

## 서울시 지하철 시스템 내의 입자상물질( $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ ) 농도 특성

### Concentration and Properties of Particulate Matters ( $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ ) in the Seoul Metropolitan

이태정 · 임효지 · 김신도<sup>1)</sup> · 박덕신<sup>2)</sup> · 김동술\*

경희대학교 환경공학과 및 환경연구소, <sup>1)</sup>서울시립대학교 환경공학과

<sup>2)</sup>한국철도기술연구원 에코시스템연구실

(2015년 4월 1일 접수, 2015년 4월 10일 수정, 2015년 4월 14일 채택)

Tae-Jung Lee, Hyoji Lim, Shin-Do Kim<sup>1)</sup>, Duck-Shin Park<sup>2)</sup> and Dong-Sool Kim\*

*Department of Environmental Science and Engineering*

*and Center for Environmental Studies, Kyung Hee University, Global Campus*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

<sup>2)</sup>*Eco-transport Research Division, Korea Railroad Research Institute*

(Received 1 April 2015, revised 10 April 2015, accepted 14 April 2015)

#### Abstract

Seoul subway plays an important part for the public transportation service in Seoul metropolitan area. As the subway system is typically a closed environment, frequent air pollution problems occurred and passengers get mal-health impact. Especially particulate matters (PM) is well known as one of the major pollutants in subway environments. The purpose of this study was to compare the concentrations of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in the Seoul subway system and to provide fundamental data in order to management of subway system.  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  samples were collected in the M station platform and tunnel of Subway Line 4 in Seoul metropolitan and in an outdoor location close to it from Apr. 21, 2010~Oct. 27, 2013. The samples collected on teflon filters using  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mini-volume portable samplers and PM sequential sampler. The PM contributions were  $48.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (outdoor),  $84.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (platform) and  $204.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tunnel) for  $PM_{10}$ , and  $34.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (outdoor),  $49.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (platform) and  $83.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (tunnel) for  $PM_{2.5}$ . The  $PM_{10}$  levels inside stations and outdoors are poorly correlated, indicating that  $PM_{10}$  levels in the metro system are mainly influenced by internal sources. In this study, we compared PM concentrations before and after operation of ventilation and Electrostatic Precipitator (EP). Despite the increased PM concentration at outdoor,  $PM_{10}$  concentration at platform and tunnel showed the 31.2% and 32.3% reduction efficiency after operation the reduction system. The overall results of this study suggest that the installation and operation of the ventilating system and EP should have served as one of the important components for maintaining the air quality in the subway system.

**Key words :** PM, Subway system, Tunnel, Platform, EP, Indoor quality

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : [atmos@khu.ac.kr](mailto:atmos@khu.ac.kr)

## 1. 서 론

지하철은 급격한 도시화에 따른 인구 과밀, 차량 증가, 지가 상승 등의 원인에 의한 지상개발의 한계를 보완하기 위하여 개발된 대중교통 수단 중의 하나이다. 우리나라는 서울시에 1호선이 1974년 운행을 시작한 이래 정시성, 쾌속성, 안전성의 장점으로 수도권 을 비롯하여 부산, 대구, 대전, 광주 등 전국 주요 대도시에서 운행되고 있다. 현재에도 노선 확장이 지속적으로 진행되고 있으며, 많은 유동인구가 지하역사 및 지하철을 이용하고 있으나 지하역사의 폐쇄성, 내·외부 오염물질 발생 등의 요인으로 인한 실내공기 오염으로 시민건강이 위협받고 있다. 지하역사 및 지하철은 자연환기가 어렵고, 밀폐된 좁은 공간에 다수의 이용객이 밀집되어 있어 공기질이 악화되는 특성이 있다. 지하철 시스템에서 가장 문제가 되는 오염물질은 열차의 운행, 지하철 이용 승객들의 이동, 환기를 위해 도입되는 외부 공기 속에 포함된 입자상물질 (PM: particulate matters)이 대표적 오염물질이라 할 수 있다 (Choi *et al.*, 2004). 지하철역의 입자상물질은 입자형태, 크기분포, 농도, 화학성분 등이 외기의 입자상 물질과는 다르다. 지하철의 입자상 물질은 각진 모양, 큰 직경, 높은 질량을 보였으며, 철로부터 기원되는 고농도의 금속물질을 포함하고 있다 (Nieuwenhuijsen *et al.*, 2007; Seaton *et al.*, 2005; Sitzmann *et al.*, 1999). 따라서 지하철역 이용자의 건강 보호 및 깨끗한 공기질을 유지하기 위해서는 지하철역의 PM과 일반 대기농도와의 관계를 파악하고, 오염특성을 확인하는 것은 매우 중요하다 (Zhao and Hopke, 2004).

지하철의 입자상 물질에 대한 연구 결과에 의하면 지상에 비해 지하철의 오염도가 높다고 보고되고 있다. Trattner (1975)는 뉴욕 지하철 시스템의 지하역사의 오염도를 평가하였으며, 승강장 총 부유먼지 (TSP; Total Suspended Particle) 농도는 160~300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지상의 90~190  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 2배 정도 높다고 보고하였다. 최근 지하철 시스템의 PM 농도 및 특성에 관한 다수의 연구가 진행되었으며, 핀란드 헬싱키 (Aarnio *et al.*, 2005), 네덜란드 스톡홀름 (Johansson and Johansson, 2003), 미국 워싱턴 (Birenzvice *et al.*, 2003), 영국 런던 (Pfeifer *et al.*, 1999), 미국 뉴욕 (Chillrud *et al.*, 2005, 2004), 이집트 카이로 (Awad, 2002), 체코 프라하

(Branis, 2006), 이탈리아 로마 (Ripanucci *et al.*, 2006), 브라질 상파울로 (Fujii *et al.*, 2007), 대만 타이페이 (Cheng *et al.*, 2008), 한국 서울 (Kim *et al.*, 2008), 프랑스 파리 (Raut *et al.*, 2009), 멕시코 멕시코시티 (Mugica-Alvarez *et al.*, 2012), 미국 LA (Kam *et al.*, 2011) 등 여러 국가에서 수행된 바 있다.

본 연구의 목적은 지하철 시스템 내 PM의 오염도 및 거동 특성을 평가하기 위하여 서울시 지하철 4호선 M역을 선정하여 2010년부터 2013년까지 외기, 승강장, 터널 등 세 지점에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 동시에 측정하였다. 또한 본선터널의 미세먼지 저감시스템 설치 및 운전 에 따른 PM 저감효율을 확인하기 위하여 저감시스템 운전 전·후 PM 농도 변화를 측정하였다. 본 자료는 서울시민의 가장 중요한 교통수단 중 하나인 지하철시스템의 공기질 관리 및 환경개선을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구 방법

지하철 시스템의 PM 특성을 파악하기 위한 시료 포집 위치는 그림 1과 같이 승강장, 터널, 외기 3지점으로, 외기는 M역에 인접한 치안센터 2층 건물 옥상에서 측정하였으며, 승강장은 M역에서 K역 방향의 승강장에서 측정하였다. 터널은 M역에서 K역 방향으로 약 70 m 정도 떨어진 지점에서 측정하였으며, 터널 내 시료채취는 안전성을 고려하여 샘플러를 중앙 기둥에 고정하여 설치하였다. 4호선 M역은 지하 2층으로 구성되어 있으며, 정거장 형태는 정거식, 총 승강장 길이는 205 m로 이루어져 있다. 터널은 M역을 중심으로 4호선 당고개 방향으로 터널 길이 1,315 m, 복선박스, 심도 8.6~13.6 m, 환기구가 3개이며, 사당 방향으로 터널길이 1,045 m, 복선박스, 심도 11.1~14.1 m, 환기구 3개로 이루어져 있다.

모든 지점에서 PM 측정은 24시간 단위로 같은 시간에 진행되었으며, 2010년부터 2013년까지 실시하였다. 2010년은 4월 21일부터 28일까지 (8일간), 7월 14일부터 21일까지 (8일간), 10월 12일부터 18일까지 (7일간), 2011년은 1월 11일부터 17일까지 (7일간), 2012년은 10월 12일에서 23일까지 (10일간), 2013년은 5월 29일에서 6월 3일 (6일간), 9월 25일에서 10월 27일까지 (14일간) 총 60일간 측정하였다. 특히,

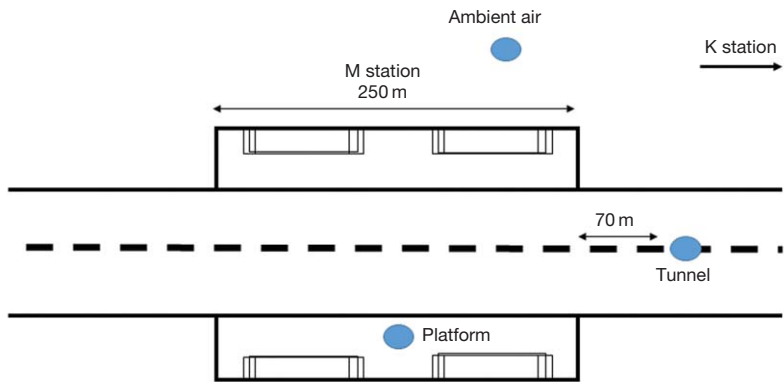


Fig. 1. Sampling site in the M subway station.

2013년 9월 25일부터 10월 22일까지의 측정은 미세먼지 저감시스템 가동에 따른 PM 오염도 변화를 분석하기 위하여 저감시스템 가동 전은 9월 25일부터 29일까지 5일간 측정하였으며, 가동 후는 10월 3일부터 5일, 22일에서 27일까지 9일간 측정하여 비교 분석하였다.

각 지점에서 사용한 샘플러는 PM mini-vol portable sampler (Model 4.1, Airmetrics Co., USA)와 PM sequential sampler (PMS-103, APM Eng, Co., Korea)로 외기와 승강장은 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> mini-vol portable sampler를 사용하였으며, 시료채취 유량은 5 L/min로 고정하여 24시간 가동하였다. 측정시간은 타이머를 사용하였고, 샘플러가 과부하 등으로 인하여 정지하는 경우에 대비하여 샘플러에 부착된 카운터의 수치와 가동시간을 기록하였다. 역사 내 터널에는 PMS-103을 사용하여 시료를 채취하였다. 연구에 사용된 PMS 샘플러는 미국 EPA PM 측정방법에 적합하게 설계되었으며, 동시에 18개의 47 mm 필터의 장착이 가능한 기기이다. 설정된 주기 및 시간과 설정유량에 따라 각 필터에 분리해서 시료채취가 가능하며, 온도와 압력을 자동으로 보정하여 오차  $\pm 1\%$  이내로 유량을 유지할 수 있다. PMS 샘플러는 16.7 L/min의 채취 유량으로 24시간 채취하였다. 본 연구에 사용한 모든 측정 장비는 측정 시작 전에 상호 비교를 통한 오차를 최소화하였다.

시료포집에 사용한 필터는 직경 47 mm, pore size 2  $\mu\text{m}$ 의 teflon filter (Zeflour, Pall Cor, USA)를 사용하였다. Teflon 필터는 시료채취 전·후로 3일간 항온·

항습상태의 전자 데시케이터 (Sanplatec Corp., Model Oyin 09678BN) 내에 보관하여 항량시킨 후, 0.001 mg의 감도를 갖는 전자저울 (Sartorius Co., Model CPA2P-F)로 칭량하였다. 칭량 전·후의 무게차를 PM의 무게로 간주하였으며, 이를 유량으로 나누어 PM 농도를 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 PM 농도

서울시 지하철 4호선 M역에서 측정된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에 대한 시료 수, 산술평균, 표준편차, 최대값, 최소값을 표 1에 나타내었다. PM<sub>10</sub> 농도범위는 외기 22.4~113.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 승강장 43.4~166.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 터널 131.9~319.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 평균농도는 외기  $48.6 \pm 19.1$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 승강장  $84.6 \pm 27.0$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 터널  $204.8 \pm 43.7$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 각 지점별 PM<sub>10</sub>의 농도는 터널이 외기의 4.2배, 승강장의 2.4배로 높았으며, 승강장이 외기의 1.7배 이상의 농도를 보였다. PM<sub>2.5</sub>는 외기 16.8~79.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 승강장 27.5~92.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 터널 25.3~143.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위를 보였으며, 산술평균농도는 외기  $34.6 \pm 13.6$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 승강장  $49.7 \pm 16.1$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 터널  $83.1 \pm 26.7$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 각 지점별 PM<sub>2.5</sub>의 농도는 터널이 외기의 2.4배, 승강장의 1.7배로 높았으며, 승강장이 외기의 1.2배 농도수준을 보였다.

지하철 터널과 승강장의 농도는 외기 농도보다 PM<sub>10</sub>은 4.2배, 2.4배 높았으나, PM<sub>2.5</sub>은 2.4배, 1.7배

**Table 1. Statistical summary of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentration measured at the outdoor, subway platform, subway tunnel in this study during 2010~2013.**

	Outdoor			Subway platform			Subway tunnel		
	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Fine fraction (PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Fine fraction (PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Fine fraction (PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> )
Average	48.6	34.6	0.71	84.6	49.7	0.59	204.8	83.1	0.41
SD <sup>a</sup>	19.1	13.6	0.72	27.0	16.1	0.60	43.7	26.7	0.61
MIN <sup>b</sup>	22.4	16.8	0.75	43.4	27.5	0.63	131.9	25.3	0.19
MAX <sup>c</sup>	113.4	79.7	0.70	166.2	92.3	0.56	319.3	143.4	0.45
N <sup>d</sup>	60			60			60		

<sup>a</sup>SD=Standard Deviation

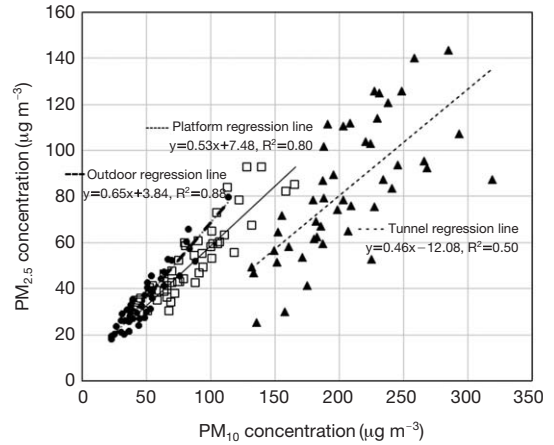
<sup>b</sup>MIN=Minimum

<sup>c</sup>MAX=Maximum

<sup>d</sup>N=Number of samples

수준으로 터널과 승강장의 높은 PM 농도는 미세입자보다는 거대입자에 의한 영향임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 각 지점별 PM<sub>10</sub> 중 PM<sub>2.5</sub>의 비율(FR: fine ratio)이 외기는 0.71이나, 승강장과 터널은 각각 0.59, 0.41로 특히, 터널의 경우 PM<sub>10</sub>의 높은 농도가 거대입자의 영향임을 확인할 수 있었다. 지하철 터널의 높은 PM 농도는 외기의 유입보다는 내부의 열차 운행에 따른 레일이나 전선, 브레이크의 마모에 의한 거대 입자의 영향으로 확인된다. 지하철 승강장은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도 및 FR을 비교한 결과 외기와 터널의 영향을 동시에 받는 것으로 확인할 수 있었다.

서울시 4호선 M역의 지하철 승강장과 외기에서의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도와 세계 여러 지역에서 측정된 자료를 비교하였다. M역 승강장의 PM 농도는 멕시코시티, LA, 타이페이, 부다페스트, 프라하, 도쿄, 베를린의 농도와 유사했으나(Mugica-Alvarez *et al.*, 2012; Kam *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2008; Salma *et al.*, 2007; Branis, 2006; Furuya *et al.*, 2001; Fromme *et al.*, 1998), 로마, 런던, 카이로, 스톡홀름의 지하철 승강장보다는 5배 이상 낮은 농도를 보였다. 지하철 승강장에서 높은 PM 오염도를 보인 로마, 런던, 카이로, 스톡홀름 지역은 외기보다 3~7배 높은 PM 농도를 보였다(Ripantucci *et al.*, 2006; Seaton *et al.*, 2005; Johansson and Johansson, 2003; Awad, 2002). 상대적으로 낮은 승강장 농도를 보인 서울시 4호선 M역을 포함한 멕시코시티, LA, 타이페이 등은 외기 농도와 비교하여 1.2~2.5배의 농도 차이를 보였다. 본 연구의 측정대상인 M역이 포함된 서울 4호선의 22개 역사의 농도를 측정된 2004년 자료와 비교하였다(Kim *et al.*, 2008). 2004년



**Fig. 2. Correlation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> data at all sampling site.**

서울 4호선 승강장의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도는 각각 359 µg/m<sup>3</sup>, 129 µg/m<sup>3</sup>로 본 연구 결과보다 PM<sub>10</sub> (84.6 µg/m<sup>3</sup>)은 4.2배, PM<sub>2.5</sub> (49.7 µg/m<sup>3</sup>)은 2.5배 높았다. 최근 조사한 4호선 M역 승강장의 낮은 PM 농도는 서울 지하철의 지속적인 공기질 관리의 결과로 사료된다. 터널 PM 농도는 2008년 서울 3호선 대청역의 터널에서 측정된 자료와 비교하였다(Son *et al.*, 2013). 대청역을 중심으로 학여울 방향과 일원 방향 터널의 PM<sub>10</sub> 농도는 각각 111 µg/m<sup>3</sup>, 177 µg/m<sup>3</sup>으로 4호선 M역사 터널 202 µg/m<sup>3</sup>보다 다소 낮았다.

지하철 승강장과 터널의 PM 특성을 확인하기 위하여 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 상관관계를 분석하여 그림 2에 제시하였다. 외기에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 상관계수(R<sup>2</sup>)는

0.88로 높은 상관관계를 보였으나, 터널에서의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 R<sup>2</sup>는 0.5로 비교적 낮은 상관관계로 터널 내 거대입자와 미세입자의 오염원이 다른 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 자료를 통해 PM의 정확한 오염원을 확인할 수는 없었으나, 기존 연구결과에 의하면 터널의 거대입자 발생은 레일과 바퀴의 마찰과 브레이크 마모 (Park *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2010; Pfeifer *et al.*, 1999; Sitzmann *et al.*, 1999), 열차 운행에 의한 입자의 재비산 (Raut *et al.*, 2009; Chan *et al.*, 2002) 등의 영향을 받는다.

전체 측정 기간 동안의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 일별 추이

는 그림 3과 같다. 외기의 PM<sub>10</sub>은 24시간 대기환경 기준 100 µg/m<sup>3</sup>를 1회(2013년 5월 30일) 초과하였으며, 실내공기질 유지기준 150 µg/m<sup>3</sup>를 적용받는 지하역사 승강장은 2회(2011년 1월 11일과 2013년 5월 30일) 초과하였다. 승강장 PM<sub>10</sub> 유지기준을 초과하는 경우 터널의 오염도 역시 293.3과 284.8 µg/m<sup>3</sup>로 높은 오염도를 보였다.

지하철 터널은 실내공기질 유지기준을 적용받지는 않으나 터널을 운행하는 지하철의 경우 터널공기가 직접적으로 객차에 유입되어 열차 내부의 오염농도에 영향을 미칠 수 있다. 2014년 3월부터 시행된

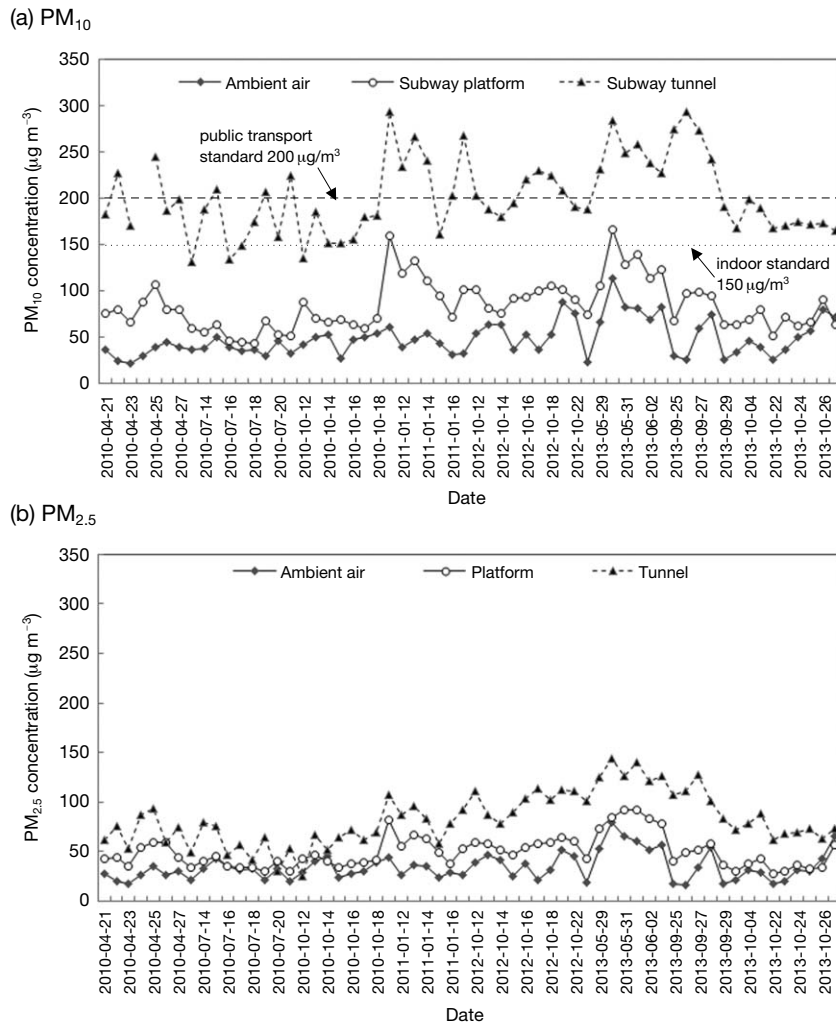


Fig. 3. Temporal variations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations at three sampling site during the study period.

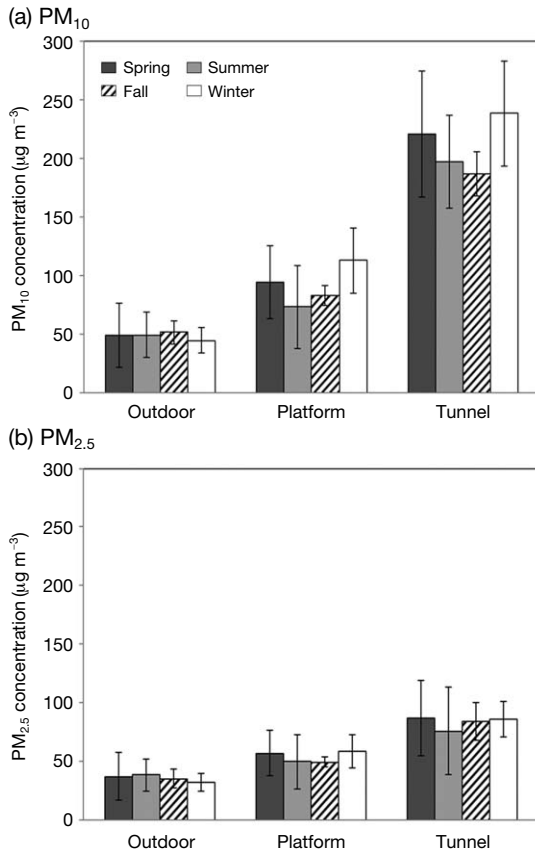


Fig. 4. Seasonal PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations at three sampling sites.

대중교통 미세먼지 농도기준은 철도객차의 경우 200 µg/m<sup>3</sup>으로 터널먼지가 열차 내부로 직접 유입되는 것을 고려하여 터널농도를 200 µg/m<sup>3</sup> 수준과 비교하였다. 본 연구 결과 본선의 환기를 중단한 2013년 9월 25일부터 29일까지 5일간 자료를 제외한 터널의 PM<sub>10</sub> 측정자료 (시료수 55회) 중 200 µg/m<sup>3</sup>를 23회 초과하였다. 따라서 객차의 공기질 관리 및 터널에서 작업하는 근로자의 건강을 보호하기 위해서는 지하철 터널의 적극적인 PM 관리가 필요하다.

계절별 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 평균농도와 표준편차는 그림 4와 같으며, 각 계절별 샘플일 수는 봄철 (4, 5월) 과 여름철 (6, 7월) 각각 11일, 가을철 (9, 10월) 17일, 겨울철 (1월) 7일 동안 이루어졌다. PM<sub>10</sub>의 계절별 산술평균 농도는 외기의 경우 가을철이 51.2±9.6 µg/

m<sup>3</sup>로 가장 높았으며, 겨울철이 44.3±11.1 µg/m<sup>3</sup>로 가장 낮았다. 그러나 지하철 승강장과 터널의 겨울철 PM<sub>10</sub> 농도는 각각 112.8±27.9 µg/m<sup>3</sup>, 238.8±44.7 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높은 농도를 보였다. 측정기간 동안 겨울철 외기의 PM 농도는 가장 낮았으나 지하철 시스템 내의 높은 PM 농도는 겨울철 낮은 기온에 의해 환기가동 시간의 감소로 지하철 내부 오염물질 축적에 따른 PM 농도가 크게 증가함을 알 수 있었다.

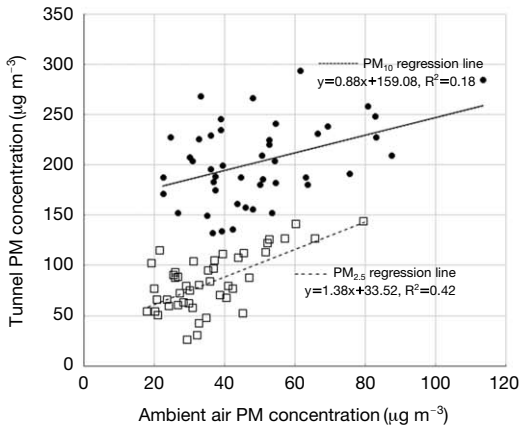
### 3. 2 지점별 PM농도 상관관계 분석

지하철 내부 오염도와 외기의 영향 요인을 분석하기 위하여 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에 대한 측정지점별 상관관계를 분석하여 그림 5에 제시하였다. 그림 5(a)는 외기와 지하철 터널의 상관관계를 나타낸 것으로 PM<sub>10</sub>의 상관계수 (R<sup>2</sup>)는 0.18, PM<sub>2.5</sub>는 0.42로 지하철 터널의 PM<sub>2.5</sub>는 외기와 비교적 높은 상관을 보였으나, PM<sub>10</sub>은 외기의 농도와 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 지하철 터널의 PM<sub>2.5</sub>는 외기의 영향을 많이 받으나 PM<sub>10</sub>은 외부 오염원의 영향보다는 내부 발생원의 영향으로 확인할 수 있다. 그림 5 (b)는 외기와 지하철 승강장의 상관관계를 나타낸 것으로 PM<sub>10</sub>의 R<sup>2</sup>은 0.39, PM<sub>2.5</sub>는 0.61로 승강장 역시 PM<sub>2.5</sub>는 외기와의 상관관계가 비교적 높았으나, PM<sub>10</sub>은 외기의 영향보다는 지하철 터널에서 생성된 큰 입자의 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 그림 5(c)는 지하철 승강장과 터널의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 상관관계를 나타낸 것으로 상관계수 R<sup>2</sup>은 각각 0.71과 0.63으로 높은 상관관계를 보였다. PM<sub>10</sub>의 높은 상관 (R<sup>2</sup>=0.71)관계는 승강장과 터널의 PM<sub>10</sub>의 기원이 유사함을 의미한다. 즉, 스크린 도어 (screen door)가 설치되었으나 스크린 도어 개폐 시 터널 내부의 고농도 PM이 승강장으로 유입되어 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다 (Kim et al., 2012; Lee et al., 2010). 따라서 승강장의 PM 관리를 위해서는 터널 내부의 PM 관리가 우선되어야 한다.

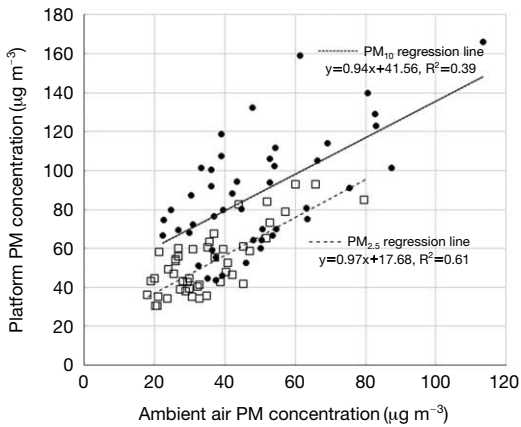
### 3. 3 미세먼지 저감시스템 가동에 따른 PM 농도 비교

본 연구에서는 2013년 9월 25일부터 10월 22일까지 미세먼지 저감시스템 설치 및 가동에 따른 PM 오염도 변화를 분석하기 위하여 저감시스템 가동 전

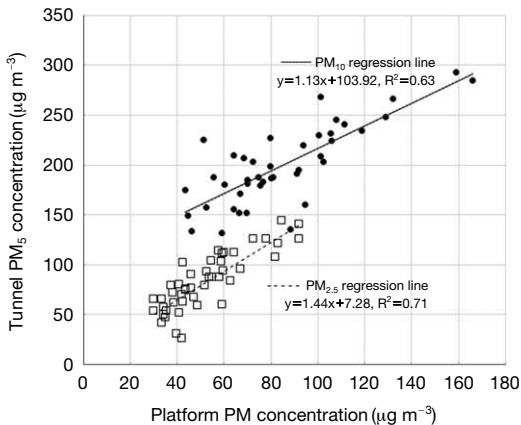
(a) Ambient air vs Subway tunnel



(b) Ambient air vs Subway platform



(c) Subway platform vs Subway tunnel



**Fig. 5. Comparison of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations from subway platform and tunnel with outdoor PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> levels.**

(9월 25~29일)과 가동 후(10월 3~5일, 22~27일)의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 측정하였다. 미세먼지 저감시스템은 터널 환기실 내 기존 환기설비를 이용하여 환기팬 후단에 연결 덕트와 고유속 전기집진기(EP; Electrostatic Precipitator), 댐퍼를 설치한 후 터널 내부의 함진공기를 외부로 배출하지 않고 EP로 먼지를 처리하여 내부로 다시 유입시키는 시스템이다.

표 2는 전기집진기 가동 전·후 각 측정지점의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 정리하였다. 외기의 평균 PM<sub>10</sub> 농도는 미세먼지 저감시스템을 가동하지 않은 기간 동안 43.4 µg/m<sup>3</sup>에서 가동 기간 동안 48.8 µg/m<sup>3</sup>로 12.5% 증가하였으며, PM<sub>2.5</sub> 농도는 28.1 µg/m<sup>3</sup>에서 32.2 µg/m<sup>3</sup>으로 14.5% 증가하였다. 그러나 승강장과 터널에서의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도는 미세먼지 저감시스템 가동에 따라 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 승강장의 PM<sub>10</sub> 농도는 저감시스템 가동 전 84.4 µg/m<sup>3</sup>에서 가동 후 68.8 µg/m<sup>3</sup>로 18.4% 감소하였으며, PM<sub>2.5</sub> 농도는 47.2 µg/m<sup>3</sup>에서 36.8 µg/m<sup>3</sup>로 22.2% 감소하였다. 터널 PM<sub>10</sub> 농도는 저감시스템 가동 전 255.0 µg/m<sup>3</sup>에서 가동 후 175.5 µg/m<sup>3</sup>로 31.2% 감소하였으며, PM<sub>2.5</sub> 농도는 106.1 µg/m<sup>3</sup>보다 가동 후 71.9 µg/m<sup>3</sup>로 32.3% 감소하였다.

미세먼지 저감시스템 설치 및 가동 전·후의 PM 농도추이를 그림 3에서 확인할 수 있다. 저감시스템 가동 후 9일 동안의 측정자료를 분석해 보면, 해당 기간 동안 터널의 농도는 모두 200 µg/m<sup>3</sup> 이하의 일정한 농도수준을 보였다. 특히, 높은 외기농도를 보인 2013년 10월 26일(79.4 µg/m<sup>3</sup>)과 27일(72.1 µg/m<sup>3</sup>) 모두 터널의 PM<sub>10</sub> 농도는 각각 172.7 µg/m<sup>3</sup>과 165.6 µg/m<sup>3</sup>로 낮은 농도를 확인할 수 있었다. 일반적인 지하철 환기시스템을 적용하는 경우 지하철 터널 및 승강장의 오염농도는 외기의 오염도에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 그러나 지하철 본선터널에 전기집진기를 설치 운영한 후 오염도를 분석한 결과, 전기집진기 가동 시 외기의 오염도에 영향을 받지 않았으며, 내부 오염도가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 지하철 터널에 미세먼지 저감장치 설치 및 운전은 터널 내부에서 발생하는 미세먼지의 농도를 효과적으로 저감할 뿐만 아니라, 외기에서 유입되는 미세먼지의 오염도 역시 효과적으로 감소시킬 수 있는 것으로 확인할 수 있었다.

**Table 2. Comparison of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations before and after operation of ventilation and EP.**

	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		
	before operation of EP <sup>a</sup>	after operation of EP	RE <sup>b</sup> (%)	before operation of EP	after operation of EP	RE (%)
Outdoor	43.4	48.8	-12.5	28.1	32.2	-14.5
Subway platform	84.4	68.8	18.4	47.2	36.8	22.2
Subway tunnel	255.0	175.5	31.2	106.1	71.9	32.3

<sup>a</sup>EP=Electrostatic Precipitator

<sup>b</sup>RE=Reduction Efficiency

#### 4. 결 론

본 연구에서는 서울 지하철 시스템 내 근로자 및 이용자의 건강에 영향을 미치는 PM의 농도 특성 및 거동을 분석하기 위하여 서울시 지하철 4호선 M역사를 선정하여 승강장, 터널, 외기 3개 지점에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도를 2010년부터 2013년까지 총 60일간 측정하였다.

각 지점별 PM<sub>10</sub> 평균농도는 외기 48.6 µg/m<sup>3</sup>, 승강장 84.6 µg/m<sup>3</sup>, 터널 204.8 µg/m<sup>3</sup>이었으며, PM<sub>2.5</sub>는 외기 34.6 µg/m<sup>3</sup>, 승강장 49.7 µg/m<sup>3</sup>, 터널 83.1 µg/m<sup>3</sup> 수준이었다. 터널의 PM<sub>10</sub> 농도는 외기보다 4.2배로 높았으나 승강장은 1.7배의 수준을 보였다. 다른 나라의 지하철 터널 자료와는 비교하지 못했으나, 승강장의 PM 농도는 세계 주요 도시 중 지하철 승강장의 PM 농도가 낮은 국가들의 농도 수준을 보였으며, 이는 국내 지하철 시스템 내 공기질 관리가 잘 이루어지고 있음을 시사한다. 지하철 승강장과 터널의 PM 발생 특성을 파악하기 위하여 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 상관관계를 분석하였다. 터널의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 R<sup>2</sup>=0.5로 비교적 낮은 상관관계로 터널 내 거대입자와 미세입자의 발생원이 다른 것을 확인할 수 있었다. 반면 승강장은 R<sup>2</sup>=0.8로 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>이 유사한 기원에 의한 영향을 확인할 수 있었다. 지하철 내부 오염도와 외기의 영향 요인을 파악하기 위하여 측정지점별 상관관계를 분석한 결과 외기와 터널의 R<sup>2</sup>는 PM<sub>10</sub> 0.18, PM<sub>2.5</sub> 0.42로 지하철 터널의 미세입자는 외기와 비교적 높은 상관관계를 보였으나, 거대입자는 외기의 농도와 거의 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 터널의 거대입자는 외부 오염도의 영향보다는 내부 발생원의 영향으로 확인할 수 있었다.

마지막으로 미세먼지 저감시스템 가동에 의한 PM 저감효과를 분석한 결과 외기의 PM 농도는 증가하였으나, 승강장과 터널의 PM<sub>10</sub> 농도는 18.4%, 31.2% 개선되었으며, PM<sub>2.5</sub> 역시 22.2%, 32.3% 저감효율을 보였다. 특히 외기의 농도가 높은 날에도 지하철 시스템 내 일정 수준의 PM 농도를 유지하고 있어, 적절한 공기질 관리를 위해서는 환기시스템과 함께 지하철 내부에서 발생하는 PM을 저감할 수 있는 저감시스템의 설치 및 운영이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도시설연구사업 (14RTRP-B081249-01)의 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사합니다.

#### References

Aarnio, P., T. Yli-Tuomi, A. Kousa, T. Makela, A. Hirsikko, K. Hammeri, M. Raisanen, R. Hillamo, T. Koskentalo, and M. Jantunen (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in the Helsinki subway system, *Atmos. Environ.*, 39(28), 5059-5066.

Awad, A.H.A. (2002) Environmental Study in subway metro stations in Cairo, Egypt, *J. Occup. Health*, 44(2), 112-118.

Birmili, W., A. Allen, F. Bary, and R. Harrison (2006) Trace metal concentrations and water solubility in size-fractionated. Atmospheric particles and influence of road traffic, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 1144-1153.



- Branis, M. (2006) The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmos. Environ.*, 40 (2), 348-356.
- Cheng, Y.H., Y.L. Lin, and C.C. Liu (2008) Levels of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Taipei Rapid transit system, *Atmos. Environ.*, 42(31), 7242-7249.
- Chillrud, S.N., D. Epstein, J.M. Ross, S.N., Sax, D., Pederson, J.D. Spengler, and P. Kinney (2004) Elevated airborne exposures to manganese, chromium and iron of teenagers from steel dust and New York City's subway system, *Environ. Sci. Technol.*, 38(3), 732-737.
- Choi, H.W., I.J. Hwang, S.D. Kim, and D.S. Kim (2004) Determination of Source Contribution Based on Aerosol Number and Mass Concentration in the Seoul Subway Stations, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(1), 17-31.
- Fujii, R., P. Oyola, J.C.R. Pereira, A.S. Nedel, and R. Caccavallo (2007) Air pollution in two Sao Paulo subway stations. In: Morrison, G., S. Rauch (Eds.), *Highway and Urban Environment*. Springer, ISBN 978-1-4020-6010-6, 181-190.
- Johansson, C. and P.A. Johansson (2003) Particulate matter in the underground of Stockholm, *Atmos. Environ.*, 37(1), 3-9.
- Kam, W., K. Cheung, N. Daher, and C. Sioutas (2011) Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro, *Atmos. Environ.*, 45, 1506-1516.
- Kim, K.H., D.X. Ho, J.S. Jeon, and J.C. Kim (2012) A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station, *Atmos. Environ.*, 49(1), 219-223.
- Kim, K.Y., Y.S. Kim, Y.M. Roh, C.M. Lee, and C.Y. Kim (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) in Seoul metropolitan subway stations, *J. Hazard. Materials*, 154(1-3), 440-443.
- Lee, T.J., J.S. Jeon, S.D. Kim, and D.S. Kim (2010) A Comparative Study on PM<sub>10</sub> Source Contributions in a Seoul Metropolitan Subway Station Before/After Installing Platform Screen Doors, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(5), 543-553.
- Mugica-Alvarez, V., J. Figueroa-Lara, M. Romero-Romoa, J. Sepulveda-Sanchez, T. Lopez-Moreno (2012) Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system, *Atmos. Environ.*, 49, 284-293.
- Nieuwenhuijsen, M.J., J.E. Gomez-Perales, and R.N. Colvile (2007) Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems, *Atmos. Environ.*, 41(37), 7995-8006.
- Park, S.B.S.N., T.J. Lee, H.K. Ko, S.J. Bae, S.D. Kim, D. Park, J.R. Sohn, and D.S. Kim (2013) Identification of PM<sub>10</sub> Chemical Characteristics and Sources and Estimation of their Contributions in a Seoul Metropolitan Subway Station, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(1), 74-85.
- Pfeifer, G.D., R.M. Harrison, and D.R. Lynam (1999) Personal exposure to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996, *Sci. Total Environ.*, 235(1-3), 253-260.
- Raut, J.C., P. Chazette, and A. Fortain (2009) Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris, *Atmos. Environ.*, 43, 860-868.
- Ripanucci, G., M. Grana, L. Vicentini, A. Magrini, and A. Bergamaschi (2006) Dust in the underground railway tunnels of an Italian town, *J. Occup. Environ. Hyg.*, 3(1), 16-25.
- Seaton, A., J. Cherrie, M. Dennekamp, K. Donaldson, J.F. Hurley, and C.L. Tran (2005) The London underground: dust and hazards to health, *Occup. Environ. Med.*, 62(6), 355-362.
- Sitzmann, B., M. Kendall, J. Watt, and I. Williams (1999) Characterisation of airborne particles in London by computer-controlled scanning electron microscopy, *Sci. Total Environ.*, 241(1-3), 63-73.
- Trattner, R.B., A.J. Perna, H.S. Kimmel, and R. Birch (1975) Respirable Dust Content of Subway Air, *Environ. Lett.*, 10(3), 347-252.
- Zhao, W. and P.K. Hopke (2004) Source apportionment for ambient particles in the San Gorgonio wildness, *Atmos. Environ.*, 38, 5901-5910.