

## 서울 일부 지하철 객차와 승강장에서 측정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도의 특성

박동욱\* · 윤경섭 · 박수택 · 하권철\*

한국방송통신대학교 자연과학부 환경보건학과, \*창원대학교 자연과학대학 보건생화학과

## Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Levels inside Train and in Platform of Subway

Dong Uk Park<sup>†</sup> · Kyung Sup Yun · Soo Taek, Park · Kwon Chul Ha\*

Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul, Korea

\*Department of Health Science and Biochemistry, Changwon National University, Changwon, Korea

(Received January 19, 2005; Accepted February 27, 2005)

### ABSTRACT

This study was performed to investigate the concentration of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in inside train and platform of subway 1, 2, 4 and 5 in Seoul, KOREA. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, temperature, humidity and carbon dioxide were monitored using Portable Aerosol Spectrometer at afternoon (between 13:00 and 16:00). The concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in inside train were monitored to be higher than those measured in platform. In addition, PM<sub>10</sub> concentration in both platform and inside train were found to be greatly higher than range of from 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  to 81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in ambient air reported by Ministry of Environment. This study found that there were many inside train in subway 1, 2, 4 line where exceeded 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  of Korean PM<sub>10</sub> standard. The average percentage that exceeded PM<sub>10</sub> standard was 83.3% in line 1, 37.9% in line 2 and 63.1% in line 4, respectively. In particular, most of inside train in subway line 1 were over PM<sub>10</sub> limit. PM<sub>2.5</sub> concentration ranged from 77.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  to 158.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which were found to be greatly higher than ambient air PM<sub>2.5</sub> standard promulgated by United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (24 hours arithmetic mean : 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , year average : 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The percentage of PM<sub>2.5</sub> in PM<sub>10</sub> was 86.2% in platform, 81.7% in inside train, 80.2% in underground and 90.2% in ground. These results indicated that fine particles (PM<sub>2.5</sub>) accounted for most of PM<sub>10</sub>.

**Keywords:** PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, fine particulate, subway, inside train, platform

### I. 서 론

우리나라에서 지하철은 중요한 시민교통 수단 중의 하나이다. 서울에서 지하철을 이용하는 시민들은 하루 약 1000만 명이다.<sup>1)</sup> 뿐만 아니라 부산, 인천, 대전, 대구, 광주에서도 많은 시민들이 지하철을 이용하고 있다. 지하철을 이용하는 많은 시민들 중에는 오염물질에 민감한 그룹인 노인, 어린이, 각종 질환자들이 포함되어 있다. 따라서 지하철 환경은 매우 중요하게 관리되어야 한다. 환경부는 최근(2003년 5월 29일)에야 지하철 생활 공간공기질 관리법 등을 실내 공기 질 관리법으

로 확대 개정하여 지하철 환경을 관리하고자 노력하고 있다.<sup>2)</sup>

국내외에서 지하철 환경에 대한 연구는 일반 대기환경보다는 많지 않다. 지하철에서 발생하는 입자상물질(particulate matter, PM)과 관련되어 국내에서 보고된 주요 연구는 박덕신 등(2004)의 철도터널의 공기 질,<sup>3)</sup> 이희관 등(2003)의 모델링을 이용한 지하역사내 공기 질 관리방안,<sup>4)</sup> 김진경 등(2004)의 16개 환승역의 승강장에서 PM<sub>10</sub>과 급속 농도<sup>5)</sup> 등이다. 이들이 연구한 조사대상은 모두 시민들이 지하철을 이용할 때 가장 많이 머무는 공간인 객차가 아니라 승강장, 역사, 터널 등이었다. 승객의 건강과 밀접한 관련이 있는 객차는 보다 엄격하게 오염물질을 관리해야 할 환경이다. 그럼에도 불구하고 우리나라에서는 지하철의 객차내부에서 PM의 농도에 대한 연구는 물론이고 보고서조차도 없

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Environmental Health, Korea National Open University  
Tel: 82-2-3668-4707, Fax: 82-2-741-4701  
E-mail : pdw545@knou.ac.kr

었다. 외국에서는 지하철 객차, 노면전차(tram)의 내부를 대상으로  $PM_{10}$ 을 포함한 오염물질의 농도가 보고된 바 있다.<sup>6,11)</sup>

지하철 환경을 장소별(승강장, 객차, 지하, 지상)로  $PM$ 의 농도, 입자크기별 분포, 발생 특성 등을 비교하여 구체적으로 관리대책을 수립할 필요가 있다. 본 연구에서는 지하철 운행특성과 장소에 따라  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 농도발생 특성을 분석하고 관리방안을 제안하고자 한다. 구체적인 목적은 첫째, 지하철의 운행특성과 장소별(객차와 승강장 그리고 지상과 지하)로  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 농도를 비교하고 평가한다. 둘째,  $PM_{10}$  농도 중에서  $PM_{2.5}$  농도가 차지하는 비율을 장소별로 평가한다. 셋째, 지하철에서  $PM$ 을 관리하기 위한 실내 공기 질 관리법의 주요 문제점을 지적한다. 본 연구결과는 지하철환경을 관리하기 위한 제도 및 기술적인 대책을 수립하는데 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

## II. 조사 대상 및 방법

### 1. 조사대상

서울 지하철 1, 2, 4, 5호선을 대상으로 2005년 1월 12일, 13일, 24일 오후(13:00~16:00) 3일 동안 조사하였다. 호선별로 1회씩 일정 구간의 객차와 승강장을 조사하였다. 지하철 호선별 조사구간은 1호선이 서울역에서 창동역(지하 12개, 지상 16개 : 총 28개 구간), 2호선은 사당역에서 왕십리역(지하 29개, 지상 7개 : 총 36 개구간), 4호선은 창동에서 서울역(지하 19개, 지상 17개 : 총 20개 구간), 5호선은 왕십리역에서 영등포구청(지하만 18개 구간)이었다.

### 2. 조사방법

채취유량 1.2L/분으로 보정된 Portable Aerosol Spectrometer(Model 1108, Grimm, Germany)를 이용하여 6초 간격으로 실시간 동안 총 먼지(Total Suspended Particle, TSP),  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 를 측정하였다. 객차에서의 농도는 지하철이 운행될 때 전체 열차 중에 중간 열차의 중앙에서 양쪽 문의 동일한 거리에 있는 곳에서 측정하였다. 승강장에서 측정위치는 승강장 폭의 중앙이었다. 승강장에서 측정은 객차에서 내린 다음 일정시간(5~15분)동안 실시하고 다시 지하철을 승차하여 객차를 측정하였다. 이와 같은 과정을 반복하여 객차와 승강장에서 측정하였다. 측정 높이는 바닥에서 대략 1.2~1.5 m였다.<sup>12)</sup> 총 모니터링 된 횟수는 2,709회(지하 1,810회, 지상 899회 또는 객차 1,624회 승강장

1,085회)였다. 동일한 시간에 동일한 횟수로  $PM$ 과 함께 온도와 습도도 측정하였다. 이산화탄소는 2호선과 5호선의 일부구간의 승강장과 객차에서 Indoor Air Quality Meters(Model 8760, TSI, USA)을 이용하여 측정하였다. 이산화탄소 농도는 승강장과 객차에서의 환기의 효율성을 판단하는 지표로 사용하였다.<sup>2)</sup>

### 3. 자료의 처리

SPSS Version 12.0을 이용하여 Portable Aerosol Spectrometer에서 6초마다 측정된 자료(총 2,709회)를 모두 분석하였다. 자료는 지상과 지하구간, 승강장과 객차, 지하철 호선별, 문이 열리고 닫힐 때 등으로 구분하여 분석하였다. 각각의 특성별(지하와 지상, 승강장과 객차)  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  농도 차이는 독립표본의 t-Test로 검정하였다. 2개 요인(지하와 지상, 승강장과 객차)의  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  농도 그리고  $PM$  크기별 함유량에 대한 영향은 일변량 분산분석(univariate ANOVA)으로 분석하였다. 객차의  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  농도에 대한 지상과 지하의 비교 분석에서 5호선은 지상구간이 없어서 제외하였다.

## III. 결 과

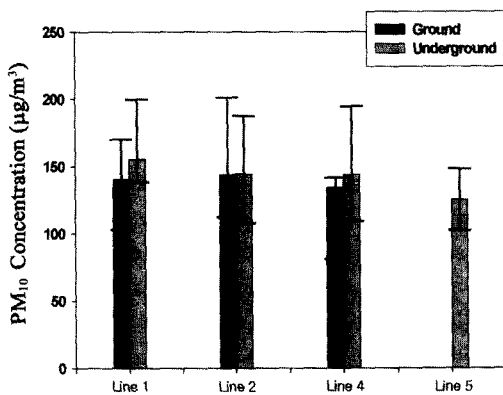
### 1. $PM_{10}$ 농도

객차에서 측정된  $PM_{10}$  평균농도는  $144.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 승강장의  $125.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 통계적으로 유의하게 높았다( $p=0.026$ ). 지하철에서 측정된(객차와 승강장)  $PM_{10}$  농도는 서울시가 보고한 2004년 1월에서 2004년 11월까지의 서울시 대기의 평균 농도 범위( $35\sim 81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 훨씬 높게 분포하고 있었다.<sup>13)</sup> 즉 본 연구를 통해  $PM_{10}$  농도가 객차 > 승강장 > 외부 대기 순으로 높은 것을 발견했다. 지하철 1, 2, 4호선 객차에서 측정된  $PM_{10}$  농도는 실내 환경기준( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과한 실내 공간이 많았다. 특히, 지하철 1호선은 지하구간 총 12개 중에서 10개 구간이나 기준을 초과하였다. 동대문-종로 5가 구간 역 객차에서  $PM_{10}$  농도는 본 연구에서 가장 높은  $207.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 2호선과 4호선의 객차 내  $PM_{10}$ 의 평균농도도  $144.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $143.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기준치에 근접하였다. 그러나 2호선과 4호선에서도 기준( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과한 구간은 각각 37.9%(총29개소 중 11개), 63.2%(총19개소 중 12개)였다. 5호선은 객차와 승강장 모두 기준치 이하였다. 한편 승강장의 평균  $PM_{10}$  농도는 기준( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 이하였지만 1개소(4호선 서울역)에서는 기준을 초과하였다.

승강장에서 측정된 본 연구의  $PM_{10}$  농도(평균 125.8

**Table 1.** The mean concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and standard deviation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> by the location of sampling

	Ground track	Underground track	Total
PM <sub>10</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Platform	123.0 ± 6.6	129.3 ± 20.9	125.8 ± 15.0
Inside train	141.5 ± 13.4	145.3 ± 12.8	144.0 ± 13.1
Total	132.2 ± 13.0	140.6 ± 17.2	137.0 ± 16.4
PM <sub>2.5</sub> , $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Platform	115.6 ± 8.6	105.4 ± 14.4	111.1 ± 12.6
Inside train	121.7 ± 16.1	116.6 ± 14.2	118.4 ± 15.1
Total	118.6 ± 13.2	113.3 ± 15.2	115.6 ± 14.6



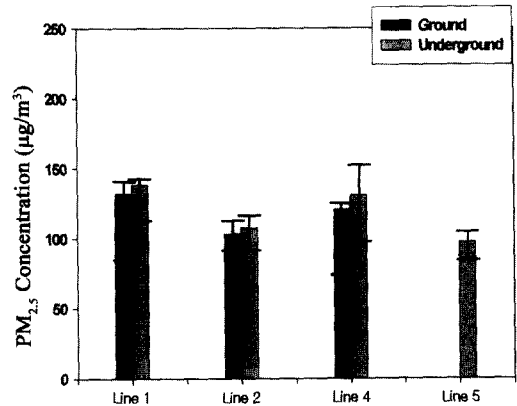
**Fig. 1.** The comparison of PM<sub>10</sub> concentration by subway line.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 범위 86.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~231.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 김진경 등 (2004)이 연구한 지하철 1, 2, 3, 4호선 환승역, 대합실, 승강장의 호흡성분진(Respirable Particulate Matter, RPM)의 평균 농도(104  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높았다.<sup>9)</sup>

한편 지하의 PM<sub>10</sub> 농도가 측정 장소나 지하철의 호선에 상관없이 지상보다 높게 나타났다(Table 1 and Fig. 1). 평균 PM 농도도 지하구간(145.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 지상구간(141.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 높았다. 호선별로도 1, 2, 4, 5호선 모두 지하의 PM<sub>10</sub> 농도가 지상보다 높았다(Fig. 1 right). 일변량 분산분석 결과, PM<sub>10</sub> 농도는 지상과 지하 그리고 객차와 승강장의 구분에 따라 유의한 차이를 나타냈다( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.230$ ). 즉 2개의 요인인 지하철의 운행특성(지상과 지하)과 측정위치(승강장과 객차)는 PM<sub>10</sub> 농도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 1).

## 2. PM<sub>2.5</sub> 농도

객차에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 농도의 평균은 118.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 범위는 84.1~158.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. PM<sub>2.5</sub> 농도는 모든



**Fig. 2.** The comparison of PM<sub>2.5</sub> concentration by subway line.

구간에서 미국 환경부(Environmental Protection Agency, EPA)가 정한 대기 24시간 (산술)평균기준 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 훨씬 초과하였다(Fig. 2). 객차에서 측정된 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 지상과 지하 모두 승강장보다 유의하게 높았다( $p < 0.001$ ). 이것은 PM<sub>10</sub> 농도에서 나타났던 특성과 동일하다.

일변량 분산분석 결과, PM<sub>2.5</sub> 농도도 지상과 지하 그리고 객차와 승강장에 따라 유의한 차이를 나타냈다( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.172$ ). 즉 PM<sub>10</sub> 농도분포와 마찬가지로 2개 요인인 지하철의 운행특성(지상과 지하)과 측정위치(승강장과 객차)는 PM<sub>2.5</sub> 농도분포에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 1).

## 3. 입자크기별 분포

PM<sub>10</sub> 농도 중에서 PM<sub>2.5</sub>가 차지하는 비율은 평균 83.5%(범위 41.3~97.8%)로 매우 높았다. 승강장은 86.2%, 객차는 81.7%, 지하구간은 80.2%, 지상구간은 90.2%였다. 승강장과 지상구간에서 약간 높은 비율을

**Table 2.** The rates (%) of PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub> and PM<sub>10</sub> to total particulate (TSP)

	Ground track	Underground track	Total
PM <sub>10</sub> to TSP, %			
Platform	61.4 ± 2.8	40.3 ± 10.6	49.1 ± 13.3
Inside train	53.1 ± 53.1	42.9 ± 12.2	45.7 ± 12.9
Total	57.3 ± 9.4	42.0 ± 11.7	47.1 ± 13.2
PM <sub>2.5</sub> to PM <sub>10</sub> , %			
Platform	93.9 ± 2.8	80.7 ± 8.1	86.2 ± 9.1
Inside train	86.5 ± 12.1	79.9 ± 9.1	81.7 ± 10.4
Total	90.2 ± 9.5	80.2 ± 8.8	83.5 ± 10.2

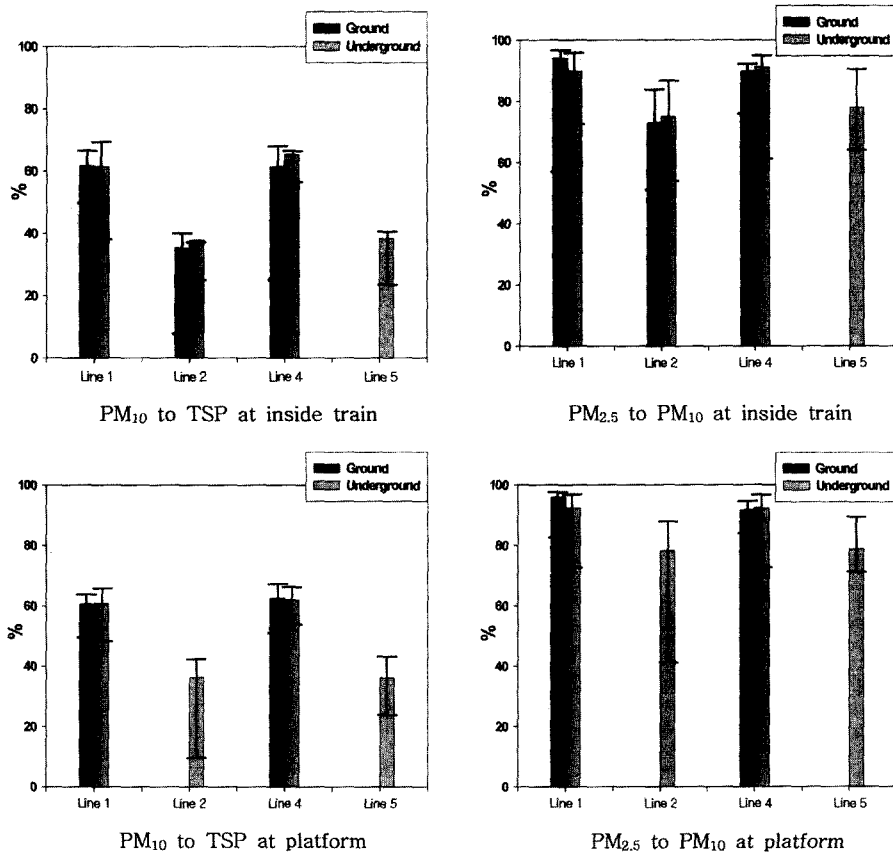


Fig. 3. The rates(%) of PM<sub>10</sub> to TSP and PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub> by subway.

나타냈다(Table 2). 지하철 호선별로 비교하면 지하철 1, 4 호선에서 PM<sub>10</sub> 중 PM<sub>2.5</sub>가 차지하는 비율이 지하철 2, 5호선보다 높았다(Fig. 3). PM<sub>10</sub> 농도 중에서 PM<sub>2.5</sub>의 비율(83.5%)이 TSP 중에서 PM<sub>10</sub>이 차지하는 비율(47.1%)보다 훨씬 높다.

일반량 분산분석 결과, 입자별 크기분포(TSP 중에서 PM<sub>10</sub> 그리고 PM<sub>10</sub> 중에서 PM<sub>2.5</sub>가 차지하는 비율)도 지상과 지하 그리고 객차와 승강장에 따라 유의한 차이를 나타냈다( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.260$ ). 이러한 분석은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도에서 나타난 결과와 동일하다. 즉 지하철의 운행특성(지상과 지하)과 측정위치(승강장과 객차)가 PM 크기별 분포에도 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Table 2).

#### IV. 고 찰

우리나라에서는 그동안 지하철 객차에서 발생하는 PM에 대한 연구는 물론이고 보고자료 조차도 없었다.

본 연구는 1, 2, 4, 5호선의 일부 지상과 지하구간을 대상으로 승강장과 객차에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도를 실시간으로 측정하였다. 본 연구에서 나타난 결과에 근거하여 고찰한 내용은 다음과 같다.

첫째, 객차에서의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 승강장보다 높았다(Table 1). 또한 지하철에서 측정된 모든 PM<sub>10</sub> 농도는 외부 대기에서 측정된 농도<sup>13)</sup>보다 2배 이상 높았다. 우리나라에서 이희관 등(2003)은 4호선에서 측정된 PM<sub>10</sub>, 이산화탄소의 농도가 외부대기보다 대합실과 승강장에서 더 높은 것을 보고한 바 있다.<sup>4)</sup> Karlsson 등(2004)도 도시 대기에서 자동차 운행이 PM의 농도를 높이지만 지하철에서는 사람들이 대기보다 더 높은 PM에 노출되고 있다고 하였다.<sup>14)</sup> 이처럼 지하철의 승강장이나 대합실 등 장소에서 PM이 대기보다 높은 것은 본 연구를 포함하여 여러 연구에서 이미 확인되었다. 우리나라에서 객차에서의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도가 오히려 승강장보다 높다는 사실은 본 연구에서 처음이었지만(Table 1), 외국에서는 이미 객차, 버스내부, 노면전차

내부 등에서 측정된 PM이 일반 도로나 대기보다 높은 것을 이미 보고하였다. Praml 등(2000)은 4년 동안 버스와 노면전차 내부에서 측정된 PM<sub>10</sub> 농도가 외부 대기의 농도보다 1.7에서 4배 정도 더 높은 것으로 보고하였다.<sup>6)</sup> 이러한 연구결과들은 본 연구결과와 일치한다. 즉 본 연구에서는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 대기보다 지하철의 승강장에서 더 높은 것을 확인하였고 나아가서 승강장보다는 객차에서 보다 더 오염이 더 심하다는 것을 발견했다. 객차에서 PM 농도가 높은 것은 객차외부에서 오염도가 낮은 신선한 공기가 공급되어 PM 농도를 낮추지 못하기 때문이다. 즉 문이 열릴 때 승강장, 외부 대기, 승객들로부터 PM을 포함한 오염물질은 계속해서 유입되지만 오염정도가 낮은 공기는 공급되지 않고 있다. 따라서 객차내에 오염되어 있는 PM 농도를 희석시키지 못하므로 일정농도까지 누적된 것으로 판단된다. 이 상태에서 승객들의 승차, 움직임, 이동, 열차의 운행 등으로 PM이 다시 공기 중으로 비산하거나 떠 있게 된다.<sup>6)</sup> 지하철과 같은 공간은 승강장이든 객차든 신선한 공기를 공급하여 오염물질의 농도를 기준이하로 유지해야 한다. 그럼에도 불구하고 겨울철 지하철 객차는 난방만 이루어지고 외부의 신선한 공기는 전혀 공급하지 않은 상태였다. 이러한 사실은 지하

철 2호선과 5호선 객차에서 이산화탄소농도가 환기기준인 1,000 ppm을 항상 초과(평균 : 1,775 ppm, 범위 1,153~3,377 ppm)한 것으로 짐작할 수 있다(Fig. 4). 모든 지하철에서 객차의 외부공기는 문이 열릴 때 유입되는 공기가 유일한 것으로 판단된다. 따라서 열차문이 닫히고 열차가 운행되는 동안에는 객차내부로 외부 공기를 공급하는 강제 환기시설은 없기 때문에 신선한 외부 공기는 부족하고 이산화탄소의 농도는 높아질 수 밖에 없다.

지하공간에서 문이 열릴 때 측정된 PM<sub>10</sub> 농도는 승강장의 오염된 공기가 유입되므로 증가하다가 문이 닫히고 다음 구간까지 운행될 때는 객차의 농도와 비슷해진다(Fig. 5 right). 지상에서는 반대의 현상이 나타났다. 즉, 문이 열릴 때 PM<sub>10</sub> 농도는 객차보다 오염정도가 낮은 일반 대기의 공기가 유입되므로 농도가 희석이 되어 지하구간보다 객차의 농도가 낮아진다(Fig. 5 left).

둘째, 객차에서 PM<sub>10</sub> 농도가 기준(150 µg/m<sup>3</sup>)을 초과한 경우가 많았다. 즉, 1호선에서는 총 28구간 중에서 12개(42.9%), 2호선은 총 36구간 중에서 13개(36.1%), 4호선은 총 20구간 중에서 12개(60.0%)가 기준을 초과하였다. 지하철을 이용하는 승객들과 자동차

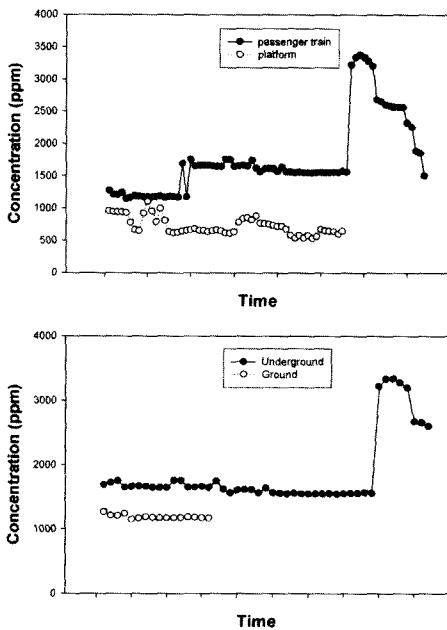


Fig. 4. The typical concentration profile of CO<sub>2</sub> in platform and inside (passenger) train. (left : between platform and inside (passenger), right : between ground and underground track in inside train).

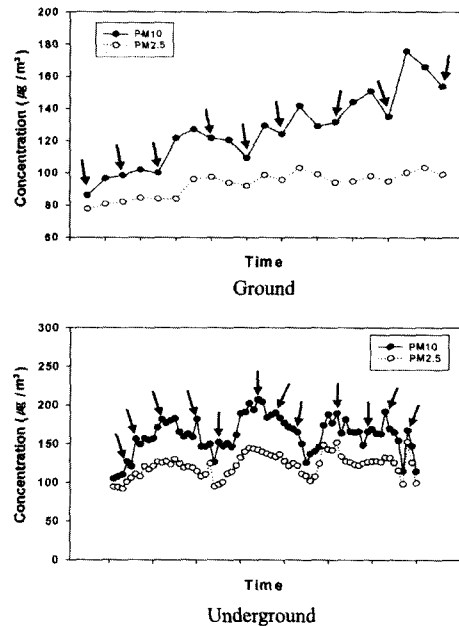


Fig. 5. The typical concentration profile of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> while subway train is running. Arrow shows the concentration monitored when door of train is open. (left : ground, right : underground).

의 운행이 증가하는 출퇴근 시간에는 보다 높은  $PM_{10}$  농도가 발생할 것으로 예상된다. 계절별, 일별, 시간대별로  $PM_{10}$  농도를 측정하여 적절한 환기량을 공급하기 위한 구체적인 관리대책을 마련해야 할 것으로 판단된다. Praml 등(2000)이 버스와 도로 노면 전차(Tram) 내부에서 측정된  $PM_{10}$ 의 평균농도는  $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이 중 2개의 노면 전차 내부에서 측정된  $PM_{10}$  농도는  $244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $279 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 버스내부보다 더 높은 것으로 보고하였다.<sup>6)</sup> 오염물질에 민감한 노인, 어린이 그리고 호흡기계 질환자들이 이러한 농도에 노출되면 건강상의 장해를 받을 수 있다.<sup>15,16)</sup>

셋째,  $PM_{2.5}$  농도(범위:  $77.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 158.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 평균:  $111.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 지하철의 지상, 지하, 객차, 승강장 상관없이 모든 장소와 구간에서 미국 EPA의 대기기준(24시간 평균:  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1년 평균:  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 훨씬 초과하였다.  $PM_{10}$  농도는 지하철 호선에 따라 일부 구간에서 기준을 초과하였지만  $PM_{2.5}$  농도는 모든 장소와 구간에서 미국 EPA의 대기기준을 초과한 것이다. 본 연구결과(평균:  $111.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 출퇴근 때에 측정된 홍콩 지하철의 평균  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,<sup>10)</sup> 멕시코 지하철의  $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>39)</sup> 보다는 훨씬 높았고 영국지하철의 평균농도  $247.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>37)</sup> 보다는 낮았다. 본 연구결과는 승객의 이용이 한가하고 외부 오염이 심하지 않은 오후시간(13:00~16:00)에 측정된 농도임을 감안하면 우리나라 지하철의  $PM_{2.5}$ 의 농도는 우려할 수준인 것으로 판단된다.

우리나라에서 대기기준으로  $PM_{10}$  농도는 설정되어 있지만  $PM_{2.5}$  농도는 설정되어 있지 않다.  $PM_{2.5}$ 는 공기역학적 직경이  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 입자들로써 100% 폐포에 침착될 수 있다. 이러한 위험 때문에 미국 EPA는 오래전(1997년)에  $PM_{2.5}$  농도를 대기기준(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)에 추가하였다. 즉 PM 기준을  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 로 구분하고 각각을 24시간과 년 평균 2개 기준으로 구분하여 관리하고 있다.  $PM_{10}$ 은 자연 상태에서 발생하는 거대(coarse) 입자가 포함되어 있는 반면  $PM_{2.5}$ 는 2차로 발생하는 미세한 크기의 오염물질 입자로써 연소과정(combustion process), 즉 자동차 배출물, 공장 연소 배출물에 의해서 생기는 오염물질이다. 따라서 도시의 대기나 지하철에서 측정된  $PM_{2.5}$ 의 오염원은 대부분 자동차 배출물(exhaust)이다.<sup>10)</sup>  $PM_{2.5}$ 가  $PM_{10}$ 보다 위험이 더 큰 이유는 연소과정에서 배출되는 다양한 오염물질을 포함한 미세한 입자형태의 2차 오염물질로서 모두 호흡기계의 폐포까지 흡수될 수 있어 건강상의 악영향을 끼칠 수 있다는 점이다.

넷째, 지하철에서 측정된  $PM_{10}$  농도의 대부분이

$PM_{2.5}$  미세입자로 구성되어 있다.  $PM_{10}$ 에서  $PM_{2.5}$ 가 차지하는 평균 비율이 83.5%로 매우 높다(Table 2).  $PM_{10}$ 중  $PM_{2.5}$ 의 비율이 가장 높은 장소는 지상의 승강장으로 평균 93.9%이다. 지하철에서 발생하는  $PM_{10}$  농도의 대부분이  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 미세입자라는 연구결과는 지하철 환경이 바람직하지 않다는 것을 나타낸다. 이러한 결과는 Chan 등(2002) 등이 홍콩의 지하철에서 측정된  $PM_{10}$ 중의  $PM_{2.5}$ 의 비 72%~78%보다 높다.<sup>10)</sup>

Chan 등(2002)은 특별히 대기 중의 미세먼지의 주요 발생원은 디젤자동차 배출물이라고 주장하였다.<sup>10)</sup> 본 연구에서도 지하철에서 발생하는 미세먼지( $2.5 \mu\text{m}$  이하)의 발생원은 외부 대기에서 유입되는 자동차 연소 배출물이 대부분일 것으로 판단된다. 실외(대기)에서 발생한 자동차 배출물은 이동 거리를 통해 지하철 내부로 투입되므로 무거운 입자는 도중에서 낙하되거나 제거되고 상대적으로 입자 크기가 작은 입자는 지하까지 유입될 수 있으므로  $PM_{2.5}$ 의 비율이 높은 원인중의 하나로 판단된다. 이것은  $PM_{2.5}$  농도가 지하구간( $113.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 지상( $118.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에서 높고  $PM_{10}$  중에서도  $PM_{2.5}$ 가 차지하는 비율이 지하(80.2%)보다 지상(90.2%)에서 훨씬 높은 결과로 짐작할 수 있다(Table 2).  $PM_{2.5}$  농도가 지하보다 지상구간에서 높은 이유는  $PM_{2.5}$ 의 주요근원인 자동차의 배출물이 지하철 지하공간보다 일반 대기에 많이 함유되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 향후 지하철 특성별로 채취된 PM 중에서 디젤배출물 농도가 차지하는 비율을 비교하면 보다 정확한 판단을 할 수 있을 것이다.

지하철로 유입되는 PM의 근원은 지하철 입구와 출구 그리고 환기장치이다. 지하철 환기장치의 (외부)공기가 들어오는 위치의 적정성, 정화장치(필터 등)의 성능을 평가해야 한다.  $2.5 \mu\text{m}$ 의 미세입자는 보통의 필터로는 제거되지 않는다. 본 연구의 결과  $PM_{2.5}$ 의 농도가 높고,  $PM_{10}$  중  $PM_{2.5}$ 의 함유비율이 높은 점 등을 고려할 때 환기장치의 설치, 성능, 관리에 문제점이 있을 것으로 판단된다. 지하철 역사(승강장, 대합실 등)는 물론 열차의 객차내부로도 신선한 공기를 적정하게 공급해야 한다. 지하철 승강장과 열차 객차의 공기는 승객의 이동, 오염된 공기의 유입 등으로 오염될 수 밖에 없다. 따라서 가능하면 오염되지 않거나 오염농도가 낮은 공기를 공급하여 오염 농도를 낮추는 것이 유일한 방법이다. 본 연구에서 밝힌 것처럼 신선한 공기가 전혀 공급이 되지 않으면 PM을 포함한 오염물질의 농도는 높아질 수밖에 없다.

다섯째, 현행 지하철의  $PM_{10}$ 에 대한 기준, 측정방법, 횟수에 대한 문제점이다. 지하철 환경은 오염원이 고정

되어 있는 실내 환경과는 다르다. 또한 지하철은 노인, 어린이, 병약자 등이 포함된 일반 시민들이 이용하고, 관리대상이 대기처럼 광범위하고 분산되어 있으며, 지하철의 공기는 외부의 대기에 의해서 영향을 받는다는 점 등은 대기환경과 비슷하다. 이럼에도 불구하고 환경부의 실내 공기질 관리법에서는 지하철 환경을 실내 환경으로 규정하여 지하철 환경에서 측정 우선순위가 낮거나 발생이 거의 일어나지 않는 부유세균, 포름알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합물(VOC), 석면 등 불필요한 측정을 강제하고 있다.<sup>6)</sup> 또한 특정장소에서 1년에 1회 측정하는 것으로 수많은 지하철의 승강장, 객차를 대상으로 지하철 환경을 대표하는 것은 통계적으로 불가능하다. 본 연구에서 측정했던 PM<sub>10</sub>을 24시간 측정에 의한 기준, 여과법에 의한 1년 중 1회의 측정으로 지하철의 PM<sub>10</sub> 농도를 대표하는 것은 불가능하다. 여과법에 의한 측정은 시간, 계절, 이용승객 수 등 여러 가지 요인에 따라 영향을 받는 지하철 환경에서는 적정하지 않은 방법으로 판단된다. 이러한 방식의 측정은 오염원과 오염의 발생이 비교적 일정하고 한정적인 산업장이나 실내 환경에서는 가능하지만 지하철과 같이 광범위한 오염원을 가지고 있고 오염물질의 발생과 농도가 계절, 이용하는 사람의 수, 대기의 오염 정도 등에 영향을 받는 경우는 적정하지 않기 때문이다. 지하철 환경은 측정해야 할 오염물질 종류, 기준, 측정방법 등에 대한 근본적인 접근방법이 달라져야 한다고 판단된다. 보다 실질적으로 자동 측정망 설치에 의한 관리, 지하철이 가동되고 승객이 이용하는 시간(20시간)을 근거한 기준 등이 법적기준에 신속하게 반영되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 고찰은 본 연구의 범위 밖이므로 향후 다시 논의할 예정이다.

본 연구결과는 겨울철 특정시간에 지하철 일부 구간만을 대상으로 수행한 것이다. 향후 계절별, 시간별로 PM을 포함한 지하철에서 발생할 수 있는 주요 오염물질농도의 변화에 대한 연구는 물론이고 특히 지하철환경에서 채취된 PM<sub>2.5</sub>에서 발암물질인 디젤배출물이 차지하는 비율을 연구할 필요가 있다.

#### IV. 결 론

본 연구는 지하철 1, 2, 4, 5호선의 일부 구간을 대상으로 승강장과 객차에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도를 Portable Aerosol Spectrometer를 이용하여 13:00~16:00에 측정하였다. 객차에서 측정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도는 승강장 보다 유의하게 높았다. 지하철의 지하, 지상, 승강장, 객차 모두 PM<sub>10</sub> 농도는 2004년 11월 서울시가

보고한 서울시 대기의 2004년 평균 농도(35~81 µg/m<sup>3</sup>)보다 2배 이상 높았다. 지하철 1, 2, 4호선 객차에서 측정된 PM<sub>10</sub> 평균농도는 실내기준인 150 µg/m<sup>3</sup>을 초과한 구간이 많았다. 특히, 1호선은 총 12개 중 10개 구간에서 기준치를 초과하였다. PM<sub>2.5</sub> 농도의 범위는 111.1~146.3 µg/m<sup>3</sup>으로 지하철의 지상, 지하, 객차, 승강장 모두에서 미국 EPA의 대기기준(24시간 평균: 65 µg/m<sup>3</sup>, 1년 평균: 15 µg/m<sup>3</sup>)을 훨씬 초과하였다. PM<sub>10</sub> 농도 중에서 PM<sub>2.5</sub>가 차지하는 비율은 승강장 86.2%, 객차 81.7%, 지하 80.2%, 지상 90.2%로 매우 높았다. 이러한 연구결과는 지하철에서 검출되는 입자상물질의 대부분은 자동차 연소과정에서 배출되는 2.5 µm 이하의 오염물질이라는 것을 의미한다. 지하철에서 PM<sub>2.5</sub> 농도를 감소시키기 위한 대책을 시급히 마련해야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 서울특별시 지하철공사 : 지하철공기오염 저감방안에 관한 연구. 2003.
2. 환경부 : 지하철승객공간 공기질 관리법 시행규칙 개정령. 2004.
3. 박덕신, 조영민, 이철규, 박병현 : 철도 터널에서의 공기 질 연구. 한국대기환경학회지, **38**, 363-364, 2004.
4. 이희관, 김신도 : 모델링을 이용한 지하 역사내 공기질 관리방안에 관한 연구. 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, 591-596, 2003.
5. 김진경, 백남원 : 서울시 지하철 역사의 실내 공기중 분포하는 먼지의 특성에 관한 연구. 한국환경보건학회지, **30**(2), 154-160, 2004.
6. Praml, G. and Schirl, R. : Dust exposure in Munich public transportation: A comprehensive 4-year survey in buses and trams, *Int Arch Occup Environ Health*, **73**, 209-214, 2000.
7. Adams, H. S., Nieuwenhuijsen, M. J. and Colville, R. N. : Determinants of fine particle personal exposure levels in transport microenvironmental, London, UK., *Atmospheric Environment*, **35**, 4557-4566, 2001.
8. Chow, J. C., Watson, J. G., Edgerton, S. A. and Vega, E. : Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City during winter 1997. *The Science of the Total Environment*, **287**, 177-201, 2002.
9. Gomez-Perales, J. E., Covile, R. N., Nieuwenhuijsen, M. J., Fernandez-Brem auntz A., Gutierrez-Avedoy, V. J., Paramo-Figueroa, V. H., Blanco-Jimenez, S., Bueno-Lopez, E., Mandujano, F., Bernabe-Cabanillas, R. and Ortiz-Segovia, E. : Commuters' exposure to PM<sub>2.5</sub>, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City. *Atmospheric Environment*, **38**, 1219-1229, 2004.
10. Chan, L. Y., Lau, W. L., Lee, S. C. and Chan, C. Y. : Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong., *Atmospheric*

- Environment*, **36**, 3363-3373, 2002.
11. Chan, L. Y., Lau, W. L., Zou, S. C., Cao, Z. X. and Lai, S. C. : Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **36**, 5831-5840, 2002.
  12. Grimm : Grimm Dust monitor 1108 Using Manual, 2000.
  13. 서울시 미세먼지경예보센터 : 2004년 11월 대기오염도 측정결과. 2004.
  14. Karlsson, H. L., Nilsson, L. and Moller, L. : Subway particle area more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cell. *Chem. Res. Toxicol*, **18**, 19-23, 2005.
  15. Gauvin, S., Reungoat, P., Cassadou, S., Dechenaux, J., Momas, I., Just, J. and Zmirou, D. : Contribution of indoor and outdoor environments to PM<sub>2.5</sub> personal exposure of children - VESTA study. *The Science of the Total Environment*, **297**, 175-181, 2002.
  16. Hadnagy, W., Stiller-Winkler, R., Kainka, E., Ranft, U. and Idel, H. : Influence of urban particulate air pollution(PM<sub>10</sub> ; PM<sub>2.5</sub>) on the immune system of children. *Aerosol Science*, **29**, S997-S998, 1998.