

SIFT-MS를 이용한 산업단지별 대기오염물질 특성 연구

- 금사공업지역과 정관일반산단을 중심으로 -

박근영*, 정태욱, 이정인, 이주희, 김경민, 한치복

대기환경연구부 산업환경팀

Study on the Characteristics of Air Pollutants Around Industrial Complexes Using SIFT-MS

- Focus on the Geumsa Industrial Area and Jeonggwan General Industrial Complex -

Geun-Yeong Park*, Tae-Uk Jeong, Jeong-In Lee, Ju-Hee Lee, Kyung-Min Kim, and Chi-Bok Han

Industrial Environment Team

Abstract

This study used a SIFT-MS-based mobile monitoring system to measure volatile organic compounds (VOCs) and odorants in real time at the Geumsa and Jeonggwan Industrial Complexes. Total VOC concentrations at both sites were over 2.5 times higher than background levels, with alkanes, aldehydes, inorganics, and amines as the dominant classes, indicating significant industrial impact on local air quality. In Geumsa, formaldehyde, hexane, and methyl iodide were detected at elevated levels, with formaldehyde exceeding background concentrations by more than twofold. In Jeonggwan, ethyl chloride were notably high, reflecting emissions from specific processes. Seasonal patterns partially deviated from typical trends, suggesting stronger influence of local emission sources than environmental factors. Real-time pollution mapping revealed considerable spatial and temporal variability, highlighting areas of repeated high concentrations and the need for targeted emission management. This study provides quantitative data on VOC distribution and emission characteristics, offering a foundation for site-specific air pollution control and ongoing monitoring strategies.

Key words : SIFT-MS, VOCs, Odorous Substances, Real-time pollution mapping

1. 서론

금사공업지역은 부산시 금정구 금사동 및 회동동 일대에 위치한 산업 집적지로서, 1960년 전후 자연 발생적으로 형성된 이후 1974년 부산시 고시 제628호에 따라 준공업지역으로 지정되었다. 고무, 자동차, 의류, 봉제 등의 업종이 주요 업종이며 이 지역은 부산항과의 접근성, 풍부한 노동력, 양호한 교통망 등의 이점을 갖추어 1960년대부터 1980년대까지 신발 및 섬유 중심의 노동집약적 산업이 밀집하여 지역경제 성장에 중요한 역할을 수행하였다. 그러나 1990년대 이후 산업기능의 노후화와 입주기업의 영세화가 심화되면서 전반적인 산업경쟁력이 저하되었다. 이를 개선하기 위해 2000년대 후반부터 첨단산업단지 조성, 도시재생 등 다양한 재정비 방안이 검토되었으나, 국·공유지 부족, 높은 공시지가 등의 요인으로 구조적 한계에 직면하고 있다.

정관일반산업단지는 부산시 기장군 정관을 달산리 일원에 2001년부터 2010년까지 총 1,601억 원의 사업비를 투입하여 조성된 산업단지이다. 단지의 총 관리면적은 102만 1,000 m²이며, 이 중 61만 2,000 m²가 산업시설 구역으로 구성되어 있다. 주요 업종은 목재, 비금속, 철강·기계, 운송장비, 기타 제조업 및 유통설비 등이다. 그러나 산업단지의 노후화, 환경문제, 주변 지역과의 입지 갈등 등으로 인해 기업 수요를 충분히 충족시키지 못하고 있으며, 이와 관련한 다양한 환경 민원이 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 상황에서 노후화의 진행과 환경민원의 증가라는 문제에 직면한 두 산업단지 주변의 대기질 현황을 정밀하게 파악하고 주요 배출원 및 오염물질 특성을 규명하는 것은 효과적인 대기오염 저감 전략 수립에 필수적이다.

특히 산업단지에서 배출되는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)과 질소산화물(NOx)은 오존(O₃) 생성의 주요 전구물질로서, 오존은 강한 산화제로 작용하여 NOx 및 황산화물(SOx)의 2차 생성입자 형성을 촉진한다. VOCs 중 할로겐화탄화수소류 및 방향족탄화수소류 등은 독성과 발암성이 높아 돌연변이를 유발하거나 장기 노출 시 감각기관 자극 및 호흡기 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 주요 배출원으로는 유기용제 사용시설, 도장시설, 세탁시설, 주유소, 각종 운송수단의 배기가스 등 다양한 인위적 요인이 있으며,

일부는 식생 등 자연적 배출원에서도 기인한다.²⁾

산업단지의 다양한 공정에서 발생하는 VOCs와 악취물질은 인근 지역 주민의 생활환경 및 건강에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구는 SIFT-MS가 탑재된 대기이동측정차량을 활용하여 두 산업단지 주변의 VOCs 농도 분포와 특성을 파악하고, 주요 배출원을 탐지함으로써 산업단지 주변의 체계적인 대기오염 감시체계 구축과 대기질 개선을 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사지점 및 시기

본 연구는 2025년 1월부터 12월까지 금사공업지역과 정관일반산단을 대상으로 분기별로 수행되었다(Fig. 1.). 연구지역의 대기질 분석을 위해 선택적 다중이온질량분석기(Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry, SIFT-MS)가 탑재된 실시간 대기이동측정시스템을 이용하여 휘발성유기화합물(VOCs) 및 악취물질을 측정하였다. 이동측정은 맑은 날 평일 낮시간에 수행되었으며, 기온, 습도, 풍향 등의 기상자료는 가장 가까운 대기측정소의 자료를 참고하였다. 측정시간대의 바람장미를 Fig. 2에 나타내었으며 측정소는 각각 금사공업지역은 회동동측정소, 정관일반산단은 기장측정소의 데이터를 참고하였다.

바람장미 분석 결과, 계절에 따라 지배적인 풍향이 관측되었으며 이러한 풍향 특성은 대기오염물질의 확산방향과 공간적 분포에 영향을 미치는 요인으로 작용할 것으로 판단된다. 저속주행(20 km/h)을 유지하면서 측정하였으며, 현장의 교통사고의 위험성이 존재하는 도로구간은 측정에서 배제하였다. 운행경로의 중복은 최소한으로 구성하였으며, 시작점 및 종점은 장비의 준비 및 정리를 위하여 넓은 도로 또는 통행량이 적은 공터를 중심으로 선정하였다. 배경농도 측정은 주변 오염원이 상대적으로 적고 대기오염물질 농도가 낮을 것으로 예상되는 북구의 신덕중학교에서 수행하였다.

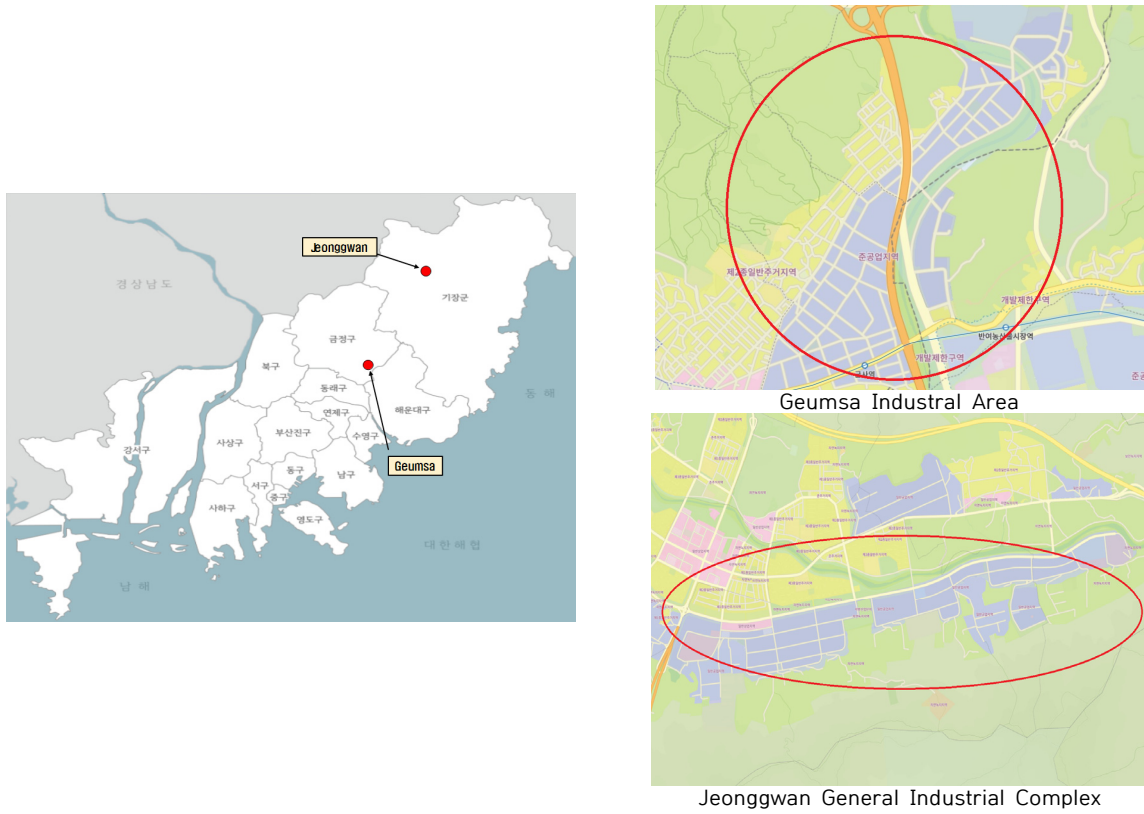


Fig. 1. Location of the sampling sites

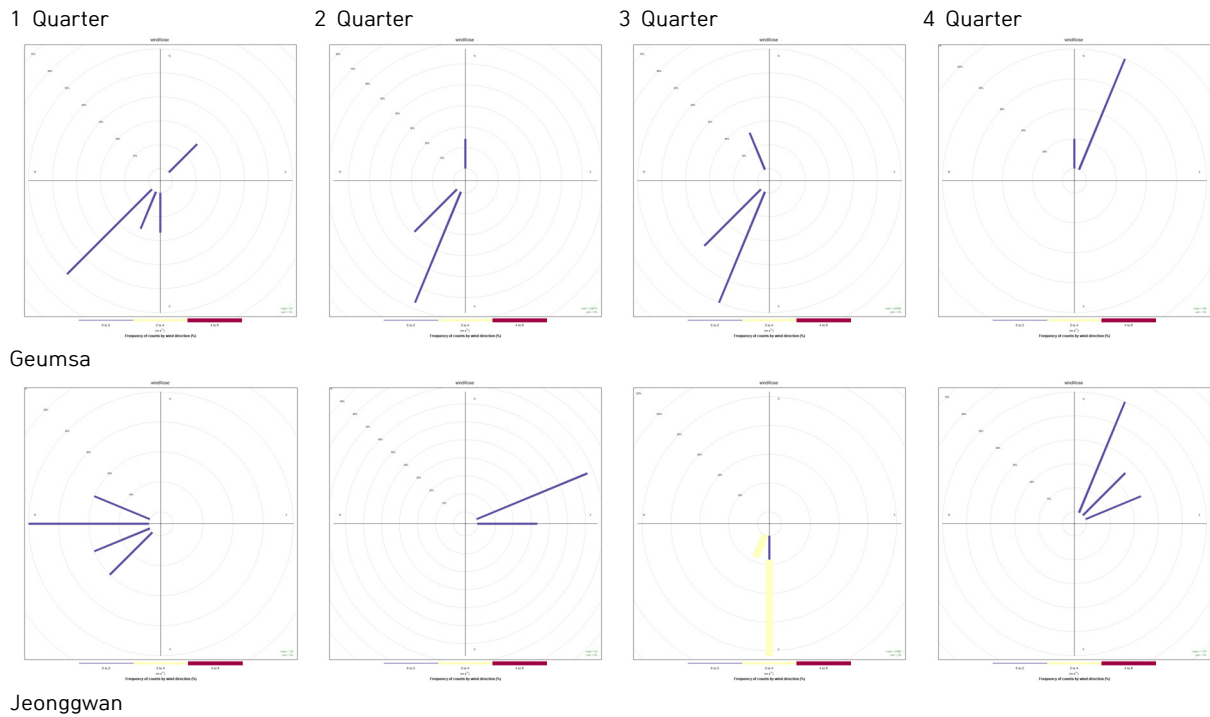


Fig. 2. Frequency of counts by wind directions

2.2. 분석항목 및 분석방법

본 연구의 분석 대상 물질은 US EPA TO-15 Method에 따라 지정된 64종 VOCs와 20종 악취물질을 포함하여 총 84종으로 구성되었다(Table. 1.). 구체적으로, 대기환경보전법상 대기오염물질 64종 중 27종, 유해성대기감시물질 43종 중 21종, VOCs 지정고시 37종 중 21종, 악취방지법 지정악취물질 22종 중 20종, 화학물질관리법 사고대비물질 97종 중 27종이 포함되었다. SIFT-MS에서 분리되지 않는 물질은 합산농도로 측정되었다.

시료 채취 및 전처리 과정 없이 대기 중 VOCs를 실시간으로 정량·정성 분석할 수 있는 SIFT-MS는 수분의 영향을 받지 않으며 시료 농축 과정 없이 pptv 수준까지 분석이 가능한 장비이다. 분석 원리

는 대기 중 질소(N₂), 산소(O₂) 및 공급된 수분(H₂O)을 마이크로파 플라즈마(microwave plasma)를 통해 이온화하여 H₃O⁺, NO⁺, O₂⁺의 세 가지 반응이온을 생성하는 방식에 기반한다(Fig. 3.). 생성된 반응이온은 flow tube 내로 주입되어 시료와 반응하며 생성이온(Product ion)을 형성하고, 이를 사중극자(Quadrupole mass filter)를 통해 검출기로 전달하여 분석한다. SIFT-MS는 GC/MS와 달리 표준물질 없이 절대정량이 가능하며, 특정 반응이온과 생성이온을 선택하고, 반응 속도 상수를 활용하여 각 화합물의 농도를 산출한다.³⁾ SIFT-MS에서 분리되지 않는 물질은 합산 농도로서 제시되었으며 분석 조건은 Table 2에 정리하였다.

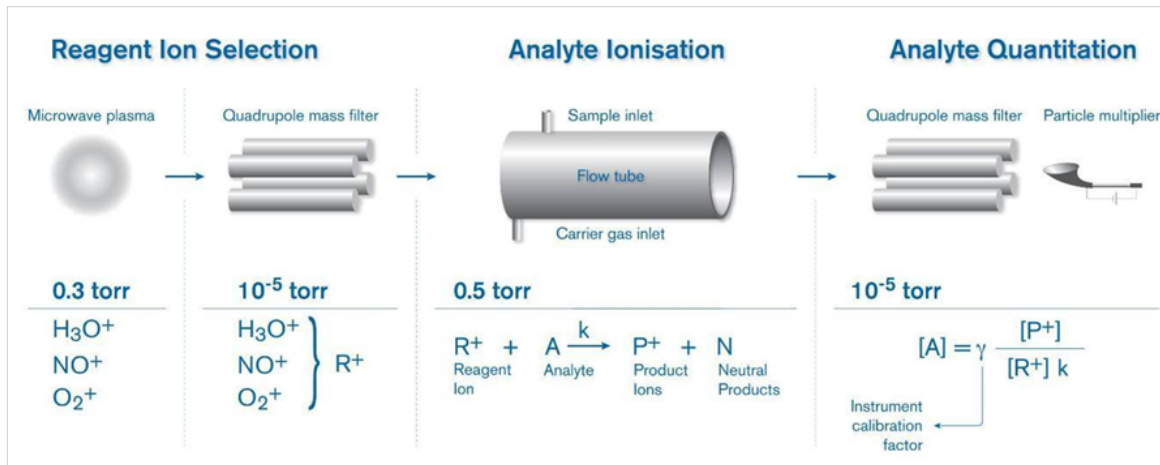


Fig. 3. Schematic representation of the SIFT-MS technique(Syft Tech., 2017).

Table 1. List of analyzed VOCs and odorous compounds

No	Compounds name	Molecule	No	Compounds name	Molecule
1	Acetonitrile	C ₂ H ₃ N	10	Carbon Tetrachloride	CCl ₄
2	Acetophenone	C ₈ H ₈ O	11	Carbonyl Sulfide	COS
3	Acrylamide	C ₃ H ₅ NO	12	Catechol	C ₆ H ₆ O ₂
4	Acrylonitrile	C ₃ H ₃ N	13	Chloroacetic Acid	C ₂ H ₃ ClO ₂
5	Allyl Chloride	C ₃ H ₅ Cl	14	Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl
6	Aniline	C ₆ H ₇ N	15	2-chloroethyl ether	C ₄ H ₈ Cl ₂ O
7	Benzene	C ₆ H ₆	16*	Chloroform	CHCl ₃
8	Bromoform	CHBr ₃		Methylen Chloride	CH ₂ Cl ₂
9	1,3-butadiene	C ₄ H ₆		1,1,2,2-tetrachloroethane	C ₂ H ₂ Cl ₄

(To be continued)

No	Compounds name	Molecule	No	Compounds name	Molecule
17	α -chlorotoluene	C ₇ H ₇ Cl	53	Styrene Oxide	C ₄ H ₈ O
18	o-cresol	C ₇ H ₈ O	54	Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄
19	1,2-dibromo-3-chloropropane	C ₆ H ₆ O ₂	55	1,2,4-trichlorobenzene	C ₆ H ₃ Cl ₃
20	1,2-dibromoethane	C ₂ H ₄ Br ₂	56	1,1,1-trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃
21	1,4-dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	57	1,1,2-trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃
22	1,1-dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	58	Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃
23	1,1-dichloroethene	C ₂ H ₂ Cl ₂	59	Triethylamine	C ₆ H ₁₅ N
24*	1,2-dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	60	Vinyl Acetate	C ₄ H ₆ O ₂
	Vinyl Chloride	C ₂ H ₃ Cl	61	Acrolein	C ₃ H ₄ O
25	1,2-dichloropropane	C ₃ H ₆ Cl ₂	62*	Ethyl Chloride	C ₂ H ₅ Cl
26	(z)-1,3-dichloropropene	C ₃ H ₄ Cl ₂		Phosgene	CCl ₂ O
27	N,N-dimethylaniline	C ₈ H ₁₁ N	63	Formaldehyde	CH ₂ O
28	Dimethylcarbamoyl Chloride	C ₃ H ₆ ClNO	64	Ammonia	NH ₃
29	N,N-dimethylformamide	C ₃ H ₇ NO	65	Methyl Mercaptan	CH ₄ S
30	Dimethylnitrosoamine	C ₂ H ₆ N ₂ O	66	Hydrogen Sulfide	H ₂ S
31	Dimethyl Sulfate	C ₂ H ₆ O ₄ S	67	Dimethyl Sulfide	C ₂ H ₆ S
32	1,4-dioxane	C ₄ H ₈ O ₂	68*	Phenol**	C ₆ H ₅ OH
33	Epichlorohydrin	C ₃ H ₅ ClO		Dimethyl Disulfide	C ₂ H ₆ S ₂
34	1,2-epoxybutane	C ₄ H ₈ O	69	Urethane	C ₃ H ₇ NO ₂
35	Ethylene Oxide	C ₂ H ₄ O	70	Trimethylamine	C ₃ H ₉ N
36	Hexachlorobutadiene	C ₄ Cl ₆	71	Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O
37	Hexane	C ₆ H ₁₄	72	Styrene	C ₈ H ₈
38	Isooctane	C ₈ H ₁₈	73*	Propionaldehyde	C ₃ H ₆ O
39	Isophorone	C ₉ H ₁₄ O		Propylene Oxidel**	C ₃ H ₆ O
40	Isopropyl Benzene	C ₉ H ₁₂	74	Butanal	C ₄ H ₈ O
41	Methanol	CH ₄ O	75	Pentanal	C ₅ H ₁₀ O
42	2-methylaziridine	C ₃ H ₇ N	76	3-methylbutanoic acid	C ₅ H ₁₀ O
43	Methyl Bromide	CH ₃ Br	77	Toluene	C ₇ H ₈
44	Methyl Chloride	CH ₃ Cl	78*	Xylenes	C ₈ H ₁₀
45	Methylhydrazine	CH ₆ N ₂		Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀
46	Methyl Iodide	CH ₃ I	79*	Methyl Ethyl Ketone	C ₄ H ₈ O
47	Methyl Isocyanate	C ₂ H ₃ NO		Acrylic Acid**	C ₃ H ₄ O ₂
48	Methyl Methacrylate	C ₅ H ₈ O ₂	80	Methyl Isobutyl ketone	C ₆ H ₁₂ O
49	Methyl Tert-Butyl Ether	C ₅ H ₁₂ O	81	Butyl Acetate	C ₆ H ₁₂ O ₂
50	2-nitropropane	C ₃ H ₇ NO ₂	82	Propanoic Acid	C ₃ H ₆ O ₂
51	N-nitrosomorpholine	C ₄ H ₈ N ₂ O ₂	83	Butanoic Acid	C ₄ H ₈ O ₂
52	Beta-Propiolactone	C ₃ H ₄ O ₂	84	Isobutyl Alcohol	C ₄ H ₁₀ O

*They are not separated in SIFT-MS and are marked together.

**Phenol, propylene oxidel and acrylic acid are not odorous compounds. But they are not separated in SIFT-MS.

Table 2. Operating condition of SIFT-MS for VOCs and odorous compounds analysis

Parameter	Value
Sample plate temperature	120°C
Flow tube temperature	120°C
Hex heater temperature	120°C
Wet source pressure	850 mTorr
Dry Source pressure	3.50 Torr
Flow tube pressure	110 mTorr
Upstream pressure	2.5 e ^{-0.4} Torr
Downstream pressure	50 mTorr

2.3. 오염지도 작성방법

실시간 대기이동측정시스템은 기존의 고정식 측정지점에서 시료 채취 후 기기 분석하는 방식과 달리, 이동 중 연속적으로 시료를 채취·분석함으로써 대기 중 오염물질 농도의 시간적 변화와 공간적 분포를 동시에 파악할 수 있다는 점에서 높은 활용성을 가진다. 이러한 특성은 산업단지와 같이 오염원 분포가 국지적 영향이 큰 지역에서 오염 특성을 정밀하게 진단하는 데 특히 유리하며, 구간별 오염도 차이를 반영한 공간적 오염지도를 작성하는 데 효과적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 반복·지속 측정을 통해 확보한 고해상도 데이터를 Python 기반의 공간분석 기법을 활용하여 각 측정지점의 농도 정보를 지리좌표와 연계한 오염지도를 구축하였다. 또한 측정된 물질의 조성 특성 분석 및 잠재적 배출원 추정을 위해 측정지역 반경 내 사업체 정보를 배출시설 신고자료와 대기배출원관리시스템(SEMS)을 통해 수집하였으며, 이를 통해 특정 물질의 공간적 농도패턴과 주변 산업시설의 운영 특성을 연계하여 산업단지 내 오염물질 배출 특성을 보다 정밀하게 파악할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산업단지별 연평균 농도

산업단지별 대기오염 특성을 파악하기 위해 연평균 농도를 화학물질군별로 분류하여 Table 3에 제시하였으며, 각 산업단지의 연평균 총농도는 Fig. 4에 나타내었다. 또한 연구지역별 화학물질군 조성 비율은 Table 3 및 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 4에서 확인되는 바와 같이, 금사공업지역의

연평균 총농도는 111.42 ppb, 정관일반산단은 118.61 ppb로 나타났으며 이는 배경농도(43.97 ppb)인 주거지역에 비해 각각 2.53배, 2.70배 높은 수준으로 두 지역 모두 대기오염물질 축적도가 높음을 나타낸다. Fig. 5과 Table 4 분석 결과, 두 산업단지 모두 알케인류가 가장 높은 비율을 차지하였으나 정관일반산단(42%)이 금사공업지역(32%)보다 더 높은 비중을 보였다. 그 외 알데하이드류, 무기질류, 아민류, 에폭사이드류, 알코올류 등은 두 지역에서 유사한 순서로 분포하였다. 다만 방향족계 물질은 금사공업지역(4.03%)이 정관일반산단(1.66%)보다 높은 비율을 보였다.

금사공업지역과 정관일반산업단지의 연평균 대기오염물질 농도는 부산광역시 내 다른 주요 산업단지들과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 수준을 유지하는 것으로 확인된다.⁴⁾ 이러한 결과는 해당 산업단지들이 다양한 제조·가공 업종을 포함하고 있음에도 불구하고, 각 사업장에서 배출량 관리, 공정 개선, 오염물질 저감시설의 운영 등으로 인해 총농도가 과도하게 증가하지 않은 것으로 해석된다. 특정 시기 또는 특정 위치에서 일시적으로 높은 농도가 관측되더라도 이는 구조적인 고농도 배출 특성 이라기보다는 공정 가동률 변화나 기상 조건 등의 영향에 의해 제한적으로 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 금사공업지역과 정관일반산업단지는 전반적으로 부산 지역 산업단지 중에서 평균적인 오염 수준을 유지하는 지역으로 분류할 수 있으며, 이는 해당 지역의 대기질 관리 정책이 일정 수준의 효과를 거두고 있음을 시사한다.

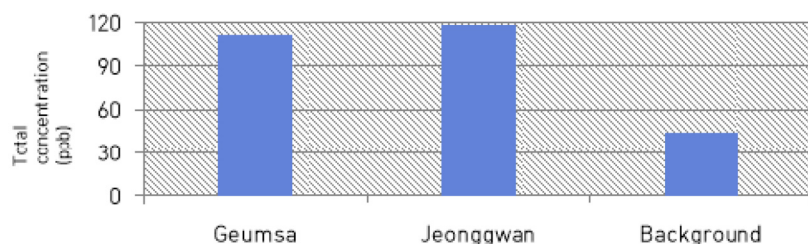


Fig 4. Total concentration of VOCs and odorous compounds in the studied industrial complexes.

Table 3. Concentration of VOCs, odorous compounds in industrial complexes

Group	Compounds(ppb)	Geumsa	Jeonggwan	Background
alkane	methyl chloride	0.76	0.82	0.46
	methyl bromide	1.88	2.16	0.58
	ethyl chloride+phosgene	4.20	17.98	1.15
	methyl iodide	8.80	8.36	2.24
	1.1-dichloroethane	1.76	1.03	0.68
	chloroform+methylen chloride+1.1.2.2-tetrachloroethane	3.31	3.66	0.70
	hexane	9.51	10.20	4.56
	1.1.1-trichloroethane	0.28	0.29	0.09
	carbon tetrachloride	0.21	0.14	0.01
	1.2-dichloroethane+vinyl chloride	0.70	0.54	0.28
	isooctane	4.23	4.65	0.91
	1.2-dibromoethane	0.26	0.22	0.03
	2-nitropropane	0.09	0.07	0.02
	1.2-dibromo-3-chloropropane	0.04	0.02	0.00
Total	36.04	50.13	11.68	
alkene	1.3-butadiene	0.17	0.25	0.31
	1.1-dichloroethene	1.53	1.56	0.37
	allyl chloride	0.37	0.33	0.26
	(Z)-1.3-dichloropropene	0.29	0.34	0.04
	trichloroethylene	0.97	0.86	0.09
	tetrachloroethylene	0.04	0.04	0.00
	Total	3.38	3.37	1.06
aldehyde	formaldehyde	12.24	11.41	5.84
	acetaldehyde	1.15	1.29	1.52
	propionaldehyde+propylene oxidel	1.45	0.85	0.16
	acrolein	1.42	1.39	0.85
	butanal	0.81	0.67	0.41
	pentanal	0.50	0.46	0.16
	Total	17.57	16.07	8.93
aromatic	benzene	0.38	0.22	0.04
	toluene	1.95	0.73	0.15
	xylene + ethylbenzene	1.49	0.58	0.16
	styrene	0.18	0.18	0.04
	isopropyl benzene	0.37	0.18	0.07
	styrene oxide	0.13	0.09	0.02
	Total	4.49	1.97	0.48

(To be continued)

Group	Compounds(ppb)	Geumsa	Jeonggwan	Background
halogenated	1.2-dichloropropane	1.47	0.91	0.20
	1.1.2-trichloroethane	1.79	1.90	0.61
	chlorobenzene	0.47	0.50	0.05
	bromoform	0.02	0.00	0.00
	1-chlorotoluene	0.45	0.27	0.06
	1.4-dichlorobenzene	0.01	0.00	0.00
	hexachlorobutadiene	0.00	0.00	0.00
	1.2.4-trichlorobenzene	0.00	0.00	0.00
	Total	4.20	3.58	0.93
ester	vinyl acetate	0.56	0.58	0.33
	methyl methacrylate	0.37	0.29	0.11
	beta-propiolactone	0.57	0.22	0.14
	dimethyl sulfate	0.45	0.60	0.10
	butyl acetate	1.13	0.93	0.20
	Total	3.08	2.61	0.88
ether	methyl tert-butyl ether	2.51	1.87	0.60
	1.4-dioxane	0.50	0.47	0.10
	2-chloroethyl ether	0.59	0.49	0.14
	Total	3.60	2.83	0.83
alcohol	methanol	4.11	3.11	2.43
	o-cresol	0.09	0.08	0.02
	catechol	0.13	0.14	0.04
	phenol+dimethyl disulfide	0.12	0.15	0.03
	isobutyl alcohol	1.44	1.26	0.40
	Total	5.89	4.74	2.91
carboxylic acid	dimethylcarbamoyl chloride	0.12	0.07	0.02
	chloroacetic acid	0.08	0.08	0.02
	3-methylbutanoic acid	0.63	0.54	0.12
	butanoic acid	0.79	0.70	0.23
	propanoic acid	0.95	0.70	0.20
	Total	2.57	2.10	0.59
epoxide	ethylene oxide	2.71	2.47	1.44
	1.2-epoxybutane	1.24	1.07	0.48
	epichlorohydrin	3.22	1.74	0.28
	Total	7.18	5.28	2.20
ketone	methyl ethyl ketone+acrylic acid	1.32	0.83	0.18
	methyl isobutyl ketone	0.37	0.32	0.11
	acetophenone	0.07	0.05	0.01
	isophorone	0.03	0.03	0.00
	Total	1.78	1.22	0.31
inorganic	carbonyl sulfide	1.92	2.26	1.49
	ammonia	7.92	10.46	0.85
	hydrogen sulfide	1.17	1.06	0.29
	Total	11.01	13.79	2.63
isocyanate	methyl isocyanate	0.18	0.18	0.09
nitrogen heterocycle	N-nitrosomorpholine	0.36	0.35	0.08

(To be continued)

Group	Compounds(ppb)	Geumsa	Jeonggwan	Background
thioether	dimethyl sulfide	0.22	0.17	0.07
thiol	methyl mercaptan	0.43	0.50	0.38
amine	2-methylaziridine	0.13	0.13	0.07
	triethylamine	0.15	0.13	0.04
	methylhydrazine	6.39	6.09	7.31
	dimethylnitrosoamine	0.50	0.43	0.24
	aniline	0.10	0.04	0.01
	acrylamide	0.14	0.16	0.07
	N,N-dimethylaniline	0.02	0.01	0.00
	trimethylamine	0.25	0.17	0.05
	Total	7.69	7.16	7.80
	amide	N,N-dimethylformamide	0.75	0.76
urethane		0.12	0.08	0.02
Total		0.87	0.83	0.27
nitrile	acrylonitrile	0.80	1.62	1.77
	acetonitrile	0.09	0.11	0.11
	Total	0.89	1.73	1.87

금사공업지역에서 측정된 벤젠 연평균 농도는 0.38 ppb로 대기환경기준($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.56 ppb)에 비해 낮은 수준이었다. 전체 화학물질군 중 알케인류(32.35%), 알데하이드류(5.77%), 무기질류(9.88%), 아민류(6.90%) 순으로 높은 비중을 차지하였다. 개별 물질별로는 포름알데하이드(12.24 ppb), 헥산(9.51 ppb), 요오드화메틸(8.80 ppb)이 상대적으로 높은 농도로 검출되었다. 또한 암모니아(7.92 ppb), 황화수소(1.17 ppb), 염화비닐(1,2-디클로로에탄 포함 0.70 ppb), 트리클로로에틸렌(0.97 ppb), 1,3-부타디엔(0.17 ppb) 등 배출허용기준 대상 물질도 검출되었다.

가장 높은 농도로 측정된 특정대기유해물질 포름알데하이드는 12.24 ppb로 배경농도(5.84 ppb)에 비해 2.10배 높았다. 포름알데하이드는 합성수지, 도장, 자동차 공정 등에서 배출되며, IARC 1군 발암물질로 분류되어 호흡기 자극, 천식 악화, 신경계 영향 등을 유발한다. 일반 배출허용기준은 8,000 ppb 이하이며, 연간 10톤 이상 배출 사업장은 4,000 ppb 이하로 관리하도록 규정된다. 두 번째로 높은 헥산은 9.51 ppb로 배경농도(4.56 ppb)의 2.09배로 나타났다. 헥산은 반도체, 신발·섬유 제조, 인쇄·도장, 화학 산업 공정 등에서 유기용제로 사용되며, 휘발성이 매우 높아 대기 중 VOCs 증가 및 광화학 스모그 생성에 기여한다. 고농도 노출 시

두통, 어지럼증, 구역감, 말초신경병증 등을 유발한다. 세 번째로 높은 요오드화메틸은 반도체·전자 산업, 의약·화학 분야에서 사용되며, 휘발성이 매우 높고 강한 독성을 가진 물질이다. 대기 수명은 짧지만 폐부종, 중추신경계 억제, 발암 가능성 등의 심각한 건강 영향을 초래하며 수생·토양 생태계에도 위해를 줄 수 있다.

금사공업지역은 자동차, 의류, 화학, 고무 등 다양한 제조업 기반의 사업체들이 밀집해 있으며, 이러한 업종의 공정 특성상 알케인류, 알데하이드류, BTEX, 케톤류와 같은 유기용제 기반 화학물질의 사용과 배출이 일반적으로 높은 것으로 알려져 있다. 이는 해당 산업들이 도장(코팅), 세정(탈지), 접착, 중합, 열가공 등의 공정을 광범위하게 활용하기 때문이며, 이러한 공정 과정에서 휘발되는 VOCs가 주요 배출원으로 기능한다. 특히 자동차 및 고무 산업에서는 유기용제 기반의 도장·코팅제와 세정제 사용량이 많아 BTEX 및 알케인류의 배출 가능성이 높고, 의류 제조 및 가공 공정에서는 열처리 또는 염색 과정에서 알데하이드류가 다량 발생할 수 있는 것으로 보고된다. 또한 화학제품 제조 공정에서는 케톤류와 같은 반응용 용제가 빈번히 사용되므로, 장비 개방, 공정 교체, 저장탱크 취급 과정에서 비산성 배출이 일어날 가능성이 상대적으로 높다.⁵⁾ 이러한 배출 특성은 금사공업지역의 산업 구성과

공정 단계의 특성에 의해 구조적으로 결정되는 것으로 해석될 수 있다.

정관일반산단의 벤젠 농도는 0.22 ppb로 대기환경기준보다 낮았다. 화학물질군의 비율은 알케인류(42.26%), 알데하이드류(13.55%), 무기질류(11.63%), 아민류(6.04%) 순으로 나타났으며, 물질별 농도는 염화에틸 복합신호(17.98 ppb), 포름알데하이드(11.41 ppb), 암모니아(10.46 ppb), 헥산(10.20 ppb)의 순이었다. 또한 황화수소(1.06 ppb), 염화비닐(0.54 ppb), 트리클로로에틸렌(0.86 ppb), 1,3-부타디엔(0.25 ppb) 등이 검출되었다. 가장 높은 농도로 검출된 염화에틸 복합신호(17.98 ppb)는 배경농도 대비 약 15.70배 수준이었다. 과거 피부마취 스프레이로도 쓰였던 염화에틸은 약품, 정밀화학물질 제조, 정유·석유화학 공정 등에 사용되며 휘발성이 매우 커 누출 즉시 기상으로 이동하며 오존층 파괴물질(ODP)로 분류된다. 두통, 어지러움, 호흡기 자극, 마취 등의 효과가 있다. 두 번째로 높은 포름알데하이드는 11.41 ppb로 나타났고, 세 번째인 암모니아(10.46 ppb)는 화학 산업, 금속처리, 폐수처리 등에서 주로 발생하며 고농도에서는 폐부종 및 호흡곤란을 유발한다.

정관일반산단의 핵심 업종인 섬유·철강·기계·운송장비 제조업은 공정 특성상 알데하이드, 알케인, 아민, 알코올 및 PAH류 물질의 사용과 배출 비중이 높은 것으로 보고된다. 섬유 및 염색 공정에서는 열처리·레진가공·염색제 사용 과정에서 알데하이드·알코올 및 용제계 알케인이 다량 발생하는 것으로 알

려져 있으며⁶⁾, 철강·금속 가공 분야에서는 절삭유 및 금속 가공유가 탄화수소계 알케인의 주요 배출원으로 작용하고, 용접·열처리 과정에서는 불완전 연소에 의해 PAH류가 발생하는 사례가 보고된 바 있다.⁷⁾ 이러한 선행연구는 정관일반산단에서 측정된 VOCs 조성 패턴이 해당 업종의 공정별 배출 특성과 일치함이 확인된다.

산업단지 내 주요 업종에서 관찰되는 물질 계열의 배출 특성은 각 산업이 보유한 공정 구조와 화학적 반응 메커니즘에 의해 체계적으로 설명될 수 있다.⁵⁾ 즉, 특정 물질이 높은 빈도로 검출되는 현상은 단순한 공정 부산물의 배출을 넘어, 원료 물질의 구성, 공정 조건(온도, 압력), 사용되는 용제의 성상, 촉매 및 첨가제의 화학적 특성 등 복합적인 요인에 의해 결정된다. 자동차·운송장비 제조업과 같이 도장·세정 공정이 핵심을 이루는 산업에서는 방향족 용제 및 알케인 기반 용제를 대량으로 사용하기 때문에 도장 건조 과정에서 용제의 휘발이 필연적으로 발생하며, 이 과정에서 알케인류, BTEX류, 알데하이드류 등이 다량 배출될 수 있다. 섬유·의류 산업의 경우 염색·가공 단계에서 다양한 유기용제와 레진 처리제가 사용되며, 특히 방수·방축·방염 효과를 위한 레진 처리제는 포름알데하이드를 전구체로 포함하고 있어 공정 조건이 고온·고습으로 유지될 때 포름알데하이드가 쉽게 방출된다. 또한 염료의 정착 및 발색 과정을 위해 아민계 첨가제나 촉매를 사용하는 경우가 많아, 공정 중 휘발성 아민류가 대기 중으로 배출되기 쉬운 구조적 특성을 가진다. 따

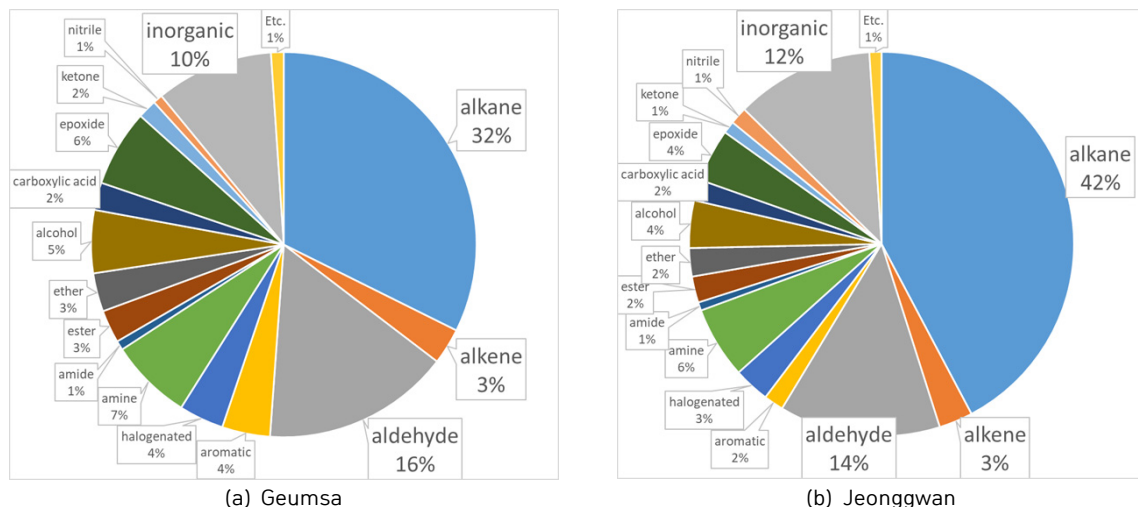


Fig 5. Proportion of each chemical group in the studied industrial complexes.

라서 산업단지 내에서 관찰되는 VOCs 및 악취물질의 조성은 단일 요인에 의한 결과가 아니라, 공정 특성에 따른 원료 사용 패턴, 반응조건, 열적 스트레스, 연소 및 열분해 과정이 복합적으로 작용하여 형성되는 결과이다.⁸⁾

금사공업지역과 정관일반산업단에서 가장 많이 측정되는 화학군은 알케인류인데, 산업단지 내에서 알케인류가 상대적으로 높은 농도로 검출되는 주요 원인은 이들 물질이 유기용제, 연료, 세정제 및 공정유의 주성분으로 광범위하게 사용되기 때문이다.⁹⁾ 알케인류는 화학적으로 반응성이 낮고 휘발성이 높아, 도장, 탈지, 세정, 금속가공 및 기계 유지관리 공정에서 용제로 사용될 경우 공정 중 증발을 통해 쉽게 대기 중으로 방출된다.¹⁰⁾

특히 자동차 및 기계 제조 공정에서는 금속 표면의 오염물 제거를 위한 탈지·세정 과정에서 헥산, 헵탄, 옥탄 등 저분자 알케인이 포함된 세정제가 사용되며, 이 과정에서 비의도적 증발 배출이 빈번하게 발생하는 것으로 보고되고 있다.¹⁶⁾ 또한 연료 저장시설, 저유소 및 산업단지 내 운송차량에서의 증발 손실은 알케인류 배출의 중요한 기여 요인으로 작용하며, 이는 산업지역에서 알케인 계열 물질의 배경농도를 상승시키는 원인으로 지적된다.⁵⁾

한편 알케인류는 방향족 화합물에 비해 상대적으로 독성이 낮아 대체용제로 선택되는 경우가 많으며, 이러한 특성으로 인해 중소규모 사업장에서 관리가 상대적으로 미흡한 상태로 사용·배출되는 경향이 있다.¹¹⁾ 이러한 복합적인 공정적·물리화학적 특성으로 인해 산업단지 대기 중에서는 알케인류가 지속적이고 광범위하게 관측되는 대표적인 VOC 계열로 나타난다.

부산 지역 내 산업단지 간 대기오염물질 조성을 비교한 결과, 산업단지별 산업 구조와 배출원 구성에 따라 오염물질의 특성이 뚜렷하게 구분되는 양상이 확인되었다. 녹산국가산업단지는 화학·금속·기계 관련 업종의 밀집도와 유해화학물질 취급사업장의 비중이 상대적으로 높아 방향족류, 아미드류 및 케톤류의 농도가 다른 산업단지에 비해 높게 나타난 반면, 신평·장림일반산업단지는 레미콘 및 물류·가공 관련 사업장이 다수 분포함에 따라 에테르류와 미세먼지의 농도가 상대적으로 높은 수준을 보였다.⁴⁾ 특히 유해화학물질 취급시설의 존재 여부와 대량 비산먼지 발생 사업장의 분포는 측정 시 오염

물질 농도에 직접적인 영향을 미치는 주요 요인으로 작용하는 것으로 확인되었다. 전국산업단지 간의 대기오염도를 단순비교하기 힘들지만 벤젠의 경우 울산은 1.58 ppb, 구미는 0.93 ppb ~ 1.02 ppb, 여수광양은 0.73 ppb, 포항은 0.57 ppb로 모든 지역은 연평균대기환경기준인 1.56 ppb 이하이지만 부산(0.22 ppb ~ 0.38 ppb)은 상대적으로 낮은 수준을 보이고 있다.

포름알데하이드의 경우 울산은 12.56 ~ 13.28 ppb, 여수광양은 2.40 ppb, 포항은 3.55 ppb로 부산(11.41 ppb ~ 12.24 ppb)이 비슷하거나 상대적으로 높은 수준을 보이고 있다.¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾ 이러한 결과는 산업단지별 대기오염 문제가 단일한 관리 기준으로는 충분히 대응하기 어렵다는 점을 시사하며, 각 산업단지의 업종 구성과 배출 특성을 고려한 맞춤형 오염저감 및 관리 전략 수립의 필요성을 명확히 보여준다.

3.2. 계절별 농도분포

금사공업지역과 정관일반산업단의 분기별 오염도는 Table 4에 제시하였다. 두 지역 모두 1분기에서 가장 낮은 총농도를 보였으며(Fig. 6), 금사공업지역은 3분기, 정관일반산업단은 4분기에 가장 높은 총농도를 나타냈다. 배경농도 역시 하반기(3·4분기)가 상반기보다 높은 수준이었다. 일반적으로 가을·겨울철에는 안정대기 형성으로 인해 대기확산이 저하되고, 여름철에는 강한 일사로 인해 광화학 반응이 증가하여 대기오염물질 농도 변화에 영향을 미친다. 선행연구에서는 VOCs 농도가 봄·겨울·여름·가을 순으로 감소하며, 특히 방향족계 물질은 겨울철 난방 및 대기역전현상으로 증가한다고 보고된다.¹⁷⁾ 그러나 본 연구에서는 이러한 전형적 계절 패턴이 명확히 확인되지 않았다. 또한 악취물질의 농도는 일반적으로 여름철에 증가하는 경향이 있으나, 정관일반산업단에서는 해당 경향이 관찰된 반면 금사공업지역에서는 나타나지 않았다. 이는 산업단지내의 오염물질 배출량 또는 다른 원인으로 인한 영향이 계절적 요인보다 상대적으로 더 크게 작용했을 가능성을 시사하며, 보다 장기적인 연속 관측을 통한 검증이 필요하다.

Fig 7와 Fig 8에 각각 금사공업지역과 정관일반산업단지에 분기별 box plotting 결과를 나타내었다. 금사공업지역의 분기별 box plot 결과, 포름알

데하이드와 헥산에서 2-3분기에 중앙값과 사분위 범위가 뚜렷하게 증가하는 경향이 나타났으며, 요오드화메틸과 암모니아에서는 일부 분기에서 이상치가 빈번히 관측되었다. 특히 포름알데하이드는 분기 간 변동폭이 커 단기적인 고농도 발생 가능성이 확인되었고, 헥산 및 iso-옥테인 등의 신호에서도 농도 편차가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 금사공업지역 내 도장·세정 및 화학제품 취급 공정에서의 간헐적 고배출 특성이 농도 분포에 반영된 것으로 해석된다. 정관일반산업단지에서는 포름알데하이드와 헥산의 중앙값이 3-4분기로 갈수록 점진적으로 증가하는 양상을 보였으며, 암모니아와 벤젠은 특정 분기에서 사분위 범위가 확대되며 국지적 고농도가 관측되었다. 정관일반산업단 또한 간헐적 고배출 특성이 공정이 집중되는 시기에 선택적 증가를 발생시켰으므로 추정할 수 있다. 오염물질의 이상치가 빈번하게 발생하는 것은 특정 공정에서의 국지적 고농도 배출 가능성을 시사한다.

금사공업지역의 경우 요오드화메틸, 헥산, 염화메틸, iso-옥테인, 포름알데하이드 등이 배경농도 대비 높은 수준을 보였으며, 1분기 대비 2·3·4분기에서 전반적으로 높은 농도가 관찰되었다. 특히 요

오드화메틸의 경우 3분기와 1분기 간 농도 차이가 최대 14.6배에 달했다. 반면, 정관일반산업단은 검출되는 오염물질의 종류가 상대적으로 제한적이었으며, 요오드화메틸, 헥산, 아크롤레인 등이 배경 대비 높았다. 특히 염화메틸은 4분기에 65.30 ppb로 급증하는 양상을 보였다. 이는 일시적 공정 영향인지 기상적 요인에 의한 것인지에 대한 추가 분석이 필요하다. 포름알데하이드의 경우 상대적으로 높은 오염도를 보이는 시간적, 공간적지점이 다양하게 나타는데, 이는 선행 연구자료에서도 발견 될 수 있는 특성으로, 이러한 현상은 포름알데하이드 물질이 사업장에서 배출되어 대기 중에서 광화학반응을 통해 2차적으로 생성된 물질일 것으로 예상되어 더 종합적인 해석이 필요하다는 점이 제시되고 있다.¹²⁾ 두 산업단지 모두 특정 물질에 대한 반복적·지속적 배출 특성이 나타나고 있어 향후 산업단지 맞춤형 저감 전략 수립이 요구된다.

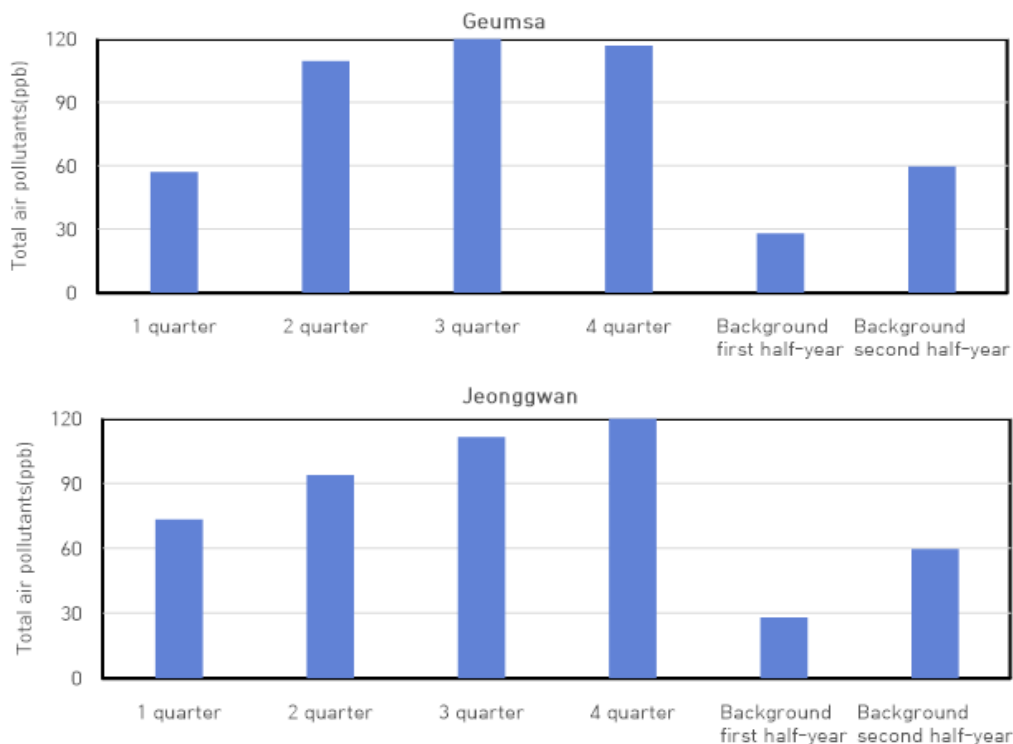


Fig 6. Total concentration of 84 air pollutants in studied industrial complexes by quarter.

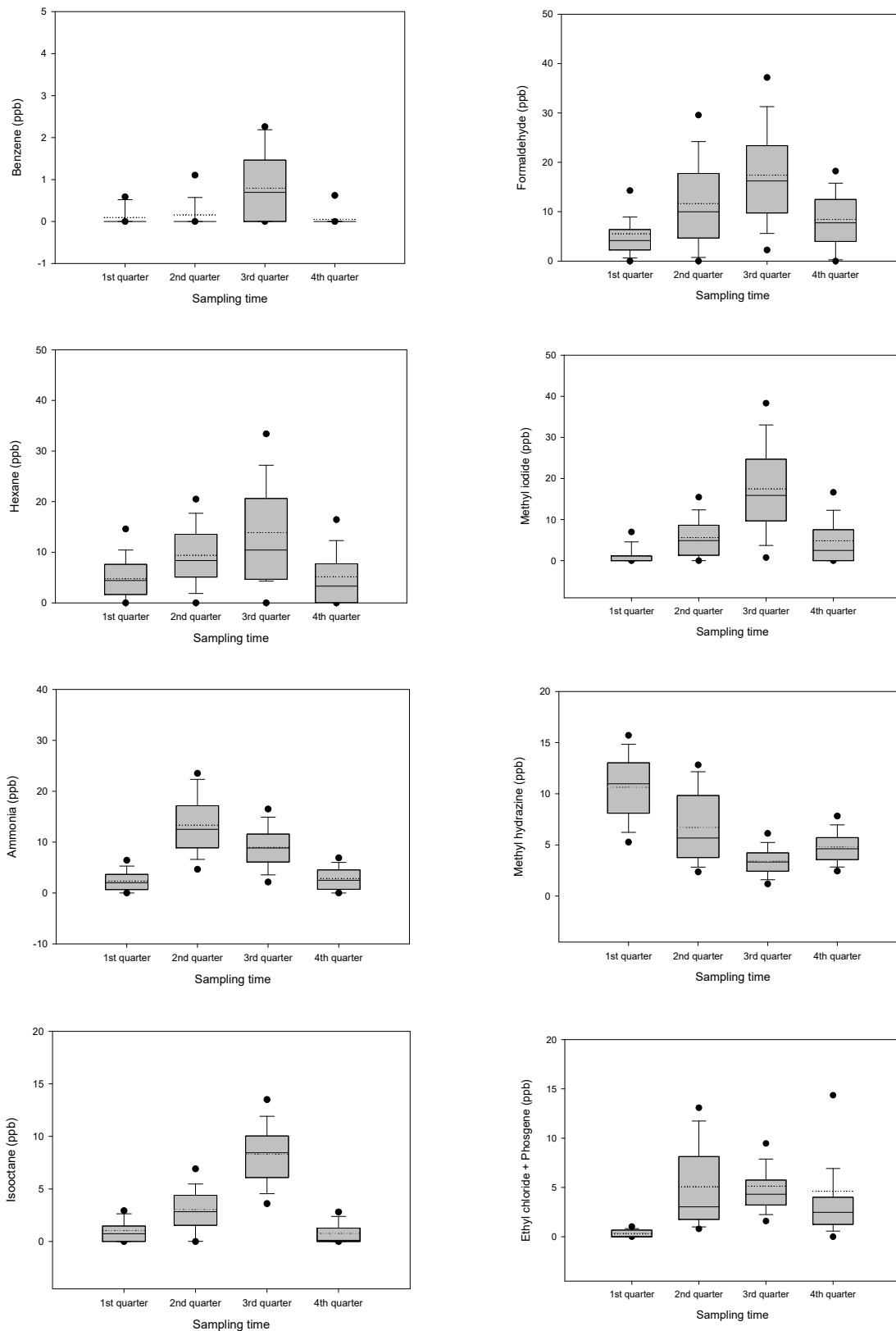


Fig. 7. Result of box plotting on Geumsa industrial area.

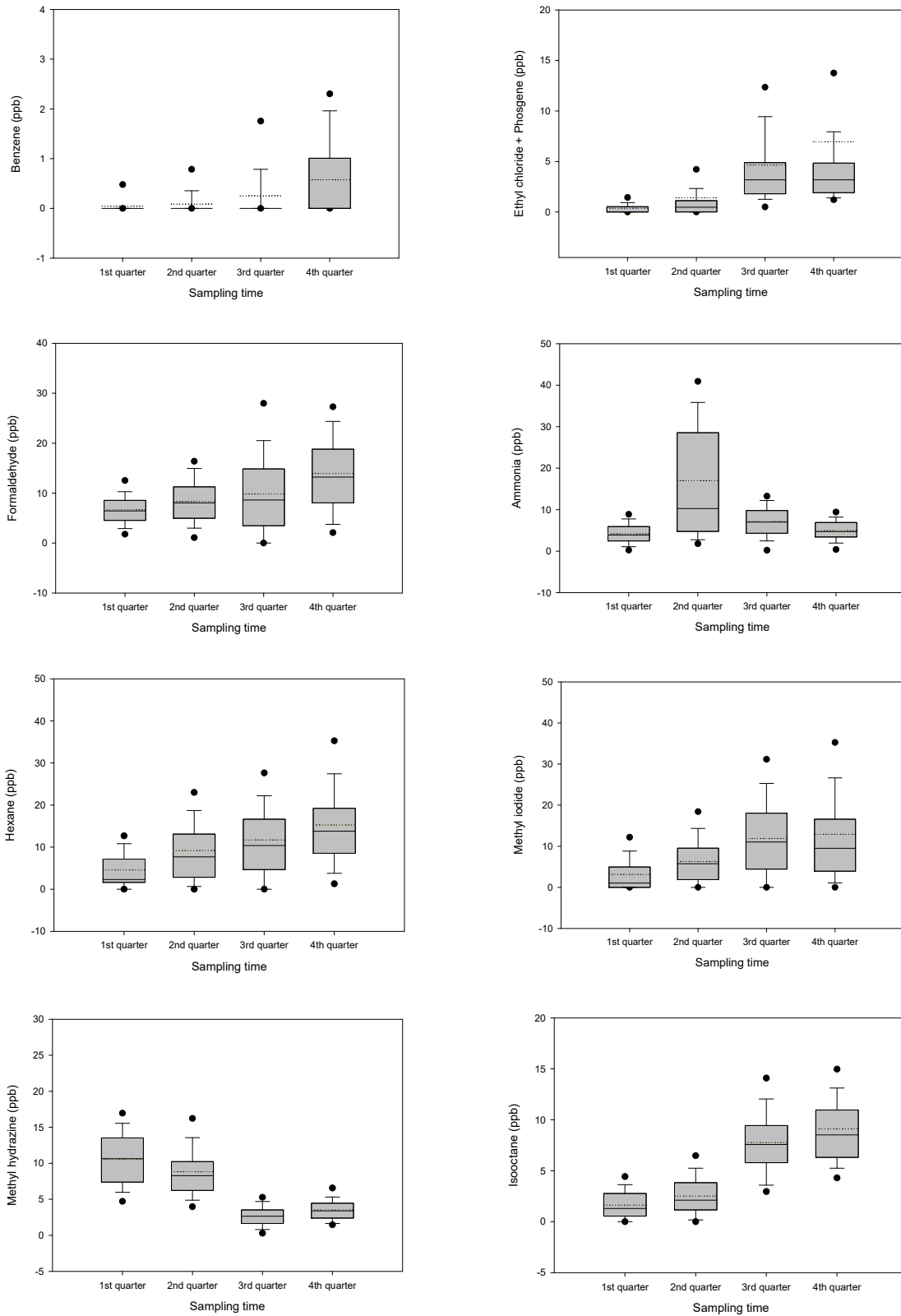


Fig. 8. Result of box plotting on Jeonggwan general industrial complex.

3.3. VOCs 배출원 추정

산업단지에서 발생하는 톨루엔(Toluene)과 벤젠(Benzene)의 농도 비율(이하 T/B 비율)은 대기 중 휘발성유기화합물의 주요 배출원을 추정하는 지표로 널리 활용되고 있다.¹³⁾¹⁴⁾ 일반적으로 T/B 비율이 1보다 작은 경우에는 바이오매스 연소, 바이오연료 또는 화석연료 연소와 같은 연소 기원의 영향이 우세한 것으로 해석되며, 반대로 1보다 큰 경우에는 산업공정 또는 용매 사용에 의한 배출 기여도가 상대적으로 높은 것으로 판단된다.¹⁴⁾ 또한 일부 선행

연구에서는 T/B 비율 3을 기준으로, 3 미만일 경우 차량 배기가스의 영향이 지배적인 반면, 3 이상일 경우 산업단지 또는 산업공정의 영향이 더 우세한 것으로 평가하고 있다.¹⁵⁾

정관일반산단의 T/B 비율은 분기별로 각각 7.43, 2.83, 3.62, 2.72로 나타났으며, 1분기에 가장 높은 값을 보였고 2분기부터 4분기까지는 비교적 유사한 수준을 유지하였다. 반면 금사공업지역의 T/B 비율은 각 분기별로 13.26, 7.84, 3.65, 5.11로 산정되었으며, 정관일반산단과 동일하게 1분기에 최고값

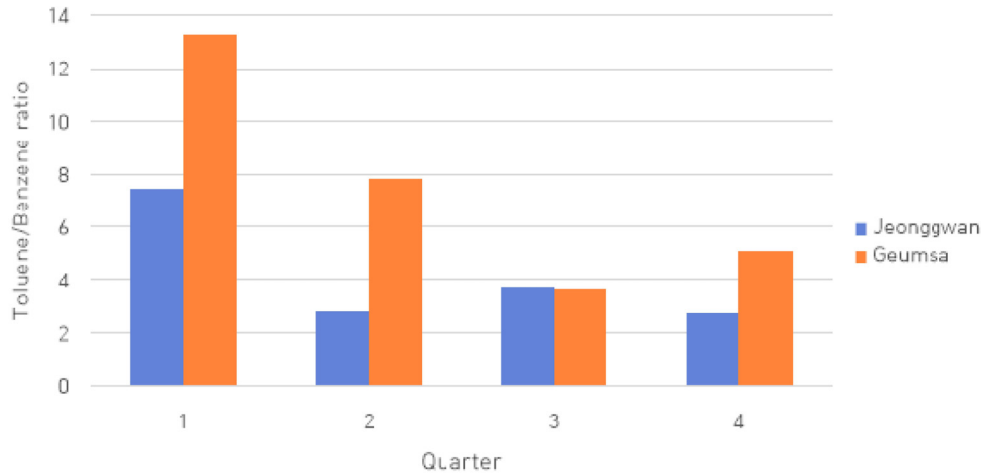


Fig. 9. T/B ratio by quarter.

Table 4. Concentration of VOCs, odorous compounds in Geumsa and Jeonggwan area

Group	Compounds	Range (ppb)		
		Geumsa	Jeonggwan	Background
alkane	methyl chloride	0.53 ~ 0.91	0.49 ~ 1.50	0.24 ~ 0.68
	methyl bromide	0.87 ~ 3.36	1.17 ~ 3.54	0.35 ~ 0.80
	ethyl chloride+phosgene	0.33 ~ 5.91	0.35 ~ 65.30	0.09 ~ 2.20
	methyl iodide	1.21 ~ 17.60	4.65 ~ 11.82	0.87 ~ 3.60
	1,1-dichloroethane	0.22 ~ 2.64	0.24 ~ 1.75	0.03 ~ 1.32
	chloroform+methylen chloride+1,1,2,2-tetrachloroethane	1.19 ~ 5.79	2.38 ~ 4.93	0.22 ~ 1.18
	hexane	4.77 ~ 13.60	6.09 ~ 13.57	3.04 ~ 6.09
	1,1,1-trichloroethane	0.14 ~ 0.46	0.10 ~ 0.42	0.08 ~ 0.09
	carbon tetrachloride	0.02 ~ 0.42	0.02 ~ 0.30	0.00 ~ 0.02
	1,2-dichloroethane+vinyl chloride	0.18 ~ 1.30	0.21 ~ 0.82	0.07 ~ 0.49
	isooctane	1.08 ~ 8.40	1.23 ~ 7.69	0.21 ~ 1.60
	1,2-dibromoethane	0.08 ~ 0.48	0.12 ~ 0.34	0.02 ~ 0.04
	2-nitropropane	0.04 ~ 0.15	0.03 ~ 0.11	0.02 ~ 0.03
	1,2-dibromo-3-chloropropane	0.00 ~ 0.10	0.01 ~ 0.05	0.00

(To be continued)

Group	Compounds	Range (ppb)		
		Geumsa	Jeonggwan	Background
alkane	methyl chloride	0.53 ~ 0.91	0.49 ~ 1.50	0.24 ~ 0.68
	methyl bromide	0.87 ~ 3.36	1.17 ~ 3.54	0.35 ~ 0.80
	ethyl chloride+phosgene	0.33 ~ 5.91	0.35 ~ 65.30	0.09 ~ 2.20
	methyl iodide	1.21 ~ 17.60	4.65 ~ 11.82	0.87 ~ 3.60
	1,1-dichloroethane	0.22 ~ 2.64	0.24 ~ 1.75	0.03 ~ 1.32
	chloroform+methylen chloride+1,1,2,2-tetrachloroethane	1.19 ~ 5.79	2.38 ~ 4.93	0.22 ~ 1.18
	hexane	4.77 ~ 13.60	6.09 ~ 13.57	3.04 ~ 6.09
	1,1,1-trichloroethane	0.14 ~ 0.46	0.10 ~ 0.42	0.08 ~ 0.09
	carbon tetrachloride	0.02 ~ 0.42	0.02 ~ 0.30	0.00 ~ 0.02
	1,2-dichloroethane+vinyl chloride	0.18 ~ 1.30	0.21 ~ 0.82	0.07 ~ 0.49
	isooctane	1.08 ~ 8.40	1.23 ~ 7.69	0.21 ~ 1.60
	1,2-dibromoethane	0.08 ~ 0.48	0.12 ~ 0.34	0.02 ~ 0.04
	2-nitropropane	0.04 ~ 0.15	0.03 ~ 0.11	0.02 ~ 0.03
1,2-dibromo-3-chloropropane	0.00 ~ 0.10	0.01 ~ 0.05	0.00	
alkene	1,3-butadiene	0.02 ~ 0.30	0.02 ~ 0.50	0.02 ~ 0.61
	1,1-dichloroethene	0.37 ~ 3.08	0.67 ~ 2.79	0.13 ~ 0.60
	allyl chloride	0.21 ~ 0.53	0.22 ~ 0.44	0.10 ~ 0.41
	(Z)-1,3-dichloropropene	0.10 ~ 0.51	0.14 ~ 0.54	0.02 ~ 0.06
	trichloroethylene	0.12 ~ 1.94	0.19 ~ 1.69	0.02 ~ 0.15
	tetrachloroethylene	0.00 ~ 0.11	0.00 ~ 0.10	0.00
ether	methyl tert-butyl ether	0.41 ~ 4.24	0.44 ~ 3.29	0.09 ~ 1.11
	1,4-dioxane	0.24 ~ 0.79	0.27 ~ 0.89	0.10 ~ 0.10
	2-chloroethyl ether	0.20 ~ 1.02	0.22 ~ 0.82	0.06 ~ 0.22
aldehyde	formaldehyde	5.21 ~ 17.41	7.42 ~ 21.01	1.13 ~ 10.56
	acetaldehyde	0.61 ~ 0.97	0.19 ~ 2.67	1.47 ~ 1.57
	propionaldehyde+propylene oxidel	0.12 ~ 2.76	0.12 ~ 1.73	0.00 ~ 0.31
	acrolein	1.23 ~ 1.69	1.09 ~ 1.77	0.58 ~ 1.12
	butanal	0.66 ~ 1.12	0.57 ~ 0.76	0.29 ~ 0.53
	pentanal	0.34 ~ 0.70	0.37 ~ 0.53	0.08 ~ 0.25
aromatic	benzene	0.10 ~ 0.78	0.05 ~ 0.47	0.03 ~ 0.05
	toluene	1.31 ~ 2.86	0.30 ~ 1.26	0.12 ~ 0.18
	xylene + ethylbenzene	1.05 ~ 1.78	0.27 ~ 0.92	0.06 ~ 0.26
	styrene	0.05 ~ 0.30	0.06 ~ 0.28	0.01 ~ 0.07
	isopropyl benzene	0.14 ~ 0.55	0.08 ~ 0.28	0.01 ~ 0.13
	styrene oxide	0.03 ~ 0.21	0.05 ~ 0.15	0.00 ~ 0.05
amide	N,N-dimethylformamide	0.35 ~ 1.12	0.57 ~ 1.21	0.21 ~ 0.29
	urethane	0.04 ~ 0.21	0.03 ~ 0.13	0.01 ~ 0.03
isocyanate	methyl isocyanate	0.11 ~ 0.24	0.12 ~ 0.25	0.09 ~ 0.09
nitrogen heterocycle	N-nitrosomorpholine	0.13 ~ 0.61	0.21 ~ 0.52	0.04 ~ 0.12
thioether	dimethyl sulfide	0.04 ~ 0.41	0.04 ~ 0.27	0.02 ~ 0.12

(To be continued)

Group	Compounds(ppb)	Range		
		Geumsa	Jeonggwan	Background
halogenated	1,2-dichloropropane	0.16 ~ 2.71	0.23 ~ 1.58	0.07 ~ 0.34
	1,1,2-trichloroethane	0.73 ~ 3.10	0.99 ~ 2.98	0.26 ~ 0.96
	chlorobenzene	0.15 ~ 0.92	0.18 ~ 0.69	0.02 ~ 0.08
	bromoform	0.00 ~ 0.04	0.00	0.00
	1-chlorotoluene	0.21 ~ 0.76	0.16 ~ 0.43	0.02 ~ 0.10
	1,4-dichlorobenzene	0.00 ~ 0.02	0.00 ~ 0.01	0.00
	hexachlorobutadiene	0.00	0.00	0.00
	1,2,4-trichlorobenzene	0.00	0.00 ~ 0.01	0.00
amine	2-methylaziridine	0.06 ~ 0.19	0.08 ~ 0.19	0.05 ~ 0.09
	triethylamine	0.06 ~ 0.22	0.07 ~ 0.19	0.02 ~ 0.06
	methylhydrazine	3.33 ~ 10.49	2.68 ~ 9.49	10.39 ~ 4.24
	dimethylnitrosoamine	0.45 ~ 0.58	0.20 ~ 0.60	0.23 ~ 0.26
	aniline	0.06 ~ 0.17	0.01 ~ 0.07	0.00 ~ 0.01
	acrylamide	0.12 ~ 0.18	0.13 ~ 0.21	0.04 ~ 0.09
	N,N-dimethylaniline	0.01 ~ 0.03	0.00 ~ 0.02	0.00
	trimethylamine	0.19 ~ 0.30	0.15 ~ 0.21	0.04 ~ 0.07
ester	vinyl acetate	0.43 ~ 0.64	0.45 ~ 0.83	0.28 ~ 0.38
	methyl methacrylate	0.20 ~ 0.56	0.24 ~ 0.35	0.07 ~ 0.16
	beta-propiolactone	0.40 ~ 0.73	0.14 ~ 0.39	0.09 ~ 0.20
	dimethyl sulfate	0.16 ~ 0.69	0.34 ~ 0.95	0.10 ~ 0.11
	butyl acetate	0.49 ~ 1.62	0.50 ~ 1.74	0.14 ~ 0.26
alcohol	methanol	3.35 ~ 4.57	2.66 ~ 3.63	2.26 ~ 2.59
	o-cresol	0.04 ~ 0.15	0.04 ~ 0.14	0.02 ~ 0.02
	catechol	0.07 ~ 0.22	0.04 ~ 0.20	0.03 ~ 0.06
	phenol+dimethyl disulfide	0.05 ~ 0.23	0.06 ~ 0.24	0.02 ~ 0.03
	isobutyl alcohol	0.33 ~ 2.70	0.83 ~ 1.79	0.09 ~ 0.70
carboxylic acid	dimethylcarbamoil chloride	0.09 ~ 0.17	0.03 ~ 0.08	0.02 ~ 0.02
	chloroacetic acid	0.03 ~ 0.15	0.03 ~ 0.08	0.01 ~ 0.03
	3-methylbutanoic acid	0.21 ~ 1.16	0.35 ~ 0.73	0.06 ~ 0.18
	butanoic acid	0.47 ~ 1.11	0.44 ~ 1.22	0.20 ~ 0.25
	propanoic acid	0.68 ~ 1.31	0.53 ~ 1.01	0.10 ~ 0.31
epoxide	ethylene oxide	1.89 ~ 3.54	1.14 ~ 3.38	0.94 ~ 1.94
	1,2-epoxybutane	0.93 ~ 1.70	0.91 ~ 1.23	0.30 ~ 0.65
	epichlorohydrin	1.61 ~ 5.49	0.67 ~ 2.57	0.20 ~ 0.36
ketone	methyl ethyl ketone+acrylic acid	0.81 ~ 1.84	0.44 ~ 1.56	0.12 ~ 0.25
	methyl isobutyl ketone	0.19 ~ 0.58	0.21 ~ 0.52	0.04 ~ 0.18
	acetophenone	0.02 ~ 0.12	0.04 ~ 0.07	0.01 ~ 0.02
	isophorone	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.00 ~ 0.01
nitrile	acrylonitrile	0.06 ~ 1.31	0.06 ~ 3.26	0.13 ~ 3.40
	acetonitrile	0.07 ~ 0.11	0.08 ~ 0.15	0.10 ~ 0.11
inorganic	carbonyl sulfide	0.88 ~ 2.96	1.58 ~ 3.43	0.56 ~ 2.42
	ammonia	2.43 ~ 14.40	4.34 ~ 25.42	0.65 ~ 1.05
	hydrogen sulfide	0.27 ~ 2.16	0.14 ~ 1.78	0.15 ~ 0.43
thiol	methyl mercaptan	0.30 ~ 0.82	0.19 ~ 1.00	0.30 ~ 0.45

을 보였으나, 특히 2분기와 4분기에서는 정관일반
 산단에 비해 현저히 높은 수치를 나타냈다.

두 산업단지 모두 연중 T/B 비율이 최소 약 3 수
 준에서 최대 13.26까지 분포하는 것으로 확인되었
 으며, 이는 두 지역의 대기 중 VOCs가 차량 배기가
 스보다는 산업공정 및 용매 사용에 의한 배출 영향
 이 상대적으로 우세함을 시사한다. 특히 금사공업
 지역에서 전반적으로 높은 T/B 비율이 관찰된 점
 해당 지역의 산업 구조와 공정 특성이 방향족
 VOCs 배출에 보다 큰 영향을 미치고 있음을 의미

하는 것으로 해석될 수 있다.

3.4. 실시간 오염지도

산업단지 내 배출물질의 종류와 농도를 전반적
 으로 파악하고, 주요 배출 위치 및 배출량을 관리하
 기 위해 대기오염물질 농도를 지리정보시스템(GPS) 데
 이터와 연계하였다. 이때 벤젠과 가장 농도가 높게
 관찰된 세 가지 물질의 공간 분포를 Fig. 10와 Fig.
 11에 나타내었다. 상단의 그림은 SIFT-MS 실시간
 농도 정보 및 지리좌표를 나타낸 그림으로 현장에



Fig. 10. Maps of hazardous air pollutants in Geumsa industrial area.

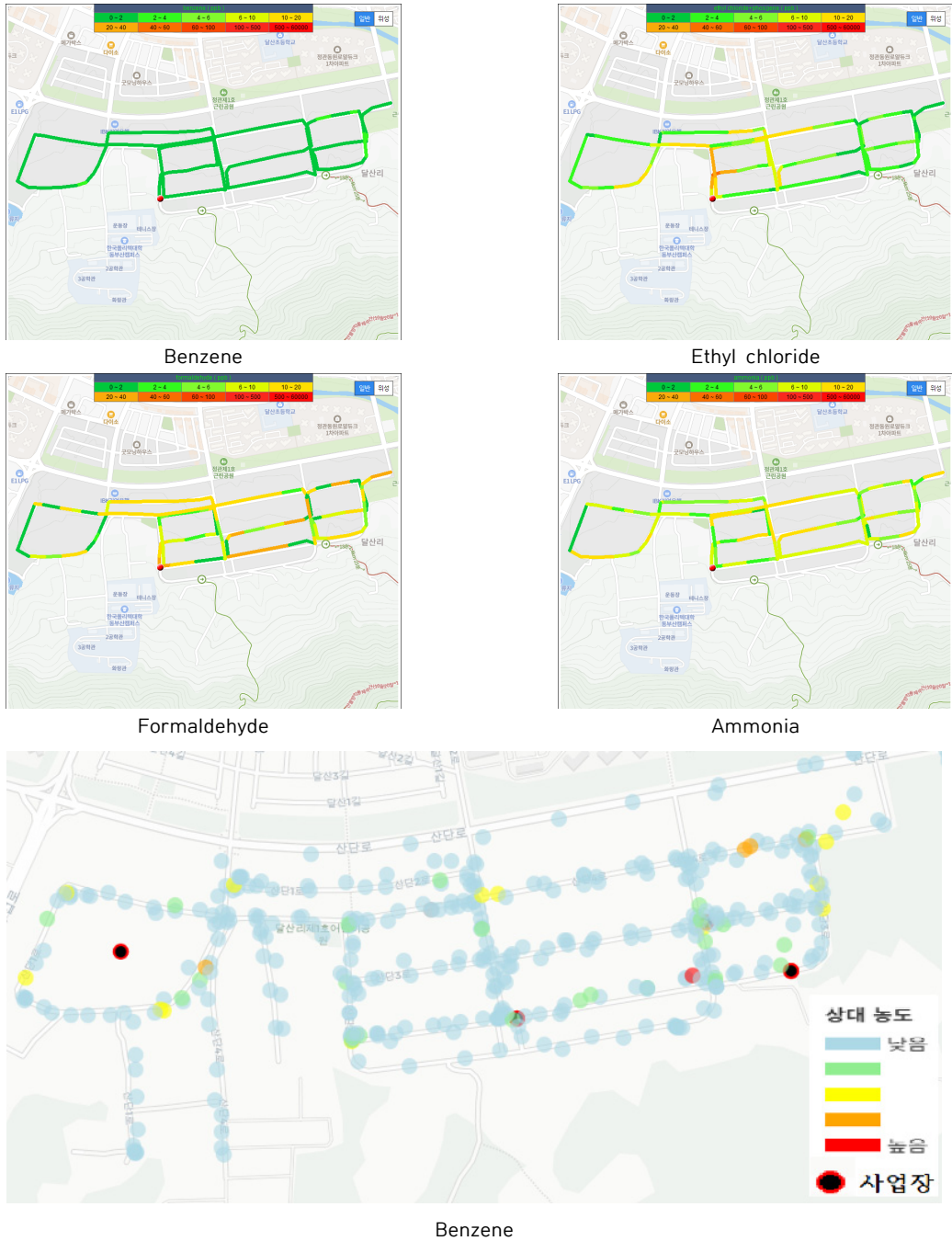


Fig 11. Maps of hazardous air pollutants in Jeonggwan industrial area.

서 즉각적으로 확인할 수 있으며, 오염위치와 상대적 오염농도를 확인하여 측정시 참고할 수 있다. Python은 각 측정지점의 오염농도를 공간좌표에 2D 또는 3D로 표현하는 공간분석 기법으로 본연구에서는 하단의 그림에 사용되었으며 현장측정 완료 후 각 측정지점의 농도정보와 지리좌표를 추출하여 Python을 활용하여 작성된 오염지도이다.

Python 기반의 데이터 분석 및 시각화 환경인 Jupyter Notebook을 활용하였다. 농도정보와 지리좌표는 전처리를 통해 구조화하여 데이터프레임(DataFrame)형태로 정리하였으며, 이를 라이브러리를 이용해 병합처리하였다. 좌표기반의 공간분석을 위해 위도·경도 정보를 활용하였고 이를 지도상에 표현하였다. 각 측정 지점의 농도 값은 색상 스

케일을 통해 시각적으로 구분되도록 설정하여, 고농도 구간과 저농도 구간을 직관적으로 식별할 수 있도록 시각화하였으며 농도정보와 구분할 수 있도록 사업체 마커를 구분하여 표현하였다. 지도 기반 시각화는 OpenStreet Map 타일을 기반으로 구현되었고 이후 추가적인 데이터 업데이트로 현재 오염지도를 계속 업데이트 가능한 형식으로 구현하였다.

측정된 물질의 조성 특성 분석 및 배출원 추정을 위해 측정지역 반경 내 사업체 정보를 수집하였으며, 해당 자료는 배출시설 신고자료와 대기배출원 관리시스템(SEMS)을 통해 확보하였다. 오염지도를 활용하여 오염농도의 정도와 위치를 한눈에 파악하는 동시에 주변 사업장 정보를 확인을 동시에 할 수 있도록 구축하여 활용하고자 하였다. 이와 같은 Python 기반 오염지도 구축 방식은 대용량 실시간 측정 데이터의 효율적인 처리와 반복 분석이 가능하다는 점, 기존의 고정식 측정소 중심 분석에서 벗어나 산업단지 내 오염물질의 공간적·시간적 특성을 표현하고 분석하는데 효과적이라는 장점을 가지고 있다.

금사공업지역에서 벤젠은 측정위치와 상관없이 상대적으로 낮은 수준을 유지한 것을 확인할 수 있다. 반면 높게 나타난 물질은 시간적·공간적 차이에 따라 농도의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 경로상 2회이상 이동한 구역을 확인하여 판단할 수 있다. 그러한 구간의 인근에는 금속가공업, 건설폐기물처리업, 세차장과 같은 업종이 있음을 확인하였다. 포름알데하이드는 합성수지, 도장, 자동차 공정, 가구용 접착제, 도료등으로 사용되기 때문에 인근 건설폐기물처리업의 영향으로 판단된다. 주로 오염지도는 측정당시의 인근사업체의 작업상태와 기상적 요인을 종합적으로 확인함으로써 배출원을 추적하는데 활용할 수 있다.

정관일반산업단지에서도 벤젠은 측정위치와 상관없이 상대적으로 낮은 수준을 유지한다. 금사공업지역과 마찬가지로 시간적·공간적 차이에 따라 농도의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 염화에틸이 상대적으로 높게 발생된 위치 인근에는 금속가공업, 물류운송업, 제과업 등이 있음을 확인하였다. 염화에틸은 살균제, 부패방지제, 화학제품 중간체로 사용되며 인근 금속가공공정 중 배출되거나 제과업종의 살균제로서 배출되었을 가능성이 있다.

포름알데하이드가 상대적으로 높게 나오는 산단2로 구간에는 연마업, 마케팅업, 가구제작업 등이 분포하고 있다. 포름알데하이드는 가구용 접착제로 사용되기 때문에 그 영향으로 판단할 수 있다.

전체적으로 농도가 높게 측정된 물질이라 하더라도 시간대와 위치에 따라 농도 차이가 존재한다. 동일한 지점에서 낮은 농도와 높은 농도가 시간별로 변화하는 현상이 관찰되었으며, 이는 환경적 요인보다 해당 위치 인근의 배출원에서 발생하는 배출 영향이 상대적으로 더 크게 작용하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 다른 산업단지에서도 비슷하게 관찰되는데, 이러한 간헐적 고농도의 검출은 측정 때마다 사업장에서의 오염물질 배출조건(조업공정, 배출량 등)이 변화되고, 동시에 기상(풍향, 풍속)조건이 달라지기 때문으로 판단된다.¹²⁾ 오염지도의 데이터 축적을 통해 지속적으로 높은 농도로 측정되는 특정 위치는 주변 배출원을 추가 조사하여 관리·저감 방안마련이 필요하고 같은 공단 내에서도 오염분포가 다양함을 확인할 수 있기 때문에 좀더 정밀한 배출원 추적이 필요하다.

특정회차의 개별 오염지도만으로는 산업단지의 전반적인 공간적 오염분포 및 배출원을 특정하기 어려울 수 있다. 본 연구에서 구축한 오염지도는 주변사업장 정보를 함께 도시하여 그림을 확인하는 동시에 주변 사업장 정보를 조회하여 오염물질의 배출원을 추적, 검사하기 위한 기초모델로서 관할 지자체와의 협업을 통한 지도의 업데이트가 반드시 필요할 것으로 사료된다. 향후 지속적인 데이터 축적과 사업체 정보를 활용하여 산업단지 대기질 모니터링과 배출원 관리 및 환경정책수립에 활용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 선택적다중이온질량분석기(SIFT-MS)를 기반으로 한 대기이동측정시스템을 활용하여 금사공업지역과 정관일반산단을 대상으로 대기 중 휘발성유기화합물(VOCs) 및 악취물질을 실시간으로 측정하고, 산업단지별 오염도 특성, 물질 조성, 공간적 분포 및 주요 배출원 특성을 종합적으로 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 두 산업단지 모두 배경농도에 비해 연간 평균 총

농도가 약 2.5배 이상 높은 수준을 보였으며, 알케인, 알데하이드, 무기질, 아민 계열 물질이 주요 구성 성분으로 확인되었다. 이는 산업단지 내 제조·가공·도장·세정·열처리 등의 공정에서 사용되는 유기용제 및 반응물질이 주변 대기질에 지속적으로 영향을 미치고 있음을 시사한다. 이는 산업단지별 맞춤형 관리 전략 수립의 필요성을 뒷받침하는 결과로 판단된다.

2. 금사공업지역에서는 포름알데하이드, 헥산, 요오드화메틸렌으로 높게 검출되었으며, 이 중 포름알데하이드는 배경농도 대비 2배 이상 높은 수준으로 측정되어 지속적인 감시가 요구되는 주요 물질로 확인되었다. 반면 정관일반산단에서는 염화에틸 복합신호가 두드러지게 높게 나타났다.
3. 분기별 오염도 분석 결과, 두 산업단지 모두 계절에 따른 일반적인 VOCs 농도 변화 경향과는 일부 상이한 양상을 보였으며, 이는 기상 조건과 같은 환경적 요인보다 산업단지 내 배출원의 운영 특성 및 공정 가동 패턴이 오염도 변동에 더 큰 영향을 미친 결과로 해석된다. 또한 톨루엔과 벤젠의 농도 비율(T/B)을 활용한 배출원 추정 결과, 두 지역 모두 산업공정에 의한 배출 영향이 차량 배기가스보다 우세한 것으로 나타나 산업단지 기인 오염의 지배적 영향을 확인할 수 있다.
4. 실시간 오염지도 분석을 통해 동일 물질이라 하더라도 시간 및 위치에 따라 농도 편차가 크게 나타났다. 이는 산업단지 내 오염물질 배출이 공간적으로 불균일하게 발생하고 있고, 고농도 발생 지점에 대한 정밀 조사와 배출시설 관리의 필요성을 시사한다. 오염지도를 활용하여 인근 배출원을 유추해볼 수 있었으며 산업단지 대기질 모니터링과 배출원 관리 및 환경정책수립을 위한 오염지도가 지속적인 업데이트가 필수적이다.

참고문헌

1. Ojala, S., Pitkäaho, S., Laitinen, T., Koivikko, N. N., Brahmi, R., Gaálová, Matejova, L., Kucherov, A., Päivärinta, S., Hirschmann, C., Nevanperä, T., Riihimäki, M., Piriälä, M., Keiski, R. L., "Catalysis in VOC abatement", *Topics in Catalysis*, 54, pp.1224-1256(2011).
2. Baek, S. O., Kim, M. H., Seo, Y. K., "Evaluation of fugitive emission characteristics of airborne Volatile Organic Compounds from different source categories", *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 19(4), pp.363-376(2003).
3. Syft Technologies Home Page, <https://www.syft.com>, (2017).
4. Busan Metropolitan City, Busan Industrial Complex Environmental Management Survey Report, Busan Metropolitan Government, Busan, <https://www.busan.go.kr>, December(2024).
5. Environmental Protection Agency: Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 Summary Report and Recommendations for Moedling Long Range Transport Impacts, U.S. EPA, Washington, D.C., pp.50-95(1998).
6. Liang, Zhishu., Jijun, Wang., Yuna, Zhang., Cheng, Han., "Removal of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a textile dyeing wastewater treatment plant and the attenuation of respiratory health risks using a pilot-scale biofilter", *Journal of Cleaner Production*, 253, (2020).
7. Joanna. Baraniecka., Krystyna. Pyrzyńska., Małgorzata. Szewczyńska., Małgorzata. Pośniak., Elżbieta. Dobrzyńska., "Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from selected processes in steelworks" *Journal of Hazardous Materials.*, Volume 183, Issues 1-3, pp. 111-115(2010).
8. World Health Organization: Air Quality Guidelines for Europe, 2nd edition, Copenhagen, pp. 87-120(2000).
9. Environmental Protection Agency Home Page, <https://www.epa.gov>, August(2019).
10. U.S. Environmental Protection Agency,

- AP-42, Chapter 4 : Evaporation Loss Sources, Section 4.6 Solvent Cleaning Operations, pp.2-15(1995).
11. World Health Organization: Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, pp.85-110(2010).
 12. Youn. S. J., "Monitoring of Hazardous Air Pollutants and Emission Sources Tacking with Real Time Mass Spectrometer(SIFT-MS)", Interdisciplinary Program of Earth Environmental Engineering, Pukyong National University (2021).
 13. 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. "Ambient aromatic hydrocarbon measurements at Welgegund, South Africa", Atmospheric Chemistry and Physics, 14, pp.7075-7089(2014).
 14. Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Lu, S., Huangm Z,m Huang, X., Yang, W., Wang, Y., Zhang, Q. "Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, pp.6669-6687(2016).
 15. Kim, S.J., Kwon, H.O., Lee, M.I., Seo, Y.W., Choi, S.D., "Spatialand temporal variations of volatile organic compounds using passive air samplers in the multiindustrial city of Ulsan, Korea", Environmental Science and Pollution Research, 26, pp.5831-5841(2019).
 16. Dresser, A. L. and Huizer, R. D., "CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited", Journal of the Air & Waste Management Association, 61(6), pp.647-659(2011).
 17. Choi. S. W., "The characteristics of air pollutants distribution around industrial complexes using real-time mobile atmospheric measurement system", Journal of Korea Society of Environmental Engineers, 43(6), pp.476~489(2021).
 18. Yu. B. G., Tak. K. H., Lee. D. W., "Characteristics of concentration distribution of volatile organic compounds in Ulsan using SIFT-MS", Journal of Korea Society of Environmental Engineers, 44(11), pp.406-417(2022).
 19. Choi. W. G., Bae. S. H., Park. D. S., Jeong. Y. K., Kim. T. O., "Characterization of volatile organic compounds concentrations in the ambient air of the kumi industrial complex", Journal of Environmental Sciences, 13(3), pp.205~214(2004).
 20. Chae. J. S., Chae. J. S., Jeon. J. M., Kang. B. W., Kim. J. H., Moon. K. J., Park. G. T., Kang. D. I., "The study on emission characteristics of gas-phase hazardous air pollutants generated at the large-scale industrial complexes", Journal of Korea Society for Atmospheric Environment, 40(1), pp.27~47(2024).