



논문

부산 지하철 내 미세먼지의 시·공간적 특성

Spatial-temporal Characteristics of Particulate Matter in Busan's Subway Systems

손윤석*, 임성후, 조은정¹⁾, 노영민, 이준엽, 한희진²⁾

부경대학교 환경공학과, ¹⁾부산광역시 보건환경연구원 미세먼지안전팀,

²⁾부경대학교 글로벌자율전공학부

Youn-Suk Son*, Sunghoo Lim, Eun-Jeung Cho¹⁾, Youngmin Noh,
Joonyeob Lee, Heejin Han²⁾

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University,
Busan, Republic of Korea

¹⁾Particulate Matter & Safety Team, Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment,
Busan, Republic of Korea

²⁾Division of Global & Interdisciplinary Studies, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2020년 8월 7일
수정일 2020년 9월 1일
채택일 2020년 9월 10일

Received 7 August 2020
Revised 1 September 2020
Accepted 10 September 2020

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

Abstract This study was performed to evaluate spatial and temporal variations of PM₁₀ and PM_{2.5} levels in Busan's subway system between 2015 and 2019. In order to understand the effect of outdoor PM (PM₁₀ and PM_{2.5}) on the PM levels in underground subway stations, this study analyzed the data obtained from the air quality monitoring stations around subway stations was also performed. This study found that the average PM₁₀ and PM_{2.5} levels in the underground subway stations decreased continuously during the period of observation. In the case of Seomyeon station, the concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in the platform of line number 1 were higher than those in the platform of line number 2 due to the depth of the platform and the number of passengers. There was no significant difference between the PM_{2.5}/PM₁₀ ratios in the waiting rooms and in platforms. In addition, when we compared the PM₁₀ and PM_{2.5} levels by the operating time of subway system, the level of PM₁₀ concentrations measured during the operation time was higher than that measured during the non-operation time. However, in the case of PM_{2.5}, the data showed that there was no significant difference between the operation and non-operation periods. Finally, this study found that the variation of PM₁₀ and PM_{2.5} levels in the underground subway stations is similar to that in the surrounding atmosphere.

Key words: Indoor air quality, PM₁₀, PM_{2.5}, Underground, Subway, Operation time

1. 서론

도시화가 지속됨으로 인하여 대중교통의 사용빈도가 증가되고 있다. 지하철은 저렴한 비용 및 정확한 운행 시간으로 가장 많이 이용되는 대중 교통수단의 하나이다. 따라서 현재 60여 국가 이상에서 지하철이 설치 및 운영되고 있고, 그 이용객수가 계속적으로 증가하고 있는 실정이다(Xu and Hao, 2017). 부산 지하

철의 경우 2019년 하루 평균 이용객수는 938천명으로 2015년 (889천명)과 비교할 때 약 5.5% 증가했다 (Busan transportation Corporation, 2020). 이는 2018년 기준 전체 부산시 내 대중교통 이용객수의 37.1%에 해당한다.

앞서 언급한 것처럼 지하철은 대다수의 시민들이 광범위하게 사용하는 교통수단이다. 그러나 지하철은 대부분의 노선이 지상에서 운행되는 다른 대중교통수

단들과는 달리 대부분의 역사가 지하에 분포하고 있는 특징을 가지고 있다. 이와 더불어, 다양한 다중이용 시설 중에서도 밀폐된 공간 및 내부에 미세먼지 발생원을 내포하고 있고, 특정 시간에 이용자가 집중되는 독특한 성질을 가지고 있어 실내공기질 오염에 대한 위험성이 상대적으로 더 높은 시설이다(Park *et al.*, 2019; Son and Ryu, 2018; Eom *et al.*, 2013). 특히, 다양한 실내 공기 오염물질 중에서 미세먼지(particulate matter: PM)는 열차의 운행 및 승객의 활동에 의하여 발생되어 내부에 축적되는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2017; Kamani *et al.*, 2014; Son *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2012; Raut *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2008; Braniš, 2006; Aarnio *et al.*, 2005; Johansson and Johansson, 2003; Awad, 2002; Furuya *et al.*, 2001). 게다가, 미세먼지 농도는 위와 같은 내부적인 요소뿐만 아니라 오염된 외부 공기의 환기 및 침투와 같은 외부적인 요소에 의해서도 좌우된다(Park *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2017, 2015; Son *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2010). 그리고 부적절한 환기 및 이용객의 증가로 인하여 지하철 실내공기질이 오염됐다는 보고는 우리나라뿐만 아니라 다양한 연구자에 의해 수행된 여러 나라의 연구 결과에서도 찾아볼 수 있다(Son and Ryu, 2018). 현재까지 그리스(Martins *et al.*, 2016a), 독일(Gerber *et al.*, 2014), 대만(Cheng *et al.*, 2008), 로마(Ripanucci *et al.*, 2006), 멕시코(Mugica-Álvarez *et al.*, 2012; Gomez-Perales *et al.*, 2004), 미국(Kam *et al.*, 2011; Wang and Gao, 2011; Grass *et al.*, 2010; Chillrud *et al.*, 2004; Levy *et al.*, 2002), 핀란드(Aarnio *et al.*, 2005), 포르투갈(Martins *et al.*, 2016b), 프랑스(Raut *et al.*, 2009), 스웨덴(Karlsson *et al.*, 2005; Johansson and Johansson, 2003), 스페인(Martins *et al.*, 2016, 2015; Querol *et al.*, 2012), 아르헨티나(Murrini *et al.*, 2009), 영국(Seaton *et al.*, 2005; Adam *et al.*, 2001), 이탈리아(Carteni *et al.*, 2015; Colombi *et al.*, 2013), 이란(Kamani *et al.*, 2014), 오스트레일리아(Knibbs and Dear, 2010), 중국(Lu *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2015a, b; Bao *et al.*, 2014; Ye *et al.*, 2010; Li *et al.*,

2007; Chan *et al.*, 2002a, b), 체코(Braniš, 2006), 터키(Onat and Stakeeva, 2014; Sahin *et al.*, 2012), 헝가리(Salma *et al.*, 2007) 및 국내(Kwon *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2008; Park and Ha, 2008)에서 측정된 지하철 미세먼지 농도의 범위를 보면 PM₁₀(particulate matter 10 μm or less in diameter)은 10~1500 μg/m³, PM_{2.5}(particulate matter 2.5 μm or less in diameter)는 7~731 μg/m³로 일반적으로 대기 중에서 측정되는 농도보다 매우 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이와 관련된 자세한 내용은 저자의 이전 논문에서 찾아 볼 수 있다(Park *et al.*, 2019). 이와 더불어, 지하철 운행으로 인해서 발생하는 미세먼지는 터널 내부에서 레일, 바퀴, 팬터그래프 등의 마모로 인하여 발생하는 물질들이 상당수를 차지하는데, 이들은 철성분을 함유하고 있는 유해한 물질들(Fe₃O₄, α-Fe₂O₃, γ-Fe₂O₃, iron (Fe) metal)이기 때문에 대기 중 미세먼지보다 인체에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Son and Ryu, 2018; Jung *et al.*, 2012; Mugica-Álvarez *et al.*, 2012; Gustavsson *et al.*, 2008; Salma *et al.*, 2007; Karlsson *et al.*, 2005). 또한, 이들은 크게 마모와 같은 기계적인 현상에 의해서 발생하는 물질(iron (Fe) metal)과 발생 후 공기 중의 산소와 반응하여 형성되는 물질들(Fe₃O₄, α-Fe₂O₃, γ-Fe₂O₃)로 구분되고 열차의 운행으로 의하여 생성되는 열차풍으로 인하여 승강장 및 대합실까지 유입되는 것으로 알려져 있다(Eom *et al.*, 2013).

이에 따라, 국내에서도 현재까지 지하철 시스템 내의 미세먼지에 대하여 다양한 연구들이 진행되어 왔다. Park and Ha (2008)는 서울 지하철의 승강장 내 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, CO 농도를 측정하였다. Lee *et al.* (2017)은 서울시 지하철 전 노선의 터널 내 미세먼지 농도를 측정하였고, 일부 구간에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도가 관련법의 기준 농도를 초과하는 것으로 보고했다. 또한, 그 논문에서는 터널 내외의 PM 상관성을 분석한 결과, 입자의 크기가 작을수록 높은 상관성이 나타나는 것으로 보고했다. Kim *et al.* (2008)은 서울지역의 22개 역사를 대상으로 승객 및 작업자가 활

동하는 다양한 공간에 대한 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도를 측정하였다. Kwon *et al.* (2015)은 6개의 주요 환승역에서 PM의 농도를 측정하고 이를 사용하여 다양한 환경인자에 대한 다변량 분석을 수행하였다. Hwang *et al.* (2017)은 2014년부터 2015년까지 100여 곳의 지하역사에서 PM₁₀ 및 CO₂ 농도를 측정하고 이들에게 미치는 환경인자 및 잠재적인 건강위해성을 평가했다. Son *et al.* (2014)은 지하철 시스템 내 미세먼지에 영향을 미치는 다양한 인자(열차의 환기 시스템, 운행조건, 승객 수, 터널의 깊이, 지하구간의 길이)에 대해서 조사했다. Choi *et al.* (2019)은 지난 10여 년간 우리나라 지하철 역사에서 측정된 PM₁₀ 농도를 지역별로 비교 분석하였다. Han *et al.* (2016)은 PM₁₀ 농도 등의 실내공기질 및 승객의 편의성에 대해서 평가하였다. 이와 더불어, Oh *et al.* (2013)은 지하역사 내의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}에 포함된 중금속으로 인하여 장기간 노출 시 발암가능성이 높음을 확인했다. Byeon *et al.* (2015)은 지하철 및 그 외기에서 채취한 미세먼지들의 화학 성분을 분석하였다. 다른 한편으로는 이러한 미세먼지의 영향을 줄일 수 있는 기술에 대한 평가를 수행한 연구들도 있다. Kim *et al.* (2012)은 승강장에 스크린도어를 설치함에 따른 승강장의 미세먼지 영향을 평가했는데, 그 결과 PM₁₀의 농도가 16%까지 감소되는 것으로 보고했다. Jung *et al.* (2012)은 스크린도어 설치로 인하여 대합실 및 승강장 내의 철-함유 입자가 확연히 줄어드는 것을 확인했다. 이와 같이 스크린도어의 설치로 인하여 대합실 및 승강장의 미세먼지 농도는 확연히 줄어들었지만, 이와 반대로 열차 내의 PM₁₀ 농도가 증가한다는 연구 결과도 보고되고 있다. Son *et al.* (2014)의 연구에 따르면 스크린도어의 설치로 인하여 열차 내의 PM₁₀ 농도는 평균 약 30%까지 증가하고 최대 103%까지 증가되는 것으로 알려졌다. 그러나 이러한 열차 및 터널 내의 미세먼지 농도는 적절한 환기 시스템의 가동만으로도 그 당시의 실내공기질 기준(150 µg/m³)을 맞출 수 있었다는 연구 결과도 있다(Son *et al.*, 2013).

지하철 시스템 내의 공기질에 대한 연구는 위에서

언급한 것처럼 현재까지 많은 연구자들에 의하여 다양하게 진행되어 왔다. 그러나 현재까지 보고된 국내 대부분의 연구들은 모두 우리나라의 수도인 서울 안에 있는 지하철 시스템들을 대상으로 수행되었다. 따라서 이들 논문의 결과 중 스크린도어나 환기시스템 성능 평가 및 화학성분 등을 이용한 배출원 추정에 대한 결과들은 다른 시도의 관련 정책 수립에 직접적인 도움을 줄 수 있지만, 측정 농도를 비교한 대부분의 논문들을 다른 지역의 지하철 실내공기질 정책에 곧바로 사용하는 것은 무리가 따른다.

부산 지하철의 경우 현재까지 CO 및 NO₂, 라돈 등과 같은 물질들을 대상으로 진행된 연구들은 일부 존재하지만 미세먼지 관련 연구는 거의 없는 실정이다(Choi *et al.*, 2020; Jeon *et al.*, 2019a; Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2003a, b, 2002). 비록 일부 논문에서 부산 지하철 시스템 내의 미세먼지 농도에 대한 연구 결과들을 제시하고 있지만, 짧은 연구기간 및 불특정 역사에서 연구가 진행됨으로 인하여 부산 지하철 내의 전체적인 미세먼지 농도의 경향을 파악하기에는 한계가 있다(Choi *et al.*, 2019; Jeon, 2019b; Kim *et al.*, 2009).

따라서 본 연구에서는 2015년부터 2019년까지 5년간 부산지역 주요 지하철역사에서 측정된 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 자료를 활용하여 미세먼지의 시간적 공간적 특성을 파악하고자 한다. 이를 위하여 5년간의 PM 농도 자료를 이용하여 시간의 경과에 따른 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 변화, 지하철 역사 내 위치에 따른 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 특성, 지하철 운행 및 외기의 영향에 대한 분석들을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 측정 장소 및 기간

부산 지하철은 1985년 7월에 최초로 개통되어 운영을 시작한 후 현재 4개 노선 115.8km가 설치되어 114개 역이 운행 중에 있다(Busan transportation Corporation, 2020). 부산시는 2010년도 10월 서면역을 시작

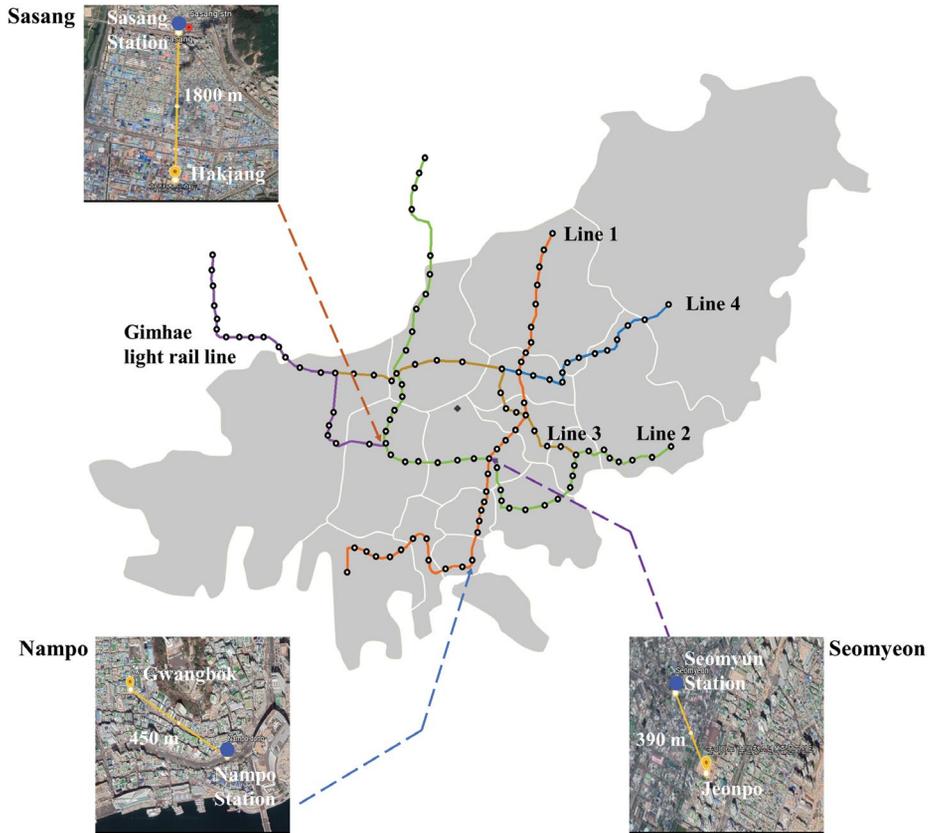


Fig. 1. The locations of subway stations (blue circle) and air quality monitoring stations (yellow circle).

으로 현재 대부분 역사의 승강장 및 대합실에 실내공기질 모니터링 시스템을 설치하여 미세먼지와 같은 오염물질들을 관리하고 있다. 본 연구에서는 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 시·공간적 특성을 확인하기 위하여 이 중에서 5년 동안(2015~2019년) 실내 오염물질의 농도 자료가 축적된 남포(Nampo: N; 1호선), 사상(Sasang: SS; 2호선), 서면역(Seomyeon: S; 1호선 및 2호선)의 승강장(Platform: P) 및 대합실(Waiting room: W)을 대상으로 연구를 수행하였다. 연구 대상에 포함된 역사의 위치는 그림 1과 같다. 자료 분석을 위하여 사용된 자료는 부산광역시 보건환경연구원에서 베타선흡수법을 이용한 자동측정장비를 사용하여 1시간 간격으로 측정된 자료이며, 정도관리 등이 끝난 확정자료를 사용하였다. 서면역의 경우에는 두 개 호선의 모든

승강장 및 대합실에서 측정되었고, 나머지 역사들은 모두 대합실에서 측정된 자료를 사용하였다. 그리고 기기 및 통신의 오류로 인하여 발생된 자료의 결측율은 대상 역사마다 약간의 차이가 있기는 하지만 전체적으로 2~4%로 나타났다.

세 개의 연구 대상 역사 모두 스크린도어가 설치되어 있고 이 중 남포역을 제외한 다른 두 역사는 모두 환승역사이다. 각 역사들의 주요 특징은 다음과 같다. 남포역은 1988년에 개통된 2면 2선의 곡선 상대식 승강장을 갖춘 지하역이다. 사상역은 1999년에 도시철도 2호선이 개통되고 이후 2011년에 부산-김해 경전철이 개통된 환승역이다. 여기서 경전철 역은 지상에 위치하고 있고, 2호선은 지하에 2면 2선식의 상대식 승강장 구조로 이루어져 있다. 서면역은 부산 도시철

Table 1. General information on target subway systems in this study.

Station	Line number	Opening year by line	Depth of platform (m)	Installation year of screen door	Number of daily passengers in 2019
Nampo	1	1988	14.28	2012	46,184
Sasang	2	1999	12.15	2012	48,859
Seomyeon	1	1985	13.03	2008	87,264
	2	1999	20.11	2008	58,875

Table 2. Annual mean concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} measured at subway systems during five years (2015~2019).

Station	Line	Location	2015		2016		2017		2018		2019		Total		
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
PM ₁₀	N ^{a)}	1	W ^{d)}	51.3	47.5	43.5	19.3	40.8	20.2	43.8	22.1	39.8	19.8	43.8	25.8
	SS ^{b)}	2	W	37.5	20.1	32.4	14.4	32.3	13.1	30.7	15.0	34.5	15.4	33.5	15.6
	S ^{c)}	1	W	51.9	22.3	47.4	19.4	45.1	18.7	39.1	25.2	41.6	18.2	45.0	20.8
	S	2	W	48.0	28.8	44.5	19.0	40.1	16.4	39.1	25.2	38.8	17.4	42.1	21.4
	S	1	P ^{e)}	55.2	80.5	51.3	22.1	43.5	20.6	38.5	20.4	37.8	22.2	45.3	33.2
	S	2	P	46.0	41.2	40.0	19.7	37.1	21.7	32.9	23.0	34.6	20.4	38.1	25.2
PM _{2.5}	N	1	W	25.7	11.7	24.1	28.5	24.9	16.6	26.5	23.5	26.3	13.5	25.5	18.8
	SS	2	W	22.2	14.0	16.6	7.9	14.2	6.9	19.6	7.5	21.5	9.7	18.8	9.2
	S	1	W	30.1	16.2	27.1	30.3	28.6	30.3	24.4	39.8	20.7	11.9	26.2	25.7
	S	2	W	27.9	16.0	28.8	37.5	23.7	15.7	24.4	39.8	20.6	11.5	25.1	24.1
	S	1	P	26.6	35.5	29.8	27.3	23.8	20.0	21.4	24.2	20.4	12.7	24.4	23.9
	S	2	P	23.6	24.0	30.2	31.8	25.1	16.5	22.9	18.4	19.1	10.9	24.2	20.3

^{a)}Nampo; ^{b)}Sasang; ^{c)}Seomyeon; ^{d)}Waiting room; ^{e)}Platform

도 최초의 환승역으로서 1985년 1호선 구간의 개통과 함께 영업을 시작하여 1999년에 2호선이 추가로 개통됨으로서 환승역이 된 부산 도시철도의 모든 역사 중에서 이용객이 가장 많은 역사이다. 이들 역사에 대한 보다 자세한 정보를 표 1에 나타내었다.

이와 더불어, 실내외 미세먼지 농도 및 상관관계를 비교 분석하기 위하여 각 지하역사에서 가장 근접한 부산시 보건환경연구원의 대기오염자동측정망자료를 사용하였다. 서면역은 전포동, 사상역은 학장동, 남포역은 광복동 자료를 동일한 기간(2015~2019년)으로 정리하여 사용하였다. 또한, 모든 지하역사 및 대기오염자동측정망들에서 얻어진 자료들은 지하철 운행에 따른 영향을 비교 평가하기 위하여 운행 시간(5시부터 다음날 1시: 총 20시간) 및 비운행 시간(1시부터 5시: 총 4시간)으로 나누어서 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 시간적 분포

표 2는 부산지역의 대상역사에서 2015년부터 2019년까지 5년에 걸쳐 측정된 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도를 나타낸 것이다. 5년 동안의 평균값을 비교해 보았을 때, 가장 높은 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 나타낸 지점은 서면 1호선의 승강장과 서면 1호선 대합실로 각각 45.3 µg/m³과 26.2 µg/m³이었고, 가장 낮은 농도를 나타낸 곳은 사상 2호선의 대합실로 각각 33.5 µg/m³과 18.8 µg/m³로 나타났다. 두 역간의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도 차이는 각각 11.5 µg/m³ 7.4 µg/m³로 서면역 1호선 대합실의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도가 사상역 대합실보다 34%, 39% 높은 것으로 나타났다. 그러나 이전에 보고된 논문들과 비교할 때 부산지역의 지하역사 안

의 PM_{10} 농도는 다른 지역의 지하역사 내에서 측정된 농도보다 확연히 낮은 것을 알 수 있었다. Choi *et al.* (2019)은 2005년부터 2017년까지 전국의 지하역사에서 중량법 및 베타선흡수법으로 측정된 PM_{10} 농도 자료들을 모아 분석을 수행하였고, 그 결과 전국 지하역사의 PM_{10} 농도의 평균값은 $77.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 서울과 대구 지역의 승강장에서는 PM_{10} 농도의 평균값이 $90.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이라고 보고하였다. 그리고 그 논문 안에서도 부산지역 승강장 및 대합실에서 측정된 PM_{10} 의 농도 값은 평균 약 $56.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 동일 기간에 6개 광역사에서 측정된 값 중에서 가장 낮은 농도를 나타냈다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 지난 6년 동안 부산시 지하역사들 안에서 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도는 지속적으로 낮아지고 있다. 특히 2015년부터 2018년도 사이에 PM_{10} 농도가 급격히 떨어지다가 현재에는 그 농도가 거의 유지되고 있는 상황이다. 이와 같은 현상은 비록 PM_{10} 농도보다 떨어지는 농도의 폭은 적지만 $PM_{2.5}$ 농도에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 대상역사들의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도를 비교한 결과, 평균적으로 21.7%와 17.6%의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 가 지난 5년 동안 감소된 것을 확인할 수 있었고 PM_{10} 의 감소율이 $PM_{2.5}$ 보다 높은 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 전국의 지하철 시스템을 대상으로 측정된 자료들을 모아서 분석한 연구의 결과와 비교 평가할 수 있다(Choi *et al.*, 2019). 그들의 결과에서도 전국 지하

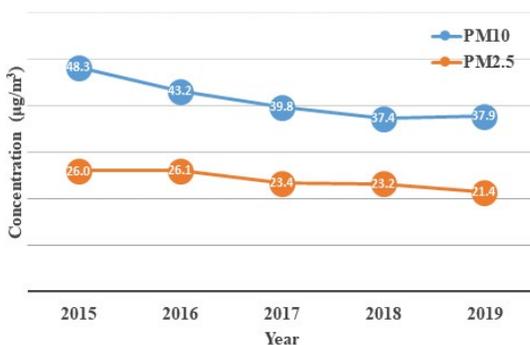


Fig. 2. Distribution of PM_{10} and $PM_{2.5}$ levels by year.

철의 PM_{10} 농도는 2015년부터 2017년 사이에 지속적으로 낮아진 것으로 보고했다. 그러나 Choi *et al.* (2019)의 연구결과에서는 본 연구에 해당하는 기간에 부산 지하철 시스템 내의 PM_{10} 농도의 변화는 없는 것으로 나타나 본 연구의 결과와 상반되는 결과를 보였다. 두 연구 간에 이와 같은 차이는 물론 부산 지하철 시스템 내 시료채취의 장소도 다르지만, 본 연구는 부산시 보건환경연구원이 직접 운영하는 3개 역사의 실내공기질 자동측정망 자료를 사용하였고, Choi *et al.* (2019)은 지하철 운영업체가 실내공기질 관리법에 의거하여 1년에 한번 환경부에 보고하는 자료를 토대로 분석이 이루어졌기 때문에 판단된다.

지난 5년 동안의 지하역사 내 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 집중적으로 분석하기 위하여 각 역사 및 위치별로 지난 5년 동안의 농도 추이를 그림 3과 같이 추가적으로 분석하였다. 그 결과, 연구 기간 동안 서면 1호선 승강장의 PM_{10} 농도의 감소가 31.5%로 가장 뚜렷하게 나타났으면, 두 번째로는 서면 2호선 승강장의 PM_{10} 농도가 24.8% 감소한 것으로 나타났다. 이때, 4곳의 대합실 내 PM_{10} 농도의 시간에 따른 변화는 승강장에서의 농도 변화보다는 그 감소폭이 작은 것을 볼 수 있었다. 그러나 모든 대상역사 내 측정지점에서 지난 5년간 PM_{10} 농도가 8.0~31.5% 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 달리, $PM_{2.5}$ 의 경우에는 모든 서면역의 승강장 및 대합실에서는 큰 폭(19.1~31.2%)으로 그 농도가 낮아졌지만, 일부 역사에서는 $PM_{2.5}$ 의 농도가 그 기간 동안 3.2% 감소(사상역)로 거의 변화가 없거나 오히려 역으로 증가하는 현상(남포역: 2.3% 증가)을 보여 지역에 따라 지하역사 내의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도의 변화는 확연히 다른 경향을 가진다는 것을 알 수 있었다. 그리고 이와 같은 현상에 대한 해석은 뒤 따르는 3.2와 3.3절에서 추가적으로 명확하게 제시할 것이다. 그리고 전체적으로 비교했을 때 사상역의 대합실에서 측정된 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도의 표준편차는 다른 역사들에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타나 이는 동일역사 안에서 PM_{10} 및

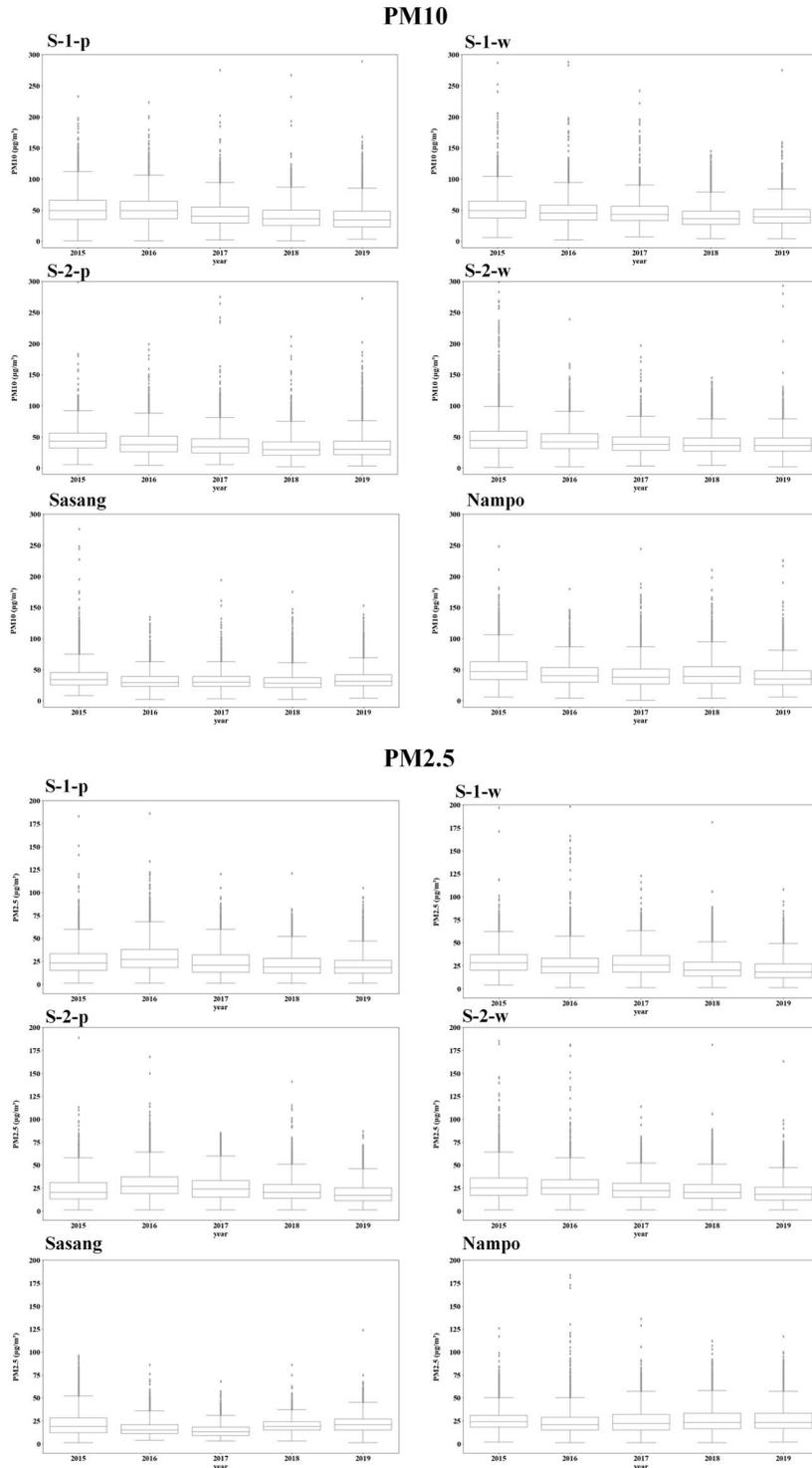


Fig. 3. Comparison of distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} levels on platforms and waiting rooms by year.

PM_{2.5}의 농도변화 폭이 상대적으로 작다는 것을 의미한다.

일반적으로 지하철 시스템 내의 PM 농도에 영향을 미치는 오염원은 열차의 운행으로 인하여 발생하는 PM, 열차 이용객들의 활동으로 인하여 발생하는 PM, 환기 시설 및 출입문 등을 통하여 유입된 대기 중의 PM과 같이 크게 3가지로 구분된다(Choi *et al.*, 2004). 그리고 이들은 입자의 크기에 따라서 그 배출원이 서로 다르다고 알려져 있다. 즉, PM_{2.5-10}은 지하철의 운행 및 승객의 활동에 의해서 주로 발생되고 PM_{2.5}는 외기로부터 유입되는 것으로 알려져 있다(Son *et al.*, 2014).

따라서 대상역사의 PM₁₀ 안에 포함되어 있는 PM_{2.5}의 기여율을 평가하기 위하여 2015년부터 2019년도까지 5년간 측정된 농도의 연평균 값을 가지고 PM_{2.5}/PM₁₀비를 산정하였고, 이는 보편적으로 지하철 시스템 등에서 미세먼지의 내외부 발생원 등을 평가할 때 사용하는 방법이다(Son *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2008; Park and Ha, 2008; Sohn *et al.*, 2008; Chan *et al.*, 2002a). 그 결과, 연구 대상의 지하역사에서는 PM_{2.5}/PM₁₀비는 0.54~0.64로 지역 간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. Jeon (2019b)은 동일한 분석을 수행했을 때, 서면 1호선 대합실이 가장 큰 PM_{2.5}/PM₁₀비를 갖고, 서면 1호선 대합실은 매년 농도비가 증가하는 추세를 보인다고 했는데, 본 연구에서처럼 연구 기간을 넓혀 분석을 수행하면 그 결과가 달라질 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PM_{2.5}/PM₁₀비는 동일한 역사라고 해도 연도에 따라서 매우 상이한 결과 값을 나타낼 수 있음을 의미한다.

Chan *et al.* (2002a)은 홍콩 지하철 내의 PM_{2.5}/PM₁₀비가 0.72~0.78이라고 보고하였고, 그들은 지하철 시스템 내에 존재하는 PM_{2.5}의 주요 배출원은 외부 유입으로서 이들 중 무거운 물질은 지하철 시스템으로 유입되는 도중에 통로 등에 침전 또는 제거되고 상대적으로 입자의 크기가 작은 PM들이 보다 많이 승강장이나 대합실에 도달한다고 발표했다. Cheng *et*

al. (2008)의 연구 결과에 따르면 타이완의 지상 및 지하 승강장의 PM_{2.5}/PM₁₀비는 0.75와 0.67~0.78이었다. 이와 유사한 연구의 결과들은 서울에서 수행된 연구들에서 찾아볼 수 있었다. Park and Ha (2008)가 서울의 지상과 지하 승강장에서 측정한 결과에서 PM_{2.5}/PM₁₀비가 0.94와 0.81로 나타났으며, Kim *et al.* (2008)에서는 지상과 지하 승강장에서의 PM_{2.5}/PM₁₀비가 0.39와 0.36으로 매우 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 PM_{2.5}/PM₁₀비가 매우 다르게 나오는 원인은 다양한 지하철 시스템의 내·외부 환경 조건에 의한 것으로 판단된다(Yu *et al.*, 2015).

3.2 역사 내 위치에 따른 분포

역사 내 위치에 따른 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도를 비교 분석하기 위하여 서면역 1과 2호선의 승강장 및 대합실에서 측정된 자료들을 비교 분석해 보았다. 그 결과 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 대합실의 농도가 승강장의 농도보다 평균 각각 1.9 µg/m³와 1.4 µg/m³ 높은 것으로 나타났다. Jeon (2019b)에 의해서 수행된 결과(2015~2017년: 3년간의 자료를 사용함)를 보면 서면 1호선 승강장에서 측정된 PM₁₀의 농도가 대합실에서 측정된 PM₁₀보다 높다고 보고했다. 이는 본 연구의 결과와 약간의 차이가 있다. 이와 같은 차이는 두 연구 간의 측정 기간의 차이에 기인한 것으로, 동일한 연구 기간으로 설정한다면 두 연구 간에는 동일한 결과가 도출되는 것을 확인했다.

서면역은 2019년 기준 하루 평균 14만 6천명이 이용하는 부산은 물론 비수도권에서 하루 평균 이용객이 가장 많은 역사이다. 서면역의 특징을 보면 1, 2호선의 대합실은 모두 지하 1층에 위치하고 있고 서면 지하상가 및 백화점과 연결되어 있어 유동인구가 매우 많은 특징을 가지고 있다. 그리고 1호선과 2호선 승강장은 각각 지하 2층과 3층에 위치하고 있고, 표 1에서 이미 제시한 것처럼 두 승강장 모두 열차풍에 의한 PM의 확산을 최소화하기 위하여 스크린 도어가 설치되어 있다. Table 2에서 보면 서면 1호선 승강장

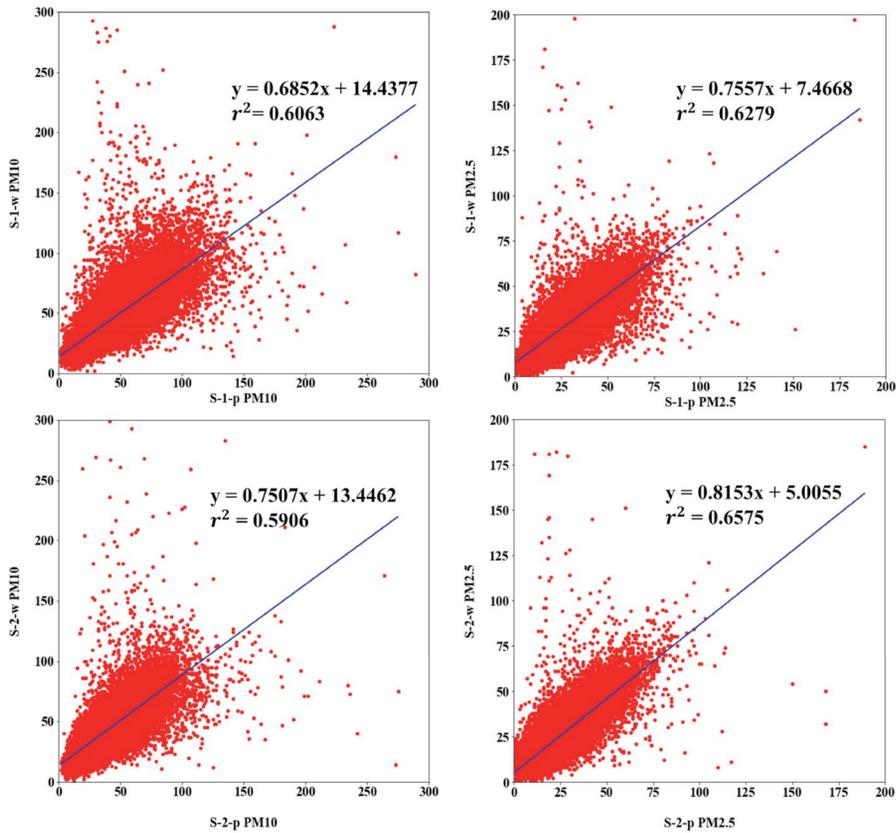


Fig. 4. Scatter plots of PM₁₀ and PM_{2.5} between platforms and waiting rooms in Semyeon subway station during five years (2015~2019).

의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도는 24.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 45.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 서면 2호선 승강장의 농도(24.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 38.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높은 것을 확인할 수 있었다. 스크린 도어로 인한 터널 내 PM 발생을 무시할 때, 이와 같이 1호선의 PM 농도가 2호선보다 높게 나온 이유는 크게 이용객 수와 승강장의 위치를 들 수 있다. Table 1의 이용객 수를 분석한 결과, 서면 1호선의 이용객 수가 2호선보다 약 1.5배 정도 많다고 보고되어 유동인구에 따른 PM의 발생 및 재비산에 영향을 미쳤을 것으로 평가된다. 이와 더불어, 서면 2호선 승강장이 1호선 승강장보다 약 7 m 정도 깊은 곳에 위치하고 있어 지상에서 배출된 외부 오염물질의 전달이 그만큼 덜 이루어져 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도가 상대적으로 더 낮은 것으로

판단된다(Jeon *et al.*, 2019b; Yu *et al.*, 2015).

서면역을 대상으로 승강장과 대합실 사이의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 상관관계를 알아보았다(그림 4). 그 결과, 1호선 승강장 및 대합실 사이의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 상관계수는 0.61과 0.63으로 나타났고, 2호선 승강장 및 대합실 사이의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 상관계수는 0.59와 0.66으로 나타나 동일한 역사 안에서 승강장 및 대합실 사이의 상관계수는 PM_{2.5}가 PM₁₀보다 조금 높다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과를 Jeon (2019b)에 의해서 수행된 연구의 결과와 비교했을 때 일치하지 않았는데, 이는 상관계수를 구하기 위하여 사용된 자료의 범위와 관계가 있다. Jeon (2019b)의 연구에서는 승강장 및 대합실에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관관

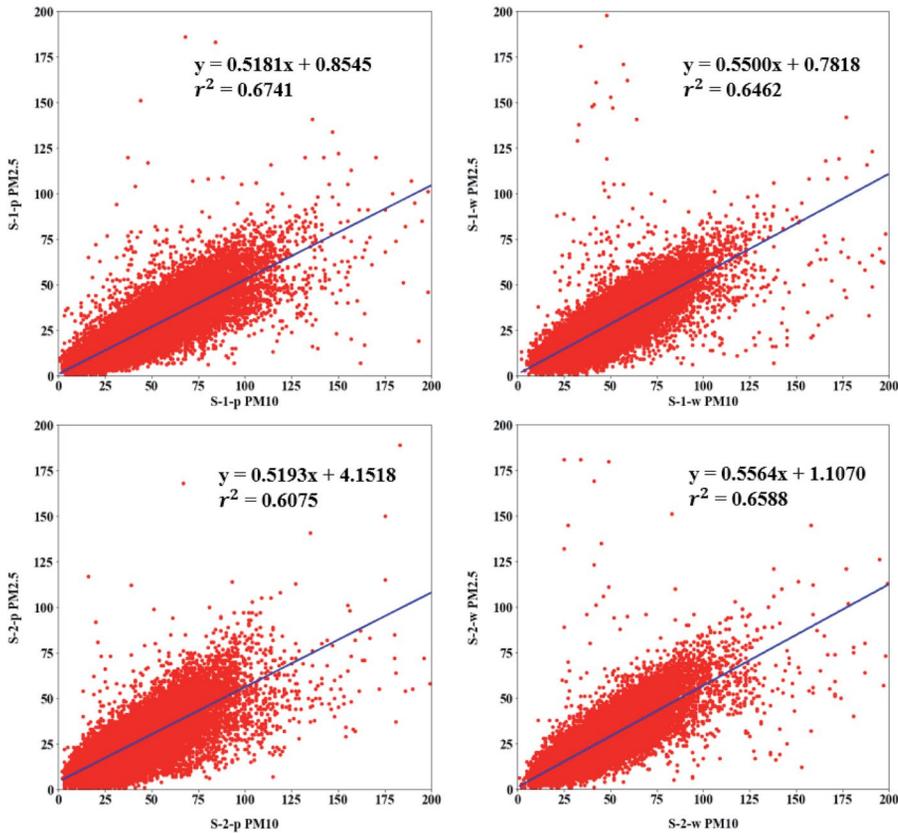


Fig. 5. Scatter plots between PM₁₀ and PM_{2.5} in platforms and waiting rooms of Semyeon subway station during five years (2015~2019).

계를 구하기 위하여 지하철이 운영되는 시간 내에서 측정된 자료만을 사용한 반면에 본 연구에서는 지하철이 운영되지 않는 시간대의 자료까지 포함함으로써 전체적으로 상관계수가 낮아진 것으로 보인다. 특히, 이러한 현상은 지하철 운영에 직접적으로 더 큰 영향을 받는 PM₁₀의 상관관계에서 뚜렷하게 보인다. 그리고 이에 대한 추가적으로 분석을 수행하기 위하여 서면역 안의 4개 지점에 대한 각각의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관성 분석을 수행하였다(그림 5). 그 결과 4개 지점에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 상관계수는 0.61~0.67 범위로 나오는 것을 확인할 수 있었고, PM_{2.5}와 PM₁₀의 추세선의 기울기 값은 1, 2호선 모두 승강장보다 대합실이 약간 큰 것으로 나타났고, 이는 승강장보다 대합실

에서의 PM₁₀ 내 PM_{2.5}의 비율이 높다는 것으로 대합실이 승강장보다 외기의 영향을 더 많이 받는다는 것을 의미한다.

3.3 지하철 운행 및 외기의 영향

지하철 운행에 따른 PM 농도의 변화를 확인하기 위하여 측정된 PM 자료를 지하철 운행시간과 비운행 시간으로 나누어 분석을 수행했다(그림 6). 그 결과 대상 역사에서 지난 5년간 지하철 비운행시간과 운행시간의 평균 PM₁₀ 농도는 각각 33.0 µg/m³과 43.0 µg/m³로 운행시간의 PM₁₀ 농도가 비운행시간의 농도보다 높게 나타났다. 이는 실질적으로 PM₁₀이 지하철의 운행 및 이용객들에 의해서 발생되고 내부에 축적

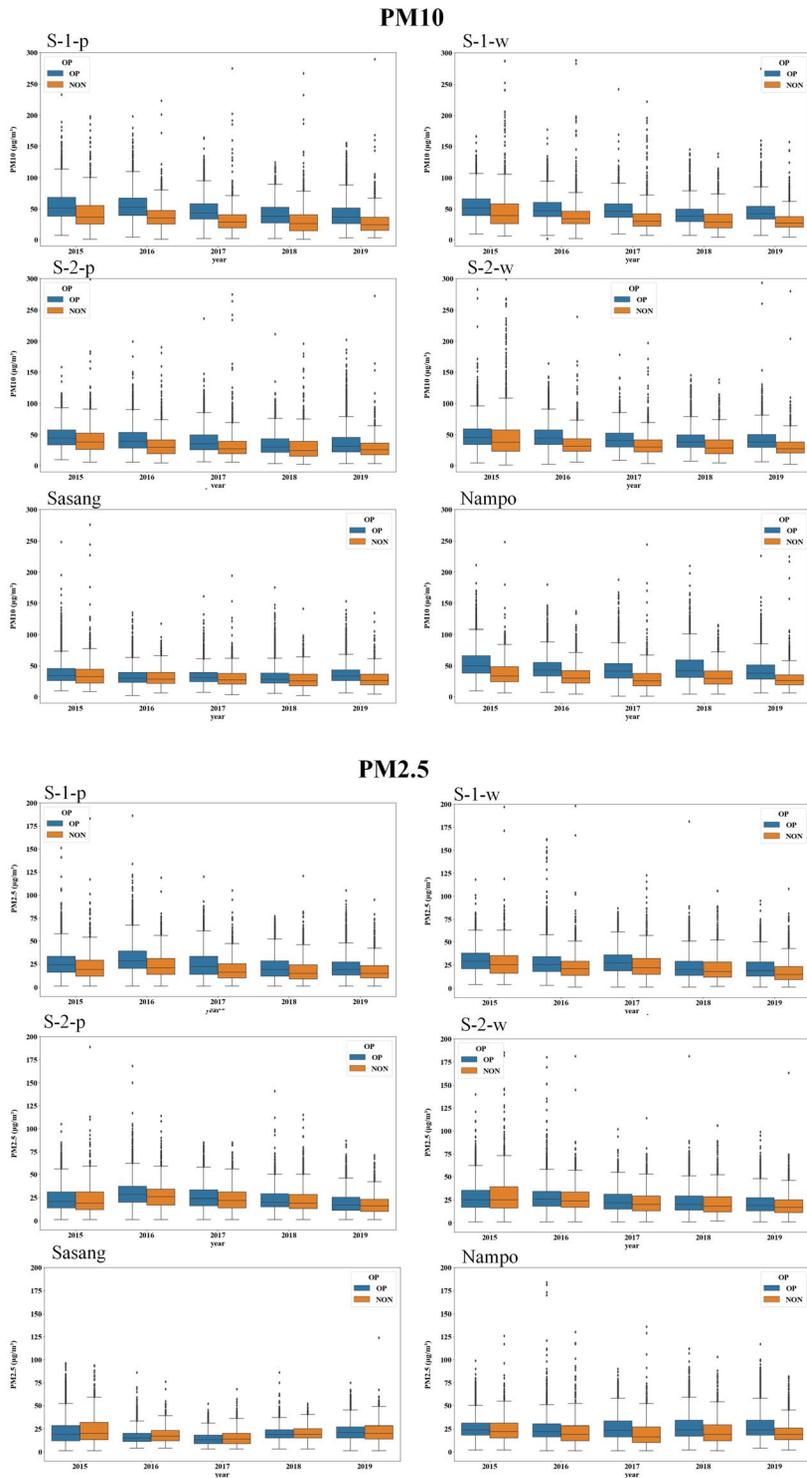


Fig. 6. Comparison of distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} levels on operation and non-operation time of subway system by year.

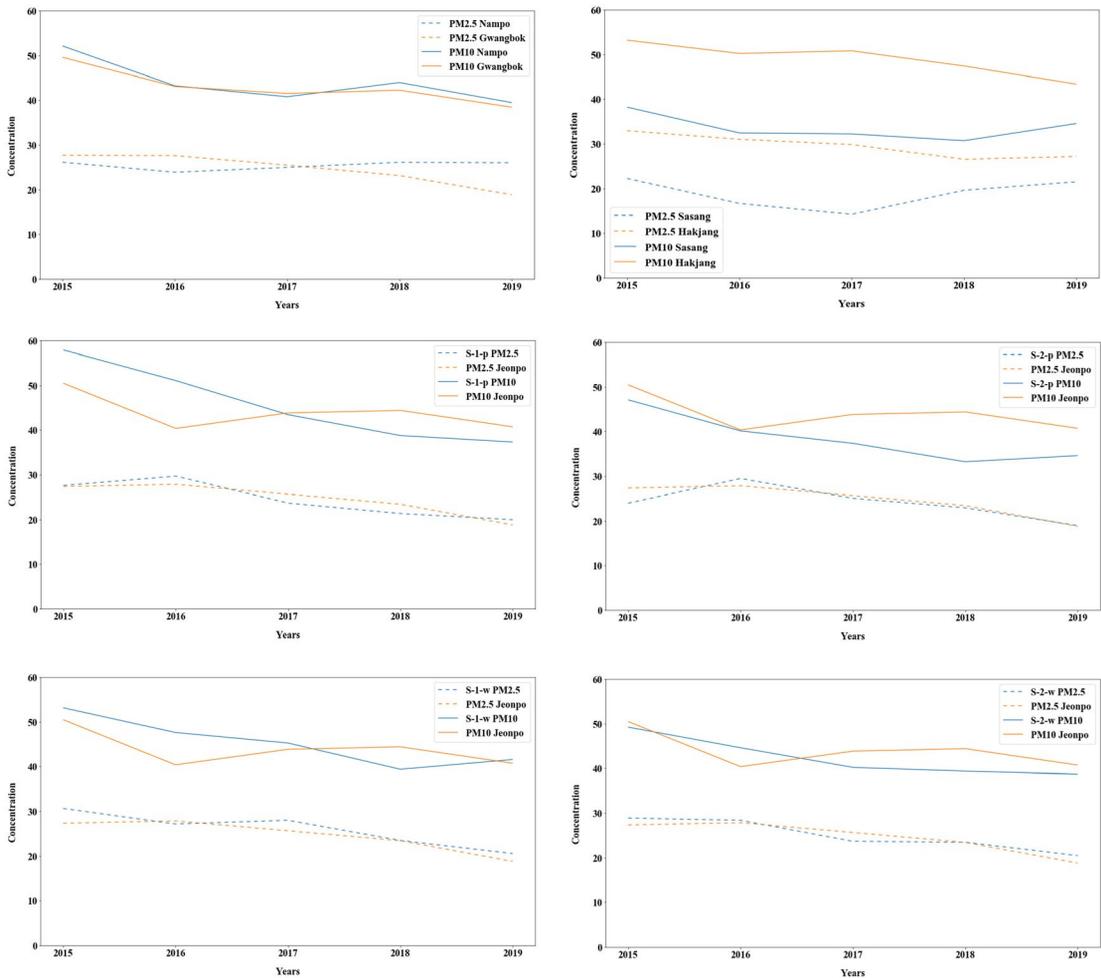


Fig. 7. Comparison of distribution of PM_{10} and $PM_{2.5}$ levels on indoor and outdoor of subway systems by year (2015~2019).

된다는 것을 의미한다. 그러나 $PM_{2.5}$ 의 경우에는 동일한 분석을 수행한 결과, 비운행시간대와 운행시간대의 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 각각 $22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $25.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지하철의 운행에 따른 변화는 미비한 것으로 나타났다. 특히, 사상역 대합실의 경우에는 비운행 시간대의 $PM_{2.5}$ 농도가 운행시간보다 높게 나타나는 것으로 평가되었는데, 이는 $PM_{2.5}$ 가 지하철 내부의 발생원보다는 외부의 발생원에 더 큰 영향을 받았다는 것을 의미한다. 지난 5년 동안의 지하철 운행시간대의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 평균 감소율은 각각 19.0%와 16.0%로 나타났다.

이에 반하여 비운행시간대의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 평균 감소율은 38.2%와 28.4%로 나타나 운행시간대와 비교했을 때 비운행시간대의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 가 지난 5년간 많이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 역사 내 농도의 감소는 지하철 운행 및 역사 내 실내공기질 관리와 같은 내부적인 영향보다는 외기와 같은 외부적인 요소의 변화에 기인된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 추가적으로 지하역사에서 측정된 농도와 주변 대기오염자동측정망에서 측정된 자료를 비교 분석하였다(그림 7). 그 결과 남포역과 서면

역의 연구 기간 동안 PM 농도 변화 추이 및 농도는 그 주변인 광복동 (PM_{10} : 42.9 ± 25.4 , $PM_{2.5}$: 26.2 ± 15.9) 및 전포동 (PM_{10} : 43.3 ± 25.9 , $PM_{2.5}$: 24.3 ± 15.9)에 위치한 대기오염자동측정망에서 얻은 PM 농도 변화 추이 및 농도와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 사상역의 경우에는 학장동 (PM_{10} : 49.0 ± 27.9 , $PM_{2.5}$: 29.4 ± 17.0)과 PM 농도 변화 추이는 유사하지만 절대적인 PM 농도 값에 있어서 외기인 학장동의 농도 값이 더 높았다. 이는 사상역과 학장동 대기오염자동측정망 사이의 거리가 다른 두 개 역과 그 주변 대기오염자동측정망(광복동, 전포동)들 사이의 거리보다 4.0~4.6배 정도 멀리 떨어져 있고, 학장동의 대기오염자동측정망의 위치가 사상공업지역 일반산업 단지에 둘러싸여 있는 환경이기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 외기가 지하역사의 PM 농도에 미치는 영향을 보다 명확하게 분석하기 위하여 추가적으로 지하역사들 내부 및 주변 대기오염자동측정망들 사이의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 상관관계를 그림 8과 같이 분석하였다. 그 결과 사상역과 학장동 사이의 관계를 제외한 다른 지역에서의 지하역사와 외기 간의 PM_{10} 의 상관계수 범위는 0.39부터 0.50 사이로 $PM_{2.5}$ 의 상관계수인 0.44부터 0.65보다 모두 작은 값을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 이는 $PM_{2.5}$ 의 농도가 PM_{10} 보다 외기의 영향을 더 많이 받는다는 것을 보여준다. 그리고 동일한 서면역에서 측정된 자료를 비교해 보면 2호선 승강장 $PM_{2.5}$ 를 제외한 모든 1호선과 2호선 대합실이 승강장보다 외기와와의 상관계수가 높은 것을 확인할 수 있었고, 이는 지상에서 가까이 위치할수록 출입문 등의 통로를 통해서 외기가 자유롭게 유입되기 때문이다. 그러나 사상역과 학장동의 관계에서 알 수 있듯이 주변의 외기 내 PM 농도가 높으면 배출원이라는 변수로 인하여 이러한 상관관계는 유의하지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

실내 공간 안의 PM 농도는 주변 외기의 PM 농도에 상당한 영향을 받는 것으로 보고되고 있다 (Jeon, 2019b; Cheng *et al.*, 2008; Braniš, 2006). Cheng *et al.* (2008)은 실내외의 PM_{10} 농도가 양의 상관관계를 가

지고 있다고 보고했고, Jung *et al.* (2010)은 지하철 승강장의 PM_{10} 농도는 일반적으로 외기의 PM_{10} 농도가 증가할 때 함께 증가한다고 발표했다. 또한, Aarnio *et al.* (2005)은 지하철 시스템 내에서 측정된 PM의 입자 수농도와 크기 분포가 그 주변의 외기에서 측정된 결과와 매우 유사하다는 것을 밝혀냈으며, Braniš (2006)은 환기 및 출입 시설 등을 통하여 유입된 외부 공기가 지하시설의 공기질에 큰 영향을 미친다고 하였다.

이상의 내용들을 토대로 할 때, 지하철 시스템 내의 PM 농도는 주변 외기에 상당한 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구의 결과로 미루어 볼 때 지난 몇 년간 부산시 지하철 시스템 내의 PM 농도의 감소는 상당 부분 지하철 주변의 외기 PM 농도의 감소에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 그러나 이를 역설적으로 말하면 외기 PM 농도가 감소되지 않았다면 지하철 시스템 내의 PM 농도는 크게 개선되지 않았을 수 있음을 의미하고, 이는 언제든지 외기의 PM 농도가 상승하면 지하철 시스템 내의 PM 농도도 증가할 수 있음을 의미한다. 따라서 지속적인 지하철 시스템 내의 PM 농도 유지 및 개선을 위해서는 보다 적극적이고 체계적인 관리 방안이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 외기가 지하역사의 PM 농도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 대상 지하역사에서 가장 가까운 위치에 있는 대기오염자동측정망들의 자료를 사용하여 연구를 수행하였다. 그러나 이들 대기오염자동측정망의 위치가 그림 1에서 제공한 것처럼 가깝게는 약 0.4 km, 멀게는 1.8 km까지 대상 지하역사에서 떨어져 있어서 이들을 서로 직접적으로 비교 분석하기에는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 지하역사의 교통 상황 등의 주변 환경 변수도 포함할 수 있게 직접적으로 지하역사 주변의 외기 농도를 측정하는 것이 분석 자료의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 이와 더불어, 본 연구에서는 PM 측정 자료만을 사용하여 연구를 수행하였는데, 현재 부산시 안에서 운영되는 일부 지하역사에서는 NO_2 , CO, CO_2 , NO, HCHO와 같은 다양한 오염물질들이 연속측정시스템을 활용하여 측정되고 있다. 따라서 지하역사 공간에

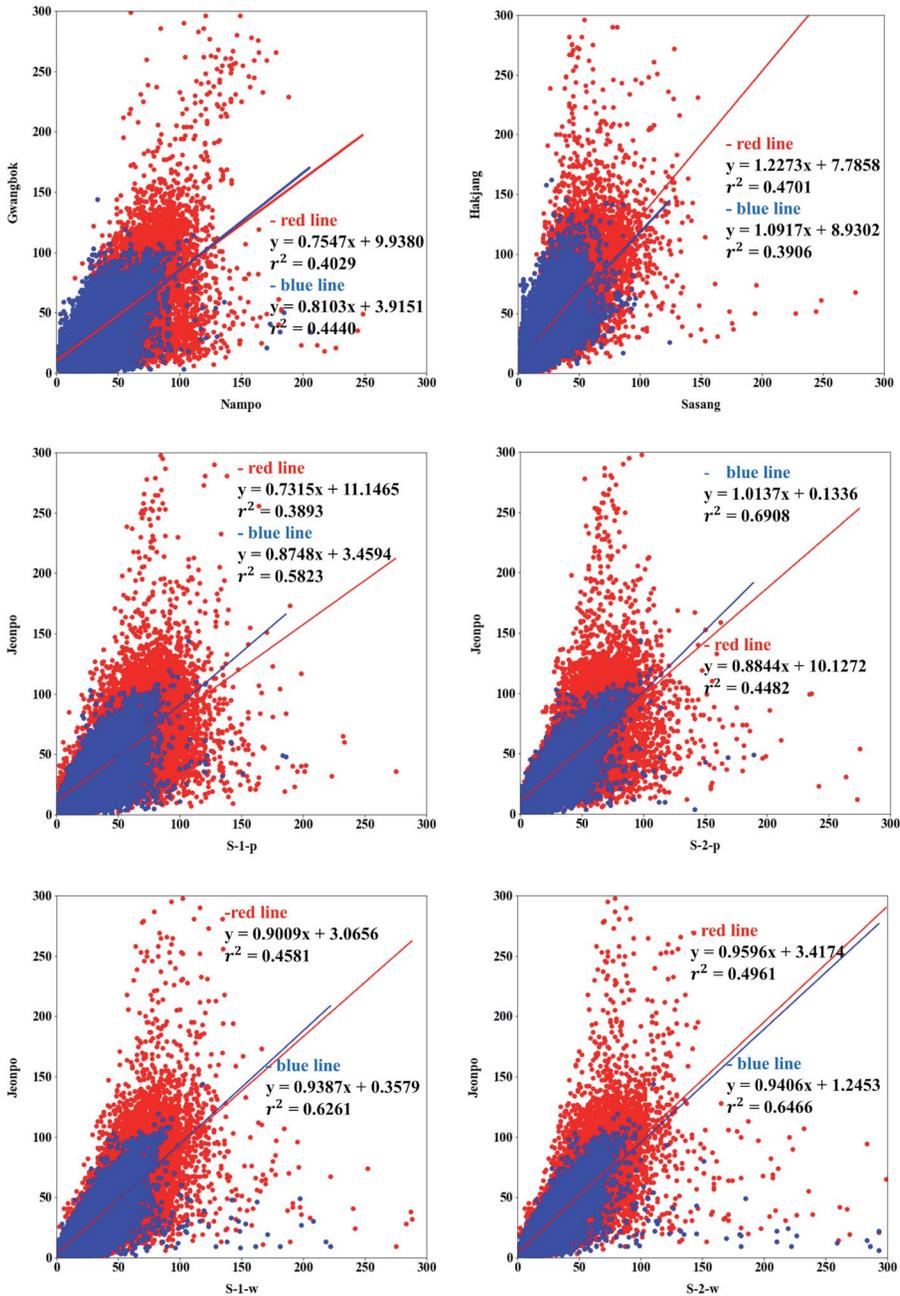


Fig. 8. Scatter plots of PM₁₀ (red line) and PM_{2.5} (blue line) between subway systems and air quality monitoring stations during five years (2015~2019).

대한 실내공기질의 효율적인 관리 및 대책을 강구하기 위하여 PM뿐만 아니라 이들 오염물질에 대한 중

합적인 비교 분석 연구도 추가적으로 수행되어야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 부산시 지하철 시스템 내의 미세먼지 농도의 변화를 시공간적으로 평가하기 위하여 2015년부터 2019년까지 5년간 지하역사 안에서 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도 자료를 비교 분석하였다. 그리고 지하역사 내의 PM 농도와 외부 공기질 간의 관계를 파악하기 위하여 지하역사 주변의 도시대기자동차측정망 자료를 이용하여 추가적으로 평가를 수행하였다. 본 연구의 결과들을 종합해서 볼 때, 지하철의 운행으로 인하여 발생하는 PM을 승강장이나 대합실로 유입되는 것을 막았다는 것에 대해서는 지하철의 운영적 측면에서 고무적인 일이다. 그러나 자료 분석의 결과에서 알 수 있듯이 아직도 대부분의 역사 내의 PM 농도는 대기 수준보다는 좋지 않았고, 만약에 지하역사의 주변 외기의 공기질이 나빠진다면 승강장과 대합실의 PM 농도를 지금과 같은 수준으로 유지하기에는 한계가 있다. 따라서 환기에 의존하는 현재의 방식보다는 시스템 및 운전의 실질적인 개선을 통하여 발생된 미세먼지를 능동적이고 직접적으로 제어하는 방안에 대하여 깊은 고민이 필요한 시점이다.

감사의 글

This research was supported by Pukyong National University Development Project Research Fund, 2020. This work was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT, MOE) and (No. 2019M3E7A1113 103).

References

- Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Räisänen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T., Jantunen, M. (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particles ($PM_{2.5}$) in the Helsinki subway system, *Atmospheric Environment*, 9(28), 5059-5066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.012>
- Adams, H., Nieuwenhuijsen, M., Colville, R., McMullen, M.A.S., Khandelwal, P. (2001) Fine particle ($PM_{2.5}$) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK, *Science of the Total Environment*, 279(1-3), 29-44. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00723-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00723-9)
- Awad, A.H.A. (2002) Environmental study in subway metro stations in Cairo, Egypt, *Journal of Occupational Health*, 44(2), 112-118. <https://doi.org/10.1539/joh.44.112>
- Bao, L.M., Lei, Q.T., Tan, M.G., Li, X.L., Zhang, G.L., Liu, W., Li, Y. (2014) Study on transition metals in airborne particulate matter in Shanghai city's subway, *Huan jing ke xue*, 35(6), 2052-2059. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.2014.06.003>
- Braniš, M. (2006) The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmospheric Environment*, 40(2), 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.060>
- Busan transportation Corporation (2020) https://www.humetro.busan.kr/homepage/history/page/subLocation.do?menu_no=10020105
- Byeon, S.H., Willis, R., Peters, T.M. (2015) Chemical characterization of outdoor and subway fine ($PM_{2.5-10}$) and coarse ($PM_{2.5}$) 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>
- Carteni, A., Cascetta, F., Campana, S. (2015) Underground and ground-level particulate matter concentrations in an Italian metro system, *Atmospheric Environment*, 101, 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.030>
- Chan, L.Y., Lau, W.L., Lee, S.C., Chan, C.Y. (2002a) Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 36(21), 3363-3373. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00318-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00318-7)
- Chan, L.Y., Lau, W.L., Zou, S.C., Cao, Z.X., Lai, S.C. (2002b) Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China, *Atmospheric Environment*, 36(38), 5831-5840. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00687-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00687-8)

- Cheng, Y.H., Lin, Y.L., Liu, C.C. (2008) Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei rapid transit system, *Atmospheric Environment*, 42(31), 7242-7249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.011>
- Chillrud, S.N., Epstein, D., Ross, J.M., Sax, S.N., Pederson, D., Spengler, J.D., Kinney, P.L. (2004) Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York city's subway system, *Environmental Science & Technology*, 38(3), 732-737. <https://doi.org/10.1021/es034734y>
- Choi, H.W., Hwang, I.J., Kim, S.D., Kim, D.S. (2004) Determination of source contribution based on aerosol number and mass concentration in the Seoul subway stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(1), 17-31.
- 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>
- 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 PM₁₀ levels monitored for more than decade in subway stations in South Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(12), 2746-2756. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.05.0263>
- Colombi, C., Angius, S., Gianelle, V., Lazzarini, M. (2013) Particulate matter concentrations, physical characteristics and elemental composition in the Milan underground transport system. *Atmospheric Environment*, 70, 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.035>
- Eom, H.J., Jung, H.J., Sobanska, S., Chung, S.G., Son, Y.S., Kim, J.C., Sunwoo, Y., Ro, C.U. (2013) Iron speciation of airborne subway particles by the combined use of energy dispersive electron probe Xray microanalysis and raman microspectrometry, *Analytical Chemistry*, 85(21), 10424-10431. <https://doi.org/10.1021/ac402406n>
- Furuya, K., Kudo, Y., Okinaga, K., Yamuki, M., Takahashi, S., Araki, Y., Hisamatsu, Y. (2001) Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 19(4), 469-485. <https://doi.org/10.1081/TMA-100107583>
- Gerber, A., Bohn, J., Groneberg, D.A., Schulze, J., Bundschuh, M. (2014) Airborne particulate matter in public transport: A field study at major intersection points in Frankfurt am main (Germany), *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-9-13>
- Gomez-Perales, J.E., Colvile, R.N., Nieuwenhuijsen, M.J., Fernández-Bremauntz, A., Gutierrez-Avedoy, V.J., Paramo-Figueroa, V.H., Blanco-Jiménez, S., Bueno-López, E., Mandujano, F., Bernabé-Cabanillas, R., Ortiz-Segovia, E. (2004) Commuters' exposure to PM_{2.5}, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City, *Atmospheric Environment*, 38(8), 1219-1229. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.11.008>
- Grass, D.S., Ross, J.M., Family, F., Barbour, J., Simpson, H.J., Coulbaly, D., Hernandez, J., Chen, Y., Slavkovich, V., Li, Y., Graziano, J., Santella, R.M., Brandt-Rauf, P., Chilrud, S.N. (2010) Airborne particulate metals in the New York city subway: A pilot study to assess the potential for health impacts, *Environmental Research*, 110(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.10.006>
- Gustavsson, P., Bigert, C., Pollán, M. (2008) Incidence of Lung Cancer Among Subway Drivers in Stockholm, *American Journal of Industrial Medicine*, 51(7), 545-547. <https://doi.org/10.1002/ajim.20584>
- 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>
- Jeon, B.I. (2019a) Characteristics of CO, CO₂, and NO₂ 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>
- Jeon, B.I. (2019b) Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} 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>
- Johansson, C., Johansson, P.Å. (2003) Particulate matter in the underground of Stockholm, *Atmospheric Environment*, 37(1), 3-9. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00833-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00833-6)
- Jung, H.J., Kim, B., Ryu, J., Maskey, S., Kim, J.C., Sohn, J., Ro, C.U. (2010) Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particulate analysis, *Atmospheric Environment*, 44(19), 2287-2293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.003>
- 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>
- Kam, W., Cheung, K., Daher, N., Sioutas, C. (2011) Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles metro, *Atmospheric Environment*, 45(8), 1506-1516. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.049>
- Kamani, H., Hoseini, M., Seyedsalehi, M., Mahdavi, Y., Jaafari, J. (2014) Concentration and characterization of airborne particles in Tehran's subway system, *Environmental Science and Pollution Research*, 21(12), 7319-7328. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2659-4>
- Karlsson, H.L., Nilsson, L., Möller, L. (2005) Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells, *Chemical Research in Toxicology*, 18(1), 19-23. <https://doi.org/10.1021/bx049723c>
- 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.2011.11.058>
- Kim, K.Y., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Kim, C.N. (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ 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, 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.
- Knibbs, L.D., de Dear, R.J. (2010) Exposure to ultrafine particles and PM_{2.5} in four Sydney transport modes, *Atmospheric Environment*, 44(26), 3224-3227. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.026>
- Kwon, S.B., Jeong, W., Park, D., Kim, K.T., Cho, K.H. (2015) A multivariate study for characterizing particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) 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.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, T.J., Jeon, J.S., Kim, S.D., Kim, D.S. (2010) A comparative study on PM₁₀ 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 (PM₁₀ and PM_{2.5}) 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>
- Lee, Y., Lee, Y.C., Kim, T., Choi, J.S., Park, D. (2018) Sources and characteristics of particulate matter in subway tunnels in Seoul, Korea, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2534. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112534>
- Levy, J.I., Dumyahn, T., Spengler, J.D. (2002) Particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in indoor and outdoor microenvironments in Boston, Massachusetts, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 12(2), 104-114. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500203>
- Li, T.T., Bai, Y.H., Liu, Z.R., Li, J.L. (2007) In-train air quality assessment of the railway transit system in Beijing: A note, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(1), 64-67. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.11.001>
- Loxham, M., Cooper, M.J., Gerlofs-Nijland, M.E., Cassee, F.R., Davies, D.E., Palmer, M.R., Teagle, D.A. (2013) Physico-chemical characterization of airborne particulate matter at a mainline underground railway station, *Environmental Science & Technology*, 47(8), 3614-3622. <https://doi.org/10.1021/es304481m>
- Lu, S., Liu, D., Zhang, W., Liu, P., Fei, Y., Gu, Y., Wu, M., Yu, S., Yonemuchi, S., Wang, X., Wang, Q. (2015) Physico-chemical characterization of PM_{2.5} in the microenvironment of

- Shanghai subway, *Atmospheric Research*, 153, 543-552. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.006>
- Martins, V., Moreno, T., Mendes, L., Eleftheriadis, K., Diapouli, E., Alves, C.A., Duarte, M., Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X., Minguillon, M.C. (2016) Factors controlling air quality in different European subway systems, *Environmental Research*, 146, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.007>
- Martins, V., Moreno, T., Minguillón, M.C., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X. (2015) Exposure to airborne particulate matter in the subway system, *Science of the Total Environment*, 511, 711-722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.013>
- Martins, V., Moreno, T., Minguillón, M.C., Van Drooge, B.L., Reche, C., Amato, F., Miguel, E., Capdevila, M., Centellers, S., Querol, X. (2016) Origin of inorganic and organic components of PM_{2.5} in subway stations of Barcelona, Spain, *Environmental Pollution*, 208, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.004>
- 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>
- Murrini, L.G., Solanes, V., Debray, M., Kreiner, A.J., Davidson, J., Davidson, M., Vázquez, M., Ozafrán, M. (2009) Concentrations and elemental composition of particulate matter in the Buenos Aires underground system, *Atmospheric Environment*, 43(30), 4577-4583. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.025>
- 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 (PM₁₀, PM_{2.5}) 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>
- Onat, B., Stakeeva, B. (2014) Assessment of fine particulate matters in the subway system of Istanbul, *Indoor and Built Environment*, 23(4), 574-583. <https://doi.org/10.1177/1420326X12464507>
- Park, D.U., Ha, K.C. (2008) Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ 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>
- Qiao, T., Xiu, G., Zheng, Y., Yang, J., Wang, L. (2015a) Characterization of PM and microclimate in a Shanghai subway tunnel, China, *Procedia Engineering*, 102, 1226-1232. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.250>
- Qiao, T., Xiu, G., Zheng, Y., Yang, J., Wang, L., Yang, J., Huang, Z. (2015b) Preliminary investigation of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and its metal elemental composition in tunnels at a subway station in Shanghai, China, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.013>
- Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., Gil, J., Miguel, E.D., Capdevila, M. (2012) Variability of levels and composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in the Barcelona metro system, *Atmospheric Chemistry & Physics*, 12(11), 5055-5076. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5055-2012>
- Raut, J.C., Chazette, P., Fortain, A. (2009) Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris, *Atmospheric Environment*, 43(4), 860-868. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.038>
- Ripanucci, G., Grana, M., Vicentini, L., Magrini, A., Bergamaschi, A. (2006) Dust in the underground railway tunnels of an Italian town, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(1), 16-25. <https://doi.org/10.1080/15459620500444004>
- Salma, I., Weidinger, T., Maenhaut, W. (2007) Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station, *Atmospheric Environment*, 41(37), 8391-8405. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.017>
- Şahin, Ü.A., Onat, B., Stakeeva, B., Ceran, T., Karim, P. (2012) PM₁₀ concentrations and the size distribution of Cu and Fe-containing particles in Istanbul's subway system, *Transport and Environment*, 17(1), 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.003>
- Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J.F., Tran, C.L. (2005) The London underground: Dust and hazards to health, *Occupational and Environmental Medicine*, 62(6), 355-362. <https://doi.org/10.1136/oem.2004.014332>
- Sohn, J.R., Kim, J.C., Kim, M.Y., Son, Y.S., Sunwoo, Y. (2008) Particulate behavior in subway airspace, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2-1, 54-59. <https://doi.org/10.5572/ajae.2008.2.1.054>
- 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., Rue, J.Y. (2018) Technological Advances for Particulate Matter Collection in Subway System, *Prospectives of Industrial Chemistry*, 21(2), 24-34. <https://doi.org/10.7464/ksct.2020.26.1.13>
- 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 PM₁₀ levels in a subway station and a trial to reduce PM₁₀ in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), 38-47. <https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.1.038>
- Wang, X.R., Gao, H.O. (2011) Exposure to fine particle mass and number concentrations in urban transportation environments of New York city, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(5), 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.03.001>
- Xu, B., Hao, J. (2017) Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review, *Environment International*, 107, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.016>
- Ye, X., Lian, Z., Jiang, C., Zhou, Z., Chen, H. (2010) Investigation of indoor environmental quality in Shanghai metro stations, China, *Environmental Monitoring and Assessment*, 167(1-4), 643-651. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1080-9>
- Yu, J.G., Kim, J.H., Kim, K.P., Jung, S.Y., Na, K.I., Jo, H.J., Sul, K.H., Kim, K.H. (2015) Comparison of PM_{2.5} pollution status at major transit subway station in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 201-208. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.201>

Authors Information

- 손윤석 (부경대학교 환경공학과 조교수)
 임성후 (부경대학교 학부과정)
 조은정 (부산광역시 보건환경연구원 팀장)
 노영민 (부경대학교 환경공학과 조교수)
 이준엽 (부경대학교 환경공학과 조교수)
 한희진 (부경대학교 글로벌자율전공학부 부교수)