제주도와 덕적도에서 관측된 초미세입자(PM2.5) 농도와 MODIS 에어러솔 광학두께와의 관계

이권호* · 박승식**†

*경일대학교 위성정보공학과, **전남대학교 환경공학과

Relationship between PM2.5 Mass Concentrations and MODIS Aerosol Optical Thickness at Dukjuk and Jeju Island

Kwonho Lee* and Seungshik Park**†

*Department of Satellite Geoinformatic Engineering, Kyungil University,

**Department of Environmental Engineering, Chonnam National University

Abstract : Using the MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) retrieved aerosol optical thickness (AOT) along with ground measurements of PM2.5 mass concentration, we assessed local air quality over Dukjuk and Jeju island and estimated possibility of satellite derived PM2.5 during nine intensive observation periods in 15 October 2005 - 24 October 2007. Averaged PM2.5 mass concentrations showed relatively variable as $25.61 \pm 22.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at Dukjuk and $17.33 \pm 10.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at Jeju. The maximum values of $188.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Dukjuk) and $50.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jeju) were recorded during Asian dust storm day. Similarly, the maximum values of MODIS AOT were found as 3.73 (Gosan) and 1.14 (Jeju). Averaged MODIS AOTs at Dukjuk (0.79 ± 0.81) were larger than that at Jeju (0.42 ± 0.24). An empirical relationship between MODIS AOT and PM2.5 mass was obtained and results show that there was a good correlation between satellite and ground based values with a linear correlation coefficient of 0.85 at Dukjuk. The result clearly demonstrates that satellite derived AOT is a good surrogate for monitoring PM air quality over study area. However, meteorological and other ancillary datasets are necessary to further apply satellite data for air quality research.

Key Words : satellite, AOT, PM2.5, monitoring

요약 : 본 연구에서는 덕적도와 제주도에서 2005년 10월 15일부터 2007년 10월 24일 까지 9차례에 걸친 집중 관측기간 동안 포집된 PM2.5의 질량 농도 자료와 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 인공위성 관측자료로 분석된 대기 에어러솔 광학두께(AOT: Aerosol Optical Thickness) 자료로부터 지역 대기 중 미세 입자의 농도 변화 특성 및 대기질 감시를 위한 인공위성 자료의 활용 가능성을 분석하였다. 전체 관측 기간 중 PM2.5의 일 평균 농도는 덕적도에서는 $25.61 \pm 22.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 제주도에서는 $17.33 \pm 10.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 변화가 크게 나타났으며, 황사가 발생한 2006년 4월 8일에는 덕적도와 제주도에 서 각각 최대값 $188.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $50.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. 또한 두 지역의 MODIS AOT 값은 $0.79 \pm$

접수일(2012년 5월 29일), 수정일(1차 : 2012년 6월 20일), 게재확정일(2012년 6월 21일).

† 교신저자: 박승식(park8162@jnu.ac.kr)

0.81(덕적도), 0.42 ± 0.24 (제주도)였으며, AOT의 최대값은 PM_{2.5}와 마찬가지로 황사현상이 발생한 2007년 4월 8일에 3.73(덕적도), 1.14(제주도)로 나타났다. 그리고 지상에서 관측된 PM_{2.5} 농도의 공간 분포 양상을 파악하기 위하여 MODIS AOT와 PM_{2.5}의 상관관계 분석결과, 덕적도는 0.85, 고산은 0.06으로서 비교적 에어러솔의 영향을 많이 받는 덕적도가 고산보다 높은 상관계수 값을 나타내었다. 이러한 상관관계를 근거로 하여 도출된 1차 선형회귀 방정식으로부터 MODIS AOT값을 PM_{2.5}로 환산한 결과는 인공위성 자료로부터 대기환경 감시를 가능케 하는 수단이 될 수 있어 유용할 것이다.

1. 서론

대기 에어러솔의 개념에 포함되는 미세먼지(PM; Particulate Matter)의 농도는 지역 대기질에 영향을 미치는 주요한 대기 오염물질로서 전세계적으로도 주요한 환경지표로 사용되고 있다. 미세먼지는 크기와 형태, 그리고 화학적 조성이 시·공간적으로 매우 다양하게 나타나며 대기중에서 액체 또는 고체상으로 존재한다. 대기 환경 기준 물질 중 입자성 물질인 미세먼지는 입자의 공기역학적 직경이 10 μm 보다 작은 입자(PM₁₀; Particulate Matter less than 10 μm)로 규정하고 있다. 특히, 공기역학적 직경이 2.5 μm 보다 작은 입자(PM_{2.5}; Particulate Matter less than 2.5 μm)는 호흡기와 혈관계로 침투하여 인체에 영향을 미치기도 하므로 보건학적으로도 매우 중요한 것으로 알려져 왔다(Krewski *et al.*, 2000).

이러한 미세입자의 생성원으로는 모래폭풍, 해염, 화산재 등과 같이 자연적인 발생원과 화석연료의 연소나 방화와 같이 인위적인 발생원으로 구분되어지며, 기후 변화 과정에도 영향을 미친다(Kaufman *et al.*, 2002). 미세먼지 입자가 환경학적, 보건학적, 그리고 기후학적으로 미치는 영향을 이해하기 위하여는 연속적인 관측 자료가 필요하지만 미세먼지 입자의 시공간적인 불균질성으로 인하여 관측의 어려움이 발생한다. 일반적으로, 미세먼지 입자 농도를 관측하는 데에는 지상에서 미세한 필터를 이용하여 미세입자를 포집하는 방법이 널리 사용되어왔다. 그러나 이러한 방법은 필터에 충분한 양의 입자가 포집되어야 하므로 분석 결과에 대하여 시간적인 분해능이 나쁘고, 점 관측(point measurement) 방식의 한계로 인하여 공간적인 분해능에 제약이 있다.

최근의 인공위성을 이용한 원격탐사 기법의 발전으로 대기 에어러솔의 광학특성(에어러솔 광학두께, 단산

란계수 등)을 비교적 정확하게 탐지해낼 수 있게 되었으며, 소형 과학위성에서부터 지구관측위성에 이르는 다양한 위성자료를 통하여 에어러솔 탐지 및 분석에 이용되고 있다(Wong *et al.*, 2010; 이권호와 김영준, 2008; Lee *et al.*, 2006; 이권호 외 2004; 손병주와 황석규 1998). 그리고 인공위성 관측자료를 이용한 에어러솔의 특성 분석 및 지역 대기질 평가를 위한 응용 연구도 가능해졌다(이권호 외 2006; 이동하 외 2006). 특히, 동북아 지역은 세계적으로도 대기 에어러솔의 발생률이 높아 지역대기 중의 에어러솔에 의한 영향이 많은 지역으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2007). 현재 지상에서 관측된 미세먼지입자 농도는 주요 도시나 거주지역을 대상으로 하여 관측망이 구성되어 있으나 도서산간지역을 포함하는 지역은 정보가 생산되지 않고 있다. 따라서 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 미세먼지입자 모니터링은 대기질 관리 측면에서도 시공간적 한계를 극복할 수 있는 중요한 가능성을 가지고 있음이 보고되었다(Wang and Christopher, 2003; Engel-Cox, *et al.*, 2004).

인공위성 원격탐사를 통하여 생산되는 물리량은 주로 에어러솔 광학두께(AOT; Aerosol Optical Thickness)로 표현된다. AOT는 지표로부터 대기 최상층부(TOA; Top of Atmosphere)까지 존재하는 모든 입자에 의한 광 소산계수(light extinction coefficient)의 총합이다. AOT는 입자의 총량과 소산효율, 흡습성 정도, 크기분포에 영향을 받지만 미세입자의 발생원이 주로 지표에 위치하고 있고 지구 중력의 영향으로 지표면에 가장 많이 존재하므로 다른 요소가 일정하다고 가정하면, 지상에서 관측한 미세먼지농도와 관련성이 있다. 따라서 본 연구에서는 인공위성 원격탐사 자료를 통하여 AOT를 도출하고 지상에서 관측된 미세먼지 농도와의 비교를 하고자, 제주도와 덕적도에서 관측된 PM_{2.5}자료와 위성자료를 분석하였다.

2. 자료 및 방법

AOT 분석을 위하여 Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) L1B 자료를 사용하였다. MODIS L1B 자료는 미국 NASA의 MODIS 자료 검색 시스템인 the Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)에서 지상관측자료와 동일한 시기에 한반도를 포함한 인근지역을 통과한 자료를 검색 및 획득하였다. MODIS 센서는 36개의 분광 채널을 가지고 있어 육지와 해양, 대기의 다양한 목표물을 탐지하는데 유용하다. 본 연구에서는 0.47–2.13 μm 파장 영역의 7개 채널자료와 복사전달모델로 미리 계산된 조건표(LUT; Look up Table)를 이용하여 AOT를 도출하였으며, 도출 알고리즘은 Lee and Kim (2010)에서 제시된 SaTellite Aerosol Retrieval (STAR) 방법을 사용하였다. STAR 알고리즘은 1 km의 공간해상도를 가지는 MODIS 픽셀 자료 값을 반사도로 전환하여 식 (1)과 같은 복사전달 방정식을 이용하여 위성이 관측한 총 반사도(ρ_{TOA})로부터 대기 분자산란에 의한 반사도($\rho_{Rayleigh}$)와 지표반사도(ρ_{Surf})에 의한 기여도를 제거한 후 남은 부분을 에어러솔에 의한 반사도(ρ_{Aer})로 취급한다.

$$\rho_{Aer} = \rho_{TOA} - \rho_{Rayleigh} - \frac{T_0 T_s \rho_{Surf}}{1 - \rho_{Surf} S_H} \quad (1)$$

T_0 와 T_s 는 각각 입사광과 반사광이 통과하는 대기 경로 중 투과도, S_H 는 반구 알베도이다. 그리고 주어진

복사전달모델 입력 값으로서의 AOT와 이 때 계산된 에어러솔에 의한 반사도와 관계는 LUT의 형태로 저장되어 식 (1)의 위성 관측 값으로부터 얻은 값과의 비교를 통하여 최종적으로 AOT를 결정하게 된다.

지상에서 관측된 미세입자 관측 자료는 URG사의 PM sampler를 이용하여 24시간동안 47 mm 직경의 석영 필터(Pallflex Tissuquartz 2500 QAO, Watman)에 포집된 PM2.5로서 실험실에서 마이크로밸런스를 이용하여 필터에 포집되기 전과 후의 질량 차로부터 PM2.5의 농도를 결정하였다. PM2.5 측정은 제주도 고산 기상대(북위 37.29°, 동경 126.16°)와 덕적도 국가배경농도측정소(북위 37.23°, 동경 126.15°)에서 2005년 10월부터 2007년 10월까지 9회에 걸친 집중관측 기간 동안 이루어졌다(Table 1 참조). 두 지상관측지점의 지리학적 위치는 Fig. 1에서 표시한 지점과 같으며 경도가 거의 같은 남북라인에 위치하고 있다.

MODIS 위성자료로 도출된 AOT 자료는 위성이 관측지점을 중심으로 반경 10 km에 해당하는 픽셀 값을 추출하여 지상관측 PM2.5 자료와 비교를 하였다. AOT와 PM2.5간의 관련성에 대한 불확실성을 평가하기 위하여 풍속, 상대습도와 같이 AOT에 영향을 미칠 수 있는 기상요소들에 대한 분석도 수행되었다. 부가적으로, 미국 해양대기청(NOAA; National Ocean & Atmosphere Administration)에서 개발된 공기궤적분석 모델인 HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) version 4.8 (Draxler and Hess, 1998)을 사용하여 장거리 이동 경

Table 1. PM2.5 and AOT at Dukjuk and Jeju during whole period of IOP

Dukjuk			Jeju	
Period	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	AOT	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	AOT
15-24 Oct. 2005	21.11 $\pm$ 22.07	0.318 $\pm$ 0.189	18.95 $\pm$ 9.80	0.19 $\pm$ 0.07
5-19 Jan. 2006	23.14 $\pm$ 11.69	0.437 $\pm$ 0.128	15.41 $\pm$ 9.94	0.54 $\pm$ 0.15
1-15 Apr. 2006	39.18 $\pm$ 45.82	2.057 $\pm$ 1.452	18.77 $\pm$ 13.75	0.60 $\pm$ 0.17
6-13 Jun. 2006	29.64 $\pm$ 10.73	NA	19.42 $\pm$ 12.23	0.61 $\pm$ 0.34
16-25 Oct. 2006	17.63 $\pm$ 9.96	NA	21.52 $\pm$ 15.80	NA
11-20 Jan. 2007	23.40 $\pm$ 18.49	0.738 $\pm$ 0.271	16.65 $\pm$ 11.15	NA
16-25 Apr. 2007	25.62 $\pm$ 11.33	NA	14.55 $\pm$ 8.09	0.38 $\pm$ 0.16
16-25 Jul. 2007	27.50 $\pm$ 17.14	NA	17.02 $\pm$ 7.52	0.34 $\pm$ 0.26
15-24 Oct. 2007	22.15 $\pm$ 19.74	0.727 $\pm$ 0.510	13.80 $\pm$ 5.18	0.29 $\pm$ 0.19
Average	25.61 $\pm$ 22.92	0.79 $\pm$ 0.81	17.33 $\pm$ 10.79	0.42 $\pm$ 0.24

NA: Not available

Fig. 1. Averaged MODIS AOT over study area and locations of ground based PM2.5 measurement sites (Dukjuk: 37.23°N, 126.15°E and Jeju: 33.29°N, 126.16°E).

로를 파악하였다. HYSPLIT 모델의 입력조건은 공기가 목표점에 도달하기 48시간 이전까지의 경로를 역 궤적 분석방법을 사용하였다.

3. PM2.5농도와 위성관측 AOT와의 관계

PM2.5 집중 관측기간 동안의 한반도를 포함한 인근 지역의 MODIS AOT값의 평균 분포는 Fig. 1과 같다. AOT의 분포를 통하여 오염원이 밀집분포하고 있는 동 중국이 주요 오염지역임을 알 수 있으며 여기서 배출된 오염입자가 기류를 타고 동쪽으로 이동하면서 침강 및 확산 작용과정에서 제거되어 에어러솔의 분포 양상이 서고동저의 형태로 나타남을 알 수 있다. 본 연구의 미세먼지 관측지점인 덕적도와 제주도는 주변의 대도시 및 산업시설의 영향이 비교적 적은 지역이므로 미세입자의 농도 증가의 원인이 근거리 보다는 이렇게 대륙으로부터의 장거리 이동이 원인이 될 수 있다.

Fig. 2는 두 관측 지점에서 집중관측기간 동안의 PM2.5 농도(막대)와 MODIS AOT(원)를 시계열 도표로 나타낸 것이다. 국내에서는 PM2.5에 대한 환경기준이 아직 없지만 미국 환경청(US EPA; Environment

Fig. 2. Daily time-series of PM2.5 (grey bar) and AOT at 550 nm (blue circle) at (a) Dukjuk and (b) Jeju. Horizontal solid lines represent US EPA PM2.5 air quality standards.

Table 2. Summary of PM2.5, MODIS AOT, wind speed (WS), and relative humidity (RH) at Dukjuk and Jeju

Station Name	Parameter	Min	Max	Mean	STD
Dukjuk	PM2.5[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	4.32	188.89	25.88	22.89
	AOT	0.08	3.73	0.79	0.81
	WS[m/sec]	0.5	4.5	1.69	0.84
	RH[%]	40.8	91.4	68.24	13.28
Jeju	PM2.5[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2.53	50.46	17.33	10.79
	AOT	0.09	1.14	0.42	0.24
	WS[m/sec]	2.2	18.4	7.11	3.36
	RH[%]	49.4	94.1	70.67	11.89

Protection Agency)에서는 일 평균 PM2.5 질량농도를 기준으로 ‘good’ (0–15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ‘moderate’ (15.4–40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ‘unhealthy for sensitive groups’ (40.5–65.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ‘unhealthy’ (65.5–150.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ‘very unhealthy’ (150.5–250.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2003) 으로 분류하고 있다. 이러한 환경기준에 대한 기준선도 그림 3에 포함하였다. 두 지점 모두 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 PM2.5농도를 나타내고 있으나 덕적도의 경우 때때로 65.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 값을 나타내었다. 특히 2006년 4월 18일경에는 황사현상이 발생하였으며, 그로 인하여 덕적도의 대기 중 PM2.5의 최대값인 188.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였으며 MODIS AOT값도 크게 증가하였다. 제주도에서는 이보다 낮은 값인 50.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었으나 관측기간 중 최대값으로 나타났다.

PM2.5와 MODIS AOT는 서로 다른 조건에서 관측된 물리량이다. PM2.5는 지표 근처에서의 건조상태의 에어러솔 미세 입자의 질량농도로서 총 에어러솔 중 분율은 지역마다 다르다. 반면에 위성이 관측한 AOT는 위성의 픽셀크기에 해당하는 영역의 대기 중 존재하는 모든 크기의 에어러솔 입자와 관련되어 있고, 에어러솔이 지표근처에 대부분이 존재하는 경우에는 분식 민감도가 떨어진다. 이러한 차이점이 두 물리량간의 불일치를 설명할 수 있지만, 두 가지 모두 대기중 에어러솔의 부하량과 비례하므로 일반적인 대기조건 하에서 대기질 감시에 있어 위성관측자료의 사용은 공간적인 한계를 극복할 수 있어 매우 유용할 것이다. 대체적으로, PM2.5와 AOT는 덕적도에서는 비슷한 변화양상을 보이고 있으나 제주도에서는 그렇지 않은 것으로 나타났다. 이것은 두 관측지점의 주요 에어러솔의 성분 및 수

Fig. 3. Relationship between daily PM2.5 mass concentrations and MODIS AOT at 550 nm.

직분포 특성으로 인한 것으로 보인다.

위성자료의 대기질 응용 가능성을 알아보기 위하여 MODIS AOT와 PM2.5의 상관분석을 수행하였다(Fig. 3). 상관분석에 사용된 PM2.5와 AOT가 동시에 존재하는 표본의 개수는 덕적도와 제주도에서 각각 21개와 31개이다. 상관분석 결과, 덕적도에서의 1차 선형회귀 방정식은 $\text{PM}_{2.5} = 45.078 \text{ AOT} + 3.345$ 로서 비교적 높

은 상관계수($R=0.854$)를 나타내었으나, 제주도에서는 1차 선형회귀 방정식 $PM_{2.5} = 2.752 AOT + 20.699$ 로서 매우 낮은 상관계수($R=0.061$)을 나타내었다. 이러한 결과는 제주도에서의 $PM_{2.5}$ 농도 값이 상대적으로 낮은 영역에 위치해 있고, AOT의 증가에 뚜렷한 영향을 줄 만큼의 $PM_{2.5}$ 농도가 나타나지 않았기 때문이다. 이와 비슷한 사례를 조사한 결과는 다음과 같다. Engel-Cox *et al.*, (2004)는 미국 California 에서 MODIS AOT와 미세먼지 농도를 비교한 결과, AOT가 적고 에어러솔 연직 분포가 다양한 조건하에서 약한 상관관계를 나타내는 것으로 보고하였다. Gupta *et al.*, (2006)은 AOT와 PM간의 강한 상관관계를 나타내는 조건은 대기 오염현상이 지표부근에서 발생했을 경우이며 약한 상관관계는 낮은 광학두께 값이 나타나는 경우로 보고하였다.

$PM_{2.5}$ 와 AOT의 상관관계에 영향을 미치는 인자는 입자의 소산효율(extinction efficiency), 흡습 성장

계수(Hygroscopic growth factor), 상대습도, 수직분포 등이 있으나, 본 연구와 관련하여 가능한 자료로서 기상자료인 풍속과 상대습도 자료를 이용하여 관련성을 알아보았다. 그 결과, 풍속의 경우 두 지점 모두 관련성이 없는 것으로 나타났으며 상대습도는 두 값의 상관도에 어느 정도 영향을 미치고 있었다. 다양한 상대습도 조건 중 75%를 기준으로 상관관계를 분석한 결과 상관계수와 회귀 직선의 기울기가 비교적 높게 나타났다. Fig. 4에서는 상대 습도값이 75%보다 낮은 경우와 75%보다 높은 경우로 나누어 $PM_{2.5}$ 와 AOT를 비교한 결과이다. 덕적도의 $PM_{2.5}$ 는 상대습도가 낮은 경우에 AOT와 강한 상관관계($R=0.954$)를 나타내었다. 상대습도는 입자의 크기와 소산효율을 증가시키므로, AOT값을 증가시키는 경향이 있다. 따라서 건조한 상태에서 $PM_{2.5}$ 와 AOT가 가지는 관계보다 AOT값의 증가로 인하여 비정상적인 관계가 도출될 수 있는 것이다.

Fig. 4 . Relationship between daily $PM_{2.5}$ mass concentrations and MODIS AOT at 550 nm.

Fig. 5. Three days HYSPLIT back-trajectories over study region for whole PM_{2.5} measurement days. Trajectory lines ending at Dukjuk and Jeju with four different heights (500 m, 1000 m, 2000 m, and 4000 m).

덕적도와 제주에 도착하는 공기의 이동경로 특성은 역궤적 분석을 통하여 알 수 있다(Fig. 5). 본 연구에서 역궤적 분석을 위하여 사용된 HYSPLIT 모델 분석 결과는 덕적도와 제주도에 도착하는 공기는 주로 대륙으로부터 기원하거나 통과하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 고도가 낮아질수록 두 지역에 도착하는 공기의 이동경로에 차이가 있었다. 1000 m 이하의 공기는 덕적도의 경우 주로 북서쪽에서 이동하는 경우가 많았으나, 제주도는 한반도 주변과 남서쪽 계열의 이동경로도 많이 포함되어 있었다. 따라서 이러한 장거리 이동경로의 차이가 앞서 분석된 PM2.5와 AOT간의 상관관계에 있어 차이를 나타내게 하는 주 원인으로 작용할 수 있다.

4. 인공위성으로 분석된 PM2.5 농도

3장에서 MODIS AOT와 PM2.5와의 상관분석 결과,

덕적도에서 관측된 PM2.5 자료를 근거로 한 1차 선형 회귀 방정식의 상관관계가 높게 도출되었다. 여기에서는 1차 선형회귀 방정식을 이용하여 MODIS AOT 자료로부터 PM2.5 농도자료를 산출하였다. 덕적도에서 도출된 1차 선형회귀 방정식이 위성이 관측하게 되는 전 지역에 대하여 적용하는 것은 다소 무리가 있을 수는 있지만, 상대습도가 비교적 낮고(RH<75%) 대기 중 에어로솔의 농도가 충분히 높은 조건(PM2.5>33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)하에서는 이러한 가정이 위성 관측값을 이용할 수 있는 가능성이 있음을 이전 장에서 증명하였다. 그리고 인공위성 자료를 이용한 PM2.5의 도출은 추후 대기관측용 라이다(Lidar)와 같이 대기 구조에 대한 상세한 자료를 제공하는 관측자료의 활용을 통해 다양한 환경조건 및 검증작업을 수행할 예정이다.

Fig. 6은 집중관측 기간 동안 PM2.5의 농도와 MODIS AOT값이 상대적으로 매우 높았던 경우를 선택

Fig. 6. MODIS derived PM2.5 mass concentrations for massive aerosol event cases of (a) 24 October 2005, (b) 8 April 2006, (c) 16 January 2007, and (d) 24 October 2007, respectively.

하여 MODIS AOT로부터 PM_{2.5} 농도값으로 환산한 결과이다. 선택된 에어러솔 이벤트는 2006년 4월 8일에 발생하였던 황사와 2005년 10월 24일, 2007년 1월 16일, 2007년 10월 24일에 발생하였던 대륙기원의 연무현상에 대하여 위성자료를 분석하였다. MODIS AOT로부터 환산된 PM_{2.5} 농도값은 에어러솔의 플룸이 위치한 영역에서 높은 값을 나타내므로, 황사나 대륙기원의 연무와 같은 장거리 이동성 에어러솔에 대한 대기질 감시에 도움이 될 것으로 판단된다.

5. 결론 및 요약

한반도 인근지역은 대륙에서 이동하는 장거리성 오염물질의 영향이 크기 때문에 광역 대기질 감시를 위해서는 지상 관측과 동시에 인공위성 관측자료의 사용이 효과적이다. 본 연구에서는 지역 내 인위적 오염원에 의한 영향이 비교적 적은 덕적도와 제주도에서 관측된 미세 입자농도와 인공위성 관측자료를 이용하여 입자성 오염물질의 변화와 거동을 분석하였다. 전체 관측 기간 중 PM_{2.5}의 일 평균 농도는 덕적도($25.88 \pm 22.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 제주도($17.33 \pm 10.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 비교적 크게 나타났으며 두 지역 모두 PM_{2.5}의 변동이 크게 나타나고 있었다. 그리고 황사현상이 나타난 2006년 4월 8일에는 덕적도에서 PM_{2.5}의 최댓값 $188.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 제주도에서 $50.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. 이렇게 지상에서 관측된 미세입자 농도의 공간 분포 양상을 파악하기 위하여 대표적인 인공위성 자료인 MODIS AOT 자료와 역궤적 분석을 수행한 결과, 높은 PM_{2.5} 값을 나타낸 날들은 PM_{2.5}와 AOT평균보다 높으며 대부분 대륙으로부터 유입된 황사나 연무의 영향으로 판단되었다. MODIS AOT와 PM_{2.5}의 상관관계 분석결과, 덕적도(0.854)가 고산(0.061)보다 높은 상관계수 값을 나타내었으며 특히 상대습도가 75%보다 적은 경우 덕적도의 상관관계($R=0.954$)는 보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 인공위성 자료로부터 대기환경 감시를 가능케하는 수단이 될 수 있을 뿐 아니라 천리안 위성과 같은 정지궤도 위성을 이용한 대기질 감시에 있어 매우 유용할 것이다.

사 사

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0025871).

참고문헌

- 손병주, 황석규, 1998. 해색센서 SeaWiFS 관측을 이용한 황사판독, *대한원격탐사학회지*, 14(4): 366-375.
- 이권호, 김영준, 2008. Collection 4와 Collection 5 MODIS 에어러솔 분석 자료의 차이와 지상관측자료와의 비교, *대한원격탐사학회지*, 24(4): 369-379.
- 이권호, 이동하, 김영준, 2006. MODIS 인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 예측 응용, *한국대기환경학회지*, 22(6): 85-862.
- 이권호, 홍천상, 김영준, 2004. MODIS와 TOMS 자료를 이용한 2001년 동북아시아 지역의 대기 에어러솔 모니터링, *대한원격탐사학회지*, 20(2): 77-89.
- 이동하, 이권호, 김영준, 2006. 에어로졸 종류 구분을 위한 MODIS 에어로졸 자료의 적용, *대한원격탐사학회지*, 22(6): 495-505.
- Draxler, R.R. and G.D. Hess, 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition, *Australian Meteorological Magazine*, 47: 295-308.
- Engel-Cox, J.A., H.H. Christopher, B.W. Coutant, and R.M. Hoff, 2004. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality, *Atmospheric Environment*, 38: 2495-2509.
- Gupta, P., S.A. Christopher, J. Wang, R. Gehrig, Y. Lee, and N. Kumar, 2006. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities, *Atmospheric Environment*, 40(30): 5880-5892.
- Kaufman, Y.J., D. Tanre, and O. Boucher, 2002. A satellite view of aerosols in climate systems, *Nature*, 419: 215-223.

- Krewski, D., R.T. Burnett, M.S. Goldberg, K. Hoover, J. Siemiatycki, M. Jerrett, A. Abrahamowicz, and W.H. White, 2000. Reanalysis of the Harvard six cities study and the American cancer society study of particulate air pollution and mortality: A special report of the institute's particle epidemiology reanalysis project, Health Effects Institute, Cambridge MA, (97pp).
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006. Atmospheric aerosol detection and its removal for satellite data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(5): 1-5.
- Lee, K.H., Y.J. Kim, W. von Hoyningen-Huene, and J.P. Burrows, 2007. Spatio-temporal variability of atmospheric aerosol from MODIS data over Northeast Asia in 2004, *Atmospheric Environment*, 41(19): 3959-3973, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.01.048.
- Lee, K.H. and Y.J. Kim, 2010. Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted and dust storm days, *Atmospheric Measurement Technique*, 3: 1771-1784, doi: 10.5194/amt-3-1771-2010.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2003. Air quality index, A Guide to Air Quality and Your Health, EPA-454/K-03-002.
- Wang, J., and S.A. Christopher, 2003. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: implications for air quality studies, *Geophysical Research Letters*, 30(21): 2095.
- Wong, M.S., K.H. Lee, and J.E. Nichol, 2010. Aerosol optical thickness retrieval using a small satellite, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(6): 605-615.