2009-2010년 봄철 심한 황사 사례에 대한 에어러솔 크기 분포와 광학적 특성

강동훈^{1),3)} · 김지영^{2),*} · 김경익³⁾ · 임병숙¹⁾

¹⁾기상청 기후변화감시센터

²⁾기상청 예보국

³⁾경북대학교 천문대기과학과

(접수: 2012년 7월 9일, 수정: 2012년 8월 20일, 게재확정일: 2012년 8월 30일)

Aerosol Size Distributions and Optical Properties during Severe Asian Dust Episodes Measured over South Korea in Spring of 2009-2010

Dong-Hun Kang^{1),3)}, Jiyoung Kim^{2),*}, Kyung-Eak Kim³⁾, and Byung-Sook Lim¹⁾

¹⁾Korea Global Atmosphere Watch Center, Korea Meteorological Administration

²⁾Forecast Bureau, Korea Meteorological Administration

³⁾Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University

(Received: 9 July 2012, Revised: 20 August 2012, Accepted: 30 August 2012)

Abstract Measurements of PM₁₀ mass concentration, aerosol light scattering and absorption coefficients as well as aerosol size distribution were made to characterize the aerosol physical and optical properties at the two Korean WMO/GAW regional stations, Anmyeondo and Gosan. Episodic cases of the severe Asian dust events occurred in spring of 2009-2010 were studied. Results in this study show that the aerosol size distributions and optical properties at both stations are closely associated with the dust source regions and the transport routes. According to the comparison of the PM₁₀ mass concentration at both stations, the aerosol concentrations at Anmyeondo are not always higher than those at Gosan although the distance from the dust source region to Anmyeondo is closer than that of Gosan. The result shows that the aerosol concentrations depend on the transport routes of the dust-containing airmass. The range of mass scattering efficiencies at Anmyeon and Gosan was 0.50~1.45 and 0.62~1.51 m²g⁻¹, respectively. The mass scattering efficiencies are comparable to those of the previous studies by Clarke *et al.* (2004) and Lee (2009). It is noted that anthropogenic fine particles scatter more effectively the sunlight than coarse dust particles. Finally, we found that the aerosol size distribution and optical properties at Anmyeondo and Gosan show somewhat different properties although the samples for the same dust episodic events are compared.

Keywords: Asian dust, Aerosol size distribution, Optical properties, Mass scattering efficiency

1. 서 론

대기 중에 부유하는 에어러솔은 지표로 입사하는 태양 복사를 흡수 또는 산란시키거나, 구름 응결핵 (cloud condensation nuclei)으로 작용하여 구름의 양과 수명을 변화시키는 과정을 통하여 지구-대기의 복사 평형에 영향을 준다 (Charlson *et al.*, 1992). 또한 대

*Corresponding Author: Dr. Jiyoung Kim, National Typhoon Center, Forecast Bureau, Korea Meteorological Administration, Jeju 699-942, Korea
Phone : +82-70-7850-6355, Fax : +82-64-805-0366
E-mail : aceasia@korea.kr

기 중 에어러솔은 태양광을 산란 또는 흡수하는 과정에서 복사에너지의 강도 변화 뿐 아니라 대기의 광화학적 반응에도 상당한 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 특히 대류권 에어러솔은 지역적으로 크기 분포나 화학조성이 매우 다양하기 때문에 이에 대한 체계적인 관측연구가 중요하다 (Zhang *et al.*, 1998).

동아시아 지역에서 발생하는 황사와 같은 토양기원의 먼지 (mineral dust)의 전체적인 순환과정은 지구 시스템 과학의 핵심적 주제로 부상하고 있으며 (Shao *et al.*, 2011), 기후 시스템 및 대기환경에 미치는 영향도 매우 큰 것으로 알려져 있다 (Yu *et al.*, 2006). 특히, 에어러솔의 물리·화학적 특성에 대한 이해는 에어러솔이 지역 대기질에 미치는 영향을 규명하는데 중요하다 (Horvath *et al.*, 1996). 세계최대의 에어러솔 발생지역 중 하나인 동아시아는 황사 뿐 아니라 중국의 산업 밀집지역으로부터 각종 인위적 에어러솔과 대기오염 물질들이 다량 배출되고 있다. 또한 대기 중으로 배출된 에어러솔과 그 전구물질 (precursor)들은 물리화학적 변환과정을 거치면서 편서풍을 타고 동쪽으로 장거리 수송되는 과정에서 풍하 측에 위치한 지역이나 국가에 다양한 영향과 피해를 준다 (Seinfeld *et al.*, 2004; Carrico *et al.*, 2003). 황사 발생 시에 미세입자 농도가 높아질 경우 지표에 도달하는 일사량 감소나 지구알베도 증가로 지구-대기의 복사수지에 상당한 영향을 미치게 된다. 또한 황사가 심할 경우 호흡기질환, 심혈관질환, 안질환 등의 발생율이 크게 증가하는 것으로 알려져 있기 때문에 황사현상은 보건학적 측면에서도 매우 중요하다 (Kwon *et al.*, 2002). 황사가 심할 때 시정이 악화되어 항공기 운항에 차질을 빚게 되고, 반도체나 정밀기기에 황사입자가 침착되면 제품 불량률이 높아지며, 기기의 고장을 유발하는 등 황사는 보건, 의료, 산업, 환경 등 다양한 측면에서 피해를 유발하는 것으로 알려져 있다 (한국환경정책·평가연구원, 2003; Monn *et al.*, 1997).

황사 등 대기 중 에어러솔은 성질이 매우 다양하기 때문에 전지구적 기후변화 연구에 있어 에어러솔의 역할과 작용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Yoon *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2008). 특히 최근의 황사 연구는 물리, 화학, 광학적 특성에 대한 연구에 국한되지 않고, 수치모델 (조창범 등, 2007), 위성 (김미자 등, 2008; Chung *et al.*, 2005) 및 라이다 (Won *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2008)에 이르기까지 광범위한 분야에서 수행되고 있다. 황사 시 에어러솔의 물리화학적 특성에 관한 선행연구로 봄철 황사 기간 동안 황사와 비황사 에어러솔의 산란 및 흡수 특성 연구 (김지영 등, 2003), 광학 입자 계수기를 이용한 에어러솔의 크기분포 (김지영 등, 2002), 입자 크기별 부피농도 분포 특성 연구 (이영곤 등, 2008),

네펠로미터와 에셀로미터를 이용한 에어러솔의 광산란 및 흡수도에 대한 관측 연구 (김지영 등, 2003; Kim *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006) 등이 있다. 심한 황사 사례에 대한 연구로는 황사 농도 단기예측모델 연구 (조창범 등, 2007), 라이다와 썬포토메터를 이용한 에어러솔의 광학적 특성 연구 (이병일 등, 2008), 황사의 비구형성이 에어러솔 광학적 두께 산출에 미치는 영향 연구 (이현주 등, 2012), MODIS를 이용한 황사 탐지 (박주선 등, 2012) 등 다수가 있으나, 우리나라의 대표적인 배경농도 관측지점인 안면도와 고산에서의 종합적인 에어러솔 관측 자료를 사용하여 황사의 특성을 비교한 연구는 드문 실정이다.

대기 중 에어러솔의 광학적 성질은 크기분포와 굴절률에 의하여 결정된다. 특히, 에어러솔의 크기분포는 광소산 효율을 결정하는데 중요한 요소로서, 가시광선의 파장과 비슷한 크기를 가진 입자의 수농도가 높을 때 소산효과가 가장 크게 나타나게 된다. 최근에 Lee (2009)는 황사 시 캘리포니아 해변에서 관측한 에어러솔의 단위 질량당 소산 효율 (mass extinction efficiency)을 분석하였고, 이시혜 등 (2008)은 화학성분별 에어러솔의 광학 분석을 위해 서울과 고산에서 관측한 에어러솔의 광소산 효율 (light extinction efficiency)을 구한 바 있다. 그러나, 에어러솔의 기후강제효과 산정 측면에서 고농도 황사 사례의 관측자료를 이용한 광산란 효율 산출 연구는 그 중요성에도 불구하고 여전히 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 2009년과 2010년 봄철에 나타났던 고농도의 황사 사례에 대해 충남 안면도와 제주도 고산에서 측정된 자료를 이용하여 황사 발원지와 이동경로에 따른 에어러솔 크기 분포와 광학적 성질 및 에어러솔의 크기에 따른 산란 효율 특성을 규명하고자 수행하였다.

2. 관측

충남 태안군 안면도에 위치한 기후변화감시센터 (이하 안면도)는 WMO/GAW (Global Atmosphere Watch)의 지역급 관측소로서 한반도 중부 서해안(36° 32'N, 126° 19'E, 45.7 m a.s.l)에 위치해 있다. 안면도에서는 1996년부터 온실가스, 반응가스, 에어러솔, 산성비 등 다양한 기후변화 원인물질을 관측하고 있으며, 관측소 주변 수십 km 이내에 큰 산업시설이 없어 인위적 오염원의 영향을 비교적 덜 받는 것으로 알려져 있다 (기상청, 2010a).

제주도 고산 관측소 (이하 고산)는 제주특별자치도 서쪽 해안에 위치해 있으며 (33° 17'N, 126° 09'E, 71 m a.s.l), 지역적 대기오염원이 적은 청정한 지역으로서 아시아 대륙으로부터 장거리 수송되는 에어러솔을 관

측하기에 적합한 장소로 알려져 있다 (Kim *et al.*, 1998). 이러한 이유로 고산 관측소에서는 2001년에 에어러솔의 복사강제력 및 물리·화학적 특성 연구를 위해 ACE-Asia (Asia-Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) 프로그램이 수행 되는 등 그동안 많은 연구가 이루어진 바 있다.

본 연구에서는 심한 황사 사례에 대해 에어러솔의 농도 분포와 광학적 특성을 분석하기 위해 안면도와 고산에서 WMO/GAW (Global Atmosphere Watch) 프로그램에서 권고하는 방법 (기상청, 2010a와 b)에 따라 동일한 기기와 방법으로 관측한 자료를 사용하였다 (Fig. 1). 에어러솔 크기 분포 분석을 위해 안면도와 고산의 APS (Aerodynamic Particle Sizer, 이하 APS) 관측 자료를 사용하였으며, 0.5~20.0 μm 사이 입자에 대해 크기 별 수농도를 분석하였다. APS는 입자가속 노즐과 광산란 장치로 구성된 측정부로 유입되는 입자의 크기에 따른 속도를 측정하고 APD (Avalanche Photo Detector)에서 산란을 감지하여 입자의 크기 별 농도를 측정한다. APS는 0.5~20.0 μm 입경의 에어러솔을 52개의 입경 구간에 대해 수농도를 매 3분마다 관측하며, APS의 샘플 및 외부 유량은 각각 1 L/min과 4 L/min이며, 수농도에 대한 측정 불확실성은 약 $\pm 10\%$ 정도이다 (이영근 등, 2008). 이를 통해 부피농도 ($dV/d\log D_p$)는 다음과 같은 관계식을 통해 계산할 수 있다 (Hobbs, 2000). 여기서 N은 단위 체적 당 입자수, D_p 는 입자의 직경을 나타낸다.

$$\frac{dV}{d\log(D_p)} = \frac{\pi D_p^3}{6} \frac{dN}{d\log(D_p)} \quad (1)$$

크기가 10 μm 이하인 에어러솔의 질량농도를 측정

Fig. 1. Location of the Anmyeondo and Gosan stations.

하기 위해 안면도와 고산에 설치된 PM_{10} (제조사: Anderson Instruments) 농도 자료를 사용하였다. PM_{10} 은 베타 (β) 선원으로 탄소 (C)-14를 이용한 입자 측정기로 필터 테이프에 포집된 입자에 의해 베타선이 감쇄되는 정도를 이용하여 에어러솔의 질량농도를 측정한다. 입자 측정기의 샘플 유량은 16.7 L/min이며, 관측 불확실성은 $\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다 (이영근 등, 2008).

에어러솔 산란계수는 네펠로미터 (제조사: TSI) 관측 자료를 사용하였고, 에어러솔 흡수계수는 에셀로미터 (제조사: Magee Sci) 관측 자료를 사용하였다. 특히, 고산에서 측정된 에어러솔의 광 산란 및 흡수계수는 서울대학교 지구환경과학부 연구팀에서 측정된 자료를 사용하였다 (기상청, 2010b). 에어러솔에 의한 광산란 및 흡수계수는 측정파장에 따라 값의 크기가 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 산란계수의 경우 550 nm 파장을, 흡수계수의 경우 880 nm 파장에서 측정된 값을 사용하였다. 에셀로미터를 이용한 흡수계수는 기기에서 측정된 검댕 (black carbon)의 질량농도를 광흡수계수로 환산 (즉 $1 \text{ ng}/\text{m}^3 = 0.01 \text{ Mm}^{-1}$) 하여 산출하였다 (기상청, 2010a). 또한 안면도에서는 통합흡입구를 통하여 유입된 공기시료를 이용하였으며, 고산에서는 각 장비별 개별 흡입구를 통해 유입된 공기시료를 이용하였다.

기상청에서는 적외광학두께지수 (Infrared Optical Depth Index, IODI)를 이용하여 황사의 시공간적 분포를 파악함으로써 황사의 감시와 예보 현업에 효과적으로 활용하고 있다. IODI는 맑을 때와 황사 시의 복사휘도의 변화비율을 이용하여 황사를 탐지하는 지수로서 주·야간 및 육지와 해상에서의 황사강도가 변함없이 표출된다는 장점이 있다 (김미자 등, 2008). 본 연구에서는 MTSAT-1R로부터 수신된 자료를 이용하여 IODI를 분석하였다. 또한 황사 발원지와 이동경로 분석을 위해 위성영상뿐만 아니라 PM_{10} 질량농도 최고값이 나타난 시각을 시점으로 NOAA/ARL의 HYSPLIT 모델을 이용하여 72시간 동안의 역궤적 분석을 수행하였다. 역궤적 분석을 위한 입력자료로 NOAA NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 GDAS (Global Data Assimilation System) 자료를 사용하였으며, 역궤적 분석을 위한 연직운동 옵션은 모델에서 생산되는 연직 속도를 선택하였다. 또한, 각 사례별 PM_{10} 질량농도 최고값이 나타난 시각을 시점으로 72시간 동안 3개의 고도별 (500, 1,500, 3,000 m) 역궤적 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 황사 농도의 시공간적 분포

우리나라에서 관측되는 황사는 주로 봄에 나타나며,

주로 고비 사막, 내몽고 지역, 만주, 중국의 황토고원 지대에서 발원되는 것으로 알려져 있다. 전종갑 등 (1999)은 우리나라 10개 관측소에서 관측된 30년간 총 황사일수를 분석한 결과, 봄철 평균이 3.4회로 발생빈도가 가장 높음을 밝힌 바 있다. 한편, 최근 기상청에서 발표한 바에 따르면, 지난 10년 (2001~2010년) 동안의 연평균 황사관측일 (28개소 기준관측 평균값)은 9.9일이며, 그중 봄철 (3~5월)이 76% (7.5일)로 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 조사된 바 있다. 2009년과 2010년에 안면도 (안면도에서는 종관기상관측이

이루어지지 않기 때문에 서산기상대에서의 황사관측 일 자료를 사용함)에서 황사가 관측된 일수는 2009년에 10일 2010년에 13일이었으며, 제주도 고산의 경우 2009년에 5일 2010년에는 12일이었다.

본 연구에서는 한반도에서 관측된 봄철 황사 사례 중 안면도와 고산 지역에서 2009~2010년 동안 PM_{10} 질량농도의 시간 평균값이 $100 \mu g/m^3$ 이상 지속된 기간에 대하여 관측자료를 분석하였다. 각 사례별 기간과 PM_{10} 질량농도 최대값을 Table 1에 요약하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 선정된 세 가지 사례 (Table 1)

Table 1. The maximum PM_{10} mass concentration ($\mu g/m^3$) during the three episodic dust events in spring of 2009-2010 at Anmyeondo and Gosan.

Cases	Sites	Dust period	Maximum PM_{10} concentration ($\mu g/m^3$)
Case 1	Anmyeondo	1245LST Mar 16 - 1945LST Mar 17, 2009	260 (1220LST Mar 17)
	Gosan	-	139 (0945LST Mar 17)
Case 2	Anmyeondo	1835LST Mar 15 - 0810LST Mar 16, 2010	272 (0125LST Mar 16)
	Gosan	2040LST Mar 15 - 0820LST Mar 16, 2010	411(2155LST Mar 15)
Case 3	Anmyeondo	1610LST Mar 20 - 2343LST Mar 20, 2010	310 (2005LST Mar 20)
	Gosan	1545LST Mar 20 - 0515LST Mar 21, 2010	1887 (2200LST, Mar 20)

Fig. 2. Time series of the PM_{10} mass concentration at Anmyeondo (red) and Gosan (black) during three Asian dust events; (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3. The dotted line indicates that the hourly-mean PM_{10} concentration is over $100 \mu g/m^3$.

에 대한 PM_{10} 질량농도의 시계열을 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 PM_{10} 질량농도의 시간 평균값이 $100 \mu g/m^3$ 이상인 구간을 의미한다. 2009년 3월 16일부터 3월 17일에 관측됐던 사례는 황사농도의 변화가 크지 않고 다소 완만하게 나타나는 특징을 보였으며 (Fig. 2(a)), 이때 안면도에서는 황사가 31시간 동안 지속되어 고산에 비해 농도가 더 짙고 지속시간도 더 길게 나타났다. 2010년 3월 15일부터 3월 16일에 발생했던 황사 사례에서는 안면도에서의 황사 지속시간이 더 길었으나 최고 농도는 고산에서 더 높게 나타났다 (Fig. 2(b)). 이때 안면도와 고산의 최고농도는 각각 $272 \mu g/m^3$ 와 $411 \mu g/m^3$ 로 나타났다. 2010년 3월 20일 오후 늦게부터 3월 21일 새벽까지 황사가 발생했던 마지막 사례에서는 고산이 안면도에 비해 황사의 지속시간이 더 길고 최고 농도도 더 크게 나타났다 (Fig. 2(c)). 이때 고산과 안면도의 질량농도의 최고값은 각각 $1,887 \mu g/m^3$ 과 $310 \mu g/m^3$ 로서 그 차이가 컸다. 이날은 남부지역에 황사경보가 발효되면서, 흑산도에서는 시간평균 농도가 $2,847 \mu g/m^3$ 로 관측되었는데, 이는 우리나라에서 황사의 질량농도 관측이 시작된 이래 최고농도로 기록된 사례이다. 이상에서 살펴본 바

와 같이 안면도와 고산에서 관측된 각 사례별 PM_{10} 질량농도 시계열과 최대 농도는 일반적인 예상 (즉, 황사는 우리나라의 북서쪽에서 발원하여 남동방향으로 이동하여 오기 때문에 안면도가 고산에 비해 항상 농도도 높고 지속시간도 길게 나타날 것이다)과 달리 황사의 이동경로에 따라 지역 별로 황사의 지속시간과 최고농도가 다르게 나타났다.

3.2. 황사 발생 시 기상조건 및 이동경로

황사 발생 시의 기상조건과 발원지 및 이동경로 분석을 위해 기상청에서 분석한 황사일기도와 MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) 위성의 적외광학 두께지수 분석결과, 그리고 미국 NOAA/ARL의 HYSPLIT 모델 결과를 사용하였다. 황사일기도는 황사 주요 발원지와 지상의 황사 관측 지점이 표시되어 있어 황사 시 발원지와 이동상황 분석에 유용하다 (Fig. 3).

Fig. 3에 제시된 사례별 일기도에 나타난 바와 같이 당시의 기상상태를 살펴보면, 몽골 및 내몽골 지역에서 발달한 저기압 권 주변에서 강한 지상풍이 불고, 그 후면에 위치한 대륙고기압의 확장으로 우리나라 쪽으

Fig. 3. Surface weather map (including dust observation information as a red circle) during three Asian dust events in this study: (a) case 1 (2100KST March 14, 2009 in left and 2100KST March 15, 2009 in right) (b) case 2 (0900KST March 14, 2010 in left and 2100KST March 15, 2010 in right), (c) case 3 (1200KST March 19, 2010 in left and 2100KST March 20, 2010 in right).

로 북서풍 또는 북풍 계열의 바람장이 형성되면서 우리나라로 황사가 유입되기에 좋은 기상조건을 갖추고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(a)는 사례 1에 대한 중관 상황을 보여 주고 있는데, 바이칼호 서쪽으로 광범위하게 형성된 저기압의 가장자리에서 황사가 발원한 상황을 잘 보여주고 있다. Fig. 3(b)에 제시된 사례 2의 경우는 만주에서 황사가 발원하여 유입되는 형태로서 (전영신 등, 2003), 황사 유입 당시에 한반도 북서쪽에 고기압이 위치해 있고 동해 부근에 저기압이 크게 발달해 있어 동서방향으로 강한 기압경도력이 형성되면서 북풍계열의 바람이 강하게 유입되고 있음을 보여 주고 있다. 이와 반면에 Fig. 3(c)에 제시된 사례 3의 경우 상층에 한기를 동반한 기압골이 남하하면서 (그림으로 제시하지는 않음) 지상저기압이 크게 발달한 가운데 우리나라를 포함하여 중국의 일부 지역까지 황사가 광범위하게 관측되었음을 보여준다.

Fig. 5에 제시된 역학적 분석결과는 안면도와 고산으로 장거리 이동해 온 공기덩이의 대체적인 이동경로를 보여준다. 공기덩이의 고도별 역학적 이동경로

와 속도 및 공간적 분포는 각 사례별 중관기상 상태의 시간적 변화에 따라 결정되는데, 사례 3을 제외하고는 안면도와 고산에 대한 역학적 분석결과가 대체로 비슷하게 나타났다. 다만, 고도가 높아짐에 따라 풍속이 증가하기 때문에 공기덩이가 더 빠른 속도로 이동하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 4(a)를 보면 2009년 3월 14일 오후에 고비, 바단지린 사막에서 황사가 발원하여 중국 북부를 지나 오르도스 (Ordos) 사막과 황토 고원에서 추가로 황사가 발원되어 발해만을 지나 한반도 전역으로 황사가 이동하였음을 알 수 있다. 즉, 우리나라 북서쪽으로부터 황사가 직접적으로 유입되었음을 보여 준다. 2010년 3월 14일 오전에 고비와 내몽골지역에서 발생한 황사 (Fig. 4(b))는 만주 지역을 지나 저기압 후면의 강한 북서풍 (Fig. 3(b))에 의해 빠르게 남동진하면서 3월 15일 오후부터 3월 16일 새벽까지 우리나라 대부분 지역에 영향을 주었던 사례로서 대기 하층의 공기는 한반도 북서쪽으로부터 유입되었음을 알 수 있다 (Fig. 5(b)). 그리고 고도가 높아짐에 따라 기류의 유입방향이 점차 서편하는 것

Fig. 4. MTSAT-IR IODI images during three Asian dust events; (a) case 1 (1400LST March 14, 2009 in the left and 1200KST March 15, 2009 in the right), (b) case 2 (1700KST March 14, 2010 in the left and 1400KST March 15, 2010 in the right), (c) case 3 (1533KST March 19, 2010 in the left and 2200KST March 20, 2010 in the right). In the figures, dust-detected area are shaded by color. Legend at the bottom of each image stands for the column-integrated dust intensity).

Fig. 5. Three-day backward trajectories started at 500m (red line), 1500m (blue line), and 3000m (green line) from Anmyondo (left) and Gosan (right): (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3. Please refer to the ticks and numbers at the bottom of each figure on the time interval and arrival time of each trajectory information.

으로 나타났는데, 이는 대기 상층으로 갈수록 편서풍의 강도가 세어진 결과로 볼 수 있다. 마지막으로, 사례 3의 경우 2010년 3월 19일 고비사막과 내몽골지역에서 발원한 황사는 중국북부와 황토고원까지 광범위하게 확장되면서 산둥반도를 지나 전국적으로 강하게 영향을 주었는데, 황사를 동반했던 저기압 후면으로부터 발달한 고기압의 영향을 받으면서 안면도에 비해 상대적으로 많은 황사 입자가 고산으로 수송되었다 (Fig. 3(c)와 4(c)). 특히, 안면도로 유입된 공기는 고산과 달리 발해만 부근에서 약한 종관 풍속의 영향으로 공기덩이가 느리게 이동하는 것으로 나타났는데, 이로 인해 안면도는 고산에 비해 황사의 직접적인 유입이 적었던 것으로 보인다. 이와 같은 결과는 다음 장에서 제시된 에어러솔 수농도 분포와 잘 일치한다.

3.3. 에어러솔의 광학적 및 물리적 특성

3.3.1. 황사 발원지 및 이동경로에 따른 광학적 특성
황사 발원지와 이동경로에 따른 에어러솔의 광학적 특성 분석을 위해 네페로미터 관측자료를 이용하여

에어러솔 산란계수와 옹스트롬 지수를 분석하였고, 에셀로미터 관측자료를 이용하여 에어러솔 흡수계수를 분석하였다. 그리고 소산계수 (extinction coefficient)에 대한 산란계수의 비인 단산란알베도 (single scattering albedo)도 함께 분석하였다.

사례 1에서 관측된 안면도에서의 산란계수 (240.33 Mm^{-1})와 흡수계수 (27.30 Mm^{-1})는 안면도의 3월 평균 값 (즉, 산란계수 115.13 Mm^{-1} , 흡수계수 10.36 Mm^{-1})보다 약 2배 이상 높게 나타나고 있어 황사 시에 산란 및 흡수계수가 크게 증가하였음을 알 수 있다. 한편, Table 2에 제시된 결과를 선행연구 결과 (Kim *et al.*, 2005)와 비교해 볼 때 산란계수는 선행연구의 황사 및 오염사례와 대체로 비슷하였지만, 흡수계수는 선행연구의 오염사례 (25.4 Mm^{-1})에 비해 조금 더 크게 나타났다. 또한, 에어러솔 크기를 나타내는 지표인 옹스트롬 지수는 1.34로 선행연구의 오염사례 (1.40)와 비슷한 특징을 보임으로써 전체적으로는 본 연구의 안면도에 관측한 황사 사례 1이 Kim *et al.* (2005)의 오염사례와 비슷한 광학적 특성을 보였다. 이러한 결과는 사례 1의 경우 황사가 고비사막과 황토고원에서 발원하여 중국의 북부지역과 산업시설이 밀집된 중국

Table 2. Period-mean aerosol optical properties (scattering and absorption coefficients, single scattering albedo, Angstrom exponent, and mass scattering efficiency) of each case at the Anmyeondo and Gosan stations, where N indicates sample number.

Cases	Sites		σ_{sp} (Mm ⁻¹) [550 nm]	σ_{ap} (Mm ⁻¹) [880 nm]	SSA[550/ 880 nm]	Angstrom Exponent	Mass Scattering Efficiency (m ² g ⁻¹) [550 nm]
Case 1	Anmyeondo (N = 31)	Mean	240.33	27.30	0.90	1.34	1.45
		Standard deviation	72.25	7.47	0.01	0.14	0.58
	Gosan	Mean	-	28.74	-	-	-
		Standard deviation	-	0.63	-	-	-
Case 2	Anmyeondo (N = 13)	Mean	93.81	9.38	0.91	0.47	0.50
		Standard deviation	34.19	3.56	0.01	0.14	0.15
	Gosan (N = 6)	Mean	148.30	8.99	0.94	0.55	0.62
		Standard deviation	52.04	1.47	0.01	0.56	0.26
Case 3	Anmyeondo (N = 3)	Mean	201.09	23.17	0.88	1.15	1.06
		Standard deviation	206.03	18.82	0.02	0.33	1.12
	Gosan (N = 13)	Mean	499.38	28.65	0.93	0.80	1.51
		Standard deviation	288.80	11.33	0.03	0.30	1.55
Mean (March) (2005~2009)	Anmyeondo		115.13	10.36	0.91	1.42	-
Dust			239.8	22.8	0.91	0.66	-
Pollution (Kim <i>et al.</i> , 2005)	Gosan		244.2	25.4	0.88	1.40	-

의 동부 해안지역을 지나 발해만과 중국 산둥반도를 거쳐 우리나라로 유입됨에 따라 고농도 황사 시에 나타날 수 있는 광학적 특성과 함께 인위적인 오염물질의 영향을 상당히 받았기 때문인 것으로 보인다.

사례 2의 경우에는 산란계수와 흡수계수 값이 Table 2에 제시된 다른 사례나 선행연구에 비해 상대적으로 작고 옹스트롬 지수는 0.47~0.55로 확연히 작은 값을 나타내었다. 옹스트롬 지수가 작을수록 조대입자가 많이 포함되어 있고, 지수가 클수록 미세입자가 많이 포함되어 있다는 사실로 비추어 볼 때 (Reid *et al.*, 1999), 상대적으로 조대입자의 기여가 많았음을 알 수 있다. 한편 황사 농도가 높았음에도 불구하고 산란계수 및 흡수계수가 상대적으로 작았던 것은 미세입자인 오염물질의 기여가 크지 않고, 자연발생적인 토양 기원의 조대입자가 상대적으로 많이 포함되었기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 따라서, 사례 2의 경우는 고비 및 내몽골지역에서 황사가 발원하였으나 인위적 오염원

이 적은 만주지역을 경유하여 우리나라로 유입된 결과로 해석된다. 에어러솔이 크기에 따라 얼마나 효율적으로 빛을 소산시킬 수 있는가는 아래의 광소산 효율을 통하여 표현할 수 있다. 다음의 식 (1)에 나타난 바와 같이 산란계수는 다음과 같이 표현할 수 있는데 (Hoppel *et al.*, 1990),

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

여기서 $Q_s(m, r, \lambda)$ 는 산란효율, m 은 굴절률, r 은 입자 반경, $n(r)$ 은 에어러솔 크기분포를 각각 나타낸다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 산란계수는 산란효율, 크기분포 및 수농도에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 사례 2의 경우 옹스트롬 지수 값 (0.47~0.55)이 작아 큰 입자로 구성되어 있어 산란이 효율적으로 일어나지 못하여 산란효율이 상대적으로 작았으며, 그에 따라 산란계수가 작게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

마지막으로 사례 3은 고비사막과 내몽골에서 황토 고원까지 광범위한 지역에서 황사가 발원하여 남동진한 사례로서 앞선 사례 1과 2와는 달리 안면도와 고산에서 서로 다른 광학적 성질이 나타났다. Table 2에 제시된 과거 5년간 (2005~2009년) 3월 평균값과 비교해 볼 때 고산에서의 산란계수 (499.38 Mm^{-1})는 약 4.3배, 흡수계수 (28.65 Mm^{-1})는 약 2.8배 높게 관측되었는데 반해, 안면도는 산란계수 (201.09 Mm^{-1})가 약 1.7배, 흡수계수 (23.17 Mm^{-1})는 약 2.2배 높게 나타났다. 이는 우리나라의 대표적인 두 배경대기 지역이라 할지라도, 기단의 이동경로에 따라 에어러솔의 광산란 및 흡수 특성이 달리 나타날 수 있음을 보여준다. 사례 3에서 두 지역이 종관적으로 동일한 기단의 영향을 받았음에도 불구하고 안면도와 고산에서의 에어러솔 광학 특성이 달리 나타난 이유는 고산이 황사의 영향을 더 크게 영향을 받았기 때문이며, 특히 안면도로 이동한 기류는 이동과정에서 다소 정제하면서 인위적 배출원이 산재해 있는 중국 동부 해안에서 배출된 인위적인 미세입자 (fine particle)의 영향을 상대적으로 더 많이 받았기 때문으로 볼 수 있다.

단산란알베도의 경우 0~1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 산란이 상대적으로 강함을 의미하는데, 최근 2년간 봄철에 발생한 심한 황사 사례에 대한 단산란알베도 값은 0.88~0.94의 범위를 가지고 나타났다. 또한, 사례 2와 3에서 안면도보다 고산의 단산란알베도 값이 높게 나타나는 특징을 보였다. 이는 고산이 안면도 보다 빛을 흡수하는 성질을 가진 인위적 에어러솔 (예를들어, 검댕이나 원소탄소 등)의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 해석할 수 있다. 그러나, 실제적으로 에어러솔에 의한 광흡수는 탄소를 포함한 미세 에어러솔 (예를들어, black carbon이나 brown carbon) 뿐만 아니라 황사입자에 의해서도 일어나며 이들 입자의 혼합상태에 따라서도 달라질 수 있다. 이에 대해서는 관측기법의 개선과 더불어 향후 추가적인 연구가 필요하다.

3.3.2. 산란 효율 특성

본 연구의 각 사례별 에어러솔 산란효율 (mass scattering efficiency) 특성을 파악하기 위하여 관측한 산란계수를 PM_{10} 농도로 나누어 단위 질량당 산란이 얼마나 효율적으로 일어나는지를 분석하였다. 산란효율에 대한 선행연구 결과를 살펴보면, Clarke *et al.* (2004)은 TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific)와 ACE-Asia 등의 국제 집중관측 기간 동안 네펠로미터 관측 (550 nm 파장 사용)을 통해 아시아 에어러솔의 전형적인 산란효율이 약 $0.3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 임을 밝힌 바 있다. 또한 Lee (2009)에 따르면 캘리포니아 해안에서 산란 효율이 $1.72 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 로 관측된 바

있다. 연구에서는 사례 1의 경우 $1.45 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, 사례 2의 경우 $0.50 \sim 0.62 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, 사례 3의 경우 $1.06 \sim 1.51 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 로서 Clarke *et al.* (2004) 보다는 크고 Lee (2009) 보다는 작은 산란효율 값을 나타내었다. 이와같이 각 산란 효율의 차이가 나타나는 이유는 발원지와 거리, 각각 다를 뿐 아니라 관측 시기 등의 차에 따라 각 사례 에어러솔의 크기 분포와 화학조성이 달랐기 때문인 것으로 보여진다. 특히, 본 연구에서의 산란효율이 Clarke *et al.* (2004) 보다 큰 이유는 안면도와 고산 모두 미세한 인위적 에어러솔의 영향을 상대적으로 더 많이 받았기 때문인 것으로 해석할 수 있고, Lee (2009) 보다 작은 이유는 Lee (2009)의 경우 캘리포니아 해안에서 관측이 이루어졌기 때문에 입경이 큰 황사입자가 태평양을 건너 장거리 수송되는 과정에서 중력에 의해 낙하됨에 따라 작은 크기의 입자들이 상대적으로 많이 분포하여 산란이 효율적으로 이루어졌기 때문인 것으로 보여진다.

또한 본 연구의 각 사례별 산란효율을 비교해 보면 사례 2의 산란효율이 작게 나타나는데, 이는 사례 2의 경우 황사가 인위적 오염원이 적은 만주 지역을 지나 저기압 후면의 강한 북서풍에 의해 빠르게 수송됨에 따라 크기가 큰 황사입자가 많이 포함되어 있어서 산란이 효과적으로 이루어지지 못했기 때문 (즉, 산란효율이 낮음)인 것으로 해석할 수 있다. 그리고 사례 1과 사례 3의 경우 1 이상의 산란효율이 관측되었는데, 이는 인위적인 미세입자와 황사의 영향을 동시에 받았기 때문이며, 이러한 결과는 다음절에 제시되는 APS 분석결과와 잘 일치하고 있다. 에어러솔의

Fig. 6. Comparison of averaged mass scattering efficiencies at 550 nm and angstrom exponents at Anmyeondo and Gosan during the three Asian dust events. In the figure, cases 1, 2, 3 are presented by red, blue, and black circles. And horizontal and vertical bars indicate standard deviations of each parameter.

산란효율 특성은 에어러솔이 기후에 미치는 복사강제 효과에 매우 중요한 요소로 작용한다. 따라서, 향후

좀 더 광범위한 관측 자료의 축적을 통해서 정확한 특성 파악을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 7. Aerosol number size distribution for (a) case 1, (b) case 2, and (c) case 3 at Anmyeondo (open circle) and Gosan (solid circle).

Fig. 8. Time evolution of the aerosol volume size distribution measured by the APS at Anmyeondo (left) and Gosan (right) during the three Asian dust events: (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3. The dark blue, blue, cyan, green, yellow, dark yellow, and pink colors in the figure indicate the volume concentration levels of 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, respectively.

각 사례별 옹스트롬지수와 산란 효율의 관계를 나타낸 결과 (Fig. 6)를 살펴보면, 전체적으로 옹스트롬 지수가 증가함에 따라 산란 효율도 비례하여 증가하는 선형관계임을 알 수 있다. 이는 입자 크기 분포에 따라 산란 효율이 다르다는 것을 의미한다. 즉, 큰 입자가 많이 분포할수록 산란 효율이 작아지고, 반대로 작은 입자가 많이 분포할수록 산란 효율은 높아진다는 기존의 연구결과와 일치하였다.

3.4. 에어러솔 수농도와 부피농도 분포 특성

본 연구에서 관측한 심한 황사 사례에 대하여 에어러솔 수농도와 부피농도의 분포를 분석하였다. Fig. 7은 심한 황사 시 안면도와 고산에서 관측한 에어러솔 크기별 수농도 분포를 나타낸다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 모든 사례에 대하여 2봉 (bimodal) 형태의 크기 분포를 나타내고 있다 (김지영 등, 2002). 최고농도가 나타난 크기 범위는 거의 일정한 분포를 보였지만 입자의 수농도 값은 지역과 사례에 따라 각각 다르게 나타났다. 특히, 모든 사례에 대해서 고산의 0.7~0.8 μm 이하 입자의 수 농도가 안면도 보다 적게 나타났다. 이는 안면도에 비해 제주도 고산이 인위적인 오염원의 영향을 적게 받고 있음을 시사한다. 또한, 사례 2와 사례 3의 경우 고산에서의 조대입자 수농도가 안면도 보다 더 크게 나타났다. 이는 황사 발원지로부터 고산이 더 멀리 떨어져 있음에도 불구하고 사례 2와 사례 3의 경우에는 고산이 안면도 보다 황사의 직접적인 영향을 더 많이 받은 것으로 나타났다. 한편, 위에서 나타난 에어러솔 크기분포의 결과를 사례별 산란계수와 비교해 볼 때 고산에서 관측한 0.7~0.8 μm 이하 입자의 수농도가 안면도 보다 적음에도 불구하고 고산의 산란계수가 더 크게 나타난 이유는 에어러솔 크기 분포에서 두 번째 모드를 차지하는 황사에 의한 조대입자의 산란 기여도가 더 크게 작용하였기 때문인 것으로 보인다. 그러나, 이에 대한 보다 엄밀한 결과를 얻기 위해서는 전체 에어러솔의 입경별 농도, 화학조성, 광학적 성질을 종합적으로 분석하는 질량 소산 종결 (mass extinction closure) 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

Fig. 8에 제시한 부피농도 시계열을 살펴보면, 사례 1에서 안면도는 0.6~1.0 μm 와 2.0~8.0 μm 부근의 부피농도가 증가한 반면에 제주도 고산은 0.8~1.0 μm 와 1.5~6.0 μm 크기 범위의 부피농도가 증가하였다. 또한 1.5 μm 부근을 중심으로 미세입자와 조대 입자 양쪽으로 100 $\mu\text{m}^3\text{cm}^{-3}$ 이상의 부피 농도 값을 나타내는 영역이 관측되었다. 이는 이영곤 등 (2008)이 제시한 황사와 오염물질 수송에 대한 특성과 일치하는 결과이다. 사례 2 (Fig. 8(b))는 북서쪽에서 유입한 황사로써 안면도는 1.8~4.0 μm , 고산은 1.7~9.6 μm 사이에서

100 $\mu\text{m}^3\text{cm}^{-3}$ 이상으로 부피농도가 높게 나타나면서, 중국대륙에서 수송된 토양과 같은 자연적 발생원에 의한 조대 입자가 영향을 미칠 때 나타나는 부피농도 분포 특성을 보여주고 있다. 이러한 결과는 황사의 입자크기는 2.0~6.0 μm 범위에 집중되어 나타나고 (전영신 등, 1999), 만주에서 발원한 황사입자는 1.35~25.0 μm 의 범위의 입자들이 뚜렷하게 증가하며 (전영신 등, 2003), 이영곤 등 (2008)이 제시한 입자크기에 따른 황사 판별기법 (2.3~6.0 μm 사이의 조대 입자에서 100 $\mu\text{m}^3\text{cm}^{-3}$ 이상의 높은 부피농도)에 대한 연구결과와 대체적으로 일치하는 결과를 보였다. Fig. 8(c)에 제시된 사례 3의 경우 아주 높은 농도의 황사 사례에 대한 결과를 보여 주는데, 안면도는 0.7~3.3 μm , 고산은 0.7 μm 보다 큰 범위에서 부피농도가 100 $\mu\text{m}^3\text{cm}^{-3}$ 이상으로 나타났다.

4. 결론 및 토의

2009년과 2010년 봄철에 관측된 세 차례의 고농도 황사 사례에 대하여 충남 안면도와 제주도 고산에서 실시한 에어러솔 관측 자료를 이용하여 황사 발원지와 이동경로에 따른 에어러솔 크기 분포와 광학적 특성을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 안면도와 고산에서 관측된 각 사례별 PM_{10} 질량농도 시계열과 최대 농도는 일반적인 예상 (즉, 황사는 우리나라의 북서쪽에서 발원하여 남동방향으로 이동하여 오기 때문에 안면도가 고산에 비해 항상 농도도 높고 지속시간도 길게 나타날 것이다)과 달리 황사의 이동경로에 따라 지역 별로 황사의 지속시간과 최고농도가 다르게 나타났으며, 에어러솔의 크기분포와 광학적 성질에 있어도 다소의 차이가 나타났다. 이는 고농도의 황사 사례일지라도 관측지점에 따라 에어러솔 특성이 상당한 공간적 불균일성이 나타날 수 있음을 의미한다.

둘째, 본 연구의 사례 1에서 얻은 산란 효율은 이영섭 (2009)의 캘리포니아 해안에서 측정한 산란효율 (1.72 m^2g^{-1})과 비슷하게 나타났으며, 사례 2에서는 Clarke *et al.* (2004)이 ACE-Asia 기간 동안에 얻은 아시아 에어러솔의 전형적인 산란효율 (0.3 m^2g^{-1})에 비해 조금 높은 0.51~0.59 m^2g^{-1} 로 관측되었다. 사례 3의 경우, 사례 1과 2의 중간 정도로 관측되었다. 이와 같은 산란 효율의 차이는 각 사례 별로 발원지와 거리가 다를 뿐 아니라 관측 시기의 차에 따른 에어러솔의 크기 분포와 화학조성이 다르기 때문인 것으로 해석된다.

셋째, 옹스트롬 지수가 증가함에 따라 에어러솔의 광산란 효율도 비례하여 증가하는 선형관계를 보였다.

이는 산란 효율이 입자의 크기 분포에 따라 크게 의존한다는 것을 의미한다. 황사 뿐 아니라 중국으로부터 유입된 인위적 에어러솔의 영향을 받을 경우 산란 효율이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 관측되었으며, 인위적 오염원이 적은 지역을 지나 저기압 후면의 강한 북서풍에 의해 빠르게 유입될 경우 크기가 큰 황사입자가 많이 포함되어 있어서 산란이 효과적으로 이루어지지 못하는 것으로 나타났다.

이 연구는 최근 봄철의 황사 고농도 사례에 대하여 위성관측 자료의 분석과 아울러 안면도와 고산에서 관측한 자료를 중심으로 에어러솔 특성에 관한 연구를 수행하였다. 그러나, 한정된 종류의 관측 장비를 통하여 대기 중 에어러솔의 다양한 특성을 종합적으로 이해하기에는 한계가 있다. 따라서, WMO/GAW 관측 프로그램과 같이 고정된 지상관측소에서의 장기적 관측 뿐 아니라 항공기, 선박 등 다양한 관측 플랫폼과 관측장비를 동원하여 다수의 연구팀들이 참여할 수 있는 집중관측 프로그램을 정기적으로 운영하는 것이 필요하다. 특히, 동아시아지역 에어러솔이 기 후에 미치는 영향에 대한 연구를 규명을 심화시키기 위해서는 이전에 실시되었던 ACE-Asia, ABC 캠페인 후속의 대규모 국제공동 집중관측이 새롭게 기획되어 실시될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청/기후변화감시센터 시험연구비로 수행되었으며, 기술역량 기반구축사업을 통해 고산에서 측정된 자료를 제공해 준 서울대 연구팀에 감사드립니다. 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 준 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청, 2010a: 2009 지구대기감시 보고서. 189pp.
- 기상청, 2010b: 온실가스 및 에어러솔의 감시기술 개발. 기상청 기술역량 기반구축사업 보고서, CATER 2009-1151, 114pp.
- 김미자, 김윤재, 손은하, 김금란, 안명환, 2008: 정지기상위성 자료를 이용한 정량적 황사지수 개발 연구. *Atmosphere*, **18**(4), 267-277.
- 김지영, 최병철, 2002: 한반도에서 측정된 에어러솔의 크기 분포와 지역별 특성. *한국기상학회지*, **38**(2), 95-104.
- 김지영, 최병철, Anne Jefferson, 문길주, 2003: 2001년 봄철 제주도 고산에서 측정된 에어러솔의 광 산란 및 흡수 특성. *한국기상학회지*, **39**(2), 239-250.
- 박주선, 김재환, 홍성재, 2012: MODIS 적외채널 배경 밝기 온도차를 이용한 동북아시아 황사 탐지. *Atmosphere*, **22**(2), 137-147.
- 이영곤, 조천호, 김명수, 2008: Aerodynamic Particle Sizer(APS)를 이용한 고농도 PM₁₀ 사례 중 황사 판별 기법 개발. *Atmosphere*, **18**(1), 25-32.
- 이병일, 윤순창, 김윤재, 2008: 지상관측장비를 이용하여 관측한 봄철 황사의 연직분포와 광학적 특성 분석. *Atmosphere*, **18**(4), 287-297.
- 이시혜, 김영성, 김상우, 윤순창, 2008: 서울과 고산의 에어로졸 화학성분과 광학특성의 계절변화. *한국대기환경학회지*, **24**(4), 470-482.
- 이현주, 김상우, 윤순창, 강정운, 2012: 황사의 비구형성이 에어러솔 광학적 광학적 두께 산출에 미치는 영향 연구. *Atmosphere*, **22**(2), 175-186.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식, 1999: 황사시 서울과 안면도의 대기중 에어러솔 수농도 특성. *한국대기환경학회지*, **15**(5), 575-586.
- 전영신, 조경숙, 김영화, 이종국, 2003: 만주에서 발원한 황사 현상. *한국대기환경학회지*, **39**(2), 45-63.
- 전종갑, 예상욱, 권민호, 정용승, 1999: 황사의 장거리 수송과 관련된 대기 순환 유형의 분류. *한국기상학회지*, **35**(4), 575-586.
- 조창범, 전영신, 구본양, 박순웅, 이상삼, 정연양, 2007: 황사 농도 단계예측모델의 PM10 농도와 실측 PM10 농도의 비교. *Atmosphere*, **17**(1), 87-99.
- 한국환경정책 · 평가연구원, 2003: 동북아시아의 황사피해 분석 및 피해저감을 위한 지역협력방안. 138pp.
- Carrico, C. M., et al., 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.
- 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.
- Chung, Y. S., H. S. Kim, K. H. Park, D. H. Choe, J. Dulam, and T. Gao, 2005: On characteristics of duststorms and associated dustfalls observed in East Asia in 2004. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**(5), 777-794.
- Clarke, A. D., et al., 2004: Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: Physiochemistry and optical properties. *J. Geophys. Res.*, **109**, D15S09, doi:10.1029/2003JD004378.
- Han, Y., X. Dai, X. Fang, Y. Chen, and F. Kang, 2008: Dust aerosols: A possible accelerant for an increasingly arid

- climate in North China. *J. Arid Environ.*, **72**, 1476-1489.
- Hobbs, P. V., 2000: *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Cambridge Univ. Press., 262pp.
- 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.
- Horvath, H., M. Kasahara, and P. Pesava, 1996: The size distribution and nearby urban location. *J. Aerosol Sci.*, **27**(3), 417-436.
- 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. Environ.*, **40**, 1550-1560.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J. A. Ogren, E. G. Dutton, J.-G. Won, Y. S. Ghim, B. I. Lee, and J. S. Han, 2005: Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes. *Atmos. Environ.*, **39**, 39-50.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, and S.-Y. Kim, 2007: Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmos. Environ.*, **41**(8), 1634-1651.
- Kim, S.-W., S. Berthier, J.-C. Raut, P. Chazette, F. Dulac, and S.-C. Yoon, 2008: Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 3705-3720.
- Kim, Y. P., S. G. Shim, K. C. Moon, C. G. Hu, C. H. Kang, and K. Y. Park, 1998: Monitoring of air pollutants at Kosan, Cheju island, Korea, during March-April 1994. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1117-1126.
- Kwon, H. J., S. H. Cho, Y. Chun, F. Lagarde, and G. Pershgen, 2002: Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environ. Res.*, **90**, 1-5.
- Lee, Y. S., 2009: In situ measurement of Asian dust aerosols off the California coast: optical closure. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **45**(3), 293-305.
- Lee, Y. S., J.-W. Cha, Y.-K. Kim, H.-W. Lee, J. K. Park, B. I. Jeon, C. B. 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.
- Monn, C., et al., 1997: Small-scale spatial variability of particulate matter < 10 (PM₁₀) and nitrogen dioxide. *Atmos. Environ.*, **31**(15), 2243-2247.
- Reid, J. S., T. F. Eck, S. A. Christopher, P. V. Hobbs, and B. Holben, 1999: Use of the angstrom exponent to estimate the variability of aging smoke particles in Brazil. *J. Geophys. Res.*, **103**, 32081-32089.
- Seinfeld, J. H., et al., ACE-ASIA, 2004: Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and Pollution. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 360-380.
- Shao, Y., K. Wyrwoll, A. Chappell, J. Huang, Z. Lin, G. H. McTainxh, M. Mikami, T. Y. Tanaka, X. Wang, S. Yoon, 2011: Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Res.*, **2**(4), 181-204.
- Won, J.-G., S.-C. Yoon, S.-W. Kim, A. Jefferson, E. G. Dutton, and B. Holben, 2004: Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurement at Gosan, Korea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**(1), 115-130.
- Yoon, S.-C., J.-G. Won, Ali H. Omar, S.W. Kim, B.-J. Sohn, 2005: Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data. *Atmos. Environ.*, **39**, 6620-6630.
- Yu, X., T. Chen, J. Chen, and Y. Liu, 2006: A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia. *Atmos. Environ.*, **40**, 5787-5797.
- Zhang, X. Y., R. Arimoto, G. H. Zhu, T. Chen, and G. Y. Zhang, 1998: Concentration, size distribution and deposition of mineral aerosol over Chinese desert region. *Tellus*, **50B**, 317-330.