

AERMOD를 활용한 건강위해성평가 및 배출저감제도에 관한 연구

A Study on Health Impact Assessment and Emissions Reduction System Using AERMOD

박성수¹ · 김덕한² · 김홍관³ · 천영우^{4*}Seong-Su Park¹, Duk-Han Kim², Hong-Kwan Kim³, Young-Woo Chon^{4*}¹Graduate Student, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea²Doctoral Student, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea³Adjunct Professor, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea⁴Associate Professor, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Young-Woo Chon, ponychon@inha.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: This study aims to quantitatively determine the impact on nearby residents by selecting the amount of chemicals emitted from the workplace among the substances subject to the chemical emission plan and predicting the concentration with the atmospheric diffusion program. **Method:** The selection of research materials considered half-life, toxicity, and the presence or absence of available monitoring station data. The areas discharged from the materials to be studied were selected as the areas to be studied, and four areas with floating populations were selected to evaluate health risks. **Result:** AERMOD was executed after conducting terrain and meteorological processing to obtain predicted concentrations. The health hazard assessment results indicated that only dichloromethane exceeded the threshold for children, while tetrachloroethylene and chloroform appeared at levels that cannot be ignored for both children and adults. **Conclusion:** Currently, in the domestic context, health hazard assessments are conducted based on the regulations outlined in the “Environmental Health Act” where if the hazard index exceeds a certain threshold, it is considered to pose a health risk. The anticipated expansion of the list of substances subject to the chemical discharge plan to 415 types by 2030 suggests the need for efficient management within workplaces. In instances where the hazard index surpasses the threshold in health hazard assessments, it is judged that effective chemical management can be achieved by prioritizing based on considerations of background concentration and predicted concentration through atmospheric dispersion modeling.

Keywords: Health risk assessment, AERMOD, Chemical substances, Emissions, Carcinogenicity

요약

연구목적: 사업장 주변에 배출되는 화학물질의 양을 선정하여 대기확산 프로그램으로 농도를 예측하여 인근 주민들에게 영향을 정량적으로 파악하는 것을 목적으로 하였다. **연구방법:** 연구물질의 선정은 반감기, 독성, 이용 가능한 측정소 자료의 유무를 고려하였다. 또한 연구대상물질에서 배출되는 지역을 연구대상 지역으로 선정하였으며, 유동인구가 있는 4개 지역을 선정하여 건강위해성을 평가하였다. **연구결과:** AERMOD를 구동하기 위하여 지형 및 기상 처리를 실시 후 예측 농도를 구하였다. 위해성 평가 결과 어린이에서만 디클로로메탄이 초과되는 것으로 나타났으나, 테트라클로로에틸렌과 클로로포름은 어린이와 성인 모두 무시할 수 없는 수준으로 나타났다. **결론:** 현재 국내 건강위해성평가는 “환경보건법”의 규정에 따라 위해지수가 일정 기준을 초과할 경우 위해성이 있는 것으로 간주된다. 향후 화학물질배출 계획서 대상물질이 2030년에는 415종으로 확대되어 사업장에서 효율적인 관리가 필요함을 시사한다. 위해성 평가에서 위해지수를 초과하는 경우 대기확산 모델링을 통해 배경농도와 예측농도를 고려하여 우선순위를 부여함으로써 화학물질 관리를 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 건강위해성평가, AERMOD, 화학물질, 배출, 발암성

Received | 10 January, 2024

Revised | 18 March, 2024

Accepted | 19 March, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

환경부에 따르면 건강영향 피해현황 분석결과 발암현상 등 유해물질에 의한 피해가 두드러진 특징으로 나타나고 있다고 하였으며 공장 주변의 주민들과 공장의 근로자들에게 암이 유발하였다는 사례가 보도되고 있다(MOE, 2013). 기존 화학물질관리는 유독물질 중 즉각적인 사고 피해와 그 영향이 큰 물질을 대상으로 집중적인 관리가 이루어져 왔으나, 2022년 12월에는 유독물질 지정관리체계 개편에 따른 관리체계의 차등화로 인해 만성유해성 물질에 대한 관리 또한 중요한 관리 대상으로 부상되었다(MOE, 2022a).

경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)에서는 의제21의 19장 “유해화학물질의 안전관리”의 이행을 위해 화학물질배출량조사제도(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR)를 회원국들에게 도입할 것을 권고함에 따라 1996년 7월 석유정제업종, 화학업종을 시범사업으로 국내에 도입되었다(MOE, 2023). 이후 환경부에서는 매년 ‘화학물질 배출량 조사결과’ 보고서를 발표하고 있으며 최근 발표된 ‘2021년 화학물질 배출량조사보고서’에 따르면 2020년 대비하여 화학물질 취급량은 11.4%(22,059천톤), 배출량은 8.3%(5,006톤) 증가하였으며 대기 99.6%, 수계 0.4%로 배출되었다(MOE, 2022b). 사업장의 제조 또는 사용과정에서 환경으로 배출되는 화학물질의 양을 사업자 스스로 파악하고, 배출저감노력을 통해 제품과 원료물질의 배출손실을 줄여 환경오염을 최소화해야 함에도 불구하고 사업장의 자체적 노력의 부족, 전국 단위의 종합적·체계적인 저감 관리의 한계로 인해 배출량을 감소시키는 것은 매우 어려운 실정이다(NICS, 2020). 2019년 배출저감계획서 제도의 도입, 2020년 저감 대상 화학물질 9종(벤젠, 염화비닐, 트리클로로에틸렌, 1,3-부타디엔, 클로로포름, N,N-디메틸포름아미드, 디클로로메탄, 아크릴로니트릴, 테트라클로로에틸렌)을 선정하였고, 2025년 53종, 2030년 415종으로 대상을 점차 확대하여 배출량의 저감을 유도하는 제도적 장치를 마련하였다(MOE, 2022c).

본 연구에서는 현재 9종인 배출저감계획 대상물질 중 발암성이 있고 배출량이 많으며 인근 지역주민에게 위대한 건강영향을 줄 것으로 예상되는 지역을 선정하고 대기확산모델 프로그램을 활용하여 건강위해성평가를 통한 정량적 평가를 하고자 하였다.

연구방법

연구절차

연구대상

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 화학물질 배출저감계획서 제출대상 9종의 화학물질 중에서 발암성과 반감기(Half life in air), 대기오염측정망을 통한 데이터 확인이 가능한 물질을 선정하여 산업단지 내 위치한 대기오염물질 배출사업장 인근 주민들에게 건강영향의 유무 및 정도를 파악하고자 하였다. 연구대상물질은 Table 1과 같이 Chloroform (발암성 구분 2, CAS No. 67-66-3), Dichloromethane (발암성 구분 1B, CAS No. 75-09-2), Tetrachloroethylene (발암성 구분 1B, CAS No. 127-18-4), Trichloroethylene (발암성 구분 1A, CAS No. 79-01-6)의 4종으로 모두 발암성으로 분류하고 반감기가 10일 이상인 사업장 근로자 및 인근 지역주민에 건강영향을 입힐 수 있는 물질이다. 연구대상물질 4종을 모두 배출하고 있는 지역을 선정하기 위하여 ‘화학물질 배출·이동량 정보시스템’의 화학물질 배출량 조사결과 세부통계(2020) 자료를 참고하여 반월·

시화국가산업단지 내 유동 인구가 있는 4개의 지역을 선정하여 평가하였다.

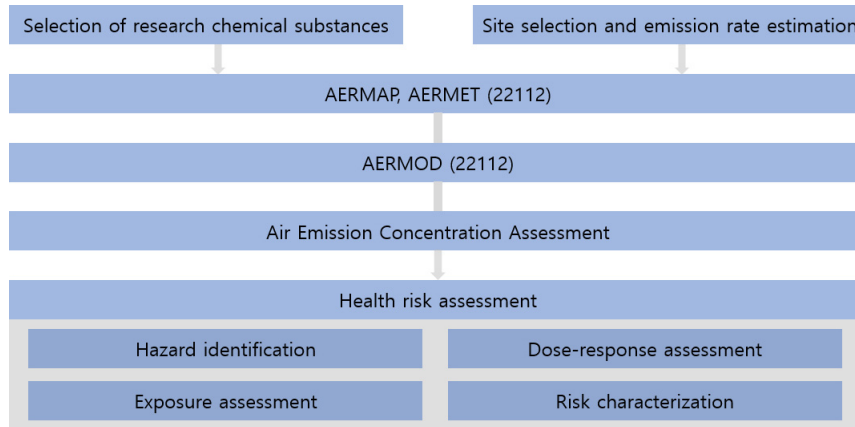


Fig. 1. Flowchart of this study

Table 1. Chemical substances properties

Chemical substance	CAS No.	Carcinogenicity	Half life in air (day)
Chloroform	67-66-3	2B*	70
Dichloromethane	75-09-2	1B*	107.01
Tetrachloroethylene	127-18-4	1B*	50
Trichloroethylene	79-01-6	1A [†]	13.3

B*: Known to have carcinogenic potential for humans, A[†]: Known or presumed human carcinogens

연구 방법

본 연구에서 선정된 지역의 대기농도를 평가하기 위해서 대기 확산 모델링 프로그램인 AERMOD (American Meteorological Society/United States Environmental Protection Agency Regulatory Model)를 사용하였다. 해당 모델은 미국 환경보호청 (United States Environmental Protection Agency, EPA)에서 규제하고 있으며 국내 환경영향평가정보지원시스템(Environmental Impact Assessment Support System, EIASS) 평가 시 사용하고 있는 모델을 선정하였다.

AERMOD 대기 확산 모델링을 하기 위해서는 크게 지형자료, 기상자료가 필요하다. 지형자료는 AERMAP (AERMOD terrain pre-processor) 자료를 구축하기 위해서 국토교통부 국토정보플랫폼(<http://map.ngii.go.kr>)에서 DXF (Drawing eXchange format) 파일을 수집하여 DEM (Digital Elevation Models) 파일로 변환한 자료를 사용하였다. 기상자료는 AERMET (AERMOD meteorological pre-processor) 자료를 구축하여야 하며 지상과 상공으로 구분된다. 기상자료는 기상청 기상자료개방포털(<http://data.kma.go.kr>)에서 해당지역의 종관 관측자료를 확보하여 CD-144 형식으로 변환하여 사용하였다. 상공자료는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 자료를 FSL (Forecast Systems Laboratory) 파일 형식으로 변환하여 사용하였다. 국내 자료의 경우 AERMOD 모델링의 적합한 데이터의 변환이 불가능하여 미국 자료를 활용하였으며 전체적인 처리과정은 Fig. 2와 같다.

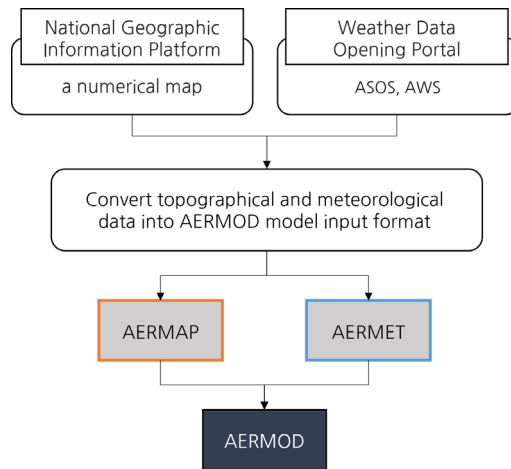


Fig. 2. AERMOD processing process

제어 옵션(Control options), 배출 정보(Source information), 수용체 정보(Receptor information), 기상 정보(Meteorology information), 출력 옵션(Output options)의 AERMOD 입력 항목 총 5가지로 입력하여 연구대상지역에서 나타나는 물질의 농도를 분석하였다. 이후 가시화를 위해 QGIS (Quantum Geographic Information System) 프로그램을 사용하여 등농도 곡선으로 나타내었다. 이를 바탕으로 건강위해성평가를 다음의 4단계를 거쳐 실시하였다.

1단계는 선정된 4종의 화학물질을 대상으로 유해성을 확인하였다. 유해성에 관한 데이터 및 정보를 수집하여 발암성 존재 여부를 Table 2와 같이 판단하고, 발암성이 있는 경우 강도의 정도를 확인하였다.

Table 2. Classification criteria for carcinogenicity

Institution	Category	Classification criteria
EU CLP*	Group 1A	Known to have carcinogenic potential for humans
	Group 1B	Presumed to have carcinogenic potential for humans
	Group 2	Suspected human carcinogens
ACGIH†	Group A1	Confirmed human carcinogens
	Group A2	Suspected human carcinogens
	Group A3	Confirmed animal carcinogen with unknown relevance to humans
	Group A4	Not classifiable as a human carcinogens
	Group A5	Not suspected as a human carcinogens
IARC‡	Group 1	Carcinogenic to humans
	Group 2A	Probably carcinogenic to humans
	Group 2B	Possibly carcinogenic to humans
	Group 3	Not classifiable as to its carcinogenicity to humans
NTP§	Group 4	Probably not carcinogenic to humans
	K	Known to be human carcinogens
	R	Reasonably anticipated to be a human carcinogen

*EU CLP : European Union Classification and Labeling/Packaging regulation

†ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists

‡IARC : International Agency for Research on Cancer

§NTP : National Toxicology Program

2단계는 발암 위험도를 결정하기 위한 자료인 용량-반응 평가자료를 수집하였다. US EPA의 IRIS와 CompTox Chemicals Dashboard를 활용하였으며, IUR (Inhalation Unit Risk), OSF (Oral Slope Factor), RfD (Reference Dose), RfC (Reference Concentration), CSF (Cancer potency Slope Factor)을 확인하였다.

3단계는 확인된 유해성을 바탕으로 노출평가를 실시하였다. 노출평가는 노출농도, 기간 및 수용체의 정보를 사용하여 물질에 대한 평생 1일 평균 노출량을 산정하였다.

4단계는 산정된 평생 1일 평균 노출량을 바탕으로 발암 위험도를 결정하였다. 발암위해도는 평생 1일 평균 노출량과 발암 잠재력을 활용하여 산정하였으며, 위험도 판단기준은 「환경보건법 시행규칙」 [별표1] 위험성기준에서 정하고 있는 10^{-6} 을 기준으로 평가하여 보수적인 기준을 적용하였다.

연구결과

대기확산모델 처리 과정

지형자료와 기상자료의 구축 과정 결과는 다음과 같다. 먼저 지형자료를 구축하기 위하여 국토교통부 국토정보플랫폼에서 대상지역에 속하는 5000:1 지도 24개를 DXF (Drawing eXchange Format) 파일로 수집하여 지리정보를 확보하였다. Auto CAD (2023, Autodesk) 프로그램을 사용하여 하나의 지도로 병합하였으며, 국가공간정보포털 NGImap 1.0을 원점 및 좌표 변환을 사용하여 등고선을 추출하였다. 추출된 지형자료를 미국 EPA의 AERMOD 지원 방식인 DEM (Digital Elevation Models) 형식으로 Fig. 3과 같이 변환하였다.

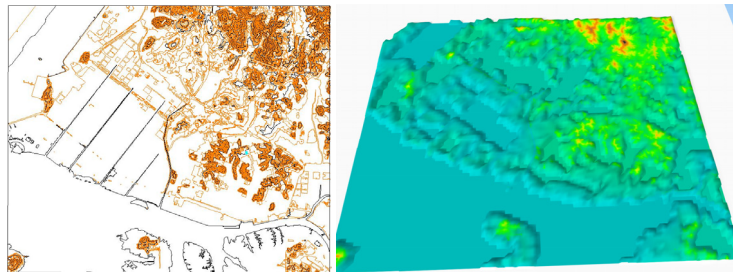


Fig. 3. The geography of the target area

다음으로 기상자료를 구축하기 위하여 기상자료는 AERMET의 Stage 1의 품질보증단계(QA)와 Stage 2를 거쳐 SFC 파일로 구축하였고, 상공자료는 AERMET의 Stage 1인 품질보증단계(QA)와 Stage 2인 Input 파일을 작성하여 PFL 파일로 구축하였다. 전체적인 처리과정은 Fig. 4와 같다.

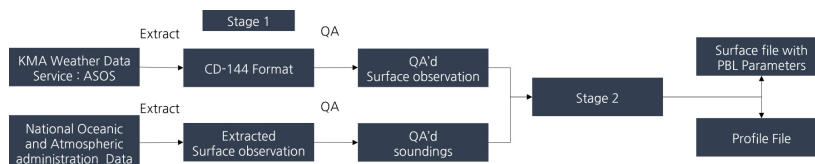


Fig. 4. AERMET weather processing flow chart

지상의 기상자료 구축 시 정확성을 높이기 위해 CD-144의 입력 항목에 따른 차이점을 확인하였다. 국내자료의 항목들을 최대한 고려하기 위하여 CD-144의 형식은 총 11가지로 입력 변수인 지점번호, 기간, 운고, 해면기압, 이슬점온도, 풍향, 풍속, 지표기압, 온도, 습도, 총운량인 자료와 최소한의 AERMET의 구동이 가능한 총 7가지의 입력 변수인 지점번호, 기간, 운고, 풍향, 풍속, 온도, 총운량인 자료를 통해 AERMOD의 농도를 Fig. 5와 같이 등농도 곡선으로 차이를 확인해 보았다.

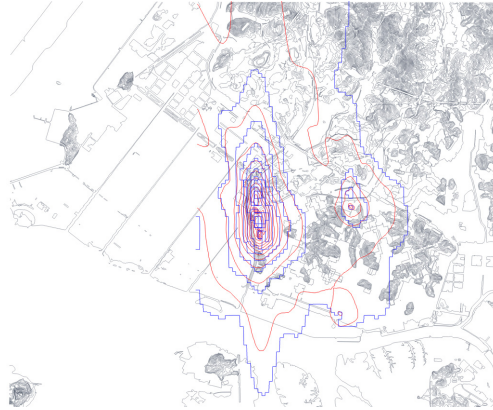


Fig. 5. Changes in concentration according to variables in CD-144 format

구축된 지형자료와 기상자료를 통해 AERMOD의 입력 파일(AERMOD.INP)의 입력 항목 중 제어 옵션에는 3시간, 8시간, 24시간 및 단기간 평균농도(1시간)의 처리과정을 입력하였으며, 물질의 반감기 항목을 입력하였다. AERMAP을 구동하여 도출된 배출원의 좌표, 면적 및 배출량 값은 배출 정보에 입력하였고, 지형 좌표 및 고도 값은 수용체 정보에 입력하였다. 기상 정보에서는 AERMET로 생성된 기상 변수들이 자동으로 입력되도록 하였고, 출력 옵션에 시간 및 예측점 별 평균 농도 값이 출력되도록 설정하였다.

대기확산모델 결과

본 연구는 AERMOD 결과로 예측 농도 평가를 진행하기 위해 선정한 주거지역인 A, B, C, D에 각 최고농도로 노출되는 지점을 기준으로 하여 분석하였다. 클로로포름이 배출되는 사업장은 2개소이며 클로로포름이 가장 높게 나타난 지역은 A지역으로 평균농도가 $0.00187\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 또한 B지역 $0.00110\mu\text{g}/\text{m}^3$, C지역 $0.00154\mu\text{g}/\text{m}^3$, D지역 $0.00136\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 디클로로메탄의 배출사업장은 21개소이며 디클로로메탄이 가장 높게 나타난 지역은 A지역으로 평균농도가 $0.11834\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났다. B지역은 $0.07587\mu\text{g}/\text{m}^3$, C지역은 $0.05716\mu\text{g}/\text{m}^3$, D지역은 $0.05834\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 테트라클로로에틸렌이 배출되는 사업장은 2개소이며, 테트라클로로에틸렌이 가장 높게 나타난 지역은 A지역으로 평균농도가 $0.00807\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났다. B지역은 $0.00500\mu\text{g}/\text{m}^3$, C지역은 $0.00427\mu\text{g}/\text{m}^3$, D지역은 $0.00483\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 마지막으로 트리클로로에틸렌은 2개소 사업장이 배출하고 있으며 가장 높게 나타난 지역은 A지역으로 평균농도가 $0.00361\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. B구역은 $0.00191\mu\text{g}/\text{m}^3$, C구역은 $0.00259\mu\text{g}/\text{m}^3$, D구역은 $0.00219\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 이후 AERMOD를 통해 나타낸 값은 AERMAP(지형 분석)과 AERMET(풍속, 풍향, 대기안정도, 기온 등 분석)를 통해 주거단지별 농도 변화를 나타내었으며, 전체적인 결과는 Table 3, Fig. 6과 같이 나타내었다.

Table 3. Average concentration of chemical substances in residential complex (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Chemical substance	A zone	B zone	C zone	D zone
Chloroform	0.00187	0.00110	0.00154	0.00136
Dichloromethane	0.11834	0.07587	0.05716	0.05834
Tetrachloroethylene	0.00807	0.00500	0.00427	0.00483
Trichloroethylene	0.00361	0.00191	0.00259	0.00219

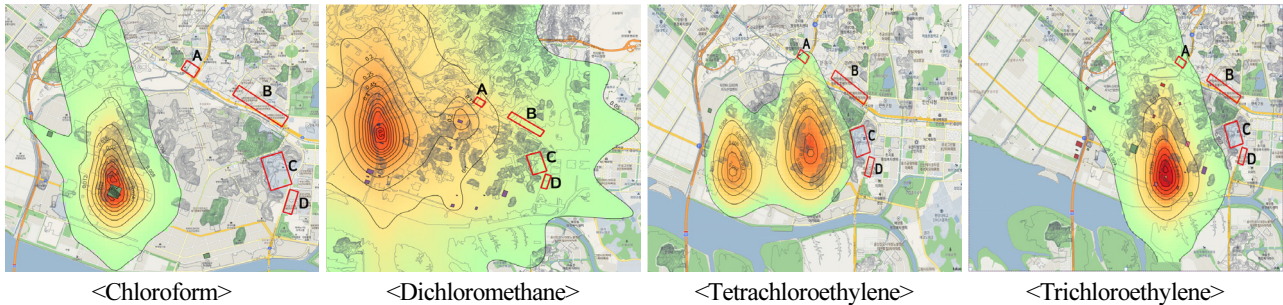


Fig. 6. Changes in concentration according to variables in CD-144 format

건강위해성평가

건강위해성평가는 특정화학물질이 인체에 어떠한 경로를 통해 유해요인에 노출되어 나타나는 위해의 정도를 정량적으로 평가하는 방법을 말하고, 본 연구에서는 산정된 배출량을 토대로 AERMOD를 수행하여 농도를 예측하였으며 대기환경연보 2020의 연구대상물질의 농도를 참고하여 예측한 농도와 대기오염측정망 자료의 농도를 합하여 농도를 구하였으며 Table 4와 같다.

Table 4. Concentration values of substances to be studied in residential areas (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Zone	Chloroform	Dichloromethane	Tetrachloroethylene	Trichloroethylene
A	0.32166	2.20367	0.15613	0.88352
B	0.32089	2.16120	0.15306	0.88182
C	0.32133	2.14249	0.15233	0.88250
D	0.32115	2.14367	0.15289	0.88210

유해성 확인

연구에서 선정된 4종의 물질 유해성에 관한 데이터 및 정보를 수집하기 위하여 국외는 EU CLP, ACGIH, NTP를 활용하였으며, 국내는 화학물질안전원, 국립환경과학원, 고용노동부의 고시 자료를 참고하여 Table 5에 나타내었다. 유해성 확인은 사람이나 동물 연구결과를 종합하여 발암성 존재 여부를 판단하고 발암성이 있다면 강도는 어느 정도인지를 평가하는 단계이다. 유해성 확인 결과 4종의 물질 모두 발암성 물질에 해당하는 것으로 나타났다.

Table 5. Result of classification of substances subject to study by institution

Institution	Chloroform	Dichloromethane	Tetrachloroethylene	Trichloroethylene
IARC	2B	2A	2A	1
EU CLP	2	2	1B	1B
ACGIH	A3	A3	A3	A2
NTP	R	R	R	K

용량-반응평가

용량-반응평가는 화학물질에 대해 유해성이 확인되었다면 그 물질의 위험성(Risk)을 수량적으로 표현하는 단계로서 비발암성 물질과 발암성 물질에 대한 접근법이 서로 다르다. 기존의 이용 가능한 용량-반응평가 자료가 충분할 경우에는 그 결과를 인용할 수 있다(NIER, 2021). EPA에서 제시하고 있는 데이터베이스(IRIS)와 US EPA CompTox Chemicals Dashboard를 국내·외의 유해성 확인 자료를 기반으로 검토하였다. 해당 데이터베이스들은 용량-반응평가로 유해성이 확인된 자료로 자료의 검토과정을 줄임으로써 시간을 절약할 수 있다. 검토 항목은 IUR (Inhalation unit risk), OSF (Oral slope factor), RfD (Reference dose), RfC (Reference concentration), CSF (Cancer potency slope factor)를 확인하였으며, Table 6과 같다.

Table 6. Chemical hazard value

Chemical substance	IUR* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OSF** (mg/kg/day)	RfD*** (mg/kg/day)	RfC [†] (mg/m ³)	CSF [‡] (mg/kg/day)
Chloroform	2.3E-5	-	1.0E-2	-	3.1E-2
Dichloromethane	1.0E-8	2.0E-3	6.0E-3	6.0E-1	2.0E-3
Tetrachloroethylene	2.6E-7	2.1E-3	6.0E-3	4.0E-2	2.1E-3
Trichloroethylene	4.1E-6	4.1E-2	5.0E-4	2.0E-3	4.6E-2

*IUR : Inhalation unit risk, **OSF : Oral slope factor, ***RfD : Reference dose,
[†]RfC : Reference concentration, [‡]CSF : Cancer potency slope factor

노출평가

노출평가 대상은 지역 내 주거단지에 거주하는 어린이와 성인으로 하였으며, 화학물질 노출농도는 대기확산 모델링 결과 값을 이용하여 주거단지의 농도 값에 대하여 ‘대기환경연보 2020’의 측정망 자료를 활용 및 보정하여 이용하였다. 노출기간은 환경기준 설정 시 일반적으로 기준인 70년으로 가정하고, 노출 대상의 호흡률과 체중은 ‘한국인의 노출계수 핸드북(2019)’(NIER, 2019a), ‘한국 어린이의 노출계수 핸드북(2019)’(NIER, 2019b)을 활용하였으며 평균 수명은 국립환경과학원고시 제2021-13호 「화학물질 위해성 평가의 구체적 방법 등에 관한 규정」에서 위해성 평가 시 적용되는 82.7년을 적용하였으며 사용한 식은 식(1)과 같다.

$$LADD = \frac{CA \times IR \times ED}{BW \times AT} \tag{1}$$

여기서, LADD : Lifetime Average Daily Dose (mg/day/kg)

CA : Background and AERMOD Predicted Concentration (mg/m³)

IR : Inhalation rat (m³/day)

ED : Exposure duration (year)

BW : Body weight (kg)

LT : Life time (day)

A~D지역까지 노출평가를 수행한 결과는 Table 7과 같다. 디클로메탄이 AERMOD를 통한 예측농도와 측정망 자료의 농도가 높아서 어린이와 성인 모두 다른 물질에 비하여 높은 값을 가지게 되었다. 어린이와 성인의 차이는 예를 들어, A지역의 어린이인 경우 디클로로메탄 노출량이 7.27×10^{-4} mg/kg/day인 경우 어린이가 대기 흡인 경로를 통해 디클로로메탄에 일일 평균 체중 1kg 당 7.27×10^{-3} mg 정도로 노출된다는 것을 의미한다. 그러나 이 수치 자체의 의미는 화학물질의 노출량만을 고려하고 있으며 위해성은 고려하지 않았기 때문에 최종적인 평가는 위해도 평가 결과를 진행하여야 한다.

Table 7. Average daily exposure by chemical substances (Unit : mg/day/kg)

Zone	Chloroform		Dichloromethane		Tetrachloroethylene		Trichloroethylene	
	Children	Adult	Children	Adult	Children	Adult	Children	Adult
A	1.06E-04	6.53E-05	7.27E-04	4.48E-04	5.15E-05	3.17E-05	2.92E-04	1.79E-04
B	1.06E-04	6.52E-05	7.13E-04	4.39E-04	5.05E-05	3.11E-05	2.91E-04	1.79E-04
C	1.06E-04	6.53E-05	7.07E-04	4.35E-04	5.03E-05	3.09E-05	2.91E-04	1.79E-04
D	1.06E-05	6.52E-05	0.80E-04	4.35E-04	5.03E-05	3.11E-05	2.91E-04	1.79E-04

위해도평가 결과

위해도 결정은 유해대기오염물질에 특정 농도로 노출되었을 경우 용량-반응 평가 및 인체 노출평가 결과를 반영하여 개인이나 인구집단에서 유해한 영향 정도, 즉, 암과 같은 영향이 발생할 확률을 결정하는 것이다. 위해성 유무 및 정도에 대한 평가의 기준은 「환경보건법 시행규칙」 [별표1]에 따라 위해도 지수가 10^{-6} 이 초과되는 경우로 하였다. 연구대상인 4가지 화학물질 모두 유해성 확인결과 발암성이 존재하는 물질이기 때문에 발암 위해도를 산정하기 위하여 발암 잠재력(Cancer potency slope factor)과 평생 일일 평균 노출량(Lifetime average daily dose)을 곱하여 발암 위해도(Cancer risk)를 결정하였으며 사용한 식은 식(2)와 같다.

$$CR = LADD \times CSF \tag{2}$$

여기서, CR : Cancer risk

LADD : Lifetime Average Daily Dose (mg/day/kg)

CSF : Carcinogenic potency factor (mg/day/kg)⁻¹

발암 잠재력은 용량-반응평가 항목에서 US EPA의 CompTox Chemicals Dashboard를 참고하여 발암잠재력 값을 사용하였다. 인체노출량은 노출평가 시 평가된 결과를 활용하여 계산한 값을 이용하였다. 발암 위험도는 발암잠재력과 평생 일일 평균 노출량을 곱한 값을 통해 구하며, 위해성 유무 및 정도에 대한 판단기준은 「환경보건법 시행규칙」 [별표1]에서 정하고 있는 10^{-6} 을 기준으로 하였다. 10^{-6} 이상인 경우 해당 물질로 인한 위해성이 있다고 판단하고, 10^{-6} 보다 큰 수인 경우 위해성이 커지는 것이다. 본 연구는 주거지역 A, B, C, D에 대한 4가지 물질은 모두 발암성 물질이며, 발암 위험도를 계산한 결과는 Table 8과 같다.

Table 8. Carcinogenic hazard values of residential areas A, B, C and D (Unit : mg/day/kg)

Zone	Chloroform		Dichloromethane		Tetrachloroethylene		Trichloroethylene	
	Children	Adult	Children	Adult	Children	Adult	Children	Adult
A	3.29E-06	2.03E-06	1.45E-06	8.95E-07	1.08E-07	6.66E-08	1.34E-05	8.26E-06
B	3.28E-06	2.02E-06	1.43E-06	8.78E-07	1.06E-07	6.53E-08	1.34E-05	8.24E-06
C	3.29E-06	2.02E-06	1.41E-06	8.70E-07	1.06E-07	6.50E-08	1.34E-05	8.25E-06
D	3.29E-06	2.02E-06	1.42E-06	8.71E-07	1.06E-07	6.52E-08	1.34E-05	8.24E-06

위해성 평가 결과 어린이의 경우 클로로포름, 디클로로메탄은 A, B, C, D지역 모두 발암위해도 수준이 10^{-6} 으로 초과되었으며, 트리클로로에틸렌은 A, B, C, D지역 모두 발암 위해도 수준이 10^{-5} 로 초과된다. 성인의 경우 클로로포름, 트리클로로에틸렌은 A, B, C, D지역 모두 발암위해도 수준이 10^{-6} 으로 초과되는 것으로 확인되었다. 따라서 디클로로메탄은 어린이의 경우에만 초과되는 것으로 나타났으며 테트라클로로에틸렌, 클로로포름은 어린이, 성인 모두 위해를 무시할만한 수준이 아닌 것으로 판단된다.

위해도 결정 시 변동 있는 인자 값과 변동 없는 인자 값으로 도출되었다. 인자 값의 변동이 없는 것은 호흡률, 노출기간, 체중, 평균 노출기간이며, 값이 변동되는 항목의 인자 값들은 AERMOD로 평가한 예측농도, 측정망 데이터의 농도 및 용량-반응을 통해 나타난 화학물질의 발암잠재력이다. 즉, 평가 시 변동이 되는 값은 AERMOD를 통한 예측농도, 측정망 데이터의 농도 및 발암잠재력의 인자 값으로 나타났다. 각 물질의 변동이 되는 인자 값들의 항목들을 평가하고자 건강영향평가를 진행한 A지역에 Eq.02를 활용하였다. 현재 국내 건강위해성평가를 통해 국내 「환경보건법 시행규칙」 [별표1]에 따라 위해도 지수가 10^{-4} ~ 10^{-6} 이 초과될 경우로 평가하고 있으나 해당 범위에 속함에 따라 물질에 대한 관리가 필요하다고 판단되는 경우 발암 위해도 값의 순위와 배경농도 및 사업장에서 배출되는 물질의 농도 값을 고려하여 우선순위를 Table 9로 나타내었다.

Table 9. Interpretation of research results

Division	Chloroform	Dichloromethane	Tetrachloroethylene	Trichloroethylene
CR*	2.03E-06	3.59E-07	3.77E-07	8.26E-06
A**	99.4186%	94.6299%	94.8313%	99.5914%
B***	0.5814%	5.3701%	5.1687%	0.4086%
CR Ranking	2	3	4	1
A, B Ranking	1	3	4	2

*CR : Background concentration+Predicted concentration through AERMOD,

** A : $CR/[BC/(\frac{CSF \times IR \times ED}{BW \times AT})]$, *** B : $CR/[PC/(\frac{CSF \times IR \times ED}{BW \times AT})]$

고찰

본 연구는 건강위해성평가를 진행하기 위해 AERMOD를 통해 농도를 예측하였다. 농도를 예측하기 위해서는 국내자료를 사용 시 AERMOD의 입력 형식에 맞는 지형 및 기상자료를 구축하여야 한다(Do, 2010). 기상자료는 대기질 모델링에서 오염물질의 이류-확산 모사와 예측결과의 신뢰성에 가장 크게 영향을 미치는 요소로 정확한 자료의 입력이 필요하다(Song et al., 2007). 이를 통해 입력 형식에 맞는 국내 기상자료 전처리 프로그램의 개발이 진행되어 왔다(Lim&Bae, 2015). 또한, 국내 환경영향평가정보지원시스템(EIASS)에서 대기질 영향을 평가 시 사용하고 있다. 하지만, 지형 및 기상 전처리 프로그램의 가변 배출계수 및 모델링 입력자료 구성을 구체적으로 설명할 필요가 있다고 하였다(Kim et al., 2023). 또한 AERMET의 대표적 형식인 CD-144와 ISHD의 형식을 비교분석하여 토지의 피복도, 풍속의 단위 변환 등의 차이로 인해 농도의 차이가 나타나 국내자료를 통해 AERMOD 사용 시 국내자료를 입력 형식으로 변환 시 모델 적용 방법을 표준화할 필요가 있다(Kim et al., 2022). 이를 바탕으로 본 연구에서는 AERMOD의 정확한 농도를 예측하기 위해 CD-144의 입력 변수들의 차이를 두어 등농도 곡선으로 표현하였다. 농도를 예측한 결과 농도의 차이가 나타나는 것을 확인하였으며, 국내자료를 AERMOD의 입력 형식을 변환 시 모델 적용 방법을 표준화할 필요가 있다.

환경부는 2019년 배출저감계획서를 도입하여 사업장은 향후 2030년에 415종의 대상으로 배출저감계획서를 제출하여야 한다. 하지만 이행 절차 중 실현 가능성 등을 고려하여 사업장에서 자율 설정으로 되어 있다. 이에 배출저감에 대한 방안을 모색하고자 한 본 연구는 화학물질 배출저감계획서 제출 대상 9종의 물질 중 반감기, 측정자료, 발암성을 고려하여 클로로포름, 디클로로메탄, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌 4종을 선정하였다. 화학물질 배출·이동량 정보시스템의 세부통계 자료를 활용하여 배출량을 선정하였다. 또한 본 연구는 향후 415종으로 확대되는 배출저감계획서를 고려하여 건강위해성평가 시 획일한 평가 방안을 모색하였다. 연구대상물질인 4종 모두 유해성 확인 결과 발암성을 가지는 화학물질로 발암 위해도 식의 접근을 하였고, 노출평가 항목에서 평생 평균 일일 노출량의 식은 물질의 농도(대기 확산 모델링을 통한 농도 예측과 측정망 데이터의 합)를 기준으로 각 인자의 값(호흡률, 체중, 기대수명, 노출기간)을 반영하여 결정하였다. 위해도 평가 시 평생 평균 일일 노출량과 발암잠재력을 고려하는 구조로 이루어져 있다. 즉 노출평가에 사용되는 물질의 농도와 위해도 결정 시 용량-반응평가의 발암잠재력 값으로 건강위해성평가 결과가 결정된다. 위해도 지수가 10^{-4} ~ 10^{-6} 의 범위에 속함에 따라 위해도에 대한 관리가 필요하다고 판단되는 경우 배경농도와 대기확산모델링을 통한 농도 예측의 비교를 통해 사업장에서 저감 계획에 대한 우선순위를 살펴볼 수 있을 것으로 판단된다. 대기 중에 존재하는 배경농도가 높은 지역인 경우 특정 사업장에 배출한 물질로 인해 발암성이 발생하는 것에 기여하였다고 보기에는 어려움이 따르므로 관리와 다른 관점에서 접근될 필요성이 있다고 보며, 건강영향평가를 통해 위해도 지수가 초과하여 대기확산모델링을 통한 농도가 높은 경우에는 사업장에 대한 관리가 적절하게 수행되어야 할 것으로 보여진다. 연구대상물질은 모두 발암성이 존재하였으며 발암잠재력은 10^{-2} ~ 10^{-3} 의 범위로 다양하게 분포하고 있다. 농도가 높은 경우일지라도 화학물질의 발암잠재력이 낮은 경우 인체에 영향을 주지 않는 결과를 얻을 수 있었으며, 반대로 물질의 배경농도와 대기확산 모델링을 예측한 농도 값이 타 물질에 비하여 낮은 경우 발암잠재력이 높은 경우 인체에 영향을 주는 결과를 얻을 수 있었다.

따라서, 배출저감계획서의 제도를 통해 사업장의 배출량 저감 계획에 있어 사업장의 자율적인 저감 계획의 목표를 두고 있다. 하지만, 향후 2030년 415종으로 확대되는 것에 대해 사업장마다 효율적인 관리가 필요할 것으로 보아 본 연구와 같이 건강위해성평가를 통해 위해도 지수가 초과되는 경우 배경농도와 대기 확산 모델링을 통한 예측농도의 값을 고려하여 우선순위를 정하는 것을 고려한다면 화학물질의 관리를 적절하게 이행할 수 있을 것이다.

결론

본 연구에서는 사업장에서 배출되는 화학물질에 대한 건강위해성평가를 실시하였다. 연구대상물질을 선정하기 위해 배출저감 대상물질 9종 중 실제 인근 거주민에게 영향을 줄 우려가 있는 방안을 모색하기 위해 반감기, 측정자료, 발암성 등을 고려하여 총 4종의 물질을 선정하였다. 대상 지역 내 화학물질의 농도를 파악하기 위해 대기확산 모델링(AERMOD)을 사용하여 예측농도 값을 구하였고, AERMOD의 정확한 농도를 예측하기 위해 CD-144의 입력 변수들의 차이를 두어 등농도 곡선으로 표현하였으며 농도를 예측한 결과 농도의 차이가 나타나는 것을 확인하였으며 국내자료를 AERMOD의 입력 형식으로 변환 시 모델 적용 방법을 표준화할 필요가 있다. 건강위해성평가 결과 디클로로메탄은 어린이의 경우에만 초과되었으나, 테트라클로로에틸렌, 클로로포름은 어린이, 성인 모두 위해를 무시할 수 없는 수준으로 나타났다. 본 연구에서는 배출저감계획서의 화학물질이 2030년에는 415종을 대상으로 하고 이러한 모든 화학물질을 사업장에서 관리하는데 어려움이 있으므로 건강영향평가를 수행하여 물질의 위해도 지수가 일정 수준을 초과하는 경우 배경농도와 대기 확산 모델링을 통한 예측농도 값을 종합적으로 고려하여 사업장 스스로 화학물질의 관리를 우선순위로 결정한다면 화학물질의 실제 영향을 평가하여 적절한 사업장 관리를 진행할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(P0012787, 2024년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- [1] Do, S.-H. (2010). Air Quality and Health Risk Assessment for the City of Daegu Using CALPUFF Diffusion Model. Ph.D. Dissertation, Kyemyoung University.
- [2] Kim, S.-H, Park, S.-H., Joo, H.-S., So, M.-S., Lee, N.-H. (2023). "A study on improvement of air quality dispersion model application method in environmental impact assessment(II) -Focusing on AERMOD model application method-." Journal of Environmental Impact Assessment, Vol. 32, No. 4, pp. 203-213.
- [3] Kim, S.-H, Park, S.-H., Tak, J.-S., Ha, J.-S., Joo, H.-S., Lee, N.-H. (2022). "A study on improvement of air quality dispersion model application method in environmental impact assessment(I) -Focusing on AERMOD model application method-." Journal of Environmental Impact Assessment, Vol.31, No. 5, pp. 271-285.
- [4] Lim, I.-H., Bae, S.-H. (2015). "A study on development of the meteorological data preprocessing program for air pollution modeling." The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 10, No. 1, pp. 47-53.
- [5] Ministry of Environment (MOE) (2013). Manual for Assessment of Health Impact Items. Sejong, Republic of Korea.
- [6] Ministry of Environment (MOE) (2022a). Together with Public and Private, a Plan to Reform the Toxic Substance Designation and Management System is Prepared. Sejong, Republic of Korea.
- [7] Ministry of Environment (MOE) (2022b). 2021 Chemical Release Inventory Survey. Sejong, Republic of Korea.
- [8] Ministry of Environment (MOE) (2022c). Appended Table 2 of the Regulations on the Investigation of Chemical

Substances and the Calculation of Emissions. Sejong, Republic of Korea.

- [9] Ministry of Environment (MOE) (2023). Domestic Implementation Background. Pollutant Release and Transfer Register. <http://icis.me.go.kr/prtr/dscamtExamInSystem/dmstcPrtnCrmstnCs.do>.
- [10] National Institute of Chemical Safety (NICS) (2020). 2020 Chemical Substance Emission Reduction Workplace Training (1. Overview of Chemical Substance Emission Reduction System) [video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=5Qv8quZ6h4I>
- [11] National Institute of Environmental Research (NIER) (2019a). Korean Children's Exposure Factor Handbook. Incheon, Republic of Korea.
- [12] National Institute of Environmental Research (NIER) (2019b). "Korean Exposure Factor Handbook. Incheon, Republic of Korea.
- [13] National Institute of Environmental Research (NIER) (2021). Atmospheric Environmental Yearbook 2020. Publication registration number 11-1480523-0011980-10, Incheon, Republic of Korea.
- [14] Song, Y., Moon, N., Sun, H., Lee, S. (2007). Study on Practical Guideline of Prediction Models in EIA. Environment Institute, Seoul, Korea.