

제주 애월 대기오염집중측정소의
PM_{2.5} 에어로졸 화학성분 자료를 이용한
광학특성 및 직접적 복사강제력 추정 연구

Estimations of the Optical Properties and Direct Radiative
Forcing of Aerosol Chemical Components in PM_{2.5} Measured
at Aewol Intensive Air Monitoring Site on Jeju Island

박연희 · 송상근* · 강창희¹⁾ · 송정민¹⁾

제주대학교 해양과학대학 지구해양과학과, ¹⁾제주대학교 자연과학대학 화학·코스메틱스학과

(2017년 8월 2일 접수, 2017년 9월 5일 수정, 2017년 9월 7일 채택)

Yeon-Hee Park, Sang-Keun Song*, Chang-Hee Kang¹⁾ and Jung-Min Song¹⁾

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University

¹⁾*Department of Chemistry and Cosmetics, Jeju National University*

(Received 2 August 2017, revised 5 September 2017, accepted 7 September 2017)

Abstract

The optical properties and direct aerosol radiative forcing (DARF) of different aerosol components in PM_{2.5} (water-soluble, insoluble, black carbon (BC), and sea-salt) were estimated using the hourly resolution data measured at Aewol intensive air monitoring site on Jeju Island during 2013, based on a modeling approach. In general, the water-soluble component was predominant over all other components with respect to its impact on the optical properties (except for absorbing BC) and DARF. The annual mean aerosol optical depth (AOD) at 500 nm for the water-soluble component was 0.14 ± 0.14 (0.04 ± 0.01 for BC). The total DARF at the surface (DARF_{SFC}) and top of the atmosphere (DARF_{TOA}), and in the atmosphere (DARF_{ATM}) for most aerosol components (except for sea-salt) during the daytime were highest in spring and lowest in fall and/or summer. The maximum DARF_{SFC} of most aerosol components occurred around noon (12:00~14:00 LST) during all seasons, while the maximum DARF_{TOA} occurred in the afternoon (13:00~16:00 LST) during most seasons (except for spring). In addition, the estimated DARF_{SFC} and DARF_{ATM} of the water-soluble component were -20 to -59 W/m² and $+3.5$ to $+14$ W/m², respectively, while those of BC were -18 to -29 W/m² and $+23$ to $+37$ W/m², respectively.

Key words : PM_{2.5} aerosol components, Hourly resolution data, Direct aerosol radiative forcing, AOD, Jeju Island

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)64-754-3431, E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

1. 서 론

지구대기 중 에어로졸은 대기복사의 균형(예, 복사강제력)에 대하여 직·간접적으로 효과를 준다. 에어로졸의 직접 효과는 대기 중에서 에어로졸이 태양복사를 직접 산란 또는 흡수하여 지구-대기 시스템(기후)의 복사균형을 변화시키는 효과를 말하며, 간접 효과는 에어로졸이 구름생성에 관여하여 구름알베도에 의해 복사균형에 영향을 미치는 효과를 말한다(Albrecht, 1989). 따라서 에어로졸에 의한 복사강제력 분석은 지구-대기 시스템의 섭동의 여러 원인을 비교하는 유용한 방법이다. 일반적으로 에어로졸은 지구온난화를 일으키는 온실기체(CO₂, CH₄ 등)와 달리 주로 음(-)의 복사강제력을 나타내 지구냉각화에 영향을 주기도 하며, 일부는 양(+)의 복사강제력을 나타내 지구온난화에도 영향을 준다. 이러한 복사강제력의 양 또는 음의 영향은 화학성분에 따른 광학특성(산란 및 흡수성 등)에 기인한다. 예를 들어, 질산염(nitrate, NO₃⁻), 황산염(sulfate, SO₄²⁻) 등의 수용성(water-soluble) 에어로졸 성분은 태양복사를 산란하여 음의 복사강제력을 증가시키며(지구냉각화 원인), 검댕(black carbon, BC) 성분은 태양복사를 대기상단(top of the atmosphere, TOA)으로부터 흡수하여 양의 복사강제력을 증가시킨다(지구온난화 원인)(IPCC, 2013).

에어로졸 광학특성 및 복사강제력과 관련된 국내의 선행연구를 보면, 대부분 배경지역을 중심으로(일부 도시지역) 관측 또는 모델링을 통해 에어로졸 광학특성과 복사강제력의 연평균 및 월평균 분석, 그리고 기상·기후인자와의 관련성 연구가 수행되어 왔다. Yoon and Kim(2006)은 배경지역인 제주 고산에서 상대습도가 증가할수록 에어로졸 광학두께(aerosol optical depth, AOD)가 증가하며, 그에 따라 지표(surface, SFC)와 TOA에서의 복사강제력이 증가함을 확인하였다. Kim *et al.*(2010)은 2001~2008년 제주 고산지역을 대상으로 에어로졸 광학특성과 복사강제력을 산출한 결과, AOD(675 nm)는 평균 0.12~0.36, 복사강제력은 SFC와 TOA에서 각각 -28, -15 W/m²로 나타났다. 또한 인도의 배경지역인 아라비아 해와 벵골만에서 에어로졸에 따른 복사강제력은 SFC에서 각각 -16, -22 W/m², TOA에서 -11, -12 W/m²로 추정된 바 있다(Kedia *et al.*, 2010). 한편 도시지역에서의 선행연구를

보면, 서울지역을 대상으로 에어로졸 입자 중 황산염과 같은 흡습성 입자가 높은 상대습도 조건하에서 흡습성장을 하면서 산란계수에 영향을 주는 것으로 분석된 바 있다(Park *et al.*, 2015). 또한 인도의 텔리지역에서는 에어로졸 화학성분 중 BC 성분에 따른 광학특성과 직접적 복사강제력을 산출한 바 있다(Singh *et al.*, 2010). 이외에도 에어로졸 복사강제력 추정식을 적용하여 복사강제력을 산출한 연구에 따르면(Song and Shon, 2014), 서울지역 전체 성분 중에서 water-soluble 성분의 복사효과가 다른 성분에 비해 가장 큰 기여도를 차지하였으며, 특히 1월에 가장 크고(-28.7 W/m²) 9월에 가장 작은 음의 복사강제력(-3.6 W/m²)이 추정되었다.

에어로졸은 입자크기에 따라 대기 중 체류시간이 수분에서 수주 가량까지 다양하기 때문에 에어로졸 광학특성 및 복사강제력은 시간규모(시간별, 월/계절별 등)에 따라 매우 다를 수 있다(Song and Shon, 2014). 그러므로 에어로졸 화학성분별 그리고 시간별 농도에 따른 복사강제력 추정은 기후변화 특성을 규명하는 데 중요한 정보가 될 수 있다(Kaskaoustis *et al.*, 2007). 그러나 과거 오랫동안 에어로졸에 의한 복사강제력을 추정할 국내외 연구들은 대부분 에어로졸 전체량 혹은 특정 먼지폭풍(dust storm)에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, 대부분 일평균 및 월평균 자료를 이용하여 복사강제력을 추정하였다. 따라서 본 연구에서는 2013년 제주 대기오염집중측정소(애월 지점)에서 측정된 시간별 PM_{2.5} 에어로졸 화학성분 농도자료 이용 및 모델링(광학모델과 대기복사전달모델)을 통해 각 에어로졸 성분별 광학특성 및 직접적 복사강제력(direct aerosol radiative forcing, DARF)을 추정하였다. 또한 연구기간 동안 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성과 DARF의 시간적 변화(월/계절 변화, 일중 변화) 특성을 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 대상지역 및 자료

본 연구에서는 제주지역의 에어로졸 화학성분별 광학특성 및 DARF를 추정하기 위하여 국립환경과학원 산하 제주 대기오염집중측정소(33°20.81'N, 126°

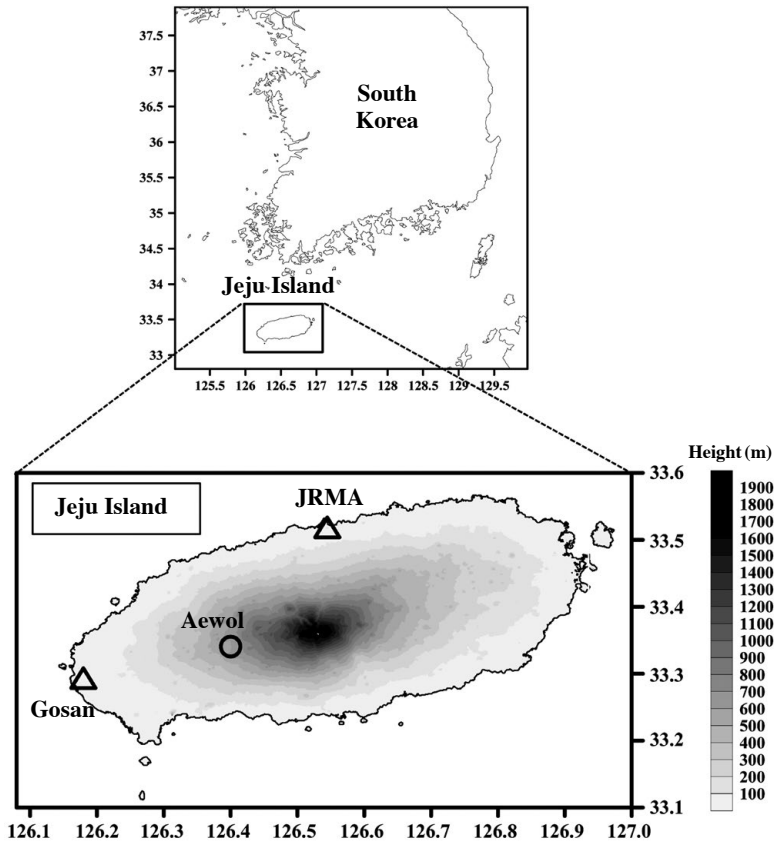


Fig. 1. Geographical locations of Aewol intensive air monitoring site on Jeju Island. JRMA site in the figure represents the Jeju Regional Meteorological Administration and Gosan site represents an observation site (Sun photometer observation) on Jeju Island provided by the Aerosol Robotic Network (AERONET) program (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

23.32°E)에서 측정된 2013년의 시간별 PM_{2.5} 화학성분 농도자료 (황사일 제외)를 이용하였다. 제주 대기오염 집중측정소는 제주시 애월읍(시골)에 위치하고 있으며, 해발 약 600 m 산간지대의 드넓은 초지 위에 위치한 지점이다(그림 1). 여기서 측정하고 있는 시간별 PM_{2.5} 화학성분 자료는 8개의 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)과 2개의 탄소성분(OC, EC)이다. 이러한 에어로졸 성분별 광학특성 및 직접적 복사강제력의 산출은 광학모델과 대기복사전달모델을 이용하였으며, 모델 구성에 대한 자세한 설명은 각각 2.2절과 2.3절에 나타난다. 이외에도 대상지점인 애월 집중측정소의 전반적인 기상특성(기온(temperature), 상대습도(relative humidity), 풍속(wind

speed))을 살펴보고, 모델링 수행에 필요한 기상 입력자료 중 상대습도와 전 운량은 애월 지점에 측정소가 없는 관계로 제주 지방기상청(Jeju Regional Meteorological Administration, JRMA)의 2013년 시간별 자료를 이용하였다(그림 1). 대상지역 관측지점의 기상특성을 간략히 분석하면 다음과 같다(표 1). 기온은 계절 특성상 여름철에 가장 높고(특히 7~8월에 평균 29°C) 겨울철에 가장 낮게 나타났다(1월에 평균 5°C). 풍속은 겨울철에 가장 강하고(12월에 4.4 m/s) 여름철에 약한 반면(6월과 8월에 2.5 m/s), 총 강수량은 6월 또는 가을철에 가장 많은 양이 관측되었으며(6월에 총 161 mm), 7월 또는 겨울철에 가장 적은 양이 나타났다(7월에 총 14.7 mm).

Table 1. Concentrations of aerosol chemical components in PM_{2.5} and their optical properties at a wavelength of 500 nm estimated by OPAC model at the Aewol intensive air monitoring site on Jeju Island during 2013.

Month	Temperature (°C)		Relative humidity (%)	Wind speed (m/s)	Concentration (µg/m ³)		Optical property			
					PM _{2.5} mass	4 chemical components	σ _{ab} (Mm ⁻¹)	σ _{sc} (Mm ⁻¹)	σ _{ext} (Mm ⁻¹)	AOD (τ)
January	5.6	70	3.7	21.50	9.32/1.27/0.95/1.14 ^a	0.94/0.14/8.22/<0.001	58.4/0.35/2.40/4.23	59.3/0.48/10.6/4.23	0.13/0.02/0.04/0.03	
February	6.2	71	3.0	13.78	4.92/0.57/0.60/1.06	0.43/0.08/5.57/<0.001	27.5/0.20/1.62/3.79	28.0/0.28/7.20/3.79	0.07/0.02/0.03/0.03	
March	10	71	3.1	28.46	14.7/2.28/0.88/1.66	1.28/0.24/7.68/<0.001	79.3/0.61/2.24/6.23	80.6/0.85/9.91/6.23	0.16/0.02/0.04/0.03	
April	13	66	3.7	23.65	10.3/1.80/0.65/0.92	1.03/0.19/5.40/<0.001	68.4/0.48/1.57/4.36	69.4/0.67/6.97/4.36	0.14/0.02/0.03/0.03	
May	19	77	2.7	36.34	20.0/3.00/1.10/0.99	1.91/0.30/9.32/<0.001	146/0.76/2.72/4.68	148/1.05/12.0/4.68	0.28/0.02/0.04/0.03	
June	22	91	2.5	15.64	10.2/2.70/0.75/1.31	1.11/0.29/6.23/<0.001	109/0.74/1.82/10.3	110/1.03/8.05/10.3	0.22/0.02/0.03/0.04	
July	29	72	3.2	11.07	7.85/1.46/0.46/2.78	0.76/0.15/3.98/<0.001	50.2/0.39/1.16/10.8	51.0/0.54/5.14/10.8	0.11/0.02/0.03/0.04	
August	29	74	2.5	11.16	8.20/1.44/0.52/2.51	0.82/0.15/4.34/<0.001	56.0/0.37/1.27/9.89	56.9/0.52/5.61/9.89	0.12/0.02/0.03/0.04	
September	24	74	2.7	11.90	7.05/1.29/0.53/3.08	0.66/0.12/4.24/<0.001	44.5/0.32/1.24/12.0	45.1/0.44/5.47/12.0	0.10/0.02/0.03/0.04	
October	19	72	3.3	15.27	6.08/1.91/0.80/0.78	0.60/0.20/6.77/<0.001	37.8/0.51/1.97/3.07	38.4/0.71/8.75/3.07	0.09/0.02/0.04/0.03	
November	13	65	4.0	25.27	10.7/2.18/0.92/1.19	1.03/0.21/7.29/<0.001	60.2/0.53/2.13/4.25	61.2/0.74/9.42/4.25	0.13/0.02/0.04/0.03	
December	8.1	61	4.4	27.29	10.9/2.17/1.32/0.65	1.10/0.21/11.2/<0.001	62.7/0.54/3.27/2.20	63.9/0.76/14.5/2.20	0.13/0.02/0.05/0.02	

^awater-soluble/insoluble/BC/sea-salt.

본 연구에서는 광학모델의 결과를 검증하기 위하여 기상 관측 Aerosol Robotic Network (AERONET, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)에서 제공받은 선포토크미터(sun photometer)의 시간별 AOD (500 nm) 관측값을 이용하였다. AERONET에서 제공되고 있는 AOD는 구름 효과 제거와 자료 처리 과정을 거친 Level 2.0 자료가 이용되었으며, 애월 및 인근에 측정지점이 없는 관계로 가장 가까운 곳에 위치한 고산(수월봉) 측정소(Gosan_SNU, 33°17'N, 126°9'E)의 AOD (500 nm) 자료를 이용하였다.

2.2 에어로졸 화학성분별 광학특성 산출 방법

본 연구에서는 애월 지점을 대상으로 2013년의 에어로졸 화학성분별 광학특성을 추정하기 위하여 광학모델인 Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC) 모델을 이용하였다. OPAC 모델에 대한 개요 및 자세한 설명은 Hess *et al.* (1998)에 잘 나타나 있다. 요약하면, OPAC 모델은 주어진 파장과 상대습도의 조건하에서 에어로졸 및 구름 성분의 광학특성(흡수(σ_{ab}), 산란(σ_{sc}), 소산계수(σ_{ext}), AOD 등)을 산출하는 모델로서, 에어로졸 및 water clouds에 대하여 61개 파장(0.25~40 µm 범위), ice clouds에 대하여 67개 파장(0.28~40 µm 범위)에 해당하는 광학특성의 산출이 가능하며, 총 8개의 상대습도(0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99%) 조건하에서 광학특성을 산출할 수 있다. 또한 OPAC 모델은 6개 유형의 water clouds, 3개 유형의 ice clouds, 10개 유형의 에어로졸 화학성분(water-soluble, insoluble, soot (또는 BC), sea-salt 2개 mode, mineral dust 4개 mode, sulfate droplets)에 대하여 각각의 광학특성을 산출할 수 있다. 여기서 각 에어로졸 화학성분은 여러 화학조성물들이 내부적으로 혼합되어 있는 것으로 가정한다(Hess *et al.*, 1998).

에어로졸 화학성분에 대한 OPAC 모델링을 위해, 파장조건으로는 모델 내에 주어진 에어로졸 파장 중 단 파장 영역대인 0.3~4.0 µm 범위의 총 24개 파장을 선택하였으며, 상대습도는 애월 지점에 측정소가 없는 관계로 JRMA의 시간별 상대습도 자료를 이용하여 상대습도에 따른 광학특성을 산출하였다. 또한 애월 지점에서 mineral dust와 sulfate droplets의 측정이 이루어지지 않아 에어로졸 화학성분을 총 4가지 즉, 수용성(water-soluble), 불용성(insoluble), 검댕(soot 또는 BC),

해염(sea-salt) 에어로졸로 분류하여 광학특성을 산출하였다. 여기서 water-soluble은 총 7가지 즉, non-sea-salt(NSS)-K⁺, NSS-Mg²⁺, NSS-Ca²⁺, NSS-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, 그리고 수용성 OC 성분으로 구성하였다(식 (1)). 이 중 4가지 NSS 성분인 NSS-K⁺, NSS-Mg²⁺, NSS-Ca²⁺, NSS-SO₄²⁻ 질량농도는 [ion]_{obs} - [Na] × (해수에서 Na⁺에 대한 각 이온의 질량비) 관계식을 이용하여 계산하였는데, Na⁺에 대한 K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ 이온의 질량비는 각각 0.036, 0.121, 0.041, 0.252를 적용하였다(Pilson, 1998). 한편, 수용성 OC는 측정이 이루어지지 않아 OC를 수용성 OC로 가정하였다. 관련 선행연구에 따르면(Park *et al.*, 2014), 서울 지역의 전체 OC 중 수용성 OC가 차지하는 비중이 매우 높게(70~90%) 분석된 바 있다.

에어로졸 입자의 insoluble 성분은 OC에 대한 유기물질(organic material, OM)의 비를 이용하였다(식 (2)). 이때 OC/OM 비는 계절에 따라 다르게 적용하였는데, 여름철은 2.06, 겨울철은 1.48, 봄철과 가을철은 여름철과 겨울철의 평균인 1.77을 이용하였다(Bae, 2011). 한편, 본 연구에서 BC 성분은 측정이 이루어지지 않아 대신 측정된 EC 성분을 분석에 이용하였다(식 (3)). 일반적으로 강한 흡광성을 갖는 EC는 탄소질 종류 간의 광학적 차이를 분석할 때 BC로 특징지어지기도 한다(Venkatachari *et al.*, 2006). 또한 선행연구에 따르면(Salako *et al.*, 2012), 우리나라 도시(대전)에서 BC/EC의 농도비율이 약 1.07로 나타나 두 성분 간에 큰 차이가 없는 것으로 사료된다. 마지막으로 sea-salt는 수용성 성분에서 분리된 Cl⁻과 Na⁺로 구성되었으며, 총 질량 농도는 [Cl⁻] + 1.47[Na⁺] 관계식을 이용하여 계산하였다(Quinn *et al.*, 2004)(식 (4)). 따라서 분류된 총 4가지의 화학성분의 구성에 대해 요약하면 다음과 같다.

$$[\text{Water-soluble}] = [\text{NSS-K}^+] + [\text{NSS-Mg}^{2+}] + [\text{NSS-Ca}^{2+}] + [\text{NSS-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{NH}_4^+] + [\text{OC}] \quad (1)$$

$$[\text{Insoluble}] = \{[\text{OC}] \times [\text{OM}]/[\text{OC}]\} - [\text{OC}] \quad (2)$$

$$[\text{BC}] = [\text{EC}] \quad (3)$$

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

여기서, OPAC 모델의 입력 자료를 위해 식 (1)~(4)의

화학성분별 단일입자당 질량농도를 수농도(number density)로 전환하였으며(Hess *et al.*, 1998), 이를 이용하여 모델링을 수행하였다. 여기서, 각 에어로졸 화학성분의 수직분포는 경계층(약 2km) 내에서 균일한 것으로 가정하였다.

2.3 직접적 복사강제력 산출 방법

본 연구에서는 애월 지점에서 2013년의 에어로졸 화학성분에 따른 직접적 복사강제력(DARF)을 추정하기 위하여 Santa Barbara의 캘리포니아대학교에서 개발된 대기복사전달모델 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer(SBDART)를 이용하였다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). SBDART 모델은 Discrete-ordinate-method(DISORT)를 기반으로 하여 단파(0.25~4.0 μm), 장파(4.0~100 μm), 전 파장영역(0.25~100 μm)에 대하여 맑은 또는 흐린 하늘 조건에서 지구 대기 내부와 표면의 평행 - 평면 복사 전달(예, 복사강제력)을 계산하는 모델로서, 본 연구에서는 단파장 영역에 속하는 0.3~4.0 μm 파장 영역과 구름이 없는 맑은 하늘 조건하에서 지표(SFC), 대기상단(TOA), 대기 중(atmosphere, ATM)의 직접적 복사강제력을 산출하였다. 여기서, 에어로졸에 의한 직접적 효과만을 살펴보기 위하여 구름의 효과를 제거하였는데, 전 운량이 100%인 시간대만 분석에서 제외하고 나머지 운량에 대해서는 구름이 없는 맑은 하늘(cloud free sky), 즉 전 운량을 0%로 가정하여 계산에 이용하였다.

일반적으로, 에어로졸 화학성분에 따른 SFC 및 TOA의 직접적 복사강제력(DARF_{SFC}, DARF_{TOA})은 에어로졸이 있는 경우의 복사플럭스(F)와 에어로졸이 없는 경우의 복사플럭스(F_{w/o})의 차로 계산이 되며, 각 복사플럭스는 net flux 즉 ‘하향플럭스(downward flux) - 상향플럭스(upward flux)’로 계산된다(식 (5)). 또한 대기 중의 복사강제력(DARF_{ATM})은 DARF_{TOA}와 DARF_{SFC}의 차이로 계산된다(식 (6)). 다음은 SFC, TOA, ATM에서의 에어로졸 직접적 복사강제력의 추정식을 나타낸다.

$$\text{DARF}_{\text{TOA,SFC}} = (F^{\downarrow} - F^{\uparrow})_{\text{TOA,SFC}} - (F_{\text{w/o}}^{\downarrow} - F_{\text{w/o}}^{\uparrow})_{\text{TOA,SFC}} \quad (5)$$

$$\text{DARF}_{\text{ATM}} = \text{DARF}_{\text{TOA}} - \text{DARF}_{\text{SFC}} \quad (6)$$

SBDART 모델링은 하루 24시간과 주간(daytime)에

대하여 각각 수행되었으며, 본 연구에서는 주로 주간을 대상으로 모의된 직접적 복사강제력에 대하여 살펴 보았다. 이때 주간의 기준은 계절별 일출과 일몰의 시간을 고려하여 봄철과 가을철에는 07~18시, 여름철에는 06~19시, 겨울철에는 08~17시로 분류하였다. 이외에도, SBDART 모델 수행을 위한 주요 매개변수는 AOD, 단일산란알베도(single scattering albedo, SSA), 위상함수(phase function), 대기 프로파일(기온, 기압, 오존밀도 등), 지표 알베도, 태양 천정각(solar zenith angle, SZA) 등이다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). AOD, SSA, 위상함수와 같은 광학변수 값은 OPAC 모델의 산출 결과를 이용하였으며, 대기프로파일 및 지표 알베도는 모델 내에서 제공하는 US62 대기 프로파일(고층 기상요소의 부재)과 초목환경의 지표알베도 값을 이용하였다(Hess *et al.*, 1998). 또한 SZA는 특정 위·경도와 날짜 및 시간을 지정해 줌에 따라 모델 내에서 계산되었다(Ricchiazzi *et al.*, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1 에어로졸 화학성분별 광학특성의 월/계절 변화

표 1은 연구기간 동안 애월 지점의 에어로졸 화학성분별 농도 및 500 nm 파장에서 추정된 광학특성(σ_{ab} , σ_{sc} , σ_{ex} , AOD)의 월/계절 변화를 나타낸다. 화학성분별 농도를 보면, water-soluble과 insoluble 성분은 봄철(특히 3~5월)에, BC 성분은 겨울철(12월)에, sea-salt 성분은 여름철 혹은 이른 가을(7~9월)에 높은 농도가 관측되었다. 주로 봄철에 높은 농도가 관측된 water-soluble과 insoluble 성분은 연무의 영향(특히, 3월과 5월)으로 추정되며(Ko *et al.*, 2016), 겨울철에 많은 난방연료의 사용 및 농작잔여물 연소에 의해 겨울철의 BC 성분의 농도가 증가한 것으로 추정된다(Streets *et al.*, 2003).

에어로졸 화학성분별 광학특성에 대해 가장 크게 영향을 주는 성분은 월/계절에 상관없이 water-soluble 성분으로 나타났다(BC의 σ_{ab} 제외). BC 성분의 경우, 태양복사의 가시광선과 근적외선을 잘 흡수하는 성질이 있어 농도가 가장 낮음에도 불구하고 BC의 σ_{ab} 가 가장 높게 나타났다(Song and Shon, 2014). 이외에도, water-soluble 성분의 광학특성 중 σ_{ex} 와 AOD는 5월에 가장

높게(각각 148 Mm⁻¹, 0.28), 2월에 가장 낮게 나타났으며(28.0 Mm⁻¹, 0.07), 다른 성분에 비해 월등히 높게 추정되었다. Insoluble 성분 역시 5월에 가장 높게(각각 1.05 Mm⁻¹, 0.022), 2월에 가장 낮게 나타났지만(0.28 Mm⁻¹, 0.021), 그 값들은 water-soluble 성분보다 매우 작았다. 또한 BC 성분의 σ_{ex} 와 AOD는 12월에 가장 높고(각각 14.5 Mm⁻¹, 0.05) 7월에 가장 낮았으며(5.14 Mm⁻¹, 0.03), sea-salt 성분은 9월에 가장 높게(각각 12.0 Mm⁻¹, 0.04) 12월에 가장 낮게 나타났다(2.20 Mm⁻¹, 0.02). 이러한 에어로졸 화학성분별 광학변수의 시간적 변화(월/계절 변화)는 각 성분들의 농도 변화와 매우 유사하게 나타났다(표 1).

광학특성 중 SSA는 소산되는 복사에 대하여 산란 및 흡수 능력의 상대적인 기여도를 측정하는 지수로서, 산란계수와 소산계수(산란계수와 흡수계수의 합)의 비로 나타낸다(Pokhrel *et al.*, 2016; Adesina *et al.*, 2014). 즉 산란에 비해 흡수의 영향이 상대적으로 작으면 SSA 값이 커지고, 반대로 흡수의 영향이 상대적으로 크면 SSA 값이 작아짐을 의미한다. 연구기간 동안(2013년) 애월 지점에서 에어로졸의 흡수 능력과 SSA의 관계를 살펴보기 위하여, 에어로졸 화학성분 중 태양복사 흡수와 가장 관련이 있는 BC 성분의 농도와 SSA의 월변화를 비교하였다(그림 4). 그 결과, 애월 지점에서 SSA(500 nm)는 7월에 가장 크고(0.94±0.02), 10월과 12월에 가장 작게 나타난 반면(0.87±0.03), BC 성분의 농도는 12월에 가장 높고(1.39 µg/m³), 7월에 가장 낮게 나타났다(0.47 µg/m³). 또한 7~12월 동안 SSA가 감소하는 경향을 보일 때 흡수계수(흡수 능력)가 가장 큰 BC 성분의 농도가 증가하는 경향을 나타냈다(10월의 SSA 제외). 10월에 BC 성분의 농도가 높지 않음에도 불구하고 매우 낮은 SSA가 나타난 것은 산란계수(산란능력)가 다른 성분에 비해 월등히 큰 water-soluble 성분의 농도가 매우 낮았기(5.67 µg/m³) 때문으로 추정된다(그림 제외). 이와 같이 BC 성분의 농도가 높을 때(작을 때) SSA가 작아지는(커지는) 패턴은 여러 선행 연구에서도 유사하게 나타났다(Panicker *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010). 예를 들어, 인도의 도시지역(Delhi)에서 8월에 가장 높은 SSA(0.89)가 나타날 때 가장 낮은 BC 농도(3.26 µg/m³)를 보였으며, 겨울철에 가장 낮은 SSA(0.74)가 나타날 때 가장 높은 BC 농도(16.7 µg/m³)를 보였다(Singh *et al.*, 2010).

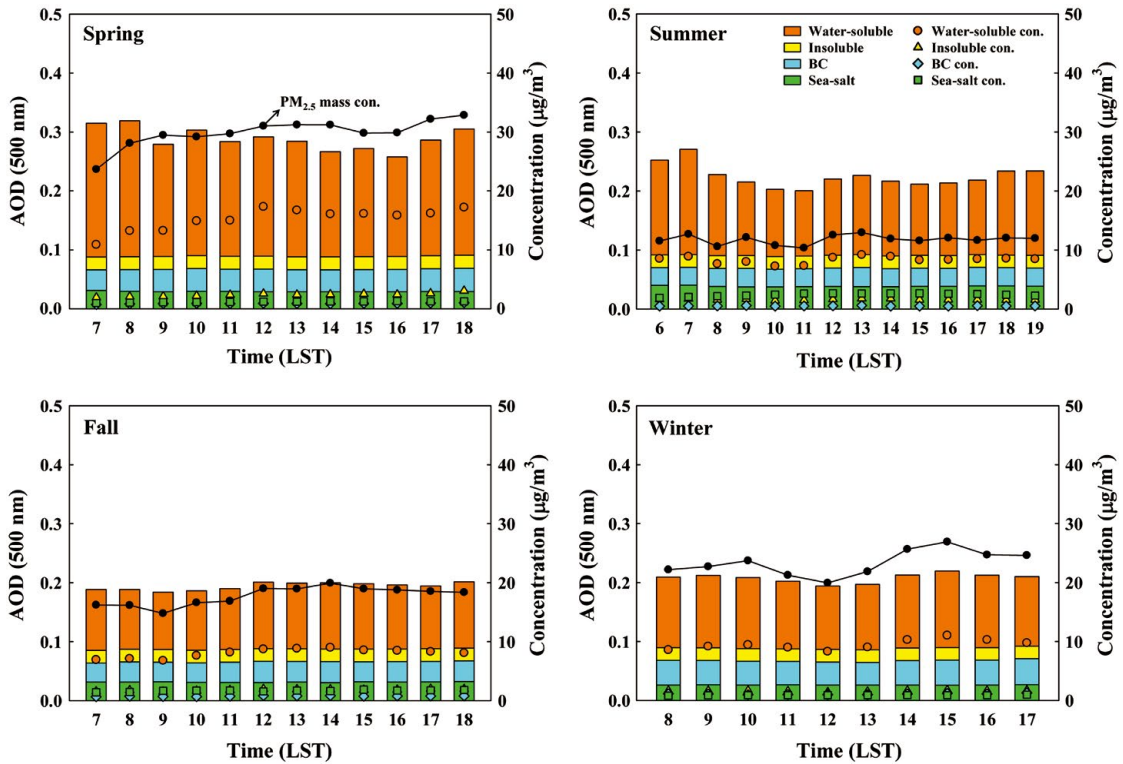


Fig. 2. Diurnal variations of concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) and aerosol optical depth (AOD, stacked bars) at 500 nm for each aerosol chemical component in $\text{PM}_{2.5}$ during four seasons in 2013.

3.2 광학특성의 일중 변화

에어로졸 광학특성 중 AOD는 대기 중 에어로졸에 의한 복사의 감쇠(산란 또는 흡수) 정도를 나타내는 지표로서, 광학특성 중 일반적으로 복사영향을 정량화하기 위하여 분석하는 변수이다. 본 연구에서는 애월 지점에서의 화학성분별 농도 및 AOD(500 nm)를 상세히 살펴보고자 계절별로 일중 변화를 분석하였다(그림 2). 전체적으로, 대상지점은 시골 산간지대에 위치하므로 도시지역과 달리 일중 AOD 값은 크지 않았으며(서울의 약 1/2 정도, Song *et al.*, 2017), 또한 AOD 일중 변화도 큰 폭의 차이는 아니었다. 계절별 일중 변화에서 AOD 값의 크기는 다소 작았지만 최고치와 최저치가 나타난 시간대는 계절별로 일부 다른 양상을 보였다. 예를 들어, 총 AOD(모든 화학성분 AOD의 합)의 경우 봄 및 여름철에는 이른 아침과 늦은 오후(18시)에 최고치가 나타났으며, 가을 및 겨울철에는 오후(각각 정오, 14~15시)에 최고치를 보였지만 다른 오전 및 오후

시간대와 비교하여 큰 폭은 아니었다. 이외에도, 화학성분별 AOD와 농도 간의 일중 변화는 봄철 오전의 water-soluble 성분을 제외하고는 계절에 관계없이 모든 시간대에서 매우 유사한 변화 패턴을 보였다. 즉, 봄철 오전(특히 07시)에 water-soluble 성분의 농도는 일중 가장 낮게 나타난 반면, AOD는 오히려 가장 높게 나타났다. 이것은 봄철 07시의 상대습도(76%)가 평균 상대습도(69%)에 비해 비교적 높아 water-soluble 성분의 흡수성장에 의해 AOD가 증가한 것으로 사료된다(Park *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2009). 관련 선행연구에 따르면(Park, 2017), 오전의 상대습도가 70%일 때의 AOD보다 85%일 때의 AOD가 0.13 정도 증가하였다는 분석결과가 발표된 바 있다.

화학성분 중 가장 높은 기여도를 보이는 water-soluble의 AOD 일중 변화는 모든 성분을 합한 총 AOD의 일중 변화와 매우 유사하였다. 즉, 대부분 계절에서 오후시간대(정오 또는 늦은 오후)에 비교적 높은 AOD

가 나타났는데(봄철과 여름철의 오전 peak 제외), 이것은 water-soluble 성분의 조성 중 높은 비중을 차지하는 SO₄²⁻의 농도가 오후에 강한 태양복사의 광화학반응으로 인해 증가함에 따라 AOD가 증가한 것으로 추정된다(Song *et al.*, 2017; Shon *et al.*, 2013). 한편, BC 성분은 일반적으로 차량이동 등과 같은 인위적인 요인이 많은 출퇴근 시간에 높은 AOD 값을 보이는데(Kondo *et al.*, 2014), 본 연구에서는 하루 중 변화가 크지 않았다. 이것은 애월 지점이 시골 산간지대에 위치해 있어 차량 등 인위적인 요인의 영향이 적기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구에서는 애월 지점의 OPAC 모델 결과를 검증하기 위하여, NASA AERONET에서 제공받은 고산(수월봉) 측정소의 AOD(500 nm)와 OPAC에 의해 모의된 AOD(500 nm)의 일평균을 서로 비교하였다(애월 지점 관측소의 부재로 인해)(그림 3). 그 결과, AERONET(지상 관측)의 평균 AOD(0.40±0.20)가 모의된 평균 AOD(4 성분 AOD의 합, 0.31±0.17)보다 크게 나타났다. 또한 AERONET 관측값과 OPAC 모델값 사이의 상관계수(r)는 0.698로 매우 높았으며 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(p-value = 3.0 × 10⁻⁴). 이러한 AERONET 관측과 OPAC 모델의 AOD 값들에서 일부 차이가 나는 이유는 관측지점과 모델 영역 간의 지리적인 위치의 차이가 크게 영향을 준 것으로 추정된다.

3.3 에어로졸 화학성분에 따른 직접적 복사강제력 추정

본 연구에서는 제주 대기오염집중측정소(애월 지점)의 2013년 PM_{2.5} 화학성분별 광학특성 자료를 이용하여 SFC, TOA, ATM에서 화학성분별 DARF의 월변화와 일중 변화를 분석하였다. 전반적으로, 애월 지점에서 주간의 총(total) DARF는 봄철에 가장 높게 가을철에 가장 낮게 추정되었다(그림 5). 자세히 분석해 보면, 5월에 DARF_{SFC}, DARF_{TOA}, DARF_{ATM}가 각각 -105, -45, +60 W/m²로 가장 높았으며, 가장 낮게 추정된 복사강제력은 10월과 11월로 나타났다. 즉, DARF_{SFC}와 DARF_{TOA}는 10월에 -53, -18 W/m²이었으며, DARF_{ATM}는 11월에 +33 W/m²로 가장 낮았다. 또한 에어로졸 화학성분 중 water-soluble 성분은 SFC와 TOA에서 음의 복사강제력(DARF_{SFC}, DARF_{TOA})에 대해 각각 36~56%, 67~85%를 차지하여 가장 높은 기여도를 나타냈

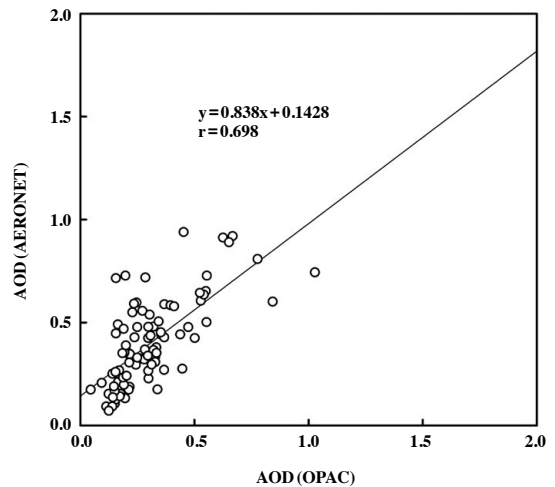


Fig. 3. Comparison of daily mean AOD (500 nm) between the OPAC model and Sun photometer observation (at the Gosan site) provided by the AERONET program (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

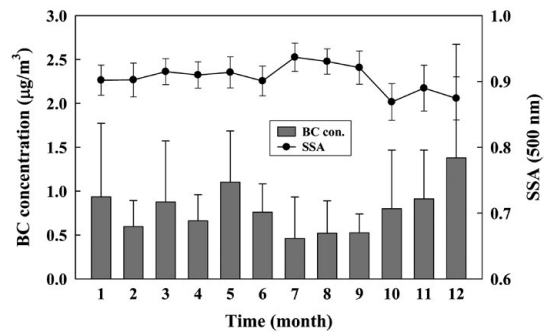


Fig. 4. Monthly variations of single scattering albedo (SSA) estimated by the OPAC model and BC concentrations at the Aewol intensive air monitoring site during the daytime in 2013. The vertical bars denote the 1 σ standard deviation from the mean values.

다. BC 성분은 SFC에서 음의 복사강제력(DARF_{SFC})에 대해 26~38%를 차지하여 water-soluble 성분 다음으로 높은 기여도를 보였으며, ATM에서 양의 복사강제력(DARF_{ATM})에 대해 62~72%로 가장 높은 기여도가 나타났다. 대상지역 BC 성분은 4가지 화학성분의 전체 농도 중에서 4~10% 정도 차지함에도 불구하고(표 1), 강한 복사 흡수성으로 인하여 ATM에서 가장 높은 양

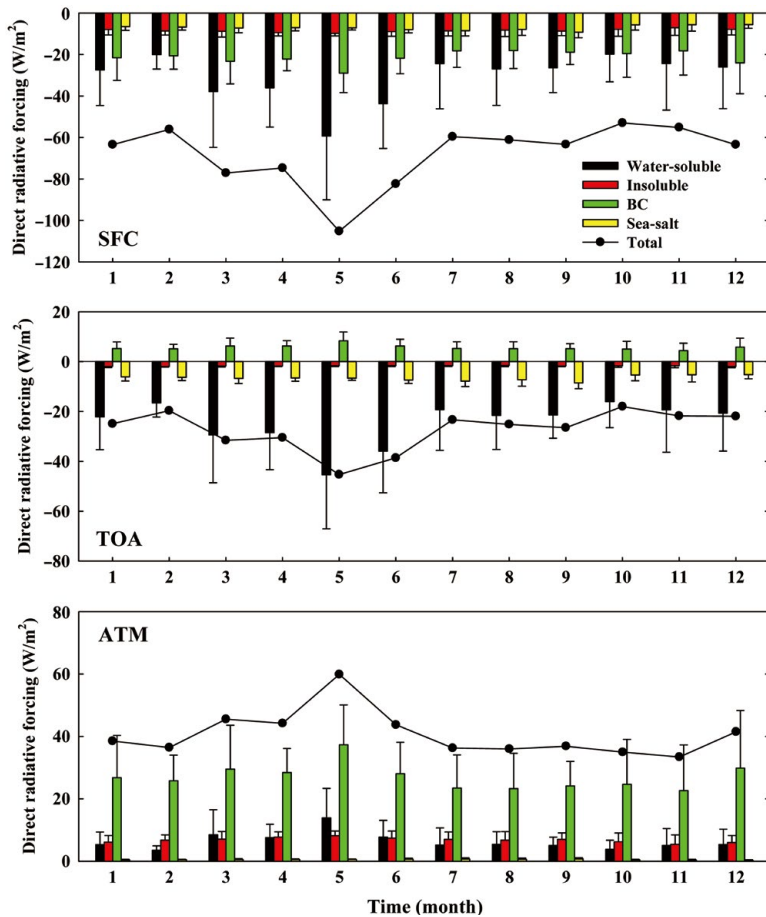


Fig. 5. Monthly variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m^2) at the SFC and TOA, and in the ATM for each aerosol chemical component in $PM_{2.5}$ at the Aewol intensive air monitoring site on Jeju Island. The vertical line represents the uncertainties corresponding to one standard deviation.

의 복사강제력이 나타난 것으로 사료된다. 한편, SFC, TOA, ATM 모두에서 insoluble과 sea-salt 성분은 각각 총 복사강제력의 17% 이하, 20% 이하로 상대적으로 매우 낮은 기여도가 추정되었다.

에어로졸 화학성분 중 음의 DARF에 대한 기여도가 가장 큰 water-soluble 성분은 봄철에 가장 높게 가을철에 가장 낮게 추정되었다(그림 5). 월별로는 5월에 $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, $DARF_{ATM}$ 가 -59 , -45 , $+14 W/m^2$ 로 가장 높게 나타났으며, 가장 낮게 추정된 $DARF_{SFC}$ 와 $DARF_{TOA}$ 는 10월에 -20 , $-16 W/m^2$, $DARF_{ATM}$ 는 2월에 $+3.5 W/m^2$ 이었다. 반면, 양의 DARF에 대한 기여도가 가장 큰 BC 성분은 봄철에 가장 높게 여름 혹은

가을철에 가장 낮게 추정되었다. 월별로는 water-soluble 성분과 마찬가지로 5월에 $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, $DARF_{ATM}$ 가 -29 , $+8.0$, $+37 W/m^2$ 로 가장 높았으며, 가장 낮게 추정된 $DARF_{SFC}$ 는 8월에 $-18 W/m^2$, $DARF_{TOA}$ 와 $DARF_{ATM}$ 는 11월에 각각 $+4.0$, $+23 W/m^2$ 이었다. 한편, 대상지역 연구기간 동안 야간을 포함한 24시간에 대해 추정된 총 DARF의 월변화 패턴은 주간 동안 추정된 총 DARF의 약 50% 수준으로 나타났다(그림 제외).

그림 6과 7은 에어로졸 화학성분별 SFC와 TOA에서 복사강제력의 일중 변화를 4계절로 분류하여 각각 나타낸다. 먼저 SFC에서 총 DARF는 계절과 상관없이

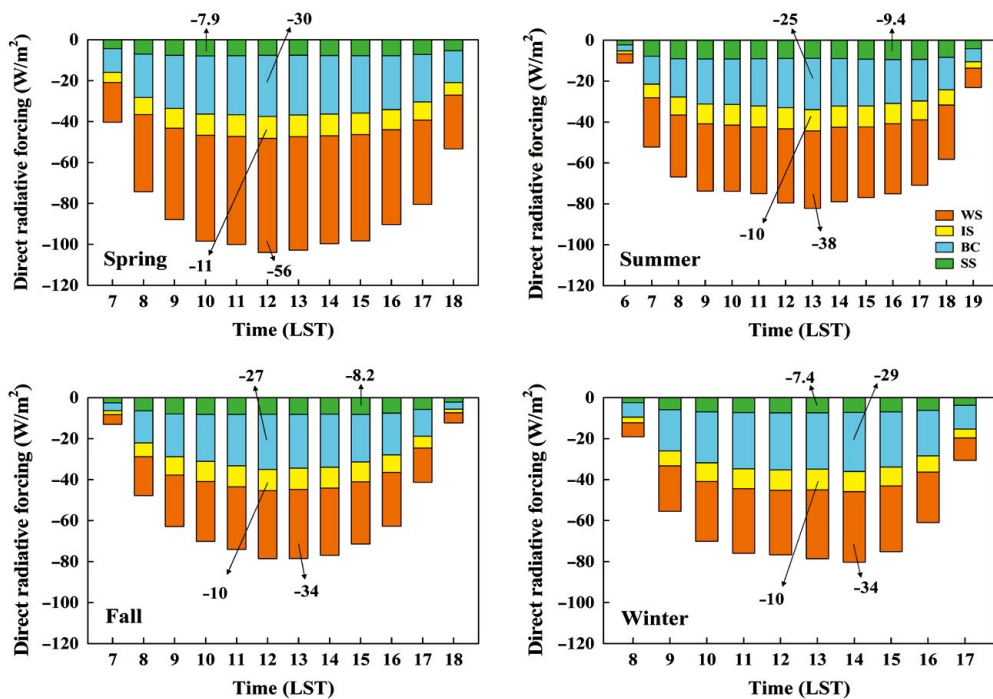


Fig. 6. Diurnal variations of direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m²) at the surface (SFC) for each aerosol chemical component in PM_{2.5} during four seasons in 2013. The number within the figures represents the maximum value for each aerosol chemical component. WS: water-soluble, IS: insoluble, BC: black carbon, and SS: sea-salt.

아침에서 오후로 갈수록 커져 12~14시경에 최고치를 나타내며, 이후 다시 감소하는 경향을 보였다(그림 6). 예를 들어, 4계절 중 가장 높은 DARF를 나타내는 봄철의 총 음의 DARF는 정오에 -104 W/m²로 가장 큰 값을 나타냈으며, 그 이후로 점차 감소하는 패턴을 보였다. 화학성분별 일중 변화를 보면, water-soluble 성분은 4계절 모두 오후 12~14시에 DARF_{SFC}가 -34~-56 W/m²로 가장 높았으며, 같은 시간대에 BC 성분은 -25~-30 W/m², insoluble 성분은 -10~-11 W/m²로 가장 높게 추정되었다. 또한 3 성분 모두 가장 낮게 추정된 시간대는 오전과 늦은 오후로 나타났다. 이와 반대로 sea-salt 성분은 봄철에만 오전(10시경)에 최고치(-7.9 W/m²)를 보였으며, 나머지 계절은 오후시간대에 최고치(-7.4~-9.4 W/m² 범위)가 나타났다. 본 연구에서 추정된 water-soluble 성분의 오후 높은 DARF는 오후시간대 증가된 광화학 생성으로 인해 고농도 SO₄²⁻가 나타나는 일중 변화 패턴과 일부 관련이 있는 것으로 추정된다(Shon *et al.*, 2013). 이러한 에어로졸 화학

성분별 DARF의 일중 변화 차이는 에어로졸 광학특성(예, AOD), 현지 시간(또는 SZA), 그리고 그들의 농도 변화의 차이에 의한 것으로 추정할 수 있다(Russell *et al.*, 1999). 한편, TOA에서의 총 DARF는 봄철 오전(10시경)에 나머지 계절은 오후시간대(13~16시)에 가장 높게 추정되었다(그림 7). 화학성분별로 보면, 4계절 모두 water-soluble과 BC 성분은 정오~14시에 가장 높았고(특히, 봄철 12시에 각각 -42, +10 W/m²), insoluble과 sea-salt 성분은 오전(8~10시) 혹은 늦은 오후(16~18시)에 높게 나타났다.

표 2는 국내외 여러 선행연구에서 산출된 복사강제력(DARF)과 본 연구결과와의 비교를 나타낸다. 서로 다른 연구기간 동안 국내 배경지역인 제주도 고산에서의 화학성분별 DARF를 비교해 보면, 2001년 4월 water-soluble 성분의 평균 DARF_{SFC}와 DARF_{TOA}는 각각 -4.3~-9.6 W/m²와 -2.7~-7.3 W/m²로 추정되었으며(Yoon and Kim, 2006), 같은 해 4월 다른 선행연구에서(Kim *et al.*, 2006) water-soluble 성분은 -10.3

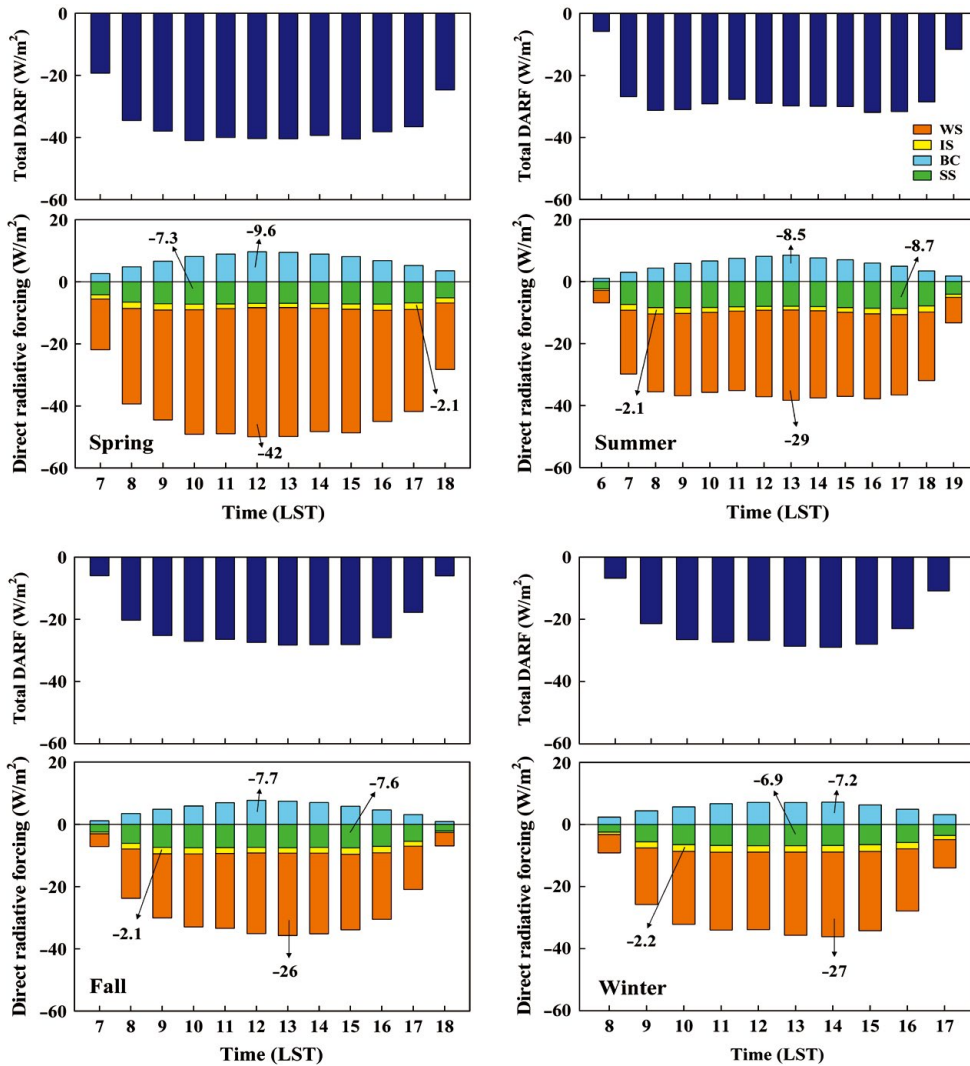


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for the direct aerosol radiative forcing (DARF, W/m²) at the TOA for each aerosol chemical component and total net DARF in PM_{2.5}.

W/m², BC 성분은 -10.1 W/m²로 추정되었다. 같은 지점인 고산에서 2010~2014년 동안 산출된 water-soluble 성분의 평균 DARF_{SFC}와 DARF_{TOA}는 각각 -28~-58 W/m²와 -22~-44 W/m², sea-salt 성분은 각각 -6.5~-8.0 W/m²와 -6.0~-7.4 W/m²이었다(Park, 2017). 이외에도, 2005년 5월 고산지역 총 에어로졸에 대한 평균 DARF_{SFC}와 DARF_{TOA}는 각각 -21 W/m²와 -8.3 W/m²(Takamura *et al.*, 2007), 2001~2008년 동안에는 각각 -28 W/m²와 -16 W/m²로 추정되었다(Kim

et al., 2010). 한편, 국외 배경지역에서의(아라비아 해, 벵골만) 총 에어로졸에 대한 평균 DARF_{SFC}와 DARF_{TOA}는 각각 -16~-31 W/m²와 -9~-12 W/m²로 산출되었다(Kedia *et al.*, 2010; Ramachandran, 2005). 본 연구의 애월 지점에서 추정된 화학성분별 DARF는 국내의 다른 배경지역과 비교해 볼 때 다소 높게 나타나거나 또는 일부 유사한 수준을 보였다.

다른 여러 도시지역의 에어로졸 화학성분별 DARF를 비교해 보면(표 2), 서울지역 water-soluble 성분의

Table 2. Comparison of direct aerosol radiative forcing (DARF) between different studies.

Location	Study period (wavelength, μm)	Type	DARF _{sc} (W/m ²)	DARF _{tox} (W/m ²)	Reference
Aeol, South Korea	2013 (0.3~4.0)	Water-soluble	-20 ± 13 to -59 ± 31	-16 ± 10 to -45 ± 22	This study
		Insoluble	-7.0 ± 3.8 to -9.8 ± 1.2	-1.5 ± 0.5 to -1.9 ± 0.3	
		BC	-18 ± 8.6 to -29 ± 9.3	+4.4 ± 3.0 to +8.4 ± 3.5	
		Sea-salt	-5.6 ± 1.8 to -9.3 ± 2.6	-5.2 ± 1.6 to -8.5 ± 2.3	
Gosan, South Korea	2010~2014 (0.3~4.0)	Water-soluble	-27.7 to -57.8	-21.6 to -44.2	Park, 2017
		Sea-salt	-6.5 to -8.0	-6.0 to -7.4	Kim <i>et al.</i> , 2006
Gosan, South Korea	Apr 2001 (0.285~4.0)	Water-soluble	-10.3	-	Yoon and Kim, 2006
		BC	-10.1	-	
Gosan, South Korea	11~13 Apr 2001 (0.55)	Water-soluble	-4.3 to -9.6	-2.7 to -7.3	Takamura <i>et al.</i> , 2007 Kim <i>et al.</i> , 2010
		Water-soluble	-4.3 to -9.6	-2.7 to -7.3	
Gosan, South Korea	Mar 2005	Aerosol	-20.8 ± 9.0	-8.3 ± 5.3	Ramachandran, 2005
		Aerosol	-28 ± 9.2	-16 ± 4.4	
Gosan, South Korea	2001~2008 (0.2~5.0)	Aerosol	-31	-9	Kedia <i>et al.</i> , 2010
		Aerosol	-16	-11	
Bay of Bengal, India	Feb~Mar 2001 (0.4~0.85)	Aerosol	-16	-12.0	Song <i>et al.</i> , 2017
		Aerosol	-22.4	-48 ± 24	
Arabian Sea Bay of Bengal, India	Mar~Apr 2006 (0.25~4.0)	Water-soluble	-63 ± 32	-1.7 ± 0.6	Badarinarath and Latha, 2006 Satheesh <i>et al.</i> , 2010
		Insoluble	-8.8 ± 3.1	+8.7 ± 5.4	
Seoul, South Korea	2010 (0.3~4.0)	BC	-32.7 ± 18.9	-5.5 ± 2.0	Panicker <i>et al.</i> , 2010
		Sea-salt	-5.9 ± 2.2	+9	
Hyderabad, India	Jan~May 2003	BC	-33	+2 to +5	Singh <i>et al.</i> , 2010
		BC	-20 to -40	-1.4 ± 0.4 to +21 ± 2	
Bangalore, India	Nov 2004 to May 2005 (0.25~4.0)	BC	-20 to -40	+3.1 to +3.9	Singh <i>et al.</i> , 2010
		BC	-14.1 to -19.5	-	
Pune, India	Oct 2004 to May 2005 (0.3~3.0)	BC	-14.1 to -19.5	-	Singh <i>et al.</i> , 2010
		BC	-46 ± 8 to -110 ± 20	-	
Delhi, India	Jan 2006 to Jan 2007 (0.3~3.0)	BC	-46 ± 8 to -110 ± 20	-	Singh <i>et al.</i> , 2010
		BC	-46 ± 8 to -110 ± 20	-	

평균 $DARF_{SFC}$ 와 $DARF_{TOA}$ 는 각각 -63 , -48 W/m^2 , insoluble 성분은 -8.8 , -1.7 W/m^2 , BC 성분은 -33 , $+8.7 \text{ W/m}^2$, sea-salt 성분은 -5.9 , -5.5 W/m^2 로 추정된 바 있다(Song *et al.*, 2017). 또한 인도의 도시지역에서 BC 성분에 의한 평균 $DARF_{SFC}$ 와 $DARF_{TOA}$ 는 각각 -14 (Pune)~ -110 W/m^2 (Delhi), -1.4 (Delhi)~ $+21 \text{ W/m}^2$ (Delhi)로 추정되었다(Panicker *et al.*, 2010; Satheesh *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010; Badarinath and Latha, 2006). 특히 인도의 메가시티인 Delhi 지역의 높은 양의 $DARF_{TOA}$ 는 주로 증가된 BC 농도로 인해 매우 큰 흡수성에 기인한 것으로 추정할 수 있다(Seinfeld and Pandis, 2016; Singh *et al.*, 2010). 이러한 도시지역과 애월 지점(본 연구)의 $DARF$ 를 비교해 볼 때 insoluble과 sea-salt 성분은 비교적 유사하였지만, water-soluble과 BC 성분은 도시지역이 조금 높게 또는 매우 큰 차이를 보였다(특히, 인도 Delhi의 BC 성분에 따른 $DARF_{SFC}$ 는 애월 지점의 최고 6배). 이와 같이 서로 다른 지역에서의 $DARF$ 차이는 연구대상지역 및 연구기간의 차이뿐만 아니라 화학성분별 농도, 입자 크기, 지표 알베도, 복사 파장(wavelength) 등의 차이로 인해 기인된 것으로 사료된다(Liao and Seinfeld, 1998).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2013년 제주 대기오염집중측정소(애월 지점)의 시간별 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도 자료를 이용하여 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성 및 직접적 복사강제력을 산출하였다(각각 OPAC과 SBDART 모델링을 통해). 전반적으로, 에어로졸 화학성분 중 water-soluble 성분이 광학특성에 미치는 영향(또는 기여도)이 가장 큰 것으로 나타났다(BC의 σ_{ab} 제외). 연구기간 동안 에어로졸 광학특성(예, σ_{ex} 와 AOD)의 높은 수치는 water-soluble과 insoluble 성분에 대해 주로 봄철에, BC 성분은 겨울철에, sea-salt 성분은 여름철 또는 이른 가을철에 나타났다. 광학특성(예, AOD)의 계절별 일중 변화를 보면, 봄 및 여름철에는 이른 아침과 늦은 오후(18시)에 최고치를 보였으며, 가을 및 겨울철은 대체로 오후(각각 정오와 14~15시)에 최고치가 나타났지만 다른 시간대와 비교하여 매우 미세한 차이였다. 또한 화학성분별 AOD와 농도의 일중 변화는 대체로(봄철

오전의 water-soluble 제외) 계절에 관계없이 모든 시간대에서 서로 유사한 패턴을 보였다. 봄철 오전에 water-soluble 성분의 농도는 일중 가장 낮은 반면, AOD는 오전에 높은 상대습도(평균 69%보다 다소 높은 76%)에 의한 water-soluble 성분의 흡수성장에 의해 증가한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 에어로졸 화학성분에 따른 광학특성은 각 성분의 농도 변화뿐만 아니라 상대습도의 변화에도 상당한 영향을 받는 것으로 사료된다.

대상지역(애월 지점)에서 에어로졸 화학성분 중 $DARF$ 에 미치는 영향(또는 기여도)은 광학특성과 마찬가지로 water-soluble 성분이 가장 크게 나타났다. 연구기간 동안 water-soluble 성분의 음의 복사강제력은 봄철에 가장 높고 가을 또는 겨울철에 가장 낮게 나타났다. 특히 5월에 $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, $DARF_{ATM}$ 는 각각 -59 , -45 , $+14 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높았으며, $DARF_{SFC}$ 와 $DARF_{TOA}$ 는 10월(-20 , -16 W/m^2)에, $DARF_{ATM}$ 는 2월($+3.5 \text{ W/m}^2$)에 가장 낮았다. BC 성분은 water-soluble 성분과 마찬가지로 봄철(5월)에 $DARF_{SFC}$, $DARF_{TOA}$, $DARF_{ATM}$ 가 가장 높고(각각 -29 , $+8.0$, $+37 \text{ W/m}^2$), 여름 또는 가을철에 가장 낮게($DARF_{SFC}$ 는 8월에 -18 W/m^2 , $DARF_{TOA}$ 와 $DARF_{ATM}$ 는 11월에 $+4.0$, $+23 \text{ W/m}^2$) 추정되었다. 일중 변화를 보면, $DARF_{SFC}$ 는 계절 또는 화학성분과 상관없이 모두 정오부터 오후 2시 사이에 가장 크게 추정된 반면, $DARF_{TOA}$ 는 대체로(봄철 제외) 오후시간대(13~16시)에 가장 크게 추정되었다. 이는 오후시간대에 비교적 활발한 광화학반응으로 인해 에어로졸 성분(특히, water-soluble과 전구물질) 농도가 증가함에 따라 이들의 $DARF$ 또한 증가한 것으로 추정할 수 있다. 결론적으로, 본 연구에서는 에어로졸 화학성분이 $DARF$ 에 미치는 영향이 시간적 변화(월/계절 및 일중 변화)에 따라 달라진다는 것을 확인하였으며, 이러한 $DARF$ 변화는 대상지역 에어로졸 화학성분 농도와 광학특성, 그리고 기상 및 환경 조건(지표 알베도, 입자 크기, 상대습도 등)에 따라 크게 변화할 수 있다.

현재 우리나라는 에어로졸 화학성분 농도를 측정하는 관측망과 시간별 농도 자료가 매우 부족한 실정이므로, 대기 중 에어로졸의 복사효과(국지 또는 지역적)를 이해하고 나아가 기후변화를 평가하는 데 많은 한계가 있다. 향후 보다 상세하고 정확한 분석을 위하여 에어로졸 성분에 대한 관측망 확충이 요구되며, 또한

복사강제력에 대한 여러 기상조건의 민감도 분석과 함께 3차원 수치모델링을 통한 공간적 분석 연구가 반드시 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1A2B2003616). 또한 이 연구는 기상청 기후변화감시예측 및 국가정책지원강화 사업(KMIPA 2015-2050)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adesina, A.J., K.R. Kumar, V. Sivakumar, and D. Griffith (2014) Direct radiative forcing of urban aerosols over Pretoria (25.75°S, 28.28°E) using AERONET Sunphotometer data: First scientific results and environmental impact, *Journal of Environmental Sciences*, 26(12), 2459-2474.
- Albrecht, B.A. (1989) Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness, *Science*, 245(4923), 1227-1230.
- Badarinath, K.V.S. and K.M. Latha (2006) Direct radiative forcing from black carbon aerosols over urban environment, *Advances in Space Research*, 37(12), 2183-2188.
- Bae, M.S. (2011) Seasonal estimation of organic mass to organic carbon (OM/OC ratio), *Proceedings of 49th meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, 182-182.
- 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(5), 831-844.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *IPCC Fifth Assessment Report - Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Kaskaoustis, D.G., H.D. Kambezidis, N. Hatzianastassiou, P.G. Kosmopoulos, and V.S. Badarinath (2007) Aerosol climatology: on the discrimination of aerosol types over four AERONET sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(3), 6357-6411.
- Kedia, S., S. Ramachandran, A. Kumar, and M.M. Sarin (2010) Spatiotemporal gradients in aerosol radiative forcing and heating rate over Bay of Bengal and Arabian Sea derived on the basis of optical, physical, and chemical properties, *Journal of Geophysical Research*, 115(D7), D07205.
- 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(35), 6718-6729.
- Kim, S.W., I.J. Choi, and S.C. Yoon (2010) A multi-year analysis of clear-sky aerosol optical properties and direct radiative forcing at Gosan, Korea (2001-2008), *Atmospheric Research*, 95(2), 279-287.
- Ko, H.-J., J.-M. Song, J.W. Cha, J. Kim, S.-B. Ryoo, and C.-H. Kang (2016) Chemical composition characteristics of atmospheric aerosols in relation to haze, Asian dust and mixed haze-Asian dust episodes at Gosan site in 2013, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3), 289-304. (in Korean with English abstract)
- Kondo, M.C., C. Mizes, J. Lee, and I. Burstyn (2014) Black carbon concentrations in a goods-movement neighborhood of Philadelphia, PA, *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(7), 4605-4618.
- Liao, H. and J.H. Seinfeld (1998) Radiative forcing by mineral dust aerosols: sensitivity to key variables, *Journal of Geophysical Research*, 103(D24), 31637-31645.
- Panicker, A.S., G. Pandithurai, P.D. Safai, S. Dipu, and D.-I. Lee (2010) On the contribution of black carbon to the composite aerosol radiative forcing over an urban environment, *Atmospheric Environment*, 44(25), 3066-3070.
- Park, D.-J., J.-Y. Ahn, H.-J. Shin, and M.-S. Bae (2014) Characteristics of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(5), 461-476. (in Korean with English abstract)
- Park, J.-S., S.-M. Park, I.-H. Song, H.-J. Shin, and T.-D. Hong (2015) Characteristics of Visibility Impairment by Semi-Continuous Optical and Chemical Property Monitoring of Aerosols in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 319-329. (in Korean with English abstract)
- Park, Y.-H. (2017) Temporal and Spatial Variations in Aerosol

- Concentrations and the Impact of Different Aerosol Chemical Components on Direct Radiative Forcing in Jeju Area, Jeju national university, Jeju, 64pp. (in Korean with English abstract)
- Pilson, M.E.Q. (1998) *An Introduction to the Chemistry of the Sea*, Prentice Hall, New Jersey, 431 pp.
- Pokhrel, R.P., N.L. Wagner, J.M. Langridge, D.A. Lack, T. Jayaratne, E.A. Stone, C.E. Stockwell, R.J. Yokelson, and S.M. Murphy (2016) Parameterization of single-scattering albedo (SSA) and absorption Ångström exponent (AAE) with EC/OC for aerosol emissions from biomass burning, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(15), 9549-9561.
- 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, *Journal of Geophysical Research*, 109(D19), D19S01.
- Ramachandran, S. (2005) Aerosol radiative forcing over Bay of Bengal and Chennai: Comparison with maritime, continental, and urban aerosol models, *Journal of Geophysical Research*, 110(D21), D21206.
- Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle (1998) SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2101-2114.
- Russell, P.B., P.V. Hobbs, and L.L. Stowe (1999) Aerosol properties and radiative effects in the United States East Coast haze plume: an overview of the Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment (TARFOX), *Journal of Geophysical Research*, 104(D2), 2213-2222.
- Salako, G.O., P.K. Hopke, D.D. Cohen, B.A. Begum, S.K. Biswas, G.G. Pandit, Y.-S. Chung, S.A. Rahman, M.S. Hamzah, P. Davy, A. Markwitz, D. Shagijamba, S. Lodoysamba, W. Wimolwattanapun, and S. Bunprapob (2012) Exploring the variation between EC and BC in a variety of locations, *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1), 1-7.
- Satheesh, S.K., V. Vinoj, and K.K. Moorthy (2010) Radiative effects of aerosols at an urban location in southern India: Observations versus model, *Atmospheric Environment*, 44(39), 5295-5304.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, third edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 1152 pp.
- Shon, Z.-H., S. Ghosh, K.-H. Kim, S.-K. Song, K. Jung, and N.-J. Kim (2013) Analysis of water-soluble ions and their precursor gases over diurnal cycle, *Atmospheric Research*, 132-133, 309-321.
- Singh, S., K. Soni, T. Bano, R.S. Tanwar, S. Nath, and B.C. Arya (2010) Clear-sky direct aerosol radiative forcing variations over mega-city Delhi, *Annales Geophysicae*, 28(5), 1157-1166.
- Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2014) Temporal variations in optical properties and direct radiative forcing of different aerosol chemical components in Seoul using hourly aerosol sampling, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(1), 1-17. (in Korean with English abstract)
- Song, S.-K., Z.-H. Shon, and Y.-H. Park (2017) Diurnal and seasonal characteristics of the optical properties and direct radiative forcing of different aerosol components in Seoul megacity, *Science of the Total Environment*, 599-600, 400-412.
- Streets, D.G., K.F. Yarber, J.H. Woo, and G.R. Carmichael (2003) Biomass burning in Asia: annual and seasonal estimates and atmospheric emissions, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 10-1-10-20.
- Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Aoki, T. Nakajima, B.J. Sohn, and H. Takenaka (2007) Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005, *Journal of Geophysical Research*, 112(D22), D22S36.
- Venkatachari, P., L. Zhou, P.K. Hopke, D. Felton, O.V. Rattigan, J.J. Schwab, and K.L. Demerjian (2006) Spatial and temporal variability of black carbon in New York City, *Journal of Geophysical Research*, 111(D10), D10S05.
- Yan, P., X. Pan, J. Tang, X. Zhou, R. Zhang, and L. Zeng (2009) Hygroscopic growth of aerosol scattering coefficient: A comparative analysis between urban and suburban sites at winter in Beijing, *Particulology*, 7(1), 52-60.
- Yoon, S.C. and J.Y. Kim (2006) Influences of relative humidity on aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during ACE-Asia, *Atmospheric Environment*, 40(23), 4328-4338.