

## 다파장 라만 라이더 시스템을 이용한 황사/비황사입자 구분 및 비황사입자의 미세물리적 특성 연구

### Classification of Dust/Non-dust Particle from the Asian Dust Plumes and Retrieval of Microphysical Properties using Raman Lidar System

신성균 · 신동호 · 이권호<sup>1)</sup> · 노영민\*

광주과학기술원 환경공학부, 경일대학교 공간정보공학과<sup>1)</sup>

(2012년 11월 15일 접수, 2012년 11월 28일 수정, 2012년 11월 30일 채택)

Sungkyun Shin, Dongho Shin, Kwonho Lee<sup>1)</sup> and Youngmin Noh\*

Department of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology

<sup>1)</sup>Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University

(Received 15 November 2012, revised 28 November 2012, accepted 30 November 2012)

### Abstract

The particle depolarization ratios were retrieved from the observation with a multi-wavelength Raman lidar at Gwangju, Korea (35.11° N, 126.54° E). The measurements were carried out on 24 February and 9 March 2004. Using the particle depolarization ratios, the non-dust aerosol particles were distinguished from the Asian dust plume, and the proportion of the non-dust particle to total dust plume was retrieved. The calculated proportion of the non-dust particle was used for the retrieval of backscatter coefficients at 355, 532, and 1064 nm and extinction coefficients at 355 and 532 nm of non-dust particles in the dust plume. Microphysical parameters of non-dust particles including single-scattering albedo at 532 nm were retrieved using retrieved optical values. The retrieved single-scattering albedo of non-dust particles was 0.92~0.95 below 1 km height and 0.82~0.91 above 1 km height on 24 February 2004 and 0.81±0.03 on 9 March 2004.

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

### 1. 서 론

중국의 급격한 산업화로 인하여 중국, 한국, 일본이

속하는 동북아시아 지역은 중요한 대기오염물질의 발생지역 중의 하나이다. 동북아시아의 공업지역 및 자동차로부터 혹은 동북아시아의 상당 부분을 차지 하고 있는 사막, 또한 시베리아 지역의 산불에서 각각 기원하는 유기물질, 황사입자 및 검댕 등과 같은 오염물질의 배출량은 전 세계 배출량의 3분의 1에서 4분의 1을 차지한다고 알려져 있다(Ginoux *et al.*,

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-715-2470, E-mail : nym@gist.ac.kr

2004; Chin *et al.*, 2002).

또한, 동북아시아의 사막지역으로부터 매년 1000에서 2150 Tg 가량의 황사가 발생 되어(Zender *et al.*, 2004), 태양광의 산란 및 흡수를 통하여 대기 복사수지에 직접적인 영향을 끼칠 뿐만 아니라 구름 생성에도 영향을 미쳐 기후변화에 직·간접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Tengen *et al.*, 2004; Rosenfeld *et al.*, 2001). 주로 중국의 타클라마칸 사막과 내몽골 지역의 고비 사막으로부터 기인한 것으로 알려진 황사는 편서기류를 타고 동북아시아 지역의 풍하 지역인 한반도와 일본열도 뿐만 아니라 알래스카를 포함한 북미대륙에까지 장거리 이동하는 것으로 알려져 있다(Jung and Kim, 2011; Lee *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2005). 장거리 이동시 황사는 중국의 도심 및 공업지역을 지나면서 인위적인 대기오염물질들과의 혼합 등으로 인하여 발생원에서와는 다른 광학적 특성을 보여준다(Yu *et al.*, 2006). Yu *et al.* (2006)에 의해 수행된 황사 발원지에서 황사의 광흡수 특성에 대한 연구는 Sun/sky radiometer 분석을 통하여 이루어졌으며, 유효반경 (Effective radius), 입자 굴절률 (Refractive index), 단산란 알베도 (Single-scattering albedo)와 같은 황사의 광학적 특성 값들을 규명하였다. 그 중 단산란 알베도의 경우 중국 발원지에서 측정된 값은 0.94의 값을 보였으나 공업지역 같은 오염물질이 많이 발생하는 곳을 통과한 후 한반도에서 관측된 값은 0.92로 상당한 차이를 보이는 바, 혼합상태의 황사의 광학적 특성은 순수황사 입자가 가지고 있는 광학적 특성 및 미세물리적 특성과는 차이가 있다고 하였다. Anderson *et al.* (2003)은 ACE-Asia 기간 동안 항공 관측으로부터 황사입자의 조대입자의 단산란 알베도는 550 nm에서  $0.96 \pm 0.01$ 으로 낮은 광흡수 특성을 보여주었으나 입경 크기가  $1 \mu\text{m}$  이하의 미세입자에서는  $0.88 \pm 0.03$ 으로 상대적으로 높은 광흡수 특성을 보여주었다. 이 또한 황사 발생시 황사층에 순수황사 입자 외에 많은 오염입자가 혼합되어 이동함을 보여준다.

황사는 장거리 이동시 이동 고도 및 경로에 따라 인위적 대기 오염입자와의 혼합 정도가 변화하고, 이에 따라 다양한 광학적 특성을 나타낼 수 있다. 따라서, 동북아시아 사막지역에서 발생하는 황사가 장거리 이동시 기후변화에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 황사와 오염입자의 혼합 특성 및 혼합

에 따른 황사층의 광학적 특성의 변화에 대한 연구가 필요하다.

라이다(LIDAR: Light Detection And Ranging)는 대기 에어로졸의 고도별 분포 및 광학적 특성의 실시간 관측이 가능한 장비이다. 특히 본 연구에 사용된 다파장 라만 라이다 시스템 (Multi-wavelength Raman Lidar System)은 라만 산란 신호 및 탄성 산란 신호를 사용함으로써 라이다 신호 분석 시, 라이다 비(Lidar ratio)의 가정 없이 정확한 에어로졸의 소산계수 (Extinction coefficient)와 후방산란계수 (Backscattering coefficient)를 산출할 수 있다. 라만 산란 신호를 통해 얻어진 두 파장에서의 소산계수와 세 파장에서의 후방산란계수는 Müller *et al.* (1999)이 제시한 역행렬 알고리즘의 입력자료로 사용되어 에어로졸 입자의 유효반경, 단산란 알베도 및 굴절률 등과 같은 미세물리적 특성 (Microphysical parameter) 등을 고도별로 분석할 수 있다(Noh *et al.*, 2007). 라이다 신호로부터 얻을 수 있는 편광소멸도 (Depolarization ratio)는 관측된 에어로졸 입자의 형태의 구분을 가능하게 하는 지표로서, 황사 발생 시 황사층에서 황사 및 비황사입자의 구분 할 수 있다(Shimizu *et al.*, 2004).

본 연구에서는 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 황사 발생 시 황사층에서 황사와 비황사를 구분하고 비황사의 단산란 알베도를 포함한 미세물리적 특성을 규명하고자 한다. 이를 통하여 장거리 이동에 따른 황사의 광학적 특성 변화 정도를 파악할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 연구 방법

본 연구에 사용된 다파장 라만 라이다는 광주과학기술원 (35.10° N, 126.53° E)에서 개발 및 운용 중으로 라만 라이다 시스템 및 소산계수, 후방산란계수 산출 알고리즘은 Noh *et al.* (2006)에 설명되어 있다. 또한 두 파장(355, 532 nm)의 에어로졸 소산계수와 세 파장(355, 532, 1064 nm)에서의 후방산란계수를 입력자료로 활용하여 에어로졸의 미세물리적 특성 (Effective radius, Refractive index, single-scattering albedo etc.)을 산출하는 역행렬 알고리즘은 Noh *et al.* (2007)에 이미 설명되진 바 있다. 본 절에서는 라이다 신호로부터 입자 편광소멸도를 구하는 방법과, 입자 편광소

멸도를 이용하여 외부적 혼합 상태의 에어로졸에서 황사와 비황사가 차지하는 비율을 계산하는 방법에 대하여 설명하려 한다.

## 2.1 라이다 편광소멸도

본 연구에 쓰여진 다파장 라이다 시스템으로부터 532 nm 파장에서의 입자 편광소멸도(Particle depolarization ratio,  $\delta_p$ )를 산출할 수 있다. 입자 편광소멸도를 구하기 위해, 우선적으로 체적 편광소멸도(Volume depolarization ratio,  $\delta$ )를 계산하여야 한다. 체적 편광소멸도는 본 라이다 시스템의 532 nm 파장에서 방출되고 후방산란되어 들어오는 선형 편광된 신호들의 비를 통하여 구할 수 있고, 본 연구에서는 다음의 식(1)과 같이 정의된다.

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

식(1)에서  $P_{\parallel}$ 와  $P_{\perp}$ 는 각각 레이저 빔에서 방사되고 대기 에어로졸에 의해 후방산란되어 돌아오는 빛의 수평성분과 수직성분을 나타낸다. 수직방향으로 편광된 레이저 빔은( $P_{\parallel}$ ) 대기에서 비구형 입자를 만나면 원래의 편광상태가 바뀌게 되는데( $P_{\perp}$ ), 이 두 신호의 비를 편광소멸도라고 한다. 체적 편광소멸도는 대기 중 에어로졸 입자의 농도가 감소하면, 그 값 역시 감소하는 경향이 있다(Cairo *et al.*, 1999). 따라서 본 연구에서는 좀 더 정확한 황사입자와 비황사 입자의 분류를 위해 입자 편광소멸도를 산출하였다. 입자 편광소멸도는 라만 라이다 신호 중 탄성산란 신호와 라만산란 신호의 비로부터 산출되는 후방산란비(Backscattering ratio,  $R$ )와  $\delta$ 를 이용하여 산출될 수 있고, 이는 다음의 식(2)과 같이 표현될 수 있다.

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

식(2)에서  $\delta_m$ 는 공기분자의 편광소멸도로서 본 연구에는 Sakai *et al.* (2003)의 연구에서 사용한 0.0049의 값을 사용하였다  $R(z)$ 는 고도  $z$ 에 따른 후방산란비로서  $(\beta_a + \beta_m)/\beta_m$ 의 식으로 표현되며,  $\beta_a$ 와  $\beta_m$ 는 각각 에어로졸에 의한 후방산란 계수와 공기분자에 의한 후방산란계수를 나타낸다.

## 2.2 황사층에서 황사입자와 비황사입자의 비율의 산출

황사 발생 시 황사층에서 황사입자의 비율을 나타내는 황사비(dust ratio,  $R_D$ )를 Shimizu *et al.* (2004)가 제안한 방식을 이용하여 산출하였다. 황사비는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

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

위 식에서  $\delta_1$ 와  $\delta_2$ 는 각각 순수 황사입자의 편광소멸도와 구형 에어로졸 입자의 편광소멸도를 나타내고, 각각의 값은 장기간 라이다 관측을 통해 실험적으로 결정되어 진다. 본 라이다 시스템을 이용한 선형 장기관측(Noh *et al.*, 2008, 2007)에서  $\delta_p$ 의 최고값과 최소값은 각각 0.34와 0.03으로 상기의 산출식에 적용하였다. 이는 일본과 중국(Sugimoto *et al.*, 2005; Shimizu *et al.*, 2004; Sugimoto *et al.*, 2003)에서 수행된 라이다 관측으로부터 얻어진 값들과 유사하다.  $\delta_p$ 의 값이  $\delta_1$ 의 값과 크거나,  $\delta_2$ 의 값과 작을 때, 각각  $R_D$ 의 값은 각각 1과 0이 될 것이다. 따라서, 혼합상태의 에어로졸에서 편광소멸도를 통해 구분된 황사입자의 비율을 수치적으로 알 수 있다. 이를 혼합상태의 에어로졸로부터 산출된 후방산란계수에 적용하면, 황사입자의 후방산란계수와 비황사입자의 후방산란계수는 각각( $R_D \times \beta_a$ )와  $((1 - R_D) \times \beta_a)$ 로 계산해낼 수 있으며, 마찬가지로, 혼합상태의 에어로졸로부터 산출된 소산계수에도 적용하여, 황사의 소산계수와 비황사입자의 소산계수의 산출을 가능하게 한다.

## 3. 결 과

본 연구에서는 연속관측 중 황사가 관측된 2004년 2월 24일과 3월 9일의 라이다 관측 신호를 분석하였다. 분석에 사용되는 라만 산란 신호는 산란 강도가 탄성 산란광에 비하여  $10^3$ 배 정도 약하여 주간 관측시 태양광으로부터 발생하는 신호 잡음으로 인하여 관측에 어려움이 있어 야간에만 관측이 수행되었다. 그림 1은 2004년 2월 24일과 2004년 3월 9일, 각각 0시부터 5시, 20시부터 익일 5시까지 관측된 대기 에어로졸의 후방산란 신호를 보여준다. 관측시 레이저 빔과 수신 망원경의 시야각의 차이로 발생하는

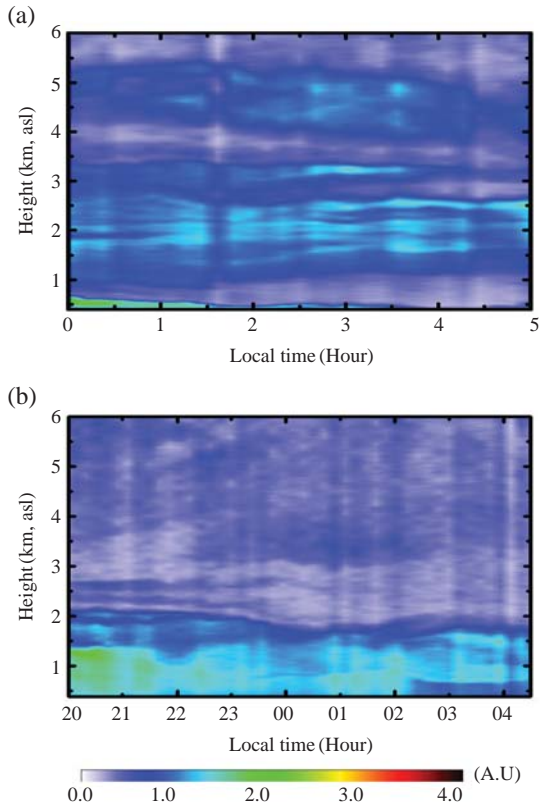


Fig. 1. Contour plot of backscattered signal of dust plume observed on 24 February 2004 (a) and 9 March 2004 (b).

중첩고도의 영향으로 최저 관측 고도는 0.3 km였다. 양일 모두 대기 중에 구름은 관측되지 않았으며, 2월 24일에는 1.5 km에서 2 km와 2.5 km에서 5 km 사이 (그림 1a), 3월 9일에는 1.5 km의 고도(그림 1b)에서 에어로졸 층이 연속관측 되었음을 확인할 수 있다. 하지만 이는 에어로졸의 고도별 분포에 따른 일부의 정보만 제공할 뿐 다른 의미를 가지진 않는다. 따라서, 라이다 관측 신호에 따른 좀 더 정확한 분석이 필요하다.

그림 2는 2004년 2월 24일과 3월 9일에 관측된 에어로졸의 후방산란계수와  $\delta$  및  $\delta_p$ 를 보여준다. 2004년 2월 24일에 1.5~2 km 사이에 비교적 높은 후방산란계수를 확인할 수 있으며, 두 층에서 관측된  $\delta_p$ 는 0.25 이상으로 황사가 관측되었음을 보여준다 (Shimizu *et al.*, 2004; Sakai *et al.*, 2003). 마찬가지로 2004년 3월 9일에도 1.5 km에서 보이는 높은 후방산란계수와 0.25~0.32의  $\delta_p$ 는 관측된 에어로졸 층에 황사입자가 포함되어 있음을 나타낸다.

본 연구에서는 산출된  $\delta_p$ 를 바탕으로 식 (3)을 이용하여  $R_D$ 를 산출하였다. 그림 3은 2월 24일과 3월 9일에 관측된 에어로졸 층에서 고도별  $R_D$  (그림 3b와 3d)와 이를 적용하여 산출된 황사와 비황사의 후방산란계수 (그림 3a와 3c)를 보여준다. 에어로졸의 고도별 분포를 고려할 때 2004년 2월 24일과 3월 9일에 각각 1 km와 2 km의 고도가 대기경계층인 것으로

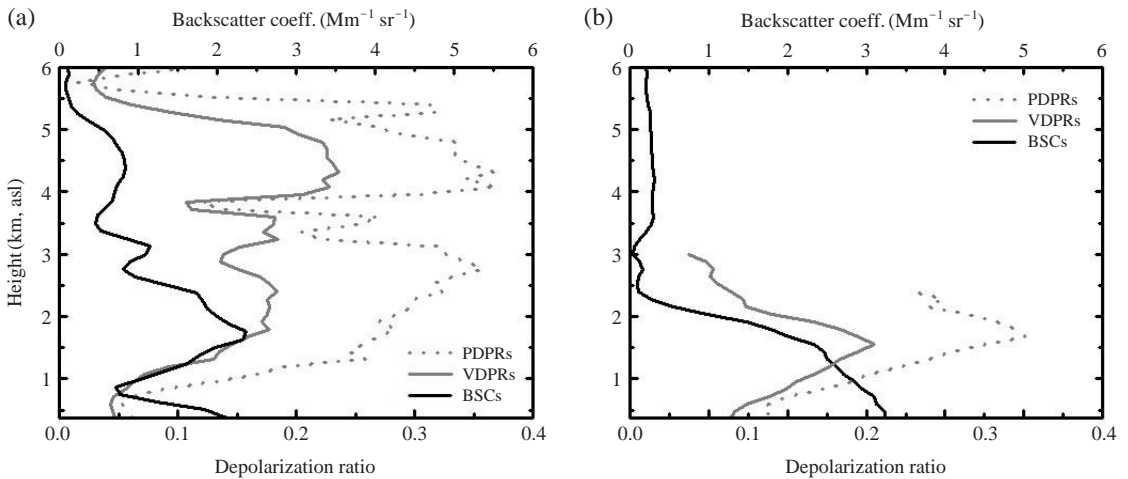
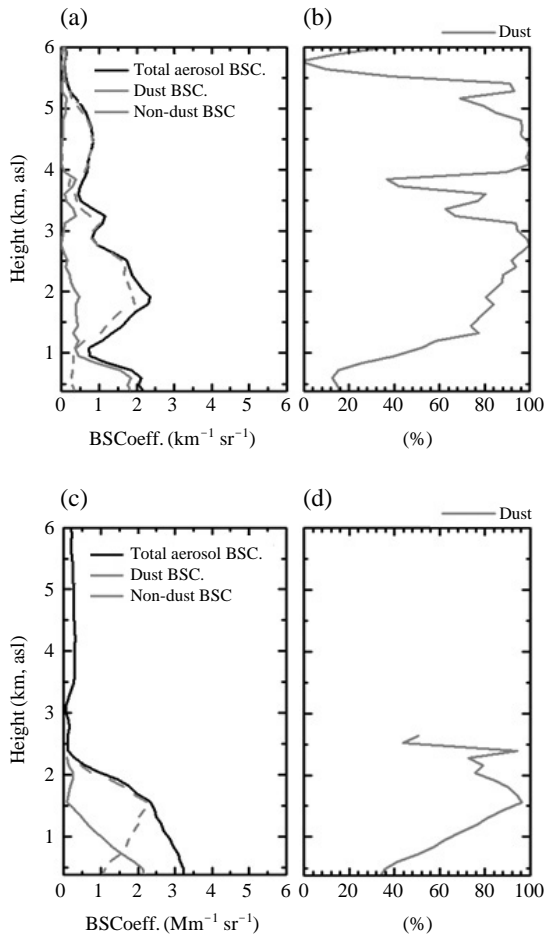


Fig. 2. The vertical profiles of backscattering coefficients (black colored solid line), volume depolarization ratios (gray colored solid line) and particle depolarization ratios (light gray colored dotted line) at 532 nm on (a) 24 February 2004 and (b) 9 March 2004.



**Fig. 3. The vertical profiles of backscattering coefficients. The backscattering coefficient of total aerosol (black colored solid line), dust (gray colored dotted line) and non-dust particle (gray colored solid line) at 532 nm (a, c) and the proportion of dust (gray color) to the total aerosols (b, d) on 24 February 2004 and 9 March 2004.**

판단된다. 2004년 2월 24일에는  $R_D$ 가 대기경계층을 경계로 1 km 미만의 고도에서는 20% 이하로 낮은 비율을 보이지만 1 km 이상의 고도부터는 80% 이상의 높은 값을 보인다. 이는 관측 당일 황사가 대기경계층 이상의 고도에서 이동하였음을 알려준다. 이와는 달리 2004년 3월 9일의 경우에는 관측된 대기 에어로졸의 대부분은 2 km 이내의 고도에 분포하고 있으며, 그 중 황사는 1.5 km 이내에서 높은 비율로 분포하고 있음을 보여준다.

그림 4는 그림 3(b, d)에서 보여준 황사비를 적용하여 산출한 2월 24일과 3월 9일의 비황사의 355, 532 nm에서의 소산계수와 355, 532 그리고 1064 nm에서의 후방산란계수를 보여준다. 본 연구에서는 이 값들을 역행렬 알고리즘의 입력자료로 사용하여 비황사입자의 미세물리적 특성을 산출하였다.

그림 5는 2004년 2월 24일과 3월 9일 각각 계산된 비황사입자들의 미세물리적 특성값을 보여주며, 결과는 표 1에 정리되어 있다. 그림 5와 표 1에 표시한 결과값과 오차는 입력자료로 사용된 각 파장에서 소산계수와 후방산란계수가 가질 수 있는 오차 범위에서 임의의 값을 적용하여 10회에 걸쳐 수행된 역행렬 알고리즘 분석값의 평균값과 표준편차를 나타낸다.

그림 5(a)에서의 비황사입자의 유효반경의 고도별 분포는 1 km 이하에서는 0.15~0.16  $\mu\text{m}$ 의 값을 보였으나, 1 km 이상의 고도에서는 0.25~0.29  $\mu\text{m}$ 의 값으로 1 km 이하의 낮은 고도보다 다소 높은 값을 나타내었다. 복소굴절률의 실수부분(Real part)은 1 km 이하의 고도에서 1.36~1.4이었으나, 1 km 이상의 고도에서는 1.32~1.33의 다소 낮은 값이었다. 복소굴절률의 허수 부분(Imaginary part)은 0.0064~0.027의 값을 보이며, 고도가 올라감에 따라 그 값도 점점 증가하였다. 단산란 알베도( $\omega$ )의 경우 1 km 이하의 고도에서는 0.92~0.95이었다. 고도가 높아짐에 따라 그 값이 0.82~0.91이었다. 이와 같은 고도에 따른 광학적 특성의 차이는 고도에 따라 기원이 다른 에어로졸이 관측된 것으로 판단된다. 그림 3(a)에서 확인한 것과 같이 1 km 이상의 상층에서 황사비가 80% 이상으로 황사입자는 주로 대기경계층 이상의 고도에서 관측지점으로 이동하여 왔다. 1 km 이상에서 관측된 비황사입자들도 관측 고도를 고려할 때, 국내에서 발생되고 유입된 현지 기원의 오염물질이 아닌, 황사가 장거리 이동할 때 중국대륙 통과 시 혼합되어진 오염입자들로 판단되어 진다. 상층에서 관측된 입자의  $\omega$ 가 0.82~0.91로 낮은 값을 보이는 것은 Noh *et al.* (2011)이 발표한 중국으로부터 기원한 오염입자가 보여준 높은 광흡수 특성값과 유사하다. Eck *et al.* (2005), Qiu *et al.* (2004) 그리고 Anderae *et al.* (2005)도 중국 공업지역으로부터 기원한 에어로졸의  $\omega$ 를 각각 0.89, 0.84, 그리고 0.86으로 본 연구와 비슷한 결과를 보고하였다. 이와 달리 1 km 이하

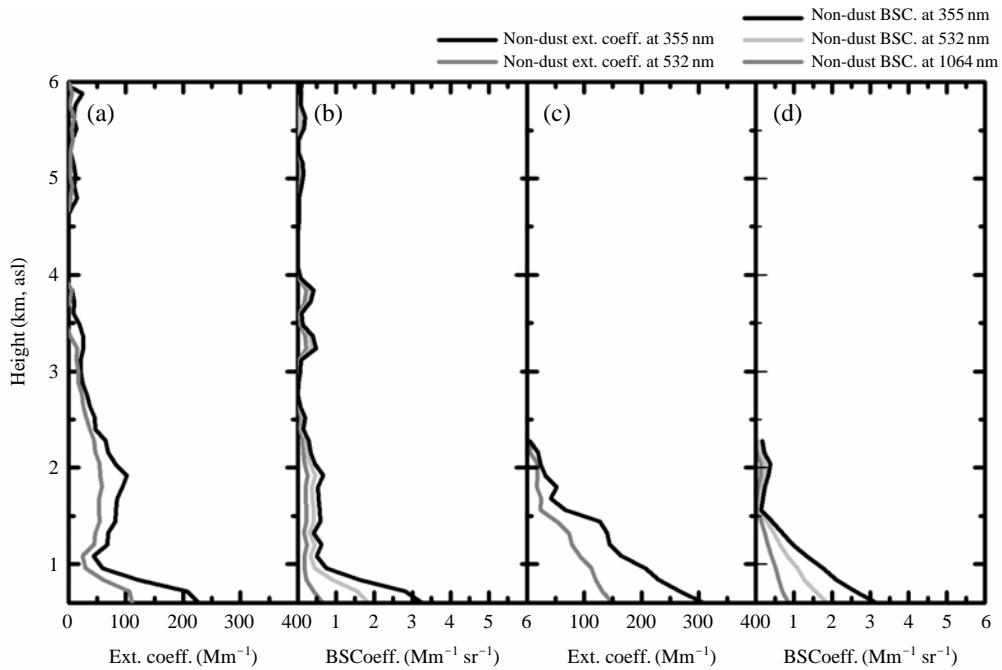


Fig. 4. Application of the proportion of non-dust particle to the total aerosol extinction coefficient and backscattering coefficient at 355 nm, 532 nm and 1064 nm. (a) the extinction coefficient of non-dust particle at 355 nm and 532 nm (b) the backscattering coefficient of non-dust particle at 355 nm, 532 nm and 1064 nm on 24 February 2004. (c) and (d) same as (a and b) except date (on 9 March 2004).

Table 1. Microphysical parameters of non-dust particles calculated from mixed aerosol with inversion algorithm.

Date	Height (km)	$Y_{eff}$ ( $\mu\text{m}$ )	$m_{real}$	$m_{image}$	SSA
24-February-04	0.3~0.48	$0.15 \pm 0.01$	$1.40 \pm 0.02$	$0.0064 \pm 0.0017$	$0.95 \pm 0.01$
	0.54~0.84	$0.16 \pm 0.04$	$1.36 \pm 0.01$	$0.0103 \pm 0.0043$	$0.92 \pm 0.02$
	0.96~1.2	$0.29 \pm 0.02$	$1.33 \pm 0.01$	$0.0123 \pm 0.0014$	$0.91 \pm 0.01$
	1.32~1.68	$0.25 \pm 0.04$	$1.32 \pm 0.01$	$0.0174 \pm 0.0047$	$0.87 \pm 0.04$
	1.8~2.1	$0.28 \pm 0.05$	$1.32 \pm 0.01$	$0.0271 \pm 0.0052$	$0.82 \pm 0.03$
09-March-04	0.48~0.72	$0.15 \pm 0.02$	$1.36 \pm 0.01$	$0.0143 \pm 0.0029$	$0.89 \pm 0.03$
	0.84~1.08	$0.18 \pm 0.02$	$1.34 \pm 0.01$	$0.0191 \pm 0.0033$	$0.86 \pm 0.03$
	1.2~1.92	$0.19 \pm 0.02$	$1.32 \pm 0.01$	$0.0256 \pm 0.0037$	$0.81 \pm 0.03$
	2.04~2.28	$0.18 \pm 0.02$	$1.34 \pm 0.01$	$0.0199 \pm 0.0039$	$0.85 \pm 0.03$

의 고도에서는  $\omega$ 가 높은 값을 보이는 것은 상층과는 달리 장거리 이동된 에어로졸의 영향보다는 지역적으로 발생된 에어로졸이 측정된 것으로 판단한다.

그림 5의 (b)에서는 대부분의 비황사입자가 황사입자와 더불어 2 km 이내의 고도에서만 주로 관측되었다. 관측 값들 또한 1.5 km 고도 근처에서  $\omega$  복소 굴절률의 실수 및 허수부분이 각각  $0.81 \pm 0.03$ ,  $1.32$

$\pm 0.01$ ,  $0.026 \pm 0.004$ 으로 다른 고도의 분석 결과와 차이를 보였을 뿐, 2월 24일의 경우와 같이 고도에 따른 차이는 보이지 않았다.  $\omega$ 가 0.81~0.89로 낮은 값을 보이는 것으로 판단할 때 2월 24일의 상층의 경우와 같이 황사가 장거리 이동시 중국의 오염지역을 통과하며 높은 광흡수 특성을 지닌 오염입자들이 혼합되어 이동되어져 관측된 것으로 판단된다.

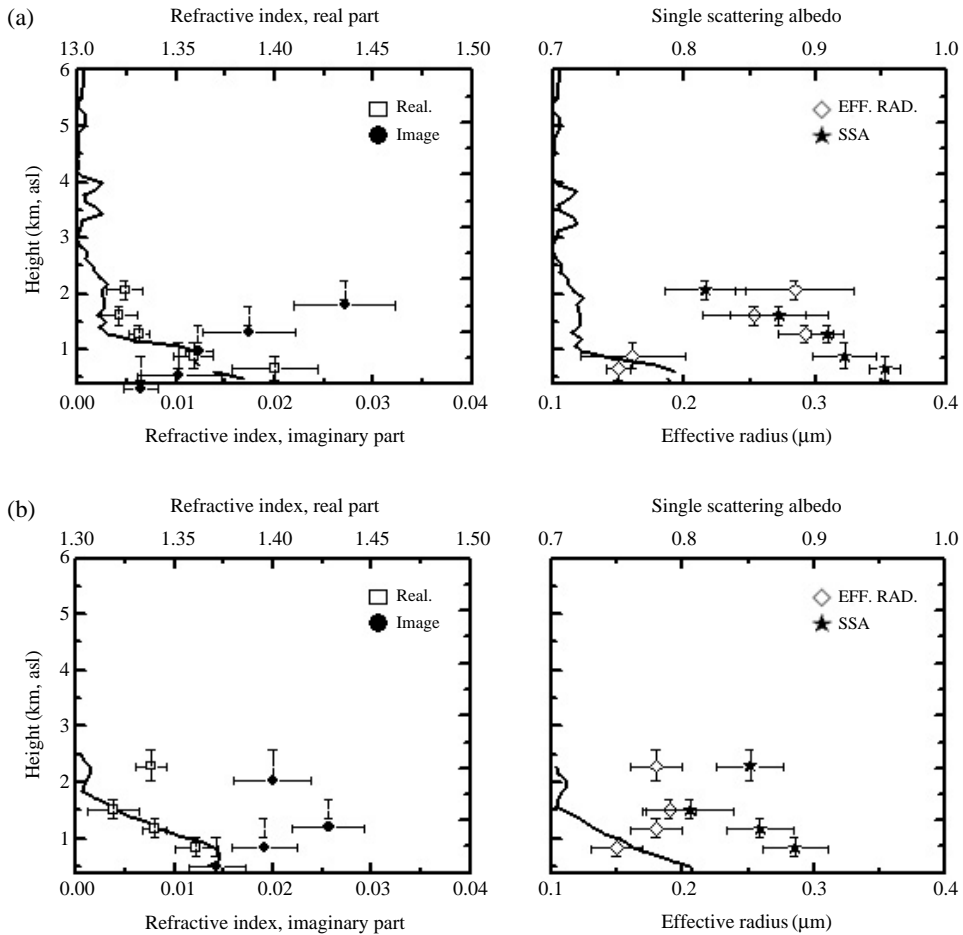


Fig. 5. Microphysical parameters. Refractive index real part (open square), Refractive index imaginary part (closed circle), Particle effective radius (open diamond) and Single scattering albedo (closed star) on (a) 24 February 2004 (b) 9 March 2004.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 2004년 2월 24일과 3월 9일에 광주에서 대기 에어로졸의 관측을 실시하였다. 관측된 라이다 신호의 분석을 통해 편광소멸도를 산출하였고, 0.25~0.32의 높은 편광소멸도 값을 나타내는 황사층을 구분할 수 있었다. 입자 편광소멸도를 이용한 혼합상태의 에어로졸에서 황사입자와 비황사입자의 비율을 알 수 있는 관계식을 이용하여, 혼합상태 에어로졸에서 비황사입자가 차지하는 비율의

우선적인 구분이 이루어졌다. 이는 전체 에어로졸의 후방산란계수와 소산계수에서 비황사입자만의 후방산란계수와 소산계수를 계산해 내는데 이용되었다. 이렇게 구분된 비황사입자의 후방산란계수와 소산계수는 역행렬 알고리즘의 입력자료로 사용되어, 혼합상태로 존재하는 에어로졸 중 비황사입자만의 미세물리적 특성을 알아낼 수 있었다.

산출된 비황사입자의 미세물리적 특성들은 황사가 이동 중에 오염입자와의 혼합 정도를 파악할 수 있게 하고 혼합 정도에 따른 황사층의 광학적 특성 변화 정도를 파악할 수 있다. 지금까지 이뤄진 황사의 특성에 대한 연구에서는 혼합상태의 황사층에서의



황사입자와 비황사입자의 분류가 이뤄지지 않았다. 하지만 본 연구에서 사용된 라이다 신호 분석을 통해, 황사층에 섞여 있는 비황사 물질을 분석하고, 비황사 물질들의 고도 별 광학적 특성은 향후 발원지로부터 장거리 이동 중에 순수황사와 혼합되어진 비황사 오염물질이 어떤 광학적 특성을 지녔는지에 대한 정보와 오염물질이 섞임에 따라 순수 황사입자의 광학적 특성과 변화에 어떻게 기여하는 분석을 가능하게 한다. 따라서 황사의 발원지와 장거리 이동 경로에 따른 혼합 상태의 황사의 특성 변화 연구에 좋은 판단 자료로 활용될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2012-7080)의 지원으로 수행되었습니다. 참여연구원 신성균은 한국연구재단의 글로벌 박사 펠로우쉽 프로그램의 지원을 받아 본 연구를 수행하였습니다.

### 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 measurement during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8647.

Andreae, M.O., O. Schmid, H. Yang, D. Chand, J. Yu, Y. Zhang, and L. Zeng (2005) Aerosol optical and chemical properties in urban Guangzhou, China, *Eos Trans. AGU*, 86(18).

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

Chin, M., P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B.N. Holben, B.N. Duncan, R.V. Martin, J.A. Logan, A. Higurashi, and T. Nakajima (2002) Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and Sun photometer measurements, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3), 461-483.

Eck, T.F., B.N. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, P. Goloub, H.B. Chen, B. Chatenet, L. Gomes, X.Y. Zhang,

S.C. Tsay, Q. Ji, D. Giles, and I. Slutsker (2005) Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central Asia and aerosol transport to the tropical mid Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 114, D11201.

Ginoux, P., J.M. Prospero, O. Torres, and M. Chin (2004) Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation, *Environmental Modeling & Software*, 19(2), 113-128.

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., 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., Y.J. Kim, and D. Müller (2007) Retrieval of aerosol microphysical parameter by inversion algorithm using multi-wavelength Raman lidar, *Korea Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 97-109.(in Korean with English abstract)

Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller (2008) Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar



- at Gwangju, Korea in spring and autumn, *Atmospheric Environment*, 42(9), 2208-2224.
- 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., Y.M. Kim, Y.J. Kim, and B.C. Choi (2006) Determination of the lidar ratio using the GIST/ADEMRC multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea *Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 1-14. (in Korean with English abstract)
- Qiu, L., L. Yang, and X. Zhang (2004) Characteristics of the imaginary part and single-scattering albedo of urban aerosols in northern China. *Tellus*, 56B, 276-284.
- Rosenfeld, D., Y. Rudich, and R. Lahav (2001) Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 5975-5980.
- Sakai, T., T. Nagai, M. Nakazato, Y. Mano, and T. Matsumura (2003) Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba, *Applied Optics* 42(36), 7103-7116.
- 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, *Journal of Geophysical Research*, 109, D19S17.
- Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arao, 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.
- 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.
- 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.