

Research Paper

대산 석유화학 산업단지 인근 지역에서의 BTEX 인체 위해성 평가

이지형*,** · 장용철* · 천광수** · 김보라**

충남대학교 환경공학과*, 환경부 금강유역환경청**

Human Health Risk Assessment of BTEX from Daesan Petrochemical Industrial Complex

Jihyeong Lee*,** · Yong-Chul Jang* · Kwangsoo Cheon** · Bora Kim**

Department of Environment Engineering, Chungnam National University*
Ministry of Environment**

요약: 본 연구에서는 대산 석유화학 산업단지에서 배출되는 BTEX (benzene toluene, ethylbenzene, and xylene)의 농도 및 분포 특성을 조사하여 지역주민에 대한 잠재적 위해성을 파악하였다. 산업단지 인근 지역주민들은 다양한 매체(공기, 물, 토양), 특히 공기를 통해 화학물질에 노출될 수 있다. 이 연구는 결정론적 및 확률론적 위해성 평가 접근 방식을 모두 사용하여 흡입에 의한 인체 건강 위험을 평가하였다. 결정론적 위해성 평가 결과 모든 지점에 대해 비발암 위해도의 유해지수(HI) 1.0보다 훨씬 낮은 결과가 나타났다. 그러나 발암 위해성 평가 결과, 산업단지 내에 위치한 A 지점에서 벤젠에 대한 초과발암위해도는 2.28×10^{-6} 로 기준치인 1.0×10^{-6} 을 약간 상회하는 것으로 나타났다. 또한, 해당 지점에 대한 확률론적 위해성 평가 결과, 보수적 기준인 1.0×10^{-6} 을 초과하는 Percentile은 45.3%로 나타났으며, 민감도 분석 결과 노출시간(ET)이 결과에 미치는 영향이 가장 크다고 판단되었다. 인체 위해성 평가 결과, 에틸벤젠, 톨루엔, 자일렌에 대해서는 인체에 위해한 영향이 적은 것으로 판단되었으나, 벤젠은 초과발암위해도 기준(1.0×10^{-6})을 초과하는 것으로 나타났다. 산업단지에서 공기 중 VOCs에 대한 광범위한 모니터링을 통해 이러한 잠재적 위험을 평가하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

주요어: BTEX, 석유화학 산업단지, 결정론적 위해성 평가, 확률론적 위해성 평가

Abstract: In this study, the concentration and distribution characteristics of BTEX (benzene toluene, ethylbenzene, and xylene) emitted from Daesan Petrochemical Industrial Complex were examined to determine their potential hazards to local residents. Residents living nearby the complex areas may be exposed to the chemicals through various media (air, water, and soil), especially by air. This study evaluated human health risks by inhalation using both deterministic and probabilistic risk assessment approaches. As a result of the deterministic risk assessment, the non-cancer risk was

First Author: Jihyeong Lee, Tel: +82-42-865-0766, E-mail: leetopography@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3470-5466

Corresponding Author: Yong-Chul Jang, Tel: +82-42-821-6674, E-mail: gogator@cnu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5435-2915

Co-Authors: Kwangsoo Cheon, Tel: +82-42-865-0790, E-mail: chunks71@korea.kr, ORCID: 0000-0002-6960-799X

Bora Kim, Tel: +82-42-865-0764, E-mail: borafull@korea.kr, ORCID: 0000-0002-9515-5683

Received: 26 August, 2022. Revised: 17 October, 2022. Accepted: 18 October, 2022.

much lower than the regulation limit of hazard index (HI 1.0) for all the points. However, in case of cancer risk evaluation, it was found that the risk of excess cancer for benzene at point A located in the industrial complex was 2.28×10^{-6} , which slightly exceeded the standard regulatory limit of 1.0×10^{-6} . In addition, the probabilistic risk assessment revealed that the percentile exceeding the standard of 1.0×10^{-6} was found to be 45.3%. The sensitivity analysis showed that exposure time (ET) had the greatest impact on the results. Based on the risk assessment study, it implied that ethylbenzene, toluene, and xylene had little adverse effects on potential human exposure, but benzene often exceeded the cancer risk standard (1.0×10^{-6}). Further studies on extensive VOCs monitoring are needed to evaluate the potential risks of industrial complex areas.

Keywords: BTEX, Petrochemical Industrial complex, Deterministic Risk Assessment, Probabilistic Risk Assessment

I. 서론

국내 경제 성장이 가속화되며 석유화학 산업 분야의 발전과 더불어 대규모 석유화학 산업단지가 조성되며, 다양한 대기 오염물질이 환경에 배출되고 있다. 특히, 충남 서산시 대산읍 독곶리 및 대죽리 일원에 위치한 대산 석유화학 산업단지의 경우 석유화학 관련 업종 50여 개 기업이 입주하여 조성된 개별입지 공장 지역으로 석유제품의 생산 및 사용과정에 의해 다량의 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)이 배출된다. 배출된 휘발성 유기화합물은 증기압이 높아 일반적으로 대기로 휘발되어 기체 상태로 존재하며, 이로 인해 산업단지 인근 지역주민들에게 호흡을 통한 노출에 의해 유해한 영향을 미칠 수 있다(Seinfeld et al. 1998). 휘발성 유기화합물은 오존과 미세먼지 등 2차 오염물질을 생성하며, 악취 또는 발암성이 강해 인체에 해로운 영향을 미친다.

대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 기반을 통해 측정된 국내 3대 석유화학 산업단지의 VOCs 배출량 비교 시, 대산 산업단지의 경우 VOCs 배출량은 연간 약 25,738 ton으로 온산산업단지(약 23,367 ton)와 비슷한 수준이었으나, 여수산업단지(약 43,456 ton)와 울산·미포(49,836 ton) 산업단지 대비 각각 1.7배, 1.9배 낮은 수준이었다. 그러나 각 배출사업장 단위면적당 VOCs 배출량 비교 시 대산석유화학 산업단지는 타 석유화학 산업단지에 비해 상대적으로 높은 것으로 확인되

었다(단위면적당 VOCs 배출량(ton/천m²): 대산 2.03, 여수 0.85, 울산·미포 1.03, 온산 1.14, 배출사업장당 VOCs 배출량(ton/사업장): 대산 1,335, 여수 830, 울산·미포 437, 온산 461) (DSICA 2019: Seosan City 2021). 또한, 대산 석유화학 산업단지의 BTEX 대기환경 모니터링 결과값 중 벤젠의 경우 환경기준(연간 평균치)인 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 것으로 나타나 집중관리가 필요한 실정이다(Health and Environment Institute of Chungcheongnam-do 2018~2020).

이러한 휘발성 유기화합물 중 다양한 석유화학제품을 제조하는 과정을 통해 생성되는 BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)는 유독성이 강한 방향족 탄화수소(Aromatic Hydrocarbon)로써, 대부분 중독성이 강해 인체에 유해한 독성물질이다. BTEX 중 벤젠은 국제암연구소(IARC)에서 인체에게 발암성이 확인된 물질로 분류한 Group 1 발암물질로서 흡입을 통해 고농도의 벤젠에 단시간 노출될 경우 현기증, 두통, 떨림 등의 증상이 나타날 수 있으며, 장기간 노출 시 백혈병이 발병할 수 있다. 에틸벤젠은 IARC 발암물질 분류에서 인체 발암 가능 물질로 분류되어 있으며, 눈과 피부 자극성을 띠는 물질이다. 톨루엔은 흡입 시 피로, 메스꺼움, 식욕 감퇴 등이 나타나며, 자일렌은 두통, 구토, 현기증 등이 나타난다(Manahan 2018).

휘발성 유기화합물에는 인체 발암물질로 분류되거나 유해한 영향을 일으킬 수 있는 다양한 물질이 포함되어 있어, 국내에서도 해당 물질들에 대한 오염수준

을 산정하고 위해성 평가가 수행된 바 있다(Kang & Chang, 2005; Jang et al, 2011; Oh et al, 2019; Kim et al, 2019; Lee et al, 2020). 최근 BTEX의 인체 건강(또는 인체) 위해성에 대한 연구는 국제적으로 다수 수행되었고(Ertan et al, 2009; Mohammad et al, 2016; Behzad et al, 2017; Anchal & Gupta, 2018; Mohammad & Ali, 2020; Liu et al, 2021; Hamid et al, 2021; Ali et al, 2021; Adel et al, 2022), 국내에서도 배출·이동량 정보를 바탕으로 한 가상변수 모델링을 통한 VOCs의 인체 위해성 평가에 관한 연구는 수행되었다(Kim et al, 2019; Kim et al, 2020). 하지만 석유화학단지 주변 지역주민의 건강 위해 우려를 고려할 때, BTEX가 다량 배출되는 석유화학 산업단지 주변 지역에서의 실측 데이터와 배출량을 기반으로 수행한 인체 위해성 평가 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대산 석유화학 산업단지에서 대기로 배출되는 BTEX의 PRTR (Pollutant release and transfer register) 배출량 자료와 국가 운영 대기 측정망 자료인 대기환경 모니터링 결과에서의 BTEX 측정 농도의 상관관계를 분석하고, 결정론적 및 확률

론적 위해성 평가(Deterministic and Probabilistic human health risk assessment)를 수행하였다. 또한, 이를 바탕으로 산업단지 인근 거주자들에게 BTEX으로 인한 인체 위해 수준을 평가하고자 하였다. 본 연구에서 제시된 BTEX의 대기 노출 시나리오에 따른 결정론적 및 확률론적 인체 위해성 평가 결과는 향후 배출량 저감 수준과 위해 관리를 위한 기초자료로 활용할 수 있다.

II. 연구방법

1. 대산 석유화학단지 대기환경 자료 확보

1) 대기환경 모니터링 자료 수집

본 연구에서는 대산 석유화학단지에서 대기로 배출되는 BTEX 농도 분포 특성을 파악하기 위해 충청남도 보건환경연구원에서 제공한 대기환경 모니터링 결과를 인체 위해성 평가 수행자료로 사용하였다(Health and Environment Institute of Chungcheongnam-do 2018~2020).

본 연구의 수행자료로 채택한 대산 석유화학 산업단지 대기환경 모니터링 결과는 이동측정차량에



Figure 1. BTEX measurement point near Daesan petrochemical industrial complex.

탑재된 SIFT-MS (Selected ion flow tube mass spectrometry)를 이용하여 측정 대상 물질을 24시간 연속 측정하는 방식으로 구동되었다. 세부 측정 원리는 수분과 입자상 오염물질을 제어하는 필터가 장착된 전처리 장치를 통해 대기 중에 존재하는 시료를 직접 채취하여 화학적 이온화방식 질량분석시스템을 이용하여 현장에서 실시간으로 대상 물질의 농도를 측정하였다(NIER 2021).

본 연구에서는 대산 석유화학단지 인근 4개의 지점에서 2018년부터 2020년까지 분기별 최소 6일에서 최대 22일까지 측정한 자료를 바탕으로 연도별 BTEX 농도 분포를 통해 위해성 평가를 수행하였으며, 대산 석유화학단지와와의 거리 및 지리적 특성에 따라 공장 밀집지역, 주거지역, 도로지역으로 분류된 대기환경 모니터링 대상 지점을 Figure 1에 제시하였다.

대상 지점 중 A 지점은 공장밀집지역 내에 위치하여 BTEX의 배출원과 가장 인접한 지점으로 산업단지 내에서 활동하는 인근 거주자들에 대한 인체 위해성 평가를 수행할 수 있는 지점이다. 또한, B 지점이 위치한 독곶리 인구수는 2020년 기준 591명이며, 대죽1리에 위치한 C 지점과 기은1리에 위치한 D 지점 인근 지역의 인구수는 각각 217명과 1,629명으로 인근 거주민의 BTEX 대기 노출에 대한 인체 위해성 평가를 위한 대표적 지점으로 활용하기에 적절하다고 판단하였다(Statistics Korea 2020).

2) 연도별 BTEX 배출 현황 자료 수집

연도별 BTEX 배출 현황은 화학물질안전원에서 공개한 2018~2020년 PRTR (Pollutant release and transfer register) 자료를 활용하였다. 충남 서산시에서 BTEX를 배출하는 사업장은 총 13개소로 이 중 대산 석유화학단지에 위치하지 않은 3개소에서 배출

Table 1. Air emission annual rates of BTEX from Daesan petrochemical industrial complex

(unit: kg/yr)

BTEX	2018	2019	2020
Benzene	35,925	42,811	47,255
Toluene	18,798	19,017	19,300
Ethylbenzene	5,471	5,914	4,111
Xylene	27,476	64,719	42,505

된 양을 제외한 BTEX 배출량 정보를 Table 1에 제시하였다(NICS 2018~2020).

2. 인체 위해성 평가 과정

1) 노출 시나리오 설정

대산 석유화학단지에서 배출되는 BTEX의 주요 배출경로는 대기 배출로 2018년 벤젠 토양배출량 3,141 kg을 제외하고, BTEX의 연도별 수계 및 토양 배출총량이 100 kg 미만으로 섭취와 피부접촉에 대한 노출에 대한 위해성은 적다고 판단하여 두 가지 경로는 노출 시나리오에서 제외했다. 따라서 본 연구에서는 대기 배출로 인한 인근 거주민들의 흡입 경로를 노출 시나리오로 설정하였으며, 산업단지에서의 오염원-수용체(sources-receptors) 사이의 대기 노출 경로를 Figure 2와 같이 설정하였다.

2) 노출평가

BTEX의 인체 노출량은 각 물질별로 구분하여 대기 흡입에 의한 노출 경로를 통해 산출하였으며 Table 2에 제시하였다(NIER 2019). 노출계수는 국내외 문헌을 참고하여 설정하였으며, Table 3에 제시하였다(US EPA 1997; NIER 2019). 본 연구의 대상 산업단지의 경우 BTEX의 배출경로 중 대부분이 대기 배출이며, 이에 따라 실외 활동 중 호흡에 의한 노출을



Figure 2. Human exposure scenario at Daesan petrochemical industrial complex.

Table 2. Exposure equations by the atmospheric exposure scenario in this study

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

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

Table 3. Exposure factors and distributions in this study

Exposure Factors	Unit	Value		Distribution	Reference
		CTE ¹⁾	RME ²⁾		
EF	day/yr	350	365	Triangular (min: 180, max: 365, likeliest: 350)	This study
ET	hr/day	2.18	6.09	Lognormal (m=2.18, s=2.01)	NIER 2019
ED	yaer	30		Normal (mean=25, s=8.25)	NIER 2019
BW	kg	64.5	84.8	Lognormal m=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}	m ³ /day	14.62	18.97	Lognormal (mean: 14.62, SD: 3.19)	NIER 2019
ABS _{air-inh}	unitless	1		Point estimate	US EPA 1997

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

고려했을 때 한국인의 평균 실외환경 노출 시간을 참고하여 노출 시간(ET)을 2.18시간으로 설정하였다. 또한, 노출 기간(ED)은 30년으로 설정하여 발암위해도 산정 시 일반적으로 사용하는 기간을 적용하였다. 가정, 학교, 사무실 등에서 발생할 수 있는 실내 노출은 외부 환기 시간이 가구마다 다르고, 실내 환경을 고려한 측정 데이터가 확보되지 않아 제외하였다.

3) 기울기 인자 및 독성참고치

본 연구에서는 BETX의 위해도 결정(Risk Characterization)을 위해 US EPA IRIS에서 제시한 기울기 인자(Slope Factor, SF)와 독성참고치(Reference Dose of Concentration, RfD of RfC)를 참고하여 유해지수(Hazard Index, HI) 및 초과발암위해도(Excess Cancer Risk, ECR)를 산정하였다. 비발암위해도 산정을 위한 독성참고치의 경우 US EPA IRIS에서 제시한 흡입 경로에 대한 자료가 모두 단위 부피당 농도로 표기되는 RfC로 설정되었기 때문에 단위 변환을 위해 한국인의 1일 호흡률 평균값과 한국 성인의 평균 체중을 적용하여 RfD로 환산하여 유해지수 산정 시 활용하였다. 벤젠을 제외한 세

Table 4. Slope factor and Reference dose

unit: (mg/kg-day)⁻¹

	Slope Factor	Reference Dose
Benzene	0.0273	0.0068
Toluene	NA	1.1333
Ethylbenzene	NA	0.2267
Xylene	NA	0.0227

NA=Not applicable

가지 물질은 US EPA에서 분류한 인체 발암 분류 불가 물질(Group D)로 발암위해도 산정을 위한 기울기 인자가 존재하지 않으며, 위해도 결정을 위한 기울기 인자 및 독성참고치를 Table 4에 제시하였다(EPA IRIS).

4) 비발암위해도 산정

본 연구에서는 BTEX의 비발암성에 의한 유해한 영향이 발생할 가능성을 판단하기 위해 앞서 제시한 독성참고치(RfD)와 일일평균노출량(Average Daily Dose, ADD)을 비교하여 각 물질별 유해성 몫(Hazard Quotient, HQ)을 산정하고, 계산된 결과를 합하여 BTEX의 인체 노출에 대한 총 유해지수(Hazard Index,

HI)를 산출하였다. 오염수준으로 인한 일일평균노출량을 일일 허용용량인 독성참고치와 비교하여 유해지수 값이 1을 초과하는 경우 인체에 비발암성에 의한 독성 발현 가능성이 있다는 것을 의미하며, 1 이하인 경우에는 비발암 위해 발생 가능성이 낮다는 것을 의미한다.

5) 발암위해도 결정

발암위해도는 암을 유발할 가능성이 있는 유해화학물질이 장기간 인체에 노출되었을 때 발암 가능성을 확률로써 나타낸 지표다. 초과발암위해도(Excess Cancer Risk, ECR)는 일반적으로 발암위해도 수준이 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 를 초과할 경우 위해도가 있다고 판단한다. 발암위해도 수준 1.0×10^{-6} 이 의미하는 것은 인구 백만 명 중 한 명이 해당 물질에 장기간 노출 시 암이 유발될 가능성이 존재한다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 초과발암위해도 산정 시 벤젠의 장기노출에 대한 수행 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 지점별 초과발암위해도의 3년 평균값을 자료를 활용하였다. 또한, 초과발암위해도 산정 결과를 평균값(Central Tendency Estimate of Risk, CTE)과 보수적인 값을 적용한 95% 상위값(Reasonable Maximum Estimate of Risk, RME)으로 산출하였으며, 산출된 결과를 바탕으로 결정론적 및 확률론적 위해성 평가를 수행하였다. 벤젠을 제외한 나머지 물질들의 경우 인체 발암 분류 불가 물질(Group D)로 분류되어 기율이 인자값이 존재하지 않아 초과발암위해도 산정은 수행하지 않았다.

본 연구에서는 결정론적 위해성 평가 결과가 허용위해수준(1.0×10^{-6})을 상회하는 지점에 대해 확률론적 위해성 평가를 수행하였다. 확률론적 위해성 평가는 Table 3에 제시된 노출계수의 분포 유형 및 범위를 적용하여 'Crystal Ball' 소프트웨어를 사용하여 'Monte-Carlo Simulation'을 통해 수행하였다.

자료의 불확실성을 보완하기 위한 'Monte Carlo Simulation'은 노출변수의 분포 유형 및 범위를 고려하여 가정을 정의하고 시뮬레이션 횟수 설정하여 확률적 분포로 결과를 도출하며, 본 연구에서는 시뮬레

이션 횟수를 100,000번으로 설정하여 확률론적 위해성 평가를 수행하였다.

6) 민감도 분석

민감도 분석은 입력 변수의 변화가 결과값에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위해 확률론적 위해성 평가 단계에서 활용된다. 민감도 분석을 통해 각 입력 변수가 결과에 미치는 영향을 정량적으로 파악이 가능하며, 이를 통해 어떤 변수들이 중요 인자인지 확인하고 분석의 신뢰도를 높일 수 있다.

본 연구에서는 확률론적 위해성 평가 수행 후 입력 변수인 노출시간(ET), 노출기간(ED), 호흡률(IR_{mh}), 몸무게(BW), 노출빈도(EF)를 대상으로 민감도 분석을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 지점별 BTEX 농도 분포 및 배출량 비교

1) 각 지점별 BTEX 농도 분포 특성

대산 석유화학단지 인근 대기환경 모니터링 자료를 바탕으로 인체 위해성 평가를 수행하기 위한 지점별 BTEX 농도 평균값과 95% UCL 값을 Table 5에 제시하였다. 각 지점별 BTEX 농도는 A, B, C, D 지점 순으로 크게 나타났으며, 석유화학 산업단지와의 거리와 상관관계가 있는 것으로 판단되었다.

A 지점의 연도별 벤젠의 평균 측정값은 우리나라 환경정책기본법 시행령에서 제시한 환경기준(연간 평균치)인 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 것으로 나타났다. B 지점도 2019년 환경기준을 초과하여 대산 석유화학 단지의 벤젠 배출에 대한 관리의 필요성이 있다고 판단되었다.

모든 지점에 대해 BTEX 농도가 2018년보다 2019년 증가하는 추세를 보였고, 2020년에는 C 지점의 자일렌 측정값을 제외하고 2019년보다 농도가 감소하였다. 또한, 각 물질에 대한 거리별 농도의 상관성을 파악하기 위해 상관계수를 산정한 결과, 벤젠 0.99, 톨루엔 0.95, 에틸벤젠 0.99, 자일렌 0.98의 상관계수 값이 산정되었다.

Table 5. Concentration distributions of BTEX from Daesan petrochemical industrial complex by four different sites

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Site	Year	n*	Average				95% UCL (upper confidence level)			
			Benzene	Toluene	Ethyl-benzene	Xylene	Benzene	Toluene	Ethyl-benzene	Xylene
A	2018	14	9.91	5.97	1.92	7.68	20.78	11.30	3.29	15.94
	2019	41	18.13	15.30	5.99	27.18	48.15	33.52	15.38	54.84
	2020	34	7.01	11.50	3.04	16.83	20.36	25.15	6.79	43.97
B	2018	14	3.79	4.49	0.85	1.71	8.49	9.44	1.83	2.54
	2019	47	5.44	6.58	3.08	8.33	18.74	15.90	10.62	20.75
	2020	30	2.37	5.38	1.59	2.98	6.22	15.81	3.84	7.66
C	2018	14	1.73	3.12	0.76	0.99	4.66	7.80	1.26	1.82
	2019	50	3.83	7.58	1.57	2.45	11.48	21.18	3.84	5.68
	2020	28	1.86	5.98	1.31	3.94	3.94	16.98	3.04	9.36
D	2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	27	3.05	6.02	1.21	3.50	7.24	13.97	2.42	7.53
	2020	6	2.38	0.83	0.40	0.28	3.85	1.71	0.70	0.57

* = number of Samples

2) 배출량과 모니터링 결과 상관관계 파악

배출량 정보와 대기환경 모니터링 결과를 비교하기 위해 모든 지점에 대한 BTEX 측정값의 연도별 평균 농도와 연도별 BTEX 배출량 정보를 Figure 3과 4에 제시하였다.

대기 농도 측정 시 풍향은 지점별로 약간의 차이가 있었으며 주로 북서풍이 부는 것으로 나타났으나, A 지점은 간헐적으로 남서풍, D 지점은 주로 북풍이 부는 것으로 확인되었다. 지점별 지형 특성을 고려하였을 때, 바다와 가까운 A 지점은 해풍의 영향을 크게 받는 것으로 판단되며, 이로 인해 대기 배출물질이 내

륙쪽으로 향하지만 확산 및 희석으로 인해 공장 밀집 지역과 거리가 멀어질수록 측정 농도가 낮아지는 것으로 판단되었다.

각 물질에 대한 연도별 측정 농도와 배출량 정보의 증감 추이는 4가지 물질 중 자일렌만 유사한 경향이 나타났고, 나머지 물질들의 경우 상관성이 낮은 그래프 양상을 보였다. 이는 본 연구에서 사용한 농도 측정자료가 연중 상시 측정된 것이 아니기 때문에 VOCs의 특성에 따라 계절별 기상조건에 대한 영향이 반영된 것으로 판단된다. 자일렌의 경우 증기압이 25°C에서 6.65~8.80 mmHg로 다른 물질들(벤젠 94.8 mmHg, 톨루엔 28.4 mmHg, 에틸벤젠 9.6

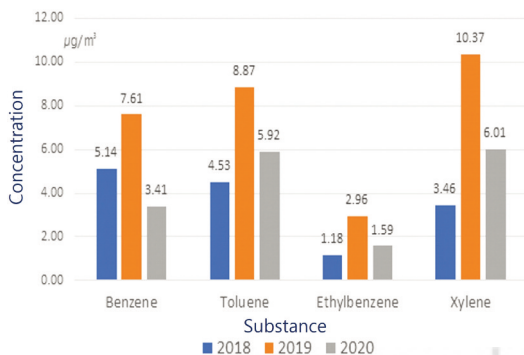


Figure 3. Average BTEX concentration in air from Daesan petrochemical industrial complex.

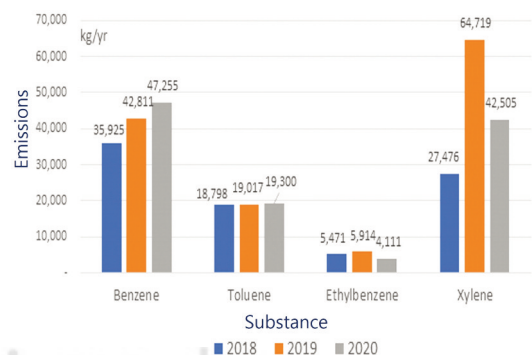


Figure 4. BTEX released to air from Daesan petrochemical industrial complex.

mmHg)에 비해 낮기 때문에 계절별 기상조건의 영향을 적게 받아 측정 농도와 배출량 자료의 유사성이 나타나 것으로 판단된다(NIFDS).

2. 인체 위해성 평가 결과

1) 결정론적 위해성 평가 결과

비발암위해도 산정 결과를 Table 6에 제시하였다. 지점별 비발암위해도를 비교한 결과, A 지점이 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 유해지수를 나타내었으나, 모든 지점에 대해 유해지수가 1.0 이하로 산정되어 대산지역 BTEX 대기 노출에 의한 비발암위해도는 낮은 것으로 나타났다.

각 물질별 비발암 위해 기여도는 벤젠이 69~82%로 가장 높았고, 자일렌이 17~30%를 차지했으며, 톨루엔과 에틸벤젠은 기여도가 매우 적은 것으로 나타났다. 지점별 벤젠에 대한 초과발암위해도 산정 결과를 Table 7에 제시하였다. 초과발암위해도의 경우 A 지점은 2018~2020년, B 지점은 2019년 1.0×10^{-6} 을 상회하는 결과가 나타났다. 그러나 벤젠의 장기노출에 대한 수행자료의 신뢰성을 확보하기 위해 지점별

3년 평균값을 적용하여 초과발암위해도를 산정한 결과 A 지점이 2.28×10^{-6} 으로 1.0×10^{-6} 을 상회하는 것으로 나타났다. 나머지 지점들은 초과발암위해도가 1.0×10^{-6} 보다 작게 나타나 벤젠의 대기 노출에 의한 발암 확률이 적다고 판단되었다.

2) 확률론적 위해성 평가 결과

본 연구에서 결정론적 위해성 평가 결과, 벤젠에 대한 초과발암위해도가 허용 위해 수준을 초과한 A 지점의 확률론적 위해성 평가를 수행하고(Figure 5), 확률론적 위해성 평가 결과 분포를 Table 8에 나타냈다.

확률론적 발암위해도 중앙값은 1.12×10^{-6} , 평균값은 1.70×10^{-6} 로 계산되었다. 결정론적 위해도 산정에서 도출된 CTE 값과 RME 값은 각각 2.28×10^{-6} , 1.67×10^{-5} 로 확률론적 위해성 결과 분포에서 78.2%, 99.9%에 위치하였다. 확률론적 위해성 평가 결과 보수적 기준인 1.0×10^{-6} 을 초과하는 Percentile은 45.3%로 나타났다. 확률론적 위해성 평가 결과에 대한 민감도 분석 결과, 노출시간(ET), 노출기간(ED), 호흡률(IRinh), 몸무게(BW), 노출빈도(EF)가 결괏값

Table 6. Non-carcinogenic risk of BTEX at each point

		A	B	C	D
Benzene	CTE	0.0339 (69%)	0.0112 (74%)	0.0072 (75%)	0.0079 (82%)
	RME	0.2484 (71%)	0.0931 (77%)	0.0559 (78%)	0.0463 (81%)
Toluene	CTE	0.0002 (0%)	0.0001 (1%)	0.0001 (1%)	0.0001 (1%)
	RME	0.0012 (0%)	0.0007 (1%)	0.0008 (1%)	0.0004 (1%)
Ethyl-benzene	CTE	0.0003 (1%)	0.0002 (1%)	0.0001 (1%)	0.0001 (1%)
	RME	0.0021 (1%)	0.0014 (1%)	0.0007 (1%)	0.0004 (1%)
Xylene	CTE	0.0150 (30%)	0.0038 (25%)	0.0021 (22%)	0.0016 (17%)
	RME	0.0958 (28%)	0.0258 (21%)	0.0141 (20%)	0.0102 (18%)
Hazard Index (HI: sum of HQ)	CTE	0.0494 (100%)	0.0153 (100%)	0.0095 (100%)	0.0097 (100%)
	RME	0.3475 (100%)	0.1210 (100%)	0.0714 (100%)	0.0572 (100%)

Table 7. Carcinogenic risk of BTEX at each point

Year	Average (CTE)				95% UCL (RME)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
2018	1.94E-06	7.42E-07	3.38E-07	-	1.17E-05	4.78E-06	2.62E-06	-
2019	3.54E-06	1.06E-06	7.48E-07	5.96E-07	2.71E-05	1.05E-05	6.46E-06	4.07E-06
2020	1.37E-06	4.63E-07	3.64E-07	4.66E-07	1.14E-05	3.50E-06	2.22E-06	2.16E-06
average	2.28E-06	7.56E-07	4.83E-07	5.31E-07	1.67E-05	6.27E-06	3.76E-06	3.11E-06

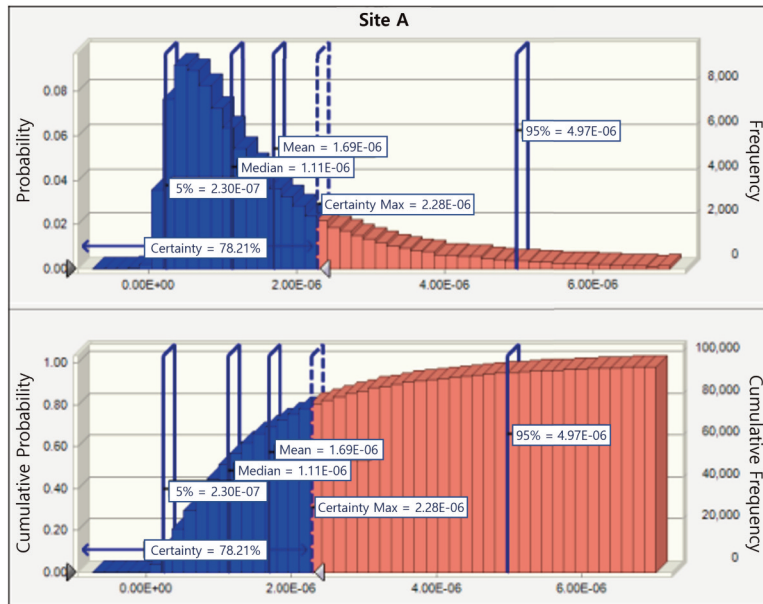


Figure 5. Results of probabilistic risk assessment at A site.

Table 8. Distribution of PRA results

Percentile		Site A
DRA	CTE	2.28E-06
	RME	1.67E-05
PRA	Min	<1.00E-07
	5%	2.30E-07
	10%	3.31E-07
	20%	5.07E-07
	30%	6.84E-07
	40%	8.81E-07
	Median	1.11E-06
	60%	1.42E-06
	70%	1.81E-06
	80%	2.41E-06
	95%	4.97E-06
Max	4.45E-05	

에 미치는 영향이 각각 73.1%, 14.7%, 5.1%, 4.7%, 3.0%로 나타났다.

3. 고찰

석유화학 산업단지에서 배출되는 BTEX의 위해성 평가를 수행한 선행연구와 본 연구의 유사성과 차이

Table 9. Comparison of BTEX concentration in other studies (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Jang et al. (2011)	Behzad et al. (2017)	This study
Benzene	0.39	1,847	6.11
Toluene	-	3,570	7.85
Ethyl-benzene	-	758	2.43
Xylene	-	560	8.66

Table 10. Comparison of benzene excess carcinogenic risk from other studies

	Jang et al. (2011)	Behzad et al. (2017)	This study
ECR	2.14×10^{-6}	6.00×10^{-6}	2.28×10^{-6}

점을 비교하기 위해 타 논문에서 발취한 농도와 발암 위험도를 Table 9, 10에 제시하였다. 과거 산업단지 주변 지역의 벤젠에 대한 인체 위해성 평가를 수행한 Jang et al. (2011)의 연구에 따르면 서산지역의 벤젠 대기 농도는 $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 연구의 농도 자료인 대산 석유화학 산업단지의 모니터링 결과값인 $6.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 큰 차이가 나타났다. 이는 산업 발달로 인한 벤젠의 대기 배출량의 증가와 대기 농도의 측정 지점 등이 상이하여 나타난 결과로 판단된다. 비교 대상 연

구의 서산지역에 대한 벤젠의 결정론적 위해성 평가 결과는 2.14×10^{-6} 으로 본 연구의 A 지점에서 산출된 결과 2.28×10^{-6} 과 유사한 것으로 나타났다.

그러나 비교 대상 연구에서의 서산지역 대기 시료 분석 결과값은 $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 본 연구의 A 지점의 시료 평균값은 $11.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 농도 차이가 크게 나타났다. 두 연구의 농도 차이가 컸음에도 불구하고 초과발암위해도 값이 유사하게 나온 이유는 위 논문의 경우 노출시간(ET)을 24시간으로 설정하였고, 수행 연구에서는 2.18시간으로 설정했기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 석유 유통 회사 작업자들의 BTEX 노출 평가에 대한 Behzad et al. (2017)의 연구에 따르면 작업 환경 내 BTEX 농도는 벤젠($1,847 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 톨루엔($3,570 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 에틸벤젠($758 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 자일렌($560 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 본 연구의 기초자료 벤젠($6.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 톨루엔($7.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 에틸벤젠($2.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 자일렌($8.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교하였을 때 큰 차이가 나타났다. 이에 따라 Behzad et al. (2017)의 연구에서 벤젠 노출에 대한 사무실 근로자의 초과발암위해도는 6.0×10^{-6} 로 위해도가 있는 것으로 확인되었다. 석유 유통 회사 작업자들의 BTEX 노출 평가에 대한 연구와 벤젠 노출에 대한 위해성 평가 비교 분석 결과, 비교 대상 연구에서 사무실 근로자의 초과발암위해도는 6.0×10^{-6} 로 본 연구 결과보다 약간 상회하는 것으로 확인되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 대산 석유화학 산업단지에서 측정된 BTEX 농도 데이터를 바탕으로 인체 위해성 평가를 수행하였으며, 그 주요 결과는 아래와 같다.

1) 대산 석유화학 산업단지 인근 지역에서의 BTEX에 대한 대기환경 모니터링 자료를 조사한 결과, 산업단지와의 거리가 가까울수록 측정된 농도가 높았으며, 전 지점에 대한 3년 평균 벤젠 농도는 $6.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 우리나라 환경정책기본법 시행령에서 제시한 환경기준(연간 평균치)인 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 상관계수를 통하여 각 물질별 산업단

지와의 거리에 따른 상관성을 분석한 결과, 벤젠 0.99, 톨루엔 0.95, 에틸벤젠 0.99, 자일렌 0.98의 상관계수 값이 산정되었다.

2) 각 물질에 대한 연도별 측정 농도와 배출량 정보의 증감 추이는 자일렌만 유사한 경향이 나타났고, 나머지 물질들의 경우 상관성이 낮은 것으로 판단되었다. 이는 본 연구에서 사용한 농도 측정자료가 연중 상시 측정된 것이 아니기 때문에 VOCs의 특성에 따라 계절별 기상조건에 대한 영향이 반영된 것으로 판단되었다. 자일렌의 경우 증기압이 6.65~8.80 mmHg로 다른 물질들(벤젠 94.8 mmHg, 톨루엔 28.4 mmHg, 에틸벤젠 9.6 mmHg)에 비해 낮으므로 계절별 기상조건에 대한 영향을 적게 받아 측정 농도와 배출량 자료의 유사성이 나타난 것으로 판단된다.

3) 대기환경 모니터링 결과값을 바탕으로 인체 위해성 평가를 수행한 결과, 모든 물질에 대한 위해성 지수(Hazard Index)는 CTE (벤젠 0.05, 톨루엔 0.02, 에틸벤젠 0.01, 자일렌, 0.01), RME (벤젠 0.35, 톨루엔 0.12, 에틸벤젠 0.07, 자일렌, 0.06) 모두 1.0이하로 나타나 비발암 위해도는 비교적 낮은 것으로 판단된다.

4) 대산 석유화학 산업단지 내에 위치한 A 지점에서 벤젠에 대한 초과발암위해도는 2.28×10^{-6} 로 기준치인 1.0×10^{-6} 을 상회하는 것으로 나타났다. 이는 인구수 백만 명 중 약 3명에게 벤젠의 대기 배출로 인한 흡입 경로를 통해 암이 발생할 가능성이 있다는 의미이다. 그리고 나머지 지점에 대해서는 B 지점 $7.56\text{E}-07$, C 지점 $4.83\text{E}-07$, D 지점 $5.31\text{E}-07$ 로 허용 위해수준 이하 값이 산정되어 해당 지점 주변 지역주민에 대한 발암 가능성은 낮다고 판단된다.

5) 결정론적 위해성 평가 결과를 바탕으로 인체에 발암 위해성이 있다고 판단되는 지점 A의 벤젠에 대한 확률론적 위해성 평가를 실시한 결과, 보수적 기준인 1.0×10^{-6} 을 초과하는 Percentile은 45.3%로 나타났다. 또한, 민감도 분석(sensitivity analysis) 결과, 노출시간(ET) 73.1%, 노출기간(ED) 14.7%, 호흡률(IRinh) 5.1%, 몸무게(BW) 4.7%, 노출빈도(EF) 3.0%로 노출시간(ET)이 위해성 평가 결과에 미치는 영향이 가장 컸다. 본 연구에서는 노출시간(ET)을 한

국민의 평균 실외활동 시간인 2.18 hr/day을 적용하여 위해성 평가를 수행했기 때문에 다소 낮은 결괏값이 도출되었을 수 있다.

본 연구를 통해 결론을 종합해 볼 때, 에틸벤젠, 톨루엔, 자일렌에 대해서는 인체 위해 영향이 상대적으로 적은 것으로 도출되었으나, 석유화학 산업단지에서 해당 물질을 다량 취급·배출하고 있으며, 이에 따라 유해화학물질로부터 인근 거주자들의 안전성 확보를 위해 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다. 또한, 대산 석유화학 산업단지 내에 위치한 A 지점에서 벤젠에 대한 발암위해도 규제 수준(1.0×10^{-6})을 종종 초과하였다. 일반적인 초과발암위해도 기준($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$)을 고려한다면 향후 해당 지역에 대한 벤젠 모니터링을 통해 추가적인 벤젠 위해성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

충남 보건환경연구원에서 가스크로마토그래피(GC/(ECD/FID))를 활용한 유해대기측정소 2개소(기은리, 대죽리)를 설치하여 2021년부터 운영 중이며, 2022년에는 1개소(화곡리)를 추가 설치하였다. 따라서 추가적인 인체 위해성 평가 수행 시 가스크로마토그래피를 이용하여 연중 24시간 연속 측정된 유해대기측정소의 BTEX 측정 결과를 기초자료로 활용하여 인체 위해성 연구를 수행하면 보다 나은 대표성과 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 추가적인 연구 수행 시 본 연구에서 드러난 한계점인 실내 환경을 고려한 측정자료를 확보하고, 화학물질 배출에 대한 기상조건 등을 고려하여 인체 위해성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

- Seinfeld JH, Pandis. 1998. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- DSICA (Daesan Industrial Complex Association). 2016. An Investigation on the Air Environment Impact of Daesan Industrial Complex.
- Seosan City. 2021. Seosan City Environmental Plan (2022-2026). Chapter 7, p. 307.
- Manahan S. 2018. 10th Edition Environmental Chemistry. Health and Environment Institute of Chungcheongnam-do. 2018-2020. Air Quality Monitoring Results. <http://www.chungnam.go.kr/main.do>. (accessed date: Dec 28, 2021)
- Kang CH, Chang YY. 2005. Risk Assessment of Hydrocarbon-Contaminated Soil Using RBCA (Risk-Based Corrective Action) Mode. Korean J. EHS Assessment 3(4): 9-17. [Korean Literature]
- Jang YC, Lee S, Shin YS, Kim H, Lee J. 2011. Human Health Risk Assessment of Benzene from Industrial Complexes of Chungcheong and Jeonla Province. Journal of Environmental Impact Assessment 20(4): 497-507. [Korean Literature]
- Oh YJ, Han YD, Kim YJ, Jung SH, Jung WH, Im JY, Lee JW, Park MK, Son BS. 2019. Heavy metals exposure and health risk assessment of PM10 particles in indoor air in industrial area. Journal of Odor and Indoor Environment 18(1): 18-27. [Korean Literature]
- Kim SM, Son ES, Seo YK, Baek SO. 2019. A Case Study on Health Impact Assessment of Hazardous Air Pollutants in Industrial Complex Development Plan. Journal of Environmental Impact Assessment 28(6): 616-625. [Korean Literature]
- Lee GI, Kim HK, Ji SM, Jang YC. 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. [Korean Literature]
- Ertan D, Fatih T, Aykan K. 2009. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill

- environment. *Journal of Hazardous Materials*. 176: 870-877.
- Mohammad M, Maryam RAS, Hamid RG, Hamideh EA, Ehsan A, Ebrahim T, Abdolmajid G, Mohsen YA, Amir M, Ali A. 2016. Investigation of outdoor BTEX: Concentration, variations, sources, spatial distribution, and risk assessment. *Chemosphere* 163: 601-609.
- Behzad H, Krystal JGP, Ali K, Hamshid YC, Alan D, Mohammad S, Mahmoud M. 2017. BTEX exposure assessment and quantitative risk assessment among petroleum product distributors. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 144: 445-449.
- Anchal G, Gupta NC. 2018. A comprehensive study on spatio-temporal distribution, health risk assessment and ozone formation potential of BTEX emissions in ambient air of Delhi, India. *Science of the Total Environment* 659: 1090-1099.
- Mohammad AM, Ali AO. 2020. Gas flares contribution in total health risk assessment of BTEX in Asalouyeh, Iran. *Process Safety and Environmental Protection* 137: 223-237.
- Liu YJ, Liu YQ, Yang HY, Wang QA, Cheng F, Lu WJ, Wang JB. 2021. Occupational health risk assessment of BTEX in municipal solid waste landfill based on external and internal exposure. *Journal of Environmental Management* 305: 114348.
- Hamid RG, Zohreh K, Mohammad SH, Mehdi F, Mohsen H. 2021. Level of air BTEX in urban, rural and industrial regions of Bandar Abbas, Iran; indoor-outdoor relationships and probabilistic health risk assessment. *Environmental Research* 200: 111745.
- Ali A, Saeed MZ, Mohammadreza M, Ali E, Amin MK. 2021. Emission of BTEX compounds from the frying process: Quantification, environmental effects, and probabilistic health risk assessment. *Environmental Research* 204: 112295.
- Adel M, Roohollah R, Sadegh N, Amin A, Mehdi F. 2022. BTEX levels in rural households: Heating system, building characteristic impacts and lifetime excess cancer risk assessment. *Environmental Pollution* 298: 118845.
- Kim O, Song YH, Choi JH, Park SH, Park CY, Lee MW, Lee JH. 2019. Human Exposure to BTEX and Its Risk Assessment Using the CalTOX Model According to the Probability Density Function in Meteorological Input Data. *J Environ Health Sci*. 45(5): 497-510. [Korean Literature]
- Kim YR, Rhee JH, Heo SK, Nam GJ, Li Q, Yoo CK. 2020. Human Health Risk, Environmental and Economic Assessment Based on Multimedia Fugacity Model for Determination of Best Available Technology (BAT) for VOC Reduction in Industrial Complex. *Korean Chemical Engineering Research* 58(3): 325-345. [Korean Literature]
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2021. Guidelines for Operation of Real-Time Mobile Mass Analysis System.
- Statistics Korea. 2020. Number of resident registration households by administrative district. <https://kostat.go.kr/portal/korea/index.action>. (accessed date: Jan. 8, 2022)
- NCIS (National Institute of Chemical Safety). 2022. Pollutant release and transfer register (2018-2020). <https://icis.me.go.kr/prtr/main.do> (accessed date: Jul 6, 2022).
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). IRIS (Integrated Risk Information System). <https://www.epa.gov/iris/> (accessed date: Dec 29, 2021).

US EPA (United States Environmental Protection Agency). 1986. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. Fed. Reg. 51.

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

US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2011. Exposure Factors Handbook.

EPA/600/R-09/052F, National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC 20460.

NIFDS (National Institute of Food and Drug Safety Evaluation). 2022. Tox-Info. <https://www.nifds.go.kr/toxinfo/> (accessed date: Jul 6, 2022).