



논문

# PTR-ToF-MS를 이용한 석유화학단지 주변의 VOCs 분포 특성에 관한 연구

## A Study on Temporal-Spatial Characteristics of Volatile Organic Compounds Distributed near Petrochemical Industrial Complex using PTR-ToF-MS

김창혁, 김정호<sup>1</sup>, 노수진<sup>2</sup>, 이선엽<sup>3</sup>, 윤수향<sup>3</sup>, 이상신<sup>3</sup>, 박종성, 김종범<sup>3</sup>,\*

국립환경과학원 대기환경연구과, <sup>1</sup>(주)미세먼지연구소,

<sup>2</sup>연세대 환경공해연구소, <sup>3</sup>충남연구원 서해안기후환경연구소

접수일 2021년 5월 17일  
수정일 2021년 9월 23일  
채택일 2021년 10월 14일

Received 17 May 2021  
Revised 23 September 2021  
Accepted 14 October 2021

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

Chang Hyeok Kim, Jeongho Kim<sup>1</sup>, Sujin Noh<sup>2</sup>, Seonyeop Lee<sup>3</sup>,  
Soo Hyang Yoon<sup>3</sup>, Sang Sin Lee<sup>3</sup>, Jong-Sung Park, Jong Bum Kim<sup>3</sup>,\*

Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research,  
Incheon, Republic of Korea

<sup>1</sup>Fine Particle Lab. Co. Ltd., Incheon, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

<sup>3</sup>Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

**Abstract** Petrochemical industrial complex emit many VOCs. As a precursor of the secondary organic aerosol, VOCs cause various health issues. In this study, we used a real-time monitoring device to measure the concentration near the petrochemical industrial complex. The proton transfer reaction-time of flight-mass spectrometer (PTR-ToF-Ms) is used in various mobile research due to its ability to measure each of many different VOCs. The main wind direction was northwest during the measurement period. The measurement using the mobile laboratory (ML) was performed with fixed and mobile measurement. In fixed measurement, the emission process, rather than wind direction, appeared to have a larger effect on the area of the petrochemical industrial complex. Mobile measurements were found to be high at landfills, dormitories, and intersections. The concentration of Benzene exceeded the annual guideline with 3.1 ppb and continuously fluctuated over time. While the standard method can obtain accurate measurements, it does not allow us to monitor measurement of change over time. This necessitates a new real-time monitoring method that can effectively manage industrial facilities.

**Key words:** PTR-ToF-MS, VOCs, Real-time monitoring, Petrochemical industrial complex, Mobile laboratory

### 1. 서 론

충청남도는 한반도 서쪽에 위치하고 있어 중국 등으로부터 유입되는 장거리 이동오염물질에 대해 직접적인 영향을 받고 있으며, 발전소, 산업단지와 같은 대형배출시설이 다수 위치하고 있어 대기오염이 사회문제로 대두되고 있다(Kim *et al.*, 2017). 2021년 기준 전국에서 운영 중인 석탄화력발전소 59기 중 29기가 충

청남도 당진, 태안, 보령, 서천에서 운영 중에 있다. 당진에 위치한 제철소는 굴뚝원시감시체계 (telemonitoring system, TMS) 기준 2016년~2020년까지 대기오염물질 배출량 1~3등을 차지하고 있으며 (Son *et al.*, 2020; Lee and Park, 2019), 서산의 대산석유화학단지는 2018년도 대기정책지원시스템 (clean air policy support system, CAPSS) 기준 충남지역 휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)의 33.3%를

배출한 것으로 나타났다(ME, 2020). VOCs는 산림이나 산불, 화산폭발 등 자연적으로 배출되기도 한다. 하지만 최근 사회적 문제를 야기하고 있는 VOCs는 원유정제나 화학물질 처리, 유기용제 사용, 자동차 배기 가스, 도장, 합성수지 제조 등 다양한 산업공정에서 배출되고 있으며 (Park *et al.*, 2005), 인체 노출 시 백혈병, 중추신경계 장애, 천식, 폐기종, 호흡장애, 폐암 등을 유발하는 것으로 보고되고 있다 (Son *et al.*, 2003; Molhave, 1991). 최근에는 대기 중에서 자외선과 반응하여 광화학 스모그를 유발하는 2차 유기입자 (secondary organic aerosol, SOA)의 전구물질로 작용하거나 지구온난화나 악취를 유발하는 등 다수의 대기오염에 영향을 미치는 것으로 나타나면서 관리 중요성이 부각되고 있다 (Liu *et al.*, 2008).

대산석유화학단지는 울산·미포 석유화학단지 및 여수석유화학단지와 더불어 3대 석유화학단지로 부지와 업체 규모면에서는 가장 작으나 주변지역 대기 오염도는 매우 높은 수준이다 (CNI, 2019). 2016년 환경부와 미국 NASA가 공동 수행한 KORUS-AQ 항공관측 결과 대산석유화학단지 상공에서 다량의 벤젠과 1,3 부타디엔의 농도가 관측되었으며 (NIER, 2016), 전 세계 195개국을 대상으로 NO<sub>2</sub> 농도변화를 분석한 결과 인도 잠나가르와 더불어 대산지역이 가장 큰 농도 증가를 보인 것으로 확인되었다 (Ducan *et al.*, 2016). 국내에서는 Kim *et al.* (2019)이 대산석유화학단지 인근 지역 마을회관에서 portable-GC를 이용하여 농도변화를 관측한 결과 벤젠의 경우 연평균 기준치를 상시 초과하였고, 유독성이 높은 1,3 부타디엔은 순간 농도 125 ppb까지 증가한 것으로 보고하였다. Baek *et al.* (2020)은 산업단지 내부와 주변 지역 영향을 검토하였는데 산업단지 내에서 사용되고 있는 헥산, 톨루엔, 자일렌, 벤젠, 에틸벤젠 등이 주변 마을에서 검출되었으며, 산단에 인접할수록 그 농도가 높은 것을 확인하였다. 충청남도에서 자체적으로 이동측정차량 (mobile laboratory, ML)을 활용하여 대산지역 주변 지역을 모니터링한 결과에서도 쓰레기 매립장에서 지난 4년간 지속적인 벤젠농도 상승을 보고하는 등

지역 VOCs가 지속적으로 문제되고 있다 (Seosan, 2020a).

미국환경청 (United State Environmental Protection Agency, U.S. EPA)이나 국내 공정시험법상 VOCs 측정·분석은 고체흡착관을 이용하여 포집 후 가스 크로마토그래피 (gas chromatography, GC)를 이용하여 분석하도록 제시하고 있다 (Krol *et al.*, 2010; U.S. EPA, 1999). 공정시험방법의 경우 측정 시료에 대해 신뢰성 높은 정보를 확보할 수 있지만 반대로 30분~1시간 내로 포집된 시료가 그 지역의 전체 시간대 농도를 대변할 수 없다는 단점이 있다. 최근에는 이러한 단점을 보완하기 위해 구간별 시료를 포집, 데이터를 획득할 수 있는 반자동 혹은 실시간 측정장비가 활용되고 있다 (Ban *et al.*, 2019; Son *et al.*, 2018). 실시간 측정장비는 가격이 비싸고, 검교정이 어려우며, 숙련된 전문가들에 의해 수행되어야 하는 단점이 있다. 하지만 그 지역에 대한 농도변화를 실시간으로 획득할 수 있으며, 항공기나 이동측정차량 등을 활용한다면 시공간적인 정보를 획득할 수 있어 최근 VOCs 모니터링 연구에 다수 활용되고 있다 (Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2013).

본 연구에서는 개별 VOC를 수초 단위로 측정, 자료를 제공해주는 양자전이질량분석기 (proton transfer reaction-time of flight-mass spectrometer, PTR-ToF-MS)를 활용하여 대산석유화학단지 인근 지역 개별 VOC의 농도분포를 검토하였다. 향후 본 연구자료는 대산석유화학단지에 대한 도심지역 선진과 개선대책 마련을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 시공간적 연구범위 설정

대산공단 인근 지역의 VOCs 농도분포를 알아보기 위해 고정측정과 이동측정으로 구분하여 수행하였다. 본 측정에서 앞서 대산항에 위치해 있는 방재기상장비 (automatic weather system, AWS) 자료를 기반으로



Fig. 1. View of measurement route for ML and stationary site.

주풍향을 분석하였고, 그 결과 북서풍이 주풍향으로 확인되었다(Seosan, 2020a). 고정측정은 주풍향과 주변 지형을 검토하여 대산석유화학단지에서 배출된 오염물질의 영향을 가장 크게 받을 것으로 예상되는 대죽1리 마을회관으로 선정하였다. 이동측정의 경우 대죽1리 마을회관을 기점으로 대산석유화학단지 둘레 길을 순회하는 도로를 대상으로 하였다.

이동측정은 PTR-ToF-MS를 이동 측정차량에 설치 후 고정측정장소인 대죽1리 마을회관(①)을 출발하여 대죽리 진입 교차로에서 우회전(②) 후 석유비축 기지를 지나 화곡리(③)에서 대죽일반산업단지 방향으로 진입 후 대산항을 거쳐 대산 컴플렉스 일반산업단지(⑥), 대산일반산업단지(⑧), 대산3 일반산업단지(⑨), 대산2 일반산업단지(⑩), 독곶2리 교차로(⑫)를 통과 후 ⑬번 위치에서 회차하여 다시 대죽1리 마을회관(①)으로 되돌아오는 경로 선정하였다. 이동측정 시 차량의 흡연유량과 장치 안전성 등을 고려하여 30~40 km/hr로 운전하였고, 1회 운행거리는 30 km, 소요시간은 1시간~1시간 10분이었다. 측정은 2019년 6월 9일 21시부터 14일 13시까지 5일간 수행하였고, 10일부터 11일까지 이틀간은 ML을 활용하여 이동측정 후 12일부터 14일까지는 대죽1리에서 고정측정하

였다. 그림 1은 고정측정장소인 대죽1리 마을회관과 AWS의 위치, 그리고 이동측정 경로를 나타낸 것이다.

## 2.2 측정장비 및 대상오염물질 선정

대산석유화학단지에서 배출되는 개별 VOC에 대해 실시간으로 데이터를 획득, 분석할 수 있는 PTR-ToF-MS (IONICON, Innsbruck, Austria)를 주 측정장비로 선정하였다. PTR-ToF-MS는 VOCs를 양자전이반응 (proton transfer reaction)을 통해 분석하며, 기존의 GC-MS 분석법에 비해 시료채취 및 전처리과정 없이 대기 중의 VOC를 초단위로 개별농도값을 분석할 수 있어 자동차 배기가스, 항공관측, SOA 기원분석 등 다양한 연구에 활용되고 있다(De and Warneke, 2006; Moser *et al.*, 2005; Hansel *et al.*, 1998; Lindinger *et al.*, 1998). 본 연구에서는 기존 석유화학단지 등에 대한 연구자료를 참고하여 석유정제공정에서 배출되는 주요 오염물질 15종을 선정하였고(Baek *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2018; Thepanondh *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2005; Jeon *et al.*, 2003), 각 개별물질에 대한 정보를 표 1에 정리하였다. 대상 개별물질에 대해서는 측정 전 표준시료와 고순도 청정공기를 사용하여 교정작업을 수행하였고, 각 물질별로 교정곡

**Table 1.** VOC target compounds of PRT-ToF-MS.

No.	Substance	CAS	Mass	ABB.	PA (Kcal/mol)	Formular
1	Propyne	74-99-7	40.0313	PPY	178.8	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>
2	Acetonitrile	75-05-8	41.0530	AN	186.2	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N
3	Propene	115-07-1	42.0810	PPE	179.6	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
4	Ketene	463-51-4	43.0184	KTN	197.3	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O
5	Acetaldehyde	75-07-0	44.0530	AA	183.8	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O
6	1,3-Butadiene	106-99-0	54.0916	13B	187.1	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>
7	2-Butene	624-64-6	56.1060	2B	178.5	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
8	Acetone	67-64-1	58.0419	AT	194.1	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
9	Isoprene	78-79-5	68.0626	ISP	198.9	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
10	MVK	78-94-4	70.0900	MVK	199.5	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O
11	MEK	78-93-3	72.1070	MEK	197.8	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O
12	Benzene	71-43-2	78.1140	BZ	179.3	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
13	Toluene	108-88-3	92.1410	TOL	187.4	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O
14	Styrene	100-42-5	104.1500	STR	200.3	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>
15	m,p-Xylene	106-42-3	106.1600	p-XYL	138	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>

선을 작성하여 장비의 정상가동 여부를 확인하였다. 다만 Ethylbenzene의 경우 검교정과정에서 데이터가 정확히 분류되지 않아 본 연구에서는 제외하였다. 그림 2는 각 개별물질에 대해 표준가스를 통해 교정을 수행한 결과이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 기상조건

측정기간 전체에 대한 평균온도는  $18.1 \pm 1.6^\circ\text{C}$ 로 최대온도는  $21.1^\circ\text{C}$ , 최저는  $15.9^\circ\text{C}$ 로 최대와 최소온도 차이는  $5.2^\circ\text{C}$ 였다. 습도는 80.2%로 높은 편이었으나 측정대상지역이 바닷가 앞이고, 계절상 습도가 높은 여름철에 해당하는 6월인 것이 반영된 결과로 판단된다. 강우는 측정기간동안 첫 날인 6월 10일 새벽 4~6 시경 총 3.5 mm 내린 후에는 맑은 날씨가 지속되었다. 평균풍속은  $1.4 \pm 0.9$  m/s로 주풍향은 지역의 주풍향과 같은 북서풍이었다. 그림 3은 측정기간 동안 대산항 앞에서 측정된 AWS 자료를 기반으로 바람장비를 나타낸 것이다(KMA, 2019). 6월 10일과 11일에는 주풍은 북서풍을 유지하고 있지만, 풍속이 3.4 m/s 이상의 강한바람이 동쪽으로부터 불어왔으며, 12일부터

바람이 잦아져 13일부터 14일까지는 무풍(Calm) 상태가 50%를 초과하는 대기 정체 현상이 나타났다.

#### 3.2 VOCs의 일변화 특징

석유화학단지는 다수의 유기화학물질을 사용하며, 배출량 또한 많아 다른 지역에 비해 높은 VOCs 배출 농도를 보인다(Mo *et al.*, 2015; Yen and Horng, 2009). 표 2는 본 연구에서 고정측정 위치인 대죽1리 마을회관에서 측정된 개별 VOC에 대한 결과를 나열한 것이다. VOC 개별물질 중 환경기준 항목인 benzene의 경우 국가 기준이 연평균 1.5 ppb인 것에 반해 측정기간 전체에 대한 평균 농도가 3.1 ppb로 약 2배 이상 높은 수준이었고, 순간 최대농도는 21.8 ppb로 14.5배 높게 나타났다. 전체적인 비율에서는 acetone이 14.7%로 가장 높은 비율을 보였고, acetaldehyde 14.2%, ketene 13.1%, propene 12.2% 순으로 확인되었다. 최대농도 대비 최소값의 비율은 acetaldehyde가 302배로 가장 큰 차이를 보였고, ketene 202배, styrene 119배, benzene 87배 등으로 배출비율이 높은 물질들이 상대적으로 최대/최소비율 또한 크게 나타났다.

표 3은 이동관측을 제외한 고정관측 데이터를 일평균 농도로 나타낸 것이다. 6월 9일과 10일, 12일은 각각 25.5 ppb, 25.2 ppb, 29.3 ppb로 나타난 반면 13일과

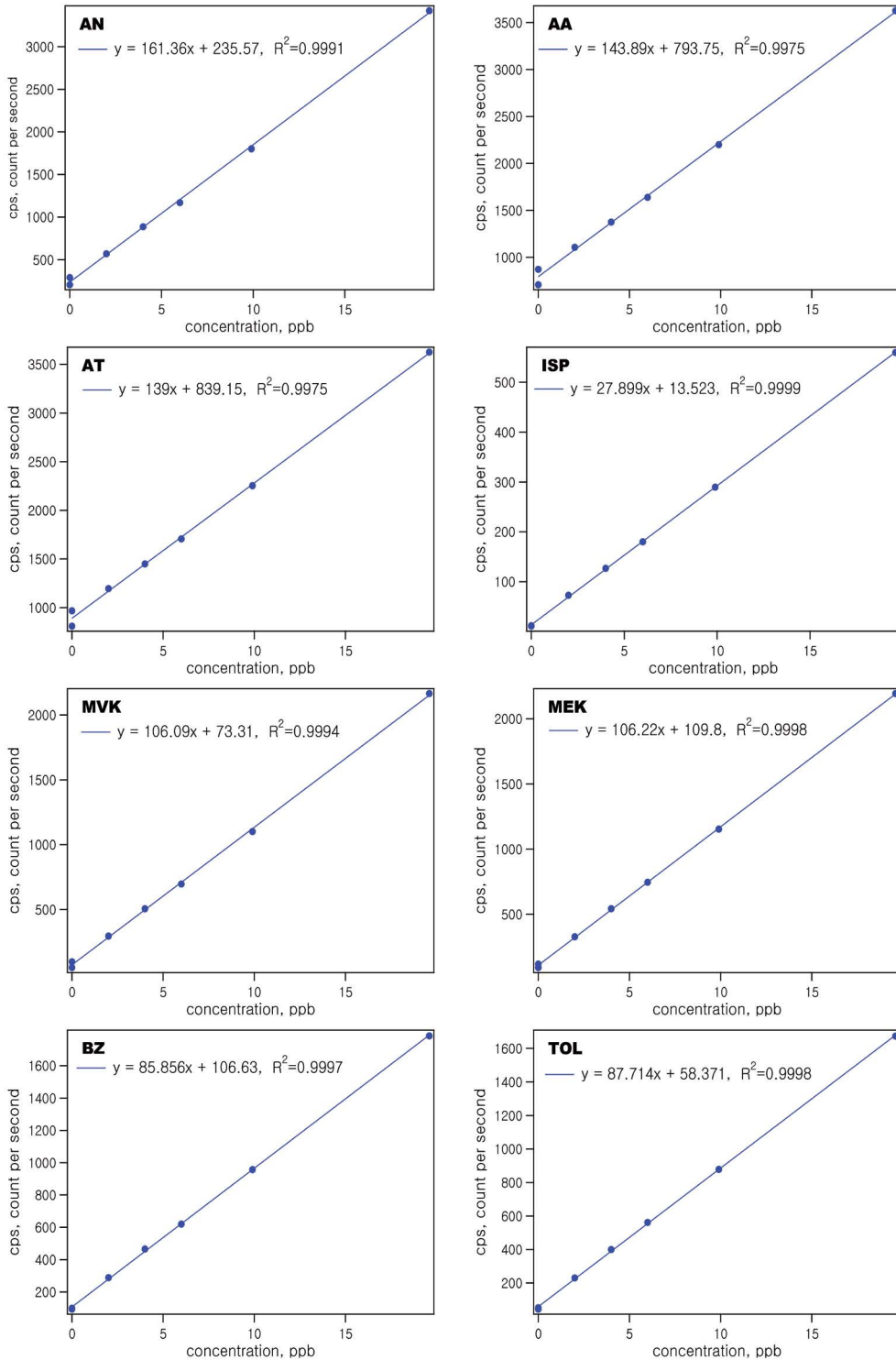


Fig. 2. Calibration sheet of PTR-ToF-MS.

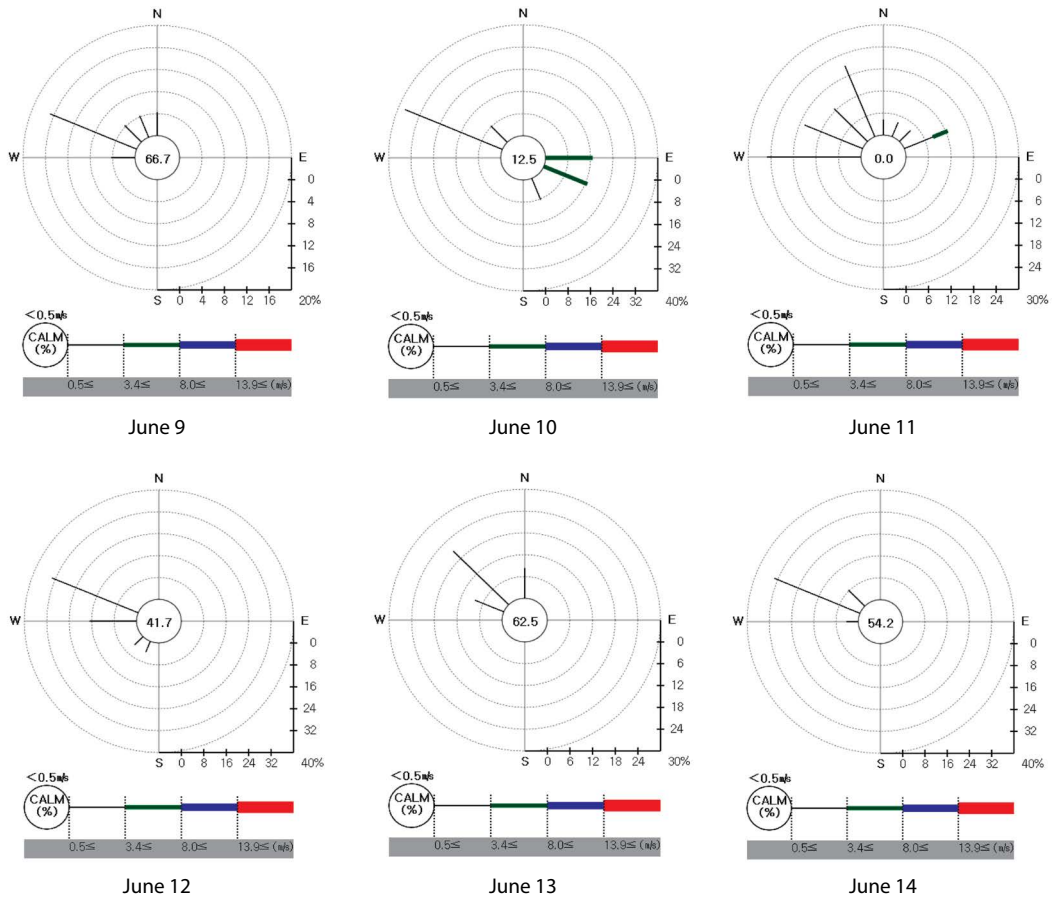


Fig. 3. Wind rose measured in Daesan port during measurement period.

14일은 그보다 높은 67.0 ppb와 70.8 ppb로 확인되었다. 농도가 낮게 나타난 3일에 비해 농도가 높게 나타난 2일의 농도가 약 2.6배 정도 높았다. 배출원으로부터 나온 오염물질은 자체적인 농도에 주변 환경영향(지형, 기온, 풍향, 풍속)에 따라 달라지게 된다. 앞서 측정지점의 풍향·풍속에 대한 조사결과 주풍은 측정대상기간 모두 북서풍으로 동일하였고, 풍속은 10일과 12일의 경우 일평균 2.7 m/s와 1.1 m/s로 나타났다. 반대로 9일과 13일, 14일은 일평균 풍속이 0.4~0.5 m/s로 무풍상태였고, 이 또한 전체 비율의 50% 이상을 차지하여 확산·희석이 더디게 진행되었을 것으로 예측된다. 동일한 풍향을 가진 조건에서 강한 바람이 불

어은 10일과 12일 대비 무풍상태가 지속된 13일과 14일의 농도가 높은 이유를 단순히 바람에 의한 확산·희석효과로 판단할 수 있다. 하지만 13일, 14일과 동일한 풍향·풍속을 보인 9일의 농도수준은 그 1/3 정도였다. 그림 4는 고정측정기간 측정된 VOCs에 대한 구성비를 나타낸 것이다. 앞서 농도가 낮은 9일과 10일, 12일의 경우 propene이 가장 높은 23.3~25.8%의 비율을 차지하고, 그 뒤를 이어 acetone > acetaldehyde > propyne, 1,3-butadiene 순으로 보인다. 하지만 농도가 높은 13일과 14일의 경우 propene의 비율이 6.9~9.0%로 급격히 감소하면서 acetaldehyde가 가장 높은 16.2~15.0%를 보였고, 이 외 ketene, benzene,

**Table 2.** Summary of VOCs concentration measured in stationary site.

(Unit: ppb)

No.	Substance	VOCs concentration					
		Mean	Percentage	S.D.	Min	Max	Max/Min
1	Propyne	4.79	10.1%	5.50	0.86	27.16	31.6
2	Acetonitrile	1.24	2.6%	0.32	0.81	2.27	2.8
3	Propene	5.79	12.2%	8.32	0.00	40.05	-
4	Ketene	6.23	13.1%	8.75	0.32	64.67	202.1
5	Acetaldehyde	6.74	14.2%	7.03	0.09	27.18	302.0
6	1,3-Butadiene	2.85	6.0%	3.98	0.66	25.75	39.0
7	2-Butene	2.99	6.3%	4.54	0.41	25.46	62.1
8	Acetone	6.96	14.7%	3.25	3.58	18.20	5.1
9	Isoprene	0.59	1.2%	0.38	0.24	2.06	8.6
10	MVK	0.50	1.1%	0.33	0.17	1.59	9.4
11	MEK	0.72	1.5%	0.40	0.22	2.05	9.3
12	Benzene	3.10	6.5%	4.31	0.24	20.76	86.5
13	Toluene	1.50	3.2%	1.63	0.18	7.28	40.4
14	Styrene	1.57	3.3%	2.61	0.09	10.72	119.1
15	m,p-Xylene	1.88	4.0%	2.29	0.23	9.61	41.8
Σ		47.45	100.0%				

**Table 3.** Daily concentration of each pollutants measured in stationary site.

(Unit: ppb)

Pollutants	Date	June 9	June 10	June 12	June 13	June 14
		Mean ± S.D.	Mean ± S.D.	Mean ± S.D.	Mean ± S.D.	Mean ± S.D.
Propyne		1.7 ± 0.6	2.1 ± 2.4	2.0 ± 1.8	6.9 ± 5.2	10.0 ± 8.1
Acetonitrile		1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.1 ± 0.7	1.4 ± 0.3	1.6 ± 0.4
Propene		6.5 ± 3.5	5.9 ± 7.0	7.6 ± 13.7	4.6 ± 3.4	6.3 ± 5.3
Ketene		0.9 ± 0.5	1.5 ± 2.3	0.6 ± 1.1	10.5 ± 10.1	8.2 ± 8.3
Acetaldehyde		4.3 ± 2.5	2.2 ± 1.7	3.5 ± 3.6	10.8 ± 7.4	10.6 ± 9.1
1,3-Butadiene		1.4 ± 0.4	1.3 ± 0.9	3.3 ± 6.6	3.3 ± 2.5	3.6 ± 2.1
2-Butene		1.0 ± 0.3	1.4 ± 2.2	1.4 ± 2.1	3.9 ± 4.5	6.5 ± 7.4
Acetone		5.4 ± 0.3	5.5 ± 1.3	4.8 ± 0.9	9.1 ± 4.1	9.1 ± 2.4
Isoprene		0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.8 ± 0.4	0.9 ± 0.5
MVK		0.3 ± 0.0	0.4 ± 0.3	0.3 ± 0.1	0.6 ± 0.4	0.8 ± 0.4
MEK		0.7 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.9 ± 0.5	1.1 ± 0.4
Benzene		0.8 ± 0.7	1.3 ± 3.0	1.8 ± 4.3	5.5 ± 5.1	3.9 ± 2.7
Toluene		0.6 ± 0.3	1.0 ± 1.3	1.0 ± 1.5	2.0 ± 1.7	2.4 ± 1.7
Styrene		0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.3	0.3 ± 0.7	3.1 ± 3.4	3.1 ± 2.9
m,p-Xylene		0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.5	0.8 ± 1.1	3.6 ± 3.0	2.7 ± 1.8
Σ		25.5	25.2	29.3	67.0	70.8

toluene, styrene, m,p-xylene의 비율이 증가하는 등 구 성비율이 다르게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 낮은 농도를 보인 9일, 10일, 12일 대비 13일과 14일 급격한 농도 증가를 보인 것은 풍속에 기인한 희

석·확산의 영향보다는 기존 대비 다른 특징을 가지는 배출이 추가되면서 나타난 결과로 판단된다.

VOCs는 배출원별 종류와 산업구조, 공정특성에 따라 다양한 분포를 나타내게 된다. 미국과 영국, 일본

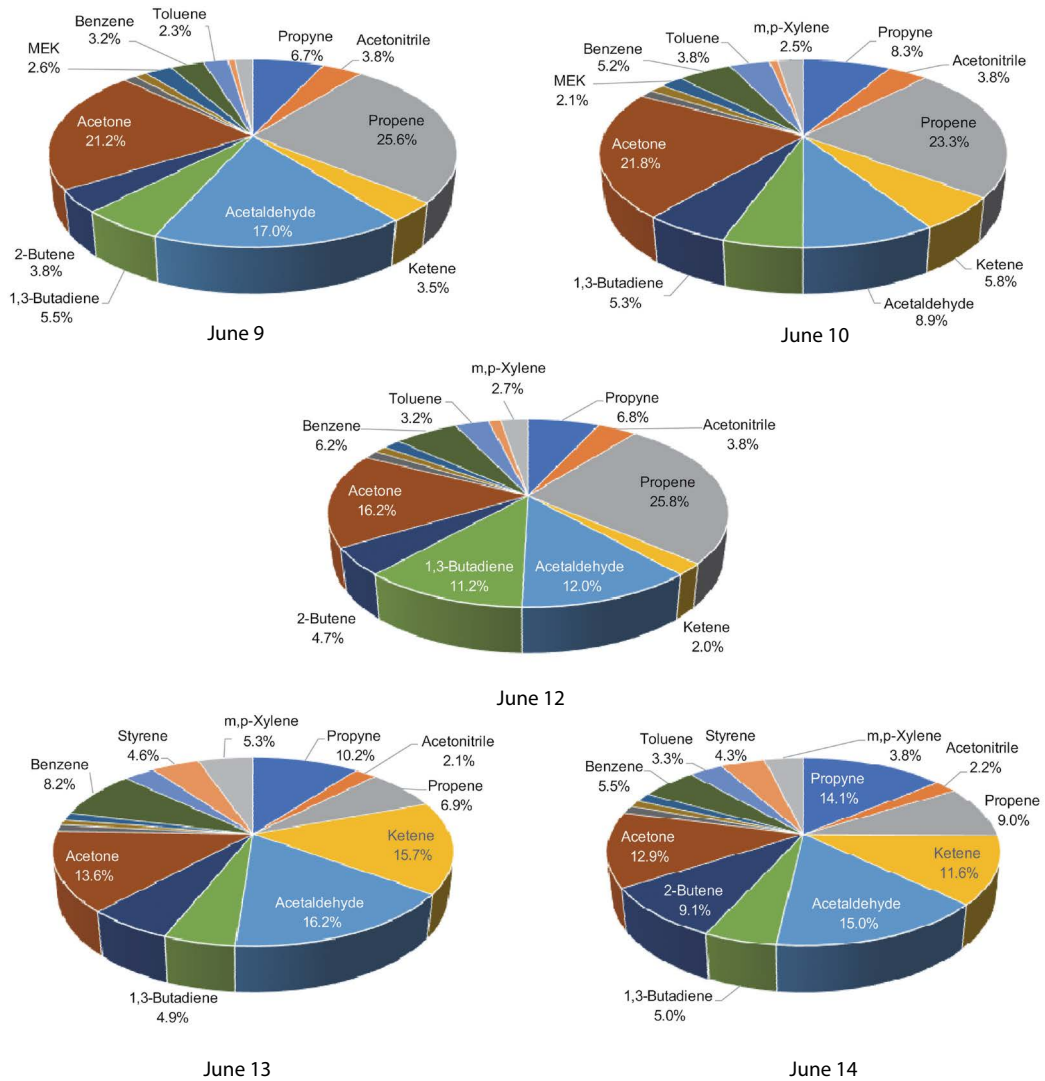


Fig. 4. Distribution ratio of each VOC measured during measurement period.

등 환경선진국들은 1990년도부터 VOCs에 대한 환경 기준을 설정하여 운영하고 있으며(U.S. EPA, 1997), 우리나라 또한 벤젠을 대상으로 연평균 기준을 설정하여 운영하고 있다. 표 4는 본 연구에서 측정된 benzene, toluene, m,p-xylene 농도와 타지역에서 수행된 연구 결과를 나타낸 것이다. 여수 석유화학단지에서 2003년과 2005년 각각 측정한 결과 benzene이 1.16 ppb와 1.32 ppb로 나타났고, toluene 1.85 ppb, 4.55 ppb, m,p-

xylene이 0.33 ppb와 0.27 ppb로 m,p-xylene의 농도가 상대적으로 낮고, benzene보다는 toluene의 농도가 높게 나타났다. 본 연구의 경우 benzene 3.10 ppb, toluene 1.50 ppb, m,p-xylene 1.88 ppb로 benzene이 toluene보다 약 2.1배 높게 나타났으며, m,p-xylene 역시 유사한 수준이었다. 하지만 그 외 포항과 구미, 대산, 하만, 평동 등 대부분의 산업단지에서 benzene보다 toluene의 농도가 최소 1.59배에서 최대 55.6배까지



**Table 4.** Measured VOCs concentration in this study and other cities.

(Unit: ppb)

Author	Year	Location	Site	Pollutants			
				Benzene	Toluene	m,p-Xylene	Sum
Jeon <i>et al.</i>	2003	Yeosu	Industrial	1.16	1.85	0.33	3.34
Jeon <i>et al.</i>	2005	Yeosu	Industrial	1.32	4.55	0.27	6.14
Baek <i>et al.</i>	2005	Pohang Gumi	Industrial	0.83	3.50	4.5	8.83
			Industrial	0.62	7.81	1.29	9.72
Jung <i>et al.</i>	2006	Nanjido Gyungasan	Landfill	31.8	259	10.4	301.2
			Landfill	2.5	34.4	10.2	47.1
Im <i>et al.</i>	2006	Ansan	Industrial	16.4	423	43.6	483
Park <i>et al.</i>	2006	Daegu Gyeonggsan	Roadside	1.18	20.4	1.87	23.45
			Sub-urban	0.89	4.31	0.87	6.07
Ryoo <i>et al.</i>	2010	Jeonju Gumam	Roadside	3.1	6.3	3.1	12.5
			Industrial	3.0	11.8	3.8	18.6
Baek <i>et al.</i>	2020	Daesan	Industrial	1.13	1.20	0.94	3.27
			Industrial	0.07	2.34	0.51	2.92
Kim <i>et al.</i>	2019	Daesan	Industrial	8.3	4.5	1.8	14.6
Kim <i>et al.</i>	2020	Haman Pyeongdong	Industrial	1.67	15.50	4.2	21.37
			Industrial	0.42	23.33	6.37	30.12
This study	2021	Daesan	Industrial	3.10	1.50	1.88	6.48

높은 것으로 나타났으며, 특히 대산에서 수행된 연구 4건 중 3건에서 benzene이 toluene보다 높고, m,p-xylene의 농도가 앞서 두 개 물질과 유사한 수준으로 나타났다. 선행 연구 결과와 본 연구 결과를 검토한 결과 대산석유화학단지의 공정이나 원료 사용 특성이 다른 지역과 상이할 것으로 예측되며, 산업단지 내 VOCs의 농도보다는 일부 매립지나 교통량이 많은 도로변의 농도가 더 높은 곳도 확인할 수 있었다.

그림 5는 고정측정기간 동안 측정지점에서 측정된 개별 VOC의 시간대별 배출특성을 나타낸 것으로 선으로 표시된 것은 실시간 측정농도이고, 막대그래프로 표시된 것은 시간평균농도이다. Benzene과 toluene, styrene, propene, propyne의 경우 12시경을 중심으로 농도의 변화는 있지만 주기적인 사용이 반복되는 반면, 1,3-butadiene이나 ketene의 경우 일부 구간에서만 배출이 확인되고 있다. 현재 공정시험법은 고

체흡착관을 활용하여 대상 지역에서 30분~1시간 동안 규정된 용량(1~4 L)을 포집하여 분석기기를 활용하여 분석하도록 하고 있다(ME, 2016). 공정시험법은 대상 지역에 대해 최대 1시간 정도의 영향만을 감지할 수 밖에 없으며, 이 또한 농도변화 특성은 배제된 상태에서 최대 1시간 정도의 평균농도만을 제시할 수 있다. 그러므로 공정시험법을 적용하여 측정 및 분석한다면, 본 연구에서 관측된 순간적으로 배출되고 있는 1,3-butadiene이나 ketene 등의 물질들에 대해서 잘못된 정보를 제공할 가능성이 있다. 공정시험법인 고체흡착법은 포집시간대의 정확한 농도값을 제공해 줄 수 있지만 반대로 대표성이 떨어지는 시간대에 포집이 이루어진다면 잘못된 정보를 제공할 수 있으므로 현장 측정은 이에 대한 사전조사와 대표시간을 고려한 측정분석이 필요할 것으로 판단된다.

그림 6은 개별 VOC에 대해 시간대별 일변화 특징

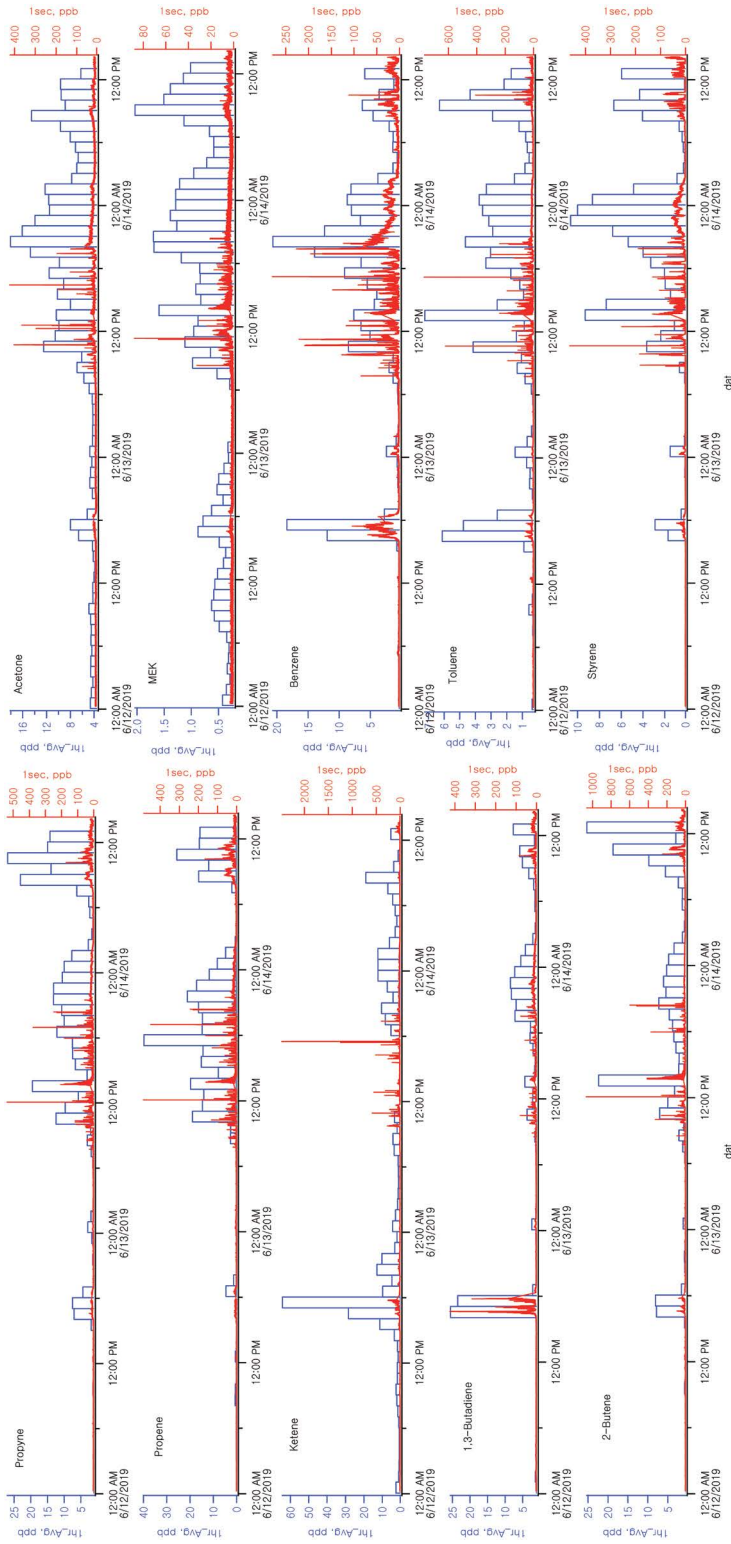


Fig. 5. Comparison of each VOC measured in stationary site.

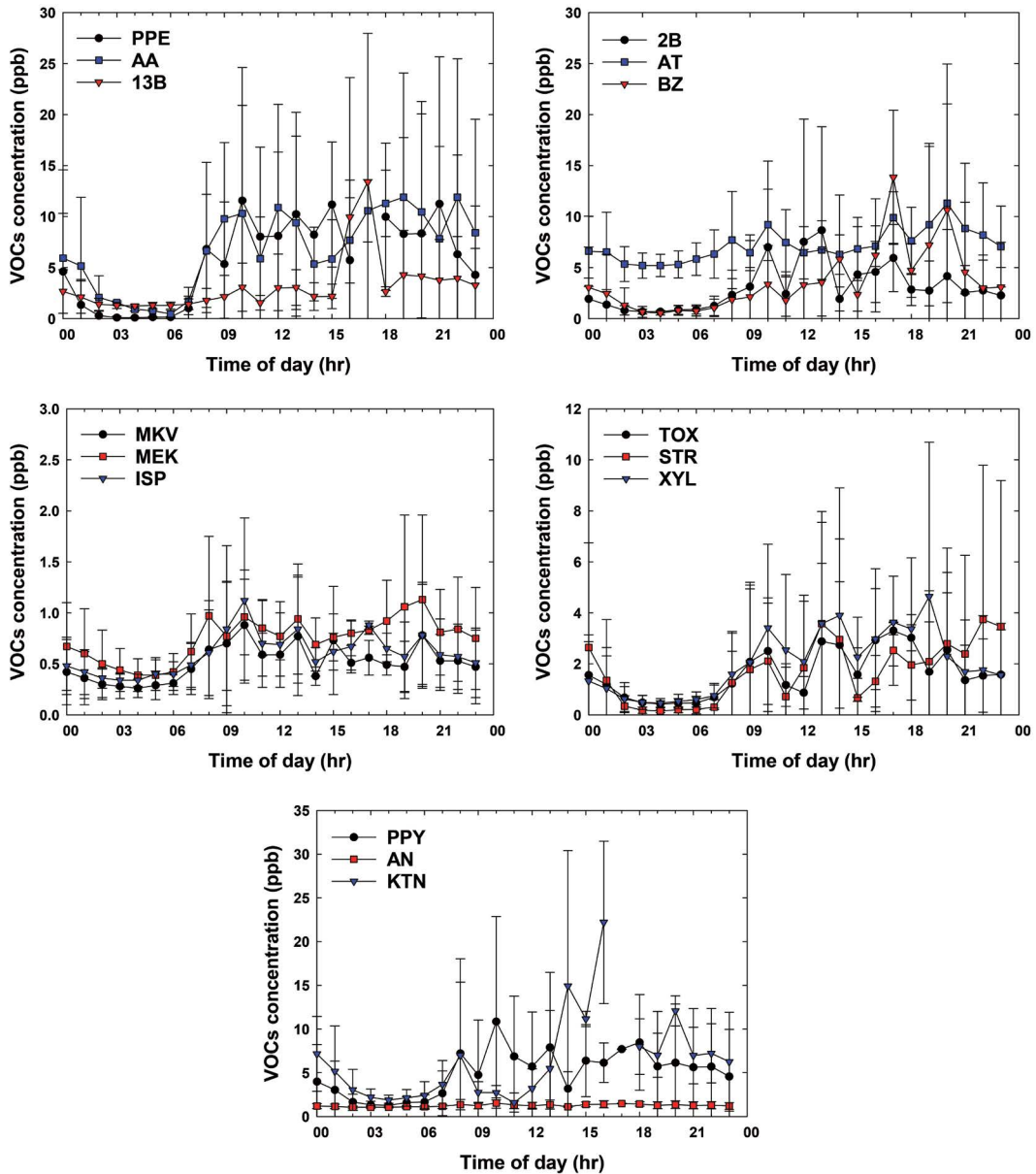


Fig. 6. Diurnal variation of VOCs concentration.

을 나타낸 것이다. 대부분의 오염물질이 0시를 기준으로 6시경까지 감소하다가 6시를 기점으로 증가하기 시작하고, 10~11시경 피크를 찍고 13~15시까지 감소 후 다시 증가하여 19~20시경을 2차 피크를 보인 뒤 감소하는 경향을 보인다. 이는 기존 도시권에서 나

타던 생활오염원 패턴과 유사한 결과이지만 도시권의 경우 대부분 일정한 경향을 보이면서 각 값들의 편차가 적게 나타나는 반면, 본 연구 결과에서는 새벽시간대를 제외한 대부분의 구간에서 평균농도 대비 편차가 큰 것으로 나타나 주중 공정이라 하더라도 매일



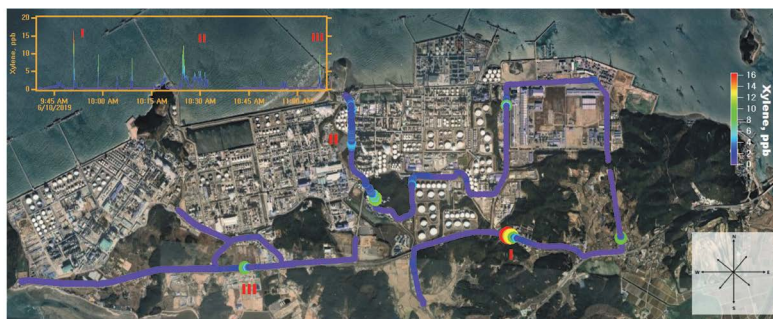
(a) TVOC



(b) Benzene



(c) Toluene



(d) m,p-Xylene

**Fig. 7.** Mapping results of VOCs measured using mobile laboratory.

**Table 5.** Results of BTEX measured near petrochemical industrial complex.(Unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Year	Site	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	m,p-Xylene	O-Xylene	Stylene	
Guideline ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Local Nation	3 (0 ppb) 5 (1.5 ppb)			None None			
2017	Landfill	1 <sup>st</sup> half	1.19	1.66	0.97	1.97		
		2 <sup>nd</sup> half	3.09	2.72	1.24	2.33		
	Village hall	1 <sup>st</sup> half	1.98	1.26	0.68	1.1		
		2 <sup>nd</sup> half	0.91	1.91	0.4	0.7		
	Intersection		1.73	1.7	0.6	1.18		
Institute		0.74	1.85	0.7	0.7			
2018	Landfill	1 <sup>st</sup> half	7.2	4.5	1.6	8.4	1	7.4
		2 <sup>nd</sup> half	12.6	7.5	2.3	5.7	0.3	34
	Village hall	1 <sup>st</sup> half	0.9	1.4	0.6	0.4	0.2	
		2 <sup>nd</sup> half	2.5	4.8	0.9	1.1	0.2	1.5
	Inter section	1 <sup>st</sup> half	3.9	2.4	0.6	1.2	0.3	0.9
		2 <sup>nd</sup> half	3.7	6.6	1.1	1.6	0.3	1.3
	Han express		5.5	1.66	0.44			0.9
Han express		1.1	0.4	0.1			0.1	
2019	Han express		2.8	5.5	1.2	1.3	0.3	0.8
	Chemical center		2.4	3.3	0.9	1.2	0.5	1.4
	Han express		14.3	8.6	10.4	11.8	5.7	
	Village hall		1.3	1.3	1.4	0.5	0.2	0.5
	Landfill		26.4	13.8	8.2	25.6	1.5	

조업조건이나 기상 등 주변 환경조건에 의한 변화폭이 매우 크다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 석유화학단지 인근 지역의 VOCs 공간분포

그림 7은 실시간 측정장비를 이동측정차량에 싣고 석유화학단지 인근을 운행하며 지역적 오염도 수준을 조사한 결과 중 본 연구에서 대표물질로 선정한 TVOCs, benzene, toluene, m,p-xylene의 농도분포를 나타낸 것이다.

그림에 표시된 로마숫자 I~III은 각 측정별로 고농도 지역으로 선정된 곳을 나타낸 곳으로 I 지역은 유류저장 탱크로리 인근 입구 부근이고, II 지역은 쓰레기 매립장, III 지역은 대산 제2일반산업단지 입구이

다. 측정결과 오염물질별로 차이가 있지만 II 지역인 쓰레기매립장 부근에서 가장 높은 농도 수준을 보였고, III, I순으로 나타났다. II 지역의 경우 기준에 충청남도 보고서에도 2018년 이후 꾸준히 벤젠농도가 증가하고 있는 것으로 나타났으며(표 5), 2020년에는 최대  $26.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국가 평균농도 기준인  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 5.3배 높은 것으로 확인되었다. 쓰레기매립지의 경우 산업단지에서 각 종 석유화학공정에서 사용되고 폐기되는 물질을 모아 폐기하는 곳으로 다양한 조건에서 활용되면서 VOCs에 노출된 물질들이 모여 농축되면서 높은 농도를 보인 것으로 판단된다(Seosan, 2020b; Chungcheongnam-do, 2019). III 지역은 대죽자원비축 국사산업단지 입구로 석유탱크로리에 다량의 석유

원료가 보관 중에 있는데 여기에 있는 원료가 밀폐되지 못하고 주변으로 확산되면서 고농도를 보인 것으로 판단된다. 마지막 I 지역은 대산 제2일반산업단지 입구지역(독곶1 교차로)으로 대산에 위치한 5개의 대형배출사업장 중 2개소가 위치하고 있어 상시 교통량이 많으며, 주변 지역이 골짜기 지대로 주풍인 북서풍이 불 경우 지역적 고농도 수준을 보이는 것으로 판단된다. 한 예로 Kim *et al.* (2019)이 동일 장소에서 고정측정을 실시하였는데 주풍인 북서풍 바람이 불 때 주변 골짜기 지역에 위치한 고정측정지점의 농도가 고농도로 증가하는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

대산산업단지는 전국 3대 석유화학단지 중 하나로 다양한 VOCs 물질들이 혼재되어 배출되고 있어 지역 주민건강 및 대기질 악화에 영향을 미치고 있다. 지역 배출특성 조사를 위해 다양한 선행연구가 진행되어 왔지만 공정시험법을 활용한 지역 농도 수준 조사가 대부분을 차지하고 있다. 하지만 대기 중에 배출되면 휘발성이 강해 쉽게 희석, 확산되는 VOCs의 특성을 고려한 조사가 필요한 만큼 초단위로 실시간 측정이 가능한 PTR-ToF-MS 및 이동측정차량을 활용한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 고정측정결과 대기환경기준물질인 benzene의 경우 기준농도인 연평균 1.5 ppb보다 2.1배 높은 3.1 ppb 수준으로 확인되었고, 순간 최대농도는 21.8 ppb로 약 14.5배 높은 수준이었다. 전체적인 조성에서는 acetone이 가장 높은 14.7%의 비율을 보였고, 최소농도 대비 최대농도 차이는 acetaldehyde가 302배로 가장 높게 나타났으며, benzene 역시 87배로 상당한 농도변화 폭을 보였다.
2. 고정측정결과를 기반으로 VOCs 물질 중 benzene, toluene, m,p-xylene을 기준으로 타지역의 농도 수준과 비교하였는데, 대조군으로 선정된 타지역 산업단지보다는 대산의 쓰레기매립장의 농도가 높게

나타났으나, 이는 일부 교통량이 많은 도로변(대구, 경산)의 VOCs 농도와 유사한 수준이었다.

3. 일반산업단지의 경우 toluene의 농도가 가장 높고, benzene과 미량의 m,p-xylene이 검출되는 수준이었으나, 대산의 경우 선행된 연구 결과를 포함 4개 경우 중 본 연구를 포함한 3개 연구에서 toluene보다 benzene의 농도가 높고, m,p-xylene의 농도 또한 benzene, toluene과 유사한 수준인 것으로 나타나 대산석유화학단지의 경우 다른 지역과 상이한 공정특성을 가지는 것으로 판단된다.
4. 일변화 특징 분석결과 6시를 기점으로 VOCs의 농도가 상승하고, 12시 전후와 19시경 피크를 보이는 일반적인 도시의 도로변 오염특성과 유사한 경향을 보였고, 이는 산업단지에서 배출되는 오염물질 외에 산단으로 출퇴근하거나 납품하는 자동차에서 배출되는 오염원의 영향도 다수 받고 있다는 것을 의미한다.
5. 시간대별 농도분포를 검토한 결과 편차가 크게 나타나기 때문에 공정시험법을 활용한 데이터 획득 시 측정 시간대 선정에 따라 상이한 결과를 도출할 수 있다는 것을 확인하였다.
6. 대산석유화학단지 인근 지역을 이동측정하여 지역적 농도분포를 검토한 결과 쓰레기매립장 지역이 가장 높은 농도 수준을 보였고, 원료보관 탱크로리 인근과 독곶1 교차로 부분이 높게 나타나 이 지역들에 대한 세부적인 조사와 원인 규명이 필요한 것으로 확인되었다.

측정에 많이 활용되고 있는 실시간 측정방법에 비해 기존의 정적인 공정시험방법은 정확한 측정값을 제공해준다. 하지만 대산석유화학단지과 같이 VOCs가 주요 배출원인 지역은 배출물질이 쉽게 변화, 확산되기 때문에 대표성 있는 자료확보가 어렵고, 측정시간대에 따른 지역 농도 수준이 다르게 판별될 수 있다. 최근 기술의 발달과 연구역량 증진에 따라 활용되고 있는 실시간 측정장비나 이동관측장비는 지역적 시공간분포를 확인할 수 있어 지역적 오염특성분석과 대책 수립에 많은 도움을 줄 수 있다. 향후 이러한 장

비들의 장점을 활용한 연구가 지속적으로 수행되고 자료가 축적된다면 대기질 개선대책 마련을 위한 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 충남녹색환경지원센터의 2021년도 연구 개발사업 “대산공단 인근 지역 악취 모델링 연구”와 (주)에이피엠엔지니어링의 지원을 받아 수행된 연구이며, 측정에 협조해 주신 모든 분들께 감사드립니다.

## References

- Baek, S.O., Kim, S.H., Kim, M.H. (2005) Characterization of Atmospheric Concentrations of Volatile Organic Compounds in Industrial Areas of Pohang and Gumi Cities, *The Korean Society of Environmental Toxicology*, 20(2), 167-178, (in Korean with English abstract).
- 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 complex: 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>
- Ban, J., Park, T., Kang, S., Kahng, S.H., Khang, B., Lee, T. (2019) Development of Particle Condensation System (PCS) Sampler for Semi-continuous Measurements of Water Soluble Aerosol Chemical Composition, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 802-814, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.802>
- ChunNam Institute (CNI) (2019) Atmospheric Environment Impact Survey in Daesan Industrial Complex, (in Korean).
- Chungcheongnam-do (2019) Result of Atmospheric Environmental Monitoring using Mobile Laboratory, [http://www.chungnam.go.kr/cnnet/board.do?mnu\\_url=/cnbbs/view.do](http://www.chungnam.go.kr/cnnet/board.do?mnu_url=/cnbbs/view.do) (accessed on Jul. 25, 2019).
- 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.
- Ducan, B.N., Lamsal, L.N., Thompson, A.M., Yosida, Y., Lu, Z., Streets, D.G., Hurwitz, M.M., Pickering, K.E. (2016) A space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO<sub>x</sub> pollution around the world (2005-2014), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 976-996. <https://doi.org/10.1002/2015JD024121>
- Hansel, A., Jordan, A., Warneke, C., Holzinger, R., Lindinger, W. (1998) Improved detection limit of the proton-transfer reaction mass spectrometer: on-line monitoring of volatile organic compounds at mixing ratios of a few pptv, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 12, 871-875.
- Im, M.S., Kim, K.H., Choi, Y.J., Jeon, E.C. (2006) Emission Characteristics of VOC due to Major Industrial Activities in the Ban Wall Industrial Complex, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(3), 325-336, (in Korean with English abstract).
- Jeon, J.M., Hur, D., Kim, D.S. (2003) Trends of volatile organic compounds in the ambient air of Yeosu industrial complex, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(6), 663-677, (in Korean with English abstract).
- Jeon, J.M., Hur, D., Kim, D.S. (2005) Development of source profiles and estimation of source contribution for VOCs by the chemical mass balance model in the Yeosu petrochemical industrial complex, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(1), 83-96, (in Korean with English abstract).
- Jung, S.W., Kim, Y.J., Jang, S.J., Kim, K.H., Hong, J.H., Kim, J.C., Sunwoo, Y. (2006) Estimation of VOCs Emissions Based on BTEX Compounds from Landfill Sites in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(2), 209-222, (in Korean with English abstract).
- Kim, J.B., Park, D., Park, S.C., Michael, V., Lee, Y., Lee, S.S., Park, J.S., Kim, J.H. (2019a) 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. (2013) 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., 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 complex of Gwangju, *Journal of Environmental Science and International*, 29(5), 479-494, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.5.479>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019) KMA weather data service, Open MET data portal. URL: <https://data.kma.go.kr> (accessed on Sep. 9. 2021).
- Krol, S., Zabiegala, B., Namiesnik, J. (2010) Monitoring VOCs in atmospheric air II. Sample collection and preparation, *Trends in Analytical Chemistry*, 29(9), 1101-1112.
- Lindinger, W., Hansel, A., Jordan, A. (1998) On-line monitoring of volatile organic compounds at pptv levels by means of proton-transfer-reaction mass spectrometry (PTR-MS)- Medical applications, food control and environmental research, *International Journal of Mass Spectrometry*, 173, 191-241.
- Liu, Y., Shao, M., Fu, L.L., Lu, S.H., Zeng, L.M., Tang, D.G. (2008) Source profile of volatile organic compounds (VOCs) measured on China: part I, *Atmospheric Environment*, 42, 6247-6260. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.070>
- Lee, B.J., Park, S.S. (2019) Temporal and Spatial Variabilities of Concentrations of Criteria Air Pollutants during Early Summer in 2018 in South Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.265>
- Ministry of Environment (ME) (2016) Methods for determination of hazardous and volatile organic compounds in ambient air-adsorbent trap method (in Korean).
- Ministry of Environment (ME) (2020) National Air Pollutants Emission 2017 (in Korean).
- Mo, z., Shao, M., Lu, S., Qu, H., Zhou, M., Sun, J., Gou, B. (2015) Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze river Delta, *Science of The Total Environment*, 533(15), 422-431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.089>
- Molhave, L. (1991) Volatile organic compounds, Indoor air quality and health, *IndoorAir*, 1(4), 357-376. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1991.00001.x>
- Moser, B., Bodrogi, F., Eibl, G., Lechner, M., Rieder, J., Lirk, P. (2005) Mass spectrometric profile of exhaled breath field study by PTR-MS, *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 145(2-3), 295-300.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Introduction to the KORUS-AQ rapid science synthesis report.
- Park, H.J., Kim, S.Y., Hong, Y.D., Han, J.S., Kim, S.W., An, S.M. (2014) Comparison of BVOC fluxes between forest and atmospheric with different estimation methods, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 17(1), 10-20, (in Korean with English abstract).
- Park, J.C., Kim, S.T., Lee, K.S. (2005) A study on the VOCs emission characteristics in the manufacture of other chemical products, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 4(4), 223-233, (in Korean with English abstract).
- 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, 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<sub>1.0</sub> 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).
- Seosan (2020a) 26th Seosan statistical yearbook (in Korean).
- Seosan (2020b) Influence analysis of petrochemical industrial complex area for designation of Atmospheric conservation special measures area (in Korean).
- Shen, L., Xiang, P., Liang, S., Chen, W., Wang, M., Lu, S., Wang, Z. (2018) Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial pro-



- cess in Wuhan, Central China, *Atmosphere*, 9, 297. <https://doi.org/10.3390/atmos9080297>
- Son, B., Breyse, P., Yang, W. (2003) Volatile organic compounds concentration in residential indoor and outdoor and its personal exposure in Korea, *Environment International*, 29(1), 79-85. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00148-4](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00148-4)
- Son, D.H., An, J.G., Ha, S.Y., Kim, G.B., Yim, U.H. (2018) Development of real-time and simultaneous quantification of volatile organic compounds in ambient with SIFT-MS (selected ion flow tube-mass spectrometry), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 393-405, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.669>
- Son, S.C., Park, S., Bae, M., Kim, S. (2020) A study in characteristics of high PM<sub>2.5</sub> pollution observed around large-scale stationary sources in Chungcheongnam-do province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 669-687, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.393>
- Thepanondh, S., Varronphan, J., Sarutichart, P., Makkasap, T. (2011) Airborne volatile organic compounds and their potential health impact on the vicinity of petrochemical industrial complex, *Water, Air, & Soil Pollution*, 214, 83-92. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0406-0>
- United State Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1997) *Compendium Method TO17: Determination of Volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes.*
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1999) *Compendium method TO-15 determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in air collected in specially-prepared canisters and analyzed by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry (GC/MS).* EPA/625/R-96/010b.
- Yen, C.H., Horng, J.J. (2009) Volatile organic compounds (VOCs) emission characteristics and control strategies for a petrochemical industrial area in middle Taiwan, *Journal of Environmental Science and Health, Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 44(13), 1424-1429. <https://doi.org/10.1080/10934520903217393>

## Authors Information

- 김창혁 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)  
 김정호 (㈜미세먼지연구소 소장)  
 노수진 (연세대 환경공해연구소 박사후연구원)  
 이선엽 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)  
 윤수향 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)  
 이상신 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구위원)  
 박종성 (국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구사)  
 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)