

# MODIS 인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 예측 응용

## Application of MODIS Satellite Observation Data for Air Quality Forecast

이 권 호 · 이 동 하 · 김 영 준\*  
광주과학기술원 환경공학과 · 환경모니터링신기술 연구센터  
(2006년 4월 16일 접수, 2006년 7월 20일 채택)

Kwon Ho Lee, Dong Ha Lee and Young Joon Kim\*  
Advanced Environmental Monitoring Research Center (ADEMRC)  
Department of Environmental Science & Engineering,  
Gwangju Institute of Science & Technology (GIST)  
(Received 16 April 2006, accepted 20 July 2006)

### Abstract

Satellites have been valuable tool for global/regional scale atmospheric environment monitoring as well as emission source detection. In this study, we present the results of application of satellite remote sensing data for air quality forecast in Seoul metropolitan area. AOT (Aerosol Optical Thickness) data from TERRA/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer) satellite were compared to ground based PM<sub>10</sub> mass concentrations, and used to estimate the possibility of the aerosol forecasting in Seoul metropolitan area. Although correlation coefficient (~0.37) between MODIS AOT products and surface PM<sub>10</sub> concentration data was relatively low, there was good correlation between MODIS AOT and surface PM concentration under certain atmospheric conditions, which supports the feasibility of using the high-resolution MODIS AOT for air quality forecasting. The MODIS AOT data with trajectory forecasts also can provide information on aerosol concentration trend. The success rate of the 24 hour aerosol concentration trend forecast result was about 75% in this study. Finally, application of satellite remote sensing data with ground-based air quality observations could provide promising results for air quality monitoring and more exact trend forecast methodology by high resolution satellite data and verification with long term measurement dataset.

**Key words :** Aerosol, MODIS, AOT, PM<sub>10</sub>

### 1. 서 론

대기 중에 있는 에어로졸은 환경오염물질로 인간

의 호흡기 질환을 일으키기도 하며, 직·간접적으로 지구복사평형에 영향을 주어 지구 기후변화-냉각화 (whitehouse effect)를 유도할 수 있다 (Schwartz, 1996). 또한, 대기 중에서의 물리·화학적 변화와 중장거리 이동에 의해 인접국가간에 상호영향을 미치기 때문에 대기오염 발생원과 피해지역간의 관계에

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)62-970-3405, E-mail : yjkim@gist.ac.kr

다른 국가 간의 분쟁 등을 야기할 수도 있다. 따라서 상시 대기 환경 감시 및 대기질 변화 예측을 위하여 대기 에어로졸의 시·공간적 관측 및 모니터링은 필수적이다. 인공위성 관측 자료는 광범위한 지역의 환경변화 모니터링 연구에 널리 사용되고 있는 수단으로써 각종 오염원을 탐지할 수 있으며 광역 환경변화에 대한 정량적 평가가 가능하다. 특히, 인공위성 자료를 이용한 원격탐사 기법은 대기 에어로졸의 시·공간적 변수를 연구하는데 유용하게 사용되었다. 1970년대 이후로 기상관측위성을 이용한 대기 에어로졸 관측이 시작되었으며 미국의 해양대기청(NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration)은 기상 관측용 인공위성(NOAA/AVHRR)을 이용하여 전 지구적 규모로 에어로졸의 분포를 지속적으로 관측해 왔으며, 대기 중 에어로졸 입자가 기후변화에 직접 및 간접적으로 상당 수준 관련되어 있다는 것을 확인하였다(Stowe *et al.*, 1997). 최근까지 미국의 EOS (Earth Observing System), 일본의 ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), 유럽연합(EU: European Union)의 환경 관측 위성(EnviSat)은 모두 대표적인 대기 에어로졸의 관측이 가능한 인공 위성이다.

한반도 지역은 대도시 지역의 인구증가로 인한 대기오염과 황사를 비롯한 대륙으로부터의 장거리이동 오염물질에 의한 영향이 증가하고 있으므로 이의 감시가 매우 절실하다. 특히, 한국 수도권에서 발생하는 오염 현상은 기상조건에 따른 대기오염물질의 축적으로 인한 지역적인 원인과 대륙으로부터 발생하여 이동하는 중장거리 이동성 오염물질에 의한 원인에 의하여 복합적인 영향을 받고 있다. 지역적인 원인으로 인하여 인접지역에서의 과도한 교통과 산업시설에서 배출되는 대기오염물질과 대기 중에서 광화학 반응으로 생성되는 2차 오염원이 주가 되고 있다. 반면에 편서풍의 영향으로 인하여 대륙에서 발생하는 각종 대기 오염 물질이 한반도까지 이동하여 영향을 미치기도 하지만 이러한 중장거리 이동물질이 한반도의 대기질에 미치는 기여도에 대해선 알려진 바가 미비하다. 인공위성 관측 자료를 이용하면 지구적/지역적 규모의 중장거리 이동성 에어로졸 및 도시규모의 에어로졸에 관한 분석을 가능하게 할 것이다.

인공위성 관측 자료는 지상관측자료와 비교검증을 통하여 신뢰도가 향상되었으며 넓은 지역을 측정할

수 있는 장점 때문에 대기환경감시에 많이 이용되고 있다. 이러한 장점을 이용하면 한 지역의 대기환경 변화 및 중장거리 이동성 물질의 감시에도 인공위성 관측 자료를 유용하게 사용할 수 있다. 인공위성 자료를 이용하여 대기 에어로졸 관측 자료를 분석하는데 있어 가장 흔하게 사용되는 파라미터는 에어로졸 광학두께(AOT: Aerosol Optical Thickness ( $\tau$ ))로서 대기 중의 존재하는 에어로졸 입자에 의하여 소산(Extinction)되는 태양광의 양의 함수로서 표현된다.

$$\tau(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_{\text{ext}}(\lambda) \cdot z dz \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{ext}}(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(\lambda, m) \cdot N(r) dr \quad (2)$$

여기서  $\sigma_{\text{ext}}(\lambda)$ 는 에어로졸 입자에 의한 파장별 소산 계수,  $z$ 는 지표면에서 위성까지의 거리,  $Q_{\text{ext}}(\lambda, m)$ 은 파장( $\lambda$ )과 굴절률( $m$ )로 정해지는 입자의 소산 효율, 그리고  $N(r)$ 은 입자의 크기별 수 농도 함수이다. 일반적으로 에어로졸 광학두께는 대기의 수직경로중의 존재하는 에어로졸의 상대적인 양에 의하여 결정되므로 에어로졸 광학두께가 증가할수록 에어로졸의 수 농도가 증가하는 것을 의미한다. 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 대기 환경 관측은 새로운 대기환경 관측에 대한 필요성과 센서기술의 발달로 인하여 많이 발전되었다. 유럽과 미국의 지구관측 위성은 지상의 환경기준물질 항목과 연계된 각종 대기 관측 구성 물질을 측정할 수 있게 되었다(Burrows, 1999; King *et al.*, 1999). 특히, 위성자료에서 관측된 에어로졸 광학두께와 대기질과의 영향에 관한 연구는 Kaufman and Fraser(1983)에 의하여 시작되었다.

한편 미국에서는 PM<sub>2.5</sub> (Particulate Matter)의 규제를 위하여 미국 환경청(EPA: Environment Protection Agency)의 주도하에 PM<sub>2.5</sub>를 포함하는 새로운 대기환경기준(24시간 평균 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 마련했으며 약 4,000여 개의 대기질 측정소를 운영하고 있다. 이러한 지상관측 자료는 중요한 연속적 측정 자료를 제공하고 있지만 공간적인 한계를 가지고 있어 측정소가 없는 지역이나 외부에서 유입되는 에어로졸에 대한 정량적인 자료를 제공하지 못하는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위한 노력으로 최근

에는 미국 항공우주국(NASA: National Astronautics & Space Administration)과 공동으로 위성자료가 제공하는 에어로졸의 공간적 분포자료와 연속 측정된 지상관측자료를 이용하여 대기질을 예측하는 연구를 활발히 수행하고 있다. 여기서 중요한 점은 만약 위성에서 관측된 에어로졸 광학두께 자료로부터 PM에 대한 농도를 해석할 수 있다면 측정망이 존재하지 않는 지역에서도 PM농도를 제시할 수 있다는 점이다. 현재는 위성에서 관측된 에어로졸 광학두께와 지상에서 관측된 PM과의 연계성을 분석하고 나아가 대기질 예측을 위한 기초자료로 활용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Engel-Cox *et al.*, 2004a, b; Kittaka *et al.*, 2004; Szykman *et al.*, 2004; Hutchison *et al.*, 2004; Hutchison, 2003; Ramon *et al.*, 2003; Wang and Christopher, 2003; Smirnov *et al.*, 2000).

본 연구에서는 대도시 지역의 대기질 예측을 위한 인공위성관측 자료의 응용을 목적으로 하였다. 이를 위하여 먼저 한반도 인근지역을 관측하고 있는 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 에어로졸 광학두께 자료를 이용하여 서울시의 대기질 관측망에서 측정된 PM<sub>10</sub>자료와의 비교분석을 수행하여 위성자료와 지상관측자료와의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 또한 위성 관측 자료에서 나타나는 지역별 위성 관측값과 역 궤적분석 모델결과를 이용하여 대기질 예측을 시도하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 MODIS 에어로졸 관측 자료가 PM 자료와의 연계성을 찾기 위하여 지상의 대기질 측정망에서 관측된 PM<sub>10</sub>농도 자료와의 상관성을 분석하였다. 사용된 자료는 2004년 한 해 동안의 한반도 인근지역을 포함하는 MODIS 에어로졸 관측 자료와 국립환경과학원에서 제공되는 대기질 자동측정망 자료 중 서울시 정동 측정소(동경 126.979도, 북위 37.564도)에서 관측된 PM<sub>10</sub>자료를 이용하였다. 그리고 인공위성 관측 자료를 이용한 에어로졸 변화 예측을 위하여 24시간 동안의 역 궤적모델 결과와 함께 지상측정소에 도달하는 기단의 위치로부터 도출된 에어로졸 광학두께 변화 양상을 통하여 에어로졸 농도 변화특성을 예측하였다.

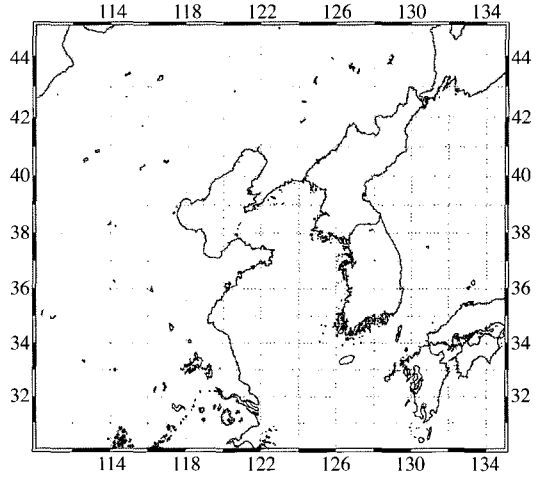


Fig. 1. Domain area for MODIS satellite data in this study.

MODIS는 미국 항공우주국의 지구관측 위성계획의 일환으로 1999년에 발사되어 성공적인 임무를 수행하고 있는 TERRA위성과 2002년에 발사된 AQUA위성의 탑재센서이다. MODIS 관측 자료는 육지, 해양, 대기에 관한 44개의 표준자료를 생산하고 있다. 특히, 대기분야에서는 해양 및 육지에서의 대기 에어로졸에 관한 특성 자료를 정기적으로 생산하고 있다(Kaufman *et al.*, 1997; Tanré *et al.*, 1997). 본 연구에서는 그림 1과 같이 2004년 동안 한반도 인근지역(동경 110~135도, 북위 30~45도)에서 관측된 TERRA/MODIS의 표준 에어로졸 관측 자료로서 위성의 직하점에서 약 10×10 km<sup>2</sup>의 해상도를 가지는 MOD04자료를 이용하였다. MOD04자료는 위성영상에서 구름의 영향이 없는 픽셀만을 선택하여 지표반사와 대기분자에 의한 영향을 제거한 후 특정 에어로졸 모델을 사용한 LUT(Look-Up Table)을 이용하여 위성의 에어로졸 광학두께를 계산한다(Kaufman *et al.*, 1997). MODIS 표준 에어로졸 분석 알고리즘은 7개의 밴드(0.47, 0.55, 0.67, 0.87, 1.24, 1.64, 2.1 μm)를 사용하며, 최종적으로 0.55 μm에서의 에어로졸 광학두께를 계산하여 해양과 육지에서의 정확도가 검증되었다(Chu *et al.*, 2002; Remer *et al.*, 2002).

MODIS 에어로졸 자료의 공간해상도 특성상 서울시 지역을 10~20개의 픽셀로 표현이 되므로 서울시내의 많은 지상관측자료와의 비교를 위해서는 좁

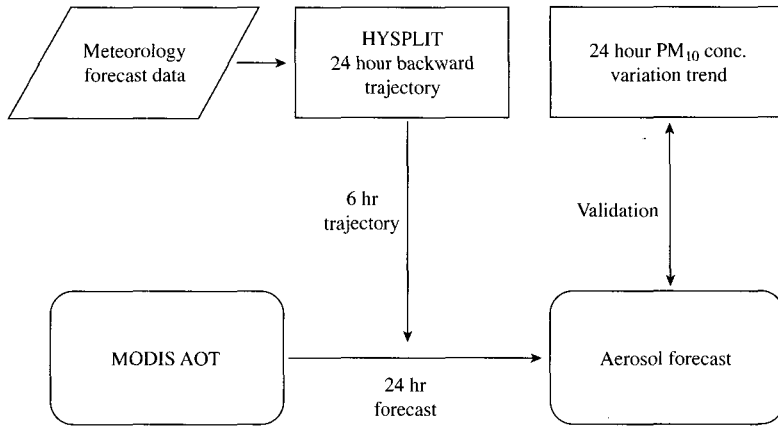


Fig. 2. Schematic diagram for aerosol forecast using MODIS satellite data in this study.

더 고해상도의 위성자료를 사용해야 한다. 그러나 위성영상의 해상도 개선은 본 연구의 연구범위에서 벗어나므로 서울시의 대표적인 측정소이며 서울시에서 비교적 중심부에 위치한 정동 관측소 자료의 시간별 PM<sub>10</sub>농도 자료를 이용하였다.

그리고 위성자료를 이용한 대기질 예측을 위하여 대기질 관측망에 도착하는 기단(Air Mass)의 이동경로를 파악하기 위하여 미국 해양 대기청에서 제공되고 있는 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Version 4.7) (Draxler and Rolph, 2003; Rolph, 2003) 모델을 이용한 24시간 전의 등온위(isentropic) 역궤적분석을 수행하였다. 기단의 최종 도착지는 서울시 정동에 위치한 대기질 측정망과 같은 위치이며 지상의 조건과 근접한 500 m 고도에서 모델링 하였다. HYSPLIT 모델 수행을 위한 기상 자료는 미국 NOAA/ARL에서 제공되는 FNL 기상 자료를 사용하였다. FNL은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 기상 예측 모델결과인 The Global Data Assimilation System (GDAS) 자료를 6시간 간격으로 저장한 것이며, 공간 해상도는 반구를 129×129도의 극 좌표 그리드의 해상도로 약 190 km를 가진다. 참고로 기상예측모델을 사용하여 생성된 GFS(The Global Forecasting System) 기상 자료를 이용하면 현재로부터 180시간 후까지 6시간 간격의 예측모델링이 가능하다. 그림 2는 본 연구의 전체적인 연구방법을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 2004년 한 해 동안의 MODIS 에어로졸 광학두께와 정동 관측소에서 관측된 PM<sub>10</sub>농도변화의 시계열 분포를 나타낸다. 2004년의 PM<sub>10</sub> 연평균 농도는 77.04±45.67 μg/m<sup>3</sup>로서 황사현상이 관측된 4월 23일의 경우 최대 597 μg/m<sup>3</sup>까지 증가하였다. 그리고 PM<sub>10</sub> 연평균 대기환경기준인 70 μg/m<sup>3</sup>보다 큰 값을 가지는 경우가 2004년 전체의 47.6%로서 에어로졸 농도는 대체적으로 높게 나타나고 있다. MODIS AOT는 구름의 영향이 없는 조건에서 서울시 정동 관측소와 가장 가까운 지점의 자료를 선택하였다. MODIS 에어로졸 광학두께는 평균 0.40±0.22 μg/m<sup>3</sup> 이고 최대값은 1.27로서 4월 21일의 경우이다. 2004년 동안의 PM<sub>10</sub>의 농도변화 추세와 MODIS 에어로졸 광학두께 변화는 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 2004년도에는 2월 25일, 3월 10~11일, 3월 30~31일 그리고 4월 23일의 4번의 황사 현상이 기록되었고 ([http://yellow.metri.re.kr/new\\_kor/datadb05\\_2.php](http://yellow.metri.re.kr/new_kor/datadb05_2.php)) 연무현상이 발생함과 동시에 에어로졸의 농도 및 에어로졸 광학두께 값이 크게 나타났던 기간이 6월과 10월에 나타났다(Lee et al., 2006). 특히 6월 8~12일에는 중국 동부지방에서 원인을 알 수 없는 화재로부터 심각한 스모크 현상이 관측되었고 한국으로 이동하는 것이 보고되었으며 10월의 경우 초순에는 연무현상이 관측되었고 중순 이후엔 러시아

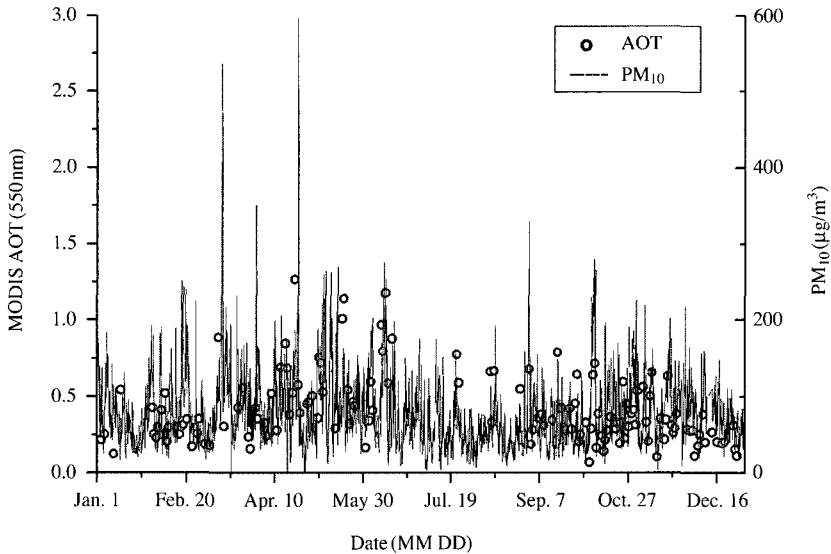


Fig. 3. Time series of MODIS aerosol optical thickness and hourly average PM<sub>10</sub> mass concentrations at Seoul, Korea in 2004.

극동지방에서 발생한 화재로부터의 스모크가 남하하여 한반도에 영향을 미치고 있는 것이 확인되었다. 2004년의 주요 에어로졸 이벤트에 대한 특성을 다음과 같이 정리하였다.

- 3월 10~11일에는 973 mb의 저기압 세력이 대륙에서 황사를 동반하여 만주를 거쳐 동쪽으로 이동하면서 한반도에 영향을 미쳤다. 황사의 영역은 MODIS영상에서 잘 나타나고 있으며, 에어로졸 광학두께가 약 0.6 이상의 높은 값을 나타내었다. PM<sub>10</sub>의 농도는 3월 10일부터 증가하기 시작하여 11일에는 200 µg/m<sup>3</sup>을 넘어 최대 536 µg/m<sup>3</sup>을 기록하였다.
- 3월 30~31일의 황사도 마찬가지로 대륙의 고기압과 저기압이 동쪽으로 이동하고 있고 제주도 남쪽의 저기압으로 인하여 풍향이 남쪽으로 바뀌면서 한반도에 영향을 미쳤다. 황사의 영역은 MODIS영상에서 잘 나타나고 있으며, 에어로졸 광학두께가 약 0.6 이상의 높은 값을 나타내었다. PM<sub>10</sub>의 농도는 3월 30일에 최대 351 µg/m<sup>3</sup>이었다.
- 4월 23일의 경우도 고기압-저기압 시스템으로 인한 황사의 효과가 있었고 PM<sub>10</sub>의 농도는 최대 597 µg/m<sup>3</sup>이었다. 반면에 24일에는 고기압이 한반도에 머물면서 맑은 날이 되었으며 에어로졸 광학

두께는 대체적으로 0.5보다 낮았으며 PM<sub>10</sub>의 농도는 평균 56 µg/m<sup>3</sup>이었다.

- 6월 10일의 경우 고기압이 중국동부지방에 머물면서 중국 동부지역~황해~한반도에 이르는 지역에 느린 풍속으로 서풍이 불고 있었다. 따라서 이 당시 중국동부지역에서 발생한 대규모 화재로 인한 스모크가 천천히 축적되어 이동하였다. 이러한 고농도 에어로졸로 인하여 에어로졸 광학두께 값이 1보다 큰 값을 나타내며 크게 상승하였으며, PM<sub>10</sub> 농도도 함께 234 µg/m<sup>3</sup>까지 증가 하였다.
  - 10월 8일의 경우 22호 태풍 Maon이 오키나와 남동쪽에서 북상 중에 있었으며 태풍의 영향으로 한반도 인근지역은 풍속이 낮은 북풍이 불고 있었으므로 오염물이 정체됨과 동시에 대륙의 오염물질이 천천히 남하 한 경우로 에어로졸 광학두께 값이 0.6 이상의 증가된 값과 PM<sub>10</sub>의 농도는 최대 266 µg/m<sup>3</sup>이었다.
  - 10월 16일의 경우 만주지방에 위치한 고기압으로부터 돌아가는 바람이 러시아 극동지역에서 발생한 에어로졸을 동해를 거쳐 한반도까지 이동시켰다. PM<sub>10</sub>의 농도는 최대 134 µg/m<sup>3</sup>이었다.
- 위성자료와 지상관측자료와의 관련성을 찾기 위하여 MODIS 에어로졸 광학두께 자료와 PM<sub>10</sub>의 상관

관계를 분석하였다. 두 자료의 측정 일치성을 위하여 MODIS 에어로졸 광학두께자료는 구름의 영향이 없는 날의 지상 관측소 위치와 가장 가까운 지점의 픽셀 자료를 사용하였고 PM<sub>10</sub> 자료는 위성통과 시각의 자료를 추출하여 가능한 한 시공간적으로 일치하는 경우를 비교하였다. 그림 4는 TERRA 위성이 통과하는 시각의 PM<sub>10</sub> 자료와 MODIS 에어로졸 광학두께자료의 상관관계를 나타내며 상관계수는 0.37(97.5% 유의수준), 표준편차는 38.87 (slope)이다. 이처럼 낮은 상관계수는 위성자료가 공간해상도와 다양한 도시지역 지표 반사도에 영향을 줌, 에어로졸의 농도를 측정하는데 있어서 에어로졸의 연직구조의 분포의 영향으로 지표농도와의 차이가 발생하는 점, 그리고 MODIS 에어로졸 광학두께의 측정 파장이 550 nm로

서 에어로졸의 소산계수가 파장과 입자의 크기가 같을 때 최대로 민감한 점 등으로 미루어 볼 때 PM<sub>10</sub>의 입자크기가 비교적 크므로 인한 것을 제시할 수 있다. 그리고 본 연구에서 계산된 상관관계는 표 1의 선행 연구결과와 비교해 볼 때 상대적으로 좋은 결과로 보이며 위성 관측 자료를 PM<sub>10</sub>농도 예측을 위하여 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. 향후 개선된 상관관계를 얻기 위해서는 한반도 지역에 맞는 위성자료 분석 알고리즘을 적용해야 함과 동시에 PM<sub>2.5</sub> 자료를 활용하는 것을 제시할 수 있다.

표 1은 MODIS 에어로졸 광학두께와 PM과의 상관성을 분석한 선행 연구 사례를 나타낸다. Engel-Cox *et al.* (2004b)는 미국 전 지역의 STN-M 관측망의 PM<sub>2.5</sub>와의 평균 상관관계가 0.396를 보이고 있고 지역별로 편차가 나타남을 보였다. 또한 PM<sub>10</sub>의 경우 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) (Malm *et al.*, 1994) 관측망 자료를 이용하여 0.334의 결과를 보여 PM<sub>2.5</sub>보다 낮은 상관관계를 보였다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이, 550 nm 파장에서의 에어로졸 광학두께 자료가 파장과 비슷한 크기의 입자에 가장 민감한 성질을 가진다는 점으로 미루어 볼 때, 입자의 크기가 작은 PM<sub>2.5</sub>에 더욱 민감한 것에서 원인을 찾을 수 있다. 미국의 경우 PM<sub>2.5</sub>의 새로운 환경기준을 제정하였고 이에 대한 연속 측정망을 운영하고 있지만 한국은 아직 PM<sub>2.5</sub>에 관한 연속적인 측정망이 존재하지 않는 관계로 본 연구에서는 부득이하게 PM<sub>10</sub>자료와 에어로졸 광학두께 자료를 사용하였다.

한편, 2004년 중 에어로졸 농도가 비교적 높게 나

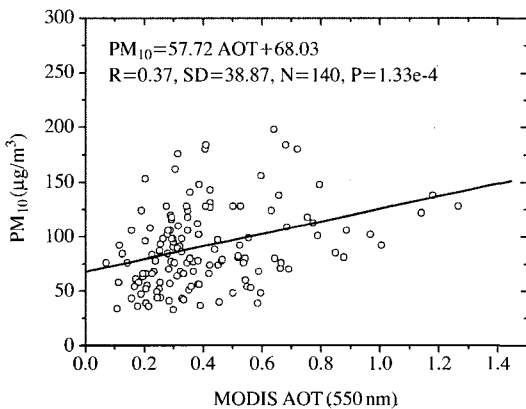


Fig. 4. Linear correlation of MODIS AOT and PM<sub>10</sub> mass concentrations.

Table 1. Correlation results between MODIS AOT and ground based PM concentrations.

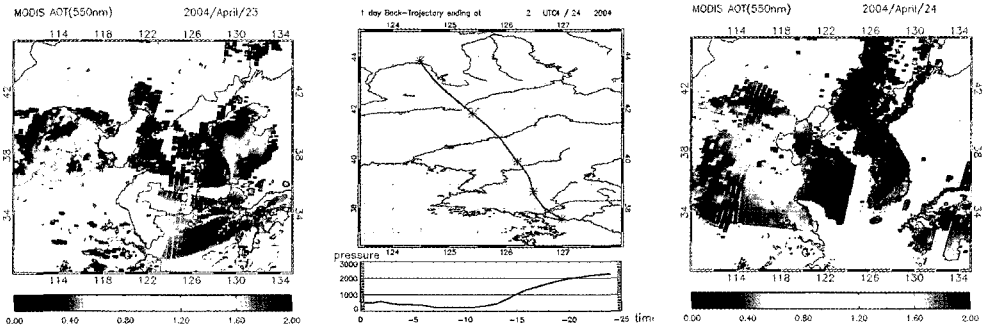
Reference	Index	Site	R	Linear equation
Eengel-Cox <i>et al.</i> (2004b)	Hourly PM <sub>2.5</sub>	STN-M	0.396	PM <sub>2.5</sub> =22.55 AOT+6.35
Eengel-Cox <i>et al.</i> (2004b)	Hourly PM <sub>10</sub>	IMPROVE (Acadia N.P.)	0.796	
Eengel-Cox <i>et al.</i> (2004b)	Hourly PM <sub>10</sub>	IMPROVE (Big Bend N.P.)	-0.052	
Eengel-Cox <i>et al.</i> (2004b)	Hourly PM <sub>10</sub>	IMPROVE (Shenandoah N.P.)	0.334	
Kittaka <i>et al.</i> (2004)	Hourly PM <sub>2.5</sub>	SLAMS/NAMS (Duluth, MN)	0.67	
Kittaka <i>et al.</i> (2004)	Hourly PM <sub>2.5</sub>	SLAMS/NAMS (Chicago, IL)	0.73	
Szykman <i>et al.</i> (2004)	Hourly PM <sub>2.5</sub>	SLAMS/NAMS (Chicago, IL)	0.76	
Wang & Christopher (2004)	Hourly PM <sub>2.5</sub>	Jefferson county, AL	0.70	
Wang & Christopher (2004)	Daily PM <sub>2.5</sub>	Jefferson county, AL	0.98	PM <sub>2.5</sub> =72.43 AOT+0.86

STN-M: The Speciation Trends Network and PM<sub>2.5</sub> Mass network

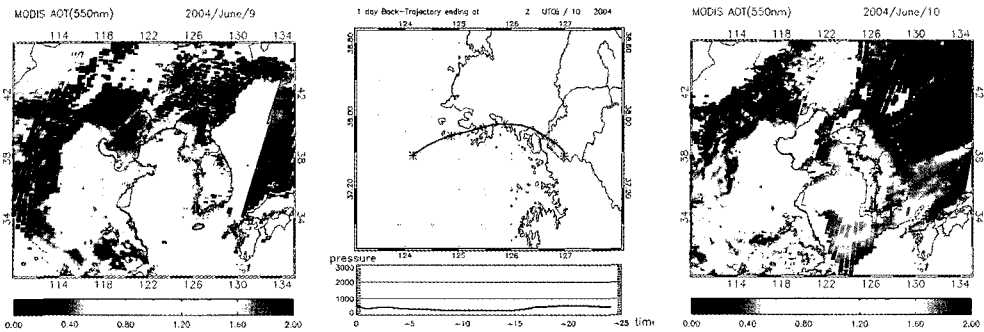
N.P.: National Park

SLAMS: The State and Local Air Monitoring Stations

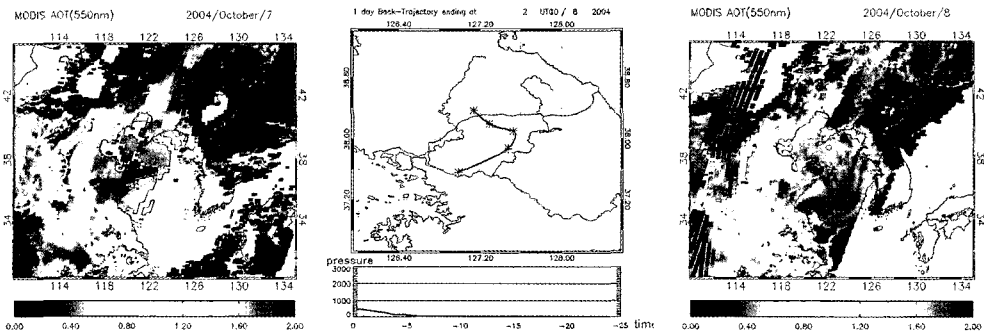
NAMS: National Ambient Monitoring Stations



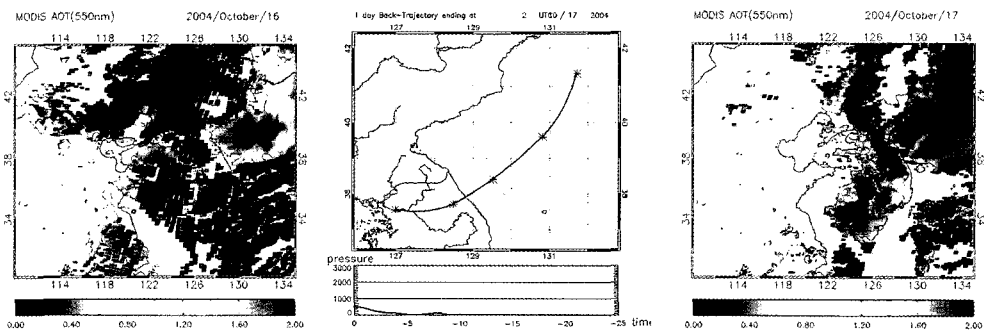
(a) April 23~24



(b) June 9~10



(c) October 7~8



(d) October 16~17

Fig. 5. MODIS AOT, HYSPLIT 24 hour backward trajectory at 24 hour later, and MODIS AOT on next day.

**Table 2. 6-hour interval forecast (maximum 24 hour) based on MODIS AOT and -24 hour backward trajectory from HYSPLIT.**

Date	AOT	Date	AOT	Date	AOT	Date	AOT	Date	AOT
3/20	0.42	4/17	0.68	6/4	0.41	10/3	0.33	10/22	0.20
+6 hr	0.43		0.57		0.33		0.18		0.23
+12 hr	0.47		0.56		0.25		0.07		0.12
+18 hr	0.42		0.51		0.23		0.07		0.12
+24 hr	0.40		0.50		0.19		0.04		0.12
Avr	0.43		0.56		0.28		0.14		0.16
Forecast	(-)		(++)		(++)		(++)		(+)
3/23	0.55	4/21	1.27	6/5	NA	10/5	0.07	10/23	0.33
+6 hr	0.74		1.18		NA		0.16		0.28
+12 hr	0.83		1.15		NA		0.07		0.23
+18 hr	0.84		0.85		NA		0.26		0.12
+24 hr	0.92		0.80		0.49		0.18		0.22
Avr	0.78		1.05		0.49		0.15		0.23
Forecast	(---)		(+++)		NA		(--)		(++)
3/30	0.42	4/22	NA	6/9	0.97	10/6	0.29	10/26	0.45
+6 hr	0.66		NA		0.97		0.18		0.29
+12 hr	0.48		NA		0.98		0.18		0.30
+18 hr	1.10		NA		0.99		0.19		0.37
+24 hr	1.09		1.03		1.02		0.19		0.35
Avr	0.75		NA		0.99		0.21		0.35
Forecast	(---)		NA		(-)		(++)		(++)
3/31	0.35	4/23	0.59	6/10	0.80	10/7	0.54	10/27	0.30
+6 hr	0.28		0.58		0.80		0.68		0.30
+12 hr	0.21		0.55		NA		0.57		0.28
+18 hr	0.28		0.30		NA		0.46		0.28
+24 hr	0.29		0.28		NA		0.54		0.28
Avr	0.28		0.46		0.80		0.56		0.29
Forecast	(++)		(++)		NA		(-)		(+)
4/5	0.28	4/24	0.39	6/11	1.18	10/8	0.71	10/28	0.42
+6 hr	0.30		0.47		0.97		0.39		0.42
+12 hr	0.28		NA		0.78		0.30		0.44
+18 hr	0.27		NA		0.63		0.26		0.41
+24 hr	0.24		NA		0.42		0.18		0.39
Avr	0.27		NA		0.79		0.37		0.41
Forecast	(+)		NA		(+++)		(+++)		(+)
4/8	0.52	4/28	0.45	6/12	NA	10/12	0.24	10/29	0.39
+6 hr	0.43		0.48		0.48		0.30		0.37
+12 hr	0.51		0.40		0.51		0.25		0.36
+18 hr	0.53		NA		0.62		0.07		0.34
+24 hr	0.67		NA		0.72		0.05		0.38
Avr	0.53		0.44		0.58		0.18		0.37
Forecast	(-)		NA		NA		(++)		(+)
4/11	0.28	4/29	0.46	6/13	0.58	10/14	0.21	10/30	0.41
+6 hr	0.18		0.60		0.71		0.47		0.34
+12 hr	0.19		0.26		0.85		0.47		0.34
+18 hr	0.20		0.29		0.85		0.09		0.32
+24 hr	0.21		0.52		0.82		0.13		0.31
Avr	0.21		0.42		0.76		0.27		0.34
Forecast	(++)		(+)		(--)		(--)		(++)
4/13	0.69	6/1	0.35	6/14	NA	10/15	0.28	10/31	0.32
+6 hr	0.66		0.27		0.57		0.09		0.34



Table 2. Continued.

Date	AOT	Date	AOT	Date	AOT	Date	AOT	Date	AOT
+12 hr	0.69		0.27		0.57		0.09		0.31
+18 hr	0.71		0.26		0.55		0.09		0.29
+24 hr	0.74		0.26		0.51		0.07		0.30
Avr	0.70		0.28		0.55		0.12		0.31
Forecast	(-)		(++)		NA		(++)		(+)
4/14	NA	6/2	0.34	6/15	0.88	10/16	NA		
+6 hr	0.52		0.41		1.05		NA		
+12 hr	NA		0.33		0.80		NA		
+18 hr	0.56		0.33		1.10		NA		
+24 hr	0.56		0.32		0.85		0.32		
Avr	0.54		0.35		0.94		0.32		
Forecast	NA		(-)		(--)		NA		
4/16	0.85	6/3	0.60	10/2	NA	10/19	0.29		
+6 hr	0.78		0.51		NA		0.18		
+12 hr	NA		0.48		0.03		0.19		
+18 hr	NA		0.46		0.02		0.19		
+24 hr	NA		0.48		0.02		0.17		
Avr	0.82		0.51		0.02		0.20		
Forecast	NA		(++)		NA		(++)		

타나는 이벤트 사례 중에서 황사와 연무 현상이 발생하였던 4월 23일, 6월 10일, 10월 8일 및 16일에 대한 MODIS AOT와 역궤적 분석결과를 그림 5에 나타내었다. MODIS AOT 자료는 구름이 없는 곳만 자료를 나타내었으며 에어로졸의 공간적 분포 양상을 알 수 있다. 그리고 역궤적 분석결과를 다음날에 서울에 도착하는 24시간 동안의 궤적을 나타내므로 MODIS자료와 함께 다음날의 에어로졸의 이동양상을 추측할 수 있다. 3번째 열의 MODIS는 다음날의 AOT를 나타내며 궤적이 전날 AOT가 높지 않은 곳에서 출발한 경우는 값이 작아지는 결과를 볼 수 있으며, 반대의 경우는 높아지는 것을 알 수 있다. 예를 들어 4월 23은 중부지방에선 황사현상이 심했지만 궤적이 이동한 경로가 북쪽의 AOT가 낮은 지역을 통과하므로 다음날인 4월 24일에는 0.3 이하의 낮은 값을 보였다. 6월 9일은 중국의 AOT값이 상당히 높았으며 황해상에도 에어로졸이 분포했지만 MODIS 에어로졸 분석 알고리즘은 해수면 태양반사(Sunglint) 영역을 제외하므로 나타나지 않았다. 궤적은 황해상에서 이동하므로 10일엔 한반도에서 높은 값을 보인다. 10월 7~8일의 경우는 정체된 궤적으로 인한 오염물의 축적이 나타나며 10월 16~17일엔 러시아 극동지역의 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 MODIS 자료와 24시간후의 역궤적 분석결과를 이용하면 에

Table 3. PM forecast level based on MODIS AOT trend.

Forecast	Sign	AOT trend
Very good	+++	≤ -0.2
Good	++	-0.05 ~ -0.2
Fair	+	0 ~ -0.05
Not-Fair	-	0 ~ 0.05
Bad	--	0.05 ~ 0.2
Very bad	---	≥ 0.2

어로졸의 이동 양상 및 양적인 변화분포를 상대적으로 예측할 수 있다. 여기서는 궤적이 이동하면서 24시간 동안의 에어로졸의 확산보다 이류현상이 지배적인 것으로 가정하였다.

Hutchison *et al.* (2004)은 미국에서 2002년 발생한 고농도 연무현상에 대해서 MODIS AOT와 오존농도를 이용하여 대기질을 예측하였다. 본 연구에서는 같은 방법을 통하여 MODIS 에어로졸 광학두께와 PM<sub>10</sub>자료를 이용하여 대기질을 예측하고자 하였다. 표 2는 현재의 MODIS AOT 자료와 다음날(24시간 후)의 -24시간 HYSPLIT 역궤적 분석 결과를 이용하여 서울시 정동 관측소에서 대기질 변화를 예측한 결과이다. 기상예측자료를 이용하여 위성이 통과하는 시간에서 24시간 후의 시점에, 서울시 정동에 도착하는 기단의 -24시간 역궤적 분석을 수행하여

Table 4. 24 hour variation trends of PM<sub>10</sub> concentrations.

Date	PM <sub>10</sub>	Date	PM <sub>10</sub>	Date	PM <sub>10</sub>	Date	PM <sub>10</sub>	Date	PM <sub>10</sub>
3/20	74	4/17	136	6/4	NA	10/3	24	10/22	75
+24 hr	86		86		70		38		50
Trend	12		-50		NA		14		-25
3/23	91	4/21	153	6/5	70	10/5	46	10/23	50
+24 hr	122		106		NA		79		60
Trend	31		-47		NA		33		10
3/30	61	4/22	106	6/9	62	10/6	79	10/26	62
+24 hr	97		142		108		164		44
Trend	36		36		46		85		-18
3/31	97	4/23	142	6/10	108	10/7	164	10/27	44
+24 hr	128		44		201		220		97
Trend	31		-98		93		56		53
4/5	47	4/24	44	6/11	201	10/8	220	10/28	97
+24 hr	44		41		144		36		94
Trend	-3		-3		-57		-184		-3
4/8	47	4/28	42	6/12	144	10/12	81	10/29	94
+24 hr	46		66		25		42		138
Trend	-1		24		-119		-39		44
4/11	71	4/29	66	6/13	25	10/14	12	10/30	138
+24 hr	48		48		33		52		112
Trend	-23		-18		8		40		-26
4/13	111	6/1	72	6/14	33	10/15	52	10/31	112
+24 hr	146		66		42		107		147
Trend	35		-6		9		55		35
4/14	146	6/2	66	6/15	42	10/16	107		
+24 hr	84		NA		96		48		
Trend	-62				54		-59		
4/16	94	6/3	NA	10/2	30	10/19	86		
+24 hr	136		NA		24		85		
Trend	42				-6		-1		

6시간 간격으로 기단의 위·경도를 찾아내었다. 그리고 위성자료에서 각 위경도에서의 AOT값이 주어진 시간 안에 서울로 이동할 수 있는 에어로졸의 양으로 가정함으로써, 에어로졸의 농도변화를 간접적으로 예측하였다. 즉, 어떠한 한 지점에서의 AOT값과 일정시간 전에 이 지점에 도착하게 되는 기단의 위·경도에서의 AOT값의 차이가 에어로졸의 농도의 변화를 의미한다. 한편 24시간 후의 에어로졸 변화 예측을 위해서 6시간 간격으로 얻은 AOT 값들의 평균과 오늘 측정된 AOT와의 차이를 통하여 PM농도의 증가 또는 감소를 예측하였다. 표 3에서는 AOT값이 전날보다 증가하거나 감소하는 양에 따라서 6단계의 PM농도 예측 기준을 설정하였으며 각 일별 PM농도 변화 예측 결과를 표 2에 나타내었다.

표 4는 표 2에서 계산된 예측결과와의 비교검증을 위하여, 실제 PM<sub>10</sub>농도 변화 실측값(Truth Value)을

나타낸다. 여기서 실측값은 위성통과 시각의 PM<sub>10</sub>농도와 24시간 후의 PM<sub>10</sub>농도의 차로써 24시간 동안의 PM<sub>10</sub>농도 변화를 나타낸다. 예를 들어 3월 20일의 경우, 위성 관측 값으로부터의 PM농도변화 예측값은 AOT값이 전날 0.42에서 다음날 0.43로 증가하였기 때문에 다음날의 PM<sub>10</sub>농도가 증가할 것으로 예상된다. 그리고 실제로 PM<sub>10</sub>농도변화 결과는 74 µg/m<sup>3</sup>에서 86 µg/m<sup>3</sup>으로 증가하였고, 본 연구의 예측 결과가 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 4월 21일의 경우도 AOT가 1.27에서 1.05로 감소하여 PM<sub>10</sub>농도가 감소할 것으로 예측하였고, 실제 PM<sub>10</sub>농도가 153 µg/m<sup>3</sup>에서 103 µg/m<sup>3</sup>으로 감소하여, 예측결과가 잘 들어 맞고 있음을 알 수 있었다.

표 5는 예측결과의 정확도를 검증하기 위하여, 표 2에서의 예측 결과와 표 4의 실측 결과를 비교한 것이다. 총 48일의 사례 일 중 위성자료 및 PM<sub>10</sub> 관측

Table 5. Comparisons between 24 hour forecast and differences of 24 hour PM<sub>10</sub> concentrations.

Date	Forecast	24hr PM <sub>10</sub> trend	Date	Forecast	24hr PM <sub>10</sub> trend	Date	Forecast	24hr PM <sub>10</sub> trend
3/20	(-)	12	6/1	(++)	-6	10/8	(+++)	-184
3/23	(---)	31	6/2	(-)	NA	10/12	(++)	-39
3/30	(---)	36	6/3	(++)	NA	10/14	(--)	40
3/31	(++)	31	6/4	(++)	NA	10/15	(++)	55
4/5	(+)	-3	6/5	NA	NA	10/16	NA	-59
4/8	(-)	-1	6/9	(-)	46	10/19	(++)	-1
4/11	(++)	-23	6/10	NA	93	10/22	(+)	-25
4/13	(-)	35	6/11	(+++)	-57	10/23	(++)	10
4/14	NA	-62	6/12	NA	-119	10/26	(++)	-18
4/16	NA	42	6/13	(--)	8	10/27	(+)	53
4/17	(++)	-50	6/14	NA	9	10/28	(+)	-3
4/21	(+++)	-47	6/15	(--)	54	10/29	(+)	44
4/22	NA	36	10/2	NA	-6	10/30	(++)	-26
4/23	(++)	-96	10/3	(++)	14	10/31	(+)	35
4/24	NA	-3	10/5	(--)	33			
4/28	NA	24	10/6	(++)	85			
4/29	(+)	-18	10/7	(-)	56			

자료가 존재하는 37일의 경우를 조사한 결과, 28일의 예측결과가 실제 PM<sub>10</sub>농도변화 추세와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 약 75.7%의 정확도를 나타내는 결과이다.

#### 4. 결 론

인공위성 자료를 대기환경 연구에 응용하기 위하여, 인공위성 관측 자료를 대기 에어로졸 감시 및 예측에 활용하고 그 결과를 분석하였다. 인공위성 관측 자료를 이용한 에어로졸 변화 예측을 위하여, 24시간 동안의 역 궤적모델 결과와 함께 지상측정소에 도달하는 기단의 위치로부터 에어로졸 광학두께 변화 양상을 도출하고 에어로졸 농도의 변화특성을 예측하였다. 이를 토대로 AOT 추세 변화의 증감이 PM농도의 변화와 관련이 있음을 확인하였다. 인공위성에서 관측된 AOT와 지상 측정망에서 관측된 PM<sub>10</sub>농도와 상관성 분석을 통하여, 두 자료 사이의 관련성이 있음을 확인하였고 에어로졸 농도에 따라 위성 관측값의 변화가 같은 추세로 나타남을 알 수 있었다. 또한 인공위성 자료와 역궤적 분석결과를 이용하여 24시간 대기질 변화를 예측한 결과, 실제 PM<sub>10</sub>농도변화 추세가 75.7%의 정확도로 일치하는 결과를 보였고 위성자료의 대기질 예측에 대한 응용 가능성을 확인하였다. 향후, 고해상도 인공위성 자료를 이용한

에어로졸의 분석기술을 개발하고 보다 다양한 지역에서의 대기질 관측 자료와의 비교, 검증을 거친다면 보다 더 정확도를 향상할 수 있는 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

Burrows, J.P. (1999) Current and future passive remote sensing techniques used to determine atmospheric constituents. In A.F. Bouwman, editor, Approaches to scaling of trace gas fluxes in ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 317-347.

Chu, A.D., Y.J. Kaufman, C. Ichoku, L.A. Remer, D. Tanré, and B.N. Holben (2002) Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land, Geophys. Research Ltr., 29, 10.1029/2001GL013205.

Draxler, R.R. and G.D. Rolph (2003) HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>).

- NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Engel-Cox, J.A., C.H. Holloman, B.W. Coutant, and R.M. Hoff (2004b) Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality, *Atmos. Environ.*, 38 (16), 2495-2509.
- Engel-Cox, J.A., R.M. Hoff, and A. Haymet (2004a) Recommendations on the Use of Satellite Remote-Sensing Data for Urban Air Quality, *J. of Air and Waste Management*, 54, 1360-1371.
- Hutchison, K.D. (2003) Applications of MODIS satellite data and products for monitoring air quality in the state of Texas, *Atmos. Environ.*, 37(17), 2403-2412.
- Hutchison, K.D., S. Smith, and S. Faruqi (2004) The use of MODIS data and aerosol products for air quality prediction, *Atmos. Environ.*, 38(30), 5057-5070.
- Kaufman, Y.J. and R.S. Fraser (1983) Light Extinction by Aerosols During Summer Air Pollution, *J. Appl. Meteor.*, 22, 1694-1706.
- Kaufman, Y.J., D. Tanré, L.A. Remer, E.F. Vermote, D.A. Chu, and B.N. Holben (1997) Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS-MODIS, *J. Geophys. Res.*, 102, 17,051-17,061.
- 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.
- Kittaka, C., J. Szykman, B. Pierce, J. Al-Saadi, D. Neil, A. Chu, L. Remer, E. Prins, and J. Holdzkom (2004) Utilizing MODIS Satellite Observations to Monitor and Analyze Fine Particulate Matter, PM<sub>2.5</sub>, Transport Event. Sixth Conference on Atmospheric Chemistry: Air Quality in Megacities, Seattle, Washington, American Meteorological Society.
- Lee, K.H., Y.J. Kim, W. von Hoyningen-Huene, and J.P. Burrows (2006) Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2006. *Atmos. Environ.*, accepted.
- Malm, W.C., J.F. Sisler, D. Huffman, R.A. Eldred, and T.A. Cahill (1994) Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States, *J. Geophys. Res.*, 99, 1357-1370.
- Ramon, D., R. Santer, and J. Vidot (2003) Determination of fine particulate matter from MERIS and SeaWiFS aerosol data, Proceeding of "MERIS users Workshop", ESA-ESRIN, Frascati, Italy, 10-13 November.
- Remer, L.A., D. Tanre, Y.J. Kaufman, C. Ichoku, S. Mattoo, R. Levy, D.A. Chu, B. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, J.V. Martins, R.R. Li, and Z. Ahmad (2002) Validation of MODIS Aerosol Retrieval Over Ocean, *Geophys. Research Lett.*, 29(12), 10.1029/2001GL013204.
- Rolph, G.D. (2003) Real-time Environmental Applications and Display System (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Schwartz, S.E. (1996) The white house effect: Shortwave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: An overview, *J. Aerosol Sci.*, 27(3), 359-382.
- Smirnov, A., B.N. Holben, D. Savoie, J.M. Prospero, Y.J. Kaufman, D. Tanre, T.F. Eck, and I. Slutsker (2000) Relationship between column aerosol optical thickness and in situ ground based dust concentrations over Barbados, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1643-1646.
- Stowe, L., A. Ignatov, and R. Singh (1997) Development, validation, and potential enhancements to the second-generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration, *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16,923-16,934.
- Szykman, J., J. White, B. Pierce, J. Al-Saadi, D. Neil, C. Kittaka, A. Chu, L. Remer, L. Gumley, and E. Prins (2004) Utilizing MODIS Satellite Observations in Near-real-time to Improve AIRNow Next Day Forecast of Fine Particulate Matter, PM<sub>2.5</sub>. Sixth Conference on Atmospheric Chemistry: Air Quality in Megacities, Seattle, Washington, American Meteorological Society.
- 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, 16,971-16,988.
- Wang, J. and S.A. Christopher (2003) Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies, *Geophys. Res. Lett.*, 30(21), 2095, doi:10.1029/2003GL018174.