

부산 도심지에서 측정된 에어로졸 농도의 물리적 특성

김연중 · 김철희*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공
(2009년 10월 28일 접수; 2009년 12월 16일 수정; 2010년 1월 13일 채택)

Physical Characteristics of Aerosol Concentrations Observed in an Urban Area, Busan

Yunjong Kim, Cheol-Hee Kim*

Division of Earth Environmental System, Atmospheric Science Major, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 28 October, 2009; revised 16 December, 2009; accepted 13 January, 2010)

Abstract

Aerosol physical properties have been measured at Pusan National University by using the 16-channel LPC(Laser Particle Counter), and particle characteristics have been examined for the period from Aug. 4 2007 to Dec. 30, 2008. Annual total average, seasonal average, and other averages of the meteorologically classified four categories such as Asian dust, precipitation, foggy, and clear days are respectively described here. Both annually and seasonally averaged number concentration show three peaks at the particle diameter of 0.3, 1.3, and 4 μm , respectively. However, the first peak for summer season tends to be shifted toward smaller size than other seasons, implying the strong fine particle generation. Meteorological condition shows strong contrast in aerosol concentrations. In Asian dust case, relatively lower number concentrations of fine particles (i.e., smaller than 0.5 μm) were predominant, while higher concentrations of coarse particles were found particularly for the size bigger than 0.5 μm . In precipitation day, number concentrations were decreased by approximately 30% due to the removal process of precipitation. Foggy day shows significantly higher concentrations for fine particles, implying the importance of the aerosol condensation process of micro-fine-particle growing to fine-particle. Finally the regressed particle size distribution function was fitted optimally with two log-normal distribution, and discussed the similarities and differences among four categorized cases of the Asian dust, precipitation, foggy, and clear days.

Key Words : Aerosols size distribution, Bi-modal distribution, Busan, LPC(Laser Particle Counter), Number concentration of aerosol

1. 서론

에어로졸은 발원지에서 직접 부유되는 토양 먼지 등의 황사입자를 비롯하여, 해염 입자, 화산재 등의 자연 기원 물질과 인간의 산업 활동에 따른 황산염, 질산

염, 검댕 등 인위적 기원의 물질 등 발생원이 매우 다양하며, 입자의 크기 범위도 0.001~100 μm 에 이르는 등 매우 광범위하다 (Willeke와 Baron, 1993). 그리고 에어로졸은 지구온난화를 일으키는 온실기체와는 달리 대기의 냉각효과를 유발하여 (Schwartz, 1996) -0.4~3.0 W/m^2 범위의 음의 지구복사 복사강제력을 가지는 것으로 보고되고 있으며 (IPCC, 1995), 이러한 에어로졸의 복사 강제력의 정량적 추정 연구는 기후변화의 불확실성을 규명하기 위한 연구로서 중요하

*Corresponding author: Cheol-Hee Kim, Division of Earth Environmental System, Atmospheric Science Major, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51- 510-3687
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

게 취급되고 있다.

기후변화와 연관된 이러한 에어로졸의 중요성으로 인하여, 입자상 물질의 측정분석 및 모델링 연구는 전 세계적으로 매우 활발하다. 국내의 관측적 연구 결과는 주로 에어로졸 수농도(단위체적당 입자 개수)의 일 변화 및 계절변화가 많이 보고되었다. 계절적으로는 에어로졸의 수농도가 봄에 상대적으로 높은 편이었으며(조, 1980), 교외 지역인 충남 청원군의 경우 계절적으로는 4, 5월에 높고, 평균적으로 대도시에 비해 20~45% 정도 낮게 나타났고, 비온 후에 새로운 기류가 유입할 때와 새벽에는 농도가 낮고, 오후에는 높게 보고되었다(정 과 윤, 1996). 대도시의 측정분석연구 역시 활발한데, 김 등(1986)은 EAA (Electrical Aerosol Analyzer)를 이용하여 0.01~1 μm 범위의 도시대기 에어로졸을 입자 개수, 표면적 및 체적 농도의 일변화 양상을 장기간 조사하여, 에어로졸 농도가 8시, 20시에 최대를 보이는 이중극대 현상이 나타남을 보였으며, 에어로졸 수농도를 지배하는 것은 극미세입자들이며 표면적, 체적농도에 기여하는 것은 큰 입자임을 밝혔다. 또한 기온, 습도, 풍향풍속이 에어로졸 농도에 영향을 주는 주요 인자임을 밝혔다. Park 과 Kim (2006)은 서울대학교와 두얼린(황사의 발원지 중 하나)지역에서 각각 황사와 비황사기간에 입경별 질량 및 수농도를 측정하여 서울과 두얼린 지역의 입자 밀도함수가 비슷한 패턴임을 밝혀 발원지로부터 황사입자들이 장거리 수송되었음을 간접적으로 밝혔다.

특정지역 에어로졸의 물리적 특성 연구는 기상상태별 입경별 수농도 분포 특성을 분석하는 것 뿐만 아니라, 사례별 농도 특성 경향을 파악하고 이를 모델링 연구와 연계시키는 연구를 포함하여야 한다. 그 이유는 대도시 입자 농도 특성을 모의하여 그 특성을 물리·화학적으로 규명하기 위하여 해당 대도시 지역의 평균적인 자료 추출 및 모델링 수행에 필요한 초기 및 경계조건을 구하기 위한 자료수집 등 여러 정보를 요구하기 때문이다. 기상상태별 대표적인 특성을 통계적으로 정리하여 그 특성을 체계적으로 파악할 경우, 특성 분석 그 자체연구 뿐만 아니라 모델링 입력 자료 구축이 대단히 용이하게 된다. 이러한 다양한 관측적 연구결과들은 결국 에어로졸의 물리적 특성이 지역적으로 상당한 차이가 있음을 밝혀줄 뿐 아니라 장거리

수송 등과 같은 외부요인까지 유추할 수 있어 에어로졸의 물리적 특성 연구는 대기오염 연구에 있어 매우 중요하다 할 수 있다.

본 연구는 대도시지역인 부산지역 도심지의 에어로졸 특성을 여러 요인별로 분석하기 위하여 부산대학교에서 장기간 측정된 에어로졸의 물리적 특성을 심도있게 분석하였다. 부산대학교 대기환경과학과 옥상에 설치된 레이저입자계수기를 통해 측정된 0.2~10.0 μm 입경 범위의 수농도 자료를 이용해서 종관기상 상태별 에어로졸 입경별 농도 특성을 분석하였다고, 아울러 측정된 자료를 통해 부산지역 에어로졸의 로그정규분포 (lognormal distribution)로 추정하여 그 특징을 통계적으로 분석하여 제시하였다.

2. 에어로졸 관측 및 분석 방법

2.1. 관측 지점 및 자료

부산대학교 자연대연구실험동(위도 35°13', 경도 129°04')에서 2007년 08월 04일부터 2008년 12월 30일까지 입경별 수농도를 연속적으로 측정된 자료를 사용하였으며, 기상상태 분류에 쓰인 기상자료는 부산 기상청(위도 35°06', 경도 129°02')의 관측자료를 사용하였다. Fig. 1에 TM-X, TM-Y 좌표로 관측 지역의 위치를 제시였다.

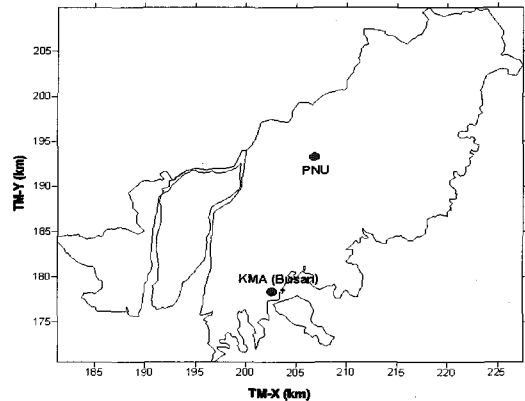


Fig. 1. Location of aerosol sampling site and meteorological observation station.

2.2. 관측 장비

에어로졸의 수농도는 레이저입자계수기(Laser Particle Counter; LPC-0210)로 측정하였다(Fig. 2). LPC는 입

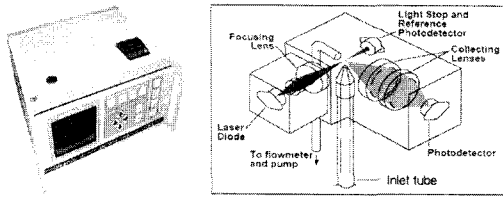


Fig. 2. Schematic of the Laser Particle Counter.

자 측정을 위해 Laser-Diode를 광원으로 사용하며, 집광 기구를 사용하여 입자의 산란신호를 수광 소자에 집광시켜서 측정한다. 측정되는 입자의 신호는 펄스 형태로 측정되는 펄스의 크기가 입자의 크기에 대응된다. 이 관계에 따라 입경이 판별되며 대응하는 입경 영역범위에서 에어로졸의 수농도가 측정된다(김, 2008). 본 연구에서는 0.2~10 μm 범위를 16개 채널로 구분하였으며(Table 1) 시간적으로는 30분 간격으로 10분간 약 50L의 공기를 자동 흡입하여 측정하였다.

2.3. 수농도, 표면적, 체적 농도의 계산

에어로졸의 크기 범위는 매우 넓은 폭을 갖기 때문에 이를 적절히 표현하기 위해서는 일반적으로 대수

적 방법으로 입자의 크기분포를 표현한다. 에어로졸 입자의 수농도로부터 표면적, 체적의 농도를 계산하기 위해 에어로졸 입자는 완전 구형이라는 가정 하에 다음의 식들을 사용할 수 있다.

$$dN/d\log D_p = 2.303 D_p \frac{dN}{dD_p} \quad (1/m^3) \quad (1)$$

$$dS/d\log D_p = 2.303 D_p \pi D_p^2 \frac{dN}{dD_p} \quad (\mu m^2/m^3) \quad (2)$$

$$dV/d\log D_p = 2.303 D_p \frac{\pi}{6} D_p^3 \frac{dN}{dD_p} \quad (\mu m^3/m^3) \quad (3)$$

여기서 N은 단위 체적당 입자의 개수를, D_p는 입자의 직경을 나타낸다. 따라서 (1)에서 입경별 입자의 개수를 측정하여 그 결과를 이용하여 (2), (3)의 식으로부터 입경별 표면적 및 체적의 농도를 순차적으로 계산하였다.

3. 에어로졸의 크기 분포

3.1. 에어로졸의 연평균 및 계절평균 농도

Fig. 3은 측정된 입경별 에어로졸의 연평균 수농도

Table 1. Aerosol size range of each of the 16 LPC channels

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8
size range(μm)	0.2~ 0.3	0.3~ 0.4	0.4~ 0.5	0.5~ 0.8	0.8~ 1.0	1.0~ 1.3	1.3~ 1.6	1.6~ 2.0
	9	10	11	12	13	14	15	16
	2.0~ 3.0	3.0~ 4.0	4.0~ 5.0	5.0~ 6.0	6.0~ 7.0	7.0~ 8.0	8.0~ 10.0	>10.0

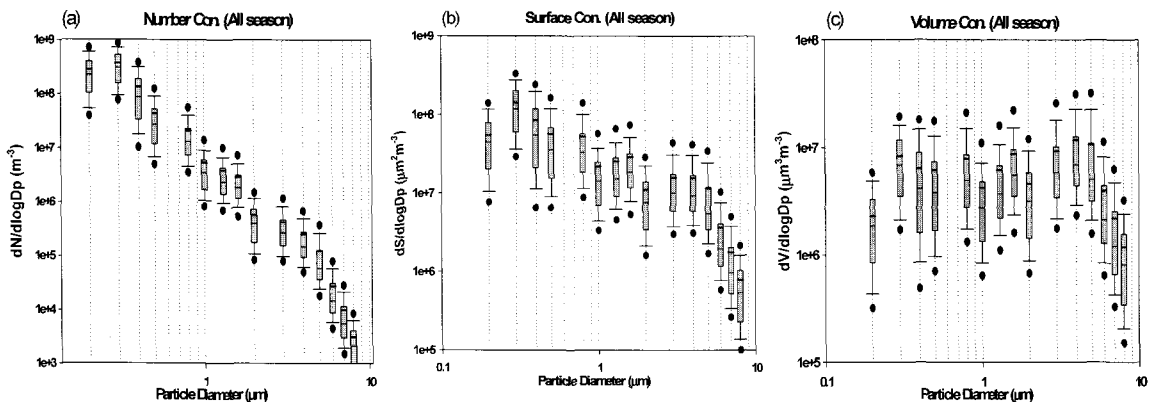


Fig. 3. Annually averaged aerosol number, surface and volume concentration size distributions observed at Pusan National University.

와 표면적 및 체적 농도분포를 나타낸 그림이다. 가로 및 세로축 간격은 상용로그로 표시하였다. Fig. 3 (a)의 연평균 입경별 수농도 분포는 0.3 μm 에서 피크를 보인 후 입경이 커질수록 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 그 감소 형태는 3개(혹은 4개)의 피크를 보였고, 표면적 및 체적 농도 역시 수농도와 유사하였다(Figs. 3(b), (c)). 이 중 체적농도를 살펴보면 세 개의 피크 중 첫 번째 피크는 0.3 μm -0.4 μm 의 구간에서 그 농도값이 $6.8 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($+12.2 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$, $-5.1 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$)로 최대값이 나타났다. (이하 모든 농도는 중간값(Median)을 나타내었으며 괄호 안은 각각 95퍼센타일, 5퍼센타일의 농도이다.) 두 번째 피크에서는 1.6 μm -2.0 μm 의 구간에서 $5.5 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($+17.5 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$, $-3.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$)로 피크값을 나타냈다. 세 번째 피크에서는 4 μm -5 μm 의 구간에서 $6.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($+25.1 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$, $-4.6 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$)로 피크값을 보였다. 이상의 다양한 피크 분포로부터 대도시 에어로졸의 발생원이 매우 다양함을 유추할 수 있고 사례별 에어로졸 성분별 화학적 특성 규명과 모델링 연구를 병행한다면 배출원 및 수용지와와의 관계까지 정량적으로 규명할 수 있을 것이다.

Fig. 4는 동기간 자료를 계절별로 구분하여 에어로졸 입경별 수, 표면적 및 체적 농도분포를 나타낸 그림이다. 그 결과 모든 계절에서 유사한 분포 양상이 나타났고 각 피크값이 나타나는 입경구간도 유사하였다. 네 계절 모두 첫 번째 피크값이 나타나는 구간인 0.2 μm -0.3 μm 에서 봄철의 경우 $4.2 \times 10^8 \text{m}^{-3}$ ($+5.6 \times 10^8 \text{m}^{-3}$, $-3.0 \times 10^8 \text{m}^{-3}$)로 가장 높은 수농도를 보였고, 그 다음으로 여름, 가을, 겨울 순으로 나타났다. 겨울철에는 $2.6 \times 10^8 \text{m}^{-3}$ ($+4.3 \times 10^8 \text{m}^{-3}$, $-2.0 \times 10^8 \text{m}^{-3}$)로 가장 낮은 수농도를 나타냈다. 여름에는 수농도의 첫 번째 피크가 나타나는 입경이 다른 계절은 0.3 μm 인데 반해 0.2 μm 로 나타났으며, 봄 다음으로 높은 중간값을 가졌고, 편차는 사계절 중에 가장 크게 나타났다. 이는 여름에 활발한 광화학 반응과 함께 입자상 오염물질이 다른 계절에 비해 상대적으로 많이 생성되었음을 유추할 수 있다. 표면적 농도 분포 또한 수농도 분포와 마찬가지로 최고농도가 미세입자구간에서 나타났으나, 체적 농도 분포는 이와 달리 초대입자구간에서 최고농도를 보였다. 초대입자 구간인 입경 1 μm 이상의

구간에 한하여 가장 높은 체적 농도를 보인 4 μm -6 μm 구간에서는 봄철에 $1.5 \times 10^7 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($+5.0 \times 10^7 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$, $-1.0 \times 10^7 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$)로 가장 높았고 가을철에 $5.9 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($+8.1 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$, $-4.1 \times 10^6 \mu\text{m}^3\text{m}^{-3}$)로 가장 낮게 나타났다. 피크가 나타나는 입경은 여름, 가을, 겨울철에는 4 μm 에서 나타난 반면 봄철에는 5 μm 으로 나타나 계절별 차이를 볼 수 있었다. 이는 봄철 황사 및 잦은 장거리 이동 등 외부 영향으로 초대입자구간에서 주로 농도가 증가한 것으로 유추할 수 있으며 이는 에어로졸 모델링 연구 등이 병행되면 구체적인 특성이 규명 될 것으로 판단된다.

3.2. 기상상태별 에어로졸의 수농도, 표면적, 체적농도 분포

Fig. 5는 황사, 강수 및 안개가 발생한 날과 이들 3 현상을 제외한 보통의 맑은날의 수농도, 표면적, 체적 농도를 나타낸 그림이다. 황사와 관련된 국내 선행연구 결과를 살펴보면 심한 황사시 인위적인 오염원이 많은 서울과 안면도의 수농도 상관계수가 전반적으로 증가하여 0.3~0.5 μm 범위의 두 지역 수농도 상관계수가 0.68로 매우 높게 나타났고, 지역별 입경별 수농도는 황사가 심할 때 두 지역 모두 0.3~0.5 μm 범위의 미세입자 구간에서는 감소한 반면 0.82~10 μm 범위의 큰 입경범위에서는 증가하는 경향을 보였다. 이처럼 황사 현상 시에는 작은 에어로졸의 수농도가 감소하는 특성이 보고되었다(전 등, 1999). 본 연구 기간 동안 황사는 총 5번 발생하였는데 2007년 0번, 2008년 5번(3/2, 3/3, 5/30, 5/31, 12/9)이었다. 본 연구 기간의 황사가 발생한 날은 에어로졸 입경이 0.5 μm 이내에서는 맑은 날에 비해 낮은 농도를, 0.5 μm 이상에서는 맑은 날보다 최고 10배 이상 농도가 증가된 양상을 보였다. 따라서 황사 발생시 전반적인 입경별 수농도 분포 형태 및 피크값이 나타나는 입경 등은 연평균 분포 양상과 유사하였으나 입경별 농도 수준은 상대적으로 입경이 큰 에어로졸의 농도값이 높게 나타나는 특징을 보였다.

강수가 발생한 날의 경우, 1 μm 이하의 미세입자구간에서는 맑은 날에 비해 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으나, 3 μm 이상에서는 맑은 날에 비해 그 농도값이 30~40% 감소하였음을 알 수 있다(Fig. 5(a)-(c)). 즉, 초대입자의 제거과정에서 강수에 의한 습성침적(wash

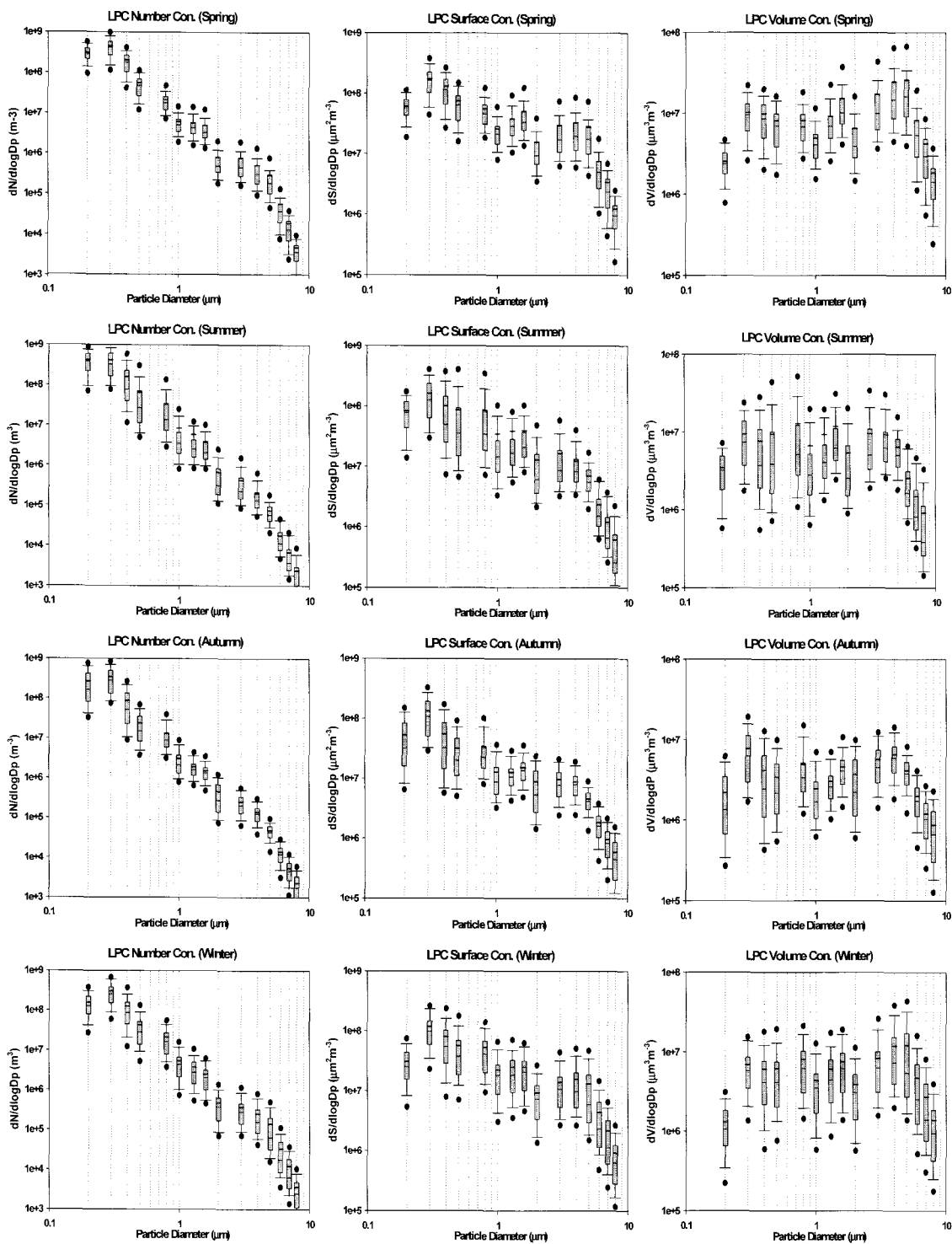


Fig. 4. Seasonally averaged aerosol number, surface and volume concentration size distributions for each season.

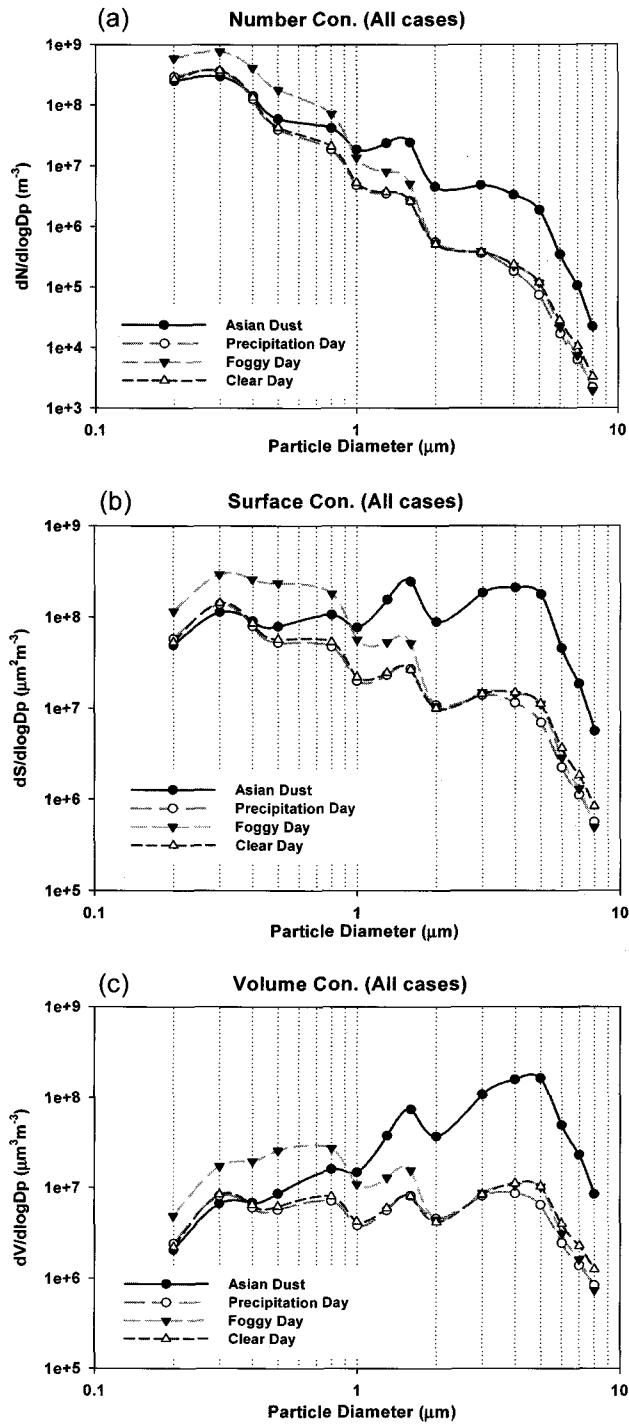


Fig. 5. Aerosol size distributions for the cases of Asian dust, precipitation, foggy and clear days.

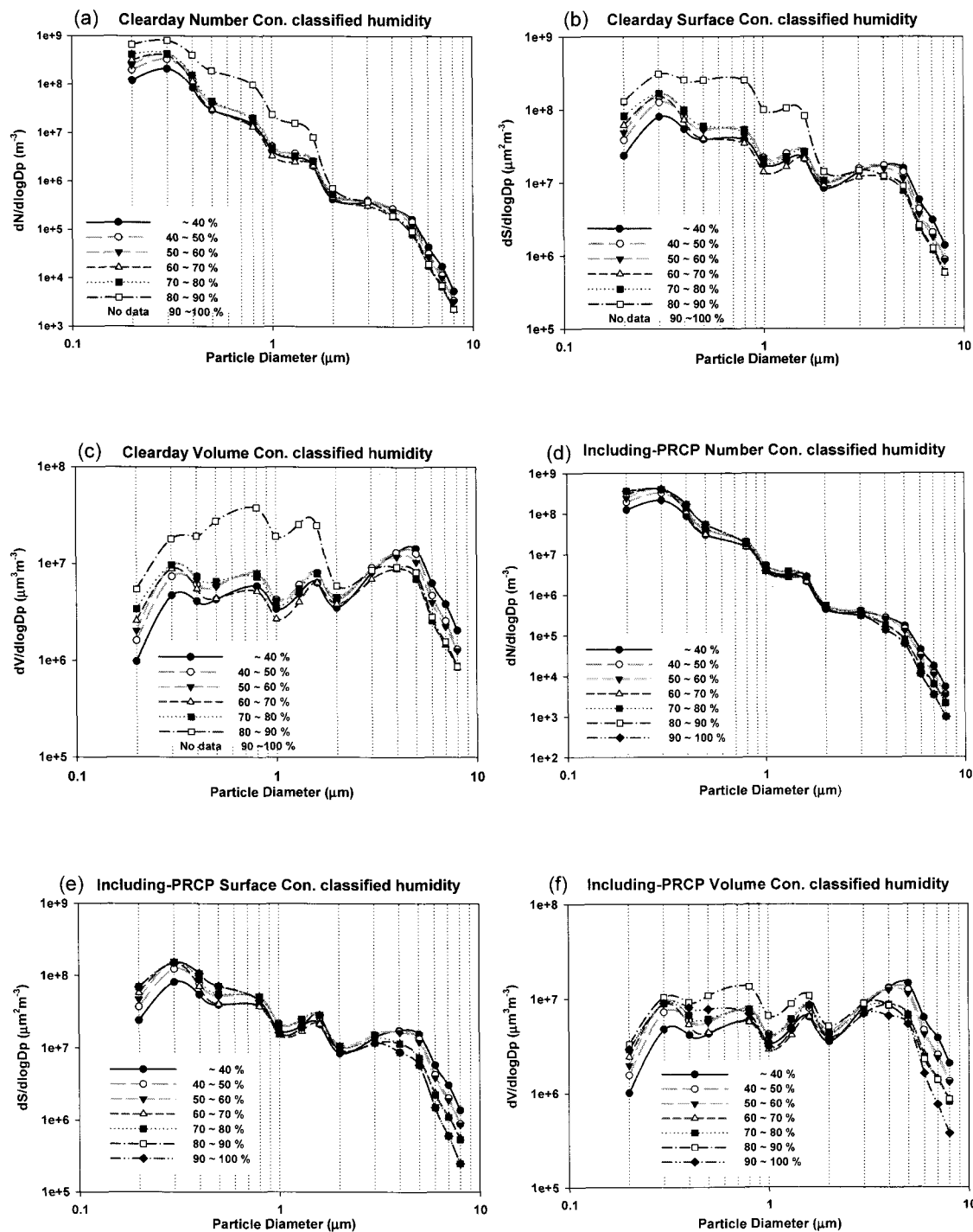


Fig. 6. Aerosol size distributions as a function of the classified humidity.

out)효과가 크게 기여하였음을 확인 할 수 있다. 이는 $1 \mu\text{m}$ 이하의 작은 미세입자의 경우, 관성충돌에 의한 입자의 제거 기작이 활발하지 못한 반면(정 등, 2003), 초대입자의 경우 강수제거 효과가 뚜렷이 확인되어 본 연구 결과로 유추해 볼 때 강수제거기작이 중요하였음을 알 수 있다.

안개가 발생한 날의 경우, 미세입자 구간에서 매우 높은 수농도 값을 보였다(Fig. 5(a)-(c)). 이는 직경 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 의 미세입자는 입자의 화학적 성분이 흡습성인 경우, 높은 상대습도로 인해 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 초미세입자가 응축하여 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 구간의 입자로 성장하게 되므로 오히려 수농도가 증가한 것으로 추정할 수 있다(정 등, 2003). 따라서 안개가 발생한 날은 습도가 높아 대기 중 기체상 오염물질이 초미세입자로 전환되는 핵화(nucleation)과정뿐 아니라 이미 생성된 초미세입자들이 응축(coagulation)에 의해 미세입자로 성장되면서 그 수농도가 증가한 것으로 볼 수 있다.

3.3. 습도에 따른 에어로졸의 크기 분포

에어로졸의 생성 및 성장에 기여하는 기작은 매우 복잡하다. 그 중에서 대기 중의 수분은 조해성을 띄는 화학성분의 입자에 달라붙어 입경 $0.1 \mu\text{m}$ 이하인 aiken 모드와 그 이상인 accumulation 모드의 입자들이 성장하거나 핵화 과정을 통해 새로운 에어로졸이 생성되기도 한다. 결국 상대습도 증가는 입경 $0.1 \mu\text{m}$ 이상의 입자상 물질의 수농도를 증가시킨다(장, 2000).

Fig. 6에서 강수가 없는 맑은 날의 수농도 분포는 미세입자구간에서 습도가 낮을수록 수농도가 낮았음을 보여준다. 그리고 본 연구의 측정된 자료에는 습도 90% 이상인 맑은 날은 존재하지 않아 그 특성을 파악하지 못하였으나 상대적으로 높은 습도인 80~90%의 범위에서 매우 높은 입자 수농도 분포가 나타남을 알 수 있다. 그리고 초대입자구간인 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 이상의 구간에서는 습도에 따른 수농도의 차이가 적거나 유사하여 습도와 연관성이 미세입자에 비해 상대적으로 매우 적다는 것을 알 수 있다. 반면 강수를 포함한 날의 수농도 분포는 습도가 낮을수록 수농도가 낮게 나타났고 높은 습도에서는 일정한 경향을 찾아보기 힘들었다. 이는 강수가 80% 이상의 습도에서 주로 형성되므로 강수발생으로 인한 제거효과가 습도에 따른

입자 생성 및 성장효과보다 더 크게 기여하여 강수를 포함한 날의 습도 80~90%구간에서의 수농도가 맑은 날의 수농도보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 강수를 포함한 날 강수의 제거효과는 습도 90~100% 구간에서 더 명확하게 나타났다. 즉, 습도 90~100%에서 강수 발생시 80~90%의 수농도보다 더 낮은 농도값을 가지는 것으로 나타나, 결국 강수효과에 의한 제거 작용이 활발하였음을 알 수 있다. 이러한 습도에 따른 특성은 표면적 및 체적 농도 분포에서도 나타났으며 그 차이는 더욱 뚜렷함을 알 수 있었다(Fig. 6(b),(c),(e),(f)).

Fig. 7은 습도에 따른 입자의 수농도로부터 계산한 총 질량 농도이다. 전체 해당 일수의 질량 농도를 강수 포함일과 무강수일로 구분하여 나타내었는데, 강수의 유무에 관계없이 두 경우 모두 50~60% 구간에서 한 개의 피크가 나타났고 80~90% 구간에서 두 번째 피크가 나타나 전체적인 질량 농도 패턴이 유사하였다. 그러나 정량적인 농도 차원에서는 60~70% 구간까지는 강수 포함일과 무강수일 모두 유사한 값을 갖지만 70% 이상의 구간부터는 강수제거효과로 인해 질량 농도값이 매우 다르게 나타났다. Fig. 6에서도 유추해 볼 수 있듯이 80%이상의 습도구간에서 강수 포함일에 비해 무강수일의 총 질량이 비정상적으로 매우 높게 나타났다. 앞서 기술한 대로 이는 높은 습도가 초미세입자의 생성 및 성장에 기인한 것으로 분석된다. 하지만 강수제거효과가 존재할 경우 미세먼지의 생성

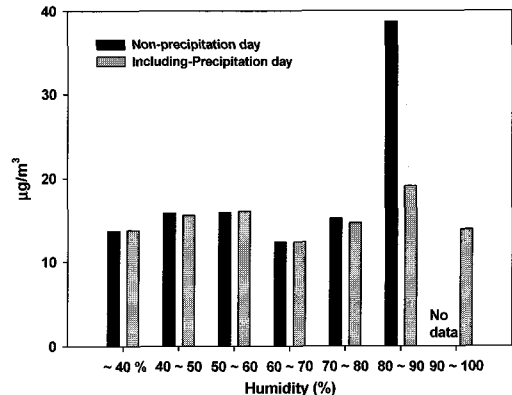


Fig. 7. Mass concentration distributions of two cases: including the precipitation day and the non-precipitation day as a function of the classified humidity.

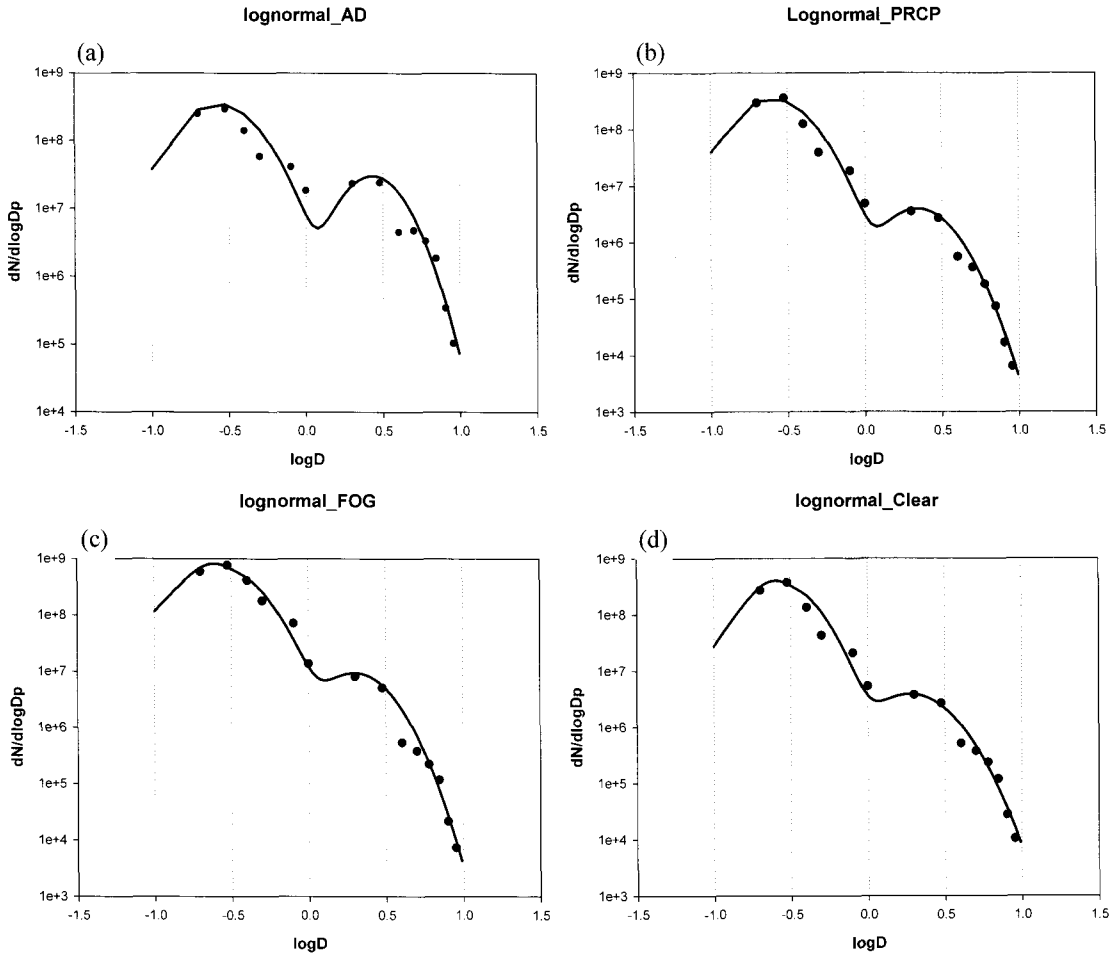


Fig. 8. Scatter plots of the number concentration vs. particle diameter in logarithm for the case of Asian dust, precipitation day, foggy day and clear days. Solid curve shows the optimum regression curve.

및 성장보다 조대먼지의 제거과정이 우세하여 총 질량이 급격히 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

3.4. 기상상태별 최적확률밀도함수 도출 및 선행연구결과와의 비교

기상상태별 대표적인 특성을 통계적으로 정리하여 그 특성을 체계적으로 파악할 경우, 특성분석 그 자체 연구뿐만 아니라 모델링 입력 자료 구축에 대단히 용이하기 때문에 본 연구에서는 측정된 자료의 크기에 따른 수농도 분포를 통계적으로 살펴보기 위하여 단위체적당 수농도(N)를 다음과 같이 입자직경(D)에 관한 로그정규분포로 그 통계변수를 측정자료로부터 추정하여 해석하였다. 일반적으로 확률밀도함수는 두

개의 피크에 대해 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN}{d(\log D)} = A_1 \exp\left[-\frac{[\log(D) - (D_{g1})]^2}{2[\log(\sigma_{g1})]^2}\right] + A_2 \exp\left[-\frac{[\log(D) - (D_{g2})]^2}{2[\log(\sigma_{g2})]^2}\right] \quad (4)$$

$$\left(A = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi} \log(\sigma_g)} \right)$$

식 (4)에서 N_T 는 에어로졸의 총 수농도를, A_1, A_2 는 수농도 분포의 진폭을, D_{g1}, D_{g2} 는 입자의 기하평균직경을, σ_1, σ_2 는 기하표준편차를 각각 나타낸다. 본 연구 기간의 측정 자료를 앞 절에서 구분된 4가지 기상상태

별로 식 (4)를 이용하여 확률밀도함수에 최적화시켰다. Table 2는 로그정규분포 상수인 N_t , D_g , σ 값을 구해 정리·요약한 것이다. 그 결과 황사가 발생한 날의 경우 각 모드에서 N_t 값은 $1.81 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ 과 $1.22 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 으로, 평균직경(D_g)은 $0.27 \mu\text{m}$, $2.7 \mu\text{m}$ 로 추정되었고, 표준편차는 $1.6 \mu\text{m}$ 와 $1.45 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 맑은 날에는 N_t 값이 $1.70 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ 와 $1.95 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, 평균직경은 $0.26 \mu\text{m}$ 와 $1.9 \mu\text{m}$, 표준편차는 $1.52 \mu\text{m}$ 와 $1.6 \mu\text{m}$ 로 각각 나타났다. 이는 황사가 발생한 날과 맑은 날을 비교하면, 모드 1에서는 N_t , 평균직경, 표준편차 모두 큰 차이가 없는데 반해 모드 2에서는 황사가 발생한 날의 경우가 맑은 날의 경우보다 N_t 값이 상대적으로 높게 나타났으며 두 경우의 평균직경차이 또한 $0.8 \mu\text{m}$ 로서 상대적으로 컸음을 의미한다. 이는 황사 발생시 모드의 특징을 통계적으로 표현한 것으로서 조대 입자로서 고농도가 이동하였음을 통계적으로 알 수 있다.

강수가 발생한 날에는 N_t 값이 $1.72 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ 와 $1.72 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, 평균직경은 $0.25 \mu\text{m}$, $2.2 \mu\text{m}$, 표준편차는 $1.55 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이 때 강수가 발생한 날과 맑은 날을 비교하면, N_t 값은 강수가 발생한 경우 모드 1에서 비슷한 값을 보였지만, 모드 2에서 강수가 발생한 날이 더 작은 값을 가졌다. 표준편차에서는 큰 차이가 나타나지 않았고, 평균직경은 모드 2에서 강수가 발생한 날의 경우가 더 크게 나타났다.

안개가 발생한 날의 경우 N_t 값은 각각 $3.96 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$ 와 $4.10 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 로 모드 1과 2에서 맑은 날의 경우

보다 2배 이상의 큰 값을 보였다. 표준편차는 $1.6 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 로 다른 경우와 비슷하여 값에서 큰 차이를 보이지 않았고, 평균직경은 $0.25 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$ 로 맑은 날의 경우와 비슷한 직경을 가진 것으로 나타났다. 즉, 3가지 기상상태의 경우와 맑은 날의 경우의 비교결과는 황사일의 경우 모드 2에서 N_t 값과 평균직경이 매우 큰 값을 나타내었고, 강수일의 경우 조대입자 부분에서 상대적으로 더 작은 값을 보였지만 대체적으로 비슷한 수준이었으며 안개일의 경우 N_t 값이 2배 이상 큰 값을 나타내었다.

본 연구의 결과를 Park과 Kim, 김과 최의 연구 결과와 비교하였다. Park과 Kim(2006)의 논문에서는 서울대학교에서 관측한 에어로졸 값을 기초로 질량농도를 계산하여 황사와 비황사 기간으로 구분하여 그 특성을 기술하였고, 특히 황사 발원지인 두얼린 지역에서 관측한 에어로졸 값과도 비교하였다. 서울대학교 관측지점에서 황사가 발생한 날의 경우 각각 평균직경이 $0.89 \mu\text{m}$, $9.12 \mu\text{m}$, 표준편차는 $2.4 \mu\text{m}$, $2.14 \mu\text{m}$ 로 나타났고, 비황사시에는 평균직경이 $0.66 \mu\text{m}$, $8.51 \mu\text{m}$, 표준편차는 $1.78 \mu\text{m}$, $2.14 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 두얼린 지역에서는 평균직경이 $0.89 \mu\text{m}$, $7.59 \mu\text{m}$, 표준편차는 $2.14 \mu\text{m}$, $1.86 \mu\text{m}$ 로 보고하였다 (Table. 3). 선행연구에서는 질량농도로 비교하였으나 본 논문에서는 수농도를 사용하였으므로 직접적인 비교는 어려우나 대체로 황사와 비황사의 경우 농도가 높고 평균직경이 커진다는 비슷한 경향이 나타남을 알 수 있다.

Table 2. Log-normal fit parameters to the aerosol number concentration distributions

Parameter		The total aerosol number concentration (N_t, m^{-3})	Geometric mean diameters ($D_{g,i}, \mu\text{m}$)	Geometric standard deviations ($\sigma_{g,i}, \mu\text{m}$)
Asian Dust	mode 1	1.81×10^8	0.27	1.6
	mode 2	1.22×10^7	2.7	1.45
Precipitation	mode 1	1.72×10^8	0.25	1.55
	mode 2	1.72×10^6	2.2	1.5
Fog	mode 1	3.96×10^8	0.25	1.6
	mode 2	4.10×10^6	2.0	1.5
Clear day	mode 1	1.70×10^8	0.26	1.52
	mode 2	1.95×10^6	1.9	1.6

Table 3. Log-normal fit parameters to the aerosol mass concentration distributions (Park and Kim, 2006)

Lognormal mode	mode1	mode2
Non-Asian dust		
d(μm)	0.66	8.51
σ (μm)	1.78	2.14
Asian dust		
d(μm)	0.89	9.12
σ (μm)	2.4	2.14
At Duolon		
d(μm)	0.89	7.59
σ (μm)	2.14	1.86

김과 최(2001)의 연구는 구체적으로 확률밀도함수를 통계적으로 구하지는 않았지만 서울, 안면도, 대관령, 고산에서의 에어로졸의 수, 표면적, 체적농도를 분석하였다. 비록 제한된 기간이지만 이중 체적농도의 경우 서울과 안면도에서는 2 μm 부근에서 피크가 나타났으나 제주도 고산과 강원도 대관령에서는 0.3 μm 에서 피크가 나타나 지역별 차이를 보고하였다. 특히 서울 지역의 도시대기는 0.4 μm , 2 μm 에서 피크가 나타났고 약하게 6 μm 에서도 피크가 나타났다. 본 연구의 대상지역인 부산도심지에서는 0.3 μm , 4 μm 에서 피크가 나타났고 약하게 1.6 μm 에서도 나타나 부산 지역이 서울과 같은 대도시 지역임에도 불구하고 그 차이를 어느 정도 발견할 수 있다. 그러나 선행연구에서는 한정된 기간이라는 점과 기상상태별 구분 없이 분석하였다는 점을 제외하면 전반적으로는 대도시의 경우 0.3 μm -0.4 μm 구간에서 피크를, 그리고 황사가 발생한 경우 대도시 및 배경 농도 지역 구분 없이 5 μm 에서 피크를 보인 것은 선행 연구와 유사하였음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

부산대학교에서 2007년 08월 04일부터 2008년 12월 30일까지 LPC를 이용해 연속적으로 관측한 입자 오염물질 농도 자료를 이용해서 중관기상 상태별 입경별 수농도 및 질량농도 특성을 비교하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 입경별 수농도 분포는 입경 0.3 μm 에서 피크

를 보인 후 입경이 커질수록 지속적으로 감소하는 경향을 보였고 그 감소 형태는 3개의 피크를 보였다. 동기간 자료를 계절별로 구분하여 나타낸 결과 에어로졸 입경별 수, 표면적 및 체적 농도분포는 네 계절에서 유사한 분포 양상이 나타났고 각 피크가 나타나는 입경구간 또한 유사하였다.

둘째, 기상상태별로 구분하여 입자 수농도 특성을 분석하였다. 황사가 발생한 날의 경우 입경 0.5 μm 이상의 범위에서 입자의 크기가 커질수록 입자의 수농도가 급격히 늘어나는 것을 확인하여 큰 입자들이 주를 이루는 황사의 특징을 잘 나타내었다. 강수가 발생한 날의 경우 3 μm 이상의 범위에서 30~40% 정도의 농도 감소가 확인되어 강수에 의한 조대 입자의 습성 침적효과가 있었음을 확인할 수 있었다. 안개가 발생한 날의 경우 미세입자 구간에서 4가지 기상상태 중에서 가장 큰 수농도 값을 보였다. 자료가 각 기상상태별 특징을 잘 나타내고 있다.

셋째, 강수가 발생하지 않은 날의 수농도 분포는 미세입자구간에서는 습도가 낮을수록 수농도가 낮고 80~90%의 습도에서 매우 높은 수농도 분포가 나타났다. 강수를 포함한 날의 수농도 분포는 강수의 제거효과로 인해 80~90% 습도 구간에서 맑은 날 보다 낮게 나타나 높은 습도 구간에서 일정한 경향을 나타내지 않았다. 또한 상대습도 구간별 맑은 날과 강수를 포함한 날의 질량농도 분포는 두 개의 피크가 나타나 비슷한 패턴을 갖지만 70% 이상의 구간부터 강수제거효과로 인해 농도값이 매우 다르게 나타났다.

넷째, 기상상태별 구분된 측정 자료를 로그정규분포로 나타내어 통계적인 입자별 특성을 추정하였다. 즉 구분된 네 가지 기상상태별 입경별 입자 농도 특성을 파악할 수 있는 통계적인 로그 정규 분포 함수를 각각 추정하였다. 이 결과는 황사시 조대입자 농도 특성, 안개가 발생한 날의 미세먼지 입자의 농도 분포 등 기상상태에 따른 통계적 입자 농도 특성을 파악할 수 있고, 향후 부산지역의 입자 모델링 연구 혹은 에어로졸의 물리적 특성 분석을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

이상에서 부산지역 입자 농도 특성은 계절별, 기상상태별 그 분포 특성이 조금씩 다르게 나타났으나, 이와 연관된 대기화학적 특성, 예를 들어 화학성분 구성

비율의 분석 등을 병행한다면 그 특징을 더욱 자세히 설명할 수 있을 것이다. 나아가 모델링 연구를 통해 에어로졸 배출 및 생성, 대기화학 변환, 수송 및 확산, 제거과정을 정량적으로 해석한다면 구체적으로 대도시 입자상 대기질 특성을 충분히 이해할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이러한 연구의 기초 작업으로서 대도시 입자 농도의 물리적 특성을 분석하였으며, 아울러 화학적 성분 분석, 모델링 연구, 그리고 대기 복사 강제력 계산 연구를 병행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-331-C00295)입니다.

참 고 문 헌

- 김지아, 2008, 지상 대기질 측정 자료를 이용한 대도시 2차 먼지 생성량 추정, 석사학위논문, 부산대학교
- 김지영, 최병철, 2001, 한반도에서 측정된 에어러솔의 크기 분포와 지역별 특성, 한국기상학회지, 38, 95-104.
- 김필수, 김운장, 이양호, 조숙현, 안승태, 1986, 도시대기 Aerosol의 입자 직경 0.01~1.0 μm 범위의 농도 변화 특성, 한국대기보전학회지, 2(2), 41-50.
- 장혜숙, 2000, 습도에 따른 에어로졸의 크기 및 빛의 소산 계수 변화에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식, 1999, 황사 시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.
- 정용승, 윤마병, 1996, 1995년 봄에 관측된 황사와 먼지 바람 연구, 한국기상학회지, 32, 17-27.
- 정창훈, 전영신, 최병철, 2003, OPC로 측정된 2001년 서울지역 에어로졸의 입경 분포, 한국대기환경학회지, 19, 515-528.
- 조희구, 1980, 서울의 대기 aerosol 입자 크기 분포에 관한 연구, 한국기상학회지, 16, 1-9.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 1995, World meteorological office, United Nations.
- Park, S. U., Kim, J. W., 2006, Aerosol size distributions observed at the Seoul National University campus in Korea during the Asian dust and Non-Asian dust periods, Atmos. Env., 40, 1722-1730.
- Schwartz, S. E., 1996, The whitehouse effect- shortwave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: an overview, J. Aerosol Sci., 27, 359-382.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998, Atmospheric chemistry and physics- From air pollution to climate change, John Wiley & Sons, Inc, 1326.
- Willeke, K., Baron, P. A., 1993, Aerosol Measurement - Principles, Techniques and Applications, Van Nostrand Reinhold, 876.