



논문

실시간 측정장비를 활용한 석유화학단지 입자상오염물질 및 휘발성유기화학물의 농도 특징

Concentration Characteristics of Particulate Matter and Volatile Organic Compounds in Petrochemical Industrial Complex using Real-time Monitoring Devices

김중범¹⁾, 박덕신¹⁾, 박세찬^{1),2)}, Micheal Versoza^{1),2)}, 이용일³⁾, 이상신, 박종성⁴⁾, 김정호^{5),6),*}

충남연구원 서해안기후환경연구소, ¹⁾한국철도기술연구원 교통환경연구팀, ²⁾과학기술연합대학원대학교 (UST) 교통시스템공학과, ³⁾서울교통공사 보건환경처, ⁴⁾국립환경과학원 기후대기연구부, ⁵⁾(주)에이피엠엔지니어링, ⁶⁾(주)미세먼지연구소

Jong Bum Kim, Duckshin Park¹⁾, Sechan Park^{1),2)}, Versoza Michael^{1),2)}, Yongil Lee³⁾, Sang Sin Lee, Jong-Sung Park⁴⁾, Jeongho Kim^{5),6),*}

Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

¹⁾Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Republic of Korea

²⁾University of Science and Technology, Transportation System Engineering, Daejeon, Republic of Korea

³⁾Health & Environment Department, SeoulMetro, Seoul, Republic of Korea

⁴⁾Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environment Research, Incheon, Republic of Korea

⁵⁾APM Engineering Co., Ltd., Bucheon, Republic of Korea

⁶⁾Fine Particle Lab. Co., Ltd., Incheon, Republic of Korea

접수일 2019년 8월 6일
 수정일 2019년 9월 17일
 채택일 2019년 10월 11일

Received 6 August 2019
 Revised 17 September 2019
 Accepted 11 October 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)32-227-0033
 E-mail : jeonghoflux@naver.com

Abstract Different air pollutants are being exhausted from the petrochemical industrial complex because of using various chemical substances. Some of these pollutants are volatile organic compounds (VOCs), with the likes of benzene that has carcinogenic properties. In this study, the research focused on monitoring daily variation of air pollutants such as VOCs, particulate matter (PM), and black carbon (BC). Real-time monitoring devices, including Portable Gas-chromatography for VOCs, were used and placed nearby petrochemical industrial plants. Results showed that PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were at low concentrations both measuring point and air quality monitoring station (AQMS). Moreover, BC concentrations were at low levels as well as other forms of VOCs were found to be lower than the national or international standard guideline. However, the concentration of Total VOC and Benzene were 46.1 ± 42.2 ppb and 2.6 ± 3.5 ppb, respectively. The National standard of benzene is 1.5 ppb (5 µg/m³) per year average, and the results of this study sometimes exceed it. This study would suggest that the need for a real-time monitoring system is a must because high concentrations were detected on a daily basis. Furthermore, additional research on carcinogenic substances such as benzene and 1.3-butadiene was detected even in the area with great distances from petrochemical plants.

Key words: Petrochemical industrial complex, Air pollutants, VOCs, Benzene, Real-time monitoring

1. 서론

산업단지는 1962년 제1차 경제개발 5개년 계획에

따라 1962년 울산공업기지와 1964년 구로공단 조성을 시작으로 우리나라의 경제성장의 원동력이 되어 왔다(KICOX, 2017). 현재 우리나라의 산업단지 현황

을 살펴보면 2019년 1분기 기준 전국 17개 권역에 1,206개의 산업단지가 조성되어 있으며, 전국 생산량의 54.0%와 수출량의 51.3%를 차지하고 있다(KICOX, 2019). 이와 같이 산업단지는 저렴한 관리운영비, 정부의 재정적 지원, 각종 규제에 대한 대응이 용이한 장점으로 증가하였으나 환경적인 측면에서는 개별 점 오염원들이 모여 거대 면오염원을 형성하기 때문에 배출원 관리의 어려움이 있다. 특히 다양한 화학물질들을 제조, 가공 및 생산하는 석유화학단지의 경우 미세먼지(particulate matter less than 10 μm , PM₁₀)와 이산화질소(Nitrogen dioxide, NO₂), 이산화황(Sulfur dioxide, SO₂), 일산화탄소(carbon monoxide, CO)와 같은 기준성 대기 오염물질 이외에 휘발성이 크고 상대적으로 독성이 강한 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)이 다수 배출되고 있어 이에 대한 관심과 관리가 요구되고 있다. VOCs는 대기 중 오존(Ozone, O₃), NO₂ 및 산화제와 반응하여 2차 유기 에어로졸(secondary organic aerosol, SOA)을 형성하여 대기오염에 영향을 미치고(Carlton, 2009; Kroll and Seinfeld, 2008; Turpin and Huntzicker, 1995), 보건학적으로 Benzene, Toluene, Butadiene 등을 포함한 VOCs는 면역체계와 중추신경계, 피부, 호흡기계, 간 등에 악영향을 미치는 유해물질로 알려져 있다(Kim and Yoo, 2017). 또한 미국산업위생전문가 협의회(American conference for governmental industrial hygienists, ACGIH)에서는 VOCs 중 Benzene을 인체 발암확인 물질(group A1)로 분류하였고, 트리클로로에틸렌(TrichloroEthylene, TCE)을 인체 발암성 의심 물질(group A2)로, 테트라클로로에틸렌(TetrachloroEthylene, PCE)과 Epichlorhydrin, Ethylbenzene 등을 동물 발암성 확인물질(group A3)로 지정하여 관리하고 있다(Moradpour *et al.*, 2017). 하지만 이러한 VOCs는 산업전반에 걸쳐 다양한 용도와 목적으로 석유화학산업, 반도체산업, 자동차 도장, 도료제조, 인쇄업, 피혁 산업 등의 생산 공정에서 사용되고 있으며, 일반 생활과 밀접한 관련이 있는 세탁소 및 주유소에서도 다수 발생하는 것으로 알려져

있다(Park *et al.*, 2005).

대량의 화석연료를 사용하여 다양한 종류의 화학물질 생산 및 가공이 수반되는 석유화학단지의 경우 이로 인한 대기오염 및 환경영향을 고려하여 세심한 관리와 주의가 필요하다. 석유화학단지의 영향으로 인한 다양한 연구들이 수행되어 왔으며, Moradpour *et al.* (2017)은 석유화학단지 내 근로자 716명을 대상으로 개인 시료를 채취·건강영향을 조사하였고, 그 결과 현장에서 석유화학물질을 직접적으로 취급하는 근로자와 정비공, 연구실 종사가 일반 사무직에 비해 최대 15배까지 높은 농도에 노출되고 있는 것으로 보고하였다. 또한 석유화학단지 내부와 인근 주거지역을 조사하여 기존 산업단지 대상 연구결과와 건강영향과의 상관성을 분석한 결과에서는 폐와 관련된 높은 유병율을 보였다(Lin *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2016; Mohan, 2012; Thepanondh *et al.*, 2011; Tiwari *et al.*, 2010). Cui (2016)과 Chen *et al.* (2014)는 공정별 VOC의 노출경로 조사 결과 각 이음새의 연결부위에서 가장 많은 노출이 확인됐으며, 대부분 Alkane 계열인 것으로 나타났다. 일부 연구에서는 산업단지 배출물질에 의한 대류권 내 SOA 생성의 주요 전구물질로 VOCs를 지목하였고, 이렇게 생성된 SOA가 대기질 뿐만 아니라 기후변화에 영향을 미치고 있어 이에 대한 인식 재고의 필요성을 강조하였다(Ragothaman and Anderson, 2017; Chen *et al.*, 2006; Cetin *et al.*, 2003; Ryerson *et al.*, 2003). 환경부는 2010년도부터 VOCs 중 벤젠을 대기환경기준물질로 포함하였으며, 관리기준으로 연평균 농도를 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정하여 운영해오고 있으나(ME, 2010), 규제라기보다 관리목표에 가깝다. 국내에서는 VOCs 자체에 대한 주변 대기환경이나 건강영향 보다는 정부에서 권고하고 있는 대기환경기준 초과 여부나 악취관련 원인 규명을 위한 연구가 많이 수행되고 있다(Choi *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2010; Hur *et al.*, 2006; Seo *et al.*, 2005). 이러한 연구들에서는 공정시험방법에서 지정하고 있는 고체흡착제 포집 후 GC-MS(gas chromatography mass spectrometer) 등을 활용하여 분석하는 방법을



Fig. 1. Location of measurement position, AQMS, and AWS.

채택하고 있다. 이러한 방법들은 정확한 값을 제시해 줄 수 있다는 장점이 있으나 시료포집시간이 길게 소요됨에 따라 휘해성이 높은 물질들에 대한 첨두값 (Ceiling value)을 확인할 수 없고, 장시간 포집 분석에 의하여 오염물질이 상쇄되는 효과를 가져 올 수 있다. 최근 양자전이 비행시간질량분석기 (proton transfer reaction-time of flight mass spectrometer, PRT-ToF-MS) 등을 활용하여 도시 대기 중 VOCs 등을 실시간 측정하여 오염도 변화를 분석한 연구가 일부 수행되긴 하였지만 (Park *et al.*, 2018), 아직 VOCs의 농도변화가 큰 석유화학단지와 같은 곳에서 실시간 분석장비를 활용한 연구자료는 많이 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 석유화학단지를 대상으로 실시간 측정장비를 활용, 석유화학단지의 주요 오염물질인 입자상 오염물질과 VOCs의 시간적 분포와 일변화 특성을 고찰하였으며, 해당 지역의 주민 건강보호 및 VOCs 관리 대책을 수립하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 측정위치 및 기상개황

그림 1은 연구대상지역인 석유화학단지와 측정지점 및 주변 국가측정망의 위치를 나타낸 것이다. 석유화학단지는 다수의 항만 시설과 함께 서해안 바닷가와 인접하며, 동서로 8.5 km, 남북으로는 2.4 km로 길게 장방형의 입지를 가진다. 해당 산업단지는 국가의 계획하에 조성된 국가산업단지가 아니라 사기업들이 모여 조성된 일반산업단지가 주를 이루기 때문에 아직도 영역 확장과 공정 개선이 수시로 이루어지고 있는 특징이 있다. 측정위치는 산업단지 인근 마을 회관 옥상으로 선정하였으며, 석유화학단지로부터 배출된 오염물질들이 마을 입구의 계곡을 타고 유입되는 형태로 오염피해를 가장 많이 받을 것으로 예상되는 지점이다. 측정대상지점과 산업단지 사이에는 산업단지로 화물을 운송하는 대형차의 주요 입·출입 산업도로가 위치하고 있으며, 측정대상 마을회관 입

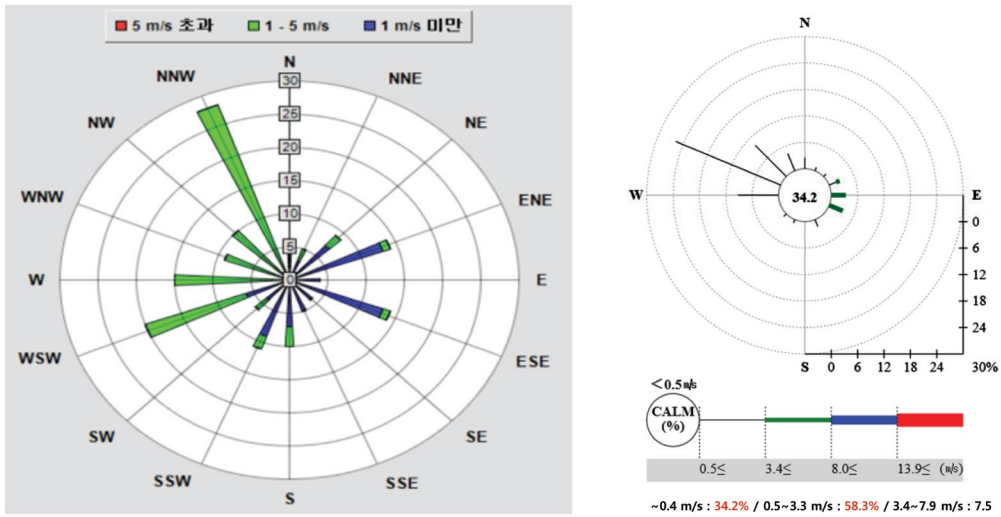


Fig. 2. Wind direction and speed of measurement location (left) and AWS (right) during measurement periods.

구 부분이 비포장도로로, 차량 이동 및 도로사정에 따라 비산먼지의 영향을 받을 수 있을 것으로 예상된다. 측정지점에서 측정된 자료와 비교분석을 위해 측정 위치로부터 1.5 km 떨어진 거리에 위치한 도시대기측정망 (air quality monitoring station, AQMS)과 3.2 km 떨어져 있는 방재기상센터 (automated weather station, AWS)에서 제공되는 자료를 활용하였다.

대기오염 영향에 대한 연구시 측정장비의 정밀/정확도도 중요하지만 또 다른 고려 요소가 풍향/풍속자료이다. 대기 중으로 배출된 오염물질은 풍향과 풍속에 따라 주변에 미치는 영향과 범위가 달라지기 때문이다. 각 시도 보건환경연구원에서는 AQMS로 측정값을 대표하기 어렵거나 주민의 요청 등에 따라 이동 측정차량 (mobile laboratory, ML)을 사용하여 간헐적 측정을 수행하며, 본 연구 수행시 동일 지점에서 측정을 실시하여 측정 차량에서 제시된 기상 데이터를 활용하였다 (CND, 2019). 그림 2의 왼쪽 자료를 보면 측정기간 동안 주풍은 북서풍으로 평균온도 19.1°C, 평균풍속 1.3 m/s로 나타났다. 그림 2의 오른쪽 AWS의 자료 역시 주풍은 북서풍으로 평균온도 18.1°C, 평균풍속 1.3 m/s로 측정기간 동안의 기상환경은 두 지점에서 거의 유사하게 나타났다. 주풍의 방향으로 미

루어 측정기간 동안 산업단지에서 배출된 오염물질의 영향을 직접적으로 받았을 것으로 판단된다.

2.2 측정장비

석유화학단지 내에서 배출되는 주요 오염물질 중 입자상 오염물질은 PM_{10} 과 초미세먼지 (particulate matter less than $2.5 \mu\text{m}$, $PM_{2.5}$), 검댕 (black carbon, BC)을, 가스상 오염물질은 석유화학단지의 주요 오염물질로 알려진 VOCs를 대상으로 선정하였다. 표 1에 본 연구에 사용된 측정 장비의 세부 사양을 나타내었다. 측정은 2019년 6월 10일 14시부터 14일 10시까지 약 4일간 진행하였고, 측정 장비들은 모두 24시간 연속측정을 원칙으로 하였으나, 각 장비별 자체 점검시간과 필터 교체 등을 고려하여 장비의 점검과 교체시간은 분석에서 제외하였다.

입자상 오염물질 측정에서는 portable aerosol spectrometer (PAS, model 1.109, Grimm, Germany)와 aethalometer (model AE51, Magee, USA)를 사용하였다. PAS의 경우 실시간 광학측정장비 중 입자의 개수 농도와 입경분포를 동시에 측정할 수 있어 다수 연구에서 사용되었고 (Kim *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016; Woo *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2014a), Aethalometer의 경

Table 1. Specification of devices used in this study.

Device	Item	Range	Resolution
Portable Aerosol Spectrometer (1.109, Grimm)	Particle number concentration and distribution	0.25~32 μm	1 min
Aethalometer (AE51, Magee)	Black carbon	Total Suspended Particle	1 min
Lab-grade portable & Automatic VOCs Analyzer (Micro-GC, Tricorntech)	VOCs (Benzene and 16 species)	0.1~100 ppbv	30 min

Table 2. Summary of the VOCs target compounds analyzed by MiTAP.

Substance	Compound	CAS NO.	Formular
Alkanes & Alkenes	Propene	115-07-1	C_3H_6
	1,3-Butadiene	106-99-0	C_4H_6
	Hexane	110-54-3	C_6H_{14}
Aromatics	Benzene	71-46-2	C_6H_6
	Toluene	108-88-3	C_7H_8
	Ethylbenzene	100-41-4	C_8H_{10}
	p-Xylene	106-42-3	C_8H_{10}
	m-Xylene	108-38-3	C_8H_{10}
	o-Xylene	95-47-6	C_8H_{10}
	Styrene	100-42-5	C_8H_8
Oxygenated VOCs	Acetone	67-64-1	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$
	Butanone	78-93-3	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$
	Ethyl Acetate	141-78-6	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$
Chlorinated VOCs	Tetrachloethylene (PCE)	127-18-4	C_2Cl_4
	Trichloroethylene (TCE)	79-01-6	C_2HCl_3
	1,4-Dichlorobenzene (1,4 DCB)	106-46-7	$\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2$
	1,2-Dichlorobenzene (1,2 DCB)	95-50-1	$\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2$
	Vinyl chloride monomer (VCM)	75-01-4	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$

우 자동차 배기가스 등 불완전 연소에 의한 BC의 실시간 농도변화를 관찰하는데 지표장비로 사용되고 있다(Kim *et al.*, 2019; Woo *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2007). 각 측정 장비는 1분 단위로 데이터를 저장하여 분석을 실시하였다. PAS의 경우 광학측정방식으로 기준 측정방법의 증량법 및 베타선 흡수법보다 수분 및 입자의 밀도변화에 따른 영향이 큰 단점이 있으나(Lee and Park, 2019), 편리한 이동성과 시간 분해능이 큰 장점이 있다. PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 제작사에서 제공하는 변환 계수를 적용하여 산출하였으며, 기존 연구에서 외기 및 실내를 대상으로 변환된 증량농도와 AQMS와 결과 높은 상관성을 보였다(Kim *et al.*, 2014a, b).

2.3 MiTAP을 이용한 VOCs 측정 분석

산업단지의 경우 다량의 화학물질 사용으로 인해 일반 도시대기 측정소에서 측정되는 환경기준 물질 보다는 VOCs에 대한 영향을 더 크게 받는다. 일반적으로 VOCs의 경우 고체흡착관에 포집하여 GC-MS를 활용한 분석이 주를 이루었으나 대부분 단일 농도 값만을 제시하는 경우가 많아 실시간으로 발생하는 오염물질의 수준을 파악하기에는 한계가 있었다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 휴대가 가능하고 중(저)가로 반실시간(semi-real time)으로 농도를 확인할 수 있는 측정 장비가 활용되고 있다. 이러한 실시간 혹은 반실시간 측정 장비들은 기존 공정시험법에 비해 측정 정확도 부분에서는 떨어질 수 있으나, 시간에 따른 오염물질의 농도변화를 관측할 수

있다는 면에서 장점이 있다. 미국환경청 (United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA)에서도 이러한 기존 측정방법의 문제점을 개선하기 위해 Method TO-15A, 17 방법을 대신할 Next-Generation Emissions Measurement (NGEM) 개발을 위해 노력 중에 있다(George *et al.*, 2019). 본 연구에서 활용된 MiTAP P310 (Tricornstech Corp., Taiwan)은 GC-FID 방식의 휴대용 VOCs 측정장비로 최소 15분부터 30분 간격으로 측정이 가능하며, 자체 제작된 표준가스를 대상으로 선별된 물질을 대상으로 최대 17가지 항목의 VOCs를 측정할 수 있다. MiTAP은 교정시료를 포함하고 있는 실린더가 설치되어 있으며, 이를 활용하여 매일 (0시~2시는 자동교정, 2시~0시는 측정) 자동 교정 시스템 (automatical calibration system, ACS)이 가동되어 측정기간 동안 별도의 교정을 필요로 하지 않고 석유화학단지, 제철소, 도로이동열원, 버스정류장, 대기환경 등 다양한 분야에 적용되어 사용되고 있으며(Thoma *et al.*, 2019), 기존 GC와의 개별물질별 상관성 분석에서도 매우 높은 상관계수 (0.972~0.997)를 보였다(Lin *et al.*, 2018). 본 측정에서는 측정을 수행하기 전에 ACS를 통한 교정 작업이 수행된 후 측정하였으며, 세부 측정항목과 관련 정보를 표 2에 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주요 오염물질 시계열 분석

그림 3과 표 3은 측정기간 동안 측정된 주요 오염물질들에 대한 시간에 따른 농도변화를 나타낸 것이다. 표 3의 경우 측정 대상기간 중 11일부터 13일까지는 24시간 연속 데이터 전체에 대한 평균값이고 측정이 시작된 1일은 14시부터 24시까지 데이터에 대한 평균이며, 측정 마지막 날인 14일엔 0시부터 10시까지의 데이터를 기반으로 작성된 자료이다.

먼저 측정지점에서 PAS에 의해 측정된 농도는 전체 기간 중 PM_{10} 은 $16.9 \pm 8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ 는 $12.4 \pm$

$5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 좋은 상태를 보였다. 약 1.5 km 떨어진 AQMS의 자료 역시 PM_{10} $24.8 \pm 7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ $15.9 \pm 5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, PM_{10} 의 농도는 측정지점에 비해 측정소가 소폭 높게 나타났으며 $PM_{2.5}$ 의 경우는 거의 유사한 수준을 보였다. 하지만 측정 기간에 대한 일별 최대농도는 측정지점의 경우 PM_{10} 기준 $46.5 \sim 91.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 기간에 대한 평균농도 대비 최대농도가 2.7~5.4배까지 높게 나타난 반면, AQMS의 경우 최대농도가 $30 \sim 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균농도 대비 최대농도가 1.2~1.8배로 상대적으로 낮게 나타났다. $PM_{2.5}$ 역시 측정지점 최대농도가 $20.3 \sim 56.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 기간 평균대비 1.6~4.5배로 높게 나타난 반면 AQMS의 경우 $15 \sim 33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1~2.1배로 유사한 경향을 보였다. BC의 경우 전체 기간 평균 $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 낮게 나타난 반면 최대농도는 $3.1 \sim 17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균 농도대비 매우 높은 3.4~19.0배 값을 보였다. 특히 11일과 14일 6시부터 12시까지 농도가 매우 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이 기간 때 PAS의 PN 역시 같이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 BC를 연소 및 자동차 기원 지표물질로 사용하고 있으며, 차량의 내연기관에서 배출되는 입자들은 대부분 $1 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자로 BC와 미세입자가 동시에 증가하는 경우 연소 및 내연기관과 같은 오염원의 영향으로 판단하고 있다(Krecl *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2014). 본 측정에서도 BC와 PN의 농도가 동시에 증가하는 것을 확인하였고, 이는 산업단지를 출입하는 각종 차량에 의한 영향으로 볼 수 있다. 측정지점에서 PM_{10} 의 농도는 앞서 언급한 측정지점 앞의 비포장도로를 운행하는 차량들로 인해 발생된 비산먼지의 영향을 받아 증가한 것으로 판단된다. 상대적으로 AQMS의 경우 이 변화패턴과 일치하지 않는데 이는 측정기간 동안 산업단지와 측정위치에 주풍 방향이 북서풍인 것에 반해 AQMS의 위치가 주요 도로 북쪽에 위치하다 보니 자동차에 기인한 오염물질의 영향을 받지 않아 나타난 결과로 판단된다. TVOC의 경우 측정 전체 기간에 대한 평균농도가 $46.1 \pm 42.2 \text{ ppb}$ 로 나타났고, 최대농도는 $67.0 \sim 202.4 \text{ ppb}$ 로 평균농도 대

Table 3. Summary of Air pollutants concentration measured in this study.

	PAS			AQMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Aethalometer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MiTAP (ppb)	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PN	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC	TVOC	Benzene
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		$\#/ \text{cm}^3$					
10-Jun †	15.1	12.8	54.4	22.6	13.0	0.5	25.4	2.1
11-Jun	16.8	12.1	50.9	22.8	15.0	0.9	40.7	2.3
12-Jun	12.7	9.2	38.0	21.9	12.7	0.7	36.4	1.3
13-Jun	17.4	12.7	53.4	27.3	19.9	0.9	73.7	4.5
14-Jun ‡	27.6	19.8	89.2	32.8	20.4	1.5	25.4	1.3
Mean \pm S.D.	16.9 \pm 8.6	12.4 \pm 5.7	53 \pm 28	24.8 \pm 7.7	15.9 \pm 5.4	0.9 \pm 0.8	46.1 \pm 42.2	2.6 \pm 3.5

† Measurement time : 14~24 (11 hr)

‡ Measurement time : 00~10 (10 hr)

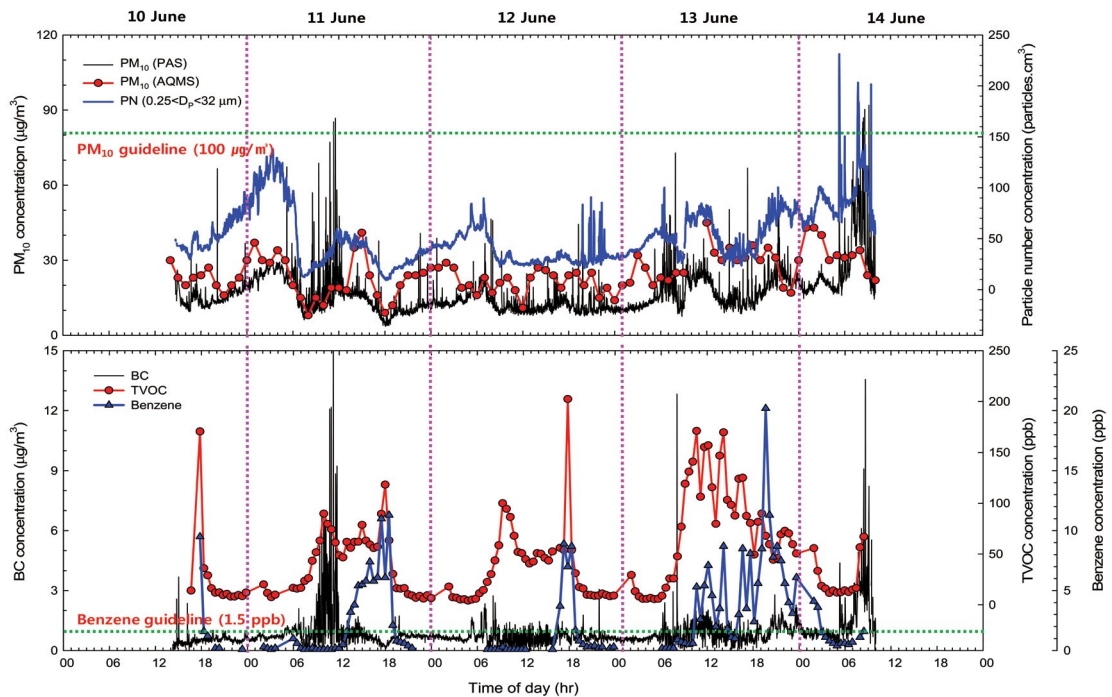


Fig. 3. Time series of major air pollutants measured in measurement position.

비 최대농도가 1.4~4.4배 높게 나타났다. TVOC 중 유일하게 환경기준이 존재하는 벤젠의 경우 기간 평균 2.6 \pm 3.5 ppb로 나타나 측정기간 중의 농도는 연평균 기준치인 1.5 ppb보다는 높게 나타났다. 벤젠 역시 측정기간 최대 농도값이 4.1~20.2 ppb로 평균농도 대비 1.6~7.8배 높게 나타났다. 시간대별로는 6시부터 12시경과 18시 전후에 높은 농도값을 보였다.

3.2 입자상 오염물질의 일변화 특징

입자상 오염물질은 인체 침투에 따른 건강영향과 독성 기작이 다르게 나타나기 때문에 크기분포 및 조성에 대한 정보가 매우 중요하다. PM₁₀의 경우 바람에 의한 비산먼지나 연소의 의한 분진, 식물 포자, 생활 마모에서 기인하는 반면, PM_{2.5}의 경우 나노 크기의 입자의 응축, 응집에 따른 성장이나 휘발성이 큰

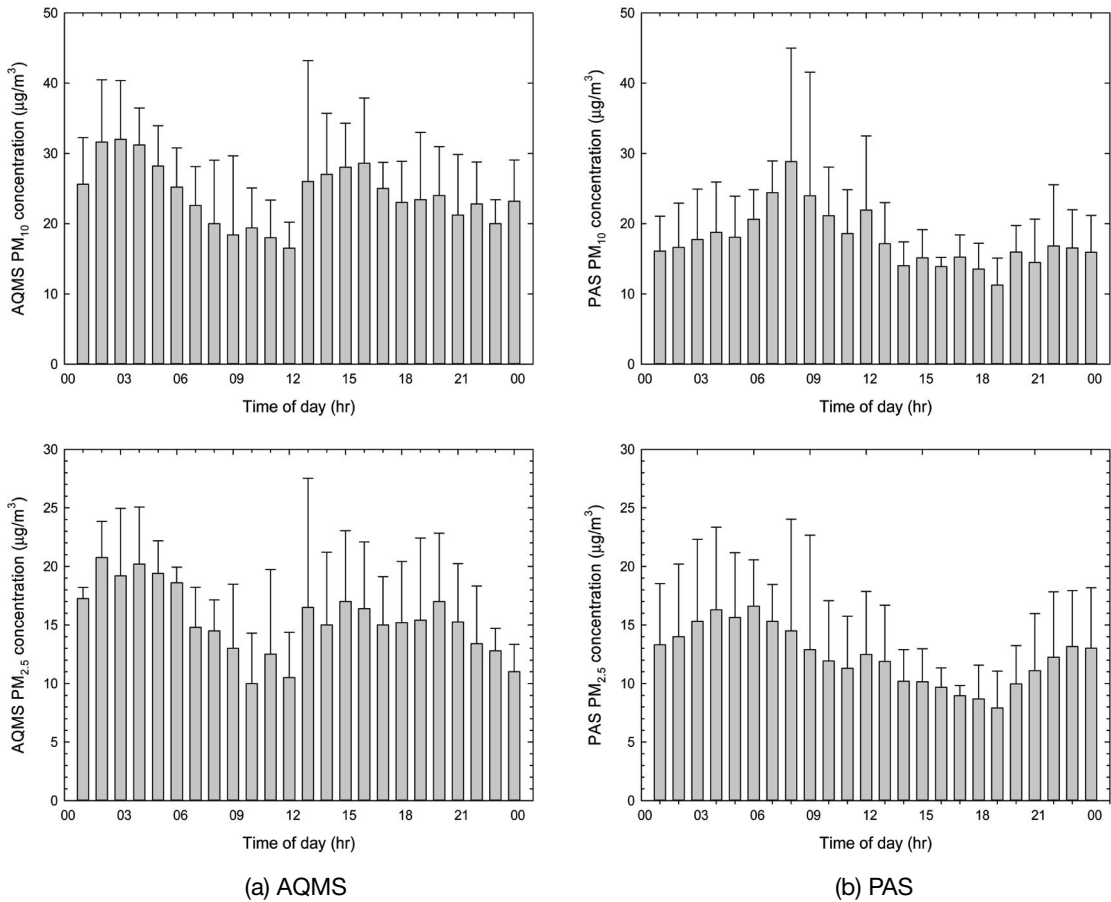


Fig. 4. Diurnal variations in PM concentrations and $PM_{2.5}$ to PM_{10} ratios measured at the monitoring site.

가스상 물질들의 상(phase) 변화 및 응집, 응결에 따른 성장, 연소에 의한 배출이 주요 인자로 작용하는 것으로 알려져 있다(Whitby and Cantrell, 1976). 채취된 시료에 대한 성분 분석을 통해 구성비에 대한 정보를 얻을 수 있다면 좋겠지만 본 연구의 경우 VOCs의 실시간 변화특성에 연구 초점을 맞춰 진행하다 보니 입자상 오염물질에 대한 성분 분석은 수행하지 않았다. 대신 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 구성비를 대상으로 시간대별 농도변화를 검토하였다. 하지만 광산관장비는 기준장비인 베타선흡수법에 비해 밀도가 보정되지 못하고, 수분과 환경조건에 따라 과대 혹은 과소평가 될 수 있어 절대적인 비교보다는 참고적인 값으로만 활

용되어야 할 것이다. 그림 4는 AQMS와 측정대상에서 PAS에 의해 측정된 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 시간대별 농도변화를 나타낸 것이다. 분석결과 AQMS의 경우 $PM_{2.5}$ 과 $PM_{10-2.5}$ 의 비율이 64.0%와 36.0%로 나타났고, PAS의 경우 70.4%와 29.6%로 나타나 측정지점에서의 $PM_{2.5}$ 의 비율이 좀 더 크게 나타났다. 시간대별로도 AQMS의 경우 새벽시간대인 1~3시경 높은 농도를 보인 후 감소하다가 11시경 다시 증가, 15시를 기점으로 다시 감소하는 경향을 보이는 반면, PAS는 새벽시간부터 점차 증가하여 7시경 최대를 찍고 다시 감소하는 경향을 보여 두 지점간 시간대별 변화 패턴이 완전 상반되는 것으로 나타났다. 이것은 측정기간 동안 주풍의

Table 4. Observed concentration of different VOCs.

Unit: ppb	Day 2					Day 3					Day 4				
	Mean	S.D.	Max	Min	n	Mean	S.D.	Max	Min	n	Mean	S.D.	Max	Min	n
Propene	21.2	18.2	71.9	3.2	41	22.8	21.7	81.1	2.7	43	42.1	35.3	120.5	3.4	44
1,3-Butadiene	8.7	13.7	47.5	0.8	9	24.2	49.6	125.1	0.5	3	9.0	6.3	22.9	3.2	14
Hexane	6.8	8.6	36.9	0.5	11	3.7	7.0	43.4	0.5	6	12.6	10.7	41.4	0.2	18
Benzene	2.3	3.2	11.3	0.1	41	1.3	2.7	8.9	0.1	43	4.7	4.2	20.2	0.2	43
Toluene	1.3	1.0	4.4	0.2	36	0.6	1.0	6.2	0.2	39	2.6	2.1	7.7	0.2	40
Ethylbenzene	0.4	0.4	1.5	0.1	32	0.3	0.5	2.6	0.1	36	1.1	1.0	3.5	0.1	26
m,p-Xylene	0.4	0.2	0.9	0.1	16	0.3	0.4	2.0	0.1	1	0.9	0.6	2.6	0.1	1
o-Xylene	0.2	0.1	0.4	0.1	36	0.1	0.1	0.4	0.1	26	0.3	0.2	0.7	0.1	36
Styrene	0.5	0.5	2.8	0.1	12	0.3	0.1	0.6	0.1	3	1.7	1.5	6.9	0.1	12
Acetone	3.1	1.4	6.3	1.4	41	2.8	1.6	7.0	1.2	41	4.7	2.4	9.1	1.2	40
Butanone	1.8	1.0	4.4	0.5	36	1.1	0.7	3.3	0.1	33	2.2	1.8	6.8	0.3	38
Ethyl Acetate	1.3	0.7	2.9	0.5	41	1.5		1.5	1.5	43	1.3	0.5	1.6	0.9	42
PCE	0.4	0.3	1.0	0.1	41	0.5	0.4	1.3	0.1	39	0.5	0.4	1.4	0.1	37
TCE	0.2	0.1	0.4	0.1	34	0.1	0.1	0.2	0.1	23	0.2	0.2	0.7	0.1	38
1,4-DCB	0.9	0.6	2.2	0.1	38	1.1	0.7	3.1	0.1	34	0.4	0.3	1.7	0.1	40
1,2-DCB	0.7	0.6	1.6	0.1	30	0.7	0.5	1.5	0.1	27	0.4	0.3	1.4	0.1	39
VCM	2.5	4.5	14.4	0.4	10	0.6	0.1	0.7	0.5	11	1.1	0.9	3.7	0.2	17

※ n max = 44 (1 data/half-hour and self calibration during midnight~2:00 am per day)

방향성이 북서풍이라는 것과 AQMS가 주요 도로 북쪽에 위치하여 도로변에서 배출되는 오염물질에 대한 영향을 적게 받는다는 점, 그리고 상대적으로 측정지점이 주요 도로의 풍하 지점에 위치하여 대기 중으로 배출된 자동차 배기가스의 영향을 더 많이 받아 나타난 결과로 판단된다. 그 예로 AQMS보다 PAS의 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 대한 비율이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

3.3 VOCs 농도분포 및 일변화 특징

대기정책이나 관리방안 제시를 위해서는 장기적이고 정확한 데이터가 필요하나 주민이나 지역 관리방안 수립을 위해서는 실시간 변화특성 파악이 중요하다. 이에 본 연구에서는 반실시간 측정 장비를 활용하여 30분 단위의 농도변화 특성을 검토하였다. 표 4는 측정이 수행된 5일 중 24시간의 자료가 전체 확보된 2일차부터 4일차까지 측정된 VOCs의 개별 평균농도를 나타낸 것이다. 30분에 1개 데이터를 생산하는 기기 특성상 하루 최대 자료는 48개이나 0시부터 2시까지 자체 검교정을 위해 자료생산이 안된다는 점을 감안할 때 최대 얻을 수 있는 자료는 44개이다. 표 4에서

n은 미검출 자료를 제외한 검출한계 이상의 유효 자료 숫자를 나타낸 것이다. 분석결과 3일 모두 지방족 탄화수소(Propene, 1,3 Butadiene, Hexan)가 전체 구성의 69.6~81.8%를 차지하는 것으로 나타났고, 방향족 4.7~13.2%, 산화 VOCs가 8.7~11.8%로 유사한 비율을 나타냈다. 염소계 VOCs는 3.0~8.9%로 가장 낮은 비율은 보였으며, 반대로 Propene과 1,3 Butadiene이 상대적으로 높게 나타났다. VOCs 물질 중 국내 유일하게 대기환경 기준이 존재하는 Benzene의 경우 연평균 5 µg/m³ (1.5 ppb)으로 관리하고 있으며, 본 측정결과 3일에 대해 일평균은 각각 2.3 ppb, 1.3 ppb, 4.7 ppb로 나타나 이 또한 환경기준농도를 순간적이긴 하지만 상회하는 것으로 나타났다.

그림 5는 본 연구에서 측정된 TVOC와 주요 오염물질인 Benzene과 Toluene, 그리고 전체 TVOC 중 높은 농도를 나타낸 지방족 탄화 수소류에 대한 5일 전체에 대한 시간대별 농도변화를 나타낸 것이다. TVOC의 경우 4일차를 제외하고는 유사한 농도변화를 나타냈다. 20~30 ppb 전후의 농도를 보이다가 6시를 기점으로 9시경까지 급격한 증가를 보인 뒤 다시 감소하다가 일과가 끝나는 17~18시경을 기점으로 급격한

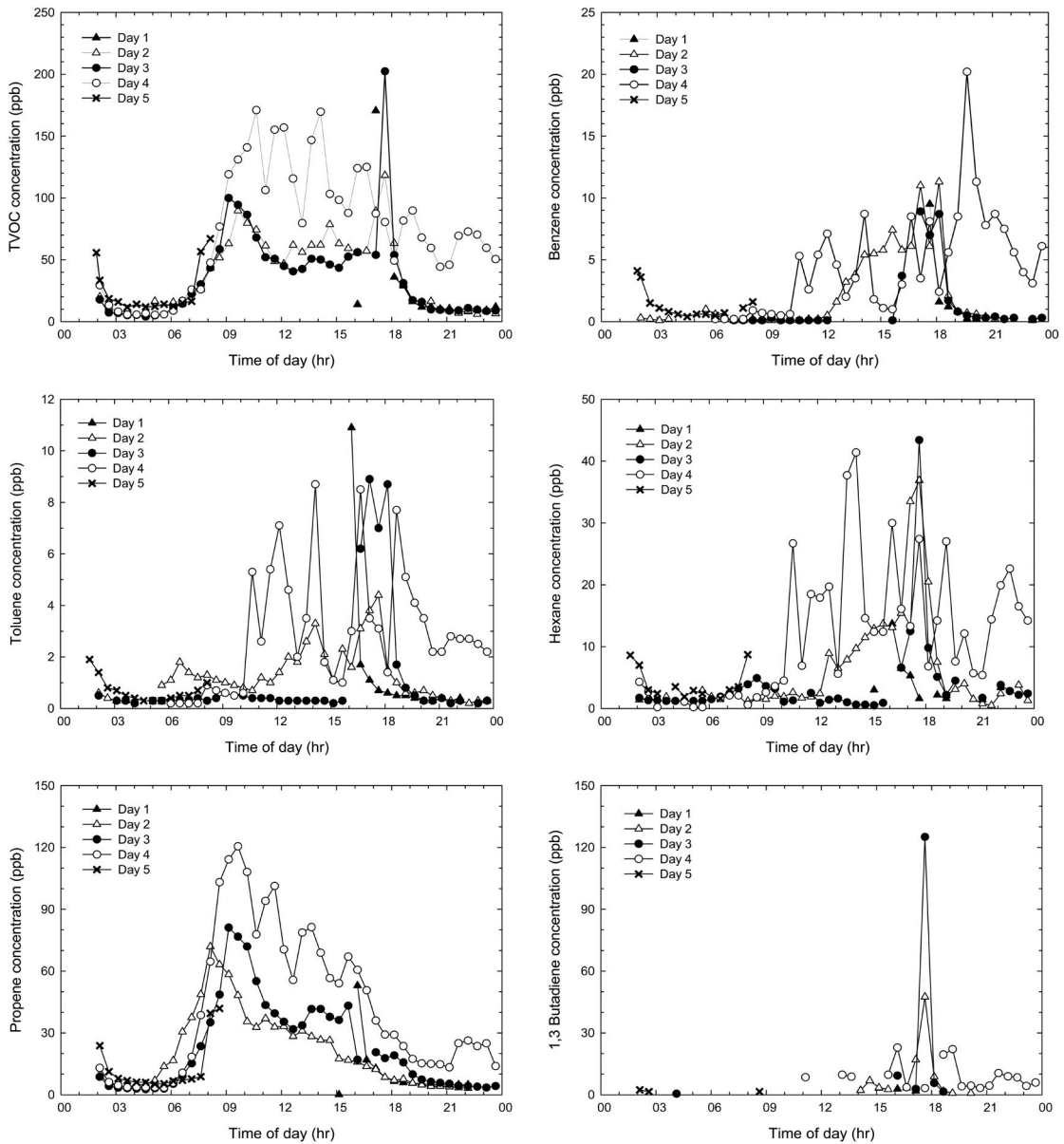


Fig. 5. Diurnal variation of TVOC, Benzene, Toluene, Hexane, 1,3 Butadiene and Propene.

증가를 보였다. 아마도 이 부분은 1,3 Butadiene의 영향을 크게 받을 것으로 판단되는데 1,3 Butadiene의 경우 하루 중 노출이 없다가 15시와 18시경 급격한 농도 증감을 보인다. 1,3 Butadiene의 경우 석유제품, 고무제품 제조나 자동차 배기가스에서 기인하는 것으로

알려져 있는데 IARC에서 규제하고 있는 Group 1 발암물질인 만큼 이에 대한 추가적인 정밀조사가 필요할 것으로 판단된다(IARC, 2007). Benzene과 Toluene, Hexane은 0시부터 9시까지 낮은 농도를 보였고, 9시를 기점으로 급격한 농도 증가 후 특별한 변화특성 없

Table 5. Summary of VOCs measured at petrochemical industrial complexes.

Region	Substances (Unit: ppb)				Author
	Benzene	Toluene	Ethly-benzene	TVOCs	
Lanzhou (China)	4.5	4.0	3.0	125	Jia <i>et al.</i> (2016)
Kaohsiung (Taiwan)	1.9	22	3.7	103.3	Lin <i>et al.</i> (2004)
Izmir (Turkey)	-	-	-	135.9	Cetin <i>et al.</i> (2003)
Shiohama (Japan)	2.1	5.2	2.9	88.0	
Negishi (Japan)	0.7	3.1	0.8	47.9	Tiwari <i>et al.</i> (2010)
Honmoku (Japan)	0.4	1.6	0.7	33.8	
Aliaga (Spain)	1.5	1.03	0.2	-	Civan <i>et al.</i> (2015)
Kocaeli (Turkey)	5.6	14.5	2.5	47.17	Pekey <i>et al.</i> (2015)
Ulsan (Korea)	1.25	5.25	1.07	-	NIER (2010)
Yesu (Korea)	3.65	3.25	1.09	-	NIER (2009)
	1.32	4.55	0.27	-	CND (2019)
Gwangyang (Koera)	1.64	0.94	0.40	-	NIER (2009)
This study (Korea)	2.6	1.4	0.6	46.1	-

이 농도 증감을 반복하였다. 세 물질 모두 석유화학공정의 주요 원료로 다양한 공정에서 빈번히 사용하고, 배출된 뒤 바로 희석·확산되지 않고 주변에서 농도 증감에 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 측정된 VOC 중에 가장 큰 비율을 차지하고 있는 물질은 불포화탄화수소물질인 Alkene 계열의 Propene으로 나타났다. 특히 Propene은 정유 및 천연가스의 부산물로서, 정제과정에서 탄화수소류가 분해되어 생성되며, 특히 나프타 공정에서 Ethylene을 생산할 때 주로 발생하는 것으로 파악된다. 석유화학단지와는 달리 여름철 서울 도심에서는 대기중 Methane 다음으로 풍부한 물질로 알려진 Methanol (Schade and Goldstein, 2006)이 VOCs 중 가장 높은 비율을 차지하는 물질로 확인되었으며, 산화된 VOCs가 83.6%를 차지하는 특징을 보였다(Park *et al.*, 2018). Park *et al.* (2018)의 연구에서는 PTR-ToF-MS로 OVOCs로 분류되는 Alcohol, Aldehyde, Ketone 화합물을 포함한 VOCs 종류를 분석함에 따라 본 연구에서 사용한 GC-FID 방식과 측정항목에 차이가 있으나, 비교해보면 석유화학단지는 서울 도심과는 달리 산화되지 않은 VOCs, 즉 Alkene 류가 상당히 높은 특징을 알 수 있으며, 이것은

배출원에서 직접적인 영향을 받고 있음을 시사한다.

표 5는 본 실험에서 측정된 TVOC와 기준 물질인 Benzene을 포함한 주요물질들에 대해 타 석유화학단지에서 수행된 연구 사례와 비교한 것이다. 국외에서 수행된 연구의 경우 개별물질과 함께 TVOC 농도가 제시된 반면 국내에서 진행된 연구의 경우 개별 물질에 대해서만 자료를 제공하고 있었다. 물론 VOCs의 경우 휘발성이 강하고 배출원으로부터 측정위치의 선정에 따라 희석·확산 등 주변 환경 조건에 따라 다양한 결과값을 보일 수 있기 때문에 이에 대한 고려는 필요할 것으로 판단된다. 해외 연구사례와 TVOC 농도 비교 결과 본 연구에서 조사된 농도는 Kaohsiung이나 Izmir와 같이 135.9~103.3 ppb로 가장 높게 나타난 지역 대비 37% 수준으로 상대적으로 낮은 농도로 확인되었다. 하지만 VOCs 중 유일하게 환경기준이 존재하는 Benzene의 경우 조사된 연구결과에서 3번째로 높게 나타났다. 국내 수행된 연구결과의 경우 개별 오염물질에 대한 농도가 제시된 반면 TVOC에 대한 농도는 확인되지 않았다. 이는 국내 환경기준이 대기환경 중 TVOC에 대한 기준이 없고, 개별물질인 Benzene만이 기준치가 정해져 있어 나타난 결과로 판

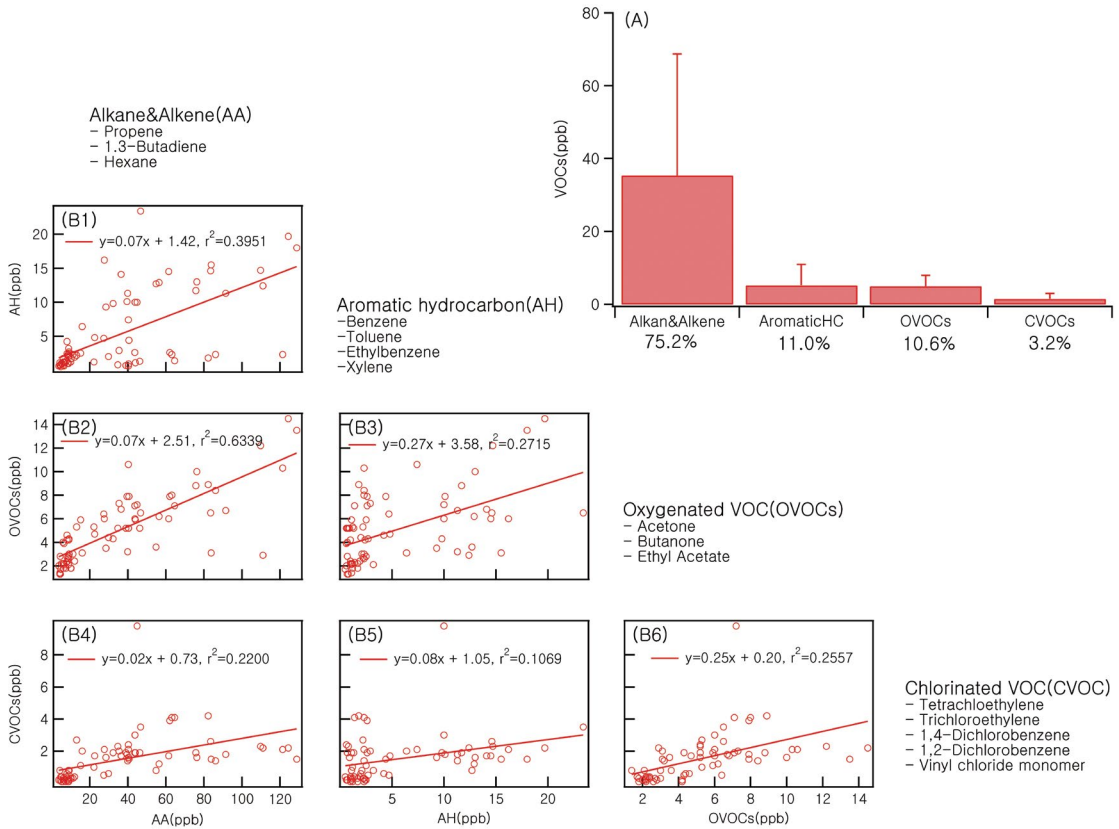


Fig. 6. Summary of the coefficients of determination (r^2) and scatter plots for the target VOCs.

단된다. 선행 연구결과 조사결과 여수에서 3.65 ppb로 가장 높은 농도를 보였고, 그 외 나머지 연구에서는 기준치를 약간 상회하거나 낮은 농도를 보여 이번 연구결과보다 대부분 낮게 나타났다. 하지만 현재 수행되고 있는 측정방법은 하루 중 일정 기간에 대 30분 정도 포집하여 분석하는 방법을 주 시험법으로 사용하기 때문에 앞서 그림 5에서 확인할 수 있는 일변화 패턴과 고농도 첨두시에 대한 특징은 전혀 확인할 수 없었다.

3.4 VOCs 물질별 상관성 분석

측정된 VOCs를 분류 특성에 따라 지방족 탄화수소(Alkane & Alkene, AA)와 방향족 탄화수소(Aromatic hydrocarbon, AH), 산화 VOCs(Oxygenated VOC,

OVOCs) 및 염소계 VOC(Chlorinated VOC, CVOCs)로 구분하였고, 1차 회귀직선 통해 각 분류별 상관성을 분석하여 그림 6에 나타났다. 그림 6의 (A)를 보면 AA가 75.2%로 가장 많은 비율을 나타냈고, AH와 OVOCs가 각각 11.0%와 10.6%로 유사한 비율을 보였다. CVOCs는 3.2%로 가장 낮은 비율을 보였다. 그림 6의 (B1)부터 (B6)까지는 각 분류에 대한 상관성을 도식화 하여 결정계수로 나타낸 것이다. 분석결과 OVOCs와 AA의 결정계수가 가장 높게 나타났지만 0.63으로 상관성은 그리 크지 않은 것으로 나타났고, 그 외 물질들 간에는 매우 낮은 상관성을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 측정지점에서 관측된 VOCs는 동일한 기원에서 배출된 것이 아닌 다수의 혼합공정에서 개별로 배출되어 주변에 복합영향을 미치고 있

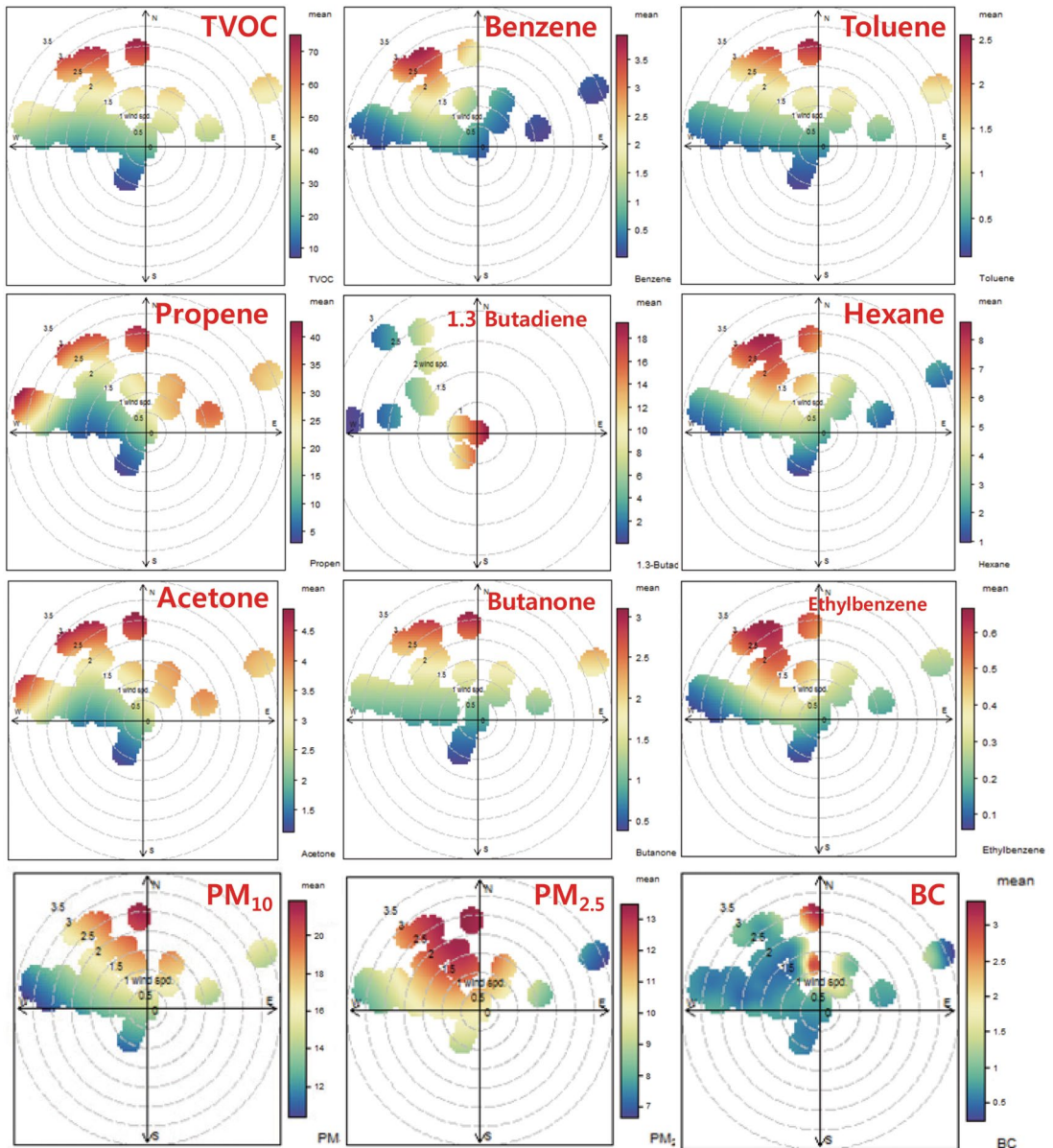


Fig. 7. Pollution roses of the major target compounds measured in measurement position.

다는 것을 의미한다.

3.5 VOCs의 주변영향 분석(오염장미)

그림 7은 VOC 물질들에 대한 측정결과를 오염장미 (pollution rose)로 나타낸 것이다. 오염장미는 오염물

질별 농도가 풍향, 풍속과 같은 기상조건에 따라 변화 하는 것을 나타내기 위해 많이 사용되고 있다(Shin *et al.*, 2007; Kim and Kim, 2000). 입력 자료는 MiTAP에서 분석된 17개의 개별 VOC 중 위해성 크거나 농도가 높게 나타난 12개 물질과 풍향, 풍속자료를 1시간

평균으로 사용하였고, 분석에는 상용 통계소프트웨어인 R v3.4.0을 사용하였다. 분석결과 Benzene을 포함한 대부분의 개별 오염물질들이 측정지점을 대상으로 북서풍이 불어올 때 높은 농도를 보였으며, 북풍이나 동북풍일 때도 일부 낮은 수준이긴 하지만 농도변화를 보였다. 특히 북서풍 계열에서 풍속이 2.5~3 m/s 구간에서 강하게 불어올 때 높은 농도를 보였다. 이는 측정지점을 대상으로 북서쪽에 위치한 석유화학단지과 주요 도로에서 기인된 오염물질이 대상지점에 도달하여 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. 1.3 Butadiene의 경우 다른 물질들과 다른 변화 양상을 보였는데, 이는 앞서 언급한 것과 같이 노출이 일정 시간대 집중적으로 나타나고, 이 외 시간대에는 미검출(N/D)된 사항이 많아 분석 데이터 부족으로 인한 차이점으로 해석된다. 간헐적이긴 하지만 일정 시간대 지속적인 고농도 사례가 밝혀진 만큼 추후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 입자상 오염물질인 PM₁₀과 PM_{2.5}의 경우 기존 VOCs 물질과 유사한 패턴을 보이는 반면 BC는 북풍일 때 농도증가가 가장 뚜렷이 보이는데, 이것은 산업단지와 마을을 양분하는 주요도로가 측정지점과 수직으로 위치하고 있어 북풍이 유입되는 경우 직접적인 영향을 받는 것으로 파악된다. 또한 BC는 자동차 이외에, 석유화학단지의 flare 장치와 같이 공정에서 발생하는 폐가스를 수집하여 연소 처리하는 시설에서 다수 발생할 수 있으므로 추후 이에 대한 영향도 검토할 필요가 있다.

4. 결 론

석유화학단지의 경우 일반 대기환경기준 외 유해도가 높은 VOCs를 다수 사용하기 때문에 이에 대한 상시 관리가 이루어져야 하나 아직까지 이에 대한 수요만 있을 뿐 효과적인 모니터링이나 대체 방안이 수립되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 반일시간으로 TVOC 뿐만 아니라 17종의 개별 VOCs를 측정할 수 있는 측정 장비를 활용하여 석유화학단지 인근지

역에서 주요 대기오염 물질에 대한 농도 수준을 관찰하였고 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 측정지점과 석유화학단지 북측에서 측정된 풍향 풍속에 대한 분석결과 주풍이 북서풍으로 산업단지에서 배출된 오염물질은 대상 측정기간 동안 측정지점에 지배적으로 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

2. 실시간 측정 장비와 측정지점 인근에 위치한 AQMS 자료를 바탕으로 입자상 오염물질 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도수준 분석 결과, 기준치 이하의 매우 낮은 농도수준을 보였다. 측정당시 주변 환경의 배경농도 자체가 낮은 것에 기인할 수도 있지만 이는 석유화학단지의 공정가동에 따른 대기오염물질 배출에 대한 입자상 오염물질의 기여율이 상대적으로 낮다는 것을 판단할 수 있다.

3. 석유화학단지의 주요 오염물질인 TVOC에 대해 측정 결과, 평균 46.1 ± 42.2 ppb 수준으로 나타났고, 이는 기존 산업단지 연구결과에 비해 낮은 농도였다. 하지만 일변화 패턴 분석 결과 일평균 대비 일 중 농도 변화 편차가 크게 보였고, 일평균보다 최대 5배까지 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 특히 발암 유해성이 높은 Benzene과 1.3 Butadiene, Propene, Hexane과 같은 지방족 탄화수소의 농도가 높게 나타났다. VOCs 중 유일하게 환경기준이 존재하는 Benzene의 경우 연평균 기준치를 상시 초과하는 한편 평균농도 대비 일 최대 농도는 4.3~6.8배까지 높게 나타났다. 특히 1.3 Butadiene은 발생 빈도는 적지만 일정 구간에서 급격한 고농도 배출이 확인되었다.

전통적인 VOCs 측정·분석 방법인 고체흡착관 포집 및 GC/MS 분석법이 공정시험법으로 활용되어 왔다. 공정시험법의 경우 검증된 정확한 값을 얻을 수 있다는 장점이 있지만 휘발성이 강하고 상대적으로 독성이 높은 VOCs 경우 대기 배출시 주변 환경에 순간적인 독성을 야기 시키고, 사라질 수 있어 측정시간대와 환경에 따른 편차가 심하게 나타날 수 있어 평균농도 관리가 아닌 실시간 측정방법을 활용한 연속 모니터링 방법 활용방안이 지속적으로 제시되어 왔다.

최근 측정분석 기술 발전과 함께 반실시간 혹은 수초 단위로 VOCs 농도를 모니터링할 수 있는 기기가 개발되어 적용되고 있다. 이러한 방법은 기존 공정시험법에 비해 정확도가 다소 떨어질 수 있지만 그 동안 단점으로 지적되어져 오던 VOCs와 같은 휘발성이 큰 물질들에 대한 농도변화를 실시간으로 확인할 수 있다는 장점으로 활용 가치가 높다. 본 연구결과에서도 VOCs 물질의 일 변동 폭이 큰 것으로 나타났고, 특히 독성이 높은 Benzene과 1.3 Butadiene 등의 농도가 높게 나타나 이에 대한 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 나타났다. 현재 개발 적용중인 반실시간 측정 장비의 경우 아직까지 정확도 면에서 기존 공정시험법에 비해 떨어질 수 있다는 것은 본 연구의 한계점으로 작용할 수 있다. 하지만 향후 본 연구에서 고농도 오염사례를 보인 주요 오염물질에 대한 공정시험법에 준한 정밀 측정과 조사가 요구되며, 장기적인 VOCs 관리 관점에서 석유화학단지 맞춤형 실시간 모니터링 시스템 구축과 운영이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 충청남도의 “대산공단지역 대기환경 영향조사 용역”과 (주)에이피엠엔지니어링의 지원을 받아 수행된 연구이며, 측정에 협조해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Carlton, A.G., Wiedinmyer, C., Kroll, J.H. (2009) A review of Secondary Organic Aerosol (SOA) formation from isoprene, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 4987-5005, <https://doi.org/10.5194/acp-9-4987>.
- Cetin, E., Odabasi, M., Seyfioglu, R. (2003) Ambient Volatile Organic Compound (VOC) concentrations around a petrochemical complex and a petroleum refinery, *Science of The Total Environment*, 312(1-3), 103-112, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00197-9).
- Chen, C.L., Shu, C.M., Fang, H.Y. (2006) Location and characterization of VOC emission at a petrochemical plant in Taiwan, *Environmental Forensics*, 7(2), 159-167, <https://doi.org/10.1080/15275920600667138>.
- Chen, M.H., Yuan, C.S., Wang, L.C. (2014) Source identification of VOCs in a petrochemical complex by applying open-path fourier transform infrared spectrometry, *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 1630-1638, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.04.0079>.
- Chen, M.J., Lin, C.H., Lai, C.H., Cheng, L.H., Yang, Y.H., Huang, L.J., Yeh, S.H., Hsu, H.T. (2016) Excess lifetime cancer risk assessment of Volatile Organic Compounds emitted from a petrochemical industrial complex, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 1954-1966, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0372>.
- Civan, M.Y., Elbir, T., Seyfioglu, R., Kuntasal, O.O., Bayram, A., Dogan, G., Yurdakul, S., Andic, O., Muezzinoglu, A., Sofuoglu, S.C., Perkey, H., Perkey, B., Bozlaker, A., Odabasi, M., Tuncel, G. (2015) Spatial and temporal variations in atmospheric VOCs, NO₂, SO₂, and O₃ concentrations at a heavily industrialized region in western Turkey, and assessment of the carcinogenic risk levels of benzene, *Atmospheric Environment*, 103, 102-113, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.031>.
- Choi, W.G., Cho, Y.H., Jang, H.S., Kim, C.H., Kim, T.O. (2010) Analysis of VOCs characterization in Gumi Industrial Complex by positive matrix factorization, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 9(2), 90-100. (in Korean with English abstract)
- Chungcheongnam-do (2019) Result of Atmospheric Environmental Monitoring using Mobile Laboratory, http://www.chungnam.go.kr/cnnet/board.do?mnu_url=/cnbbs/view.do (accessed on Jul. 25, 2019).
- Cui, H. (2016) Source profile of Volatile Organic Compounds (VOCs) of a petrochemical industrial in the Yantze River Delta, China, *Chemical Engineering Transactions*, 54, 121-126, <https://doi.org/10.3303/CET1654021>.
- George, I., Thoma, E., Duvall, R., Wu, T., Chou, T-KA, Liu, S., Chung, D., Deshmukh, P., Cansler, J., Cooley, A., Dewitt, B., Paris, B. (2019) Field Demonstration of a Novel Portable Automated Gas Chromatograph for Speciated Air Toxic VOC Measurement in Louisville, KY, Paper #ME30; AWMA Air Quality Measurement Methods and Technology Conference, Durham, NC, April 2.
- Hur, D., Jeon, J.M., Seo, S.G., Goo, O.S., Seo, B.R., Yoon, H.S. (2006) Emission characteristics of Odorous Volatile Organic Compounds in petrochemical industrial complex, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*,

- 5(1), 26-32. (in Korean with English abstract)
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2007) IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, 100F, 1,3 Butadiene.
- Jia, C., Max, X., Huang, T., Liang, X., Wang, Y., Shen, Y., Jiang, W., Wang, H., Bai, Z., Ma, M., Yu, Z., Ma, J., Gao, H. (2016) Non-Methane Hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, Northwest China, Atmospheric Research, 169(1) Part A, 225-236, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.10.006>.
- Kim, B.H., Kim, D.S. (2000) Studies on the environmental behaviors of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ in Suwon area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 16(2), 89-101. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.B., Lee, G., Ryu, S.H., Lee, J.Y., Woo, S.H., Lee, S.B., Yun, S.T., Bae, G.N. (2014a) Diurnal variation of air pollutants at a daycare center near the heavy road, Journal of Odor and Indoor Environment, 13(1), 28-39, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie.2014.13.1.28>.
- Kim, J.B., Lee, G., Ryu, S.H., Lee, J.Y., Woo, S.H., Lee, S.B., Kim, K.H., Yun, S.T., Bae, G.N. (2014b) Indoor air pollution of a high-rise apartment caused by combustion sources in winter, Particle and Aerosol Research, 10(3), 119-130, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.11629/jpaar.2014.10.3.119>.
- Kim, J.B., Kim, K.H., Ryu, S.H., Yun, S.T., Bae, G.N. (2016) Exposure characteristics of particles during after-treatment processes of aluminum oxide fibers and nickel powders, Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 26(2), 225-236, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.2.225>.
- Kim, J.B., Kim, C.H., Lee, S.B., Kim, K.H., Yoo, J.W., Bae, G.N. (2019) Characteristics of spatial and temporal air pollution on bicycle way along the Han River in Seoul, Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 184-194, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.184>.
- Kim, J.H., Yoo, K.S. (2017) Study on the enhancement of VOCs management at laundry facilities in Korea, Journal of Environmental Policy and Administration, 25(3), 139-171, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.3.139>.
- Korea Industrial Complex Corporation (KICOX) (2017) Korea Industrial Complex Statistics for 15 years.
- Korea Industrial Complex Corporation (KICOX) (2019) Status of the National Industrial Complex.
- Krecl, P., Johansson, C., Targino, A.C., Strom, J., Burman, L. (2017) Trends in black carbon and size-resolved particle number concentrations and vehicle emission factors under real-world conditions, Atmospheric Environment, 165, 155-168, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.036>.
- Kroll, J., Seinfeld, J. (2008) Chemistry of secondary organic aerosol: formation and evolution of low volatility organics in the atmosphere, Atmospheric Environment, 42(16), 3593-3624, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.003>.
- Kumar, P., Morawska, L., Birmili, W., Paasonen, P., Hu, M., Kulmala, M., Harrison, R.M., Norford, L., Britter, R. (2014) Ultra-fine particles in cities, Environment International, 66, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.01.013>.
- Lee, B.J., Park, S.S. (2019) Evaluation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration from online light scattering dust using gravimetric and beta-ray absorption methods, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(3), 357-369, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.357>.
- Lee, S.B., Bae, G.N., Park, S.M., Jung, S.G. (2007) Black carbon pollution level at a roadside of Seoul in spring, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(4), 46-477. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y., Jeong, W., Choi, K., Kim, T., Park, D. (2016) Estimation of particulate matters in subway tunnels using a kriging method, Journal of Odor and Indoor Environment, 15(2), 126-133, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15250/joie.2016.15.2.126>.
- Lin, C.H., Huang, P.J., Hsu, Y.F. (2018) Development and application of an on-site continuous VOCs sensing network, China Steel Technical Report, 31, 45-51.
- Lin, C.K., Hung, H.Y., Christiani, D.C., Forastiere, F., Lin, R.T. (2017) Lung cancer mortality of residents living near petrochemical industrial complex: a meta-analysis, Environmental Health, 16, 101, <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0309-2>.
- Lin, T.Y., Sree, U., Tseng, S.H., Chiu, K.H., Wu, C.H., Lo, J.G. (2004) Volatile Organic Compound concentrations in ambient air of Kaohsiung petroleum refinery in Taiwan, Atmospheric Environment, 38(25), 4111-4122, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.025>.
- Mohan, S., Ethirajan, R. (2012) Assessment of hazardous Volatile Organic Compounds (VOC) in a residential area abutting a large petrochemical complex, Journal of Tropical Forestry and Environmental, 2(1), 48-59, <https://doi.org/10.31357/jtfe.v2i1.569>.
- Moradpour, Z., Shahna, F.G., Bahrami, A., Soltanian, A., Hesam,

- G. (2017) Evaluation of Volatile Organic Compounds at petrochemical complex in Iran, *Health Scope*, 6(4), e62595, <https://doi.org/10.5812/jhealthscope.62595>.
- Ministry of Environment (ME) (2010) Framework act on Environmental Policy.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2009) Study on Research of Hazardous Air Pollutants in Yeosu and Gwangyang area.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) Study on Research of Hazardous Air Pollutants in Ulsan area.
- Park, H.Y., Park, G.H., Kim, I.S., Bae, J.S., Oh, Y.G., Seo, Y.G., Yang, S.I. (2010) Characteristics of odors in Yeosu industrial complex, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 9(4), 177-185. (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.S., Song, I.H., Kim, H.W., Lim, H.B., Park, S.M., Shin, S.N., Shim, 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)
- Perky, H., Perky, B., Arslanbas, D., Bozkurt, Z., Dogan, G., Tuncel, G. (2015) Source identification of Volatile Organic Compounds and Particulate Matters in an urban and industrial areas of Turkey, *Ekoloji*, 24(94), 1-9, <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2015.941>.
- Ryerson, T.B., Trainer, M., Angevine, W.M., Brock, C.A., Dissly, R.W., Fehsenfeld, F.C., Frost, G.J., Goldan, P.D., Holloway, J.S., Hubler, G., Jakoubek, R.O., Kuster, W.C., Neuman, J.A., Nicks Jr, D.K., Parrish, D.D., Roberts, J.M., Sueper, D.T. (2003) Effect of petrochemical industrial emissions of reactive alkenes and NO_x on tropospheric ozone formation in Houston, Texas, *Journal of Geophysical Research*, 108(D8), 4249, <https://doi.org/10.1029/2002JD003070>.
- Ragothaman, A., Anderson, W.A. (2017) Air quality impacts of petroleum refining and petrochemical industries, *Environments*, 4, 66, <https://doi.org/10.3390/environments4030066>.
- Schade, G.W., Goldstein, A.H. (2006) Seasonal measurements of acetone and methanol: Abundances and implications for atmospheric budgets, *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB1011, <https://doi.org/10.1029/2005GB002566>.
- Seo, B.R., Jung, K.H., Hur, D., Goo, O.S., Jeon, J.M., Seo, S.G., Jeon, G.S. (2005) Trends of odorous aldehydes on Yeosu petrochemical industrial complex, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 4(3), 451-162. (in Korean with English abstract)
- Shin, M.K., Lee, C.D., Ha, H.S., Choi, C.S., Kim, Y.H. (2007) The influence of meteorological factors on PM₁₀ concentration in Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 322-331. (in Korean with English abstract)
- Thepanondh, S., Varoonphan, 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(1-4), 83-92, <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0406-0>.
- Thoma, E., George, I., Duval, R., Wu, T., Whitaker, D., Oliver, K., Shaibal, M., Brantley, H., Spann, J., Bell, T., Carlton-Carew, N., Deshmukh, P., Cansler, J., Cousett, T., Tang, W., Cooley, A., Zimmerman, K., DeWitt, B., Paris, B. (2019) Rubbertown next generation emissions measurement demonstration project, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 2041, <https://doi.org/10.3390/ijerph16112041>.
- Tiwari, V., Hanai, Y., Masunaga, S. (2010) Ambient levels of Volatile Organic Compounds in the vicinity of petrochemical industrial area of Yokohama, Japan, *Air Quality, Atmospheric & Health*, 3(3), 65-75, <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0052-0>.
- Turpin, B., Huntzicker, J. (1995) Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentration during SCAQS, *Atmospheric Environment*, 29(23), 3527-3544, [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00276-Q](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00276-Q).
- Whitby, K.T., Cantrell, B. (1976) The physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmospheric Environment*, 12(1-3), 135-159, [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90196-8).
- Woo, S.H., Lee, S.B., Kim, K.H., Lee, G., Ryu, S.H., Kim, J.B., Bae, G.B. (2014) On-road air pollution characteristics around a daycare center in urban area, *Particle and Aerosol Research*, 10(2), 61-75, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.11629/jpaar.2014.10.2.061>.
- Woo, S.H., Kim, J.B., Hwang, M.S., Tahk, G.H., Yoon, H.H., Yook, S.J., Bae, G.N. (2016) Diurnal variation of the dust concentration in a railway tunnel, *Journal of the Korean*

Society for Railway, 19(3), 280-287, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.3.280>.

Authors Information

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
박덕신 (한국철도기술연구원 교통환경연구실 수석연구원)

박세찬 (과학기술연합대학원대학교 교통시스템공학 학생연구원)
마이클 버소자 (과학기술연합대학원대학교 교통시스템공학
학생연구원)

이용일 (서울교통공사 보건환경처 전문위원)

이상신 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)

박종성 (국립환경과학원 기후대기연구부 연구사)

김정호 ((주)에이피엠엔지니어링 기술이사)

(현, (주)미세먼지연구소 소장)