

## 서울 지하철 시청역 구내에서의 부유먼지 농도의 변동 패턴과 측정방법간 비교

김민영 · 정일현  
단국대학교 화학공학과

### The Measurement of Airborne Particulate Matter Using Different Methods at City Hall Station of Subway in Seoul

Min young Kim and Il-hyun Jung

Department of Chemical Engineering, Dankook University  
Yongsan-gu Hannam-dong San 8, Seoul 140-7, Korea

The concentrations of PM<sub>10</sub> and TSP were measured and compared using high volume air samplers, PM<sub>10</sub> high volume air samplers, mini volume air samplers, and  $\beta$ -ray attenuation type dust monitor simultaneously at City Hall station of subway line 1, in Seoul. The concentration of particulate matter appeared to be decreased at mid-night and reached to a minimum value at 5 a.m.. It can be considered that the diurnal variation caused by air currency due to the running trains and the moving passengers. A regular pattern was shown in this variation due to stable particle concentration. The weekly variation of suspended particulate matter concentration for different measuring methods showed same pattern having lowest concentration on weekend. The pattern of variation between methods was highly correlated but the concentration measured by individual method was fluctuated for the measuring period. The concentration and coefficient of variability of TSP measured by high volume air sampler ranged from 13.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  to 41.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and from 3.2% to 8.3% respectively and those by mini volume air sampler ranged from 0.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  to 13.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and from 0.4% to 4.3% respectively. The precision level of mini volume air sampler was higher than that of high volume air sampler.

**Key words :** PM<sub>10</sub>, TSP, coefficient of variation

#### 1. 서 론

환경부에서는 그간 실내오염 권고기준을 총먼지 (TSP)로 규정하고 있었으나, 최근에 '지하공간 실내공기질 관리법' 시행규칙에서 실내환경기준치로서 TSP 대신 PM<sub>10</sub> 농도로 규정(관보 13816호, 98. 1. 26)하기 시작했다.

또한 현행 먼지에 대한 환경대기 측정방법은 환경부 고시 91-73호(91. 11. 5)<sup>1</sup>와 환경측정기기의 형식 승인, 정도검사 등에 관한 고시 96-86호(96. 7. 1)<sup>2</sup>에 의거  $\beta$ -선흡수법, 고용량 공기포집법, 저용량 공기포집법, 광산란법과 광투과법 등으로 되어 있다.

환경정책기본법 시행령 중 개정령 (대통령령 제 14069호 [관보 12606호(93. 12. 31)])에 의하면 총먼지의 경우  $\beta$ -선 흡수법, 고용량 공기포집법으로 되어 있고, 미세먼지는  $\beta$ -선 흡수법으로 측정방법을 한정하여 놓고 있다. 또한 보건복지부의 공중위생법에서는 실내공기 중의 미세먼지 측정은 다단식 분립기를 부착한 저용량 공기포집법으로 제정하여 시행하고 있다.

고용량 공기포집법이나 저용량 공기포집법 등은 직접법으로서 먼지 무게를 직접 칭량함으로써 정확히 먼지 농도를 측정할 수 있는 반면에 상대농도를 구하는 광투과식, 광산란식 등 간접법은 각종 방해요인이 있을 수 있으므로 지역과 장소, 계절에

따라 직접법과 비교하여 보정하지 않으면 안된다.  $\beta$ -선 흡수법은 그 원리상 질량 농도를 구하는 직접법의 범주에 포함하는 것으로 볼 수 있으나 원리와 구조상 몇가지 특징이나 제약을 갖고 있다. 또한  $PM_{10}$ (미세먼지) 측정은 현실적으로  $\beta$ -선 흡수법과 함께  $PM_{10}$  고용량 공기포집법이나 저용량 공기포집법 혹은 미니 용량 공기포집방법 등이 병행 사용되고 있는 실정이므로 이들 먼지 측정법의 특성을 규명하여 문제점을 파악하는 것은 이들 먼지 측정법의 선정이나 사용시 또는 측정 결과의 해석을 위해서도 매우 중요한 일이라 하겠다.

우리나라에서는 1991년에  $\beta$ -선 흡수법을 공정 시험방법으로 채용한 이래 대기오염 측정망에 국가와 여러 지방자치단체에서 주로 이 방법을 도입 가동하고 있고 유럽, 미국, 일본, 동남아시아 등 세계의 여러 나라에서도 사용하고 있다.

현재 서울은 지하철 총 연장 277.9 km에, 1~8호선을 개통 운행중이거나 건설중이며 총 198 개 역사와 1 일 이용객 470만명에 이르고 있다.<sup>3</sup> 서울시 지하철공사에서는 1, 2, 3, 4호선마다 각 1 개 역을 선정 실내 공기질을 측정할 수 있는 실내공기질 연속관측장비(Indoor Air Quality Monitor)를 설치 운영 중에 있다. 그러나 시행규칙 공포 이전(1998. 1. 26)까지 먼지 농도 측정에는  $\beta$ -선 흡수법의 측정기에서 시료가스 도입 부분의 분립기를 떼어 내고 시료공기를 도입 측정된 데이터를 TSP 농도로 사용하였다. 그러나, 고용량 공기포집기를 부유먼지의 기준측정법이라고 하였을 때 실내환경에서의 측정법간의 실제적 차이가 있을 것으로 예상되어 일반 대기환경 중에서 이들 측정법간에 정밀한 비교 분석을 시도하게 되었으며 아울러 지하철 1호선 시청역사 내에서의 부유먼지의 농도와 변동패턴을 조사하였다.

## 2. 측 정

### 2.1. 시료 채취 장소 및 측정 기간

부유먼지의 비교 측정은 Indoor Air Quality Monitor가 설치되어 있는 지하철 1호선 시청역을 대상으로 하였으며, 측정은 1차로 1997년 6월 2일부터 6월 17일까지 16 일간, 2차로 동년 7월 23일부터 8월 8일까지 17 일간 등 총 33 일간 실시하였다. 시청역은 서울의 가장 중심에 위치하고 현재 개통 중인 1호선~5호선까지의 총 166 개 역(이중 20 개 역사는 지상 구간) 중에서 이용객 수가 일일 평균 약 52,000 인으로 이용객이 비교적 많은 역 중의 하나이며, 2호선 시청역과는 서로 관통되어 있어 오염의 영향을 서로 주고 받는 곳이다. 측정 장소는 대합실층 중간 부분으로 승강장으로 내려가는 계단이 있는 근처로서 그 위치상 승강장과 대합실간의 공기 이동이 가장 원활한 곳이라 사료된다. 1호선 시청역의 일반 현황은 Table 1과 같고 측정 위치는 Fig. 1과 같다.

### 2.2. 측정장치의 원리

#### 2.2.1. $\beta$ -선 흡수법

먼지농도를 연속 자동 측정하기 위한  $\beta$ -선 흡수법은 Nader<sup>4</sup> 등과 Essen<sup>5</sup>에 의하여 연구, 개발 되었으며, 부유입자상물질 채취기구, 여지공급기구,  $\beta$ -선원, 검출기 및 연산제어기 등으로 구성되어 있다. 이 방법은 대기 중의 부유입자상물질을 여지 위에 포집하여 를 형태의 유리 섬유 여지와 여지 위에 포집된 먼지에 의한  $\beta$ -선의 흡수도에서 대기 중 먼지 농도를 구하는 것이다. 낮은 에너지의  $\beta$ -선은 에너지의 일부가 여지와 여지 위에 포집

Table 1. The present status of City Hall Station of Subway Line 1 in Seoul.

Total Area (m <sup>2</sup> )	Waiting Room (m <sup>2</sup> )	Platform (m <sup>2</sup> )	Supply Flow Rate (m <sup>3</sup> /hr)		Exhaust Flow Rate (m <sup>3</sup> /hr)	Ratio of Supply- Exhaust Flow Rate	Number of Air changes per hour
			Ventilator	Air conditioner			
10,421	7,533	2,888	8,160	236,040	246,120	0.99	6.75

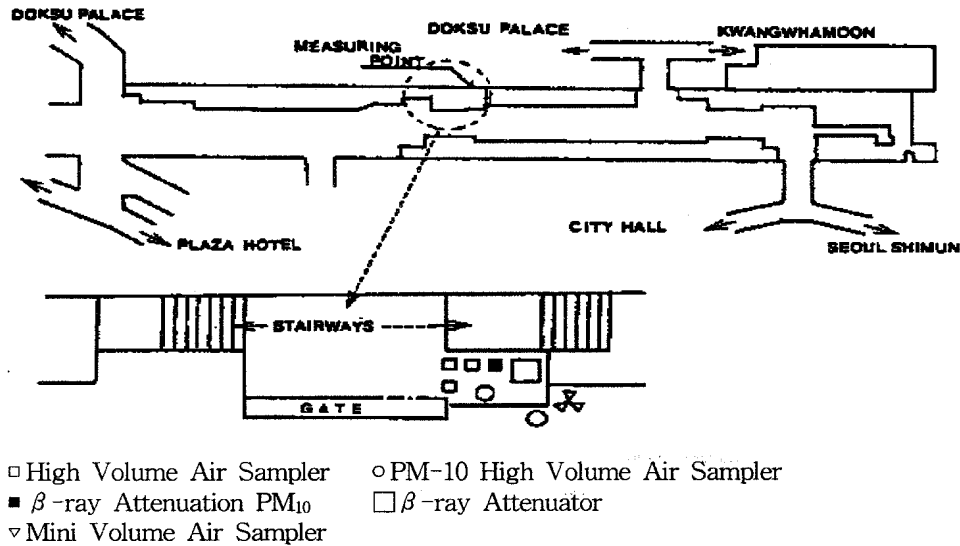


Fig. 1. Location of Various of samplers at waiting room.

된 먼지에 흡수되고 나머지는 통과하게 되므로 통과된  $\beta$ -선 강도와 먼지의 중량 사이의 관계에서 농도를 구한다.  $\beta$ -선원으로는 방사성 동위원소  $^{147}\text{Pm}$ 을 밀폐형으로 사용하고 방사선의 강도는 원자력법에 규정한  $100\mu\text{Ci}$  이하의 저에너지이므로 안전성이 높으며, 검출기에는 전리상(intillator)를 사용하고 있다.

측정범위는  $0\sim 500\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0\sim 1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0\sim 2000\mu\text{g}/\text{m}^3$  등의 세 가지 범위로 자동 스위칭 기능을 갖고 있다. 측정 정도는 최대 눈금치의 10% 이내이다. 모든 측정 조작 및 측정치의 연산은 제어부의 지시에 의해서 자동적으로 행하여지며 중량 농도로서 지시 기록된다. 측정기의 교정은 교정용 입자를 사용하여 기준측정법과 동시 측정하여 실시하는 것(동적 교정)을 원칙으로 하지만 감도유지를 위한 일상적인 교정은 마일러나 폴리아미드 등의 박막을 카세트 상태로 한 등가막(Standard Film)을 사용하는 정적교정에 통상 의존하고 있다. 그러나 정적교정은 어디까지나 검출기의 감도나 연산제어부의 작동 상태를 확인하기 위한 것이기 때문에 환경대기로 표준측정법과 동시 측정을 행하는 것이 바람직하다고 사료된다. 이같이 표준측정법과 동시측정에 의한 확인은, 동적과정으로 의미를 부여할수 있게 되므로 사용개시시에 행하여야 하나 샘플링 시스템의 변경등의 경우에도 행하

는 것이 바람직하다. 즉, 환경대기를 표준측정법인 고용량 공기포집기나 저용량 공기포집기 혹은 미니용량 공기포집기와 동시에 2~3일의 측정기간에 3회 이상 측정하여 표준측정법과 측정치의 차이가  $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$  또는  $\pm 10\%$ 의 범위 내에 있는가를 확인(일본 환경청 지침)해야만 한다.

$\beta$ -선 흡수법은 질량 농도를 직접 구할 수 있고 먼지농도는 자동연산 기능이 있는 프린터에 직접 기록되어 농도 환산 작업이 필요치 않다. 또한 안정성이 높고 2~3 개월마다 여지 교환 작업 이외에는 유지관리가 필요치 않는 등의 장점이 있으나  $30\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하의 저농도 역에서 정확 정밀도가 충분치 않은 결점이 있다.

### 2.2.2. High volume air sampler

고용량 공기포집기(High volume air sampler)는 유리섬유상 여지( $20\times 25\text{cm}$ )를 통하여 대략  $1.5\text{m}^3/\text{min}$ 의 공기흡입량으로 대기를 24 시간 흡인하여 포집한 부유먼지를 칭량하여 흡인량으로부터 농도를 구하며 공기흡인유량은 roots meter로 교정한다. 채취 전후의 여지는 습도 50%의 분위기 중에서 24~48 시간 항량한 다음 상대습도 50%의 항온항습실에서 화학천칭(최소눈금  $0.1\text{mg}$ , Mettler AE200)을 사용하여 칭량하였다. 1차 측정시는 Graseby의 표준형 고용량 공기

포집기를 사용하였고, 2차 측정시는 Ecotech의 brushless 표준형 고용량 공기포집기를 사용하였다.

### 2.2.3. PM<sub>10</sub> high volume air sampler

PM<sub>10</sub> 고용량 공기포집기는 10  $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 포집기 위하여 입경선별도입장치(size selective inlet)를 고용량 공기포집기에 부착시킨 것으로서 미국 EPA의 Federal Reference Method (FRM)<sup>6</sup>에서 권고하는 대기질 측정 장비이며 채취 유량은 1.13 m<sup>3</sup>/min(40 ft<sup>3</sup>/min)이다. 그외는 위의 고용량 포집기와 동일하다.

### 2.2.4. Mini volume air sampler

5L/min의 유속으로 필터에 공기를 채취하였으며 채취 후의 여지는 습도 50%의 데시케이터에서 24~48 시간 건조시켜 항량하였다. 본 장치는 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 미국 EPA의 FRM 채취 장치는 아니나 대기질 측정 자료에서 Reference Method와 상당히 근접한 결과를 나타내는 장비로서 정확성 밀성이 좋고, 배터리 가동과 경량 저소음형으로 실내공기 측정에 장점이 많은 기기이다.

## 2.3. 측정 장치의 비교

비교시험에 사용한 5 종류의 먼지측정방법은 Table 2와 같다. 고용량 공기포집기 3 , PM<sub>10</sub> 고용량 공기 포집기 2 대, 미니용량 공기포집기 3 대 그리고  $\beta$ -선 흡수법의 분립기를 제거한 것 (Kimoto  $\beta$ -SPM monitor Model 186C)과 분립기를 부착한  $\beta$ -선 흡수법(Wedding사) 각 1 대 등 총 10 대의 장비를 동원하여 동일 장소에서 측정 비교하였다.

미니용량 공기포집기 여지는 47 mm의 (Pallflex 제) 테프론 코팅 유리섬유여지를 사용하였으며 측정전후의 무게는 마이크로 바란스(Mettler UMT-2)로 0.1  $\mu\text{g}$ 까지 칭량하였다. 그리고  $\beta$ -선 흡수법에서 사용한 여지는 아크릴수지로서 유기바인더 처리한 유리섬유체 여지를 사용하며 포집경은 11 mm 이고 흡입가스유량은 18 L/min으로서 측정단위는 1 시간이다.

**Table 2.** Five kinds of measuring equipments for airborne particulate matter.

Measuring Equipment	Maker & Model	Subject of measurement	Operating time/sampling volume	Filter	Number of equipment use
High Volume Air Sampler	Graseby GS2380	TSP	24hrs/ $\approx$ 1500m <sup>3</sup>	Whatman	3
	Ecotech 2000			WPM 2000	2
PM <sub>10</sub> High Volume Air Sampler	Wedding 600	PM <sub>10</sub>	24hrs/ $\approx$ 1200m <sup>3</sup>	Whatman WPM 2000	2
Mini Volume Portable Sampler	Air Metrics Minivol	PM <sub>10</sub>	24hrs/7.2m <sup>3</sup>	Pallflex T60 A20	3
$\beta$ -ray Attenuation PM <sub>10</sub> Sampler	Wedding B-G	PM <sub>10</sub>	1hr/1.08m <sup>3</sup>	Schleicher & schuell GF-10	1
$\beta$ -ray Attenuator*	Kimoto 186C	TSP	1hr/1.08m <sup>3</sup>	Toyo GS-25K	1

\* removed the 10  $\mu\text{m}$  cut cyclone

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 측정농도의 비교

고용량 공기포집기등 모두 5 종류의 측정장치에 의한 2차 측정결과는 Table 3과 같다. 고용량 공기포집기로 측정한 총부유먼지 농도의 평균치는  $215.0 \pm 20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (평균 $\pm$ 표준편차)이었으며 최저  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  최고  $251.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다.  $\text{PM}_{10}$  고용량 공기포집기에 의한 미세먼지( $\text{PM}_{10}$ ) 농도가 가장 낮은 농도를 나타내어 평균  $124.1 \pm 18.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.

미니용량 공기포집기와  $\beta$ -선 흡수법( $\text{PM}_{10}$ )은 각각  $144.3 \pm 20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $142.4 \pm 17.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 유사한 것으로 나타났으며 최저치 및 최고 농도도 각각  $106.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $105.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 그리고  $175.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $169.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 비슷하였다. 그러나  $\text{PM}_{10}$  분립기를 제거한  $\beta$ -선 흡수법은  $174.4 \pm 27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고용량 공기포집기에 의한 총부유먼지와 미니용량 공기포집기 그리고 분립기가 있는  $\beta$ -선 흡수법에 의한 측정치의 거의 중간 정도의 농도를 나타내고 있었다.

따라서 분립기를 제거한  $\beta$ -선 흡수법에 의한 측정값이 총부유먼지라고 평가하는 데는 문제가 있을 수 있다고 생각된다. 이는 3 m 이내의 제한된 실내 높이에서 각 측정기의 먼지 포집 위치의

차이와, 설치위치간에 공기 흐름 정도에 차이와 그리고 지하철 역사의 전압 변동 등에 따른 유량의 안정성 문제 등이 있었겠으나, 최근의  $\beta$ -선 흡수법은 분립기를 부착하여  $\text{PM}_{10}$  분석용으로 설계되기 때문에 분립기 이외에 측정기의 시료 도입구의 구조에 문제가 있을 수 있으므로 이에 관하여는 추후 상세한 조사 분석이 필요한 것으로 사료된다.  $\beta$ -선 흡수법의 분립기 부착여부의 차이에 따른 먼지농도는,  $\text{PM}_{10}$ 에 비하여 TSP 농도가 22.5% 높았고,  $\beta$ -선 흡수법에 의한  $\text{PM}_{10}$  농도와 고용량 공기포집기간에는 23.2%의 차이가 있었다.

#### 3.2. 농도별 출현빈도

2차 시험기간 중  $\beta$ -선 흡수법에 의한 미세먼지  $\text{PM}_{10}$ 의 농도별 출현빈도는 Fig. 2와 같다. 총 371회의 측정값 중 일반 환경대기 기준치인 연평균치  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하를 나타낸 회수는 55 회로 14.8%를 차지하고 있고, 단기기준인 24 시간 평균치인  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하인 회수는 184 회로 전체 측정치의 49.6%를 나타내었다. 즉 측정기간 중 단기 환경기준치를 상회하는 출현빈도가 50% 이상임을 알 수 있었다.  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하는 18.3%,  $101 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  까지가 전체의 75.2%,  $201 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 회수는 6.5%를 나타내었다.

Table 3. Measuring results of TSP and  $\text{PM}_{10}$  by various methods(unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

parameter	TSP		$\text{PM}_{10}$		
	High-vol	$\beta$ -ray attenuator*	High vol	Mini-vol	$\beta$ -ray attenuator Sampler
Mean $\pm$ S.D.	$215.0 \pm 20.8$	$174.4 \pm 27.0$	$124.1 \pm 18.3$	$144.3 \pm 20.1$	$142.4 \pm 17.6$
n**	16	17	15	16	17
minimum	180	122.7	97.2	106.6	105.3
maximum	251.7	208.5	153.1	175.5	169.6

$\beta$ -ray attenuation\* : removed the  $10 \mu\text{m}$  cut cyclone

n\*\* : the number of measurement (but,  $\beta$ -ray methods are 24hrs averaging data)

3.3. 연속측정에 의한 일중 농도 변동

$\beta$ -ray 흡수법에 의한  $PM_{10}$  의 장시간 연속 가동에 의한 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 먼지의 환경거동을 파악키위한 방법으로 먼지의 시간적 분포특성을 아는 것은 매우 중요하다. 총 16일간의 측정기간 중  $PM_{10}$  농도를 시간대별로 처리하

여 일간변동을 나타낸 것이다.

열차 운행이 중단되는 밤 0~1시경부터 먼지 농도는 줄기 시작하여, 밤 1시부터 아침 6시까지는 통상 먼지 농도가  $100 \mu g/m^3$ 을 넘지 않고 있고 아침 5시경이 일중 최저농도를 나타내고 있으며 이때의 농도는  $25 \mu g/m^3$  전후의 매우 낮은 농도로 나타나 지하철 역사 내의 먼지에 의한 공기오염은 열차

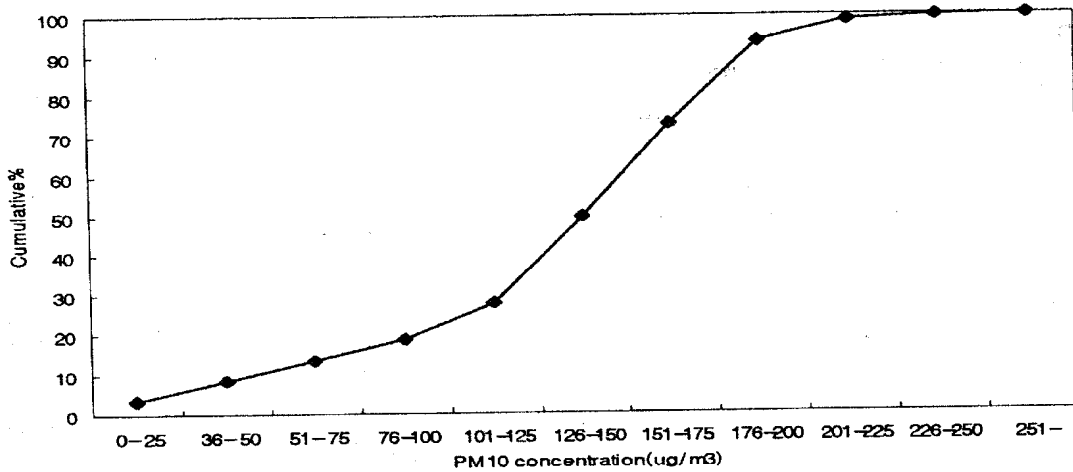


Fig. 2. Cumulative frequency diagram of  $PM_{10}$  concentration with  $\beta$ -ray attenuation  $PM_{10}$  sampler.

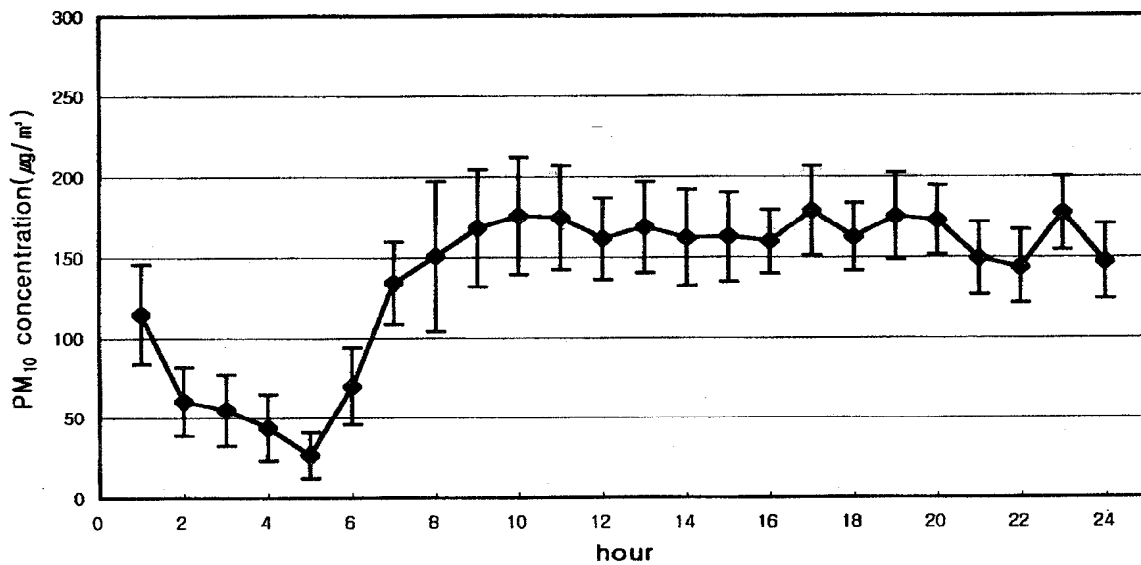


Fig. 3. Diurnal variation of  $PM_{10}$  concentration measured by  $\beta$ -ray attenuation  $PM_{10}$  sampler.

운행과 이용객의 통행으로 인한 것임을 유추할 수 있었다.

20시 이후 감소되는 패턴은 저녁 시간대의 러시아워가 끝나면서 열차의 배차간격이 길어지고, 열차이용 승객수도 줄어드는 때문으로 보이나 23시 경의 피크가 나타나는 이유는 열차 운행중단 시간이 가까워지면서 인공 급배기장치의 가동을 미리 중지시키기 때문인 것으로 추측된다.

### 3.4. 부유먼지 농도의 일간 변동

고용량 공기포집기에 의한 총부유먼지 농도와 PM<sub>10</sub> 고용량 공기포집기, β-선 흡수법, 그리고 미니용량 공기포집기에 의한 10 μm 이하의 미세먼지 농도의 일간변동은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 지하철역 내의 총부유먼지와 미세먼지농도 모두 토·일요일을 최저로, 일정하면서도 매우 유사한 변동 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다. 7월 26·27일, 8월 2·3일은 각각 토·일요일로서 주말의 차량 운행 편수 감소와 이용 승객수의 차이에서 오는 농도

감소로 보여진다.

β-선 흡수법에 의한 총부유먼지 농도는 고용량 공기포집기에 의한 먼지 농도보다 현저히 낮음을 알 수 있으며, 이는 분립기를 제거한 β-선 흡수법이 고용량 공기포집기에 의한 총부유먼지와 일치할 것이라는 종래의 견해와 상치되는 조사결과를 나타내었다. 미니용량 공기포집기와 PM<sub>10</sub> β-선 흡수법으로 측정된 농도는 매우 잘 일치하고 있고, TSP β-선 흡수법은 이들과 고용량 공기포집기에 의한 측정 농도와의 중간 농도로 나타나고 있으며, PM<sub>10</sub> 고용량 공기포집기에 의한 측정 농도가 가장 낮으나 전술한 바와 같이 변동 패턴은 매우 유사하였다.

### 3.5. TSP 중 PM<sub>10</sub> 농도 비율

통상 실내나 실외 공기에서 총부유먼지 중 PM<sub>10</sub> 농도의 비율은 80% 정도로 알고 있으나, 이번 지하철 시청역 대표소에서 측정결과 Table 4와 같았다. 고용량 공기포집기와 미니용량 공기포집기에

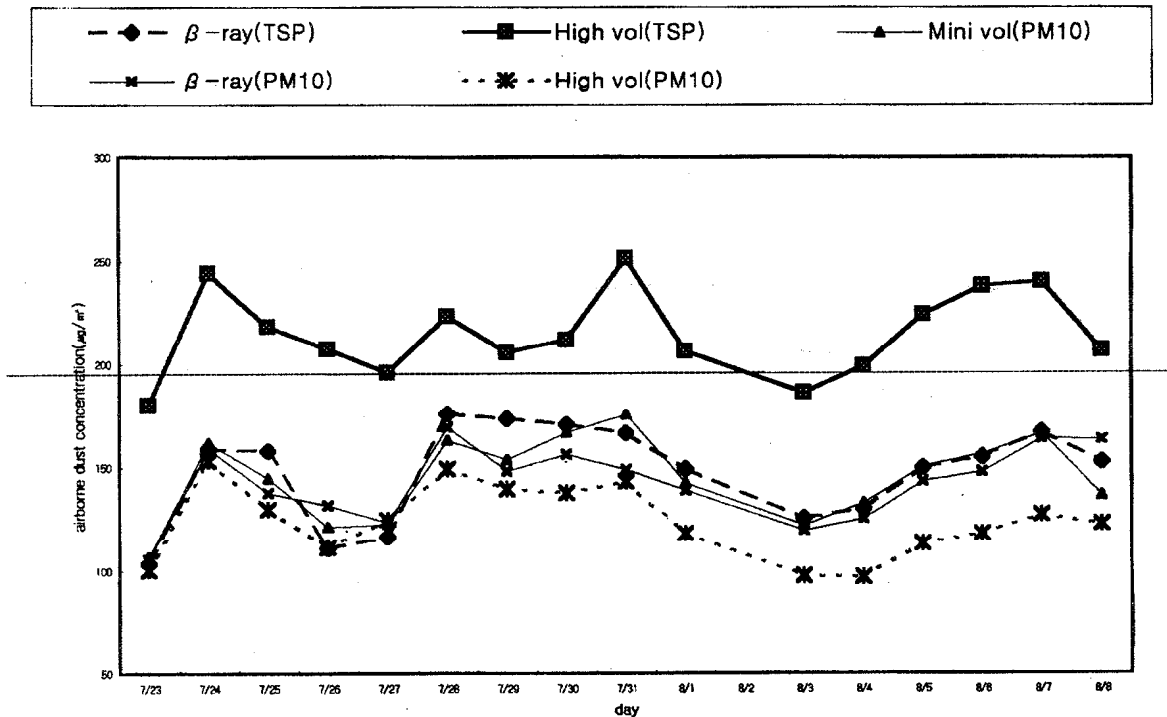


Fig. 4. Day-to-day variation of airborne dust concentration(μg/m³).

의한 먼지 측정치로서 비교한 바 1차 14 회 평균치는 64.4±6.4%, 2차 16 회 평균치는 66.9±5.5%로 나타나 지하철역 공기 중 10 μm 이하의 미세먼지는 대략 65% 전후를 나타내었다. 최소 분율은 1차 57.9%, 2차 58.1%였으며 최대 분율은 1차 76.5%, 2차 78.8%로서 최소와 최대 분율은 약 2주 정도의 조사기간 중에도 20% 정도의 높은 변동을 나타내어, 지하철 시정역의 실내 공기에서의 총부유먼지 중 평균적인 PM<sub>10</sub> 농도 분율은 별 의미가 없음을 알 수 있었다.

Hoffman<sup>7</sup> 등이 일리노이주 메이웃드 등에서 일반 대기환경을 대상으로 실시한 총부유먼지 중 PM<sub>10</sub>의 분율은 49%~63%등으로 금번 조사에 비하여 PM<sub>10</sub> 분율이 낮았고, 1997년도 상하반기에 각각 측정한 결과는 상반기의 11 개 지하철역 평균 62.5%, 최소 45%, 최대 80.5%였고, 4 개 지하상가 평균 60.6% 최소 54.4%, 최대 69.9%였으며 하반기는 지하철역 평균 69.6%, 최소 56.7%, 최대 87.1% 그리고 지하상가의 평균은 69.1%, 최소 53.6% 최대 85.5%로 동일 장소에서라도 계절(시간)에 따라 매우 큰 변동성을 나타낸 것은 본 연구 조사와도 일치되는 것이다.

### 3.6. 미니용량 및 고용량 공기포집기의 측정 정도

본 비교시험에 있어 동일한 장치를 3 대씩 동시 설치하여 측정한 미니용량 공기포집기와 고용량 공기포집기의 측정정도를 조사한 결과 Table 5 및 Table 6와 같았다. 고용량 공기포집기는 1차 측정치이며 총 11 회의 측정에서 최고치는 303.9 μg/m<sup>3</sup> 최저치는 228.0 μg/m<sup>3</sup>을 나타내었으며 11 회 평균치는 257.2±24.8 μg/m<sup>3</sup>로 Table 3의 2차 측정치보다 높게 나타났음을 알 수 있다. 3개의 단위 측정치간 차이가 가장 크게 나타난 것은 41.7 μg/m<sup>3</sup> 이었고, 가장 낮은 것은 13.1 μg/m<sup>3</sup>이었다. 또한 동일 시간에서 3 개 측정치간의 변동계수는 평균 최대 8.3% 최소 3.2% 평균 5.8%로 측정장치간의 정밀도는 양호한 편이었다. 미니용량 공기포집기는 6월의 1차 시험에서는 16 회 평균 159.4±27.4 μg/m<sup>3</sup>였으며 7, 8월의 2차 시험에서는 17 회 평균 144.3±20.1 μg/m<sup>3</sup>로 나타나 7, 8월보다는 6월에 미세먼지 농도가 다소 높고, 농도의 변동 폭도 큼을 알 수 있었다. 3대의 측정기 사이에 측정범위는 1차 측정시는 최대 10.9μg/m<sup>3</sup>, 최소 2.7 μg/m<sup>3</sup>, 2차 측정시는

**Table 4.** Ratio of PM<sub>10</sub> concentration to TSP in subway station(City Hall).

	1 <sup>st</sup> measurement								2 <sup>nd</sup> measurement									
$\frac{PM_{10}}{TSP} \times 100(\%)$	58.5%	63.4	57.9	57.9	68.3	60.8	60.3	69.1	67.0	66.7%	66.2	66.3	58.4	69.4	73.1	74.8	78.8	69.7
	76.5	67.7	76.4	72.9	67.0	(n=14)				69.0	65.6	66.7	58.1	65.9	60.5	66.2	(n=16)	
Mean±S.D.	64.4 ± 6.4								66.9 ± 5.5									
min	57.9								58.1									
max	76.5								78.8									

**Table 5.** Precision of the measurement for PM<sub>10</sub> by mini volume air sampler(unit : μg/m<sup>3</sup>).

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1 <sup>st</sup>	Mean	151.7	122.8	127.0	134.3	164.2	157.2	153.3	147.1	155.6	161.1	156	151.3	155.0	232.2	207.7	174.5	-
	Range*	2.7	5.2	8.9	3.8	4.7	6.8	8.8	6.6	5.3	8.9	6.4	5.5	10.8	10.9	13.1	7.6	-
	C.V%	0.9	2.1	3.9	1.5	1.6	2.2	2.9	2.3	1.7	2.8	2.3	1.9	3.5	2.5	3.3	2.2	-
2 <sup>nd</sup>	Mean	106.6	161.8	155.6	121.2	122.4	163.3	153.1	166.9	175.5	142.8	117.0	122.2	133.0	150.6	156.8	166.7	136.9
	Range*	8.8	9.8	5.0	5.9	0.8	3.0	8.6	4.8	7.0	4.9	6.0	4.7	3.2	6.1	4.5	2.8	2.5
	C.V%	4.3	3.3	1.9	2.6	0.4	0.9	2.8	1.6	2.5	1.7	2.7	1.9	1.2	2.0	1.4	0.9	1.0

Range : difference between maximum and minimum.

최대 9.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최소 0.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 변동 계수를 보면 1차 측정시 최대 3.5%, 최소 0.9%이고 2차 측정시에는 최대 4.3% 최소 0.4%로 고용량 공기포집기에 비하여 상대적으로 정밀도가 높은 것으로 나타났다. Purdue(1987)는 미국의 EPA  $\text{PM}_{10}$  측정방법에 관한 필수조건으로 10 대의  $\text{PM}_{10}$  농도측정기를 가동할 때 그 정밀도는 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 일 때는 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상일 때는 7% 이내여야 함을 지적한 바 미니용량 공기포집기는 이에 모두 적합하였다.

### 3.7. 측정법 비교

고용량 공기포집법,  $\text{PM}_{10}$  고용량 공기포집법, 미니용량 공기포집법,  $\beta$ -선 흡수법(분립기 부착 및 제거한 것)등 총 5 개 측정법간의 측정자료를 비교 검토하여 각 측정법간의 상관성을 비교 분석하였다. 미국의 여러 주의 EPA에서 보고된  $\beta$ -선 흡수법과 고용량 공기포집기간의 데이터 상관성은 양호한 결과를 얻고 있고, 여러 주에서 테스트한 결과도 고용량 공기포집기에 의한  $\text{PM}_{10}$  농도와  $\beta$ -선 흡수법에 의한  $\text{PM}_{10}$ 농도와는 상관성도 양호함을 보고하고 있다. 이 결과 EPA에서 인가된  $\text{PM}_{10}$  샘플러를 미국 이외의 국가에서도 많이 사용하게 되었다.

더우기 표준 샘플링 방식을 부가시킴으로써(예컨대 미국의  $\text{PM}_{10}$  Inlet) 각국의 표준적인 SPM 측정기로 채용되고 있다. 각 측정법간의 회귀방정식과 회귀직선은 Fig 5와 Table 7과 같다. 고용량 공기포집법에 의한 총부유먼지와  $\text{PM}_{10}$  고용량 공기포집법이 180~250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위내이고  $\text{PM}_{10}$  고용량 공기포집법이 대략 100~150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위 내로 두 측정치간에 다소의 편차가 있음이 확인 되었다. 고용량 공기포집법과 미니용량 공기포집법에 의한 미세먼지 측정치간의 상관관계는 앞서의  $\text{PM}_{10}$  고용량 공기포집법보다  $r=0.857$ 로 상관성이 높고 편차도 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 고용량 공기포집법과  $\beta$ -선 흡수법간의 상관관계를 나타낸 것으로 상관관계는 높지 않으나 편차는 높은 농도에서 현저함을 알 수 있다. 고용량 공기포집기와 분립기를 제거한  $\beta$ -선 흡수법  $\text{PM}_{10}$ 간의 회귀직선에서 보듯이 상관관계는 비교적 낮고 편차가 큼을 알 수 있었다. 예상대로라면 분립기를 제거한  $\beta$ -선 흡수법의 측정치는 고용량 공기포집기에 의한 총부유먼지 농도와 유사해야 하나 많은 차이가 있음을 알 수 있고, 전 측정범위에서 편차가 큼을 알 수 있었다. 그러나 1차 측정결과에서는 상관성이 매우 높게 나타났으며 편차도 상대적으로 적게 나

**Table 6.** Precision of the measurement for TSP by high volume air sampler(unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mean	276.0	274.8	228.0	248.4	247.9	239.9	232.7	232.2	303.9	284.6	260.6
Range	23.3	26.0	27.6	35.5	13.1	33.9	14.7	27.3	39.8	32.2	41.7
C.V%	4.7	4.8	6.4	7.2	3.8	7.1	3.2	6.0	6.6	5.7	8.3

Range : difference between maximum and minimum.

**Table 7.** Regression equation between the values measured by various methods.

Measuring Method			Regression Equation	Correlation coefficient(r)
X	vs	Y		
$\beta$ -ray $\text{PM}_{10}$		$\text{PM}_{10}$ high vol	$\bar{Y}=0.79X+43.9$	0.81
$\beta$ -ray monitor		$\beta$ -ray $\text{PM}_{10}$	$\bar{Y}=1.13X-14.9$	0.86
$\beta$ -ray monitor		Mini vol	$\bar{Y}=1.25X-5.5$	0.92

타났다. 1차와 2차 측정결과를 비교하면 차이가 있으나 이는 1차와 2차 측정시 사용한 장비가 서로 달랐던 것도 한 원인일 수도 있다고 생각된다. 기울기는 다른 방법간에 비하여 유사하게 나타났다.

이와 같은 결과는 기간에 따라서 측정법간의 상관 계수가 현저히 변동하는 것이 확인된 것으로서 역시 측정지역에 따라서도 변동요인이 있을 수 있음이 예상되었다.

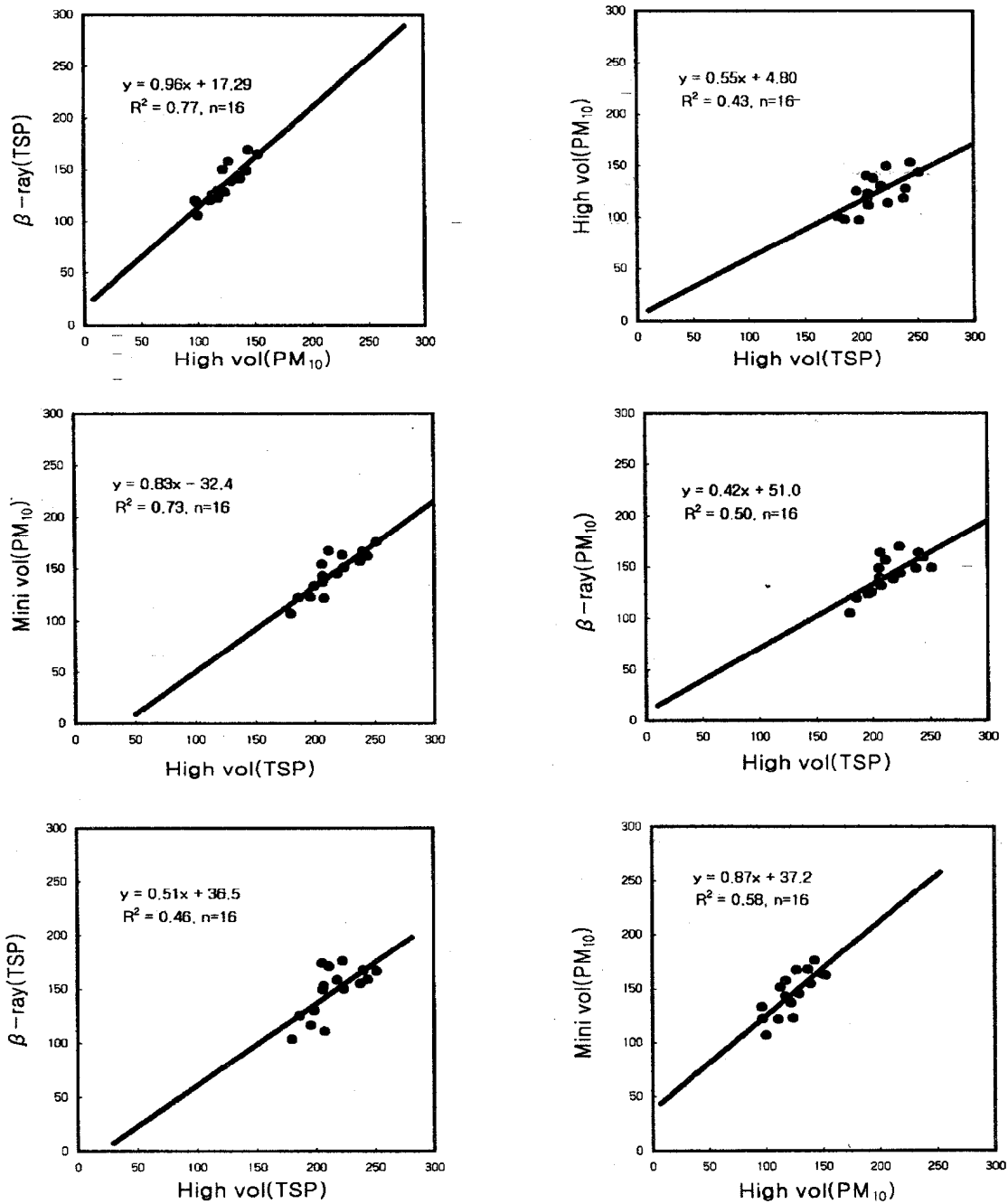


Fig. 5. Relationships among the suspended particulate matter concentration( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) from the different measurement methods.

### 3.8. 분산분석

고용량 공기포집기 등 5 개 측정 방법으로 관측된 부유먼지 농도자료로서 분산분석을 하여 유의성을 검정하였으며, 그 결과는 Table 8과 같다. 24 시간 평균치 일간변동(요일간)과 측정방법간에도 모두 고도로 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다. 개개의 측정방법간의 유의차가 어느 정도인지 알기 위하여 Table 9와 같이 5 개 측정방법에 대한 평균 측정치의 편차와 유의성을 나타내었다. 가장 낮게 측정된 농도를 나타낸 PM<sub>10</sub>-고용량 공기포집기 방법은 β-선 흡수법(PM<sub>10</sub>), 미니용량 공기포집기, β-선 흡수법(TSP) 그리고 고용량 공기포집기 등과 측정 방법간에 평균치 차가 1% 수준에서 유의성을 나타내고 있다. β-선 흡수법(PM<sub>10</sub>), 미니용량 공기포집법, β-선 흡수법(TSP) 등은 고용량 공기 포집법과 1% 수준에서 유의차를 나타내고 있었으나, 위의 세 측정 방법간에는 유의성이 확인되지 않았다.

## 4. 결 론

서울시의 지하철 1호선 시청역을 대상으로 1997

년 6월 2일~8월 8일 사이에 31일간 고용량 공기포집법, PM<sub>10</sub> 고용량 공기포집법, 미니용량 공기포집법 그리고 β-선 흡수법등 총 5 개 측정 방법을 동시에 측정 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고용량 공기포집법에 의한 총부유먼지 농도는 215.0±20.8 μg/m<sup>3</sup>이었으며, 분립기를 제거한 β-선흡수법은 174.4±27.0 μg/m<sup>3</sup>로 두 측정치간에는 상당한 차이를 나타내었다.
2. 미니용량 공기포집법과 β-선 흡수법에 의한 PM<sub>10</sub> 농도는 각각 144.3±20.1 μg/m<sup>3</sup>와 142.4±17.6 μg/m<sup>3</sup>로 양 측정치는 매우 유사하였으나 PM<sub>10</sub> 고용량 공기포집법에 의한 농도는 124.1±18.3 μg/m<sup>3</sup>로 위의 두 방법에 비하여 낮게 나타났다.
3. 조사 기간중의 시청역 대표소의 PM<sub>10</sub> 농도 출현빈도는 장기환경대기기준치 80 μg/m<sup>3</sup> 이하가 전체의14.8%, 단기기준치 150 μg/m<sup>3</sup>이하는 49.6%를 나타내었으며 200 μg/m<sup>3</sup>을 초과한 회수는 6.5%였다.
4. 총부유먼지 중의 PM<sub>10</sub> 농도 비율은 그 평균치로서 약 64.4~66.9%로 나타났으며 일일 기준으로 최대와 최소비율 사이가 20% 내외로 매우 큰 변동폭을 나타내었다.

Table 8. Results of Analysis of Variance.

Factor	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F Value
Total	79	121897.6		
Variety	15	29094.16	1939.61	12.00**
Methods	4	83107.12	20776.78	128.56**
Error	60	9696.32	161.6	

\*\*P<0.01

Table 9. Measuring Data and Significance between Measuring Methods using ANOVA.

	High Vol. (PM <sub>10</sub> )	β-ray Attenuator(PM <sub>10</sub> )	Mini Vol (PM <sub>10</sub> )	β-ray Attenuator(TSP)	High Vol. (TSP)
High Vol(PM <sub>10</sub> )					
β-ray(PM <sub>10</sub> )	69.07**				
Mini Vol.(PM <sub>10</sub> )	71.6**	2.53			
β-ray(TSP)	74.18**	5.11	2.58		
High Vol(TSP)	94.56**	25.5**	22.96**	20.38**	

\*\*P<0.01

5. 고용량 공기포집기에 의한 시험 결과 최고  $303.9 \pm 20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최저  $228 \pm 14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 동시 가동한 3대간의 측정 범위는 최대  $41.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최소  $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 변동계수는 최대 8.3% 최소 3.2%로 정밀도는 비교적 양호하였다.
6. 미니용량 공기포집기는 1차 및 2차 시험 중 최소  $106.6 \pm 4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최대  $232.2 \pm 5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 3대간 측정범위는 최대  $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  최소  $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 변동계수는 최대 4.3%, 최소 0.4%로 고용량 공기포집기에 비하여 정밀도는 높은 것으로 나타났다.
7. 지하철역사 내 먼지의 일중 농도는 자정부터 농도가 줄기 시작하여 오전 5시경에 최저를 나타내어 지하철역사 내의 먼지오염은 열차 운행과 이용객의 통행으로 인함을 유추할 수 있었으며 측정치는 일중 일정한 변동 패턴을 나타내고 있었다.
8. 지하철 역사내의  $\text{PM}_{10}$  농도는 토, 일요일을 최저로, 일정하면서도 측정 방법간에 매우 유사한 변동패턴을 나타내었다.
9. 각 측정 방법의 측정자료 사이에는 서로 유의한 상관관계를 나타내었으나 측정기간에 따라 현저히 변동하는 것을 확인하였고 또한 지역에 따라서도 변동 요인이 있을 수 있음이 예상되었다.

#### 감사의 글

이 연구는 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 환경부, 1991, "대기오염공정시험방법", pp 358-372, 433-441.
2. 환경부, 1996, "환경측정기기의 형식 승인, 정도 검사 등에 관한 고시 제96-86호".
3. 지하철공사, 1997, "1997년 9월말 역별 열차 이용 인원 현황".
4. J. S. Nader and D. R. Allen, *Am. Ind. Hyg. Assoc.*, 1960, 21, 300.
5. H. D. Essen, P. F. Wulfrath, and G. F. Koln, *VDI-Zeit*, 1964, 106, 1191.
6. L. J. Purdue, 1987, "EPA  $\text{PM}_{10}$  Methodology Requirements", pp 85-92, APCA, ( $\text{PM}_{10}$  : Implementation of standards), California.
7. A. J. Hoffman, L. J. Purdue, K. A. Rehme and D. M. Holland, 1987, "1987  $\text{PM}_{10}$  Sampler Intercomparison Study (Transactions  $\text{PM}_{10}$  : Implementation of standards)", pp 138-150, Ed. C. V. Mathai, D. H. Stonefield, APCA, California.