

석영 라만 채널을 이용한 황사 후방 산란 계수 산출

Retrieval of Dust Backscatter Coefficient using Quartz Raman Channel in Lidar Measurements

노 영 민 · Detlef Mueller · 이 한 림¹⁾·*

광주과학기술원 환경공학부, ¹⁾연세대학교 대기과학과

(2011년 11월 16일 접수, 2011년 12월 23일 수정, 2012년 1월 9일 채택)

Young Min Noh, Detlef Mueller and Hanlim Lee¹⁾·*

School of Environmental Science & Engineering,

Gwangju Institute of Science & Technology

¹⁾*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

(Received 16 November 2011, revised 23 December 2011, accepted 9 January 2012)

Abstract

We present a retrieval method to obtain dust backscatter coefficient from the mixed Asian dust and pollutant layer. In the present study, vertically resolved quartz (silicon dioxide, silica) concentration was calculated using Raman scattering signals from quartz at 546 nm. Dust concentration was obtained based on typical mass percentage of quartz in Asian dust. The highest value of dust concentration at 3.7 km in March 21, 2010 was 22.3 and 10.9 $\mu\text{g m}^{-3}$ according to the quartz percentage in Asian dust as 65 and 30% based on literature survey, respectively. OPAC (Optical Properties of Aerosol and Clouds) simulations were conducted to calculate dust backscatter coefficient. The retrieved dust concentration was used as an input parameter for the OPAC calculations. Utilization of quartz Raman channel in Lidar measurements is considered useful for distinguishing optical properties of dust and non-dust aerosol in the mixing state of Asian dust.

Key words : Quartz, OPAC, Lidar, Asian dust

1. 서 론

동북아시아 지역은 황사(Asian dust), smoke 입자, 오염 입자 등 다양한 종류의 대기 에어로솔이 발생하고 있으며 유럽과 아프리카 등 대부분의 지역에서 대기 에어로솔의 발생량이 감소하는 추세이나 아시

아 지역은 여전히 증가하는 경향을 보인다(Lee *et al.*, 2006). 이들 중 주로 봄철에 중국의 타클라마칸 사막과 몽고 등지에서 주로 발생하는 황사는 편서풍의 기류를 타고 태평양으로 이동하여 때로는 아시아 지역의 대기 환경에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 장거리 이동을 통하여 알래스카 지역과 미국 본토에까지 도달하기도 한다(Husar *et al.*, 2001; Uno *et al.*, 2001). 대기 에어로솔 중 입자가 크고 비구형성의 형태를 가지는 황사 입자는 다른 에어로솔과는 구분되는 산

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-2123-7576, E-mail : hanlimlee10@gmail.com

란 특성을 보인다(Schwartz and Andreae, 2002). 하지만, 황사의 광학적 특성은 발생원에서 생성 후 중국의 공업지역 및 대도시 상공을 통과하면서 각종 오염물질 및 입자들과 혼합되어 발생원에서와는 다른 광학적 특성을 나타낸다(Huebert *et al.*, 2003). 이러한 황사와 오염물질의 혼합과 이에 따른 광학적 특성의 변화에 대한 연구가 ACE-Asia (Hubert *et al.*, 2003)를 통하여 수행되었다. Anderson *et al.* (2003)은 ACE-Asia 기간 중 항공기를 이용한 in-situ 관측으로부터 상층에서 관측된 황사 층에서 $1\ \mu\text{m}$ 이하 크기의 미세오염입자는 단산란알베도(Single-scattering albedo)가 0.88 ± 0.03 으로 낮으나 $1\ \mu\text{m}$ 이상의 초대 황사 입자는 단산란알베도(Single-scattering albedo)가 0.96 ± 0.01 로 미세오염입자와 구분됨을 밝혔다. Kim *et al.* (2004)는 지상 관측으로부터 장거리 이동된 황사가 이동 중 오염입자와의 혼합으로 인하여 단산란알베도가 감소한다고 밝혔다. 하지만 이러한 연구 방법들은 다양한 고도로 이동하는 황사 관측에 있어 공간적 및 실시간 연속 관측에 제약이 발생한다.

황사를 비롯한 대기 에어러솔의 연속적인 수직분포를 측정할 수 있는 원격탐사 방법으로 라이다(LIDAR: Light Detection And Range) 관측이 있다. 라이다 관측을 통하여 황사 및 대기 에어러솔의 고도 분포를 포함한 광학적 특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 현재까지의 라이다 관측은 혼합된 대기 에어러솔의 광학적 특성을 구분하는 것에는 한계가 있었다. 다만, Shimizu *et al.* (2004)가 편광소멸도(Depolarization ratio)를 이용하여 황사와 황사를 제외한 에어러솔의 후방산란계수를 산출하였으나, 이는 입자의 비구형성만을 활용한 방법으로 정확성이 떨어진다. Muller *et al.* (2010)와 Tatarov and Sugimoto (2005)은 새로운 황사 관측 방법으로 석영 라만 채널 관측을 통하여 황사 발생시 황사의 주요 성분인 석영으로부터 유발된 석영 라만 산란신호를 검출하여 석영 후방산란계수를 산출하였다. Noh *et al.* (2011)은 석영에 의해 라만 산란되는 강도가 고도별 석영의 농도에 비례한다는 이론을 바탕으로 고도별 석영의 농도를 산출하고 문헌자료를 바탕으로 황사 중 석영의 비율을 적용하여 고도별 황사의 농도를 산출하였다. 하지만 황사 관측 시 황사가 발원지로부터 장거리 이동 중 각종 오염물질과의 혼합으로 인하여 발

생되는 광학적 특성의 변화를 연구하기 위해서는 라이다로 관측된 전체 에어러솔의 후방산란계수로부터 황사와 비황사의 후방산란계수를 분리하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 고도별 황사의 농도를 산출하는 선행연구를 바탕으로 입자의 농도로부터 광학적 특성 값을 산출할 수 있는 OPAC (Optical Properties of Aerosol and Clouds; Hess *et al.*, 1998)을 접목하여 황사만의 후방산란계수를 산출할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

또한, 본 연구방법으로 산출된 황사의 후방산란계수와 기존의 편광소멸도를 이용한 방법으로 산출된 황사의 후방산란계수를 비교하여 본 연구방법의 유효성을 확인하였다.

2. 연구방법

Tatarov and Sugimoto (2005)의 이론에 기초하여 석영(silicon dioxide, silica) 입자의 라만 산란으로부터 석영의 후방산란계수를 산출하였으며, 황사의 농도는 산출된 석영 후방산란계수와 문헌자료를 바탕으로 황사에서 석영이 차지하는 비율을 적용하여 유추하였다(Noh *et al.*, 2011). 표 2에서 보여주듯이 아시아 지역에서 발생한 황사 입자의 성분들 중에서 석영이 차지하는 비율은 황사의 발원지와 관측 지점에 따라 6.2%에서 80.5% 사이의 값을 보였다. 본 연구에서는 황사입자에서 석영의 질량이 차지하는 비율을 선행연구(Ganzei and Razzhigaeva, 2006; Feng *et al.*, 2002; Ivanov *et al.*, 1989)에서 측정된 비율의 평균인 65.0%와 30.0%의 두 가지로 구분하여 고도별 황사의 농도를 산출하고, 산출된 고도별 황사농도를 OPAC의 입력자료로 활용하여 황사입자만의 후방산란계수를 산출하였다.

OPAC은 에어러솔과 구름의 광학특성 요소를 계산하는 모델로 6개의 water clouds, 3개의 ice clouds, Desert 입자를 포함한 10개의 에어러솔 성분에 대해 $0.25 \sim 40\ \mu\text{m}$ 파장범위와 0~99% 상대습도 범위에서의 광학특성을 알려준다. 이때 에어러솔의 광학특성은 Mie 이론을 통해 계산되고 구름과 에어러솔은 외부혼합(external mixtures)을 가정하며 습도의 변화에 따라 에어러솔의 입경이 달라지는 현상(hysteresis

Table 1. Microphysical properties of desert particle components in dry state.

Component	σ	r_{modN} (μm)	r_{modV} (μm)	r_{min} (μm)	r_{max} (μm)	ρ (g cm^{-3})	M^* ($\mu\text{g m}^{-3}$)/(part. cm^{-3})	M
Mineral (nuc.)	1.95	0.07	0.27	0.005	20.0	2.6	2.78E-2	0.110
Mineral (acc.)	2.00	0.39	1.60	0.005	20.0	2.6	5.53E0	0.747
Mineral-trans.	2.20	0.50	3.00	0.02	5.0	2.6	1.59E1	0.152

Here, σ , r_{modN} , r_{modV} , r_{min} , and r_{max} are parameters of the lognormal size distribution. The term ρ is the density of the aerosol particles and M^* is the aerosol mass per cubic meter air, integrated over the size distribution and normalized to 1 particle per cubic centimeter of air. M is mass mixing ratio of components.

Table 2. Mass percentage of quartz in Asian dust.

Sampling site	SiO ₂ (%)	Reference
Beshkent, Uzbekistan	65	Ivanov <i>et al.</i> , 1989
Kashi, China	56.2	Feng <i>et al.</i> , 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	Ganzei and Razzhigaeva, 2006
Beijing, China	63.5	
Vladivostok, Russia	59.3 ~ 68.5	Ma <i>et al.</i> , 2001
Kyoto, Japan	6.2 ~ 80.5	

effect)은 고려하지 못한다.

본 연구에서는 관측된 황사 입자가 nuclei, accumulation, 그리고 수송된 입자의 세가지 형태의 입자로 구성되었다고 가정하였다. 표 1은 본 연구에서 구분한 세가지 황사 입자의 물리적 특성값과 단위 입자당 질량(M^*) 및 질량혼합비 (Mass mixing ratio, M)를 보여준다(Hess *et al.*, 1998). 석영 라만 채널 관측으로부터 도출된 전체 황사의 농도는 식(1)을 이용하여 각 황사 성분의 수농도로 변환하였다.

$$N_i = \frac{D_z R_i}{M_i^*} \tag{1}$$

여기서, N_i 는 황사 성분 i 의 수농도를, D_z 는 고도 z 에서 황사 농도, R_i 는 황사 성분 i 의 무게비, 그리고 M_i^* 는 성분 i 의 단위 입자당 무게를 나타낸다. 식(1)로부터 산출된 고도별 각 황사 성분의 수농도를 OPAC의 입력자료로 사용하여 황사의 소산계수(Dust extinction coefficient, α_p)를 산출하였다. 이때의 상대

습도는 관측 당시의 radiosonde 데이터를 바탕으로 60%를 적용하였다.

산출된 소산계수를 선행연구(Noh *et al.*, 2007; Murayama *et al.*, 2004; Sakai *et al.*, 2003)로부터 산출된 45 sr의 라이다 비(Lidar ratio)를 나누어서 최종적으로 황사의 후방산란계수(Dust backscatter coefficient, β_b)를 산출하였다.

본 연구에서는 편광소멸도 값을 이용하여 황사의 후방산란계수를 산출하고 석영 라만 채널 분석으로부터 산출된 값과 비교하였다. 편광소멸도를 이용하여 황사의 후방산란계수를 산출하기 위해서는 입자와 공기분자의 편광소멸도를 모두 포함하는 선형체적 편광소멸도(linear volume depolarization ratio, δ_v)와 입자만의 편광소멸도(particle depolarization ratio, δ_p)의 두 가지가 필요하다(Sakai *et al.*, 2003). δ_v 는 아래의 식(2)로부터 산출하였다.

$$\delta_v = \frac{P_s}{P_p + P_s} \tag{2}$$

여기서, P_p 와 P_s 는 각각 후방산란 신호의 수평과 수직 산란 신호를 나타낸다. 전체 에어러솔에서 황사를 구분하는데 사용할 수 있는 입자 편광소멸도는 식(3)으로부터 산출하였다.

$$\delta_p = \frac{\delta_v(z)R(z) - \delta_m}{R(z) - 1} \tag{3}$$

여기서, δ_m 은 공기분자의 편광소멸도로서 본 연구에서는 선행연구사례(Sakai *et al.*, 2003)의 측정값인 0.0049를 사용하였다. $R(z)$ 는 산란비(scattering ratio)를 나타낸다.

전체 에어러솔에서 황사가 차지하는 비율(R_D)은 Shimizu *et al.* (2004)가 제안한 아래의 식(4)로부터 계산하였다.

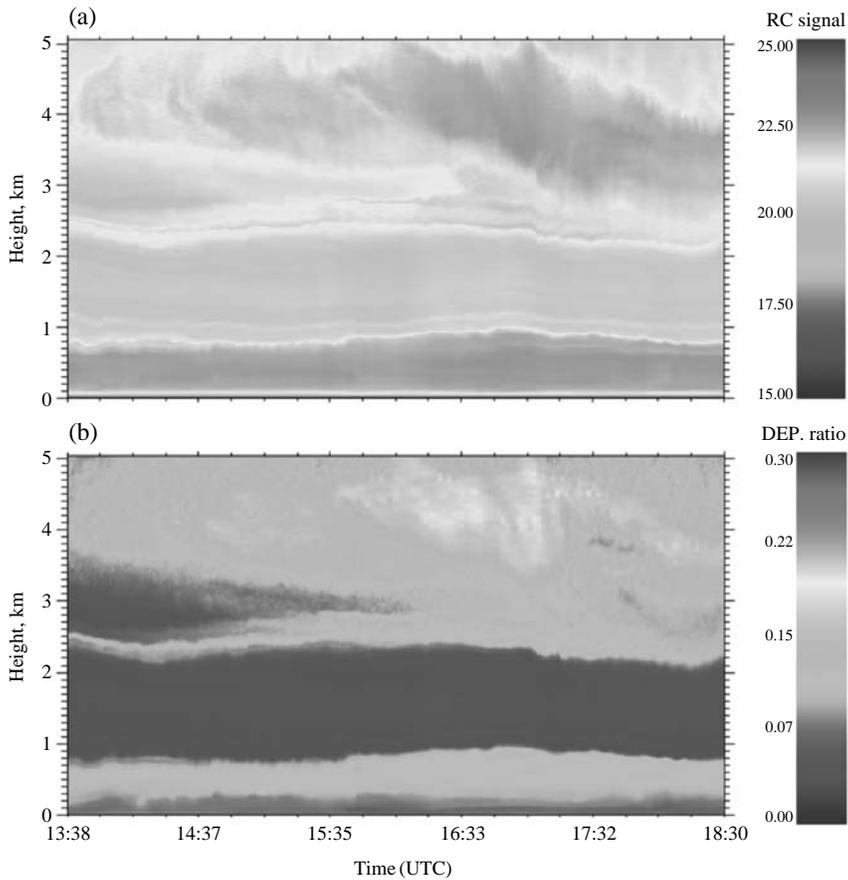


Fig. 1. Time-height cross section of range-corrected backscatter signal (a) and depolarization ratio (b) at 532 nm over Gwangju, Korea on 21 March 2010.

$$R_D = \frac{(\delta_a - \delta_2)(1 + \delta_1)}{(\delta_1 - \delta_2)(1 + \delta_a)} \quad (4)$$

여기서, δ_1 과 δ_2 는 경험적으로 산출되는 황사와 비황사 입자의 입자 편광소멸도 값으로 선행연구(Noh *et al.*, 2008, 2007)로부터 얻어진 0.34와 0.03의 값을 각각 사용하였다. 마지막으로 계산되어진 황사 비율을 이용하여 에어러솔 후방산란계수로부터 황사의 후방산란계수를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 대기 관측은 2010년 봄 기간에 광주과학기술

원 (35.10°N, 126.53°E)에서 지속적으로 수행되었다. 본 연구에서는 석영 라만 채널과 편광소멸도 채널의 관측이 동시에 수행된 3월 21일 관측데이터를 분석하였다. 그림 1은 3월 21일 13:38 (UTC)부터 18:30 (UTC) 사이에 관측된 후방산란신호 세기(a)와 전체 편광소멸도(b) 값을 보여준다. 그림 1(a)에 보여주는 관측된 대기 에어러솔은 지표면에서 1 km 고도까지와 2 km 이상의 고도에 주요한 에어러솔이 분포하고 있음을 보여주고 있다. 그림 1(b)에서 보여주는 편광소멸도는 0.10~0.15로 일반적인 오염입자가 보여주는 0.05~0.08의 편광소멸도보다 높은 편광소멸도를 보여 관측된 에어러솔이 황사임을 알 수 있었다.

그림 1에서 보여준 에어러솔의 고도별 분포와 편광소멸도 결과를 바탕으로 구름에 의한 영향이 없고 높

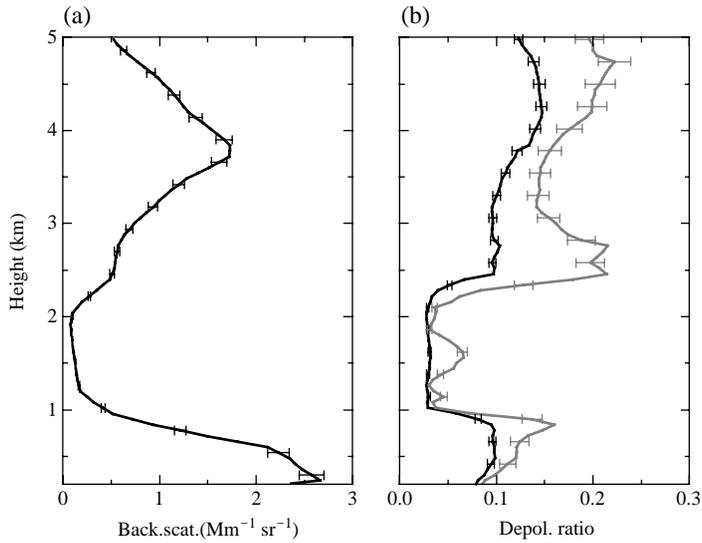


Fig. 2. (a) Mean profile of the aerosol backscatter coefficient at 532 nm for the measurement from 14:30 to 17:50 on 21 March 2010 (UTC). (b) Linear volume depolarization ratio (black color) and particle depolarization ratio (gray color).

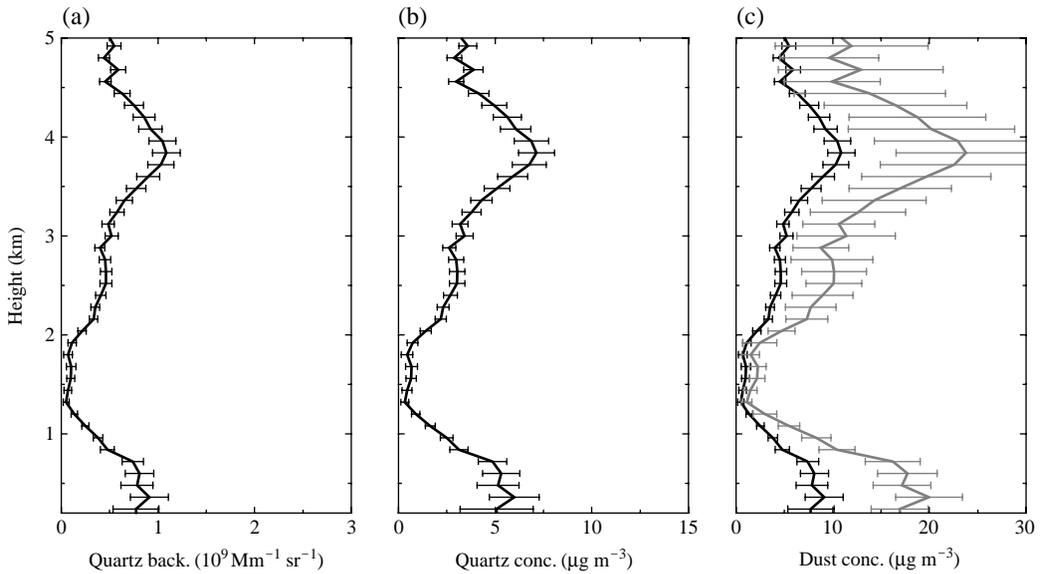


Fig. 3. (a) Profiles of the Quartz backscatter coefficients at 532 nm. (b) Mineral quartz concentration derived from the quartz backscatter coefficients. (c) Dust concentrations at the quartz weight 30% (gray color) and 65% (black color).

은 산란 신호를 보인 14시 30분부터 17시 50분(UTC) 까지 측정된 5 km 고도까지의 각 관측 채널별 수신 신호를 합하여 분석을 수행하였다. 그림 2는 대기 에

어러솔에 의한 후방산란계수(a)와 선형체적 및 입자 편광소멸도(b) 값을 보여준다.

그림 3(a)는 관측된 대기 에어러솔 중에 포함된

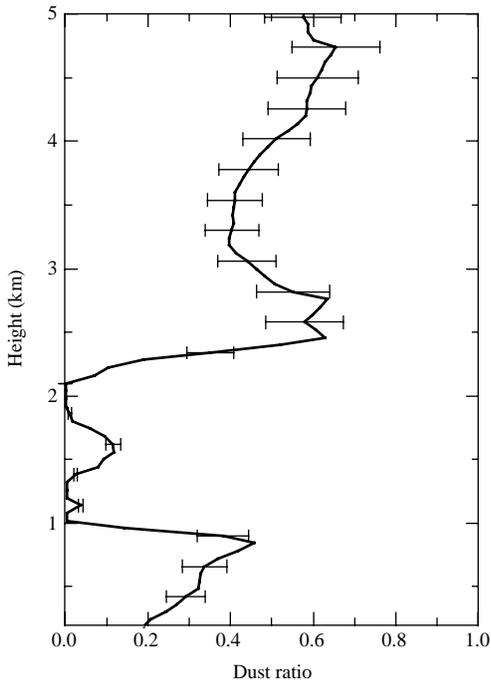


Fig. 4. Dust ratio calculated by depolarization ratio.

석영에 의한 후방산란계수로서 그림 2(a)의 대기 에어러솔에 의한 후방산란계수와 일치되는 고도분포를 보여준다. 하지만, 에어러솔 후방산란계수는 1 km 이하의 고도에서의 값이 상층에 비하여 높으나 석영 후방산란계수는 상층의 3.7 km 고도에서 $1.1 \times 10^{-9} \text{ Mm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 으로 가장 높은 값을 보였다. 이는 그림 2(b)에서 보이듯이 높은 입자 편광소멸도 값을 보인 상층에 더 많은 먼지 입자가 포함되어 높은 석영 후방산란 신호를 발생시킨 것으로 고려된다. 이렇게 분석된 석영의 후방 산란 신호로부터 산출된 석영의 농도는 그림 3(b)에 표현되어 있다. 석영의 농도는 고도에 따라 최저 $0.3 \mu\text{g m}^{-3}$ 에서 최대 $7.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 농도 분포를 보였다. 그리고 본 연구에서는 석영 라만 산란 신호를 수신하여 산출된 고도별 석영 농도와 황사입자의 성분들 중 석영이 차지하는 비율을 이용하여 고도별 황사의 농도를 유추하였다. 본 연구에서는 석영의 비율을 30.0%와 65.0%의 두 가지로 가정하여 황사의 농도를 유추하였다. 그림 3(c)는 유추된 황사의 농도로서 3.7 km 고도에서 석영의 비율이 30.0% 일 때 $22.3 \mu\text{g m}^{-3}$, 그리고 65.0%일 때 $10.9 \mu\text{g m}^{-3}$ 의

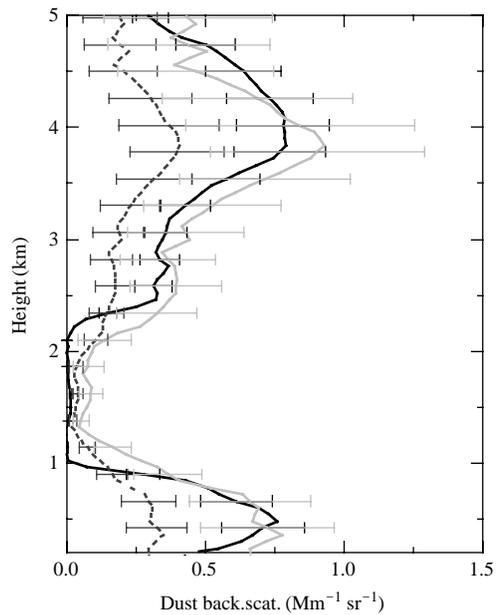


Fig. 5. Dust backscatter coefficient by OPAC calculation with 30 quartz weight percentage (gray color) and 65 quartz weight percentage (dotted dark gray color) and depolarization measurement (black color).

최고 농도를 보였다.

그림 4는 식 (4)로부터 산출된 고도별 황사의 비율을 보여준다. 1 km 이내의 고도에서는 0.2에서 0.4의 황사 비율을 보였으나 2 km 이상의 고도에서는 0.4에서 0.6으로 높은 비율을 보였다. 산출된 고도별 황사 비율을 그림 2(a)의 에어러솔 후방산란계수에 곱하여 황사의 후방산란계수를 산출하였다.

그림 5는 그림 3(c)에서의 고도별 황사 농도를 바탕으로 OPAC 계산으로 도출된 황사의 후방산란계수와 편광소멸도 값으로부터 산출된 황사의 후방산란계수를 보여준다. 65.0%의 석영 비율로 산출된 황사 후방산란계수는 편광소멸도로 산출된 황사 후방산란계수에 비하여 낮은 값을 보였으나, 30%의 석영 비율로 계산된 황사 후방산란계수는 유사한 경향을 보였다. 이러한 결과는 석영 라만 채널 관측으로부터 황사의 후방산란계수를 산출하는 과정에서 가장 중요한 것은 황사에서 석영이 차지하는 비율로 판단된다. 표 2는 동북아시아 지역 발원지와 이동 경로상에서 황사속에 포함된 석영의 질량비를 정리한 것이다.

Ganzei and Razzhigaeva (2006), Feng *et al.* (2002) 그리고 Ivanov *et al.* (1989)에서와 같이 황사의 발원지나 발원지 부근에서의 석영의 비율은 대부분 50% 이상의 비율로 평균 65.0%의 비율을 보였다. 하지만 Ma *et al.* (2001)은 일본 Koyto에서 샘플링 방식의 측정으로 장거리 이동된 황사 중 석영의 비율이 최소 6.2%에서 최대 80.5%로 높은 변화폭을 보인다고 발표하였다. 이는 분석 방법의 차이 등으로 유발된 것도 있지만 근본적으로는 장거리 이동을 통하여 발원지와는 다른 황사의 조성이 관측된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 석영 라만 채널 관측을 통하여 산출된 고도별 석영 농도로부터 황사의 농도를 유추하고 OPAC 계산을 통하여 황사만의 후방산란계수를 도출하였다. 본 연구를 통하여 라이다 원격 탐사 기술을 이용하여 장거리 이동 중인 황사층에서 황사와 황사 이외의 에어러솔의 광학적 특성을 구분할 수 있음을 알 수 있었다. 황사의 후방산란계수 산출에 있어 황사입자에서 석영이 차지하는 비율이 중요한 변수로 판단된다. 이 문제를 해결하기 위하여 향후 연구로 석영 라만 채널 관측 시 지표면에서 석영의 비율을 산출할 수 있는 관측을 동시에 수행한다면 정확도 높은 고도별 황사의 후방산란계수를 산출할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 황사의 발원지 별 석영 비율에 관한 자료를 데이터베이스화하여 황사 관측 시 역궤적 분석을 통하여 발원지를 구분하고 이에 따른 석영 비율을 적용하는 것도 한 방법이 될 것으로 판단된다.

이와 같이 장거리 이동 중인 황사층에서 황사와 황사 이외 에어러솔 후방산란계수의 구분은 동북아시아 지역에서 봄철에 주로 발생하는 황사와 황사 이외의 미세입자와의 이동 및 혼합 특성과 혼합으로 인한 광학적 특성 변화의 연구에 매우 유용한 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3112)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 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 measurements during ACE-Asia, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8647, doi:10.1029/2002JD003247.
- 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, *Lithol. Miner. Resour.*, 41(3), 215-221.
- Hess, M., P. Koepke, and I. Schult (1998) Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79(5), 831-844.
- 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, 18317-18330.
- Ivanov, V.A., M.A. Prokofyev, D.A. Zhukovsky, V.F. Zhvallev, 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.
- Kim, K.W., Z. He, and Y.J. Kim (2004) Physicochemical characteristics and radiative properties of Asian dust particles observed at Kwangju, Korea, during the 2001 ACE-Asia intensive observation period, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S02, doi:10.1029/2003JD003693.
- Lee, D.H., K.H. Lee, J.E. Kim, and J. Kim (2006) Character-

- istics of atmospheric aerosol optical thickness over the northeast Asia using TERRA/MODIS data during the Year 2000~2005, *Atmosphere*, 16(2), 85-96.
- Ma, C.J., M. Kasahara, R. Höller, and T. Kamiya (2001) Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period, *Atmos. Environ.*, 35(15), 2707-2714.
- Murayama, T., D. Müller, K. Wada, A. Shimizu, M. Sekiguchi, and T. Tsukamoto (2004) Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 1-5.
- Müller, D., I. Mattis, B. Tatarov, Y.M. Noh, D.H. Shin, S.K. Shin, K.H. Lee, Y.J. Kim, and N. Sugimoto (2010) Mineral quartz concentration measurements of mixed mineral dust/urban haze pollution plumes over Korea with multiwavelength aerosol Raman-quartz lidar, *Geophys. Res. Lett.*, 37(20), L20810.
- 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.
- Noh, Y.M., K.H. Lee, and H.L. Lee (2011) A retrieval of vertically-resolved Asian dust concentration from quartz channel measurements of Raman lidar, *J. KOSAE*, 27(3), 326-336. (in Korean with English abstract)
- 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.
- Schwartz, S.E. and M.O. Andreae (2002), Uncertainty in climate change caused by aerosols, *Science*, 272, 1121-1122.
- Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, 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, *J. Geophys. Res.*, 109, D19S17, doi:10.1029/2002JD003253.
- 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, 18331-18344.