한국환경분석학회지 제16권 (제4호) 266~271, 2013
J. of the Korean Society for Environmental Analysis

황사에 의한 미세먼지의 입경분포 특성

김종찬†
서울과학기술대학교 환경공학과

Characteristics of Particle Size Distribution of PM_{10} by Asian Dust

Jong-Chan Kim†
Department of Environment Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

Received October 22, 2013/Revised November 18, 2013/Accepted December 6, 2013

The concentration of fine dust rises during Asian dust event. In order to establish an effective countermeasure against a high concentration of fine particles, it is important to characterize the particle size distribution and grasp the particle diameter which has higher concentration than the other. The particle diameter which occupied the highest portion during Asian dust events was about 4.5 μm. Particle with 2.5 μm and 5.0 μm also accounted for relatively higher percentages than the other. The proportion of $PM_{2.5}$ out of PM_{10} was 46% in the absence of Asian dust which decreased rapidly to 24% during the events. Particle diameter with 4.5 μm indicated the highest mass concentration in the presence of Asian dust and 3.3 μm showed the greatest increase in concentration which increased 3.9-fold against 2.4-fold that of PM_{10}. When PM_{10} concentration increased during the event, coarse particles with diameter from 2.8 μm to 5.7 μm demonstrated the highest concentration. Time-dependent concentration in a residential area on normal day indicated that ultra-fine particle had relatively higher concentration in the morning, but coarse particle in the afternoon.

Key words: Asian dust, Particle size distribution, PM_{10}, $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$

1. 서 론

황사는 알카리 성분을 포함하고 있어 산성비와 산성토양을 중화시키고 해양 프랑크톤에 무기염류를 제공하며 마그네슘 등과 같은 성분이 식물성장을 촉진시킨다는 견해도 있으나, 시정장애와 호흡기 및 순환기질환을 일으키며, 정밀기기의 오작동과 옷, 차량, 건물 등을 훼손하며 식물의 생장에 장애를 주는 등 인체와 동식물은 물론 항공 및 정밀산업 등 사회경제적 전반에 영향을 미친다.

황사가 발생할 때 대기 중에 존재하는 황사먼지의 입경 분포를 파악하는 것은 황사 관리대책에서 매우 중요하다. 입자의 직경에 따라 발생기원도 다르고 관리대책도 다르기 때문에 입경별 분포를 분석하면 농도 증가에 기여하는 입자의 크기를 알 수 있고 거기에 맞는 관리대책을 추진할 수 있다. 황사가 포함하고 있는 PM_{10}은 입자의 직경이 작을수록 표면적이 크고 대기 중에 체류하는 시간이 길어 유해한 대기오염물질을 많이 흡착할 수 있다. 최근 독성학적인 조사 및 연구에 의하면 100 nm 이하인 초미세입자가 조대입자에 비해 질량당 위해도가 높다는 것이 밝혀지고 있다.[1,2] 그러므로 PM_{10} 질량농도는 역학 연구에서 입자에 의한 인체 노출량을 평가하는데 적합한 지표라고 할 수 없다.[3] 따라서 입자상 물질에 대한 최근의 연구는 입자의 질량농도 뿐만 아니라 입경별 개수 농도, 표면적 등 다양한 물리적 특성을 다루고 있다.

미세먼지에 대한 우리나라의 환경기준은 제정 초기에는 총 부유분진(Total Suspended Particle, TSP)을 환

†To whom correspondence should be addressed.
Tel: 82-2-970-6619, Fax: 82-2-971-5576, E-mail: kjc2580@seoultech.ac.kr

경기준 물질로 관리하여 오다가 1993년부터 입자의 크기가 인체에 미치는 영향을 고려하여 PM_{10}을 환경기준으로 추가하여 관리하기 시작했으며, 2011년에는 환경정책 기본법 및 대기환경보전법을 개정하여 $PM_{2.5}$를 대기환경기준에 추가하고 2015년부터 시행하려는 계획을 추진하고 있다.

대기 중에 존재하는 미세먼지는 입자의 직경이 크고 작음에 따라 발생기원도 다르기 때문에 관리대책도 달라야 한다. 황사는 대부분 토양성분을 기원으로 하는 조대입자(Coarse Particle Matters, CPM)이며 입자의 직경이 크기 때문에 표면적이 작고 대기 중에서 수일 정도 밖에 체류하지 못하며 따라서 유해오염물질을 많이 흡착할 수 없어 위해성은 그다지 크지 않다. 그러나 최근 중국 동부의 산업발전으로 연료연소나 화학작용에 의해 생성되거나 대기 중에서 광화학 반응에 의해 생성되는 미세입자(Fine Particle Matters, FPM)가 황사에 포함되어 장거리 이동되고 있다. 입자의 직경이 작으면 작을수록 표면적이 크며 대기 중에 체류시간이 수일에서 수개월정도 되기 때문에 많은 유해물질을 흡착하여 위해성이 크다.[4)]

본 연구에서는 경기도 종합대기 측정소가 설치되어 있는 의왕시 고천동에서 황사가 발생하는 시기에 황사입자의 입경별 개수 농도를 측정하는 입자계수기(Environmental Dust Monitor #164, GRIMM Aerosol Technic)를 이용하여 미세먼지의 입경별 개수 농도와 질량농도를 측정하고 황사가 발생했을 때와 발생하지 않았을 때를 비교분석하였다. 분석결과를 토대로 고농도 미세먼지 농도 발생에 기여하는 입자의 크기를 밝혀내고 황사에 의한 고농도 미세먼지 관리대책의 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 측정지점 및 기간

황사에 의한 부유먼지의 입경별 분포특성을 파악하기 위해 선정한 측정지점의 위치는 Fig. 1과 같다. 시료채취지점은 경기도 종합대기 측정소가 설치되어 있는 의왕시 고천동을 대상지점으로 하였다. 종합 대기측정소는 우리나라의 대기측정망 종류가 대부분 설치되어 있는 측정소로 미세먼지 이외의 다른 대기오염 항목과 비교 분석이 용이하기 때문에 시료채취지점으로 선정하였다. 측정기간은 황사가 발생한 2012년 11월 28일을 기준으로 앞뒤로 1일을 추가하여 총 3일간 24시간 측정하였다.

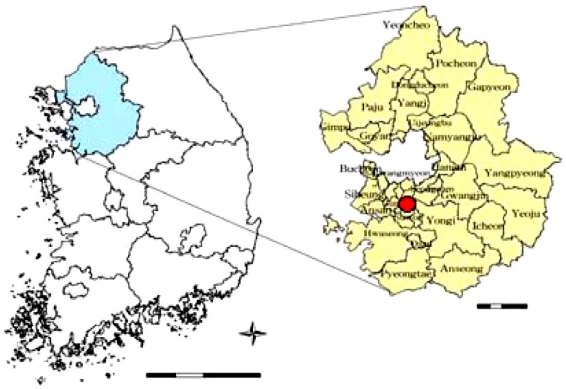


Fig. 1. Location of sampling site.

2.2. 측정방법

황사먼지의 입경별 입자 개수농도 측정은 입자계수기(Environmental Dust Moniter #164, GRIMM Aerosol Technic, 이하 EDM)로 측정하였다. EDM은 장비에 유입된 에어러졸에 의해 산란된 레이저 빛을 감지하여 크기를 0.25 μm와 32 μm 사이의 30구간으로 구분하여 개수농도를 측정한 후 각 구간별 입자의 수를 질량분포로 전환하여 PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1과 같은 입경별 질량농도를 측정하게 된다. 이후 측정된 모든 입자는 장치의 후단의 47 mm PFTE 여지에 여과되며 중량측정을 통해 장치의 보정이 이루어진다.[5)] EDM은 최소 1분 간격으로 24시간 상시 측정이 가능하며 유입된 공기의 수분을 제거하기 위해 공기흡입구의 Inlet Heater를 통해 수분을 선택적으로 제거할 수 있도록 되어 있다. 입경 구간별 개수농도로 측정된 자료를 질량농도로 환산하여 황사가 발생했을 때와 황사가 없었던 평상시 미세먼지의 입경분포 특성과 입경별 질량농도 특성을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 황사에 의한 미세먼지 입경분포 특성

황사가 발생했을 때 PM_{10} 농도를 23개 구간의 입경별로 측정한 후 전체 농도에서 각 입경별 농도가 차지하는 크기를 나타낸 점유율을 황사가 없었을 때와 비교분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 황사가 없는 평상시 미세먼지 농도 점유율이 가장 높은 구간은 입자직경 0.3 μm 부근과 4.5 μm 부근으로 이산형 분포를 이루고 있으나 황사가 발생하면 입경 4.5 μm 부근의 점유율이 현저하게 높게 나타났다. 미세먼지의 발생 특성상 토양을 기원으로 하는 먼지는 조대(coarse) 먼지가 대부분이고, 화석

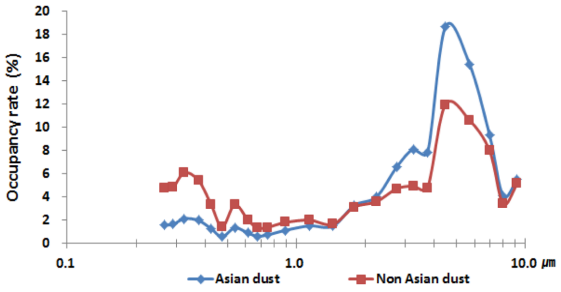


Fig. 2. Characteristics of Particle Size Distribution of PM_{10} by yellow sand.

연료의 연소나 화학반응에 의해 생성되는 인위적 기원 먼지는 미세(Fine) 먼지가 대부분인 것으로 알려져 있다.[4)]

따라서 황사가 없는 평상시에는 자동차 연료 연소에 의한 먼지와 화학반응 또는 공장의 화학 공정에서 배출되는 먼지가 대기 중에 많으므로 0.3 μm 부근의 초미세 입자와 인간 활동 및 주거지역에서 발생하는 비산먼지의 영향으로 4.5 μm 부근의 점유율이 높아 이산형 분포를 보이게 된다. 자동차에서 배출되는 배출입자의 직경은 경유차의 경우 입자수로는 입경 0.1 μm 부근이 가장 많고, 질량농도로는 입경 0.2 μm 부근이 가장 높은 것으로 보고되고 있다.[6)] 또 도로주행과정에서 타이어 마모에 의한 PM_{10}의 발생특성을 조사한 결과 입경 2.5 μm 부근에서 질량농도가 가장 높다고 보고되고 있다.[7)] 반면 황사가 발생하면 토양을 기원으로 하는 비산먼지가 절대적으로 증가하여 미세입자와 조대입자의 비율이 큰 차이를 나타내게 되어 대기 중 미세먼지 농도는 평상시와는 다르게 4.5 μm 부근의 조대입자의 점유율이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

도시 대기에서 PM_{10}의 질량대비 입경분포는 입자의 발생 및 소멸기작의 차이에 의해 2 μm 부근을 중심으로 양측에 피크를 가지는 이산형 분포(bimodal distribution)를 보인다.[8)] 본 연구에서도 황사가 없는 평상시에는 입경 1.0 μm 부근을 중심으로 최저값을 보이는 이산형 분포를 보였으며 황사가 발생하면 조대입자의 점유율이 높아져 대기 중 미세먼지의 입경분포는 조대입자가 쪽으로 편중되는 양상을 나타내었다.

황사가 없는 평상시 대기환경기준으로 설정되어 있는 PM_{10}의 질량농도를 줄이기 위해서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 점유율이 높은 직경 1.0 μm 이하의 초미세입자 농도 감소가 매우 중요함을 알 수 있다. 과거 일본 도쿄의 대기 중 미세먼지 농도 감소도 입경 2.1 μm 이하의 초미세먼지 질량농도 감소에 의한 것이었다.[4)]

Table 1. Characteristics of dust concentration ratio by Yellow sand

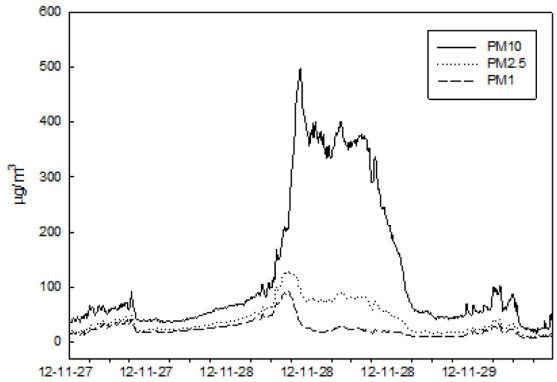
	$PM_{1.0}/PM_{10}$	$PM_{2.5}/PM_{10}$	$PM_{5.0}/PM_{10}$
Yellow sand	0.140	0.243	0.655
Non Yellow sand	0.359	0.463	0.728
Rate (Y/NY)	0.389	0.525	0.900

Table 1은 황사가 발생했을 때 연구대상지역에서 미세먼지 농도의 비율을 나타낸 것이다. 표에 나타난 바와 같이 황사가 발생했을 때 PM_{10}에서 차지하는 $PM_{1.0}$ 및 $PM_{2.5}$, $PM_{5.0}$ 비율이 황사가 없을 때에 비하여 입자가 커질수록 현저하게 높아짐을 알 수 있었다. 따라서 황사가 발생하면 대기 중 부유먼지의 대부분은 조대먼지 임을 알 수 있었다. 황사가 없는 평상적인 날 PM_{10} 중에 $PM_{1.0}$은 35.9%, $PM_{2.5}$는 46.3%를 나타냈으며 $PM_{5.0}$은 72.8%를 나타냈다. 이것은 Lee and Oh (2008)[5)] 등이 천안시에서 Dust Monitor 이용한 측정에서 $PM_{2.5}/PM_{10}$의 비율이 72.0~76.8%로 조사되었고 Kim, and Cho (2004)[9)] 등은 Potable Aerosol Spectrometer를 이용하여 서울시 대기를 측정한 결과 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율이 74.5%를 나타낸 것과 비교하면 비율이 낮게 나타났는데 이는 지역적인 특성이나 측정지점의 차이에서 나타나는 정도라고 판단된다. 또 황사 먼지와 황사가 없는 평상시 먼지의 비율을 비교하면 초미세먼지($PM_{1.0}$)는 비율이 낮은 반면 조대먼지($PM_{5.0}$)는 비율이 거의 같아지는 현상을 나타내었다. 이것은 평상시 먼지에는 초미세먼지와 조대먼지의 분포가 이산형을 이루면서 나타나지만 황사가 발생하면 조대먼지의 분포가 현저하게 증가하기 때문으로 판단된다.

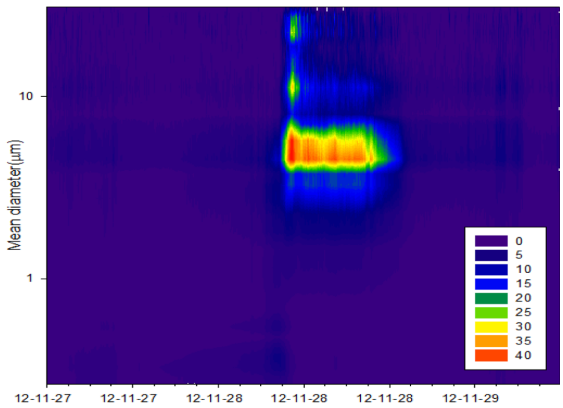
3.2. 황사로 인한 PM_{10} 농도 증가와 입경분포 변화

황사가 발생하여 PM_{10} 농도가 증가하면 농도 증가에 기여하는 미세먼지 입자의 입경분포 변화를 알아보기 위해 연구대상지역인 고천동에서 미세먼지를 연속 측정하여 실시간 농도와 입경별 3차원(3 Dimension, 3D) 입자 개수 그래프를 Fig. 3에 나타냈다. 또 황사가 발생하여 질량농도가 증가할 때 어떤 입자 크기가 먼지 농도 증가에 영향을 미치는가를 알아보기 위해 연구기간 동안 측정한 자료를 황사 기간과 황사가 없는 기간으로 분류하여 입경별 농도 증가율을 Fig. 3에 나타냈다.

실시간 농도변화와 입경분포 그래프에 나타난 바와 같이 황사가 발생하여 농도가 증가할 때 3 μm부터 5 μm까지 조대입자가 높은 증가율을 나타내었다. 또 Table 2



(a) Real time



(b) 3D Graph

Fig. 3. Real-time particle concentration and distribution of each particles size in Residential.

Table 2. Concentration increase rate of each particles size in Residential

Diameter (μm)	0.4	2.8	3.3	4.5	5.8	PM_{10}
Yellow sand Conc. (μg/m^3)	1.6	8.2	10.1	23.2	19.2	124.4
Non Yellow sand Conc. (μg/m^3)	1.7	2.5	2.6	6.3	5.6	52.6
Increase (times)	0.9	3.3	3.9	3.6	3.4	2.4

와 같이 최고농도를 나타낸 입자직경은 4.5 μm 부근이며 증가율이 가장 높은 입자 직경은 3.3 μm 부근으로 황사가 발생하여 PM_{10} 농도가 2.4배 증가할 때 3.9배 증가하는 것으로 나타났다. 또 2.8 μm에서 5.8 μm 부근까지 농도 증가율이 PM_{10} 농도가 증가하는 것보다 현저하게 높아 결과적으로 황사가 발생하여 PM_{10}의 농도가 증가하는 것은 조대입자가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

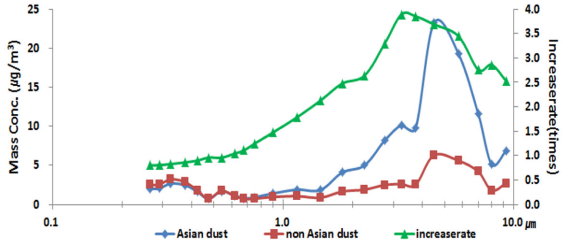


Fig. 4. Concentration increase rate of each particles size in Residential.

일반적으로 대도시의 대기오염 형태는 화석연료의 연소에 의한 일반 대기오염물질이 주를 이루며, 계절에 따른 변동이 큰 반면 산업단지는 공장이 가동되며 제조공정이나 화학공정 중에서 배출되는 특정 대기오염물질의 농도가 높고 계절변동이 크게 나타나지 않는 특징이 있다.[10,11] 본 연구의 대상지역인 주거지역에서 조대입자의 농도증가율이 높은 것은 생활환경에서 비롯되는 고기구이 등 생물성 연소 생성물과 인간 활동 등에 의한 비산먼지 등이 원인으로 판단된다. Park et al. (2011)[12] 등이 연구한 자료에 의하면 시민이 주로 섭취하는 고기류를 불에 직접 구울(직화구이) 때 발생되는 먼지입자의 직경은 2.5 μm 이하가 69%를 차지하고 2.5~10 μm의 조대입자는 약 30% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 결론적으로 주거지역에서 PM_{10} 중에서 조대입자의 점유율이 높은 것은 비산먼지의 영향이 크게 작용하고 생선이나 고기구이 등 음식조리에서 비롯되는 생물성 연소의 영향도 있다고 할 수 있다.

3.3. 미세먼지 농도와 입경분포의 시간별 특성

황사가 없는 평상시 연구대상 지역인 일반 주거지역에서 하루를 주기로 미세먼지의 입경분포 변화를 알아보기 위해 오전(05~13시), 오후(13~21시), 밤(21~05시)으로 시간 구간을 설정하여 측정된 미세먼지 농도의 입경분포를 분석하였다. 분석결과 황사가 없을 때 일반 주거지역에서 전체적인 입경분포는 1.0 μm 이하의 작은 입자와 5.0 μm 부근의 조대입자가 높은 농도를 보이는 이산형 분포가 나타났다. 이는 일반 주거지역은 토양을 기원으로 하는 먼지의 영향이 크고 생활환경에서 비롯되는 고기구이 등 생물성연소 생성물과 인간 활동 등에 의한 비산먼지 등이 원인으로 판단된다.

Park et al. (2011)[12] 등에 의하면 식생활에서 많이 섭취하는 고기류(소, 돼지, 닭, 오리)와 고기 부산물(곱창, 막창 등) 등을 불에 직접 구울(직화구이) 때 가장 많

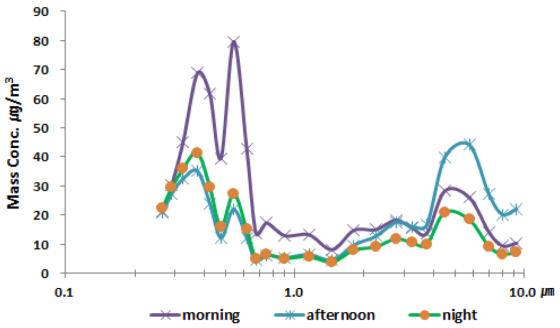


Fig. 5. Time characteristics of the particle size distribution.

이 발생되는 먼지입자의 직경은 2.5 μm로 나타났고 99.2~99.5% 정도가 PM_{10}이었다.

미세먼지 입경별 농도의 시간별 특성을 보면 초미세입자는 비교적 오전에 높은 농도를 보인 반면, 조대입자는 오후에 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 오전보다 오후가 풍속이 크기 때문에 바람에 의한 토양비산먼지 영향이 원인인 것으로 판단된다.

Bae et al. (2007) 등이 조사한 결과[13]에 의하면 100~600 nm 크기의 미세입자 농도는 03~05시 사이의 농도가 가장 낮았고, 이후로 아침 출근시간대에 급격히 높아져 08~09시 사이에 최고농도를 나타내었다. 09시 이후에 농도가 약간 낮아졌고 낮 14시 이후에 다시 서서히 증가하여 19~21시 사이에 높은 농도를 나타냈으며, 21시 이후부터 새벽까지 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서도 입경이 비슷한 0.4 μm(400 nm) 부근의 중량농도가 오전에 가장 높게 나타났고 다음이 오후에 높았으며, 야간에 가장 낮은 농도를 나타내었다.

4. 결 론

황사가 발생하여 미세먼지의 농도가 급격히 상승할 때 먼지 입경분포 특성을 분석하고 황사로 인한 고농도 미세먼지가 발생할 때 농도 증가에 기여하는 입자의 크기를 파악하여 황사 미세먼지 관리대책을 효율적으로 추진하고자 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 황사가 발생하면 먼지의 입경별 농도 점유율이 가장 높은 구간은 입자직경 4.5 μm 부근이었다.

2. PM_{10} 중에서 차지하는 $PM_{2.5}$의 비율은 황사가 없을 때 46%에서 황사가 발생하면 24%로 급속히 감소하였음.

3. 황사가 발생할 때 최고농도를 나타낸 입자직경은 4.5 μm 부근이며 증가율이 가장 높은 입자 직경은 3.3 μm 부근으로 PM_{10} 농도가 2.4배 증가할 때 3.9배 증가하였다.

4. 황사가 발생하여 PM_{10} 농도가 증가할 때 최대 증가율을 나타낸 먼지의 입경은 2.8에서 5.7 μm까지 조대먼지로 나타났다.

5. 황사가 없을 때 일반 주거지역에서 시간별 특성을 분석한 결과 초미세입자는 비교적 오전에 높은 농도를 보인 반면, 조대입자는 오후에 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다.

황사가 발생하여 대기 중에 존재하는 미세먼지의 입경분포를 파악하는 것은 황사 중 미세먼지 관리대책에서 매우 중요하다. 이는 미세먼지의 입경에 따라 황사의 발생지역도 다르고 황사 관리대책도 달라야하기 때문이다. 따라서 PM_{10}이 높은 농도로 나타나는 시기의 입경별 분포를 면밀히 분석하여 황사로 인한 미세먼지의 농도 증가에 기여하는 입자 크기에 맞는 관리대책을 추진해야 황사에 의한 피해를 줄일 수 있고 대기환경 개선을 위한 효율적인 정책이 수립될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 창작연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. D. Montoya, J. Lawrence, G.G. Murthy, A. Sarnat, J. Godleski, and P. Koutrakis, Continuous measurments of ambient particle deposition in human subjects, *Aerosol Science and Technology*, **2004**, 38. 980-990.
2. H.J. Bae, Effect of Reduced Ambient PM10 Level on the Health of Children in Lower-income Families, *Journal of Envinronmental Health Sciences*, **2010**, 36(3), 182-190.
3. T. Tuch, P. Brand, H.E. Wichmann, and J. Heyder, Varition of particle number and mass concentration in varous size ranges of ambient aerosols in eastern German, *Atmospheric Environment*, **1997**, 31, 4193-4197.
4. Y.P. Kim, Journal of Korean Society for Air Pollution in Seoul Caused by Aerosol, *Atmospheric Environment*, **2006**, 22(5), 535-553.
5. H.M. Lee, and S.W. Oh, Characterization of PM10 and PM2.5 in Cheonan Area Using a Dust Monitor, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*,

2008, 24(3), 367-375.
6. T.H. Kobayashi, Study the health effects of fine particulate matter such as diesel exhaust and diesel exhaust particles, *Research Booklet* **2010**, No. 22, NIES of Japan.
7. S.H. Lee, H.S. Kim, J.H. Park, and G.B. Cho, The Properties of Roadway Particles from the Interaction between the Tire and the Road Pavement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2012**, 28(2), 131-141.
8. J.E. Kim, and H.Y. Lee, Aerosol Density Determined Using Micro-orifice Uniform Deposit Impactor and Aerosol Dust Monitors Data at Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2010**, 26(3), 288-304.
9. M.Y. Kim, and S.J. Cho, Estimation of practical Use for Portable Aerosol Spectrometer, Proceeding of the 37th Meeting of KOSAE, **2004**.
10. B.W. Kang, J.S. Han, M.D. Lee, H.S. Lee, J.H. Kim, E.S. Son, and S.O. Baek, Concentration Characteristics of Airborne Hexavalent Chromium in the Industrial Area, *Journal of Envinronmental Health Sciences*, **2009**, 25(3), 179-187.
11. M.S. Oh, T.J. Lee, and D.S. Kim, Characteristics of Ionic Components in Size-resolved Particulate Matters in Suwon Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2009**, 25(1), 46-56.
12. S.K. Park, S.J. Choi, G.J. Park, J.Y. Kim, C.K, Bong, S. J. Park, J.H. Kim, and U.H. Hwang, Collection Characteristics of Particulate Matters from Biomass Burning by Control Devices: Mainly Commercial Meat Cooking, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2011**, 27(6), 641-649.
13. G.N. Bae, S.Y. Huh, S.B. Lee, M.H. An, D.H. Park, and J.H. Hwang, Ultrafine particle pollution level at the roadside of Seoul in spring, *Particle and Aerosol Research*, **2007**, 3(3), 10-22.