

논문

# 지하역사 내 가스상 오염물질의 시공간적 분포 특성

## Characteristics of Spatial-temporal Distribution of Gaseous Compounds in Underground Subway Stations

제보민, 유성지, 조은정<sup>1)</sup>, 손운석\*

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공,

<sup>1)</sup>부산광역시 보건환경연구원 물환경연구부 물환경생태팀

Bo-Min Je, Seong-ji Yu, Eun-Jeung Cho<sup>1)</sup>, Youn-Suk Son\*

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University,  
Busan, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Water Environment Research Department, Busan Metropolitan City Institute of Health &  
Environment, Busan, Republic of Korea

접수일 2022년 9월 30일  
수정일 2022년 11월 1일  
채택일 2022년 11월 3일

Received 30 September 2022  
Revised 1 November 2022  
Accepted 3 November 2022

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)51-629-6522  
E-mail : sonys@pknu.ac.kr

**Abstract** This study was conducted to understand the temporal and spatial distribution characteristics of CO<sub>2</sub>, CO, and NO<sub>2</sub> in underground subway stations. To understand the relationship between indoor and outdoor air, concentrations of air pollutants measured at air quality monitoring stations around the subway stations were also additionally analyzed. As a result of analyzing indoor air quality of underground stations, it was confirmed that CO<sub>2</sub>, CO, and NO<sub>2</sub> concentrations were continuously decreasing, and the CO concentration decreased the most. In the case of Seomyeon Station, the level of CO of Line 1 was higher than that of Line 2, and the concentration of CO<sub>2</sub> in the waiting room was higher than that in the platform. In addition, when we compared the concentration of CO and NO<sub>2</sub> by operation of subway, the levels of these compounds during operation time was higher than those during non-operation time. Finally, the trend of changes in the concentration of CO<sub>2</sub>, CO, and NO<sub>2</sub> in the underground station was similar to that of the surrounding atmosphere.

**Key words:** Indoor air quality, Subway station, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>

### 1. 서론

현대화 및 도시화가 진행되면서 인구 밀도가 증가하고 이에 따른 교통체증도 증가하고 있다. 현대인들은 복잡한 교통체증을 피하기 위하여 빠르고 편리하며 저렴한 교통 수단을 선택하는 경향이 있다(Kim *et al.*, 2012). 그중 운임이 저렴하고, 운행시간이 정확한 지하철은 사람들이 많이 이용하는 대중교통 수단 중 하나이다(Son *et al.*, 2020). 2020년을 기준으로, 전국적으로 688개의 역(Railway Industry Information Center, 2022)이 운영되고 있으며 수송인원이 증가하는 추세이다. 부산 지하철의 경우, 2021년 수송인원

은 695,683명으로 전년 대비(673,484명) 약 3.3% 증가했다(Busan transportation Corporation, 2022). 특히 최근 거리두기 완화, 고유가 시대에 직면하면서 2022년 1월부터 5월까지의 수송인원은 735,779명(Busan transportation Corporation, 2022)으로 향후 큰 폭으로 상승할 것으로 예상된다.

대부분의 지하철과 지하역사는 다수의 유동인구가 밀집되어 있는 지하 공간의 형태이다. 따라서 지하철 시스템의 실내공기질 관리가 매우 중요하다. 특히 지하철역사는 외부환경과 달리 밀폐된 공간이므로 실내공기질 관리에 한계점이 있다. 또한 지하철 객차 내 공간은 다른 시설에 비해 협소함에도 불구하고 출퇴

근시 매우 혼잡하며, 이용객의 밀도가 높기 때문에 실내공기질 오염에 대한 위험도가 상대적으로 높은 시설이다(Park *et al.*, 2006). 이 외에도 지하역사 내 실내공기질은 위에서 언급한 내부적인 원인뿐만 아니라 환기 등을 통한 외부공기의 침투와 같은 외부적인 원인에 의해서도 영향을 받는다(Son *et al.*, 2022, 2013; Park *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2015, 2010; Kim *et al.*, 2012).

지하역사 내에 존재하는 오염물질에는 미세먼지, 이산화탄소, 라돈, 석면, 휘발성 유기화합물 등이 있다(Choi *et al.*, 2020). 이러한 오염물질들은 「실내공기질 관리법」의 유지기준과 권고기준에 따라 적절한 농도로 관리되고 있다. 현재, 지하역사의 실내공기질 유지기준은 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 100 µg/m<sup>3</sup> 이하, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 50 µg/m<sup>3</sup> 이하, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 1000 ppm 이하, 폼알데하이드 100 µg/m<sup>3</sup> (HCHO) 이하, 일산화탄소(CO) 10 ppm 이하이다(Indoor Air Quality Control Act, 2021). 또한 위 시설의 실내공기질 권고기준은 이산화질소(NO<sub>2</sub>) 10 ppm 이하, 라돈(Rn) 148 Bq/m<sup>3</sup> 이하, 총 휘발성 유기화합물(TVOC) 500 µg/m<sup>3</sup> 이하이다.

「실내공기질 관리법」에 포함된 오염물질 중 입자상물질인 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 농도가 높아지면 기관지염이나 폐 기능 약화 등과 같은 호흡기 질환을 유발시키며, 혈관 기능 장애, 혈전증 등 심혈관계 증상의 대표적인 원인 물질로 알려져 있다(Deng *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2000). 또한, CO<sub>2</sub>는 만성 폐질환과 중추신경 영향 등을 유발시키며 CO는 심장장애 및 중추신경계 장애를 일으킨다(Lee, 2006). 이와 마찬가지로 NO<sub>2</sub>는 만성 폐쇄성 폐질환 사망 위험 증가와 관련이 있으며, 신경질환 유발 인자이다(Hwang *et al.*, 2018; Meng *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2012).

이러한 위험성들로 인하여 오랜 기간 동안 국내에서 지하 공간의 미세먼지에 대한 측정 및 분석뿐만 아니라 저감 기술, 인체 유해성 및 위험성 등에 대한 수많은 연구들이 진행되고 있다(Son *et al.*, 2022, 2014, 2013; Choi *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2019; Jeon *et al.*,

2019a, b; Lee *et al.*, 2017; Hwang *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2016; Byeon *et al.*, 2015; Kwon *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2008; Park and Ha., 2008; Lee *et al.*, 2003a, b, 2002). 물론 입자상물질 이외의 다른 오염물질에 대해서도 일부 연구가 수행되었다. Hwang *et al.* (2018)은 2014년부터 2015년까지 2년간 100곳의 지하역사에서 Rn 및 NO<sub>2</sub> 농도를 측정하고 인체에 영향을 미치는 환경적요인을 분석 및 평가하였다. 그리고 Namgung *et al.* (2016)은 서울 지상역사 3곳과 지하역사 5곳에서 PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, TVOC, HCHO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등의 물질의 농도를 측정하여 외기가 지하철 실내공기질에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만 현재까지 보고된 대부분의 연구들은 서울 지하철 시스템을 대상으로 수행되어 왔으며, 지하철 미세먼지 농도 및 성분 분석에 대한 내용에만 중점을 두고 있는 것이 사실이다(Son *et al.*, 2020). 특히, 지하철 내 실내 공기질과 외부 대기질과의 관계에 대한 연구는 극히 일부만 진행되었고 이 또한 대부분의 연구가 미세먼지 및 초미세먼지에 국한되어 있어서 상대적으로 다른 거동을 보일 것으로 예상되는 가스상 오염물질에 대한 연구는 특히 미비한 실정이다(Son *et al.*, 2022, 2020). 최근에 일부 연구진에 의해서 부산 지하철 시스템 내의 오염물질에 대한 연구가 소개되고 있다. Son *et al.* (2020)은 2015년부터 2019년까지 5년간 부산 지하역사 내의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도 자료를 비교 분석하고 외부공기질과 지하역사 내의 PM 농도의 관계를 평가하였다. Jeon *et al.* (2019a, b)은 2015년부터 2017년까지 3년간 부산 주요 지하역사의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도 자료를 사용하여 계절별, 요일별, 연도별로 미세먼지의 농도변화를 분석했다. 이와 같이 부산 지하철을 대상으로 한 연구는 일부 존재하지만 가스상 오염물질에 대한 연구는 극히 드문 실정이다.

따라서 본 연구에서는 6년간(2014년~2019년) 부산지역 주요 지하역사에서 측정된 CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 농도 자료를 활용하여 지하역사 내 오염 수준을 평가하였다. 또한, 이들 물질들의 실내외 농도 특성을 확인

하기 위하여 지하역사 주변의 대기질 측정망 자료를 활용하여 그 관계를 도출하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 결과는 향후 지하철 시스템의 실내공기질 관리를 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것이다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 측정 장소

부산 지하철은 1985년 7월 1호선 개통을 시작으로 현재 선로 길이는 115.8 km이며 4개 노선, 114개의 역을 운행하고 있다(Busan transportation Corporation, 2022). 현재 부산 교통공사는 「실내공기질 관리법」의 실내공기질 유지기준과 권고기준에 따라 주기적으로 지하철역사와 전동차의 공기질을 측정하고 있다. 이와 더불어 1호선에서부터 4호선까지 91개의 역에 104대의 실내오염물질 측정시스템을 설치하여 실내공기질 오염물질을 실시간으로 관리하고 있으며, 측정값은 부산광역시 보건환경정보 공개시스템을 통하여 공개하고 있다.

본 연구는 부산 지하철 역사 중 서면(Seomyeon; 1호선 및 2호선), 남포(Nampo; 1호선), 사상(Sasang; 2호선) 3개 역의 승강장(Platform: P) 및 대합실(Waiting room: W)을 대상으로 연구를 진행하였다. 대합실에 설치된 모든 공기질 측정기는 역의 중앙에 있는 개찰구 옆에 설치되어 운영되고 있었고, 승강장의 경우 대부분의 공기질 측정기는 탑승구의 중앙인 4번 승강장과 5번 승강장 사이에 위치해 있었다. 또한 모든 역사에 스크린 도어가 설치되어 있으며, 서면역과 사상역은 서로 다른 호선을 연결해 주는 환승 역사이다. 서면역은 1985년 부산 도시철도 1호선의 개통과 함께 운영을 시작하였으며 1999년에 2호선이 개통된 부산 최초의 환승역이다. 특히, 서면역은 부산의 모든 도시철도 가운데 승객이 가장 많이 이용하는 역사라고 알려져 있다. 사상역은 1999년에 도시철도 2호선이 개통되고 2011년에 부산-김해 경전철이 개통된 환승역이다. 게다가 2022년 12월 부산-마산 복선전철

이 개통될 예정이며, 2024년 5호선이 추가로 개통되어 4개 노선의 환승역사가 될 예정이다. 또한, 부산 도시철도 중에서 서면역 다음으로 하루평균 이용객이 많은 역사이다. 이 역은 환승역이 분리된 구조로, 지상에 있는 경전철과 지하에 있는 2호선 역 사이에서 간접 환승을 할 수 있도록 되어있다. 남포역은 1988년에 개통된 역사로 부산 1호선 도시철도 가운데 세 번째로 승객이 많은 역사이며, 2면 2선의 곡선상대식 승강장을 갖춘 지하역이다(Son *et al.*, 2020).

### 2.2 활용 데이터의 범위

본 연구에서는 지하역사 내 CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>의 시·공간적 거동 특성 및 외부 대기가 실내공기질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 6년(2014년~2019년) 동안 부산광역시 보건환경연구원이 수집한 자료를 활용하여 연구를 진행하였다. 분석을 위하여 사용된 자료는 부산광역시 보건환경연구원에서 자동측정장비를 사용하여 1시간 간격으로 측정된 자료이다. 이때, CO<sub>2</sub>와 CO는 비분산적외선법을 이용하였고, NO<sub>2</sub>의 경우 화학발광법을 이용하여 측정된 자료로 정도관리 등이 끝난 확정자료를 사용하였다. 서면역은 두 개 호선의 모든 승강장 및 대합실에서 측정되었고, 사상역과 남포역의 경우에는 대합실에서 측정된 자료를 사용하였다. 그리고 기기 및 통신의 오류로 인하여 발생된 자료의 결측율은 대상 역사마다 약간의 차이가 있기는 하지만 전체적으로 2~4%였다. 또한, 지하역사 주변의 부산광역시 보건환경연구원의 대기 오염자동측정망자료를 사용하여 외부 대기질과의 상관관계 및 실내외 미세먼지 농도를 비교 분석하였다. 이를 위해 동일한 기간(2014~2019년) 동안의 서면역은 전포동, 사상역은 학장동, 남포역은 광복동 자료를 활용하였다. 또한, 지하철 운행에 따른 실내공기질 영향을 비교하고 평가하기 위하여 하루 중 오전 5시부터 다음날 오전 1시까지 20시간을 운행시간(operation time: OP)으로 오전 1시부터 오전 5시까지 4시간을 비운행시간(non-operation time: NOP)으로 두 구간으로 나누어 추가 분석을 수행하였다.

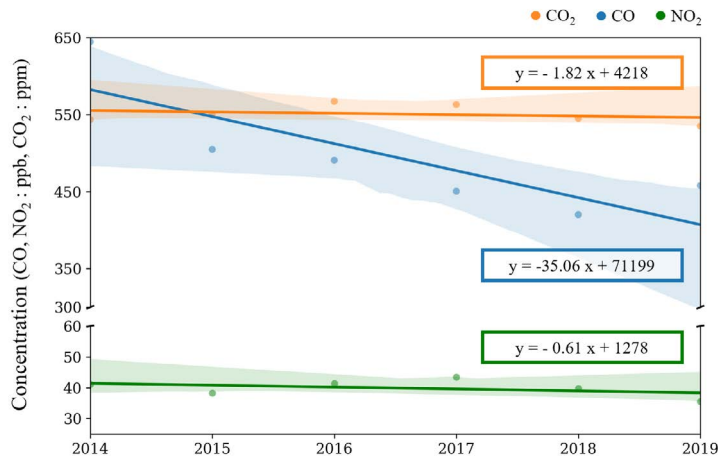


Fig. 1. Variations of levels of indoor air pollutants in subway stations from 2014 to 2019.

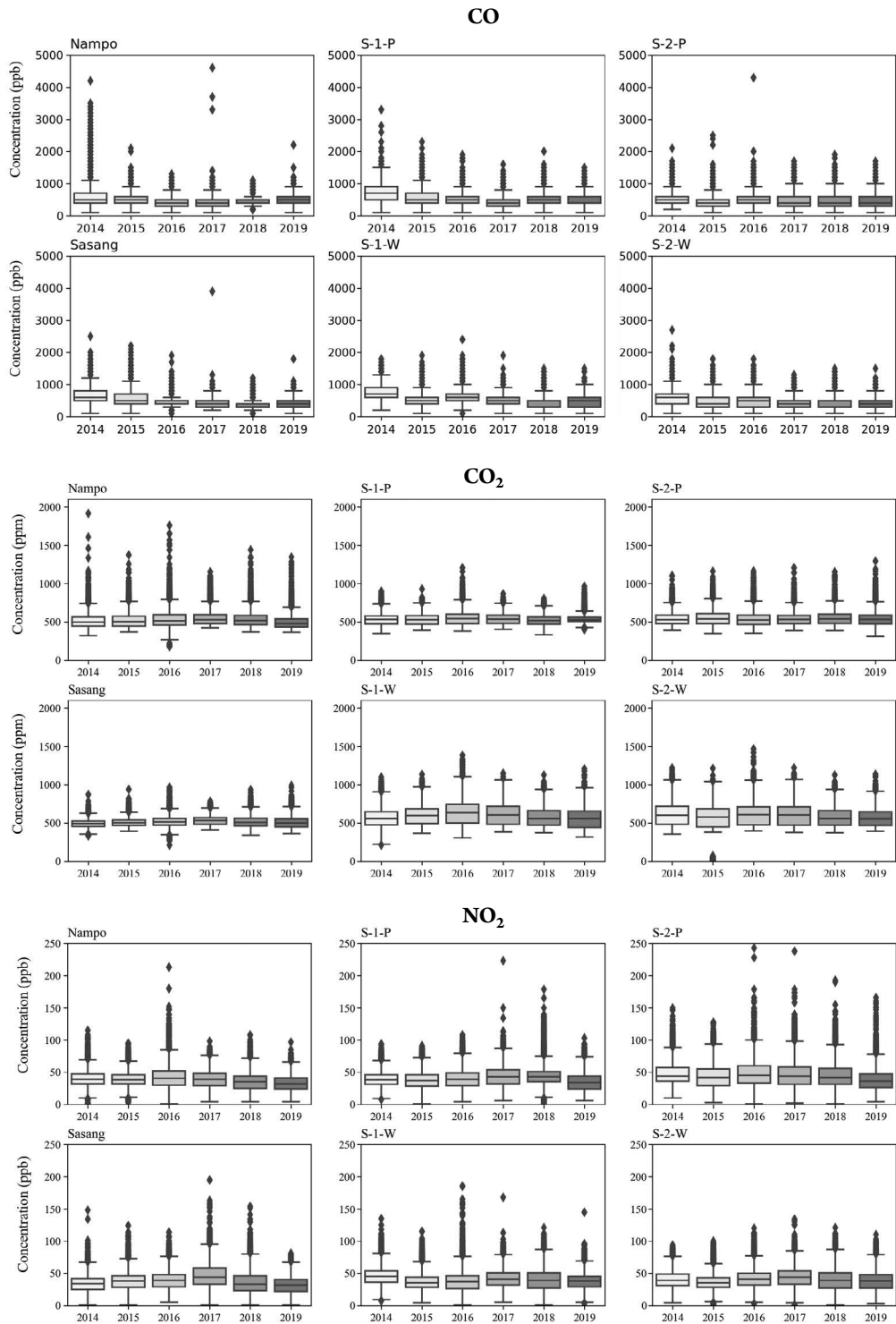
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실내공기 오염물질의 연평균 농도 변화

그림 1은 2014년에서부터 2019년까지 6년간 부산 지하철 대상 역사에서 측정된 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>2</sub>의 농도 변화를 나타낸 것이다. 활용된 농도 자료는 대상 역사들의 평균값을 사용하였으며, 원자료에서 0값, 문자, 음수 값을 제외한 자료를 사용하여 평균값을 산출하였다. 또한, CO<sub>2</sub>의 서면 2호선 대합실(S2W)의 2015년 7월 데이터는 이상현상으로 인하여 삭제 후 값을 산출하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 지난 6년 동안 지하역사 내 CO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub>의 농도 변화는 거의 없는 반면, CO의 농도는 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. CO<sub>2</sub> 농도 증감은 이용자 수와 유의미한 상관성이 있다는 연구결과가 나타남에 따라(Jeon *et al.*, 2019b; Moreno *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2012) 지하철 이용자 수의 변화가 크지 않다는 것을 예상할 수 있다. 2019년의 수송실적은 약 94만명으로, 2014년의 수송실적(약 89만명)보다 약 0.1% 정도 증가했는데(Busan transportation Corporation, 2022) 대상 역사의 CO<sub>2</sub> 농도는 지난 6년간 CO<sub>2</sub>는 평균 1.5% 감소했기 때문에(2014년: 544 ppm, 2019년: 535 ppm) 이용객이 증가했음에도 CO<sub>2</sub> 농도가 감소하는 경향이 있

는 것으로 판단할 수 있다. 또한 대상 역사의 NO<sub>2</sub> 농도를 비교했을 때, 지난 6년간 평균 13.7% 감소했다(2014년: 41 ppb, 2019년: 36 ppb). CO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub>의 농도 변화는 미미하지만 NO<sub>2</sub>의 농도가 CO<sub>2</sub>에 비해 상대적으로 큰 폭으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 특히 CO는 지난 6년간 평균 29% 감소한 것을 확인할 수 있었고 모든 물질 중 가장 큰 폭으로 감소했다는 것을 알 수 있다(2014년: 645 ppb, 2019년: 458 ppb).

지난 6년간 지하 역사 내 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>2</sub> 농도 변화를 추가적으로 분석하기 위하여 그림 2와 같이 지하 역사의 위치에 따른 분석을 수행하였다. 그 결과 사상역(2014년: 644 ppb, 2019년: 403 ppb)과 서면 1호선 대합실(2014년: 764 ppb, 2019년: 480 ppb)의 CO 농도 감소율이 37%로 농도가 가장 큰 폭으로 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 서면 2호선 승강장의 CO 농도 감소율은 12%로 가장 농도가 적게 감소(2014년: 528 ppb, 2019년: 466 ppb)한 것을 보았을 때, 모든 대상 역사에서 CO 농도는 다른 물질보다 대체적으로 많이 감소했다는 것을 알 수 있다. 세 역사의 외기 자료와 비교해 봤을 때(air Korea, 2020) 광복동과 전포동의 CO 농도는 일정한 양상을 보였으며(광복동: 0.4 ppm, 전포동: 0.3 ppm) 광복동의 CO 농도는 오히려 증가(2014년: 0.4 ppm, 2019년 0.5 ppm)하는



**Fig. 2.** Comparison of CO<sub>2</sub>, CO and NO<sub>2</sub> concentration distributions in platforms and waiting rooms over 6 years.

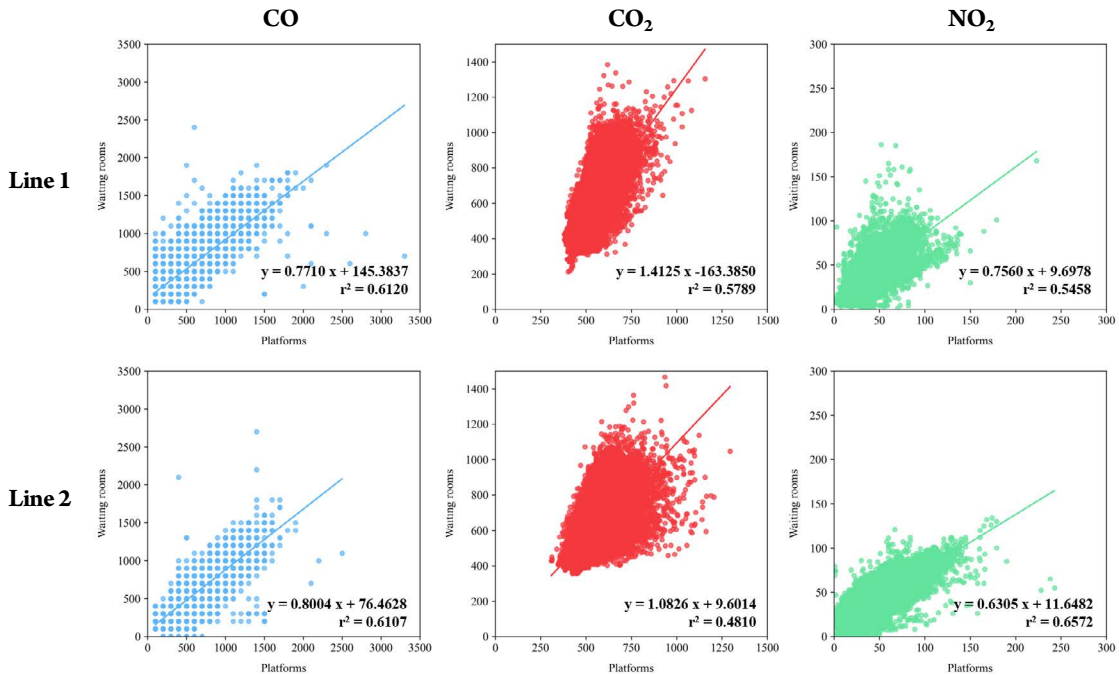


Fig. 3. Scatter plots between CO<sub>2</sub>, CO and NO<sub>2</sub> in platforms and waiting rooms of Seomyeon subway station from 2014 to 2019.

양상을 보였다. 외기의 변화가 일정한 편임에도 불구하고, 외기의 영향을 많이 받는 CO의 농도가(Moreno *et al.*, 2014) 전 역사에서 많이 감소했다는 것은 지하역사의 환기 효율이 개선되었다는 것을 의미한다. 실제로 부산 지하철은 노후 환기설비 교체, 공기정화기 설치 등의 지하역사의 공기질 개선사업을 지속적으로 수행하고 있다(Busan transportation Corporation, 2022). 이와 유사하게 서면 2호선 승강장의 NO<sub>2</sub> 농도의 감소율은 약 20%로 가장 큰 폭으로 농도가 감소하였으며(2014년: 478 ppb, 2019년: 38 ppb), 두 번째와 세 번째로 남포역(2014년: 40 ppb, 2019년: 33 ppb) 18%, 서면 1호선 승강장(2014년: 46 ppb, 2019년: 38 ppb) 18%의 감소율을 확인할 수 있다. 모든 대상 역사에서의 NO<sub>2</sub> 농도는 지난 6년간 5~20% 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이와 달리 CO<sub>2</sub>의 경우, 서면 2호선 대합실의 농도 감소율이 가장 크게 나타났는데 그 값이 7%로 다른 물질에 비해서는 미미한 변화

가 있다는 것을 확인할 수 있다(2014년: 616 ppm, 2019년: 571 ppm). 또한, 일부 역사에서는 CO<sub>2</sub> 농도 감소가 거의 없거나(서면 2호선 승강장: 0.1% 감소), 오히려 일부 증가하는 현상(서면 1호선 승강장: 0.6% 증가, 사상역: 3.6% 증가)이 나타나 역사별, 위치별로 농도 변화가 다른 경향을 가진다는 것을 알 수 있었다. 이는, 위에서 언급한 바와 같이 이용객 수에 영향을 많이 받기 때문에 나타난 결과라고 할 수 있다. 전체적인 표준편차를 비교해 봤을 때, 사상역에서 측정된 표준편차는(CO<sub>2</sub>: 99 ppm, CO: 173 ppb, NO<sub>2</sub>: 15 ppb) 다른 역사들에 비해 상대적으로 작은 값을 나타냈고, 서면역 2호선 대합실은 상대적으로 큰 값(CO<sub>2</sub>: 137 ppm, CO: 179 ppb, NO<sub>2</sub>: 15 ppb)을 나타냈다. 이는 각각의 역사 내에서 오염물질 농도 변화의 폭의 크기를 의미한다. 따라서 사상역은 오염물질 농도의 변화가 상대적으로 일정하며 서면역 2호선 대합실은 상대적으로 농도 변화가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 역사 내 위치에 따른 농도 분포 및 관계

그림 3은 역사 내 위치에 따른 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>2</sub> 농도를 비교 분석하기 위하여 서면역 1, 2호선의 승강장과 대합실의 농도 분포를 나타낸 것이다. 이때, 농도자료는 2014년부터 2019년까지의 전체 데이터를 사용했으며, 원자료에서 0값, 문자, 음수 값을 제외한 자료를 사용하여 평균을 산출하였다. 또한, 아래쪽 이상값을 제외하고 분석을 수행하였다. CO의 경우 Line 1 농도의 평균(±표준편차)값은(536±222 ppb) Line 2보다(467±192 ppb) 컸으며, CO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub>는 Line 1 농도의 평균값이(CO<sub>2</sub>: 563±104 ppm, NO<sub>2</sub>: 40±15 ppb) Line 2보다(CO<sub>2</sub>: 565±121 ppm, NO<sub>2</sub>: 42±18 ppb) 작다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 Line 1의 CO의 농도는 높은 반면, CO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub>의 농도가 Line 1이 낮은 이유는 승강장 및 대합실의 위치를 들 수 있다. Moreno *et al.* (2014)은 도로 위 차량 운행이 지하철 내 CO 농도에 영향을 준다는 연구 결과를 보였다. 서면역의 Line 1은 지하 13 m에 위치하고 있고, Line 2는 지하 20 m에 위치하고 있다. Line 2가 약 7 m 정도 깊은 곳에 있기 때문에, 외부의 교통수단에 의해 발생하는 CO에 의해(Namgung *et al.*, 2016) 더 높은 곳에 위치해 있는 Line 1이 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다.

동일한 Line의 물질별 농도를 비교해 보았을 때, Line 1의 NO<sub>2</sub> 농도를 제외한 모든 물질들에서 농도 차이를 확인할 수 있었다. Line 1에서는 CO와 CO<sub>2</sub> 모두 대합실의 농도가 승강장보다 각각 5%, 11% 높았으며, Line 2에서는 CO<sub>2</sub>의 대합실 농도만 승강장보다 9% 높았다. Jeon (2019b)에서는 3년간(2015년~2017년) 서면 1호선과 2호선의 CO<sub>2</sub> 농도를 비교하였는데 대합실의 CO<sub>2</sub> 농도가 승강장의 농도보다 각각 16%, 15% 높은 결과를 보였다. Namgung *et al.* (2016)에 따르면 CO 농도는 대합실이 승강장의 농도보다 대부분 1.2~1.5배 높으며, 도로의 차량 운행에 의해 승강장과 CO 농도와의 유의미한 상관관계가 있다는 결과를 보였다. 이와 같이 다른 연구 결과들도 본 연구의 결과와 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

### 3.3 열차운행에 따른 영향

그림 4와 같이 열차 운행에 따른 오염물질의 농도 차이를 확인하기 위하여 측정된 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>2</sub> 자료를 열차 운행시간(OP)과 비운행시간(NOP)으로 나누어 분석을 수행하였다. 4개 역사에서 측정된 평균 농도를 비교해 보았을 때, 열차 운행시간의 평균 NO<sub>2</sub> 농도는 42.2 ppb로 비운행시간(28.4 ppb)보다 48.4%가량 높은 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 CO<sub>2</sub>는 열차 운행시간의 농도(571.2 ppm)가 비운행시간의 농도(442 ppm)보다 29.2% 높았고, CO의 농도는 열차 운행시간(504.8 ppb)이 비운행시간(445.3 ppb)보다 13.3% 높게 나타난다. 따라서 세 물질 모두가 비운행시간보다 운행시간에 높은 농도를 나타낸다는 것을 볼 수 있다. 특히, 낮시간의 높은 CO 농도는 교통체증으로 인하여 차량이 멈추고 출발하는 과정에서 공회전, 감속, 가속 등에서 다량 방출된 것이 유입되는 것으로 이해할 수 있다(Lee *et al.*, 2002). 마찬가지로 NO<sub>2</sub>도 주 발생원인 차량의 배출가스가 지하철 환기시설 가동에 의해 지하역사 내로 유입되어 도로와 비슷한 농도 수준으로 유지되며 태양광이 없는 지하역사에서 광화학 반응이 일어나지 않아 높은 농도로 유지된다는 것을 알 수 있다(Jeon, 2019b; Kim *et al.*, 2009).

따라서 NO<sub>2</sub> 및 CO의 경우 지하철의 운행시간 동안 외부 차량의 운행으로 인해서 발생된 오염물질이 환기구 및 출입구 등을 통하여 실내로 유입되어 실내 농도에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. Moreno *et al.* (2014)은 승객의 수와 호흡활동에 의해 CO<sub>2</sub>의 농도가 높아진다는 결과를 보였다. Kwon *et al.* (2008)은 승객수와 CO<sub>2</sub>의 상관관계를 보였는데, 지하철 한 칸의 이용객이 285명이 넘으면 대기질 권고기준인 3500 ppm을 초과할 것이라고 예상하였다. 이러한 연구결과에 의하면 CO<sub>2</sub>는 지하철 운행시간 동안 승객들의 호흡이 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3.4 외기 농도 변화에 따른 영향

그림 5는 지하역사 내부와 대기오염자동측정망에

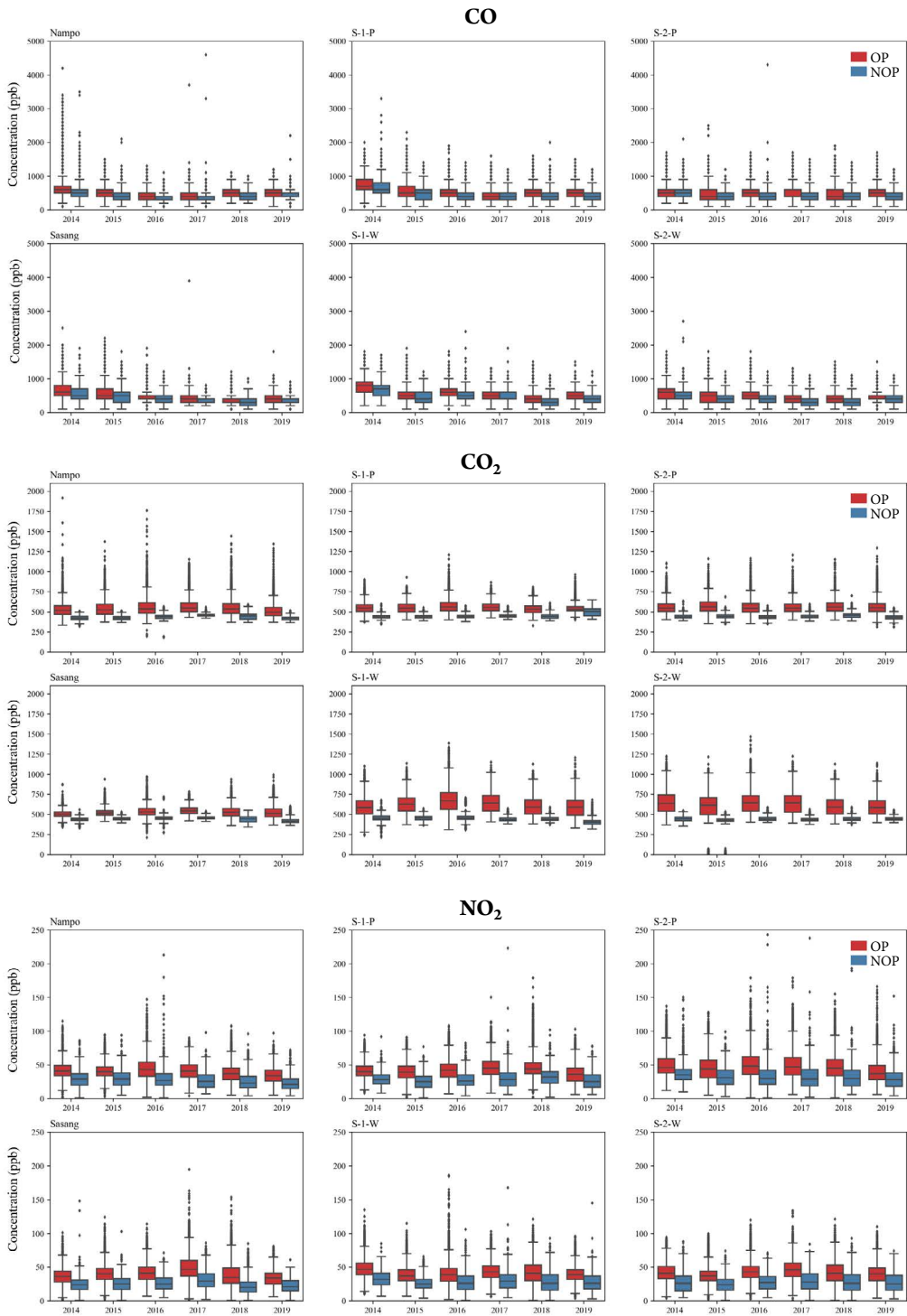


Fig. 4. Comparison of distribution of CO<sub>2</sub>, CO and NO<sub>2</sub> levels on operation and non-operation time of subway systems by years.



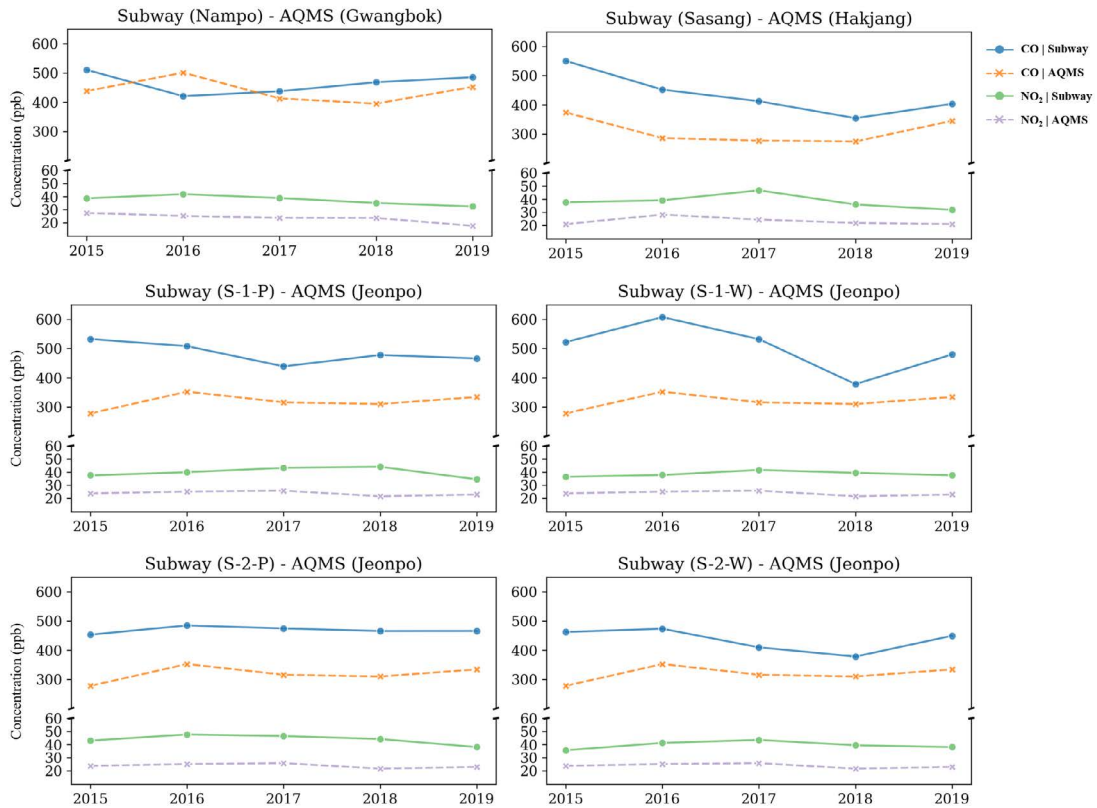


Fig. 5. Comparison of distribution of CO and NO<sub>2</sub> levels on indoor and outdoor of subway systems from 2015 to 2019.

서 측정된 외기 농도 자료의 연평균 값을 비교한 결과이다. 지난 5년 동안 농도 변화 추세는 외기의 변화와 지하역사 내부의 변화가 비슷하지만 외기보다는 지하역사 내부에서 측정된 결과의 변화 폭이 보다 작은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 모든 역사에서 CO와 NO<sub>2</sub> 외기 농도보다 지하역사의 평균농도가 더 높은 것으로 나타났다. 남포역의 경우, 지하역사의 오염물질 농도(CO: 464 ± 32 ppb, NO<sub>2</sub>: 37 ± 3 ppb)와 광복동에서 측정된 대기오염자동측정망 농도(CO: 439 ± 36 ppb, NO<sub>2</sub>: 23 ± 3 ppb)의 차이가 각각 24 ppb, 13 ppb로 가장 작았다. 그러나 서면역과 사상역의 경우, 전포동과 학장동의 평균 농도 값과의 차이는 CO는 116~186 ppb, NO<sub>2</sub>는 14~20 ppb로 남포역에 비해 상대적으로 큰 차이를 보였다. 서면역은 환승역으로 1호선과 2호선이 함께 운행되기 때문에 열차의 운행

빈도가 높고 승객의 유입도 많다. 또한 사상역의 경우 학장동의 대기오염자동측정망의 위치가 사상 공업단지 내 위치하고, 사상역과의 거리는 대략 1800 m 정도로 전포동(390 m)과 남포동(450 m)에 비해 상대적으로 멀리 떨어져 있기 때문에 이와 같은 결과를 나타내는 것으로 판단된다. Lee *et al.* (2014)은 전동차가 지상을 운행할 때와 지하를 운행할 때의 농도를 비교하였는데 CO 농도는 지상구간보다 지하구간에서의 농도가 1.2배 컸으며, 이와 반대로 NO<sub>2</sub>는 지상구간의 농도가 더 큰 것으로 나왔다. 이는 지상구간에서 질소산화물의 광화학 반응에 의한 결과로 판단할 수 있다. 또한 NO<sub>2</sub>가 객실 내부에서 실내공기질 기준치를 초과하는 경향을 보여 추가적인 조사를 해본 결과 전동차가 운행되면서 NO와 NO<sub>2</sub>가 발생하는 것으로 추정했다. Park *et al.* (2008)은 지하철 환기

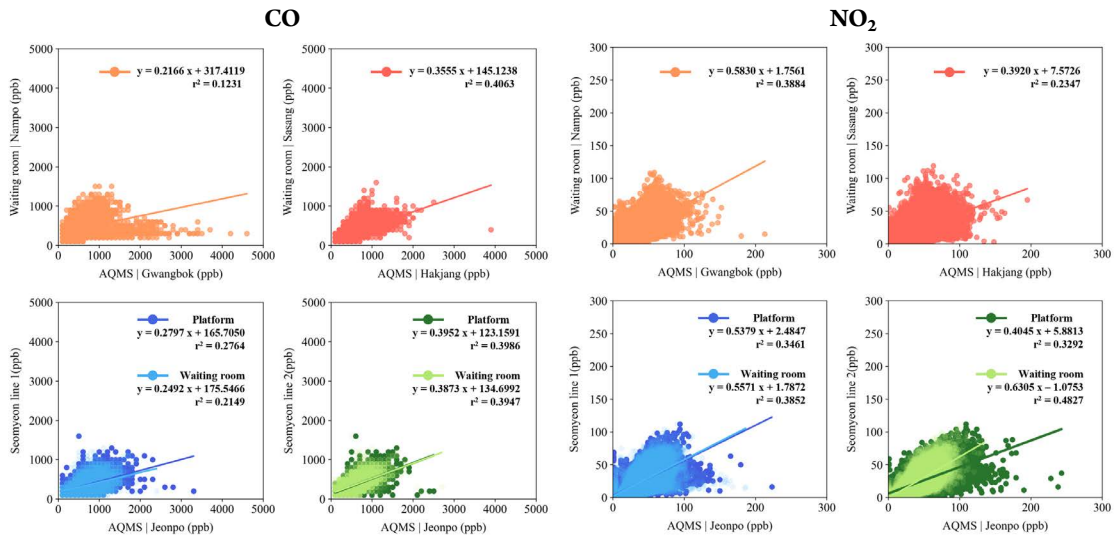


Fig. 6. Scatter plots of CO and NO<sub>2</sub> between AQMSs and underground subway stations by using hourly average values.

장치의 CO 농도를 모니터링하여 평균 1175 ppm의 결과를 보였는데 이는 환기 최적 농도(1000 ppm)를 훨씬 초과한 것으로, 열차 내부에 공기가 충분히 공급되지 못한다는 것을 알 수 있다. 이는 결국, CO와 NO<sub>2</sub> 두 물질 모두 일반적으로 지하 역사 내 발생원이 없다고 알려져 있지만 지하 역사 내 발생원이 존재할 가능성이 있으며, 지하역사의 구조상 외부에서 유입된 오염물질들이 환기 등의 방법을 통해 외부로 배출되기 어렵고, 지상에 비해 공기의 희석이 어렵기 때문에 볼 수 있다(Lee *et al.*, 2014).

추가적으로, 외부 대기오염물질이 지하역사 내부 실내공기질에 미치는 영향을 집중적으로 분석하기 위하여 외부의 대기오염자동측정과 지하역사에서 얻어진 자료를 이용하여 상관관계를 도출하였다(그림 6). 그 결과 CO의 결정계수는 0.12부터 0.41 사이의 범위를 나타내어 NO<sub>2</sub>의 결정계수 범위인 0.23부터 0.48보다 상대적으로 작은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Son *et al.* (2020)은 부산 지하역사와 외기의 PM 농도 상관관계를 비교하였는데 동일 역사에서 동일 기간 동안 측정된 PM<sub>10</sub>의 결정계수의 범위는 0.39부터 0.50의 범위를 나타냈고, PM<sub>2.5</sub>는

0.39부터 0.69의 범위로 나타났다. 이 결과와 비교해 볼 때, CO와 NO<sub>2</sub>가 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>에 비해 외기와의 상관성이 더 적은 것으로 나타났다. 따라서 이들 물질이 외기뿐만 아니라 구조물이나 상가 등 다른 발생원 및 환경적 요인에 의한 것일수도 있으므로 외부의 차량에 의해 영향을 받는다고 단정 지을 수 없다는 것을 나타낸다(Namgung *et al.*, 2016).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 부산 지하철 내 가스상 오염물질의 농도를 바탕으로 시공간적 거동 특성을 평가하기 위하여 2014년부터 2019년까지 6년간 부산 지하철 내에서 측정된 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>2</sub>의 농도 변화를 분석하였다. 추가적으로, 지하철 내 실내공기질과 외부 공기 질 사이의 상관성을 분석하기 위하여 대상 역사 주변의 대기오염자동측정망자료 자료를 활용하여 추가적인 비교분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 종합해서 분석했을 때, 부산 지하역사의 오염물질 농도가 지속적으로 감소했다는 것은 긍정적인 결과로 확인

할 수 있다. 하지만 분석자료의 결과를 확인했을 때, 거의 모든 역사 내부의 승강장과 대합실의 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>2</sub> 농도는 외부 대기질보다 좋지 않다는 것을 알 수 있었고, 외부 대기질에 따라 내부 공기질도 비슷한 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 이는 외부 공기질이 악화되었을 때 승강장과 대합실의 내부 공기질의 기준치를 유지하는 것에는 한계가 있다고 판단된다. 따라서 환기에 의존하는 기존의 공기질 관리방안보다 오염물질의 거동특성을 파악한 실질적인 시스템 운영을 통해 지하역사 내 공기질을 개선하기 위한 대책들이 필요하다.

### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2021년)에 의해서 연구되었음.

### References

- Airkorea (2020) <https://www.airkorea.or.kr/index>
- Busan transportation Corporation (2022) [https://www.humetro.busan.kr/homepage/default/board/view.do?board\\_no=2206DXXP3V&conf\\_no=81&menu\\_no=1001040201](https://www.humetro.busan.kr/homepage/default/board/view.do?board_no=2206DXXP3V&conf_no=81&menu_no=1001040201)
- Byeon, S.H., Willis, R., Peters, T.M. (2015) Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM<sub>2.5-10</sub>) and coarse (PM<sub>2.5</sub>) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(2), 2090-2104. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202090>
- Campbell, A. (2004) Inflammation, neurodegenerative diseases, and environmental exposures, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1035, 117-132.
- Choi, C.K., Yoo, S.Y., Jeon, B.K. (2000) A Study on the Characteristics of Concentrations of Atmospheric Aerosols in Pusan, *Korean Journal of Environmental Health Society*, 26, 41-48, (in Korean with English abstract).
- Choi, S., Park, J.H., Bae, S.Y., Kim, S.Y., Byun, H., Kwak, H., Hwang, S., Park, J., Park, H., Lee, K., Kim, W., Park, D.U. (2019) Characteristics of PM<sub>10</sub> levels monitored for more than decade in subway stations in South Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(12), 2746-2756.
- Choi, S.W., Cha, Y.W., Cho, Y.M., Cho, J.G. (2020) A study on distribution and characteristics of radon concentration in metro line 1 in Busan, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 42(1), 19-27. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2020.42.1.19>
- Deng, Q., Deng, L., Miao, Y., Guo, X., Li, Y. (2019) Particle deposition in the human lung: Health implications of particulate matter from different sources, *Environmental Research*, 169, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.014>
- Han, J., Kwon, S.B., Chun, C. (2016) Indoor environment and passengers' comfort in subway stations in Seoul, *Building and Environment*, 104, 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.008>
- Hwang, S.H., Park, J.B., Park, W.M. (2018) Radon and NO<sub>2</sub> levels and related environmental factors in 100 underground subway platforms over two-year period, *Journal of Environmental Radioactivity* 181, 102-108.
- Hwang, S.H., Park, W.M., Park, J.B., Nam, T. (2017) Characteristics of PM<sub>10</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations on 100 underground subway station platforms in 2014 and 2015, *Atmospheric Environment*, 167, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.019>
- Indoor Air Quality Control Act (2021) <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?efYd=20210401&lsiSeq=208237#0000>
- Jeon, B.I. (2019a) Characteristics of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations at subway stations in Busan for 3 years (2015-2017), *Journal of Environmental Science International*, 28(7), 581-594. <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.7.581>
- Jeon, B.I. (2019b) Characteristics of CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>2</sub> concentrations at subway stations in Busan for 3 years (2015-2017), *Journal of Environmental Science International*, 28(7), 595-606. <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.7.595>
- Jung, H.J., Malek, B.A., Koo, Y.S., Jung, J.H., Son, Y.S., Kim, J.C., Kim, H.K., Ro, C.U. (2012) Chemical speciation of size-segregated floor dusts and airborne magnetic particles collected at underground subway stations in Seoul, Korea, *Journal of Hazardous Materials*, 213, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.006>
- Kim, K.H., Ho, D.X., Jeon, J.S., Kim, J.C. (2012) A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station, *Atmospheric Environment*, 49, 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.006>

- org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.058
- Kim, K.Y., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Kim, C.N. (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) 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, Y.T., Jeong, J.W., Jeong, T.U. (2009) Comparison of indoor air quality and urban air quality in Busan, The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, 19(1), 168-176.
- Kwon, S.-B., Cho, Y., Park, D., Park, E.-Y. (2008) Study on the Indoor Air Quality of Seoul Metropolitan Subway during the Rush Hour, *Indoor and Built Environment*, 17(4), 361-369. <https://doi.org/10.1177/1420326X08094683>
- 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, E.S., Lee, T.J., Park, M.B., Park, D.S., Kim, D.S. (2017) Characteristics of particulate matter concentration and classification of contamination patterns in the Seoul metropolitan subway tunnels, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(6), 593-604. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.593>
- Lee, H.K. (2006) Current Status and Management of Indoor Air Quality in Subway Stations, *Air Cleaning Technology*, 19(3), 43-53.
- Lee, H.W., Jang, N.S., Kwak, J., Lee, H.R., Kim, H.M. (2002) Analysis of air pollution in subway area of Busan Metropolitan City, *Journal of Environmental Science International*, 11(3), 169-176. <https://doi.org/10.5322/jes.2002.11.3.169>
- Lee, H.W., Park, J.K., Jang, N.S., Lee, H.R., Kim, H.M. (2003a) Analysis of ambient air quality level in subway area in Busan metropolitan city, *Journal of Environmental Science International*, 22, 207-215. <https://doi.org/10.5322/JES.2003.12.2.207>
- Lee, H.W., Park, J.K., Jang, N.S., Lee, H.R., Kim, H.M. (2003b) The evaluation of CO concentration level at underground space in Busan metropolitan city, *Journal of Environmental Science International*, 12(1), 35-40. <https://doi.org/10.5322/JES.2003.12.1.035>
- Lee, J.Y., Jang, K.J., Han, H. (2012) Study of pollution concentration source and its change pattern in underground station, *Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea*, 547-550.
- Lee, K.B., Kim, J.S., Bae, S.J., Kim, S.D. (2014) Research Study on Indoor Air Quality (IAQ) inside of the Subway Cabin in Seoul Metropolitan City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(2), 175-187. <https://doi.org/10.5572/kosae.2014.30.2.175>
- Lee, T.J., Jeon, J.S., Kim, S.D., Kim, D.S. (2010) A comparative study on PM<sub>10</sub> source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 543-553. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2010.26.5.543>
- Lee, T.J., Lim, H., Kim, S.D., Park, D.S., Kim, D.S. (2015) Concentration and properties of particulate matters (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) in the Seoul metropolitan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 164-172. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.164>
- Li, H., Chen, L., Guo, Z., Sang, N., Li, G. (2012) In vivo screening to determine neurological hazards of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) using Wistar rats, *Journal of Hazardous Materials*, 225-226, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.063>
- Meng, X., Wang, C., Cao, D., Wong, C.-M., Kan, H. (2013) Short-term effect of ambient air pollution on COPD mortality in four Chinese cities, *Atmospheric Environment*, 77, 149-154.
- Moreno, T., Perez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillon, 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>
- Namgung, H.K., Song, J.H., Kim, S.Y., Kim, H.M., Kwon, S.B. (2016) Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 17(5), 17-25. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.17>
- Oh, Y.H., Nam, I.S., Kim, S.D., Kim, D.S., Park, D.S., Kim, J.H., Sohn, J.R. (2013) Health Risk Assessment for Heavy Metals in Particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) of Indoor Air in Subway Station, *The Korean Society of Living Environmental System*, 20(1), 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.018>
- Park, D.U., Ha, K.C. (2008) Characteristics of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO<sub>2</sub> and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environment International*, 34(5), 629-634. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.007>

- Park, J.H., Son, Y.S., Kim, K.H. (2019) A review of traditional and advanced technologies for the removal of particulate matter in subway systems, *Indoor Air*, 29(2), 177-191. <https://doi.org/10.1111/ina.12532>
- Park, W.M., Lee, C.M., ROH, Y.M., Kim, Y.S., Park, D.S. (2006) A Study on the Indoor Air Quality of Seoul Subway Passenger Cabin, *Proceeding of the 41st Meeting of KOSAE Korean Society for Atmospheric Environment*.
- Railway Industry Information Center (2022) *Railway Statistical Yearbook*. [http://www.kric.go.kr/jsp/industry/rai/railwayStatistics2List.jsp?q\\_sdate=2016&q\\_edate=2021](http://www.kric.go.kr/jsp/industry/rai/railwayStatistics2List.jsp?q_sdate=2016&q_edate=2021)
- Son, Y.S., Jeon, J.S., Lee, H.J., Ryu, I.C., Kim, J.C. (2014) Installation of platform screen doors and their impact on indoor air quality: Seoul subway trains, *Journal of Air Waste Management Association*, 64, 1054-1061. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.923350>
- Son, Y.S., Lim, S., Cho, E.J., Noh, Y., Lee, J., Han, H. (2020) Spatial-temporal Characteristics of Particulate Matter in Busan's Subway Systems, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 589-607. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.589>
- Son, Y.S., Salama, A., Jeong, H.S., Kim, S.H., Jeong, J.H., Lee, J.H., Sunwoo, Y., Kim, J.C. (2013) The effect of platform screen doors on PM<sub>10</sub> levels in a subway station and a trial to reduce PM<sub>10</sub> in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), 38-47. <https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.1.038>
- Son, Y.S., Yu, S., Seo, S.H., Choi, I. (2022) Effects of Indoor Air Quality in Subway Systems according to Changes in Outdoor Air Quality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 13-29. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.13>

### Authors Information

제보민 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 학부 과정) (je1252@naver.com)

유성지 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사 과정) (hp0102@naver.com)

조은정 (부산광역시 보건환경연구원 물환경연구부 물환경생태 팀 팀장) (cej1276@korea.kr)

손윤석 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 부교수) (sonys@pknu.ac.kr)