

## 지하역사 공조시스템 효율분석을 통한 공기질 개선방향 연구

김정미\*, 유숙진, 손정원, 유상웅, 김소윤, 류경림, 정현철

부산광역시 보건환경연구원, 대기환경연구부 미세먼지안전팀

### A Study on air quality improvement through the efficiency analysis of Air Control System in underground station

Jeong-mi Kim\*, Sook-jin You, Jeongwon Son, Sangwoong Yoo, So-yun Kim, Gyeong-rim Ryu, Hyunchel Jeong

*Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Korea  
Department of Atmospheric Environment Research, Particulate Matter Safety Team*

#### Abstracts

In this study compared and analyzed the PM-2.5 reduction efficiency of indoor air and the filter replacement of the air conditioning system promoted by the Busan Transportation Corporation, and compared and analyzed the PM-2.5 reduction effect of the air conditioning system operation schedule. After replacing the filter of the air conditioning system, the reduction efficiency of PM-2.5 in Sasang platform was  $15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and  $6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, which was 2.3 times higher than the Gamjeon platform. Comparing the indoor and outdoor air ratio (I/O ratio) with the beta-ray absorption method of the Gamjeon and Sasang platform, the I/O ratio of the Gamjeon platform was 0.17~1.46 after the filter replacement date, and the I/O ratio of Sasang station was 2.3 times lower than that of the filter replacement.

As a result of analyzing 91 stations of lines 1 ~ 4 that changed the PM-2.5 concentration according to the change in the operating schedule of the air conditioning system, the air conditioning and exhaust facilities of line 1 differ by  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and 28.6% PM-2.5 reduction efficiency compared to the same month of the previous year. The stations of not replacing the filter on Line 2 showed a PM-2.5 reduction efficiency of 14.3% compared to the same month of the previous year as the average concentration was reduced by  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and was lower than that of Line 1. However, the stations of replacing the filter on Line 2 showed the difference and the PM-2.5 reduction efficiency of 40.0% compared to the same month of the previous year, showing the largest PM-2.5 reduction efficiency.

## I. 서론

최근 미세먼지에 대한 사회적 관심과 실내오염에 대한 우려가 커지고 있다. 특히 단기간에 많은 이용객들이 출퇴근 수단으로 이용하는 지하철의 경우 지하공간의 실내공기질이 불특정 다수의 건강에 영향을 미치게 된다.<sup>1)</sup>

이로 인하여 「실내공기질 관리법」 제4조의7에 따라 지하역사의 실내공기질측정망 운영이 의무화되면서 전국 지하역사에 초미세먼지 자동측정기가 설치되었고, 2021. 4. 1일부터 측정결과가 실내공기질 통합관리시스템 및 승강장 내 측정기 표출장치를 통해 시민들에게 실시간 공개되고 있다.<sup>2)</sup>

부산의 대표적인 대중교통수단인 부산 도시철도 또한 1985년 1호선의 운영을 시작으로 현재 총 4개 노선 114개 역이 있으며 지하역사 공기질 측정망을 계속 확장 구축하여 현재 91개 역사 104개 지점에 초미세먼지 자동측정기를 설치하여 시민들에게 신속한 지하역사 공기질 정보를 제공하고 있다.

하지만 지하역사는 닫힌 공간으로, 축적된 오염물질에 대한 저감 방안이 부족하며 환기설비를 가동하는 것 외에 다른 방법이 없는 실정이다.<sup>1)</sup> 외기에서 유입되는 바깥 공기는 공조기를 통하여 지하역사 내에서 재순환하는 순환공기와 혼합되고 에어필터를 거쳐 일부 미세먼지가 저감된 상태로 대합실과 승강장에 공급된다. 그러나 에어필터들은 사용 시간에 따라 성능이 떨어지고 적절한 유지보수가 이루어지지 않으면 에어필터가 막혀 공기조화장치의 송풍기에 부하를 발생시키며 실내 공기질의 악화를 수반하게 된다.<sup>1)3)</sup>

이러한 문제를 해결하고자 정부에서는 제3차 지하역사 공기질 개선대책을 통하여 지하역사에 일정 용량 이상 만족하는 환기설비 설치를 의무화하였고, 지하역사에 사용되는 환기설비 내 필터규격 등 성능을 구체화하여 환기설비 운영의 효율성을 제고하고자 하였으며, 환기설비·필터 등 적정 관리 및 가동 증대 등을 위한 「지하역사 환기설비 운영·관리 규정」 마련을 추진

하고 있다.

이에 본 연구는 정부의 지하역사 실내공기질 개선 추진과제와 부합하여 부산지역 지하역사의 기존 공조시스템 현황 및 문제점을 파악하고 2022년 2월에 공조시스템이 교체되어 정상 가동중인 일부 역사와 기존역사의 초미세먼지 농도를 비교·분석함으로써 공조시스템의 효율분석을 통해 공기질을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 지하역사 실내공기질

일반적으로 실내공기는 외기와는 달리 확산이나 희석되는 공간이 크지 않아 한번 오염이 되면 비교적 쉽게 악화되는 특성이 있으며 자연환기나 공기조화설비에 의해 어느 정도 개선이 될 수 있지만, 오염물질의 지속적인 유입과 누적이 계속되면 호흡기 질환 등 건강과 관련된 다양한 질환을 유발할 수 있으므로 실내환경이 인간에게 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다.

#### 1.1. 지하역사 실내공기 오염원

지하역사 실내공기 오염원에 영향을 미치는 요인들로 Table 1에 나타낸 것과 같이 크게 오염물질의 외부 유입에 의한 요인과 열차 운행에 의하여 자체적으로 발생하는 요인으로 나눌 수 있다.<sup>4)</sup>

#### 1.2. 오염인자

지하역사 내에 존재하고 있는 오염원은 Table 2와 같이 크게 지하철을 이용하는 승객과 운행 열차, 역사 밖의 외기 등으로 구분할 수 있다. 지하역사 실내공기질의 주요 오염물질은 지하역사를 이용하는 승객이나 유동인구의 신발과 옷 등에 묻어 유입되는 토양관련(soil related) 오염물(Ca, Fe, Si, Al, Na, K, Mn 등)과 도로와 인접한 환기구로 유입되는 자동차 운행으로 발생된 연소물질 및 마모, 도로분진 등 유입되는 외부복합(outdoor source) 오염물(Cr, Fe, Si, Na, K, Mn, Ni

Table 1. Major factors contributing to emission sources in underground stations<sup>4)</sup>

| Inflow                                     | Self-generated     | Spread of contaminants |
|--|--------------------|------------------------|
| Passengers using the subway                | Train wheel wear   | Train wind             |
| Underpass floating population              | Rail wear          | Ventilation system     |
| Forced(mechanical) Ventilation system      | Brake wear         |                        |
| Natural ventilation(external air entrance) | Catenary line wear |                        |

등), 전동차 운행시 브레이크, 레일마모 등에 의한 철 관련(ferrous related) 오염물(Fe, Cu 등)으로 구분할 수 있으며, Table 3에 나타내었다. 철 관련 오염물은 열차풍에 의해 승강장이나 대합실로 유입된다. 유입 오염물질의 크기는 토양관련 오염물은 PM-10이상의 거대입자이고 외부 복합오염물은 주로 PM-2.5이며 자연환기와 강제환기로 유입된다.<sup>4)</sup>

### 1.3. 지하역사 외기 환기량 기준

지하역사의 실내공기질은 지하철을 이용하는 승객과 열차운행에 의한 오염발생원 이외에도 외기의 영향도 받는다. 지하역사 오염원을 고려하여 환기시 도입되는

외기중의 대기오염물질을 제거함으로써 지하역사 내의 공기질을 개선시킬 수 있다. 지하역사는 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에 따라 기계환기설비를 설치하여야 하는 다중이용시설로 분류되어 있으며, 지하역사 내의 필요 환기량은 예상 이용인원당 25 m<sup>3</sup>/인/h 이상, 환기횟수는 0.5 회/hr 이상으로 '철도설계지침' 과 '건축물의 설비기준 등에 관한 규칙'에 규정되어 있다. 따라서 외기 급기시설과 공기조화기에 필터와 같은 여과장치를 부착하거나 성능을 강화하여 공기오염도를 저감시킬 수 있다. 2022년 지하역사의 실내공기질 기준과 부산 지하역사의 오염물질 평균농도를 Table 4에, 부산교통공사에서 시행하는 공기질 개선

Table 2. Indoor emission source in underground stations

| Indoor air pollution source  |   |
|--|---|
| - subway passengers<br>- an underground pedestrian on the subway<br>- Air pollutants introduced by ventilation system<br>- train wind by train operation | - Ventilation using mechanical equipment<br>- Natural ventilation through pure openings and stair entrances |

Table 3. Major sources of contamination in underground stations

| Section   | Soil related | Outdoor source | Ferrous related |
|-----------|--------------|----------------|-----------------|
| Concourse | 20.2%        | 55.6%          | 24.2%           |
| Platform  | 14.4%        | 29.9%          | 55.7%           |
| Tunnel    | 16.0%        | 18.6%          | 65.4%           |

Table 4. Busan underground station indoor air quality standard and average conc. (2022)

| Item          | PM-2.5( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | PM-10( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | CO <sub>2</sub> (ppm) | CO(ppm)  | NO <sub>2</sub> (ppm) | HCHO( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------------------------------|
| Standards     | below 50                           | below 100                         | below 1,000           | below 10 | below 0.1             | below 100                        |
| Average Conc. | 16                                 | 28                                | 493                   | 0.4      | 0.028                 | 2.1                              |

Table 5. Major status of underground station air quality improvement project (Humetro)

| Year  | Section               | Improvement project   |
|---|-----------------------|---|
| 2020 ~ 2022<br>(3 years)  | Ventilation           | Replacement of underground station ventilation system(including air filtration system)              |
|   |                       | Establishment of interlocking system for air purifier and ventilation system in underground station |
|   |                       | Installation of air purifiers in underground stations   |
|   |                       | Ventilation duct and air filter cleaning  |
|   | Train and main tunnel | Installation of air purifiers in trains   |
|   |                       | Water cleaning in the tunnel  |
| Replacing old ventilation system on main line and installing two-way dust collector |                       |   |

사업 주요현황을 Table 5에 나타내었다.

#### 1.4. 지하역사 환기의 흐름 및 제어

지하역사내 공기질 개선을 위해서는 현재 설치·운영되고 있는 환기장치들의 제어가 필요하며, 지하역사내 환기는 크게 기계설비로 가동되는 강제환기와 일반적인 개구부(계단출입구, 환기장치가 미설치된 일반 개구부)를 통해서 공기가 유입되는 자연환기가 있다. 이 중 자연환기에 의한 환기효과는 지하역사내에서의 조건에 영향을 많이 받게 되며, 강제환기에 비해 그 제어가 어렵다.<sup>4)</sup> 지하역사의 강제환기 흐름은 Fig. 1과 같이 외기도입부를 통하여 유입된 외기가 1차 여과 필터를 거치고 공기조화기를 통해 2차 필터로 정화된 후

대합실과 승강장 상부에 설치된 급기구로 지하역사 내에 유입되며 일정시간 순환된 공기가 강제배기를 통하여 대합실과 승강장 상부에 설치된 배기구로 나가고 최종적으로 실외 배기탑에서 방출되는 순서로 이루어진다.

#### 1.5. 부산 지하역사 공조시스템 필터 및 국내 공조필터 종류

급기구 공기여과장치에 적용하는 국내 공조필터 종류 및 특징을 Table 6에 나타내었다. 부산 도시철도 기존역사의 공조시스템은 급기구 데미스터 필터(1차)와 공조기 무전원정전식 필터(2차)가 설치되어 있으나 기존 공조시스템으로는 초미세먼지 대응이 불가한 상황이

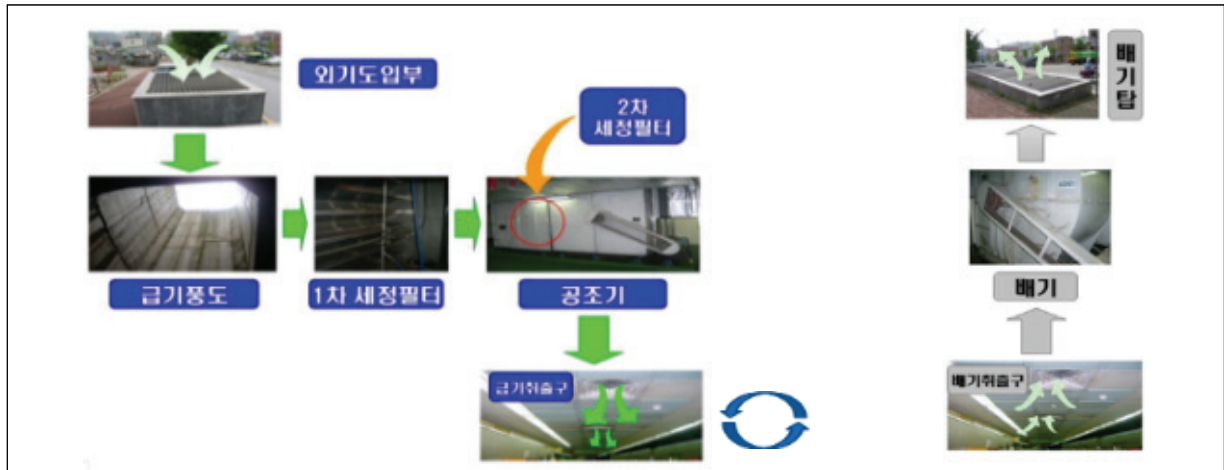







Fig. 1. Ventilation flow chart of underground station<sup>5)</sup>

Table 6. Types and features of air supply air filter<sup>5)</sup>

| Section                 | Demister  | Unpowered power supply  | Medium filter   | Metal filter (plate type)  | Metal filter (cylindrical)  |
|-------------------------|---|---|---|--|---|
| Shape                   |  |  |  |  |  |
| Quality of the material | Stainless steel   | PE+PP Combination   | Glass Fiber   | Stainless steel  | Stainless steel   |
| PM-2.5                  | Unable to capture   | Unable to capture   | More than MERV13  | MERV10   | MERV10  |
| Merit                   | No filter replacement required (Washing)  | No filter replacement required (Washing)  | Excellent collection efficiency<br>No need for water supply facilities              | PM-2.5 Collection Available<br>No filter replacement required (Washing)              | PM-2.5 Collection Available<br>No need for water supply facilities(dry cleaning)      |
| Weak-ness               | Unable to capture PM2.5   | Unable to capture PM2.5   | Periodic filter replacement required  | Accessory installation space required  | Accessory installation space required   |

다. 이에 부산교통공사에서는 2호선 일부인 사상 ~ 울리 구간 10개 역사의 공조시스템을 급기구 데미스터 필터(1차)와 공조기 미디움 필터(2차)로 교체하여 2022년 2월말 이후 정상가동 중이다. 미디움 필터는 유리섬유(Glass fiber)를 사용하여 여러 가지 형태로 제작하여 사용하는 필터로서 1  $\mu\text{m}$  이상의 분진을 포집하여 기계장치의 보호와 실내 청정도를 높이는 데 사용하는 중성능 필터이다.<sup>6)</sup>

### 1.6. MERV 등급

MERV 등급은 필터의 최소효율(Minimum Efficiency Reporting Value)로서, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)에서 만든 필터의 제거능력을 등급화 한 것이다. 입자크기에 따른 MERV 등급과 MERV 등급에 따른 적용 범위는 Table 7과 Table 8과 같으며, PM-2.5를 완전히 제거하기 위해서는 MERV 등급이 12이상인 필터를 사용해야 함을 알 수 있다. 부산 도시철도 2호선 일부 구간에 교체된 미디움 필터는 2021년 12월에 실시한 ASHRAE Standard 52.2-2017 시험 방법에 따른 성능검사에서 0.3 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  입자제거율 (E1) 89.1%, 1.0 ~ 3.0  $\mu\text{m}$  입자제거율(E2) 97.4%, 3.0 ~ 10.0  $\mu\text{m}$ (E3) 입자제거율 98.9%로 나타났으며 Table 9와 비교하여 MERV 등급이 15임이 입증되었다.

## 2. 대상역사(감전역과 사상역)의 특성

### 2.1. 공간적 구조 및 유동인구

대상역사로 도시철도 2호선 중 2022년 2월에 공조시스템 교체가 완료되어 정상가동된 사상역과 공조시스템 교체가 되지 않은 역사 중 사상역과 인접하여 외기의 영향이 비슷할 것으로 예상되는 역사인 감전역을 선정하였다. 감전역은 지하1층에 대합실, 지하2층에 승강장이 있으며 일 평균 수송인원은 3,240명이다. 사상역 또한 지하1층에 대합실, 지하2층에 승강장이 있어 감전역과 역사구조는 비슷하나, 서부시외버스터미널 및 부산김해경전철과 인접해 있어 일 평균 수송인원은 19,172명으로, 2호선 중 두 번째로 이용 승객수가 많은 역사이며 감전역보다 5.5배 많다. 두 역사 모두 승강장에는 스크린도어(PSD; Platform screen door)가 설치되어 있으나 감전역 승강장은 반밀폐형으로 PSD와 천장사이에 17 cm 열린 구간이 존재하지만, 사상역 승강장은 밀폐형으로 차량이 운행되는 터널과 승강장이 완벽하게 공간적으로 분리되어 있다는 차이점이 있다. PSD는 차량이 정차하여 승객이 승·차하는 시간대에만 개방되도록 자동 운전되고 있다. 두 역의 승강장의 형태는 상행과 하행 노선이 분리되어 있어 승강장 대기 승객이 서로 마주 보는 특성을 가지는 상대식 타입으로 구성되어 있다.

Table 7. MERV Index according to particle diameter<sup>5)</sup>

| MERV    | Min. particle diameter   | Common removal contaminants   |
|---------|--------------------------|---|
| 1 ~ 4   | 10 $\mu\text{m}$ ~       | Pollen, dust mites, sand dust, spray paint dust, carpet fiber         |
| 5 ~ 8   | 10.0 ~ 3.0 $\mu\text{m}$ | Fungi, spores, dust mite debris, pet dandruff, hair spray             |
| 9 ~ 12  | 3.0 ~ 1.0 $\mu\text{m}$  | Legionella, Humidifier Dust, Lead Dust, Processed Flour               |
| 13 ~ 16 | 1.0 ~ 0.3 $\mu\text{m}$  | Bacteria, sneezing, most smoke and insecticide dust, cosmetics powder |
| 17 ~ 20 | ~ 0.3 $\mu\text{m}$      | Microorganisms, carbon dust, smoke                                    |

Table 8. Applicable building types according to MERV Index<sup>5)</sup>

| MERV    | Min. particle diameter   | Applicable building types   |
|---------|--------------------------|---|
| 1 ~ 4   | 10 $\mu\text{m}$ ~       | Minimum filtration, general housing, window air conditioning  |
| 5 ~ 8   | 10.0 ~ 3.0 $\mu\text{m}$ | Commercial buildings, excellent houses, general workshops   |
| 9 ~ 12  | 3.0 ~ 1.0 $\mu\text{m}$  | High-end houses, excellent commercial buildings, excellent workshops  |
| 13 ~ 16 | 1.0 ~ 0.3 $\mu\text{m}$  | General hospital, smoking room, high-end commercial building  |
| 17 ~ 20 | ~ 0.3 $\mu\text{m}$      | Clean rooms, radioactive removal facilities, pharmaceutical facilities, carcinogen removal facilities, surgical rooms |

2.2. 공조시스템의 가동시간 및 규격

감전역과 사상역은 1999년에 개통된 역사로 지하역사의 환기를 위하여 기계 환기가 가동되는데, 2022년 5월까지의 승강장과 대합실의 공조기와 배기설비(승/공, 승/배, 대/공, 대/배)를 각각 시간당 30분씩 일일 10시간씩 가동(5 ~ 24시)하였으나 부산교통공사에서는 공조시스템 가동 스케줄에 따른 실내공기질의 변화를 파악하고자 1호선 ~ 4호선 91개 전역사의 공조기 가동시간을 6월 ~ 8월에는 열차 운행시간인 5시 ~ 24시에 19시간 연속(50분 가동 10분 정지)으로 운전하였으며, 9월부터는 각 역사의 현장여건에 맞게 이전 스케줄로 전환한 상태이다. Table 10은 감전역과 사상역의 변경 전·후의 가동 스케줄을 나타내었다.

감전역은 급기구 데미스터 필터(1차)와 공조기 무전 원정전식 필터(2차)가 설치되어 있으나 사상역은 급기구 데미스터 필터(1차)는 감전역과 같지만 공조기에는 2022년 2월경 교체된 미디움 필터(2차)가 설치(공조기 총 4대, 공조기 1대당 550 mm × 550 mm = 18 EA 설치)되어 있으며 각 필터의 PM-2.5 포집효율은 Table 11과 같다.

감전역과 사상역의 급·배기시설 설계사양을 Table 12에 나타내었다. 승강장의 공조기는 각 역사당 4대로 감전역은 급기 풍량이 배기 풍량보다 2배 많게 설계되어 급기에 치중되어 있으나, 사상역은 급기 풍량과 배기 풍량이 비슷하게 설계되어 있어 급기와 배기가 조

Table 9. MERV parameters

| MERV Index | Composite average particle size efficiency, %<br>in size range, μm |                   |                    |
|------------|--|-------------------|--------------------|
|            | Range 1 (0.3~1.0)  | Range 2 (1.0~3.0) | Range 3 (3.0~10.0) |
| 8          | N/A  | 20 ≤ E2           | 70 ≤ E3            |
| 9          | N/A  | 35 ≤ E2           | 75 ≤ E3            |
| 10         | N/A  | 50 ≤ E2           | 80 ≤ E3            |
| 11         | 20 ≤ E1  | 65 ≤ E2           | 85 ≤ E3            |
| 12         | 35 ≤ E1  | 80 ≤ E2           | 90 ≤ E3            |
| 13         | 50 ≤ E1  | 85 ≤ E2           | 90 ≤ E3            |
| 14         | 75 ≤ E1  | 90 ≤ E2           | 95 ≤ E3            |
| 15         | 85 ≤ E1  | 90 ≤ E2           | 95 ≤ E3            |
| 16         | 95 ≤ E1  | 95 ≤ E2           | 95 ≤ E3            |

Table 10. Schedule for operating air handling unit in Gamjeon and Sasang platform

| Schedule Station | Platform schedule (~ 2022. 5.)          | Platform schedule (2022. 6. ~ 8.)       | Platform schedule (2022. 9. ~)          |
|------------------|---|---|---|
| Gamjeon          | 5:00 ~ 24:00<br>10 hours<br>30min/hr on | 5:00 ~ 24:00<br>19 hours<br>50min/hr on | 5:00 ~ 24:00<br>10 hours<br>30min/hr on |
| Sasang           | 5:00 ~ 24:00<br>10 hours<br>30min/hr on | 5:00 ~ 24:00<br>19 hours<br>50min/hr on | 5:00 ~ 24:00<br>10 hours<br>30min/hr on |

Table 11. Characteristics of Air Conditioning System in Gamjeon and Sasang Station

| Station | Outdoor filter     |  | AHU filter             |  |
|---------|--------------------|--|------------------------|--|
|         | Name               | Characteristic                                     | Name                   | Characteristic                                 |
| Gamjeon | Demister (Washing) | · PM-2.5 : No performance standard<br>· MERV : 4~5 | Unpowered power supply | PM-2.5 : No performance standard<br>MERV : 6~7 |
| Sasang  |                    |  | Medium filter          | PM-2.5 : 90%<br>MERV : 15                      |



화를 이룬다. 또한 감전역의 배기구는 선로의 상하부에 위치해 있어 반밀폐형 스크린도어로 인해 배기가 일부 차단된 반면, 사상역은 밀폐형 스크린도어가 설치되어 있으며 배기구가 승강장 상부에 별도로 설치되어 있어 감전역보다 승강장 내 공기 순환에 유리할 것으로 판단된다.

### 3. 감전역과 사상역의 급·배기시설

#### 3.1. 디퓨저 평면 배치도 및 제원

급·배기시설을 개량하지 않은 감전역과 2022년 2월 경 공조시스템의 필터를 미디움 필터로 교체하면서 급·배기시설을 전면 개량한 사상역의 승강장 내 급·배기시설을 조사하였다. 두 역사 모두 지하역사 공기질 측정망(미세먼지측정소)이 설치되어 있는 장산행 방향 승강장을 조사한 결과, 감전역의 승강장에는 급기용 원형 및 각형 디퓨저 58개가 상부에 설치되어 있고, 사상역의 승강장에는 급기용 각형 디퓨저 87개와 배기용

각형 디퓨저 20개가 상부에 설치되어 있으며 디퓨저 개수 및 재원은 Table 13에 나타내었다. Fig. 3과 같이 감전역의 승강장에는 4대의 공기청정기가 설치되어 있으며 초미세먼지 측정소가 중앙에 배치되어 있다. 감전역의 승강장 내에는 58개 디퓨저가 모두 급기용이었으며 배기구는 선로부 상하부에 설치되어 있었고 스크린도어(PSD) 설치로 하부배기는 차단되었으나 상부배기는 반밀폐형인 스크린도어(PSD)와 천장사이에 17 cm 열린 구간으로 이루어진다. PSD가 설치되기 전에는 열차풍에 의한 교란으로 승강장 내 상부와 하부 공간 간에 기류 혼합효과가 발생하였으나, 설치 후에는 이러한 기류 혼합효과가 줄어들었다. 사상역의 승강장에는 Fig. 4와 같이 5대의 공기청정기가 설치되어 있고 초미세먼지 측정소가 중앙에서 상행선 방향으로 치우쳐져 배치되어 있다. 배기시설을 전면 개량한 사상역의 급기구는 이용 승객들이 대기하는 공간인 스크린도어 개폐구간(승강장 가운데)을 중심으로 배치되

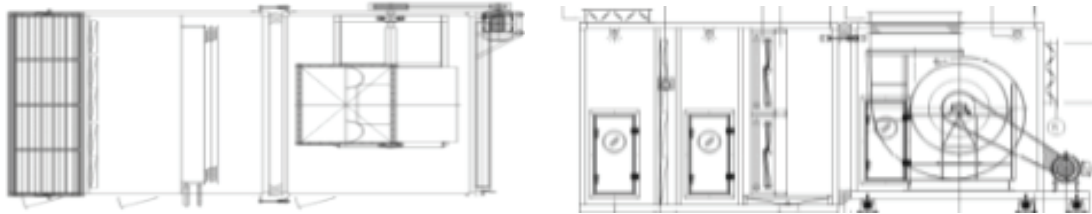


Fig. 2. Floor plan of Air handling unit in Gamjeon and Sasang subway station

Table 12. Standards of air handling unit and exhaust fan in Gamjeon and Sasang subway station

| Section | purpose                                  | standards   | Count |
|---------|--|---|-------|
| Gamjeon | Platform air handling unit (AHU-1)       | Air volume:75,000CMH, static pressure:990Pa, power:22kW   | 4     |
|         | Concourse air handling unit (AHU-2)      | Air volume:39,540CMH, static pressure:980Pa, power:18.5kW | 2     |
|         | Station office air handling unit (AC-1)  | Air volume:7,200CMH, static pressure:880Pa, power:3.7kW   | 1     |
|         | Platform exhaust fan                     | Air volume:37,500CMH, static pressure:545Pa, power:15kW   | 4     |
|         | Concourse exhaust fan                    | Air volume:29,940CMH, static pressure:644Pa, power:11kW   | 2     |
| Sasang  | Platform air handling unit (AHU-1)       | Air volume:51,225CMH, static pressure:1,050Pa, power:30kW | 4     |
|         | Concourse air handling unit (AHU-2)      | Air volume:33,200CMH, static pressure:950Pa, power:15kW   | 2     |
|         | Station office air handling unit (AHU-3) | Air volume:16,900CMH, static pressure:1,050Pa, power:11kW | 1     |
|         | Platform exhaust fan                     | Air volume:51,240CMH, static pressure:545Pa, power:15kW   | 4     |
|         | Concourse exhaust fan                    | Air volume:26,220CMH, static pressure:445Pa, power:5.5kW  | 2     |

Table 13. The number of ventilation diffusers and specification in the platform of Gamjeon and Sasang station

| Section | Supply circle diffuser | Supply rectangular diffuser | Exhaust rectangular diffuser |
|---------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Gamjeon | 500×500 (∅300) = 44EA  | 500×500 = 14EA              | -                            |
| Sasang  | -                      | 500×500 = 87EA              | 500×500 = 20EA               |

어 있고 배기구는 승강장 좌우 양끝으로 배치되어 있어 승강장 중심부에 정체된 공기를 급기를 통해 밀어 내어 양끝의 배기구로 배출하는 방식으로 승강장 내 공기순환에 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 측정방법

4.1. 시료채취 및 분석

PM2.5의 농도는 2021년 11월부터 2022년 10월까지 감전역과 사상역 승강장에 설치된 지하역사 공기질 측정망 측정기의 자료(베타선탄수법-Met One, BAM-1020)와 3월 ~ 4월까지 감전역과 사상역 승강장과 급기실에 설치된 중량법 측정기(APM, Met One)를 이용하여 감전역 (실외)급기실, (실내)승강장의 각각 2 지점에서 유량 16.7 L/min으로 PM-2.5를 연속 채취한 자료를 활용하였다. 중량법 측정기는 24시간 동안 측정을 수행하였으며, 베타선탄수법 측정기는 1시간

간격으로 측정을 수행하였다. 시료채취 지점은 대상역사의 (실외)급기실, (실내)승강장 각각 2지점이며, Fig. 5와 같다. 지하역사 인근의 대기 중 PM-2.5 농도를 확인하기 위하여 각 대상역사 인근 대기측정소(감전역-학장동, 사상역-덕포동)의 자료를 활용하여 외기 농도를 비교하였다.

4.2. 급·배기량 조사

승강장 내 환기설비 차이에 따른 PM-2.5의 농도변화를 알아보기 위해 지하역사 공기질 측정망 미세먼지 측정기(베타선탄수법 측정기)와 중량법 측정기가 설치되어 있는 감전역과 사상역 장산행 승강장 급·배기구의 디퓨저 제원을 조사하고 급·배기구 풍속을 역사별로 측정하였다. Fig. 6과 같이 풍속계를 (Kestrel 5500) 사용하여 급·배기구에서 풍속을 직접 측정하였으며, 승강장 내 온도, 습도 및 기압도 동시에 측정하였다.

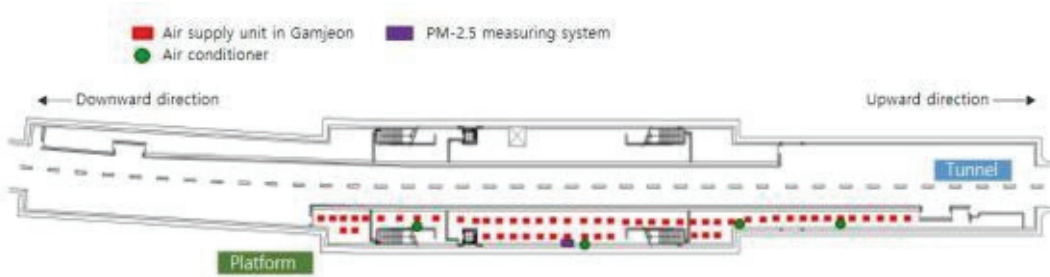


Fig. 3. Schematic of platform and locations of air supply unit in Gamjeon subway station

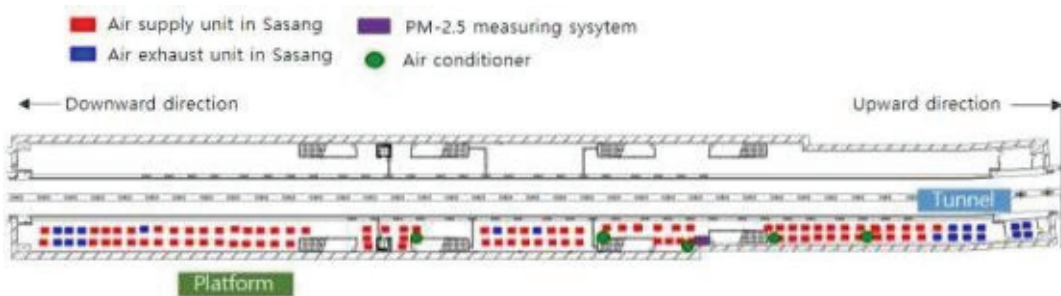


Fig. 4. Schematic of platform locations of air supply unit and Air exhaust unit in Sasang subway station

Table 14. Analytical item and method

| Section                      | Sampler   | Item   | Flow rate  | Analytical instrument  |
|------------------------------|---|--------|------------|--|
| Outdoor<br>(Air supply room) | Low volume air sampler<br>(APM and Met One)               | PM-2.5 | 16.7 L/min | PM Filter weighting robot system                                       |
| Indoor<br>(Platform)         | Low volume air sampler<br>(APM and Met One<br>(BAM-1020)) |        |            | PM Filter weighting robot system beta rays<br>(Scintillation detector) |



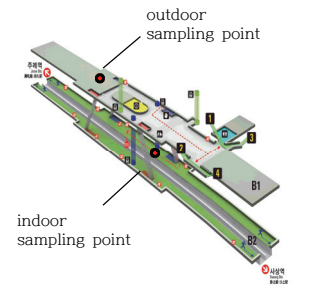


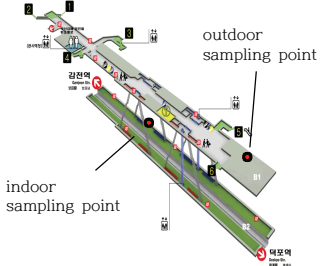


| Section | Sampling site  | Outdoor(Air supply room)   | Indoor(Platform)  |
|---------|--|--|---|
| Gamjeon |  <p>outdoor sampling point</p> <p>indoor sampling point</p> |  |  |
| Sasang  |  <p>outdoor sampling point</p> <p>indoor sampling point</p> |  |  |

Fig. 5. Sampling location for this study

|         |   |                              |   |
|---------|---|------------------------------|---|
| Gamjeon |  | Supply circle diffuser       |  |
|         |   | Supply rectangular diffuser  |  |
| Sasang  |  | Supply rectangular diffuser  |  |
|         |   | Exhaust rectangular diffuser |  |

Fig. 6. Supply circle, rectangular diffuser and Exhaust rectangular diffuser in the platform Gamjeon and Sasang subway station

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. PM-2.5 저감효율 분석

부산교통공사에서 2022년 2월말까지 2호선 일부인 사상 ~ 율리 구간 10개 역사의 공조시스템을 급기구 데미스터 필터(1차)와 공조기 미디움 필터(2차)로 교체한 후, 2022년 3월 25일 ~ 4월 8일 기간동안 급기실과 승강장에서 같은 날 같은 시간대에 24시간 동안 채취한 52개 샘플을 중량법으로 분석한 결과, 감전역의 급기실은 5.8 ~ 39.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 사상역의 급기실은 8.2 ~ 34.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PM-2.5 농도분포를 보였으며, 두 역사의 급기실 PM-2.5 평균농도가 16.4 ~ 16.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비슷하게 나타났으나, 승강장은 감전역이 4.1 ~ 37.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 사상역이 1.3 ~ 14.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PM-2.5 농도분포를 보였으며, 감전역의 평균농도가 15.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 사상역의 평균농도는 6.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감전역이 2.3배 높게 나타났다. PM-2.5의 저감효율은 감전역이 4.3%로 미미하여 급기실로 유입된 외기의 영향을 그대로 받고 있었으나, 사상역은 59.3%로 감전역보다 13.8배 높은 것으로 나타났다.

#### 2. PM-2.5 실내외 공기비(I/O ratio) 비교

감전역과 사상역 승강장의 2022년 3월 25일 ~ 4월 8일 기간동안 급기실과 승강장에서 상기와 같이 채취·분석한 결과를 토대로 두 역사의 PM-2.5 실내외 농도비(I/O ratio)를 비교해 보았다. 대기 중 오염물질은 실내로 유입될 수 있고, 많은 연구에서 대기 중 오염물질의 농도가 실내 오염물질의 농도와 밀접한 관련이 있음을 제시한 바 있다. I/O ratio가 1에 가까울수록 실내 외 농도가 서로 균질하다는 것을 의미하고 I/O ratio가 1보다 낮으면 실외농도가 더 높다는 것을, 1보다 높으면 실내농도가 더 높고 실내 배출원이 존재할 가능성이 있음을 나타낸다.6) 비교 결과, 감전역의 I/O ratio는 0.71 ~ 1.46의 분포로 평균 I/O ratio가 1.00이었으나, 사상역은 0.10 ~ 0.88의 분포로 평균 I/O ratio가 0.44이었으며 감전역 대비 2.3배 낮은 것으로 나타났다. 이는 공조시스템의 필터교체 후 외기의 오염물질이 제거되어 지하역사 내로 공기가 유입됨으로써 실내외 공기비가 현저히 낮아진 것으로 판단된다.

Table 15. Result of measurement of PM-2.5 conc. (gravimetric method)

| Section | Month        | PM-2.5 Conc. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |            |            |             |                  |            |            |             | Reduction rate (%) |
|---------|--------------|---|------------|------------|-------------|------------------|------------|------------|-------------|--------------------|
|         |              | Outdoor(Air supply room)                  |            |            |             | Indoor(Platform) |            |            |             |                    |
|         |              | Mean                                      | SD         | Min        | Max         | Mean             | SD         | Min        | Max         |                    |
| Gamjeon | March        | 15.5                                      | 13.7       | 5.8        | 39.5        | 15.7             | 12.9       | 4.1        | 37.7        | 0.0                |
|         | April        | 17.0                                      | 6.5        | 8.2        | 28.2        | 15.7             | 3.7        | 10.5       | 22.8        | 7.6                |
|         | <b>Total</b> | <b>16.4</b>                               | <b>9.4</b> | <b>5.8</b> | <b>39.5</b> | <b>15.7</b>      | <b>8.0</b> | <b>4.1</b> | <b>37.7</b> | <b>4.3</b>         |
| Sasang  | March        | 15.4                                      | 10.7       | 8.2        | 34.0        | 6.0              | 5.2        | 1.3        | 14.2        | 61.0               |
|         | April        | 17.5                                      | 6.1        | 8.3        | 28.1        | 7.3              | 2.1        | 2.6        | 10.3        | 58.3               |
|         | <b>Total</b> | <b>16.7</b>                               | <b>7.8</b> | <b>8.2</b> | <b>34.0</b> | <b>6.8</b>       | <b>3.5</b> | <b>1.3</b> | <b>14.2</b> | <b>59.3</b>        |



Fig. 7. PM-2.5 I/O ratio with replacement of AHU

\* AHU (Air handling Unit)

### 3. 공조기 필터 차압 상태

사상역에는 A, B 환기실 2실로 구분되어 있고, 1실당 두 대의 공조기가 설치되어 있으며 2022년 7~9월 중 3회에 걸쳐 측정된 공조기의 미디움필터 차압 결과값을 Table 16에 정리하였다. 차압이란 필터 여과 전과 후의 압력차이를 말하는데 필터의 교체주기를 결정짓는 중요한 지표이다. 사상역에 교체된 미디움 필터의 설계시방서에 따르면 필터 적정유지 차압은 12 ~ 38 mmH<sub>2</sub>O로, 40 mmH<sub>2</sub>O를 초과하면 교체시기가 도래한 것으로 본다. Table 16과 같이 사상역 승강장에 설치된 공조기 4대의 차압은 서서히 증가하면서 2022년 8월 10일 이후 2 ~ 3대의 공조기의 차압이 40 mmH<sub>2</sub>O를 넘어 미디움 필터의 교체가 필요할 것으로 판단된다.

### 4. 공조시스템 가동 스케줄 변경에 따른 PM-2.5 농도 변화

#### 4.1. 호선별 PM-2.5 농도변화

가동 스케줄을 변동한 1 ~ 4호선의 91개 전역사에 대하여 공조시스템의 가동 스케줄 변화에 따른 PM-2.5 농도변화를 분석하였다. 계절적인 농도변화에 영향을 받지 않도록 2021년 11월 ~ 2022년 10월간 작년 동월

측정 데이터와 비교하여 PM-2.5 평균농도를 Table 17에 나타내었다. 2호선은 미디움필터 교체에 따른 농도 변화 또한 확인하고자 필터 교체를 하지 않은 역사(장산 ~ 감전, 26개 역사)와 필터교체와 급배기시설을 개량한 역사(사상 ~ 울리, 10개 역사)를 비교하여 분석하였다. 그 결과 Fig. 9과 같이 1호선은 전년도 동월과 비교하여 PM-2.5 평균농도가 3 µg/m<sup>3</sup> 저감되었으며, 승강장의 공조기와 배기시설을 19시간 가동한 6 ~ 8월은 평균농도 21 µg/m<sup>3</sup>에서 15 µg/m<sup>3</sup>로, 6 µg/m<sup>3</sup>의 차이를 보이며 전년도 동월 대비 28.6%의 PM-2.5 저감효율을 보여 공기질 개선에 크게 도움이 되는 것으로 판단된다. 2호선은 Fig. 10과 같이 필터를 교체하지 않은 역사(장산 ~ 감전)의 전년도 동월과 비교하여 전체적으로는 PM-2.5 평균농도가 오히려 증가하였으나 6 ~ 8월은 평균농도 14 µg/m<sup>3</sup>에서 12 µg/m<sup>3</sup>로, 2 µg/m<sup>3</sup>의 차이를 보여 전년도 동월 대비 14.3%의 PM-2.5 저감효율을 보였고 1호선의 저감효율보다는 낮게 나타났다. 하지만 2호선의 필터를 교체한 역사(사상 ~ 울리)의 6 ~ 8월 사이 PM-2.5 평균농도는 15 µg/m<sup>3</sup>에서 9 µg/m<sup>3</sup>로, 6 µg/m<sup>3</sup>의 차이를 나타내며 전년도 동월 대비 40.0%의 PM-2.5 저감효율을 보여 1호선과 마찬가지로 공조기와 배기시설의 가동시간 증가로 인한 공

Table 16. Differential pressure of Air handling unit in Sasang platform

| Date       | Ventilation room name | Differential pressure of air handling unit in platform (mmAq) |       | Filter differential pressure retention criteria (mmAq) |
|------------|-----------------------|---|-------|--|
|            |                       | AHU 1   | AHU 2 |  |
| 2022-07-08 | A                     | 20  | 11    | 12 ~ 38  |
|            | B                     | 20  | 21    |  |
| 2022-08-10 | A                     | 39  | 17    |  |
|            | B                     | 46  | 48    |  |
| 2022-09-08 | A                     | 49  | 20    |  |
|            | B                     | 84  | 68    |  |

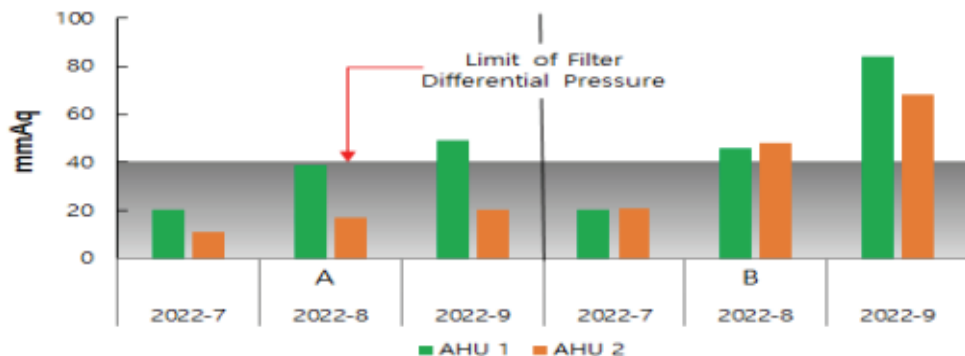


Fig. 8. Change of differential pressure of Air handling unit in Sasang platform

기질이 개선된 것으로 보인다. 3호선과 4호선은 Fig. 11과 같이 전년도 동월과 비교하여 PM-2.5 평균농도가 각각 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  저감되었으며, 승강장의 공조기와 배기시설을 19시간 가동한 6 ~ 8월은 3호선은 14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 4호선은 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균농도가 저감되었고 PM-2.5 저감효율은 각각 21.4%, 16.7%를 나타내었다. 공조기를 19시간 가동한 기간동안 동년 대비 PM-2.5 저감효율이 높은 순서로는 2호선[필터교체역사] (40.0%) > 1호선 (28.6%) > 3호선(21.4%) > 4호선 (16.7%) > 2호선[필

터미교체역사] (14.3%)로 조사되어 필터교체와 공조기 가동시간 증대가 동시에 이루어진 역사가 공기질 개선이 큰 것으로 판단된다.

Table 17. PM-2.5 Concentration by Line according to changing operation schedule of AHU

| month | PM-2.5 Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |      |                          |      |                      |      |             |      |            |      |
|-------|---|------|--------------------------|------|----------------------|------|-------------|------|------------|------|
|       | Line 1 [32]                                       |      | Line 2 [36]              |      |                      |      | Line 3 [13] |      | Line 4 [9] |      |
|       | 2021  | 2022 | not Filter replaced [26] |      | Filter replaced [10] |      | 2021        | 2022 | 2021       | 2022 |
|       |   |      | 2021                     | 2022 | 2021                 | 2022 |             |      |            |      |
| Nov   | 21  | 23   | 19                       | 19   | 20                   | 23   | 17          | 19   | 16         | 16   |
| Dec   | 25  | 24   | 21                       | 20   | 23                   | 26   | 25          | 19   | 21         | 16   |
| Jan   | 23  | 23   | 18                       | 22   | 20                   | 28   | 23          | 22   | 19         | 19   |
| Feb   | 25  | 22   | 21                       | 20   | 22                   | 20   | 25          | 22   | 21         | 18   |
| Mar   | 27  | 26   | 21                       | 23   | 21                   | 21   | 23          | 23   | 20         | 20   |
| Apr   | 23  | 20   | 16                       | 17   | 16                   | 13   | 18          | 16   | 15         | 15   |
| May   | 24  | 21   | 17                       | 19   | 16                   | 13   | 18          | 17   | 15         | 16   |
| Jun   | 25  | 14   | 18                       | 12   | 16                   | 8    | 18          | 11   | 16         | 11   |
| Jul   | 19  | 16   | 13                       | 13   | 14                   | 9    | 13          | 12   | 11         | 11   |
| Aug   | 18  | 14   | 12                       | 12   | 14                   | 10   | 11          | 10   | 9          | 9    |
| Sep   | 16  | 14   | 10                       | 11   | 13                   | 11   | 9           | 10   | 8          | 9    |
| Oct   | 18  | 14   | 14                       | 12   | 16                   | 11   | 14          | 13   | 12         | 10   |
| Mean  | 22  | 19   | 16                       | 17   | 17                   | 16   | 18          | 16   | 15         | 14   |

\* [ ] : Number of stations on each line

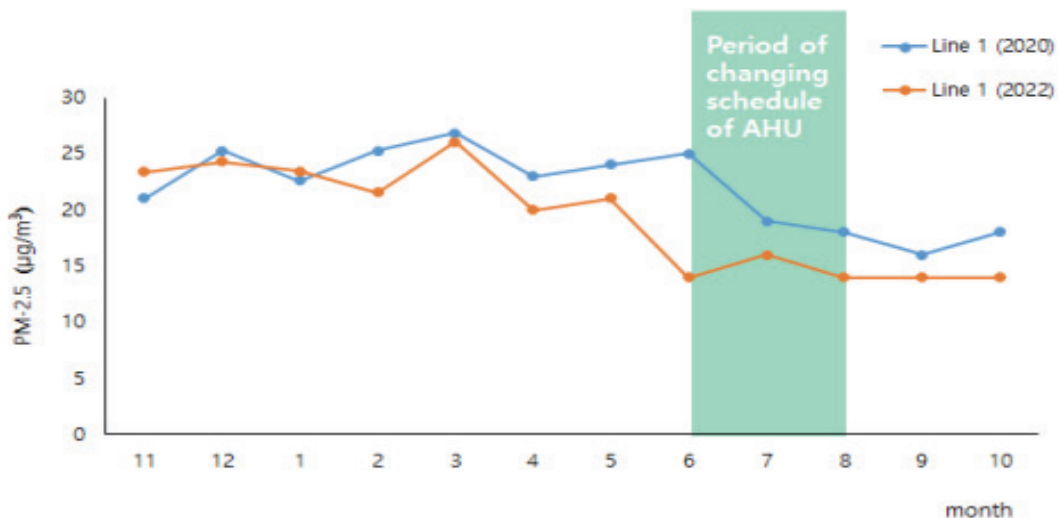


Fig. 9. PM-2.5 Concentration in Line 1 according to changing operation schedule of AHU

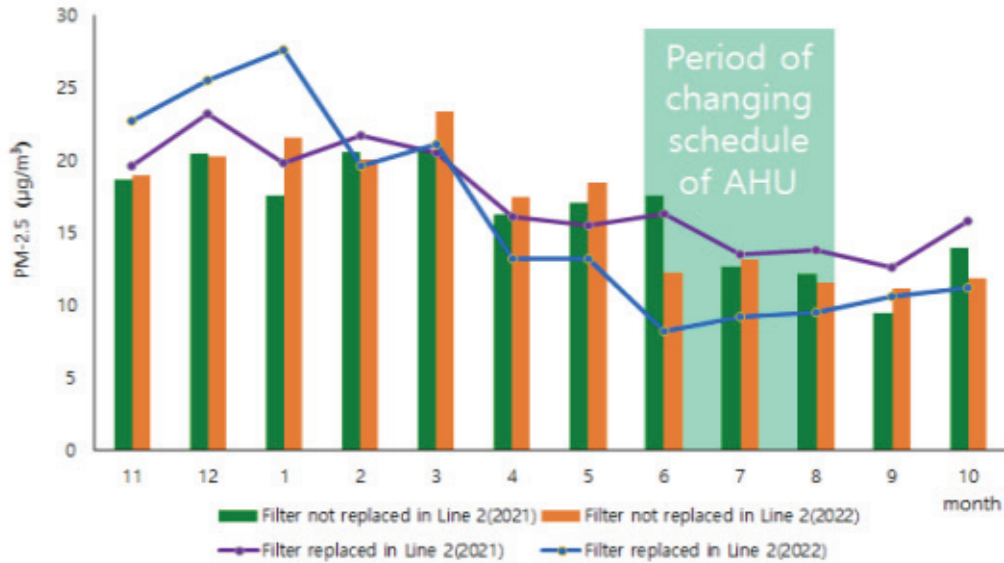


Fig. 10. PM-2.5 Concentration in Line 2 according to changing operation schedule of AHU

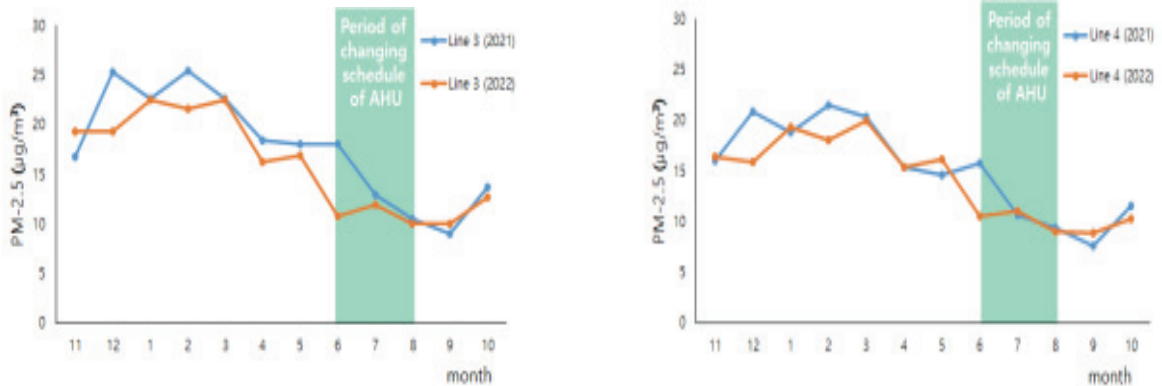


Fig. 11. PM-2.5 Concentration in Line 3 and 4 according to changing operation schedule of AHU

#### 4.2. 시간대별 PM-2.5 농도변화

가동 스케줄을 변경한 1 ~ 4호선의 91개 전역사에 대하여 공조기를 19시간 가동한 기간인 6 ~ 8월 동안의 PM-2.5 농도변화를 계절적인 농도변화에 영향을 받지 않도록 작년 동월 측정 데이터와 비교하여 5 ~ 23시까지 시간별로 분석하였다. 2호선은 미디움필터 교체에 따른 농도 변화를 확인하고자 필터 교체를 하지 않은 역사(장산 ~ 감전)와 필터교체와 급배기시설을 개량한 역사(사상 ~ 울리)를 비교하여 분석하였다. 그 결과 Fig. 12 ~ 14와 같이 전 호선 모두 공조기 가동시간을 증가한 첫 달인 6월에 PM-2.5 평균농도 저감 폭이 가장 큰 것으로 나타났고 7 ~ 8월에는 6월에 저감된 상태로 PM-2.5의 농도가 유지되는 양상을 보였다. 각 호선별로 PM-2.5의 농도변화를 살펴보면, Fig. 12와 같이 1호선은 6월에 동월 대비 PM-2.5 평균농도가 11.7

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 낮아져 PM-2.5 저감효율은 45.7%이었으며, 출퇴근 시간대인 8 ~ 10시, 18 ~ 20시에 14 ~ 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 저감되었고 저감효율은 46.7 ~ 51.6%로 나타났다. 7 ~ 8월에도 동월 대비 PM-2.5 평균농도가 각각 3.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 4.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 낮아졌고 6월과 마찬가지로 출퇴근 시간대에 동월 대비 5 ~ 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 낮아짐으로써 1호선은 출퇴근 시간대에 공조기 가동시간을 증가시킨 효과가 큰 것으로 판단된다. 2호선은 Fig. 13과 같이 6월에 필터를 교체한 역사와 필터를 교체하지 않은 역사의 동월 대비 평균농도가 8.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 5.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 가장 많이 저감되었고 제거효율은 53.1%, 30.6%이었으며, 7 ~ 8월에도 필터를 교체한 역사는 동월 대비 평균농도 4.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 3.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 저감되었지만 필터를 교체하지 않은 역사는 7 ~ 8월의



평균농도가 동월과 비슷하게 나타났다. 이는 자갈도상 등 내부오염원이 있고 I/O ratio가 높은 1호선에는 대기질이 좋은 7 ~ 8월에도 공조시간 증가에 따른 PM-2.5 농도의 저감효과가 있지만, 콘크리트 도상 등 내부오염원이 적은 2호선에서 대기질이 좋은 상태에서는 공조시간 증가에 따른 PM-2.5 농도의 저감보다는 필터교체에 따른 PM-2.5 농도제거 효과가 더 큰 것으로 판단된다. Fig. 14와 같이 3, 4호선도 마찬가지로 6월에는 동월 대비 평균농도가 7.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 5.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  만큼 가장 많이 저감되었고 제거효율은 43.2%, 32.8%이었으며, 7 ~ 8월에는 동월과 비슷하게 나타났

다. 5시부터 23시까지 시간대별 PM-2.5 농도변화는 1호선에서는 스케줄 변경 전인 PM-2.5농도의 표준편차가 작년 동월(6 ~ 8월)에는 2.61 ~ 3.94였으나, 스케줄 변경 후에는 1.27 ~ 1.83으로 시간대별 농도변화의 편차가 줄어들었고, 2호선은 필터를 교체한 역사는 작년 동월 1.19 ~ 1.31에서 0.94 ~ 1.34로, 필터를 교체하지 않은 역사에서는 작년 동월 0.88 ~ 1.01에서 0.52 ~ 0.89로 편차의 차이가 미미하였으며, 3, 4호선 역시 작년 동월 0.70 ~ 1.50에서 0.69 ~ 1.38, 0.79 ~ 1.25에서 0.91 ~ 1.15로 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

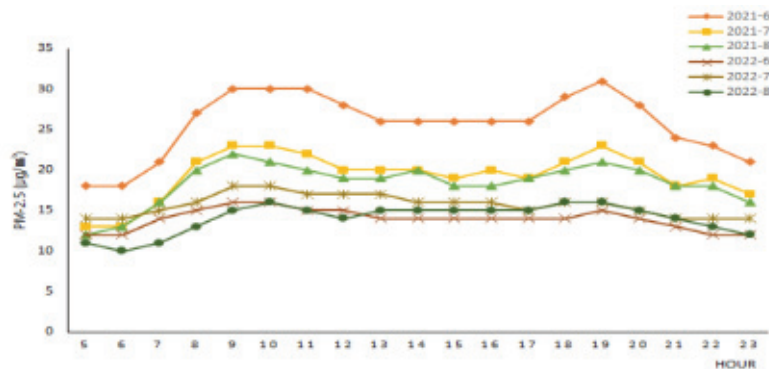


Fig. 12. PM-2.5 Concentration in Line 1 over time according to changing operation schedule of AHU

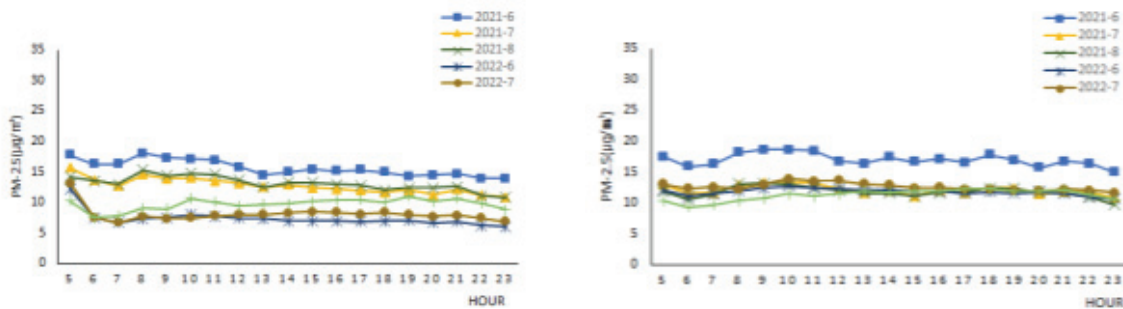


Fig. 13. PM-2.5 Concentration in Line 2 over time according to changing operation schedule of AHU (Left: Filter replaced, Right: Filter not replaced)

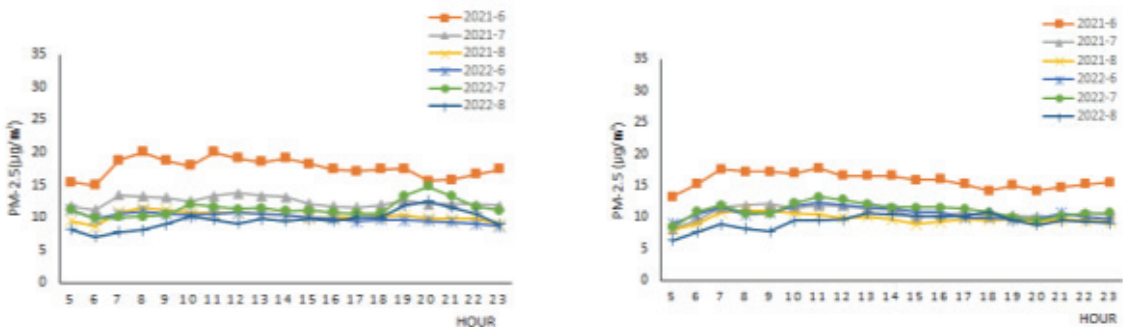


Fig. 14. PM-2.5 Concentration in Line 3 and 4 over time according to changing operation schedule of AHU



5. 디퓨저의 풍속 측정

2022년 9월 29일, 9월 30일, 10월 18일 3일에 걸쳐 감전역과 사상역 승강장(장산행)의 디퓨저의 풍속을 한 곳당 1분씩, 디퓨저의 규격 내(500×500)에서 풍속계의 위치를 달리해 가며 최저풍속과 최고풍속을 측정하였다. 각 일자에 대한 기온과 기압, 상대습도는 Table 18에 나타내었다. 감전역 승강장에 설치된 58개의 급기용 디퓨저 풍속은 최저풍속 0.2 m/s ~ 최고 풍속 9.5 m/s의 분포를 나타냈으며 평균풍속이 2.5 m/s이었고, 사상역의 87개의 급기용 디퓨저는 0.4 m/s ~ 9.7 m/s의 분포를 보이고, 평균풍속이 4.3

m/s로 감전역 대비 1.7배 높았다. 이는 사상역의 공조기 필터 교체와 급기시설의 개량 때문인 것으로 판단되며 풍속이 높아지면 승강장 내 공급되는 공기량이 많아지고 공기 정제 시간이 짧아져 공기의 순환이 잘 이루어진다. Fig. 15와 Fig. 16에 나타난 바와 같이 급기구가 감전역 대비 사상역에 1.5배 많아 승강장 내 외부 공기가 균등히 분배되어 유입되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 풍속증가에 따른 공기순환 및 환기 유도가 앞서 연구한 필터교체와 공조기 가동시간 증가와 더불어 PM-2.5농도 저감에도 기여한 것으로 판단된다.

Table 18. Temperature, Barometric pressure, Relative humidity in Gamjeon and Sasang Platform

| Section    | Gamjeon   |                         |                      | Sasang    |                         |                      |
|------------|-----------|-------------------------|----------------------|-----------|-------------------------|----------------------|
|            | Temp.(°C) | Barometric pressure(mb) | Relative humidity(%) | Temp.(°C) | Barometric pressure(mb) | Relative humidity(%) |
| 2022-9-29  | 27.4      | 1015.0                  | 38.8                 | -         |                         |                      |
| 2022-9-30  | -         |                         |                      | 27.7      | 1017.1                  | 62.0                 |
| 2022-10-18 | -         |                         |                      | 22.3      | 1021.0                  | 26.3                 |

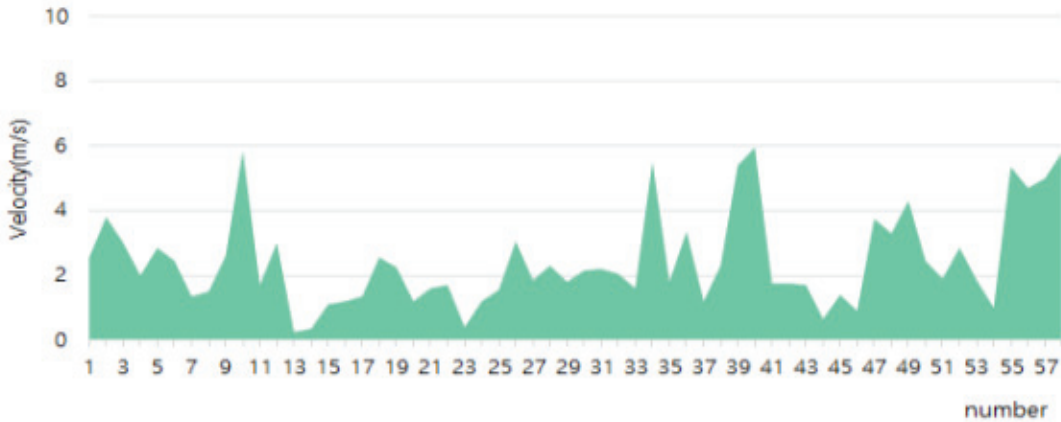


Fig. 15. Average velocity of air supply unit in Gamjeon subway station platform

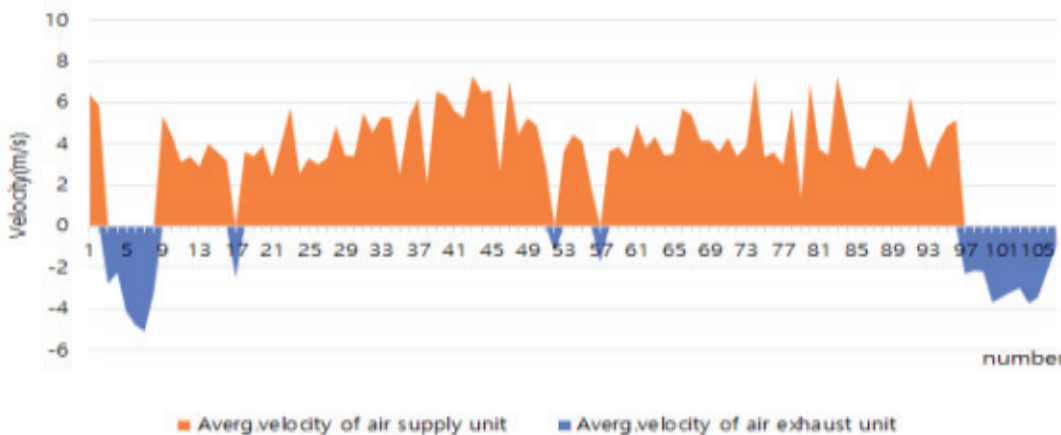


Fig. 16. Average velocity of air Supply and exhaust Unit in Sasang subway station platform

## IV. 결론

본 연구는 부산지역 지하역사 중 부산교통공사에서 추진한 공조시스템의 필터교체와 급·배기시설이 개량된 역사를 중심으로 미개량 역사와 실내공기의 PM-2.5 제거효율을 비교·분석하고, 공조시스템 가동 시간 스케줄 변경에 따른 PM-2.5 저감 효과를 비교·분석하여 공기질 개선방안을 도출하고자 하였으며 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 감전역과 공조시스템의 필터를 교체한 사상역의 PM-2.5 저감효율을 분석한 결과, 감전역과 사상역의 평균농도가 각각 15.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 6.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감전역이 2.3배 높게 나타났으며, PM-2.5의 저감효율은 사상역은 59.3%로 감전역의 저감효율인 4.3%보다 13.8배 높은 것으로 나타났다.

2. PM-2.5 실내외 공기비(I/O ratio)를 비교해 본 결과, 감전역의 I/O ratio는 0.71 ~ 1.46의 분포로 평균 I/O ratio가 1.00이었으나, 사상역은 0.10 ~ 0.88의 분포로 평균 I/O ratio가 0.44이었으며 감전역 대비 2.3배 낮은 것으로 나타났다. 이는 공조시스템의 필터 교체 후 외기의 오염물질이 제거되어 지하역사 내로 공기가 유입됨으로써 실내외 공기비가 현저히 낮아진 것으로 판단된다.

3. 감전역과 사상역의 급배기시설을 조사한 결과, 감전역의 디퓨저 풍속은 0.2 ~ 9.5 m/s의 분포를 나타냈으며 평균풍속이 2.5 m/s이었고, 사상역은 급기구 디퓨저는 0.4 ~ 9.7 m/s의 분포를 보이고, 평균풍속이 4.3 m/s으로, 사상역의 급·배기시설이 개량됨으로써 1.7배 높아진 것으로 판단된다. 급배기시설을 개량하지 않은 역사인 감전역 승강장 상행선에는 급기만 이루어지고 있으며, 배기시설은 선로부에 위치해 있었다. PSD가 설치되기 전에는 열차풍에 의한 교란으로 승강장 내 상부와 하부 공간 간에 기류 혼합효과가 발생하였으나, 설치 후에는 이러한 기류 혼합효과가 줄어들어 감전역 승강장에는 정체된 공기로 인해 PM-2.5 저감효율이 떨어지는 것으로 판단된다. 이에 반해 급·배기시설을 전면 개량한 사상역의 급기구는 이용 승객들이 대기하는 공간인 스크린도어 개폐구간(승강장 가운데)을 중심으로 배치되어 있고 배기구는 승강장 좌우 양끝으로 배치되어 있어 승강장 중심부에

정체된 공기를 급기를 통해 밀어내어 양끝의 배기구로 배출하는 방식으로 승강장 내 공기순환에 도움이 될 것으로 판단된다.

4. 공조기 필터의 차압을 분석한 결과, 2022년 8월 10일 이후 2 ~ 3대의 공조기의 차압이 40 mmH<sub>2</sub>O를 넘어 필터 적정유지 차압을 만족하지 못하는 것으로 나타났으며 차압 상승 등으로 공기 정화기능이 감소된 것으로 판단된다.

5. 공조시스템의 가동 스케줄 변화에 따른 1 ~ 4호선 91개 전 역사에 대하여 PM-2.5 농도변화를 분석한 결과, 공조기 가동시간을 증대한 6월 ~ 8월 사이 전년도 동월 대비 PM-2.5 농도 저감효율은 2호선[필터교체역사] (40.0%) > 1호선 (28.6%) > 3호선(21.4%) > 4호선 (16.7%) > 2호선[필터미교체역사] (14.3%)로 나타나 필터교체와 공조기 가동시간 증대가 동시에 이루어진 역사가 공기질 개선이 큰 것으로 판단된다.

6. 공조시스템의 가동 스케줄을 변동한 1 ~ 4호선 91개 전 역사에 대하여 시간대별 농도 변화를 전년도 동월 자료와 비교·분석한 결과, 전 호선 모두 공조기 가동시간을 증가한 첫 달인 6월에 PM-2.5 평균농도 저감 폭이 가장 큰 것으로 나타났으며 이는 자갈도상 등 내부오염원이 있고 I/O ratio가 높은 1호선에는 대기질이 좋은 7 ~ 8월에도 공조시간 증가에 따른 PM-2.5 농도의 저감효과가 있지만, 콘크리트 도상 등 내부오염원이 적은 2호선에는 대기질이 좋은 상태에서는 공조시간 증가에 따른 PM-2.5 농도의 저감보다는 필터 교체에 따른 PM-2.5 농도저감 효과가 더 큰 것으로 판단된다.

7. 감전역과 사상역 승강장(장산행)의 디퓨저의 풍속을 측정된 결과, 감전역의 급기용 디퓨저 평균풍속은 2.5 m/s이었고, 사상역의 급기용 디퓨저 평균풍속은 4.3 m/s으로 감전역 대비 1.7배 높았다. 이는 사상역의 공조기 필터 교체와 급기시설의 개량 때문인 것으로 판단되며 이러한 풍속증가에 따른 공기순환 및 환기 유도가 앞서 연구한 필터교체와 공조기 가동시간 증가와 더불어 PM-2.5농도 저감에도 기여한 것으로 판단된다.

이번 연구 수행을 통하여 감전역과 사상역을 중심으

로 이루어진 공기질 개선방향은 크게 두가지로 볼 수 있다.

첫번째는 공조시스템 필터 교체 역사인 사상역은 미 교체 역사인 감전역과 비교하여 PM-2.5 저감효율이 13.8배 높아졌고, 실내외 공기비(I/O ratio) 또한 2.3 배 낮아짐으로써 새로운 필터교체가 공기질 개선에 크게 기여함을 확인할 수 있었다. 하지만 미디움 필터 특성 상 반영구적인 사용이 불가하고 주기적으로 교체를 해야 하는 단점이 있기 때문에 필터의 주기적인 관리와 적절한 교체비용 산정이 필요할 것으로 판단된다.

두 번째는 공조시스템 스케줄 변경에 따른 가동시간 증가로 전 호선의 PM-2.5 저감효율이 높아짐을 확인할 수 있었으며, 특히 필터교체와 공조시스템 가동시간 증가가 동시에 이루어질 때 PM-2.5 저감효율이 가장 높음을 확인할 수 있었다. 다만 대기질이 상대적으로 좋은 6 ~ 8월에 한시적으로 스케줄을 변화시켜 보았으므로 계절별 상황에 따른 저감효율을 확인하기 위해서는 황사발생 등 PM-2.5 고농도 시기에 추가 조사할 필요할 것으로 판단된다.

2023년 2월 정부에서는 제4차 지하역사 공기질 개선대책을 제시하였다. 추진 과제 중 하나인 스마트 공기질 관리 시스템은 지하역사 실내공기질 측정망, 대기측정망, 교통정체 정보시스템의 자료를 바탕으로 역사 내·외부 오염도, 교통정보 등 빅데이터 분석 및 인공지능 기술을 활용하여 미세먼지 농도를 예측하고 그에 맞는 공조시스템 및 초미세먼지 저감장치의 운영하는 시스템이다. 철도기술연구원에서는 이를 통해 전국의 승강장 미세먼지 50% 저감, 공조설비 운영비용 20% 절감 효과가 있을 것으로 예상하고 있다. 부산교통공사에서도 2023년 주요사업으로 공기질 연동 스마트 환기설비 운용시스템 구축을 선정하였으므로, 향후 본 연구가 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. 박세찬, 수치해석을 활용한 지하역사 기류분포 및 PM10 농도분포 연구, 한국철도기술연구원(2019).
2. 강태연, 부산지역 지하역사 PM-2.5의 농도분포 및 화학적 조성에 관한 연구, 부산보건환경연구원 (2021).
3. 박성환, 대심도 지하역사 공조시스템 관리방안 검토·연구, 우송대학교 철도대학원(2013).
4. 김용선, 지하철 공기정화시스템 개선에 관한 연구
5. 부산교통공사, 환경위원회 회의자료, 부산교통공사 (2022).
6. 강지원, 실내 외 농도 비(I/O ratio)에 기반한 주변 환경과 실내 미세먼지 농도분포 특성:선행연구 리뷰와 여름철 부산과 평택 초등학교에서의 측정 결과를 중심으로(2020).
7. 한국여과기공업협동조합, 공조용 에어필터 단체표준 제정(안)(2006).
8. 부산교통공사, 환기설비 개선방안 보고, 부산교통공사(2022).
9. 권순박, 도시철도 지하역사 PSD 설치에 따른 배기 시스템 개선 연구, 한국철도기술연구원(2015).
10. 환경부, 실내공기질관리법(2021).
11. 권순박, 지하역사 공조설비 운영에 따른 승강장 급배기량 분석, 한국철도기술연구원(2014).
12. 이예완, 외부 대기 초미세먼지 농도와 지하철 역사 내 초미세먼지 농도의 상관관계 분석(2021).
13. 김인원, 지하역사 내 스크린도어 설치에 따른 미세먼지 농도 저감 효과(2010).
14. 손운석, 부산 지하철 내 미세먼지의 시·공간적 특성(2020).
15. 부산교통공사, 부산지하철 2-225 공구 공조설비 T.A.B 용역 보고서(2001).
16. 부산교통공사, 2호선 공기조화기 교체(1차, 3공구) 공기조화설비 시험·조정·평가 용역 최종보고서 (2022).
17. 장용준, 대심도 지하역사 승강장 및 대합실 평상시/비상시 급배기 풍량에 대한 실험적 연구(2012).
18. 배성준, 도시철도 지하역사 승강장 환기시스템 개선방안 연구(2016).
19. 환경부, 제3차 공기질 개선대책(2018).
20. 환경부, 제4차 공기질 개선대책(2023).