

다파장 라만 라이다를 이용한 발생지에 따른 안면도 지역 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성

Investigation of Source Dependent Optical and Microphysical Characteristics of Aerosol Using Multi-wavelength Raman Lidar in Anmyun, Korea

노영민¹⁾ · 이한림^{2),*} · Detlef Müller^{1),3)}

¹⁾광주과학기술원 환경공학과, ²⁾연세대학교 대기과학과,

³⁾라이프찌히 대기연구소

(2010년 5월 20일 접수, 2010년 7월 2일 수정, 2010년 8월 20일 채택)

Young Min Noh¹⁾, Hanlim Lee^{2),*}, Detlef Müller^{1),3)}

¹⁾*Department of Environmental Science & Engineering,
Gwangju Institute of Science & Technology*

²⁾*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

³⁾*Leibniz-Institute for Tropospheric Research*

(Received 20 May 2010, revised 2 July 2010, accepted 20 August 2010)

Abstract

We present optical and microphysical particle properties of aerosol retrieved by multi-wavelength Raman lidar at Anmyun island (36.32°N, 126.19°E), Korea. The results present aerosol properties in various height layers of the atmospheric pollution layers observed over the Korean peninsula on eight consecutive days (27, 28, 29, 30 and 31 May, 4, 5 and 7 June) in 2005 at Anmyun island. We found anthropogenic pollution on 27, 28, and 29 May and local haze on other measurement days. The origin of the particle plumes was determined by simulations of FLEXPART. The source regions of the particles resulted in rather clear differences between the optical and microphysical properties of the pollution layers. The single-scattering albedo of anthropogenic aerosols from China (0.91 ± 0.01 at 532 nm) were lower than the single-scattering albedo of local haze aerosols (0.95 ± 0.01 at 532 nm). Local haze aerosols show larger effective radii of $0.24 \pm 0.02 \mu\text{m}$ at relative humidity of 55 ~ 75%. The effective radii of anthropogenic aerosols are $0.20 \pm 0.2 \mu\text{m}$ and $0.27 \mu\text{m}$ at relative humidity of 25 ~ 50%.

Key words : Raman lidar, Aerosol, Effective radius, Single scattering albedo

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-2123-7616, E-mail : hanlimlee@yonsei.ac.kr

1. 서 론

대기 에어러솔은 태양광을 산란 또는 흡수하여 대기의 복사 특성을 변화시켜 지구의 온도 및 기후변화에 영향을 미친다(Ramanathan and Feng, 2009; Ramanathan and Vogelmann, 1997; Charlson *et al.*, 1992). 그러나, 대기 에어러솔이 기후변화에 미치는 영향에 대한 과학적 이해는 온실가스에 비하며 부족한 실정이다. 지난 십수 년간 대기 에어러솔의 특성을 연구하고, 대기 에어러솔이 기후변화에 미치는 영향과 그 불확실성을 파악하기 위한 현장 연구가 지구촌 곳곳에서 실시되었다. First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1)은 지구 남반구에서 오염된 해양 대기 환경에서 대기 에어러솔의 특성을 연구하였으며(Bates *et al.*, 1998), Second Aerosol Characterization Experiment (ACE 2)는 대서양 동북부 아열대 지역에서의 인위적 오염물질에 의한 해양 대기 환경의 특성 변화를 연구하였다(Raes *et al.*, 2000). Indian Ocean Experiment (INDOEX)는 남아시아 지역에서 발생된 대기 오염물질의 광학적 특성과 발생지에 따른 광학적 특성의 차이를 연구하였다(Ramanathan *et al.*, 2001).

동아시아 지역에서 발생된 대기 에어러솔은 인위적 발생 에어러솔과 자연 발생 에어러솔의 혼합으로 인하여 다양한 광학적 특성을 보여준다. 특히, 동아시아 지역은 높은 화석 연료의 사용으로 인하여 세계에서 가장 많은 양의 인위적 오염물질이 발생하는 지역이기도 하다(Li *et al.*, 2007; Streets *et al.*, 2007). 봄철에는 황사(Asian dust)로 표현되는 많은 양의 먼지 입자가 중앙 아시아 지역의 사막으로부터 발생되어 한국과 일본 등 동아시아 풍하 지역으로 이동된다(Iwasaka *et al.*, 1998). 또한, 중국과 러시아의 시베리아 지역에서 발생된 산불에 의한 연기 입자들도 장거리 이동을 통하여 동아시아 지역의 대기환경에 영향을 미친다(Lee *et al.*, 2005). 특히, 전 세계적으로 대기 에어러솔의 발생량이 감소하는 추세와는 달리 동아시아 지역은 황사 발생횟수의 증가, 산업 활성화와 인구 증가에 따른 오염물질 발생량의 증가 등으로 대기 에어러솔의 농도가 증가하는 추세를 보이고 있다(Lee *et al.*, 2006). 더군다나 지역에서 발생된 각종 대기 오염물질은 장거리 이동을 통하여 동아시아 지역

뿐만 아니라 북반구 전체의 대기 환경에 영향을 준다(Ramanathan and Feng, 2009). 이러한 동아시아 지역의 대기 에어러솔의 연구를 위하여 ACE-Asia와 같은 대규모의 대기환경 관측이 수행되고(Huebert *et al.*, 2003) 국내에서는 중국으로부터 이동되는 황사 및 각종 오염입자에 대한 연구가 수행되었으나(Noh *et al.*, 2007a; Han *et al.*, 2006; Lee and Kim, 2004), 동아시아 지역에서의 대기 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

대기 에어러솔의 고도분포와 광학적 특성을 실시간으로 관측이 가능한 라이다(LIDAR: Light Detection And Range) 장비는 에어러솔의 이동특성 관측에 있어 매우 유용한 장비이다. 다양한 대기 에어러솔의 광산란과 흡수 등 정확한 복사 특성을 파악하기 위해서는 탄성산란과 함께 라만 산란을 측정할 수 있는 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 소산계수(extinction coefficient, α), 후방산란계수(backscatter coefficient, β) 등의 광학적 특성뿐만 아니라 입자의 유효경(effective radius, γ_{eff}), 단산란 알베도(single-scattering albedo, ω), 굴절률(refractive index, m) 등과 같은 미세물리학적 특성(microphysical property)을 고도분포와 함께 파악하는 것이 필수적이다.

본 연구는 2005년 5월 27일부터 6월 7일까지 안면도에서 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템으로 관측된 데이터를 분석하여 발생지역에 따른 대기 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성의 차이점을 밝히고자 한다.

2. 연구방법

2.1 GIST 다파장 라만 라이다 시스템

본 연구에 사용된 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템과 라만 방법을 이용한 소산계수 및 후방산란계수를 산출하는 방법은 Noh *et al.* (2008, 2007b, 2006)에 설명되어 있다. 본 연구에 사용된 다파장 라만 라이다 시스템은 20 Hz의 펄스 반복율을 가지고 355, 532, 그리고 1,064 nm의 세 파장을 동시에 조사할 수 있는 Nd:YAG 레이저를 광원으로 사용하여 대기 중의 공기분자 및 대기 에어러솔로부터 후방산란된 레이저 광을 일곱 개 채널의 검출시스템으로 수신할 수 있다. 관측 신호의 분석을 통하여

355와 532 nm의 두 파장에서의 입자소산계수와 355, 532 및 1,064 nm의 세 파장에서의 입자후방산란계수의 산출이 가능하다. 고도별 에어러솔 소산계수 및 후방산란계수는 387과 607 nm의 질소 라만 산란 신호와 355와 532 nm의 탄성산란 신호를 이용하여 라만 방법(Ansmann *et al.*, 1992, 1990)으로 분석하였다.

2.2 에어러솔 미세물리적 특성 분석

다파장 라만 라이다로 관측된 광학 데이터를 입력 자료로 사용하여 에어러솔의 미세물리적 특성을 분석하는 역행렬 알고리즘은 Noh *et al.* (2007a), Müller *et al.* (1999a, b), Veselovskii *et al.* (2004, 2002)에 설명되어 있다. 라이다 관측으로부터 도출된 에어러솔의 고도분포로부터 에어러솔 층을 선별하고 분류된 에어러솔 층에서의 355, 532 및 1,064 nm의 세 파장에서의 β 와 355와 532 nm의 두 파장에서의 α 를 역행렬 알고리즘의 입력자료로 활용하였다. 역행렬 알고리즘 분석으로부터 유효경(Effective radius, r_{eff}), 복소굴절률(Complex refractive index, m) 및 단산란 알베도(Single scattering albedo, ω)의 에어러솔 미세물리적 특성 값을 산출할 수 있다.

관측 데이터 및 가공 데이터를 활용하여 실시된 오차분석은 입력 자료로 사용된 광학 데이터의 오차가 20% 이내일 경우에 유효경은 20~30% 오차 범위 내에서 분석되었으며, 부피 및 단면적 농도는 50%의 정확도를 가지는 것으로 분석되었다(Noh *et al.*, 2009). 복소굴절률의 실수부분(Real part, m_{real})은 입력 데이터의 오차가 15% 이내일 경우 분석 오차는 ± 0.05 이내로 발생하였다. 복소굴절률의 허수부분(Imaginary part, m_{image})은 결과값이 0.01 이상일 경우에 $\pm 50\%$ 의 분석오차를 보였다.

2.3 역계적 분산 모델

라만 라이다로 관측된 대기 에어러솔 층의 발생지를 파악하기 위하여 본 연구에서는 FLEXPART(Stohl *et al.*, 2005)를 분석에 활용하였다. FLEXPART는 Lagrangean 입자 분산 모델로서 Global Forecast System(GFS)으로부터 분석된 기상자료를 입력자료로 활용하였다. FLEXPART 시뮬레이션은 라만 라이다가 관측된 지점에서 라이다 분석으로 파악된 대기 에어러솔 층의 측정 고도를 시작 기점으로 하여

역으로 에어러솔의 이동경로를 파악하는 방식으로 수행되었다. 본 연구에서 수행된 시뮬레이션은 10일간 에어러솔의 역계적을 추적하였으며, 입자가 대기 중에 머무르는 체류시간 분석을 통하여 에어러솔 층의 이동경로를 산출하였다. FLEXPART 결과 그래프는 격자 안에 공기피가 머무르는 시간을 log 10의 지수함수로 표시한 것으로 붉은 색이 나타날수록 그 지역에서 발생한 대기 에어러솔의 영향이 큰 것을 나타낸다.

3. 에어러솔 광학적 특성 관측

광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 대기 에어러솔의 광학 데이터 관측은 2005년 5월 27일부터 6월 7일까지 안면도 해안에 위치한 기후변화감시센터(36.32°N, 126.19°E)에서 실시되었다. 본 연구에서 수행된 다파장 라만 라이다 관측은 일몰 후부터 일출전까지 밤시간에 실시되었으며, 12일간의 관측기간 중 강우가 발생한 6월 1일부터 3일과 6월 6일을 제외한 8일 동안 라이다 관측이 수행되었다.

그림 1은 라이다 관측 기간 동안에 안면도 기후변화감시센터에서 베타게이지(Beta gauge, Anderson FH62C14)로 관측된 지상에서의 PM₁₀ 농도변화를 보여준다. 라이다 관측 실시 전인 5월 26일까지의 PM₁₀ 농도는 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 5월과 6월의 월평균 농도인 48과 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비슷한 농도를 보였으나 라이다 관측이 시작된 27일부터 29일까지는 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 농도가 관측되었다. 이때 최고 농도는

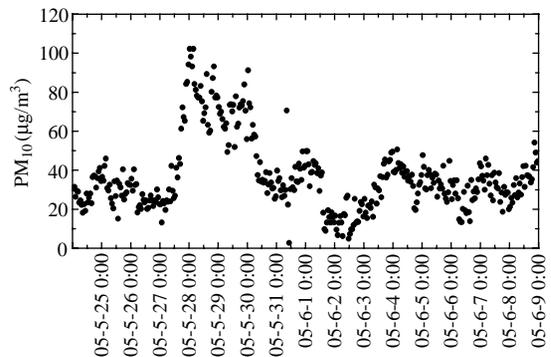


Fig. 1. 1-hour average surface PM₁₀.

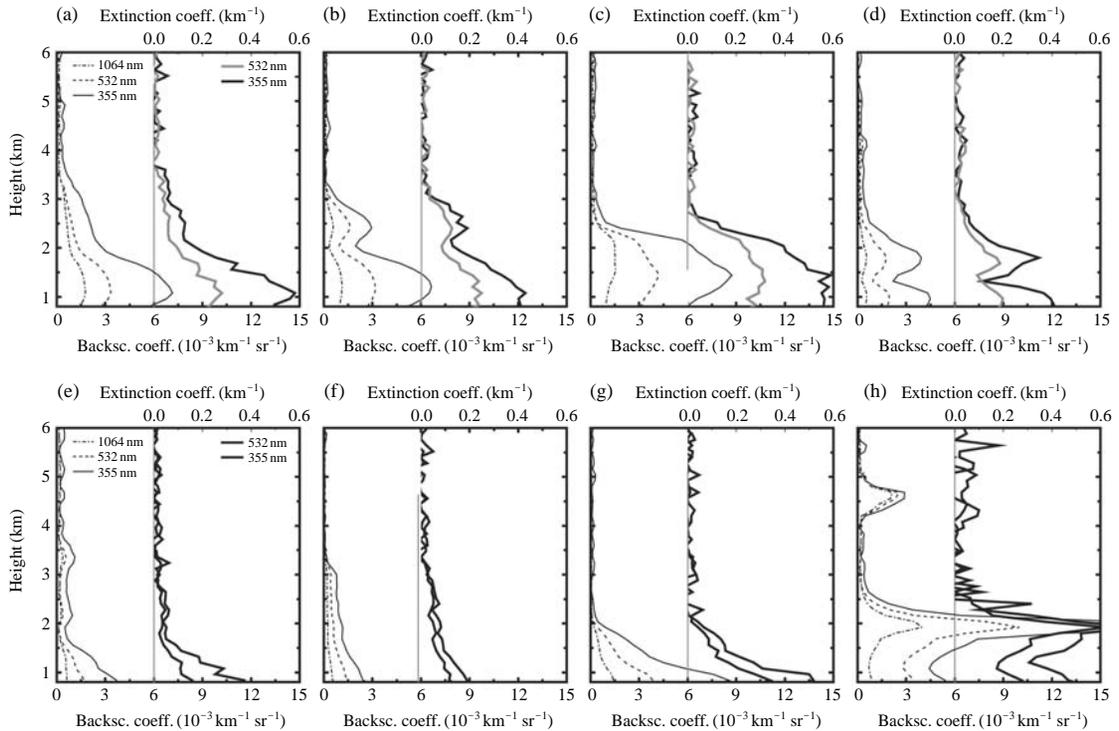


Fig. 2. The mean profiles of the particle backscatter coefficients at 355, 532, and 1,064 nm and the particle extinction coefficients at 355 and 532 nm (a) 27 May (b) 28 May (c) 29 May (d) 30 May (e) 31 May (f) 4 June (g) 5 June (h) 7 June 2005.

28일 01:00에 관측된 $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 30일부터는 PM_{10} 의 농도가 일상적 농도인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 전후로 관측되었다.

그림 2는 8일간 관측된 다파장 라만 라이더 데이터를 라만 방법으로 분석한 355와 532 nm에서의 α 와 355, 532, 그리고 1,064 nm에서의 β 의 수직분포를 보여준다. 중첩고도의 영향으로 정확한 관측이 실시되지 않은 700 m 이하의 값은 그래프 상에 표시하지 않았다. 높은 PM_{10} 농도가 관측된 5월 27일부터 29일까지 에어러솔 소산계수 및 후방산란계수는 355 nm에서 에어러솔 소산계수가 0.4 km^{-1} 으로 높은 값을 보였으나 30일부터는 0.3 km^{-1} 으로 낮은 값을 보여 PM_{10} 농도 변화와 유사한 변화를 보여주었다. 주요한 대기 에어러솔 층이 관측된 고도 분포는 5월 27일에 3.5 km 고도까지 관측되어 가장 높은 고도분포를 보였으며 29일까지 2.5 km 고도까지 에어러솔 층이 관측되었으나 이후 관측일이 경과함에 따라 관

측고도 또한 감소하는 경향을 보여 5월 31일부터는 주요 에어러솔 층은 2 km 이하의 고도에서 관측되는 경향을 보였다. 5월 27일부터 29일까지 관측된 높은 농도의 PM_{10} 은 라이더 관측을 통한 관측고도를 고려할 때 중국으로부터 장거리 이동된 에어러솔의 영향으로 판단된다. 6월 7일 관측 결과에서 1.9~2.5 km 고도에서 높은 소산계수 및 후방산란계수 값을 보이는 것은 대기 에어러솔에 의한 것이 아닌 낮은 구름의 영향으로 판단된다. 그림 3은 관측된 에어러솔 층의 발생지를 파악하기 위한 FLEXPART 분석 결과를 보여준다. 라이더 관측이 시작된 5월 27일의 경우 관측된 에어러솔은 관측 지점에서 북서 방향으로부터 장거리 이동되어 왔으며 국내에서 발생한 에어러솔에 의한 영향이 없는 것으로 보인다. 28일부터 29일 사이에는 국내에서 발생한 에어러솔에 의한 영향이 있으나 여전히 북서 방향으로부터 장거리 이동된 에어러솔이 관측된 것으로 판단된다. 하지만 5월 30일

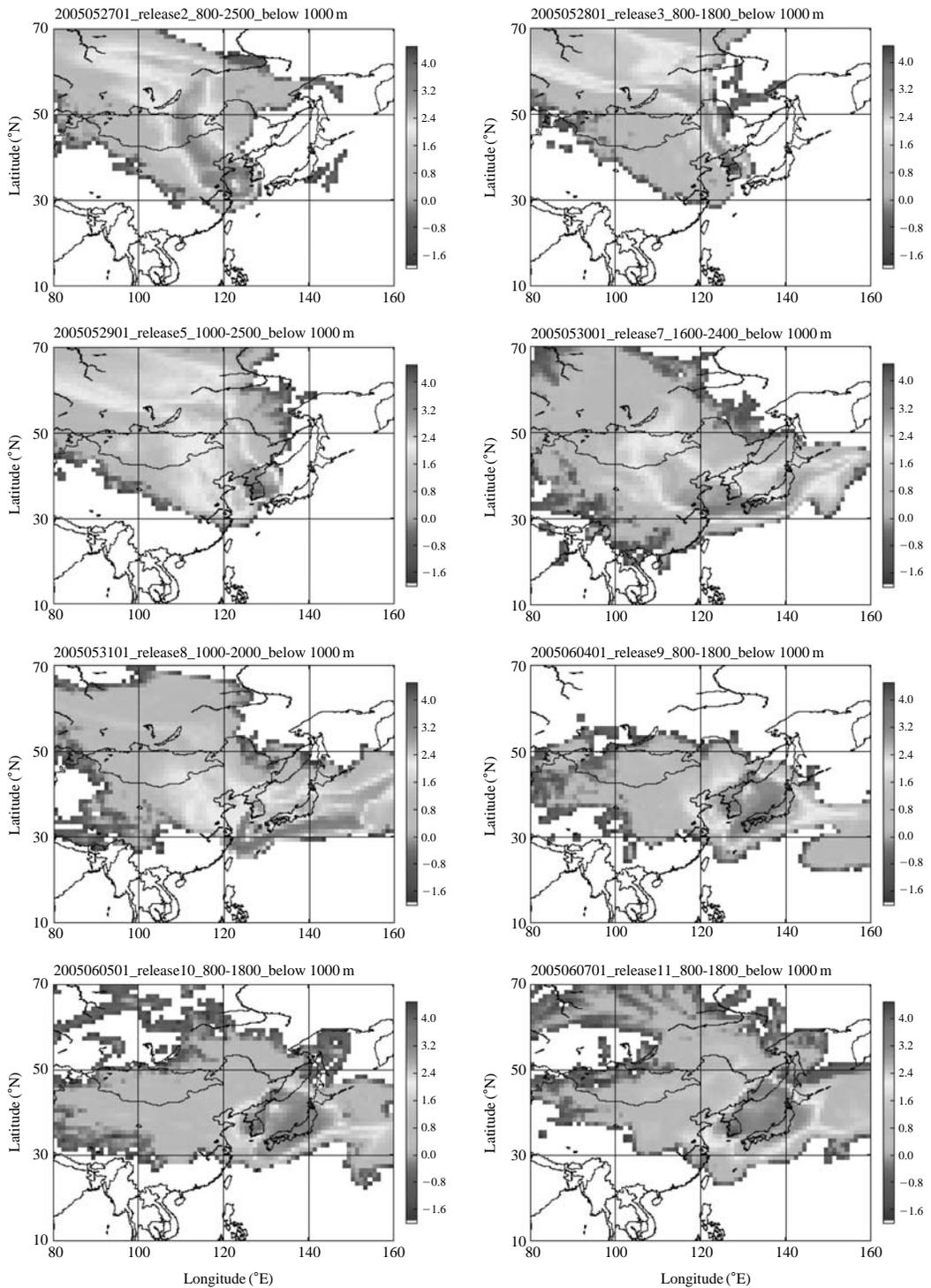


Fig. 3. Backward simulations with FLEXPART for the pollution layers. Color scale indicates the probability that the air parcel could pick up pollution in the corresponding grid cell.

Table 1. Particle extinction coefficient (α), backscatter coefficients (β), Ångström exponent (Å), lidar ratio (S), and relative humidity (RH) measured for the observed aerosol layers.

Date	Height (km)	α_{355} (km^{-1})	α_{532} (km^{-1})	β_{532} ($\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$)	Å	S_{355} (sr)	S_{532} (sr)	RH (%)*
27-May-05	0.78 ~ 1.38	0.53 ± 0.04	0.25 ± 0.02	3.17 ± 0.20	1.86 ± 0.15	65 ± 2	80 ± 3	40
	1.50 ~ 1.86	0.31 ± 0.04	0.16 ± 0.04	2.36 ± 0.45	1.63 ± 0.19	57 ± 7	68 ± 5	50
	1.86 ~ 2.34	0.15 ± 0.04	0.08 ± 0.02	1.24 ± 0.17	1.55 ± 0.16	53 ± 5	63 ± 10	42
	2.34 ~ 2.70	0.12 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.91 ± 0.07	1.71 ± 0.25	55 ± 5	67 ± 9	24
28-May-05	0.78 ~ 1.14	0.41 ± 0.01	0.24 ± 0.01	2.98 ± 0.19	1.32 ± 0.07	69 ± 5	80 ± 6	35
	1.14 ~ 1.50	0.37 ± 0.03	0.22 ± 0.01	3.08 ± 0.11	1.29 ± 0.22	56 ± 6	72 ± 5	45
	1.62 ~ 1.98	0.22 ± 0.05	0.12 ± 0.03	1.76 ± 0.10	1.50 ± 0.08	62 ± 5	70 ± 6	35
29-May-05	1.02 ~ 1.38	0.56 ± 0.02	0.30 ± 0.01	3.83 ± 0.23	1.54 ± 0.16	70 ± 5	79 ± 3	51
	1.38 ~ 1.74	0.52 ± 0.06	0.29 ± 0.02	3.98 ± 0.28	1.44 ± 0.20	63 ± 4	74 ± 2	47
	1.74 ~ 2.22	0.36 ± 0.08	0.22 ± 0.04	2.89 ± 0.31	1.24 ± 0.12	62 ± 2	76 ± 2	40
30-May-05	0.90 ~ 1.26	0.28 ± 0.05	0.17 ± 0.03	1.76 ± 0.26	1.23 ± 0.07	69 ± 2	96 ± 5	40
	1.38 ~ 1.98	0.24 ± 0.03	0.14 ± 0.03	1.53 ± 0.27	1.33 ± 0.21	71 ± 7	94 ± 12	35
31-May-05	1.14 ~ 1.50	0.16 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.93 ± 0.02	1.71 ± 0.27	78 ± 8	87 ± 9	75
4-Jun-05	0.78 ~ 1.38	0.15 ± 0.03	0.10 ± 0.02	1.19 ± 0.09	1.05 ± 0.17	75 ± 3	85 ± 6	54
	1.38 ~ 1.74	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.69 ± 0.03	1.00 ± 0.27	72 ± 6	79 ± 2	54
5-Jun-05	0.78 ~ 1.38	0.38 ± 0.09	0.23 ± 0.05	2.84 ± 0.38	1.24 ± 0.23	61 ± 5	78 ± 7	55
	1.50 ~ 1.86	0.13 ± 0.02	0.08 ± 0.01	1.03 ± 0.15	1.20 ± 0.14	62 ± 4	80 ± 8	70
7-Jun-05	0.78 ~ 1.38	0.39 ± 0.03	0.21 ± 0.03	3.11 ± 0.25	1.47 ± 0.23	80 ± 5	68 ± 3	72
	1.50 ~ 1.86	0.51 ± 0.02	0.35 ± 0.04	5.28 ± 0.56	0.96 ± 0.31	61 ± 2	68 ± 4	67

*Relative humidity measured by radiosonde launched at Osan airport.

에는 북서방향뿐만 아니라 남쪽과 동쪽으로부터 이동해온 에어러솔의 영향이 증가되는 경향이 관측되기 시작하여 31일부터 6월 7일까지는 북서쪽으로부터의 이동은 사라지고 남쪽(5월 31일)과 동쪽(6월 4, 5, 7일)으로부터 에어러솔이 이동되는 것으로 확인된다. 이는 이전 관측일과는 확연히 다른 이동 경향으로 5월 27일부터 29일까지는 중국으로부터 장거리 이동된 에어러솔이 관측되었으나, 30일에 혼합되는 경향이 관측되고, 이후 관측에서는 국내에서 발생된 에어러솔이 관측된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이후 5월 27일부터 29일까지 관측된 대기 에어러솔을 중국으로부터 장거리 이동된 오염 입자로서 장거리 오염입자(Long-range transported particle, LTP)로 표시하고 5월 30일부터 6월 7일까지 공기괴가 동쪽으로부터 이동한 경우는 국내에서 발생된 대기 에어러솔로 판단하여 지역 입자(Local particle, LP)로 표현하였다.

표 1은 관측기간 동안 측정된 광학 데이터 값들을 고도분포에 따라 여러 개의 구간으로 나누어 표시하였다. 355와 532 nm의 두 파장에서의 소산계수로부터 계산된 파장역지수(Ångström exponent, Å)는 LTP

가 관측된 5월 27일부터 29일까지는 1.24에서 1.86 사이의 값으로 1.51 ± 0.19 의 평균값을 보였으나, 그 이후의 LP가 관측된 기간에는 5월 31일의 1.71값을 제외하고는 0.96에서 1.47 사이의 값으로 평균값이 1.24 ± 0.24 으로 LTP 관측일보다 낮은 값이 관측되었다. 이는 작은 입자 크기를 보이는 대기 에어러솔이 27일부터 29일까지 관측되었으나, 이후 관측일에는 이에 비하여 상대적으로 큰 입자가 관측되었음을 나타내어 입자의 발생지역에 따라 다른 특성을 가진 대기 에어러솔이 관측되었음을 시사한다. 라이다 비의 분포 또한 에어러솔의 이동경로에 따라 구분되는 특성을 보였다. LTP의 경우 라이다 비가 355와 532 nm에서 각각 $53 \sim 70$ sr과 $63 \sim 80$ sr의 값을 보였으나, LP는 각각 $61 \sim 80$ sr과 $68 \sim 96$ sr으로 높은 값을 보였다.

4. 미세물리적 특성

관측된 에어러솔의 자세한 미세물리적 특성을 파악하기 위하여 표 1의 고도별 구간으로 정리된 소산

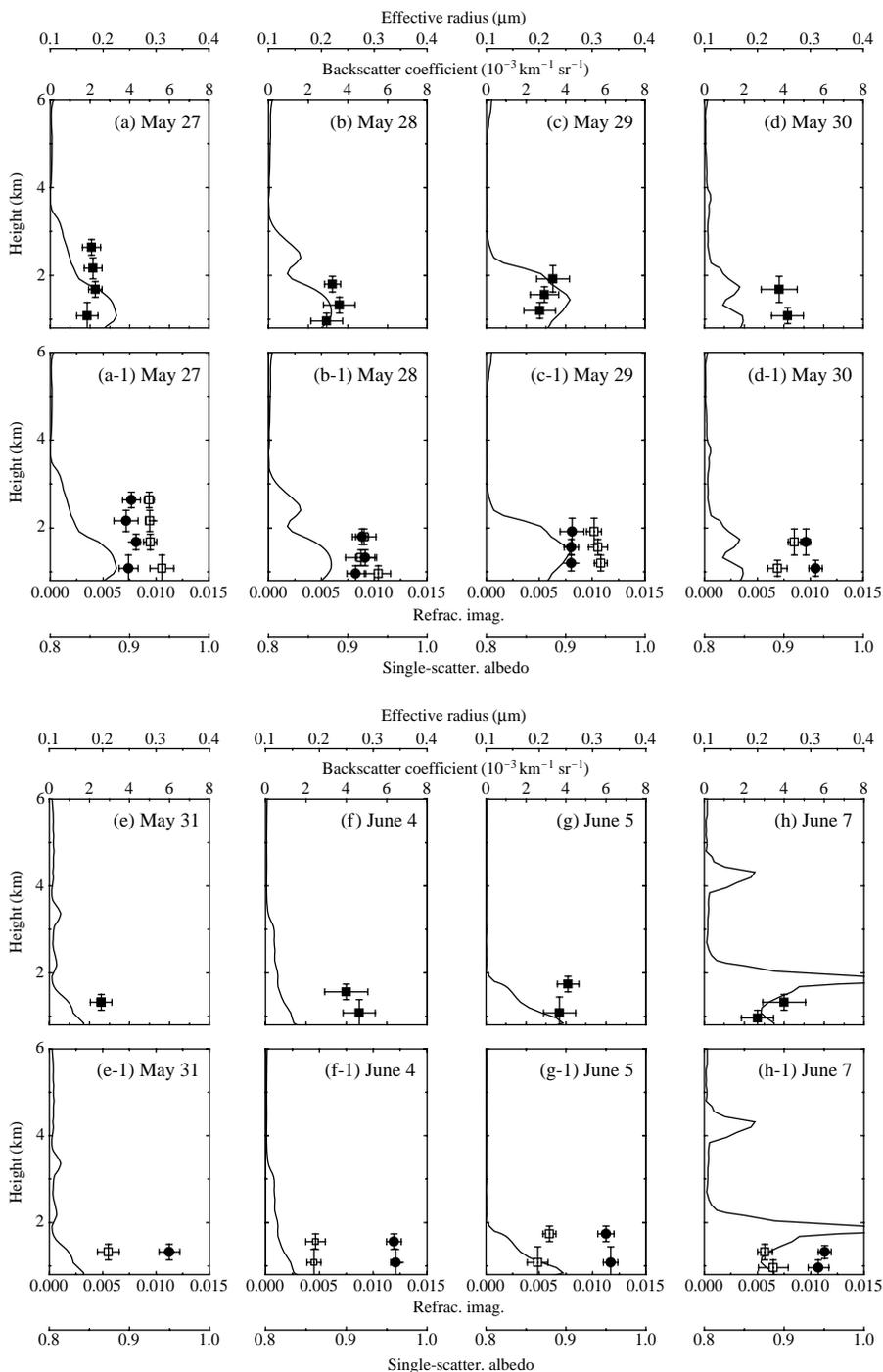


Fig. 4. Particle effective radius (closed square), refractive index of the imaginary part (open squares) and single-scattering albedo (closed circles). Vertical error bars denote height ranges across which optical input data were averaged. Horizontal error bars denote uncertainty from the data inversion. Also shown are the profiles of the particle backscatter coefficient at 532 nm.

Table 2. Microphysical parameters derived from the inversion of the lidar data.

Air mass pathway	Date	Height (km)	$\gamma_{\text{eff}}^1, \mu\text{m}$	Refractive index		ω^4
				m_{real}^2	m_{image}^3	
Long-range transport	27-May-05	0.78~1.38	0.17 ± 0.02	1.405 ± 0.017	0.0105 ± 0.0011	0.90 ± 0.01
		1.50~1.86	0.19 ± 0.02	1.464 ± 0.011	0.0094 ± 0.0006	0.91 ± 0.01
		1.86~2.34	0.18 ± 0.02	1.488 ± 0.017	0.0094 ± 0.0003	0.90 ± 0.02
		2.34~2.70	0.18 ± 0.02	1.491 ± 0.012	0.0093 ± 0.0005	0.90 ± 0.01
	28-May-05	0.78~1.14	0.21 ± 0.03	1.384 ± 0.013	0.0104 ± 0.0012	0.91 ± 0.01
		1.14~1.50	0.23 ± 0.03	1.414 ± 0.017	0.0087 ± 0.0015	0.92 ± 0.01
		1.62~1.98	0.22 ± 0.02	1.415 ± 0.018	0.0090 ± 0.0011	0.92 ± 0.01
	29-May-05	1.02~1.38	0.20 ± 0.03	1.372 ± 0.014	0.0108 ± 0.0006	0.91 ± 0.01
		1.38~1.74	0.21 ± 0.03	1.405 ± 0.018	0.0106 ± 0.0009	0.91 ± 0.01
		1.74~2.22	0.23 ± 0.03	1.451 ± 0.012	0.0102 ± 0.0007	0.91 ± 0.01
	Average		0.20 ± 0.02	1.429 ± 0.042	0.0099 ± 0.0007	0.91 ± 0.01
	30-May-05	0.90~1.26	0.26 ± 0.03	1.346 ± 0.008	0.0069 ± 0.0009	0.94 ± 0.01
1.38~1.98		0.24 ± 0.03	1.359 ± 0.008	0.0085 ± 0.0006	0.93 ± 0.01	
31-May-05	1.14~1.50	0.24 ± 0.02	1.382 ± 0.020	0.0055 ± 0.0010	0.95 ± 0.01	
Local	4-Jun-05	0.78~1.38	0.27 ± 0.03	1.374 ± 0.010	0.0045 ± 0.0006	0.96 ± 0.01
		1.38~1.74	0.25 ± 0.04	1.385 ± 0.008	0.0046 ± 0.0009	0.96 ± 0.01
	5-Jun-05	0.78~1.38	0.24 ± 0.03	1.393 ± 0.008	0.0045 ± 0.0010	0.96 ± 0.01
		1.50~1.86	0.25 ± 0.02	1.389 ± 0.014	0.0060 ± 0.0006	0.95 ± 0.01
	7-Jun-05	0.78~1.38	0.24 ± 0.03	1.361 ± 0.019	0.0065 ± 0.0014	0.94 ± 0.01
		1.50~1.86	0.25 ± 0.04	1.381 ± 0.011	0.0057 ± 0.0007	0.95 ± 0.01
	Average		0.25 ± 0.02	1.374 ± 0.016	0.0059 ± 0.0013	0.95 ± 0.01

¹Effective radius, ²Real part of refractive index, ³Imaginary part of refractive index, ⁴Single-scattering albedo

계수와 후방산란계수를 입력 자료로 사용하여 역행렬 알고리즘 분석을 실시하였다. 그림 4는 역행렬 알고리즘으로 계산된 에어러솔의 미세물리적 특성값(유효경, 복소굴절률 허수부분 및 단산란 알베도)을 보여주고 있으며 표 2는 결과값들의 수치를 정리한 것이다. 표 2는 그림 3에서 분석된 에어러솔의 발생지에 따라 LTP와 LP로 구분하였다. 유효경 (effective radius)은 LTP의 경우 0.17에서 0.23 μm 사이의 값을 보였으며 평균값은 $0.20 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 로 작은 입자 크기 분포로 분석되었다. 이에 반하여 LP는 입자 크기 분포가 0.24에서 0.27 μm 으로 $0.25 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 의 평균값을 보여 LTP에 비하여 상대적으로 큰 입자가 관측되었음을 보여준다. 일반적으로 장거리 이동되어오는 에어러솔은 이동 시 응집현상에 의하여 입자의 크기가 커지는 경우가 있으나 본 연구에서 보여주는 낮은 유효경을 고려할 때 이러한 현상은 발생되지 않은 것으로 판단된다. 하지만 장거리 이동된 에어러솔보다 국지적으로 발생된 에어러솔의 입자 크기가 큰 것은

상대습도에 의하여 입자의 크기가 증가된 것으로 판단된다. 그림 5는 유효경과 상대습도와의 상관관계를 나타내는 그래프로서 LTP의 경우 상대습도 분포가 24~51%로 $41 \pm 8\%$ 의 평균 상대습도를 보였다. 이에 반하여 LP는 30일의 35~40%의 경우를 제외하고는 54~75%로 $60 \pm 15\%$ 의 상대적으로 높은 평균 상대습도가 관측되었다. 상대습도 증가에 따른 입자 크기 증가는 아시아 지역에서 관측되는 대기 에어러솔의 높은 흡습 성장 계수(Hygroscopic growth factor, $f(\text{RH})$) 값으로 설명될 수 있을 것이다. Kim *et al.* (2006)은 ACE-Asia 관측 기간 동안 제주도 고산 관측을 통하여 중국으로부터 이동된 오염 입자의 흡습 성장 계수는 2.75 ± 0.38 이고, 한국 국내로부터 이동된 오염입자의 흡습 성장 계수가 1.91 ± 0.16 임을 밝혔다. 이는 ACE-2 기간 동안 관측된 유럽 지역 도시 오염 입자의 흡습 성장 계수인 1.46 ± 0.10 에 비하여 높은 값이다(Carrico *et al.*, 2000). Noh *et al.* (2009)는 2005년 10월에 이동경로가 본 연구와 비슷한 오염

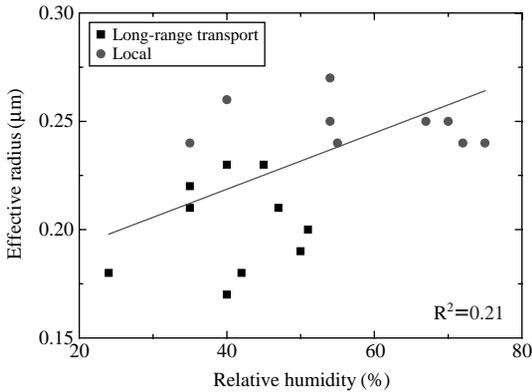


Fig. 5. Correlation plot of effective radius versus relative humidity.

입자와 시베리아 지역으로부터 이동된 연기입자를 광주에서 관측하였다. 이 때 연기입자와 오염입자의 유효경은 각각 $0.35 \pm 0.03 \mu\text{m}$ 과 $0.33 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 로 본 연구의 결과보다 큰 입자가 관측되었다. 이러한 차이는 당시의 상대습도가 60~90%로 본 연구에 비하여 월등히 높은 조건으로 높은 상대습도 조건에서 이동 시 입자의 크기가 증가된 것으로 판단된다.

복소굴절률(complex refractive index)의 실수부분(real part) 값은 LTP의 경우 1.43 ± 0.04 인 데 비하여 지역 연무는 1.37 ± 0.02 로 차이를 보였다. 복소굴절률 실수부분은 상대습도가 높고 오염물질을 많이 포함할수록 낮은 값을 나타낸다(Müller *et al.*, 2005). 이러한 결과는 그림 3에서 보여주었듯이 발생지에 따른 상대습도의 차이와 밀접한 관계를 보여준다. LP의 경우 분석된 복소굴절률 실수부분이 낮은 값을 보여 상대적으로 높은 상대습도가 지역 연무의 특성에 영향을 미친 것으로 판단되며, LTP의 경우는 상대 습도의 영향이 적은 것으로 판단된다.

표 2에서 보여주는 단산란 알베도는 532 nm에서 0.90에서 0.96의 값이 관측되었다. 이러한 관측값은 표 2에서 보여주듯이 발생지에 따라 분류하였을 경우 유효경의 경우와 같이 명확하게 구분되었다. 그림 6은 입자의 광흡수 특성을 나타내는 요소인 단산란 알베도와 복소굴절률 허수부분의 상관관계를 보여준다. 본 연구에서 두 요소의 상관계수값은 0.91로 매우 높은 값을 보여주었으며, 발생지에 따라 광흡수 특성이 명확하게 구분됨을 알 수 있다. 중국으로부터

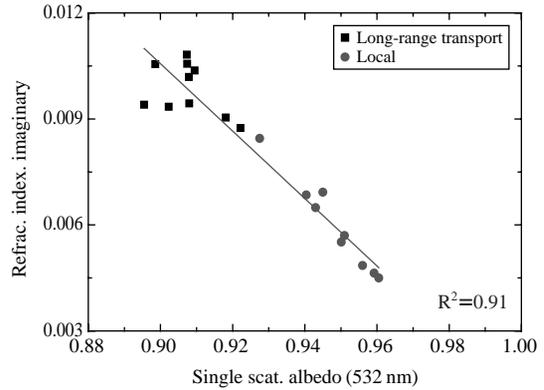


Fig. 6. Single-scattering albedo at 532 nm versus the imaginary part of the complex refractive index.

이동된 LTP의 단산란 알베도는 0.90~0.92 값으로 0.91 ± 0.01 의 평균값을 보였다. 다양한 측정 방법으로 중국 도시 오염지역에서 관측된 단산란 알베도는 낮은 값을 보였다. 라만 라이더와 선포토미터를 이용하여 Pearl River Delta (South China)와 Beijing (North China)에서 관측된 단산란 알베도는 각각 0.77 ± 0.12 와 0.78 ± 0.11 이었다(Tesche *et al.*, 2007; Müller *et al.*, 2006). Eck *et al.* (2005)는 중국 Beijing과 Julin, 두 도시지역에서 선포토미터 관측으로 550 nm에서 0.89의 단산란 알베도를 측정하였다. Andreae *et al.* (2005)는 중국 동남부에 위치한 Guangzhou의 도심 지역에서 0.86의 평균 단산란 알베도를 관측하였다. Lee *et al.* (2007)은 지상관측과 위성관측의 조합을 통하여 중국 전역의 평균 단산란 알베도가 0.89 ± 0.04 임을 보고하였다. 이와 같이 중국 지역에서 관측되는 단산란 알베도는 전체적으로 0.9 이하의 값이 관측되었음을 알 수 있다.

이와는 달리, 동북아시아의 풍하측에 위치한 한국과 일본에서 관측된 값은 오염 입자의 발생지인 중국지역에서 관측된 값에 비하여 높은 값이 관측되었다. 2001년 ACE-Asia 기간 동안 한국과 일본의 해안 지역에서 지상 실시간 관측 장비를 이용한 단산란 알베도 측정값은 평균 0.94 ± 0.03 이었다(Carrico *et al.*, 2003). Noh *et al.* (2009)은 다파장 라만 라이더 관측을 통하여 중국지역으로 발생되어 장거리 이동된 것으로 판단되는 오염입자의 단산란 알베도가 0.90 ± 0.03 임을 보고하였다. 발생지인 중국에서 측정된 값

과 풍하측에 위치한 한국과 일본에서 관측된 오염입자의 단산란 알베도 값의 차이는 지역적으로 장거리 이동 중 입자 상호의 혼합 작용으로 인하여 광흡수 특성이 감소되는 것이 한 이유일 것이다(Mallet *et al.*, 2004; Jacobson, 2001). 다른 이유는 장거리 이동 중 습도의 영향으로 입자의 광흡수 특성이 감소된 것이다. 유효경에서 보여준 바와 같이 중국 지역에서 발생하는 오염입자는 높은 흡성 성장 계수를 보이며, 이로 인하여 높은 상대 습도 조건에서 입자의 크기는 증가되고 광흡수 특성은 감소하는 것이다. Carrico *et al.* (2003)은 관측을 통하여 상대습도가 40에서 85%로 증가될 때, 단산란 알베도는 0.91에서 0.96으로 증가됨을 보여주었다. 하지만 본 연구에서는 중국으로부터 이동된 LTP의 평균 유효경이 $0.2 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 로 낮은 값으로 장거리 이동 중 입자 상호의 혼합 작용이 적었으며 낮은 상대습도 조건으로 인하여 습도 및 입자 혼합 작용에 의한 광흡수 특성의 변화가 미미했던 것으로 판단된다.

본 연구에서 LP의 단산란 알베도는 평균 0.95 ± 0.01 로 중국으로부터 이동된 오염입자에 비하여 높은 값을 보였다. Cheng *et al.* (2009)은 중국 북경에서 VTDMA를 이용한 soot 입자의 생성 및 혼합특성 연구를 통하여 생성된 soot 입자와 오염입자가 상대습도의 증가로 인하여 입자의 흡습성이 증가하고 이에 따라 입자의 크기 증가 및 광흡수 특성이 감소하는 경향이 soot 입자가 다른 오염입자와 혼합과 침적 등과 같은 입자 상호 작용으로부터 입자의 크기가 증가하는 경향에 비하여 훨씬 높음을 밝혔다. 이러한 연구 결과는 발생지에 따라 입자의 광학적 및 미세물리적 특성이 차이가 나는 것에 입자 상호 작용보다 상대습도의 차이가 크게 영향을 미쳤음을 뒷받침한다. 발생지에 따라 광흡수 특성의 차이가 발생하는 것은 상대습도의 영향과 함께 중국과 한국에서 사용되는 연료 형태, 연소 방식, 그리고 오염 저감 기술의 차이에서 발생하는 것으로 사료된다(Eck *et al.*, 2005).

5. 결 론

광주과학기술원의 다과장 라만 라이다 시스템을 이용하여 안면도에서 2005년 5월 27일부터 6월 7일까지 대기 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성을

연구하였다. 관측 기간 중 총 8일의 라이다 관측 결과를 산출할 수 있었다. FLEXPART 역궤적 분석과 라이다로 관측된 대기 에어러솔의 고도분포를 통하여 관측된 대기 에어러솔의 발생지를 중국 지역으로부터 장거리 이동한 LTP와 국내에서 발생된 LP로 구분할 수 있었다.

관측된 대기 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성은 에어러솔의 발생지에 따라 구분되는 특성을 보였다. LTP는 평균 라이다 비가 355와 532nm에서 각각 61.2 ± 5.8 과 $72.9 \pm 5.9 \text{ sr}$ 로 LP의 69.9 ± 7.3 과 $81.7 \pm 10.0 \text{ sr}$ 보다 낮은 값을 보였다. 파장역지수(Ångström exponent, Å) 또한 LTP가 1.51 ± 0.19 의 평균값을 보였으나 LP는 평균값이 1.24 ± 0.24 를 보였다. 미세물리적 특성 중 발생지에 따른 입자의 광흡수 특성의 차이는 역행렬 분석으로 산출된 단산란 알베도에서도 관측되었다. LTP는 0.91 ± 0.01 의 평균값을 보인 데 반해 LP는 0.95 ± 0.01 의 평균값으로 중국으로부터 발생된 LTP의 광흡수 특성이 월등히 높음을 알 수 있었다. 유효경은 LTP 경우, $41 \pm 8\%$ 의 낮은 상대습도 조건에서 평균값이 $0.20 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 로 작은 입자 크기 분포로 분석되었으나, 지역 연무는 $60 \pm 15\%$ 의 상대적으로 높은 상대습도 하에서 평균 $0.25 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 로 LTP에 비하여 상대적으로 큰 입자가 관측되었다.

본 연구를 통하여 광주과학기술원의 다과장 라만 라이다를 이용한 에어러솔의 관측과 역행렬 알고리즘 분석에 의해 대기 에어러솔의 발생지에 따른 광학적 및 미세물리적 특성이 구분되었다. 특히, 중국 지역으로 유입된 LTP의 광흡수 특성이 국내에서 발생된 입자에 비하여 높음을 알 수 있었다. 광흡수 특성의 차이가 발생하는 것은 유효경의 경우와 마찬가지로 LP가 발생했을 때 높은 상대 습도로 인하여 광흡수 특성이 감소된 것으로 판단된다. 본 시스템과 분석방법을 통한 지속적인 에어러솔의 연구는 동북아시아 지역에서 발생하여 편서풍 기류를 타고 이동하는 다양한 종류의 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성을 설명하는 데 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER

2009-3112)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 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, Proceeding of the 2005 Spring Meeting of AGU, abstract #A21A-23.
- Ansmann, A., U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp, and W. Michaelis (1990) Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar, *Optics Letters*, 15, 746-748.
- 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, *Applied Optics*, 31, 7113-7131.
- Bates, T.S., B.J. Huebert, J.L. Gras, F.B. Griffiths, and P.A. Durkee (1998) International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Project's First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1): Overview, *J. Geophys. Res.*, 103, 16297-16318.
- Carrico, C.M., M.J. Rood, J.A. Ogren, X.C. Neusüß, A. Wiedensohler, and J. Heintzenberg (2000) Aerosol optical properties at Sagres, Portugal during ACE-2, *Tellus-B* 52B, 694-715.
- Carrico, C.M., P. Kus, M.J. Rood, P.K. Quinn, and T.S. Bates (2003) Mixtures of pollution, dust, sea salt, and volcanic aerosol during ACE-Asia: Radiative properties as a function of relative humidity, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8650, doi:10.1029/2003JD003405.
- Charlson, R.J., S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A. Coakley Jr., J.E. Hansen, and D.J. Hofmann (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-430.
- Cheng, Y.F., M. Berghof, R.M. Garland, A. Wiedensohler, B. Wehner, T. Müller, H. Su, Y.H. Zhang, P. Achtert, A. Nowak, U. Poschl, T. Zhu, M. Hu, and L.M. Zeng (2009) Influence of soot mixing state on aerosol light absorption and single scattering albedo during air mass aging at a polluted regional site in northeastern China, *J. Geophys. Res.*, 114, D00G10, doi:10.1029/2008JD010883.
- 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 eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific, *J. Geophys. Res.*, 110, D06202, doi:10.1029/2004JD005274.
- Han, J.S., Y.M. Kim, J.Y. Ahn, B.J. Kong, J.S. Choi, S.U. Lee, and S.J. Lee (2006) Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutants flux during 1997~2004, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(1), 99-106. (in Korean with English abstract)
- 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, *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8633.
- Iwasaka, Y., M. Yamato, R. Imasu, and A. Ono (1998) Transport of Asian dust (KOSA) particles-importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles *Tellus, Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 40B, 494-503.
- Jacobson, M.Z. (2001) Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols, *Nature*, 409, 695-697.
- Kim, J.Y., S.C. Yoon, A. Jefferson, and S.W. Kim (2006) Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001, *Atmospheric Environment*, 40, 1550-1560.
- Lee, D.H., K.H. Lee, J.E. Kim, and Y.J. Kim (2006) Characteristics of atmospheric aerosol optical thickness over the Northeast Asia using TERRA/MODIS data during the year 2000~2005, *Atmosphere*, 16(2), 85-96.
- Lee, K.H. and Y.J. Kim (2004) Russian forest fire smoke aerosol monitoring using satellite and AERONET data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(4), 437-450. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.H., J.E. Kim, Y.J. Kim, J. Kim, and W. von 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., Z. Li, M.S. Wong, J. Xin, Y. Wang, W.M. Hao, and F. Zhao (2007) Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- Li, Z., F. Niu, K.H. Lee, J. Xin, W.M. Hao, B. Nordgren, Y. Wang, and P. Wang (2007) Validation and under-

- standing of moderate resolution imaging spectro-radiometer aerosol products using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S07, doi:10.1029/2007JD008479.
- Mallet, M., J.C. Roger, S. Despiou, J.P. Putaud, and O. Dubovik (2004) A study of the mixing state of black carbon in urban zone, *J. Geophys. Res.*, 109, D04202, doi:10.1029/2003JD003940.
- Müller, D., I. Mattis, U. Wandinger, A. Ansmann, D. Althausen, and A. Stohl (2005) Raman lidar observations of aged Siberian and Canadian forest fire smoke in the free troposphere over Germany in 2003: Microphysical particle characterization, *J. Geophys. Res.*, D17201, doi:10.1029/2004JD005756.
- Müller, D., M. Tesche, H. Eichler, R. Engelmann, D. Althausen, A. Ansmann, Y.F. Cheng, Y.H. Zhang, and M. Hu (2006) Strong particle light-absorption over the Pearl River Delta (South China) and Beijing (North China) determined from combined Raman lidar and Sun photometer observations, *Geophys. Res. Letts.*, 33, L20811, doi:10.1029/2006GL027196.
- Müller, D., U. Wandinger, and A. Ansmann (1999a) Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory, *Applied Optics*, 38, 2346-2357.
- Müller, D., U. Wandinger, and A. Ansmann (1999b) Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Simulation, *Applied Optics*, 38, 2358-2368.
- 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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(1), 1-14. (in Korean with English abstract)
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller (2007a) Retrieval of aerosol microphysical parameter by inversion algorithm using multi-wavelength Raman lidar data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(1), 97-109. (in Korean with English abstract)
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, B.C. Choi, and T. Murayama (2007b) Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea, *Atmospheric Research*, 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, *Atmospheric Environment*, 42, 2208-2224.
- Noh, Y.M., D. Müller, D.H. Shin, H.L. Lee, J.S. Jung, K.H. Lee, M. Cribb, Z. Li, and Y.J. Kim (2009) Optical and microphysical properties of severe haze and smoke aerosol measured by integrated remote sensing techniques in Gwangju, Korea, *Atmospheric Environment*, 43, 879-888.
- Raes, F., T. Bates, F. McGovern, and M. VanLiedekerke (2000) The 2nd Aerosol Characterization Experiment (ACE-2): General overview and main results, *Tellus, B*, 52, 111-125.
- Ramanathan, V. and A.M. Vogelmann (1997) Greenhouse effect, atmospheric solar absorption, and the Earth's radiation budget: From the Arrhenius-Langely era to the 1990's, *Ambio*, 26(1), 38-46.
- Ramanathan, V. and F. Feng (2009) Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives, *Atmospheric Environment*, 43, 37-50.
- Ramanathan, V., P.J. Crutzen, J. Lelieveld, A.P. Mitra, D. Althausen, J. Andersons, M.O. Andreae, W. Cantrell, G.R. Cass, C.E. Chung, A.D. Clarke, J.A. Coakley, W.D. Collins, W.C. Conant, F. Dulac, T.M.J. Heintzenberg, A.J. Heymsfield, B. Holben, S. Howell, J. Hudson, A. Jayaraman, T. Kiehl, T.N. Krishnamurti, D. Lubin, G. McFarquhar, T. Novakov, J.A. Ogren, I.A. Podgorny, K. Prather, K. riestley, J.M. Prospero, P.K. Quinn, K. Rajeev, P. Rasch, S. Rupert, R. Sadourny, S.K. Satheesh, G.E. Shaw, P. Sheridan, and F.P.J. Valero (2001) The Indian ocean experiment: an integrated assessment of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian Haze, *J. Geophys. Res.*, 106(D22), 28371-28399.
- Stohl, A., C. Forster, A. Frank, P. Seibert, and G. Wotawa (2005) Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2461-2474.
- Streets, D.G., J.S. Fu, C.J. Jang, J. Ho, K. He, X. Tang, Y. Zhang, Z. Wang, Z. Li, Q. Zhang, L. Wang, B. Wang, and C. Yu (2007) Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games, *Atmospheric Environment*, 41, 480-492.
- Tesche, M., A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, R. Engelmann, M. Hu, and Y. Zhang (2007) Particle backscatter, extinction, and lidar ratio profiling with Raman lidar in south and north China, *Applied Optics*, 46, 6302-6308.
- Veselovskii, I., A. Kolgotin, V. Griaznov, D. Müller, U. Wandinger, and D.N. Whiteman (2002) Inversion with

regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding, *Applied Optics*, 41, 3685-3699.

Veselovskii, I., A. Kolgotin, V. Griaznov, D. Müller, K. Fran-

ke, and D.N. Whiteman (2004) Inversion of multiwavelength Raman lidar data for retrieval of bimodal aerosol size distribution, *Applied Optics*, 43, 1180-1195.