

논문

밀폐형 버스정류장 내외부 대기오염물질 조사

Measurement of Internal and External Air Pollutants of Enclosed Bus Station

이가혜, 황규철, 박세찬, 이다솜¹⁾, 김관철¹⁾, 송민영²⁾, 최우석³⁾, 허재석⁴⁾, 박덕신⁴⁾, 이건희⁵⁾, 정무현⁶⁾, 김종범*

충남연구원 서해안기후환경연구소, ¹⁾차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정연구실, ²⁾서울기술연구원 기후환경연구실, ³⁾세종대학교 데이터사이언스학과, ⁴⁾한국철도기술연구원 교통환경연구실, ⁵⁾(주)APM엔지니어링 기술영업부, ⁶⁾한국화학융합시험연구원 대기환경센터

접수일 2023년 1월 5일
수정일 2023년 1월 25일
채택일 2023년 2월 6일

Received 5 January 2023
Revised 25 January 2023
Accepted 6 February 2023

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

Gahye Lee, Kyucheol Hwang, Sechan Park, Dasom Lee¹⁾, Kwanchul Kim¹⁾, Min young Song²⁾, Woosuk Choi³⁾, Jaeseok Heo⁴⁾, Duckshin Park⁴⁾, Gunhee Lee⁵⁾, Muhyun Jung⁶⁾, Jong Bum Kim*

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

¹⁾Advanced PM Monitoring Laboratory, Advanced Institute of Convergence Technology, Suwon, Republic of Korea

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

³⁾Department of Data Science, Sejong University, Seoul, Republic of Korea

⁴⁾Transportation Environmental Research Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Republic of Korea

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

⁶⁾Air Quality Center, Korea Testing & Research Institute, Gwacheon, Republic of Korea

Abstract Buses are one of the most commonly used forms of transportation, and air pollution occurring at the roadside poses a higher health risk than general air pollution. In particular, users of bus-only lanes suffer adverse health effects due to exposure to air pollutants emitted from vehicles running in both directions. This study was conducted on air quality characteristics of an enclosed-type bus station located in Asan City, between 14~24 October, 2022. Pollution levels at the roadside were higher than that of roadside air quality monitoring station (RAQMS), with an exception of carbon monoxide (CO). The average black carbon (BC) concentrations during the measurement period were $2.3 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The average concentration of CO₂ inside the enclosed bus station was 987 ppm, which was close to the standards for the maintenance of Indoor Air Quality (IAQ). It was found that pollutant concentrations at the roadside were 1.5 to 2 times higher than the general air pollution level. The result of comparing indoor and outdoor air pollution showed that concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} outside the enclosed bus station were 1.8 to 2 times higher than that inside. In addition, heavy metal analysis of roadside PM_{2.5} detected representative soil and mobile pollutants including Si, S, Al, Fe, and Ti. These results show that there is a need for both management and long-term regulatory measures for air pollution at bus stations.

Key words: Bus station, RAQMS, Roadside, Pollutant, PM_{2.5}

1. 서론

정부는 대기질 관리를 위해 대기오염물질 배출량 정보를 1999년부터 연단위로 고시하고 있다(NIER,

2007). 고시 초기에는 일산화탄소(carbon monoxide, CO)와 총부유분진(total suspended particulate, TSP)을 포함하여 총 7개 물질을 산정하였고, 이후에 초미세먼지(particulate matter less than 2.5 μm , PM_{2.5})와

검댕(black carbon, BC)을 포함하여 현재는 총 9개 물질을 산정하고 있다. 부문별로는 에너지 산업연소부터 비산업연소, 제조업연소, 생산공정 등 13개 항목으로 분류하고 있다(Yeo *et al.*, 2019). 2019년 배출량 기준 전국 TSP 배출량은 484,527 톤으로 비산먼지의 기여율은 66.8% (323,462 톤)로 가장 높은 수준이며, 그중 50.7%가 도로 재비산먼지이다(NAIR, 2022). 질소산화물(nitrogen dioxide, NO_x)과 CO 역시 도로 이동오염원에 대한 기여도가 높은 것으로 알려져 있으며(Brimblecombe *et al.*, 2021; Kamara and Harrison, 2021; Longley *et al.*, 2015; Lawrence *et al.*, 2004), 국내 연구에서도 서울을 포함한 광주, 대구 등 대도시의 주요 대기오염물질 배출원으로 이동오염원을 언급하고 있다(Kim *et al.*, 2016).

도로변에서 배출되는 오염물질은 BC를 포함하여 NO_x, CO, 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 입자상 오염물질(particulate matter, PM) 등 다양한 대기오염물질이 존재한다(Park, 2013). 이러한 오염물질들은 자동차 배출가스, 타이어, 브레이크 패드 및 도로와의 마모, 도로변 먼지의 재비산, 주변 토양 유입 등 다양한 배출원을 가진다(Amoto *et al.*, 2011; Furusjo *et al.*, 2007). 도로변에서 발생된 오염물질은 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn), 니켈(Ni), 카드뮴(Cd)과 같은 중금속을 다량 함유하고 있으며(Adachi and Tainosho, 2004), 단·장기적인 독성영향을 미친다(Jeong *et al.*, 2020). 특히, 자동차에서 배출되는 PM은 100 nm 이하의 미세한 크기를 가지기 때문에 인체 유입 시 폐포 및 세포 속까지 침투하여 폐 기능감소, 심혈관계 질환, 호흡기계 영향 및 당뇨병, 사망률 증가 등 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있다(Cho *et al.*, 2019; Ngoc *et al.*, 2018; Kim, 2014).

도로를 이용하는 대중교통 중 버스는 2019년 기준 전국 대중교통 분담률의 23.0%로 가장 높은 비율을 차지한다(SK, 2022). 서울을 포함한 일부 광역 지자체에서는 버스 중앙차선제를 설치하여 버스의 원활한 소통을 유도하고 있으며, 대전이나 세종시의 경우

간선급행버스체계(bus rapid transit, BRT)를 운영하는 등 주민들의 버스 활용도를 높이기 위해 노력하고 있다. 하지만 버스 중앙차선제도 도입으로 도로변에서 배출된 오염물질이 버스를 기다리는 승객에게 악영향을 미친다는 연구 결과가 보도되고 있다(Lee *et al.*, 2014). Kim *et al.* (2017)이 버스정류장에서 승객들이 대기하는 시간을 분석한 결과 약 7.8~10.2분으로 나타났으며, 대기시간 동안 도로에서 발생된 오염물질에 노출될 수 밖에 없어 이에 대한 대책 마련이 필요한 실정이다. 정부에서는 도로오염원에 대한 개선대책으로 친환경 자동차 보급, 노후 경유차 조기 폐차 및 엔진 교체 지원, 도로 살수 차량 및 분진 흡입 차량 도입 등 다양한 대책을 추진하고 있지만 뚜렷한 개선 효과는 나타나지 않고 있다(Baik *et al.*, 2018). 이러한 문제 해결을 위해 지자체에서는 밀폐형 버스정류장 도입을 추진하고 있다(Seo and Kim, 2021). 기존의 개방형 버스정류장을 밀폐형이나 반밀폐형으로 바꾸고, 내부에 공조설비나 공기질 개선장치를 장착하여 시범운영 중에 있으나 아직까지 이들에 대한 정량적인 개선 효과를 보고한 자료가 부족하다(Lee and Kyen, 2020).

이에 본 연구에서는 밀폐형 버스정류장을 대상으로 버스정류장 외부의 오염도 수준과 실내 차단 효과를 분석하여 현재 추진 중인 밀폐형 버스정류장 도입에 따른 효과를 제시하고자 한다. 향후 본 자료는 밀폐형 버스정류장 도입에 대한 정책추진 효과 분석의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 측정장소 및 일정

그림 1은 측정장소와 측정장비의 설치 모습을 나타낸 것이다. 측정 위치는 충청남도 내 인구가 많고, 버스정류장 혼잡도가 높을 것으로 판단되는 천안아산 KTX 버스정류장으로 선정하였다. 버스는 지도 기준 우측에서 좌측방향으로 운행하며, 출입구는 차량

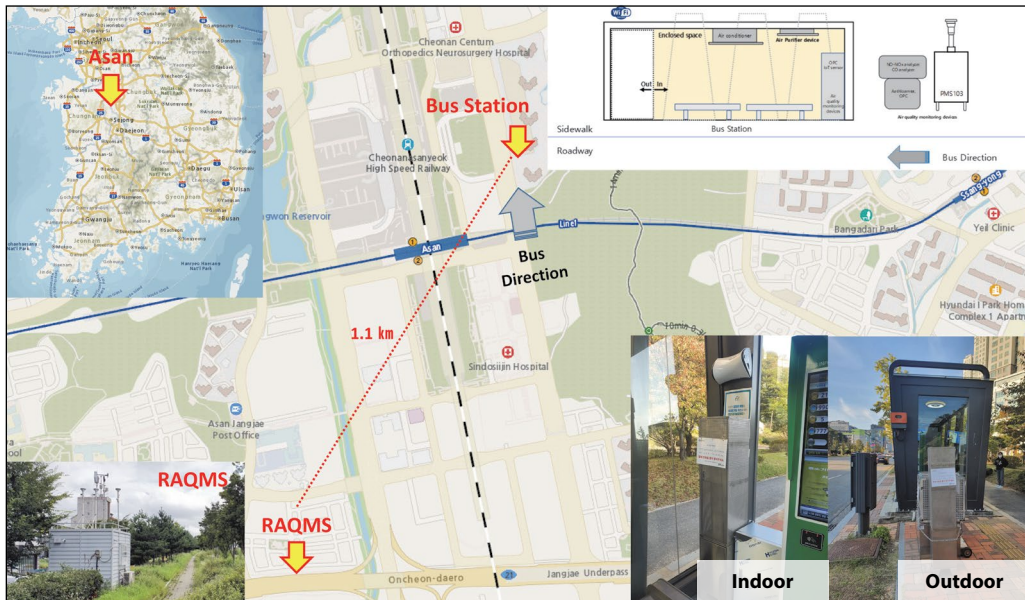


Fig. 1. Location of Measurement site, RAQMS (roadside air quality monitoring station) and setup photo of monitoring devices.

의 운행방향과 수평하게 설치되어 있다. 버스정류장은 가로×세로×높이가 각각 $4 \times 1.6 \times 2.5$ m로 총 용적은 16 m^3 (4.8평)이다. 내부에서는 공기질 개선과 쾌적성 향상을 위해 공기청정기와 천장형 냉난방기가 설치되어 있으며, 7시부터 18시까지 운영되고 있다. 공기청정기는 도로변에서 버스정류장을 봤을 경우 오른쪽 끝부분에서 약 1 m 이격된 천장에 설치되어 있으며, 성적서상 규격은 사용면적 8평형, 처리풍량 $200 \sim 600 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다. 처리방법은 HEPA 필터를 기반으로 한 다층 여과복합방식이다. 버스정류장 외부와 주변 도로변 오염도 파악을 위해 측정지점으로부터 남서쪽으로 약 1.1 km 떨어져 있는 장재리 도로변 대기측정소 (roadside air quality monitoring station, RAQMS) 자료를 활용하였다.

버스정류장은 천안아산 KTX역 앞에 위치하고 있어 경부선을 이용하는 지역 주민들의 이용이 빈번한 곳으로 주변 지역에는 특별한 대기오염물질 배출시설이 위치해 있지 않으며, 주거 및 대형상점들이 둘러싸고 있다. 시내 순환버스와 간이 시외버스 정류장으로 공동으로 사용되고 있으며, 시내 순환버스 9개

노선에서 일평균 164대, 시외버스는 4개 노선에 일평균 48대가 운영 중에 있다. 전국적으로 대기질 개선 등을 목적으로 전기나 수소를 원료로 하는 친환경버스로의 전환이 진행되고 있으나, 해당 버스정류장에 운영하는 버스는 모두 디젤 버스로 확인되었다. 측정은 2022년 10월 14일 (금)부터 24일 (월)까지 수행되었으며, 측정기간 중 평균 온도와 최대온도는 각각 13.0°C , 24.5°C 이었고, 대부분 맑고 강우는 없었으며, 평균 풍속은 0.6 m/s 로 대기는 정온에 가까운 안정상태였다.

2.2 측정항목 및 장비

측정장비는 버스정류장 외부의 도로변에서 배출된 오염물질에 대한 직접적인 영향을 분석하기 위해 도로 끝에 설치된 연석으로부터 약 1 m 이내에 설치하였다. 내부는 승객들의 안전과 이동에 불편함이 없도록 가장 안쪽 좌석 옆에 설치하였다. 도로변 RAQMS의 경우 측정지점으로부터 약 1.1 km 떨어진 지역에 위치해 있으며, 도로 중심으로부터 약 30 m 떨어진 가로수 군집지역 내부에 위치해 있다.

Table 1. Summary of measurement instruments used in this study.

Species	Instrument	Indoor	Outdoor	Time resolution	Flow	Specification
BC	Aethalometer (AE43, Magee Scientific) with PM _{2.5} cyclone		○	1 min	5 lpm	- Accuracy: 0.03 µg/m ³ - 0.01~100 µg/m ³
CO	CO analyzer (48iQ, Thermo)		○	1 min	1 lpm	- Accuracy: 100 ppb - 0~10,000 ppm
NO, NO ₂ , NO _x	NO-NO _x analyzer (42iQ, Thermo)		○	1 min	0.1 lpm	- Accuracy: 10 ppb - 0~100 ppm
PM _{2.5}	PM _{2.5} sequential sampler (LAS-16, APM Eng.)		○	24 hr	16.7 lpm	- Ø: 47 mm - Gravity method
Metal in PM _{2.5}	X-Ray fluorescence (Epsilon 4, Malvern Panalytical B.V.)		○	-	-	- Al, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, P, S, Cr, Si
Particle number, distribution	Portable Aerosol Spectrometer (11-D, Grimm)	○	○	-	1.2 lpm	- 31 channels - 0~100 mg/m ³
CO ₂ , RH, Temperature	AirGuard K (IAQ-CW1, K-weather)	○		5 min	0.1 lpm	- CO ₂ : 0~3,000 ppm - RH: 0~100% - Temp.: -40~70°C

측정은 두가지 목적으로 수행되었다. 첫 번째 목적은 도로 인접지역 (1 m 거리 내)과 도로변(RAQMS)과의 농도 비교이고, 두 번째 목적은 버스정류장 내부와 외부의 농도 비교이다.

첫 번째 연구를 위해 자동차 배출가스의 지표 물질로 사용되고 있는 검댕 (black carbon, BC)을 PM_{2.5} 분립장치(M4110, Magee Scientific)를 장착한 Aethalometer (AE43, Magee Scientific)를 활용하여 측정하였고, 자동차 배출가스의 주요 배출물질인 CO (48iQ, Thermo)와 NO-NO₂ (42iQ, Thermo)를 각각 실시간 연속 측정장비를 활용하여 측정하였다. 그 외 도로변 PM_{2.5}의 중금속 농도를 파악하기 위해 PM_{2.5} 중량 농도 측정장비인 PM_{2.5} sequential sampler (LAS-16, APM Engineering)을 사용하였다. BC와 CO, NO-NO₂는 각 1분 단위로 측정되며 비교·분석을 위해 1시간 평균된 자료를 사용하였다. PM_{2.5}는 24시간 동안 포집 후 X선 형광분석법(X-Ray fluorescence, XRF, Epsilon 4, Malvern Panalytical B.V.)을 이용하여 중금속 농도를 산정하였다. 표 1은 본 연구에서 수행된 측

정장비들의 세부 사양을 나타낸 것이다.

두 번째 연구를 위해 버스정류장 내부 공간조건과 승객의 안전 등을 고려하여 광산란 측정장비 (portable aerosol spectrometer, PAS, 11-D, Grimm)를 각각 버스정류장 내부와 외부에 설치하였다. 광산란장비는 동일 지점에 대한 측정시 상관계수를 근거로 자료 보정 과정이 필요하다 (Park *et al.*, 2016). 이에 본 연구에서는 실험에 사용될 2대의 측정장비를 측정 전 외부환경에서 동시에 측정하여 상관성 분석을 실시하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타냈다. 측정된 자료는 각 장비별로 보정계수 (correlation factor, CF)를 활용하여 수농도를 중량농도로 환산해 준다. PM_{2.5}의 경우 두 장비간 상관성이 매우 높게 나타나 ($R^2 = 0.99$) 그대로 활용하였다. 하지만 PM₁₀의 경우 그림 2의 (b)에 나타난 것과 같이 실내외 측정 산포도가 0.88 ($R^2 = 0.90$)를 보여 이를 환산농도로에 반영하여 산정하였다. 국내에서 광산란장비의 보정계수 산정에 관한 연구가 다수 보고되었으며, 세부적인 내용은 Kim *et al.* (2020)에 자세히 설명되어 있다.

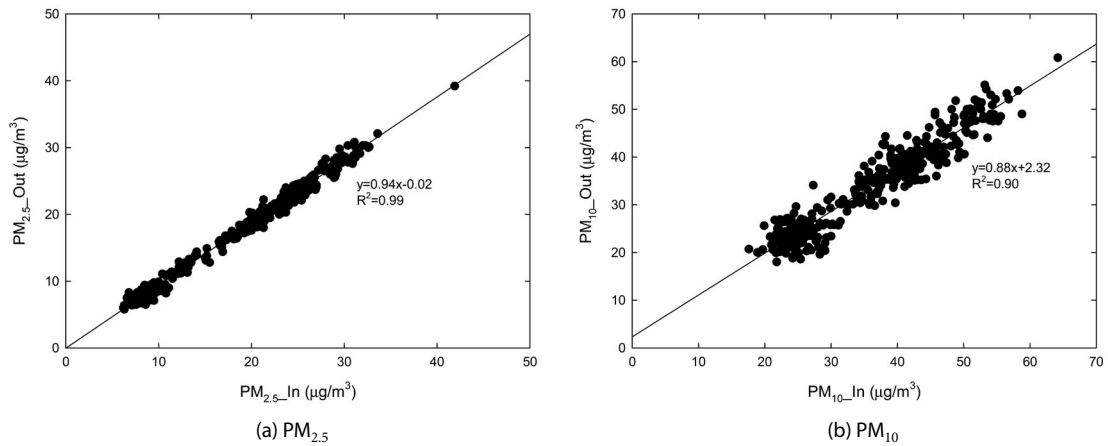


Fig. 2. Scatter plot of PAS installed at inner bus station and outdoor.

3. 측정 결과

3.1 도로변 오염도 분석

그림 3은 측정대상 지점으로 선정된 버스정류장 외부와 RAQMS에서 측정된 자료를 나타낸 것으로, 왼쪽은 일평균 농도변화를, 오른쪽은 시간평균 농도변화를 나타낸 그림이다. 그림 내 DGL (daily guideline)은 일평균 기준을, 8-GL (8-hr guideline)은 8시간 평균 기준이며, 따로 시간 단위가 주어지지 않은 오염물질의 경우 GL (guideline)로 기준을 표기하였다. 실시간 분석 장비인 NO₂와 CO, BC는 1분 간격으로 얻어진 자료를 시간과 일평균으로 통계처리하여 도식화하였으며, PM_{2.5}의 경우 중금속 분석을 위해 중량법 장비를 활용하여 1일(24시간) 연속 측정된 결과를 시간 동기화하여 나타냈다. RAQMS의 경우 중량법과 검교정을 통해 보정된 베타선 흡수법이 활용되고 있다. 연속적인 측정값을 줄 수 없는 중량법을 대신하여 농도변화 특성 분석을 위해 베타선 흡수법을 활용하고 있으며, 데이터 신뢰성 향상을 위해 일정 주기로 중량법과 비교·분석하고 있다. 하지만 중량법 대비 수분, 온도 등이 간섭을 일으킬 수 있기 때문에 절대값에 대한 오차로 작용할 수 있다(MOE, 2021). 주중과 주말의 중금속 농도변화 파악을 위해 주중 3회 주말 1회 측정을 수행하였다. 측정 결과 도

로변 농도가 45.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 RAQMS의 26.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 1.7배 높게 나타났다. 모든 측정일에 도로변 측정치가 모두 높게 나타났으며, 도로변 측정 4일 중 1일을 제외한 3일은 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타났다. 반대로 RAQMS는 1일을 제외한 3일이 대기환경기준을 만족하는 것으로 나타났다. NO₂의 경우 도로변이 23.5 ± 8.0 ppb로 RAQMS 21.6 ± 6.8 ppb보다 약간 높은 수준(8.7%)을 보였다. 도로변과 RAQMS 모두 일평균 대기환경기준 이하로 나타났으며, 도로변과 RAQMS의 농도가 큰 차이를 보이지 않았다. 시간대별 농도변화에서는 두 곳 모두 5시까지 감소하다가 차량 운행량이 증가하는 6시를 기점으로 증가하기 시작하였으며, 8시경에 최대 농도를 나타내고 그 후 점점 감소하다 13시경부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 시간대별 농도변화는 RAQMS보다 도로변이 더 큰 폭으로 변화하였다. CO의 경우 도로변 측정값이 0.36 ± 0.07 ppm으로 0.45 ± 0.13 ppm의 RAQMS보다 낮게 나왔다. 전반적인 시간대별 농도변화는 NO₂ 농도변화와 유사한 경향을 보였고, NO₂와 CO 모두 일평균과 시간 평균 모두 대기환경기준을 만족하였다.

국내·외에서 도로변 입자상 오염물질의 배출특성을 검토한 결과, 도로변에서 배출되는 입자는 주로 나노 크기이며, 짧은 시간 동안 매우 큰 폭의 농도변

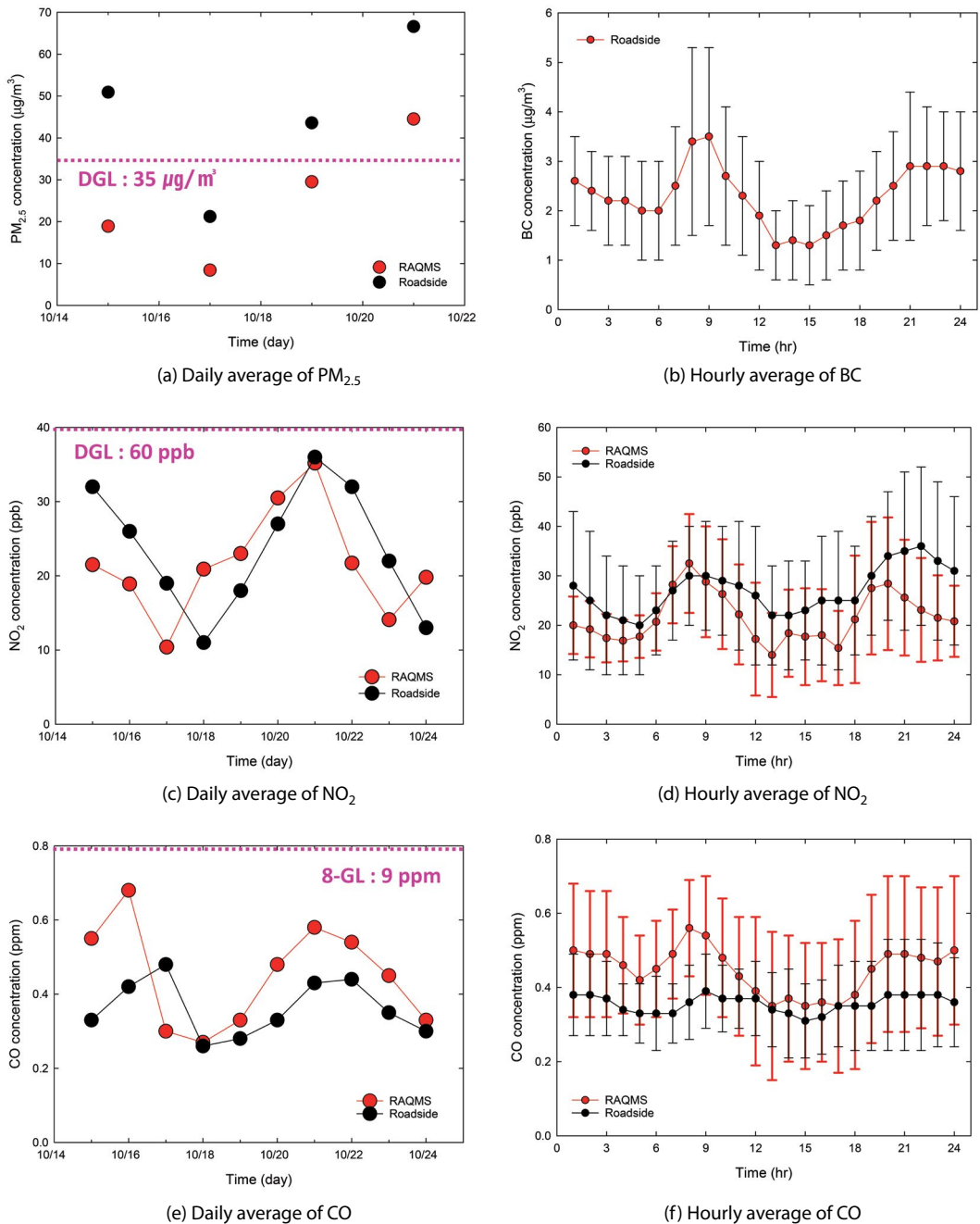


Fig. 3. Variation of daily and hourly average concentration of pollutants measured at roadside and RAQMS.

화를 보인다. 이러한 특징은 NO_x와 BC와도 유사한 경향을 보인다(Lee and Bae, 2009; Bae et al., 2007). 또한 도로변에 배출된 오염물질은 배출원으로부터 이

격거리가 멀어질수록 지속적으로 감소하며(Kim et al., 2020; Bukowiecki et al., 2002), 수평지역에서는 50~100 m 내에서 입자상 오염물질의 농도가 절반 수

Table 2. Summary of BC concentration reported in previous studies.

Author	Year	Location	City	Pollutant	Concentration
Viidanoja <i>et al.</i>	2002	Urban	Helsinki	PM _{2.5}	0.6~2.1 µg/m ³
Park <i>et al.</i>	2009	Urban	Gwangju	PM _{2.5}	1.9 µg/m ³
Jung and Park	2010	Urban	Gwangju	PM _{2.5}	2.6±2.0 µg/m ³
Kim <i>et al.</i>	2019	Urban	Seoul	PM _{2.5}	2.7 µg/m ³
Cha <i>et al.</i>	2019	Urban	Cheongju	PM _{2.5}	0.8~2.4 µg/m ³
Mori <i>et al.</i>	2020	Urban	Tokyo	PM _{2.5}	0.41~1.1 µg/m ³
Engelhardt <i>et al.</i>	2022	Urban	Caracas	PM _{2.5}	1.75±0.89 µg/m ³
This study	2022	Roadside	Asan	PM _{2.5}	2.3±1.1 µg/m ³

준까지 감소한다 (Hitchins *et al.*, 2000). 다만 이러한 변화는 차량의 이동속도, 주변 지형, 건물 배치, 기상 조건, 계절적 특징에 따라 매우 큰 차이를 보인다고 보고하였다 (Yu *et al.*, 2016).

전반적으로 PM_{2.5}와 NO₂의 경우 도로변이 RAQMS 보다 높은 농도 수준을 보였다. 이는 도로변의 경우 차량이 이동하는 도로와 이격거리가 불과 1 m도 되지 않고, 차량 이동 시 형성되는 차량풍에 의해 배출된 오염물질이 희석확산될 겨를 없이 바로 노출 및 검출되기 때문에 측정지점의 농도가 고농도로 나타난 것으로 판단된다. 반대로 RAQMS의 경우 도로변에 인접해 있지만, 도로 중심으로부터 약 30 m 이격되어 있고, 측정소 특성상 지상으로부터 2~3 m 높이에 유입구 (inlet)가 위치하기 때문에 오염물질 발생원으로 측정구 유입구까지 이동하는 과정에서 희석 및 확산 효과가 커 상대적으로 낮은 농도값이 나타나는 것으로 판단된다. 2021년 NO₂와 CO의 전국 연평균 농도는 각각 18 ppb (월평균 9~21 ppb)와 0.4 ppm (월평균 0.3~0.5 ppm)으로 나타났다 (NIER, 2022). RAQMS에서 측정된 농도가 NO₂는 2021년도 연평균 농도 (21.6~23.5 ppb) 대비 소폭 높은 편이나, CO는 연평균 농도 (0.36~0.45 ppm)와 유사한 수준으로 확인되었다. 이는 NO₂의 경우 자동차로부터 배출된 오염물질의 영향으로 농도 상승효과가 일부 반영되어 나타난 것으로 보인다. 하지만 CO의 경우 농도 상승 효과가 보이기는 하나 기저 수준에 머물러 도로변 기인에 따른 농도 상승이 뚜렷하게 나타났다고 보기에 어려운 수준이다.

BC의 평균농도는 2.3±1.1 µg/m³로 나타났다. BC의 하루 중 농도변화는 0시를 기점으로 6시까지 감소한 후 7시부터 증가하여 9~10시경 최대 농도를 보인다. 이후 13시까지 감소하다가 13시를 기점으로 다시 증가하는 패턴으로, 앞서 NO₂ 및 CO와 유사한 전형적인 도시오염특성을 보였다. 이는 도로변에서 측정된 BC를 포함한 NO₂와 CO의 주 배출원이 자동차라는 것을 의미한다. 표 2는 국내·외에서 조사된 도심 배경지역의 BC 농도를 나타낸 것이다. 2019년 서울과 청주 배경지역의 농도는 0.8~2.7 µg/m³이었고, 광주 도심에서 2009~2010년에 측정된 BC 농도는 1.9~2.6 µg/m³ 수준이었다. 국외의 경우 헬싱키 도심에서 2002년 측정된 BC 농도는 0.6~2.1 µg/m³이고, 도쿄와 카라카스의 배경지역의 BC 농도는 0.4~1.8 µg/m³ 수준으로 대부분의 도심 배경지역의 경우 BC 농도가 2 µg/m³ 전후로 나타났다. 하지만 본 연구에서 측정된 BC의 도로변 오염도는 2.3 µg/m³으로 도심 배경지역보다 소폭 높은 수준을 보였다. BC는 선행연구에서 알레르기성 질환과 발암유발, 호흡기질환 등을 야기하는 것으로 알려져 있어 (Lee *et al.*, 2013) 추후 보건학적 관점에서 관리 기준 마련과 대책 수립이 필요하다.

3.2 버스정류장 내외 오염도 분석

대상지점으로 선정된 버스정류장은 아산시에서 미세먼지 안심 승강장으로 지정·관리하고 있다. 실내 공간에 대한 주요 오염지표로 미세먼지와 더불어 CO₂가 활용되고 있으며, 밀폐형 버스정류장은 아직

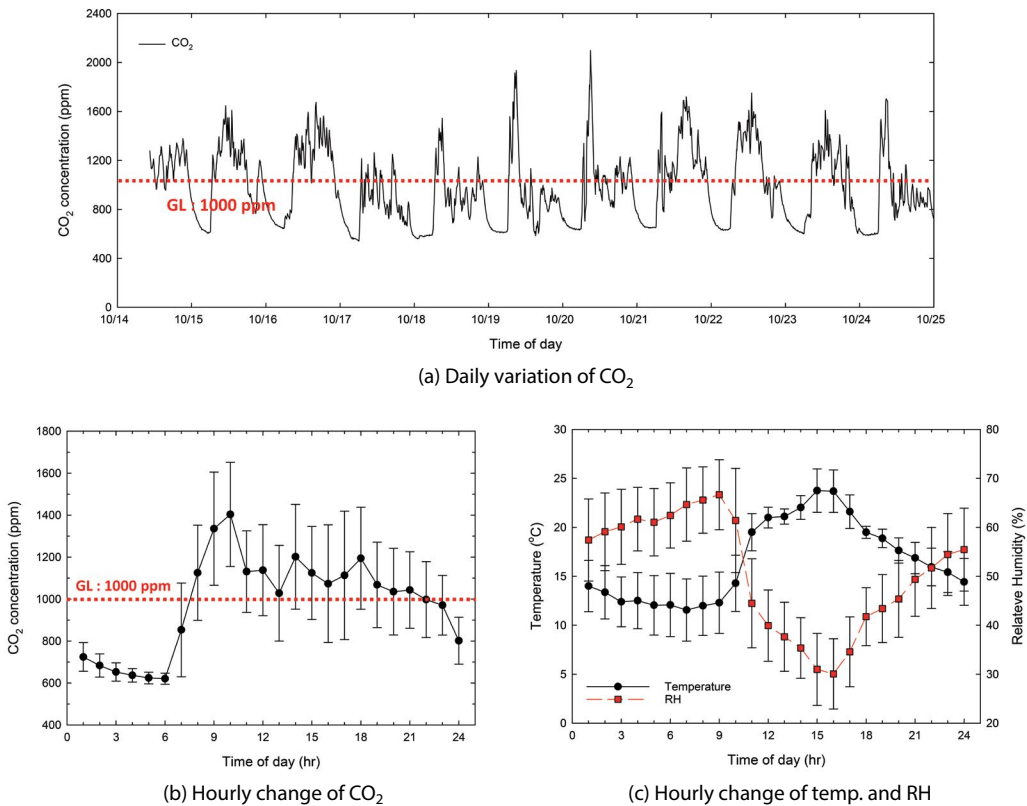


Fig. 4. Daily & hourly Variation of CO₂ concentration, Temperature, and RH measured in enclosed bus station.

다중이용시설로 분류되지 않아 관리규정이 없지만, 철도역사나 항만시설, 공항 여객터미널 등은 다중이용시설로 분류되어 CO₂ 기준 1,000 ppm 이하로 관리되고 있다. 그림 4는 측정 기간 중 밀폐된 버스정류장 내 CO₂의 일변화와 CO₂ 및 온습도의 시간대별 변화를 나타낸 것이다. 측정 기간 전체에 대한 CO₂ 농도는 실내공기질 유지기준과 유사한 수준인 987±296 ppm으로 확인되었다. 시간대별로는 이용객 수가 증가하는 6시를 기점으로 증가하기 시작하여 10시경 최대 농도를 찍고 감소하다가 13시와 17시경 다시 최대치를 보이고 농도가 감소하였다. CO₂의 경우 주요 배출원이 밀폐된 버스정류장 내 승객이기 때문에 승객의 혼잡도에 따라 농도가 상이하게 나타나는데, 7시부터 24시까지 편차가 크다는 것은 이용객의 사용빈도가 일정하지 않다는 것을 의미한다. 측정 기간에

실내 온도 역시 16.6±4.6°C로 내부 공조설비 가동 여부에 따른 온도 편차가 큰 것으로 나타났다.

그림 5는 밀폐형 버스정류장 실내외에서 설치된 PAS에서 얻어진 측정정보를 시간에 따라 나열한 후 실내·외 비(indoor/outdoor ratio; I/O ratio)로 나타낸 것이다. I/O ratio는 측정된 지점에 대한 영향이 실내와 외기 중 어느 곳이 더 지배적인지 판단하는 지표로 많이 사용되며, 1보다 크면 실내 영향이 더 큰 것으로 보고, 반대일 경우 외부영향이 더 큰 것으로 판단한다(Chen and Zhao, 2011; Diapoili *et al.*, 2011). PM₁₀의 경우 실내 27.7±11.5 µg/m³, 외부 55.7±18.1 µg/m³으로 실외가 실내 대비 약 2.0배 높았고, 동일 기간 RAQMS는 44.6 µg/m³으로 실내는 AQMS의 63%, 외부는 126%였다. I/O ratio는 0.49로 실내에 대한 외부영향이 큰 것으로 확인되었다. 실내와 외부

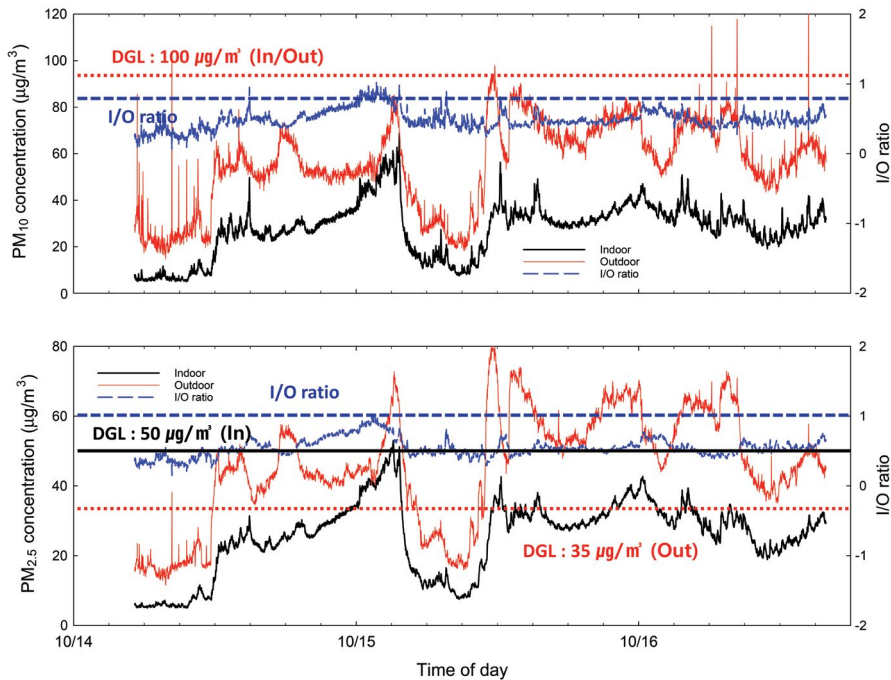


Fig. 5. Daily variation of PM_{10} , $PM_{2.5}$ measured at internal and external of enclosed bus station.

모두 환경기준은 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 동일하는데 대부분의 구간에서 기준치를 만족하였다. $PM_{2.5}$ 는 실내 $25.4 \pm 10.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 외기 $45.6 \pm 16.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실외가 실내 대비 약 1.8배 높게 나타났고, 동일 기간 RAQMS의 농도는 $25.9 \pm 11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실내 농도와 유사한 수준이었다.

대기 중에 부유하는 입자는 물리·화학적 작용을 받는데 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자는 주로 확산에 의한 영향을 많이 받고, 그 외 입자는 중력이나 부력, 관성력 등이 작용한다(Hinds and Zhu, 2022). 선행연구에서 도로변에서 배출된 입자는 수십~수백 nm 크기를 갖는 나노입자가 주요 입자로 보고하였다(Belkacem *et al.*, 2020; Minoura *et al.*, 2009). 본 밀폐형 버스정류장 또한 도로변에서 기인한 입자가 차량풍과 확산력에 의해 버스정류장 쪽으로 유입되었으나 1차적으로 벽면에 부딪쳐 차단, 부착 제거되고, 나머지 입자들만 승객의 유출입시 개방되는 문으로 유입되어 영향을 미친 것으로 판단된다.

$PM_{2.5}$ I/O ratio는 0.55로 PM_{10} 보다는 소폭 높았지만 $PM_{2.5}$ 역시 외부영향이 크게 작용하고 있는 것으로 나타났다. $PM_{2.5}$ 의 경우 PM_{10} 과 다르게 실내외 관리기준이 다른데, 실외는 일평균 농도로 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 실내공기질은 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다(MOE, 2022a, b) 실내공기질 관련 기준값은 대부분 대기환경기준이 실내공기질 기준과 유사하거나 소폭 높은 수준이나, 본 연구에서 확인된 바에 따르면 실내 $PM_{2.5}$ 농도기준이 외부보다 높은 것으로 확인되었다. $PM_{2.5}$ 의 실내 농도는 기준치인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하는 것으로 나타났지만 외부 농도는 기준치인 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 대부분 상회하는 것으로 나타났으며, 일부 구간에서는 실내 농도조차 이보다 높게 나타났다.

그림 6은 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 대한 시간대별 농도변화와 실내외 상관분석 결과이다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 모두 절대적인 농도값은 다르지만 유사한 변화 패턴을 나타내고 있다. 외기의 경우, 0시부터 7시까지 증감을 반복하며 전반적인 농도감소 경향을 보이다가 차량운

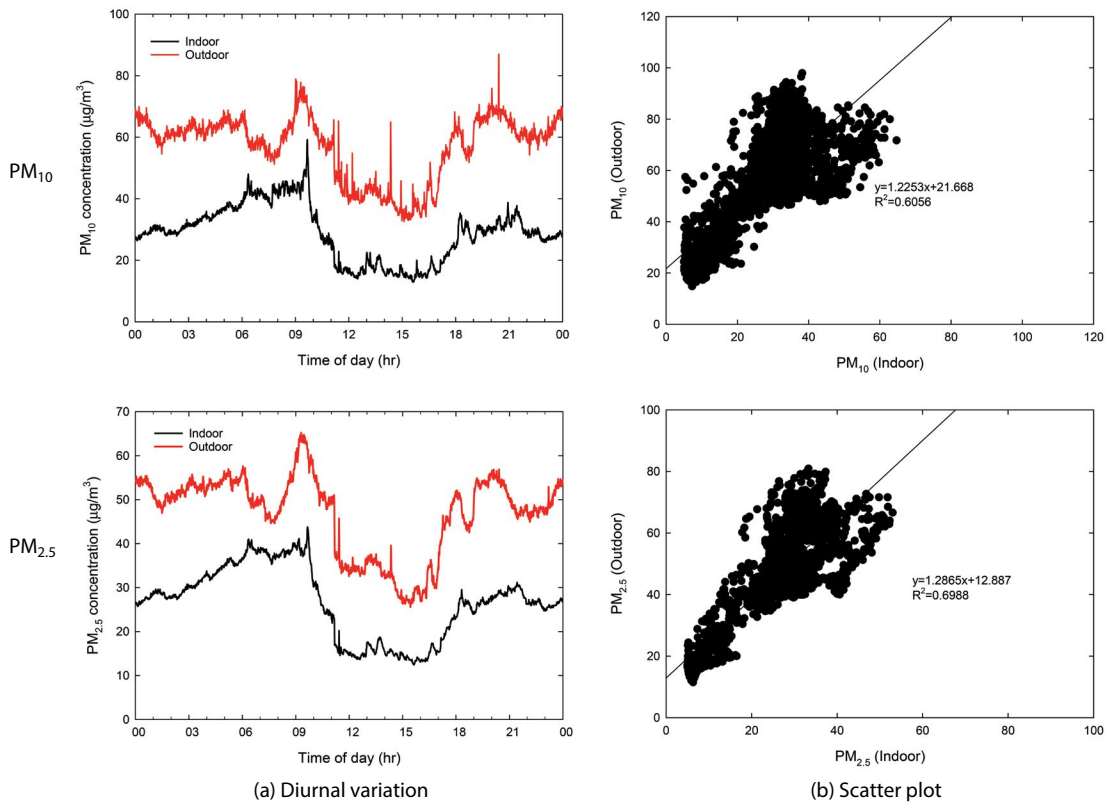


Fig. 6. Diurnal variation and scatter plot of PM_{10} and $PM_{2.5}$ measured at internal and external of enclosed bus station.

행량이 증가하는 7시를 기점으로 급격히 증가하여 9~10시경 일 중 최대 농도를 보인 후 16시경까지 감소 후 다시 증가하였다. 이는 동일 기간 같이 측정된 NO_2 , CO, BC와 유사한 패턴으로 도로변 이동오염원의 영향을 크게 받는 도시형 오염패턴과 일치한다. 실내의 경우, 0시부터 꾸준히 농도가 증가하다가 외기보다 조금 늦은 10시경 최대 농도를 보이고 감소하다가 17시경부터 다시 증가하는 경향을 보인다. 그림 6의 (b)는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 대한 실내외 상관분석 결과를 나타내었으며, R^2 이 각각 0.61과 0.70으로 높은 상관관계를 보였다.

3.3 도로변 중금속 오염도

그림 7의 (a)는 $PM_{2.5}$ 내 포함되어 있는 중금속의 비율을 나타낸 것이다. $PM_{2.5}$ 는 주중과 주말의 차이

를 보기 위하여 총 4회 측정을 수행하였으며, 10월 15일 주말, 나머지 17, 19, 21일은 주중이다. 4일 중 17일이 가장 낮은 $21.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 21일이 가장 높은 $66.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보였다. 전반적으로 측정된 4일에 대해 절대적인 농도 차이는 있었지만, 중금속 성분비는 12.9~22.4% 수준으로 나타났다.

그림 7의 (b)는 $PM_{2.5}$ 내 중금속의 물질별 절대 농도와 성분비를 나타낸 것이다. 그림 7의 (a)에 나타낸 것처럼 4일간 측정된 중금속 총 농도는 $4.7\sim 8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이다. 성분별로는 4일 모두 규소(Si) 성분이 37.3~50.2%로 가장 많은 비율을 차지하였고, 그 뒤를 이어 황(S) 성분이 19.5~27.3%로 나타났다. 일자별로는 휴일인 15일의 경우 규소(Si) (41.4%) > 황(S) (23.7%) > 철(Fe) (18.1%) > 알루미늄(Al) (9.9%) > 아연(Zn) (1.9%) 순으로 나타났고, 17일 역시 15일과 동

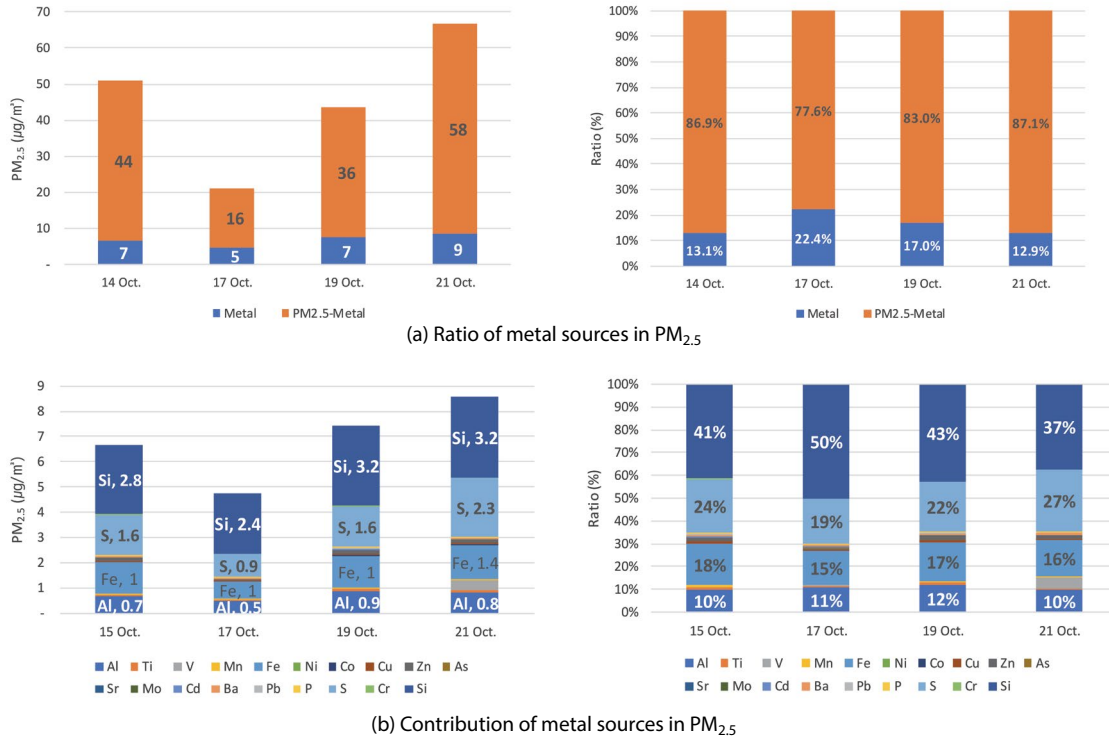


Fig. 7. Contribution and ratio of metal sources in PM_{2.5}.

일한 순서로 규소(Si) (50.2%) > 황(S) (19.5%) > 철(Fe) (14.6%) > 알루미늄(Al) (10.7%) > 아연(Zn) (1.0%)으로 나타났다. 19일은 앞선 15일과 17일과 동일한 비율을 보였으나 21일의 경우 규소(Si) (37.3%) > 황(S) (27.3%) > 철(Fe) (15.9%) > 알루미늄(Al) (9.6%) > 바나듐(V) (4.7%)으로 Si의 비율이 다른 날에 비해 감소한 반면 S와 V의 비율이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 해당 날짜에 RAQMS 기준 PM_{2.5} 농도가 44.5 µg/m³까지 올라가는 고농도 사례가 확인되었는데 이 영향으로 기존과 다른 성분비가 나타난 것으로 판단된다. 오염도가 높은 지역이나 대기질 관리 정책 수립을 위해 기존 지역에 대한 기여도 분석에 수용모델이 다수 활용되고 있다(Lee et al., 2009). 수용모델은 해당 지점에서 측정된 자료를 오염원 지시자와 비교 분석하여 배출원에 대해 추정하게 된다(Choi et al., 2010). 국립환경과학원에서는 수도권 산

업단지를 중심으로 대기 배출원 기여도 분석 연구에서 그동안 사용된 지시자를 정리하여 제시하였다(NIER, 2021). 이 자료에 따르면 본 연구에서 측정된 중금속 성분 중 Si, Al, Fe, Ti은 토양 성분에 대한 지시자이며, Zn과 S의 경우 자동차 배출에 대한 지시자로 분류된다. 본 연구가 자동차 이동 도로에 인접한 버스정류장 바로 옆에서 수행된 점을 감안한다면 지시자의 분류체계에 따라 정확히 분석된 것으로 판단된다. 한 가지 특이한 점은 S의 성분비가 매우 높다는 것인데 이는 측정대상인 아산시의 경우 아직까지 압축천연가스(compressed natural gas, CNG)나 전기, 수소 등의 친환경 버스로의 전환이 늦어져 기존의 경유(diesel) 버스가 주요 노선이며, 경유에서 기인한 S의 영향이 반영된 결과로 판단된다. 이는 다시 말하면 도로변 오염원 개선을 위해서는 운행 버스의 친환경 버스로의 전환이 필요하다는 의미로 해석된다.

3.4 밀폐형 버스정류장 관리대책 제언

대기관리권역법과 미세먼지특별법이 제정된 이후 정부에서는 분야별 대기환경 개선대책을 수립하여 추진 중에 있다. 그중 이동오염원 부문은 친환경 수송시스템으로의 전환을 목표로 추진 중이다. 밀폐형 버스정류장은 이러한 노력의 일환으로 서울을 포함한 구리, 부천, 안산 등 전국의 광역 및 기초 지자체에서 시범운영 중에 있다. 하지만 밀폐형 버스정류장의 경우, 아직까지 정식적으로 다중이용시설로 분류하고 있지 않기 때문에 관련 규제나 기준이 없는 실정이다. 그리고 버스의 이동 편리를 위해 운영 중인 버스 중앙차선제는 버스의 원활한 운행을 유도함에 따라 도심 주요 문제인 교통체증을 해결하고 운행과정에서 발생하는 배출가스량을 감소시키는 등 긍정적인 효과를 나타내고 있다. 하지만 양방향으로 운행되는 도로 가운데 버스정류장을 설치함으로써 자동차에서 배출된 오염물질이 중앙차선 버스정류장에서 대기하는 이용객의 노출을 증가시켜 건강상 악영향을 줄 수 있다는 연구결과가 보고되고 있어 (Lee et al., 2014), 환경 변화에 따른 새로운 대책 마련과 현황파악이 필요한 것으로 나타나고 있다. 이에 본 연구에서는 밀폐형 버스정류장을 대상으로 현장평가연구를 수행하였고, 그 결과를 기반으로 다음과 같은 관리대책을 제안하고자 한다.

첫째, 본 연구결과 밀폐형 버스정류장 설치에 따라 도로변에서 배출된 오염물질에 대한 노출농도가 절반 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 2021년 한국철도기술연구원에서 수행한 연구에서도 이와 유사한 수준의 개선 효과를 보고한 바 있다 (KRRI, 2021). 인구가 밀집되어 있는 도심지역은 산업단지와 같은 산업공정보다는 도로 이동오염원에 대한 영향이 큰 것으로 나타나고 있기 때문에 도로오염원에 의한 시민 건강보호를 위해 밀폐형 버스정류장 보급사업이 지속적으로 추진될 필요가 있다.

둘째, 현재 버스정류장은 이용객의 안전과 냉난방 제공, 도로변 오염물질로부터 보호하기 위해 밀폐형이나 반밀폐형으로 개선사업이 추진되고 있다. 하지

만 대부분의 사업이 시범사업으로 추진되다 보니 설치가 용이하거나 해당 지자체의 협조가 원활한 지역을 대상으로 선정되고 있다. 연구조사 결과, 차량이 편도로 운행하는 버스 차선보다는 버스정류장을 중심으로 양방향으로 운행하는 버스중앙차선의 오염도가 더 큰 만큼 밀폐형 버스정류장에 대한 보급을 버스 중앙차선을 우선적으로 추진할 필요가 있다 (Baik et al., 2018).

셋째, 현재 버스정류장은 밀폐형으로 보급사업이 시범적으로 추진되어가고 있기 때문에 실내공기질 관리법에 따른 다중이용시설로 구분되어 있지 않아 관리규정이 존재하지 않는다. 하지만 국가와 지자체 차원에서 밀폐형 버스정류장에 대한 필요성을 인식하고 점차 확대해 나가는 가운데 이에 대한 관리규정 마련이 함께 논의되어야 할 것이다. 지하역사나 항만, 항공기의 여객터미널이 다중이용시설로 분류되어 관리되고 있는 만큼 필요성과 당위성은 충분한 것으로 판단된다. 그리고 현재 실내공기질 관리법상의 유지기준과 권고기준에 대한 전면적인 재검토도 필요할 것으로 판단된다. 실내의 경우, 외부오염원에 대한 차단과 내부 배출원 관리만 잘 이루어진다면 충분히 외부 대기질 대비 청정한 상태를 유지할 수 있음에도 불구하고, 외부 대기환경기준 대비 실내공기질 기준이 더 높은 항목이 존재하고 있다. 물론 이는 지하역사 등을 포함하기 때문이긴 하지만, 실내에 대한 그 외 공간(노약자 활동공간, 의료시설 등)은 충분히 더 낮은 농도를 갖출 필요가 있다. WHO에서는 배경농도와 지역적 특성을 반영하여 신규 대기환경기준을 제시하였는데 여기서 $PM_{2.5}$ 에 대한 기준을 실내외 통합하여 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제시하였다 (WHO, 2021). 국내의 경우 배경농도 자체가 이보다 높은 수준으로 WHO만큼의 기준 강화는 어렵겠지만 전면적인 검토를 통한 환경기준 재정비가 필요해 보인다.

넷째, 본 연구에서 $PM_{2.5}$ 에 대한 증감속 분석결과, S에 대한 기여도가 토양지각성분인 Si 다음으로 높게 나타났다. 수도권을 포함한 대도시들은 CNG를 거쳐 전기 및 수소 버스로 전환을 추진 중에 있지만, 측정

대상인 아산시가 포함된 충청남도는 15개 시·군 중 단 2개 시·군만이 CNG 버스가 주력으로 운영되고 있으며, 그 외 13개 시·군은 아직까지 디젤 버스가 주요 교통수단으로 활용되고 있다. 도로오염원에 대한 대기질 개선을 위해서는 이들 디젤 버스에 대한 빠른 전환이 요구된다(ChungNam, 2021).

4. 결 론

대기질 개선을 위해 다양한 맞춤형 정책이 수립·추진되고 있는 가운데 대도시는 도로 이동오염원에 대한 기여도가 큰 것으로 나타나 이에 대한 다양한 대책이 마련되고 있다. 그중 버스는 주요 교통수단으로 활용되고 있으며, 버스의 운행 편리 증대와 교통 혼잡 방지를 위해 버스 중앙차선제 등을 도입하고 있다(Lee et al., 2014). 이에 각 지자체에서는 승객의 건강보호와 이용 편리 증대를 위해 밀폐형 버스정류장을 시범운영 중에 있으나 아직까지 이들 정류장에 대한 개선 효과를 분석한 결과는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 아산시에 위치한 밀폐형 버스정류장을 대상으로 현장평가를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 밀폐형 버스정류장이 위치한 도로변과 RAQMS의 오염도를 분석한 결과, CO를 제외한 도로변의 오염도가 더 높게 나타났다. 도로변의 경우 배출원인 도로와 인접해 있으며, 차량 운행에 따라 생성된 차량풍에 따라 희석·확산이 충분히 발생하지 못한 상태로 영향을 받아 높은 농도로 관측되는 반면, RAQMS는 도로변 인근에 위치해 있기는 하지만 본 연구에서 측정 위치로 선정된 버스정류장보다 이격거리가 더 멀고, 흡입구 또한 지상으로부터 2~3m 높이에 있어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 하지만 본 연구결과는 그 당시 교통량 및 운행 차량 조성의 차이, 사용된 측정장비의 특성이 반영된 결과로 추후 지속적인 추가 연구를 통해 데이터의 신뢰성과 정확도를 높일 필요가 있다.

2. 도로변 오염원의 주요 지표로 활용되는 BC의 경우 측정 기간 평균농도가 $2.3 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났는데 이는 서울이나 광주, 청주 등 도시 배경지역보다 높은 수준으로 향후 이에 대한 관리대책 마련이 필요하다.
3. 버스정류장 내부 CO₂ 농도는 987 ppm으로 실내공기질 유지기준에 근접한 수준으로 나타났고, 시간별로는 7시부터 20시까지는 기준치를 초과하는 것으로 나타나 CO₂에 대한 관리대책 마련이 필요한 것으로 나타났다.
4. 실내외 영향 분석결과 밀폐형 버스정류장 내부 대비 외부의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도가 각각 1.8~2배 높은 수준이며, I/O ratio는 0.49~0.55로 대부분 외부 요인이 반영된 결과로 나타났다. 밀폐형 버스정류장 설치시 PM_{2.5}의 실내 농도를 외부 대비 절반 수준으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다.
5. 도로변에서 포집된 PM_{2.5}의 중금속 분석 결과 Si, S, Al, Fe, Ti, Zn이 검출되었고, 수용모델의 지시자들과 비교분석 결과 토양 및 이동오염원에 대한 기여도가 높게 나타났고, 특히 S에 대한 기여도가 높게 나타나 지역적 대기질 개선을 위해 디젤버스에 대한 순차적인 전환이 필요한 것으로 확인되었다.

본 연구결과 PM_{2.5} 기준 RAQMS에서 측정된 농도보다 버스정류장 외부의 농도가 1.7배 정도 높은 수준인 것으로 나타났으며, 밀폐형 버스정류장 설치에 따라 승객들이 노출되는 오염도를 절반 수준까지 낮출 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 최근 주정부와 기초지자체 차원의 밀폐형 버스정류장 보급 시범사업이 추진되고 있는 가운데 이들에 대한 장기적인 관점에서의 관리대책과 규제방안이 같이 고민되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 충청남도의 지원을 받아 수행된 “지역간 공동연구를 통한 광역 미세먼지 개선 기초연구

(22DE012)”의 일환으로 진행되었으며, 측정에 협조해 주신 (주)에이피엠엔지니어링 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Adachi, K., Tainosho, Y. (2004) Characteristics of heavy metal particles embedded in tire dust, *Environmental International*, 30, 1009-1017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>
- Amato, F., Viana, M., Richard, A., Furger, M., Prevot, A.S.H., Nava, S., Lucarelli, F., Bukowiecki, N., Alastuey, A., Reche, C., Moreno, T., Pandolfi, M., Pey, J., Querl, X. (2011) Size and time-resolved roadside enrichment of atmospheric particulate pollutants, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 2917-2931. <https://doi.org/10.5194/acp-11-2917-2011>
- 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).
- Baik, Y.J., Kim, D.W., Kwon, H.Y., Kim, Y., Kim, S.Y. (2018) Impact of the Exclusive Median Bus Lane System on Air Pollution Concentrations in Seoul, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 542-553, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.542>
- Belkacem, I., Khaldi, S., Helali, A., Slimi, K., Serindat, S. (2020) The influence of urban road traffic on nanoparticles: Roadside measurements, *Atmospheric Environment*, 242(1), 117786. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117786>
- Brimblecombe, P., Chu, M.Y., Liu, C.H., Ning, Z. (2021) NO_x and CO Fluctuations in a Busy Street Canyon, *Environments*, 8, 137. <https://doi.org/10.3390/environments8120137>
- 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.
- Cha, Y., Lee, S., Lee, J. (2019) Measurement of Black Carbon Concentration and Comparison with PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations Monitored in Chungcheong Province, Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 541-547. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.08.0325>
- Chen, C., Zhao, B. (2011) Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, *Atmospheric Environment*, 45(2), 275-288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- Cho, B.Y., Shin, S.H., Jung, C.S., Ju, M.H., Yoon, M.H., Ahn, J.E., Bae, G.S. (2019) Characteristics of Particle Size Distribution at the Roadside of Daegu, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 16-26, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.016>
- 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 (ChungNam) (2021) 60th ChungNam Statistical Year Book, XI Transportation and information telecommunication.
- Diapouli, E., Eleftheriadis, K., Karanasiou, A.A., Vratolis, S., Hermansen, O., Colbeck, I., Lazaridis, M. (2011) Indoor and Outdoor Particle Number and Mass Concentrations in Athens. Sources, Sinks and Variability of Aerosol Parameters, *Aerosol and Air Quality Research*, 11, 632-642. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2010.09.0080>
- Engelhardt, V., Perez, T., Donoso, L., Muller, T., Wiedensohler, A. (2022) Black carbon and particulate matter mass concentrations in the Metropolitan District of Caracas, Venezuela: An assessment of temporal variation and contributing sources, *Elementa Science of the Anthropocene*, 10(1), <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00024>
- Furusjo, E., Sternbeck, J., Cousins, A.P. (2007) PM₁₀ source characterization at urban and highway roadside locations, *Science of the Total Environment*, 387, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.021>
- Hinds, W.C., Zhu, Y. (2022) *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 3rd Edition, Wiley.
- Hitchins, J., Morawska, L., Wolff, R., Gilbert, D. (2000) Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road, *Atmospheric Environment*, 34(1), 51-59. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00304-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00304-0)
- Jeong, H., Choi, J.Y., Ra, K. (2020) Characteristics for Heavy Metal Pollution in Road Dust from Daebul Industrial Complex: Classification by Particle Size and Mag-

- netic Separation, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 29(4), 252-271, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2020.29.4.252>
- Jung, J.H., Park, S.S. (2010) Characteristics of Black Carbon in PM_{2.5} Observed in Gwangju for Year 2008 and Examination of Filter Loading Effect, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(4), 392-402, (in Korean with English abstract).
- Kamara, A.A., Harrison, R.M. (2021) Analysis of the air pollution climate of a central urban roadside supersite: London, Marylebone Road, *Atmospheric Environment*, 258(1), 118479. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118479>
- Kim, C.W. (2014) Development of guideline for the prevention and management of particulate matter/Asian dust-induced health damage (Allergic diseases), Korea Center for Disease Control and Prevention.
- 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.B., Kim, D., Noh, S., Yoon, K.H., Park, D., Lee, J.J., Kim, J. (2020) Estimation of PM_{2.5} Correction Factor for Optical Particle Counter in Ambient Air, *Particle and Aerosol Research*, 16(2), 49-59, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2020.16.2.049>
- Kim, J.S., Choi, Y.J., Lee, K.B., Kim, S.D. (2016) Relation with Activity of Road Mobile Source and Roadside Nitrogen Oxide Concentration, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 9-20, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.009>
- Kim, K.H. (2017) Optimal Allocation of Local Bus Routes at the Multiple Berths - Using the Microscopic Operational Data -, Doctor's Thesis, Seoul National University, 85-123, (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. <https://doi.org/10.3390/atmos11050496>
- Korea Railroad Research Institute (KRRRI) (2021) Development of particulate matter reduction system for bus station, 150-159.
- Lawrence, A.J., Masih, A., Taneja, A. (2004) Indoor/outdoor relationships of carbon monoxide and oxides of nitrogen in domestic homes with roadside, urban and rural locations in a central Indian region, *Indoor Air* 15, 76-82. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00311.x>
- Lee, C.S., Kim, H.H., Yu, S.D., Lee, J.S., Chang, J.Y., Gwak, Y.K., Son, H.R., Lim, Y.W. (2013) A survey of distribution for environment exposure in the activities space of elementary schools - Focused on PM₁₀, PM_{2.5}, Black Carbon, VOCs and Formaldehyde, *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 10(4), 303-317, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11597/jkosie.2013.10.4.303>
- Lee, S.B., Bae, G.N. (2009) Characteristics of Air Pollution at a Junction Area Contaminated with Vehicle Emissions, *Transactions of Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(4), 48-53. (in Korean with English abstract).
- Lee, T.J., Huh, J.B., Yi, S.M., Kim, S.D., Kim, D.S. (2009) Estimation of PM₁₀ Source Contributions on Three Cities in the Metropolitan Area by Using PMF Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(4), 275-288, (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.K., Kim, W.S., Hong, S.M., Shin, E.S. (2014) Comparison of Air Pollution Characteristics in the Center Lane-Bus Stop and the Surrounding Areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(4), 378-386, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.4.378>
- Lee, Y.W., Kyen, S.Y. (2020) A Study on the Improvement of the Legal System for the Introduction of Fine Dust Management Bus Station on the Road, *The Journal of Humanities and Social Science* 21, 11(5), 1005-1015, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.22143/HSS21.11.5.73>
- Longley, I., Somervell, E., Gray, S. (2015) Roadside increments in PM₁₀, NO_x and NO₂ concentrations observed over 2 months at a major highway in New Zealand, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8, 591-602. <https://doi.org/10.1007/s11869-014-0305-4>
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Guideline for Installation and Operating of Air Pollution Monitoring Station.
- Ministry of Environment (MOE) (2022a) Enforcement rule of Indoor Air Quality Control Act.
- Ministry of Environment (MOE) (2022b) Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy.
- Minoura, H., Takekawa, H., Terada, S. (2009) Roadside nanoparticles corresponding to vehicle emissions during

- one signal cycle, *Atmospheric Environment*, 43(3), 546-556. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.004>
- Mori, T., Ohata, S., Morino, Y., Koike, M., Moteki, N., Kondo, Y. (2020) Changes in black carbon and PM_{2.5} in Tokyo in 2003-2017, *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Science*, 96, 122-129. <https://doi.org/10.2183/pjab.96.010>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) National air pollutants emission.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007) National Air Pollutant Emission Trends, 1999~2005.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2021) The characteristics of air quality and contribution of emission sources by region (II), (in Korean with English abstract).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) Annual report of air quality in Korea 2021.
- Ngoc, L.T.N., Kim, M., Bui, V.K.H., Park, D., Lee, Y.C. (2018) Particulate Matter Exposure of Passengers at Bus Stations: A Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 2886. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122886>
- Park, D.J., Cho, I.W., Lee, K.Y., Park, K., Lee, Y.J., Ahn, J.Y., Bae, M.S. (2016) Analysis of Poly Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollutants Originated from Local Road Dust by Special Measurements, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3), 272-279, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.272>
- Park, J.H. (2013) Comparison Study of Air Pollutants and Respiratory Disease Symptom According to Road Traffic Volume at Elementary Schools, Master's Thesis, Yonsei University, 1-6, (in Korean with English abstract).
- Park, S.S., Jung, J.H., Cho, S.Y., Kim, S.J. (2009) Compensation of Aethalometer Black Carbon Data Observed at a Gwangju Site, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(6), 571-578, (in Korean with English abstract).
- Seo, J., Kim, H. (2021) Types of Smart Bus Stop and Their Impacts on Reducing Fine Dust Concentrations in Seoul, *Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, 12(3), 39-50, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5804/LHIJ.2021.12.3.39>
- Statistics Korea (SK) (2022) Public transport share rate. Available URL: <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4259> (accessed in Dec. 26, 2022).
- Viidanoja, J., Sillanpaa, M., Laakko, J., Kerminen, V.M., Hillamo, R., Aarnio, P., Koskentalo, T. (2002) Organic and black carbon in PM_{2.5} and PM₁₀: 1 year of data from an urban site in Helsinki, Finland, *Atmospheric Environment*, 36(19), 3183-3193. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00205-4)
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>, (accessed on Dec. 29, 2022).
- Yeo, S.Y., Kee, H.K., Choi, S.W., Seol, S.H., Jin, H.A., Yoo, C., Lim, H.Y., Kim, J.S. (2019) Analysis of the National Air Pollutant Emission Inventory (CAPSS 2015) and the Major Cause of Change in Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(3), 212-231. <https://doi.org/10.5572/ajae.2019.13.3.212>
- Yu, C.H., Fan, Z., Liyo, P.J., Baptista, A.M Greenbergm, M., Laumbach, R.J. (2016) A novel mobile monitoring approach to characterize spatial and temporal variation in traffic-related air pollutants in an urban, community, *Atmospheric Environment*, 141, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.044>

Authors Information

- 이가혜 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(gahya1129@cni.re.kr)
- 황규철 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(kchwang@cni.re.kr)
- 박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(psc89@cni.re.kr)
- 이다솜 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정연구실 선임연구원) (leedasom@snu.ac.kr)
- 김관철 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정연구실 선임연구원) (fehouse@snu.ac.kr)
- 송민영 (서울기술연구원 기후환경연구실 수석연구원)
(myson@sit.re.kr)
- 최우석 (세종대학교 데이터사이언스학과 교수)
(wschoi@sejong.ac.kr)
- 허재석 (한국철도기술연구원 교통환경연구실 연구원)
(jsheo1005@krri.re.kr)
- 박덕신 (한국철도기술연구원 교통환경연구실 수석연구원)
(dspark@krri.re.kr)
- 이건희 ((주)APM엔지니어링 기술영업부 차장)
(gunhee.lee@apm.co.kr)
- 정무현 (한국화학융합시험연구원 대기환경센터 책임연구원)
(dew1029@ktr.or.kr)
- 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)