

샘플유량과 기상조건에 따른 미세먼지 종량 측정용 기구간의 농도 비교

양 원 호 · 김 대 원^{*} · 김 진 국 · 윤 충 식 · 허 용 · 이 부 용^{*}
대구가톨릭대학교 산업보건학과, ^{*}대구가톨릭대학교 환경과학과
(2004년 6월 4일 접수; 2005년 1월 3일 채택)

Comparative Evaluation of Gravimetric Measurement Samplers for Fine Particles by Sampling Flow Rates and Meteorological Conditions

Won Ho Yang, Dae Won Kim^{*}, Jin Kuk Kim, Chung Sik Yoon,
Yong Heo and Bu Yong Lee^{*}

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea
^{*}Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea
(Manuscript received 4 June, 2004; accepted 3 January, 2005)

Several samplers using gravimetric methods such as high-volume air sampler, MiniVol portable sampler, personal environmental monitor(PEM) and cyclone were applied to determine the concentrations of fine particles in atmospheric condition. Comparative evaluation between high-volume air sampler and MiniVol portable sampler for PM₁₀, and between MiniVol portable sampler and PEM was undertaken from June, 2003 to January 2004. Simultaneously, meteorological conditions such as wind speed, wind direction, relative humidity and temperature was measured to check the factors affecting the concentrations of fine particles. In addition, particle concentrations by cyclone with an aerodynamic diameter of 4 μm were measured. Correlation coefficient between high-volume air sampler and portable air sampler for PM₁₀ was 0.79 ($p < 0.001$). However, the mean concentration for PM₁₀ by high-volume air sampler was significantly higher than that by MiniVol portable sampler ($p = 0.018$). Correlation coefficient between Minivol portable sampler and PEM for PM_{2.5} was 0.74 ($p < 0.001$), and the measured mean concentrations for PM_{2.5} did not show significant difference. Difference of the measured concentrations of fine particle might be explained by wind speed and humidity among meteorological conditions. Particle concentration differences by measurement samplers were proportional to the wind speed, but inversely proportional to the relative humidity, though it was not a significant correlation.

Key Words : Fine particles, PM₁₀, Gravimetric sampling, Meteorological factors

1. 서 론

현대사회는 인구, 산업, 경제활동이 도시에 집중되며, 공장의 가동과 가정의 활동 및 자동차 사용량의 증가로 각종 오염물질을 방출하므로 도시지역의 실외 대기가 오염되고 있다. 또한 근로자가 제조 및

기타 작업 활동을 하는 작업 실내환경 뿐만 아니라 작업공정 없이 근로자가 일하는 사무실 및 일반 대중이 거주하는 주택 등의 실내환경에서도 환기 및 실내 발생원에 따른 실내환경이 오염되고 있다¹⁾.

실내·외 환경에서 공기 중 입자상 물질은 먼지, 매연, 검댕, 액적 등의 고체상 또는 액체상 물질로 구분할 수 있는데, 부유먼지는 보통 입경 10 μm 을 기준으로 미세먼지와 거대먼지로 분류된다. 미세먼지 노출에 따른 건강영향의 역학(疫學)연구에 의하면, 미세먼지는 호흡기 계통, 특히 폐에 위해를 주는

Corresponding Author : Won Ho Yang, Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea
Phone: +82-53-850-3739
E-mail: whyang@cu.ac.kr

것으로 나타나고 있으며 사망률의 증가를 초래하는 것으로 보고 되고 있다²⁾. 이혜문(1996) 등이 3년간 PM₁₀(particulate matters less than 10 μ m as an aerodynamic diameter) 측정에서 Cr과 Cd의 초과발암 위험도는 각각 1.6×10^{-6} 과 5.6×10^{-6} 로 보고하였다³⁾. 미세먼지가 인체에 영향을 미치는 먼지의 크기, 화학적 조성, 농도분포, 수증기 친화력 등 다양한 변수와 밀접한 관계가 있다⁴⁾. 미세먼지 노출에 따른 건강영향의 중요성으로 Moschandreas와 Saksena(2002)는 직접적 노출측정, 물질수지(mass balance)를 이용한 물리적 방법의 간접적 노출예측, 회귀방법 등의 통계적 노출예측을 제시하였다⁵⁾.

대기환경기준 중 미세먼지를 규정하기 위한 중요한 것 중의 한 가지는 대기환경기준의 목적 달성을 위한 신뢰성 있는 측정방법을 마련하는 것이다. 또한 미세먼지의 발생원 규명, 그 제어방법, 인체에 미치는 유해성을 평가하기 위해서는 신뢰성 있는 공인된 측정방법이 마련되어야 한다. 공기환경 중 미세먼지의 측정방법에는 여러 가지가 있으나 측정원리의 측면에서는 중량법과 광학적 방법으로 구분할 수 있으며, 포집유량 측면에서는 High-volume과 Low-volume으로 구분된다. 실내환경에서는 상대적으로 소형펌프를 이용한 낮은 유량을 이용하여 지역시료(area sampling)와 근로자 및 거주자를 대상으로 호흡위치에서 개인노출(personal exposure sampling)을 이용하여 미세먼지를 측정하고 있다⁶⁾.

먼지측정에 내재된 가장 큰 문제는 시료의 채취 방법에 따른 측정결과와 상대적 오차가 클 수 있다는 것이다^{7,8)}. 국내의 경우 대기환경 공정시험법에서는 미세먼지의 측정방법으로 High-volume 및 Low-volume법에 의한 중량법과 광학적 방법인 β -ray 측정방법을 포함하는 5가지 방법을 명시해 놓고 있다. 실내환경에서는 개인노출 평가용으로 저 유량(1~5 L/min) 펌프를 연결한 측정기를 사용하고 있다. 대기환경에서 공기역학적 직경을 2.5 μ m(PM_{2.5})와 10 μ m(PM₁₀) 구분할 때 적용하는 역학적 방법은 측정기마다 상이할 수 있지만, 측정기구의 측정결과와 상대적 오차는 유량에 따른 유입속도는 공기환경 중 기류, 습도, 온도 등의 기상변화에 특히 영향을 받을 수 있다⁹⁾. 또한 micro-balance를 이용한 중량 분석은 온도, 습도, 조도, 기류, 정전기에 영향을 받을 수 있기 때문에 여과지(filter)는 24 시간 동안 상대습도 30~40% 범위에서 오차 $\pm 5\%$ 이내를 유지해야 하고, 온도는 20~23°C 범위에서 오차 $\pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지해야 한다¹⁰⁾.

본 연구에서는 측정기의 유입속도는 실내 및 실외환경에서 기류 등 기타 기상조건에 영향을 받을 가능성을 고려하여, 다른 유량범위를 가진 측정기를

이용한 시료채취와 채취된 미세먼지의 농도를 상호 비교·평가하고자 하였다. 본 연구 결과는 기상 환경조건에 따른 적절한 측정기구의 선택 및 측정 자료의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 생각한다.

2. 연구방법

본 연구에서 중량법에 의한 대기 중 미세먼지의 측정은 대구가톨릭대학교 자연대학 5층 건물옥상(지상에서 약 20 m)에서 2003년 6월부터 2004년 1월까지 1주당 3일과 4일로 구분하여 2회를 동일한 조건으로 측정하였고, 동시에 풍향, 풍속, 습도, 온도를 data-logger가 연결된 자동관측 장비(CR10X, Campbell, USA)를 이용하여 동시에 측정하였다. 자동관측장비는 1시간당 평균 기류속도, 습도, 온도, 풍향을 측정할 수 있도록 조작하였다. 미세먼지 시료 측정기로 공기역학적 직경을 10 μ m로 분리할 수 있는 사이클론(cyclone)을 연결한 High-volume air sampler(Kimoto Electric Co., Japan), MiniVol portable sampler(Airmetrics, USA), 호흡성 분진용(respirable suspended particulate; RSP), Cyclone(cut-off: 4 μ m, SKC Inc., USA) 및 PEM(personal environmental monitor; SKC Inc., USA)를 이용하였다. 측정기 각각의 포집유량은 High-volume air sampler(PM₁₀) 440 L/min, MiniVol portable sampler(PM₁₀과 PM_{2.5}) 5 L/min, RSP(cut-off; 4 μ m) 2.5 L/min, PEM(PM_{2.5}) 2 L/min 이었다. High-volume air sampler와 MiniVol portable sampler는 기기 자체에 강우(降雨)를 피할 수 있지만, 그렇지 못한 Cyclone과 PEM은 상부에 강우를 피할 수 있도록 아크릴과 철재를 이용하여 장치를 설계하였다.

미세먼지 측정결과에 미치는 여지의 채취효율차이에 의한 영향을 최소화하기 위해, High-volume air sampler를 제외하고 동일한 종류의 여지를 사용하였다. 사용한 여지는 High-volume air sampler는 유리섬유(glass fiber, Whatman Co.)를 이용하였고, 기타 다른 측정기에서는 pore size가 1 μ m 이하인 PTFE(Teflon) 여지를 사용하였다. 유량점검은 High-volume air sampler는 제조회사에서 공급하는 유량보정용 Orifice를 이용한 정압변동에 따른 유량 보정표를 이용하였고, 다른 측정 기구는 비누거품미터(soap bubble meter)를 이용하여 매회 측정시마다 측정 및 보정 하였다. 시료 채취 기간 중의 대표 유량은 측정 전·후의 3회씩 측정된 값을 평균하여 사용하였으며, 시료채취 전·후의 여지는 테시케이터(상대습도 40 \pm 5°C)에서 향량이 되도록 48시간 보관하였다. 여지에 포집된 시료는 10⁻⁵g까지 칭량할 수 있는 Micro-balance(Scaltec Inc., Germany)를 이용하였고, 정전기의 영향을 최소화하기 위하여 정전기 제

저장치를 사용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 측정농도 비교

2003년 6월부터 2004년 1월까지 1주일에 2회(3일, 4일)씩 총 40회 측정된 각 측정기별 농도를 Table 1 과 Fig. 1에 나타내었다. 측정기간 동안 태풍으로 기기 오작동에 의한 농도 측정값은 자료 분석에서 제외하였다. 측정기기에서 유량이 가장 적은 PEM의 검출한계(limit of detection; LOD)는 field blank 시료의 무게 변화를 측정된 결과 시료채취 전의 blank 시료의 무게차이는 2 μg 정도로 나타났으며, 본 연구에서는 정확한 측정을 위해 최소 무게변화량을 이 값의 3배(3 SD)인 6 μg 정도로 간주하였다. 따라서 6 μg 을 실제 시료포집 조건에 적용할 경우 PEM의 검출한계는 약 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 일 것으로 추정하였다. 또한 시료 채취 기간 중 측정 전·후의 펌프의 유량 차이가 20% 이하이어야 함을 고려할 때 (NIOSH NMAM, 2003), 본 연구에서 이용된 PEM과 Cyclone의 측정 전·후의 차이는 평균 1.7(± 2.8)과 3.1(± 4.2)을 나타내었다¹¹⁾.

High-volume air sampler와 MiniVol portable sampler를 이용한 PM_{10} 의 농도의 평균값은 각각 50.83(± 28.91) 및 46.97(± 24.50) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내어 High-volume air sampler가 높은 값을 나타냈으며 짝비교 t-test에 의하면 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p=0.018$). 이 결과는 유입 유량 및 포집에 영향 요인이 있는 것으로 생각할 수 있다. $\text{PM}_{2.5}$ 측정에서는 유량이 2.5배 높은 MiniVol portable sampler(5 L/min)의 측정농도와 PEM(2 L/min) 측정농도는 유의한 차이를 나타내지 않았다($p=0.796$). 절단입경(cut-off diameter)이 4 μm 인 Cyclone의 유량은 2.5 L/min으로 평균농도 값은 PM_{10} 측정용인 PEM보다 높은 유량이었으나 평균농도는 적은 값을 나타내었다.

MiniVol에 의해서 동일한 유량으로 측정된 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 간의 상관계수는 0.77, 기울기는 0.59로 나타났다(Fig. 2). 기울기는 PM_{10} 중 $\text{PM}_{2.5}$ 의 함량분율을 59%로 해석할 수 있으며, 유럽 연구에서 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 함량 분율이 대략 70%라고 보고한 것보다는 적은 값을 나타내었다¹²⁾. 그럼에도 최진수와 백성욱(1998)이 대구 4지역에서 1년간 연구한 $\text{PM}_{10}/\text{TSP}$

Table 1. Measured concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of fine particles by different samplers

Measurement		Mean \pm S.D.	Median	Range	Paired t-test
PM_{10}	High-volume air sampler (440 L/min)	52.43 \pm 34.75	42.86	6.21 ~ 125.48	p= 0.018
	MiniVol portable sampler (5 L/min)	42.67 \pm 23.46	36.79	9.11 ~ 92.21	
$\text{PM}_{2.5}$	MiniVol portable sampler (5 L/min)	37.33 \pm 18.89	37.89	8.48 ~ 83.31	p= 0.796
	PEM (2 L/min)	36.31 \pm 25.11	31.30	2.60 ~ 113.10	
Cut-off 4 μm	Cyclone (2.5 L/min)	34.81 \pm 21.48	31.30	9.10 ~ 116.60	

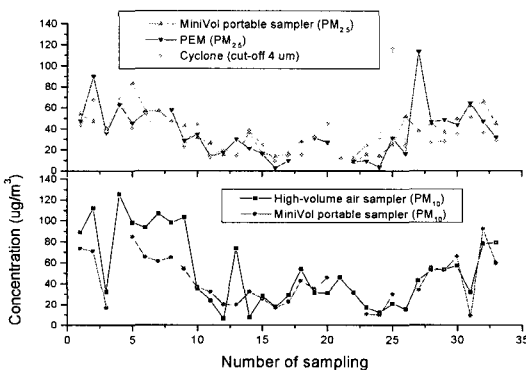


Fig. 1. Comparison among measured concentrations by difference samplers.

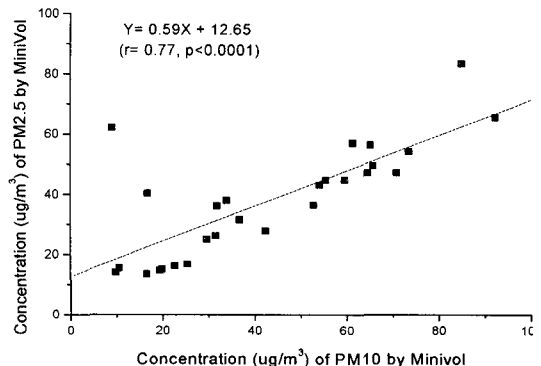


Fig. 2. Correlation between concentrations of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ by MiniVol portable sampler.

가 계절에 따라 0.64~0.73의 함량 분율을 고려하면 TSP 중 PM_{2.5}의 비율이 매우 높음을 알 수 있다¹³⁾.

3.2. 측정기구간 상관성 분석

측정된 미세먼지의 측정기기 별 농도 경향은 비슷하였다. PM₁₀은 상대적으로 High-volume air sampler의 농도가 MiniVol portable sampler에 비해 높았지만, 상관성을 비교해보면 상관계수가 0.83(p<0.001)과 짝비교 t-test의 p-value가 0.018로 나타나 농도 값 측정에 유량, 채취효율 등 미확인 요인이 계속적으로 영향을 준 것으로 판단할 수 있다. PM_{2.5} 측정에서는 MiniVol과 PEM 유의한 상관관계(r=0.734, p<0.001)와 짝비교 t-test의 p-value가 0.796를 나타내어 농도값 자료의 호환에는 큰 문제가 없는 것으로 생각한다(Table 1 및 Table 2). PM₁₀과 PM_{2.5} 측정기기 간의 상관성은 모두 통계적으로 유의한 관계를 나타내었고, Cyclone은 상대적으로 낮은 상관성을 보였다. Cyclone의 경우 MiniVol(PM_{2.5})와 PEM과 비교하여 평균농도 값은 낮았고, 또한 상대적으로 낮은 상관계수 값은 50%의 포집효율을 나타내는 절단입경인 4 μm 입자와 가스(gas)의 분리가

미확인 영향요인으로 적절하게 이루어지지 않은 것으로 생각할 수 있다.

3.3. 미세먼지 측정농도와 기상요인

본 연구에서 미세먼지 측정기 사이의 농도 값에 영향요인으로 기상분야 중 풍속, 풍향, 습도, 온도를 동시에 측정하였고, 그 영향을 분석하였다. 우선 풍속의 영향으로 미세먼지 측정기간 동안 동시에 측정된 기류와 측정기 농도 값의 차이와 상관성을 분석하여 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. PM₁₀ 측정기와 PM_{2.5} 측정기는 각각 통계적으로 유의한 상관성을 보이진 않았지만, 풍속이 높아질수록 측정기간 미세먼지 농도 차이가 높아지는 경향을 나타내었다. 풍속이 3일 또는 4일 동안의 평균값이기 때문에 실제적으로 강풍 등의 고풍속 영향을 정확히 파악할 수 없었지만, 풍속이 측정기의 유입유량에 영향을 줄 수 있음을 나타내고 있다.

기상 요인 중 습도와 측정기 농도 값의 차이와 상관성은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과도 PM₁₀과 PM_{2.5} 측정기 각각 통계적으로 유의한 상관성을 보이진 않았지만, 습도가 높을수록 측정기기

Table 2. Spearman correlation coefficient (r) between measured concentrations by different samplers

Correlation coefficient (r)	High-volume air sampler (PM ₁₀)	MiniVol (PM ₁₀)	MiniVol (PM _{2.5})	PEM (PM _{2.5})	Cyclone (Cut-off 4 μm)
High-volume air sampler (PM ₁₀)	1				
MiniVol (PM ₁₀)	.785**	1			
MiniVol (PM _{2.5})	.640**	.749**	1		
PEM (PM _{2.5})	.733**	.584*	.744**	1	
Cyclone (Cut-off 4 μm)	.371*	.390*	.622*	.735**	1

*: Correlation is significant at the .05 level (2-tailed)

**: Correlation is significant at the .01 level (2-tailed)

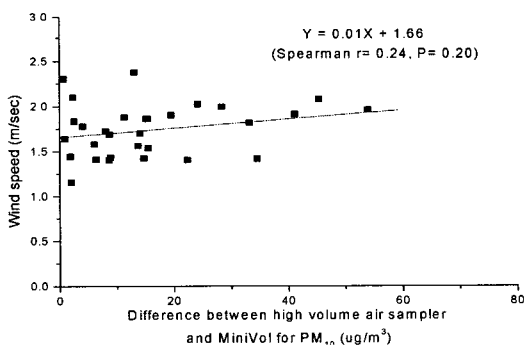


Fig. 3. Correlation between concentration difference of PM₁₀ samplers and wind speed.

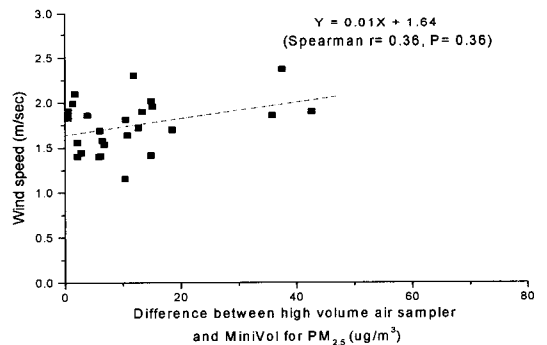


Fig. 4. Correlation between concentration difference of PM_{2.5} samplers and wind speed.

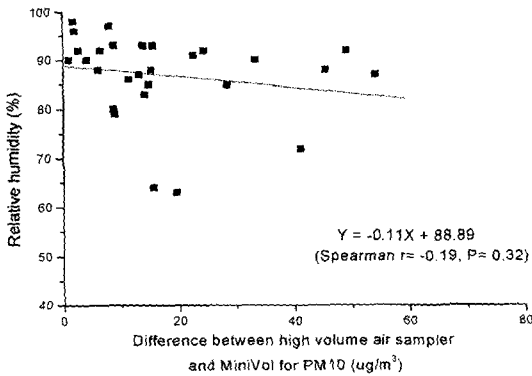


Fig. 5. Correlation between concentration difference of PM₁₀ samplers and relative humidity.

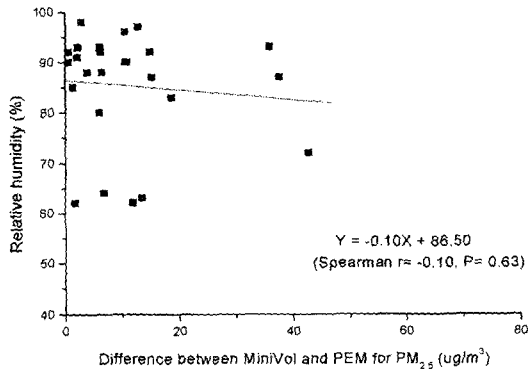


Fig. 6. Correlation between concentration difference of PM_{2.5} samplers and relative humidity.

간 농도 차이가 낮아지는 경향을 나타내었다. 이 결과는 습도가 높아질수록 대기 중에서 입자상 물질의 농도가 감소하고 있다고 발표한 Monn(1995)의 결과를 고려할 때⁹⁾, 미세먼지의 저 농도에서는 측정기간 차이가 감소하지만 고농도에서는 차이가 높아질 수 있음으로 나타내는 것이다. 하지만, 휘발성 유기화합물 등이 흡착되어 승화성이 있는 미세먼지는 기상으로 날아가 최종 중량으로는 나타나지 않을 수 있기 때문에 과소평가할 가능성이 있으며^{14,15)}, 필터 자체가 습도에 영향이 크기 때문에 더 심도있는 연구가 요망된다.

본 연구에서 상대습도와 미세먼지(PM₁₀ 및 PM_{2.5})의 관련성을 Fig. 7에 나타내었다. 상대습도에 대해서 미세먼지 농도는 음(-)의 상관성을 보였으며 이것은 대기 중에서 입자상 물질의 물리적인 wash-out로 농도가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 기타

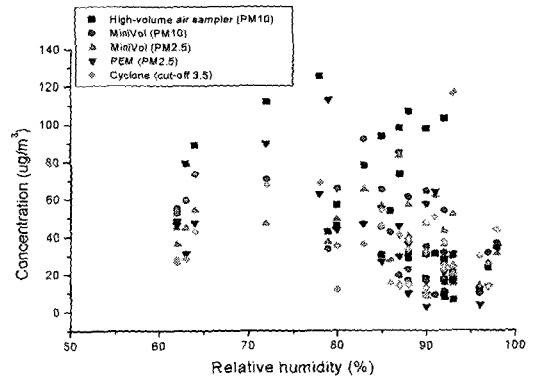


Fig. 7. Correlation between concentrations of fine particles and relative humidity.

기상요인 온도는 PM₁₀과 PM_{2.5}가 각각 다른 경향을 보였고, 풍향은 기준 설정의 어려움으로 관련성을 분석하지 않았다.

4. 결론

본 연구는 다른 유입 유량범위를 가진 측정기를 이용한 시료측정과 채취된 미세먼지(PM₁₀과 PM_{2.5})의 농도를 비교·평가하고, 그 영향으로 기상요인 중 풍속, 습도 관련성을 분석하였다. 측정기간 동안 측정기별로 높은 농도차이를 나타낸 기간을 살펴보면 풍속이 높았던 것으로 분석되었고, 상대적으로 저습도는 측정기간 측정기별 농도차이를 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서, 기상요소 중 풍속과 습도는 미세먼지의 측정시 유입속도에 영향을 일으킬 수 있는 것으로 생각할 수 있다. 결론적으로 건강유해 영향을 일으킬 수 있는 미세먼지의 측정에 다양한 측정기가 사용될 수 있지만, 실내 및 실외 대기환경 등 측정 장소의 환경적 요소 중 기상요소를 고려하여 측정기를 선택하여야 신뢰성 있는 농도를 측정할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) Wallace, L., 1996, Indoor Particle: A review, Journal of the Air & Waste Management Association, 46, 98-126.
- 2) Lee, J. T. and C. M. Shy, 1999, Respiratory function as measured by peak expiratory flow rate and PM₁₀: six communities study, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 9(4), 293-299.
- 3) 이혜문, 김동술, 이진홍, 1996, PM-10 내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가, 한국대기

- 보전학회지, 12(5), 555-566.
- 4) Chow, J. C., 1995, Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45(5), 320-382.
 - 5) Moschandreas, D. J. and S. Saksena, 2002, Modeling exposure to particulate matter, *Chemosphere*, 49, 1137-150.
 - 6) Bae, H., W. Yang and M. Chung, 2004, Potential exposure and traffic contribution to indoor air quality of shoe-stalls near busy road in Korea, *The Science of the Total Environment*, 323, 99-105
 - 7) 백성욱, 박지혜, 서영교, 2002, 실내의 공기 중 부유먼지 측정방법 상호간의 비교평가, *한국대기환경학회지*, 18(4), 285-295.
 - 8) Solomon, P., M. Derrick, J. Moyers and P. Hyde, 1982, Performance comparison of three samplers of suspended airborne particulate matter, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 32(4), 373-375.
 - 9) Monn, C. H., O. Braendli, G. Schaeppi, C. H. Schindler, U. Ackermann, P. H. Leuenberger and Sapaldia Team, 1995, Particulate matter <math><10\mu\text{m}</math>(PM₁₀) and total suspended particulate (TSP) in urban, rural and alpine air in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 29(19), 2565-2573.
 - 10) Carlton, A. G. and A. Teitz, 2002, Design of a cost-effective weighting facility for PM_{2.5} quality assurance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52, 506-510.
 - 11) Manual of Analytical Methods(NMAM), 4th Edition, Respirable 0600, NIOSH, <http://www.cdc.gov/niosh/nmam/>.
 - 12) WHO Regional Publications, 1999, *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*, European Series, 85, 99-144.
 - 13) 최진수, 백성욱, 1998, 대기 중 TSP와 PM₁₀ 농도의 관련성, *한국대기보전학회지*, 14(1), 1-10.
 - 14) Wolkoff, P. and C. K. Wilkins, 1994, Indoor VOCs from household floor dust: comparison of headspace with desorbed VOCs; method for VOC release determination, *Indoor Air*, 4, 248-254.
 - 15) Hyttinen, M., P. Pasanen and P. Kalliokoski, 2001, Adsorption and desorption of selected VOCs in dust collected on air filters, *Atmospheric Environment*, 35, 5709-5716.