환경영향평가 Vol. 34, No. 2(2025), pp.93-107 J. Environ. Impact Assess. 34(2): 93-107(2025) ISSN 1225-7184
https://doi.org/10.14249/eia.2025.34.2.93

Research Paper

산업단지 인근 지역의 환경대기 중 VOCs 인체 위해성 평가

전현재*, · 장용철* · 이규열** · 이지형** · 이동훈****

충남대학교 환경공학과*, 환경부 금강유역환경청**

Human Health Risk Assessment of VOCs in the Ambient Air from Industrial Complexes

HyunJae Jeon*, · YongChul Jang* · GyuYeol Lee** · JiHyeong Lee** · DongHun Rhee****

Department of Environment Engineering, Chungnam National University*
Geum River Basin Environmental Office, Ministry of Environment**

요약: 본 연구는 대산, 울산, 여수 산업단지 인근 지역의 환경대기 중 휘발성 유기화합물(VOCs)에 대한 인체 위해성을 평가하는 것을 목표로 하였다. 2021년부터 2023년까지 국립환경과학원(NIER)의 유해대기물질 측정망 데이터를 활용하여 VOCs의 농도 분포를 분석하고, 비발암 및 발암 위해성을 평가하였다. 각 산업단지 별 VOCs 분석 결과, 모든 산업단지에서 VOCs 총 농도는 증가하는 추세이며, 농도 상승에 기여하는 주요 물질은 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane(대산), toluene과 xylene(울산, 여수)로 나타났다. 비발암 위해도 평가에서는 모든 지점에서 유해지수(HI) 값이 1 미만으로 나타나 대기 중 VOCs 노출에 따른 비발암 위해도는 낮은 수준이었다. 그러나 발암 위해도 평가 결과, 대산산업단지에서 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane의 초과 발암 위해도(ECR)가 1.0×10^{-6}을 상회하였고, 울산, 여수산업단지에서는 1,3-butadiene이 허용 위해 수준을 초과하는 것으로 나타났다. 해당 물질들에 대해 확률론적 위해성 평가를 수행한 결과, 대산산업단지에서 1,3-butadiene과 1,2-dichloroethane의 허용 위해 수준(1.0×10^{-6})은 각각 25.2%, 21.3%에 위치하였다. 울산 및 여수산업단지의 경우 1,3-butadiene의 1.0×10^{-6}의 위치는 각각 14.5%, 64.0%로 대산 및 울산산업단지에서 암이 발생할 위험이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 민감도 분석 결과에서는 노출시간(ET)이 위해도에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 분석되어 야외 활동 시간이 긴 거주자나 작업 현장에 오래 노출되는 근로자의 발암 위험이 더 높은 것으로 확인되었다. 따라서 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane에 대한 상세 모니터링을 지속하고 추가적인 위해성 평가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

주요어: 휘발성 유기화합물, 산업단지, 결정론적 위해성 평가, 비발암 위해도, 발암 위해도, 확률론적 위해성 평가

Abstract: This study aimed to evaluate the human health risks of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air in the areas near industrial complexes in Daesan, Ulsan, and Yeosu. Using data of

First Author: HyunJae Jeon, Tel: +82-42-865-0764, E-mail: wgw9123@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9724-6491
Corresponding Author: YongChul Jang, Tel: +82-42-821-6674, E-mail: gogator@cnu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5435-2915
Co-Authors: GyuYeol Lee, Tel: +82-42-865-0790, E-mail: wabaang@korea.kr, ORCID: 0000-0002-7381-4764
JiHyeong Lee, Tel: +82-42-865-9028, E-mail: leetopography@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3470-5466
DongHun Rhee, Tel: +82-42-865-0766, E-mail: movehun@korea.kr, ORCID: 0009-0000-9882-0549

Received: 21 February, 2025. Revised: 9 April, 2025. Accepted: 10 April, 2025.

www.kci.go.kr

hazardous air pollutant measurement network from the National Institute of Environmental Research (NIER) from 2021 to 2023, we analyzed the concentration distribution of VOCs and evaluated their non-carcinogenic and carcinogenic risks. The results of VOCs analysis for each industrial complex showed that the total concentration of VOCs is trending upward in all industrial complexes, and the main substances contributing to the increase in concentration are 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane (Daesan), toluene and xylene(Ulsan, Yeosu). The non-carcinogenic risk assessment revealed that the hazard index (HI) value was less than 1 at all sites, indicating that no significant non-carcinogenic risks from exposure of airborne VOCs may occur nearby at the sites. However, the carcinogenic risk assessment indicated that the excess carcinogenic risk (ECR) of 1,3-butadiene and 1,2-dichloroethane was more than the acceptable risk level (1.0×10^{-6}) at Daesan Industrial Complex, while 1,3-butadiene exceeded the risk level at Ulsan and Yeosu Industrial Complexes. By conducting the probabilistic risk assessment for these substances, the acceptable risk levels (1.0×10^{-6}) of 1,3-butadiene and 1,2-dichloroethane in the Daesan Industrial Complex were located at 25.2% and 21.3%, respectively. In the case of Ulsan and Yeosu Industrial Complexes, the locations of 1.0×10^{-6} of 1,3-butadiene were 14.5% and 64.0%, respectively. It implies that the risk of carcinogenesis in the Daesan and Ulsan Industrial Complexes are greater than the other one. Furthermore, sensitivity analysis results showed that exposure time (ET) is the most influential factor on risk, with residents who spend more time outdoors and workers with prolonged exposure to the workplace having a higher risk of carcinogenesis. It is warranted that more detailed emission sources and further refined risk assessment studies for 1,3-butadiene and 1,2-dichloroethane are required.

Keywords : VOC, Industrial complex, Deterministic Risk Assessment, Non-carcinogenic risk, Carcinogenic risk, Probabilistic Risk Assessment

I. 서론

휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 대기압에서 끓는점이 250°C 이하이면서 증기압이 높아 상온에서 기체로 존재하는 물질이다. VOCs는 광화학 반응을 통해 오존 및 2차 유기 에어로졸을 생성하는 전구물질을 포함하고 있어 기후변화와 대기질에 영향을 미친다(Parrish et al., 2000; Shen et al., 2018). 또한 인체 노출 시 감각기관을 자극, 중추신경계 손상, 폐 질환, 발암 등 급성 및 만성적인 건강 피해를 초래할 수 있다(WHO, 2002; Boeglin et al., 2006). 특히, 국제암연구기관(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 1군 발암물질로 지정한 benzene, 1,3-butadiene, vinyl chloride와 같은 VOCs는 체계적인 감시와 위해 관리가 중요하다.

우리나라는 환경부의 휘발성 유기화합물 지정고시에 따라 목록화 된 VOCs 37종에 대해 사업장 배출을 규제하고 있다. 또한, 독성이 상대적으로 높은 VOCs에 대해 대기환경보전법에서 유해대기감시물질 및 특정 유해대기물질로 지정하고 있다. 이들 VOCs 중 17종은 유해대기물질 측정망을 통해 체계적인 모니터링과 관리 시스템을 갖추고 있다. 그러나 VOCs는 석유화학 공정, 도료 제조시설, 자동차 배기가스 등 다양한 곳에서 배출된다(Bong et al., 2008; Kansal A, 2009). 환경부의 화학물질 배출량 조사(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR)에 따르면 최근 3년간 발암우려물질의 총 배출량은 점차 증가하는 추세이다(2020년: 9,896 ton, 2021년: 10,049 ton, 2022년: 10,287 ton). 특히 대규모 석유화학 산업단지는 VOCs의 주요 배출원이 될 수 있고, 배출된 VOCs는 대기로 방출되어 인체 호흡을 통한 노출로 인해 산업단지 근로자와 인근 지역 주민들에게 잠재적 건강 위해를 줄 수 있다(Seinfeld et al., 1998).

국외의 경우, 석유화학 산업단지 인근에서 여러 종류의 VOCs에 대한 잠재적인 건강 영향을 평가하기 위해 장기적인 모니터링 데이터를 활용한 인체 위해성 평

www.kci.go.kr

가가 다수 수행되었다. 대만 석유화학 산업단지 인근에서 수행된 VOCs에 대한 인체 위해성 평가 연구에 따르면 acrylonitrile, benzene, 1,3-butadiene, vinyl chloride이 발암 가능성이 큰 물질로 나타나 배출 저감이 필요하다고 강조하였다(Chen et al., 2016). 또한, 태국 및 중국의 석유화학 산업단지에서 수행된 연구 결과에서는 trichloromethane, 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane, benzene이 발암 잠재력이 높은 것으로 평가되었다(Pinthong et al., 2022; Tan et al., 2024).

국내의 경우, 여수와 대산 석유화학 산업단지 인근에서 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)에 대한 인체 위해성 평가 결과, benzene의 발암 위해가 보고된 바 있다(Jang et al., 2011; Lee et al., 2022). 구미 산업단지, 대구 염색 산업단지에 수행된 인체 위해성 평가에서는 chloroform이 발암 위험이 높은 물질로 나타났다(Lim et al., 2009; Shuai et al., 2018). 울산 석유화학 산업단지에서 일주일간 샘플링하여 59종의 VOCs에 대해 수행된 인체 위해성 평가에서 benzene이 발암 위해도에 가장 높게 기여하는 것으로 보고되는 등 다수의 연구가 수행되었지만(Kim et al., 2024), 아직까지 석유화학 산업단지 인근에서 많은 종류의 VOCs를 대상으로 장기적인 실측 데이터 분석 기반 주변 지역의 인체 위해성 평가 연구는 매우 미흡한 실정이다. 대규모 석유화학단지인 대산, 울산, 여수산업단지 인근의 주거지역은 모두 대략적으로 1~3km 정도 떨어진 지역에 위치해 있으며, 해당 산업단지 인근 지역에 거주하는 주민과 산업단지 근로자의 건강 위해가 우려될 수 있으므로, 체계적인 VOCs 모니터링 자료를 통해 노출 수준과 잠재적 위해 수준을 평가하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 대산, 울산, 여수산업단지 인근 지역의 유해대기물질 측정소의 최근 모니터링 자료를 활용하여 대기 중 VOCs의 농도 분포를 분석하고, VOCs 노출에 따른 인체 위해성을 평가를 수행하였다. 이를 바탕으로 산업단지 인근 주민들에게 VOCs가 미치는 잠재적 위해 수준을 파악하고, 향후 VOCs의 장기적인 관리방안 및 정책 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 산업단지별 VOCs 측정 자료 수집

본 연구에서는 대산·울산·여수 산업단지 인근 지역의 VOCs 농도 분포 분석과 신뢰도 있는 인체 위해성 평가를 위해 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research)에서 유해대기물질 측정소의 VOCs 일평균 농도 자료를 제공받았으며, 서산 유해대기물질 측정망 설치 시점인 2021년부터 3년간(2021~2023)의 데이터를 활용하였다. 대산·울산·여수 산업단지 인근 유해화학물질 측정소는 Figure 1에 나타냈다.

유해대기물질 측정망은 도시지역, 주요 산단, 배경농도 지역에서 특정유해대기물질에 의한 오염 실태를 파악하기 위해 국가(환경부)가 한국환경공단에 위탁하여 운영하는 배출원감시측정망이다. 유해대기물질 측정망 중 VOCs는 자동연속측정방법을 이용하여 1~2시간 주기로 연속 측정하며, 측정 원리는 현장에 설치된 시료 도입장치를 통하여 저온농축관에 대기 중의 시료를 직접 농축한 후, 열탈착으로 기체크로마토그래피(Gas Chromatography) 분리관으로 이송하고, 광이온화검출기(PID) 또는 불꽃이온화검출기/전자포획형검출기(FID/ECD)로 VOCs를 정성정량 분석하여 측정한다(NIER 2024).

유해대기물질 측정소에서 측정하는 VOCs는 17종이나 2023년에 측정을 시행한 1종(acrylonitrile)과 3년간 자료 중에서 대부분 검출이 되지 않았거나, 측정 데이터가 부족하다고 판단되는 5종(methylchloroform, trichloroethylene, tetrachloroethylene, 1,1-dichloroethane, dichloromethane)은 연구에서 제외하였다. 또한, m,p-xylene, o-xylene은 자일렌에 대한 인체 위해성 평가를 위해 두 물질의 농도를 더한 값을 사용하고 Xylenes로 표기하였다. 자료 왜곡을 줄여 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 일평균 자료는 별도로 보정하지 않았고, benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes, styrene, chloroform, carbontetrachloride, 1,3-butadiene, vinyl chloride, 1,2-dichloroethane 등 총 10종의 VOCs에 대해 연구를 수행하였다.

www.kci.go.kr

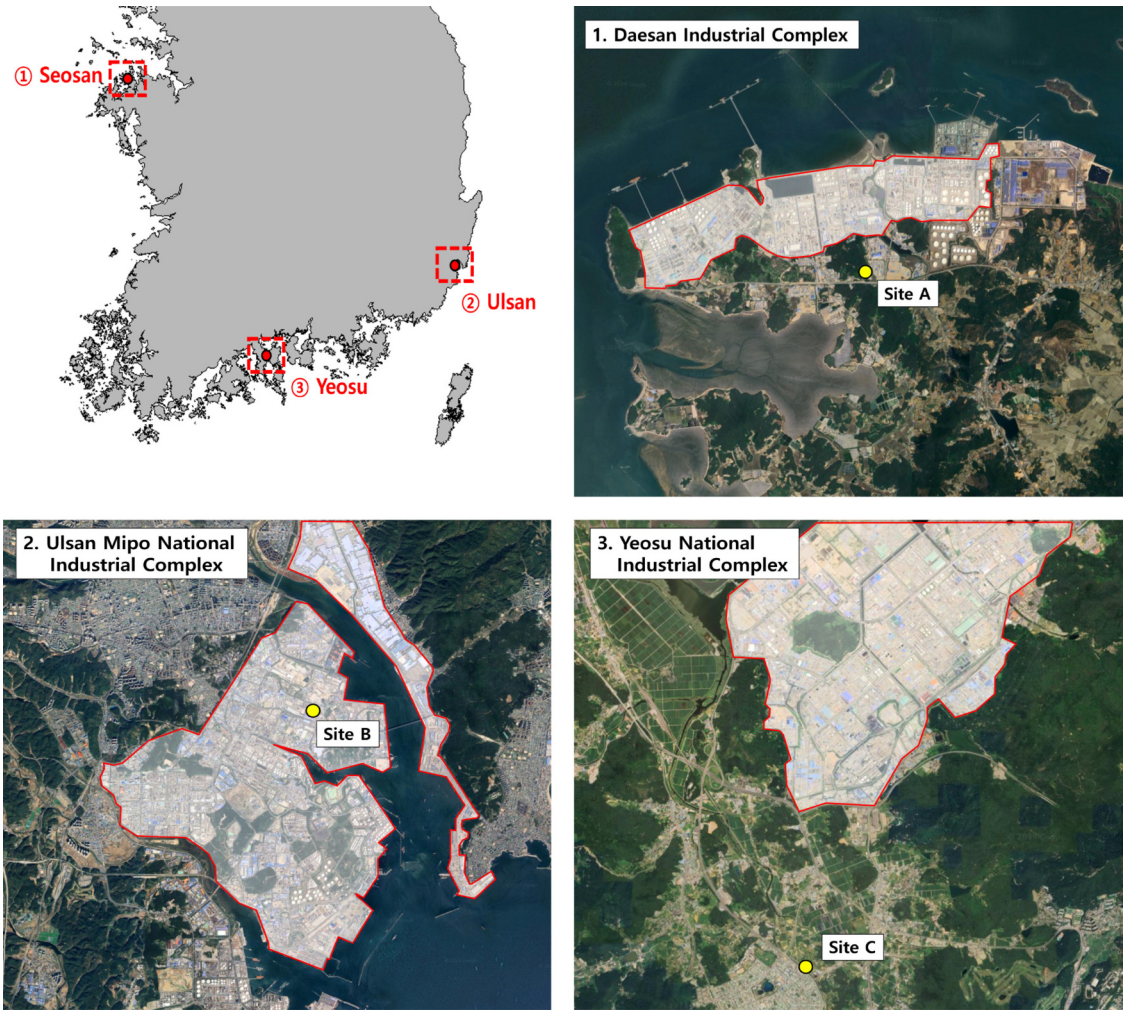

Figure 1. VOCs measurement point near 3 industrial complexes

2. 인체 위해성 평가

1) 노출평가

대기 중 VOCs의 인체 노출평가를 위해 각 물질별로 구분하여 흡입에 의한 노출 경로를 통해 일일평균노출량(Average Daily Dose, ADD)과 평생일일평균노출량(Lifetime Average Daily Dose, LADD)를 산출하였으며, 국내외 문헌들을 참고하여 일일평균노출량 계산식과 관련된 인자들을 Table 1과 Table 2에 각각 제시하였다(US EPA 1997; NIER 2019; MOEL 2020).

산업단지에서 대기 중으로 배출되는 VOCs는 호흡(inhalation)을 통해 인체 노출이 일어난다. 이러한 인체 노출경로를 본 연구의 주요 노출 경로로 고려하였다. 산업단지 주변 인근 주거지역에 해당하는 A, C 지점은 한국인의 평균 실외환경 노출 시간을 참고하여 노출 시간(ET)을 2.18시간으로 설정하였으며, 산업단지 지역인 B지점은 한국인의 평균 작업현장 노출 시간을 참고하여 7.24시간으로 설정하였다(NIER 2019). 노출 기간(ED)은 30년으로 설정하여 발암 위해도 산정 시 일반적으로 사용하는 기간을 적용하였으며, 노출빈도(ET)는 B지점의 경우 한국인의 연간 평균 근무일수를 참고하여 230일, A, C지점은 발암 위해도 산정 시 주거지역에 일반적으로 사용하는 350일을 적용하였다(Lee et al., 2020; Lee et al., 2022).

www.kci.go.kr

Table 1. Exposure equations by Inhalation route of VOCs in this study

Inhalation	$(L)ADD = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ET \times ED \times ABS_{air\text{-}inh}}{BW \times AT \times 365}$

ADD: average daily dose(mg/kg/day), C_{air}: concentration in air(μg/m^3), IR_{inh}: inhalation rate(m^3/day), EF: exposure frequency(day/yr), ET: exposure time(hr/day), ED: exposure duration(year), $ABS_{air\text{-}inh}$: absorption factor by inhalation(unitless), BW: body weight(kg), AT: average time(year)

Table 2. Exposure factors and distributions for probabilistic risk assessment in this study

Exposure Factors	Unit	Value		Distribution	Reference
		CTE[1)]	RME[2)]		
EFR	day/yr	350	365	Triangular(min:180, max:365, likeliest:350)	This study
EFI		230	320	Triangular(min:130, max:320, likeliest:230)	
ETR	hr/day	2.18	6.09	Lognormal(mean=2.18, s=2.01)	NIER 2019
ETI		7.24	11.87	Lognormal(mean=7.24, s=3.27)	NIER 2019
ED	yaer	30		Normal(mean=25, s=8.25)	NIER 2019
BW	kg	64.5	84.8	Normal(mean=64.5 s=12.65)	NIER 2019
AT_C	year	82.7		Point estimate	NIER 2019
AT_{NC}	year	30		Point estimate	NIER 2019
IR_{inh}	m3/day	14.62	18.97	Lognormal(mean:14.62, SD:3.19)	NIER 2019
$ABS_{air\text{-}inh}$	unitless	1		Point estimate	US EPA 1997

[1)] CTE(Central Tendency Exposure), [2)] RME(Reasonable Maximum Exposure)

2) 기울기 인자와 독성 참고치

위해도 결정(Risk Characterization)은 기울기 인자(Slope Factor, SF)와 독성참고치(Reference Dose, RfD)를 활용하여 산정한다. US EPA IRIS는 대기 흡입에 의한 위해성 평가 시 발암성 물질은 흡입 단위 위해도(Inhalation Unit Risk, IUR), 비발암성물질은 흡입 독성 참고치(Reference Concentration, RfC)를 제안하고 있다. 하지만 본 연구에서 일부 VOCs 독성값이 제시되어 있지 않아, 한국인의 1일 호흡률 평균값, 한국 성인의 평균 체중을 적용하여 기울기 인자와 독성참고치를 산출하여 위해성 평가에 적용하였고, 각 독성값은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Slope factors and reference doses of selected VOCs for risk assessment

(unit : mg/kg-day-1)

	Slope Factor	Reference Dose
Benzene	0.0344	0.0068
Toluene	NA	1.1333
Ethylbenzene	NA	0.2267
Xylenes	NA	0.0227
Styrene	NA	0.2267
Chloroform	0.1015	NA
Carbontetrachloride	0.0265	0.0227
1,3-Butadiene	0.1324	0.0005
Vinyl Chloride	0.0388	0.0227
1,2-Dichloroethane	0.1147	NA

NA=Not applicable

www.kci.go.kr

3) 비발암 위해도 산정

비발암성 위해도는 암을 일으키지 않는 화학물질이 인체에 노출되었을 때 유해 영향(독성)이 발생할 확률을 나타낸 지수다. 앞서 제시한 독성참고치(RfD)와 일일평균노출량(ADD)의 비율로 각 물질별 유해성 몫(Hazard Quotient, HQ)을 산출할 수 있으며, 이때 산출식은 (1)과 같다.

$$HQ = ADD/RfD \quad (1)$$

본 연구에서는 비발암성 위해도를 산정하기 위해 산출된 각 물질별 유해성 몫을 합하여 VOCs의 인체 노출에 대한 총 유해지수(Hazard Index, HI)를 산출하였다. 산출된 유해지수가 1을 초과하면 인체에 비발암성 독성이 발현될 가능성이 있다는 의미이며, 1 이하일 경우 비발암성 유해 영향이 나타날 가능성이 낮다고 판단할 수 있다.

4) 발암 위해도 산정

발암 위해도는 암을 유발할 가능성이 있는 화학물질이 인체에 노출되었을 때의 발암 위험성을 추정하기 위한 지수를 말한다. Table3에서 제시한 기울기 인자(SF)와 평생일일평균노출량(LADD)을 곱하여서 초과 발암 위해도(Excess Cancer Risk, ECR)를 산출한다. 산출식은 (2)와 같다.

$$ECR = LADD \times SF \quad (2)$$

US EPA(1998)의 지침에 따라 초과 발암 위해도(ECR)의 위해성 판단 기준은 1.0×10^{-6}~1.0×10^{-4}이며, 해당 물질의 초과 발암 위해도가 기준치(1.0×10^{-6})를 초과하면 인체에 장기간 노출되었을 때 인구 1,000,000명 중 1명이 발암 위험이 있다고 해석한다. 본 연구에서는 각 지점의 VOCs의 노출에 대한 대표성을 확보하기 위해 초과 발암 위해도의 3년 평균값을 자료를 활용하였다. 또한, 초과 발암 위해도 산정은 연구의 기초자료로 활용할 수 있는 평균값(Central Tendency Estimate of Risk, CTE)과 위해도 최대 추정치인 95% 상위값(Resonable Maximum Estimate of Risk, RME) 2가지로 산출하였다.

5) 확률론적 위해성 평가

확률론적 위해성 평가는 유해지수, 초과 발암 위해도와 같은 결정론적 위해성 평가가 가지고 있는 불확실성을 보완하기 위해 수행한다. 확률론적 위해성 평가를 수행하는 대표적인 방법은 'Monte-Carlo Simulation'이며, 이 방법은 무작위로 추출한 표본을 원하는 함수에 넣어 계산하여 확률 분포로 결과를 도출한다. 본 연구에서는 초과 발암 위해도가 허용 위해 수준(1.0×10^{-6})을 초과하는 VOCs를 대상으로 'Crystal Ball' 소프트웨어를 활용하여 Table 2에 제시된 노출계수의 분포 유형 및 범위를 적용한 후 'Monte-Carlo Simulation'을 수행하였다. 시뮬레이션 횟수는 100,000번으로 설정하였고, 결과에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 지점별 VOCs 농도 분포 특성

지점별 VOCs 농도 평균값과 95% UCL 값을 Table 4에 제시하고 각 지점에서의 연도별 평균 농도의 합과 VOCs 평균값을 도시하여 Figure 2에 나타냈다. 2021년부터 2023년까지 VOCs 농도 분포에서 지점별로 유의미한 차이를 확인할 수 있었다. 지점 A에서는 1,2-dchloroethane, 1,3-butadiene, benzene의 농도가 높았으며, 대부분 VOCs가 비슷한 변동을 보였으나 1,3-butadiene과 vinyl chloride가 급격하게 증가하는 추세를 보였고, 2022년에 1,2-dchloroethane의 농도가 6.07 $\mu g/m^3$로 다른 물질과 비교했을 때 3년간 가장 높은 수치로 나타났다. 지점 B에서는 2023년에 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane을 제외하고 모든 물질에서 증가하는 경향을 보였으며, 특히 xylene과 toluene은 큰 폭으로 증가하여 B 지점의 전체 농도 상승에 기여하였다. 지점 C에서는 전체적인 VOCs의 농도가 낮았으나 2023년에 toluene, xylene, styrene의 농도가 급격하게 증가하였다. 1,3-butadiene은 전체적으로 감소하는 경향을 보이지만 지속적으로 검출되는 것을 확인할 수 있었다.

각 지점에서 연도별 VOCs 평균 농도의 합은 지점 A, B, C 순으로 나타났다. B 지점은 측정 위치가 산업단지 내에 있어 평균 농도의 합이 가장 높을 것으로 예상했으나 A 지점보다 낮은 것으로 확인되었다. 이는 여러 기상조건의 영향과 더불어 BTEX 및 1,3-butadiene과 같은 VOCs이 석유화학 제품 및 기초화학물질 제조업

www.kci.go.kr

Table 4. Concentration distributions of VOCs from Daesan, Ulsan, and Yeosu industrial complexes

unit : μg/m^3

VOC	Year	Average±SD						95% UCL		
		A		B		C		A	B	C
		n	Value	n	Value	n	Value			
Benzene	2021	258	3.86±4.60	168	1.34±1.56	236	0.54±0.46	11.41	3.90	1.30
	2022	346	2.69±2.26	312	1.55±1.66	265	0.36±0.51	6.41	4.28	1.20
	2023	331	3.86±5.91	301	2.30±3.06	256	0.41±0.45	13.58	7.34	1.15
Toluene	2021	258	3.05±3.28	168	3.31±3.27	236	0.86±0.86	8.45	8.69	2.27
	2022	346	1.93±2.62	312	2.83±2.37	265	1.32±3.45	6.25	6.73	6.99
	2023	331	2.77±3.44	301	3.96±4.17	256	3.83±1.81	8.44	10.83	6.81
Ethyl benzene	2021	258	1.28±1.54	168	1.16±1.91	236	0.33±0.44	3.82	4.31	1.05
	2022	346	1.10±1.29	312	0.83±0.97	265	0.15±0.21	3.22	2.43	0.48
	2023	331	1.65±2.47	301	1.24±1.32	256	0.90±0.60	5.72	3.41	1.88
Xylenes	2021	258	1.10±1.12	168	2.53±4.00	236	0.63±0.82	2.94	9.10	1.98
	2022	346	0.84±0.93	312	2.66±3.22	265	0.29±0.50	2.37	7.96	1.12
	2023	331	1.40±1.64	301	4.62±5.04	256	2.12±1.75	4.10	12.91	5.01
Styrene	2021	258	0.38±0.61	168	0.09±0.29	236	0.16±0.26	1.39	0.58	0.58
	2022	346	0.19±0.31	312	0.15±0.31	265	0.21±0.42	0.70	0.66	0.90
	2023	331	0.30±0.50	301	0.28±0.50	256	2.18±2.04	1.11	1.09	5.54
Chloroform	2021	258	1.35±3.62	168	0.45±0.72	236	N.D.	7.30	1.64	N.D.
	2022	346	0.58±0.46	312	0.57±0.80	265	0.05±0.12	1.33	1.89	0.25
	2023	331	0.73±0.77	301	0.64±0.67	256	0.04±0.08	2.00	1.74	0.17
Carbon tetrachloride	2021	258	0.44±0.09	168	0.10±0.19	236	0.05±0.10	0.58	0.41	0.21
	2022	346	0.47±0.04	312	0.17±0.19	265	0.22±0.16	0.53	0.48	0.48
	2023	331	0.42±0.18	301	0.22±0.18	256	0.17±0.16	0.71	0.52	0.43
1,3-Butadiene	2021	258	2.31±3.53	168	1.48±1.93	236	1.81±1.93	8.12	4.66	4.99
	2022	346	3.56±5.55	312	1.65±1.77	265	1.59±2.97	12.69	4.56	6.47
	2023	331	5.82±12.31	301	0.79±2.23	256	1.31±2.39	26.07	4.46	5.25
Vinyl Chloride	2021	258	0.90±2.01	168	2.08±3.15	236	0.40±0.55	4.20	7.26	1.30
	2022	346	1.97±7.28	312	2.27±3.31	265	0.20±0.48	13.94	7.72	0.98
	2023	331	2.47±9.39	301	2.87±6.56	256	0.07±0.68	17.92	13.66	1.19
1,2-Dichloro ethane	2021	258	3.98±5.80	168	0.44±0.72	236	0.19±0.53	13.51	1.61	1.07
	2022	346	6.07±7.85	312	N.D.	265	0.33±0.68	18.98	N.D.	1.45
	2023	331	5.08±6.61	301	N.D.	256	0.19±0.45	15.95	N.D.	0.94

N.D. = No Data

뿐만 아니라 자동차 배기가스, 담배 연기에서도 배출되어 대기 중 VOCs 농도에 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다(Moon et al., 2022; Chae et al., 2024; Sultana et al., 2024). 특히, C 지점에 대해 Choi 등 (2023)은 여수시 사업장에서 배출되는 VOCs가 직접적으로 대기 중 농도에 영향을 주지 않다고 하였으므로 배출원에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 각 지점에서 물질별 월평균 농도와 지역별 월 최다 풍향, 월평균 풍속 자료를 활용하여 지점별 VOCs 농도 변화 시계열 그래프와 풍향·풍속 자료를 도시하였다(Figure 3). 2021~2023년까지 지점별 평균 풍속은 서산지역이 3.1 m/s, 울산지역이 2.5 m/s, 여수지역이 3.9 m/s로 여수지역이 가장 풍속이 강하였다. 지점별 최다 풍향의 경우에는 서산지역과 울산지역이 각각 서풍, 북서풍계열이

www.kci.go.kr

우세한 것으로 나타났고, 여수지역은 동풍계열이 우세한 것으로 나타났다. 시간에 따른 VOCs의 농도 분포는 풍향·풍속 자료와 낮은 상관성을 보였으며, 이는 배출된 VOCs가 기온, 강수 등 기상 조건들과 산업단지가 아닌 다른 배출원에서의 VOCs의 영향이 농도 분포에 반영된 것으로 판단된다.

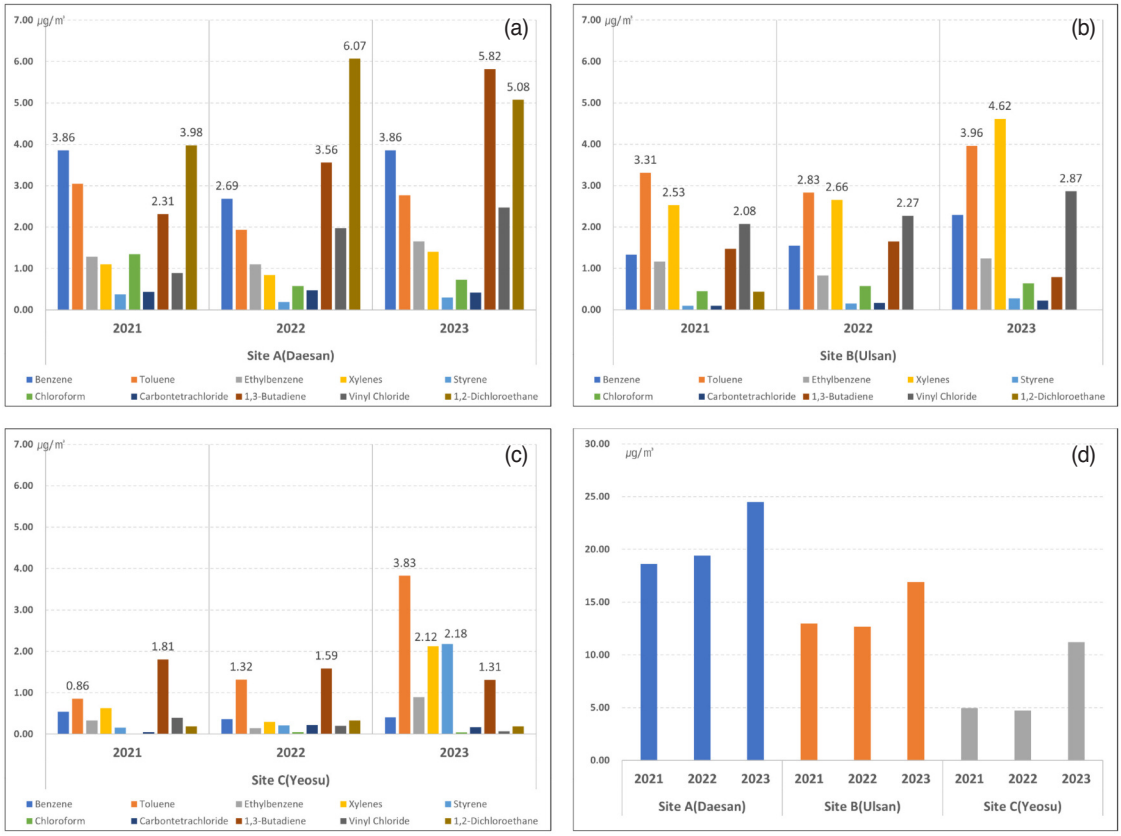

Figure 2. Average Concentration of VOCs from Daesan(a), Ulsan(b), and Yeosu(c) industrial complexes and sum of the concentration at each site(d)

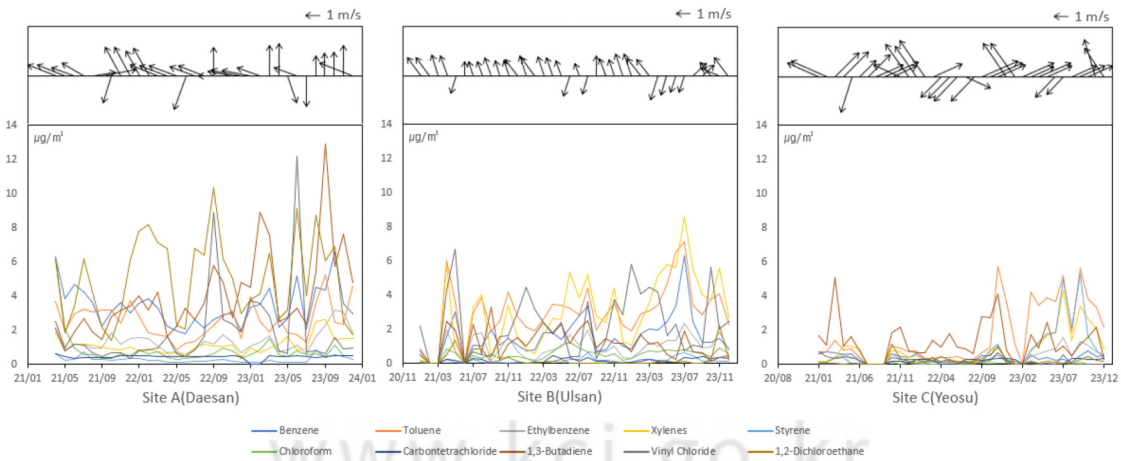

Figure 3. Time series graph of VOCs concentration changes with wind direction and wind speed data at each site

Table 5. Non-carcinogenic risk of target VOCs at each site

VOC	Average(CTE)			95% UCL(RME)		
	A	B	C	A	B	C
Benzene	0.01007 (5.51%)	0.01095 (7.55%)	0.00127 (1.79%)	0.08736 (4.19%)	0.07379 (6.50%)	0.01015 (1.41%)
Toluene	0.00005 (0.02%)	0.00013 (0.09%)	0.00003 (0.05%)	0.00039 (0.02%)	0.00075 (0.07%)	0.00027 (0.04%)
Ethyl-benzene	0.00012 (0.06%)	0.00020 (0.14%)	0.00004 (0.06%)	0.00106 (0.05%)	0.00145 (0.13%)	0.00028 (0.04%)
Xylene	0.00097 (0.53%)	0.00621 (4.24%)	0.00088 (1.25%)	0.00785 (0.38%)	0.04275 (3.77%)	0.00677 (0.94%)
Styrene	0.00003 (0.01%)	0.00003 (0.02%)	0.00007 (0.10%)	0.00027 (0.01%)	0.00033 (0.03%)	0.00059 (0.08%)
Carbontetrachloride	0.00038 (0.21%)	0.00031 (0.21%)	0.00013 (0.18%)	0.00152 (0.07%)	0.00201 (0.18%)	0.00093 (0.13%)
1,3-Butadiene	0.16972 (92.80%)	0.12409 (85.57%)	0.06836 (96.30%)	1.95668 (93.83%)	0.97535 (85.91%)	0.69751 (96.96%)
Vinyl Chloride	0.00155 (0.85%)	0.00309 (2.13%)	0.00019 (0.27%)	0.03011 (1.44%)	0.03888 (3.42%)	0.00290 (0.40%)
Hazard Index (HI: sum of HQ)	0.18288 (100%)	0.14502 (100%)	0.07098 (100%)	2.08524 (100%)	1.13531 (100%)	0.71940 (100%)

2. 인체 위해성 평가 결과

1) 비발암 위해도 산정 결과

대상 VOCs 10종의 흡입 노출에 의한 비발암 위해도 산정 결과를 Table 5에 제시하였다. 지점별 비발암위해도를 비교한 결과, 지점 A가 다른 산단에 비해 상대적으로 높은 유해지수를 나타내었으나, 모든 지점에서 유해지수가 1 이하로 산정되어 VOC의 대기 노출에 의한 비발암 위해도는 미미한 것으로 확인됐다. 다만, RME 값으로 평가했을 때, A 지점과 B 지점에서 유해지수가 2.08524, 1.13531으로 1을 초과하여 잠재적인 위험이 있는 것으로 나타났다. 각 물질별 비발암 위해기여도는 전 지점에서 1,3-butadiene이 85.57~96.30%로 가장 높았고, 다음으로 벤젠이 1.79~7.55%를 차지했으며, 그 외 VOCs는 기여도가 매우 적은 것을 확인할 수 있었다. Le 등(2024)은 석유화학 단지가 인접한 대만의 가오슝 항에서 benzene, 1,3-butadiene을 포함한 6종의 VOCs에 대해 비발암 건강 영향 평가를 실시한 결과 유해지수가 1 미만으로 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 반면에 Gao 등(2022)의 연구에 따르면 동중국에 위치한 석유화학 공장에서 1,3-butadiene, BTEX, Carbon tetrachloride 등 16종에 대해 비발암위해도를 산정한 결과 유해지수는 1.57로 본 연구 결과와 차이를 보였다. 이는 산업단지 인근이 아닌 석유화학 공장 내에서 VOCs 측정을 실시하여 위해지수 1을 초과한 것으로 판단된다.

2) 초과 발암 위해도 산정 결과

지점별 VOCs에 대한 초과 발암 위해도 산정 결과를 Table 6에 제시하였다. 전체 초과 발암 위해도(ECR)는 모든 지점에서 허용 위해 수준(1.0×10^{-6})을 초과하였으며, 지점 A, B, C에서 각각 9.91×10^{-6}, 6.34×10^{-6}, 1.91×10^{-6}으로 지점 A가 가장 발암 위험이 높은 것으로 나타났다. 물질별 초과 발암 위해도는 지점 A의 경우 1,3-butadiene과 1,2-dichloroethane의 초과 발암 위해도가 각각 3.96×10^{-6}, 4.14×10^{-6}으로 1.0×10^{-6}을 상회하는 것으로 나타났으며, 지점 B, C에서도 1,3-butadiene이 각각 2.70×10^{-6}, 1.49×10^{-6}으로 허용 위해 수준을 초과하여 발암 위험이 있는 것으로 확인되었다. 그 외의 VOCs는 각 지점에서 초과 발암 위해도가 1.0×10^{-6} 미만으로 VOCs의 대기 노출에 의한 발암 확률이 적은 것으로 나타났다. 지점 C에서는 RME 값이 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane이 허용 위해 수준을 초과하였으며, 지점 A와 B는 Carbontetrachloride를 제외한 모든 물질

www.kci.go.kr

Table 6. Carcinogenic risk of target VOCs at each site

VOC	Average(CTE)			95% UCL(RME)		
	A	B	C	A	B	C
Benzene	8.55E-07	9.29E-07	1.08E-07	7.42E-06	6.26E-06	8.61E-07
Chloroform	6.43E-07	8.79E-07	3.26E-08	7.41E-06	6.27E-06	4.39E-07
Carbontetrachloride	8.38E-08	6.71E-08	2.75E-08	3.31E-07	4.37E-07	2.03E-07
1,3-Butadiene	3.69E-06	2.70E-06	1.49E-06	4.26E-05	2.12E-05	1.52E-05
Vinyl Chloride	4.94E-07	9.88E-07	6.15E-08	9.61E-06	1.24E-05	9.26E-07
1,2-Dichloroethane	4.14E-06	7.81E-07	1.95E-07	3.81E-05	6.52E-06	2.72E-06
Total of carcinogenic risk	9.91E-06	6.34E-06	1.91E-06	1.05E-04	5.31E-05	2.03E-05

이 1.0×10^{-6}을 상회하여 잠재적인 위험이 있는 것으로 판단된다. 본 연구 결과와 다르게 Kim 등(2024)이 울산 석유화학 산업단지 인근에서 수행한 VOCs에 대한 인체 위해성 평가에서는 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane이 모두 1.0×10^{-6} 미만으로 발암 위해도에 기여하지 않았다. 이는 VOCs의 샘플 채취 기간이 7일로 매우 짧았기 때문으로 판단된다. 반면에 해외 위해성 평가 연구 사례에서는 본 연구와 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 태국의 석유화학 단지에서 수행한 VOCs 흡입 노출에 대한 위해성 평가 연구에 따르면 다른 VOCs와 함께 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane이 1.0×10^{-6}을 초과하여 암을 일으킬 수 있는 주요 인자로 나타났다(Pinthong et al., 2021; Malakan et al., 2024). 특히 1,3-butadiene은 산업단지 및 석유화학 공장에서 수행된 여러 위해성 평가 연구 결과에서도 발암 위험성이 높다고 언급하며 관리의 필요성을 강조하였다(Chen et al., 2016; Sadeghi-Yarandi et al., 2020; Gao et al., 2022; Khoshakhlagh et al., 2022; Le et al., 2024). 따라서 본 연구 대상 산업단지에서도 허용 위해 수준을 초과한 VOCs에 대해 배출 기원 연구 및 종합적인 관리가 필요할 것으로 사료된다.

3) 확률론적 위해성 평가 결과

각 지점별 초과 발암 위해도의 허용 위해 수준을 초과한 1,3-butadiene, 1,2-dichloroethane에 대해 확률론적 위해성 평가를 수행하였다(Figure 4). A, B 지점에서는 1,3-butadiene의 확률론적 발암 위해도의 중앙값과 평균값이 허용 위해 수준(1.00×10^{-6})을 초과하는 것으로

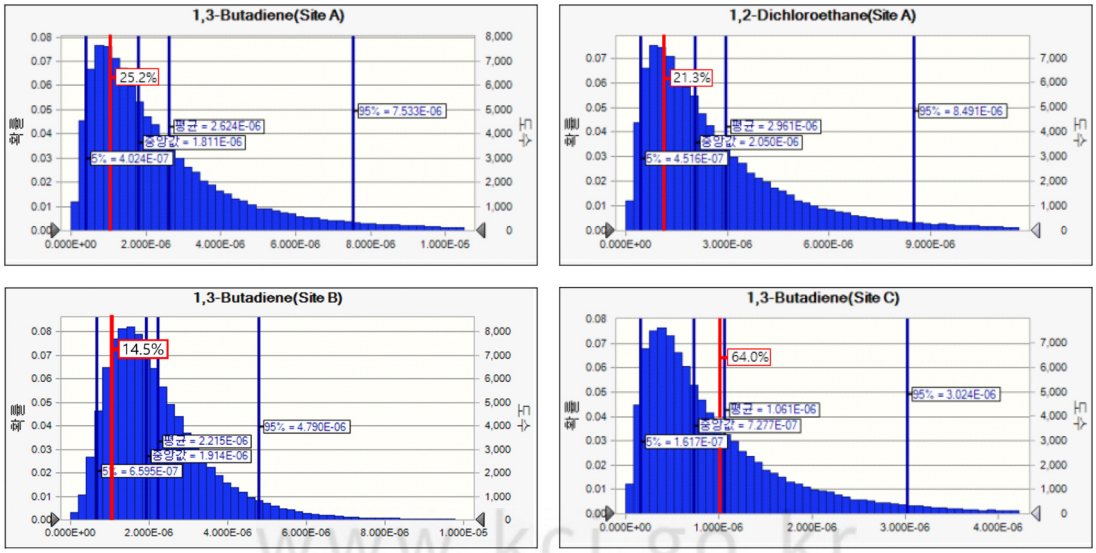

Figure 4. Results of probabilistic cancer risks for 1,3-butadiene and 1,2-dichloroethane

www.kci.go.kr

나타났으며, A 지점의 경우 1,2-dichloroethane 역시 중앙값과 평균값 모두 해당 수준을 초과하였다. A 지점에서 허용 위해 수준은 1,3-butadiene과 1,2-dichloroethane의 확률 분포 내 각각 25.2%, 21.3%에 위치하였고, 두 물질의 CTE와 RME는 각각 79.5%, 99.9%, 그리고 79.0%, 99.9%에 해당하였다. B 지점의 경우 1,3-butadiene에 대한 허용 위해 수준은 확률 분포의 14.5%에 위치하였고, CTE 및 RME는 각각 72.5%, 99.9%에 해당하였다. C 지점에서는 1,3-butadiene의 중앙값은 허용 위해 수준 이하였으나, 평균값은 2.96×10^{-6}으로 초과하였다. 확률 분포 내에서 허용 위해 수준은 64.0%에 위치하였으며, CTE와 RME는 각각 79.2%, 99.9%로 평가되었다.

확률론적 위해성 평가 결과를 기반으로 민감도 분석을 실시한 결과, 모든 대상 지점과 물질에서 노출시간(ET), 노출기간(ED)이 초과 발암 위해도에 영향을 끼치는 주요 요인으로 나타났으며, 노출빈도(EF), 몸무게(BW)와 호흡률(IRinh)은 상대적으로 영향이 미미한 것으로 확인되었다. 지점 A와 C는 모두 노출시간(ET)과 노출기간(ED)이 각각 80~82%, 15~16% 범위로 매우 유사하게 나타났으며, 지점 B는 노출시간(ET)이 54.7%로 상대적으로 낮은 대신, 노출기간(ED)이 36.7%로 비교적 높게 나타났다. 이는 노출 패턴에 따라 위해도에 기여하는 요인이 다를 수 있음을 시사하며, 전반적으로 노출 시간(ET)이 초과 발암 위해도에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 국내 3대 석유화학 산업단지인 대산산업단지, 울산미포국가산업단지, 여수국가산업단지 인근의 VOCs 농도 분석과 인체 위해성 평가를 수행하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 대산산단에서는 1,2-dchloroethane, 1,3-butadiene, benzene의 농도가 높게 분포했다. 2022년에는 1,2-dichloroethane이 6.07 μg/m^{3}로 가장 높은 수치를 기록했으며, 1,3-butadiene과 vinyl chloride은 농도가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 울산산단에서는 2023년 toluene과 xylene이 크게 증가하여 전체 VOCs 농도 상승에 기여했고, 여수산단은 전반적으로 VOCs 농도가 낮았으나 2023년에 toluene, xylene, styrene이 급증하는 양상을 보였다. 지점별 VOCs 평균 농도의 합은 대산산단, 울산산단, 여수산단 순으로 높게 나타났으며, 물질별 농도가 풍향·풍속과 상관성이 낮은 것으로 보아 측정된 VOCs가 기온, 강수 등의 기상조건과 비산업 배출원에서 의해서도 영향을 받았을 것으로 판단된다.

2) 비발암 위해성 평가에서는 대산산단의 유해지수가 상대적으로 높았으나, 모든 지점에서 1 이하로 나타나 대기 중 VOCs의 비발암 위험은 크지 않았다. 반면, 발암 위해성 평가 결과에서는 대산, 울산, 여수 산업단지 순으로 전체 초과 발암 위해도가 높은 것으로 확인되었다. 물질별 초과 발암 위해도는 대산산단의 경우 1,3-butadiene과 1,2-dichloroethane이 각각 3.96×10^{-6}, 4.14×10^{-6}으로 1.0×10^{-6}을 상회하여 각 물질의 대기 흡입을 통한 노출로 인해 백만명 중 약 4명이 발암 가능성이 있는 것으로 나타났다. 울산산단과 여수산단에서도 1,3-butadiene이 2.70×10^{-6}, 1.49×10^{-6}으로 허용 위해 수준을 초과하여 각각 백만명 당 약 3명, 2명이 암이 발생할 확률이 있는 것으로 나타났다.

3) 각 산업단지에서 허용 위해 수준을 초과하는 물질들에 대해 확률론적 위해성 평가를 실시한 결과, 대산 및 울산산단에서 1,3-butadiene의 허용 위해 수준(1.0×10^{-6})은 각각 25.2%, 14.5%에 위치하였고, 대산산단에서 1,2-dichloroethane의 경우 21.3%에 위치하였다. 여수산단에서 1,3-butadiene의 허용 위해 수준 확률 분포는 64.0%에 해당되었다. 또한, 대산 및 울산산단에서 1,3-butadiene과 대산산단에서 1,2-dichloroethane의 확률론적 발암 위해도의 중앙값 및 평균값과 여수산단에서 1,3-butadiene의 확률론적 발암 위해도의 평균값이 허용 위해 수준을 초과한 것으로 나타났다. 이는 해당 물질들에 장기간 노출되었을 때 대산 및 울산산단에서 암이 발생할 위험이 더 높다는 것을 의미한다.

4) 민감도 분석 결과에서는 노출시간(ET)과 노출기간(ED)이 초과 발암 위해도에 영향을 미치는 주요 인자로 나타났다. 대산 및 여수산단에서 노출시간(ET)의

www.kci.go.kr

영향이 강하게 나타났으며(80~82%), 울산산단의 경우 노출시간(ET)의 기여도가 상대적으로 낮고(54.7%), 노출기간(ED)이 비교적 높게 나타났다(36.7%). 이는 노출 패턴에 따라 위해도에 기여하는 변수가 다를 수 있음을 시사하며, 야외 활동 시간이 긴 거주자와 작업 환경에 오래 노출되는 근로자가 더 높은 발암 가능성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구 결론을 종합해보면 인체 위해성 평가를 실시한 대상 VOCs 10종 중 대산산단에서는 1,3-butadiene과 1,2-dichloroethane, 울산, 여수산단에서는 1,3-butadiene이 허용 발암 위해 수준(1.0×10^{-6})을 초과하여 인근 거주자 및 근로자들이 호흡을 통해 해당 물질들에 대해 지속적으로 노출되었을 때 암이 발생할 잠재적인 위험이 있는 것으로 나타났다. 특히, 해당 물질들에 대해 노출시간이 긴 주민이나 근로자가 발암 위험이 더 높은 것으로 나타났으므로 건강 보호 조치 또는 저감 대책이 필요할 수 있다. 또한, VOCs 배출 관련 규제 강화와 체계적인 모니터링 시스템이 갖추어져 있더라도 노출에 따른 건강 위해 우려가 존재할 수 있으므로 지속적인 위해성 평가 연구가 필요하다고 판단된다. 그러나 본 연구에서 위해성 평가 수행 시 노출계수를 일반적인 국내·외 연구 자료를 바탕으로 적용하였기 때문에 국내 산업단지 인근 거주자의 및 근로자의 실내 재실 시간, 이동시간 등 활동 패턴과 노출 특성 등을 반영할 경우, 본 연구에서 가정한 일반적인 노출 조건 시나리오와 달라 위해성 평가 결괏값에 차이가 있을 수 있다. 또한, 본 연구에서는 각 산업단지 별 측점지점이 한군데로 다수의 측정지점을 설치하여 수집된 데이터로 지역적 특성을 반영한 인체 위해성 평가를 수행할 경우 그 결과가 본 연구와 상이할 수 있다는 한계점이 있다. 따라서, 향후 VOCs 위해성 평가 수행 시 대산, 울산, 여수산업단지 인근에서 추가적인 상세 모니터링을 실시하여 지역적 특성을 파악하고, 지역 주민과 작업자의 활동도 자료 및 거주 특성을 반영한 인체 위해성 평가가 수행된다면 보다 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

References

문광주, 이영아, 김해리, 박규태, 박정민. (2022). 이동형 질량분석시스템을 사용한 국내 산단지역 대기 중 VOCs 농도 분포 특성 연구. **한국도시환경학회지, 22**(4), 207-227.

Moon, K. J, Lee, Y., Kim, H., Park, K., & Park, J. (2022). Study on the Distribution of VOCs in the Ambient Air of Domestic Industrial Complexes using Mobile SIFT-MS. *Journal of the Korean Society of Urban Environment, 22*(4), 207-227. https://doi.org/10.33768/ksue.2022.22.4.207

봉상훈, 정성욱, 박흥재, 김우성, 김성훈. (2008). 김해지역 대기 중 휘발성유기화합물 특성연구. **한국환경과학회지, 17**(8), 871-878.

Bong, S. H., Jeong, S. W., Park, H. J., Kim, W. S., & Kim, S. H. (2008). A Study on the Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds in Gimhae. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society, 17*(8), 871-878.

이가인, 김홍경, 지승민, 장용철. (2020). 국내 도로 노면 퇴적입자 내 PAHs의 인체 위해성 평가. **환경영향평가, 29**(4), 286-297.

Lee, G., Kim, H., Ji, S., & Jang, Y. C. (2020). Human Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Road Dust Sediments in Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment, 29*(4), 286-297.

이지형, 장용철, 천광수, 김보라. (2022). 대산 석유화학 산업단지 인근 지역에서의 BTEX 인체 위해성 평가. **환경영향평가, 31**(5), 321-333.

Lee, J., Jang, Y. C., Cheon, K., & Kim, B. (2022). Human Health Risk Assessment of BTEX from Daesan Petrochemical Industrial Complex. *Journal of Environmental Impact Assessment, 31*(5), 321-333.

Lim, H. S., Jeong, T. C., & Kim, T. O. (2009). Risk Assessments of Exposure to Airborne Volatile Organic Compounds in Gumi Industrial Complex

www.kci.go.kr

Areas, Korea. *Korean Journal of Odor Research and Engineering, 8*(3), 136-143.

장용철, 이성우, 신용승, 김희갑, 이종현. (2011). 충청, 전라지역 산업단지 주변지역에서의 벤젠 인체 위해성 평가, **환경영향평가, 20**(4), 497-507.

Jang, Y. C., Lee, S. W., Shin, Y. S., Kim, H. K., & Lee, J. H. (2011). Human Health Risk Assessment of Benzene from Industrial Complexes of Chungcheong and Jeonla Province. *Journal of Environmental Impact Assessment, 20*(4), 497-507.

채종성, 채정석, 전준민, 강병욱, 김종호, 문광주, 박규태, 강대일. (2024). 대규모 산업단지에서 발생하는 가스상 유해대기오염물질의 배출특성 조사 연구. **한국대기환경학회지, 40**(1), 22-47.

Chae, J. S., Chae, J. S., Jeon, J. M., Kang, B. W., Kim, J. H., Moon, K. J., Park, G. T., & Kang, D. I. (2024). The Study on Emission Characteristics of Gas-phase Hazardous Air Pollutants Generated at the Large-scale Industrial Complexes. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40*(1), 22-47.https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.27

최민석, 김용현. (2023). 여수국가산업단지에서 배출되는 대기오염물질이 여수시 대기질에 미치는 영향 연구. **한국대기환경학회지, 39**(1), 77-93.

Choi, M. S., & Kim, Y. H. (2023). A Study on Air Pollutants Emitted from Yeosu National Industrial Complex Affecting Air Quality in Yeosu, Republic of Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39*(1), 77-93. https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.77

고용노동부. (2020). 2019 고용형태별근로실태조사 보고서 (11-1490000-003360-10).

Ministry of Employment and Labor. (2020). 2019 Survey Report on Labor conditions by Emplyment type (11-1490000-003360-10).

국립환경과학원. (2019). 한국인의 노출계수 핸드북 (11-1480523-003782-01). 환경부.

National Institute of Environmental Research. (2019). Korean Exposure Factors Handbook (11-1480523-003782-01). Ministry of Environment.

국립환경과학원. (2024). 대기환경측정망 설치·운영 지침 (11-1480523-005330-01). 환경부.

National Institute of Environmental Research. (2024). Guidelines for the Installation and Operation of Air Quality Monitoring Networks (11-1480523-005330-01). Ministry of Environment.

화학물질안전원. (2024). 화학물질 배출량 보고 서비스. 환경부.

National Institute of Chemical Safety. (2024). Pollutant release and transfer register. Ministry of Environment. https://icis.me.go.kr/prtr/main.do

Chen, M. J., Lin, C. H., Lai, C. H., Cheng, L. H., Yang, Y. H., Huang, L. J., Yeh, S. H., & Hsu, H. T. (2016). Excess Lifetime Cancer Risk Assessment of Volatile Organic Compounds Emitted from a Petrochemical Industrial Complex. *Aerosol and Air Quality Research, 16*(8), 1954-1966. https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0372

Gao, S., Zhang, Z., Wang, Q., Ma, Y., Wu, Y., Wu, S., Cui, H., Fu, Q., Zhang, S., Wang, S., & Zhou. B. (2022). Emissions and health risk assessment of process-based volatile organic compounds of a representative petrochemical enterprise in East China. *Air Quality, Atmosphere & Health, 15*(6), 1095-1109. https://doi.org/10.1007/s11869-021-01117-4

Kansal, A. (2009). Sources and Reactivity of NMHCs and VOCs in the Atmosphere: A Review. *Journal of Hazardous Materials, 166*(1), 17-26. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.048

Khoshakhlagh, A. H., Gruszecka-Kosowska, A., Adeniji, A. O., & Tran, L. (2022). Probabilistic human health risk assessment of 1,3-butadiene and styrene exposure using Monte Carlo simulation technique in the carpet production industry. *Scientific Reports, 12*(1), 1-13. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26537-9

Kim, S. J., Lee, S. J., Kim, H., Hong, Y., & Choi, S. D.

www.kci.go.kr

(2024). Contribution of individual sources of volatile organic compounds to their cancer and non-cancer risks in the multi-industrial city of Ulsan, South Korea. *Air Quality, Atmosphere & Health, 17*(9), 1937-1949. https://doi.org/10.1007/s11869-024-01554-x

Le, T. H., Yuan, C. S., Lin, C., Hsu, Z. P., Hsu, I. H, & Wang, L. C. (2024). Comprehensive Analysis of VOCs in an Industrial Harbor City: Spatiotemporal Distribution, Health Risk, and Potential Sources. *Aerosol and Air Quality Research*, 24(8). https://doi.org/10.4209/aaqr.240069

Malakan, W., Thepanondh, S., Keawboonchu, J., Kultan, V., Kondo, A., & Shimadera, H. (2024). Integrated assessment of inhalation health risk and economic benefit of improving ambient targeted VOCs in Petrochemical industrial area. *Air Quality, Atmosphere & Health, 17*(9), 1885-1903. https://doi.org/10.1007/s11869-024-01552-z

Parrish, D. D., & Fehsenfeld, F. C. (2000). Methods for gas-phase measurements of ozone precursors. *Atmospheric Environment, 34*(12-14), 1921-1957. http://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00454-9

Pinthong, N., Thepanondh, S., & Kondo, A. (2022). Source Identification of VOCs and their Environmental Health Risk in a Petrochemical Industrial Area. *Aerosol and Air Quality Research, 22*(2), 1-18. https://doi.org/10.4209/aaqr.210064

Sadeghi-Yarandi, M., Karimi, A., Ahmadi, V., Sajedian, A. A., Soltanzadeh, A., & Golbabaei, F. (2020). Cancer and non-cancer health risk assessment of occupational exposure to 1,3-butadiene in a petrochemical plant in Iran. *Toxicology & industrial health, 36*(12), 960-970. https://doi.org/10.1177/0748233720962238

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (1998). **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**. Wiley.

Shen, L., Xiang, P., Liang, S., Chen, W., Wang, M., Lu, S., & Wang, Z. (2018). Sources profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, Central China. *Atmosphere, 9*(8), 297-314. http://doi.org/10.3390/atmos9080297

Shuai, J., Kim, S., Ryu, H., Park, J., Lee, C. K., Kim, G. B., Ultra V. U. Jr., & Yang, W. (2018). Health risk assessment of volatile organic compounds exposure near Daegu dyeing industrial complex in South Korea. *BMC Public Health, 18*(1), 528-541. https://doi.org/10.1186/s12889-018-5454-1

Sultana, D., & Hoover, S. (2024). Analysis of gasoline-related pollutant exposures and risks in California between 1996 and 2014. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 34*(3), 518-528. https://dog.org/10.1038/s41370-023-00615-0

Tan, T., Xu, X., Gu, H., Cao, L., Liu, T., Zhang, Y., Wang, J., Chen, M., Li, H., & Ge, X. (2024). The Characteristics, Sources, and Health Risks of Volatile Organic Compounds in an Industrial Area of Nanjing. *TOXICS, 12*(12), 868-885. https://doi.org/10.3390/toxics12120868

International Agency for Research on Cancer [IARC]. (2024). List of Classifications by cancer sites with sufficient or limited evidence in humans, Volumes 1 to 137. World Health Organization. https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. Integrated Risk Information System(IRIS). https://www.epa.gov/iris/

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2005). Guidelines for Cancinogen Risk Assessment. https://www3.epa.gov/airtoxics/cancer_guidelines_final_3-25-05.pdf

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (1989). Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual

www.kci.go.kr

(Part A). https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/rags_a.pdf

United States Environmental Protection Agency [US EPA]. (2022). Technical Appendix A - Toxicity Weights for TRI Chemicals and Chemical Categories. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/technical_appendix_a-toxicity_v2.3.4.pdf

World Health Organization [WHO]. (2002). The health effects of indoor air pollution exposure in developing countries / by Nigel Bruce, Rogelio Perez-Padilla, and Rachel Albalak. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/67496/WHO_SDE_OEH_02.05.pdf?sequence=1&isAllowed=y

www.kci.go.kr