

창립 40주년 기념 특집호

서울 지하철 승강장 내 초미세먼지의 농도 변화 특성 분석

Characteristics of Fine Particulate Variations in the Underground Subway Platforms: A Case of Seoul

권용범*

한국생산기술연구원 한러혁신센터

Yongbum Kwon*

Korea-Russia Innovation Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, Republic of Korea

접수일 2023년 7월 28일
수정일 2023년 8월 30일
채택일 2023년 8월 31일

Received 28 July 2023
Revised 30 August 2023
Accepted 31 August 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)32-226-1366
E-mail : kyb916@kitech.re.kr

Abstract This study aims to investigate the potential relations affecting indoor air quality (IAQ) of underground subway platforms based on the hourly $PM_{2.5}$ monitoring data from subway platforms and air quality monitoring station (AQMS) as well as passenger statistics in 2022. Among more than 250 subway stations in lines 1 to 8 of Seoul subway, (1)-Jonggak; (2)-Euljiro1(il)-ga; (3)-Irwon; (4)-Mia; (5)-Gwangnaru; (6)-Beotigogae; (7)-Suraksan; (8)-Songpa were targeted recording the highest annual $PM_{2.5}$ level in each line. $PM_{2.5}$ in the underground subway platforms generally showed a significant correlation with the number of passengers by frequent train services during the station operation time, and thus higher-level of $PM_{2.5}$ was observed during rush hours. Otherwise, the influence of ambient air to subway platform IAQ was more predominant in the station closing time. Eventually, the variation of $PM_{2.5}$ level in the underground subway platform was mainly determined following the degree of correlation with internal (train frequency and passenger) and external (outdoor air quality) influence factors as temporal variations. In case of specific period such as the highest indoor $PM_{2.5}$ day and the largest passenger day, the correlations between platform $PM_{2.5}$ and passenger were increased about 46~3% and 13~78%, respectively than the normal period. For high-level $PM_{2.5}$ ($PM_{2.5}$ warning) period, indoor $PM_{2.5}$ level was raised up to 85% comparing normal period. This aspect was also similar on seasonal variations case, because seasonal mean $PM_{2.5}$ levels in the subway platform showed parallel trend with seasonal mean outdoor air qualities. Therefore, this study would be useful to confirm characteristics of $PM_{2.5}$ variations in the underground subway platform for further subway IAQ management.

Key words: Indoor $PM_{2.5}$, Seoul subway, Outdoor air conditions, Train frequency, Correlation, Temporal variation

1. 서 론

급격한 도시화와 인구 과밀로 인하여 도심 주요 교통수단 중 하나인 지하철에 대한 대중의 의존도가 날로 증가하고 있다. 우리나라는 1974년 서울역에서 청량리까지 지하철 1호선 구간의 개통을 시작으로 현재 수도권에만 약 640여 개의 지하철역을 잇는 23개의 광범위한 노선이 운영 중이다. 특히, 지하철 1호선은 지난 2014년 서울미래유산으로 등재되어 역사·문

화적으로도 그 의미가 깊다고 볼 수 있다. 국내 연간 지하철 이용객 수를 살펴보면 2017년 2,573백만 명에서 2018년 2,587백만 명, 2019년 2,645백만 명으로 전년 대비 매년 약 0.54%, 2.19%씩 증가하는 추세를 보였다. 2020년과 2021년은 코로나19로 인하여 이용객 수가 각각 1,918백만 명, 1,966백만 명으로 감소하였지만, 사회적 거리두기 전면 해제와 일상회복을 계기로 지하철 이용률은 다시 늘어날 것으로 예상된다. 서울 지하철 이용 승객수의 경우 우리나라 전체 지하

철 이용객 수의 약 27~28%를 차지하고 있는 것으로 보고되는데, 2015년에는 약 27.67%에서 2021년 28.89%로 그 증가 추이가 매우 뚜렷하다 (Statistics KOREA, 2022).

지하철은 다른 대중교통 수단과 다르게 대부분의 역사들이 자연환기가 까다로운 지하 깊은 곳에 위치하고 있으며, 출퇴근 시간 등 특정 시간대에 밀폐된 공간 내 대규모 이용자가 집중한다는 독특한 시공간적 특징을 나타낸다 (Lee *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2016a). 또한, 철로의 마모, 이용객의 혼잡, 열차풍에 의한 (재)비산 등 역사 내부에 다양한 실내공기오염원이 존재하기 때문에 여타 대중이용시설에 비하여 안전하고 쾌적한 실내공기질 관리에 상대적으로 어려움을 갖는다 (Yang *et al.*, 2023; Xu and Hao, 2017; Kwon *et al.*, 2008). 지하철 역사 내 대표적인 입자상 오염물질인 초미세먼지 (Particulate matter 2.5 μm or less in diameter, $\text{PM}_{2.5}$)의 농도는 앞서 언급했던 바와 같이 레일, 바퀴, 제동장치, 팬터그래프 (Pantograph) 등의 마모와 같은 열차의 운행 및 지하철 이용객의 활동에서 비롯된 내부적 환경 요인뿐만 아니라 출입구, 환기 설비 등을 통한 외부대기 중 고농도 오염물질의 역사 내 유입에 따른 외부적인 환경 요인과의 복합적 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 사실은 다양한 연구자들에 의해 수행된 선행 연구에서도 거듭 확인할 수 있다. Son *et al.* (2020)은 국내외 여러 나라 지하철 역사 내 초미세먼지에 관한 연구 결과를 종합해 보았는데 그 농도 범위가 7~731 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대기 중에서 측정되는 농도보다 월등히 높은 것을 확인하였다. Yu *et al.* (2015)는 대규모 환승역인 왕십리 역사 내 2호선, 5호선, 중앙선, 분당선 4개의 서로 다른 지하철 승강장에서 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 측정하고 스크린도어 설치 여부, 유동인구 수, 역사 플랫폼 깊이 등에 따른 농도 변화 추이를 분석하기도 하였다. Lee *et al.* (2022)는 지하철 역사 입구, 방풍문 외부, 대합실, 승강장에 총 30개의 $\text{PM}_{2.5}$ 측정 센서를 설치하여 농도 변화 특성을 분석하고 역사 승강장의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 예측하는 이론모델을 개발함으로써 효과적인 지하 역사 실내공기질 관리

방안을 제시하였다. Figueroa-Lara *et al.* (2019)는 지하 역사 내 입자상 오염물질을 채취하여 물리화학적 분석을 진행한 결과 구리, 아연, 망간, 납, 크롬 등의 다양한 종류의 중금속이 함유되어 있는 것을 확인하였으며, 그 중에서도 철 성분의 함유량이 상당히 높았으며, 대기 중의 (초)미세먼지보다 인체 영향이 더욱 심각할 것으로 우려한 바 있다. Guo *et al.* (2014)도 마찬가지로 지하 역사에서 포집한 입자상 오염물질의 투과 전자현미경 분석 결과 자성을 가진 철 성분과 결합된 입자가 지배적으로 나타났음을 확인하였다. 이러한 결과들은 역사 내 선로-바퀴-브레이크 사이의 밀접한 기계적 마찰 (마모)로 인하여 비롯된 물질 (iron (Fe) metal)과 철 성분을 함유한 유해물질 발생 이후 공기중 산소와 반응하여 생성되는 물질 (Fe_3O_4 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 등이 지하철 이용객들에게 미치는 건강 위해성 관점에서 시사하는 바를 뒷받침한다 (Ma *et al.*, 2015; Gustavsson *et al.*, 2008; Nieuwenhuijsen *et al.*, 2007; Karlsson *et al.*, 2005; Chillrud *et al.*, 2004). 또한, 열차의 출·도착 시 발생하는 열차풍으로 인하여 터널 내 공기가 승강장까지 다량 유입된다는 결과로 미루어 보았을 때 (Kim *et al.*, 2004), 중금속 함유 입자상 오염물질이 승강장과 대합실 공기질에 상당한 영향을 끼칠 수 있으므로 각별한 관리가 요구된다. 최근에는 지하 역사와 같은 복잡한 관리 특성을 지니는 실내 공간의 오염 정도를 분석, 진단하고 변화를 예측하여 능동적으로 대응하기 위한 머신러닝 기법 활용 사례가 소개되고 있다. 예를 들어 Heo *et al.* (2019)는 외부 대기 농도, 지하철 운행 빈도, 이용객 수, 환기 시스템 운영 등의 영향인자를 심층강화학습 (Deep reinforcement learning, DeepRL) 기법에 적용하여 역사 실내공기질을 적절히 유지하고 에너지 소모를 최소화하는 방안을 소개하였다. Kim *et al.* (2022)은 많은 양의 지하 역사 공기질 측정 자료를 효과적으로 해석하기 위하여 빅데이터 분석방법을 적용하고, 역사 내 공기질 예측 기법을 제시하기도 하였다. 이 밖에 전 세계 주요 도시 지하철 역사 내 실내 입자상·기체상 오염물질의 특성을 파악하고, 적

절한 기준을 충족하기 위한 관리 방안 및 환기 시스템에 관한 연구는 오랜 시간에 걸쳐 다양하게 이루어져 왔다(Parchami *et al.*, 2022; Son *et al.*, 2021b; Smith *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2018; Martins *et al.*, 2016b; Vilcassim *et al.*, 2014; Suárez *et al.*, 2014; Aarnio *et al.*, 2005).

국내 역시 그동안 지하 역사 공기질에 관한 연구가 상당부분 진행되었으나, PM_{2.5} 자료가 공식적으로 공개되기 전까지의 연구 대상물질은 비교적 오랜 기간 동안 측정 데이터베이스가 누적된 미세먼지 (Particulate matter 10 µm or less in diameter, PM₁₀), 질소산화물 (Nitrogen oxide, NO_x), 일산화탄소 (Carbon monoxide, CO), 이산화탄소 (Carbon dioxide, CO₂), 오존 (Ozone, O₃), 폼알데하이드 (Formaldehyde, HCHO), 총휘발성유기화합물 (Total volatile organic carbon, TVOC), 총부유세균 (Total airborne bacteria, TAB)이 주를 이루었다 (Jeon, 2019; Lee *et al.*, 2017; Hwang and Kim, 2017; Namgung *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016; Yim *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2014). 최근 들어 PM_{2.5}를 중심으로 다룬 연구들이 다수 이루어지고 있는데 이는 실내공기질 관리법에서 정하는 PM_{2.5} 관리 강화 (다중이용시설 유지기준 설정, 기준 환기설비 (25 m³/인·h) 설치 의무화, 자동차 PM_{2.5} 및 CO₂ 자가측정 (연 1회) 관리 권고, 승강장 PM_{2.5} 상시측정 및 결과 공시 등)에 의한 것도 있겠지만, 그만큼 지하 역사를 포함한 다중이용시설 공기질에 대한 대중의 경각심 또한 증가했다는 의미로도 해석할 수 있다.

본 연구에서는 서울 지하철역 중 역사 내 연평균 PM_{2.5} 농도가 높은 곳을 선정하고, 대상 역사 승강장, 주변 도시대기 및 도로변대기 측정망에서 수집된 가장 최근 1년치 자료 (22년도)를 활용하여 지하 역사 PM_{2.5} 변화 특성을 다양한 관점에서 체계적으로 해석하고자 하였다. 기존 연구에서는 지하철역 승강장 및 대합실의 공기질을 직접 측정하여 연구를 수행한 사례도 있으나, 그 기간이 매우 제한적 (수 일~특정 기간)이고 수집된 측정 결과 또한 주로 광산란법과 같은 간접적인 측정방법에 의한 것으로 베타선 흡수법

이나 중량법에 비하여 상대적으로 낮은 신뢰성에 대한 우려가 제기될 수 있다 (Ryu *et al.*, 2022; Lee and Park, 2019; Rai *et al.*, 2017). 따라서 본 연구의 결과는 국내 지하 역사 공간 내 PM_{2.5}의 종합적인 이해를 증진하고, 이를 바탕으로 향후 지하 역사 실내공기질의 보다 효율적인 관리 및 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 데이터 활용 범위

지하철 역사 내 PM_{2.5} 농도 변화 특성 분석을 위하여 본 연구에서는 한국환경공단 실내공기질 관리 종합정보망 (InAir, 2022)에서 제공하는 2022년 1월부터 12월까지의 서울교통공사 관할의 1~8호선 지하 역사 승강장 내 1시간 평균 PM_{2.5} 자료를 활용하였다. 승강장의 경우 대합실과 비교하였을 때 터널 내 오염물질의 영향을 직접적으로 받기 쉬우며, 이용객이 역사 내 머무르는 시간이 가장 긴 공간이므로 현실적인 평가에 적합하기 때문이다. 또한, 지하 역사 승강장에 설치된 PM_{2.5} 측정기는 환경부로부터 형식 승인된 베타선 흡수법 장비로 연 1회 이상 중량법과 비교하여 정확도를 인증 받기 때문에 그 신뢰도가 비교적 높다고 볼 수 있다 (Lee *et al.*, 2022). 지하철 역사 실내공기질에 미치는 외부대기의 영향 정도를 파악하기 위하여 도시대기질 측정망 및 도로변대기 측정망에서 수집하고 전국 실시간 대기 오염도 공개 홈페이지에서 제공하는 1년간 (2022년)의 1시간 평균 PM_{2.5} 확정자료를 이용하였다 (Airkorea, 2022). 대기오염측정망의 설치 및 운영 지침에 따르면, 신뢰도 향상을 위하여 측정자료를 주기적으로 관리하도록 되어있다. 이때 측정망 자료는 1차적으로 관할 유역 (지방)환경청 또는 시·도에서 이상 유무를 확인하고, 1차 확정되어진 측정치에 대하여 국립환경과학원에서 최종 확정된다. 지하철 운행 및 이용객 수에 따른 영향 정도를 분석하기 위하여 서울교통공사 (Seoul Metro, 2022)와

Table 1. General information of the target subway stations and their platforms in this study.

(Line)-Station	Operation year	Platform type	Depth of platform (m)	Floors of platform	Daily mean passengers in 2022	Annual mean of PM _{2.5} (µg/m ³)
(1)-Jonggak	1974	Side	11.43	2 nd basement	60,962	121.0
(2)-Euljiro1(il)-ga	1983	Side	13.46	2 nd basement	72,031	64.4
(3)-Irwon	1993	Side	15.79	3 rd basement	17,462	89.3
(4)-Mia	1985	Side	12.45	2 nd basement	26,454	89.8
(5)-Gwangnaru	1995	Side	19.12	3 rd basement	23,662	50.1
(6)-Beotigogae	2001	Side	44.65	5 th basement	3,803	52.2
(7)-Suraksan	1997	Island	14.46	3 rd basement	23,018	45.2
(8)-Songpa	1996	Side	14.80	2 nd basement	14,787	34.2

공공데이터포털 (Public Data Portal, 2022)에서 제공하는 요일별, 시간별 지하철 운행 일정과 역별 승하차 인원 자료를 활용하여 연구를 수행하였다.

2.2 연구 대상 역사 선정

본 연구에서는 보다 실효성 있는 연구 결과를 도출하기 위하여 활용한 자료에 전원단절, 유지보수, 동작 불량 등으로 인한 결측이나 손실된 값이 적으며, 충실하게 측정 자료가 작성된 지하철 역사를 대상으로 승강장의 연평균 PM_{2.5} 농도를 분석하였다. 그리하여 서울교통공사에서 운영하는 250여 개 역사 중 노선별 (1~8호선)로 2022년 기준 승강장 내 연평균 PM_{2.5} 농도가 가장 높은 지하 역사인 종각역 (Jonggak, 1호선), 을지로입구역 (Euljiro1(il)-ga, 2호선), 일원역 (Irwon, 3호선), 미아역 (Mia, 4호선), 광나루역 (Gwangnaru, 5호선), 버티고개역 (Beotigogae, 6호선) 수락산역 (Suraksan, 7호선), 송파역 (Songpa, 8호선)을 연구 대상 역사로 선정하였다. 역사 내 PM_{2.5} 농도 변화와 그 특성을 파악하고자 선정된 지하철역에서 각각 가장 인접한 (0.8~2 km 반경) 도시대기 측정소인 중구 (Jung-gu), 송파구 (Songpa-gu), 성북구 (Seongbuk-gu), 광진구 (Gwangjin-gu), 용산구 (Yongsan-gu), 노원구 (Nowon-gu)의 6개 측정소의 자료를 활용하였다. 이와 더불어 역사와 근접한 도로변대기 측정소를 선정하였고, 종로 (Jong-ro), 강남대로 (Gangnam-daero), 정릉로 (Jeongneung-ro), 천호대로 (Cheonho-daero), 청계천로 (Cheonggyecheon-ro), 화랑로 (Hwarang-ro) 측정소에서 수집된 PM_{2.5} 측정자

료를 부가적으로 분석하였다. 도로변대기 측정소의 경우 도시대기 측정소에 비하여 연구 대상 역사로부터 비교적 거리가 멀리 떨어져 있었으며 (0.9~4.4 km 반경), 특히 7호선 수락산역은 그보다 더 멀리 위치한 화랑로 측정소 (6.9 km)가 역사로부터 가장 가까운 도로변대기 측정소였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 지하철 역사 내·외부 PM_{2.5} 농도 분포

서울 도심 지역의 대상 역사 승강장에서 측정된 일평균 PM_{2.5} 자료와 지하철역 인근에 위치한 도시대기 질 측정소 (Air quality monitoring station, AQMS)로부터 수집된 일평균 PM_{2.5} 자료를 활용하여 월별 농도 변화를 그림 1과 같이 나타냈다. 승강장 내 가장 높은 PM_{2.5} 농도를 나타낸 역사는 종각역으로 연평균 (±표준편차) 121.0±35.3 µg/m³를 기록하였으며, 미아역 (89.8±51.3 µg/m³), 일원역 (89.3±46.6 µg/m³), 을지로입구역 (64.4±19.2 µg/m³), 버티고개역 (52.2±21.4 µg/m³), 광나루역 (50.1±22.2 µg/m³), 수락산역 (45.2±16.3 µg/m³), 송파역 (34.2±10.7 µg/m³) 순으로 분포를 보였다. 전반적으로 역사 승강장과 인근 측정소에 따라 그 변화 폭과 오염 수준에 차이가 있었지만, 지하 역사 승강장에서 측정된 PM_{2.5}의 농도는 해당지역 외부 대기질보다 모두 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 승강장의 농도가 외부 대기에서의 측정값보다 높은 경향을 보이는 것은 Son

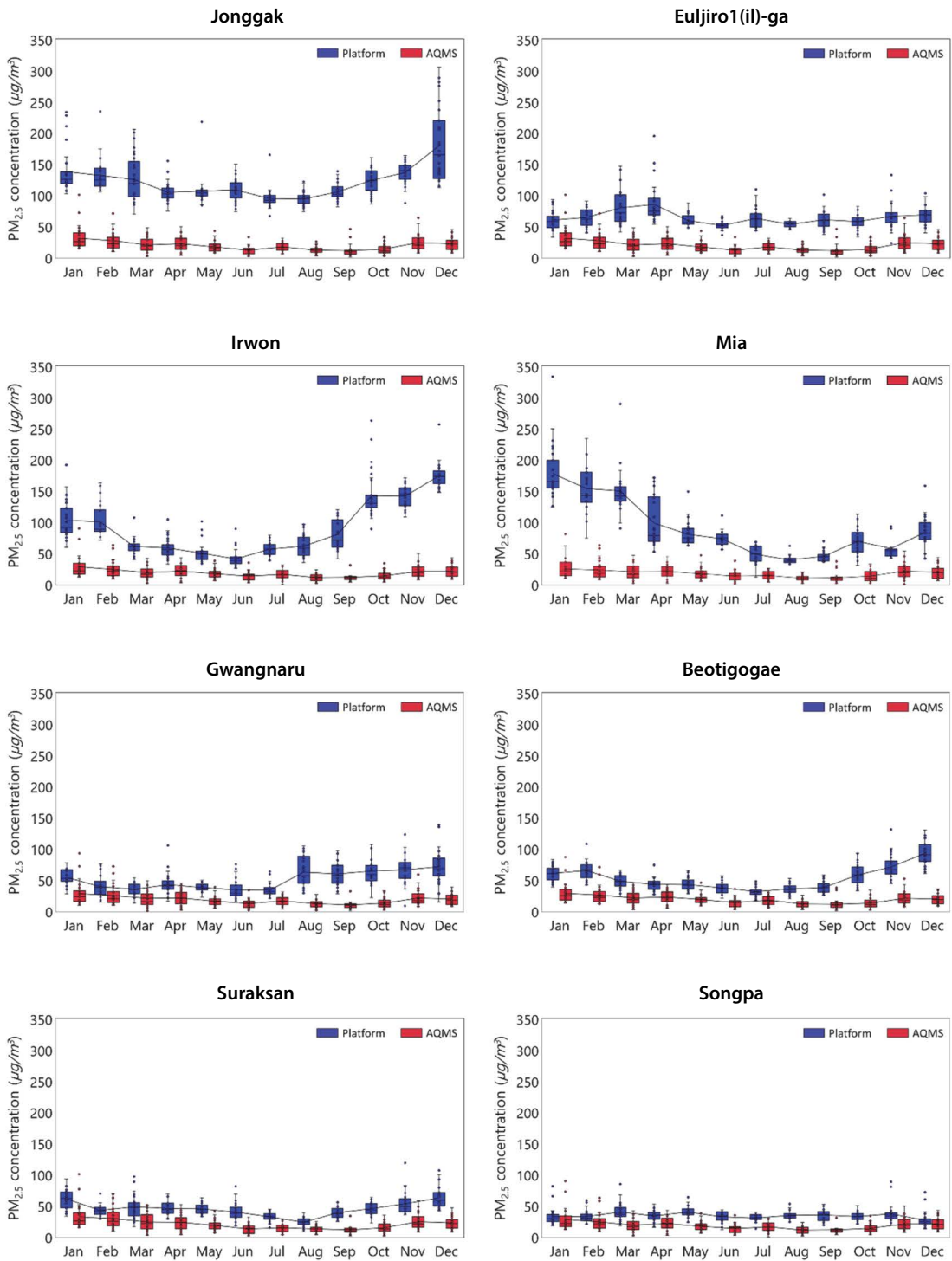


Fig. 1. Distributions of daily mean PM_{2.5} levels in the target underground subway platforms and ambient air in 2022.

et al. (2022), Lee et al. (2022), Son et al. (2020) 등에서 언급하는 바와 같이 지하철 역사 내부에 직간접적인 PM_{2.5} 배출원이 존재하거나, 출입구 및 주변 환기구를 통하여 역사 내부로 유입된 오염물질의 영향을 받은 결과로 판단된다. 지하 깊은 곳에 위치하고 있는 역사의 공간적 특징 또한 승강장 내 불충분한 환기를 야기하여 실내 오염물질이 외부로 배출되지 못하고 내부에 쉽게 축적되는 원인으로 꼽을 수 있는데, 이는 기존의 연구 결과와 유사한 경향을 보인다(Son et al., 2021a; Barmparetos et al., 2016; Cheng et al., 2008).

우리나라 실내공기질 관리법에서는 지하 역사 승강장 및 대합실에 대하여 PM₁₀ 등 실내공기오염물질에 대한 유지기준을 설정하여 엄격히 관리하고 있다. 특히, 2019년 7월부터는 지하철 역사 내 PM_{2.5} 기준(24시간 평균 50 µg/m³ 이하)을 신설하였고, 21년 4월부로 전국 모든 지하 역사 승강장의 PM_{2.5} 농도를 상시 측정하여 그 결과를 공개하도록 하고 있다. 본 연구의 대상 역사 주변 도시대기질 측정소(중각역-중구, 을지로입구역-중구, 일원역-송파구, 미아역-성북구, 광나루역-광진구, 버티고개역-용산구, 수락산역-노원구, 송파역-송파구)에서 수집된 2022년도 일평균 자료를 살펴보면, 한 해 동안 대기 중 PM_{2.5} 기준치(35 µg/m³)를 초과하는 빈도가 측정소에 따라 적게는 26일에서 많게는 46일(중구: 41일, 송파구: 29일, 성북구: 36일, 광진구: 26일, 용산구: 31일, 노원구 46일)로 분석되었다. 반면, 1년 중 승강장 내 일평균 PM_{2.5} 농도의 실내공기질 유지기준(50 µg/m³) 초과일 수는 중각역이 363일로 가장 높게 나타났고, 일원역(288일), 을지로입구역(286일), 미아역(253일), 버티고개(161일), 광나루역(135일), 수락산역(121일), 송파역(24일) 순으로 본 연구의 대상 역사 중 송파역을 제외한 모든 역사 승강장의 기준농도 초과 빈도가 그 주변 외부대기보다 월등하게 높은 것으로 파악되었다. 외부 대기질이 좋음~보통 수준에도 불구하고 역사 내부의 PM_{2.5} 농도가 현저하게 높게 나타나는 것은 1차적으로 역사 내부에서 생성된 다량의 오염물질로부

터 기인한 것도 있겠으나, 한편으로는 환기 시설을 통하여 공급되는 외부의 깨끗한 공기가 높은 농도의 역사 내부 오염 정도를 기준치 이하로 희석할 만큼 충분하지 않다는 양상으로도 이해할 수 있다.

3.2 승강장 내 PM_{2.5}의 시간적 변화 특성

지하 역사 내 PM_{2.5} 변화 특성을 보다 면밀하게 살펴보기 위하여 1년치(2022년) 역사별 승강장 PM_{2.5} 시간평균 자료와 역사 주변 가장 가까운 도시대기질 시간평균 측정 자료, 도로변대기질 시간평균 측정 자료를 정리하여 분석하였다. 지하 역사의 경우 시간대 별로 열차 운행 빈도와 이용객 수가 상이하고, 역사 미운영 시간대(01~05시)도 존재하기 때문에 일평균 자료에 비하여 시간평균 자료가 그 특성을 보다 잘 반영할 수 있다고 볼 수 있다. 실제로 본 연구의 대상 역사 내 승강장 PM_{2.5}와 그 주변 도시대기질 및 도로변대기질 일평균 측정 자료 간 결정계수(Coefficient of determination, R²)를 살펴보면, 승강장과 도시대기 사이의 범위는 역사에 따라 작게는 0.03에서 크게는 0.33까지로 분석되었다. 승강장과 도로변대기 사이의 R² 범위는 0.04에서 0.30으로 도시대기 사이의 R²와 마찬가지로 역사에 따라 매우 광범위하게 나타나 그 관계를 쉽게 특정 짓기 모호한 경향을 보였다. 또한, 승강장 내 일평균 PM_{2.5}와 하루 평균 이용객 수 사이의 R²를 비교해 보면, 그 범위가 역사에 따라 0.01에서 0.11로 나타나기 때문에 일평균 값으로만 상관관계를 분석하였을 때 전반적으로 승강장 농도와 외부 대기(도시대기질 및 도로변대기질) 사이의 결정계수(0.03~0.33)가 승강장 농도와 이용객 수와의 결정계수(0.01~0.11)보다 높은 것으로 단정지어질 수 있다. 그러나 앞서 언급했던 지하철 역사의 운영 특성(유동 인구 및 지하철 운행 빈도의 가변성)과 함께 다양한 오염원의 영향을 받는 외부 대기의 역사 내부 상관 정도의 복잡성을 고려한다면 일평균 값을 활용하여 지하 역사의 PM_{2.5} 변화 특성을 체계적으로 판단하기에는 한계가 따른다. 따라서, 이와 같은 일평균 자료의 취약점을 보완하기 위하여 역사별 승강장, 주

변 도시대기 및 도로변대기의 시간평균 $PM_{2.5}$ 자료를 정리하였고, 그림 2와 같이 제시하였다.

그림 2는 본 연구의 대상 역사 승강장에서 수집된 1년치 $PM_{2.5}$ 시간 평균값과 역사별로 가장 가까운 곳에 위치한 도시대기측정소 및 도로변대기 측정소에서 수집된 $PM_{2.5}$ 시간평균 자료, 역사별, 시간대별 이용객 수 자료를 활용하여 상관관계 분석을 수행한 것이다. 해당 분석은 출퇴근 시간대, 평상시, 열차 미운영 시간대 등을 구분 없이 모두 포함한 자료로써 역사 승강장 내부와 도시 대기 및 도로변대기 간 $PM_{2.5}$ 변화 간 전반적인 상관관계를 확인할 수 있다. 그 결과, 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도와 주변 도시대기 $PM_{2.5}$ 사이의 R^2 (파란색 표시)는 종각역 0.03, 을지로입구역 0.06, 일원역 0.02, 미아역 0.06, 광나루역 0.03, 버티고개역 0.04, 수락산역 0.08, 송파역 0.16으로 나타났다. 승강장 내부와 도로변대기 $PM_{2.5}$ 의 R^2 (붉은색 표시)는 종각역 0.02, 을지로입구역 0.07, 일원역 0.04, 미아역 0.07, 광나루역 0.03, 버티고개역 0.05, 수락산역 0.07, 송파역 0.14로 지하 역사 승강장과 도시대기 R^2 와 보편적으로 비슷한 수준으로 확인되었다. 그러나, 승강장 $PM_{2.5}$ 농도와 이용객 수 사이의 R^2 (연두색 표시) 비교해 보면 종각역 0.24, 을지로입구역 0.23, 일원역 0.19, 미아역 0.20, 광나루역 0.21, 버티고개역 0.20, 수락산역 0.23, 송파역 0.16으로, 송파역을 제외한 모든 대상 역사에서 승강장 $PM_{2.5}$ 농도와 이용객 수 사이의 R^2 가 비교적 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이용객 수가 증가한다는 것은 열차의 운행이 빈번해진다는 것이고, 그로 인해 열차 선로에서 발생되어 승강장으로 유입된 오염물질들이 다양한 반응을 거쳐 $PM_{2.5}$ 농도 증가에 기인하기 때문이다 (Lee *et al.*, 2018). 이는 결국 출퇴근 시간 등 열차의 운행이 집중되는 혼잡시간대에 보다 각별한 역사 실내공기질 관리의 필요성을 시사한다고 볼 수 있다.

국내 대중교통차량의 제작·운영 관리지침에서는 차량 내 실내공기질 권고기준을 마련하고 $PM_{2.5}$ 와 CO_2 를 평상시 기준 및 혼잡시 (07:30~09:30, 18:00~20:00) 기준으로 구분하여 관리하도록 하고 있다. 본

연구의 대상 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 측정값을 1) 혼잡 시간대 (Rush hour); 2) 평상시 (Non-rush hour); 3) 열차 비운행시 (Non-operation) 로 구분하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이용객이 존재할 경우 (열차 운행 빈도가 높은 출퇴근시 및 평상시)와 이용객이 존재하지 않을 경우 (역사 미운영시) 승강장 $PM_{2.5}$ 농도 차이가 확연하게 보였으며, 1년 동안의 대상 역사 승강장 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 혼잡시 $88.0 \pm 39.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평상시 $74.3 \pm 26.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 미운행시 $23.4 \pm 8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다.

역사별로 혼잡시와 평상시 평균 $PM_{2.5}$ 의 농도를 비교해 보면 광나루역: $55.6, 58.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 버티고개역: $62.3, 59.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 수락산역: $49.9, 53.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 송파역: $34.8, 39.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 승강장 내 $PM_{2.5}$ 평균농도 변화가 비교적 미미하였다. 반면, 나머지 역사의 경우 종각역: $152.1, 131.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 을지로입구역: $88.6, 63.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 일원역: $130.9, 96.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 미아역: $130.1, 92.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 농도 차이가 앞서 언급된 역사 승강장보다 뚜렷하게 보였다. 연중 승강장 내 $PM_{2.5}$ 최대값 또한 운행시 (혼잡시 및 평상시)의 시간평균 최대 농도가 미운행시에 보다 모두 높게 나타났으며, 미운행시간 대비 운행시간의 $PM_{2.5}$ 연중 최고 농도는 미아역 (294%) → 수락산역 (256%) → 버티고개역 (222%) → 광나루역 (185%) → 일원역 (152%) → 송파역 (144%) → 종각역 (65%) → 을지로입구역 (2%) 순으로 증가하였다. 열차 미운행시간대와 혼잡시간대 승강장 내 $PM_{2.5}$ 평균농도를 살펴 보면 작게는 2.1배 (송파역)에서 많게는 7.3배 (미아역)까지 증가하는 역사도 확인되었다. 이러한 추이는 Son *et al.* (2022)의 연구에서 보고된 바와 같이 서울 도심 대규모 환승역사에서 측정된 열차 운행시간과 미운행시간대의 PM_{10} 농도 경향과 유사한 특징을 나타냈다. 그러나, 열차 운행시간의 PM_{10} 의 농도가 미운행시간의 농도보다 거의 2배 이상 높다는 선행 연구의 결과와 비교하였을 때 입자의 크기에 따라 열차의 운행 및 이용객의 활동 변화로부터 받는 영향 정도가 상이하다는 것도 함께 암시하고 있다.

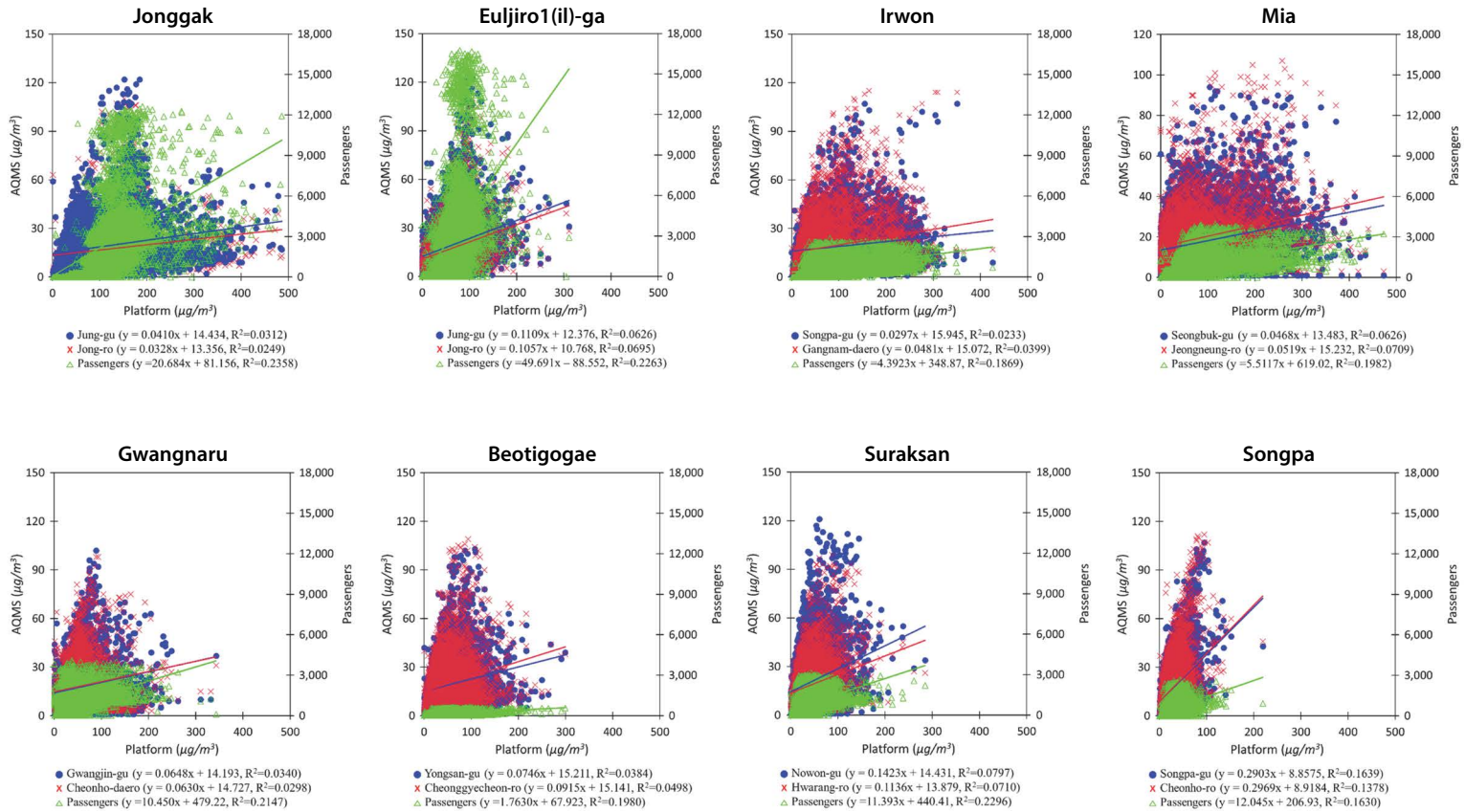


Fig. 2. Scatter plots of PM_{2.5} between target underground subway platforms comparing their nearest AQMSs (Urban and roadside) and passengers.

열차 운행시간의 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 미운행시간의 $PM_{2.5}$ 농도에 비하여 대체로 낮은 것으로 분석되었으나, 외부 대기와의 상관관계를 정확히 규명하기 위하여 추가적인 분석을 진행하였다. 이에 열차 운행시간대와 미운행시간대의 승강장 내 시간평균 $PM_{2.5}$ 농도 및 도시대기 시간평균 $PM_{2.5}$ 농도 사이의 R^2 를 도출해 보았다. 그 결과 열차 운행시간에 비해 미운행시간대에서 승강장과 외부 대기 $PM_{2.5}$ 농도 사이의 상관관계가 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 보다 구체적으로 깊어보면 승강장별로 종각역: 0.03 → 0.27; 을지로입구역: 0.06 → 0.29; 일원역: 0.02 → 0.22; 미아역: 0.08 → 0.14; 광나루역: 0.03 → 0.50; 버티고개역: 0.03 → 0.38; 수락산역: 0.11 → 0.41; 송파역: 0.18 → 0.48과 같이 모든 역사에서 이용객이

없는 열차 미운행시간의 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 이용객이 증가하는 열차 운행시간보다 외부 대기와의 상관성이 더욱 증가한다는 것을 의미한다.

지하 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도의 변화 특성을 종합적으로 살펴보기 위하여 본 연구에서 도출된 R^2 의 변화, 승강장과 도시대기 $PM_{2.5}$ 측정값, 이용객 수, 열차 운행 빈도를 시간대별로 정리하여 그림 4에 나타냈다. 이때 승강장과 도시대기, 승강장과 이용객 수 사이의 R^2 는 시간평균 자료를 활용하여 산출하였는데, 시간에 따른 전반적인 영향 특성을 살펴보고자 역사별로 2022년도 기간 중 동 시간대 승강장 농도와 도시대기, 이용객 수의 평균을 산출하고, 8개 역사의 동시간대 승강장 평균 $PM_{2.5}$ 와 도시대기 평균 $PM_{2.5}$ 사이의 R^2 , 승강장 $PM_{2.5}$ 평균값과 이용객 평균값 사이의 R^2 를 구하여 시간 변화에 따라 나타냈다. 다시 말하자면, 지하 역사 승강장 8곳의 0시부터 23시까지 각각 365개의 승강장 $PM_{2.5}$, 도시대기 $PM_{2.5}$, 이용객 수 데이터를 활용하여 시간대별로 동시간대 평균을 도출하고, 역사별로 산출된 항목별(승강장 농도, 도시대기, 이용객 수) 0~23시 평균값 사이의 R^2 를 구하여 본 연구의 대상 역사 승강장의 전체적인 변화 추이와 특성을 살펴보고자 한 것이다. 승강장과 도시대기의 시간대별 농도와 이용객 수, 열차의 운행 빈도 또한 1년치 자료에서 날짜에 상관없이 동시간대 값의 평균값을 도출하여 시간에 따른 전체적인 변화 추이를 나타냈다. 그 결과, 시간에 따른 지하 역사 승강

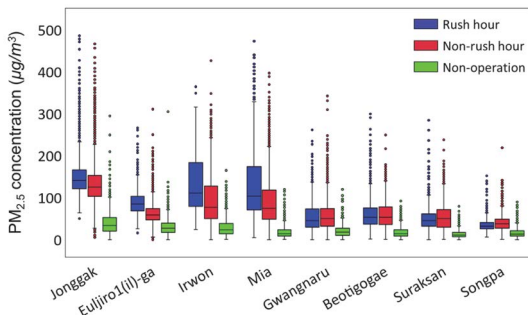


Fig. 3. Comparison of $PM_{2.5}$ concentrations in the target underground subway platforms between rush hours, non-rush hours and non-operation hours.

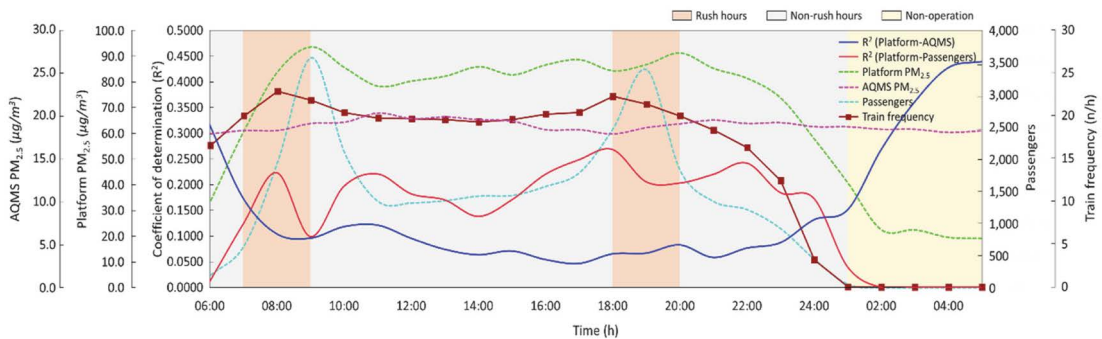


Fig. 4. Overview of daily mean coefficient of determinations for platform-AQMS and Platform-passengers with average $PM_{2.5}$ variations in the target underground subway platforms, AQMSs and passengers.

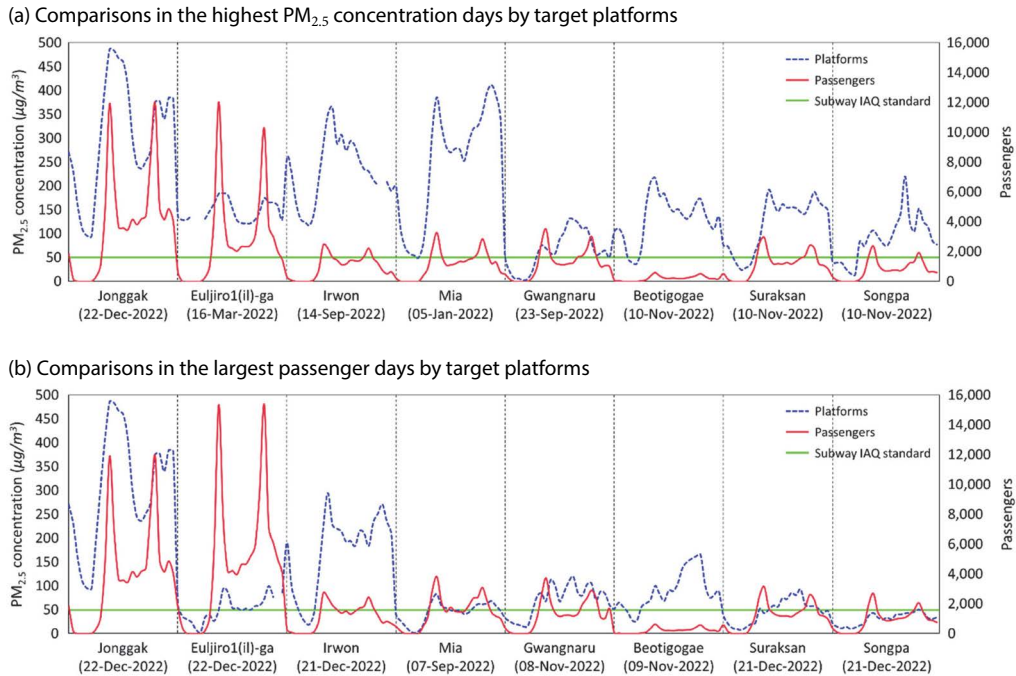


Fig. 5. Hourly mean $PM_{2.5}$ variations of the target underground subway platforms by passengers in different cases.

장 내 $PM_{2.5}$ 농도는 이용객 수와 열차의 운행 빈도의 변화 추이와 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다. 그렇기 때문에 열차 운행시간대의 승강장 $PM_{2.5}$ 농도의 경우 이용객 수와의 R^2 가 외부 대기와의 R^2 보다 높은 것으로 나타났다. 특히, 출퇴근시간대에는 승강장 농도와 이용객 수 사이의 R^2 가 가파르게 변화하였으며, 열차 미운행시간대에 가까워질수록 그 값은 점차 감소되었다. 반면, 열차 미운행시간대는 승강장 $PM_{2.5}$ 농도와 외부 대기의 R^2 가 이용객 수와의 R^2 보다 높게 나타났으며, 열차 운행이 시작되기 직전인 04~05시경 승강장과 외부 대기 $PM_{2.5}$ 간 상관관계가 최대에 이르는 것으로 보아 역사 운영시간 외의 승강장 $PM_{2.5}$ 농도는 외부 대기의 영향과 더욱 밀접하게 연관되어 있는 것으로 판단할 수 있었다.

3.3 특정 기간 중 승강장 $PM_{2.5}$ 의 농도 특성

일반적으로 지하 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 이용객 수에 밀접한 영향을 받는 이유는 열차의 운영을

제외하고 이용객의 옷가지에서 묻어나오는 먼지, 이용객의 이동 간 역사 바닥에 쌓여 있는 먼지의 재비산 등을 원인으로 꼽는다 (Yu et al., 2015). 이는 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 높은 날 또는 지하철 이용객이 많은 날에 더욱 뚜렷하게 나타나는 경향을 보였다. 그림 5는 역사별로 (a) 승강장 내 일평균 $PM_{2.5}$ 농도가 가장 높은 날과 (b) 이용객 수가 가장 많은 날을 뽑아 각각 하루 동안 시간에 따른 승강장 농도와 이용객 변화 추이를 나타낸 것이다. 먼저 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 가장 높은 날은 종각역이 12월 22일, 을지로입구역 3월 16일, 일원역 9월 14일, 미아역 1월 5일, 광나루역 9월 23일, 버티고개역, 수락산역, 송파역이 11월 10일로 나타났으며 모두 평일이였다. 때문에 대부분의 역사에서 출근시간대(07~09시) 및 퇴근시간대(18~20시)에 각각 두 개의 이용객 수 최고점이 나타났다. 역사마다 이용객 규모의 차이는 있으나 모든 역사에서 대체로 이용객의 수가 증가하면 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도 역시 증가하는 패턴을 보였는데, 이는 앞

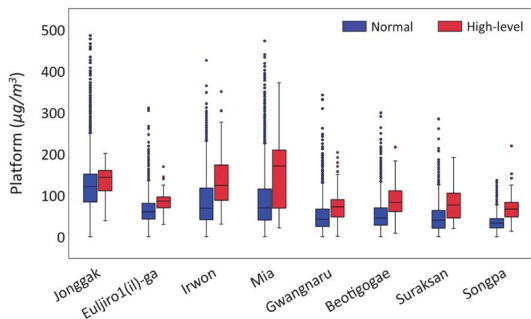


Fig. 6. Hourly PM_{2.5} distribution in the target underground subway platforms during the normal (except high-level periods) and high-level (PM_{2.5} warning) periods.

서 언급하였듯이 열차의 운행 횟수 증가에 따른 것으로 설명이 가능하다. 일 이용객 수가 최대인 날의 경우 종각역, 을지로입구역이 12월 22일, 일원역, 수락산역, 송파역이 12월 21일, 미아역 9월 7일, 광나루역 11월 8일, 버티고개역 11월 9일 이었으며, 승강장 내 일평균 PM_{2.5} 농도가 가장 높은 날의 경우와 같이 승강장 PM_{2.5} 농도 추이와 이용객 변화가 비슷한 변화 패턴을 보였다. 이러한 특성은 상관분석을 통하여 더욱 확실하게 확인할 수 있다. 이를테면 종각역의 경우 승강장 농도와 이용객 수 사이의 R²이 2022년 전체 기간 중에는 0.24으로 나타났으나, 승강장 최고 농도일과 이용객 최대일에는 0.44로 대폭 증가하였다. 다른 역사 승강장 또한 유사한 특징을 보였으며, 전체 기간 중 승강장 농도와 이용객 수 사이 R²이 승강장 농도 최고일과 이용객 최대일에 각각 을지로입구역: 0.23 → 0.42, 0.26; 일원역: 0.19 → 0.53, 0.55; 미아역: 0.20 → 0.65, 0.77; 광나루역: 0.21 → 0.36, 0.43; 버티고개역: 0.20 → 0.70, 0.50; 수락산역: 0.23 → 0.46, 0.32; 송파역: 0.16 → 0.39, 0.76으로 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 결국 역사 승강장 내에서 고농도의 PM_{2.5} 관측 시 이용객 수, 즉 열차의 운행 빈도 증가로 인한 내부적인 오염 요소가 직접적으로 영향을 끼친다는 의미로 해석할 수 있다.

승강장 내 고농도 사례 또는 이용객 최대일과 같이 내부적 관점에서 바라보는 것과는 다르게 외부적 관

점에서 평상시와 또 다른 특성을 갖는 기간으로는 초미세먼지 주의보(또는 경보) 발령 기간을 꼽을 수 있겠다. 대기환경보전법에 따르면 기상조건을 고려하여 해당 지역의 대기자동측정소에서 측정된 PM_{2.5} 시간평균농도가 75 µg/m³ 이상 2시간 지속될 경우 PM_{2.5} 주의보, 150 µg/m³ 이상 2시간 지속될 경우 경보를 발령하도록 되어있다. 이후 주의보 발령 중 시간평균농도가 대기환경기준치 (35 µg/m³) 아래로 내려가게 될 경우 해제되고, 경보 단계에서 PM_{2.5} 시간평균농도가 75 µg/m³ 미만으로 완화될 경우에는 주의보로 전환된다. 2022년에는 전국적으로 PM_{2.5} 경보 1회 포함 총 118회의 주의보가 발령되었는데, 서울의 경우 1월 8일 22시~10일 21시, 2월 11일 23시~13일 21시, 11월 9일 24시~11일 05시 총 3회의 주의보가 발령되었다. 이에 서울권역의 주의보 발령 기간만 추려 PM_{2.5} 주의보 발령 기간을 제외한 평상시 기간과 주의보 발령 기간의 대상 역사 승강장에서 측정된 PM_{2.5} 시간평균 측정값을 활용하여 비교 분석하였다 (그림 6). 먼저 역사 승강장별로 평상시 기간(주의보 기간 제외)의 PM_{2.5} 평균농도를 살펴보면 종각역이 120.1 µg/m³로 가장 높게 나타났고, 이후 일원역(88.2 µg/m³), 미아역(87.8 µg/m³), 을지로입구역(63.4 µg/m³), 버티고개역(51.8 µg/m³), 광나루역(50.3 µg/m³), 수락산역(44.7 µg/m³), 송파역(33.6 µg/m³) 순으로 나타났다. 반면, 외부 대기의 PM_{2.5} 농도가 높은 경우에는 모든 대상 역사 승강장에서 그 농도가 함께 높아지는 경향을 보였다. 가령 송파역의 경우 평상시 33.6 µg/m³에서 주의보 발령시 67.8 µg/m³로 약 102% 이상 증가하는 것을 확인하였다. 다른 역사에서도 마찬가지로 수락산역(82.8 µg/m³, 85%), 미아역(150.6 µg/m³, 71%), 버티고개역(88.0 µg/m³, 70%), 일원역(136.7 µg/m³, 55%), 광나루역(77.8 µg/m³, 55%), 을지로입구역(84.4 µg/m³, 33%), 종각역(134.8 µg/m³, 12%)과 같이 작게는 12%에서 많게는 85%까지 평상시보다 주의보 발령시 승강장 내 PM_{2.5} 농도가 증가되는 특성을 보였다. 특히, 대상 역사 중 평상시 승강장 농도가 낮은 편이었던 송파역, 수락산역, 버티고개

역의 경우 주의보 기간일 때 다른 대상 역사보다 승강장 내 $PM_{2.5}$ 평균농도의 증가율이 확연히 큰 것으로 나타났다.

외부 대기가 고농도일 경우 승강장 내 $PM_{2.5}$ 영향 특성을 살펴보고자 대상 역사 승강장, 도시대기의 시간평균 $PM_{2.5}$ 측정값을 활용하여 상관관계도 함께 알아보았다. 그 결과, 주의보 기간을 제외한 기간 및 주의보 기간의 승강장 농도와 도시대기 사이의 R^2 을 비교해보니 종각역, 을지로입구역, 광나루역에서는 승강장-도시대기 사이 R^2 이 주의보 기간을 제외한 평소 기간보다 주의보 기간 동안에 모두 증가되는 것을 확인하였다. 다시 말해 종각역 (0.03 → 0.12), 을지로입구역 (0.06 → 0.30), 광나루역 (0.03 → 0.10)을 제외한 일원역 (0.02 → 0.02), 송파역 (0.12 → 0.11)의 경우 승강장 $PM_{2.5}$ 와 외부 대기 사이의 상관관계가 크게 변화가 없었으며, 미아역 (0.05 → 0.03), 버티고개역 (0.03 → 0.02), 수락산역 (0.06 → 0.00)은 그 상관성이 줄어드는 경향을 보였다. 이는 역사에 따라 $PM_{2.5}$ 주의보 기간 중 승강장 실내공기질에 대한 외부 고농도 대기의 영향이 상이한 것으로 해석되며, 해당 기간에 역사의 환기 수준, 이용객 수의 규모, 역사 출입구에 커튼 가동 유무 등이 큰 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다. 반면, $PM_{2.5}$ 주의보 기간이더라도 이용객이 없는 역사 미운영시간대 (01~05시)에는 모든 역사에서 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도와 외부 대기 사이의 상관관계가 확연하게 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있었다. 자세히 살펴보면, $PM_{2.5}$ 주의보 전체 기간과 주의보 기간 중 역사 미운영시간대의 승강장과 도시대기 $PM_{2.5}$ 측정값 사이 R^2 범위는 0.26~0.87로 종각역 0.87, 수락산역 0.75, 광나루역 0.73, 송파역 0.65, 을지로입구역 0.60, 미아역 0.57, 버티고개역 0.31, 일원역 0.26 순으로 분석되었다. 결국 열차 미운영시간대에는 평상시와 $PM_{2.5}$ 주의보 기간 모두 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도는 외부 대기의와 밀접한 관계를 나타낸다고 결론지을 수 있었다. 다만, 앞서 살펴보았듯이 $PM_{2.5}$ 주의보 기간 동안 승강장 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 외부 대기 영향이 역사마다 각기 다르게 나타나는 것으로 보아

향후 다른 영향 요소가 다방면으로 고려된 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

우리나라는 뚜렷한 기후 특성으로 인하여 계절에 따라 대기중 $PM_{2.5}$ 농도에 기여하는 원인과 정도에 차이를 보인다. 예를 들어 봄철과 겨울철에는 북서 계절풍의 영향으로 중국, 북한 등 국외 유입 영향이 높게 나타나는 반면, 여름철에는 장마 등 빈번한 강수와 북태평양 고기압의 영향으로 대기중 오염물질이 비교적 줄어드는 특징을 보인다. 겨울철에는 국외로부터 유입된 $PM_{2.5}$ 의 국내 영향이 최대 약 80%까지 증가한다는 선행 연구 또한 국내 대기질의 계절적 관리의 필요성을 잘 암시하고 있다(Lee *et al.*, 2019). 이에 환경부는 겨울철 고농도 $PM_{2.5}$ 의 효과적 관리를 위하여 2019년 12월~다음해 3월까지 제1차 미세먼지 계절관리제를 시행하였으며, 사업장, 수송 부문 등 주요 배출원에 대한 오염물질 발생 저감을 꾀하였다. 이후 산업 및 민간 부문의 대기오염물질 배출의 집중적 관리를 위하여 두 차례의 미세먼지 계절관리제가 추가로 이루어졌다. 가장 최근에는 2022년 12월부터 이듬해 3월까지 제4차 미세먼지 계절관리제가 시행되었으며, 그 결과, 총 대기오염물질 감축량이 3차 대비 약 2% 증가한 것으로 보고된 바 있다(KMOE, 2023).

앞서 본 연구에서는 외부 대기질이 고농도일 경우 특히 역사 승강장 $PM_{2.5}$ 농도에 보다 밀접하게 영향을 주는 것을 확인한 바 있다. 다시 말해 계절에 따른 우리나라 대기환경 특성은 지하철 실내공기질 관리에 중요한 고려 요소로 작용하기 때문에 계절별 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도 변화에 대한 이해는 중요한 의미를 갖는다. 그림 7은 본 연구의 대상 역사 승강장, 주변 도시대기 및 도로변대기의 계절별 $PM_{2.5}$ 시간평균 농도 분포와 측정소별 평균농도 변화 추이를 역사마다 구분하여 나타낸 것이다. 지하 역사 주변 도시대기 및 도로변대기 측정소에서 측정된 $PM_{2.5}$ 의 경우 지역마다 변화폭의 차이는 있었으나, 대체로 봄에서 여름으로 향하면서 그 농도 추이는 점차 낮아져 여름철에 가장 낮은 농도 범위를 보였다. 이후 가

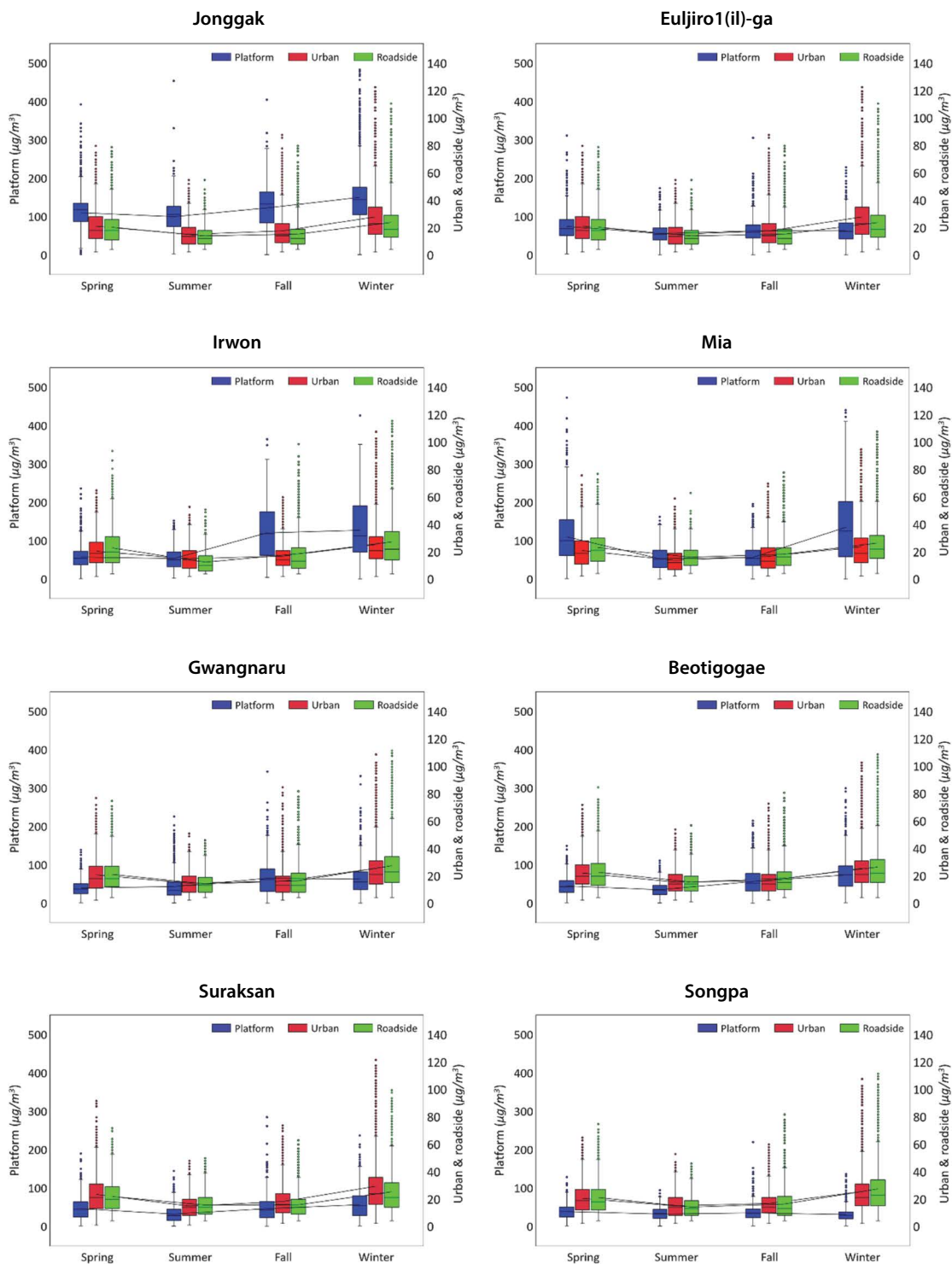


Fig. 7. Distribution of hourly mean $\text{PM}_{2.5}$ in target underground subway platforms, urban and roadside monitoring stations for concentration variation overview by seasons.

Table 2. Summary of coefficient of determination (R^2) by the different analysis cases in this study.

Case	Station	Coefficient of determination (R^2)		
		Platform-Urban	Platform-Roadside	Platform-Passengers
Mean $PM_{2.5}$ concentration in the whole period (Hourly / Daily)	Jonggak	0.0312 / 0.0771	0.0249 / 0.0517	0.2358 / 0.0087
	Euljiro1 (il)-ga	0.0626 / 0.1500	0.0695 / 0.1494	0.2263 / 0.0162
	Irwon	0.0233 / 0.0324	0.0399 / 0.0486	0.1869 / 0.0240
	Mia	0.0626 / 0.1171	0.0709 / 0.1198	0.1982 / 0.0121
	Gwangnaru	0.0340 / 0.0471	0.0298 / 0.0432	0.2147 / 0.1102
	Beotigogae	0.0384 / 0.0631	0.0498 / 0.0807	0.1980 / 0.0288
	Suraksan	0.0797 / 0.2293	0.0710 / 0.1786	0.2296 / 0.0064
	Songpa	0.1639 / 0.3288	0.1378 / 0.2994	0.1630 / 0.0130
Hourly mean $PM_{2.5}$ concentration in the whole period (Operation / Non-operation times)	Jonggak	0.0331 / 0.2627	0.0233 / 0.2638	0.0948 / -
	Euljiro1 (il)-ga	0.0563 / 0.2876	0.0624 / 0.3063	0.1336 / -
	Irwon	0.0224 / 0.2181	0.0395 / 0.2517	0.0703 / -
	Mia	0.0784 / 0.1427	0.0809 / 0.1397	0.0602 / -
	Gwangnaru	0.0257 / 0.4994	0.0222 / 0.4799	0.1042 / -
	Beotigogae	0.0336 / 0.3808	0.0484 / 0.3746	0.0548 / -
	Suraksan	0.1064 / 0.4102	0.0815 / 0.3919	0.0618 / -
	Songpa	0.1834 / 0.4763	0.1541 / 0.4774	0.0410 / -
Hourly mean $PM_{2.5}$ concentration in the whole period (Except high-level durations)	Jonggak	0.0337	0.0264	0.2373
	Euljiro1 (il)-ga	0.0567	0.0644	0.2313
	Irwon	0.0166	0.0328	0.1927
	Mia	0.0513	0.0595	0.2060
	Gwangnaru	0.0271	0.0231	0.2170
	Beotigogae	0.0271	0.0377	0.2029
	Suraksan	0.0615	0.0516	0.2367
	Songpa	0.1208	0.0931	0.1809
Hourly mean $PM_{2.5}$ concentration in the whole high-level duration	Jonggak	0.1221	0.0927	0.2792
	Euljiro1 (il)-ga	0.2977	0.2877	0.1172
	Irwon	0.0192	0.0226	0.0731
	Mia	0.0307	0.0496	0.1527
	Gwangnaru	0.1043	0.1089	0.3236
	Beotigogae	0.0062	0.0005	0.4054
	Suraksan	0.0042	0.0093	0.4670
	Songpa	0.1126	0.1170	0.2437
Hourly mean $PM_{2.5}$ concentration in the high-level duration (only for the non-operation time)	Jonggak	0.8721	0.8801	-
	Euljiro1 (il)-ga	0.5992	0.6306	-
	Irwon	0.2647	0.2556	-
	Mia	0.5703	0.5167	-
	Gwangnaru	0.7317	0.5030	-
	Beotigogae	0.3069	0.4004	-
	Suraksan	0.7509	0.7795	-
	Songpa	0.6515	0.4981	-

을철부터 $PM_{2.5}$ 의 농도 추이는 서서히 증가하면서 겨울철에 최고 농도 추이를 보였다. 지하 역사 승강장은 역사마다 나타내는 $PM_{2.5}$ 농도 범위에 차이가

있었지만, 송파역을 제외한 대부분의 역사가 외부 대기의 $PM_{2.5}$ 변화 패턴과 유사한 것으로 나타났다. 즉, 승강장 $PM_{2.5}$ 농도와 외부 대기의 $PM_{2.5}$ 농도 간 봄~

Table 3. Comparison of annual subway PM_{2.5} concentrations between Seoul metro report and our analysis results.

Rank	(Line)-Station	Report from Seoul metro	This study
1	(1)-Jonggak	58.0	121.0
2	(1)-Dogdaemun	54.0	79.6
3	(1)-Jongno3 (sam)-ga	44.6	64.0
	⋮		
10	(1)-Jegi-dong	36.2	74.7
11	(2)- Euljiro1 (il)-ga	35.3	64.4
12	(1)-City Hall	34.9	42.9
	⋮		
92	(4)-Mia	23.1	89.8
93	(4)-Samgakji	23.1	40.8
	⋮		
102	(5)-Janghanpyeong	22.4	38.5
103	(3)-Irwon	23.3	89.3
104	(5)-Kkachisan	22.3	38.5
	⋮		
142	(5)-Gwangnaru	19.6	50.1
143	(6)-Gusan	19.6	27.0
144	(7)-Suraksan	19.5	45.2
	⋮		
169	(6)-Beotigogae	18.2	52.2
	⋮		
183	(8)-Songpa	17.3	34.2

겨울 계절별 변화를 전반적으로 살펴보기 위해 8개 역사의 측정값 평균을 비교해 보면 도시대기 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$): 20.2 → 13.8 → 16.0 → 25.4, 도로변대기 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$): 20.6 → 13.5 → 15.8 → 25.0, 승강장 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$): 64.7 → 50.4 → 70.4 → 87.3과 같이 봄에서 겨울로 지날수록 PM_{2.5} 농도는 여름철에 최저 농도 구간을 나타내는 완만한 V자 형태를 보였다. 이와 같은 특징은 승강장 내부 PM_{2.5}가 유지기준 미만 농도라도 계절에 따라 외부대기가 고농도일 경우 언제든지 실내공기질에 영향을 줄 수 있다는 것을 암시한다. 따라서 미세먼지 계절관리제와 같은 국내 정책은 향후 중장기적으로 실효성 있는 다중이용시설 실내공기질 관리에 긍정적인 결과로 연계될 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 요약 및 고찰

PM_{2.5}는 인체 유해성 측면에서 그 심각성이 인정되어 세계보건기구 (World health organization, WHO)에서는 PM₁₀과 함께 1군 발암물질 (Group 1)

로 지정하였다. 이러한 이유로 지하철 이용 승객의 건강을 보호하고 환경상의 잠재적인 인체 위해를 예방하기 위한 다양한 노력들이 요구되고 있다. 본 연구에서는 2022년 1월부터 12월까지의 지하 역사 승강장 PM_{2.5} 측정 자료를 활용하여 서울교통공사에서 관리하는 1~8호선 약 250여 개 지하철역 중 각각 호선별 연평균 PM_{2.5} 농도가 가장 높은 역사를 꼽아 지하 역사 승강장의 PM_{2.5} 변화 특성을 다양한 관점에서 종합해 보고자 하였다. 호선별로 연평균 PM_{2.5}가 높은 역사는 1호선: 종각역, 2호선: 을지로입구역, 3호선: 일원역, 4호선: 미아역, 5호선: 광나루역, 6호선: 버티고개역, 7호선: 수락산역, 8호선: 송파역으로 나타났다. 연평균 PM_{2.5} 농도는 역사마다 낮게는 34.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 높게는 121.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 역사 승강장별로 시간에 따른 PM_{2.5} 변화 특성을 살펴본 결과 승강장 내 PM_{2.5} 농도는 대체적으로 열차 운행 빈도가 높아 이용객이 가장 붐비는 출퇴근시간대 (07~09시, 18~20시) 최고 농도를 나타냈으며, 열차

운행이 없는 자정~01시 이후로는 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 점차 감소하는 패턴을 보였다.

외부 대기(도시대기, 도로변대기) 및 이용객 수에 따른 상관관계 분석 결과에 따르면, 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도와 외부 대기, 이용객 수 변화 사이의 R^2 또한 시간 변화에 따라 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 더욱 자세히 살펴보면, 이용객 수가 최대로 나타나는 출퇴근시간대에는 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도와 이용객 수 사이의 R^2 이 급격하게 증가하는 추이를 보였으며, 이용객이 존재하는 열차 운행시간대에는 승강장 농도-외부대기 사이의 R^2 보다 승강장 농도-이용객 수 사이의 R^2 이 상당부분 높은 것으로 나타났다. 이후 이용객 수가 점차 줄어드는 열차 미운행시간대로 가까워질수록 승강장 농도-이용객 수 사이의 R^2 이 점차 감소하여 역사 미운행시간대에 들어서면 결국 두 값이 서로 역전되어 승강장 농도-외부대기 간 R^2 이 승강장 농도-이용객 수 사이의 R^2 보다 확연하게 높은 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 앞선 연구에서 보고된 여러 가지 단편적인 관점들을 시간의 변화에 따라 종합적으로 반영한다고 볼 수 있다. 예를 들어 Kam *et al.* (2011)은 열차의 운행과 역사 내 $PM_{2.5}$ 농도의 상관관계에 대하여 분석하였다. 그 결과, 지하철의 경우 지상으로 다니는 경전철에 비하여 외부로부터 받는 영향에 제한적이기 때문에 내부적 환경 요인에 의한 영향에 상대적으로 의존도가 높다고 판단하였다. 이러한 추이는 결국 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 열차 운행 빈도가 최대로 증가하는 출퇴근시간대의 지하 역사 승강장 $PM_{2.5}$ 가 높은 범위의 농도를 나타내다가 열차 운행 빈도가 줄어드는 심야시간 혹은 이른 아침 시간에 감소하는 이유를 함께 설명한다. 결국, 선행 연구에서 시사하는 바와 같이 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도는 내부적 환경 요인과 외부적 환경 요인으로부터 모두 밀접한 영향을 받지만, 보다 구체적으로는 그림 4에서 볼 수 있듯이 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도는 일반적으로 시간이 변화하면서 달라지는 다양한 영향 요인과 주고받는 상관관계의 정도에

따라 결정된다고 정리할 수 있다.

특정 기간 동안의 지하 역사 승강장 내 농도 변화 특성을 규명하기 위하여 본 연구에서는 1) 승강장 최고 농도일 및 역사 최대 이용객일, 2) 평상시와 $PM_{2.5}$ 주의보 발령기간, 3) 계절별 변화로 구분하여 분석해 보았다. 먼저 승강장 최고 농도일과 역사 최대 이용객일에는 모든 역사에서 이용객의 수(열차의 운행 빈도)가 증가하면 $PM_{2.5}$ 농도 역시 증가하는 공통적인 패턴을 나타냈다. 특히, 이러한 특징은 승강장 $PM_{2.5}$ 농도와 이용객 수 사이의 상관관계 분석에서 더욱 확연하게 나타났는데, 모든 역사에서의 R^2 이 평상시보다 승강장 최고 농도일과 역사 최대 이용객일 때 각각 46~72%, 13~78%만큼 증가하는 것으로 평가되었다. 주의보 발령 기간 동안의 측정값만 정리하여 분석해 본 결과 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도는 평상시보다 작게는 12%에서 많게는 102%까지 증가되는 것을 확인하였다. 그러나, 연구 대상 역사 중 평소 실내 $PM_{2.5}$ 농도가 비교적 낮은 편이었던 역사 승강장에서 주의보 기간 동안 다른 역사보다 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 급격하게 증가한 부분(송파역: 102%, 수락산역: 85%, 버티고개역: 70%)에 대해서는 추후 역사의 구조, 환기 시스템 등을 고려한 보다 면밀한 분석이 요구된다. 전체 기간에서 주의보 기간을 제외한 기간과 주의보 기간만의 승강장 농도와 도시대기 측정값 사이의 R^2 분석에서는 평상시보다 주의보 기간에 승강장-도시대기 간 R^2 이 증가하는 역사(종각역, 을지로입구역, 광나루역)가 있는 반면, 평상시와 주의보 기간의 승강장-도시대기 간 R^2 이 크게 차이가 없는 역사(일원역, 송파역)도 확인되었다. 심지어 미아역, 버티고개역, 수락산역은 평상시보다 주의보 기간에 승강장과 도시대기 사이의 상관성이 줄어드는 경향을 보이기도 하였다. 이에 Son *et al.* (2022)는 비슷한 상황에서 역사별로 그 영향 정도가 서로 다른 경우 역사 내 환경(스크린도어, 도상의 재질, 환기 가동 유무 등)이 큰 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 또한, Lee *et al.* (2022)는 보편적으로 역사의 심도가 깊어질수록 지하 역사의 $PM_{2.5}$ 농도는 외부 대기의 영향이

적어진다고 결론 지었으나, 역사의 개통 연도, 역사 구조(환승역 유무 등), 혼잡도에 따라 그 상관관계가 달라질 수 있어 심층적 분석을 위해서는 여러 가지 요소들을 고려할 필요가 있다고 언급하였다. 이처럼 향후 연구에서는 이상의 시사점을 기반으로 지하 역사 실내공기질에 영향을 미치는 관계를 분석한다면 더욱 진전된 연구 성과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 계절에 따른 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 변화 특성을 살펴본 결과, 전반적으로 계절풍의 영향으로 여름철 $PM_{2.5}$ 농도가 줄어들고 가을과 겨울철에 들어서면서 다시 증가하는 외부 대기의 변화 패턴과 유사하게 나타났다. 이는 결국 짧은 시간의 흐름에 따른 지하 역사 승강장 $PM_{2.5}$ 는 변화하는 역사 내부 상황에 따라 유의미한 연관성을 갖는 영향 요소가 달라지지만, 계절적 변화와 같은 비교적 넓은 기간 범위에서 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 는 외부 대기 $PM_{2.5}$ 변화 범위와 비슷한 흐름으로 증감한다는 것을 알 수 있다. 지하 역사가 갖는 시공간적 특성으로 인하여 외부 대기가 좋음 상태라도 실질적인 노력 없이 실내공기질의 뚜렷한 개선을 기대하기는 쉽지 않다. 그러나 역설적으로는 가을~겨울철 외부 대기의 적절한 관리가 지하 역사 실내공기질 개선에 긍정적 영향을 미칠 수 있기 때문에 국내에서 시행하는 미세먼지 계절관리제가 지속된다면 지하철 시스템의 실내공기질 개선에 더욱 고무적일 것으로 판단된다. 이상과 같이 본 연구에서 도출한 결과 중 다양한 관점에 따른 상관관계 분석 결과는 표 2와 같이 종합적으로 정리하였다.

국내 실내공기관리법 관리법에서는 연 1회 자가측정을 통해 이를 대중에 공개하고 기준치 이내로 관리하도록 권고하고 있다. 서울교통공사에서 공개한 연간 지하 역사 공기질 측정 결과에 따르면 종각역 $58.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 을지로입구역 $35.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일원역 $23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 미아역 $23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 광나루역 $19.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 버티고개역 $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 수락산역 $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 송파역 $17.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 발표되어(Seoul Metro, 2023), 본 연구에서 활용한 2022년 연평균 $PM_{2.5}$ 측정값과 비교하였을 때 다

소 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다(표 3). 뿐만 아니라 본 연구의 대상 역사 승강장의 일평균 $PM_{2.5}$ 농도가 유지기준을 초과하는 빈도가 역사마다 1년 중 적게는 24일(송파역)에서 최대 363일(종각역)에 달하는 반면, 서울교통공사에서 공개하는 연간 지하 역사 공기질 측정 결과에서는 대부분의 역사에서 $PM_{2.5}$ 농도가 유지기준 아래로 적절하게 관리되는 것과 같이 비춰진다. 과거 지하 역사 실내공기질에 대한 국민적 관심이 증가되면서 대합실에 공기질 측정시스템이 구축되고, 이후 역사 내 실내공기질을 보다 실질적으로 잘 반영할 수 있는 승강장에도 추가적으로 설치되면서 그동안의 과정들은 역사 내 극심한 실내 환경 오염을 개선하기 위한 의미 있는 움직임으로 평가되고 있다. 더 나아가 실내공기질 관리법에서 지하 역사 실내공기질 유지 기준을 설정하고 $PM_{2.5}$ 오염도의 실시간 분석 및 결과 공개는 장기적으로 지하 역사 공기질의 비약적 개선이라는 큰 기대를 안고 있다. 따라서, 향후 실질적인 지하 역사 실내공기질 관리와 개선을 위한 보다 효과적이고 정교한 방안들의 제시가 요구된다.

본 연구에서는 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도가 이용객과 열차의 운행과 같은 내부적인 환경 요인뿐만 아니라 어떠한 경우에는 외부적인 환경 요인에도 매우 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 이러한 상관관계를 파악함에 있어 역사 주변 외기를 실시간으로 관측하는 대기오염측정망과 도로변대기측정망은 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 본 연구는 물론 측정망 자료를 활용하는 다양한 연구의 수행에 중요한 수단인 국내 도시대기 및 도로변대기측정망은 그 범위가 다소 포괄적이어서 보다 정확한 규명에 활용되기에는 더욱 보완이 필요하다. 가령 본 연구의 대상 역사 중 하나인 수락산역은 인근 도로변대기측정소의 부재로 약 7km 떨어져 태릉입구역에 보다 가까운 화랑로 측정소(화랑로 429 태능입구역 8번 출구)의 자료를 활용하기도 하였다. 이는 결국 연구의 수행에 있어 신뢰성에 한계를 갖는 결과의 도출이나 불필요한 오차의 발생으로 이어질 수 있기 때문에 보다

조직적이고 체계적인 도시대기 및 도로변대기측정망의 구축과 운용이 절실히 요구되는 실정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 서울교통공사에서 관리하는 1~8호선 약 250여 개 지하 역사 중 승강장 내 연평균 $PM_{2.5}$ 농도가 가장 높은 역사를 호선별로 선정하여 승강장 내 $PM_{2.5}$ 변화 특성과 시간에 따른 외부 대기 및 이용객 수와의 상관관계를 종합적으로 분석하고자 하였다. 그 결과 지하 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 변화 특성을 파악하고, 시간에 따른 내외부적 환경 요인과의 유의미한 상관관계를 규명할 수 있었다.

일반적으로 승강장 내 $PM_{2.5}$ 는 열차의 운행 빈도가 증가하여 이용객이 가장 붐비는 출퇴근시간대 최고 농도를 나타냈으며, 열차 운행이 없는 자정~01시 이후로는 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 점차 감소하였다. 외부 대기 및 이용객 수에 따른 상관관계 분석 결과 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도와 외부 대기, 이용객 수 변화 사이의 R^2 가 시간에 따라 변화하는 것을 확인하였는데, 보편적으로 열차 운행시간대에는 역사 내부적 환경 요인에 대한 R^2 이 높게 나타났으며, 역사 미운영시간대에는 외부적 환경 요인과의 R^2 이 지배적이었다. 이를 통하여 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도는 일반적으로 시간이 변화하면서 역사 내외부적 영향 요인과 주고받는 상관관계 정도에 따라 결정된다고 판단할 수 있었다. 특정 기간 중 승강장 최고 농도일과 역사 최대 이용객일에는 모든 역사에서 이용객의 수가 증가하면 $PM_{2.5}$ 역시 증가하는 공통적인 패턴을 보였으며, 승강장 $PM_{2.5}$ 농도와 이용객 수 사이의 R^2 이 평상시보다 승강장 최고 농도일과 역사 최대 이용객일 때 각각 46~72%, 13~78%만큼 증가하는 것으로 분석되었다. 외부 고농도 대기로 인하여 $PM_{2.5}$ 주의보가 발령된 기간 중에는 평상시보다 작게는 12% 에서 많게는 85%까지 승강장 내 $PM_{2.5}$ 농도가 증가되는 특성을 보여 고농도 기간에 역사 실내공기

질에 대한 각별한 관리의 필요성을 의미하였다. 또한, 계절에 따른 역사 승강장 내 $PM_{2.5}$ 변화 특성을 살펴본 결과 시간 단위에서는 지하 역사 승강장 $PM_{2.5}$ 는 역사 내외부 상황에 따라 상관관계를 갖는 요소가 달라지지만, 계절적 변화와 같은 비교적 넓은 기간 범위에서 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 는 외부 대기 $PM_{2.5}$ 변화 범위와 유사한 추세로 증감한다는 것을 확인하였다.

그동안 기존 연구에서도 지하 역사의 실내공기질 특성을 분석하기 위한 다양한 시도가 있었지만, 지하 역사 $PM_{2.5}$ 및 주변 도시대기, 도로변대기의 최신 측정 자료를 활용하여 종합적인 평가를 수행했다는 점에서 의미가 있다. 물론, 풍속·풍향을 포함한 역사 주변 AQMS에서의 기상조건, 역사에 구축되어 있는 환기 시설, 역사의 노후화, 역사별로 실내공기질 관리 수준 등 다양한 내외부적 요인을 고려하지 않고 승강장과 외부 대기(도시대기 및 도로변대기)의 $PM_{2.5}$ 측정값과 역사 이용객 수의 시간적 변화만을 활용하여 지하 역사 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도의 변화 특성을 판단하기에는 한계가 있을 것이다. 그러나 광범위한 자료 분석을 통하여 국내 지하 역사의 $PM_{2.5}$ 실태를 파악하고, 시간 변화에 따른 외기와 승강장의 $PM_{2.5}$ 농도 및 이용객 수와 승강장 $PM_{2.5}$ 농도 사이의 상관관계 변화 특성을 파악함으로써 향후 지하 역사의 효과적 $PM_{2.5}$ 관리를 위한 기초자료로서 갖는 의미는 분명하다.

References

- 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 ($PM_{2.5}$) in the Helsinki subway system, *Atmospheric Environment*, 39 (28), 5059-5066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.012>
- Airkorea. (2022) <https://www.airkorea.or.kr/>.
- Barmpareos, N., Assimakopoulos, V.D., Assimakopoulos, M.N., Tsairidi, E. (2016) Particulate matter levels and com-

- fort conditions in the trains and platforms of the Athens underground metro, *AIMS Environmental Science*, 3(2). <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.2.199>
- Cheng, Y.-H., Lin, Y.-L., Liu, C.-C. (2008) Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei rapid transit system, *Atmospheric Environment*, 42(31), 7242-7249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.011>
- Chillrud, S.N., Epstein, D., Ross, J.M., Sax, S.N., Pederson, D., Spengler, J.D., Kinney, P.L. (2004) Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system, *Environmental Science & Technology*, 38(3), 732-737. <https://doi.org/10.1021/es034734y>
- Figueroa-Lara, J., Murcia-Gonzalez, J., Garcia-Martinez, R., Romero-Romo, M., Rodriguez, M.T., Mugica-Álvarez, V. (2019) Effect of platform subway depth on the presence of Airborne PM_{2.5}, metals, and toxic organic species, *Journal of Hazardous Materials*, 377, 427-436.
- Guo, L., Hu, Y., Hu, Q., Lin, J., Li, C., Chen, J., Li, L., Fu, H. (2014) Characteristics and chemical compositions of particulate matter collected at the selected metro stations of Shanghai, China, *Science of The Total Environment*, 496, 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.055>
- Gustavsson, P., Bigert, C., Pollán, M. (2008) Incidence of lung cancer among subway drivers in Stockholm, *American Journal of Industrial Medicine*, 51(7), 545-547. <https://doi.org/10.1002/ajim.20584>
- Heo, S., Nam, K., Loy-Benitez, J., Li, Q., Lee, S., Yoo, C. (2019) A deep reinforcement learning-based autonomous ventilation control system for smart indoor air quality management in a subway station, *Energy and Buildings*, 202, 109440. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109440>
- Hwang, S.H., Kim, J.O. (2017) Evaluation of Exposure Characteristics of Fine Dusts by Subway Lines, *Journal of Environmental Health Sciences*, 43(1), 71-76. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2017.43.1.71>
- InAir (2022) <https://www.inair.or.kr/info/>.
- Jeon, B.I. (2019) Characteristics of CO, CO₂, and NO₂ 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>
- Kam, W., Cheung, K., Daher, N., Sioutas, C. (2011) Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro, *Atmospheric Environment*, 45(8), 1506-1516.
- 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/tx049723c>
- Kim, J.B., Park, S., Lee, Y., Lee, S., Kim, J., Park, D. (2022) Prediction of Concentration Change and Influence Analysis of Indoor/Outdoor in Subway Station using Indoor Air Quality Monitoring Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 30-45. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.30>
- Kim, M.H., Han, K.S., Kim, H.S., Gong, H.S., Kim, C.H., Jeong, J.C. (2016) A study on diffusion and distribution of PM₁₀ in metropolitan subway tunnel, *Journal of Korean Society for Urban Railway*, 4(4), 577-582.
- Kim, S.D., Song, H.H., Lee, H. (2004) Estimation of Train-Induced Wind Generated by Train Operation in Subway Tunnels, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 16(7), 652-657.
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2023) Korea Ministry of Environment. Retrieved from <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1602020> (22 May 2023).
- Kwon, S.B., Cho, Y., Park, D., Park, E.Y. (2008) Study on the indoor air quality of Seoul metropolitan subway during the rush hour, *Indoor and Built Environment*, 17(4), 361-369. <https://doi.org/10.1177/1420326X08094683>
- Lee, B.J., Park, S.S. (2019) Evaluation of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations from Online Light Scattering Dust Monitors Using Gravimetric and Beta-ray Absorption Methods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 357-369. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.357>
- Lee, D., Choi, J.-Y., Myoung, J., Kim, O., Park, J., Shin, H.-J., Ban, S.-J., Park, H.-J., Nam, K.-P. (2019) Analysis of a severe PM_{2.5} episode in the Seoul Metropolitan area in South Korea from 27 February to 7 March 2019: Focused on estimation of domestic and foreign contribution, *Atmosphere*, 10(12), 756.
- Lee, H.S., Hwang, S.J., Hwang, H.S. (2017) A Study on PM₁₀ Control in Subway Tunnels Using Natural Polysaccharide Dust Collecting Agent, *Journal of Environmental Health Sciences*, 43(2), 122-129. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2017.43.2.122>
- Lee, K.B., Kim, J.S., Bae, S.J., Kim, S.D. (2014) Research Study on Indoor Air Quality (IAQ) inside of the Subway Cabin in Seoul Metropolitan City, *Journal of Korean Society*

- for Atmospheric Environment, 30(2), 175-187. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.2.175>
- Lee, Y., Choi, K., Jung, W., Versoza, M.E., Barabad, M.L.M., Kim, T., Park, D. (2018) Generation characteristics of nanoparticles emitted from subways in operation, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2230-2239. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0439>
- Lee, Y., Kim, Y.S., Lee, H., Kim, Y.J., Han, B., Kim, H.J. (2022) Analysis of the Correlation between the Concentration of PM_{2.5} in the Outside Atmosphere and the Concentration of PM_{2.5} in the Subway Station, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 1-12. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.1>
- Lu, H., Zhu, Y., Qi, Y., Yu, J. (2018) Do urban subway openings reduce PM_{2.5} concentrations? Evidence from China, *Sustainability*, 10(11), 4147. <https://doi.org/10.3390/su10114147>
- Ma, C.J., Lee, K.B., Kim, S.D., Sera, K. (2015) Chemical properties and source profiles of particulate matter collected on an underground subway platform, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 9(2), 165-172. <https://doi.org/10.5572/ajae.2015.9.2.165>
- Martins, V., Moreno, T., Mendes, L., Eleftheriadis, K., Diapouli, E., Alves, C.A., Duarte, M., de Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X. (2016a) Factors controlling air quality in different European subway systems, *Environmental research*, 146, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.007>
- Martins, V., Moreno, T., Minguillón, M.C., Van Drooge, B.L., Reche, C., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Querol, X. (2016b) Origin of inorganic and organic components of PM_{2.5} in subway stations of Barcelona, Spain, *Environmental Pollution*, 208, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.004>
- Namgung, H.K., Song, J.H., Kim, S.Y., Kim, H.M., Kwon, S.B. (2016) Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 17(5), 17-25. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.17>
- Nieuwenhuijsen, M., Gomez-Perales, J., Colville, R. (2007) Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems, *Atmospheric Environment*, 41(37), 7995-8006. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.002>
- Parchami, M., Motlagh, M.S., Pardakhti, A. (2022) Particulate matter concentrations and characterization in urban subway system-case study Tehran, Iran, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12017-022-00000-0>
- Public Data Portal (2022) <https://www.data.go.kr/>
- Rai, A.C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A.N., Di Sabatino, S., Ratti, C., Yasar, A., Rickerby, D. (2017) End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring, *Science of The Total Environment*, 607, 691-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266>
- Ryu, J., Jeong, S., Kim, G., Park, W., Park, S. (2022) Evaluation of Measurement Reliability of Light-scattering PM_{2.5} Monitor Applied with Referenced-channel Calibration Technology, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 341-353. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.341>
- Seoul Metro (2022) <https://www.seoulmetro.co.kr/>
- Seoul Metro (2023) <http://www.seoulmetro.co.kr/kr/board.do?menuidx=495>
- Smith, J., Barratt, B., Fuller, G., Kelly, F., Loxham, M., Nicolosi, E., Priestman, M., Tremper, A., Green, D. (2020) PM_{2.5} on the London Underground, *Environment International*, 134, 105188. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105188>
- Son, J., Kim, K., Kwon, S., Park, S.-M., Ha, K., Shin, Y., Ahn, M., Cho, S., Shin, J., Shin, Y. (2021a) Source quantification of PM₁₀ and PM_{2.5} using iron tracer mass balance in a Seoul subway station, South Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 21(7), 200573. <https://doi.org/10.1080/10864302.2021.200573>
- Son, J., Kim, K., Kwon, S., Park, S., Ha, K., Shin, Y., Ahn, M., Cho, S., Shin, J., Shin, Y. (2021b) Source quantification of PM₁₀ and PM_{2.5} using iron tracer mass balance in a Seoul subway station, South Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 21(7), 200573. <https://doi.org/10.1080/10864302.2021.200573>
- 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., Yu, S.J., Seo, S.H., Choi, I.Y. (2022) Effects of Indoor Air Quality in Subway Systems according to Changes in Outdoor Air Quality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 13-29. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.13>
- Statistics KOREA (2022) <https://www.index.go.kr/>
- Suárez, L., Mesías, S., Iglesias, V., Silva, C., Cáceres, D.D., Ruiz-Rudolph, P. (2014) Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 16(6), 1309-1317. <https://doi.org/10.1039/C3EM00648D>
- Vilcassim, M.R., Thurston, G.D., Peltier, R.E., Gordon, T. (2014) Black carbon and particulate matter (PM_{2.5}) concentrations

- in New York City's subway stations, *Environmental Science & Technology*, 48 (24), 14738-14745. <https://doi.org/10.1021/es504295h>
- 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>
- Yang, J., Fan, X., Zhang, H., Zheng, W., Ye, T. (2023) A review on characteristics and mitigation strategies of indoor air quality in underground subway stations, *Science of The Total Environment*, 869, 161781.
- Yim, B., Lee, K., Kim, J., Hong, H., Kim, J., Jo, K.-H., Jung, E., Kim, I., An, Y. (2014) Evaluation on Indoor Air Quality by Statistical Analysis of Indoor Air Pollutants Concentration in a Seoul Metropolitan Underground Railway Station, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(3), 233-244. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.3.233>
- Yu, J.G., Kim, J.H., Kim, K.P., Jung, S.Y., Na, K.I., Jo, H.J., Sul, K.H., Kim, K.H. (2015) Comparison of PM_{2.5} Pollution Status at a Major Transit Subway Station in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 201-208. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.201>

Authors Information

권용범 (한국생산기술연구원 한러혁신센터 연구원)
(kyb916@kitech.re.kr)