

# 서울시 지하철 미세먼지 특성분석 및 양방향전기집진기 성능평가

이형돈\* · 이승환\*\* · 박찬규\*†

## Characteristic Analysis of PM in Seoul Subway Station and Performance Evaluation of Bi-directional Electrostatic Precipitator for Reduction of PM

Hyung-Don Lee\*, Seung-Hwan Lee\*\*, Chan-Gyu Park\*\*†

Key Words : PM(미세먼지), Seoul subway station(서울 지하철), Particle counter(갯수농도), Bi-directional electrostatic precipitator(양방향전기집진기), Performance evaluation(성능평가)

### ABSTRACT

Subway is one of the representative public transportation in Korea, and especially, nine lines (327.1 km) were installed and ran in the metropolitan city in Korea. In this time, level of indoor air pollution is continuously increase due to the increasing of passengers using subway and inflow of outside air such as wayside, so management point about indoor air quality in subway station continuously is growing. Hence, air quality monitoring systems and air purifiers in several seoul subway stations has installed, however, the concentration of particulate matter (PM) in the underground subway stations is still higher than the outside. In this study, we analyzed the characteristics of quantitative concentration for PM in seoul subway, and conducted the performance evaluation about developed bi-directional electrostatic precipitator. Results of PM concentration, the ratio( $PM_{2.5}/PM_{10}$ ) in the outside was higher than waiting room and platform in two subway station (Sin-rim and Sa-dang). The ratio of particle counter for  $PM_{2.5}$  at platform was higher than waiting room in subway station. As a result of the performance evaluation for bi-directional electrostatic precipitator, when the applied voltage was at least 10 kV, the PM collection efficiency was more than 90%, and there's no difference about simultaneous concentration of ozone by materials and carbon coatings.

### 1. 서론

우리나라의 대표적 대중교통수단 중 지하철은 1974년 서울시에 1호선이 운영을 시작한 이래 2014년 기준 수도권에 9개 노선 327.1 km가 설치되어 운영 중에 있고, 현재도 계속 노선확장이 진행 중인 상황이다.<sup>(1)</sup> 지하철은 안정성, 쾌속성, 정시성 등의 장점을 살려, 부산, 대구, 대전, 광주 등 전국적으로 대도시에서 운행되고 있으나, 유동인구가 상당히 높은 지하철역사는 내부에서 발생하는 오염물질과 외부 오염물질의 유입 등으로 인해 철도를 이용하는 승객들의 건강상의 문제가 매우 심각해지고 있는 상황이다.<sup>(2)</sup>

또한 지하철 노선의 지속적인 확충에 의해 지하공간을 인간의 새로운 활동영역으로 인식시킴에 따라 지하철의 내부 공기질의 오염도로 인해 인체 건강에 위대한 영향을 직접, 혹은 간

접적으로 발생시킬 수 있어 이러한 공간오염 문제가 사회환경적인 문제점으로 야기되고 있다. 이러한 문제는 지하철 내부의 공기질은 구조적으로 기계적인 급배기 시스템을 통해 실내공기질을 유지하게 되는데, 이러한 시설만으로는 지하공간 특성이 고려된 쾌적한 환경을 만들 수 없다는 문제점이 발생한다.<sup>(3)</sup> 특히 서울시의 경우 2016년 기준 지하철 이용객의 하루 평균 인원은 7,999천 명으로 전년 대비 1만 4천명 증가했고, 지하철 이용 비율은 59.3%로 이용객 비율이 꾸준히 증가되고 있는 추세로 지하철 내 공기질에 대한 관리는 더욱더 중요해지고 있는 시점이다. 또한 지하철 내 공기질 문제는 노후화된 환기시설과 이용승객의 증가에 따른 열차 운행 횟수의 증가로 인해 지하철역사와 터널 등에서 발생하는 내부분진으로 인해 그 농도가 매년 가중되고 있다.<sup>(2,4)</sup> 이러한 지하철역사에서의 미세먼지 오염원에 대한 사례로는 2006년 중각 지하소평

\* 한국산업기술시험원 환경기술본부 물환경센터 (Water Environment Center, Environmental Technology Division, KTL)

\*\* (주)리트코 기술연구소 (Royal Industrial Tech Corp, Ritco)

† 교신저자, E-mail : pgg6189@hotmail.com

센터에서 발생한 공기오염 사례를 들 수 있다. 이 사례를 계기로 서울시에서는 지하상가 내 공기질의 쾌적 관리를 위해 20여 곳에 공기질 모니터링 시스템을 구축하고, 공기정화장치를 설치한 사례가 있다. 그러나, 이러한 단발적인 대책에도 불구하고, 지하역사는 지하철이 운행하고 있는 구간과 연결되어 있고, 지상통로와도 직·간접적으로 연결되어 있기 때문에 보다 현실적이고 체계적으로 지하역사의 공기질을 관리할 필요성이 대두되고 있다.<sup>(5)</sup>

지하철 내부의 미세먼지와 관련된 다양한 선행연구들이 진행되었으며,<sup>(6-9)</sup> 국가별 지하역사 미세먼지의 측정값에 대한 연구도 다양하게 진행된 사례가 있다.<sup>(10-12)</sup> 미세먼지 이외, 기타 실내환경에서 발생하는 이산화탄소, 이산화질소 등의 대기오염물질에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구에서는 지하역사 이용객에 의해 이산화탄소가 주로 발생되며, 그 증감은 철도의 이용객 수와 높은 상관관계가 있다고 분석되었다. 특히 이산화질소 농도의 경우, 주 발생원은 역사 출구 근처의 도로오염원에 의한 영향으로 외부와 인접한 출입구와 계단 등에서 이산화질소가 높은 수준으로 발생된다고 보고된 바 있다.<sup>(13-15)</sup>

이렇게 지하철과 관련된 다양한 실내 공기질 중 특히 미세먼지 발생의 주요 원인으로는 지하철 이용 승객들의 이동 중 발생하는 미세먼지, 열차의 운행과정에서 열차풍 등에 의해 배출되는 미세먼지(비산먼지 포함), 그리고 환기를 위해 도입되는 외부 공기 속에 포함된 미세먼지 등이 복합적으로 작용하여 내부 농도가 결정된다. 따라서 이러한 지하역사 내 고농도 미세먼지를 효율적으로 제어하기 위해서는 오염원의 정성, 정량적 분석을 통해 각각의 오염원을 분리하고 기여도를 추정하고 오염원을 정확히 확인할 필요가 있다. 특히 미세먼지 저감을 위해 서울교통공사에서는 1년에 2회씩 터널 내 물청소를 추진하고 있으나 청소 전후 미세먼지 저감효과가 거의 없으며, 레일의 마모관리를 위해 레일연마작업을 하였으나 전후 미세먼지 저감효과가 크게 없는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

이에 본 연구에서는 실제 지하역사 내 미세먼지 발생농도 수준을 분석하기 위해 서울시 지하철 2곳을 선정하여 미세먼지에 대한 정량적 농도 및 개수농도에 대한 분석을 수행하였다. 또한 이러한 미세먼지의 효율적 관리와 저감을 위해서 본선 터널과 역사의 미세먼지 농도를 동시에 저감할 수 있는 양방향 전기집진기를 개발하였으며, Lab 실험을 통해 다양한 변수조건 하에 집진효율 등에 관한 성능을 평가하고자 하였다.

## 2. 미세먼지 샘플링 및 분석 방법

### 2.1 미세먼지 샘플링 선정 역사

본 연구에서는 서울시 지하역사 중 역사 내 유동인구, 서울교통공사에서 기 측정된 미세먼지 데이터<sup>(5)</sup> 등을 고려하여

대표 2개 역사(2호선 신림역, 4호선 사당역)를 선정하였으며, 각 역사별 샘플링 지점은 지하역사에서는 승강장과 대합실, 외부에서는 각 역사별로 출구에서 10 m 거리의 도로변 인근에서 각각 측정하였다. Fig. 1에는 세부적인 측정위치와 샘플링 사진을 그림으로 도식화하여 나타내었다.

개수농도는 서울 사당역을 선정하여 분석하였으며, 특히 사당역은 2호선과 4호선이 연결되어 있는 환승역으로 지하 3층(약 30 m 이상)까지 건설이 되어 있으며, 승차인원이 2호선은 42,107명/일, 4호선은 29,797명/일로 매우 혼잡한 역사 중 한 곳이다. 측정 기간과 지점은 2018년 5~6월 사이에 사당역 내 총 4곳으로 대합실 1지점과 승강장 3지점(2호선 1지점, 4호선 2지점)에서 수행하였고, 그 위치는 Fig. 2에 나타내었다. 사당역 외기(외부)에서는 출구 근처 10 m 내의 도로변에서 측정하였으며, 지점별 30회에 걸쳐 개수농도를 분석하였고 각 지점을 산술평균하여 구한 자료를 최종 결과로 확정하였다.

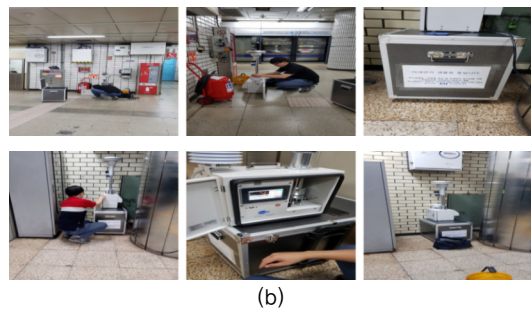
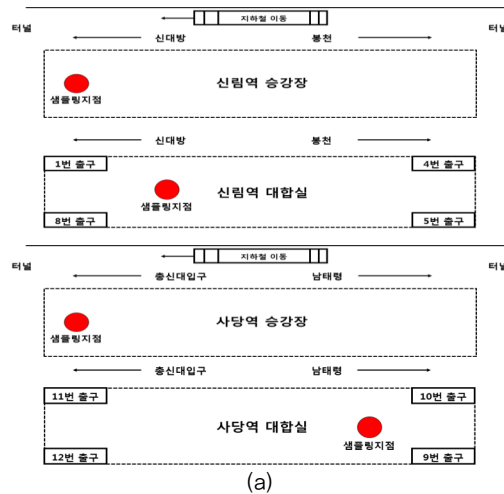


Fig. 1 (a) Location of PM sampling (b) Picture of PM sampling in Seoul subway station

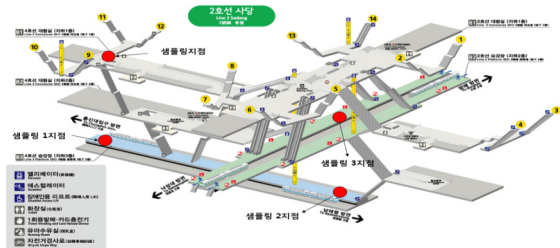


Fig. 2 Measurement point of particle counter of PM in Sa-dang subway station

2.2 미세먼지 분석방법

미세먼지의 정량적 농도분석을 위한 측정기기는 (주)캡익코 퍼레이션의 KMS-4200 샘플러를 사용하였으며, 채취 유량은 16.7 LPM으로 고정하여 24시간 채취하였다. 시간은 sampler에 부착된 timer를 사용하여 setting 하였고, sampler가 과부하 등으로 멈추는 경우 시간을 계산하기 위하여 sampler에 부착된 counter의 수치를 기록하였다. 설치한 sampler를 수거할 때는 sampler가 정지되기 전 측정지점에 도착하여 24시간 가동이 되었는지 확인한 후, 수거를 완료하였다. 시료 채취에 사용한 filter는 미국 Corning Costa사의 직경 47 mm, pore size 0.2  $\mu\text{m}$ 의 Membra-Fil membrane filter를 사용하였으며, filter는 채취 전·후에 전자 테시케이터에 보관하고, 시료채취 전·후의 무게차를 채취시 유량으로 나누어 환산한 후, 미세먼지 농도를 최종적으로 계산하였다.

개수농도(Particle counter) 측정기기는 미국 API(The Amherst Process Instruments, Inc.)사의 particle size analysis system(API, Aerosizer LD, USA)을 사용하였다. 사용된 기기는 0.1~700  $\mu\text{m}$  범위의 입경별 측정이 가능하며, 초당 100,000개의 입자 측정이 가능하며, 본 연구의 통계 분석에는 큰 입자를 제외한 0.1~10  $\mu\text{m}$  범위의 입자에 대해서 분석을 수행하였다. 또한 흡입 유량은 평균 1 L/min의 유량으로 60초간 흡입, 지점별로 3번 반복 측정하였고, voltage값은 기본값으로 측정하였다.

3. 미세먼지 정량적 농도 및 SEM 분석

3.1 미세먼지 정량적 농도 분석

신림역과 사당역에서 각 역사별 외부 1지점, 대합실 1지점, 승강장 1지점을 대상으로  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 24시간 샘플링을 수행하였으며, 그 농도 분석결과와 분율을 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. 2호선 신림역의 경우, 평균농도가 외부에서  $\text{PM}_{10}$  47.82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  35.55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 대합실은  $\text{PM}_{10}$ 이 113.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 는 73.60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 승강장의 경우는  $\text{PM}_{10}$ 이 155.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 는 100.22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었으며, 가장 높은 농도를 보인 곳은 승강장이며, 대합실, 외부 순인 것으로 확인되었다. 1차와 2차 측정 모두, 대합실과 승강장에서  $\text{PM}_{10}$  농도는 모두 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상으로 확인되었으며,  $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우, 2차 측정 시 승강장에서 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 농도를 보이는 것으로 나타났다.

이는 기존 년도별 신림역에서 측정된 2017년 데이터(100.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )와 비교 시, 대합실의 경우 13.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  높은 농도인 수준이다. 또한 비록 2번의 측정결과에 대한 분석결과이나, 승강장에서의 평균농도가 국가 실내공기질 기준인

Table 1 Concentration of PM( $\text{PM}_{10}$ & $\text{PM}_{2.5}$ ) in Sinrim and Sadang subway station

Number	Subway station	Measured position	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$		
			$\mu\text{g}/\text{m}^3$		%		
First	No. 2	Sin-rim	Outside	49.48	37.01	74.8	
			Waiting room	109.36	70.69	64.6	
			Platform	143.46	92.32	64.3	
Second		Sin-rim	Sin-rim	Outside	46.16	34.10	73.9
				Waiting room	117.68	76.51	65.0
				Platform	167.58	116.43	69.5
Avg.		Sin-rim	Sin-rim	Outside	47.82	35.55	74.3
				Waiting room	113.52	73.60	64.8
				Platform	155.52	100.22	64.4
First	No. 4	Sa-dang	Outside	46.57	34.93	75.0	
			Waiting room	108.95	72.77	66.8	
			Platform	134.31	89.40	66.6	
Second		Sa-dang	Sa-dang	Outside	45.74	30.77	67.3
				Waiting room	103.54	68.20	65.9
				Platform	117.68	71.94	61.1
Avg.		Sa-dang	Sa-dang	Outside	46.16	32.85	71.2
				Waiting room	106.25	70.48	66.3
				Platform	126.00	80.67	64.0

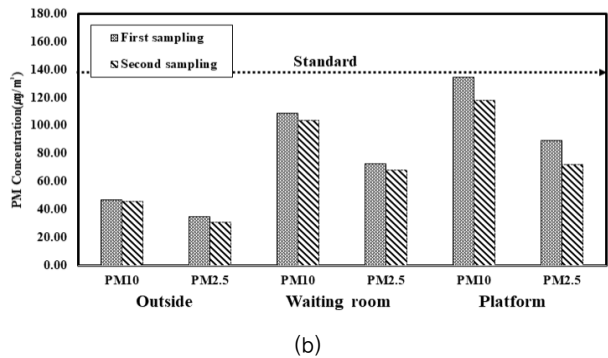
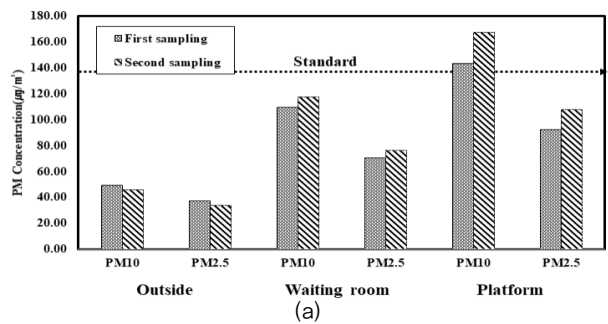


Fig. 3 (a) Results of concentration for PM( $\text{PM}_{10}$  &  $\text{PM}_{2.5}$ ) in Sin-rim (b) Sa-dang subway station

150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하(서울시 기준 : 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하)를 초과하는 결과를 보여, 미세먼지 저감을 위한 제어설비 또는 환기시설에 대한 정비 및 교체가 필요할 것으로 판단되었다.

4호선 사당역의 경우, 평균농도가 외부에서  $\text{PM}_{10}$  46.16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  32.85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 대합실은  $\text{PM}_{10}$ 이 106.25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 는 70.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 승강장의 경우는  $\text{PM}_{10}$ 이 126.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 는 80.67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었으며, 신림역과 마찬가지로 가장 높은 농도를 보인 곳은 승강장이며, 대합실, 외부 순

인 것으로 확인되었다. 대합실과 승강장에서의 PM<sub>10</sub> 농도는 모두 100 µg/m<sup>3</sup> 이상으로 확인되었으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우는 100 µg/m<sup>3</sup> 이하 농도 분포를 보이는 것으로 분석되었다. 2013년부터 2017년까지 사당역에서 측정된 기존 데이터와 비교분석한 결과, 년도별로 7.3~18.8 µg/m<sup>3</sup> 수준으로 초과된 농도 분포를 나타내었으며, 신림역과 마찬가지로 미세먼지 감소를 위한 집진시설 등이 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

위 결과를 종합적으로 분석하기 위해 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 분율을 분석한 결과, 두 역사 모두 내부(대합실, 승강장)에서의 분율 대비, 외부에서의 그 분율이 다소 높은 비율로 나타났으며, 이는 지하철 운행 등에 따라 터널 등에서 마모 등으로 발생하는 Fe 성분 등의 조대입자가 일반 외기에 비해 다소 증가함으로써, 상대적으로 입자가 큰 미세먼지 농도가 평균적으로 높아진데 기인하는 결과로 사료된다.

### 3.2 미세먼지 개수농도 분석

입경분포에 따른 개수농도를 측정 분석한 결과는 아래 그림에 나타내었으며, 측정 지점에서 측정된 평균 개수농도를 Table 2에 나타내었다. 전체 지점별 총 개수농도의 평균값은 약 88.72개/cm<sup>3</sup>으로 나타났으며, 가장 높은 개수농도가 나타난 지점은 승강장에서 1.4~1.6 µm 범위에서 12개/cm<sup>3</sup>로 나타났고, 가장 낮은 개수농도를 나타난 지점은 외부(외기) > 대합실 순으로 나타났다. 대체적으로 외기, 승강장과 대합실 모두 0.74~2.20 µm 사이즈에서 가장 높은 개수농도가 나타났다. 특히 외기의 평균 개수농도가 약 32.2개/cm<sup>3</sup>에 비해 지하 승강장은 평균 115.8개/cm<sup>3</sup>로 약 3배 이상 개수차이가 있는 것으로 평가되었다.

PM<sub>1</sub>(0.1~1 µm), PM<sub>2.5</sub>(1~2.5 µm), PM<sub>10</sub>(2.5~10 µm)로 나눈 후, 입경분포를 합산하여 그 비율을 분석하고자 하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 Table 3에 나타내었다. 사당역 외부에서 측정된 미세먼지 크기별 비율을 분석한 결과, PM<sub>1</sub> 27.9%, PM<sub>2.5</sub> 49.6%, PM<sub>10</sub> 22.4%, 대합실의 경우, PM<sub>1</sub>의 비율이 31.5%, PM<sub>2.5</sub> 44.9%, PM<sub>10</sub> 23.7%로 나타났고, 승강장의 경우, PM<sub>1</sub>의 비율이 24.0%, PM<sub>2.5</sub> 53.2%, PM<sub>10</sub> 22.8%로 분석되었다. 대합실에 비해 승강장에서 PM<sub>2.5</sub> 이하의 비율이 다소 높게 평가되었으며, 이러한 이유는 승강장 내부에 있는 터널 등으로부터 지하철로 인해 발생하는 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub> 이하)와 연결된 오염소스가 존재하는 것으로 판단되며, 기계식 환기설비 등에 의해 지하내부로 미세먼지 제어가 이루어지기 때문에, 미세먼지 제어가 완벽히 되지 않았을 경우에는 초미세먼지 농도가 높아 질 수 있는 원인이 된 것으로 판단된다.

Table 2 Particle counter of PM in Sa-dang subway station

Size range (µm)	Line 4			Line 2		Avg.
	Outside	Waiting room	Platform 1	Platform 2	Platform 3	
0.10~0.12	0.009	0.012	0.144	0.164	0.176	0.101
0.12~0.14	0.009	0.031	0.151	0.162	0.156	0.102
0.14~0.16	0.010	0.041	0.125	0.139	0.178	0.099
0.16~0.18	0.010	0.079	0.135	0.102	0.141	0.093
0.18~0.22	0.013	0.082	0.166	0.241	0.255	0.151
0.22~0.25	0.015	0.103	0.213	0.215	0.295	0.168
0.25~0.29	0.039	0.092	0.242	0.299	0.391	0.213
0.29~0.34	0.123	0.273	0.372	0.451	0.499	0.344
0.34~0.40	0.155	0.561	0.649	0.689	0.663	0.543
0.40~0.46	0.299	0.669	0.914	0.877	1.129	0.778
0.46~0.54	0.543	1.412	1.673	1.613	1.753	1.399
0.54~0.63	0.908	2.005	2.522	2.712	2.688	2.167
0.63~0.74	1.521	3.255	4.729	4.611	4.904	3.804
0.74~0.86	2.235	5.023	6.511	9.509	7.73	6.202
0.86~1.00	3.112	6.526	8.518	9.711	9.555	7.484
1.00~1.20	3.777	7.438	11.777	11.967	11.23	9.238
1.20~1.40	3.102	6.342	11.379	11.293	11.278	8.679
1.40~1.60	2.772	5.041	11.256	12.051	12.128	8.650
1.60~1.80	2.342	3.328	9.206	9.407	9.239	6.704
1.80~2.20	2.119	3.923	9.057	9.155	8.123	6.475
2.20~2.50	1.872	2.688	7.253	7.93	8.203	5.589
2.50~2.90	1.762	2.781	6.821	6.438	7.55	5.070
2.90~3.40	1.442	2.387	4.328	4.712	5.52	3.678
3.40~4.00	1.082	2.272	3.882	3.12	3.23	2.717
4.00~4.60	0.782	1.923	2.951	2.312	2.55	2.104
4.60~5.40	0.632	1.779	2.631	2.51	2.21	1.952
5.40~6.30	0.551	1.655	1.723	1.79	1.621	1.468
6.30~7.40	0.421	1.041	1.366	1.201	1.391	1.084
7.40~8.60	0.339	0.832	1.005	1.203	1.211	0.918
8.60~10.0	0.214	0.492	0.931	1.082	0.995	0.743
Total	32.21	64.09	112.63	117.67	116.99	88.72

Table 3 Distribution of particle counter for particle size

Size range (µm)	Particle counter for particle size distribution(number/cm <sup>3</sup> )					Avg.
	Outside	Waiting room	Platform 1	Platform 2	Platform 3	
PM <sub>1</sub> (0.1~1)	9.00	20.16	27.06	31.50	30.51	27.31
PM <sub>2.5</sub> (1~2.5)	15.98	28.76	59.93	61.80	60.20	52.67
PM <sub>10</sub> (2.5~10)	7.23	15.16	25.64	24.37	26.28	22.86
Total	32.21	64.09	112.63	117.67	116.99	102.84

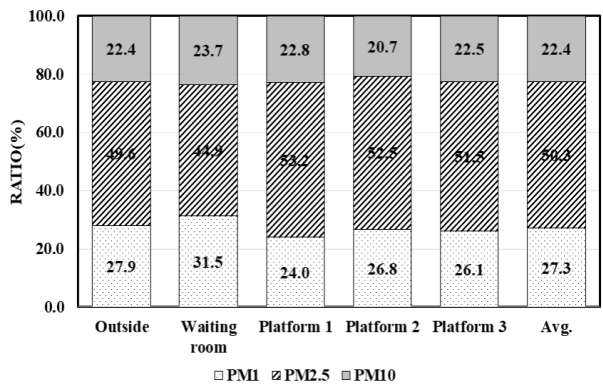


Fig. 4 Ratio of particle counter by particle size distribution

### 3.3 SEM 분석

신림역에서 샘플링한 시료를 활용하여 한국산업기술시험원에서 보유하고 있는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, MIRA 3xMU, TESCAN Inc.)으로 미세먼지의 표면을 분석하여 입자 크기와 구조를 분석하였으며, 그 결과를 지하철 대합실과 승강장을 각각 비교해 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 기존문헌을 분석해보면, 일반 터널에서 발생하는 미세먼지 등은 입자와 입자가 응집된 조대입자들이 상당수 포함되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 대기 중 수분과 차량에서 배출되는 유분 등의 성분이 응집되어 조대한 입자들이 많이 발견되기 때문이다. 대합실에서 샘플링된 시료를 볼 때, 10 µm 이상의 조대한 사이즈와 2.5 µm 이하의 미세 사이즈를 갖고 있는 미세먼지가 동시에 관찰되는 특징을 보였으며, 승강장 내 샘플링된 시료에 대한 SEM 사진을 분석한 결과, 지하철이 운행하는 곳과 가까운 영향으로 인해, 열차의 운행으로 인해 열차와 레일 사이의 마찰 등에 의한 미세한 무기성 입자(Fe 등)가 많이 포함된 형태의 구조가 나타났다.

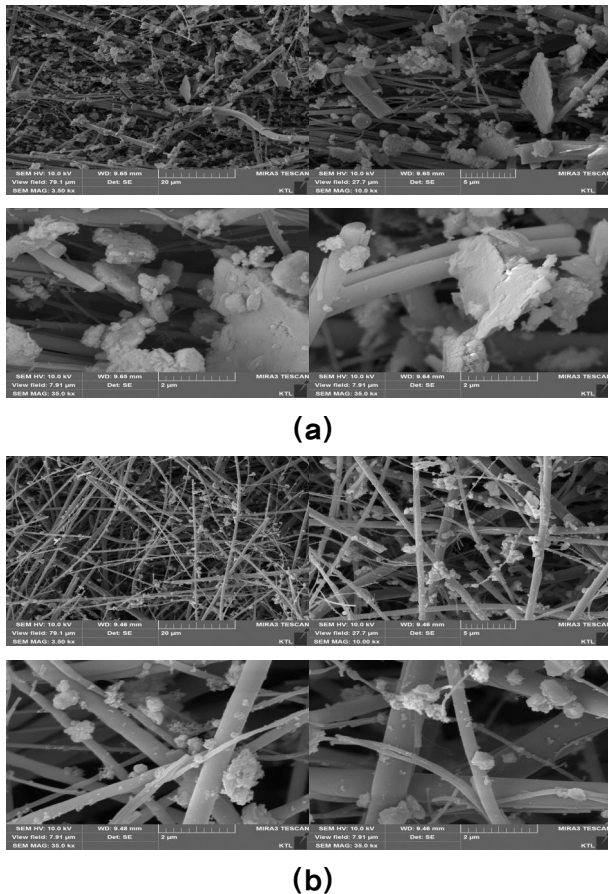


Fig. 5 (a) SEM picture for PM in waiting room (b) platform in Sin-rim subway station

### 4. 양방향 전기집진기 성능평가

#### 4.1 성능평가 시스템 구성

서울시 지하철 본선터널 내 열차풍에 의해 흩어지는 미세먼지 집진을 위한 양방향전기집진기를 제작하였으며, 집진기의 성능평가를 위해 Fig. 6과 같은 모의장치를 구성하였다. (주)리트코 시험동에서 시험을 수행하였고, 전체적인 모의장치 구성은 입자발생장치와 풍동장치로 구성되어 있으며, 세부구성으로는 풍동장치는 내부 유속을 조절할 수 있는 팬, 미세먼지 발생장치, 성능평가 대상인 양방향 전기집진장치, 입자의 농도를 측정할 수 있는 샘플링 관, 차압계, 오존측정기 등으로 구성되어 있다. 미세먼지 발생을 위해서 디젤발전기를 이용해 총미세먼지 농도(최대 800 µg/m³)를 정량적으로 투입하였고, 미세먼지농도를 실시간으로 측정할 수 있는 PDR-1500 장비를 활용하여 순간효율을 측정하고(초당데이터생성)할 수 있도록 집진장치의 성능평가 시스템을 구성하였다.

인가전압에 따른 효율 시험은 대전부 SPIKE판에 대전부용 POWER PACK으로 각각 7 kV, 10 kV, 12 kV DC를 공급하여 대전부를 통과하는 미세먼지에 (-)전기를 전하하고, 다른 집진부용 POWER PACK으로 집진부에 유도전압, 5 kV DC를 공급하여 (-)전기를 띤 미세먼지를 (+)집진판에 포집하는 방식으로 집진효율을 측정하였다. 또한 위 조건에서 집진셀의 재질(알루미늄, Stainless Steel)과 코팅유무(카본코팅)를 기본으로 하고 장치의 집진효율, 오존발생량에 대한 전반적인 성능평가 테스트를 수행하였다.

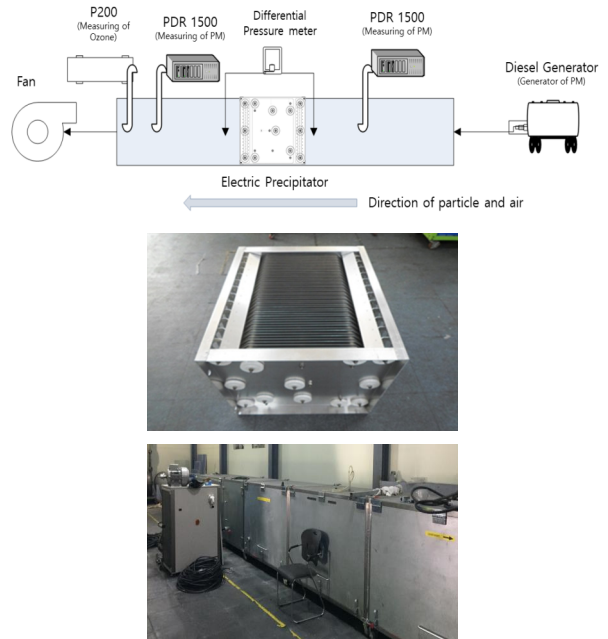


Fig. 6 Picture of Experimental equipment(Bi-directional Electrostatic Precipitator(B-ESP))

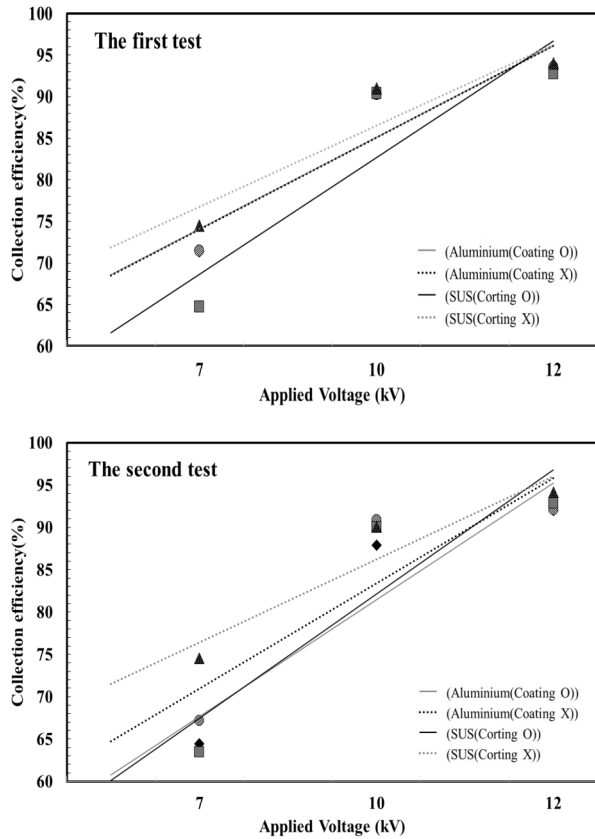


Fig. 7 Efficiency of PM collection with respect to the applied voltage by materials of collecting cell and carbon coating

#### 4.2 양방향 전기집진기 성능평가 결과

대전부에 알루미늄과 SUS 재질을 각각 사용한 집진셀에 카본코팅 유무에 따른 미세먼지 집진효율을 분석하였으며, 이때 인가전압은 7~12 kV로 변화시키고 미세먼지는 디젤발전기를 이용해 분사시켜 2회에 걸쳐 집진효율 테스트를 진행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 분석 결과, 인가전압이 7 kV일 경우, 알루미늄 재질에서 카본코팅 유무에 따른 집진효율은 코팅 시 64.46~71.43%, 비코팅시 67.19~71.46%의 효율을 보이는 것으로 나타났으며, SUS재질에서 카본코팅 유무에 따른 집진효율은 코팅 시 63.46~64.75%, 비코팅시 평균 74.51%로 나타났다.

인가전압이 10 kV에서는 알루미늄 재질에서 코팅시 87.89~90.36%, 비코팅시 90.30~90.87%, SUS재질에서 코팅시 90.05~90.45%, 비코팅시 90.06~90.99%로 나타났다. 인가전압 12 kV에서는 알루미늄 재질에서 코팅시 92.03~93.46%, 비 코팅시 92.09~93.56%, SUS재질에서는 코팅시 92.79~92.84%, 비 코팅시 93.99~94.12%로 분석되었다. 종합적으로 대전부 재질과 집진셀의 코팅 유무 따른 양방향전기집진기의 집진효율을 평가한 결과, 인가전압이 10 kV 이상일 때, 집진셀 재질에 관계없이 약 90%를 상회하는 효율을 보이는

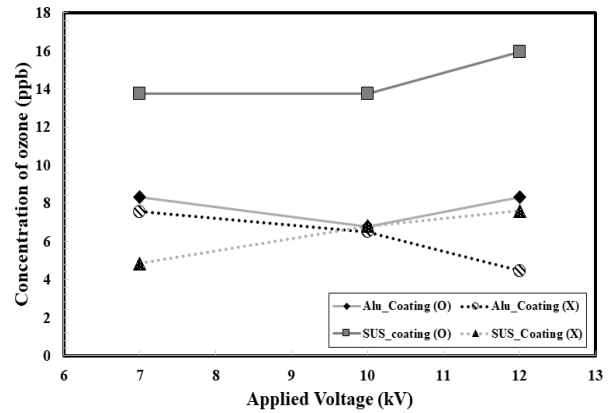


Fig. 8 Concentration of Ozone with respect to the applied voltage by materials of collecting cell and carbon coating

것으로 분석되었으며, 재질 종류와 카본 코팅에 따라서는 집진효율에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 평가되었다.

일반적으로 전기집진기의 경우, 소재의 종류에 따라 대전부 셀을 제작할 경우, 약 12 kV 이상으로 전기를 인가할 경우, 약 60 ppb 수준의 오존이 발생하는 현상이 나타나게 되며, 이에 본 연구에서는 고전압 인가에 따른 오존농도 발생 유무에 대한 평가를 진행하였다. 실험조건은 풍동 내 풍속은 1.58 m/s, 집진기 통과풍속을 5 m/s로 고정한 상태에서 알루미늄과 SUS 대전부 별 탄소 코팅 유무와 인가전압차이에 따른 오존농도 분석을 수행하였으며, 2회에 걸친 평균농도에 대한 결과를 Fig. 8에 도식화하여 나타내었다.

분석 결과, 코팅에 따른 오존발생량은 탄소 코팅 유무에 크게 관계없이 전반적으로 발생농도가 최소 1.9~16.1 ppb 수준으로 매우 낮은 수준인 것으로 평가되었으며, 대전부가 SUS일 경우, 알루미늄 재질에 비해 오존농도가 더 높은 것으로 평가되었다. 종합적으로는 카본 코팅과 재질변화에 따른 오존발생 농도차이는 크지 않은 경향을 나타내었으며, 실제 본 집진기를 설치할 경우, 장치에서 발생하는 오존발생으로 인한 지하역사 내 실내공기질 오존농도 변화에는 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

#### 5. 결 론

서울시 지하철 역 2곳을 대상으로 정량적인 미세먼지 농도 분포특성과 양방향전기집진기의 성능평가를 수행한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 서울시 지하철역 2곳(신림, 사당역)의 미세먼지 정량적 농도를 분석한 결과, 두 역사 모두 내부(대합실, 승강장)에서의 분율 대비, 외부에서의 그 분율이 다소 높은 비율로 나타났으며, 미세먼지 감소를 위한 저감시설 등이 고려되어야 할 것으로 판단되었다.
- 2) 사당역 내 미세먼지 개수농도를 분석한 결과, 대합실에

비해 승강장에서 PM<sub>2.5</sub> 이하의 비율이 다소 높게 평가 되었으며, 이러한 이유는 승강장 내부에 터널 등 열차로 인해 발생하는 초미세먼지와 연결된 오염소스에 기인하는 것으로 판단되었다.

- 3) 대전부 재질변화와 코팅유무에 따른 미세먼지 집진효율 실험 결과, 대전부 인가전압이 최소 10 kV 이상을 유지 시, 90% 이상의 집진효율을 보이는 것으로 분석 되었으며, 재질 종류와 카본 코팅에 따라서 집진효율에 미치는 영향이 작았고, 향후 본 개발제품을 서울시 지하철 역사에 적용할 경우, 인가전압이 고려된 전력소비량에 대한 시험운전이 선행적으로 필요할 것으로 평가 되었다.
- 4) 미세먼지 집진에 따른 2차 오존발생농도를 분석한 결과, 재질과 코팅유무에 따른 농도 차이는 크지 않아, 실제 적용 시, 오존발생에 따른 지하역사 내 실내공기질에 미치는 영향은 미비할 것으로 평가되었다.

## 후 기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(과제번호 : FD 170004) 2017년 미세먼지 저감기술 개발지원사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. 이에 감사드립니다.

## References

- (1) Yim, B. B., Lee, K. S., Kim, J. I., Hong, H. S., Kim, J. W., Jo, K. H., Jung, E. G., Kim I. K., and An, Y. S., 2014, "Evaluation on Indoor Air Quality by Statistical Analysis of indoor Air Pollutants Concentration in a Seoul Metropolitan Underground Railway Station," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 3, pp. 233-244.
- (2) Lee, T. J., Lim, H. J., Kim, S. D., Park, D. S., and 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*, Vol. 31, No. 2, pp. 164-172.
- (3) Do, H. S., Song, H. B., Shin, D. C., Kwak, J. H., Lee M. S., Yoon, H. S., Kang, H. J., and Phee, Y. G., 2009, "Characteristic Assessment of Heavy Metals in Dusts Collected by the Air Filtration System at Subway Stations in Daegu, Korea," *Journal of Korea Society of Environment Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 42-50.
- (4) Lee, E. S., Lee, T. J., Park, M. B., Park, D. S., and 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*, Vol. 33, No. 6, pp. 593-604.
- (5) Seoul Metro Homepage, 2019, <http://www.seoulmetro.co.kr>
- (6) Park, S. B. S., Lee, T. J., Ko, H. K., Bae, S. J., Kim, S. D., Park, D. S., Sohn, J. R., and Kim, D. S., 2013, "Identification of PM<sub>10</sub> chemical characteristics and sources and estimation of their contributions in a Seoul metropolitan subway station," *Journal of Korea Society of Environment Engineering*, Vol. 29 No. 1, pp. 74-85.
- (7) Lee, T. J., Jeon, J. S., Kim, S. D., and 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*, Vol. 26, No. 5, pp. 543-553.
- (8) Park, D. U., and 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," *Environment International*, Vol. 34, No. 5, pp. 629-634.
- (9) Kim, K. Y., Kim, Y.S. Roh, Y. M., Lee, C. M., and 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*, Vol. 154, No. 1-3, pp. 440-443.
- (10) Son, Y. S., Salama, A., Jeong, H. S., Kim, S., Jeong, J. H., Lee, J., Sunwoo, Y. and 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*, Vol. 7, No. 1, pp. 38-47.
- (11) Cheng, Y. H., Lin, Y. L. and Liu, C. C., 2008, "Levels of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Taipei rapid transit system," *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 31, pp. 7242-7249.
- (12) Kam, W., Cheung, K., Daher, N. and Sioutas, C., 2011, "Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro," *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 8, pp. 1506-1516.
- (13) Kyu, H. K., Song, J. H., Kim, S. Y., Kim, H. M., and Kwon, S. B., 2016, "Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 17-25.
- (14) Lee, J. Y., Jang, K. J. and Han, H., 2012, "Study of pollution concentration source and its change pattern in underground station," *Conference of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, pp. 547-550.
- (15) Son, B. S., Jang, B. K., Park, J. A. and Kim, Y. S., 2000, "Indoor and outdoor NO<sub>2</sub> concentrations at subway station and personal NO<sub>2</sub> exposure of subway station workers," *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 134-141.