

기술자료

충남 서산지역 대기 중 BTEX 및 주요 *n*-Alkane의 농도 특성과 주변 산업단지 배출 영향

Concentration Characteristics of BTEX and Major *n*-Alkanes in Ambient Air in Seosan, Korea, and Potential Influences from Nearby Industrial Complexes

강성구¹⁾, 김주애^{1),2),*}, 임유락¹⁾, 이미혜¹⁾, 이광열³⁾

¹⁾고려대학교 지구환경과학과, ²⁾고려대학교 기초과학연구원,

³⁾국립환경과학원 대기환경연구과

Sunggu Kang¹⁾, Joo-Ae Kim^{1),2),*}, Yurak Lim¹⁾, Meehye Lee¹⁾, Kwangyul Lee³⁾

¹⁾Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul, Republic of Korea

²⁾The Institute of Basic Science, Korea University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Atmospheric Environmental Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2026년 8월 3일
수정일 2026년 8월 27일
채택일 2026년 8월 27일

Received 3 August 2026
Revised 27 August 2026
Accepted 27 August 2026

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3290-3645
E-mail : alal78@korea.ac.kr

Abstract This study characterized ambient volatile organic compounds (VOCs) in Seosan, Korea, and examined the potential influence of surrounding industrial areas. A total of 390 one-hour sorbent-tube samples were collected at the NIER Chungcheong Region Atmospheric Environment Research Center on selected days between January and November 2020. Passive samplers were also deployed at sites in four surrounding industrial areas (Daesan, Songsan, Inju, and Dunpo) during four sampling periods, each lasting approximately one month, from September to December 2020. Among the eight VOCs measured in Seosan, toluene showed the highest mean mixing ratio (2.17 ppbv), followed by benzene (0.89 ppbv) and *n*-heptane (0.50 ppbv). The mixing ratios of all eight VOCs differed significantly among sampling months ($p < 0.001$ for all species), although the monthly results were based on selected sampling days and did not represent full-month means. The summed mixing ratio of the eight VOCs was highest in September and lowest in April. The September increase was dominated by toluene, whereas ethylbenzene and xylenes were relatively elevated in summer. *n*-Hexane and benzene were elevated under northwesterly winds, whereas toluene, ethylbenzene, and xylenes were elevated under northeasterly winds, suggesting potential transport from industrial areas along these wind sectors. In contrast, *n*-heptane was elevated under low-wind conditions, consistent with the accumulation of nearby traffic- and fuel-related emissions under limited atmospheric dispersion. Period-averaged VOC concentrations and compositions varied substantially among the industrial sites. At Daesan, *n*-hexane and benzene accounted for relatively large fractions, whereas toluene and C₈ aromatic compounds were more prominent at Inju and Dunpo. Overall, VOC levels in Seosan reflected both local emissions and transport from surrounding industrial areas, with their relative influences varying with meteorological conditions. The limited temporal coverage, however, constrains quantitative source attribution and highlights the need for long-term continuous measurements.

Key words: VOCs, BTEX, *n*-Alkanes, Seosan, Industrial complex

1. 서 론

충청남도는 국내에서 산업단지와 석탄화력발전소

가 가장 밀집한 지역 중 하나로, 산업활동에 따른 대기 오염물질 배출이 지속적으로 보고되고 있다. 2024년 기준 충청남도에는 국가산업단지 6개소, 일반산업단

지 74개소, 도시첨단산업단지 3개소 및 농공단지 94개소를 포함하여 총 177개의 산업단지가 위치하며 (KICOX, 2024), 국내 석탄화력발전소 61개 발전호기 중 31기가 충청지역에 위치한다(Park *et al.*, 2025). 또한 CAPSS에 따르면 충청남도는 전국에서 세 번째로 많은 대기오염물질을 배출하는 지역이며 (NAIR, 2026), 굴뚝자동측정기기 (TMS) 자료에서도 전국 TMS 부착 사업장 총배출량의 약 18.8%를 차지하는 것으로 보고되었다(MCEE, 2026). 이러한 배출 특성은 충남 서북부 지역의 대기질이 도심 영향뿐 아니라 주변 산업지역의 영향을 함께 받을 가능성을 시사하며, 산업단지와 인접한 지역에서 VOCs의 공간적 변동 특성을 이해하는 것이 중요하다.

휘발성유기화합물 (VOCs)은 산업공정, 석유 저장·취급시설, 용제 사용, 교통 및 연소과정 등 다양한 배출원에서 발생하며, 오존 및 2차 유기에어로졸 생성의 주요 전구물질이다(Lee *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2015; Atkinson and Arey, 2003). 특히 산업단지에서는 업종과 생산공정에 따라 VOCs의 조성과 상대적 기여가 크게 달라질 수 있으므로, 농도뿐만 아니라 개별 화합물의 조성과 상대적 분포는 배출 특성을 이해하는 중요한 지표로 활용된다. 국내에서도 여수·광양, 대산, 포항, 시화·반월 및 울산 등 주요 산업단지를 대상으로 VOC 관측이 수행되었으며, 산업단지의 업종과 기상조건에 따라 VOC 조성 및 공간분포가 달라지는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2025, 2019; Chae *et al.*, 2024). 또한 일부 산업단지에서는 인접 주거지역에서도 산업지역과 유사한 VOC 조성이 나타나 산업단지 영향 가능성이 제시되었다. 따라서 산업단지 주변 대기질을 평가할 때에는 평균농도뿐 아니라 VOC 조성 및 기상조건을 함께 고려할 필요가 있다.

서산 북서부에는 원유정제와 석유화학 산업이 밀집한 대산석유화학단지가 위치하며, 북동부에는 송산과 인주를 중심으로 철강, 자동차 및 금속가공 산업이 분포한다(Asan City, 2026; Dangjin City, 2026; KICOX, 2024). KORUS-AQ 항공관측에서는 대산 상공에서 benzene과 1,3-butadiene을 포함한 다양한 VOCs가 높

게 관측되었으며, 석유화학 산업과 관련된 특유의 VOC 조성이 보고되었다(Simpson *et al.*, 2020). 또한 국내 지상관측에서도 산업단지 내부와 인접 지역 간 VOC 조성 및 공간 분포의 차이가 보고되었다(Park *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021a). 특히 국립환경과학원은 2011년 대산석유화학단지 인근 공업지역의 2개 지점과 산업단지에서 약 7 km 떨어진 주거지역에서 계절별로 유해대기오염물질 (HAPs)을 조사하였으며, *n*-hexane이 가장 높은 평균농도를 보였고 benzene을 포함한 주요 VOCs의 농도가 공업지역에서 주거지역보다 높게 나타나 산업단지의 영향을 시사하였다(Baek *et al.*, 2020; NIER, 2012). 최근 서산지역에서도 계절별 VOC 특성과 benzene의 건강 위해성이 보고된 바 있다(Shastri *et al.*, 2025). 그러나 기존 연구는 주로 산업단지와 인접 지역의 공간적 농도 분포 및 계절적 특성을 규명하는 데 초점을 두었으며, 서산 도심 주거지역에서 관측된 VOCs의 시간적 변동 특성을 기상조건 및 대기오염물질 농도와 연계하고, 주변 산업 지역별 VOC 조성 및 함께 해석한 연구는 제한적이었다.

본 연구에서는 충청권 대기환경연구소에서 관측한 서산지역 VOC 자료를 이용하여 농도와 조성의 시간적 변동 특성을 분석하였다. 또한 대산, 송산, 인주 및 둔포 산업지역에서 측정된 패시브 샘플러 자료를 참고자료로 활용하여 산업지역별 VOC 조성 특성을 비교하고, 풍향·풍속에 따른 VOC 분포 및 T/B 비와 함께 해석함으로써 서산 측정지점에서 관측된 VOCs가 주변 산업지역의 영향을 어떻게 반영하는지를 평가하였다. 본 연구는 서산지역 VOC 관측자료의 특성을 체계적으로 제시하고, 산업단지와 인접한 주거지역에서 관측되는 VOCs의 공간적 변동을 이해하기 위한 기초자료를 제공하는 데 목적이 있다.

2. 연구 방법

2.1 VOCs 샘플링

VOC 시료는 충남 서산시 수석동에 위치한 국립환

경과학원 충청권 대기환경연구소 옥상(지상 약 10 m)에서 흡착관을 이용하여 채취하였다. 관측은 2020년 1월 15일부터 11월 7일까지 월별로 1~3회의 관측기간을 선정하여 수행하였으며, 각 관측기간에 1시간 간격으로 시료를 채취하여 총 390개의 흡착관 시료를 확보하였다. 월별 세부 시료 채취 기간과 확보된 시료 수, 월별 농도 차이의 통계적 유의성을 표 1에 제시하였다.

측정지점 주변은 비교적 개활되어 있으나, 반경 5 km 이내에 주거·상업시설과 서산오토밸리·테크노밸리 등 일반산업단지가 위치한다. 동쪽 약 1 km 지점에는 수석농공단지, 북쪽 약 1 km 지점에는 서해안고속도로와 서산 시내를 연결하는 주요 도로가 위치한다. 서산 및 인접 도시에는 대산석유화학단지, 송산·인주 일반산업단지, 석탄화력발전소 등 대형 산업·연소 배출원이 분포하므로, 측정지점의 VOC 농도는 주변 배출과, 기상조건에 따른 인근 산업지역 배출의 영향을 받을 수 있다(그림 1).

서산 측정지점과 주변 산업단지의 VOC 조성 차이를 파악하기 위해 충청남도 보건환경연구원 대기측정

Table 1. Monthly sampling periods and numbers of VOC samples collected using sorbent tubes at the Seosan site.

Month	Sampling dates	Number of samples
January	15~16	23
February	11, 14	14
March	18~19	26
April	28~29	24
May	6~7, 12~13, 20~22	92
June	10	3
July	8~9	24
August	18~19, 24~25	48
September	24~25	26
October	12~13, 18~19, 24~26	99
November	7	11
Total	390 samples from 32 days	

Note: Monthly differences in VOC mixing ratios across the 11 months were evaluated using the Kruskal-Wallis test, with statistical significance defined as $p < 0.05$. Missing values were excluded on a species-by-species basis. All eight VOCs showed significant differences among months ($p < 0.001$ for each species).

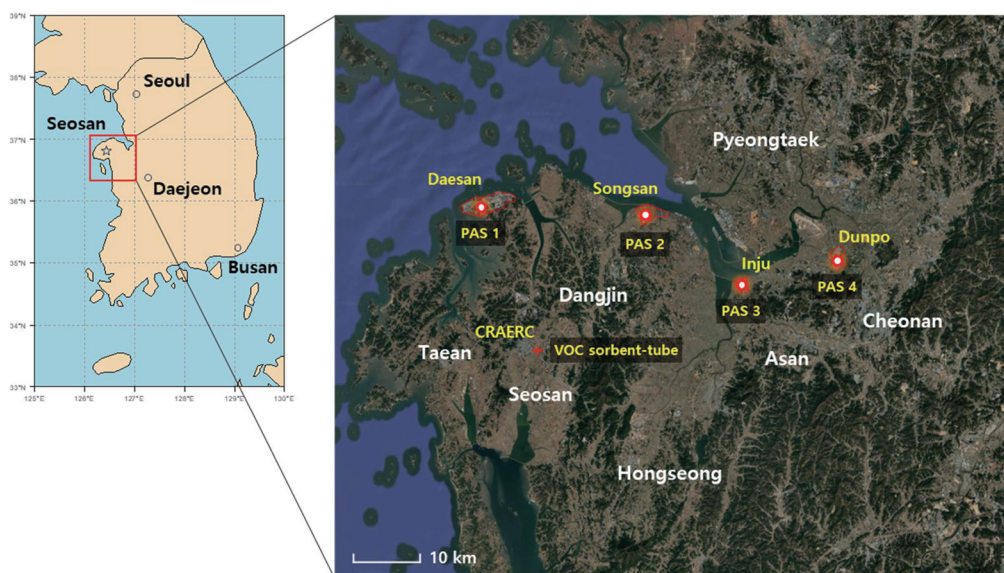


Fig. 1. Location of the VOC sampling sites. Sorbent-tube sampling was conducted at the Chungcheong Region Atmospheric Environment Research Center (CRAERC) in Seosan. Passive air samplers were deployed at four air-quality monitoring stations operated by the Korea Environment Corporation (KECO) in the surrounding industrial sites (circles): PAS 1, Daesan-ri (36.990°N, 126.384°E), PAS 2, Songsan-myeon (36.976°N, 126.716°E), PAS 3, Inju-myeon (36.873°N, 126.879°E), and PAS 4, Dunpo-myeon (36.920°N, 127.061°E).

망의 대산리(충남 서산시 대산을 충의로 1942 대산종합시장), 송산면(충남 당진시 송산면 유곡로 342-27 공공하폐수처리시설), 인주면(충남 아산시 인주면 인주산단로 23-28), 둔포면(충남 아산시 둔포면 중앙공원로 43)에 패시브 샘플러를 설치하였다. 네 지역에서는 2020년 9~12월 동안 월 1회 시료를 채취하였으며, 각 지역에서 총 4개의 패시브 샘플러 시료를 확보하였다. 패시브 샘플러는 약 1개월 동안의 평균농도를 제공하는 적분시료이며, 서산 측정지점의 흡착관 시료는 월별 선정일의 1시간 농도를 제공한다. 이러한 채취기간과 시간해상도의 차이로 인해 두 자료의 절대농도를 직접 비교하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 패시브 샘플러 자료를 산업단지별 주요 VOC 조성과 T/B 비의 상대적 차이를 해석하는 보조 자료로 사용하였다.

기상자료와 기체상 대기오염물질(NO , CO , SO_2 , O_3)은 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소의 1시간 평균자료를 이용하였다. 기체상 대기오염물질은 측정소 개소일인 2020년 7월 1일부터 본 연구의 마지막 VOC 관측일인 11월 7일까지의 자료 중, VOC 관측일과 동일한 날짜 및 시간대의 자료만을 선별하여 사용

하였다. 따라서 1~11월의 VOC 자료와 달리 기체상 대기오염물질 자료는 7월 이후의 VOC 관측일에 한정되며, 두 자료는 농도 수준이나 시간별 동시변동이 아닌 일변화와 풍향·풍속별 분포의 정성적 유사성을 중심으로 비교하였다. 계절별 바람장미 분석에는 VOC 시료 채취일의 1시간 기상자료를 이용하였다. 계절은 1~2월을 겨울, 3~5월을 봄, 6~8월을 여름, 9~11월을 가을로 구분하였다. 각 월의 기상자료가 1~2일에 한정되므로, 계절별 풍향·풍속 분포는 장기적인 계절 특성을 대표하지 않으며 각 계절의 측정일에 관측된 기상조건을 나타낸다.

2.2 분석 방법

흡착관 및 패시브 샘플러를 이용한 VOC 기기분석 조건을 표 2에 제시하였다. 두 채취 방법 모두 $\text{C}_5\text{-C}_{12}$ *n*-alkanes 및 BTEX 표준물질을 이용하여 동일한 성분을 정성·정량 분석 대상으로 설정하였다. 흡착관 시료는 열 탈착-가스크로마토그래피-불꽃이온화검출기(TD-GC-FID)로 분석하였으며, 패시브 샘플러 시료는 용매로 추출한 후 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS)로 분석하였다. *m,p*-Xylene은 두 이성질체

Table 2. Instrumental operating conditions for the analysis of VOCs collected using sorbent tubes and passive samplers.

Analytical parameter	Sorbent tube (TD-GC-FID)	Passive sampler (GC-MS)
Instrument	TD: TurboMatrix 300 (PerkinElmer, USA); GC-FID: 7890A (Agilent Technologies, USA)	6890N GC coupled to a 5975N MSD (Agilent Technologies, USA)
Analytical column	DB-VRX (60 m × 320 μm × 1.8 μm , Agilent Technologies, USA)	HP-1 (60 m × 320 μm × 1.0 μm , Agilent Technologies, USA)
Carrier gas	N_2 (99.999%)	He (99.999%)
Carrier gas condition	Constant pressure, 30 psi (initial flow: 2.88 mL min^{-1})	Constant flow, 1.0 mL min^{-1}
Initial oven temperature	45°C (10 min)	37°C (7 min)
Oven ramp 1	To 170°C at 5°C min^{-1}	To 170°C at 5°C min^{-1} (4 min)
Oven ramp 2	To 200°C at 15°C min^{-1} (10 min)	To 200°C at 5°C min^{-1} (4 min)
Oven ramp 3	–	To 260°C at 10°C min^{-1}
Detector/analyzer	Flame ionization detector	Quadrupole mass selective detector
Detector temperature	300°C	–
Detector gases	H_2 (> 99.99996%; NMH2-500plus hydrogen generator, VICI DBS, Switzerland): 35 mL min^{-1} ; Zero air: 350 mL min^{-1} ; Makeup flow (99.999% N_2): 25 mL min^{-1}	–
Ion source temperature	–	230°C
Quadrupole temperature	–	150°C
Acquisition mode	–	SIM

의 흡산 농도로 산정하였다.

흡착관을 이용한 VOC 시료 채취 및 정성·정량 분석은 EPA TO-17 및 공정시험법에 준하는 방법을 토대로 수행하였다(KMOE, 2020; KMOE and NIER, 2019; US EPA, 1999). 시료 채취에는 Carbotrap B와 Carboxen 1000이 이중으로 충전된 Air Toxic 흡착관(1/4 in.×3 1/2 in., Supelco, USA)을 사용하였다. 시료의 연속 채취를 위해 연속채취기(STS-25, Sequential Tube Sampler, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 100 mL min⁻¹의 유량으로 1시간 동안 시료당 6 L의 대기를 포집하였다. 시료 채취 과정에서 O₃에 의한 VOC 산화를 방지하기 위해 인렛에 potassium iodide (KI) 1.5 g이 충전된 ozone scrubber (Supelco, USA)를 장착하였다. 모든 흡착관은 사용 전에 tube conditioner (ATC 1200, ACEN Co. Ltd, USA)를 이용하여 순도 99.999%의 질소가 300°C에서 60 mL min⁻¹의 유량으로 흐르는 조건에서 1시간 동안 세척하였다.

VOC 정량에는 농도가 각각 1,000 µg mL⁻¹인 C₅-C₁₂ n-alkanes 및 BTEX 액상 표준물질(Supelco, USA)을 혼합하여 사용하였다. 흡착관 분석을 위한 검량용 표준용액은 혼합표준용액을 methanol로 희석하여 10 µL 주입 시 각 성분의 질량이 각각 20, 40, 100, 200 및 400 ng이 되도록 제조하였다. 흡착관을 T자형 표준물질 주입장치에 연결한 후 순도 99.999%의 질소를 100 mL min⁻¹의 유량으로 총 2분간 흘렸으며, 질소가 흐르는 상태에서 각 검량용 표준용액 10 µL을 주입하여 휘발된 표준물질이 흡착관에 포집되도록 하였다. 표준물질이 주입된 흡착관은 실제 시료와 동일한 조건으로 분석하였다.

흡착관 시료는 열 탈착 전처리 장치(TurboMatrix 300TD, Perkin Elmer, USA)가 결합된 가스크로마토그래피-불꽃이온화검출기(Agilent 7890A, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였다. 열 탈착 및 GC 분석에는 순도 99.999%의 질소를 사용하였다. 흡착관은 320°C에서 1차 열 탈착하였으며, 탈착된 VOCs를 -30°C로 유지된 저온 트랩에 농축하였다. 이후 저온 트랩을 4°C s⁻¹의 속도로 320°C까지 가열하여

VOCs를 2차 탈착한 후 GC 컬럼으로 이송하였다. 열 탈착 장치의 밸브와 transfer line 온도는 모두 200°C로 유지하였다. 각 성분은 표준물질과 시료에서 나타난 피크의 머무름시간을 비교하여 확인하였으며, 표준물질 주입 질량과 FID 피크 면적 간의 5단계 검량선을 이용하여 정량하였다.

패시브 샘플러를 활용한 VOC 측정은 샘플러와 대기 간 오염물질 농도 차이에 따라 고농도(대기)에서 저농도(샘플러)로 확산·이동하는 원리를 이용한 것으로, 흡착재로 활성탄(activated charcoal)이 사용되었다(ICS Maugeri, 2019). 노출이 완료된 패시브 샘플러에 dichloromethane 1 mL를 주입하고 소니케이터를 이용하여 30분 동안 추출하였다. 추출액은 가스크로마토그래프(6890N GC, Agilent Technologies, USA)에 질량분석기(5975N MSD, Agilent Technologies, USA)가 결합된 GC-MS로 분석하였다. 정량에는 흡착관 분석과 동일하게 C₅-C₁₂ n-alkanes 및 BTEX 표준물질로 작성한 검량선을 사용하였다. 각 성분은 표준물질과의 머무름시간 및 질량스펙트럼을 비교하여 확인하였으며, 정량 이온의 피크 면적을 이용하여 농도를 산정하였다.

패시브 샘플러로 채취된 각 VOC의 평균농도는 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$C(\mu\text{g m}^{-3}) = \frac{m}{Q_K \times t} \times 10^{-6} \quad (1)$$

여기서 m 은 추출·분석을 통해 산정된 VOC의 질량(µg), Q_K 는 VOC의 sampling rate (mL min⁻¹), t 는 노출 시간(min)이다. Sampling rate는 온도의 영향을 받므로, 노출기간 동안의 평균기온을 이용하여 298 K, 1 atm 조건에서 제시된 각 VOC의 sampling rate를 식 (2)와 같이 보정하였다(ICS Maugeri, 2019).

$$Q_K = Q_{298} \left(\frac{T + 273.15}{298} \right)^{1.5} \quad (2)$$

여기서 T 는 패시브 샘플러 노출기간 동안의 평균기온이며, 노출기간 평균기온 산정에는 각 설치지역과 인접한 기상청 방재기상관측자료를 사용하였다.

노출기간 평균기온으로 보정한 sampling rate을 이용하여 산출된 질량농도는 패시브 샘플러와 흡착관 측정 결과의 단위를 통일하기 위해 이상기체식을 이용하여 ppbv로 변환하였다(식 (3)). 기압은 1 atm으로 가정하였으며, 온도는 sampling rate 보정과 동일하게 각 패시브 샘플러 노출기간의 평균기온을 적용하였다.

$$C_{ppbv} = C_{\mu g m^{-3}} \times \frac{R(T + 273.15)}{M_w P} \times 10^3 \quad (3)$$

여기서 C_{ppbv} 는 VOC의 부피혼합비(ppbv), $C_{\mu g m^{-3}}$ 는 식 (1)에서 산출된 질량농도($\mu g m^{-3}$), R 은 기체상수($8.2057 \times 10^{-5} m^3 atm mol^{-1} K^{-1}$), T 는 패시브 샘플러 노출기간의 평균기온($^{\circ}C$), M_w 는 각 VOC의 분자량($g mol^{-1}$), P 는 기압(atm)이다.

2.3 측정자료의 정도관리

흡착관과 패시브 샘플러를 이용한 VOC 시료 채취 및 TD-GC-FID와 GC-MS 분석의 전반적인 성능을 평가하기 위하여 실험실 바탕시험, 검량선의 직선성, 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL) 및 반복분석 정밀도를 평가하였다. 시료 채취 매체와 분석 과정에서 발생할 수 있는 잔류 오염을 확인하기 위하여 실제 시료와 동일한 전처리 과정을 거쳤으나 대기 시료에 노출되지 않은 흡착관과 패시브 샘플러를 각각 5개씩 준비하여 해당 분석기기로 연속 분석하였다. US EPA TO-17은 실제 시료 채취용 흡착관과 동일한 조건에서 함께 충전·전처리되고 유사한 사용 이력을 가진 흡착관을 실험실 바탕시료로 사용하도록 제시한다. 또한 ISO 16017-1은 흡착관 바탕시험에서 방해 피크의 면적이 분석 대상 물질의 일반적인 피크 면적의 10% 이하인 경우 바탕 수준이 적합한 것으로 제시하고 있다(ISO, 2000; US EPA, 1999). 본 연구의 실험실 바탕시험에서는 모든 정량 대상 VOCs가 MDL 미만으로 나타나, 시료 채취 매체와 분석과정에서 발생할 수 있는 잔류 오염이 정량 결과에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단하였다.

전체 정량 대상 VOCs에 대하여 각 분석 방법에 적합한 5개 농도수준의 표준혼합시료를 이용하여 검량

선을 작성하고 직선성을 평가하였다. 그 결과, TD-GC-FID와 GC-MS 모두 정량대상 VOCs의 결정계수(R^2)가 0.99 이상으로 나타나 양호한 직선성을 보였다.

MDL은 검출한계 부근의 농도 또는 질량에 해당하는 표준시료를 각 분석 방법으로 7회 반복 분석한 결과의 표준편차에 99% 신뢰수준의 Student's t 값을 적용하여 산정하였다. 흡착관-TD-GC-FID의 경우 대기 시료 채취량 6 L를 적용하였으며, 패시브 샘플러-GC-MS의 경우 액상 VOC 표준용액을 DCM으로 희석하여 제조한 저농도 표준시료를 분석하여 추출액 기준 검출한계를 산정한 후 실제 시료 채취 조건을 적용하여 대기 중 혼합비로 환산하였다. 두 분석 방법에서 산정된 물질별 대기농도 환산 MDL은 0.05~0.15 ppbv 범위로 나타났다.

반복분석 정밀도는 benzene 기준 100 ng의 표준혼합시료를 각 분석 방법으로 7회 연속 분석하여 얻은 상대표준편차(Relative Standard Deviation, RSD)를 바탕으로 평가하였다. 두 분석방법 모두 정량대상 VOCs의 RSD가 5% 이내로 나타나 양호한 반복분석 정밀도를 보였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 VOCs 조성 특성

서산 측정지점의 흡착관 시료에서 정량된 VOCs는 benzene, toluene, ethylbenzene, *m,p*-xylene 및 *o*-xylene의 방향족 화합물 5종과 *n*-hexane, *n*-heptane 및 *n*-octane의 *n*-alkane 3종이었다(표 3). 전체 기간 toluene의 평균농도가 2.17 ppbv로 가장 높았으며, benzene(0.89 ppbv), *n*-heptane(0.50 ppbv), ethylbenzene(0.47 ppbv), *o*-xylene(0.47 ppbv), *m,p*-xylene(0.46 ppbv), *n*-hexane(0.18 ppbv) 및 *n*-octane(0.04 ppbv)이 뒤를 이었다. Benzene, toluene 및 *m,p*-xylene의 검출빈도는 90% 이상으로 높은 반면, *n*-alkane 계열은 50% 미만으로 낮았다. 특히 *n*-octane은 대부분의 시료에서 검출한계 미만이었으므로 계절 및 시간대별 농도 차이를 제한적으로 해석하였다. 분석 대상인 C_5 - C_{12} *n*-alka-

Table 3. Statistical summary of 8 VOC species measured in Seosan from January to November 2020 (unit: ppbv).

Species	Arith. mean ¹	Median	S.D. ²	90%ile	Max	Detection freq ³
<i>n</i> -Hexane	0.18	0.04	0.32	0.48	3.19	34.6%
<i>n</i> -Heptane	0.50	0.07	0.84	1.26	7.12	47.1%
<i>n</i> -Octane	0.04	0.03	0.03	0.03	0.27	10.8%
Benzene	0.89	0.56	0.99	1.98	7.37	91.3%
Toluene	2.17	1.22	2.78	4.88	15.26	98.8%
Ethylbenzene	0.47	0.35	0.44	1.06	2.22	75.8%
<i>m,p</i> -Xylene	0.46	0.27	0.49	1.24	2.58	93.3%
<i>o</i> -Xylene	0.47	0.31	0.50	1.20	2.51	66.3%

Values below the method detection limit (MDL) were substituted with one-half of the MDL.

¹Arithmetic mean

²Standard deviation

³Detection frequency (%) = D/N, where D is the number of samples in which the species was detected and N is the total number of samples (n = 390).

Table 4. Comparison of mean BTEX mixing ratios measured in Seosan (January~November 2020) with those reported for other sites (unit: ppbv).

Species	This study	Previous studies				HAPs	PAMS
	Seosan	Daesan ¹	Daesan ²	Daesan ³	Dokgot ⁴	Songsan ⁴	Seoul ⁵
Benzene	0.89	1.13	3.10	2.1	0.63	0.36	0.3
Toluene	2.17	1.20	1.50	1.1	2.02	2.11	2.8
Ethylbenzene	0.47	0.62	–	–	0.62	0.25	0.5
<i>m,p</i> -Xylene	0.46	0.94	1.88	–	0.37	0.29	0.6
<i>o</i> -Xylene	0.47	0.33	–	–	0.12	0.38	0.2

¹Baek *et al.*, 2020

²Kim *et al.*, 2021a

³Park *et al.*, 2022

⁴NIER, 2021

⁵SIHE, 2021

nes 중 *n*-nonane, *n*-decane, *n*-undecane 및 *n*-dodecane은 모든 시료에서 검출되지 않았다.

서산에서 측정된 BTEX 평균농도를 국내 다른 지역의 선행 연구 결과와 비교하였다(표 4). 서산의 benzene 농도는 서울 도심보다 높았으며, toluene 농도는 대산과 송산 등 일부 산업단지 또는 산업단지 주변 지역에서 보고된 값과 유사하였다(Park *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021a; NIER, 2021; SIHE, 2021; Baek *et al.*, 2020). 각각 보고된 농도들은 측정시기, 시료 채취 방법, 시간 해상도 등이 달라 절대농도를 비교할 수 없지만 서산 측정지점이 주거·농경지가 혼재한 도시 외곽지역에 위치한 것을 감안하면 대부분의 VOC 농도는 주변 주거·상업시설, 도로 및 소규모 산업시설의 배출 영향으로 볼 수 있다. 특히 서산에서 나타난 상대적으로

높은 benzene과 toluene 농도는 인근 산업지역으로부터의 수송 가능성을 배제할 수 없다.

월별 관측일을 기준으로 산정한 VOC 평균농도와 상대적 조성은 관측 월에 따라 큰 차이를 보였다(그림 2). 다만 6월은 유효 시료가 3개에 불과하여 월별 농도 비교와 해석에서 제외하였다. 6월을 제외하면 분석된 8종 VOCs의 합계 농도는 9월에 가장 높았으며, 1월에도 상대적으로 높은 수준을 보인 반면 4월에는 가장 낮았다. 9월의 농도 증가는 주로 toluene에 의해 나타났다. VOC 관측시간과 일치하는 기상자료를 살펴보면(KMA, 2024), 9월에는 정온조건이 나타나지 않았고 북동풍이 우세하였다. 따라서 9월의 높은 농도는 대기 정체에 따른 국지적 축적보다는 북동풍 조건에서의 외부 유입과 관련되었을 가능성이 있다. 1

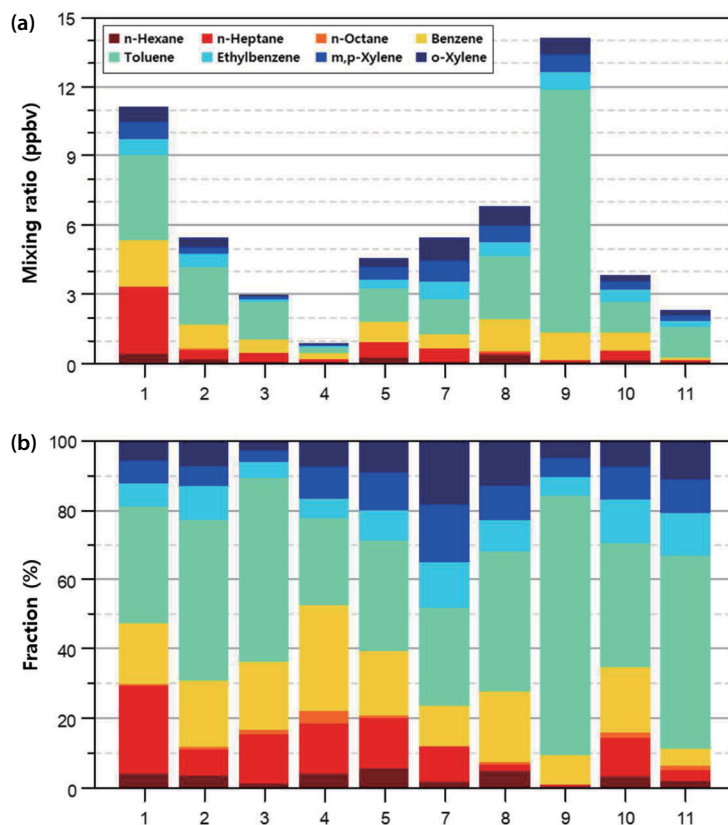


Fig. 2. Mean mixing ratios and relative compositions of eight VOCs measured at the Seosan site on selected sampling days in each month: (a) mean mixing ratios and (b) relative contributions of individual compounds to the sum of the eight VOCs.

월에는 평균풍속이 1.4 m s^{-1} 로 낮고 정온조건의 빈도가 26.1%로 나타났으며, toluene과 benzene뿐만 아니라 n-heptane의 기여도 상대적으로 컸다. 이는 대기 확산이 제한된 조건에서 VOCs가 측정지점 인근에 축적되었을 가능성을 시사한다. 반면 4월에는 평균풍속이 3.2 m s^{-1} 이고 정온조건이 나타나지 않았으며 남풍이 우세하였다. 이에 따라 대기 확산이 상대적으로 원활하고 북서풍 및 북동풍 계열의 외부 유입이 제한되어 VOC 농도가 낮게 나타났을 가능성이 있다. 이러한 풍향별 유입 가능성은 3.4.1절에서 개별 VOC의 풍향·풍속별 농도분포를 바탕으로 추가로 검토하였다.

한편 ethylbenzene, m,p-xylene 및 o-xylene은 7~8월에 비교적 높은 농도를 보였으며, 측정일 기준 여름철 방향족 VOC 증가는 주로 이들 C_8 방향족 화합물에서

관찰되었다. 이들 물질은 도장·코팅 및 제조공정의 용제 사용과 관련되며, 고온조건에서는 유기용제와 석유계 제품의 비산배출이 증가할 수 있다(Abbasi *et al.*, 2020; Amini *et al.*, 2017; Ragotherman and Anderson, 2017). 월별로 나타난 VOC 농도와 상대 조성의 차이는 서산지역 VOCs의 시간적 변동 특성을 보여주며, 개별 VOC의 우세 시기와 조성 변화는 배출 특성과 기상조건이 복합적으로 반영된 결과로 판단된다. 다만 본 연구의 월별 결과는 제한된 관측일의 자료를 바탕으로 산정되었으므로 해당 월 전체의 일반적인 농도 특성을 나타내는 것으로 해석하지 않았다.

3.2 VOC 분포 특성

VOC 시료 채취일의 기상자료에서는 북서풍이 전

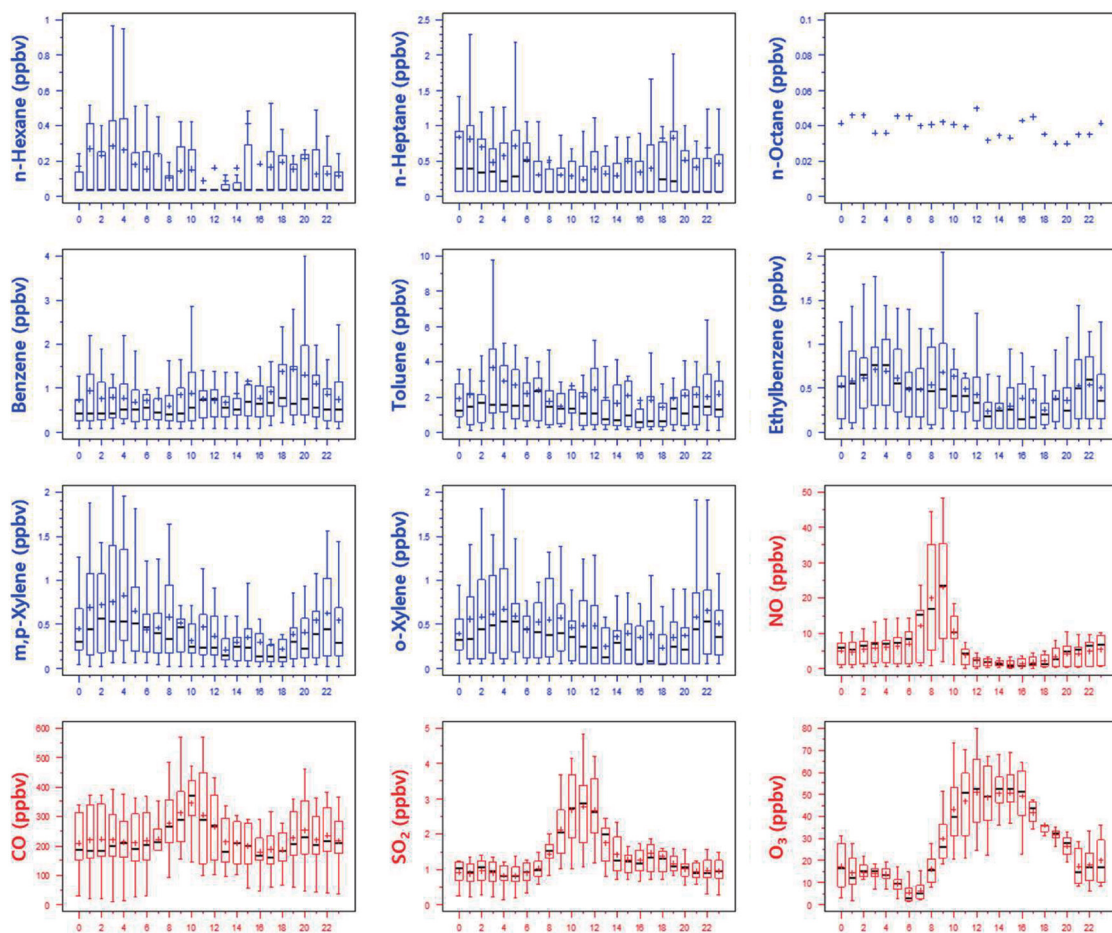


Fig. 3. Diurnal variations in the mixing ratios of eight VOCs and selected reactive gases (NO, CO, SO₂, and O₃) in Seosan. Box plots for the VOCs and reactive gases are shown in blue and red, respectively. Boxes represent the interquartile range, horizontal lines indicate the median, plus signs indicate the arithmetic mean, and whiskers extend to the most extreme values within 1.5 times the interquartile range.

반적으로 우세하였다(KMA, 2024). 시료 채취일을 계절별로 구분하면, 봄에는 남서풍의 빈도가 상대적으로 증가하였고, 여름에는 북서풍, 북풍 및 북동풍이 빈번하게 관측되었으며, 가을과 겨울에는 북서풍과 북동풍이 우세하였다. 특히 가을에는 정온조건(풍속 0.5 m s⁻¹ 이하)의 빈도가 38.2%로 네 계절 중 가장 높았다. 시간대별로는 00~09시에 북동풍과 남풍 계열의 바람이 상대적으로 빈번하였으나, 09시 이후에는 북서풍의 빈도와 풍속이 증가하였다. 18시 이후에는 풍속이 감소하면서 북동풍의 빈도가 다시 증가하였다. 이러한

시간대별 풍계 변화는 VOC 및 주요 기체상 대기오염 물질의 일변화를 해석할 때 함께 고려하였다.

VOCs의 일변화는 물질별로 서로 다른 양상을 보였다(그림 3). *n*-Hexane은 오전까지 비교적 낮은 농도를 유지한 후 오후에 증가하여 15시경 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. Benzene과 *n*-heptane 역시 오전보다 늦은 오후에 농도가 증가하는 경향을 보였으며, *n*-heptane은 시간대별 농도의 변동폭이 크게 나타났다. 이러한 C₆-C₇ *n*-alkanes와 benzene의 오후 증가는 낮 시간 동안의 대기경계층 발달에 따른 희석만으로

는 설명하기 어려우며, 오후의 풍향 및 풍속 변화에 따라 측정지점에 영향을 미치는 배출원의 기여가 달라졌을 가능성을 시사한다. 특히 늦은 오후에는 풍속이 감소하기 시작하므로, 배출원의 영향과 대기 희석의 약화가 함께 농도 증가에 기여했을 가능성이 있다. 다만 시간대별 농도 분포만으로 구체적인 배출원이나 유입 방향을 특정하기에는 한계가 있다. 반면 *n*-octane은 모든 시간대에서 검출한계 부근의 농도를 유지하여 뚜렷한 일변화를 확인하기 어려웠다.

Toluene, ethylbenzene, *m,p*-xylene 및 *o*-xylene은 C_6 - C_7 *n*-alkanes와 다른 일변화 특성을 보였다. Toluene의 시간대별 변화는 상대적으로 작았으나 새벽과 야간에 농도가 다소 높았다. Ethylbenzene, *m,p*-xylene 및 *o*-xylene도 새벽과 이른 오전에 높은 농도를 보인 후 낮 동안 감소하고 18시 이후 다시 증가하였다. 이러한 방향족 VOCs의 낮 시간대 농도 감소에는 대기정계층 발달에 따른 희석과 OH 라디칼과의 반응에 의한 광화학적 제거가 영향을 미쳤을 가능성이 있다(Ma *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2017; Atkinson and Arey, 2003). 특히 ethylbenzene과 xylenes는 benzene보다 OH 반응성이 높아 낮 시간의 광화학적 제거 효과가 상대적으로 크게 나타날 수 있다. 반대로 새벽과 야간의 높은 농도는 광화학적 제거가 약화되고 대기정계층이 낮아지면서 측정지점 주변 및 인근 지역에서 배출된 오염물질이 축적된 결과로 해석할 수 있다. 시간대에 따른 풍계 변화도 이러한 농도 변화에 함께 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

주요 기체상 대기오염물질의 일변화는 측정소가 개소한 2020년 7월 이후 자료 중 VOC 관측과 날짜 및 시간이 일치하는 자료를 이용하여 산정하였다. NO와 CO는 출근 시간대인 09~10시에 최고 농도에 도달하여 출근 시간대 교통 배출의 영향을 시사하였다(Wang *et al.*, 2026; Cazorla *et al.*, 2025; Han *et al.*, 2023). 그러나 방향족 VOCs는 같은 시간대에 뚜렷한 증가를 보이지 않았다. 이는 서산에서 관측된 VOC 농도가 교통 배출뿐만 아니라 지역 배출원의 영향, 기상조건 및 광화학반응이 복합적으로 작용한 결과임을

보여준다. SO_2 는 북서풍의 빈도와 풍속이 증가하는 09시경부터 상승하여 11시에 최고 농도를 보였으며, 이는 풍계 변화에 따라 산업 및 연소 배출의 영향이 증가했을 가능성을 시사한다. O_3 는 광화학 생성이 활발해지는 10시부터 증가하여 14~15시에 최고 농도에 도달한 후 감소하였다(Kim *et al.*, 2023; Monks *et al.*, 2015).

종합하면, 서산에서 관측된 VOCs의 일변화는 물질별 배출 특성뿐만 아니라 시간대별 풍계와 대기 혼합, 광화학적 제거가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 따라서 일변화 분포만으로 개별 배출원의 영향을 특정하기는 어려우며, 풍향 및 풍속에 따른 농도 분포를 함께 고려할 필요가 있다.

3.3 산업단지 주변 VOC 특성

서산 인근 지역 산업단지 주변에서 패시브 샘플러를 이용하여 측정된 VOC 농도의 상대적 분포를 그림 4에 나타냈다. 측정기간과 시간해상도의 차이를 고려하여, 서산에서 흡착관을 이용한 분석 결과와 산업단지별 VOC 농도는 절대적인 농도 비교보다 상대적인 조성 특성을 파악하는 데 활용하였으며 네 지역 모두 *n*-heptane과 *n*-octane은 검출한계 미만으로 제외하였다. 국내 대기환경기준이 설정된 benzene의 측정기간 평균농도는 모든 지역에서 연평균 기준인 $5 \mu g m^{-3}$ (약 1.5 ppbv)에 해당하는 농도보다 낮았다. 다만 패시브 샘플러 시료의 측정기간이 연간을 포괄하지 않으므로, 본 결과만으로 연평균 환경기준의 달성 여부를 판단할 수 없다.

대산에서는 *n*-hexane과 benzene이 각각 4.85 ppbv (77.0%)와 0.97 ppbv (15.4%)로 전체 VOCs의 약 92%를 차지하여 다른 지역과 뚜렷이 구별되는 조성을 보였다. 반면 toluene과 ethylbenzene 및 xylene류의 기여는 모두 4% 미만으로 낮았다. 이러한 결과는 대산이 다른 산업지역과 비교하여 석유계 VOC 중심의 조성을 나타냄을 보여준다. 송산에서는 *m,p*-xylene이 0.33 ppbv로 가장 높았으나 대부분의 VOC 농도는 0.10 ppbv 내외로 나타나 네 지역 가운데 가장 낮은 수준을

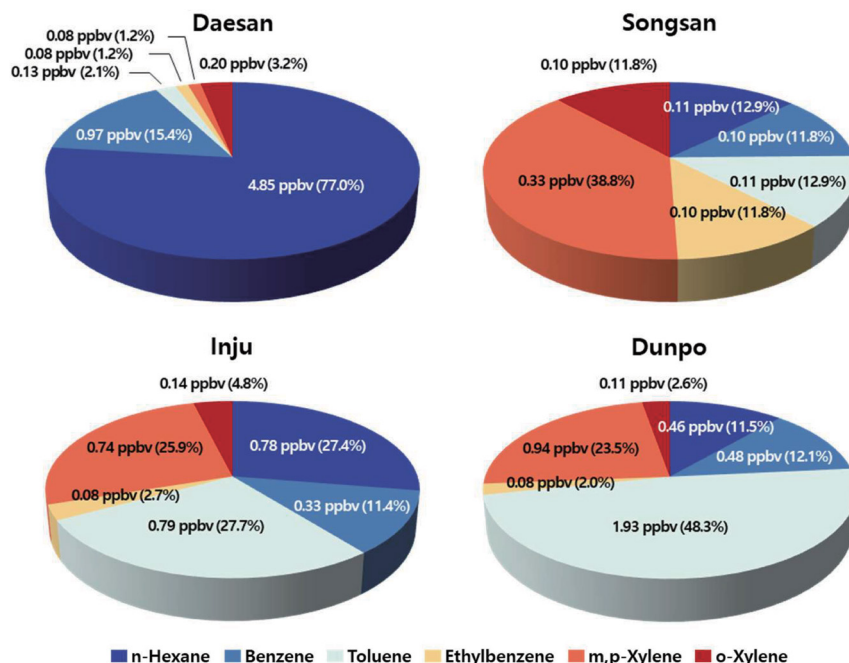


Fig. 4. Relative compositions of six selected VOCs measured using passive samplers at the Daesan, Songsan, Inju, and Dunpo industrial complexes from September to December 2020. Values represent the mean of four monthly passive sampler measurements at each site. Values within the pie charts indicate mean mixing ratios (ppbv) and relative contributions (%).

보였다. 또한 특정 VOC가 지배적인 조성보다는 여러 방향족 VOCs가 비교적 유사한 비율로 분포하는 특성을 나타냈다. 인주와 둔포에서는 모두 toluene이 각각 0.79 ppbv와 1.93 ppbv로 가장 높은 농도를 보였으며, toluene과 xylene류가 전체 VOCs의 절반 이상을 차지하여 방향족 VOCs의 상대적 기여가 크게 나타났다. 세부 조성은 다소 달랐는데 둔포면에서는 toluene이 전체의 약 48%를 차지하여 가장 우세한 반면, 인주는 *n*-hexane, benzene, toluene 및 *m,p*-xylene이 비교적 고르게 분포하였다.

이러한 산업단지별 VOC 조성 차이와 서산에서 관측된 풍향별 VOC 분포를 함께 고려하여 주변 산업지역의 영향 가능성을 해석하였다.

3. 4 서산지역 VOCs 배출 영향 추정

3. 4. 1 풍향·풍속에 따른 배출 영향 추정

VOC 및 대기오염물질 농도의 풍향·풍속 의존성은

고농도 공기가 유입되는 방향과 대기 확산조건을 파악하고, 주변 지역으로부터의 수송과 측정지점 인근 배출의 축적 가능성을 해석하는 데 유용한 진단정보를 제공한다(Carslaw and Ropkins, 2012; Carslaw *et al.*, 2006). 이를 살펴보기 위해 풍향·풍속 조건에 따른 평균농도 분포를 나타내었다(그림 5).

서산에서 관측된 VOCs는 풍향·풍속에 따라 종별로 뚜렷한 농도 분포 차이를 보였다. *n*-Hexane과 benzene은 북서풍과 비교적 높은 풍속에서 증가한 반면, toluene, ethylbenzene 및 xylenes는 북동풍에서 증가하였다. 이와 달리 *n*-heptane은 특정 풍향보다 낮은 풍속에서 높았으며, 7월 이후 VOCs와 동시 관측된 NO에서도 유사한 분포가 나타났다. 이러한 차이는 서산의 VOC 농도가 주변 지역으로부터의 수송과 측정지점 인근 배출의 축적에 복합적으로 영향을 받았음을 시사한다.

북서풍 조건에서 증가한 *n*-hexane과 benzene은 대

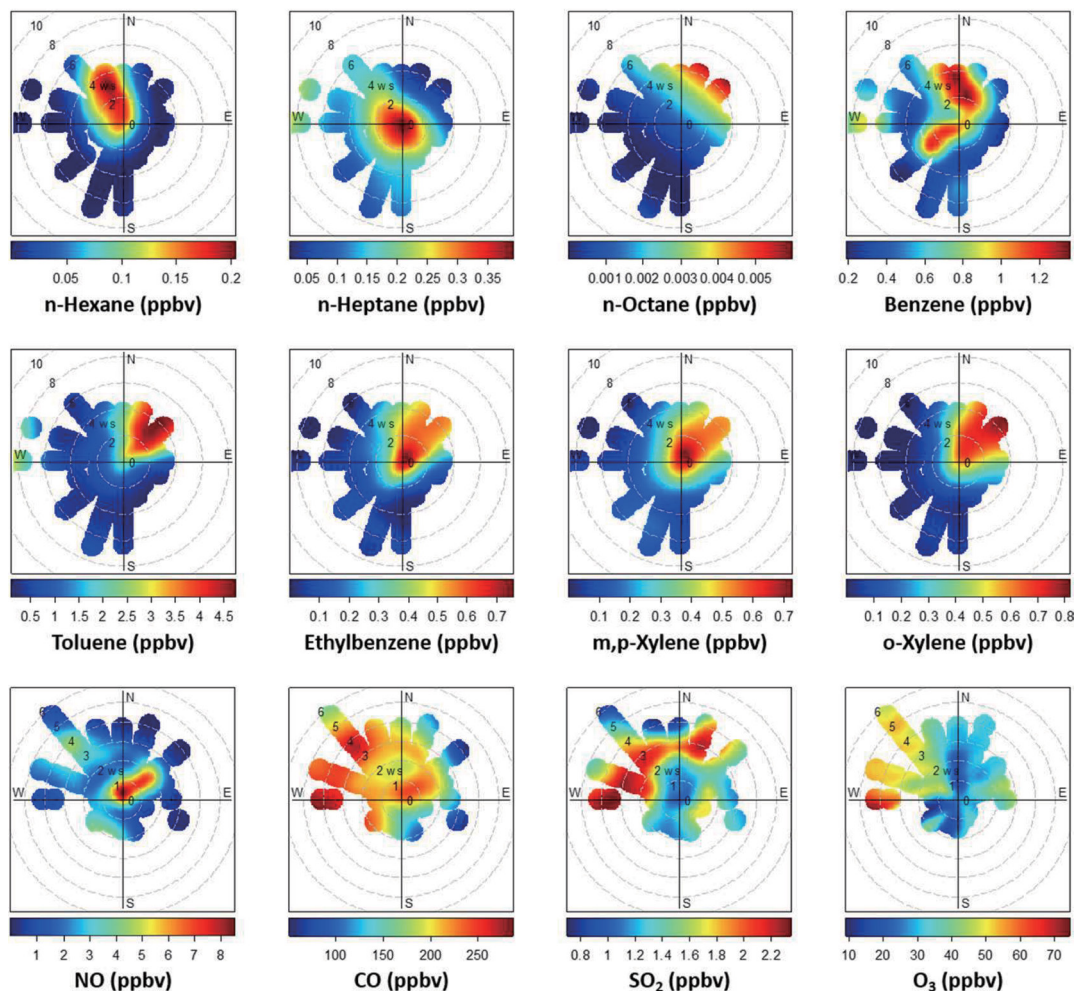


Fig. 5. Bivariate polar plots of eight VOCs and selected reactive gases (NO, CO, SO₂, and O₃) in Seosan, generated using polarPlot in openair (R v4.5.2). Angle, distance from the center, and color indicate wind direction, wind speed, and mean mixing ratio, respectively. Color scales vary among species.

산을 포함한 북서쪽 산업지역으로부터의 수송 가능성을 시사한다. *n*-Hexane은 북풍과 북서풍이 불고 풍속이 2 m s^{-1} 이상일 때 증가하였으며, benzene도 북서풍·고풍속 조건에서 증가하였다. CO와 SO₂ 역시 북서풍 조건에서 상대적으로 높았다. 다만 자료가 포괄하는 기간이 다르므로, 이러한 풍향별 분포만으로 공통 배출원의 영향을 파악하기는 어렵다. 패시브 샘플러 결과에서는 대산리의 *n*-hexane과 benzene이 분석 대상 6종 VOCs의 총농도 중 90% 이상을 차지하여 두

물질이 우세한 조성 특성을 보였다. 이러한 결과를 종합하면, 서산에서 관측된 *n*-hexane과 benzene의 증가는 대산을 포함한 북서쪽 산업지역으로부터의 수송과 관련되었을 가능성이 있다. 다만 benzene은 석유화학 공정뿐 아니라 차량 배출과 화석연료 연소에서도 발생할 수 있고(Oliveira *et al.*, 2024; Han *et al.*, 2023; Ho *et al.*, 2009), 서풍·고풍속 조건에서도 증가하였으므로 북수의 배출원 또는 수송 경로가 함께 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

n-Heptane과 NO는 낮은 풍속에서 증가하여 측정 지점 주변 배출의 축적 가능성을 시사한다. *n*-Heptane은 특정 풍향과 뚜렷한 연관성을 보이지 않았으나 풍속 2 m s^{-1} 미만에서 증가하였다. *n*-Heptane은 터널 관측에서 차량 배출 및 연료 증발과 관련된 성분으로 확인되었으며(Huang *et al.*, 2025; Ho *et al.*, 2009; Hwa *et al.*, 2002), 도시 대기 관측에서도 차량 배출과 연료 증발의 영향을 받는 성분으로 보고되었다(Han *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2023). 오전시간 풍속이 낮을 때 NO의 증가를 고려한다면 이러한 분포는 대기 확산이 제한된 조건에서 측정지점 인근의 교통·연료 관련 배출과 국지적 연소 배출이 함께 축적되었을 가능성을 시사한다.

북동풍에서 높게 나타난 방향족 VOCs의 증가는 인주면과 둔포면을 포함한 북동쪽 산업·물류지역의 영향을 반영하는 것으로 해석하였다. Ethylbenzene과 *m,p*-xylene은 NO와 유사하게 측정지역 인근 저풍속일 때 가장 높았으나 북동쪽을 따라 toluene 및 *o*-xylene과 같이 2 m s^{-1} 이상의 풍속에서도 증가하였다. 위에서 언급한 바와 같이 인주와 둔포는 자동차·금속가공업체와 플라스틱·고무 제조업체가 입지한 지역으로 대산보다 toluene과 C_8 방향족 VOCs의 기여율이 높았다(Asan City, 2026). 따라서 서산에서 관측된 북동풍 계열의 방향족 VOC 증가는 풍향 경로상 존재하는 복수의 배출원을 고려하더라도 인주와 둔포에서 확인된 방향족 VOC 중심 구성과 연관되어 북동쪽 산업지역으로부터의 수송 가능성을 뒷받침한다.

O_3 도 북서풍과 고풍속 조건에서 증가하였으며, CO 및 SO_2 와 유사한 분포를 보였다. 이는 대기오염물질과 O_3 전구물질이 풍부한 공기의 지역적 유입, 수송 과정에서의 광화학 생성 및 유입 공기 자체의 배경농도가 복합적으로 반영된 결과로 해석된다(Kim *et al.*, 2021b; Monks *et al.*, 2015; Pochanart *et al.*, 2015).

3. 4. 2 Toluene/benzene 비

Toluene/benzene (T/B) 비는 두 물질의 상대적 우세와 배출원 조성의 차이를 파악하는 데 사용되는 지표

이다. 일반적으로 높은 T/B 비는 toluene이 상대적으로 풍부한 용제 사용 등의 영향을, 낮은 T/B 비는 benzene이 상대적으로 풍부한 배출 특성 또는 광화학적 으로 노화된 공기의 영향을 시사한다(Cui *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2010; Gelencsér *et al.*, 1997).

산업 유형에 따른 지역별 T/B 비를 비교하기 위해, 본 연구에서 조사한 대산, 송산, 인주 및 둔포와 서산 도심 주거지역의 결과를 선행 연구자료와 함께 제시하였다(그림 6a). 대산은 정유·석유화학, 송산은 철강·금속가공, 인주와 둔포는 자동차·금속가공 및 플라스틱·고무 제조업이 분포한 지역이다. 선행 연구의 비교자료로는 정유·석유화학 산업단지인 여수·광양과 대산, 철강산업 중심의 포항, 다양한 제조업체가 밀집한 시화·반월(Chae *et al.*, 2024), 서울 도심지역(Kang *et al.*, 2026), 그리고 석유화학·자동차·조선업 등이 공존하는 울산의 도심 및 산업지역(Kim *et al.*, 2025)을 포함하였다. 선행 연구마다 측정기간, 측정지점 구성 및 T/B 산정 방식이 서로 다르므로, 이 비교는 산업 유형별 절대적인 T/B 기준을 제시하기보다 지역별 toluene과 benzene의 상대적 조성 차이를 파악하기 위한 참고자료로 활용하였다.

본 연구에서 대산, 송산, 인주 및 둔포의 T/B 비는 각각 0.14, 1.10, 2.42 및 4.00이었다. 또한, 4개 채취시기별 농도로부터 산정한 T/B 비는 네 산업지역 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다(exact Friedman permutation test, $p=0.034$). 대산은 비교 대상 지역 중 가장 낮은 T/B를 보였으며, 이는 앞서 확인된 대산의 benzene의 상대적 우세와 일치한다. 또한 이 값은 선행 연구의 대산과 여수·광양에서 보고된 각각 0.7~1.8과 1.1~1.7보다 낮아, 대산에서 toluene에 비해 benzene의 상대적 기여가 매우 컸음을 보여준다. 철강·금속가공업체가 입지한 송산의 T/B 비는 포항 철강산업지역의 지점별 범위인 1.5~7.3보다 낮았으며, 다른 제조업 중심 산업단지와 비교해도 낮은 수준이었다. 반면 인주와 둔포의 T/B 비는 대산 및 송산보다 높아, benzene에 비해 toluene이 상대적으로 우세한 조성을 나타냈다. 그러나 인주와 둔포의 T/B 비는 제조업 중

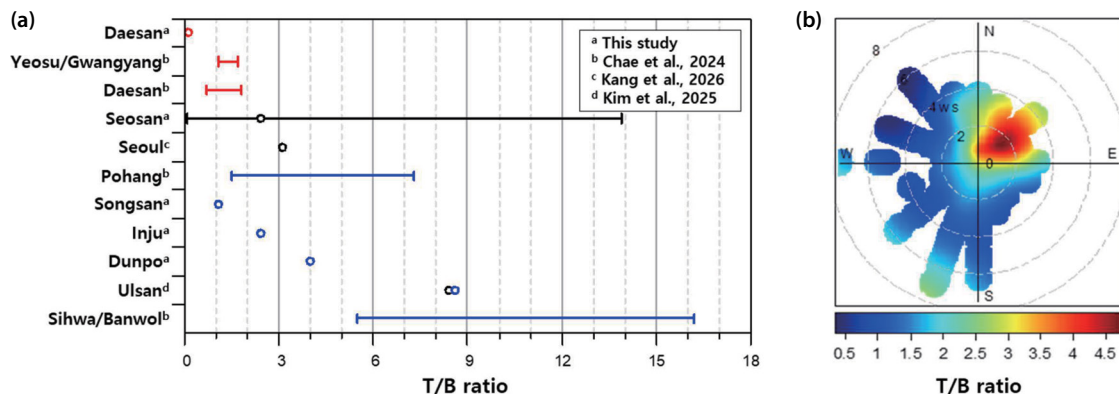


Fig. 6. Diagnostic toluene-to-benzene (T/B) ratios: (a) comparison of values from this study with those reported in previous studies and (b) bivariate polar plot for Seosan. In (a), red, black, and blue represent petrochemical, residential, and general industrial areas, respectively; circles and error bars indicate mean values and reported minimum~maximum ranges, respectively. T/B differed significantly among the four passive-sampler sites (exact Friedman permutation test, $p = 0.034$). In (b), angle, radius, and color indicate wind direction, wind speed, and mean T/B, respectively.

심의 시화·반월에서 보고된 지점별 범위인 5.5~16.2 보다 낮았으며, 울산의 도심 및 산업단지에서 보고된 8.4와 8.6보다도 낮았다. 한편 서산 측정지점의 평균 T/B 비는 2.75로, 서울 도심지역의 5~6월 평균인 3.10과 유사한 수준이었다. 이러한 차이는 T/B 비가 산업단지의 업종만으로 결정되는 것이 아니라 세부 생산 공정, 용제 사용, 연소 배출과의 혼합 및 대기 중 반응·수송의 영향을 함께 받는다는 점을 보여준다.

서산의 풍향별 T/B 분포는 북동풍 조건에서 toluene의 상대적 영향이 커지는 특성을 뒷받침하였다(그림 6b). 높은 T/B 비는 북동풍과 풍속 2 m s^{-1} 이상의 조건에 집중되었으며, 이는 해당 조건에서 toluene이 benzene보다 상대적으로 크게 증가했음을 의미한다. 이러한 분포는 T/B 비가 매우 낮은 대산의 조성과의 뚜렷이 구별되었으며, 대산보다 T/B 비가 높고 방향족 VOCs가 우세한 인주 및 둔포의 조성적 특징에 가까웠다. 특히 둔포의 높은 T/B 비(4.00)는 서산에서 북동풍 조건에 나타난 T/B 비의 증가가 북동쪽 산업지역의 상대적으로 toluene-rich한 조성과의 관련되었을 가능성을 시사한다. 따라서 서산의 평균 T/B 비에는 측정지점 주변의 국지 배출과 북동쪽 산업·물류지역으로부터의 수송이 함께 반영되었을 가능성이 있다.

다만 T/B 비는 배출원의 초기 조성뿐 아니라 toluene과 benzene의 서로 다른 대기 반응속도와 수송시간에도 영향을 받으므로, 이를 이용하여 개별 배출원의 기여도를 정량적으로 구분하지 않았다(Fukusaki *et al.*, 2021; Anthwal *et al.*, 2010; Gelencsér *et al.*, 1997).

4. 결 론

본 연구에서는 충청권 대기환경연구소에서 2020년 1~11월 중 월별 선정일에 관측한 VOC 자료를 이용하여 서산지역 VOC의 농도 및 조성 특성을 분석하고, 주변 산업단지에서 측정된 패시브 샘플러 자료와 함께 해석하였다. 서산에서는 toluene이 가장 높은 평균농도를 보였으며, VOC의 농도와 조성은 측정시기와 물질에 따라 큰 차이를 나타냈다. 특히 풍향과 풍속에 따라 VOC 종별 분포가 뚜렷하게 달라져 서산 측정지점이 다양한 배출원의 영향을 함께 반영하고 있음을 확인하였다.

풍향·풍속 분석에서는 *n*-hexane과 benzene이 북서풍과 비교적 고풍속에서 증가한 반면, toluene과 C_8 방향족 VOCs는 북동풍 조건에서 상대적으로 증가하

였다. 또한 *n*-heptane과 NO는 저풍속 조건에서 증가하여 측정지점 주변의 국지적 배출 축적 가능성을 보여주었다. 패시브 샘플러 자료에서는 대산이 *n*-hexane과 benzene 중심의 조성을, 인주와 둔포는 toluene과 xylenes 중심의 조성을 나타내어 산업단지별로 서로 다른 VOC 특성이 확인되었다. 이러한 조성 차이는 서산에서 관측된 풍향별 VOC 분포와 정성적으로 일치하여, 서산 측정지점이 주변 산업지역의 VOC 특성을 일부 반영하고 있음을 시사하였다. 다만 본 연구에서는 산업단지의 기여율을 정량적으로 산정하기보다 관측자료를 기반으로 주변 산업지역 영향의 가능성을 해석하는 데 초점을 두었다.

아울러 본 연구의 흡착관 측정은 월별 선정일에 수행되었으므로 월 전체의 농도 및 조성 변동을 대표하거나 단기적·간헐적 배출 현상을 충분히 포착하는 데 한계가 있다. 향후 장기 연속관측 자료가 축적된다면 산업지역과 국지 배출원의 상대적 영향뿐만 아니라 계절별 변동과 일시적인 고농도 발생 특성을 보다 구체적으로 평가할 수 있을 것이다.

서산 측정지점은 대규모 산업단지 내부가 아닌 주거지와 농경지가 혼재한 도시 외곽지역에 위치하지만, 풍향에 따라 주변 산업지역과 국지 배출원의 영향이 함께 반영되는 특성을 보였다. 따라서 평균농도만으로 배출 특성을 해석하기보다 풍향과 VOC 조성을 함께 고려하는 접근이 주변 산업지역의 영향 가능성을 파악하는 데 유용함을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 서산지역 VOC 장기 관측자료의 해석과 산업단지 인접지역의 대기질 평가 및 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 “사업장 미세먼지 생성 원인규명 고도화(2019M1A2A2103953)” 및 한국환경산업기술원 “현장조사 및 스모그캠버를 활용한 오존생성 역학관계 분석기술 개발(RS-2026-25501457)” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Abbasi, F., Pasalari, H., Delgado-Saborit, J.M., Rafiee, A., Abbasi, A., Hoseini, M. (2020) Characterization and risk assessment of BTEX in ambient air of a Middle Eastern City, *Process Safety and Environmental Protection*, 139, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.019>
- Amini, H., Hosseini, V., Schindler, C., Hassankhany, H., Yunesian, M., Henderson, S.B., Künzli, N. (2017) Spatiotemporal description of BTEX volatile organic compounds in a Middle Eastern megacity: Tehran Study of Exposure Prediction for Environmental Health Research (Tehran SEPEHR), *Environmental Pollution*, 226, 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.027>
- Anthwal, A., Park, C.G., Jung, K., Kim, M.Y., Kim, K.H. (2010) The temporal and spatial distribution of volatile organic compounds (VOCs) in the urban residential atmosphere of Seoul, Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 4(1), 42-54. <https://doi.org/10.1007/BF03654898>
- Asan City (2026) Overview of the Inju General Industrial Complex. <https://www.asan.go.kr/main/cms/?no=181> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Atkinson, R., Arey, J. (2003) Atmospheric degradation of volatile organic compounds, *Chemical Reviews*, 103(12), 4605-4638. <https://doi.org/10.1021/cr0206420>
- Baek, S.O., Seo, Y.K., Kim, J.H. (2020) Occurrence and Distributions of Volatile Organic Compounds in the Ambient Air of Large Petro-chemical Industrial Complexes: Focusing on Daesan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 32-47, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.032>
- Carslaw, D.C., Beevers, S.D., Ropkins, K., Bell, M.C. (2006) Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, 40(28), 5424-5434. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.062>
- Carslaw, D.C., Ropkins, K. (2012) openair - An R package for air quality data analysis, *Environmental Modelling & Software*, 27-28, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Cazorla, M., Trujillo, M., Seguel, R., Gallardo, L. (2025) Comparative ozone production sensitivity to NO_x and VOCs in Quito, Ecuador, and Santiago, Chile, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 7087-7109. <https://doi.org/10.5194/acp-25-7087-2025>
- 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), 27-47, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.27>
- Cui, L., Wu, D., Wang, S., Xu, Q., Hu, R., Hao, J. (2022) Measurement report: Ambient volatile organic compound (VOC) pollution in urban Beijing: characteristics, sources, and implications for pollution control, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 11931-11944. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11931-2022>
- Dangjin City (2026) Overview of the Songsan 2 General Industrial Complex. https://www.dangjin.go.kr/kor/sub05_01_02_05.do (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Fukusaki, Y., Kousa, Y., Umehara, M., Ishida, M., Sato, R., Otagiri, K., Hoshi, J., Nudejima, C., Takahashi, K., Nakai, S. (2021) Source region identification and source apportionment of volatile organic compounds in the Tokyo Bay coastal area, Japan, *Atmospheric Environment: X*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100103>
- Gelencsér, A., Siszler, K., Hlavay, J. (1997) Toluene-benzene concentration ratio as a tool for characterizing the distance from vehicular emission sources, *Environmental Science and Technology*, 31(10), 2869-2872. <https://doi.org/10.1021/es970004c>
- Han, Y., Wang, T., Li, R., Fu, H., Duan, Y., Gao, S., Zhang, L., Chen, J. (2023) Measurement report: Volatile organic compound characteristics of the different land-use types in Shanghai: Spatiotemporal variation, source apportionment and impact on secondary formations of ozone and aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 2877-2900. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2877-2023>
- Ho, K.F., Lee, S.C., Ho, W.K., Blake, D.R., Cheng, Y., Li, Y.S., Ho, S.S.H., Fung, K., Louie, P.K.K., Park, D. (2009) Vehicular emission of volatile organic compounds (VOCs) from a tunnel study in Hong Kong, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 7491-7504. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7491-2009>
- Huang, W., Wang, S., Cheng, P., Chen, B., Yuan, B., Yu, P., Wang, H., Ma, N., Li, M., Lu, K. (2025) Measurement report: Unexpected high volatile organic compounds emission from vehicles on the Tibetan Plateau, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 15403-15414. <https://doi.org/10.5194/acp-25-15403-2025>
- Hwa, M.-Y., Hsieh, C.-C., Wu, T.-C., Chang, L.-F.W. (2002) Real-world vehicle emissions and VOCs profile in the Taipei tunnel located at Taiwan Taipei area., *Atmospheric Environment*, 36(12), 1993-2002. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00148-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00148-6)
- Instituti Clinici Scientifici Maugeri S.p.A. (ICS Maugeri) (2019) Radiello User Manual. <https://discover.restek.com/instruction-sheet/radiello-instruction-manual/radiello-user-manual> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- International Organization for Standardization (ISO) (2000) Indoor, ambient and workplace air - Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography - Part 1: Pumped sampling (ISO Standard No. 16017-1:2000). <https://www.iso.org/standard/29194.html> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Jiang, Z., Grosselin, B., Daële, V., Mellouki, A., Mu, Y. (2017) Seasonal and diurnal variations of BTEX compounds in the semi-urban environment of Orleans, France. *Science of The Total Environment*, 574, 1659-1664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.214>
- Kang, S., Lee, M., Lee, K., Lim, C., Shin, S.-A., Kim, J.-A. (2026) Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in Seoul Metropolitan during 2022 SIJAQ campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 42(1), 104-122, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2026.42.1.104>
- Kim, C.H., Kim, J., Noh, S., Lee, S., Yoon, S.H., Lee, S.S., Park, J.-S., Kim, J.B. (2021a) A Study on Temporal-Spatial Characteristics of Volatile Organic Compounds Distributed near Petrochemical Industrial Complex using PTR-ToF-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 812-828, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.812>
- Kim, H.C., Lee, D., Ngan, F., Kim, B.U., Kim, S., Bae, C., Yoon, J.H. (2021b) Synoptic weather and surface ozone concentration in South Korea, *Atmospheric Environment*, 244, 117985. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117985>
- Kim, S.J., Kwon, H.O., Lee, M.I., Seo, Y., Choi, S.D. (2019) Spatial and temporal variations of volatile organic compounds using passive air samplers in the multi-industrial city of Ulsan, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6), 5831-5841. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4032-5>
- Kim, S.J., Lee, S.J., Hong, Y., Choi, S.D. (2025) Investigation of priority anthropogenic VOCs in the large industrial city of Ulsan, South Korea, focusing on their levels, risks, and secondary formation potential, *Atmospheric Environment*, 343, 120982. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120982>

- Kim, S.-W., Kim, K.-M., Jeong, Y., Seo, S., Park, Y., Kim, J. (2023) Changes in surface ozone in South Korea on diurnal to decadal timescales for the period of 2001-2021, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 12867-12886. <https://doi.org/10.5194/acp-23-12867-2023>
- Korea Industrial Complex Corporation (KICOX) (2024) Statistics on the Status of Industrial Complexes Nationwide, First Quarter of 2024. <https://www.kicox.or.kr/board/List/1020?searchCategory=17> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) Open MET Data Portal - 2024 Automated Synoptic Observing System (ASOS) Data for Seosan. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2020) Methods for Determination of Hazardous and Volatile Organic Compounds in Ambient air - Adsorbent Trap Methods. Official Test Standards of Atmospheric Pollution, ES 01804.2. <https://www.law.go.kr/LSW//admRulLsInfoP.do?chrClsCd=010201&admRulSeq=2100000192565> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Korea Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research (KMOE, NIER) (2019) Installation and Operation Guidelines for Air Pollution Monitoring Networks. <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5671447> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Lee, Y., Won, S.R., Shin, H.J., Kim, D.G., Lee, J.Y. (2023) Seasonal characteristics of volatile organic compounds in Seoul, Korea: major sources and contribution to secondary organic aerosol formation, *Aerosol and Air Quality Research*, 23(8), 220429. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220429>
- Ma, W., Feng, Z., Zhan, J., Liu, Y., Liu, P., Liu, C., Ma, Q., Yang, K., Wang, Y., He, H., Kulmala, M., Mu, Y., Liu, J. (2022) Influence of photochemical loss of volatile organic compounds on understanding ozone formation mechanism, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 4841-4851. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4841-2022>
- Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE) (2026) 2025 Results of the Tele-Monitoring System (TMS) for Stack Emissions. <https://mcee.go.kr/home/web/newsRead.do?sessionId=SWu77QacOoqvYvYGRigZccG2fMockhzM7CZ3RDr.mehome2?pagerOffset=30&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10607&orgCd=&condition.fromDate=null&condition.createDeptName=null&condition.inactiveYn=N&condition.code=null&condition.pageIndex=null&condition.toDate=null&condition.boardId=1866850&condition.rnSeq=97&condition.deleteYn=N&boardId=1874090&boardMasterId=939> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O., Williams, M.L. (2015) Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889-8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2026) 2023 CAPSS Emission. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=10&articleId=580&boardId=10&menuId=32¤tPageNo=1> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) Investigation of Hazardous Air Pollutants (HAPs) in the Dae-san Area. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201300007685&dbt=TRKO&rn=> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2021) Annual Report of Air Quality in Korea 2020. https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Oliveira, K., Guevara, M., Jorba, O., Petetin, H., Bowdalo, D., Tena, C., Montané Pinto, G., López, F., Pérez García-Pando, C. (2024) On the uncertainty of anthropogenic aromatic volatile organic compound emissions: Model evaluation and sensitivity analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 7137-7177. <https://doi.org/10.5194/acp-24-7137-2024>
- Park, M.-S., Min, S.-H., Kim, J.-T. (2025) The Supply-Disruption Effects of Coal-Fired Power Plant Closures on the Chungnam Regional Economy, *Journal of the Korean Regional Development Association*, 37(5), 125-150, (in Korean with English abstract). <https://data.doi.or.kr/10.22885/KRDA.2025.37.5.125>
- Park, S., Kim, J., Lee, G., Noh, S., Chae, J.S., Kim, M.Y., Jeon, J.M., Lee, S.S., Kim, J.B. (2022) Characteristics of Spatial Distribution VOCs around Petrochemical Complex Using Passive Sampler, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 764-775, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.764>
- Pochanart, P., Wang, Z., Akimoto, H. (2015) Boundary layer ozone transport from eastern China to southern Japan: Pollution episodes observed during monsoon onset in

- 2004, Asian Journal of Atmospheric Environment, 9(1), 48-56. <https://doi.org/10.5572/ajae.2015.9.1.048>
- Ragothaman, A., Anderson, W.A. (2017) Air quality impacts of petroleum refining and petrochemical industries, Environments, 4(3), 66. <https://doi.org/10.3390/environments4030066>
- Seoul Institute of Health and Environment (SIHE) (2021) 2020 Seoul Air Quality Report. <https://news.seoul.go.kr/env/archives/517137?listPage=1> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Shastri, A., Nirmalkar, J., Kim, S., Oh, S., Lee, K., Song, M. (2025) Seasonal characteristics and health risk assessment of anthropogenic volatile organic compounds at a rural site in South Korea, ACS Earth and Space Chemistry, 9(7), 1768-1779. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacchem.5c00012>
- Simpson, I.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S.C., Fleming, L.T., Crawford, J.H., Diskin, G.S., Emmons, L.K., Fried, A., Guo, H., Peterson, D.A., Wisthaler, A., Woo, J.-H., Barré, J., Gaubert, B., Kim, J., Kim, M.J., Kim, Y., Knote, C., Mikoviny, T., Pusede, S.E., Schroeder, J.R., Wang, Y., Wennberg, P.O., Zeng, L. (2020) Characterization, sources and reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in Seoul and surrounding regions during KORUS-AQ, Elementa Science of the Anthropocene, 8(1), 37. <https://doi.org/10.1525/elementa.434>
- Song, S.K., Shon, Z.H., Son, H.K. (2015) Characteristics of Ozone Precursor Emissions and POCP in the Biggest Port City in Korea, Asian Journal of Atmospheric Environment, 9(2), 146-157. <https://doi.org/10.5572/ajae.2015.9.2.146>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1999) Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air: Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Active Sampling onto Sorbent Tubes. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/to-17r.pdf> (Accessed on Aug. 25, 2026).
- Wang, H., Wen, Y., Wu, J., Cai, R., Shen, Y., Deng, C., Li, Y., Li, Y., Wu, H., Huang, D., Cheng, H., Yan, C., Gao, J., Zheng, M., Liu, Y., Kulmala, M., Mao, F., Smith, J.N., Zhang, S., Hao, J., Li, X., Jiang, J. (2026) Accelerated reduction of atmospheric ultrafine particles since China VI vehicle emission standards, npj Climate and Atmospheric Science, 9(1), Article 55. <https://doi.org/10.1038/s41612-026-01327-6>
- Yuan, B., Shao, M., Lu, S., Wang, B. (2010) Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China, Atmospheric Environment, 44, 1919-1926. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.02.014>

Authors Information & Contributions

- 강성구 (고려대학교 지구환경과학과 박사과정, ksg946@korea.ac.kr) Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Validation, Visualization, Writing - original draft
- 김주애 (고려대학교 지구환경과학과, 기초과학연구원 연구교수, alal78@korea.ac.kr) Conceptualization, Supervision, Writing - review & editing
- 임유락 (고려대학교 지구환경과학과 박사과정, yurak0704@korea.ac.kr) Formal analysis, Investigation, Methodology
- 이미혜 (고려대학교 지구환경과학과 교수, meehye@korea.ac.kr) Conceptualization, Funding acquisition, Resources
- 이광열 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구사, kylee21@korea.kr) Data curation, Formal analysis