

실내·외 공기 중 부유먼지 측정방법 상호간의 비교평가 - 중량법을 대상으로

Comparative Evaluation of Gravimetric Measurement Methods for Suspended Particles in Indoor and Outdoor Air

백성옥* · 박지혜 · 서영교
영남대학교 토목도시환경공학부 대기환경연구실
(2002년 3월 12일 접수, 2002년 6월 26일 채택)

Sung-Ok Baek*, Ji-Hyae Park and Yeung-Kyo Seo
*School of Civil, Urban, and Environmental Engineering, Yeungnam University,
Kyungsan 712-749*

(Received 12 March 2002, accepted 26 June 2002)

Abstract

In this study, several types of gravimetric methods (such as high, medium, low, and ultra low volume sampling methods) were applied to determine suspended particulate matter concentrations in both ambient and indoor environments. Comparative evaluations were undertaken with SPM data obtained using a variety of samplers (TSP, PM10, and PM4.0) at different sampling flow rates. Correlation coefficients between TSP and PM10 concentrations measured at different flow rates fell in the range of 0.73 ~ 0.94 (n = 40). In addition, correlation coefficients for PM concentrations measured by different TSP samplers were in the range of 0.90 ~ 0.95 (n = 36 or n = 38), while 0.77 ~ 0.91 (n = 38) for PM10 samplers. Correlation analysis was also conducted on indoor monitoring data that were measured using ultra-low-volume samplers at both different or identical flow rates. The correlation coefficients were in the range of 0.98 ~ 0.99 (n = 38) between TSP and TSP and 0.92 ~ 0.94 (n = 38) between TSP and PM10. The mean ratio for high volume PM10 to TSP concentration that was monitored at identical flow rates in the ambient air appeared to be 0.72. The mean ratios of PM10 to TSP and PM4.0 to TSP observed with identical flow rates at indoor environments were 0.47 and 0.40. The results of this study may provide empirical information concerning the compatibility of aerosol data obtained by gravimetric sampling methods at different flow rates.

Key words : SPM, TSP, PM10, PM4.0, Air monitoring, Gravimetric sampling methods

1. 서 론

* Corresponding author
Tel : 053-810-2544, E-mail : sobaek@yu.ac.kr

대기 중 입자상 물질은 먼지, 매연, 검댕, 액적 등의 고체상이나 액체상 물질로 나누어지는데 이들

부유먼지는 보통 입경 $2.5\mu\text{m}$ 을 기준으로 미세입자와 거대입자로 분류된다. 부유먼지가 인체에 미치는 영향은 먼지의 크기, 화학적 조성, 농도분포, 물에 대한 친화력 등 다양한 변수와 밀접한 관계가 있다 (Chow, 1995). 최근 미국 EPA는 입자상 오염물질에 대한 1차 및 2차 대기질기준을 먼지의 입경을 고려하여 PM_{2.5}(입경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 입자)의 경우 연간 기준치는 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 24시간 기준치는 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 추가 설정하였다. 이는 부유먼지의 농도가 기존의 기준치 이하인 경우에도 조기사망률, 병원이용률, 호흡기관련 질병의 발생률 등의 보건학적인 피해가 감소하지 않는다는 연구에 기초한 것이다 (US EPA, 1997). 한편, 국내에서는 1995년에 부유먼지 항목으로 기존의 환경기준에 설정된 TSP와는 별도로 PM₁₀ 항목을 추가하여 환경기준에 설정하였으며, 현재는 이들 항목의 측정을 병행하고 있다.

부유먼지가 인체에 미치는 유해성을 평가하기 위해서는 무엇보다도 신뢰성 있고 공인된 측정방법이 마련되어 있어야 한다. 대기 중 부유먼지의 측정방법에는 여러 가지가 있으나 측정원리의 측면에서는 중량법과 광학적방법으로, 포집유량의 측면에서는 high-volume과 low-volume으로 구분되며, 입자의 크기별 포집장치의 부착유무에 따라 입도 분리형과 비분리형으로 구분되기도 한다. 먼지측정방법은 원리적 측면에서 기기분석이나 습식화학분석에 의존하는 기체상시료의 분석방법과는 달리 비교적 간단한 편이다. 그럼에도 불구하고 분진측정에 내재된 가장 큰 문제점으로 지적되는 것은 시료의 채취방법에 따른 측정결과의 상대적인 오차가 클 수 있다는 점이다 (Solomon, 1982). 특히 중량법과 광학적방법 혹은 high-volume과 low-volume 방법 사이에는 반드시 일관된 비례성 혹은 상관성이 존재하지 않을 수도 있으며 양자의 상관성은 대기 중 부유먼지의 분포특성, 즉 지역 및 계절에 따라 상당한 편차가 나타날 수 있음이 이미 여러 유형의 현장실측을 통해 입증된 바 있다 (e.g., Baily and Clayton, 1982). 이러한 이유에서 환경기준을 설정하거나 권고치를 제시할 때는 그에 기초한 측정방법을 명시하거나 권장하는데, 부유먼지에 관한 한 이 점은 매우 중요한 사항이 된다.

국내의 경우 환경오염 공정시험법에는 부유먼지의 측정방법으로 high- 및 low-volume 샘플링에 의

한 중량법과 일종의 광학적 방법인 β -ray측정법을 포함하는 다섯가지 방법을 명시해 놓고 있다. 그러나 실제의 경우 환경부에서는 전국적인 대기오염 자동측정망에서 비 중량법인 β -ray측정법을 통해 매 시간별 농도자료를 측정하고 있다. 비단 부유먼지 뿐만 아니라 어떤 항목이라도 공인된 측정방법들은 어떤 경우에서든 허용오차 범위내에서 서로 일치하는 결과를 생산할 수 있어야 한다. 그러나 β -ray법에 의한 측정자료는 고농도 영역에서 중량법에 의한 측정치와 상호간 큰 차이를 보이는 등 문제점이 제기되어 왔다 (US EPA, 1996a, b). 따라서 실내·외 환경에 설정된 먼지 기준치 적용에 있어서, 측정방법의 차이에서 오는 구조적 문제를 명확히 규정하지 않은 상태에서 상이한 측정법에 의해 얻어진 농도자료를 서로 비교 평가할 경우, 편중(bias) 해석할 경향이 높아 실제 농도보다 과대 혹은 과소로 평가하는 것과 같은 이론의 소지가 내재해 있다.

이처럼 분진의 측정과 관련된 여러 가지 오차 발생의 가능성을 감안하여, 본 연구에서는 중량법에 의한 측정방법을 기준으로 서로 다른 시료채취 유량을 적용할 경우 측정된 부유먼지의 농도 자료간에 어느 정도의 차이를 보이며, 또한 농도자료간의 연관성은 어느 정도 존재하는지를 파악해 보고자 하였다. 따라서 두 가지의 측면 즉, 환경대기에서의 다양한 유량범위를 가진 측정기를 이용한 시료채취와 실내환경에서 비교적 낮은 유량범위에서 채취된 부유먼지의 농도를 상호 비교평가하고자 하였다. 이를 위하여 실외환경에서는 측정방법을 먼저 공기채취유량의 크기에 따라 high(약 1000 L/min 이상), medium(100~200 L/min), low(약 30 L/min) 및 ultra low-volume(약 10 L/min 이하)의 네가지 유형으로 분류하고, PM₁₀ 입도 분리장치의 부착 유무에 따른 측정결과의 차이와 상관성, TSP 대 PM₁₀ 농도비의 비교를 통해 각 측정법으로 구한 자료의 호환성에 대해 고찰하였다. 또한, high-vol 샘플러의 사용이 실질적으로 곤란한 실내환경에서는 ultra low-vol 샘플러를 사용하여 서로 다른 유량조건에서 얻어진 실내 공기 중 TSP, PM₁₀, PM_{4.0}의 농도를 측정하여 각 샘플러의 차이에 따른 농도측정 결과를 비교하여 측정방법에 따른 먼지농도자료의 호환성을 검토하고자 하였다. 본 연구에서는 여러 가지 먼지 측정방법 중 중량법에 국한하고 있으며 광학적 방법

과 중량법간의 비교 고찰은 또 다른 별도의 연구과제가 될 것으로 사료된다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채취기간 및 장소

중량법에 의한 환경대기 중 부유먼지의 채취에서는 경북 경산시 영남대학교의 공과대학 4층 건물 옥상(지상에서 약 15m)에서 1997년 8월부터 1998년 9월까지 동일한 조건으로 총 6대의 서로 다른 샘플러를 가동하여 총 40세트의 먼지시료를 채취하였다. 그리고 다양한 형태의 흡인유량을 지닌 6대의 ultra low-volume 샘플러를 이용하여, 1999년 4월과 5월에 서로 상이한 농도수준을 지니고 있는 3개의

실내환경(주물공장, 자동차 경정비센터, 대학연구실)에서 실내 공기 중 부유먼지의 농도를 측정하였다. 이때 샘플러들은 각각 상이한 유량 조건에서 TSP와 PM10 혹은 TSP와 PM4.0을 동시에 채취할 수 있도록 서로 다른 3개조의 샘플러를 구성하였으며, 각 샘플러 당 38개의 세트시료를 채취하였다.

2.2 시료 채취방법

본 연구에서 사용한 다양한 먼지 시료 채취방법들에 대한 상세한 내용과 규격들은 표 1에 제시하였다. 환경대기 중 TSP의 채취를 위한 샘플러의 구성은 그 채취유량에 따라 high-, med-, low-, ultra low-volume 샘플러로 구분하였으며, PM10의 채취는 10µm 이하의 입경을 가진 먼지를 선택적으로 분리 채취할 수 있는 high-vol PM10 inlet (Graseby

Table 1. Details of sampling instruments and operation conditions used in this study.

Measurement		Sampler	Flow rate	Filter medium	Remark
Hi-Vol.	TSP	High volume air sampler model 305 (Sierra Anderson, USA)	1.13 m ³ /min	Glass fiber, 8" × 10" (Whatman, EPM2000)	Ambient air monitoring
	PM10	High volume air sampler model GMWL-2000H with a PM10 inlet model SA/G1200 (GMW, USA)	1.13 m ³ /min	Glass fiber, 8" × 10" (Whatman, EPM2000)	
Med-Vol.	TSP	PS-1 PUF sampler (Graseby-GMW, USA)	146 L/min	Glass fiber, 4" (Whatman, EPM2000)	Ambient air monitoring
Low-Vol.	TSP	User modified sampler	29 L/min	Glass fiber, 47 mm (Whatman, EPM2000)	Ambient air monitoring
	PM10	VAP sampler with a PM10 inlet (URG, USA)	32 L/min	Glass fiber, 47 mm (Whatman, EPM2000)	Ambient air monitoring
Ultra Low-Vol.	PM10	MiniVOL portable sampler with a PM10 inlet (Air-Metrics, USA)	5 L/min	Glass fiber, 47 mm (Whatman, EPM2000)	Ambient air monitoring
Ultra Low-Vol.	TSP	User modified sampler	10 L/min	PTFE, 47 mm (Millipore, 1 µm)	Indoor air monitoring
	TSP	User modified sampler	10 L/min	PTFE, 47 mm (Millipore, 1 µm)	Indoor air monitoring
	TSP	User modified sampler	5 L/min	PTFE, 47 mm (Millipore, 1 µm)	Indoor air monitoring
	PM10	MiniVOL portable sampler with a PM10 inlet (Air-Metrics, USA)	5 L/min	PTFE, 47 mm (Millipore, 1 µm)	Indoor air monitoring
	PM4.0	SKC airCheck sampler (Model 224-PCXR8, USA) with a cyclone-type inlet model BGI-4 (BGI, USA)	2.2 L/min	PTFE, 37 mm (Millipore, 1 µm)	Indoor air monitoring
	TSP	SKC airCheck sampler (Model 224-PCXR8, USA)	2.2 L/min	PTFE, 37 mm (Millipore, 1 µm)	Indoor air monitoring

Anderson/General Metal Works SA/G1200, Impaction type, U.S.A)이 장착된 high-vol 샘플러와 그의 PM10 입도분리가 가능한 low-vol, ultra low-vol 샘플러를 사용하였다. 환경대기 중 TSP 및 PM10 측정에는 샘플러간의 상호영향을 배제하기 위하여 충분히 이격시킨 상태에서 운전하였다. 환경대기 중 각종 TSP 채취를 위해서 적용된 채취유량은 high-vol PM10 샘플러의 PM10 입도분리장치에 적정 유량으로 설계되어 있는 1.13 m³/min (40CFM)과 가급적 동일한 여과속도 (38 cm/sec)를 유지하도록 설정하였다. PM10 측정용 샘플러들은 각 측정기의 입도 분리에 맞는 제조회사의 권장 설계유량에 따라 고정하여 24시간 동안 동일한 시간대에 운전되었다.

실내 공기 중 부유먼지의 측정에 있어서는 가급적 실내환경의 특성을 고려하여 흡인된 공기의 재순환에 따른 영향을 최소화하기 위해 시료채취 유량이 아주 적은 샘플러들로 구성하였다. 시료채취시 PM10 샘플러의 채취유량과 동일한 TSP의 채취유량을 비교하기 위해, TSP 샘플러의 경우 5 L/min으로 가동시킨 샘플러 및 이보다 더 큰 유량범위에서 채취한 TSP와의 비교를 위해 10 L/min의 샘플러를 가동하였다. 또한 PM4.0 샘플러의 흡인유량인 2.2 L/min과 동일한 유량으로 흡인된 TSP의 농도를 비교하기 위해 2.2 L/min으로 가동한 TSP 샘플러도 운영하였다. 실내 공기 중 부유먼지 시료의 채취는 시료채취 시간이 공기 중 부유먼지의 부하정도에 따라 5~10 시간 정도로 장소에 따라 다르게 적용하였다. 특히, PM4.0 (D₅₀ = 4 μm)은 미국 산업위생학회에서 작업장 환경 내의 호흡성 먼지를 측정하기 위해 설정한 입경인데, 현재 미국, 영국 및 유럽국가들이 이러한 입경의 적용을 따르고 있다 (ACGIH, 1991).

2.3 먼지시료의 측정

본 연구에서는 먼지측정결과에 미치는 여지의 채취효율차이에 의한 영향을 최소화하기 위해, 실외와 실내 환경에서 각각 동일한 종류의 여지를 사용하였다. 즉, 환경대기 측정에는 모두 유리섬유 여지를 이용하였으며, 실내 공기 측정에서는 pore size가 1 μm인 테플론 여지를 사용하였다. 유량점검은 high-vol의 경우 제조회사에서 공급하는 유량보정용 orifice를 이용한 정압변동에 따른 유량 보정표를 이용하였다. 반면, low-vol의 경우 적산식 건식가스

미터 (URG-3000-O2C, USA)와 질량유량계 (Top-Trak, 288-13-OVI-PVI-IV, USA) 등을 병행하여 사용하였다. 시료 채취 기간중의 대표 유량은 샘플링 전·후의 3회씩 측정된 값을 평균하여 사용하였으며, 시료채취 전·후의 여지는 메시케이터 (상대 습도 45±5%, 온도 22±3°C)에서 항량이 되도록 24시간 보관하였다. 유리섬유 여지를 사용한 먼지시료는 0.1 mg까지 칭량할 수 있는 화학저울 (AE100, Mettler Inc., Switzerland)을 사용하여 5회 측정 평균치를 계산하였다. 한편, 테플론 여지를 사용한 실내 먼지시료 여지는 2 μg까지 칭량할 수 있는 microbalance (M3P, Satorius Inc., Germany)를 이용하여 하나의 여지 시료에 대해 사용 전·후 각 5회씩 반복 측정하여 농도를 산출하였다. 이때 microbalance를 이용한 칭량에서 측정치의 오차에 상당히 많은 영향을 미치는 정전기의 영향을 최소화하기 위하여, 전하발생을 이용한 정전기 제거장치 (Ionizing blower IB8, Amersham plc., UK)를 사용하였다.

이와 같은 중량법에 의한 여지측정에 따른 부유먼지 농도의 검출저한계 (Limit of Detection)는 공기시료여지의 무게변화를 기초로 추정된 결과, low-volume sampling의 경우 약 5 μg/m³ 정도인 것으로 나타났다. 정량한계 (Limit of Quantitation)는 그 3배인 약 15 μg/m³ 수준일 것으로 추정하였다 (ACS, 1980). 대체로 high-volume sampling의 경우 시료채취량이 많은 관계로 low-volume에 비해서는 검출저한계가 낮은 것으로 나타났다. 측정 재현성은 동일한 측정기의 중복측정 결과를 분석한 결과 약 10% 이내인 것으로 추정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시료 채취방법에 따른 측정자료 비교

다양한 시료 채취방법에 따라 측정된 부유먼지 농도자료의 전반적 개황을 요약하여 표 1에 나타내었다. 환경대기 중 TSP의 농도수준은 평균값을 기준으로 볼 때, 샘플러마다 약간 차이를 보이나 50~67 μg/m³ 정도로 나타났다. TSP 샘플러에 대한 평균 농도 측면에서 볼 때, high-vol 샘플러가 가장 높은 값을 보였다. 이에 반해 medium- 및 low-vol 샘플러 등은 각각 high-vol 측정치의 약 80% 및 70% 수

Table 2. Summary of suspended particulate concentrations measured by different samplers.

Measurement (Flow rate)	Mean ± S.D.	Median	Range	MRE*	n	Remark
TSP (1130 L/min)	67.0 ± 25.4	62.8	28.6 ~ 142.1	0%	40	Outdoor air
TSP (146 L/min)	49.9 ± 20.7	43.9	24.8 ~ 122.1	25%	40	
TSP (29 L/min)	54.8 ± 28.3	50.2	18.7 ~ 124.5	22%	40	
PM10 (1130 L/min)	45.5 ± 20.0	44.0	18.7 ~ 97.9	32%	40	
PM10 (32 L/min)	39.8 ± 19.7	35.9	10.9 ~ 97.6	41%	40	
PM10 (5 L/min)	37.3 ± 22.0	30.9	10.4 ~ 106.4	45%	40	
TSP (10 L/min) - Set A	112.5 ± 91.1	96.9	16.4 ~ 382.5	0%	38	Indoor air
TSP (10 L/min) - Set B	123.9 ± 93.2	107.5	17.7 ~ 404.2	13%	36	
TSP (5 L/min)	118.5 ± 93.1	104.0	13.1 ~ 421.9	14%	38	
TSP (2.2 L/min)	108.7 ± 86.1	84.0	18.5 ~ 375.6	11%	38	
PM10 (5 L/min)	63.5 ± 47.6	51.3	10.5 ~ 194.4	38%	38	
PM4.0 (2.2 L/min)	48.7 ± 39.6	36.7	10.7 ~ 174.0	51%	38	

* MRE (mean relative error) was estimated with respect to the measured data from TSP (1130 L/min) and TSP (10 L/min)-Set A for outdoor and indoor sites, respectively.

준의 농도를 보여 그 차이가 어느 정도 심각함을 암시하고 있다. 환경대기 중 측정된 PM10의 농도를 보면 TSP와 거의 유사한 결과를 보여주는데, 각 샘플러별로 관측된 농도를 보면 산술 평균값을 기준으로 37~46 µg/m³ 범위 내에 존재하고 있는 것으로 나타났다. PM10 샘플러 역시 공기시료 채취유량이 낮아짐에 따라 그 농도 또한 감소하는 경향을 보여서 샘플러의 선정이나 채취유량의 선정은 결국 PM10의 농도측정에 상당한 영향을 주리라 판단된다.

한편, 실내환경에서의 부유먼지 측정은 먼지 농도가 아주 높거나 아주 낮을 것으로 예상되는 다양한 장소를 임의로 선택하여 시료채취가 이루어 졌으므로 측정된 먼지 농도 역시 저농도에서 고농도에 이르기까지 매우 다양하게 나타났다. 실내 공기 중에서 측정된 TSP는 평균값을 기준으로 109~124 µg/m³, PM10 농도는 평균값을 기준으로 49~64 µg/m³으로 나타났다. 이와 같은 농도범위는 실내환경에서 일반적으로 검출되는 농도수준이기는 하나, 대표성에 절대적 의미를 부여할 필요는 없을 것으로 사료된다. 동일한 두 대의 TSP 샘플러 (10 L/min) 상호간의 측정결과는 평균 중복재현성 (mean duplicate precision, 이때 중복재현성은 두 측정치의 평균에 대한 두 측정치간 차이의 백분율로 정의됨)이 10.6% (n=36)로 나타났다. 따라서 본 연구에서의 중량법에 의한 먼지 측정재현성은 전반적으로 약 10% 수준의 random error를 가지고 있다고 볼 수 있다. 한편, 동시

에 같은 장소에서 측정된 TSP (5 L/min)는 TSP (10 L/min)의 측정결과와 random error의 범위와 유사한 결과를 나타내고 있으며, 가장 유량이 낮은 TSP (2.2 L/min) 역시 평균상대오차 (mean relative error, 이때 상대오차는 기준 측정값에 대한 다른 측정치와의 차이의 백분율로 정의됨)가 약 11% 정도로 유사한 결과를 나타내었다. 이와 같이 실내환경에서의 측정결과는 실외에서의 측정결과에 비해 상호간의 차이가 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 여기에는 여러 요인이 있을 수 있겠으나 매우 낮은 유량으로 공기시료를 채취할 경우 먼지 농도에 큰 영향을 줄 수 있는 굵은 입자의 포착 가능성이 상대적으로 적을 수 있다는 점과, 또한 샘플러를 통과한 여과공기의 재유입에 따른 영향이 상대적으로 적을 수 있다는 점과 관련지을 수 있다. 또한 실내측정의 경우 태플론 여지를 사용함으로써 수분 영향을 최소화할 수 있었다는 점도 하나의 요인으로 생각할 수 있다.

3.2 측정방법간의 상관성 평가

3.2.1 환경대기 중 부유먼지 자료간의 상관성

서로 다른 유량에서 채취된 환경대기 중 부유먼지의 농도 자료간 (TSP, PM10)에는 다소의 차이를 확인할 수 있었다. 이들 측정자료간에는 분명히 특정한 관계가 있을 것으로 판단되어, TSP 자료간, PM10 자료간 혹은 TSP와 PM10 자료간에는 어떠한 상관성을 가지고 있는지에 대해 상호비교 평가해

보았다. 그림 1에는 환경대기 중에서 서로 다른 유량의 샘플러로 측정된 부유먼지의 농도에 대해 각 농도 자료간의 상관성, 기울기, 절편을 나타내었다.

먼저 서로 다른 채취유량으로 측정된 TSP 농도 자료간의 상관성을 비교해보면, 상관계수가 0.9 이상으로 나타나 TSP 간에는 비교적 높은 상관성을 보이므로 자료의 호환에는 큰 문제가 없을 것으로 생각된다.

한편, 서로 다른 유량으로 측정된 PM10 자료간의 상관성을 비교해보면, PM10 자료에 있어서는 고유량으로 측정된 PM10보다 저유량으로 측정된 PM10 농도가 전반적으로 낮게 나타나고 있음을 보여주었

다. 고유량 대 중간유량, 중간유량 대 저유량 샘플러 간에서 상관계수가 0.91 및 0.81 정도로 비교적 높게 나타난 반면, 고유량과 저유량 샘플러간에는 상관계수가 0.73으로 다소 떨어지고 있어 유량차이가 큰 샘플러간에는 상관성이 다소 떨어짐을 알 수 있었다.

TSP와 PM10간의 상관성 비교에서는 특히 high-vol TSP와 PM10의 관계가 중요한 의미를 주고 있는데 이 양자는 동일한 유량으로 채취된 것으로써 상관계수는 0.92로 매우 높았으며, 기울기는 0.72로 나타났다.

여기에서 기울기가 가지는 이론적 의미는 TSP 중

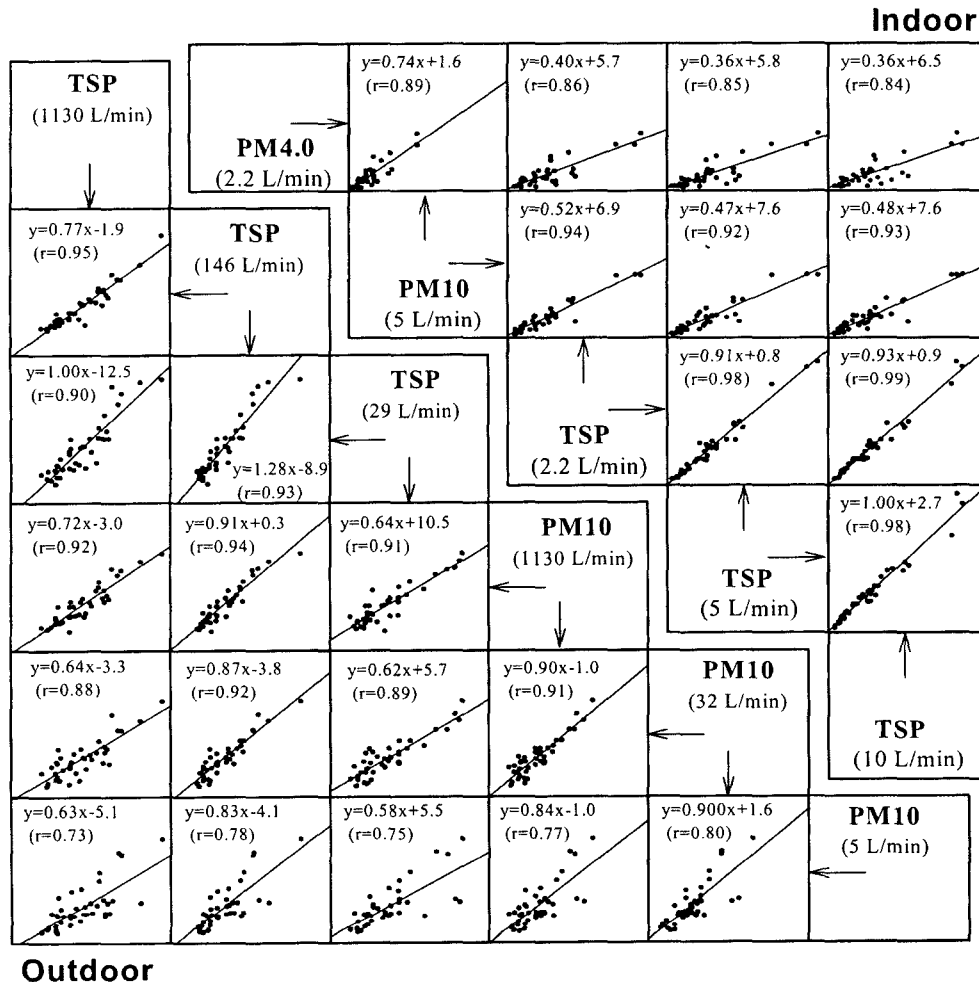


Fig. 1. Comparison of correlations in the concentrations of TSP, PM10 and PM4.0 between indoor and outdoor site.

Table 3. Summary of regression coefficients measured by different samplers in outdoor site.

Combination of sampler			Regression equation [Y = a X + b]		
[Y]		[X]	a	b	r
TSP (146)*	vs.	TSP (1130)	0.77 (0.69~0.86)*	-1.9* (-7.9~4.2)*	0.948
TSP (29)	vs.	TSP (1130)	1.00* (0.85~1.16)	-12.5 (-23.8~-1.2)	0.902
TSP (29)	vs.	TSP (146)	1.28 (1.11~1.44)	-8.9 (-17.6~-0.2)	0.933
PM10 (32)	vs.	PM10 (1130)	0.90* (0.76~1.03)	-1.0* (-7.7~5.7)	0.910
PM10 (5)	vs.	PM10 (1130)	0.84* (0.61~1.07)	-1.0* (-12.5~-10.5)	0.765
PM10 (5)	vs.	PM10 (32)	0.90* (0.68~1.12)	1.6* (-8.1~11.2)	0.805
PM10 (5)	vs.	TSP (1130)	0.63 (0.44~0.83)	-5.1* (-19.0~8.7)	0.732
PM10 (5)	vs.	TSP (146)	0.83* (0.61~1.05)	-4.1* (-15.8~7.6)	0.782
PM10 (5)	vs.	TSP (29)	0.58 (0.41~0.75)	5.5* (-4.9~16.0)	0.747
PM10 (32)	vs.	TSP (1130)	0.64 (0.50~0.79)	-3.3* (-13.6~6.9)	0.830
PM10 (32)	vs.	TSP (146)	0.87* (0.75~1.00)	-3.8* (-10.5~2.9)	0.918
PM10 (32)	vs.	TSP (29)	0.62 (0.52~0.72)	5.7* (-0.6~12.0)	0.894
PM10 (1130)	vs.	TSP (1130)	0.72 (0.62~0.83)	-3.0* (-10.2~4.3)	0.920
PM10 (1130)	vs.	TSP (146)	0.91* (0.80~1.02)	0.3* (-5.6~6.2)	0.938
PM10 (1130)	vs.	TSP (29)	0.64 (0.54~0.76)	10.5 (4.4~11.6)	0.906

* : Value in the parenthesis indicates the sampling flow rate (L/min).
 * : Indicates that each slope and intercept is not different from 1 and 0, respectively at a significance level of 0.05.
 † : Indicates the 95% confidence intervals for slope and intercept.

의 PM10의 함량분율(예를 들면 72%)로 볼 수 있는데, 이러한 결과는 1993~94년의 1년간에 걸친 대구지역 4개 지역을 대상으로 연구한 PM10/TSP의 함량분율의 평가(최진수와 백성욱, 1998)에서 얻어진 결과(계절에 따라 0.64~0.73)와 매우 유사한 수준이다.

중간정도의 유량과 저유량으로 채취된 PM10과 TSP의 상관성 비교에서 찾을 수 있을 유사성 혹은 공통성을 비교해 보면, 중정도의 유량 혹은 저유량으로 채취된 PM10 농도자료는 중간 정도의 유량으로 채취된 TSP자료의 상관계수가 다소 높고 기율기 또한 0.83 이상으로 높게 나타났지만, 고유량 혹은 저유량의 TSP자료와는 상관성도 다소 떨어지며 기율기도 0.58~0.64 정도로 낮게 나타나고 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 극단적인 유량의 차이를 가지는 샘플러간의 측정결과는 서로 차이가 클 수 있음을 재확인할 수 있었다. 특히, ultra low-vol 샘플러로 대기 중 먼지를 채취했을 때, 다른 샘플러들에 의해 측정된 먼지농도와와의 상관성이 상대적으로 낮은 이유는 시료채취시 풍속이나 풍향 등 외부적인 요인에 민감하게 반응할 수 있고, 먼지시료채취량이 상대적으로 작아 중량측정시 오차가 클 수 있

기 때문인 것으로 추정된다.

표 3에는 환경대기 중 부유먼지 측정 자료간의 상관성을 나타낸 그림 1의 직선회귀식을 요약 정리 하여, 각각의 샘플러간에 얻어진 회귀식의 기율기와 절편 및 95% 신뢰구간을 비교해 나타내었다. 표 3에 정리한 것과 같이 서로 다른 유량으로 측정된 동일한 항목간의 상관계수는 TSP의 경우 0.90~0.95의 높은 수치를 나타내었으며, PM10 또한 0.77~0.91의 높은 수치를 나타내었다. 각각의 기율기와 절편은 대부분 5% 유의수준에서 1 및 0과 다르지 않는 것으로 나타났으며, 각 상관계수 또한 5% 수준에서 유의적인(p<0.001)인 것으로 나타났다.

한편, 서로 다른 유량으로 측정된 PM10과 TSP의 상관계수는 매우 다양하게 나타났다. 그러나 채취유량이 증가하는 High volume PM10으로 갈수록 PM10과 TSP와 상관성의 세기 및 기율기가 점점 증가하는 것으로 나타나고 있어 환경대기 중 부유먼지 시료의 채취에 있어서는 가능한 한 고유량의 샘플러 사용이 바람직할 것으로 사료된다. 이와 같이 표에 나타낸 신뢰구간의 평가는 각 산출된 농도자료의 신뢰성 확보 측면에서 유용할 것으로 생각되며, 직선 회귀식에서 산출된 각 샘플러간의 기율기와 절

편은 서로 다른 측정방법으로 결정된 부유먼지 농도자료간의 비교에 있어서 유용한 정보를 제공할 것으로 사료된다.

3.2.2 실내 공기 중 부유먼지 자료간의 상관성

실내 공기 중에 측정된 TSP, PM10, PM4.0 자료간의 상관성을 비교하였으며, 향후 중량법에 의해 측정된 부유먼지 농도자료간의 비교나 자료의 호환에 이용할 정보를 제공할 수 있도록 양자간의 관련성을 비교해 보았다. 그림 1에는 다양한 유량의 샘플러로 측정된 실내 공기 중 부유먼지 농도 자료로부터 구한 상관성, 기울기, 절편을 각각 도시하였다.

서로 다른 유량으로 채취한 TSP시료의 농도자료간 상관성을 비교한 결과, 상관계수는 0.98~0.99로 매우 높았으며, 기울기는 0.91~1.0에 가깝게 나타났다. 이러한 결과를 그림 1에 나타난 실외 환경대기 중에서 측정된 TSP간의 상관성 자료와 비교해 볼 때 상관계수가 매우 높음을 알 수 있으며 또한 서로 다른 유량으로 채취한 TSP 농도자료간에는 거의 1:1 대응하는 양상을 보여주었다. 특히, 환경대기 중의 TSP 농도보다 훨씬 높은 400 µg/m³의 농도범위에서도 비교적 일정하게 연계성을 보여주며, 절편 또한 거의 0에 가깝게 나타나, 각 측정자료간 호환성에는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

PM10과 TSP간의 관련성을 보면, 상관계수는 0.92~0.94 정도로 매우 우수한 편이며, 회귀식의 기울기는 샘플러의 조합에 따라 아주 미약한 차이는 있으나 0.47~0.52로 서로 유사한 결과를 보여주고 있었다. 특히, 5 L/min의 동일한 유량으로 채취한 PM10과 TSP 자료간의 회귀식에서는 0.47의 기울기를 보이고 있어서 PM10/TSP의 농도분율은 약 47% 정도가 됨을 추측할 수 있다. 여기서 얻어진 PM10/TSP의 비는 환경대기 중에서 나타난 0.72와 비교해 볼 때 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 환경대기 중 부유먼지의 주요 발생원 또는 구성성분이 실내 공기 중 먼지의 구성성분과 매우 다를 수 있다는 점을 암시한다. 따라서, 환경대기 중에서 관측된 PM10/TSP의 비가 실내 공기 중 부유먼지의 농도관제에 그대로 적용될 수 없음을 각각 시사한다고 할 수 있다.

사이클론식 입도분리장치가 장착되어 공기역학적 등가경을 기준으로 cut-off size가 4.0 µm인 PM4.0

과 서로 다른 유량으로 채취한 TSP간의 상관성은 0.84~0.86 정도로 나타나, 서로 다른 유량으로 채취된 TSP와 PM10간의 상관성에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 또한, 각 회귀식에서의 기울기는 0.36~0.40 정도로 나타나 PM10과 TSP간의 결과보다 약간 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 특히, 2.2 L/min의 동일한 유량으로 채취한 PM4.0과 TSP와의 관계식을 보면, 직선회귀식의 기울기가 0.4로 나타나는데 이것은 간접적으로 TSP 중 PM4.0이 차지하는 비율로 평가할 수 있겠다. 결국 PM4.0/TSP의 함량분율은 약 40%가 되는 것으로 추측할 수 있다. 또한 PM4.0과 PM10 자료간의 농도 비교에서도 매우 높은 상관성을 보여주었다. 특히 PM4.0과 PM10의 관계를 보면, 직선회귀식의 기울기가 0.74로 나타나 PM4.0/PM10 농도비는 약 74%가 되는 것으로 조사되었다. 그러나 이러한 결과는 본 연구에서 측정대상으로 한 몇몇 유형의 실내환경에서 얻어진 제한적인 결과이므로 보편적인 가치를 부여할 수는 없다고 사료된다.

표 4에는 다양한 실내환경에서 서로 다른 채취 유량으로 측정된 부유먼지 농도자료간의 연관성을 요약하였다. 전반적으로 볼 때, 모든 자료간의 상관계수가 환경대기 중에서 측정된 자료간에 나타난 상관계수(표 3)에 비해 높은 것을 알 수 있다. 또한 모든 자료의 조합에 있어서도 각 회귀식에서 나타난 절편은 5% 수준에서 0과 유의적인 차이가 없는 것으로 나타나고 있어 서로 다른 유량으로 측정된 부유먼지 자료간의 변환에는 큰 어려움이 없는 것으로 나타났다.

3.3 TSP대 PM10 및 PM4.0의 농도분율 평가

본 연구에서 측정된 PM10/TSP 농도분율은 환경대기의 경우 0.34~0.99로 나타났고, 실내 공기의 경우에는 PM10/TSP 농도분율은 0.25~0.90의 다양한 농도수준으로 나타났다. 그런데 과거에 대도시지역의 공단지역, 상업지역, 주거지역, 교외지역을 대상으로 측정된 결과에서는 전자와 유사하게 0.64~0.73 정도인 것으로 보고된 바 있다(최진수와 백성욱, 1998). 참고로 미국 아리조나주의 Joseph에서 조사된 바에 의하면 도시 대기 중 TSP에 대한 PM10의 농도분율은 약 0.4~0.6 수준으로 보고된 바 있다(Mathai et al., 1988). 스위스 알프스지역 내의 교외 및 도시

Table 4. Summary of regression coefficients measured by different samplers in indoor sites.

Combination of sampler			Regression equation [Y = aX + b]		
[Y]		[X]	a	b	r
TSP (10) B [#]	vs.	TSP (10) A	0.99* (0.91 ~ 1.07) ⁺	8.5* (-3.0 ~ 20.1) ⁺	0.976
TSP (5)	vs.	TSP (10)**	0.99* (0.93 ~ 1.07)	2.7* (-7.1 ~ 12.5)	0.981
TSP (2.2)	vs.	TSP (10)	0.93 (0.88 ~ 0.98)	0.9* (-7.0 ~ 8.8)	0.986
TSP (2.2)	vs.	TSP (5)	0.91 (0.85 ~ 0.97)	0.8* (-7.7 ~ 9.3)	0.983
PM10 (5)	vs.	TSP (10)	0.48 (0.42 ~ 0.55)	7.6* (-2.2 ~ 17.3)	0.926
PM10 (5)	vs.	TSP (5)	0.47 (0.40 ~ 0.54)	7.6* (-2.4 ~ 17.7)	0.922
PM10 (5)	vs.	TSP (2.2)	0.52 (0.46 ~ 0.58)	6.9* (-1.7 ~ 15.6)	0.942
PM4.0 (2.2)	vs.	TSP (10)	0.36 (0.28 ~ 0.44)	6.5* (-5.2 ~ 18.3)	0.837
PM4.0 (2.2)	vs.	TSP (5)	0.36 (0.29 ~ 0.44)	5.8* (-5.6 ~ 17.2)	0.849
PM4.0 (2.2)	vs.	TSP (2.2)	0.40 (0.32 ~ 0.47)	5.7* (-5.3 ~ 16.6)	0.860
PM4.0 (2.2)	vs.	PM10 (5)	0.74 (0.61 ~ 0.87)	1.6* (-8.5 ~ 11.7)	0.891

Number of data is 38 except TSP (10) B (n=36).

[#] : Values in the parenthesis indicate sampling flow rate for each measurement (L/min).

* : Indicates that each slope and intercept is not different from 1 and 0, respectively at a significance level of 0.05.

** : Indicates the mean TSP concentration of TSP (10) A and TSP (10) B.

+ : Indicates the 95% confidence intervals for slope and intercept.

지역에서 1년간 측정한 연구결과에서는 부유먼지의 농도가 낮은 교외지역에서는 PM10/TSP가 0.57 ~ 0.62 정도로 낮게 나타나는 반면 부유먼지의 농도가 높은 도심지역에서는 0.75 정도로 높게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Monn *et al.*, 1995). 그리고 Couling (1993)은 부유먼지의 농도가 높고, 풍속이 클 때에는 PM10의 농도분율이 상대적으로 감소한다고 보고하고 있다. 이러한 결과로 추정해 볼 때 대기 중 부유먼지는 연소원이나 대기 중 이차 생성 염입자 등과 연계된 인위적 먼지 오염원의 기여분이 상대적으로 클 것으로 추정되며 또한 PM10의 농도분율의 변동에는 지역적 및 계절적 특성이 중요한 요인으로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 실내·외 공기 중에서 측정된 PM10과 TSP에 대한 농도분율이 먼지오염정도에 따라 어떤 변화를 나타내는지 보기 위해 편의상 TSP 농도 70 µg/m³을 기준으로 고농도와 저농도 그룹으로 나누어 각각에 대한 PM10/TSP 분율의 누적확률 분포를 비교해 보았다(그림 2). 먼저 환경대기의 경우 두 그룹에 대한 t-검정을 한 결과 고농도 그룹에 대한 PM10/TSP 분율의 평균은 0.67, 저농도 그룹에 대한 PM10/TSP 분율의 평균은 0.69로 나타나 두 그룹간의 PM10/TSP 분율은 5% 유의수준에서 차이가 없는 것(p=0.71)으로 나타났다.

이와는 대조적으로 실외환경에 비해 기상조건의 영향을 적게 받는 실내환경의 경우, 고농도 그룹에 대한 PM10/TSP 분율의 평균은 0.66, 저농도 그룹에 대한 PM10/TSP 분율의 평균은 0.54로 나타나 5% 유의수준에서 두 그룹간의 농도분율은 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 먼지농도의 변동폭이 상대적으로 적은 환경대기 중에서는 TSP 농도가 증가하여도 PM10/TSP 농도분율이 비교적 일정하게 나타났지만, 농도 변화폭이 큰 다양한 실내환경에서는 TSP 농도가 높아질수록 PM10/TSP 농도분율은 낮게 나타나는 경향을 나타낼 수 있다. 이와 같은 현상은 외부로부터 도로나 토사의 비산 먼지 유입이 없는 실내환경에서는 TSP와 PM10의 농도 차이가 크게 나지 않아 PM10/TSP 분율비가 높게 나타나지만, 외부로부터의 먼지 유입이 많아 농도가 증가하는 실내환경에서는 TSP 농도가 증가하게 되므로 PM10/TSP 분율이 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

실내 공기 중에서의 이러한 PM10/TSP 농도분율 특성을 좀 더 명확하게 파악하기 위하여, 표 5에는 TSP의 농도를 50 µg/m³ 간격으로 각 TSP 농도 구간별 동일한 유량으로 채취한 PM10/TSP 및 PM4.0/TSP 평균비를 계산하여 정리하였다. 여러 장소에서 측정된 부유먼지 자료를 모두 동등한 상태에서 평

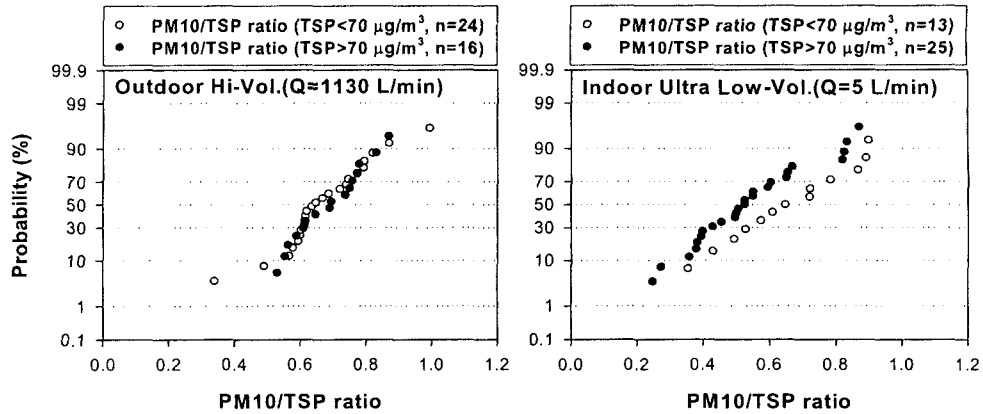


Fig. 2. Cumulative probability of PM10 to TSP ratio in indoor and outdoor sites.

Table 5. Ratio of PM10 and PM4.0 to TSP for the TSP concentration range in indoor sites.

TSP concentration range (µg/m³)	PM10/TSP (5L/min)		PM4.0/TSP (2.2L/min)	
	Observed data	Mean ratio	Observed data	Mean ratio
> 350	2	0.48	2	0.42
300~350	-	-	1	0.46
250~300	1	0.65	-	-
200~250	2	0.40	-	-
150~200	4	0.50	4	0.38
100~150	11	0.51	11	0.44
Σ(>100)	20	0.50	18	0.43
50~100	8	0.67	8	0.45
>50	10	0.66	12	0.62
Σ(<100)	18	0.67	20	0.55

가하는 것이 상당히 어려우므로 특정 측정지점의 실내 공기 중에 측정된 부유먼지의 농도자료는 그 지점의 특성을 반영되도록 하기 위해서는 농도수준 범위별로 분류하여 평가하고자 하였다.

표 5에 의하면 본 연구에서 측정된 실내 공기 중 TSP의 평균농도인 100 µg/m³을 기준으로 해서 저농도 그룹과 고농도 그룹의 TSP 대 PM10 분율과 TSP 대 PM4.0 분율이 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉 저농도 그룹에서 TSP 대 PM10의 평균분율은 0.66으로 나타난 반면 고농도 그룹에서는 0.50으로 나타났다. 그리고 TSP대 PM4.0분율 역시 100 µg/m³을 기준으로 한 저농도 그룹에서는 0.55로 나타난

반면 고농도 그룹에서는 0.43으로 나타났다. 따라서 본 연구의 결과를 요약하면 TSP대 PM10의 분율은 TSP가 고농도로 갈수록 상대적으로 낮아진다고 볼 수 있었으며, 이러한 현상은 미국의 Wisconsin에서 1985년부터 3년간에 걸쳐 측정된 TSP의 농도범위 별 PM10/TSP 비에서 TSP가 저농도로 갈수록 PM10의 평균 농도비가 상대적으로 증가하는 것과 동일한 결과를 보여 주었다(Mathai *et al.*, 1988).

4. 결 론

실내·외 환경에서 빈번히 사용하는 중량법에 의한 여러 가지 먼지 측정방법을 다양한 조건(유량변화)에서 비교평가하여, 측정자료간에는 어느 정도의 차이를 보이는지, 그리고 서로 다른 측정법간에 어떠한 관련성이 있는지를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

부유먼지의 측정에 있어서는 특히, 적용한 샘플러 간 측정방법의 차이, 채취유량의 차이 등이 동일한 부유먼지 측정항목 상호간에 대해서도 서로 유의한 차이를 보일 수 있을 뿐만 아니라, 서로 다른 항목간에도 예를 들면, TSP 대 PM10 혹은 TSP 대 PM4.0의 상관성 혹은 농도비에도 영향을 주는 가장 중요한 인자임을 확인할 수 있었다. 환경대기 중 부유먼지의 농도 혹은 TSP에 대한 PM10의 농도비는 적용한 샘플러 형태의 차이, 여과매체의 차이, 먼지 발

생원과 관련된 측정지점의 지리·지형적 특성과 계절적 특성 극지적인 기상조건에 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 임의의 지역에서 장기간에 걸쳐 TSP를 기준으로 누적 측정되어 온 농도 자료를 PM10을 기준으로 측정된 자료와 직접 비교하고자 하거나 혹은 그 반대의 경우에는 가능한 한 PM10의 농도분율의 변화 등에 관해 평가된 자료를 활용하거나 유사한 환경조건에서 측정된 두 측정법 상호간의 상관성을 이용한다면 양 자료의 호환에는 큰 문제가 없을 것으로 생각된다. 본 연구에서 얻어진 자료로부터 경험적으로 산출된 직선 회귀식의 기울기와 절편 그리고 이들의 95% 신뢰구간에 대한 평가자료는 중량법으로 얻어진 부유먼지 농도자료간 비교와 변환작업에 있어서 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같은 측면에서 볼 때 분진에 관련된 연구 및 향후 환경기준의 설정시 다음과 같은 사항이 중요한 것으로 보인다. 첫째, 서로 다른 방법으로 채취된 분진농도자료에 호환성을 부여하기 위하여 국내 실정에 적합한 보정계수 혹은 상관관계를 규명하여 줌으로써 분진에 관련된 대기질의 해석 및 자료의 이용에 대한 과학적인 근거를 마련하여야 한다. 둘째, 대기 중 부유분진농도 및 분진에 함유된 화학적 유해성분의 위해성 평가의 주요 부분인 피폭평가 과정에서 기존 공인된 방법의 표준화 및 규격화를 위한 정도관리(QC/QA)방법을 정립해야 할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 2000년도 영남대학교 학술연구조성비의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

최진수, 백성욱(1998) 대기 중 TSP와 PM10 농도의 관련

성, 한국대기보전학회지, 14(1), 1-10.
 ACGHI (1991) Notice of intended change-Appendix D-Particle size selective sampling criteria of air borne particulate matter, *Appl. Occup. Environ. Hygiene*, 6(9). Appendix pages.
 Bailey, D.L.R. and P. Clayton (1982) The measurement of suspended particles and total concentrations in the atmosphere using standard smoke shade methods. *Atmos. Environ.*, 16, 2683-2690.
 Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *A & WMA*, 45(5), 320-382.
 Couling, S. Ed. (1993) *Measurement of airborne pollutants*, Butterworth-Heinemann Ltd., First Published, Part 1. Ambient air quality, 301pp.
 Mathai, C.V. and D.H. Stonefield, Ed. (1988) *Transactions, PM-10; Implementation of standard*, Air pollution control association, Pittsburgh, PA, 93-99pp, 179-190pp.
 Monn, C., O. Braendli, G. Schaeppi, Ch. Schindler, U. Ackermann-Liebrich, Ph. Leuenberger, and S. Team (1995) Particulate matter < 10 μm (PM10) and total suspended particulates (TSP) in urban, rural and alpine air in Switzerland, *Atmos. Environ.*, 29(19), 2565-2573.
 Solomon, P. (1982) Performance comparison of three samplers of suspended airborne particulate matter. *JAPCA*, 32, 373-375.
 Sweizer, T.A. (1985) A field evaluation of two PM-10 inlets in an industrialized area of Illinois, *J. Air Pollut. Control Asso.*, 35(7), 744-746.
 US EPA (1996a) List of designated reference and equivalent methods, Office of Research and development, Research Triangle Park, N.C., Mar. 10, 1996.
 US EPA (1996b) Air quality criteria for particulate matter, EPA/600/P-95/001aF-cF, Office of Research and Development, Washington, D.C., Apr. 1996.
 US EPA (1997) National ambient air quality standards for particulate matter; final rule. Code of federal regulations, Part 50, Title 40.