

논문

대규모 산업단지에서 발생하는 가스상 유해대기오염물질의 배출특성 조사 연구

The Study on Emission Characteristics of Gas-phase Hazardous Air Pollutants Generated at the Large-scale Industrial Complexes

채종성*, 채정석, 전준민, 강병욱¹⁾, 김종호²⁾, 문광주³⁾, 박규태³⁾, 강대일³⁾

(주)그린환경종합센터, ¹⁾한국교통대학교, ²⁾한서대학교, ³⁾국립환경과학원

Jong-Seong Chae*, Jeong-Seok Chae, Jun-Min Jeon, Byung-Wook Kang¹⁾,
Jong-Ho Kim²⁾, Kwang-Joo Moon³⁾, Gyu-Tae Park³⁾, Dae-Il Kang³⁾

Department of R&D Planning and Research, Green Environmental Complex Center, Suncheon,
Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation,
Chungju, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea

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

접수일 2023년 7월 20일
수정일 2023년 7월 31일
채택일 2023년 8월 17일

Received 20 July 2023
Revised 31 July 2023
Accepted 17 August 2023

*Corresponding author
Tel: +82-(0)61-903-1261
E-mail: chaejs0124@gecc.co.kr

Abstract Hazardous Air Pollutants (HAPs) are present in low concentrations in the environmental air, but have the potential to cause serious harm to humans, animals, and plants through long-term exposure. HAPs have carcinogenic, genotoxic, organismal accumulation, and mutagenic properties. In this study, we conducted a monitoring study of gaseous HAPs pollutants volatile organic compounds (VOCs) in Yeosu-Gwangyang, Pohang, Daesan, Ulsan-Onsan, and Sihwa-Banwol industrial complexes and obtained the following results. The concentration of total VOCs in 5 industrial complexes are Sihwa · Banwol 84.58 μm^3 , Ulsan · Onsan 52.09 μm^3 , Pohang 46.24 μm^3 , Daesan 45.64 μm^3 , Yeosu · Gwangyang 38.51 μm^3 , in order, the Sihwa · Banwol industrial complexes showed the highest, and the Yeosu · Gwangyang industrial complexes showed the lowest. The concentration of benzene in all five industrial complexes was below environmental standards, and its concentration was 0.73 ppb in Yeosu-Gwangyang, 0.57 ppb in Pohang, 0.78 ppb in Daesan, 1.02 ppb in Ulsan-Onsan, and 0.51 ppb in Sihwa-Banwol. Among the VOCs, the highest average concentration is formaldehyde in Yeosu-Gwangyang, Pohang, Daesan, and Ulsan-Onsan, and acetone in Sihwa-Banwol. The toluene/benzene(T/B), m,p-Xylene/ethylbenzene (X/E) ratio and conditional probability function (CPF) model were used to evaluate the location of pollution sources at the measurement points.

Key words: HAPs, VOCs, Industrial complexes, T/B ratio, CPF

1. 서 론

우리나라는 세계에서 그 유래를 찾아볼 수 없을 정도로 급속하게 산업화와 도시화를 이룩하였다. 2023년 한국산업단지공단(Korea Industrial Complex Corporation)에서 조사한 전국산업단지 현황을 보면 국가산업단지 47개를 포함하여 일반, 도시첨단, 농공

등 1,276개의 단지가 조성되어 있으며 산업단지에서 근무하는 고용인원만 약 230만 명이다(KICOX, 2023). 국토가 좁은 우리나라의 특성상 산업단지가 조성된 이후 주변에 거주지가 만들어지면서 다양한 환경 문제가 많이 발생하고 있다. 환경 문제 중에서 미세먼지나 악취는 국민의 관심도가 매우 높은 반면에, 산업단지에서 발생하는 유해대기오염물질(Hazardous

Air Pollutants, 이하 HAPs)은 상대적으로 국민들의 관심이 부족하다.

HAPs에 단기간 노출되면 눈 자극, 메스꺼움 또는 호흡 곤란이 발생할 수 있으며, 장기간 노출되면 호흡기 또는 신경계 손상, 선천적 기형 및 생식 기능 장애가 발생할 수 있다(WHO, 2000). HAPs는 토양이나 호수 및 하천에 퇴적되어 잠재적으로 생태계에 영향을 줄 수 있다. 또한 대기 중에서 반응하여 2차 오염물질인 오존 등과 같은 광화학산화물, 미세먼지를 발생시키는 원인물질이기도 하며, 일부 물질은 악취 생성물질이기도 하다(Lee *et al.*, 2021; Seo *et al.*, 2011). HAPs의 배출원은 대부분 화학공장과 같은 산업체와 발전소 등과 같은 고정오염원, 수송 수단인 이동오염원의 배기가스, 건축 자재 및 세척용제 등의 실내오염원으로 구분할 수 있으며, 그 외에 화학물질 누출 사고 및 산불 발생도 배출원이 된다(Thang *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2018).

우리나라에서 HAPs는 대기환경보전법에서 저농도에서 장기적인 섭취나, 노출로 인하여 사람의 건강이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 수 있어 대기 배출에 대한 관리가 필요하다고 인정된 물질로서 환경부(Ministry of Environment, MOE)에서 benzene, 1,3-butadiene, styrene, ethylbenzene 등을 포함하는 35종의 독성물질을 특정대기유해물질로 지정하고 있다(MOE, 2023). 또한 benzene에 대한 대기환경기준(연평균 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 별도로 마련하여 2010년부터 전국적으로 적용하고 있다. 현재는 benzene만 기준치 농도가 설정되어 있어서, 수용체 중심의 관리방안을 도출하기 위해서도 추가적인 HAPs에 대한 기준안 설정이 요구되고 있다. 이와는 별도로 국립환경과학원은 약 400여 종의 유해화학물질을 화학물질 배출·이동량 정보(Pollutants Release and Transfer Regstrs, PRTR)의 보고 대상 물질로 선정하고, 그중에서 환경보건학적 중요성이 높은 48종을 우선관리물질로 정한 바 있다(Kim and Baek, 2019; Baek and Jeon, 2013). 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에서 2011

년 국가유해대기오염물질 기본계획 수립 및 배출 특성 사업 종합평가 과제를 통하여 HAPs 우선관리 대상 물질 8종(benzene, 1,3-butadiene, trichloroethylene, formaldehyde, acrolein, benzo[a]pyrene, 6가 크롬(Cr^{6+}), 초미세먼지)를 선정하고 제안한 바 있다(NIER, 2011). 또한 2018년부터 여수·광양 산업단지를 시작으로 포항, 대산, 울산·온산, 시화·반월 산업단지까지 HAPs 모니터링 연구가 수행되었다(NIER, 2018~2022). 각각의 산업단지의 특징을 보면 여수, 대산, 울산·온산 산업단은 정유사 및 화학업체가 밀집한 우리나라 3대 석유화학단지이며 광양, 포항 산업단은 대표적인 철강 산업단지이다. 시화·반월 산업단은 약 2만개의 업체중에서 5종(대기오염물질 연간 배출량 합계가 2톤 미만) 이상 사업장이 약 7%이고, 대부분이 5종 이하인 소규모 업체가 밀집된 산업단지(KICOX, 2023; Gyeonggi-do, 2021).

본 연구에서는 2018년부터 2022년까지 수행한 여수·광양 산업단지, 포항 산업단지, 대산 산업단지, 울산·온산 산업단지, 시화·반월 산업단지의 HAPs 물질에 대한 모니터링 연구 결과 중에서 가스상 오염물질을 평가하고 toluene/benzene (T/B) 및 m,p-Xylene/ethylbenzene (X/E) ratio와 conditional probability function (CPF) 모델로 배출원을 예측하여, 이를 통해 향후 산업단지 지역의 HAPs 관리방안 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1 시료 채취 위치 및 기간

5개 산업지역 가스상 HAPs 모니터링 연구는 2018년 여수·광양 산업단지, 2019년 포항 산업단지, 2020년 대산 산업단지, 2021년 울산·온산 산업단지, 2022년 시화·반월 산업단지까지 5개 산업에서 수행되었으며 측정기간 및 측정 장소는 표 1과 그림 1에 나타내었다. 여수·광양 산업단지는 5개 측정지점에서 3 계절 동안 4회차 측정, 포항 산업단지는 4개 측정지

Table 1. HAPs measurement period, site and type in 5 industrial complex.

Industrial complex	Measurement period	Measurement site	Location	Type
Yeosu Gwangyang	2018.12.14~12.20 2019.02.08~02.14 2019.04.24~04.30 2019.07.12~07.18	Haesan-dong	A	Industry
		Jungheung-dong	B	Industry
		Taein-dong	C	Industry
		Sangam-dong	D	Residential
		Geumho-dong	E	Residential
Pohang	2019.07.02~07.08 2019.08.06~08.12 2019.10.15~10.21 2019.11.12~11.18	Cheongnim-dong	A	Industry
		Ho-dong	B	Industry
		Sangdae-dong	C	Residential
		Heunghae-eup	D	Residential
Daesan	2020.05.26~06.01 2020.08.19~08.25 2020.10.06~10.12	Dokgot-1ri	A	Industry
		Hwagok-2ri	B	Residential
		Daejuk-1ri	C	Residential
		Daero-3ri	D	Residential
Ulsan Onsan	2021.04.27~05.03 2021.07.27~08.02 2021.09.28~10.04	Bugok-dong	A	Industry
		Hwasan-ri	B	Industry
		Yaeum-dong	C	Industry
		Sinjeong-dong	D	Residential
		Nammok-dong	E	Residential
		Deoksin-ri	F	Residential
Sihwa Banwol	2022.05.22~05.27 2022.07.26~08.02 2022.09.21~09.28	Wonsi-dong	A	Industry
		Jeongwang-2dong	B	Industry
		Ansan-station	C	Residential
		Jeongwangbon-dong	D	Residential

점에서 2계절 동안 4회차 측정, 대산 산업단지는 4개 측정지점에서 3계절 동안 3회차 측정, 울산·온산 산업단지는 6개 지점에서 3계절 동안 3회차 측정, 시화·반월 산업단지는 4개 지점에서 3계절 동안 3회차 측정을 수행하였으며 공통적으로 5개 산단에서 각 측정 회차에 7일 연속 측정이 이루어졌다. 측정지점 수, 측정 계절, 시료 채취 날짜가 산단마다 다르다. 5개 산단 모두 동일한 계절 및 날짜에 측정 못한 이유는, 연구 수행이 시작되는 날짜 및 기간이 다르기 때문이다. 각 산업단지의 측정지점은 여수·광양 산업단지는 3개의 공업지역과 2개의 주거지역, 포항은 각각 2개의 공업지역과 주거지역, 대산 산업단지는 1개의 공업지역과 3개의 주거지역, 울산·온산 산업단지는 3개의 공업지역과 3개의 주거지역, 시화·반월 산업단지는 각각 2개의 공업지역과 주거지역으로 구분된다.

2.2 측정방법

본 연구에서는 방향족탄화수소 (aromatic hydrocarbons) 8종, 할로겐화탄화수소 (halogenated hydrocarbons) 30종, Alkene 1종 그리고 OVOCs (Oxygenated VOCs) 10종을 포함하여 총 49종을 선정하여 연구를 수행하였다. 특정대기유해물질은 13종, 오존전구물질은 8종이 포함되어 있다.

VOCs 49종 중에서 OVOCs 10종을 제외한 39종의 시료 채취는 대기오염공정시험기준 (ES 01804.2, ES 01803.1)을 준용하여 수행하였다. VOCs는 오전(9시~10시)·오후(3시~4시)를 구분하여 1일 2회씩 연속으로 7일간 시료를 채취하였다. VOCs 측정에 사용된 펌프는 측정 전·후의 유량 변동이 적은 mini-pump air sampler (SIBATA MP-Σ30KN)을 사용하여, 약 100 mL/min의 유량으로 흡착관 1개당 1시간 동안 가동하여 채취함으로써 측정지점 1개 지점당 측정 회차별로 14개의 시료를 채취하였다.

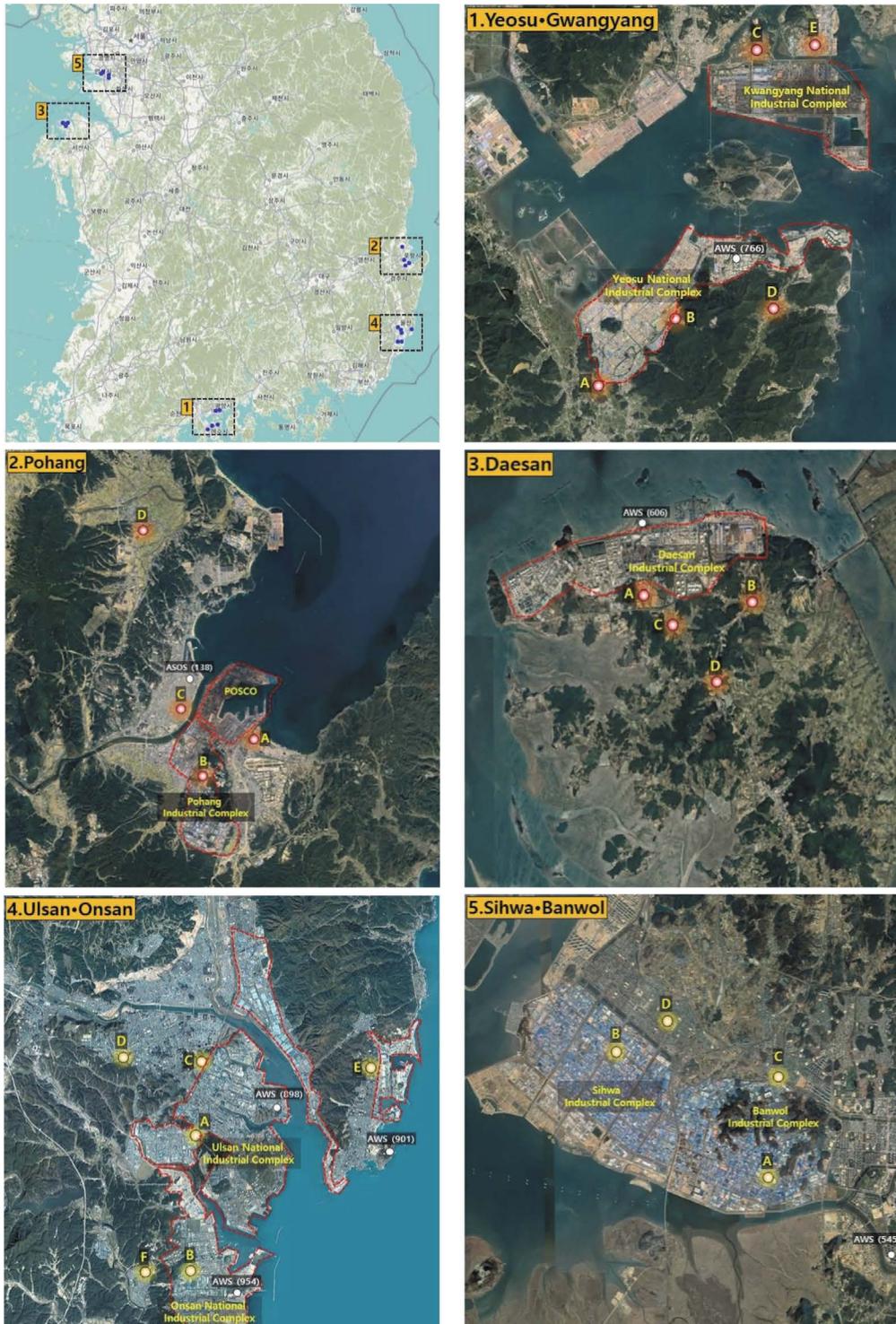


Fig. 1. VOCs and carbonyl compound sampling points in 5 industrial complex.

기체상 표준 혼합물질은 독성 VOCs 물질이 들어 있는 Lindeus사의 TO-14용 VOCs 표준혼합시료(공칭 1 ppm)를 사용하였다. 시료 채취 매체는 VOCs에 대해 우수한 흡착 능력과 탈착 능력을 나타내는 120 mg의 Tenax-Ta를 사용하였으며, VOCs 대상 물질의 분석에는 자동 열탈착 장치(TurboMatrix, Perkin-Elmer)가 GC컬럼(DB-1, 0.32 mm × 60 m × 3 μm, Agilent Technologies)으로 직접 연결된 GC/MS(HP 6890/5973 inert, Hewlett Packard) 시스템을 사용하였다.

49종의 VOCs 중에 환경 대기 중에서 검출 빈도가 높은 formaldehyde와 acetaldehyde를 비롯한 총 10종의 OVOCs가 있다. OVOCs의 정성·정량을 위해 carbonyl-2,4-DNPH 혼합표준물질(Custom Mix 50 μg/mL in acetonitrile, LC10224)을 사용하였다. OVOCs의 경우는 측정 시료 채취를 위해 소용량 펌프(SIBATA MP-Σ300N)를 사용하여 1 L/min의 유량으로 오전, 오후 각 1시간씩 DNPH-실리카가 충전된 카트리지를(Top trading)에 채취하였다. 이때 오존의 영향을 배제하기 위하여 1 cm (i.d.) × 2 cm (length)의 테플론 튜브에 약 1.5 g의 KI가 충전된 오존스크러버(Ozone Scrubber, Top trading, Korea)를 2,4-DNPH 카트리지 앞에 장착하여 시료를 채취하였으며, 시료 채취 시 빛에 의한 영향을 방지하기 위해 알루미늄 호일로 카트리지를 감싼 후 시료를 채취하였다. 2,4-DNPH와 반응하여 형성된 카보닐-DNPH 유도체는 피펫과 눈금이 매겨진 시험관을 이용하여, 아세트나이트릴을 2.5 mL씩 두 번 주입하여 약 1분 동안 DNPH 유도체를 추출하였다. DNPH 유도체 카보닐화합물은 자외선 검출기의 파장을 360 nm로 고정시켜 고성능액체 크로마토그래피(HPLC)를 이용하여 분석하였다(Kim *et al.*, 2018b).

정도관리는 GC/MS를 이용한 VOCs 분석 방법의 재현성을 표준 혼합시료의 상대표준편차(Relative Standard Deviation)로 평가하였다. 방향족탄화수소, 할로젠화탄화수소, Alkene의 분석 재현성이 10% 이내로 나타났으며 대기오염공정시험법에서 제시하고

있는 기준 20%에 만족하는 결과를 보였으며 정확도 또한 기준 30%를 만족하였다. 결정계수(R^2)값은 모두 0.99 이상이 나와서 선형성과 상관성은 양호한 결과를 얻었다. OVOCs의 상대 표준편차는 5% 미만으로 나타나 재현성이 양호한 것으로 나타났으며, 정확도 또한 기준치인 10% 이내를 만족하였다. 결정계수(R^2)값은 0.99 이상이 나와서 선형성과 상관성은 양호한 결과를 얻었다.

2.3 기상 개황

5개 산업단지의 기상자료는 크게 2가지 방법으로 획득하였다. 첫 번째는 산단 내부나 인근에 설치된 종관기상관측(ASOS, Automated Synoptic Observing System)과 방재기상관측(AWS, Auto Weather Station)의 자료를 이용하는 것이고, 두 번째는 시료 채취 장소에 기상대를 설치하여 기상자료를 직접 획득하였다. 설치한 기상대는 Weather Station (RainWise Inc)으로 온도, 습도, 풍향, 풍속 등 기상을 측정할 수 있는 장비이다. 표 2에 5개 산단의 기상 개황을 나타내었다.

여수·광양 산업단지는 여수 산단 내부에 위치한 여수 산단 AWS 자료를, 포항 산업단지는 포항 ASOS 자료를, 대산 산업단지는 대산 AWS 자료를, 울산·온산 산업단지는 장생포, 온산 AWS 자료를, 시화·반월은 기상관측소와 거리가 멀어 각 지점에 설치한 기상대 자료를 이용하였다. 시료 채취 회차별로 7일 동안 풍향의 빈도가 높은 방향을 주풍으로 평가하여, 해당 기간에 측정 장소가 산업단지의 영향을 받는 시기인지 판단할 수 있다. 5개 산단 대부분의 측정 지점에서 계절별, 측정 회차별로 차이는 있지만, 산업단지의 영향을 받는 것으로 나타났다. 대산 산업단지의 8월과 포항 산단의 11월에 주풍이 각각 남남서풍과 서남서풍으로, 산업단지의 영향이 비교적 적은 시기로 나타났다.

2.4 Conditional Probability Function (CPF)

CPF 모델은 조건부 확률 함수로 기상자료와 측정

Table 2. Sampling periods and weather conditions in 5 industrial complex.

Industrial complex	Weather data	Date	Wind speed (m/s)	Rainfall (mm)	Prevailing wind direction
Yeosu Gwangyang	Yeosu-sandan (766) AWS	2018.12.14~12.20	3.5±1.5	1.5	WSW
		2019.02.08~02.14	3.3±2.1	0	WNW
		2019.04.24~04.30	3.4±1.4	57	N
		2019.07.12~07.18	2.6±1.4	16.5	ENE
Pohang	Pohang (138) ASOS	2019.07.02~07.08	2.7±1.4	0	NE
		2019.08.06~08.12	2.9±1.3	62.5	NNE
		2019.10.15~10.21	2.9±1.8	31.8	NE
		2019.11.12~11.18	2.4±1.2	1.6	WSW
Daesan	Daesan (606) AWS	2020.05.26~06.01	1.9±0.8	0.5	SSW
		2020.08.19~08.25	1.8±1.1	0	WNW
		2020.10.06~10.12	3.4±1.6	0	ENE
Ulsan Onsan	Ulgi (901)	2021.04.27~05.03	3.4±1.5	10	SW
		2021.07.27~08.02	2.3±1.3	0	SW
		2021.09.28~10.04	2.6±1.1	29	SW
	Jangsaengpo (898)	2021.04.27~05.03	2.6±1.1	11	NE
		2021.07.27~08.02	2.0±1.1	0	WSW
		2021.09.28~10.04	2.1±1.0	33.5	NNW
	Onsan (954)	2021.04.27~05.03	3.3±1.6	10	S
		2021.07.27~08.02	2.6±1.2	1	SSW
		2021.09.28~10.04	3.0±1.4	19	SSW
Sihwa Banwol	A site (Wonsi-dong)	2022.05.22~05.27	1.3±0.7	-	W
		2022.07.26~08.02	1.2±0.7	-	W
		2022.09.21~09.28	0.5±0.6	-	E
	B site (Jeongwang-2dong)	2022.05.22~05.27	1.6±1.0	-	NW
		2022.07.26~08.02	1.3±0.7	-	ENE
		2022.09.21~09.28	1.0±0.8	-	WSW

자료를 이용하여 오염원의 국지적인 위치를 추정할 수 있는 방법이다. 풍향과 풍속 등 기상자료와 측정 자료를 결합하여 CPF를 계산할 수 있다. 계산된 CPF probability 값은 1에 가까울수록 그 방향에 오염원이 존재할 가능성이 높은 것을 의미한다. CPF 값은 아래 식으로 계산한다.

$$CPF_{(\Delta\theta)} = m_{(\Delta\theta)} / n_{(\Delta\theta)}$$

여기서, $m_{(\Delta\theta)}$ 는 $(\Delta\theta)$ 방향에서 불어오는 바람의 빈도수 중 농도가 일정 기준치일 때의 바람 빈도수를, $n_{(\Delta\theta)}$ 는 $(\Delta\theta)$ 방향에서 불어오는 바람의 총 빈도수를 의미한다(Park *et al.*, 2022a; Heo *et al.*, 2018). $(\Delta\theta)$

는 풍속이 매우 낮을 때는 불어오는 방향에 대한 불확실도가 높기 때문에 분석에서 제외하였으며 (0.5 m/s 미만), 고농도일 때 오염원의 국지적인 위치를 추정하기 위하여 본 연구에서는 75th percentile을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 5개 산업 유해대기오염물질 배출량 현황

5개 산업에서 대기 중으로 배출되는 유해대기오염물질의 배출량 및 배출원을 파악하기 위하여, 화학물

Table 3. List of VOC with respect to the emission amounts from the sources in 5 industrial complexes.

Rank	Chemical	Emission (kg/yr)	Number of source	Type of industry	Rank	Chemical	Emission (kg/yr)	Number of source	Type of industry
Yeosu									
1	2-Butene	284,725	2	A	16	Hydrogen chloride ^{a)}	26,669	26	A, B, C
2	Butane	224,001	16	A, B, C	17	Xylenes	26,026	26	J, B, A
3	1-Butene	142,012	17	A, B	18	1,3-Butadiene ^{a)}	25,942	19	A, E, B
4	Propylene	77,303	19	A, B, E	21	Benzene ^{a)}	20,211	20	A, B, D
5	Ethylene	62,574	20	A, E, B	22	1,2-Dichloroethane ¹⁾	19,255	4	A
6	n-Hexane	59,963	24	A, B, D	24	Ethylbenzene ¹⁾	17,263	20	J, A, B
7	Ammonia	57,520	14	A, C, B	32	Aniline ¹⁾	2,485	7	A, F
8	Styrene ^{a)}	50,629	19	E, A, F	35	Carbon tetrachloride ¹⁾	1,415	1	A
9	Toluene	46,371	32	A, B, E	50	Ethylene oxide ¹⁾	361	4	A
10	Vinyl chloride ¹⁾	41,345	3	A, E	53	Dichloromethane ¹⁾	301	5	A, G
13	Isoprene	30,852	6	D, A	56	Methyl ethyl ketone	163	2	A
14	Acrylonitrile ¹⁾	27,736	3	E, A, F	57	Formaldehyde ¹⁾	139	4	A
15	Phenol ¹⁾	27,229	9	A, F	58	Acetaldehyde ¹⁾	131	1	A
ΣVOCs		1,272,621 kg/yr			ΣHAPs		261,111 kg/yr		
Gwangyang									
1	Xylenes	145,087	4	K, A, I	8	Hydrogen sulfide	3,308	1	I
2	Ethylbenzene ¹⁾	36,886	2	K, A	9	Benzene ¹⁾	2,896	9	A, F, L
3	Ethylene	24,350	7	A, F, I	10	Methanol	2,029	4	A, I, L
5	Ammonia	12,568	4	A, C, I	18	Phenol ¹⁾	380	2	L
6	2-Propanol	7,725	1	K	20	Toluene	282	4	A, I
7	Hydrogen chloride ¹⁾	6,966	4	I, A	24	Hydrogen fluoride ¹⁾	104	1	I
ΣVOCs		242,581 kg/yr			ΣHAPs		47,232 kg/yr		
Pohang									
1	2-Propanol	324,288	6	J, I, A	7	Toluene	19,925	8	I, A, J
2	Xylenes	92,463	16	K, I, J	8	Methyl ethyl ketone	7,045	3	A, I
3	Ammonia	49,221	3	A, I	10	Hydrogen sulfide	5,280	1	I
4	Methanol	38,563	6	A, I, J	14	Ethylene	3,076	2	K, I
5	Hydrogen chloride ¹⁾	32,943	22	I, J, A	23	Benzene ¹⁾	453	2	I
6	Ethylbenzene ¹⁾	20,988	3	K, J	24	Naphthalene	390	4	A, I, L
ΣVOCs		567,275 kg/yr			ΣHAPs		54,384 kg/yr		
Daesan									
1	Propylene	170,951	4	B, A	20	1,3-Butadiene ¹⁾	4,649	3	A
3	Carbon monoxide	60,690	1	A	21	Ethylbenzene ¹⁾	4,126	8	A, B
4	2-Propanol	51,874	2	A	23	Acrylonitrile ¹⁾	2,714	1	A
5	Benzene ¹⁾	47,260	9	B, A	25	Hydrogen chloride ¹⁾	2,320	4	A
6	Xylenes	42,596	10	A, B, O	27	Methyl chloride	2,021	2	A
7	Butane	40,324	8	B, A	30	Propylene oxide ¹⁾	1,515	3	A
8	Hydrogen bromide	38,141	1	A	31	Vinyl chloride ¹⁾	1,379	1	A
9	Ethylene	23,633	3	A	32	1,2-Dichloroethane ¹⁾	907	1	A
10	Ammonia	22,142	3	B, A	39	Phenol ¹⁾	400	4	A
11	Toluene	20,034	10	A, B, O	40	Formaldehyde ¹⁾	397	2	A
15	Styrene ¹⁾	11,160	5	A	41	Tetrachloroethylene ¹⁾	383	3	A, B
17	Ethylene oxide ¹⁾	10,059	8	A	44	N,N-Dimethylformamide	192	3	A
ΣVOCs		549,808 kg/yr			ΣHAPs		87,269 kg/yr		

Table 3. Continued.

Rank	Chemical	Emission (kg/yr)	Number of source	Type of industry	Rank	Chemical	Emission (kg/yr)	Number of source	Type of industry
Ulsan · Onsan									
1	Xylenes	4,166,237	60	K, O, J	25	Vinyl chloride ¹⁾	25,822	3	A
2	Ethylbenzene ¹⁾	1,106,894	33	K, O, A	26	Acrylonitrile ¹⁾	25,693	12	D, A
3	Toluene	449,062	52	K, O, G	29	Chlorine ¹⁾	25,129	14	A, I
4	Methyl ethyl ketone	325,501	19	T, G, E	30	1,3-Butadiene ¹⁾	22,318	9	A, B
5	Propylene	285,947	16	A, B	33	Formaldehyde ¹⁾	18,494	11	U, A
6	2-Propanol	238,173	23	K, O, A	39	Dichloromethane ¹⁾	12,719	9	A, E, F
8	Ethylene	182,374	18	A, B, K	41	Chloroform ¹⁾	12,593	8	A
9	Carbon monoxide	95,700	5	A, B	43	Propylene oxide ¹⁾	10,069	9	B, A, D
10	Ammonia	76,881	34	C, A, E	46	Hydrogen cyanide ¹⁾	7,642	1	A
11	Vinyl acetate	76,253	7	D, A	47	Ethylene oxide ¹⁾	5,726	7	A
13	Benzene ¹⁾	58,579	19	A, B, D	49	1,2-Dichloroethane ¹⁾	4,634	5	D, A, R
18	Hydrogen fluoride ¹⁾	33,229	7	A, E	59	Methyl disulfide ¹⁾	2,975	7	A, B
21	Styrene ¹⁾	30,361	21	A, D, F	64	Phenol ¹⁾	1,925	7	F, A, B
22	Hydrogen chloride ¹⁾	29,551	46	A, B, O	76	Boron trifluoride ¹⁾	392	2	A
24	Tetrachloroethylene ¹⁾	26,826	4	A, B	85	Trichloroethylene ¹⁾	110	2	A, F
ΣVOCs		7,357,809 kg/yr			ΣHAPs		1,461,681 kg/yr		
Sihwa · Banwol									
1	Toluene	773,843	61	V, Q, T	15	Tetrachloroethylene ¹⁾	9,841	2	Z
2	Methyl ethyl ketone	525,585	37	Q, V, E	19	Chloroform ¹⁾	5,281	7	G, A
3	Ethyl acetate	368,663	47	V, T, E	24	Trichloroethylene ¹⁾	4,202	3	O
4	Dichloromethane ¹⁾	313,854	32	J, G, I	25	Formaldehyde ¹⁾	3,507	39	X, A, V
5	Xylenes	68,411	34	J, I, O	26	Styrene ¹⁾	3,006	12	A
6	Methanol	62,002	57	T, G, V	32	Ethylbenzene ¹⁾	2,081	5	A, O
7	2-Propanol	58,876	52	T, G, V	37	Hydrogen fluoride ¹⁾	990	4	I, L
8	Hydrogen chloride ¹⁾	51,025	84	X, J, F	44	Phenol ¹⁾	457	6	A
9	Acetic acid	34,249	33	T, G, V	46	Acrylonitrile ¹⁾	440	4	A
11	N,N Dimethylformamide	23,766	21	Q, E, G	50	Aniline ¹⁾	279	4	A, F
ΣVOCs		2,310,358 kg/yr			ΣHAPs		394,963 kg/yr		

¹⁾included in the 35 HAP, ²⁾Industry type :

A: Manufacture of chemicals and chemical products; except pharmaceuticals and medicinal chemicals

B: Manufacture of coke, briquettes and refined petroleum products, C: Electricity, gas, steam and air conditioning supply

D: Warehousing and support activities for transportation, E: Manufacture of rubber and plastics products

F: Waste collection, treatment and disposal activities; materials recovery

G: Manufacture of pharmaceuticals, medicinal chemical and botanical products

I: Manufacture of basic metals, J: Manufacture of fabricated metal products, except machinery and furniture

K: Manufacture of other transport equipment, L: Manufacture of other non-metallic mineral products

O: Manufacture of motor vehicles, trailers and semitrailers, Q: Manufacture of textiles, except apparel

R: Manufacture of food products, T: Printing and reproduction of recorded media

U: Manufacture of wood and of products of wood and cork; except furniture, V: Manufacture of pulp, paper and paper products,

X: Manufacture of electronic components, computer; visual, sounding and communication equipment

Pollutant Release and Transfer Registers (PRTR, 2020) National Institute of Chemical Safety

질안전원의 최신 자료인 2020년 PRTR 자료를 이용하였다. 표 3에 5개 산업의 PRTR 자료를 제시하였다. 여수·광양 산업은 산업의 배출 특성이 많이 다르기 때문에 분리하여 배출량을 조사하였으며, VOC 위주로 입자상 물질을 제외한 순위이며 특정대기유해물

질 위주로 작성하였다. 광양, 포항, 대산, 시화·반월 산업은 10위권 안에 알루미늄, 망간 및 화합물이 있어서 제외하였다.

가스상 오염물질 배출량은 울산·온산 산업이 가장 많고 대산 산업이 가장 적다. 특정대기오염물질 배출

량은 울산·온산 산업에서 21종에서 1,462 ton/yr (19.9%), 시화·반월은 12종에서 395 ton/yr (17.6%), 여수·광양은 14종에서 308 ton/yr (20.5%), 대산은 13종에서 87 ton/yr (17.0%), 포항 산업은 3종에서 54 ton/yr (10.7%)이 배출되고 있다. 각 산업에서 가장 많이 배출되는 특정대기유해물질을 보면 여수·광양은 ethylbenzene, 포항은 hydrogen chloride, 대산은 benzene, 울산·온산은 ethylbenzene, 시화·반월은 dichloromethane이다.

각 산업에서 특정대기유해물질을 배출하는 주요 업종을 보면, 여수·광양 산업은 “화학물질 및 화학제품 제조업(A)”, “고무 및 플라스틱제품 제조업(E)”, “폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업(F)”이다. 포항 산업은 “금속 가공제품 제조업(J)”, “1차 금속 제조업(I)”, “기타 운송장비 제조업(K)”이다. 대산 산업은 “화학물질 및 화학제품 제조업(A)”, “코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업(B)”이다. 울산·온산 산업은 “기타 운송장비 제조업(K)”, “자동차 트레일러 제조업(O)”, “화학물질 및 화학제품 제조업(A)”이다. 시화·반월은 “금속 가공제품 제조업(J)”, “의료용 물질 및 의약품 제조업(G)”, “전자 부품, 컴퓨터 제조업(X)”이다. 5개 산업마다 배출량이 많은 성분 중에 2-butene, butane, 1-butene, propylene, n-hexane, 2-propanol, ammonia, methanol 등은 본 연구에서 측정하지 않아서 PRTR 배출량 순위와 본 연구의 결과를 직접적으로 비교하기 어렵지만, 순위에 있는 대부분의 HAPs 물질이 분석되었다.

3.2 VOCs 분석 결과

표 4에 5개 산업의 VOCs 분석 결과를 나타내었다. 49종 분석물질의 평균 농도와 최대값을 각각 나타냈다. 5개 산업에서 검출된 성분은 여수·광양 39종, 포항 34종, 대산 39종, 울산·온산 39종, 시화·반월 산업은 38종으로 포항 산업이 가장 적게 검출되었고 나머지 4개 산업은 비슷하였다.

5개 산업 benzene의 평균 농도가 울산·온산 1.02 ppb, 대산 0.78 ppb, 여수·광양 0.73 ppb, 포항 0.57

ppb, 시화·반월 0.51 ppb로 연평균 대기환경기준(약 1.5 ppb)보다 낮게 나타났다. 포항 산업은 2010년 (Kim *et al.*, 2018a) 연구 결과인 0.55 ppb와 거의 유사한 결과를 나타내었고, 대산 산업은 2011년 (Baek *et al.*, 2020) 공업지역 연구 결과인 0.95 ppb보다 감소하였으며, 시화·반월 산업은 2010년 (Byeon *et al.*, 2010) 연구 결과보다 매우 낮았으며, 2018년 (Kim *et al.*, 2020) 연구 결과인 0.45 ppb와 비슷한 결과를 나타냈다.

표 3의 2020년 PRTR 자료의 benzene 배출량을 보면 울산·온산 58,579 kg/yr, 대산 47,260 kg/yr, 여수·광양 23,107 kg/yr, 포항 453 kg/yr, 시화·반월 산업은 거의 배출되지 않는다. PRTR 자료를 보면 benzene의 농도가 울산·온산 산업이 가장 높고, 시화·반월 산업의 농도가 가장 낮은 것이 타당하나, 배출량 차이에 비하여 농도 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 도시 지역에서 benzene은 자동차 배기가스와 주유소 등에서 배출되며, 산업단지에서는 석유정제업이나 화학제품 제조업에서 배출된다 (Lee *et al.*, 2023; Baek *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019). 따라서 포항 및 시화·반월 산업의 benzene 농도는 표 1의 측정지점을 참고하면 자동차와 주유소 등의 영향을 많이 받은 것으로 사료되며, 여수·광양과 울산·온산 산업은 산업단지의 배출원과 자동차 배기가스 및 주유소의 영향을 동시에 받을 것으로 사료되며, 대산 산업은 측정지점이 교통량 및 거주 인구가 매우 적기 때문에 산업의 영향을 많이 받을 것으로 사료된다.

1,3-Butadiene과 formaldehyde는 특정대기유해물질이면서 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, 이하 IARC) 기준 1등급 발암물질이다. 1,3-Butadiene은 주로 화학물질 및 화학제품 제조업에서 배출되며, 자동차 배기가스 및 담배연기에서도 배출되는 물질로 울산·온산 0.57 ppb, 대산 0.18, 여수·광양 0.1 ppb, 포항 0.01 미만, 시화·반월은 불검출(N.D)로 나타났다. 2020년 PRTR 자료를 보면 시화·반월과 포항 산업은 배출되지 않으며, 여수·광양은 25,942 kg/yr, 울산·온산은 22,318 kg/yr, 대산은

Table 4. VOCs mean, max concentrations of 5 industrial complex.

Industrial complex	Yeosu · Gwangyang (n = 280)		Pohang (n = 224)		Daesan (n = 252)		Ulsan · Onsan (n = 252)		Sihwa · Banwol (n = 168)	
	Year		Year		Year		Year		Year	
	2018~2019		2019		2020		2021		2022	
Compounds	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)
Freon 12	N.D ³⁾	N.D	N.D	N.D	0.06	3.45	0.03	3.21	0.03	3.13
Methylchloride	< 0.01	0.68	N.D	N.D	0.42	4.36	0.06	5.51	0.30	11.42
Freon 114	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	< 0.01	0.02	N.D	N.D
Vinyl chloride ²⁾	< 0.01	1.07	N.D	N.D	0.03	1.65	0.01	1.62	N.D	N.D
Methyl bromide	< 0.01	0.26	< 0.01	0.19	< 0.01	0.35	N.D	N.D	< 0.01	0.26
Ethylchloride	< 0.01	0.38	N.D	N.D	< 0.01	0.23	N.D	N.D	N.D	N.D
Freon 11	0.15	1.93	0.06	0.90	0.18	1.41	0.21	0.89	0.08	0.29
1,1-Dichloroethene	< 0.01	0.20	N.D	N.D	< 0.01	0.32	N.D	N.D	N.D	N.D
Dichloromethane ²⁾	0.64	4.24	0.09	0.51	0.31	2.83	0.44	9.76	0.51	3.16
Freon 113	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02	0.71	0.01	0.11	< 0.01	0.08
1,1-Dichloroethane	N.D	N.D	N.D	N.D	< 0.01	0.72	N.D	N.D	N.D	N.D
cis-1,2-Dichloroethylene	< 0.01	0.07	N.D	N.D	N.D	N.D	< 0.01	0.16	N.D	N.D
Chloroform ²⁾	0.05	0.63	0.15	0.65	0.36	4.12	0.91	30.82	0.17	0.81
1,2-Dichloroethane ²⁾	0.21	2.63	0.03	0.27	0.23	3.70	0.08	2.87	0.11	0.49
Carbontetrachloride ²⁾	0.12	0.71	0.09	0.32	0.31	0.99	0.05	0.19	0.10	0.22
1,2-Dichloropropane	0.08	0.88	0.03	0.29	0.15	0.80	0.02	0.21	0.18	0.63
Trichloroethylene ²⁾	0.05	0.76	0.06	2.52	0.20	1.19	0.01	0.22	0.46	11.05
1,1,2-Trichloroethane	0.02	0.78	N.D	N.D	N.D	N.D	< 0.01	0.16	< 0.01	0.18
Tetrachloroethylene ²⁾	0.05	0.98	0.04	0.52	0.03	0.70	0.02	0.49	0.12	1.31
Chlorobenzene	0.06	0.82	0.02	0.44	0.04	0.98	0.02	0.43	0.07	5.02
1,1,2,2-Tetrachloroethane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	< 0.01	0.10
1,4-Dichlorobenzene	0.06	1.11	0.04	0.44	0.12	0.78	0.11	0.74	0.02	0.21
1,3-Dichlorobenzene	0.02	0.66	< 0.01	0.20	0.05	1.72	< 0.01	0.25	0.02	0.24
1,2-Dichlorobenzene	0.05	1.14	0.01	0.49	< 0.01	0.76	< 0.01	0.13	0.01	0.19
1,2,4-Trichlorobenzene	< 0.01	0.56	< 0.01	0.24	N.D	N.D	< 0.01	0.21	< 0.01	0.31
Hexachloro 1,3-butadiene	N.D	N.D	< 0.01	0.41	N.D	N.D	N.D	N.D	< 0.01	0.10
Benzene ^{1,2)}	0.73	5.81	0.57	2.56	0.78	6.79	1.02	13.47	0.51	1.38
Toluene ¹⁾	0.93	6.37	1.91	20.55	0.89	6.23	1.15	13.37	5.69	54.28
Ethylbenzene ^{1,2)}	0.48	3.97	1.01	11.28	0.46	4.64	0.52	4.03	1.03	3.94
m,p-Xylene ¹⁾	0.32	2.99	0.75	8.51	0.32	3.77	0.46	5.68	0.82	8.67
Styrene ^{1,2)}	0.29	3.07	0.26	2.20	0.23	4.68	0.17	1.85	0.13	0.81
o-Xylene ¹⁾	0.29	2.05	0.56	3.90	0.31	2.73	0.48	4.67	0.56	2.08
1,3,5-Trimethylbenzene ¹⁾	0.09	0.67	0.19	0.75	0.04	0.52	0.12	0.46	0.09	0.36
1,2,4-Trimethylbenzene ¹⁾	0.15	0.86	0.39	2.70	0.10	1.47	0.20	0.98	0.16	1.04
1,3-Butadiene ²⁾	0.10	1.63	< 0.01	0.26	0.18	5.86	0.57	25.97	N.D	N.D

Table 4. Continued.

Industrial complex	Yeosu·Gwangyang (n = 280)		Pohang (n = 224)		Daesan (n = 252)		Ulsan·Onsan (n = 252)		Sihwa·Banwol (n = 168)	
	2018~2019		2019		2020		2021		2022	
Year	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)	Mean (ppb)	Max (ppb)
Compounds										
Formaldehyde ²⁾	2.40	9.06	3.55	10.79	5.69	29.36	3.91	14.80	4.51	33.17
Acetaldehyde ²⁾	1.74	5.85	1.81	7.36	1.82	10.45	1.88	10.48	0.97	22.14
Acetone	1.87	11.69	2.03	7.81	2.18	4.77	3.54	18.01	6.14	19.17
Acroleine	0.13	2.33	0.05	0.46	0.11	1.91	<0.01	0.10	<0.01	0.11
Propionaldehyde	0.19	1.02	0.09	1.48	0.06	1.19	0.20	1.11	0.17	0.55
2-Butanone	0.95	4.72	0.96	14.71	0.51	13.44	1.00	20.13	3.27	39.59
Butyraldehyde	0.17	3.43	0.09	0.93	0.02	0.31	0.17	0.99	0.06	0.31
Benzaldehyde	0.04	0.42	0.03	0.89	0.08	0.50	0.04	0.61	0.03	0.23
i-Valeraldehyde	0.02	0.26	0.00	0.54	0.03	0.23	0.04	0.72	<0.01	0.33
n-Valeraldehyde	0.04	0.21	0.00	0.43	0.01	0.21	0.03	0.38	<0.01	0.15
Number of detected VOC	39		34		39		39		38	

¹⁾Included in the 56 ozone precursor, ²⁾Included in the 35 HAP, ³⁾N.D.: Not Detection (less than <0.01)

4,649 kg/yr를 각각 배출하고 있다. 배출량에 비하여 농도가 낮은 이유는 반응성으로 인해 대기 중으로 배출된 후 빠르게 분해되기 때문인 것으로 사료된다 (Baek *et al.*, 2020; Sexton *et al.*, 2007).

Formaldehyde의 경우 눈, 피부 및 호흡기에 자극을 주거나 피부에 과민 반응을 유발할 수 있다(NIER, 2012). OVOCs 10개 물질 중에서 시화·반월 산단은 acetone의 평균 농도가 가장 높고, 다른 4개 산단은 formaldehyde의 평균 농도가 가장 높게 나타났다. 평균 농도는 대산 산단이 5.69 ppb로 가장 높고 여수·광양 산단은 2.40 ppb로 가장 낮게 나타났다. 2020년 PRTR 자료를 보면 울산·온산 18,494 kg/yr, 시화·반월 3,507 kg/yr, 대산 397 kg/yr, 여수·광양 139 kg/yr, 포항 38 kg/yr이다. 배출량과 각 산단의 평균 농도가 일치하지 않음을 알 수 있는데 OVOCs는 생산 공정이나 자동차와 같은 1차 배출원에서 배출되거나, 환경 대기에서 탄화수소의 광화학 반응에 의해 2차적으로 생성되기 때문에 배출량만으로 평가하기 어렵다. 도시 지역의 OVOCs는 화석 연료를 사용하는 자동차에서 배출되는 formaldehyde와 acetaldehyde가 가장 많은 부분을 차지하며, propionaldehyde, butyraldehyde, benzaldehyde 등은 연료의 연소과정을 통해 배출된다(Magnusson *et al.*, 2002). 본 연구에서는 formaldehyde, acetaldehyde, acetone, 2-butanone (Methyl Ethyl Ketone) 등 4종의 농도가 높게 나타났다.

그림 2에 5개 산단의 VOCs 그룹별 분석 결과를 나타내었다. 전체 49종의 분석물질을 방향족탄화수소 (aromatic hydrocarbons) 8종, 할로젠화탄화수소 (halogenated hydrocarbons) 30종, Alkene 1종, 그리고 카보닐화합물 10종을 OVOCs (oxygenated VOCs) (Liu *et al.*, 2021; Xia *et al.*, 2021; Legreid *et al.*, 2007)로 그룹화하였다. 49종 중에서 alkene 물질은 1,3-butadiene 1종이다. 5개 산단의 ΣVOCs는 시화·반월 84.58 µg/m³, 울산·온산 52.09 µg/m³, 포항 46.24 µg/m³, 대산 45.64 µg/m³, 여수·광양 38.51 µg/m³ 순서로 시화·반월 산단이 가장 높고, 여수·광양 산단이 낮게

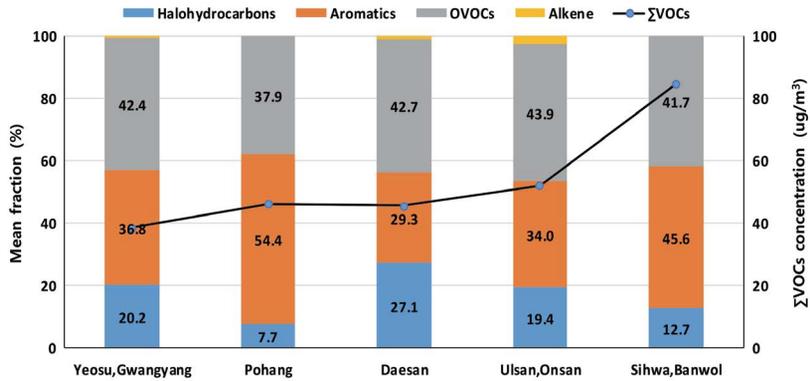


Fig. 2. Mean fractions and VOCs concentration of 5 industrial complexes.

나타났다. 대규모 석유화학 산업단지가 없는 시화·반월 산업단지의 Σ VOCs의 농도가 가장 높은 이유는 약 2만개의 소규모 업체에서 배출하는 VOCs가 원인일 것으로 사료된다. 또한 표 5의 기상자료에서 알 수 있듯이 시화·반월 산단의 풍속이 측정기간 동안 다른 산단에 비해 느렸기 때문에 사료된다. 시화·반월 산단의 A 측정지점의 경우 울산·온산 및 여수·광양에 비해 약 3배 정도 풍속이 느리게 측정되었다. 풍속과 대기오염물질 확산 연구에 따르면(Chung et al., 2005) 풍속이 2배 증가하면 오염물질의 농도가 34%~38% 감소하는 것으로 보고된 바 있다.

3.3 측정지점별, 측정시기별 분석결과

그림 3에 5개 산단 측정지점별로 VOCs 그룹별 농도와, benzene과 formaldehyde의 농도를 각각 나타내었다. 각 측정지점은 표 1과 그림 1에 나타냈듯이 공업지역과, 주거지역으로 구분하였다. 첫 번째 그룹별 농도를 보면 포항, 울산·온산, 시화·반월 3개 산단은 공업지역의 농도가 높은 것을 알 수 있으며 여수·광양과 대산 산단은 차이가 거의 없다. 여수·광양과 대산 산단은 할로젠탄화수소, 방향족탄화수소, OVOCs 등 3개의 그룹별 농도 또한 비슷한 경향을 나타내었다. 공업지역과 주거지역의 농도 차이가 큰 포항 산단 B지점과 시화·반월 A, B지점은 방향족탄화수소의 농도가 높았으며, 울산·온산 산단은 방향족탄화수소와 할로젠탄화수소의 농도가 더 높게 나타났다.

Benzene의 경우 평균 농도가 낮은 여수·광양, 포항, 시화·반월 3개의 산업단지는 공업지역과 주거지역의 농도 차이가 거의 없었으며, 평균 농도가 높은 대산과 울산·온산 산업단지는 공업지역의 농도가 더 높았다. Formaldehyde는 5개 산단 중에서는 대산 산단과 시화·반월 산단의 C 지점의 농도가 높게 나타났다. 대산 산단은 공업지역보다 주거지역의 농도가 높게 나타났으며, 그 외 4개 산단은 비슷하게 나타났다.

그림 4에 5개 산단의 측정시기별로 VOCs 그룹별 농도와 benzene과 formaldehyde의 농도를 각각 나타내었다. 3회 측정된 대산, 울산·온산, 시화·반월 산업단지는 봄(4~5월), 여름(7~8월), 가을(9~10월) 3계절 동안 측정하였으나, 4회 측정된 여수·광양(12월, 2월, 4월, 7월)과 포항(7~8월, 10~11월) 산단은 계절로 구분하기 어려워 5개 산단 전부 측정된 월로 표기하였다.

5개 산단의 측정시기별 VOCs 농도는 시화·반월 산단의 5월에 $104.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 여수·광양 산단의 4월에 $20.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮았다. 포항, 대산, 울산·온산 3개 산단은 측정시기별로 VOCs의 농도 차이가 크지 않았으나, 여수·광양과 시화·반월 산단은 측정시기별로 차이가 크게 나타났다. 화학공업이 발달한 여수·광양 산단의 2월과 대산 산단의 10월에 방향족화합물의 비율이 각각 3.0%, 5.9%로 가장 낮았으며 이때 할로젠탄화수소의 비율이 가장 높

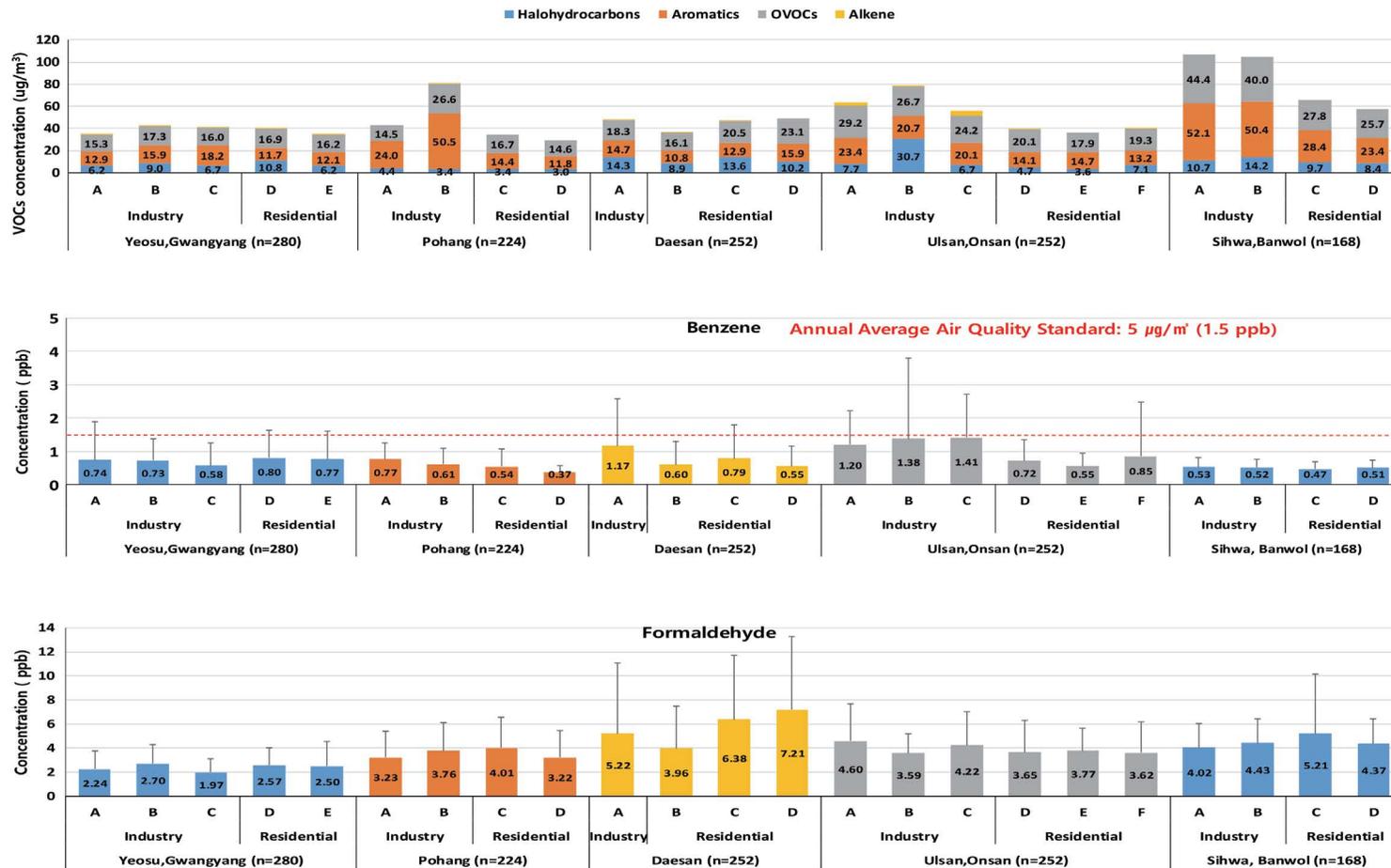


Fig. 3. Comparison of VOCs concentrations by measurement site in 5 industrial complexes.

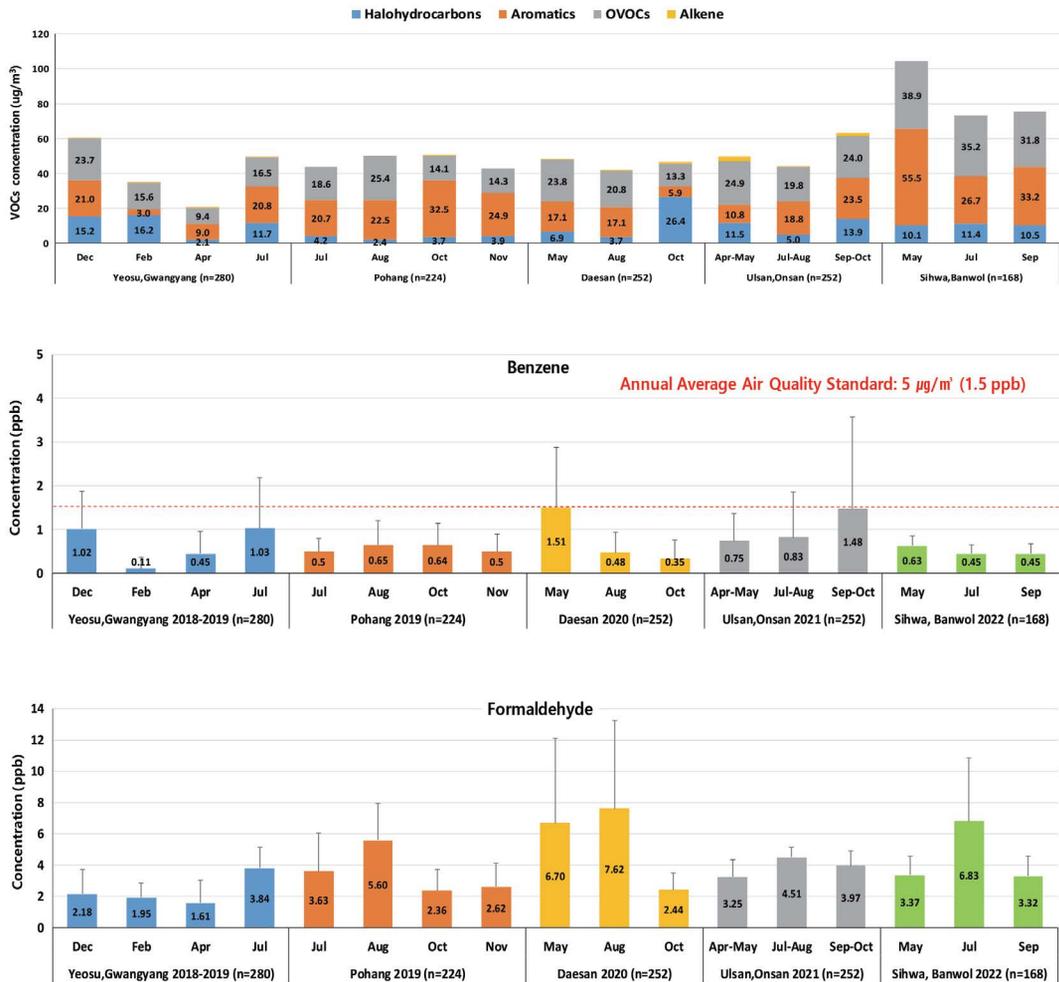


Fig. 4. Comparison of VOCs concentration by measured period in 5 industrial complexes.

았다. 같은 산업단지에서도 측정시기별로 VOCs 그룹의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. Benzene은 포항과 시화·반월 산업단에서 측정시기별로 농도 차이가 크지 않았으나, 여수·광양, 대산, 울산·온산 산업단은 농도 차이가 크게 나타났다. 특히 대산 5월은 1.51 ppb로 기준치보다 높았으며 울산·온산 9~10월은 1.48 ppb로 기준치에 거의 근접하였다.

OVOCs는 1차 오염물질이자 대기 중에서 광화학 반응을 통해 생성되는 2차 오염물질로 여름철의 농도가 다른 계절에 비하여 증가하는 경향을 보인다고 알려져 있다. 그러나 formaldehyde를 포함한 10종의

OVOCs 농도를 보면 7~8월에 농도가 높지 않고, 산업단지에 따라 최고 농도를 보이는 측정시기가 다르게 나타났다. 여수·광양은 12월, 포항은 8월, 대산은 5월, 울산·온산은 4~5월, 시화·반월은 5월에 농도가 가장 높게 나타났다.

3. 4. VOCs 오염원 추정

5개 산업단에서 측정된 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)의 중간 농도비를 이용하여, 각 산업단의 VOCs 배출원과 외부 공기의 유입상태를 추정하였다. 그림 5에 5개 산업단의 측정지점별, 측정시기별

toluene/benzene (이하 T/B) 농도 비율 분포와 m,p-Xylene/ethylbenzene (이하 X/E)의 농도 비율 분포를 나타냈다.

T/B 비율은 측정지점에 영향을 주는 대기 오염물질의 배출원을 추정하는데 널리 사용된다 (Jaars *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016). T/B 비율 값이 1보다 작은 경우는 바이오매스, 바이오연료, 화석연료 연소의 경우이며, 차량 배기가스의 경우에는 1~10, 1보다 큰 경우는 산업공정 및 용매를 사용한 경우이다 (Zhang *et al.*, 2016). 또한 T/B 비율 3을 기준으로 3보다 작으면 차량 배기가스의 영향이 우세하고, 3보다 크면 산업단지의 영향이 더 우세하다고 평가하기도 한다 (Kim *et al.*, 2019).

5개 산업단지에서 T/B 비율이 가장 큰 산업은 시화·반월 산업단지로 공업지역인 A, B 지점의 평균이 각각 16.2와 14.4이며 주거지역인 C, D 지점도 각각 8.1과 5.5로, 4지점 모두 산업의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났으며, 포항 산업의 공업지역인 B 지점 또한 평균 7.3으로 산업의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다. 여수·광양 산업은 1.1~1.7, 포항 산업은 B 지점을 제외한 다른 지점은 1.5~2.2, 대산 산업은 0.7~1.8, 울산·온산 산업은 1.0~1.4로 차량 배기가스의 영향이 산업의 영향보다 더 큰 것으로 사료된다. 측정시기별 T/B 비율은 여수·광양 산업은 1.1~1.6, 포항 산업은 2.8~4.3, 대산 산업은 0.6~2.2, 울산·온산 산업은 0.9~1.1, 시화·반월 산업은 7.9~13.7이다. 여수·광양, 대산, 울산·온산 3개 산업은 특정 시기에 T/B 비율이 높아지는 현상은 없었으나, 포항 산업은 10월에 시화·반월 산업은 5월에 높게 나타났다.

X/E 비율은 대기 중에서 얼마나 오래 체류했는지를 나타낸다. 대기 중 VOC의 체류시간은 benzene은 9.4일, toluene은 1.9일, m-Xylene은 11.8 hr, p-Xylene은 19.4 hr, ethylbenzene은 1.6일이다 (Ragothaman and Anderson, 2017; Monod *et al.*, 2001). 또한 2020년 국립환경과학원의 장거리이동대기오염물질 보고서를 보면 1,3-butadiene, formaldehyde는 수 시간, vinyl chloride, trichloroethylene은 수일, dichloromet-

hane은 수개월로 제시하였다 (NIER, 2020). VOCs 물질의 대기 중 체류시간에 영향을 주는 요인은 주로 광화학반응과 OH 라디칼과의 반응이며, 반응이 빠른 물질은 체류시간이 짧아진다 (Monod *et al.*, 2001). X/E 비율이 클수록 지역오염원의 영향이, X/E 비율이 낮을수록 외부 유입에 의한 영향이 크다 (Song *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2019). X/E 비율 값이 크면 오염원이 측정지점과 가까운 거리에 위치하여 광화학 반응이 활발히 진행되지 않았음을 의미한다.

측정지점별 X/E 값을 보면 포항 산업이 평균 0.1~3.9로 가장 크고, 포항 산업의 공업지역인 B 지점이 평균 3.9로 5개 산업 전 측정지점에서 가장 높게 나타났다. 여수·광양 산업은 0.5~0.8, B 지점을 제외한 포항 산업은 0.1~1.5, 대산 산업은 0.5~1.1, 울산·온산 산업은 0.8~1.2, 시화·반월 산업은 0.7~0.9로 나타났다. 포항 산업 B 지점을 제외한 전 측정지점에서 외부 유입에 의한 영향이 크게 나타났다. 측정시기별 X/E 비율은 여수·광양 산업이 평균 0.0~0.9, 포항 산업이 0.6~0.9, 대산 산업이 0.4~1.0, 울산·온산 산업이 0.8~0.9, 시화·반월 산업은 모두 0.8을 나타냈다. 측정지점별 결과와 비슷하게 5개 산업 모두, 외부 유입에 의한 영향을 받는 것으로 나타났다.

CPF를 계산한 지점은 각각의 산업에서 benzene과 formaldehyde 농도가 최대를 나타내는 측정지점을 선택하였다. 여수·광양은 (A, E), 포항은 (A, C), 대산은 (C, C), 울산·온산은 (B, F), 시화·반월은 (B, C) 측정지점이다. 대산을 제외한 4개의 산업은 평균 농도가 높은 지점이 최대 농도 또한 높게 나타났으나, 대산 산업은 평균 농도와 최대 농도를 나타내는 지점이 다르다. Benzene의 경우 평균 농도는 공업지역인 A 지점이 높으나 최대 농도는 주거지역 C 지점이 높게 나타난 이유는, C 지점을 중심으로 Y자 형태의 골이 형성되어 있어, 바람이 불 때 C 지점의 농도가 최대 값을 나타낸 것으로 사료된다 (Park *et al.*, 2022b). 그림 5에 5개 산업의 benzene과 formaldehyde의 CPF 분석 결과를 나타내었다. Benzene 결과를 보면 전반적으로 오염원이 위치하는 방향과 산업이 위치하는

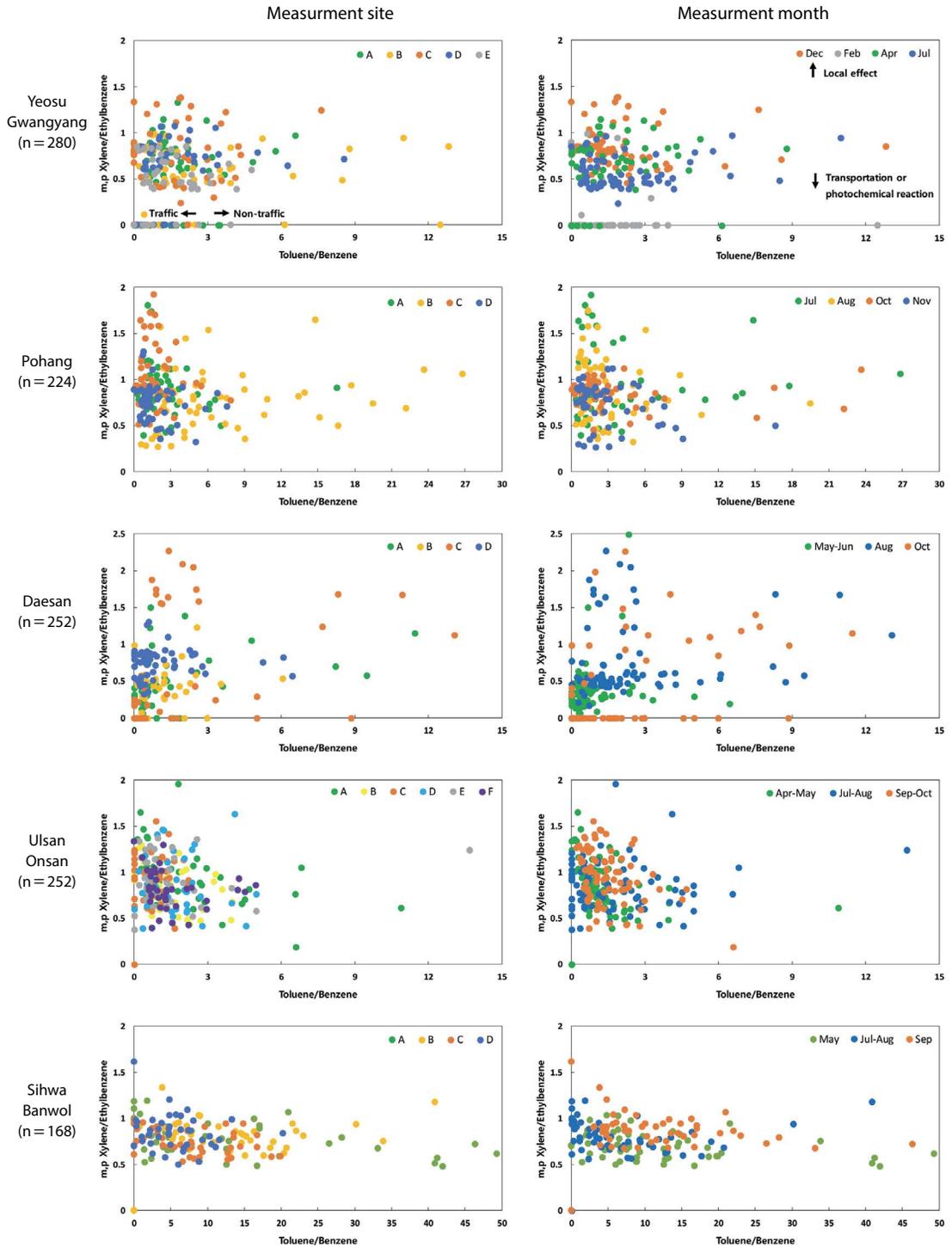


Fig. 5. CPF plot of 5 industrial complexes about benzene and formaldehyde.

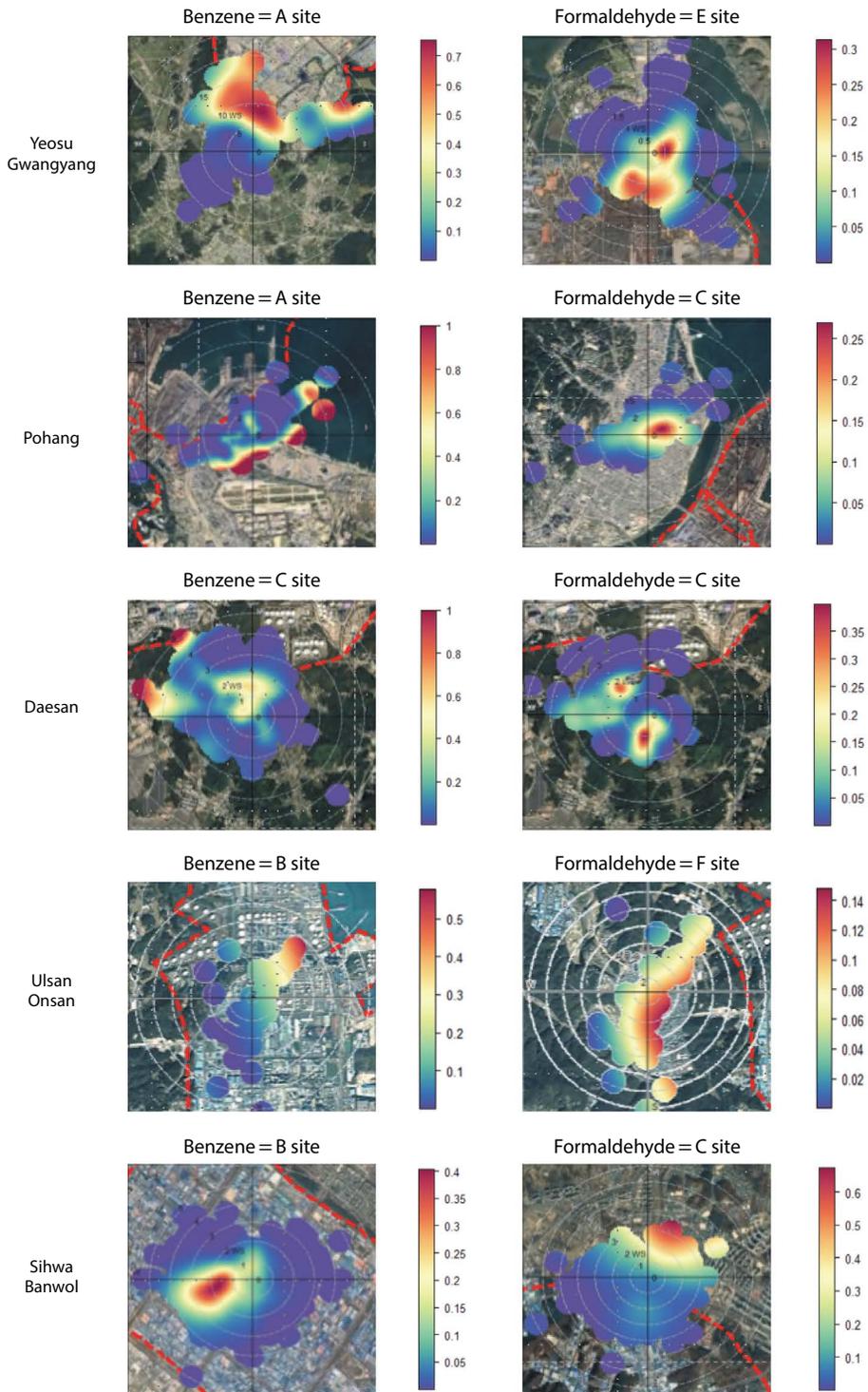


Fig. 6. CPF plot of 5 industrial complexes about benzene and formaldehyde.

방향이 잘 일치하고 있다. 여수·광양 산단의 A 측정지점의 북동 방향에 여수 산단이, 대산 C 측정지점의 북서 방향에 대산 산단이, 울산·온산 B 측정지점의 북서 방향, 시화·반월 B 측정지점의 남서 방향에 각각 산단이 위치하고 있으며, 포항 산단 B 측정지점만 주거지역 및 바닷가 방향이다. 포항과 대산 산단의 경우 CPF probability 값이 1이므로 해당 방향에 오염원이 높은 확률로 위치하는 것으로 사료된다. Formaldehyde는 CPF probability 값이 0.14~0.6으로 해당 위치에 오염원이 위치할 확률은 benzene보다 낮다고 사료되며, benzene과 다르게 오염원이 위치하는 방향과 산단이 위치하는 방향이 일치하지 않고 있다. 여수·광양 산단의 E 측정지점의 남쪽방향에 광양산단이 위치하고 있으나 동쪽은 일반 주거지역과 바닷가이며, 포항 산단의 C 측정지점 또한 오염원의 위치가 주거지역 및 바닷가 방향이다. 대산 C 측정지점의 남쪽방향은 농촌 지역이며, 시화·반월 C 측정지점의 북서쪽은 주거지역이다. 울산·온산 F 측정지점의 남동 방향에 온산 산업단지가 위치하고 있다. Formaldehyde는 생산 공정이나 자동차와 같은 1차 배출원과 및 환경 대기에서 광화학 반응에 의해 2차적으로 생성되기 때문에 오염원의 위치가 산단 방향과 일치하지 않을 수 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 여수·광양, 포항, 대산, 울산·온산, 시화·반월 5개 국가산업단지에서 가스상 HAPs 물질 49종을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

5개 산단에서 전체 49종의 물질 중에서 검출된 성분은 여수·광양은 39종, 포항 34종, 대산 39종, 울산·온산 39종, 시화·반월 38종이다. 오존전구물질 8종은 5개 산단 모두 검출되었고, 특정대기유해물질 13종 중에서 1,3-butadiene은 시화·반월 산단에서, vinyl chloride는 포항과 시화·반월 산단에서 검출되지 않았다.

5개 산단의 Σ VOCs는 시화·반월 $84.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 울산·온산 $52.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 포항 $46.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대산 $45.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여수·광양 $38.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순서로 시화·반월 산단이 가장 높고, 여수·광양 산단이 낮게 나타났다. 대규모 석유화학 산업단지가 없는 시화·반월 산업단지의 Σ VOCs의 농도가 가장 높은 이유는 2023년 1분기 기준으로 약 2만개의 소규모 업체에서 배출하는 VOCs가 원인일 것으로 사료된다. 2020년 PRTR 자료를 보면 울산·온산 산단의 배출량이 시화·반월 산단보다 3배 이상 많은데, Σ VOCs 농도가 시화·반월 산단이 높은 이유는, 시화·반월 산단의 풍속이 측정기간 동안 다른 산단에 비해 최대 3배 이상 느렸기 때문으로 사료된다. 5개 산단 모두 benzene의 평균 농도가 연평균 대기환경기준 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (약 1.5 ppb)보다 낮았으며, formaldehyde의 평균 농도는 대산이 5.69 ppb로 가장 높고, 여수·광양 산단이 2.40 ppb로 가장 낮게 나타났다.

측정지점별 VOCs 농도는 포항, 울산·온산, 시화·반월 3개 산단은 공업지역의 농도가 높은 것을 알 수 있으며 여수·광양과 대산 산단은 공업지역과 주거지역의 농도 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 포항 산단과 시화·반월 산단은 방향족탄화수소가, 울산·온산 산단은 방향족탄화수소와 할로겐탄화수소의 농도가 공업지역이 더 높게 나타났다.

5개 산단의 측정시기별 Σ VOCs는 시화·반월 산단의 5월에 $104.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 여수·광양 산단의 4월에 $20.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 측정되었다. 포항, 대산, 울산·온산 산단은 측정시기별로 Σ VOCs가 비슷하나, 여수·광양과 시화·반월 산단은 측정시기별로 농도 차이가 크게 나타났다. 화학공업이 발달한 여수·광양 산단의 2월과 대산 산단의 10월에 방향족화합물의 비율이 각각 3.0%, 5.9%로 가장 낮았으며 이때 할로겐탄화수소의 비율이 가장 높게 나타났다.

VOCs 중에서 T/B 비율을 계산하여 오염원을 추정하였다. 5개 산단 중에서 T/B 비율이 가장 큰 산단은 시화·반월 산단으로 4지점 모두 측정지점 근처의 산

업단지의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났으며, 포항 산단의 B 지점 또한 산단의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다. 시화·반월 산단과 포항 산단의 B 지점을 제외한 다른 측정지점은 교통의 영향이 더 큰 것으로 사료된다.

5개 산업단지에서 benzene과 formaldehyde가 고농도일 때 CPF를 이용한 오염원 위치 예측 결과 benzene은 포항 산단을 제외한 4개 산단은 오염원이 위치가 산단 방향과 잘 일치하였다. Formaldehyde는 울산·오산 산단만 오염원의 위치가 산단 방향과 일치를 하고, 4개 산단은 오염원의 위치가 산단 방향과 일치하지 않았는데, formaldehyde는 생산 공정이나 자동차와 같은 1차 배출원 및 환경 대기에서 광화학 반응에 의해 2차적으로 생성되기 때문에 오염원의 위치가 산단 방향과 일치하지 않을 수 있다.

본 연구는 5개 대규모 산업단지에 인접한 지역에서 가스상 HAPs 현황 파악 및 T/B 비율, X/E 비율, CPF 모델을 이용해 오염원의 배출원을 추정하였다. 산업단지 인접 지역에는 다양한 VOCs가 항상 존재하고 주민들은 이들 물질에 항상 노출되기 때문에, HAPs 관리에서 가장 먼저 고려하여야 할 것은 수용체 (receptor)인 산단 인근 주민의 건강이다. 따라서 본 연구 결과를 대규모 산업단지의 가스상 HAPs 관리방안 수립과 산단 주변에 거주하는 주민의 건강 증진을 위한 환경보건 관리방안 수립의 기초자료로 제공하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2022-01-02-088).

References

- Baek, S.O., Jeon, C.G. (2013) Current status and future directions of management of hazardous air pollutants in Korea - focusing on ambient air monitoring issues, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 513-527, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.5.513>
- 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. (2010) Patterns of the main VOCs concentration in ambient air around Shihwa Area, *Korean Society of Environmental Engineers*, 32(1), 61-68, (in Korean with English abstract).
- Chung, J.D., Kim, J.W., Kim, J.T. (2005) Sensitivity analysis of the atmospheric dispersion modeling through the condition of input variable, *Journal of the Environmental Sciences*, 14(9), 851-860, (in Korean with English abstract).
- Gyeonggi-do (2021) https://www.gg.go.kr/gg_env_manage.
- Heo, J.W., Kim, C.H., Min, Y.K., Kim, H.J., Sung, Y.G., Kim, J.S., Lee, K.B., Heo, J.B. (2018) Source apportionment of PM₁₀ at Pyeongtaek Area using Positive Matrix Factorization (PMF) model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 849-864, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.849>
- Jaars, K., Beukes, J.P., Zyl, P.G., Venter, A.D., Josipovic, M., Pinaar, J.J., Vakkari, V., Aaltonen, H., Laaksi, H., Kulmala, M., Tiitta, P., Guenther, A., Hellen, H., Laakso, L., Hakola, H. (2014) Ambient aromatic hydrocarbon measurements at Welgegund, South Africa, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 7075-7089. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7075-2014>
- Kim, D.G., Woo, J.S., Han, H.S., Kim, Y.J., Kim, W.S., Hong, S.M., Kim, J.S., Yoon, M.H. (2020) Distribution characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) in an industrial complex and in affected areas in Siheung and Ansan, *Journal of Environmental Health Sciences*, 46(3), 256-266, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2020.46.3.256>
- Kim, J.P., Park, S.S., Bae, M.S. (2018b) An analytical method of formaldehyde in exhaust gases from industrial facilities using a HPLC under isocratic conditions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 616-624, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.616>
- Kim, J.Y., Baek, S.O. (2019) Emission characteristics of airborne

- toxic chemicals in Yeongnam region-focusing on health risks, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 467-475, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.461>
- Kim, M.J., Seo, Y.K., Cho, B.Y., Baek, S.O. (2018a) Characteristics of hazardous air pollutants in the steel industrial city, Pohang (II) - Volatile Organic Compounds, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 244-258, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.244>
- Kim, S.J., Kwon, H.O., Lee, M.I., Seo, Y.W., 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, 5831-5841. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4032-5>
- Korea Industrial Complex Corporation (KICOX) (2023) <https://www.kicox.or.kr/index.do>
- Lee, B.K., Choi, S.D., Shin, B., Kim, S.J., Lee, S.J., Kim, D.G., Lee, G., Kang, H.J., Kim, H.S., Park, D.Y. (2023) Sensitivity analysis of volatile organic compounds to PM_{2.5} concentrations in a representative industrial city of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00003-y>
- Lee, T.J., Lee, S.M., Chae, J.S., Jeon, J.M., Kim, D.S., Jo, Y.M. (2021) Inventory of ozone precursor VOCs from organic solvents used in residential workplaces and assessment of ozone formation contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 102-112, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.102>
- Liu, Y., Kong, L., Liu, X., Zhang, Y., Li, C., Zhang, Y., Zhang, C., Qu, Y., An, J., Ma, D., Tan, Q., Feng, M., Zha, S. (2021) Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China, *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.013>
- Legreid, G., Lööv, J.B., Staehelin, J., Hueglin, C., Hill, M., Buchmann, B., Prevot, A.S.H., Reimann, S. (2007) Oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) at an urban background site in Zurich (Europe): Seasonal variation and source allocation, *Atmospheric Environment*, 41(38), 8409-8423. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.026>
- Magnusson, R., Calle, N., Andersson, B. (2002) Emissions of aldehydes and ketones from a two-stroke engine using ethanol and ethanol-blended gasoline as fuel, *Environmental Science & Technology*, 36(8), 1656-1664. <https://doi.org/10.1021/es010262g>
- Monod, A., Sive, B.C., Avino, P., Chen, T., Blake, D.R., Rowland, F.S. (2001) Monoaromatic compounds in ambient air of various cities: a focus on correlations between the xylenes and ethylbenzene, *Atmospheric Environment*, 35, 135-149.
- Ministry of Environment (MOE) (2023) Clean Air Conservation ACT.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) Korea Air Toxics Plan.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) Multi-media and multi-pathway aggregate risk assessment (II) - Formaldehyde -
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018~2022) Monitoring of Hazardous Air Pollutants and Health Risk Assessment in the Industrial Area (I~V).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) <https://www.nier.go.kr/NIER>
- Nguyen, T.N.T., Jung, K.S., Son, J.M., Kwon, H.O., Choi, S.D. (2018) Seasonal variation, phase distribution, and source identification of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons at a semi-rural site in Ulsan, South Korea, *Environmental Pollution*, 236, 529-539. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.080>
- Park, J.E., Kim, H.W., Kim, Y.K., Heo, J.B., Kim, S.W., Jeon, K.H., Yi, S.M., Hopke, P.K. (2022a) Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF, *Science of the Total Environment*, 833, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155056>
- Park, S.C., Kim, J.H., Lee, G.H., Noh, S.J., Chae, J.S., Kim, M.Y., Jeon, J.M., Lee, S.S., Kim, J.B. (2022b) 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>
- Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) (2020) Pollutant Release and Transfer Register System. <http://ncis.nier.go.kr/tri/> (accessed Jun. 30, 2023).
- 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>
- Song, M.K., Oh, S.H., Choi, S.Y., Jeon, H.J., Yu, G.H., Bae, M.S. (2023) Assessment of gaseous pollutants and oxidative potential in the national steel industrial complex - implication of PMF Model (PART II), *Journal of*

- Korean Society for Atmospheric Environment, 39(2), 227-238, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.2.227>
- Seo, Y.K., Chung, S.H., Baek, S.O. (2011) Current status and prospective of hazardous VOC in ambient air, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 734-745, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.734>
- Sexton, K.G., Doyle, M.L., Jeffries, H.E., Ebersviller, S. (2007) Development and testing of a chemical mechanism for atmospheric photochemical transformations of 1,3-butadiene, *Chemico-Biological Interactions*, 166, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2007.01.002>
- Thang, P.Q., Kim, S.J., Lee, S.J., Ye, J., Seo, Y.K., Baek, S.O., Choi, S.D. (2019) Seasonal Characteristics of Particulate Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in a Petrochemical and Oil Refinery Industrial Area on the West Coast of South Korea, *Atmospheric Environment*, 198, 398-406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.008>
- World Health Organization (WHO) (2000) *Air Quality Guidelines for Europe*, 273p.
- Xia, S.Y., Wang, C., Zhu, B., Chen, X., Feng, N., Yu, G.H., Huang, X.F. (2021) Long-term observations of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in an urban atmosphere in southern China, 2014-2019, *Environmental Pollution*, 270, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116301>
- Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Lu, 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*, 6669-6687. <https://doi.org/10.1002/2016JD025115>

Authors Information

- 채종성 (주)그린환경종합센터 부장) (chaejs0214@gecc.co.kr)
 채정석 (주)그린환경종합센터 이사) (chaejs21@gecc.co.kr)
 전준민 (주)그린환경종합센터 대표) (jmjeon4959@gecc.co.kr)
 강병욱 (한국교통대학교 교수) (bwkang@ut.ac.kr)
 김종호 (한서대학교 교수) (kimjh@hanseo.ac.kr)
 문광주 (국립환경과학원 연구관) (iamiyan@korea.kr)
 박규태 (국립환경과학원 연구사) (gt0303@korea.kr)
 강대일 (국립환경과학원 연구관) (nierkang@korea.kr)