

MODIS와 TOMS자료를 이용한 2001년 동북아시아 지역의 대기 에어로졸 모니터링

이권호 · 홍천상 · 김영준

광주과학기술원 환경공학과, 환경 모니터링 신기술 연구센터

Atmospheric Aerosol Monitoring Over Northeast Asia During 2001 from MODIS and TOMS data

Kwon Ho Lee, Chun Sang Hong, and Young Joon Kim

Advanced Environmental Monitoring Research Center(ADEMRC)

Dept. of Environmental Science & Engineering

Gwangju Institute of Science & Technology(GIST)

Abstract : The spatial and temporal variations of aerosol optical depth (AOD) over Northeast Asia regions have special importance in the aerosol research for estimation of aerosol radiative forcing parameters and climate change. Aerosol optical and physical properties (AOD and Ångstrom parameter) have been investigated by using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Aerosol Index (AI) to estimate aerosol characteristics over the study region during 2001. Additionally, aerosol characteristics over the Korean peninsular during Aerosol Characteristic Experiment in Asia (ACE-Asia) Intensive Observation Period (IOP) have been investigated by using satellite observations. The results showed that the daily-observed aerosol data indicate seasonal variations with relatively higher aerosol loading in the spring and very low during the winter. The typical Asian dust case showed higher AOD (> 0.7) with lower Ångstrom exponent (< 0.5) and higher AI (> 0.5) that is mainly due to the composition of coarse particles in the springtime. Mean AOD for 2001 at 4 different places showed 0.65 ± 0.37 at Beijing, 0.31 ± 0.19 at Gosan, 0.54 ± 0.26 at Seoul, and 0.38 ± 0.19 at Kwangju, respectively. An interesting result was found in the present study that polluted aerosol events with small size dominated-aerosol loading around the Korean peninsular are sometimes observed. The origin of these polluted aerosols was thought to East China. Aerosol distribution from satellite images and trajectory results shows the proof of aerosol transport. Therefore, aerosol monitoring using satellite data is very useful.

Key Words : MODIS, TOMS, AOD, AI, ACE-Asia.

요약 : 동북아시아 지역의 에어로졸 광학두께의 시공간적 변화는 기후변화에 큰 역할을 하는 데

기중의 에어로졸의 연구에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 MODIS를 이용한 에어로졸 광학두께 자료와 TOMS 에어로졸 인덱스 자료를 수집하여 2001년 한해동안의 에어로졸의 물리학적 광학적 특성을 살펴보았다. 일별 에어로졸 관측 자료를 분석한 결과 에어로졸의 계절별 변화양상은 봄에 높고 겨울에 낮음을 뚜렷이 나타내고 있었다. 한편, 지역별 특징은 2001년에 MODIS에 의해 관측된 에어로졸 광학 두께의 연평균 값은 베이징이 가장 높은 0.65 ± 0.37 이고 고산이 가장 낮은 0.31 ± 0.19 로 나타났으며 서울과 광주가 각각 0.54 ± 0.26 과 0.38 ± 0.19 로 관측되었다. 이러한 연중 에어로졸 분석결과를 바탕으로 2001년 봄철 ACE-Asia 집중 관측 기간 중에 MODIS와 TOMS 관측 자료를 이용한 한반도 인근지역의 에어로졸 특성을 조사하였다. 봄철에 높은 값을 보이는 에어로졸 광학두께(>0.7)와 에어로졸 인덱스 값(>0.5), 그리고 낮은 값을 나타내는 Ångstrom 지수 (<0.5)는 모두 봄철 황사현상에 의한 것이다. 그러나 때때로 황사와 같이 큰 입자가 아닌 다른 오염원에 의한 에어로졸로 인한 영향도 발견되고 있어 중국에서 발생한 오염된 에어로졸이 한반도로 이동하는 것이 원인으로 사료된다. 위성영상에서 나타난 에어로졸의 공간적 분포양상이 이를 입증하고 있다. 따라서 동북아시아 지역의 에어로졸 특성을 나타내는데 위성자료의 활용도는 매우 효과적이다.

1. 서론

에어로졸은 기후예측모델링에 있어 중요한 불확실 인자로서 직접적으로는 빛의 산란, 흡수 등 복사평형에 영향을 미치며, 간접적으로는 구름 응결핵(Cloud Condensation Nuclei; CCN)으로 작용함으로써 알베도(Albedo)와 구름의 수명에 영향을 미치게 된다. 인위적인 에어로졸에 의한 복사 강제력(Radiative Forcing)은 현재 전지구적 평균으로 $-0.3 \sim -3.5 \text{ W/m}^2$ 정도로 추정되며, 이것은 온실기체에 의한 복사 강제력인 $2.0 \sim 2.8 \text{ W/m}^2$ 와 비교된다(IPCC, 2001). 이러한 에어로졸은 중위도 인구 밀집 지역에서 발생하는 황산화물과 같은 인위적 에어로졸의 영향이 크다고 알려져 있으며 자연적으로 발생하는 에어로졸(먼지, 해염입자 등)에 의한 영향도 무시할 수 없다(Charlson *et al.*, 1992, Ramanathan *et al.*, 1995). 그러므로 에어로졸에 대한 영향을 정량화해야 하고, 기후변화 모델예측을 위한 에어로졸 복사 강제력에 있어서의 불확실성을 최소화 해야 할 필요가 있으며 이를 위하여 2001년 4월에는 제주 고산에서 ACE-Asia(Aerosol Characteristic Experiment in Asia) 집중관측이 이루어졌다. ACE-Asia 관측결과는 다음과 같이 요약되었다(Huebert *et al.*, 2003).

- 아시아 지역의 에어로졸은 다양한 오염물질(탄소, 황산화물, 질소산화물과 유기물)과 혼합된 먼지성분으로서 다양한 물리 광학적 특성을 가지고 있다.
- 4월 한달 동안 동아시아 지역에서 관측된 광학두께와 복사 플럭스를 사용해 계산된 직접 복사 강제 효과는 약 -30 Wm^{-2} 정도로 매우 큰 값을 나타내었다.

이러한 에어로졸에 의한 복사영향을 정량화 하기 위하여 에어로졸 광학두께(AOD; Aerosol Optical Depth)를 분석할 필요가 있으며 이 물리량은 지상에서 관측하는 Sunphotometer, Radiometer, LIDAR(Light Detection And Ranging)등과 같은 복사관측장비와 항공관측 그리고 위성관측을 통하여 분석할 수 있다. 기본적으로 인공위성 원격탐사자료는 가시광선 영역대의 밴드에서 대기중의 분자들이나 에어로졸에 의한 산란효과에 의해 영향을 받는다. 특히 최근에는 인공위성에 의한 대기 에어로졸의 관측방법이 널리 사용되고 있으며 위성관측자료가 에어로졸 모니터링에 있어서 중요한 요소가 되었다. 에어로졸 관측에 흔히 이용되고 있는 위성센서로는 Advanced Very High Resolution Radiometer(Rao *et al.*, 1989; Husar *et al.*, 1997; Stowe *et al.*, 1997), Geostationary

Meteorological Satellite-5(Lee, 2001), Total Ozone Mapping Spectrometer(Herman *et al.*, 1997; Torres *et al.*, 2002), Sea -Viewing Wide Field- of-view Sensor(von Hoyningen *et al.*, 2003), Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances(Deuze *et al.*, 1989), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(Kaufman *et al.*, 1997a; Tanre *et al.*, 1997), Multi-angle Imaging Spectroradiometer(Martonchik *et al.*, 2002) 등이 있다. 특히 황사 현상과 같은 먼지구름은 인공위성 영상에서 쉽게 관측되며 이러한 먼지 구름이 복사 강제 효과에 대한 기여도가 클 것으로 예측된다.

본 연구에서는 미국 NASA(National Aeronautic and Space Administration)의 지구관측위성중의 하나인 TERRA위성의 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)센서의 에어로졸 관측자료와 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer)에어로졸 인덱스(Aerosol Index ; AI) 자료를 이용하여 한반도 인근 지역에서의 2001년 에어로졸의 특성을 비교 분석하였다. 또한 2001년 ACE-Asia 집중관측 기간 동안의MODIS와 TOMS 에어로졸 관측자료를 비교 분석하였으며, 후진계적분석을 통하여 에어로졸의 장거리 이동 패턴분석을 통하여 한반도 인근지역 내의 대기환경변화에 영향을 미치는 에어로졸의 분포 및 특성을 규명하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 에어로졸 관측자료를 이용하기 위하여 대표적인 에어로졸 관측 센서인 MODIS와 TOMS를 사용하였다. Table 1은 MODIS와 TOMS의 기기 특성과 본 논문에서 사용된 에어로졸 관측 자료의 특성을 나타낸다. MODIS는 미국 NASA의 지구관측 위성 계획(EOS; Earth Observing System)의 일환으로 발사된 위성(TERRA : 1999년 발사, AQUA; 2002년 발사)에 탑재된 센서로서 36개의 파장 분해능과 2330km의 수평 관측폭을 가지며 고도 705km에서 극 궤도를

돌고 있다. MODIS는 대기권과 해양, 육지에서 발생하는 지구 동역학과 프로세스를 관측함으로써 폭 넓은 관측 결과 자료를 제공해주고 있다. MODIS 관측자료는 육지, 해양, 대기와 관련된 44개의 표준 자료를 생산하고 있으며 각각의 자료에 대한 자세한 설명은 Algorithm Theoretical Basis Documents(ATBDs)를 통하여 배포되고 있다. 본 연구에서는 MODIS에 의해 관측된 에어로졸 자료를 분석하기 위하여 MODIS 에어로졸 표준 자료인 MOD04자료를 이용하였다. MOD04는 직하점에서 $10 \times 10 \text{ km}^2$ (at nadir)의 해상도로 전지구적인 에어로졸의 분포 및 광학적·물리학적 파라미터를 포함하는 MODIS Aerosol Product로서 해양 및 육지에서 에어로졸 광학두께(550nm)와 Ångstrom 지수, 그리고 에어로졸의 종류 및 질량 부하량(Mass loading)에 관한 자료를 포함하고 있다.

한편, MODIS는 에어로졸 광학두께 생성을 위하여 육지와 해양에서 각기 다른 알고리즘을 사용하여 에어로졸 광학두께를 구하는데 MODIS 이전의 관측 위성들은 육지에서의 반사도의 영향으로 에어로졸 관측이 어려웠으나 MODIS는 향상된 분광 해상도를 사용한 알고리즘의 사용으로 인하여 육지 위에서의 에어로졸 관측이 가능해졌다. 먼저 육지에서는 비교적 대기의 영향이 적은 근적외 영역(2.13, $3.8 \mu\text{m}$)의 채널을 사용하여 지표면의 반사도를 구한다음 청색($0.47 \mu\text{m}$)과 적색($0.66 \mu\text{m}$)채널의 지표 반사도와와의 상관관계를 통하여 dark pixel을 지정하게 된다(Kaufman *et al.*, 1997b). 근적외 채널에서 낮은 반사도를 가지는 픽셀은 청색과 적

Table 1. Technical Specifications of MODIS and TOMS.

Characteristics	MODIS	TOMS
Orbit	Sun-synchronous	Sun-synchronous
Altitude	705km	739km
Spatial Resolution	$10 \times 10 \text{ km}^2$	$1 \times 1 \text{ degree}$
Aerosol Data	AOD (550nm), Angstrom Exponent, etc.	AI
Aerosol Data Format	HDF-EOS	Text
Period (used here)	2001	2001

색 채널의 반사도를 이용하여 미리 계산된 LUT (Look Up Table)을 이용하는 에어로졸 알고리즘이 개발되었다(Kaufman *et al.*, 1997a).

그리고 해양의 경우 표면반사도가 비교적 균일하고 낮은 반사도 값을 가지므로 에어로졸 광학두께를 구하기 위하여 표면 반사도를 구하지 않는다. 이 경우 에어로졸의 광학두께 이외에 에어로졸의 컬럼 부하량과 크기분포(0.08~5 μ m)가 가능한데 이것은 6개의 밴드영역(0.55~2.13 μ m)에서 미리 가정된 11개의 크기분포(5가지 미세 입자 영역, 6가지 조대 입자 영역)를 사용하여 복사전달 모델을 계산한 결과를 이용하여 얻어진다(Tanre *et al.*, 1997). 이 원리는 위성이 관측하는 총 복사량 $L_{\lambda}^s(\mu_s, \mu_v, \phi_s)$ 이 에어로졸의 크기 분포에서 미세 입자영역과 조대 입자영역에 의해 영향을 받는다는 가정 하에 다음과 같은 식으로 나타내어 질 수 있다.

$$L_{\lambda}^s(\mu_s, \mu_v, \phi_s) = \eta L_{\lambda}^s(\mu_s, \mu_v, \phi_s) + (1 - \eta) L_{\lambda}^l(\mu_s, \mu_v, \phi_s) \quad (1)$$

여기서, $L_{\lambda}^s(\mu_s, \mu_v, \phi_s)$ 와 $L_{\lambda}^l(\mu_s, \mu_v, \phi_s)$ 는 각각 미세 입자에 의한 복사량과 조대 입자에 의한 복사량이고 η 는 각 크기 영역의 비율인데 이 값을 구하는 것이 중요하다. 이 값을 구하기 위하여 모델 계산을 통하여 얻어진 일련의 값들과 비교를 통하여 최소의 에러 값을 가지는 값을 선택하게 되는데 다음과 같은 식을 이용한다.

$$\epsilon_{sl} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{L_j^m(\mu_s, \mu_v, \phi_s) - L_j^c(\mu_s, \mu_v, \phi_s)}{L_j^m(\mu_s, \mu_v, \phi_s) + 0.01}} \quad (2)$$

여기서 $L_j^m(\mu_s, \mu_v, \phi_s)$ 과 $L_j^c(\mu_s, \mu_v, \phi_s)$ 는 각각 채널에서 관측된 복사량과 계산된 복사량이다.

또한 같은 기간 중에 TOMS 에어로졸 인덱스 관측 자료를 분석하여 에어로졸의 광학적 특성을 분석하였다. EP-TOMS 위성자료(<http://toms.gsfc.nasa.gov>)가 사용 되었으며 EP-TOMS는 740km의 고도에서 6개의 채널(360.4 \pm 0.2 nm, 331.3 \pm 0.1 nm, 322.4 \pm 0.1 nm, 317.6 \pm 0.1 nm, 312.6 \pm 0.1 nm, and 308.6 \pm 0.1 nm)을 가지며 에어로졸 관측자료는 1 $^{\circ}$ \times 1 $^{\circ}$ 의 공간해상도를 가진다 (Table 1). TOMS는 원래 자외선 및 오존 관측을

주 임무로 하고 있지만 자외선 파장 영역에서의 331nm와 360nm의 채널의 분광대비(Spectral Contrast)기법을 사용하여 에어로졸의 자외선 흡수 특성을 분석한다. 이러한 분광대비 특성을 이용하여 다음 식과 같은 에어로졸 지수를 생산하게 된다(Herman *et al.*, 1997).

$$AI = -100 \{ \log_{10}[(I_{331}/I_{360})_{meas}] - \log_{10}[(I_{331}/I_{360})_{calc}] \} \quad (3)$$

여기서, I_{meas} 와 I_{calc} 는 각각 위성에 의해 관측된 복사량과 모델 계산에 의한 Rayleigh 복사량이다. 자외선 영역의 에어로졸 관측기법은 자외선 흡수 에어로졸에 대단히 민감하고 비흡수성 에어로졸과 구분 지을 수 있는 것과 지상이나 육지에서 관측이 가능한 장점이 있다. 대표적인 자외선 흡수성 에어로졸은 생체소각(Biomass Burning)으로 인한 스모크, 공업 지역에서 발생하는 탄소입자, 먼지, 그리고 황사와 같은 사막기원의 에어로졸이며 TOMS 에어로졸 인덱스는 양의 값을 가진다. 대표적인 자외선 비흡수성 에어로졸은 황산염(Sulphate) 입자로 TOMS 에어로졸 인덱스는 음의 값을 나타낸다. 한편, TOMS 에어로졸 인덱스는 육지와 해양에서 모두 응용이 가능하지만 알고리즘 자체에서 에어로졸의 고도에 따른 영향을 받으므로 1~2km 이상의 높이에 존재하는 에어로졸이 관측된다. 이것은 자외선 흡수성 에어로졸이 지표면 근처에 존재할 때, 에어로졸에 의한 Mie 산란효과가 에어로졸 층의 밑에 Rayleigh 산란으로 인한 자외선의 흡수효과 보다도 커질 수 있기 때문에 음의 에어로졸 인덱스 값을 나타낼 수 있어 문제가 된다(Hsu *et al.*, 1999).

3. 결 과

1) MODIS 에어로졸 관측 자료 특성의 통계 분석

2001년 동북 아시아 지역의 에어로졸 광학 특성 분석을 위하여 베이징과 서울, 광주, 고산에서의 MODIS 에어로졸 자료와 TOMS 에어로졸 인덱스

자료를 이용하여 통계학적 분석을 수행하였다. 일반적으로 에어로졸의 광학 특성은 주로 계절별 생성요인의 변화와 이동경향에 따라 달라지게 되는데, 에어로졸 광학두께와 Ångstrom 지수는 연무현상과 같이 미세 입자의 영향을 많이 받는 경우 에어로졸 광학 두께 값은 증가하지만 Ångstrom 지수는 큰 값을 가지고, 반면에 황사와 같은 큰 입자가 존재할 경우 Ångstrom 지수는 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 또한 인위적인 오염의 영향이 많거나 농촌지역과 가까운 지역은 추수기 소각으로 발생한 작은 입자로 인하여 큰 값을 나타낸다.

Fig. 1은 네 지역에서의 2001년 동안의 일별 MODIS 에어로졸 광학 두께(550nm)와 Ångstrom 지수를 나타내고 있으며 위에서 언급한 경향을 보여주고 있다. 계절별 특성은 봄철에 높은 에어로졸 광학두께(> 0.7)를 나타나는 경우가 많으며 겨울철에 낮은 에어로졸 광학 두께를 나타내는 것으로 보아 봄철 황사 및 장거리 이동 에어로졸에 의

한 영향을 고려해 볼 수 있다. 특히 가을철 추수 후 소각으로 인한 영향으로 에어로졸 광학두께가 다소 증가함과 동시에 높은 Ångstrom 지수가 나타나는 것을 알 수 있다. 지역별 특성을 살펴보면 먼저 도시지역인 베이징과 서울은 대체적으로 광주와 고산보다 높은 에어로졸 광학두께를 나타내는 경우가 많지만 서울의 경우 겨울철에 다소 높은 에어로졸 광학두께와 높은 Ångstrom 지수 (> 1.0)를 보여 인위적 발생원에 의한 에어로졸의 영향이 베이징보다 많이 받고 있음을 나타낸다. 농촌지역의 특성을 나타내고 있는 광주 및 고산지역은 앞의 두 도시지역보다 낮은 에어로졸 광학두께 값을 나타내지만 광주의 경우 좀 더 복잡한 양상을 나타내고 있는데 이는 도시지역과 농촌지역이 혼재해 있는 이유로 설명 할 수 있다.

연중 에어로졸 광학두께 값의 변화는 봄철 황사현상과의 상관관계로 높게 나타남을 보이지만 전체적으로 높은 Ångstrom 지수로 인하여 작은

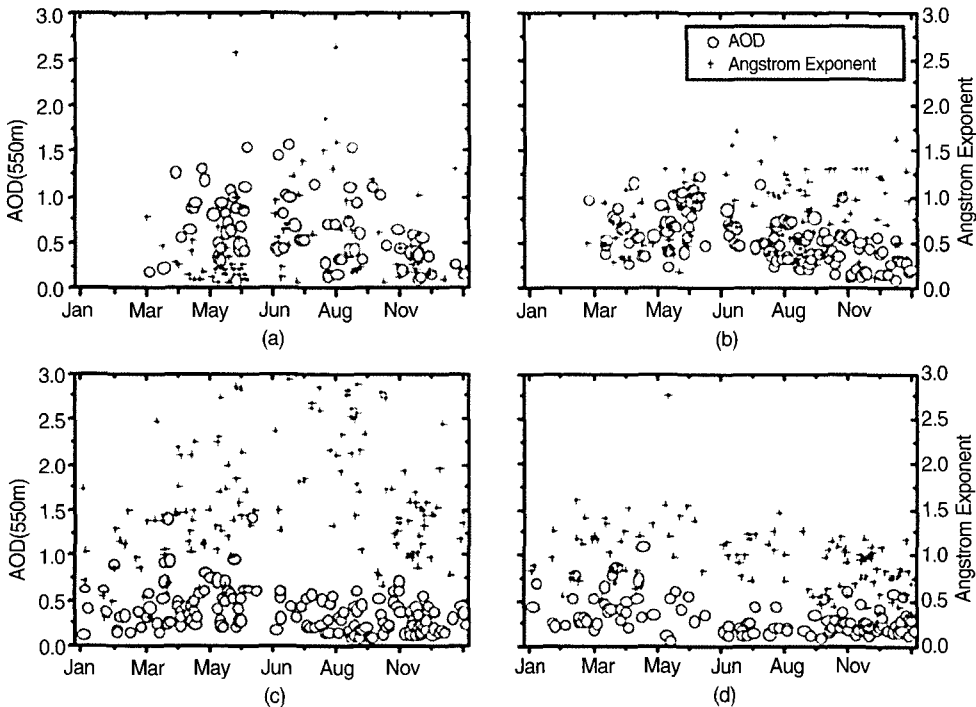


Fig. 1. Time series of MODIS retrieved AOD at 500nm wavelength and Angstrom exponent(α) values at (a) Beijing, (b) Seoul, (c) Kwangju, (d) Gosan during 2001.

입자의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 고산의 경우는 해안가에 위치하고 있어 근처 오염원에 대한 영향은 배제할 수 있는 것으로 간주되나 봄철 황사 및 장거리 이동 오염물의 영향으로 다소 에어로졸 광학두께가 다소 높은 에어로졸 광학 두께 값을 보인다. 또한 연중 낮은 에어로졸 광학 두께와 약 1.2정도의 Ångstrom 지수가 나타나는 것은 해염(Sea-spray)에어로졸의 영향으로 간주된다.(Gerasopoulos et al., 2003)

Table 2는 각 지역별 에어로졸 관측자료 특성을 요약한 것으로 2001년에 MODIS에 의해 관측된 에어로졸 광학 두께의 연평균 값은 베이징이 가장 높은 0.65 ± 0.37 이고 고산이 가장 낮은 0.31 ± 0.19 로 나타났으며 서울과 광주가 각각 0.54 ± 0.26 과 0.38 ± 0.19 로 관측되었다. 여기서 최고값을 보이는 베이징과 최저값을 보이는 고산과의 차이는 약 2배 이상을 나타내고 있어 두 지역간의 에어로졸의 영

Table 2. Statistical analysis from daily MODIS AOD values.

	MODIS AOD(550nm)				
	Average	Std.	Max.	Min.	N obs.
Beijing	0.65	0.37	1.58	0.09	78
Seoul	0.54	0.26	1.23	0.1	118
Gwangju	0.38	0.23	1.42	0.08	145
Gosan	0.31	0.19	1.1	0.05	110

	MODIS AOD(550nm)				
	Average	Std.	Max.	Min.	N obs.
Beijing	0.54	0.53	2.64	0.06	78
Seoul	0.79	0.37	1.72	0.11	118
Gwangju	1.57	0.65	2.99	0.31	135
Gosan	0.95	0.35	2.75	0.21	110

향을 상대적으로 파악할 수 있다. 또한 Ångstrom 지수는 광주가 가장 높은 1.57 ± 0.65 , 가장 낮은 베이징이 0.54 ± 0.53 이며 서울과 고산이 각각 $0.79 \pm$

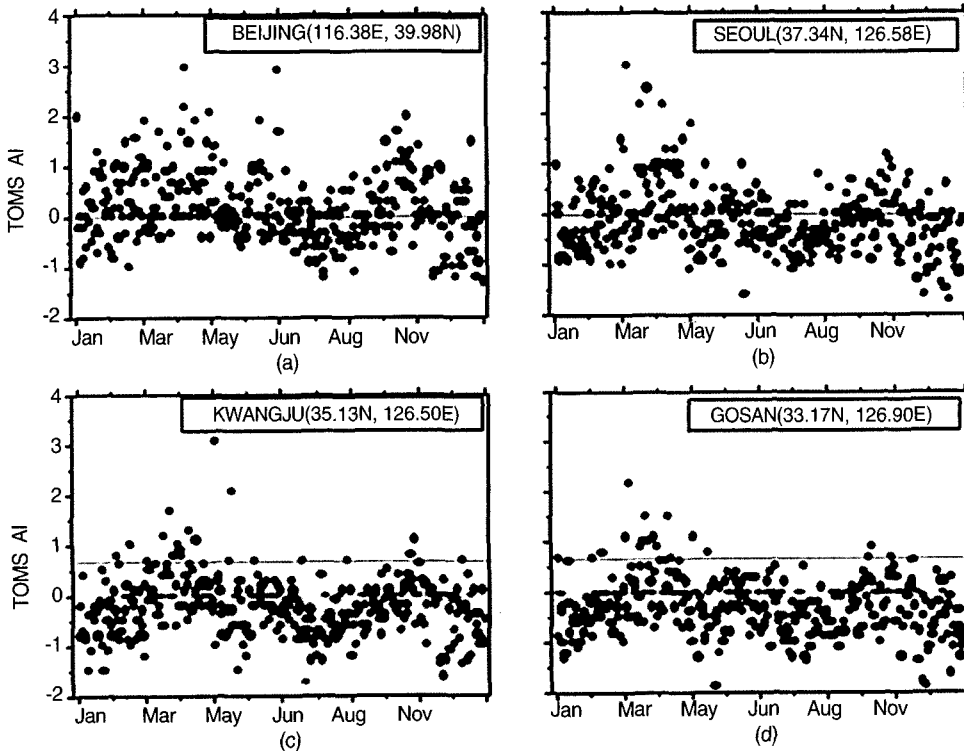


Fig. 2. Time series of TOMS retrieved AI values at (a) Beijing, (b) Seoul, (c) Kwangju, (d) Gosan during 2001.

0.37, 0.95 ± 0.35 로 관측되었다. 이것은 연중 베이징은 조대 입자영역의 에어로졸에 의한 영향이 많고 광주는 미세입자의 영향을 받고 있음을 보여준다.

2) TOMS 에어로졸 인덱스 자료 특성의 통계분석

TOMS 에어로졸 인덱스 자료의 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 전체적으로 TOMS 에어로졸 인덱스 자료는 봄과 가을에 높은 경향을 나타내고 있으며 봄철 황사가 발생한 날의 에어로졸 인덱스 값은 비교적 큰 양의 값을 나타내고 있어 연중 최고 값을 기록하고 있다. 특히 베이징의 경우 다른 곳보다 큰 에어로졸 인덱스 값과 MODIS 에어로졸 관측자료에서 나타난 바와 같이 큰 입자로 인한 에어로졸 광학두께의 증가를 나타내고 있어 대륙기원의 에어로졸의 영향을 많이 받고 있는 것으로 분석되어진다. 반면에 고산의 경우는 봄철 증가한 에어로졸 인덱스 값을 제외하고 음의 에어로졸 인덱스 값이 많이 나타나는 것으로 보아 앞서 언급한 해염입자의 영향을 설명해준다.

Table 3은 연평균 통계분석결과로서 베이징과 고산은 양의 에어로졸 인덱스(각각 0.18 ± 0.72 , 0.3 ± 0.58)로 자외선 흡수 에어로졸에 의한 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있으며 서울과 광주는 음의 에어로졸 인덱스 값(-0.14 ± 0.64 , -0.23 ± 0.63)으로 자외선 비 흡수성 에어로졸 및 저층에 존재하는 에어로졸의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 하지만 네 곳 모두 봄철에 최대값(각각 4.10, 3.00, 4.30, 2.20)을 나타내는 것은 황사의 영향이다.

Table 4는 MODIS 에어로졸 관측 값의 특성 구분을 위하여 TOMS 에어로졸 인덱스와 비교를

Table 3. Statistical analysis from daily TOMS AI values.

	TOMS AI				
	Average	Std.	Max.	Min.	N obs.
Beijing	0.18	0.72	4.1	-1.3	365
Seoul	-0.14	0.64	3	-1.7	365
Gwangju	-0.23	0.63	4.3	-1.7	365
Gosan	0.3	0.58	2.2	-2.3	365

Table 4. Statistical analysis from daily MODIS AOD values sorted by the sign of TOMS AI.

- AI	MODIS AOD(550nm)					
	Average	Std.	Max.	Min.	N obs.	N (%)
Beijing	0.61	0.37	1.58	0.09	38	56.72
Seoul	0.51	0.24	1.23	0.10	78	60.47
Gwangju	0.34	0.18	0.96	0.08	92	63.45
Gosan	0.25	0.12	0.69	0.04	76	69.09

+ AI	MODIS AOD(550nm)					
	Average	Std.	Max.	Min.	N obs.	N (%)
Beijing	0.80	0.35	1.54	0.23	29	43.28
Seoul	0.55	0.28	1.15	0.10	51	39.53
Gwangju	0.44	0.30	1.42	0.09	53	36.55
Gosan	0.43	0.25	1.10	0.12	34	30.91

한 것으로 양의 에어로졸 인덱스 값을 가지는 날의 에어로졸 광학두께 평균값과 음의 에어로졸 인덱스 값을 가지는 날의 평균을 구분하였다. MODIS 에어로졸 관측자료가 있는 날의 TOMS 에어로졸 인덱스 값의 분포는 음의 값을 가지는 날이 60% 이상을 차지하고 있지만 베이징의 경우 다른 지역들보다 양의 값을 가지는 날이 많은 것으로 나타나고 있다. 또한 네 지역 모두 양의 에어로졸 인덱스 값을 가질 때의 에어로졸 광학두께 평균값이 음의 에어로졸 인덱스 값을 가질 때보다 더 높은 것으로 나타나 자외선 흡수성 에어로졸의 영향을 받는 일수는 적지만 이에 대한 영향이 비흡수성 에어로졸의 영향보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3) ACE-Asia IOP 기간 중 에어로졸 관측 자료 특성

앞의 결과를 토대로 연중 에어로졸의 영향을 많이 받는 봄철의 동북아 지역의 에어로졸 특성을 분석하고자 2001년 ACE-Asia 집중관측기간 동안의 위성 관측자료를 분석하였다. MODIS 에어로졸 관측자료와 지상관측자료의 비교를 위하여 ACE-Asia기간동안 고산에서의 AERONET (Aerosol Robotic Network; Holben *et al.*, 1998)

Sunphotometer 자료를 수집하였다(http://aeronet.gsfc.nasa.gov). 그리고 각 자료의 공간해상도의 차이는 어떠한 지역에서의 위경도가 위성자료의 위경도와 제일 가깝거나 포함되어지는 격자의 자료를 중심으로 분석되었다.

Fig. 3은 제주 고산(126.1°E, 33.17°N)에서의 MODIS, AERONET 에어로졸 광학두께와 Ångstrom 지수의 시계열 그래프를 나타내었다. MODIS 에어로졸 관측 자료는 하루에 1회 생산되므로 자세한 시간적 변화패턴을 분석하는데 어려움이 있지만, 지상관측자료와의 상호 보완과 공간적 분석능력이 넓다는 이점을 가지고 있다. MODIS 에어로졸 분석자료는 대체적으로 지상관측자료와 비슷한 경향을 보이고 있고 광학두께 분석결과, ACE-Asia 집중 관측 기간 중 MODIS 에

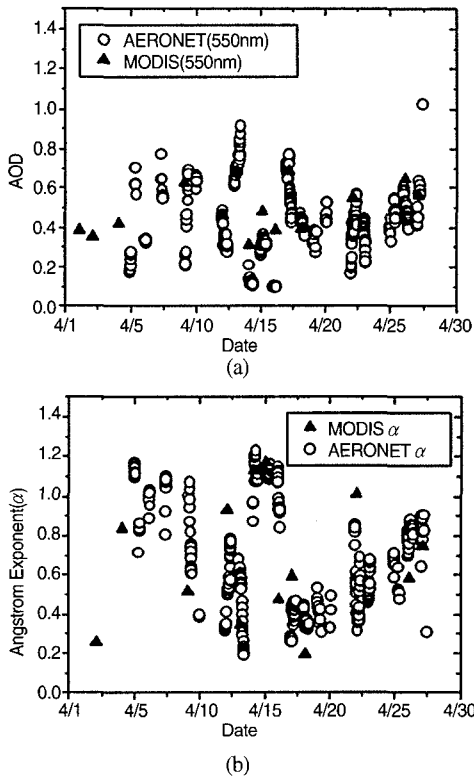


Fig. 3. Time series of MODIS retrieved (a) AOD at 550nm wavelength and AERONET sunphotometer measured AOD at 500nm at Gosan and (b) Angstrom exponent during ACE-Asia IOP.

어로졸 광학두께는 평균 0.50 ± 0.13 로서 고산의 2001년 연 평균값 0.31보다 높은 값을 나타내고 있으며 MODIS Ångstrom 지수는 평균 0.68 ± 0.31 로 연 평균값인 0.95보다 낮은 값을 나타내어 봄철 황사현상에 영향을 크게 받는 것으로 나타난다.

기상청 자료에 의하면 4월중에는 강수가 여러 번 있었으며 황사기간은 4월 10일(UTC 0406)~14일(UTC 0900), 4월 25일(UTC 0216)~(UTC 1725)로 보고되었다. 이때 고산에서 관측된 LIDAR 관측결과를 보면 4월 13일과 26일에는 황사가 관측되었고 15일에는 고도 2km미만에 에어로졸 층이 관측되었으며 특히, 4월 13일에는 LIDAR 관측결과 에어로졸의 수직분포가 몇 개의 층(1km, 4km)으로 구분되어 있는 것을 알 수 있었다(Hong et al., 2003). 이 때의 제주고산을 통과하는 기단(Air Mass)의 이동경로를 파악하기 위하여 HYSPLIT-4(Hybrid Single-Particle Lagrangian-Integrated Trajectory; Draxler et al., 1998) 모델을 사용하여 몇 가지 케이스에 대하여 후진궤적(backward trajectory)분석을 수행하였다. HYSPLIT-4 모델 입력자료로 미국의 U.S. National Center for Environmental Prediction(NCEP)가 제공하는 전구 격자 기상 자료인 FNL(Final Run) 기상자료를 사용하였다. 모델 실행 조건으로 제주고산(33.1 126.1)에 도착하는 Air Mass의 5개의 고도(500m, 1,000m, 2,000m, 3,000m, 4,000m)별 96시간의 등온위(isentropic)조건을 사용하여 계산하였다.

Fig. 4는 고산에서 에어로졸에 의한 영향이 많다고 여겨지는 4월 13일, 14일, 15일, 17일의 HYSPLIT-4 결과를 나타내었다. 4월 13일의 경우 4km를 제외한 유적선들이 중국의 서북부 지역 및 몽고와 인근지역에 위치한 사막 지대에서 출발하여 중국 동부 아래쪽 공업지대의 낮은 고도층을 통과하는 것을 알 수 있다. 4km 이상의 유적선은 하층의 유적선과는 약간 다른 이동 경로를 보이고 있어 이날의 에어로졸 다중 층 생성에 관한 설명을 해주고 있다. 비교적 에어로졸의 영향이 적었던 4월 14일의 유적선은 이동 고도가 높고 주로 중국 북부 지역 및 만주지역을 이동하였으며, 15

일의 경우엔 러시아의 바이칼 호수 근처를 출발한 유적선이 중국 베이징 인근지역 및 황해상의 저고도를 거쳐서 제주에 이르는 것으로 보아 이에 대한 영향을 받을 수 있음을 판단할 수 있다. 17일의 경우도 에어로졸에 의한 영향이 나타나는 날이며 유적선은 복잡한 이동경로를 보이고 있다.

Fig. 5는 4월 13일 MODIS 에어로졸 광학두께와 Ångstrom 지수, 그리고 TOMS 에어로졸 인덱스 분석영상을 나타낸다. MODIS의 RGB(

Green Blue) 합성영상을 토대로 한반도 인근지역의 에어로졸과 구름의 분포영역을 가시적으로 표현할 수 있는데 황사의 경우 황색의 에어로졸 영역이 잘 표시되며 연무나 기타 오염에 의한 에어로졸은 회백색 및 푸른색을 띠고 있는 것으로 나타나고 있다. 이때의 에어로졸 광학두께와 Ångstrom 지수 값을 통하여 에어로졸의 광학적 특성을 알 수 있다. 황사가 관측되었던 4월 13일엔 황사영역이 제주도를 포함한 서해 및 남해 일부지

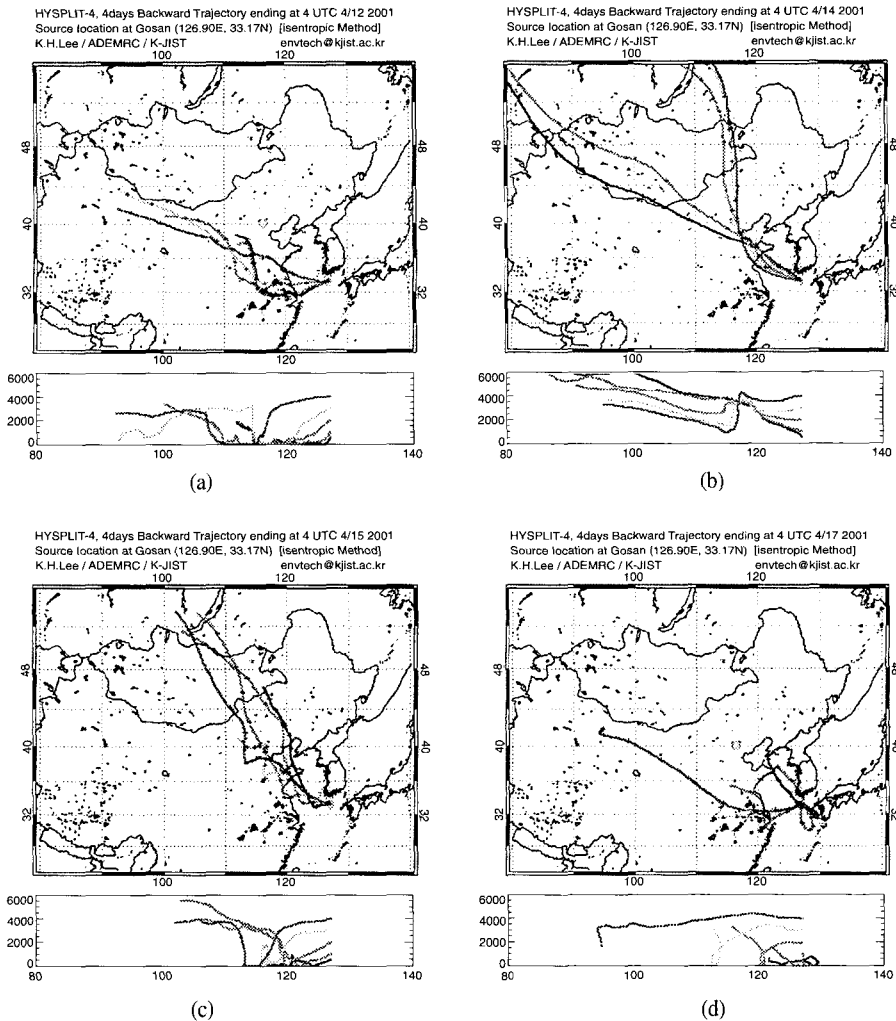


Fig. 4. HYSPLIT-4 96 hour backward trajectory results from Gosan on April (a) 13, (b) 14, (c) 15, and (d) 17, 2001; Color of trajectory line means vertical height which are Red(4,000m), Yellow(3,000m), Green(2,000m), Sky(1,000m), Blue(5,00m).

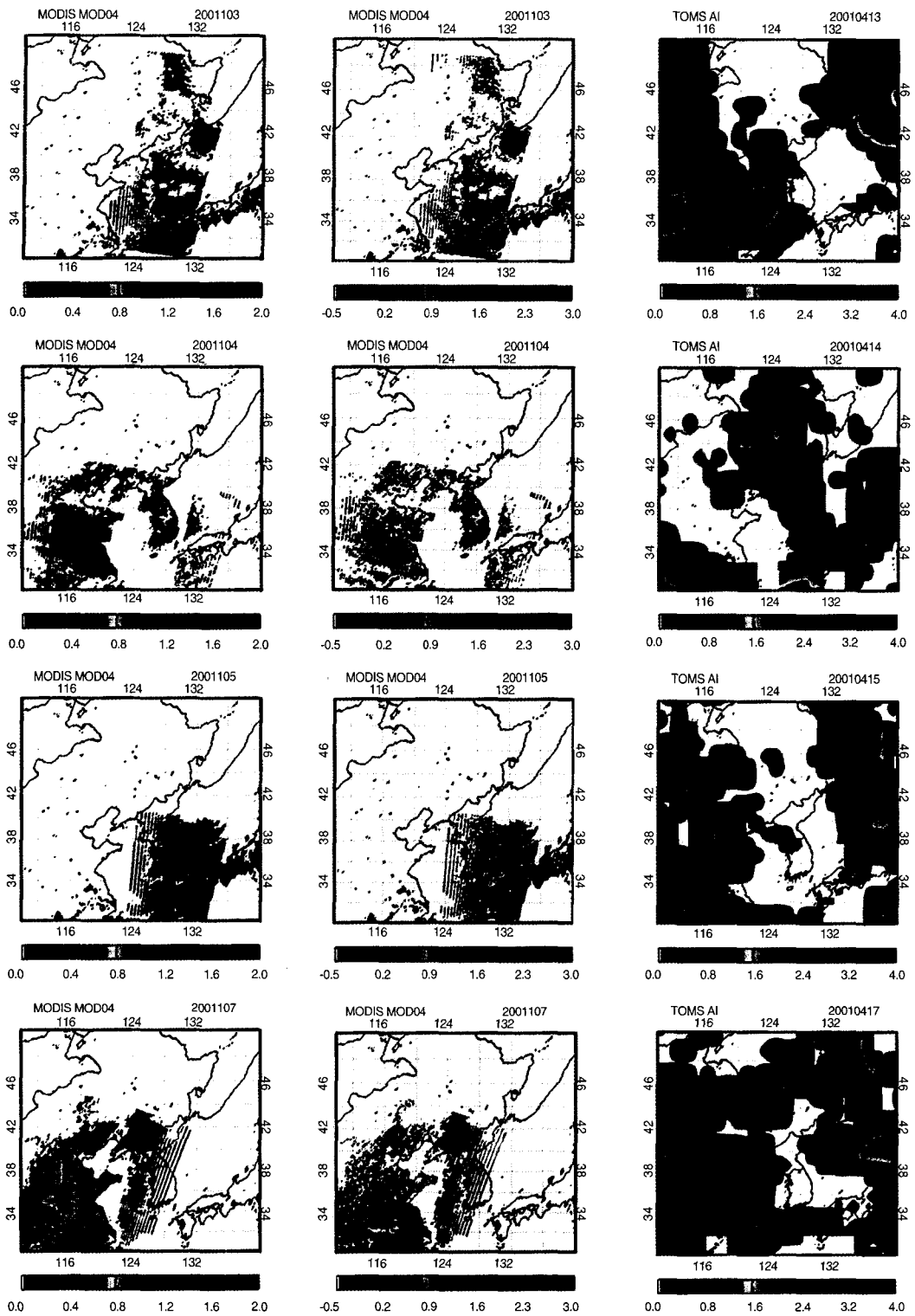


Fig. 5. MODIS retrieved AOD, Angstrom exponent, and TOMS AI map on April 13, 14, 15, and 17, 2001.

역에만 분포하고 있으며, 높은 에어로졸 광학두께 (>0.7)와 낮은 알파 값(<0.5)을 가지는 것으로 나타나고 있다. 이때 에어로졸 광학두께가 0.7보다 큰 영역은 37,400km²으로 매우 넓은 수평분포를 나타내었다. 반면에 다음날인 4월 14일은 제주도 인근 지역은 에어로졸의 영향을 거의 받지 않고 있고, 낮은 에어로졸 광학두께(<0.3)와 높은 알파값(>1.0)을 보이고 있어 비교적 에어로졸의 영향이 적은 날이었다. 또한 4월 15일은 특이한 경우로 황사에 의한 영향이 없었음에도 불구하고 상대적으로 큰 에어로졸 광학두께(>0.4)와 알파값(>1.0)을 나타내는 영역이 한반도 인근에 존재하고 있어 황사와 같은 조대입자에 의한 영향이 아닌 다른 오염원에 의한 미세입자에 의한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이날의 라이다 관측결과를 보면 고도 약 2km이하에 강한 신호가 나타나고 있어 황사와는 다른 에어로졸의 영향에 의한 것으로 판단된다. 한편 MODIS에 의해 분석된 고산에서의 에어로졸 Mass loading 값은 13일에 최고값 5.9 μ g/cm²과 월평균 3.84 \pm 1.14 μ g/cm²를 나타내었다.

고산에서의 TOMS 에어로졸 인덱스 시계열 분포 자료결과를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 황사가 발생한 날의 AI값은 비교적 큰 양의 값을 나타내고 있으나, 4월 15일의 경우에는 음의 AI값을 나타내어 황사입자와 다른 UV영역대의 복사를 흡수하지 않는 에어로졸(Sulphate, Seasalt)이나 저층에 존재하는 에어로졸로서 이전의 MODIS 관

측결과와 연관 지어 설명 할 수 있다.

4. 결론

MODIS와 TOMS 위성관측자료를 이용하여 2001년 동북아시아의 에어로졸 분포 특성 및 광학적 특성을 비교 분석하였으며 2001년 봄철 에어로졸 특성을 ACE-Asia의 연구와 연계하여 분석하였다. 2001년 한해동안 발생한 에어로졸은 주로 봄철에 많은 영향을 나타내고 있으며 지역적 특징을 보이고 있는 것으로 나타났다. 지역별 사례연구를 통하여 도시 지역도 베이징은 대륙기원의 에어로졸의 영향을 많이 받고 있는 것과 서울은 인위적인 오염원에 의한 영향을 많이 받고 있는 것을 알 수 있었다. 반면에 농촌지역인 광주와 제주의 경우, 광주는 근처 농경지의 계절별 활동에 대한 영향을 많이 받고 있으며 제주는 지리적인 위치로 인하여 해양의 영향과 외부로부터의 장거리 이동 오염에 대한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

이러한 연중 에어로졸 분석결과를 특징을 바탕으로 2001년 봄철 ACE-Asia 집중 관측 기간 중에 MODIS와 TOMS에 의해 관측된 에어로졸 광학적 파라미터를 분석하였다. 동 기간 중에 MODIS 자료를 이용하여 에어로졸의 시·공간적 분포 양상을 규명할 수 있었으며 황사 기간 중에 황사 영역의 분포 및 광학적 파라미터에 대한 분석이 가능하였다. 4월 13일에 발생한 황사는 높은 에어로졸 광학두께와 함께 지상 및 위성 자료로서 분석이 가능하였으며 특히 LIDAR에 의한 연직구조는 몇 개의 에어로졸 층으로 나타나고 있으므로 모델을 통한 복사영향을 파악하는 것이 중요하다. 4월 15일의 에어로졸은 황사에 의한 영향이 아닌 다른 원인에 의한 영향임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 황사와 오염 에어로졸간의 서로 다른 광물리학적 특성을 인해 위성관측자료에서 확인할 수 있어 Huebert *et al.*(2003)이 제시한 아시아 지역의 에어로졸 주요 특성에 관한 결과와도 부합되는 내용이다.

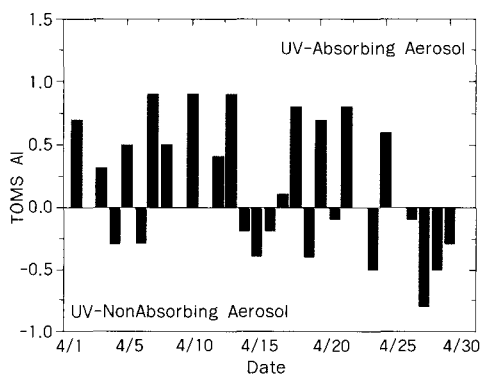


Fig. 6. Time series of TOMS AI at Gosan during ACE-Asia IOP

결론적으로, 인공위성을 이용한 에어로졸 광학 파라미터 자료는 에어로졸의 광학적 특성을 구분하는데 유용하며 특히, 황사현상에 관한 광역 분포 정보의 제공과 에어로졸의 광학특성을 분석함으로써 다른 원인에 의한 에어로졸의 영향을 구분할 수 있었다. MODIS 및 기타 환경관측위성 자료를 이용한 에어로졸 광학특성 분포지도를 이용하면 한반도 인근지역 에어로졸의 모니터링에 기여도가 클 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 광주과학기술원 환경 모니터링 신기술연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 한국 항공우주연구원의 “위성자료 공공활용연구”의 위탁연구 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, J. E., Hansen, and D. J. Hofmann, 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255: 423-420.
- 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.
- Draxler, R. R. and G. D. Hess, 1998. An Overview of the Hysplit_4 Modeling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition, *Aust. Met. Mag.*, 47: 295-308.
- Gerasopolous, E., M. O. Andreae, C. S. Zerefos, T. W. Andreae, D. Balis, P. Formenti, P. Merlet, V. Amiridis, and C. Papastefanou, 2003. Climatological aspects of aerosol optical properties in northern Greece, *Atmos. Chem. & Phys. Discuss.*, 3: 2059-2099.
- Hermann, J. R., O. Bhartia, C. 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.
- Holben B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Rem. Sens. Environ.*, 66: 1-16.
- Hong, C. S., K. H. Lee, Y. J. Kim, and Y. Iwasaka, 2004. LIDAR Measurements of Vertical Aerosol Profile and Optical Depth during the ACE-Asia 2001 IOP at Gosan, Jeju Island, Korea, *Environ. Moni. and Asses.*, 92, 1-3. (accepted)
- Hsu, N. C., J. R. Herman, O. Torres, B. N. Holben, D. Tanre, T. F. Eck, A. Smirnov, B. Chatenet, and F. Lavenue, 1999. Comparisons of the TOMS aerosol index with Sun-photometer aerosol optical thickness: Results and applications, *J. Geophys. Res.*, 105: 6269-6279.
- 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.
- Husar, R. B., J. M. Prospero, and L. L. Stowe, 1997. Characterization of Tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA/AVHRR optical thickness operational product. *JGR*, 102(D14): 16889-16909.
- IPCC (2001) Climate Change 2001, *The Scientific Basis*,

- Cambridge Univ. Press.
- Martonchik, J. V., D. J. 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.
- Kaufman, Y. J., D. Tanre, 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.
- Lee, K. H., 2001. *Yellow Sand Aerosol Monitoring by GMS-5 Satellite Remote Sensing Data with a Radiative Transfer Model*, K-JIST M. S. Degree Thesis.
- Rao, C. R. N., E. P. McClain, and L. L. Stowe, 1989, Remote Sensing of Aerosols Over Oceans From AVHRR, *Int. J. Rem. Sens.*, 10(4-5): 743-749.
- Stowe, L. L., A. M. Ignatov, and R. R. Singh, 1997. Second generation operational aerosol product at NOAA/NESDIS. *J. Geophys. Res.*, 102(D14): 16, 923-16, 934.
- Tanre, 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.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, M. O. Andreae, J. Coakley, R. Dickerson, J. Heintzenberg, A. Heymsfield, J. T. Kiehl, D. Kley, T. N. Krishnamurti, J. Kuettner, J. Lelieveld, S. C. Liu, A. P. Mitra, J. Prospero, R. Sadourny, A. F. Tuck, and F. P. J. Valero, 1995. Indian Oceanic Experiment(INDOEX) white paper, Rep. C4, Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. of Calif., Sandiego.
- 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.