

2001년 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성

Characteristics of Urban Aerosol Number Size Distribution in Seoul during the Winter Season of 2001

배귀남* · 김민철 · 임득용 · 문길주 · 백남준¹⁾
한국과학기술연구원 지구환경연구센터, ¹⁾삼성엔지니어링주식회사 기술연구소
(2002년 6월 18일 접수, 2002년 12월 26일 채택)

Gwi-Nam Bae*, Min Cheol Kim, Deuk-Yong Lim, Kil-Choo Moon and Nam Jun Baik¹⁾
Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology,
¹⁾R & D, Samsung Engineering Co., Ltd.
(Received 18 June 2002, accepted 26 December 2002)

Abstract

The number size distribution of urban aerosols ranging from 0.02 to 20 μm in diameter was measured by using a scanning mobility particle sizer (SMPS) system and an aerodynamic particle sizer spectrometer (APS) at Seoul from November 30, 2001 to January 14, 2002. The gaseous species such as CO, NO, NO₂, and O₃ were also continuously monitored. The daily average concentration of urban aerosols sorted into three groups (0.02~0.1 μm , 0.1~1 μm , and 1~10 μm) and the typical number, surface, and volume distributions of urban aerosols were discussed in this paper. The weekly variation of aerosol concentration was compared with those of gaseous concentrations, relative humidity, and visibility. The results showed that the particle number concentration seemed to increase in the morning and the number concentration of fine particles less than 1 μm in diameter seemed to increase when the concentrations of CO, NO, and NO₂ were high. The number concentration of fine particles was relatively high when the relative humidity was greater than 70% during the increasing period of relative humidity. The visibility was weakly correlated with the concentration of aerosols ranging 0.1 to 1 μm , and the number size distribution for high visibility episode was apparently different from that for low visibility episode.

Key words : Urban aerosol, Size distribution, Relative humidity, Visibility, Seoul, Winter

1. 서 론

에어로졸은 공기 중에 부유하는 0.002~100 μm 크기의 고체 또는 액체 입자를 말하며, 우리 주위에

분진, 미스트, 흙, 스모그 등 다양한 형태로 존재한다. 에어로졸은 에너지, 재료, 환경, 보건 등 다양한 분야에 관련되어 산업 및 인체의 건강에 지대한 영향을 미치고 있다. 대기 에어로졸은 대도시 스모그, 대기오염물질의 장거리 이동, 황사, 지구기후 변화 등의 문제와 직접적으로 관련되며, 이러한 현상을 정확히 규명하기 위해서는 대기 에어로졸의 입경분

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-958-5676, E-mail : gnbae@kist.re.kr

포나 수 농도와 같은 에어로졸에 대한 상세한 정보가 필요하다.

외국의 경우 Electrical Aerosol Analyzer (EAA), Optical Particle Counter (OPC), Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) 등의 입경별 수 농도 측정기를 사용한 대기 에어로졸 연구가 많이 수행되어 대도시, 해양, 전원지역, 극지방의 에어로졸 입경분포 특성이 잘 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 1998). 최근 Woo *et al.* (2001)은 세계 최초로 나노 입자 측정기 (nanometer aerosol Differential Mobility Analyzer; nano-DMA)를 사용하여 미국 애틀란타시 대기 중 초미세 입자의 특성을 밝혀냈다.

국내의 경우 김필수 등(1991, 1988, 1986)이 1980년대 중반부터 3차례(1984년 5월~10월, 1987년 10월~1988년 6월, 1991년 4월) EAA (TSI, Inc. model 3030)를 사용하여 0.01~1.0 μm 범위인 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도를 측정한 바 있다. 이용근 등(1985)은 다단 임팩터인 Andersen 채취기 (Kanomax, Inc. model 3351 Mark II)를 사용하여 1985년 3월과 6월 서울 대기 에어로졸의 입경별 질량 농도를 측정하였다. 이종훈, 백남준 등(1996, 1995, 1994)은 스모그 현상을 규명하기 위하여 Andersen 채취기 (model SE2110-K)로 1993년 8월, 10월 및 11월, 1994년 6월 서울 대기 에어로졸의 입경별 질량 농도를 측정하였다. Chun *et al.* (2001a, b)은 1998년 4월과 1999년 1월 황사가 발생할 때 OPC (Hiac/Royco model 5230)를 사용하여 0.3~25 μm 범위인 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도를 측정하였다.

자동차는 대도시의 대표적인 오염물질 배출원이며, 주로 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 탄화수소(HC), 입자상 물질(PM)들이 자동차로부터 배출되어 대기를 오염시키고 있다. 대기 중의 미세 입자는 빛을 산란시키거나 흡수하여 시정을 감소시킨다. 공기 중의 수분이 증가하면 비균질 반응(heterogeneous nucleation)에 의해 입자가 생성되기도 하고, 기존의 미세 입자에 수분이 응축되어 입자가 성장한다고 알려져 있다(Pitchford and McMurry, 1994). 그러므로, 대도시 지역의 에어로졸은 가스상 물질, 습도, 시정 등과 상관성이 있을 것으로 생각된다.

서울 대기 에어로졸의 입경분포 특히, 수 농도 분포가 잘 알려져 있지 않으므로, 본 연구에서는 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도를 측정하

였다. 즉, 실험실에서 외기를 직접 측정할 수 있는 시스템을 구축하여 2001년 11월 30일부터 2002년 1월 14일까지 SMPS (TSI, Inc. model 3934U)와 공기 역학적 입자 계수기(Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer; APS, TSI, Inc. model 3320)를 사용하여 0.02~20 μm 범위의 에어로졸을 측정하여 겨울철 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성을 살펴보았다. 대기 기준성 가스상 물질인 CO, O_3 , NO - NO_2 - NO_x 를 동시에 측정하여 에어로졸과 가스상 물질의 상관성을 검토하였다. 또한, 기상청으로부터 기온, 상대습도, 시정, 일사량의 자료를 입수하여 에어로졸과 상대습도, 시정의 관련성도 검토하였다.

2. 측 정

스모그 챔버로 도입되는 외기의 특성을 파악하기 위하여 실내 스모그 챔버가 설치된 한국과학기술연구원 실험용 클린룸(37° 60'N, 127° 05'E)의 지붕 위에 외기 도입관의 입구를 설치하였다(배귀남 등, 2001). 그림 1은 외기 도입관 주변의 모습을 나타낸 것으로, 클린룸이 건물과 언덕진 도로 사이에 위치하여 출퇴근시 자동차 오염원의 영향을 직접적으로 받을 수 있다. 그러나, 주변의 큰 도로를 이용하는 자동차의 통행량이 비해 이 도로를 이용하는 자동차의 통행량이 매우 적고, 측정자료에서 이 도로를 이용하는 자동차에 의한 국소적인 영향을 발견할 수 없었다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 외기 측정 시스템은



Fig. 1. View of the air pollution monitoring station.

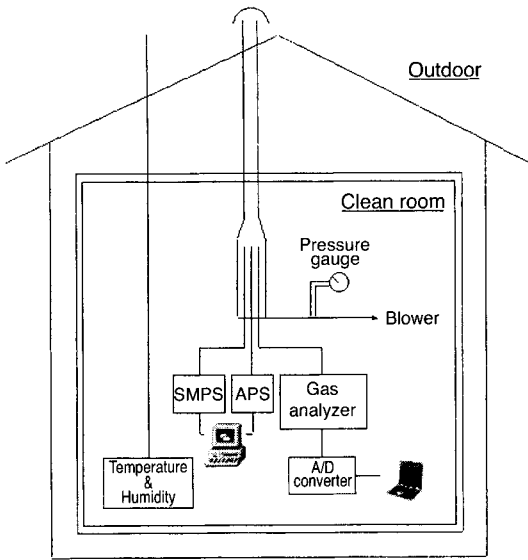


Fig. 2. Schematic diagram of the air pollution monitoring system.

대기 중의 에어로졸, 가스상 물질, 온도 및 습도를 측정하기 위하여 크게 외기 도입부, 공기 샘플링부, 유량 조절부 및 측정장비로 구성되어 있다. 측정장비가 설치된 클린룸 시설의 지붕 위 약 1 m 높이 (지상으로부터 약 8 m 높이)에 내경이 약 28 mm인 외기 도입관을 수직으로 설치하여 관내 에어로졸의 손실을 최소화시켰다. 외기 도입관의 입구에서 약 5 m/s의 속도로 공기를 흡입할 수 있도록 설계하였다. 클린룸 내에서는 측정장비의 흡인유량을 고려하여 외기 도입관의 내경을 80 mm로 확대한 후 등속 흡인이 되도록 2개의 에어로졸 샘플링관의 내경을 선정하였다. 이때 1 μm 이하인 입자의 입경분포를 측정할 수 있는 SMPS와 0.5 μm 이상인 입자의 입경분포를 측정할 수 있는 APS의 샘플링관을 별도로 설치하여 조대 입자의 손실을 줄이려고 노력하였다. 가스상 물질의 경우 하나의 샘플링관을 사용하여 약 4 L/min의 유량으로 공기를 뽑아낸 후 분기관을 설치하여 가스분석기(Thermo Environmental Instruments Inc., USA)로 CO, O₃ 및 NO-NO₂-NO_x를 측정하였다. 외기 온도와 건물 내 온도 차이에 의해 외기가 도입관을 통해 흡인되는 동안 가열 또는 냉각되는 현상을 최소화시키기 위하여 외기 도입관의 표면을 단열재로 감았다. 또한, 외기 도입관

근처에 온도와 습도 센서를 설치하여 기상인자도 측정할 수 있도록 하였다. 송풍기를 사용하여 외기를 도입하였고 인버터를 사용하여 외기 도입량을 조절하였으며, 샘플링관 하류에 오리피스 차압계를 설치하여 흡인되는 유량을 항상 모니터링할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성을 파악하기 위하여 2001년 11월 30일부터 2002년 1월 14일까지 SMPS와 APS를 사용하여 0.02~20 μm 범위인 에어로졸의 입경별 수 농도를 측정하였다. 실험에 사용된 SMPS는 입경을 분류하는 Electrostatic Classifier (EC, TSI, Inc. model 3071)와 입자의 수 농도를 측정하는 응축핵 계수기(Ultra-fine Condensation Particle Counter, UCPC, TSI, Inc. model 3025)로 구성되어 있다. EC는 에어로졸 유량(aerosol flow)이 0.3 L/min, 회석 유량(sheath flow)이 3 L/min인 조건에서 사용하였으며, 이때 측정 입경 범위는 0.0165~0.626 μm 이었다.

입경별 수 농도의 일변화 특성을 살펴보기 위하여 24시간 동안 약 20분 또는 30분마다 150초씩(SMPS) 또는 60초씩(APS) 1~2회 반복 측정하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 SMPS의 경우 2001년 12월 25일부터 2002년 1월 14일 사이에 15일의 일변화 측정자료를 얻었고, APS의 경우 2001년 11월 30일부터 2002년 1월 14일 사이에 35일의 일변화 측정자료를 얻었으며, SMPS와 APS의 측정자료를 함께 얻은 날은 모두 15일이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대기 에어로졸의 일평균 농도

측정기간 동안 입자의 일평균 수 농도와 질량 농도를 입경별로 분류하여 표 1에 나타냈다. 이때, 0.02~0.1 μm 범위와 0.1~0.6 μm 범위인 입자는 SMPS의 측정자료를, 0.6~1 μm 범위와 1~10 μm 범위인 입자는 APS의 측정자료를 이용하였고, 측정된 입자를 밀도가 1 g/cm³인 구형 입자로 가정하여 수 농도를 질량 농도로 변환시켰다. 또한, 황사가 발생한 2001년 12월 13일과 14일, 2002년 1월 12일과 13일의 측정치를 제외하고 측정기간의 평균 농도와 표준오차를 계산하였다.

Table 1. Daily average concentrations of aerosol number and mass during the winter season of 2001.

Date	Number concentration (particles/cm ³)				Mass concentration (µg/m ³)			
	0.02~0.1 µm	0.1~0.6 µm	0.6~1 µm	1~10 µm	0.02~0.1 µm	0.1~0.6 µm	0.6~1 µm	1~10 µm
11-30-01	NM ¹⁾	NM	18.45	2.62	NM	NM	3.79	19.11
12-01-01	NM	NM	41.55	4.11	NM	NM	8.35	25.84
12-02-01	NM	NM	84.08	5.52	NM	NM	17.85	20.69
12-03-01	NM	NM	37.97	3.84	NM	NM	7.72	26.72
12-05-01	NM	NM	14.56	1.97	NM	NM	2.91	14.32
12-06-01	NM	NM	14.89	2.83	NM	NM	3.07	23.41
12-07-01	NM	NM	21.72	3.38	NM	NM	4.40	25.22
12-08-01	NM	NM	50.34	4.69	NM	NM	10.06	30.06
12-09-01	NM	NM	67.61	6.05	NM	NM	14.15	32.11
12-10-01	NM	NM	61.85	6.15	NM	NM	12.77	36.78
12-11-01	NM	NM	37.09	3.86	NM	NM	7.31	23.67
12-12-01	NM	NM	22.18	2.60	NM	NM	4.30	15.99
12-13-01 ²⁾	NM	NM	14.31	17.87	NM	NM	3.15	191.89
12-14-01 ²⁾	NM	NM	10.10	5.62	NM	NM	2.13	80.35
12-15-01	NM	NM	7.92	2.59	NM	NM	1.64	28.63
12-16-01	NM	NM	19.34	2.84	NM	NM	3.87	21.76
12-17-01	NM	NM	28.26	3.56	NM	NM	5.63	24.38
12-22-01	NM	NM	43.46	4.90	NM	NM	8.85	24.69
12-23-01	NM	NM	38.38	4.16	NM	NM	7.82	21.96
12-24-01	NM	NM	39.96	4.35	NM	NM	7.98	24.80
12-25-01	3272	4055	26.44	2.94	0.62	34.76	5.22	18.38
12-26-01	7800	4646	32.02	4.23	1.12	29.50	6.47	26.37
12-28-01	4865	4542	28.50	3.27	0.97	25.75	5.69	20.28
12-29-01	6126	5462	36.59	6.03	1.02	32.54	7.31	45.35
12-30-01	4783	1308	9.53	4.17	0.49	8.36	1.97	53.40
12-31-01	6814	3735	17.99	2.70	0.95	21.22	3.47	19.93
01-01-02	3552	1182	16.47	2.44	0.29	9.42	3.27	18.02
01-02-02	4258	966	13.11	1.73	0.33	7.33	2.61	11.19
01-03-02	6549	3967	22.83	2.63	1.03	20.91	4.49	14.74
01-04-02	5434	5363	56.14	10.62	0.87	37.72	11.28	76.76
01-06-02	4712	4030	24.79	2.46	0.79	23.61	4.75	17.77
01-07-02	3232	1533	14.05	3.04	0.33	11.38	2.81	23.93
01-12-02 ²⁾	5654	9360	141.14	13.70	1.36	64.64	28.56	66.33
01-13-02 ²⁾	4341	5459	137.49	13.23	0.68	50.87	27.82	61.76
01-14-02	5639	2630	43.13	5.73	0.63	20.33	8.99	28.58
Number of days	13	13	31	31	13	13	31	31
Mean	5157	3340	31.97	3.94	0.73	21.76	6.48	26.29
Standard error	392	449	3.26	0.32	0.08	2.85	0.68	2.29

¹⁾ Not measured²⁾ Asian dust storm was observed

측정기간 동안 입자의 수 농도를 보면, 0.02~0.1 µm 범위인 입자의 평균 농도는 약 5000개/cm³으로 0.1~0.6 µm 범위인 입자의 평균 농도(약 3000개/cm³)의 약 1.5배이다. 0.1~0.6 µm 범위인 입자의 일평균 농도는 966~5462개/cm³으로 크게 변하여 측정일에 따른 편차(표준오차)가 0.02~0.1 µm 범위

인 입자의 편차보다 크다. 측정기간 동안 질량 농도를 보면, 0.02~0.1 µm 범위인 입자의 일평균 농도는 전체 입자(0.02~10 µm) 농도의 3% 이하로 매우 낮고, 0.1~1 µm 범위인 입자의 일평균 농도는 전체 입자 농도의 16~68%로 측정일에 따라 크게 다르다. 또한, 0.1~1 µm 범위인 입자의 평균 농도가 1~

10 μm 범위인 입자의 평균 농도보다 약간 높다.

아침 9시의 시정이 8 km로 관측된 2001년 12월 2일의 경우 1~10 μm 범위인 입자의 수 농도는 겨울철 평균 농도의 약 1.4배(질량 농도의 경우 약 0.8배)이고, 0.6~1 μm 범위인 입자의 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 2.6배(질량 농도의 경우 약 2.8배) 높았다. 전날 저녁에 2.0 mm의 강수량이 기록되고 오전 9시까지 상대습도가 86~91%로 매우 높았으므로, 수분이 가스상 물질과 반응하여 입자로 변환되거나 대기 에어로졸에 응축되어 빛을 잘 산란시키는 크기로 입자를 성장시켜 시정이 나빠진 것으로 여겨진다(오현선과 윤순창, 1996).

낮 시간대(9~18시)의 시정이 7 km로 관측된 2002년 1월 4일의 경우 0.1~0.6 μm , 0.6~1 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 1.6~1.8배(질량 농도의 경우 약 1.7배) 높았고, 1~10 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 2.7배(질량 농도의 경우 약 2.9배) 높았다. 전날 저녁부터 상대습도가 높아지기 시작하여 이날 낮 시간대의 상대습도는 66~82% 높았으므로(그림 8 참조), 역시 수분에 의한 영향으로 시정이 나빠진 것으로 생각된다.

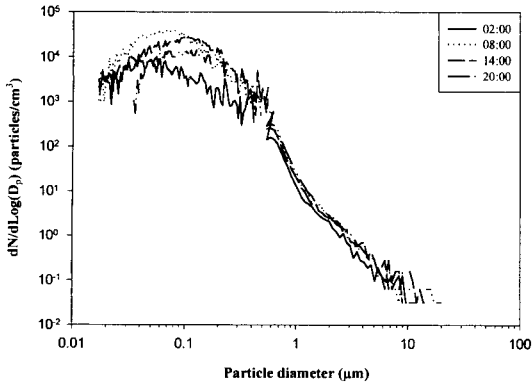
겨울철 황사가 발생한 2002년 1월 12일의 경우 0.02~0.1 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 1.1배(질량 농도의 경우 약 1.9배) 높았고, 0.1~0.6 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 2.8배(질량 농도의 경우 약 3.0배) 높았다. 또한, 0.6~1 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 4.4배(질량 농도의 경우 약 4.4배) 높았고, 1~10 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 3.5배(질량 농도의 경우 약 2.5배) 높았다. 황사가 발생한 2001년 12월 13일의 경우 0.6~1 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도의 약 0.4배(질량 농도의 경우 약 0.5배)로 낮았지만, 1~10 μm 범위인 입자의 일평균 수 농도는 겨울철 평균 농도보다 약 4.5배(질량 농도의 경우 약 7.3배) 높았다. 즉, 황사가 발생하면 평상시와 다르게 시정에 큰 영향을 미치는 0.1~0.6 μm 범위인 입자 수가 0.02~0.1 μm 범위인 입자 수보다 더 많았고, 1~10 μm 범위인 입자의 수가 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 측정결과는 Chun *et al.* (2001a)

이 1998년 4월 황사 발생시 OPC로 측정된 에어로졸 농도 특성과 유사하다. 즉, 이들의 측정결과에 의하면, 황사 발생시 1 μm 이하인 입자의 수 농도는 감소하고 2~3 μm 범위인 입자의 질량 농도가 급격히 증가하였다.

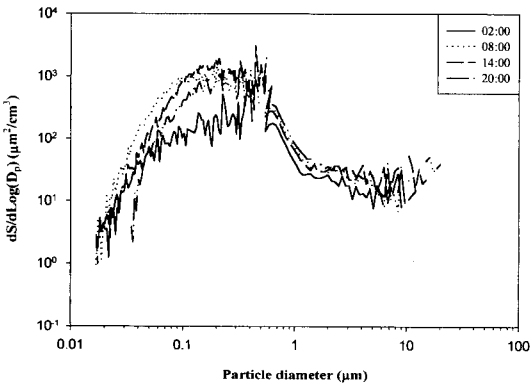
3.2 대기 에어로졸의 입경분포

일반적으로 대도시 대기 에어로졸은 공장, 교통수단, 발전소, 자연적 배출원 등으로부터 발생된 1차 입자상 물질과 가스-입자 변환 메커니즘에 의해 생성된 2차 입자상 물질이 혼합되어 있다(Seinfeld and Pandis, 1998). 수 농도의 경우 0.1 μm 보다 작은 입자가 대부분을 차지하지만, 표면적 농도의 경우 0.1~0.5 μm 범위가 가장 많다. 질량 농도의 경우 2 가지 분명한 모드를 갖는데, 하나는 축적 모드(accumulation mode)라고 불리는 서브마이크론(sub-micron) 영역이고, 다른 하나는 조대 입자(coarse particle) 영역이다. 이러한 에어로졸의 입경분포는 오염원으로부터의 거리에 따라 달라질 수 있다(Seinfeld and Pandis, 1998).

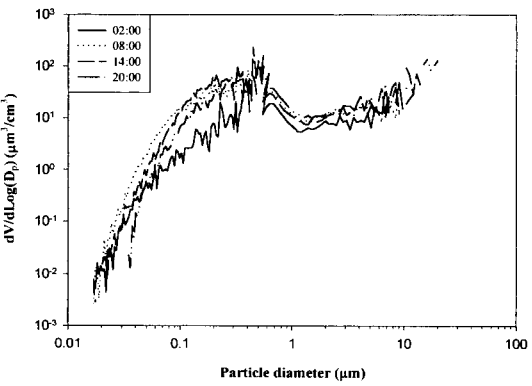
겨울철 대기 에어로졸의 수, 표면적 및 체적의 크기분포를 살펴보기 위하여 2002년 1월 3일 6시간 간격(2시, 8시, 14시, 20시)으로 구한 입경분포의 예를 그림 3에 나타냈다. 그림 3을 보면, 하루 동안 입자의 수, 표면적 및 체적 농도는 시간에 따라 크게 변하지만, 전체적인 에어로졸 입경분포의 모양은 시간에 무관하게 거의 비슷하였다. 수 농도를 나타낸 그림 3(a)를 보면, 입경이 0.5 μm 이하인 입자의 수 농도가 시간에 따라 큰 차이를 보이고, 입경이 0.5 μm 보다 커지면 수 농도는 급격히 감소하였다. 표면적 농도를 나타낸 그림 3(b)를 보면, 표면적 농도는 입경이 커짐에 따라 증가하여 0.2~0.3 μm 근처에서 최대가 되며, 가시광선 영역에서 빛을 가장 잘 산란시키는 입경에 해당하는 0.1~1 μm 범위에서 표면적 농도가 대체로 높았다(Reist, 1993). 체적 농도를 나타낸 그림 3(c)를 보면, 체적(질량) 농도는 입경이 커짐에 따라 급격히 증가하여 약 0.5 μm 에서 첫 번째 피크를 나타낸 후 약간 감소하다가 1~2 μm 이후에 다시 증가하였다. 이것은 대도시에서 전형적으로 나타나는 이산형 분포와 비슷하다(Seinfeld and Pandis, 1998; 박정호와 최금찬, 1997).



(a) number



(b) surface

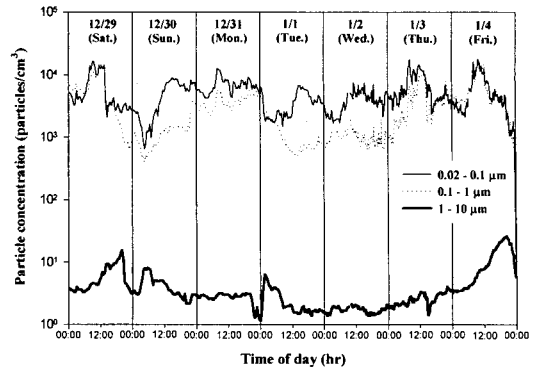


(c) volume (mass)

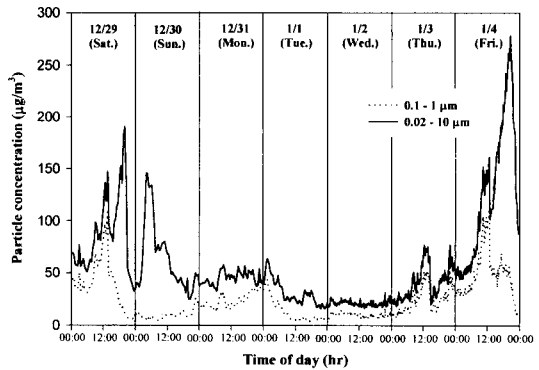
Fig. 3. Urban aerosol size distributions in Seoul on January 3, 2002.

3.3 대기 에어로졸 농도의 주간 변화

에어로졸의 입경을 3가지 (0.02~0.1 μm, 0.1~1



(a) number



(b) mass

Fig. 4. Weekly variation of aerosol number and mass concentrations from December 29, 2001 to January 4, 2002.

μm, 1~10 μm)로 구분하여 수 농도 및 질량 농도의 주간 변화의 예 (2001년 12월 29일~2002년 1월 4일)를 그림 4에 나타냈다. 이 기간 동안 12월 29일 9~15시에 1.2 mm, 12월 31일 18~24시에 6.7 mm의 강수량이 기록되었다. 전날 저녁에 강수량이 기록되고, 공휴일인 1월 1일을 제외한 6일에 대하여 0.02~1 μm 범위인 미세 입자의 수 농도의 일변화를 그림 5에 나타냈다.

수 농도의 주간 변화를 나타낸 그림 4(a)와 그림 5를 보면, 공휴일이고 전날 저녁에 강수량이 기록된 1월 1일을 제외하고 입자의 수 농도는 대체로 오전(6~12시)에 증가하는 경향을 나타냈다. 김필수 등 (1986)의 연구에서도 이러한 경향이 발견되었으며, 낮은 혼합고와 교통량의 증가로 인해 오전에 미세

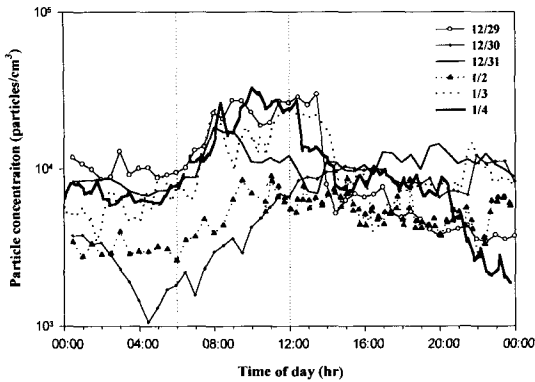


Fig. 5. Diurnal variation of fine particle number concentration from December 29, 2001 to January 4, 2002 except January 1, 2002.

입자의 수 농도가 증가하는 것으로 생각된다. 시베리아와 같은 대륙의 전원지역에서도 오전에 에어로졸의 수 농도가 증가되는 현상이 관측되었는데, 이때 에어로졸은 광화학 반응에 의해 가스가 입자로 변환되어 생긴 것이다 (Koutsenogii and Jaenicke, 1994).

그러나, 전체적으로 하루 동안의 수 농도 변화는 일정한 경향을 나타내지 않고 측정일에 따라 매우 달랐다. 특히, 0.1~1 μ m 범위인 입자의 수 농도는 측정일에 따라 0.02~0.1 μ m 범위인 입자의 수 농도와 큰 차이를 보일 때도 있고 서로 비슷할 때도 있었다. 상대적으로 질량 농도가 높을 때 주로 0.1~1 μ m 범위인 입자의 수 농도가 0.02~0.1 μ m 범위인 입자의 수 농도와 비슷하였다. 대체로 0.02~0.1 μ m 범위와 0.1~1 μ m 범위인 입자의 수 농도 변화 경향은 서로 비슷하지만, 1~10 μ m 범위인 입자의 수 농도 변화 경향은 이들과 달랐다. 이것은 입경에 따라 오염물질의 배출원, 기상조건 등의 영향을 받는 정도가 다르기 때문인 것으로 추정된다.

질량 농도의 주간 변화를 나타낸 그림 4(b)를 보면, 질량 농도도 측정일에 따라 매우 다르고, 질량 농도가 높은 경우 농도의 일변화가 매우 심하였다. 즉, 2002년 1월 4일의 일평균 질량 농도는 127 μ g/m³인데, 최고 농도는 278 μ g/m³으로 최저 농도(44 μ g/m³)보다 약 6배 높았다. 이것으로부터 양호한 대기질을 유지하기 위해서는 일평균 농도뿐만 아니라 최고 농도도 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단

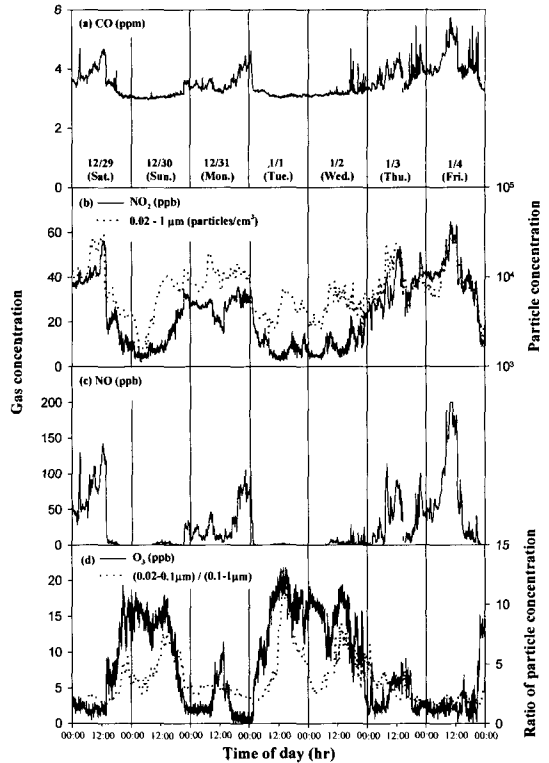


Fig. 6. Weekly variation of gaseous concentrations from December 29, 2001 to January 4, 2002.

된다.

3. 4 에어로졸과 가스 농도의 상관성

에어로졸 농도와 가스 농도의 상관성을 살펴보기 위하여 에어로졸 농도의 주간 변화를 나타낸 기간 동안 함께 측정된 가스상 물질 (CO, NO, NO₂, O₃)의 농도를 그림 6에 나타냈다. 그림 6(b)에 0.02~1 μ m 범위인 미세 입자의 수 농도를 함께 나타냈다. 그림 6을 보면, 대체로 가스(CO, NO, NO₂) 농도가 높을 때 1 μ m 이하인 미세 입자의 수 농도도 높았다. 특히, 12월 29일, 1월 3일과 4일의 경우 NO₂ 농도의 일변화 경향이 미세 입자의 수 농도의 일변화 경향과 거의 일치하였다. NO₂ 농도와 미세 입자의 수 농도의 상관관계를 나타낸 그림 7을 보면, 대체로 미세 입자의 수 농도가 증가함에 따라 NO₂ 농도도 증가하며, 이때 상관계수(r²)는 0.62이다. 자동차의 불완전 연소에 의해 이들 가스와 미세 입자가 발생되

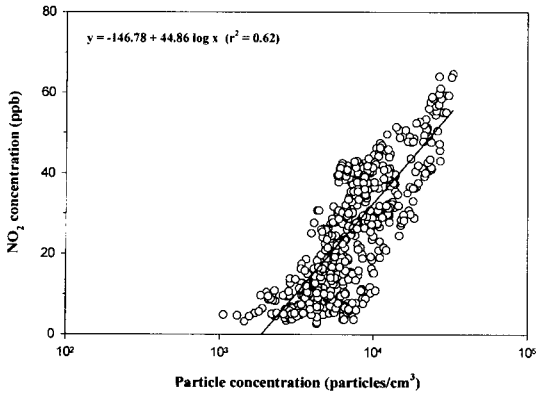


Fig. 7. Relationship between fine particle number concentration and NO₂ concentration.

므로, 이러한 측정결과는 겨울철 서울 대기 에어로졸의 주 배출원이 자동차임을 의미한다.

그림 4(a)와 그림 6(d)를 보면, 대체로 0.02~0.1 μm 범위인 입자의 수 농도가 0.1~1 μm 범위인 입자의 수 농도보다 높을 때 오존 농도가 상대적으로 매우 높았다. 0.02~0.1 μm 범위인 입자와 0.1~1 μm 범위인 입자의 수 농도비를 구하여 그림 6(d)에 함께 나타냈다. 수 농도비가 5 이상인 경우 오존 농도가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 또한, 낮의 오존 농도가 높을 때 일사량도 많았다. 이것으로부터 광화학 반응에 의해 0.02~0.1 μm 범위인 2차 유기 에어로졸(secondary organic aerosol)이 생성되면서 오존 농도도 함께 증가한 것으로 추정된다(그림 11(a) 참조). 광화학 반응에 의해 0.02~0.1 μm 범위인 입자 수가 증가하였지만, 겨울철이라 태양의 광도가 낮아 광화학 스모그는 발생되지 않은 것으로 생각된다.

3.5 에어로졸과 상대습도의 상관성

에어로졸 농도와 기상인자의 상관성을 살펴보기 위하여 에어로졸 농도의 주간 변화를 나타낸 기간 동안 기상청으로부터 기온, 상대습도, 시정 및 일사량의 측정자료를 입수하였으며, 1시간 평균 기온과 상대습도의 주간 변화를 그림 8에 나타냈다. 공기 중의 수분이 증가하면 비균질 반응에 의해 입자가 생성되기도 하고, 기존의 미세 입자에 수분이 응축되어 입자가 성장한다(Pitchford and McMurry, 1994).

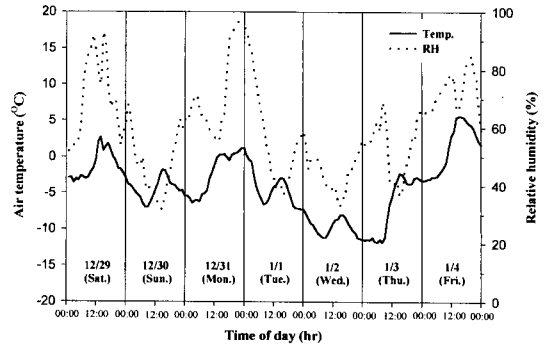


Fig. 8. Weekly variation of air temperature and relative humidity from December 29, 2001 to January 4, 2002.

대기의 입경별 수 농도분포, 입자의 성분, 가스 농도 등에 따라 습도가 에어로졸에 미치는 영향은 달라진다. 그러므로, 백남준 등(1996)의 연구에서 상대습도와 대기 입자의 산란계수 사이의 상관성이 발견되지 않았고, 본 연구에서도 상대습도와 에어로졸 수 농도 사이의 직접적인 상관성을 발견할 수 없었다.

그림 8을 보면, 상대습도는 일정 시간 동안 증가한 후 다시 일정 시간 동안 감소하는 반복되는 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 상대습도가 계속 상승하는 경우 습도가 에어로졸 농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 0.02~1 μm 범위인 미세 입자의 수 농도와 상대습도의 상관관계를 그림 9에 나타냈다. 그림 9(a)는 1주일 동안 모든 상대습도와 미세 입자의 수 농도의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림을 보면, 상대습도가 60% 이하로 낮을 때 대부분의 수 농도는 15,000개/cm³ 이하이었고, 상대습도가 60% 이상으로 높을 때 수 농도의 편차는 커지고 15,000~35,000개/cm³ 범위의 높은 농도가 관측되었다. 그림 9(b)는 그림 8에서 보는 바와 같이 상대습도가 증가하고 있는 동안(d(RH)/dt > 0)의 데이터만을 사용하여 상대습도와 미세 입자의 수 농도의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림을 보면, 상대습도가 70% 이하인 경우 모든 수 농도는 15,000개/cm³ 이하이었으나, 상대습도가 70% 이상인 경우 모든 수 농도는 10,000개/cm³ 이상으로 높았다. 이번 연구에서는 측정자료가 많지 않아 이러한 상관성을 정확히 규명할 수 없었지만, 향후 상대습도 증가에 따른 수 농도와 입경분포의 변화를 규명하는 연구를 수

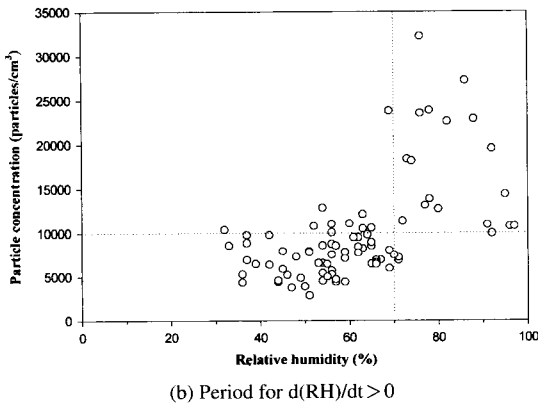
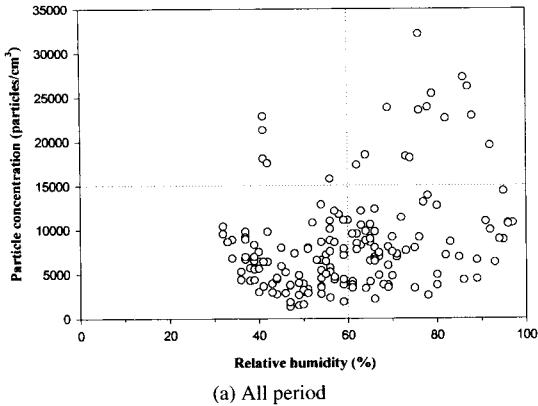


Fig. 9. Relationship between fine particle number concentration and relative humidity.

행할 예정이다.

3.6 에어로졸과 시정의 상관성

시정 장애는 에어로졸에 의해 생기므로, 에어로졸의 농도와 시정의 상관성을 살펴보기 위하여 빛을 잘 산란시키는 0.1~1 μ m 범위인 입자의 수 농도와 시정의 상관관계를 구하여 그림 10에 나타냈다. 그림 10을 보면, 대체로 입자의 수 농도가 증가함에 따라 시정이 감소하는 경향을 나타낸다. 입자 수 농도가 10³개/cm³ 이하로 낮으면 시정이 15 km 이상으로 좋았고, 10⁴개/cm³ 이상으로 높으면 시정이 10 km 이하로 나빠졌다. 그런데, 입자 수 농도가 10³~10⁴개/cm³ 범위이면 시정의 편차가 컸다. 시정은 공간적 측정자료이고, 에어로졸 농도는 공간적 평균이 아닌 한 위치에서 얻은 측정자료이므로, 편차가 커

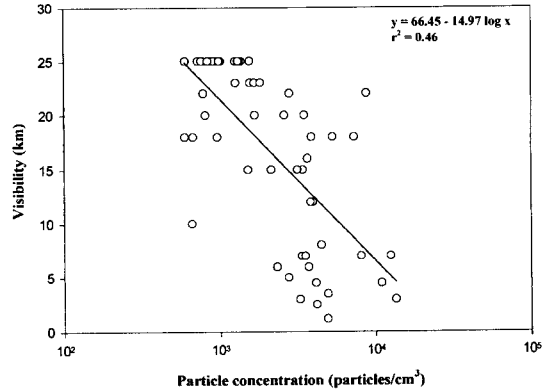
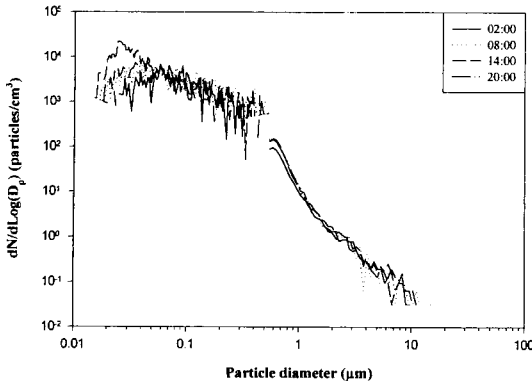


Fig. 10. Relationship between visibility and particle number concentration in the range of 0.1 to 1 μ m.

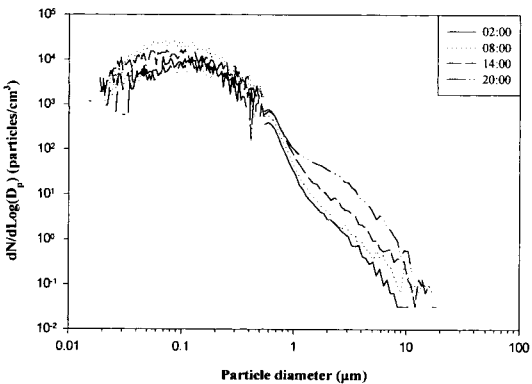
진 것으로 생각된다. 또한, 시정이 아주 좋거나 나쁜 경우 서울 지역 전체의 대기 상태는 비교적 균일하고, 시정이 중간인 경우 대기 상태가 공간적으로 상당히 불균일하여 시정의 편차가 커진 것으로 추정된다. 입자의 표면적 농도 및 질량 농도와 시정의 상관관계는 수 농도의 경우와 비슷하였다. 일사량과 시정의 측정자료를 비교하면, 낮의 시정이 좋을 때 일사량도 많았다.

시정에 따른 입경분포의 차이를 살펴보기 위하여 주간의 시정이 25 km로 관측된 2002년 1월 2일과 7 km로 관측된 2002년 1월 4일의 입경별 수 농도 분포를 그림 11(a)와 (b)에 각각 나타냈다. 시정이 좋은 1월 2일의 경우 그림 4(a)에 나타낸 바와 같이 0.02~0.1 μ m 범위인 입자의 수가 0.1~1 μ m 범위인 입자의 수보다 현저하게 많아 입경이 감소함에 따라 수 농도가 계속 증가하는 입경분포를 나타냈다. 특히, 14시경 0.04 μ m 이하인 입자가 현저하게 증가한 것은 앞에서 언급한 바와 같이 광화학 반응에 의해 2차 유기 에어로졸이 생성되었기 때문인 것으로 추정된다. 시정이 좋고 오존 농도도 상대적으로 높았던 1월 1일 낮에도 이러한 입경분포가 관측되었다.

상대습도가 높아 수분에 의해 시정이 나빠진 것으로 추정되는 1월 4일의 경우 그림 4(a)에 나타낸 바와 같이 0.02~0.1 μ m 범위인 입자의 수가 0.1~1 μ m 범위인 입자의 수와 거의 비슷하므로, 입경이 감소함에 따라 수 농도가 증가하여 0.1 μ m 근처에



(a) High visibility on January 2, 2002



(b) Low visibility on January 4, 2002

Fig. 11. Dependency of aerosol size distribution on the visibility.

서 최고농도를 나타낸 후 감소하는 입경분포를 나타냈다. 또한, APS의 측정범위에 해당하는 0.5 μm 이상인 입자의 수 농도가 시간이 경과함에 따라 현저하게 높아지는 입경분포를 나타냈다. 시간이 경과함에 따라 상대습도가 계속 증가하였고(그림 8 참조), 1~10 μm 범위인 입자의 수 농도도 증가하였다(그림 4(a) 참조). 이것은 수분에 의해 미세 입자가 커져 1~10 μm 범위인 입자 수가 증가된 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2001년 11월 30일부터 2002년 1월 14일까지 SMPS와 APS를 사용하여 0.02~20

μm 범위인 에어로졸을 측정하여 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경분포, 수 농도 및 질량 농도 등의 일반적 특징을 살펴본 후 에어로졸과 가스 농도, 상대습도, 시정의 관련성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 측정기간 동안 입자 수 농도의 경우 0.02~0.1 μm 범위인 입자의 평균 농도는 약 5000개/cm³으로 0.1~0.6 μm 범위인 입자의 평균 농도보다 약 1.5배 높았고, 질량 농도의 경우 0.1~1 μm 범위인 입자의 평균 농도가 1~10 μm 범위인 입자의 평균 농도보다 약간 높았다.

둘째, 하루 동안 에어로졸의 수, 표면적 및 체적 농도는 시간에 따라 크게 변하지만 전체적인 에어로졸의 입경분포는 시간에 무관하게 거의 비슷하였다. 질량 농도의 경우 대도시에서 전형적으로 나타나는 이산형 분포와 비슷하였다.

셋째, 입자의 수 농도는 대체로 오전에 증가하는 경향을 나타냈고, 하루 동안의 수 농도 변화는 측정일에 따라 매우 다르게 나타났다. 또한, 입자의 질량 농도가 높은 날 농도의 일변화가 매우 심하게 나타났다. 그러므로, 양호한 대기질을 유지하기 위해서는 일평균 농도뿐만 아니라 시간 평균 최대 농도도 중요하게 고려되어야 한다.

넷째, 대체로 가스(CO, NO, NO₂) 농도가 높을 때 1 μm 이하인 미세 입자의 수 농도도 높았고, 0.02~0.1 μm 범위인 입자의 수 농도가 0.1~1 μm 범위인 입자의 수 농도보다 높을 때 오존 농도가 상대적으로 매우 높았다.

다섯째, 상대습도가 증가하는 동안 상대습도가 70% 이상인 경우 수 1 μm 이하인 미세 입자의 수 농도는 10,000개/cm³ 이상으로 높았고, 상대습도가 70% 이하인 경우 수 농도는 15,000개/cm³ 이하로 낮았다.

여섯째, 시정 장애는 에어로졸에 의해 생기므로, 대체로 빛을 잘 산란시키는 0.1~1 μm 범위인 에어로졸의 수 농도가 증가함에 따라 시정이 나빠지는 경향을 나타냈다. 또한, 겨울철 시정이 좋은 날과 나쁜 날의 입경분포는 뚜렷하게 다른 경향을 나타내었고, 상대습도가 높은 날 미세 입자 뿐만 아니라 조대 입자의 수 농도도 증가하여 시정이 감소된 것으로 생각된다.

이 연구를 통하여 지금까지 잘 알려져 있지 않은

서울 대기 중에 포함된 0.02~20 μm 범위인 에어로졸의 입경별 수 농도의 상세한 측정자료를 확보하여 겨울철 에어로졸의 입경분포와 농도 특성을 밝혀냈다. 에어로졸 농도와 기준성 가스 농도와의 상관성을 검토하여 겨울철 미세 입자는 주로 자동차로부터 배출되는 것임을 확인하였다. 에어로졸 농도와 상대습도의 직접적인 상관성을 밝혀내지는 못하였지만, 특별한 조건(상대습도가 증가하는 동안 상대습도 70% 이상일 때)에서 에어로졸 농도가 높음을 밝혀냈다. 이러한 상관관계는 추가 연구를 수행하여 밝혀낼 예정이다. 일반적으로 0.1~1 μm 범위인 에어로졸 농도와 시정이 상관관계가 있다고 알려져 있는데, 본 연구에서는 실제 대기 에어로졸과 시정의 측정자료를 이용하여 이들의 상관성을 입증하였고, 시정이 좋은 날과 나쁜 날의 입경분포가 뚜렷하게 다르다는 것을 밝혀냈다. 이러한 연구결과는 대기를 이용한 실내 스모그 챔버 연구에서 초기 조건인 외기의 특성을 파악하는데 활용될 수 있다.

사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 : 2000-N-NL-01-C-184)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드린다. 또한, 기상자료를 제공하여 준 기상연구소 김지영 연구사에게 감사를 드린다.

참 고 문 헌

김필수(1988) 서울 대기 Aerosol의 물리적 특성: 가시광선의 산란, 한국대기보전학회지, 4(2), 28-37.
 김필수, 김윤장, 이양호, 조숙현, 안승태(1986) 도시대기 Aerosol의 입자직경 0.01~1.0 μm 범위의 농도 변화 특성, 한국대기보전학회지, 2(2), 41-50.
 김필수, 오미석, 김의훈(1991) 서울 대기 에어로솔의 농도와 광소산에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 227-234.
 박정호, 최금찬(1997) 저압 임팩터를 이용한 대기 에어로졸 입자의 입경분포 측정과 화학조성 자료의 해석, 한국대기보전학회지, 13(6), 475-486.

배귀남, 송기범, 김민철, 임득용, 진현철, 문길주(2001) 대기 에어로졸 실험용 실내 스모그 챔버의 설계 및 성능평가, 한국대기환경학회 추계학술대회는논문집, 85-86.
 백남준, 김태오, 김성주, 김용표, 문길주(1994) 서울시의 1993년 가을철 시정 및 입자 특성 측정 및 분석, 10(1), 32-40.
 백남준, 이종훈, 김용표, 문길주(1996) 1994년 6월 서울지역 시정장애의 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 12(4), 407-419.
 오현선, 윤순창(1996) 서울지역의 시정악화에 영향을 미치는 대기오염 및 기상장의 특성, 한국기상학회지, 32, 131-138.
 이용근, 김만구, 원정호(1985) Andersen 시료채취기를 이용한 도시대기 중 부유입자상 물질의 입도분포 측정, 한국대기보전학회지, 1(1), 93-98.
 이종훈, 백남준, 김용표, 문길주(1995) 1993년 8월의 서울지역 시정 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 291-298.
 Chun, Y., K.O. Boo, J. Kim, S.U. Park, and M. Lee (2001a) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, Journal of Geophysical Research, 106(D16), 18461-18469.
 Chun, Y., J. Kim, J.C. Choi, K.O. Boo, S.N. Oh, and M. Lee (2001b) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, Atmospheric Environment, 35, 2715-2721.
 Koutsenogii, P.K. and R. Jaenicke (1994) Number concentration and size distribution of atmospheric aerosol in Siberia, Journal of Aerosol Science, 25(2), 377-383.
 Pitchford, M.L. and P.H. McMurry (1994) Relationship between measured water vapor growth and chemistry of atmospheric aerosol for Grand Canyon, Arizona, in winter 1990, Atmospheric Environment, 28(5), 827-839.
 Reist, P.C. (1993) *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill, Inc. chapter 16.
 Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., chapter 7.
 Woo, K.S., D.R. Chen, D.Y.H. Pui, and P.H. McMurry (2001) Measurement of Atlanta aerosol size distributions: Observations of ultrafine particle events, Aerosol Science and Technology, 34, 75-87.