

마이크로탑스 II 다파장 복사계를 이용한 대기 에어로솔 광학 두께 관측

Aerosol Optical Thickness Measurements from the Microtops-II Multi-wavelength Radiometer

이 권 호* · 이 규 태

강릉원주대학교 복사위성연구소, 대기환경과학과

(2015년 12월 28일 접수, 2016년 1월 4일 수정, 2016년 1월 11일 채택)

Kwon-Ho Lee* and Kyu-Tae Lee

*Research Institute for Radiation-Satellite (RIRS), Department of Atmospheric &
Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University*

(Received 28 December 2015, revised 4 January 2016, accepted 11 January 2016)

Abstract

Aerosol optical thickness (AOT) and Ångström exponents were monitored at the KIU site (N35.91°, E128.80°) during the continuous observation period of 5 November 2010~19 March 2013 using a Microtops-II handheld multi-wavelength radiometer. Comparisons of AOT values from the Microtops-II with the Sun-sky radiometer data from the Aerosol Robotic Network (AERONET) showed very good agreements: correlation coefficients are lies between 0.98 and 0.99, slopes range from 0.98 to 1.01, and intercepts are smaller than 0.008 at five wavelengths (380 nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm). During the observation period, the Microtops-II AOT and Ångström exponents are $\tau_{500} = 0.560 \pm 0.351$, $\alpha_{500-870} = 1.135 \pm 0.445$. Fine mode aerosols appear to dominate in the study region with significant contributions from small particles.

Key words : Aerosol optical thickness, Ångström exponent, Radiometer

1. 서 론

대기 에어로솔(atmospheric aerosols)의 광학 특성은 주로 에어로솔 입자의 크기와 화학적 성분에 의하여 결정된다. 즉, 에어로솔 입자의 크기는 전자기 파의 파

장과 물리적 상호작용에 의한 산란효율(scattering efficiency)을 결정하며, 입자의 화학특성은 전자기파의 흡수성(electro-magnetic absorption)에 영향을 미친다. 이러한 에어로솔의 광학 특성이 지구-태양의 복사 에너지 전달과정에 간섭하게 되므로, 복사 강제력(radiative forcing)으로 인한 기후변화 효과의 한 원인 인자로 알려져 있다(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013; Ramanathan *et al.*, 2001). 대기 에어로솔의 복사 강제력은 아시아 지역에서 기여도가 상대적으로

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-640-2319, E-mail : kwonho.lee@gmail.com

높게 나타나고 있다(Lee, 2012; Li *et al.*, 2010). 이러한 대기 에어로솔의 광학 특성 정보는 현재 대기 에어로솔의 부하량, 주요 입자 크기분포, 장거리 이동 및 광화학 반응 특성(Tatarov *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2006a), 대기질 예측(Lee *et al.*, 2006b), 복사강제 효과 산정(Lee, 2012) 등을 파악하는 데 중요한 자료로 활용할 수 있고, 더 나아가 지역 및 광역적 대기질 관리를 위한 입자성 오염물질의 제어 전략을 수립하는 데 유용하게 쓰일 수 있다.

에어로솔의 광학특성에 따른 미세물리적 특성과의 관계가 함수적으로 관계가 있기 때문에, 기기적으로 측정된 산란광이나 흡수광으로부터 에어로솔 입자의 크기, 수 농도, 질량 농도를 유추할 수도 있다. 대표적인 사례로서, 레이저의 산란 신호로부터 입자의 크기별 수 농도를 측정할 수 있는 광학 입자 계수기(Optical Particle Counter; OPC), 광 흡수 측정을 통해 탄소 입자를 측정하는 에살로미터(Aethalometer) 등이 있다. 그리고 대기환경 자동 측정망에서 흔히 사용되는 필터 기반의 미세먼지 농도 측정은 필터에 누적 포집된 입자에 의한 광 흡수 계수를 질량농도로 환산하는 원리를 사용한다. 최근에는 레이저 유도 백열법(Laser Induced Incandescence)을 차용한 Single Particle Soot Photometer (SP2)로 탄소 입자에 대한 측정을 한 연구 사례도 보고되었다(Lee *et al.*, 2010).

위에서 언급된 측정기기들은 지상에서의 지점관측을 통한 에어로솔 입자의 특성 정보를 제공해 주지만, 관측 범위의 한계점을 지니고 있다. 따라서, 대기 전체의 에어로솔 특성 관측을 위하여 복사계(Radiometer) 또는 라이다(LIDAR)를 사용하는 방법이 사용된다. 라이다는 레이저의 후방산란(back scattering) 신호를 측정하여 고도 별 에어로솔의 광학 특성을 측정 가능하지만, 상대적으로 비 경제적이며 기기 운영이 어려운 단점이 있다. 복사계는 지구 대기를 통과하는 복사에

너지를 측정하여 산란광 또는 흡수광에 미치는 에어로솔의 특성(광학두께, 단산란알베도, 크기분포 등)을 비교적 간단히 산출 할 수 있어 널리 사용되고 있다. 그러나, 태양광을 수동적으로 측정하는 기기 특성상 기상조건이 나쁜 경우(구름, 강수, 안개 등)나 야간에는 관측이 불가능한 단점이 있다.

여러 개의 파장대에서 복사량을 측정할 수 있는 다 파장 복사계는 입자의 광학 특성값과 미세물리적 특성을 제공한다. 복사계 관측을 통하여 에어로솔 광학두께(aerosol optical thickness; AOT 또는 τ)값은 전체 대기 컬럼내에 존재하는 모든 입자성 물질의 총 부하량을 상대적으로 표현한 값으로서, 각 고도 별 에어로솔의 소산계수의 합을 의미한다. 지상에서 관측한 AOT 값은 인공위성으로 산출된 AOT의 검 · 보정을 위하여 사용되므로 중요한 물리량으로 취급되고 있다.

본 연구에서는 도시 외곽지역에서 대기 에어로솔의 광학 특성을 조사하기 위하여 다파장 복사계인 Microtops-II를 이용하여 5개 파장별(380 nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm) AOT를 장기간 연속 측정하였다. 그리고 Microtops-II 자료의 정확도를 검증하기 위하여 지상 관측 네트워크인 Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun-sky radiometer (Cimel Electronique S.A.S, France) 관측자료와 비교 검증을 하였다. 검증된 Microtops-II 자료를 이용하여, 장기간 측정된 파장별 AOT 값의 분석을 통하여 측정기간 중 에어로솔의 부하량과 크기분포 변화 특성을 파악하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 자료의 종류와 관측 기간 및 범위 요소는 표 1과 같이 경상북도 경산시 외곽지역에서 연속관측을 수행한 Microtops-II 관측 자료와, 이 자료

Table 1. List of data and observation parameters used in this study.

Data	Period	Coverage	Resolution	Parameters
Microtops-II	2010/11/05~2013/03/19	N35.91°, E128.80°	Point	AOT ($\lambda = 380 \text{ nm}, 440 \text{ nm}, 500 \text{ nm}, 675 \text{ nm}, 870 \text{ nm}$), Ångström exponent
CIMEL-318	2012/03/12~2012/12/19	N35.91°, E128.80°	Point	AOT ($\lambda = 1640 \text{ nm}, 1020 \text{ nm}, 870 \text{ nm}, 675 \text{ nm}, 500 \text{ nm}, 440 \text{ nm}, 380 \text{ nm}, 340 \text{ nm}$), Ångström exponent

의 비교검증을 위한 CIMEL-318 Sun-sky radiometer 관측 자료를 포함한다. 두 기기의 특성과 자료의 산출 과정에 대한 상세 설명은 다음과 같다.

2.1 Microtops-II 관측자료

Microtops-II (Solar Light Co., Inc., USA)는 수동형 다파장 복사계의 일종으로 휴대용 관측을 목적으로 제작된 작은 크기의 외형(10×20×4.3 cm, 600 g)을 가지고 있으며, 비교적 간단한 조작법과 경제적인 장점으로 인하여 시간과 장소에 구애 받지 않고 대기 관측이 가능하다. 그림 1은 Microtops-II의 구조를 설명하고 있으며, 5개의 파장대에서 복사 에너지를 측정할 수 있는 광학 센서를 사용하고 있다. Microtops-II 복사량 측정 오차는 약 2% 이내이며, 광 센서의 반치 전폭(Full Width at half maximum, FWHM)은 약 2.4 nm, 관측 시야각(Field of View, FOV)은 2.5도, 정렬각은 0.1도보다 작은 것으로 알려져 있다(Morys *et al.*, 2001).

Microtops-II 관측은 경상북도 경산시에 위치한 경일대학교 캠퍼스 제4공학관(N35.91°, E128.80°)에서 2010년 11월 5일부터 2013년 3월 19일까지 약 2년 5개월 동안 구름이 없는 맑은 날, 일출 이후부터 일몰 이전까지 약 30분에서 1시간 간격으로 연속 관측을 수행하였다. 관측지점은 대구광역시와 약 20 km 정도 떨어진 외곽지역에 위치하고 있으며, 주변 지역은 주로 산지 및 농지, 그리고 4번 국도가 지나고 있으며, 비교적 대규모 대기오염 배출원은 없는 것으로 판단된다

(그림 2 참조).

Microtops-II 관측시, 태양 방향으로 정확한 정렬이 필요하므로 삼각대 또는 바닥 지지대를 사용하여 최대

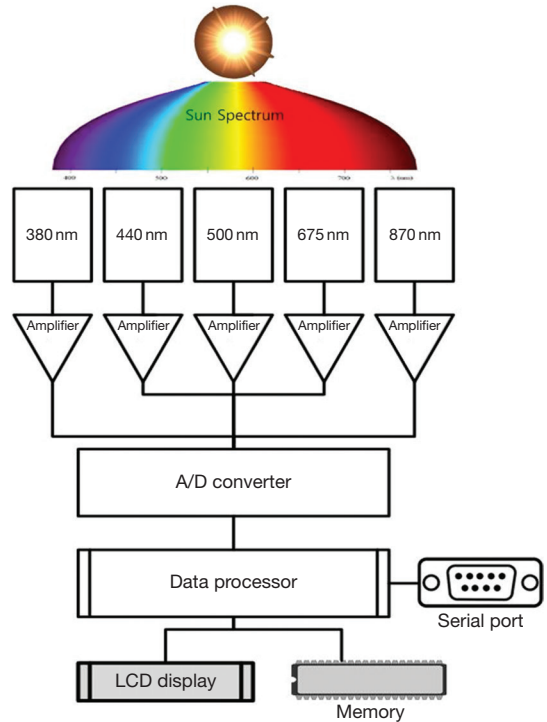


Fig. 1. Schematic diagram of the measurement method with Microtops-II used in this study.

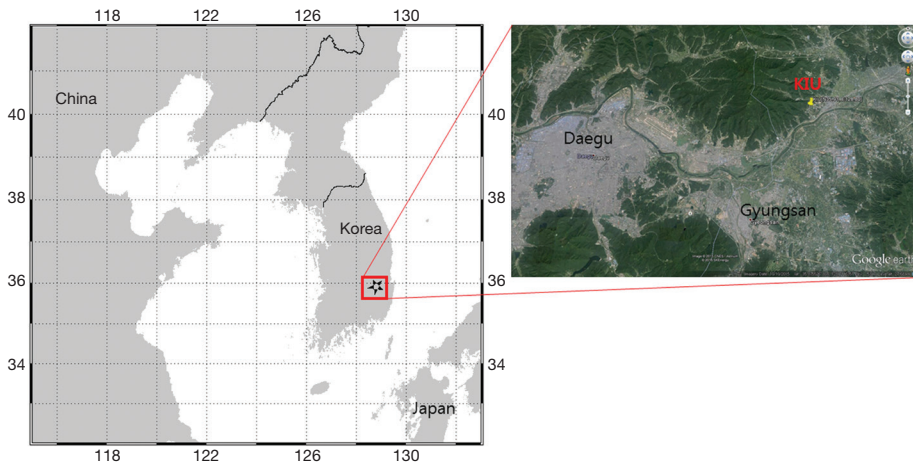


Fig. 2. Location of the Microtops-II measurement site (Kyungil University (KIU), N35.91°, E128.80°).

한 흔들림이 없는 조건하에서 1회 관측 시 연속 10회 측정을 실시하였다. 측정 자료는 기기 내 메모리에 저장되며, 주기적으로 시리얼 포트를 통해 제작사에서 제공된 통신 소프트웨어를 이용하여 수집하였다. 관측 자료의 품질관리를 위하여 10회 측정된 자료의 최대/최소 값을 제외한 나머지에 대한 평균값을 사용하였다.

Microtops-II가 관측한 파장별 직달 일사량(direct irradiance)는 랑리 보정법(Langley calibration method)을 이용하여 결정된 태양 상수값(I_0)으로부터 다음과 같이 총 광학두께(τ_{Tot})를 구할 수 있다.

$$\tau_{Tot}(\lambda) = -\frac{1}{m} \ln\left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right) \quad (1)$$

식(1)에서, m 은 태양 천정각(θ_0)의 함수($m = \frac{1}{\cos\theta_0}$)인 상대 광 경로(air mass), λ 는 파장, I 는 Microtops-II가 관측한 파장별 직달 일사량이다. τ_{Tot} 는 대기분자 산란(Rayleigh scattering), 미량기체에 의한 흡수 기여도를 제거하면 식(2)와 같이 AOT 값을 결정할 수 있게 된다.

$$\tau_{Aer}(\lambda) = \tau_{Tot}(\lambda) - \tau_{Ray}(\lambda) - \tau_{Gas}(\lambda) \quad (2)$$

식(2)에서 Rayleigh 산란에 의한 광학두께(τ_{Ray})는 식(3)과 같이 파장에 의한 함수(Hansen and Travis, 1974)가 적용된다.

$$\tau_{Ray}(\lambda) = 0.008569\lambda^{-4} (1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) \quad (3)$$

그리고 미량기체에 의한 광학두께(τ_{Gas})는 자외선~가시광선 영역의 파장대에 흡수선을 가지고 있는 오존(O_3)과 이산화질소(NO_2)에 의한 영향을 고려할 수 있다. 오존과 이산화질소에 대한 파장별 흡수계수는 각각 Nicolet(1981)과 Vandaele *et al.*(2002)의 실험실 측정결과값을 이용하였으며, τ_{Gas} 는 각 기체 성분 별 광 흡수 계수(σ_{Gas})와 대기 중 농도(D_{Gas})로부터 식(4)와 같이 계산할 수 있다. 오존과 이산화질소에 대한 D_{Gas} 값은 각각 해당일에 OMI 인공위성 관측자료로부터 본 연구의 관측지역에 가장 가까운 화소값을 사용하였다.

$$\tau_{Gas}(\lambda) = \sigma_{Gas}(\lambda) \times D_{Gas} \quad (4)$$

2. 2 AERONET sun-sky radiometer 자료

Microtops-II AOT자료의 검증을 위한 지상 실측값(ground truth) 자료로서, 동일 관측 지점에서 2012년 한 해 동안 CIMEL-318 sun-sky radiometer 관측 자료를 AERONET 데이터 베이스(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)에서 획득하였다. 본 연구에서는 사용된 AERONET AOT 자료는 유효 자료의 개수를 가능한 많이 확보하기 위하여 구름 효과가 제거된 Level 1.5 자료를 사용하였다.

CIMEL-318 sun-sky radiometer는 8개의 채널(1640

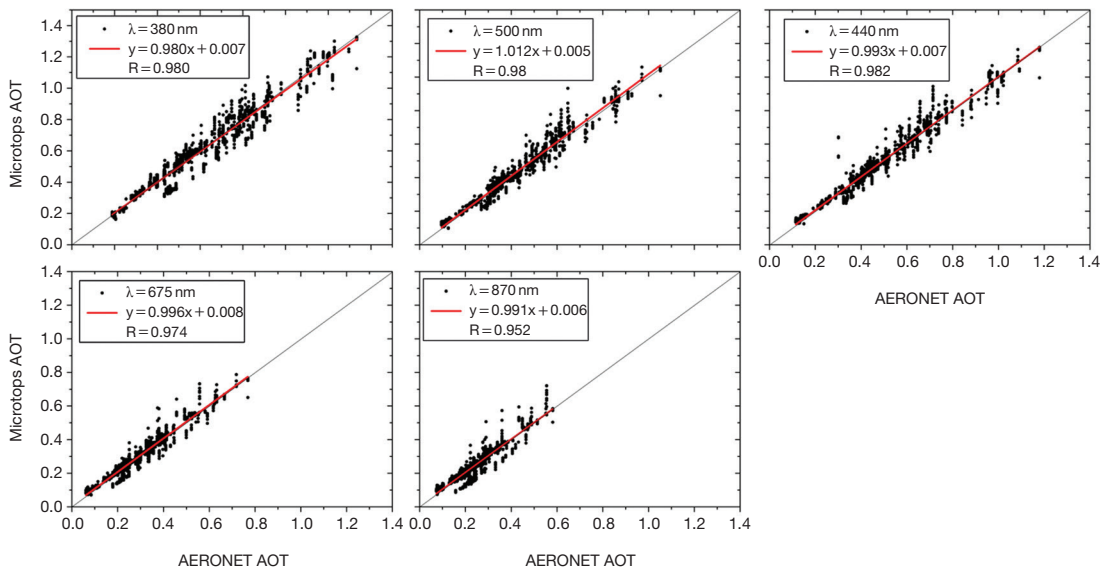


Fig. 3. Microtops-II AOT as a function of AERONET AOT.

nm, 1020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm, 340 nm)에서 직달 일사량을 측정하여 각종 보정 및 복사전달계산 과정을 거쳐서 AOT 값을 결정한다. AOT 자료는 각 채널에서 0.01 이하의 안정된 오차범위를 가진다(Eck *et al.*, 1999). Microtops-II AOT 관측 값과 비교를 위해서 AERONET AOT는 Microtops-II의 관측시간과 동일한 ± 5 분 이내에 해당하는 관측 자료를 평균한 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Microtops-II AOT 자료의 검증

Microtops-II 관측을 통해 획득한 5개 채널 별 AOT 자료와 동일한 파장대의 AERONET AOT자료(즉, 380

nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm)와의 비교를 수행하였다(그림 3). 그림 3에서 Microtops-II AOT(τ_M)와 AERONET AOT(τ_A)와의 선형 회귀 방정식의 기울기 값은 0.98~1.01의 범위를 가지며, y-절편은 0.005~0.008 값을 가지는 것으로 나타난다. 두 기기간의 AOT 값의 상관계수는 모두 0.98 이상의 값을 가지고 있으며, 0.0001보다 작은 p 값을 가지고 있으므로 매우 유의한 상관관계를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 이러한 선형 회귀 분석결과는 본 연구에서 분석된 Microtops-II의 5개 채널 별 AOT 자료의 정확도가 AERONET AOT와 같이 매우 정확한 수준임을 확인할 수 있다.

3.2 에어로솔 광학특성

그림 4는 전체 관측 기간 동안의 파장 별 Microtops-

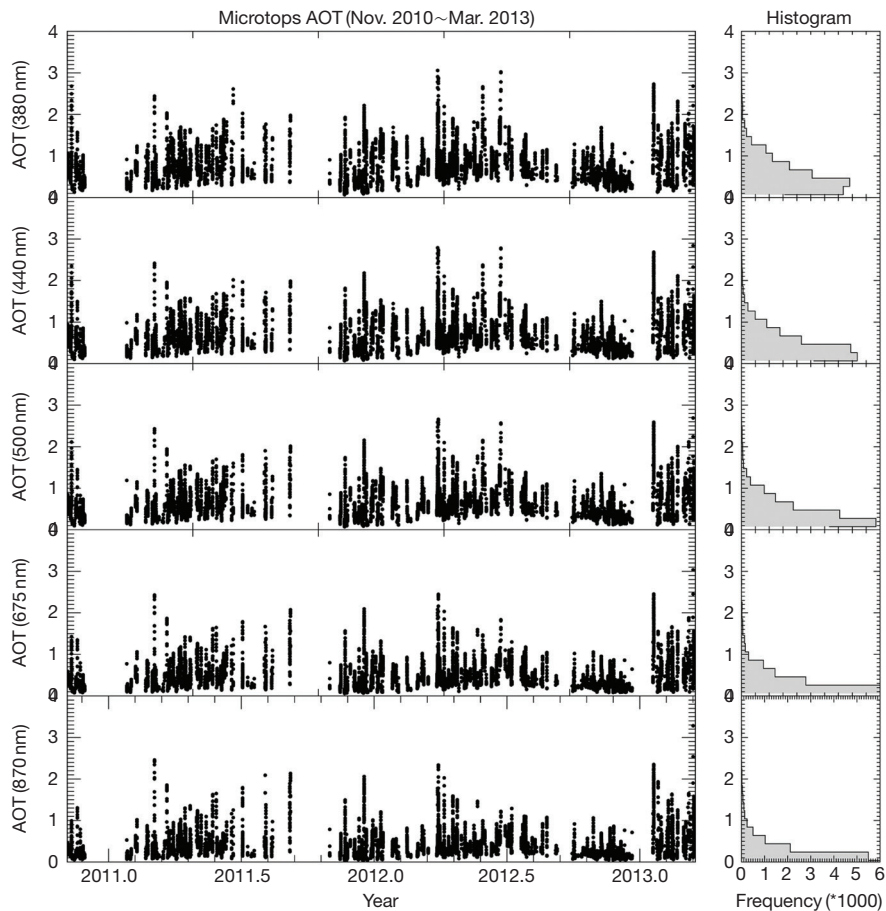


Fig. 4. Time series of the Microtops-II AOTs and frequency histogram observed from 5 November 2010 to 19 March 2013.

II AOT의 시계열 분포를 나타낸다. AOT는 주로 봄철과 여름철에 증가하였으며, 겨울철에 감소하고 있는 계절 변화를 나타내고 있다. 이것은 대륙으로부터 이동하는 황사 또는 미세먼지의 유입과 여름철 증가한 상대습도에 따른 입자의 성장이 광 투과도를 감소시키므로 AOT가 증가하는 원인으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2010). 반면에, 겨울철의 건조하고 북동풍이 우세한 조건하에서는 황사와 같이 대규모 에어로솔 이벤트 보다는 난방이나 교통에 의한 미세 입자가 주를 이루며, 따라서 광 투과도가 상대적으로 증가하기 때문에 여름철보다 AOT가 감소하는 것으로 판단된다.

표 1은 파장별 AOT의 기술통계 결과이다. 파장별 AOT 값은 $\tau_M(380)=0.697 \pm 0.403$, $\tau_M(440)=0.604 \pm 0.371$, $\tau_M(500)=0.560 \pm 0.351$, $\tau_M(675)=0.413 \pm 0.305$, $\tau_M(870)=0.329 \pm 0.287$ 으로 나타났으며, 파장이 짧아질수록 AOT값이 커지고 있는 일반적인 경향을 따르고 있다(그림 4의 AOT 빈도 히스토그램 참조). 최대값은 각각 3.057(380 nm), 2.842(440 nm), 2.690(500 nm), 3.035(675 nm), 3.280(870 nm)으로 봄철에 기록된 값으로서, 파장별로 거의 비슷한 범위의 값을 가지는 것으로 보아 황사와 같이 비교적 입자의 크기가 큰 경우를 의미한다.

Table 1. Descriptive statistics of Microtops-II AOT observed from 5 November 2010 to 19 March 2013.

$\tau_M(\lambda)$	380 nm	440 nm	500 nm	675 nm	870 nm
Mean	0.697	0.604	0.560	0.413	0.329
STD	0.403	0.371	0.351	0.305	0.287
Max	3.057	2.842	2.690	3.035	3.280
Min	0.064	0.066	0.071	0.057	0.039

Table 2. Summary of AOT measurements from other studies.

Site	Period	Mean AOT(500 nm)	Reference
Xianghe, China	2005~2008	0.61~0.99	Lee <i>et al.</i> (2010)
Taihu, China	2008	0.87	Lee <i>et al.</i> (2010)
Shouxian, China	2008	0.84	Lee <i>et al.</i> (2010)
National mean, China	2005	0.69	Lee <i>et al.</i> (2007)
11 cities of China	Winter, 1994~2001	0.61	Qiu <i>et al.</i> (2005)
Seoul, Korea	Jan. 2011	0.22	Lee <i>et al.</i> (2013)
Yellow Sea	April 2006	0.7	Liu <i>et al.</i> (2010)
Xianghe	7 April to 15 May 2006	0.17 (clear)~4.0 (dust)	Logan <i>et al.</i> (2010)
Mauna Loa Obs., USA	1994~1999	0.020	Holben <i>et al.</i> (2001)
Greenbelt, USA	1993~1999	0.23	Holben <i>et al.</i> (2001)

표 2는 동 아시아 지역에서 관측된 파장 500 nm AOT 관측값을 선행 연구결과로부터 조사한 리스트이다. 중국의 대도시 지역에서 1년 이상의 관측된 AOT 값의 범위가 약 0.6~1.0 사이의 값을 가진다. 본 연구에서 관측된 $\tau_M(500)=0.560 \pm 0.351$ 의 값은 이보다 낮은 값의 범위에 있지만, 비슷한 수준의 AOT 값에 속해 있으므로, 동아시아 전체적인 에어로솔의 영향권에 속해 있음을 간접적으로 알 수 있다. 보다 상세한 지역적 분포에 대한 분석을 위해서는 인공위성이나 모델링 자료를 통하여 분석하는 것이 필요하나, 본 연구의 범위를 벗어나므로 후속 연구에서 다를 예정이다.

파장별 AOT는 에어로솔 크기의 함수로서, 입자의 크기 정보를 분석하기 위하여 파장별 AOT 조합에 따른 Ångström 지수($\alpha_{\lambda_1-\lambda_2}$)를 다음과 같은 식(5)를 이용하여 계산하였다.

$$\alpha_{\lambda_1-\lambda_2} = - \left(\frac{\ln(\tau_1 / \tau_2)}{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)} \right) \quad (5)$$

$\alpha_{\lambda_1-\lambda_2}$ 의 계산에 사용된 파장별 조합은 380 nm~440 nm, 380 nm~500 nm, 440 nm~675 nm, 440 nm~870 nm, 500 nm~870 nm의 다섯 개의 조합을 사용하였다. 일반적으로, Ångström 지수는 태양 스펙트럼에서 에어로솔 크기를 나타낼 수 있는 지수로 알려져 있으며 (Gobbi *et al.*, 2007): $a > 1$ 인 경우는 미세 입자가 우세한 경우, $0 < a < 1$ 인 경우는 조대입자와 미세입자가 혼재해 있는 경우, $a \sim 0$ 인 경우는 조대 입자가 우세한 경우를 나타낸다.

그림 5는 전체 관측 기간 동안의 파장별 조합에 따른 Ångström 지수의 시계열 분포를 나타낸다. 전체 관

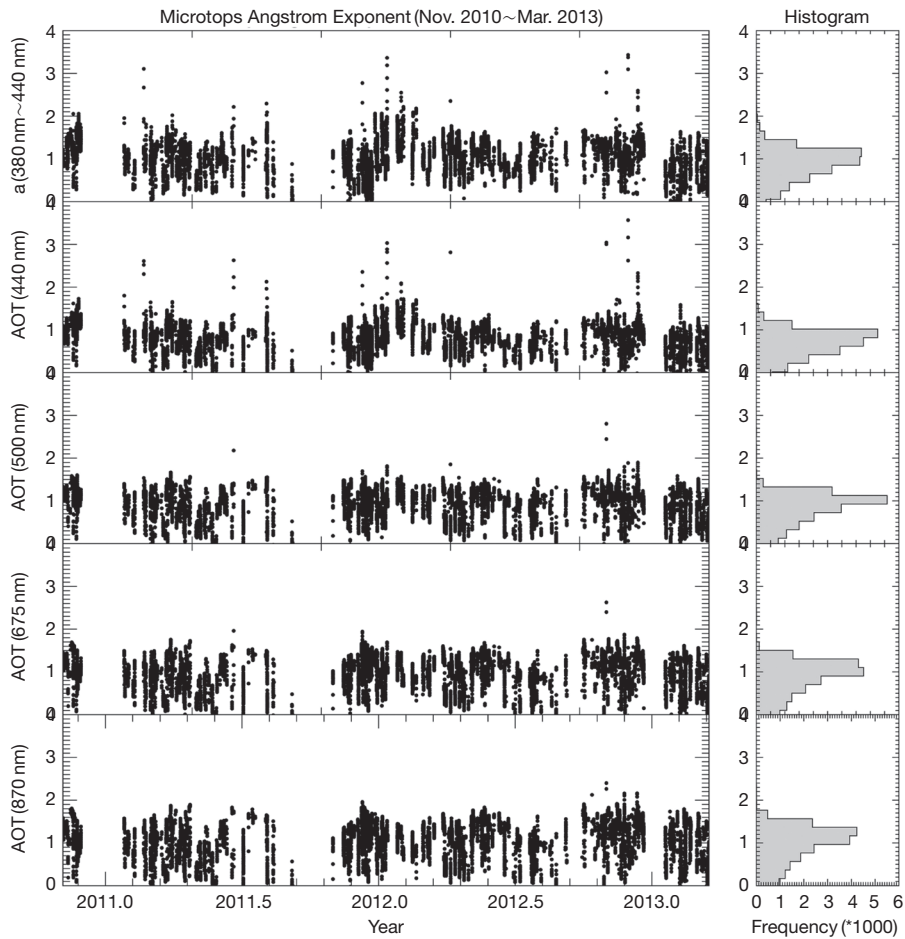


Fig. 5. Time series of the Microtops-II Ångström exponents and frequency histogram from 5 November 2010 to 19 March 2013.

측 기간 중 일 평균 최소값은 주로 봄철에 나타나며, 이는 봄철의 AOT가 증가한 것과 관계가 있는 것으로서, 황사와 같이 입자의 크기가 비교적 큰 에어로솔이 대기 중 부하량(atmospheric loading)이 증가한 것을 의미한다. 표 3은 Ångström 지수의 기술통계 결과이다. 파장 조합별 Ångström 지수값은 $\alpha_{380-440}=1.054 \pm 0.382$, $\alpha_{380-500}=0.855 \pm 0.333$, $\alpha_{440-675}=0.993 \pm 0.368$, $\alpha_{440-870}=1.040 \pm 0.409$, $\alpha_{500-870}=1.135 \pm 0.445$ 으로 나타났다. 이는 위에서 언급한대로, 대기 중에 미세 입자가 우세한 경우인 것으로 알 수 있다.

표 4는 동 아시아 지역에서 관측된 Ångström 지수값을 선행 연구결과로부터 조사한 리스트이다. 중국의

Table 3. Descriptive statistics of Microtops-II derived Ångström exponents from 5 November 2010 to 19 March 2013.

$\alpha(\lambda_1 - \lambda_2)$	380~ 440	380~ 500	440~ 675	440~ 870	500~ 870
Mean	1.054	0.855	0.993	1.040	1.135
STD	0.382	0.333	0.368	0.409	0.445
Max	3.428	3.565	2.803	2.625	2.398
Min	-0.951	-0.985	-0.677	-0.696	-0.634

대도시 지역에서 1년 이상의 관측된 Ångström 지수값의 범위가 약 0.9~1.0 사이의 값으로서, 황사 사례를 제외하고 주로 1.0 근처의 값을 나타내었다. 이는, 본

Table 4. Summary of Ångström exponents measurements from other studies.

Site	Period	Mean α	Reference
Xianghe, China	2005~2008	0.96~1.14	Lee <i>et al.</i> (2010)
Taihu, China	2008	1.14	Lee <i>et al.</i> (2010)
Shouxian, China	2008	1.15	Lee <i>et al.</i> (2010)
National mean, China	2005	1.07	Lee <i>et al.</i> (2007)
Yellow Sea	April 2006	0.3	Liu <i>et al.</i> (2010)
Xianghe	7 April to 15 May 2006	1.26 (clear)~0.1 (dust)	Logan <i>et al.</i> (2010)
Mauna Loa Obs., USA	1994~1999	1.50	Holben <i>et al.</i> (2001)
Greenbelt, USA	1993~1999	1.64	Holben <i>et al.</i> (2001)

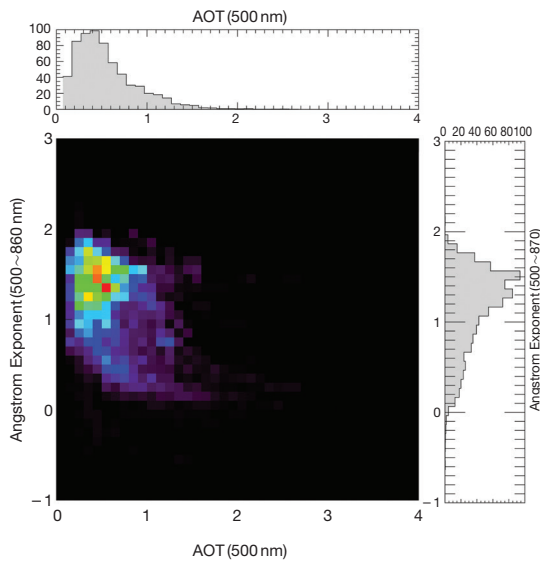


Fig. 6. Time series of the Microtops-II Ångström exponents and frequency histogram from 5 November 2010 to 19 March 2013.

연구에서 관측된 Ångström 지수값과 비슷한 범위의 값이므로, 미세 입자에 의한 영향이 동아시아의 주 에어로솔 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

그리고 전체 관측 기간 동안의 AOT와 Ångström 지수의 관계도(그림 6)에서는 경산지역의 에어로솔의 부하량이 증가할수록 Ångström 지수값이 작아지는 특성을 나타낸다. 이러한 결과는 연구 대상지역의 에어리졸은 주로 입자의 크기가 작은 오염성 입자보다는 상대적으로 큰 입자들이 영향을 미치고 있음을 재 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

AOT는 지상으로부터 고 고도 대기 중에 존재하는 모든 에어로솔 입자의 상대적인 양을 반영하므로, 대기환경감시 및 예측, 인공위성 관측자료의 검증 등 다양한 분야에서 활용되고 있는 물리량이다. 본 연구에서는 2010년 11월 5일부터 2013년 3월 19일 까지 약 2년 5개월 동안 지상에서 Microtops-II 다파장 복사계를 이용하여 5개 파장별 AOT와 Ångström 지수를 산출하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) Microtops-II 다파장 복사계를 이용하여 분석된 AOT 자료의 품질 검증을 위하여 기존의 지상 복사관측 네트워크인 AERONET에서 사용되고 있는 CIMEL-318 sun-sky radiometer와 비교한 결과를 정량적으로 분석하였다. 두 기기로부터 산출된 파장별 AOT 값의 1 : 1 상관 분석결과, 회귀 방정식의 기울기 (0.98 - 1.01), y-절편 (0.005 - 0.008), 상관계수 (>0.98), p 값 (<0.0001)의 범위를 가지고 있으므로 매우 유의한 상관관계를 나타내고 있다. 따라서, Microtops-II의 5개 채널 별 AOT 자료의 정확도가 매우 정확한 수준임을 확인할 수 있었다.

(2) Microtops-II 다파장 복사계를 이용하여 산출된 파장별 AOT는 $\tau_M(380) = 0.697 \pm 0.403$, $\tau_M(440) = 0.604 \pm 0.371$, $\tau_M(500) = 0.560 \pm 0.351$, $\tau_M(675) = 0.413 \pm 0.305$, $\tau_M(870) = 0.329 \pm 0.287$ 의 범위로 나타났으며, 봄과 여름에 증가하며, 겨울철에 감소하고 있는 계절별 특성을 나타내고 있다.

(3) Ångström 지수의 범위는 $\alpha_{380-440} = 1.054 \pm 0.382$, $\alpha_{380-500} = 0.855 \pm 0.333$, $\alpha_{440-675} = 0.993 \pm 0.368$, $\alpha_{440-870}$

$= 1.040 \pm 0.409$, $\alpha_{500-870} = 1.135 \pm 0.445$ 으로 나타났으며, 선행연구결과와 비교해 볼 때, 관측 지점을 포함한 동아시아 대기 에어로솔은 주로 미세입자에 의한 영향이 우세하게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 관측된 장기간 동안의 파장별 AOT 자료는 향후, 고해상도의 연속관측이 가능한 인공위성 자료와의 비교분석에 활용되어, 지상관측의 한계인 공간적 관측 정확도를 보다 향상시킬 수 있는 기본 정보로 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 “정지궤도 기상위성 지상국 개발 (NMSC-2014-01)” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

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, 31333-31349.

Gobbi, G.P., Y.J. Kaufman, I. Koren, and T.F. Eck (2007) Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 453-458, doi:10.5194/acp-7-453-2007.

Hansen, J.E. and L.D. Travis (1974) Light Scattering in Planetary Atmospheres, *Space Sci. Rev.* 16, 527.

Holben, B.N., A. Smirnov, T.F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W.W. Newcomb, J.S. Schafer, D. Tanre, B. Chatelet, and F. Lavenu (2001) An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET, *J. Geophys. Res.*, 106 (D11), 12067-12097, doi:10.1029/2001JD900014.

International Panel on Climate Change (IPCC) (2013) Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lee, K.-H., K.-W. Kim, G. Kim, K. Jung, and S.-H. Lee (2013) Visibility Estimated from the Multi-wavelength Sunphotometer during the Winter 2011

Intensive Observation Period at Seoul, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 682-691.

Lee, K.H. (2012) Aerosol direct radiative forcing by three dimensional observations from passive- and active-satellite sensors, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(2), 159-171, DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.159>. (in Korean with English abstract)

Lee, K.H., D.H. Lee, and Y.J. Kim (2006b) Application of MODIS satellite observation data for air quality forecast, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 85-862. (in Korean with English abstract)

Lee, K.H., Y.J. Kim, and J.S. Han (2006a) Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004, *Atmospheric Environment*, 40(27), 5146-5155.

Lee, K.H., Z. Li, M.C. Cribb, J. Liu, L. Wang, Y. Zheng, X. Xia, H. Chen, and B. Li (2010) Aerosol optical depth measurements in eastern China and a new calibration method, *J. Geophys. Res.*, 115, D00K11, doi:10.1029/2009JD012812.

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.

Lee, S., Y.S. Ghim, S.-W. Kim, and S.-C. Yoon (2010) Capability of accumulation mode aerosols containing black carbon as CCN observed during the PACDEX campaign, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 380-391. (in Korean with English abstract)

Li, Z., K.-H. Lee, Y. Wang, J. Xin, and W.-M. Hao (2010) First observation-based estimates of cloud-free aerosol radiative forcing across China, *J. Geophys. Res.*, 115, D00K18, doi:10.1029/2009JD013306.

Logan, T., B. Xi, X. Dong, R. Obrecht, Z. Li, and M. Cribb (2010) A study of Asian dust plumes using satellite, surface, and aircraft measurements during the INTEX-B field experiment, *J. Geophys. Res.*, 115, D00K25, doi:10.1029/2010JD014134.

Morys, M., F.M. Mims, and S.E. Anderson (2001) Design, calibration and performance of MICROTOPS II hand-held ozonometer, *J. Geophys. Res.* 106(13), 14573-14582.

Nicolet, M. (1981) The solar spectral irradiance and its action in the atmospheric photo dissociation processes,

- Planet. Space Sci., 29, 951-974.
- Qiu, J., X.M. Zong, and X.Y. Zhang (2005) A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile, *J. Aerosol Sci.*, 36, 361-371.
- Ramanathan, V., P.J. Crutzen, J.T. Kiehl, and D. Rosenfeld (2001) Aerosol, climate, and hydrological cycle, *Science*, 294, 2119-2124, doi:10.1126/science.1064034.
- Tatarov, B., D. Müller, Y.-M. Noh, K.-H. Lee, D.-H. Shin, S.-K. Shin, N. Sugimoto, P. Seifert, and Y.-J. Kim (2012) Record heavy mineral dust outbreaks over Korea in 2010: Two cases observed with multi-wavelength aerosol/depolarization/Raman-quartz lidar, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L14801, doi:10.1029/2012GL051972.
- Vandaele, A.C., C. Hermans, S. Fally, M. Carleer, R. Colin, M.-F. Merienne, A. Jenouvrier, and B. Coquart (2002) High-resolution Fourier transform measurement of the NO₂ visible and near-infrared absorption cross sections: Temperature and pressure effects, *J. Geophys. Res.*, 107 (D18), 4348, doi:10.1029/2001 JD000971.