SKYNET 관측 자료를 이용한 동아시아 영역에서의 MODIS 에어로솔 광학 두께 산출물 검증

장현성¹ · 송환진¹ · 전형욱¹ · 손병주^{1,*} · 타카무라 타미오²

¹서울대학교 지구환경과학부, 151-742, 서울특별시 관악구 관악로 1

²Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

Validation of MODIS-derived Aerosol Optical Thickness Using SKYNET Measurements over East Asia

Hyun-Sung Jang¹, Hwan-Jin Song¹, Hyoung-Wook Chun¹,
Byung-Ju Sohn^{1,*}, and Tamio Takamura²

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan

Abstract: Using six-year (2004-2009) SKYNET measurements, MODIS-derived AOTs were validated at five SKYNET sites (Seoul, Chiba, Etchujima, Fukuejima, and Hedomisaki), in addition to climatological analysis of MODIS-derived optical properties over the East Asian domain (20-50°N, 90-150°E). In so doing MODIS-SKYNET collocated AOT data were constructed if two measurements are taken within 25 km distance and within 30 minute time difference. From the comparison of two measurements, it is demonstrated that aerosol type insignificantly affects the accuracy of MODIS AOT. It is because the aerosol model combining predefined fine aerosol model and coarse aerosol model is used for the retrieval. However, positive bias between MODIS and SKYNET increases as fraction of the coarse aerosol model increases. In addition, MODIS AOT appears to be overestimated in case of lower aerosol loading while the overestimation tends to decrease with increased aerosol loading. Regression analysis between MODIS AOT and SKYNET AOT for 550 nm band yields 0.86, 0.16, and 0.61 of regression slope, intercept, and coefficient of determination, respectively. Those statistical results may draw a conclusion that MODIS AOTs over East Asia carry a reasonable accuracy compared to ground-based SKYNET measurements.

Keywords: aerosol optical thickness, fine mode fraction, MODIS, SKYNET

요약: 본 연구는 동아시아 영역에 속해있는 5개 SKYNET 관측소(서울, 지바, 오텔루 지마, 후쿠에 지마, 헤도 미사키)에서 6년 간 관측한 AOT 자료를 활용하여 MODIS에서 산출된 AOT를 검증하였고, 아울러 에어로솔 기후장 분석도 함께 수행하였다. 검증연구를 위해 관측소 25 km 이내의 MODIS AOT를 평균하였고, MODIS 관측시각 30분 전후 SKYNET AOT를 평균하여 시공간 일치 자료를 생산하였다. 시공간 일치 자료의 비교 결과 MODIS AOT의 정확도는 에어로솔 종류에 크게 영향을 받지 않았으나, MODIS AOT 산출과정 중 거대 입자 모형의 사용비율이 높아질수록 SKYNET AOT에 비해서 비교적 큰 값을 산출하는 경향을 보였다. 또한 AOT가 낮은 대기에서 MODIS AOT는 과대 추정하는 경향을 보였고 그 경향성은 AOT가 높아질수록 줄어들었다. MODIS-SKYNET AOT간의 회귀분석 결과 기울기는 0.86, Y절편은 0.16으로 나타났고 결정계수(R^2)는 0.61로 나타났다. 이러한 통계적 결과로 미루어 볼 때 동아시아 영역에서 산출된 MODIS AOT는 지상 관측에 견줄 만큼 정확하다고 볼 수 있다.

주요어: 에어로솔 광학 두께, 미세 입자 비율, MODIS, SKYNET

*Corresponding author: sohn@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-7783

Fax: +82-2-872-8156

서론

에어로솔은 태양광을 반사하는 직접 효과, 구름의 밝기 및 지속 시간에 영향을 주는 간접 효과(Twomey, 1974; Albrecht, 1989) 등을 통해 전 지구적인 복사 수지에 중요한 영향을 끼친다. 인공위성은 넓은 지역의 에어로솔 정보를 얻을 수 있는 좋은 관측 수단으로써, 전 지구적인 에어로솔 정보를 제공하는 데 큰 기여를 하고 있다. 특히 극궤도 위성인 Terra 및 Aqua에 탑재되어 있는 다중채널 센서인 고분해능 영상분광계(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; MODIS)는 에어로솔의 광학두께(Aerosol Optical Thickness; AOT) 뿐만 아니라 옹스트롬 지수(Angström Exponent; AE), 미세 입자 비율(Fine Mode Fraction; FMF) 등 다양한 에어로솔 정보를 산출함에 따라 많은 연구에 활용되어 왔다(Anderson et al., 2005; Ramachandran, 2007; Kim et al., 2007).

그러나 MODIS 자료는 지표 및 대기에서 반사된 태양광을 이용하여 여러 물리적 가정을 통해 산출되므로 지상 관측 자료와의 비교를 통해 산출물의 정확도를 검증하는 것이 필요하다(Kaufman et al., 1997a). 특히 에어로솔이 육지상의 자료일 때 지역에 따라 에어로솔 모형을 가정한 후 AOT를 비롯한 에어로솔 정보를 산출하므로(e.g. Levy et al., 2007) 다양한 지역에서의 검증작업이 필요하다. 더욱이 바다에 비해서 지표 반사도를 추정하기 어렵기 때문에 육지 알고리즘의 산출물에 대해서는 엄밀한 검증이 필요하다. 비록 선행연구에서 MODIS 육지 에어로솔 산출물의 정확도는 우수하게 평가되어왔으나(Chu et al., 2002; Remer et al., 2005; Levy et al., 2007) 동아시아 지역은 다양한 에어로솔이 혼재하는 지역임을 감안할 때 한국, 일본을 중심으로 한 검증 연구는 충분한 것으로 판단되지 않는다.

한편, 한국과 일본을 중심으로 구축된 SKYradiometer NETwork (SKYNET)은 직달 및 산란광을 이용하여 에어로솔 광학적 특성을 관측하는 스카이라디오미터 관측망으로서 위성자료를 검증하기에 적합한 에어로솔 정보를 제공하고 있다(Takamura et al., 2004). 특히 Khatri and Takamura(2008)에 의해서 개발된 SKYNET의 구름 제거 기법은 기존 AERONET에서 사용하던 구름 제거 기법(Smirnov et al., 2000)에 비해서 입자가 크고 AOT가 높은 에어로솔을 구름으로 오인하는 사례를 많이 줄였기 때문에 황사와 같이

입자가 크고 AOT가 높은 에어로솔에 대한 자료를 더 많이 얻을 수 있게 되었다. 과거 MODIS AOT 검증 연구는 주로 AERONET 관측 자료를 통해 이루어졌고, 동아시아 지역에서 역시 AERONET 관측 자료를 이용한 선행연구가 수행된 바 있으나(이권호와 김영준, 2008) SKYNET 원시 복사 관측 자료를 사용하는 경우 다양한 형태의 비교가 가능하다.

본 연구에서는 2004-2009년의 동아시아 SKYNET 관측 자료를 활용하여 Aqua위성에 탑재된 MODIS의 AOT 산출물을 검증하며 이를 위해 MODIS 관측 시각으로부터 최대 30분의 시간 차를 가지는 SKYNET 자료와, SKYNET 관측 지점으로부터 최대 25 km 공간 차를 가지는 MODIS 자료를 이용하여 시공간 일치 자료를 생산한다. MODIS AOT 검증에 앞서, 검증 연구를 위해 수집한 장기간의 MODIS, SKYNET 에어로솔 관측 자료를 기반으로 동아시아 지역의 에어로솔 기후장을 분석하며, 또한 기후장과 시공간 일치 자료의 비교를 통해 관측 사이트별, 관측 파장별, 에어로솔 종류에 따른 MODIS AOT의 정확도를 분석한다.

자료 및 연구 방법

극궤도 위성인 MODIS의 에어로솔 정보는 넓은 지역에 대해 하루에 한번 산출되지만, 지상 관측 네트워크인 SKYNET의 에어로솔 정보는 사이트가 위치한 제한된 지역에 대해 10분 이내의 짧은 시간 간격을 두고 산출된다. 그러므로 두 자료간 비교가 가능하도록 MODIS, SKYNET자료에 대해 각각 공간, 시간 평균을 취하여 시공간 일치 자료를 생산한다. 즉, SKYNET 사이트 위치에서 MODIS 관측 시각의 MODIS AOT(AOT_{mod})와 SKYNET AOT(AOT_{sky})를 생산해야 두 기기간의 비교가 가능하다. AOT_{mod} 는 AOT_{sky} 를 얻는 지상 관측소에서 일정반경(R) 이내에 포함되는 모든 MODIS AOT 관측픽셀을 거리(r)에 따른 가중치(w)를 주어 공간 평균함으로써 얻을 수 있다. 이때 w는 식(1)과 같다.

$$w(r)=\exp(-0.5 \times r^2/R^2) \quad (1)$$

본 연구의 공간 평균 영역은 지상 관측소로부터 R=25 km 이내의 지역으로 이와 유사한 범위가 여러 선행연구에서도 선택되어 왔다(Kleidman et al., 2005; Santese et al., 2007). AOT_{sky} 의 경우 MODIS

Fig. 1. Study domain and location of sites (SNU: Seoul National University, Korea; CHI: Chiba University, Japan; ETC: Etchujima, Japan; FKE: Fukuejima, Japan; CHD: Hedomisaki, Japan).

가 지상 관측소를 관측한 시각으로부터 30분 전후에 관측된 모든 스카이라디오미터 자료를 시간 평균하여 얻었다.

본 검증 연구는 2004년 1월에서 2009년 12월 기간 동안 관측된 SKYNET, MODIS 자료를 이용하여 수행하였으며 연구 영역은 한국과 일본을 중심으로 한 20-50°N, 90-150°E의 동아시아영역으로 5개 SKYNET 사이트를 포함한다(Fig. 1). 각 관측 사이트의 위도 및 경도, 관측 기간, 기기의 관측 주기, 연구 기간 내의 평균 AOT와 AE 값을 Table 1에 제시하였다.

자료처리에 사용된 SKYNET 자료는 구름제거 알고리즘을 통과한 최고등급(Level 2.0) 자료로 400, 500, 675 nm 파장에서 산출된 AOT가 MODIS AOT 검증을 위해 사용된다. 또한 에어로솔 종류 구분을 위해서 단일산란알베도(Single Scattering Albedo; SSA)와 AE를 사용하였다(Higurashi and Nakajima,

2002). AE는 파장에 따른 AOT의 변화율을 나타내는 지수로서 식 (2)와 같이 정의된다.

$$AE(\lambda_1, \lambda_2) = \ln(\tau_2/\tau_1) / \ln(\lambda_1/\lambda_2) \quad (2)$$

식 (2)에서 τ , λ 는 AOT, 파장을 의미하여, 아래첨자 1, 2는 서로 다른 두 채널을 의미한다.

가시 광선 영역에서 작은 입자는 비교적 짧은 파장의 태양광을 잘 소산시키기 때문에 파장 별 AOT의 변화가 크지만, 입자가 커질수록 이런 경향이 줄어들어서 파장에 따른 AOT의 변화가 둔감해지게 된다. 그러므로 AE는 에어로솔의 입자 크기를 대표할 수 있는 지수로써 사용 가능하다. 또한 AE는 파장의 선택과 무관하게 비슷한 값을 가지므로 이 성질을 이용하여 SKYNET 관측 파장의 AOT를 MODIS 관측 파장의 AOT로 변환하였다(Muhammad, 1983).

MODIS는 AOT를 산출할 때 산출지역의 에어로솔 성질에 대한 기후값을 바탕으로 에어로솔의 종류를 가정한 후 AOT를 산출하기 때문에 실제 산출 당시의 에어로솔 종류는 기후값과 다를 수 있으며, 따라서 AOT의 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 모든 시공간 일치 자료를 AOT, AE, SSA에 대하여 각 변수값이 낮은 집단, 평균 집단, 높은 집단으로 나누어 에어로솔 종류를 구분한 후 MODIS AOT 오차($AOT_{mod} - AOT_{sky}$)의 민감도를 살펴본다. 이때 집단간의 경계는 $\text{평균} \pm 0.5 \times \text{표준편차}$ 로 두었으며 그 값은 Table 2에 나타냈다.

검증을 위한 MODIS 자료는 Collection 5의 MYD04 level 2 육지 산출물을 사용하고 기후장 분석에 있어서는 분석의 용이함을 위해 해양 및 육지에서 산출된 자료를 1°×1°로 격자화한 MYD08_M3을 사용한다. 이 때 MODIS 에어로솔 자료등급 중 '좋은' 이상의 평가를 받은 자료(즉, QA=2, 3)들만 사용하고 산출 변수 중 440, 550, 670 nm의 AOT와 FMF를

Table 1. Descriptions of SKNET. Site names, locations, instrument types, observation periods and intervals, and climatological means of retrieved AOT (500 nm), Angström exponent, and SSA (500 nm) are given

Site		Longitude °E	Latitude °N	Instrument type	Observation period	Observation interval (minute)	AOT 500 nm	AE	SSA 500 nm
Seoul	SNU	126.949	37.460	POM01	05.11-09.12	3-10	0.50	1.20	0.91
Chiba	CHI	140.124	35.622	POM01 POM02	05.09-09.12	5-10	0.27	1.16	0.91
Etchujima	ETC	139.796	35.664	POM01	04.03-09.12	10	0.32	1.29	0.90
Fukuejima	FKE	128.682	32.752	POM01 POM02	06.03-09.12	5-10	0.39	1.02	0.91
Hedomisaki	CHD	128.249	26.867	POM01 POM02	05.08-09.12	10	0.25	1.03	0.97

Table 2. Mean, standard deviation (σ), mean -0.5σ , and mean $+0.5\sigma$ for collocated AOT_{sky} (550 nm), AE_{sky} , SSA_{sky} (500 nm), and FMF_{mod} . The mean- 0.5σ and mean+ 0.5σ values are used for threshold values for grouping data (i.e., low value group: $X \leq \text{mean} - 0.5\sigma$, middle value group: $\text{mean} - 0.5\sigma < X < \text{mean} + 0.5\sigma$, high value group: $\text{mean} + 0.5\sigma \leq X$)

	AOT	AE	SSA	FMF
Mean	0.42	1.26	0.92	0.62
σ	0.26	0.26	0.06	0.32
Mean- 0.5σ	0.29	1.13	0.89	0.46
Mean+ 0.5σ	0.55	1.39	0.95	0.78

사용한다. 아울러 FMF에 따른 AOT 오차를 분석하기 위해서 경계값을 평균값 $\pm 0.5 \times$ 표준편차로 두어 FMF가 작은 집단, 평균 집단, 큰 집단으로 나눈 후 집단 별 MODIS AOT의 오차를 분석하였으며, 각 경계값은 Table 2에 나타났다.

MODIS 에어로솔 평균분포

AOT 검증에 앞서 동아시아지역의 MODIS 산출 에어로솔의 계절별 평균분포를 분석하였다. 분석 자료로서 2004-2009년 MODIS에서 관측한 AOT와 FMF를 사용하였으며 Fig. 2와 Fig. 3에 각각의 결과를 제시하였다. 에어로솔의 광학두께는 계절평균에서 볼 때 0.5 이하의 값으로 나타나 있으며 계절에 따라 뚜렷한 변동성을 보이고 있다. 봄철은 중국 동부에서 동해상으로 0.4 이상의 높은 AOT 영역이 나타나나, 여름철은 그 영역이 중국동부 및 서해에 국한되고 있다. 가을철에 그 영역은 더욱 줄어 중국 동부에 한정되어 나타나나 겨울철로 바뀌면서 다시 서해로 확장되는 형태를 보인다. 중국 동부에서 사계절 모두 높은 AOT가 유지되는 것은 인위적인 에어로솔이 지속적으로 다량 방출되기 때문이며, 동쪽의 한반도나 동해로 확장되는 형태는 기압 패턴과 같은 대기상태

Fig. 2. Seasonal distribution of MODIS-derived AOT (550 nm) over the East Asia domain from 2004 to 2009.

Fig. 3. Same as in Fig. 2 except fine mode fraction (FMF).

의 계절변동에 의한 에어로솔 분포의 변동과 관련이 있는 것으로 판단된다. 사계절 모두 높은 값의 AOT가 분포하는 중국 동부와는 달리 한반도와 일본 열도의 경우 봄, 여름철에 비교적 높은 AOT가 분포하고 가을, 겨울철에는 상대적으로 낮은 AOT가 분포한다. 중국 북부 및 만주지역의 경우 봄철에 0.3 정도로 사계절 중 가장 높은 AOT를 보이다가 점점 낮아져서 가을에 가장 낮은 값을 보인 후 겨울에 다시 증가하는 형태를 보인다.

미세입자 모드 비율(FMF)의 경우 한반도, 만주지역, 일본 열도 모두에서 여름철에 가장 높은 값을 보이고 있다. 이후 가을철에는 전반적으로 감소된 FMF를 보이다가 겨울철에 가장 낮은 FMF 분포가 나타나고 봄철에는 다시 증가하는 형태를 보인다. 중국 동부에서 여름철을 제외한 계절에 0.4 이하의 낮은 FMF가 계속해서 나타나는 것은 다른 지역과는 달리 황사와 같은 큰 입자가 사계절 동안 중국대륙에 존재하는 것으로 볼 수 있다.

동아시아 지역의 에어로솔 계절변동은 Kim et al. (2007)에서도 논의된 바 있다. 봄철의 경우 건조한 지표면 조건과 강한 풍속으로 인해 황사와 같은 거대 입자의 에어로솔이 많이 생성되어 황사의 발원지인 중국을 시작으로 AOT가 높아지고 따라서 FMF가 낮아지게 된다. 봄철에서 여름철로 넘어가면 지표면이 습해지고 대기의 운동이 정체되는 경향을 보이므로 황사의 발생은 억제되나 중국 도심에서 방출된 인위적인 에어로솔이 높은 습도 아래에서 성장하며 (Jeong et al., 2007) 정체된 대기운동에 의해 유동성이 낮아 여름철에 높은 AOT가 나타난다. 특히 초여름철인 6월에 사계절 중 가장 높은 AOT를 보이는 것으로 알려져 있다. 가을철은 낮아진 습도에 의해 인위적인 에어로솔의 성장이 억제되고 대기 운동 또한 빨라지게 되므로 낮은 AOT와 높은 FMF를 보이는 것으로 해석된다. 겨울철은 가을철과 비슷하게 낮은 습도와 빠른 대기 운동을 보이지만 2월에 발생하는 황사와 같은 자연적인 에어로솔에 의해서 가을철

Fig. 4. Time series of (top) collocated AOT, (middle) collocated SKYNET AE vs. MODIS FMF for the 6 years period from 2004 to 2009, and (bottom) number of collocated data used for the seasonal average.

보다는 AOT가 높아지고 FMF는 감소한다.

Fig. 4는 분석지역 내의 시공간 일치 자료를 이용하여 계절 평균한 AOT_{sky} , AOT_{mod} , AE, FMF의 시계열과 평균에 사용된 시공간 일치 자료수의 히스토그램이다. AOT_{sky} 와 AOT_{mod} 는 매우 유사한 형태의 계절변동을 보이나 전체적으로 AOT_{mod} 의 값이 AOT_{sky} 에 비해 높게 나타나고 있다. Table 3에 파장별(470, 550, 660 nm) AOT_{sky} , $AOT_{mod}-AOT_{sky}$ 의 6년(2004-2009) 평균값 및 표준편차를 나타내었다. 시계열 결과와 같이 AOT 차이의 평균값이 모두 양수로 나타났다으며 그 차이는 봄철에 가장 크다. AOT의 평균값

은 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 높으며, 이는 시계열에서도 2007년을 제외하고 모든 해에서 동일하게 나타나고 있다. 파장 별 AOT 평균값을 볼 때, 파장이 길어질수록 AOT가 낮아지는데 이는 짧은 파장에서 더 많은 태양광의 감쇄가 일어나기 때문이다. 파장 별 AOT의 차이의 경우 550 nm에서 가장 작다. 비록 6년의 짧은 기간의 자료로 경년변동을 논하기는 어렵지만, 흥미롭게 MODIS AOT의 경우 시간에 따라 점차 작은 값은 보이고 있다. 상대적으로 작은 값을 가지고 있는 SKYNET AOT의 변화는 뚜렷한 변화를 보이고 있지 않다.

Table 3. Seasonal means of SKYNET AOT, mean difference between MODIS AOT and SKYNET AOT, and their associated mean standard deviation for 6-year periods from 2004 to 2009

470 nm	Mean (SKYNET)	Mean (MODIS- SKYNET)	σ (MODIS- SKYNET)	550 nm	Mean (SKYNET)	Mean (MODIS- SKYNET)	σ (MODIS- SKYNET)	660 nm	Mean (SKYNET)	Mean (MODIS- SKYNET)	σ (MODIS- SKYNET)
MAM (187)	0.55	0.19	0.20	MAM (187)	0.47	0.16	0.18	MAM (187)	0.36	0.18	0.18
JJA (122)	0.58	0.14	0.24	JJA (122)	0.50	0.08	0.23	JJA (122)	0.39	0.10	0.21
SON (143)	0.35	0.08	0.12	SON (143)	0.30	0.06	0.12	SON (143)	0.22	0.08	0.11
DJF (20)	0.30	0.02	0.12	DJF (20)	0.25	0.01	0.14	DJF (20)	0.19	0.04	0.13
Total (472)	0.49	0.14	0.20	Total (472)	0.42	0.10	0.18	Total (472)	0.32	0.12	0.17

AE와 FMF는 모두 대기 중 에어로솔의 입자 크기를 나타낼 수 있는 변수로 사용할 수 있으며, 두 변수 모두 그 값이 클 수록 대기 중에 작은 입자가 우세함을 의미한다. AE의 경우 자료수가 가장 적은 2005년 겨울을 제외하면 1-1.5 사이의 값을 보인다. AOT와 다르게 뚜렷한 연 변동 경향은 보이지 않으나 모든 연도에 있어서 봄에 가장 낮은 AE를 보이다가 점점 증가하는 경향을 보인다. 이는 봄철에 입자가 큰 에어로솔이 우세하게 나타남을 의미한다. FMF 역시 AE와 유사하게 봄에 낮은 값을 보이다가 여름에 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보인다. 그러나 AOT의 시계열과 비교했을 때 AE와 FMF의 시계열은 그 경향성에서 상관관계가 약함을 알 수 있다. FMF는 AOT를 만족하는 미세 입자 모형과 거대 입자 모형의 사용비율을 의미하므로, 물리적 의미를 부여할 수 있는 AE와는 다를 것으로 생각되고 정확도도 상대적으로 낮을 것으로 판단된다. 그러나 경년 변동에서 흥미 있는 시계열이 발견된다. 6년 동안의 분석기간에서 FMF가 증가하는 경향을 갖는 반면 AE는 점차 감소하는 추세를 보인다. 일반적으로 AE, FMF 모두 입자가 작을 때 큰 값을 가지므로, 관측값과 다른 경향을 갖는 FMF는 그 정확도가 상대적으로 낮음을 의미하는 것으로 판단한다.

SKYNET을 이용한 MODIS AOT 검증

Fig. 5는 연구지역 내의 5개 사이트에 대해 550 nm의 AOT_{sky} 와 AOT_{mod} 산포도를 나타낸다. 산포도를 볼 때 SNU 사이트가 다른 네 사이트와 비교할 때 보다 큰 AOT의 분포를 보이고 있다. 결정계수는 0.69로 다른 사이트에 비해 비교적 높은 값을 보이나 평균오차와 표준편차가 각각 0.04, 0.20으로 비교적 큰 산포를 보이고 있다. 지역적으로 서로 가까운 장소에 위치한 CHI와 ETC 사이트의 경우 대부분의 시공간 일치 자료가 1:1 대응 직선 위쪽에 위치하는 것을 볼 수 있는데 이들 지역에서 MODIS AOT가 명백하게 과대 추정되고 있음을 의미한다. FKE 사이트의 경우 0.85로 가장 높은 결정계수를 보이며 평균오차 역시 0.05로 가장 낮게 나타나 지상 관측과 MODIS 위성관측 사이의 가장 높은 통계적 신뢰성을 보이고 있다. CHD 사이트의 경우 결정계수가 0.53으로 낮게 나타났으나, 샘플 수가 작은 이유에도 기인한 것으로 판단되어, 통계적인 신뢰성은 낮은 것으로

생각된다.

Fig. 6은 모든 시공간 일치 자료의 파장별 산포도를 나타낸다. 550 nm를 중심으로 볼 때 연구 지역 내의 AOT는 0-2 사이의 값을 보였으나 대부분 1 이하로 나타났다. 연구 기간 내 총 472개의 시공간 일치 자료가 생산되었고 440, 550, 670 nm에 대해 각각의 결정계수는 0.67, 0.61, 0.55로 나타났다. 선형회귀선의 기울기는 세 파장에 대해 각각 0.95, 0.87, 0.89로 1 이하의 값을 보였고 y절편은 세 파장 모두 0.16으로 나타났다. AOT 오차의 평균값은 각각 0.14, 0.10, 0.12로 AOT_{mod} 가 AOT_{sky} 에 비해 크게 나타났는데, 이를 선형회귀선의 통계량과 종합하여 판단해보면 많은 자료가 집중되어 있는 AOT가 낮은 영역에서 MODIS가 AOT를 과대추정을 하다가 대기의 AOT가 높아질수록 과대추정 경향이 줄어드는 것으로 해석할 수 있다.

에어로솔 종류 또는 농도에 따른 AOT 산출 정확도를 살펴보기 위해 자료를 AOT, AE, SSA, FMF 각각에 대해 이들 값이 낮은 집단, 평균 집단, 높은 집단으로 나눈 후 이들 집단이 갖는 AOT 오차의 히스토그램을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7a를 살펴보면 AOT가 낮은 집단에 비해 높은 집단의 오차의 중심이 음수 쪽에 치우쳐져 있는데 이는 AOT가 낮을 때 과대추정을 하다가 AOT가 높아질수록 점점 과대추정 경향이 줄어드는 산포도 분석 결과와 동일하다. 오차의 표준편차도 AOT가 높은 집단으로 갈수록 증가하는데 이는 AOT가 높아질수록 산출 정확성이 불안정해지는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 7b에 나타난 AE 집단간의 AOT 오차의 분포를 살펴볼 때 오차의 평균과 표준 편차 값은 집단 간 차이를 보이지 않았으나 AE가 큰 집단이 오차가 0 근처일 때의 빈도가 가장 높게 나타났다. SSA 역시 집단에 따른 과대, 과소 추정경향을 보이지 않았지만 SSA가 가장 낮은 집단의 오차의 표준편차가 가장 작았고 오차가 0 일 때의 빈도가 가장 높게 나타났다. 히스토그램 결과 상으로 볼 때 상대적으로 입자가 작고 SSA가 낮은 입자에 대한 AOT 산출 정확도가 가장 높게 나타났지만 에어로솔 특성에 따른 산출 정확도의 민감도는 크지 않았다. MODIS AOT와 일치되었을 때의 에어로솔이 비교적 AE가 1 근처에 집중되어 있고 SSA 역시 0.9 근처에 집중된 것으로 볼 때, 집단간의 광학적 특징이 크게 다르지 않았던 점 역시 낮은 민감도의 원인이 될 수 있다(Table 2).

Fig. 5. Statistical analysis of collocated MODIS AOT and SKYNET measurements at five SKYNET sites.

MODIS가 추정한 입자 크기 분포에 따른 민감도를 Fig. 7d에 나타내었다. FMF에 따른 세 집단간 표준 편차는 0.16, 0.17, 0.16으로 비슷하게 나타났다. 그러

나 FMF가 높은 집단에서 낮은 집단으로 갈수록 오차의 평균이 -0.05, 0.06, 0.15로 증가하였다. 또한 빈도수 역시 FMF가 낮아질수록 낮아졌다. 이는 MODIS

Fig. 6. Comparison between SKYNET and MODIS AOT for (a) 440 nm, (b) 550 nm and (c) 670 nm.

에서 AOT를 산출할 때 거대 입자 모형의 사용비율이 높아질수록 산출정확도가 낮아질 뿐 아니라 과대 추정하는 경향이 강해진다는 것을 의미한다.

이러한 지상 관측 값과의 오차의 원인을 파악하기 위해서는 MODIS AOT의 산출 원리를 파악해야 한다. Collection 5의 MYD04 level 2 AOT산출은 440, 670, 2120 nm 세 파장을 이용하여 10 km×10 km 해상도로 이루어진다. 센서 관측 해상도가 500 m×500 m이므로 산출물 하나 당 서브픽셀 20×20개가 사용된다. 우선 대기 중 에어로솔에 대한 영향을 적게 받는 2120 nm 파장을 이용하여 400개 점 중 산출에 적합한 어두운 픽셀을 선택한다. 어두운 픽셀을 찾는 이유는 대기 중 에어로솔 정보를 산출함에 있어 지표에서 반사된 태양광의 영향을 최대한 줄여서 AOT 산출 정확도를 높이기 위함이다. 2120 nm 파장을 이용하여 찾은 어두운 픽셀이 일정 수 이상이 되면 선택된 점들의 440, 670, 2120 nm 관측값을 평균하여 10 km×10 km의 관측값으로 사용한다. 태양과 위성의 위치, 지표 반사율, 에어로솔 종류가 알려진 경우 복사전달계산을 통해 위성에 도달하는 440 nm와 660 nm의 관측값을 AOT의 함수로서 나타낼 수 있으므로 관측값과 가장 유사한 값을 생산하는 AOT를 산출할 수 있다. 이 때, 440, 670 nm의 지표 반사율은 평균된 2120 nm 관측값을 바탕으로 NDVI, 산란각 등을 고려하여 경험적으로 추정하고, 에어로솔 종류는 지상 관측값을 바탕으로 만들어진 계절별, 지역별 에어로솔 성질에 대한 기후자료를 바탕으로 추정한다. 각 지역의 기후 자료는 미세 입자 모형과 거대 입자 모형으로 구성되어 있는데, 산출시 두 모형의 조합 비율이 MODIS의 FMF이다. 즉, 미세 입자 모형만 이용하여 복사계산을 한 것이 산출에 가장 적합하다면 FMF 값은 1이 되고 거대 입자 모형만 이용하여 복사계산을 한 것이 산출에 가장 적합하다면 FMF 값은 0이 된다. MODIS의 에어로솔 산출에 관한 더 자세한 정보는 Levy et al.(2007)를 통해 얻을 수 있다.

이러한 AOT 산출 원리를 고려할 때 MODIS AOT 오차의 원인은 크게 네 가지를 들 수 있다. 첫째로는 지표 반사도 추정 오차이다. 지표 반사도의 오차는 AOT 추정에 큰 오차를 유발하는 것으로써 지표 반사도의 오차가 0.01일 때 AOT는 0.1 정도의 오차를 유발할 수 있다(Kaufman et al., 1997b). 최근 지표 반사율 추정을 개선하기 위해 2120 nm 채널에서 대기 중 에어로솔의 효과를 고려한 지표 반사도 산출과 이를 이용한 AOT 산출 알고리즘의 개선을 시도하고 있다. 그러나 2120 nm의 관측값을 이용한

Fig. 7. Histograms showing AOT differences between MODIS and SKYNET for three groups. Three groups are categorized by low value group, middle value group, and high value group for (a) AOT, (b) AE, (c) SSA, and (d) FMF. Threshold for each group determined by $\text{mean} \pm 0.5 \times \sigma$ for collocated data.

440, 670 nm의 지표 반사도를 추정하는 과정이 산란 각, 식생지수를 활용한 경험적 방법으로 이루어짐을 고려할 때 개선의 여지는 남아있다. 둘째로는 계절별, 지역별로 설정되어있는 에어로솔과 관련된 기후장의 정확도이다. MODIS의 에어로솔 모형은 세 가지 미세 입자 모형과 한가지 거대 입자 모형으로 구성되어 있고 각각의 지역은 계절별, 지역별로 한 가지 미세 입자 모형과 거대 입자 모형을 갖는다. 이와 관련한 기후장이 지상 관측 자료에 근거를 두고 있어 해당 지역의 지상 관측소의 유무에 따라 기후장의 신뢰도가 크게 다를 수 있다. Mi et al.(2007)와 Misra et al.(2008)은 가장 최근의 C005 알고리즘이 비록 지표 반사도가 모수화를 통해 개선되었지만, 알고리즘 내에서 가정하는 에어로솔 모형은 충분하지 않음을 지적하였다. 비록 기후장이 그 지역을 잘 대변한다고 하더라도 기후장을 바탕으로 하는 산출방법은

다양한 에어로솔에 대해 AOT를 산출하는데 있어서 한계를 지닌다. 셋째로 에어로솔 이외의 요소에 의해 태양광이 영향을 받게 될 경우 산출 정확도는 낮아지게 된다. 가장 대표적인 요소로 구름을 들 수 있다. 구름에 의한 관측값의 오염현상은 비단 위성관측의 문제일 뿐만 아니라 지상 관측에 있어서도 중요한 문제로서 취급되고 있다. 마지막으로 위성이 수신한 전기적 관측 신호를 과학적 물리량으로 바꾸는 검정 과정 상의 문제를 들 수 있다. 이는 센서 검정과 관련된 문제로서 알고리즘 자체의 문제보다는 기기적인 문제로 볼 수 있다.

결론

본 연구는 동아시아 영역에 대해 MODIS와 SKYNET 에어로솔 관측 자료의 평균장을 분석하고 MODIS의

산출정확도를 살펴보았다. 동아시아의 계절별 AOT는 봄과 여름에 높고 가을과 겨울에 낮은 경향을 보였다. 반면 AE와 FMF는 뚜렷한 계절 변동은 보이지 않지만 봄에 최소값을 보이다가 여름에 크게 증가하는 공통된 경향을 보였다. 이는 봄에 대기 중 큰 입자들이 많이 부유하다가 여름이 될수록 대기 중 입자가 점점 작아진다는 것을 의미한다. MODIS 자료를 통해 볼 때 중국 동부지역은 계절에 관계없이 높은 AOT이 나타나는 경향을 보이나 한반도와 일본 열도의 경우 봄철에 최댓값, 가을철에 최솟값이 분포하는 계절변동을 보였다.

FMF의 경우 중국 동부의 경우 여름을 제외하고 0.4 이하의 낮은 값들을 보였고, 한반도와 일본 열도의 경우는 여름에 높은 값들이 분포하고 겨울에 낮은 값들이 분포하였다. 시공간 일치된 전체자료를 통해 살펴볼 때 470, 550, 670 nm에서 SKYNET AOT와 MODIS AOT간의 결정계수는 각각 0.67, 0.61, 0.55로 나타났고, 이로 미루어 볼 때 동아시아 지역에서의 MODIS 관측은 AOT를 비교적 잘 추정하고 있다고 판단된다. 하지만 AOT가 낮은 대기에 대해서 과대 추정하는 경향을 보였고 그 경향은 AOT가 커질수록 작아지는 경향이 있다. 이런 오차의 원인으로는 지표 반사도의 산출 오차, 적합하지 않는 에어로솔 모형 가정, 구름에 의한 오염, 센서의 관측 오류 등을 들 수 있다. 지상 관측 자료로부터 얻은 에어로솔 정보를 바탕으로 구분된 에어로솔 종류에 따른 산출 경향을 살펴보았을 때 뚜렷한 민감도를 살펴볼 수는 없었지만 입자가 비교적 작고 SSA가 비교적 낮은 대기에서의 MODIS AOT의 산출이 비교적 정확한 것으로 나타났다. MODIS 역시 미세 입자 모형을 많이 사용할수록 산출 정확도가 높아지는 경향을 보였는데 이는 거대 입자 모형의 수정이 필요하다는 것을 시사하는 것이기도 하다. 실제 MODIS는 전구를 대상으로 1개의 거대 입자 모형을 사용하므로 이에 대한 개선이 필요하다고 볼 수 있다.

감사의 글

건설적인 의견을 제시하여 주신 두 분 심사자에게 감사드립니다. 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2103)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 이권호, 김영준, 2008, Collection 4와 Collection 5 MODIS 에어로솔 분석 자료의 차이와 지상관측자료와의 비교. 대한원격탐사학회, 24, 369-379.
- Albrecht, B.A., 1989, Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245, 1227-1230.
- Anderson, T.L., Wu, Y., Chu, D.A., Schmid, B., Redemann, J., and Dubovik, O., 2005, Testing the MODIS satellite retrieval of aerosol fine-mode fraction. *Journal of Geophysical Research*, 110, D18204, doi:10.1029/2005JD005978.
- Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Remer, L.A., Tanré, D., and Holben, B.N., 2002, Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophysical Research Letters*, 29, doi:10.1029/2001GL013205.
- Higurashi, A. and Nakajima, T., 2002, Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data. *Geophysical Research Letters*, 29, doi:10.1029/2002GL015357.
- Jeong, M.-J., Li, Z., Andrews, E., and Tsay, S.-C., 2007, Effect of aerosol humidification on the column aerosol optical thickness over the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains site. *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2006JD007176.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouin, R., Grassl, H., Herman, B.M., King, M.D., and Teillet, P.M., 1997a, Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16815-16830.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., Remer, L.A., Vermote, E., Chu, A., and Holben, B.N., 1997b, Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*, 102, 17051-17067.
- Khatri, P. and Takamura, T., 2009, An algorithm to screen cloud affected data for skyradiometer data analysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87, 189-204.
- Kim, S., Yoon, S., Kim, J., and Kim, S., 2007, Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmospheric Environment*, 41, 1634-1651.
- Kleidman, R.G., O'Neill, N.T., Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Eck, T.F., Tanré, D., Dubovik, O., and Holben, B.N., 2005, Comparison of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Aerosol Robotic Net-

- work (AERONET) remote-sensing retrievals of aerosol fine mode fraction over ocean. *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2005JD005760.
- Levy, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F., and Kaufman, Y.J., 2007, Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2006JD007811.
- Mi, W., Li, Z., Xia, X., Holben, B., Levy, R., Zhao, F., Chen, H., and Cribb, M., 2007, Evaluation of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products at two Aerosol Robotic Network stations in China. *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2007JD008474.
- Misra, A., Jayaraman, A., and Ganguly, D., 2008, Validation of MODIS derived aerosol optical depth over Western India. *Journal of Geophysical Research*, 113, doi:10.1029/2007JD009075.
- Muhammad, I., 1983, Introduction to solar radiation. Academic Press, 390 p.
- Ramachandran, S., 2007, Aerosol optical depth and fine mode fraction variations deduced from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) over four urban areas in India. *Journal of Geophysical Research*, 112, D16207, doi:10.1029/2007JDO008500.
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F., Vermote, E., and Holben, B.N., 2005, The MODIS aerosol, algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62, 947-973.
- Santese, M., De Tomasi, F., and Perrone, M.R., 2007, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Aerosol Robotic Network (AERONET) retrievals during dust outbreaks over the Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2007JD008482.
- Smimov, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Dubovik, O., and Slutsker, I., 2000, Cloud screening and quality control algorithm for the AERONET database. *Remote Sensing of Environment*, 73, 334-337.
- Takamura, T., Nakajima, T., and SKYNET community group, 2004, Overview of SKYNET and its activities. *Optica Pura Y Aplicada*, 37, 3303-3308.
- Twomey, S., 1974, Pollution and the planetary albedo. *Atmospheric Environment*, 8, 1251-1256.

2010년 12월 7일 접수
2010년 12월 22일 수정원고 접수
2011년 1월 3일 채택