로 개인별 노출수준과 건강영향 가능성을 정량화하는 접근이 필요하다. 화학사고로 방출된 유해화학물질의 농도는 풍향, 풍속 및 강수 등의 기상조건과 지형적 특성에 따라 시간과 공간별로 다르게 나타나므로, 개인이 실제로 노출된 농도와 노출시간은 서로 다를 수 있다. 따라서 화학사고 이후의 피해를 평가할 때에는 사고 영향권의 포함 여부만을 적용하기보다는 노출 대상자가 사고 당시 어느 위치에 얼마나 오래 체류하였는지를 반영한 개인단위 노출평가가 요구된다(Park, 2023).

개인단위 노출모델(Personal Oriented Exposure Model, POEM)은 환경 중 유해화학물질의 농도와 개인의 위치, 이동경로, 시간활동 양상 및 각 미세환경에서의 체류시간을 결합하여 실제 개인 노출 수준을 추정하는 방법

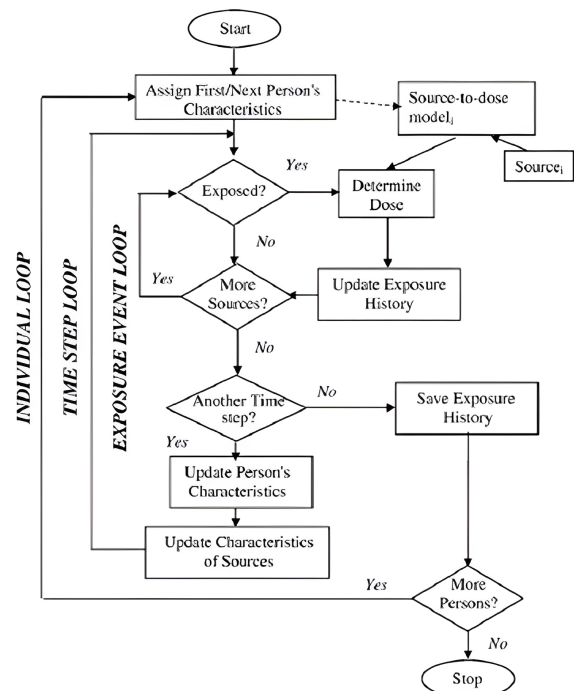


Figure 5. Personal oriented exposure modeling(POEM) framework(Arnold & Price, 2007)

이다(Figure 5). 개인노출은 실외와 실내 농도의 단순 평균으로 결정되는 것이 아니라, 개인이 시간대별로 실내, 실외, 교통수단 등의 어떤 미세 환경에 있었으며 각 장소에 얼마나 체류하였는지에 따라 달라진다. 이에 GPS 또는

Table 3. Proposed framework for health risk assessment-supported chemical accident damage determination

Stage	Data and information	Assessment methods and criteria	Application
Initial accident response	Chemical substances, release amount, release duration, meteorological data	Atmospheric dispersion models, AEGL, ERPG, PAC	Identification of initial impact zones and protective action areas
Environmental monitoring	Concentrations in air and soil	Environmental monitoring, atmospheric dispersion models, multimedia fate models	Reconstruction of spatial and temporal environmental concentrations
Individual exposure assessment	Individual location, movement patterns, time spent at each location, time activity data	POEM, multimedia and multi-route exposure assessment	Estimation of individual exposure levels
Health impact assessment	Symptoms, medical records, clinical test results, pre-existing diseases	Acute exposure guidelines, non-carcinogenic and carcinogenic risk assessment	Evaluation of potential health effects and risk levels
Support for damage determination	Exposure, risk assessment, clinical, and epidemiological evidence	Integrated evaluation of multiple lines of evidence	Identification of highly exposed individuals, prioritization of further investigation, and support for damage-level assessment

이동통신 기반 위치정보와 시간활동자료를 이용하여 개인의 이동궤적을 재구성하고, 해당 위치와 시간에 대응하는 환경농도를 연결한 후 체류시간을 가중하여 개인별 노출량을 산정할 수 있다(Hu et al., 2020; Liu et al., 2023; Michele & Catherine, 2024; Park, 2026).

이러한 건강위해성평가 방법을 실제 화학사고 피해 판정에 적용하기 위해서는 사고 발생 이후 확보되는 자료를 단계적으로 연계하는 평가체계가 필요하다. 구체적으로 사고 초기에는 사고물질, 누출량, 방출시간 및 기상조건 등을 바탕으로 초기 영향범위를 설정하고, 이후 환경모니터링과 확산모델을 이용하여 시간·공간별 환경농도를 재구성할 수 있다(Kim & Byeon, 2017; Zhang & Wang, 2022). 이를 개인의 위치 및 시간활동자료와 연계하여 개인별 노출량과 건강위해도를 평가하고(Hong et al., 2020; Park, 2023; Jung et al., 2024), 최종적으로 증상, 진료기록 및 건강영향 조사결과와 함께 종합적으로 검토함으로써 피해조사 대상자 및 고노출군의 선별과 피해수준 검토를 지원할 수 있다(Nakayama et al., 2023; ATSDR, 2024). 이러한 단계별 적용체계와 각 단계에서 활용 가능한 자료 및 평가기준을 Table 3에 제시하였다.

화학사고에 따른 건강영향은 노출 시점과 지속기간에 따라 구분하여 평가할 필요가 있다. 사고 직후의 단기 고농도 노출은 AEGL 및 PAC 등의 급성 노출기준을 적용하고, 사고 후 환경매체의 잔류오염으로 노출이 지

속되는 경우에는 다매체·다경로 노출을 고려한 비발암 및 발암 위해도를 평가할 수 있다(WHO, 2010; Hong et al., 2020). 이들 평가결과는 하나의 위해도로 통합하기보다는 각각의 시간적 특성에 따라 해석하고, 기존 질환 및 취약집단의 특성을 포함한 건강영향 조사결과와 함께 피해 판정을 지원하는 근거로 활용하는 것이 적절하다.

화학사고 피해 판정에 POEM을 적용하기 위해서는 사고물질의 누출량, 누출시간, 기상조건 및 물리·화학적 특성을 기반으로 산정한 시간별·공간별 환경농도와 개인의 위치정보 및 시간활동자료를 연계하여 개인별 노출량을 산출해야 한다. 이때 이동경로와 체류시간뿐만 아니라 실내·외 체류 여부, 실외 유해화학물질의 실내 유입, 연령·체중·호흡률 등의 개인별 노출계수를 함께 반영함으로써 동일한 사고 영향권에 있었던 사람 사이에서도 실제 노출수준의 차이를 평가할 수 있다. 실제 화학사고를 가정한 개인단위 평가에서도 다매체 환경동태 모델의 격자별 농도와 GPS 및 시간위치기록자료를 결합하여 급·만성 노출량과 위해도를 산정하였으며, 유사한 위치와 활동양상을 보인 대상자 사이에서도 위해도에 차이가 나타나 개인단위 위치정보의 중요성이 확인되었다(Park, 2023). 산정된 개인별 노출량은 사고 직후의 급성 흡입노출을 급성노출 기준과 비교하거나, 사고 이후의 누적 노출을 바탕으로 비발암 및 발암 위해도를 평가하는데 활용할 수 있다. 또한, 유해화학물질이

토양, 수계 및 생활환경에 잔류하는 경우에는 흡입과 함께 경구 및 경피 노출을 포함한 다매체·다경로 평가를 적용하여 2차 노출까지 고려할 수 있다(Hong et al., 2020; Park et al., 2020; Park, 2023; Jung et al., 2024). 이러한 접근은 화학사고로 인한 피해 여부를 결정하는 단일 기준이라기보다 개인별 노출 가능성과 위해수준을 객관적으로 제시함으로써 기존의 거리, 증상 및 신고 중심 피해 판정을 보완하고, 피해조사 대상자와 고노출군을 선별하기 위한 과학적 근거로 활용될 수 있다(ATSDR, 2025).

IV. 고 찰

현재 화학사고 피해 판정 체계는 신속한 사고 대응과 제한된 자료 환경을 고려하여 공간 및 집단 접근, 증상 및 신고 기반 판단, 급성 흡입 중심 평가 등을 중심으로 운영되고 있다. 이러한 방식은 사고 초기 단계에서 영향 범위를 빠르게 설정하고 대응 대상을 구분할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 실제 현장 대응과정에서도 현실적으로 활용 가능성이 높은 방법으로 사용되고 있다. 또한, 행정기관 입장에서는 집단 단위 접근이 조사 및 지원 대상을 비교적 신속하게 설정할 수 있다는 실무적 장점을 가지고 있다(Bowen et al., 2000; OECD, 2023). 그러나 이러한 접근은 실제 개인의 노출 수준과 건강영향을 충분히 반영하기 어렵고, 동일 영향권 내 개인 간 노출 차이 및 다중 노출경로에 의한 총 노출을 정밀하게 평가하기에는 한계가 있다(Pałaszewska-Tkacz et al., 2017; de Souza et al., 2023). 따라서 향후 화학사고 피해 판정 체계는 단순 영향권 기반 접근에서 벗어나 실제 개인 노출 특성을 보다 반영할 수 있는 방향으로 개선될 필요가 있다.

건강위해성평가 기반 접근은 이러한 한계를 보완할 수 있는 가능성이 있지만, 실제 적용을 위해서는 기술적·제도적 기반이 함께 마련되어야 한다. 화학사고 상황에서는 유해화학물질의 배출량, 환경 중 농도 변화 및 개인 활동자료를 충분히 확보하기 어려우며, 대기확산모델의 예측 결과 또한 기상조건, 방출조건 및 지형 특성 등에 따라 불확실성이 발생할 수 있다(Kim & Byeon, 2017; Pouyakian et al., 2023). 따라서 환경 모니터링 자료, 대기확산모델, 위치정보 및 노출평가 자료를 통합적으로 연계할 수 있는 데이터 기반 구축과 함께 모델의 신뢰성 검증이 지속적으로 이루어져야 한다(Zhang & Wang, 2022; Michele

& Catherine, 2024). 또한, 위치정보 활용에 따른 개인정보 보호와 데이터 활용 범위에 대한 법적·윤리적 기준을 마련하여 사회적 수용성을 확보하는 노력도 병행되어야 한다(Monroe et al., 2021).

특히 대기확산모델과 개인단위 노출평가 결과에는 누출량 및 방출 지속시간과 같은 사고조건, 풍향·풍속 등의 기상자료, 지형 및 건물 특성뿐만 아니라 실외 유해화학물질의 실내 침투율, 개인 위치 및 시간활동자료의 정확도 등에 따른 불확실성이 포함될 수 있다(Kim & Byeon, 2017; Zhang & Wang, 2022; Park, 2023). 따라서 주요 입력변수의 변화가 노출량 및 위해도 산정 결과에 미치는 영향을 확인하기 위한 민감도 분석을 수행하고, 사고 초기와 같이 자료가 충분하지 않은 경우에는 합리적인 최악조건을 적용한 보수적 노출 시나리오를 활용할 필요가 있다. 또한, 입력자료의 범위 또는 확률분포를 확보할 수 있는 경우에는 시나리오별 평가 또는 확률론적 분석을 통해 노출량과 위해도의 변동범위를 제시함으로써 평가 결과의 불확실성을 함께 고려할 필요가 있다.

한편, POEM 적용을 위해 GPS, 이동통신 자료 등 개인 위치정보를 활용하는 경우에는 자료 수집에 대한 동의와 함께 수집 목적 및 범위의 최소화, 비식별화, 접근권한 제한, 보관기간 및 제3자 제공 기준 등 개인정보 보호 절차를 마련할 필요가 있다(PIPC, 2024). 또한, 위치정보를 확보하기 어려운 대상자는 시간활동 설문, 거주·근무지 및 대피기록 등의 대체자료를 이용하여 노출을 재구성하고, 위치정보 제공 여부가 피해 판정의 유·불리로 이어지지 않도록 평가의 형평성을 확보할 필요가 있다.

향후 화학사고 피해 판정 체계는 개인 위치정보, 시간 활동자료, 다매체 환경동태모델 및 건강위해성평가를 통합한 데이터 기반 의사결정 체계로 발전할 필요가 있다(Jung et al., 2024; Boone et al., 2025). 특히, 위치정보 기반 POEM과 다매체 환경동태모델을 연계한 통합 위해성평가 플랫폼은 사고 발생 이후 시간에 따라 변화하는 개인별 노출수준과 건강위해도를 정량적으로 평가하고, 이를 기반으로 고노출군 및 우선 조사대상자를 선별하고 피해수준 검토를 지원하는 과학적 근거를 제공할 수 있다. 또한, 건강위해성평가 결과를 시·공간적으로 가시화하고 환경 모니터링 자료 및 건강영향평가 결과와 연계함으로써 피해조사, 건강영향평가 및 사후 건강관리 등을 지원하는 통합 대응체계로 활용될 수

있을 것으로 기대된다.

V. 결론

본고는 화학사고 피해 판정 체계의 현황과 한계를 검토하고, 화학사고 발생 시 건강위해성평가를 기반으로 한 피해 판정 체계의 적용 가능성을 고찰하였다. 현재의 피해 판정 체계는 사고 초기 단계에서 신속한 대응과 행정적 의사결정을 지원하는데 효과적이지만, 실제 개인의 노출 수준과 건강영향을 정량적으로 반영하기에는 한계가 있다. 특히, 동일한 사고 영향권 내에서도 개인별 위치, 활동양상 및 노출경로에 따라 실제 노출 수준이 달라질 수 있으므로, 보다 정밀한 피해 판정을 위해서는 개인단위 노출 특성을 반영한 평가체계의 도입이 필요하다.

최근에는 위치정보 서비스와 시간활동자료를 활용한 POEM, 다매체 환경동태모델 및 건강위해성평가를 연계하여 개인별 노출량과 건강위해도를 정량적으로 평가하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 이러한 접근은 사고 직후의 급성 노출뿐만 아니라 토양 및 수계를 통한 다중 노출경로와 장기 누적 노출까지 함께 고려할 수 있어, 기존의 공간적 영향권 및 증상 중심의 피해 판정의 한계를 보완할 수 있는 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

향후에는 화학사고 통합 위해성평가 플랫폼을 활용하여 개인별 노출평가와 건강위해성평가를 유기적으로 연계하고, 고노출군 및 우선 조사대상자의 선별과 화학사고 피해 판정 및 건강영향평가를 지원하는 체계로 확대 및 고도화할 필요가 있다. 다만 모델과 입력자료의 불확실성이 존재하므로 건강위해성평가만으로 개별 피해, 사고와 건강영향 간의 인과성 또는 보상 여부를 확정할 수 없으며, 환경측정자료, 임상 및 역학자료, 행정적 판단 등과 종합적으로 검토되어야 한다. 아울러 개인정보 보호와 데이터 활용에 대한 제도적 기반을 함께 마련함으로써, 화학사고 피해 판정의 객관성과 신뢰성을 향상시키고, 피해조사, 건강영향평가 및 사후 건강관리까지 연계 가능한 통합 지원체제로 발전시켜 나가야 할 것이다. 이러한 접근은 화학사고 노출 대상자를 과학적이고 합리적으로 보호하기 위한 기반을 제공하는 동시에 향후 화학사고 대응 정책과 공중보건 관리체계의 고도화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 화학사고 예측·예방 고도화 기술개발사업(RS-2022-KE002249) 및 한국환경보전원의 화학물질 안전관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry(ATSDR). Assessment of Chemical Exposures(ACE) Toolkit[Internet]. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 2024 [cited 2026 May 13]. Available from: <https://atsdr.cdc.gov/ace/php/toolkit/index.html>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry(ATSDR). Public Health Assessment Guidance Manual(PHAGM)[Internet]. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 2025 [cited 2026 May 21]. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/>
- American Industrial Hygiene Association(AIHA). Emergency Response Planning Guidelines (ERPGs) [Internet]. Falls Church(VA): AIHA Guideline Foundation; 2026 [cited 2026 May 13]. Available from: <https://www.aiha.org/get-involved/aiha-guideline-foundation/erpgs>
- Andersson L, Claeson AS, Ledin L, Wisting F, Nordin S. The influence of health-risk perception and distress on reactions to low-level chemical exposure. *Front Psychol* 2013;4:816 (<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00816>)
- Arnold SF, Price PS. Modeling mixtures resulting from concurrent exposures to multiple sources. *Toxicol Appl Pharmacol* 2007;223(2):121-124 (<https://doi.org/10.1016/j.taap.2006.11.032>)
- Boone S, Sun W, Gonnabathula P, Wu J, Orr MF, Mumtaz MM, Ruiz P. Assessing the Application of Physiologically Based Pharmacokinetic Models in Acute Chemical Incidents. *J Xenobiot* 2025;15(2):42 (<https://doi.org/10.3390/jox15020042>)
- Bowen HJ, Palmer SR, Fielder HMP, Coleman G, Routledge PA, Fone DL. Community exposures to chemical incidents: development and evaluation of the first environmental public health surveillance system in Europe. *J Epidemiol Community Health* 2000;54(11):870-873 (<https://doi.org/10.1136/jech.54.11.870>)

- de Souza P, Anenberg S, Makarewicz C, Shirgaokar M, Duarte F, Ratti C, Durant JL, Kinney PL, Niemeier D. Quantifying Disparities in Air Pollution Exposure across the United States Using Home and Work Addresses. *Environ Sci Technol* 2023;58(1):280–290 (<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07926>)
- Gerbecks J, Baliatsas C, Yzermans CJ, Simoes M, Huss A, Verheij RA, Dückers MLA. Living in the vicinity of pesticide-treated crop fields: Exploring associated perceptions and psychological aspects in relation to self-reported and registry-based health symptoms. *BMC Psychol* 2024;12:669 (<https://doi.org/10.1186/s40359-024-02162-1>)
- Hong HJ, Park SH, Lim HB, Lee CM. Development on Health Risk Assessment Method for Multi-Media Exposure of Hazardous Chemical by Chemical Accident. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(10):3385 (<https://doi.org/10.3390/ijerph17103385>)
- Hu K, Rahman A, Gharakheili HH, Sivaraman V. HazeDose: Design and Analysis of a Personal Air Pollution Inhaled Dose Estimation System using Wearable Sensors. *arXiv* 2020;arXiv:2005.13745
- Jung JY, Park SH, Moon JE, Yoon JH, Yoon SW, Lee CM. Aggregate risk assessment for multi-route exposure to hazardous chemicals caused by chemical accidents, with a focus on toluene. *Asian J Atmos Environ* 2024;18(1):17 (<https://doi.org/10.1007/s44273-024-00039-8>)
- Kalyva ME, Vist GE, Diemar MG, López-Soop G, Bozada TJ, Luechtefeld T. Accessible methods and tools to estimate chemical exposure in humans to support risk assessment: A systematic scoping review. *Environ Pollut* 2024;352:124109 (<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124109>)
- Kim MU, Byeon SH. Use and Limitations of Offsite Consequence Analysis Tools from South Korea and the United States in Hydrogen Fluoride Accidental Release. *Integr Environ Assess Manag* 2017;14(2):205–211 (<https://doi.org/10.1002/ieam.2019>)
- Liu Z, Liu C, Mostafavi A. Beyond Residence: A Mobility-based Approach for Improved Evaluation of Human Exposure to Environmental Hazards. *Environ Sci Technol* 2023;57(41):15511–15522 (<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04691>)
- Lunn RM, Clemons M, Blain R, Mahabir S, Mehta SS, Rooney AA, Singh A, Smith-Roe S, Taylor KW, Tracy W, Zarco M, Fenton SE. Identifying the known and unknown health hazard information for chemical disasters: a phased scoping review of the East Palestine, Ohio train derailment. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2025;35(6):888–906 (<https://doi.org/10.1038/s41370-025-00803-0>)
- Michele RR, Catherine B. Integrated environmental health assessment: Proposed approaches to exposure during chemical incidents. *Integr Environ Assess Manag* 2024;20(2):481–497 (<https://doi.org/10.1002/ieam.4810>)
- Ministry of Climate, Energy and Environment(MCEE). Chemicals Control Act [Internet]. [cited 2026 Apr 4]. Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%ED%99%94%ED%95%99%EB%AC%BC%EC%A7%88%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%B2%95>
- Monroe C, Tazi F, Das S. Location Data and COVID-19 Contact Tracing: How Data Privacy Regulations and Cell Service Providers Work In Tandem. *arXiv* 2021;arXiv:2103.14155
- Moon JE, Park SH, Kim YH, Jang H, Jung JY, Yoon SW, Lee CM. Health Risk Assessment of Toluene and Formaldehyde Based on a Short-Term Exposure Scenario: A Comparison of the Reference Concentration, Reference Dose, and Minimal Risk Level. *Toxics* 2025;13(8):683 (<https://doi.org/10.3390/toxics13080683>)
- Nakayama JY, Surasi K, Owen LR, Johnson M, Martell S, Kittler A, Lopatin P, Patrick S, Mertzluft C, Horton DK, Orr M. Assessment of Chemical Exposures Investigation After Fire at an Industrial Chemical Facility in Winnebago County, Illinois. *J Environ Health* 2023;85(7):8–15
- National Chemicals Information System(NCIS). Practical Guide for Chemical Accident Impact Investigation; 2022. p. 24
- National Chemicals Information System(NCIS). Regulations on the Preparation of Chemical Accident Prevention and Management Plans, etc [Internet]. [cited 2026 Apr 29]. Available from: <https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%ED%99%94%ED%95%99%EC%82%AC%EA%B3%A0%EC%98%8%EB%B0%A9%EA%B4%80%EB%A6%AC%EA%B3%84%ED%9A%8D%EC%84%9C%EC%9E%91%EC%84%B1%EB%93%B1%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%A0%95>
- National Chemicals Information System(NCIS). Technical Guidelines on Accident Scenario Selection and Risk Analysis.; 2021. p. 49.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres) [Internet]. Seattle(WA): Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration; 2026 [cited 2026 Apr 24]. Available from:

- <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/aloha>
- National Research Council(NRC). Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process. Washington (DC): National Academy Press; 1983. p. 206
- Nikolopoulou D, Ntzani E, Kyriakopoulou K, Anagnostopoulos C, Machera K. Priorities and Challenges in Methodology for Human Health Risk Assessment from Combined Exposure to Multiple Chemicals. *Toxics* 2023;11(5):401 (<https://doi.org/10.3390/toxics11050401>)
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response. 3rd ed. Paris: OECD Publishing; 2023. p. 203
- Pałaszewska-Tkacz A, Czerczak S, Konieczko K. Chemical incidents resulted in hazardous substances releases in the context of human health hazards. *Int J Occup Med Environ Health* 2017;30(1):95-110 (<https://doi.org/10.13075/ijom.1896.00734>)
- Park SH, Lim HB, Hong HJ, Kim HS, Yoon DK, Lee HW, Kong HK, Jeon JI, Choi JW, Cho EM, Cho YS, Lee CM. Health risk assessment for multimedia exposure of formaldehyde emitted by chemical accident. *Environ Sci Pollut Res* 2020;28:9712-9722 (<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11403-w>)
- Park SH. Study on application of the exposure and risk assessment method based on personal oriented location for exposure to hazardous chemical by chemical accident [dissertation]. Seoul: Seokyeong University; 2023
- Park SY. Development of an AI-Based Integrated Personal Exposure Assessment System for Predicting Personal Exposure to Urban PM2.5 and Trace Elements [dissertation]. Seoul: Seokyeong University; 2026
- Personal Information Protection Commission(PIPC). Guidelines for Processing Pseudonymized Information. Seoul: Personal Information Protection Commission; 2024. [Korean]
- Pouyakian M, Ashouri M, Eidani S, Madvari RF, Laal F. A systematic review of consequence modeling studies of the process accidents in Iran from 2006 to 2022. *Heliyon* 2023;9(2):e13550 (<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13550>)
- Prussia AJ, Hill J, Cornwell CR, Siwakoti RC, Demchuk E. Meta-analysis of animal applied to short-term inhalation exposure levels of hazardous chemicals. *Regul Toxicol Pharmacol* 2020;115:104682 (<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104682>)
- Shilnikova N, Momoli F, Karyakina N, Krewski D. Review of non-invasive biomarkers as a tool for exposure characterization in human health risk assessments. *J Toxicol Environ Health* 2025;28(2):122-150 (<https://doi.org/10.1080/10937404.2024.2428206>)
- Su C, Zhang H, Cridge C, Liang R. A review of multimedia transport and fate models for chemicals: Principles, features and applicability. *Sci Total Environ* 2019;668:881-892 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.456>)
- U.S. Department of Transportation(US DOT). 2024 Emergency Response Guidebook. Washington (DC): U.S. Department of Transportation; 2024. p. 392
- United States Department of Energy(US DOE). PAC Chemical Database[Internet]. Washington(DC): United States Department of Energy; 2026 [cited 2026 May 13]. Available from: <https://emhub1.energy.gov/pacteel>
- United States Environmental Protection Agency(US EPA). Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals[Internet]. Washington(DC): United States Environmental Protection Agency; 2026 [cited 2026 May 13]. Available from: <https://www.epa.gov/aegl>
- United States Environmental Protection Agency(US EPA). Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I: Human Health Evaluation Manual. Part A. Interim final. Washington (DC): Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency; 1989. EPA/540/1-89/002
- United States Environmental Protection Agency(US EPA). Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. Washington (DC): Office of Emergency Management; 2009. p. 134
- Vandenberg LN, Rayasam SDG, Axelrad DA, Bennett DH, Brown P, Carignan CC, Chartres N, Diamond ML, Joglekar R, Shamasunder B, Shrader-Frechette K, Subra WA, Zarker K, Woodruff TJ. Addressing systemic problems with exposure assessments to protect the public's health. *Environ Health* 2022; 21(121):1-20 (<https://doi.org/10.1186/s12940-022-00917-0>)
- World Health Organization(WHO). Manual for the Public Health Management of Chemical Incidents.; 2009. p. 167
- World Health Organization(WHO). WHO Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazards. Harmonization Project Document No. 8. Geneva: World Health Organization; 2010. ISBN 978-92-4-154807-6
- Yoon CS. Current Status of Chemical Substance Management in Korea 3: Emergency (Leak,

Accident) Standards for Chemical Substances.
Korean Industrial Health Association 2016;Jul:22-31

Zhang X, Wang J. Atmospheric dispersion of
chemical, biological, and radiological hazardous
pollutants: Informing risk assessment for public
safety. J Saf Sci Resil 2022;3(4):372-397

(<https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.09.001>)

<저자정보>

정지윤(박사과정 연구원), 박시현(연구교수), 최재원(석사
과정 연구원), 이철민(교수), 윤성원(교수)