한국대기환경학회지 제 27 권 제 3 호
J. KOSAE Vol. 27, No. 3 (2011) pp. 326 ~ 336
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: 10.5572/KOSAE.2011.27.3.326

라만 라이다의 석영 채널을 이용한 고도별 황사 농도 산출

A Retrieval of Vertically-Resolved Asian Dust Concentration from Quartz Channel Measurements of Raman Lidar

노 영 민 · 이 권 호[1),*] · 이 한 림[2)]
광주과학기술원 환경공학과, [1)]경일대학교 위성정보공학과, [2)]연세대학교 대기과학과

(2011년 1월 20일 접수, 2011년 3월 22일 수정, 2011년 5월 11일 채택)

Young Min Noh, Kwonho Lee[1),*] and Hanlim Lee[2)]
Department of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology
[1)]*Department of Satellite Geoinformatics Engineering, Kyungil University*
[2)]*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

(Received 20 January 2011, revised 22 March 2011, accepted 11 May 2011)

Abstract

The Light Detection and Ranging (Lidar) observation provides a specific knowledge of the temporal and vertical distribution and the optical properties of the aerosols. Unlike typical Mie scattering Lidars, which can measure back-scattering and depolarization, the Raman Lidar can measure the quartz signal at the ultra violet (360 nm) and the visible (546 nm) wavelengths. In this work, we developed a method for estimating mineral quartz concentration immersed in Asian dust using Raman scattering of quartz (silicon dioxide, silica). During the Asian dust period of March 15, 16, and 21 in 2010, Raman lidar measurements detected the presence of quartz, and successfully showed the vertical profile of the dust concentrations. The satellite observations such as the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) confirmed spatial distribution of Asian dust. This approach will be useful for characterizing the quartz dominated in the atmospheric aerosols and the investigations of mineral dust. It will be especially applicable for distinguishing the dust and non-dust aerosols in studies on the mixing state of Asian aerosols. Additionally, the presented method combined with satellite observations is enable qualitative and quantitative monitoring for Asian dust.

Key words : Quartz, Lidar, Asian dust, Satellite

1. 서 론

다양한 종류의 대기 에어러솔은 태양광을 산란 또는 흡수하여 대기의 복사 특성을 변화시켜 지구의 온도 및 기후변화에 영향을 미친다(Ramanathan and Feng, 2009). 이들 중 먼지입자(Mineral dust)는 높은 산란 특성으로 인하여 지구 복사 수지에 중대한 영향을 미친다(Schwartz and Andreae, 2002). 먼지 입자의

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)53-850-7383, E-mail : khlee@kiu.ac.kr

주요한 발생원은 사하라 사막에서 발생하는 사하라 먼지(Saharan dust)와 중앙아시아 지역에서 발생하는 황사(Asian dust)이다. 중국의 타클라마칸 사막과 몽고 등지에서 주로 발생하는 황사는 편서풍의 기류를 타고 태평양으로 이동하여 때로는 알래스카 지역과 미국 본토에까지 도달하기도 한다(Husar *et al*., 2001; Uno *et al*., 2001). 특히, 발생원에서 생성 후 중국의 공업지역 및 대도시 상공을 통과하여 태평양으로 이동하는 황사는 이동 중 오염물질과의 혼합으로 인하여 발생원에서와는 다른 광학적 특성을 보여준다(Hubert *et al*., 2003). 이러한 황사와 오염물질의 혼합과 이에 따른 광학적 특성의 변화에 대한 연구는 ACE-Asia (Hubert *et al*., 2003)을 통하여 연구가 되었으나 이에 대한 이해는 여전히 부족한 실정이다. 따라서 황사 발생시 황사와 오염입자의 혼합 특성을 연구할 수 있는 관측 기술의 필요성이 요구된다.

황사의 특성을 분석하기 위하여 다양한 연구결과가 보고되었는데, 여기에는 필터 샘플링을 이용한 화학분석법과 전자기파를 이용한 질량분석법, 그리고 센서를 활용한 원격탐사법이 있다. 특히, 원격탐사법은 인간의 활동이 제한되는 점을 극복하고 보다 다양한 공간상에서 황사를 관측할 수 있는 장점이 있다. 대표적인 원격탐사법에는 레이저를 활용한 센싱기법이 있는데, 라이다(Light Detect and Range: LIDAR)가 대표적으로 황사를 비롯한 대기중의 에어러솔의 수직적인 분포를 측정할 수 있다. 특히, 황사의 주요 구성 성분인 석영(Quartz)의 라만 산란을 관측하는 방법으로 석영의 농도를 산출하는 방법을 High-spectral resolution lidar (HSRL)에 적용한 결과가 보고되기도 하였다(Tatarov and Sugimoto, 2005). 그리고 인공위성 센서는 우주에서 지구를 관측하여 에어러솔의 분포를 광역적으로 측정할 수 있으며, 인공위성을 활용하여 대기중의 에어러솔을 분석하는 다양한 방법은 다양하다(Lee *et al*., 2009).

본 연구는 석영 라만 산란을 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다(Noh *et al*., 2008, 2007)에 적용하여 황사의 연직 분포 및 고도 별 농도를 산출하고자 한다. 또한, 본 연구에서는 가시광선 영역대인 546 nm 라만 산란 신호뿐만 아니라 자외선 영역대인 360 nm의 라만 산란 신호를 동시에 측정하여 관측 결과를 비교 분석하여 고도 별 석영의 농도를 산출하였다.

2. 실험방법

광주과학기술원내(35.10°N, 126.53°E)에 위치한 다파장 라만 라이다 시스템은 국내 유일의 다파장 라만 라이다 시스템으로 기존의 시스템에 새로이 두 파장(360 nm, 546 nm)의 석영 라만 채널을 추가하였으며 장치에 대한 자세한 사항은 Shin *et al*. (2010)에 설명되어 있다. 여기에서는 이러한 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 2010년 3월에 수행한 대기 관측 중에서 석영 라만 산란 신호를 수신한 2010년 3월 15, 16, 21일의 데이터를 분석하여 대기중 석영의 농도를 산출하였다. 다파장 라만 라이다 시스템으로 관측이 실시된 날짜, 시간과 관측 파장은 표 1에 정리되어 있다.

석영(silicon dioxide, silica) 입자의 라만 산란을 이용한 먼지입자의 관측은 Tatarov and Sugimoto (2005)의 이론에 기초한다. 여기에서는 석영 성분을 먼지입자의 지표로 사용하는 것에는 두 가지 이유가 있다. 첫째, 먼지입자에서 석영성분이 차지하는 비율이 높으며 특히 황사의 경우에 60% 전후로 다른 성분이 비하여 월등히 높다(Ganzei and Razzahigaeva, 2006; Feng *et al*., 2002). 둘째, 석영 입자에서 발생하는 466 cm^{-1}의 라만 산란광은 탄성산란 신호나 공기분자의 라만 산란 신호와 명확히 구분되는 파장대를 형성하여 라이다 관측에 적합하다. 간섭필터의 사용으로 탄성산란 신호로부터 라만 산란 신호를 다른 공기분자의 후방산란 신호나 라만 산란 신호로부터 효과적으로 구분할 수 있다.

석영 라만 산란 신호의 해석은 Ansmann *et al*. (1990)

Table 1. Lidar observation time and observed wavelengths.

Lidar observation time	Observed wavelengths (nm)	Quartz data
15 March (19:28) ~ 16 March (05:49)	360, 387, 546, 607	15 March (19:37) ~ 16 March (00:20)
16 March (21:57) ~ 17 March (05:47)	546, 607	16 March (22:00) ~ 17 March (04:00)
21 March (20:50) ~ 22 March (05:50)	360, 387, 546, 607	21 March (23:30) ~ 22 March (03:50)

의 라만 해석방법에 기초하여 분석한다.

$$P_R(r, \lambda_L, \lambda_R)=P_L\frac{B_R F_R(r)}{r^2}\beta_R(r, \lambda_L, \lambda_R) \times \exp\left(-\int_0^r [\alpha_p(z, \lambda_L)+\alpha_m(z, \lambda_L) +\alpha_p(z, \lambda_R)+\alpha_m(z, \lambda_R)]dz\right) \quad (1)$$

여기서, $P_R(r, \lambda_L, \lambda_R)$은 라만 파장 λ_R에서 거리 r에서의 수신된 신호의 세기를 나타낸다. P_L과 λ_L은 조사된 레이저의 세기 및 파장을 나타내며 $F(r)$은 송신부 및 수신부의 geometrical form factor이다. B는 모든 부분의 독립적 요소를 포함하는 상수이며, $B_R(r, \lambda_L, \lambda_R)$는 라만 후방산란계수이다. 에어러솔과 공기분자의 소산계수는 각각 α_p와 α_m으로 표시된다. 시스템 요소(B와 $F(r)$)를 알면 수신된 라만 산란 신호로부터 목적 물질(여기선 석영)의 라만 후방산란계수를 알 수 있다. Geometrical form factor와 효율은 기기보정을 위한 관측을 통하여 산출할 수 있다. 소산계수는 질소분자의 라만 산란광의 관측을 통하여 레이저 파장대에서 라이다 비의 가정 없이 산출할 수 있다.

식(1)의 석영 라만 산란식을 해석하기 위해서는 파장 λ에서 공기분자에 의한 고도별 소산계수와 후방산란계수인 $\alpha_m(r, \lambda_L)$와 $\beta_m(r, \lambda_L)$의 라만 파장에서 입자의 소산계수를 알아야만 한다. 공기 분자에 의한 산란값은 표준대기나 모델 결과값으로부터 산출할 수 있고 석영의 라만 파장에서의 에어러솔 소산계수는 레이저 파장에서의 소산계수와의 상관관계로부터 산출할 수 있다(Ansmann *et al*., 1990).

위의 방법으로 석영 라만 산란식 식(1)은 아래와 같은 석영에 의한 후방산란계수식이 유도된다.

$$\beta_R(r, \lambda_L, \lambda_R)=\xi(r)\frac{P_R(r, \lambda_L, \lambda_R)}{P_m(r, \lambda_L)}\beta_m(r, \lambda_L)\eta(r, \lambda_L, \lambda_R) \quad (2)$$

여기서 $\xi(r)$는 라만 채널과 공기분자 채널의 시스템 상수이다. $P_m(r, \lambda_L)$는 공기분자(주로 질소분자)에 의한 후방산란계수를 나타내며, $\eta(r, \lambda_L, \lambda_R)$는 파장별 광학적 두께에 따른 보정값을 나타낸다.

대기중의 석영의 농도는 석영의 라만 후방산란계수로부터 산출할 수 있다. 라만 산란 미분단면적에 대한 라만 후방산란계수의 비인 $d\sigma(\lambda_L, \lambda_R, \pi)/d\Omega$와 석영 분자의 수 농도인 N_q가 여기에 사용되며 식(3)으로 표현된다.

$$\beta_R(r, \lambda_L, \lambda_R)=N_q(r)\frac{d\sigma(\lambda_L, \lambda_R, \pi)}{d\Omega} \quad (3)$$

석영분자의 라만 미분단면적을 알면 위 식을 이용하여 수 농도와 질량농도를 산출할 수 있다. 석영분자의 라만 미분단면적은 황사를 구성하고 있는 결정 구조(α-quartz, β-quartz, α-, β1-, and β2-tridymite, α- and β-cristobalite), 결정화 과정, 비결정 규소의 유무 및 혼합상태에 따라 달라진다. 이러한 것들은 먼지입자에서 석영 미분단면적의 산출을 어렵게 한다. 본 연구에서는 석영 성분의 미분단면적으로 Schoen and Cummins (1971)에 의해 연구된 466 cm^{-1} 파장에서 3.8×10^{-30} cm^2 sr^{-1} $molecule^{-1}$값을 사용하고 이 값으로부터 석영(silicon dioxide)의 농도를 산출하여 오염입자 등과 혼합되어 이동하는 황사 입자의 고도분포와 고도 별 질량 농도를 유추해 낼 수 있다.

관측기간 동안의 대기상태를 설명하기 위하여 인공위성 관측자료를 부가적으로 사용하였다. 위성자료는 NASA의 지구관측위성인 AQUA/MODIS 자료를 획득하여 한반도 인근지역을 포함하는 영역(30～42°N, 112～132°E)에 대하여 칼라합성영상과 에어러솔 광학두께(Aerosol Optical Depth: AOD)를 산출하였다. 위성자료에서 에어러솔 광학두께를 산출하는 방법은 Lee and Kim (2010)에서 설명된 방법을 이용하였다.

그림 1은 3월 14일부터 23일 동안 연속 관측된 PM_{10} 농도(실선)변화와 석영 라만 채널의 관측 시간(빗금 영역)을 보여준다. 3일의 석영 라만 채널 관측

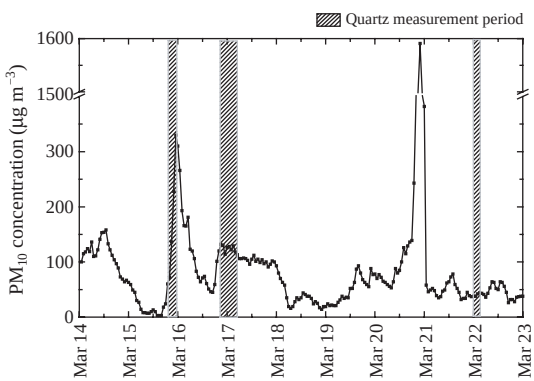

Fig. 1. Hourly mean PM_{10} concentration measured at Gwangju Regional Meteorological Administration.

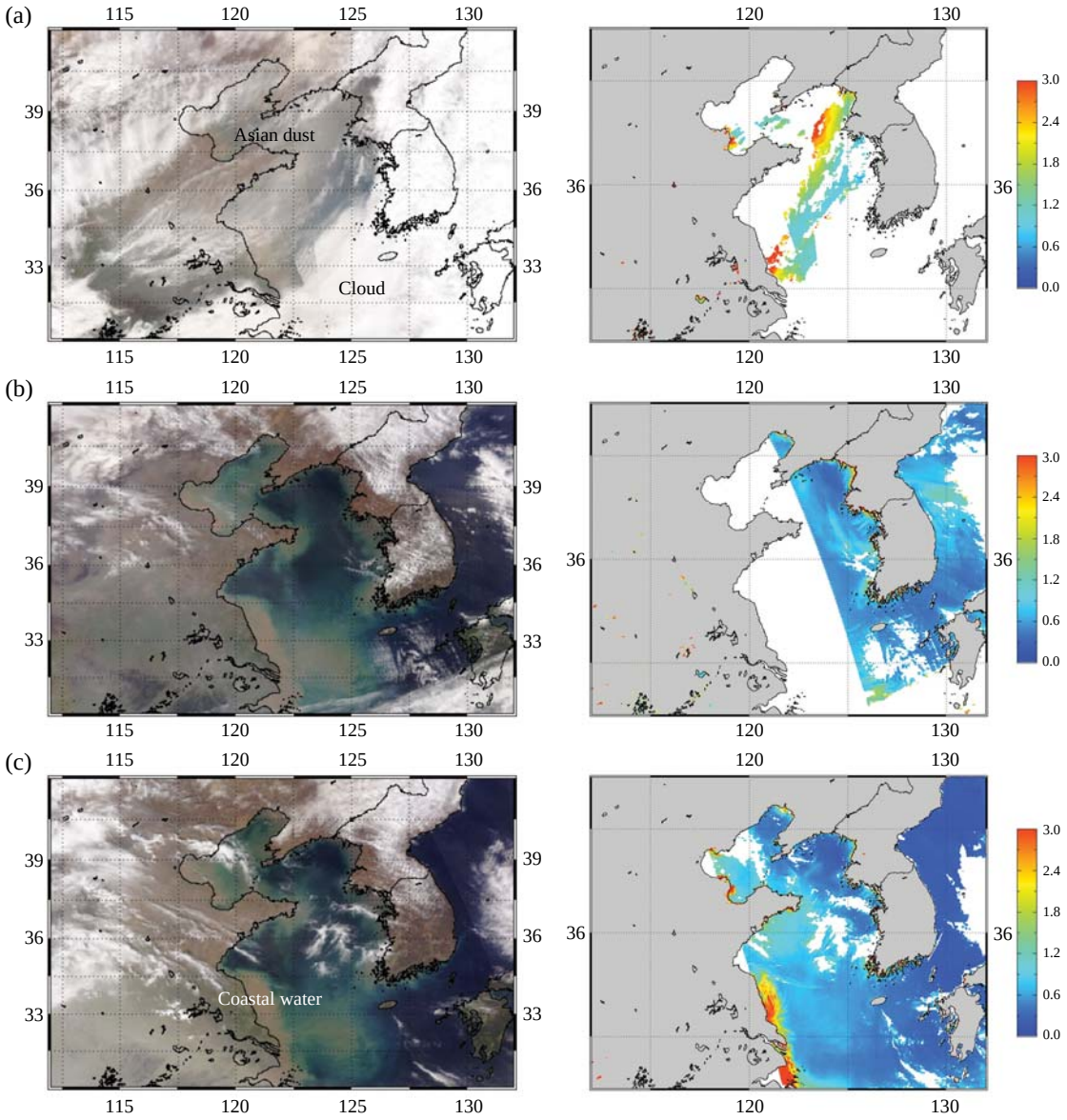

Fig. 2. AQUA/MODIS color composite images and AOD map on 15, 16, and 21 March 2010.

기간 중 3월 15일에는 황사가 밤사이에 한반도를 통과하였기 때문에 고농도의 PM_{10}이 관측되었으며 이때의 PM_{10} 최대값은 319 μg/m^{3}에 이르렀다. 3월 15일 오후 2시경에 관측된 위성영상(그림 2a)에서 나타난 황사 영역대는 서해와 북한지역에 이르고 있으나 편서풍을 타고 밤늦게 라이다 관측 지점을 통과한 것으로 보인다. 황사가 통과한 후 3월 16일 오후까지 비교적 맑은 대기상태를 보였으나(그림 2b), 3월 16일 밤부터 17일 새벽까지 수행된 관측 기간 중에도 평균 124±6 μg/m^{3}의 높은 PM_{10} 농도가 관측되었다. 3월 20일 오후는 매우 강한 황사가 한반도를 빠른 속도로 통과하였으며, 오후 늦은 시각부터는 한반도 인근지역은 비교적 맑은 날의 대기조건을 보였다(그림 2c). 그러고 3월 22일 새벽의 석영 라만 채널 관측 기

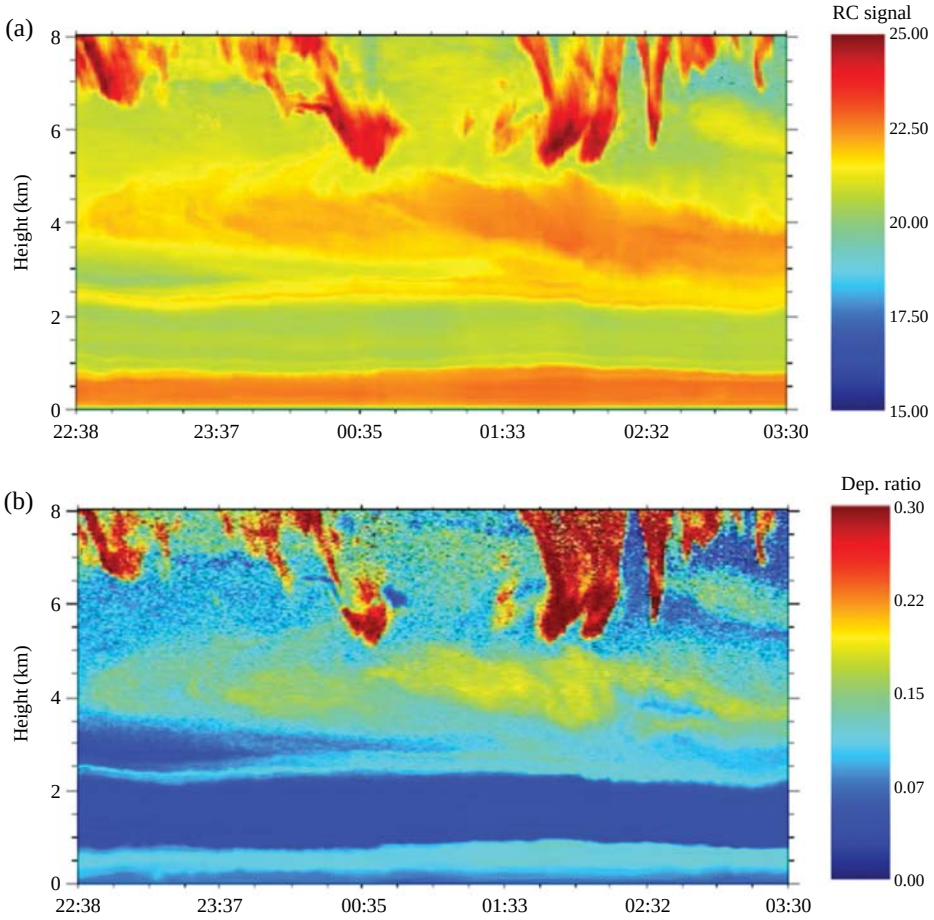

Fig. 3. Time-height cross section of range-corrected backscatter signal (a) and depolarization ratio (b) at 532 nm over Gwangju, Korea on 21 March 2010.

간 중 42±3 μg/m^{3}의 낮은 농도의 PM_{10}이 관측되었다.

석영 라만 신호의 분석에 필요한 석영 라만 파장대인 360, 546 nm와 질소분자에 의한 라만 산란 파장대인 387, 607 nm는 3일 동안의 관측일 동안 주로 밤 시간대에 관측이 수행되었다. 3월 16일의 경우, 360 nm의 파장은 검출기 이상으로 신호가 수신되지 않아 546 nm의 신호만 수신할 수 있었다. 특히, 2010년 3월 21일 관측에서는 석영 라만 채널의 관측과 동시에 편광 소멸도(Depolarization ratio)를 측정하였다. 편광 소멸도는 입자의 비구형성을 나타내는 지표로서 관측된 대기 에어러솔 중에 황사와 같은 먼지 입자가 포함되어 있을 경우 0.1～0.25의 값을 보이며, 먼지입자가 포함되지 않은 연무와 같은 오염 입자는 0.05 이하의 값을 보이므로(Sakai *et al*., 2003) 황사의 구분에 용이하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 라이다 관측 및 석영 라만 신호 분석

그림 3은 3월 21일 22시 38분부터 22일 03시 30분까지 관측된 532 nm에서의 거리 보정된 후방산란 신호와 편광 소멸도를 보여준다. 그림 3(a)의 후방산란신호 값으로부터 대기 에어러솔이 대기 경계층인 지표면에서 1 km 고도 구간과 2～8 km 고도에서 관측되었음을 알 수 있다. 그림 3(b)의 편광 소멸도는 고

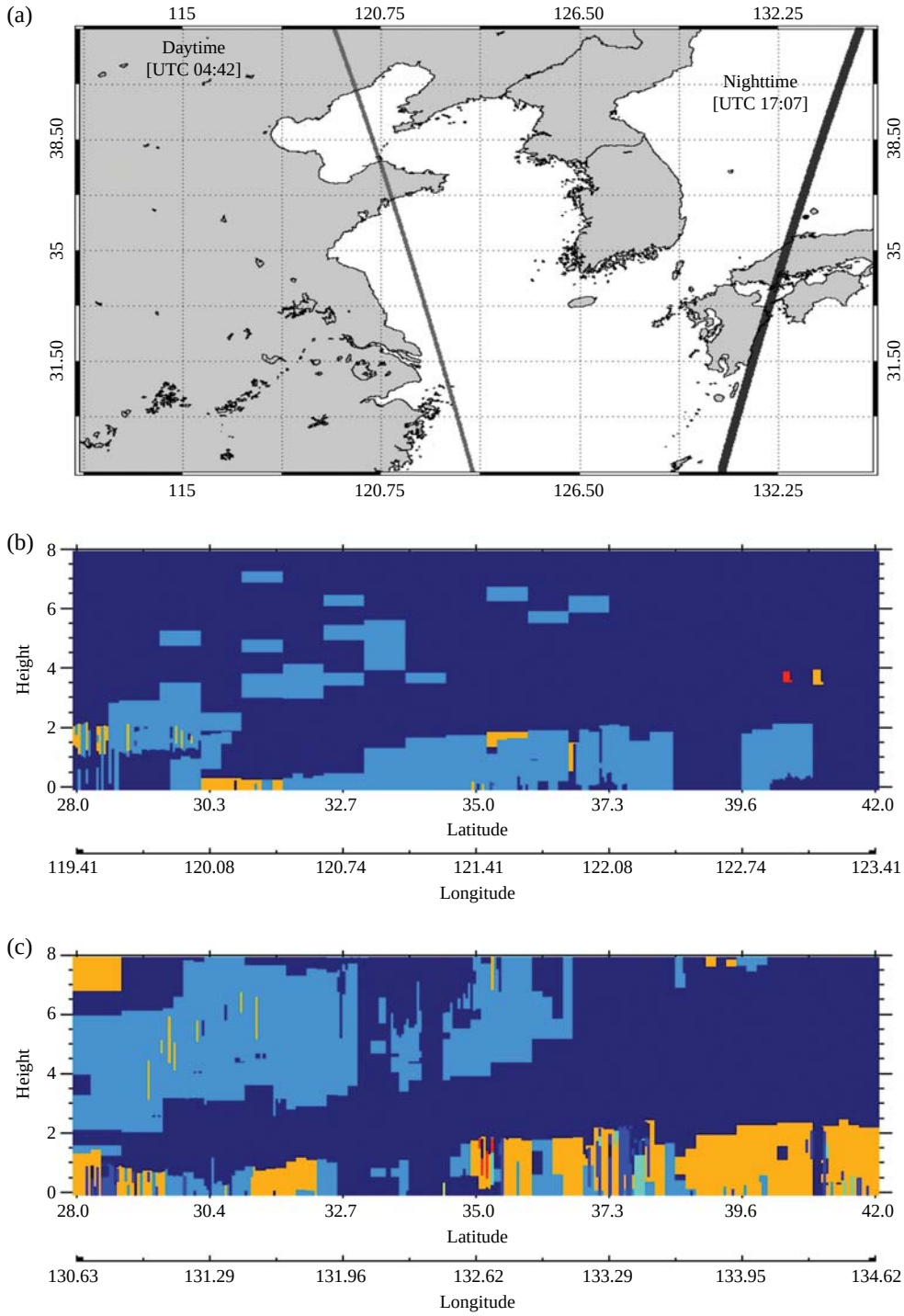

Fig. 4. (a) CALIPSO overpass track, (b) VFM for daytime and (c) nighttime on 21 March 2010. Colors on VFM plots represent no aerosol (dark blue), dust (sky blue), polluted dust (orange), respectively.

도에 따라 다른 값을 보여준다. 지표면에서 1 km 고도에서는 편광 소멸도 값이 0.1로 일반적인 오염입자의 편광 소멸도보다 높은 값을 보였으며, 2～5 km 고도에서는 0.1～0.25 사이의 전형적인 먼지입자의 편광 소멸도 값을 보였다. 5 km 이상의 고도에서는 0.15～0.2 사이의 편광 소멸도와 0.25 이상의 높은 편광 소멸도 값이 관측되는데, 0.25 이상의 높은 편광 소멸도는 얼음 구름으로부터 산출되는 값으로 5 km 이상의 고도에서는 얼음구름과 먼지 입자가 동시에 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 고도에 따른 편광 소멸도 값의 차이로부터 관측된 대기 에어러솔이 먼지입자와 얼음 구름임을 알 수 있었다.

그림 3에서 나타나는 상층의 에어러솔 층은 라이다 탑재 위성인 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 자료에서 동 시간대에 관측된 자료를 통하여 재확인이 가능하다. 그림 4(a)는 동 시간대에 두 번에 걸쳐 서해와 동해를 관측한 CALIPSO 위성의 경로를 보여준다. 그림 4(b)에서 오후 1시 40분경 서해상을 통과한 CALIPSO 위성자료에서 에어러솔의 종류를 나타내는 VFM (Vertical Feature Mask) 자료를 보면 2 km 이내의 고도에서 먼지 (dust)형 에어러솔이 관측됨을 보여준다. 본 연구의 라이다 관측 시점과 중첩되는 새벽 2시경 동해상을 통과한 CALIPSO 위성자료를 보여주는 그림 4(c)에서는 2～8 km 고도에 먼지 (dust)형 에어러솔이 나타나고 있는 것으로 보아 그림 3의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 3의 결과를 바탕으로 구름에 의한 영향이 없고 높은 산란 신호를 보인 3월 21일 23시 30분부터 22일 03시 30분까지 측정된 5 km 고도까지의 석영 라만 산란 신호를 합하여 석영 농도를 산출하기 위한 분석을 수행하였다. 그림 5는 대기 에어러솔에 의한 후방산란계수 (a)와 먼지입자의 고도분포를 보여주는 석영 후방산란계수 (b)를 보여준다. 그림 5(a)은 그림 3(a)에서 확인되었듯이 지표면에서 1 km, 그리고 2～5 km 고도에서 대기 에어러솔이 관측되었음을 보여준

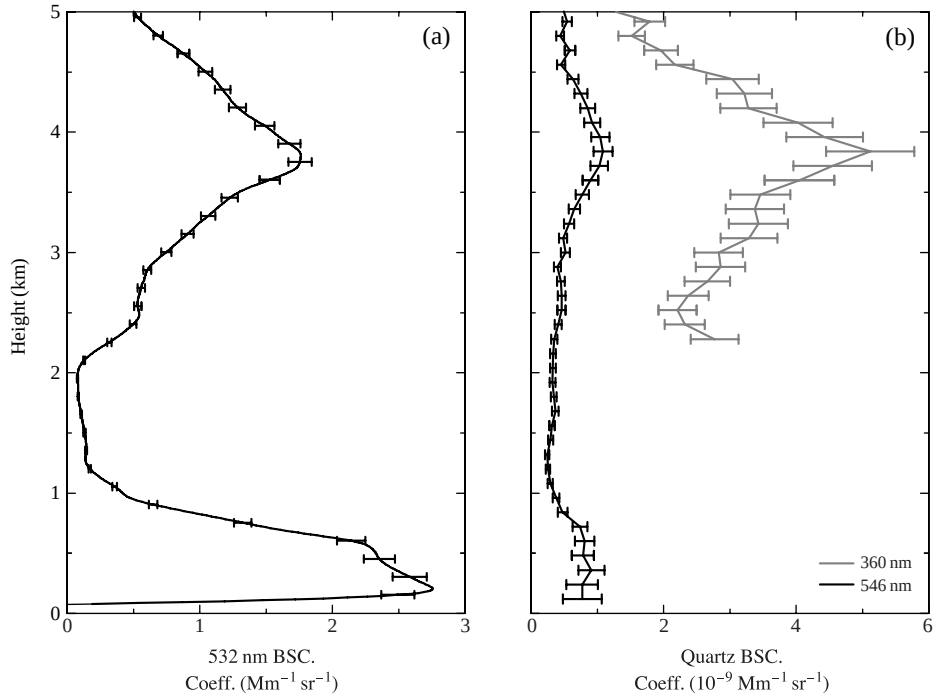

Fig. 5. (a) Mean profile of the aerosol backscatter coefficient at 532 nm for the measurement from 23:30 on 21 March to 03:50 on 22 March 2010 (LT). (b) Backscatter coefficients of quartz measured at 360 nm (gray color) and 546 nm (black color).

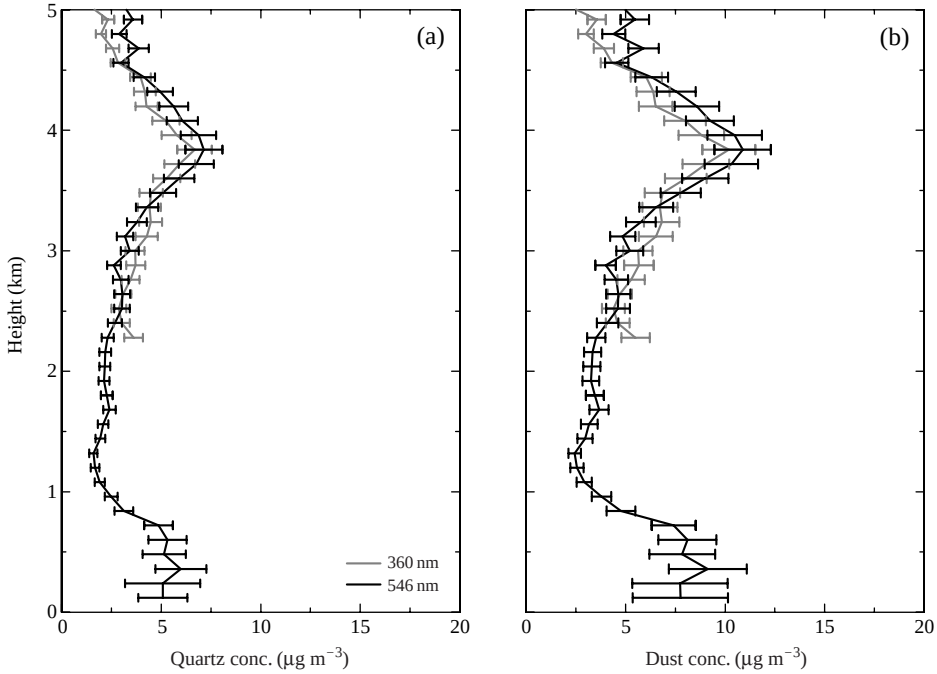

Fig. 6. Profiles of the mineral quartz concentration derived from the quartz backscatter coefficients (a) and dust concentrations (b) at 360 (gray color) and 546 (black color) nm.

다. 그림 5(b)는 관측된 대기 에어러솔 중에 포함된 석영에 의한 후방산란계수로서 546 nm는 지표면에서 5 km 고도까지 산출되었으나, 360 nm는 시스템 보정의 문제로 2 km 이상의 고도에서만 결과가 산출되었다. 546 nm에서 보여주는 고도 별 석영 후방산란계수는 그림 5(a)의 대기 에어러솔에 의한 후방산란계수와 일치되는 고도분포를 보여준다. 하지만, 그림 5(a)와 같이 1km 이하의 고도에서 관측된 값이 상층에 비하여 높은 후방산란계수 값을 보여주나 석영 후방산란계수는 상층의 3.7 km 고도에서 1.1×10^{-9} Mm^{-1} sr^{-1}으로 가장 높은 값을 보였다. 이는 그림 3(b)에서 보이듯이 높은 편광 소멸도 값을 보인 상층에 더 많은 먼지 입자가 포함되어 높은 석영 후방 산란 신호를 발생한 것으로 고려된다.

Table 2. Weight percentage of quartz in Asian dust.

Region	SiO_2 (%)	Reference
Beshkent, Uzbekistan	65	Ivanov *et al*., 1989
Central Sudan	60.8 ~ 63.8	Sharif, 1995
Kashi, China	56.2	Feng *et al*., 2002
Kunlun, China	61.3	
Luntai, China	77.2	
Donghuang, China	75.8	
Lanzhou, China	59.3	
Xi'an, China	62.51	
Ningxia, China	66.8	
Xilin Hot, Mongolia	71.2	
Beijing, China	63.5	
Vladivostok, Russia	59.3 ~ 68.5	Ganzei and Razzhigaeva, 2006

Average: 65.6 ± 6.6%

3. 2 고도별 황사 농도 산출

그림 5에서 분석된 석영의 후방 산란 신호로부터 석영의 농도를 산출하였으며 그 결과를 그림 6 (a)에 나타내었다. 석영의 농도는 고도 별로 1.5 ~ 7.6 μg/m^{3}의 농도 분포를 보였다.

본 연구에서는 석영 라만 산란 신호를 수신하여 산출된 고도 별 석영 농도로부터 고도 별 황사의 농도를 유추하였다. 고도 별 황사 농도의 유추에는 황

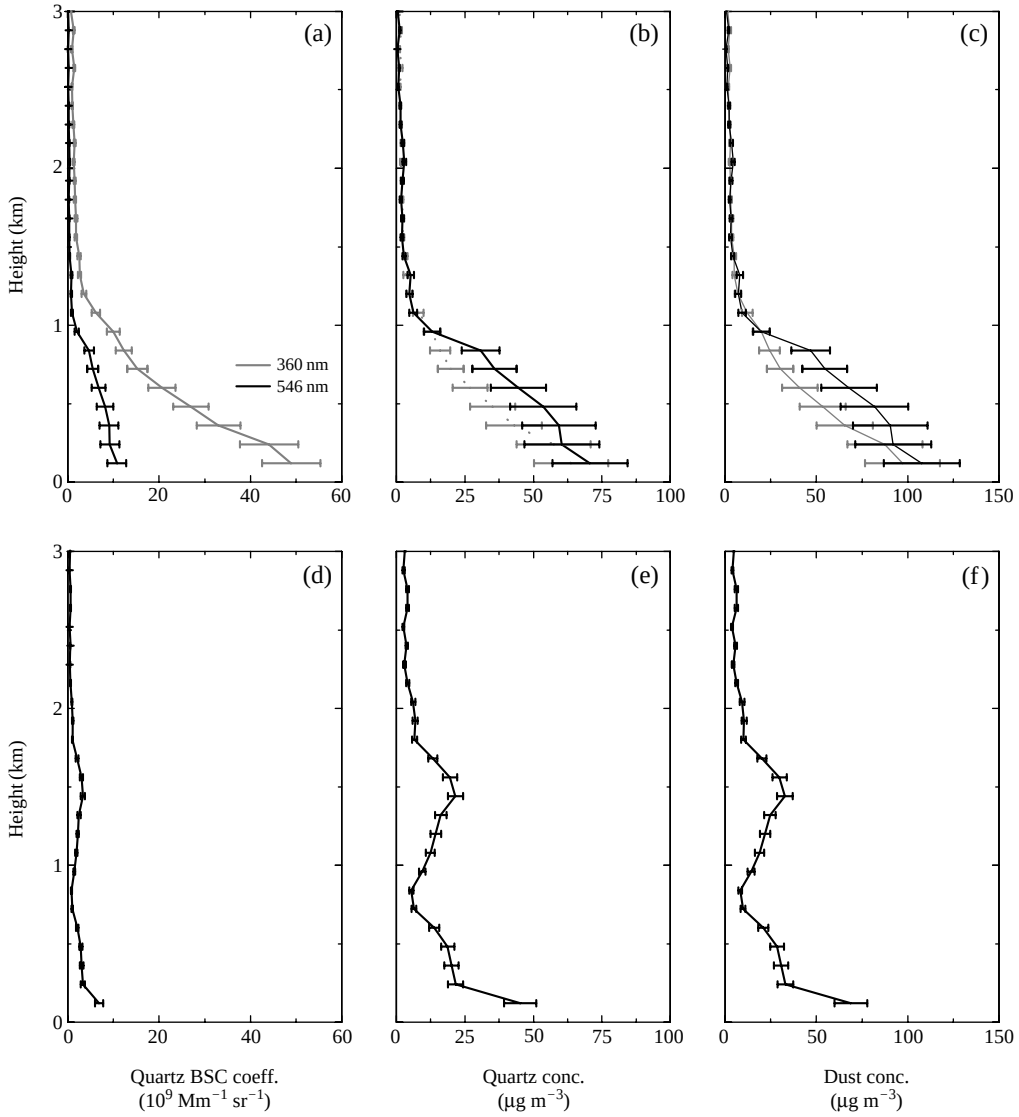

Fig. 7. Profiles of backscatter coefficients of quartz (a, d), the mineral quartz concentration derived from the quartz backscatter coefficients (b, e) and dust concentrations (c, f) at 360 (gray color) and 546 (black color) nm measured from 19:37 on 15 March to 00:20 on 16 March 2010 (a, b, c) and from 22:00 on 16 March to 04:00 on 17 March 2010 (d, e. f).

사입자의 성분들 중 석영이 차지하는 비율을 이용하였다. 일반적으로, 아시아 지역에서 발생한 황사 입자의 성분들 중에서 석영이 차지하는 비율에 대한 문헌 값은 약 56.2%에서 77.2% 사이의 값을 보이므로 (표 2), 본 연구에서는 표 2에 정리된 값들의 평균값인 65.6%를 사용하여 황사의 농도를 유추하였다. 그림 6(b)는 산출된 고도 별 황사의 농도를 보여준다.

그림 7은 같은 분석 방법으로 2010년 3월 15일과 16일에 관측된 석영 후방산란계수(a, d), 석영 농도(b, e) 그리고 황사 농도(c, f)를 보여준다. 3월 15일의 경우 1 km 이하의 고도에서 고농도의 황사가 관측되었으며, 최저 관측고도에서의 농도는 107 μg/m^3이 산

출되었다. 3월 16일의 경우에는 1 km 이하의 고도와 1～2 km 고도로 두 개의 황사 층이 관측되었으며 3월 15일에 비하여 낮은 50 μg/m^3 전후의 값이 관측되었다.

표 3은 석영 라만 신호 수신 기간 동안의 지표면에서 관측된 평균 PM_{10} 농도와 석영 라만 산란 신호 분석으로 산출된 최저 관측 고도(0.12 km)에서의 석영 농도와 황사의 농도를 보여준다. 본 연구에서는 지표면과 라이다 시스템의 최저 관측 고도인 0.12 km 사이의 대기 에어러솔의 농도는 일정하다고 가정하여 지표면에서 측정된 PM_{10} 농도와 라이다 분석 결과를 비교하였다. 3월 15일의 경우 PM_{10} 농도가 215 ±110 μg/m^{3}일 때 석영 라만 신호 분석으로 산출된 황사의 농도는 107±30 μg/m^{3}이었다. 3월 16일에는 시간 별 PM_{10} 농도변화가 10 μg/m^3 전후로 큰 차이를 보이지 않았다. 이때의 평균 PM_{10} 농도는 124±6 μg/m^{3}이었고 석영 라만 분석에 의한 황사의 농도는 69±16 μg/m^{3}이었다. 3월 15일과 16일의 PM_{10} 농도에서 황사가 차지하는 비율은 각각 0.498과 0.556이었으며, 3월 21일의 경우 황사가 차지하는 비율은 0.19로 이전 관측 일에 비하여 낮은 분포를 보였다. 이는 석영 라만 분석 시 황사에서 석영이 차지하는 비율(본 연구에서는 65.6%로 가정)의 변화에 의해 발생할 수 있는 오차를 고려하더라도 전체 PM_{10} 농도에서 황사가 차지하는 비율이 20～50%로 측정되는 것은 황사 발생시 발원지에서 발생된 황사 입자 외에도 장거리 이동시 중국의 산업화 지역을 통과시 포함되거나 국내에서 발생된 미세 입자(fine particles)가 황사 입자와 혼합되어 동시에 관측되었음을 시사한다.

본 연구에서는 석영 라만 산란 신호를 수신하여 석영의 농도를 산출하고 석영이 황사에서 차지하는 비율을 문헌자료로부터 유추하여 황사의 연직분포 및 고도 별 농도를 산출하였다. 황사에서 석영이 차지하는 비율은 황사의 발원지에 따라 변화될 수 있으므로 정확한 황사의 농도를 산출하기 위해서는 발원지 별 석영 비율에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 향후 라이다 관측 시 황사에서 석영의 비율을 산출하고 황사와 황사 외 미세먼지 농도를 구분할 수 있는 지점(in-situ) 관측을 수행하여 본 연구 방법의 정확성을 높이고 분석 결과의 검정이 필요할 것으로 고려된다.

Table 3. PM_{10}, SiO_2 and dust concentrations in Gwangju area.

Date	PM_{10} (μg m^{-3})	SiO_2 (μg m^{-3})	Dust (μg m^{-3})	Dust/PM_{10}
2010.03.15	215±110	70±25	107±30	0.498
2010.03.16	124±6	45±10	69±16	0.556
2010.03.21	42±3	5±2	8±3	0.190

4. 결 론

본 연구에서는 석영 라만 채널을 이용한 라이다 관측을 통하여 국내 최초로 석영 라만 산란 신호를 수신하고 이를 분석하여 고도 별 석영의 후방산란계수와 농도를 산출하였다. 또한, 본 연구에서는 라이다로 관측된 고도별 석영 농도에서 황사가 차지하는 비율 값을 이용하여 고도 별 황사 농도를 유추할 수 있었다. 2010년 3월 15, 16, 21일에 관측된 후방 산란신호 관측 결과를 대상으로 석영 농도를 분석한 결과, 황사가 관측되었던 3월 15일의 경우에는 고도 1 km 이하에서 고농도의 황사가 관측되었으며, 최저 관측고도에서의 석영 농도는 107 μg/m^{3}이 산출되었다. 3월 16일의 경우에는 1 km 이하의 고도와 1～2 km 고도로 두 개의 황사 층이 관측되었으며 3월 15일에 비하여 낮은 50 μg/m^3 전후의 값이 관측되었다. 이러한 라이다 관측을 통한 석영 농도 분석 결과는 지상에서 관측된 PM_{10} 농도와 비례하는 경향을 보였다. 한편, 황사기간 중 PM_{10} 농도에서 황사가 차지하는 비율은 20～50%로 분석되었으며, 이러한 비율은 순수한 황사입자가 장거리 이동시 다른 오염 입자와 혼합되어 동시에 관측되었음을 나타낸다.

이와 같이 석영 라만 채널을 이용한 황사의 농도 산출은 황사 발생시 고도 별 황사의 농도 산출함으로써 전체 에어로솔 농도에서 황사와 황사 외 미세입자의 농도를 구분할 수 있다. 이러한 농도의 구분은 동북아시아 지역에서 봄철에 주로 발생하는 황사와 황사 이외의 미세입자와의 이동특성 및 혼합 특성을 밝히는데 매우 유용한 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시 · 예측 및 국가정책지원 강화사업(RACS 2010-1003) 및 2010년도 정

부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0022171).

참 고 문 헌

Ansmann, A., U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp, and W. Michaelis (1990) Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar, Opt. Lett., 15, 746-748.

Feng, Q., K.N. Endo, and G.D. Cheng (2002) Dust storms in China: A case study of dust storm variation and dust characteristics, Bull. Eng. Geol. Environ., 61, 253-261.

Ganzei, L.A. and N.G. Razzhigaeva (2006) Composition of sand storm particles in the southern far east, Lithology and Mineral Resources, 41(3), 215-221.

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 relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, J. Geophys. Res., 108(D23), 8633.

Husar, R.B., D.M. Tratt, B.A. Schichtel, S.R. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gassó, T. Gill, N.S. Laulainen, F. Lu, M.C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B.N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G.C. Feldman, C. McClain, R.J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W.E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto, and W.C. Malm (2001) Asian dust events of April 1998, J. Geophys. Res., 106, 18,317-18,330.

Ivanov, V.A., M.A. Prokofyev, D.A. Zhukovsky, V.F. Zhvalev, L.S. Ivlev, and J.W. Winchester (1989) Chemical and mineralogical investigation of tropospheric aerosols during the U.S.S.R.-U.S.A. experiment “DUNE”, Dushanbe, Tadzhik SSR, Special environmental Report No. 17, WMO-No. 724, World Meteorological Organization, Geneva, pp. 100-103.

Lee, K.H. and Y.J. Kim (2010) Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted and dust storm days, Atmos. Meas. Tech., 3, 1771-1784, doi:10.5194/amt-3-1771-2010.

Lee, K.H., Z. Li, Y.J. Kim, and A. Kokhanovsky (2009) Aerosol monitoring from satellite observations: a history of three decades, Atmospheric and Biological Environmental Monitoring. Edited by Y.J. Kim, U. Platt, M.B. Gu, and H. Iwahashi, Springer, doi:10.1007/978-1-4020-9674-7_2, 13-38.

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, Atmos. Res., doi:10.1016/j.atmosres.2007.03.006.

Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller (2008) Seasonal characteristics of lidar ratio measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn, Atmos. Environ., 42, 2208-2224.

Ramanathan, V. and F. Feng (2009) Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives, Atmos. Environ., 43, 37-50.

Sakai, T., T. Nagai, M. Nakazato, Y. Mano, and T. Murayama (2003) Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and watervapor mixing ratio over Tsukuba, Appl. Opt., 42(36), 7103-7116.

Schoen, P.E. and H.Z. Cummins (1971) Absolute cross sections for Raman and Brillouin light scattering in quartz, in Proceedings of Second International Conference on Light Scattering in Solids. Edited by M. Balkanski, p. 460, Flammarion, Paris.

Schwartz, S.E. and M.O. Andreae (2002) Uncertainty in climate change caused by aerosols, Science, 272, 1121-1122.

Sharif, S. (1995) Chemical and mineral composition of dust and its effect on the dielectric constant, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33(2), 353-359.

Shin, D.H., Y.M. Noh, B. Tatarov, S.K. Shin, Y.J. Kim, and D. Müller (2010) Multiwavelength aerosol Raman lidar for optical and microphysical aerosol typing over east Asia, Proceeding of the 25th International Laser Radar conference, St. Petersburg, Russia, 239-242.

Tatarov, B. and N. Sugimoto (2005) Estimation of quartz concentration in the tropospheric mineral aerosols using combined Raman and high-spectral-resolution lidars, Opt. Lett., 30, 3407-3409.

Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui, and N. Sugimoto (2001) Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation, J. Geophys. Res., 106, 18,331-18,344.