

## Collection 4 와 Collection 5 MODIS 에어러솔 분석 자료의 차이와 지상관측자료와의 비교

이권호\*<sup>†</sup> · 김영준\*\*

\*Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland, \*\*광주과학기술원 환경공학과

### Difference between Collection 4 and 5 MODIS Aerosol Products and Comparison with Ground based Measurements

Kwon Ho Lee\*<sup>†</sup> and Young Joon Kim\*\*

\*Earth System Science Interdisciplinary Center (ESSIC), University of Maryland (UMD)

\*\*Dept. of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology (GIST)

**Abstract :** The aerosol retrieval algorithm for the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) measurements was updated recently. This paper reports on the comparison and validation of two latest versions (Collection 4 and 5, shortly C004 and C005) of the MODIS aerosol product over northeast Asian region. The differences between the aerosol optical thickness (AOT) from the C004 and C005 retrieval algorithms and the correlation with ground based AERONET sunphotometer observations are investigated. Over the study region, spatially averaged annual mean AOT retrieved from C005 algorithm ( $AOT_{C005}$ ) is about 0.035 AOT (5%) less than the C004 counterparts. The linear correlations between MODIS and AERONET AOT also are  $R=0.89$  (slope=0.86) for the C004 and  $R=0.95$  (slope=1.00) for the C005. Moreover, the magnitude of the mean error in  $AOT_{C005}$ , difference between MODIS AOT and AERONET AOT, is 40% less than that in  $AOT_{C004}$ .

**Key Words :** MODIS, C004, C005, AOT, AERONET.

**요약 :** 인공위성 관측자료를 이용한 대기 에어러솔 원격탐사 기법은 단시간에 넓은 공간적 영역을 분석할 수 있게 하며, 대상 지역에 존재하는 에어러솔의 분포 정보 및 광학적, 물리학적 특성을 제공 해준다. MODIS 위성자료는 현재까지 가장 진보된 에어러솔 분석자료를 생산하고 있으며, 가장 최근에 개선된 에어러솔 알고리즘(Collection 5 또는 C005)은 기존의 알고리즘(Collection 4 또는 C004)에 비해 많은 부분이 개선되었다. 본 연구는 동북아 지역에서 두 가지 MODIS 에어러솔 알고리즘에 의해 생산된 에어러솔 관측자료를 비교하였고, 각각의 정확도를 검증하기 위하여 AERONET sunphotometer 관측자료와 비교분석하였다. 2005년 한해 동안의 MODIS 에어러솔 광학두께를 이용하여 에어러솔 광학 두께 (AOT)의 차이를 분석한 결과 에어러솔의 시공간적인 분포특징은 비슷하였으나,  $AOT_{C005}$ 가  $AOT_{C004}$ 에 비하여 약 0.035(5%) 정도의 낮은 값을 보였다. MODIS AOT와 AERONET AOT와의 비교결과 C004가 상관계수  $R=0.89$  (기울기=0.86)를, C005는  $R=0.95$  (기울기=1.00)을 보였다. 더욱이 정확도 분석에서는 C005가 C004에 비해 약 40% 정도 개선이 된 것으로 나타났다.

## 1. 서론

대기중의 에어러솔은 기후 예측에 있어 중요한 불확실 인자로서 직·간접적으로 기후변화 및 복사평형에 영향을 미친다(IPCC, 2007). 한반도를 포함하는 동북아시아 지역은 대기 에어러솔의 주요 발생 지역으로, 인위적(황산화물, 질소산화물, 또는 탄소) 또는 자연적(사막 기원, 산불 등)으로 발생한 에어러솔의 영향이 다양하게 일어나고 있다(Huebert *et al.*, 2003; Nakajima *et al.*, 2007, Li *et al.*, 2007a, 이동하 등, 2006a, Lee *et al.*, 2007a). 이러한 에어러솔의 시·공간적인 변화양상을 정성적·정량적으로 분석하기 위하여 원격탐사법이 널리 사용되고 있다(King *et al.*, 1999). 특히 인공위성 관측자료를 이용한 대기 에어러솔의 원격탐사는 단시간에 넓은 공간적 영역을 분석할 수 있어 지역적 또는 전 지구적 규모로 에어러솔의 분포 정보, 광학적/물리학적 특성, 및 대기질에 관한 정보를 제공해 준다(Al-Saadi *et al.*, 2005, 이권호 등, 2006).

현재까지 대기 에어러솔 분석에 흔히 이용되고 있는 위성센서로는 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) (Stowe *et al.*, 1997), Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) (Herman *et al.*, 1997; Torres *et al.*, 2002), Sea-Viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) (Gordon and Wang, 1994, von Hoyningen *et al.*, 2003), Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances (POLDER) (Deuze *et al.*, 1989), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Kaufman *et al.*, 1997a; Tanré *et al.*, 1997), Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR) (Martonchik *et al.*, 2002) 등이 있다. 제한된 채널 수와 관측영역 및 공간 분해능을 가지는 기존의 위성센서와는 달리, 1999년과 2002년에 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 MODIS 센서는 3가지의 공간 해상도(250m, 500m, 1km)와 36개의 채널(0.41~15 $\mu$ m)을 가지고 있는 대기 에어러솔을 관측하는데 있어 가장 진보적인 위성 센서이다. MODIS 에어러솔 분석자료는 미국 NASA (National Aeronautic and Space Administration)에서 개발된 에어러솔 분석 알고리즘을 이용하여 에어러솔 광학두께(Aerosol Optical

Thickness: AOT,  $\tau$ )와 에어러솔의 입자 크기분포 등에 관련된 정보를 포함하고 있다. 최근까지 MODIS 에어러솔 알고리즘은(현재 version 5.2.6) 기존의 것보다 향상된 정확도를 제시하고 있으며, 알고리즘 결과의 검증에 위한 노력으로서 많은 지상관측자료와의 비교연구가 이루어져 왔다(Chu *et al.*, 2002, Remer *et al.*, 2002, 2005, Levy *et al.*, 2007). 이러한 위성자료의 검증은 생산된 자료의 정확도 평가 뿐 아니라 알고리즘의 개선에 있어 매우 중요한 과정이다.

가장 최근에 발표된 MODIS 에어러솔 알고리즘(Collection 5 또는 C005)은 기존의 알고리즘(Collection 4 또는 C004)에 비해 많은 부분이 개선되었다(Remer *et al.*, 2006, Levy *et al.*, 2007). 그러나 정확도 분석에 관한 연구에서 동북아 지역은 지상관측자료의 부재로 인하여 정확히 알려져 있지 않고 최근에서야 지상관측자료를 이용한 정확도 연구가 보고되고 있다(Li *et al.*, 2007b). 따라서 본 연구는 한반도를 중심으로 한 동북아 지역에서 두 가지 알고리즘(C004, C005)을 사용한 TERRA/MODIS 에어러솔 관측자료를 상호 비교하고, 각 자료의 정확도를 검증하기 위하여 sunphotometer 지상관측 네트워크인 AERONET (Aerosol Robotic Network) 관측자료와 비교분석 하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구의 대상 지역은 동경 100°~150°, 북위 20°~52°의 영역으로 중국 동북부, 한반도, 일본 및 북태평양 일부를 포함한다(그림 1). 여기서 사용된 MODIS 자료는 2005년의 한 해 동안의 Level 2 에어러솔 자료(MOD04\_L2)로서 두 가지의 알고리즘(C004 와 C005)으로부터 생산된 결과를 이용하였다(표 1). MOD04\_L2 자료는 직하점(Nadir)에서 약 10 $\times$ 10km<sup>2</sup>의 공간 해상도를 가지며, 해양 및 육지에서 AOT( $\lambda=0.55\mu$ m)와 입자의 크기와 관련된 Ångström 지수, 그리고 에어러솔의 종류 및 질량 부하량(Mass loading)에 관한 자료를 포함하고 있다. MODIS AOT의 검증을 위한 지상 실측값(ground truth) 자료로서 연구 대상 지역내의 존재하는 11개의 AERONET sunphotometer 관측지점(그림 1)에서의 에어러솔 자료를 수집하였다.

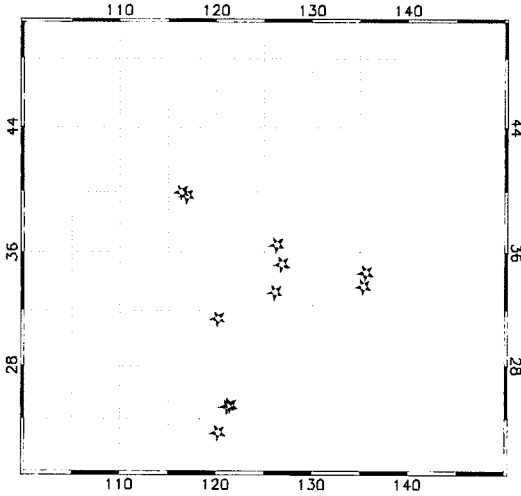


Fig. 1. Study area and locations of 11 AERONET sunphotometer measurement sites.

Table 1. Specifications of MODIS aerosol products used in this study

Characteristics	C004	C005
a) PGE version	4.2.4	5.2.6
Data Format	HDF-EOS V.2.9	HDF-EOS V.2.9
Period (used here)	2005	2005
No. of Files	4137	3783
Total size	13.4Gbyte	4.18Gbyte
Reference	Remer <i>et al</i> (2005)	Remer <i>et al</i> (2006)

a) PGE: The Program Executable

일반적으로, 위성영상에서 에어러솔에 대한 기여도를 찾기 위해서는 가시광선 영역의 태양광이 지표면(육지 또는 해양)에서 반사되는 양과 지구 대기 구성 물질(가스상 또는 입자상)에 의하여 흡수 또는 산란 되는 양을 정확히 알고 있어야 한다. 그러나 이러한 각각의 물리량을 정확히 파악하기는 불가능하므로, 기존의 이론값이나 경험치 또는 적절한 가정을 이용한다. MODIS 에어러솔 알고리즘은 육지와 해양에서 각기 다른 방법을 사용하는데 이것은 Terra 위성의 발사 이전에 보고된 MODIS 에어러솔 알고리즘에 대한 기술보고서(ATBD for MODIS aerosol retrieval) (Kaufman *et al.*, 1998)에 자세하게 기술되어 있다. 이 초창기 알고리즘을 바탕으로 하여 추가 및 변경사항이 적용된 C003와 C004 알고리즘이 발표되었다. 특히, C005 알고리즘은 제 2세대 에어러솔 분석 알고리즘으로 불리우며, 기존의 알고리즘보다 다양한 변화가 적용되었다(Remer

*et al.*, 2006, Levy *et al.*, 2007). 본 연구에서 사용된 C004와 C005 알고리즘에 대한 개략도를 그림 2와 3에 나타내었다.

해양의 경우,  $0.47\mu\text{m}$ 보다 큰 MODIS 채널 영역에서는 지표 반사도가 비교적 균일하고 낮으므로 AOT를 구하기 위하여 해양에 대한 지표 반사도 효과를 무시할 수 있다. 그리고 에어러솔의 종류별 LUT 작성을 위하여 6개의 채널( $0.55\sim 2.13\mu\text{m}$ )에서 미리 가정된 9개의 크기분포(4가지 미세 입자 영역, 5가지 거대 입자 영역)와 입자의 굴절률 정보를 이용하여, (미세입자+거대입자)의 20가지의 조합으로부터 Mie 산란 이론을 적용한 에어러솔의 특성값(소산계수, 단산란 알베도, 비대칭계수 등)을 계산한다. 여기서 얻어진 에어러솔 특성값은 복사 전달모델의 입력자료로 사용되며, AOT는 복사전달 모델에 의하여 계산된 반사도( $\rho_{\lambda}^{LUT}$ )와 위성이 관측한 반사도( $\rho_{\lambda}^{TOA}$ )의 최소차이( $\epsilon$ )를 가지는 (미세입자+거대입자)조합에서 찾을 수 있다(Tanré *et al.*, 1997).

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=1}^6 N_{\lambda} \left( \frac{\rho_{\lambda}^{TOA} - \rho_{\lambda}^{LUT}}{\rho_{\lambda}^{TOA} + 0.01} \right)^2}{N_{\lambda}}} \quad (1)$$

여기서,  $N_{\lambda}$ 는 계산에 사용된 픽셀의 개수, 0.01은 장파장 영역에서 대기가 매우 깨끗한 경우에 분모가 음수가 되는 것을 방지하기 위한 값이다.  $\rho_{\lambda}^{LUT}$ 는 위성이 관측하는 복사량이 미세 입자에 의한 반사도( $\rho_{\lambda}^{fine}$ )와 조대 입자에 의한 반사도( $\rho_{\lambda}^{coarse}$ )의 조합( $\eta$ )에 의하여 영향을 받는다는 가정 하에 다음과 같은 식으로 나타내어 질 수 있다.

$$\rho_{\lambda}^{LUT} = \eta \cdot \rho_{\lambda}^{fine} + (1 - \eta) \cdot \rho_{\lambda}^{coarse} \quad (2)$$

따라서 식 (1) 과(2)를 이용하여 최소값  $\epsilon$ 를 가지게 되는  $\eta$ 를 찾게 되면 AOT 뿐 아니라 에어러솔 크기분포에 대한 정보도 얻을 수 있다(그림 2).

육지의 경우, 가시광 영역에서 지표반사도가 일반적으로 해양 (또는 대기) 보다 높게 나타나므로 지표반사도가 비교적 적은 픽셀(dark pixel)을 찾아 근적외 채널( $2.13\mu\text{m}$ )과 두 개의 가시 채널( $0.47\mu\text{m}$ ,  $0.66\mu\text{m}$ )의 비율( $\rho_{0.66}^{Surf} = 0.5 \cdot \rho_{2.12}^{TOA}$ ,  $\rho_{0.47}^{Surf} = 0.25 \cdot \rho_{2.12}^{TOA}$ )을 이용하여 지표반사도를 정하는 방법이 C004에서 사용되었다(Kaufman *et al.*, 1997b). 하지만 근적외 채널에서는

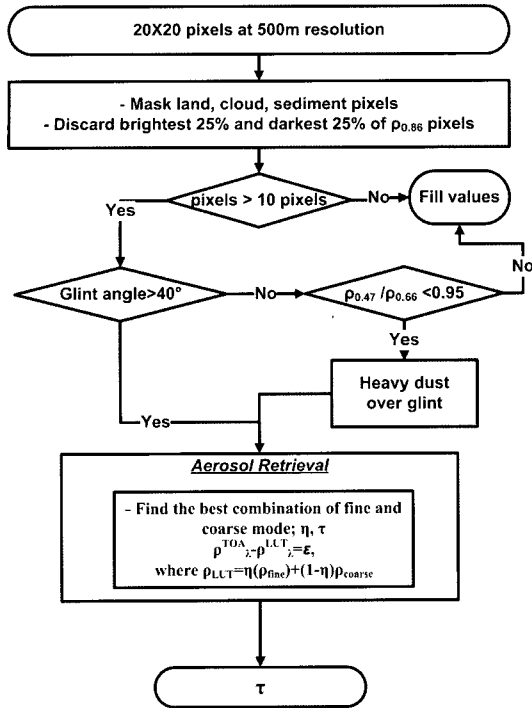


Fig. 2. Schematic diagram of the MODIS aerosol retrieval algorithm over ocean.

먼지입자와 같이 비교적 입자가 큰 에어러솔의 영향을 무시할 수 없고, 근적외/가시광 비율은 지역적 또는 계절별 다양한 식생분포에 의하여 고정된 값을 가지지 않으므로 에어러솔 분석에 있어 주요 오차의 원인이 되었다(Levy et al., 2006, Li et al., 2007, Lee et al., 2007b). 이 문제점을 해결하고자 C005 알고리즘에서는 식생지수와 산란각이 고려된 근적외/가시광 비율을 적용하여 지표반사도 산정을 하고 있다(Levy et al., 2006).

$$\rho_{0.66}^{Surf} = slope_{0.66/2.12} \cdot \rho_{2.12}^{Surf} + yin_{0.66/2.12} \quad (3)$$

$$\rho_{0.47}^{Surf} = 0.49 \cdot \rho_{0.66}^{Surf} + 0.005 \quad (4)$$

여기서  $slope_{0.66/2.12}$ 는 식생지수 ( $NDVI_{SW} = (\rho_{1.24}^{TOA} - \rho_{2.12}^{TOA}) / (\rho_{1.24}^{TOA} + \rho_{2.12}^{TOA})$ )와 산란각( $\Theta$ )의 함수이고  $yin_{0.66/2.12}$ 도 산란각의 일차 방정식으로 사용된다.

$$slope_{0.66/2.12} = slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SW}} + 0.002\Theta - 0.27 \quad (5)$$

$$yin_{0.66/2.12} = 0.00025\Theta + 0.033 \quad (6)$$

여기서 다시  $slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SW}}$ 는  $NDVI_{SW}$ 에 따라 다음과 같은 값을 가지게 된다.

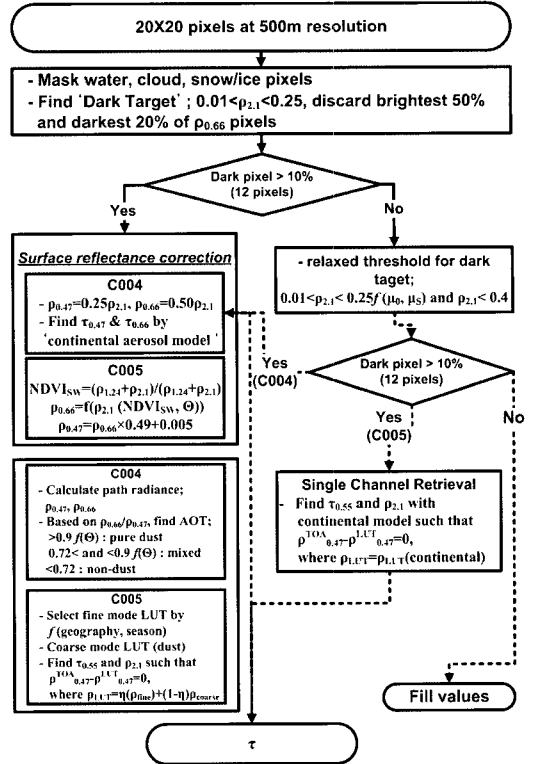


Fig. 3. Schematic diagram of the MODIS aerosol retrieval algorithm over land.

$$\begin{aligned} slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SW}} &= 0.48 ; (NDVI_{SW} < 0.25 \text{ 인 경우}) \\ &= 0.58 ; (NDVI_{SW} > 0.75 \text{ 인 경우}) \\ &= 0.48 + 0.2(NDVI_{SW} - 0.25) \\ &\quad ; (0.25 \leq NDVI_{SW} \leq 0.75 \text{ 인 경우}) \end{aligned}$$

그리고 지표의 영향이 제거된 위성자료는 가정된 에어러솔 광학 특성값을 이용하여 (위성반사도-AOT)와의 관계를 나타낸 LUT를 사용하여 최종적으로 AOT를 찾는다. C004 알고리즘에서는 전세계 대륙을 특정 지역으로 구분하여 지역별/계절별 에어러솔 모델을 사용하였으나 이것은 단순한 통계에 의한 값일 뿐 정확한 대기중의 에어러솔 특성을 반영하지 못하여 오차의 원인이 되기도 한다. 특히 에어러솔의 크기분포와 단산란 알베도가 정확히 고려되지 못한 LUT를 사용할 경우 오차의 강도는 더욱더 커지게 된다(Lee et al., 2007c). C005 알고리즘은 지표의 영향이 제일 적은 채널 (0.47 $\mu$ m)에서 기존의 C004 해양 알고리즘에서 사용된 미세-거대 입자 조합법을 사용함으로써 인하여 이러한 문제점을 해결하고자 하였다(그림 3).

### 3. 결과

#### 1) C004와 C005 MODIS 에어러솔 자료의 비교

MODIS 에어러솔 자료를 이용한 동북아 에어러솔의 분포 특성을 파악하기 위하여 연구 대상 지역을 위경도  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  (약  $100\text{km}^2$ ) 격자로 나누어 각 격자별 계절 평균을 구하였다. 계절 평균은 각각의 MODIS AOT 자

료를 월평균 AOT 자료로 평균화하였고, 이를 토대로 MAM(March-April-May; 봄), JJA(June-July-August; 여름), SON(September-October-November; 가을), DJF(December-January-February; 겨울)의 4계절 AOT 자료로 평균하였다. 월평균 AOT 자료는 각 픽셀당 7일 이상 관측된 자료만 선별하여 사용하였다.

그림 4는 계절평균 MODIS AOT를 나타낸 것으로

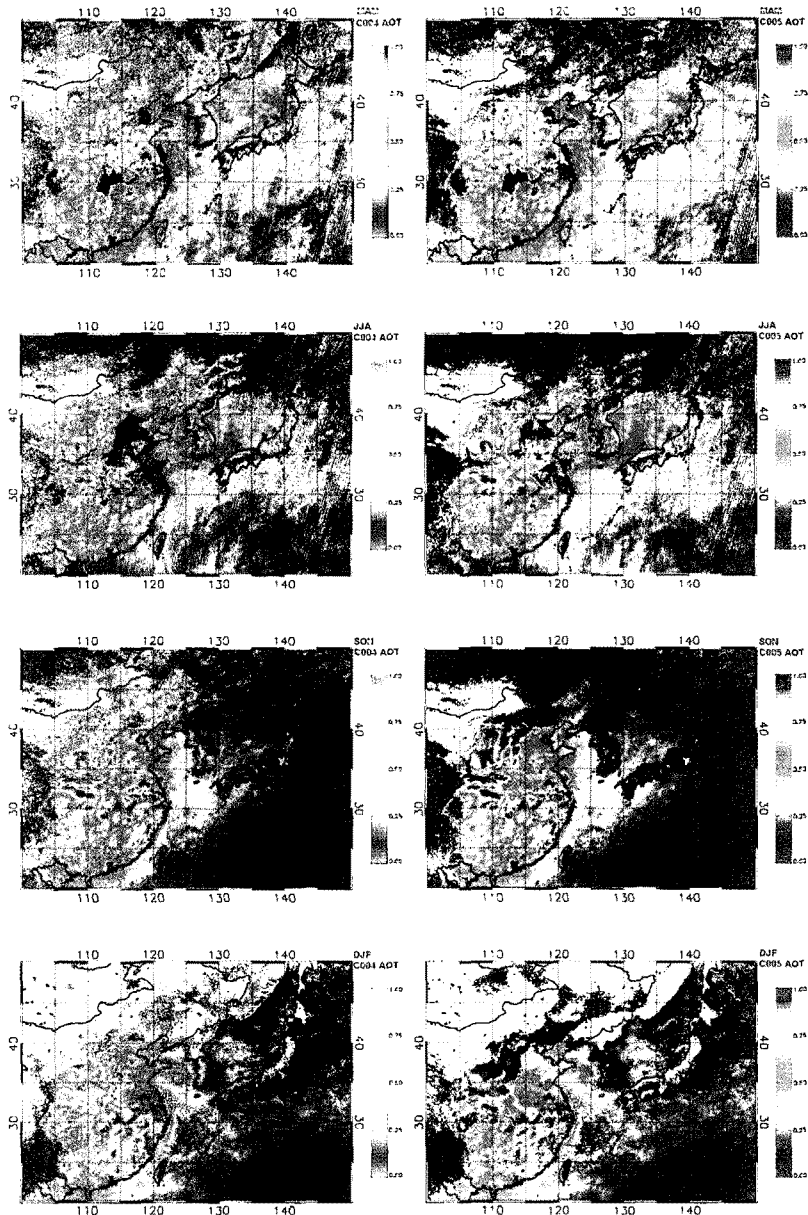


Fig. 4. Seasonal mean MODIS AOT<sub>C004</sub> and AOT<sub>C005</sub> during 2005.

픽셀 중 자료가 없는 경우는 AOT 산출에서 제외하여 0으로 나타내었다. 계절별 특징으로는 봄과 여름철 AOT 값이 전체적으로 높은 값을 나타내고 있으며, 특히 대도시와 공단 지역이 밀집되어 있는 중국 동부 지역이 다른 지역보다 상당히 높은 AOT 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 이 등(2006b)이 6년 동안 관측된 MODIS AOT 자료를 이용하여 중국의 AOT를 분석한 결과 상대적으로 매우 높은 상승률( $>0.004\tau/\text{month}$ ), 특히 황하강 유역을 중심으로 북위  $36^\circ$ 에서 북위  $40^\circ$  지역에서 최고  $0.008\tau/\text{month}$ 에 해당하는 AOT 증가현상이 나타남을 보인 것과 일치한다. 또한 MODIS에서 관측된 AOT는 대체적으로 중국지역에 가까울수록 높아지는 경향을 나타내며 중국의 AOT가 높은 계절일수록 연구 대상지역 내의 AOT분포범위가 넓어지고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 4에서의 시·공간별 분포양상은  $AOT_{C004}$ 와  $AOT_{C005}$  모두 비슷한 결과를 보이거나  $AOT_{C004}$ 가 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다.

두 MODIS 에어러솔 알고리즘에 의한 AOT의 차이를 알아보기 위하여 각 계절별 AOT값의 절대차 ( $AOT_{C005} - AOT_{C004}$ )를 그림 5에 나타내었다. 연구대상 지역의 모든 픽셀을 평균화 한 각 계절별 평균값의 절대차는  $-0.034 \sim -0.036$ 의 값을 나타냄으로써 C004에

비하여 C005는 약 5% 정도의 AOT값이 적은 값을 보인다. 육지의 경우 C004알고리즘에 비해 C005 알고리즘의 변화가 해양의 것보다 많은 데에 기인하여 해양보다 많은 부분에서 적은 값(많은 차이)을 보인다. 이러한 차이는 육지에서의 지표반사도 설정값이 C004에서는 C005보다 저평가하고 있기 때문이다(Lee *et al.*, 2007a, Li *et al.*, 2007). 그리고 보다 개선된 구름 및 눈(snow) 픽셀 제거 알고리즘으로 인해 위성영상에서 비정상적으로 높은 반사도를 나타내는 픽셀을 제거할 수 있게 되어, 그림 4의 C004의 경우처럼 비정상적으로 높은 값을 나타내는 픽셀들이 없는 것도 개선된 C005 알고리즘 결과의 특징이다. 육지와 마찬가지로 해양에서도 C005가 낮은 값을 보이고 있으나 서해 일부 연안지역에서는 C005가 높은 값을 보이는 것은 해양의 연안지역의 높은 지표반사도를 나타내는 조건대 지역이 제대로 마스크되고 있지 못한 것으로 보인다. 그리고 LUT 작성에 있어 에어러솔 모델이 C004와 다른 것도 AOT의 차이가 되는 한 원인이다.

두 알고리즘에서 가장 큰 특색인 지표반사도의 산정에 의한 차이를 알아보기 위하여 복사전달 모델인 SBDART (Ricchiazzi *et al.*, 1998)를 사용하여 다양한 에어러솔의 존재 조건하에서 (종류와 AOT) 지표반사도

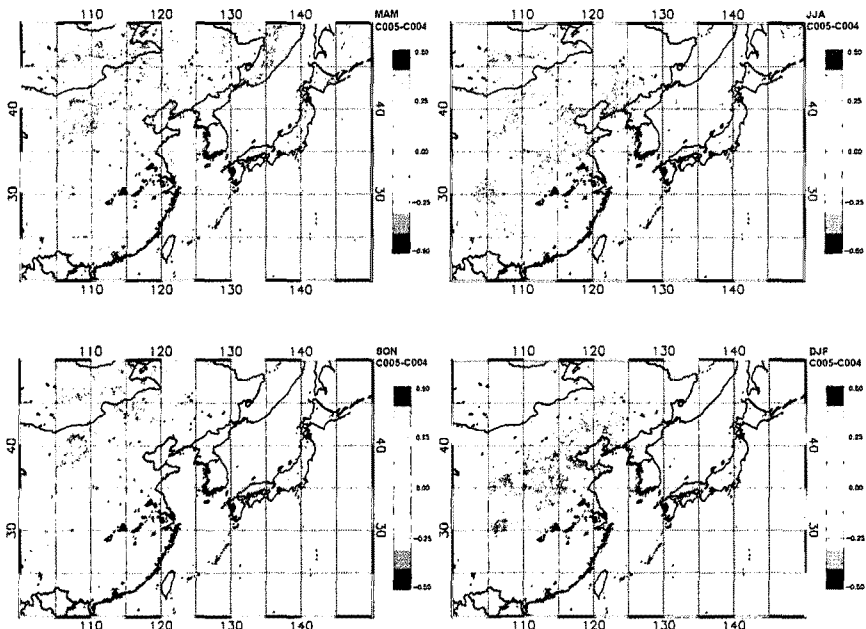


Fig. 5. Absolute difference ( $AOT_{C005} - AOT_{C004}$ ) of the seasonal mean MODIS AOT.

를 계산하였다. 여기서 사용된 7가지 에어러솔의 광학 특성값은 OPAC 모델(Hess *et al.*, 1998)을 사용하였다. 각 AOT 조건하에 계산된  $\rho_{2.12}^{TOA}$ 와  $\rho_{1.24}^{TOA}$ 를 바탕으로 NDVISw을 구하였으며 식 (3)~(6)을 이용하여 C005와 C004에서 사용되는 지표반사도를 계산하였다. 그림 6은 C004, C005 알고리즘에서 사용되는 지표반사도 산정 결과와 AOT와의 관계를 나타내며 C004의 지표반사도 값이 보다 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 AOT산정을 위한 지표반사도 효과 제거과정에 영향을 미치게 되어 AOT<sub>C004</sub>가 AOT<sub>C005</sub> 보다 큰 값을 가지게 되는 원인이 되는 것이다.

## 2) AERONET 자료와 비교

기존의 MODIS AOT의 정확도는 육지에서  $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.15\tau$ (Chu *et al.*, 1998, 2002)와 해양에서  $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$ (Tanré *et al.*, 1997, Remer *et al.* 2002)로 보고되고 있다. 그러나 이것은 Terra 위성 발사 이전에 시행된 항공기에 탑재된 MODIS 시뮬레이터의 실험값으로, Terra 위성 발사 후에 전세계 AERONET 관측 자료와 비교를 통해 검증이 이루어 지긴 하였지만 동북아 지역은 대상이 아니었다. 또한 최근에 시행된 AOT<sub>C004</sub>의 검증에 있어서도 동북아 지역은 지상관측 지점이 매우 부족하였다(Remer *et al.*, 2005). 따라서 본 연구에서는 MODIS AOT 자료의 정확성을 분석하기 위하여 연구 지역내의 Sunphotometer 지상관측 네트워크인 AERONET AOT 자료(Level 2.0, Quality Assured)와 비교하였다.

AERONET sunphotometer에서 측정된 AOT 자료는 각 채널에서 0.01이하의 안정된 오차범위를 가진다(Eck *et al.* 1999). 지상 관측값과 비교를 위해서 MODIS AOT는 각 지상 관측 지점의 위·경도를 중심으로 반경 약 20km에 해당하는 픽셀값들을 추출하여 평균하였으며, 지상에서 관측된 AERONET AOT는 MODIS가 관측하는 시간의  $\pm 30$ 분에 해당하는 값을 평균하였다. 연구지역 내에서의 11개의 AERONET 관측 지점은 Anmyon (AM; 동경126.330°, 북위 36.539°), Beijing (BJ; 동경116.381°, 북위 39.977°), Chen-Kung University (CK; 동경120.217, 북위23.000), Gwangju (GJ; 동경126.843°, 북위 35.228°), Gosan (GS; 동경126.162°, 북위 33.292°), NCU (NC; 동경 121.192, 북위 24.967), Osaka (OK; 동경 135.591, 북위 34.651), Shirahama (SH; 동경 135.357, 북위 33.693), Taihu (TH; 동경 120.215, 북위 31.421), Taipei (TP; 동경 121.500, 북위 25.030), Xianghe (XH; 동경116.962°, 북위 39.754°)에 해당한다.

각 AERONET 관측 지점에서 MODIS와 AERONET의 상관관계는 0.55 $\mu$ m 기준으로 표 2와 3에 나타내었다. 표 2에서 AOT<sub>C004</sub>는 선형 회귀 방정식에서 Xinghe를 제외하고는 모두 1보다 작은 기울기와 큰 y-절편 값을 가지는 것으로 나타난다. 이것은 에어러솔이 적은 맑은날의 경우 과대평가(=지표 반사도의 과소평가)를, 예

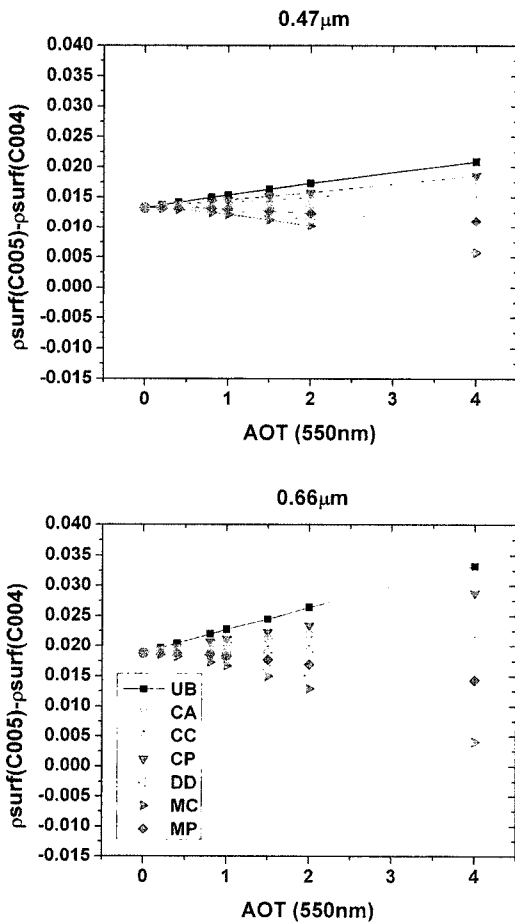


Fig. 6. Difference between surface reflectance by C004 and by C005 algorithm versus AOT at 550nm. TOA reflectances at MODIS bands (no. 1~7) were calculated by SBDART. Input conditions are US-standard atmosphere, sun zenith angle=40, satellite viewing angle=20, relative azimuth angle=0, surface = vegetation, respectively.

Table 2. Linear regression ( $y=Ax+B$ ) results from MODIS AOT<sub>C004</sub> and AERONET AOT values. R, MD, SD, N are correlation coefficient, mean difference, standard deviation, total number of data points, respectively

Site	A	B	R	MD	SD	N
AM	0.767	0.298	0.868	0.208	0.073	38
BJ	0.711	0.277	0.868	0.122	0.033	154
CK	0.962	0.131	0.798	0.110	0.103	52
GJ	0.789	0.060	0.880	-0.029	0.051	72
GS	0.975	0.134	0.950	0.126	0.065	26
NC	0.772	0.162	0.874	0.072	0.088	26
OK	0.747	0.223	0.709	0.143	0.085	78
SH	0.891	0.061	0.893	0.033	0.038	138
TH	0.779	0.203	0.880	0.052	0.062	48
TP	0.698	0.058	0.859	-0.081	0.073	35
XH	1.028	0.086	0.881	0.102	0.044	158
All	0.858	0.145	0.860	0.081	0.018	825

어려솔씨 많은 날에는 과소평가 ( $= \rho_{\lambda}^{LUT}$ 의 과소평가) 된 AOT<sub>C004</sub>를 나타낸다. 표 3에서 AOT<sub>C005</sub>의 경우는 각 지점별 기울기는 Taipei를 제외하고 1에 근접하고 있으며 절편도 적어진 것으로 보아 C005 알고리즘의 정확

Table 3. Same as table 2 but MODIS AOT<sub>C005</sub> values

Site	A	B	R	MD	SD	N
AM	0.947	0.143	0.921	0.117	0.083	25
BJ	0.899	0.130	0.920	0.083	0.032	145
CK	0.942	0.098	0.894	0.069	0.081	36
GJ	0.990	-0.055	0.945	-0.059	0.045	61
GS	1.212	0.009	0.957	0.078	0.075	26
NC	0.838	0.130	0.728	0.068	0.168	24
OK	0.916	0.213	0.695	0.183	0.127	58
SH	0.878	0.018	0.890	-0.014	0.042	115
TH	0.812	0.235	0.896	0.126	0.077	29
TP	0.681	0.056	0.810	-0.097	0.093	30
XH	1.113	-0.008	0.964	0.049	0.024	168
All	1.003	0.048	0.919	0.049	0.016	717

도가 C004에 비해 현저히 증가한 것으로 보인다. 이러한 사실은 평균오차가 0.081에서 0.049로 약 40%정도 줄어든 것에서도 확인할 수 있다.

AERONET 관측 지점의 지리적 위치에 따라 육지 (BJ, GJ, OK, TH, XH), 해양(GS), 혼합지역(AM, CK, NC, SH, TP)으로 구분하였다. 그림 7은 육지와 해양에

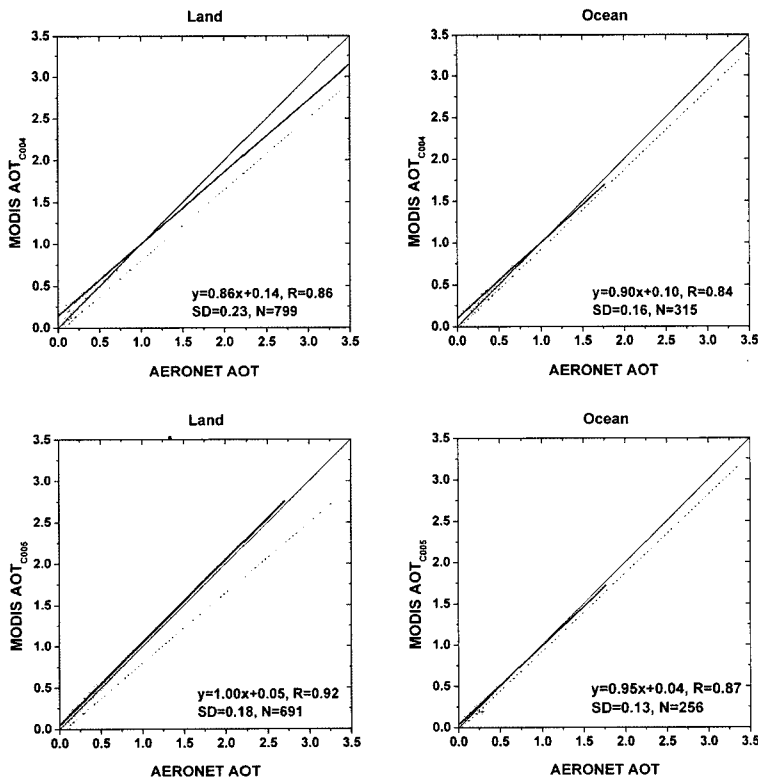


Fig. 7. MODIS AOT plotted against collocated AERONET observations.



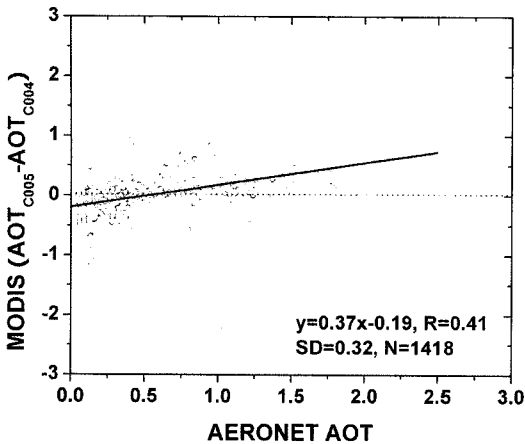


Fig. 8. Scatter plots of MODIS (AOT<sub>005</sub>-AOT<sub>004</sub>) versus AERONET AOT.

서의 상관관계를 나타내며 MODIS AOT의 알려진 정확도 범위는 점선으로 표시하였다. 각각의 비교에서 AOT<sub>C004</sub>의 선형회귀직선은 작은 AOT에서 정확도 범위를 벗어나고 있으나 AOT<sub>C005</sub>의 선형회귀직선은 모두 정확도 안에 위치하고 있다. 여기서도 마찬가지로 AOT<sub>C005</sub>의 육지에서의 상관관계는 AOT<sub>C004</sub>에 비하여 많은 개선이 이루어진 결과로 보인다.

그림 8에서는 MODIS 알고리즘의 개선으로 인한 AOT의 차이와 AOT와의 관계를 살펴보기 위하여 AOT<sub>C005</sub>가 AOT<sub>C004</sub>의 절대차와 AERONET AOT를 비교하였다. 여기서는 AERONET AOT를 오차가 없는 완전한 참값으로 가정할 경우, 선형 회귀 직선을 통하여 AERONET AOT가 0.5를 경계로 이보다 작은 경우  $AOT_{C004} > AOT_{C005}$ 인 경우가 많고 0.5보다 크면 반대의 결과를 나타낸다. 이것은 결국, 대기에 의한 반사도가 적은 경우 지표반사도의 영향이 크게 되어 에어러솔 분석에 주요 오차 원인이 되는 것을 재확인 시켜준다.

#### 4. 요약 및 결론

현재까지 MODIS L2 에어러솔 자료는 C004 알고리즘을 거쳐 가장 최근에 개선된 C005 알고리즘을 이용하여 사용자에게 제공되고 있다. C005 알고리즘은 기존의 C004 알고리즘과는 달리 많은 부분, 특히 육지의 경우 제 2세대 알고리즘으로 칭하며 지표반사도와 에어러솔

모델의 사용에 있어 개선점이 반영되었다. 기존의 C004 알고리즘의 사용까지 MODIS 에어러솔 자료를 이용한 검증연구가 수행되었으나 한반도를 포함한 동북아 지역은 아직도 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2005년 한 해 동안의 두 가지 다른 알고리즘 (C004와 C005)의 MODIS 에어러솔 자료를 수집하여 동북아 지역의 대기 에어러솔의 시·공간적 분포 특성 및 지상 관측 자료와 비교 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- MODIS 에어러솔 자료를 이용한 계절별 AOT 분포 특성으로는 일반적으로 봄과 여름철이 상대적으로 높으며, 공간적 분포 특성으로는 중국지역이 다른 지역에 비해 높은 AOT값과 이 지역을 중심으로 확산되는 에어러솔의 분포 특성을 알 수 있다.
- 두 가지 MODIS 에어러솔 알고리즘의 비교로서 AOT<sub>C005</sub>가 AOT<sub>C004</sub>보다 약 0.035 (5%)의 AOT값이 적게 나타났으며, 이러한 변화는 육지의 경우가 더욱 뚜렷하다. 이것은 C005 알고리즘에서는 육지에서의 지표반사도 설정 및 에어러솔 모델의 변화에 의한 영향으로 볼 수 있다.
- 동북아시아 지역에서 MODIS 에어러솔 자료와 지상 관측 자료의 비교 결과는 대체적으로 알려진 MODIS AOT 정확도 내에서 일치하며, C005 알고리즘의 정확도는 C004에 비해 약 40% 개선된 것으로 나타났다.

결론적으로, 인공위성을 이용한 에어러솔 분석은 광역 분포 정보를 제공함으로써 유용하지만 분석 알고리즘에 따라 정확도가 다르므로 주의가 필요하다. 위성 자료의 분석 알고리즘의 개발과 함께 검증에 대한 연구는 향후 COMS와 같은 국내 자체 위성 자료를 이용한 대기 에어러솔 연구에 있어도 기여도가 클 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국 해양 연구원의 “정지궤도해색위성(GOCI) 활용연구지원 사업”의 연구 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- 이권호, 이동하, 김영준, 2006. MODIS인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 예측 응용, 한국 대기환경학회지, 22(6): 851-862.
- 이동하, 이권호, 김정은, 김영준, 2006a. 동북아시아 지역에서 Terra/MODIS 위성자료를 이용한 2000~2005년 동안의 대기 에어로졸 광학두께 변화특성, 대기, 16(2): 85-96.
- 이동하, 이권호, 김영준, 2006b. 에어로졸 종류 구분을 위한 MODIS 에어로졸 자료의 적용, 대한 원격탐사 학회지, 22(6): 495-505.
- Al-Saadi, J, J. Szykman, B. Pierce, C. Kittaka, D. Neil, D. A. Chu, L. Remer, L. Gumley, E. Prins, L. Weinstock, C. McDonald, R. Wayland, and F. Dimmick, 2005. Improving national air quality forecasts with satellite aerosol observations, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 86(9): 1249-1261.
- Chu, D. A., Y. J. Kaufman, C. Ichoku, L. A. Remer, D. Tanré, and B. N. Holben, 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval overland, *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2001GL013205.
- Chu, D. A., Y. J. Kaufman, L. A. Remer, and B. N. Holben, 1998. Remote sensing of smoke from MODIS airborne simulator during the SCAR-B experiment, *J. Geophys. Res.*, 103: 31979-31988.
- Deuze, J. L., C. Devaux, M. Herman, R. Santer, J. Y. Balois, L. Gonzalez, P. Lecomte, and C. Verwaerde, 1989. Photopolarimetric observations of aerosols and clouds from balloon, *Remote Sens. Environm.* 29: 93-109.
- 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.
- Gordon, H. R. and M. Wang, 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm, *Appl. Opt.* 33: 443-452.
- Hess, M., P. Koepke, and I. Schultz, 1998. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 831-844.
- Hermann, J. R., O. Bhartia, Torres, C. Hsu, C. Seftor, and E. Celarier, 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data, *J. Geophys. Res.*, 102: 16911-16922.
- Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, 2003. An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- Kaufman, Y. J., D. Tanré, L. Remer, E. F. Vermote, A. Chu, and B. N. Holben, 1997a. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectrometer, *J. Geophys. Res.*, 102: 17051-17067.
- Kaufman, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, and L. Flynn, 1997b. The MODIS 2.1-mm channel correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 1286-1298.
- King, M. D., Y. J. Kaufman, D. Tanré, and T. Nakajima, 1999. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present, and future. *Bull. Am.*

- Meteorol. Soc.*, 80: 2229-2259.
- Lee, K. H., Y. J. Kim, W. von Hoyningen-Huene, and J. P. Burrows, 2007a. Spatio-Temporal Variability of Atmospheric Aerosol from MODIS data over Northeast Asia in 2004, *Atmos. Environ.*, 41(19), 3959-3973. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.01.048.
- Lee, K. H., Z. Li, and Y. J. Kim, 2007b. SWIR/VIS reflectance ratio over Korea for aerosol retrieval, *Korean J. of Remote Sensing*, 23(1), 1-5.
- Lee, K. H., Z. Li, M. S. Wong, J. Xin, Y. Wang, and F. Zhao, 2007c. Aerosol single scattering albedo across China retrieved from a combination of ground-based and satellite measurements, *J. of Geophys. Res.*, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- Levy, R. C., L. A. Remer, S. Mattoo, E. F. Vermote, and Y. J. Kaufman, 2007a. A second-generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance. *J. Geophys. Res.* 112: D13211.
- Li, Z., F. Niu, K. H. Lee, J. Xin, W. Hao, B. Nordgren, Y. Wang, and P. Wang, 2007b. Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S07, doi:10.1029/2007JD008479.
- Li, Z., H. Chen, M. Cribb, R. Dickerson, B. Holben, C. Li, D. Lu, Y. Luo, H. Maring, and G. Shi, 2007a. Preface to special section on East Asian Studies of Tropospheric Aerosols: An International Regional Experiment (EAST-AIRE). *J. Geophys. Res.*, 112(d22): D22S00, Doi:10.1029/2007JD008853.
- Martonchik, J. V., D. Diner, K. A. Crean, and M. A. Bull, 2002. Regional Aerosol Retrieval Results From MISR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1520-1531
- Nakajima, T., *et al.*, 2007. Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009.
- Remer L., D. Tanré, and Y. J. Kaufman, 2006. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from MODIS: Collection 5, Algorithm Theoretical Basis Document, [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atmos\\_atbd.php](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atmos_atbd.php).
- Remer, L. *et al.*, 2002. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 8008, doi:10.1029/2001GL013204.
- Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle, 1998. SBDART: A research and teaching tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 2101-2114.
- Stowe, L. L., A. M. Ignatov, and R. R. Singh, 1997. Second generation operational aerosol product at NOAA/NESDIS. *J. Geophys. Res.*, 102(D14): 16923-16934.
- Tanré, D., Y. J. Kaufman, M. Herman, and S. Mattoo, 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances, *J. Geophys. Res.*, 102(D14): 16971-16988.
- Torres, O., P. K. Bhartia, J. R. Herman, A. Sinyuk, P. Ginoux, and B. Holben, 2002. A Long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements., *J. Atmos. Sci.*, 59: 398-413.
- von Hoyningen-Huene, W., M. Freitag, and J. B. Burrows, 2003. Retrieval of aerosol optical thickness over land surfaces from top-of-atmosphere radiance, *J. Geophys. Res.*, 108(D9): 4260-4280.