

인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링

이 권 호 · 김 영 준*

광주과학기술원 환경공학과 환경모니터링신기술 연구센터

(2003년 11월 13일 접수, 2004년 6월 14일 채택)

Russian Forest Fire Smoke Aerosol Monitoring Using Satellite and AERONET Data

Kwon Ho Lee and Young Joon Kim*

Advanced Environmental Monitoring Research Center (ADEMRC)

Dept. of Environmental Science & Engineering

Kwangju Institute of Science & Technology K-JIST

(Received 13 November 2003, accepted 14 June 2004)

Abstract

Extensive forest fire activities occurred across the border in Russia, particularly east of Lake Baikal between the Amur and Lena rivers in May 2003. These forest fires released large amounts of particulates and gases into the atmosphere, resulting in adverse effects on regional air quality and the global radiation budget. Smoke pollution from the Russian fires near Lake Baikal was transported to Korea through Mongolia and eastern China. On 20 May 2003, a number of large fires were burning in eastern Russian, producing a thick, widespread pall of smoke over much of Northeast Asia.

In this study, separation technique was used for aerosol retrieval application with imagery from MODIS aboard TERRA satellites. MODIS true-color image shows the location of fires and the grayish color of the smoke plumes over Northeast Asia. Aerosol optical thickness (AOT) retrieved from the MODIS data were compared with fire hot spots, ground-based radiation data and TOMS-based aerosol index data. Large AOT, 2.0~5.0 was observed on 20 May 2003 over Korea due to the influence of the long range transport of smoke aerosol plume from the Russian fires, while surface observed fine mode of aerosol size distribution increased.

Key words : Forest fire, Smoke, MODIS, TOMS, AERONET

1. 서 론

* Corresponding author
Tel : +82-(0)62-970-3401, E-mail : yjkim@kjist.ac.kr

생체소각(Biomass Burning)은 에어로졸과 미량기

체를 발생함으로 인하여 대기오염 및 지구복사수지에 영향을 미친다. 생체소각은 미량기체 및 에어로졸의 주요한 발생원중 하나로서 생체소각으로 인해 발생한 스모크 에어로졸은 주로 탄소성분으로 구성되며 주로 산불이나 농지에서의 소각에 의해 발생한다. 이러한 스모크 에어로졸은 지구복사수지 및 기후변화에 영향을 미친다 (Kaufman and Fraser 1997a; Crutzen and Andreae 1990). Kaufman *et al.* (1997b)은 Smoke Cloud and Radiation-Brazil (SCAR-B) 동안 항공관측을 통해 생체소각으로 인한 스모크를 관측하였으며 Ross *et al.* (1998)은 생체소각이 심한 지역에서 약 -2 to -3 Wm^{-2} 의 복사강제효과를 계산하였고 Penner *et al.* (1992)은 전지구적 복사강제효과는 약 -0.3 Wm^{-2} 로 평가하였다.

이러한 생체소각은 주로 인도, 동남아시아, 아프리카, 중앙 아메리카, 캐나다 (Wotawa and Trainer, 2000), 그리고 중국 북동부와 시베리아 남동부 지역 (Cahoon *et al.*, 1994)에서 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 생체소각의 원인으로는 주로 인위적인 원인에 의해 발생하고 있지만 자연적 원인 (낙뢰와 건조지대에서의 자연발화)에 의해서도 발생하고 있다. 주거지역이 없는 식생지대에서 발생하는 화재는 통제가 어려워 규모 및 발생정도가 심각해 지는 경우도 있다. 특히 우리나라와 가까운 러시아의 시베리아 지역에서는 산불이 거의 매년 일어나고 있으며 2003년에 발생한 화재는 9,571건 이상이며 448,356 헥타르의 산림이 영향을 받았다 [http://www.fire.uni-freiburg.de/GFMCnew/2003/0520/20030520_ru.htm]. 이러한 대규모 산불로 인해 발생한 대기오염물질은 수백 킬로미터 이상의 장거리 이동을 함과 동시에 때로는 성층권에 도달하기도 한다 (Fromm *et al.*, 2000).

이러한 생체소각의 현황을 파악하는 데는 시·공간적인 측정 범위의 장점으로 인하여 인공위성 자료가 많이 사용되고 있다. 인공위성 영상에서 스모크 에어로졸은 가시적으로 구별이 되며 물리·광학적 특성을 찾는 것은 중요한 요소가 되고 있다. Kaufman *et al.* (1990)과 Christopher *et al.* (1996)은 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)의 몇 가지 채널을 이용하여 위성영상에서 스모크를 나타내었다. Zhang *et al.* (2001)은 정지위성인 GOES 8 관측자료를 이용하여 남 아메리카에서 발생한 산불의 스모크 에어로졸을 연구하였다. Nakajima *et al.* (1999)

은 1997년 인도네시아에서 발생한 대규모 산불로 인한 에어로졸에 대하여 AVHRR과 TOMS 자료를 이용하여 에어로졸 광학 두께를 분석하였다.

본 연구에서는 2003년 5월에 러시아 지역 산불에서 발생한 스모크 에어로졸의 발생 현황 및 장거리 이동 경로 및 물리 광학적 특성을 규명하기 위하여 인공위성 자료와 지상 복사 관측자료를 이용하였다. 이를 위하여 TOMS와 MODIS 인공위성자료를 이용하여 산불 발생 지역 및 에어로졸의 공간적인 분포 양상을 분석하고 지상복사관측 자료로서 AERONET Sunphotometer 관측자료를 이용하여 특정 지역에 에어로졸의 물리·광학적 특성을 평가하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2003년 러시아에서 발생한 산불은 3월초부터 계속되었으며 7월 말까지도 산불이 계속되었다. 본 연구에서는 그 영향이 가장 심했던 2003년 5월에 발생한 산불로 인한 에어로졸을 분석하기 위하여 지상복사관측자료 및 인공위성 자료를 사용하였다. 대표적인 환경관측 센서인 MODIS를 사용하여 산불의 위치 및 에어로졸의 공간 분포 그리고 에어로졸 광학 두께를 분석하였다. 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 2330 km의 수평 관측 폭을 가지며 고도 705 km에서 극 궤도를 돌고 있다. MODIS는 대기권과 해양, 육지에서 발생하는 지구 동역학과 프로세스를 관측함으로써 폭 넓은 관측 결과 자료를 제공해주고 있다. 또한 MODIS 관측자료는 육지, 해양, 대기와 관련된 44개의 표준 자료를 생산하고 있으며 각각의 자료에 대한 자세한 설명은 Algorithm Theoretical Basis Documents (ATBD's)를 통하여 배포되고 있다.

우선 산불이 발생한 지역을 파악하기 위하여 MODIS Fire 분석 자료인 MOD14자료를 이용하였다. MOD14는 적외체널 (3.9 μm 와 11 μm)을 이용하여 직하점에서 1×1 km^2 (at nadir)의 해상도로 전지구적인 Fire의 위치와 방출 에너지, Flaming and Smoldering Ratio, 리고 화재지역의 넓이에 관한 자료를 포함하고 있다 (Kaufman and Justice, 1998). 그러므로

MOD14로 러시아 지역의 산불 발생 위치와 연구기 간동안 발생한 총 Hot spot의 개수를 조사하였다.

또한 산불 발생 기간 중에 EP-TOMS 에어로졸 인덱스 관측 자료 (<http://toms.gsfc.nasa.gov>)를 수집하여 에어로졸의 이동양상 및 자외선 흡수 특성을 분석하였다. 에어로졸 인덱스는 자외선 영역에서의 331 nm와 360 nm의 채널의 분광대비(Spectral Contrast) 기법을 사용하여 에어로졸을 자외선 흡수 특성을 다음 식과 같이 나타낸다(Herman *et al.*, 1997).

$$AI = -100\{\log_{10}[(I_{331}/I_{360})_{meas}] - \log_{10}[(I_{331}/I_{360})_{calc}]\} \quad (1)$$

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.

그리고 2003년 5월의 기단(Air Mass)의 이동경로를 파악하기 위하여 HYSPLIT-4(Hybrid Single-Particle Lagrangian-Integrated Trajectory: Draxler *et al.*, 1998) 모델을 사용하여 역 궤적(Backward trajectory)분석을 수행하였다. HYSPLIT-4 모델의 후진궤적분석 입력조건으로 안면도(동경 126.12, 북위 36.32)에 도착하는 기단의 5개의 고도(500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m)별 -240시간의 등온위(isentropic)조건을 사용하여 계산하였다. 그리고 산불이 밀집한 두 지역(FP1, FP2)을 대상으로 전진궤적(forward trajectory)분석을 같은 조건을 사용하여 계산하였다.

러시아 산불로 인한 에어로졸의 물리·광학적 특성을 조사하기 위하여 AERONET sunphotometer 자료 [<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>]를 이용하였다. 관측 사이트로는 Tomsk, Dalanzadgad, 베이징, 그리고 안면도의 2003년 5월 한달간의 자료를 이용하였다. 한편, 파장별 에어로졸 광학두께를 파장의 함수로 표현

하면 $\tau(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$ 와 같이 나타낼 수 있으며 여기서 다음과 같이 Ångstrom 지수(α)를 구하였다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n [(\ln \tau_a(\lambda_i) - \overline{\ln \tau_a}) \cdot (\ln \lambda_i - \overline{\ln \lambda})]}{\sum_{i=1}^n [(\ln \lambda_i - \overline{\ln \lambda})^2]} \quad (2)$$

$$\beta = \exp[\overline{\ln \tau_a} + \overline{\ln \lambda} \cdot \alpha] \quad (3)$$

여기서 λ_i 는 파장, $\tau(\lambda)$ 는 파장별 에어로졸 광학두께, N 은 계산에 사용된 파장의 개수이다. 그리고 Dubovik알고리즘(Dubovik and King, 2000)을 사용한 에어로졸의 크기분포를 사용하여 각 지역별 에어로졸의 특성을 비교하였다.

마지막으로 MODIS자료를 이용하여 RGB영상(적색: 채널 1, 녹색: 채널 4, 청색: 채널 3)을 분석하였으며 이는 에어로졸의 공간적 분포 양상 및 시각적 특성에 관한 정보를 제공해준다. 그리고 에어로졸 광학두께 생성을 위하여 한국 항공우주 연구원에서 수신하고 있는 MODIS Level 1A(L1A) 자료를 이용하여 에어로졸 광학두께를 분석하였다. MODIS 자료에서 에어로졸 광학두께를 분석하기 위해서 von Hoyningen *et al.* (2003)이 제시한 BAER(Bremen Aerosol Retrieval) 방법을 사용하였다. BAER은 원래 SeaWiFS 자료를 이용하여 해양 및 육지에서 에어로졸 광학두께 분석을 위한 알고리즘이지만 본 연구에서는 MODIS 자료의 에어로졸 분석을 위하여 변형된 BAER를 사용하였다.

우선 L1A자료를 채널별 반사도 자료인 Level 1B(L1B)로 변환한 다음 채널별 반사도 값을 산출하였다. 그리고 위성이 수신하는 각 채널별 반사도는 태양과 센서의 위치, Rayleigh 산란, 에어로졸 산란, 대기투과도, 지표반사도 등에 의해 영향을 받게 되는데, 에어로졸에 의한 반사도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_a = \rho_{TOA} - \rho_{Ray}(\lambda, \theta, p(z), M_0, M_S) - \omega_0(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda, M_S) \cdot \rho_{surf}(\lambda, z_0, z_S) \quad (4)$$

여기서 $\rho_{Ray}(\lambda, \theta, p, M_0, M_S)$ 는 Rayleigh산란에 의한 반사도, 산란각 θ , 대기압 p , 태양경로 M_0 , 위성 경로 M_S , 단산란 알베도 $\omega_0(\lambda)$, Rayleigh투과도 τ_R , 그리고 $\rho_{surf}(\lambda, z_0, z_S)$ 는 지표면 반사도이다. 대기압 $p(z)$

는 지형고도모델(DEM: Digital Elevation Model)을 사용하여 각 픽셀에서의 고도 z km에서의 압력을 다음과 같은 기압방정식(Barometric equation)을 사용하여 구하였다.

$$p(z) = p_0 \cdot \exp\left[\frac{-28.97 \cdot g \cdot 0.75 \cdot z}{8.135 \cdot (T_{\text{surf}} - g \cdot 0.75 \cdot z)}\right] \quad (5)$$

지표 반사도를 구하기 위해서는 해양의 경우 육지보다 일정한 반사도를 가지지만 육지의 경우 반사도가 일정하지 않기 때문에 Kaufman *et al.* (1997d)이 제안한 'Dark target' 방법을 변형하여 von Hoyningen *et al.* (2003)이 사용한 식생지수(NDVI: Normalized Differential Vegetation Index)를 이용한 선형 모델을 사용하였다. 이 방법은 지표면을 식생과 토양으로 구분하여 MODIS 채널 1 (670 nm)와 채널 2 (865 nm)를 사용하여 계산된 식생지수로 식생과 토양의 반사도에 대한 기여율을 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$\rho_{\text{surf}}(\lambda) = F \cdot [C_{\text{veg}} \cdot \rho_{\text{veg}}(\lambda) + (1 - C_{\text{veg}}) \cdot \rho_{\text{soil}}(\lambda)] \quad (6)$$

여기서 F 는 scaling factor 이고 C_{veg} 는 식생지수 $\rho_{\text{veg}}(\lambda)$ 는 식생의 스펙트라, $\rho_{\text{soil}}(\lambda)$ 는 토양의 스펙트라이다.

따라서 에어로졸에 의한 반사도는 위성이 관측한 반사도에서 다른 대기중의 영향과 지표특성에 의한 영향을 제거한 다음 구할 수 있다. MODIS자료는 복사전달 모델인 6S(Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) (Vermote *et al.*, 1997) 코드의 Biomass burning 에어로졸 모델을 사용하여 미리 계산된 LUT(Look Up Table)을 이용하여 에어로졸에 의한 반사도와 에어로졸 광학두께와의 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

한편, 일반적으로 구름의 경우 에어로졸과는 달리 적외선 영역에서 높은 반사도와 온도특성을 나타내므로 위성에 감지되는 복사량을 통해 구름의 단면적인 분포를 알 수 있다. NASA에서는 MODIS 표준 구름제거 알고리즘(MOD35) (Ackerman *et al.*, 1998)에 제시된 37가지 테스트를 통하여 구름을 제거하고 있지만 에어로졸이 상대적으로 많이 존재하는 경우 구름으로 제거되기도 하는 문제가 있다. 따라서 MOD35에서 제시된 가시영상 반사도 경계값 테스트의 기준(0.18)을 완화시킨 값(0.3)을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 산불발생지역과 이동궤적 분석

MOD14에 의해 나타난 2003년 5월 1일부터 24일까지 발생한 산불의 총 개수는 11,533개로 그림 1과 같이 대부분의 산불이 바이칼호 인근지역과 극동지역에 위치해 있음을 알 수 있다. 이러한 산불은 거의 매년 일어나고 있으며 Kajii *et al.* (2003)은 1998년 시베리아 산불로 인한 대기오염물질이 대륙성 고기압의 영향으로 남동쪽으로 이동하며 홋카이도에서 관측된 일산화 탄소의 증가가 이러한 산불로 인한 것을 보였다. 특히 4~5월에는 바이칼호 인근지역에서 집중적으로 발생하며 6~10월까지는 극동지역에서 집중적으로 발생하여 오염물질이 극동지방을 지나 북태평양 쪽으로 향함을 보였다. 이러한 대규모 산불로 인한 대기오염물질은 지구 복사 및 대기질에 큰 악화를 미치고 주변국으로 이동시 큰 문제가 될 것이지만 사람이 살지 않는 지역에서 대규모로 발생하기 때문에 종합적인 상황과악이 이루어지고 있지 않다.

한편, 러시아 산불에 의해 발생한 생체소가 에어로졸은 위성영상에서 쉽게 관측이 되며 산불이 발생한 인근지역의 에어로졸 생성 여부는 우선 TOMS 에어로졸 인덱스 자료로서 확인할 수 있다. 2003년 5월 16일~23일까지의 TOMS 자료가 누락되었으므로 에어로졸의 영향이 가장 잘 나타난 5월 6일부터 11일까지의 일별 TOMS 에어로졸 인덱스의 분포를 그림 2에 나타내었다. TOMS 에어로졸 인덱스는 산불발생지가 많이 위치한 바이칼호 인근지역에서부터 극동 연안 지역에 이르기까지 매우 높은 값(>3.0)을 나타내고 있으며 발생원에서 해양쪽으로 길게 늘어선 모습은 기류에 따라 상당한 양의 에어로졸이 이동하고 있는 모습을 나타낸다. 산불발생지역은 툰드라 산림지역으로서 이 지역에서 발생하는 에어로졸이 먼지나 황사와 같은 에어로졸과는 거리가 있고 또한 지표근처에서 발생하는 오염 에어로졸의 경우 TOMS의 신뢰도가 떨어져 음의 에어로졸 인덱스값을 나타내므로 여기에서는 주로 산불에서 발생하는 에어로졸에 의한 에어로졸 인덱스의 증가량으로 해석할 수 있다. 특히 이 지역에서는 5월 한달간 거의 매일 많은 양의 에어로졸이 생성되어 에어로졸 인덱

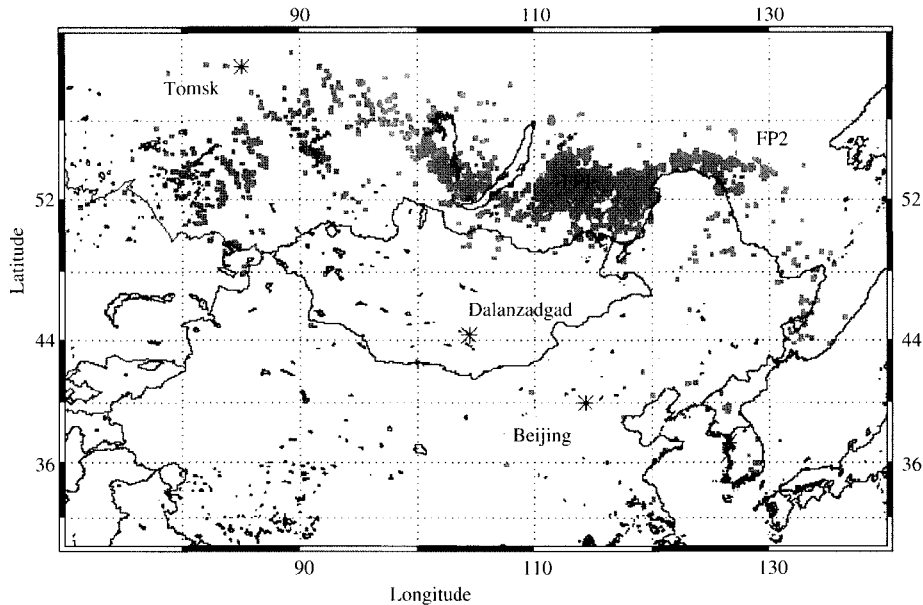


Fig. 1. Fire positions from MODIS fire product (MOD14; 1*1 km² resolution) during 1~23 May 2003. Study area and location of four AERONET Sites at Tomsk, Dalanzadgad, Beijing.

스 값이 높게 나타나고 있으며 또한 에어로졸 인덱스 값이 큰 것은 생체소각 에어로졸 같은 자외선 흡수성 에어로졸에 의한 영향을 많이 받고 있음을 나타낸다.

TOMS 에어로졸 인덱스의 분포를 분석한 결과, 대부분의 경우 산불로 인한 에어로졸은 북의 50도 이상의 고위도 지방에서 편서풍을 타고 극동지방을 지나 일본의 홋카이도 방향으로 이동하는 양상을 나타낸다. 이러한 경향은 Kato *et al.* (2002)이 1998년에 발생한 시베리아 산불로 인한 대기오염물질이 이동한 경로를 분석한 결과와 일치한다. 그러나 그림 2에서 보이는 바와 같이 2003년 5월 8일과 10일의 경우엔 에어로졸 영역이 시베리아에서 만주나 한반도 쪽으로 남하하여 이동하는 모습도 보이고 있어 한반도에도 스모크 에어로졸에 의한 영향이 나타나고 있음을 알 수 있다.

앞서 MODIS자료를 이용하여 산불이 발생한 위치와 규모를 파악하였으며 TOMS 에어로졸 인덱스 자료를 이용하여 산불로 인한 에어로졸의 규모 및 이동경향을 살펴보았다. 다음으로 러시아지역에서 발생한 산불로 인한 에어로졸의 이동경로를 파악하기 위

하여 HYSPLIT-4 모델을 통한 궤적분석을 수행하였다. 먼저 안면도(동경 126.10, 북위 36.32)를 도착점으로 하는 기단의 10일전까지의 역 궤적분석결과와 대표적인 산불 발생지역인 바이칼호 인근지역(FP1)과 극동지역(FP2)의 산불위치를 시작점으로 하는 전진 궤적분석을 10일 후까지 수행하였다. 5월 한달간 안면도의 기단은 주로 산불발생지역이 밀집한 북서부 지역에서 기원하는 경우가 많이 나타났고(80%) 산불발생지역의 기단은 주로 러시아 극동지방을 향하고 있지만 한반도 인근지역을 향하고 있는 경우(25%)도 있어 이러한 경우에 산불로 인한 대기오염물질이 한반도에 영향을 미칠 가능성이 있음을 나타내었다.

이렇게 러시아에서 발생한 대규모 산불로 인한 스모크 에어로졸은 계속된 배출로 인하여 주변국에 영향을 미치고 있음이 증명되었으며 2003년 5월 20일은 스모크 에어로졸이 한반도까지 남하한 경우로 NASA의 Rapid Response Team의 MODIS영상을 통하여 확인할 수 있다(http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/natural_haza_rds_v2.php?img_id=10677). 또한 2003년 5월 23일에 캐나다에서 발견

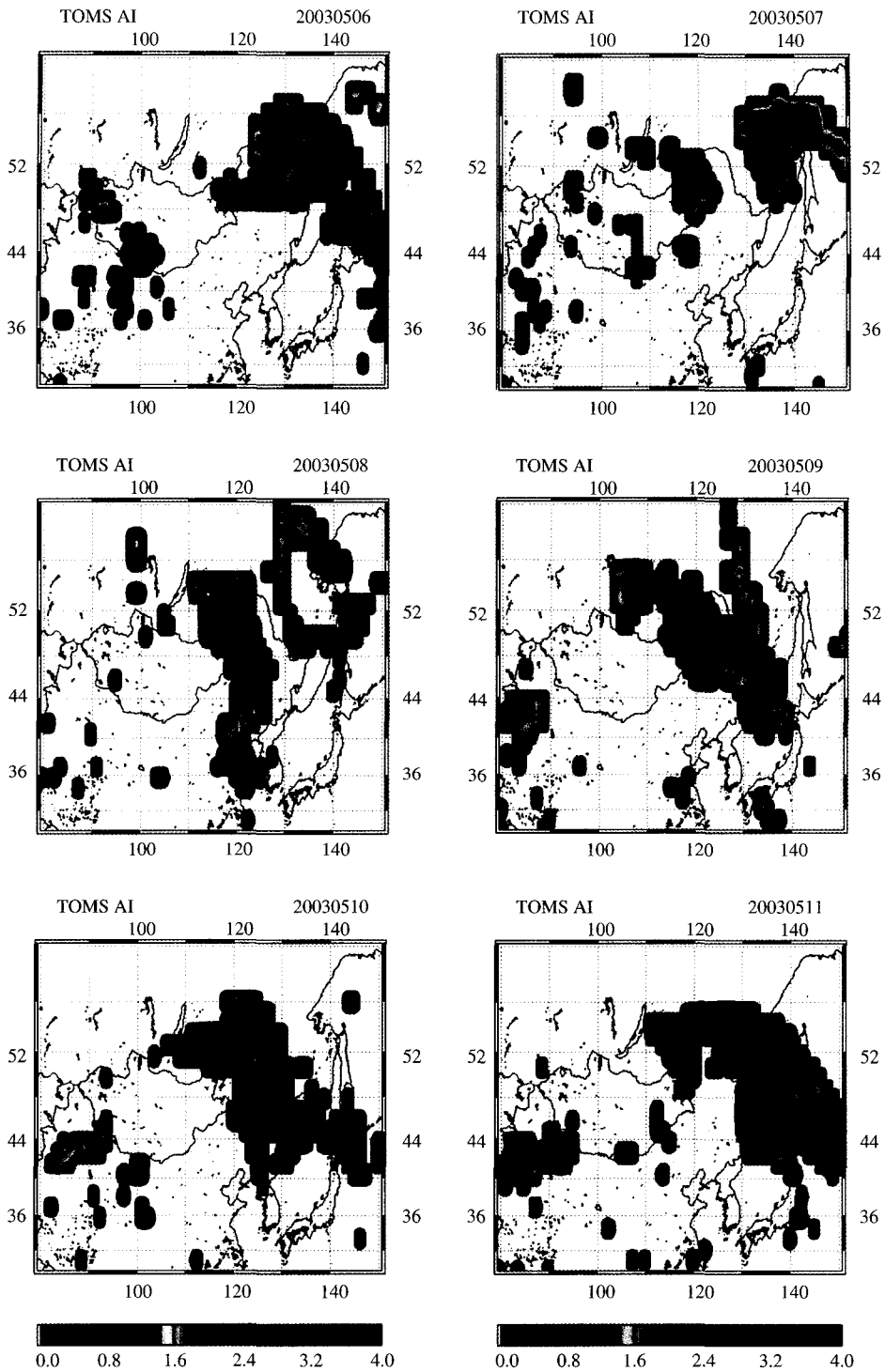


Fig. 2. TOMS aerosol index map during 6~11 May 2003. TOMS data during 16 May~23 May 2003 are not available for sensor problem.

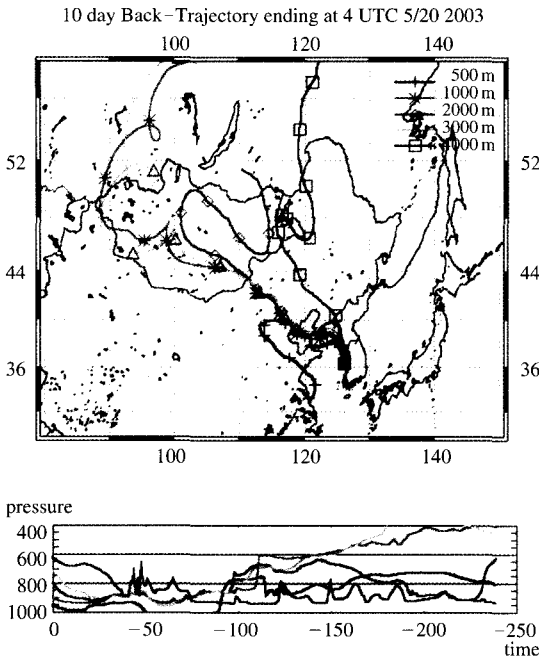


Fig. 3. HYSPLIT-4 backward trajectory result for 20 May.

된 스모크는 러시아에서 발생한 산불에 의한 영향으로 알려졌다 (http://earthobservatory.nasa.gov/Natural-Hazards/natural_hazards_v2.php?img_id=10689). 따라서 스모크 에어로졸이 우리나라에 영향을 크게 준 5월 20일을 대상으로 안면도에 도착하는 역궤적 분석을 수행한 결과를 그림 3에 나타내었다. 5월 20일 안면도에 도착하는 기단의 경우 산불지역에서 기원하는 유적선이 한반도로 유입되는 결과를 볼 수 있다. 고도별 유적선의 경향을 보면 산불발생 지역의 시작하는 유적선은 한반도 쪽으로 이동하면서 다른 고도층의 유적선과 발해만 인근지역에서 합쳐지면서 고도별 유적선들도 서로 모이는 것으로 나타나고 있어 산불지역에서 이동해온 에어로졸이 다른 고도의 유적선에도 영향을 미칠 수 있음을 나타내고 있다.

그림 4는 2003년 5월 19일 UTC 00시의 기상도이며, 이 기상도는 스모크를 동반 하여 이동하는 전형적인 저기압의 형태를 보여준다. 전날 러시아 국경근방의 극동지방에서 형성된 998 hPa의 강력한 저기압이 주의 풍속을 가중시켰고 점차 사할린쪽으로 빠져 나가면서 19일에는 이 저기압(1001.7 hPa)의 세력이 약해지며 저기압 끝 자락이 만주지방 통과하고 있

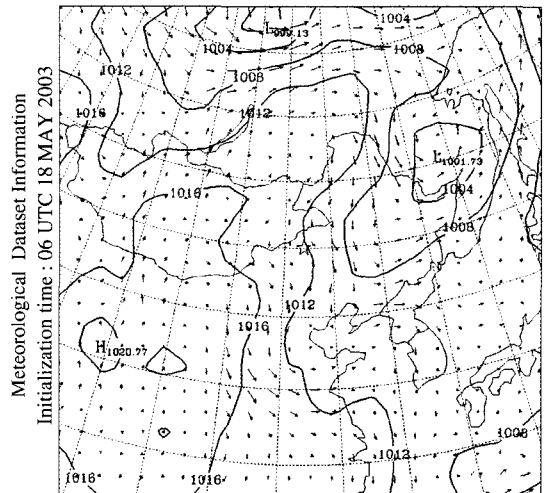
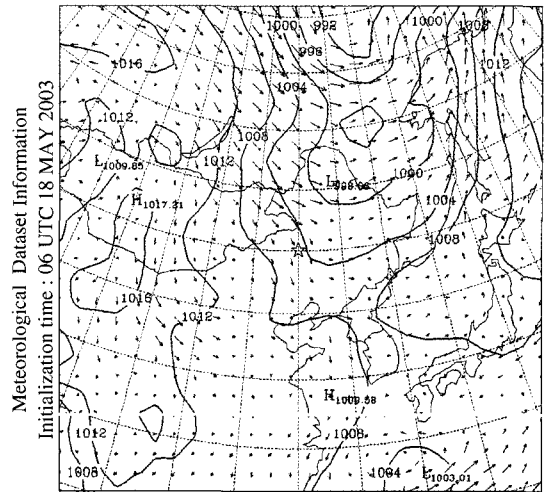


Fig. 4. Meteorological map containing Mean Sea-level Pressure (hPa) and wind vector (850hPa) of UTC 06 May 18 (top) and UTC 06 May 19 (bottom) may 2003.

면서 기류의 이동이 남하하고 있음을 보였다. 그림 5는 다음날인 2003년 5월 20일 UTC 00시의 기상도이며 전날의 저기압은 홋카이도 서쪽에 1006.6 hPa의 약한 저기압으로 위치하고 있으며 고위도 지방에 강한 저기압(995.9 hPa)의 끝자락이 바이칼호 인근 지역으로 떨어져 나와 새로운 저기압(999.8 hPa)으로 발달하는 모습을 보이는 한편, 인근의 고기압과 함께 한반도에 영향을 주고, 풍향은 고기압과 저기압

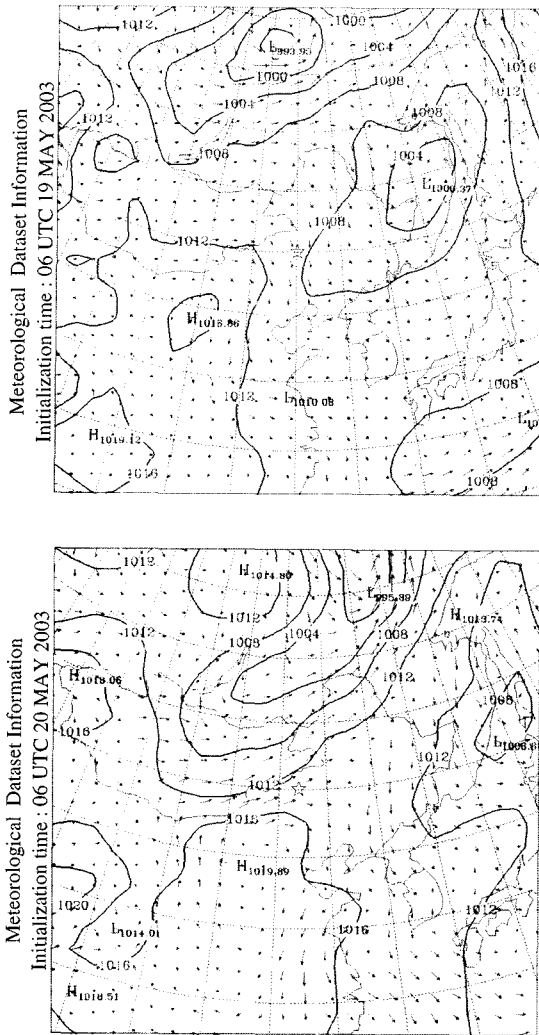


Fig. 5. Meteorological map containing Mean Sea-level Pressure (hPa) and wind vector (850hPa) of UTC 06 May 19 (top) and UTC 06 May 20 (bottom) may 2003.

사이에서 S자 형태로 남하하고 있다. 이와 함께 스모크 에어로졸이 서해안과 만주중지에서 발생하고 있는 것으로 사료된다. 그리고 중국의 동북부의 고기압과 저기압사이의 풍향은 만주에서 북한으로 향하고 있어 앞의 역 궤적분석 결과와 일치함을 보이고 있다.

3. 2 MODIS 에어로졸 분석결과

앞서 러시아의 산림지역에서 발생한 산불은 많은

양의 에어로졸을 방출하고 있으며 기상상태에 따라 스모크 에어로졸 플룸이 이동하고 있는 것을 확인하였다. 특히 2003년 5월 20일의 경우엔 스모크 에어로졸 플룸이 한반도에까지 영역이 확장되어 위성영상에서 나타나는 경우로서 이 때의 위성영상을 분석하였다. 그림 6은 1km×1km의 수평 공간 해상도를 가지는 2003년 5월 20일의 MODIS Level 1B 가시영역 밴드별 영상을 이용하여 나타낸 RGB (Red=660 nm, Green = 555 nm, Blue = 470 nm) 칼라합성영상과 MODIS 밴드1~7번에 이르는 반사도의 영상을 나타낸다. 일반적으로 위성영상에서 나타나는 것은 지구에서 반사된 태양광이 위성에서 감지되는 것으로 구름이 존재하는 지역은 지면에 비해 반사도가 커서 많은 빛이 지구 밖으로 반사되어 밝은 영상을 나타내고 반대로 반사도가 낮은 해양은 어둡게 나타난다. 그림 6의 각 밴드별 영상에서 알 수 있듯이 가시영역 (465~660nm)의 영상에서는 구름과 에어로졸로 인하여 지표영상이 나타나지 않는 반면 근적외 영역인 865nm 이상의 파장대에서는 입경이 작은 에어로졸은 나타나지 않고 구름에 의한 영향으로 동해안 및 일부 중부지방에 밝게 나타나고 있다. 그리고 MODIS RGB 합성 영상에서 만주와 한반도 수도권 이북지역 및 중국의 산둥반도에 매우 짙은 스모크 에어로졸 영역이 위치해 있음을 나타내고 있다.

그림 7은 MODIS 수신 자료로부터 도출된 파장 550 nm에서의 에어로졸 광학두께를 나타낸다. 자료가 없는 부분은 구름에 의하여 제거된 픽셀과 Sun glint 영역으로 에어로졸 분석을 수행할 수 없는 영역이다. MODIS 위성영상을 이용하여 도출한 에어로졸 광학두께의 값도 에어로졸이 존재하고 있는 영역에서는 상당히 큰 에어로졸 광학두께 (>3.0)을 나타내고 있어 에어로졸에 의한 대기질 악화 및 복사강제효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 5월 20일 MODIS 에어로졸 광학두께 분석 결과를 보면 한반도에서는 스모크 에어로졸 영역이 많이 존재하는 수도권 지역과 북한에서 2.0 이상의 높은 값을 나타내고 있지만 남부지역에서는 그다지 높은 값을 보이지 않고 있으므로 에어로졸의 영역이 위치하는 지역에 따라 영향이 다르게 나타나고 있는 것이 나타난다.

그리고 2003년 5월 한달 동안 MODIS 자료를 분석한 결과의 정확성을 조사하기 위하여 지상에서 관측된 자료와의 비교를 위하여 안면도와 베이징의

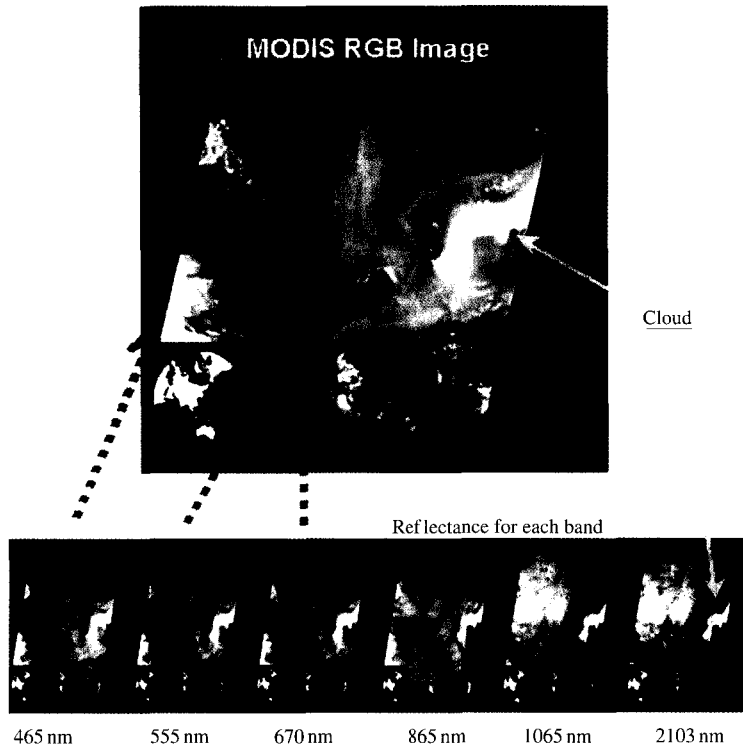


Fig. 6. MODIS RGB color composite image and grey image of band reflectance on 20 May 2003.

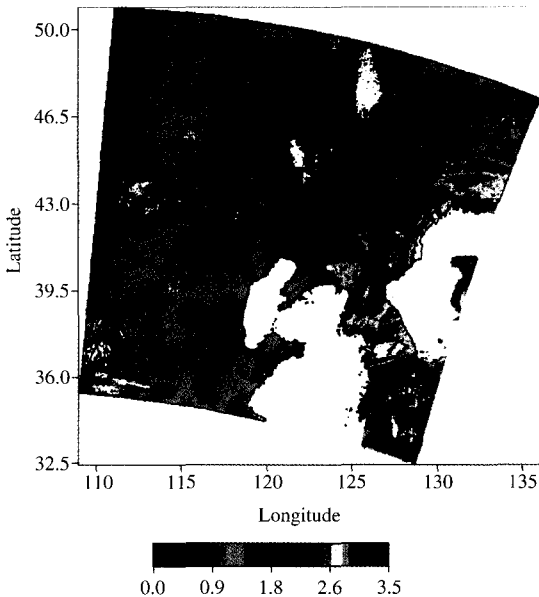


Fig. 7. MODIS retrieved AOT at 550 nm on 20 May 2003.

AERONET 자료와의 상관성을 그림 8에 나타내었다. 안면도와 베이징에서 위성 통과 시간에 AERONET 관측자료를 이용하였으며 MODIS 에어로졸 광학두께 자료는 안면도와 베이징에서 가까운 지점의 위경도 별로 0.5도 사이의 값을 사용하였다. 안면도와 베이징에서의 선형 회귀선의 기울기는 각각 0.91과 1.09로서 내륙지방인 베이징에서 약간 큰 값을 나타내고 있으나 MODIS 분석값은 지상관측자료와 잘 일치하는 결과를 보여준다.

한편, 표 1은 한국에서 광학두께값이 가장 크게 나타났던 2003년 5월 20일의 지상에서 관측한 AERONET 에어로졸 광학두께 자료와 MODIS 에어로졸 광학두께자료를 비교 정리한 것으로 이때의 높은 에어로졸 광학두께값과 Angstrom 지수는 안면도와 베이징에서는 미세입자에 의한 에어로졸의 양이 증가 했음을 증명하며 5월 20일의 위성영상에서 보듯이 이러한 원인은 지역적인 오염현상이기보다는 산불로 인한 스모크 에어로졸 플룸이 이 지역을 뒤

Table 1. Comparison of aerosol optical thickness values between MODIS and AERONET on 20 May 2003

	MODIS			AERONET		
	λ (nm)	τ	α	λ (nm)	τ	α
Anmyun	465	3.74	1.23	440	3.82	1.25
	555	2.93		500	3.47	
	660	2.45		670	2.35	
Beijing	465	1.82	1.33	440	2.00	1.55
	555	1.44		500	NA	
	660	1.15		670	1.18	

덮고 있어서 나타나는 결과로 해석할 수 있다.

3.3 AETONET Sunphotometer 관측 자료물 이용한 에어로졸의 광학적 특성분석

러시아 지역에서 발생한 산불로 인한 스모크 에어로졸의 물리적·광학적 특성을 분석하고자 산발발생 지역과 한반도에 이르는 경로의 주변지역에 위치한 네 곳의 AERONET 관측 사이트에서 2003년 5월 한 달간의 자료를 분석하였다. 그림 9은 5월 한달간 Tomsk, Dalanzadgad, 베이징 및 안면도의 AERONET sunphotometer에 의해 관측된 일 평균 에어로졸 광학두께 (440 nm)와 Ångstrom 지수의 시계열 그래프를 나타낸다. 안면도와 베이징은 Tomsk와 Dalanzadgad 보다 상당히 높은 에어로졸 광학두께 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 Tomsk와 Dalanzadgad 보다 안면도와 베이징이 에어로졸의 영향을 많이 받았음을 보여주며 베이징은 5월중 전체적으로 높은 수치를 나타내는 일이 많이 존재하고 있으며 안면도의 경우 5월 13일부터 증가하기 시작하여 5월 23일까지 높은 값을 보이고 있다. 특히 안면도에선 5월 20일에는 에어로졸 광학두께의 최고값인 5.59, 베이징에선 5월 19일 6.20으로 상당히 높은 값을 나타내고 있다. 그리고 5월 25일엔 전국적으로 강수가 있었던 다음날인 5월 26일엔 거의 최소값으로 배경농도의 에어로졸을 나타내고 있다. Ångstrom 지수를 계산해본결과 베이징과 안면도에서 스모크에 의한 영향이 심했던 19, 20, 21일의 경우 거의 1.3 정도의 값을 나타내고 있다. 2003년 5월엔 황사현상이 거의 없었고 에어로졸 광학두께의 최고값이 나타난 날의 Ångstrom 지수가 상대적으로 큰 값을 나타내므로 황사에 대한 영향은 배제할 수 있다. 일반적으로 스모크 에어로졸은

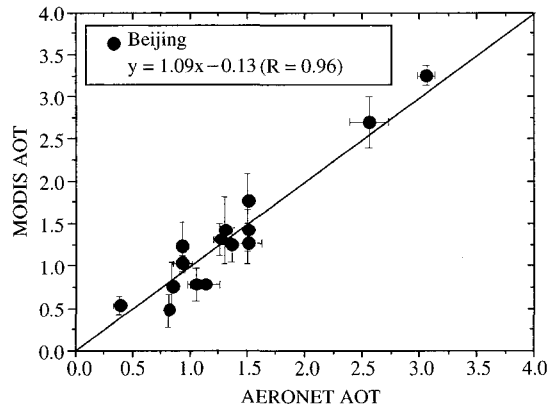
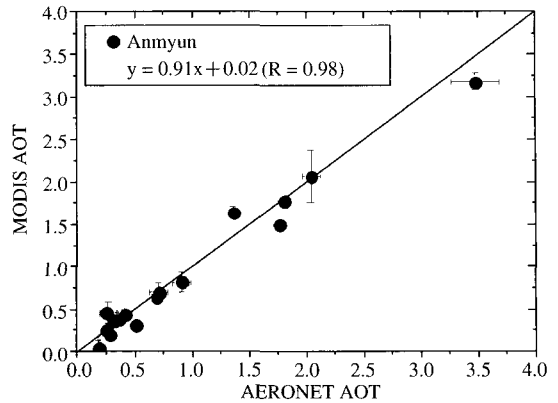


Fig. 8. Comparison between MODIS retrieved AOT and AERONET sunphotometer measured AOT at 550 nm at Anmyun (top) and Beijing (bottom) during May 2003.

주로 미세입자로 구성되어있어 Ångstrom 지수가 높은 값을 보이는 것이다.

그림 10은 안면도에서 에어로졸 광학두께 값이 가장 높았던 5월 19, 20일과 날씨가 맑았던 5월 2일, 그리고 2001년 3월 20일 황사현상이 보고되었던 때의 파장별 에어로졸 광학두께를 비교한 것이다. 여기서 두 곡선의 파장별 지수 함수가 보이는 지수의 차이를 고려해보면 각 에어로졸의 특성을 알아낼 수 있다. 에어로졸의 영향이 적은 맑은 날의 경우 주로 1 안팎의 값을 보이고 있으나 스모크 에어로졸의 경우 1.25로서 약간 증가하였다. 이것은 미세입자가 작은 500µm보다 작은 파장영역에서 더욱 감쇄가 많이 일어나기 때문이다. 그리고 황사의 경우는 0.47로

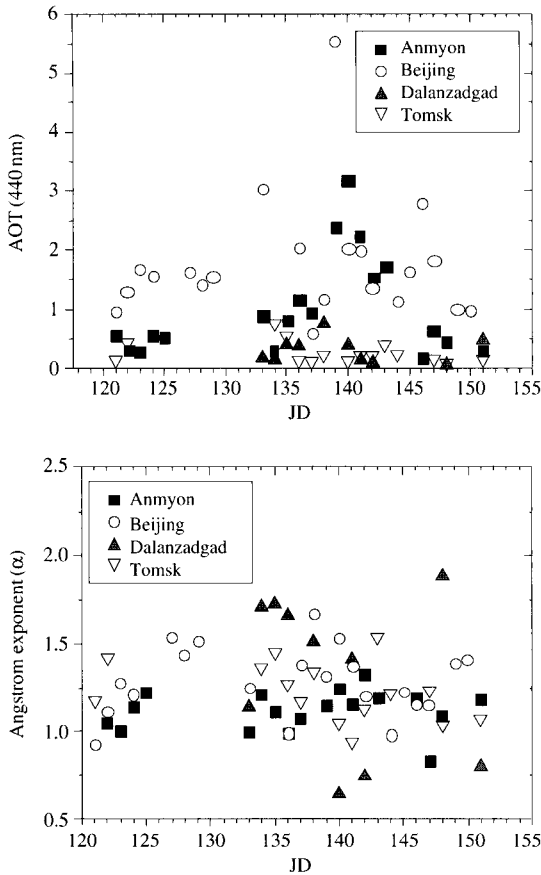


Fig. 9. AERONET sunphotometer measured AOT at 440 nm (top) and Ångström exponent (bottom) during May 2003.

서 앞의 두 경우와는 매우 작은 값을 나타내고 있는데 이것은 조대입자가 많이 존재하는 황사 에어로졸이 500 μm 이후의 파장대에서 많은 감쇄현상이 일어나기 때문이다.

그림 11은 네 지역(안면, 베이징, Dalanzadgad, Tomsk)에서의 일 평균 에어로졸 크기분포를 나타낸 것으로 에어로졸광학두께가 높은 날의 경우 미세입자 영역의 농도가 더욱 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 입자크기분포의 함수를 표 2에 정리해 본결과 산불이 발생한 인근지역의 미세입자의 크기가 근원지에서 멀어질수록 약간 증가하는 것으로 미루어보아 스모크 에어로졸이 장거리 이동을 하면서 에이징(Aging) 현상이 발생한 것을 고려해 볼 수 있

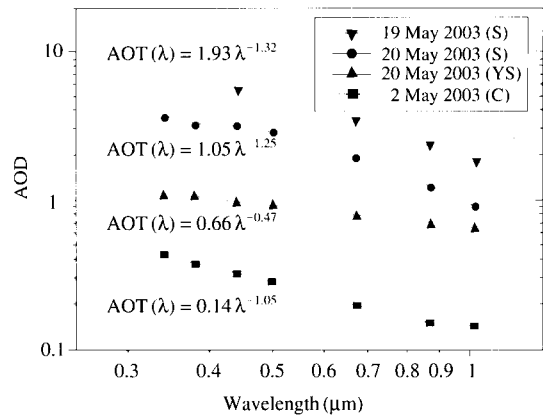


Fig. 10. AERONET sunphotometer measured spectral AOT and wavelength dependent exponent function for various cases. Smoke aerosol cases at Beijing on 19 May and 26 May 2003, at Anmyun on 20 May 2003, Asian dust case at Anmyun on 20 March 2001, and clear day case at Anmyun on 2 May 2003.

Table 2. Aerosol size distribution parameters for four each AERONET sites during May 2003.

	Size distribution parameter	Fine	Coarse
Anmyun	Vol. Conc. (μm ³ /μm ²)	0.11 ± 0.09	0.13 ± 0.10
	Eff. Rad. (μm)	0.16 ± 0.02	2.00 ± 0.44
	MMR (μm)	0.18 ± 0.02	2.90 ± 0.75
	STD	0.51 ± 0.07	0.85 ± 0.09
Beijing	Vol. Conc. (μm ³ /μm ²)	0.20 ± 0.11	0.23 ± 0.12
	Eff. Rad. (μm)	0.15 ± 0.03	2.07 ± 0.34
	MMR (μm)	0.17 ± 0.09	2.94 ± 0.51
	STD	0.52 ± 0.06	0.84 ± 0.06
Dalanzadgad	Vol. Conc. (μm ³ /μm ²)	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.07
	Eff. Rad. (μm)	0.13 ± 0.02	1.97 ± 0.31
	MMR (μm)	0.15 ± 0.02	2.66 ± 0.46
	STD	0.44 ± 0.06	0.78 ± 0.14
Tomsk	Vol. Conc. (μm ³ /μm ²)	0.04 ± 0.03	0.06 ± 0.04
	Eff. Rad. (μm)	0.14 ± 0.01	2.73 ± 0.67
	MMR (μm)	0.15 ± 0.01	3.89 ± 0.92
	STD	0.42 ± 0.06	0.51 ± 0.07

다. 표 3은 같은 기간의 에어로졸 단산란 알베도(ω)를 나타낸 것으로 산불인근지역과 떨어진 곳의 차이점으로 에어로졸 입자의 흡수성이 적어지는 것으로 나타나고 있다.

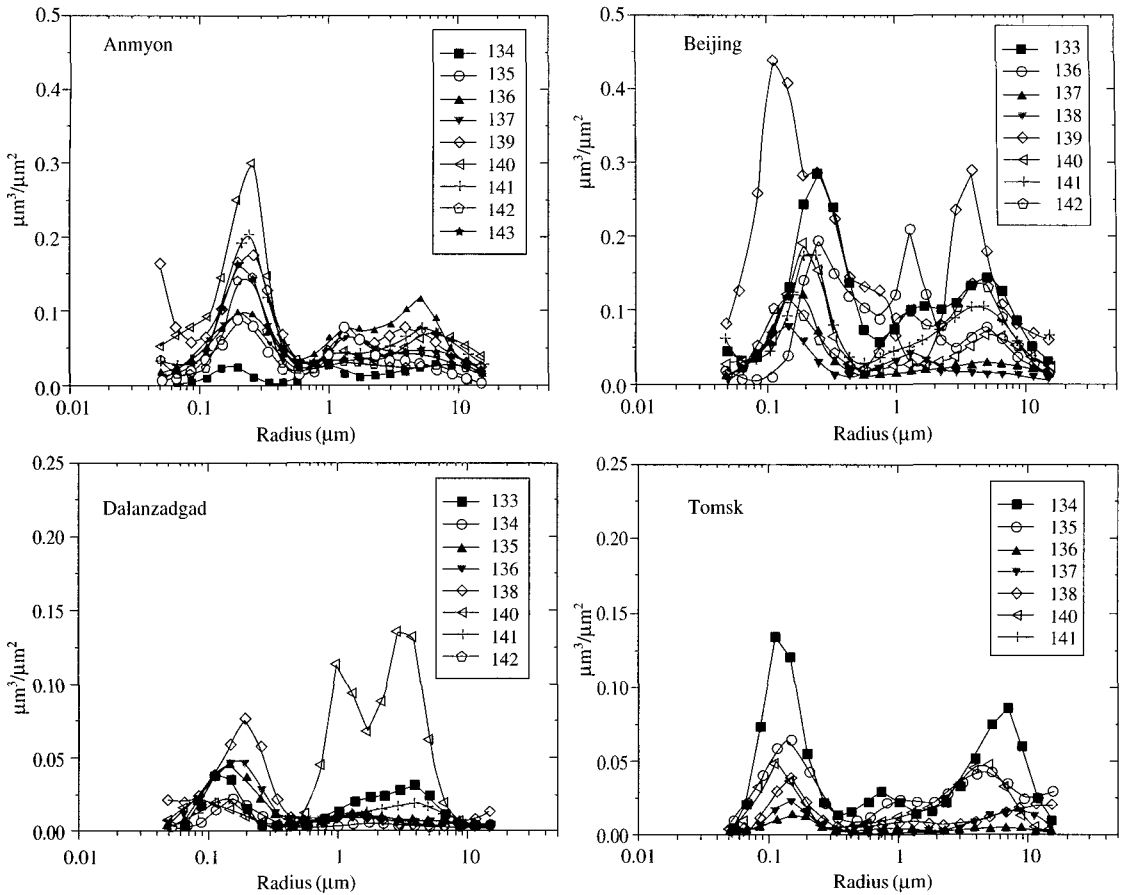


Fig. 11. Aerosol size distribution retrieved from AERONET sunphotometer measured spectral AOD.

Table 3. Spectral single scattering albedo from daily AERONET measurement values during May 2003.

Wavelength (nm)	441	673	873	1022
Anmyun	0.93±0.04	0.92±0.64	0.90±0.09	0.88±0.11
Beijing	0.93±0.27	0.92±0.03	0.91±0.03	0.91±0.03
Dalanzadgade	0.93±0.02	0.92±0.02	0.91±0.03	0.91±0.03
Tomsk	0.85±0.06	0.80±0.76	0.76±0.09	0.74±0.10

4. 결 론

2003년 5월에 발생한 러시아 지역 산불로 인한 에어로졸이 한국 인근지역에 대기질에 미치는 영향을 정량화 하기 위하여 에어로졸의 장거리 이동 경로 및 물리 광학적 특성을 조사하였다. MODIS Fire 분

석자료와 TOMS 자료를 이용하여 조사한 러시아 지역 산불의 특성은 우선, 산불발생지역이 바이칼호 인근지역을 중심으로 동서로 넓게 퍼져있으며 이 지역에서 발생한 대규모의 산불로 인한 에어로졸의 발생이 매우 심각하여 여기서 발생한 스모크 에어로졸이 기류에 따라 이동하는 것을 파악할 수 있었다. 이러한 스모크 에어로졸의 이동 궤적분석결과 주로 극동지역을 통하여 이동하는 경향을 보이고 있으나 때때로 한반도 인근지역으로 남하하는 경향이 있어 한반도에도 영향을 미칠 수 있어 문제점으로 제시될 수 있다. 특히 2003년 봄은 황사현상이 극히 적었던 경우이지만 이러한 미세 입자로 구성된 스모크 에어로졸이 영향을 미친다면 대기질 관리측면에서 더욱 심각한 문제가 아닐 수 없다. 실제로 지상에서 관측된 에어로졸의 물리·광학적 패턴은 이러한 에어로졸이

대기중에 존재할 경우 주로 미세입자로 이루어진 에어로졸이 큰 광학두께 값을 나타냄으로 인하여 심각한 대기질 악화를 초래함을 보였다.

한편, MODIS 관측자료를 이용하여 2003년 5월 한 달간 에어로졸을 분석한 결과는 지상자료와 좋은 상관관계를 보여주었으며 에어로졸의 공간적 분포를 규명할 수 있었다. 특히 2003년 5월 20일에 MODIS 에 나타난 산불로 인하여 발생한 스모크 에어로졸 플룸의 형태는 한반도를 매우 짙게 뒤덮고 있으며 매우 큰 에어로졸 광학두께 값(>2.0)을 가지며 이로 인하여 이 지역에 있어서 지역적인 규모의 복사 강제효과 및 대기오염을 유발할 가능성을 보였다.

이와 같이 인공위성을 이용한 에어로졸 분석 자료는 에어로졸의 광학적 특성을 구분하는데 유용하며 특히, 황사 및 산불에 의한 에어로졸의 광역 분포 정보의 제공과 에어로졸의 광학특성을 분석할 수 있다. MODIS 및 기타 환경관측위성 이용한 에어로졸 광학특성 분포지도도를 이용하면 한반도 인근지역 에어로졸의 모니터링에 기여도가 클 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 환경모니터링 신기술연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금 및 한국 항공우주연구원의 “위성자료 공공활용연구”의 위탁연구 사업의 일환으로 이루어진 것입니다.

참고 문헌

Ackerman, S.A., K.I. Strabala, P.W.P. Menzel, R.A. Frey, C.C. Moeller, and L.E. Gumley (1998). Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 103 (D24): 32,141–32,157.

Cahoon, D.R., Jr., B.J. Stocks, J.S. Levine, W.R. Cofer, III, and Pierson, J.M. (1994) Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia. *J. Geophys. Res.*, 99, 18,627–18,638.

Christopher, S.A., D.V. Kliche, J. Chou, and R.M. Welch (1996) First estimates of the radiative forcing of aerosols generated from biomass burning using satellite data *J. Geophys. Res.*, 101, 21265–21273.

Crutzen, P. and M. Andreae (1990) Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science*, 250: 1669–1678.

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.

Dubovik, O. and M.D. King (2000) A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 105, 20 673–20 696.

Fromm, M., J. Alfred, K. Hoppel, J. Hornstein, R. Bevilacqua, E. Shettle, R. Li, Z. Servranckx, and B. Stocks (2000) Observations of boreal forest fire smoke in the stratosphere by POAM III, SAGE II, and lidar in 1998, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1407–1410.

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., Bhartia, O. 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. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov (1998) AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Rem. Sens. Environ.*, 66: 1–16.

Hsu, N.C., J.R. Herman, O. Torres, B.N. Holben, D. Tanre, T.F. Eck, A. Smirnov, B. Chatenet, F. Lavenu (1999) Comparisons of the TOMS aerosol index with Sun-photometer aerosol optical thickness: Results and applications, *J. Geophys. Res.*, 105: 6269–6279.

Kajii, Y., S. Kato, D.G. Streets, N.Y. Tsai, Anatoly Shvidenko, Sten Nilsson, Nickolay P. Minko, Nickolay Abushenko, Dimitry Altyntsev, and Tamara, V. Khodzer (2003) Boreal Forest Fires in Siberia in 1998: Estimation of Area and Emissions of Pollutants by AVHRR Satellite Data, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2001JD001078.

Kato, S., P. Pochanart, J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto Y. Ozakib, K. Obib, T. Katsuno, D.G. Streetsd, N.P. Minko (2002), The influence of Siberian forest fires

- on carbon monoxide concentrations at Happo, Japan, *Atmos. Environ.*, 36, 385–390.
- Kaufman Y., R. Fraser (1997a) The effect of smoke particles on clouds and climate forcing, *Science* 277: 1636–1432.
- Kaufman, Y.J., P.V. Hobbs, V.W.J.H. Kirchhoff, P. Artaxo, L.A. Remer, B.N. Holben, M.D. King, D.E. Ward, E.M. Prins, K.M. Longo, L.F. Mattos, C.A. Nobre, J.F. Spinhirne, Q. Ji, A.M. Thompson, J.F. Gleason, S.A. Christopher, and S.-C. Tsay (1997b) Smoke, Clouds and Radiation–Brazil (SCAR–B) Experiment. *J. Geophys. Res. (SCAR–B Special Issue)*, 103, 31,783–31,808.
- Kaufman, Y.J., D. Tanre, L. Remer, E.F. Vermote, A. Chu, and B.N. Holben (1997c) Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectrometer, *J. Geophys. Res.*, 102: 17051–17067.
- Kaufman, Y.J., C.O. Justice, L.P. Flynn, J.D. Kendall, E.M. Prins, L. Giglio, D.E. Ward, P. Menzel, and A.W. Setzer (1998). Potential global fire monitoring from EOS–MODIS. *J. Geophys. Res.*, 103, 31955, 32215.
- Kaufman, Y.J., C.J. Tucker, and I. Fung (1990) Remote sensing of biomass burning in the tropics. *J. Geophys. Res.*, 95, 9927–9939.
- Nakajima, T., A. Higurashi, N. Takeuchi, and J.R. Herman (1999) Satellite and ground–based study of optical properties of 1997 Indonesian forest fire aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2421–2424.
- Penner, J.E., R.E. Dickinson, C.A. O’Neill (1992) Effects of aerosols from biomass burning on the global radiation budget. *Science* 256, 1432–1434.
- Ross, J.L., P.V. Hobbs, and B. Holben, Radiative characteristics of regional hazes dominated by smoke from biomass burning in Brazil: Closure tests and direct radiative forcing (1998) *J. Geophys. Res.*, 103, 31, 925–31,941.
- Vermote, E., D. Tanre, J.L. Deuz, M. Herman, and J.J. Morcette (1997), Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 675–686.
- W. von Hoyningen–Huene, 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.
- Wotawa, G. and M.Trainer (2000) The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. *Science*, 288, 324–328.
- Zhang, J., S.A. Christopher, and B.N. Holben (2001) Intercomparison of aerosol optical thickness derived from GOES–8 Imager and Ground–Based Sun Photometers, *J. Geophys. Res.*, 106, 7387–7398.