

## 서울시 지하철 2호선의 가을철 객실 PM<sub>2.5</sub> 농도의 특성

신혜린\* · 정현희\* · 이기영\*\*\*†

\*서울대학교 보건대학원 환경보건학과, \*\*서울대학교 보건환경연구소

### Characteristics of In-cabin PM<sub>2.5</sub> Concentration in Seoul Metro Line Number 2 in Autumn

Hyerin Shin, Hyunhee Jung, and Kiyoung Lee

\*Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University

\*\*Institute of Health and Environment, Seoul National University

#### ABSTRACT

**Objectives:** Subway is one of the most common transportation modes in Seoul, Korea. The objectives of this study were to determine characteristics of in-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration in Seoul Metro Line Number 2 and to identify factors of the PM<sub>2.5</sub> concentration.

**Methods:** In-cabin PM<sub>2.5</sub> concentrations in Seoul Metro Line Number 2 were measured using real-time monitors and the factors affecting PM<sub>2.5</sub> concentration in cabin were observed. Linear regression analysis of in-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration and indoor/outdoor (I/O) ratio were performed.

**Results:** In-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration was associated with the in-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration in previous station. In-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration was correlated with ambient PM<sub>2.5</sub> concentration and associated with underground station with control of the in-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration in previous station. I/O ratio increased as the number of passengers increased and when passing through the underground station with control of I/O ratio in previous station.

**Conclusion:** In-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration was affected by ambient PM<sub>2.5</sub> concentration. Therefore, management of in-cabin PM<sub>2.5</sub> concentrations should be based on outdoor air quality.

**Keywords:** Seoul metro, subway cabin, PM<sub>2.5</sub>, I/O ratio, indoor air

## I. 서 론

지하철은 이용의 편리성과 정시성으로 인해 서울 시민들이 가장 많이 이용하는 대중 교통수단이다. 2016년 서울연구원의 보고에 따르면 대중교통 중 지하철 이용비율은 59.3%였으며 이는 40.7%인 버스 이용비율보다 높은 수치로 지하철의 높은 수송부담률을 보여준다.<sup>1)</sup> 또한 2017년 서울시에 따르면 서울 지하철 2호선은 운송실적이 가장 높았으며, 서울지

하철 중 가장 혼잡하였다.<sup>2)</sup> 2014년 국토교통부의 교통수단이용실태조사에 따르면 통행당 이동수단 평균 소요 시간은 지하철 44.5분, 도보 14.0분, 자가용승용차 28.0분, 시내버스 31.9분으로 조사되어 사람들이 비교적 긴 시간 동안 지하철 안에 머무르는 것으로 나타났으며<sup>3)</sup> 이에 따라 지하철의 실내 공기질에 대한 관심이 지속적으로 증대되고 있다.

서울시의 지하철 역은 대부분 지하에 위치하고 있으며 이 때문에 자연환기가 어렵고 많은 이용객이

†Corresponding author: Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea, Tel: +82-880-2735, E-mail: cleanair@snu.ac.kr  
Received: 29March, 2019 Revised: 09, April, 2019 Accepted: 20, April, 2019

물리며 공기질이 악화되는 특성을 가지고 있다. 이에 따라 객실 내에서 발생하거나 외부에서 유입된 입자상 물질은 내부에 오랜 시간 머물며 이용객들로 하여금 높은 농도의 PM<sub>2.5</sub> 노출을 유발할 수 있다. PM<sub>2.5</sub>의 흡입은 인체에 각종 부정적인 건강영향을 미치며, PM<sub>2.5</sub> 농도가 10 µg/m<sup>3</sup> 증가할 경우 전체 연령의 호흡기계 관련 질환 입원 발생위험이 1.05% 증가하며, 65세 이상의 노령인구의 경우 입원 발생 위험이 8.84% 증가한다는 보고가 있다.<sup>4)</sup>

국내 지하철에서 미세먼지에 관한 최근 연구로는 5호선에서 8호선까지 지하철 승무원석에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도 실시간 모니터링<sup>5)</sup>, 4개 노선에서의 객실 내 PM<sub>10</sub> 농도 측정<sup>6)</sup>, 서울시 지하철 승강장과 터널 내의 PM<sub>2.5</sub> 농도 특성 파악<sup>7)</sup>, 서울시 지하철 본선의 전 구간 지하 터널에서 PM<sub>2.5</sub> 농도 측정<sup>8)</sup> 등이 있다. 지하 터널에서 발생한 입자가 열차의 출입문과 통로 등의 틈 사이로 유입되어 열차가 지상 구간을 지날 때 보다 지하 구간을 지날 때 객실 내 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>) 농도가 높았다.<sup>9)</sup> 객실 내에서의 PM<sub>2.5</sub> 노출 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 국내 지하철 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에 대한 연구 결과에 따르면 이용 승객 수에 따른 오염, 출입문의 개폐 등이 객차 내 농도 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.<sup>10)</sup>

본 연구는 서울지하철 2호선을 대상으로 지하철 객실 내의 PM<sub>2.5</sub> 농도변화의 특성을 파악하고 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에 영향을 미치는 요인을 확인하여 지하철 객실 내 공기질 관리방안 마련의 기초자료로 활용하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

2018년 10월부터 11월 사이에 지선을 제외한 서울시 지하철 2호선을 대상으로 총 10차례 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도와 온도 및 상대습도를 조사하였다. 두 명의 측정자가 5일에 걸쳐 한 역에서 출발하는 2호선 외선순환, 내선순환 열차에 각각 동시에 탑승하여 측정 및 관찰을 진행하였다. 측정시간은 오후 4시부터 6시 사이로 2호선 내 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 온습도 측정과 함께 출입문이 여닫히는 시간과 객실 내 재실자 수를 관찰하였다. 5번 객실 내 출입문 5-2와 5-3 사이의 한 곳을 측정 장소로 선정하였으며 열차가 출발

하기 전 출입문이 닫힌 후, 출입문 5-2와 5-3 사이의 사람을 세어 4를 곱해 객실 내 전체 재실자 수로 계산하였다. 또한 객실 내 PM<sub>2.5</sub>의 농도에 영향을 미칠 수 있는 요소인 스크린 도어를 통한 역과 터널의 분리 여부, 역의 지상 또는 지하 여부를 관찰하였다. 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 줄 것으로 판단되어 외기 농도를 변수로 포함하였다. 외기 농도는 한국환경공단이 운영하는 전국 실시간 대기오염도 공개 홈페이지인 에어코리아(www.airkorea.or.kr)의 오후 4시에서 6시 사이의 서울시 25개 구의 PM<sub>2.5</sub> 평균농도를 사용하였다.

측정기기로는 광산란식 직독 측정 기기인 Sidepak (Model AM510, TSI Inc., USA)를 사용하여 PM<sub>2.5</sub>의 농도를 측정하였고 온습도는 HOBO Temperature/Relative Humidity Data logger (Onset Computer Corp., USA)를 사용하여 측정하였다. 측정간격은 순간적인 농도변화를 파악하기 위해 1초 단위로 측정하였으며 기기 유량은 1.7 L/min으로 유지하였고, 데이터의 신뢰성을 위해 측정 전 모든 기기에 보정을 시행하였다. 측정 위치는 측정자의 호흡기 위치로 설정하였다.

측정 후 수집된 PM<sub>2.5</sub>의 실시간 데이터는 Trakpro software (TrakPro Version 4.20, TSI Inc.)를 사용하여 추출하였으며 온습도 데이터는 HOBOware (Onset Computer Corp., USA)를 사용하여 추출하였다. Sidepak으로 수집한 PM<sub>2.5</sub> 농도는 광산란식 측정 방법에 의해 수집된 2차 중량측정 농도이므로 기기보정계수 0.295를 사용하여 보정하였으며 단위는 µg/m<sup>3</sup>로 나타났다.<sup>12)</sup>

구간 별 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 역에 도착하여 열차 문이 닫힌 직후부터 다음 역에 도착하여 열리기 직전까지의 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 산술평균을 사용하였다. 수집된 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 독립변수로, 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도, 이전 구간에서의 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도, 관찰한 객실 내 재실자 수, 스크린도어를 통한 플랫폼과 터널의 분리여부, 역의 지상 또는 지하 여부를 종속변수로 두고 선형회귀분석을 시행하였다. 객실 내 온도와 상대습도의 경우 그 변화가 크지 않아 선형회귀분석에서 제외하였다.

객실 내 PM<sub>2.5</sub> 발생원의 영향을 확인하기 위해 I/O ratio를 구하고 이에 영향을 미칠 수 있는 요인들과 회귀분석을 시행하였다. I/O ratio는 앞서 구한 객

실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 해당 측정 일자의 외기 농도로 나누어 나타내었다. I/O ratio를 독립변수로, 이전 구간에서의 I/O ratio, 관찰한 객실 내 재실자 수, 스크린도어를 통한 플랫폼과 터널의 분리여부, 역의 지상 또는 지하 여부를 종속변수로 두고 선형회귀분석을 시행하였다. 모든 통계분석은 R version 3.4.4 (R development)을 사용하여 실시하였다. 측정 일자 별 역 구간의 I/O ratio 변화는 SigmaPlot 10.0 (Systat Software, Inc., USA)를 사용하여 그래프로 나타내었다.

### III. 결 과

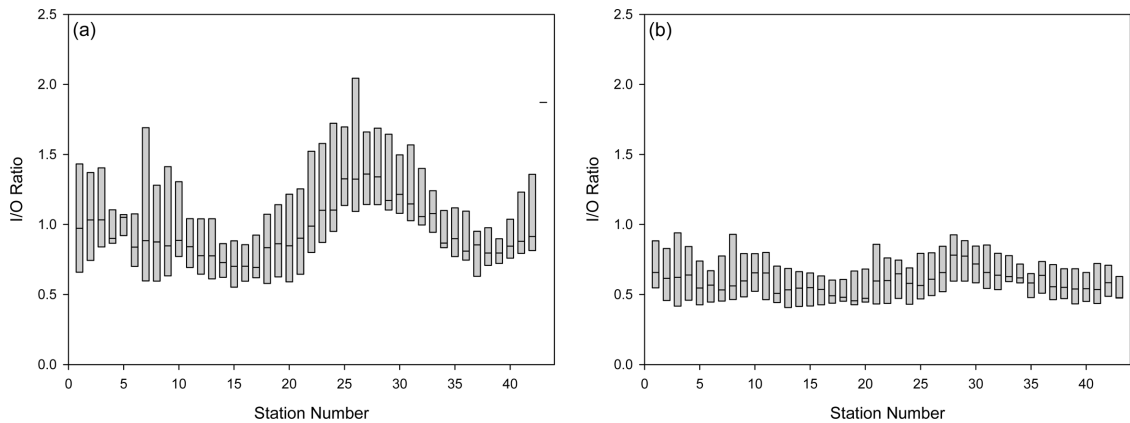
각 측정 별 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도, 평균 승객의 수, 객실 내 온도 및 상대습도, 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도의 평균과 표준편차를 Table 1에 나타내었다. 객실 내 평균 농도는 최저 7.5±3.4 µg/m<sup>3</sup>, 최고 66.9±10.8 µg/m<sup>3</sup>의 값을 보였다. 이 날의 서울시 25개구 평균 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도는 각각 8.9±3.5, 93.4±16.5 µg/m<sup>3</sup>이었다. 객실 내부의 온도와 상대습도는 객실 내 에어컨에 의해 조절되고 있었으며 평균 온도는 최저 21.5±1.0°C, 최고 28.6±2.0°C이었으며, 평균 상대습도의 최저는 32.7±2.3%, 최고는 52.3±6.0%이었다. 객실 내 평균 승객의 수는 최저 88±20명, 최대는 148±59명이었으며 역 구간에 따라 큰 차이를 보였다.

객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 끼치는 요인을 파악하기 위해 회귀분석을 시행하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도, 이전 구간에서의 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도, 역의 지상 또는 지하 여부가 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 외기 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높을수록 객실 내 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높아지는 결과를 보였으며(p<0.001), 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 지하에 위치한 역을 지날 때 지상에 위치한 역을 지날 때 보다 높은 수준의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 보였다(p=0.014).

I/O ratio와 변수들에 대한 회귀분석을 시행한 결과, I/O ratio는 이전 구간에서의 I/O ratio, 역의 지상 또는 지하 여부, 객실 내 승객의 수에 영향을 받는 것으로 나타났다. 지하에 위치한 역을 지날 때가 지상에 위치한 역을 지날 때 보다 높은 I/O ratio를 가졌으며(p<0.001), 객실 내 승객의 수가 많을수록 I/O ratio가 커지는 결과를 보였다(p<0.05). 각 일자 별 측정 데이터를 외기 농도로 나누어 I/O ratio로 나타내었고 이를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 Fig. 1의 (a)의 경우 외기 농도가 20 µg/m<sup>3</sup> 이하일 때 객실의 I/O ratio를 나타낸 것이며, I/O ratio가 1을 기점으로 크게 변동하는 경향을 보였다. (b)의 경우 외기 농도가 20 µg/m<sup>3</sup> 이상일 때의 객실의 I/O ratio를 나타낸 것이며, 전 역 구간에 상관없이 대부분 1 이하인 경향을 보였다.

**Table 1.** Descriptive statistics for Average PM<sub>2.5</sub> concentration, average number of passengers, temperature, relative humidity in cabin, and outdoor PM<sub>2.5</sub> concentration

Date	Circle	Average PM <sub>2.5</sub> in cabin (mg/m <sup>3</sup> )	Average number of passengers (N)	Temperature in cabin (°C)	Relative humidity in cabin (%)	Outdoor PM <sub>2.5</sub> concentration (mg/m <sup>3</sup> )
10/09	Inner	8.8±4.0	127±36	25.9±0.6	47.4±2.1	8.9±3.5
	Outer	7.5±3.4	120±23	28.2±1.1	44.9±2.3	
10/23	Inner	16.7±5.5	135±30	28.6±2.0	52.3±6.0	23.0±6.6
	Outer	10.9±3.7	128±38	26.6±1.4	50.4±4.0	
10/30	Inner	10.2±5.7	148±59	21.5±1.0	41.2±3.8	10.3±3.0
	Outer	9.4±4.5	88±20	25.7±1.8	32.7±2.3	
11/06	Inner	47.4±8.9	103±29	21.6±0.6	50.2±3.2	93.4±16.5
	Outer	66.9±10.8	133±30	25.2±1.0	47.4±2.5	
11/13	Inner	27.0±11.3	88±26	26.9±1.9	34.2±3.2	17.2±3.0
	Outer	14.1±5.5	132±47	24.3±1.8	41.9±3.8	



**Fig. 1.** Profiles of I/O ratio in cabin for 43 stations of Seoul metro line number 2. (a) I/O ratio in cabin with outdoor PM<sub>2.5</sub> concentration (<20 µg/m<sup>3</sup>) (b) I/O ratio in cabin with high outdoor PM<sub>2.5</sub> concentration (>20 µg/m<sup>3</sup>)

**Table 2.** Linear multivariate regression analysis of in-cabin PM<sub>2.5</sub> concentration

Variable	Estimate	Standard Error	p-value
Outdoor PM <sub>2.5</sub> concentration	0.045	0.010	<0.001 ***
The number of passenger	-0.006	0.003	0.056
In-cabin PM <sub>2.5</sub> concentration in previous section	0.897	0.021	<0.001 ***
Separation of platform and tunnel through screendoor	0.201	0.463	0.664
Whether station is ground or underground	0.851	0.344	0.014 *

#### IV. 고 찰

측정에 사용한 광산란식 직독식 기기인 Sidepak은 중량법과의 보정이 필요하다. 하지만 이 연구에서는 전원공급, 공기 흡인에 의한 소음 등의 제한 때문에 Sidepak만을 사용하여 측정을 시행하였다. Sidepak을 이용한 실내 PM<sub>2.5</sub> 관련 연구에서 보정계수로 0.295-0.550의 값을 사용함을 확인하였고<sup>12-15)</sup> 이 연구에서는 0.295의 값을 보정계수로 사용하였다. 따라서 이 연구의 결과에서 보여주는 농도가 정확한 수치가 아닐 수도 있다.

서울지하철 2호선의 객실 내 농도를 10회 측정한 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 측정 일자 별로 7.5±3.4 µg/m<sup>3</sup>에서 66.9±10.8 µg/m<sup>3</sup>으로 외기 농도에 따라 큰 편차를 보였다. 국외의 연구에서 측정된 지하철 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도로 헬싱키의 지하철 객실 내 7일간 매일 12시간씩 측정된 객실 내 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 21 µg/m<sup>3</sup> 이었다.<sup>16)</sup> 헬싱키의 경우 측정 일자 별 외기 농도의 차이가 크지 않아 7일의 결과에 큰 편차가 없었다. 뉴욕의 통근 수단에 따른 PM<sub>2.5</sub> 노출 연구

에서는 2일 간 측정된 지하철 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 39.36 µg/m<sup>3</sup>이었다.<sup>17)</sup> 이번 연구 결과 중 외기 농도가 93.4±16.5 µg/m<sup>3</sup>으로 가장 높았던 날을 제외하고 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 이 수치를 초과하는 날은 없었다.

지하철 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 이전 구간에서의 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 보정하여 분석한 결과 외기 농도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 외기의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높을수록 객실 내의 PM<sub>2.5</sub> 농도도 상승하는 결과를 보였는데 이를 통해 입자상 물질이 외부에서 유입됨에 따라 지하철 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 상승한 것임을 알 수 있다. 또한 열차가 지하에 위치한 역을 지날 때 지상에 위치한 역을 지날 때보다 객실 내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높았다. 타이베이 경우 지하와 지상 역을 지날 때의 PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도가 각각 28 (11-48) µg/m<sup>3</sup>, 19 (3-47) µg/m<sup>3</sup>이었으며, 지하 역 구간의 농도가 지상 구간 보다 높았으며, 외기의 영향이 큰 것으로 나타났다.<sup>18)</sup> 지하 공간은 그 특성 상 환기에 한계가 존재하며, 운행에 따라 미세먼지가 발생할 수 있다.<sup>19)</sup> 또한 지하공간에

서 미세먼지의 제거가 효과적으로 이루어지기 어렵기 때문에 지하역사 및 객실의 공기질 관리체계가 강화되어야 한다.

객실 내  $PM_{2.5}$  농도를 외기 농도와의 비율로 나타내어 I/O ratio로 나타내었을 때, I/O ratio는 뚜렷하게 두 가지 형태로 나뉘었다. 외기 농도가  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하 일 때 I/O ratio는 1을 기점으로 위아래로 크게 변동하였다. 반면에 외기 농도가  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 일 때 I/O ratio는 1보다 작았다. I/O ratio가 1을 초과하는 경우는 해당 측정 시간 동안 객실 내부에  $PM_{2.5}$  농도를 유의하게 상승시킬 발생원이 존재하거나, 발생한 미세먼지를 제거할 환기시스템이 작동하지 않음을 의미할 수 있다.

외기 농도가 높은 경우에 I/O ratio가 1보다 작은 것은 환기 시스템 가동을 통해 객실 내 공기질을 관리하지만 객실의 농도를 충분히 증가시킬 수 있는 수준은 아닌 것으로 보인다. 지하터널 내 PM의 상관성을 분석한 연구 결과, 터널 내  $PM_{2.5}$  농도는 외기 농도와 높은 상관성을 보이는 것으로 나타나,<sup>8)</sup> 외기 농도를 지하 터널 구간의 농도로 고려하였다. 특히 지하구간을 통과할 때 객실의 I/O ratio 대부분이 1을 초과하였는데, 객실 내의  $PM_{2.5}$ 가 지하터널에서의 발생에 기인한 것으로 추정된다. 승객이 많은 혼잡 시간대에 지하철 운행 편수가 증가하여 지하터널 내 먼지가 재비산하여 객실 내로 유입되었을 가능성이 있다.

이번 연구의 결과는 외선순환과 내선순환을 각각 5회 측정된 결과로 미세먼지의 농도를 일반화할 수 있을 만큼 충분한 측정이 되었다고 할 수 없다. 그러나 객실의  $PM_{2.5}$  농도의 관리에서 외기의 농도를 고려한 접근이 필요함을 보여준다. 특히 외기의 농도가 높은 날에는 객실의 미세먼지농도가 외기에 비해 낮게 유지되고 있음을 보여준다. 또 이 연구는 특정시간에 국한하여 측정하였다. 2호선 운행 편수는 시간당 11.2편이었으며, 측정이 이루어진 16시부터 18시의 지하철 운행 편수는 시간당 14.6편이었다.<sup>20)</sup> 따라서 이번 연구의 대상은 비교적 혼잡한 시간대였음을 알 수 있다.

## V. 결 론

지하철 객실 내  $PM_{2.5}$  농도는 외기  $PM_{2.5}$  농도, 이

전 구간에서의 객실 내  $PM_{2.5}$  농도, 역의 지상 또는 지하 여부에 유의한 상관관계를 보였다. 그러므로 객실 내  $PM_{2.5}$  관리를 위해서는 외기를 고려한 접근법이 필요하다. 특히 열차가 지하 터널 구간을 지날 때에는 공기정화시스템이 작동하도록 관리체계의 개선이 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자 지원사업(연구과제 NRF-2017R1A2B4 006468)의 일환으로 수행하여 작성된 논문입니다.

## References

1. Seoul Metropolitan Government. Traffic card data '16 Seoul public transportation status reduced by passengers for two consecutive years. Available: <https://opengov.seoul.go.kr/press/11070105> [accessed 31 December 2018].
2. Seoul Metropolitan Government. Seoul subway congestion statistics. Available: <http://data.seoul.go.kr/dataList/datasetView.do?infd=262&srvType=S&serviceKind=2&currentPageNo=1> [accessed 2 January 2019].
3. The Korea Transport Institute. Korea transport database. Available: <https://www.ktdb.go.kr/www/contents.do?key=291> [accessed 2 January 2019].
4. Kong S, Bae H, Hong S, Park H. A study on the health impact and management policy of  $PM_{2.5}$  in Korea (II), Korea Environment Institute; 2013.
5. Kwag H, Jin K, Kim W, Yang W, Choi S, Part D. Evaluation on air quality inside subway driver cabin by monitoring PM,  $CO_2$ , and CO levels. *Korean Journal of Environmental Health*. 2005; 31(5): 379-386.
6. Kim Y, Hong S, Jeon J. Investigation of indoor air quality of public transportation system in Seoul city. *Korean Journal of Environmental Health*. 1994; 3:28-38.
7. Lee T, Lim H, Park D, Kim D. Concentration and properties of particulate matters ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ) in the Seoul metropolitan. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2015; 31(2): 164-172.
8. Lee E, Lee T, Park M, Park D, Kim D. Characteristics of particulate matter concentration and classification of contamination patterns in the Seoul

- metropolitan subway tunnels. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2017; 33(6): 593-604.
9. Roh Y, Park W, Lee C, Kim Y, Park D, Kim S. A study of PM levels in subway passenger cabins in Seoul metropolitan area. *Journal of Korean Society of Occupational Environmental Hygiene*. 2007; 17(1): 13-20.
  10. Kim J, Woo S, Kim C, Lim H, Hwang M, Yoon H, et al. Characteristics of particulate pollution in a cabin of operating urban railway. *Journal of Korean Society for Urban Railway*. 2017; 5(4): 1015-1026.
  11. Lee K, Hahn EJ, Riker C, Head S, Seithers P. Immediate impact of smoke-free laws on indoor air quality. *Southern Medical Journal*. 2007; 100(9): 885-889.
  12. Borgini A, Tittarelli A, Ricci C, Bertoldi M, De Seager E, Crosignani P. Personal exposure to PM<sub>2.5</sub> among high-school students in Milan and background measurement: the EuroLifeNet study. *Atmospheric Environment*. 2011; 45: 4147-4151.
  13. Semple S, Green DA, McAlpine G, Cowie H, Seaton A. Exposure to particulate matter on an Indian stone-crushing site. *Occupational Environmental Medicine*. 2008; 65: 300-305.
  14. Yun D, Kim M, Lee J, Kim B, Lee D, Lee S, et al. Correction factors for outdoor concentrations of PM<sub>2.5</sub> measured with portable real-time monitors compared with gravimetric methods: results from South Korea. *Journal of Environmental Science International*. 2015; 24(12): 1559-1567.
  15. Dacunto PJ, Cheng KC, Acevedo-Bolton V, Jiang RT, Klepeis NE, Repace JL, et al. Real-time particle monitor calibration factors and PM<sub>2.5</sub> emission factors for multiple indoor sources. *Environmental Science Processes & Impacts*. 2013; 15: 1511-1519.
  16. Arnio P, Uli-Tuomi T, Kousa A, Makela T, Hirsikko A, Hameri K, et al. The concentration and composition of and exposure to fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in the Helsinki subway system. *Atmospheric Environment*. 2005; 39: 5059-5066.
  17. Wang X, Gao O. Exposure to fine particle mass and number concentrations in urban transportation environments of New York City. *Transport and Environment*. 2011; 16(5): 384-391.
  18. Cheng YH, Liu ZS, Yan JW. Comparisons of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Particle Number, and CO<sub>2</sub> levels inside metro trains traveling in underground tunnels and on elevated tracks. *Aerosol and Air Quality Research*. 2012; 12: 879-897.
  19. Park D, Lee T, Hwang D, Jung W, Lee Y, Cho K, et al. Identification of the sources of PM<sub>10</sub> in a subway tunnel using positive matrix factorization. *Journal of Air Waste Management Association*. 2014; 64: 1360-1367.
  20. Seoulmetro cyberstation. Available: <https://smss.seoulmetro.co.kr/traininfo/traininfoUserView.do> [accessed 25 April 2019].

#### <저자정보>

신혜린(학생), 정현희(학생), 이기영(교수)