

## 네펠로미터로 관측한 서울의 에어러솔 산란계수 특성

심성보<sup>1</sup> · 윤영준<sup>2</sup> · 염성수<sup>1,\*</sup> · 차주완<sup>1</sup> · 김종환<sup>1</sup> · 김 준<sup>1</sup> · 이방용<sup>2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>2</sup>한국해양연구원 부설 극지연구소

(2008년 10월 28일 접수; 2008년 12월 22일 승인)

## Nephelometer Measurement of Aerosol Scattering Coefficients at Seoul

Sungbo Shim<sup>1</sup>, Young Jun Yoon<sup>2</sup>, Seong Soo Yum<sup>1,\*</sup>, Joo Wan Cha<sup>1</sup>,  
Jong Hwan Kim<sup>1</sup>, Jhoon Kim<sup>1</sup> and Bang-Yong Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University

<sup>2</sup>Korea Polar Research Institute, KORDI

(Manuscript received 28 October 2008; in final form 22 December 2008)

### Abstract

Aerosol scattering coefficients for three different wavelengths ( $\lambda = 450, 550, 700$  nm) are measured almost continuously by a nephelometer in Seoul for a period of 13 months (February 2007-February 2008), which includes two weeks break in August 2007 for measurements at Daegwallyeong and YoungJongdo. The mean of the daily average scattering coefficients at  $\lambda = 550$  nm is  $194.1 \pm 144.2$  Mm<sup>-1</sup> and the minimum and maximum are 14.3 Mm<sup>-1</sup> and 998.1 Mm<sup>-1</sup>, respectively. The scattering coefficient shows a general increasing trend with atmospheric relative humidity (RH). When the data are classified according to weather conditions, the days with no major weather events show the smallest scattering coefficient and also the lowest RH. Surprisingly haze/fog days show the largest scattering coefficient and Asian dust days comes in second. Although the variation is large within a season, winter shows the largest and autumn shows the smallest scattering coefficient. The average Ångström exponent is  $1.40 \pm 0.32$  for the entire Seoul measurement. As expected, Asian dust days show the smallest Ångström exponent and haze/fog days are the next, suggesting more efficient hygroscopic growth of aerosols for this weather condition. Aerosol scattering coefficient seems to show better correspondence with CCN concentration rather than total aerosol concentration, which may indicate that CCN active aerosols are also good scattering aerosols.

**Key words:** nephelometer, aerosol scattering coefficient, Ångström exponent, Seoul

### 1. 서 론

태양으로부터 방출되는 복사에너지는 지구 대기를 통과하면서 대기에 흡수 산란되어 지표에 도달하게 되는데, 이 과정에서 에어러솔이 직접적 또는 간접적으로 감쇄계수에 영향을 준다. 직접적으로는 에어러솔의

크기와 수농도, 광학성질이 흡수와 산란에 영향을 준다. 간접적으로는 에어러솔 입자 중 일부가 구름응결 핵(cloud condensation nuclei, CCN)으로 작용해 구름의 미세물리적 성질은 물론 역학적 발달과 강수효율을 변화시켜 구름에 의한 태양복사의 반사효율을 결정한다 (Twomey, 1977; Albrecht, 1989). 이와 같이 에어러솔에 의한 흡수와 산란과정은 대기 복사 평형에 중요한 역할을 하며 기후변화 연구 및 계산에 중요한 인자로 작용한다(Anderson *et al.*, 1996; Charlson *et al.*, 1992).

IPCC 보고서에 따르면, 에어러솔에 의한 산란효과와 인위적 CCN의 증가에 의한 구름의 반사율 증가는 기후변화에 있어 냉각 효과에 기여하는 영향력이 매우

\*Corresponding Author: Seong Soo Yum, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea.  
Phone: +82-2-2123-5681, fax: +82-2-365-5163  
E-mail: ssum@yonsei.ac.kr

클 것으로 추정되나 그 정도가 아직 불분명하다(IPCC, 2007). 그 이유 중의 하나는 에어러솔 농도가 시간적, 공간적으로 매우 크게 변화하기 때문이며 따라서 에어러솔이 기후 변화에 미치는 영향력에 대한 정확한 이해와 예측을 위한 첫 단계로 에어러솔의 광학특성에 대한 기본적인 관측이 선행되어야 한다. 특히 도심지역은 청정지역에 비해 많은 교통량과 산업 활동으로 인해 높은 에어러솔 농도를 보인다. 이런 인위적인 에어러솔은 도시 대기 중에 체류하거나 이동하면서 빛의 산란과 흡수에 영향을 주며, 그 수농도와 구성요소는 출퇴근 시간 및 계절과 기상상태에 따라 상당히 변화가 심하다. 이런 미세입자에 의한 산란은 도심지역 시정감쇄의 주요 원인이 된다.

에어러솔의 산란효과에 대한 측정은 전 세계적으로 여러 선진 연구 기관에서 네펠로미터라는 기기를 이용하여 수행한 바 있으며(Guyon *et al.*, 2003; Adam *et al.*, 2004; Doherty *et al.*, 2005; Chamailard *et al.*, 2006), 국내에서는 제주도 고산과 광주에서 주로 황사 사례에 대한 에어러솔의 광학특성 등과 같은 연구(Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006)와 서울 지역 산란에 따른 시정 연구(Baik *et al.*, 1996) 등이 이루어진 바 있다.

본 연구는 도심 지역 에어러솔의 광학적 특성을 살펴

보고자 하는 기초 연구로서, 네펠로미터(Nephelometer)를 이용하여 서울지역의 산란계수를 1년 1개월간 상시 측정하고 다른 장비로 관측한 에어러솔 특성과 비교하였다. 단지 1년 남짓의 자료로 계절과 기상상태에 따른 에어러솔 산란 특성의 변화를 파악하는 것은 통계적 신뢰성을 보장하기 어려우나 장기적인 자료 축적의 첫 단계로서 비교분석을 위한 기초자료를 제공한다는 데 큰 의미가 있을 것이다.

## 2. 관측 방법

### 2.1 장비 소개와 측정 원리

본 연구에서 사용한 3파장 산란계 네펠로미터는 미국 TSI사(model 3563)에서 제작한 것으로 3개의 파장( $\lambda$ ) 450 nm, 550 nm, 700 nm에 대한 총산란계수(Total scattering coefficient)와 후방산란계수(Back scattering coefficient)를 산출한다. (앞으로 산란계수는 총산란계수를 뜻한다.) 이 장비를 간단히 소개하면 Fig. 1에 보인 바와 같이 크게 흡입부, 산란부, 측정부로 구분된다.

흡입부의 주요 요소는 자동밸브(Automated Valve)와 HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터로 이루어져 있다. 자동밸브를 조정하여 55분 동안은 정구

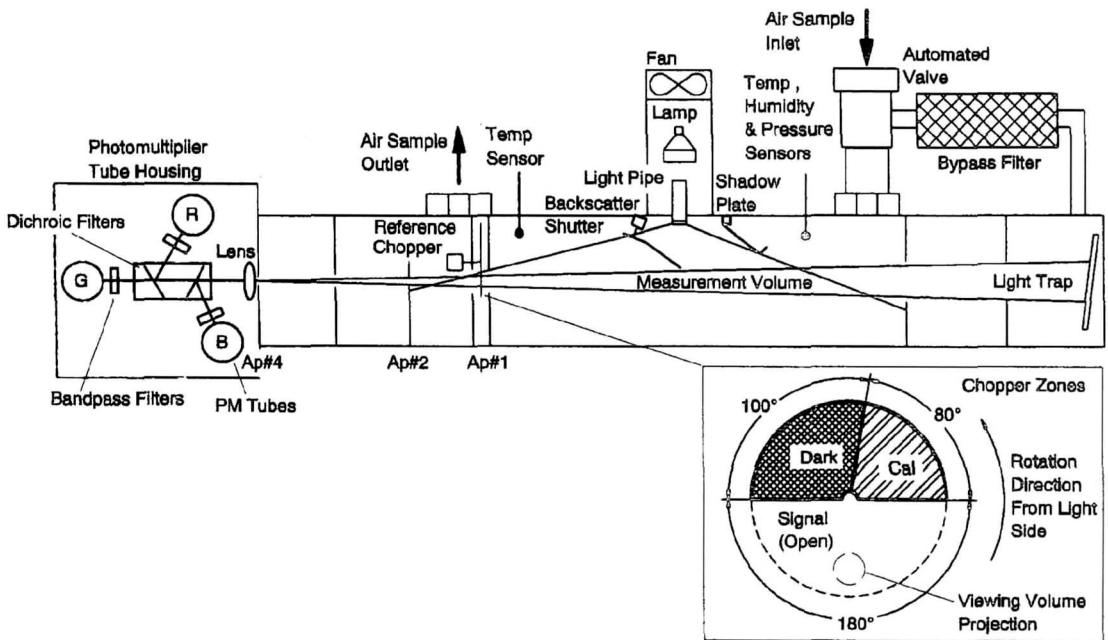


Fig. 1. Design features of the TSI 3563 Integrating Nephelometer (Anderson *et al.*, 1996).

모드(normal mode)로 에어러솔을 포함한 표본공기를 직접 측정하고, 그 후 5분 동안은 제로모드(zero mode)로서 HEPA 필터로 에어러솔을 제거한 공기를 측정한다. 제로모드로 장비 자체의 산란계수(Noise scattering coefficient)를 측정하고, 이를 바탕으로 정규모드에서 관측된 산란계수 값을 보정한다.

산란부의 주요 요소는 할로겐 램프, 후방산란서터(Backscattering Shutter), 참조변환기(Reference Chopper)로 이루어져 있다. 흡입부를 통하여 받아들인 표본공기를 할로겐 램프로 산란시킨다. 이때 후방산란서터가 회전하며 산란계수(7°에서 170°)와 후방산란계수(90°에서 170°)로 구별시켜 준다. 참조변환기는 원반의 형태로 하단 180° 영역은 모든 빛을 통과시켜 측정부로 전달시켜 주는 신호부(signal section)이며, 상부 100° 영역(dark section)은 모든 빛을 차단시켜서 장비의 오차를 점검하고, 나머지 80° 영역은 램프의 안정도를 측정할 수 있는 검정부(calibration section)로 분할된다. 참조변환기는 1초에 23회 회전한다.

측정부의 주요 요소인 photomultiplier tubes(PMT)는 산란부를 통해서 들어온 산란입자량 즉 광자 수(photon counts)를 파랑색(450 nm), 녹색(550 nm), 적색(700 nm)의 세 파장에 대해서 각각 측정한다.

네펠로미터를 이용하여 산란계수를 구하는 과정은 간단한 형태의 1차 방정식으로 나타낼 수 있다(Anderson *et al.*, 1996).

$$\sigma_{sp} = K_2 C_m - W - \sigma_{s-air}(T, P) \quad (1)$$

$$\sigma_{bsp} = K_2 C_m - W_b - K_4 \sigma_{s-air}(T, P) \quad (2)$$

$$W = K_2 C_z - \sigma_{s-z} \quad (3)$$

$$W_b = K_2 C_{zb} - K_4 \sigma_{s-z} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_{sp}$  은 입자산란계수,  $C_m$ 는 광자 수로서  $K_2$  와  $W$ 와의 관계식으로 나타난다. 아래첨자  $b$ 는 후방산란을 의미하며 아래첨자  $z$ 는 제로모드에서 측정된 값을 의미한다.  $\sigma_{s-air}(T, P)$  는 건조대기 온도  $T$ , 압력  $P$  상태에서 알려진 대기산란계수를 뜻한다. 네펠로미터가 측정된 광자 수를 산란계수로 변환하기 위해서  $K_2$ ,  $K_4$  와  $W$ 의 값을 알아야 하기 때문에 검정(calibration) 과정이 선행된다. 검정 과정에서는 이미 알려진 약한/강한 산란계수를 갖는 기체(무에어러솔공기/ $CO_2$ )를 이용하

여 정상화된 광자 수(normalized photon counts)를 측정하고, Fig. 2에서와 같이 산란계수와 1차 선형관계를 만족한다는 가정하에 기울기  $K_2$ 를 결정한다(Anderson *et al.*, 1996).  $K_4$ 는  $\sigma_{bsp}$ 와  $\sigma_{sp}$ 의 비율로 약 0.5 값을 갖는다.  $W$ 는 제로모드에서 즉 HEPA 필터를 통과한 무에어러솔 상태에서의 장비 벽면의 산란 값을 나타낸다. 결과적으로 네펠로미터는 3파장 각각에 대한  $\sigma_{sp}$ 와  $\sigma_{bsp}$ 의 6개 값을 생산한다. 본 연구에서는 위와 같은 개념을 활용하여 구성된 TSI사의 기기검정프로그램(calibration software)을 사용하여 세 번(5월, 7월, 9월)의 기기검정을 실시하였다.

## 2.2 관측 장소 및 기간

본 연구에서는 서울 서대문구 신촌동에 위치한 연세대학교 과학관 6층(N37°33', E126°56')에 3파장 산란계 네펠로미터를 설치하여 2007년 2월부터 2008년 2월까지 상시 관측하였다. 또한 2007년 8월 16일부터 21일까지는 구 대관령기상대(N37°40', E128°43')에서, 2007년 8월 22일부터 29일까지는 영종도 인천공항 연안(N37°27', E126°21')에서 특별관측을 실시하였다.

이와 더불어 같은 장소와 기간에 CPC(Condensation Particle Counter, TSI사, model 3010, 3025, 3781)로 에어러솔 총 수농도를 측정하였다(최소직경: model3010 > 10nm, model3025 > 3nm, model3781 > 7nm). 또한 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, TSI사, model

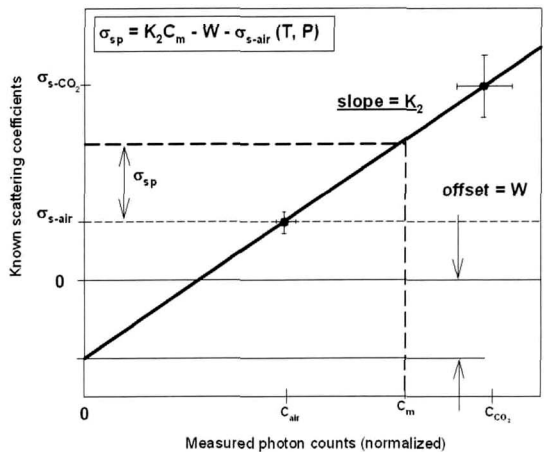


Fig. 2. Schematics of nephelometer calibration based on the assumption of a linear response to changing scattering coefficient. Standard dry air and  $CO_2$  were used in experiments (Anderson *et al.*, 1996).

**Table 1.** Average scattering coefficient ( $\lambda=550$  nm) and AWS RH for each weather condition.

	Cases	Average	Min.	Max.	RH (%)	Number of days
	All	194.1±144.2	14.3	998.1	62.0±14.6	249
	No event	124.1±62.3	19.6	278.3	54.3±12.8	139
<sup>1</sup> Seoul	<sup>2</sup> Haze/Fog	373.7±149.8	149.2	998.1	67.6±10.0	52
	<sup>3</sup> Strong rain	143.8±140.0	14.3	666.1	80.7±6.0	26
	<sup>4</sup> Weak rain	228.6±126.2	18.0	483.2	73.1±8.5	26
	Asian dust	327.7±74.4	195.0	419.5	62.0±7.5	6

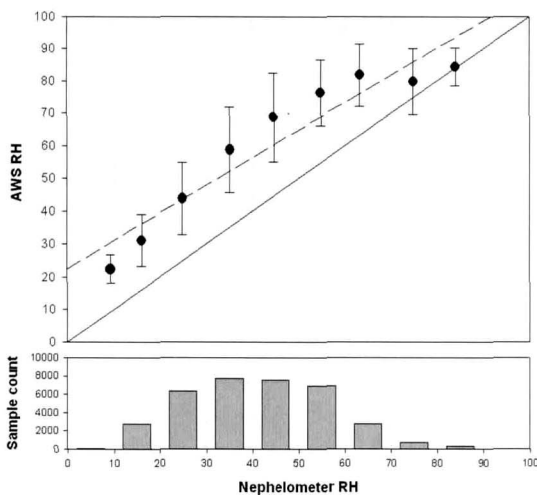
Unit :  $Mm^{-1}$ <sup>1</sup>Measured by Nephelometer (TSI Inc model 3563) at  $\lambda=550$  nm.<sup>2</sup>Haze/Fog cases were defined as being fogs continuously more than 12 hrs in a day.<sup>3</sup>Defined as the daily accumulated rainfall being larger than 10mm.<sup>4</sup>Defined as the daily accumulated rainfall being from 1 to 10 mm.

3080)로 직경 10nm-500 nm 구간의 에어러솔 크기분포를 측정하였으며, DMT사의 CCN counter를 이용하여 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0% 과포화도에 대한 CCN 수농도를 측정하였다. 각 관측장비로 측정된 값을 네펠로미터 관측값과 비교하여 서로의 상관성을 알아 보았다.

### 3. 결 과

#### 3.1 습도와의 연관성

산란계수는 주변 대기의 습도에 영향을 받는다. 일



**Fig. 3.** Comparison of the measured RH by an AWS and the RH measured inside the TSI 3563 Integrating Nephelometer at Yonsei University (Seoul, Korea), shown together with the sample count for each 10% RH bin. The solid line indicates the 1:1 line and the dashed line is the linear regression line for the data.

차적으로 수증기에 의한 빛의 굴절률이 산란계수에 직접적으로 영향을 주며, 이차적으로 수증기가 흡습성이 강한 에어러솔에 달라 붙어 입자의 성장에 기여함으로써 산란계수에 영향을 준다(Hoppel *et al.*, 1990). 네펠로미터는 장비의 내/외부 온도 차로 생기는 내부 벽면의 응결에 의한 산란 오차를 최소화하기 위해 자체 히터가 내장 되어 있다. 그러나 이는 표본 에어러솔을 건조시키게 되므로 실제 습도보다 과소 측정된다. Fig. 3은 관측기간 동안 장비가 위치한 건물의 옥상에 설치한 AWS로 측정된 습도 자료와 네펠로미터 장비 내 습도 센서의 측정 값을 비교한 것으로서, 실선은 1:1 선을 나타내며 파선은 각 점에 대한 선형회귀선이다. 장비 내 상대습도(RH)와 대기 RH의 전체 평균값은 20%의 차이를 보였으나 그 차이는 RH가 높을수록 줄어드는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 Guyon *et al.* (2003)의 장비 내 RH 15% 감소와 유사한 결과라 할 수 있다.

Fig. 4는 관측 기간 동안의 일평균 산란계수( $\lambda = 550$  nm)를 기상상태에 따라 구분하여 대기에서 관측한 AWS RH의 함수로 나타낸 것이며, Table 1은 각 기상상태에 대한 평균을 보인 것이다. 각 기상상태의 구분은 기상청 발표를 따른다. 전체적으로 볼 때,  $\sigma_{sp}$ 는 RH에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이다가 관측된 RH의 상한값(~90%)에 가까워지면 오히려 다시 감소하는 양상을 보인다. 기상상태에 따른 구분을 보면, 무사례일(no event)의  $\sigma_{sp}$ 가 가장 낮은 경향을 보이며, 강한 강수일(heavy rain)의  $\sigma_{sp}$ 가 두 번째로 낮았다. 강한 강수일의 RH가 가장 높게 측정되었음에도 불구하고 (Table 1)  $\sigma_{sp}$ 가 낮은 것은 강수에 의한 세정효과로 에어러솔의 양이 줄어든 때문으로 추정되며 Fig. 4에서

RH의 상한값(~90%)에 가까워질 때  $\sigma_{sp}$  평균값이 줄어드는 것도 대부분 강한 강수일의 낮은  $\sigma_{sp}$  때문인 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 강수의 세정효과로 인한 산란계수의 감소는 외국의 선행연구 사례(Guyon et al., 2003)에서도 잘 나타나는데, 아마존 건기 산불 발생기간 동안에 일평균 산란계수가  $16 \text{ Mm}^{-1}$ 에서  $654 \text{ Mm}^{-1}$ (중간값:  $91 \text{ Mm}^{-1}$ )의 변화를 보인데 반해 우기에는 산불과 같은 심각한 에어러솔 생성원의 부재와 더불어 강수로 인한 세정효과로 산란계수가  $0.9 \text{ Mm}^{-1}$ 에서  $30.6 \text{ Mm}^{-1}$ 의 급격한 감소를 보였다 (Table 2).

특이한 것은 Fig. 4에서  $\sigma_{sp}$ 가 아주 높은 값을 보인 날에 연무/안개(haze/fog)로 분류된 날들이 많이 포함되어 이 때의 평균값이 황사일 평균보다도 높았다 (Table 1). 연무/안개일은 기상청 자료에 근거하여 서울지역에 안개가 하루 중 12시간 이상인 날들로 구분하였다. 연무/안개일의 RH와 황사일의 RH는 큰 차이가 없으나 (67.6% vs. 62.0%, Table 1) 각각의 경우 입자들의 흡습성장율(hygroscopic growth rate)에는 큰 차이가 있을 수 있다. Carrico et al. (2003)은 ACE-Asia 기간 중의 동북아시아 해양 선박관측을 통해 황사입자들의 흡습성장율이 가장 낮았고, 대부분의 오염된 기단의 에어러솔들이 무기염 입자들의 흡습성장 곡선에

서 흔히 볼 수 있는 조해상대습도(deliquescence relative humidity, DRH)에서의 급격한 흡습성장(Seinfeld and Pandis, 1998)이 아니라, 이력현상대(hysteresis loop)에서 볼 수 있는 흡습성장율을 가진다는 것을 보였다. Fitzgerald et al. (1982)도 비슷한 결과를 얻은 바 있다. 즉 오염된 기단의 에어러솔들은 RH가 DRH에 이르지 않더라도 일정한 정도의 흡습성장을 경험한 것들이라는 것이다. 이를 통해 유추해 볼 수 있는 것은 서울의 연무/안개일에도 에어러솔이 비슷한 흡습성장을 경험한 반면, 황사일에는 그 효과가 적었을 것으로 추정되며, 그것이 연무/안개일 평균  $\sigma_{sp}$ 가 황사일 평균  $\sigma_{sp}$  보다 큰 이유의 하나가 될 수 있다는 것이다. 또한 각각의 SMPS 수농도를 비교했을 때 연무/안개일이 30% 정도 더 많은 수농도를 가졌던 것도 ( $12551 \text{ cm}^{-3}$  vs.  $9497 \text{ cm}^{-3}$ ) 그 이유의 하나로 간주할 수 있을 것이며 황사입자는 산란효율이 적은 조대입자가 상대적으로 많은 비율을 차지하는 것도 하나의 이유로 지적할 수 있을 것이다(입자 크기에 대해서는 3.3에 논의하였음). 제주도 고산에서의 측정에서, Kim et al., (2006)은 수증기에 의한 산란계수 변화와 흡습 효과를 최소화하여 건조 에어러솔만의 광학특성을 살펴 보기 위해, 주로 장비 내 RH 40% (대기 RH 60%) 이하의 산란계수 값을 분석하였

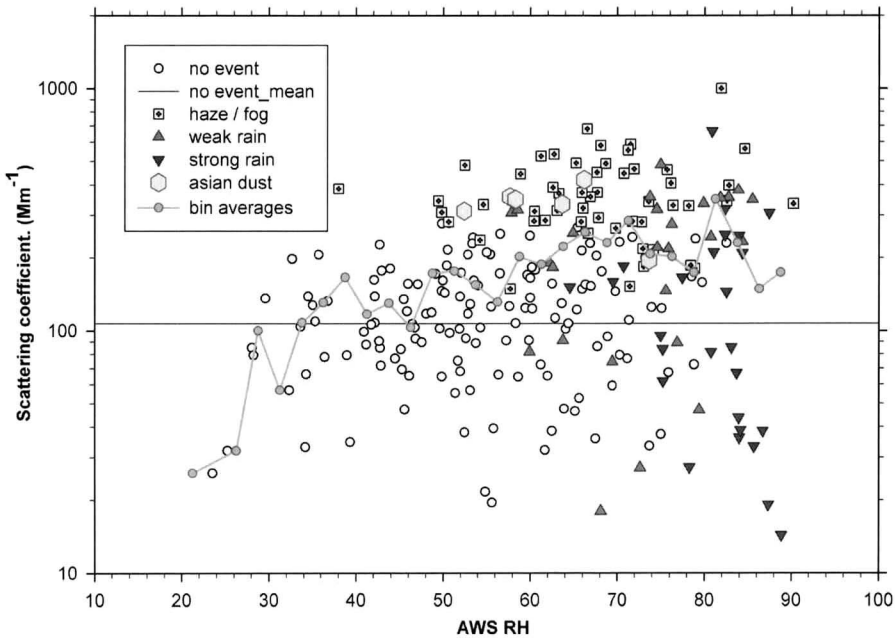


Fig. 4. Daily average scattering coefficients as a function of AWS RH. Symbols indicate different weather conditions, explained in the text and Table 1. The horizontal solid line indicates the average for no event days. The grey line connects averages for 2.5% RH bins.

**Table 2.** Seasonal average scattering coefficients ( $\lambda=550$  nm) in Seoul and their comparison with the measurements in other places around the world.

Location	Period	Average	Min.	Max.	Number of days
<sup>1</sup> Seoul	07`Mar.~May.	206.2±108.1	34.7	460.1	92
	07`Jun.~Aug.	201.9±151.0	14.3	666.1	74
	07`Sep.~Nov.	87.1±46.5	27.4	243.3	35
	07`Dec.~Feb.	236.9±198.5	56.8	998.1	48
<sup>1</sup> Daegwallyeong	07`Aug.16~21	82.4±28.1	42.6	104.8	6
<sup>1</sup> Youngjongdo	07`Aug.22~29	70.1±25.3	39.3	103.7	8
<sup>2</sup> Amazon (Guyon <i>et al.</i> , 2003)	99`Apr.~May [rainy]	-	0.9	30.6	39
	99`Sep.~Oct. [biomass burning]	91(median)	16	654	43
<sup>3</sup> Atlantic Ocean (Hoppel <i>et al.</i> , 1990)	83`Mar.13~31	24.4	8.0	71.0	10
ACE-Asia (Carrico <i>et al.</i> , 2003)	01`Mar.~Apr.	23±13(2.56) [marine] 64±30(1.86) [polluted] 181±82(1.25) [dust]	-	-	-
<sup>4</sup> Seoul (Baik <i>et al.</i> , 1995)	93`Oct.19~21	160±130 [Clear]	-	-	3
	93`Nov.03~05	630±250[Smoggy]	-	-	3
<sup>5</sup> Anmyeon-do (Lee <i>et al.</i> , 2006)	5 years From 1999 to 2003.	86(median)	-	-	-
<sup>6</sup> Gosan (Kim <i>et al.</i> , 2006)	01`Apr.11~27	239 [Dust]	-	-	17
		77 [P. Chi.]			
		78 [P. Kor.]			
		137 [Smoke]			

Unit :  $\text{Mm}^{-1}$ <sup>1</sup>measured by Nephelometer (TSI Inc model 3563) at  $\lambda=550$  nm.<sup>2</sup>measured by Nephelometer (model M930, Radiance Research, Seattle, USA) at  $\lambda=545$  nm.<sup>3</sup>measured by Nephelometer (Meteorology Research Inc.) at  $\lambda=475$  nm.<sup>4</sup>measured by Nephelometer (model MRI 1598).<sup>5</sup>measured by Nephelometer (model TSI 3523) at  $\lambda=550$  nm.<sup>6</sup>measured by Nephelometer (TSI Inc model 3563) at RH of 40% and  $\lambda=550$  nm for  $D_p < 10 \mu\text{m}$  (P. Chi : Pollution China, P. Kor : Pollution Korea).

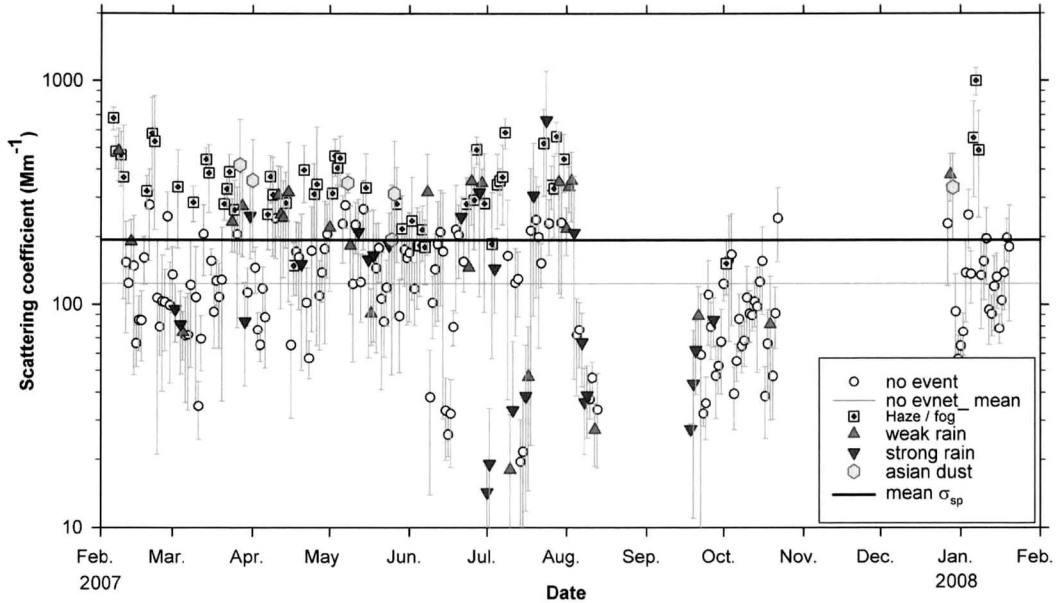
으나, Fig. 4를 보면 서울 에어러솔에 대해서는 이러한 경계가 매우 모호함을 알 수 있다.

### 3.2 서울 산란계수의 계절 변화와 일변화

Fig. 5는  $\lambda=550$  nm에서의  $\sigma_{sp}$ 의 계절 변화를 보인 것이고 Table 2는 서울의 계절 평균값을 타 지역에서의 관측 값과 비교한 것이다. 평균적으로 겨울의  $\sigma_{sp}$ 가 가장 높게 나타났으며, 가을철에 가장 낮은  $\sigma_{sp}$ 를 보였다. 여름철에는 강수로 인한 세정효과 때문에 매우 낮은  $\sigma_{sp}$ 를 기록한 날들이 많았으나 큰 값을 나타낸 날들도 많아(Fig. 5) 변화가 심했음을 알 수 있다(Table 2).

비교적 청정지역인 대관령과 영종도에서 여름에 관

측한  $\sigma_{sp}$  평균값은 서울의 여름 평균값 보다 반 이하로 낮았다(Table 2). 서울의  $\sigma_{sp}$  평균값은 대서양 배경 대기에서의 평균값(Hoppel *et al.*, 1990, Table 2) 보다 6 배 이상 높았으며, 여름철을 제외하면 최소값도 대서양 배경 대기에서의 평균값과 비슷하거나 높게 나타났다. Carrico *et al.* (2003)의 ACE-Asia 기간 동안의 선박 관측은 하와이에서 시작하여 일본 근해를 집중 관측하였는데 해양성 기단을 관측한 초기의 산란계수 값은 흡습성장효과 [ $f = \sigma_{sp}(\text{RH}=\text{ambient}) / \sigma_{sp}(\text{RH}=19\%)$ ]를 고려하더라도 [ $\sigma_{sp}(\text{RH}=\text{ambient}) = \sigma_{sp}(\text{RH}=19\%)*f = 23 \times 2.56 = 58.9$ ] 서울의 최소값보다 그리 높지 않았다. 일본 근해의 오염된 기단(polluted)과 황사(dust) 관측 값도 흡습성장효과를 고려하더라도 서



**Fig. 5.** Time variation of the daily average scattering coefficients. Symbols indicate different weather conditions. Two horizontal lines are averages for the whole data set and no event days only.

울의 무 사례일 평균이나 황사일 평균보다 낮았다. 또한 안면도(Lee *et al.*, 2006)와 고산(Kim *et al.*, 2006) 등의 한반도 해안 지역에서의 값(Table 2)과 비교했을 때에도, 인위적인 에어러솔 배출에 따른 서울의 산란 계수 증가를 확인할 수 있다. 그러나 1993년에 Baik *et al.* (1995)이 서울에서 측정했던 맑은 날과 스모그 날의 값보다는 각각에 있어 다소 낮은 경향을 보였다고 할 수 있다.

Fig. 6는  $\sigma_{sp}$ 의 평균 일변화 경향을 전 관측 자료와 무 사례일에 대해서 그린 것이다. 매일매일의 변화 폭이 커서 오차범위가 매우 크고 평균값의 변화 폭이 크지 않으나, 새벽에서 오전에 높은 값을 보이다가 오후에 낮은 값을 보이고 밤이 되면 다시 증가하는 경향은 잘 나타나며, 이것이 RH의 변화 경향과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 에어러솔의 흡습성장 경향을 잘 나타냄과 동시에 대기혼합층이 낮이 되면서 점차 두꺼워져 에어러솔 농도를 희석시켜 주는 효과와 서울의 출근길 교통량 증가와도 연관이 있을 것으로 추정된다. 무 사례일에 대한 일변화 경향도 비슷한 양상을 보이거나 주말에는 일변화가 뚜렷하지 않은데 이는 교통량이 출퇴근 시간대에 집중되지 않기 때문으로 추정할 수 있을 것이다. Baik *et al.* (1995)도 비슷한 일변화 경향을 보인 바 있다. 전 기간 자료를 주중과 주말로 나누

어 살펴 보면, 주말의  $\sigma_{sp}$ 가 낮으며 둘의 차이가 오후 시간에 더 크게 벌어짐을 볼 수 있다 (Fig. 6a). 전 관측 자료의 경우 평일과 주말의 평균값이 각각  $199.0 \pm 12.9 \text{ Mm}^{-1}$ 과  $182 \pm 25.2 \text{ Mm}^{-1}$ 로 나타나 주말에 9.3%가 감소하였으나, 무 사례 일의 평균값이 각각  $134.5 \pm 11.2 \text{ Mm}^{-1}$ 과  $101.6 \pm 10.8 \text{ Mm}^{-1}$ 로 나타나 주말에 32.4%의 감소를 보였다. 주중과 주말의 차이는 서울 지역 교통량의 차이를 잘 반영한다고 볼 수 있다. 일례로 2005년 서울외각선 수리터널의 교통량은 평일에 평균 95,000대, 일요일에 평균 70,000대를 기록하였다(이상표 등, 2006). 이는 주말의 PM10 농도가 주중에 비해 12% 낮다는 김병곤 등(2007)의 연구와도 일맥상통한다. 오후에 차이가 더 벌어지는 것도 같은 이유로 추정할 수 있다. 즉 토요일 이른 오전 시간은 금요일 밤 시간대의 영향이 사라지지 않고 남아 있을 것으로 추정되는 반면에 오후 시간대는 주중의 영향이 없을 것으로 기대되며, 이러한 영향이 주말에 대한 시간대별 평균에 반영된 것으로 판단할 수 있다. 다른 기상상태에 대한  $\sigma_{sp}$ 의 평균 일변화 경향도 살펴 볼 수 있으나, 기간이 짧고 각각의 기상현상이  $\sigma_{sp}$ 에 영향을 미치는 시간대가 일정하지 않아 뚜렷한 일변화 경향을 파악할 수 없으므로 생략하였다.

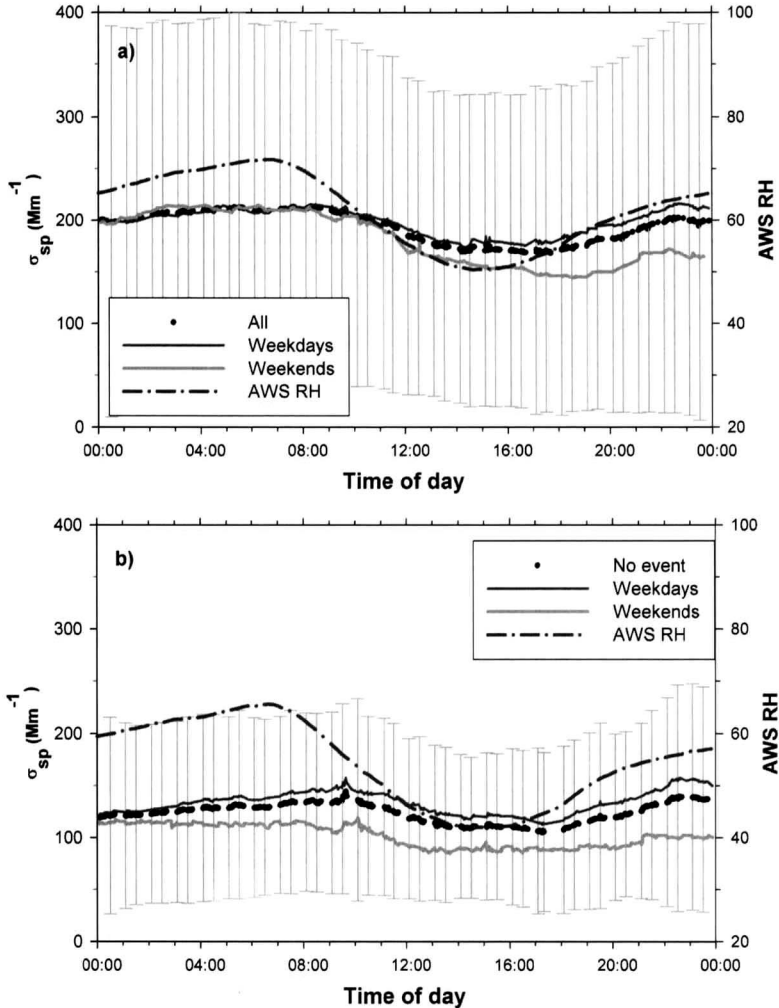


Fig. 6. Mean diurnal variation of the scattering coefficient at  $\lambda=550$  nm and AWS RH for all data set and no event days only. The gray error bars indicate standard deviation. Weekdays and weekends averages are also shown.

### 3.3 에어러솔 크기분포와의 관계

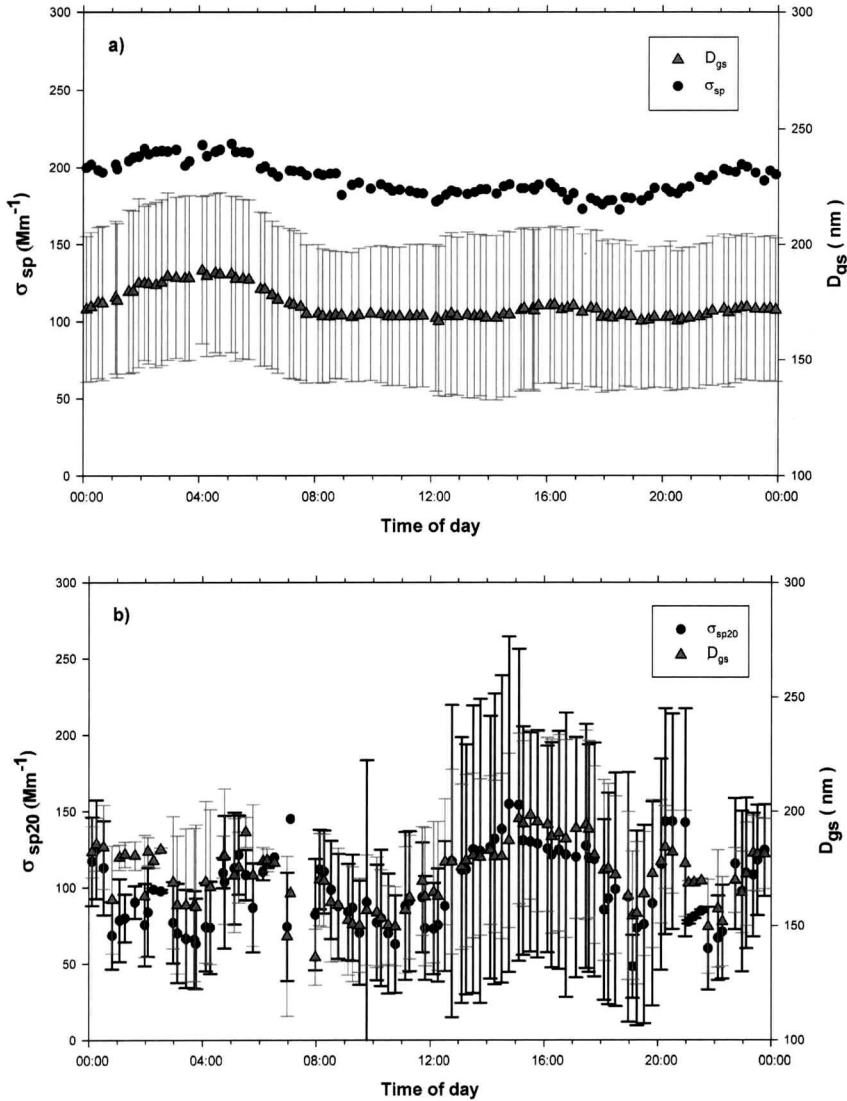
$$\text{관측한 산란계수 방정식 } \sigma_{sp} = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_s(m, r, \lambda) n(r) dr$$

에 의하면(Hoppel *et al.*, 1990), 산란계수는 입자의 표면적 분포와 산란효율(scattering efficiency)  $Q_s(m, r, \lambda)$ 에 의해 결정된다. 여기서  $m$ 은 굴절률,  $r$ 은 입자 반경,  $n(r)$ 은 입자 수밀도함수(aerosol number density function)를 나타낸다. 전 관측 기간 중 네펠로미터와 SMPS 동시 관측이 있었던 경우에 대해서만  $\sigma_{sp}$ 와 에어러솔 크기분포의 기하 표면적 평균 직경(geometric surface mean diameter,  $D_{gs}$ )의 평균 일변화를 비교한

Fig. 7a를 보면, 두 값의 일변화 경향이 대체로 일치함을 알 수 있다. 장비 내 RH가 20% 이하인 건조하고 습도에 영향을 적게 받은 날들에 대한 비교를 보면 두 값의 일치 경향이 더 뚜렷함을 알 수 있다 (Fig. 7b).

지적할 것은 SMPS의 관측 범위가 직경 10 nm에서 480 nm까지 인데 비해 네펠로미터 산란계수는 큰 입자를 제거하는 과정을 거치지 않고 모든 크기 입자의 산란을 포함한 결과라는 점이다. 이는 네펠로미터 측정 산란계수에 미치는 큰 입자들의 영향이 상대적으로 적었거나 큰 입자들의 산란효율이 낮았다는 것을, 혹은 큰 입자와 작은 입자의 분포 비율이 비교적 일정한 값을 유지했다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 또한 네





**Fig. 7.** Comparison of the mean diurnal variation of the scattering coefficient at  $\lambda=550$  nm and the average of the geometric surface mean diameter ( $D_{gs}$ ) measured by the SMPS for the entire data set (a) and only for instrument RH lower than 20% ( $\sigma_{sp20}$ ) (b). Only the days when the data from both instruments were available are used in the calculation.

펠로미터가 입자의 기하 부피 평균 직경(geometric volume mean diameter,  $D_{gv}$ )  $1\mu\text{m}$  이상에서 산란계수를 20%-50% 정도 과소평가한다는 연구 결과와도 무관하지 않을 것으로 생각된다(Anderson *et al.*, 1996).

### 3.4 Ångström exponent

산란계수는 빛의 파장과 산란 입자의 크기와 수농도에 의해 결정되는데 산란계수의 파장에 대한 의존도

( $\sigma_{sp} \propto \lambda^{-\alpha}$ )는 산란 입자의 크기를 나타내는 척도로 사용할 수 있다. 여기서  $\alpha$ 는 Ångström exponent로서 Rayleigh 산란 영역에 해당하는 기체의 경우  $\sim 4$ 의 값을 가지며 산란 입자가 커질수록 입자의 크기에 대한 의존도가 증가하고 파장에 대한 의존도가 줄어들어  $\alpha$ 가 작아진다. 대기 에어로솔에 의한 산란의 경우  $\alpha$ 의 값이 대략 0.5~2.5 사이의 범위를 가지며 안개나 모래폭풍 같은 매우 큰 입자에 의한 산란의 경우  $\alpha$ 의 값이 0에 가깝다. 일반적으로 오염된 도시지역에서는

~1.5 정도의 값으로 알려져 있다(Ruby and Waggoner, 1981).

본 연구에서는 국내의 선행 연구 사례(Kim et al., 2006)를 참조하여, 네펠로미터로 측정된 3 파장(450, 550, 700 nm) 산란계수에 대해서 아래의 식으로부터 구한 값을 평균하여 지상에서의  $\alpha$  값을 계산하였다.

$$\alpha_1 = -\ln(\sigma_{sp,450nm} / \sigma_{sp,550nm}) / \ln(450nm / 550nm) \quad (5)$$

$$\alpha_2 = -\ln(\sigma_{sp,550nm} / \sigma_{sp,700nm}) / \ln(550nm / 700nm) \quad (6)$$

$$\alpha_3 = -\ln(\sigma_{sp,450nm} / \sigma_{sp,700nm}) / \ln(450nm / 700nm) \quad (7)$$

Table 3는 관측기간 중에 서울에서 측정된  $\sigma_{sp}$  값을 이용하여 구한  $\alpha$  값을 대관령, 영종도, 고산 측정값(Kim et al., 2006)과 비교한 것이다. 각 기상상태의 최소, 최대값은 해당 기상상태가 있었던 날의 일 평균값의 최소, 최대값을 뜻한다. 관측기간 내 서울의 평균  $\alpha$ 는  $1.40 \pm 0.32$ 로 일반적인 오염된 도시지역에서의 값인 ~1.5에 근사한 값을 나타냈다. 각 기상상태 별로 살펴보면,  $\alpha$ 는 황사일에 가장 낮았으며, 나머지는 평균값의 차이가 표준편차 값들보다 작을 만큼 큰 차이는 보이지 않으나 무사레일이 가장 높고, 약한 강수일, 강한 강수일, 연무/안개일의 순이었다. 황사일의  $\alpha$  평균이 가장 작은 것은 큰 황사입자들 때문으로 예상할 수 있으며, 앞서 논의한 대로 연무/안개일의  $\alpha$ 가 두 번

째로 작은 이유에는 입자들의 흡습성장이 다른 기상상태에 비해 좀더 효과적이었을 것이라는 것이 포함될 수 있을 것이다. 황사일 각각에 대해서는 다음 절에서 논의한다. 대관령과 영종도의  $\alpha$  값은 서울 전체 평균보다도 약간 큰 경향을 보인 반면, Kim et al. (2006)의 고산 관측 기단 별  $\alpha$ 값은, 서울과 유사한 경향을 보였는데 Smoke로 분류된 기단의  $\alpha$ 가 가장 컸던 것은 서울의 연무/안개일이 두 번째로 낮은  $\alpha$ 를 갖는 것과 대조를 이룬다.

### 3.5 황사 사례

2007년 3월 27일(Case 1), 4월 1일(Case 2), 12월 29일(Case 3)은 한반도에 황사가 통과하면서 서울지역 시정이 5 km 이하로 낮아질 정도의 시정감쇄를 보였다. Fig. 8은 이 당시에 네펠로미터로 측정된 3 파장  $\sigma_{sp}$ 와  $\alpha$ 의 시계열 변화를 서울 근교 관악산의 PM10 농도의 변화와 같이 그린 것이다. PM10 농도는 기상청 홈페이지에서 제공받았다. 세 날의 PM10 농도 최대값이  $400 \mu\text{g m}^{-3}$  이상으로 나타났으며, 특히 4월 1일은 PM10 농도가  $1233 \mu\text{g m}^{-3}$ 를 기록한 매우 심한 황사가 기록된 날이었다.

Fig. 8을 자세히 살펴보면 Case 1의 경우  $\sigma_{sp}$ 와 PM10 농도의 변화 경향이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 기간 중의  $\alpha$  값이 변화가 거의 없어 광학적 특성이

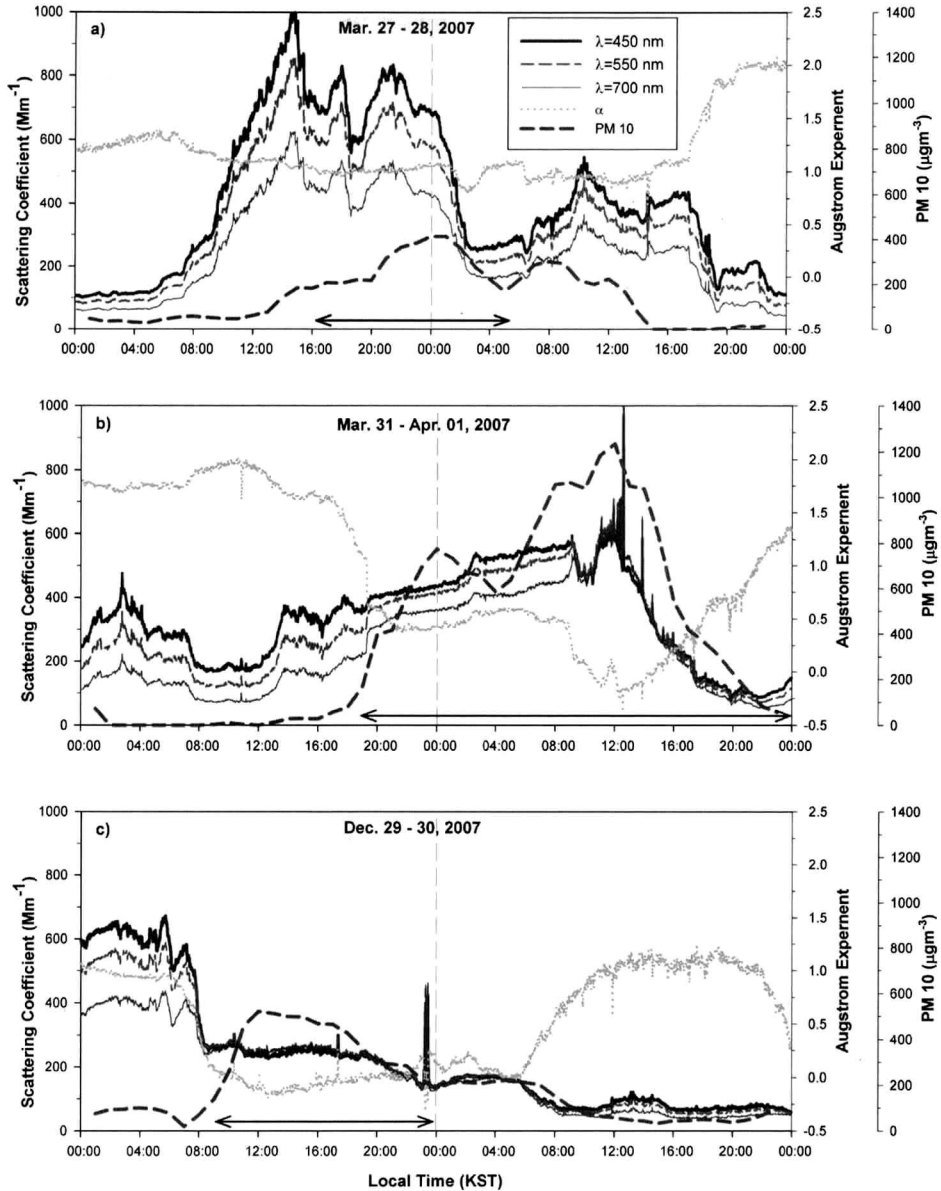
**Table 3.** Average Ångström exponent in Seoul for each weather condition and their comparison with the measurements at Daegwallyeong, Youngjongdo and Gosan.

Location	Case / Period	Average	Min.	Max.	Number of days
<sup>1</sup> Seoul	All	$1.40 \pm 0.32$	0.30	1.96	249
	No event	$1.49 \pm 0.27$	0.64	1.91	139
	Haze/Fog	$1.28 \pm 0.34$	0.56	1.88	52
	Strong rain	$1.34 \pm 0.31$	0.67	1.96	26
	Weak rain	$1.39 \pm 0.31$	0.80	1.88	26
	Asian dust	$0.89 \pm 0.58$	0.30	1.82	6
	<sup>2</sup> Mar.27.14H~Mar.28.05H	$1.01 \pm 0.06$	0.80	1.09	-
	<sup>2</sup> Mar.31.19H~Apr.02.00H	$0.45 \pm 0.35$	-0.35	1.38	-
<sup>2</sup> Dec.29.09H~Dec.30.00H	$0.02 \pm 0.09$	-0.32	0.27	-	
<sup>1</sup> Daegwallyeong	07' Aug.16~Aug.21	$1.55 \pm 0.06$	1.47	1.65	6
<sup>1</sup> Youngjongdo	07' Aug.22~Aug.29	$1.46 \pm 0.21$	1.02	1.78	8
<sup>3</sup> Gosan (Kim et al., 2006)	Dust	$0.62 \pm 0.17$	-	-	-
	Pollution China	$1.31 \pm 0.29$	-	-	-
	Pollution Korea	$1.50 \pm 0.26$	-	-	-
	Smoke	$1.59 \pm 0.31$	-	-	-

<sup>1</sup>calculated with the scattering coefficients at  $\lambda=450, 550$  and  $700$  nm.

<sup>2</sup>For each Asian dust period.

<sup>3</sup>calculated with the scattering coefficients at  $\lambda=450$  and  $700$  nm measured at RH = 40% for  $D_p < 10 \mu\text{m}$ .



**Fig. 8.** Time variation of the scattering coefficients at the three wavelengths (450, 550 and 700 nm) and the Ångström exponent measured by the nephelometer at Yonsei University (Seoul, Korea) in comparison to the PM10 mass concentration measured at Gwanak Mountain during the three Asian dust periods. The horizontal arrows indicate Asian dust period designated by KMA.

유사한 입자들이었다면 아마도 거의 일정한 크기의 황사입자들이 유입되었다고 추정할 수 있다. 가장 높은 PM10 농도를 기록한 Case 2에도  $\sigma_{sp}$ 와 PM10 농도의 변화 경향은 비슷했으나  $\sigma_{sp}$  값 자체는 PM10 농도가 상대적으로 적었던 Case 1 보다 오히려 낮게 나타나는 경향을 보였다. 그럼에도 불구하고 황사가 통과한 시

간 동안 3 파장의  $\sigma_{sp}$ 가 큰 차이 없이 나타나  $\alpha$ 의 계산 값이 급격하게 감소했고 PM10 농도가 최대값을 기록한 시각에는  $\alpha$ 가 음의 값을 기록했다. Case 3에는 황사의 시작과 더불어  $\sigma_{sp}$ 가 급격히 감소하는 경향을 보인 반면, 황사 기간의 PM10 농도가 4월 1일에 비해 매우 작았음에도 불구하고 그 기간의 평균  $\alpha$  값이 -0.02

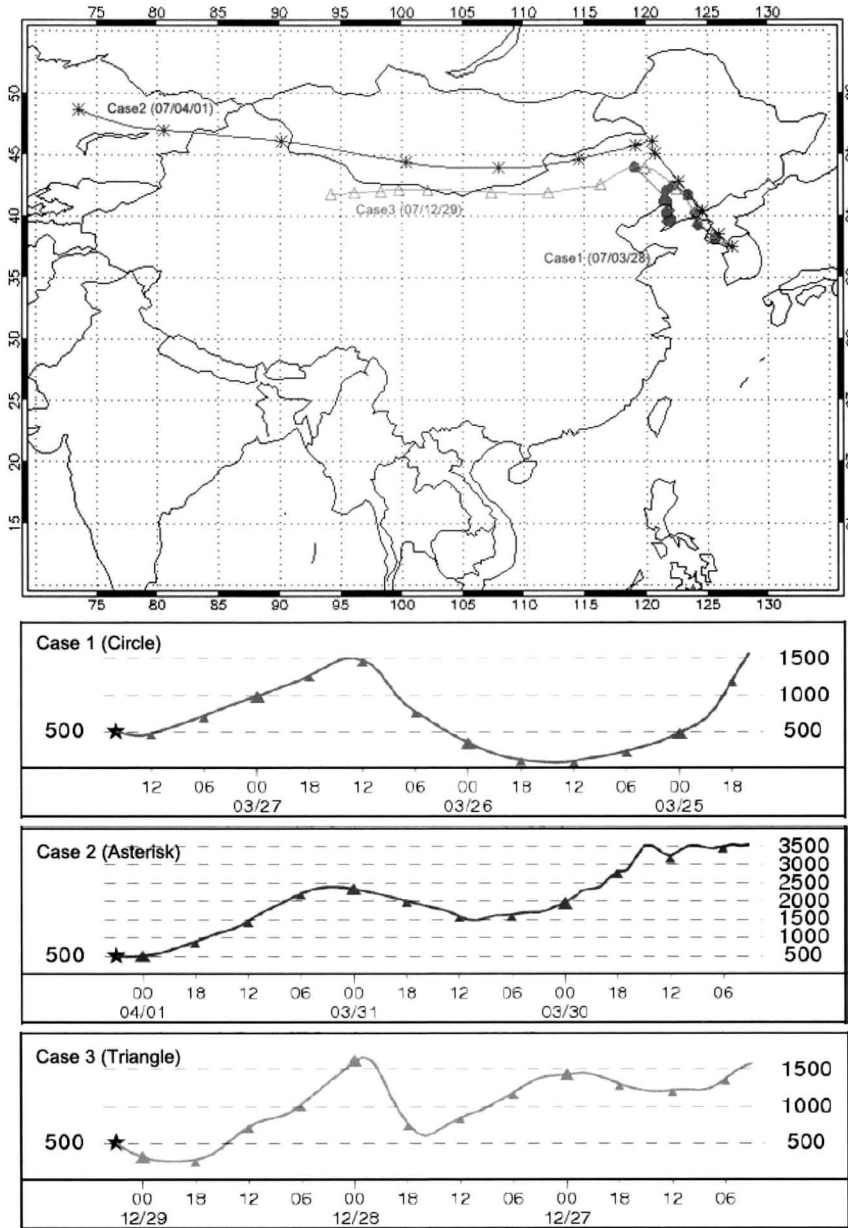
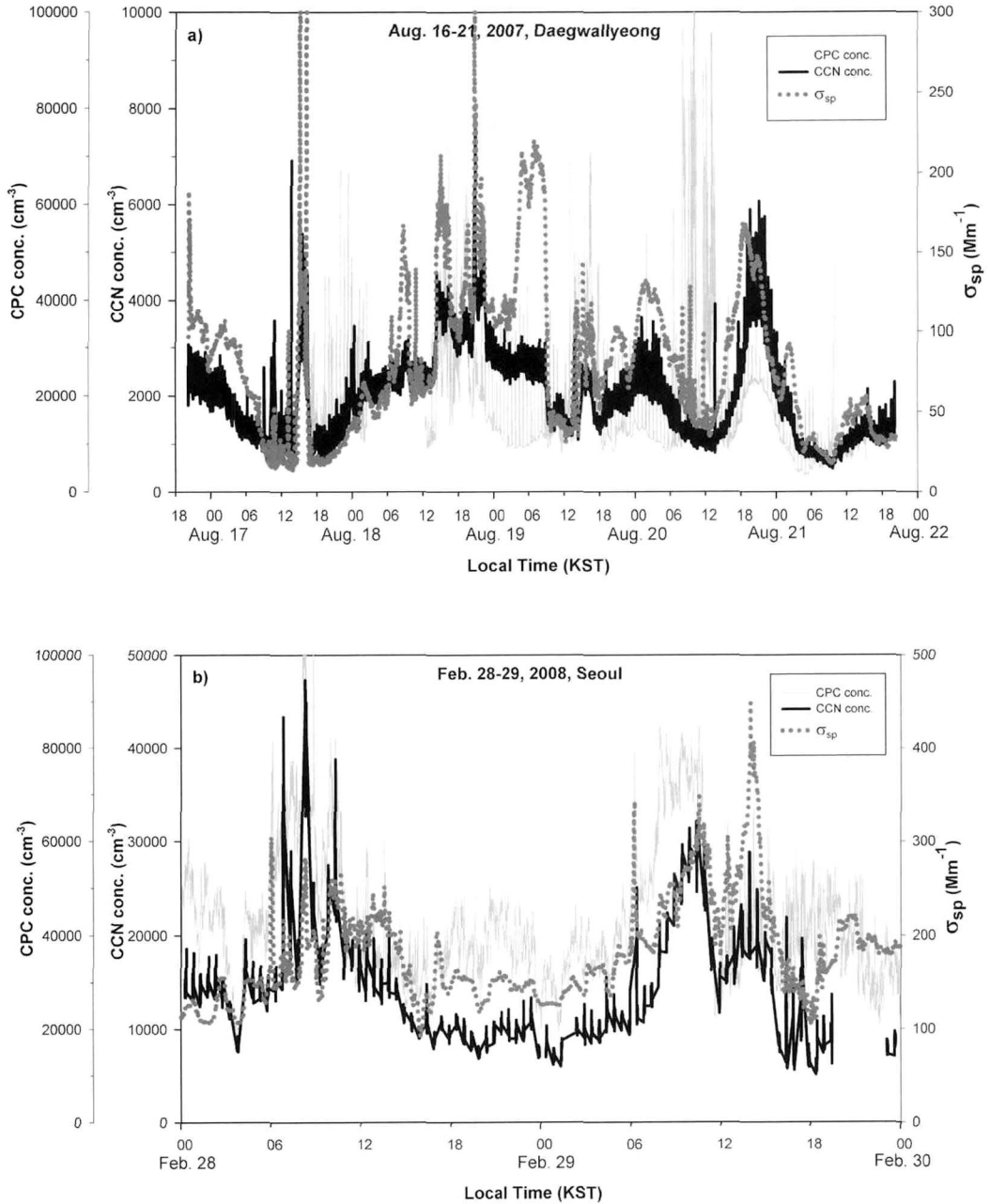


Fig. 9. 72-hrs Air mass back trajectories at the time of the peak PM10 mass concentration for each of the three Asian dust periods. Locations at 6 hrs interval are marked. measured by the nephelometer at Yonsei University (Seoul, Korea) in comparison to the PM10 mass concentration measured at Gwanak Mountain during the three Asian dust periods.

를 기록할 정도로 작아(Table 3) 산란에 기여하는 에어러솔의 크기가 매우 컸다고 추측할 수 있다. 이러한 현상은 PM10 농도에 기여하는 황사 입자들의 산란효율이 일정하지 않고 또한 크기도 다양한 것들이 관측되었음을 의미한다. 또한 세 사례를 자세히 비교해 보면, PM10 농도가 비슷하다면, 큰  $\alpha$  값을 보일 때 (즉 입자

의 크기가 상대적으로 작을 때) 산란계수가 큰 (즉 에어러솔의 산란효율이 높아 산란이 잘 일어나는) 경향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 사례 중 PM10 농도가 최대값을 가졌던 시각에 대한 역궤적 추적을 나타낸다. Case 1의 경우에는 황사입자가 비교적 느린 속도로 만주 지역에서부



**Fig. 10.** Time variation of CPC aerosol concentration, CCN concentration and scattering coefficient during the Daegwallyeong measurement (a) and for a few day period in Seoul (b).

터 한반도 서해안을 통해서 돌아 들어오고 있다. 특히 중국 북동부에 오랜 시간을 체류하고 있는데, 이곳은 인구 밀집지역으로서 암모늄, 황산염, 질산염 등 인위적으로 발생하는 에어러솔이 높은 수농도를 보인다

(Park *et al.*, 2004). 따라서 Case 1 기간에 상대적으로 작은 PM10 농도에도 불구하고 높은 σ<sub>sp</sub>를 기록한 것은 중국 인구 밀집 지역의 인위적 오염원의 영향이 반영된 것으로 추측할 수 있다. Case 2의 경우 황사입자의

대부분이 고비사막을 거쳐 대륙을 통해 매우 빠르게 수송되어 왔음을 보여주며, Case 3의 경우에도 Case 2와 비슷한 이동경로를 나타냈다. 황사입자가 중국 북동부 지역을 장기간 머무르며 인위적 에어러솔과 섞이기 쉬웠을 것으로 추정되는 Case 1에 비해 Case 2와 Case 3의 경우에는 상대적으로 대륙의 높은 고도에서부터 빠른 속도로 내려왔기 때문에 비교적 주변환경의 영향을 적게 받은 순수 황사 입자가 유입된 것으로 판단할 수 있다. 그러므로 Case 1의 경우와 같이 인위적 영향을 받은 황사 입자들에 비해 크기가 큰 반면 산란효율이 작았다고 해석할 수 있다.

### 3.6 CCN 수농도와 산란계수의 관계

Fig. 10a는 2007년 8월 16일부터 21일까지 구 대관령기상대에서 관측한 네펠로미터 산란계수, CCN 수농도, 에어러솔 수농도(CPC로 측정된 수농도)의 시간 변화를 나타낸 것이다. 8월 19일 04시부터 08시까지는 안개가 유입되었던 시간으로, 높은 RH에 의해  $\sigma_{sp}$  증가현상을 보인다. 8월 20일 7시에서 14시까지는 구 대관령기상대 근처에서 아스팔트 공사를 시행하였는데, 이 시간에 에어러솔 수농도는 급격히 증가하였으나, 산란계수와 CCN 수농도는 큰 변화를 보이지 않고 도리어 낮아졌다. 이는 산란계수가 에어러솔의 수농도 뿐만 아니라 그 종류 및 광학 성질에 크게 영향을 받고 있음을 잘 나타내는데, 도로 포장에 사용되는 아스팔트는 주로 검은 입자로 산란보다 흡수에 기여하며 비흡수성 에어러솔로 작용하고 있음을 보여준다. 주목할 것은 전 기간에 대해서 산란계수의 값이 에어러솔 수농도 보다는 CCN 수농도와 그 변화 경향이 좀더 잘 일치한다는 것이다.

서울 지역에서도 많은 날에 대해서 이와 비슷한 경향을 보였는데 Fig. 10b가 그 일례이다. 산란계수, 에어러솔 수농도와 CCN 수농도 값이 대체로 비슷한 경향을 보이거나 CCN이 산란계수와 좀더 좋은 일치 경향을 보인다. 이는 CCN으로 작용하는 에어러솔이 산란에 좀더 효과적으로 기여할 수 있음을 시사하며 CCN의 인위적 증가가 구름의 성질을 변화시켜 태양복사 반사율을 증가시키는 간접적인 효과뿐만 아니라, 직접적으로 산란효율을 증가시키는 요인으로도 작용할 수 있음을 뜻한다. 대표적 인위적 에어러솔인  $(NH_4)_2SO_4$ 은 산란효율이 높고(Liou, 2002), 흡수성이 강해 아주 좋은 CCN 역할을 하므로(Seinfeld and Pandis, 1998)

CCN 수농도와 산란계수의 좋은 상관관계를 유도할 수 있을 것이다. 그러나 어떤 화학성분의 입자들이 CCN으로 작용할 수 있는가는 아직 확실히 밝혀지지 않았으며, 이런 입자들의 광학적 특성도 많이 알려지지 않았다. 그런 의미에서 Fig. 10에 보인 CCN 수농도와 산란계수의 좋은 상관관계가  $(NH_4)_2SO_4$  뿐만 아니라 다른 종류의 CCN에도 적용되는지 살펴 보는 것은 흥미로운 것이다. 이에 대해서는 별도의 연구에서 보다 자세하게 다루어질 예정이다.

### 4. 요약 및 결론

네펠로미터를 이용하여 서울에서의 에어러솔 산란계수를 2007년 2월부터 2008년 2월까지 장기 관측하였다. 서울의 일평균 산란계수의 평균값은  $194.1 \pm 144.2 \text{ Mm}^{-1}$ 였으나 기상상태에 따라 변화가 많아 최소값이  $14.3 \text{ Mm}^{-1}$ , 최대값은  $998.1 \text{ Mm}^{-1}$ 를 기록했다. 전반적으로 산란계수는 상대습도에 비례하여 높아지는 경향을 보였다. 기상상태에 따라 구분해 보면, 무 사례일(no event)의 산란계수 평균값이 가장 작고 연무/안개일의 평균이 가장 높았으며 이는 황사일 평균보다도 높은 것이었다. 강한 강수일에는 높은 상대습도에도 불구하고, 상대적으로 낮은 산란계수 값을 보여, 강수에 의한 세정 효과가 컸음을 추정할 수 있다. 산란계수는 한 계절 내에서도 변화가 심했으나 평균적으로 보면 겨울이 가장 높고 가을에 가장 낮은 값을 보였다.

Ångström exponent의 평균값은  $1.40 \pm 0.32$ 로 일반적인 오염된 도시지역에서의 값인  $\sim 1.5$ 에 근사한 값을 나타냈다. 관측기간 중에 세 번의 황사 사례가 발생하였는데, 이 때의 에어러솔 산란계수와 Ångström exponent의 특성이 미묘한 차이를 보였다. 황사의 이동속도가 느렸던 첫 번째 사례와 황사 발원지로부터의 이동속도가 빨랐던 두, 세 번째 사례를 비교해 보면 첫 번째 사례의 Ångström exponent와 산란계수가 커서 황사 입자가 작은 반면 중국 인구밀집 지역에 오래 머무르면서 인위적인 영향으로 산란효율이 높아지는 특징을 보였다고 할 수 있다. 두, 세 번째 사례는 첫 번째 사례에 비해 Ångström exponent가 작고 산란계수도 작아 황사 입자가 큰 반면 산란효율이 작은 경향을 보였다고 할 수 있다. 마지막으로 산란계수의 변화는 에어러솔 수농도보다는 구름응결핵 수농도의 변화와 좀더 좋은 일치 경향을 보였는데 이는 구름응결핵으로 작용할 수 있는 입자들이 산란에 좀더 직접적으로 기

여할 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

1년 남짓의 관측으로 서울 대기 에어러솔 산란계수의 계절 변동에 대해 단정적 언급을 하는 것은 무리가 있다. 다년간의 연속적 관측은 물론 황사와 같은 특이 기상상태 하에서의 에어러솔 산란계수의 변화에 대해서도 통계적인 신뢰성을 확보할 수 있을 만큼의 관측 및 분석자료가 축적되어야 한반도 도시 대기 에어러솔 산란계수의 특성을 규명할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 에어러솔의 광학적 성질인 산란계수와 물리, 화학적 특성이라 할 수 있는 수농도, 크기분포 그리고 구름응결핵 수농도를 연관 지어 설명하려는 시도를 하였다. 향후 이러한 자료의 축적이 이루어지면 기후에 미치는 에어러솔의 직접적, 간접적 효과를 포괄적으로 이해하는 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대한다.

**감사의 글**

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”의 지원을 받았다. 윤영준, 이방용 박사는 극지 연구소 기본과제 “극지 대기 및 기후 변화 연구(PE08030)”의 지원을 받았다. 황사기간 PM10 농도 자료를 제공한 기상청에 감사사를 드린다.

**참고문헌**

김병곤, 김유준, 은승희, 최민혁, 2007: 서울의 일교차 주말효과와 에어러솔과의 연관성. *대기*, **17**, 147-157.  
 이상표, 박양수, 채수창, 조원덕, 2006: 장대터널 계측데이터를 이용한 교통량 및 환기특성 분석. *대한설비공학회 2006년도 자동제어부문 학술강연회*, **10**, 109-119  
 Adam, M., M. Pahlow, V. A. Kovalev, J. M. Ondov, M. B. Parlange, and N. Nair, 2004: Aerosol optical characterization by nephelometer and lidar: The Baltimore Supersite experiment during the Canadian forest fire smoke intrusion. *J. Geophys. Res.*, **109**, D16S02, doi:10.1029/2003JD004047.  
 Anderson, T. L., and Coauthors, 1996: Performance characteristics of a high-sensitivity, three wavelength, total scatter/ backscatter nephelometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 967-986.  
 Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-1230.  
 Baik, N.-J., Y. P. Kim and K. C. Moon, 1996: Visibility study in Seoul, 1993. *Atmos. Env.*, **30**, No.13, 2319-2328.  
 Carrico, C. M., P. Kus, M. J. Rood, P. K. Quinn, and T. S. Bates, 2003: Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as

a function of relative humidity. *J. Geophys. Res.*, **108**, D23, 8650, doi:10.1029/2003JD003405.  
 Chamailard, K., C. Kleefeld, S. G. Jennings, D. Ceburnis, and C. D. O'Dowd, 2006: Light scattering properties of sea-salt aerosol particles inferred from modeling studies and ground-based measurements. *J. Quan. Spect. Radia. Trans.*, **101**, 498-511.  
 Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Oakley Jr., J. E. Hansen, and D. J. Hofmann, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, **255**, 423-430.  
 Doherty, S. J., P. K. Quinn, A. Jefferson, C. M. Carrico, T. L. Anderson, and D. Hegg, 2005: A comparison and summary of aerosol optical properties as observed in situ from aircraft, ship, and land during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **110**, D04201, doi:10.1029/2004JD004964.  
 Fitzgerald, J. W., W. A. Hoppel, and M. A. Vietti, 1982: The size and scattering coefficient of urban aerosol particles at Washington, DC as a function of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1838-1852.  
 Guyon, P., B. Graham, J. Beck, O. Boucher, E. Gerasopoulos, O. L. Mayol-Bracero, G. C. Roberts, P. Artaxo, and M. O. Andreae, 2003: Physical properties and concentration of aerosol particles over the Amazon tropical forest during background and biomass burning conditions. *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 951-967.  
 Hoppel, W. A., J. W. Fitzgerald, G. M. Frick, R. E. Larson, and E. J. Mack, 1990: Aerosol size distributions and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, **95(D4)**, 3659-3686.  
 IPCC, 2007: Climate change 2007, The physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.  
 Kim, J., S.-C. Yoon, A. Jefferson, and S.-W. Kim, 2006: Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001. *Atmos. Env.*, **40**, 1550-1560.  
 Kim, K. W., Z. He, and Y. J. Kim, 2004: Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S02, doi:10.1029/2003JD003693.  
 Kim, Y. J., K. W. Kim, and S. J. Oh, 2001: Seasonal characteristics of haze observed by continuous visibility monitoring in the urban atmosphere of Kwangju, Korea. *Environ. Monit. Assess.*, **70**, 35-46.  
 Lee, Y., J.-W. Cha, Y.-K. Kim, H.-W. Lee, J. Park, B. Jeon, C. Cho and H.-S. Chung, 2006: Seasonal aerosol optical properties at Anmyon-do Global Atmosphere Watch Observatory, Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 5, 265-

- 275.
- Liou, K. N., 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, London, 583 pp.
- Park, M. H., Y. P. Kim, C.-H. Kang, and S.-G. Shim, 2004: Aerosol composition change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S13, doi: 10.1029/2003JD004110.
- Ruby, M. G., and A. P. Waggoner, 1981: Intercomparison of Integrating Nephelometer Measurements. *Envir. Sci. Technol.*, **15**, 109-113.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., 1998: *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New Jersey, 1326 pp.
- Twomey, S., 1977: The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149-1152.