



논문

천안도심지역 도장시설과 인접 도로변 VOCs의 시공간 분포 특징

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of VOCs around Painting Facilities and Roadside Located near Cheonan Downtown Area

이가혜, 김정호¹⁾, 박세찬, 송민영²⁾, 김관철³⁾, 이다솜³⁾, 최우석⁴⁾, 김종범*

충남연구원 서해안기후환경연구소, ¹⁾(주)한국환경과학연구소,

²⁾서울기술연구원 기후환경연구소,

³⁾차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정 연구실,

⁴⁾세종대학교 데이터사이언스학과

접수일 2022년 7월 28일
수정일 2022년 8월 29일
채택일 2022년 9월 22일

Received 28 July 2022
Revised 29 August 2022
Accepted 22 September 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-630-3924
E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Gahye Lee, Jeongho Kim¹⁾, Sechan Park, Min young Song²⁾, Kwanchul Kim³⁾,
Dasom Lee³⁾, Woosuk Choi⁴⁾, Jong Bum Kim*

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

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

²⁾Division of Climate & Environmental Research, Seoul Institute of Technology, Seoul, Republic of Korea

³⁾Advanced PM Monitoring Laboratory, Advanced Institute of Convergence Technology, Suwon, Republic of Korea

⁴⁾Department of Data Science, Sejong University, Seoul, Republic of Korea

Abstract The Republic of Korea has established an air quality monitoring station (AQMS) to manage air quality. Recently, interest in volatile organic compounds (VOCs) emitted from various industrial processes and automobiles has increased worldwide, and it can adversely affect human health. Accordingly, in this study, we measured VOCs at areas adjacent to painting facilities and roadsides in an urban area using a mobile laboratory installed proton transfer reaction time of flight mass spectrometry (PTR-ToF-MS) for a total of 14 times (M1 to M14) for 3 days. The result showed that the concentration of VOCs was higher on weekdays than on weekends and that acetone and methanol were the main components of VOCs at both times. The concentration of benzene was 0.4 ppb, which is below the domestic environmental standard (annual average of 1.5 ppb). In addition, the concentration of VOCs was higher in the sections of nearby road than near the painting facilities, indicating that air quality in urban areas may be impacted more strongly by pollutants from vehicles than by pollutants emitted from workplaces such as painting facilities. Lastly, the study found a stagnant section showing significantly high concentrations of VOCs, for which urgent measures are required to improve air quality.

Key words: VOCs, Mobile laboratory, Painting facilities, PTR-ToF-MS, Roadside

1. 서 론

우리나라는 1991년 환경정책기본법을 제정하여 환경관리를 위한 제도적 기반을 마련하였으며, 대기환경보전법을 통해 대기배출원 및 일반대기질의 목표 달성을 위한 기초를 수립하였다(MOE, 1991a). 또

한, 전국적인 대기오염 및 기후·생태계 변화유발물질의 실태 파악을 위해 대기오염측정망(air quality monitoring station, AQMS)을 설치하여 상시 모니터링을 실시하고 있다(MOE, 1991b). 대기환경보전법에는 총 64개의 물질을 대기오염물질로 지정하고 있으며, 그 중 미세먼지(particulate matter less than 10

μm , PM_{10})와 초미세먼지 (particulate matter less than $2.5 \mu\text{m}$, $\text{PM}_{2.5}$)를 포함한 8종에 대해서는 대기환경 기준물질로 관리하고 있다(MOE, 2021). 이 외에도 주변 환경영향과 인체 유해성을 고려하여 유해성대기 감시물질과 특정대기유해물질을 설정하고 있는데, 최근에는 벤젠, 스티렌, 1,3 부타디엔 등을 포함하는 휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)에 대한 관심이 증가하고 있다(Kim *et al.*, 2014). 일반적으로 VOCs는 상온·상압에서 기체 상태로 존재하며, 휘발성이 높아 대기 중에서 쉽게 증발되어 희석·확산되는 경향이 있고(Seo *et al.*, 2011), NO_x 등과 반응하여 오존(O_3) 생성 및 2차생성 입자 (secondary aerosol, SA)의 주요 전구물질로 작용한다(Ryoo *et al.*, 2010). 이와 같은 VOCs의 배출원으로 석유화학산업, 의약품 제조업, 전자산업, 도장시설, 세정시설, 세탁시설, 유기용제 사용, 주유소와 자동차 등이 고려되고 있으며, 산업계 및 우리 생활 전반에 걸쳐 다양한 곳에서 배출되는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2008). 우리나라 VOCs 배출량은 2019년 기준 전체 대기오염물질 배출량(3,952,822 ton)의 25.8%인 1,020,216 ton으로 나타났으며, 그중 유기용제 사용이 53.4%(545,244 ton/year)로 가장 높은 비율을 보였다. 그 뒤를 이어 생산공정 18.3%(186,292 ton/year), 연소 오염원 8.2%(83,521 ton/year)로 조사되었으며, 비도로 및 도로 이동오염원은 각각 6.3%(63,951 ton/year)와 3.6%(36,663 ton/year) 순으로 나타났다(NAEI, 2022).

산업, 생산 및 연소과정과 관련된 배출원을 제외하면 교통과 관련한 배출원이 총 VOCs 배출량 기여도 중 가장 높았다. 도로이동배출원은 자동차 배출가스 또는 경유차 등에서 배출되는 오염원을 뜻하며 국내 자동차 관리법에 따라 차종에 대해 분류하고, 차종에 따라 경형, 소형, 대형으로 나누어 배출량을 산정하고 있다. 또한 비도로이동오염원은 자동차 외 철도, 선박 및 항공기 등으로 분류하여 배출량을 산정하고 있다. 현재 우리나라는 노후차량 대체와 차량 관리제, 친환경자동차 보급 등 관리 규제 강화로 감소 추세이지만

이는 결코 무시할 수 없는 수치이다.

국내 VOCs 배출량은 지속적으로 증가하는 추세이며, 유기용제 사용 배출원 중 도장시설에서 배출하는 VOCs 농도가 가장 높은 비율을 차지하였다. 도장산업은 생활 밀집시설로 생활공간 가까이 인접해 있으며, 크고 작은 자동차 정비 및 수리업체에서 다양한 유기용제가 사용되고 있다. 따라서 이에 대한 악취 및 대기오염물질 배출은 다양한 민원의 대상이 되고 있다(Yu *et al.*, 2019). 도장시설은 대부분 배출량이 작은 4, 5종 소형사업장으로 분류되고 있어 대형사업장에 적용되는 굴뚝원격감시체계 (telemonitoring system, TMS)가 적용되지 않으며, 자체적으로 매년 수행하는 자가측정과 4년마다 진행되는 배출량 조사 관리의 전부이다(Choi *et al.*, 2021a). 도장시설에서 차량의 광택이나 도막 형성을 위해 사용되는 도료에는 탄화수소(hydrocarbon, HC)를 포함하여 부탄올, 이소프로필알콜, 아세트산에틸, 아세톤, 메틸에틸케톤, 메틸이소부틸케톤 등 다양한 VOCs가 함유되어 있어 인체 노출 시 감각기관의 자극이나 천식 등 유해한 영향을 미칠 수 있다(Choi *et al.*, 2021b).

Kim *et al.* (2020)은 광주지역 산단 내 위치한 도장 및 인쇄시설에서 배출되는 VOCs의 배출 특성을 고체흡착관 및 GC를 사용하여 평가하였으며, Yoo *et al.* (2005)는 부산지역에 운영 중인 도장시설 25개를 대상으로 직독식 검출기를 이용하여 배출특성을 조사하였다. Chun *et al.* (2021)은 서울시에 위치한 3개 도장시설을 대상으로 직독식 장비를 활용하여 THC에 대한 농도 변화를 검토하였으며, 이 밖에도 도장시설 내외부에서 배출되는 오염도 분석을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(Lee *et al.*, 2021; Mo *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 1993). 하지만 대부분의 연구가 직독식이나 흡착법을 이용하여 배출구 인근 지역에 대한 분포특성 조사에 초점을 맞춰 진행되어 왔다. 흡착법의 경우 현 국가공인 공정시험법으로 정확한 정보를 제공해 줄 수 있으나, 측정의 한계로 측정 대상 기간에 대한 단편적인 농도만을 제공해 주어 전체 공정에 대한 농도변화를 확인

하기 어렵다. 반대로 직독식 기기의 경우 공정가동에 따른 연속적인 데이터를 획득할 수 있으나 제시된 측정값에 대한 신뢰도가 낮다(Kim *et al.*, 2021a). 최근에는 이러한 단점들을 보완하여 실시간으로 다수의 개별 VOC를 측정할 수 있는 장비들이 개발되어 운영되고 있다(Kim *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2013b).

본 연구에서는 항공관측이나 이동관측(mobile laboratory, ML) 등에 사용되는 실시간 분석장비를 탑재한 ML을 활용하여 도심지역 내 위치한 도장시설과 인근 도로변 VOCs 농도의 시공간적 분포를 파악하고자 하였으며, 향후 본 연구 결과는 지역 대기 관리대책 수립을 위한 기초정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구 방법

2.1 이동측정차량(ML) 및 측정장비

도장시설과 인근 도로변의 VOCs 시공간 분포를 파악하기 위해 실시간으로 VOCs를 측정할 수 있는 양자전이 비행시간질량분석기(proton transfer reaction-time of flight mass spectrometer, PTR-ToF-MS, IONICON, AUT)를 장착한 이동측정차량(mobile laboratory, ML)을 활용하였다. PTR-ToF-MS는 현장에서 전처리 없이 초 단위로 대기 중 VOCs를 분석할

수 있어, 항공관측이나 이동관측 등 실시간으로 데이터를 획득해야 하는 다수의 연구에서 활용되어 왔다. 최근에는 국내 다수의 대기환경연구소에서 지역 대기질 모니터링 연구에 적용되고 있다. ML을 이용한 측정 시 측정 유입구가 자동차 배출구에 인접해 있거나 이동없이 공회전 시간이 길어질 경우, 자체적인 영향을 미칠 수 있는데, 이에 대한 영향을 최소화하기 위해 이동측정간 앞 차량과의 간격을 최소 3~5 m 이상 이격시켰고, 흡입구를 차량 상부에 설치하여 이에 대한 영향을 최소화하도록 하였다.

측정 효율증대와 안정적인 흡인을 위해 ML은 시속 20~30 km로 운행하였다. 이동관측은 2인 1조로 수행하였으며 운전자는 차량 운행을, 동승자는 측정 장비 운영 및 선정 지역에 대한 특이사항을 기재하여 데이터 분석에 활용하였다.

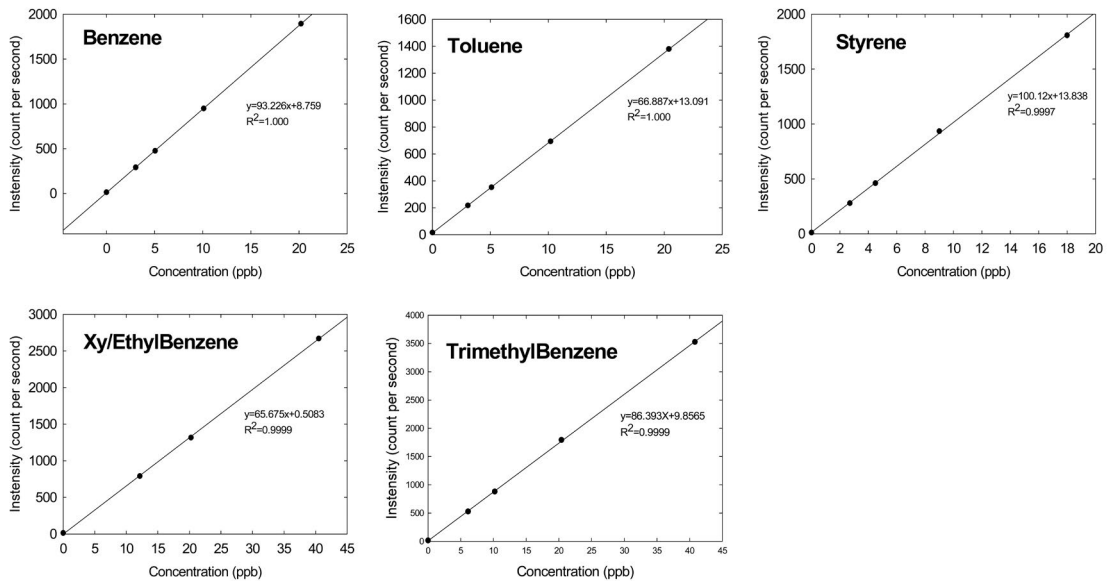
PTR-ToF-MS의 장비 사양 및 분석조건에 대하여 표 1에 나타냈으며, 측정된 VOCs 물질에 대한 세부정보를 표 2에 제시하였다. 표 2의 분석대상 VOCs 물질에서 도장시설과 관련되어 있는 물질은 도장원료와 희석제 사용에 따라 Toluene, Xylene이 해당하며, 두 물질 모두 자동차와 같은 이동오염원에서도 배출되는 물질이다. 도장시설에서 사용하는 도료의 주요 지표 물질로는 배출계수 산정을 통해 톨루엔(TOL) (181.10 g/kg)과 메틸이소부틸케톤(MIK) (126.91 g/kg)이 가장 큰 비율을 차지하며, 이외에 자일렌(XYL), Isopropyl alcohol 등이 있다(Kim *et al.*,

Table 1. PTR-ToF-MS instrument conditions and acquisition method.

Items		Contents
Instrument model		PTR-ToF-MS 1000
Chemical ionization		H ₃ O ⁺ mode
Ion drift tube	Temperature	60°C
	Drift voltage	600 VdC
	E/N(electric field)	145 Td(townsend) (1 Td = 10 ⁻¹⁷ V · cm ²)
	Drift pressure	2.3 mbar
Time of flight mass analyzer	Mass range	m/z 10~m/z 500
	Ion extraction rate	80 kHz
	Acquisition spectra	Every 1 second (1 hz)

Table 2. VOCs target compounds of PRT-ToF-MS.

Substance	ABB.	Formular	Protonated mass	Boiling point (°C)	Proton affinity (kJ/mole)
Methanol	MOH	CH ₄ O	33.03	64.7	754.3
Acetonitrile	AN	C ₂ H ₃ N	42.03	81.3~82.1	779.2
Ketene	KT	C ₂ H ₂ O	43.02	-56.1	825.5
Acetaldehyde	AA	C ₂ H ₄ O	45.03	20.2	768.5
1,3 Butadiene	BD	C ₄ H ₆	55.05	-4.4	783.4
Acetone	ACT	C ₃ H ₆ O	59.05	56.1	812
Acetic Acid	AAC	C ₂ H ₄ O ₂	61.03	118~119	783.7
Isoprene	ISP	C ₅ H ₈	69.07	34.1	826.4
Methyl Vinyl Ketone	MVK	C ₄ H ₆ O	71.05	81.4	834.7
Methyl Ethyl Ketone	MEK	C ₄ H ₈ O	73.06	79.6	827.3
Benzene	BZ	C ₆ H ₆	79.05	80.1	750.4
Ethyl acetate	EA	C ₄ H ₈ O ₂	89.06	77.1	835.7
Toluene	TOL	C ₇ H ₈	93.06	111	784.3
Styrene	STR	C ₈ H ₈	105.07	145	876.2
Xylene	XYL	C ₈ H ₁₀	107.08	138.5	796
n-Butyl Acetate	nBA	C ₆ H ₁₂ O ₂	117.06	126.1	885.3
Trimethylbenzene	TMB	C ₉ H ₁₂	121.10	169~171	784
Pinene	PN	C ₁₀ H ₁₆	137.13	155~156	839.5

**Fig. 1.** Calibration curves of VOCs.

2013a). 본 연구에서는 도장시설의 지표 물질로 이용되는 Methyl Isobutyl Ketone 및 Isopropyl alcohol을 정성하지 못하였으며, 이동측정 시 도장시설 영향 분석에는 다소 제한점이 있었다.

2.2 VOCs 물질의 정량

도장시설 밀집지역에 대한 실시간 오염도 분석을 위해 사용된 PTR-ToF-MS는 선택된 VOCs 개별 물질에 대해 초 단위로 측정할 수 있어, 실시간 농도변화



Fig. 2. View of Measurement route, windrose and ML.

특성을 검토할 수 있다. 측정장비의 원리, 분석방법, 정성 및 교정 등에 대한 내용은 이전 연구들에서 자세히 제시되어 있다 (Kim et al., 2021; Kim et al., 2013b; Jordan et al., 2009; De Gouw et al., 2006). 하지만 기존의 공정시험법 대비 실시간 측정 장비를 활용하는 만큼 정확도 확보를 위해 사전 검·교정 작업이 매우 중요하다. 본 연구에서는 표준물질 확보에 한계점이 있어, VOCs 물질의 정량에는 분석 이온의 통과 효율을 이용한 이론산정과 확보된 표준물질을 이용한 교정 방법을 동시에 적용하였다. 표준물질은 상업적으로 시판되는 VOCs 100 ppb의 혼합 표준시료 (TO-14A Aromatics Mix, RESTEK)를 이용하였다. 분석 이온의 통과효율은 zero air를 이용하여 장비의 배경농도를 측정한 후 표준시료 100 ppb를 측정한 후, m/z (mass of charge)에 따른 해당 이온의 상대적인 감도를 비교하여 통과효율을 산정하였다. 여기에 VOCs 물질에 대한 반응속도상수는 $2.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ 값을 적용하여 개별 물질에 대한 이론적인 농도를 계산하였다 (Kim et al., 2014; Kim et al., 2013b; De

Gouw et al., 2006). 확보된 표준물질을 이용한 교정은 고정밀 질량유량조절장치 (mass flow controller, MFC)를 통해 zero air와 표준시료를 혼합하여 일정한 농도로 단계적으로 주입하여 검량선을 작성하였으며 (Kim et al., 2021a; Park et al., 2018), 각각의 물질에 대하여 그림 1에 나타났다. 방향족 탄화수소류 ($C_n \geq 6$)에 대한 선형성은 유의한 수준으로 나타났다 ($R^2 > 0.999$).

2.3 대상 지역 및 측정 일정

측정대상 지역인 천안시는 2019년 기준 충청남도 인구의 29.3%가 거주하고 있는 충청남도 최대 도시로 교육, 문화, 교통의 요충지이다. 그림 2와 같이 VOCs 측정대상 지역은 충남 천안시에 위치한 도장 시설 밀집지역과 인근 주거지역에 해당하며, 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 로마 숫자를 기준으로, 1번 지역은 천안종합운동장으로 이동측정차량 정비 및 충전, 배경농도 측정을 위한 거점으로 선정하였고, 3번은 양복 8차선 고속화 도로로 차량의 이동속도가

빠른 구간이다. 10번은 1번 고속도로에서 내려와 천안시청 및 아산시로 진입하는 6차선 도로이며, 4번은 도장시설 밀집지역이다. 4번 지역은 직선거리 500 m × 500 m 정사각형 안에 17개의 도장시설이 위치해 있어 주중 작업시간 동안 총탄화수소(total hydrocarbon, THC)의 배출량이 많을 것으로 예상된다. 그 외 도로는 편도 1~2차선의 간선도로이다. 측정은 초기 천안종합운동장을 나와 주거밀집지역인 2번을 거쳐 3번 고속화 도로를 경유한 뒤 4번 도장시설 밀집지역을 순회한다. 그 뒤 5번으로 나와 6번부터 9번까지 주거지역 주변의 이면도로를 측정한 뒤 10번 6차선 도로를 지나 1번 구역으로 복귀하게 된다. 전체적인 공간은 가로 4.5 km, 세로 2.6 km 내에서 1회 운행시간은 1시간 10분~15분 소요되었으며, 1회 총 운행 거리는 21 km였다.

Table 3. Summary of measurement schedule for VOCs monitoring.

Time	5 Sep. 2021 (Sun.)	6 Sep. 2021 (Mon.)	7 Sep. 2021 (Tue.)
8:00	M1	M3	M9
10:00	M2	M4	M10
12:00		M5	M11
14:00		M6	M12
16:00		M7	M13
18:00		M8	M14

기상인자는 대기질에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 특히 풍향과 풍속은 오염물질의 확산 및 희석에 대한 매우 큰 영향 인자이다. 따라서 본 연구에서는 측정지점 인근의 풍향·풍속을 알아보기 위해 초기 측정지점으로부터 약 6.3 km 떨어진 방재기상관측(automatic weather station, AWS) 자료를 이용하여 측정기간 동안 기상개황을 알아보았다. 주풍은 북동풍으로 평균 최저기온은 18.1°C, 평균 최고기온은 25.1°C, 평균기온은 21.1°C로 나타났으며, 평균 풍속은 1 m/s로 확인되었다.

이동측정은 2021년 9월 5일(일)부터 9월 7일(화)까지 수행하였으며, 세부적인 내용은 표 3에 나타났다. 9월 5일(일)은 도장시설이 운영하지 않는 조건에서 주변 지역의 배경농도 확인을 위해 2회 운행(M1, M2)하였고, 9월 6일(월)과 7일(화)은 도장시설 운영에 따른 영향파악을 위해 8시부터 19시까지 하루 6회 진행하여 총 12회(M3~M14) 데이터를 획득하였다. 그 외 시간에는 천안종합운동장 내부에서 고정측정 및 측정정비 점검 및 교정을 진행하였다.

3. 측정 결과

3.1 VOCs 농도분포

앞서 표 3에 나타난 것처럼 3일간 공정 미가동 구

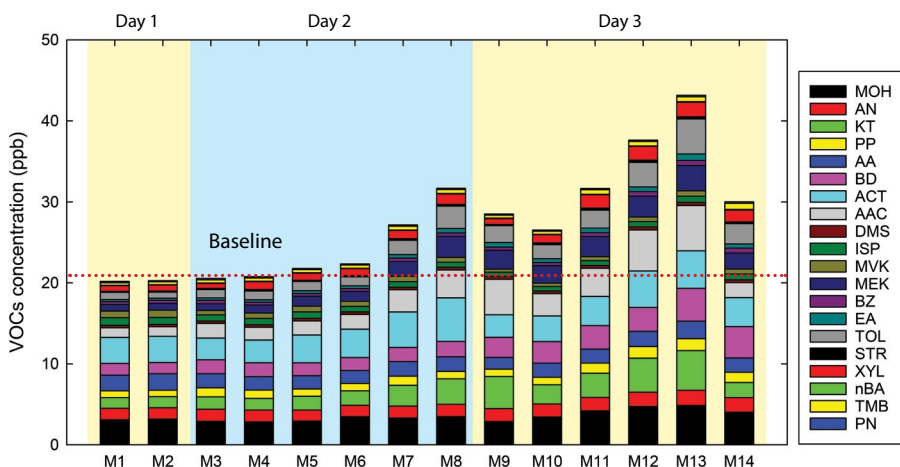


Fig. 3. Average concentration of VOCs emitted at each measurement using ML.

반응을 통해 생성된다. 또한 대류권 내에서 HO_x 형성에 주요한 역할을 하며 오존생성과정에 참여하므로 (Schade and Goldstein, 2006), 메탄을 생성기원인 비메탄계-탄화수소류에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 이와 함께 M1, M2는 오염원이 비교적 적은 주말인데도 불구하고 메탄올을 포함한 아세트알데하이드(AA), 케텐(KT) 및 아세톤(ACT)과 같은 산화된 VOCs가 차지하는 비율이 높은 특징을 보였다. 이것은 메탄올과 아세톤의 경우 체류 시간과 반감기가 길어 대기 중 오랫동안 잔류하는 특성이 반영된 것으로 추정된다. 스모그의 광화학반응으로 발생하는 산화물의 총칭인 질산과산화아세틸(peroxyacetyl nitrate, PAN)의 전구체로 알려진 아세트알데하이드(AA)와 반응성이 강한 케텐(KT)의 경우 도시 대기 중에 존재하는 탄화수소류의 산화와 이동오염원인 자동차 내연기관의 연소과정에서 직접 배출된다. 두 물질 모두 반응성이 강한 물질로 오존생성과 같은 2차 광화학반응에 주요하게 작용함에 따라, 향후 해당 물질에 대하여 지속적인 측정과 연구가 필요할 것이다.

주중인 2일 차(DAY 2)와 3일 차(DAY 3) 역시 아세톤과 메탄올의 비율이 높게 나타났다. 이는 주말에 비해 활동도가 증가하면서 대기 중 탄화수소류의 공급이 원활해짐에 따라 산화 반응을 통한 생성 또한 증가한 것으로 판단된다. M0과 DAY 1에서는 낮은 비율을 보였던 아세트산(ACT)과 톨루엔(TOL)의 비율이 증가한 것으로 확인되었다. 아세트산은 주로 낮 시간대에 농도가 증가하고, 밤 시간대는 분해 및 제거되는 경로를 가지기 때문에 비교적 오전에는 농도가 낮고 오후에는 농도가 높은 특징을 보이는 것으로 파악된다(Khare *et al.*, 1999). 방향족 탄화수소 계열의 톨루엔은 대표적인 인위적 기원 오염물질에 해당하며, 자동차뿐만 아니라 도장시설의 희석제 사용에서도 배출된다. 톨루엔은 주말에 비해 주중에는 2~4 배가량 증가하였다. 톨루엔은 벤젠보다 높은 수준이었으며, M1~M14에서 B/T (Benzene to Toluene ratio)는 0.5 이내로 나타나, 주중에 인위적으로 배출된 톨루엔의 증가에 따른 영향이 작용한 것으로 판단된다.

VOCs 항목 중 유일하게 대기환경기준이 설정되어 있는 벤젠(연평균 5 µg/m³, 1.5 ppb)의 경우, 측정 기간 전체에 대해 평균 0.4 ppb로 기준치보다 낮은 수준을 보였다. 세계보건기구(world health organization, WHO)에서는 벤젠과 더불어 1,3 부타디엔(BD)을 발암물질로 분류하고 있는데, 일반적으로 도시 대기 중에는 1~10 ppb 수준이며, 자동차 배기가스는 20~60 ppb 수준으로 알려져 있다(WHO, 2000). 본 측정결과 1,3 부타디엔의 농도는 1.4~4.0 ppb로 나타나 기존 연구결과와 유사한 수준인 것으로 확인되었다. 톨루엔(TOL)의 경우 측정결과가 0.7~4.7 ppb 수준으로 나타났다. 기존 선행연구에서 산업단지의 경우 10~20 ppb 수준이고, 도시 대기 중에는 0~3 ppb 수준인 것으로 보고하였는데(Baek *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2006), 본 측정결과는 기존 선행 연구결과 대비 유사하거나 약간 높은 수준인 것으로 나타났다.

3.2 도장시설 및 인근 도로변 VOCs의 공간 분포

조사 대상 구역에 대한 VOCs의 공간분포 확인을 위해 이동측정 경로를 가시화시켜 분석하였다. 이동측정 연구의 경우 이동측정차량이 실시간으로 이동하면서 초 단위의 데이터를 확보할 수 있다는 장점이 있으며, 이들 데이터를 GPS 기반으로 운행 경로와 동기화시켜 분석 시 지역적 농도분포를 확인할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 측정이 진행된 3일에 대해 수행된 총 14회의 이동측정결과를 도식화하여 분석하였다.

3.2.1 Day 1

그림 5는 주말 오전에 도장시설과 주변 도로변의 배경농도 측정을 위해 수행한 M1과 M2의 결과를 도식화하여 나타낸 것이다. 도식화한 그림의 범례는 M1부터 M14까지의 일관성 있는 분석을 수행하기 위해 0~100 ppb로 규격화하여 나타났다. 측정대상 시간이 일요일 오전 시간대로 차량 통행량이 주중에 비해 적은 편이고, IV구역에 위치한 도장시설은 운영



Fig. 5. Spatial distribution of VOCs measured by mobile laboratory on 5 Sep. 2021.

하지 않는 상태였다. 대부분의 구간에서 40 ppb 이하의 농도 수준을 보였다. M1의 경우, V와 VI의 일부 구간과 M2의 VIII과 X의 일부 구간에서 40~60 ppb 수준의 농도가 관찰되었을 뿐 특별한 고농도 구간은 나타나지 않았다.

3.2.2 Day 2

그림 6은 평일을 대상으로 8시부터 20시까지 6회 운행한 결과(M3~M8)를 나타낸 것이다. M3은 도장시설이 운행 가동 전인 8시 전·후 출근시간대로 도장시설 밀집지역의 농도는 20 ppb 이하로 낮은 반면, 상가 밀집지역인 VIII과 IX구역에서 60~100 ppb 수준의 높은 농도를 보였다. M4는 10시 이후로 도장시설의 작업이 시작되면서 도장시설 밀집지역인 IV구역의 농도가 증가하기 시작하였고, 앞서 M3와 마찬가지로 IX구역은 약간 낮은 수준이지만 고농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다. M5 역시 도장시설 밀집지역의 일부 구간에서 고농도가 확인되었고, 이번에도 VIII과 IX구역은 높은 농도가 확인되었다. 도장시설 밀집지역에서 VOCs 전체 농도를 증가시키는 물질로 유기용제의 주요 성분인 톨루엔과 자일렌 그리고 트리메틸벤젠과 같은 물질이 지표 물질로 나타났으며, 도장시설을 가동하기 전 (Day 1)과 비교해보면 약 1.5~2배 가량 증가하였다. M6은 기존과 다르게 III구간에서 고농도 사례를 보였다. 이때는 시간적으

로 14시경으로 오전 출근시간대 대비 운행차량이 감소하면서 대로변 차량의 운행속도가 빨라져 도로변 오염도가 증가한 영향으로 판단된다. 이번에도 앞선 측정과 유사하게 도장시설 밀집지역인 IV와 IX의 농도가 높게 나타났다. M7의 경우 앞서와 마찬가지로 IV, VIII, IX구역에서 농도가 높게 나타났으며, M8의 경우 기존의 상습 고농도 구간 외에 VI과 X구간까지 고농도를 보였다. 이는 M8의 경우 시간대가 18시 이후로 퇴근시간대 교통량 증가로 인한 영향이 미친 것으로 판단된다. 1일 6회 이동관측 결과 고농도 지역으로 예측되었던 도장시설 밀집지역인 IV구역 외에도 상시 차량 정체 구간인 VIII과 IX구역에서의 고농도가 지속적으로 관찰되었다.

3.2.3 Day 3

그림 7은 측정 2일차(M3~M8)와 마찬가지로 3일차 평일날을 대상으로 6회 측정된 결과를 도식화하여 나타낸 것이다(M9~M14). 동일한 측정구간인 M3에서 VIII과 IX의 일부 구간에서 고농도 지점이 확인되었던 것에 반해, M9의 경우 III의 일부 구간과 IX의 전 구간에서 매우 높은 농도가 확인되었다. 이 외에도 일부 VI과 X구간에서도 약간 높은 농도 구간이 확인되었다. M10의 경우 M9와 유사한 패턴이 반복되었다. M11의 경우 타 측정구간 대비 60 ppb 이상의 고농도 구간이 관측되지 않았는데 이는 앞서 1일 차

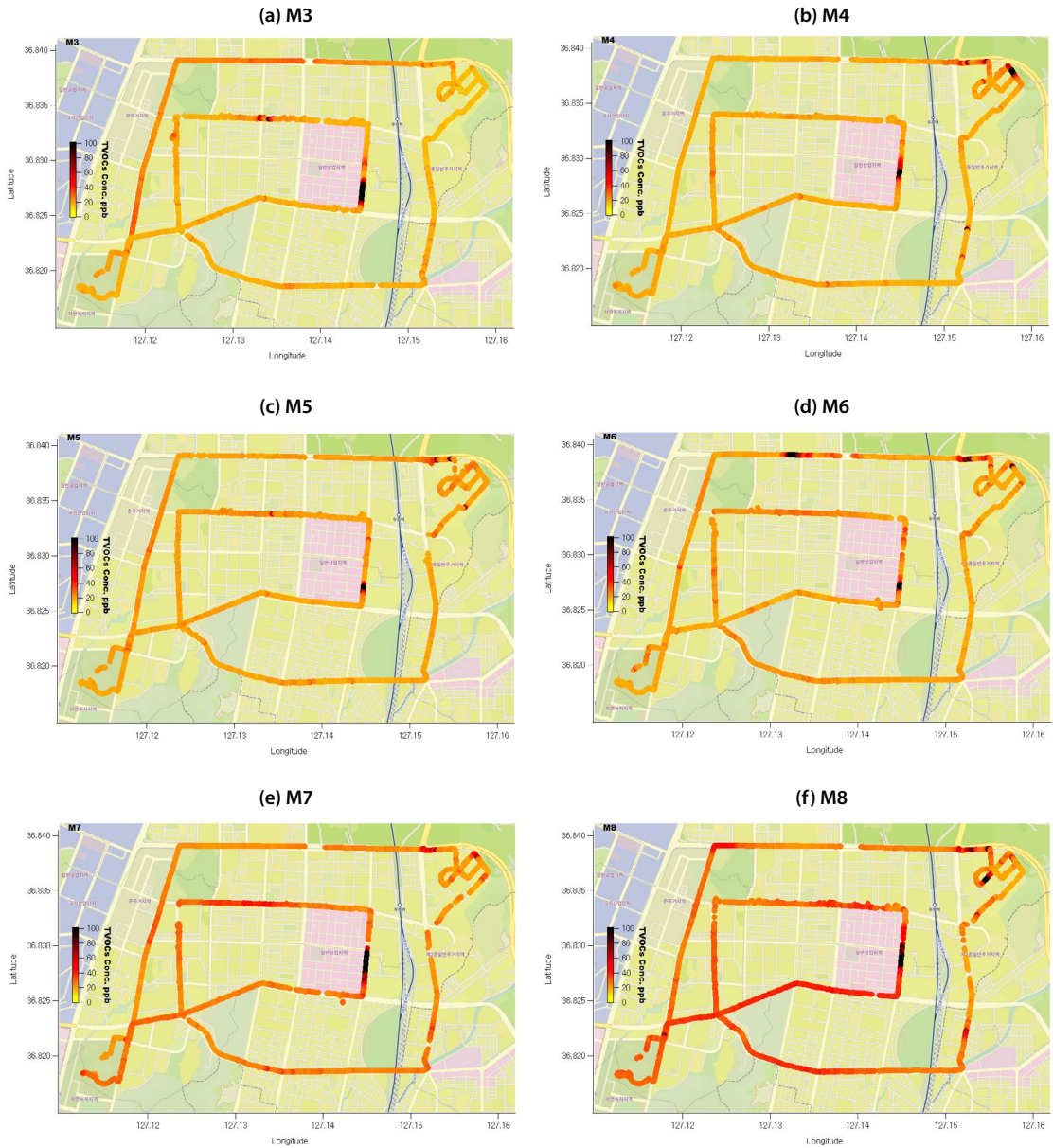


Fig. 6. Spatial distribution of VOCs measured by mobile laboratory on 6 Sep. 2021.

에서도 M5에서 타 측정구간 대비 고농도 구간이 나타나지 않았던 것과 유사한 경향이다. M5나 M11의 측정시간대가 12시로 점심시간 도로변 차량 이동량이 감소하고 도장시설의 공정가동이 감소되어 나타난 결과로 예측된다. M12와 M13은 측정지점 전 구

간에 걸쳐 높은 농도 분포를 보이며, 특히 IV, VIII, IX 구간에서 매우 높은 농도 분포를 나타냈다. M14에서는 기존에 나타났던 경향과 다르게 상승 고농도 구간인 VIII과 IX구간의 농도가 낮게 나타난 반면, III~V 구간에서 높은 농도를 보였다.

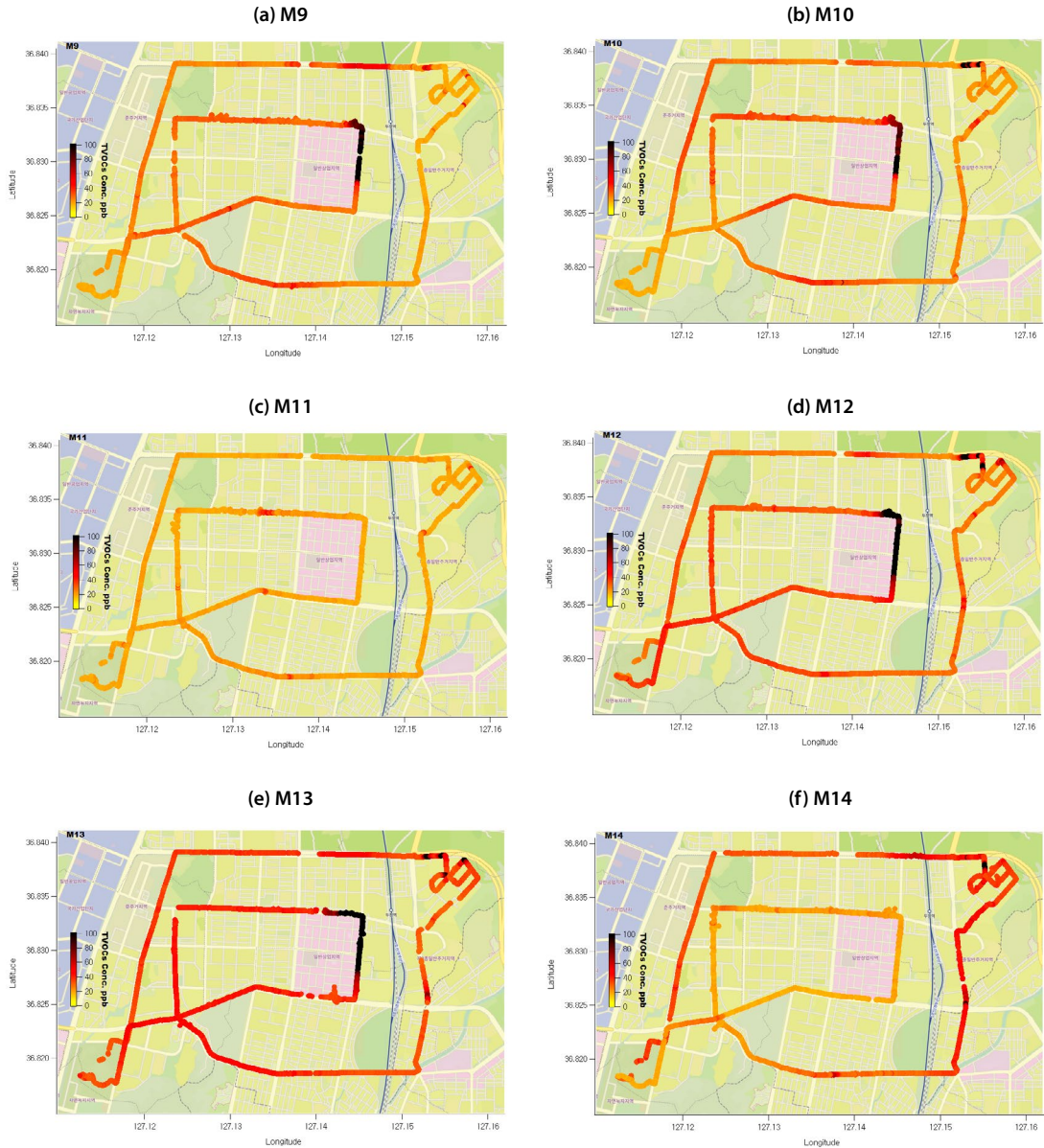


Fig. 7. Spatial distribution of VOCs measured by mobile laboratory on 7 Sep. 2021.

3.3 VOCs 시공간분포와 고농도 구간 (Hot-spot area)

표 4는 M1부터 M14에 대한 구간별 측정 평균값을 나타낸 것이다. 측정 경로별로는 3일 차의 14시~18시까지 측정한 M12와 M13이 각각 45.8 ppb와 48.6

ppb로 가장 높은 농도를 보였고, 주말 오전에 수행된 M1과 M2의 농도가 동일하게 20.2 ppb로 가장 낮은 농도를 나타냈다. 공간적으로는 측정 초기 도장시설이 밀집되어 있는 IV구역에서 가장 높은 농도를 나타낼 것으로 예상하였지만 측정결과 III과 VIII, IX이

Table 4. Comparison of the concentration of VOCs measured at each section.

(unit: ppb)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	Mean
I	21.1	20.5	22.4	19.6	21.0	20.4	24.2	30.6	21.0	18.9	19.2	25.5	31.7	35.1	23.7
II	19.0	19.8	23.4	17.5	22.1	20.8	24.6	27.6	26.4	30.6	31.3	30.9	35.5	35.2	26.1
III	18.9	19.1	22.6	22.5	24.1	32.3	26.3	32.1	27.4	33.2	35.4	36.5	44.2	38.1	29.5
IV	19.3	20.7	16.7	26.4	23.4	21.0	23.6	27.5	19.1	22.6	25.5	28.8	35.1	40.7	25.0
V	21.6	18.8	18.7	18.1	20.6	19.3	27.4	23.1	19.2	24.6	25.6	29.4	35.8	44.4	24.8
VI	21.9	23.3	17.7	20.3	19.6	21.7	26.0	32.8	28.0	29.3	34.1	31.7	38.8	31.4	26.9
VII	19.3	19.9	19.1	20.3	20.3	22.0	24.6	31.8	27.5	25.6	39.6	36.2	43.7	20.8	26.5
VIII	20.2	20.7	22.1	19.3	21.8	23.6	31.2	31.7	32.6	31.7	36.5	37.3	49.3	21.7	28.5
IX	19.5	19.2	44.6	26.7	28.3	30.8	42.2	47.1	111.5	66.6	68.6	163.6	131.3	19.7	58.5
X	20.8	20.4	19.9	18.8	21.2	20.8	27.7	38.3	28.7	26.9	32.0	38.2	40.8	19.2	26.7
Mean	20.2	20.2	22.7	21.0	22.2	23.3	27.8	32.3	34.2	31.0	34.8	45.8	48.6	30.6	

가장 높은 구간으로 나타났다. 전체 구간들에서도 특히 M12의 IX구간과 M9의 IX구간이 가장 높았는데, 오염물질별로는 케텐(C_2H_2O , KT)과 아세트산($C_3H_4O_2$, AAC)이 가장 높은 비율을 차지하였다. 두 물질은 공통적으로 연소과정 및 자동차 내연기관 등에서 직접 배출되는 물질인 동시에 대기 중 VOCs의 산화 과정을 통해 생성되는 물질에 해당한다. 이동측정을 실시한 전체 구간을 검토해보면, 그림 6과 그림 7에 나타난 것과 같이, 지도 중앙의 상업지구(연보라색) 왕복 4차선 도로(IX)인 봉정로에서 고농도가 관찰되고 있다. 지적도를 통해 중앙의 일반상업지역을 두고 2종 일반지역이 둘러싸고 있는 형태이며, 상업지구 오른쪽으로는 KT&G 천안공장과 2,586세대(총 16개동)의 아파트단지가 위치함에 따라 이동측정에 영향을 줄 수 있는 차량 통행량 이외에 신호등의 신호대기와 같은 요소들이 다수 존재한다. 특히 고농도가 빈번히 관측된 IX구간의 측정은 북쪽에서 남쪽 방향으로 진행되었으며, 차량의 통행 방향을 통해 아파트단지 진입을 위한 구간 정체, KT&G 천안공장의 남서쪽 부지 경계의 교차로(봉오로 인쇄상 사거리)에서 차량 정체와 신호대기에 따른 영향을 받은 것으로 추정된다.

충청남도의 경우 2019년 대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS) 기준, 도장시설이 배출 기여도 1위로 전체 VOCs 배출량의 27.1%를 배출하는 것으로 나타났으며, 그 뒤를 이어 석유제품

생산(13.5%), 유기화학제품 제조업(12.0%)로 나타났다. 조사대상 지역으로 선정된 도장시설 밀집지역은 약 0.25 km^2 의 좁은 면적에 17개 되는 도장시설이 밀집되어 있어 VOCs가 고농도로 검출될 것으로 예상되었다. 하지만 본 측정 결과, 도장시설 밀집지역보다 상시 차량 운행이 많고, 교통 혼잡도가 높은 지역에서의 VOCs 농도가 더 높은 수준을 보였다. 이는 배출량이 꼭 그 지역의 농도에 직접적인 영향을 미치지 않는다는 것과 도심지역의 경우, 배출 기여도가 높은 것으로 알려져 있는 사업장에 의한 영향보다는 자동차에 의한 영향이 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

VOCs는 CAPSS 기준 전국 대기오염물질 배출량 중 25.8%를 차지할 만큼 많은 비중을 차지하고 있으며 산업활동과 자동차 배기가스, 도장 및 세탁시설과 같이 생활에 밀접한 시설에서 배출되고 있다. 이에 본 연구에서는 도심지역 내 도장시설 밀집지역을 대상으로 이동관측 차량과 실시간 VOCs 분석 장비를 이용하여 시공간 분포를 검토하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. VOCs 농도가 주말에는 $20.2 \pm 0.9 \text{ ppb}$, 주중에는 $28.5 \pm 1.2 \text{ ppb}$ 로 주중이 약간 높은 농도를 보였다. 물질별로는 주중과 주말 모두 아세톤(ACT)과 메

탄올(MOH)이 주를 이루었고, 주중에는 아세트산(AAC)과 톨루엔(TOL)이 증가하는 것으로 나타났다.

- VOCs 물질 중 유일하게 대기환경기준이 지정되어 있는 벤젠(1.5 ppb)의 경우, 0.4 ppb로 연평균 기준치를 만족하는 것으로 나타났으며 주요 오염물질인 1,3 부타디엔과 톨루엔 모두 선행연구와 유사하거나 약간 높은 수준으로 나타났다.
- 측정경로를 10개의 구간으로 구분하여 분석한 결과, 도장시설 밀집지역(IV)과 인근 도로 구간 중 III, VIII 및 IX구간에서 고농도가 관찰되었다. 특히 VIII과 IX에서는 대부분의 측정에서 도장시설 밀집지역인 IV구간보다 고농도로 확인되었다.
- M1부터 M14까지 운행 시간대별 분할 구간에 대한 공간분포를 검토한 결과, 도장시설 밀집지역(IV)보다 인근 도로변 III과 VIII, IX구간의 농도가 더 높은 것으로 나타났다. 특히 IX구간의 경우 도장시설 밀집지역인 IV의 25.0 ppb보다 약 2.34배 높은 58.5 ppb로 나타났다.
- 대상 지역의 대기질 개선을 위해서는 도장시설 밀집지역에 대한 VOCs 저감 대책보다는 차량 이동이 많고, 상시 정체 구간인 VIII, IX구간에 대한 개선정책 추진이 더 효과적일 것으로 나타났다. 이는 VOCs 배출 기여도가 높은 도장시설에서 배출된 오염물질이 절대적으로 그 지역에 영향을 미치지 않는다는 것과 도심지역의 주요 오염원인 사업장 배출원보다 자동차에 의한 영향이 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구는 주중과 주말을 대상으로 단편적으로 수행된 결과로 해당 지역에 대한 정확한 정보를 제공하기에는 한계가 있다. 하지만 14번의 연속 관측결과, 주중 시간대 도장시설 밀집지역에서 고농도 VOCs 농도가 관찰되어 이 부분에 대한 관리가 필요하다는 것과 도장시설보다는 주변 도로변의 VOCs 농도가 더 높아 해당 구간에 대한 우선적인 교통량 분산과 신호체계 개선 등의 정책이 추진되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다. 이동관측은 시간대에 따른 환경이

나 교통변수로 그 지역에 대한 대표농도를 제공할 수 없지만, 시공간분포 정보 제공에 따른 우선 관리지역 선정이나 추진되고 있는 정책에 대한 효과 분석에 유용하게 활용될 수 있다. 추후 이동관측을 통한 특정 구간에 대한 모니터링 연구가 지속적으로 수행된다면 지역 대기 관리대책 수립을 위한 효과적인 근거 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 충청남도의 지원을 받아 수행된 “광역 대기오염관리를 위한 지역오염특성 분석(21DE015)”의 일환으로 진행되었으며, 측정에 협조해 주신 천안시청, 천안시설관리공단 및 (주)에이피엠엔지니어링 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Baek, S.O., Seo, Y.K., Kim, J.H. (2020) Occurrence and Distributions of Volatile Organic Compounds in the Ambient Air of Large Petro-chemical Industrial Complexes: Focusing on Daesan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 32-47, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.032>
- Choi, S.W., Bae, C.H., Kim, H.C., Kim, T., Lee, H.K., Song, S.J., Jang, J.P., Lee, K.B., Choi, S.A., Lee, H.J., Park, Y., Park, S.Y., Kim, Y.M., Yoo, C. (2021a) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Association for Atmospheric Environment*, 15(4), 2021064. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.064>
- Choi, S., Park, S., Cha, Y., Lee, S., Yoo, E. (2021b) The characteristics of air pollutants distribution around industrial complex using real-time mobile atmospheric measurement system, *Journal of Korean Society for Environment and Engineering*, 43(6), 476-489, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2021.43.6.476>
- Chun, H.J., Song, J.H., Park, J.H., Choi, W.S., Lee, K.Y., Song, M.Y.

- (2021) Characteristics of the VOCs emitted from automotive painting workshop and control facilities, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 20(1), 39-50. <https://doi.org/10.15250/joie.2021.20.1.39>
- De Gouw, J., Warneke C. (2006) Measurements of volatile organic compounds in the earth's atmosphere using proton-transfer-reaction mass spectrometry, *Mass Spectrometry Reviews*, 26, 223-257.
- Jordan, A., Haidacher, S., Hanel, G., Hartungen, E., Mark, L., Seehauser, H., Schotchkowsky, R., Sulzer, P., Mark, T.D. (2009) A high resolution and high sensitivity proton-transfer- reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-ToF-MS), *International Journal of Mass Spectrometry*, 286, 122-128.
- Khare, P., Kumar, N., Kumari, K.M., Srivastava, S.S. (1999) Atmospheric organic acids: An overview, *Reviews of Geophysics*, 37, 2, 227-248.
- Kim, B.R. (2011) VOC Emissions from Automotive Painting and Their Control: A Review, *Environmental Engineering Research*, 16(1), 1-9. <https://doi.org/10.4491/ee.2011.16.1.001>
- Kim, C.H., Kim, J.H., Noh, S., Lee, S., Yoon, S.H., Lee, S.S., Park, J.S., Kim, J.B. (2021a) A Study on Temporal-Spatial Characteristics of Volatile Organic Compounds Distributed near Petrochemical Industrial Complex using PTR-ToF-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 812-828, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.812>
- Kim, E.K., Song, H.B., Park, M.S., Kim, J.K., Kwon, J.D., Choi, S.J., Park, S.K., Han, G.H. (2014) The Concentrations of Ambient VOCs at Industrial Complex Area in Daegu City, *Journal of Korean Society for Environmental Engineering*, 36(7), 498-505, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.7.498>
- Kim, E.S., Kim, C.M., Moon, B.J., Sung, S.H., Kim, Y.I., Kim, S.S., Jeon, B.M., Kim, Y.D., Yun, J.S., Eo, S.M. (2018) The Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Automobile Painting Facilities in Seoul, *Report of Seoul Institute of Health and Environment*, 54, 181-187, (in Korean with English abstract).
- Kim, H.N., Bong, C.K., Kim, Y.G., Jeon, J.M. (2013a) The Study on the Emission Characteristics of HAPs and PM from the Motor Vehicle Paint Facility, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6), 713-721, (in Korean with English abstract).
- Kim, J.B., Kim, C.H., Noh, S., Hwang, E.Y., Park, D., Lee, J.J., Kim, J. (2021) A study on spatial distribution characteristics of air pollutants in Bucheon-si using mobile laboratory, *Particle and Aerosol Research*, 17(1), 9-20, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.1.009>
- Kim, J.B., Park, D., Park, S.C., Michael, V., Lee, Y., Lee, S.S., Park, J.S., Kim, J.H. (2019) Concentration characteristics of particulate matter and volatile organic compounds in petrochemical industrial complex using real-time monitoring devices, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 683-700, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.683>
- Kim, J.H., Yoon, G.H., Mark, L., Lee, J.J., Park, J.S., Ahn, J.Y., Han, J.S., Kim, S.D. (2013b) Comparison of real-time mass spectrums on the main and side stream smoke of cigarette using an proton trans reaction-mass spectrometer (PTR-MS), *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 13(2), 117-127, (in Korean with English abstract).
- Kim, K.J., Yoon, Y.S., Lee, J.S., Park, H.J., Seo, S.J., Yoon, J., Seok, G.S., Choi, K.H. (2014) Analysis of Chemical Accident Causing Substances using PTR-ToF-MS-Case Study of Chemical Accident by Reaction Process with Epoxy and Acrylic Acid-, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 17(1), 21-28, (in Korean with English abstract).
- Kim, S.H., Kim, W.S., Park, H.J., Jeong, S.W., Bong, S.H. (2008) A Study on the Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds in Gimhae, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 17(8), 871-878, (in Korean with English abstract).
- Kim, S.H., Seo, D.J., Kim, H.R., Park, J.H., Lee, K.W., Bae, S.J., Song, H.M. (2020) Estimation and Analysis of VOCs Emissions from Painting and Printing Facilities in Industrial Complexes of Gwangju, *Journal of Environmental Science International*, 29(5), 479-494, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.5.479>
- Lee, Y.Y., Lee, S., Hwang, S.C., Kang, S., Lee, I., Jeong, J.M., Hong, S., Cho, K.S. (2021) Emission characteristics of particulate matter and volatile organic compounds (VOCs) from a motor vehicle painting booth and ozone production contribution evaluation, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 20(1), 28-38, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2021.20.1.28>
- Ministry of Environment (MOE) (1991a) Framework act on Environmental Policy.

- Ministry of Environment (MOE) (1991b) Clean air act conservation act.
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Setup and Operating guideline for Air Quality Monitoring System.
- Mo, Z., W. S., Shao, M. (2021) Volatile organic compound (VOC) emissions and health risk assessment in paint and coatings industry in the Yangtze River Delta, China, *Environmental Pollution*, 269(15), 115740. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.11.5740>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEI) (2022) Emissions by Year. <https://www.air.go.kr/en/jbpg/sub03> (accessed in Jul. 15, 2022).
- Park, J.H., Seo, Y.K., Baek, S.O. (2006) A Study on the Comparison of Atmospheric Concentrations of Volatile Organic Compounds in a Large Urban Area and a Sub-Urban Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 767-778, (in Korean with English abstract).
- Park, J.S., Song, I.H., Kim, H.W., Lim, H.B., Park, S., Shin, S.N., Shin, H.J., Lee, S.B., Kim, J.S., Kim, J.H. (2018) Characteristics of Diurnal Variation of Volatile Organic Compounds in Seoul, Korea during the Summer Season, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 21(4), 264-280, (in Korean with English abstract).
- Park, S.M., Park, J.S., Song, I.H., Shin, H.J., Hong, Y.D., Kim, J.H. (2015) Characteristics of Oxygenated-VOCs and Oxidation of organic component in PM_{1.0} at an urban site of Seoul during June, 2014, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 15(3), 207-218, (in Korean with English abstract).
- Ryoo, J.Y., Kim, D.S., Chae, S.C., Nam, T.C., Choi, Y.S. (2010) Characteristics of Air Quality in the West Coastal Urban Atmosphere; Characteristics of VOCs Concentration Measured from an Industrial Complex Monitoring Station at Gunsan and a Roadside Station at Jeonju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(6), 633-648, (in Korean with English abstract).
- Schade, G.W., Goldstein, A.H. (2006) Seasonal measurement of acetone and methanol: Abundances and implications for atmospheric budgets, *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB1011. <https://doi.org/10.1029/2005GB002566>
- Seo, Y.K., Chung, S.H., Baek, S.O. (2011) Current status and prospective of hazardous VOC in ambient air, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 734-745, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.734>
- Smith, C.M., Brown, W.E. (1993) Elimination of VOC Emissions from Surface Coating Operations, *Air & Waste Management Association*, 43(7), 1015-1019. <https://doi.org/10.1080/1073161X.1993.10467175>
- World Health Organization (WHO) (2000) Air Quality Guideline, Second edition, Chapter 5.3-1,3-Butadiene, 1-16.
- Yoo, E.C., Cho, G.J., Kim, Y.T. (2004) Study on the Characteristics of THC Emission in Paint and Dry Booths, Report. Busan Institute of Health and Environment, 14(2), 60-77.
- Yu, J., Ryu, S., Kim, J., Kim, J., Park, J., Gong, B. (2019) Characteristics of emissions for air pollutants and odorous substances in a domestic dyeing industrial complex by using a real-time mobile monitoring system, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 18(4), 362-370, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2019.18.4.362>

Authors Information

- 이가혜 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(gahya1129@cni.re.kr)
- 김정호 ((주)한국환경과학연구소 소장)
(jeonghoflux@naver.com)
- 박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(psc89@cni.re.kr)
- 송민영 (서울기술연구원 기후환경연구실 수석연구원)
(mysong@sit.re.kr)
- 김관철 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정연구실 선임연구원) (fehouse@snu.ac.kr)
- 이다솜 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정연구실 선임연구원) (leedasom@snu.ac.kr)
- 최우석 (세종대학교 데이터사이언스학과 교수)
(wschoi@sejong.ac.kr)
- 김중범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)