다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 고도별 황사의 단산란 알베도 산출

노영민* · 이철규** · 김관철*† · 신성균* · 신동호* · 최성철***

* 광주과학기술원 환경공학부, ** 기상연구소 응용기상연구과, *** (주) 솔탑

Retrieval of Vertical Single-scattering albedo of Asian dust using Multi-wavelength Raman Lidar System

Youngmin Noh*, Chulkyu Lee**, Kwanchul Kim* ,
Sungkyun Shin*, Dongho Shin* and Sungchul Choi***

* School of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology,

** Meteorological Application Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research,

*** SOLETOP Inc.

Abstract : A new approach to retrieve the single-scattering albedo (SSA) of Asian dust plume, mixed with pollution particles, using multi-wavelength Raman lidar system was suggested in this study. Asian dust plume was separated as dust and non-dust particle (i.e. spherical particle) by the particle depolarization ratio at 532 nm. The vertical profiles of optical properties (the particle extinction coefficient at 355 and 532 nm and backscatter coefficient at 355, 532 and 1064 nm) for non-dust particle were used as input parameter for the inversion algorithm. The inversion algorithm provides the vertical distribution of microphysical properties of non-dust particle only so that the estimation of the SSA for the Asian dust in mixing state was suggested in this study. In order to estimate the SSA for the mixed Asian dust, we combined the SSA of non-dust particles retrieved by the inversion algorithms with assumed the SSA of 0.96 at 532 nm for dust. The retrieved SSA of Asian dust plume by lidar data was compared with the Aerosol Robotics Network (AERONET) retrieved values and showed good agreement.

Key Words : Lidar, Depolarization ratio, Asian dust, Single-scattering albedo

요약 : 본 연구에서는 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 대기 중의 비구형 순수 황사입자와 구형 오염 입자가 혼합된 황사 입자의 단산란 알베도를 산출할 수 있는 방법론을 제시하고, 실제 대기 관측 사례 분석 자료로부터 정확도를 검증하고자 하였다. 편광소멸도는 황사와 비황사와의 혼합정도에 반비례함을 응용하여 편광소멸도 값으로부터 황사비를 산출하고 이를 이용하여 황사와 비황사로 황사층을 구분하였다. 산출된 비황사의 두 파장(355, 532 nm)의 소산계수와 세 파장(355, 532, 1064 nm)의 후방산란계수를 이용하여

접수일(2013년 8월 16일), 수정일(1차 : 2013년 8월 23일), 게재확정일(2013년 8월 23일).

† 교신저자: 김관철(fehouse@gist.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

역행렬 분석을 수행하여 비황사의 고도별 단산란알베도를 도출하였다. 황사와 비황사의 가중치를 소산계수 값으로부터 산출하고 각 가중치를 황사와 비황사에 적용하여 황사 층 전체의 고도별 단산란알베도를 산출하였다. 단, 황사의 단산란알베도는 순수황사로 가정하여 발원지에서 측정된 순수황사가 나타내는 0.96의 값을 적용하였다. 본 연구로부터 개발된 분석방법은 기존의 원격탐사 기술의 한계점을 극복하여 황사의 이동 시 타 오염입자와의 혼합에 따른 광학적 특성의 변화에 대한 정밀한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

황사(Asian dust)는 중앙아시아의 사막지역에서 매년 1000에서 2150 Tg 가량이 발생되며(Zender *et al.*, 2004), 다른 에어로졸과 더불어 아시아 지역의 대기환경 및 기후변화에 직·간접적으로 영향을 미치는 중요한 에어로졸의 하나이다(Tengen *et al.*, 2004; Rosenfeld *et al.*, 2001). 또한, 황사는 많은 양이 편서기류를 타고 동북아시아 지역의 풍하 지역인 한반도, 일본열도 뿐만 아니라 알래스카를 포함한 북미대륙에까지 장거리 이동하여 지구적으로 영향을 미치는 에어로졸로 알려져 있다(Huang *et al.*, 2005; Jung and Kim, 2011; Lee *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2006).

편서기류를 타고 장거리 이동 시 기상조건에 따라 다양한 고도 및 이동경로로 이동하는 황사는 경우에 따라 중국의 도심 및 공업지역에서 발생된 오염물질이나 biomass smoke 입자 등과 혼합되기도 한다. 황사와 다른 입자와의 혼합은 황사 층의 광학적 특성 변화를 유발한다(Yu *et al.*, 2006). Noh and Lee(2013)은 황사 발생지와 이동 경로상의 AERONET sun/sky radiometer 데이터와 위성 관측 데이터 분석을 통하여 황사가 이동 시 다른 입자들과의 혼합으로 광학적 특성, 그 중에서도 광흡수 특성의 변화가 높게 발생할 수 있다는 것을 확인하였다.

Anderson *et al.*(2003)은 ACE-Asia 기간 동안 항공기를 이용한 황사 관측을 통하여 입경크기가 1 mm 이상 조대 입자의 단산란 알베도(Single-scattering albedo, ω)는 550 nm에서 0.96 ± 0.01 인데 반하여 $1 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자에서는 0.88 ± 0.03 으로 상대적으로 낮은 값을 측정하였다. 이는 황사 발생시 황사 층에 조대입자인 순수황사 외에 미세한 오염입자가 혼합되어있음을 나타낸다. Noh *et al.* (2012)는 황사층에 오염입자, 특히 black carbon과 같은 광흡수 특성이 높은 입자의 혼합은 황사층내 복사 가열 증가를 통하여 황사층을 안정화해 장거리 이동

이 용이하게 함을 밝혔다.

황사의 장거리 이동 메커니즘을 명확히 규명하고 기후변화에 대한 황사의 영향을 정량화하기 위해서는 타 오염물질과의 혼합에 따른 황사층의 광학적 특성 변화, 특히 광흡수 특성의 변화에 대한 정밀한 정보가 필요하다. 이를 위해서는 다양한 고도로 이동하는 황사의 고도분포를 포함한 실시간 연속적인 측정 및 분석이 요구된다.

라이다(LIDAR: Light Detection And Ranging)는 대기 에어로졸의 고도별 분포 및 광학적 특성의 실시간 연속 관측이 가능한 장비이다. 라이다 관측을 통하여 황사를 포함한 대기 에어로졸의 고도분포와 광학적 특성의 관측에 대한 연구는 많이 이루어졌으나 광흡수 특성에 대한 직접적인 연구는 현재까지 수행되지 않았다.

본 연구에서는 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 황사층의 광흡수 특성에 대한 정보를 제공할 수 있는 고도별 ω 를 직접적으로 산출할 수 있는 새로운 분석 방법을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 Noh *et al.*(2007)에 설명되어있는 라만 분석 방법으로 산출되는 세 파장(355, 532 및 1064 nm)에서의 후방산란계수(Backscatter coefficient, β)와 두 파장(355, 532 nm)에서의 소산계수(Extinction coefficient, α)를 이용하여 ω 를 포함한 미세물리적 특성값을 산출할 수 있는 역행렬 분석법(Noh *et al.*, 2011)이 기본이론으로 적용된다. 이 역행렬 분석법은 오염입자나 smoke 입자에는 적용할 수 있으나, 입자의 형태를 구형으로 가정하기 때문에 비구형입자인 황사 등 먼지입자에는 적용할 수 없었다. 이러한 이유로 Noh *et al.*(2011)은 동북아시아 지역에서 오염입자 및 smoke 입자의 이동경로에 따른 광흡수 특성의 변화 및 차이점을 연구하였으나, 주요 에어로

줄의 하나인 황사는 분석대상에서 제외되었다.

이에 본 연구는 기존 연구의 한계점을 극복하기 위하여 황사 발생 시 황사층에서 순수황사와 비황사로 분리하는 것으로 시작한다. 이를 위하여 532 nm 수평 및 수직 후방산란광의 비로부터 입자의 비구형성을 알 수 있는 편광소멸도(Depolarization ratio)를 도출하고, 이를 활용하여 황사층에서 순수황사와 비황사의 비(황사비: Dust ratio: R_D)를 고도분포에 따라 산출하였다. 황사비를 활용하여 전체 황사층에서 황사 외 에어로졸의 소산 및 후방산란계수를 산출하고, 산출된 데이터로부터 역행렬 알고리즘(Noh *et al.*, 2007)을 이용하여 532 nm에서의 ω 를 산출하였다. 각 단계별 설명은 아래에 적시되어 있다.

입자의 비구형성에 대한 정보를 제공하는 기본요소인 체적 편광소멸도(Volume depolarization ratio, δ)는 본 라이다 시스템의 532 nm 파장에서 방출되고 후방산란되어 들어오는 수평 및 수직 산란신호를 활용하여 식 (1)로 산출된다.

$$\delta = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel} + P_{\perp}} \quad (1)$$

여기서, $P_{\parallel}$ 와 $P_{\perp}$ 는 대기 중으로 조사된 편광 레이저 빔이 대기 중에서 공기분자 및 에어로졸에 의해 후방산란된 광의 수평 및 수직성분을 나타낸다. δ 는 대기 중 에어로졸 입자의 농도에 영향을 받는 요소이므로(Cairo *et al.*, 1999), 본 연구에서는 농도에 무관한 입자의 비구형성을 표현할 수 있는 입자 편광소멸도(Particle depolarization ratio, δ_p)의 산출이 필요하다. δ_p 는 라만 라이다 신호 중 탄성산란 신호와 라만 산란 신호의 비로부터 산출되는 후방산란비(Backscattering ratio, R)와 δ 를 이용하여 산출될 수 있고, 이는 다음의 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\delta_p = \frac{\delta(z)R(z) - \delta_m}{R(z) - 1} \quad (2)$$

여기서, $R(z)$ 는 고도별 후방산란비로서 $((\beta_a + \beta_m)/\beta_m)$ 의 식으로 표현되며, β_a 와 β_m 는 각각 에어로졸 및 공기분자에 의한 후방산란계수를 나타낸다. δ_m 는 공기분자의 편광소멸도로서 본 라이다 시스템에서는 간섭필터의 영향을 고려하여 0.004의 값을 사용하였다(Cairo *et al.*, 1999).

황사비(dust ratio, R_D)는 산출된 δ_p 를 바탕으로 Shimizu *et al.*(2004)가 제안한 식 (3)의 방식으로 산출하였다.

$$R_D = \frac{(\delta_p - \delta_2)(1 - \delta_1)}{(\delta_1 - \delta_2)(1 - \delta_p)} \quad (3)$$

위 식에서 δ_1 과 δ_2 는 각각 황사입자와 오염입자만이 관측되었을 때의 δ_p 를 나타내며 본 라이다 시스템을 이용한 장기관측(Noh *et al.*, 2007, 2008)으로부터 각각 0.34와 0.03의 값을 도출하여 본 연구에 적용하였다. 이는 아시아 지역 황사 관측으로부터 얻어진 값과 유사하다(Sugimoto *et al.*, 2003; Shimizu *et al.*, 2004; Sugimoto *et al.*, 2005). 따라서, 분석된 δ_p 의 값이 δ_1 의 값보다 크거나 δ_2 의 값보다 적은 경우 각각의 R_D 값은 1과 0으로 적용하고 δ_p 에 따라 황사 입자의 비율을 수치상으로 산출할 수 있다. 산출된 황사비는 에어로졸 후방산란계수와 황사비를 이용하여 $(R_D \times \beta_a)$ 와 $((1 - R_D) \times \beta_a)$ 의 식으로부터 각각 순수황사와 비황사의 후방산란계수를 산출할 수 있다.

본 연구에서 532 nm에서의 편광소멸도 만이 측정되어 황사비도 532 nm에서만 산출할 수 있다. 산출된 황사비로 순수황사와 비황사로 구분하는 것 또한 532 nm 파장만 가능하므로 355와 1064 nm 파장대는 파장역지수(Ångström exponent, α)를 이용하여 산출하였다. 순수황사의 경우 대부분 조대입자로 구성되어 532 nm와 355 nm, 532 nm와 1064 nm 후방산란계수 상호 간의 α 를 0으로 적용할 수 있다. 이를 적용하여 532 nm에서 산출된 순수황사의 후방산란계수로부터 355와 1064 nm의 순수황사 후방산란계수를 산출하였다. 구분되지 않은 355와 1064 nm의 후방산란계수에서 순수황사 후방산란계수 값을 빼주어 비황사의 후방산란계수를 산출하였다. 소산계수 부분도 같은 방법을 적용하여 355와 532 nm 파장에서 각각의 소산계수를 산출하였다.

구분된 순수황사와 비황사의 소산 및 후방산란계수에서 비황사의 소산 및 후방산란계수를 입력자료로 활용하여 Müller *et al.*(1999)가 고안한 역행렬 분석을 수행하여 ω 를 산출하였다.

최종적으로 순수황사의 ω 는 발원지에서의 값과 유사하다고 가정하여 순수황사의 ω 로 판단되는 0.96(Yu *et al.*, 2006)을 적용하고, 구분된 소산계수 값을 이용하여 아래의 식으로부터 황사층 전체의 ω 를 산출하였다.

$$P_D = \frac{\tau_D}{\tau_D + \tau_{ND}} \quad (4)$$

$$\omega_t = (P_D \times \omega_D) + \{(1 - P_D) \times \omega_{ND}\} \quad (5)$$

여기서, P_D 는 전체 황사층에 황사만의 소산비를, τ_D 와 τ_{ND} 는 각각 황사와 비황사의 광학적 두께를, ω_D 는 황사의 ω , ω_{ND} 는 비황사의 ω 를, ω_s 는 황사층의 ω 를 나타낸다.

3. 결 과

본 연구에서 제안된 방법은 광주과학기술원(35.10°N, 126.53°E)의 다파장 라만 라이더 시스템(Multi-wavelength Raman lidar system)으로 2004년 4월 2일에 관측된 데이터를 이용하여 분석을 수행하였다. Fig. 1은 2004년 4월 2일 22시부터 다음날 02시 동안 관측된 데이터를 라만 분석법으로 분석한 각 파장별 소산계수와 후방산란계수와 체적 및 입자 편광소멸도, 그리고 황사비를 보여준다. Fig. 1(a)는 관측 당일 에어로졸이 6 km 고도까지 분포하고 있고 2.5에서 3.0 km를 경계로 상층과 하층의 두 개의 층으로 구분됨을 보여준다. Fig. 1(b)의 편광소멸도는 2.0 km 이상의 고도에서는 0.2 이상의 값을 보여주는 데 반해 그 이하의 고도에서는 0.1 전후의 값으로 두 층

Fig. 1. (a) Extinction coefficient at 355 (Black line) and 532 (Gray line) nm and backscatter coefficient at 355 (Blue line), 532 (Green line) and 1064 (Red line) nm retrieved by Raman method. (b) Volume (Dark gray line) and particle (Yellow line) depolarization ratio. (c) Dust ratio.

의 구성 성분이 다름을 나타낸다. 위층의 높은 편광소멸도는 황사가 주요한 성분임을 알려주나 아래층은

일반적인 오염입자의 편광소멸도인 0.05보다는 높으나 황사 발생시 관측되는 값보다는 낮은 0.1 전후로 오염입자가 주요 성분이고 황사 입자가 일정량 혼합된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 1(c)의 황사비에서 보여

Fig. 2. 5-day Hysplit backward trajectory according to the altitude of dust layers.

Fig. 3. Extinction and backscatter coefficients of (a) dust and (b) non-dust particles.

진다.

Fig. 2는 Hysplit을 이용한 고도별 5일간의 역궤적분석을 보여준다. 2.0 km 이하의 고도의 에어로졸 층을 추적한 것은 황사 발원지를 통과하고 중국의 오염물질이 많이 생성되는 산업지역을 비교적 느린 속도로 이동한 것으로 파악된다. 이에 반해 상층의 에어로졸은 황사 발원지를 통과하기는 하나 아래층에 비하여 빠른 이동 속도를 보이며 3 km이상의 높은 고도로만 이동하고 있음을 보여준다.

Fig. 3은 황사비로부터 구분된 황사(a)와 비황사(b)의 각 파장별 소산 및 후방산란계수를 보여준다. 3 ~ 5.5 km의 상층에서는 황사가 주요한 에어로졸이나 하층에서는 비황사가 주요한 에어로졸임을 보여준다. Fig. 3(b)의 비황사의 소산 및 후방산란계수를 입력자료로 활용하여 역행렬 분석을 수행하여 산출된 고도별 ω 는 Fig. 4에서 보여준다. 하층의 ω 는 0.63에서 0.73으로 매우 낮은 값이 산출된 반면 상층은 0.79에서 0.93으로 하층에 비하여 높은 값이 산출되었다. 이는 Fig. 2의 역궤적 분석에서 파악된 것과 같이 하층의 경우 중국의 오염지역으로부터 장거리 이동된 오염물질이 많이 관측된 것으로 파악되며, 오염물질 중 black carbon과 같은 광흡수 물질이 많은 것으로 파악된다. 이에 반하여 상층은 높고 빠른 이동경로로부터 하층과는 달리 오염물질의 혼합이 적어 높은 ω 값이 관측된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 황사와 비황사의 광학적 가중치를 적용하여 도출한 황사를 포함한 전체 에어로졸의 ω 를 보여준다. 하층과 상층 ω 의 분포는 각각 0.78 ~ 0.80과 0.93 ~ 0.95

Fig. 4. Backscatter coefficient at 532 nm (Gray line) and single-scattering albedo at 532 nm of non-dust particles.

Fig. 5. Backscatter coefficient at 532 nm (Gray line) and single-scattering albedo at 532 nm of total aerosol layer including dust and non-dust particles.

로 여전히 하층의 값이 낮아 고도별 이동경로에 따라 ω 값이 차이가 나는 것을 보여준다.

Fig. 6은 AERONET의 sun/sky radiometer로 측정된 440, 675, 870 그리고 1020 nm에서의 ω 값과 고도별 산란계수값에 따른 가중치를 적용하여 산출한 532 nm에서의 ω 값과의 비교결과를 보여준다. AERONET 데이터와 비교하면 라이다로부터 도출된 ω 값이 0.2 정도 적은 값을 보여주나 라이다 분석 값의 오차범위 이내에 있는 결과이며, AERONET 데이터는 낮에 측정되어 밤에 측정된 라이다 결과와는 6시간 정도의 시간차가 있어 절대적 분석값의 비교는 의미가 퇴색된다. 하지만 0.2 정도의 값의 차이에도 불구하고 라이다를 이용한 황사의 ω 값의 산출이 유효함을 Fig. 6을 통하여 확인할 수 있다. 또한, 전체층에 대한 값은 비슷한 결과를 보여주더라고

Fig. 6. Single-scattering albedo by sun/sky radiometer at 440, 670, 870 and 1020 nm (square) and lidar at 532 nm (open circle).

Fig. 5에서와 같이 고도에 따라서는 층별로 다른 광흡수 특성이 있는 에어로졸이 이동할 때 라이다를 이용한 분석이 매우 유용함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 기존에 분석되지 않던 황사의 고도별 ω 를 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 분석하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법으로 황사의 정확한 고도에 따른 분포 및 광학적 농도, 그리고 광흡수 특성까지 정밀하게 파악할 수 있음을 분석 결과를 통하여 알 수 있었다. 특히, 고도에 따라 다른 광학적 특성이 있는 에어로졸이 두 개 이상의 층으로 나누어져 분포할 경우, 다른 원격탐사 장비와는 달리 본 연구에서 제안된 라이다 분석법은 각각 에어로졸 층의 광학적 특성을 구분할 수 있었다. 또한, 선평토크와 비교를 통하여 오차범위 내에서 일치되는 분석결과를 산출함을 확인할 수 있었다.

향후 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 축적된 분석 데이터를 확보한다면 황사 이동시 황사의 이동경로에 따른 광학적 특성 변화 연구에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 위성이나 선평토크와 같은 기존의 원격탐사 기술이 제공하지 못하였던 고도분포의 정보를 제공하여 기존 원격 탐사 기술을 근본적으로 보완할 수 있는 응용기술로 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “응용기상기술개발”의 일환으로 수행 되었습니다.

Reference

- Anderson, T.L., S.J. Masonis, D.S. Covert, N.C. Ahlquist, S.G. Howell, A.D. Clarke, and C.S. McNaughton, 2003. Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurement during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research*, 108(D23): 8647.
- Cairo, F., D. Donfrancesco, A. Adriani, L. Pulvirenti, and F. Fierli, 1999. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar, *Applied Optics*, 38(21): 4425-4432.
- Huang, J., P. Minnis, B. Lin, T. Wang, Y. Yi, Y. Hu, S. Sun-Mack, and K. Ayers, 2005. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES, *Geophysical Research Letters*, 33: L06824, doi:10.1029/2005GL024724.
- Jung, J., and Y.J. Kim, 2011. Tracking sources of severe haze episodes and their physicochemical and hygroscopic properties under Asian continental outflow: Long-range transport pollution, postharvest biomass burning, and Asian dust, *Journal of Geophysical Research*, 116(D2): D02206.
- Lee, K.H., J.E. Kim, Y.J. Kim, J. Kim, and W.V. Hoyningen-Huene, 2005. Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Atmospheric Environment*, 39(1): 85-99.
- Lee, K.H., Y.J. Kim and M.J. Kim, 2006. Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and

- October 2004, *Atmospheric Environment*, 40(27): 5146-5155.
- Müller, D., U. Wandinger, and A. Ansmann, 1999. Microphysical particle parameter from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory, *Applied Optics*, 38(12): 2346-2357.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, B.C. Choi, and T. Murayama, 2007. Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea, *Atmospheric Research*, 86(1): 76-87.
- Noh, Y.M., D. Müller, I. Mattis, H. Lee, and Y.J. Kim, 2011. Vertically resolved light absorption characteristics and the influence of relative humidity on particle properties: multiwavelength Raman lidar observations of East Asian aerosol types over Korea. *Journal of Geophysical Research*, 116: D06206.
- Noh, Y.M., D. Müller, H. Lee, K.H. Lee, K. Kim, S. Shin, and Y.J. Kim, 2012. Estimation of radiative forcing by the dust and non-dust content in mixed east Asian pollution plumes on the basis of depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Environment*, 61: 221-231.
- Noh, Y.M., and K.H. Lee, 2013. Characterization of optical properties of long-range transported Asian dust in Northeast Asia, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(2): 243-251 (in Korean with English abstract).
- Rosenfeld, D., Y. Rudich, and R. Lahav, 2001. Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop, *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98: 5975-5980.
- Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arai, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki, 2004. Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research*, 109: D19S17.
- Sugimoto, N., I. Uno, M. Nishikawa, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, Y. Chen, and H. Quan, 2003. Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: Observations and model analysis of recent events. *Geophysical Research Letters*, 30(12): 1640.
- Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arai, X. Dong, S. Zhao, J. Zhou, and C.H. Lee, 2005. Study of Asian dust phenomena in 2001-2003 using a network of continuously operated polarization lidars. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 5(3-6): 145-157.
- Tegen, I., M. Werner, S.P. Harrison, and K.E. Kohfeld, 2004. Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission, *Geophysical Research Letter*, 31, L05105, doi:10.1029/2003GL019216.
- Yu, X., T. Cheng, J. Chen, and Y. Liu, 2006. A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia, *Atmospheric Environment*, 40(30): 5787-5797.
- Zender, C.S., R.L. Miller, and I. Tegen, 2004. Quantifying mineral dust mass budgets: Terminology, constraints, and current estimates, *EOS Trans. AGU*, 85(48): 509-512.