

부산지역 지하철역사 실내공기질 통계분석을 통한 특성 평가

류경림*, 손정원, 김정미, 강민경, 정현철

대기환경연구부 실내환경팀

A Evaluation of Characteristics through statistical analysis of indoor air quality of Subway Platforms in Busan

Ryu Kyeong-Rim·Son Jeong-Won·Kim Jeong-Mi·Kang Min-kyeong and Jeong Hyun-Chel

Indoor Environment Team

Abstracts

This study aims to evaluate the characteristics of indoor air quality (IAQ) in subway stations within Busan, South Korea, through statistical analysis of PM-2.5 and CO₂ data collected between 2021 and 2024. Urban subway systems, characterized by enclosed structures and limited natural ventilation, are critical areas for air quality monitoring due to their high user density and internal pollution sources such as tunnel dust and train-induced airflows. The study examines the relationships between IAQ parameters and external air quality, passenger activity levels, ventilation rates, and meteorological conditions.

The results reveal significant correlations between PM-2.5 concentrations at subway platforms and external ambient air, as well as notable seasonal and hourly variations influenced by external air quality, ventilation operations, and passenger density. In particular, the introduction of a smart ventilation system in July 2024 was associated with an increase in PM-2.5 levels, highlighting the need for optimized ventilation strategies. Furthermore, structural factors, including platform type, screen door installation, and track design, were found to significantly influence PM-2.5 levels, with fully enclosed screen doors and concrete trackbeds contributing to lower concentrations.

This study underscores the importance of tailored IAQ management strategies for subway environments. By proposing a platform-specific Indoor Air Quality Index (IAQI-P) and relative criteria based on Indoor/Outdoor Ratios (I/O Ratios), the findings provide actionable insights for enhancing air quality management. These results contribute to improving the health and comfort of subway users and offer a basis for establishing effective IAQ standards for underground transit systems.

Keywords : *Subway Platform, PM-2.5, CO₂, Indoor Air Quality Index*

1. 서론

부산광역시는 교통 혼잡을 완화하고 시민들에게 신속하고 편리한 교통 서비스를 제공하기 위해 도시철도를 중심으로 대중교통망을 지속적으로 발전시켜 왔다. 부산시 도시철도는 1985년 7월에 1호선 노포동 ~ 범내골 구간 개통을 시작으로, 2024년 기준 총 4개 노선, 114개역이 있으며, 주변 교통상황의 영향을 받지 않고 정확한 운행시간 및 안전하고 신속함을 이유로 현재까지도 지속적으로 노선 확장이 추진되고 있다.(Busan Transportation Corporation, 2024)

이처럼 도시철도는 대중교통 수단에서 차지하는 비중이 점차 증가하여 지하철역사는 불특정 다수가 이용하는 대표적인 다중이용시설로 자리 잡았다.

그러나 지하철역사는 터널 내 축적된 먼지가 열차 운행으로 인해 승강장으로 유입되는 등 내부에 미세먼지 발생원이 있으며,¹⁾ 폐쇄적 구조와 자연 환기의 어려움, 특정 시간대 이용객 집중 등으로 인해 실내공기 오염이 이용자들에게 위험 요인으로 작용하고 있어 지하철역사 실내공간에서의 공기질에 대한 우려가 증가하고 있다. 이와 같은 지하철역사의 구조적 특성으로 인해 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), 이산화탄소(CO₂)와 같은 주요 오염물질이 실내에 축적될 가능성이 높고, 실내 오염물질의 높은 농도는 실내 공기질을 저하시켜 호흡기 질환, 피로감, 집중력 저하 등 다양한 건강 문제를 유발할 수 있다.²⁾ 특히, 도시철도 이용 빈도가 높은 도시 환경에서는 공중보건 측면에서 지하철역사 내 공기질을 적정 수준으로 유지·관리하는 것이 매우 중요한 과제이다.

이와 같은 이유로 지하철역사 실내공기질에 대한 우려와 관심이 높아지면서 「실내공기질 관리법」 제4조의 7에 따라 전국 지하철역사에 초미세먼지 자동측정기기가 설치되었으며,³⁾ 2021년 4월 1일부터 ‘실내공기질 관리 종합정보망’과 승강장 내 표출장치를 통해 실시간으로 측정 결과가 공개되고 있다. 부산광역시 지하철역사 내 공기질은 실내공기질 자동측정망을 통해 장기간에 걸쳐 연속적으로 모니터링되고 있으며, 승강장과 대합실에서 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂) 농도가 자동으로 측정되고 있다. 그러나 이러한 데이터는 단순 모니터링에 그치는 경우가 많아, 실내공기질 변화에 대한 정밀한 분석과 유지·관리를 위해서는 구체적인 평가 기준 마련이 요구되었다. 특히, 지하철

역사 내 실내공기질 관리는 주로 유지·관리기준에 의존하고 있어, 다양한 환경적 조건을 반영한 적정 관리 평가기준 수립이 필요하였다.

본 연구는 부산시 지하철역사 내 승강장과 대합실에서 초미세먼지(PM-2.5), 이산화탄소(CO₂)의 실시간 농도자료를 통계분석하여 지하철역사 공기질 특성을 평가하고자 하였다. 장기적으로 축적된 데이터를 활용하여 지하철역사 내 실내 오염물질 농도와 외기 농도, 시간대, 계절, 환기량 등 다양한 변수 간의 상관성을 규명하고, 지하철역사 내 공기질 변화의 주요 요인을 파악하고, 부산시 지하철역사 내 공기질 관리를 위한 실질적이고 과학적인 평가기준을 제안함으로써, 대중교통 이용자의 건강 보호와 쾌적한 이용 환경을 조성하는 데 기여하려고 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 및 연구기간

부산광역시보건환경연구원은 2008년 7월부터 서면지하철역(1호선, 2호선) 승강장, 대합실과 수영·연산·미남·덕천지하철역 대합실에서 실내공기질 측정망을 구축하였으며, 2020년까지 총 91개 역사에 104개의 자동측정망을 구축하였다. 본 연구에서는 91개 역사 승강장(1호선 32개, 2호선 37개, 3호선 13개, 4호선 9개)의 초미세먼지(PM-2.5) 자동 측정 농도자료를 활용하였다.(Fig. 1) 지하철역사 승강장의 PM-2.5 농도를 실외의 PM-2.5 농도와 비교하기 위해 각 지하철역사와 가장 가까운 대기측정소의 자동 측정 농도자료를 외기 농도자료로 활용하였다.(Fig. 2)

또한 승객수와 실내공기질 간의 상관관계를 보다 정확히 분석하기 위해, 유동인구가 많은 역사 대합실 및 승강장에 설치되어 있는 이산화탄소(CO₂) 자동측정기의 농도 자료도 활용하였다. 이산화탄소(CO₂) 자동측정기가 설치된 역의 목록은 Table 1에 제시하였다.



Fig. 1. Indoor air quality monitoring stations on Busan subway platforms(Red Points) and underground station indoor air quality monitoring systems.

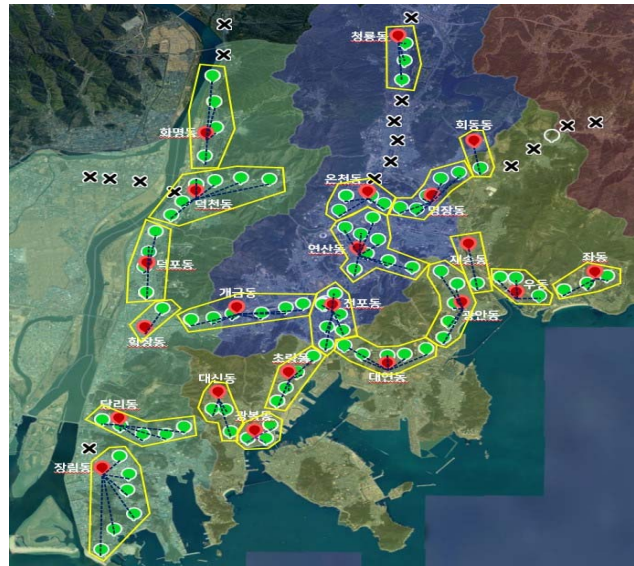


Fig. 2. Ambient air monitoring stations near subway indoor air quality monitoring systems.

Table 1. List of stations equipped with automatic carbon dioxide(CO₂) monitoring devices

Platform		Concourse			
Line 1	Line 2	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
Seomyeon	Seomyeon	Hadan	Seomyeon	Suyeong	Dongrae
		Jagalchi	Sasang	Yeonsan	
		Nampo		Minam	
		Busan station		Deokcheon	
		Seomyeon			
		Bujeon			

부산지역 지하역사 실내공기질 연구는 주로 일부 역사 승강장의 자동측정망을 활용한 미세먼지 농도 분석에 의존해왔다. 그러나 지하에 위치한 전체 승강장에서 장기간 연속 측정된 농도 데이터를 활용하여 실내 오염물질의 농도 특성을 평가한 사례는 거의 보고되지 않았다.

본 연구에서는 부산지역 지하역사의 실내공기질 특성을 확인하기 위해, Fig. 1 및 Table 1에 나타난 지하역사의 자동측정망이 모두 구축된 2021년 1월부터 2024년 11월까지의 초미세먼지(PM-2.5)와 이산화탄소(CO₂) 농도 데이터를 활용하여 통계분석을 수행하였다. 또한, 실내공기오염물질 농도에 영향을 미칠 수 있는 환기량 및 외기와의 상관성을 분석하고, 쾌적한 공기질 확보를 위해 지하역사의 체계적인 관리 및 유지에 필요한 실질적인 자료를 제공하기 위해 보다 심층적인 분석을 진행하였다.

2.2. 측정항목 및 분석방법

부산지역 지하역사 실내공기질 농도 특성을 평가하기 위해, 부산시 도시철도 1 ~ 4호선 중 Fig. 1에 빨간 점으로 표시된 지하역사 승강장에서 2021년 1월부터 2024년 11월까지 약 4년간 측정된 PM-2.5 자료와 Table 1에 나타난 지하역사에서 측정된 CO₂ 농도 자료를 활용하였다. 실내공기질 자동측정기는 「실내공기질 관리법」 제4조의 7 및 「다중이용시설 실내공기질 자동측정망 설치 및 운영매뉴얼」, 「지하역사 실내 초미세먼지 측정기기 운영·관리 참고 매뉴얼」에 따라 관리·운영하였다.

PM2.5는 베타선 흡수법(β -Ray Absorption Method, BAM-1020, Metone, USA), CO₂는 비분산적외선법(Non-Dispersive Infrared Method, VA3000, Horiba)

을 통해 24시간 연속 측정된 데이터의 1시간 평균 농도를 사용하여 통계분석을 실시하였다. 데이터 간 상관성 분석 및 기타 통계분석은 SPSS(v.18.0) 프로그램을 이용하였다. 실내공기오염물질 농도 데이터와 각종 영향 인자 간의 상관성은 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)을 사용하여 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PM-2.5 시계열 농도 추이

Fig. 3은 부산지역 지하역사 승강장에 설치된 실내 공기질 자동측정기를 통해 2021년부터 2023년까지 3년간 측정된 PM-2.5의 시간평균 농도를 바탕으로 산정된 호선별 연평균 농도와 2021년 1월부터 2024년 11월까지 약 4년간의 호선별 평균 농도를 나타낸 것이다.

4년간의 전체 평균 PM-2.5 농도는 17.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 1호선(20.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 2호선(16.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) = 3호선(16.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 4호선(14.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 확인되었다. 3년간(2021 ~ 2023년)의 연평균 농도를 비교해 보면, 1호선이 가장 높은 농도를 보였으며, 2021년 22.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022년 18.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023년 20.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매년 다른 호선들보다 2.5 ~ 7.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 값으로 조사되었다. 반면, 2·3호선은 3년간 외기 PM-2.5 농도(2021 ~ 2023년 평균: 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 가장 유사한 값을 나타내었다. 4호선은 다른 호선들과 달리 3년간 연평균 농도가 외기 농도보다 낮게 측정되었으며, 전반적으로 가장 낮은 연평균 농도를 기록하였다. 이는 4호선이 상대적으로 신축된 역사 구조를 갖추고 있으며, 비교적 승객수가 적고 승강장 길이가 짧아 환기 효율이 높기 때문에, 다른 호선들에 비해 낮은 PM-2.5 농도로 조사되었다.

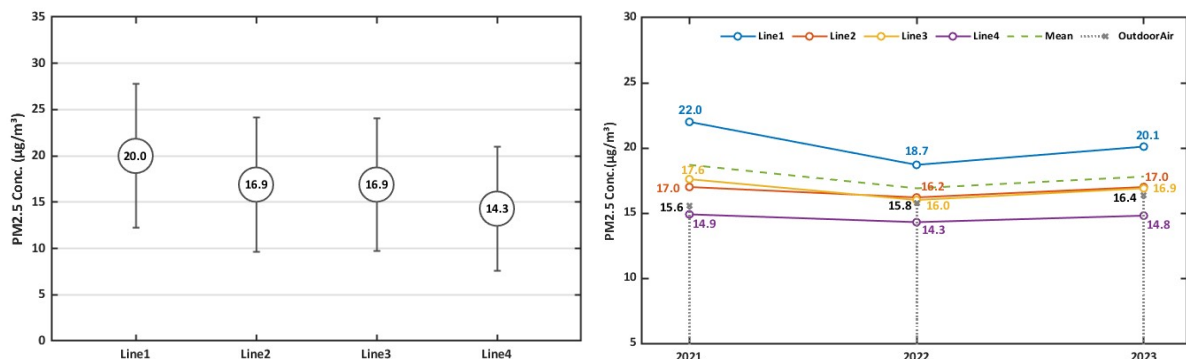


Fig. 3. 4-Year average PM-2.5 concentrations(2021 - 2024) and annual averages by Subway Line(2021 - 2023).

전반적인 PM-2.5 농도는 2021년($18.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 2022년($16.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 약간 감소하였으나, 2023년($17.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 이러한 변화는 근처 대기측정소에서 측정된 외기 PM-2.5 연평균 농도(2021년 $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022년 $15.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023년 $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와는 차이를 보였다. 외기의 연평균 농도는 지속적으로 증가하는 추세를 보였으나, 실내 농도는 2022년에 감소하였다가 2023년에 다시 증가하였다. 이는 2021년에 실시된 1호선 노후 역사들의 환기시설 관련 공사로 인한 1호선 일부 역사의 PM-2.5 농도가 일시적으로 증가했으며, 이로 인해 2021년 전체 호선의 연평균 농도가 상승한 것으로 분석되었다.

Table 2는 호선별 PM-2.5 유지기준 초과 횟수를 나타낸 것으로, 현재 「실내공기질 관리법」에 따라 지하역사의 PM-2.5 유지기준은 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정되어 있다. 분석 결과, 2021년의 외기 PM-2.5 농도가 2022년보다 낮았음에도 불구하고 2021년의 1호선에서 유지기준 초과 횟수가 2022년에 비해 현저히 많았음을 확인할 수 있다. 이는 1호선의 노후 역사에서 2021년 동안 지속적으로 내부 공사를 진행한 점이 주요 원인으로 분석된다. 2021년 1호선에서 진행된 주요 공사 내역은 다음과 같다.

- 5월: 부산진역 냉동설비 개량 전기공사(14회 초과)
- 6월: 하단역 수막설비 공사(하단역 28회, 당리역 17회 초과)
- 7월: 대티역 환기시설 공사(7회 초과)
- 8월: 서대신역 환기시설 공사(6회 초과)
- 12월: 낮개역 환기시설 공사(6회 초과)

이러한 공사로 인해 환기시설 개보수 과정 등에서 발생한 미세먼지가 내부 PM-2.5 농도를 증가시켜, 유지기준 초과 횟수가 크게 증가한 것으로 판단되었다. 특히, 공사 과정에서 발생한 비산먼지와 환기 설비 작동의 제한은 실내공기질 악화에 주요한 영향을 미친

요인으로 보인다. 이를 바탕으로 노후 역사의 개보수로 인한 공사기간 동안 실내공기질 관리를 강화하기 위해 다음과 같은 방안이 요구되었다. 먼저, 공사로 인해 발생하는 미세먼지를 신속히 배출하기 위한 임시 환기 장치를 설치 운영하고, 공사 현장에서 발생하는 미세먼지 확산을 줄이기 위해 비산먼지 억제제를 도포하는 등의 적극적인 대책이 필요하다. 또한, 환기 설비 개보수 시 실내공기질에 미치는 영향을 최소화하기 위해 세부적인 관리 메뉴얼을 개발하고 이를 실효성 있게 실행하는 것이 중요하다. 더불어, 공사 환경별 미세먼지 농도 변화에 대한 정량적 분석을 통해 더욱 세부적이고 효과적인 실내공기질 관리 체계 개선 방안을 마련하여야 할 것이다.

Table 3과 Fig. 4는 부산지역 지하역사 승강장에 설치된 실내공기질 자동측정기를 통해 2021년 1월부터 2024년 11월까지 약 4년간 측정된 PM-2.5의 호선별 월평균 농도를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 4개 호선 모두 유사한 계절적 경향을 보였다. 대체로 2월 ~ 3월에 가장 높은 농도를 기록하며, 4월부터 점진적으로 감소하여 9월에 최저농도를 나타낸 후 다시 증가하는 양상을 보였다. 4개 호선의 PM-2.5 월평균 농도는 3월($22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 1월($21.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 2월($20.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > ... > 8월($13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 7월($12.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 9월($11.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났으며, 외기 PM-2.5 월평균 농도 역시 유사한 경향을 보였다. 외기 농도는 3월($21.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 1월($20.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 2월($19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > ... > 7월($10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 8월($10.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 9월($8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 확인되었다. 2021년부터 2023년까지는 3월 ~ 4월에 최대농도를 기록하고, 9월에 최저농도를 기록하는 계절적 변동이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 2024년은 다른 연도와 비교하여 8월 농도가 급격히 상승하였는데 이는 부산교통공사에서 2024년 7월 22일부터 에너지 절감을 목표로 도입한 스마트 환기시스템의 영향으로 대기질이 양호한 경우

Table 2. Number of times exceeding the standard at Line(2021. 1. - 2024. 11.)

Line	Number of times exceeding the standard				Sum
	2021 year	2022 year	2023 year	2024 year	
Line 1	250	151	229	62	692
Line 2	50	91	130	39	310
Line 3	21	24	25	7	77
Line 4	9	5	9	0	23
Sum	330	271	393	118	1,102

환기 시간을 하루 8 ~ 19시간에서 4시간으로 감소시켰으며, 이로 인해 실내 PM-2.5 농도가 상승한 것으로 평가되었다.

Table 4는 2021년부터 2024년까지 약 4년간 부산 지역 지하철역 승강장과 외기에서 측정된 PM-2.5 농

도를 계절별로 분석한 결과를 제시한다. 분석 결과, 계절별로 PM-2.5 평균 농도와 유지기준 초과 횟수에 뚜렷한 차이를 보였다.

Table 3. Monthly average PM-2.5 concentrations by Subway Line

Line	Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Line 1	2021	22.6	25.3	26.8	22.8	23.6	25.2	19.0	17.9	16.1	18.2	23.4	24.2
	2022	23.4	21.6	26.1	19.7	21.2	13.9	15.6	13.8	13.9	14.1	21.2	20.6
	2023	24.6	25.3	25.6	21.0	20.6	18.1	17.2	15.2	14.1	17.2	19.5	22.4
	2024	21.6	18.5	22.3	23.0	17.8	20.2	13.7	18.5	15.9	17.0	19.3	-
	Avg.	23.1	22.7	25.2	21.6	20.8	19.4	16.4	16.4	15.0	16.6	20.9	22.4
Line 2	2021	18.4	21.2	20.9	16.4	16.8	17.4	13.1	12.8	10.4	14.5	20.1	21.8
	2022	23.4	20.0	23.0	16.5	17.3	11.4	12.3	11.2	11.3	11.9	18.3	17.7
	2023	21.0	22.1	22.4	19.0	17.4	14.8	13.5	12.2	10.5	13.8	16.5	20.5
	2024	19.5	17.1	19.4	20.6	15.5	17.7	11.3	19.3	17.1	16.8	18.5	-
	Avg.	20.6	20.1	21.4	18.1	16.8	15.3	12.6	13.9	12.3	14.3	18.4	20.0
Line 3	2021	22.7	25.5	22.6	18.4	18.0	18.0	13.0	10.5	9.1	13.7	19.4	20.9
	2022	22.4	21.7	22.6	16.3	16.9	10.7	12.0	10.1	10.0	12.7	17.6	18.3
	2023	21.7	22.5	22.3	17.9	16.9	14.6	12.3	11.3	10.6	14.9	16.8	20.7
	2024	20.3	18.8	20.1	20.2	16.3	18.5	10.5	16.1	16.0	16.8	17.7	-
	Avg.	21.8	22.1	21.9	18.2	17.0	15.5	12.0	12.0	11.4	14.5	17.9	20.0
Line 4	2021	18.8	21.4	20.3	15.3	14.7	15.8	10.7	9.4	7.7	11.6	16.4	17.7
	2022	19.4	17.9	20.1	15.4	16.1	10.6	10.9	9.1	8.9	10.4	16.9	16.2
	2023	19.8	20.3	20.4	17.4	15.6	13.2	11.4	9.9	8.7	11.7	13.1	16.4
	2024	17.1	14.9	17.5	17.2	12.6	14.6	8.5	11.1	8.9	9.3	11.8	-
	Avg.	18.8	18.6	19.6	16.3	14.8	13.6	10.4	9.9	8.6	10.8	14.6	16.8

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

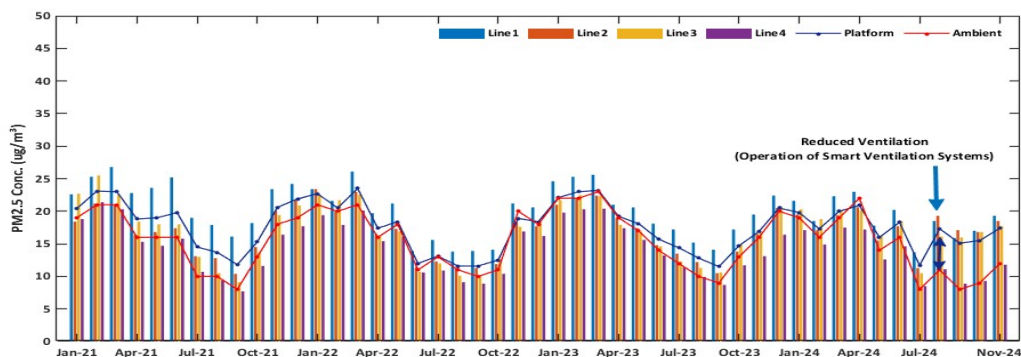


Fig. 4. Monthly average PM-2.5 concentrations in underground station platforms and ambient air over 4 years(2021 - 2024).

Table 4. Seasonal PM-2.5 average concentrations and number of times exceeding the standard

		Season							
		Spring		Summer		Autumn		Winter	
		Platform	Ambient	Platform	Ambient	Platform	Ambient	Platform	Ambient
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg.	19.8	18.5	14.5	11.7	15.2	12.2	21.2	19.9
	Std.	7.7	10.4	5.2	5.9	5.1	6.6	8.5	10.2
	Max.	69.2	105.0	35.0	36.0	35.4	39.0	58.3	64.0
	Min.	7.6	4.0	6.1	3.0	6.8	2.0	8.1	5.0
Meas. Days		368		368		364		361	
No. (Rate: %)	2021	177 (2.1)	57 (2.9)	88 (1.1)	0 (0.0)	21 (0.3)	31 (1.6)	60 (0.7)	116 (6.1)
	2022	45 (0.5)	113 (5.8)	7 (0.1)	1 (0.1)	22 (0.3)	20 (1.0)	211 (2.6)	168 (8.9)
	2023	131 (1.6)	161 (8.3)	3 (0.0)	0 (0.0)	19 (0.2)	1 (0.1)	217 (2.6)	141 (7.5)
	2024	63 (0.8)	91 (4.7)	4 (0.0)	16 (0.8)	11 (0.1)	0 (0.0)	69 (0.8)	107 (5.6)
	Sum	416 (1.2)	422 (5.5)	102 (0.3)	17 (0.2)	73 (0.2)	55 (0.7)	557 (1.7)	532 (7.0)

(Remark) 1. No.: Number of times exceeding the standard(Platform Std. = $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ambient Std. = $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

2. Number of PM-2.5 Monitors (Platform = 91, Ambient = 21)

봄철(3월 ~ 5월)은 승강장의 평균 농도가 $19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 외기 평균 농도 또한 $18.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 유지기준 초과 횟수는 승강장이 416회(1.2%), 외기가 422회(5.5%)로 겨울철 다음으로 높은 수준을 기록하였다. 이는 봄철에 주로 발생하는 황사와 대기 정체 현상으로 인한 외기 오염과 유동인구 수 증가로 인한 재비산 먼지가 복합적으로 영향을 미친 결과로 판단된다.

여름철(6월 ~ 8월)에는 승강장 평균 농도가 $14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았으며, 외기 평균 농도는 $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 유지기준 초과 횟수는 102회(0.3%), 외기가 17회(0.2%)로 다른 계절에 비해 현저히 적었다. 이는 여름철에 강수량이 많아 대기 중 미세먼지가 세정 효과에 의해 제거되고, 고온으로 인한 상승 기류가 활성화되어 지표면 부근의 오염물질이 대기 상층으로 분산되는 효과가 반영된 것으로 보인다.⁴⁾ 또한, 건조한 봄-겨울철과 달리 여름철에는 상대습도가 높아 바닥이나 벽면에 침착된 먼지가 재비산되는 현상이 줄어드는 점도 주요 원인으로 판단된다.

가을철(9월 ~ 11월)에는 승강장의 평균 농도가 $15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 외기 평균 농도가 $12.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났

으며, 유지기준 초과 횟수는 승강장이 73회(0.2%), 외기가 55회(0.7%)로 여름철보다 소폭 증가하였다.

겨울철(12월 ~ 2월)에는 승강장의 평균 농도가 $21.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 값을 기록하였으며, 외기 평균 농도는 $19.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 유지기준 초과 횟수는 승강장이 557회(1.7%), 외기가 532회(7.0%)로 다른 계절 대비 가장 빈번하게 초과하는 경향을 보였다. 이와 같은 겨울철 특성은 외기와 내부 요인이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 12월 ~ 1월 사이에는 난방 사용이 증가하며, 난방 연료의 연소로 인해 대기 중 미세먼지 배출량이 증가한다.⁵⁾ 또한, 지하역사 내부에서도 난방 기기의 사용이 많아지며, 이에 기인하여 발생하는 미세먼지가 승강장 내부 농도 상승에 영향을 미친 것으로 분석된다. 아울러, 겨울철 대기 환경 특성상 기온 역전 현상이 빈번하게 발생하여, 대기 중 오염물질이 상층으로 확산되지 못하고 지표면 부근에 갇히는 현상이 나타나며, 오염물질이 축적되며 유입되어 지하역사 실내 공기질에도 영향을 미친 것으로 보인다.⁶⁾

이와 같은 계절별 PM-2.5 농도 분포 특성은 계절별로 공기질 관리 전략이 달라져야 함을 시사한다. 특히,

겨울철과 봄철에는 외기 오염이 실내로 유입되는 것이 주요 원인으로 분석되므로, 급기부 필터의 성능을 강화하고 정기적인 교체 및 유지보수를 통해 외기 오염 물질의 실내 유입을 최소화해야 한다. 이와 함께, 외기 오염도가 높은 시기에는 급기량 조정과 필터 고효율화를 병행하여 내부 공기질을 안정적으로 유지할 수 있는 관리 방안을 마련해야 한다.

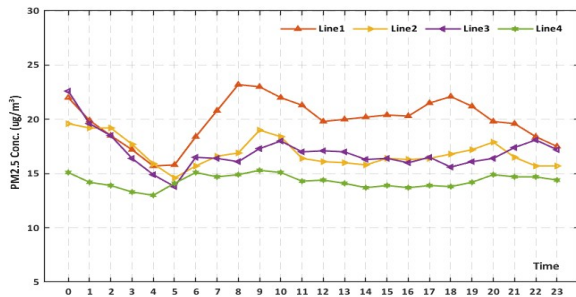


Fig. 5. Distribution of PM-2.5 concentrations on the Busan Subway Platform by hour for 4 years(2021 - 2024).

Fig. 5는 2021년 1월부터 2024년 11월까지의 시간 평균 농도를 바탕으로 호선별 PM-2.5 농도의 시간대별 변화를 나타낸 것이다. 운행 시간(5시 ~ 24시) 동안 1호선은 8시 ~ 9시에 최고점($23.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 기록한 후 농도가 감소하였으나, 17시부터 다시 상승하기 시작해 18시 ~ 19시에 두 번째 정점($22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 나타낸 뒤 다시 감소하는 양상을 보였다. 2호선 역시 1호선과 유사하게 출·퇴근 시간대인 9시 ~ 10시($19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 20시 ~ 21시($17.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 높은 농도가 관측되었다. 선행연구에 따르면 열차풍은 열차 운행 시 전두부의 양압과 후미부의 부압의 발생으로 난류가 형성된다고 알려져 있다. 압력변동에 따른 공기유동으로 본선 터널의 오염물질 이동을 수반하며, 미세농도 변화 패턴이 열차 운행빈도 패턴과 유사함을 검증했다.^{7),8)} 또한,

이화학적 분석 결과 역사 내 금속성 미세먼지가 주로 발생해 대부분이 산화철 성분으로 규명된다고 보고되어 열차풍이 지하역사 실내공기질 매개체가 될 수 있다고 판단했다.⁹⁾ 이와 같은 연구결과를 토대로 부산시 도시철도가 출·퇴근 시간에 맞춰 배차간격이 단축되며 열차 운행 횟수가 증가하여 열차풍이 더 많이 유입되어 미세먼지 농도를 증가시키는 요인이기도 하였다. 1호선의 열차 운행 횟수는 1시간당 7회 ~ 10회에서 14회 ~ 15회로, 2호선은 1시간당 8회 ~ 9회에서 11회 ~ 13회로 증가하여 터널 내 고농도 미세먼지 유입 빈도 또한 높아져 농도가 상승한 것으로 판단된다.

3호선은 10시 ~ 11시($18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 22시 ~ 23시($18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 최대농도가 나타났으며, 3호선 중 심도가 깊은 역사(예: 만덕역, 배산역)에서 환기 설비의 운영이 종료되는 시간대인 22시 ~ 23시에 지속해서 높은 농도가 관측되었다. 이는 심도가 깊은 역사 특성상 자연적인 공기 순환이 부족하여 미세먼지 농도가 증가한 것으로 분석된다.¹⁰⁾

반면, 4호선은 최대농도가 9시 ~ 10시($15.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 관측되었으며, 다른 호선에 비해 시간대별 농도 변화 폭이 상대적으로 작았다. 전체적으로 4호선은 가장 낮은 농도 수준을 유지했는데, 이는 4호선이 부산 도시철도 노선 중 비교적 짧은 노선으로 다른 호선에 비해 환기 효율이 높고, 열차 운행 횟수와 승객수가 적어 미세먼지 발생 및 재비산이 상대적으로 적었기 때문으로 판단된다.

또한, 비운행 시간(0시 ~ 5시)에는 환기 설비가 종료됨에 따라 초반에 PM-2.5 농도가 증가하였으나, 열차 운행이 완전히 종료되는 1시 ~ 5시에는 점차 감소하는 경향을 보였다. 5시 이후에는 환기 설비의 가동 재개와 열차 운행 시작으로 인해 터널 내부에 침착·축적된 PM-2.5가 재비산 및 재부상하며 농도가 다시 상승하는 양상이 나타났다.^{1),2)}

Table 5. Number of Stations by Platform structure

	Screen Door Type		Track Type		Platform Type	
	Full	Half	Concrete	Gravel	Lateral	Island
Line 1	13	19	6	26	28	4
Line 2	4	33	37	-	33	4
Line 3	13	-	13	-	9	4
Line 4	9	-	9	-	6	3
Sum	39	52	65	26	76	15

(Remark) Island Platform: A platform shared by trains in both directions, designed like an island floating between the tracks.(↔ Lateral Platform)

3.2. 시설별 농도 특성

부산지역 지하역사의 PM-2.5 농도를 승강장 구조별로 분석한 결과(Table 6), 스크린도어 유형, 궤도 구조 유형, 승강장 구조 유형에 따라 농도 차이가 뚜렷하게 나타났다. 승강장 구조에 따른 역사의 개수는 Table 5에 제시하였다.

스크린도어 유형별로는 밀폐형 스크린도어가 설치된 승강장이 반밀폐형 스크린도어가 설치된 승강장보다 PM-2.5 농도가 낮게 측정되었다. 2021년부터 2023년까지 3년간의 연평균 데이터를 기준으로, 밀폐형 스크린도어가 설치된 1호선 승강장의 평균 농도는 $17.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 근처 대기측정소에서 측정된 외기 PM-2.5 평균 농도인 $17.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 유사한 수준을 보여준다. 반면, 반밀폐형 스크린도어가 설치된 승강장의 평균 농도는 $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 밀폐형 스크린도어 승강장에 비해 약 21% 높은 것으로 나타났으며, 근처 외기 PM-2.5 평균 농도 ($15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 30% 높은 수준을 기록하였다.

2호선의 경우, 밀폐형 스크린도어가 설치된 승강장의 평균 농도는 $16.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 외기 농도($16.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 유사한 수준으로 나타났으며, 반밀폐형 스크

린도어가 설치된 승강장은 $16.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 외기 농도 ($15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 5% 높은 수준을 보였다. 이러한 결과는 밀폐형 스크린도어는 내부 오염원을 효과적으로 차단하는데 기여하는 반면, 반밀폐형 스크린도어는 구조적 특성상 열차풍에 의해 터널 내부의 미세먼지가 밀폐형 스크린도어에 비해 승강장으로 더 쉽게 유입된다는 점을 시사한다.^{11),12)} 특히 1호선에서 농도 차이가 두드러진 이유는 2호선의 경우 전 구간이 콘크리트 도상으로 구성된 반면, 1호선은 다대포해수욕장역에서 동매역 구간의 6개 역사만 콘크리트 도상으로 되어 있고, 나머지 구간은 자갈 도상으로 이루어져 있어 터널 내부 미세먼지의 영향을 더욱 크게 받았기 때문으로 생각되었다.

궤도구조에 따른 PM-2.5 농도는 콘크리트 도상과 자갈 도상 간 유의미한 차이를 보였다. 1호선에서 자갈 도상의 평균 농도($20.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 콘크리트 도상의 평균 농도($18.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 약 10% 높게 측정되었다. 콘크리트 도상은 외기 평균 농도($19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 유사한 수준을 보였으나, 자갈 도상의 경우 외기 평균 농도 ($15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 16% 높은 값으로 나타났다. 이러한 차이는 자갈 도상에서 자갈 간 마찰로 인해

Table 6. Average PM-2.5 Concentration by Platform Structure(2021 - 2023)

		PM-2.5 Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
		Screen Door Type		Track Type		Platform Type	
		Full	Half	Concrete	Gravel	Lateral	Island
Line 1	2021	18.2	24.7	19.6	22.7	20.7	31.8
	2022	17.0	19.9	18.2	18.9	17.6	26.6
	2023	17.5	21.9	18.3	20.5	18.6	30.5
Line 2	2021	15.8	17.2	17.0	-	17.2	15.2
	2022	15.9	16.2	16.2	-	16.2	16.1
	2023	17.9	16.9	17.0	-	16.9	17.4
Line 3	2021	17.6	-	17.6	-	17.7	18.1
	2022	16.0	-	16.0	-	16.0	16.2
	2023	16.9	-	16.9	-	17.2	16.6
Line 4	2021	14.9	-	14.9	-	15.5	13.9
	2022	14.3	-	14.3	-	14.6	13.7
	2023	14.8	-	14.8	-	14.8	14.8
Avg.		16.6	18.7	16.6	20.7	17.5	19.4

발생하는 석분의 영향이 주요 요인으로 판단된다.¹³⁾

승강장 구조 유형에 따라서도 PM-2.5 평균 농도의 차이가 관찰되었으며, 섬식 승강장이 상대식 승강장보다 더 높은 농도로 측정되었다. 섬식 승강장은 양방향 열차가 하나의 승강장을 공유하며, 승강장이 선로 사이에 위치하는 구조이다. 이러한 구조적 특성으로 인해 열차의 양방향 운행으로 공기 흐름이 복잡해지고, 열차풍의 영향을 받아 오염물질 확산이 증가하는 것으로 해석된다.¹⁴⁾ 반면, 상대식 승강장은 선로 양쪽에 각각의 승강장이 위치하며, 열차 운행 방향별로 승강장이 분리된 구조로, 열차와 승객 활동이 상대적으로 분리가 원활하고, 한 방향의 공기 흐름이 유지됨으로써 환기 효율이 높은 특징을 보인다. 따라서 상대식 승강장은 구조적 특성으로 인해 섬식 승강장보다 PM-2.5 농도가 낮은 결과를 나타내었다. 승강장의 구조에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 평균농도는 Table 6에서 나타난 바와 같이 다른 호선에 비해 1호선에서 섬식 승강장($29.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 상대식 승강장($19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 간의 농도 차이가 특히 크게 나타났다. 이는 1호선의 섬식 승강장이 모두 반밀폐형 스크린도어 구조로 되어 있어, 양방향 열차풍에 의한 공기 흐름의 영향이 더욱 크게 작용한 결과로 판단되었다.¹⁵⁾

3.3. 기상요소에 따른 PM-2.5 농도 분포

지하역사의 PM-2.5 농도는 내부 미세먼지 발생원에 의한 영향뿐만 아니라 환기설비 운용 및 승객에 의한 운반 등으로 외기로부터 유입되는 등 복합적으로 영향을 받을 수 있다.⁸⁾ Table 7은 지하역사의 2021년부터 2023년에 걸쳐 측정한 PM-2.5 농도를 기상청으로부터 수집한 기온, 상대습도, 풍속 등 주요 기상요소와 비교하여 상관성을 분석한 결과이다.

피어슨 상관분석을 통해 승강장 PM-2.5 농도와 외기 PM-2.5 농도, 기상 요소 간의 상관관계를 분석한 결과, 외기 PM-2.5 농도(Ambient)와의 상관관계수가 $0.978(p < 0.01)$ 로 매우 유의한 상관관계를 나타내어, 외부 대기질이 지하역사의 PM-2.5 농도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 생각되었다. 한편 기온(Temp.)과 승강장 PM-2.5 농도 간 상관관계수는 $-0.295(p < 0.01)$ 로 음의 상관관계를 나타냈으며, 외기 온도가 상승할수록 지하역사의 PM-2.5 농도가 감소하는 경향을 의미한다. 상대습도(RH)와의 상관관계수는 $-0.256(p < 0.01)$ 으로 기온과 유사하게 음의 상관관계를 보였다. 상대습도가 높아지면 입자상 물질의 응집이 촉진되어 미세먼지가 침강하거나 지하역사 터널 내 침강된 미세먼지가 높은 습도로 인해 재비산되는 것이 방지되어 이러한 경향이 관찰된 것으로 보인다. 강우량(rainfall)과도 상관관계수가 $-0.233(p < 0.01)$ 으로 음의 상관관계를 나타냈으며, 강우량이 증가할수록 외부 대기질이 개선되어 지하역사 내 농도도 감소하는 결과를 보였다. 이는 강우가 대기 중 미세먼지를 씻어내는 정화 효과를 가져오는 것으로 해석된다.⁴⁾ 반면, 풍속(wind)과의 상관관계수는 $-0.127(p < 0.01)$ 으로 다른 기상요소에 비해 낮은 상관관계로 나타났다. 그러나 외부 풍속이 높을수록 자연 환기 효과가 증가하여 지하역사 내 PM-2.5 농도가 낮아지는 경향은 확인되었다.

이상의 결과는 지하역사 PM-2.5 농도가 외부 대기질과 밀접하게 연관되어 있으며, 온도, 습도, 강우량, 풍속 등의 기상요소가 농도 변화에 영향을 미친다는 점을 보여준다. 특히 외부 대기질 개선이 지하역사 공기질 관리에 중요한 요인임을 강조하며, 계절 및 기상 조건에 따른 맞춤형 환기 및 공기질 개선 방안의 필요성을 시사한다.

Table 7. Correlations between Temperature(Temp.), Relative Humidity(RH), Rainfall, Wind and the concentration of PM-2.5 measured at Platform, Ambient

	PM-2.5 at Platform	PM-2.5 at Ambient	Temp.	RH	Rainfall	Wind
PM-2.5 at Platform	1.000					
PM-2.5 at Ambient	$0.978^{\text{a)}$	1.000				
Temp.	$-0.295^{\text{a)}$	$-0.275^{\text{a)}$	1.000			
RH	$-0.256^{\text{a)}$	$-0.270^{\text{a)}$	$0.689^{\text{a)}$	1.000		
Rainfall	$-0.233^{\text{a)}$	$-0.267^{\text{a)}$	$0.154^{\text{a)}$	$0.392^{\text{a)}$	1.000	
Wind	$-0.127^{\text{a)}$	$-0.126^{\text{a)}$	-0.040	0.058	$0.125^{\text{b)}$	1.000

(Remark) a)p-value < 0.01 by Pearson correlation.

b)p-value < 0.05 by Pearson correlation.

3.4. 외기에 따른 PM-2.5 농도 분포

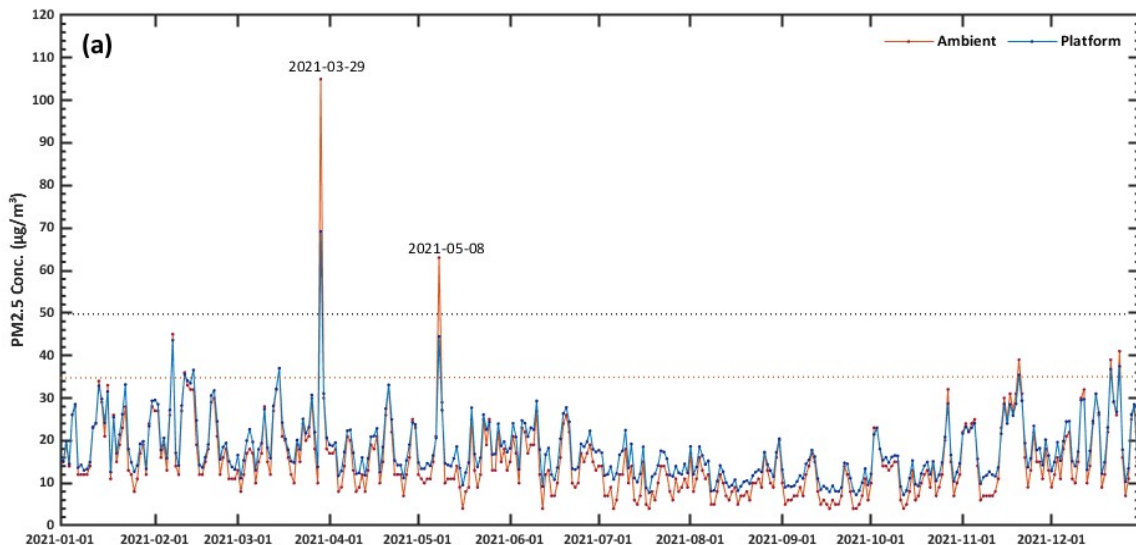
본 연구는 2021년부터 2024년까지의 지하역사 승강장과 외기의 일평균 PM-2.5 농도 데이터를 분석하여, 외부 대기질 변화가 승강장 실내공기질에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 6은 2021년 1월부터 2024년 11월까지의 지하역사 승강장에서 측정된 PM-2.5 일평균농도 자료와 주변 대기오염자동측정망에서 측정된 PM-2.5 일평균농도 자료를 비교한 결과를 나타내었다. 약 4년간의 데이터를 분석한 결과, 승강장의 PM-2.5 농도 및 변화 추이는 외기 농도와 거의 일치하는 경향을 보였다. 2021년도의 경우(Fig. 6 (a)), 승강장의 PM-2.5 농도는 대체로 외기보다 높은 수준임을 확인할 수 있었다. 그러나 3월 29일, 5월 8일과 같이 대기의 초미세먼지 농도가 급격히 상승한 경우에는 외기 농도가 승강장을 초과하는 역전 현상이 관찰되었다. 이는 황사나 대기정체로 인한 초미세먼지 주의보 발령과 같은 외부 대기질 악화 상황에서 승강장의 환기시스템이 미세먼지 일부를 제거하는 역할과 오염된 외부 공기의 유입을 억제하여, 내부 공기 흐름이 상대적으로 안정적이었기 때문으로 판단되었다.¹⁶⁾ 2022년(Fig. 6 (b))과 2023년(Fig. 6 (c))의 분석 결과에서도 2021년과 마찬가지로 승강장과 외기의 농도가 비슷한 추이를 보였다. 평상시에는 승강장의 농도가 외기보다 높았으나, 외기 농도가 고농도로 관측된 날에는 농도가 역전되는 현상이 지속적으로 확인되었다. 이는 외기 농도 변화가 승강장 실내공기질에 직접적인 영향을 미치며, 고농도 외기오염 상황에서는 환기시스템의 필터링 효과로 인해 승강장의 PM-2.5 농도가 상대적으로

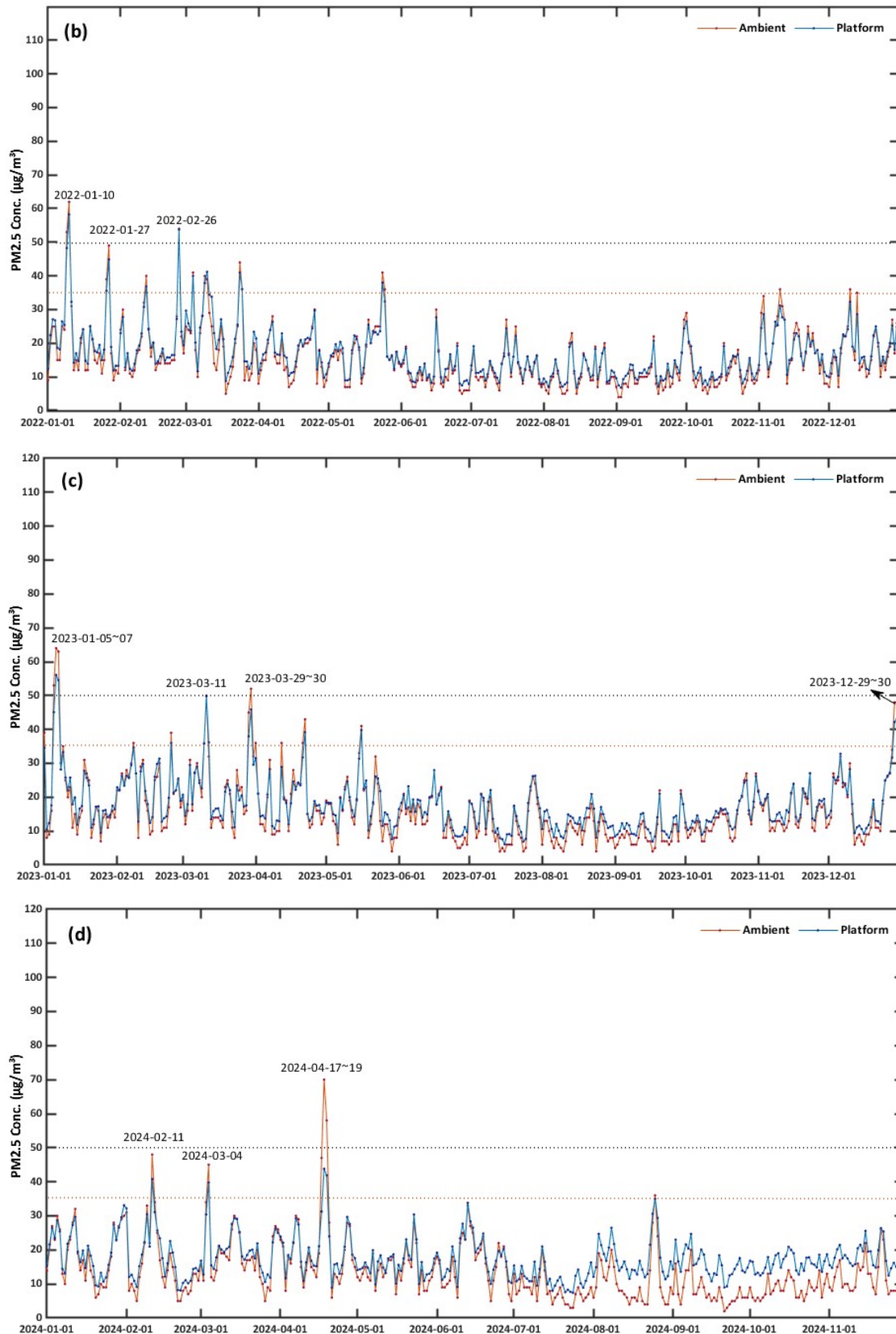
로 낮게 유지될 수 있음을 시사한다.

2024년의 경우(Fig. 6 (d)), 7월 이후 스마트 환기 설비 적용으로 환기량이 감소함에 따라 승강장의 농도와 외기 농도 간의 차이가 크게 증가한 것으로 나타났다. 환기량 감소 이전에는 승강장과 외기 농도가 유사한 추이를 보였으나, 이후 승강장 농도가 외기보다 현저히 높은 상태를 유지하였다. 이는 환기량이 감소하여 실내오염물질이 배출되지 못하고 내부에 축적되었기 때문으로 분석된다. 스마트 환기 설비 도입 이후, 실내공기질 개선을 위한 효율적 운영 방안이 필요하다는 점이 강조된다.

4년간의 장기적 추세(Fig. 6 (e))를 종합적으로 살펴보면, 승강장 PM-2.5 농도는 대부분 외기보다 높은 수준으로 측정되었다. 이는 승강장 내 공기 흐름의 제한과 내부 오염원 발생과 외부 오염물질 유입으로 미세먼지 농도가 가중되는 것으로 판단되었다. 다만, 황사나 대기 정체로 인해 초미세먼지 주의보 및 경보가 발령된 날과 같이 외기 농도가 높은 시기에는 환기시스템 및 지하역사 내에 설치되어 있는 공기청정기의 정화작용으로 외기 농도보다 낮은 농도를 나타내었다.

승강장과 외기의 농도 비교를 통해 지하역사 승강장의 PM-2.5 농도가 외기 농도에 의해 영향을 받는 특성과 환기 설비 운영의 중요성을 강조하였다. 향후 연구에서는 스마트 환기 설비 도입 이후 장기적 데이터를 기반으로 외기와 승강장 농도를 비교하여, 환기 설비의 효율적 운영 방안을 제시할 필요가 있다.





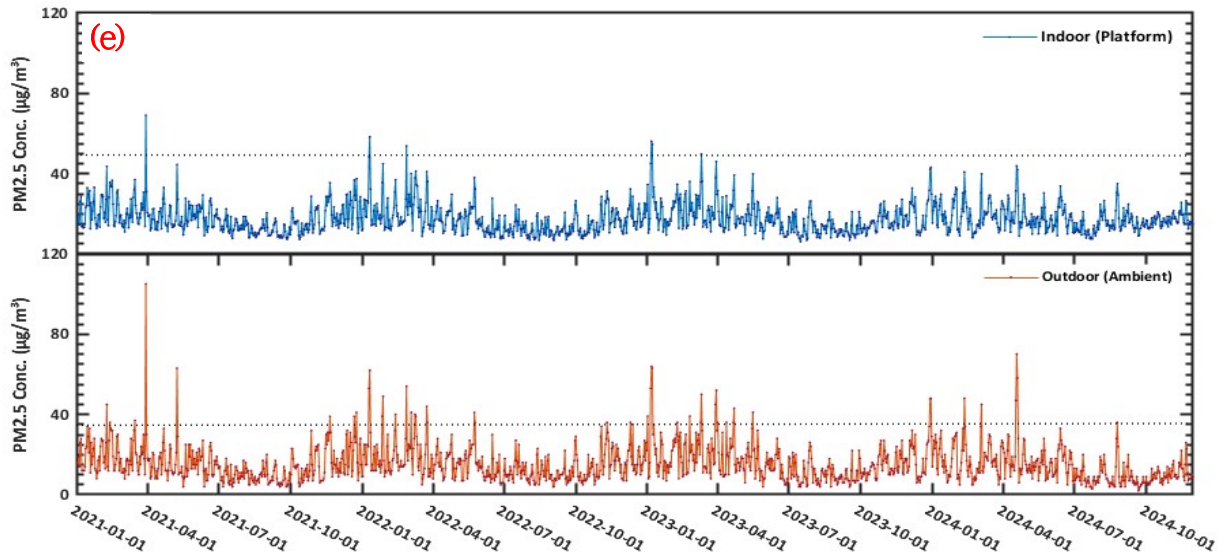


Fig. 6. Daily Average PM-2.5 Concentrations at Subway Platforms and Ambient Air(2021 - 2024).

3.5. 지하역사 실내공기질 평가기준 도출

현재 외부 대기질 평가는 다양한 국가 및 지역에서 대기 오염 물질의 농도를 종합적으로 분석하여 대기질 수준을 직관적으로 파악할 수 있도록 설계된 지표를 통해 이루어지고 있다. 국내에서는 환경부가 운영하는 에어코리아(AirKorea)에서 통합대기환경지수(CAI, Comprehensive Air Quality Index)를 제공하고 있으며, 해외의 경우 홍콩의 대기질 건강지수(AQHI, Air Quality Health Index), 미국 환경청의 대기질 지수(AQI, Air Quality Index)와 같이 개별 오염물질 농도를 기반으로 종합적인 대기질 수준을 제공하는 평가지표가 마련되어 있다. 이러한 지표들은 대기질의 상태를 직관적으로 이해할 수 있게 할 뿐만 아니라, 대기오염에 따른 위험 수준에 따라 예·경보를 발령하는 데에도 활용된다.

반면, 실내공기질의 경우 현재까지 별도의 평가지표는 마련되어 있지 않으며, 유지·권고기준에 의존하는 상황이다. 지하역사의 실내공기질 유지·권고기준은

Table 8에 제시하였다. 국내 실내공기질 관리기준은 「실내공기질 관리법」에 따라 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 포름알데히드(HCHO) 등 개별 오염물질 농도를 규정하고 있지만, 이를 종합적으로 평가하거나 직관적으로 공기질 수준을 나타내는 지표는 부재하다. 따라서, 실내공기질 관리자가 공기질 수준을 쉽게 이해하고 신속히 적절한 조치를 취할 수 있도록 실내공기질에 대한 통합 평가지표를 개발할 필요성이 대두되고 있다.

특히, 지하역사는 밀폐된 구조로 인해 공기 흐름이 제한적이며, 터널 내 발생하는 미세먼지와 같은 내부 오염원이 실내공기질에 큰 영향을 미친다.⁸⁾ 외부 대기질과 달리 지하역사의 실내공기질은 환기시스템, 승객 활동, 스크린도어 설치 여부 등 다양한 내부요인에 의해 결정되며, 이는 일반적인 대기질 평가지표로 평가하기 어려운 특성을 가진다. 따라서, 지하역사와 같은 특수 환경을 고려한 실내공기질 평가지표를 개발하는 것은 실내공기질 관리의 효율성을 높이는 데 필수적

Table 8. Indoor air quality maintenance and recommended Standards for underground stations according to the indoor air quality management act

	Maintenance Std.					Recommended Std.		
	PM-10 (µg/m ³)	PM-2.5 (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	HCHO (µg/m ³)	CO (ppm)	NO ₂ (ppm)	Rn (Bq/m ³)	TVOC (µg/m ³)
Underground station platform	100 (100)	50 (50)	1,000 (1,000)	100 (90)	10 (7)	0.1	148	500

(Remark) (): Maintenance standards according to Busan city ordinance

이다.

지표 개발 과정에서는 지하역사에서 주로 발생하는 주요 오염물질을 기준으로 하여, 농도 수준에 따른 등급 분류와 건강 영향 평가를 반영해야 한다. 예를 들어, 외부 대기질지수(CAI)와 유사하게 색상과 등급으로 실내공기질 상태를 직관적으로 나타내고, 이에 따른 권고 조치를 제안하는 체계를 마련할 수 있다. 이러한 지표는 실내공기질 관리자가 실시간으로 공기질 수준을 확인하고, 환기시스템 강화, 청소 빈도 증가, 오염원 차단 등의 조치를 신속히 취할 수 있도록 돕는다.

결론적으로, 실내공기질 평가지표는 지하역사와 같은 밀폐된 환경에서 공기질 관리를 효과적으로 수행하기 위한 핵심 도구로 기능할 수 있다. 이를 통해 실내 공기질 수준을 체계적으로 평가하고, 개선 방안을 실질적으로 실행할 수 있는 기반을 제공할 수 있다.

3.6 절대적 기준치 설정

지하역사 승강장의 실내공기질 평가지표를 설정하기 위해서는 실내 환경의 특성과 이용객의 건강영향을 고려한 절대적 기준치를 정의해야 한다. 이러한 기준은 기존 국내외 실내외 공기질 기준을 참고하되 지하역사라는 특수한 환경 조건에 적합하도록 설정되어야 한다.

Table 9와 Table 10에 실내공기질 관련 국내·외 법규, 지표 등에서 규정하고 있는 3개 오염물질 농도 기준치를 나타내었다.

먼저 대기 중 농도의 국내외 평가기준을 살펴보면 미국 환경청(EPA, Environmental Protection Agency)은 국가대기환경기준(NAAQS, National Ambient Air Quality Standards)을 통해 건강 및 환경에 영향을 미치는 7가지 주요 오염물질(PM-10,

PM-2.5, SO₂, O₃, NO₂, CO, Pb)의 농도를 규제하고 있다(EPA, 2006). EPA는 이 기준을 바탕으로 대기질 지수(AQI)를 실외 대기질 평가에 사용하고 있으며, PM-10, PM-2.5, SO₂, O₃, NO₂, CO의 농도를 측정하여 대기질 상태를 평가한다. 홍콩에서는 대기질 건강 지수(AQHI)를 사용하여 대기질 상태를 평가했다. AQHI는 오염물질의 단기 건강 영향을 강조하며, PM-10, PM-2.5, SO₂, O₃, NO₂을 기반으로 산출되었다. 싱가포르 국립환경청은 오염물질 기준 지수(PSI, Pollutant Standards Index)를 사용하여 평가한다. 위 실외 대기 평가기준들은 PM-10, PM-2.5는 24시간 평균, 나머지 물질들은 단기 노출 영향을 고려하여 기준을 설정하였다(SO₂, NO₂: 1시간 평균농도, O₃, CO: 8시간 평균 농도). 말레이시아는 대기오염지수(API, Air Pollution Index)를 사용하며, PM-10, PM-2.5, SO₂, O₃, NO₂, CO를 평가한다. 국내에서는 통합대기 지수(CAI)를 사용하여 대기오염도 측정치를 사람들이 쉽게 알 수 있도록 하고 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위해 개발한 대기오염도 표현방식을 사용한다. 사람들의 쉬운 인식을 위해 등급별 색상을 지정하였으며, 지수에 포함되는 대상오염물질은 대기 중 PM-10, PM-2.5(예측이동평균), SO₂, O₃, NO₂, CO(1시간 평균) 이다.

Table 9. IAQ code, Certification, Guideline and Index

	Name	Country	Type
A	Enforcement Decree of the IAQ Control Act	Korea	Code
B	ASHRAE 62.1	USA	Index
C	IAQ Certification Scheme	Hong Kong	Certification
D	EU INDEX Project	European Union	Index
E	LEED Indoor Air Quality	USA	Certification
F	Indoor Air Quality Guideline	Singapore	Guideline
G	Indoor Air Quality Index	Taiwan	Index
H	Indoor Environmental Index	Malaysia	Index

Table 10. Comparative references of IAQ code, Certification, Guideline, and Index

	Class	PM-10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	Application/IAQ status
A (Korea)		100	50	1,000	For general population
B (USA)				1,000	
C (Hong Kong)	1	20		800	Excellent
	2	100		1,000	Good
D (European Union)		50	25		
E (USA)		25	12	800	
F (Singapore)		150		1,000	
G (Taiwan)	1	15	10	350	Little or no risk
	2	60	45	600	Acceptable
	3	150	100	1,000	Health effect for sensitive population
	4	350	135	5,000	Health effect for each individual
	5	420	250	30,000	More serious health effect
	6	600	500	40,000	Emergency condition
H (Malaysia)	1	20		600	Good
	2	150		1,000	Moderate
	3	180		1,500	Unhealthy
	4	600		5,000	Hazardous

국의 실내공기질 기준은 국가 및 기관별로 차이를 보이며, 실내 환경의 쾌적성과 건강 보호를 위해 다양한 방식으로 제시되고 있다.

미국의 공조냉동기술인협회(ASHRAE, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers)[B]는 난방, 냉방 및 공조기 설 향상을 위한 기구로 실내 이산화탄소 농도를 1,000 ppm 미만으로 유지할 것을 권고하고 있다. 이는 실내 공기질 개선과 환기 시스템 효율성을 높이기 위한 중요한 지침으로 활용되고 있다. 홍콩 특별행정구의 실내공기질 관리그룹(IAQMG, The Government of the HongKong Special Administrative Region Indoor Air Quality Management Group)[C]은 미국 EPA 및 WHO(World Health Organization)의 지침을 참고하여 실내공기질을 두 가지 등급으로 구분하였다. 'Excellent' 등급은 $\text{PM-10} \leq 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{CO}_2 \leq 800 \text{ ppm}$ 으로 설정되었으며, 'Good' 등급은 $\text{PM-10} \leq 100$

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{CO}_2 \leq 1,000 \text{ ppm}$ 으로 설정되었다. 이 기준은 8시간 평균 농도를 기반으로 하며, 민감군과 일반 대중의 건강을 보호하기 위한 지침으로 제시되었다.¹⁷⁾ EU INDEX Project[D]는 유럽연합 환경청(EEA, European Environment Agency)에서 실내공기질 관련 오염물질의 건강 위험성을 체계적으로 평가하고, 이를 바탕으로 정책 개발과 기준 설정에 필요한 과학적 근거를 제공하였다.¹⁸⁾ 미국 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)의 Indoor Air Quality[E]는 LEED 인증 프로그램 내에서 건물의 실내공기질을 평가하고 개선하는 데 중점을 둔 평가 항목이다. LEED IAQ는 친환경 건물 설계와 운영을 통해 실내환경의 건강과 쾌적성을 보장하기 위한 기준을 제공한다. 싱가포르의 업무시설에 대한 실내공기질 기준 [F]으로 PM-10 등 4개 물질에 대한 권고기준과 CO₂ 등 4개 물질에 대한 유지기준을 단일 수치로 제시하고 있다.¹⁹⁾ 대만[G]은 실내공기질 지표개발을 위해 11가

지 오염물질에 대한 6단계 등급 기준을 설정하였다.²⁰⁾ 말레이시아 산업안전보건부(DOSH, Department of Occupational Safety and Health in Malaysia)[H]는 미국 EPA, 미국 OSHA(Occupational Safety and Health Administration), WHO 등의 지침을 참고하여 실내공기질 4단계 등급 기준을 제시하였다. 이 기준은 8시간 평균 농도를 바탕으로 규정되었다.²¹⁾

국내 「실내공기질 관리법」은 PM-10, PM-2.5, CO₂, CO, HCHO 등 개별 오염물질의 유지 및 권고기준[A]을 제시하고 있다(Table 8).³⁾ 그러나 실외공기질 지표와 달리 실내 환경에 대한 종합적 평가지표는 부재한 상황이다. 이러한 한계를 해결하기 위해, 본 연구는 지하역사 실내공기질 지수(IAQI-P, Indoor Air Quality Index-Platform)를 국내외 기준을 참고하여 주요 오염물질을 기반으로 농도 수준을 6개 등급으로 평가해, 관리자가 실내공기질 상태를 직관적으로 파악하고, 적합한 개선 조치를 신속히 취할 수 있도록 돕는 것을 목표로 하였다.

국가별 기준을 분석한 결과, PM-2.5와 PM-10의 기준은 국가 및 기관별로 다소 차이가 있었다(Table 10). 오염물질별로 살펴보면, PM-10에 대해서는 일반인 대상 100 µg/m³ 또는 150 µg/m³, 민감군 대상 50 µg/m³ ~ 60 µg/m³, 우수한 수준으로 15 µg/m³ ~ 50 µg/m³ 정도, PM-2.5에 대해서는 일반인 45 µg/m³ ~ 50 µg/m³, 민감군 35 µg/m³ 우수한 수준으로 10µg/m³ 정도의 기준치가 제시되고 있다. CO₂의 경우 일반 대중 및 민감군 900 ppm ~ 1000 ppm, 우수한 수준으로 600 ppm ~ 800 ppm 범위의 기준치가 제시되었다.

본 연구는 불특정 다수가 사용하는 공간의 실내공기질을 대상으로 하므로, PM-2.5와 PM-10의 경우 국내 실내공기질 관리법, 미국 EPA 가이드라인, WHO 기준을 참고하며, 건강에 미치는 영향을 고려하여 실내에서는 외부 기준보다 강화된 기준을 적용하였다. 이산화탄소는 ASHRAE, 홍콩 IAQMG 우수 등급을 기준으로

로 환기 수준을 나타내는 주요 지표로 활용하며, 이에 따라, 주요 오염물질에 대한 절대적 기준치는 Table 11과 같이 설정하였다.

3.7 상대적 기준치 설정

실내공기 오염물질 농도의 실내외 비율은 외부 오염물질이 실내로 유입되어 미치는 영향과 실내 오염원에 의한 영향을 정량화할 수 있는 수단으로 널리 이용되고 있다.^{22),23)} 본 연구에서도 지하역사 실내공기질의 상대적 기준치를 설정하기 위해 외부 대기질과의 비교 평가 방식(Indoor/Outdoor Ratio, I/O Ratio), 유동 인구와의 상관성을 적용하여 주요 오염물질(PM-2.5, PM-10, CO₂)의 관리 기준을 도출하였다. 특히, PM-2.5와 PM-10은 외부 대기질 대비 실내 농도의 변화 패턴을 I/O Ratio를 통해 평가하였으며, CO₂는 승하차 인원 및 유동 인구와의 상관성을 분석하여 환기 효율 개선 방안을 도출하였다.

PM-2.5와 PM-10의 경우, I/O Ratio가 0.9 이하일 때 실내공기질 관리 등급은 ‘ 좋음(Good)’으로 1.0을 초과할 경우 ‘주의(Caution)’로 평가하였다. 이는 I/O ratio가 1.0에 가까울 때는 외기의 영향을 많이 받으며, 1.0을 초과한 경우는 환기 효율이 낮아지거나 내부 오염물질 배출이 증가한 상태로, 환기설비 강화를 필요로 하는 상태를 의미한다. 부산교통공사에서 2024년 7월 22일부터 스마트 환기 설비를 적용하여 환기시간을 단축시킨 사례를 분석한 결과, 환기시간이 단축된 이후 전 호선의 PM-2.5의 I/O Ratio가 큰 폭으로 증가한 것을 확인하였다(Fig. 7). 이는 환기시간 감소가 내부 오염물질 농도에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, I/O Ratio는 실내공기질 관리의 핵심 지표로 작용할 수 있음을 보여준다.

CO₂는 지하역사에서 인체 호흡에 의해 주로 발생하므로, 유동 인구와 밀접한 상관관계를 가진다.²⁴⁾ 2024년 1월부터 10월까지 10개월간 시간 평균 승하차 인원

Table 11. Indoor Air Quality Index for Platforms(IAQI-P) Standards in Subway Stations

Grade	Description	PM-10	PM-2.5	CO ₂
Good	No health impact	≤ 30	≤ 15	≤ 800
Moderate	Caution for sensitive groups	31 - 100	16 - 35	801 - 1,000
Caution	Harmful to health	101 - 150	36 - 50	1,001 - 1,200
Unhealthy	Risk of health deterioration	151 - 200	51 - 75	1,201 - 1,500
Very Unhealthy	Serious health effects	201 - 300	76 - 100	1,501 - 2,000
Hazardous	Critical health risk	> 300	> 100	> 2,000

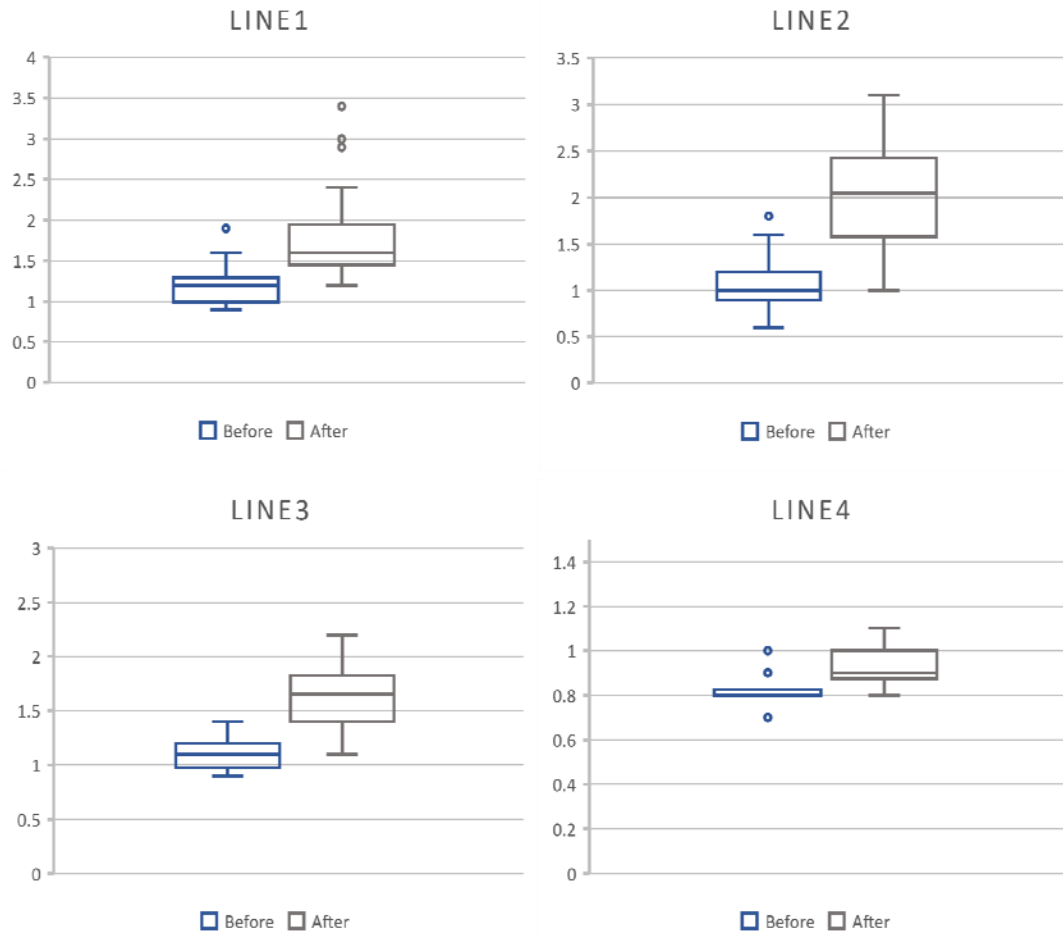


Fig 7. Comparison of I/O ratio by subway line before and after smart ventilation system operation (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

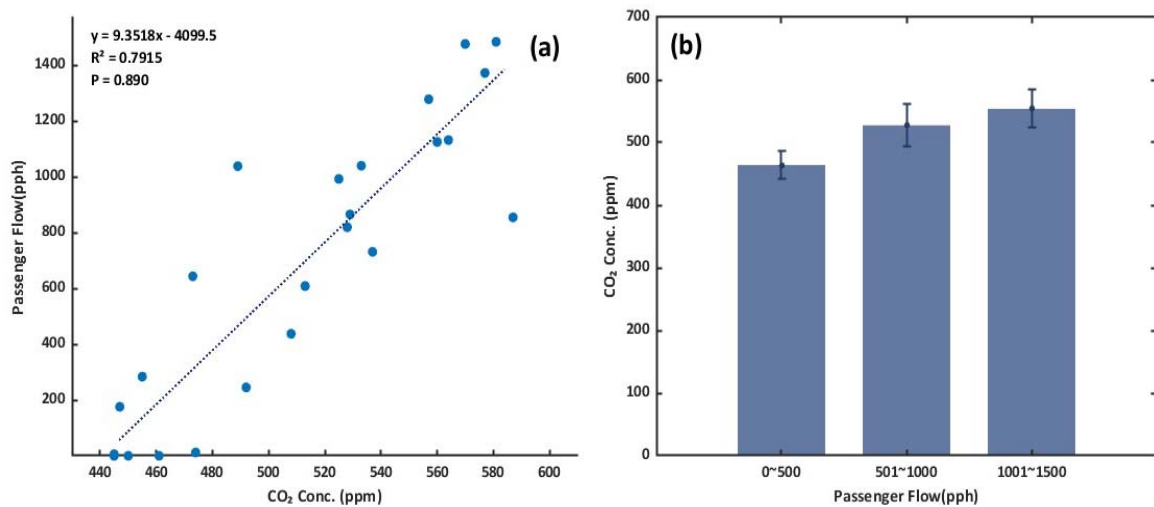


Fig. 8. (a) Correlation between CO₂ concentration and passenger flow (pph: Persons/hr), (b) Average CO₂ concentration by passenger number groups.

과 CO₂ 농도의 상관성을 분석한 결과, 유동 인구 증가에 따라 CO₂ 농도가 선형적으로 증가하는 경향이 확인되었으며 매우 유의미한 상관관계를 가짐을 알 수 있었다(Fig. 8(a)). 유동 인구를 0명 ~ 500명, 501명 ~ 1,000명, 1,000명 이상으로 구분하여 CO₂ 평균 농도를 비교한 결과, 인구 증가에 따라 CO₂ 농도는 각각 464 ppm, 527 ppm, 554 ppm으로 유의미한 차이를 나타내었다(Fig. 8(b)). 이는 유동인구가 많은 특정 시간대에 따라 맞춤형 환기 관리가 필요함을 나타낸다.

본 연구를 통해 I/O Ratio와 승하차 인원수를 활용한 지하역사 실내공기질의 상대적 기준치를 설정하였으며, 동적이고 실용적인 공기질 평가 체계를 제안하였다. PM-2.5와 PM-10은 I/O Ratio를 기준으로, CO₂는 승하차 인원과의 상관성을 기반으로 맞춤형 환기 관리 방안을 제시하며, 상대적 기준치를 설정하였다. 이러한 결과는 지하역사 내 공기질 관리의 효율성을 높이고, 승객과 근무자의 건강 보호를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 여럿 항목의 장기적 데이터를 기반으로 지역 및 역사별 특성을 반영한 기준치를 세분화할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 2021년부터 2024년까지 부산지역 지하역사의 실내공기질(PM-2.5 및 CO₂) 데이터를 분석하여, 지하역사의 실내공기질 특성과 이를 관리하기 위한 방안과 결론을 도출하였다.

1. PM-2.5 농도는 외부 대기질과 뚜렷한 상관성을 보이며, 외기 오염 상황이 실내 공기질에 직접적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 초미세먼지 주의보 발령일과 같은 고농도 외기 오염 상황에서는 외기 농도가 승강장 농도를 초과하는 역전 현상이 관찰되었으며, 이는 환기설비의 필터링 효과로 인해 발생한 것으로 판단된다. 반면, 평상시에는 승강장 PM-2.5 농도가 외기보다 높은 경향을 보였으며, 이는 터널 먼지, 승객에 의한 내부 발생 오염이 주된 기여 요인으로 작용했기 때문이다. 이러한 결과는 내부 오염원을 최소화하기 위한 정기적인 청소와 관리가 필수적임을 시사한다.
2. 2024년 7월 스마트 환기 설비 도입 이후, 환기량 감소로 인해 승강장 PM-2.5 농도가 외기와 큰 차이를 보이며 증가하는 현상이 확인되었다. 스마트 환기

설비 적용 이전에는 승강장과 외기의 PM-2.5 농도가 유사한 수준을 유지했으나, 이후 승강장의 PM-2.5 농도는 외기 대비 약 20% 이상 높아지는 경향이 나타났다. 이는 환기설비의 운영 전략이 환기량 감소에 따른 내부 공기질 저하를 보완하지 못했음을 의미하며, 적정 환기량 유지 및 오염물질 제거를 위한 설비 조정이 필요하다.

3. CO₂ 농도는 승하차 인원 및 유동 인구와 밀접한 상관관계를 나타냈으며, 유동 인구 증가에 따라 농도가 선형적으로 증가하였다. 특정 시간대와 구간에서 CO₂ 농도가 기준치를 초과하는 사례가 다수 관찰되었으며, 이는 승객 밀집도가 높은 구간에 추가적인 환기 방안을 마련해야 함을 시사한다.
 4. 승강장 구조적 특성에 따른 PM-2.5 농도 추이는 다음과 같이 나타났다. 밀폐형 스크린도어는 열차풍에 의해 터널 먼지가 유입되는 것을 효과적으로 차단하였으며, 승강장 PM-2.5 농도를 평균 15% ~ 20% 낮추는 효과를 보였다. 반면, 반밀폐형 스크린도어가 설치된 승강장은 터널 먼지가 유입되어 농도가 높게 나타났다. 궤도구조에서도 자갈 궤도가 콘크리트 궤도에 비해 PM-2.5 농도를 약 10% 높이는 원인으로 확인되었다. 이는 궤도에 있는 분쇄된 자갈 등으로 승강장에 유입되어 미세먼지 발생의 주요 요인으로 작용했기 때문이다. 따라서 지하역사 설계와 시공시에 오염물질 유입을 최소화하기 위한 구조적 개선이 필요함을 강조한다.
 5. 승강장 실내공기질의 절대적 기준치(IAQI-P)와 상대적 기준치(I/O ratio, 유동인구)를 제안하였다. IAQI-P는 승강장의 실내공기질 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 도구로 활용될 수 있으며, I/O Ratio는 실내·외 공기질 변화와 환기의 효율성, 실내 공기질 관리 등급을 평가하는 데 기여할 수 있다.
- 본 연구는 승강장 실내공기질 관리의 효율성을 높이고, 승객과 근무자의 건강을 보호하며, 공공 교통시설의 신뢰성을 강화하는 데 기여할 것이다. 향후 연구에서는 지역별 및 역사별 특성을 반영한 세부 공기질 관리 전략을 수립할 필요가 있다. 또한, 장기적 데이터 분석을 통해 계절적 요인, 외부 대기질 변화, 내부 오염원의 특성을 통합적으로 고려한 환기설비 개선 방안을 제시해야 한다. 이를 통해 지하역사의 공기질 개선뿐만 아니라 지속 가능한 도시교통환경을 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Park S. B. S. N., Lee T. J., Ko H. k., Bae S. J., Kim S. D., Park D. S., Sohn J. R. & Kim D. S., "Identification of PM-10 Chemical Characteristics and Sources and Estimation of their Contributions in a Seoul Metropolitan Subway Station", *J. Korean Soc. Atmos. Environ* **29**(1), pp.74~85(2013).
2. Jang S. K., "실내 공기오염물질이 인체 건강에 미치는 영향", *Air Cleaning Technology* **19**(1), pp.1~9(2006).
3. Ministry of Environment(ME). Enforcement Rules of the Indoor Air Quality Control Act(2020)
4. Tai, A. P., Mickley, L. J., & Jacob, D.J. "Correlations between fine particulate matter (PM-2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM-2.5 to climate change." *Atmos. Environ.* **44**, pp.3976~3984(2010).
5. Li T, Cao S, Fan D, Zhang Y, Wang B, Zhao X, et al. "Household concentrations and personal exposure of PM-2.5 among urban residents using different cooking fuels." *Sci. Total Environ.* **548-549**, pp.6~12(2016).
6. Jee J. B., Cho C. R., Kim S. H. & Song M. J., "An Analysis of Meteorological Characteristics for Fine Particles on the Korean Peninsula during Wintertime, 2015-2021." *J. Korean Soc. Atmos. Environ* **38**(3), pp.394~413(2022).
7. Jeon B. I., "Characteristics of PM10 and PM2.5 Concentrations at Subway Stations in Busan for 3 years (2015~2017)", *J. Environ. Sci. Int.* **28**(7), pp.581~594(2019).
8. Kwon S. B., Jeong W. T., Park D. S., Kim K. T., Cho K. H. "A multivariate study for characterizing particulate matter (PM-10, PM-2.5, and PM-1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea." *J. Hazard. Mater.* **297**, pp.295~303(2015).
9. Lee Y. I., Lee Y. C., Kim T. S., Choi J. S. & Park D. S. "Sources and Characteristics of Particulate Matter in Subway Tunnels in Seoul, Korea", *Int. J. Environ. Res. Public Health* **15**(11), pp.2534~2550(2018).
10. Jang Y. J., Lee H. S., Park D. S., "Experimental Study for the Capacity of Ordinary and Emergency Ventilation System in Deeply Underground Subway Station." *J. Korean Soc. Railw.* **15**(6), pp.579~587(2012).
11. Son Y. S., Salama A., Kim J. C., "The Effect of Platform Screen Doors on PM10 Levels in a Subway Station and a Trial to Reduce PM10 in Tunnels, Asian", *J. Atmos. Environ.* **7**, pp.38~47(2013).
12. Sohn J. R., Hung Y. R., Park H. H., Oh Y. H., Choi W. & Kim S. G., "The Removal Effect of Fine Particles Applied Platform Screen Door in Seoul Subway Station.", *J. Environ. Sanit. Eng.* **24**(4), pp.60~68(2009).
13. Ryu S. M. & Lee J. Y., "A study on the comparative analysis of air quality in tunnels according to road bed of underground section in subway tunnel (Master's thesis)", *University of Seoul, Seoul, Korea*(2017).
14. Jo J. K., Kim D. G., Kim S. K., Baek M. K. et al., "Evaluation on indoor air quality (IAQ) of subway station in Gyeonggi-do", *J. Odor Indoor Environ.* **20**(2), pp.121~129(2021).
15. Shin, T. G. , Kim, Y. D., "A Research study for wind environment of subway station", *J. Korean Soc. Railw.* **2005.05a**, pp.1~6(2005).
16. Park S. B., Yoo K. H., & Kim Y. S., "An Experiment on Field Air Quality Measurement of a Metal Filter for Ventilation in a Subway Station", *J. Soc. Air-Cond. Refrig. Eng. Korea*, pp.866~869(2018).
17. IAQ Management Group. A Guide on Indoor Air Quality Certification Scheme for Offices and Public Places(2019).
18. European Comission, The INDEX Project: Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU(2005).
19. Institute of Environmental Epidemiology (IEE). Guidelines for Good Indoor Air Quality

- in Office Premises(1996).
20. Wang, H., Tseng, C., Hsieh, T. "Developing an indoor air quality index system based on the health risk assessment", *Indoor Air*, 749(2008)
 21. Saad, S.M., Shakaff, A.Y.M., Saad, R.M., Yusof, A.M., Andrew, A.M., Zakaria, A., Adom, A.H., "Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index", *AIP Conf. Proc.* **1808(1)**, 020043(2017).
 22. Tippayawong N., Khuntong P. Nitatwichit C., Khunatorn Y., Tantakitti C., "Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments", *Build. Environ.* **44(1)**, pp.188~197(2009)
 23. Ko Y. D., Kim D. S., "Indoor Air Quality Analyses by I/O Ratio and F/C Ratio in a Large Underground Shopping Mall (Master's thesis)", *Kyung Hee University, Seoul, Korea.*(2021)
 24. Yim, B. b. , Lee, K. S. , Kim, J. I. , Hong, H. S. , Kim, J. W. , Jo, K. H. , Jung, E. G. , Kim, I. K. , An, Y. S., "Evaluation on indoor air quality by statistical analysis of indoor air pollutants concentration in a Seoul Metropolitan underground railway station", *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* **30(3)**, pp.233~244(2014).