

# 외부 대기 초미세먼지 농도와 지하철 역사 내 초미세먼지 농도의 상관관계 분석

## Analysis of the Correlation between the Concentration of PM<sub>2.5</sub> in the Outside Atmosphere and the Concentration of PM<sub>2.5</sub> in the Subway Station

이예완<sup>1)</sup>, 김예슬<sup>1),2)</sup>, 이한얼<sup>1)</sup>, 김용진<sup>1)</sup>, 한방우<sup>1),2)</sup>, 김학준<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>한국기계연구원 환경시스템연구본부,

<sup>2)</sup>과학기술연합대학원대학교 (UST) 환경에너지기계공학전공

Yeawan Lee<sup>1)</sup>, Ye-Sle Kim<sup>1),2)</sup>, Haneol Lee<sup>1)</sup>, Yong-Jin Kim<sup>1)</sup>, Bangwoo Han<sup>1),2)</sup>, Hak-Joon Kim<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>Environmental System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Environmental & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology (UST), Daejeon, Republic of Korea

접수일 2021년 9월 29일  
수정일 2021년 12월 27일  
채택일 2022년 2월 11일

Received 29 September 2021  
Revised 27 December 2021  
Accepted 11 February 2022

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)42-868-7775  
E-mail : diayolk@kimm.re.kr

**Abstract** This study analyzed the correlation between the air quality of the outside air and the indoor air in the subway station and presented theoretical model to predict PM<sub>2.5</sub> concentration of platform at Yuseong Oncheon Station in Daejeon, South Korea. A total of 30 portable PM<sub>2.5</sub> sensors were used to analyze the underground station by dividing it into four sections: the station entrance, the outside of the wind proof door, the concourse, and the platform. The deeper the depth of the station area, the lower the PM<sub>2.5</sub> concentration, and the lower the correlation with outdoor air. Variations in PM<sub>2.5</sub> concentration by station area according to the operation of air conditioners and air handling units were analyzed, and a theoretical model was developed to predict PM<sub>2.5</sub> concentration of platform. This theoretical model was well matched with the average standard deviation of 0.64 µg/m<sup>3</sup> by comparing experimental results. It is expected that the theoretical model of this study can be used to select an appropriate building air ventilation scenario, such as the mixing ratio, ventilation time, depending on the level of PM<sub>2.5</sub> concentration of atmosphere.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, Sensor, Subway, Air handling unit

### 1. 서 론

미세먼지는 세계보건기구 (WHO) 산하의 국제 암 연구소에서 1등급 발암물질로 분류한 대기오염물질이다. 특히, 직경 2.5 µm 미만의 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>)는 세포 안으로 침투하여 혈류를 통해 다른 조직으로 이동하여 심혈관 질환을 증가시킬 수 있어 일반 미세먼지 (PM<sub>10</sub>)보다 더 위험하다 (Leiva *et al.*, 2013). 매일

평균 800만 명 이상의 시민이 수도권 지하철을 이용하고 있지만, Kwon *et al.* (2015)에 의하면 서울 지하철 역사 내부의 대합실 및 승강장의 PM<sub>10</sub> 농도는 외부 대기에 비해 2배 이상 높다. 뿐만 아니라, PM<sub>2.5</sub>는 PM<sub>10</sub>의 절반 이상을 차지한다는 연구 결과가 있어 지하철 역사의 실내 공기질 관리는 특히 중요하다. 따라서 환경부에서는 다중이용시설의 실내 초미세먼지 농도 규제를 시행하고 있으며, 전 세계적으로도 지하철

역사의 초미세먼지 현황에 대해 많은 연구가 수행되었다 (Guo *et al.*, 2014; Şahin *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2008).

지하철 역사에는 철로의 마모 입자, 이용객의 혼잡도, 열차풍에 의한 비산, 터널의 유지 보수 작업 등 다양한 오염원이 존재한다 (Moreno *et al.*, 2014; Querol *et al.*, 2012). Eom *et al.* (2013)은 지하철 터널에서 부유하는 PM<sub>10</sub> 입자의 성분을 분석하여 터널 내부의 부유 입자는 철로 및 펜타그래프에서 발생한 철 성분을 다량 함유함을 발표하였다. Lee *et al.* (2018)은 열차의 속도가 증가하면 열차 바퀴와 레일의 접촉점에서 발생하는 마모 입자의 양뿐만 아니라 공기 중 부유 입자의 농도 또한 증가함을 보고하였다. Mugica-Alvarez *et al.* (2012)에서는 지하철 승강장의 공기질은 출퇴근 이용자가 많은 평일이 주말보다 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 각각 19%, 13% 높았다.

실내의 오염원 외에도 외부 대기의 미세먼지 또한 지하철 역사의 PM 농도를 증가시킬 수 있다. Marsik *et al.* (2008)은 외부 대기와 실내 공기의 PM 농도는 양의 상관관계가 있음을 밝힌 바 있다. Kim *et al.* (2015)과 Loy-Benitez *et al.* (2018)은 외부 대기의 공기질과 연계한 공조 시스템 운영을 통해 역사의 실내 공기질을 관리하여 공조 설비에 소모되는 에너지를 줄였다. Park *et al.* (2018)은 인공신경망 (Artificial Neural Network, ANN)을 활용하여 외부 대기의 PM 정보, 지하철 운행 횟수, 공조 설비의 운영 정보를 이용하여 지하철 역사의 실내 PM<sub>10</sub> 농도를 예측하였다.

비록 많은 연구들이 지하철 역사의 공기질에 대해 연구하였지만, 대부분 효율적인 공조 설비 운영 방안에 대한 연구에 치중되어 있거나 방대한 양의 데이터 축적이 필요한 인공신경망을 활용하여 실내 공기질을 예측하였다. 또한, 기존 연구에서는 5개 이내의 특정 지점에서만 입자 농도를 측정하였기 때문에 역사 전체에 대한 초미세먼지 분포를 알기 어렵다는 한계가 있다. 지하철 역사는 역사 외부와 연결된 대합실과 지하철을 탑승하는 승강장이 개방적으로 연결되어 있기 때문에 역사의 실내 공기질에 미치는 대기 중 PM 농

도, 공조환기설비 운영 유무, 승객 수, 지하 상업시설 운영 유무 등 여러 요인에 대한 포괄적인 연구가 필요하다. 따라서, 지하철 외부, 대합실, 승강장 등을 포함하여 역사 전체에 대한 동시 입자 측정 및 종합적인 분석이 필요하다.

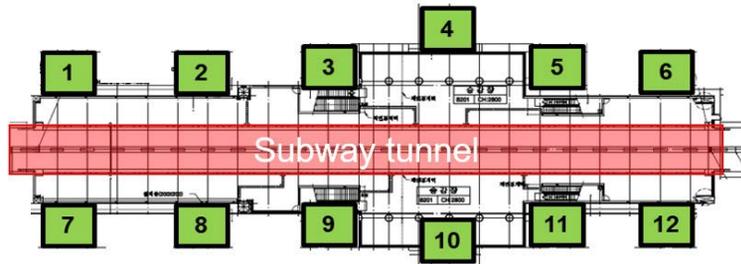
본 연구에서는 30개의 PM<sub>2.5</sub> 센서를 사용하여 대합실, 승강장, 방풍문 외부, 역사 외부 총 4개의 구역에 대해 지하철 역사 전체에 대한 PM<sub>2.5</sub> 농도를 측정하고 외부 대기와의 상관 관계에 대해 분석하였다. 대상 역사로는 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 지하철 이용객의 영향을 보기 위해 대전광역시에서 두 번째로 승객 수가 많고 역사 구조가 단순한 유성온천역을 선정하였다. PM<sub>2.5</sub> 센서의 정확도 향상을 위해 환경부 제공 도시 대기 환경 정보와 센서 측정 결과를 보정하는 연구를 수행하였다. 공조기 및 공기청정기의 운전에 따른 구역별 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 분석하였고, 대기 중 PM<sub>2.5</sub> 농도 정보와 공조환기설비의 운전 정보를 통해 역사 내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 예측하는 이론 모델을 개발하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구는 대전광역시 유성온천역에서 수행되었으며, 총 30개의 휴대용 광산란 센서 (Model PMSA003, Plantower, China)를 사용하여 역사의 초미세먼지를 측정하였다. 센서는 보조배터리를 통해 전원을 공급받아 24시간 이상 연속 측정이 가능하였다. 센서는 PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>에 대해 측정을 수행하며, 온도 및 습도를 측정하였다. 센서는 정확도 보정을 위해 환경부에서 제공하는 도시 대기 PM<sub>2.5</sub> 농도와 선형회귀분석을 통해 상관관계를 도출하고 보정하였다. 또한, 역사 내부 공기와 외부 대기의 입자 밀도 차이로 인한 보정 계수 산출을 위해 환경부에서 제공하는 유성온천역 승강장 PM<sub>2.5</sub> 농도 정보와 승강장에 설치된 센서의 PM<sub>2.5</sub> 농도 측정 결과를 비교하였다.

그림 1은 유성온천역의 승강장 및 대합실의 평면도를 나타낸다. 지하 1층과 2층에는 각각 대합실과 승강

(a) Platform (B2)



(b) Concourse (B1)

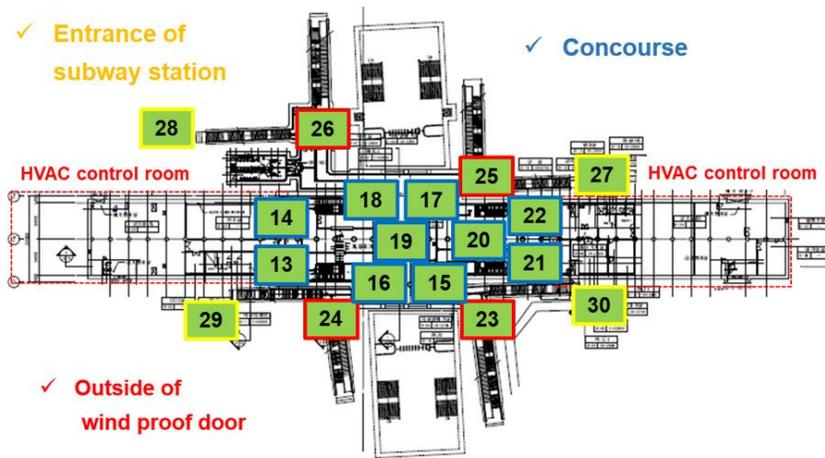


Fig. 1. Schematic of Yuseong Oncheon subway station and locations of  $PM_{2.5}$  sensors: (a) platform, (b) concourse.

장이 위치한다. 대합실의 체적은  $4,737\text{ m}^3$ 이며 승강장의 체적은 상행 및 하행 각  $2,383\text{ m}^3$ 이다. 출입구는 총 8개이다. 그림 1(a)는 승강장의 평면 도면이며, 녹색 상자는 초미세먼지 센서의 설치 위치를 나타낸다. 상자의 번호는 센서의 번호를 나타낸다. 승강장은 상행/하행에 따라 중간의 지하철 터널에 의해 두 개의 구역으로 분리되었다. 상행 및 하행 구역에 초미세먼지 센서는 각각 6개씩 총 12개의 센서가 승강장에 설치되었다. 그림 1(b)는 대합실의 평면도이다. 대합실에는 총 18개의 센서가 설치되었다. 센서의 설치 구역에 따라 녹색 상자의 테두리 색깔을 다르게 표시하였다. 노란색 테두리는 지하철 역사 입구, 붉은색 테두리는 방풍문 외부, 파란색 테두리는 대합실 내부를 나타낸다.

역사 외부에 4개, 방풍문 외부에 4개, 대합실 내부에 10개의 센서가 설치되었다.

그림 2는 지하 역사 공조실에 설치된 공조기의 필터 효율 측정 실험 셋업 그림이다. 해당 그림은 Kim *et al.* (2020)의 그림 3을 수정한 것이다. RA는 건물로부터 공조기로 유입되는 환기(Return Air)이며, EA는 공조기에서 외부로 배출하는 공기(Exhaust Air), OA는 외부에서 실내로 유입되는 공기(Outdoor Air), SA는 공조기에서 실내로 공급하는 급기이다(Supply Air). OA와 EA의 비율은 댐퍼에 의해 조정되며, 본 실험에서는 OA 댐퍼를 닫고 공조기를 운전하였다. 필터의 전단 및 후단에 입자계수기(Model 1.109, GRIMM, Germany)가 설치되어  $PM_{2.5}$  효율을 측정하였다. 승강

장 공조기는 대합실용 1대, 승강장 상행 및 하행 구역 각 1대 총 3대가 있으며, 본 연구에서는 승강장 공조기를 대상으로 필터 효율을 측정하였다. 공조기의 정격 유량은 표 1과 같다.

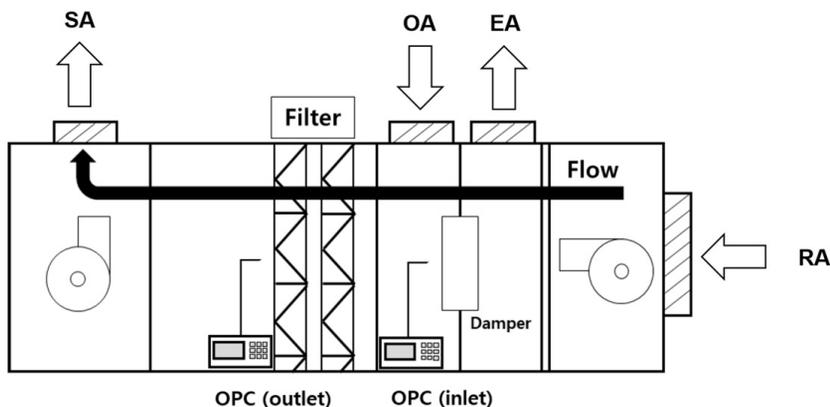
표 2는 본 연구에서의 공조기 및 공기청정기 운전 스케줄을 나타낸다. 대합실 공조기는 정지 후 승강장 공조기만 가동하였다. 공기청정기 (Model AS488B-WR, LG electronics, Korea)는 지하철 승강장에 설치된 실시간 초미세먼지 측정기기와 연동되어 PM<sub>2.5</sub> 농도가 45 µg/m<sup>3</sup> 초과 시 자동으로 운전되었다. 공기청정기는 승강장에 6대, 대합실에 6대 설치되었다. 공기청정기의 적용면적은 158 m<sup>2</sup>이다.

**Table 1.** Specifications of the air handling unit for platform.

Air type	Flow rate
SA	32,000 m <sup>3</sup> /hr
OA	3,200~28,800 m <sup>3</sup> /hr
RA	28,800 m <sup>3</sup> /hr
EA	0~32,000 m <sup>3</sup> /hr

**Table 2.** The operation schedule of the air handling unit and air cleaners in the subway station.

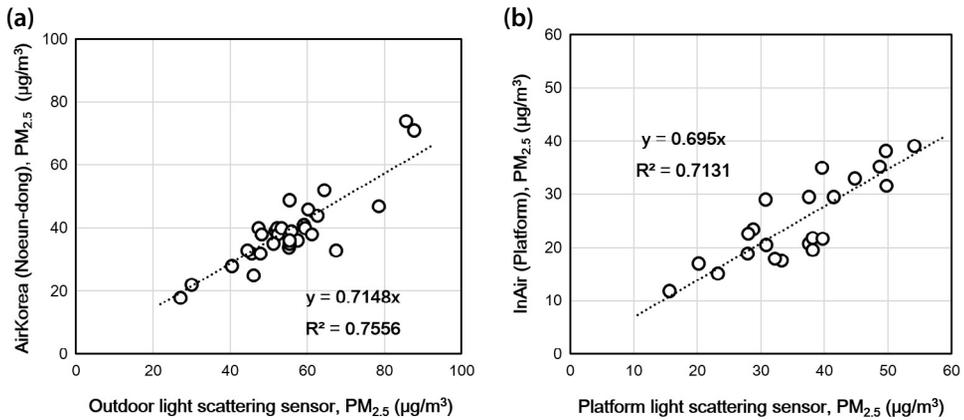
Operating schedule	SCH 1	SCH 2	SCH 3	SCH 4	SCH 5	SCH 6
Air handling unit	07:00~09:00	10:00~12:00	13:00~15:00	16:00~18:00	19:00~21:00	22:00~24:00
Air cleaner					19:13~20:13	21:54~23:09



**Fig. 2.** Schematic of particle removal efficiency evaluation experiment of the air handling unit filter (Kim *et al.*, 2020).

### 3. 결 과

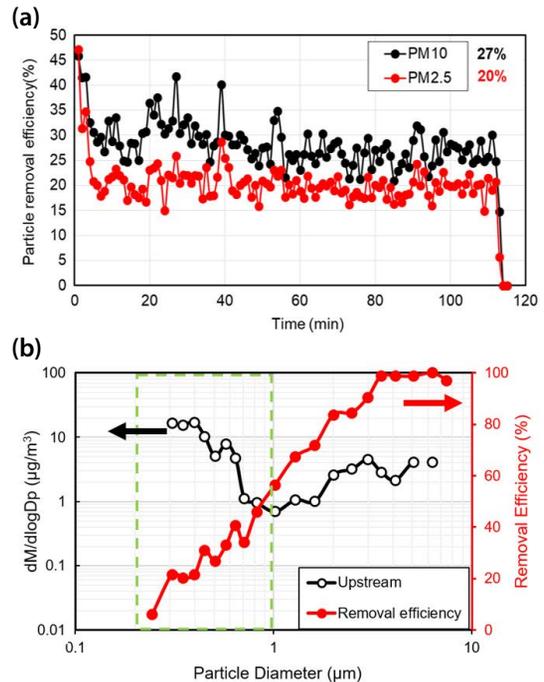
그림 3은 본 연구에 사용된 휴대용 센서에서 출력하는 PM<sub>2.5</sub> 농도와 환경부 제공 대기 환경정보 및 승강장 실내 공기질의 상관관계를 나타낸다. 그림 3(a)에서 센서는 대기 환경정보를 얻기 위해 역사 외부에 설치되었으며, 그림 1(b)의 27~30번 센서에 해당된다. 역사 외부는 도로변 인근에 위치해 있어서 우천 및 차량 배출 먼지의 영향을 피하기 위해 센서를 역사 입구의 계단 내벽에 부착하였다. 대기 환경정보는 유성온천역사에서 2.7 km 떨어진 위치의 노은동 측정소의 정보를 사용하였다. 노은동 측정소는 주민센터 3층 옥상에 배타선 흡수법 방식의 계측 장비를 설치하여 도시대기의 PM<sub>2.5</sub>를 측정한다. 노은동 측정소와 유성온천역 사이에는 소각장, 발전소 등 점 오염원이 없고, 두 곳의 측정 결과는 본 연구에서 2회 48시간 동안의 측정 기간 동안 서로 선형관계를 나타내었다. 이를 선형회귀방법으로 절편이 없는 선형 함수로 분석하면



**Fig. 3.** The correlation of PM<sub>2.5</sub> concentration measured by accredited air quality monitoring station and PM<sub>2.5</sub> concentration measured by light scattering sensor (a) outdoor, (b) platform.

그 관계는  $y=0.7148x$ 에 해당된다.  $x$ 는 센서의 PM<sub>2.5</sub> 농도 출력값,  $y$ 는 노은동 측정소의 대기 중 PM<sub>2.5</sub> 농도이다. 지하철 역사 내부의 입자는 터널에서 유입되는 철 성분 입자로 인해 대기 중 입자의 조성 다 다를 수 있기 때문에, 그림 3(b)에서 환경부 실내공기질 관리 종합정보망 (InAir, <https://www.inair.or.kr>)에서 제공하는 유성온천역 승강장의 PM<sub>2.5</sub> 농도와 승강장에 부착된 센서 1~12번 센서의 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도를 비교하였다. 승강장에 설치된 PM<sub>2.5</sub> 측정기는 환경부 형식승인 베타선 흡수법 장비로 연 1회 이상 중량법과 비교하여 정확도를 인증받았다. 선형회귀분석 방법으로 비교 결과, 센서 보정계수 0.695를 도출하였고, 이는 외부 대기와의 보정계수 0.7148과 3% 이내의 차이만을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 역사 내부 및 외부의 센서 모두 그림 3(a)에 의해 도출된 보정계수 0.7148을 사용하여 보정하였다.

그림 4(a)는 공조기의 필터 효율을 측정한 결과이다. 측정은 2시간 동안 수행되었으며, 측정 시작 후 20분 및 종료 전 20분은 공조기의 가동 및 정지로 인해 불안정한 결과를 나타냈다. 평균 효율은 안정적으로 공조기가 운전된 80분에 대해 산출되었다. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 제거 효율은 각각 20%, 27%로 측정되었다. 그림 4(b)는 공조기 내부로 유입되는 입자의 질량 분포



**Fig. 4.** (a) PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> removal efficiencies of the air handling unit filter. (b) Particle mass distribution and removal efficiency of filter depending on particle diameter in the air handling unit.

및 입경별 제거 효율을 나타낸다. 필터 전단에서 측정된 분포에 따르면, 가장 많은 질량을 차지하는 것은 1

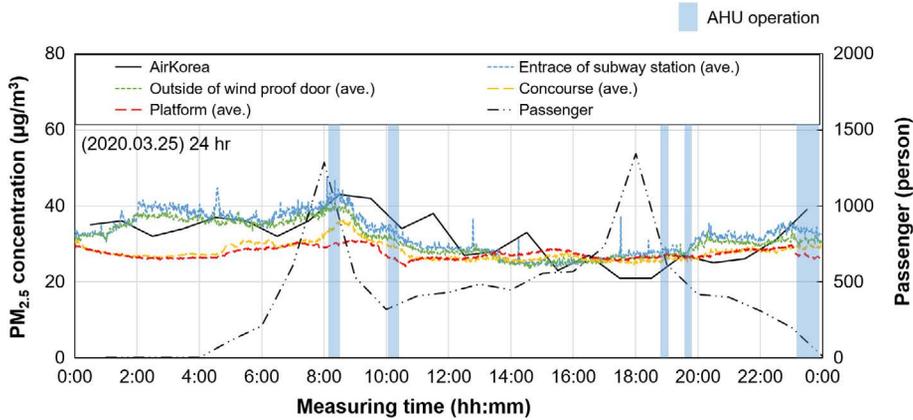


Fig. 5.  $PM_{2.5}$  concentration and the passenger number of the subway station on March 25, 2020. The blue shading indicates the operating time of the air handling units.

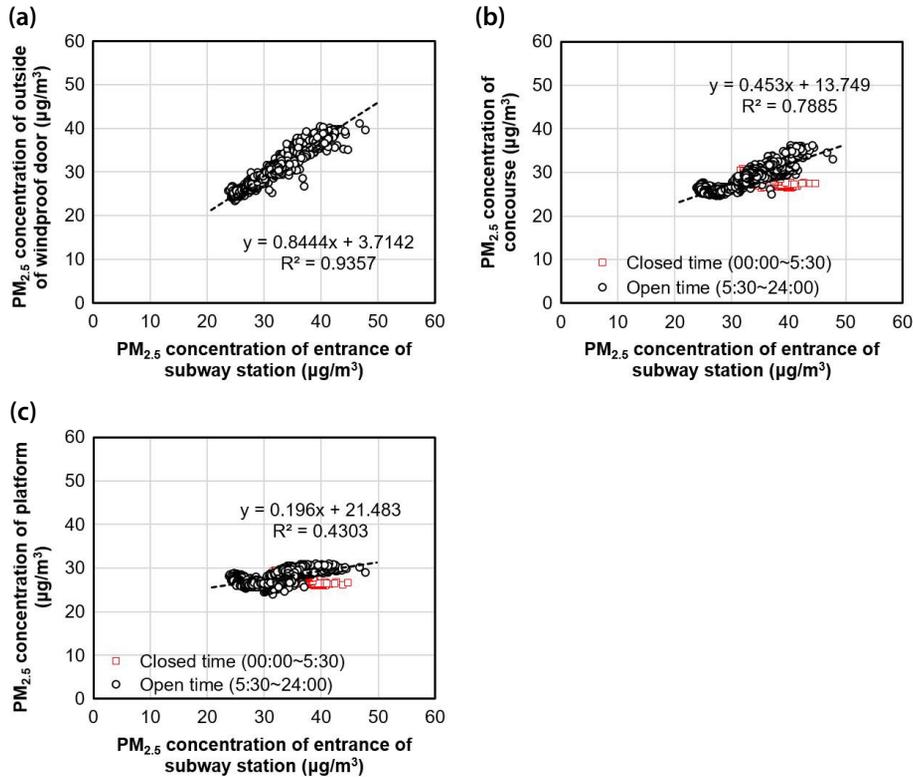
$\mu\text{m}$  미만의  $PM_{1.0}$ 이었으며,  $0.28 \mu\text{m}$ 에서 가장 높은 질량 분포를 나타냈다. 입경별 제거 효율을 보면 제거 효율은 입경에 대해 선형적으로 증가하였으며,  $3.5 \mu\text{m}$  이상의 직경을 갖는 입자에 대해서는 99% 이상의 제거 효율을 나타냈다.

공조기의 필터는 한국쓰리엠(주)에서 제공한 것으로, ANSI/ASHRAE 52.2 규격을 따른 공인시험 결과 MERV 10등급으로 판정되었으나, 본 연구에서는 실제  $PM_{2.5}$  제거 효율은 20%에 불과하였다. 이는 공조기에 유입되는 입자 중 대다수가  $PM_{1.0}$ 에 해당하는 나노 입자이기 때문이다. 필터의 효율은 입자 크기에 비례하며, MERV 10등급의 필터는  $1.0 \mu\text{m}$  이상의 입자에 대해서 50% 이상의 효율을 가지지만  $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 의 입자 범위에 대해서는 효율이 미미하기 때문에 ANSI/ASHRAE 52.2 규격에서 입자 제거 효율을 규정하지 않는다. 그림 4(b)에서 보이는 바와 같이, 공조기로 유입되는 입자 중 가장 많은 질량을 차지하는 입자는  $PM_{1.0}$ 에 해당하는 극초미세먼지이기 때문에 공조기의  $PM_{2.5}$  제거 효율은 20% 수준으로 MERV 10등급에 의거하여 예상되는 효율에 비해 낮게 측정되었던 것으로 판단된다.  $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 의 입자 범위의 입자에 대해서는 필터의 제거 효율은 81.3%로 MERV 10등급에 비해 다소 높은 효율을 보이나, 이는 필터 오염으로 인해

입자 제거 효율이 증가되었기 때문으로 생각된다.

그림 5는 2020년 3월 25일에 유성온천역에서 측정된  $PM_{2.5}$  농도이다. 파란색 음영은 공조기의 가동 시간을 나타낸 것이다. 실험을 위한 별도의 운전 스케줄을 조정하지 않고 대전도시철도공사의 평상시 공조기 운영 조건과 동일하다. 대합실과 승강장의 공조기는 함께 가동되었고, 간헐적으로 30분을 초과하지 않도록 가동되었다. 출퇴근시간인 7~9시와 17~19시에 승객 수가 가장 많았으며, 8시에 1,284명, 18시에 1,343명을 기록하였다.  $PM_{2.5}$  농도는 역사의 구역별로 색깔을 달리하였다. 검은색 실선은 환경부에서 제공하는 전국실시간대기오염도 공개 홈페이지(에어코리아, [www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr))의 도시대기측정망 정보이다. 파란색, 초록색, 노란색, 그리고 붉은색 점선은 각각 역사 외부, 방풍문 외부, 대합실, 그리고 승강장에 설치된 센서 측정값이다.

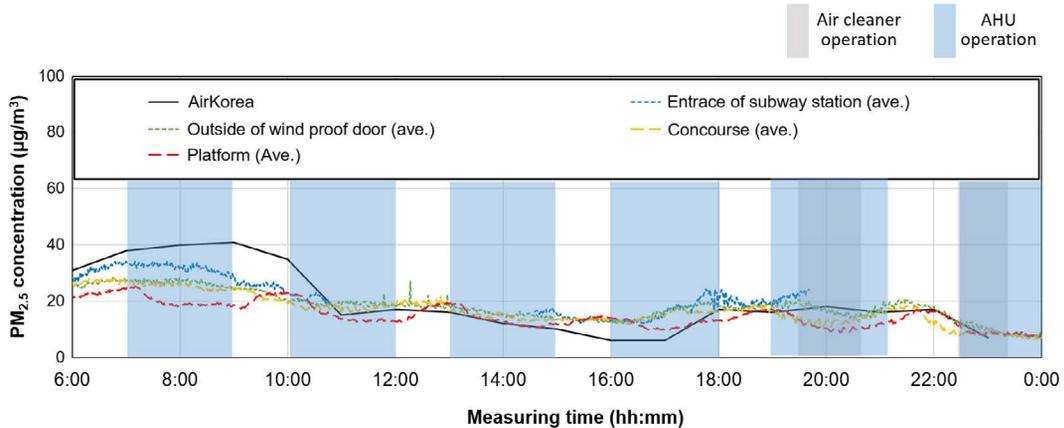
24시간 측정 결과, 방풍문 외부와 역사 입구에서 측정된  $PM_{2.5}$  농도는 대기환경측정소와 유사한 추세를 보였다. 그러나 방풍문 내부에 속하는 대합실과 승강장의 경우, 0시부터 11시까지는 방풍문 외부에 비해 최대  $18.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  낮은 초미세먼지 농도를 나타냈다. 약 11시 이후부터 승강장 및 대합실의 초미세먼지 농도는 역사 외부와 25% 이내의 유사한 수준을 유지하



**Fig. 6.** Correlations of  $PM_{2.5}$  concentrations of entrance of subway station and inside subway station: (a) outside of wind proof door, (b) concourse, (c) platform.

였다. 이는 0:00부터 5:30까지 지하철 미운행으로 방풍문이 폐쇄되어 역사 외부와 방풍문 내부가 차단되었기 때문이다. 지하철 운행이 시작되는 5:30 이후부터 방풍문이 개방되고 대기 중 초미세먼지가 역사로 유입되어 약 11시 이후부터는 역사 내부와 외부 대기의  $PM_{2.5}$  차이가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 전체적으로  $PM_{2.5}$  농도는 역사 입구, 방풍문 외부, 대합실, 승강장 순으로 낮아졌다. Mugica-Alvarez *et al.* (2012)의 연구 결과와 달리, 승객 수가 가장 많은 7~9시와 17~19시 사이의 출퇴근 시간대에 실내  $PM_{2.5}$  농도가 유의미하게 증가하지 않았다. 즉, 지하철 승객 수와 역사 내부의  $PM_{2.5}$  농도는 상관관계가 보이지 않았으며, 역사 외부 대기의  $PM_{2.5}$  농도가 중요한 것으로 판단된다.

외부 대기와 역사 내부 공기의 상관관계를 알기 위해 방풍문 외부, 대합실, 그리고 승강장의  $PM_{2.5}$  농도와 역사 입구의  $PM_{2.5}$  농도 비교를 그림 6(a)~(c)에 각각 나타냈다. 3개의 구역 모두 역사 입구 측, 외부 대기와 유의미한 상관관계를 보였다. 그림 6(a)에 의하면, 방풍문 외부와 역사 입구의  $PM_{2.5}$  농도는  $y = 0.8444x + 3.7142$ 의 상관관계를 가지며, 결정계수  $R^2$ 가 0.9357로 매우 높은 상관관계를 보였다. 이는 방풍문 외부와 역사 입구가 외부 대기와 24시간 연결되어 있어 실외로 분류될 수 있음을 고려하였을 때 타당하다. 그림 6(b)는 대합실과 역사 입구의  $PM_{2.5}$  농도를 비교한 것이다. 붉은색 마커는 역사가 폐쇄되어 방풍문이 닫힌 시간이며, 검은색 마커는 방풍문이 개방된 시간이다. 방풍문 폐쇄 시간에는 역사 입구의



**Fig. 7.** PM<sub>2.5</sub> concentration of the subway station on June 10, 2020. The blue shading indicates the operating time of the air handling units (AHUs). The grey shading indicates the operating time of the air cleaners.

PM<sub>2.5</sub> 농도가 31.9 µg/m<sup>3</sup>에서 42.3 µg/m<sup>3</sup>까지 10.4 µg/m<sup>3</sup> 변화하였으나 대합실의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 5 µg/m<sup>3</sup> 이내로 일정하게 유지되었다. 방풍문이 개방된 시간대에 대하여 대합실과 역사 입구의 PM<sub>2.5</sub> 농도는  $y=0.453x+13.749$ 의 선형관계를 보였으며, 결정계수 R<sup>2</sup>는 0.7885였다. 그림 6(c)는 승강장과 역사 입구의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 비교한 것이다. 대합실과 마찬가지로 방풍문의 폐쇄 여부에 따라 외부 대기와 상관관계가 다르게 나타났다. 방풍문 개방 시간대에서 승강장과 역사 입구의 PM<sub>2.5</sub> 농도는  $y=0.196x+21.483$ 의 선형관계를 보였으며, 결정계수 R<sup>2</sup>는 0.4303이었다. 선형관계에 대한 결정계수는 방풍문 외부, 대합실, 승강장 순으로 낮아졌다. 이는 구역의 심도 순서와 동일하다. 즉, 심도가 깊어져 외부와의 개방성이 떨어질수록 외부 대기와의 상관관계가 낮게 나타나며, 초미세먼지의 유입이 감소하여 PM<sub>2.5</sub> 농도 또한 낮아진 것으로 판단된다. 유성온천역은 기존의 연구 결과와 달리, 승객 수에 의한 공기질 오염 영향이 거의 없고 외부 대기와의 상관관계가 매우 높게 나타났다. 이는 역사의 승강장을 기준으로 심도가 14.2m에 불과하여 환기율이 매우 높기 때문으로 생각된다. 또한, 대전도시철도 공사에서는 5:00~23:30까지 지하철 터널의 환기구에서 배기팬만 가동하여 터널 내부의 공기가 승강장으로

로 유입되지 않도록 주의하여 공조설비를 가동하고 있다. 즉, 역사의 낮은 심도와 터널 환기 설비의 운영으로 인해 승강장으로부터의 입자 유입이 최소화되고, 외부 대기의 유입이 증대된 것으로 판단된다.

그림 7은 2020년 6월 10일에 유성온천역에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도이다. 각각의 실선 및 점선의 표시는 그림 5와 동일하다. 파란색 음영과 회색 음영 각각 공조기와 공기청정기의 가동 시간을 나타낸 것이다. 공조기의 운영에 따른 역사 내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 알기 위해 대합실 공조기는 정지하고 승강장 공조기만 2시간 가동, 1시간 정지의 스케줄로 운전되었다. 실내 초미세먼지 저감을 목적으로, 공조기의 댐퍼는 외부 공기의 유입 없이 실내 순환형으로 운전되었다. 공조기가 가동된 7~9시, 10~12시, 13~15시, 16~18시에는 승강장 PM<sub>2.5</sub> 농도는 평균 33.8%의 뚜렷한 저하가 있었다. 승강장과 대합실은 계단으로 이어진 개방된 공간임에도 불구하고 승강장 공조기 가동으로 대합실에는 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화가 나타나지 않았다. 대합실과 방풍문 외부 및 역사 입구에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도는 에어코리아 제공 대기 환경 정보와 유사한 추세를 나타냈다. 공조기가 정지된 시간에는 승강장에서 급격하게 농도가 상승하여 대합실과 5.0 µg/m<sup>3</sup> 이내의 차이로 유사한 수준까지 회복되었다. 따라서, 역사의 초미세먼지

는 외부 대기에서 방풍문을 통해 대합실로 유입되고, 최종적으로 승강장으로 유입되는 것으로 판단된다. 19~21시 및 22~24시에는 공기청정기가 함께 가동되어 평균 46.8%의 PM<sub>2.5</sub> 농도 저하를 보였다. 이때는 대합실 및 승강장 전체에 설치된 공기청정기가 가동되어 대합실도 평균 42.3%의 농도 저하를 보였다.

본 연구에서는 질량보존법칙에 의거하여 공조기 및 공기청정기의 가동에 따른 지하철 승강장의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 예측할 수 있는 이론 모델을 그림 7의 결과를 적용하여 완성하였다. Cooper and Alley (1994)에 따르면, 실내의 입자 농도는 질량 보존 법칙에 의해 식 (1)과 같이 정리된다.

$$\frac{dC_i}{dt} = Q_{SA} C_{SA} + S - Q_{ExA} C_i - Q_{RA} C_i - kC_i V - CADR C_i \quad (1)$$

여기서 V는 승강장의 부피, C<sub>i</sub>는 승강장의 입자 농도, t는 시간, Q<sub>SA</sub>는 공조기의 급기 유량인 32,000 m<sup>3</sup>/hr, C<sub>SA</sub>는 SA의 입자 농도, S는 입자 발생률, Q<sub>ExA</sub>는 승강장에서 외부로 유출되는 유량으로 SA와 RA의 유량 차이인 3,200 m<sup>3</sup>/hr로 가정하였다. Q<sub>RA</sub>는 공조기의 환기 유량인 28,800 m<sup>3</sup>/hr, k는 입자의 침착율, CADR (Clean Air Delivery Rate)은 공기청정기의 청정화능력이다. 본 실험에서는 EA 및 OA 댐퍼를 닫은 상태로, EA 유량은 0, OA 유량 Q<sub>OA</sub>는 급기 및 환기 유량 차이인 3,200 m<sup>3</sup>/hr로 가정하였다. C<sub>SA</sub>는 공조기로 유입된 OA 및 RA가 공조 필터를 거친 후의 입자 농도를 고려하여 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_{SA} = (1-\eta)\{\chi C_{OA} + (1-\chi)C_i\} \quad (2)$$

η는 공조기의 필터 효율, χ는 OA와 RA의 비율로 0.11, C<sub>OA</sub>는 OA의 입자 농도이다. 공조기의 필터 효율은 그림 4의 결과를 통해 PM<sub>2.5</sub>를 대상으로 20%로 설정하였다. 식 (1)에 식 (2)를 대입 후 미분방정식은 식 (3)~(5)와 같이 정리된다.

$$C_i(t) = \frac{1}{B} \{ [A + B \times C_i(t_0)] e^{\beta(t-t_0)} - A \} \quad (3)$$

$$A = \frac{1}{V} \{ Q_{SA}(1-\eta)\chi C_{OA} + S \} \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{V} \{ Q_{SA}(1-\eta)(1-\chi) - Q_{ExA} - Q_{RA} - kV - CADR \} \quad (5)$$

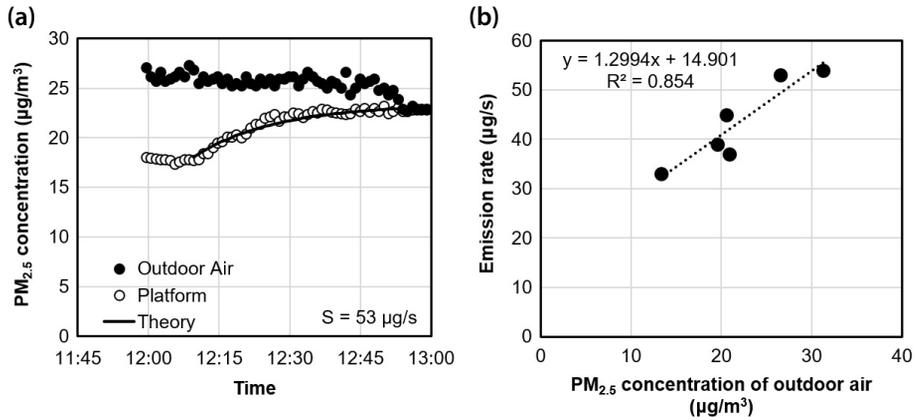
A와 B는 식 (3)을 간소화하기 위해 도입된 변수이다. t<sub>0</sub>는 초기 시간이다. 승강장의 입자 발생률 S는 공조기가 정지되었을 때의 승강장의 PM<sub>2.5</sub> 농도 상승 그래프로부터 실험적으로 산출 가능하다. 공조기로 인한 공기의 유출입이 없을 때, 식 (5)는 식 (6)과 같이 정리된다.

$$C_i(t) = \frac{S}{kV} + \left( C_i(t_0) - \frac{S}{kV} \right) e^{-k(t-t_0)} \quad (6)$$

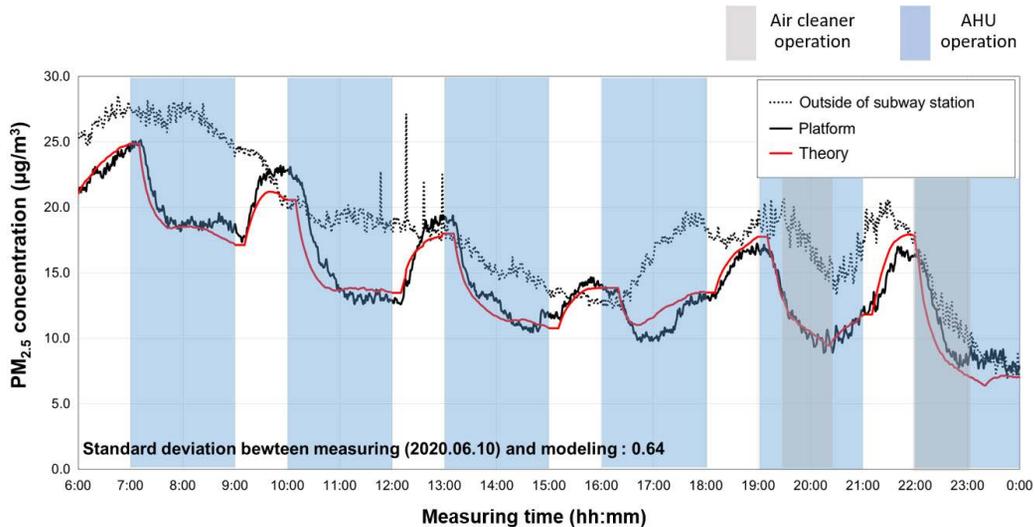
그림 5~7의 결과로부터 승강장의 입자는 열차 운행 또는 승객의 이동으로부터 발생되기보다는 외부 대기로부터 유입되는 것으로 예상된다. 그림 8(a)는 그림 7에서 공조기가 정지된 12~13시의 지하철 입구(C<sub>OA</sub>) 및 승강장(C<sub>i</sub>)의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 나타낸 것이다. 평균 C<sub>OA</sub>는 26.5 μg/m<sup>3</sup>였으며, 검은색 실선은 입자의 침착율 k를 0.057 min<sup>-1</sup>로 가정 후 입자 발생률 S에 53 μg/s를 대입하여 식 (6)을 통해 계산한 결과이다. 실험 측정값과 식 (6)의 계산 결과가 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 공조기가 정지된 시간대에 그림 8(a)와 동일한 방식으로 적절한 입자 발생률 S를 설정하였고, 입자 발생률과 외부 대기의 상관관계를 그림 8(b)에 나타냈다. 입자 발생률과 외부 대기의 PM<sub>2.5</sub> 농도와의 상관관계는 식 (7)과 같았으며, 결정계수 R<sup>2</sup>는 0.854였다.

$$S = 1.2994 C_{OA} + 14.901 \quad (7)$$

그림 9는 식 (6)을 식 (3)~(5)에 적용하여 유성온천역 승강장의 일간 PM<sub>2.5</sub> 농도를 계산한 결과이다. 점선은 지하철 역사 입구에서 측정된 외부 대기의 PM<sub>2.5</sub> 농도이며, 검은색 실선은 승강장에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도이다. 붉은색 실선은 식 (3)~(6)에 의해 이론으로 계산된 결과이다. 이론 모델과 실험 결과는 평균 표준편차 0.64 μg/m<sup>3</sup>를 나타내며 본 연구의 이론 모델이 실험 결과와 잘 매칭됨을 보여주었다. 공조기만 가동된 구간뿐만 아니라, 공기청정기와 공조기가 함께 가동된 19:13~20:13, 22:00~23:09 시간대에서도 이론 모델이 실험 결과와 잘 매칭되었다.



**Fig. 8.** (a) The PM<sub>2.5</sub> concentration at 12:00~13:00 in Fig. 7. Black symbols indicate outdoor air PM<sub>2.5</sub> concentration measured at the entrance of subway station. White symbols indicate PM<sub>2.5</sub> concentration measured at platform. Black line indicate theoretical PM<sub>2.5</sub> concentration assuming emission rate  $S = 53 \mu\text{g/s}$ . (b) Emission rate in platform according to outdoor air PM<sub>2.5</sub> concentration measured at the entrance of subway station.



**Fig. 9.** Experimental and theoretical PM<sub>2.5</sub> concentration of the subway station on June 10, 2020. The blue shading indicates the operating time of the air handling units (AHUs). The grey shading indicates the operating time of the air cleaners.

#### 4. 고 찰

대전광역시 유성온천역의 초미세먼지 농도는 외부 대기와 밀접한 관련성을 보였으며, 이는 심도가 깊어 질수록 낮아졌다. 지하 역사의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 심도가 깊은 순서로 농도가 낮아졌으며, 외부 대기보다 낮게

나타났다. 이는 기존의 지하철 역사의 연구 결과와 대치되는 결과로, 대전 지하철 1호선이 2006년 개통된 비교적 신축 역사임을 고려해야 한다. 기존의 지하철 역사 연구들은 수도권 역사를 대상으로 지하 역사의 실내 공기질은 승강장의 열차 운행 시 발생하는 입자의 유입이 중요하다고 밝혔다(Jung *et al.*, 2010). 그

러나 서울 지하철 1호선이 1974년에 개통되었고 수도권 지하철은 환승역이 많아 심도가 평균 19.8 m, 최대 심도 55.8 m에 달한다. 일평균 승객 수는 2019년 기준 970만 명에 달한다(경기도교통정보센터, <https://gits.gg.go.kr/>). 이에 반해 본 연구의 실험 역사인 유성온천역은 심도 14.2 m에 불과하여 외부 대기와의 공기 유출입이 쉽고 일평균 승객 수는 대전에서 두 번째로 높은 순위이나, 2만 명에 불과하다(대전도시철도공사, <https://www.djet.co.kr/>). 따라서, 본 연구의 결과가 보편적으로 다른 역사에 적용되지 않을 수 있으며, 외부 대기와 역사의 실내 공기질의 상관관계를 심층적으로 분석하기 위해서는 역사 심도, 혼잡도, 역사 구조 등에 따른 추가 연구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구는 대전광역시 유성온천역에서 수행한 실험 결과를 통해 외부 대기의 공기질과 역사 내 실내 공기질의 상관관계를 분석하고 역사 승강장의  $PM_{2.5}$  농도를 예측하는 이론 모델을 제시하였다. 총 30개의 휴대용 초미세먼지 센서를 사용하여 지하 역사를 역사 입구, 방풍문 외부, 대합실, 승강장 총 4개의 구역으로 나누어 분석하였다. 역사 구역의 심도가 깊어질수록  $PM_{2.5}$  농도는 낮아졌고, 승강장이 가장 낮은  $PM_{2.5}$  농도를 나타냈다. 방풍문 외부는 외부 대기와 측정시간과 상관없이 결정계수  $R^2=0.9357$ 의 선형 관계를 보였으나, 방풍문 안쪽의 대합실과 승강장은 지하철 미운행 시간에는 방풍문 폐쇄로 인해 외부 대기와 단절되었다. 방풍문 개방 이후에는 대합실과 승강장 모두 외부 대기와 선형적인 관계를 보였으나, 결정계수  $R^2$ 는 심도가 깊어질수록 낮아졌다. 즉, 외부 대기와의 상관성은 심도가 깊어질수록 낮아졌다.

공조기의 운전 스케줄을 조정하여 승강장 공조기만 가동하였을 때, 4개의 구역 중 승강장의 초미세먼지 농도만 평균 46.8% 감소하였다. 실험 결과를 통해 역사의 초미세먼지는 외부 대기에서 방풍문을 통해 대

합실로 유입되고, 최종적으로 승강장으로 유입되는 것으로 판단된다. 승강장의 입자 발생률은 외부 대기의 공기질과 선형관계를 보였으며, 질량 밸런스를 통해 승강장의  $PM_{2.5}$  농도를 예측하는 이론 모델을 제시하였다. 이론 모델은 실험 결과와 평균 표준편차  $0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보이며 잘 매칭되었다.

본 연구는 지하철 역사의 실내 공기질과 외부 대기와의 상관관계를 분석하였을 뿐만 아니라, 공조기 운영 및 외부 대기의 공기질에 따른 실내 공기질을 예측하는 모델을 제시하였다. 본 연구의 이론 모델은 추후 외부 대기의 초미세먼지 농도 수준에 따라 공조기의 OA 및 RA의 혼합비와 공조 시간 선정 등 적절한 건물 공조 방식을 선정하는 데 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 향후에는 역사 심도, 혼잡도, 구조 등에 따라 이론 모델을 심층적으로 개발한다면 전국 지하철 역사의 실내 공기질 관리에 적절한 공조 시나리오를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

- Cooper, C.D., Alley, F.C. (1994) Air Pollution Control-A Design Approach, 2nd Ed., Waveland Press Inc., U.S.A.
- Guo, L., Hu, Y., Hu, Q., Lin, J., Li, C., Chen, J., Li, L., Fu, H. (2014) Characteristics and chemical compositions of particulate matter collected at the selected metro stations of Shanghai, China, Science of the Total Environment, 496, 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.055>
- Kim, K.Y., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Kim, C.N. (2008) Spatial distribution of particulate matter ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ) in Seoul Metropolitan Subway stations, Journal of Hazardous Materials, 154(1-3), 440-443. <https://doi.org/>

- 10.1016/j.jhazmat.2007.10.042
- Kim, M., Braatz, R.D., Kim, J.T., Yoo, C. (2015) Indoor air quality control for improving passenger health in subway platforms using an outdoor air quality dependent ventilation system, *Building and Environment*, 92, 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.010>
- Kim, Y.S., Lee, Y., Kim, Y.J., Han, B., Kim, H.J. (2020) Particle collection performance of a separated two-stage electrostatic precipitator for subway air purification. *Particle and Aerosol Research*, 16(4), 119-130. <https://doi.org/10.11629/jpaar.2020.16.4.119>
- Kwon, S.B., Jeong, W., Park, D., Kim, K.T., Cho, K.H. (2015) A multivariate study for characterizing particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub>) in Seoul metropolitan subway stations, Korea, *Journal of Hazardous Materials*, 297, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.015>
- Lee, H., Namgung, H.G., Kwon, S.B. (2018) Effect of train velocity on the amount of airborne wear particles generated from wheel-rail contacts, *Wear*, 414, 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.023>
- Leiva, G.M.A., Santibañez, D.A., Ibarra, E.S., Matus, C.P., Seguel, R. (2013) A five-year study of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and cerebrovascular diseases, *Environmental Pollution*, 181, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.057>
- Loy-Benitez, J., Li, Q., Ifaei, P., Nam, K., Heo, S., Yoo, C. (2018) A dynamic gain-scheduled ventilation control system for a subway station based on outdoor air quality conditions, *Building and Environment*, 144, 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.016>
- Marsik, T., Johnson, R. (2008) HVAC air-quality model and its use to test a PM<sub>2.5</sub> control strategy, *Building and Environment*, 43(11), 1850-1857. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.001>
- Moreno, T., Pérez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillón, M.C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Gibbons, W. (2014) Subway platform air quality: assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design, *Atmospheric Environment*, 92, 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.043>
- Mugica-Álvarez, V., Figueroa-Lara, J., Romero-Romo, M., Sepúlveda-Sánchez, J., López-Moreno, T. (2012) Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system, *Atmospheric Environment*, 49, 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.038>
- Park, S., Kim, M., Kim, M., Namgung, H.G., Kim, K.T., Cho, K.H., Kwon, S.B. (2018) Predicting PM<sub>10</sub> concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN), *Journal of Hazardous Materials*, 341, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.050>
- Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., de Miguel, E., Capdevila, M. (2012) Variability of levels and composition of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Barcelona metro system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(11), 5055-5076. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5055-2012>
- Şahin, Ü.A., Onat, B., Stakeeva, B., Ceran, T., Karim, P. (2012) PM<sub>10</sub> concentrations and the size distribution of Cu and Fe-containing particles in Istanbul's subway system, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.003>

## Authors Information

이예완 (한국기계연구원 환경기계연구실 연구원)  
(lyw90@kimm.re.kr)

김예슬 (한국기계연구원 환경기계연구실 비상근 학생연구원,  
과학기술연합대학원대학교 석사과정) (kbook95@kimm.re.kr)

이한얼 (한국기계연구원 환경기계연구실 박사후연구원)  
(haneol0616@kimm.re.kr)

김용진 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원)  
(yjkim@kimm.re.kr)

한방우 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원, 과학기술  
연합대학원대학교 교수) (bhan@kimm.re.kr)

김학준 (한국기계연구원 환경기계연구실 책임연구원, 과학기술  
연합대학원대학교 교수) (diayolk@kimm.re.kr)