

논문

창원시 산단지역 휘발성유기화합물 및 원소성분 거동 분석

Assessment of Behavior for Volatile Organic Compounds and Trace Elements in the Changwon Industrial Complex

최운선, 장세경¹⁾, 이철우¹⁾, 박채형, 김문수, 송명기*, 배민석*

국립목포대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경과학원 환경보건연구과

Wunseon Choi, Sekyung Jang¹⁾, Chul-Woo Lee¹⁾, Chaehyeong Park,
Moonsu Kim, Myoungki Song*, Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University,
Muan, Republic of Korea

¹⁾Environmental Health Research Division, National Institute of Environmental Research,
Incheon, Republic of Korea

접수일 2020년 2월 27일

수정일 2020년 4월 3일

채택일 2020년 4월 6일

Received 27 February 2020

Revised 3 April 2020

Accepted 6 April 2020

*Corresponding author

Tel : +82-(0)61-450-2480

E-mail : kaynyy@gmail.com

Tel : +82-(0)61-450-2485

E-mail : minsbae@mokpo.ac.kr

Abstract Air pollution has been well documented as a major public health issue for many areas of the world, as a growing body of pollutants increases the risks of numerous diseases. In particular, the industrial complex is of importance for human health related to the higher concentrations of toxic emission. PM_{2.5} mass, sixteen heavy metals and twenty one volatile organic compounds collected at four sampling sites around the Changwon Industrial Complex were analyzed using gas chromatography - mass spectrometry and inductive coupled plasma - mass spectrometry. The results show that the source emissions can mainly contribute to sampling sites based on diurnal patterns and conditional probability function analyses. Ratio of volatile organic compounds to toluene and pairwise correlation scatterplots between 1,3,5-trimethylbenzene and n-propylbenzene & 4-chlorotoluene indicate that volatile organic compounds was highly associated with human activities. The Measurement of hazardous air pollutant result can contribute to establish the emission strategies for reduction from the industrial areas.

Key words: Industrial, Emissions, PM_{2.5}, VOCs, Metal

1. 배경

대기오염물질의 증가로부터 다양한 질병이 발생한다는 임상적 결과가 나타남에 따라 대기오염은 전 세계 여러 지역의 관심을 받고 있다(Janssen *et al.*, 2013; Polichetti *et al.*, 2009; Delfino *et al.*, 2005). 대기오염물질은 입자상 물질과 가스상 물질로 구분할 수 있다(Lee *et al.*, 2019). 이 중 입자상 물질은 PM_{2.5} 및 PM₁₀으로 대변되는 입자크기에 따른 미세먼지이며(Park and Lim, 2006), 미세먼지의 주요 구성은 유기탄소(organic carbon, OC), 원소탄소(elemental carbon, EC) 등의 탄소물질, 중금속, 수용성 이온 성분 등이다(San-

drini *et al.*, 2014; Gentner *et al.*, 2012; Chow *et al.*, 2010). 또한, benzene, toluene 등의 휘발성유기화합물과 같은 가스상 성분이 혼재되어 대기오염에 영향을 주고 있다(Brown, 2002). 이러한 대기오염물질은 대기 중 풍향, 풍속 등에 의해 장거리 이동이 가능하며, 체류 시간에 따른 노화(aging) 현상과 더불어, 넓은 지역에 심각한 환경문제를 야기한다(Kang *et al.*, 2018). 이에 대기오염물질 저감을 위해서는 지역별 대기오염물질의 특성을 이해하고 배출원을 추적함과 동시에 대기오염물질 저감 시설을 도입할 필요가 있다.

일반적으로 도시지역과 산업단지는 배출원 배출 특성의 차이로 인하여 대기오염물질 및 농도에 차이가

있다(Kang *et al.*, 2018). 선행연구를 살펴보면, 경북에 위치한 김천산업단지는 주변 지역보다 $PM_{2.5}$ 및 중금속 농도가 높으며(Hwang and Kim, 2019), 석유화학 산업지역에서는 benzene, toluene, ethylbenzene 및 xylene 등의 휘발성유기화합물(organic volatile compounds, VOCs)의 농도가 높고(Yurdakul *et al.*, 2013; Kansal, 2009), 철강 산업지역에서는 일반적인 도시지역보다 높은 중금속 농도가 나타나는 것으로 보고되고 있다(Amodio *et al.*, 2013; Hleis *et al.*, 2013). 이와 더불어, 산업단지 인근 지역은 악취, 빨래 건조물의 손상 등과 같은 대기환경 불만으로 빈번한 민원이 발생하고 있다(Kang *et al.*, 2018). 이에 국가는 2016년 부산(NIER, 2016a), 2017년 광주(NIER, 2017a), 2017 대구(NIER, 2017b), 2018년 거제(NIER, 2018a) 등의 산업단지 주변 지역에 대한 환경 보건 평가를 수행하고 있으며, 산업단지 지역의 유해 대기오염물질을 모니터링하여 산업단지 주변 지역에 대한 대기질을 관리하고 있다. 국내 산업단지 주변 지역의 유해 대기오염물질 측정 및 모니터링은 지역의 위치 또는 산업단지별로 수행되고 있으며, 향후 업종별로 발생하는 유해물질을 이해하는 것은 유해물질 배출원 추적 및 저감 시설 도입을 위해 반드시 필요하다.

본 연구는 산업단지 주변 지역의 대기오염물질을 분석하고, 산업단지 주변 지역 대기 환경에 영향을 미치는 배출원에 대한 배출성분 특성을 분석하였다. 이를 위하여 창원시 조선업 기반 산업단지 주변의 네 지점을 선정하여 시료를 채취하여 $PM_{2.5}$, 16성분 중금속, 21성분 휘발성유기화합물을 유도결합 플라즈마 질량분석기 및 가스크로마토그래피 질량분석기로 분석하였다. 분석 결과는 측정 지점의 농도 차이, Conditional Probability Function (CPF) 분석, 분석 지점별 대기오염물질의 동질성 평가 등을 바탕으로 분석하였으며, 결과로부터 산업단지 주변 지역의 대기질에 영향을 미치는 배출성분을 확인하였다. 연구 결과는 조선업 기반 사업체에서 배출되는 유해 대기오염물질의 특성을 제시하였다. 본 연구 결과는 유해 대기오염물질 배출 저감 시설의 도입 및 배출원 인벤토리 구축 등에 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 지역 및 시료 채취

본 연구는 경상남도 창원시에 있는 국가산업단지 주변에서 시료를 채취하였다. 진해구에 위치한 국가 산업단지는 산업시설용지 1,664 m^2 과 기타 시설구역 1,474 m^2 으로 구성된 총 면적 3,138 m^2 의 크기로, 한 국표준산업분류 기준 ‘기타운송장비 제조업’에 해당하는 기업이 입주해 있으며, 구체적으로 조선업 관련 제조업을 수행하는 업체들이다.

연구 지역의 유해 대기오염물질을 측정하기 위하여 그림 1과 같이 시료 채취 지점을 선정하였다. 그림 1에서와 같이 총 4개 지점에서 시료를 채취하였으며, A, B, C의 3개 지점은 산업단지 경계에 위치해 있다. 지점 D는 바탕시료를 측정하기 위한 대조구 지점으로 산업단지와 직선거리로 약 1.7 km 떨어져 있고, 산업단지와 대조구 지점 사이에는 해발 약 150 m의 산이 위치하고 있기 때문에 산업단지의 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

시료 채취는 2019년 7월부터 2019년 12월까지, 계절적 영향을 확인하기 위해 7월, 10월, 12월의 여름, 가을, 겨울을 대변하는 시기를 구분하여 최소 5일 이상 연속적으로 시료를 채취하였다. 여름 시료 채취는 A, B지점 8월 18일~8월 29일, C, D지점 8월 30일~9월 06일까지 수행하였다. 가을 시료 채취는 A, B지점 10월 21일~10월 30일, C, D지점 10월 14일~9월 20일까지 수행하였다. 겨울 시료 채취는 A, B지점 11월 20일~11월 27일, C, D지점 11월 29일~12월 04일까지 수행하였다. 시료 채취 기간 중 8월 27일, 8월 29일 및 12월 1일에 시간당 3 mm 수준 비가 내렸고, 9월 2일~9월 3일, 12월 1일에 간헐적으로 강한 비가 내렸다. 하지만 실험 결과를 바탕으로 판단할 경우 시료 채취 기간에 내린 비는 연구 결과에 큰 영향을 나타내지 않았다.

시료 채취는 $PM_{2.5}$ 및 중금속 분석을 위한 필터 포

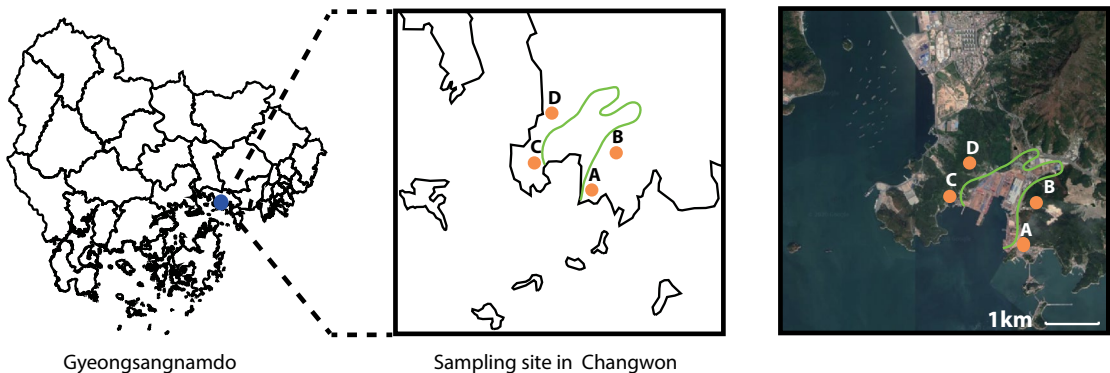


Fig. 1. Sampling sites in the Changwon Industrial Complex.

집과 VOCs 분석을 위한 가스상 물질 포집으로 구분하였으며, $PM_{2.5}$ 및 중금속 분석용 시료는 24시간 간격으로 포집하였고, VOCs 분석용 시료는 자체 제작한 포집기를 이용하여, 3시간 간격으로 하루 8회 포집하였다. $PM_{2.5}$ 및 중금속 분석 시료는 92 L/min의 총 유량 하에, 두 열로 나누어진 두 개의 테플론 필터 (PTFE R2PJ047, Pall Corp, USA)에 각각 46 L/min 유량으로 포집하였다. VOCs 분석용 시료는 질량 유량계 (VICD240-8SW-AIR-100L, (주)MFC Korea, Korea)를 이용하여 50 mL/min으로 흡착튜브에 포집하였다.

2.2 실험 방법 및 항목

2.2.1 중금속 분석

분석 항목은 $PM_{2.5}$ 와 Be, Al, V 등 16종의 중금속, benzene, toluene 등의 휘발성유기화합물 20종 등 총 37항목이다. $PM_{2.5}$ 는 테프론 여과지를 이용해 포집 전 무게와 포집 후 무게를 3번씩 측정하고, 평균 무게를 산출하여 포집 유량에 대한 무게의 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타내었다. 6가 크롬을 제외한 중금속 분석의 전처리는 $PM_{2.5}$ 가 포집된 필터에 5.5% HNO_3 와 16.75% HCl 이 혼합된 산 10 mL를 주입한 후 1,000 W에서 마이크로파 산분해 하였다. 중금속 분석은 전처리된 시료를 테프론 재질의 $0.45\mu\text{m}$ 필터를 이용하여 여과한 후 Inductive Coupled Plasma/ Mass Spectrometry

(ICP/MS, 7900CE, Agilent, USA)를 이용해서 측정하였다. 6가 크롬 분석은 National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) method 7600을 이용하였다. NIOSH method 7600은 분석용 필터를 0.02% NaOH와 0.03% Na_2CO_3 를 함유한 추출액을 이용하여 가열 추출한 후 자외 및 가시선 분광분석법 (UV-vis)을 이용하여 분석하는 방법이다. 다만 본 연구의 6가 크롬 분석을 위한 정량한계가 $1.51\text{ ng}/\text{m}^3$ 으로 다른 중금속 항목과 비교하여 높은 수준이었다. 이에 6가 크롬은 2일 또는 3일 동안 채취한 포집 필터를 중첩하여 분석을 수행하였다.

6가 크롬을 제외한 중금속 정도관리는 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서 제조한 standard reference material (SRM) 2783과 1640a를 사용하였다. SRM 2783은 폴리카보네이트 재질의 필터에 중금속 물질이 포집되어 있는 필터로 실험 방법의 적합성을 평가하기 위하여 사용하였다. 평가는 SRM 2783을 본 연구의 실험법에 따라 분석한 후 기준값에 대한 정확도를 산정하였다. 분석 결과, 표 1과 같이 측정 가능한 10개 항목에서 정확도 $100 \pm 15\%$ 를 만족하였다.

중금속 농도는 추출액 blank (BLK) 및 공필터 (filter) BLK를 1개를 1 set로 분석된 결과값이다. SRM 2783은 필터 형태의 표준물질이기 때문에 분석에 대한 정확도 평가에 유용하다. 하지만 SRM 2783의 재

Table 1. Result of SRM 2783 analysis using ICP/MS.

(unit: ng)

	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Standard	48.50	135.00	320.00	26500.00	7.70	68.00
1st	45.63	118.27	322.38	23339.18	7.14	61.88
2nd	46.73	115.44	298.74	24492.16	7.39	71.99
Average	46.18	116.86	310.56	23915.67	7.26	66.94
Accuracy	95.21%	86.56%	97.05%	90.25%	94.31%	98.44%
	Cu	Zn	As	Ba	Pb	
Standard	404.00	1790.00	11.80	335.00	317.00	
1st	428.31	1690.25	11.17	322.31	339.13	
2nd	389.71	1767.63	10.01	315.97	337.97	
Average	409.01	1728.94	10.59	319.14	338.55	
Accuracy	101.24%	96.59%	89.75%	95.27%	106.80%	

질은 폴리카보네이트로 본 연구에서 사용한 테플론 재질이 아니다. 이는 미량 중금속 분석을 위한 바탕 농도에 차이를 발생할 수 있다. 또한 SRM 2783은 분석 항목 15개 중 10개 항목에 대한 평가만이 가능하기 때문에 분석 항목 15개에 대한 정도관리가 추가로 필요하다. 이에 본 연구에서는 용액상 표준물질인 SRM 1640a를 연구에서 사용하는 테프론 필터에 spike하여 정확도를 평가하였다. SRM 1640a에 대한 spike test는 시료 분석 중에 수행되었으며, 총 6회 측정하였다. 그 결과, 표 2와 같이 15개 항목 모두에서 정확도 $100 \pm 15\%$ 를 만족하였다.

6가 크롬에 대한 정도관리는 정량한계 측정, 검정 곡선의 결정 계수, SRM 1640a의 크롬 농도를 이용한 정확도를 바탕으로 평가하였다. 6가 크롬 정도관리 결과 정량한계는 $0.1 \mu\text{g/mL}$ 이하였으며, 결정계수 0.9999, 4회 측정에 대한 정확도는 모두 95% 이상으로 나타났다.

2.2.2 휘발성유기화합물 분석

VOCs 분석은 Thermal Desorption (Unity2, Markes International, Ltd, UK) - gas chromatography (GC, Agilent 7890A) - mass spectrometer (MS, Agilent 5975C)를 이용하였다. 본 연구에서는 미국 EPA TO-17 (고체 흡착법)을 적용하여 미국 EPA TO-14의 대상 물질 중

측정 가능한 방향족 탄화수소 성분을 측정하였으며, 분석 항목은 benzene, n-propylbenzene, 1,3,5-trimethylbenzene, p-isopropylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, toluene 등을 포함하여 20 항목이었다. VOCs 포집은 3시간 간격으로 자체 제작한 연속 VOC 포집기를 이용하여 하루 8개 시료를 채취하였다. 연속 VOC 포집기는 VOCs 저유량 중간 소실을 최소화하기 위해, 약 유량 20 L/min (lpm) 하에 시료를 흡착관 전까지 흡입하였다. 이후 TD를 이용하여 50 mL/min 유량 하에 3시간 동안 시료를 채취하였다. 이후, 고체흡착관을 이용하여 GC/MS로 유입되었다. 고체흡착관 기기 내부에 저온 흡착관 (Cold Trap) 장치를 -20°C 에서 시료의 저온 농축 및 재흡착을 유도한 후, 320°C 에서 15분간 열 탈착하여 GC column으로 이동시킨다. GC 주입 후 길이 60 m, 안지름 0.25 mm 및 상 두께 $0.25 \mu\text{m}$ 의 컬럼에 의해 분리된 시료들은 Quadruple MS를 통해 최종적으로 정성, 정량되었다(표 3).

본 연구에서는 휘발성유기화합물의 분석 정도관리는 검량선의 결정 계수 (r^2)와 표준물질에 대한 Calibration Curve Verification (CCV)를 사용하여 평가하였다. 검량선 작성을 위해 15개 농도 구간의 표준물질을 측정하였다. 그 결과 결정계수 (r^2)는 모든 항목, 모든 측정에서 최소 0.998 이상이 나타났다. 표준물질에 대한 CCV 평가는 분석 시료 15개 기준 1회 측

Table 2. Result of SRM 1640a analysis using ICP/MS.(unit: $\mu\text{g/L}$)

		Be	Al	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Standard		3.03	52.60	15.05	40.54	40.39	36.80	20.24	25.32
1st sampling	1st	3.00	53.68	15.30	40.75	40.10	37.68	21.41	24.90
	2nd	3.11	54.84	15.15	40.66	40.01	37.43	20.39	24.61
Average		3.06	54.26	15.23	40.70	40.05	37.55	20.90	24.75
Recovery		101.03	103.16	101.17	100.40	99.17	102.05	103.27	97.77
2nd sampling	1st	3.34	47.64	15.02	37.64	38.47	34.27	19.44	28.55
	2nd	3.35	53.96	14.10	38.99	36.83	35.52	18.36	29.18
Average		3.35	50.80	14.56	38.31	37.65	34.89	18.90	28.86
Recovery		110.64	96.58	96.74	94.51	93.23	94.82	93.37	113.99
3rd sampling	1st	3.31	50.66	15.49	40.70	40.14	37.95	19.93	25.08
	2nd	3.05	51.63	15.31	40.69	40.05	35.52	20.14	25.16
Average		3.18	51.14	15.40	40.70	40.09	36.73	20.03	25.12
Recovery		105.07	97.23	102.33	100.39	99.27	99.82	98.98	99.21
		Cu	Zn	As	Se	Cd	Ba	Pb	
Standard		85.07	55.64	8.08	19.97	3.99	151.80	12.10	
1st sampling	1st	85.21	56.73	7.93	20.77	3.93	148.44	12.70	
	2nd	84.66	56.85	8.03	21.55	3.88	148.76	12.91	
Average		84.93	56.79	7.98	21.16	3.91	148.60	12.81	
Recovery		99.84	102.07	98.82	105.95	97.90	97.89	105.83	
2nd sampling	1st	89.62	51.17	7.64	21.20	3.75	142.97	12.61	
	2nd	84.61	55.38	8.01	21.45	3.77	143.62	12.17	
Average		87.12	53.27	7.83	21.32	3.76	143.30	12.39	
Recovery		102.41	95.74	96.92	106.78	94.11	94.40	102.40	
3rd sampling	1st	86.07	56.78	7.98	19.07	4.02	151.53	12.91	
	2nd	84.82	55.68	8.13	19.02	4.01	148.69	12.83	
Average		85.44	56.23	8.05	19.05	4.02	150.11	12.87	
Recovery		100.44	101.06	99.74	95.37	100.58	98.89	106.37	

정하였고, 총 32회 분석한 결과, 모든 측정에서 기준 농도 대비 $98.2 \pm 9.1\%$ (평균 $\pm$ 표준오차)의 정확도를 나타냈다. VOCs 농도는 공흡착튜브에 대한 BLK 실험, 필드 흡착튜브 BLK 실험을 바탕으로 분석된 결과 값이다. VOCs의 분석 peak는 최소 3배 signal to noise (S/N) 값을 모두 확인했으며, 결정계수 (r^2) 및

표준물질에 대한 CCV를 기준으로 VOCs 분석은 높은 정도관리와 함께 결과를 산출했다.

2.3 CPF 분석

산업단지 오염원으로부터 수용 측정값의 기여율 분석을 위해 toluene, ethylbenzene, xylene (TEX) 농

Table 3. Analytical condition of thermal desorption gas chromatography - mass spectrometer.

Thermal desorption		ULTRA/UNITY (Markes, UK)		
Ultra	Pre purge	1 min		
	Primary desorption time	10 min		
	Primary desorption flow	50 mL/min		
	Primary desorption temp.	300°C		
Unity	Cold trap hold time	5 min		
	Cold trap high temp.	320°C		
	Cold trap low temp.	-20°C		
	Cold trap packing	Tenax TA		
	Min. Pressure	12 psi		
	Inlet split	No		
	Outlet split	10 mL/min		
	Flow path temp.	120°C		
Gas chromatography		HP6890 (Hewlett Packard, USA)		
Oven	Oven ramp	°C/min	Next temp. (°C)	Hold min
	Initial	-	35	10
	Ramp 1	5	300	22
	Total run time	60 min		
	Equilibration time	0.5 min		
	Oven max temp.	325°C		
Column	DB-1 (60 m × 0.25 mm × 1.0 μm)			
MSD	HP5975 (Hewlett Packard, USA)			
	Detector type	Quadrupole		
	Mode	SIM / SCAN		
	Quadrupole temp.	150°C		
	MS Source temp.	230°C		
	Transfer line temp.	320°C		
	Mass range	50~550 amu		
	Electron energy (EM)	70 eV		
	EM voltage	Run at Autotune voltage = Relative		

도, 풍향 및 풍속 자료를 이용, CPF 분석을 수행하였다. CPF는 풍향, 풍속을 고려해 고농도 오염원의 위치를 추정할 수 있는 통계적 확률 모델로, 각 지점에서 측정된 농도 및 시간별 풍향을 고려할 경우 오염원의 잠재적인 위치를 분석하는 데 유용하다. 본 연구에 사용한 CPF 모델은 식(1)과 식(2)에 의해 계산된다.

$$CPF = \frac{n_{\Delta\theta_i}}{m_{\Delta\theta_i}} \times W \quad \text{식(1)}$$

$$W = \begin{cases} 1.00 & 80 < n_{\Delta\theta_i} \\ 0.70 & 60 < n_{\Delta\theta_i} \leq 80 \\ 0.45 & 40 < n_{\Delta\theta_i} \leq 60 \\ 0.25 & 20 < n_{\Delta\theta_i} \leq 40 \\ 0.10 & n_{\Delta\theta_i} \leq 20 \end{cases} \quad \text{식(2)}$$

여기서, $n_{\Delta\theta_i}$ 은 풍향 θ , 풍속 i 에서의 상위 30%에 대한 고농도로 지정된 TEX 농도이며, $m_{\Delta\theta_i}$ 은 풍향 θ , 풍속 i 에서의 전체 샘플 개수이다. 풍속이 0.4 m/s 미만인 자료의 경우 풍향에 대한 불확도가 높아 제외하였다. CPF 결과는 상위 농도에 대한 임계치 이상의 전체 풍

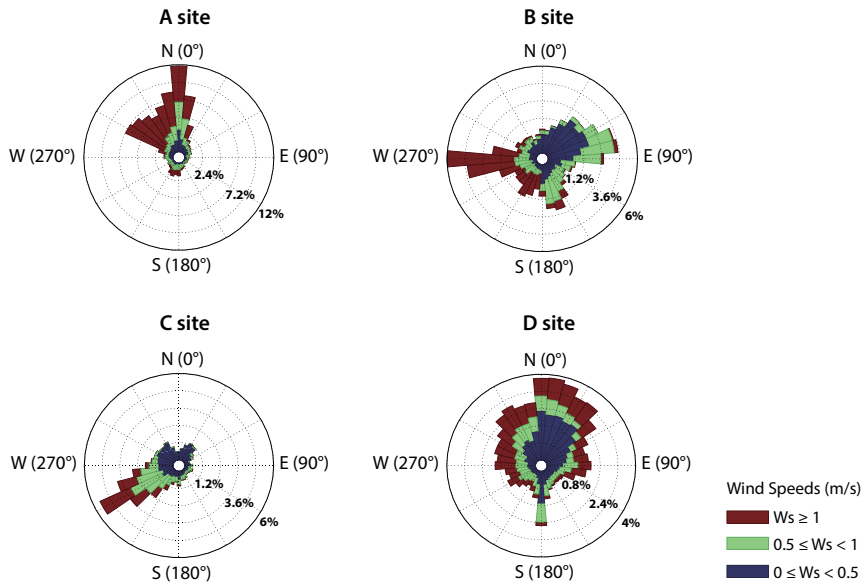


Fig. 2. Wind roses of the A, B, C and D sampling sites in the Changwon Industrial Complex.

Table 4. Seasonal average of PM_{2.5} concentrations at the sampling sites.

Site (μg/m ³)	Summer	Fall	Winter	Sampling locational average
A	16.11 ± 7.26 (n=6)	7.22 ± 5.07 (n=5)	8.80 ± 4.99 (n=5)	10.71 ± 6.89
B	16.82 ± 9.10 (n=5)	17.13 ± 12.76 (n=5)	11.62 ± 7.22 (n=5)	15.19 ± 9.59
C	10.08 ± 3.65 (n=7)	7.99 ± 2.35 (n=6)	7.56 ± 2.55 (n=6)	8.54 ± 3.02
D	12.71 ± 5.26 (n=7)	8.00 ± 2.76 (n=6)	8.78 ± 3.02 (n=6)	9.83 ± 4.31
Seasonal average	13.93 ± 3.13	10.09 ± 4.71	9.19 ± 1.72	11.07 ± 2.89

향의 빈도수를 기본으로 계산되므로, 측정 빈도수가 낮을 경우 상대 불확도가 증가할 수 있다. 이에, 빈도수에 따른 가중치를 적용하여 최종 계산하였다.

3. 결 과

3.1 측정지점별 풍향 풍속 결과

연구 기간 동안 연구 지역의 풍향, 풍속을 그림 2에 나타내었다. 풍향 및 풍속은 시료 채취 기간 동안 자동 기상장비를 이용하여 1분 단위로 측정한 후 1시간 평균자료를 수치화했다. 지점별 평균 풍속은 A지점 1.54 m/s, B지점 0.85 m/s, C지점 0.32 m/s, D지점 0.60

m/s로 나타났다. 지점별 주 풍향은 A지점은 북풍, B지점 서풍, C지점 남서풍, D지점 북동풍으로 나타났다. A지점 및 B지점은 산업단지에서 불어오는 바람 영향이 분석되며, C지점은 해풍의 영향, D지점은 해풍과 산에서 불어오는 바람의 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 A, B와 C, D지점에서 분석된 결과를 비교함으로써 산업단지 배출 특성을 분석하였다.

3.2 PM_{2.5} 분석 결과

4개 측정 지점에 대한 PM_{2.5}의 계절별 평균 농도를 표 4에 나타내었다. 표 4와 같이 연구 지역 PM_{2.5}의 평균 농도는 11.07 μg/m³으로 나타났으며, 계절별로는 여름 (13.93 μg/m³), 가을 (10.09 μg/m³), 겨울 (9.19

$\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났다. 연구 지점별로는 B지점이 가장 높았으며, 이후 A지점, D지점, C지점의 순으로 나타났다. 4개 지점을 비교하였을 때 여름철의 경우 A와 B지점이 C, D지점에 비해 약 1.5배 높았으며, B지점의 경우 3개 계절 모두에서 C 및 D지점에 비해 1.3~2.4배 이상 높았다. 연구 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 국내 대표적인 공업도시인 울산지역의 농도 $20.1\sim 35\mu\text{g}/\text{m}^3$, 경북지역 산업단지 농도 $22.96\sim 36.08\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 수준으로 나타나(Hwang and Kim, 2019; Lee *et al.*, 2018), $\text{PM}_{2.5}$ 농도만을 바탕으로 A 및 B지점의 산업단지 영향을 명확히 확인할 수 없었다. 하지만 C, D지점과 A, B지점의 농도 차이, 오염물질의 유입을 나타내는 풍향 등을 고려하여 판단할 경우 A 및 B지점의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 산업단지의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3.3 중금속 분석 결과

중금속 분석 결과를 표 5에 나타내었다. 측정 지점의 중금속 농도는 B지점 ($1,284.57\text{ ng}/\text{m}^3$), A지점 ($708.83\text{ ng}/\text{m}^3$), C지점 ($277.53\text{ ng}/\text{m}^3$), D지점 ($216.02\text{ ng}/\text{m}^3$)의 순으로 높게 나타났다. 풍향 및 $\text{PM}_{2.5}$ 결과 바탕으로 A와 B지점은 산업단지의 영향을 받는 지

점, C와 D지점은 산업단지의 영향을 받지 않는 지점으로 구분하였을 때, 산업단지의 영향을 받는 지점은 산업단지의 영향을 받지 않는 지점에 비해 중금속의 농도가 3~5배 높았다.

C 및 D지점을 기준으로 연구 지역의 중금속 농도 특성을 살펴보면 Fe ($108.32\text{ ng}/\text{m}^3$), Zn ($50.43\text{ ng}/\text{m}^3$), Al ($40.53\text{ ng}/\text{m}^3$), Mn ($20.83\text{ ng}/\text{m}^3$), Pb ($6.03\text{ ng}/\text{m}^3$), V ($5.45\text{ ng}/\text{m}^3$)의 평균 농도 순으로 높게 나타났으며, 이외 항목은 $5\text{ ng}/\text{m}^3$ 이하로 분석되었다. A 및 B지점의 중금속 농도가 C와 D지점보다 약 2배 이상 높은 중금속은 Al, As, Se 및 Ba으로 나타났으며, 4배 이상 높은 중금속은 Fe과 Zn이었다. 또한 Mn은 A와 B지역이 C, D지점보다 약 7배 높은 것으로 확인되었다. 특히 산업단지의 영향을 상대적으로 많이 받는다고 판단되는 B지점의 경우 Mn은 C, D지점에 비해 9배 이상 높은 농도를 나타냈으며, Fe는 6배 이상 높았다. 중금속 농도를 기준으로 판단했을 때 A와 B지점은 산업단지의 직접적인 영향이 있는 것으로 분석되었다.

연구 지역의 계절별 중금속 농도 특성을 표 6에 나타내었다. 표에서와 같이 중금속 농도는 겨울($834\pm 127\text{ ng}/\text{m}^3$) > 여름($520\pm 64\text{ ng}/\text{m}^3$) > 가을(399 ± 47

Table 5. Overall average of trace elemental concentrations at each sampling site (Average $\pm$ Standard deviation).

Compounds (ng/m^3)	A (n=16)	B (n=15)	C (n=19)	D (n=19)	MDL (ng/m^3)
Be	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.01	0.00 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.00
Al	34.65 ± 32.43	140.22 ± 142.56	38.20 ± 37.32	42.85 ± 39.76	0.01
V	6.23 ± 6.88	4.82 ± 5.45	5.78 ± 7.06	5.12 ± 6.69	0.00
Cr	2.49 ± 2.59	5.43 ± 5.36	2.64 ± 1.81	2.37 ± 1.44	0.03
Mn	107.17 ± 69.82	194.21 ± 220.92	26.23 ± 32.03	15.43 ± 12.87	0.05
Fe	363.05 ± 233.84	664.51 ± 704.95	122.50 ± 103.58	94.13 ± 61.72	0.26
Co	0.09 ± 0.04	0.13 ± 0.08	0.05 ± 0.04	0.05 ± 0.04	0.01
Ni	3.35 ± 2.79	5.02 ± 3.73	3.06 ± 2.04	2.64 ± 1.89	0.01
Cu	7.52 ± 2.63	8.81 ± 4.59	5.75 ± 3.10	4.18 ± 2.20	0.00
Zn	166.21 ± 92.56	246.11 ± 243.92	62.48 ± 64.86	38.38 ± 21.77	0.12
As	3.82 ± 2.74	3.05 ± 2.03	1.84 ± 1.12	1.80 ± 1.32	0.03
Se	1.49 ± 1.30	1.29 ± 1.09	0.63 ± 0.42	0.73 ± 0.40	0.04
Cd	0.42 ± 0.35	0.43 ± 0.44	0.40 ± 0.34	0.33 ± 0.25	0.00
Ba	2.41 ± 1.98	2.73 ± 1.69	1.02 ± 0.46	1.15 ± 0.57	0.02
Pb	8.79 ± 3.59	6.72 ± 3.32	6.10 ± 2.98	5.96 ± 3.04	0.00
Cr^{6+}	1.13 ± 0.60	1.09 ± 0.47	0.85 ± 0.44	0.89 ± 0.38	0.00
Σ	708.83 ± 96.93	$1,284.57\pm 174.47$	277.53 ± 33.03	216.02 ± 25.28	

Table 6. Seasonal average of trace elemental concentrations (Average $\pm$ Standard deviation).

Compounds (ng/m ³)	Summer (n = 25)	Fall (n = 22)	Winter (n = 22)
Be	1 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.01
Al	85.52 $\pm$ 110.73	59.61 $\pm$ 81.12	34.01 $\pm$ 23.57
V	11.31 $\pm$ 7.37	2.90 $\pm$ 2.68	1.49 $\pm$ 1.47
Cr	3.06 $\pm$ 4.57	3.09 $\pm$ 2.72	3.41 $\pm$ 1.58
Mn	51.36 $\pm$ 55.27	54.05 $\pm$ 50.30	133.92 $\pm$ 206.30
Fe	237.97 $\pm$ 229.53	167.83 $\pm$ 117.26	465.95 $\pm$ 649.55
Co	0.07 $\pm$ 0.06	0.07 $\pm$ 0.04	0.08 $\pm$ 0.07
Ni	4.79 $\pm$ 3.65	2.25 $\pm$ 1.55	3.09 $\pm$ 1.61
Cu	5.71 $\pm$ 3.45	5.88 $\pm$ 1.96	7.68 $\pm$ 4.62
Zn	102.85 $\pm$ 82.61	87.20 $\pm$ 73.25	171.71 $\pm$ 233.15
As	2.06 $\pm$ 1.24	3.92 $\pm$ 2.56	1.73 $\pm$ 1.33
Se	1.36 $\pm$ 1.17	0.94 $\pm$ 0.78	0.65 $\pm$ 0.51
Cd	0.46 $\pm$ 0.33	0.32 $\pm$ 0.29	0.39 $\pm$ 0.40
Ba	1.04 $\pm$ 0.53	2.83 $\pm$ 1.68	1.48 $\pm$ 1.40
Pb	6.62 $\pm$ 3.85	6.38 $\pm$ 2.54	7.49 $\pm$ 3.47
Cr ⁶⁺	0.77 $\pm$ 0.56	1.29 $\pm$ 0.40	0.92 $\pm$ 0.28
Σ	519.97 $\pm$ 63.65	398.55 $\pm$ 46.51	834 $\pm$ 121.75

Table 7. Comparison of trace elemental concentrations with previous studies.

Compounds (ng/m ³)	In this study	Busan ^{a,b}	Gwangyang Bay ^{c,d}	Incheon ^e	Gwangju ^f
Be	0.01	0.12	0.00	0.31	–
Al	87.44	–	–	2,466.62	285.40
V	5.53	7.88	–	12.24	–
Cr	3.96	31.16	22.78	50.51	2.25
Mn	150.69	62.46	46.96	76.16	15.52
Fe	513.78	–	1,687.13	1,870.93	411.65
Co	0.11	0.98	0.50	1.05	–
Ni	4.19	19.84	16.88	10.16	4.94
Cu	8.17	–	9.00	–	9.74
Zn	206.16	–	1,023.38	96.40	77.46
As	3.44	3.10	8.10	6.88	1.40
Se	1.39	0.33	–	0.72	–
Cd	0.43	7.02	0.55	1.34	0.17
Ba	2.57	–	–	–	–
Pb	7.76	46.99	36.95	57.24	9.83
Cr ⁶⁺	1.11	0.37	36.95	–	0.54

^aNational Institute of Environmental Research (2016a)^bNational Institute of Environmental Research (2016b)^cNational Institute of Environmental Research (2017a)^dNational Institute of Environmental Research (2017b)^eNational Institute of Environmental Research (2015)^fNational Institute of Environmental Research (2018)

ng/m³)의 순으로 나타났다. 항목별 농도는 Al, Mn, Fe 및 Zn를 제외하고는 계절별로 큰 변동은 없었으며, Mn, Fe, Zn의 농도는 겨울 > 여름 > 가을의 순으로 나타났다으며, Al은 여름이 가장 높았다.

연구 지역 중금속 농도의 위해성을 살펴보기 위하여 국내 환경정책기본법 및 World Health Organization (WHO), European Union (EU) 가이드라인 (EEA, 2015; WHO, 2000)과 비교하였다. 분석 항목 16개 중

상기 환경정책기본법 및 국외 자료에 명시되어 있는 기준치 및 권고치는 V ($\leq 50 \text{ ng/m}^3$), Ni ($\leq 150 \text{ ng/m}^3$), Cu ($\leq 150 \text{ ng/m}^3$), As ($\leq 6 \text{ ng/m}^3$), Cd ($\leq 5 \text{ ng/m}^3$), Pb ($\leq 500 \text{ ng/m}^3$) 및 Mn ($\leq 150 \text{ ng/m}^3$)의 7개 항목이었다. 연구 지역의 중금속 농도 중 권고치 초과한 항목은 B지점의 Mn (194.21 ng/m^3)으로 나타났다. EU 가이드라인에 따르면 Mn은 도시 및 농촌지역에서 평균 $10\sim 70 \text{ ng/m}^3$ 농도이며, 금속 주조 공장 등 발생원 부근에서 $200\sim 300 \text{ ng/m}^3$ 의 농도가 나타나는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 B지점 Mn의 평균 농도는 194.21 ng/m^3 으로 발생원 주변의 농도와 비슷한 수준인 것으로 확인되었다.

연구 지역의 A 및 B지점의 중금속 농도와 국내 산업단지 및 주거지역의 중금속 농도를 비교하였다(표 7). 그 결과, 분석 항목 16개 중 Ba를 제외한 15개 항목 중 Mn은 선행 연구들의 평균 중금속 농도보다 약 30% 이상 높은 것으로 나타났고, Se는 약 56% 높았다. 이외 12개 항목은 선행 연구 자료와 비교했을 때 2~70% 수준으로 확인되었다. 또한 선행연구 중 광주

지역의 일반 측정소 평균 농도와 본 연구 결과를 비교할 때 10개 항목을 비교할 수 있었다. 비교 가능한 10개 항목 중 본 연구에서 도출된 Mn은 약 5.5배, Cd은 약 1.4배 이상 광주 지역의 일반대기 측정소보다 높았다. 이외 8개 항목은 광주 지역 일반대기 측정소의 중금속 농도와 비슷하거나 낮은 수준이었다. 본 연구에서 국내 주요 산업단지의 중금속 농도보다 높은 결과를 나타낸 Se의 경우 현재까지 환경 독성 유무에 대한 논란의 소지가 있고, 측정된 농도인 1.49 ng/m^3 는 선행 연구의 독성 발현치들과 비교하여 매우 낮은 수준이다(Marco *et al.*, 2017). 또한 일반 측정소 결과와 비교하였을 때 높은 농도를 나타낸 Cd는 WHO 가이드라인에 제시된 5 ng/m^3 의 10% 이하로 낮은 수준이다. 다만 Mn의 경우 국내 산업단지 및 광주 지역 측정소의 농도보다 높은 뿐만 아니라, WHO 권고 기준인 150 ng/m^3 이상으로 나타나 관리가 필요할 것으로 판단된다. 결론적으로, Mn을 제외한 중금속 농도는 인체에 큰 영향을 미칠 수준은 아니지만, A와 B지점은 산업단지의 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Table 8. Overall average of volatile organic compound concentrations at each sampling site (Average $\pm$ Standard deviation).

Compounds (ppb)	Abbreviation	A (n = 127)	B (n = 118)	C (n = 152)	D (n = 150)
benzene	B	0.478 ± 0.136	0.482 ± 0.122	0.420 ± 0.126	0.448 ± 0.121
trichloroethene	TrCE	0.059 ± 0.030	0.060 ± 0.040	0.064 ± 0.027	0.062 ± 0.018
toluene	T	1.659 ± 0.293	2.563 ± 0.317	1.333 ± 0.108	1.297 ± 0.084
tetrachloroethene	TeCE	0.016 ± 0.007	0.015 ± 0.005	0.012 ± 0.001	0.012 ± 0.003
chlorobenzene	CB	0.013 ± 0.008	0.011 ± 0.006	0.007 ± 0.001	0.007 ± 0.002
ethylbenzene	EB	1.721 ± 0.332	2.212 ± 0.838	0.787 ± 0.514	0.657 ± 0.513
m&p-xylene	mpX	0.770 ± 0.420	1.282 ± 0.865	0.405 ± 0.313	0.330 ± 0.299
styrene	St	0.103 ± 0.054	0.104 ± 0.068	0.075 ± 0.036	0.083 ± 0.033
o-xylene	oX	0.858 ± 0.096	1.544 ± 0.398	0.429 ± 0.204	0.319 ± 0.160
isopropylbenzene	IPB	0.025 ± 0.011	0.042 ± 0.019	0.017 ± 0.010	0.011 ± 0.005
n-propylbenzene & 4-chlorotoluene	PBCT	0.018 ± 0.019	0.027 ± 0.030	0.011 ± 0.014	0.008 ± 0.007
1,3,5-trimethylbenzene	135MB	0.050 ± 0.039	0.085 ± 0.067	0.047 ± 0.030	0.027 ± 0.016
p-isopropylbenzene	IPB	0.029 ± 0.015	0.040 ± 0.024	0.021 ± 0.016	0.019 ± 0.008
1,2,4-trimethylbenzene	124MB	0.215 ± 0.174	0.332 ± 0.279	0.145 ± 0.141	0.119 ± 0.066
1,2-dichlorobenzene	12CB	0.006 ± 0.004	0.006 ± 0.004	0.016 ± 0.022	0.003 ± 0.001
1,3-dichlorobenzene	13CB	0.003 ± 0.003	0.002 ± 0.002	0.091 ± 0.155	0.002 ± 0.001
1,4-dichlorobenzene	14CB	0.003 ± 0.002	0.003 ± 0.002	0.002 ± 0.001	0.001 ± 0.001
n-butylbenzene	nBB	0.039 ± 0.003	0.035 ± 0.015	0.018 ± 0.018	0.025 ± 0.003
1,2,3-trichlorobenzene	123CB	0.001 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.007 ± 0.010	0.001 ± 0.001
naphthalene	NaT	0.046 ± 0.023	0.069 ± 0.042	0.026 ± 0.014	0.024 ± 0.003
hexachloro-1,3-butadiene	H13B	0.003 ± 0.003	0.003 ± 0.003	0.002 ± 0.001	0.002 ± 0.001
Σ		6.113 ± 1.615	8.917 ± 3.006	3.933 ± 1.380	3.459 ± 1.233

3.4 휘발성유기화합물 분석 결과

휘발성유기화합물은 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX)를 포함한 21개 항목을 측정하였다. 3회에 걸쳐 측정된 지점별 휘발성유기화합물의 농도의 합은 B지점 (8.917 ppb), A지점 (6.113 ppb), C지점 (3.933 ppb), D지점 (3.459 ppb) 순으로 높게 나타나, C와 D지점보다 A와 B지점이 약 2배 이상 높았다. 항목별로 살펴보면 A, B, C 및 D지점의 휘발성유기화합물 평균 농도는 toluene, ethylbenzene, m&p-xylene, o-xylene, benzene, 1,2,4-trimethylbenzene 순으로 나타났으며, 이외 15개 항목은 모두 평균 농도 0.1 ppb 이하였다. 또한 상위 6개 항목은 전체 휘발성유기화합물의 약 92%를 차지하고 있었으며, 특히 BTEX의 합은 전체 휘발성유기화합물 농도의 89%를 차지하고 있었다.

C와 D지점에 비해서 산업단지 영향을 받는 A와 B지역을 비교한 결과, 1.5배 이상 높은 농도를 나타내는 휘발성유기화합물은 o-xylene, m&p-xylene, ethyl-

benzene, isopropylbenzene, n-propylbenzene, naphthalene, 1,2,4-trimethylbenzene, 1,4-dichlorobenzene, 1,3,5-trimethylbenzene, p-isopropylbenzene, n-butylbenzene, chlorobenzene, toluene, hexachloro-1,3-butadiene으로 나타났다.

일반적으로 대기 중 BTEX의 인위적인 생성은 경유, 휘발유 등을 연료로 사용하는 자동차 배기가스, 석유화학 산업 배출, 페인트 사용 등이다(Doherty *et al.*, 2017; Yurdakul *et al.*, 2013; Kansal, 2009). BTEX 농도만을 기준으로 산업단지의 영향을 확인할 순 없지만, 산업단지 내 이동 차량, 선박 도로 포장 과정에서 사용되는 페인트 등을 고려할 때 연구 지역의 BTEX 농도는 산업단지의 영향이 있을 것으로 판단된다. 이에 연구 지역의 주요 휘발성유기화합물인 toluene, ethylbenzene, xylene (TEX)을 대상으로 배출원을 확인하고자 TEX 물질에 대한 시간별 농도, 계절별에 따른 시간별 농도 및 CPF 분석을 수행하였다.

그림 3 및 4는 연구 기간에 측정된 TEX의 농도를

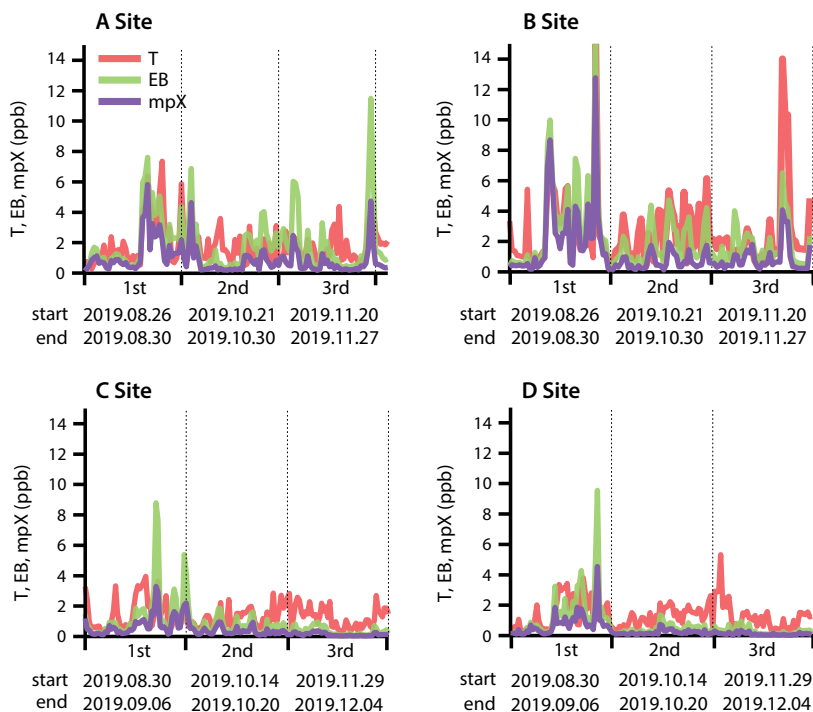


Fig. 3. Temporal concentrations of toluene, ethylbenzene, m&p-xylene at the sampling sites.

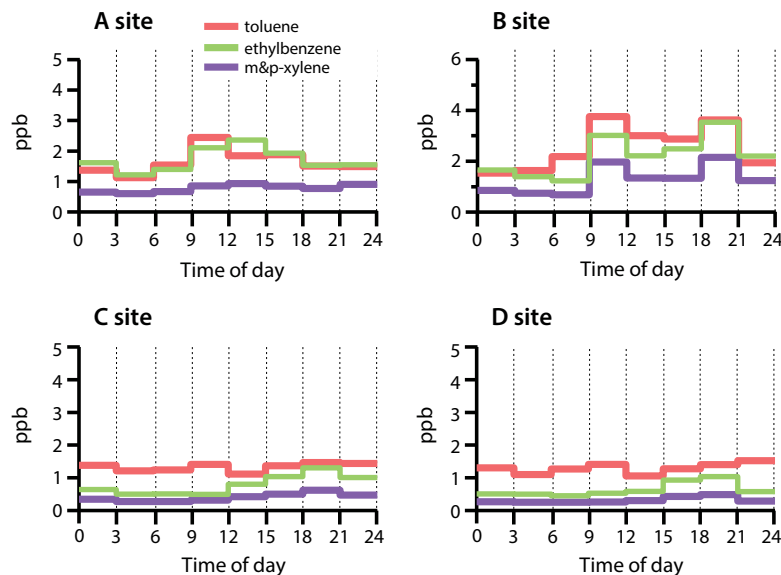


Fig. 4. Diurnal concentrations of toluene, ethylbenzene, m&p-xylene at the sampling sites.

시계열 및 측정 3시간 평균으로 나타낸 것이다. 그림 3 및 4에서 나타내듯이 전체적인 TEX의 농도는 C와 D지점에 비해 A와 B지점이 높았다. 측정 시간별 기준으로 살펴보면 20~09시는 A, B 및 C, D지점의 TEX 농도에 큰 차이가 없는 반면, 09~20시까지 C와 D지점보다 A, B지점의 농도가 높게 분석되었다. 이는 TEX의 배출이 출퇴근 시간에 의한 차량 이동 증가 및 난방 등에 의한 야간 배출보다 일과 시간에 의한 배출이 크게 영향을 준 것으로 판단된다. 상기 결과는 연구 기간 중 확인된 시계열 농도에서 지속적으로 관찰되었으며(그림 3), 특히 TEX의 농도가 높은 여름 및 겨울 일과 시간에 TEX 증가가 뚜렷하게 나타난다. 따라서 A와 B지점의 높은 TEX의 배출원은 일과 시간의 생산활동에 의한 것으로 분석된다.

분석 항목 중 가장 높은 농도를 나타낸 toluene을 기준으로 각 성분에 대한 비율을 통해 배출 특성을 분석하였다. 비율 계산의 목적은 휘발성유기화합물의 배출원에 대한 동질성을 살펴보기 위함이다. 그림 5는 A와 B지점은 20개 항목에 대한 toluene 비율을 나타낸 것이다. 이는 A와 B지점에 대한 성분별 배출

특성을 나타내며, A와 B지점의 휘발성유기화합물의 배출 특성이 매우 유사함을 의미한다. 반면 C와 D지점은 그림 5에서의 비율과 차이를 나타냈으며, 풍향, 농도 일변화 등을 고려할 때, 지점에 영향을 주는 배출원에 차이가 있는 것으로 해석된다.

지점별 배출원에 대한 동질성을 추가적으로 살펴 보기 위하여 toluene을 제외한 20개 항목에 대한 상관성과 toluene 농도에 대한 비를 확인하였다(그림 6). 그림에서와 같이 20개 항목 중 1,3,5-trimethylbenzene (135MB)와 n-propylbenzene & 4-chlorotoluene (PBCT)의 상관성이 높았다. 하지만 상관성을 나타내는 결정계수(r^2)와 기울기(slope) 및 toluene 농도에 대한 비율을 비교하였을 때 A와 B지점은 유사한 결과를 보였고, C 및 D지점은 독립적인 특성을 나타내었다. 이는 A와 B지점의 대기오염물질이 동일한 배출원에 기인한다는 것을 의미하며, C 및 D지점은 특정 배출원에 대한 영향을 받지 않음을 의미한다.

그림 7은 TEX에 대한 CPF 분석 결과를 보여준다. 본 연구에서의 CPF는 상위 30% 이상의 풍속에서 특정 항목의 농도가 상위 30%보다 높을 확률을 계산한

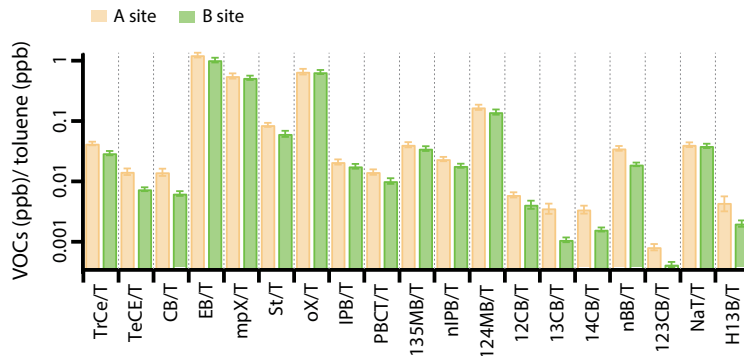


Fig. 5. Ratio of volatile organic compounds to toluene at the A and B sites (error bars indicate standard errors).

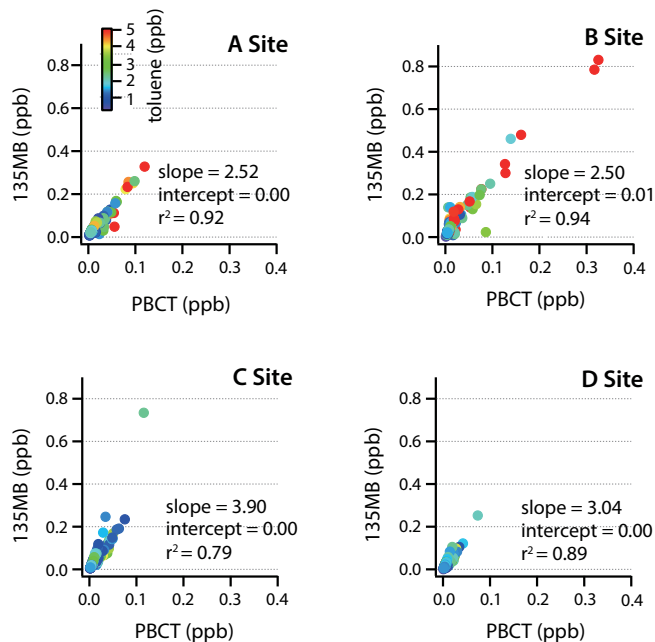


Fig. 6. Pairwise correlation scatterplots between 1,3,5-trimethylbenzene and n-propylbenzene & 4-chlorotoluene at the sampling sites.

다. 즉, 풍향, 풍속 및 시간에 따라 일정 기준 이하 항목에 대한 데이터를 배제함으로써 측정 지점에 영향을 미치는 항목 유형을 분리하는 역할을 한다(Malby *et al.*, 2013). CPF 분석 결과 A지점은 북서 방향, B지점은 서쪽 방향에서 TEX가 유입됨을 확인하였다. 여기서 A지점의 북서 방향과 B지점의 서쪽 방향은 그림 1에서의 산업단지가 위치해 있는 지역과 일치한

다. 하지만, C와 D지점은 각각 서남 방향과 북서 방향에서 TEX가 유입되며, 이 방향은 해양에서 불어온 바람으로, 산업단지 이외의 배출원으로부터 영향을 받았음을 의미한다. 즉, A, B지점의 TEX 농도가 C, D지점에 비해 높은 것은 산업단지의 영향에 의한 것으로 해석된다.

결론적으로, A, B지점과 C, D지점의 농도 차이, 시

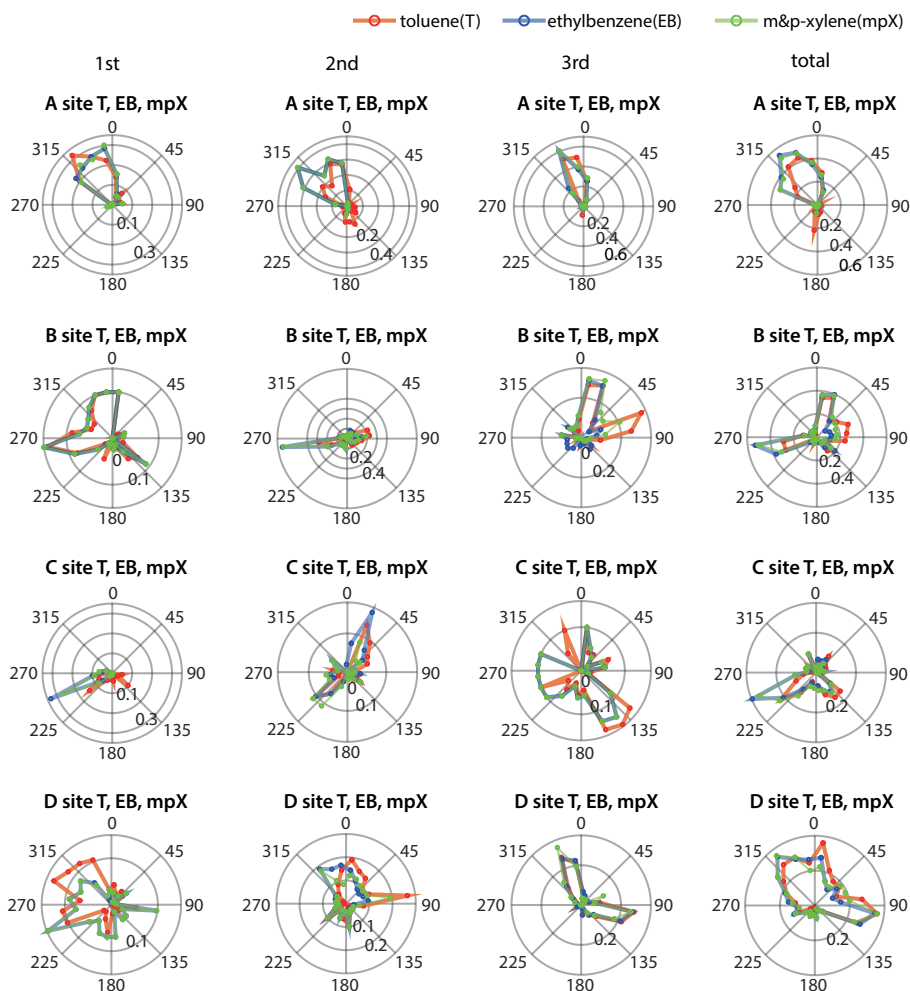


Fig. 7. Seasonal and overall results of conditional probability function (CPF) for toluene, ethylbenzene, m&p-xylene at the sampling sites.

간별 TEX 농도, toluene 비율 및 상관성 분석, CPF에 의한 배출원의 방향 등 종합적으로 분석해 볼 때, A, B지점의 휘발성유기화합물 농도는 산업단지 영향을 받음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 경상남도 창원시 진해구에 위치한 국가 산업단지 주변 지역에서 대기유해 물질에 대한 특성

및 영향을 분석하였다. 그 결과, 측정 지역의 $PM_{2.5}$ 농도는 평균 $11.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 비영향 지점 2개보다 산업단지의 영향을 받는 2개 지점의 농도가 약 1.3~2.4배 높게 분석되었다. 연구에서 측정된 16종의 중금속 역시 비영향권 지역보다 산업단지에 영향을 받는 지점에서 중금속의 농도가 높게 나타났다. 하지만 Mn을 제외한 항목은 인체에 큰 위해성을 주는 수준은 아닌 것으로 분석되었다. 휘발성유기화합물 21개 항목을 분석한 결과 BTEX의 합이 전체 휘발성유기화합물의 약 89%를 차지하며, 산업단지 주

변 지점과 비영향권 지점의 농도 차이, 시간별 TEX 농도, toluene 비율 및 상관성 분석, CPF에 의한 배출원의 방향 등 종합적으로 판단했을 때 산업단지 주변 지점은 산업단지의 영향을 받고 있었다.

본 연구 지역은 조선업을 기반으로 하는 국가산업단지 주변으로서, 연구의 목적은 조선업 기반 산업체에서 배출되는 유해물질 농도 및 영향을 분석함에 있다. 연구 결과는 다양한 업종 중 조선업에서 배출되는 유해물질의 농도를 간접적으로 제시한다는 것에서 의의가 있으며, 연구 결과는 다양한 정책 마련 및 업종별 유해물질 인벤토리 구축을 위해 사용되기를 기대한다.

감사의 글

본 논문은 환경부 국립환경과학원의 지원(NIER-RP2019-261) 및 한국연구재단(NRF-2020R1I1A3054851)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Amodio, M., Andriani, E., Dambruoso, P.R., Gennaro, de. G., Di Gilio, A., Intini, M., Palmisani, J., Tutino, M. (2013) A Monitoring strategy to assess the fugitive emission from a steel plant, *Atmospheric Environment*, 79, 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.001>
- Brown, S.K. (2002) Volatile organic pollutants in new and established buildings in Melbourne, Australia, *Indoor Air*, 12(1), 55-63. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.120107.x>
- Chow, J.C., Watson, J.G., Lowenthal, D.H., Chen, L.-W.A., Motallebi, N. (2010) Black and Organic Carbon Emission Inventories: Review and Application to California, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60, 497-507. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.4.497>
- Delfino, R.J., Sioutas, C., Malik, S. (2005) Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health, *Environ Health Perspect*, 113(8), 34-46. <https://doi.org/10.1289/ehp.7938>
- Doherty, B.T., Kwok, R.K., Curry, M.D., Ekenga, C., Chambers, D., Sandler, D.P., Engel, L.S. (2017) Association between blood BTEX concentrations and hematologic parameters among adult residents of the U.S. Gulf States, *European Environment Agency*, 156(2017), 579-587, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.048>
- European Environment Agency (EEA) (2015) Air quality in Europe - 2015 report. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015>
- Gentner, D.R., Isaacman, G., Worton, D.R., Chan, A.W.H., Dallmann, T.R., Davis, L., Liu, S., Day, D.A., Russell, L.M., Wilson, K.R., Weber, R., Guha, A., Harley, R.A., Goldstein, A.H. (2012) Elucidating secondary organic aerosol from diesel and gasoline vehicles through detailed characterization of organic carbon emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 18318-18323. <https://doi.org/10.1073/pnas.1212272109>
- Hleis, D., Fernandez-Olmo, I., Ledoux, F., Kfoury, A., Courcot, L., Desmonts, T., Courcot, D. (2013) Chemical profile identification of fugitive and confined particle emissions from an integrated iron and steelmaking plant, *Journal of Hazardous Materials*, 250, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.080>
- Hwang, I.J., Kim, T.H. (2019) Chemical Characteristics of Ambient PM_{2.5} at Industrial Complex in Gyeongbuk Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 336-345, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.336>
- Janssen, N.A.H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C., Cassee, F.R. (2013) Short-term effects of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5-10} on daily mortality in The Netherlands, *Science of The Total Environment*, 20(6), 463-464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>
- Kang, B.-U., Jeon, J.-M., Lee, H.-S. (2018) The characteristics of PM_{2.5} and trace elements in the vicinity of steel industrial complex, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 19(1), 18-29, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.26511/JKSET.19.1.3>
- Kansal, A. (2009) Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: a review, *Journal of Hazardous Materials*, 166(2009), 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.048>
- Lee, S.-J., Kim, S.-J., Park, M.-K., Cho, I.-G., Lee, H.-Y., Choi, S.-D. (2018) Contamination Characteristics of Hazardous Air Pollutants in Particulate Matter in the Atmosphere of Ulsan, Korea, *Journal of the Korea Society for Environmental Analysis*, 21(4), 281-291, (in Korean with English abstract). UCI (KEPA) I410-ECN-0102-2019-500-001448982
- Lee, Y., Kim, E., Oh, S.-H., Park, M., Chong, J., Lee, H., Song, H., Kwak,

- N., Lee, E., Kim, K., Park, K., Bae, M.-S. (2019) Assessment between MSA and Land Originated Secondary Organic Products of PM_{2.5} Using LC/MSMS in Gwangju Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 636-646, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.636>
- Malby, A.R., Whyatt, J.D., Timmis, R.J. (2013) Conditional extraction of air-pollutant source signals from air-quality monitoring, *Atmospheric Environment*, 74, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.028>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) Monitoring of Hazardous Air Pollutants in the Urban Ambient Atmosphere (II). <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/09/5670223.pdf>
- National Institute of Environmental Researcha (NIER) (2016a) Environmental health assessment on the general industrial complex (VI). <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/023/5638479.pdf>
- National Institute of Environmental Researchb (NIER) (2016b) Monitoring of Hazardous Air Pollutants in the Urban Ambient Atmosphere (III). <https://doi.org/10.23000/TRKO201700007893>
- National Institute of Environmental Researchc (NIER) (2016c) Environmental health assessment on the general industrial complex (VI). <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/023/5638479.pdf>
- National Institute of Environmental Researcha (NIER) (2017a) An estimation study of major air pollutants for residential area around Gwangyang industrial complex. <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/023/5638890.pdf>
- National Institute of Environmental Researchb (NIER) (2017b) Comprehensive Evaluation on the Result of four years (2012~2015) Monitoring of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects among Residents Living near Industrial Complex. <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/023/5638949.pdf>
- National Institute of Environmental Researchc (NIER) (2017c) Environmental Health Assessment (VII) - Gwangju Material Two Industrial Sites. <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/024/5669127.pdf>
- National Institute of Environmental Researchd (NIER) (2017d) Monitoring of hazardous air pollutants in urban and mountainous areas (I): Daegu. <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/09/023/5670166.pdf>
- National Institute of Environmental Researcha (NIER) (2018a) Monitoring of Hazardous Air Pollutants in the Urban Ambient Atmosphere (IV). <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/025/5677573.pdf>
- National Institute of Environmental Researchb (NIER) (2018b) Environmental health assessment on the general industrial complex (VIII). <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/025/5680349.pdf>
- Park, J.Y., Lim, H.J. (2006) Characteristics of Water Soluble Ions in Fine Particles during the Winter and Spring in Daegu, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 627-641, (in Korean with English abstract).
- Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V., Nunziata, A. (2009) Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system, *Toxicology*, 261(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.04.035>
- Sandrini, S., Fuzzi, S., Piazzalunga, A., Prati, P., Bonasoni, P., Cavalli, F., Bove, M.C., Calvello, M., Cappelletti, D., Colombi, C., Contini, D., de Gennaro, G., Di Gilio, A., Fermo, P., Ferrero, L., Gianelle, V., Giugliano, M., Ielpo, P., Lonati, G., Marinoni, A., Massabò, D., Molteni, U., Moroni, B., Pavese, G., Perrino, C., Perrone, M.G., Perrone, M.R., Putaud, J.-P., Sargolini, T., Vecchi, R., Gilardoni, S. (2014) Spatial and seasonal variability of carbonaceous aerosol across Italy, *Atmospheric Environment*, 99, 587-598. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.032>
- Vinceti, M., Filippini, T., Cilloni, S., Bargellini, A., Vergoni, A.V., Tsatsakis, A., Ferrante, M. (2017) Health risk assessment of environmental selenium: Emerging evidence and challenges (Review), *Molecular Medicine Reports*, 15(5), 3323-3335. <https://doi.org/10.3892/mmr.2017.6377>
- World Health Organization (WHO) (2000) Air Quality Guidelines for Europe (Second Edition), WHO Regional Publications, European Series, No. 91. <http://hdl.handle.net/20.500.11822/8681>
- Yurdakul, S., Civan, M., Tuncel, G. (2013) Volatile organic compounds in semi-urban Ankara atmosphere, Turkey: sources and variability, *Atmospheric Research*, 120, 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.015>

Authors Information

최운선 (국립목포대학교 석사연구원)
 장세경 (국립환경과학원 연구관)
 이철우 (국립환경과학원 과장)
 박채형 (국립목포대학교 석사연구원)
 김문수 (국립목포대학교 학부연구원)
 송명기 (국립목포대학교 연구교수)
 배민석 (국립목포대학교 교수)