

서울과 고산의 에어로졸 화학성분과 광학특성의 계절변화

Seasonal Variations of Chemical Composition and Optical Properties of Aerosols at Seoul and Gosan

이시혜 · 김영성¹⁾ · 김상우 · 윤순창*

서울대학교 지구환경과학부, ¹⁾한국외국어대학교 환경학과

(2008년 4월 28일 접수, 2008년 8월 14일 채택)

S. Lee, Y.S. Ghim¹⁾, S.-W. Kim and S.-C. Yoon*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

¹⁾*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

(Received 28 April 2008, accepted 14 August 2008)

Abstract

Seasonal variations of chemical composition and optical properties of aerosols at Seoul and Gosan were investigated using the ground-based aerosol measurements and an optical model calculation. The mass fraction of elemental carbon was 8~17%, but its contribution on light absorption was high up to 29~48% in Seoul. In Gosan, the contribution of water soluble aerosols on aerosol extinction was 83~94% due to the high mass fraction of these particles in the range of 56~88%. Model calculation showed that the water holding capacity of aerosols was larger in Gosan than in Seoul because of higher relative humidity and temperature along with abundant water soluble aerosols. Difference between measured and calculated aerosol optical depths was the highest in summer. This was because aerosol optical depth calculated from ground-based measurements could not consider aerosol loadings at high altitude in spite of high column-integrated aerosol loadings observed by Sun photometer. Although hygroscopic growth was expected to be dominant in summer, the mass concentration of water soluble aerosols was too low to permit this growth.

Key words : Aerosol optical property, Aerosol water content, Water soluble aerosol, EC

1. 서 론

온실기체는 지구온난화를 가속시키는 반면 황산염 등의 에어로졸은 빛을 산란시킴으로써 지구냉각화에

기여하고 있다(Charlson *et al.*, 1992). 온실기체와 달리 체류시간이 짧은 에어로졸은 배출지역에 따라 화학조성이 다르기 때문에 에어로졸에 의한 광학 기여도는 도심과 청정지역에서 다른 양상으로 나타난다(Yoon *et al.*, 2005). 또한 중국에서 발생하여 장거리 이동하는 황사는 다량의 토양성분과 인위적 에어로졸이 같이 이동되면서 여러 지역에 걸쳐 복사효율에

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-880-6717, E-mail : yoon@snu.ac.kr

영향을 끼칠 수 있다(Carrico *et al.*, 2003b). 이때 계절과 지역에 따라 달라지는 기상장과 상대습도 등의 기상요소는 에어로졸의 수분함유량, 산란·흡수효율 등에 중요한 변수로 작용한다. 간혹 황사 발생 시 상층기류를 타고 지표의 수분이 황사층에 유입된 경우에는 에어로졸에 의한 산란·산란계수와 수증기의 연직분포가 비슷하게 나타나며, 황사층에 포함된 수증기에 의해 연직방향의 복사 가열율(radiative heating/cooling rate)이 영향을 받기도 한다(Kim *et al.*, 2004). 황사에 포함된 수분은 수송과정에서 친수성 에어로졸의 흡습성장에 영향을 끼쳐 황사층 에어로졸의 산란계수가 증가하는 현상이 항공측정을 통해 관측되었다(Yoon *et al.*, 2006).

에어로졸의 질량농도와 화학성분에 중요한 변수로 작용하는 상대습도는 단일산란알베도(single scattering albedo: SSA)와 큰 상관관계를 나타내며 상대습도의 증감에 따라 지표의 복사효율이 달라진다고 알려져 있다(Markowicz *et al.*, 2003). Yoon and Kim (2006)의 연구에 의하면 지표와 대기 상층에서 에어로졸에 의한 복사강제력은 상대습도에 따라 증가하며 이는 대류권 하층의 수용성 에어로졸에 의한 흡습성장 때문이라고 밝히고 있다. 에어로졸의 화학성분은 인위적인 오염원이 많은 지역과 자연적인 배출원이 많은 지역 또는 장거리 이동되는 에어로졸의 영향이 큰 청정환 지역에 따라 차이를 보이며 에어로졸의 화학특성과 기상조건에 따라 수분을 흡수할 수 있는 능력이 달라진다. 상대습도에 의한 산란영향 및 흡습성장은 입자의 입경분포보다는 화학조성에 민감하게 나타나며(McInnes *et al.*, 1998), 유기탄소나 토양 성분들보다는 황산염, 질산염 등 무기이온이 많은 지역에서 에어로졸의 흡습성장이 활발하게 진행된다(Day and Malm, 2001).

동북 아시아에서는 ACE-Asia(Huebert *et al.*, 2003)와 ABC-EAREX2005(Nakajima *et al.*, 2007) 같은 국제공동 집중 관측실험을 통해 배경농도 지역인 고산에 대한 광학자료가 많이 축적되었으나 서울과 같은 도심에서의 에어로졸 광학특성에 관한 연구는 부족한 상황이다. 에어로졸의 화학성분과 광학특성의 상관관계를 분석하기 위해서는 도심과 청정지역에서 동시에 측정과 관측이 진행되어야 하지만 지금까지 우리나라에서는 봄철 황사 발생기간에 관측이 집중되었으며 지속적인 광학관측이 이루어진 것은 비교

적 최근의 일이다. 또한 많은 인력을 필요로 하는 에어로졸 화학성분의 측정은 여전히 미흡하며 연직으로 분포하는 에어로졸의 화학성분 측정 역시 전무한 실정이다. 그러나 측정·분석자료가 풍부하더라도 연직 특성을 관측하는 광학자료와 지표에서 측정하는 화학성분별 농도자료를 비교·분석하는 것은 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서는 위에서 언급한 여러 제한점을 감안하여 에어로졸의 직접 배출이 많은 서울과 장거리 이동의 영향을 볼 수 있는 고산에서의 에어로졸 광학 특성을 비교하였다. 두 지역은 배출원의 특성이 다를 뿐만 아니라 내륙과 해안에 위치하는 지역적 특성에 따라 계절별 기상특성 역시 뚜렷한 차이를 보인다. 그러므로 본 연구에서는 서울과 고산의 다른 기상특성과 계절별 에어로졸의 농도분포 특성을 고려하여 입자의 수분함유량을 추정하였고 화학성분에 따른 에어로졸의 광학 기여도를 살펴 보았다.

2. 연구 방법

2.1 에어로졸 화학성분 농도 측정

에어로졸의 화학성분 농도는 표 1(a)와 같은 계절별 기상조건에서 내륙 도심지역인 서울과 청정 해안 지역인 고산에서 표 2와 같은 샘플러와 필터를 이용하여 각각 측정하였다. 서울의 에어로졸은 Kang *et al.* (2004)에서와 같이 지상 15 m의 건물에 세 대의 디누더 시스템을 장착하여 주요 가스상 물질과 수용성 이온 성분들, 유기탄소(OC), 원소탄소(EC)를 측정하였다. 디누더-필터팩 시스템에서 주요 가스상 물질은 NaCl, Na₂CO₃, Citric Acid로 코팅된 3단 원형 디누더(URG, USA)에 흡착하였고, 수용성 이온 성분은 테플론과 나일론의 2단 필터팩에 포집하였다. 수용성 이온 성분은 증류수와 메탄올에 적셔 초음파세척기(Brason, 8210)에서 용출한 후 이온 크로마토그래피(Dionex, DX-100)를 이용해 분석하였다. 주요 원소농도는 PIXE(Proton-Induced X-ray Emission spectroscopy; Menzel *et al.*, 2002; Valkovic *et al.*, 1974) 방법으로 분석하였고 유기탄소와 원소탄소 측정에 사용된 필터는 DRI(Desert Research Institute, Nevada, USA)에 의뢰하여 TOR(Thermal/Optical Reflectance; Chow *et al.*, 2004) 방법으로 분석하였다. 서울에서 측

Table 1. Meteorological conditions during (a) aerosol sampling periods and (b) Sun photometer measurements.

		Spring	Summer	Fall	Winter	
(a)	Seoul	Sampling periods	2001. 4/9 ~ 5/13	2001. 7/26 ~ 9/5	2001. 10/12 ~ 11/23	2002. 1/2 ~ 2/8
		Number of samples	15	15	9	15
		Temperature (°C)	12.6	25.0	15.3	0.9
		Relative humidity (%)	54.1	71.8	60.6	55.8
		Wind speed (ms ⁻¹)	2.5	1.3	1.4	2.1
Gosan	Sampling periods	2002. 3/29 ~ 4/12	2003. 8/18 ~ 9/1	2001. 11/13 ~ 11/25	2003. 2/14 ~ 2/26	
	Number of samples	15	15	13	13	
	Temperature (°C)	12.5	25.7	12.2	7.7	
	Relative humidity (%)	72.6	89.0	60.0	69.6	
	Wind speed (ms ⁻¹)	8.4	5.8	9.9	8.6	
(b)						
			Spring	Summer	Fall	Winter
Seoul	Sampling periods	2002. 3/12 ~ 5/31	2002. 6/1 ~ 8/23	2002. 9/17 ~ 11/30	2002. 12/4 ~ 2003. 2/11	
	Number of days	18	60	57	35	
	Temperature (°C)	13.4	24.1	11.7	-1.7	
	Relative humidity (%)	52.4	66.6	57.3	54.1	
	Wind speed (ms ⁻¹)	2.5	2.0	2.0	2.3	
Gosan	Sampling periods	2004. 3/1 ~ 5/25	2004. 6/1 ~ 8/31	2004. 9/2 ~ 11/30	2004. 12/1 ~ 2005. 1/28	
	Number of samples	54	55	34	27	
	Temperature (°C)	12.4	25.2	19.3	8.3	
	Relative humidity (%)	65.2	78.5	66.6	62.6	
	Wind speed (ms ⁻¹)	7.0	4.3	6.5	9.2	

Table 2. Aerosol sampler sets and filters for measuring of aerosol chemical composition.

	Seoul	Gosan
Sampler	Teflon coated aluminum cyclone (16.7 LPM, d ₅₀ ≤ 2.5 μm; URG), Three annular denuders (URG), Filter pack (URG), Rotameter, Pump, Housing box	Teflon coated aluminum cyclone (16.7 LPM, d ₅₀ ≤ 2.5 μm; URG), Filter holder for 47 mm filters (URG), Float-type flowmeter, Dry gas meter, Vacuum pump
Filters	Teflon and Nylasorb membrane filters (47 mm diameter with 1 mm pore size; Gelman Science), pre-fired Quartz filter (URG)	Teflon membrane filters (Gelman, Zeflour), Quartz fiber filters (URG- 2000-30UB)

정한 에어로졸의 분석방법에 대한 보다 자세한 설명은 강충민(2003)에서 확인할 수 있다.

한반도 배경농도를 측정하기에 좋은 고산 관측소는 제주도 북제주군 한경면 고산리 수월봉에 위치하며 PM_{2.5} 채취를 위해 Kim *et al.* (2007a)의 연구와 같

이 필터팩과 싸이클론(URG, USA)을 이용하여 현장 컨테이너 옥상에서 공기를 포집하였다. 이때 고산에서 사용한 필터팩은 서울과 달리 디누더를 장착하지 않은 상태이므로 샘플링 중간에 반휘발성 에어로졸의 휘발에 의한 오차가 발생할 수 있음을 고려해야

한다. 테플론 필터에 포집된 에어로졸의 질량농도는 샘플링 전후의 무게를 측정하여 구하였으며 이온 중 수용성 성분은 증류수와 초순수로 용출시킨 후 이온 크로마토그래피(Dinex-100)로 분석하였다. 유기탄소와 원소탄소는 미국 캘리포니아에 있는 AtmAA (Atmospheric Assessment Associates, Inc.)에 의뢰하여 TMO (Thermal Manganese dioxide Oxidation; Fung, 1990) 방법을 이용해 분석하였다. 고산에서 측정된 에어로졸 성분에 대한 분석방법은 한진석 등(2004)과 Lee *et al.* (2001)에서 확인할 수 있다.

2. 2 에어로졸 광학 특성 관측

서울과 고산의 계절별 광학 자료는 지상에서 원격으로 관측하는 AERONET (Aerosol Robotic Network; Holben *et al.*, 1998)의 Cimel 318-1 선포터미터 (Sun photometer) 자료를 이용하였다. 서울은 서울대학교 (북위 37° 27' 28", 동경 126° 57' 03", 116 m) 자연과학대학 옥상에서 관측하였고 고산은 앞에서 설명한 고산 관측소 (북위 33° 17' 31", 동경 126° 09' 43", 72 m)에서 관측하였다. 선포터미터는 다중채널을 사용하는 automatic sun-and-sky scanning radiometer로 직달일사와 산란일사를 관측하며 관측파장은 1020, 870, 675, 440 nm이다. 관심파장인 550 nm에서의 에어로졸 광학두께 (Aerosol Optical Depth: AOD)를 살펴보기 위해 본 연구에서는 관측파장을 2차 함수로 내삽하여 사용하였다 (Kaskaoutis and Kambezidis, 2006; Knapp and Stowe, 2002). 선포터미터로 관측하는 에어로졸 광학두께는 구름이 없는 맑은 날 낮에 측정이 이루어졌으며 자료를 처리하는 과정에 있어서 구름이 있다고 여겨지는 날은 구름제거 알고리즘을 통해 스크리닝을 거친 후 이용하였다. 표 1(b)에서 선포터미터 관측 기간은 에어로졸 측정일과 차이가 있지만 본 연구에서는 에어로졸의 화학성분과 광학특성의 계절변화에 관심을 두고 있기 때문에 관측일수와 샘플 수를 고려한다면 도심과 배경농도를 대표하는 두 지역의 계절변화를 살펴보기에 무리가 없다고 여겨진다. 특히 우리나라의 경우 에어로졸의 화학성분은 1990년대 초반부터 본격적인 측정이 이루어진 반면 에어로졸의 광학 측정은 2000년대 초반부터 시작되어 비교적 최근에 관측결과가 분석되고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 에어로졸의 화학성분 측정과 광학측정의 시기가 다르다는 것을 감안하

여 계절특성이 현저히 다른 두 지역의 계절특성에 초점을 맞추었다. Kim *et al.* (2007b)의 연구에서는 다년간의 선포터미터 관측 결과를 통해 동북아시아 각 지역의 계절변화를 잘 보여주고 있다. 고산의 경우는 본 연구의 관측값과 같은 계절 경향이 나타났으며, 인위적 오염원의 영향이 강한 우리나라 광주와 중국 베이징에서는 서울과 같은 계절변화를 보였다.

에어로졸의 연직분포는 523.5 nm 파장의 빛을 발사하여 후방 산란되는 양을 관측하는 라이다 (Micro-Pulse Lidar; SES Inc., USA)를 통해 살펴보았다. 본 연구에서는 Kim *et al.* (2007b)의 연구에서와 마찬가지로 지표에서 9 km까지 연직 30 m 간격으로 10분씩 이동 평균 (moving average)한 자료를 이용하였으며 전체 소산계수에 대한 후방산란 비율을 나타내는 라이다 비는 45.8 sr을 사용하여 Fernald (1984)의 방법으로 소산계수를 산출하였다. 에어로졸 연직분포의 계절변화를 살펴보기 위해 1997년 10월에서 2004년 6월까지 서울과 고산의 라이다 자료를 이용해 신호가 매우 약하거나 노이즈가 심한 자료는 제외하였고 동일한 지역에 위치한 선포터미터 자료와 비교하여 낮 동안 구름에 의한 영향을 제거하였다. 밤에는 대류경계층 이하에서 소산계수가 1.0 km^{-1} 이상인 값을, 대류경계층 이상에서는 소산계수가 0.5 km^{-1} 이상인 값을 취하여 구름의 효과를 제거한 후 에어로졸의 영향만을 살펴보았다.

2. 3 모델링

본 연구에서는 에어로졸의 상변화를 계산해 주는 평형모델과 에어로졸에 의한 광학특성을 계산해 주는 광학모델이 동시에 사용되었다. SCAPE (Simulating Composition of Atmospheric Particles at Equilibrium; Kim *et al.*, 1993a, b)는 황산염, 질산염, 암모늄 등과 같은 인위적인 오염성분과 칼슘, 마그네슘, 나트륨 등 토양 및 해양 성분들을 바탕으로 기온, 상대습도 등의 기상자료로부터 오염물질의 기체/입자상의 분배와 입자내 수분함량, 입자의 강산성도를 예측한다. 대기 중 에어로졸의 화학조성은 수분함량과 강산성도에 따라 결정되지만 현재의 입자 포집 방법으로는 입자내 수분과 산성도를 정량적으로 측정하기 어렵다. 그러므로 SCAPE는 에어로졸의 흡습성장과 관련하여 에어로졸의 수분함량을 계산하고 산-염기 평형 상태에 이른 입자의 조성을 구하는 데 매우 유용하

다. 본 연구에서는 2.1절에서 구한 주요 수용성 이온의 농도와 표 1(a)의 에어로졸 측정 당시의 기상조건을 입력자료로 하여 평형상태에 이르렀을 때의 입자상 에어로졸의 농도와 수분함량을 계산하였다.

OPAC (Optical Properties of Aerosol and Clouds; Bates *et al.*, 2006; Hess *et al.*, 1998)은 에어로졸과 구름의 광학성분을 계산하는 모델로 6개의 water clouds, 3개의 ice clouds, 10개의 에어로졸 성분에 대해 0.25 ~ 40 μm 파장범위와 0 ~ 99% 상대습도 범위에서의 광학특성을 알려준다. 이때 에어로졸의 광학특성은 Mic 이론을 통해 계산되고 구름과 에어로졸은 외부 혼합(external mixtures)을 가정한다. OPAC에서는 다양한 상대습도에 따라 에어로졸의 광학특성을 계산하지만 같은 상대습도에서 건조한 에어로졸과 습한 에어로졸의 입경이 달라지는 현상(hysteresis effect)은 고려하지 못한다. 에어로졸의 화학조성에 따른 광학특성을 살펴보기 위해 먼저 OPAC을 이용해 단일 입자에 대한 산산 · 산란 · 흡수계수, 단일산란알베도 등을 계산하였다. 이 때 측정된 에어로졸의 화학 성분별 농도를 모델에서 얻어진 단일입자에 대한 질량 농도로 나누어 에어로졸의 수 농도를 계산하였고, 이를 이용해 계절별 에어로졸의 광학 기여도를 산출하였다. OPAC에서 계산된 계절별 에어로졸 광학두께는 나중에 선포터미터로 관측한 에어로졸 광학두께와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 계절별 에어로졸의 농도 분포

서울과 고산의 계절별 PM_{2.5} 에어로졸의 화학성분 농도는 그림 1에서 볼 수 있다. 서울과 고산 모두 황산염, 질산염, 암모늄 등의 농도가 높았고 봄에는 황사의 영향을 받아 수용성 이온성분들의 농도와 함께 Al, Si 등의 원소 농도가 높았다. 봄철 에어로졸 샘플링 기간 동안 기상청의 통계에 따르면 서울에서는 4일, 고산에서는 3일간 황사가 발생하였다. 화학 질량 수지 모델 (Chemical Mass Balance model: CMB)을 통해 에어로졸의 배출원을 역추적한 결과 서울은 가을과 겨울에 중국으로부터 오염물질이 유입되었고, 산불 발생, 자동차 배출 등의 영향으로 탄소염을 비롯한 황산염, 질산염, 유기탄소 등의 농도가 높았다

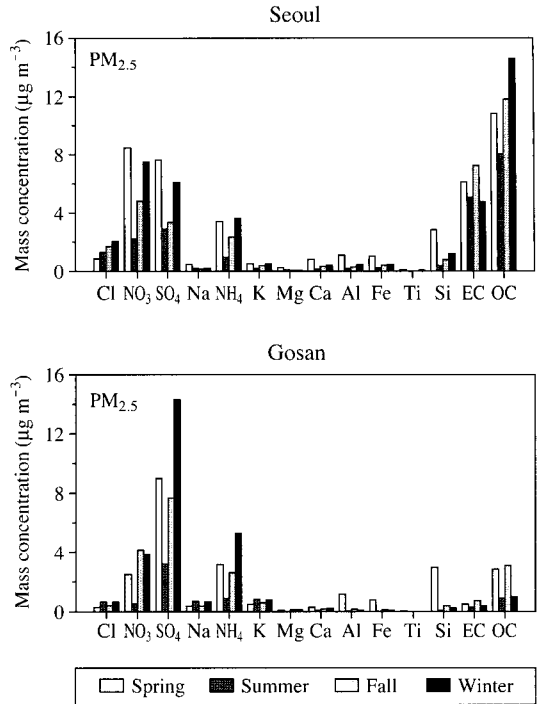


Fig. 1. Seasonal variations of aerosol chemical compositions in Seoul and Gosan.

(강충민, 2003). 고산에서는 여름철 북태평양 기단과 중국 남부의 청정한 공기체가 유입되어 대부분의 에어로졸 농도가 낮았던 반면 가을에는 한반도에 정체된 고기압으로 오염물질이 적체되면서 대부분 오염물질의 농도가 높았고, 겨울에는 중국 동쪽 해안의 오염된 공기가 유입되면서 황산염 등의 농도가 높았다(Kim *et al.*, 2007a).

그림 2에서는 식 (1)~(5)와 같이 화학적 성질이 비슷한 에어로졸들을 묶어 OPAC의 입력자료로 이용한 에어로졸 그룹의 계절별 농도를 보여준다.

$$\begin{aligned}
 [\text{Water soluble}] = & [\text{Cl}^-] + [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{2-}] \\
 & + [\text{NH}_4^+] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Mg}^{2+}] \\
 & + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{OM}]_{\text{water soluble}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$[\text{Insoluble}] = [\text{OM}]_{\text{total}} - [\text{OM}]_{\text{water soluble}} \tag{2}$$

$$[\text{Soot}] = [\text{EC}] \tag{3}$$

$$[\text{Sea-salt}] = [\text{Cl}^-] + 1.47[\text{Na}^+] \tag{4}$$

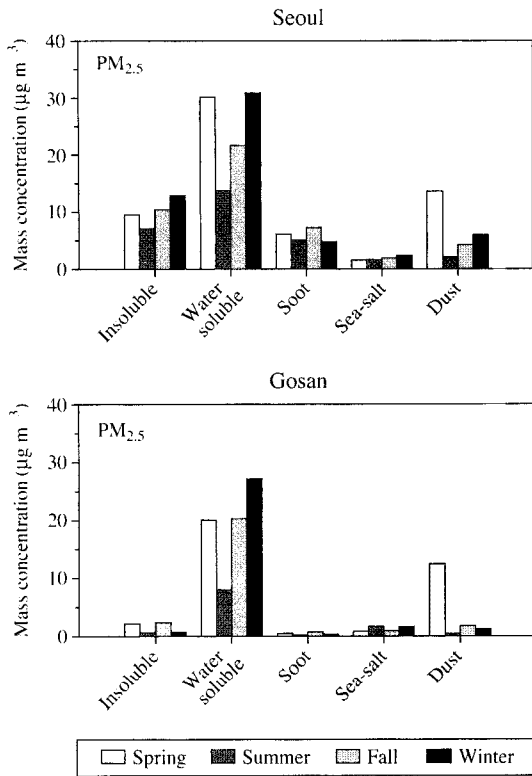


Fig. 2. Seasonal variations of aerosol types for optical model calculation.

$$\begin{aligned}
 [\text{Dust}] = & 2.49 [\text{Si}] + 2.20 [\text{Al}] + 2.42 [\text{Fe}] \\
 & + 1.94 [\text{Ti}] + 1.63 [\text{Ca}] \quad (5)
 \end{aligned}$$

Hess *et al.* (1998)과 같이 황산염, 질산염, 수용성 유기물 등과 같은 수용성 이온 성분들은 식(1)과 같이 그룹화하였으며 이때 사용된 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 등은 비해염 농도이다. 토양 성분과 같은 불수용성 이온 성분은 전체 유기물에서 수용성 유기물을 뺀 식(2)를 적용하였으며 빛을 흡수하는 대표적인 물질인 원소탄소는 [Soot]로 표현하였다. 해염 성분은 Na^+ 와 다른 양이온 간의 성분비(해염성분비)가 1.47임을 이용하여 식(4)를 적용하였고(Quinn *et al.*, 2004; Holland, 1978) 원소물질로 이루어진 광물이나 장거리 이동된 사막성분 물질은 식(5)와 같이 그룹화하였다(Bates *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006; Malm *et al.*, 1994). 여기서 총 유기물 농도인 $[\text{OM}]_{\text{total}}$ 은 Turpin and Lim (2001)과 같이 도심 지역인 서울에서는 유

기탄소 농도의 1.6배, 비도심 지역인 고산에서는 장거리 이동에 따른 반응을 감안하여 2.1배 하였다. 유기탄소 중 수용성 유기탄소 성분은 각각 홍콩의 도심과 시골의 비율을 적용하여 서울에서 45%, 고산에서 64%를 차지한다고 가정하였다(Yu, 2002).

그림 1과 마찬가지로 그림 2에서도 서울의 [Insoluble], [Soot] 등의 농도가 고산에 비해 높았고 두 지역 모두 [Water soluble] 에어로졸이 높은 비율을 차지했다. 봄철에는 황사의 영향이 잘 드러났으며 직접 배출이 감소하고 복사가열로 대류경계층이 상승하는 여름에는 서울과 고산에서 대부분의 에어로졸이 낮은 농도를 보였다. 특히 여름철에는 서울과 고산 모두 측정 전후에 강수에 의한 세정효과가 있었다. [Soot] 농도는 가을철 서울에서 가장 높은 농도를 보였고 오염 물질의 배출이 특히 많은 겨울철에는 [Water soluble] 에어로졸의 농도가 서울과 고산 모두에서 가장 높았다.

3.2 화학성분별 에어로졸의 광학 기여도

대기기주(air column)에 존재하는 에어로졸의 양을 나타내는 에어로졸 광학두께는 식(6)과 같이 소산계수(산란계수와 흡수계수의 합)의 연직적분에 의해 얻어지며 상대습도와 고도의 함수로 구해진다. 여기에서 에어로졸의 산란계수와 흡수계수는 입경분포, 수 농도, 파장, 굴절지수 등에 의해 결정되며 대기 중에 빛을 흡수 또는 산란시키는 에어로졸의 농도가 높을 때 에어로졸 광학두께 역시 높게 나타난다.

$$\tau_{\lambda} = \sum_{i=1}^N \tau_{\lambda,i} = \sum_{i=1}^N \int_{\text{SFC}}^{\text{TOA}} [\sigma_{\text{sp},\lambda,i}(\text{RH}, z) + \sigma_{\text{ap},\lambda,i}(\text{RH}, z)] dz \quad (6)$$

관심파장에서의 화학성분별 에어로졸 광학두께는 OPAC에서 구한 단일입자에 대한 소산계수에 에어로졸의 수 농도를 곱한 후 이 값을 지표에서 에어로졸 층까지 적분하여 구하였다. 이때 지표에서 에어로졸 층까지의 성분별 농도가 균일하다고 가정하였으며(Kim *et al.*, 2006; Markowicz *et al.*, 2003), 에어로졸 층은 Kim *et al.* (2007b)의 서울과 고산의 라이다 연직자료를 이용하여 전체 에어로졸의 70% 이상을 차지하는 영역에서 결정하였다. 그림 3에서는 이렇게 구한 각각의 화학성분별 에어로졸 광학두께를 보여준다. 서울과 고산 모두 계절별 에어로졸 농도에 의

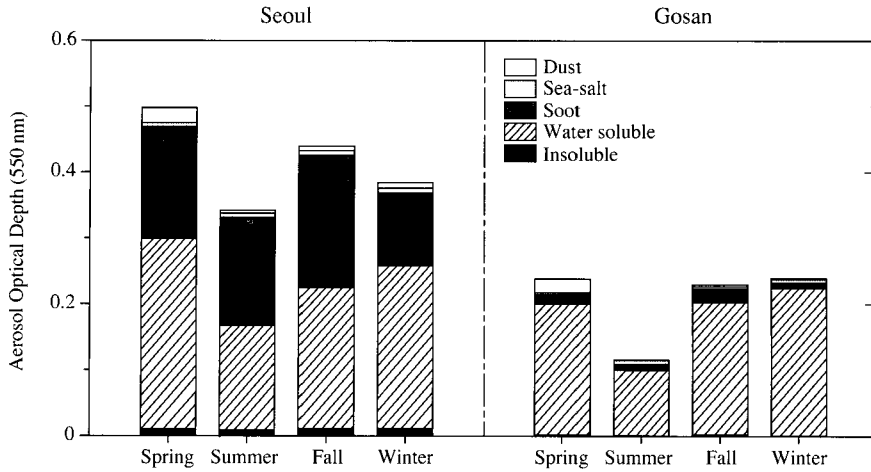


Fig. 3. Chemically apportioned AODs calculated from OPAC model.

한 에어로졸 광학두께는 수용성 이온에 의한 기여도가 크게 나타났다. 특히 서울에서는 고산과 달리 [Soot]에 의한 기여도가 두드러졌다. Latha and Badar-inath (2004)의 연구에서도 도심과 비도심의 광학특성의 차이는 도심의 원소탄소에 의한 빛 흡수능력의 차이 때문이라고 밝히고 있다.

두 지역에서 비중이 큰 성분인 수용성 이온과 원소탄소의 영향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 그림 4에서는 화학 성분비와 광학 기여도의 계절분포를 그려 보았다. 이때 기타 에어로졸에는 수용성 이온과 원소탄소를 제외한 토양 성분과 해염 등이 포함된다. 서울에서는 전체 에어로졸 중 원소탄소가 차지하는 비율이 8~17%인 것에 비해 소산계수에서 원소탄소가 기여하는 정도는 29~48%로 높게 구해졌다. 도심에서는 적은 양의 원소탄소가 흡수계수를 증가시키면서 소산계수를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 반면 고산에서는 봄철을 제외한 모든 계절에서 수용성 이온이 차지하는 비율이 전체 에어로졸의 70% 이상이었으며 수용성 이온의 광학 기여도 역시 85~94%로 높게 나타났다. 서울에 비해 겨울철 기온이 높고 상대습도가 높은 고산의 경우(표 1(a), (b)) 수용성 이온이 차지하는 비율은 88%로 다른 계절에 비해 높았고 입자내 수분 또한 높을 것으로 예상하였다. 고산에서는 겨울에 입자내 수분과 함께 수용성 이온에 의한 산란이 증가하면서 소산계수에 미치는 영향이 94%로 다른 계절에 비해 큰 것을 확인할 수

있었다.

표 3에서는 계절별로 소산계수에서 흡수와 산란이 차지하는 정도가 얼마나 되는지 단일산란알베도를 통해 잘 보여주고 있다. 서울과 고산 모두 흡수 에어로졸보다는 산란 에어로졸의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 전체적으로 서울의 단일산란알베도가 고산보다 낮은 것을 볼 때 서울에서 흡수 에어로졸의 영향이 고산보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 그러나 Carrico *et al.* (2003a)에 의하면 도심에서 PM_{2.5}와 산란계수는 높은 상관관계를 보이지만 원소탄소와 흡수계수의 상관관계는 원소탄소 농도 측정의 불확실성으로 인해 낮은 것으로 연구되고 있어 원소탄소의 계절특성을 분석하는 데 적잖은 어려움이 따른다.

단위질량 당 소산계수의 값을 의미하는 소산효율은 계절별로 서울에서 2.70~3.30 m²g⁻¹, 고산에서 2.20~3.07 m²g⁻¹로 구해졌다. Cheng *et al.* (2008)에서는 중국 Xinken에서 측정한 550 nm에서의 소산효율이 미세입자 (<1 μm)에서 7.6±1.1 m²g⁻¹, 조대입자 (<10 μm)에서 4.1±0.8 m²g⁻¹로 구해졌으며, Quinn *et al.* (2002)에서는 인도 대륙의 미세입자 소산효율이 2.3~4.7 m²g⁻¹로 본 연구결과와 비슷한 값을 보였다. 특히 서울에서는 여름에 3.30 m²g⁻¹, 고산에서는 겨울에 3.07 m²g⁻¹로 다른 계절에 비해 소산효율이 높게 나타났다. 서울과 고산에서 이러한 계절 특성을 보이는 것은 두 지역의 기상특성과 함께 화학조성이 다르기 때문으로 파악된다. 표 3에서 여름철 서울의

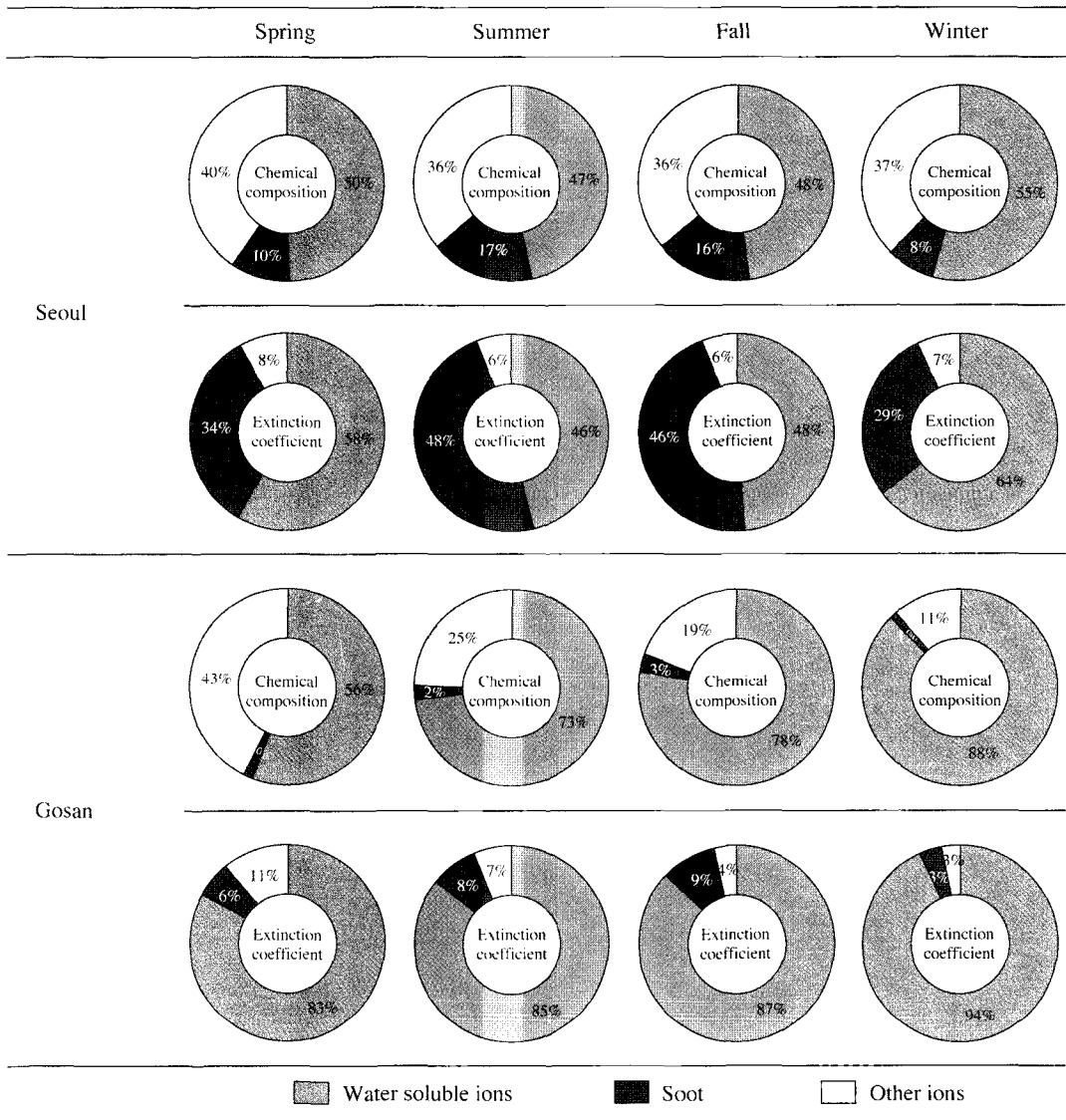


Fig. 4. Seasonal contribution of aerosol chemical compositions in PM_{2.5} to aerosol extinction coefficients.

단일산란알베도는 0.60으로 다른 계절에 비해 흡수 계수에 기여하는 원소탄소의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또한 그림 3에서도 여름철 서울의 원소탄소 화학조성이 17%로 다른 계절에 비해 가장 높은 비중을 차지하면서 전체 소산계수 중 원소탄소의 기여도가 48%로 높게 구해졌다. 반면 고산에서는 겨울철에 수용성 이온이 전체 에어로졸의 88%를 차지하면서 전체 소산계수에서 수용성 에어로졸에 의한 영향이

Table 3. Seasonal characteristics of aerosol single scattering albedo (SSA) and aerosol extinction efficiency (Q_{ext}).

		Spring	Summer	Fall	Winter
Seoul	SSA	0.71	0.60	0.62	0.75
	$Q_{ext} (m^2 g^{-1})^a$	2.72	3.30	3.23	2.70
Gosan	SSA	0.93	0.93	0.91	0.95
	$Q_{ext} (m^2 g^{-1})$	2.20	2.99	2.93	3.07

^a $Q_{ext} (m^2 g^{-1}) = \sigma_{ext, 550nm} (Mm^{-1}) / PM_{2.5} \text{ mass concentration } (\mu g m^{-3})$

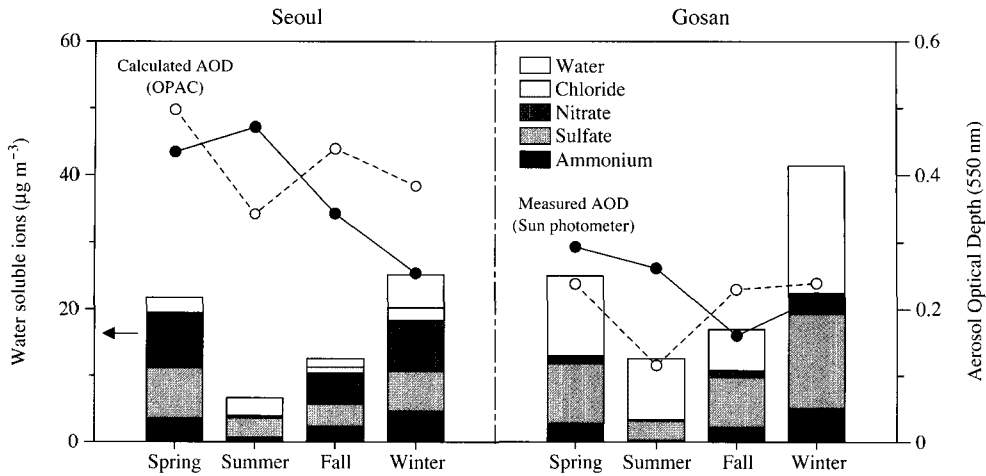


Fig. 5. Seasonal variations of AOD and major inorganic aerosols in company with calculated aerosol water content. Bar graphs represent water soluble ions, solid lines with closed circles are AODs measured by Sun photometer and dashed lines with opened circles are AODs calculated from OPAC model.

Table 4. Seasonal variations of aerosol optical depths (AODs) at 550 nm and PM₁₀ mass concentrations.

		Spring	Summer	Fall	Winter
Seoul	AOD measured by Sun photometer	0.43	0.47	0.34	0.25
	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	126.91	58.73	53.97	63.39
	AOD calculated from the OPAC	0.50	0.34	0.44	0.38
	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	108.42	36.56	66.23	107.03
Gosan	AOD measured by Sun photometer	0.29	0.26	0.16	0.22
	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	72.85	38.56	39.50	54.89
	AODs calculated from the OPAC	0.24	0.12	0.23	0.24
	PM ₁₀ (µg m ⁻³)	99.36	18.42	51.66	60.36

사계절 중 가장 높았다.

3.3 에어로졸의 흡습성과 광학특성의 계절별 상관관계

그림 5에서는 SCAPE로 예측한 입자내 수분을 포함한 수용성 에어로졸과 예측/관측된 에어로졸 광학두께의 계절변화를 보여준다. 수용성 에어로졸은 상대습도가 조해점에 이르면 수분을 빠르게 흡수하는 특성을 지니고 있으며 에어로졸의 농도가 높고 상대습도가 높을 때 수분을 많이 함유하게 된다. 내륙에 위치한 서울에서는 인위적 오염물질이면서 동시에 흡습성 에어로졸인 황산염, 질산염, 암모늄 등의 농도가 높음에도 수분함량은 해안에 위치한 고산에서 높

았다. Tsai and Kuo (2005)은 스모그 챔버 실험을 통해 대기 중 에어로졸의 수분함량을 측정된 결과 도심보다 해안에서 입자 내 수분이 높음을 밝혔다. 한편, SCAPE는 수용성 유기물질을 고려할 수 없는 한계가 있으므로 (Meng *et al.*, 1995) 그림 1에서처럼 유기탄소의 농도가 월등히 높은 서울에서 입자 내 수분이 낮게 예측되었을 가능성도 배제할 수 없다. 그러나 고산에서는 장거리 이동에 의한 오염물질의 영향으로 유기탄소 중 수용성 성분의 비중이 서울에 비해 크기 때문에 두 지역에서 유기탄소에 의한 에어로졸 수분함유량의 차이는 상쇄될 수 있다.

그림 5에서는 주요 에어로졸의 농도와 함께 OPAC을 이용하여 예측된 에어로졸 광학두께와 선포터미

터로 관측된 에어로졸 광학두께의 계절변화를 볼 수 있다. 서울에서는 여름을 제외한 모든 계절의 에어로졸 광학두께가 높게 예측되었으며 고산에서는 가을과 겨울에 에어로졸 광학두께가 높게 예측되었다. 이는 OPAC 계산의 입력자료로 이용된 에어로졸 농도가 선포터미터 관측 당시의 에어로졸 농도보다 높았기 때문에 여겨진다. 표 4에서 OPAC 계산에 이용된 에어로졸 측정일과 선포터미터 관측일에 해당하는 에어로졸의 계절변화를 환경부의 PM₁₀ 농도를 통해 확인하였다. 본 연구에서 언급되는 모든 에어로졸 광학두께는 550 nm에서의 값이므로 측정자료가 존재한다면 PM₁₀보다는 산란과 흡수가 크게 일어나는 PM_{2.5}와 비교하는 것이 훨씬 바람직할 것이다. 그러나 동일한 기간에 측정된 PM_{2.5}의 질량농도를 구하는 것이 쉽지 않아 동일한 방법으로 지표에서 측정된 PM₁₀ 농도를 이용하여 측정된 에어로졸 광학두께와 계산된 에어로졸 광학두께의 차이를 비교해 보았다. 그 결과 조대입자의 영향이 강한 봄철을 제외하면 모든 계절에 에어로졸 광학두께는 PM₁₀ 질량농도에 비례하는 것을 알 수 있었다. 앞에서 언급한 바와 같이 광학모델 계산에 의한 에어로졸 광학두께는 서울과 고산 모두 가을, 겨울에 선포터미터 관측에 의한 에어로졸 광학두께보다 높았고 이때의 에어로졸 질량농도 역시 높게 나타났다. 에어로졸 광학두께는 에어로졸의 소산계수를 연직으로 적분한 값이므로 만약 봄철 대류권 상층으로 황사가 지나갈 경우 지표 에어로졸 농도와 에어로졸 광학두께의 상관성은 낮아질 수 있다. 지표에서 샘플링한 에어로졸은 대기 상층의 에어로졸을 포함하지 못하기 때문에 지표 관측자료를 이용하여 연직으로 분포하는 전체 에어로졸의 특성을 밝히려면 앞에서 언급한 바와 같이 매우 청정한 날에 균질한 농도의 에어로졸이 존재한다는 가정이 필수적이다.

그림 5에서 에어로졸 광학두께 측정값과 예측값의 차이가 가장 두드러지는 것은 여름철이었으며 에어로졸의 농도가 낮은 여름에 실제 에어로졸 광학두께가 오히려 높았다. Kim *et al.* (2007b)은 동아시아의 MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectrometer), AERONET, 라이다의 월별자료를 분석하며, 에어로졸 광학두께 최대값이 6월에 나타나는 이유를 상대적으로 낮은 풍속으로 인한 오염물질의 축적, 태양 복사에너지 증가로 인한 2차 에어로졸의 생성, 상대

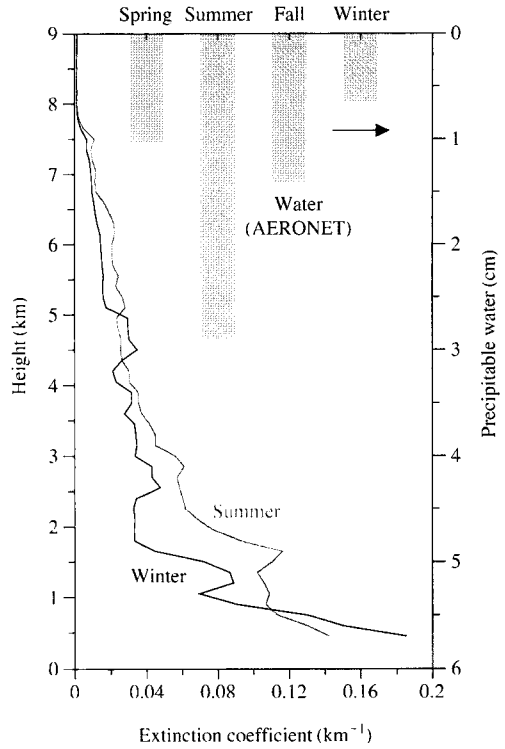


Fig. 6. Aerosol vertical profiles measured by ground-based MPL in summer and winter and seasonal water vapor amounts derived from AERONET measurements.

습도 증가로 인한 흡습성 에어로졸의 성장과 중국 동쪽 해안에서 발생하는 바이오매스 연소 등으로 추정하였다. 본 연구에서는 여름철 에어로졸의 흡습성장에 관심을 갖고 SCAPE를 통해 입자내 수분을 계산한 결과 다른 계절에 비해 여름철 흡습성장이 지배적이지는 않았다. 다만 여름의 높은 기온과 상대습도를 에어로졸이 흡습 성장하기에 충분한 기상조건을 만족하지만 에어로졸의 농도가 워낙 낮기 때문에 입자내 수분의 절대량이 높지는 않았다. 그림 6에서 막대그래프로 표현한 AERONET의 선포터미터로 구한 수증기 총량은 여름이 다른 계절보다 2배 이상 높았다. 즉, 여름철 대기 중에는 에어로졸과 결합하지 않은 수증기량이 많으며 에어로졸 농도와 기상 조건에 따라 에어로졸이 수분을 함유할 수 있는 잠재력이 크다는 것을 예상할 수 있다.

에어로졸의 계절변화와 달리 여름철 에어로졸 광

학두께가 높은 것은 선포터미터의 에어로졸 광학두께 관측값과 관련하여 여름철 에어로졸의 연직 부하량이 큰 것이 하나의 이유가 될 수 있다. 여름철 에어로졸의 연직분포는 Kim *et al.* (2007b)의 서울과 고산의 라이다 연직자료로부터 알 수 있다. 그림 6을 보면 겨울에는 연직 1 km 이하의 지표에 대부분의 에어로졸이 존재하는 반면 여름에는 중층 대류권까지 에어로졸이 분포해 있음을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

지역별 에어로졸의 화학특성은 배출원과 기상조건이 다를 때 매우 다른 양상을 보이며 에어로졸의 광학특성 역시 에어로졸의 화학종에 따라 뚜렷한 차이를 보인다. 그러므로 본 연구에서는 인위적 오염원이 많은 서울과 대표적 청정지역으로 알려진 고산에서 계절별 에어로졸의 농도변화와 함께 에어로졸의 광학특성에 대해 살펴보았다.

서울에서는 원소탄소, 유기탄소, 질산염 등의 농도가 모든 계절에 걸쳐 높게 나타났고, 고산에서는 청정한 공기계가 유입되는 여름철을 제외하면 외부에서 오염된 공기가 유입되는 다른 계절에 황산염, 질산염 등의 농도가 높았다. 에어로졸의 연직 부하량을 나타내는 에어로졸 광학두께의 화학성분별 기여도는 서울과 고산 모두 수용성 이온의 영향이 강하였고, 고산과 다르게 특히 서울에서는 원소탄소의 영향이 두드러졌다.

에어로졸의 계절변화와 관련하여 두 지역의 에어로졸 광학두께를 선포터미터로 관측한 결과 에어로졸의 농도가 낮은 여름에 오히려 에어로졸 광학두께가 높았다. 여름에 지표 에어로졸의 질량농도는 낮게 측정되었으나 실제 에어로졸의 연직 부하량은 크다는 것을 라이다를 통해 확인할 수 있었다. 여름에는 대기 중에 풍부한 수증기량으로 인해 중층 대류권까지 존재하는 수용성 에어로졸의 흡습성장이 클 것으로 예상하였으나 화학 평형 모델을 통해 입자내 수분함량을 계산한 결과 수분의 영향은 미미하였다. 그러나 기온과 상대습도가 높고 수용성 이온의 농도가 풍부한 고산 에어로졸의 수분 함유 능력이 서울에 비해 크다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 BK21과 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2006-4104)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 강충민 (2003) Characteristics of the fine particles and source apportionment using the CMB model in Seoul area, 건국대학교 박사학위논문.
- 한진석, 김영성, 문광주, 안준영, 김정은, 류성윤, 김영준, 공부주, 이석조 (2004) 2001년 11월 오염시기와 2002년 봄 황사시기 제주도 고산에서의 미량원소 농도 변화, 한국대기환경학회지, 20, 143-151.
- Bates, T.S., T.L. Anderson, T. Baynard, T. Bond, O. Boucher, G. Carmichael, A. Clarke, C. Erlick, H. Guo, L. Horowitz, S. Howel, S. Kulkarni, H. Maring, A. McComiskey, A. Middlebrook, K. Noone, C.D. O'Dowd, J. Ogren, J. Penner, P.K. Quinn, A.R. Ravishankara, D.L. Savoie, S.E. Schwartz, Y. Shinzuka, Y. Tang, R.J. Weber, and Y. Wu (2006) Aerosol direct radiative effects over the northwest Atlantic, north Pacific, and Indian Oceans: Estimates based on in situ chemical and optical measurements and chemical transport modeling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1657-1732.
- Carrico, C.M., M.H. Bergin, J. Xu, K. Baumann, and H. Maring (2003a) Urban aerosol radiative properties: Measurements during the 1999 Atlanta Supersite Experiment, *J. Geophysical Research*, 108, D7, 8422, doi:10.1029/2001JD001222.
- Carrico, C.M., P. Kus, M.J. Rood, P.K. Quinn, and T.S. Bates (2003b) Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as a function of relative humidity, *J. Geophysical Research*, 108, D23, 8650, doi:10.1029/2003JD003405.
- Charlson, R.J., S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A. Coakley, Jr., J.E. Hansen, and D.J. Hofmann (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-430.
- Cheng, Y.F., A. Wiedensohler, H. Eichler, H. Su, T. Gnauk, E. Brüggemann, H. Herrmann, J. Heintzenberg, J. Slanina, T. Tuch, M. Hu, and Y.H. Zhang (2008) Aerosol optical properties and related chemical

- apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China, *Atmospheric Environment*, In Press.
- Chow, J.C., J.G. Watson, L.-W. A. Chen, W.P. Arnott, and H. Moosmüller (2004) Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols, *Environmental Science and Technology*, 38, 4414-4422.
- Day, D.E. and W.C. Malm (2001) Aerosol light scattering measurement as a function of relative humidity: A composition between measurement made at three different sites, *Atmospheric Environment*, 35, 5169-5176.
- Fernald, F.G. (1984) Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments, *Applied Optics*, 23, 653-659.
- Fung, K. (1990) Particulate carbon speciation by MnO₂ oxidation, *Aerosol Science and Technology*, 12, 122-127.
- Hess, M., P. Koepke, and I. Schult (1998) Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 831-844.
- Holben, B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov (1998) AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66, 1-16.
- Holland, H.D. (1978) *The chemistry of the Atmosphere and Oceans*, Wiley, Hoboken, NJ, 154pp.
- Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima (2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationship between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophysical Research*, 108, D23, 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Kang, C.-M., H.S. Lee, B.-W. Kang, S.-W. Lee, and Y. Sunwoo (2004) Chemical characteristic of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea, *Atmospheric Environment*, 38, 4749-4760.
- Kaskaoutis, D.G. and H.D. Kambezidis (2006) Investigation into the wavelength dependence of the aerosol optical depth in the Athens area, *Q. J. R. Meteorological Society*, 132, 2217-2234.
- Kim, J., S.-C. Yoon, S.-W. Kim, F. Brechtel, A. Jefferson, E.G. Dutton, K.N. Bower, S. Cliff, and J.J. Schauer (2006) Chemical apportionment of shortwave direct aerosol radiative forcing at the Gosan super-site, Korea during ACE-Asia, *Atmospheric Environment*, 40, 6718-6729.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, C.H. Song, S.-C. Yoon, and J.S. Han (2007a) Seasonal characteristics of air masses arriving at Gosan, Korea, using fine particle measurements between November 2001 and August 2003, *J. Geophysical Research*, 112, D07202, doi:10.1029/2005JD006946.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J.-G. Won, E.G. Dutton, J.A. Ogren, and T.L. Anderson (2004) Observation of enhanced water vapor in Asian dust layer and its effect on atmospheric radiative heating rate, *Geophysical Research Letters*, 31, L18113, doi:10.1029/2004GL020024.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, and S.-Y. Kim (2007b) Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/Sky radiometer measurements, *Atmospheric Environment*, 41, 1634-1651.
- Kim, Y.P., J.H. Seinfeld, and P. Saxena (1993a) Atmospheric gas-aerosol equilibrium I. Thermodynamic model, *Aerosol Science and Technology*, 19, 157-181.
- Kim, Y.P., J.H. Seinfeld, and P. Saxena (1993b) Atmospheric gas-aerosol equilibrium II. Analysis of common approximations and activity coefficient calculation methods, *Aerosol Science and Technology*, 19, 182-198.
- Knapp, K.R. and L.L. Stowe (2002) Evaluating the potential for retrieving aerosol optical depth over land from AVHRR pathfinder atmosphere data, *J. Atmospheric Sciences*, 59, 279-293.
- Latha, K.M. and K.V.S. Badarinath (2004) Characterization of aerosol and its radiation impacts over urban and rural environments-A case study from Hyderabad and Srisailem, *Environmental Pollution*, 132, 463-468.
- Lee, J.H., Y.P. Kim, K.-C. Moon, H.-K. Kim, and C.B. Lee (2001) Fine particle measurements at two background sites in Korea between 1996 and 1997, *Atmospheric Environment*, 35, 635-643.
- Malm, W.C., J.F. Sisler, D. Huffman, R.A. Eldred, and T.A. Cahill (1994) Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States, *J. Geophysical Research*, 99, D1, 1347-1370.
- Markowicz, K.M., P.J. Flatau, P.K. Quinn, C.M. Carrico, M.K. Flatau, A.M. Vogelmann, D. Bates, M. Liu, and M.J. Rood (2003) Influence of relative humidity

- on aerosol radiative forcing: An ACE-Asia experiment respective, *J. Geophysical Research*, 108, D23, 8662, doi:10.1029/2002JD003066.
- McInnes, L., M. Bergin, J. Ogren, and S. Schwartz (1998) Apportionment of light scattering and hygroscopic growth to aerosol composition, *Geophysical Research Letters*, 25, 513-516.
- Meng, Z., J.H. Seinfeld, P. Saxena, and Y.P. Kim (1995) Contribution of water to particulate mass in the South coast air basin, *Aerosol Science and Technology*, 22, 111-123.
- Menzel, N., P. Schramel, and K. Wittmaack (2002) Elemental composition of aerosol particulate matter collected on membrane filters: A comparison of results by PIXE and ICP-AES, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 189, 94-99.
- Nakajima, T., S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takemura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto, and N. Schutgens (2007) Overview of the atmospheric brown cloud east Asian regional experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia, *J. Geophysical Research*, 112, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009.
- Quinn, P.K., D.J. Coffman, T.S. Bates, E.J. Welton, D.S. Covert, T.L. Miller, J.E. Johnson, S. Maria, L. Russell, R. Arimoto, C.M. Carrico, M.J. Rood, and J. Anderson (2004) Aerosol optical properties measured on board the Ronald H. Brown during ACE-Asia as a function of aerosol chemical composition and source region, *J. Geophysical Research*, 109, D19S01, doi:10.1029/2003JD004010.
- Quinn, P.K., D.J. Coffman, T.S. Bates, T.L. Miller, J.E. Johnson, E.J. Welton, C.C. Neusüss, M. Miller, and P. J. Sheridan (2002) Aerosol optical properties during INDOEX 1999: Means, variability, and controlling factors, *J. Geophysical Research*, 107, D19, 8020, doi:10.1029/2000JD000037.
- Tsai, Y.I. and S.-C. Kuo (2005) PM_{2.5} aerosol water content and chemical composition in a metropolitan and a coastal area in southern Taiwan, *Atmospheric Environment*, 39, 4827-4839.
- Turpin, B.J. and H.-J. Lim (2001) Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass, *Aerosol Science and Technology*, 35, 602-610.
- Valkovic, V., R.B. Liebert, T. Zabel, H.T. Larson, D. Miljanic, R.M. Wheeler, and G.C. Phillips (1974) Trace element analysis using proton-induced X-ray emission spectroscopy, *Nuclear Instruments and Methods*, 114, 573-579.
- Yoon, S.-C. and J. Kim (2006) Influences of relative humidity on aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during ACE-Asia, *Atmospheric Environment*, 40, 4328-4338.
- Yoon, S.-C., J.-G. Won, A.H. Omar, S.-W. Kim, and B.-J. Sohn (2005) Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data, *Atmospheric Environment*, 39, 6620-6630.
- Yoon, S.-C., S.-W. Kim, J. Kim, B.-J. Sohn, A. Jefferson, S.-J. Choi, D.-H. Cha, D.-K. Lee, T.L. Anderson, S.J. Doherty, and R.J. Weber (2006) Enhanced water vapor in Asian dust layer: Entrainment processes and implication for aerosol optical properties, *Atmospheric Environment*, 40, 2409-2421.
- Yu, J.Z. (2002) Chemical characterization of water-soluble organic compounds in particulate matter in Hong Kong, report, Hong Kong Environ. Prot. Dep., Hong Kong.