

역행렬 알고리즘을 이용한 다파장 라만 라이다 데이터의 고도별 에어로졸 Microphysical Parameter 도출

Retrieval of Aerosol Microphysical Parameter by Inversion Algorithm using Multi-wavelength Raman Lidar Data

노영민 · 김영준* · Detlef Müller¹⁾

광주과학기술원 환경공학과, 환경 모니터링 신기술 연구센터,

¹⁾Leibniz-Institute for Tropospheric Research

(2006년 11월 14일 접수, 2007년 2월 13일 채택)

Young Min Noh, Young Joon Kim* and Detlef Müller¹⁾

Advanced Environmental Monitoring Research Center, Department of

Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology

¹⁾*Leibniz-Institute for Tropospheric Research*

(Received 14 November 2006, accepted 13 February 2007)

Abstract

Vertical distribution and optical properties of atmospheric aerosols above the Korean peninsula are quite important to estimate effects of aerosol on atmospheric environment and regional radiative forcing. For the first time in Korea, vertical microphysical properties of atmospheric aerosol obtained by inversion algorithm were analyzed based on optical data of multi-wavelength Raman lidar system developed by the Advanced Environmental Monitoring Research Center (ADEMRC), Gwangju Institute Science and Technology (GIST). Data collected on 14 June 2004 at Gwangju (35.10°N, 126.53°E) and 27 May 2005 at Anmyeon island (36.32°N, 126.19°E) were used as raw optical data for inversion algorithm. Siberian forest fire smoke and local originated haze were observed above and within the height of PBL, respectively on 14 June 2004 according to NOAA/Hysplit backstrajjectory analysis. The inversion of lidar optical data resulted in particle effective radii around 0.31~0.33 μm , single scattering albedo between 0.964~0.977 at 532 nm in PBL and effective radii of 0.27 μm and single scattering albedo between 0.923~0.924 above PBL. In the case on 27 May 2005, biomass burning from east China was a main source of aerosol plume. The inversion results of the data on 27 May 2005 were found to be particle effective radii between 0.23~0.24 μm , single scattering albedo around 0.924~0.929 at 532 nm. Additionally, the inversion values were well matched with those of Sun/sky radiometer in measurement period.

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

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-970-3401, E-mail : yjkim@gist.ac.kr

1. 서 론

대기에 존재하는 여러 성분들 중에서 에어로졸이 차지하는 비율은 비록 적은 부분일지라도 그들은 지구 복사 수지, 대기질, 구름 생성과 강우 변화뿐만 아니라 대류권 및 성층권에서의 화학변화에 상당한 영향을 미친다. 대기 에어로졸은 입사되는 태양광의 산란과 흡수에 영향을 미쳐 기후변화에 직접적인 영향을 주기도하고 간접적으로는 구름의 생성과 지속시간에 영향을 주어 기후변화에 영향을 준다(Haywood and Ramaswamy, 1998; Hansen *et al.*, 1997). 근래의 중국의 산업화로 발생하는 오염입자들과 건조지역의 확대로 봄철 황사입사 등은 지속적으로 증가하는 추세이다(Luo *et al.*, 2001). 이러한 에어로졸은 한곳에 머무르지 않고 기류를 타고 한반도로 이동하기도 한다. 또한 봄철에 중국 북동부와 시베리아 남동부 지역에서 매년 발생하고 있는 것으로 보고되고 있는 Biomass burning 에어로졸(Cahoon *et al.*, 1994)도 편서풍 기류를 타고 이동하여 한국의 대기에 영향을 미친다(Lee *et al.*, 2005). 동북아시아 지역에서 발생하여 편서풍을 타고 한반도 상공을 통과하여 이동하는 다양한 에어로졸들의 이동양상 및 광학적 특성 연구는 대기 에어로졸에 의한 기후변화 연구에 있어 중요한 부분이다. Sun/sky radiometer (Eck *et al.*, 2005)와 UV-MFRSR (Kim *et al.*, 2006)을 이용하여 동북아시아 지역에서의 대기 에어로졸의 광학적 특성 연구가 이루어져 에어로졸의 계절적 변화 특성을 연구하였으나 위의 연구들은 에어로졸의 정확한 이동특성을 밝힐 수 있는 고도별 분포 특성을 관측하지 못하였다. 대기 에어로졸의 고도분포와 광학적 특성의 실시간 관측이 가능한 라이다(LIDAR: Light Detection And Range) 장비는 에어로졸의 이동특성 관측에 유용한 장비이다. 현재 대부분의 국내 라이다 장비들은 대기 중 공기분자와 에어로졸의 탄성산란에 의한 후방산란광을 측정한다. 탄성 후방산란광만을 측정할 계산에서 라이다 식에 포함된 두 개의 미지수인 소산계수(Extinction coefficient)와 후방산란계수(Backscattering coefficient)에 의해 식은 복잡한 미분 방정식의 해석 과정을 거치게 된다(Fernald *et al.*, 1972). 이 과정에서 중요한 것은 에어로졸 소산계수를 후방산란계수로 나눈 값인 라이다 비(Lidar ratio)를 가정

하여 넣어주는 것과 데이터 분석이 시작되는 에어로졸이 존재하지 않고 공기분자만이 존재하는 구간을 기준고도를 설정하는 것이며(Fernald, 1984; Klett, 1981), 선택된 라이다 비와 기준고도에 따라 많은 오차를 발생시키기도 한다. 공기분자의 라만 산란광을 이용하는 라만 해석 방법은 해석 시 앞의 방법과 같은 가정을 하는 부분 없이 해석함으로써 데이터의 정확성이 높다(Ansmann *et al.*, 1992; Whiteman *et al.*, 1992). Müller *et al.* (1999a)은 라만 방법으로 계산된 두 파장에서의 소산계수(Extinction coefficient)와 세 파장에서의 후방산란계수(Backscattering coefficient)를 입력자료로 이용하여 입자의 유효경(effective radius), 단산란 알베도(single-scattering albedo), 굴절률(refractive index) 등과 같은 미세물리적 특성(microphysical parameter)을 분석할 수 있는 역행렬 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서는 다파장 라만 라이다로 관측된 광학적 특성값을 이용하여 미세물리적 특성을 분석하는 역행렬 알고리즘의 기본 이론을 설명하고 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다를 이용하여 2004년 6월 14일 광주와 2005년 5월 27일 안면도에서 관측된 대기 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성을 역행렬 알고리즘의 적용으로 밝히고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에 사용된 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템과 라만 방법을 이용한 소산계수 및 후방산란계수를 구하는 방법은 노영민 등(2006)에 설명되어있다. 라만 방법으로 계산된 고도별 에어로졸의 광학적 요소 값들은 Müller *et al.* (1999a, b)이 제안한 역행렬 알고리즘의 입력 자료로 사용하여 에어로졸의 미세물리적 특성값을 구하였으며, 계산 과정은 아래에 설명되어있다.

2.1 Microphysical parameter 계산

입자의 물리적 특성은 입자의 수직분포와 파장에 따른 소산계수와 후방산란계수를 이용하여 역행렬 알고리즘으로 계산된다. 광학적 값들은 식(1)에서 보는 바와 같이 첫번째 Fredholm적분식의 물리적 양에 관련되어 있다(Tikhonov and Arsenin, 1977; Shifin

and Perelman, 1964).

$$g_i(\lambda_k) = \int_{\min}^{\max} K_i(r, m, \lambda_k, s) v(r) dr + \varepsilon_i^{\text{exp}}(\lambda_k) \quad (1)$$

$$i = \beta_{\text{par}}, \alpha_{\text{par}}, k = 1, \dots, n$$

여기서 $g_i(\lambda_k)$ 은 파장 λ_k 에서 광학적 데이터를 나타낸다. 아래첨자 i 는 입력자료인 소산계수와 후방산란계수의 종류를 나타내며, 데이터는 $\varepsilon_i^{\text{exp}}(\lambda_k)$ 의 오차를 지닌다.

$v(r)$ 은 dr 간격의 입자반경 당 입자의 부피농도를 나타낸다. 광학적으로 유효한 최소 입자크기는 r_{\min} 으로 정의되며, 355 nm 이상의 파장대에서 유효한 최소 입자크기는 50 nm이다. 입자의 농도가 낮아 신호에 영향을 미치지 않는 최대입자크기는 r_{\max} 로 표시된다. 대류권에 존재하는 일반적인 에어로졸의 r_{\max} 값은 10 μm 보다 적은 값을 가진다.

$K_i(r, m, \lambda_k, s)$ 부분은 후방산란계수와 소산계수의 kernel efficiency를 나타내며, 이는 입자 크기 r , complex refractive index m , 파장 λ_k , 형태함수 s 에 의존한다. 본 연구에서 사용되는 알고리즘에서는 에어로졸의 형태를 구형으로 가정하여 계산함으로써 형태함수를 생략한다. 하지만, 에어로졸을 구형으로 가정하는 것은 많은 제약이 따르며, 특히 황사 입자와 같은 비구형성의 입자의 계산에서는 이 식을 사용할 수가 없다.

입자가 구형의 모양을 가진다면 kernel function $K_i(r, m, \lambda_k)$ 은 각각의 입자의 기하단면적 πr^2 이 가중된 소산효율(extinction efficiency)와 후방산란효율(backscatter efficiency)로부터 계산될 수 있다.

$$K_i(r, m, \lambda_k) = (3/4r)Q_i(r, m, \lambda_k) \quad (2)$$

식(1)은 분석적인 방법으로는 해결되지 않으며, 수치해석 과정(Tikhonov and Arsenin, 1977)은 소위 ill-posed inverse problem으로 귀결시킨다.

식(1)의 해석에서 크기분포 $v(r)$ 은 기수함수(base function) $\varepsilon^{\text{math}}(r)$ 와 가중인자(weight factor) w_j 의 선형조합으로 구성된다.

$$v(r) = \sum_j w_j B_j(r) + \varepsilon^{\text{math}}(r) \quad (3)$$

식(3)의 오른쪽 부분은 기수함수를 이용한 크기분포의 추정에서 발생하는 수리적 오차인 $\varepsilon^{\text{math}}(r)$ 을

포함한다. 본 연구에서는 입자의 크기분포를 표현하는데 효과적인 삼각형 형태의 기수함수가 알고리즘에 사용된다(Veselovskii *et al.*, 2002; Müller *et al.*, 1999a). 식(2)와 (3)을 식(1)에 삽입하고 벡터 행렬 식으로 표현하면

$$g = Aw + \varepsilon \quad (4)$$

로 나타난다. 광학 데이터는 $g = [g_p]$ 로 표현되며 여기서 $p = (i, \lambda_k)$ 는 광학 데이터의 종류와 개수를 나타낸다. 가중인자는 $w = [w_j]$, 오차 ε 은 $[\varepsilon_p]$ 로 표시되며 $\varepsilon_p = \varepsilon_p^{\text{exp}} + \varepsilon_p^{\text{math}}$ 로서 실험오차와 수리오차의 합이다. 가중행렬 $A = [A_{pj}]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{pj}(m) = \int_{\min}^{\max} K_p(r, m) B_j(r) dr \quad (5)$$

가중인자에 대한 식(4)의 해는

$$w = A^{-1}g + \varepsilon' \quad (6)$$

광학 데이터가 오차 허용치인 $\varepsilon' = -A^{-1}\varepsilon$ 의 범위 안에서 재현되더라도 적당한 결과를 도출하는 것에는 실패하였다(Twomey, 1977). 이것은 오차의 증가와 해의 비연속성을 이끄는 A 와 A^{-1} 요소가 가지는 여러 차수의 높은 변동성으로 설명이 된다. 이러한 이유로 역행렬의 해를 찾기 위하여 최소한도법(minimization) 개념이나 최소거리방법(the method of minimum distance)으로 불리는 regularization 과정이 필요하다. 이를 위하여 penalty function으로 불리는 e^2 가 도입된다. 이것의 간략한 Euclidian norm $\|\cdot\|$ 을 통한 정의는

$$e^2 \geq \|Aw - g\|^2 + \gamma \Gamma(v) \quad (7)$$

이다.

Penalty function은 물리적 문제에서 결정되는 해의 물리적 한계를 포함하고 있다. 본 연구에서 사용되는 알고리즘은 non-descriptive regularization으로 불리는 방법들을 사용한다(Böckmann, 2001). Smooth와 positive solution은 계산된 크기분포에서 가정된다. r_{\min} 과 r_{\max} 의 근처값에서 입자 크기분포가 나타내는 경향들은 제한조건으로 사용된다.

식(7)에서의 smoothing 제한요소는 추가적인 $\Gamma(v)$ 를 통하여 설명된다. $\Gamma(v)$ 는 음수를 취하지 않는 숫자로서 smoothing를 통하여 변환된 입자의 크기분포

$v(r)$ 에서 벗어나는 크기의 단위이다. 식 (7)은 weight vector w 를 나타내는 closed 형태로 변환될 수 있다. 식 (8)을 도출하기 위한 과정들은 Twomey (1977)과 Müller *et al.* (1999a)에 설명되어 있다.

$$w = (A^T A + \gamma H)^{-1} A^T g \quad (8)$$

A^T 는 행렬 A 의 전치행렬을 나타낸다. H 는 smoothing 행렬이고 γ 는 Lagrange multiplier이다.

만약, γ 의 차수가 몇 차수 증가한다면, Lagrange multiplier의 최저값은 식 (8)에서 최소값이 된다. 이 해석의 과정은 Müller *et al.* (1999a)와 Ansmann and Müller (2005)에 설명되어 있다.

여기까지 논의된 것들은 하나의 굴절률과 입력 광학 자료에 대한 각각의 하나의 예의 입자의 부피 농도를 구하는 것에 대한 설명이다. 결과는 더 많은 제한요소들에 의해서 변화될 수 있다. 측정 오차를 안다면 입자의 부피 농도들은 반복 계산된 광학 데이터들이 가지는 입력 광학자료들의 특정 불확실성 내에서 수용된다.

에서 수용된다.

제한된 역행렬 알고리즘의 타당성 검사는 라이다 분석 결과와 비행기에 장치된 in-situ 샘플러 관측 결과와의 비교를 통하여 검증되었다 (Veselovskii *et al.*, 2002; Wandinger *et al.*, 2002). 알고리즘의 분석 오차에 대한 연구는 Müller *et al.* (1999a)과 Veselovskii *et al.* (2002)에 의해 실시되었으며, microphysical parameter들이 가지는 오차는 표 1에 정리되어 있다. 입력자료로 사용되는 광학 데이터가 가지는 평균 오차는 <20%였으며, 라이다 관측으로 얻어진 데이터의 오차가 10% 정도였을 때 낮은 수치의 역행렬 분석 오차를 보였다.

Table 1. Range of mean errors of microphysical parameters.

Parameter	Range of mean error
Effective radius	~ 10% ~ 50%
Volume concentration	~ 10% ~ 50%
Surface-area concentration	~ 10% ~ 50%
Number concentration	> 30%
Complex refractive index, real part	~ ±0.07 ~ ±0.03
Complex refractive index, imaginary part	~ 30% ~ 100%
Single-scattering albedo	~ ±0.03 ~ ±0.07

3. 결 과

광주과학기술원의 다광장 라만 라이다 시스템을 이용한 에어로졸의 광학 데이터 관측은 2004년 2월부터 실시되었다. 관측일 중 심한 연무가 발생한 2004년 6월 14일과 2005년 5월 27일에 측정된 광학 데이터들을 이용하여 역행렬 알고리즘 분석을 실시하였다. 2004년 6월 14일 관측(이하 광주)은 광주 (35.10°N, 126.53°E)에서 실시되었으며 2005년 5월 27일(이하 안면도)은 안면도 해안에 위치한 지구대기감시관측소(KGAWO; 36.32°N, 126.19°E)에서 실시되었다.

3.1 광학 데이터 관측

광주와 안면도에서 실시된 라만 라이다 관측은 일

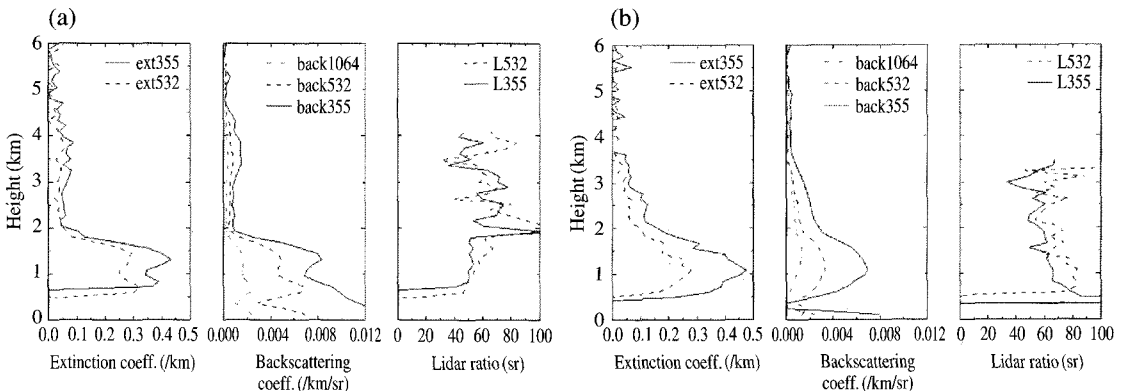


Fig. 1. Vertical profiles of the particle extinction coefficient at 355 and 532 nm, the particle backscattering coefficient at 355, 532, and 1,064 nm, the lidar ratio at 355 and 532 nm on (a) 14 June 2004 and (b) 27 May 2005.

물 후부터 일출 전까지의 밤시간에 실시되었으며, 관측 중에 대기 중에 구름은 관측되지 않았다. 광학데이터들의 분석방법은 노영민 등(2006)에서 설명된 방법으로 분석하였다. 그림 1(a)와 (b)는 라만 방법으로 분석된 355와 532 nm에서의 소산계수(Extinction

coeff.), 355, 532, 1,064 nm에서의 후방산란계수, 그리고 355와 532 nm에서의 라이다 비의 고도별 분포를 보여준다. 광주 관측에서 후방산란계수로부터 4.5 km 고도까지 에어로졸이 분포하고 있음을 알 수 있고 355와 532 nm, 두 파장 모두에서 측정이 되는 소산

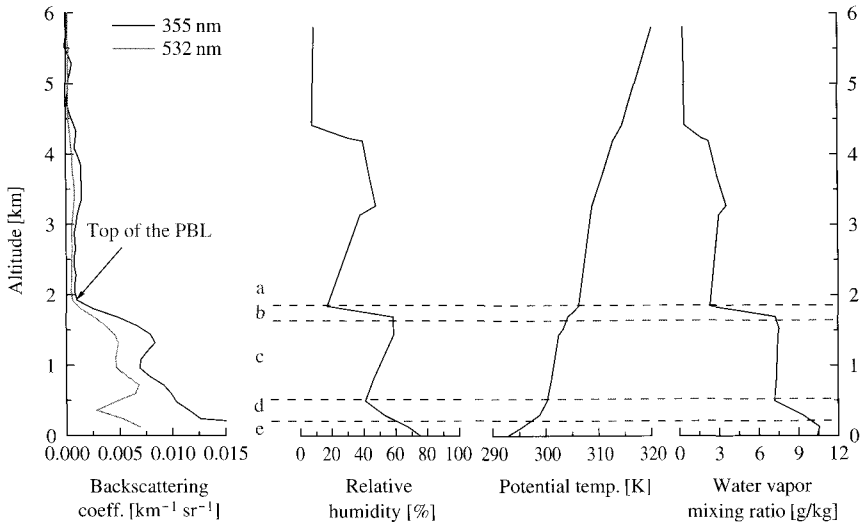


Fig. 2. Vertical profile of aerosol backscattering coefficient at 355 and 532 nm, relative humidity, potential temperature, and water vapor mixing ratio measured on 14 June 2004 at Gwangju, Korea. a: Free troposphere, b: Entrainment zone, c: Residual layer, d: Stable (Nocturnal) boundary, e: Surface layer.

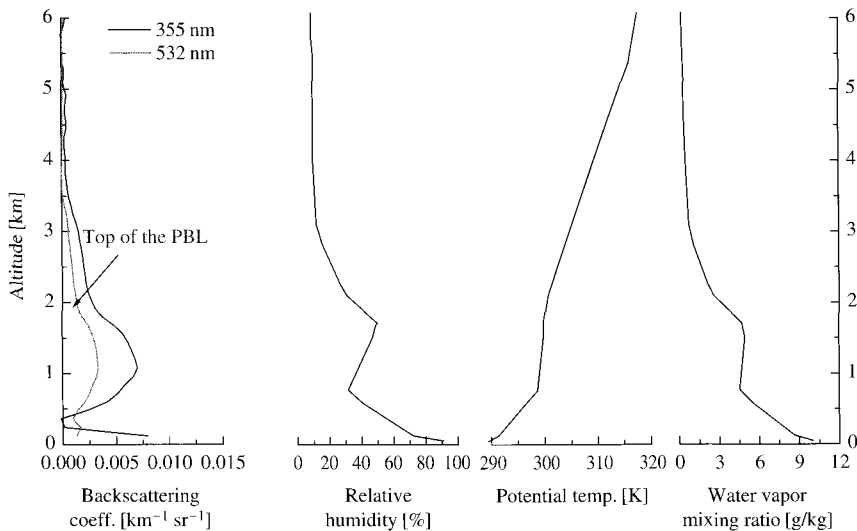


Fig. 3. Vertical profile of aerosol extinction coefficient at 355 and 532 nm, relative humidity, potential temperature, and water vapor mixing ratio measured on 27 May 2005 at Anmyeon island, Korea.

Table 2. Optical parameter observed by GIST Multi-wavelength Raman lidar.

	Height (km)	α_{355} (km^{-1})	α_{532} (km^{-1})	β_{355} ($\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$)	β_{532} ($\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$)	β_{1064} ($\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$)	S_{355} (sr)	S_{532} (sr)	\AA
Gwangju (June 14, 2004)	1.02~1.62	0.388	0.271	7.530E-03	4.520E-03	1.540E-03	52.04	60.06	0.88
	1.62~1.86	0.188	0.125	3.750E-03	2.020E-03	5.052E-04	51.03	61.81	1.03
	2.34~2.70	0.052	0.033	7.885E-04	5.342E-04	2.165E-04	68.56	61.83	1.22
	2.70~3.18	0.068	0.043	1.390E-03	7.064E-04	3.298E-04	49.26	61.84	1.16
	3.18~4.02	0.061	0.037	8.993E-04	5.713E-04	2.611E-04	69.17	64.56	1.22
Anmyeon (May 27, 2005)	0.78~1.38	0.435	0.254	3.170E-03	3.170E-03	1.030E-03	65.00	80.06	1.34
	1.50~1.86	0.275	0.162	2.360E-03	2.360E-03	1.180E-03	57.45	68.19	1.31
	1.86~2.34	0.140	0.079	1.240E-03	1.240E-03	7.739E-04	53.10	62.86	1.40
	2.34~2.70	0.113	0.061	9.124E-04	9.124E-04	6.151E-04	55.35	67.17	1.54
	2.70~3.18	0.075	0.042	6.344E-04	6.344E-04	4.797E-04	46.83	67.98	1.40

계수의 고도분포는 0.9~4.2 km이다. 안면도에서는 3.5 km 고도까지 에어로졸이 분포하고 최저관측고도는 0.7 km이다. 두 파장에서의 라이다 비의 변화는 532 nm에서의 값이 355 nm의 값보다 높은 특성을 보여주고 있다. 그림 2와 3은 라만 라이다로 관측된 에어로졸 소산계수의 고도분포와 광주(그림 2)와 오산(그림 3)에서 새벽 3시에 측정된 존테자료의 고도별 상대습도, 온도, 그리고 수증기 혼합비를 이용하여 대기의 연직분포를 분석한 그림이다. 광주관측의 경우 지상에서 200 m 고도까지의 접지경계층(Surface layer), 200~500 m의 안정경계층(Stable boundary layer), 그리고 500~1,600 m 사이의 잔여층(Residual layer)가 관측되어 일몰 후 발생하는 대기경계층의 명확한 형태를 보여주며(Stull, 1986) 대기경계층은 2 km 고도에 위치해있다. 라만 라이다의 고도별 소산계수분포를 보면 대기경계층을 경계로 내부에는 많은 에어로졸이 존재하나 상층에는 미약한 에어로졸만이 존재하여 대기경계층을 경계로 에어로졸 분포가 나뉘었음을 알 수 있다. 안면도 관측은 관측 지역이 해안이어서 700 m부근의 해양경계층(Marine boundary layer)이 존재하는 것으로 고려되나 대기경계층의 존재는 확인되지 않으며 명확한 층의 구분없이 3.5 km 고도까지 에어로졸이 분포함을 보여준다. 상대습도는 광주관측에서는 대기경계층 내부에서 60%의 값을 보이고 대기경계층 상층 에어로졸이 분포하는 3~4 km 구간에서 50%에 가까운 값을 보여준다. 이에 반해 안면도에서는 해양경계층인 700 m 이상의 고도에서는 최고값인 50% 보다 낮은 값을 보이고 2 km 이상의 고도에서는 20% 정도로 낮은 상대습도가 관측되었다.

표 2는 두 지역에서 측정된 광학 데이터 값들을 고도분포에 따라 5개의 구간으로 나누어 평균한 값을 보여준다. 중첩고도의 영향으로 정확한 관측이 이루어지지 않은 0.7 km(안면도 관측)와 1 km(광주관측) 이하의 관측값은 포함시키지 않았다. 355와 532 nm 두 파장에서의 소산계수를 이용하여 계산한 파장역지수(\AA ngström exponent)는 광주관측은 5개의 구간에서 1.22 이하의 값을 보이며, 특히 대기경계층 내부에서는 1 이하의 값을 보인 반면 안면도 관측은 모든 구간에서 1.3 이상의 값을 보여 광주에서 대기경계층 내부에서 입자가 큰 에어로졸이 관측되었다(Ansmann *et al.*, 2002a).

관측기간에 광주와 안면도에 도착하는 기단의 이동 경로를 파악하기 위하여 미국의 NOAA/ARL에서 개발한 HYSPLIT-4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 모델을 이용하여 유적선 분석을 하였으며(Draxler and Hess, 1998), 기상입력자료로는 미국 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)의 GDAS (Global Data Assimilation System) 자료를 북반구에 대해 극 평사도법을 이용하여 129×129 격자 간격으로 변환한 FNL (Final Run) 자료를 사용하였다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 라만 라이다 관측이 실시된 2004년 6월 14일 24시와 2005년 5월 27일 03시의 5일 역계적 유적선 분석 결과이다. 광주관측에서는 대기경계층 내부 기단(1,000 m)과 상층 기단(2,500, 3,500 m)의 이동경로는 북쪽에서 빠르게 이동하여 한반도로 진입하는 비슷한 경로를 보여주나 5일전 기단의 시작위치는 서로 다른 지역에서 발생하였음을 알 수 있다. 안면도 관측은 에어로졸이 관측된 모든 고도에서 유적선이 서

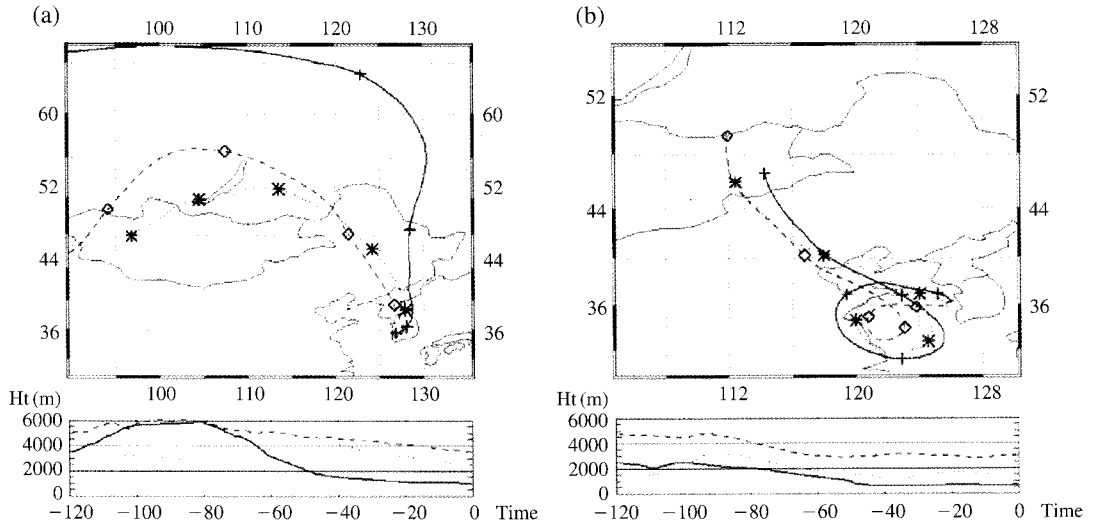


Fig. 4. Five day backward trajectories for different arrival heights over the lidar site. (a) 1,000 m (blue), 2,500 m (green), and 3,500 m (red) observed on 24:00 14 June 2004 at Gwangju. (b) 700 m (blue), 1,500 m (green), and 3,000 m (red) observed on 24:00 27 May 2005 at Anmyeon island.

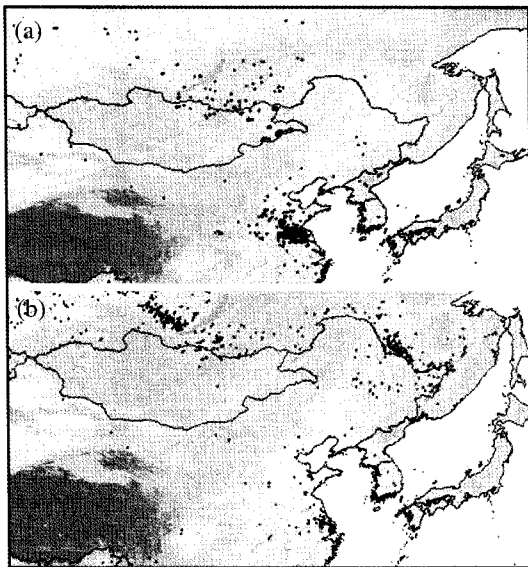


Fig. 5. Burnt area due to forest fires detected by Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) onboard the Terra satellite (<http://maps.geog.umd.edu/>). (a) From 11 to 12 June 2004 (b) From 22 to 25 May 2005.

해에서 맴돌고 있어 기단이 느리게 이동하고 한반도 서해 지역에서 정체된 형태를 나타낸다. 그림 5의 (a)

와 (b)는 미국 NASA 인공위성인 TERRA와 AQUA 로 2004년 6월 11일~12일과 2005년 5월 22~25일에 관측된 산불분석자료로 산불이 발생한 지역은 붉은 점으로 표시되어있다. 역궤적 분석에서 광주관측의 1,000 m 결과를 제외한 유적선들이 산불분석 자료에서 산불이 발생한 지역을 통과하여 이동함을 알 수 있다. 이를 통하여 광주 관측일 대기경계층 내부 에어로졸을 제외한 상층 에어로졸과 안면도에서 관측된 에어로졸이 산불에 인한 biomass burning 에어로졸인 것으로 판단된다.

3. 2 Mircophysical parameter

관측된 에어로졸의 자세한 광학적 특성을 파악하기 위하여 표 2에 고도별 구간으로 정리된 소산계수와 후방산란계수를 입력 자료로 사용하여 역행렬 알고리즘 분석을 실시하여 에어로졸의 미세물리적 특성을 파악하였다. 그림 6과 7은 역행렬 알고리즘으로 계산된 에어로졸의 미세물리적 특성값을 보여주고 있으며 결과값들의 수치는 표 3에 정리되어 있다. 그림 6, 7과 표 3에 표시된 오차는 허용 범위 내의 정확도로 반복 수행된 역행렬 알고리즘 분석값의 표준 편차로 계산된 값이다. 유효경 (Effective radius)의 고도별 분포는 그림 6에서 대기경계층 내부에는 0.3

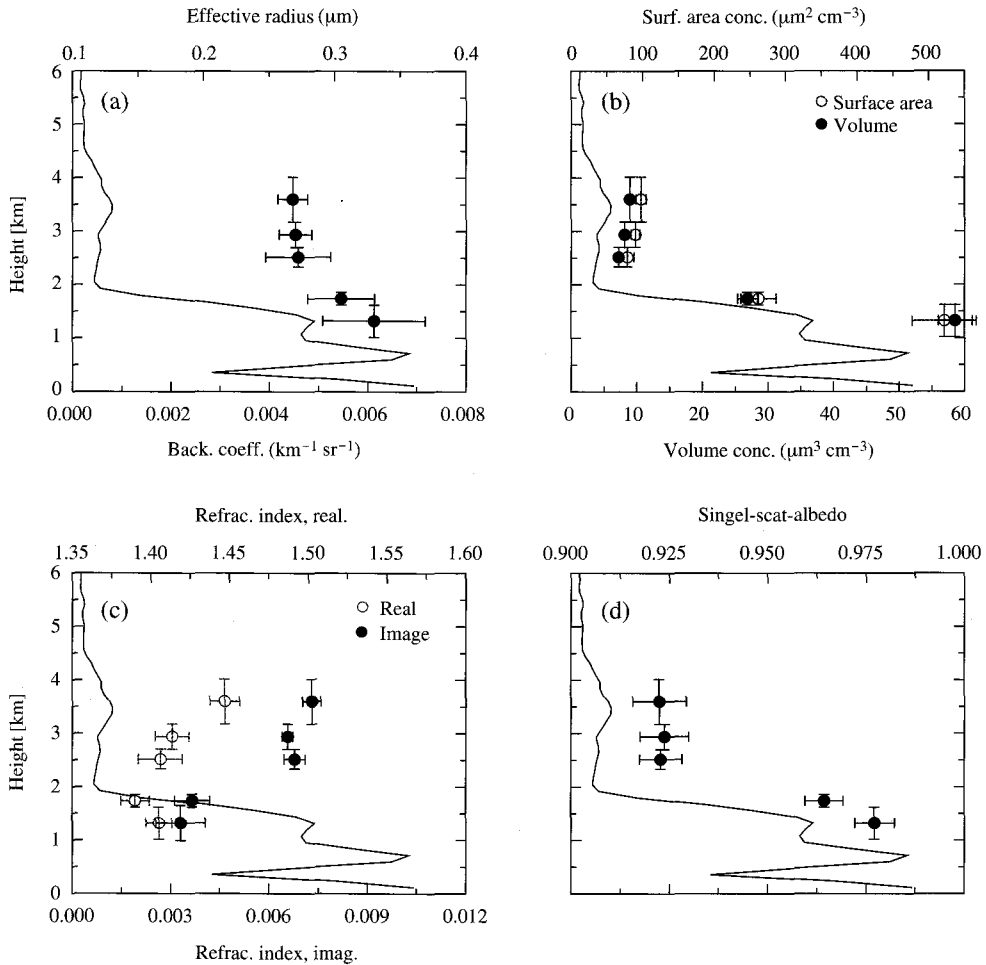


Fig. 6. Microphysical parameters observed on 14 June 2004. (a) Particle effective radius. (b) Surface area concentration (open circle) and Volume concentration (close circle). (c) Refractive index real part (open circle) and Refractive index imaginary part (close circle). (d) Single-scattering albedo at 532 nm. 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.

μm 보다 큰 입자들이 존재하나 상층에는 세 층의 평균값이 $0.27 \mu\text{m}$ 을 보여 대기경계층을 경계로 에어로졸의 입경분포가 달라졌으나, 안면도 관측은 유효경이 고도에 따라 분포범위가 $0.23 \sim 0.24 \mu\text{m}$ 로 고도별로 차이를 보이지 않았다. 다른 지역에서 관측된 biomass burning 에어로졸과 연무입자들의 유효경을 포함한 미세물리적 특성들은 표 4에 정리되어 있다. 산불에 의하여 발생된 biomass burning 에어로졸의 유효경은 발생지역에서부터 이동거리가 증가함에 따라

커지는 경향을 보이며 이는 Müller *et al.* (2005)이 보여준 결과와 일치한다. 그림 8은 파장역지수와 역행렬 알고리즘으로 계산된 유효경과의 상관관계를 보여주는 것으로 역학적 분석을 통한 에어로졸의 이동거리를 고려할 때 중국 동부지역에서 발생한 경우가 가장 적은 입경분포와 높은 파장 역지수 값을 가지며 시베리아 지역으로부터 발생된 것으로 고려되는 에어로졸은 이보다 큰 유효경을 보여준다. 하지만 이러한 유효경의 분포는 이동거리를 고려할 때 일본

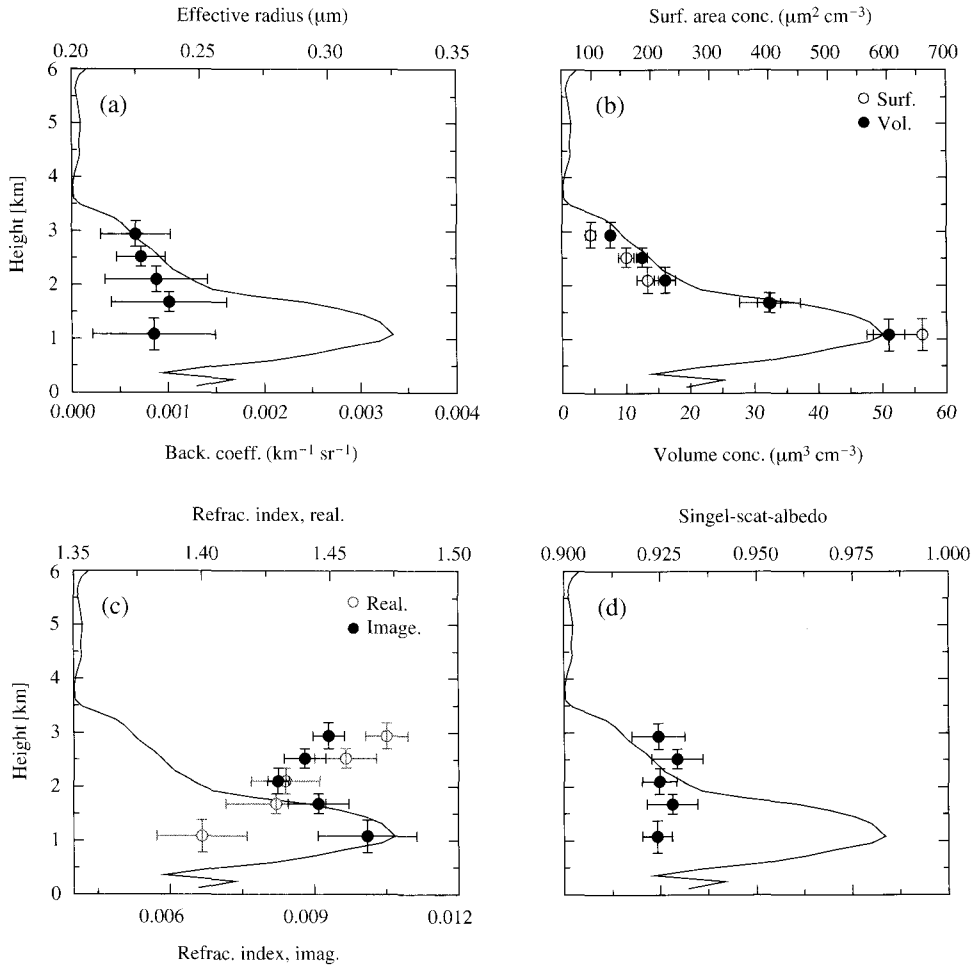


Fig. 7. Microphysical parameters observed on 27 May 2005. (a) Particle effective radius. (b) Surface area concentration (open circle) and Volume concentration (close circle). (c) Refractive index real part (open circle) and Refractive index imaginary part (close circle). (d) Single-scattering albedo at 532 nm. 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.

(Murayama *et al.*, 2004)과 북미(Eck *et al.*, 2003)에서 관측된 biomass burning 에어로졸의 유효경보다 큰 특성을 보였다. 광주 관측일 대기경계층 내부의 에어로졸은 국지적으로 발생한 연무로 가장 큰 입자가 분포하고 있음을 보여준다. 이는 그림 2에서 보여준 바와 같이 대기경계층 내부의 높은 상대습도의 영향으로 입자의 크기가 증가된 것으로 여겨진다.

복소굴절률(complex refractive index) 실수부분(real part) 값은 광주에서 대기경계층 내부는 1.39~1.405

이고 상층에서는 구간에서 값이 1.406~1.447로 값이 증가하였다. 안면도는 1.400~1.472이고 고도가 증가함에 따라 증가하는 특성을 보여주었다. 복소굴절률 실수부분은 상대습도가 높고 오염물질을 많이 포함할수록 낮은 값을 나타낸다(Müller *et al.*, 2005). 안면도 관측 결과는 그림 3에서 보여주듯이 고도가 증가하면서 감소하는 상대습도와 밀접한 관계를 보여준다. 다른 지역의 관측 결과와 비교할 때 광주 결과는 대기경계층 내부의 복소굴절률 실수부분이 낮

Table 3. Microphysical parameters calculated from inversion algorithm.

Date	Height (km)	$\gamma_{\text{eff}}, \mu\text{m}$	$S, \mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}$	$v, \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$	m_{real}	m_{image}	SSA
14-Jun-04	1.02 ~ 1.62	0.33 ± 0.04	522 ± 45	58.6 ± 2.6	1.405 ± 0.008	0.0033 ± 0.0008	0.977 ± 0.005
	1.62 ~ 1.86	0.31 ± 0.03	262 ± 25	26.9 ± 1.5	1.390 ± 0.009	0.0037 ± 0.0005	0.964 ± 0.005
	2.34 ~ 2.70	0.27 ± 0.02	79 ± 9	7.2 ± 0.3	1.406 ± 0.014	0.0068 ± 0.0003	0.923 ± 0.005
	2.70 ~ 3.18	0.27 ± 0.01	90 ± 6	8.2 ± 0.5	1.413 ± 0.011	0.0066 ± 0.0002	0.924 ± 0.006
	3.18 ~ 4.02	0.27 ± 0.01	98 ± 7	9.0 ± 0.4	1.447 ± 0.010	0.0073 ± 0.0003	0.923 ± 0.007
27-May-05	0.78 ~ 1.38	0.23 ± 0.02	659 ± 94	51.0 ± 2.5	1.400 ± 0.018	0.0101 ± 0.0010	0.924 ± 0.004
	1.50 ~ 1.86	0.24 ± 0.02	402 ± 51	32.3 ± 1.8	1.429 ± 0.019	0.0091 ± 0.006	0.928 ± 0.007
	1.86 ~ 2.34	0.23 ± 0.02	195 ± 18	16.1 ± 1.7	1.433 ± 0.013	0.0083 ± 0.0002	0.925 ± 0.004
	2.34 ~ 2.70	0.23 ± 0.01	159 ± 13	12.5 ± 0.9	1.456 ± 0.012	0.0088 ± 0.0004	0.929 ± 0.007
	2.70 ~ 3.18	0.23 ± 0.01	99 ± 8	7.6 ± 0.5	1.472 ± 0.008	0.0093 ± 0.0003	0.925 ± 0.007

The variable γ_{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.

Table 4. Particle effective Radius, Ångström Exponent, single-scattering albedo, and real and imaginary part of complex refractive index for forest fire smoke (a, b, c) and urban haze (d).

Source region	Observational area (Distance)	$\gamma_{\text{eff}}, \mu\text{m}$	Å	SSA	m_{real}	m_{image}	Reference
East/Central Siberia and central Canada ^a	Germany (~7,000~13,000 km)	0.36 ± 0.05	0.71 ± 0.44	0.93 ± 0.03	1.48 ± 0.06	0.003 ± 0.003	Müller <i>et al.</i> (2005)
West Canada ^b	Germany (~8,000 km)	0.27 ± 0.04	~0.06	0.83 ± 0.06	1.55~1.66	0.05 ± 0.02	Wandinger <i>et al.</i> (2002)
East/central Siberia ^c	Japan (~3,000~4,000 km)	0.22 ± 0.04	1.35 ± 0.28	0.94 ± 0.07	-	0.003 ± 0.003	Murayama <i>et al.</i> (2004)
Eastern Europe ^d	Germany	0.19 ± 0.04	1.8~2.8	0.97 ± 0.06	~1.45	~0.003	Müller <i>et al.</i> (2004)

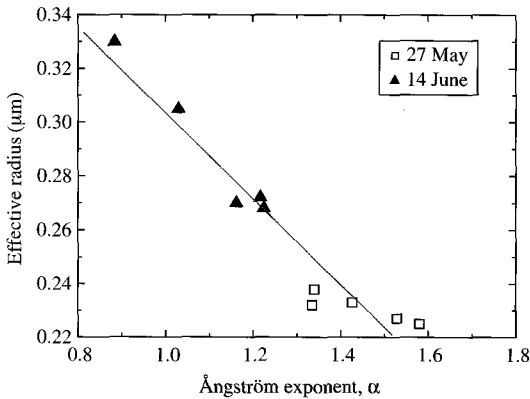


Fig. 8. Correlation plot of effective radius versus Ångström exponent. Open square denotes observed on 14 June 2004 and closed triangle denotes observed on 27 May 2005.

은 값을 보여 상대습도 변화와 더불어 대기경계층 내부에 존재하는 오염물질의 영향을 많이 받은 것으

로 사료되며 이러한 영향은 안면도에서도 발생된 것으로 보인다. 복소굴절률 허수부분 (imaginary part)과 532 nm에서의 단산란알베도 (single scattering albedo) 값의 분포를 살펴보면 광주와 안면도에서 관측된 에어로졸이 서로 다른 광학적 특성을 지님을 명확히 알 수 있다. 단산란 알베도 값을 보면 광주관측에서 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) 광주관측의 대기경계층 상층부와 안면도 관측은 0.92~0.93으로 높은 광흡수 특성을 보이는 biomass burning 에어로졸의 특성을 보여 두 관측 사이에 다른 광학적 특성을 지니는 에어로졸이 관측되었음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합하면 광주에서 관측된 대기 에어로졸은 대기경계층을 경계로 기단의 이동경로와 단산란 알베도 값의 분포로부터 내부는 밤 사이 낮은 온도하강과 상대습도의 영향으로 비교적 큰 입자로 이루어진 국지적으로 발생한 연무가 주요한 구

Table 5. Real and imaginary part of complex refractive index and single-scattering albedo derived from Sun/sky radiometer at Gwangju, Korea.

Date	λ	m_{real}	m_{image}	SSA
14-Jun-04	441 nm	1.405	0.00250	0.976
	673 nm	1.442	0.00256	0.972
27-May-05	441 nm	1.434	0.01009	0.928
	673 nm	1.433	0.00968	0.908

성원으로 판단되며, 상층은 시베리아 지역에서 산불에 의해 발생된 biomass burning 에어로졸인 것으로 사료된다. 안면도의 경우는 중국 동부지역에서 발생된 biomass burning 에어로졸이 주 구성원으로 판단된다. Müller *et al.* (2004)은 도시지역에서 발생된 연무현상을 다파장 라만 라이다로 관측하였는데 이 때 단산란 알베도 값이 0.97로 광주 관측과 유사한 값을 보였으나 유효경은 0.19 μm 로 많은 차이를 보였다. 이는 광주의 관측시 상대습도는 60%였으나 Müller의 관측이 실시된 Leipzig (51.3N, 12.4E)에서는 40% 이하로 두 지역간의 상대습도의 영향이 많이 작용한 것으로 판단된다.

표 5는 AERONET (AErosol RObotic NETwork) 역행렬 알고리즘 (Dubovik and King, 2000)으로 분석된 Sun/sky radiometer의 단산란 알베도와 복소굴절률을 나타낸다. 2005년 5월 27일에는 안면도에서는 Sun/sky radiometer 관측이 이루어지지 않아 같은 기간의 광주에서 관측된 결과를 표시하였으며 441 nm와 673 nm의 두 파장에서의 값으로 표시하였다. 2004년 6월 14일의 경우 대기경계층 내부 (1.02~1.86 km)에서의 라만 라이다 관측 결과와 Sun/sky radiometer 관측 결과가 유사한 값을 보였으며 2005년 5월 27일 또한 두 시스템의 관측 결과가 유사한 결과를 보였다. Sun/sky radiometer는 낮 시간대에 관측되었고 라만 라이다는 밤에 관측이 실시되어 두 관측 결과의 시간차이를 고려할 때 잘 일치되는 결과를 보여주며 이는 낮부터 밤까지 발생된 에어로졸의 특성이 변화되지 않았음을 나타낸다. 특히 2004년 6월 14일의 경우 Sun/sky radiometer 관측 결과가 라만 라이다의 대기경계층 내부의 관측 결과와 일치되는 것은 대기경계층 내부의 에어로졸이 Sun/sky radiometer 관측에 영향을 주었고 상층의 에어로졸은 전체 농도 분포에 작은 부분을 차지하여 영향을 미치지 못한

것으로 사료된다.

4. 결 론

국내 처음으로 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다로 관측된 데이터를 입력자료로 사용한 역행렬 알고리즘으로 대기 에어로졸의 미세물리적 특성을 고도별로 분석하였다. 분석에 사용된 광학 데이터는 2004년 6월 14일 광주와 2005년 5월 27일 안면도에서 관측된 자료를 이용하였다. 이 두 날은 맑은 날에 비하여 높은 농도의 에어로졸이 관측된 날로 광주의 경우 에어로졸은 4.5 km 고도까지 분포하고 있었으며 안면도는 3.5 km까지 분포하였다. 광주 관측은 존테자료와 라이다의 비교분석을 통하여 대기경계층이 명확히 존재함을 알 수 있었으며 이 층을 경계로 내부에는 지역에서 발생한 연무가 존재하였으나 상층에는 시베리아 지역에서 발생된 biomass burning 에어로졸이 관측되었다. 대기경계층을 경계로 유효경의 경우 내부는 0.3 μm >의 큰 입자가 존재하였으나 상층은 0.27 μm 로 작은 크기의 에어로졸이 존재하였으며, 단산란 알베도 값도 내부와 상층에서 각각 0.964~0.977과 0.923~0.924로 명확히 구분되는 광흡수 특성을 보여주었다. 안면도에서는 대기경계층이 명확하게 구분되지 않았으며 미세물리적 특성을 분석한 고도별 에어로졸 유효경 분포와 단산란 알베도 값이 각각 0.23~0.24 μm 와 0.924~0.929로 고도에 따른 차이를 보이지 않아 같은 종류의 에어로졸이 분포함을 알 수 있었다. 안면도에서 관측된 에어로졸은 국지적으로는 이 기간이 5월 중순경부터 농촌지역에서 보리 추수 끝내고 발생된 부산물을 태움으로써 많이 발생하는 biomass burning 에어로졸 (Ryu *et al.*, 2004)과 역계적 분석으로부터 중국 동부지역에서 발생된 biomass burning 에어로졸의 영향을 받은 것으로 고려할 수 있다. 하지만, 분석이 실시된 고도가 0.8 km 이상에서 실시되었고 관측지역에 해안이어서 해양경계층의 존재를 고려한다면 중국으로부터 장거리 이동된 biomass burning 에어로졸이 주요한 영향을 미친 것으로 사료된다. 역행렬 알고리즘 분석 결과는 Sun/sky radiometer 관측 결과와 비교하였을 때 낮과 밤의 시간차를 고려할 때 일치된 결과를 보여주었다.

본 연구를 통하여 광주과학기술원의 다파장 라만

라이다를 이용한 대기 에어로졸의 관측과 역행렬 알고리즘을 이용한 대기 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성 분석은 성공적인 결과를 보여주었다. 본 시스템과 분석방법을 통한 지속적인 대기 에어로졸의 연구는 동북아시아 지역에서 발생하여 편서풍 기류를 타고 이동하는 다양한 종류의 대기 에어로졸의 광학적 특성 및 이동과정을 설명하는 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2007-4108)의 지원으로 수행되었습니다. 참여연구원 노영민은 BK21사업의 지원을 받아서 수행하였습니다.

참고 문헌

노영민, 김영민, 김영준, 최병철 (2006) GIST/ADEMRC 다과장 라만 라이더 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이더 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.

Ansmann, A., F. Wagner, D. Müller, D. Althausen, A. Herber, W. von Hoyningen-Huene, and U. Wandinger (2002a) European pollution outbreaks during ACE 2: Optical particle properties inferred from multiwavelength lidar and star-Sun photometry, *J. Geophys. Res.*, 107(D15), 4259, doi:10.1029/2001JD001109.

Ansmann, A. and D. Müller (2005) Lidar and atmospheric aerosol particles, in *Lidar. Range-resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, edited by C. Weitkamp, Springer, New York, 105-141.

Bockmann, C. (2001) Hybrid regularization method for the ill-posed inversion of multiwavelength lidar data in the retrieval of aerosol size distributions, *Appl. Opt.*, 40, 1329-1342.

Cahoon, D.R. Jr., B.J. Stocks, J.S. Levine, W.R. Cofer III,

and J.M. Pierson (1994) Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and south-eastern Siberia, *J. Geophys. Res.*, 99, 18627-18638.

Draxler, R.R. and G.D. Hess (1998) An Overview of the Hysplit_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition, *Aust. Met. Mag.*, 47, 295-308.

Dubovik, O. and M.D. King (2000) A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol Optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 105, 20673-20696.

Eck, T.F., B.N. Holben, J.S. Reid, N.T. O'Neill, J.S. Schafer, O. Dubovik, A. Smirnov, M.A. Yamasoe, and P. Artaxo (2003) High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions, *Geophys. Res. Lett.*, 30(20), 2035, doi:10.1029/2003GL017861.

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.

Fernald, F.G., B.M. Herman, and J.A. Reagan (1972) Determination of Aerosol Height Distribution by Lidar, *J. Appl. Meteorol.*, 11, 482-489.

Fernald, F.G. (1984) Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments, *Appl. Opt.*, 23, 652-653.

Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy (1997) Radiative forcing and climate response, *J. Geophys. Res.*, 102, 6831-6864.

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.

Kim, J.E., Z. He, and Y.J. Kim (2006) Temporal Variation and Measurement Uncertainty of UV Aerosol Optical Depth Measured from April 2002 to July 2004 at Gwangju, Korea, *Atmospheric Research*, 81(2), 111-123.

Klett, J.D. (1981) Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Appl. Opt.*, 20(2), 211-220.

Lee, K., H. Lee, 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.

- Luo, Y., D. Lu, X. Zhou, and W. Li (2001) Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years, *J. Geophys. Res.*, 106, 14501-14513.
- 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., U. Wandinger, and A. Ansmann (1999b) Microphysical parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Simulation, *Appl. Opt.*, 38, 2358-2368.
- 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.
- 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.
- 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, L23103.
- Ryu, S.Y., J.E. Kim, H. Zhuanshi, and Y.J. Kim (2004) Chemical Composition of Post-Harvest Biomass Burning Aerosols in Gwangju, Korea, *AWMA*, 1124-1137.
- Shifin, K.S. and A.Y. Perelman (1964) Calculation of particle distribution by the data on spectral transparency, *Pure Appl. Geophys.*, 58, 208-220.
- Stull, R.B. (1986) An introduction to Boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-25.
- Tikhonov, A.N. and V.Y. Arsenin (1977) Solutions of Ill-posed Problems, John Wiley, New York, 258 pp.
- Twomey, S. (1977) Introduction to the mathematics of inversion in remote sensing and indirect measurements, Elsevier, Amsterdam, 243 pp.
- 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, *Appl. Opt.*, 41, 3685-3699.
- Wandinger, U., D. Müller, C. Bockmann, D. Althausen, V. Matthias, J. Bosenberg, V. Weiss, M. Fiebig, M. Wendisch, A. Stohl, and A. Ansmann (2002) Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multiwavelength lidar and aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, 107(D21), 8125, doi:10.1029/2000JD000202.
- Whiteman, D.N., S.H. Melfi, and R.A. Ferrare (1992) Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere, *Appl. Opt.*, 31, 3068.