



서울글로벌챌린지 2021 수상작

# 외부 대기질의 변화에 따른 지하철 실내공기질의 영향

## Effects of Indoor Air Quality in Subway Systems according to Changes in Outdoor Air Quality

손윤석\*, 유성지<sup>1)</sup>, 서서희<sup>1)</sup>, 최인영<sup>2)</sup>

부경대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부,  
<sup>2)</sup>건국대학교 사회환경공학부

Youn-Suk Son\*, Seong-ji Yu<sup>1)</sup>, Seo Hee Seo<sup>1)</sup>, In-young Choi<sup>2)</sup>

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University,  
Busan, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University,  
Busan, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2021년 9월 30일  
수정일 2021년 12월 28일  
채택일 2022년 1월 11일

Received 30 September 2021  
Revised 28 December 2021  
Accepted 11 January 2022

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)51-629-6522  
E-mail : sonys@pknu.ac.kr

**Abstract** In this study, we investigated effects of indoor air quality in subway systems according to changes in outdoor air quality. To do this, we analyzed and compared the data measured from five air quality monitoring stations (AQMSs) and four underground subway stations in the central Seoul area. As a result, concentrations of outdoor pollutants (SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) except for O<sub>3</sub> have been continuously decreasing over the past decade. On the other hand, for levels of pollutants in subway stations, there was a difference by the subway stations and pollutants, but a clear decrease in concentration during the study period could not be confirmed. In addition, as a result of analyzing the correlation between indoor and outdoor pollutant levels, it is judged that gaseous pollutants (NO<sub>2</sub> and CO) came from the outside, but in the case of particulate matter, internal environmental factors were also found to be very large.

**Key words:** Indoor Air Quality (IAQ), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Underground subway station, Ambient air, Correlation

### 1. 서 론

현대 사회가 발달됨에 따라 도시화 및 인구밀집이 지속되고 있고 이에 따라 대중교통의 이용 빈도가 증가되고 있는 실정이다. 지하철은 상대적으로 저렴한 운임 및 정확한 운행 시간으로 가장 많이 이용되는 대중교통수단 중의 하나이다(Son *et al.*, 2020). 전 세계적으로 현재까지 60개국 이상에서 지하철이 설치 및 운영되고 있고, 승객 수가 지속적으로 증가하고 있다(Son *et al.*, 2020; Xu and Hao, 2017). 서울시의 경우, 2018년 대중교통 이용객 수는 하루 평균 약 1,037만 명으로 전년 대비 1.2% (12만 6천 명) 감소했다. 이 중

버스 이용객의 경우, 14만 3천 명 (2.7%) 감소한 것으로 나타났는데, 이에 반하여, 지하철 이용객 수는 전년 대비 1만 6천 명 (0.3%) 증가했다(Seoul Metropolitan Government, 2020). 전체적으로 볼 때, 서울시의 경우 대중교통 이용량 중 지하철이 차지하는 비율은 49.3%이다(Son, 2020).

이와 같이 대다수의 시민이 사용하고 있는 지하철은 다른 대중교통수단들과 달리 거의 모든 역사가 지하에 배치되어 있는 독특한 특성을 가지고 있다. 게다가, 지하철은 내부에 다양한 오염원을 가지고 있고, 지하라는 공간의 특수성으로 인하여 상대적으로 다른 대중이용시설에 비해 밀폐되어 있기 때문에 실내공기

질의 오염이 보다 심각한 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2019; Son and Ryu, 2018; Eom *et al.*, 2013). 선행 연구의 결과들에 따르면, 다양한 실내공기 오염물질 중에서도 미세먼지(particulate matter: PM)는 열차의 운행 및 승객의 활동과 같은 내부 요인에 의해 발생되어 지하철 시스템 내부에 축적되는 것으로 알려져 있다(Kamani *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2012; Raut *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2008; Braniš, 2006; Aarnio *et al.*, 2005; Johansson and Johansson, 2003; Awad, 2002; Furuya *et al.*, 2001). 이와 더불어, 보다 최근의 연구 결과들에 따르면 지하철 시스템 내의 미세먼지 농도는 앞에서 언급한 내부적인 요소뿐만 아니라 오염된 외부 공기의 환기 및 침투에 따른 외부적인 요소에도 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Park *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2017, 2015; Son *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2010). 이와 같이, 부적절한 환기 및 이용객의 증가로 인하여 지하철 실내공기질이 악화되고 있다는 연구 결과는 우리나라뿐만 아니라 국외에서 수행된 다양한 연구 결과에서도 확인할 수 있었다(Son and Ryu, 2018). 현재까지 국내를 포함한 전 세계에서 진행된 연구 결과에 따르면, 실제로 측정된 지하철 미세먼지 농도의 범위가 PM<sub>10</sub> (particulate matter 10 µm or less in diameter)은 10~1,500 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub> (particulate matter 2.5 µm or less in diameter)는 7~731 µg/m<sup>3</sup>로 나타나 대기 중에서 측정된 농도보다 상당히 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있었고 이와 관련된 보다 자세한 내용은 저자의 이전 논문에 정리되어 있다(Park *et al.*, 2019).

지하철 시스템의 주요 미세먼지 발생원은 내부에 존재하는데, 팬터그래프, 레일, 바퀴 등의 마모로 인하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한, 이들은 철성분(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, iron (Fe) metal)을 함유하고 있기 때문에 대기 중 미세먼지보다 인체에 보다 심각한 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다(Son and Ryu, 2018; Jung *et al.*, 2012; Mugica-Álvarez *et al.*, 2012; Gustavsson *et al.*, 2008; Salma *et al.*, 2007; Karlsson *et al.*, 2005). 게다가 이들은 열차의 운행 과정에서

발생되는 열차풍으로 인하여 승강장 및 대합실과 같은 승객이 이용하고 있는 지점까지 유입되는 것으로 알려져 있다(Eom *et al.*, 2013).

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 국내에서는 지난 20여 년 동안 지하철 시스템 내의 미세먼지에 대한 측정 및 분석뿐만 아니라 이를 해결하기 위한 저감 기술 및 인체 유해성까지 다양한 연구들이 진행되어 왔다(Choi *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2019; Jeon *et al.*, 2019a, 2019b; Lee *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2003a, 2003b, 2002; Hwang *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2016; Byeon *et al.*, 2015; Kwon *et al.*, 2015; Son *et al.*, 2014, 2013; Oh *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2008; Park and Ha, 2008). 그러나 대부분의 논문들은 지하철 시스템 내의 미세먼지 농도 및 성분 분석에 대한 내용에만 국한되어 있어 근본적으로 지하철 시스템의 공기질에 막대한 영향을 미칠 수 있는 외부 대기와의 관계에 대한 연구는 극히 일부만 수행된 실정이다(Son *et al.*, 2020). Lee *et al.* (2017)은 터널 내기와 외기의 PM에 대한 상관성을 분석하였고, 그 결과 입자의 크기가 작을수록 외기와의 상관성이 높게 나타나는 것을 확인하였다. Hwang *et al.* (2017)은 2014부터 2015년까지 지하역사 100여 곳에서 PM<sub>10</sub> 농도를 측정하고 이들에게 영향을 미치는 환경인자들에 대해서 평가하였다. 이와 더불어, Byeon *et al.* (2015)은 지하철 및 외기에서 포집한 미세먼지들의 화학 성분을 분석하였고, Kwon *et al.* (2015)은 6개 환승역에서 PM의 농도 및 환경인자를 측정하여 다변량 분석을 수행하였다. 그러나 앞서 언급한 대부분의 선행 연구들은 1) 특정 목적을 가지고 연구가 수행되었고, 2) 물리적 및 제원적인 한계로 인하여 특정 역사에서 단시간적으로 진행되었으며, 3) 중량법이 아닌 광산란법을 측정에 이용하여 측정된 농도 값의 절대값에 대한 신뢰성의 문제점들을 내포하고 있다. 따라서 현재까지 보고된 연구결과만으로는 외부 대기가 지하철 시스템에 미치는 영향을 파악하기에는 그 한계점이 분명히 존재하고 이를 극복하기 위해서는 다수의 역에서 베타레이 또는 중량법을 이용한 다량

의 측정 데이터를 활용한 연구가 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에서는 현시점에서 활용할 수 있는 지하철 시스템 및 외부 대기 측정망 자료 등을 이용하여 외부 대기가 지하철 실내공기질에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 에어코리아에서 제공하는 지난 10년 동안의 서울 중심지역의 도시대기 및 도로변 대기 측정소 자료, 4년 동안의 지하철 대합실 측정자료, 1달 동안의 승강장 측정 자료를 본 연구에 사용하였다. 그리고 보다 현실성 있는 데이터 분석을 위하여 지하철 운행에 따른 영향을 시공간적으로 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 서울 지하철

서울 지하철은 서울특별시와 주변 시외 지역을 잇는 주요 대중교통 체계로 세 곳의 운영기관이 관리하고 있다. 그중 서울의 대부분 호선을 관리하는 서울교통공사는 서울 지하철 1~8호선, 그리고 9호선 2·3단계 구간의 총 293개 역(약 319.3 km)을 운영하고 있다 (Seoul Metro, 2021a).

서울 지하철의 경우, 「실내공기질 관리법」에 의하여 현재 지하철역사 및 전동차에서 오염물질의 측정이 주기적으로 이루어지고 있다. 지하철역사의 경우 유지기준인 미세먼지 (Particulate matter,  $PM_{10}$ ), 초미세먼지 ( $PM_{2.5}$ ), 이산화탄소 ( $CO_2$ ), 포름알데하이드 (Formaldehyde), 일산화탄소 (CO)와 권고기준인 이산화질소 ( $NO_2$ ), 라돈 (Radon), 총휘발성유기화합물 (Total volatile organic compounds, TVOC)이 측정 및 관리되고 있다. 특히 실내공기 오염물질 중  $PM_{2.5}$ 의 인체 유해성에 대한 인식의 증가로 인하여 2020년 12월부터  $PM_{2.5}$  측정기가 전 역사의 승강장 및 전동차에 설치되었으며, 2021년 4월부터 실시간으로 역사마다  $PM_{2.5}$  농도를 공개하고 있다.

### 2.2 활용 데이터의 범위

본 연구에서는 서울 지하철역사 내 실내공기질의 시·

공간적인 특성 및 외부 대기가 지하철 실내공기질에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 서울교통공사가 체계적으로 수집한  $NO_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $PM_{10}$ 에 대한 4년간 (2017년~2020년)의 자료를 활용하여 연구를 진행하였다. 이때, 지하철의 운행 및 이용객의 영향을 평가하기 위하여 서울 중심부의 환승역인 동대문역사문화공원역 (Dongdaemun History & Culture Park: DS, 2호선, 4호선 및 5호선), 서울역 (Seoul Station: SS, 1호선 및 4호선), 시청역 (City Hall: CS, 1호선 및 2호선), 충무로역 (Chungmuro: CHS, 3호선 및 4호선) 총 4곳의 역사를 대상으로 연구를 수행하였다. 이들 4곳 환승역의 실내공기질 자료는 서울교통공사에서 공공데이터로 개방하고 있는 대합실에서 측정된 자료를 사용하여 연구를 수행하였다 (Seoul Metro, 2021b). 이와 더불어,  $PM_{2.5}$ 의 경우에는 위에서 언급한 것처럼 한국환경공단의 실내공기질 관리 종합정보망에서 공공데이터가 4월부터 개방되어 현재 승강장에서 수집된 4월부터 7월까지 자료가 확정자료로서 공개되어 있다 (InAir, 2021). 그러나 연구를 진행하고 있는 현시점 (2021년 9월)에서 승강장에서 측정된  $PM_{2.5}$ 의 확정자료와 상관관계 분석을 수행할 외부 대기질 (Air quality monitoring station: AQMS) 자료가 2021년 4월까지만 공개되어 있는 실정임으로 4월 한 달 간의 자료를 활용하여 승강장에서의  $PM_{2.5}$ 에 대한 외부 대기와의 상관분석 등이 이루어졌다.

### 2.3 연구 대상 역사

본 연구에서는 보다 실효성 있는 자료 분석을 수행하기 위하여 교통량 및 이용 승객수가 많은 서울 중심부에 위치한 4개 역사를 대상으로 연구를 진행하였다 (그림 1). 이들 역사들은 2018년 및 2019년 일일 이용 승객수 기준으로 각각 SS역은 6위, 5위, CS역은 19위, 14위, CHS역은 38위, 41위, DS역은 23위, 22위로 전체 역사 293개 중 상당히 높은 이용 승객수 순위를 보이고 있다. 이러한 통계에서 사용된 이용 승객수는 출입구 이용객 수만 집계된 것으로, 환승을 위해 대기하는 승강장의 이용객 수는 훨씬 더 높을 것으로 예상된다.

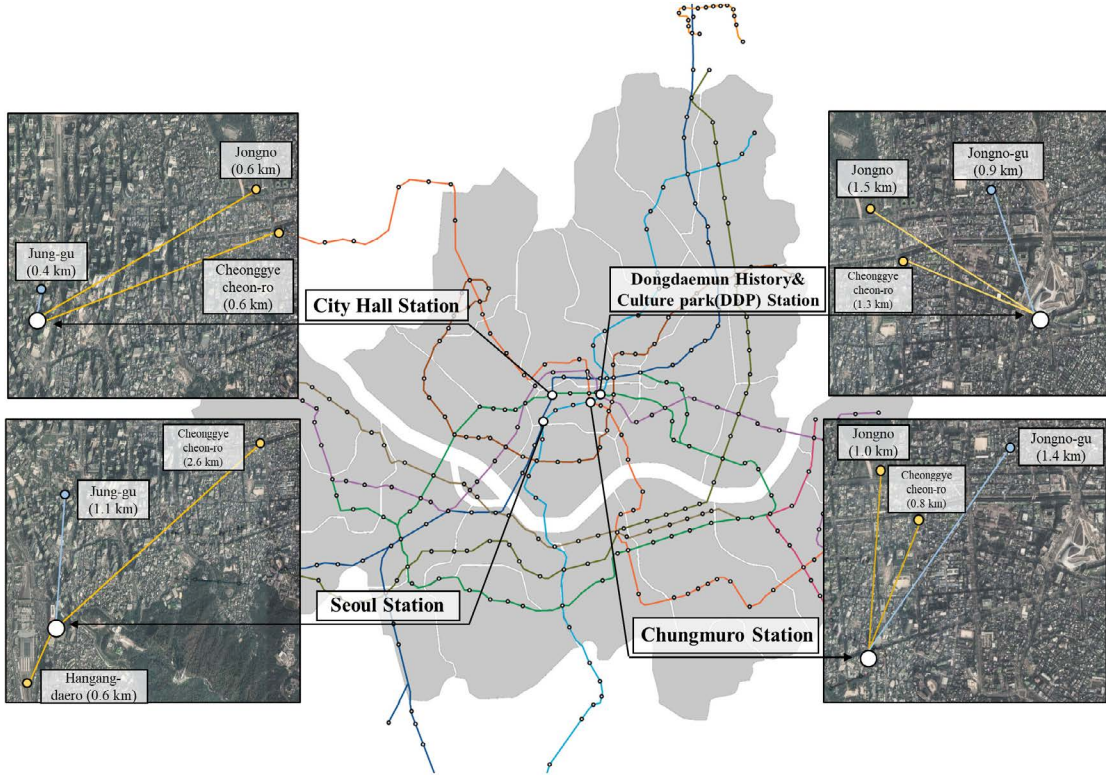


Fig. 1. The locations of studied subway stations (white circle) and air quality monitoring stations (urban: blue circle, roadside: yellow circle).

이들 4개 역사들의 주요 특징은 모두 두 개 이상의 호선을 운행하는 환승 역사이고 대합실과 승강장이 지하에 위치해 있다. SS역은 총 지하 2층으로 구성되어 있고, 두 호선 모두 1면 2선의 선식 승강장 구조를 이루고 있다. CS역은 총 지하 3층까지 있으며, 1호선은 2면 2선의 상대식 구조, 2호선은 1면 2선의 섬식 구조를 이루고 있다. CHS역은 총 지하 4층까지 있으며, 3호선은 1면 2선의 섬식 구조, 4호선은 2면 2선의 상대식 구조를 이루고 있다. 또한 두 호선의 출입 게이트가 구분 없이 통합된 것이 특징이다. DS역은 총 지하 5층으로 구성되어 있으며, 2호선은 2면 2선의 상대식 구조, 4호선 및 5호선은 1면 2선의 섬식 구조를 이루고 있다. 이 외의 각 지하역사의 상세한 정보는 표 1에 나타내었다(Seoul Metro, 2021c).

외부 대기가 지하역사의 실내공기질에 미치는 영향

을 분석하기 위하여 ‘에어코리아’에서 제공하는 Air quality monitoring system (AQMS) 자료를 이용하여 상관관계 등을 분석하였다(Airkorea, 2021). 대기오염 측정망은 4개 역사와 인접한 도시대기 측정망(종로구(Jongno-gu), 중구(Jung-gu))과 도로변대기 측정망(종로(Jongno), 청계천로(Cheonggyecheon-ro), 한강대로(Hangang-daero)) 총 5곳을 선정하여 분석을 수행하였으며, 그림 1은 4개 지하역사와 5개 외부 대기 측정망의 거리 및 위치를 나타내고 있다. 이와 더불어, 지하철 운행에 따른 공기질의 영향을 파악하기 위하여 운행 시간(operation time: OP) 오전 5시부터 다음 날 오전 1시까지 총 20시간 및 미운행 시간(non-operation time: NOP) 오전 1시부터 오전 5시까지 총 4시간으로 구분하여 분석을 수행하였다.



**Table 1.** General information on target subway stations in this study.

Station	Line	Opening year by line	Depth of platform	Installation year of screen door	Number of daily passengers		
					2018	2019	2020
SS	1	1974	11.85	2007	108,469	111,771	49,616
	4	1985	13.95	2009	35,715	37,210	20,598
CS	1	1974	10.05	2007	49,484	52,611	25,506
	2	1984	19.89	2009	47,933	50,005	13,531
CHS	3	1985	26.59	2009	64,597	63,611	13,818
	4	1985	16.47	2009			
DS	2	1984	14	2007	41,561	41,980	16,720
	4	1985	21.26	2008	42,229	43,748	13,180
	5	1996	29.29	2008	6,703	6,045	21,355

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 서울 중심지역 외부 대기의 농도 변화

외부 대기가 지하철 실내공기질에 미치는 영향을 명확히 평가하기 위해서는 외부 대기 농도의 변화를 우선적으로 파악해야 한다. 이를 위하여 2010년부터 2020년까지 서울 중심지역 내의 도시 대기 및 도로변 대기 측정소에서 측정된 SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> (2015~2020)의 농도를 확인하였고, 그 결과 O<sub>3</sub>을 제외한 모든 오염물질의 농도가 도시대기 및 도로변대기 측정소 모두에서 꾸준히 감소하는 것을 알 수 있었다(그림 2). 그러나 O<sub>3</sub>의 경우, 이와 반대로 도시대기(19 → 24 ppb) 및 도로변대기(13 → 22 ppb) 측정소 모두에서 측정 기간 동안 농도가 확연히 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 농도 증가의 폭은 도로변대기 측정소에서 측정된 값이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 SO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub>의 경우에는 도시대기 및 도로변대기 측정소에서 얻어진 농도의 증가 폭이 거의 유사하게 나타났다. CO와 NO<sub>2</sub>의 경우에는 도로변대기 측정소에서는 지난 10년 동안 농도가 꾸준히 감소하였고, 도시대기 측정소에서 측정된 농도에서는 NO<sub>2</sub>의 경우 다소 감소했지만 CO의 경우 뚜렷한 변화를 확인할 수 없었다. PM<sub>2.5</sub>는 지난 6년간 도시대기 측정망에서 측정된 값으로 볼 때는 약간 감소하는 것으로 나타났지만, 도로변대기 측정소의 결과는 3년 동안의 자료

만을 사용했기 때문에 본 연구에서 그 경향성을 파악하기에는 한계가 있었다. 전반적으로 볼 때, 연구 대상 지역 내의 외부 대기오염물질의 농도는 O<sub>3</sub>과 같은 일부 물질을 제외하고는 지난 10여 년 동안 확연히 감소하는 추세로 나타났고, 이러한 감소 추세는 자동차의 영향을 직접적으로 받는 도로변대기 측정소에서 보다 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있었고 이는 자동차 운행 및 관련 정책의 실효성이 나타난 결과로 판단된다.

#### 3.2 지하철 대합실 내 실내 오염물질의 농도 변화

그림 3은 지난 4년 동안 서울 중심지역의 4개 지하철역사의 승강장에서 측정된 NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, CO<sub>2</sub>의 농도를 나타내고 있다. 4개 지하철역사에서 측정된 농도의 경우, 지하철역사 및 물질별로 차이가 있지만, 종합적으로 볼 때, 연구 기간 동안 뚜렷한 농도 감소는 확인할 수 없었다. 특히 CS(47 → 69 µg/m<sup>3</sup>)와 SS(38 → 52 µg/m<sup>3</sup>) 역사의 대합실에서 측정된 PM<sub>10</sub> 농도의 결과를 보면 해당 기간 동안 큰 폭으로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이 결과들을 앞 절의 결과들과 비교해 볼 때, 해당 기간 동안 서울 중심지역의 외부 대기 내 오염물질의 농도는 일반적으로 감소하지만 그 결과가 지하철 대합실 실내공기질에 직접적인 영향을 미치는 것은 아닌 것으로 판단된다. 이는 다시 말해서 지하철 대합실 내 실내공기질은 환기 및 침투를 통한 외부 대

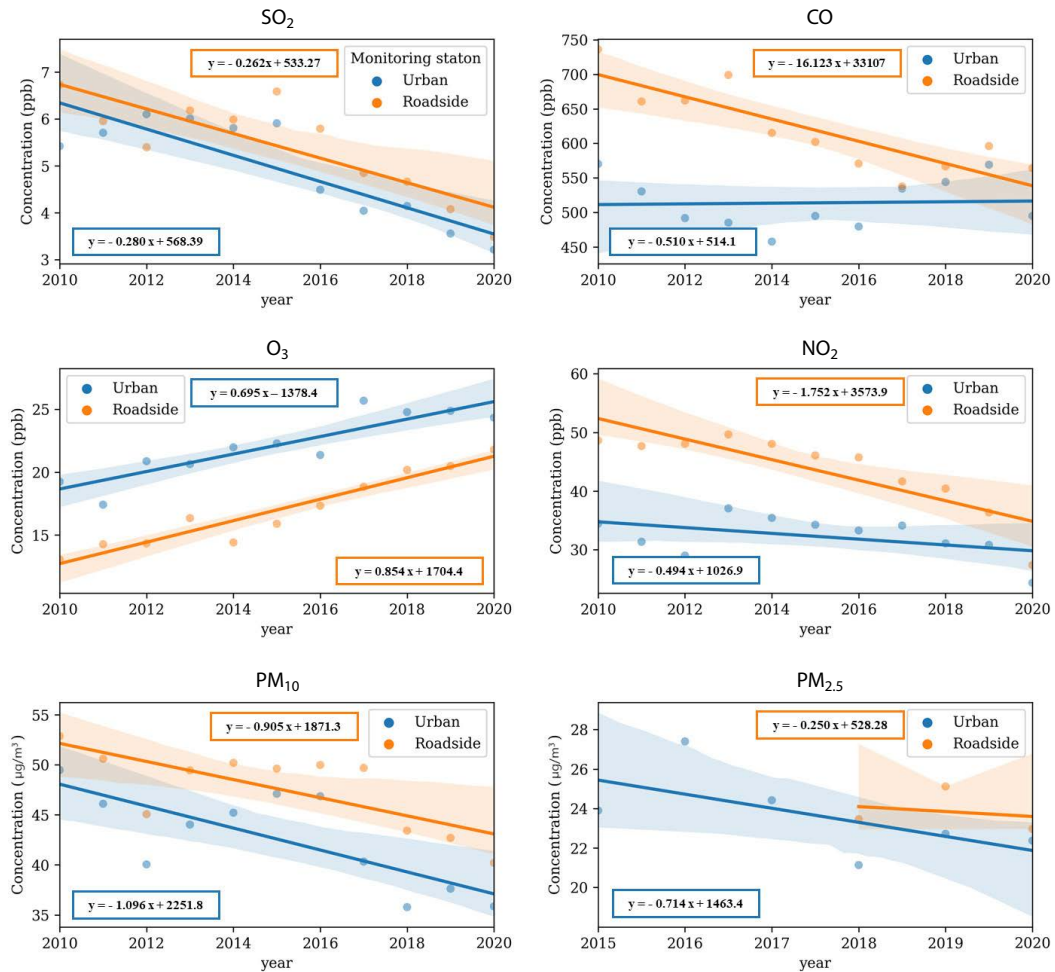


Fig. 2. Yearly variations of air pollutant concentrations in central Seoul area from 2010 to 2020.

기질의 영향뿐만 아니라 실내 공간 안에 존재하는 다양한 오염원들에 영향을 받은 결과로 판단된다.

그러나 위의 연구결과로 외부 대기와 지하철 대합실 내 실내공기질의 상관성에 대한 직접적인 비교는 일부 기간의 데이터 미확보로 인하여 명확하기 규명하기 힘들다. 왜냐하면 지하철 대합실에서 측정된 데이터의 경우, 앞에서 언급한 것처럼 2017년은 8월부터 12월까지만, 그리고 2020년은 1월부터 4월까지의 데이터 평균값을 한 해의 평균값으로 사용했기 때문이다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 1년치 모든 데이터가 확보된 2018년과 2019년에 4개의

지하역사 대합실과 5개의 외부 대기 측정소에서 측정된 NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO의 결과를 이용하여 평균 월별 오염물질들의 농도를 다시 산출하였고, 그 결과를 그림 4에 제시하여 비교하였다. 그 결과 2년 동안 평균(± 표준편차) 대합실(NO<sub>2</sub>: 41 ± 5 ppb, PM<sub>10</sub>: 46 ± 14 µg/m<sup>3</sup>, CO: 619 ± 110 ppb) 내의 농도가 외부 대기 측정소(NO<sub>2</sub>: 35 ± 6 ppb, PM<sub>10</sub>: 40 ± 13 µg/m<sup>3</sup>, CO: 580 ± 120 ppb)보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 대합실의 농도가 외부 대기에서의 측정값보다 높은 것은 결국 지하철 역사 내에 NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO의 배출원이 존재하거나 또는 이들 물질이 도로

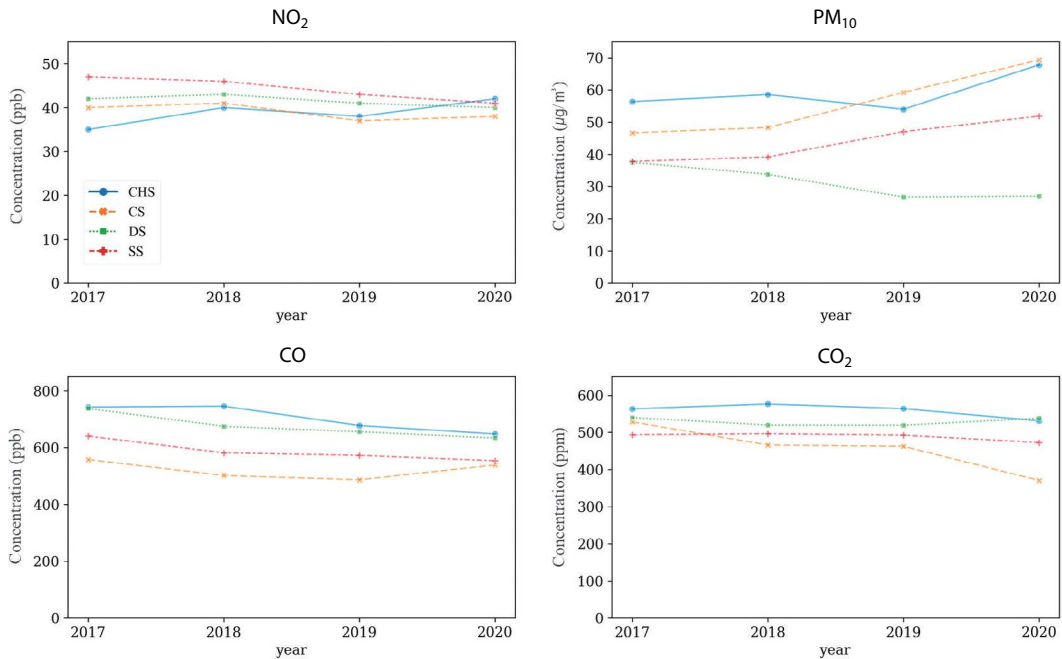


Fig. 3. Yearly concentration variations of indoor air pollutants in the waiting rooms of four subway stations from 2017 to 2020.

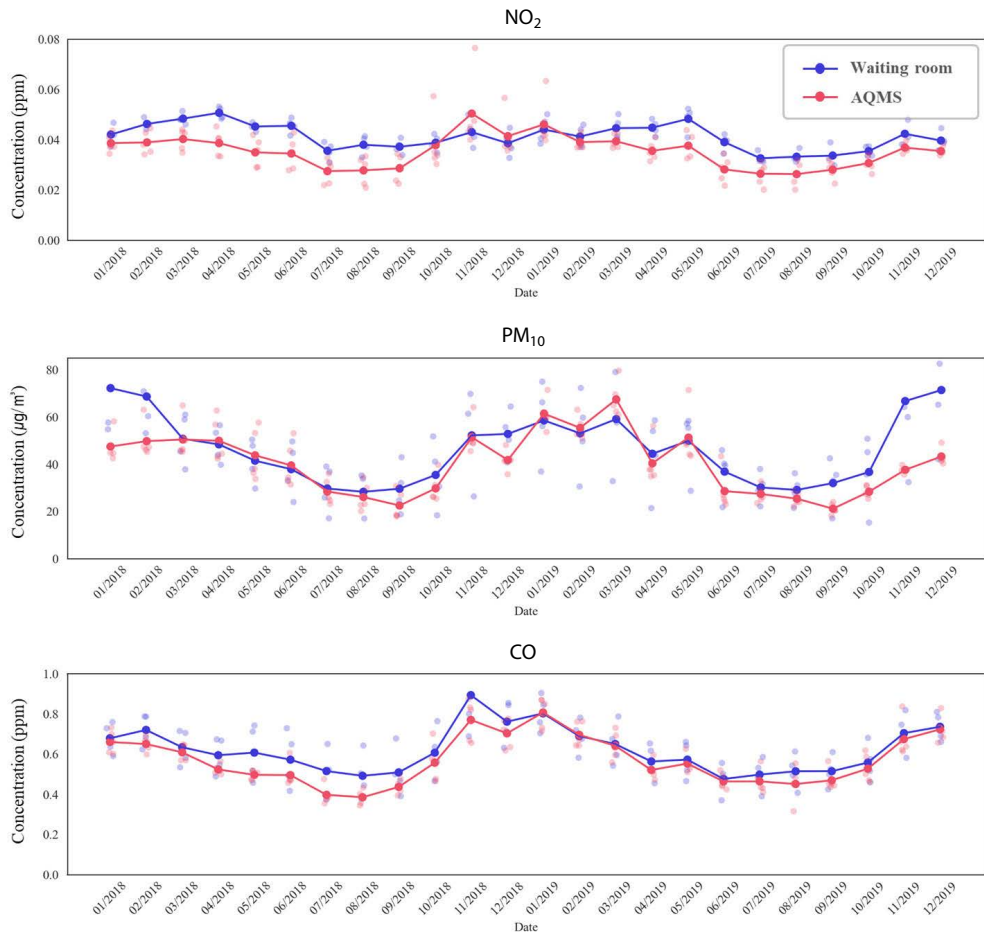
주변의 환기구 및 출입구를 통하여 역사로 유입된 뒤 불충분한 환기로 인하여 배출되지 않고 지하역사에 축적되는 것을 의미한다. 또한 그림 4에 나타난 것처럼 외부 대기의 NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> 및 CO의 농도는 일반적으로 연중 겨울철에 높아졌다가 상대적으로 여름과 가을에 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 대합실의 경우에는 NO<sub>2</sub>의 농도는 뚜렷한 계절적인 특성을 확인할 수 없었지만 PM<sub>10</sub>과 CO의 농도는 전반적으로 외기의 변화 패턴을 따라가는 것으로 나타났다.

위에서 언급한 것처럼 그림 4에서 우리는 대합실의 PM<sub>10</sub>과 CO의 농도가 NO<sub>2</sub>에 비해 상대적으로 외부 대기와 더 뚜렷한 상관성을 갖는 것을 보았고, 이를 보다 명확하게 확인하기 위하여 외부 대기와 대합실 내 실내공기질의 상관관계를 분석하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그 결과, 외부 대기와 대합실 내 실내공기질의 결정계수는 CO ( $r^2=0.90$ ), PM<sub>10</sub> ( $r^2=0.54$ ), NO<sub>2</sub> ( $r^2=0.43$ ) 순으로 나타나, 확실히 대합실 내의 CO 농도는 PM<sub>10</sub>이나 NO<sub>2</sub>에 비해 외부 대

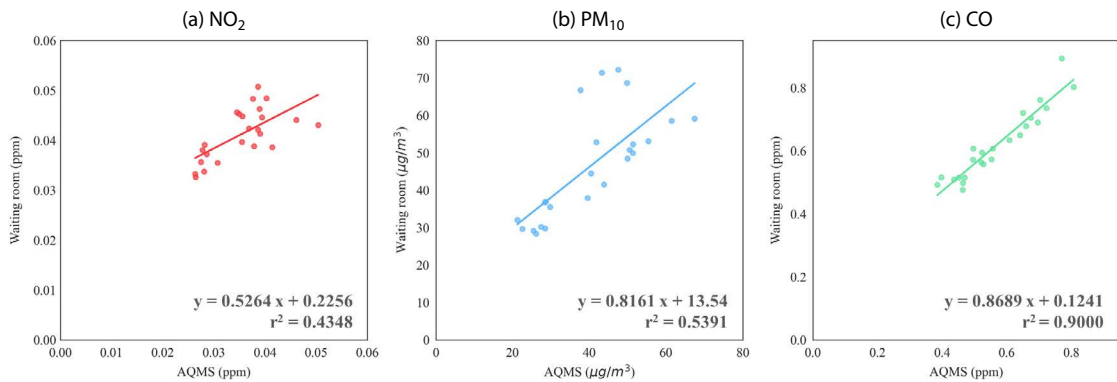
기에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 지하철은 매시간 열차의 운행 횟수 및 이용객 수가 크게 변동하기 때문에 이에 따른 영향도 고려해야 한다. 이를 위해 시간별 농도 자료의 분석을 수행하였다.

그림 6은 전체 자료에 대한 시간별 평균값들을 이용한 외부 대기와 대합실 내 실내공기질의 상관관계를 나타내고 있다. 그 결과, 외부 대기와 대합실 내 실내공기질의 결정계수는 CO ( $r^2=0.84$ ), NO<sub>2</sub> ( $r^2=0.61$ ), PM<sub>10</sub> ( $r^2=0.34$ ) 순으로 나타났고, 이는 위에서 월평균으로 상관관계를 구했을 때와 비교했을 때, 결정계수가 NO<sub>2</sub>의 경우에는 커지고, CO와 PM<sub>10</sub>은 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 결국 대합실 내의 PM<sub>10</sub> 농도는 CO와 NO<sub>2</sub>와는 달리 외부 대기뿐만 아니라 이용객이나 열차 운행과 같은 다양한 실내 환경의 영향에 더욱 큰 영향을 받는 것을 의미한다.

위의 결과를 보다 구체적으로 역별로 보면 물질 간의 상관관계를 보다 명확히 이해할 수 있다. 그림 7은 외부 대기와 4개 지하역사의 대합실 내 실내공기질의



**Fig. 4.** Mean monthly concentrations of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and CO in the studied subway waiting rooms and outdoor airs between 2018 and 2019.



**Fig. 5.** Scatter plots of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and CO between AQMSs and waiting rooms by using monthly average values.



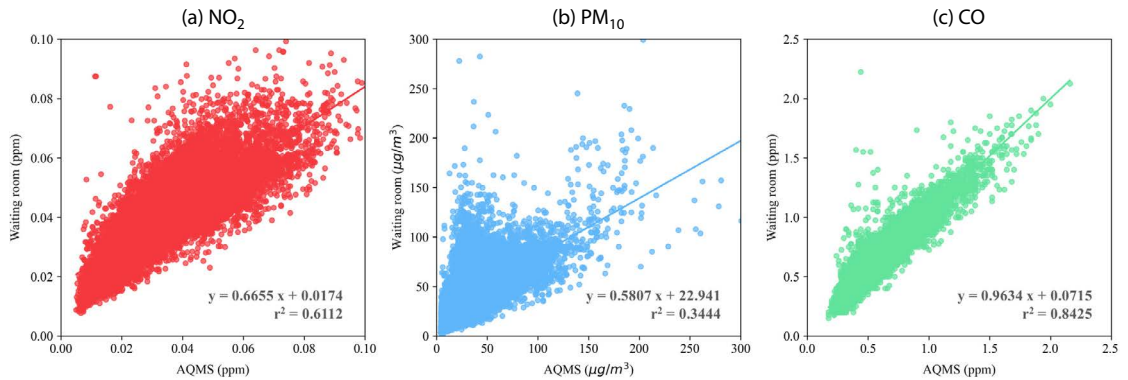


Fig. 6. Scatter plots of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and  $\text{CO}$  between AQMSs and waiting rooms by using hourly average values.

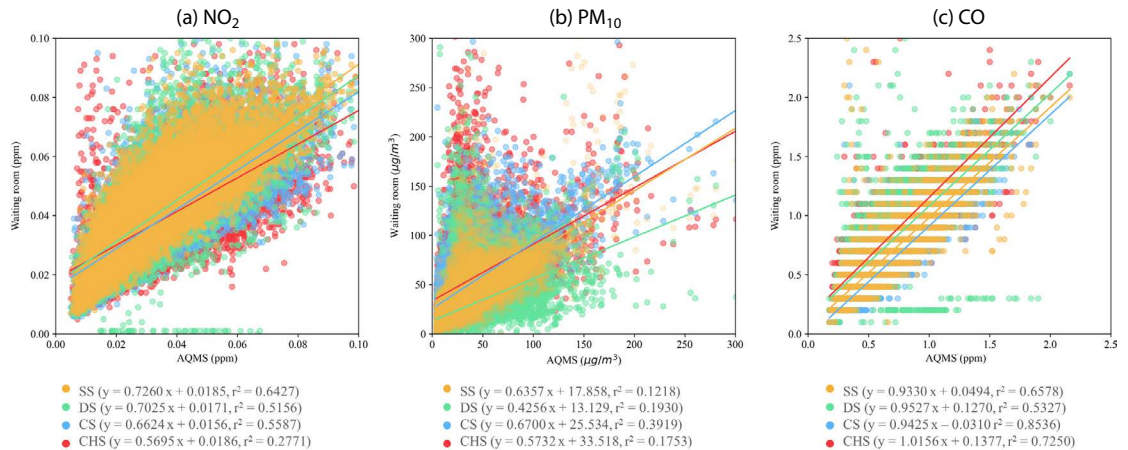


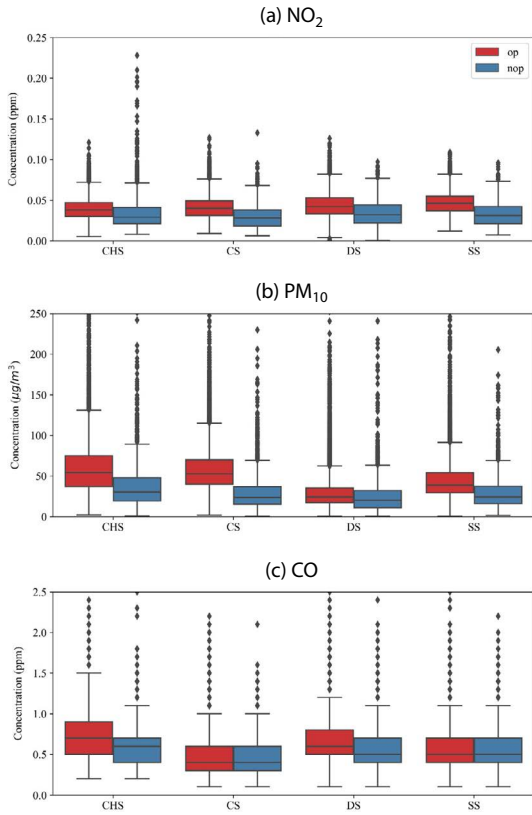
Fig. 7. Scatter plots of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and  $\text{CO}$  between AQMSs and four waiting rooms by using hourly average values.

상관관계를 보여주고 있다. 그 결과, 외부 대기과 대합실 내 실내공기질의 결정계수는  $\text{CO}$  (0.53~0.85),  $\text{NO}_2$  (0.27~0.64),  $\text{PM}_{10}$  (0.12~0.39) 순으로 나타났다. 이 결과는 역사별로 외부 대기과 대합실 내 실내공기질의 상관성이 확연히 차이가 나는 것을 의미하며, 이는 각 대합실이 처해있는 실내 환경이  $\text{PM}_{10}$ 과 같은 물질의 농도 변화에 영향을 미친다는 것을 암시한다.

### 3.3 열차운영에 따른 대합실 내 오염물질의 농도 특성

선형 연구들의 결과에 따르면 지하역사 내 오염물질 중  $\text{PM}_{10}$ 은 열차의 운행 및 이용자의 수에 큰 영향

을 받는 것으로 알려져 있다(Son *et al.*, 2014). 이에 따라 2018년부터 2019년까지 대합실에서 측정된 실내 오염물질의 농도에 대한 열차 운행 시간에 따른 재분석을 수행하였다(그림 8). 그 결과 대상 물질( $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{CO}$ ) 모두가 열차 운행 시간(operation time: OP)에 측정된 농도가 미운영 시간(non-operation time: NOP)에 측정된 농도보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히  $\text{PM}_{10}$ 의 경우, 열차 운행 시간에 측정된 농도(4개 역사 평균:  $48.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 미운영 시간에 측정된 농도(4개 역사 평균:  $31.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 평균 57%가량 높게 나타나는 것으로 확인되어,  $\text{NO}_2$  (OP: 42.6 ppb, NOP: 33.9 ppb) 및  $\text{CO}$  (OP: 622.4 ppb,



**Fig. 8.** Comparison of distribution of  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ , and CO levels in waiting rooms on operation and non-operation time.

NOP: 557.7 ppb)보다 열차 운행 및 이용자의 수에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히,  $\text{PM}_{10}$ 의 경우에는 역사에 따라서도 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었는데, CS 역사에서 측정된  $\text{PM}_{10}$ 의 농도를 확인해 보면 열차 운행 시간에 측정된  $\text{PM}_{10}$ 의 농도가 미운행 시간에 측정된  $\text{PM}_{10}$ 의 농도보다 거의 2배 정도 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 열차의 운행 및 이용자 수 및 활동들이 지하역사 미세먼지 등을 위시한 실내공기 오염물질의 농도에 많은 영향을 미친다는 것을 시사한다.

열차 운행에 따른 외부 대기가 대합실 내 실내공기 질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상관관계 분석을 추가적으로 수행하였다(그림 9). 그 결과  $\text{NO}_2$ 와 CO는 열차의 미운행 시간에 얻어진 결정계수

( $\text{NO}_2=0.55$ ,  $\text{CO}=0.81$ )가 운행 시간에 얻어진 결정계수( $\text{NO}_2=0.61$ ,  $\text{CO}=0.85$ )보다 약간 떨어지는 것을 확인하였다. 이에 반하여,  $\text{PM}_{10}$ 의 경우에는 운행 시간에 얻어진 외부 대기와 대합실 내 결정계수(0.32)가 미운행 시간에 얻어진 결정계수(0.53)보다 확연히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 결국 물질별로 외부 대기와 실내공기질 간의 상관관계에 확연한 차이가 있음을 시사한다. 다시 말해서  $\text{NO}_2$ 와 CO와 같은 가스상 물질은 환기 및 침투에 의한 외부 대기의 유입에 인한 영향을 주로 받지만,  $\text{PM}_{10}$ 과 같은 입자상 물질은 외부 대기질뿐만 아니라 열차 및 이용객과 같은 내부 환경의 영향에 상대적으로 취약하다는 것을 의미한다.

### 3.4 승강장 내 오염물질의 농도 특성

앞에서 대합실의 실내 오염물질의 농도가 외부 대기와 어떤 영향을 받는지 확인한 결과, 대합실 내에서 입자상 오염물질( $\text{PM}_{10}$ )보다는 가스상 오염물질( $\text{NO}_2$ , CO)이 외부 대기질과 더 밀접한 상관관계를 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 그리고 열차의 운행 및 이용객들의 활동과 같은 실내 영향 인자 때문에  $\text{PM}_{10}$ 의 결정계수가 다른 오염물질들에 비해 낮은 이유를 설명하였다. 지하철 내의 PM 농도에 영향을 미치는 오염원은 1) 열차의 운행으로 인하여 발생하는 PM; 2) 열차 이용객들의 활동으로 인하여 발생하는 PM; 3) 환기구 및 출입문 등을 통하여 유입된 외부 대기 중의 PM 등으로 구분할 수 있고, 이들은 입자의 크기에 따라 그 기원이 서로 다른 것으로 보고되고 있다(Son *et al.*, 2020). 일반적으로  $\text{PM}_{2.5-10}$ 은 열차의 운행 및 이용객의 활동 등에 의해 주로 기인하고, 이와 달리  $\text{PM}_{2.5}$ 는 외기로부터 대부분 유입되는 것으로 알려져 있다(Son *et al.*, 2014).

실제로 지하철 운행에 따른 미세먼지의 생성량, 조성, 인체 유해성 등을 평가하기 위한 장소로는 대합실보다는 승강장이 보다 현실적인 평가 장소이다. 왜냐하면 지하철 시스템 내에서 미세먼지가 가장 많이 발생하는 장소는 터널 내부인데, 승강장은 아무리 스크

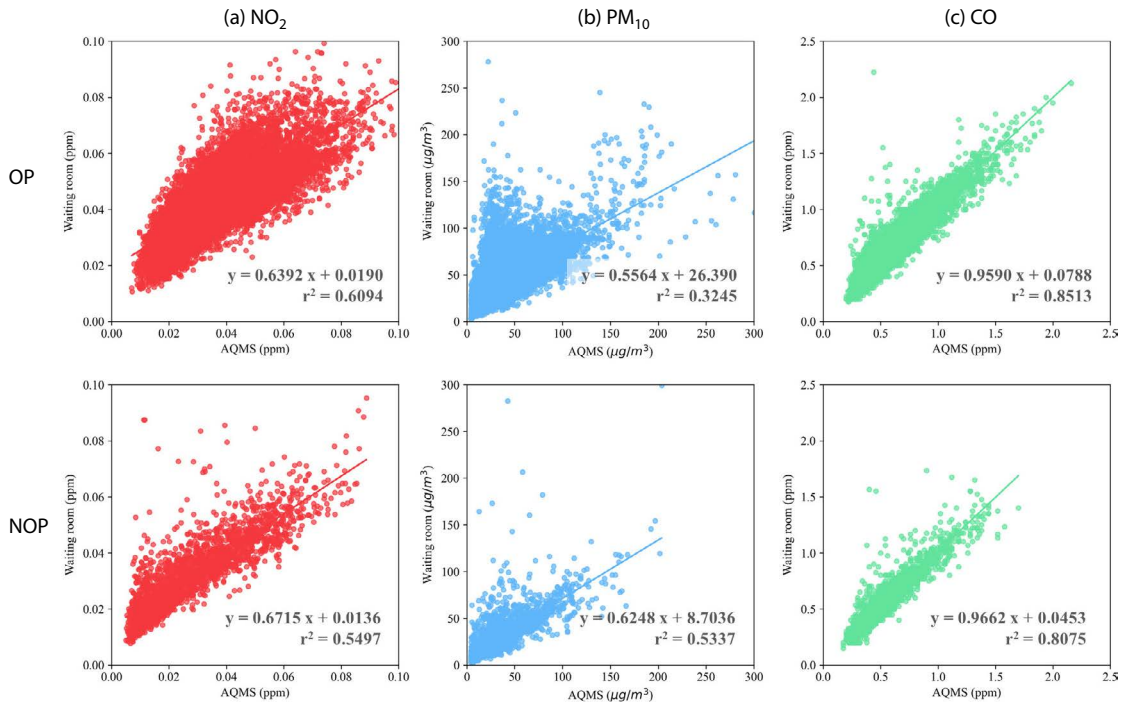


Fig. 9. Scatter plots of NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, and CO between waiting rooms and AQMSs by operation and non-operation time.

린도어 (Platform screen door: PSD)가 설치되어 있다고 하더라도 터널 내 공기질의 영향을 직접적으로 받을 수밖에 없고, 이용객이 실질적으로 역사 내에 머무르는 시간이 대합실보다 길기 때문에 이용객의 건강에 더욱 유해할 수 있는 장소이기 때문이다. 그러나 현재까지 서울교통공사 등의 지하철 운영 주체에 의해서 설치되어 운영되고 있는 실내공기질 모니터링 시스템들은 대부분 대합실에 위치하여 운영되고 있었고, 미세먼지 문제가 사회적으로 큰 파장을 일으킨 이후에야 추가적으로 승강장에 설치되어, 현재 한국환경공단에서 이를 종합적으로 관리하고 있는 실정이다.

그림 10은 4개 역사의 승강장 안에서 2021년 4월 한 달 동안 측정된 PM<sub>2.5</sub>의 농도를 열차의 운행 시간 및 미운행 시간으로 구분하여 나타내고 있다. 그 결과 4개 역사의 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 운행 시간에는 52.1 μg/m<sup>3</sup>로 미운행 시간에는 32.8 μg/m<sup>3</sup>로 나타나 운행 시간에 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도가 미운행 시간에 비해 59%

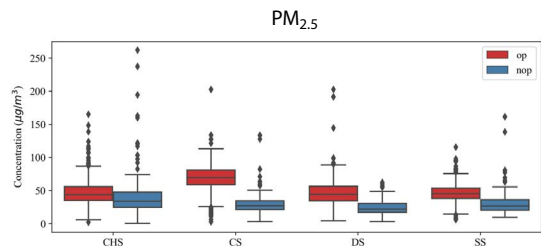


Fig. 10. Comparison of distribution of PM<sub>2.5</sub> levels in platforms on operation and non-operation time.

정도 높은 것을 확인할 수 있었다. 이를 보다 구체적으로 살펴보면 미운행 시간 대비 운행 시간의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 역사별로 각각 5% (CHS), 124% (CS), 90% (DS), 48% (SS) 증가하는 것으로 나타나 CHS 역사는 상대적으로 열차의 운행에 의한 승강장 내 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 영향을 덜 받지만, 나머지 역사의 경우 매우 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이는 다시 말해, 지하철 운행에 따른 승강장 내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 역사별

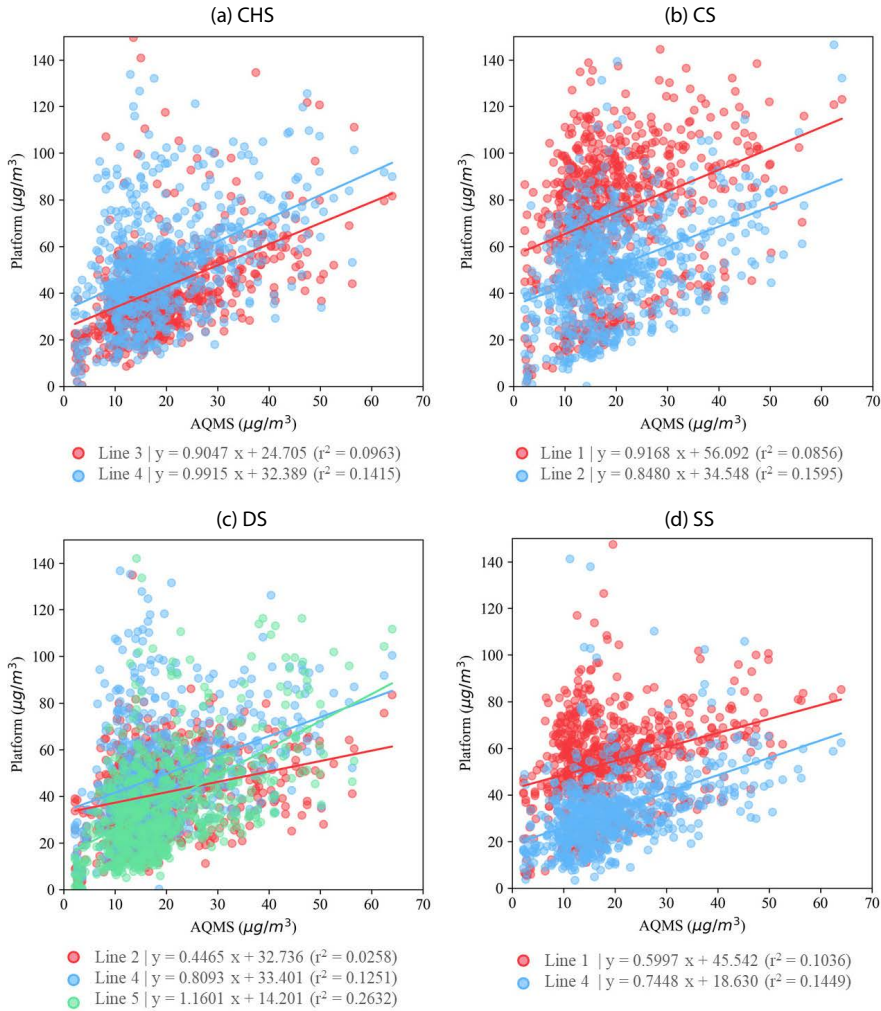


Fig. 11. Scatter plots of  $\text{PM}_{2.5}$  measured between different platforms within the same subway stations and AQMSs.

로 그 영향이 매우 상이한 것을 의미하며 이는 역사 내 환경(스크린 도어, 도상의 재질, 환기 가동 유무 등)이 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

외부 대기가 승강장 내  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 상관관계 분석을 수행하였다(그림 11). 이때 외부 대기의  $\text{PM}_{2.5}$  농도는 5개 측정망 자료들의 시간별 평균값을 사용하였고, 승강장 내 농도는 4개 대상 역사 내에 각 호선별로 따로 분리하여 분석을 수행하였다. 그 결과 외부 대기와 승강장 내  $\text{PM}_{2.5}$ 의 결정계수는 0.025~0.263의 범위로 나타나는

것을 확인하였고, 이는 외부 대기와 승강장 내  $\text{PM}_{2.5}$ 의 상관성이 매우 낮은 것을 의미한다. 그리고 비록 결정계수가 전체적으로 매우 낮기는 하지만 전체 대상 역사 모두에서 동일한 지하역사 안에 위치한 승강장이라도 늦게 개통된 호선의 승강장에서의 결정계수(ex: DS 역사 내 2호선(개통년: 1984; 결정계수:  $r^2=0.025$ ) → 4호선(1985:  $r^2=0.125$ ) → 5호선(1996:  $r^2=0.263$ ))가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 개통 시기가 늦은 역사일수록 승강장의 깊이가 지상으로부터 깊어지지만 보다 효율적인 환기



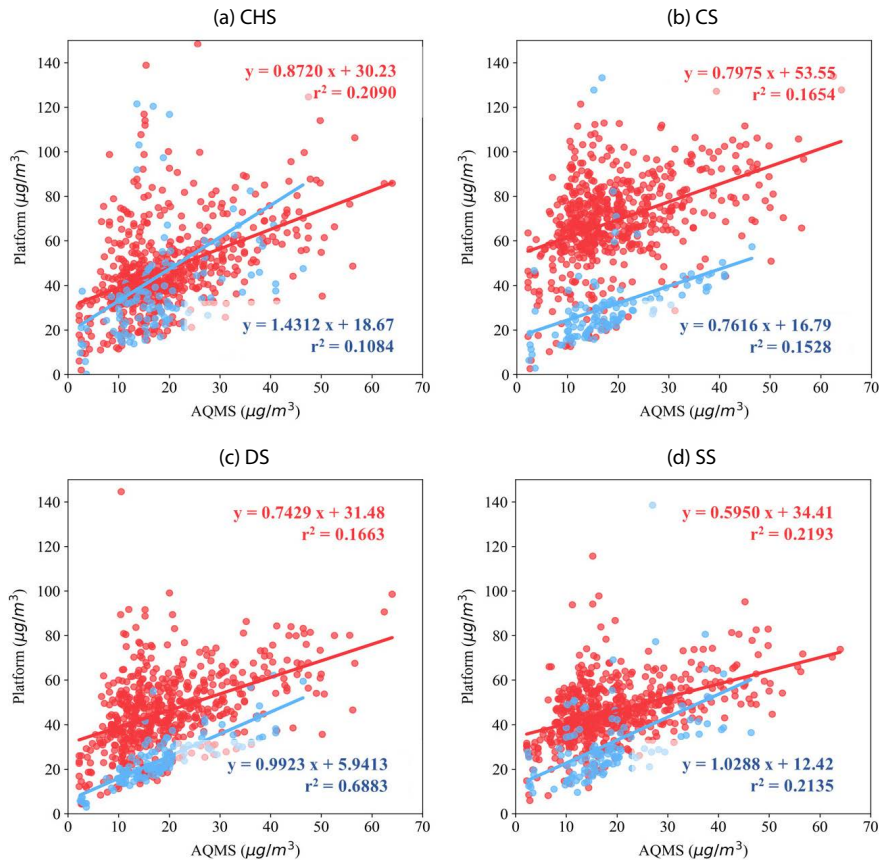


Fig. 12. Scatter plots of  $\text{PM}_{2.5}$  between platforms and AQMSs by operation and non-operation time.

시설의 도입 등으로 인하여 나타난 결과로 판단된다.

그림 12는 각각의 지하역사에 대한 열차 운행에 따른 승강장 및 AQMS에서 측정된  $\text{PM}_{2.5}$ 의 상관관계를 나타내고 있다. 이때, AQMS 자료는 5개 외기 측정소의 평균값을 사용하였으며, 승강장은 각 역사의 호선들의 평균값을 사용하여 결과를 산출하였다. 그 결과 미운행 시 DS 역사( $r^2=0.69$ )를 제외하고는 승강장과 외부 대기 사이의  $\text{PM}_{2.5}$ 의 상관관계가 매우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 열차의 운행 시 승강장과 외부 대기 사이의  $\text{PM}_{2.5}$ 의 결정계수가 굉장히 낮게 나타나는 이유는  $\text{PM}_{2.5}$ 는 외기로부터 대부분 유입된다는 선행 연구(Son *et al.*, 2014)의 결과와 달리 승강장 내  $\text{PM}_{2.5}$ 도 열차 운행과 같은 역사

내부의 환경에 큰 영향을 받는다는 것을 암시한다. 게다가 앞 절에서 대합실의  $\text{PM}_{10}$  농도와 외기의 상관관계 분석 결과와는 상이하게 DS 역사를 제외한 대부분의 역사에서 지하철의 운행 시와 미운행 시를 비교했을 때 승강장의  $\text{PM}_{2.5}$ 의 결정계수는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 대합실의  $\text{PM}_{10}$ 과는 달리 승강장 내의  $\text{PM}_{2.5}$ 는 지하철의 미운행 시에도  $\text{PM}_{10}$ 과 같이 빨리 침강하지 못하거나 외부와의 연결된 유로를 통하여 빨리 희석되지 못하고 내부에서 발생된 상태로 지하공간 안에서 지속적으로 존재할 수 있다는 것을 의미한다.

일반적으로 실내의 PM 농도는 주변 외부 대기의 PM 농도와 상당히 밀접한 관계를 갖고 있는 것으로



알려져 있다(Jeon, 2019a; Cheng *et al.*, 2008; Braniš, 2006). Cheng *et al.* (2008)은 외부 대기와 실내 공간 안의 PM<sub>10</sub> 농도는 양의 상관관계를 갖는다고 보고했다. 그리고 지하철 승강장의 PM<sub>10</sub> 농도는 일반적으로 외부 대기의 PM<sub>10</sub> 농도가 증가할수록 함께 증가하는 것으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2010). 게다가, Aarnio *et al.* (2005)은 지하철 환경 내에서 측정된 PM의 입자 수농도 및 크기 분포가 주변의 외부 대기를 측정한 결과와 매우 일치하는 것을 확인하였다. 이와 더불어, Braniš (2006)는 환기구 및 출구 등의 유입 경로를 통하여 내부로 유입된 외부 대기가 지하역사의 공기질에 큰 영향을 미친다고 언급하였다.

이상의 선행 연구와 본 연구에서 나온 결과들을 기반으로 지하철 시스템 내의 PM 농도는 전반적으로 외부 대기의 영향을 받지만 열차의 운행과 같은 내부 발생원에 대한 영향도 무시할 수 없을 정도로 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 지난 10여 년 동안 외부 대기질과 관련된 다양한 정책의 도입 및 실천으로 서울 중심지역 안의 외부 대기 중 오염물질의 농도가 지속적으로 감소하고 있다는 것은 고무적인 현상이지만 상대적으로 지하역사 내의 실내공기질의 뚜렷한 개선은 확인할 수 없었다. 이를 다시 말하면 정부의 대기오염 관리 정책 등으로 외부 대기가 개선된다고 하더라도 지하철 운영 및 관리자의 자구책이 마련되지 않는다면 지하철 시스템 내의 공기질은 개선되는 않는다는 것을 의미한다. 작년 4월 12일에 서울교통공사는 ‘2022년까지 7,958억원의 예산을 투입하여 지하역사, 터널, 전동차 등의 지하철 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 및 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도를 각각 2018년 대비 최대 50% 및 45% 저감하겠다’고 발표했다. 그리고 이를 위하여 ‘2020 미세먼지관리 종합계획’을 발표했고 4대 분야(미세먼지 차단, 제거, 정화, 측정·관리) 23개의 대책을 내놓고 실행할 계획이다(Seoul Metropolitan Government, 2020; Son, 2020). 그러나 이와 같은 계획의 실효성 및 지속적인 지하철 시스템 내의 실내공기질의 유지 및 개선을 위해서는 보다 체계적이고 조직적인 관리 방안이 절실히 요구되는 실정이다(Son *et*

*al.*, 2020). 추가적으로 대부분의 정책들은 환경부의 ‘실내공기질관리법’의 기준을 맞추기 위하여 대합실 및 승강장에 초점을 맞추고 있는데, 정책의 효과를 극대화하고 시민들의 건강 증진에 이바지하기 위해서는 터널 및 환기구에서 배출되는 오염된 배기에 대한 추가적인 정책들도 마련되어야 서울시민의 궁극적인 건강 증진에 힘쓸 수 있을 것이다(Seoul Metropolitan Government, 2020).

본 연구에서는 외부 대기가 지하역사의 승강장 및 대합실의 공기질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 대상 지하역사들 주변의 도시대기 및 도로변대기 측정망에서 측정된 값의 평균값을 사용하여 연구를 수행하였다. 그러나 이들 대기자동측정망의 위치는 그림 1에서 제공한 것처럼 가깝게는 약 0.4 km, 멀게는 2.6 km까지 대상 지하역사에서 떨어져 있어서 이들의 값을 이용하여 외부 대기의 실내공기질 영향을 평가하기에는 한계점이 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 직접적으로 지하역사 주변의 외기 농도를 측정함과 동시에 교통량 등을 분석하는 것이 자료 해석의 신뢰성 확보에 도움이 될 것이다. 게다가 본 연구에서는 NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>과 같은 단일물질에 대한 분석이 주로 이루어졌지만 향후 연구에서는 이들 물질들 간의 관계를 분석하면 외부 대기에 의한 실내공기질의 영향을 파악하는데 있어 보다 진일보할 수 있을 것으로 판단되고, 이를 통하여 보다 효율적인 실내공기질의 관리 및 대책을 내놓을 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 서울 중심지역에 위치한 지하철 시스템 내의 실내공기 오염물질의 농도가 외부 대기에 어떠한 영향을 받는지 평가하기 위하여 지난 10년 동안의 주변 도시 및 도로변 대기망 측정 자료와 4년 동안의 대합실 내 측정 자료, 그리고 한 달 동안의 승강장 측정 자료를 시공간적으로 비교 분석하여 그 상관

관계를 도출해냈다. 본 연구의 결과들을 종합해서 판단할 때, 서울 중심지역의 외부 대기 오염물질의 농도가 일부 물질(O<sub>3</sub>)을 제외하고 지속적으로 감소하고 있다는 것은 대단히 고무적인 일이다. 그러나 자료 분석의 결과에서 알 수 있듯이 아직도 대부분의 역사 내 승강장 및 대합실의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 농도는 외부 대기 수준보다는 좋지 않았고, 일평균 농도는 비록 법적 기준치를 맞추고 있지만, 특정 시간대에서는 법적 기준치를 훨씬 상회하는 농도들이 나타나는 것으로 확인되어 승객들의 건강을 보존하기 위해 조속한 대책이 요구된다. 게다가 외부 대기과 지하역사 내 실내공기질의 상관관계를 분석한 결과, 가스상 오염물질(NO<sub>2</sub>, CO)의 경우에는 대부분 외부 대기에 기인된 것으로 판단되지만, 입자상 오염물질의 경우에는 외부 대기뿐만 아니라 열차의 운행과 같은 내부적인 환경요인이 매우 크다는 것을 알 수 있었고, 이는 서울시에서 다양한 대기관리 정책을 제시 및 실행하여 외부 대기를 관리한다고 해도 지하철 운영자의 자구적인 노력 없이는 지하철 시스템 내의 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>과 같은 입자상 물질의 관리에는 그 한계가 있다는 것을 시사한다. 따라서 자연 및 기기 환기 방식에 의존한 현재의 지하철 공기질 관리 방안에서 벗어난 고강도의 시스템 개선 및 운영을 통한 지하철 발생 오염물질의 저감을 위한 근원적인 대책들이 요구되는 시점이다.

## 감사의 글

서울특별시 서울산업진흥원 <서울글로벌챌린지 2021> 사업을 통해 우수 논문으로 선정되어 작성된 논문입니다.

## References

- Airkorea (2021) <https://www.airkorea.or.kr/index>
- Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Räisänen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T., Jantunen, M. (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in the Helsinki subway system, *Atmospheric Environment*, 9(28), 5059-5066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.01>
- Awad, A.H.A. (2002) Environmental study in subway metro stations in Cairo, Egypt, *Journal of Occupational Health*, 44(2), 112-118. <https://doi.org/10.1539/joh.44.112>
- Braniš, M. (2006) The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmospheric Environment*, 40(2), 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.060>
- Byeon, S.H., Willis, R., Peters, T.M. (2015) Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM<sub>2.5-10</sub>) and coarse (PM<sub>2.5</sub>) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(2), 2090-2104. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202090>
- Cheng, Y.H., Lin, Y.L., Liu, C.C. (2008) Levels of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Taipei rapid transit system, *Atmospheric Environment*, 42(31), 7242-7249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.011>
- Choi, S., Park, J.H., Bae, S.Y., Kim, S.Y., Byun, H., Kwak, H., Hwang, S., Park, J., Park, H., Lee, K., Kim, W., Park, D.U. (2019) Characteristics of PM<sub>10</sub> levels monitored for more than decade in subway stations in South Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(12), 2746-2756. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.05.0263>
- Choi, S.W., Cha, Y.W., Cho, Y.M., Cho, J.G. (2020) A study on distribution and characteristics of radon concentration in metro line 1 in Busan, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 42(1), 19-27. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2020.42.1.19>
- Eom, H.J., Jung, H.J., Sobanska, S., Chung, S.G., Son, Y.S., Kim, J.C., Sunwoo, Y., Ro, C.U. (2013) Iron speciation of airborne subway particles by the combined use of energy dispersive electron probe X-ray microanalysis and raman microspectrometry, *Analytical Chemistry*, 85(21), 10424-10431. <https://doi.org/10.1021/ac402406n>
- Furuya, K., Kudo, Y., Okinaga, K., Yamuki, M., Takahashi, S., Araki, Y., Hisamatsu, Y. (2001) Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 19(4), 469-485. <https://doi.org/10.1081/TMA-100107583>
- Gustavsson, P., Bigert, C., Pollán, M. (2008) Incidence of Lung Cancer Among Subway Drivers in Stockholm, *Ameri-*

- can Journal of Industrial Medicine, 51(7), 545-547. <https://doi.org/10.1002/ajim.20584>
- Han, J., Kwon, S.B., Chun, C. (2016) Indoor environment and passengers' comfort in subway stations in Seoul, Building and Environment, 104, 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.008>
- Hwang, S.H., Park, W.M., Park, J.B., Nam, T. (2017) Characteristics of PM<sub>10</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations on 100 underground subway station platforms in 2014 and 2015, Atmospheric Environment, 167, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.019>
- InAir (2021) [https://www.inair.or.kr/info/main\\_portal.html](https://www.inair.or.kr/info/main_portal.html)
- Jeon, B.I. (2019a) Characteristics of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations at subway stations in Busan for 3 years (2015-2017), Journal of Environmental Science International, 28(7), 581-594. <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.7.581>
- Jeon, B.I. (2019b) Characteristics of CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>2</sub> concentrations at subway stations in Busan for 3 years (2015-2017), Journal of Environmental Science International, 28(7), 595-606. <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.7.595>
- Johansson, C., Johansson, P.Å. (2003) Particulate matter in the underground of Stockholm, Atmospheric Environment, 37(1), 3-9. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00833-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00833-6)
- Jung, H.J., Kim, B., Ryu, J., Maskey, S., Kim, J.C., Sohn, J., Ro, C.U. (2010) Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis, Atmospheric Environment, 44(19), 2287-2293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.003>
- Jung, H.J., Malek, B.A., Koo, Y.S., Jung, J.H., Son, Y.S., Kim, J.C., Kim, H.K., Ro, C.U. (2012) Chemical speciation of size-segregated floor dusts and airborne magnetic particles collected at underground subway stations in Seoul, Korea, Journal of Hazardous Materials, 213, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.006>
- Kamani, H., Hoseini, M., Seyedsalehi, M., Mahdavi, Y., Jaafari, J. (2014) Concentration and characterization of airborne particles in Tehran's subway system, Environmental Science and Pollution Research, 21(12), 7319-7328. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2659-4>
- Karlsson, H.L., Nilsson, L., Möller, L. (2005) Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells, Chemical Research in Toxicology, 18(1), 19-23. <https://doi.org/10.1021/bx049723c>
- Kim, K.H., Ho, D.X., Jeon, J.S., Kim, J.C. (2012) A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station, Atmospheric Environment, 49, 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.058>
- Kim, K.Y., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Kim, C.N. (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) in Seoul metropolitan subway stations, Journal of Hazardous Materials, 154(1-3), 440-443. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.042>
- Kim, Y.T., Jeong, J.W., Jeong, T.U. (2009) Comparison of indoor air quality and urban air quality in Busan, The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, 19(1), 168-176.
- Kwon, S.B., Jeong, W., Park, D., Kim, K.T., Cho, K.H. (2015) A multivariate study for characterizing particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub>) in Seoul metropolitan subway stations, Korea, Journal of Hazardous Materials, 297, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.015>
- Lee, E.S., Lee, T.J., Park, M.B., Park, D.S., Kim, D.S. (2017) Characteristics of particulate matter concentration and classification of contamination patterns in the Seoul metropolitan subway tunnels, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(6), 593-604. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.593>
- Lee, H.W., Jang, N.S., Kwak, J., Lee, H.R., Kim, H.M. (2002) Analysis of air pollution in subway area of Busan metropolitan city, Journal of Environmental Science International, 11(3), 169-176. <https://doi.org/10.5322/JES.2002.11.3.169>
- Lee, H.W., Park, J.K., Jang, N.S., Lee, H.R., Kim, H.M. (2003a) Analysis of ambient air quality level in subway area in Busan metropolitan city, Journal of Environmental Science International, 22, 207-215. <https://doi.org/10.5322/JES.2003.12.2.207>
- Lee, H.W., Park, J.K., Jang, N.S., Lee, H.R., Kim, H.M. (2003b) The evaluation of CO concentration level at underground space in Busan metropolitan city, Journal of Environmental Science International, 12(1), 35-40. <https://doi.org/10.5322/JES.2003.12.1.035>
- Lee, T.J., Jeon, J.S., Kim, S.D., Kim, D.S. (2010) A comparative study on PM<sub>10</sub> source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 26(5), 543-553. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2010.26.5.543>
- Lee, T.J., Lim, H., Kim, S.D., Park, D.S., Kim, D.S. (2015) Concentration and properties of particulate matters (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) in the Seoul metropolitan, Journal of Korean

- Society for Atmospheric Environment, 31(2), 164-172. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.164>
- Mugica-Álvarez, V., Figueroa-Lara, J., Romero-Romo, M., Sepúlveda-Sánchez, J., Lopez-Moreno, T. (2012) Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system, *Atmospheric Environment*, 49, 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.038>
- Oh, Y.H., Nam, I.S., Kim, S.D., Kim, D.S., Park, D.S., Kim, J.H., Sohn, J.R. (2013) Health Risk Assessment for Heavy Metals in Particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) of Indoor Air in Subway Station, *The Korean Society of Living Environmental System*, 20(1), 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.018>
- Park, D.U., Ha, K.C. (2008) Characteristics of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO<sub>2</sub> and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environment International*, 34(5), 629-634. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.007>
- Park, J.H., Son, Y.S., Kim, K.H. (2019) A review of traditional and advanced technologies for the removal of particulate matter in subway systems, *Indoor Air*, 29(2), 177-191. <https://doi.org/10.1111/ina.12532>
- Raut, J.C., Chazette, P., Fortain, A. (2009) Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris, *Atmospheric Environment*, 43(4), 860-868. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.038>
- Salma, I., Weidinger, T., Maenhaut, W. (2007) Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station, *Atmospheric Environment*, 41(37), 8391-8405. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.017>
- Seoul Metro (2021a) <https://www.seoulmetro.co.kr/kr/>
- Seoul Metro (2021b) <https://www.seoulmetro.co.kr/kr/board.do?menuidx=551&bbsidx=2209390>
- Seoul Metro (2021c) <https://www.seoulmetro.co.kr/kr/board.do?menuidx=551>
- Seoul Metropolitan Government (2020) Public Transportation Usage Status. <https://news.seoul.go.kr/traffic/archives/31616>
- Son, Y.S. (2020) Suggestions for Efficient Reduction of Subway Particulate matter, *The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(3), 7-11.
- Son, Y.S., Jeon, J.S., Lee, H.J., Ryu, I.C., Kim, J.C. (2014) Installation of platform screen doors and their impact on indoor air quality: Seoul subway trains, *Journal of Air Waste Management Association*, 64, 1054-1061. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.923350>
- Son, Y.S., Lim, S., Cho, E.J., Noh, Y., Lee, J., Han, H. (2020) Spatial-temporal Characteristics of Particulate Matter in Busan's Subway Systems, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 589-607. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.589>
- Son, Y.S., Rue, J.Y. (2018) Technological Advances for Particulate Matter Collection in Subway System, *Prospectives of Industrial Chemistry*, 21(2), 24-34. <https://doi.org/10.7464/ksct.2020.26.1.13>
- Son, Y.S., Salama, A., Jeong, H.S., Kim, S.H., Jeong, J.H., Lee, J.H., Sunwoo, Y., Kim, J.C. (2013) The effect of platform screen doors on PM<sub>10</sub> levels in a subway station and a trial to reduce PM<sub>10</sub> in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), 38-47. <https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.1.038>
- Xu, B., Hao, J. (2017) Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review, *Environment International*, 107, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.016>

## Authors Information

손윤석 (부경대학교 환경공학과 부교수)  
(sonys@pknu.ac.kr)

유성지 (부경대학교 지구환경시스템과학부 석사과정)  
(hp0102@naver.com)

서서희 (부경대학교 지구환경시스템과학부 박사과정)  
(seoseoheee@naver.com)

최인영 (건국대학교 사회환경공학부 박사과정)  
(force@konkuk.ac.kr)