

## 서울시 지하철 객차 내 PM과 CO<sub>2</sub>의 농도 분포

이철민 · 박화미<sup>†</sup> · 노영만 · 김윤신 · 박동선\*

한양대학교 환경 및 산업의학연구소, \*주)이플러스티  
(2007. 9. 13. 접수/2008. 1. 25. 채택)

### A Survey of Particulate Matters and CO<sub>2</sub> Levels in Seoul Subway Carriages

Young-Man Roh · Wha Me Park<sup>†</sup> · Choel Min Lee · Yoon Shin Kim · Dong Sun Park\*

*Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University*

*\*EplusT Co., Ltd.*

(Received September 13, 2007/Accepted January 25, 2008)

#### ABSTRACT

The objective of this study is to provide the research data on the actual concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> and CO<sub>2</sub> in Seoul subway carriages. Mean concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub>, and CO<sub>2</sub> in subway carriages were investigated at levels of 215.1±101.4 µg/m<sup>3</sup>, 86.9±38.6 µg/m<sup>3</sup>, 27.0±11.4 µg/m<sup>3</sup>, and 1,588±714 ppm, respectively. The mean concentrations in subway carriages were higher when the train ran on an underground track rather than on an above ground track. The measured concentration of particulate matter varied with the time of day and was highest in the morning, followed by noon and evening while the CO<sub>2</sub> concentration was highest in the morning, followed by evening and noon. In relation to correlation among the pollutants: the correlation between PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> was 0.92, and that between PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> was 0.94. The inclusion rate of PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub> was 41±7% and that of PM<sub>1</sub> to PM<sub>2.5</sub> was 32±4%. In addition, the CO<sub>2</sub> concentration had a positive relation with the number of people in a carriage, whereas the concentration of PM<sub>10</sub> had negative correlation to the number of people. In relation to these two pollutants we calculated using a regression equation (34.06 + 0.04 CO<sub>2</sub>(ppm) - 0.09 PM<sub>10</sub>(µg/m<sup>3</sup>)(R<sup>2</sup>=0.30, p<0.01, n=707), that a maximum number of 61 persons would ensure that each pollutant is maintained below the criteria level, applicable to subway stations.

**Keywords:** subway carriage, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>, CO<sub>2</sub>

#### I. 서 론

경제의 성장으로 산업의 구조는 급변하였으며, 사회는 대량 생산과 대량 소비가 가능하게 되었다. 경제규모의 확대는 도시로의 인구증가를 야기시켰으며, 그 부작용으로 심각한 교통난과 만성적인 토지의 과부족이 발생하였다. 세계 각국의 주요 대도시와 마찬가지로 서울시 역시 만성적인 토지 부족과 심각한 교통문제라는 도시문제에 직면해 있으며, 이를 해소하기 위하여 효율적이고 입체적인 토지이용이 강구되었다. 그 대표적인 예로 지하철의 운영을 들 수 있다. 서울시 지하철은

1974년 제 1기 지하철 1호선 9개 역을 시발로 현재는 제 2기 지하철 8호선까지 총 316개 역사를 운행하고 있으며, 2011년에는 3기 지하철이 완공되어 서울시 교통 부담률의 절반에 가까운 48%를 기록할 것으로 예상하고 있다(Choi, 2004).

지하철 환경은 크게 매표가 이루어지는 대합실, 지하철을 타고 내리는 승강장 그리고 지하철 차량내부로 구분할 수 있다. 그 동안 국내 지하철 환경에 대한 연구는 대부분 대합실과 승강장만을 대상으로 이루어져 왔으며(Hwang *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2002; Song *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1994), 상대적으로 승객들이 가장 많이 머무르는 환경인 객차환경에 대한 연구는 수편에 불과하다(Park *et al.*, 2005; Kwag *et al.*, 2005).

Adams *et al.*(2001)은 런던 시민들이 이용하고 있는

<sup>†</sup>Corresponding author : Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University  
Tel: 82-2-2220-1510, Fax: 82-2-2292-2510  
E-mail : wmpark2045@hanmail.net

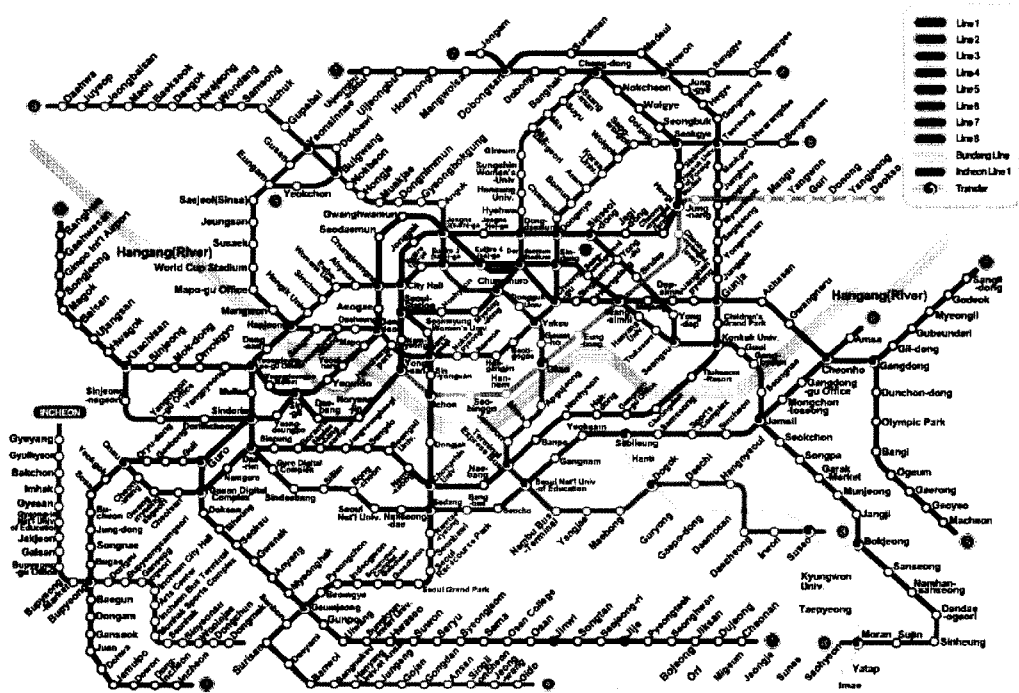


Fig. 1. Subway route map in Seoul metropolis.

교통수단의 형태에 따른 PM<sub>2.5</sub>의 노출수준을 조사하여 제시한 바 있다. 이 보고에 따르면 지하철을 이용하는 그룹이 다른 육상 교통수단(Bus, Car, Bicycle)을 이용하는 그룹에 비해 노출 수준이 약 3배~8배 정도 높은 것으로 나타났다. 반면, Chan *et al.*(2002)은 중국의 육상 교통수단(Bus, Taxi)에서의 PM<sub>10</sub>과 CO의 농도가 지하철에서의 농도에 비해 각각 1.2~3.0배 그리고 2.6~9.3배 높은 것으로 보고하고 있다. 프랑스 파리에서 수행된 Dor *et al.*(1995)의 연구에 의하면 객차 내 오염물질의 농도는 객차 운행 선로와 인접한 도로를 운행하는 차량들로부터 배출된 오염물질이 자연적으로 또는 강제환기에 의해 지하철 운행공간으로 유입된 후 객차 내로 침투하여 영향을 받는 것으로 보고한 바 있다. 이와 같은 결과는 지하철 객차의 공기질은 주변 환경의 공기질 및 물리적 환경에 크게 영향을 받고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있으며, 운송수단의 공기질 관리를 통한 국민보건의 증진을 위해서는 우선적으로 국내 각 운송수단의 공기질 평가에 대한 현장조사가 선행되어야 하며, 또한 이러한 조사 결과를 바탕으로 건강 위해성 평가 및 발생원 규명 등의 연구를 통한 적정 관리 방안 및 관리 수준의 정립이 이루어져야 함을 보여주는 결과이다.

이에 본 연구에서는 향후 국내 지하철 객차 내 공기

질 관리방안 설정을 위한 기초자료의 확보를 목적으로 입자상물질(PM)과 CO<sub>2</sub>에 대한 운행시간별, 지상 및 지하 운행구간별 및 객차 내 탑승인원 등 다각적 환경조건에 따른 지하철 객차 내 오염물질의 농도분포를 조사하여 제시하였다.

## II. 연구방법

서울시를 운행하는 지하철 전 노선별 객차 내 입자상 오염물질 및 가스상 오염물질의 농도분포 특성을 파악하기 위해 2005년 7월부터 9월까지 3개월간 객차 내 공기 중 입자상 오염물질 중 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>과 CO<sub>2</sub>의 농도분포를 1호선부터 8호선 전 노선을 대상으로 시발역부터 종착역까지 출퇴근 시간대인 07시부터 09시 및 18시부터 20시까지와 이용객이 적은 11시부터 1시까지 총 3개의 시간대로 구분하여 각 노선별로 3회 연속 조사하였다. 대상오염물질의 조사 위치는 객차의 출입문 입구 선반과 객차의 중앙 선반에 대상오염물질을 실시간으로 조사할 수 있는 측정 장비를 설치하였다.

본 연구에 사용된 측정장비로는 입자상 물질인 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>의 측정은 광산란 방식의 휴대용장비(DustMate Turnkey Instruments Ltd.)를 이용하였으며,



Fig. 2. Sampling sites in Seoul metropolis.

CO<sub>2</sub>, CO의 측정은 비분산적외선분석법을 적용한 휴대용측정장비(IAQ-CALC, TSI Incorporated)를 이용하였다. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>과 CO<sub>2</sub>는 지하철 운행시간

동안 동시에 각각 10초 간격으로 연속 측정되어 측정장비에 저장되었으며, 실험실에 돌아와 자료를 computer로 전송하여 저장하였다. 또한 조사원이 객차에 탑승하여 기기의 작동 시간 및 열차의 운행구간별 운행시간과 정차시간 및 출입문이 개폐시간 등을 기록하였다. 기록된 시간표는 실험실에서 전송된 각 조사대상오염물질의 시간별 농도자료에 첨부하여 시간별 오염물질의 농도 매트릭스를 작성하여 자료 분석에 활용하였다.

### III. 결 과

#### 1. 지하철 객차 내 오염물질의 농도 분포

지하철 객차 내에서 조사된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>과

Table 1. The distribution of concentration for pollutants by sampling period and point in subway carriages

Point	Shift (o'clock)	PM (µg/m <sup>3</sup> )				Gases (ppm)	
		N <sub>PM</sub> *	PM <sub>10</sub> **	PM <sub>2.5</sub> **	PM <sub>1</sub> **	N <sub>CO2</sub> *	CO <sub>2</sub> **
Entrance	7-9	10,974	238.4±107.3*	95.4±42.6	29.6±13.1	10,939	1871±890
	11-13	10,493	203.7±86.2	85.6±31.1	27.2±9.4	10,425	1387±490
	18-20	10,795	196.0±104.9	81.7±41.8	25.2±11.5	10,686	1530±641
	Sub total	32,262	212.9±101.8	87.6±39.4	27.3±11.6	32,050	1600±726
Central	7-9	10,973	243.1±107.2	94.4±42.0	29.1±13.1	10,854	1838±867
	11-13	10,475	205.0±82.5	83.0±29.6	26.0±8.7	10,110	1370±456
	18-20	10,769	203.2±105.4	80.8±39.2	24.6±10.6	10,627	1508±615
	Sub total	32,217	217.3±100.9	86.1±37.9	26.6±11.2	31,591	1577±701
Total	7-9	21,947	240.7±107.3	94.9±42.3	29.3±13.1	21,793	1,855±879
	11-13	20,968	204.3±84.4	84.3±30.4	26.6±9.1	20,535	1,379±474
	18-20	21,564	199.6±105.2	81.3±40.5	24.9±11.1	21,313	1519±629
	Sub total	64,479	215.1±101.4	86.9±38.6	27.0±11.4	63,641	1,588±714

\*N<sub>PM</sub>, N<sub>CO2</sub>, N<sub>CO</sub> : number of samples measured during the sampling period.

\*\*Mean concentration standard deviation.

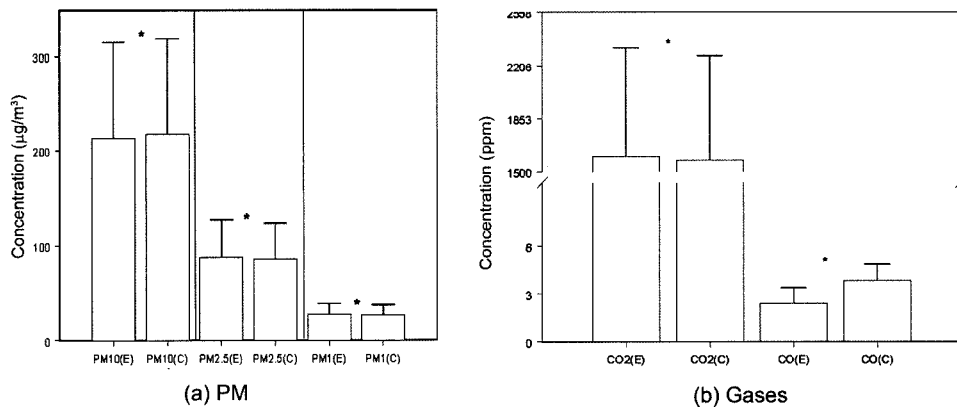


Fig. 3. Comparison of concentration in each pollutants by sampling point in subway carriage. Letters of E and C on the x-axis indicate the sampling site of entrance and central for subway carriages. Symbols of asterisk (\*) in this figure stand for p value < 0.01.

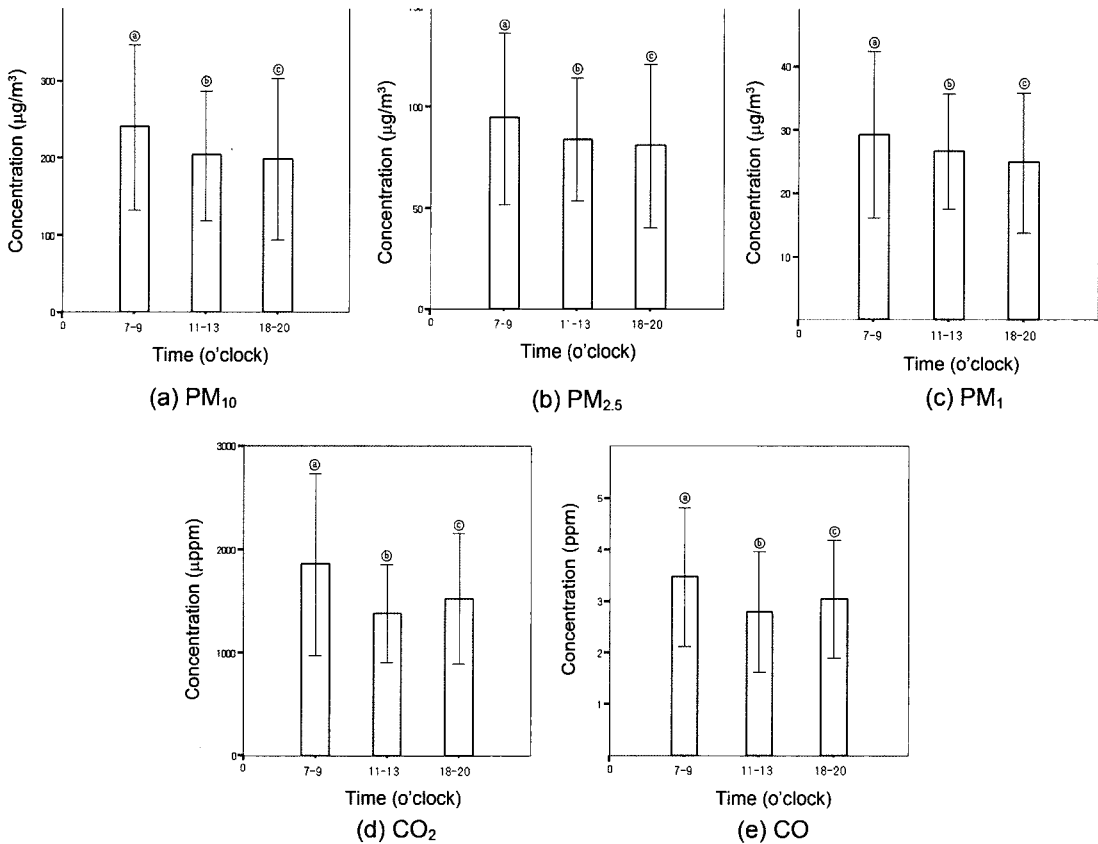


Fig. 4. Comparison of concentration in each pollutants by sampling period in subway carriage. The same letters indicate non-significant difference between groups based on Tukey's multiple comparison test.

CO<sub>2</sub>의 농도분포 조사결과는 Table 1과 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 객차 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>의 평균농도는 각각 215.1 ± 101.4 µg/m<sup>3</sup>, 86.9 ± 38.6 µg/m<sup>3</sup>, 27.0 ± 11.4 µg/m<sup>3</sup>로 조사되었으며, CO<sub>2</sub>의 평균농도는 각각 1,588 ± 714 ppm, 3.1 ± 1.3 ppm으로 조사되었다. 객차의 출입구와 중앙에서의 오염물질의 농도조사 결과 PM<sub>10</sub>의 경우 출입구에서의 농도(212.9 ± 101.8 µg/m<sup>3</sup>)에 비해 중앙에서 조사된 농도(217.3 ± 100.9 µg/m<sup>3</sup>)가 낮은 것으로 조사되었으며, PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 경우 출입구에서의 농도(각, 87.6 ± 39.4 µg/m<sup>3</sup>, 27.3 ± 11.6 µg/m<sup>3</sup>)가 중앙에서의 농도(각 86.1 ± 37.9 µg/m<sup>3</sup>, 26.6 ± 11.2 µg/m<sup>3</sup>)에 비해 높은 농도를 나타내고 있는 것으로 조사되었다. CO<sub>2</sub>는 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>과 같이 객차 출입구에서의 농도(1,600 ± 726 ppm)가 중앙에서 조사된 농도(1,577 ± 701 ppm)에 비해 높은 것으로 조사되었다. 본 연구에서 조사된 객차 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>과 CO<sub>2</sub> 및 CO의 객차 출입구에서의 농도와 중앙에서의 농도간에는 모두 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사

되었다(p<0.01).

## 2. 운행 위치 및 시간대에 따른 객차 내 오염물질의 농도 비교

운행 위치 즉, 지하 또는 지상구간을 운행하는 동안 객차 내 오염물질의 농도를 비교한 결과는 Table 2와 같다. 지하 또는 지상구간을 운행중인 객차 내에서의 PM<sub>10</sub>(각, 218.9 ± 100.3 µg/m<sup>3</sup>와 188.5 ± 101.7 µg/m<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub>(각, 88.9 ± 38.5 µg/m<sup>3</sup>, 74.5 ± 39.6 µg/m<sup>3</sup>) 및 PM<sub>1</sub>(각, 27.5 ± 11.4 µg/m<sup>3</sup>, 23.9 ± 11.7 µg/m<sup>3</sup>)와 CO<sub>2</sub>(각, 1,678 ± 732 ppm, 1,485 ± 571 ppm)의 농도는 지하구간을 운행하는 동안이 지상구간을 운행하는 동안보다 높은 것으로 조사되었으며, 이는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다(p<0.01).

지하철의 운행시간대(아침: 7:00~9:00, 점심: 11:00~13:00, 저녁: 18:00~20:00)별 객차 내 오염물질의 농도 분포의 차이를 조사하기 위해 일변량분산분석 및 사후검정을 수행한 결과 입자상 물질인 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및

**Table 2.** The concentration of each pollutants in carriage by subway location

Pollutant	Location	n	Mean	SD	p-Value
PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	Underground	47812	218.9	100.3	p<0.01
	Ground	9338	188.5	101.7	
PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	Underground	47812	88.9	38.5	p<0.01
	Ground	9338	74.5	39.6	
PM <sub>1</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	Underground	47812	27.5	11.4	p<0.01
	Ground	9338	23.9	11.7	
CO <sub>2</sub> (ppm)	Underground	47811	1678	732	p<0.01
	Ground	9356	1485	571	

n - number of samples used in the analysis, SD - standard deviation.

**Table 3.** Correlation matrix among CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub>

Pollutant	CO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>
CO <sub>2</sub>	1.00*	-0.02*	-0.06*	-0.07*
PM <sub>10</sub>		1.00*	0.92*	0.77*
PM <sub>2.5</sub>			1.00*	0.94*
PM <sub>1</sub>				1.00*

\*Correlation is significant at the 0.01 level.

PM<sub>1</sub>는 모두 아침(각, 240.7±107.3 μg/m<sup>3</sup>, 94.9±42.3 μg/m<sup>3</sup>, 29.3±13.1 μg/m<sup>3</sup>), 점심(각, 204.3 μg/m<sup>3</sup>±84.4 μg/m<sup>3</sup>, 84.3 μg/m<sup>3</sup>±30.4 μg/m<sup>3</sup>, 26.6 μg/m<sup>3</sup>±9.1 μg/m<sup>3</sup>), 저녁(각, 199.6±105.2 μg/m<sup>3</sup>, 81.3±40.5 μg/m<sup>3</sup>, 24.9±11.1 μg/m<sup>3</sup>)의 순으로 높은 농도를 나타냈으며, 모두 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으며(p<0.01), CO<sub>2</sub>는 아침(각, 1,855±879 ppm, 3.5±1.3 ppm), 저녁(각, 1,519±629, 3.1±1.1 ppm), 점심(1,379±474 ppm, 2.8±1.2 ppm)의 순으로 통계적으로 유의한 농도차이를 나타냈다(p<0.01).

### 3. 객차 내 오염물질간의 관련성 및 승객수와의 관련성

운행 중인 객차 내에서 조사된 공기 중의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 및 CO<sub>2</sub>간의 상관성을 분석한 결과 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>1</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>의 상관의 크기는 각각 0.92, 0.77 및 0.94로 모두 높은 양의 상관관계를 나타냈다(p<0.01).

차량 내 승객수는 조사원이 역사 단위로 실제 승객수를 조사하였는데, 이는 지하철 1량의 좌석수 54석을 기본으로 앉은 사람과 서있는 사람 수를 합하고, 100명 이상의 승객수는 단위면적 당 승객수를 세어, 전체 승객수를 환산한 혼잡도와 거의 같은 결과를 나타냈다.

객차 내 오염물질 중 높은 상관관계를 보인 입자상 물질간의 함유율을 조사한 결과 Table 4와 같다. PM<sub>10</sub>에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 함유율은 41±7%로 조사되었으며, PM<sub>10</sub>에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 농도를 예측할 수 있는 회귀방정

**Table 4.** Corresponding measurement of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub>

Point	Ratio	n	Mean	SD
Entrance	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> <sup>1)</sup>	32,262	0.42	0.07
	PM <sub>1</sub> /PM <sub>10</sub> <sup>2)</sup>	32,262	0.14	0.04
	PM <sub>1</sub> /PM <sub>2.5</sub> <sup>3)</sup>	32,262	0.32	0.04
Central	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	32,217	0.40	0.07
	PM <sub>1</sub> /PM <sub>10</sub>	32,217	0.13	0.04
	PM <sub>1</sub> /PM <sub>2.5</sub>	32,217	0.32	0.04
Total	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	64,479	0.41	0.07
	PM <sub>1</sub> /PM <sub>10</sub>	64,479	0.13	0.04
	PM <sub>1</sub> /PM <sub>2.5</sub>	64,479	0.32	0.04

n - number of samples used in the analysis, SD - standard deviation, 1) - PM<sub>2.5</sub> to PM<sub>10</sub> exposure ratio; 2) - PM<sub>1</sub> to PM<sub>10</sub> exposure ratio; 3) - PM<sub>1</sub> to PM<sub>2.5</sub> exposure ratio.

식을 산출한 결과 PM<sub>2.5</sub>(μg/m<sup>3</sup>)=11.00 + 0.35PM<sub>10</sub>( μg/m<sup>3</sup>)(R<sup>2</sup>=0.84, p<0.01, n=57156)으로 PM<sub>10</sub> 농도 변화는 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화의 84%를 설명할 수 있는 높은 유의한 관련성을 나타냈다. 또한 PM<sub>2.5</sub>에 대한 PM<sub>1</sub>의 함유율은 32%로 조사되었으며, PM<sub>2.5</sub>에 대한 PM<sub>1</sub>의 농도를 예측할 수 있는 회귀방정식을 산출한 결과 PM<sub>1</sub>(μg/m<sup>3</sup>)=2.8 + 0.28PM<sub>2.5</sub>(μg/m<sup>3</sup>)(R<sup>2</sup>=0.89, p<0.01, n=57156)로 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화는 PM<sub>1</sub> 농도 변화의 89%를 설명할 수 있는 매우 높은 유의한 관련성을 나타냈다.

객차 내 정원 승객수인 160명 이하의 승객인원이 탑승한 객차 내 인구 밀집도와 PM<sub>10</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 농도와의 관계를 조사한 결과 PM<sub>10</sub>은 승객의 수와의 상관의 크기가 -0.13로 음의 관계가 있는 것으로 조사되었으며(p<0.01), CO<sub>2</sub>은 승객의 수와의 상관 크기가 0.52로 양의 관계가 있는 것으로 조사되었다(p<0.01). 또한 현재 국내 '다중이용시설 등의 실내공기질관리법'에서 정하고 있는 지하역사에서의 PM<sub>10</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 기준인 150 μg/m<sup>3</sup>과 1,000 ppm을 객차 내에서 유지하기 위한 적정 승객수를 산출하기 위해 회귀방정식을 산출한 결

과 승객수(명) =  $34.06 + 0.04\text{CO}_2(\text{ppm}) - 0.09\text{PM}_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$  ( $R^2=0.30, p<0.01, n=707$ )으로 산출되었으며, 각 오염물질별 현 기준치이하를 유지하기 위한 객차 내 적정 승객수는 61명으로 조사되었다.

#### IV. 고 찰

국내 운송 수단 내의 실내공기질에 관한 연구는 매우 미흡한 수준이다. 특히 지하철의 경우 지하철 역사에 대한 연구는 매년 꾸준히 연구되어져 오고 있으나 객차 내 공기질에 관한 연구는 일부 연구자에 의해 간헐적으로 수행된 몇건의 연구(박 등, 2005; 광 등, 2005; Jo and Park, 1999)에 불과한 실정이다. 또한 이들 연구는 일부 구간이나 일부 호선 등에 국한되어 수행되어져왔다. 이에 본 연구는 서울에 위치한 1기 및 2기 지하철 전체 호선(1호선부터 8호선)을 운행하는 객차를 대상으로 객차가 운행하는 전 구간에서 호선별 3회씩, 아침, 점심, 저녁의 시간대별로 객차 내 실내공기질을 조사하여 제시함으로써 본 연구의 수행을 통해 획득된 결과는 향후 국내 및 국외 관련 연구에 있어 유용한 자료로서 활용되어질 가능성이 매우 높을 것으로 사료된다.

본 연구에서 조사된 객차 내 입자상 오염물질인 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>의 평균농도는 광 등(2005)에 의해 조사된 서울시 2기 지하철인 5호선, 6호선, 7호선 및 8호선의 승무원석에서 조사된 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 평균농도인  $79.1 \pm 36.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $61.1 \pm 29.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 PM<sub>10</sub>은 약 2.7배, PM<sub>2.5</sub>는 1.4배 높은 것으로 조사되었다. 이와 같은 농도의 차이는 관현석 등의 연구는 승무원 석에서 조사된 연구결과인 반면 본 연구는 다수의 승객들이 이용하는 객차에서 조사된 연구결과로 승객들의 행동에 의한 객차 내 입자상 먼지의 증가로 기인된 결과로 여겨진다. 즉, 지하철 객차 및 지하철역사의 입자상 물질의 주요 발생원으로 지하철 이용승객들의 이동, 지하철 운행과정에서의 입자상 물질의 배출 및 환기에 의한 입자상 물질의 도입으로 알려져 있으며, 본 연구의 결과와 관현석 등의 연구결과간의 차이는 지하철역사의 입자상 물질의 주요 발생원 중 이용승객들의 이동에 의해 기인한 결과로 사료된다. 본 연구에서 조사된 PM<sub>10</sub>의 평균농도는 Adams 등(2001)이 여름철 영국 런던 지하철 객차 내에서 조사한 평균농도인  $247.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 것으로 조사되었으나, Chan (2002)에 의해 조사된 중국의 Guangzhou와 Hong Kong의 지하철 객차 내에서 조사된 평균농도인  $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 매우 높은 농도를 나타냈다.

또한 본 연구에서 조사된 PM<sub>2.5</sub>의 평균농도는 Chan (2002)에 의해 조사된 중국의 Guangzhou의 지하철 객차 내에서 조사된 평균농도인  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 농도를 나타냈다.

본 연구에서 조사된 객차 내 CO<sub>2</sub> 평균농도는 관현석 등(2005)에 의해 조사된 객차 내 승무원석에서 조사된 CO<sub>2</sub>의 평균농도인  $1.189 \pm 525\text{ppm}$ 에 비해 높은 농도를 나타냈다. 본 연구의 결과가 관현석 등의 결과에 비해 높게 나타난 것은 CO<sub>2</sub>는 호흡에 의해 배출되는 대표적 오염물질로 1인의 승무원이 있는 승무원석에 비해 다수의 승객들이 이용하는 객차의 경우 승객들의 호흡에 의한 이산화탄소의 증가로 기인한 결과로 여겨진다.

지하 및 지상구간의 운행중인 객차 내 오염물질의 농도 비교 결과 지하구간을 운행 중에 있는 객차 내 오염물질의 농도가 지상구간을 운행 중에 있는 객차 내 오염물질의 농도에 비해 높은 것으로 조사되었으며, 이는 광 등(2005)과 Adams 등(2001)의 연구 결과와 동일한 결과를 나타냈다. 이는 객차 내 실내공기질은 운행 구간 즉 지상과 지하의 운행구간에 따라 영향을 받고 있으며, 또한 지하구간의 공기질이 지상구간의 공기질에 비해 매우 악화되어 있음을 간접적으로 시사하는 결과라 할 수 있다.

객차 내 오염물질간의 관계를 조사한 결과 입자상 물질인 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>1</sub>간에는 높은 양의 상관관계가 있는 것으로 조사되었으며, 입자상 물질간의 함유율을 조사한 결과 PM<sub>10</sub>에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 함유율은 41%로 조사되어 Chan(2002) 등에 의해 조사된 중국 Guangzhou의 지하철 객차 내 PM<sub>10</sub>에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 함유율인 79%에 비해 낮은 함유율을 나타냈다. 또한 국립환경연구원에 의해 조사된 서울시 대기중의 PM<sub>10</sub>에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 함유율인 51%에 비해 낮은 것으로 조사되었다. PM<sub>2.5</sub>는 2차로 발생하는 미세한 크기의 오염물질 입자로서 도시의 대기나 지하철에서 측정된 PM<sub>2.5</sub>의 오염원은 대부분 자동차 배출물에 기인한 것으로 알려져 있으며(Chan, 2002), 또한 PM<sub>10</sub>은 자연 상태에서 발생하는 거대입자와 PM<sub>2.5</sub>로 구성되어 있음을 고려할 때, 본 연구에서 조사된 서울시에 운행되어지고 있는 객차 내 실내공기중의 입자상 물질은 승객들에 부착되어 있던 외부 토양입자 등 자연 상태에서 발생하는 거대입자의 유입과 환기구를 통한 외기로부터 유입 및 승객들에 부착된 자동차 배출물이 객차 내로 유입되어 실내공기를 악화시키고 있는 것으로 여겨진다. 또한 PM<sub>10</sub>에 비해 PM<sub>2.5</sub>의 함유율이 타 지하철 객차내에서 조사된 결과 및 서울시 대기에서 조사된 결과에 비해 낮은 것은 서울시 객차 내 공기중 입자상 오염물

질의 경우 자동차 배출물 등과 같은 2차로 발생된 입자상 오염물질에 비해 토양 등과 같은 자연 상태에서 발생된 거대입자에 의한 오염의 기여율이 높음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

객차 내 승객 수 즉, 인구 밀집 정도와 오염물질의 농도간의 관련성을 조사하기 위해 객차 내 공기질을 조사와 동시에 탑승자의 수를 조사하였으나 탑승자의 수가 정원인 160명을 초과할 경우 탑승자 수의 조사를 정확히 수행할 수 없었다. 이에 본 연구결과에서는 정원인 160명 이하의 탑승 조건에서의 객차 내 인구 밀집 정도와 오염물질의 농도간의 관련성을 분석하였으며, 그 결과 객차 내 승객의 수에 따라 CO<sub>2</sub>는 양의 관련성을 보인 반면 입자상물질인 PM<sub>10</sub>은 상관의 크기는 작았으나 음의 관련성을 보이는 것으로 조사되었다. CO<sub>2</sub>의 경우 승객의 호흡산물의 대표적 물질로 승객의 수와 객차 내 농도가 양의 상관을 나타낸 것으로 사료된다. 그러나 음의 상관성을 나타낸 입자상 물질인 PM<sub>10</sub>의 경우는 객차 내 승객의 수가 증가함에 따라 객차 내 승객들의 움직임이 커지 못함으로써 승객들의 움직임에 의한 오염물질의 발생이 감소함에 기인한 결과로 여겨진다. 즉, 초기에는 승객이 증가함에 입자상 물질의 농도가 증가하다가 인구 밀집도가 증가하여 활동이 부자연스러워짐에 따라 농도가 감소되어진 것으로 사료된다.

객차 내 실내공기 중 문제시 되고 있는 CO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub>을 대상으로 객차 내 적정승객수를 산출하기 위해 회귀방정식을 산출하여 환경부의 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'에서 정하고 있는 지하역사 내 실내공기질에 관한 기준안 중 CO<sub>2</sub> 및 PM<sub>10</sub>의 기준인 1000 ppm과 150 µg/m<sup>3</sup>을 적용하여 객차 내 적정 승객수를 산출한 결과 61명으로 조사되었다. 현재 국내 지하철 객차 1칸의 좌석은 7인용이 2개 경로석 3인용이 4개로 총 좌석 수가 54개이며, 손잡이 12개 짜리 6개, 5개 짜리 4개로 좌석에 앉고 손잡이를 잡고 서면 146명이 지하철을 탈 수 있도록 설계되어져 있으며, 정원인원으로는 160명으로 제시되고 있다. 그러나 본 연구에서 조사된 적정 승객수는 61명으로 객차 내 실내공기질이 매우 열악한 환경에 노출되어 있는 것으로 조사되었다. 적정 승객수를 산출하는데 적용된 기준은 앞에서 제시한 바와 같이 지하철 객차 내 환경과는 다른 특성을 가진 공간에 적용되는 기준이며, 또한 다른 주요 실내오염물질을 고려하지 않고 산출된 식으로 결과 해석에 있어 오해가 발생할 가능성이 높으나 향후 관리방안 설정에 있어 기초적 자료의 제시라는데 그 의미를 지닐 수 있다.

## V. 결 론

국내 실내공기질에 관련된 연구는 1980년대 말부터 시작하여 1996년 12월 30일 환경부의 '지하생활공간공기질관리법'의 제정 이전까지 주택 및 사무실 등의 일부 시설에 대해 중점적으로 수행되어져 왔으며, 그 후 지하철역사 등으로의 연구 대상시설이 확대되어졌다(이와 김, 2004). 또한 2004년 5월 30일 '다중이용시설 등의 실내공기질관리법'의 시행을 통해 불특정 다수인이 이용하는 다중이용시설들에 관한 실내공기질의 실태조사를 통한 관리방안 설정에 관한 다수의 연구가 수행되어져 오고 있으나 아직 운송수단 내 실내공기질에 관한 연구는 매우 미진한 실정이다. 이에 본 연구는 서울시 등 국내 대도시의 높은 교통분담률을 차지하고 있는 지하철 객차 내 실내공기질 관리를 위한 기초자료의 확보를 목적으로 입자상 물질과 가스상 물질 중 CO<sub>2</sub> 및 CO에 대한 실태조사 결과를 제공하고자 수행되었다.

본 연구의 수행을 통해 산출된 결과를 요약하면 다음과 같다. 지하철 객차 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 평균농도는 각각 215.1±101.4 µg/m<sup>3</sup>, 86.9±38.6 µg/m<sup>3</sup>, 27.0±11.4 µg/m<sup>3</sup>, 1,588±714 ppm으로 조사되었다. 지하 또는 지상구간을 운행하는 동안의 객차 내 입자상 물질과 CO<sub>2</sub>의 농도는 지하구간을 운행하는 동안이 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 또한 지하철의 운행시간대에 따른 객차 내 오염물질의 농도 분포에 조사 결과 입자상 물질은 아침, 점심, 저녁의 순으로, CO<sub>2</sub>는 아침, 저녁, 점심의 순으로 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다.

객차 내 오염물질 별 상관관계를 조사한 결과 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>1</sub>간의 상관의 크기가 각각 0.92와 0.94로 높은 양의 상관관계를 나타냈으며, PM<sub>10</sub>에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 함유율은 41±7%로, PM<sub>2.5</sub>에 대한 PM<sub>1</sub>의 함유율은 32±4%로 조사되었다.

객차 내 승객인원이 탑승한 객차 내 인구 밀집도와 PM<sub>10</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 농도와의 관계는 PM<sub>10</sub>의 농도는 승객의 수와 음의 관계가 있는 것으로 조사된 반면, CO<sub>2</sub>의 농도는 승객의 수와 양의 관계가 있는 것으로 조사되었으며, 이 두 오염물질을 이용한 객차 내 적정한 승객수를 산출하기 위한 일환으로 회귀방정식을 산출한 결과 승객수(명) = 34.06 + 0.04CO<sub>2</sub>(ppm) - 0.09PM<sub>10</sub>(µg/m<sup>3</sup>) (R<sup>2</sup>=0.30, p<0.01, n=707)으로 각 오염물질별 지하역사에 적용되어지고 있는 현 기준치의 이하로 유지하기 위한 객차 내 적정 승객수는 61명으로 조사되었다.

## 참고문헌

1. Choi, H. W., Hwang, I. J., Kim, S. D. and Kim, D. S. : 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, 2004.
2. Kwag, H. S., Jin, K. W., Yang, W. S., Choi, S. J. and Park, D. U. : Evaluation on air quality inside subway driver cabin by monitoring PM, CO<sub>2</sub>, and CO levels. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(5), 379-386, 2005.
3. Kim, J. K., Shin, H. S., Lee, J. J., Kim, K. and Lee, J. H. : Study on the biological effects of TSP collected from the subway station with tradescantia bioassay. *Korean Journal Environmental Toxicology*, **17**(3), 245-252, 2002.
4. Song, H. B., Shin, D. C., Hwang, S. M., Park, Y. J., Hong, S. H., Moon, Y. H. and Baek, S. O. : Characterization of indoor air quality at subway stations in Taegu Area. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **21**(9), 1673-1688, 1999.
5. Kim, M. Y., La, S. H., Shin, D. C., Han, K. M., Choi, K. S. and Chung, I. H. : Distribution characteristics between line and line for indoor air pollutant factors at subway stations in Seoul Area. *Korean Journal of Environmental Health and Society*, **24**(2), 134-144, 1998.
6. Kim, D. S., Kim, S. D., Kim, Y. S., Shin, E. B. and Lee, T. J. : Quantitative determination of aerosol contribution in Seoul metropolitan subway stations. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **16**(3), 309-319, 1994.
7. Park, D. U., Yun, K. S., Park, S. T. and Ha, K. C. : Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> levels inside train and in platform of subway. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(1), 39-46, 2005.
8. Adams, H. S., Nieuwenhuijsen, M. J., Colville, R. N., McMullen, M.A.S. and Khandelwal, P. : Fine particle (PM<sub>2.5</sub>) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *The Science of the Total Environment* **279**, 29-44, 2001.
9. 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 models while commuting in urban area of Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **36**, 5831- 5840, 2002.
10. Dor, F., Moullec, Y. L. and Festy, B. : Exposure of city residents to carbon monoxide and monocyclic aromatic hydrocarbons during commuting trips. *Economic Geography* **20**, 109-114, 1995 (in Chinese).
11. Jo, W. K. and Park, K. H. : Commuter exposure to volatile organic compounds under different driving conditions. *Atmospheric Environment*, **33**, 409-417, 1999.
12. Lee, C. M. and Kim, Y. S. : Korean journal of environmental sciences for monitoring. *Health and Control*, **1**(1), 39-60, 2004.