

경기도 대기 중 유해 휘발성유기화합물질 분포 특성

김동기[†] · 송일석 · 우정식 · 배용수 · 이용기 · 박익범 · 한현수 · 김용준 · 김종수

경기도보건환경연구원 대기연구부

Concentration Distribution of Toxic Volatile Organic Hydrocarbons in Gyeonggi-do's Atmosphere

Dong-Gi Kim[†], Il-Seok Song, Jung-Sik Woo, Yong-Soo Bae, Yong-Ki Lee, Ik-Beom Park, Hyun-Su Han, Yong-Jun Kim, and Jong-Soo Kim

Gyeonggi-do Institute of Health & Environment, Gyeonggi-do, Korea

Received February 9, 2018/Revised February 20, 2018/Accepted March 9, 2018

This study examines the characteristics of 43 toxic volatile organic compounds (VOCs) in roadside, residential, and industrial complex areas located in Gyeonggi-do, South Korea. Benzene, toluene, ethyl benzene, xylene isomers (BTEX), and 1,3,5-trimethylbenzene were frequently detected in each study region. The seasonal concentrations fluctuated throughout the year, with high values observed in fall and winter, and low values observed in summer, primarily due to photo degradation and washout associated with summer rainfall. Variations in wind speed induced by temperature inversion during night-time hour and photochemical degradation during day-time hours also appeared to influence variations in contaminant concentrations, with concentrations at night-time being 1.8 times those in day-time. The percentage of VOC distribution for roadside-residential, industrial, and industrial-roadside areas were 79%, 8%, and 8%, respectively.

Key words: Toxic volatile organic compounds, Detection frequency, Seasonal concentration, Day-time concentration, Night-time concentration

1. 서 론

유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs)이란 저농도나 장기간 노출, 섭취 시 동·식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 줄 수 있는 대기 중에 존재하는 오염물질들을 일컫는 말로 다환방향족탄화수소류(PAHs), PCBs 및 다이옥신류, 중금속, 일부 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 등이 HAPs 범주에 포함된다. 특히 대기환경에서 낮은 농도에서도 장시간 노출될 경우 심각한 건강피해를 유발할 수 있으며 잔류성(persistent), 생물 농축성(bioaccumulation) 및 독성(toxic) 등의 특성을 보인다. 이들 오염물질 중 다이옥신 등과 같은 잔류성유기오염물질(POPs)의

경우 주요 대기배출원에 대한 지속적인 관리로 국내 대기 배출량을 현저히 줄이는 결과를 나았으나, 산업계의 유기화합물질 사용량 증가로 VOCs의 대기 배출량은 지속해서 증가하고 있다.¹⁾

VOCs의 주요 인위적인 배출원으로는 자동차, 도장시설, 저유조, 주유소, 인쇄·잉크산업, 폐수처리장, 도로포장, 농업 산업 등으로 구분할 수 있다.^{2,3)} 이 중 자동차, 선박 등의 도장 공정 등을 포함하는 유기용제 사용과 관련된 배출량이 전체의 50% 이상을 차지하며, 자동차 관련 이동 오염원의 배출량이 13.5% 정도를 차지하는 것으로 보고되었다.⁴⁾

VOCs는 증기압이 높아 대기 중 대부분 가스 상태로 존재하며 환경·보건학적으로 크게 두 가지 중요성을 지

[†]To whom correspondence should be addressed.

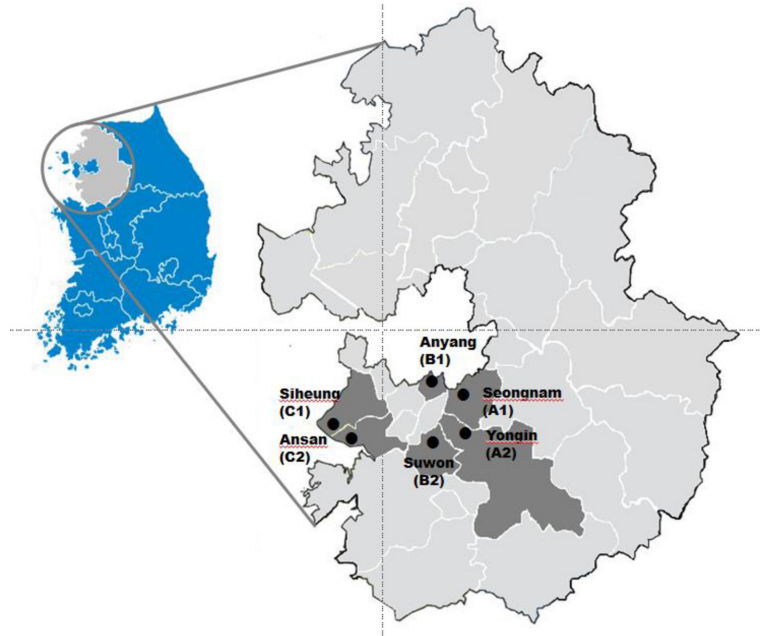


Fig. 1. Sampling sites in the Gyeonggi-do study area.

니다. 하나는 대기 중 질소 산화물과 공존 시 광화학 반응으로 오존, PAN, 알데하이드류, 케톤류 등 2차 오염물질인 광화학 산화성 물질을 생성시켜 광화학스모그를 유발하는 전구물질의 역할을 들 수 있다.⁵⁾ 다른 하나는 방향족 탄화수소나 할로겐화탄화수소 등과 같이 물질 자체만으로도 인체 위해성을 지닌 벤젠, 1,3부타디엔, 포름알데하이드, 트리클로로에틸렌 등 국제암연구소(IARC)에서 인체 발암물질(그룹 1)로 분류하고 있다.⁶⁾

따라서 선진국을 중심으로 한 국제적인 조적을 통해 엄격한 총량규제가 이루어지고 있으며⁷⁾ 국내에서는 2015년 1월 1일부터 toxic VOCs를 중심으로 한 HAPs 비산배출시설에 대한 관리를 시작하고 있으며 지속적으로 강화하고 있다.

국내의 VOCs 연구는 광화학스모그 유발 전구 VOCs를 대상으로 한 배출특성 조사, 오존 생성 기여율 평가

연구⁸⁻¹³⁾ 와 PMF 모델을 이용한 발생원 규명 연구¹⁴⁾ 등 VOCs의 대기 환경적 스트레스에 대한 연구는 다양하게 이루어지고 있으며 도시지역, 산업단지 및 대기배출시설 등을 대상으로 유해(toxic) VOCs인 방향족 탄화수소, 할로겐화탄화수소 등 HAPs에 대한 모니터링 및 실태조사 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁵⁻¹⁹⁾

경기도는 유해대기오염물질의 오염실태를 파악하기 위하여 시흥과 안산 산업단지 내 두 지역에 측정소를 설치하여 13종의 VOCs를 대상으로 경기도 유해대기 감시 시스템을 운영 중이나 제한된 분석항목으로 toxic VOCs에 대한 종합적인 평가를 수행하기에는 자료가 부족한 실정이다. 차세대 환경정책의 목표는 건강 위해성에 기반한 환경보건정책으로, 국민의 건강 보호와 피해 저감을 위해 인체위해성이 큰 물질의 관리에 중점을 둔 유해대기오염물질에 대한 관심과 관리 강화가 요구된다.

Table 1. Type, location, and characterization of sampling points

Areas		Sites	Around environment
Roadside	A1	Baekhyeon-dong, Bundang-gu, Seongnam-si	Open area, Intersection
	A2	Gugal-dong, Giheung-gu, Yongin-si,	Apartment, Intersection
Residential area	B1	Anyang2-dong, Manan-gu, Anyang-si	Apartment Household
	B2	Sinpung-dong, Paldal-gu, Suwon-si	Apartment Household
Industrial complex area	C1	Jeongwang-dong, Siheung-si	Sihwa- industrial complex
	C2	Wonsi-dong, Danwon-gu, Ansan-si	Banwol- industrial complex

본 연구에서는 경기도 내 주거지역, 도로변, 공업지역을 대상으로 유해대기오염물질 중에서 toxic VOCs 43종에 대한 연구조사를 통해 대기 중 농도 및 분포특성 등을 종합적으로 파악하여 지역 대기오염원 관리 및 정 책수립을 위한 기초자료를 마련하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 측정지점 및 기간

본 연구에서는 도로변 지역 2개소, 주거지역 2개소, 공업지역 2개소(이하 산단 지역) 등 총 6개소(Fig. 1)에 대

하여 현재 경기도에서 대기 질 측정을 위해 운영하는 대기오염 자동측정소(건물 옥상 또는 도로변)를 지역별 측정지점으로 하였다(Table 1).

시료 채취는 2017년 2월(Round 1: 2.1~2.16), 5월(Round 2: 5.15~5.31), 8월(Round 3: 8.1~8.22), 11월(Round 4: 11.6~11.22) 총 4회 실시하였다.

각 지점에 대하여 주간(11:00~), 야간(23:00~) 100분씩 3일간 5개 시료(주간 3시료, 야간 2시료)를 채취하였다. 시료 채취 기간의 기상자료를 Table 2에 나타내었다. 온도(Temp.), 습도(Hum.), 강우량(Rf.)은 기상청 자료를 이용하였고 풍향(W.D.)과 풍속(W.S.)은 측정지점 측정소

Table 2. Summary of meteorological data associated with sampling times

		A1					B1					C1				
		A1-1	A1-2	A1-3	A1-4	A1-5	B1-1	B1-2	B1-3	B1-4	B1-5	C1-1	C1-2	C1-3	C1-4	C1-5
Round 1	Temp.	-0.7	-5.4	-1.6	1.4	3.6	-1.9	-2	-2	-0.7	-0.2	1.2	-2.1	-0.3	-3	0.3
	W.D.	N	NNE	SSW	NNW	WSW	NNW	NW	ENE	WNW	SE	NNE	NNE	E	E	NW
	W.S.	3.3	1.1	1.1	0.6	1.1	3	1.7	0.8	0.7	1.6	4.1	2.1	1.2	1.2	2.2
	Rf.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Round 2	Temp.	17.4	14.2	18.9	14.1	21.5	25.0	16.9	22.1	16.7	22.2	25.7	17.7	22.6	17.0	23.0
	W.D.	WNW	SW	SW	WSW	E	NNE	-	NNE	-	NNE	NNE	N	NNE	-	NNE
	W.S.	1.8	1	1.2	0.7	1.4	1.3	0.7	1.9	0.8	1.7	3.3	1.1	2.7	1.3	4.2
	Rf.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.5	0.0	0.0	0.0	9.0	0.5
Round 3	Temp.	28.9	27.0	30.5	27.7	29.8	29.6	25.8	27.4	25.8	25.1	29.3	26.2	27.3	26.2	26.4
	W.D.	SW	S	SSW	-	SSW	NNE	NNE	N	NNE	N	NNE	-	NNE	N	N
	W.S.	1.4	0.6	1.0	0.7	1.2	1.5	0.6	1.2	1.1	1.3	2.8	0.7	2.7	1.9	1.7
	Rf.	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	4.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0
Round 4	Temp.	15.7	12.3	14.0	16.0	16.0	9.2	10.7	10.2	4.9	4.7	9.8	12.1	11.6	5.0	7.6
	W.D.	SSW	-	SE	SSE	W	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	N	NNE
	W.S.	1.1	1.5	1.0	0.8	1.8	1	2	3.5	0.5	3.1	2.3	5	5.8	1.9	3.6
	Rf.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0
		A2					B2					C2				
		A2-1	A2-2	A2-3	A2-4	A2-5	B2-1	B2-2	B2-3	B2-4	B2-5	C2-1	C2-2	C2-3	C2-4	C2-5
Round 1	Temp.	-0.3	-5.1	-1.6	1.4	4.1	1.8	-2.6	2.8	-1.1	8.2	3.1	-5.1	3.8	-2.9	8.7
	W.D.	NW	NW	S	SE	SE	SW	SSW	SSE	NE	S	W	ESE	E	-	SSE
	W.S.	1.5	0.7	1.7	0.7	0.9	2.1	0.7	1.9	0.6	1.6	1.8	0.3	1.4	0.8	2.6
	Rf.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Round 2	Temp.	17.8	13.8	20.1	14.1	21.6	23.5	19.9	23.8	20.9	23.2	25.2	16.7	25.9	15.1	23.7
	W.D.	W	WSW	E	NE	S	W	W	S	-	S	SSW	-	SW	NW	SSE
	W.S.	2.0	1.1	1.3	0.8	1.2	2.4	1.1	1.5	2.1	1.7	1.9	1.0	2.2	0.5	1.6
	Rf.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Round 3	Temp.	29.0	27.6	32.6	28.5	30.5	27.5	25.2	26.8	27.4	28.2	27.8	22.8	29.7	27.1	28.6
	W.D.	ENE	ESE	ENE	NE	ESE	WNW	-	SSE	S	SSW	WNW	ENE	WSW	WSW	WSW
	W.S.	1.2	0.7	1.5	0.8	1.5	1.7	0.5	1.3	0.6	1.3	1.8	0.7	2.8	2.3	2.8
	Rf.	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.0	33.5	3.0	0.0	0.0	3.5	4.0	0.0
Round 4	Temp.	11.6	7.1	13.8	13.5	15.3	2.0	-0.9	2.2	1.5	5.4	3.8	-3.0	3.2	-2.8	8.0
	W.D.	NNW	SSW	ESE	-	WSW	NE	SSW	NE	WNW	NE	S	-	E	E	ESE
	W.S.	1.1	0.7	1.4	0.8	1.8	0.9	1.1	0.7	0.4	1.1	1.7	1.0	1.3	1.1	2.1
	Rf.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0

Temp.: Temperature, W.D.: Wind direction, W.S.: Wind speed, Rf.: Rainfall

자료를 이용하여 분석결과를 평가하는 데 활용하였다.

2.2. 시료채취 및 분석방법

VOCs의 정량·정성 분석을 위하여 대기오염공정시험 기준의 환경대기 중 유해 휘발성 유기화합물(VOCs) 시험방법-고체흡착관법(ES 01804.2)을 주 시험방법으로 하고 EPA Method TO-17A를 참고하였다. 저유량 펌프($\Sigma 30$, Sibata, Japan)를 이용하여 유량 100 mL/분으로 100분간 약 10 L 시료를 채취하였다. 시료채취에 사용한 흡착관은 3 bed type (C3-AAXX-5035, Markes international Ltd, UK)으로 흡착제 Carbpac C + Carbpac B + Carbosieve S III이 충전된 것으로 사용하기 전에 320°C에서 2시간 열 탈착시켜 안정화한 후 사용하였다.

VOCs 검량을 위해 표준 가스 JHAP 43 mix gas (SUPELCO 500429)를 흡착관에 단계적으로 주입(5 mL, 10 mL, 20 mL, 40 mL, 100 mL) 흡착시킨 후 열탈착-가스크로마토그래프/질량분석기 분석 크로마토그램의 피이크 면적을 이용하여 검정곡선을 작성하였다.

흡착관에 흡착된 시료는 자동열탈착 시료주입장치(Unity2-Ultra, Markes, UK)에서 헬륨가스 30 mL/분으로 250°C에서 10분간 열탈착시킨 후 -15°C로 유지되는 cold trap(U-T2GPH, Markes, UK)에서 농축, 다시 300°C에서 3분간 열탈착되어 가스크로마토그래프(Gas chromatograph, 450-GC, Varian, USA)-질량분석기(Mass spectrometer, 200-MS, Varian, USA)에 주입된다.

GC의 분석에 사용한 column은 VF-1ms(60 m, 0.25 mm, 1 μ m, Agilent J&W)로 분석 온도조건은 40°C에서 5분간 유지하고 분당 6°C씩 증가시켜 220°C까지 온도를 높인 후 다시 분당 20°C씩 상승하게 하여 최종 290°C에서 5분간 유지해 분석대상 VOCs가 column을 모두 통과하도록 하였다. 각각의 VOCs별 정성분석을 위해서 머무름 시간과 3개 질량의 이온 비를 이용하였고, 정량을 위해서 하나의 정량이온을 선정하고 외부표준법(external standard method)에 의한 검정곡선을 작성하여 분석 시료를 정량하였다.

2.3. 측정분석 정도관리

VOCs의 머무름 시간에 대한 재현성을 확인결과 1% 이하로 평가되었으며 개별 물질에 대한 검정곡선 작성 결과 r^2 값은 0.99 이상으로 우수한 결과를 나타냈다. 반복 정밀도는 표준물질 농도(10~30) ng을 흡착관에 주입 7회 반복 분석한 결과 상대표준편차(RSD)는 (2.0~6.0)%

정도로 나타났고 이때 표준편차와 신뢰수준 99%에서 t-분포(자유도 6)에 따른 43종 물질의 방법 검출한계(MDL) 범위는 (0.8~3.0) ng으로 평가되었다. 바탕시료 평가를 위하여 흡착관 시료 10개 분석 시마다 현장 바탕시료를 1개 분석하여 분석물질에 영향을 줄 수 있는 오염물질의 유무를 확인한 결과 극소수의 피크들을 제외하고는 noise 수준으로 평가되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. VOCs의 출현 특성

대기 중에 존재하는 수많은 VOCs 중에서도 검출빈도와 검출농도 측면에서 빈번히 또는 고농도로 출현하는 VOCs 개별물질의 종류를 평가하는 것은 지역의 특성을 고려한 주요 관리 대상 물질을 파악할 수 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서는 도로변, 주거지역, 산단 지역을 대상으로 총 43개의 VOCs 물질을 분석하였다. 이 중에서 GC 분석에서 두 물질이 서로 분리되지 않는 *m*-xylene과 *p*-xylene을 *m,p*-xylene 하나의 항목으로 분석하여 총 42개의 물질에 대하여 검출빈도와 농도를 평가하였다.

Table 3과 4에 도로변 2개 지점, 주거지역 2개 지점, 산단 지역 2개 지점에서 측정된 전체 VOCs 자료를 지역별 평균값으로 VOCs 개별물질에 대한 검출빈도와 농도를 순위로 각각 나타내었다. 도로변에서는 전체 42종의 물질 중 29종의 물질이 검출되었고 그 중 11종이 50% 이상의 검출빈도를 보였으며 13종은 검출한계 이하로 나타났다. 주거지역은 29종의 물질이 검출되었고 그중 12종이 50% 이상의 검출빈도를 보였다. 산단지역은 26종의 물질이 검출되었으며 그 중 16종의 물질이 50% 이상 검출빈도로 나타났다.

세 조사지역을 구분 없이 하나의 표본으로 볼 때 toluene은 전체시료에서 100%의 검출빈도를 나타냈다. 지역별로 세분화하여 살펴보면 도로변에서는 toluene과 ethyl benzene, 주거지역은 toluene, 산단 지역은 toluene, ethyl benzene, *m,p*-xylene, *o*-xylene 및 1,3,5-trimethyl benzene이 100% 검출빈도를 보여 대기 중에 상존하는 물질인 것으로 나타났다.

다음으로 90% 이상의 검출빈도를 보인 물질은 도로변에서는 methylene chloride, *m,p*-xylene, benzene 및 *o*-xylene이었고 주거지역은 ethyl benzene, *m,p*-xylene 및 halocarbon 12 등이 그리고 4-ethyltoluene과 1,2,4-trimethylbenzene은 산단 지역에서 90% 이상의 시료에서 검출되었다.

Table 3. Ranking of the detection frequencies for VOCs at roadside, residential, and industrial areas

Roadside (n=40)		Residential (n=40)		Industrial (n=40)				
Rank	Frequency (%)	Rank	Frequency (%)	Rank	Frequency (%)			
1	Toluene	100.0	1	Toluene	100.0	1	Toluene	100.0
2	Ethylbenzene	100.0	2	Ethylbenzene	95.0	2	Ethylbenzene	100.0
3	Methylene chloride	97.5	3	Halocarbon 12	90.0	3	<i>m,p</i> -xylene	100.0
4	Benzene	95.0	4	<i>m,p</i> -xylene	90.0	4	<i>o</i> -Xylene	100.0
5	<i>m,p</i> -xylene	95.0	5	<i>o</i> -Xylene	87.5	5	1,3,5-Trimethylbenzene	100.0
6	<i>o</i> -Xylene	92.5	6	Methylene chloride	80.0	6	4-Ethyltoluene	95.0
7	Halocarbon 12	80.0	7	Halocarbon 11	72.5	7	1,2,4-Trimethylbenzene	92.5
8	Halocarbon 11	77.5	8	Benzene	72.5	8	Halocarbon 12	87.5
9	1,2,4-Trimethylbenzene	77.5	9	1,2,4-Trimethylbenzene	72.5	9	Methylene chloride	87.5
10	4-Ethyltoluene	65.0	10	4-Ethyltoluene	67.5	10	Benzene	85.0
11	1,3,5-Trimethylbenzene	65.0	11	1,3,5-Trimethylbenzene	67.5	11	Styrene	77.5
12	Chloroform	42.5	12	Styrene	55.0	12	Halocarbon 11	75.0
13	1,2-Dichloropropane	40.0	13	Chloroform	40.0	13	Trichloroethylene	70.0
14	Halocarbon 114	37.5	14	Halocarbon 114	37.5	14	Chloroform	67.5
15	Styrene	37.5	15	Carbon tetrachloride	35.0	15	Halocarbon 114	52.5
16	1,2-Dichloroethane	32.5	16	Trichloroethylene	35.0	16	1,2-Dichloropropane	52.5
17	Carbon tetrachloride	30.0	17	Halocarbon 113	32.5	17	Ethyl Chloride	45.0
18	Trichloroethylene	30.0	18	1,3-Dichlorobenzene	30.0	18	1,2-Dichloroethane	42.5
19	Ethyl Chloride	27.5	19	Ethyl Chloride	20.0	19	Chlorobenzene	32.5
20	Halocarbon 113	25.0	20	1,2-Dichloroethane	20.0	20	Acrylonitrile	27.5
21	Tetrachloroethylene	25.0	21	1,2-Dichloropropane	17.5	21	Halocarbon 113	27.5
22	Chlorobenzene	12.5	22	Tetrachloroethylene	12.5	22	Carbon tetrachloride	25.0
23	Acrylonitrile	10.0	23	Vinyl chloride	7.5	23	Tetrachloroethylene	15.0
24	1,1-Dichloroethylene	5.0	24	1,2-Dichlorobenzene	7.5	24	1,3-Butadiene	10.0
25	3-Chloropropylene	5.0	25	1,1,2,2-Tetrachloroethane	5.0	25	Vinyl chloride	7.5
26	1,1,2-Trichloroethane	5.0	26	Chlorobenzene	2.5	26	<i>cis</i> -1,2-Dichloroethane	7.5
27	1,2-Dichlorobenzene	5.0	27	3-Chloropropylene	2.5	27	Bromomethane	N.D.
28	Vinyl chloride	2.5	28	Acrylonitrile	2.0	28	Chloromethane	N.D.
29	1,1-Dichloroethane	2.5	29	Bromomethane	2.0	29	1,1-Dichloroethylene	N.D.
30	1,3-Butadiene	N.D.	30	1,3-Butadiene	N.D.	30	3-Chloropropylene	N.D.
31	Bromomethane	N.D.	31	Chloromethane	N.D.	31	1,1-Dichloroethane	N.D.
32	Chloromethane	N.D.	32	1,1-Dichloroethylene	N.D.	32	1,1,1-Trichloroethane	N.D.
33	<i>cis</i> -1,2-Dichloroethane	N.D.	33	1,1-Dichloroethane	N.D.	33	<i>cis</i> -1,3-Dichloropropene	N.D.
34	1,1,1-Trichloroethane	N.D.	34	<i>cis</i> -1,2-Dichloroethane	N.D.	34	<i>trans</i> -1,3-Dichloropropene	N.D.
35	<i>cis</i> -1,3-Dichloropropene	N.D.	35	1,1,1-Trichloroethane	N.D.	35	1,1,2-Trichloroethane	N.D.
36	<i>trans</i> -1,3-Dichloropropene	N.D.	36	<i>cis</i> -1,3-Dichloropropene	N.D.	36	1,2-Dibromoethane	N.D.
37	1,2-Dibromoethane	N.D.	37	<i>trans</i> -1,3-Dichloropropene	N.D.	37	1,1,2,2-Tetrachloroethane	N.D.
38	1,1,2,2-Tetrachloroethane	N.D.	38	1,1,2-Trichloroethane	N.D.	38	1,3-Dichlorobenzene	N.D.
39	1,3-Dichlorobenzene	N.D.	39	1,2-Dibromoethane	N.D.	39	1,4-Dichlorobenzene	N.D.
40	1,4-Dichlorobenzene	N.D.	40	1,4-Dichlorobenzene	N.D.	40	1,2-Dichlorobenzene	N.D.
41	1,2,4-Trichlorobenzene	N.D.	41	1,2,4-Trichlorobenzene	N.D.	41	1,2,4-Trichlorobenzene	N.D.
42	Hexachloro-1,3-butadiene	N.D.	42	Hexachloro-1,3-butadiene	N.D.	42	Hexachloro-1,3-butadiene	N.D.

N.D. : Not detected

특히 xylene 이성체와 toluene은 국내 화학물질 배출 (5.4%)과 methylene chloride(5.2%)도 연간 배출량이 각각 31.4%, 15.3%를 각각 차지하는 전체 배출량 순위 각각 5위, 6위로 국내 사용량이 많은 물질¹⁾로 특히 산 단지역을 중심으로 한 화학물질의 사용은 도로변, 주거

Table 4. Ranking of the concentrations for VOCs at roadside, residential, and industrial area (unit: ppb)

Rank	Roadside (n=40)						Residential (n=40)						Industrial (n=40)					
	VOCs	Ave.	S.D.	Min	Max	Rank	VOCs	Ave.	S.D.	Min	Max	Rank	VOCs	Ave.	S.D.	Min	Max	
1	Toluene	3.74	5.30	0.12	27.82	1	Toluene	3.93	2.84	0.04	11.29	1	Toluene	10.61	8.54	0.58	35.65	
2	Methylene chloride	0.80	1.04	0.00*	4.86	2	Methylene chloride	0.58	0.97	N.D.	5.76	2	Methylene chloride	8.82	21.44	N.D.	129.8	
3	Ethylbenzene	0.72	1.37	0.01	8.02	3	Ethylbenzene	0.45	0.36	N.D.	1.17	3	Chloroform	1.90	8.38	N.D.	52.26	
4	Halocarbon 12	0.56	0.32	N.D.	1.86	4	<i>m,p</i> -xylene	0.37	0.34	N.D.	1.25	4	Ethylbenzene	1.57	1.76	0.17	8.40	
5	<i>m,p</i> -xylene	0.45	0.83	N.D.	4.72	5	Halocarbon 12	0.36	0.22	N.D.	0.82	5	<i>m,p</i> -xylene	1.10	1.07	0.13	4.99	
6	Benzene	0.40	0.21	N.D.	0.86	6	Benzene	0.34	0.19	N.D.	0.74	6	<i>o</i> -Xylene	0.72	0.74	0.09	3.47	
7	Ethyl Chloride	0.32	0.32	N.D.	1.17	7	<i>o</i> -Xylene	0.25	0.23	N.D.	0.90	7	Benzene	0.46	0.25	N.D.	1.14	
8	1,2-Dichloroethane	0.32	0.15	N.D.	0.62	8	Styrene	0.14	0.21	N.D.	0.56	8	Halocarbon 12	0.43	0.34	N.D.	2.01	
9	<i>o</i> -Xylene	0.30	0.59	N.D.	3.35	9	Halocarbon 11	0.12	0.10	N.D.	0.32	9	Trichloroethylene	0.40	0.40	N.D.	1.57	
10	Halocarbon 11	0.24	0.13	N.D.	0.52	10	1,2,4-Trimethylbenzene	0.10	0.16	N.D.	0.84	10	1,2,4-Trimethylbenzene	0.32	0.43	N.D.	2.28	
11	1,2-Dichloropropane	0.24	0.12	N.D.	0.43	11	Trichloroethylene	0.09	0.15	N.D.	0.54	11	Ethyl Chloride	0.26	0.45	N.D.	1.98	
12	Acrylonitrile	0.22	0.11	N.D.	0.54	12	Chloroform	0.05	0.09	N.D.	0.31	12	1,2-Dichloropropane	0.20	0.28	N.D.	1.06	
13	Chloroform	0.20	0.13	N.D.	0.40	13	Ethyl Chloride	0.05	0.14	N.D.	0.77	13	Styrene	0.20	0.24	N.D.	0.63	
14	Styrene	0.20	0.17	N.D.	0.50	14	4-Ethyltoluene	0.04	0.06	N.D.	0.31	14	Acrylonitrile	0.13	0.35	N.D.	2.04	
15	Chlorobenzene	0.16	0.27	N.D.	0.81	15	1,2-Dichloroethane	0.04	0.10	N.D.	0.47	15	Halocarbon 11	0.13	0.10	N.D.	0.40	
16	Tetrachloroethylene	0.14	0.07	N.D.	0.29	16	Carbon tetrachloride	0.04	0.07	N.D.	0.17	16	4-Ethyltoluene	0.12	0.17	N.D.	0.95	
17	1,1,2-Trichloroethane	0.11	0.09	N.D.	0.28	17	Tetrachloroethylene	0.04	0.22	N.D.	1.41	17	1,3,5-Trimethylbenzene	0.08	0.11	N.D.	0.61	
18	Trichloroethylene	0.09	0.06	N.D.	0.27	18	1,2-Dichloropropane	0.04	0.09	N.D.	0.37	18	1,2-Dichloroethane	0.07	0.12	N.D.	0.45	
19	Carbon tetrachloride	0.08	0.07	N.D.	0.17	19	1,3-Dichlorobenzene	0.03	0.06	N.D.	0.19	19	Carbon tetrachloride	0.03	0.06	N.D.	0.16	
20	1,2,4-Trimethylbenzene	0.05	0.16	N.D.	0.87	20	1,3,5-Trimethylbenzene	0.03	0.04	N.D.	0.20	20	Halocarbon 113	0.02	0.04	N.D.	0.10	
21	Halocarbon 113	0.05	0.04	N.D.	0.10	21	Halocarbon 114	0.02	0.07	N.D.	0.20	21	Tetrachloroethylene	0.02	0.06	N.D.	0.23	
22	4-Ethyltoluene	0.04	0.05	N.D.	0.24	22	Halocarbon 113	0.02	0.09	N.D.	0.58	22	Chlorobenzene	0.01	0.05	N.D.	0.28	
23	1,3,5-Trimethylbenzene	0.03	0.06	N.D.	0.35	23	Chlorobenzene	0.02	0.03	N.D.	0.10	23	Halocarbon 114	0.01	0.01	N.D.	0.04	
24	Halocarbon 114	0.02	0.01	N.D.	0.03	24	Acrylonitrile	0.01	0.06	N.D.	0.28	24	<i>cis</i> -1,2-Dichloroethane	0.01	0.04	N.D.	0.27	
25	Vinyl chloride	0.00*	0.01	N.D.	0.04	25	1,2-Dichlorobenzene	0.01	0.06	N.D.	0.36	25	Vinyl chloride	0.01	0.03	N.D.	0.19	
26	1,1-Dichloroethylene	0.00*	0.04	N.D.	0.24	26	Vinyl chloride	0.00*	0.04	N.D.	0.18	26	1,3-Butadiene	0.00*	0.02	N.D.	0.11	
27	3-Chloropropylene	0.00*	0.15	N.D.	0.74	27	3-Chloropropylene	0.00*	0.04	N.D.	0.12		-					
-28	1,1-Dichloroethane	0.00*	0.03	N.D.	0.17	28	Bromomethane	0.00*	0.02	N.D.	0.14		-					
29	1,2-Dichlorobenzene	0.00*	0.04	N.D.	0.18	29	1,1,2,2-Tetrachloroethane	0.00*	0.01	N.D.	0.03		-					
	BTEXS	5.75					BTEXS	5.47					BTEXS	14.65				
	TVOCs	9.44					TVOCs	7.17					TVOCs	27.63				

*concentration <0.005, N.D. : Not detected

지역보다 산단 지역에서 benzene, toluene, ethylbenzene 및 xylene (이하 BTEX) 등 VOCs 물질이 높은 검출빈도를 보이는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

한편 지역별 농도 순위 5위 이내 물질로는 도로변에서 toluene이 3.74 ppb로서 가장 높았고 다음은 methylene chloride (0.8 ppb), ethyl benzene (0.72 ppb), halocarbon 12 (0.56 ppb), *m,p*-xylene (0.45 ppb) 순으로, 전체 검출된 29종의 물질 중 17개 물질이 0.1 ppb 이상이었고 이외 12종의 평균 농도는 0.03 ppb 수준으로 비교적 낮게 나타났다. 주거지역은 toluene이 3.93 ppb로 가장 높았고 다음은 methylene chloride (0.58 ppb), ethyl benzene (0.45 ppb), *m,p*-xylene (0.37 ppb), halocarbon 12 (0.36 ppb) 순이며, 검출된 29개 물질 중 10개 물질이 0.1 ppb 이상이었고 이외 19종의 평균 농도는 0.03 ppb 수준으로 비교적 낮았다. 산단 지역은 toluene이 10.61 ppb로 가장 높았고 다음으로 methylene chloride (8.82 ppb), chloroform (1.90 ppb), ethyl benzene (1.57 ppb), *m,p*-xylene (1.10 ppb) 순으로 26종의 검출물질 중 16개 물질이 0.1 ppb 이상이었던가 이외 10개 물질의 평균농도는 0.03 ppb로 낮게 나타났다. Toluene은 유기용제로 많이 사용될 뿐만 아니라 페인트 등 도료사용 도장·인쇄시설 및 자동차 배기가스 등에서도 배출되므로 대기 중에 상존하는 대표적인 VOCs 중의 하나이다.

지역별 BTEX 농도는 도로변은 5.75 ppb, 주거지역은 5.47 ppb, 산단 지역은 14.65 ppb로 산단 지역에서 2.6 배 높게 나타났으며, 본 연구에서 43종 VOCs 중에서 검출된 VOCs 농도의 합을 총 VOCs(total VOCs, TVOCs)로 나타낼 때 산단 지역이 도로변 9.44 ppb, 주거지역 7.17 ppb보다 3~4배 정도 높게 나타났다. BTEX 농도와 TVOCs 농도의 비는 도로변 0.61, 주거지역은 0.76, 산단 지역은 0.53으로 각각 나타나 주거지역은 BTEX 농도 비중이 높은 반면 산단 지역에서 유기용제 사용 및 화학제품 제조공정 등의 다양한 VOCs 영향으로 BTEX 비율이 주거지역보다 낮은 것으로 판단된다.

Methylene chloride는 공기 중으로 그대로 배출될 수 있는 각종 발포제나 페인트 등 도료 제거제, 냉매, 각종 용제 등으로 폭넓게 사용되고 있으며 최근의 연구결과에 따르면 오존층을 파괴하는 주요 원인물질로 보고되었다.^{20,21)} 본 연구에서 methylene chloride는 도로변, 주거지역 및 산단 지역에서 각각 97.5%, 80% 및 87.5%로 검출빈도가 높게 나타났고 농도 순위 또한 각 지역에서 두 번째로 높게 나타났다. 특히 산단 지역은 도로

변과 주거지역보다 10~15배 높게 검출되었고, 낮은 검출 농도분포(N.D.~129.80 ppb)를 보였다. Chloroform은 도로변과 주거지역에서 검출빈도와 농도가 낮게 나타난 반면 산단 지역은 67.5%의 검출빈도를 보이더라도 측정 농도가 1.90 ppb로 농도 순위 3위를 차지하는 등 산단 지역의 특징적 물질로 인식되었다.

한편 VOCs 중 국가 대기 환경기준 항목인 benzene은 알려진 발암성 때문에 환경·보건학적으로 관심이 집중되는 물질로 전 지점에서 측정된 농도는 평균 0.40 ppb (ND~1.14)로 국가 대기 환경기준인 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.5 ppb)보다 낮은 농도를 보였으나 세 지역에서 평균 90%의 높은 검출빈도를 나타냈다. 국제암연구센터(IARC), 세계보건기구(WHO) 등에서 규정한 발암물질(Group 1)인 1,3-butadiene은 도로변과 주거지역에서는 검출되지 않았고 산단 지역은 0.01 ppb 이하 수준으로 낮게 검출되었으며 검출빈도 10%로 낮게 나타났다. 이 밖에도 발암물질 vinyl chloride는 도로변, 주거지역, 산단 지역에서 2.5%, 10% 및 7.5%의 검출빈도를 각각 나타냈고 검출된 농도는 0.01 ppb 이하로 낮은 수준을 나타냈다. 드라이클리닝, 유지 추출 용제, 살충제 및 유기화합물 합성 원료 등 다양하게 사용되어 환경 독성이 강하며 발암물질로 알려진 trichloroethylene은 도로변과 주거지역에서 각각 0.09 ppb이었으나 산단 지역은 0.4 ppb로 도로변과 주거지역 평균 농도보다 4배 이상 높았으며 검출빈도 또한 70%로 도로변과 주거지역보다 높게 나타났다. 따라서 VOCs 물질에 대한 지역 대기관리는 환경보건학적으로 중요도가 큰 물질을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 검출빈도가 높아 환경에 스트레스가 큰 물질들인 benzene, toluene, ethyl benzene, *m,p*-xylene 등 BTEX 그룹과 검출빈도는 낮으나 유해성이 큰 trichloroethylene 및 검출농도 순위가 높으며 오존층 파괴의 주요 물질로 부각되고 있는 methylene chloride 등에 대한 감시가 필요한 것으로 판단된다.

3.2. 측정지점별 VOCs 농도

VOCs는 다양한 발생원에서 배출되기 때문에 지역적 특성에 따라 서로 다른 농도 분포 패턴을 나타낸다. 본 연구결과를 BTEX 및 styrene(이하 BTEXS) 농도를 중심으로 지역적 특성이 유사한 선행 연구결과와 오염수준을 비교 평가하였다(Table 5). 자동차의 오염 영향을 평가할 수 있는 도로변 지역의 BTEX는 A1 4.81 ppb, A2 6.68 ppb, 서울역 7.64 ppb로 서울역보다 상대적으로 낮았으며 benzene, toluene 및 *m,p*-xylene 등은 근

Table 5. Summary of the regional concentrations for VOCs in the study area and other cities (unit: ppb)

Location	Comment	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	<i>m,p</i> -xylene	Styrene	o-Xylene	BTEXS	Ref.
A1	Roadside	0.39	3.21	0.54	0.32	0.14	0.21	4.81	
A2	Roadside	0.40	4.27	0.89	0.57	0.17	0.39	6.68	
B1	Residential	0.38	3.81	0.44	0.41	0.13	0.26	5.43	This study
B2	Residential	0.29	4.05	0.46	0.33	0.14	0.23	5.51	
C1	Industrial	0.40	9.07	2.07	1.40	0.18	0.91	14.03	
C2	Industrial	0.51	12.15	1.07	0.80	0.21	0.53	15.27	
Gamjeon (Busan)	Industrial	0.55	11.02	1.68	1.30	0.16	0.68	15.39	정 등 ¹⁴⁾
Jangrim (Busan)	Industrial	0.51	11.21	2.82	1.61	0.15	0.90	17.19	
Ehyun-Dong (Daegu)	Industrial	0.20	10.70	0.76	1.19	N.D.*	0.43	13.28	김 등 ¹⁶⁾
Galsan-Dong (Daegu)	Industrial	0.22	18.24	1.30	2.00	0.39	0.62	22.77	
Nowon-Dong (Daegu)	Industrial	0.19	17.93	2.04	1.98	0.02	0.70	22.86	
Jisan-Dong (Daegu)	Residential	0.17	1.78	0.72	0.74	0.60	0.16	4.17	
Guro-Gu (Seoul)	Residential	0.43	4.36	0.58	0.90	0.08	0.35	6.70	
Gangnam-Gu (Seoul)	Residential	0.50	4.52	1.08	0.93	0.10	0.33	7.46	NIER ¹⁷⁾
Seoul station (Seoul)	Roadside	0.51	5.49	0.59	0.70	0.09	0.26	7.64	

N.D.*: Not detected

소한 차이를 나타냈다. 주거지역의 BTEXS는 B1 5.43 ppb, B2 5.51 ppb로 대구 지산동 4.17 ppb보다는 높게 나타났으나 서울 구로구 6.70 ppb, 강남구 7.46 ppb보다 낮게 나타났다. benzene과 toluene은 지산동보다는 높았으나 서울의 구로구, 강남구와 비슷한 수준을 보였으며 ethyl benzene과 *m,p*-xylene은 B1, B2에서 상대적으로 낮게 나타났다.

산단 지역은 BTEXS 농도가 C1 14.03 ppb, C2 15.27 ppb, 부산의 감전 15.39 ppb, 장림 17.19 ppb, 대구의 이현동 13.28 ppb, 갈산동 22.77 ppb, 노원동 22.86 ppb로 C1과 C2 지점은 대구의 갈산동과 노원동보다는 낮았고 부산의 감전, 장림과는 비슷한 수준이었다.

도시지역의 자동차 배출가스와 연료를 주입할 때 산업현장에서 주로 배출되는 benzene은 C1 0.40 ppb, C2 0.51 ppb으로 감전 0.55 ppb, 장림 0.51 ppb과 유사한 값을 보였으나 이현동 0.20 ppb, 갈산동 0.22 ppb, 노원동 0.19 ppb와 비교해 높은 값을 나타냈다. 이와 반대로 toluene은 C1 9.07 ppb, C2 12.15 ppb으로 감전, 장림, 이현동 등과 비슷하였고 갈산동 18.24 ppb, 노원동

17.93 ppb보다 낮게 나타났다.

3.2.1. 계절별 VOCs 농도

VOCs 농도의 계절적 변동을 파악하기 위하여 겨울(Round 1: R1), 봄(Round 2: R2), 여름(Round 3: R3) 및 가을(Round 4: R4)로 구분하여 채취한 시료의 분석 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 일반적으로 대기 중에 입자상과 가스상으로 존재하는 다이옥신, PCBs 등과 같은 반휘발성 유기화합물질(semi-volatile organic compounds: SVOCs)은 기온의 변화에 따라 입자-가스 분배가 변하며 이때 입자상에 존재하는 양이 많은 겨울철에 농도가 높고 반대로 여름철에 농도가 낮은 전형적인 동고하저의 농도구배를 나타내는데²²⁾ 비해 VOCs는 배출원의 배출 강도 변화, 대기 중 질소산화물 존재 하의 광화학 반응, 바람 등 국지적 기상 요인에 따라 농도가 결정되기 때문에 측정항목에 따른 뚜렷한 계절적 농도변동을 파악하기가 어려운 것으로 알려져 있다.^{23,24)}

본 연구에서는 TVOCs의 계절별 농도 변동을 파악하였다. 비록 3일간 채취된 시료이기 때문에 전체적인 계

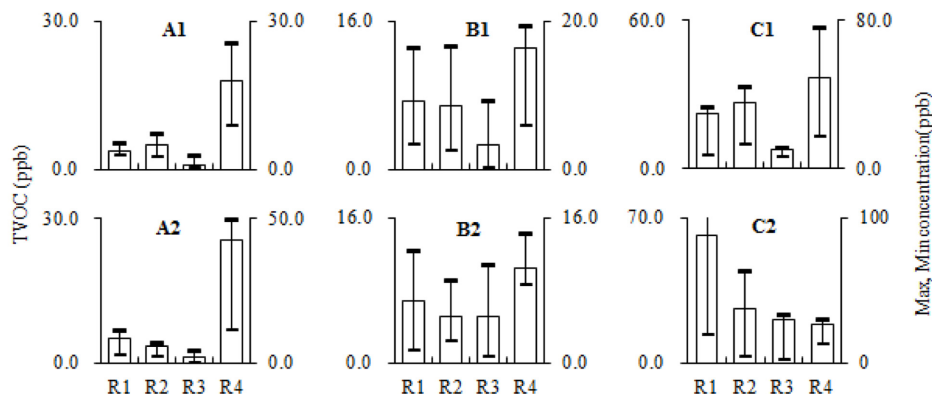


Fig. 2. Seasonal concentrations_(R1; winter, R2; spring, R3; summer, R4; fall) of TVOCs.

절별 특성을 반영할 수는 없으나 조사지점에서 동고하저의 농도분포가 나타났다. 세부적으로 살펴보면 C2 지점을 제외한 5개 지점에서 평균적으로 가을철 20.77 (10.43~36.59) ppb로 제일 높고 다음으로 겨울 9.08 (3.77~22.27) ppb과 봄 9.39 (3.61~26.37) ppb로 비슷한 농도를 보이며 여름은 3.49 (0.98~7.56) ppb로 제일 낮게 나타났다. C2는 겨울철 61.76 ppb로 제일 높고 다음으로 봄 26.55 ppb, 여름 21.21 ppb, 가을 18.52 ppb 순으로 나타났다. 본 연구에서 여름철에 VOCs 농도가 낮은 원인으로는 강우일과 비 강우일의 대기오염도가 강우일에 낮게 나타나는 것과 광화학 반응에 의한 광분해와 관련된 것으로 사료된다. 특히 여름철 시료 채취 기간 3일 중 1~2일 동안 간헐적인 강우로 대기오염물질들을 세정효과 (wash-out)가 주요했던 것으로 사료된다.²⁵⁾

3.2.2. 주·야간 VOCs 농도 분포

VOCs의 주간과 야간의 농도 변동을 파악하기 위하여 공통으로 주간 11시 및 야간 23시부터 각각 100분간 채취된 시료의 분석결과와 시료 채취시간의 온도와 풍속을 Fig. 3에 나타냈다.

TVOCs의 야간과 주간의 농도비는 A1은 1.2(주간 6.38 ppb, 야간 7.85 ppb), A2는 2.2(주간 6.10 ppb, 야간 13.14 ppb)로, B1은 2.2(주간 5.07 ppb, 야간 11.18 ppb), B2는 1.4(주간 5.86 ppb, 야간 8.32 ppb)로, C1은 1.9(주간 17.17 ppb, 야간 32.24 ppb) 및 C2는 1.9(주간 23.44 ppb, 야간 44.98 ppb)로 시료 채취 기간에 따라 다소간의 차이는 있었으나 전반적으로 조사 대상 물질들에 대해서도 야간의 농도가 주간보다 높게 나타

났다.

BTEXS 등을 대상으로 한 선행된 연구에서는 인위적 오염원의 영향을 적게 받는 녹지지역은 대기 안정으로 정체된 상태에서 오염물질이 상승하는 시간대인 야간에 농도가 높고, 주거지역은 출근 시간 및 하루 중 일상 활동이 활발한 오전 시간에 농도가 높은 것으로 보고했으며^{17,23)} 산단 지역의 시간별 toluene 농도는 조업이 시작되는 8시에서 10시 사이에 최고 농도를 보이고 점심시간 일시 조업이 정지되는 12시에 최저 농도를 나타낸 후, 다시 조업 재개에 따라 증가하기 시작하여 퇴근 시간인 18~20시에 고농도를 보였다가 감소하는 것으로 보고했다.¹⁵⁾ 이와 반대로 Choi 등²⁶⁾은 대구지역 일반 대기 중 BTEX 농도 연구에서 주거지역과 상업지역에서는 주간에 농도가 높게 분포하였고 공업지역은 야간에 농도가 높게 분포하는 것을 보고하였으며 일본 요코하마²⁷⁾, 스페인 바르셀로나²⁸⁾, 인도 허말라야 동부²⁹⁾ 등에서 VOCs의 주·야간 농도분포를 연구한 결과에서도 야간에 높은 농도분포가 보고되어 본 연구와 유사한 결과를 나타냈다.

대기 중 VOCs의 1일 농도 분포는 배출원의 배출 강도, 기온역전, 광분해, 바람 방향 및 세기 등의 영향에 따른다. 기온의 일변화와 바람은 지표면의 복사역전과 오염물질의 확산과 관련하여 지역 오염도 평가에 활용될 수 있다. 특히 바람의 방향은 오염물질의 유입 또는 깨끗한 공기의 유입에 따라 오염도를 악화시키거나 반대로 희석하며 바람의 세기는 오염물질을 확산시키는 기능을 한다.

본 연구에서 VOCs 농도의 주·야간 농도변동을 설명하기 위하여 VOCs와 기상인자들 사이의 상관분석을 수행한 결과 대기 온도와 풍속에 대하여 유의한 상관성을

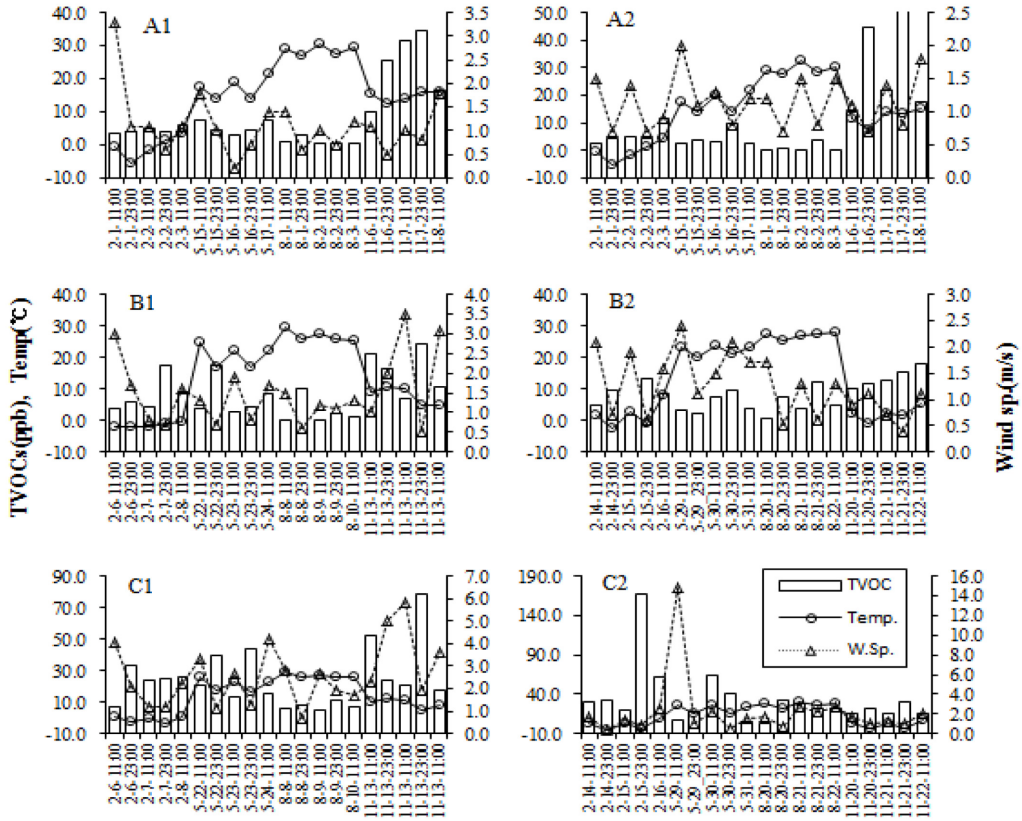


Fig. 3. Concentration and meteorological data (temperature and wind speed) for day- and night-time sampling periods.

나타냈다.

대기 온도는 도로변, 주거지역 및 산단 지역에서 결정 계수(r^2 , $p < 0.01$)는 각각 0.50, 0.38 및 0.65로, 풍속은 각각 -0.61, -0.71 및 -0.67로 음의 상관성을 나타냈다.

본 연구에서 시료 채취가 진행되는 동안의 주간과 야간 평균 풍속의 비는 A1 1.8, A2 1.8, B1 1.8, B2 1.7, C1 1.6 및 C2 3.21로 각각 나타나 주간에 오염물질의 확산이 활발히 일어나고 야간에 상대적으로 적게 일어날 것을 추측할 수 있다. 높은 농도분포를 차지하는 BTEX는 높은 광화학적 오존생성력(POCP; photochemical Ozone Creative Potential)을 가진다. 이는 대기 중 NO와 공존 시 쉽게 분해되는 것으로 해석될 수 있다. Bloemend and Burn (1993)³⁰이 보고한 대기 중 BTEX 물질의 반감기는 벤젠을 제외하면 평균 1.08일로 비교적 짧게 나타났다(Table 6). VOCs의 배출은 주간 및 야간에 각각 이루어진다. 주간 광화학 반응의 짧은 반감기는 1일 VOCs 농도를 변동시킬 수 있다. 따라서 야간 VOCs 농도는 주간에 배출되어 분해되지 않은 농도와 야

Table 6. List of reaction rates and half-life of VOCs in the atmosphere²³⁾

VOCs	Reaction rate (cm ³ /mole, sec)	Half-life (day)
Benzene	1.28×10^{-12}	9.04
Toluene	6.19×10^{-12}	1.87
Ethyl benzene	7.5×10^{-12}	1.54
<i>o</i> -xylene	1.47×10^{-11}	0.79
<i>m</i> -xylene	2.45×10^{-11}	0.47
<i>p</i> -xylene	1.52×10^{-11}	0.76

간에 배출되는 VOCs가 더해져 높은 농도를 나타낼 수 있다. 따라서 광화학적 분해와 기온역전에 의한 풍속의 감소는 본 연구에서 VOCs의 주·야간 농도구배를 일으키는 주요한 요인으로 사료된다.

3.3. 지역별 VOCs 패턴 분석

개별 VOCs 농도분포 사이의 유사성을 파악하여 어떤 발생원들에 의해 영향을 받는가를 개략적으로 추정하기

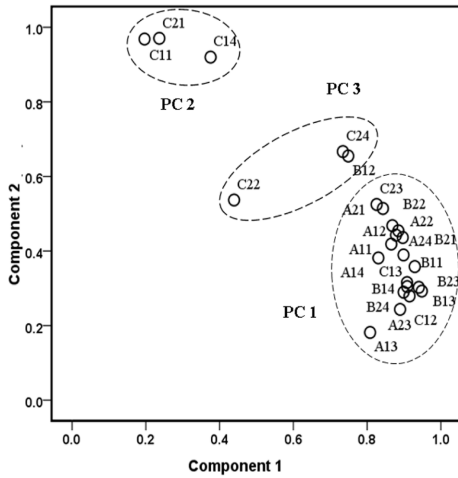


Fig. 4. Component plot in rotated space by principle component analysis.

위하여 요인분석(SPSS, ver. 17.0)을 수행하였다. 같은 요인에 의해 구분되는 자료 군과 개별 항목의 결정계수

를 검토하였으며, 각 요인에 대한 주성분을 확인하였다. 지점별 3일간 채취한 5개 시료의 분석결과를 평균하여 분석 자료로 요인분석을 수행한 결과 세 개의 요인으로 추출되었으며 총 분석 자료의 95%를 설명하는 것으로 나타났다(Fig. 4). PC1은 도로-주거지역이 혼합된 도시 대기 패턴으로 79%의 설명력을 보였으며 PC2는 산단 지역 패턴 8% 설명력을 나타냈고 PC3는 산단-도로 복합된 패턴으로 8%의 분산 설명력을 나타냈다.

추출된 요인별 주성분을 살펴보면(Fig. 5) PC1은 toluene 48.7%, ethyl benzene 7.9%, methylene chloride와 halocarbon 6.7%, *m,p*-xylene 5.6%로 VOCs의 76%를 차지했다. PC2는 methylene chloride 46.8%, toluene 29.7%로 두 물질이 VOCs의 77%를 차지했으며, PC3은 toluene 40.3%, methylene chloride 19.4%, chloroform 13.9%로 VOCs의 74%를 차지했다. 특히 산단 지역과 관련하여 toluene, methylene chloride 및 chloroform 등의 분포가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, 다양한 지역의 대기 중 VOCs의 분포 패턴을 파악하는 것은 이들 물질의 배출원 기여도 평가 등 오염원

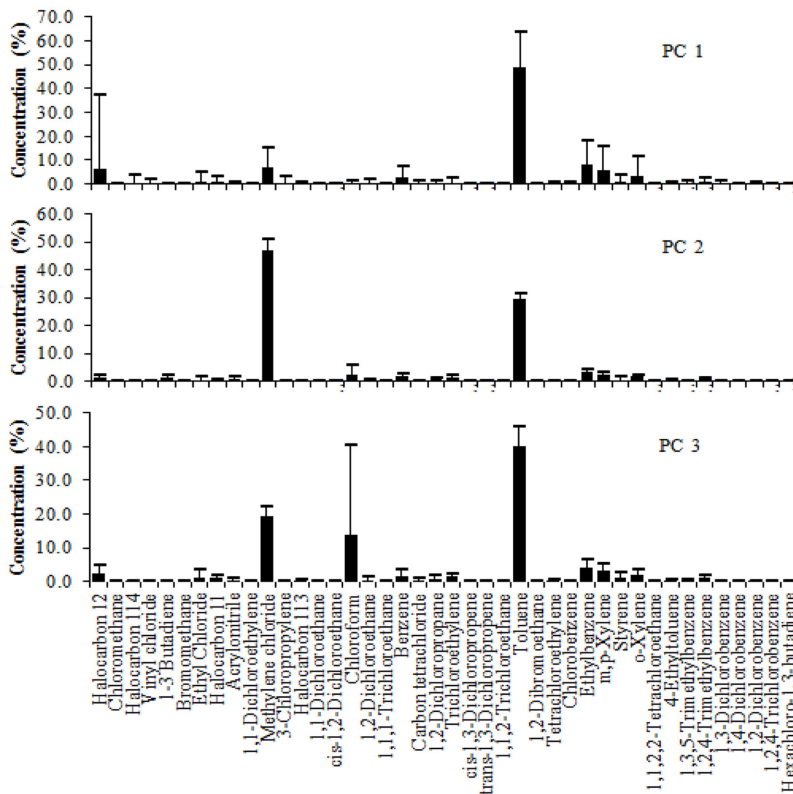


Fig. 5. VOCs profiles for PC1, PC2 and PC3.

해석에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

경기도 내 주거지역, 도로변, 산단 지역을 대상으로 유해대기오염물질 중에서 toxic VOCs 43종에 대한 대기 중 농도 및 분포특성 조사를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) VOCs 검출빈도를 평가한 결과 대기 중 상존 물질이 많은 지역은 산업단지, 도로변 및 주거지역의 순으로 파악되었다. 이에 기초한 지역 대기관리는 검출빈도가 높아 환경에 스트레스가 큰 물질들인 benzene, toluene, ethyl benzene, *m,p*-xylene 등 BTEX 그룹과 검출빈도는 낮을지라도 유해성이 큰 trichloroethylene 및 검출농도 순위가 높으며 오존층 파괴의 주요 물질로 부각되고 있는 methylene chloride 등에 대한 감시가 필요한 것으로 판단된다.

2) 계절별 VOCs 농도는 가을 > 겨울 > 봄 > 여름 순으로 여름철 광화학 반응과 강우의 wash-out 영향으로 동고하저의 농도분포를 나타내는 것으로 판단된다.

3) 주간 VOCs의 광화학 분해와 야간 대기안정에 따른 풍속의 감소는 VOCs의 야간 농도 구배를 일으키는 원인으로 사료되며 야간과 주간 VOCs 농도비는 평균 1.8로 야간에 농도가 높은 것으로 조사되었으나 이는 주·야간 일정 시간대에 대한 결과로 24시간 연속 시료 채취를 통한 분포특성 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4) 대기 중 VOCs의 주요 패턴으로는 도로-주거지역이 혼합된 도시대기 패턴으로 toluene, ethyl benzene, methylene chloride, halocarbon 12 및 *m,p*-xylene의 분포가 전체의 79%를 차지했으며, 산단 지역은 methylene chloride, toluene, 산단-도로 복합패턴은 toluene, methylene chloride 및 chloroform이 주요 물질로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원의 시도보건환경연구원 국고보조사업의 지원을 받아 수행되었습니다(076-1900-1946-309-330).

참고문헌

1. 화학물질안전원, “2015년도 화학물질 배출량 조사결과

보고서”, 2017; <http://icis.me.go.kr/prtr/infoYard/infoYardBbsDetail.do>.

2. P. A. Scheff and R. A. Wadden, “Receptor modeling of volatile organic compounds-Emission inventory and validation”, *Environmental Science & Technology*, **1993**, 27, 617-625.
3. H. J. T. Bloemen and J. Burn, “Chemistry and analysis of volatile organic compounds in the environment”, Blackie Academic and Professional, Cardelino, **1993**, 127-130.
4. J. C. Kim, “Trends and control technologies of volatile organic compound”, *Korea J. Atmos. Environ.* **2006**, 22, 743-757.
5. D. D. Parrish and F. C. Fehsenfeld, “Methods for gas-phase measurements of ozone precursors”, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 1921-1957.
6. International Agency for Research on Cancer, <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification>, **2013**.
7. 국립환경과학원, “선진국의 휘발성유기화합물(VOCs) 배출저감 사례분석을 통한 국내 적용방안 연구-최종 보고서”, **2007**, 33-44.
8. 조정구, 이승민, 유은철, 김현실, 박재행, 빈재훈, 이상훈, “오존발생기전에 미치는 주요인자의 농도특성에 관한 연구”, 부산광역시 보건환경연구원보, **2002**, 제12권, 155-169.
9. 허미숙, 안미진, 유승성, 김홍주, 정호진, 이순희, 정권, “서울지역 고농도 오존발생시 VOCs 지역적 특성”, 서울특별시 보건환경연구원보, **2007**, 제43호, 317-326.
10. 광진, 부산지역 휘발성유기화합물(VOCs)의 농도분포 특성연구-당감동, 덕천동 광화학평가측정소를 대상으로-, 부산광역시 보건환경연구원보, **2004**, 제14권(II), 229-254.
11. 김소영, 한진석, 김희강, “휘발성 유기화합물의 주요 배출원의 배출물질 구성비에 관한 연구-오존 생성 전구물질을 중심으로-”, *한국대기환경학회지*, **2001**, 17, 233-240.
12. 이재영, 이학성, 강병욱, 신대윤, “휘발성유기화합물의 배출원 구성물질 성분비에 관한 기초 연구”, *한국환경과학회지*, **2003**, 12, 487-496.
13. 송복주, 이승민, 조갑제, 조정구, 유평중, 김기곤, “부산지역 페인트제조시설의 VOCs/HAPs 배출특성 및 흡착능 평가”, *대한환경공학회지*, **2012**, 34, 316-325.
14. 정장표, 유숙진, “부산시 공업지역 환경 대기 중 VOCs 특성 및 발생원 규명”, **2011**, *대한환경공학회지* 33, 644-655
15. 한진석, 이민도, 임용재, 이상욱, 김영미, 공부주, 안준영, 홍유덕, “수도권 지역에서 환경대기 중 유해대기오염물질(VOCs, Aldehydes, PAHs) 농도분포 특성연구”, *한국대기환경학회지*, **2006**, 22, 574-589.
16. 김은경, 송희봉, 박민숙, 임종기, 권중대, 최수진, 박수경, 한개희, “대구시 산단지역 대기 중 휘발성유기화합물질의 농도”, *대한환경공학회지*, **2014**, 36, 498-505.

17. 국립환경과학원, “도시지역 유해대기오염물질(HAPs) 모니터링(I) 최종보고서”, **2014**.
18. 국립환경과학원, “화학섬유제조업의 HAPs 시설관리기준 제정을 위한 조사 최종보고서” **2012**.
19. 국립환경과학원, “여수·광양지역 유해대기오염물질(HAPs) 조사연구”, **2010**.
20. D. E. Oram, M. J. Ashfold, J. C. Laube, L. J. Gooch, S. Humphrey, W. T. Sturges, E. Leedham-Elvidge, G. L. Forster, N. R. P. Harris, M. I. Mead, A. A. Samah, S. M. Phang, C.-F. Ou-Yang, N.-H. Lin, J.-L. Wang, A. K. Baker, C. A. M. Brenninkmeijer, and D. Sherry, “A growing threat to the ozone layer from short-lived anthropogenic chlorocarbons”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2017**, 17, 11929-11941.
21. R. Hossaini, M. P. Chipperfield, S. A. Montzka, A. A. Leeson, S. S. Dhomse, and J. Pyle, “The increasing threat to stratospheric ozone from dichloromethane”, *Nature Communications*, **2017**, 8, Article number: 15962, doi:10.1038/ncomms15962.
22. D.-G. Kim, K.-I. Choi, and D.-H. Lee, “Gas-particle partitioning and behavior of dioxin-like PCBs in the urban atmosphere of Gyeonggi-do South Korea”, *Atmospheric Research*, **2011**, 101, 386-395.
23. S. O. Baek, S. R. Kim, and B. K. Kim, “Variation of and Affecting Factors on the Atmospheric Concentrations of Volatile Organic Compounds in an Urban Area,” *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, **2002**, 24, 1391-1404.
24. M. H. Kim, D. G. Park, and S. O. Baek, “Characteristics of atmospheric concentration of volatile organic compounds at a heavy-traffic site in a large Urban area”, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, **2002**, 18, 113-128.
25. A. Vairavamurthy, J. M. Robert, and L. Newman, “Sampling of atmospheric carbonyl compounds for determination by liquid chromatography after 2,4-dinitrophenylhydrazine labeling, sampling and analysis of airborne pollutions”, **1993**, Edited by E. E. Wineger and Keith, L. H, 150-151, Lewis Publishers, USA.
26. S.-W. Choi, S.-W. Park, C.-S. Lee, H.-J. Kim, S. Bae, and H. I. Inyang, “Patterns of VOCs and BTEX concentration in the ambient air around industrial sources in Daegu, Korea”, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, **2009**, 44, 99-107.
27. V. Tiwari, Y. Hanai, and S. Masunaga, “Ambient levels of volatile organic compounds in the vicinity of petrochemical industrial area of Yokohama, Japan”, *Air Quality, Atmosphere and Health*, **2010**, 3, 65-75.
28. T. Filella and J. Peñuelas, “Daily, weekly, and seasonal time courses of VOC concentrations in a semi-urban area near Barcelona”, *Atmospheric Environment*, **2006**, 40, 7752-7769.
29. C. Sarkar, A. Chattarjee, D. Majumdar, S. K. Ghosh, A. Srivastava, and S. Raha, “Volatile organic compounds over Eastern Himalaya, India: temporal variation and source characterization using Positive Matrix Factorization”, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **2014**, 14, 32133-32175.
30. H. J. T. Bloemend and J. Burn, “Chemistry and analysis of volatile organic compounds in the environment -VOCs and the environment and public health-health effects”, *Journal of Chemical Education, Springer*, **1993**, 72, 25-91.