

스카이라디오미터(Sky-radiometer)로 관측된 공주지역 에어로솔의 광학적 특성

곽종흠 · 서명석* · 김맹기 · 곽서연 · 이태희

공주대학교 대기과학과, 314-701 충남 공주시 신관동 182

Optical Properties of Aerosol at Gongju Estimated by Ground-based Measurements Using Sky-radiometer

Chong-Heum Kwak, Myoung-Seok Suh*, Maeng-Ki Kim,
Seo-Youn Kwak and Tae-Hee Lee

Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: We investigate the optical properties of aerosols over Gongju by an indirect method using the ground measurement, Sky-radiometer. The analysis period is from January to December, 2004. Skyrad.pack.3 is used to estimate the optical properties, such as the aerosol optical thickness (AOT), single scattering albedo (SSA), Ångstrom exponent (α) and size distribution, of aerosols from the ground measured radiance data. And quality control is applied to minimize the cloud-contaminated data and improve the quality of analysis results. The 12-month average of AOT, α , and SSA are 0.46, 1.14, and 0.91, respectively. The average volume spectra of aerosols shows a bi-modal distribution, the first peak at fine mode and the second peak at coarse mode. AOT and coarse particles clearly increases while SSA decreases during the Asian dust events. The optical properties of aerosols at Gongju vary with seasons, but those are not influenced by the wind direction.

Keywords: Sky-radiometer, aerosol, optical properties, Asian dust, seasonal variation

요약: 본 연구에서는 충청남도 공주시에 위치한 공주대학교 자연과학대학 옥상에 설치된 분광복사측정기의 일종인 스카이라디오미터(Sky-radiometer)로 측정된 적달 및 산란 일사량을 이용하여 간접적으로 공주지역의 에어로솔의 광학적 특성을 분석하였다. 분석기간은 2004년 1월부터 12월까지이며 에어로솔의 광학적 특성의 분석에 활용된 알고리즘은 Skyrad.pack.3(Nakajima et al., 1996)이다. 주요 분석요소는 에어로솔의 광학두께(AOT), 단일 산란알베도(SSA), 옹스트롬 지수(α) 및 에어로솔의 크기별 분포이며 분석결과의 질을 높이기 위하여 초기 관측 자료의 품질검사를 수행하였다. 공주지역의 연평균 AOT, α 및 SSA는 각각 0.46, 1.14, 그리고 0.91이며 계절 및 기상현상에 따라 큰 시간변동을 보이고 있다. 크기별 입자분포에서는 미세입자와 조대입자에서 최대치가 나타나는 쌍봉(bi-modal) 형태를 보이고 있으며 황사(Asian dust) 기간인 봄에는 조대입자의 총 부피가 크게 증가하고 여름에는 반대로 미세입자의 부피가 증가하는 계절 변동을 보이고 있다. 이러한 현상은 봄철동안에 AOT와 SSA가 각각 크게 증가하고 감소하는 점에서도 확인되고 있다. 또한 공주지역의 에어로솔의 광학적 특성은 계절에 따라서 변화가 크게 나타나고 있으나 풍향의 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타나고 있다.

주요어: 스카이라디오미터, 에어로솔, 광학 특성, 황사, 계절변동

*Corresponding author: sms416@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8533

Fax: 82-41-856-8527

서 론

에어로솔이란 대기 중에 자연적, 인위적으로 발생된 먼지나 여러 종류의 물질들로 구성된 작은 입자를 총칭한다(Willeke and Baron, 1993). 에어로솔은 산불, 화산폭발이나 바람에 의해 부유된 토양입자와 같은 자연적 요인과 인간의 산업 활동에 따른 오염물질 배출과 같은 인위적 요인 등 그 생성 원인이 매우 다양할 뿐 만 아니라 그들의 광학적 특성의 시·공간적 변동이 현저하다. 이러한 에어로솔은 기후 변화의 한 요소로 작용하여 대기에 입사하는 태양 복사를 산란시키거나 흡수하여 지구에 도달하는 태양 복사 에너지량에 영향을 주는 직접적 효과와 구름의 응결핵으로 작용하여 구름의 양과 수명을 변화시키는 간접적 효과를 통해 지구 대기의 복사 평형에 영향을 준다(Charlson et al., 1992; Kiehl and Briegleb, 1993; Nakajima et al., 2003).

에어로솔에 의한 복사 강제력이 기후에 미치는 영향은 매우 중요하지만, 이들이 대기 순환 및 기후 시스템에 어떻게 영향을 미치는가에 대해서는 아직까지 많은 불확실성을 가지고 있다(IPCC, 2001). 에어로솔에 대한 광학적, 화학적 정보의 불확실성이 큰 것은 이미 많은 연구에서 지적한 바와 같이 에어로솔의 특성이 시·공간적으로 변동이 클 뿐만 아니라 변동 특성에 부합하는 관측이 어렵기 때문이다(Nakajima et al., 1996). 또한 에어로솔 광학적 특성의 시·공간적 변동성은 에어로솔 타입뿐 아니라 다른 기상학적 특성에도 영향을 받는다. 따라서 에어로솔의 복사수지에 대한 직·간접적인 강제력의 불확실성을 해소하기 위해서는 보다 많은 관측과 분석이 시도되어야 한다(Arao and Ishizaka, 1986; Nakajima et al., 1996; Smirnov et al., 2000; IPCC, 2001).

동아시아는 세계적으로 거대한 에어로솔 발원지로 알려져 있으며, 특히 우리나라는 매년 봄에 황사의 영향을 받고 있다. 많은 양의 에어로솔이 편서풍에 의해 태평양 지역으로 수송되고 있어서 이 지역에서는 에어로솔이 복사수지에 미치는 영향이 크게 나타날 것으로 생각된다(Kim et al., 2004). Shaw(1980)에 의하면 강한 제트류를 통해 아시아 대륙에서 발생한 0.5~5.0 μm 크기의 황사가 3.5~4.0 km의 고도면을 따라 태평양을 건너 북아메리카까지 수송된다. 이는 황사 현상이 이미 동아시아뿐만 아니라 전 세계적으로 직접적인 영향을 미치고 있음을 나타내는 것

이다. 특히 황사 발생은 각종 산업 분야 및 인체에 피해를 유발하는 것으로 알려져 그 연구의 필요성이 날로 증대되고 있다.

동아시아 지역에서의 에어로솔에 대한 정량적 정보의 필요성이 인식됨에 따라 동아시아 해역과 동중국해에서는 야외 현장 특별관측이 행해졌다. 이들 특별관측의 목적은 이들 해역에서의 에어로솔의 물리적, 화학적, 복사적 특성을 결정하고 에어로솔과 복사 사이의 상호작용을 정량적으로 결정하기 위함이다. 또한 주요 에어로솔 유형의 변화를 감지하기 위해 아시아-태평양 지역 에어로솔 특성실험(Asian-Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment, 이후 ACE-Asia)이 행해졌다(Alfaro et al., 2003). 또한 아시아 대륙 기후에서의 에어로솔 역할을 연구하기 위해서 1997년 Sky-radiometer Network(SKYNET)라는 에어로솔/복사 지표면 관측망이 설립되었다(<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/aerosol/skyenet/index.html>).

우리나라에서도 에어로솔의 광학적 특성에 대한 연구의 필요성이 증대됨에 따라 황사 발생시 입자의 크기 분포, 화학성분 분석, 장거리 수송 등 다양한 연구들이 수행되었다(조희구, 1980; 전종갑 외, 2000; 전영신 외, 2003; 신승숙 외, 2004; 유정문과 조희구, 1979). 또한 최근에는 안면도와 제주도 고산 등 주로 청정 해안가 지역에서 특별 관측된 자료들을 이용하여 에어로솔의 광학적 특성에 대한 연구가 이루어졌다(김지영 외, 2002; Kim et al., 2004). 하지만 아직까지 한반도 내륙지역에서 장기간 에어로솔의 광학적 특성에 대해서 관측하거나 연구한 사례는 많지 않다.

본 연구에서는 충청남도 공주시에 위치한 공주대학교 자연과학대학 옥상에 설치된 스카이라디오미터(Sky-radiometer)로 2004년 1월부터 12월까지 관측한 자료를 이용하여 공주지역 에어로솔의 광학적 특성(aerosol optical thickness, Ångstrom exponent, single scattering albedo, volume spectrum)에 대해 조사하였다.

자료 및 연구방법

자료

본 연구에 사용된 자료는 2004년 1월부터 12월까지 충청남도 공주시에 위치한 공주대학교 자연과학대학 옥상(127.08 E, 36.28 N)에 설치된 스카이라디오미터로 관측한 7개 파장(315, 400, 500, 675, 870,

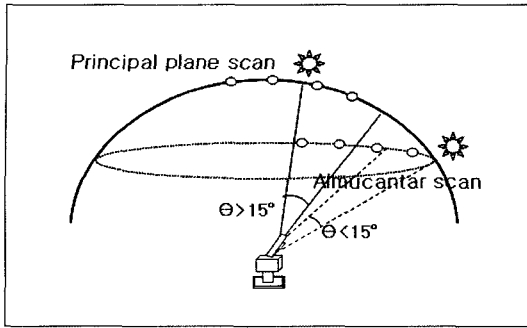


Fig. 1. Geometry of the ground-based Sky-radiometer observation methods (Kim, 2003).

940, 1020 nm)에서의 직달 및 산란 일사량과 동일기간 동안의 지상관측 기상자료이다. 관측에 사용된 스카이라디오미터 POM01-L(Prede Co., Ltd.)은 분광복사계(spectral radiometer), 태양 추적기(sun tracker) 및 강우감지기(rain sensor)로 구성되어 있으며, 1° FOV(field of view)로 직달 및 산란 일사량을 측정한다. 본 기기의 장점은 태양의 위치 추적 및 구름 유무를 자동으로 수행하여 태양위치(일정 고도각을 기준)와 기상조건에 따라 관측여부를 결정하며 관측 자료는 관측과 동시에 개인용 컴퓨터에 자동으로 전송되는 점이다.

Fig. 1은 스카이라디오미터의 관측원리를 나타낸 것으로 산란 일사량은 두 가지 원리로 측정한다. 산란각(θ)이 15°보다 작을 경우에는 일정 천정각하에 방위각을 변화시키며 측정하는 almucantar geometry 방식으로 측정하고, 산란각(θ)이 15°보다 큰 경우에는 일정 방위각하에 천정각을 변화시키며 측정하는 주축선 기하(principle geometry) 방식으로 측정한다. 산란각(θ)이 0°일 때에는 직달일사량을 측정한다. 즉, 다양한 태양-대기-센서 위치관계에서 직달 및 산란 일사량을 측정하고 그로부터 대기 중에 부유하는 에어로솔의 광학적 특성을 간접적으로 추정한다.

연구방법

스카이라디오미터로 관측된 자료로부터 에어로솔 광학두께(aerosol optical thickness, AOT), 옹스트롬 지수(Angstrom exponent, α), 단일 산란 알베도(single scattering albedo, SSA), 그리고 입자 크기별 부피분포(volume spectrum)와 같은 에어로솔의 광학적 특성을 분석하기 위해서 Nakajima et al.(1996)이 개발한 Skyrad.pack(version 3) 프로그램을 사용하였

다. 이 프로그램은 관측지역 및 관측기기의 특성 값을 이용하여 초기 상대적 크기의 전압값(count value)을 물리량(radiance)으로 변환해주는 모듈, 대기상단에서의 직달일사량인 F_0 를 계산하는 복사전달 모델, 선형 및 비선형의 역산방법(inversion method)을 사용하여 에어로솔의 광학적 특성을 산출하는 모듈로 구성되어 있다. AOT는 에어로솔에 의해 얼마나 태양 복사가 감쇄되었나를 가늠할 수 있는 양으로 그 값이 클수록 많은 입자가 분포한다는 것을 의미하고, 반대로 그 값이 작으면 적은 수의 입자가 분포한다는 것을 의미한다. 옹스트롬 지수(α)는 에어로솔의 상대적인 크기를 나타내는 지수로서 그 값이 클수록 작은 입자가 큰 입자보다 상대적으로 많이 존재함을 의미하고, 반대로 그 값이 작을 때는 큰 입자가 작은 입자보다 상대적으로 많이 존재함을 의미한다. SSA는 감쇄계수(extinction coefficient)에 대한 산란계수의 비로서 그 값이 1일 경우에는 완전 산란, 0일 경우에는 완전 흡수를 의미한다. 에어로솔은 형태 및 크기가 매우 다양하나 여기서는 계산을 간단히 하기 위하여 에어로솔의 형태가 구형이라고 가정한다.

지상관측자료로부터 에어로솔의 특성을 분석하기 위해서는 관측 자료에 내재된 여러 가지 잡음을 제거해야 한다. 특히 태양복사에 대해 반투과적 성질을 갖는 권운이나 부분적으로 구름(partly cloud)이 있을 경우 스카이라디오미터는 이를 감지하지 못하고 관측하게 되어 관측 값이 갑자기 커지게 되는 경우가 발생하기도 한다. 본 연구에서는 관측 자료의 품질검사를 3단계로 하였다(Kim et al., 2004). 1단계에서는 음의 AOT와 같은 비정상적 관측 값을 제거하였다. 2단계에서는 구름에 의하여 오염된 관측 값을 Smirnov et al.(2000)의 방법으로 제거하였다. 이 방법은 짧은 시간동안 연속적으로 관측된 값들 중 비정상적으로 큰 변동을 가지는 자료를 탐지하는 방법으로 미 항공우주국(NASA)의 Aerosol Robotic Network(AERONET) 관측 자료들로부터 비정상적인 값을 구분하는 경계값(threshold value)을 산출하였다. 다른 동아시아 지역과 같이 공주도 황사의 영향을 받기 때문에 비정상 자료의 구분 경계 값으로 Smirnov et al.(2000)의 0.02 대신 Kim et al.(2004)이 동아시아 지역의 에어로솔에 대해 경험적으로 산출한 0.03을 이용하였다.

관측 자료의 시각적 분석결과 1, 2단계의 품질검사 후에도 비정상적인 자료 값의 제거가 충분히 되지 않아 3단계 품질검사를 시행하였다. 이 방법은

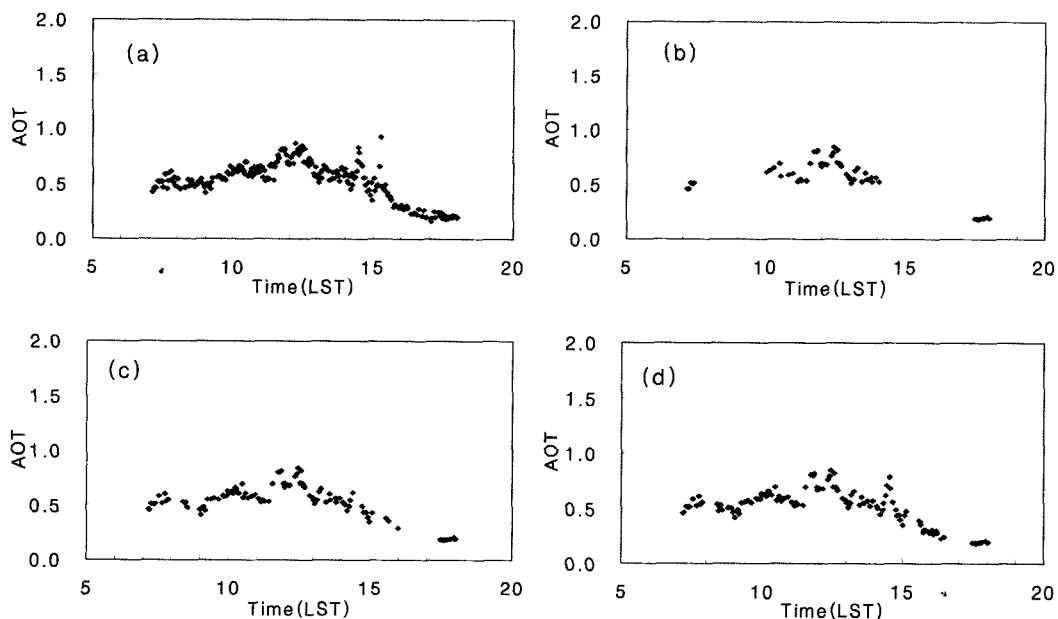


Fig. 2. AOT (23, April, 2004) of raw and quality controlled data with a various threshold values. (a) raw data, (b) filtered with 7%, (c) filtered with 10%, and (d) filtered with 13%.

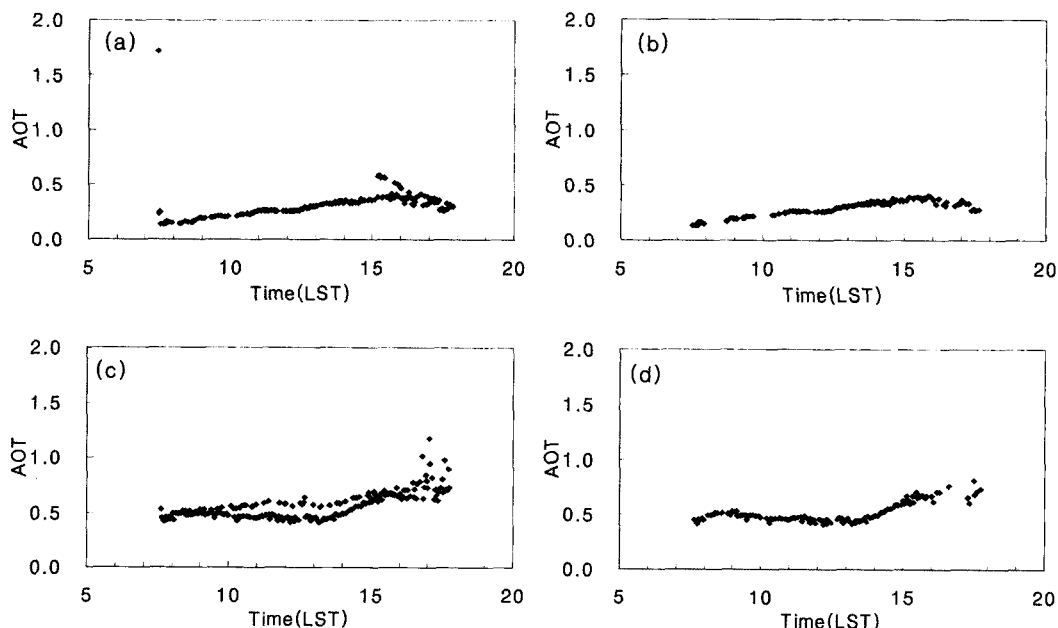


Fig. 3. AOT of raw and filtered data. (a) raw data at clear day (8, April, 2004), (b) filtered data at clear day, (c) raw data at Asian dust (31, March, 2004), and (d) filtered data at Asian dust.

Skyrad.pack으로부터 간접적으로 산출된 에어로솔의 광학적 특성 값들을 복사전달 모델에 입력하여 다시 지상에서의 복사량을 계산한 후 관측한 값과 계산 값의 차이가 일정범위 이상이면 문제가 있는 것으로

하여 분석에서 제외하는 방법이다. 다른 관련 연구에서는 두 값의 차이가 7% 이상인 데이터를 제거한 후 광학적 특성을 분석하였는데, 공주지역의 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 7%를 적용해 본 결과 관

측자료 대부분이 비정상 자료로 판정되어 7%대신 10%를 적용하였다(Kim et al., 2004). 이것은 본 연구에 사용된 측정 장비가 최신 장비라서 측정 수준이 과거 장비에 비하여 양호한 것과 관측소 주변 환경(장비가 옥상에 설치된 점, 주변에 아파트와 기숙사가 위치한 점 등)이 복합적으로 작용한 것으로 추정된다.

Fig. 3은 품질검사 전과 후의 시간별 AOT 변화를 두개의 사례에 대하여 나타낸 것이다. 맑은 날의 경우(a, 4월 8일) AOT가 전체적으로 매우 작게 나타나고 있으나 오전 7시 30분경과 오후 3시에서 4시 사이에 전체 값에서 크게 벗어나는 값들이 나타나고 있다. 또한 황사가 발생했던 날(c, 3월 31일)의 경우에는 전체적으로 AOT가 0.5 이상으로 크게 나타나고 있으며 오후 2시 경부터 AOT의 변동이 크게 나타나고 있다. 품질검사를 적용한 결과(b), (d)에서는 이들 비정상적인 값들이 대부분 제거되었음을 볼 수가 있다. 뿐만 아니라 일부 정상적인 값들도 비정상적인 것으로 판정되었음을 볼 수가 있다. 따라서 본 연구에서 분석한 에어로솔의 광학적 특성 값은 상대적으로 양질의 자료로부터 도출한 것으로 볼 수가 있다. 그러나 그림에는 나타내지 않았지만 지속적인 구름 등에 의하여 상대적으로 큰 AOT가 연속적으로 관측될 때에도 본 품질검사에서는 충분히 제거하지 못하는 문제점을 보이고 있다.

결과 및 토의

2004년 1월부터 12월까지 1년 동안 공주대학교에서 0.5 μm 의 파장대에서 관측된 광학적 특성을 품질검사 수준(QC level)에 따라 월별로 요약하였다(Tables 1, 2, and 3). 전체적으로 품질검사 수준에 따라 공주지역 에어로솔의 광학적 특성이 민감하게 반응함을 볼 수가 있다. 즉, 품질검사를 엄격하게 함에 따라 AOT의 경우 값과 변동성이 같이 작아지나 α 와 SSA는 값은 커지고 변동성은 작아지고 있다. 따라서 공주지역에서 청정한 경우에는 크기는 작고 산란율(SSA)이 큰 에어로솔이 희박하게 존재함을 알 수 있다. 공주지역의 연평균 AOT는 0.40에서 0.46으로 관측횟수가 현저히 작은 여름을 제외하면 공주지역에서는 봄(3, 4, 5월)에 AOT의 값과 변동성이 가장 크게 나타나고 있다. 또한 AOT가 가장 큰 7, 8월의 0.50~0.67은 가장 작은 2월과 10월의 0.24-0.31 보다 약 2배 이상으로 나타나 AOT의 월변동이 매우 큼을 알 수 있다. 월평균 α 는 4월에 0.89에서 0.96 사이로 가장 작게 나타나고 9월과 10월에 1.25에서 1.55로 큰 값이 나타나고 있으며 변동성은 AOT와 같이 주로 봄에 크게 나타나고 있다. 즉, 공주지역에서는 다른 동아시아 지역과 같이 봄에 큰 입자가 많이 분포하고 가을에 작은 입자들이 많이 분포함을 알 수가 있다. 월평균 SSA는 월 및 품질검사 수준에 따라

Table 1. Monthly mean, standard deviation and number of data for AOT according to the filtering threshold values from January to December of 2004

Mon	Var.	AOT filtered with the given threshold value										
		Raw data			13%			10%			7%	
		Ave.	SD	#	Ave.	SD	#	Ave.	SD	#	Ave.	SD
Jan.	0.61	0.70	1792	0.31	0.18	612	0.29	0.16	486	0.29	0.13	136
Feb.	0.60	0.74	2616	0.32	0.21	1166	0.31	0.19	951	0.24	0.14	179
Mar.	0.78	0.75	3047	0.50	0.29	1428	0.48	0.27	1183	0.37	0.16	398
Apr.	0.78	0.78	4411	0.50	0.30	2228	0.50	0.28	1965	0.49	0.29	818
May	0.92	1.01	3453	0.52	0.30	1632	0.52	0.26	1249	0.58	0.27	434
Jun.	1.26	1.33	2960	0.73	0.60	1085	0.63	0.45	700	0.62	0.42	171
Jul.	1.57	1.64	1750	0.79	0.58	400	0.67	0.44	252	0.60	0.33	34
Aug.	1.20	1.26	2690	0.64	0.34	690	0.66	0.31	410	0.50	0.2	773
Sep.	0.86	1.10	2593	0.41	0.27	615	0.40	0.30	292	0.31	0.2	149
Oct.	0.57	0.73	3106	0.31	0.20	1604	0.30	0.20	861	0.27	0.12	135
Nov.	0.74	0.73	1973	0.40	0.28	1019	0.41	0.27	700	0.29	0.17	80
Dec.	0.61	0.62	2624	0.31	0.17	1213	0.30	0.15	929	0.29	0.14	256
Ave.	0.88	0.95	2,751	0.48	0.31	1,141	0.46	0.27	832	0.40	0.22	230

Table 2. Same as in Table 1 except Ångstrom exponent (α)

Mon	Var.	α filtered with the given threshold value										
		Raw data			13%			10%			7%	
		Ave.	SD	#	Ave.	SD	#	Ave.	SD	#	Ave.	SD
Jan.	0.87	0.45	1792	1.18	0.25	612	1.22	0.22	486	1.38	0.19	136
Feb.	0.80	0.41	2616	1.02	0.26	1166	1.03	0.25	951	1.17	0.25	179
Mar.	0.76	0.41	3047	0.98	0.32	1428	1.01	0.31	1183	1.02	0.32	398
Apr.	0.73	0.37	4411	0.88	0.30	2228	0.89	0.30	1965	0.96	0.32	818
May	0.89	0.45	3453	1.12	0.36	1632	1.15	0.37	1249	1.26	0.40	434
Jun.	0.83	0.41	2960	1.13	0.29	1085	1.22	0.27	700	1.34	0.24	171
Jul.	0.78	0.45	1750	1.10	0.27	400	1.17	0.21	252	1.19	0.14	34
Aug.	0.79	0.46	2690	1.11	0.27	690	1.13	0.26	410	1.29	0.30	73
Sep.	0.91	0.46	2593	1.24	0.27	615	1.25	0.28	292	1.55	0.29	49
Oct.	1.10	0.37	3106	1.27	0.23	1604	1.32	0.23	861	1.53	0.30	135
Nov.	0.98	0.32	1973	1.13	0.24	1019	1.16	0.23	700	1.37	0.20	80
Dec.	0.89	0.38	2624	1.12	0.26	1213	1.15	0.27	929	1.32	0.28	256
Ave.	0.86	0.41	2,751	1.11	0.28	1,141	1.14	0.27	832	1.28	0.27	230

Table 3. Same as in Table 1 except single scattering albedo.

Mon	Var.	SSA filtered with the given threshold value										
		Raw data			13%			10%			7%	
		Ave.	SD	#	Ave.	SD	#	Ave.	SD	#	Ave.	SD
Jan.	0.89	0.11	1792	0.94	0.06	612	0.94	0.06	486	0.97	0.04	136
Feb.	0.87	0.11	2616	0.91	0.06	1166	0.91	0.06	951	0.92	0.07	179
Mar.	0.88	0.10	3047	0.91	0.07	1428	0.90	0.07	1183	0.89	0.06	398
Apr.	0.87	0.10	4411	0.90	0.06	2228	0.89	0.06	1965	0.89	0.06	818
May	0.88	0.13	3453	0.94	0.06	1632	0.94	0.06	1249	0.94	0.06	434
Jun.	0.88	0.12	2960	0.93	0.08	1085	0.94	0.08	700	0.95	0.07	171
Jul.	0.86	0.13	1750	0.89	0.11	400	0.89	0.10	252	0.88	0.12	34
Aug.	0.85	0.14	2690	0.88	0.12	690	0.88	0.13	410	0.92	0.11	73
Sep.	0.86	0.13	2593	0.89	0.11	615	0.88	0.12	292	0.91	0.10	49
Oct.	0.87	0.11	3106	0.91	0.07	1604	0.92	0.06	861	0.93	0.05	135
Nov.	0.84	0.13	1973	0.88	0.10	1019	0.87	0.10	700	0.93	0.07	80
Dec.	0.86	0.12	2624	0.92	0.07	1213	0.92	0.07	929	0.92	0.06	256
Ave.	0.87	0.12	2,751	0.91	0.08	1,141	0.91	0.08	832	0.92	0.07	230

0.87(11월, 10%)에서 0.97(1월, 7%)까지의 값이 나타나고 있어 SSA의 계절변동이 적지 않음을 알 수 있다. 공주에서 SSA의 이러한 월 변동의 원인에 대해서는 에어로솔의 화학성분 분석과 궤적 분석이 이루어져야 할 것이다.

Fig. 4는 AOT- α 관계의 계절변동을 보기 위하여 AOT와 α 의 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 계절에 따라 차이는 있지만 전체적으로 AOT와 α 의 변동 범위가 크게 나타나고 있으며 두 값은 서로 반비례 관계를 보이고 있다. 다른 계절에 비해 봄에는 AOT와 α 의 값이 클 뿐만 아니라 발생범위(변동 폭)도 크게 나타나고 있으며 두 값 사이에 뚜렷한 관계가 나타

나지 않고 있다. 주목할 점은 α 가 0.5 이하로 작을 때 0.5 이상으로 큰 AOT가 나타나는 점으로 이것은 봄에 황사가 발생했을 때 조대입자가 증가된 것에 의한 것으로 보인다. 여름에는 α 값이 약 0.7 이상으로 크게 나타나고 있으며 AOT- α 사이에 음의 상관성이 뚜렷하게 나타나고 있다. 가을에는 α 값이 약 1.0 이상으로 크게 나타나고 있으며 AOT- α 값의 관계는 매우 독특하게 두 가지 모드로 나타나고 있다. 첫 번째 모드는 AOT가 약 0.25 이하로 작을 때 α 값의 변동이 크게 나타나는 것이고 두 번째는 여름과 같이 AOT- α 가 음의 상관성을 보이는 것이다. 첫 번째 모드는 우리나라 가을의 전형적인 하늘상태를 보이는

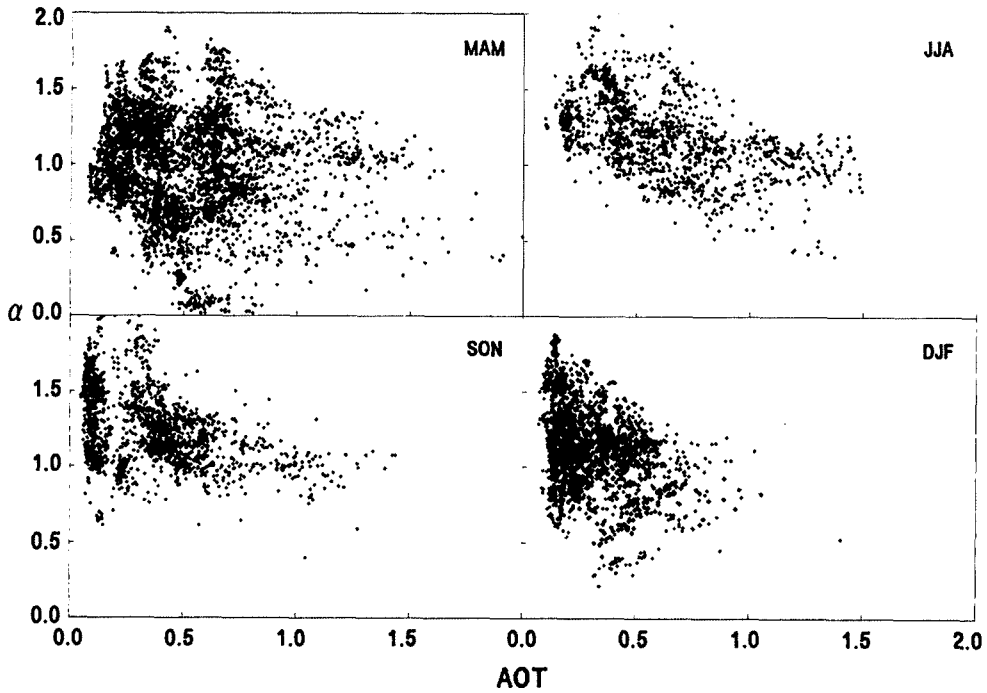


Fig. 4. Scatter plot of AOT and α over Gongju for MAM (March-May), JJA (June-August), SON (September-November), and DJF (December-February) of 2004.

것으로 SKYNET 관측소중의 하나인 중국의 만달고비(Mandalgovi)에서의 가을 값과 거의 일치하고 있다 (Kim et al., 2004, Fig. 4). 겨울에는 다른 계절에 비해 AOT 값의 변동성이 작은 반면 α 값의 변동성은 크게 나타나고 있다. 공주지역 에어로솔의 광학적 특성은 AOT와 α 가 각각 0.5에서 1.5 사이에 폭 넓게 나타나고 있는데 이는 공주의 서쪽에 위치한 안면도에서의 에어로솔의 광학적 특성과 유사하게 나타난다. 또한 동아시아 지역 SKYNET 4개 관측소(Mandalgovi, Dunhuang, Yinchuan, and Sri-Samrong)의 관측결과를 분석한 Kim et al.(2004)의 연구결과와 비교할 때 공주지역 에어로솔의 AOT- α 관계는 독특한 것으로 나타나고 있다. 이처럼 지역에 따라 AOT- α 관계가 상이하게 분포하는 점은 에어로솔에 대한 보다 많은 관측의 필요성을 제시한다.

Fig. 5는 5일 평균한 AOT, α 의 시계열과 그 값들의 12개월 평균을 나타낸 것이다. 5일 평균을 계산하는 과정에서 3일 이상 관측이 있을 경우만 평균을 취하였다. 따라서 시계열에서 불연속이 있는 것은 3일 이상 지속된 구름으로 인하여 관측이 이루어지지 못한 경우와 품질검사 과정에서 관측 자료가 대부분 제외된 경우이다. 공주지역에서의 AOT와 α 모두 계

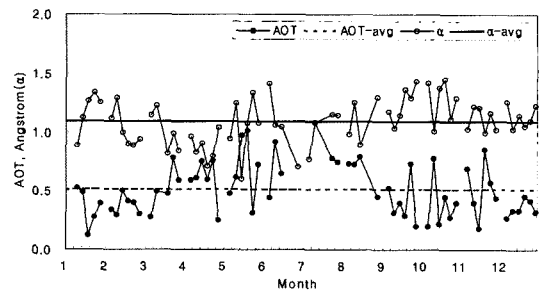


Fig. 5. Time series of the 5-day averaged AOT and α from January to December of 2004.

절에 관계없이 강한 시간변동을 보이고 있으며 AOT와 α 는 상대적으로 겨울에 변동성이 작게 나타나고 있다. 이는 공주지역을 지배하는 기단의 특성과 황사와 같은 대기현상의 계절변동과 관련된 것으로 보인다. 계절변동 뿐만 아니라 5일 주기 변동에서도 AOT와 α 는 일부 기간(2월말, 3월말, 4월 중순)을 제외하고는 전 계절에 걸쳐 강한 음의 상관성을 보이고 있어 AOT가 증가하는 것은 주로 황사와 같은 큰 입자에 의한 것임을 추정할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서와 같이 5일 평균한 SSA를 나타낸 것으로 연평균은 약 0.9이며 SSA도 AOT 및 α

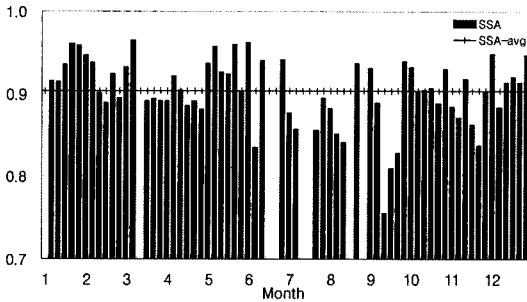


Fig. 6. Same as in Fig. 5 except SSA.

와 같이 강한 시간변동을 보이고 있다. 황사기간인 봄에 SSA가 대부분 평균이하로 나타나고 있는데 이것은 황사 발생시 에어로솔의 흡수성이 증가함을 제시한다. 황사발생시 SSA가 약 0.8 정도로 낮아지는 점에 대해서는 안면도 및 고산에서의 관측결과에서도 나타나고 있다(Kim et al., 2004). Kim et al.(2004)에 의하면 SSA는 사막의 영향이 큰 둔황(Dunhuang)과 만달고비(Mandalgovi)에서 0.90~0.94이고, 산불의 영향을 많이 받는 스리삼롱(Sri-Samrong)에서는 0.86~0.93 으로 계절변동이 크게 나타나고 있다. 즉, 에어로솔의 유형, 이동되어 온 거리에 따라 에어로솔의 광학적 특성이 달라지고 있음을 제시한다. 따라서 기후모델이나 복사수지모델에서 에어로솔의 광학적 특성을 처방할 때는 이러한 점을 고려하여야 할 것이다. 다른 계절에 비해 여름과 가을에 SSA가 작은 현상은 둔황과 스리삼롱에서도 나타난다.

Fig. 7은 공주지역에서 입자크기별 부피분포를 월별로 나타낸 것이다. 입자크기별 부피분포는 계절에 관계없이 미세입자(약 $0.2 \mu\text{m}$)와 조대입자($10 \mu\text{m}$)에서 최대치가 발생하는 전형적인 쌍봉(bi-modal) 형태를 보이고 있다. 하지만 월에 따라 부피분포의 패턴이 매우 다양하게 나타나고 있다. 황사가 주로 발생

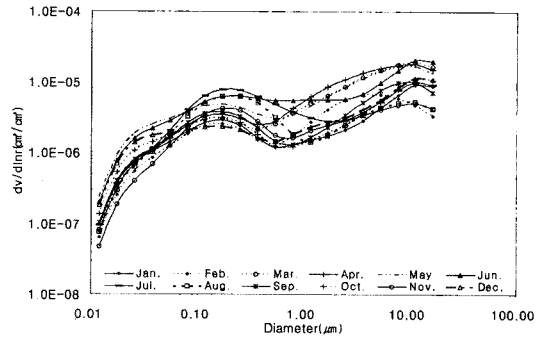


Fig. 7. Distribution of volume spectrum according to the particle sizes from January to December ($dV/dlnr$) of 2004.

하는 달인 3, 4, 5월에는 미세입자는 다른 달과 유사하나 $0.5 \mu\text{m}$ 이상으로 크기가 큰 입자들의 부피가 현저하게 증가하고 있다. 반면에 여름철 우기인 6, 7, 8월에는 미세입자의 부피가 크게 증가하고 있으며 두 최대치사이의 경계가 다른 달의 $0.5\sim0.6 \mu\text{m}$ 에서 약 $2 \mu\text{m}$ 로 이동되고 있다. 월에 따라 크기별 부피분포가 다양하게 나타나는 것은 앞에서 설명한 AOT와 α 의 월변동과 관련이 있는 것으로 보인다.

풍향이 에어로솔의 광학적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 풍향별로 AOT, α , 및 SSA의 분포를 도시하였다(Fig. 8). 공주지역에서는 주로 서풍계열의 바람이 동풍계열의 바람보다 빈번하게 불고 있음을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 공주지역의 AOT, α 및 SSA는 풍향의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나고 있다. 이는 관측소 주변에 대규모의 인위적인 오염원이 없는 것과 관련된 것으로 보인다.

Fig. 9는 2004년 4월 중 공주에서 맑은 날과 황사가 발생한 날의 AOT와 α 를 나타낸 것이다. 맑은 날인 4월 8일의 경우에는 AOT는 0.5 이하로 작고 α 는

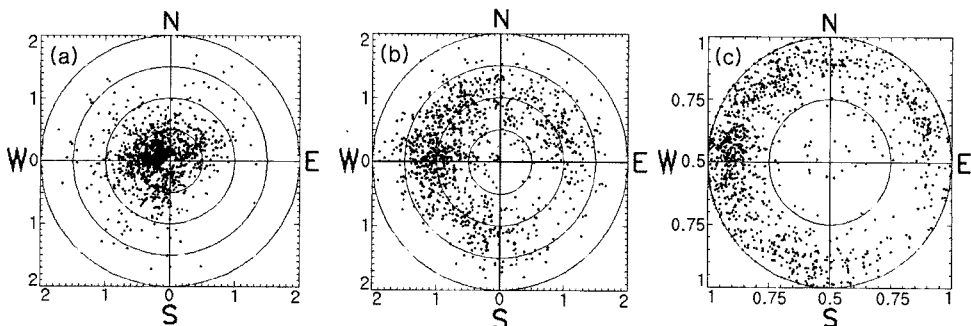


Fig. 8. Scatter plot of AOT (a), α (b), and SSA (c) over Gongju according to the wind direction of 2004.

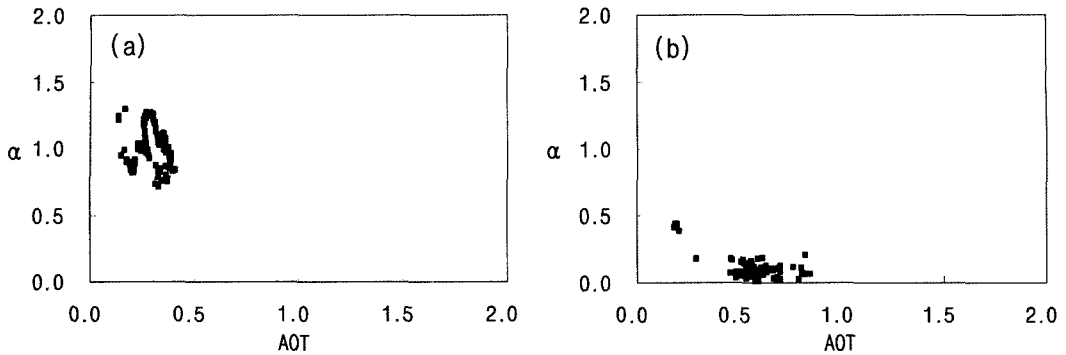


Fig. 9. Examples of AOT-Ångstrom exponent. (a) clear day (8, April, 2004), (b) Asian dust day (23, April, 2004).

0.7~1.4로 큰 범위에 분포되어 있어 크기가 작은 입자가 농도도 낮게 존재함을 알 수 있다. 반면 4월 23일은 황사가 있었던 날로써 맑은 날에 비해 AOT는 커지고 α 는 현저히 작아졌음을 볼 수가 있다. 이러한 변화는 황사 발생시에는 대기 중에 큰 입자들이 상대적으로 많이 존재하고 있음을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 공주대학교 자연대 옥상에서 운용중인 스카이라디오미터(Sky-radiometer)로 측정된 직달 및 산란 복사자료로부터 공주지역의 에어로솔의 광학적 특성을 분석하였다. 분석기간은 2004년 1월부터 12월까지이다. 에어로솔의 광학적 특성의 분석에 활용된 알고리즘은 대기상단 및 지표에서의 측정 복사값과 계산 복사값 사이의 차를 에어로솔에 의한 것으로 추정하는 간접적 방법으로 Nakajima et al.(1996)이 개발한 Skyrad.pack.3를 이용하였다. 주요 분석요소는 에어로솔의 광학두께(AOT), 단일 산란알베도(SSA), 옹스트롬 지수(α) 및 에어로솔의 크기별 분포이며 분석결과와 질을 높이기 위하여 초기 관측 자료의 품질검사를 수행하였다.

공주지역의 연 평균 AOT는 약 0.46으로 원환(Yinchuan)과는 유사하나 스리삼롱(Sri-Samrong)보다는 작게 나타나고 있다. 월평균 옹스트롬 지수(α)의 최소값과 최대값은 각각 0.89와 1.32이고 연평균은 1.14이다. 이 값은 약 0.9와 1.0의 값을 갖는 만달고비(Mandalgovi)와 스리삼롱과는 유사한 값이나 0.5와 0.2 이하의 값을 갖는 원환과 둔황(Dunhuang)보다는 현저히 큰 값이다. 즉, 공주지역의 에어로솔 입자 크기는 만달고비와 스리삼롱과는 유사하나 원환과 둔황

보다는 현저히 작음을 알 수 있다(Kim et al., 2004). 또한 월평균 SSA의 최소값과 최대값은 각각 0.87과 0.94 이고 연평균은 약 0.91로 동아시아 지역의 둔황과 만달고비 지역에서의 값들과 유사한 반면 스리삼롱 지역의 0.92~0.94 보다는 적은 값을 보이고 있다.

월평균 크기별 입자의 부피분포에서는 미세입자와 조대입자에서 최대치가 나타나는 쌍봉(bi-modal) 형태를 보이고 있으나 월에 따라 최소치와 최대치가 나타나는 입자의 크기 및 부피에서 강한 변동을 보이고 있다. 황사(Asian dust)가 주로 발생하는 봄에는 조대입자의 총 부피가 다른 달에 비하여 현저히 증가하고 있다. 이러한 현상은 봄에 AOT와 α 가 각각 크게 증가하고 감소하는 점에서도 확인되고 있다. 반면에 여름인 6, 7, 8월에는 조대입자와 미세입자의 총 부피가 각각 현저하게 감소하고 증가하고 있다. 이는 동아시아 여름 몬순과 관련된 지속적인 강수현상에 의하여 조대입자가 습침착된 것과 관련된 것으로 보인다. 또한 공주지역의 에어로솔은 풍향에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타나고 있다.

동아시아 지역 SKYNET 4개 관측소(Mandalgovi, Dunhuang, Yinchuan, and Sri-Samrong)의 관측결과를 분석한 Kim et al.(2004)의 연구결과와 비교할 때 공주지역 에어로솔의 광학적 특성은 평균, 계절변동, 변동범위, AOT- α 관계 등에서 타 지역과 다른 특성을 보이고 있다. 또한 전체적으로 에어로솔의 광학적 특성이 품질검사의 수준에 민감하게 반응하고 있어 결과 해석 시 유의할 필요가 있으며 분석결과와 신뢰도를 높이기 위해서는 보다 체계적이고 표준화된 품질검사 기법의 개발이 필요하다. 이처럼 지역에 따라 광학적 특성이 지역 및 계절에 따라 상이하게 분포

하는 점은 에어로솔에 대한 보다 많은 관측의 필요성을 제시한다.

사 사

본 연구는 2003년도 공주대학교 학술연구비지원과제 「에어로솔의 복사강제력에 관한 연구」와 「통신해양기상위성 1호 개발-지상자료처리시스템 개발사업(III)」의 일환으로 수행된 것입니다. 연구비 지원에 감사드립니다. 이 논문을 심사하시고 수정에 도움을 주신 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김지영, 최병철, 오성남, 2002, ACE-Asia 기간 중 제주도 고산에서 썬포토메터로 관측한 황사의 광학적 특성. 한국기상학회지, 38(4), 355-367.
- 신승숙, 윤순창, 남재철, 2004, 1993~2002년 황사/비황사시의 에어로솔 화학성분 분석, 한국기상학회지, 40(3), 345-359.
- 유정문, 조희구, 1979, 대기혼탁도에 따르는 천공복사의 산란위상함수, 한국기상학회지, 15(2), 1-9.
- 전영신, 임주연, 최병철, 2003, 황사(黃砂)현상과 연무(煙霧)현상에 따른 서울의 봄철 에어로솔 특성, 한국기상학회지, 39(4), 459-474.
- 전종갑, 예상욱, 광용문, 정용승, 2000, 한반도에서 관측된 1998년 4월 황사의 특성 및 장거리 수송 패턴 분석, 한국기상학회지, 36(3), 405-416.
- 조희구, 1980, 서울의 대기 Aerosol 입자 크기 분포에 관한 연구. 한국기상학회지, 16, 1-9.
- Alfaro, S. C., Gomes, L., Rajot, J. L., Lafon, S., Gaudichet, A., Chatenet, B., Maille, M., Cautenet, G., Lasserre, F., Cachier, H. and Zhang, X. Y., 2003, Chemical and optical characterization of aerosols measured in spring 2002 at the 대기혼탁도ACE-Asia supersite, Zhenbeitai, China. Journal of Geophysical Research, 108(D23), 8641, doi:10.1029/2002JD003214.
- Arao, K. and Ishizaka, Y., 1986, Volume and mass of yellow sand dust in the air over Japan as estimated from atmospheric turbidity. Journal of Meteorological Society of Japan, 64, 79-94.
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley J. A., Jr., Hansen J. E. and Hofmann, D. J., 1992, Climate forcing by anthropogenic aerosols. Science, 255(5043), 423-430.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Climate Change 2001, The Scientific Basis, edited by Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., and Maskell (eds.), K., Cambridge Univ., Press, New York., 881p.
- Kiehl, J. T. and Briegleb, B. P., 1993, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. Science, 260, 311-314.
- Kim, D. H., 2003, Aerosol optical properties and associated aerosol radiative forcing over East Asia determined from ground-based measurements of sunphotometry. Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 122p.
- Kim, D. H., Sohn, B. J., Nakajima, T., Takamura, T., Takamura, T., Choi, B. C. and Yoon, S. C., 2004, Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements. Journal of Geophysical Research, 109, D02209, doi: 10.1029/2003JD003387.
- Nakajima, T., Tonna, G., Rao, R., Boi, P., Kaufman, Y. and Holben, B., 1996, Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. Applied Optics LP, 35(15), 2672-2686.
- Nakajima, T., Sekiguchi, M., Takemura, T., Uno, I., Higurashi, A., Kim, D. H., Sohn, B. J., Oh, S. N., Nakajima, T. Y., Ohta, S., Okada, I., Takamura, T. and Kawamoto, K., 2003, Significance of direct and indirect radiative forcing of aerosols in the East China Sea region, Journal of Geophysical Research, 108(D23), 8658, doi:10.1029/2002JD003261.
- Shaw, G. E., 1980, Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian island. Journal of Applied Meteorology, 19, 1254-1259.
- Smirnov, A., Holben, B. N., Eck, T. F., Dubovik, O. and Slutsker, I., 2000, Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database. Remote Sensing of Environment, 73(3), 337-349.
- Willeke, K. and Baron, P. A., 1993, Aerosol measurement, principles, techniques, and applications. Van Nostrand Reinhold, 876.

2005년 7월 28일 원고 접수
2005년 10월 25일 수정원고 접수
2005년 10월 25일 원고 채택