



논문

# 서울 한강변 자전거 도로의 시공간적 대기오염 특징

## Characteristics of Spatial and Temporal Air Pollution on Bicycle Way along the Han River in Seoul, Korea

김종범, 김창혁<sup>1)</sup>, 이승복<sup>1)</sup>, 김경환<sup>2)</sup>, 유재우<sup>3)</sup>, 배귀남<sup>2)</sup>,\*

충남연구원 서해안기후환경연구소, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 환경복지연구센터  
<sup>2)</sup>한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단, <sup>3)</sup>한국방송공사

Jong Bum Kim, Chang Hyeok Kim<sup>1)</sup>, Seung-Bok Lee<sup>1)</sup>, Kyung Hwan Kim<sup>2)</sup>,  
 Jae-Woo Yoo<sup>3)</sup>, Gwi-Nam Bae<sup>2)</sup>,\*

Seohaean Research Institute, ChungNam Institute

<sup>1)</sup>Environment, Health and Welfare Research Center, Korea Institute of Science and  
 Technology (KIST)

<sup>2)</sup>Center for Particulate Air Pollution and Health, Korea Institute of  
 Science and Technology (KIST)

<sup>3)</sup>Korean Broadcasting System (KBS)

접수일 2018년 10월 22일  
 수정일 2019년 1월 29일  
 채택일 2019년 3월 18일

Received 22 October 2018  
 Revised 29 January 2019  
 Accepted 18 March 2019

\*Corresponding author  
 Tel : +82-(0)2-958-5676  
 E-mail : gnbae@kist.re.kr

**Abstract** Bicycle way is generally located near the motor road due to the limitation of available space and convenient use. People who use bicycle may inhale highly polluted air during the travelling over the bicycle way. In this study, spatial and temporal variation of air quality over bicycle way was investigated using a mobile laboratory equipped with real-time monitoring instruments. Size distribution of particles ranging from 5.6~560 nm, black carbon, and particle-bound PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) were monitored. In addition, NO, NO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> were measured. They are indicators of vehicle exhaust. Air pollution level over bicycle way was compared with those of expressway and city road, and the nearest ambient air quality monitoring station. As expected, the air pollution level over bicycle road was high during the commuting time due to the heavy traffic volume. The air pollution level at the location close to the expressway was almost the same as that of the expressway. It is suggested that cyclists need to be cautious about highly polluted air over bicycle way.

**Key words:** Air pollution, Bicycle way, Expressway, Han River, Vehicle exhaust

### 1. 서론

세계적으로 산업화, 정보화가 가속화됨에 따라 경제와 생활의 거점인 대도시들이 생겨나고 있으며, 2014년 세계 도시화율은 54%로 인구가 천만명이 넘는 거대도시가 증가하고 있다(UN, 2014). 거대도시에는 주거공간 부족, 교통혼잡, 환경오염 등 다양한 문제가 발생하고 있다. 서울의 면적은 605.20 km<sup>2</sup>로 우리나라 전체 면적의 0.6%이지만 977만명이 거주하고 있다(SK, 2018). 경제협력개발기구(Organiza-

tion for Economic Cooperation and Development, OECD) 가입 국가 중 서울과 인천을 포함한 수도권의 인구밀도는 16,700명/km<sup>2</sup>으로 2등인 런던에 비해 3.27배 높다(KRIHS, 2018). 전국 자동차 등록대수 중 14.1%가 서울에 등록되어 있어(MOLIT, 2017), 교통혼잡도가 높고 도로이동오염원의 대기오염 기여도도 매우 높은 것으로 알려져 있다. 자동차 배기가스에는 미세먼지(particulate matter less than 10 μm, PM<sub>10</sub>)를 포함한 이산화질소(nitrogen dioxide, NO<sub>2</sub>), 검댕(black carbon, BC), 일산화탄소(carbon monoxide,

CO) 등이 포함되어 있으며, 2012년 세계보건기구(World Health Organization, WHO)가 경유 자동차에서 배출되는 디젤입자를 인체에 암을 유발할 수 있는 1군 발암물질(Group 1)로 분류하여 더욱 주목받고 있다(WHO, 2012). 세계경제포럼(World Economic Forum, WEF)에서는 각국의 환경과 관련된 경제, 사회정책을 종합적으로 평가하여 매년 환경성능지수(Environmental Performance Index, EPI)를 발표하는데, 2016년 우리나라의 공기질은 180개국 중 173위를 차지할 만큼 매우 좋지 않다(WEF, 2017).

선진국에서는 날이 늘어가는 도시의 환경문제와 교통혼잡을 해결하기 위해 친환경 교통수단인 자전거 이용을 독려하고 있으며, 다양한 정책을 개발하여 지원하고 있다. 미국은 2005년 연방도로관리청의 주관으로 초등학교 및 중학교 학생 등을 대상으로 학교 주변지역 내 교통혼잡 방지와 대기오염 감소를 목적으로 “Safe Routes to School” 프로그램을 도입하여 자전거를 이용한 등하교를 권고하고 있다. 프랑스 파리의 경우 대기오염 개선을 위해 한시적으로 대중교통수단인 시내버스, 지하철 및 공공자전거를 무료로 운행하기도 하였다. 네덜란드의 경우 자전거 이용 확대를 위해 자전거 도로를 재시공하는 등 많은 노력을 기울이고 있다(KOTI, 2014). 우리나라에서도 자동차의 대체수단으로 자전거의 수송 분담률을 증가시키기 위해 1995년부터 “자전거 이용 활성화에 관한 법률”을 제정하여 시행하고 있으며(MOIS, 1995), 서울시에서는 2017년 기준에 있던 자전거 도로의 이용률 증가와 안전성 확보, 타 지역 자전거 도로와 연계성 향상을 위해 자전거 도로 개선계획을 수립하여 시행하고 있다(SMG, 2017a).

2016년 전국 자전거 수송 분담률은 1.4%이며, 이 중 서울은 1.6%이고 특히 송파구의 경우 26%의 근로자가 자전거로 출퇴근하는 것으로 조사되었다(SK, 2018). 서울시에서 운영하고 있는 공공 자전거 대여 서비스인 “따릉이” 역시 출퇴근 시간대의 이용률이 40%로 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만 자전거로 출퇴근하는 사람들에 대한 건강영향이 문제로 지적되

고 있다(MacNaughton *et al.*, 2014). 한강시민공원은 1986년 정비되어 시민의 휴식과 여가활동을 증진시키기 위해 사용되고 있으며, 연간 6천여명 정도가 이용하고 있다(SMG, 2018a). 그러나 대부분의 한강시민공원이 강변북로, 올림픽대로와 같은 도시고속도로에 인접하여 도로에서 발생한 자동차 오염물질의 영향을 크게 받을 수 있다. 특히 풍향에 따라 도로에서 배출된 오염물질이 한강공원을 이용하는 시민들에게 직접적으로 노출될 수 있으며, 최근 웰빙(well-being) 열풍과 함께 한강변 자전거 도로를 이용하여 출퇴근하는 사람들에게는 더욱 나쁠 수 있다. 도심에서 자전거를 타고 다니면서 노출되는 대기오염의 영향이 보고되고 있는데, Hankey *et al.* (2017, 2012)은 도심 거리에서 오후 퇴근 시간대 자전거를 탈 경우 입자상 오염물질에 대한 노출이 증가하고, 퇴근 시 교통량이 많은 거리 대신 교통량이 적은 이면도로를 이용하면 PM<sub>10</sub>과 BC에 대한 노출을 각각 11%와 19% 줄일 수 있는 것으로 보고하였다. Apparicio *et al.* (2016)은 도심에서 자전거를 타면서 시간대별 NO<sub>x</sub>와 소음의 노출 수준을 조사하였고, Tainio *et al.* (2016)은 도심에서 걷기와 자전거 타기를 통해 얻을 수 있는 건강상 이익이 대기오염의 노출에 의해 일정 부분 감소됨을 밝히고 이와 관련된 상관관계를 제시하였다. Han and Naehar (2005)는 자동차 도로에서 발생하는 주요 오염물질로 NO<sub>2</sub>와 BC를 선정하여 자동차 도로 인근에 위치한 자전거 도로의 경우 도로에서 배출된 오염물질에 의해 천식, 폐암, 심혈관계 질환 등의 발병률이 증가하고, 특히 도로변 BC 노출에 의한 사망률이 초미세먼지(particulate matter less than 2.5 μm, PM<sub>2.5</sub>)의 영향보다 더 큰 것으로 보고하였다(Janssen *et al.*, 2011). 국내에서도 온실가스를 저감시키기 위해 대중교통과 연계한 자전거 도로의 활성화에 대한 연구나 환경 친화적 자전거 도로를 계획하기 위해 모델링을 통한 대기오염물질의 노출농도를 산정하는 연구가 일부 수행되었으나 아직 자전거 도로를 대상으로 노출 수준에 대한 현장연구는 거의 알려져 있지 않다.

이에 본 연구에서는 도시고속도로에서 발생된 오

염물질이 인접한 자전거 도로에 미치는 영향을 시공간적으로 분석하여 공원관리자 및 자전거 도로 이용자에게 기초정보로 제공하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 측정위치 및 시간대

도시고속도로에서 배출된 오염물질이 자전거 도로에 미치는 영향을 알아보기 위해 반포대교 남단부터 원효대로 남단까지 자전거 도로와 올림픽대로를 대상구간으로 선정하였다. 그림 1은 본 연구에서 선정한 측정경로와 측정기간 동안 도시고속도로와 자전거 도로의 이격거리에 따른 영향을 파악하기 위해 선정한 비교측정지점 (comparative measurement position, CMP), 자동기상관측소 (automatic weather system, AWS) 및 도시대기측정소 (air quality monitoring station, AQMS)의 위치와 측정시간을 나타낸 것이다. 도로에서 배출된 오염물질의 확산 및 희석에 가장 큰 영향을 미치는 것이 주변의 풍향·풍속이므로, 본 연구에서는 측정기간 동안 주변 풍향·풍속의 변화를 파악하기 위해 측정지점으로부터 약 300 m 떨어진

한강 AWS의 자료를 활용하였다. 또한, 측정도로로부터 약 330 m 떨어진 서초구 AQMS 자료를 측정 시 주변 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> 농도로 활용하였다.

그림 2는 CMP 4곳의 위치를 상세하게 나타낸 것이다. CMP 1은 지리적으로 원효대교 남단에 위치하고, 63 스퀘어 앞쪽에서 여의상류 IC를 통해 여의나루 방면으로 가는 차량들의 교차가 빈번히 이루어지는 지역이다. CMP 2는 올림픽대로 바로 아래인데 자전거 도로로 통행하는 사람들의 머리 위로 차량들이 운행하고 있어 거리적으로 도로와 가장 인접하여 있으며, 벽 한쪽 부분이 막혀있어 다른 구간에 비해 오염물질이 유입되었을 경우 확산·희석되기 어려운 구조이다. CMP 3은 CMP 2와 마찬가지로 자전거 도로이나 올림픽대로로부터 60 m 떨어진 위치의 개활지로 도로에서 배출된 오염물질이 측정위치까지 이동하는 동안 어느 정도 확산·희석 효과를 기대할 수 있는 지점이다. 마지막 CMP 4는 올림픽대로로부터 가장 멀리 떨어진 지점 (90 m)이나 한강공원 출입구로 이동하는 차량의 영향을 주기적으로 받을 것으로 예상된다.

2017년 3월 15일 하루 중 도로가 가장 혼잡하고 자전거 도로의 이용자가 가장 많은 오전·오후 출퇴근

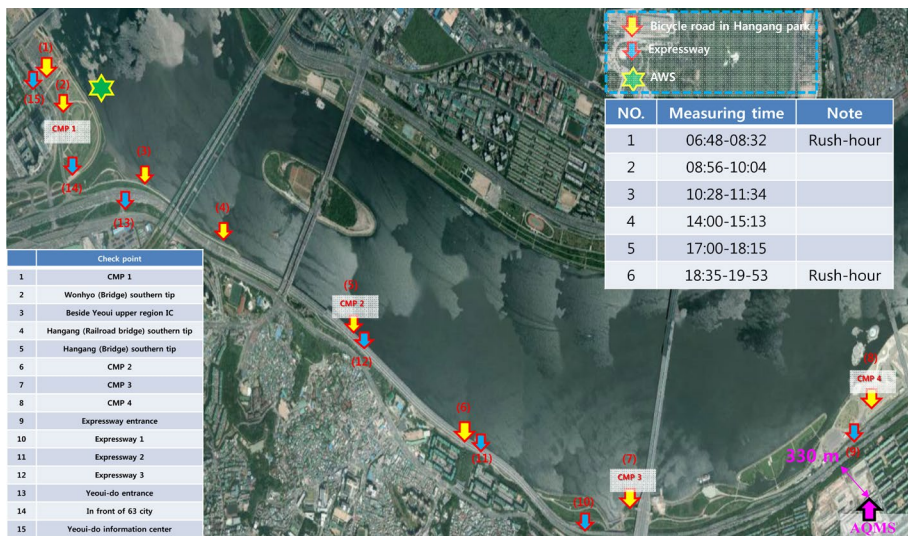


Fig. 1. Map of measurement route, check points, AWS, AQMS, and measuring time.

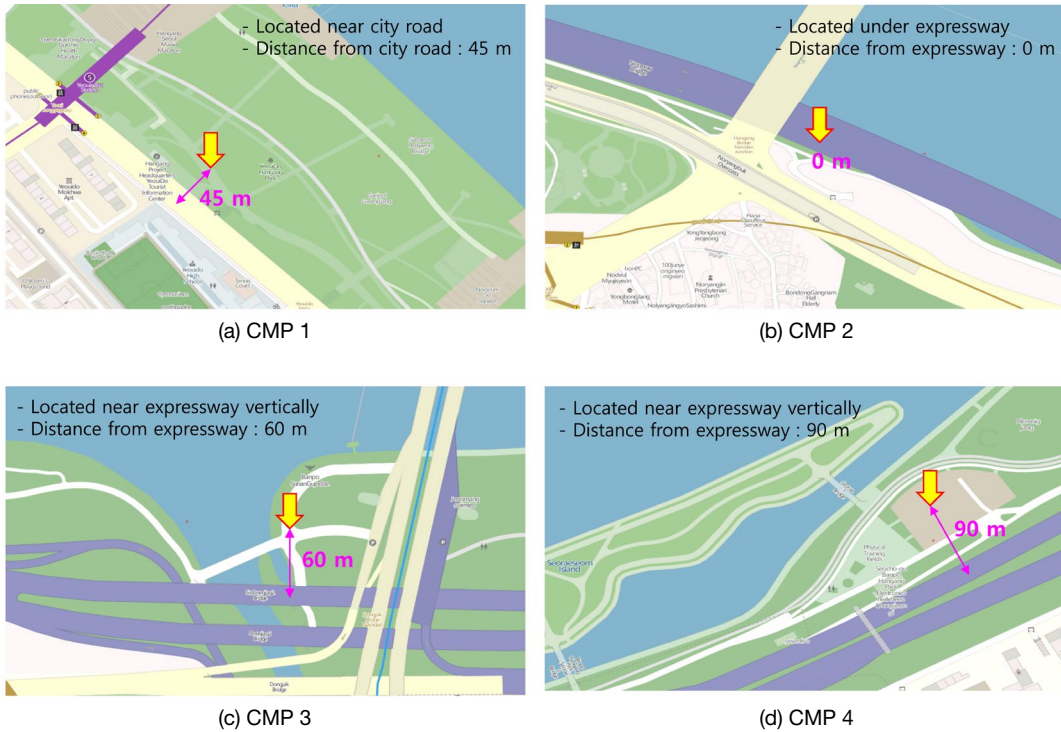


Fig. 2. Map of comparative measurement positions indicating distance from the expressway or city road.

시간대를 포함하여 6시 48분부터 19시 53분까지 6회 왕복 측정을 실시하였다. 이동측정차량(mobile laboratory, ML)을 이용하여 원효대교 남단의 여의도 공원 내 자전거 도로(1)에서 측정을 시작하여 도로를 따라 운행하였고, 회차 지점인 올림픽대로 진입로(9)에서 도시고속도로인 올림픽대로로 진입하여 도시고속도로의 오염도를 측정한 후 (15)에서 다시 자전거 도로(1)로 회차하였다.

## 2.2 측정장비

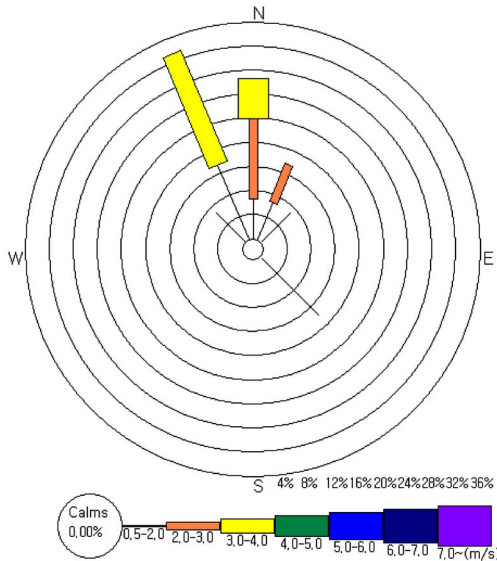
도시고속도로에 인접한 자전거 도로 위 대기오염 물질의 특징을 분석하기 위해 ML을 사용하였다. ML은 고정측정소의 측정값이 대표하기 어려운 지역이나 공간적으로 매우 불균일한 특징을 나타내는 지역 혹은 자동차 배출 오염물질처럼 배출원 인근 지역에서 직접 측정이 필요한 연구에 많이 사용되고 있다 (Woo et al., 2014). 국내에서도 교차로나 도시고속도

로와 같이 차량 통행량이 많은 지역이나 주요 도로로부터 떨어진 이면도로의 오염도 분석 등 주로 도로에서 배출된 오염물질의 실시간 측정에 많이 활용되고 있다 (Kwak et al., 2018; Woo et al., 2016; Kim et al., 2015a, 2014).

ML은 실시간 측정장비를 차량 내부에 장착한 후 등속흡인을 고려하여 설계된 측정관을 통해 유입된 공기 중 입자상 및 가스상 오염물질의 농도를 측정한다 (Kim et al., 2015b). BC와 NO<sub>2</sub>는 자동차 배출가스에 기인되는 대기오염의 주요 지표물질로 사용되고 있다 (Han and Naether, 2005). ML은 실험목적에 따라 측정장비를 추가하거나 제외할 수 있는데, 본 연구에서는 입자상 오염물질을 측정하기 위해 fast mobility particle sizer (FMPS, model 3091, TSI)를 사용하여 도로에 부유하고 있는 나노크기 입자의 입경별 개수농도 (particle number concentration, PN)를 측정하였다. Aethalometer (model AE42, Magee)와 particle-

**Table 1.** Specification of monitoring instruments used in this study.

Classification	Instrument	Air pollutant	Range	Data storage interval
Particulate pollutant	Fast mobility particle sizer	Particle size distribution	5.6~560 nm	1 sec
	Aethalometer	Black carbon	<2.5 $\mu\text{m}$	15 sec
	Particle-bound PAHs monitor	Particle-bound PAHs	TSP	6 sec
Gaseous pollutant	NO <sub>x</sub> analyser	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	0~10 ppm	1 sec

**Fig. 3.** Distribution of wind direction and speed monitored at the AWS during the measurement period.

bound PAHs monitor (model PAS 2000, EcoChem)를 사용하여 각각 BC와 입자상 PAHs를 측정하였다. 가스상 오염물질 중 일산화질소(nitrogen monoxide, NO)와 NO<sub>2</sub>를 측정하기 위해 NO<sub>x</sub> analyser (model CLD 700 AL, Eco Physics)를 사용하였다. 입자상 물질의 측정장비는 측정 전 자체 검교정 시스템을 이용하여 제로 테스트를 실시하였고, 현장에서는 측정 전 고성능필터 (high efficiency particulate air filter, HEPA filter)와 질량유량계 (mass flow meter, MFM)를 사용하여 장비의 누출과 샘플링 유량을 확인하였다. 가스상 물질의 측정장비는 실험실에서 표준가스로 교정 후 사용하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 측정장비들의 세부사항을 나타낸 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자전거 도로 인근 기상 및 대기질

도심에 위치한 강은 비열 차이에 의해 기류를 형성하고 주변의 온도를 조절하는 역할을 한다(Kim and Kim, 2008). 연구대상인 자전거 도로는 한강변에 위치하고, 바람의 방향에 따라 남풍이 불면 자전거 도로 남단에 위치한 도시고속도로에서 배출된 오염물질의 영향을 직접적으로 받을 수 있고, 반대로 북풍이 불면 북단에 위치한 도시고속도로에서 배출된 오염물질의 영향을 주로 받게 된다. 그림 3은 측정기점으로부터 약 300 m 떨어진 한강 AWS에서 측정된 2017년 3월 15일 6시부터 20시까지 1시간 단위의 기상상태를 나타낸 바람장미(wind rose)이다. 당일 주풍은 북북서풍으로 시간평균 풍속은  $2.1 \pm 1.0$  m/s이었고, 측정기간 중 최고 풍속은 17시에 3.9 m/s이었으며, 최저 풍속은 8~10시 2시간 동안 0.7 m/s이었다(KMA, 2018). 이에 따라 남쪽에 위치한 도시고속도로에서 배출된 오염물질의 확산이 북쪽 방향에 위치한 자전거 도로에 직접적인 영향을 미치지 않았을 것으로 추정된다.

그림 4는 측정도로로부터 330 m 떨어진 AQMS에서 측정된 당일 시간에 따른 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 NO<sub>2</sub> 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 봄철에는 계절풍으로 중국 등 오염지역의 공기유입이 활발하여 대기오염이 다른 계절에 비해 심하다. 측정이 실시된 3월에도 PM<sub>10</sub> 기준 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 넘는 고농도 사례가 5일 이상 관측되었고, 평균농도 역시 PM<sub>10</sub> 65.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub> 43.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일평균 대기환경기준을 상회할 만큼 높았다. 측정일의 경우 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도가 각각 47,

27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 3월 중 대기질이 좋은 날이었다(SMG, 2018b). 가스상 오염물질인  $\text{NO}_2$ 의 경우 3월 평균농도가 37 ppb이었는데, 측정일 농도는 40 ppb로 평균과 유사하였다.

### 3.2 도로 상 대기오염도

그림 5는 시간대별로 6회 측정 시 회별 전체구간 평균농도를 나타낸 것이다. 자동차 배기가스의 주요

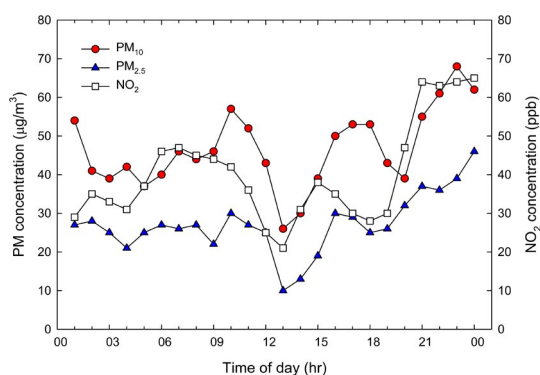


Fig. 4. Diurnal variation of  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , and  $\text{NO}_2$  concentrations monitored at AQMS.

지표로 많이 사용되는 BC와 NO의 경우 출근 시간대인 첫 번째 측정에서 4.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 145.0 ppb로 가장 높았으며, 그 뒤 점차 감소하다가 17시 이후 퇴근 시간이 다가오면서 차량 증가로 인해 농도가 높아졌다. PAHs의 경우 마지막 여섯 번째 측정에서 79.6  $\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으나, 첫 번째와 다섯 번째 측정값이 56.5~59.1  $\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 유사하여 전체적인 농도 변화 경향은 BC와 유사하였다. 전체  $\text{NO}_2$  평균농도는 63.9 ppb로 측정일 AQMS에서 측정된 40 ppb보다 약 1.7 배 높았는데, ML은 도로 상 농도를 측정하지만 AQMS는 도로로부터 약 300 m 이상 이격된 위치에서 어느 정도 희석된 농도를 측정하기 때문에 생긴 차이로 여겨진다. 일변화를 비교하면 AQMS의 경우 13~14시경 최소 농도를 나타내고, 본 측정결과도 역시 가장 낮은 네 번째 측정 시간대가 14시경이므로 일변화 패턴은 유사한 것으로 생각된다.

표 2는 전체 측정값을 도로별로 구분하여 평균농도를 나타낸 것이다. BC 농도는 도시고속도로와 도시도로에서 3.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 동일하게 나타났고, 자전거 도로에서 2.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 자동차 도로의 70% 수준이었다.

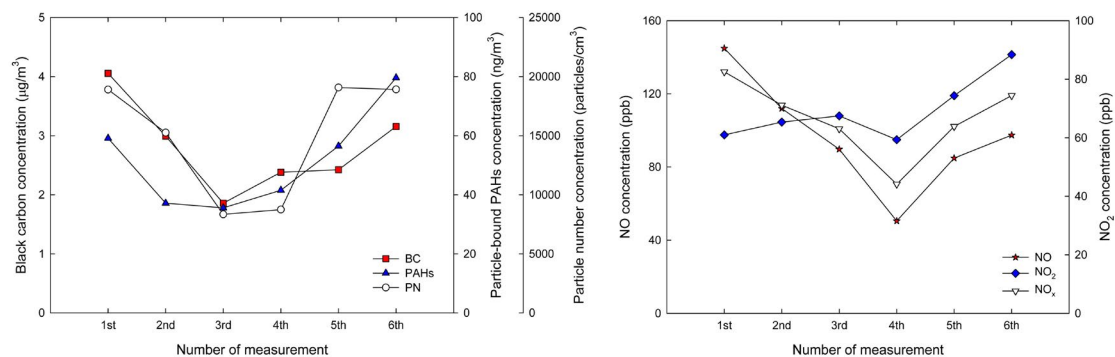


Fig. 5. Diurnal variation of pollutant concentrations averaged for each measurement period.

Table 2. Average concentration of pollutants monitored on each road.

	BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Particle-bound PAHs ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )	NO (ppb)	$\text{NO}_2$ (ppb)	$\text{NO}_x$ (ppb)	PN (particles/ $\text{cm}^3$ )
Bicycle way	2.7	43.8	83.9	62.8	147.1	15,242
Expressway	3.9	95.7	158.6	74.2	233.3	37,572
City road	3.9	88.3	233.0	86.6	320.1	28,457

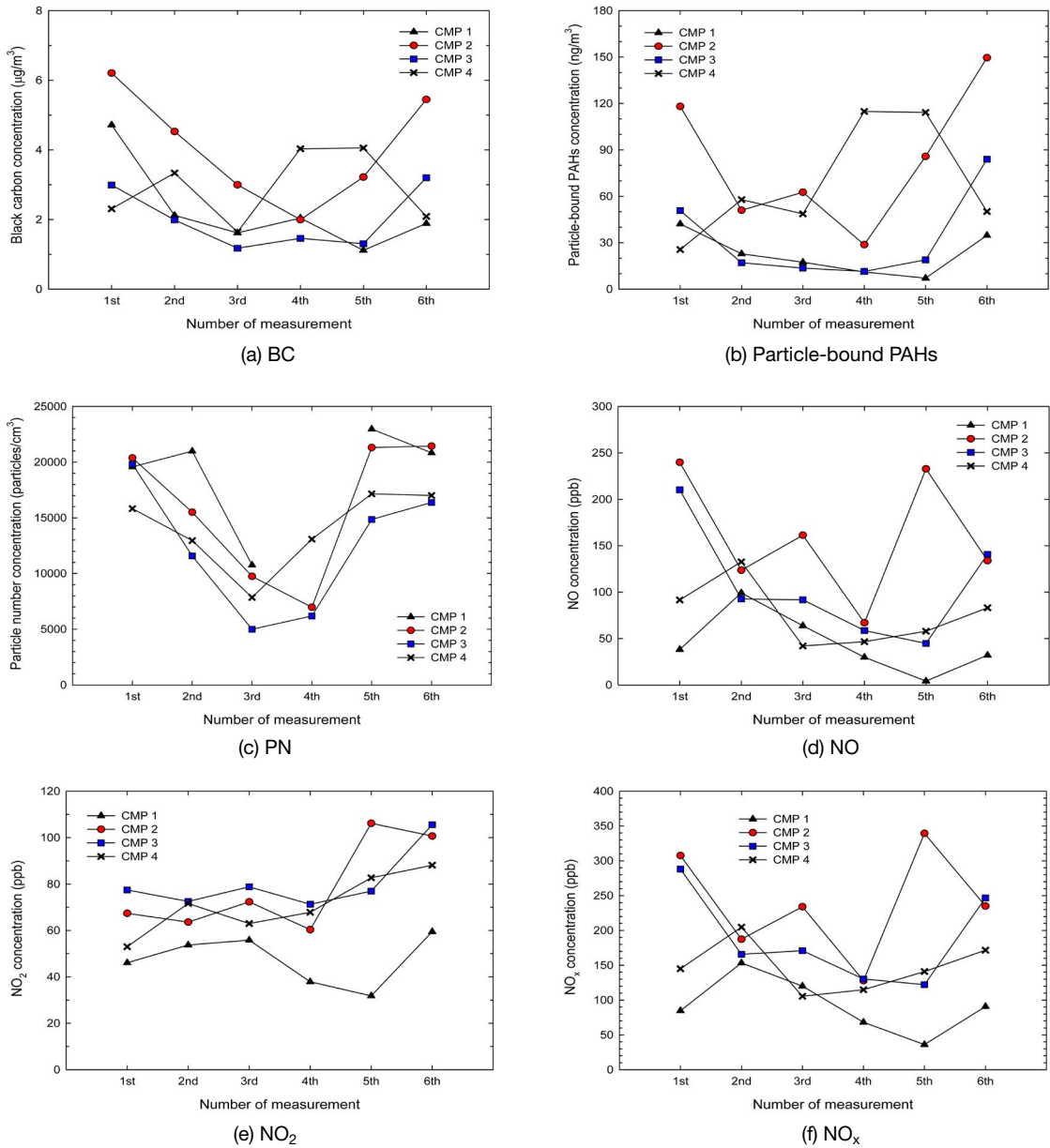


Fig. 6. Diurnal variation of pollutant concentrations monitored at four CMPs.

PAHs 농도는 도시고속도로와 도시도로에서 각각 95.7, 88.3  $\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 유사한 반면 자전거 도로에서는 43.8  $\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 자동차 도로의 약 50% 수준이었다. PN 농도는 도시고속도로에서 37,572 particles/ $\text{cm}^3$ 으로 가장 높았고, 도시도로에서 28,457 particles/ $\text{cm}^3$ ,

자전거 도로에서 15,242 particles/ $\text{cm}^3$  순으로 나타나 도시고속도로가 자전거 도로에 비해 2.5배 가량 높았다. 가스상 오염물질인 NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  농도는 모두 도시도로 > 도시고속도로 > 자전거 도로 순으로 나타났다. 도시도로의 경우 자전거 도로에 비해 1.4~2.8배

가량 높았다. 이전 연구에서 ML을 사용하여 차량 운행조건과 이격간격에 따른 입자상 오염물질의 배출특성을 조사하였는데, 차량의 운행속도가 빠를수록 배출되는 입자상 오염물질의 농도가 증가하고, 도시고속도로에 비해 상대적으로 주행속도가 낮은 시내도로에서 NO<sub>x</sub> 배출이 높은 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2011). 서울시에서 조사한 자료에 의하면, 도시고속도로(올림픽대로)의 평균 운행속도는 56.9 km/h로 도시도로(여의동로)의 24.8 km/h에 비해 2.3배 빠른 것으로 나타났다(SMG, 2018c). 본 연구에서도 상대적으로 주행속도가 낮은 도시도로에서 NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> 농도가 높은 반면, 도시고속도로에서 입자상 오염물질의 농도가 높게 나타났다.

그림 6은 시간대별 4곳의 정지측정위치에서 관측한 농도를 나타낸 것이다. 입자상 오염물질인 BC와 PAHs의 경우 유사한 변화 패턴을 나타냈는데, 교통혼잡시간인 오전과 오후 출퇴근 시간대에 가장 높았으며, 교통량이 적은 4번째(14:00~15:13) 구간의 농도가 가장 낮았다. 입자 개수농도(particle number concentration, PN)의 경우 CMP 2와 CMP 3에서 BC 및 PAHs 농도와 유사한 변화를 나타냈으나, 다른 구간에서는 전혀 다른 변화 양상을 보였다. 주변 AQMS의 NO<sub>2</sub> 농도는 7시~10시 사이 높은 농도를 유지하다가 감소한 후 15시 일시적으로 증가한 후 감소하였고, 다시 17시를 기점으로 증가하는 추세를 나타냈다. 특히, 오후 18시~20시 사이에 급격하게 증가하였다. 본 연구에서는 도로에 가장 인접한 CMP 2에서 3번째(10:28~11:34)와 5번째(17:00~18:15) 측정값이 높게 나타나 AQMS의 측정결과와는 다른 변화 패턴을 보였다. 일부 구간에서 약간 상이한 변화를 보였

지만, 가스상 오염물질의 농도 변화는 대체로 유사한 패턴을 나타냈다.

### 3.3 이격거리에 따른 도로 상 오염도 비교

표 3은 6회 측정 시 각 CMP에서 관측한 오염물질의 농도를 이격거리에 따라 나타낸 것이다. 본 연구에서 측정된 BC의 측정기간 평균농도가 4.5 µg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 수도권 대기 중 BC 농도가 1.2~4.4 µg/m<sup>3</sup>이었고(Kim, 2012), 교외지역 농도는 1.1~1.6 µg/m<sup>3</sup>인 점을 감안할 때(Lee *et al.*, 2014), 도시고속도로와 도시고속도로 바로 아래 위치한 CMP 2에서 BC 농도가 4.1 µg/m<sup>3</sup>이라는 것은 매우 높은 수준이다. PAHs의 경우 도시고속도로에서 93.2 ng/m<sup>3</sup>이었고, 가장 가까운 CMP 2에서도 이와 유사한 82.6 ng/m<sup>3</sup>이었다. Park *et al.* (2010)이 측정방법은 다르지만 서울 서대문구 도로변에서 고용량 시료채취법으로 수행한 연구에서 59.1 ng/m<sup>3</sup>으로 보고하였고, 서울을 포함한 세계 주요 도시를 대상으로 한 연구결과가 35~67 ng/m<sup>3</sup> 수준이었다는 것을 감안했을 때, 자전거 도로의 농도가 22.5~82.6 ng/m<sup>3</sup>인 것은 BC와 마찬가지로 매우 높은 수준이다. NO<sub>2</sub>는 70.9 ppb, NO<sub>x</sub>는 203.9 ppb, PN은 39,196 particles/cm<sup>3</sup>으로 나타났다. 이것은 대전시에서 지역별로 측정된 NO<sub>2</sub> 농도가 31.3~43.2 ppb 수준이었고, 서울 서대문구와 청량리에서 측정된 농도가 NO<sub>x</sub> 133 ppb, PN 12,926~24,910 particles/cm<sup>3</sup>, 그리고 당일 AQMS의 NO<sub>2</sub> 농도인 40 ppb에 비해 1.5~2배 높다(Lee and Bae, 2010; Yim *et al.*, 2008; Bae *et al.*, 2007). 서울시에서 조사한 도로 교통량 정보에 의하면, 도시고속도로(올림픽대로)의 일평균 운행대수는 261,351대로 도시도로(여의대방로)

**Table 3.** Average concentrations of pollutant monitored at CMPs.

Location (distance from the expressway)	BC (µg/m <sup>3</sup> )	Particle-bound PAHs (ng/m <sup>3</sup> )	NO (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	NO <sub>x</sub> (ppb)	PN (particles/cm <sup>3</sup> )
CMP 1 (45 m)	2.2	22.5	44.6	47.5	92.2	19,029
CMP 2 (0 m)	4.1	82.6	159.8	78.4	238.6	15,893
CMP 3 (60 m)	2.0	32.6	106.4	80.4	187.3	12,304
CMP 4 (90 m)	2.9	68.5	75.6	71.0	147.1	13,983
Expressway	4.5	93.2	132.6	70.9	203.9	39,196



의 96,898대에 비해 2.7배나 높은 것으로 나타났는데 (SMG, 2017b), 도시고속도로와 인근 자전거 도로의 농도가 타 지역에서 수행된 연구결과에 비해 높게 나타난 것은 교통량에 기인한 배출량 차이 때문인 것으로 추정된다.

가스상 오염물질인 NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>의 경우 CMP 2와 거의 유사하거나 좀 더 높은 경향을 나타냈고, 그 외 구간에서는 약 1/2 수준이었다. PN의 경우 도시고속도로에 비해 자전거 도로의 농도가 36~49% 수준이었다.

#### 4. 결 론

대도시 교통체증에 의한 혼잡도 증가와 함께 웰빙 열풍이 불면서 출퇴근 시간대를 활용하여 운동하려는 사람들의 자전거 도로 이용이 증가하고 있다. 하지만 한강변에 위치한 자전거 도로의 경우 강의 양쪽에 강변북로와 올림픽대로라는 서울을 관통하는 도시고속도로가 인접해 있어 기상조건에 따라 도로에서 배출된 오염물질의 영향을 직접적으로 받을 수밖에 없다. 이에 본 연구에서는 도시고속도로에 인접해 있는 일정 구간의 자전거 도로를 선정하여 시간대 및 이격거리에 따른 오염물질의 농도 수준을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자전거 도로의 인근 도시고속도로와 도시도로의 농도는 출퇴근 시간대에 가장 높았고, 도로별로는 운행 특성에 따라 도시도로에서 NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>가 높았으며, 도시고속도로에서는 입자상 오염물질인 BC, PAHs, PN이 높게 나타났다. 자전거 도로에서 BC 농도는 2.7 µg/m<sup>3</sup>으로 자동차 도로의 70% 수준이었고, PAHs 농도는 43.8 ng/m<sup>3</sup>으로 자동차 도로의 약 50% 수준이었다. 자전거 도로에서 PN 농도는 15,242 particles/cm<sup>3</sup>으로 도시고속도로의 약 40% 수준이었다. 가스상 오염물질인 NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도는 모두 도시도로 > 도시고속도로 > 자전거 도로 순으로 나타났다.
2. 도시고속도로의 오염도 수준은 기존 도심에서 측

정된 자료에 비해 1.5~2배 정도 높았다. 이것은 도시고속도로가 도심에 비해 차량 운행속도가 빠르고 통행량이 많기 때문인 것으로 판단된다.

3. 도시고속도로로부터 이격거리에 따른 자전거 도로의 오염도를 분석하여 도시고속도로 바로 아래 위치하여 이격거리가 거의 없는 위치(CMP 2)의 농도가 가장 높았으며, 특히 유해성이 큰 BC와 PAHs 농도가 매우 높았다.

본 연구를 통해 주요 도시고속도로와 인접해 있는 자전거 도로의 경우 대기오염물질의 농도가 인접 도로와 유사한 수준까지 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 시간대별 변화 특성을 파악하기 위해 반복 측정을 실시하였지만, 하루 동안 측정결과이기 때문에 풍향과 풍속의 변화, 계절적 차이, 교통량 변화 등 다양한 요인에 의해 약간 상이한 결과가 나타날 수 있다는 점을 감안하여야 한다. 유산소 운동 시 호흡량이 증가하면서 평상시에 비해 더 많은 공기를 흡입하게 되는데, 이때 오염된 공기를 마시면 오히려 건강에 해로울 수 있다. 정부에서는 국민건강을 보호하기 위해 생활환경의 대기오염 특성을 파악하여 국민들이 오염도가 심한 시간대에 자전거 도로의 이용을 자제하는 등 올바른 생활습관을 갖도록 객관적인 정보를 제공할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 KBS의 “특집다큐, 어린이를 위한 우리 동네 미세먼지 보고서”와 한국과학기술연구원의 기관고유사업 “환경복지를 위한 실내공기 유해인자 제어 및 탐지기술 개발(2E29670)”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- Apparicio, P., Carrier, M., Gelb, J., Seguin, A.M., Kingham, S. (2016) Cyclist's exposure to air pollution and road traffic noise in central city neighbourhood of Montreal, Jour-

- nal of Transport Geography, 57, 63-69, DOI: 10.1016/j.trangeo.2016.09.014.
- Bae, G.N., Huh, S., Lee, S.B., An, M., Park, D., Hwang, J. (2007) Ultrafine particle pollution level at the roadside of Seoul in Spring, Particle and Aerosol Research, 3(1), 29-40. (in Korean with English Abstract)
- Han, X., Naeher, L.P. (2005) A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world, Environmental International, 32, 106-120, DOI: 10.1016/j.envint.2005.05.020.
- Hankey, S., Lindsey, G., Marshall, J.D. (2017) Population-level exposure to particulate air pollution during active travel: planning for low-exposure, health-promoting cities, Environmental Health Perspectives, 125(4), 527-534, DOI: 10.1289/EHP442.
- Hankey, S., Marshall, J.D., Brauer, M. (2012) Health impacts of the built environment: within-urban variability in physical inactivity, air pollution, and ischemic heart disease mortality, Environmental Health Perspectives, 120(2), 247-253, DOI: 10.1289/ehp.1103806.
- Jassen, N.A.H., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., Bree, L., Brink, H., Keuken, M., Atkinson, R.W., Andeson, H.R., Brunekreef, B., Cassee, F.R. (2011) Black carbon as an additional indicator of adverse health effects of airborne particles compared with PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, Environmental Health Perspectives, 119(12), 1691-1699, DOI: 10.1289/ehp.1003369.
- Kim, K.H., Lee, S.B., Woo, S.H., Bae, G.N. (2014) NO<sub>x</sub> profile around a signalized intersection of busy roadway, Atmospheric Environment, 97, 144-154, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.012.
- Kim, K.H., Lee, S.B., Woo, D., Bae, G.N. (2015a) Influence of wind direction and speed on the transport of particle-bound PAHs in a roadway environment, Atmospheric Pollution Research, 6, 1024-1034, DOI: 10.1016/j.apr.2015.05.007.
- Kim, K.H., Woo, D., Lee, S.B., Bae, G.N. (2015b) On-road measurements of ultrafine particles and associated air pollutants in a densely populated area of Seoul, Korea, Aerosol and Air Quality Research, 15, 142-153, DOI: 10.4209/aaqr.2014.01.0014.
- Kim, Y.R., Kim, K.S. (2008) Water management strategy of Seoul for response the climate change, Korea, The Seoul Institute, 10, 1-20.
- Kim, Y.S. (2012) Black carbon monitoring for managing hazardous air pollutants in the metropolitan area, Seoul Studies, 13(2), 175-186.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2018) Open data portal for weather. (<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)
- Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS) (2018) Urban information network. (<https://ubin.krihs.re.kr/ubin/index.php>)
- Korea Transport Institute (KOTI) (2014) KOTI Bicycle transport newsletter, 5(3), 1-8.
- Kwak, K.H., Woo, S.H., Kim, K.H., Lee, S.B., Bae, G.N., Ma, Y.I., Sunwoo, Y., Baik, J.J. (2018) On-road air quality associated with traffic composition and street-canyon ventilation: mobile monitoring and CFD modeling, Atmosphere, 9(3), 92, DOI: 10.3390/atmos9030092.
- Lee, K.W., Han, S.C., Lee, J. (2014) Measurement of black carbon concentration in rural area, Transportations of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, 1, 17-24. (in Korean with English Abstract), DOI: 10.3795/KSME-B.2014.38.1.017.
- Lee, M., Lim, J., Kim, S., Kim, K., Jung, C. (2013) A study on the emission characteristics of gasoline vehicle according to the climate and driving conditions, Proceeding of the Korean Society of Automotive Engineers Conference, 283-289. (in Korean with English abstract)
- Lee, S., Kim, H., Park, J., Cho, G. (2011) On-road investigation of PM emission of diesel aftertreatment technologies (DPF, Urea-SCR), Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 19(5), 92-99. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.B., Bae, G.N. (2010) Characteristics of air pollution at a junction area contaminated with vehicle emissions, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, 18(4), 48-53. (in Korean with English Abstract)
- MacNaughton, S., Melly, J., Vallarino, G., Admkiewicz, J.D., Spengier. (2014) Impact of bicycle route type on exposure to traffic-related air pollution, Science of the Total Environment, 15(490), 37-43, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.111.
- Ministry of Interior and Safety (MOIS) (1995) Promotion of the use of bicycle act.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2017) Statistical yearbook of MOLIT 2017.
- Park, J.S., Yoon, S.K., Bae, W.K. (2010) Distribution and emission source of PAHs in ambient air of Seoul, Analysis Science and Technology, 23(3), 269-277. (in Korean with English Abstract), DOI: 10.5806/AST.2010.23.3.269.
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2017a) Seoul in my hands. (<http://mediahub.seoul.go.kr/archives/1091295>)
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2017b) Seoul traffic volume research report 2016.
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2018a) Life in Seoul.

- (<https://hangang.seoul.go.kr/>)
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2018b) Seoul atmospheric information. (<http://cleanair.seoul.go.kr>)
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2018c) Seoul vehicles speed report 2017.
- Statistics Korea (SK) (2018) Korean statistical information service. (<http://kosis.kr/index>)
- Tainio, M., Nazelle, A.J.D., Gotschi, T., Kahlmier, S., Rojas-Rueda, D., Nieuwenhijzen, M.J., Sa, T.H.D., Kelly, P., Woodcock, J. (2016) Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking?, *Preventive Medicine*, 87, 233-236, DOI: 10.1016/j.ypmed.2016.02.002.
- United Nations (UN) (2014) World urbanization prospects: The 2014 revision.
- Woo, S.H., Lee, S.B., Kim, K.H., Lee, G., Ryu, S.H., Kim, J.B., Bae, G.N. (2014) On-road air pollution characteristics around a day-care center in urban area, *Particle and Aerosol Research*, 10(2), 61-75. (in Korean with English Abstract), DOI: 10.11629/jpaar.2014.10.2.061.
- Woo, S.H., Kwak, K.H., Bae, G.N., Kim, K.H., Kim, C.H., Yook, S.J., Jeon, S., Kwon, S., Kim, J., Lee, S.B. (2016) Overestimation of on-road air quality surveying data measured with a mobile laboratory caused by exhaust plumes of a vehicle ahead in dense traffic areas, *Environmental Pollution*, 218, 1116-1127, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.065.
- World Economic Forum (WEF) (2017) Environmental Performance Index 2016.
- World Health Organization (WHO) (2012) IARC: Diesel engine exhaust carcinogenic.
- Yim, B., Kim, S.T., Yang, H.M. (2008) Nitrogen dioxide measurement with diffusive passive samplers at the curbside points in Daejeon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(2), 143-152. (in Korean with English Abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2008.24.2.143.

### Authors Information

- 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)  
 김창혁 (한국과학기술연구원 환경복지연구센터 학생연구원)  
 이승복 (한국과학기술연구원 환경복지연구센터 선임연구원)  
 김경환 (한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단 연구팀장)  
 유재우 (한국방송공사 TV제작본부 교양다큐 PD)  
 배귀남 (한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단 사업단장)