

서울지역 겨울철 대기 에어로졸의 수 농도 및 산란계수 분석

이현혜^{1,2)} · 김진영¹⁾ · 이승복¹⁾ · 배귀남^{1)*} · 염성수²⁾

¹⁾한국과학기술연구원 지구환경센터, ²⁾연세대학교 대기과학과

(2010년 6월 8일 투고; 2010년 6월 28일 수정; 2010년 6월 29일 게재확정)

Urban Aerosol Number Concentration and Scattering Coefficient in Seoul, Korea, during Winter

Hyun-Hye Lee^{1,2)} · Jin Young Kim¹⁾ · Seung-Bok Lee¹⁾ · Gwi-Nam Bae^{1)*} · Seong Soo Yum²⁾

¹⁾Global Environment Center, Korea Institute of Science and Technology

²⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

(Received 8 June 2010; received in revised form 28 June 2010; accepted 29 June 2010)

Abstract

Size-segregated number concentration and scattering coefficient of urban aerosols were measured using an SMPS (scanning mobility particle sizer) and a nephelometer, respectively in Seoul, Korea, during the winter season of 2003. The average number concentrations of ultrafine particles (20~100 nm) and accumulation mode particles (100~600 nm) were 2,170 particles cm⁻³ and 1,521 particles cm⁻³, respectively. The scattering coefficient at the wavelength of 550 nm ranged from 62.6 Mm⁻¹ to 330.1 Mm⁻¹ and average value was 163.4 Mm⁻¹. The peak concentrations of ultrafine particles and accumulation mode particles were simultaneously recorded between 6:00 and 9:00 A.M., indicating the effect of vehicle emissions which are major air pollution sources in the urban atmosphere. On average, the number concentration of ultrafine particles was 1.4 times higher than that of accumulation mode particles, although it was a little higher during the morning peak time. The variation of aerosol scattering coefficient was in good agreement with that of accumulation mode particle number concentration rather than that of ultrafine particle number concentration.

Keywords : Light scattering, Ultrafine particle, Accumulation mode particle, Visibility, Seoul

1. 서 론

대기 중 부유하고 있는 에어로졸은 광산란과 광 흡수를 크게 유발시키는 요인이다. 그 중에서도 에

어로졸에 의한 광산란 현상은 시정과 기후변화 연구의 중요한 주제이다. 특히, 시정장에는 시간적, 공간적으로 변화가 많은 현상으로 그 원인을 규명하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 우리나라의 경우 제주도 고산에서 관측된 에어로졸의 산란계수와 흡수계수가 지구상의 다른 지역에 비해 상당히 높

* Corresponding author.

Tel : +82-2-958-5676, E-mail : gnbae@kist.re.kr

게 나타났다. 이러한 측정결과는 아시아 지역 내에서 광범위하게 배출된 황사 등 자연적 에어로졸뿐만 아니라 화석연료의 연소와 거대규모의 산불 등 다량의 대기오염물질 배출로부터 생성된 인위적 에어로졸이 대기의 복사과정을 통해 지역기후와 지구기후에 상당한 영향을 줄 수 있음을 시사한다(Kim *et al.*, 2003).

온실기체에 비해 에어로졸은 대기 중 수명이 짧고 지역에 따라 물리·화학적 성질이 다양한 특징을 가지고 있다. 에어로졸의 이러한 시·공간적 분포와 성질의 차이 때문에 지역규모에서 에어로졸을 관측하고, 에어로졸의 물리적, 화학적 및 광학적 특성을 밝히는 것은 매우 중요하다. 이와 같이 관측된 자료를 통해 밝혀진 에어로졸 특성은 위성관측 자료의 검증이나 복사강제력 산출 등 기후변화나 대기환경 연구 등에 다양하게 활용된다(Anderson *et al.*, 1996; Tagen *et al.*, 1996; Anderson and Ogren, 1998; Kim *et al.*, 2001; Sheridan *et al.*, 2001; Delene and Ogren, 2002; Wang *et al.*, 2003).

특히, 에어로졸의 광학적 특성은 입자의 크기와 밀접한 관계가 있다. 입자의 크기가 빛의 파장과 비슷한 에어로졸, 즉 0.1~1.0 μm 범위의 부유 입자상 물질은 가시광선을 잘 산란시키므로 시계를 흐리게 한다. 이 범위의 대기 입자들의 수는 1 μm 이상인 입자들보다 많기 때문에 가시광선의 산란은 이들 입자에 의해 지배된다. 따라서 축적 모드 입자(accumulation mode particle)에 의한 도시 대기의 광산란 특성은 물리적인 면과 환경오염의 관점에서 중요하며, 기후와 관련된 지구환경 문제에 영향을 미친다(Kim, 1988). 또한, 자동차 등의 엔진에서 배출되는 초미세 입자(ultrafine particle)는 인체 위생성과 관련하여 그 중요성이 증대되고 있다(Kittelson, 1988; Wichmann and Peters, 2000).

네펠로미터(nephelometer)를 이용하여 대기 중 에어로졸에 의한 빛의 산란 등 광학적 특성에 관한 연구들이 국내·외에서 수행되어왔다. 국내에서 Shin *et al.* (2000)은 배경 대기 지역에서 네펠로미터 측정값을 이용하여 시정을 추정하고, 에어로졸의 분포 특징을 파악하였다. Kim *et al.* (2003)은 제주도 고산 집중측정소(Supersite)에서 네펠로미터와 PSAP(particle soot absorption photometer)로 에어로졸의 광학적 특성을 측정하였다. 최근에는 Shim *et al.* (2008)이

네펠로미터를 이용하여 서울지역의 에어로졸 산란계수의 특징을 파악하였다. 국외 연구로는 2002년 Jabiru에서 네펠로미터를 이용한 측정(Carr and Burridge, 2004), 네펠로미터와 aethalometer 등 다른 장비를 사용하여 에어로졸의 광학적 특징을 규명한 연구(Patrick *et al.*, 2005) 등이 있다.

본 연구에서는 도시지역에서 에어로졸이 광산란에 미치는 영향을 파악하기 위하여 서울에 위치한 한국과학기술연구원(KIST) 내에서 2003년 2월에 대기 에어로졸의 산란계수와 수 농도를 측정하여 초미세 입자와 축적 모드 입자의 수 농도에 따른 산란계수 특징을 비교·분석하였다. 입자의 산란계수 및 수 농도와 겨울철 서울지역의 대기 시정의 관련성도 함께 검토하였다.

2. 측 정

2.1 측정위치

서울시 성북구 하월곡동에 위치한 KIST에서 2003년 2월 1일부터 6일까지 6일 동안 네펠로미터와 SMPS(scanning mobility particle sizer)로 에어로졸의 산란계수와 입경별 수 농도를 각각 측정하였다. 측정위치는 서울 도심으로부터 약 7 km 떨어진 곳이며, 주변 북쪽 및 서쪽에 위치한 도로로부터 약 400 m 떨어져 있다. 동쪽에는 약 100 m 높이의 산이 있

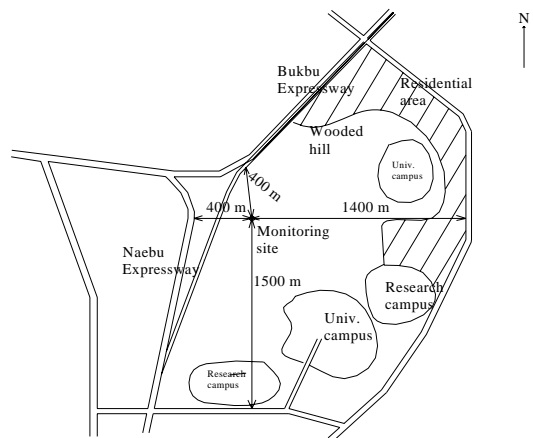


Figure 1. Location of the urban aerosol monitoring site in Seoul, Korea (Hung *et al.*, 2010).

고, 남쪽과 동쪽으로 약 1,500 m 떨어진 곳에 4차선 도로가 있다(그림 1). KIST 실험용 클린룸(37°60'N, 127°05'E)의 지붕 위에 외기 도입관의 입구를 설치하였다(Bae *et al.*, 2003). 클린룸이 건물과 언덕진 도로 사이에 위치하여 출·퇴근시 자동차 오염원의 영향을 직접적으로 받을 수 있지만, 주변의 큰 도로를 이용하는 자동차의 통행량에 비해 이 도로를 이용하는 자동차의 통행량은 적은 편이다.

2.2 측정방법

에어로졸의 산란계수와 더불어 입경별 수 농도를 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 3파장 산란계인 네펠로미터(TSI, Inc. model 3563)와 SMPS(TSI, Inc. model 3936 L25)를 이용하여 대기 에어로졸의 산란계수와 입경별 수 농도를 각각 측정하였다.

대기 중의 에어로졸, 온도 및 습도를 측정하기 위해서 크게 외기 도입부, 공기 샘플링부, 유량 조절부 및 측정장비로 구성된 외기 측정 시스템을 설치하였다. 측정장비가 설치된 클린룸 시설(해발고도 약 30 m)의 지붕 위 약 1 m 높이(지상으로부터 약 8 m 높이)에 내경이 약 28 mm인 외기 도입관을 수직으로 설치하여 관내 에어로졸의 손실을 최소화시켰으며, 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. 외기 온도와 건물 내 온도 차이에 의해 외기가 도입관을 통해 흡인되는 동안 가열 또는 냉각되는 현상을 최소화하기 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 유량을 약 20 L/min으로 조절하였으며, 오리피스 차압계를 설치하여 흡인되는 유량을 항상 모니터링할 수 있도록 하였다(Bae *et al.*, 2003).

3파장 산란계인 네펠로미터의 각 파장에서 총산란계수(total scattering coefficient)를 측정하였다. 산란계수는 빛이 에어로졸을 단위거리만큼 통과할 때 감쇄하는 비율을 의미한다. 네펠로미터는 대기 중 부유하는 입자들의 산란 정도를 측정할 수 있다. 네펠로미터의 산란부를 통해서 들어온 광자 수(photon

counts)는 파랑색(450 nm), 녹색(550 nm), 적색(700 nm) 3파장의 photomultiplier tubes(PMT)에 의해 각각 측정된다. 총산란계수는 후방산란계수보다 높게 나타난다. 이것은 측정된 광자 수와 제로모드에서 측정된 광자 수의 차이($c_m - c_z$)에 의해 입자의 산란계수 값이 달라지기 때문이다(Anderson *et al.*, 1996). 제로모드는 정규모드(normal mode)로 55분 동안 측정 후 5분 동안 HEPA(high efficiency particulate air) 필터로 에어로졸을 제거한 공기를 공급하는 동안 측정된 것을 말한다. 제로모드에서 장비 자체의 산란계수(noise scattering coefficient)를 측정하고, 이를 바탕으로 정규모드에서 관측된 산란계수 값을 보정한다(Shim *et al.*, 2008).

$$\sigma_{sp} = \frac{\sigma_{k-hi} - \sigma_{k-lo}}{c_{hi} - c_{lo}} (c_m - c_z) - (\sigma_{k-air} - \sigma_{k-z}) \quad (1)$$

$$\sigma_{bsp} = \frac{\sigma_{k-hi} - \sigma_{k-lo}}{c_{hi} - c_{lo}} (c_{mb} - c_{zb}) - \frac{c_{hb} - c_{lb}}{c_{hi} - c_{lo}} (\sigma_{k-air} - \sigma_{k-z}) \quad (2)$$

여기서, σ_{sp} 와 σ_{bsp} 는 각각 입자산란계수, 후방산란계수, σ_{k-hi} 는 이미 알려진 강한 산란계수를 갖는 기체로 보정하여 얻은 산란계수, σ_{k-lo} 는 이미 알려진 약한 산란계수를 갖는 기체로 보정하여 얻은 산란계수를 나타낸다. 그리고 c_m 은 측정된 광자수, c_z 는 제로모드에서 측정된 광자수, c_{hi} 는 강한 산란계수를 갖는 기체로 측정된 광자수, c_{lo} 는 약한 산란계수를 갖는 기체로 측정된 광자수를 의미한다. σ_{k-air} 는 표준건조공기(standard dry air)에 의해 보정된 온도와 압력에 따른 산란계수이고, 표준건조공기는 부피당 N₂ 78.09%, O₂ 20.95%, Ar 0.93%, CO₂ 0.03%로 구성된 공기를 말한다. 아래첨자 'z'는 제로모드, 'b'는 후방산란을 의미한다.

측정기간 동안 기온이 -7~5℃ 범위로 낮아 네펠로미터를 보호하기 위해서 내부 히터(heater)를 끄지 않았으며, 이것이 측정결과에 영향을 미쳤을 수도 있다.

SMPS는 다분산 입자를 일정 크기의 단분산 입자로 분류하는 EC(electrostatic classifier, TSI, Inc. model 3071)와 입자의 수 농도를 측정하는 응축핵계수기(UCPC, ultrafine condensation particle counter, TSI, Inc. model 3025)로 구성되어 있다. 이 때, 샘플링 유량을 0.3 L/min으로 설정하여 16.5 ~ 626 nm 범위인 입자를 30분 간격으로 90초(up scan: 60 sec,

retrace: 30 sec) 동안 측정하였다. SMPS 내부의 확산 손실을 고려할 때 수십 nm 이하인 입자의 수 농도가 낮게 평가되었을 것으로 생각된다.

2.3 기상 조건

계절과 지역에 따라 달라지는 기상장과 상대습도 등의 기상요소는 에어로졸의 수분 함유량, 산란·흡수효율 등에 중요한 변수로 작용하며(Kim *et al.*, 2004), 대기 중 입자는 빛을 산란시키거나 흡수하여 시정을 감소시킨다. 기상관측소의 AWS(automatic weather station) 자료가 측정 지점 주변 도시 대기 측정소 및 도로변 대기 측정소의 무인 운영 AWS 자료보다 정확도가 비교적 높기 때문에 서울특별시 중로구 송월동 1번지에 위치한 기상관측소(37°34'N, 126°57'E) 자료를 이용하여 주요 기상변수인 기온, 상대습도를 그림 2에 나타내었다. 측정기간 중 비는 내리지 않았으며, 평균 풍속은 2.5 m/s(2.1~2.8 m/s), 평균 기온은 -1.1°C(-6.6~4.5 °C)이었다.

측정기간 중 2월 4일~6일까지 불어온 서풍은 자동차 배출 오염물질이 측정지역으로 이동하는데 기여하였다(Hung *et al.*, 2010). 자동차는 대도시의 대표적인 오염 배출원으로 주로 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 탄화수소(HC)와 같은 가스상 물질과 함께 작은 입자들을 배출한다. 입자는 특히 습도의 영향을 받는데, 공기 중 수분이 증가하면 비균질 반응에 의해 입자가 생성되기도 하고, 기존의 입자에 수분이 응축되어 입자가 성장한다(Pitchford and McMurry, 1994). Hoppel *et al.* (1990)의 연구에서도 일

차적으로 수증기에 의한 빛의 굴절률이 입자의 산란계수에 직접적으로 영향을 미치며, 이차적으로 수증기가 흡습성이 강한 에어로졸에 흡수되어 입자의 성장에 기여함으로써 산란계수에 영향을 미치는 것을 관찰하였다. 산란계수와 습도의 연관성은 산란계수의 일반화에서 다시 언급하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에어로졸의 산란계수 특징

그림 3은 측정기간 동안 시간에 따른 3파장의 총 산란계수를 나타낸 것이다. 같은 시간에서 파장별로 산란계수가 다른 것은 파장별 민감도(sensitivity)가 다르기 때문이다. 2월 1일부터 6일까지 450 nm, 550 nm, 700 nm의 파장별 평균 산란계수는 각각 210.4 Mm⁻¹, 163.4 Mm⁻¹, 121.8 Mm⁻¹이었다. 여기서, 1 Mm⁻¹은 10⁶ m⁻¹을 의미한다. 550 nm에서 평균 산란계수는 안면도 지구대기감시센터(36°32'N, 126°19'E, 45 m MSL)에서 2003년 2월 측정한 550 nm 파장의 평균 산란계수(187.9 Mm⁻¹)보다 약간 낮았다(Lee *et al.*, 2006). 또한, 2008년 2월 1일~6일 동안 서울 서대문구 신촌동에 위치한 연세대학교 과학관 6층(37°33'N, 126°56'E)에서 관측한 550 nm 파장의 평균 산란계수(152.7 Mm⁻¹)보다는 10.7 Mm⁻¹ 높았지만, 다른 지역과 비교하면 같은 서울지역 내에서 큰 차이를 보이는 것은 아니다(Shim *et al.*, 2008; 표 1).

중국의 경우 2005년 12월 25일부터 2006년 1월 2

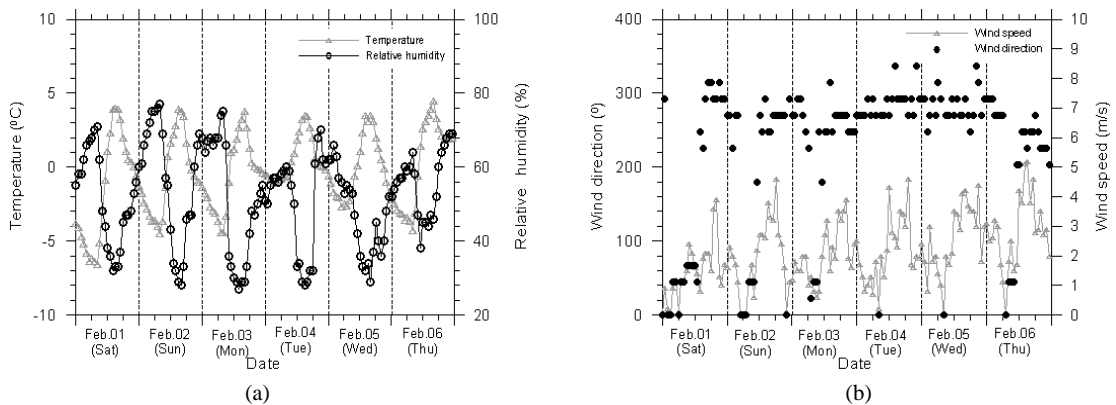


Figure 2. Variations of meteorological parameters during the monitoring period of 2003 in Seoul: (a) temperature and relative humidity, (b) wind direction and speed.

일까지 관측한 베이징의 도시지역은 시골지역에 비해 산란계수가 약 1.5배 높았고, 에어로졸의 구성에 따라 약 8배 이상의 큰 차이를 보였으며, 특히 시골 지역보다 도시지역에서 더 큰 차이를 보였다(Yan *et al.*, 2009; 표 1). 이번 연구에서 측정한 서울의 산란계수는 베이징의 오염된 지역 값의 약 50% 수준으로 낮아 상대적으로 에어로졸에 의한 대기 오염도가 낮음을 알 수 있다(표 1).

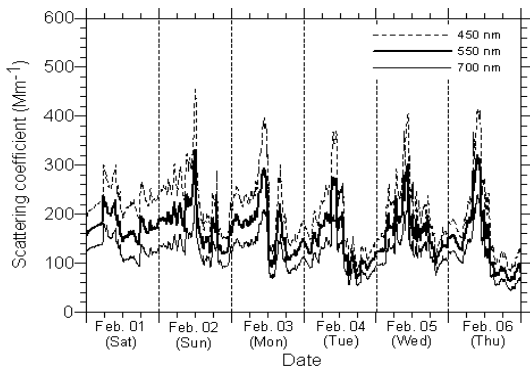


Figure 3. Variations of total aerosol scattering coefficients at three wavelengths, 450, 550 and 700 nm, measured by a nephelometer at KIST in 2003.

3.2 에어로졸의 수 농도 특징

측정기간 동안 SMPS로 측정된 에어로졸을 초미세 입자(20~100 nm)와 축적 모드 입자(100~600 nm)로 구분하여 수 농도 변화를 그림 4에, 초미세 입자와 축적 모드 입자의 수 농도비를 그림 5에 나타내었다. 측정기간 동안 입자의 수 농도를 보면, 초미세 입자는 794~6,952 개/cm³, 축적 모드 입자는 572~5,004 개/cm³ 범위이었다. 초미세 입자의 평균 수 농도(2,170 개/cm³)는 축적 모드 입자(1,521 개/cm³)의 약 1.4배이었다.

축적 모드 입자의 수 농도는 시간에 따라 초미세 입자의 수 농도와 큰 차이를 보일 때도 있었고, 서로 비슷할 때도 있었다. 대체로 새벽 시간과 낮 12 시경에 축적 모드 입자와 초미세 입자의 수 농도가 비슷하였으며(그림 5), 오전 6시와 9시 사이에는 초미세 입자뿐만 아니라 축적 모드 입자의 수 농도가 급격히 증가하였다. 이 시간대는 출근에 의해 교통량이 증가하는 시간으로 초미세 입자의 증가는 자동차의 배출에 의한 것으로 판단되는데, 차량 통행이 더 많을 뿐 아니라 풍향에 의해 자동차 배출의 영향을 더 많이 받은 2월 4일(수)~6일(금)에 초미세 입자의 수 농도가 더 높은 것에서도 이를 확인할 수 있다(그림 4, Hung *et al.*, 2010). 한편, 축적 모드 입

Table 1. Comparison of average aerosol scattering coefficients at 550 nm.

Location	Period	Average scattering coefficient (Mm ⁻¹)	Number of days	Aerosol types	Reference
KIST (Seoul, Korea; this study)	Feb. 1-6, 2003	163.4	6	-	This study
Yonsei University (Seoul, Korea)	Feb. 1-6, 2008	152.7	6	-	Shim <i>et al.</i> (2008)
Korea Global Atmosphere Watch Observatory (Anmyeon-do, Korea)	Feb., 2003	187.9	28	-	Lee <i>et al.</i> (2006)
Shangdianzi (Rural site outside Beijing, China)	Dec. 25-27, 2005	32.4	3	Relatively clean	Yan <i>et al.</i> (2009)
	Dec. 27, 2005 - Jan. 2, 2006	256.7	7	Relatively polluted	
Chinese Academy of Meteorological Science (Urban site in Beijing, China)	Dec. 7-10, 2005	394.9	4	Relatively polluted	Yan <i>et al.</i> (2009)
	Dec. 10-17, 2005	33.5	8	Relatively clean	

자의 일부는 수분에 의해 초미세 입자가 커져 축적 모드 입자로 전환되어 증가한 것으로 생각할 수 있는데, Oh and Yoon (1996)에 의하면 오전 시간에 상대습도가 매우 높았을 경우, 수분이 가스상 물질과 반응하여 입자로 변환되거나, 대기 에어로졸에 응축되어 빛을 잘 산란시키는 크기로 입자를 성장시켜 시정이 나빠지는 것으로 추론하였다. 대기 중 수분은 두 가지 형태로 빛을 소멸시키는데, 하나는 액적상의 순수한 수분이 광산란을 일으키는 경우로 입경이 0.1~2.0 μm 사이에서 주로 일어나고(Moon *et al.*, 1992), 또 하나는 다른 조해성인 화학성분 입자에 수분이 흡수되어 입자의 상변화 또는 조성변화에 의해 입경이 커져 산란계수에 영향을 주는 경우이다(Sloane and White, 1986; McMurry and Stolzenburg, 1989). 전자의 경우는 대기 중에 수분이 과포화될 때(상대습도 100% 이상)만 일어나므로 이러한 경우는 희박하며(Shah, 1981) 후자의 경우가 많다(Jang, 2000). Bae *et al.* (2003), Kim *et al.* (1986)의 연구에서도 대체로 오전 6시~12시 사이에 수 농도가 증가하는 경향이 발견되었으며, 출근 시간대 교통량 증가에 따른 자동차의 배출 증가와 오전 시간대 높은 상대습도에 의하여 입자 생성 및 성장이 촉진되어 결과적으로 수 농도가 증가한 것으로 판단된다. 국외의 경우 여름철에 시베리아와 같은 대륙의 전원지역에서도 오전에 $r < 0.1 \mu\text{m}$ 범위의 에어로졸의 수 농도가 증가되는 현상이 관측되었는데, 이는 에어로졸의 광화학 반응에 의해 가스가 입자로 변환되어 생긴 것이다(Koutsougi and Jaenicke, 1994).

한편, 초미세 입자와 축적 모드 입자의 수 농도가 모두 증가하는 오전 6시~9시 사이에도 축적 모드 입자보다는 초미세 입자의 농도가 대체로 높으며, 수 농도 증가율 또한 초미세 입자의 경우가 더 높는데(그림 4), Kim and Ahn (2005)에서는 오전 6시~9시 사이에 초미세 입자의 수가 급격하게 증가하였으며, 축적 모드 입자의 수는 제한적으로 증가하였다. 이는 초미세 입자의 배출이 축적 모드 입자의 배출보다 매우 많다는 것을 확인시켜주는 것으로, 본 연구와 비교해보면 공통적으로 수 농도가 증가하는 시간대가 오전 6시~9시로 같았고, 오전 10시~12시 사이에는 초미세 입자의 수가 현저하게 줄었으며, 축적 모드 입자의 수도 같이 줄어들었음을 확인할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이, 오전 6시~9시 사이

에는 출근시간대 차량의 영향으로 초미세 입자의 배출이 매우 활발한 것이며, 축적 모드 입자의 수 농도가 증가한 것은 도로에서 다량으로 배출된 초미세 입자의 일부가 측정지역으로 이동하면서 축적 모드 입자로 성장했을 수 있으며, 또한 주변지역으로부터 축적 모드 입자가 직접 유입되었을 가능성도 있다. Lee and Bae (2010)의 연구에서는 도로변에서 직접 측정된 입자에 비하여 도로로부터 멀리 떨어진 위치에서 측정된 초미세 입자의 수 농도가 상대적으로 매우 낮았고, 변화폭도 상대적으로 작음을 보여주었는데, 이는 오염원에서 발생한 초미세 입자가 주변지역으로 이동하는 동안 충분한 확산과 희석이 이루어졌다는 것을 의미한다.

축적 모드 입자의 수 농도에 대한 초미세 입자의 수 농도비를 나타낸 그림 5를 보면, 전반적으로 초미세 입자의 수 농도가 축적 모드 입자의 수 농도보다 높음을 알 수 있다. 자동차 배출의 영향이 적은 자정부터 대략 새벽 6시 사이에는 축적 모드 입자에 비해 초미세 입자의 수 농도가 빠르게 감소하였으며, 앞에서 설명한 오전 출근 시간대에는 초미세 입자의 수 농도가 축적 모드 입자의 수 농도보다 빠르게 증가하여 작은 피크를 형성하였다. 흥미로운 것은 퇴근 시간대인 오후 6시 이후의 수 농도 변화인데, 출근 시간대에 비해 퇴근 시간대에는 차량 운행 시간이 보다 분산되는 특징에 따라 초미세 입자의 수 농도는 출근 시간대보다 낮으나, 상대적으로 축적 모드 입자의 수 농도 증가가 미미하여 축적 모드 입자에 대한 초미세 입자의 농도비가 급격히 증가

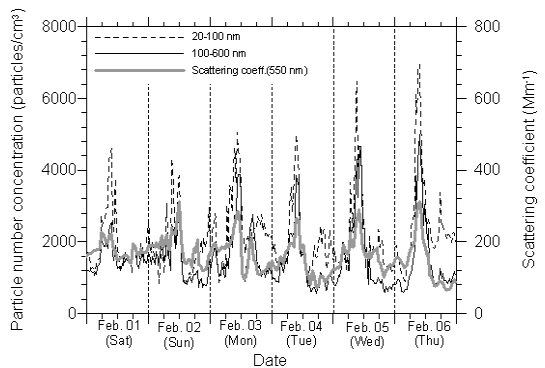


Figure 4. Variations of particle number concentrations and aerosol scattering coefficient at the wavelength of 550 nm measured in 2003.

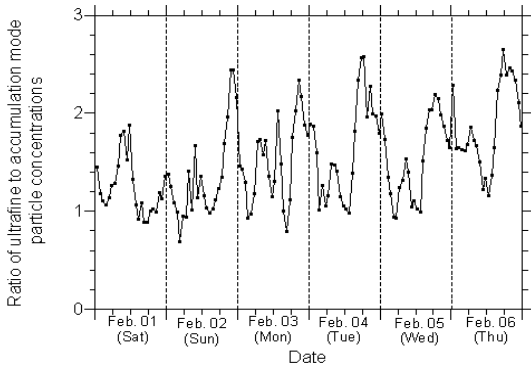


Figure 5. Variation of ratio of ultrafine particle (20–100 nm) number concentration to accumulation mode particle (100–600 nm) number concentration measured in 2003.

하였다. 특히, 피크가 형성된 늦은 밤시간대에는 2 배 이상의 차이를 나타내었다. Kim and Ahn (2005)에서는 봄철 측정 자료를 분석하여 출근 시간대에 입자의 생성이 저녁 시간대보다 많은 이유는 아침에 출근하는 차량의 급격한 증가와 더불어 아침에 내리쬐는 강한 자외선 및 심한 일교차 때문인 것으로 해석하였다. 그러나 자외선이 상대적으로 약한 겨울철에 측정된 본 연구에서도 유사한 측정결과가 나타났으므로, 향후 추가 연구를 통해 정확한 원인을 밝혀 낼 필요가 있다.

3.3 산란계수와 수 농도의 상관성

산란계수와 수 농도의 상관성을 알아보기 위하여 초미세 입자 및 축적 모드 입자의 수 농도와 함께 시간에 따른 550 nm 파장에서 입자의 산란계수의 변화를 그림 4에 나타내었다. 에어로졸 입자의 수 농도 변화는 550 nm 파장에서 산란계수 변화와 비슷한 양상을 보였다. 특히, 축적 모드 입자의 수 농도와 산란계수의 변동 폭이 비슷하고, 축적 모드 입자의 변화가 초미세 입자에 비해 산란계수의 변화와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 100 nm 이하의 초미세 입자보다 100~600 nm 크기의 축적 모드 입자가 산란계수에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미하며, 이로써 산란계수가 입자의 수 농도뿐만 아니라 입자 크기의 함수라는 사실을 확인할 수 있었다.

그림 4에서 시간 평균 산란계수를 분석해 보면,

축적 모드 입자와 초미세 입자의 수 농도가 가장 높았던 2월 6일 오전 9시경에 산란계수 또한 높게 나타났다. 그러나 일평균 산란계수와 수 농도가 항상 비례하는 것은 아니다. 대표적인 예로 2월 6일에 입자의 일평균 수 농도가 4,079 개/cm³로 가장 높았지만, 산란계수는 가장 높지 않았다. 반면, 2월 2일에 입자의 수 농도가 낮았음에도 불구하고 일평균 산란계수가 181.9 Mm⁻¹로 가장 높았던 것을 볼 수 있다. 특히, 2월 2일에 에어로졸의 산란계수가 높았던 것은 습도와 관련이 있었던 것으로 추정된다(그림 6). 그림 2의 기상조건을 보면, 2일은 상대습도가 가장 높았던 날 중의 하나로, 2일 오전 8시에 상대습도가 최고 77%까지 증가하였으며, 네펠로미터 장비 내 습도 센서 측정값도 다른 날에 비해 상대적으로 높은 값이 지속되었다. 그림 7은 시간에 따른 입경 분포의 변화를 나타낸 것인데, 상대습도가 높았던 오전 시간대에 초미세 입자의 수 농도가 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급했듯이, 오전

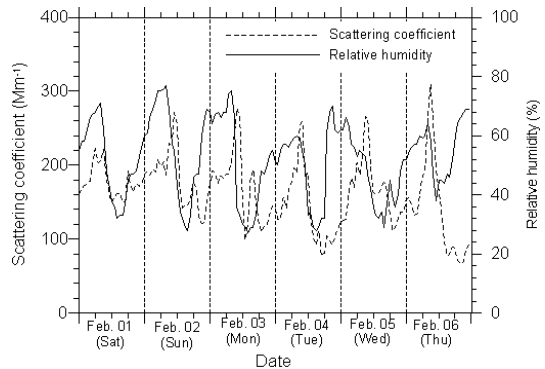


Figure 6. Variations of scattering coefficient and relative humidity during the monitoring period of 2003.

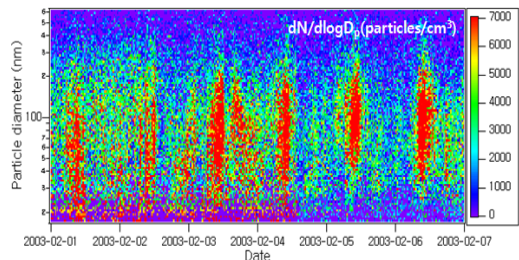


Figure 7. Variation of aerosol size distribution during the monitoring period.

시간의 높은 상대습도에 의하여 입자 생성 및 성장이 촉진되어 결과적으로 수 농도가 증가한 것으로 판단된다. 즉, 대체로 에어로졸의 수 농도가 높아지면 산란계수도 높아지는 경향을 보이지만, 산란계수는 에어로졸의 수 농도, 크기뿐만 아니라 대기 중 습도에 의해 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.

입자의 산란계수와 입경별 수 농도의 상관성을 정량화하기 위하여 산란계수와 초미세 입자, 축적 모드 입자의 수 농도의 상관도를 비교하였는데(그림 8), 각각의 결정계수(R^2)는 0.49, 0.70으로 축적 모드 입자의 결정계수가 더 높게 나타났다. 다시 말해서 산란계수는 초미세 입자보다 축적 모드 입자의 영향을 더 받는다. 산란계수가 높은 것은 그만큼 가시광선의 투과율이 감소하므로, 시정이 낮아짐을 의미하고, 시정과 관련성은 3.5에서 언급하였다.

3.4 산란계수와 수 농도의 일변화

앞의 그림 4에서 에어로졸의 산란계수 변화를 요일별로 살펴보면, 토요일과 일요일에는 평일과 비교하여 출근 시간대의 피크 값은 높지 않지만, 오후에는 오히려 주중보다 다소 높은 경향이 있다. 그러므로 주중과 주말의 산란계수의 일변화 차이가 관찰되는지 살펴보기 위하여 평일, 토요일 및 일요일의 산란계수 일변화를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 평일과 토요일의 경우, 산란계수의 피크 값이 출근 시간대인 오전 9시에 정확하게 나타난 반면, 일요일에는 오전 11시에 나타났다. 또한, 평일에는 오후 시

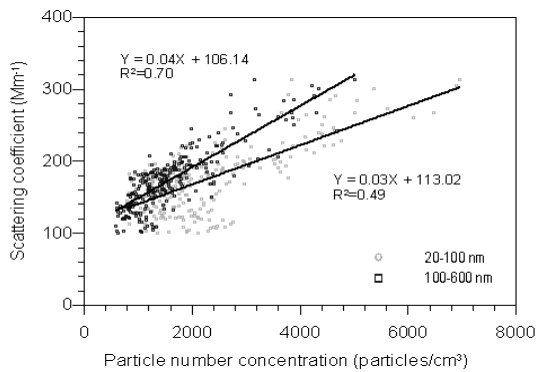


Figure 8. Relationships between scattering coefficient and number concentrations of ultrafine particles and accumulation mode particles.

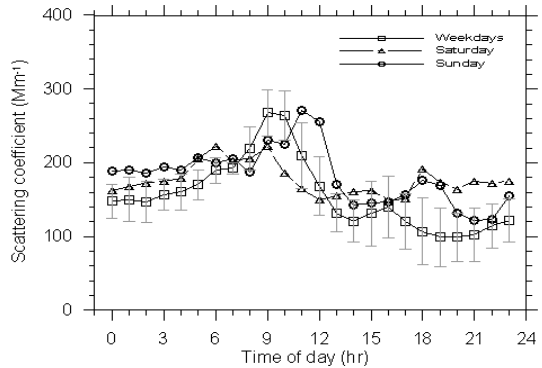


Figure 9. Comparison of diurnal variations of scattering coefficient among weekdays, Saturday, and Sunday.

간대에 산란계수가 크게 감소하였으나, 주말에는 오후 시간대에도 산란계수가 크게 낮아지지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉, 도심지역에서 산란계수에 영향을 미치는 주요 요인이 자동차라고 가정할 때, 축적 모드 입자의 수를 고려한다면 주말에는 출근 시간대에 차량 운행이 집중되지 않고 분산되는 경향이 있으며, 오후에도 나들이 차량 등에 의하여 평일에 비해 차량 운행이 많았을 가능성을 암시한다. 특히, 주말에는 주변지역으로부터 2차적으로 유입되는 에어로졸의 영향을 무시할 수 없다는 것을 간접적으로 의미한다.

에어로졸 산란계수와 입자 수 농도의 평균 일변화를 함께 비교해 보면(그림 10), 20~600 nm 입자의 수 농도와 산란계수의 변화 양상이 비교적 비슷하다. 입자의 수 농도는 새벽 3시에 2,581 개/cm³로 가장 낮았고, 오전 9시에 8,186 개/cm³로 가장 높았다. 오후 3시에 20~600 nm 입자의 수 농도가 2,698 개/cm³로 감소한 뒤, 다시 증가하여 오후 6시에 3,231 개/cm³까지 증가하는 일변화를 나타낸다. 전체적으로 초미세 입자의 수 농도가 축적 모드 입자의 수 농도와 비슷하거나 높았고, 특히 오후 8시와 9시 사이에는 2배 정도 차이가 발생하였다(평균 수 농도비 1.4). 피크가 나타난 오전 9시에 초미세 입자의 1시간 평균 수 농도는 4,985 개/cm³로 축적 모드 입자의 수 농도 3,202 개/cm³의 약 1.6배이다. 측정기간 동안의 평균 수 농도비인 약 1.4와 비교하여 약간 높은 수치인 것으로 보아 초미세 입자의 배출이 축적 모드 입자의 증가보다 많다는 것을 의미한다.

한편, 산란계수의 일변화는 오전 9시에 최고로 높았으며, 오후에는 초미세 입자보다 축적 모드 입자의 변화 경향과 비슷하였다. 오후 8시에 최저값을 나타낸 후에는 다시 증가하였다. 특히, 오전 9시에 산란계수가 가장 높은 것은 광산란 유효 크기 입자의 수가 이 때 가장 많다는 것을 의미하며, 앞에서 설명한 바와 같이 출근 시간대인 동시에 비교적 낮은 대기층 내에 누적된 차량 배출 물질과 적당한 습도 및 태양광의 영향으로 생성된 2차 에어로졸로 인해 입자 수와 산란계수가 크게 증가하는 것으로 생각한다(Willeke and Brochmann, 1977). 그러나 퇴근 시간에는 출근 시간에 비해 급격한 차량 증가와 자외선의 영향이 덜하므로 초미세 입자에 비해 축적 모드 입자가 상대적으로 덜 증가하는 것으로 보인다. 즉, 출근 시간 이후에는 대기 경계층이 상승하고 대기 중 오염물질이 쉽게 확산되어 오후에는 입자의 수 농도와 산란계수가 낮아지게 된다. 그리고 밤에는 대기층이 다시 안정되어 오염물이 축적되어서 입자의 수 농도와 산란계수가 다시 증가하는 것이다. 전반적으로 초미세 입자에 비해 축적 모드 입자의 일변화 폭은 더 적었다. 새벽 3시에 입자의 수 농도가 낮은 것은 하루 중 교통량이 가장 적으므로 에어로졸의 배출량이 적고, 태양광이 없으므로 대기오염물질로부터 광화학적 2차 에어로졸이 생성되지 않기 때문이다(Bae *et al.*, 2007).

3.5 산란계수와 시정의 관계

시정이란 대기가 빛을 투과시키는 정도를 의미하며, 사람의 눈으로 물체를 식별할 수 있는 최대한의

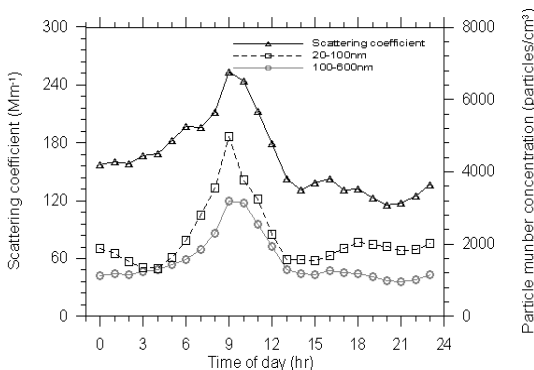


Figure 10. Mean diurnal variation of particle number concentrations and aerosol scattering coefficient.

거리(가시거리)를 의미한다. Dzubay *et al.* (1982)과 Tsay *et al.* (1991)에 의하면, 대기 중에 떠있는 기체 상태의 물질보다는 입자 상태 물질의 산란이 시정 악화에 가장 크게 기여한다. 대기 입자들 일부의 성분은 수분을 잘 흡수하는 흡습성(hygroscopic) 물질들로 이들이 수분을 흡수하여 빛의 산란에 효과적인 크기의 입자로 성장하여 시정을 악화시키는데 (Sloane and White, 1986), 특히 0.1~1.0 μm 크기의 작은 입자들은 가시광선 파장과 크기가 비슷하여 단위질량당 빛의 산란효율이 가장 크다(McCartney, 1976; Friedlander, 1977). 본 연구기간 동안의 시정 자료는 기상청 목측 값을 이용하였다.

2003년 2월 6일의 경우 오전 9시의 시정이 15 km로 관측되었고, 초미세 입자의 수 농도는 7,612 개/cm³, 축적 모드 입자의 수 농도는 5,608 개/cm³로 오후 6시 이후 농도보다 각각 약 3.4배, 약 6배이고, 산란계수가 322.4 Mm⁻¹로 가장 높았다. 반면, 시정이 20 km로 증가된 오후 6시~9시까지는 초미세 입자의 평균 수 농도는 2,289 개/cm³, 축적 모드 입자의 평균 수 농도는 954 개/cm³로 오전 9시와 비교하여 평균 수 농도가 낮았으며, 산란계수 또한 73.4 Mm⁻¹로 낮았다. 향후 연구에서는 산란계수와 함께 흡수계수도 측정하여 시정 값을 계산하여 목측 시정 값과 비교할 필요가 있다.

앞에서 논의된 바에 의하면, 산란계수에 영향을 미치는 것은 초미세 입자보다 축적 모드 입자 영역이며, Bäumer *et al.* (2008)의 연구에서도 시정 감소에 영향을 미치는 것은 300 nm 이상의 작은 입자들의 수 농도 증가라고 하였다. 또한, Lee *et al.* (1995)의 연구에서도 0.1~2.0 μm의 작은 입자에 해당하는 황산암모늄염, 질산암모늄염 등의 무기 이온염이 빛의 산란, 흡수에 효과적이기 때문에 시정장애에 크게 영향을 끼친다고 하였다.

그림 11은 측정기간 동안 낮과 밤의 시정과 산란계수의 상관성을 나타낸 것이다. 산란계수와 시정은 반비례 관계로 산란계수가 클수록, 즉 대기 중 에어로졸의 수가 증가하거나 산란효율이 증가하는 방향으로 에어로졸의 크기 또는 조성이 변하여 빛을 산란시키는 정도가 커질수록 시정이 감소하는데, 에어로졸에 의한 산란계수가 약 100 Mm⁻¹ 만큼 증가할 때 시정이 약 4~5 km 만큼 감소하는 경향을 보였다. 시정은 10~20 km 범위를 가지며 낮보다는 밤에 시정

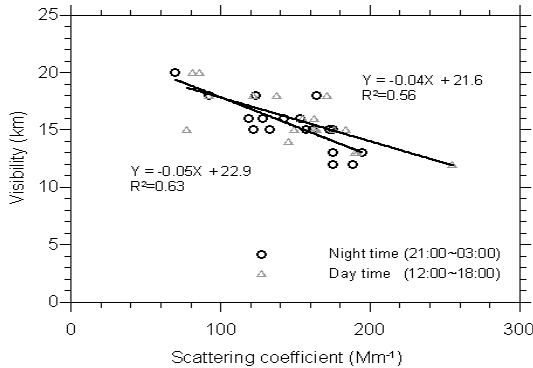


Figure 11. Correlation between scattering coefficient and visibility during daytime and nighttime.

과 산란계수의 상관성이 높았지만, 그 차이는 크지 않았다. 또한, 서울 대기 에어로졸의 산란 특성을 연구한 Kim (1988)은 야간의 산란계수와 시정은 큰 의미를 가지지 않는다고 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시지역에서 에어로졸이 광산란에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2003년 2월 KIST에서 네펠로미터와 SMPS를 이용하여 에어로졸의 산란계수와 20~600 nm 범위인 입자의 입경별 수 농도를 측정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 초미세 입자와 축적 모드 입자의 일평균 수 농도는 각각 2,170 개/cm³, 1,521 개/cm³로 초미세 입자가 약 1.4배 더 높았다. 오전 6시~9시에 초미세 입자의 배출이 활발하였으며, 그 영향으로 축적 모드 입자도 증가하였다. 이러한 축적 모드 입자의 수 농도가 증가한 것은 도로에서 초미세 입자의 이동뿐만 아니라, 주변지역으로부터 2차적으로 유입되는 에어로졸의 영향도 있을 것이다. 출·퇴근 시간대에 초미세 입자의 수 농도가 급격히 증가하는 것으로 보아 자동차 배출의 영향을 받는다고 할 수 있다. 그러나 오전 시간대의 입자 배출의 영향이 오후 시간대보다 훨씬 크게 나타났다.

둘째, 입자의 산란계수는 수 농도와 비슷한 변화 경향을 나타내며, 마찬가지로 오전 9시에 피크를 형성하였다. 즉, 자동차 배출에 의해 입자의 수 농도가

증가하고 결과적으로 산란계수도 증가하는 것인데, 오후에는 대기 경계층 상승에 따른 희석에 의해 산란계수가 크게 증가하지 않았다.

셋째, 초미세 입자보다 축적 모드 입자가 산란계수와 상관성이 더 높았다. 즉, 100 nm 이하의 초미세 입자보다는 100~600 nm 범위의 축적 모드 입자가 광산란에 더 많은 영향을 주게 되고, 결과적으로 시정은 초미세 입자보다 축적 모드 입자의 영향을 더 받는다고 할 수 있다.

국내에서는 SMPS를 이용한 다양한 에어로졸 연구가 활발히 진행 중이지만, 네펠로미터와 관련된 시정 연구는 국외에 비해 아직 활발하지 못한 실정이다. 단기간의 측정자료로 에어로졸의 수 농도와 산란계수의 특징을 분석하는데 어려움이 있지만, 이를 바탕으로 향후 네펠로미터를 이용하여 계절에 따른 시정의 변화를 파악할 필요가 있으며, 에어로졸의 흡수계수를 함께 측정할 경우 에어로졸이 시정에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Anderson, T.L., Covert, D.S., Marshall, S.F., Laucks, M.L., Charlson, R.J., Waggoner, A.P., Ogren, J.A., Caldow, R., Holm, R.L., Quant, F.R., Sem, G.J., Wiedensohler, A., Ahlquist, N.A., and Bates, T.S. (1996). Performance characteristics of a high-sensitivity, three-wavelength, total scatter/backscatter nephelometer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, 967-986.

Anderson, T.L. and Ogren, J.A. (1998). Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer, *Aerosol Science and*

- Technology*, 29, 57-69.
- Bae, G.N., Hu, S.Y., Lee, S.B., Ahn, M.H., Park, D.H., and Hwang, J.H. (2007). Ultrafine particle level at a roadside of Seoul in spring, *Particle and Aerosol Research*, 3(1), 29-40.
- Bae, G.N., Kim, M.C., Lim, D.Y., Moon, K.C., and Baik, N.J. (2003). 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.
- Bäumer, D., Vogel, B., Versik, S., Rinke, R., Möhler, O., and Schnaiter, M. (2008). Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany, *Atmospheric Environment*, 42, 989-998.
- Carr, S.B. and Burridge, M.A. (2004). The operation of a three wavelength nephelometer and some measurements made at Jabiru during 2002, *Defence Science and Technology Organisation*, 1-18.
- Delene, D.J. and Ogren, J.A. (2002). Variability of aerosol optical properties at four north American surface monitoring sites. *Journal of the Atmospheric Science*, 59, 1135-1150.
- Dzubay, T.G., Stevens, R.K., and Lewis, C.W. (1982). Visibility and aerosol composition in Houston, Texas, *Environmental Science and Technology*, 16, 514-525.
- Friedlander, S.K. (1977). *Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior*, New York, John Wiley and Sons, Inc.
- Hoppel, W.A., Fitzgerald, J.W., Frick, G.M., Larson, R.E., and Mack, E.J. (1990). Aerosol size distributions and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 95(D4), 3659-3686.
- Hung, N.T.Q., Bae, G.N., and Lee, S.B. (2010). Ultrafine particle and gas contamination of urban air in Seoul, Korea, during winter, *International Journal of Environment and Pollution*, 41(1/2), 3-20.
- Jang, H.S. (2000). *Study on the aerosol size and extinction coefficient variations associated with relative humidity*, Master Thesis, Seoul National University, p. 42.
- Kim, J., Choi, B.C., Jefferson, A., and Moon, K.C. (2003). Aerosol light scattering absorption measured at Gosan, Korea in spring of 2001, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 39(2), 239-250.
- Kim, J., Oh, S.N., Chun, Y.S., and Cha, J.W. (2001). Physical, chemical, and optical properties of aerosols in Korea: Long-range transport from the Asian continent, *Preprints A Millenium Symposium on Atmospheric Chemistry, 81st American Meteorological Society Annual Meeting*, 14-19.
- Kim, K.W., He, Z., and Kim, Y.J. (2004). Physico-chemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period, *Journal of Geophysical Research*, 109(D19), 15-18.
- Kim, P.S. (1988). Physical characteristics of atmospheric aerosol in Seoul: Scattering of visible light, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 4(2), 28-37.
- Kim, P.S., Kim, Y.J., Lee, Y.H., Cho, S.H., and Ahn, S.T. (1986). A study on the characteristics of urban aerosol concentration in the size range of 0.01~1.0 μm , *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 2(2), 41-50.
- Kim, Y.M. and Ahn, K.H. (2005). Monitoring of airborne fine particle using SMPS in Ansan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(3), 295-301.
- Kittelson, D.B. (1988). Engines and nanoparticles, *Journal of Aerosol Science*, 29, 575-585.
- Koutsenogii, P.K. and Jaenicke, R. (1994). Number concentration and size distribution of atmospheric aerosol in Siberia, *Journal of Aerosol Science*,

- 25(2), 377-383.
- Lee, J.H., Baik, N.J., Kim, Y.P., and Moon, K.C. (1995). Visibility study in Seoul on Aug., 1993, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 11(3), 291-298.
- Lee, S.B. and Bae, G.N. (2010). Characteristics of air pollution at a junction area contaminated with vehicle emissions, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 18(4), 48-53.
- Lee, Y., Cha, J.W., Kim, Y.K., Lee, H.W., Park, J., Jeon, B., Cho, C., and Chung, H.S. (2006). Seasonal aerosol optical properties at Anmyon-do global atmosphere watch observatory, Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(5), 265-275.
- McCartney, E.J. (1976). *Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles*, New York, John Wiley and Sons, Inc..
- McMurry, P.H. and Stolzenburg, M.R. (1989). On the sensitivity of particle size to relative humidity for Los Angeles aerosols, *Atmospheric Environment*, 23(2), 497-507.
- Moon, K.C., Shim, S.G., Baik, N.J., and Kim, S.J. (1992). *A study on the Seoul smog phenomena (I)*, Report of Korea Institute of Science and Technology.
- Oh, H.S. and Yoon, S.C. (1996). Characteristics of air pollutions and meteorological field affecting the visibility impairment in Seoul, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 32(1), 131-138.
- Patrick, W., Hamasha, K., Moosmüller, H., Sheridan, P.J., and Ogren, J.A. (2005). Towards aerosol light-absorption measurements with a 7-wavelength aethalometer: Evolution with a photoacoustic instrument and 3-wavelength nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 39, 17-29.
- Pitchford, M.L. and McMurry, P.H. (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.
- Shah, J.J. (1981). *Measurements of carbonaceous aerosol across the U.S.: Source and role in visibility degradation*, Ph.D. Thesis, Oregon Graduate Center, Beaverton, Oregon.
- Sheridan, P.J., Delene, D.J., and Ogren, J.A. (2001). Four years of continuous surface aerosol measurements from the department of energy's atmospheric radiation measurement program southern great plains cloud radiation testbed site. *Journal of Geophysical Research*, 106 (D18), 20735-20747.
- Shim, S., Yoon, Y.J., Yum, S.S., Cha, J.W., Kim, J.H., Kim, J., and Lee, B.Y. (2008). Nephelometer measurement of aerosol scattering coefficients at Seoul, *Atmosphere*, 18(4), 459-474.
- Shin, D.S., Kim, J.S., Cha, J.W., Kim, S.J., and Bang, S.Y. (2000). Nephelometer measurement of aerosol distribution and visibility in a background area, *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, 315-317.
- Sloane, C.S. and White, W. (1986). Visibility: An evolving issue, *Environmental Science and Technology*, 20(8), 760-766.
- Tagen, L., Laci, A.A., and Fung, I. (1996). The influence on climate forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols from distributed soils. *Nature*, 380, 419-422.
- Tsay, S.C., Stephens, G.L., and Greenwald, T.J. (1991). An investigation of aerosol microstructure on visual air quality, *Atmospheric Environment*, 25A, 5(6), 1039-1053.
- Wang, J., Christopher, S.A., Brechtel, F.J., Kim, J., Schmid, B., Russell, P.B., and Holben, B.N. (2003). Geostationary satellite retrievals of aerosol optical thickness during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 108(D23), 8657-8671.
- Wichmann, H.H. and Peters, A. (2000). Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particle exposure, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 358, 2751-2769.

- Willeke, K. and Brochmann, J.E. (1977). Extinction coefficients for multimodal atmospheric particle size distributions, *Atmospheric Environment*, 11, 995-999.
- Yan, P., Pan, X., Tang, J., Zhou, X., Zhang, R., and Zeng, L. (2009). Hygroscopic growth of aerosol scattering coefficient: A comparative analysis between urban and suburban sites at winter in Beijing, *China Particuology*, 7, 52-60.