



창립 40주년 기념 특집호

# 주행 측정 차량을 이용한 국내 자동차 대기오염 연구 동향

## Trend on the Domestic Vehicle-Related Air Pollution Studies Using a Mobile Laboratory

배귀남\*, 이승복<sup>1)</sup>, 김경환<sup>1)</sup>, 광경환<sup>2)</sup>

한국과학기술연구원 초미세먼지사업단, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 지속가능환경연구원,  
<sup>2)</sup>강원대학교 환경융합학부

Gwi-Nam Bae\*, Seung-Bok Lee<sup>1)</sup>, Kyung Hwan Kim<sup>1)</sup>, Kyung-Hwan Kwak<sup>2)</sup>

Center for FRIEND Project, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Center for Sustainable Environment Research, KIST, Seoul, Republic of Korea

<sup>2)</sup>School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea

접수일 2023년 7월 27일  
수정일 2023년 9월 13일  
채택일 2023년 9월 26일

Received 27 July 2023

Revised 13 September 2023

Accepted 26 September 2023

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-958-5676

E-mail : gnbae@kist.re.kr

**Abstract** Vehicle emission is a dominant source of air pollutants in urban areas. For protecting citizen's health, vehicle-related air pollution has been continuously monitored at roadside air monitoring stations. Mobile laboratory (ML) with a high spatial resolution has been operated to investigate vehicle-related air pollution on roads in detail since early 2000s. In this work, vehicle-related air pollution studies using an ML carried out by the KIST research team in Korea was extensively reviewed. Studies on on-road monitoring, tunnel measurements, and air pollution map were discussed. International collaborations were also mentioned. Recently, MLs are popularly utilized by many research teams in Korea to characterize spatial air pollution distribution.

**Key words:** Air pollution map, Emission factor, Mobile laboratory, Vehicle emission, Spatial distribution

### 1. 서 론

2013년 1월 중국을 중심으로 동북아시아 지역에서 극심한 스모그가 장기간 지속되는 현상이 발생하여 전 세계 사람들이 동북아시아 지역의 심각한 대기오염에 주목하게 되었다. 한국에서는 2003년 '수도권 대기환경 개선에 관한 특별법'을 제정하여 대기질 개선을 위하여 많이 노력하여 점차 미세먼지 농도가 낮아지고 있었으나 (UNEP, 2023), 중국의 영향을 받아 2013년 이후 더 이상 감소하지 않고 정체 상태에 머물러 미세먼지가 사회적 이슈로 크게 부각되었다. 에어코리아를 통해 도시대기 측정소의 관측값이 실시간으로 공개되고 있었는데, 국민들의 상세한 미세먼

지 정보에 대한 요구로 도시대기 측정소가 2013년 257개소(2013년 12월 기준, 대기환경연보, 환경부)에서 2022년 521개소(2022년 12월 기준, 대기환경월보, 환경부)로 2배 넘게 확충되었다. 또한, 2014년부터 미세먼지 예보가 실시되고 있다.

한편, 도시 지역의 경우 도로를 달리는 자동차가 주된 대기오염물질의 배출원이므로, 한국과 유사하게 좁은 면적에 많은 자동차가 운행되는 유럽의 도시에는 도시대기 측정소에 추가로 도로변 대기 측정소를 설치하여 자동차 인접 대기오염을 모니터링하고 있다. 한국도 도시 지역에 점차 도로변 대기 측정소를 확충하는 추세이다. 서울시의 경우 도로변 대기 측정소가 2013년 12개소(2013년 12월 기준, 대기환

경연보, 환경부)에서 2022년 15개소(2022년 12월 기준, 대기환경월보, 환경부)로 늘었다. 하지만 정보화 시대를 살고 있는 현대인들은 시·공간적으로 해상도가 더 높은 대기오염 정보를 원하고 있다.

이러한 추세에 맞추어 주행 측정 차량(ML, mobile laboratory)에 실시간 측정기를 설치한 후 주행하면서 도로상 대기오염물질을 측정하는 연구가 2000년대 초부터 수행되었다(Hagler *et al.*, 2010; Kittelson *et al.*, 2006; Westerhahl *et al.*, 2005; Pirjola *et al.*, 2004; Bukowiecki *et al.*, 2002). 본 고에서는 배터리 없이 외부 전원을 이용하여 고정된 위치에서 측정하는 ‘이동 측정 차량’과 구분하여 배터리를 이용하여 주행하면서 측정할 수 있는 차량을 ‘주행 측정 차량’이라고 부르려고 한다. 이와 함께 다양한 시·공간적 해상도를 적용하는 대기질 모델링 연구도 시도되었다(Briant and Seigneur, 2013; Keuken *et al.*, 2013; Menut *et al.*, 2013; Beevers *et al.*, 2012; Zwack *et al.*, 2011; Stein *et al.*, 2007; Touma *et al.*, 2006). 교통 신호가 있는 교차로에서 입자 수 농도의 영향 구역에 관한 연구도 수행되었다(Goel and Kumar, 2015).

또한, 차량에 노출 챔버(exposure chamber)를 설치하여 대기오염물질의 노출에 따른 건강 영향을 조사하는 연구도 수행되었다(Zhu *et al.*, 2008). 더 나아가 대기질 모델을 노출 모델과 결합하여 건강 영향을 분석하는 연구를 시도하였다(Isakov *et al.*, 2009). 자동차 대기오염물질의 노출평가에 필요한 공간적 해상도 조건에 관한 연구도 수행되었다(den Batterman *et al.*, 2014). 사람들이 직접 측정기를 갖고 도로 인접 지역을 돌아다니면서 자동차 인접 국소환경(micro-environments)의 대기오염도를 조사하였다(Houston *et al.*, 2013). 자전거를 타고 20 m 공간 해상도의 검댕(BC, black carbon) 농도 지도를 작성하는 연구가 수행되었다(Bossche *et al.*, 2015). 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도와 자동차 배출가스 농도의 비를 이용하여 실도로에서 배출계수를 구하는 연구도 수행되었다(Liggio *et al.*, 2012). 최근 세계보건기구(WHO, World Health Organization)에서는 글로벌 대기질 가이드라인을

개정하면서 관련 자료의 부족으로 가이드라인 항목으로 지정하지 않았지만, 건강에 유해하다고 추정되는 극미세입자(UFP, ultrafine particle), BC, 황사(sand & dust storms)에 대하여 우수 실행방안(good practice statement)을 제시하였다(WHO, 2021).

시·도보건환경연구원에서는 도시대기 측정소의 공간적 한계를 보완하기 위하여 이동 측정 차량을 운영하고 있다. 이 차량은 도시대기 측정소에서 운영하는 다양한 측정기를 차량에 탑재한 후 특정한 장소로 이동 및 전원을 연결하여 주로 단기간 측정을 실시하여 기존 측정소의 관측값과 비교하여 공간적 차이를 파악하고 있다. 더 상세한 공간분포를 파악하기 위하여 한국과학기술연구원(KIST)에서는 환경부 Eco-STAR Project (무·저공해자동차사업단)와 Global Top Project (친환경자동차기술개발사업단), KIST 기관고유사업의 연구비 지원을 받아 2010년부터 차량에 실시간 측정기를 장착하여 도로를 주행하면서 자동차 배출 대기오염물질을 모니터링하는 연구를 수행하였다. 처음에는 그랜드 스타렉스 차량에 10종의 측정기를 장착하여 운영하였고(Bae *et al.*, 2016, 2013; Kim *et al.*, 2015a), 간편하게 2~3개 항목을 측정할 수 있도록 소형차도 이용하였다. 최근에는 전기차(EV, electric vehicle)에 실시간 측정기를 장착하여 연구하고 있다. 이들 차량의 특징을 비교하여 표 1에 나타냈다.

최근 국내의 타 연구기관에서도 ML을 이용한 연구가 시도되고 있다. 한국환경공단에서는 2018년 2월 ML에 실시간 질량분석장치(SIFT-MS, Selective Ion Flow Tube - Mass Spectrometry)를 장착하여 산업단지의 유해대기오염물질(HAPs, hazardous air pollutants)의 공간분포를 분석하였다(Youn *et al.*, 2020). 국립목포대학교에서는 2020년 ML에 암모니아(NH<sub>3</sub>), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), BC 측정기를 장착하여 계절별 서울시 암모니아 농도의 공간분포를 분석하였다(Kim *et al.*, 2021).

본 고에서는 3차원 대기질 특성을 규명하는 데 항공기, 드론과 함께 ML이 이동형 대기질 측정 플랫폼

**Table 1.** Comparison of three mobile laboratories operated by the KIST research team.

Name of platform	Gas phase instruments	Particle phase instruments	Purpose / User
Mobile laboratory (ML) based on Hyundai Grand Starex	NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> analyzer (Environmental S.A.), SO <sub>2</sub> analyzer (43i, Thermo Scientific), CO/CO <sub>2</sub> analyzer (Environmental S.A.)	FMPS (TSI), CPC & OPC (Grimm Aerosol Technik), PAHs monitor (PAS-2000, EchoChem Analytics), Particle surface area monitor (AeroTrak Nanoparticle Aerosol Monitor 9000, TSI), BC monitor (AE-33, Magee Scientific)	Research on atmospheric environment, vehicle emission, and health effect / Professional experts
Mobile air quality monitoring station (MAMS) based on Kia Soul	NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> analyzer (CLD 700 AL, Eco-Physics)	Dust monitor (1.109, Grimm Aerosol Technik), BC monitor (AE-51, AethLabs)	Air quality management / Local governmental officers
Electric mobile laboratory based on Kia Bongo EV	NH <sub>3</sub> analyzer (Picarro Inc.), NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> analyzer (42i, Thermo Scientific), PTR-MS (Ionicon Analytik G.m.b.H.)	Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM, Aerodyne Inc.), BC monitor (AE-33, Magee Scientific), Trace elements (online-XRF, Xact 625, SailBri Cooper, Inc.)	Physicochemical research on atmospheric environment / Professional experts

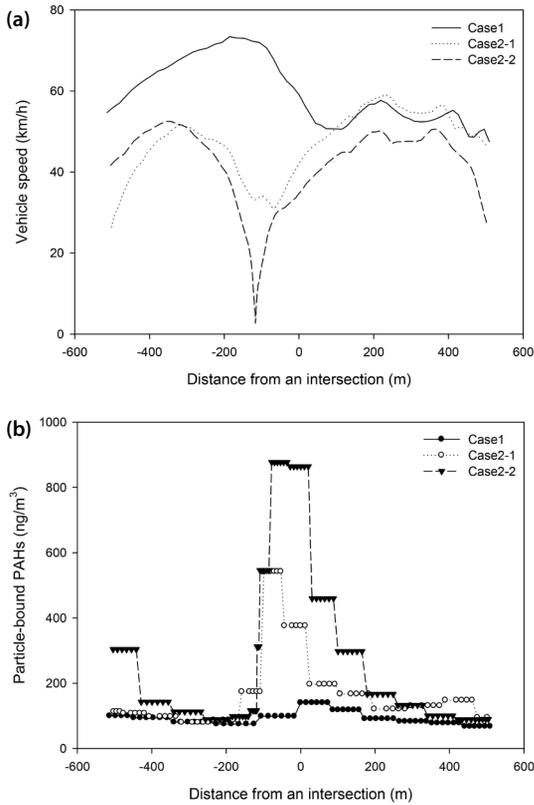
으로 유용하게 사용될 수 있도록 KIST 연구팀의 연구 경험을 주제별로 정리하여 소개하였다.

## 2. 도로상 대기오염 모니터링

먼저 교통량에 따른 오염도 차이를 파악하기 위하여 2010년 10월 5일 서울시 노원구를 대상으로 교통량이 많은 간선도로와 차량의 이동이 적은 이면도로를 주행하면서 5 nm 이상인 UFP의 총 수 농도를 응축입자계수기(CPC, Condensation Particle Counter, Grimm mobile 5404)로 측정하여 공간분포를 조사하였다(Lee *et al.*, 2011). 이때 건물목에서 신호등에 따라 정차 후 출발 시 UFP 농도가 급격하게 증가하는 현상이 관찰되었다. 초기 연구로 데이터 스크리닝을 충분히 하지 못하여 정차 시 디젤 연료를 이용하는 주행 차량의 배출가스(self-contamination) 영향이 포함되어 있을 수 있다. 또한, 도심 교차로에서 교통 신호에 따라 자동차에서 배출되는 NO<sub>x</sub> 농도의 변화 패턴을 조사하였다(Kim *et al.*, 2014). 교통 신호에 따른 자동차 운행 패턴을 3가지 경우(① 준 정속 운전, ② 감속과 가속 운전, ③ 감속, 공회전 및 가속 운전)로 구분하여 14회 측정 자료의 시·공간 분포 특징을 분석

하여 교차로 중심으로부터 400 m까지 NO<sub>x</sub> 농도가 증가하는 것을 밝혀냈다. 그림 1은 준 정속 운전의 경우(Case 1)와 감속과 가속 운전의 경우(Case 2)에 대하여 교차로 근처에서 차량의 속도 변화와 경유 자동차에서 배출되는 입자 부착 다환방향족탄화수소(PM-PAHs, particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons) 농도의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. Case 1의 경우 차량의 속도 변화가 적어 교차로 중심에서 PM-PAHs 농도의 증가가 미미하나, Case 2의 경우 차량의 속도 변화가 매우 커 교차로 중심에서 PM-PAHs 농도의 증가가 두드러지게 나타난다. 이러한 결과들은 교통의 흐름을 매끄럽게 제어하는 교통 신호 체계를 운영하여 도심의 대기오염 발생을 억제할 필요가 있다는 것을 시사한다.

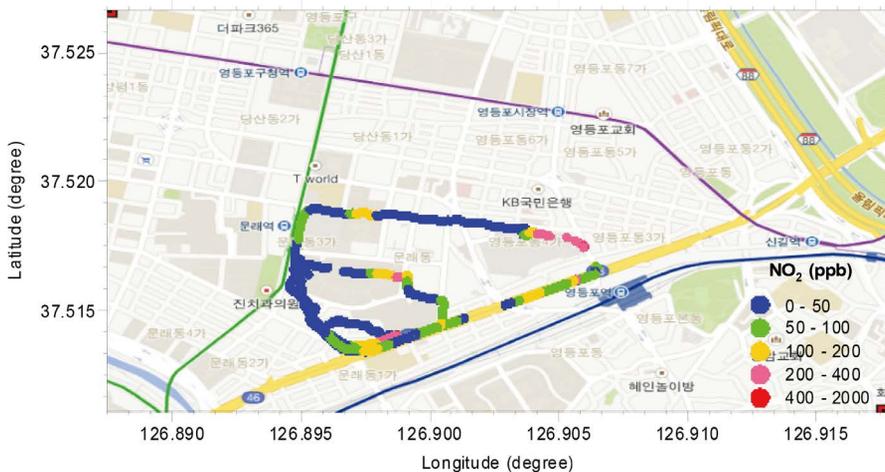
대표적 어린이 생활시설인 어린이집 주변 도로를 ML로 모니터링하여 교통량 등에 따른 오염도 차이를 상세하게 비교하였다(Woo *et al.*, 2014). 2013년 8월 30일 어린이가 주로 생활하는 아파트와 어린이집 주변의 도로를 3개 경로(route)로 구분하여 5회 측정을 통해 도로상 대기오염도의 고해상도 공간분포와 일변화 특징을 조사하였다. 그림 2를 보면 교통량이 많은 간선도로의 NO<sub>2</sub> 농도가 주택가 이면도로에 비해 상대적으로 높은 공간적 분포를 쉽게 알 수 있다.



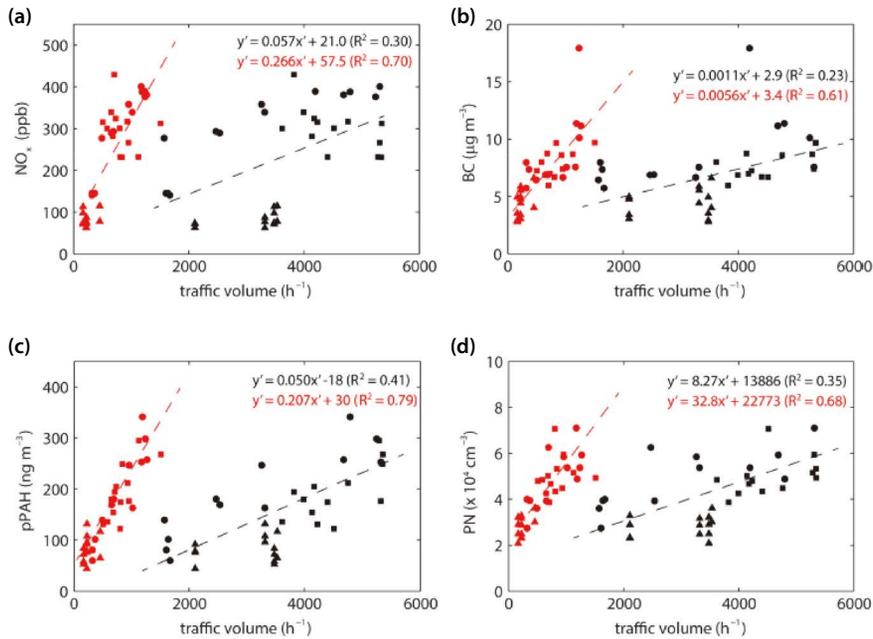
**Fig. 1.** (a) Vehicle speed and (b) PM-PAHs concentration profiles for Case 1 and Case 2 around the intersection as a function of distance.

이러한 도로상 측정 자료를 인근 도시대기 측정소 및 도로변 대기 측정소의 관측 자료와 비교하여 유사한 패턴을 확인하였다. 또한, KBS 특집다큐 어린이를 위한 우리 동네 미세먼지 보고서(2017년 5월 6일 방영)의 제작과 연계하여 2017년 3월 15일 자동차 도로에 인접하여 위치한 서울시 한강변 자전거 도로의 대기 오염도를 조사하였다(Kim *et al.*, 2019).

서울에서 가장 변화한 강남구의 상업시설과 주거 시설로 이루어진 지역의 도로를 주행하면서 교통량에 따른 대기오염도의 공간분포를 조사하였다(Kim *et al.*, 2015a). 직사각형 경로를 2~4 km 거리의 5개 섹션으로 구분하여 2011년 12월 22일 5회 반복 측정하였고, 이때 배경농도를 함께 측정하였다. 주거지역의 입자 수, 입자 표면적, 검댕, 입자 부착 다환방향족탄화수소 (PM-PAHs), 일산화질소 (NO), 이산화질소 (NO<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub> 농도가 교통량이 많은 상업지역 등 다른 섹션에 비해 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있었다. 또한, 서울시 강남구 테헤란로에서 교통량과 도시 협곡 환기에 따른 도로상 대기질 변화를 ML 측정과 함께 전산유체역학 (CFD, computational fluid dynamics) 모델링 기법으로 해석하였다(Kwak *et al.*, 2018). 2013년 11월 5일부터 8일 사이에 1.8 km 거리의 도시



**Fig. 2.** Spatial NO<sub>2</sub> map around the day-care center (1st run).



**Fig. 3.** Scatter diagrams between measured (a) NO<sub>x</sub>, (b) BC, (c) pPAH (PM-PAH), and (d) PN concentrations and total (black) and HEV (red) traffic volumes during mobile monitoring periods 1 (circle), 2 (square), and 3 (triangle) with linear regression lines for total (black dashed line) and HEV (red dashed line) traffic volumes, respectively (Kwak *et al.*, 2018).

협곡을 ML로 주행하였고, 도로에 대한 풍향을 3가지로 구분하여 각각 13회 주행한 측정 자료를 100 m 간격으로 분석하였다. 이때 차종별 교통량을 측정하여 대기오염도와 관계도 분석하였다(그림 3). RV/SUV (recreational vehicle / sports utility vehicle), 트럭, 밴, 버스 등과 같은 경유 자동차 (HEV, high emitting vehicle)에서 대기오염물질이 많이 배출된다는 것을 밝혀냈다. 또한, 동일한 배출 조건에서도 주변 건물 구조에 의해 환기 효율이 낮은 구간에서 고농도의 대기오염물질에 노출된다는 것을 확인하였다.

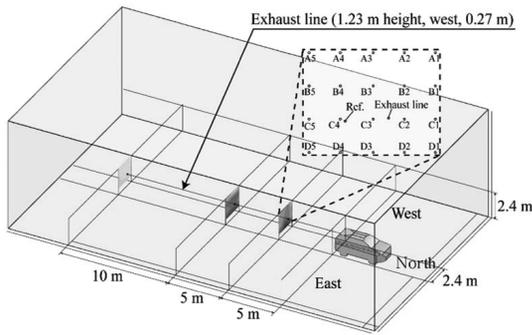
서울시의 교통 체증을 해소하기 위하여 건설한 내부순환로는 총 길이가 약 40.1 km인 자동차 전용도로이다. 2009년 12월에 3일 동안 오전과 오후 한 차례씩 모두 6회에 걸쳐 ML로 내부순환로를 주행하여 대기오염물질의 공간분포를 파악하였다(Woo *et al.*, 2013). 6회 측정 데이터를 통계적으로 용이하게 처리하기 위하여 내부순환로에 12개 지점을 설정하여

UFP의 공간분포를 표현하였고, 구간별 오염도를 통계적으로 나타냈다. 또한, 5.6~560 nm 범위의 입경분포를 측정할 수 있는 Fast Mobility Particle Sizer (FMPS, TSI model 3091)를 사용하여 도로상 UFP의 입경분포를 구하여 고농도를 나타내는 지점의 입경 범위를 파악하였다.

한편, 이동형 배기가스 측정 시스템(PEMS, portable emission monitoring system)을 장착한 차량을 ML로 추적하면서 CO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub> 농도를 측정하고 CFD 시뮬레이션을 수행하여 교통량이 많은 도로 주행 시 앞 자동차의 배기가스 플룸이 측정값에 미치는 영향을 조사하는 기초 연구도 수행하였다(Woo *et al.*, 2016). 2015년 1월 국립환경과학원 외부 소음 시험 트랙(직선 길이 660 m, 폭 10 m)에서 ML의 주행속도를 20, 30, 40 km/h로 변화시키고 두 차의 간격을 5, 10, 20 m로 유지하면서 실험하였다(그림 4).

KIST에서는 태국 Asian Institute of Technology

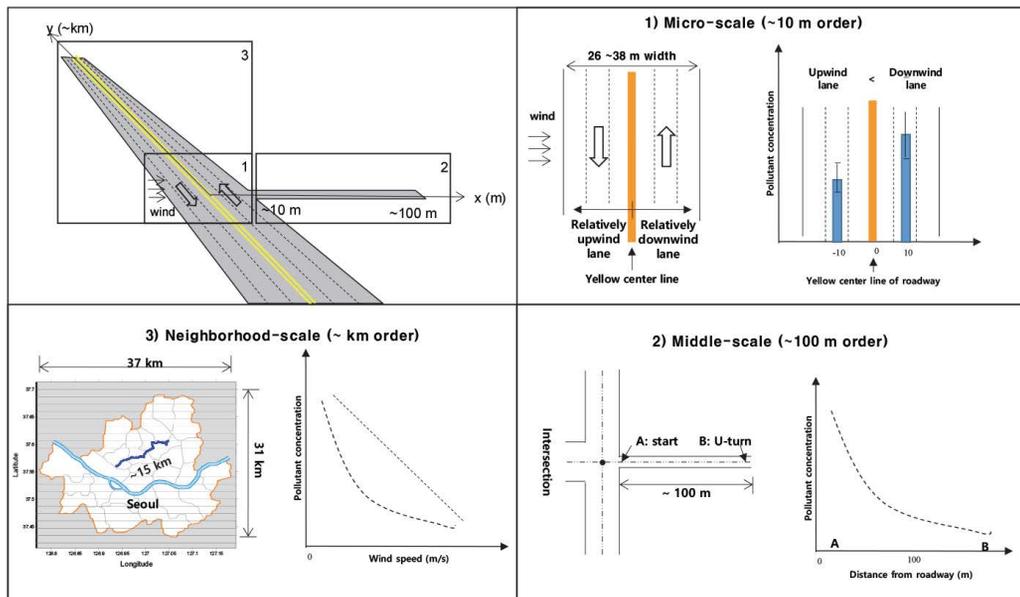
(AIT)와 공동으로 방콕과 서울의 대기오염을 비교하기 위한 국제협력 연구를 실시하여 방콕 도로상 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) 농도의 공간분포를 조사하였다(Kim Oanh *et al.*, 2013). 2010년 건기 (dry season)와 우기 (wet season)에 도로변과 도로상에서 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>)와 BTEX를 모니터링하여 대기오염 수준을 분석하였다. 또한, 동일한



**Fig. 4.** Schematic for measurement of spatial distributions of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentration downstream of the PEMS vehicle exhaust when vehicle was driving northward (Woo *et al.*, 2016).

시기에 도로변과 도로상 BC 농도를 측정하였다 (Hung *et al.*, 2014).

풍향과 풍속이 도로에서 배출된 대기오염물질의 이동에 미치는 영향을 그림 5에 나타난 바와 같이 도시 지역에서 나타날 수 있는 3가지 스케일 (~10 m, ~100 m, ~ km)에 대하여 상세하게 조사하였다(Kim *et al.*, 2015b). 2012년 마이크로 스케일 (~10 m)로 서울시 강남구 도로, 중간 스케일 (~100 m)로 연세대학교 정문과 연결되는 내부 도로, 근방 스케일 (~ km)로 14.8 km 거리의 KIST와 연세대학교 정문 사이 도로를 선정하여 자동차 배출가스의 지시자로 PM-PAHs를 측정하여 공간분포 특징을 파악하였다. 경유 자동차에서 배출되는 검댕에 비해 PM-PAHs가 도로에서 이격거리에 따른 농도의 감소 경향이 더 뚜렷하였다. 이것은 PM-PAHs가 자동차 배출가스의 중요한 지시자임을 의미한다. 최근 ML과 드론을 이용하여 안성 경부고속도로 도로변에서 도로이격거리가 증가할수록 입자의 수 농도가 감소하는 농도 구배가 난류 강도와 같은 기상 특성에 따라 변동하는 현상을 밝혀냈다(Kim *et al.*, 2023). 또한, 입경분포 데이터를 수용



**Fig. 5.** Classification of wind effects on air pollution in urban areas (modified from Fig. 1 in Kim *et al.*, 2015b).

모델에 적용하여 연료별 차종의 수 농도 기여도를 분석하였다.

KIST에서는 일본 사이타마대학교와 공동으로 ML을 KIST 인접 도로변에 주차한 상태에서 대기오염물질을 모니터링한 연구도 수행하였다 (Kim *et al.*, 2016). 탄소성 에어로졸은 유기 탄소(OC, organic carbon)와 무기 탄소(EC, elemental carbon)로 구분할 수 있고, 에어로졸 중 탄소 성분을 파악하기 위하여 TOR (thermal-optical reflectance) 방법이 많이 사용되고 있다. 이 방법을 사용하면 탄소 성분을 5개의 OC (OC1~OC4, POC (pyrolyzed OC))와 3개의 EC (EC1~EC3)로 분류할 수 있다. 2012년 11~12월에 15일 동안 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>0.1</sub> 중 탄소 성분을 분석하여 UFP 성분으로서 EC2 분율을 조사하였다.

### 3. 터널 측정

터널은 운행 자동차의 배출을 연구하기에 적합한 장소로 알려져 있다. 터널 내부에 측정기를 설치하고 주기적으로 점검하는 일은 매우 힘들고 위험한 작업이다. 그런데 ML을 이용하면 터널 내부의 공간적 오염도를 쉽게 파악할 수 있다. KIST 연구팀에서는 2011년 2월 8일 서울시 내부순환로에 위치한 정릉터널 (1,650 m)과 홍지문터널 (1,890 m)을 하행 방향과 상행 방향으로 주행하면서 입자의 수 농도 및 크기분포, 호흡기에 침착되는 입자의 표면적, NO<sub>x</sub> 및 CO<sub>2</sub> 농도 등을 동시에 측정하여 터널 내부 오염도의 공간 분포와 오염도 수준을 파악하였다 (Park *et al.*, 2012). 이때 터널 내부에서 자동차 진행 방향의 거리에 따라 대기오염물질의 농도가 거의 선형적으로 증가하다가 출구 직전에 급격하게 감소하는 현상을 관측하였다. NO<sub>x</sub> 농도는 출구 근처에서 1 ppm을 초과하는 매우 고농도를 나타냈다.

터널의 입구로부터 거리에 따른 오염물질 농도의 증가 기울기와 교통량의 관계로부터 실주행 자동차의 배출계수 (emission factor)를 신속하게 구하는 방법을 제안하였다 (Lee *et al.*, 2021). 서울시 내부순환

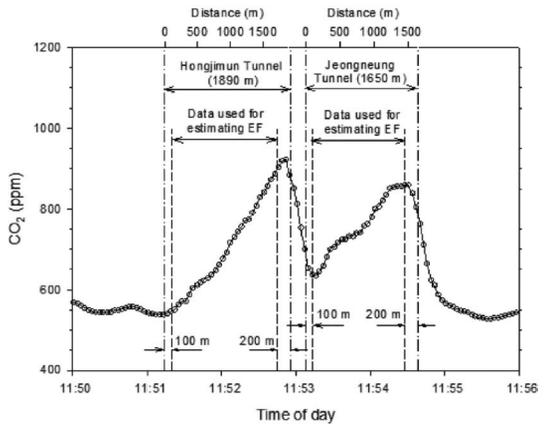
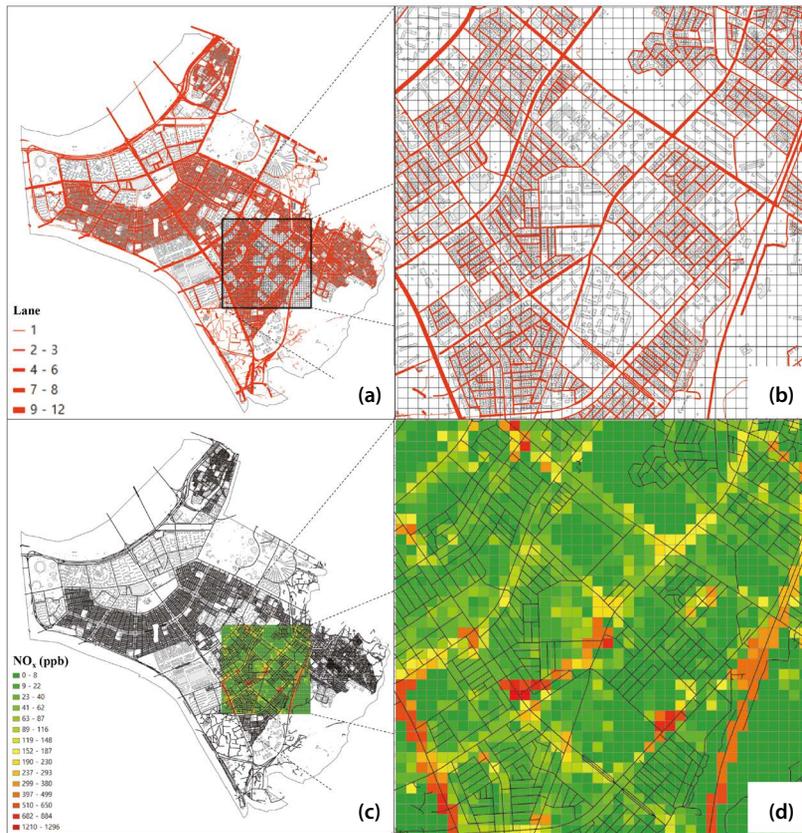


Fig. 6. CO<sub>2</sub> concentration profile obtained on 8 February (Lee *et al.*, 2021).

로에 서로 인접하게 위치한 홍지문터널과 정릉터널을 ML로 주행하면서 CO<sub>2</sub>, PM-PAHs, NO<sub>x</sub> 농도를 측정하여 거리에 따른 농도 구배로부터 배출계수를 산출하였다(그림 6).

### 4. 오염지도 작성

25개의 기초지자체(구)로 구성된 서울시의 경우 25개 도시대기 측정소가 운영되고 있어 구당 1개 정도이다. 그런데 인구밀도는 1km<sup>2</sup>당 약 19,000명으로 매우 높아 도시대기 측정소 데이터를 이용할 경우 수십만 명이 같은 농도에 노출되는 것으로 여겨진다. 자동차 배출가스의 노출로 인한 건강 영향을 세밀하게 평가하려면 촘촘한 농도 정보가 필요하다. KIST 연구팀에서는 대기오염으로 인한 주민들의 건강 영향을 파악할 수 있는 노출평가에 활용될 수 있도록 50×50 m<sup>2</sup> 격자의 고해상도 대기오염 지도를 제안하고, ML 측정을 통해 지도 작성 절차를 도출하였다 (Kim *et al.*, 2020). 2014년 6월에 5일 동안 송파구의 2×2 km<sup>2</sup> 도메인을 대상으로 ML로 PM-PAHs 농도의 공간분포를 상세하게 측정하여 대기오염 지도를 완성하고, 4개 구역(1×1 km<sup>2</sup>)의 통계값을 비교하였다. 그림 7에서 (a)는 측정 대상 지자체(서울시 송파구)의



**Fig. 7.** (a) Roadway map and study domain in Songpa-gu district, (b)  $2 \times 2 \text{ km}^2$  target study area in detail, (c) 2-D gridded air pollution map with 15  $\text{NO}_x$  concentration levels depicted in Songpa-gu district, and (d)  $2 \times 2 \text{ km}^2$   $\text{NO}_x$  pollution map.

교통량을 추정할 수 있는 도로 차선 수를 나타낸 것이고, (b)는 측정 도메인( $2 \times 2 \text{ km}^2$ )의 도로 상황을 상세하게 나타낸 것이다. (c)는 측정 도메인에서  $\text{NO}_x$  농도를 구간으로 구분한 공간분포를 지자체의 지도에 표시한 것이고, (d)는 이것을 확대하여 나타낸 것이다.

## 5. 그 밖의 주요 연구 및 시사점

경희의료원, 연세대학교 의과대학과 협업하여 ML에 실험용 쥐의 코 노출 챔버를 설치하고, 실험용 쥐를 3개 그룹으로 나누어 서울시 세브란스병원 인근 대기오염에 노출시켜 실제 대기오염이 쥐의 심장 내 피세포 기능장애를 일으킨다는 것을 밝혀냈다

(Hwang *et al.*, 2014). 서울대학교 환경대학원, 강원대학교와 협업을 통해 2019년 1월 서울시 건물과 도심 도로상  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  등을 측정하여  $\text{CO}_2$ 가 도심에서 대기오염 배출의 지시자로 유용하고,  $\text{CO}_2$  저감을 통해 대기질도 개선되는 공편익(co-benefit) 효과를 분석하였다(Sim *et al.*, 2020). 앞으로도 이러한 관련 분야 연구자와 협업을 통해 도로상 대기오염의 주행 측정 연구가 건강 피해 저감과 탄소중립이라는 국가 정책 목표를 달성하는 데 이바지할 것으로 기대된다.

주행 측정 차량을 이용한 도로상 대기오염 모니터링 연구를 수행하는 과정에서 몇 가지 중요하게 고려해야 할 사항이 있다. 첫째, 자차 배기가스에 의한 측정 자료의 오염을 방지하거나 사후 제거해야 한다. 본 연구진은 자차 배기가스의 영향을 최소화하기 위

해 초기에는 매연저감장치(DPF, diesel particulate filter)를 설치하기도 하였으나 문제가 발생하여 탈거하였고, 급가속이나 급감속을 적게하면서 운행하였다. 풍향과 풍속을 고려하여 일정 차속 이상으로 주행하였으며, 측정 후 데이터에서 차속 및 풍향/풍속을 함께 고려하여 데이터를 선별하기도 하였다. 도로상 노출 오염도 관점의 연구에서는 자차 영향을 포함하기도 하였다. 또한, 주행 시 선행 차량과 간격을 일정하게 유지하면서 고배출 차량과 인접하지 않도록 주행하였다. 몇몇 연구에서는 측정 자료를 후처리하는 과정에서 일정 주행 속도 이상의 자료만 사용하는 방법을 적용하였다. 둘째, 주행 측정 차량에 장착한 PM<sub>2.5</sub> 농도 측정 장비는 0.3~32 µm의 입자를 측정하는 광산란 측정 방식의 OPC(optical particle counter)이므로, 측정 자료의 신뢰도를 확보하기 위해 매회 주행 측정 후 배경 농도를 측정하고, 이를 도시대기 측정소 자료 등과 비교하여 검증하였다. 셋째, 주행 측정의 특성상 주행 속도가 빠를수록 일정 구간 내 수집되는 자료 수가 적어진다. 따라서 오염지도 등 공간 분포를 상세하게 표현하기 위해 주행 속도를 일정 수준 이하로 유지하였다.

## 6. 요약

산업화로 경제가 성장함에 따라 사람들이 도시로 이주하여 생활하면서 도시의 인구밀도가 농촌 등 다른 지역에 비해 매우 높다. 또한, 소득 수준이 높아 자동차의 등록 대수도 많아 좁은 도시 지역에 자동차로 인한 대기오염이 심하고, 많은 사람에게 대기오염물질이 노출되어 건강을 악화시키는 원인이 되므로 국가에서 중요하게 관리하고 있다. 정부에서는 도시 지역의 자동차 오염을 관리하기 위하여 도로변 대기 측정소를 운영하고 있고, 측정소도 계속 확충하고 있다. 그러나 이들 측정소의 측정항목이 도시대기 측정소와 동일한 기준성 대기오염물질이고, 자동차에서 배출되는 검댕, PM-PAHs, UFP 등이 포함되어 있지 않

아 자동차 오염의 변화를 상세하게 파악하고 있지 못한 실정이다. 또한, 도로변 대기 측정소가 많지 않으므로, 도시 지역에서 불균일한 대기오염의 공간적 분포를 잘 알지 못하여 자동차로 인한 대기오염 관리에 어려움이 있다.

KIST 연구팀에서는 국내에서 처음으로 2010년부터 ML을 운영하여 자동차로 인한 대기오염의 공간 분포를 상세하게 조사하고 있다. 연구 주제는 크게 도로상 대기오염 모니터링, 터널 측정, 오염지도 작성으로 구분할 수 있다. 이러한 연구를 통해 몇 가지 특징적인 연구성과를 도출하였다. 첫째, 도심의 변화한 교차로에서 교통 신호에 따른 NO<sub>x</sub> 농도의 변화 패턴을 제시하였다. 둘째, 도시 지역에서 나타날 수 있는 3가지 스케일(~10 m, ~100 m, ~km)에 대하여 풍향과 풍속이 도로에서 배출된 대기오염물질의 이동에 미치는 영향을 정량적으로 밝혀냈다. 셋째, 터널 측정을 통해 매우 신속하게 운행 자동차의 배출계수를 산출하는 방법을 제안하였다. 넷째, 도시 지역에서 대기오염으로 인한 주민들의 건강 영향을 상세하게 파악할 수 있도록 50×50 m<sup>2</sup> 격자의 고해상도 대기오염 지도를 제작하는 절차를 도출하였다.

WHO에서는 2021년 대기질 가이드라인을 개정하여 발표하면서 검댕, UFP 등의 중요성을 언급하고, 이에 대한 체계적 관리가 필요하다고 역설하였다(WHO, 2021). 향후 ML 측정이 보다 활발하게 수행되어 도심, 산업단지 등 대기오염이 심한 지역에서 대기오염물질의 불균일한 공간분포를 상세하게 밝혀내어 맞춤형 오염원 관리에 활용될 수 있기를 기대한다. 또한, 국가에서 운영하는 도로변 대기 측정소에 BC, UFP를 측정할 수 있는 장비를 구축하여 자동차로 인한 대기오염을 보다 상세하게 파악할 필요가 있다.

## 감사의 글

KIST에서는 2010년부터 ML을 본격적으로 운영하여 자동차 기인 도로상 대기오염을 모니터링하였습

니다. 그동안 ML 운영에 참여한 연구자들(우대광 박사, 우성호, 김창혁, 김종범 박사, 이광재, 류성희, 이선엽, 이승재 박사, 이동훈, 진현철, 김인구, 김남건)의 수고에 감사드립니다. 이 논문은 2020년도 과학기술 정보통신부의 재원으로 한국연구재단 - 동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업의 지원을 받아 수행하였습니다(과제번호: 2020M3G1A1108840).

## References

- Bae, G.N., Kim, K.W., Lee, S.B., Woo, S.H., Kim, J.Y. (2016) Air pollution monitor method, Korean Patent No. 10-1653280, Registered on August 26, 2016.
- Bae, G.N., Lee, S.B., Jin, H.C., Lee, S.J., Lee, D.H., Shin, D.C., Lee, S.H., Kim, C.S. (2013) Multi-functional monitoring vehicle for mobile measurement of air pollution, Korean Patent No. 10-1311426, Registered on September 16, 2013.
- Batterman, S., Chambliss, S., Isakov, V. (2014) Spatial resolution requirements for traffic-related air pollutant exposure evaluations, *Atmospheric Environment*, 94, 518-528.
- Beevers, S.D., Kitwiroon, N., Williams, M.L., Carslaw, D.C. (2012) One way coupling of CMAQ and a road source dispersion model for fine scale air pollution predictions, *Atmospheric Environment*, 59, 47-58.
- Briant, R., Seigneur, C. (2013) Multi-scale modeling of roadway air quality impacts: Development and evaluation of a Plume-in-Grid model, *Atmospheric Environment*, 68, 162-173.
- Bukowiecki, N., Dommen, J., Prevot, A.S.H., Richter, R., Weingartner, E., Baltensperger, U. (2002) A mobile pollutant measurement laboratory - measuring gas phase and aerosol ambient concentrations with high spatial and temporal resolution, *Atmospheric Environment*, 36, 5569-5579.
- den Bossche, J.V., Peters, J., Verwaeren, J., Botteldooren, D. (2015) Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset, *Atmospheric Environment*, 105, 148-161.
- Goel, A., Kumar, P. (2015) Zone of influence for particle number concentrations at signalised traffic intersections, *Atmospheric Environment*, 123, 25-38.
- Hagler, G.S.W., Thoma, E.D., Baldauf, R.W. (2010) High-resolution mobile monitoring of carbon monoxide and ultrafine particle concentrations in a near-road environment, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(3), 328-336.
- Houston, D., Wu, J., Yang, D., Jaimes, G. (2013) Particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in transportation microenvironments, *Atmospheric Environment*, 71, 148-157.
- Hung, N.T.Q., Lee, S.B., Hang, N.T., Kongpran, J., Kim Oanh, N.T., Shim, S.G., Bae, G.N. (2014) Characterization of black carbon at roadside sites and along vehicle roadways in the Bangkok Metropolitan Region, *Atmospheric Environment*, 92, 231-239.
- Hwang, S.J., Lee, K.H., Kim, C.S., Kim, J.Y., Woo, J.S., Jang, H.H., Lee, S.R., Kim, J.B., Kim, W.S., Bae, G.N., Shin, D.C., Kim, W. (2014) Endothelial dysfunction in heart failure rats exposed to real urban air pollution, *International Journal of Cardiology*, 176(2), 20, 494-496.
- Isakov, V., Touma, J.S., Burke, J., Lobdell, D.T., Palma, T., Rosenbaum, A., Özkaynak, H. (2009) Combining regional- and local-scale air quality models with exposure models for use in environmental health studies, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(4), 461-472.
- Keuken, M.P., Zandveld, P., Jonkers, S., Moerman, M., Jedynska, A.D., Verbeek, R., Visschedijk, A., Elshout van den, S., Panteliadis, P., Velders, G.J.M. (2013) Modelling elemental carbon at regional, urban and traffic locations in The Netherlands, *Atmospheric Environment*, 73, 73-80.
- 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).
- Kim, K.H., Kwak, K.H., Lee, J.Y., Woo, S.H., Kim, J.B., Lee, S.B., Ryu, S.H., Kim, C.H., Bae, G.N., Oh, I. (2020) Spatial mapping of a highly non-uniform distribution of particle-bound PAH in a densely populated urban area, *Atmosphere*, 11, 496.
- Kim, K.H., Lee, S.B., Woo, D., Bae, G.N. (2015b) Influence of wind direction and speed on the transport of particle-bound PAHs in a roadway environment, *Atmospheric Pollution Research*, 6, 1024-1034.
- 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.
- Kim, K.H., Woo, D., Lee, S.B., Bae, G.N. (2015a) On-road mea-

- surements of ultrafine particles and associated air pollutants in a densely populated area of Seoul, Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 142-153.
- Kim, K.H., Woo, S.H., Lee, S.B., Bae, G.N., Sekiguchi, K., Kobayashi, R., Kamiyama, M. (2016) Carbonaceous components in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>0.1</sub> with online measurements of gaseous and particulate pollutants: Implication of thermal-optical derived EC2 fraction as a component of ultrafine particles in the roadside environment, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 361-372.
- Kim, M., Lim, Y., Song, I., Kim, M., Song, M., Oh, S.H., Lee, T., Song, M., Bae, M.S. (2021) Spatial analysis of ammonia from vehicle measurement in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 637-646, (in Korean with English abstract).
- Kim, N.G., Jeong, S.B., Jin, H.C., Lee, J., Kim, K.H., Kim, S., Park, Y., Choi, W., Kwak, K.-H., Lee, H., Kang, G., Kim, C., Woo, S.-H., Lee, S., Kim, W.Y., Ahn, K., Lee, K.-Y., Lee, S.-B. (2023) Spatial and PMF analysis of particle size distributions simultaneously measured at four locations at the roadside of highways, *Science of the Total Environment*, 893, 164892.
- Kim Oanh, N.T., Kongpran, J., Hang, N.T., Parkpian, P., Hung, N.T.Q., Lee, S.B., Bae, G.N. (2013) Characterization of gaseous pollutants and PM<sub>2.5</sub> at fixed roadsides and along vehicle traveling routes in Bangkok Metropolitan Region, *Atmospheric Environment*, 77, 674-685.
- Kittelson, D.B., Watts, W.F., Johnson, J.P. (2006) On-road and laboratory evaluation of combustion aerosols - Part 1: Summary of diesel engine results, *Journal of Aerosol Science*, 37, 913-930.
- 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, 92.
- Lee, S.B., Kim, K.H., Park, B.E., Bae, G.N. (2021) A fast method for estimating the emission factors of air pollutants from in-use vehicles fleet, *Applied Sciences*, 11, 7206.
- Lee, S.B., Lee, D.H., Lee, S.J., Jin, H.C., Bae, G.N. (2011) Characteristics of spatial distribution of ultrafine particle number concentration on the roads of Nowon-gu, Seoul, *Particle and Aerosol Research*, 7(1), 21-30, (in Korean with English abstract).
- Liggio, J., Gordon, M., Smallwood, G., Li, S.M., Stroud, C., Staebler, R., Lu, G., Lee, P., Taylor, B., Brook, J.R. (2012) Are emissions of black carbon from gasoline vehicles underestimated? Insights from near and on-road measurements, *Environmental Science & Technology*, 46, 4819-4828.
- Menuet, L., Bessagnet, B., Colette, A., Khvorostyanov, D. (2013) On the impact of the vertical resolution on chemistry-transport modelling, *Atmospheric Environment*, 67, 370-384.
- Park, B.E., Lee, S.B., Lee, D.H., Lee, S.J., Woo, D.K., Choi, J.H., Jin, H.C., Bae, G.N., Yun, S.T. (2012) Spatial distribution of air pollution level inside roadway tunnels in urban area, *Particle and Aerosol Research*, 8(1), 17-28, (in Korean with English abstract).
- Pirjola, L., Parviainen, H., Hussein, T., Valli, A., Hameri, K., Aalto, P., Virtanen, A., Keskinen, J., Pakkanen, T.A., Makela, T., Hillamo, R.E. (2004) "Sniffer" - a novel tool for chasing vehicles and measuring traffic pollutants, *Atmospheric Environment*, 38, 3625-3635.
- Sim, S., Jeong, S., Park, H., Park, C., Kwak, K.H., Lee, S.B., Kim, C.H., Lee, S., Chang, J.S., Kang, H., Woo, J.H. (2020) Co-benefit potential of urban CO<sub>2</sub> and air quality monitoring: A study on the first mobile campaign and building monitoring experiments in Seoul during the winter, *Atmospheric Pollution Research*, 11, 1963-1970.
- Stein, A.F., Isakov, V., Godowitch, J., Draxler, R.R. (2007) A hybrid modeling approach to resolve pollutant concentrations in an urban area, *Atmospheric Environment*, 41, 9410-9426.
- Touma, J.S., Isakov, V., Ching, J., Seigneur, C. (2006) Air quality modeling of hazardous pollutants: Current status and future directions, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(5), 547-558.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2023) Achieving clean air for blue skies in Seoul, Incheon and Gyeonggi, Republic of Korea.
- Westerdahl, D., Fruin, S., Sax, T., Fine, P.M., Sioutas, C. (2005) Mobile platform measurements of ultrafine particles and associated pollutant concentrations on freeways and residential streets in Los Angeles, *Atmospheric Environment*, 39, 3597-3610.
- Woo, D., Lee, S.B., Lee, S.J., Kim, J.Y., Jin, H.C., Kim, T., Bae, G.N. (2013) Spatial distributions of on-road ultrafine particle number concentration on Naebu Express Way in Seoul during winter season, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(1), 10-26, (in Korean with English abstract).
- 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.
- 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).
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines.
- Youn, S.J., Jo, K.H., Kim, H.S., Song, G.B., Lee, S.B., Jeong, J.Y. (2020) Measurement of hazardous air pollutants in industrial complex using mobile measurement system with SIFT-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 507-521, (in Korean with English abstract).
- Zhu, Y., Fung, D.C., Kennedy, N., Hinds, W.C., Eiguren-Fernandez, A. (2008) Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside a mobile exposure system on Los Angeles freeways, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(3), 424-434.
- Zwack, L.M., Paciorek, C.J., Spengler, J.D., Levy, J.I. (2011) Modeling spatial patterns of traffic-related air pollutants in complex, *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 852-859.

### Authors Information

- 배귀남 (한국과학기술연구원 초미세먼지사업단 단장)  
(gnbae@kist.re.kr)
- 이승복 (한국과학기술연구원 지속가능환경연구단 책임연구원)  
(sblee2@kist.re.kr)
- 김경환 (한국과학기술연구원 지속가능환경연구단 선임연구원)  
(khkim@kist.re.kr)
- 곽경환 (강원대학교 환경융합학부 부교수)  
(khkwak@kangwon.ac.kr)