IoT 기반 지하역사 내 바이오필터시스템 설치에 따른 실내공기질 변화 및 영향 요인 분석

양호형¹ , 김형주² , 방성원³ , 조훈우⁴ , 김호현^{1,5*}

¹평택대학교 생활 및 산업 환경R&D 센터, ²건국대학교 생물공학과, ³(주)가든포유, ⁴(주)에어록, ⁵평택대학교 ICT융합학부 ICT환경융합전공

Analysis of Changes and Factors Influencing IAQ in Subway Stations Using IoT Technology after Bio-Filter System Installation

Ho-Hyeong Yang¹, Hyung-Joo Kim², Sung-Won Bang³, Heun-Woo Cho⁴, and Ho-Hyun Kim^{1,5*}

¹Life & Industry Environmental R&D Center in Pyeongtaek University, ²Department of Biological Engineering, Konkuk University, ³Garden4u Co., Ltd., ⁴Aircok Co., Ltd., ⁵Department of Information, Communication and Technology Convergence, ICT Environment Convergence, Pyeongtaek University

ABSTRACT

Background: Subway stations have the characteristics of being located underground and are a representative public-use facility used by an unspecified number of people. As concerns about indoor air quality (IAQ) increase, various management measures are being implemented. However, there are few systematic studies and cases of long-term continuous measurement of underground station air quality.

Objectives: The purpose of this study is to analyze changes and factors influencing IAQ in subway stations through real-time continuous long-term measurement using IoT-based IAQ sensing equipment, and to evaluate the IAQ improvement effect of a bio-filter system.

Methods: The IAQ of a subway station in Seoul was measured using IoT-based sensing equipment. A bio-filter system was installed after collecting the background concentrations for about five months. Based on the data collected over about 21 months, changes in indoor air quality and influencing factors were analyzed and the reduction effect of the bio-filter system was evaluated.

Results: As a result of the analysis, PM₁₀, PM_{2.5}, and CO₂ increased during rush hour according to the change in the number of passengers, and PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were high when a PM warning/watch was issued. There was an effect of improving IAQ with the installation of the bio-filter system. The reduction rate of a new-bio-filter system with improved efficiency was higher than that of the existing bio-filter system. Factors affecting PM_{2.5} in the subway station were the outdoor PM_{2.5}, platform PM_{2.5}, and the number of passengers.

Conclusions: The IAQ in a subway station is affected by passengers, ventilation through the air supply and exhaust, and the spread of particulate matter generated by train operation. Based on these results, it is expected that IAQ can be efficiently improved if a bio-filter system with improved efficiency is developed in consideration of the factors affecting IAQ and proper placement.

Key words: Subway station, indoor air quality, IoT, io-filter system, plants

Received August 16, 2021

Revised September 6, 2021

Accepted September 10, 2021

Highlights:

- PM_{2.5}, PM₁₀, and CO₂ were high during peak hours as the number of subway passengers increased.
- PM_{2.5} was affected by outdoor air, the platform PM_{2.5}, and the number of passengers.
- CO₂ was affected by the number of passengers and the outdoor PM_{2.5}.
- After a bio-filter system was installed, PM₁₀, PM_{2.5}, and CO₂ decreased significantly.
- In particular, the effect of reducing PM₁₀ and PM_{2.5} was evident at the outlet of the bio-filter system.

*Corresponding author:

Department of Information, Communication and Technology Convergence, ICT Environment Convergence, Pyeongtaek University, 3825 Seodong-daero, Pyeongtaek 17869, Republic of Korea
Tel: +82-31-659- 8092
Fax: +82-31-685-8885
E-mail: ho4sh@ptu.ac.kr

I. 서 론

현대인들의 생활양식 변화로 일상생활의 약 80% 이상을 실내에서 보내고 있으며, WHO는 이로 인해 실내 공기오염의 위험에 노출되어 있다고 경고한 바 있다.¹⁻⁵⁾ 대중교통 수단 내에서 머무르는 시간이 하루 중 3.6%로 조사되었으며,⁶⁾ 대중교통 수송분담율이 2006년 36.4%에서 2017년 43.2%로 지난 10년간 증가⁷⁾함에 따라 대중교통 수단을 이용할 때 노출되는 실내 공기질에 대한 관심 역시 증가하고 있다. 지하역사의 경우 지하에 위치하고 있다는 점과 함께 불특정 다수가 이용하는 대표적인 다중이용시설로 인식되면서 실내공기질 오염에 대한 우려가 높아지고 있다.^{8,9)} 2019년 7월 실내공기질 관리법 개정에 따라 지하역사 실내공기질 미세먼지 유지기준이 강화되고 초미세먼지 기준이 신설되었으며, 지하역사 승강장에 실내공기질 자동 측정망 설치 의무화가 시행되는 등 지하역사 실내공기질에 대한 관심에 상응하는 관리 대책이 추진되고 있다.

뉴욕시 보고서에 따르면 지하철 객실 내는 공기순환으로 인해 미세먼지가 배출되지만 지하역사는 공기 순환이 제한되어 있다는 사실을 근거로 제시하며 지하철 객실 이용보다 지하역사 공간에 머무른 시간이 인체에 대한 위해성 정도를 결정하는 중요변수라고 밝히고 있다.¹⁰⁾ 이에 따라 지하철 이용객들의 건강을 위해 지하역사 내 실내공기질 관리를 위한 방법이 필요한 실정이다. 그러나 지하역사 공기질의 경우 국내는 물론 해외에서도 체계적인 연구 결과는 많이 보고되어 있지 않은 실정이며, 장기간의 연속 측정을 통해 실내공기질 변화를 분석하여 보고한 사례는 거의 없다.

실내공기질과 이로 인한 건강 영향에 대해 관심도가 높아지

면서 실내공기질 개선을 위해 다양한 형태의 실내공기질 개선 방법 연구되고 있다. 선행 연구를 통해 실내 식물 배치가 실내 환경을 효율적으로 조절하는 대안이 될 수 있다고 제안되었으며,¹¹⁻¹³⁾ 실내 공간의 한계를 고려할 때 최적의 방법은 실내 수직 정원이 될 수 있다고 제안되었다.¹⁴⁾ 공학적인 실내공기질 개선 방법에 비해 식물을 활용한 방법은 보다 친환경적인 방법으로, 식물을 활용한 실내공기질 개선 효과 연구가 이루어지고 있으나 단순 식물 배치가 아닌 식물을 활용한 효율적인 공기정화시스템의 생산은 미비한 실정이다.

최근 국내에서 미세먼지 주의보 및 경보 초과 횟수가 잦아지면서 미세먼지 노출과 제어에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 사물인터넷(Internet of Things, IoT)의 발달은 웹, 모바일 환경에서 능동적으로 데이터를 정보를 생성하고 이를 통해 사용자에게 새로운 가치를 부여할 수 있게 되었다.¹⁵⁾ 이에 따라 IoT 센싱 기술을 기반으로 실시간으로 공기질을 모니터링하여 빅데이터를 생산 및 저장하고 이를 실시간으로 평가하는 기술이 선호되고 있다. 국내외 여러 연구에서도 IoT 기술을 활용하여 실내 공기질을 측정하고 모니터링 시스템 구축 및 플랫폼에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.¹⁶⁻²¹⁾

따라서 본 연구에서는 지하역사 내 실내공기질 개선 여부를 확인하고자 식물을 활용한 바이오필터시스템을 설치하였고, 실내공기질 변화는 IoT 기반 센싱 장비를 활용하여 실시간으로 측정된 결과를 분석하였다. 본 연구의 목적은 지하역사 내 실내공기질의 장기간 실시간 연속 측정을 통해 지하역사 내 공기질 변화와 영향요인을 분석하고 바이오필터시스템의 실내공기질 개선 효과를 평가하는 데에 있다.

Fig. 1. Location of IAQ measuring equipment and bio-filter systems

II. 연구 방법

1. 연구대상 및 조사기간

본 연구는 2019년 9월부터 2021년 5월까지 약 21개월간 서울시 소재의 지하역사 공간 내 쉼터 공간을 선정하여 실내공기질 모니터링을 수행하였다. 대상 지하역사는 3개의 노선을 환승할 수 있으며, 2019년 수송인원은 33,497,042명(승하차기준)이다.²²⁾ 지하역사 공간 내를 쉼터, 환승통로 우측 및 좌측으로 나누어 각 공간별로 IoT 기반 실내공기질 모니터링 장비를 설치하였다. 고농도 미세먼지가 빈번하게 발생하는 가을 및 겨울철을 포함한 약 5개월간의 배경 농도 수집 후 바이오필터시스템(Biowall-soop) 6대와 new-바이오필터시스템 1대를 설치하

였으며, 실내공기질 저감 효과 평가를 위해 바이오필터시스템의 토출구와 토출구 외부에 총 8대의 IoT 기반 실내공기질 모니터링 장비를 추가 설치하여 약 16개월간 실내공기질을 조사하였다(Fig. 1).

2. 측정 물질 선정

실내공기질 관리법의 적용대상이 되는 지하역사 등 다중이용시설의 실내공기질 유지·권고기준 항목인 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂를 대상으로 측정하였으며 센서로 측정 가능한 온도와 습도 또한 포함하여 총 5개 항목을 대상으로 지하역사 내 실내공기질 모니터링을 진행하였다.

Table 1. Detailed specification of IoT sensing device

Measurement item	Method	Measurement range	Sensor precision*
PM _{2.5}	Laser light-scattering	0~1,000 µg/m ³	±15 µg/m ³ (≤100 µg/m ³), ±30% (≥100 µg/m ³)
PM ₁₀	Laser light-scattering	0~6,000 µg/m ³	±15 µg/m ³ (≤100 µg/m ³), ±10% (≥100 µg/m ³)
CO ₂	NDIR	0~5,000 ppm	±45 ppm +3% of Reading
Temperature	Band Gap	-40~125°C	±0.3°C (0~70°C), ±0.5°C (-40~0, 70~125°C)
Humidity	Capacitive Polymer	0~100%RH	±3.5%RH (20~80%RH), ±4.5%RH (other range)

*Precision according to the measuring range of the sensor.

Fig. 2. Structure of bio-filter system (A) Structure of bio-filter system, (B) Air purification principle of bio-filter system

3. IoT 센싱 장비 설치 및 정보

지하역사 공간을 쉼터, 환승통로 우측, 환승통로 좌측, 바이오필터시스템 토출구, 바이오필터시스템 토출구 외부, new-바이오필터시스템의 토출구 등으로 나누어 IoT 기반 IAQ 센싱 장비를 총 14대 설치하였으며 1분 단위로 오염물질을 측정하였다. 오염물질 발생원의 분포 및 실내 기류를 고려하여 주변 시설 등에 의한 영향과 부착물 등으로 인한 측정 장애가 없고 대상 시설의 오염도를 대표할 수 있다고 판단되는 곳을 선정하였으며, 지하철 이용객들의 이동에 방해가 되지 않는 위치에 설치하였다. 사용된 장비의 세부 사항은 Table 1에 나타내었으며, 미세먼지 간이측정기 성능인증 평가에서 1등급을 받은 장비이다. 환경부는 광산란식 미세먼지 간이측정기의 신뢰도를 보완하기 위해 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제24조를 통해 형식승인이나 예비형식승인을 받지 않은 미세먼지 측정기를 대상으로 시험참버평가와 환경대기 등가성평가를 통해 성능을 평가하고 등급(1~3등급, 등급 외)을 부여하고 있다.

4. 지하역사 내 바이오필터시스템 설치 및 정보

지하역사 내 실내공기질의 배경농도 파악을 위해 약 5개월 동안 바이오필터시스템 없이 IoT 기반 IAQ 센싱 장비를 통해 배경농도 조사 후 바이오필터시스템을 설치하였다. 바이오필터시스템은 전면부로 오염된 공기를 흡수하여 식물의 잎과 뿌리 및 토양을 거쳐 정화된 공기를 상단의 토출구로 배출하는 방식으로 공기를 정화한다(Fig. 2). 바이오필터시스템의 설치 위치는 이용객들이 머무는 공간인 쉼터 공간 주변에 설치하였으며 총 6대를 설치하였다. 또한 고효율의 바이오필터시스템 개발을 위해 시제품 단계인 new-바이오필터시스템도 함께 설치하여 그 효과를 평가하고자 하였다(Fig. 3). 바이오필터시스템에 식재된 식물은 온도변화에 쉽게 고사하는 초본성 식물대신 목본성 식물을 사용하였으며 바이오필터시스템 1대 당 총 64개의 식물이 식재되었으며, 바이오필터시스템의 세부사항은 Table 2에 나타내었다.

5. 통계 분석

연구기간 동안 IoT 기반 IAQ 센싱 장비를 통해 수집된 빅데이터를 바탕으로 지하역사 내 실내공기질 변화를 시간대, 혼잡/비혼잡시간(혼잡시간: 07:00~10:00, 17:00~20:00), 주중/주말, 계절(봄, 여름, 가을, 겨울), 미세먼지 주의보/경보 발령 여부 등으로 나누어 분석하였다. 혼잡/비혼잡시간 대의 경우 실내공기질 관리법의 대중교통차량 실내공기질 권고기준의 도시철도 혼잡시간대(주중 07:30~09:30, 18:00~20:00)와 비혼잡시간대(혼잡시간대 외의 시간대)를 참고하여 혼잡시간대를 07:00~10:00, 17:00~20:00으로 산정하였다. 계절은 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)로, 미세먼지 주의보/경보 발령일은 에어코리아 미세먼지 권역별 주의보/경보 발령 내역 중 연구기간 내 서울권역에 미세먼지 주의보/경보가 발령된 일자를 추출하여 사용하였다.

바이오필터시스템의 실내공기질 개선 효과 평가를 위해 측정 위치별로 바이오필터시스템의 설치 전과 후로 나누어 비교하였으며, 지하역사 내 PM_{2.5} 및 CO₂ 농도에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해 단계적(stepwise) 다중회귀분석을 사용하여 평가하였다. 통계분석은 IBM SPSS Statistics 27을 사용하여 분석하였다.

Table 2. Detailed specifications of installed plants

Item	Specifications
(W)×(D)×(H) mm	1000×240×1800
Number of pots per unit	64 ea
Plant species	<i>Podocarpus macrophyllus</i> <i>Ardisia pusilla</i> <i>Ardisia pusilla</i> 'Variegata' <i>Ardisia japonica</i>
Amount of soil per pot	1.7 L
Composition of soil	Bed soil 80%, Biochar 20%
Water supply	400 L/h (3 min per day)

Fig. 3. Installation of bio-filter system (A) New bio-filter system, (B) Bio-filter system

III. 결 과

1. 지하역사 공간 내 실내공기질 변화 분석

지하역사 공간 내 설치한 IoT 기반 실내공기질 측정 장비를 통해 2019년 9월부터 2021년 5월까지 약 21개월 간 수집된 데이터를 시간대, 혼잡/비혼잡시간(혼잡시간: 07:00~10:00, 17:00~20:00), 주중/주말, 계절(봄, 여름, 가을, 겨울), 미세먼지 주의보/경보 발령 여부 등으로 나누어 PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 농도를 분석하였다.

전체 연구 기간 동안 평균 농도는 PM_{10} 34.08 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 18.85 $\mu g/m^3$, CO_2 540.90 ppm으로 실내공기질 관리법에 따른 지하역사 등 다중이용시설 유지기준인 PM_{10} 100 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 50 $\mu g/m^3$, CO_2 1,000 ppm을 초과하지 않는 것으로 나타났다.²³⁾

시간의 흐름에 따라 주중의 경우 출퇴근시간대인 07:00~10:00와 17:00~20:00에 지하철 승하차 인원이 증가하면서 $PM_{2.5}$ 과 CO_2 농도가 점차 증가하다가 승하차 인원이 감소함에 따라 감소하는 양상을 보였다. 주말의 경우 승객수가 점차 증가함에 따라 $PM_{2.5}$ 와 CO_2 농도가 소폭 증가하다가 승하차 인원이 감소함에 따라 소폭 감소하는 모습을 보였다.

혼잡/비혼잡시간에 따라 평균 농도는 혼잡시간대 PM_{10} 38.47 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 21.15 $\mu g/m^3$, CO_2 593.29 ppm이고 비혼잡시간대 PM_{10} 34 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 18.74 $\mu g/m^3$, CO_2 513.12 ppm으로 혼잡시간대에 높은 것으로 나타났다.

주중/주말에 따른 평균 농도는 주중 PM_{10} 35.11 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 19.34 $\mu g/m^3$, CO_2 550.06 ppm이고 주말 PM_{10} 36.42 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 20.04 $\mu g/m^3$, CO_2 514.55 ppm으로 미세먼지는

주중보다 주말에 높았으며 CO_2 는 주말보다 주중에 높은 것으로 나타났다.

미세먼지 주의보/경보 발령에 따른 평균 농도는 발령 시 PM_{10} 67.45 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 37.59 $\mu g/m^3$, CO_2 599.88 ppm이고 미발령 시 PM_{10} 34.52 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 19 $\mu g/m^3$, CO_2 538.03 ppm으로 미세먼지 주의보/경보 발령 시에 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 와 CO_2 농도가 높은 것으로 나타났다(Table 3, Figs. 4, 5).

계절에 따른 평균 농도는 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 경우 겨울, 봄, 가을, 여름 순으로 높은 것으로 나타났으며, CO_2 의 경우 겨울, 가을, 여름, 봄 순으로 높은 것으로 나타났다.

이에 따라 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 는 시간에 따른 이용객 수 변화, 요일, 미세먼지 주의보/경보 발령, 계절 등에 영향을 받는 것으로 판단된다.

2. 바이오필터시스템 설치에 따른 지하역사 공간 실내 공기질 평가

2.1. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$

각 위치별 평균 PM_{10} 농도의 경우, 바이오필터시스템의 토출구에서 28.96 $\mu g/m^3$, 토출구 외부에서 29.45 $\mu g/m^3$, new-바이오필터시스템 토출구에서 28.75 $\mu g/m^3$ 이었다. 승터에서는 설치 전 35.65 $\mu g/m^3$, 설치 후 33.43 $\mu g/m^3$ 이었고, 환승통로 우측은 설치 전 42.32 $\mu g/m^3$, 설치 후 32.83 $\mu g/m^3$ 이었으며, 환승통로 좌측은 설치 전 47.98 $\mu g/m^3$, 38.87 $\mu g/m^3$ 으로 나타났다. 각 위치별 평균 $PM_{2.5}$ 농도의 경우, 바이오필터시스템의 토출구에서 16.01 $\mu g/m^3$, 토출구 외부에서 17.53 $\mu g/m^3$, new-바이오필터시스템 토출구에서 15.26 $\mu g/m^3$ 이었다. 승터

Table 3. Comparison of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and CO_2 concentration by factors

	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	p-value	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	p-value	CO_2 (ppm)	p-value
Total	34.08±23.10		18.85±12.39		540.90±102.54	
Peak/Off-peak						
Peak	38.47±21.14	<0.001	21.15±11.53	<0.001	593.29±92.99	<0.001
Off-peak	34±22.14		18.74±11.96		513.12±73.46	
Weekdays/Weekend						
Weekdays	35.11±21.15	<0.001	19.34±11.46	<0.01	550.06±92.16	<0.001
Weekend	36.42±23.66		20.04±12.83		514.55±74.57	
PM warning/watch issued						
Issued	67.45±24.78	<0.001	37.59±13.95	<0.001	599.88±109.45	<0.001
Not issued	34.52±21.08		19±11.37		538.03±87.59	
Season						
Spring	34.04±21.14	<0.01	18.73±11.4	<0.001	526.92±80.73	<0.01
Summer	27.63±15.28		15.5±8.26		530.47±76.26	
Fall	30.05±17.38		16.59±9.3		546.62±93.51	
Winter	46.35±25.2		25.36±13.86		551.29±95.93	

Fig. 4. Comparison of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ concentration by factors (A) Time in weekdays and weekend, (B) Peak/off-peak, (C) Weekdays/weekend, (D) Season, (E) Particulate matters warning/watch issued

에서는 설치 전 $21.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 설치 후 $20.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 환승통로 우측은 설치 전 $22.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 설치 후 $17.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고, 환승통로 좌측은 설치 전 $25.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $20.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다(Table 4, Fig. 6). 대응표본 t-검정 결과, 바이오필터시스템 설치 전과 후의 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 는 유의미한 차이를 보였다($p < 0.001$). 모든 공간에서 바이오필터시스템 설치 전에 비해 설치 후 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 감소한 것으로 나타났으나, 바이오필터시스템의 토출구 및 토출구 외부의 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 다른 공간에 비해 낮은 것으로 나타났다(Table 4, Fig. 6).

바이오필터시스템의 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 개선 효과를 파악하기 위하여 저감율을 분석하였다. 바이오필터시스템 토출구 및 토출구 외부의 경우, 실내공기질 측정장비를 바이오필터시스템 배치 이후에 설치하였기 때문에 설치 이전 데이터를 바이오필터시스템을 배치한 공간인 쉼터 공간의 설치 이전 데이터로 활용하였다. PM_{10} 저감율은 환승통로 우측(22.43%), new-바이오

Fig. 5. Comparison of CO_2 concentration by factors (A) Time in weekdays and weekend, (B) Peak/off-peak, (C) Weekdays/weekend, (D) Season, (E) Particulate matters warning/watch issued

필터시스템의 토출구(19.4%), 환승통로 좌측(19.0%), 바이오필터시스템의 토출구(18.8%), 바이오필터시스템의 토출구 외부(17.4%), 쉼터(6.2%) 순으로 높은 것으로 나타났다. $\text{PM}_{2.5}$ 저감율은 new-바이오필터시스템의 토출구(29.9%), 바이오필터시스템의 토출구(26.4%), 환승통로 우측(22.0%), 바이오필터시스템의 토출구 외부(19.5%), 환승통로 좌측(18.9%), 쉼터(3.7%) 순으로 높은 것으로 나타났다(Table 5).

2.2. CO_2

각 위치별 평균 CO_2 농도의 경우, 바이오필터시스템의 토출구에서 542.75 ppm, 토출구 외부에서 535.06 ppm, new-바이오필터시스템 토출구에서 519.95 ppm이었다. 쉼터에서는 설치 전 572.38 ppm, 설치 후 546.58 ppm이었으며, 환승통로 우측은 설치 전 586.04 ppm, 설치 후 550.12 ppm이었으며, 환승통로 좌측은 설치 전 577.92 ppm, 525.07 ppm으로 나타났다(Table 4, Fig. 6).

Table 4. Comparison of indoor air quality in subway stations according to bio-filter system installation by equipment location

Equipment location	Bio-filter system	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	CO ₂ (ppm)	Temperature (°C)	Humidity (%RH ^{a)})
Bio-filter system	After (n=3051268) t(p) ^{b)}	28.96±20.49	16.01±10.70	542.75±99.31	20.03±5.76	57.45±13.78
Outside of bio-filter system	After (n=1124088) t(p)	29.45±21.77	17.53±11.79	535.06±96.14	21.08±5.43	45.31±17.76
New bio-filter system	After (n=637322) t(p)	28.75±19.07	15.26±9.75	519.95±88.88	22.57±4.98	50.53±15.64
Shelter	Before (n=228053) After (n=727120) t(p)	35.65±20.65 33.43±19.43 140.306***	21.76±12.60 20.97±12.27 138.214***	572.38±108.03 546.58±92.77 45.453***	18.52±5.17 23.02±4.01 17.057***	32.88±10.54 48.49±17.47 -115.176***
Right side of transfer passage	Before (n=376222) After (n=1041561) t(p)	42.32±24.06 32.83±21.95 41.559***	22.28±12.69 17.39±11.40 22.218***	586.04±124.11 550.12±119.25 29.840***	19.73±5.37 19.6±5.18 -384.248***	38.35±13.75 41.9±15.34 -693.276***
Left side of transfer passage	Before (n=410242) After (n=1243937) t(p)	47.98±28.29 38.87±25.96 104.371***	25.36±15.22 20.57±13.76 103.110***	577.92±114.62 525.07±96.83 59.291***	19.61±5.25 19.89±5.41 -46.650***	38.21±12.93 44.75±16.43 -384.031***

^{a)}Relative humidity, ^{b)}t-value and p-value by paired sample t-test.

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

Fig. 6. Comparison of IAQ according to the bio-filter system installation by sampling location (A) PM₁₀, (B) PM_{2.5}, (C) CO₂

*Bio-filter system, **Outside of bio-filter system, ***New bio-filter system, ****Shelter, *****Right side of transfer passage, ****Left side of transfer passage

Table 5. Reduction rate according to bio-filter system installation

Reduction rate	Bio-filter system	Outside of bio-filter system	New bio-filter system	Shelter	Right side of transfer passage	Left side of transfer passage
PM ₁₀	18.8%	17.4%	19.4%	6.2%	22.4%	19.0%
PM _{2.5}	26.4%	19.5%	29.9%	3.7%	22.0%	18.9%
CO ₂	5.2%	6.5%	9.2%	4.5%	6.1%	9.1%

바이오필터시스템의 CO₂ 개선 효과를 파악하기 위하여 저감율을 분석하였다. PM₁₀ 및 PM_{2.5} 저감율과 같이 바이오필터시스템 토출구 및 토출구 외부의 경우, 설치 이전 데이터를 바이오필터시스템을 배치한 공간인 쉼터 공간의 설치 이전 데이터로 활용하였다. CO₂ 저감율은 new-바이오필터시스템의 토출구(9.2%), 환승통로 좌측(9.1%), 바이오필터시스템의 토출구 외부(6.5%), 환승통로 우측(6.1%), 바이오필터시스템의 토출구(5.2%), 쉼터(4.5%) 순으로 높은 것으로 나타났다(Table 5).

2.3. 지하역사 공간 내 실내공기질에 영향을 미치는 요인 분석

앞서 시간대, 혼잡/비혼잡시간(혼잡시간: 07:00~10:00, 17:00~20:00), 주중/주말, 계절(봄, 여름, 가을, 겨울), 미세먼지 주의보/경보 발령 여부 등으로 나누어 실내공기질 변화를 분석한 결과, 실내공기질 수준에 차이가 있었다. 또한, 연구기간 내 코로나19가 발생하고 상황이 악화됨에 따라 지하철 승하차 인원이 2019년 대비 약 40% 이상 감소하였다(Fig. 7).¹⁶⁾ 따라서 바이오필터시스템이 설치된 지하역사 공간 내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미칠 수 있는 여러가지 요인을 분석하기 위해 단계적 다중회귀분석을 실시하였다. 반응변수는 각 측정 위치별 PM_{2.5}와 CO₂ 농도로 구분하였으며, 설명변수로는 대상 지하역사 주변 도시대기 자동측정망을 통해 수집된 PM_{2.5} 농도, 지하역사 승강장에서 실내공기질 자동측정망을 통해 수집된 PM_{2.5} 농도, 승하차 인원, 혼잡/비혼잡 여부, 계절, 바이오필터시스템 설치 여부, 미세먼지 주의보/경보 발령 여부, 주중/주말 등으로 하였다.

2.3.1. 지하역사 내 PM_{2.5}에 영향을 미치는 요인

지하역사 내 각 위치별 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 요인을 회귀 분석한 결과, 바이오필터시스템 토출구의 경우 79.8%의 설명력을 나타냈으며, 외기 PM_{2.5} 농도, 승강장 PM_{2.5} 농도, 승

하차 인원, 혼잡시간대 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다. 바이오필터시스템 토출구 외부의 경우 78.8%의 설명력을 보였으며, 외기 PM_{2.5} 농도, 봄, 승하차 인원, 승강장 PM_{2.5} 농도, 주말 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다. new-바이오필터시스템 토출구의 경우 80.6%의 설명력을 나타냈으며 외기 PM_{2.5} 농도, 승하차 인원, 승강장 PM_{2.5} 농도, 봄, 주말, 혼잡시간대 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다. 봄의 경우 여름보다 상대적으로 낮은 영향력을 미쳤다. 쉼터 공간의 경우 외기 PM_{2.5} 농도, 바이오필터시스템 설치, 승강장 PM_{2.5} 농도, 가을, 승하차 인원, 혼잡시간대 순으로 영향이 컸고, 가을의 영향력이 여름의 영향력보다 큰 것으로 나타났으며 82.9%의 설명력을 보였다. 환승통로 우측의 경우 83.7%의 설명력을 보였으며, 외기 PM_{2.5} 농도, 가을, 승강장 PM_{2.5} 농도, 바이오필터시스템 설치, 승하차 인원, 겨울, 혼잡시간대, 미세먼지 주의보/경보 발령, 주말 순으로 영향이 큰 것으로 나타났으며, 가을과 겨울의 영향력이 여름보다 큰 것으로 나타났다. 환승통로 좌측의 경우 86.5%의 설명력을 나타냈으며 외기 PM_{2.5} 농도, 바이오필터시스템 설치, 승강장 PM_{2.5} 농도, 승하차 인원, 혼잡시간대, 봄 순으로 영향이 큰 것으로 나타났고 봄의 영향력이 여름의 영향력보다 적은 것으로 나타났다. 위치를 구분하지 않고 전체 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 분석한 결과, 회귀모형은 85.6%의 설명력을 나타냈으며, 외기 PM_{2.5} 농도, 승강장 PM_{2.5} 농도, 승하차 인원, 혼잡시간대, 겨울, 바이오필터시스템 설치 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다(Table 6).

지하역사 내 PM_{2.5} 농도는 모든 위치에서 외기 PM_{2.5} 농도, 승강장 PM_{2.5} 농도, 승하차 인원의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 위치에 따라 혼잡시간대, 미세먼지 주의보/경보 발령, 주말, 계절, 바이오필터시스템 설치 등의 영향을 받는 것으로 나타났다. 지하역사 내 PM_{2.5} 농도는 바이오필터시스템 설치로 인한 영향에 비해 승하차 인원 변화와 외기 PM_{2.5} 및 승강장 PM_{2.5}

Fig. 7. Changes in the number of subway passengers pre month by line (A) Line A, (B) Line B, (C) Line C

Table 6. Stepwise regression model of the indoor PM_{2.5} concentration in the subway station

Location	Variable	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t(p) ^{a)}
		B	SE	β	
Bio-filter system	(Constant)	-0.320	0.384		-0.835***
	PM _{2.5} (outdoor)	0.665	0.012	0.816	56.926***
	PM _{2.5} (platform)	0.130	0.019	0.106	6.970***
	Passengers	0.000	0.000	0.063	4.361***
	Peak/off-peak	1.051	0.314	0.046	3.341***
$F(p)=1387.052^{***}, \text{adj.}R^2=0.798$					
Outside of bio-filter system	(Constant)	-3.510	0.640		-5.489
	PM _{2.5} (outdoor)	0.754	0.014	0.841	52.932***
	PM _{2.5} (platform)	0.138	0.022	0.101	6.139***
	Spring	3.659	0.427	0.118	8.563***
	Passengers	0.001	0.000	0.105	7.128***
	Weekday/weekend	-0.936	0.386	-0.033	-2.422*
$F(p)=965.688^{***}, \text{adj.}R^2=0.788$					
New bio-filter system	(Constant)	1.147	0.574		1.998
	PM _{2.5} (outdoor)	0.721	0.014	0.803	50.278***
	Passengers	0.001	0.000	0.114	6.169***
	Spring	-2.715	0.382	-0.103	-7.108***
	PM _{2.5} (platform)	0.132	0.021	0.109	6.431***
	Weekday/weekend	-1.024	0.403	-0.038	-2.542*
	Peak/off-peak	0.823	0.389	0.035	2.118*
$F(p)=701.095^{***}, \text{adj.}R^2=0.806$					
Shelter	(Constant)	-2.289	0.328		-6.987
	PM _{2.5} (outdoor)	0.751	0.007	0.870	108.893***
	Plants	6.707	0.232	0.262	28.893***
	Passengers	0.000	0.000	0.045	5.363***
	PM _{2.5} (platform)	0.080	0.007	0.097	11.229***
	Fall	2.616	0.243	0.095	10.784***
	Peak/off-peak	0.985	0.190	0.039	10.784***
$F(p)=2897.127^{***}, \text{adj.}R^2=0.829$					
Right side of transfer passage	(Constant)	-0.327	0.428		-0.765
	PM _{2.5} (outdoor)	0.754	0.007	0.891	115.420***
	Passengers	0.000	0.000	0.079	9.906***
	PM _{2.5} (platform)	0.067	0.006	0.085	10.463***
	Fall	2.874	0.388	0.114	7.414***
	Plants	2.026	0.327	0.079	6.195***
	Weekday/weekend	-0.381	0.180	-0.014	-2.112*
	PM_Warning	1.552	0.707	0.014	2.194*
	Peak/off-peak	0.383	0.172	0.016	2.229*
	Winter	0.680	0.323	0.027	2.102*
$F(p)=2304.881^{***}, \text{adj.}R^2=0.837$					

Table 6. Continued

Location	Variable	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t(p) ^{a)}
		B	SE	β	
Left side of transfer passage	(Constant)	0.264	0.268		0.987
	PM _{2.5} (outdoor)	0.915	0.007	0.868	128.733***
	Plants	5.504	0.342	0.173	16.095***
	PM _{2.5} (platform)	0.087	0.007	0.088	12.763***
	Passengers	0.000	0.000	0.050	7.109***
	Peak/off-peak	1.125	0.193	0.037	5.817***
	Spring	-0.938	0.361	-0.027	-2.599**
$F(p)=4335.104^{***}$, $\text{adj.}R^2=0.865$					
Whole space	(Constant)	1.262	0.234		5.405
	PM _{2.5} (outdoor)	0.788	0.006	0.884	124.689***
	PM _{2.5} (platform)	0.078	0.006	0.093	12.657***
	Passengers	0.000	0.000	0.064	8.854***
	Peak/off-peak	0.784	0.169	0.030	4.626***
	Winter	0.647	0.181	0.025	3.570***
	Plants	0.638	0.184	0.024	3.458***
$F(p)=4045.794^{***}$, $\text{adj.}R^2=0.856$					

^{a)}t-value and p-value by stepwise multiple regression analysis

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

유입의 영향을 가장 크게 받는 것으로 판단된다. 또한 위치에 따라 이용객들의 이동이나 급배기구 위치 등으로 인해 혼잡시간대, 주말, 계절, 미세먼지 주의보/경보 발령 등에 영향을 받는다고 할 수 있다.

2.3.2. 지하역사 내 CO₂에 영향을 미치는 요인

지하역사 내 각 위치별 CO₂ 농도에 영향을 미치는 요인을 회귀 분석한 결과, 바이오필터시스템 토출구의 경우 44.1%의 설명력을 보였으며 승하차 인원, 외기 PM_{2.5} 농도, 주중, 혼잡시간대, 봄 순으로 영향이 높은 것으로 나타났고 봄에 비해 여름의 영향력이 큰 것으로 나타났다. 바이오필터시스템 토출구 외부 모형의 경우 38.1%의 설명력을 보였으며 승하차 인원, 주중, 봄, 외기 PM_{2.5} 농도, 혼잡시간대 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다. new-바이오필터시스템 토출구의 경우, 50.7%의 설명력을 보였으며 승하차 인원, 주중, 외기 PM_{2.5} 농도, 혼잡시간대, 미세먼지 주의보/경보 발령, 봄 순으로 영향이 큰 것으로 나타났고 여름에 비해 봄의 영향력이 작은 것으로 나타났다. 승터 공간의 경우 59.1%의 설명력을 나타냈으며, 승하차 인원, 바이오필터시스템 설치, 외기 PM_{2.5} 농도, 봄, 승강장 PM_{2.5} 농도, 혼잡시간대, 겨울 순으로 영향력이 큰 것으로 나타났고 여름에 비해 겨울이, 봄에 비해 여름이 높은 영향력을 미쳤다. 환승통로 우측의 경우 56.7%의 설명력을 보였고 승하차 인원, 바이오필터시스템 설치, 외기 PM_{2.5} 농도, 가을, 승강장 PM_{2.5} 농도, 겨

울, 주중, 혼잡시간대 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다. 환승통로 좌측의 경우 65.2%의 설명력을 나타냈으며 승하차 인원, 봄, 바이오필터시스템 설치, 외기 PM_{2.5} 농도, 가을, 주중, 승강장 PM_{2.5}, 미세먼지 주의보/경보 미발령 순으로 높은 것으로 나타났고 가을이 여름에 비해, 여름이 봄에 비해 영향력이 큰 것으로 나타났다. 위치를 구분하지 않고 전체 CO₂ 농도에 미치는 영향을 분석한 결과, 63.6%의 설명력을 보였으며, 승하차 인원, 외기 PM_{2.5} 농도, 바이오필터시스템 설치, 봄, 가을, 승강장 PM_{2.5} 주중, 혼잡시간대 순으로 영향력이 높았고 가을이 여름에 비해, 여름이 봄에 비해 영향력이 큰 것으로 나타났다(Table 7).

지하역사 내 CO₂ 농도는 모든 위치에서 승하차 인원, 외기 PM_{2.5} 농도의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 주중과 혼잡시간대 영향도 큰 것으로 나타났다. 이는 지하역사 내 CO₂ 농도가 바이오필터시스템 설치로 인한 영향에 비해 이용객과 환기로 인한 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다.

IV. 고 찰

최근 지하역사 공간의 실내공기 오염에 대한 관심이 확산됨에 따라 정부는 실내공기질 관리법을 개정하여 지하역사 실내공기질 유지·관리 기준을 강화하고 승강장 내 실내공기질 자동 측정망 설치 의무화를 실시하는 등 지하역사의 실내공기질에

Table 7. Stepwise regression model of the indoor CO₂ concentration in the subway station

Location	Variable	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t(p) ^{a)}
		B	SE	β	
Bio-filter system	(Constant)	422.959	6.611		63.978
	Passengers	0.024	0.001	0.472	18.648***
	PM _{2.5} (outdoor)	1.473	0.134	0.225	10.993***
	Weekday/weekend	29.962	4.453	0.146	6.728***
	Peak/off-peak	16.494	4.301	0.089	3.835***
	Spring	-15.149	4.597	-0.069	-3.295***
	$F(p)=222.393^{***}$, adj. $R^2=0.441$				
Outside of bio-filter system	(Constant)	379.428	8.238		46.056
	Passengers	0.028	0.002	0.495	17.849***
	Weekday/weekend	36.142	5.203	0.166	6.946***
	Spring	37.955	5.731	0.156	6.623***
	PM _{2.5} (outdoor)	1.096	0.160	0.157	6.857***
	Peak/off-peak	13.158	5.058	0.066	2.601**
	$F(p)=160.317^{***}$, adj. $R^2=0.381$				
New bio-filter system	(Constant)	422.443	6.531		64.680
	Passengers	0.025	0.001	0.522	18.240***
	PM _{2.5} (outdoor)	0.872	0.149	0.131	5.847***
	Weekday/weekend	33.094	4.766	0.167	6.943***
	Peak/off-peak	22.697	4.618	0.129	4.915***
	PM_Warning	72.036	18.067	0.090	3.987***
	Spring	-14.641	4.512	-0.075	-3.245***
	$F(p)=173.782^{***}$, adj. $R^2=0.507$				
Shelter	(Constant)	408.907	3.249		125.842
	Passengers	0.025	0.001	0.665	50.577***
	PM _{2.5} (outdoor)	1.434	0.080	0.222	17.824***
	Winter	4.787	2.804	0.025	1.707*
	Plants	44.202	3.930	0.231	11.247***
	Spring	-43.314	4.728	-0.212	-9.160***
	PM _{2.5} (platform)	0.529	0.082	0.087	6.454***
	Peak/off-peak	8.814	2.203	0.047	4.002***
	$F(p)=740.889^{***}$, adj. $R^2=0.591$				
Right side of transfer passage	(Constant)	356.763	6.386		55.867
	Passengers	0.032	0.001	0.704	53.928***
	PM _{2.5} (outdoor)	1.422	0.097	0.183	14.597***
	Plants	50.534	4.890	0.215	10.333***
	PM _{2.5} (platform)	0.743	0.097	0.102	7.693***
	Fall	36.623	5.785	0.157	6.330***
	Winter	17.616	4.843	0.077	3.638***
	Weekday/weekend	9.962	2.709	0.040	3.677***
	Peak/off-peak	8.894	2.580	0.040	3.447***
	$F(p)=661.965^{***}$, adj. $R^2=0.567$				

Table 7. Continued

Location	Variable	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t(p) ^{a)}
		B	SE	β	
Left side of transfer passage	(Constant)	394.602	3.980		99.137
	Passengers	0.029	0.000	0.687	64.372***
	PM _{2.5} (outdoor)	2.355	0.082	0.323	28.665***
	Spring	-93.324	4.018	-0.395	-23.224***
	Plants	78.635	4.071	0.357	19.318***
	Fall	25.595	2.786	0.117	9.185***
	PM_Warning	-24.612	8.762	-0.027	-2.809**
	Weekday/weekend	7.129	2.255	0.031	3.161**
	PM _{2.5} (platform)	0.187	0.082	0.027	2.290*
	$F(p)=949.941^{***}, \text{adj.}R^2=0.652$				
Whole space	(Constant)	391.463	3.654		107.130
	Passengers	0.028	0.000	0.726	60.848***
	PM _{2.5} (outdoor)	1.662	0.075	0.253	22.194***
	Weekday/weekend	8.536	2.094	0.040	4.077***
	Fall	20.503	2.561	0.103	8.006***
	Plants	36.737	3.737	0.185	9.831***
	Spring	-24.829	3.688	-0.116	-6.732***
	PM _{2.5} (platform)	0.376	0.075	0.061	5.036***
	Peak/off-peak	4.783	1.998	0.025	2.393*
	$F(p)=891.751^{***}, \text{adj.}R^2=0.636$				

^{a)}t-value and p-value by stepwise multiple regression analysis

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

대한 규제를 강화하였다. 본 연구는 공학적인 실내공기질 개선 방법에 비해 친환경적인 식물을 활용한 방법을 적용하고 그 효과를 평가하고 지하역사 내 실내공기질에 영향을 미치는 요인을 파악하고자 하였다.

지하역사 내 실내공기질 평가 결과, 전체 연구 기간 동안 평균 농도는 실내공기질 관리법에 따른 지하역사 등 다중이용시설 유지기준인 PM₁₀ 100 µg/m³, PM_{2.5} 50 µg/m³, CO₂ 1,000 ppm을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

선행연구와 마찬가지로 본 연구에서도 지하철 승하차 인원이 증가함에 따라 출근시간대에 PM₁₀, PM_{2.5} 농도가 증가하였다가 다소 감소하였다가 퇴근시간대에 다시 농도가 높아지는 특성을 보였다.^{9,24)} CO₂는 비혼잡시간대에 비해 혼잡시간대에 높은 것으로 나타나 이산화탄소 농도의 증가는 승하차 인원 증감과 유의한 상관성이 있다고 보고된 선행 연구결과와 일치한다.^{9,25)}

주중에 비해 주말에 PM₁₀, PM_{2.5} 평균 농도가 높은 것으로 나타났는데 이는 주말에 비해 주중에 이용객이 더 많으나 출퇴근 시간대에 이용객이 급격히 증가했다가 다시 줄어드는 주중과 다르게 주말에는 시간대에 따라 비교적 일정한 이용객수를 유지하여 꾸준한 이용객의 움직임에 의한 재비산의 영향으로

판단된다. 재실자의 활동에 의한 PM₁₀의 재비산이 보고된 바 있다.²⁶⁾

미세먼지 주의보/경보 발령 시 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 평균 농도가 미발령 시에 비해 높게 나타났으며, 이는 황사의 발생에 의한 대기 중 PM₁₀ 증가로 인한 지하역사 내 PM₁₀ 증가를 설명할 수 있다고 보고한 선행 연구결과로 설명될 수 있다.⁹⁾

다양한 선행 연구를 통해 실내 식물 배치를 통한 실내공기질 개선 효과가 확인된 바 있다. Shao et al. (2021)²⁷⁾의 연구는 실내 수직 정원 시스템 설치에 따른 PM 및 CO₂ 농도의 통계적으로 유의미한 차이를 보고한 바 있다. 실내 식물을 통해 입자상 물질의 농도 감소에 효과를 확인한 바 있으며,^{28,29)} 식물이 적용되지 않은 공간 보다 적용된 공간의 실내 PM₁₀ 농도가 감소하였다는 연구 결과가 보고된 바 있다.^{30,31)} 바이오필터시스템 설치에 따른 지하역사 공간 실내공기질 개선 효과 평가 결과, PM₁₀ 및 PM_{2.5}와 CO₂는 각각 설치 전과 후 농도 차이가 통계적으로 유의미하게 감소한 것으로 나타났다. 이는 선행 연구결과와 마찬가지로 바이오필터시스템이 실내공기질 개선에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 저감율이 가장 낮게 나타난 승하차의 경우 이용객들의 움직임으로 인해 영향을 받은 것으

로 판단되며, 쉼터 이용객의 영향이 적은 토출구에 설치된 장비의 경우 저감율이 약 18~30%로 나타났다. 다른 공간과 비교하여 설치 후 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도 수준이 낮은 것으로 나타나 바이오필터시스템의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 저감 효과가 있는 것으로 사료된다. 또한 바이오필터시스템과 new-바이오필터시스템의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 저감율을 비교하였을 때, new-바이오필터시스템의 저감율이 더 높은 것으로 나타나 바이오필터시스템을 개선하여 개발한 new-바이오필터시스템의 제거 효율이 더 좋은 것으로 사료된다. 환승통로 우측과 좌측의 저감율은 코로나19로 인하여 2019년 대비 40% 이상 감소한 승하차 인원의 영향을 받은 것으로 판단된다.

지하역사 내 실내공기질에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 단계적 다중회귀분석을 실시한 결과 $PM_{2.5}$ 의 경우 외기 $PM_{2.5}$, 승강장 $PM_{2.5}$, 승하차 인원의 영향을 받는 것으로 나타났다. CO_2 의 경우 승하차 인원, 외기 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 실내 재실자로 인한 영향^{32,33)}과 급배기구를 통한 환기와 열차 운행에 따라 발생한 미세먼지가 승강장에서 대합실로 확산되기 때문인 것이라고 할 수 있다.³⁴⁾ 미세먼지 및 이산화탄소와 승하차 인원이 유의한 상관관계를 보이며, 특히 CO_2 가 높은 상관성을 나타낸 선행 연구 결과와 같이, 본 연구에서도 다중회귀분석 결과 지하역사 내 $PM_{2.5}$ 와 CO_2 농도에 승하차 인원의 영향이 있는 것으로 나타났다.⁹⁾

본 연구의 제한점은 첫째, 외기 $PM_{2.5}$ 와 승강장 $PM_{2.5}$ 농도를 동일한 장비로 측정하지 못하고 국가 자동측정망으로 측정된 데이터를 사용함에 있다. 국가 자동측정망의 경우 베타선 측정법이고 본 연구에서 사용된 장비는 광산란법 장비이다. 미세먼지 간이측정 성능인증 평가에서 1등급을 받은 장비이나, 자동측정망에 사용된 베타선 장비와 비교 분석을 통해 교정되지 않았다는 한계점이 있다.

둘째, 선정한 대상 공간이 개방되어 있는 공간이라는 한계점이 있다. 바이오필터시스템을 설치한 쉼터공간이 밀폐되어 있지 않고 개방되어 있는 공간이기 때문에 바이오필터시스템의 실내공기질 저감 효과가 다른 요인들로 인해 희석되었다고 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서는 적은 양의 식물로도 효율성이 높은 바이오필터시스템을 적용하였고, 보다 더 효율성을 높인 시제품 단계의 바이오필터시스템을 함께 적용하고 영향 요인을 파악하기 위해 회귀분석을 실시하는 등 정확한 효과 평가를 위해 노력하였다.

셋째, 코로나19 악화로 인해 바이오필터시스템을 설치한 쉼터 공간이 폐쇄됨에 따라 실내공기질 조사가 불가능하여 2021년 5월 이후 조사를 종료하였다. 이에 따라 총 21개월간의 연구기간 동안 여름을 제외한 다른 계절은 실내공기질을 6개월씩 조사하였으나 여름의 경우 약 3개월로 다른 계절에 비해 적어 동일한 기간의 계절 데이터를 비교하지 못했다는 한계점이 있다.

넷째, 코로나19로 인해 지하철 이용객 수가 감소하여 전체 공간의 미세먼지와 이산화탄소 농도가 감소하였으며 쉼터 공간이 일부 폐쇄되는 등의 어려움이 있었던 점도 이 연구의 제한점으로 볼 수 있다. 하지만 승하차 인원이 큰 폭으로 감소한 것이 실내공기질에 영향을 미치는지를 분석하여 지하역사 내 실내공기질 평가에 반영하고자 노력하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 최근 관심이 증가하고 있는 지하역사 공간의 효율적인 실내공기질 개선을 위해 식물을 활용한 바이오필터시스템을 지하역사 공간에 조성된 쉼터공간에 설치하고, 주변 공간과 바이오필터시스템의 토출구에서 토출되는 공기질 분석을 통해 바이오필터시스템의 실내공기질 개선 효과와 지하역사 내 실내공기질 변화 및 영향 요인을 파악하고자 하였다.

지하역사 내 실내공기질은 실내공기질 관리법에 따른 지하역사 등 다중이용시설 유지기준을 초과하지 않았다. 지하철 승하차 인원이 증가함에 따라 주중 출근시간대에 미세먼지 및 이산화탄소 농도가 증가한 후, 감소하였다가 퇴근시간대에 다시 증가하는 것으로 나타났다. 미세먼지 주의보/경보 발령에 따라 주의보/경보 발령 시 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도가 높게 나타났다.

바이오필터시스템 설치 후, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 가 감소하였으며 바이오필터시스템 토출구와 토출구 외부의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도가 다른 공간에 비해 낮아 바이오필터시스템의 실내공기질 개선 효과가 있는 것으로 확인되었다. 또한, 기존 바이오필터시스템 제품보다 효율성을 개선한 제품인 new-바이오필터시스템 제품이 저감율이 높은 것으로 나타났다.

지하역사 내 $PM_{2.5}$ 및 CO_2 에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 다중회귀분석을 실시한 결과, $PM_{2.5}$ 의 경우 외기 $PM_{2.5}$, 승강장 $PM_{2.5}$, 승하차 인원의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, CO_2 의 경우 승하차 인원, 외기 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 받는 것으로 나타나 지하철 이용객으로 인한 영향, 급배기구를 통한 환기, 열차 운행으로 인해 발생한 미세먼지의 대합실로의 확산 등이 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 통해 바이오필터시스템의 실내공기질 개선 효과를 확인할 수 있었으며, 지하역사 내 실내공기질에 영향을 미치는 요인을 파악할 수 있었다. 지하역사 실내공기질 영향 인자를 고려하여 바이오필터시스템의 효율성을 개선한 제품이 개발되고 적절한 바이오필터시스템 배치가 이루어진다면 지하역사 내 실내공기질을 효율적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발

사업(2019157C10-2121-0101)의 지원에 의하여 이루어진 것이며, 서울교통공사 도시철도연구원과의 업무 협약을 통해 장소를 협조 받았습니다. 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Shiotsu M, Yoshizawa S, Ikeda K, Nozaki A. Survey on human activity patterns according to time and place: basic research on the exposure dose to indoor air pollutants Part 1. *J Archit Plan*. 1998; 63(511): 45-52.
- Guieysse B, Hort C, Platel V, Munoz R, Ondarts M, Revah S. Biological treatment of indoor air for VOC removal: potential and challenges. *Biotechnol Adv*. 2008; 26(5): 398-410.
- Orwell RL, Wood RL, Tarran J, Torpy F, Burchett MD. Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality. *Water Air Soil Pollut*. 2004; 157: 193-207.
- United States Department of Labor. American Time Use Survey (ATUS). Available: <http://www.bls.gov/tus/> [accessed 18 January 2021].
- World Health Organization (WHO). WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. Copenhagen: WHO; 2010.
- Statistics KOREA (KOSTAT). Life Time Survey. Available: https://iaqinfo.nier.go.kr/leinfo/indoor_mass_transit.do [accessed 12 February 2020].
- Statistics KOREA (KOSTAT). Public Transport Distribution Rate. Available: <http://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4259> [accessed 12 February 2020].
- Hong JH, Oh HN. Economic value of improving indoor air quality of subway stations in Seoul metropolitan area. *J Korean Econ Stud*. 2006; 17: 169-198.
- Yim BB, Lee KS, Kim JI, Hong HS, Kim JW, Jo KH, et al. 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*. 2014; 30(3): 233-244.
- Kinney PL, Chillrud SN, Sax S, Ross JM, Pederson DC, Johnson D, et al. Toxic Exposure Assessment: A Columbia-Harvard (TEACH) Study (the New York City Report). Mickey Leland National Urban Air Toxics Research Center Research Report 3. New York: NU-ATRC; 2005.
- Adachi M, Rohde CLE, Kendle AD. Effects of floral and foliage displays on human emotions. *HortTechnology*. 2000; 10(1): 59-63.
- Bringslimark T, Hartig T, Patil GG. The psychological benefits of indoor plants: a critical review of the experimental literature. *J Environ Psychol*. 2009; 29(4): 422-433.
- Wood RA, Orwell RL, Tarran J, Torpy F, Burchett M. Potted-plant/growth media interactions and capacities for removal of volatiles from indoor air. *J Hortic Sci Biotechnol*. 2002; 77(1): 120-129.
- Cao Y, Li F, Wang Y, Yu Y, Wang Z, Liu X, et al. Assisted deposition of PM_{2.5} from indoor air by ornamental potted plants. *Sustainability*. 2019; 11(9): 2546.
- Kim YM, Ryoo HY. User experience research paradigm in internet of things environment. *J Integr Des Res*. 2017; 16(3): 19-29.
- Lee JH, An SM, Kwak MJ, Kim KJ, Kim HH. Development of an IAQ index for indoor garden based IoT applications for residents' health management. *J Environ Health Sci*. 2018; 44(5): 421-432.
- Noh JH, Tack HH. The implementation of the fine dust measuring system based on Internet of Things (IoT). *J Korea Inst Inf Commun Eng*. 2017; 21(4): 829-835.
- Benammar M, Abdaoui A, Ahmad SHM, Touati F, Kadri A. A modular IoT platform for real-time indoor air quality monitoring. *Sensors (Basel)*. 2018; 18(2): 581.
- Jo JH, Jo B, Kim JH, Choi I. Implementation of IoT-based air quality monitoring system for investigating particulate matter (PM₁₀) in subway tunnels. *Int J Environ Res Public Health*. 2020; 17(15): 5429.
- Pradityo F, Surantha N. Indoor air quality monitoring and controlling system based on IoT and Fuzzy logic. Paper presented at: 2019 7th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT); 2019 July 24-26; Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE, 2019.
- Mumtaz R, Zaidi SMH, Shakir MZ, Shafi U, Malik MM, Haque A, et al. Internet of Things (IoT) based indoor air quality sensing and predictive analytic- a COVID-19 perspective. *Electronics*. 2021; 10(2): 184-209.
- Seoul Metro. Seoul Transportation Corporation's Transportation Performance. Available: <http://www.seoulmetro.co.kr/kr/board.do?menuIdx=548> [accessed 18 June 2021].
- Indoor Air Quality Control Act, Article 5 (Standards for maintenance of indoor air quality, etc.); Indoor Air Quality Control Act Enforcement Regulations, Article 3 (Standards for maintenance of indoor air quality). 2019.
- Park DU, Yun KS, Park ST, Ha KC. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} levels inside train and in platform of subway. *J Environ Health Sci*. 2005; 31(1): 39-46.
- Lee JY, Jang KJ, Han H. Study of pollution concentration source and its change pattern in underground station. Paper presented at: 2012 SAREK Summer Annual Conference; 2012 June 27-29; Yongpyong, Korea. Seoul: Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2012. p. 547-550.
- Partti-Pellinen K, Marttila O, Ahonen A, Suominen O, Haahtela T. Penetration of nitrogen oxides and particles from outdoor into indoor air and removal of the pollutants through filtration of incoming air. *Indoor Air*. 2000; 10(2): 126-132.
- Shao Y, Li J, Zhou Z, Zhang F, Cui Y. The impact of indoor living wall system on air quality: a comparative monitoring test in building corridors. *Sustainability*. 2021; 13(14): 7884.
- Pettit T, Irga PJ, Abdo P, Torpy FR. Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter? *Build Environ*. 2017; 125(15): 299-307.
- Torpy F, Zavattaro M. Bench-study of green-wall plants for indoor air pollution reduction. *J Living Archit*. 2018; 5(1): 1-15.

30. Ju JH. Change in the concentration of fine particles, temperature, and relative humidity as affected by different volume ratios of interior greening in real indoor space. *J Korean Soc Environ Restor Technol.* 2010; 13(2): 1-7.
31. Gwak YK, Kim HH, Lee SE, Son HR, Kim KJ, Shin DC, et al. A study on the change of indoor air quality (IAQ) and health score measurement according to amount of indoor plants in the elementary school classrooms. *J Odor Indoor Environ.* 2015; 14(3): 190-198.
32. Chao CYH, Tung TCW, Burnett J. Influence of different indoor activities on the indoor particulate levels in residential buildings. *Indoor Built Environ.* 1998; 7(2): 110-121.
33. He C, Morawska L, Hitchins J, Gilbert D. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmos Environ.* 2004; 38(21): 3405-3415.
34. Park JH, Park JC, Eum SJ. Estimation of diffusion direction and velocity of PM10 in a subway station (for Gaehwasan station of subway line 5 in Seoul). *J Korean Soc Transp.* 2010; 28(5): 55-64.

〈저자정보〉

양호형(주임연구원), 김형주(교수), 방성원(대표),
조훈우(대표), 김호현(교수)