

논문

완주군 산업단지 주변 주거지역의 대기 중 VOCs 및 SVOCs 농도 평가

Comparative Assessment of Volatile and Semi-Volatile Organic Compounds in Residential and Industrial Areas of the Wanju Industrial Complex Region

안영지¹⁾, 최민석¹⁾, 김용현^{1),2),3),4),*}

¹⁾전북대학교 환경에너지융합학과, ²⁾전북대학교 환경공학과
³⁾전북대학교 토양환경연구센터, ⁴⁾전북특별자치도 환경보건센터

Young-Ji An¹⁾, Min-Seok Choi¹⁾, Yong-Hyun Kim^{1),2),3),4),*}

¹⁾Department of Environment & Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea
²⁾Department of Environmental Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea
³⁾Soil Environment Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea
⁴⁾Jeonbuk State Environment Health Center, Jeonju, Republic of Korea

접수일 2025년 7월 22일
수정일 2025년 8월 5일
채택일 2025년 8월 20일

Received 22 July 2025
Revised 5 August 2025
Accepted 20 August 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)63-270-2446
E-mail : ykim84@jbnu.ac.kr

Abstract This study investigated ambient air quality in and around the Wanju industrial complex, where a residential area is uniquely enclosed by industrial facilities. The analysis focused on volatile organic compounds (VOCs: benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene) and semi-volatile organic compounds (SVOCs: polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalates) to assess the impact of industrial emissions on nearby residential zones. Samples were collected from the industrial complex, a proximate residential area within its boundary, and adjacent residential areas. VOCs were measured over two 4-week periods in spring and autumn 2024, while SVOCs were sampled on December 5, 2024. VOC concentrations were highest within the industrial complex (3.46 ± 1.26 ppb), followed by the immediately adjacent residential area (0.91 ± 0.34 ppb). Surrounding residential areas recorded lower levels (0.56 ± 0.07 ppb), similar to the background site (Jeonju). Although the concentration of VOCs in surrounding residential areas was approximately 40% higher in autumn compared to spring, a detailed analysis that considered wind direction, wind speed, and temperature indicates that this increase cannot be attributed to seasonal variation. Rather, the observed VOC concentrations appear to be influenced primarily by the physical proximity to the industrial complex. At the industrial site, PAHs and phthalates were 2.8 and 7.4 times higher than background levels, respectively. These findings provide foundational data for developing pollutant control strategies in the Wanju industrial complex and highlight the need for air quality policies targeting residential areas near industrial sources.

Key words: Volatile organic compound (VOC), Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), Phthalates, Wanju industrial complex

1. 서론

산업단지는 제조업과 화학물질 취급 시설이 집적된 공간으로, 공정 특성 및 사용 원료의 종류에 따라 다양한 대기오염물질이 다량으로 배출될 수 있다(He

et al., 2024). 이러한 산업단지에서 배출되는 대기오염물질은 주변지역의 대기질 악화에 직접적인 영향을 미치며, 특히 인근에 주거지역이 위치한 경우 그 영향이 더욱 심각해질 수 있다(Bergsta et al., 2021; Shuai et al., 2018; Eom et al., 2018). 화학물질안전원

(National Institute of Chemical Safety, NICS)에서 발표한 화학물질 배출량 조사(pollutant release and transfer register, PRTR) 자료에 따르면, 2021년 국내 전체 화학물질 배출량 중 65% 이상이 산업단지를 통해 배출되었으며, 이 중 88.2%는 대기오염물질에 해당한다(NICS, 2021). 그러나 사업장에서 배출되는 대기오염물질 중 오직 43.1%만이 대기방지시설을 통해 처리되고 있으며, 나머지는 코팅, 혼합, 화학반응 등의 공정 또는 원료 및 제품의 이송·운반 과정에서 비점오염원 형태로 배출되기 때문에 방지시설을 통한 관리가 어려운 실정이다(NICS, 2021). 대기로 배출되는 화학물질 중 일부는 유해 대기오염물질로 분류되어 장기간 인체 노출 시 암을 유발하는 등 인체 건강에 심각한 악영향을 줄 수 있다(Peng *et al.*, 2025; Shetty *et al.*, 2023).

산업단지에서 배출되는 주요 기체상 대기오염물질로는 volatile organic compounds (VOCs)과 semi-VOCs (SVOCs)가 있다. VOCs는 주로 사업장에서 유기용제로 사용되는 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene (BTEXS)이 대표적이며, 이들 물질은 장기간 흡입 노출 시 폐, 간, 신장 등 주요 장기의 손상 및 발암성을 유발하여 심각한 건강상의 악영향을 초래할 수 있다(Yu *et al.*, 2024; Hussain *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024). 또한, O₃ 및 PM_{2.5}의 전구물질로 작용하여 광화학 스모그 형성과 대기질 악화에도 기여하는 것으로 알려져 있다(He *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2020). 한편, 산업단지에서 배출되는 대표적인 SVOCs에는 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)와 phthalates가 있다. PAHs는 연소 공정 등에서 발생하는 유해 대기오염물질로, 흡입 노출 시 세포 변성 및 발암 유발 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다(Barbosa Jr *et al.*, 2023; Holme *et al.*, 2023; Ravanbakhsh *et al.*, 2023). Phthalates는 플라스틱의 가소제로 광범위하게 사용되며, 대표적인 내분비계 교란물질로 분류된다. 인체 노출 시 생식계, 태아 및 아동 발달, 면역계 등의 생리적 균형을 교란하여 다양한 건강영향을 유발할 수 있다(Arrigo *et al.*, 2023; Zhang

et al., 2022).

최근까지도 일부 산업단지 인근 대기 중에서 BTEXS가 상대적으로 높은 농도로 검출되고 있으며, PAHs 및 phthalates와 같은 SVOC의 존재 또한 다수의 선행연구를 통해 보고되고 있다. Kim (2024)의 연구에 따르면, 파주 산업단지 내 대기 중 BTEXS 농도는 8.5 ppb (xylene)에서 25.7 ppb (toluene) 수준으로 일반 주거지역에서 검출된 VOC 농도 범위(0.20 ppb (o-xylene)-1.38 ppb (toluene))에 비해 현저히 높은 수준으로 평가된다(Hwang *et al.*, 2024). 또한, 자동차, 석유, 비철금속 관련 산업단지가 위치한 울산시의 경우, BTEX의 대기 중 평균 농도는 53.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2025). PAH의 경우, 반월국가산업단지 내 대기 중에서 기체상 PAHs는 3.895~8.375 ng Sm⁻³, 입자상 PAHs는 1.484~7.979 ng Sm⁻³ 범위로 검출된 사례가 보고되었으며(Lee *et al.*, 2023), phthalates는 울산 산업단지 대기 중에서 32.40~192.75 ng m⁻³ 범위로 검출된 바 있다(Baek *et al.*, 2020). 반월시 화산산업단지 인근 아산호 주변 대기에서는 기체상 phthalates가 0.38~15.69 ng m⁻³, 입자상 phthalates가 3.33~17.68 ng m⁻³ 수준으로 확인된 연구도 보고되었다(Lee *et al.*, 2019). 이와 같이, 다양한 산업단지에서는 VOCs뿐만 아니라 PAHs, phthalates 등 인체 위해성이 높은 유기화합물들이 대기 중에 상존하고 있으며, 이들 물질의 농도는 인근 주거지역 주민의 건강에 악영향을 줄 수 있는 수준에 이를 수 있다. 따라서, 산업단지와 주거지역 간의 과학적이고 합리적인 경계 설정 및 체계적인 대기오염 관리 방안 마련이 지속적으로 요구되고 있다.

완주산업단지는 전북특별자치도 완주군에 위치한 일반산업단지로, 산업단지가 주거지역을 둘러싼 형태의 특이한 구조의 산업단지에 해당한다. 2024년 기준으로 완주산업단지는 총면적 약 3,358,000 m² (약 102만 평) 규모로 구성되어 있으며, 자동차, 기계, 전기 및 전자, 화학, 영상 및 통신장비 등 다양한 업종의 기업 407개사가 입주해 있다. 단지 내에는 전력 및 통신 인프라, 폐수 및 폐기물 처리 시설 등 주요 기반사

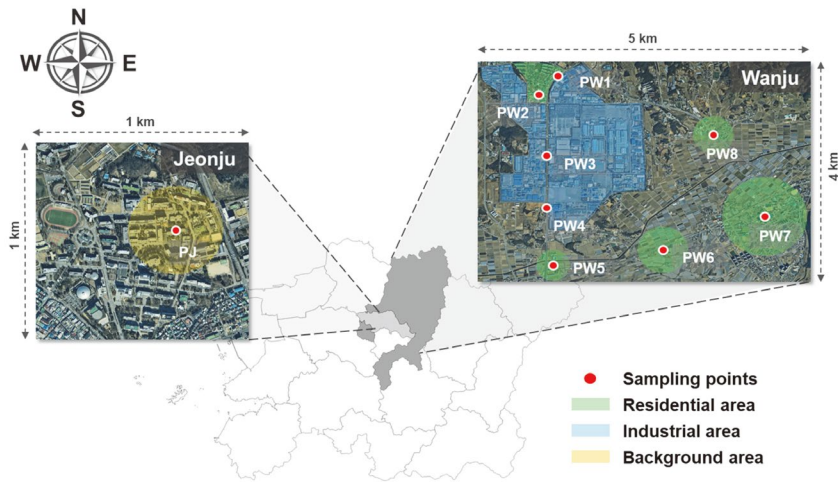


Fig. 1. Sampling locations for VOCs, PAHs, and phthalates in the Wanju industrial complex and surrounding residential areas.

설이 구축되어 있으며, 총 19,185명의 노동자가 근무 중이다. 완주산업단지는 면적 규모 면에서는 중소형 산업단지에 해당하지만, 주거지역과의 인접성으로 인해 사업장에서 배출되는 VOCs 및 SVOCs이 인근 주민의 건강에 미치는 잠재적 영향이 큰 지역으로 평가된다. 2020년도에 국립환경과학원이 발간한 “일반산단 주변지역 환경보건평가(X)-완주일반산단 보고서”에 따르면, 완주산단 인근 지역 주민들은 악취로 인해 생활의 불편을 겪고 있으며, 특히, 봉동읍 지역에서 결막염, 순환기계 질환, 호흡기계 질환, 피부염 및 습진 등의 유병률이 전국 및 전라북도 평균보다 다소 높은 것으로 나타났다(NIER, 2020). 이러한 지역 특성으로 인해 완주산업단지의 대기질 관리에 대한 지역사회의 관심과 요구가 점차 증가하고 있다.

완주군에는 총 3개의 대기환경측정소가 있으며, 각각 고산면, 구이면, 봉동읍에 위치해 있다. 이들 측정소는 일반대기환경측정망에 해당하며, SO_2 , CO, NO_2 , O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 항목을 측정하고 있다. 반면, 산업단지에서 배출되는 유해대기물질인 VOCs 및 PAHs를 측정하기 위한 특수대기환경측정소는 설치되어 있지 않아, 별도의 측정이 이루어지고 있지 않다. 또한 대기환경보전법 시행규칙에서 정의하는 대기오염물질 목록에는 phthalates가 포함되어 있지 않

아, 대기 중 phthalates에 대한 법적 농도 기준이나 공식적인 측정 역시 시행되지 않고 있다. 따라서 주거지역과 사업장이 인접한 완주산업단지의 대기오염 특성을 VOC 중심으로 평가하는 것은 환경보건 측면에서 중요한 과제이다.

본 연구에서는 사업장과 주거지역이 사실상 공존하는 완주산업단지를 대상으로 대기 중 VOCs 및 SVOCs 농도를 측정하고, 다양한 지점별 농도 수준과 지역 간 농도 차이를 비교 및 분석함으로써 특이 구조의 완주산업단지의 대기오염 특성을 평가해 보았다. 본 연구는 주거지를 둘러싼 일반산업단지와 그 주변 주거지역의 VOCs 및 SVOCs의 농도를 동시에 평가하는 데에 의의가 있으며, 대기오염물질 모니터링의 사각지대를 볼 수 있는 일반산업단지의 대기질 관리를 위한 주요한 기초 자료를 마련하는 데 주요할 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채취 지점 및 기간

본 연구에서는 완주산업단지 및 주변 주거지역 8개 지점(Point Wanju, PW1~PW8)과 배경지역인 전

Table 1. Sampling points and measurement periods for the target analytes.

Order	City	Location code	Target compounds	Measurement period	Sampling frequency	Location type
1	Wanju	PW1	VOCs: BTEXS	1st: 2024-04-17 to 2024-05-15 (4 weeks)	1st: 2 samples/location/week (n = 72) 2nd: 3 samples/location/week (n = 108)	Residential area encircled by the wanju industrial complex
2		PW2		2nd: 2024-10-01 to 2024-10-30 (4 weeks)		
3		PW3				
4		PW4	PAHs and Phthalates	2024-12-05 (1 day)	2 samples/location/week (n = 2)	Industrial complex
5		PW5	VOCs: BTEXS	1st: 2024-04-17 to 2024-05-15 (4 weeks)	1st: 2 samples/location/week (n = 72) 2nd: 3 samples/location/week (n = 108)	Residential area located in the vicinity but outside the industrial boundary
6		PW6		2nd: 2024-10-01 to 2024-10-30 (4 weeks)		
7		PW7				
8		PW8				
9	Jeonju	PJ	VOCs: BTEXS	1st: 2024-04-17 to 2024-05-15 (4 weeks) 2nd: 2024-10-01 to 2024-10-30 (4 weeks)	1st: 2 samples/location/week (n = 72) 2nd: 3 samples/location/week (n = 108)	Background area
		PAHs and Phthalates	2024-12-04 (1 day)	2 samples/location/week (n = 2)		

북대학교 (Point Jeonju, PJ)를 시료채취 지점으로 선정하였다. PW1과 PW2는 산업단지에 둘러싸인 주거지역, PW3과 PW4는 산업단지, PW5와 PW6은 산업단지 남쪽에 위치한 인근 주거지역, PW7과 PW8은 산업단지 동쪽에 위치한 인근 주거지역에 해당한다 (그림 1). 시료채취 지점에서 VOCs는 2024년도에 4주간 2회(1차와 2차) 시료를 채취하였으며(표 1), 다양한 기상 정보(날씨, 풍속 등)도 기록하였다(표 S1). SVOCs는 2024년 12월에 하루 동안 PW4와 PJ 시료를 채취하였다.

2.2 분석 대상 VOCs 및 SVOCs

분석 대상 VOC는 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene (BTEXS)이며, SVOCs는 16종 PAHs와 7종 phthalates를 선정하였다. 이러한 성분들은 사업장에서 용매로 주로 사용되거나 제조 과정에서 생성될 가능성이 높으며, 인체 노출 시 건강상 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(표 S2). 16종 PAHs와 7종 phthalates는 다음과 같다. (1) PAHs: naphthalene

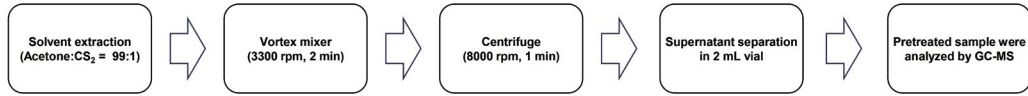
(NAP), acenaphthylene (ACL), 2-bromonaphthalene (2-BN), acenaphthene (ACN), fluorene (FLR), phenanthrene (PHN), anthracene (ANT), fluoranthene (FLT), pyrene (PYR), benzo[a]anthracene (BAA), chrysene (CHY), benzo[b]fluoranthene (BBF), benzo[a]pyrene (BAP), indeno[1,2,3-c,d]pyrene (ICP), dibenz[a,h]anthracene (DBA), benzo[g,h,i]perylene (BGP), (2) phthalates: dimethyl phthalate (DMP), diethyl phthalate (DEP), di-n-butyl phthalate (DBP), benzyl butyl phthalate (BBP), bis(2-ethylhexyl) adipate (DEHA), bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), Di-n-octyl phthalate (DOP) (표 S2).

2.3 시료채취, 전처리, 기기분석 방법

대기 중 VOCs의 채취는 passive sampler (3M™ Organic Vapor Monitor 3500+, 3M, USA)를 이용하였으며, 시료채취를 마치면 VOC 용매 추출을 실시하였다. VOC 추출시료는 gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) 시스템 (GC-MS; GC: Nexis

Exp 1. Pretreatment protocol of passive sampler to monitor VOCs in ambient air

Monitoring VOCs in ambient air using a passive sampler (3M 3500+)
 Exposure duration : 7 days / 8 weeks (in duplicate or triplicate)
 Target compounds : Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene



Exp 2. Monitoring of SVOCs in ambient air using sorbent tubes

Sampling of SVOCs (PAHs and phthalates) was performed using a vacuum pump
 Exposure duration : 120 min (in duplicate)
 Target compounds : SVOCs (PAHs and phthalates)

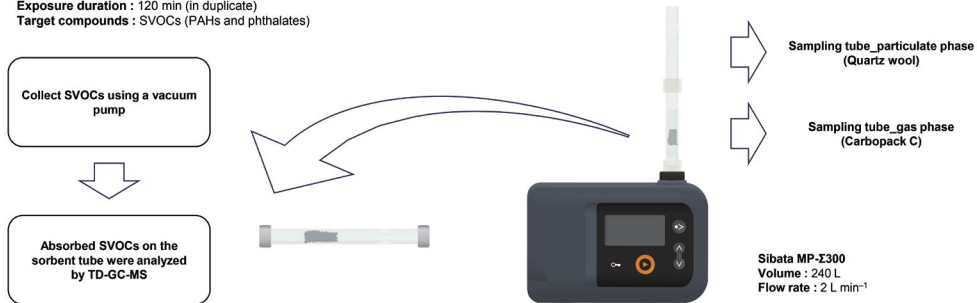


Fig. 2. Schematic overview of the procedures for sampling, pretreatment, and instrumental analysis of atmospheric VOCs and SVOCs (PAHs and phthalates).

GC-2030, MS: GCMS-QP2020 NX, Shimadzu, Japan) 을 이용하여 분석하였다. 그리고 SVOCs는 sorbent tube로 흡착 채취하였으며, 입자상 및 기체상 SVOCs를 효과적으로 채취할 수 있도록 quartz wool (6-570-01, AS ONE, Japan)로 채운 sorbent tube와 Carbopack C (10257, Sigma-Aldrich, USA)로 채운 sorbent tube를 연속적으로 연결하여 활용하였다(Kim and Kim, 2015). 시료채취를 마친 sorbent tube는 thermal desorption (TD) 시스템 (TD-30, Shimadzu, Japan)에 장착하여 열탈착을 유도함으로써 VOCs의 전처리를 수행하였다. 열탈착된 VOC는 GC-MS 시스템으로 정량 분석하였다. VOC와 SVOC의 시료채취 및 전처리 방법에 대해서는 그림 2에 모식화하여 제시하였으며, 자세한 방법 및 조건에 대해서는 supplementary material에 기술하였다(표 S3, S4).

2. 4 VOCs 농도 산정식(passive sampler)

Passive sampler를 이용한 VOCs의 농도는 식 (1)과 식 (2)와 같이 산출하였다. 이때, 기체의 몰 부피는 표

S1에 제시한 샘플링 시점의 기온 정보를 활용하여 계산하였으며, sampler의 시료채취 속도, 노출 시간 등 농도 계산에 필요한 주요 변수들은 표 S3에 상세하게 정리하였다. 식 (1)에서 C_m 은 GC-MS 분석을 통해 확보한 VOC의 액상 검출 농도이며, De 는 passive sampler로부터 VOC의 용매 탈착 효율(%)을 의미한다.

$$C_t (\mu\text{g mL}^{-3}) = \frac{C_m (\mu\text{g mL}^{-1}) \times \text{extraction volume (1 mL)} \times 1000 \text{ L}}{\text{Sampling volume (L)} \times De \times 1 \text{ m}^3} \quad (1)$$

$$C_t (\text{ppb}) = \frac{C_t (\mu\text{g mL}^{-1}) \times \text{molar volume (L mol}^{-1}) \times 10^3 (\text{mL L}^{-1}) \times 1000}{MW (\text{g mol}^{-1}) \times 10^6 (\mu\text{g g}^{-1})} \quad (2)$$

2. 5 검량 및 정도관리(quality control, QC)

자료 확보

분석 대상 BTEXS와 PAHs 및 phthalates의 검량선 및 QC 자료를 확보하기 위해 우선적으로 이들의 작업용 표준시료(working standard, WS)를 조제하였다.

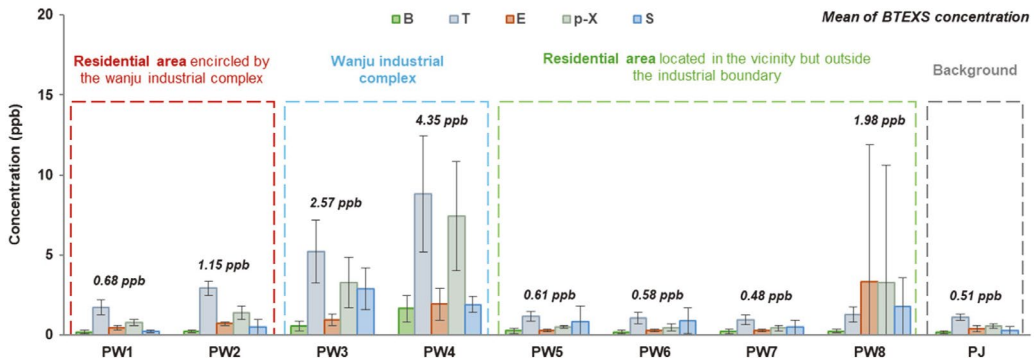


Fig. 3. Comparison of average BTEXS concentrations by sampling point in the industrial complex and surrounding residential areas.

다양한 농도대의 분석 대상 VOCs 및 SVOCs 시약을 구매한 후 이들을 용매로 희석하는 방식으로 최종검량을 위한 최종 작업용 표준시료 (final working standard, F-WS)를 준비하였다.

BTEXS의 농도 평가를 위한 검량선은 1차 측정에서 5점, 2차 측정에는 7점 검량선으로 확보하였으며, PAHs 및 phthalates의 경우 4점 검량선을 확보하였다. 분석 시스템에 대한 분석재현성은 F-WS의 중간 농도점을 3회 반복 분석한 후 검출 농도에 대한 상대 표준편차 (relative standard deviation, RSD)를 산출함으로써 평가하였다. 분석 대상 성분들의 검출한계는 limit of detection (LOD)로 산정하였으며, 분석시스템의 blank 시료 내 noise peak 7개의 peak area에 대한 SD를 구하고, 여기에 3.3을 곱한 후 response factor (RF)로 나누어서 산출하였다. 분석 대상 VOCs 및 SVOCs의 자세한 WS 준비 방법과 이들의 분석 방법에 대해서는 supplementary material에 제시하였다 (표 S5).

BTEXS의 RF는 1차 측정에서 평균 $20,167 \pm 4721 \mu\text{L ng}^{-1}$, 2차 측정에서 평균 $31,738 \pm 10,030 \mu\text{L ng}^{-1}$ 로 나타났으며, PAHs와 phthalates는 각각 $16,451 \pm 7,496 \mu\text{L ng}^{-1}$ 및 $7,496 \pm 2,790 \mu\text{L ng}^{-1}$ 수준을 보였다 (그림 S1, S2, 표 S6). 모든 분석 대상 성분의 R^2 는 0.99 이상으로 우수한 직선성을 보였다. BTEXS의 평균 RSD는 5% 미만으로 매우 양호한 분석 재현성을 기

록하였으며, SVOC 역시 대부분 10% 미만의 RSD를 기록하면서 양호한 재현성을 보였다. LOD는 BTEXS의 경우, 평균 $0.002 \pm 0.001 \text{ ppb}$ 로 나타났으며, PAHs와 phthalates는 각각 $0.10 \sim 0.46 \text{ ng m}^{-3}$ 및 $0.15 \sim 0.44 \text{ ng m}^{-3}$ 범위로, 미량 분석에 대한 정량 신뢰성을 확인하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 완주산업단지 대기 중 VOCs 농도 분포 분석

3.1.1. 측정 지점별 VOCs 농도 분포

본 연구에서는 완주산업단지가 대기질에 미치는 영향을 확인하기 위해 측정 지점별 BTEXS의 8주간 평균 농도를 비교 분석하였다 (그림 3, 표 S7). 산업단지의 영향 범위를 보다 명확히 파악하고자, 산업단지로부터 거리에 따라 구분하여 BTEXS 농도를 비교해 보았다. 다만, 8주간의 BTEXS의 농도 자료로 제한되기 때문에 측정 지점별 기상조건 등 장기적인 농도 영향에 대한 해석에 한계가 있어, 산업단지에 둘러싸인 특이 구조의 완주산업단지에 의한 주변 주거지역의 VOC 농도 영향을 직관적으로 평가하는 데 초점을 두었다.

배경지역 (PJ)에서의 BTEXS의 평균 농도는 $0.51 \pm$

0.36 ppb로 확인되었으며, toluene이 1.12 ppb로 가장 높은 수준을 보였다. 이를 제외한 다른 구성 성분들은 모두 1 ppb 미만으로, 전반적으로 낮은 농도 범위를 나타냈다. 반면, 산업단지 내 측정 지점인 PW3과 PW4에서는 각각 2.57 ppb 및 4.35 ppb의 BTEXS 농도가 측정되어, 배경지역에 비해 뚜렷하게 높은 고농도 특성을 보였다. 특히, 두 지점 간 약 1.8 ppb의 농도 차이는 해당 사업장의 화학물질 사용량, 원료 특성, 배출 방식 등 개별 사업장에 따른 배출 특성의 차이에서 기인할 것으로 판단된다. 또한, 산업단지로 둘러싸인 주거지역에서도 배경지역보다 전반적으로 높은 BTEXS 농도가 확인되었다. PW1 지점은 0.68 ppb로 비교적 낮은 수준을 보였으나, PW2에서는 1.15 ppb로 PJ 대비 약 2.2배 높은 농도를 기록하였다. 개별성분으로 보면, PW2에서 측정된 toluene과 p-xylene의 농도는 PJ 대비 모두 2.5배 이상 높은 수준이었으며, 이 두 성분이 PW2의 BTEXS 총 농도 중 75% 이상을 차지하였다.

산업단지로 둘러싸인 주거지역(PW1, PW2)의 농도는 다른 주거지역에 비해 BTEXS의 농도가 상대적으로 높게 나타났으며, 산업단지 주변 주거지역은 PW8를 제외하고 모두 BTEXS 평균 농도가 약 1.5 ppb 이하로 배경지역과 유사한 수준이었다. PW8는 BTEXS 평균 농도가 1.98 ± 1.33 ppb로 상대적으로 높은 농도를 기록하였는데, 이는 산업단지와 거리를 고려하였을 때 산업단지의 직접적인 영향이라 판단하기 어렵다. PW8의 ethylbenzene 농도는 3.33 ppb로 산업단지(PW3, PW4) 농도보다 높은 수준을 기록하였다. 결과적으로, 산업단지로 둘러싸인 주거지역의 평균 농도는 0.91 ± 0.34 ppb로, 산업단지 근접 주거지역(PW8 제외)의 평균 농도인 0.56 ± 0.07 ppb 대비 62.5% 높은 수준이었다. 전반적으로 PW3~7의 산업단지 인근 주거지역은 배경지역과 유사한 농도 범위를 보였다.

3.1.2 기간별 VOCs 농도 차이

VOCs의 농도 측정 기간에 따른 이들의 농도 변화

를 확인하기 위해 측정 지점의 주차별 BTEXS 농도를 그림 4에 제시하였다. 본 연구는 연간 2회 간격을 두고 측정을 실시하였으며, W1~W4는 봄철(4~5월), W5~W8은 가을철(10월)로 각각 4주간 연속 측정을 수행하였다. 이후 각 지점별 8주간의 측정 자료에 대한 평균값을 기준으로 분석을 수행하였다.

BTEXS 측정 기간 동안 toluene이 평균 2.69 ± 0.71 ppb로 가장 높은 농도를 나타냈으며, benzene은 0.42 ± 0.13 ppb로 가장 낮은 농도를 기록하였다. 1주차를 제외한 대부분의 시기에서는 toluene, p-xylene, styrene, ethylbenzene, benzene 순으로 농도 분포를 보였다. 반면, 1주차에는 ethylbenzene과 p-xylene이 상대적으로 높은 농도를 보이는데, 이는 PW8 지점의 1주차 측정값이 매우 높았던 결과에 의한 것이다(그림 4). PW8의 1주차 BTEXS의 평균 농도는 10.71 ppb로, 산업단지인 PW4의 3.40 ppb 대비 약 215% 높은 수치를 기록하였다. 이 중 ethylbenzene과 p-xylene은 각각 24.56 ppb 및 21.41 ppb로, 전체 농도에서 가장 큰 비중을 차지하였다. 1주차를 제외한 2~8주차 평균 농도는 ethylbenzene 0.29 ± 0.07 ppb, p-xylene 0.69 ± 0.38 ppb로 매우 낮은 수준을 기록하였다. 즉, PW8의 1주차에서 확인한 VOC의 높은 농도 측정 결과는 산업단지의 영향보다는 특이적인 현상(PW8 지점 자체 발생원)으로 볼 수 있다.

BTEXS의 평균 농도는 봄철인 1차 측정시기(1.31 ± 0.99 ppb)보다 가을철 2차 측정시기(1.56 ± 1.07 ppb)에서 약 20% 증가한 수준으로 나타났다. 이 중 ethylbenzene과 p-xylene은 앞서 언급한 PW8의 1주차에서 이례적으로 높은 농도가 측정되어 전체 평균 농도를 끌어올린 것으로 해석된다. 특히, toluene의 경우 2차 측정시기의 평균 농도는 3.17 ± 0.59 ppb로, 1차 측정시기(2.21 ± 0.45 ppb) 대비 43.43% 증가하여 두 시기간 가장 뚜렷한 변화를 보였다. 이러한 BTEXS의 농도 증가는 산업단지 내 지점인 PW3과 PW4에서 가장 뚜렷하게 관측되었다. 두 지점의 평균 농도는 1차 측정시기 2.38 ± 0.88 ppb에서 2차 측정시기 4.54 ± 1.57 ppb로 약 2배 수준의 차이를 보였으며,

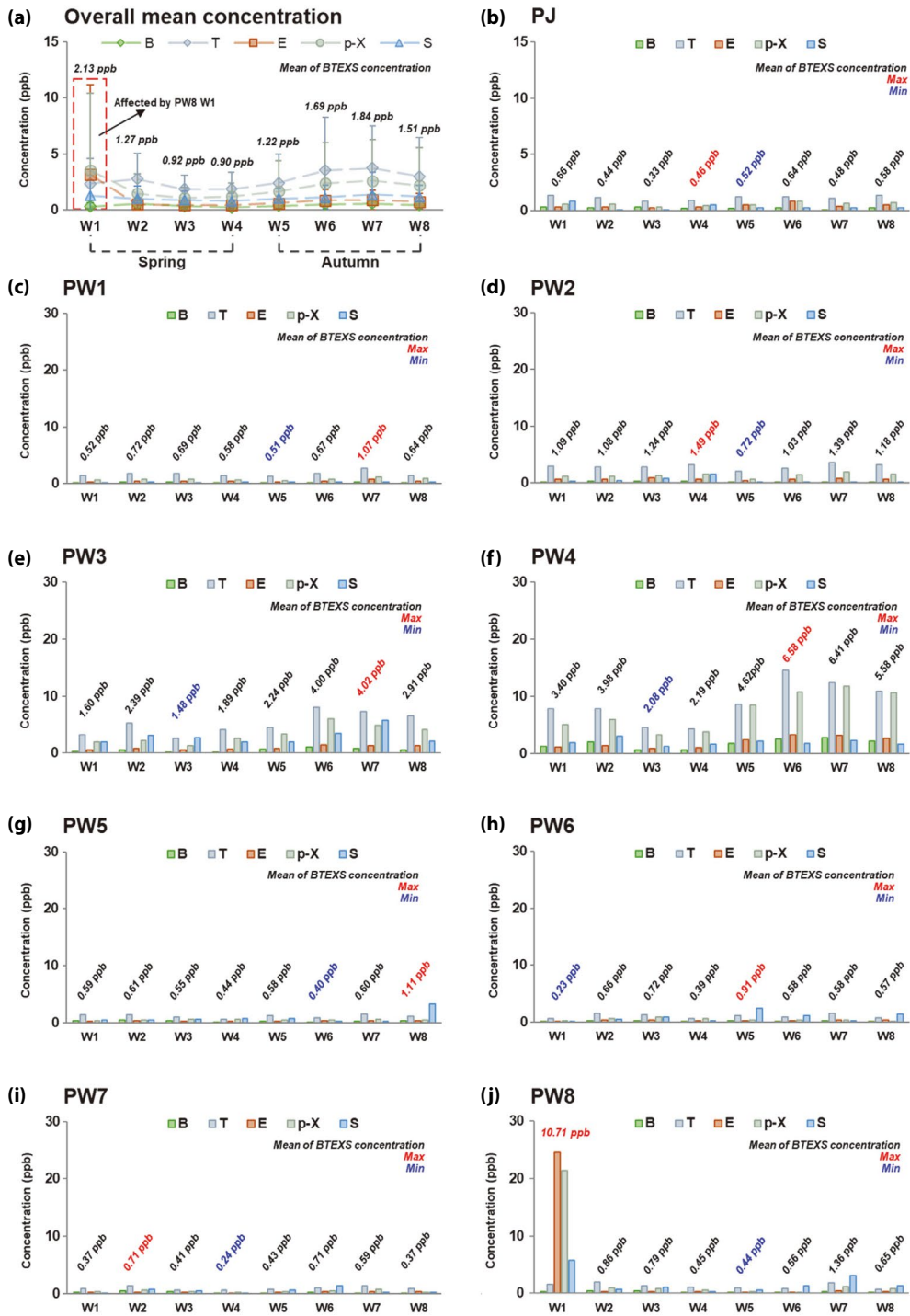


Fig. 4. Temporal variations in BTEXS concentrations by sampling point at one-week intervals. (a) average across all sampling points and (b to j) individual sampling points.

이는 사업장 내 공정 운영 및 배출량 변화에 따른 차이로 해석된다. PW3과 PW4는 완주산업단지의 BTEXS 배출원에 해당하므로, 측정 시기별 농도 차이는 각 사업장의 가동 조건이나 배출 패턴 변화에 기인한 것으로 판단된다.

BTEXS 농도에 대한 풍향의 영향을 평가하기 위해, 산업단지 내 주요 배출원으로 판단되는 PW3과 PW4를 중심으로, 주풍향에 따른 주변 측정 지점의 농도 변화를 비교 분석해 보았다. 1차 측정시기에는 서풍 및 서남풍이 우세하여, 해당 풍향 하에서 BTEXS가 PW6~8 측정 지점 방향으로 이동할 가능성이 높다고 판단된다. 이에 따라 해당 지점에서 BTEXS 농도가 증가할 것으로 예상되었으나, 실제 측정된 BTEXS의 평균 농도는 0.58 ppb로 전체 측정기간의 평균 BTEXS 농도인 0.59 ppb와 거의 유사한 수준이었다. 한편, 2차 측정시기에는 주풍향이 동남풍이었으며, 이와 다른 북서풍의 영향을 받는 PW7 지점의 자료를 제외한, PW6~8 측정 지점의 BTEXS 평균 농도는 0.58 ppb로 1차 측정시기와 동일하였다. 또한, 1차 및 2차 측정시기의 온도(16~19°C)와 풍속(1.0~1.9 m/s) 범위가 크지 않았던 것도 고려할 때, 기상조건에 따른 측정 지점별 유의미한 BTEXS 농도 변화가 관찰되지 않았다. 이는 1차와 2차 측정시기로 구분된 계절적 차이 또한 측정 지점별 BTEXS의 농도에 영향을 줄 수 있다는 근거가 부족함을 뒷받침한다. 결과적으로, 측정시기 간의 BTEXS 농도 차이는 기상변수보다는 사업장 내부의 배출 활동에 의해 주도되었을 가능성이 높으며, 따라서 배출원의 공정 특성 및 가동률 등을 고려한 정밀 조사가 필요하다. 요약하자면, 산업단지 내 BTEXS는 기상조건보다는 사업장으로부터의 거리와 배출량에 따라 지점별 영향을 나타내며, 특히 PW1과 PW2는 사업장 인근에 위치함에 따라 직접적인 영향을 받는 것으로 확인되었다. 다만, 본 연구는 두 계절(봄, 가을)의 각 4주간에 걸친 단기 측정 자료를 기반으로 하고 있어, 계절 및 기상조건에 따른 장기적 농도 특성 해석에는 한계가 존재하며, 향후에는 연속적인 연간 측정 자료 확보를 통해,

BTEXS의 계절 및 기상별 변화 특성을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

3.1.3 지점 간 VOCs 농도 분포 특성 및 통계적 비교 분석

BTEXS 농도의 공간적 특성을 파악하기 위해 9개 측정 지점(PW1~9, PJ)을 대상으로 주차별(n=8) 평균 농도 값을 이용하여 일원산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 수행하였다. 전체 시료의 BTEXS를 대상으로 ANOVA 통계 분석을 실시한 결과, p-value가 5.22×10^{-15} 로 측정 지점별 BTEXS의 농도가 통계적으로 유의미한 차이가 있음을 확인하였다.

추가적으로 산업단지로부터 거리에 따른 주변 주거지역의 VOC 농도 차이에 대한 유의성을 평가하기 위해, 산업단지로부터 거리에 따라 그룹별로 나누어서 ANOVA 및 paired t-test를 수행해 보았다. 산업단지로 둘러싸인 주거지역(PW1~2), 산업단지 내 측정 지점(PW3~4), 산업단지 인근 주거지역(PW5~8), 배경지역(PJ). ANOVA 분석 결과, p-value는 1.56×10^{-14} 로 그룹별 BTEXS의 농도 차이가 통계적으로 유의함을 확인하였다. 이를 다시 BTEXS 개별 성분별로 나누어서 ANOVA 분석을 하면, ethylbenzene이 유일하게 p-value가 0.27로 통계적 유의성이 나타나지 않았으며, BTEXS의 p-value는 모두 0.01 이하로 산업단지과 거리에 따른 농도 차이가 유의함을 확인하였다. Ethylbenzene의 경우, 산업단지의 거리에 따라 유의미한 농도 차이가 나타나지 않았으며, 이는 산업단지 내에서 배출되는 주요 대기오염물질에 해당하지 않음을 간접적으로 유추할 수 있다. Paired t-test 결과, 산업단지 내 측정 지점(PW3~4)의 평균 BTEXS 농도는 3.46 ppb로 배경지역(PJ=0.49 ppb), 산업단지 근접 주거지역(PW5~8=0.91 ppb, PW8의 1주차 자료 제외 시 0.59 ppb) 그리고 산업단지로 둘러싸인 주거지역(PW1~2=0.89 ppb)과 모두 통계적으로 유의미한 농도 차이를 보였다(p-values < 0.01). PW1~2와 PW5~8은 PJ와 대비하여 통계적으로 유의미한 농도

차이를 기록하였지만, PW1~2와 PW5~8은 전체 BTEXS 농도에 대한 paired t-test에서 p-value가 0.93으로 통계적으로 유의미한 농도 차이를 보이지 않았다. 이는 PW8의 1주차에서 특이적으로 BTEXS의 농도(특히 ethylbenzene과 p-xylene)가 높게 나타난 것이 반영된 결과에 해당한다. 이에 PW8의 1주차 자료를 제외하고 다시 PW1~2와 PW5~8 간의 BTEXS의 paired t-test를 하면, p-value는 0.009 수준으로 PW1~2와 PW5~8 간의 BTEXS의 농도가 통계적으로 유의미한 차이를 보인다는 것을 확인하였다. 결과적으로, 산업단지 내 BTEXS의 농도가 주변지역보다 높은 것이 통계적으로 유의함을 확인하였으며, 이러한 BTEXS의 농도는 산업단지로부터 거리가 가까운 지역에서보다 높은 농도로 존재한다는 것 또한 통계적 분석을 통해 유의하였음을 증명하였다.

3.1.4 BTEXS 배출량 구성비와 측정 농도 비교

산업단지 배출량과 실제 측정된 BTEXS 농도를 비교하기 위해 환경부 화학물질안전원에서 제공하는 배출 및 이동량 정보를 활용하여 완주산업단지의 BTEXS 배출량 자료를 분석하였다. 분석에 사용된 배출량 정보는 2018년부터 2022년까지 완주산업단지 대기배출량이며, 이 중 BTEXS 관련 항목만을 선별하여 분석에 활용하였다(그림 S3).

5년간('18~'22) BTEXS의 평균 배출량은 toluene (29,200 kg yr⁻¹), xylene (17,111 kg yr⁻¹), styrene (4,075 kg yr⁻¹), ethylbenzene (2,962 kg yr⁻¹), benzene (223 kg yr⁻¹) 순으로 나타났으며, 이들을 기준으로 산정한 구성비는 toluene 54.51%, xylene 31.94%, styrene 7.61%, ethylbenzene 5.53%, benzene 0.42%로 나타났다(그림 S3). 이는 대기 중에서 측정된 BTEXS의 농도 비율과 일치하지는 않으나, toluene과 xylene의 상대적 비중이 높다는 점에서 구성 경향이 유사함을 보여준다. BTEXS 측정 지점에서 측정 기간 동안 평균 toluene의 농도는 2.69±0.71 ppb로 가장 높았으며, xylene (2.02±0.83 ppb), styrene (1.09±0.19 ppb), ethylbenzene (0.95±0.90 ppb), benzene (0.42±0.13 ppb) 순으

로 그 뒤를 이었다. 이는 사업장의 BTEXS의 배출량과 동일한 순서이며, 농도 비율은 각각 37.54%, 28.17%, 15.20%, 13.30%, 5.79%로 나타났다. 다만, 본 연구에서 제시한 사업장의 대기오염물질 배출량은 최근 5년간의 평균값이고, BTEXS의 측정 농도는 2024년 특정 기간(봄과 가을 8주간)에 한정된 것으로 자료들의 비교 평가에 제한적이다(자료 조사 기간 및 기상조건 등의 차이). 본 연구 결과는 장기적인 배출량 자료와 실제 대기 중 농도 분포 간의 상관 가능성을 확인하는 데 의의가 있으며, 나아가 BTEXS 중 toluene과 xylene의 높은 비중은 산업단지 기반 VOCs 관리 방안 수립 시 주요 고려 대상임을 시사한다.

3.2 완주산업단지 대기 중 SVOCs의 단기 농도 특성

완주산업단지 지역(PW4) 및 배경지역(PJ)에서 채취한 대기 중 SVOCs의 농도(ng m⁻³)는 PAHs 및 phthalates의 검출 질량(ng)을 시료채취 부피(L)로 나눈 후, 단위 환산 계수(1 m³=1000 L)를 곱하여 산출하였다. 불검출 성분에 대해서는 LOD 값을 적용하였다(그림 5).

3.2.1 PAHs의 농도 분포 및 특성

전체 측정 지점에서 총 16종의 PAHs 중 8종이 검출되었으며, 총 PAHs 농도는 배경지역인 PJ 지점에서 42.1 ng m⁻³, 산업단지 지역인 PW4 지점에서 117 ng m⁻³로, 산업단지 지역에서 상대적으로 높은 농도를 기록하였다. PAHs의 기체상 및 입자상 분포는 각각 평균 98.1±1.3% 및 1.9±1.3%로, 모든 지점에서 유사한 분율을 보였다. 이들 중 naphthalene (NAP)은 가장 높은 농도로 검출되었으며, 대부분이 기체상 형태로 존재하였다. 특히, 기체상 NAP 농도는 PW4 지점이 PJ 지점에 비해 약 2.5배 높은 103 ng m⁻³로 나타났다. Fluorene (FLR)은 기체상으로부터만 검출되었으며, PW4 지점에서 PJ 지점보다 약 2.6배 높은 0.69 ng m⁻³의 농도로 확인되었다. Phenanthrene (PHN)은 기

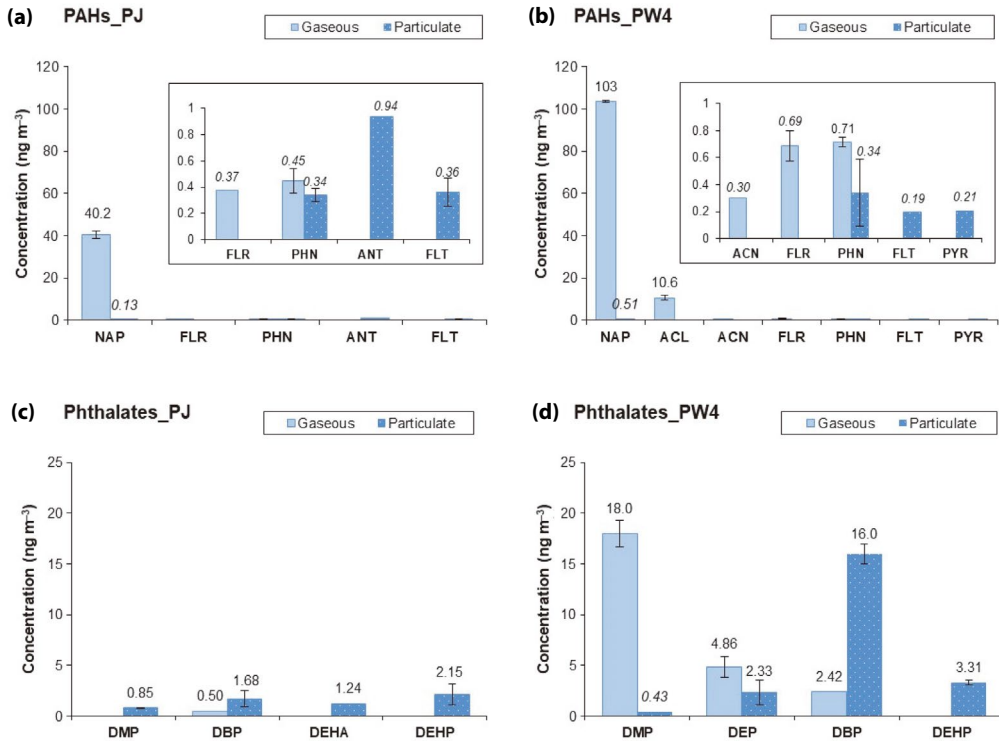


Fig. 5. Concentration levels of particulate and gaseous SVOCs in ambient air at the industrial site (PW4) compared to the background site (PJ). (a and b) PAHs and (c and d) phthalates.

체상과 입자상 모두에서 검출되었으며, 두 지점의 입자상 농도는 동일하게 0.34 ng m^{-3} 로 나타났고, 기체상 농도는 PW4 지점이 PJ 지점보다 약 1.6배 높은 0.71 ng m^{-3} 로 확인되었다. Anthracene (ANT)의 경우 입자상으로만 검출되었으며, PJ 지점에서 0.54 ng m^{-3} 의 농도로 특이적으로 나타났다. 입자상으로만 검출된 fluoranthene (FLT)는 PJ 지점에서 PW4 지점보다 0.9 ng m^{-3} 높은 농도를 나타냈다. 그 외에 acenaphthylene (ACL), acenaphthene (ACN) 및 pyrene (PYR) 등 3종의 성분은 PW4 지점에서 검출되었다. ACL은 기체상으로만 10.6 ng m^{-3} 로 검출되어, NAP 다음으로 높은 농도를 나타냈으며, 이는 산업단지 지역의 영향을 반영하는 결과로 해석된다. ACN(기체상)과 PYR(입자상)은 각각 0.18 ng m^{-3} 및 0.14 ng m^{-3} 로 낮은 농도 수준을 보였다. 산업단지에서 검출된 7종 PAHs에 대한 benzo[a]pyrene의 toxicity equivalency

quantities (TEQs)는 0.117 ng m^{-3} 으로, 이는 세계보건기구(WHO)에서 제시한 PAHs의 건강 기반 권고 농도(health-based guideline levels)인 0.12 ng m^{-3} 에 근접한 수준으로, 잠재적인 건강 위해 가능성을 시사한다(Boström *et al.*, 2002; Nisbet and Lagoy, 1992).

3.2.2 Phthalates의 농도 분포 및 특성

대기 중 phthalates의 총 농도는 PW4 지점에서 PJ 지점보다 약 7.4배 높은 4.61 ng m^{-3} 로 나타났다. PAHs와는 달리, phthalates는 측정 지점에 따라 기체상과 입자상 간의 비율에서 뚜렷한 차이를 보였다. 배경지역인 PJ 지점에서는 기체상이 93.5%, 입자상이 6.5%를 차지하여 기체상 phthalates의 비중이 컸던 반면, 산업단지 지역인 PW4 지점에서는 기체상과 입자상이 각각 47.7%와 52.3%로 유사한 비율을 보였다. Dimethyl phthalate (DMP)는 기체상과 입자상 모두

에서 검출되었으며, PW4 지점의 기체상 농도는 PJ 지점보다 약 146배 높은 18.0 ng m^{-3} 로 확인되어, 기체상 phthalates 중 가장 큰 비중을 차지하였다. 반면, 입자상 DMP 농도는 평균 $0.61 \pm 0.34 \text{ ng m}^{-3}$ 로, 두 지점 간 유의미한 차이를 보이지 않았다. Diethyl phthalate (DEP)는 PW4 지점에서만 검출되었으며, 기체상 농도는 입자상보다 약 2배 높은 4.86 ng m^{-3} 로 나타났다. Dibutyl phthalate (DBP)는 두 상 모두에서 검출되었으며, 특히 PW4 지점에서는 입자상 DBP가 16.0 ng m^{-3} 로 측정되어, 입자상 phthalates 농도의 대부분을 차지하였다. DBP는 PJ와 PW4 지점 모두에서 입자상 농도가 기체상보다 높게 나타나는 경향을 보였다. Di(2-ethylhexyl) adipate (DEHA)는 PJ 지점에서만 1.16 ng m^{-3} 의 낮은 농도로 검출되었으며, di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)는 입자상으로만 검출되어 평균 $2.73 \pm 0.82 \text{ ng m}^{-3}$ 의 농도를 나타냈다. 이를 통해, PAHs와 phthalates 모두 산업단지 지역에서 더 높은 농도 분포를 보였으며, 특히 phthalates의 경우 산업단지에서 상대적으로 높은 수준으로 검출되어 지속적인 모니터링의 필요성이 제기된다. Phthalates의 흡입 노출 기준치에 관한 자료가 제한적임에도 불구하고, 유럽화학물질청(ECHA)의 화학물질의 등록평가허가 및 제한에 관한 규정(REACH)에 따라 엄격히 관리되는 DBP와 DEHP가 산업단지에서 고농도로 검출되었다는 점을 고려할 때, 장기 노출에 대한 주의가 필요하다(Astuto *et al.*, 2023; EFSA, 2019).

3. 2. 3 완주산업단지의 SVOCs 농도에 대한 해석 및 시사점

본 연구에서는 단일 일자에 수행된 시료채취를 기반으로 PAHs 및 phthalates 농도를 평가함으로써, 주거지역을 둘러싼 특이한 구조를 가진 완주산업단지에서 유해 SVOCs의 실태를 파악하는 데 있어 유의미한 정보를 제공하였다. PAHs와 phthalates는 기준 대기오염물질 수준으로 관리하고 있지 않고, 분석 과정이 상대적으로 복잡하며 고가의 장비가 필요한 이유들로 현재까지 정부차원의 정기적인 농도 모니터

링이 이루어지고 있지 않은 유해 대기오염물질들에 해당한다. 이와 같은 PAHs 및 phthalates의 농도 모니터링의 어려움을 고려하였을 때, 단일 농도 자료이지만 특수 입지 조건의 산업단지의 SVOCs 농도를 확인하는 측면에서 중요한 SVOCs의 관리적 필요성의 근거를 마련하는 데에 의미를 갖는다.

PAHs의 경우, 산업단지 지점(PW4)에서의 총 농도는 배경지역(PJ) 대비 약 2.8배 높았으며, 주로 NAP이 기체상으로 우세하게 검출되었다. 특히, PW4 지점에서 검출된 7종 PAHs에 대한 TEQ는 0.117 ng m^{-3} 로, WHO가 제시한 건강 기반 권고농도에 근접하는 농도로 인근 주민의 흡입 노출에 따른 건강 악영향 가능성을 시사한다. 다만, ANT와 FLT는 배경지역에서만 입자상으로 검출되거나 산업단지 대비 높은 농도로 검출되었는데, 이는 배경지역이 교통량이 상당한 전주 도심지역인 점이 반영된 결과로 예측할 수 있다. 그럼에도 불구하고, ANT와 FLT 농도는 모두 1 ng m^{-3} 이하 수준으로 절대 농도가 매우 낮았음을 알 수 있다. 또한, BAP를 포함한 상대적으로 분자량이 큰 PAHs는 산업단지와 배경지역 모두에서 검출되지 않았다. 본 연구에서 제시한 PAHs 분석시스템에서 BAP의 검출한계는 0.15 ng m^{-3} 이며, 일반 외기에 존재하는 BAP의 농도는 0.1 ng m^{-3} 이하로 존재하기 때문에 검출이 되지 않았던 것으로 판단된다(Kim and Kim, 2015). 즉 완주산업단지에서는 200 g mol^{-1} 이하 수준의 분자량을 갖는 PAHs가 주로 검출됨을 확인하였다. Phthalates의 총 농도는 산업단지에서 배경지역 대비 약 7.4배 높았으며, 특히 입자상에서의 DBP와 DEHP 농도가 높게 검출되었다. 이 두 성분은 REACH에서 엄격히 관리되는 물질로, 산업단지 인근 거주자의 장기적 노출 가능성을 내포하고 나아가 건강상 악영향을 줄 수 있음을 시사한다. 특히 사항으로 DEHA가 배경지역에서만 낮은 농도 수준이지만 1.24 ng m^{-3} 로 검출되었으며, 이와 같은 결과에 대해서 후속 연구를 통해 확인이 필요할 것으로 판단된다.

비록, 본 연구에서는 단일 일자에 채취된 SVOCs

농도자료를 기반으로 하여 계절적 또는 장기적 추세를 일반화하기에는 한계가 있다. 그러나 본 연구 결과는 산업단지와 인접 주거지역 간 대기오염의 공간적 분포 특성과 함께 향후 지속적 모니터링 및 관리방안의 필요성을 뒷받침하는 기초자료로 활용될 수 있다는 점에서 의의를 갖는다. 특히, 비정형적 구조를 갖는 산업단지의 대기환경 관리 및 건강 위해성 평가 체계 마련에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 완주산업단지와 주변 주거지역을 대상으로 BTEXS, PAHs 및 phthalates의 농도를 측정하여, 산업단지에서 배출되는 대기오염물질이 인근 주거지역 대기질에 미치는 영향을 평가하였다. BTEXS 농도는 산업단지 내에서 평균 3.46 ppb로 가장 높았으며, 초근접 주거지역에서도 산업단지의 영향을 받아 평균 0.91 ppb로 높은 수준을 보였다. 산업단지 외곽 주거지역에서는 평균 0.56 ppb 수준으로 상대적으로 낮은 농도를 기록하였다. 계절에 따른 풍향, 온도 등의 기상학적 변수는 산업단지 주변지역의 BTEXS 농도 분포에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었으며, 측정된 BTEXS 농도는 산업단지로부터의 물리적 거리 차이에 따라 결정되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 대기 중 BTEXS의 공간적 분포가 기상조건보다는 산업단지와의 거리 의존성이 더 크다는 점을 시사한다. 산업단지에서 측정된 PAHs 및 phthalates의 총 농도는 각각 117 ng m^{-3} , 4.61 ng m^{-3} 로, 배경지역에 대비하여 유의미한 수준으로 높게 나타났으며, 일부 성분은 WHO 건강 기준에 근접하거나 이를 초과하는 수준을 기록하였다. 이는 산업단지 인근 주민의 건강에 잠재적 위해가 존재함을 의미하며, 해당 지역의 특수한 입지 구조(주거지역을 감싸는 산업단지 형태)로 인해 노출 가능성이 더욱 높아질 수 있음을 시사한다. 결론적으로 본 연구는 VOCs뿐 아니라 PAHs 및 phthalates와 같은 SVOCs

에 대해서도 체계적인 대기질 모니터링의 필요성을 강조하며, 향후 산업단지 내 종사자 및 인근 주민의 건강 보호를 위한 규제와 감시 체계 마련의 근거 자료로 활용될 수 있다. 특히, 본 연구는 제한된 측정 자료임에도 불구하고, 산업단지의 구조적 특성이 주거지역 대기오염도에 미치는 영향을 실증적으로 제시했다는 점에서 학술적 및 정책적 시사점이 클 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 전북대학교 2024학년도 교육, 연구 및 학생지도비용(학술트랙)을 지원받아 수행하였습니다.

References

- Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G., Faggio, C. (2023) Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system, *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 270, 109645. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>
- Astuto, M., Benford, D., Bodin, L., Cattaneo, I., Halldorsson, T., Schlatter, J., Sharpe, R., Tarazona, J., Younes, M. (2023) Applying the adverse outcome pathway concept for assessing non-monotonic dose responses: Biphasic effect of bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) on testosterone levels, *Archives of Toxicology*, 97(2), 313-327. <https://doi.org/10.1007/s00204-022-03409-9>
- Baek, K.-M., Kim, M.-J., Seo, Y.-K., Kang, B.-W., Kim, J.-H., Baek, S.-O. (2020) Spatiotemporal Variations and Health Implications of Hazardous Air Pollutants in Ulsan, a Multi-Industrial City in Korea, *Atmosphere*, 11(5), 547. <https://doi.org/10.3390/atmos11050547>
- Barbosa, Jr F., Rocha, B.A., Souza, M.C., Bocato, M.Z., Azevedo, L.F., Adeyemi, J.A., Santana, A., Campiglia, A.D. (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 26(1), 28-65. <https://doi.org/10.1080/10937463.2023.2244444>

- 1080/10937404.2022.2164390
- Bergstra, A.D., Brunekreef, B., Burdorf, A. (2021) The influence of industry-related air pollution on birth outcomes in an industrialized area, *Environmental Pollution*, 269, 115741. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115741>
- Boström, C.-E., Gerde, P., Hanberg, A., Jernström, B., Johansson, C., Kyrklund, T., Rannug, A., Törnqvist, M., Victorin, K., Westerholm, R. (2002) Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air, *Environmental Health Perspectives*, 110(suppl 3), 451-488. <https://doi.org/10.1289/ehp.110-1241197>
- EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes and Processing Aids (CEP), Silano, V., Barat, B., Baviera, J.M., Bolognesi, C., Chesson, A., Cocconcelli, P.S., Crebelli, R., Gott, D.M., Grob, K., Lampi, E. (2019) Update of the risk assessment of di-butylphthalate (DBP), butyl-benzylphthalate (BBP), bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), di-isononylphthalate (DINP) and di-isodecylphthalate (DIDP) for use in food contact materials, *EFSA Journal*, 17(12), e05838. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5838>
- Eom, S.-Y., Choi, J., Bae, S., Lim, J.-A., Kim, G.-B., Yu, S.-D., Kim, Y., Lim, H.-S., Son, B.-S., Paek, D. (2018) Health effects of environmental pollution in population living near industrial complex areas in Korea, *Environmental health and toxicology*, 33(1), e2018004. <https://doi.org/10.5620/eh.t.2018004>
- He, L., Duan, Y., Zhang, Y., Yu, Q., Huo, J., Chen, J., Cui, H., Li, Y., Ma, W. (2024) Effects of VOC emissions from chemical industrial parks on regional O₃-PM_{2.5} compound pollution in the Yangtze River Delta, *Science of the Total Environment*, 906, 167503. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167503>
- Holme, J.A., Vondráček, J., Machala, M., Lagadic-Gossman, D., Vogel, C.F., Le, Ferrec, E., Sparfel, L., Øvreivik, J. (2023) Lung cancer associated with combustion particles and fine particulate matter (PM_{2.5})-The roles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and the aryl hydrocarbon receptor (AhR), *Biochemical pharmacology*, 216, 115801. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2023.115801>
- Hussain, M.S., Gupta, G., Mishra, R., Patel, N., Gupta, S., Alzarea, S.I., Kazmi, I., Kumbhar, P., Disouza, J., Dureja, H. (2024) Unlocking the secrets: Volatile Organic Compounds (VOCs) and their devastating effects on lung cancer, *Pathology-Research and Practice*, 255, 155157. <https://doi.org/10.1016/j.prp.2024.155157>
- Hwang, H., Park, O.-h., Jang, J.-w., Yang, Y.-c., Kim, M.-j., Kang, C., Jung, H.-y., Seo, G.-y., Kim, Y. (2024) Estimation of VOCs Concentration and Emission Source at the Environmental Atmosphere in Gwangju Songam Industrial Complex, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 25(2), 126-136, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.26511/JKSET.25.2.6>
- Kim, S.-Y. (2024) A study on distribution characteristics of volatile organic compounds in Paju industrial complex area, using proton transfer reaction-time of flight mass spectrometry, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 18(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00023-8>
- Kim, Y.-H., Kim, K.-H. (2015) A simple methodological validation of the gas/particle fractionation of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air, *Scientific Reports*, 5(1), 11679. <https://doi.org/10.1038/srep11679>
- Lee, G., Kim, S.-J., Choi, S.-D. (2025) Influence of industrial emissions on volatile organic compound levels and secondary formation of organic aerosol and ozone in a multi-industrial city during the warm season, *Atmospheric Environment*, 343, 120983. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120983>
- Lee, Y.-M., Lee, J.-E., Choe, W., Kim, T., Lee, J.-Y., Kho, Y., Choi, K., Zoh, K.-D. (2019) Distribution of phthalate esters in air, water, sediments, and fish in the Asan Lake of Korea, *Environment International*, 126, 635-643. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.059>
- Lee, Y., Lee, J., Beak, N., Han, J. (2023) Winter and Summer Distribution Characteristics of Particulate and Gaseous PAHs in the Air in Industrial Complex, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 23(2), 21-32, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.33768/ksue.2023.23.2.21>
- Li, Q., Su, G., Li, C., Liu, P., Zhao, X., Zhang, C., Sun, X., Mu, Y., Wu, M., Wang, Q. (2020) An investigation into the role of VOCs in SOA and ozone production in Beijing, China, *Science of the Total Environment*, 720, 137536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137536>
- National Institute of Chemical Safety Agency (NICS) (2021) Pollutant Release and Transfer Registers. <https://icis.me.go.kr/prtr/pblictn/examinResultReprt.do#>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Environmental health assessment on the general industrial complex (X). <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5716022?offset=2> (accessed on Jul. 17, 2025).
- Nisbet, I.C., Lagoy, P.K. (1992) Toxic equivalency factors (TEFs)

- for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 16(3), 290-300. [https://doi.org/10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X)
- Peng, D., Liu, X.-Y., Sheng, Y.-H., Li, S.-Q., Zhang, D., Chen, B., Yu, P., Li, Z.-Y., Li, S., Xu, R.-B. (2025) Ambient air pollution and the risk of cancer: Evidence from global cohort studies and epigenetic-related causal inference, *Journal of Hazardous Materials*, 489, 137619. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137619>
- Ravanbakhsh, M., Yousefi, H., Lak, E., Ansari, M.J., Suksatan, W., Qasim, Q.A., Asban, P., Kianizadeh, M., Mohammadi, M.J. (2023) Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on respiratory diseases and the risk factors related to cancer, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 43(9), 8371-8387. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2149569>
- Shetty, S.S., Deepthi, D., Harshitha, S., Sonkusare, S., Naik, P.B., Madhyastha, H. (2023) Environmental pollutants and their effects on human health, *Heliyon*, 9(9), e19496. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19496>
- Shuai, J., Kim, S., Ryu, H., Park, J., Lee, C.K., Kim, G.-B., Ultra, Jr V.U., 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. <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5454-1>
- Yu, H., Ma, J., Chen, D., Gao, Y., Li, G., An, T. (2024) Associations between inhalation of typical volatile and semi-volatile organic compounds in e-waste dismantling workers with liver function damage, *Journal of Hazardous Materials*, 464, 133004. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133004>
- Zhang, S., Tang, H., Zhou, M., Pan, L. (2024) Sexual dimorphism association of combined exposure to volatile organic compounds (VOC) with kidney damage, *Environmental Research*, 258, 119426. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119426>
- Zhang, Y., Lyu, L., Tao, Y., Ju, H., Chen, J. (2022) Health risks of phthalates: A review of immunotoxicity, *Environmental Pollution*, 313(120173). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120173>

Authors Information

안영지 (전북대학교 환경에너지융합학과 박사과정 학생)
(anozi1649@jbnu.ac.kr)

최민석 (전북대학교 환경에너지융합학과 박사과정 학생)
(cms@jbnu.ac.kr)

김용현 (전북대학교 환경공학과 교수, 전북특별자치도
환경보건센터 센터장) (ykim84@jbnu.ac.kr)

Supplementary Materials

1. 시료채취 및 전처리 방법

1.1 VOCs: BTEXS (passive sampler 기반)

대기 중 volatile organic compounds (VOCs) 채취는 외부 동력 없이 확산 원리에 기반하여 VOCs를 채취할 수 있는 passive sampler (3M™ Organic Vapor Monitor 3500+, 3M, USA)를 이용하였다 (Stock *et al.*, 2008; Zulu and Naidoo, 2022). 조사 대상 지점에서 시료채취를 마친 passive sampler는 sampler case에서 흡착 패드를 분리하여, 10 mL vial에 옮긴 후, 1 mL의 추출 용매를 주입하였다. 추출에는 BTEXS 성분의 회수율을 높이기 위해 1% carbon disulfide (CS₂)를 첨가한 acetone (acetone 99% + CS₂ 1%, ATCS)용매를 사용하였다 (Jang and Kim, 2025). 이후, vortex mixer를 이용하여 3300 rpm에서 2 min간 교반한 후, 상온에서 1 h 동안 안정화시켰다. 추출이 완료된 시료는 부유 입자를 제거하기 위해 추출액 1 mL을 2 mL micro tube에 옮긴 뒤, 8000 rpm에서 1 min 간 원심분리를 수행하였다. 원심분리 후 상등액 0.5 mL를 분취하여 2 mL amber vial에 소분하였으며, 분석 전까지 시료 손실을 방지하기 위해 4°C에서 냉장 보관하였다.

1.2 SVOCs: PAHs 및 phthalate (sorbent tube 기반)

조사대상 지점에서 semi-VOCs (SVOCs)를 채취하기 위한 sorbent tube의 흡착제는 입자상 및 기체상 SVOCs를 효과적으로 채취할 수 있도록 quartz wool (6-570-01, AS ONE, Japan)과 Carboxen 102 (10257, Sigma-Aldrich, USA)를 활용하였다 (Kim and Kim, 2015). 입자상 SVOC 채취를 위한 sorbent tube는 quartz trap (Outer Diameter × Length = 6.35 mm × 88.9 mm)에 quartz wool 약 11 mg을 충전하고, 관 외부로 wool 이탈을 방지하기 위해 quartz trap 하단에

sorbent-retaining gauze (C-GZ020, Markes International, UK)를 삽입하여 제작하였다 (Q tube). 기체상 SVOC 채취를 위한 sorbent tube는 quartz trap에 quartz wool (11 mg)을 먼저 충전한 후, Carboxen C (50 mg)을 삽입하고, 다시 quartz wool (11 mg)을 채운 뒤, sorbent-retaining gauze로 고정하여 제작하였다 (C tube).

대기 시료를 채취하기 전 오염물질 제거 및 안정화를 위해 sorbent tube 세척장치 (CT2000, CHEM-TEKINS, Korea)에 sorbent tube를 장착한 후, 330°C에서 3 h 동안 100~120 mL min⁻¹ 유량으로 고순도 N₂ (>99.999%)를 흘려주는 방식으로 conditioning을 진행하였다. 시료채취 시에는 Q tube 후단부를 C tube 전단부와 silicone tubing으로 연결하고, C tube의 후단은 mass flow controller가 장착된 진공 펌프 (MP-Σ300KN, Sibata, Japan)와 silicone tubing으로 연결하였다. Vacuum pump는 2 L min⁻¹ 유량으로 2 h 동안 가동하여 총 240 L의 대기 시료가 sorbent tube들을 통과하도록 하여 채취를 진행하였다. 채취를 완료한 sorbent tube들은 양단을 전용 마개로 밀봉한 후, 지퍼백에 넣어 보관하였다. Sorbent tube에 채취된 대기 시료는 thermal desorption (TD) 시스템 (TD-30, Shimadzu, Japan)을 이용하여 전처리를 수행하였으며, 열탈착 조건 및 정량 평가를 위한 기기분석 조건은 supplementary material의 Section 2에 자세하게 제시하였다.

2. 기기분석조건

2.1 BTEXS

전처리를 마친 VOCs 추출 용액은 자동 시료 주입장치 (AOC-30i, Shimadzu, Japan)가 장착된 gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) 시스템

(GC-MS; GC: Nexis GC-2030, MS: GCMS-QP2020 NX, Shimadzu, Japan)을 이용하여 분석하였다. BTEXS 성분의 분리 분석에는 DB-5MS column (1차 측정: 봄)과 DB-Heavy Wax column (2차 측정: 가을)을 활용하였다. 분석 시료는 280°C로 설정된 injector를 통해 주입하였으며, oven 조건은 초기 온도 40°C에서 6 min간 유지한 후, 10°C min⁻¹로 승온하여 최종 온도 220°C에서 4 min간 유지되도록 설정하였다 (total run time: 28 min). BTEXS 성분의 정량은 MS에서 total ion chromatogram (TIC) mode로 1차 수행하였으며, 간섭 물질의 영향을 최소화하기 위해 extracted ion chromatogram (EIC) mode로 재정량하여 최종 농도를 산출하였다.

2.2 PAHs 및 phthalates

PAHs 및 phthalates 분석은 TD-GC-MS를 이용하여 수행하였다. 대기 시료를 채취한 sorbent tube를 TD에 장착한 후, 300°C에서 7 min간 100 mL min⁻¹의 유속으로 1차 열탈착을 진행하였다. 열탈착된 성분들은 Tenax TA가 충전된 cold trap으로 0°C에서 재흡착한 뒤, 이후 cold trap의 온도를 320°C로 상승시켜 2차 열탈착을 수행하였다. 2차로 열탈착된 성분들은 GC로 전송하였으며, 이들은 GC에 장착된 DB-5MS column으로 분리 분석하였다. GC oven 조건은 초기 온도를 80°C로 설정하여 5 min간 유지한 후, 20°C min⁻¹로 300°C까지 승온시킨 후 24 min간 유지하였다 (total run time: 40 min). PAHs 및 phthalates의 정량은 간섭 물질의 영향을 최소화하기 위해 EIC mode를 활용하여 최종 농도를 산출하였다.

3. Working standards 준비

3.1 BTEXS

BTEXS정량을 위한 표준시료 (working standard, WS)는 99% 이상의 순도를 갖는 원시료 (reagent grade chemical, RGC)를 구입한 후, passive sampler

추출에 사용한 것과 동일한 ATCS 용매로 단계 희석하여 조제하였다. 먼저 BTEXS의 RGC를 평균 45 ± 0.9 µL씩 주입한 뒤, ATCS 용매를 1772 µL를 채워 최종 부피 2000 µL의 20 mg mL⁻¹ 농도를 갖는 1차 표준시료 (primary standards, PS)를 조제하였다. 이후 PS 10 µL와 ATCS 1990 µL를 혼합하여 100 µg mL⁻¹ 농도의 1차 작업용 표준시료 (1st working standards, 1st-WS)를 조제하였다. 2nd-WS는 1st-WS 400 µL를 ATCS 1600 µL와 혼합하여 20 µg mL⁻¹ 농도로 준비하였다. 마지막으로 BTEXS의 검량을 위한 최종 표준시료 (final-WS, F-WS)는 0.05~5.0 ng µL⁻¹ 범위의 7점 농도대로 조제하였다.

3.2 PAHs 및 phthalates

PAHs 및 phthalates의 정량 분석을 위한 WSs는 primary standards (PSs)를 구입한 후, gravimetric 방법으로 단계적으로 희석하여 준비하였다. PAHs의 PS는 2000 µg mL⁻¹의 16종 PAH mixture solution (CRM47930, Supelco, USA)를 사용하였으며, phthalates의 PS는 1000 µg mL⁻¹의 7종 phthalate mixture solution (40077-U, Supelco, USA)를 사용하였다. WSs 제조를 위한 희석 용매는 methanol (for PAHs)과 n-hexane (for phthalates)으로 선정하였다. PAHs의 1st-WS는 PS 500 µL를 2 mL vial에 주입한 후 methanol 용매 1500 µL를 채워 최종 부피 2000 µL의 500 µg mL⁻¹ 농도로 준비하였다. Phthalates의 1st-WS는 PS 1000 µL 주입한 후 n-hexane 용매 1000 µL를 채워 500 µg mL⁻¹ 농도로 준비하였다. 최종 검량에 필요한 F-WS는 1st-WS를 각각의 희석 용매를 사용하여 4점 농도로 조제하였다 (concentrations of PAHs and phthalates in F-WS: 5, 10, 25 and 50 ng µL⁻¹).

4. Working standards 분석

4.1 BTEXS

BTEXS를 함유한 F-WS 시료는 supplementary

material의 Section 2에 기술된 VOCs 추출 용액 분석 방법과 동일한 방법으로 분석하였다.

4.2 PAHs 및 phthalates

PAHs 및 phthalates의 검량을 위해 준비된 F-WS를 이용하여 액상 시료를 자연기화시킨 후 sorbent tube에 흡착을 유도하였다(Kim and Kim, 2015). 시료 흡착에는 대기 시료채취에 사용한 것과 동일한 사양의 Carbopack C로 충전된 C tube를 사용하였으며, 사용된 sorbent tube는 supplementary material의 Section 1.2에서 기술한 방법에 따라 오염물질 제거 및 안정화를 위한 conditioning을 수행하였다. Conditioning을 마친 sorbent tube의 후단부를 vacuum pump에 연결하였다. 이후 10 μ L liquid syringe를 이용하여 각 농도의 F-WS 1 μ L를 분취하여, syringe needle을 silicon tubing에 통과시켜 sorbent tube 상단의 quartz wool에 주입하였다. 이와 동시에 1 L min^{-1} 의 유량으로 3 min간 vacuum pump를 가동하여 총 3L의 공기를 유입시켰다. F-WS가 흡착된 sorbent tube는 supplementary material의 Section 2에 기술된 열탈착 및 분석 조건에 따라 분석을 진행하였다.

References





























- Jang, S.-E., Kim, Y.-H. (2025) Optimizing solvent extraction methods for activated carbon-based passive samplers in atmospheric volatile organic compound analysis: minimizing analytical interferences from pretreatment solvents and ensuring quantitative reliability, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 417(11), 2267-2279. <https://doi.org/10.1007/s00216-025-05814-2>
- Kim, Y.-H., Kim, K.-H. (2015) A simple methodological validation of the gas/particle fractionation of polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air, *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/11679>. 10.1038/srep11679(2015)
- Stock, T.H., Morandi, M.T., Afshar, M., Chung, K.C. (2008) Evaluation of the use of diffusive air samplers for determining temporal and spatial variation of volatile organic compounds in the ambient air of urban communities, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(10), 1303-1310. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.10.1303>
- Zulu, Z., Naidoo, R.N. (2022) Styrene associated respiratory outcomes among reinforced plastic industry workers, *Archives of Environmental & Occupational Health*, 77(7), 576-585. <https://doi.org/10.1080/19338244.2021.1972279>

Table S1. Meteorological conditions during the sampling period.

Order	Season	Date	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Rainfall (mm)	Wind speed (m s ⁻¹)	Prevailing wind direction	Meteorological station
1	Spring	2024-04-17 to 2024-04-24	16.33 ± 1.45	69.70 ± 11.39	2.00 ± 2.38	1.39 ± 0.45	SE	Jeonju (146) ASOS ^a
2		2024-04-24 to 2024-05-01	16.79 ± 2.00	71.73 ± 10.28	4.80 ± 6.44	1.41 ± 0.35	W	
3		2024-05-01 to 2024-05-08	17.08 ± 2.44	75.29 ± 13.75	12.68 ± 15.67	1.90 ± 0.66	SW	
4		2024-05-08 to 2024-05-15	17.06 ± 1.87	61.86 ± 7.11	8.45 ± 7.44	1.88 ± 0.37	W	
5	Autumn	2024-10-01 to 2024-10-08	16.96 ± 1.75	77.61 ± 8.61	4.03 ± 2.93	1.16 ± 0.40	SE	
6		2024-10-08 to 2024-10-15	18.89 ± 0.59	77.40 ± 9.25	2.83 ± 3.23	1.04 ± 0.16	ESE	
7		2024-10-15 to 2024-10-23	18.53 ± 2.79	84.14 ± 11.09	0.58 ± 10.19	1.19 ± 0.81	NW	
8		2024-10-23 to 2024-10-30	15.95 ± 1.58	78.46 ± 5.26	11.17 ± 0.78	1.31 ± 0.72	ESE	
9	Winter	2024-12-04	5	55.30	0.00	1.4	SE	
10		2024-12-05	6.3	76.80	2.10	1.6	WSW	

^aAutomated Synoptic Observing System (ASOS): Nearest meteorological station to the sampling points (Both Wanju and Jeonju).

Table S2. Physicochemical information of target compounds (VOCs, PAHs, and phthalates).

Order	Target compounds			MW (g mol ⁻¹)	Density (g mL ⁻¹)	Formula	CAS number	Boiling point (°C)	Selected spectra* (m/z)	Chemical structure
	Group	Full name	Short name							
1		Benzene*	B	78	0.87	C ₆ H ₆	71-43-2	80.1	78	
2		Toluene*	T	92	0.87	C ₇ H ₈	108-88-3	110.6	92	
3	VOCs	Ethyl benzene*	E	106	0.87	C ₈ H ₁₀	100-41-4	136.2	106	
4		p-Xylene	p-X	106	0.87	C ₈ H ₁₀	106-42-3	138.4	106	
5		Styrene*	S	104	0.91	C ₈ H ₈	100-42-5	145	104	
6		Naphthalene*	NAP	128	1.14	C ₁₀ H ₈	91-20-3	218	128	
7		Acenaphthylene	ACL	152	0.90	C ₁₂ H ₈	208-96-8	280	152	
8		2-Bromonaphthalene*	2-BN	207	1.61	C ₁₀ H ₇ Br	580-13-2	281	127	
9		Acenaphthene	ACN	154	1.22	C ₁₂ H ₁₀	83-32-9	279	154	
10		Fluorene	FLR	202	1.25	C ₁₃ H ₁₀	86-73-7	295	166	
11		Phenanthrene	PHN	178	1.18	C ₁₄ H ₁₀	85-01-8	340	178	
12		Anthracene	ANT	178	1.25	C ₁₄ H ₁₀	120-12-7	340	178	
13	PAHs	Fluoranthene	FLT	166	1.20	C ₁₃ H ₁₀	206-44-0	375	166	
14		Pyrene	PYR	202	1.27	C ₁₆ H ₁₀	129-00-0	393	202	
15		Benzo(a)anthracene*	BAA	228	1.19	C ₁₈ H ₁₂	56-55-3	437.6	228	
16		Chrysene	CHY	228	1.27	C ₁₈ H ₁₂	218-01-9	448	228	
17		Benzo(b)fluoranthene*	BBF	252	1.29	C ₂₀ H ₁₂	205-99-2	481	252	
18		Benzo(a)pyrene*	BAP	252	1.24	C ₂₀ H ₁₂	50-32-8	496	252	
19		Indeno(1,2,3-c,d)pyrene*	ICP	276	1.38	C ₂₂ H ₁₂	193-39-5	536	276	
20		Dibenz(a,h)anthracene*	DBA	278	1.23	C ₂₂ H ₁₄	53-70-3	524	278	
21		Benzo(g,h,i)perylene	BGP	276	1.38	C ₂₂ H ₁₂	191-24-2	550	276	
22		Dimethyl phthalate	DMP	194	1.19	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	131-11-3	283.7	163	
23		Diethyl phthalate	DEP	222	1.12	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	84-66-2	295	149	
24		Di-n-butyl phthalate*	DBP	278	1.05	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	84-74-2	340	149	
25	Phthalates	Benzyl butyl phthalate*	BBP	312	1.10	C ₁₉ H ₂₀ O ₄	85-68-7	370	149	
26		Bis-2-ethylhexyl adipate*	DEHA	371	0.93	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	103-23-1	417	129	
27		Bis(2-ethylhexyl)phthalate	DEHP	391	0.99	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	117-81-7	385	149	
28		Di-n-octyl phthalate	DnOP	391	0.98	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	117-84-0	385	149	

*Designated as Hazardous Air Pollutants (HAPs) under the United States Clean Air Act by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

Table S3. Sampling parameters for VOCs and sampling conditions for PAHs and Phthalates.

Order	Group		Sampler type	Sampling rate (L min ⁻¹)	Sampling time (min)	Sampling volume (L)	8 h reporting limit (mg m ⁻³)
1	VOCs	Benzene	3M 3500 +	0.00969	10,080	97.7	0.086
2		Toluene		0.00948		95.6	0.44
3		Ethyl benzene		0.00891		89.8	0.12
4		p-Xylene		0.00754		76.0	0.28
5		Styrene		0.00921		92.8	0.11
6	PAHs & phthalates	All target compounds	Sorbent tube	2	120	240	NA ^a

^aNot available

Table S4. Instrumental condition for the analysis of VOCs (DI-GC-MS), PAHs, and phthalates (TD-GC-MS).

Operating condition	Target compounds		
	PAHs and pthalates		VOCs
A. Tube cleaner (Model: CT2000, Chemtekis, Republic of Korea)			
a. Sampling tube cleaning condition			
Desorption flow (mL min ⁻¹):	100~120		
Cleaning time (hour):	3		
Desorption temperature (°C):	330		
B. Thermal desorber (Model:TD-30, shimadzu, Japan)			
a. Sampling tube			
Trap tube:	Carbopack C		NA ^a
Desorption flow (mL min ⁻¹):	100		
Desorption time (min):	7		
Desorption temp. (°C):	300		
b. Cold-trap (CT)			
Adsorption temp. (°C):	0		
Desorption temp. (°C):	320		
c. Line and interface temp. (°C)			
	300		
C. Carrier gas setting			
Injection temperature (°C):	NA		280
Carrier gas:		He (≥ 99.999%)	
Column gas flow (mL min ⁻¹):		2	
Purge gas flow rate (mL min ⁻¹):		3	
Split ratio:		10	
D. Gas chromatograph (Model: GC-2030, Shimadzu, Japan)			
a. Column:	DB-5MS (Agilent J&W, USA)	DB-5MS (Agilent J&W, USA)	DB-Heavy wax (Agilent J&W, USA)
Length (m)	60	60	60
Diameter (mm)	0.25	0.25	0.32
Film thickness (µm)	0.25	0.25	0.25
b. Oven setting			
Initial (°C):	80 (hold time: 5 min)		40 (hold time: 6 min)
Ramping (°C min ⁻¹):	20		10
Final (°C):	300 (hold time: 24 min)		220 (hold time: 4 min)
Total operating time (min):	40		40
E. Mass spectrometer (Model: GCMS-QP2020, Shimadzu, Japan)			
Ionization mode:		70 (eV)	
Ion source temp. (°C):	280		250
Interface temp. (°C):	280		250
Total ion chromatograms range (m/z):		35-600	
Extracted ion chromatograms range (m/z):	PAHs: 127-128, 152-154, 166, 202, 228, 252, 276-278 Phthalates: 129, 149, 163		78, 92, 104, 106
Scan speed:		1250	

^aNot available

Table S5. Preparation of working standards for the target compounds (VOCs, PAHs, and phthalates).

Order	Group	Compounds	Density (g mL ⁻¹)	PS		1st-WS		2nd-WS		Final WS ^a (ng µL ⁻¹)						
				Mixing recipe	Concentration (mg mL ⁻¹)	Mixing recipe	Concentration (ng µL ⁻¹)	Mixing recipe	Concentration (ng µL ⁻¹)	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
1	VOCs	Benzene	0.87	each 46 µL RGC (including 44 µL styrene) + 1772 µL ATCS	20.1	10 µL PS + 1990 µL ATCS	101	400 µL 1st WS + 1600 µL ATCS	20	0.05	0.10	0.20	0.50	1.01	2.01	5.03
2		Toluene	0.87		19.9		99		20	0.05	0.10	0.20	0.50	0.99	1.99	4.97
3		Ethyl benzene	0.87		19.9		100		20	0.05	0.10	0.20	0.50	1.00	1.99	4.98
4		p-Xylene	0.87		19.9		99		20	0.05	0.10	0.20	0.50	0.99	1.99	4.97
5		Styrene	0.91		19.9		100		20	0.05	0.10	0.20	0.50	1.00	1.99	4.98
6	PAHs	Naphthalene	1.14	Purchases of PAHs mixture (CRM4930, Supelco)	2000	500 µL PS + 1500 µL Methanol	500	-	5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
7		Acenaphthylene	0.90		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
8		2-Bromonaphthalene	1.61		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
9		Acenaphthene	1.22		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
10		Fluorene	1.25		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
11		Phenanthrene	1.18		2001		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
12		Anthracene	1.25		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
13		Fluoranthene	1.20		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
14		Pyrene	1.27		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
15		Benzo(a)anthracene	1.19		2001		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
16		Chrysene	1.27		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
17		Benzo(b)fluoranthene	1.29		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
18		Benzo(a)pyrene	1.24		1986		497		4.97	9.9	24.8	49.7	-	-	-	
19		Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	1.38		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
20		Dibenz(a,h)anthracene	1.23		2000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
21	Benzo(g,h,i)perylene	1.38	2000	500	5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-					
22	Phthalates	Dimethyl phthalate	1.19	Purchases of Phthalates mixture (40077-U, Supelco)	1001	1000 µL PS + Hexane	501	-	5.01	10.0	25.0	50.1	-	-	-	
23		Diethyl phthalate	1.12		999		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
24		Di-n-butyl phthalate	1.05		1001		501		5.01	10.0	25.0	50.1	-	-	-	
25		Benzyl butyl phthalate	1.10		999		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
26		Bis-2-ethylhexyl adipate	0.93		1000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
27		Bis(2-ethylhexyl)phthalate	0.99		999		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	
28		Di-n-octyl phthalate	0.98		1000		500		5.00	10.0	25.0	50.0	-	-	-	

^aAbbreviations: reagent grade chemical (RGC), primary standard (PS), and working standard (WS).

^bVOCs working solutions were prepared by mixing appropriate volumes of the first working solution (2nd WS) and ATCS (acetone 99% + carbon disulfide 1%) as follows (2nd WS and ATCS; µL): 5 and 1995 (1st point), 10 and 1990 (2nd point), 20 and 1980 (3rd point), 50 and 1950 (4th point), 100 and 1900 (5th point), 200 and 1800 (6th point), 500 and 1500 (7th point).

^cPAHs working solutions were prepared by mixing appropriate volumes of the first working solution (1st WS) and methanol (MeOH) as follows (1st WS and MeOH; µL): 20 and 1980 (1st point), 40 and 1960 (2nd point), 100 and 1900 (3rd point), 200 and 1800 (4th point).

^dPhthalates working solutions were prepared by mixing appropriate volumes of the first working solution (1st WS) and hexane as follows (1st WS and hexane; µL): 20 and 1980 (1st point), 40 and 1960 (2nd point), 100 and 1900 (3rd point), 200 and 1800 (4th point).

Table S6. Quality control (QC) results for target compounds (VOCs, PAHs, and phthalates).

Order	Group	Compounds	RF ($\mu\text{L ng}^{-1}$)	R ²	RSD (%)	LOD (ng m^{-3})	Note
1		Benzene (B)	24,266	0.9970	0.06	0.001	1st (Spring)
			38,618	0.9992	5.47	0.002	2nd (Autumn)
2		Toluene (T)	15,924	0.9978	1.49	0.002	1st (Spring)
			24,559	0.9996	4.23	0.003	2nd (Autumn)
3	VOCs	Ethyl benzene (E)	16,391	0.9981	0.98	0.001	1st (Spring)
			22,880	0.9997	2.81	0.003	2nd (Autumn)
4		p-Xylene (p-X)	18,101	0.9979	1.73	0.001	1st (Spring)
			26,749	0.9999	3.91	0.002	2nd (Autumn)
5		Styrene (S)	26,151	0.9997	2.23	0.001	1st (Spring)
			45,886	0.9983	4.31	0.001	2nd (Autumn)
6	PAHs	Naphthalene (NAP)	18,856	0.9995	3.80	0.13	-
7		Acenaphthylene (ACL)	11,567	0.9998	2.56	0.22	-
8		2-Bromonaphthalene (2-BN)	5,509	0.9991	3.65	0.46	-
9		Acenaphthene (ACN)	17,093	0.9998	3.62	0.15	-
10		Fluorene (FLR)	7,371	0.9997	6.78	0.34	-
11		Phenanthrene (PHN)	14,253	0.9997	11.36	0.18	-
12		Anthracene (ANT)	8,342	0.9910	8.58	0.30	-
13		Fluoranthene (FLT)	16,844	0.9972	5.46	0.15	-
14		Pyrene (PYR)	17,074	0.9976	5.48	0.15	-
15		Benzo(a)anthracene (BAA)	17,933	0.9956	4.72	0.14	-
16		Chrysene (CHY)	18,562	0.9943	4.58	0.14	-
17		Benzo(b)fluoranthene (BBF)	18,767	0.9976	5.29	0.13	-
18		Benzo(a)pyrene (BAP)	16,802	0.9970	5.66	0.15	-
19		Indeno(1,2,3-c,d)pyrene (ICP)	23,185	0.9995	7.34	0.11	-
20		Dibenz(a,h)anthracene (DBA)	26,219	0.9996	5.83	0.10	-
21	Benzo(g,h,i)perylene (BGP)	24,839	0.9990	5.91	0.10	-	
22	Phthalates	Dimethyl phthalate (DMP)	6,722	0.9989	0.41	0.25	-
23		Diethyl phthalate (DEP)	6,637	0.9986	0.41	0.25	-
24		Di-n-butyl phthalate (DBP)	11,422	0.9986	0.70	0.15	-
25		Benzy butyl phthalate (BBP)	3,800	0.9976	6.83	0.44	-
26		Bis-2-ethylhexyl adipate (DEHA)	5,639	0.9970	5.12	0.29	-
27		Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	7,188	0.9978	3.19	0.23	-
28		Di-n-octyl phthalate (DnOP)	11,065	0.9969	6.40	0.15	-

*Abbreviations: limit of detection (LOD), response factor (RF), and relative standard deviation (RSD).

Table S7. Mean concentrations of BTEXS by sampling site and measurement period.

Order	Study week	Concentration of sampling site (ppb)								
		PW1	PW2	PW3	PW4	PW5	PW6	PW7	PW8	PJ
Benzene										
1	W1	0.13	0.21	0.24	1.18	0.37	0.01	0.20	0.27	0.30
2	W2	0.33	0.28	0.60	1.91	0.46	0.22	0.55	0.39	0.23
3	W3	0.26	0.36	0.24	0.55	0.33	0.32	0.36	0.37	0.27
4	W4	0.13	0.31	0.16	0.56	0.07	0.19	0.16	0.09	0.18
5	W5	0.09	0.15	0.63	1.67	0.22	0.28	0.13	0.20	0.16
6	W6	0.14	0.08	1.03	2.54	0.04	0.12	0.20	0.24	0.21
7	W7	0.35	0.22	0.81	2.72	0.26	0.27	0.14	0.29	0.04
8	W8	0.10	0.17	0.59	2.16	0.34	0.14	0.10	0.10	0.20
Toluene										
9	W1	1.43	2.93	3.16	7.80	1.41	0.63	0.88	1.59	1.34
10	W2	1.79	2.86	5.25	7.77	1.36	1.49	1.39	1.98	1.14
11	W3	1.77	2.83	2.57	4.52	1.00	1.23	0.67	1.29	0.82
12	W4	1.43	3.18	4.11	4.22	0.58	0.70	0.58	1.04	0.86
13	W5	1.31	2.10	4.52	8.52	1.25	1.16	0.75	0.90	1.22
14	W6	1.81	2.65	8.04	14.58	0.92	0.93	1.00	0.88	1.18
15	W7	2.78	3.66	7.30	12.36	1.51	1.58	1.44	1.85	1.09
16	W8	1.47	3.19	6.54	10.88	1.18	0.84	0.90	0.67	1.30
Ethylbenzene										
17	W1	0.33	0.71	0.60	1.14	0.29	0.17	0.21	24.56	0.29
18	W2	0.41	0.66	0.77	1.36	0.30	0.37	0.28	0.30	0.28
19	W3	0.44	0.90	0.52	0.82	0.20	0.35	0.19	0.30	0.23
20	W4	0.38	0.74	0.71	0.90	0.23	0.22	0.19	0.27	0.32
21	W5	0.35	0.45	0.81	2.32	0.22	0.27	0.26	0.22	0.46
22	W6	0.41	0.67	1.41	3.22	0.32	0.29	0.38	0.22	0.79
23	W7	0.76	0.83	1.34	3.07	0.38	0.39	0.39	0.44	0.37
24	W8	0.46	0.65	1.29	2.58	0.31	0.35	0.33	0.29	0.47
p-Xylene										
25	W1	0.66	1.26	1.97	4.99	0.38	0.31	0.39	21.41	0.55
26	W2	0.76	1.21	2.25	5.89	0.50	0.69	0.61	0.94	0.54
27	W3	0.82	1.34	1.31	3.28	0.59	0.85	0.32	0.88	0.30
28	W4	0.68	1.58	2.56	3.72	0.55	0.63	0.23	0.54	0.42
29	W5	0.57	0.63	3.29	8.50	0.47	0.40	0.35	0.35	0.50
30	W6	0.76	1.51	6.01	10.78	0.49	0.40	0.56	0.10	0.78
31	W7	1.23	2.02	4.86	11.74	0.62	0.43	0.74	1.19	0.64
32	W8	0.92	1.64	4.05	10.66	0.49	0.10	0.29	0.84	0.69
Styrene										
33	W1	0.04	0.33	2.02	1.89	0.47	0.04	0.18	5.72	0.82
34	W2	0.29	0.38	3.09	2.95	0.45	0.53	0.73	0.69	0.04
35	W3	0.14	0.76	2.74	1.25	0.61	0.86	0.50	1.12	0.04
36	W4	0.29	1.65	1.93	1.57	0.79	0.24	0.04	0.30	0.50
37	W5	0.25	0.25	1.96	2.08	0.72	2.46	0.66	0.55	0.25
38	W6	0.25	0.25	3.53	1.77	0.25	1.16	1.43	1.35	0.25
39	W7	0.25	0.25	5.78	2.18	0.25	0.25	0.25	3.04	0.25
40	W8	0.25	0.25	2.07	1.60	3.23	1.42	0.25	1.33	0.25

*Method detection limit (MDL)

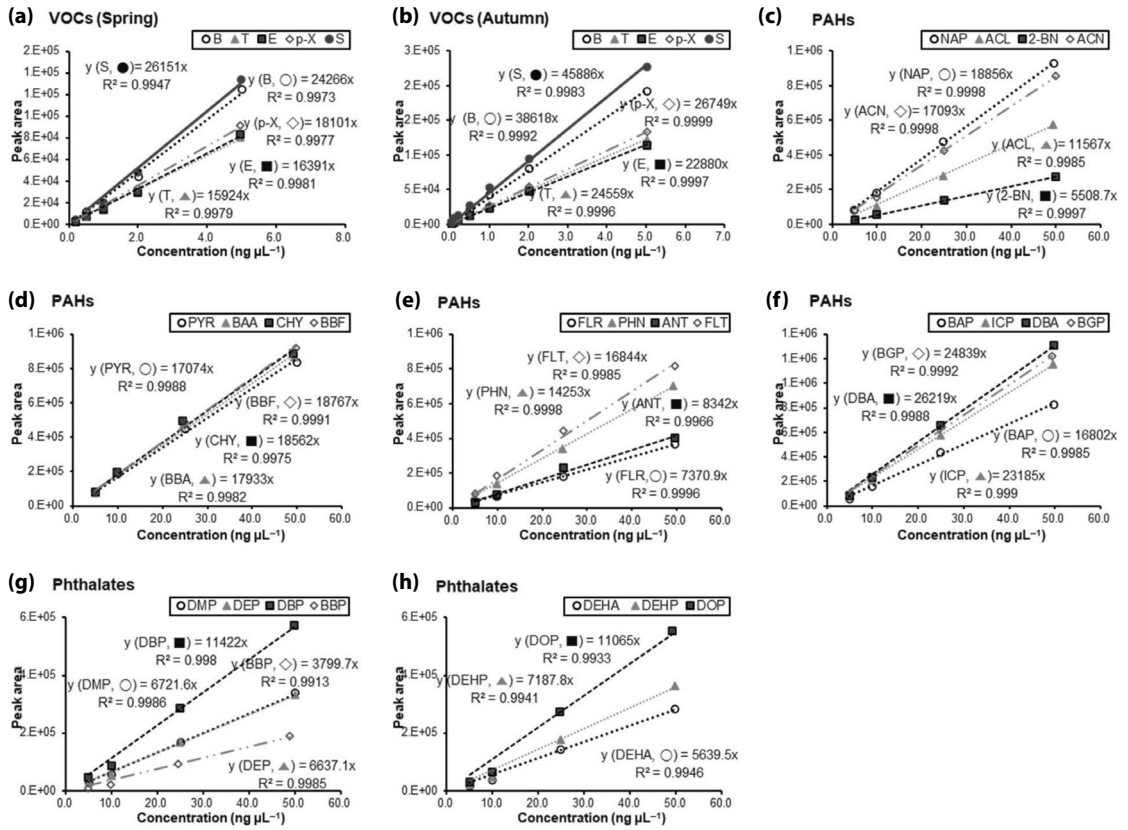


Fig. S1. Calibration curve results for the target compounds. (a) 5 VOCs, (b~e) 16 PAHs, and (f~g) 7 phthalates.

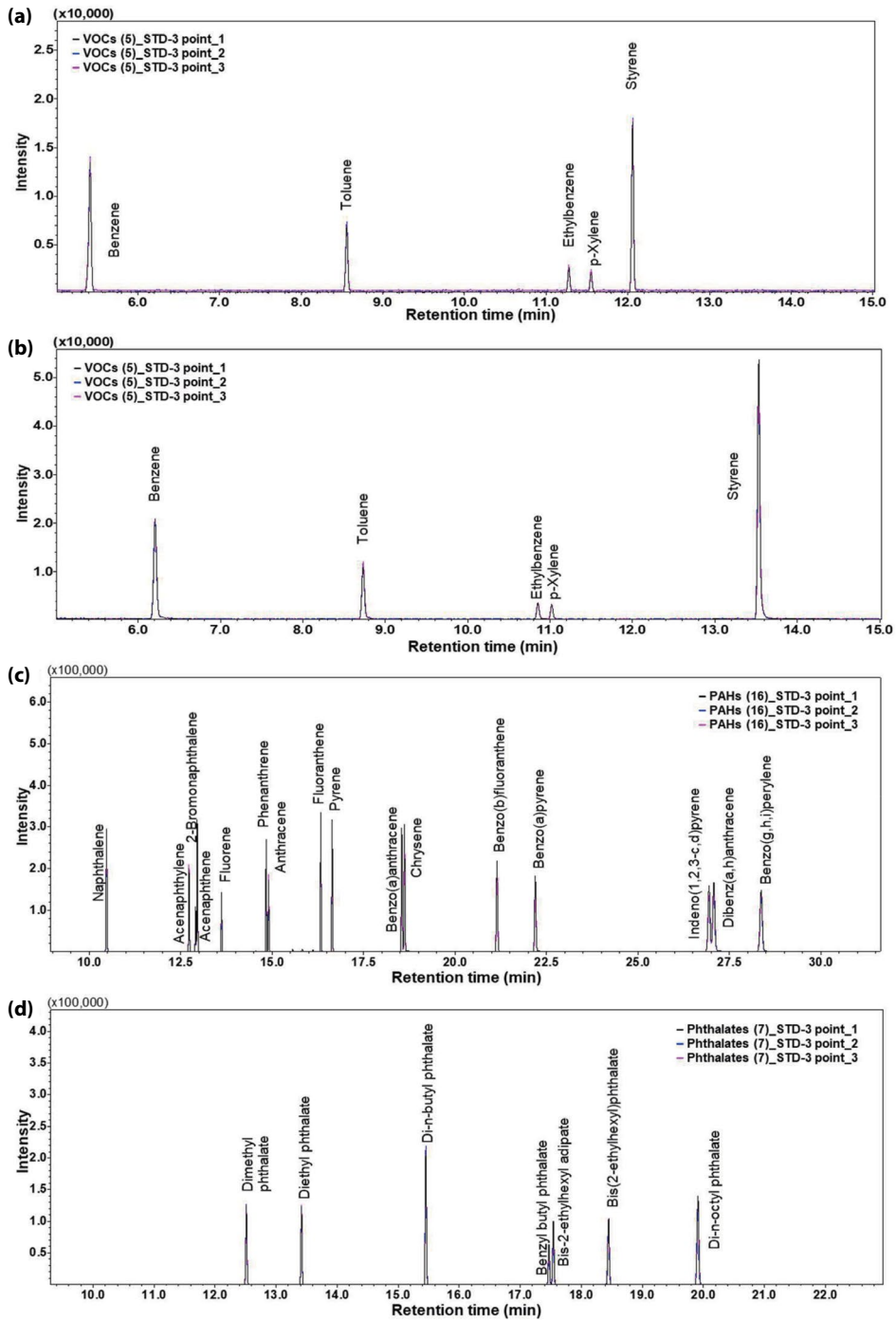


Fig. S2. Chromatograms from three replicate analyses at the third calibration point of F-WS. (a) 5 VOCs (using DB-5 column), (b) 5 VOCs (using heavy-wax column), (c) 16 PAHs, and (d) 7 phthalates.

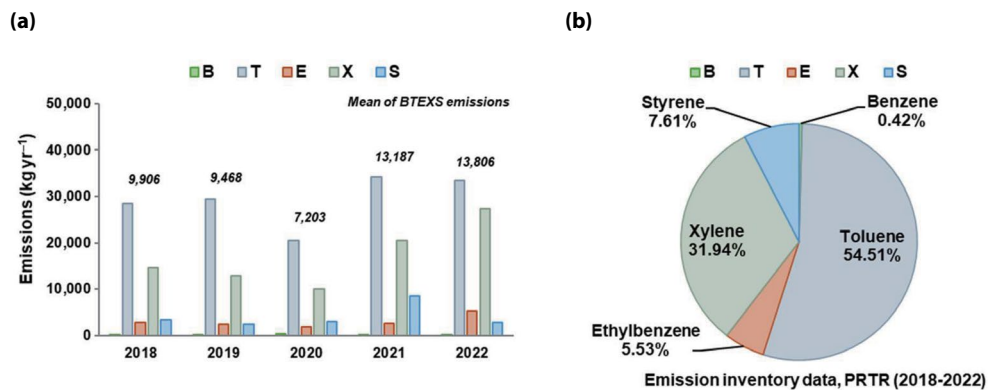


Fig. S3. Emission data of BTEXS compounds released into the atmosphere from the Wanju industrial complex between 2018 and 2022. (a) annual data and (b) percentage composition.