

## 스카이라디오미터 관측을 통한 서울 상공 에어러솔의 광학적 특성 분석

구자호<sup>1</sup> · 김 준<sup>1,\*</sup> · 김미진<sup>1</sup> · 조희구<sup>1</sup> · Kazuma Aoki<sup>2</sup> · Maki Yamano<sup>3</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대기과학과 지구환경연구소

<sup>2</sup>Department of Earth Science, University of Toyama, Japan

<sup>3</sup>Center for Climate System Research, University of Tokyo, Japan

(2007년 8월 11일 접수; 2007년 12월 29일 승인)

## Analysis of Aerosol Optical Properties in Seoul Using Skyradiometer Observation

Ja-Ho Koo<sup>1</sup>, Jhoon Kim<sup>1,\*</sup>, Mi-Jin Kim<sup>1</sup>, Hi Ku Cho<sup>1</sup>, Kazuma Aoki<sup>2</sup> and Maki Yamano<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IEEA, BK21 program, Global Environmental Laboratory/Department of Atmospheric Sciences,  
Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science, University of Toyama, Japan

<sup>3</sup>Center for Climate System Research, University of Tokyo, Japan

(Manuscript received 11 August 2007; in final form 29 December 2007)

### Abstract

Optical characteristics of aerosols in Seoul are investigated from the measurements of sky radiance by Skyradiometer at Yonsei University from December 2005 to November 2006. Aerosol optical depth (AOD) shows a maximum in June due to weak ventilation and particle growth by aging process and hygroscopic effect. Single scattering albedo (SSA) and Angstrom Exponent (AE) show the lowest value in spring due to the Asian dust. It is clear that coarse mode is dominant in spring and fine mode is dominant in summer from the volume size distribution measured in this study. The explanations on the changes of aerosol loadings are provided through the correlation between AOD and AE, while the pattern of wavelength dependency related to particle size is shown through the correlation between SSA and AE. Backward trajectory analysis by HYSPLIT provides information about origin of aerosol, which allows us to classify the case according to the source region and the path distance. Although the direction of backward trajectory traces back mostly to west, coarse mode particle is dominant in the case of long pathway and fine mode particle is dominant in the case of short pathway. This discrepancy is caused by the regional difference of emitted particles.

**Key words:** Aerosol optical depth, Skyradiometer, Single Scattering albedo, Angstrom Exponent, Volume Size Distribution, Back Trajectory

### 1. 서 론

동아시아 지역은 연중 자연적, 그리고 인위적 에어러솔의 발생으로 대기환경 및 기후에 많은 영향을 미

치고 있어, 전세계의 관심을 받고 있는 지역이다. 이러한 대기 중의 에어러솔은 기후 변화에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 에어러솔이 기후변화에 미치는 영향력은 크게 지표로 입사되는 태양복사에너지를 흡수, 반사, 산란하는 직접적인 효과 (Charlson *et al.*, 1992)와 구름 응결핵으로 작용하여 구름의 발생 빈도 및 지속시간에 영향을 주는 간접적인 효과 (Rosenfeld, 2000)로 나뉘어 진다. 이러한 에어러솔에 의한 복사 강제력의 변화에 대해서는 지속적인 연구가 진행되어 오고 있지만 아직까지도 많은 불확실성을 가

\*Corresponding Author: Jhoon Kim, Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea.  
Phone : +82-2-2123-5682, Fax : +82-2-365-5163  
E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

지고 있다 (e.g. IPCC, 2007). 특히 최근 도심지역이 점차 확장되면서 주변지역을 포괄하는 광역화가 이루어지고 있으며, 인구가 밀집한 대도시의 특성을 지니는 곳이 증가하면서 대도시에서 인위적 요인에 의해 배출되는 에어러솔이 주변 기후에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 날로 증대되고 있다. 이러한 연구들을 위해서는 대도시에서의 에어러솔의 광학적 특성을 분석하고 그 변화를 이해하는 것이 매우 중요하다.

에어러솔 관측은 AERONET (Aerosol Robotic Network) (e.g. Holben *et al.*, 1998)과 SKYNET (SKYradiometer NETwork, Kim *et al.*, 2004)을 포함하는 지상관측망과 함께 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) 등과 같은 위성원격탐사에 의해서 이루어지는데 (e.g. Remer *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2007), 위성의 경우 아직까지 육지지역에서는 높은 지표 반사도의 영향으로 인해 관측 결과 자료의 신뢰도가 다소 떨어지므로 (Remer *et al.*, 2005), 지상 관측망에 의한 대기질 모니터링은 그 정확한 관측 외에도 위성 관측 자료를 검증하는데 있어서도 매우 중요하다.

이와 같은 관측망에서 산출된 자료를 이용하여 그동안 에어러솔의 특성에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. Eck *et al.* (1999)은 에어러솔 광학깊이 (Aerosol Optical Depth, AOD)와 옴스트롬 지수 (Angstrom Exponent)와의 상관관계를 통하여 미세입자의 성장이 광학깊이에 기여한다는 사실을 밝혀내었고, AOD의 파장에 대한 의존도와 부피 크기 분포의 형태가 지역적인 특성에 민감하게 반응하여 입자의 크기에 따라 차이를 나타내고 있음을 보였다. 특히 에어러솔의 배출량이 많은 동북아시아 주변을 중심으로 활발한 연구가 진행되었는데, Kim *et al.* (2004)은 SKYNET 관측소 중 만달고비(Mandalgovi), 둔황 (Dunhuang), 인촨 (Yinchuan), 스리삼롱 (Sri-samrong) 네 지점에 대하여 AOD, 단일산란알베도, 옴스트롬 지수, 부피크기분포와 같은 에어러솔의 광학적 특성들의 분석을 통해 사막지역 및 산업 활동으로 인해 오염물질 배출이 많은 지역의 대기의 특성에 대해 살펴보았다. Eck *et al.* (2005)는 AERONET 관측소 중에서 동아시아 및 태평양 중부 지역을 대상으로 9개의 지점을 선정하여 위에서 언급한 파라미터들의 월평균 특성 및 파장에 따른 특징을 살펴봄으로서 동아시아 지역에서 황사가 발생하는 3월에서 5월까지의 기간 동안에 AOD가 최대값을 나타내고 옴스트롬 지수가 최소값을 나타낸다는 결과를 얻었다. Aoki and Fujiyoshi (2003)와 곽종흠 등

(2005) 역시 유사한 방식의 연구를 각각 삿포로와 공주에서 스카이라디오미터에 의해 지속적으로 관측된 자료를 이용하여 수행하여 왔다. 이와 같은 연구들은 지역적 특성에 따라 대기 중의 에어러솔의 특성 및 분포가 어떻게 차이를 보이는지에 대해서 의미 있는 많은 결과물들을 산출해왔다. 또한 에어러솔의 특성은 관측 지점에서 배출되는 입자들뿐만 아니라 외부로부터 수송되는 입자의 특성에도 관련이 있으므로 대기가 유입되는 경로를 살펴보는 분석도 중요하다. 이러한 외부대기와 의 연관성을 보다 더 상세하게 살펴보기 위해 HYSPLIT4 모델 (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory 4, Draxler and Rolph, 2003)을 이용한 역궤적 경로 분석은 이류의 시작점과 경로, 방향에 따라 분석 지점의 에어러솔 특성의 차이를 보여 주며, 이러한 측면은 다수의 선행연구에서 신뢰할만한 결과와 함께 검증되어 왔다 (e.g. Moorthy and Babu, 2006).

본 연구에서는 스카이라디오미터 자료의 분석을 통해 서울 지역의 에어러솔의 광학적 특성에 대해서 살펴보고자 하였다. 특히 서울의 경우 대도시로서 인위적인 활동으로 인해 배출되는 에어러솔의 특성이 나타남과 동시에 황사와 같은 자연 발생적인 에어러솔의 영향력 또한 살펴볼 수 있을 것으로 기대되는 지역으로서 과거에도 많은 연구가 진행되어 왔다 (e.g. Cho, 1981; Kim *et al.*, 2006). 본 연구에서는 이와 같은 선행 연구 결과를 바탕으로 그동안 주로 개별적으로 다루어져 온 에어러솔 광학적 파라미터들의 특성들을 상호 비교하여 함께 살펴봄으로서 이전에 비해 보다 진전된 의미 있는 분석을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 관측 정보

### 2.1 위치 정보

대한민국의 수도인 서울은 인구는 약 960만명, 수도권을 포함할 경우 약 2300만명에 달하는 세계적으로 대표적인 메가시티 (megacity, 사전적 정의에 따라 인구 100만 이상의 도시를 의미)중의 하나다 (UN World Urbanization Prospects Report, 2005). 이 지역은 계절적으로 여름과 겨울, 건기와 우기의 구분이 뚜렷하며 계절의 변화에 따라 바람의 방향이 북서풍과 남동풍 사이에서 변화하고 있어 풍향에 따라 수송되어 온

입자의 특성에 차이를 보인다. 특히 매년 2월 하순에서 4월 하순까지는 중국 내륙지역으로부터 발생한 황사가 유입되고 있으며 그 발생빈도와 강도는 해가 갈수록 증가하고 있는 상황이다. 본 연구에 사용된 관측기기가 설치된 연세대학교 과학관은 동경 126.98°, 북위 37.57°, 고도 86 m 지점에 위치해 있으며, 도심 한복판에 위치하고 있으면서도 건물, 도로, 공장 등에 의한 방해 요소가 없는 장점을 가지고 있다. 그러므로 현 위치에서 관측되는 자료는 인접지역의 국지적인 오염원이나 에어러솔의 배출에 비교적 큰 영향을 받지 않고 서울 지역의 일반적인 대기 상태를 잘 보여줄 수 있다.

Fig. 1은 서울지역에서 측정된 2005년 12월부터 2006년 11월까지의 1년 동안의 온도, 대기압, 상대습도의 월평균 값과 월 총강수량의 값 및 강수일수를 시계열로 나타낸 그림이다. 자료는 연세대학교 과학관에 설치된 AWS (Automatic Weather System)로부터 측정을 하였고 강수량자료의 경우만 기기 문제로 인해 기상청에서 관측한 값을 사용하였다. 기압의 경우 북쪽의 찬 시베리아 고기압의 영향을 받는 건조한 겨울철에 기압이 높고 장마와 태풍의 영향이 있는 여름에 기압이 낮아지는 모습을 보이고 있는데, 이는 일사조건

의 차이로 인해 여름에 높고 겨울에 낮게 나타나는 기온의 연 변화 추세와는 반대로 나타나는 측면이 있다. 또한 맑은 날씨가 자주 있는 가을철에는 기압배치가 비교적 불안한 봄철보다 평균기압이 높게 나타난다. 습도와 강수량의 경우는 비슷한 패턴을 보이고 있는데, 장마가 가장 강하게 나타나는 7월에 월평균 80%의 상대 습도와 약 1000 mm의 월 총강수량으로 연중 최고를 나타내고 있다. 그러나 강수의 경우 7월 이외에는 약 1/5 수준인 200 mm 이하의 월 총강수량을 보이고 있으므로 전체적으로 볼 때 강수의 영향을 살펴볼 수 있는 시기는 7월 부근으로 좁혀진다. 이와 같이 서울 지역은 춥고 건조한 겨울, 습하고 더운 여름의 특성이 뚜렷하게 대비되어 나타나는 기후적 특성을 보인다.

## 2.2 기기 및 자료 정보

연세대학교 과학관에 설치된 스카이라디오미터 (PREDE, model POM-02)는 태양직달 및 산란 복사량을 측정하는 장비로 총 11개 파장에서 10분 간격으로 초기자료를 생산하고 있다. 스카이라디오미터의 관측방법은 크게 연직으로 각도를 변화시키면서 관측을 수행하는 Principal 측정법과 수평방향으로 각도를 변화시키면서 관측하는 Almicantar 측정법으로 크게 나눌 수 있다 (Fig. 2a). 이러한 방법으로 측정된 초기값들은 Nakajima *et al.*, (1996)이 고안한 Skyrad.pack ver4.2 모델에 입력되어 에어러솔 광학깊이(AOD), 단일산란 알베도, 부피크기분포, 위상함수와 같은 광학적 특성을 나타내는 파라미터로 계산된다. Fig. 2(b)는 Skyrad.pack 에서 사용되는 반전 방법 (inversion method)의 순서도를 나타낸 그림이다 (Nakajima *et al.*, 1996). 이 알고리즘에서는 단색광에서의 관측한 산란 복사 휘도 값 대신에 직달 복사량에 대한 산란 복사 값의 비  $R(\theta)$ 를 초기 추정 값으로 가정하고, 관계식에 의해 역으로 단위 단면에 대한 공기기둥 내의 에어러솔의 컬럼 내 부피 스펙트럼 (Columnar volume spectrum)  $v(r)$ 을 산출한 다음 복사전달 방정식에 의해 다시  $R(\theta)$ 을 계산하여 구한다. 이렇게 산출한 값과 측정된 값의 차이가 허용 오차 범위 내에 들어올 때까지 반복계산 (iterative calculation)을 수행하여 앞서 언급한 에어러솔 파라미터들이 산출 된다. 본 연구에서는 2005년 12월부터 2006년 11월까지 1년 동안 11개 채널 중 340, 380, 400, 500, 675, 870, 1020 nm의 7개 채널에서 자료를 산출, 분석하였다. 관측 기간 중 2006년 3월은 기

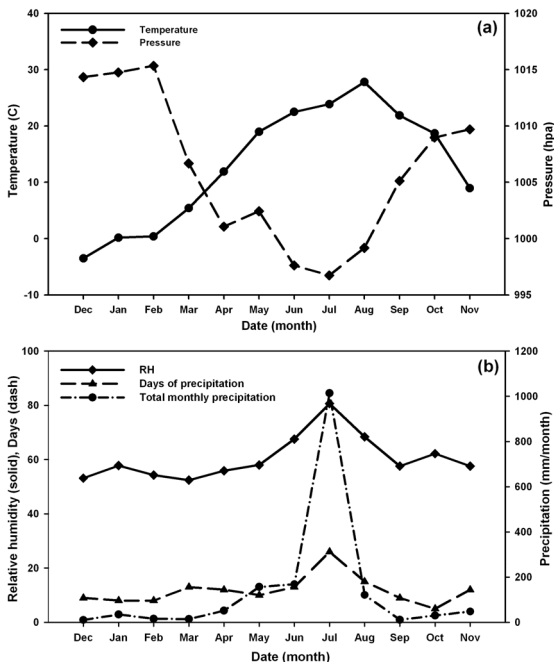


Fig. 1. Monthly mean (a) temperature, pressure (b) relative humidity, the days of precipitation, and total monthly precipitation which are measured by AWS of Yonsei University, Seoul (126.98E, 37.57N).

기 문제로 인해 관측이 원활하게 수행되지 않아서 자료의 품질이 좋지 않아 분석에서 제외하였다. 그 밖에도 강수 등에 의해 관측이 이루어지지 않은 날을 제외한 계절분석에 사용가능한 자료 일 수는 겨울에는 73일, 봄에는 39일, 여름에는 60일, 가을에는 81일이다.

한편 국지적인 에어러솔의 분포 특징에 대해 더 정확한 고찰을 하기 위해 에어러솔이 수송되어오는 과정

을 미국 국립해양대기관리청 (NOAA)에서 개발한 HYSPLIT4 모델을 이용하여 이류경로를 역추적 산출하고 그에 따른 에어러솔 특성의 차이를 분석하였다. 본 연구에서는 연세대학교 과학관 관측 장소에 도착한 이류의 역궤적을 3일전까지 거슬러 가는 과정을 6시간 간격으로 대상 기간 전체에 대해 계산하여 구한 후 풍향과 진행거리를 기준으로 4가지 경우로 나누어 분석하였다. 상세한 내용은 3.2절에 서술되었다.

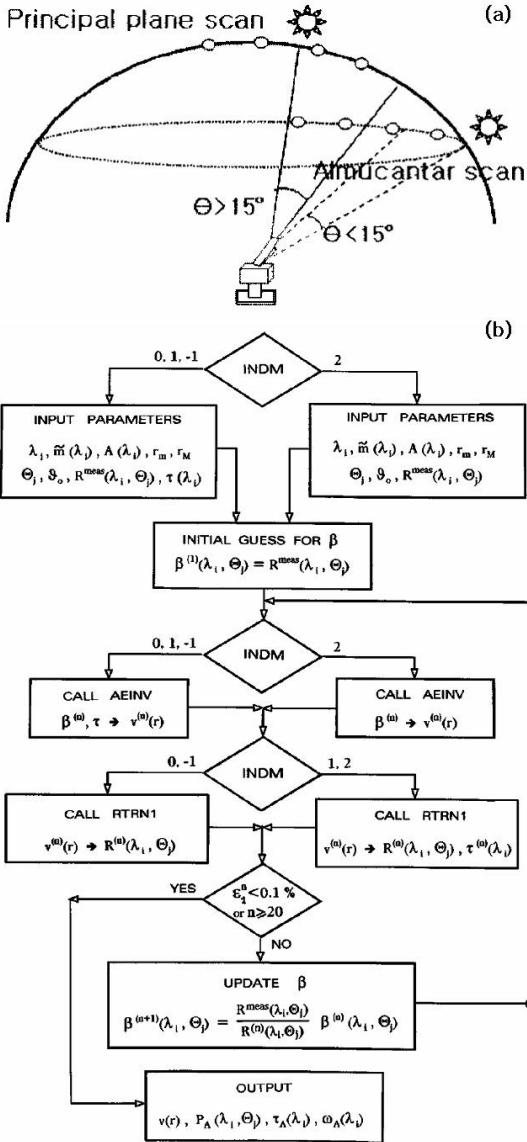


Fig. 2. (a) Two kinds of geometry of the Skyradiometer observation methods (taken from Kim, 2003). (b) Flow chart of the main part of the Skyrad.pack for inverting data of direct and diffuse solar radiation (taken from Nakajima *et al.*, 1996).

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 서울 상공 에어러솔의 광학적 특성

##### 3.1.1 에어러솔 광학두께 (AOD)

Fig. 3은 분석기간 동안 AOD의 월별 평균값 (7개 채널) 및 500 nm 평균값 을 분석한 그림이다. 파장에 따라 AOD가 차이가 나타나는 것은 파장과 입자 반경의 관계식으로 나타나는 크기변수 (size parameter)에 따라 감쇄 효율 (extinction efficiency)이 달라지기 때문이다. 월별 평균값을 살펴보면 12월 이후로 증가하는 추세를 보이다가 6월에 최대값을 나타내고 이후 다시 감소하여 12월에 최소값을 나타내는 양상을 보이고 있다. Fig. 4는 HYSPLIT4 모델을 이용하여 6시간 간격으로 구한 3일 역궤적 경로를 월별로 구분해서 나타낸 그림이다. 11월에서 3월까지의 북서쪽에서 빠르게 이류가 접근해오고 있는 반면 4월부터 점점 약해지면서 6월에는 이류가 가장 약하게 나타나고 있는 것으로 볼 때 AOD가 가장 높게 나타나는 6월 부근에는 수평방향으로 대기의 환기 작용 (ventilation)이 상대적으로 미약한 편임을 알 수 있다. 한편 연직방향으

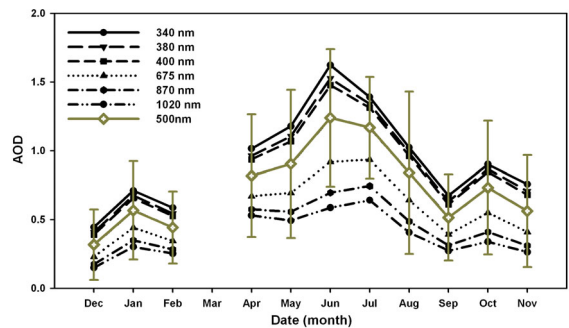


Fig. 3. Monthly mean AOD measured at 7 wavelengths of Skyradiometer. Monthly mean values of AOD at 500nm are represented with vertical error bar. The error bar represents  $\pm 1\sigma$  about the mean AOD value for each month.

로는 Fig. 1에서 보면 알 수 있듯이 이 시기에 기압은 상당히 낮으므로 대류 작용이 활발하게 일어나게 된다. 즉 지역적으로 배출된 입자와 중국 동쪽 해안의 산업지대에서 유입된 에어러솔 입자들이 수평방향으로 환기되는 정도가 상대적으로 약하여 정체되어 있는 상황에서 (Kim *et al.*, 2006) 강한 대류에 의해 연직 방향으로 혼합 작용이 일어나면서 충돌, 병합 과정에 의해 입자가 성장하게 된다. 또한 이 시기에 상대습도가 높게 나타나고 있음을 볼 때 일반적으로 흡습성이 높은 것으로 알려진 산업화 과정에 의해서 발생하는 오염물질, 화력발전소 및 차량에서 화석연료의 연소에 의해 발생하는 입자와 같은 도시 지역의 에어러솔 입자들이 (Kotchenruther and Hobbs, 1998; Eck *et al.*, 1999) 성장하여 부피가 증가하는 과정에서 AOD가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 실제 이 시기에 Columnar total precipitaion water의 크기도 높게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다 (Kim *et al.*, 2006). 6월에 AOD가 가장 크게 나타나는 패턴은 Eck *et al.* (2005)의 선행연구에

서도 나타나고 있는데 여기에서는 그 이유로서 러시아 산불의 영향에 대해 언급하고 있다. 이러한 러시아 산불은 매년 해당지역의 눈이 녹기 시작하면서 찾아오는 건조기인 봄철부터 늦가을까지 지속되는 패턴을 보이며 화재가 발생한 면적이 1996년에 약 60000 km<sup>2</sup>에서 6년 후인 2002년에 약 두 배인 117000 km<sup>2</sup>에 이를 만큼 그 강도가 급속히 증가하고 있어, 인접해 있는 우리나라에서는 기류에 따라 직간접적인 영향을 받고 있는 것으로 보인다 (IFFN, 2002). 7월로 들어오면서 AOD 값이 낮아지기 시작하는데 이는 Fig. 1의 강수량의 월별변화에서 확인할 수 있듯이, 장마가 시작되면서 대기 중의 오염입자들이 강수에 의해 지표로 습성 침착하기 때문이다. 이후 가을로 접어들면서 식생의 성장에 의한 자연적인 에어러솔의 발생 감소 (Ganguly *et al.*, 2006) 및 낮은 습도, 기압의 상승에 따른 대류의 약화 등에 의해 AOD의 값은 급속도로 감소하여 봄철보다 작은 값을 보이게 된다.

계절별 변화를 살펴보면 (Fig. 5a) 서울의 AOD는

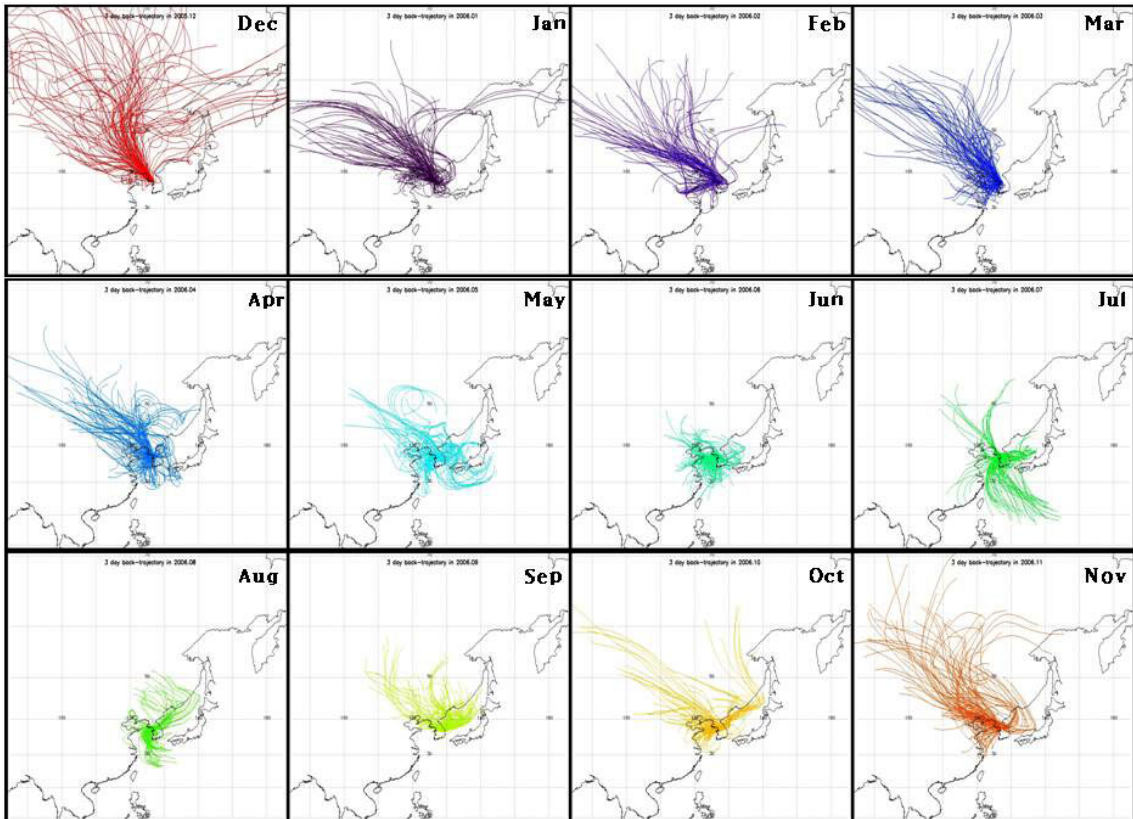
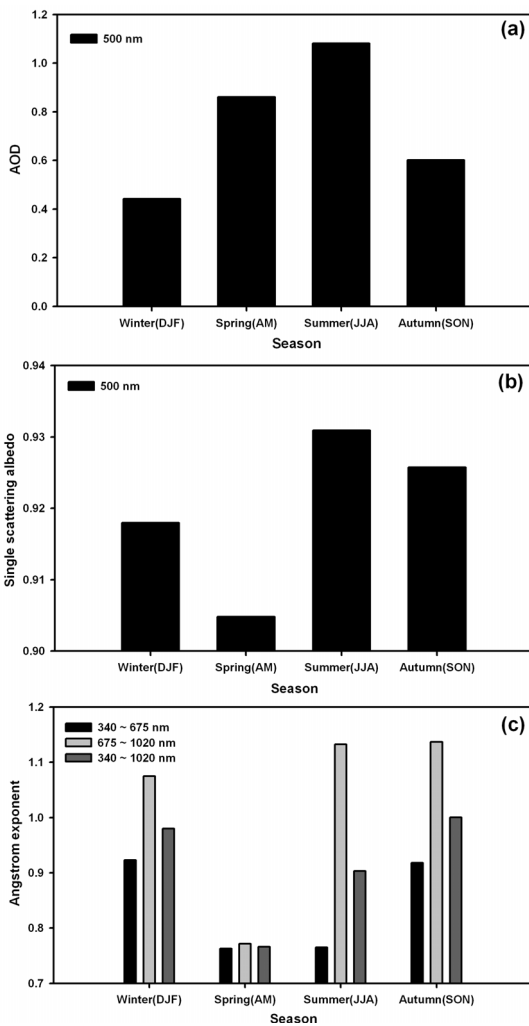


Fig. 4. 3-day back trajectories at each month in Seoul. These trajectories are calculated by HYSPLIT4 with 6-hour intervals from Dec 2005 to Nov 2006.

겨울에 가장 낮은 값 (0.44)을 가지고 여름에 가장 높은 값 (1.08)을 가진다. 반면 Aoki and Fujiyoshi (2003)가 일본 삿포로에서 관측한 자료를 분석한 경우 서울과 달리 황사의 영향을 받는 봄철에 가장 AOD가 높게 나타나고 가을, 겨울에 낮게 나타나는 것으로 나타나고 있는데 이를 통해 서울 지역이 다른 도심지역 보다 더 미세입자의 배출로 인한 대기오염이 심각하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 Ganguly *et al.* (2006)은 인도의 아메다바드 (Ahmedabad) 시에서 관측한 자료를 이용하여 몬순 이전에는 지표 경계층의 높이가 높아지면서 자연발생적인 입자와 인위적으로

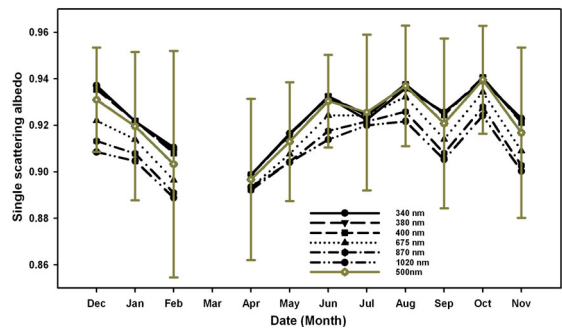


**Fig. 5.** Seasonal mean value of aerosol optical parameters such as (a) AOD (500 nm), (b) Single scattering albedo (500 nm), and (c) Angstrom exponent (340-675, 675-1020, 340-1020 nm) measured by Skyradiometer.

발생한 입자가 혼재함에 따라, 몬순 시기에는 습성 침적에도 불구하고, 높은 상대습도에 의한 입자의 성장에 의해 AOD가 증가하고 있음을 밝히고 있다. 이와 같은 패턴은 역시 서울 지역에서 장마가 나타나는 여름의 높은 AOD를 설명하는데 적용할 수 있다.

### 3.1.2 단일산란알베도

단일 산란 알베도는 입자의 산란성 정도를 나타내는 척도로서 그 값이 1에 가까울수록 산란의 영향이 강함을 의미한다. Fig. 6은 단일산란알베도 값의 월 평균값 (7개 채널) 및 500 nm 평균을 나타낸 그림이다. 관측값이 없는 3월을 제외하더라도 2월에서 4월 사이에 단일산란알베도 값이 0.89 정도로서 연중 가장 낮게 나타나고 있는데, 이 시기가 중국 내륙으로부터 황사가 불어오는 시기와 일치하고 있는 것으로 보아 봄철에 우리나라로 불어오는 황사는 복사 흡수성이 강하게 나타난다고 볼 수 있으며 (Kim *et al.*, 2005) 또한 인위적 에어러솔 중 복사흡수성이 강한 탄소계열 에어러솔의 영향도 함께 나타난 것으로 해석할 수 있다 (Babu *et al.*, 2002; Deepshikha *et al.*, 2005). 이후 온도 상승과 기압 하강으로 인해 지표 혼합층이 발달하고 그로 인해 미세 입자의 확장이 진행되면서 8월에는 짧은 파장영역에서 0.94를 나타낼 정도로 산란 정도가 커지고 가을과 겨울로 접어들면서 지역적 난방소요 등의 연소과정 증가로 입자의 산란성이 작아지게 된다. 이 과정에서 7월의 경우는 특이하게 340, 380, 400 nm의 짧은 파장 채널과 그 외의 채널과의 단일산란알베도 크기가 다른 추세를 보이면서 파장에 따른 차이를 보이고 있는데, 이는 가장 강수량이 많은 7월에 대부분



**Fig. 6.** Monthly mean single scattering albedo measured at 7 wavelengths of Skyradiometer. Monthly mean values of single scattering albedo at 500nm are represented with vertical error bar. The error bar represents  $\pm 1\sigma$  about the mean single scattering albedo value for each month.

의 에어러솔이 강수에 의한 습식 침전에 의해 대기 중에서 제거가 된 상황에서 맑은 날 강한 일사에 의한 질소산화물의 광해리 작용에 의해 202 ~ 422nm 범위의 단파 복사 영역의 흡수가 일어나기 때문으로 보여진다 (Seinfeld and Pandis, 1998). 10월의 경우는 특이하게도 갑자기 단일산란알베도가 큰 폭으로 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이를 Fig. 1에서의 월평균 상대습도의 소폭 증가 및 Fig. 3에서 AOD의 소폭 증가 경향과 비교하여 살펴보았을 때, 가을날의 일반적인 청명한 대기와 비교해서 상대적으로 미세입자 농도의 증가에 의해 산란성이 증가한 것으로 추정된다. 실제로 2006년 10월의 월평균 기온은 기상청이 관측을 시작한 1904년 이래로 10월 월평균으로서는 가장 높은 값을 나타내었기에 이 과정에서 혼합층의 발달이 예상된다. 6월 이후 12월까지 단일산란알베도가 격월주기로 진동하는 경향은 비록 소폭이기는 하나 매우 흥미롭다.

### 3.1.3 옴스트롬 지수

AOD의 크기는 파장에 따라서 차이를 보이는데 이러한 파장 의존도로부터 고안된 파라미터가 옴스트롬 지수이다. 옴스트롬 지수가 작을수록 입자는 조대입자 영역에 가깝고, 커질수록 미세입자 영역에 가까워진다 (Reid *et al.*, 1999). Fig. 7은 분석기간 동안의 옴스트롬 지수의 월평균을 340-675 nm, 675-1020 nm, 그리고 340-1020 nm 영역의 전체 파장쌍의 세 경우에 대하여 나타낸 그림이다. 340-1020 nm 영역을 보면 12월에 약 1.2의 값을 보이다가 이후 계속 감소하여 4월에 약 0.6 정도 까지 떨어지는데 이는 앞에서 언급하였듯 이 시기에 황사 영향권에 들어가기 때문이다. 이후

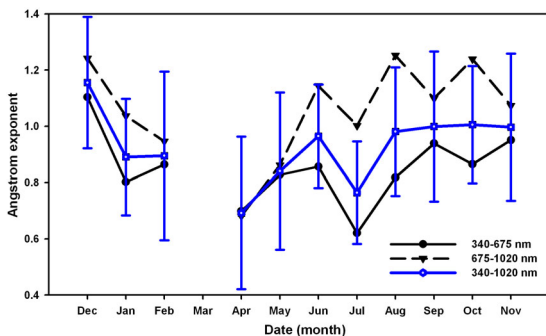


Fig. 7. Monthly mean single Angstrom exponent measured at 7 wavelengths of Skyradiometer. Monthly mean values of Angstrom exponent at 340-1020 nm pair are represented with vertical error bar. The error bar represents  $\pm 1\sigma$  about the mean Angstrom exponent value for each month.

점차 값이 증가하다가 8월부터 11월 사이에는 거의 1.0부근의 값으로 유지되는 모습을 보이고 있는데 7월에 갑자기 낮은 값을 가지는 이유는 강수와 구름으로 인해 관측 일수가 적은 영향도 있지만 지속적인 강수 및 높은 상대습도로 인해 관측이 가능한 시점에서도 대기 중에 작은 물방울이 존재하고 있어서 영향을 받은 것으로 추정된다.

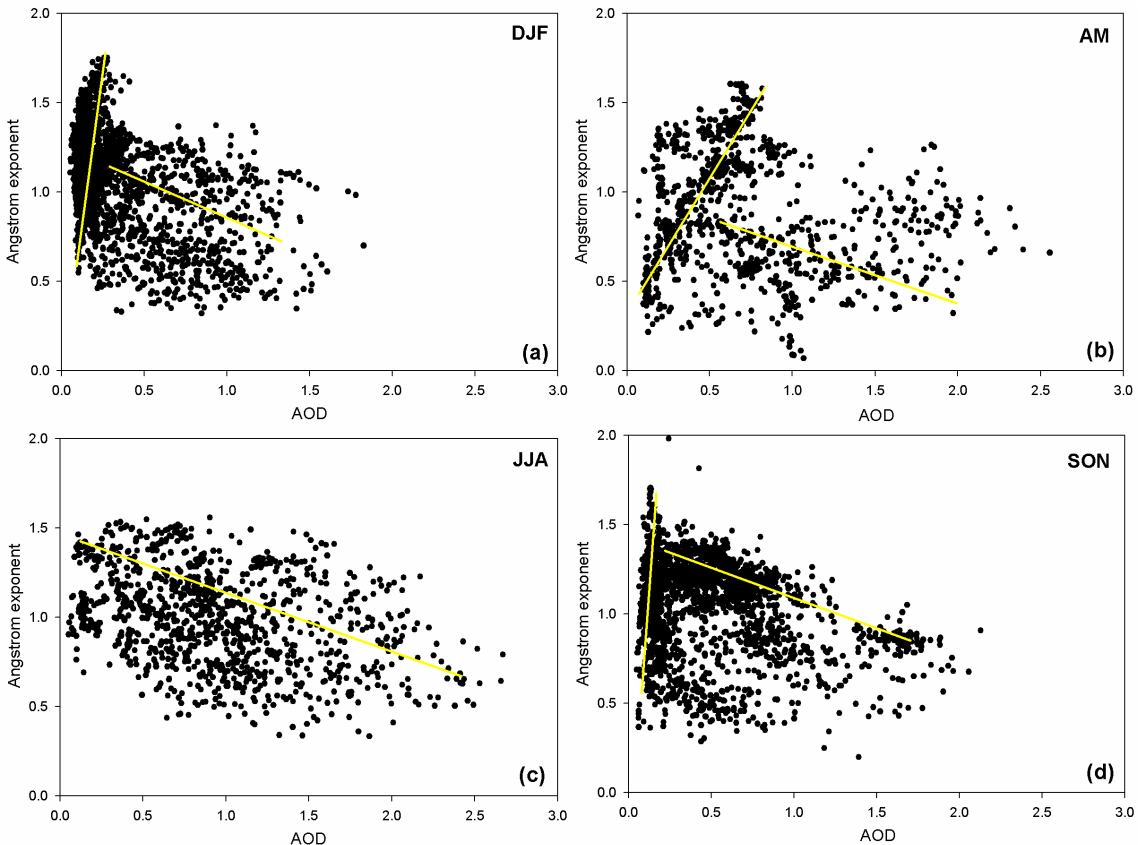
Fig. 5(c)에 나타난 계절 평균으로 살펴보면 옴스트롬 지수의 차이가 확연하게 드러나는데, 황사 영향권에 들어가는 봄철에 가장 낮은 값을 (조대입자), 장마 이후 고기압 영향권에 들면서 청명한 대기 질을 유지하는 가을에 가장 높게 (미세입자) 나타난다. 특이한 점은 옴스트롬 지수를 산출하는 데 있어 340-675 nm 파장쌍을 택했을 때와 675-1020 nm 파장쌍을 택했을 때의 차이점으로서 이 차이를 살펴보면 대기 중 입자의 크기 변화에 대한 좀 더 자세한 고찰이 가능해진다. 옴스트롬 지수가 가장 작게 나타나는 봄의 경우 340-675 nm 파장쌍과 675-1020 nm 파장쌍일 때의 차이가 거의 없지만 여름으로 넘어오면서 340-675 nm 파장쌍 영역에서 옴스트롬 지수 값의 변화가 미약한 반면, 675-1020 nm 파장쌍에서 급격한 증가 추세를 보이고 있다. Ganguly *et al.* (2006)은 선행연구에서 이와 같은 차이에 대해 상대적으로 짧은 파장쌍에서 계산된 옴스트롬 지수의 경우 핵생성영역 (nucleation mode)와 적산영역 (accumulation mode)에 속하는 크기가 작은 입자에 민감하고, 상대적으로 긴 파장쌍에서 계산된 경우 조대영역 (coarse mode)의 큰 입자에 민감하기 때문이라고 설명하고 있다. 이는 크기변수에 따라 산란효율에 차이가 생겨 (Liou, 2002), 산란효율이 가장 크게 나타날 때의 입자 반경은 파장이 증가함에 따라 같이 증가하게 됨으로서 관측파장에 따라 민감도가 크게 나타나는 입자 영역에 차이를 보이게 되기 때문이다. 그러므로 봄에서 여름으로 넘어오면서 긴 파장쌍에서의 옴스트롬 지수가 증가하는 추세는 크기가 큰 입자의 농도가 감소하기 때문인 것으로 설명할 수 있는데 이는 봄철 이후 황사의 유입이 잦아들면서 대기 중의 큰 입자의 비중이 감소하기 때문이다.

Fig. 8은 AOD와 옴스트롬 지수와의 관계를 계절별로 나누어서 나타낸 그림으로 (Eck *et al.*, 1999; Aoki and Fusiyoshi, 2003; Kim *et al.*, 2006) 비록 분산이 크게 나타나고는 있지만 전반적으로 AOD와 옴스트롬 지수간의 관계를 잘 설명해주고 있다. 이 그림을 통해서 에어러솔의 증감 및 성장과 AOD 크기와의 관계는

(1) 청정한 대기 상태 (2) 에어러솔 배출이 증가되기 시작하는 시점 (3) 에어러솔의 성장이 시작하는 단계의 3 단계로 나누어 살펴볼 수 있음을 알 수 있다. AOD가 낮은 청정대기 상태에서는 미세입자와 조대입자 영역의 에어러솔들이 유사한 비율로 분포하고 있다가 산업화 과정 및 차량운행과정의 오염물질 배출을 통해 미세입자의 농도가 급속도로 증가하면서 AOD가 높아지는데 이는 AOD의 증가에 따라 옴스트롬 지수가 증가하는 경향을 통해 확인할 수 있다 (Reid *et al.*, 1999). 그러나 AOD가 일정 크기 이상이 되면 오히려 AOD의 증가에 따라 옴스트롬 지수의 크기가 감소하게 되는데, 이는 이후의 AOD 증가에 기여하는 가장 큰 원인은 작은 입자들 사이의 충돌에 의한 응축 및 응결에 의한 에어러솔의 성장이라는 사실을 의미하고 있다 (Eck *et al.*, 1999; Reid *et al.*, 1999). 이러한 패턴은 특히 가을과 겨울에 상대적으로 잘 나타나는 편인 반면 여름에는 낮은 AOD 영역에서의 옴스트롬 지수의 증가 패

턴은 보기 힘들고 전반적으로 AOD 증가에 따른 옴스트롬 지수의 감소만이 보이는데, 이는 혼탁해진 대기 내의 에어러솔들이 높은 습도 하에서 응결작용을 통해 성장하는 과정에서 AOD가 증가한다고 한 앞선 해석을 뒷받침해준다.

한편 Fig. 7을 보면 8월에서 11월 사이에 파장쌍에 따른 옴스트롬 지수의 차이가 나타나는데, 이 시기 동안에는 340-675 nm 파장쌍과 675-1020 nm 파장쌍 영역의 변화 경향이 반대로 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이에 착안하여 Fig. 9 과 같이 단일산란알베도와 옴스트롬 지수를 전체 관측 기간 동안의 자료를 이용하여 비교, 분석해보았다. 관측하는 7개의 채널에서 인접한 파장쌍 6개(340-380 nm, 380-400 nm, 400-500 nm, 500-675 nm, 675-870 nm, 870-1020 nm) 에 대하여 옴스트롬 지수를 구한 뒤 500nm 영역의 단일산란알베도 값과 상관관계를 비교, 분석해보았다. 흥미롭게도 상대적으로 긴 파장쌍으로 접근할수록 옴스트롬 지



**Fig. 8.** Relations between AOD and Angstrom exponent about the cases of simultaneous measurement in winter(a), spring(b), summer(c), and autumn(d). Yellow line indicates the changing pattern with AOD increasing.



수와 단일산란알베도의 상관관계가 급격하게 좋아져서 870-1020 nm 파장쌍에서의 결정계수 (determination coefficient)  $R^2$  값이 0.811까지 나타남을 확인할 수 있으며 또한 870-1020 nm 파장쌍에 접근할수록 기울기의 값이 커지는 것도 함께 살펴볼 수 있다. 이 관계를 옴스트롬 지수의 크기가 작은 경우 (0.8 미만)와 큰 경우 (0.8 이상)으로 나누어보면 짧은 파장쌍에서 구한 옴스트롬 지수의 경우 입자의 크기 여부에 크게 관여하지 않고 단일산란알베도가 0.9이상의 값을 보이는 반면 긴 파장쌍에서 구한 옴스트롬 지수의 경우 작은 값에서 상대적으로 낮은 단일산란알베도 값을 보이고

있다. 이는 상대적으로 큰 입자들이 복사 흡수성을 크게 나타내고 있는 것을 의미하며 Fig. 6에서 황사시기에 단일산란알베도가 낮게 나타나는 점을 잘 보여주고 있다.

지금까지 살펴본 AOD (500 nm), 단일산란알베도 (500 nm), 옴스트롬 지수 (340-1020 nm) 의 월 평균값을 Table 1에 정리하였다.

3.1.4 부피 크기 분포

입자의 직경에 따른 부피 크기 분포 (volume size distribution)는 관측이 이루어지는 시기의 대기 중 에어로솔의 분포특징을 잘 보여준다. 일반적으로 도심지역에서는 미세입자와 조대입자 영역에서 두 개의 봉우리가 나타나는 쌍봉 분포 (bimodal distribution)가, 비도심 대륙 지역 (rural continental site)에서는 단봉 분포 (monomodal distribution)가 나타나는 특징이 있다 (Seinfeld and Pandis, 1998). Fig. 10은 분석기간 동안 구름에 의한 영향력을 제거하기 위해서 기상청에서 제공하는 서울의 운량 목적자료를 이용하여 운량이 1 이하인 날만을 선정한 후 최소 40개 이상의 측정값을 산출해 낸 경우에 대해서 부피 크기 분포를 살펴보았다. 2005년 12월에서 2006년 11월 사이까지 1년의 기간 동안 위의 조건을 만족하는 날짜 수는 10.7%에 해당하는 39일이 있었으며 이를 다시 계절별로 (겨울-20일, 봄-3일, 여름-1일, 가을-16일) 나누어 그 특성에 대해서 살펴보는 과정을 거쳤다. 입자 반경 구간에 따른 연직 컬럼 내 에어로솔 부피 크기의 분포를 의미하는  $dV/d\ln r$ 의 경우 봄, 가을에 상대적으로 높고 여름, 겨

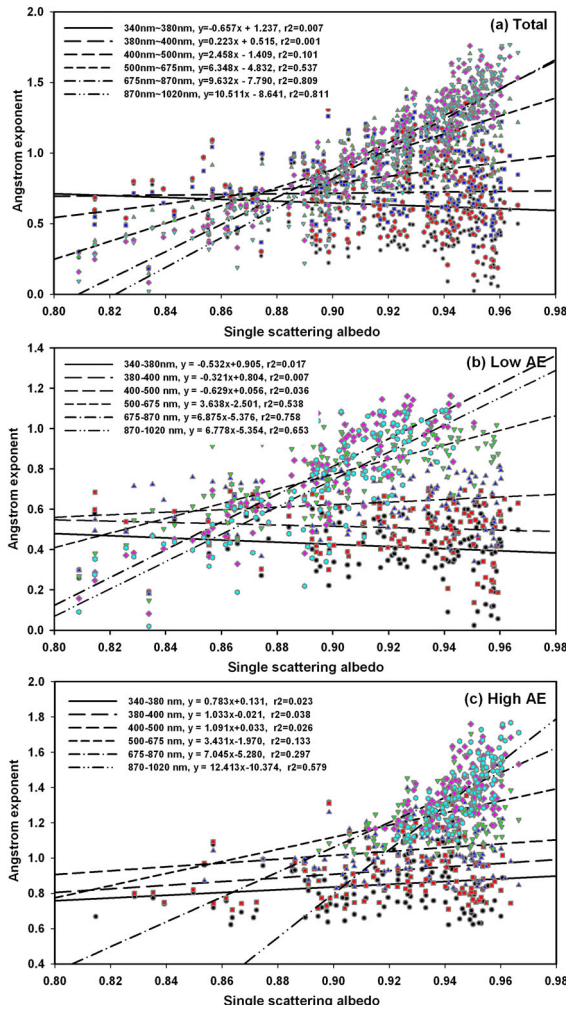
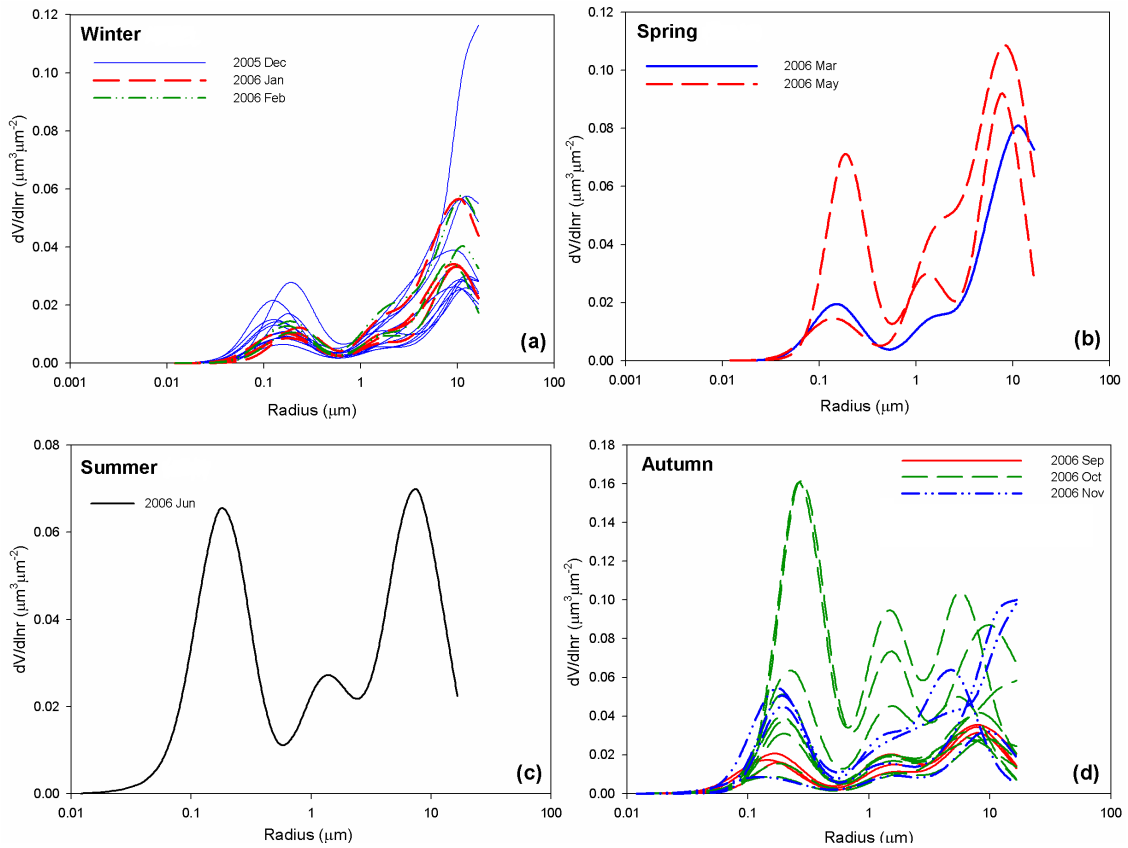


Fig. 9. The correlation between single scattering albedo (500nm) and Angstrom exponent retrieved at each neighbor wavelength pair. (a) is about all cases from Dec 2005 to Nov 2006, (b) is about low Angstrom exponents (lower than 0.8) and (c) is about high Angstrom exponents (higher than 0.8).

Table 1. Monthly Mean of AOD (500nm), single scattering albedo (SSA, 500nm) and Angstrom exponent (AE, 340-1020 nm).

Month	AOD	SSA	AE
Dec	0.316	0.931	1.155
Jan	0.566	0.920	0.891
Feb	0.441	0.903	0.895
Mar	Bad	Bad	Bad
Apr	0.818	0.900	0.692
May	0.903	0.913	0.841
Jun	1.239	0.930	0.965
Jul	1.167	0.926	0.764
Aug	0.840	0.937	0.981
Sep	0.514	0.921	1.000
Oct	0.731	0.940	1.006
Nov	0.561	0.917	0.997



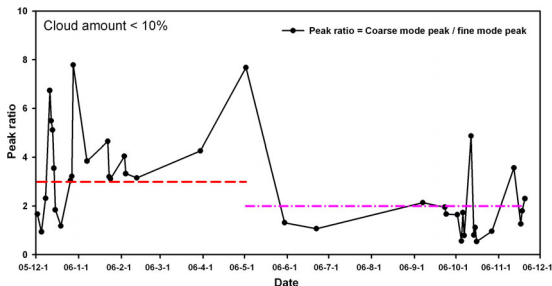
**Fig. 10.** The seasonal pattern of volume distributions measured by Skyradiometer. These are retrieved for clear cases (cloud amount < 1/10) in (a) winter (20 days), (b) spring (3 cases), (c) summer (1 case), and (d) autumn (16 cases).

울에 낮게 나타나며 그 중에서 10월의 경우는 관측기간 중 가장 높은 값을 나타내고 있는 특징을 보이고 있다. 전반적인 서울 상공의 대기의 분포의 모양은 쌍봉 분포를 가지고 있는데 입자 반경이  $0.11\sim 0.26\ \mu\text{m}$  부근인 미세입자 영역과  $5\ \mu\text{m}$  이상의 조대입자 영역에서 봉우리가 나타나고 있다. 계절적으로는 겨울과 봄철에는 조대입자 영역의 봉우리가 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보이다가 여름으로 들어서면서 거의 두 봉우리의 높이가 비슷해지고 가을로 가면 오히려 미세입자 영역의 봉우리가 높게 나타나는 경우도 발생한다.

이러한 계절적 차이를 좀 더 자세히 살펴보기 위해서 미세입자 영역의 봉우리 값을 C1, 조대입자 영역의 값을 C2라고 할 때 C2/C1 값을 의미하는 최대값 비율 (peak ratio) 값을 구해보았다 (Fig. 11). 2006년 5월 2일에서 5월 30일로 넘어가면서서 최대값 비율의 값의 크기의 급격한 변화가 나타나는데, 5월 2일 이전의 경우에 해당하는 총 21일 중 76.2%에 해당하는 16일에

서 최대값 비율이 3이상으로 나타난 데 반해 5월 30일 이후의 총 18일에 대해서는 77.8%에 해당하는 14일에서 비율값이 2이하로 나타나고 있었다. 이것은 겨울에서 봄철에 이르는 시기에 조대입자 영역이, 여름부터 시작하여 가을에 이르게 되면 미세입자 영역이 지배적으로 분포하게 되는 경향을 보여준다. 특히 10월의 경우 분석대상이 되는 9일 중 절반이 넘는 5일이 최대값 비율이 1 이하의 값으로서, 미세입자의 부피 크기가 조대입자 영역보다 높게 나타나고 있는 이러한 양상은 앞서 살펴본 10월의 단일산란알베도와 옴스트롬 지수의 특징적인 면과 연관된다.

한 가지 더 주의 깊게 살펴보아야 할 점은 반경  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  영역에서 나타나는 제 3의 봉우리이다. 이 영역의 봉우리는 겨울에는 발견되지 않다가 늦봄으로 들어서면서 조금씩 보이기 시작하여 여름, 가을에 그 형태가 분명하게 나타나고 있는데 특히 10월의 경우에는 조대입자 영역의 봉우리와 크게 차이가 없을 정도로 분명



**Fig. 11.** Peak ratio of volume size distribution (defined as coarse mode peak over fine mode peak) for clear days (cloud amount < 1/10) from Dec, 2005 to Nov, 2006.

한 모양새를 나타내고 있다. 이 영역의 봉우리가 뚜렷하게 나타날 때 최대값 비율의 값이 낮게 나타나는 특징을 보이는데 이는 도심 지역 미세입자의 대부분을 차지하는 화석연료의 연소에 의해 발생한 에어러솔의 흡습성에 의해 (Kotchenruther and Hobbs, 1998; Eck *et al.*, 1999) 반경 1~2  $\mu\text{m}$  크기범위까지 성장한 결과로 생각된다. 하지만 아직까지 에어러솔의 화학종에 따른 흡습성 정도에 대해서는 알려진 바가 제한적인데다 기존의 연구결과들 사이에서 지역에 따른 차이도 존재하고 있기 때문에 추후 지속적인 관측을 통해 더욱 깊게 살펴볼 필요가 있다.

### 3.2 역궤적분석

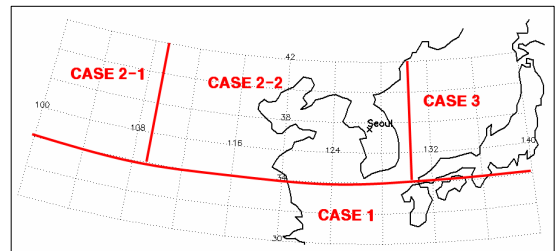
#### 3.2.1 월별 궤적 분포 특성

Fig. 4에서 2005년 12월부터 2006년 11월까지의 1년 동안 관측 장소인 서울을 기준으로 (126.98E, 37.57N, 500 m) 3일간의 이류의 역궤적 (3-day back trajectory) 을 HYSPLIT 모델로 구한 결과를 월별로 나타내었다. 12월에서 4월까지의 겨울과 봄철의 경우 중국 북부 내륙지방으로부터 북서풍이 빠르게 불어오고 있으며 늦봄인 5월로 접어들면서 그 세기가 다소 약해진다. 5월부터는 동쪽으로부터의 이류도 나타나는데 이는 늦가을까지 나타난다. 6월에는 이류의 세기가 매우 약해지면서 진행거리가 짧은 이류가 나타나고 있으며 중국 동쪽 연안으로부터 남서풍 및 서풍이 지배적으로 나타나고 있다. 이후 여름철 동안에는 태평양으로부터의 남동풍 및 남풍이 주로 나타나고 있으며 장마가 한창인 7월에 그 정도가 상대적으로 가장 크게 나타나고 있다. 이는 앞서 살펴본 월별 AOD 특성에서 6월에서 7월로 가면서 평균 AOD값이 떨어지는 이유도 부분적으로 설명하고 있다. 여름에는 전반적으로 진행거리가

겨울-봄 기간의 북서풍에 비해서 다소 짧게 나타나는 편이다. 가을이 시작되는 9월로 접어들면서 남쪽으로부터의 이류는 거의 사라지고 동풍이 주로 나타나다가 11월이 되면서 다시금 북서풍이 강해지는 패턴을 보여주고 있다. 환기의 관점에서 보면 늦가을부터 봄까지는 빠른 이류에 의해 대기의 유입과 방출이 빠르게 이루어지는 반면 여름에는 그 정도가 확연하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 여름철의 약한 이류 현상으로 인해 대기 중 입자 농도가 증가하게 되고 충돌, 병합 및 흡습성에 의한 입자의 성장이 일어나게 된다 (cf. Fig. 10c).

#### 3.2.2 궤적 특성에 따른 에어러솔 광학적 특성 분석

앞서 살펴본 3일간의 역궤적 분포를 풍향과 이동거리의 차이에 따라 몇 가지 경우로 나누어 분석하였다 (e.g. Moorthy and Babu, 2006). 풍향은 크게 북서풍계열, 남풍계열, 동풍계열로 나눌 수 있고 북서풍계열의 경우 중국 내륙지방으로부터 시작되는 이동거리가 긴 경우와 중국 연안에서 시작되는 이동거리가 짧은 경우로 나눌 수 있었다. 종합한 결과 Fig. 12와 같이 총 4가지 경우로 궤적들을 나눌 수 있었는데, Case 1은 남풍 계열로서 3일전 궤적의 위치가 북위 34도 이하로 나타난 경우를 나타내고, Case 2는 북서풍 계열로서 북위 34도 이상인 경우 중 3일 전 궤적의 위치가 동경 110도 보다 작은 경우, 즉 이동거리가 긴 경우를 Case 2-1, 동경 110도와 관측 지점인 동경 126.98도 사이에 있는 경우, 즉 이동거리가 짧은 경우를 Case 2-2라고 구분하였다. Case 3은 동풍 계열로서 3일전 궤적의 위치가 북위 34도 이상, 동경 130도 이상에서 나타나는



**Fig. 12.** Divided cases of 3-day back trajectories of Fig. 5. based on the source region and the distance of pathway. Case 1 means the location of 3-day back trajectory is lower than 34N. Among the cases which is higher than 34N, Case 2-1 means the location of 3-day back trajectory is west of 110E, Case 2-2 means the location of 3-day back trajectory is between 110E and Seoul, and Case 3 means the location of 3-day back trajectory is east of Seoul.

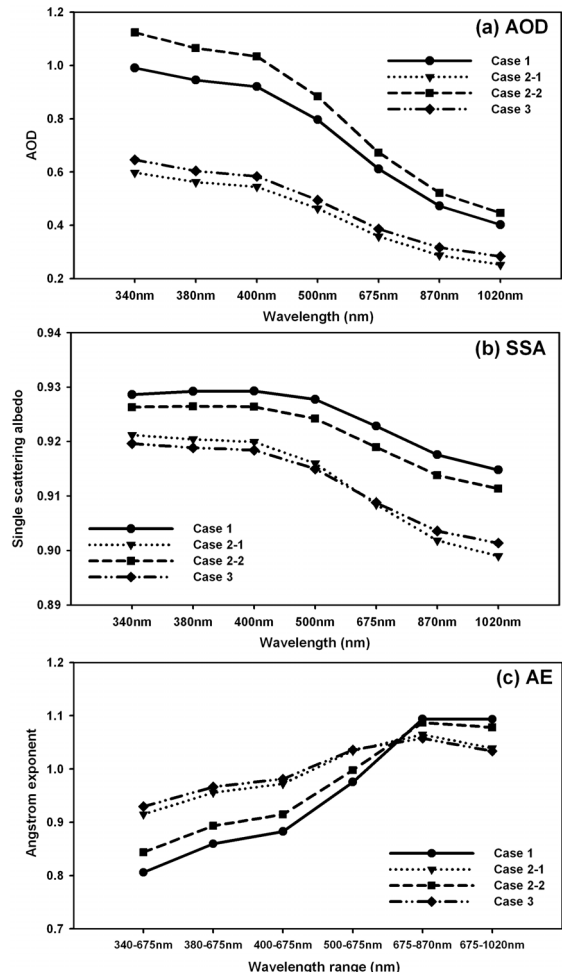
경우를 의미한다. 이렇게 4가지로 구분된 궤적의 경우에 대해서 월별 나타나는 빈도를 정리한 표가 Table 2이다. 궤적의 특성은 계절에 따라 비교적 뚜렷하게 드러나고 있는데, Case 1의 경우 북태평양 고기압의 영향력이 큰 여름철에 강하게 나타나고 있음을 볼 수 있고 Case 2-1의 경우 겨울과 봄에 강하게 나타나다가 4월 이후로 약해지기 시작한다. 반면 방향은 같지만 수송거리가 짧은 Case 2-2의 경우는 거의 월별, 계절별 변화 없이 일상적으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 동풍의 경우에도 전반적인 빈도가 유사하게 나타나지만 상대적으로 9월쯤에 보다 더 강하게 나타나고 있다.

Fig. 13은 앞서 나눈 4가지 경우에 해당하는 Skyradiometer 관측값을 파장별로 평균하여 정리한 그림이다. Table 2에서 구해진 6시간 간격의 자료를 이용하여 일별 대표 궤적을 구한 후에 Skyradiometer 관측값의 일 평균값을 각 경우별로 나누어 그 평균값을 계산하였다. 전체적으로 볼 때, Case 2-1과 Case 3의 경우가 유사하게 나타나고 있고 대조적으로 Case 1과 Case 2-2가 유사하게 나타나면서 크게 두 그룹으로 나뉘어 진다. AOD의 경우 Case 1과 Case 2-2의 경우가

높게 나타나고 있는데 이는 Case 2-2의 경우가 중국 연안의 산업화된 지역에서 발생한 많은 양의 에어러솔이 유입되는 주경로인데다 Case 1의 경우도 중국 화남지방 근처를 거쳐서 올라오는 경우가 많아 상대적으로 에어러솔의 농도가 높게 나타나고 있기 때문이다. 반면 Case 2-1과 Case 3은 자연발생적인 에어러솔의 비중이 높게 나타나는 경우로서 그 값이 상대적으로 낮게 나타난다. 옴스트롬 지수를 살펴보면 Case 2-1과 Case 3의 파장쌍의 변화에 대한 값의 변화보다 Case 1과 Case 2-1의 변화가 더 크게 나타나고 있는 것이 보이는데 이것은 3.1.3절에서 설명한 바와 같이 작은 입자의 경우 파장에 대한 차이가 더 크게 나타나기 때문이다. 역시 여기에서도 Case 3이 Case 2-1과 거의 유

**Table 2.** Monthly and seasonal frequencies for 4 cases of trajectories, based on the difference of the wind direction and distance.

Period	Case 1	Case 2-1	Case 2-2	Case 3
December 2005	0	75	17	28
January 2006	2	57	56	5
February 2006	3	48	57	3
Winter	5	180	130	36
March 2006	7	48	66	1
April 2006	11	44	52	10
May 2006	26	10	56	24
Spring	44	102	174	35
June 2006	33	0	68	10
July 2006	59	2	32	22
August 2006	49	0	49	17
Summer	141	2	149	49
September 2006	0	5	36	57
October 2006	5	21	67	21
November 2006	2	39	71	4
Autumn	7	65	174	82



**Fig. 13.** Mean value of (a) AOD, (b) single scattering albedo and (c) Angstrom exponent at each wavelength with respect to the 4 cases of trajectories.

사한 특징을 보이고 있다.

단일산란알베도의 경우, Case 1과 Case 2-2이 높은 값을 보이는데 이 경우는 인위적으로 배출되는 황화합물, 질소산화물, 유기탄소 화합물 등 복사 산란성을 보이는 미세 입자 에어러솔과 역시 강한 복사 산란성을 보이는 해염 입자가 주성분이어서 단일산란알베도가 높게 나타나는 것으로 보인다. 반면 Case 2-1과 Case 3의 경우 단일산란알베도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 한반도 북쪽과 서쪽의 중국과 몽골 내륙의 사막지역에서 자연적으로 발생하는 입자들이 복사 흡수성을 띠는 것을 의미한다 (Kim *et al.*, 2005). 일반적으로 광물먼지입자(mineral dust)의 경우 복사 산란성이 강하게 나타나는 것으로 알려져 있으나 본 연구 및 선행연구 결과에서 복사 흡수성을 강하게 나타내고 있는 것으로 볼 때, 이 지역의 광물먼지입자에 복사 흡수성을 갖는 물질이 포함되어 있거나 이동하는 과정에서 복사 흡수를 잘하는 검댕과 같은 흑탄소입자(black carbon)와 혼합되는 경우를 (Kim *et al.*, 2005) 생각할 수 있다. Case 3의 경우 동쪽 해안가에서 불어 오기 때문에 해염입자의 높은 산란성이 대표적으로 나타날 것으로 기대하였다. 실제로 Case 1의 경우 인위적인 에어러솔의 산란 효과에 북태평양에서 유입되어 오는 해염입자의 산란성까지 더해져서 높은 산란성을 보이고 있음을 볼 때, Case 3의 경우 북쪽 대륙에서 발생한 에어러솔이 기상장에 의해 관측지점의 동쪽을 경유해서 유입되고 있는 것으로 추정된다.

#### 4. 요약 및 결론

지금까지 2005년 12월에서 2006년 11월까지의 1년 동안 Skyradiometer로 관측한 여러 가지 파라미터를 이용하여 서울 상공의 에어러솔의 광학적 특성을 분석하고, HYSPLIT 모델을 이용한 역궤적 구분을 통해 에어러솔의 발생원에 따른 차이점을 좀 더 자세하게 살펴보았다. 광학적 파라미터들의 변화와 역궤적 추적을 통해 분석한 결과를 토대로 서울 상공의 에어러솔의 전반적인 연 변동 경향을 살펴볼 수 있다. 겨울과 초봄까지는 별다른 에어러솔의 자연적인 발생원 없이 북서풍의 영향으로 환기 작용이 크게 작용하며 국지적인 연소과정의 증가로 인한 비교적 청정한 대기상태를 보이다가, 3월과 4월에는 황사의 발생빈도가 증가하면서 복사 흡수성이 높은 모래먼지의 비중이 높아지게 된다. 여름으로 접어들면서 이류의 세기가 약해짐에 따

라 대기 중의 높은 농도의 에어러솔이 환기되지 못하고 머물러 있는 상태에서 습도가 증가함에 따라 에어러솔의 흡습작용이 강화되면서 입자가 성장하게 된다. 그 결과 장마에 접어들기 직전인 6월에 대기 중의 에어러솔 농도가 가장 높아지면서 혼탁해지는 양상을 보이고 있다. 장마가 시작되면서 많은 양의 에어러솔이 습성 침착에 의해 대기 중에서 제거되면서 에어러솔의 농도는 낮아지고 인위적 활동에 의해 발생하는 산란성이 높은 작은 입자들의 비중이 높아지게 된다. 이러한 추세는 가을까지 이어지는데 다만 2006년 10월의 경우는 일반적으로 알려진 가을철 특징과는 달리, 특이하게 미세영역 입자의 성장이 보이는 모습이 나타나고 있다.

이번 연구는 서울 지역의 에어러솔의 특징을 살펴볼 수 있었던 것 이상으로 지속적인 관측을 통한 자료 분석의 기반이 되었다는 부분에서 의미를 찾을 수 있다. 특히 서울은 상당한 숫자의 인구가 모여 사는 산업화된 대도시로서, 자연적 발생원과 인위적인 발생원이 복합적으로 작용하는 에어러솔의 특성은 기존의 연구가 밝혀내지 못한 많은 흥미로운 요소를 가지고 있으며 원인의 상당수가 도시화 현상에 기인하고 있다는 점에서 중요성을 가진다. 향후 보다 진전된 분석을 위하여 지속적인 관측과 함께 위성관측자료를 이용한 비교, 그리고 다른 측기에서 산출되는 다양한 자료들과의 비교 등을 수행해야 할 것이다.

#### 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3203) 및 2차년도 BK21 연구 프로그램의 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다. 논문의 심사와 수정에 힘써주신 심사위원회 깊은 감사를 드립니다. 또한 HYSPLIT 모델을 제공해주신 미국 국립해양대기관리청 대기자원연구실(NOAA air resources laboratory)에도 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고문헌

- 곽중홍, 서명석, 김맹기, 광서연, 이태희, 2005: 스카이라디오미터로 관측된 공주지 역 에어러솔의 광학적 특성, *한국지구과학학회지*, **26**, 790-799.
- Aoki Kazuma, and Yasushi Fujiyoshi, 2003: Sky Radiometer Measurements of Aerosol Optical Properties over Sapporo, Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 493-513.

- Babu, S. S., S. K. Satheesh, and K. K. Moorthy, 2002: Aerosol radiative forcing due to enhanced black carbon at an urban site in India, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1880.
- Charson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A., Coakley, Jr., J. E. Hansen, D. J. Hofmann, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, **255**, 423-430.
- Cho, Hi-Ku, 1981: The variation of Atmospheric Turbidity over Seoul, *J. of Korean Met. Society*, **17**, 1-20.
- Deepshikha, S., S. K. Satheesh, and J. Srinivasan, 2005: Regional distribution of absorbing efficiency of dust aerosols over India and adjacent continents inferred using satellite remote sensing, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03811.
- Drexler, R. R., and Rolph, G. D., 2003: HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Eck, T. F., B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne, 1999: Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *J. Geophys. Res.*, **104**, 31,333-31,349.
- \_\_\_\_\_ et al., 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.
- Ganguly, D., A. Jayaraman, and H. Gadhavi, 2006: Physical and optical properties of aerosols over an urban location in western India: Seasonal variabilities, *J. Geophys. Res.*, **111**, D24206.
- Holben, B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998: AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens Environ.*, **66**, 1-16.
- International forest fire news (IFFN), 2002, Russian federation fire 2002 special part III, *International forest fire news*, **No.28**, 22-28 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: IPCC's fourth assessment report - Technical summary, 21-87 pp.
- Kim, D.-H., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takemura, T. Takemura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, **109**, D02209.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2005: Aerosol radiative forcing over east Asia determined from ground-based solar radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, **110**, D10S22.
- Kim, J., J. Lee, J. M. Yoon, A. Higurashi, T. Takemura, and C. H. Song, Consistency of the aerosol type classification from satellite remote sensing during the ABC EAREX campaign, 2007: *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S33.
- Kim, S. W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J. A. Ogren, E. G. Dutton, J.-G. Won, Y. S. Ghim, B.-I. Lee, and J.-S. Han, 2005: Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001, *Atmos. Environ.*, **39**, 39-50.
- \_\_\_\_\_, Soon-Chang Yoon, Jiyoung Kim, and Seung-Yeon Kim, 2006: Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR and AERONET Sun/sky Radiometer Measurements, *Atmos. Environ.*, **41**, 1634-1651.
- Kocheneruther, R. A., and P. V. Hobbs, 1998: Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil, *J. Geophys. Res.*, **103**, p.32081-32089.
- Liou, K. N., 2002: An introduction to atmospheric radiation, second edition, Academic. New York, 65-110, 191 pp.
- Moorthy, K. K., and S. S. Babu, 2006: Aerosol black carbon over Bay of Bengal observed from an island location, Port Blair: Temporal features and long-range transport, *J. Geophys. Res.*, **111**, D17205.
- Nakajima, Teruyuki, G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Appl. Opt.*, **35**, 2672-2686.
- Remer, L. A., Y. J. Kaufman, D. Tanre, S. Mattoo, D. A. Chu, J. V. Martins, R.-R. Li, C. Ichoku, R.C. Levy, R.G. Kleidman, T.F. Eck, E. Vermote, and B.N. Holben, 2005: The MODIS aerosol algorithm, products, and validation, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 947-973.
- Reid, J. S., T. F. Eck, S. A. Christopher, P. V. Hobbs, and B. Holben, 1999: Use of the angstrom exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil, *J. Geophys. Res.*, **103**, 32081-32089.
- Rosenfeld, D., 2000: Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution, *Science*, **287**, 1793-1796.
- Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis, 1998: Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, Wiley interscience, New York, 144, 408-448 pp.
- UN, 2005: UN world urbanization prospects report, [www.unpopulation.org](http://www.unpopulation.org).