

기술자료

Passive Sampler를 이용한 석유화학단지 주변 지역 VOCs의 공간분포 특징 연구

Characteristics of Spatial Distribution VOCs around Petrochemical Complex Using Passive Sampler

박세찬, 김정호¹⁾, 이가혜, 노수진²⁾, 채정석³⁾, 김민영³⁾, 전준민³⁾, 이상신, 김종범*

충남연구원 서해안기후환경연구소, ¹⁾(주)한국환경과학연구소,

²⁾연세대 환경공해연구소, ³⁾(주)그린환경종합센터

접수일 2022년 8월 23일

수정일 2022년 9월 10일

채택일 2022년 9월 16일

Received 23 August 2022

Revised 10 September 2022

Accepted 16 September 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-630-3924

E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Sechan Park, Jeongho Kim¹⁾, Gahye Lee, Sujin Noh²⁾, Jeong Seok Chae³⁾,
Min Young Kim³⁾, Jun-Min Jeon³⁾, Sang Sin Lee, Jong Bum Kim*

Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

¹⁾R&D center, Korea Environment Science Institution, Wonju, Republic of Korea

²⁾Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Department of R&D planning and Research, Green Environmental Complex Center, Suncheon, Republic of Korea

Abstract The northern region of Chungcheongnam-do is located in several large-scale industrial facilities. The region of Daesan has a large-scale petrochemical complex, accounting for 7.3% of the nation's total VOCs (volatile organic compounds, VOCs) emission. In this study, VOCs were measured at 31 locations in the Daesan area using a passive sampler; VOCs concentration distribution by area and the influence of the different seasons on the VOCs in the area were investigated. The result of seasonal measurement of VOCs, the highest concentration was measured in winter (18.6 ppb), summer (12.0 ppb), and spring and autumn (10.5 ppb). Benzene and toluene accounted for 69.1 to 72.7% of the VOCs concentration regardless of the season. The result of investigating the affected area based on the benzene measurement, high concentrations of VOCs were identified in a specific area. Although the distance from the pollutant source is important, it was confirmed that the diffusion depends on the wind direction, wind speed and topography. In order to improve the problems of high-concentration VOC areas, continuous monitoring and national policies will be required.

Key words: VOCs, Petrochemical complex, Passive sampler, Spatial distribution, Influence area

1. 서 론

휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)은 석유화학 공정, 화학제품 제조업, 주유시설, 도장시설, 세탁 및 세정시설, 인쇄, 아스콘 제조, 아스팔트 도로 포장 및 자동차 배기가스 등 다양한 배출원을 통해 대기로 배출된다(Chae *et al.*, 2022). 우리나라 VOCs 배출량은 1999년 665,043 톤에서 2019년 1,020,216톤으로 약 1.53배 증가하였으며, 가스상 오

염물질 중 NH₃ (6.38배 증가)를 제외하고 증가율이 가장 높은 수준이다(NAEI, 2022). VOCs 중 벤젠과 포름알데하이드, 1, 3부타디엔은 발암물질로 분류되며, 아세트알데하이드, 아크릴로니트릴, 클로로포름, 1,2-디클로로에탄 등은 특정대기유해물질로 관리되고 있다(MOE, 2022). 이와 같이 VOCs는 인체에 유입되어 졸음, 호흡곤란, 구토, 메스꺼움과 더불어 심할 경우 복부경련, 의식불명, 질식, 발암을 유발할 수 있다(Cheng, 2019).

충청남도는 제철소, 석탄화력발전소, 산업단지 등 대형배출시설들이 밀집되어 있으며, 대기오염물질 배출량은 2019년도 기준으로 우리나라 대기오염물질 배출량의 3위를 차지하고 있다(Kim *et al.*, 2020a). 전국 VOCs 배출량은 7.3% (74,724톤)를 차지하고 있으며, 그중 32.5%가 서산에서 배출되었다. 서산에는 전국 3대 석유화학단지 중 하나인 대산석유화학단지가 위치하고 있으며, 여기서 배출되는 VOCs는 지역 주민과 농작물에 다양한 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Baek *et al.*, 2020). 대산석유화학단지과 인접한 독곶리에는 환경부 유해대기측정소가 운영되고 있다(MOE, 2021). 여기서 VOCs 모니터링은 수동측정과 자동측정법이 병행된다. 수동은 월 2회 24시간 측정하며, 자동은 1~2시간 간격으로 측정하여 정보를 제공한다. 이러한 고정측정망의 정보는 해당 지점의 단일 수용체에 대한 영향을 분석할 수 있으나, 주변 지역에 대한 전반적인 영향을 보기엔 한계가 있다. 최근에는 이러한 고정측정망의 단점을 보완하기 위해 실시간 분석장비를 장착한 이동측정차량(mobile laboratory, ML)이 활용되고 있다(Choi *et al.*, 2021). 이동측정 방법은 실시간 질량분석기를 이용함으로써 시간분해능이 높은 이동측정 자료를 얻을 수 있지만, 같은 시간대에 지역적 공간분포 파악에는 제한적이다. 오염물질의 지역적 공간분포 파악에는 수동시료채취(passive air sampler, PAS) 방법이 활용되고 있다(Lee *et al.*, 2017). PAS 방법은 같은 시간대에 여러 장소에서 데이터의 수집이 필요한 연구에 적용되고 있다(Cha *et al.*, 2020). PAS 방법은 공정시험법에 비해 정확도가 낮은 단점이 있으나, 최근에는 기술의 발달로 공정시험방법과의 오차를 점차 줄여나가고 있는 추세이다(Wania and Shunthirasingham, 2020).

Choi and Chang (2005)은 PAS를 이용하여 실내와 도시대기 중 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)의 농도수준을 검토하였고, Oh *et al.* (2019)과 Sim *et al.* (2012)은 악취 원인 분석에 활용하였다. Chun (2014)과 Park *et al.* (2021)은 지역의 대기

오염물질 농도 확인에 사용하는 등 PAS는 주로 광범위한 지역에 대한 동시간대 농도변화 파악에 사용되었다. Byeon *et al.* (2011, 2010, 2009)은 시화공단을 대상으로 구역별, 계절별 VOCs의 공간분포를 측정하였지만, 환경기준물질인 미세먼지(particulate matter less than 10 μm , PM₁₀)나 이산화황(Sulfate dioxide, SO₂), 이산화질소(nitrate dioxide, NO₂)를 대상으로 한 연구가 대부분이었다.

대산석유화학단지는 해당 지역 내에 여러 개별 사업장의 공정 배출시설들이 산재한 특징을 가진다. 또한 태안반도 해안에 인접하여 기상조건에 따라 주변 지역에 확산되어 미치는 영향 차이가 크게 나타날 수 있다. 이러한 조건에서 고정측정망의 VOCs 정보를 통해 해당 지역의 영향을 정확히 파악하기 어렵다. 그러므로 PAS 방법은 공정시험법 대비 측정 해상도는 낮지만, 지역 공간분포 조사 등에 유용하게 활용될 수 있다(U.S. EPA, 2019).

본 연구에서는 PAS를 사용하여 대산석유화학단지 인근 지역 마을별 VOCs의 농도수준을 파악하였다. 향후 본 연구 결과는 지역 관리대책 수립 시 우선관리 지역 선정 등에 대한 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 측정장소 및 기간

측정대상 지역은 충청남도 서산시 대산읍이다. 대산읍에 있는 대산석유화학단지 북쪽의 대산항을 기준으로 남쪽 14 km 이내에 31개 지점을 선정하였다. 측정지점은 지역 주민들의 왕래가 가장 활발한 마을회관을 중심으로 선정하였고, 29개 대상지점과 대조군(웅도리, 별천포) 2개소를 운영하였다. 측정은 2018년 3월부터 2019년 2월까지 4계절을 대상으로 계절별로 약 1주일씩 측정하였다. 충청남도 보건환경연구원에서는 ML에 실시간 VOCs 측정장비(selected ion flow tube mass spectrometry, SIFT-MS, Italy)를



Fig. 1. Measurement location of VOCs around petrochemical complex.

Table 1. Measurement period and location of VOCs at each season.

		2018			2019
		Spring	Sumer	Fall	Winter
Passive sampler		6~13 Mar.	14~20 Jun.	18~24 Oct.	20~26 Feb.
Mobile laboratory	Landfill of Daesan	1~7 Mar.	-	-	-
	Village hall of Daejuk 1-ri	8~14 Mar.	-	-	-
	Dokgot intersection	15~21 Mar.			
	Han express		15~21 Jun.	19~25 Oct.	16~26 Feb.

부착하여 주요 배출원 지점에 대한 모니터링을 수행하였다. SIFT-MS에 대한 측정원리와 특징은 다수의 선행 연구에서 확인할 수 있다 (Hwang *et al.*, 2020; Youn *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2018). 본 연구가 수행된 기간 역시 대산석유화학단지 인근에서 측정이 이루어졌으며, ML 측정자료를 참고하여 PAS의 측정 데이터 분석을 수행하였다. 그림 1은 PAS 측정과 ML 측정지점을 나타냈으며 세부적인 측정 일정은 표 1과 같다.

2.2 Passive Air Sampler

PAS를 이용하여 대산석유화학단지 인근 지역에 대한 VOCs 공간분포를 측정하였다. 대기환경보전법 제2조의 제10호에 따라 관리 중인 37개 VOCs 중 (MOE, 2022), 발암물질로 알려져 있는 벤젠을 포함하여 톨루엔, 자일렌 등 총 5가지 항목을 대상으로 설정하였다. VOCs 포집에는 PAS (3500, 3M, USA)를 사용하였으며, 포집된 시료는 액상의 CS₂ 1 mL에 30분간 추출 후 GC (gas chromatography, GC-2010, Shimadzu, Japan)와 FID (flame ionization detector, FID-

Table 2. Chemical specification of VOC target compounds.

NO	Substance	CAS	Mass	ABB.	Formular	Carcinogen class	
						IARC	ACGIH
1	Benzene	71-43-2	78.1140	BZ	C ₆ H ₆	Group 1	A1
2	Toluene	108-88-3	92.1410	TOL	C ₇ H ₈ O	Group 3	A4
3	Ethylbenzene	100-41-4	106.1680	EB	C ₈ H ₁₀	Group 2B	A3
4	m,p,o-Xylene	106-42-3	106.1600	m,p,o-XYL	C ₈ H ₁₀	Group 3	A4
5	Styrene	100-42-5	104.1500	STR	C ₈ H ₈	Group 2B	A4

※ IARC: International Agency for Research on Cancer

※ ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists

2010, Shimadzu, Japan)로 분석하였다. PAS는 샘플러와 대기에 존재하는 오염물질간 농도차에 따라 고농도에서 저농도 지역인 샘플러 표면으로 확산·이동하여 필터 표면에 흡수·흡착되게 되고, 이 값은 식 (1)에 따라 농도로 환산된다(3M, 2022).

$$C(\text{ppm or ppb}) = \frac{(W_p + 2.2 \times W_s)}{r \times t} \quad (1)$$

여기서 C = concentration (ppm or ppb)

W_p = weight collected on the primary pad corrected for blank (μg or ng)

W_s = weight collected on the secondary pad corrected for blank (μg or ng)

t = time (minutes)

r = Recovery Coefficient (0.97)

PAS의 측정대상 지점은 대부분 지역 마을회관 2층으로 선정하였다. 측정위치의 일관성을 확보하기 위해 지상으로부터 약 4~5 m 높이에 샘플러를 설치하였으며, 계절별로 7일 동안 대기 중에 노출 후 회수하여 분석하였다. PAS 방법은 농도가 높은 작업환경에서 근로자 건강영향평가를 위해 근로시간을 기준으로 6~8시간 또는 24시간의 노출 방법이 적용된다. 그러나 PAS를 대기 중에서 노출시간이 짧은 단기간 측정에 활용할 경우 상대적으로 포집 총량이 적어 시료의 대표성에 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 샘플러의 반응시간을 지연시켜 최대 3개월까지 측정하는 방법이 제안되고 있다(Healy

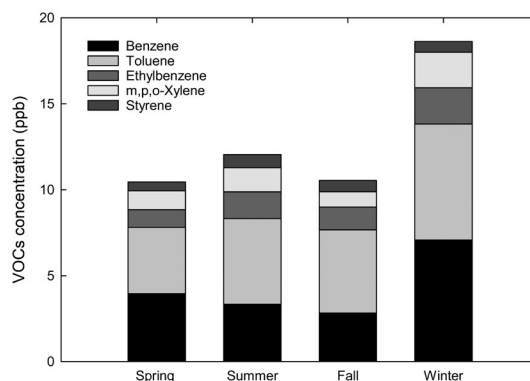


Fig. 2. Summary of VOC compound measured for each season using PAS.

et al., 2021). 국내에서 본 연구와 동일한 샘플러를 활용하여 수행된 연구에서 21개 지점에서 1개월간 측정된 사례도 조사되었다(Byeon *et al.*, 2011, 2009). 본 연구에서는 대상 지역의 농도 수준과 측정 일정을 고려하여 계절별로 7일을 측정 기간으로 설정하였다.

31개 측정지점 모두 샘플링 기간을 맞추기 위해 각 샘플러는 현장 설치시 설치시간을 기입하여 최대한 동일한 시간에 시료채취가 이루어지도록 하였다. 표 2는 본 연구에서 대상물질로 선정한 5개 개별 VOC에 대한 정보이다.

3. 측정 결과

3.1 계절별 VOCs의 농도 분포

그림 2는 대산석유화학단지 인근 31개소에 측정된

Table 3. Concentration of VOCs at each season using PAS

Unit : ppb	Passive sampler	Mobile laboratory				
		Landfill of Daesan	Village hall of Daejuk 1-ri	Dokgot intersection	Han express	
2018	Spring	VOCs	10.5	7.1	2.3	0.9
		BZ	4	2.1	1.1	0.3
		TOL	3.9	1.1	0.6	0.3
		T/B	1.0	0.5	0.5	1.0
	Summer	VOCs	12			2.3
		BZ	3.3			1.6
		TOL	5			0.4
		T/B	1.5			0.3
	Fall	VOCs	10.5			0.5
		BZ	2.8			0.3
		TOL	4.8			0.1
		T/B	1.7			0.3
2019	Winter	VOCs	18.6			2.9
		BZ	7.1			0.8
		TOL	6.7			1.3
		T/B	0.9			1.6

※ VOCs = BZ + TOL + EB + (m,p,o)XYL + STR

VOCs의 농도를 계절별로 나타낸 것이다. 봄과 가을이 각각 10.5 ppb로 낮은 수치를 보였고, 여름 12.0 ppb, 겨울 18.6 ppb로 가장 높은 수치를 보였다. 계절별로 개별 VOC 구성비는 봄철의 경우 BZ가 37.8%로 가장 높은 비율을 차지하였고, TOL이 BZ보다 약간 낮은 37.0%, m,p,o-XYL 10.5% 순으로 확인되었다. 그 외 EB이 9.8%, STR 4.9% 순으로 나타났다. 여름철과 가을철에는 봄철과 다르게 TOL이 각각 41.4%와 45.9%로 가장 높은 비율을 보였고, 그 뒤를 BZ가 각각 27.7%와 26.9%로 TOL과 BZ가 전체 구성의 69.1~72.8%를 차지하는 것으로 확인되었다. 겨울철은 봄철과 같이 BZ가 38.0%로 가장 높은 비율을 보였고, TOL 36.2%, EB 11.3%로 봄철과 유사한 비율을 보였다. 일반적으로 산업단지의 경우 TOL의 농도가 높고, BZ과 미량의 m,p,o-XYL이 나타나는 것으로 알려져 있으나, Kim *et al.* (2021)과 Kim *et al.* (2020b)은 대산석유화학단지에는 동일 조건의 울산, 여수의 측정 결과와는 다르게 BZ의 농도가 TOL보다 지속적으로 더 높게 나타나고 있는 것을 보고하였으며, 본 연구

의 측정 결과 역시 동일한 것을 확인할 수 있었다.

표 3은 계절별로 측정된 PAS와 이동관측 결과를 나타낸 것이다. PAS 측정 결과는 구간에 따라 4~21 배 높은 수치를 보였다. VOCs 물질 중 유일하게 대기환경기준이 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.5 ppb)로 존재하는 BZ의 경우 PAS에서는 대부분 기준치를 초과한 것으로 나타났다. 이동관측 결과 역시 일부 구간에서 기준치를 상회하는 것으로 확인되었다.

하지만 이는 서로 상이한 측정 방법과 구간으로 절대적인 비교에는 무리가 있다. Byeon *et al.* (2011)은 PAS와 고체흡착관을 활용하여 동일 지점을 대상으로 공간분포를 조사하였으며, 측정 기간이 길수록 농도값은 더 높게 측정되지만 분석기기의 분석능에 따라 분석 정확도가 높아지는 것을 확인하였다. 본 연구 결과 역시 측정 기간이 더 긴 PAS가 더 높은 농도를 보인 반면 다수의 연구에서 기존 공정시험법과 유사한 수준의 검출능력을 확인한 실시간 장비의 정확도가 더 높은 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2018; Dunne *et al.*, 2016; Perraud *et al.*, 2016).

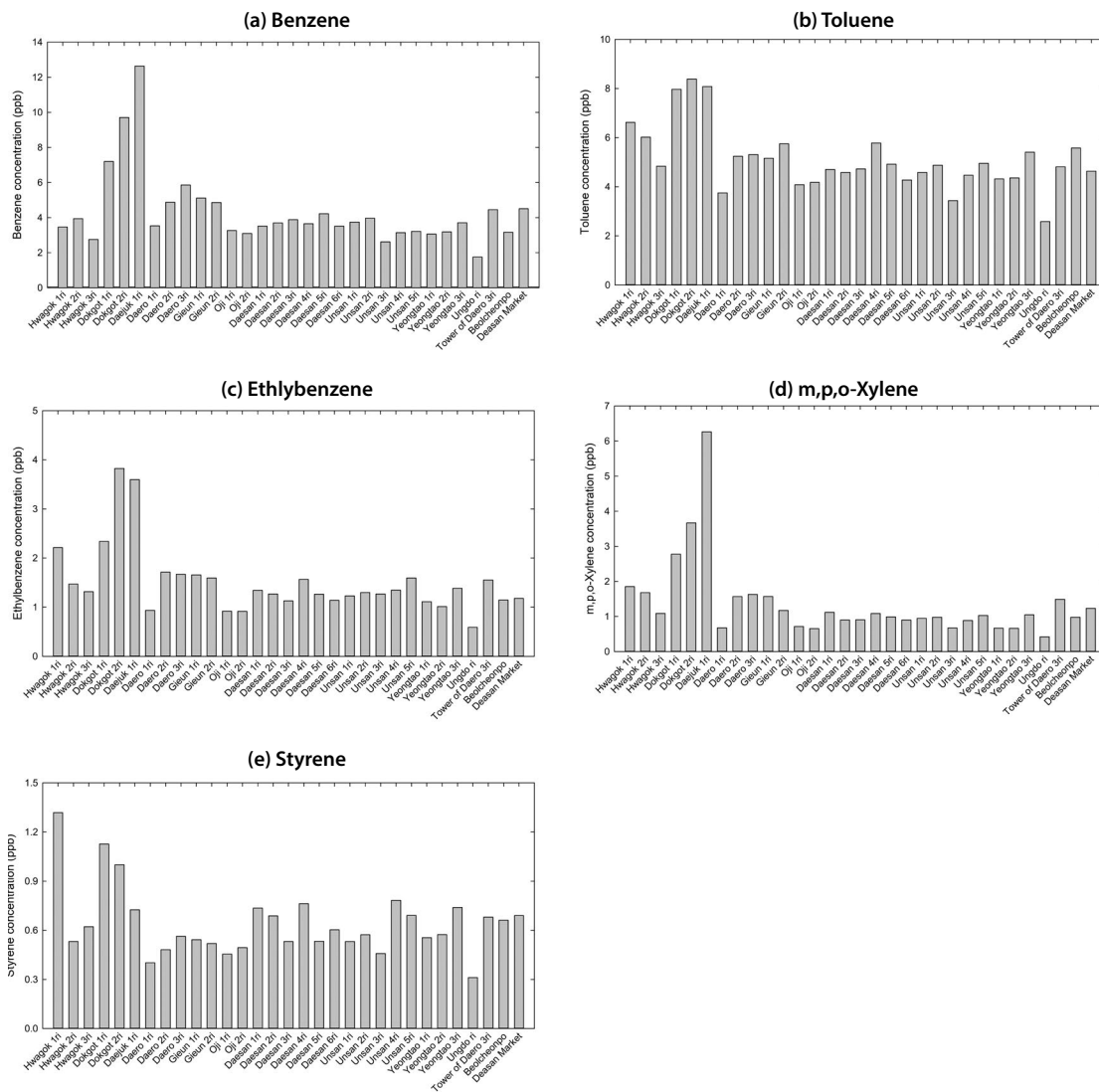


Fig. 3. Concentration of individual VOC measured at each village.

BZ와 TOL은 인위적인 활동에서 대기로 배출되는 대표적인 VOCs 물질이다. BZ는 가장 단순한 방향족 물질로 대기 중에서 OH 라디칼 반응이 주요 흡수원으로 작용하며, TOL은 광학적으로 생성된 OH 라디칼과의 반응에 의해 대기 중에서 분해된다(Park *et al.*, 2018). BZ와 TOL의 비율은 다양한 VOCs 배출환경에서 배출원에 대한 영향 분석 시 활용되는데, BZ는 연소과정에서 비율이 높아지는 특징을 가진다. 반

면 TOL의 경우 차량 배출의 영향이 있을 경우 농도가 증가하며, 특히 산업공정이나 용매처리 등 직접 이용하는 경우 매우 큰 증가율을 보인다. 일반적으로 T/B의 비율은 생체연소나 바이오 연료 및 석탄연소에 기인할 경우 BZ의 양이 TOL보다 많아 1보다 작은 수치를 보이며, 산업공정 및 용매 이용시 BZ와 TOL이 같이 증가하지만 TOL의 양이 더 많이 증가하여 1보다 큰 수치를 보인다. 하지만 자동차 배기가스에

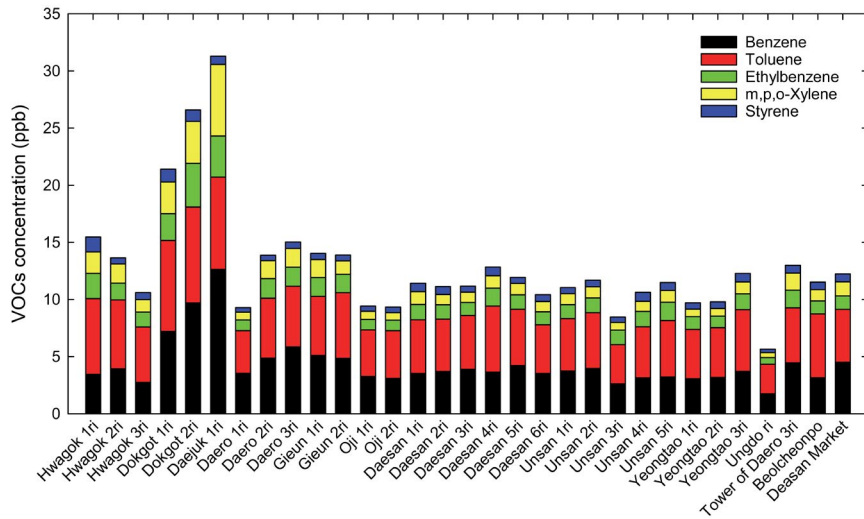


Fig. 4. Summary of VOCs concentration measured at each village.

의한 기여도가 높은 구간에서는 BZ 대비 TOL의 비중이 압도적으로 높게 나타나므로 1~10 사이의 값을 갖는 것으로 알려져 있다 (Zhang *et al.*, 2016). PAS로 측정된 T/B는 0.9~1.7로 대부분 1 이상으로 산업공정에 대한 영향이 그대로 나타난 반면 독곶2리와 대죽1리, 대로3리, 기은1리 등은 1 이하의 값을 보였다. 실시간 측정 장비를 활용한 데이터 역시 0.5~1.6까지 높게 나타났으나 쓰레기매립장을 제외하고 PAS 측정과 유사한 3개 지점은 역시 1.0 이하의 값을 보였다. 바닷가를 북쪽으로 동서로 길게 위치한 대산석유화학단지 대로를 가운데 두고 상부에는 산업단지 위치하고 있으며, 하부에는 주거지역이 밀집되어 있다. 대죽1리를 중심으로 Y자 형태의 골이 형성되어 있어 바람이 불면 주변에서 발생한 기류를 타고 대죽1리 주변에서 가장 고농도를 보이는 것을 다수의 선행 연구에서 확인할 수 있었으며, 이들 지역에서 BZ의 농도가 TOL보다 높은 수치를 보였다 (Kim *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2020b). 본 연구 또한 대부분 T/B의 비율이 1.0 보다 크게 나왔지만 영향이 상대적으로 더 크게 나타나는 고농도 지역에서는 1.0 이하로 나와 추후 이에 대한 세부적인 조사와 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 마을별 VOCs의 농도 및 공간분포

석유화학단지에서 배출된 VOCs에 대한 영향권인 대산읍을 대상으로 31개 지역에서의 공간분포를 확인하였다. 4계절별로 측정된 6개 개별물질은 마을별로 농도 수준을 그림 3에 나타내었다. BZ의 마을별로 대죽1리 (12.6 ppb), 독곶2리 (9.7 ppb), 독곶1리 (7.2 ppb) 순으로 높은 농도를 보였다. TOL 역시 앞의 BZ와 동일한 3개 마을이 상위 3위를 차지하였지만 농도 순서는 독곶2리 (8.4 ppb), 대죽1리 (8.1 ppb), 독곶1리 (8.0 ppb) 순으로 나타났다. EB는 TOL과 유사한 농도 분포를 나타냈으며, m,p,o-XYL은 BZ와 유사한 농도 분포를 보였다. 마지막으로 STR은 화곡1리에서 가장 높은 1.3 ppb를 보였고, 독곶1리와 독곶2리가 각각 1.1 ppb와 1.0 ppb를 보였다.

그림 4는 6개 VOC 개별물질에 대한 합을 마을별로 합하여 나타낸 것이다. 대죽1리가 가장 높은 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 독곶2리와 독곶1리가 높은 지역으로 확인되었다. 앞서 그림 1의 마을 배치도를 보면 대산석유화학단지에 가장 인접해 있는 마을은 서쪽편으로는 독곶1리와 2리, 그리고 동쪽편으로는 화곡1리와 2리이며, 그 뒤를 이어 약간 이격되어 대죽1리가 가까이 인접해 있는 것을 확인할 수 있

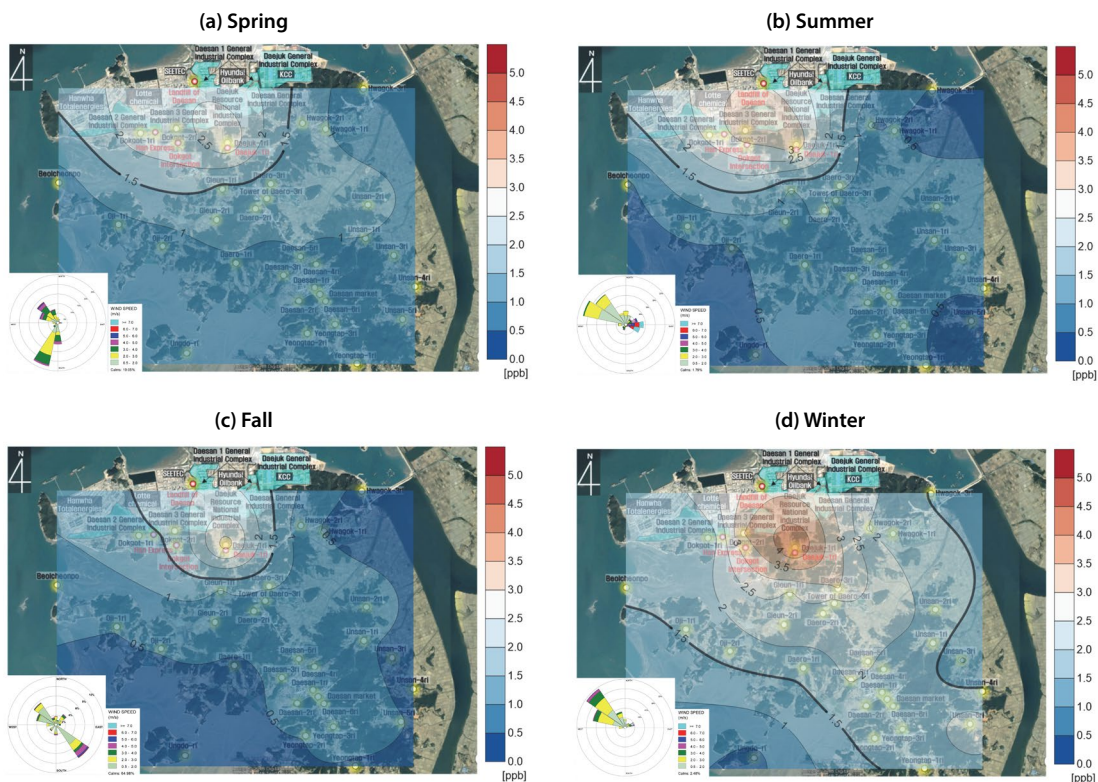


Fig. 5. Spatial distribution of Benzene by season.

었다. 하지만 본 측정에서 공간분포를 확인해 본 결과, 가장 인접해 있는 독곶1, 2리 및 화곡리 1, 2리보다 대죽1리가 가장 높은 농도를 보였다. 이는 북서쪽에 위치해 있는 대산석유화학단지에서 배출된 오염물질이 동일한 풍하지역에 위치해 있지만 대죽1리의 경우 독곶 및 화곡리에 비해 산맥의 골짜기(valley)에 위치해 있어 기류가 물리면서 오염물질이 농축되어 나타난 결과로 판단된다. Kim *et al.* (2020b)이 이동관측 결과에서도 산업단지 내부를 제외하고는 주변지역 측정시 대죽1리에서 가장 높은 농도를 확인하였는데, 본 연구에서도 유사한 결과가 도출되었다.

3.3 VOCs의 영향권 분석

그림 5는 각 지점별로 측정된 BZ의 데이터를 기반으로 상용 프로그램인 Surfer (version 10)를 이용하여 등농도 곡선으로 표현한 것이다. 가장 농도가 높게

나타난 대죽1리를 기준으로 봄철 측정 당시 PAS의 값이 실시간 측정농도보다 약 3.6배 높게 나타났다. 앞서 언급한 것처럼 상이한 측정 및 분석방법으로 두 측정방법 간 농도 차이가 발생하는데 본 연구에서는 선행 연구 등을 토대로 기존 공정시험법 대비 분석 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있는 실시간 분석값을 실제 농도로 설정하였다. 그 결과 PAS의 측정농도를 3.6으로 나누어 영향권역을 설정하였으며, 그 중 BZ의 연간 기준치인 1.5 ppb ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 영향권으로 표시하였다. 그림 5의 (a)는 봄철 측정 결과로 영향권 내부에 대죽1리와 독곶1, 2리 등 3개 마을이 들어왔다. 측정 기간 중 지역내 주풍은 남서풍으로 나타났으며, 이는 내륙에서 북쪽으로 바람이 불어 산업단지에서 배출된 오염물질의 영향이 적게 나타난 것으로 판단되며, 한달 중 정온상태가 19.05%로 상대적으로 대기가 안정한 상태로 확인되었다. 그림 5의 (b)는 여

름철 측정 결과로 영향권 내에는 봄철과 마찬가지로 대죽1리와 독곶1, 2리만이 포함되는 것으로 확인되었다. 하지만 봄철과 달리 주풍이 북서풍으로 산업단지에서 배출된 오염물질이 대죽1리의 골을 타고 대로리와 기은리까지 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5의 (c)는 가을철 측정 결과로 봄과 여름철과 다르게 독곶1리를 제외한 대죽1리와 독곶2리만이 영향권 안에 포함되는 것으로 확인되었다. 이 때의 주풍은 동남풍과 북서풍으로 나타났으며, 동남풍의 경우 최대 5.6 m/s까지 빠른 풍속을 보였다. 하지만 측정 기간 중 정온상태가 65.0%로 나타나 풍속이 빠른 날에만 밀집되어 나타나고, 그 외 대부분의 기간에는 안정적인 상태로 유지되었던 것으로 확인되었다. 가을철 영향권의 경우 봄과 여름철 대비 좁은 지역에 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 다른 계절 대비 높은 정온상태로 인해 지역 내 오염물질의 희석·확산 효과가 적게 나타난 결과로 판단된다. 마지막으로 그림 5의 (d)는 겨울철 측정 결과로 대산을 대부분이 영향권 내에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 겨울철 주풍은 북서풍으로 타 계절과 다르게 밀집되어 있으며, 풍속이 빠르며, 정온상태가 2.5%로 대기가 매우 불안정한 상태인 것으로 확인되었다. 불안정한 상태의 대기는 배출원으로부터 배출된 오염물질을 빠르게 주변으로 희석·확산시켜 대상 지역에 대한 오염도를 낮춰주는 장점이 있지만 반대로 주변 지역에서는 해당지역에서 배출되지 않은 이동오염물질로 인한 피해를 받을 수 있다. 특히 대부분의 마을이 주요 배출시설인 산업단지 동남쪽에 위치해 있는 것을 감안했을 때 북서풍을 타고 확산되는 오염물질은 보건학적으로 더 큰 피해를 야기시킬 수 있다.

4. 결 론

다수의 배출시설이 존재하는 산업단지의 경우 오염물질 배출특성에 따른 오염도 파악이 매우 중요하

지만 대부분의 지역에서 도시대기측정망 (air quality monitoring station, AQMS)이 설치되어 지역에 대한 대표농도만을 확인할 수 있다. 그러나 관리대책 마련을 위해서는 지역에 확산되어 피해를 야기시키고 있는 오염물질에 대한 공간분포 정보가 필요하다. 이에 본 연구에서는 비교적 간편하게 공간정보를 확보할 수 있는 PAS를 사용하여 석유화학단지 인근 지역에 대한 VOCs 공간분포를 확인하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. PAS를 이용하여 계절별 5개 VOC 물질에 대한 농도 변화를 검토한 결과, 겨울철이 18.6 ppb로 가장 높은 농도를 보였고, 여름철 12.0 ppb, 봄철과 가을철 10.5 ppb로 나타났다. 개별 물질로는 BZ이 37.8%로 가장 높은 비율을 보였고, 그 뒤를 이어 TOL 37.0%, m,p,o-XYL 10.5%, EB 9.8% 순으로 확인되었다.
2. PAS 측정 결과를 실시간 분석장비 (SIFT-MS) 데이터와 비교한 결과, PAS가 4~12배 높은 농도를 보였으며, T/B로 배출원에 대한 분석 결과 0.9~1.7로 나타나 산업단지에 의한 영향이 큰 것으로 확인되었다.
3. 마을별 공간분포를 확인한 결과, 대죽1리가 가장 높은 농도를 보였으며 그 뒤를 이어 독곶2리와 독곶1리가 높은 농도를 보였다. 산업단지 인근에 위치해 있는 화곡1, 2리의 경우, 상대적으로 이격거리가 먼 대로리와 기은리 등과 유사한 수준을 나타나 지역에 대한 영향은 인접거리도 중요하지만 풍향과 지형의 영향도 크게 작용한다는 것을 확인할 수 있었다.
4. BZ 측정 결과를 기반으로 등농도 곡선으로 나타내 영향권을 설정하였는데 봄, 여름, 가을철의 경우 대죽1리, 독곶1, 2리가 영향권으로 설정되었으며, 겨울철은 대산을 전체가 영향권으로 설정되었다. 이는 배출원의 배출량도 중요하지만 계절에 따른 풍향과 풍속의 영향이 더 크게 작용한다는 것을 의미한다.

대산석유화학단지는 전국 3대 석유화학단지 중 하나로 VOCs를 포함하여 유해대기오염물질 (hazardous air pollutants, HAPs)이 다수 배출되는 것으로 보고되고 있어 주변 지역에 대한 영향조사가 중요하다. 본 연구 결과에서는 산업단지 인근에 위치한 대죽1리와 독곶1, 2에 대한 영향이 큰 것으로 나타나 이들 지역에 대한 정밀조사 및 개선대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 충청남도의 지원을 받아 수행된 “대산지역 산업악취 원인규명과 관리계획 수립 기초조사 연구 (19DE018)”의 일환으로 진행되었으며, 측정분석에 도움주신 (주)그린환경종합센터 관계자분께 감사드립니다.

References

- 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>
- Byeon, S.H., Lee, J.G., Kim, J.K. (2009) Patterns of Offensive Odor Compounds According to Blocks in Shihwa Industrial Complex, *Korean Society of Environmental Engineers*, 31(12), 1161-1168, (in Korean with English abstract).
- Byeon, S.H., Lee, J.G., Kim, J.K. (2010) Patterns of the main VOCs concentration in ambient air around Shihwa Area, *Korean Society of Environmental Engineers*, 32(1), 1229-1236, (in Korean with English abstract).
- Byeon, S.H., Choi, H.I., Moon, H.I., Lee, J.G., Kim, J.K. (2011) Comparison of Active and Passive Sampler for Determining Temporal and Spatial Concentration Assessment of the Main Volatile Organic Compounds Concentration in Shihwa Industrial Complex, *Korean Society of Environmental Engineers*, 33(11), 790-796, (in Korean with English abstract).
- Choi, S., Park, S., Cha, Y., Lee, S., Yoo, E. (2021) The Characteristics of Air Pollutants Distribution Around Industrial Complexes Using Real-Time Mobile Atmospheric Measurement System, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 43(6), 479-483, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2021.43.6.476>
- Choi, S.D., Chang, Y.S. (2005) Air Monitoring of Persistent Organic Pollutants Using Passive Air Samplers, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(5), 481-494, (in Korean with English abstract).
- Cha, S.H., Han, Y.J., Jeon, J.W., Kim, Y.H., Kim, H., Noh, S., Kwon, M.H. (2020) Development and Field Application of a Passive Sampler for Atmospheric Mercury, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(1), 14-27. <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.1.014>
- Chae, J.S., Chae, J.S., Kim, M.Y., Jeon, J.M., Lee, T.J., Jo, Y.M. (2022) Inventory of VOCs Including Ozone Precursors Emitted from Residential Workplaces and Evaluation of Contribution to Ozone Formation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 175-187, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.175>
- Chun, M.Y. (2014) Estimation of Atmospheric PAH Concentrations and Sources at Several Sites Using Pine Needles as a Passive Air Sampler, *Journal of Environmental Health Sciences*, 40(1), 38-46, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.668/JEHS.2014.40.1.38>
- Cheng, S., Zhang, J., Wang, Y., Zhang, D., Teng, G., Chien, G.C., Huang, Q., Zhang, Y.B., Yan, P. (2019) Global Research Trends in Health Effects of Volatile Organic Compounds during the Last 16 Years: A Bibliometric Analysis, *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 1834-1843. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.06.0327>
- Dunne, E., Galbally, I.E., Cheng, M., Selleck, P., Molloy, S.B., Lawson, S.J. (2016) Comparison of VOC measurements made by PTR-MS, adsorbent tubes-GC-FID-MS and DNPH derivatization-HPLC during the Sydney Particle Study, 2012: a contribution to the assessment of uncertainty in routine atmospheric VOC measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 141-159. <https://doi.org/10.5194/amt-11-141-2018>
- Healy, R.M., Pautler, B.G., Groenevelt, H., Mcalary, T., Wang, J.M., Sofowote, U., Su, Y., Munoz, A., Todd, A. (2021) Field evaluation of a low-uptake VOC passive sampler suitable for long-term deployments, *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101152. <https://doi.org/10.1016/j.atpr.2021.101152>

- 1016/j.apr.2021.101152
- Hwang, K., An, J.G., Lee, S., Choi, W., Yim, U.H. (2020) A Study on the Ozone Formation Potential of Volatile Organic Compounds in Busan using SIFT-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 645-668, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.645>
- Kim, C.H., Kim, J., Noh, S., Lee, S., Yoon, S.H., Lee, S.S., Park, J.S., Kim, J.B. (2021) 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, J.B., Yoon, S.H., Lee, S.S., Kim, K.H., Noh, S.J., Bae, G.N. (2020a) Spatial and Temporal Distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 464-481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464>
- Kim, J.B., Park, D., Park, S., Michael, V., Lee, Y., Lee, S.S., Park, J.S., Kim, J. (2020b) Concentration Characteristics of Particulate Matter and Volatile Organic Compounds in Petrochemical Industrial Complex using Real-time Monitoring Devices, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 683-700. (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.683>
- Lee, S.M., Lim, B.A., Kim, S. (2017) Monitoring of Formaldehyde Concentration in Exhibition Hall Using Passive Sampler, *Journal of Conservation Science*, 33(5), 319-329, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.12654/JCS.2017.33.5.01>
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Setup and Operating guideline for Air Quality Monitoring System.
- Ministry of Environment (MOE) (2022) Clean air act conservation act.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEI) Emissions by Year, <https://www.air.go.kr/en/jbagg/sub03> (accessed in Jul. 29, 2022).
- Oh, J.B., Kim, H.S., Kim, J.Y., Kim, S.T., Hong, S.J., Jo, K.H. (2019) A comparative study on the sensory grid method and passive air sampler measurement results of livestock odor, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 18(3), 244-252, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2019.18.3.244>
- Park, J.S., Song, I.H., Kim, H.W., Lim, H.B., Park, S.M., Shin, S.N., Shin, H.J., Lee, S.B., Kim, J.S., Kim, J.H. (2018) Characteristics of Diurnal Variation of Volatile Organic Compounds in Seoul, Korea during the Summer Season, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 21(4), 264-280. (in Korean with English abstract).
- Perraud, V., Meinardi, S., Blake, D.R., Finlayson-Pitts, B.J. (2016) Challenges associated with the sampling and analysis of organosulfur compounds in air using real-time PTR-ToF-MS and offline GC-FID, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 1325-1340. <https://doi.org/10.5194/amt-9-1325-2016>
- Sim, N.J., Kim, S.T., Lee, S.J. (2012) The Survey for the Evaluation of Odor in a Park Using Passive Sampler, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 11(1), 9-14, (in Korean with English abstract).
- Son, H.D., An, J.G., Ha, S.Y., Kim, G.N., Yim, U.H. (2018) Development of Real-time and Simultaneous Quantification of Volatile Organic Compounds in Ambient with SIFT-MS (Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 393-405, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.393>
- Three M (3M) (2022) Technical Bulletin, Organic vapor monitor sampling and analysis guide.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2019) Method 325A - Volatile Organic Compounds from Fugitive and Area Sources: Sampler Deployment and VOC Sample Collection.
- Wania, F., Shunthirasingham, C. (2020) Passive air sampling for semi-volatile organic chemicals, *Environmental Science Processes & Impacts*, 22, 1925-2002, <https://doi.org/10.1039/d0em00194e>
- Youn, S.J., Jo, K.H., Kim, H.S., Song, G.B., Lee, S.B., Jeong, J.Y. (2020) Measurement of Hazardous Air Pollutants in Industrial Complex Using Mobile Measurement System with SIFT-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 507-521, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.507>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Lü, S., Huang, Z., Huang, X., Yang, W., Wang, Y., Zhang, Q. (2016) Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(11), 6669-6687. <https://doi.org/10.1002/2016JD025115>

Authors Information

박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(psc89@cni.re.kr)

김정호 ((주)한국환경과학연구소 소장)
(jeonghoflux@naver.com)

이가혜 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(gahya1129@cni.re.kr)

노수진 (연세대 환경공해연구소 박사후연구원)
(sjnoh@yuh.ac)

채정석 ((주)그린환경종합센터 부장)
(chaejs21@gecc.co.kr)

김민영 ((주)그린환경종합센터 차장)
(mykim@gecc.co.kr)

전준민 ((주)그린환경종합센터 센터장)
(jmjeon4959@gecc.co.kr)

이상신 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구위원)
(sinslee@cni.re.kr)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)