

## 2D1) 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 대기 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성 연구

### Study on the Optical and Microphysical Properties of Atmospheric Aerosol using Multi-wavelength Raman Lidar System

노영민 · Detlef Müller · 김영준<sup>1)</sup>

Institute for Tropospheric Research, <sup>1)</sup>광주과학기술원 환경모니터링 신기술  
연구센터

#### 1. 서 론

대기에 존재하는 여러 성분들에서 대기 에어로졸이 차지하는 비율은 비록 적은 부분일지라도 그들은 지구 복사 수지, 대기질, 구름 생성과 강우 변화뿐만 아니라 대류권 및 성층권에서의 화학변화에 상당한 영향을 미친다. 대기 에어로졸에 의해 입사되는 태양광의 산란과 흡수는 기후변화에 직접적인 영향을 미치고 구름의 생성과 지속시간에 영향을 주는 작용은 간접적으로 기후변화에 영향을 준다(Haywood and Ramaswamy, 1998; Hansen et al., 1997). 이러한 에어로졸은 한곳에 머무르지 않고 기류를 타고 이동하며 대기중에서 다양한 변화를 일으킨다. 특히 근래 중국의 산업화와 더불어 많은 에어로졸이 발생하고 있으며 발생한 에어로졸은 많은 양이 편서풍을 타고 한국을 통과하여 이동한다. 이동하는 에어로졸은 다양한 고도분포를 보이며 고도별로 다른 광학적 특성을 보이기도 한다. 또한 봄철에 시베리아 지역에서 매년 산불에 의해 발생한 에어로졸도 한국으로 이동되기도 한다. 대기 에어로졸의 고도분포와 광학적 특성의 실시간 관측이 가능한 라이다(LIDAR: Light Detection And Range) 장비는 에어로졸의 이동특성 관측에 유용한 장비이다. 특히, 라이다의 한 종류인 라만 라이다는 데이터 해석 시 공기분자의 라만 산란광을 이용하여 라이다 비의 가정없이 데이터 해석을 수행하여 고도별 에어로졸의 광학적 특성값을 정확하게 산출할 수 있다(Ansmann et al., 1992). 또한, 라만 라이다로 산출된 광학적 특성값은 effective radius, single scattering albedo, refractive index 등과 같은 미세물리적 특성값 산출을 위한 역행렬 알고리즘의 입력 자료로 활용할 수 있다. 본 연구는 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템과 역행렬 알고리즘을 활용하여 한반도에서 관측되는 다양한 종류의 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성을 연구하였다.

#### 2. 연구 방법

광주과학기술원의 다파장 라이다 시스템은 2001년에 구축되어 소산계수(Extinction coefficient) 등의 광학적 특성을 관측하여 왔으며, 2004년부터 두 파장에서의 에어로졸 소산계수(Extinction coefficient)와 세 파장에서의 후방산란계수(Backscattering coefficient)를 동시에 관측할 수 있는 다파장 라만 라이다 시스템을 구축하였다(Noh et al., 2007, 2008). 이후 연속 관측을 바탕으로 시스템의 안정성을 확보하였으며, 독일 Leipzig의 Institute of Tropospheric Research(IfT)와의 공동으로 데이터 분석 알고리즘 연구를 통하여 미세물리적 요소 분석을 위한 알고리즘을 확보하였다(Müller et al., 1999). 본 연구에서는 2004년부터 2006년까지 광주과학기술원과 안면도 지구대기감시센터에서 실시된 다파장 라만 라이다 관측 자료를 활용하여 355, 532nm의 두 파장에서의 소산계수(Extinction coeff.), 355, 532, 1,064nm의 세 파장에서의 후방산란계수 (Backscattering coeff.), 그리고 355, 532nm의 라이다 비(Lidar ratio)를 산출하여 대기 에어로졸의 고도별 광학적 특성 및 분포를 파악하였다. 특히 라이다 비는 대기 에어로졸의 종류별 특성을 구분할 수 있는 함수로서 Hysplit 4 역계적 분석과 더불어 동북아시아 지역에서 발생하여 한반도로 이동하여 국내 대기에 영향을 주는 황사를 포함한 다양한 종류의 대기 에어로졸의 특성을 구분하는데 활용하였다. 종류별로 구분된 대기 에어로졸은 소산계수와 후방산란계수를 입력자료로 활용한 역

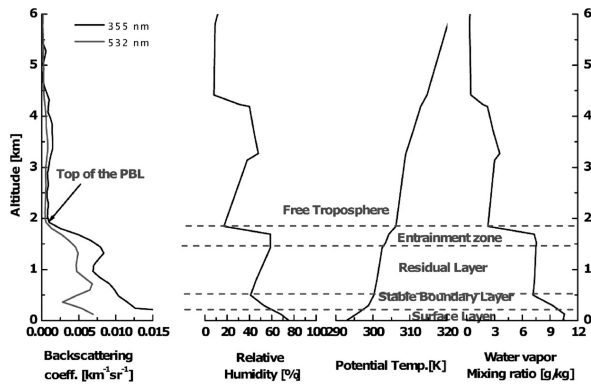


Fig. 1. Vertical profile of aerosol backscattering coefficient at 355 and 532 nm, relative humidity, potential temperature, and water vapor mixing ratio measured on 14 June 2004 at Gwangju, Korea.

직분포를 분석한 그림이다. 지상에서 200m 고도까지의 접지경계층(Surface layer), 200~500m의 안정경계층(Stable boundary layer), 그리고 500~1,600m 사이의 잔여층(Residual layer)가 관측되어 일몰 후 발생하는 대기경계층의 명확한 형태를 보여주며(Stull, 1986) 대기경계층은 2km 고도에 위치해있다. 라이다와 존재관측 결과의 비교는 관측이 실시된 기간에 대하여 모두 수행되었으며 이를 통한 대기경계층의 고도 분포는 1~2km 사이에서 관측되었다. 대기 경계층을 파악한 후 각 고도별 에어로졸층을 구분하여 층별로 역계적 분석을 실시하여 라이다 비(lidar ratio), 파장역지수(Angstrom Exponent), 편광소멸도(Depolarization ratio) 등의 광학적 특성과 더불어 대기 에어로졸의 종류를 구분짓는데 활용하였다.

표 1은 에어로졸 종류에 따른 광학적 특성 값을 보여준다. 황사 입자는 편광소멸도 값이 다른 에어로졸에 비하여 확연히 구분되는 높은 값을 보였으며, 두 파장에서의 라이다 비는 전체적으로 46 ~ 65sr의 분포를 보이고 종류에 따라서는 두 파장에서 값의 차이를 보였다. 비구형입자로 구성된 황사의 경우 편광소멸도 값이 0.20으로 다른 에어로졸과 확연히 구분되는 높은 값을 보였으며, 큰 입자로 구성되어 있어 파장 역지수 값도 0.98의 낮은 값을 보였다.

Table 1. Optical properties according to aerosol types.

Aerosol type	$S^a$ , sr		$\hat{a}^b$ 355 - 532 nm	$\delta^c$	RH(%)
	355 nm	532 nm			
Dust	56 ± 10	51 ± 6	0.98 ± 0.27	0.20 ± 0.04	36.5 ± 17.3
Haze	58 ± 9	60 ± 10	1.41 ± 0.67	0.09 ± 0.04	41.7 ± 19.6
Smoke	46 ± 7	65 ± 8	0.93 ± 0.26	0.08 ± 0.01	46.6 ± 18.9
Non-categorized	54 ± 6	49 ± 5	1.23 ± 0.57	-	27.2 ± 25.9

a: Lidar ratio, b: Angstrom Exponent, c: Depolarization ratio

### 3.2 미세물리적 데이터 산출

대기 에어로졸 종류별로 구분되어진 광학적 특성값 중 소산계수와 후방산란계수를 입력자료로 하여 역행렬 알고리즘 분석을 실시하여 에어로졸 종류별 미세물리적 특성값의 차이를 연구하였다. 그림 2는 2004년 6월 14일에 관측된 광학적 결과를 이용하여 분석한 미세물리적 특성값을 고도별로 구분하여 보여주고 있다.

행렬 분석을 통하여 effective radius, single scattering albedo 등의 미세물리적 특성값을 산출하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 광학데이터 산출

광주와 안면도에서 실시된 라만 라이다 관측은 일몰 후부터 일출 전까지의 밤시간에 실시되었으며, 관측 중에 대기 중에 구름은 관측되지 않았다. 광학데이터들의 분석방법은 노영민 등(2006)에서 설명된 방법으로 분석하였다. 그림 1은 라만 라이다로 관측된 에어로졸 소산계수의 고도분포와 라이다 관측 지점에서 5km 떨어진 곳에서 측정된 존재자료의 고도별 상대습도, 온도, 그리고 수증기 혼합비를 이용하여 대기의 연

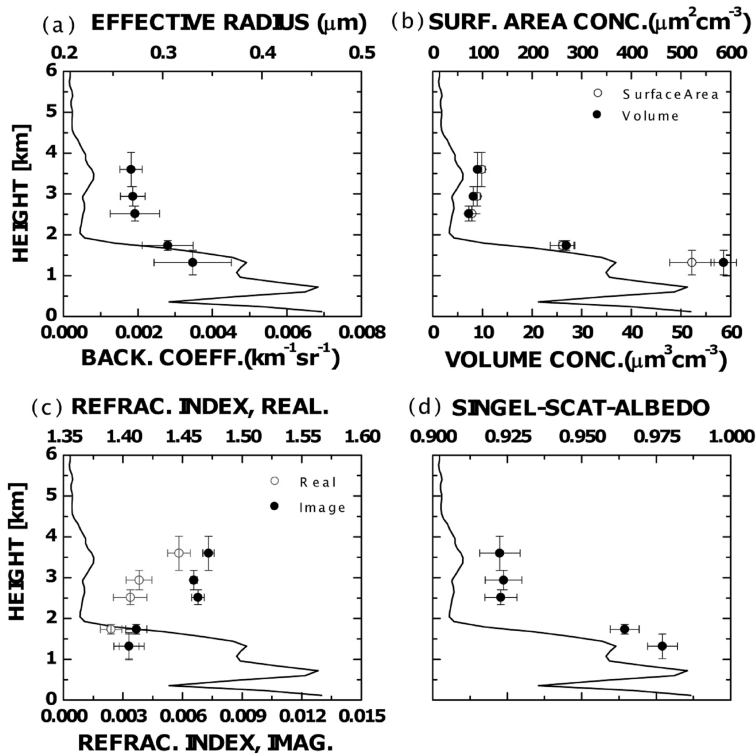


Fig. 2. Microphysical parameters observed on 14 June 2004. (a) Particle effective radius. (b) Surface area concentration(open circle) and Volume concentration(close circle). (c) Refractive index real part(open circle) and Refractive index imaginary part(close circle). (d) Single-scattering albedo at 532nm. Vertical bars denote the height ranges across which the optical data were averaged for the data inversion. These bars thus also denote the height range for which the derived parameters hold. Horizontal bars denote statistical uncertainty.

그림에서 보여지는 실선은 532nm의 후방산란계수로서 이를 통하여 관측된 대기 에어로졸의 고도별 분포를 파악할 수 있다. 그림 2(a)에서 보여주는 유효경(Effective radius)의 고도별 분포는 대기경계층 내부에는 0.3 $\mu\text{m}$ 보다 큰 입자들이 존재하나 상층에는 세 층의 평균값이 0.27 $\mu\text{m}$ 을 보여 대기경계층을 경계로 에어로졸의 입경분포가 다름을 보여주고, 이는 대기 경계층을 경계로 상층과 하층에 다른 특성을 가진 대기 에어로졸이 동 시간대에 관측되었음을 보여준다. 그림 2(c)의 복소굴절률(complex refractive index) 실수부분(real part) 값은 대기경계층 내부는 1.39~1.405이고 상층에서는 구간에서 값이 1.406~1.447로 값이 증가하였다. 복소굴절률 실수부분은 상대습도가 높고 오염물질을 많이 포함할수록 낮은 값을 나타낸다(Müller et al., 2005). 대기경계층 내부의 복소굴절률 실수부분이 낮은 값을 보인 것은 상대습도 변화와 더불어 대기경계층 내부에 존재하는 오염물질의 영향을 많이 받은 것으로 사료되며 복소굴절률 허수부분(imaginary part)과 532nm에서의 단산란알베도(single scattering albedo) 값의 분포를 살펴보면 대기 경계층을 경계로 서로 다른 광학적 특성을 지님을 명확히 알 수 있다. 단산란 알베도 값을 보면 대부분의 에어로졸이 존재하는 대기경계층 이하 구간은 0.98과 0.96의 값을 보여 약한 광흡수 특성을 지니는 연무 입자가 관측된 것으로 판단되나(Müller et al., 2004) 대기경계층 상층부는 0.92~0.93으로 상대적으로 높은 광흡수 특성을 보이는 biomass burning 에어로졸의 특성을 보여 두 관측 사이에 다른 광학적 특성을 지니는 에어로졸이 관측되었음을 알 수 있다. 그림 2에서 보여준 바와 같이 역행렬 분석을 통하여 대기 에어로졸의 미세물리적 특성을 구분할 수 있었으며, 특히 기후변화와 관련된 중요한 정보인 대기 에어로졸의 광흡수 특성을 알 수 있는 단산란 알베도를 산출할 수 있었다.

표 2는 표 1에서 구분된 대기 에어로졸의 종류에 따른 광학적 특성 값을 입력하여 구하여진 미세물리적 특성값을 보여주고 있다. 대기 에어로졸 종류에 따른 미세물리적 특성값의 차이는 광흡수 특성인 imaginary part of refractive index와 단산란 알베도에서 확연하게 차이가 났다. 국내에서 발생된 것으로 판단되는 대기 에어로졸의 광흡수 특성이 가장 낮게 나타났으며, 중국지역으로부터 기원한 오염입자들의 광흡수 특성이 높게 나타났다. 이는 산업형태와 사용하는 화석연료의 지역별 차이로부터 기원된 것으로 중국지역이 black carbon을 많이 발생시키는 연료를 사용하여 높은 광흡수 성질을 가진 대기 에어로졸을 발생시키는 것으로 판단되며, 국내 대기질은 중국으로부터 장거리 이동된 에어로졸의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다.

Table 2. Microphysical properties according to aerosol types.

Type	$r_{\text{eff}}$ , $\mu\text{m}$ .	m real	m image	SSA
Local Haze	$0.33 \pm 0.04$	$1.41 \pm 0.01$	$0.003 \pm 0.001$	$0.98 \pm 0.01$
Biomass burning_Siberia	$0.27 \pm 0.01$	$1.41 \pm 0.01$	$0.007 \pm 0.001$	$0.94 \pm 0.02$
Pollution_north China	$0.30 \pm 0.03$	$1.39 \pm 0.01$	$0.012 \pm 0.001$	$0.87 \pm 0.02$
Pollution_south China	$0.28 \pm 0.03$	$1.39 \pm 0.02$	$0.014 \pm 0.002$	$0.85 \pm 0.03$

The variable  $r_{\text{eff}}$  denotes the effective radius, S denotes the surface-area concentration,  $v$  denotes volume concentration, m real denotes complex refractive index real part, m image denotes complex refractive index imaginary part, and SSA denotes single scattering albedo values.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구의 분석 결과로부터 한국에서 관측되는 다양한 대기 에어로졸은 중국 및 기타 지역에서 발생되어 장거리 이동된 것으로 에어로졸의 발생지역에 따라 다른 광학적 및 미세물리적 특성을 보이는 것을 알 수 있었다. 장기적 관점에서 대기 에어로졸에 의한 국내 대기질의 변화를 파악하고 예측하기 위해서는 장거리 이동 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성 관측이 지속적으로 필요할 것으로 사료되며, 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다로부터 생산된 대기 에어로졸의 미세물리적 특성값은 동북아시아 지역에서 발생하여 한국지역을 통과하여 이동하는 다양한 종류의 에어로졸의 특성을 파악하여 대기 에어로졸에 의한 지역 대기질 연구와 기후변화 연구에 중요한 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2007-4108)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 노영민, 김영민, 김영준, 최병철 (2006) GIST/ADEMRC 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이다 비 연구, 한국대기환경학회지, 22(1), 1-14.
- Ansmann, A., U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp, and W. Michaelis (1992) Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar, Appl. Opt., 31, 7113-7131.
- Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy (1997) Radiative forcing and climate response, J. Geophys. Res., 102, 683-6864.
- Haywood, J.M. and V. Ramaswamy (1998) Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols, J. Geophys. Res., 103, 6043-6058.
- Müller, D., U. Wandinger, and A. Ansmann (1999a) Microphysical particle parameters from

extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory, Appl. Opt., 38, 2346-2357.

Müller D., I. Mattis, A. Ansmann, B. Wehner, D. Althausen, and U. Wandinger (2004) Closure study on optical and microphysical properties of a mixed urban and Arctic haze air mass observed with Raman lidar and Sun photometer, J. Geophys. Res, 109, D13206.

Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Muller (2008) Seasonal characteristics of lidar ratio 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.