

서울시 미세먼지의 밀도 추정에 관한 연구

김신도[†] · 김창환 · 황의현*

서울시립대학교 환경공학과, *경도대학 토목과
(2008. 3. 10. 접수/2008. 4. 5. 채택)

A Study on the Particles Density Estimation in Seoul Metropolitan

Shin-Do Kim[†] · Chang-Hwan Kim · Ui-Hyun Hwang*

Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul

**Dept. of Civil Engineering, Gyeongdo Provincial College*

(Received March 10, 2008/Accepted April 5, 2008)

ABSTRACT

The variation of the particle size distribution and density as well as the chemical composition of aerosols is important to evaluate the particles. This study measured and analyzed airborne particles using a scanning mobility particle sizer (SMPS) system and an aerodynamic particle sizer (APS) at the University of Seoul during every season. The highest particle number concentration of airborne particles less than 0.9 μm , occurred in winter, while the highest particle number concentration of airborne particles more than 0.9 μm , occurred in spring. Mass concentration appeared highest at spring. Also, when we compared β -ray's mass concentration with calculated mass concentration by using the SMPS-APS system during each season, density of the winter is 1.92 g/cm^3 , spring density is 1.64 g/cm^3 , fall density is 1.57 g/cm^3 . We found out that PM10 density was differ every season. However, while the calculated density is whole density for PM10 the density of each diameter was different. In this study the density estimation equation of the QCM cascade impactor measured mass concentration of each diameter.

Keywords: SMPS, APS, QCM, size distribution, mass, density

I. 서 론

대기오염물질인 입자상물질은 대기 중에 고체나 액체 상태로 존재하는 물질을 말한다. 일반적으로 크기는 0.001~500 μm (대부분 0.1~10 μm)이며, 직경 2.5 μm 크기를 기준으로 미세입자(Fine particle)와 거대입자(Coarse particle)로 분류된다.

입자는 크기에 따라서 대기 확산 및 이동, 침강속도, 광투과성, 기상과 물질 전달 속도, 방지시설 효율 등이 결정된다는 점에서 입경별 분포 특성과 이에 대한 밀도를 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다(김 등, 2007).

외국에서는 MOUDI(Micro - Orifice Uniform Deopst

Impactor), 광학입자계수기(OPC, Optical Particle Counter), APS(Aerodynamic Particle Sizer), SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer), EAA(Electrical Aerosol Analyzer)를 통해 대기 중의 에어로졸 특성에 대한 연구가 다수 수행되어 대도시, 해양, 전원지역, 극지방의 에어로졸 입경분포 특성을 보고하고 있으나, 우리나라는 이에 대한 다양한 연구가 미흡한 실정이다(Keady 1992; Constantious Sioutas, 1999; Buzorius, 1999; Morawska, 1999; Erwin Karg, 2000; Peter H. McMurry, 2002; Si Shen, 2002; Philip Demokritou, 2004).

또한 미세먼지를 이루고 있는 입자상 물질에 대한 효율적인 처리와 정확한 정보를 얻기 위해서는 입경별 크기 분포와 입자의 밀도 등의 물리적 특성에 대한 많은 자료의 확보가 필요하다(김 등, 1986).

따라서, 본 연구에서는 SMPS와 APS를 이용하여 일반대기 중 입자상 물질을 계절별로 측정하여 입자상 물

[†]Corresponding author : Department of Environment Engineering, University of Seoul
Tel : 82-2-2210-2453, Fax : 82-2-2242-4962
E-mail : sdkim@uos.ac.kr

질의 입경분포 특성을 파악하였으며(배 등, 2003), PM10 β-ray와 QCM(Quartz Crystal Microbalance) cascade impactor를 이용하여 입자상 물질의 밀도 특성에 대하여 연구하였다.

II. 실험 방법

본 측정에서는 미세먼지의 입경별 입자개수를 측정하기 위하여 SMPS를 이용하여 입경이 0.9 μm 이하의 입자를 측정하였으며, APS를 이용하여 0.9~10 μm의 입자를 측정하였다. 또한 동일한 시간대에 PM10 β-ray와 QCM을 이용하여 중량농도를 측정하였다.

SMPS(TSI, USA)는 CPC(Condensation Particle Counter, TSI Model 3010, USA)와 EC(Electrostatic Classifier, TSI, Model 3071A, USA)로 이루어졌으며, APS(API, USA)는 Aerosizer와 Aerodiluter로 구성되어 있다.

입경별 중량농도를 측정하는 QCM은 수정진동저울이라고도 하며 수정의 결정을 매우 얇은 판 모양으로 잘라 낸 조각 양 끝에 금속 박막을 붙인 구조를 한 전기소자로, 두 금속 박막을 통해 수정 조각에 교류 전장을 인가하면 일정한 진동수(공명 진동수)로 진동하는 성질을 나타낸다. 그 금속 박막 표면에 나노 그램 정도의 미량 물질이 흡착되면 그 중량에 따라 공명 진동수가 감소하므로 미량 저울로 이용할 수 있다는 원리를 이용하고 있다(Ahn, 1995).

본 연구에서는 입자의 입경별 밀도를 산출하기 위하여 QCM cascade impactor를 이용하여 10개의 단에서 측정된 입경별 중량농도와 SMPS-APS를 이용하여 측정된 입경별 입자가 차지하는 부피와의 상관관계를 이용하였다.

본 연구의 측정 지점은 서울시 동대문구 전농동에 위치한 서울시립대학교 공대실험동 옥상으로 측정지점 주변은 별다른 특정 배출원이 없으며 주거지역과 녹지지역으로 구성되어 있다.

측정은 일반 대기를 대상으로 2005년 12월 1일부터 16일까지 겨울철, 2006년 3월 18일부터 4월 27일까지

봄철, 2007년 9월 1일부터 9월 28일까지 그리고 2007년 11월 13일부터 11월 21일까지 가을철에 측정을 하였다. 여름철은 장마로 인하여 측정결과와 신뢰도가 낮아 측정 대상에서 제외하였다.

III. 결 과

1. 계절별 입자 개수와 중량농도

Fig. 1에는 각 계절에 SMPS-APS system을 이용하여 측정된 입자상 물질의 평균 개수농도를 나타냈다.

모든 계절에서 SMPS로 측정된 0.9 μm 이하의 입경 범위에서 개수농도가 10⁹ 단위로 매우 높게 나타났으며, APS에서 측정된 0.9 μm 이상 입경 범위의 개수농도는 10⁶ 단위로 측정되어 개수농도의 차이가 매우 커 Fig. 1에서 나타나는 것과 같이 0.9 μm 이상의 입경범위에서는 개수농도가 거의 없는 것처럼 나타났다.

Fig. 1에서 0.9 μm 이하 영역에서의 개수농도는 겨울 > 봄 > 가을의 순으로 높은 값을 나타내고 있다. 봄철의 경우 황사가 발생한 날을 제외한 자료만을 선별하였으나, 대체적으로 봄철의 경우 황사의 잔류로 인해 전반적으로 개수농도가 높게 측정된 것으로 판단된다.

입경별 최빈값은 겨울이 0.051 μm, 봄 0.091 μm, 가을 0.095 μm로 측정되었으며, 계절별 입자의 기하평균 입경은 겨울이 0.063 μm, 봄 0.081 μm, 가을이 0.098 μm로 나타났다. 봄과 가을의 경우 입경이 약 0.1 μm 크기 부근에서 최대 개수농도를 보이는 특성은 대다수의 외국 발표 자료와 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 겨울철에는 입경이 약 0.05 μm 크기의 작은 입경

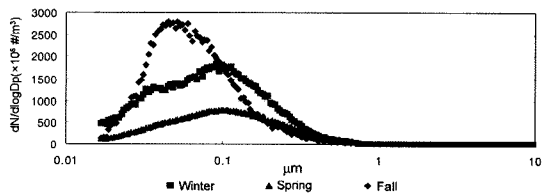


Fig. 1. Number concentration for season.

Table 1. Measurement device of particle

Method	Instrument	Size range	Flow rate	Remark
Aerosol count	APS (API, USA)	0.9~10 μm	2.0 LPM	Real time
	SMPS (TSI, USA)	0.015~0.9 μm	Sheath air 2.5 LPM Aerosol 0.25 LPM	Real time
Mass	β-ray (ANDERSON, USA)	PM10	10~24 LPM	Real time
	QCM (CALIFORNIA, USA)	PM10	2.0 LPM	Real time

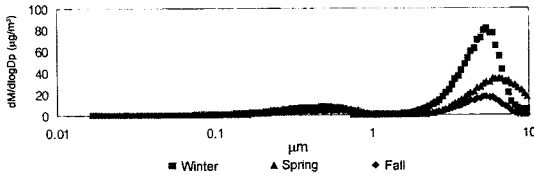


Fig. 2. Mass concentration for season.

먼지가 타 계절에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 이 크기 범위의 영역은 주로 난방 및 연소에 의해 발생하는 인위적인 입자로 추정된다.

Fig. 2는 계절별 SMPS-APS system에서 측정된 개수 농도를 먼지의 밀도를 1 g/cm³로 가정하여 중량농도로 환산된 그림이다. 봄>가을>겨울의 순으로 높은 값을 나타냈다. 개수농도로는 겨울이 높으나 중량농도로는 봄이 높다.

Fig. 1과 2에서 나타났듯이 입자의 개수 농도는 0.9 µm 이하의 입경을 가진 입자가 대부분을 차지하지만, 중량농도는 0.9 µm 이상의 입경을 가진 입자가 대부분을 차지한다는 것을 알 수 있다.

따라서, 입자의 정확한 특성을 파악하기 위해서는 입자의 중량 뿐만 아니라 입경에 따른 개수 농도에 대한 자료의 축적이 매우 중요하다(정 등, 2003).

2. 계절에 따른 밀도의 추정

SMPS-APS system은 입자의 개수 측정시 입자의 밀도가 1 g/cm³로 설정되어 측정값이 얻어지며, system에서 계산된 중량농도와 PM10 β-ray에서 측정된 중량농도의 상관관계를 비교하여 대기중 PM10에 대한 평균적인 입자의 밀도를 산출할 수 있다.

Fig. 3~5는 각 계절별 PM10 β-ray에서 측정된 중량농도와 SMPS-APS system에서 밀도가 1 g/cm³로 설정되어 계산된 PM10 농도를 일별로 비교하여 나타내었으며, 각 계절별 평균 밀도를 산출하기 위하여 β-ray와 SMPS-APS system에서 측정된 농도의 상관관계를 나타내었다.

각 계절별 상관관계 그래프에서 추세선의 기울기는 PM10에 대한 평균 밀도로써, 겨울철은 1.92 g/cm³, 봄철은 1.64 g/cm³, 가을철은 1.57 g/cm³로 나타나 겨울철 PM10의 평균밀도가 가장 높은 것으로 조사되었다.

이러한 결과를 통해 대기중에 존재하는 입자상물질은 계절별로 다른 밀도를 나타내는 것으로 조사되어, 기존의 많은 연구에서 PM10의 중량농도만을 중요한 특성으로 판단하고 있으나 계절별 밀도의 차이는 계절별로 입자를 구성하고 있는 물질이 다르다는 것을 의미하므로, 향후 입자에 관한 연구에서는 입자의 다양한 물리

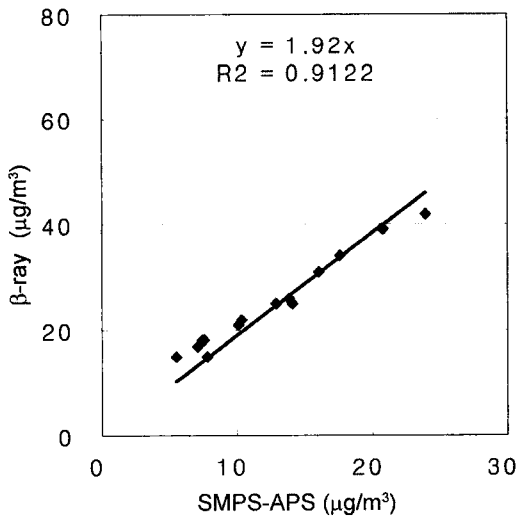
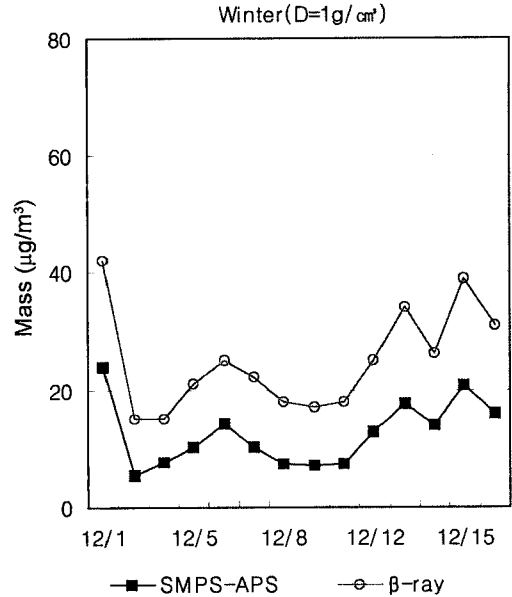


Fig. 3. PM10 density estimation for Winter.

적 특성에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

3. 입경별 중량 농도

입자상물질은 각 입경별로 입자를 구성하는 성분이 달라 입경별 밀도 차이가 있으므로 본 연구에서는 입경별 밀도를 측정된 입경별 중량농도를 입경별 개수 농도로부터 계산된 입자의 부피로 나누어 산출하였다.

각 입경별 중량농도는 QCM cascade impactor를 이용하여 PM10을 10개의 영역으로 세분화하여 중량농도

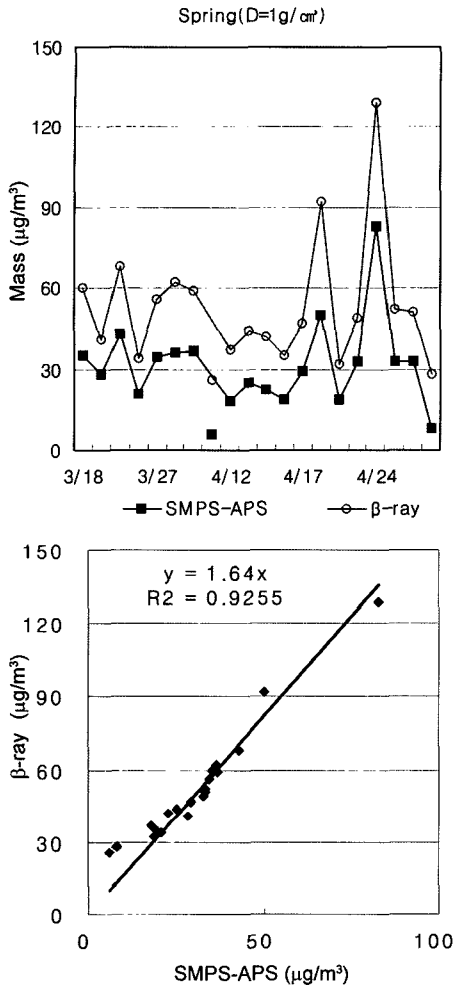


Fig. 4. PM10 density estimation for Spring.

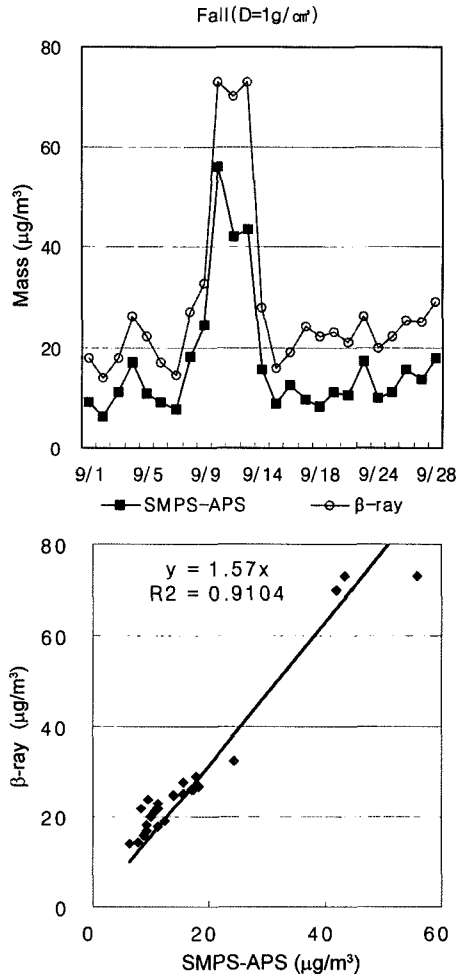


Fig. 5. PM10 density estimation for Fall.

를 측정하였으며, Fig. 6에 QCM cascade impactor를 이용하여 가을철에 측정된 10개의 Stage에 대한 중량 농도를 나타내었다.

측정된 결과에서 대기중 중량농도는 1~2 µm을 중심으로 조대먼지와 미세먼지가 나누어지는 이산형분포를 나타내고 있었으며, 이러한 결과는 도시대기에서 나타나는 입자상물질의 분포 형태와 동일한 경향을 나타내는 것으로, 자연적인 발생원에 기인한 조대먼지보다 인위적인 기원에 의한 미세먼지 영역에서 높게 나타나는 전형적인 도시지역의 특성을 나타내었다.

Fig. 7은 SMPS-APS system에서 측정된 입경별 개수농도로부터 계산된 입자의 입경별 부피를 나타내었다.

각 입경별 밀도는 QCM에서 측정된 각 입경별 중량농도(µg/m³)와 SMPS-APS system에서 계산된 입경

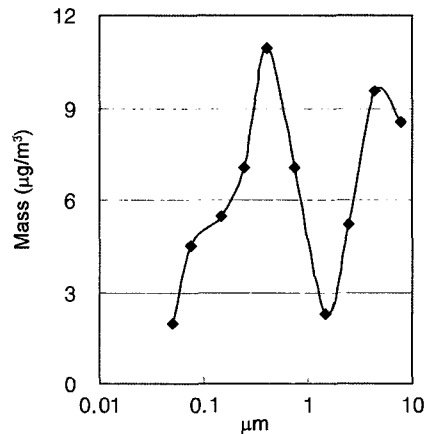


Fig. 6. PM10 Mass concentrations using QCM cascade impactor.

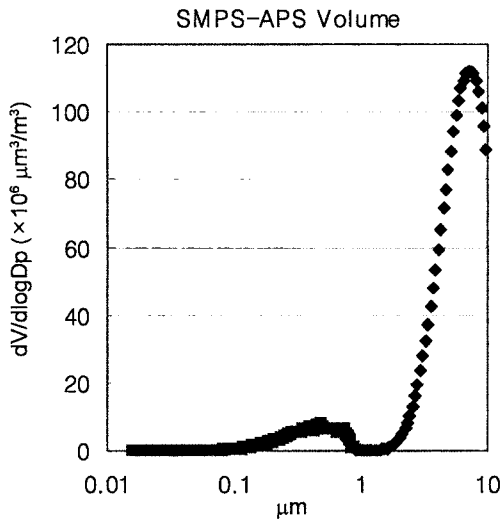


Fig. 7. Volume for particle size.

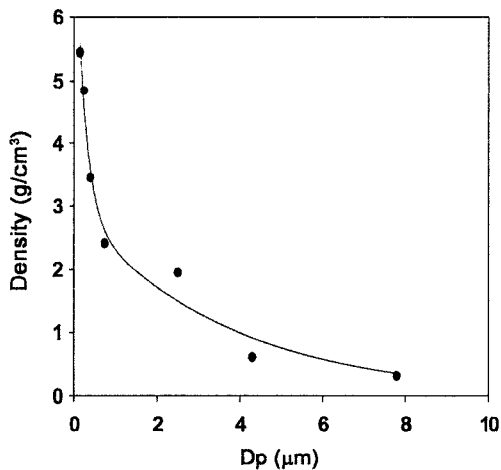


Fig. 8. Density estimation equation of particles in the atmosphere.

별 부피($\mu\text{m}^3/\text{m}^3$)를 이용하여 아래 식으로 산출하였다.

$$\text{밀도}(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{\text{입경별 중량}(\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{입경별 부피}(\mu\text{m}^3/\text{m}^3)} \times 10^6$$

Fig. 8은 식으로부터 계산된 각 입경별 밀도를 나타낸 것으로, $R^2=0.987$ 로 매우 높게 나타났으며 밀도추정식은 다음과 같다.

$$\text{Density} = 5.7348 * \text{Exp}^{(-3.9273 * Dp)} + 3.0638 * \text{Exp}^{(-0.2228 * Dp)}$$

향후 측정값의 신뢰도가 낮은 입경 0.5~1 μm 범위의 개수농도 측정에 대한 정확한 측정이 보완되어야 할 것

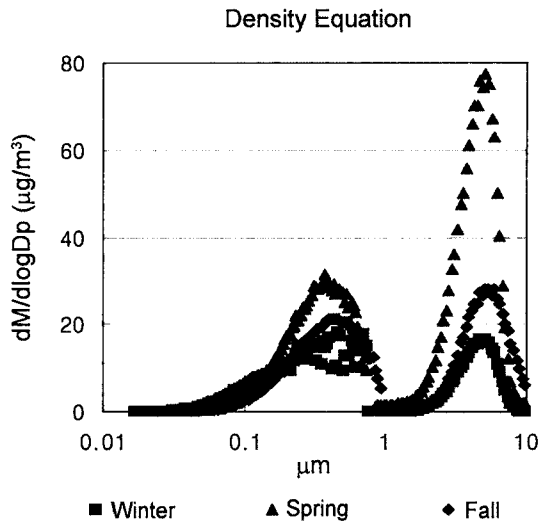


Fig. 9. Mass concentration using density estimation equation.

이다.

Fig. 9는 본 연구에서 산출된 입경별밀도추정식을 이용하여 입자의 입경별 밀도를 대입한 각 계절별 중량농도를 나타낸 그림으로, Fig. 2에서 나타낸 중량농도 그래프는 입경이 작은 영역의 중량농도가 과소평가되었다는 것을 알 수 있다. 또한, PM10의 평균 밀도를 이용하여 계산된 중량농도는 조대 영역에서 중량농도가 과대평가되므로, 입경별 중량농도 분포는 반듯이 입경별 밀도를 보정하여 산출되어야 정확한 특성을 파악할 수 있다는 것을 의미한다.

IV. 결 론

본 연구는 계절에 따른 입자상 물질의 입경분포 및 PM10에 대한 밀도를 파악하기 위하여 SMPS-APS system을 이용하여 각 입경에 대한 입자상 물질의 개수농도를 측정하였으며, PM10 β -ray, QCM을 이용하여 중량농도를 측정하였다.

개수농도는 0.9 μm 이하의 미세영역에서는 겨울의 개수농도가 가장 높았으며, 봄, 가을의 순으로 나타났다. 0.9 μm 이상의 조대영역에서는 봄의 개수농도가 가장 높았으며, 가을, 겨울의 순으로 조사되었다.

입경별 중량농도는 입경이 큰 영역 입자의 영향이 크며, 봄>가을>겨울의 순으로 높게 나타났다.

각 계절별 SMPS-APS와 PM10 β -ray의 상관관계를 이용한 PM10 밀도는 겨울철 1.92 g/cm^3 , 봄철 1.64 g/cm^3 , 가을철 1.57 g/cm^3 으로 계절마다 다른 밀도값을 나타냈다.

그러나 이러한 밀도값은 PM10 전체에 대한 평균 밀도값을 의미하는 것이며, 실제 각 입자의 크기에 따른 밀도는 구성물질에 따라 다르므로, 각 입경별 밀도를 산출하였다. 각 입경별 밀도는 QCM을 이용하여 측정된 각 입경별 중량농도와 SMPS-APS system의 개수농도로부터 계산된 입경별 부피와의 상관관계를 이용하였다.

이러한 방법으로 각 입경별 입자의 밀도를 구할 수 있는 밀도추정식을 산출하였으며, 본 연구의 결과를 통하여 향후 입자의 중량농도 분포 특성 파악시 미세영역에서 과소평가되거나 초대영역에서 과대평가되는 기존의 연구방법에서 발생하는 문제점을 보완하여 정확한 입경별 중량농도 분포를 표현할 수 있다.

그러나 APS-SMPS system에서 신뢰도가 낮은 입경 범위의 측정값에 대하여 향후 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005년 서울시립대학교 산학협력단 교내 연구과제인(200505011002) “SMPS-APS System을 이용한 대기 중 먼지입경 특성 연구”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Kim, S. C., Kang, D. S. and Cha, Y. H. : Study on characteristics by aerodynamic diameter of airborne suspended particulate matters. *Korean Journal of Environmental Health Society*, **26**(2), 108-115, 2000.
- Kim, S. Y., Chung, M. H., Son, B. S., Yang, W. H. and Choi, K. H. : A study on airborne particulate matter of a local area in Seoul. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(4), 301-308, 2005.
- Kim, H. K., Cho, K. C., Lee, J. H., Choi, M. K., Ma, C. J., Kang, C. M. and Yeo, H. G. : Seasonal variation in size distributions for ionic components in the atmospheric aerosol. *Korean Journal of Environmental Health Society*, **22**(4), 55-61, 1996.
- Kim, S. D., Kim, C. H., Jung, K. S. and Hwang, U. H. : A study on the particles density estimation using SMPS-APS, QCM in the atmosphere. *Particle and Aerosol Research*, **3**(2), 67-73, 2007.
- Kim, P. S., Kim, Y. J., Lee, Y. H., Cho, S. H. and Ahn, S. T. : A study on the characteristics of urban aerosol concentration in the size range of 0.01~1.0 μm , *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2**(2), 41-50, 1986.
- Bae, G. N., Kim, M. C., Lim, D. Y., Moon, K. C. and Baik, N. J. : Characteristics of urban aerosol number size distribution in Seoul during the winter season of 2001. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **19**(2), 167-177, 2003.
- Jung, C. H., Chun, Y. S. and Choi, B. C. : Characteristics of aerosol size distribution from OPC measurement in Seoul, 2001. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **19**(5), 515-528, 2003.
- Constantinos, S., Eileen, A. and Jack, M. W. : Evaluation of the measurement performance of the scanning mobility particle sizer and aerodynamic particle sizer. *Aerosol Science and Technology*, **30**, 84-92, 1999.
- Erwin K. : The density of ambient particles from combined DMA and APS data. *Journal of Aerosol Science*, **31**(1), 759-760, 2000.
- Buzorius, G., Hameri, K., Pekkaned, J. and Kulmala, M. : Spatial variation of aerosol number concentration in Helsinki City. *Atmospheric Environment*, **33**, 553-565, 1999.
- Ahn, K. H. : Instrumentation for particle measurement and monodisperse particle generation. *The Korea Society of Mechanical Engineers*, **35**(2), 379-389, 1995.
- Morawska, L., Johnson, G., Ristovski, Z. D. and Agranovski, V. : Relation between particle mass and number for submicrometer airborne particles. *Atmospheric Environment* **33**, 1983-1990, 1999.
- Cheng, M. D. and Tanner, R. L. : Characterization of ultrafine and fine particles at a site near the Great Somky Mountains National Park. *Atmospheric Environment*, **36**, 5795-5806, 2002.
- Keady, P. B., Quant, F. R. and Sem, G. J. : Differential mobility particle sizer : a new instrument for high-resolution aerosol size distribution measurement below 1 μm , DMPS instruction manual, TSI Inc., 1992.
- Peter, H. M., Xin, W., Park, K. H. and Kensei, E. : The relationship between mass and mobility for atmospheric particles : A new technique for measuring particle Density. *Aerosol Science and Technology*, **36**, 227-228, 2002.
- Philip, D., Lee, S. J., Stephen T. F. and Petros, K. : A compact multistage (Cascade) impactor for the characterization of atmospheric aerosols. *Aerosol Science*, **35**, 281-299, 2004.
- Si, S., Peter, A. Y., Yifang, Z., Michael, D. G. and Constantinos, S. : Evaluation of the SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM2.5, PM10 and coarse(PM2.5-10). *Atmospheric Environment*, **36**, 3939-3950, 2002.