

MODIS 에어러솔 광학두께와 지상에서 관측된 시정거리를 이용한 대기 에어러솔 연직분포 산출

이권호^{1*}

Estimation of Aerosol Vertical Profile from the MODIS Aerosol Optical Thickness and Surface Visibility Data

Kwon-Ho LEE^{1*}

요 약

본 연구에서는 MODIS 인공위성으로 분석된 에어러솔 광학두께 자료와 지상에서 관측된 시정거리 자료를 이용하여 에어러솔 연직분포 모델링을 수행하였다. 위성과 지상관측자료로부터 에어러솔의 척도 고도를 구할 수 있었으며, 그 결과는 복사전달 모델에서 사용되고 있는 표준대기 모델과 비교에서 만족할 만한 수준의 근사치를 보였다. 그리고 실제 사례로서 대기가 청명한 경우 ($\tau_{\text{MODIS}}=0.12\pm 0.07$, 시정거리= $21.13\pm 3.31\text{km}$)와 혼탁한 경우 ($\tau_{\text{MODIS}}=1.71\pm 0.85$, 시정거리= $13.33\pm 5.66\text{km}$)에 대해서 적용하여 척도 고도를 산정한 결과는 각각 전국 평균값으로서 $0.63\pm 0.33\text{km}$ 와 $1.71\pm 0.84\text{km}$ 로 나타났다. 그리고 이 결과를 바탕으로 대기 에어러솔 소산계수의 연직분포를 구할 수 있었으며, 최종적으로 KML 형식으로 코딩되어 관심 영역의 대기 환경 특성 변화를 감시하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어 : MODIS, 시정거리, 에어러솔, 소산계수, KML

ABSTRACT

This study presents a modeling of aerosol extinction vertical profiles in Korea by using the Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) derived aerosol optical thickness (AOT) and ground based visibility observation data. The method uses a series of physical equations for the derivation of aerosol scale height and vertical profiles from MODIS AOT and surface visibility data. The modelled results under the standard atmospheric condition showed small differences with the standard aerosol

2013년 4월 10일 접수 Received on April 10, 2013 / 2013년 6월 25일 수정 Revised on June 25, 2013 / 2013년 6월 26일 심사완료 Accepted on June 26, 2013

¹ 경일대학교 공간정보공학과 Dept. of Geoinformatics Engineering, Kyungil University

* Corresponding Author E-mail : khlee@kiu.ac.kr

vertical profile used in the radiative transfer model. Model derived aerosol scale heights for two cases of clean ($\tau_{\text{MODIS}}=0.12\pm 0.07$, visibility= $21.13\pm 3.31\text{km}$) and hazy atmosphere ($\tau_{\text{MODIS}}=1.71\pm 0.85$, visibility= $13.33\pm 5.66\text{km}$) are $0.63\pm 0.33\text{km}$ and $1.71\pm 0.84\text{km}$. Based on these results, aerosol extinction profiles can be estimated and the results are transformed into the KML code for visualization of dataset. This has implications for atmospheric environmental monitoring and environmental policies for the future.

KEYWORDS : MODIS, Visibility, Aerosol, Extinction Coefficient, KML

서론

대기 에어러솔은 지구 대기 중에 존재하는 미세한 입자성 물질로서 위성 원격 탐사 및 기후 변화와 관련된 연구에 있어 중요한 요소이다(Kaufman *et al.*, 1997; Lee, 2011). 최근까지, 인공위성 원격 탐사를 통하여 다양한 에어러솔 분석 알고리즘이 개발되고 있으며, 산출물의 정확도도 높아지고 있다(Lee 2002; Lee *et al.*, 2009). 에어러솔의 연직 분포는 복잡한 복사전달 과정 및 모델링 분야에서 중요한 입력 자료이며, 결과물의 정확도를 높이는 데 기여하기도 한다. 그러나 대부분의 수동형 센서를 탑재한 인공위성으로부터 분석된 결과물은 수평적 구조를 가지고 있지만 수직적 분포에 관한 정보를 얻기는 부적합하다(Lee, 2012; 2013). 대기 에어러솔 연직 구조에 대한 정보를 얻기 위해서는 능동형 센서(예: 라이다 등)를 이용하거나 실지 관측(예: 항공기, 풍선 등)을 이용하여야 하지만 고가의 장비와 운용의 어려움이 단점이 된다. 이러한 단점을 극복하기 위한 노력으로서, 최근에는 지상에서 복사 관측 장비를 이용하여 산출된 에어러솔 광학특성 자료로부터 에어러솔의 연직구조를 산정하거나(Qiu *et al.*, 2005; Wong *et al.*, 2009), 에어러솔 광학두께(aerosol optical thickness; AOT, τ)와 시정거리를 비교하여 상관관계에 관한 연구가 수행되었다(Retalis *et al.*, 2010).

에어러솔의 연직구조에 대한 정보는 각 고

도별 에어러솔의 광 소산계수(light extinction coefficient, σ_{Ext})로 표현되며, 이 값은 에어러솔 입자에 의하여 산란되거나 흡수되는 광량의 비율을 의미한다. 고도별 광 소산계수를 적분한 값은 AOT로 표현되며, 연직 대기중에 존재하는 총 에어러솔의 상대적인 양을 의미한다. 그리고 지표 고도에서의 에어러솔 광 소산계수는 시정거리(visibility)와 관련이 있다(Koschmieder, 1924). 흔히 사용되는 대기 에어러솔 원격탐사 자료는 AOT 산출물이며, 물리적 변환식을 이용하여 에어러솔 연직 구조 및 시정거리 산정이 가능하다(Qiu *et al.*, 2005; Nichole *et al.*, 2010; Retalis *et al.*, 2010). 특히, Qiu *et al.*(2005)는 복사계의 일종인 Pyrheliometer 관측결과를 이용한 에어러솔 소산계수값과 MODTRAN 복사전달 모델과 비교를 통하여 매우 근사한 결과를 얻었으며, Wong *et al.*(2009)은 다과장 복사계인 Cimel sunphotometer 관측결과와 대기 관측용 Micro-pulse Lidar 관측 결과 상대오차 약 0.004km^{-1} 의 매우 적은 차이를 나타냄을 보고하였다.

지리정보시스템(GIS)은 다양한 자료 형식을 가시화할 수 있으므로, 방대한 양의 기상 정보나 환경정보를 공간적 프레임워크에서 다루기에 적합하다. Kim and Kim(2011)은 웹 기반 주제도 작성에 있어 이러한 지리정보 시스템과 최근의 구글을 이용한 주제도가 자료 해석에 대한 유연성을 제고할 수 있음을 보였다. 현재, 기상청에서는 지도기반 날씨 서비스(<http://gis.kma.go.kr/COMIS4P/map/map.js>)

p)를 통하여 천리안 위성영상 및 날씨관련 정보를 제공하고 있다. 그러나 국내외적으로 대기 에어러솔에 관한 연직 분포 및 시정거리에 관한 정보가 가시화되고 있지 않다. 그리고 인공위성으로부터 분석된 AOT 자료는 대기 환경 관리 및 감시 측면에서 에어러솔 부하량을 산정하는데 활용되었으나(Engel-Cox *et al.*, 2004; Lee and Park, 2012), 인공위성 관측자료를 이용하여 에어러솔 연직구조 및 시정거리 산출과 관련된 연구는 아직 미비한 편이다. 따라서, 본 연구에서는 MODIS 인공위성자료를 이용한 대기 에어러솔의 연직분포 및 시정거리를 산출하는 방법을 제안하고, 이 결과를 최근 활용도가 증가하고 있는 KMZ 형태의 포맷으로 가공하여 구글 어스를 이용하여 가시화하였다.

자료 및 방법

본 연구에서 사용된 MODIS 에어러솔 자료

는 NASA 에어러솔 분석 알고리즘을 사용하여 산출된 Level 2(version 5.1) 자료로서 파장 550nm에서의 AOT(AOT₅₅₀)이다. MODIS 에어러솔 분석 알고리즘은 육지와 해상에서 지표반사도의 차이로 인하여 서로 다른 알고리즘을 사용하며, AOT의 정확도는 육지에서 $\Delta AOT = \pm 0.05 \pm 0.20 AOT$, 해양에서 $\Delta AOT = \pm 0.03 \pm 0.05 AOT$ 를 가지는 것으로 알려져 있다(Remer *et al.*, 2005). MODIS는 TERRA와 AQUA 두 인공위성에 탑재되어 오전과 오후 한반도 상공을 지나가며, 궤도에 따라 하루 2회-4회 정도 자료가 가능하다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 자료처리 과정을 설명한 개념도이며 모든 자료처리와 코딩 과정은 Exelisvis사의 Interactive Data Language(IDL) 소프트웨어를 이용하여 처리하였다. MODIS AOT(τ_{MODIS})는 태양 복사 에너지가 지구 대기중의 에어러솔에 의하여 소산된 양을 상대적으로 측정한 물리량이다. MODIS는 다중파장 복사계(Multi-wavelength

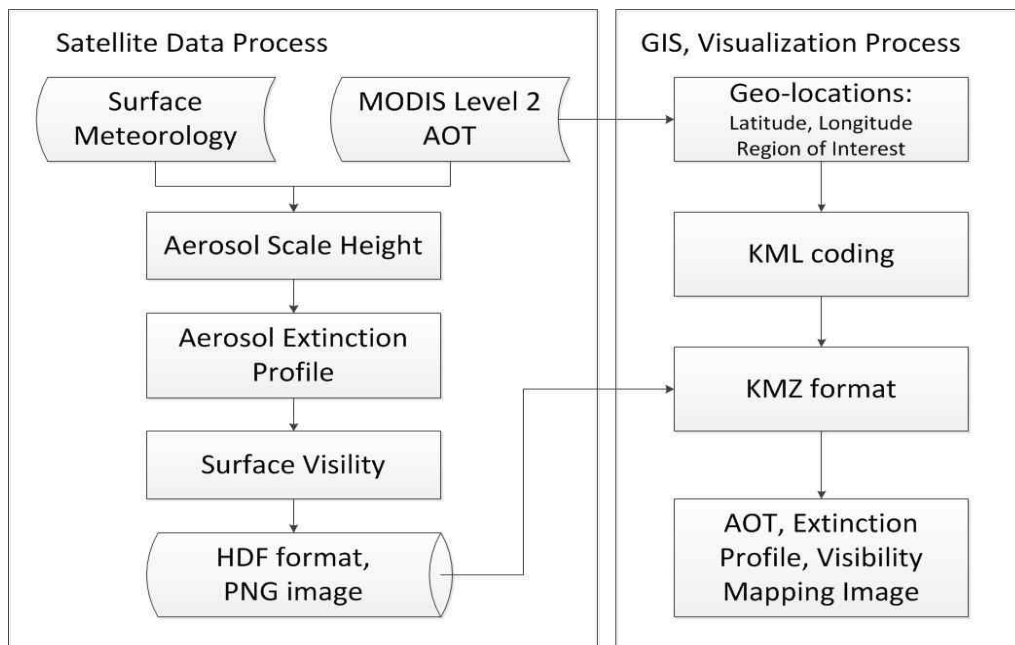


FIGURE 1. Data processing flowchart for aerosol extinction and visibility visualization in this study

Spectro-radiometer)로서 특정 파장 λ 에서 복사계가 감지하는 복사량(I_{MODIS})은 지구 대기권으로 입사하는 태양복사 에너지(I_0)가 대기 에어러솔에 의하여 소산되며, 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$I_{MODIS}(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-\tau_{MODIS}(\lambda)) \quad (1)$$

식 (1)에서 τ_{MODIS} 는 고도 z km 에서의 에어러솔 소산계수(σ_{Ext})를 전체 대기에 대하여 적분한 값으로 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\tau_{MODIS}(\lambda) = \int_{z=0}^{\infty} \sigma_{Ext}(\lambda, z) dz \quad (2)$$

그리고 지표($z=0$ km)에서 파장 550nm의 에어러솔 소산계수($\sigma_{Ext}(0)$)는 식 (3)의 Koshemieder 방정식(Middleton, 1952)을 이용하여 시정거리(Vis)로 계산할 수 있다. 그리고 본 연구에서는 550nm의 파장에 대한 물리량이 주로 사용되므로 이후 언급되는 τ_{MODIS} 와 에어러솔 소산계수는 이 파장에 해당된다.

$$Vis = \frac{3.912}{\sigma_{Ext}(0)} \quad (3)$$

따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 τ_{MODIS} 값으로부터 시정거리를 알기 위하여 소산계수의 연직적 분포에 대한 정보가 필요하다. 에어러솔의 연직분포는 고도가 높아짐에 따라 지수적으로 감소하는 형태를 보이는 것으로 알려져 있으므로(Elterman, 1970; McClatchey *et al.*, 1972; Hess *et al.*, 1998), 식 (2)에서 에어러솔 소산계수는 고도에 대한 지수함수로 식 (4)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{Ext}(z) = \sigma_{Ext}(0) \cdot \exp\left(\frac{-z}{H}\right) \quad (4)$$

식 (4)의 지수항의 H 는 고도에 따른 에어

러솔의 지수적 감소 정도를 결정하는 척도 고도(scale height)이다. 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 적분하면 지수항이 매우 작아지므로, 식 (5)와 같이 간단하게 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_{MODIS} &= \sigma_{Ext}(0) \cdot H \cdot \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\infty}{H}\right) \right\} \\ &\simeq \sigma_{Ext}(0) \cdot H \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)로부터 소산계수를 구하기 위하여 척도 고도가 필요하므로, 본 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 시정거리 자료와 식 (3)으로부터 $\sigma_{Ext}(0)$ 를 구하여 식 (5)에서 척도 고도를 결정한다. 이후 식 (4)를 이용하여 에어러솔 소산계수의 연직분포를 모델링 할 수 있다.

식 (3)과 식 (5)를 결합하면, 시정거리는 와 척도 고도의 함수로 표현된다. 따라서 MODIS의 각 픽셀별 AOT와 위에서 결정된 척도 고도 값으로부터 시정거리를 결정할 수 있다.

$$Vis = \frac{3.912}{\tau_{MODIS}} H \quad (6)$$

이상과 같이, τ_{MODIS} 로부터 계산된 에어러솔 연직분포와 시정거리자료는 이미지와 HDF 포맷으로 저장된다. 그리고 MODIS 영상자료의 기하정보와 함께 Keyhole Markup Language(KML) 형식으로 코딩되며, KML 파일과 함께 τ_{MODIS} 지도, 그리고 지상에서의 각 관측 지점별 에어러솔 연직분포도와 함께 압축파일 형식인 KMZ 형식으로 최종 저장된다.

에어러솔 척도 고도

위성관측 자료에서 분석된 에어러솔 척도 고도 및 소산계수의 연직분포 결과의 정확도를 분석하기 위해서는 지상에서 관측된 자료와 비교하는 것이 이상적이나, 현실적으로 장기간에

걸친 다양한 지점에서의 지상관측자료의 확보가 어렵고, 본 연구의 범위를 벗어나므로 실제 널리 사용되고 있는 복사전달 모델의 표준대기 모델과 비교분석을 통하여 모델의 가능성을 평가하였다. 그림 2는 복사전달 모델인 Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum(6S) (Vermote *et al.*, 1997)에서 사용하고 있는 표준 대기 에어러솔의 연직 구조와 본 연구에서 사용되는 에어러솔 연직분포 모델 결과를 비교한 그림이다. 복사전달 모델에서 사용하고 있는 에어러솔의 연직분포는 지상에서의 시정거리가 5km와 23km인 경우에 대하여 AOT값은 0.82와 0.26, 척도 고도는 0.99km와 1.45km로 정의되며, 일반적으로 사용되고 있는 표준화된 대기 에어러솔의 상태를 제시해준다. 6S의 표준 대기 에어러솔 프로파일과 본 연구에서 제시한 연직분포 모델의 비교결과는 비교적 잘 일치하였다. 시정거리가 5km의 경우는 고도가 높아질수록 약간의 불일치하는 점이 존재하였다. 6S와 광학특성 모델 결과에 대한 절대오

차($\Delta\sigma = \frac{1}{n} \sum (\sigma_{Ext}^{6S}(z) - \sigma_{Ext}^{Model}(z))$)는 표 1과 같이, 시정거리 5km와 23km의 경우에 각각 0.001km^{-1} , 0.0003km^{-1} 으로 매우 적은 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시된 에어러솔 연직구조 모델결과의 유용성이 충분히 검증되었다고 할 수 있다.

MODIS 위성자료 중 한반도 전역에 대하여 구름의 영향이 없고 결측치가 거의 없는 경우를 사례일(2012년 4월 26일과 2012년 5월 9일)로 선정하여 대기 에어러솔 척도 고도를 산정하였다. 2012년 4월 26일의 경우, 전국 40개 기상관측소(표 2 참조)에서 관측된 시정거리의 평균값은 약 $21.13 \pm 3.31\text{km}$ 로서 매우 큰 시정 거리를 가지는 대기상태로 기록되었다. 그리고 Terra/MODIS 위성은 약 12:00LT 경 한반도 상공을 통과하였으며, τ_{MODIS} 값은 0.12 ± 0.07 의 범위 안에 있어 매우 청명한 대기 조건이라고 할 수 있다(그림 3). 그러나 2012년 5월 9일은 전국적으로 연무현상이 보고되었으며, 그림 3의 τ_{MODIS} 결과에서도 다소 높은 AOT값이 나타나고 있다.

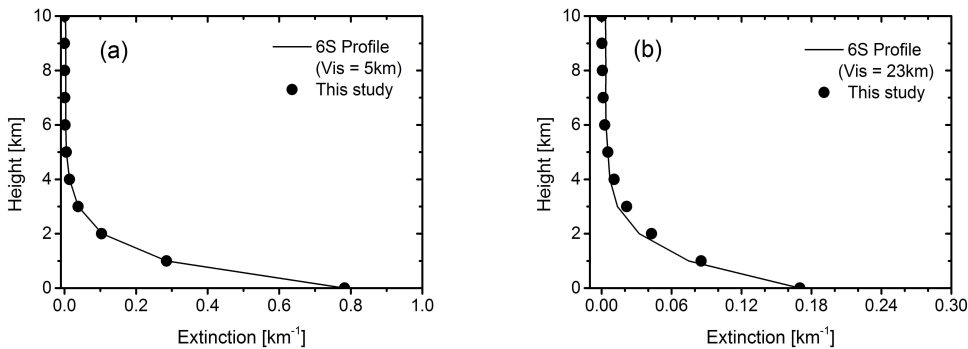


FIGURE 2. Comparison of the standard aerosol extinction profiles from 6S radiative transfer model for different visibility conditions(solid lines) and modeled extinction profiles(solid circles) suggested by this study

TABLE 1. Comparisons of extinction profiles from 6S and modelling in this study

6S Visibility	Abs. Difference [km ⁻¹]
5km	0.001
23km	0.0003

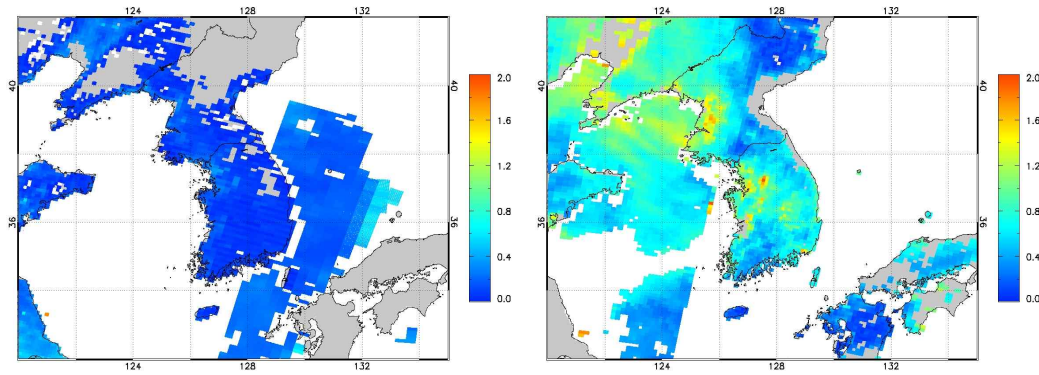


FIGURE 3. Aerosol optical thickness from the Terra/MODIS on 26 April 2012(left) and 9 May 2012(right)

이 당시 시정거리의 평균값은 약 13.33 ± 5.66 km로서 4월 26일과 비교하여 시정 거리가 매우 작아졌음을 알 수 있다. 그리고 τ_{MODIS} 값은 1.71 ± 0.85 의 범위 안에 있어 혼탁한 대기 조건이라고 할 수 있다.

표 2는 2012년 4월 26일 Terra/MODIS가 한반도를 통과하는 정오 시간의 전국 40개 기상 관측소에서 관측된 시정 거리와 τ_{MODIS} 를

이용하여 계산한 척도 고도를 나타내었다. 전국적으로 청명한 대기 조건하에서 척도 고도는 약 0.63 ± 0.33 km의 범위를 나타내었다. 이러한 값의 범위는 Qiu *et al.*(2005)이 중국 11개 도시 지역에서 1994년부터 2001년 까지 지상 관측 자료로부터 분석된 척도 고도의 연평균 값인 1.94km 보다는 낮은 값이다. 이러한 결과는 τ_{MODIS} 값이 상대적으로 낮은 대기

TABLE 2. 40 meteorological observation sites for visibility used in this study. observed data on 26 April 2012 are listed

Name	Latitude	Longitude	Visibility	AOT	Scale height	Name	Latitude	Longitude	Visibility	AOT	Scale height
Seoul	37.57	126.95	20	0.17	0.87	Mokpo	34.82	126.37	20	0.16	0.84
Baengnyeongdo	37.95	124.62	20	NA	NA	Heuksando	34.68	125.45	12	NA	NA
Incheon	37.47	126.62	20	0.22	1.13	Wando	34.38	126.70	20	0.20	1.02
Suwon	37.27	126.98	17	0.37	1.61	Yeosu	34.73	127.73	20	0.17	0.87
Cheorwon	38.13	127.30	20	0.15	0.77	Jindo	34.47	126.32	20	0.16	0.80
Chuncheon	37.90	127.73	20	0.06	0.33	Suncheon	35.02	127.37	18	0.05	0.23
Wonju	37.33	127.93	20	0.08	0.40	Jeju	33.50	126.52	25	0.15	0.95
Sokcho	38.25	128.55	20	0.05	0.26	Gosan	33.28	126.15	15	0.15	0.57
Bukgangneung	37.80	128.85	20	0.03	0.15	Seogwipo	33.23	126.55	25	0.15	0.95
Daegwallyeong	37.67	128.72	20	0.08	0.39	Seongsan	33.38	126.87	20	0.12	0.63
Ulleungdo	37.47	130.88	25	0.14	0.90	Uljin	36.98	129.40	20	0.03	0.14
Cheongju	36.63	127.43	20	0.10	0.49	Andong	36.57	128.70	20	0.11	0.57
Seosan	36.77	126.48	20	0.17	0.84	Deagu	35.88	128.62	25	0.05	0.35
Daejeon	36.37	127.37	20	0.07	0.36	Pohang	36.02	129.37	25	0.09	0.55
Cheonan	36.77	127.12	20	0.25	1.29	Busan	36.10	129.02	30	0.08	0.61
Boryeong	36.32	126.55	20	0.11	0.57	Ulsan	35.55	129.32	25	0.06	0.39
Gunsan	36.00	126.75	20	0.10	0.49	Changwon	35.17	128.57	25	0.09	0.59
Jeonju	35.82	129.15	20	0.11	0.56	Tongyeong	34.83	128.43	25	0.08	0.54
Gochang	35.33	126.58	20	0.17	0.86	Jinju	35.15	128.03	25	0.07	0.45
Gwangju	35.17	126.88	20	0.05	0.23	Geochang	35.67	127.90	28	0.04	0.25

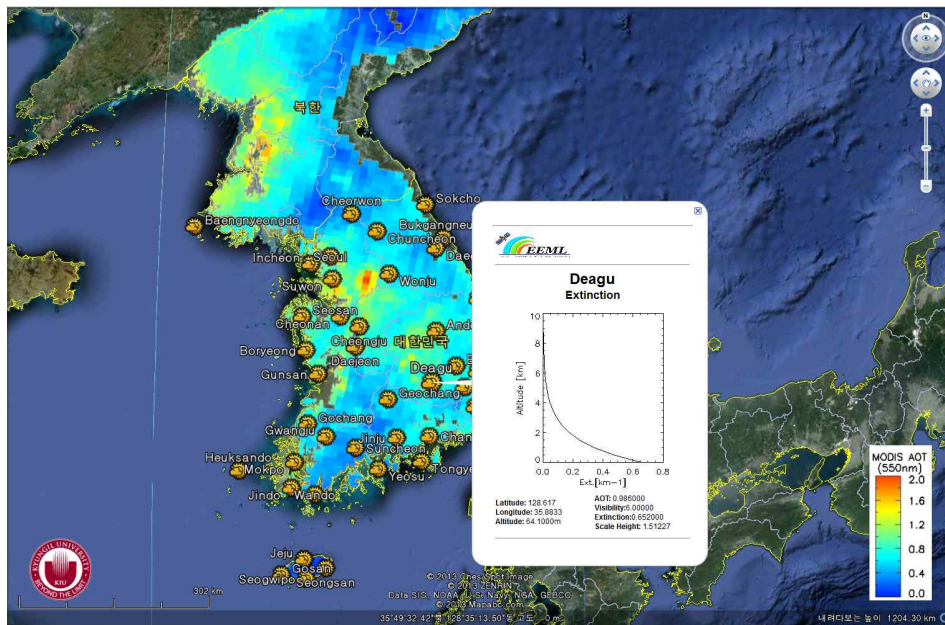
조건하에서 대기 에어러솔의 연직분포가 다른 경우보다도 낮은 고도를 유지하였기 때문이다. 표 3은 2012년 5월 9일 연무일에 해당하는 결과로서, 척도 고도는 약 $1.71 \pm 0.84 \text{ km}$ 의 범위를 나타냈으며 이전에 언급한 중국 지역의 관측결과와 비슷한 수준을 나타내었다. 이 결과는 대기중의 연무현상이 짙어지면서 에어러솔층이 증가함으로 인하여 척도 고도 값이 증가한 것으로 판단된다.

에어러솔 연직분포 가시화

이전에 결정된 에어러솔 척도 고도 자료를 이용하여 에어러솔 소산계수의 연직분포 모델링을 수행하였다. 이 과정에서 IDL 코딩을 통하여 MODIS 자료 입력, 자료 처리 후 생성되는 τ_{MODIS} 맵은 png 이미지 형식으로 저장된다. 그리고 각 기상관측 지점에서의 시정거리 정보는 해당 위치의 τ_{MODIS} 와 함께 에어러솔 소산계수의 연직분포를 계산하며, 그 결과는

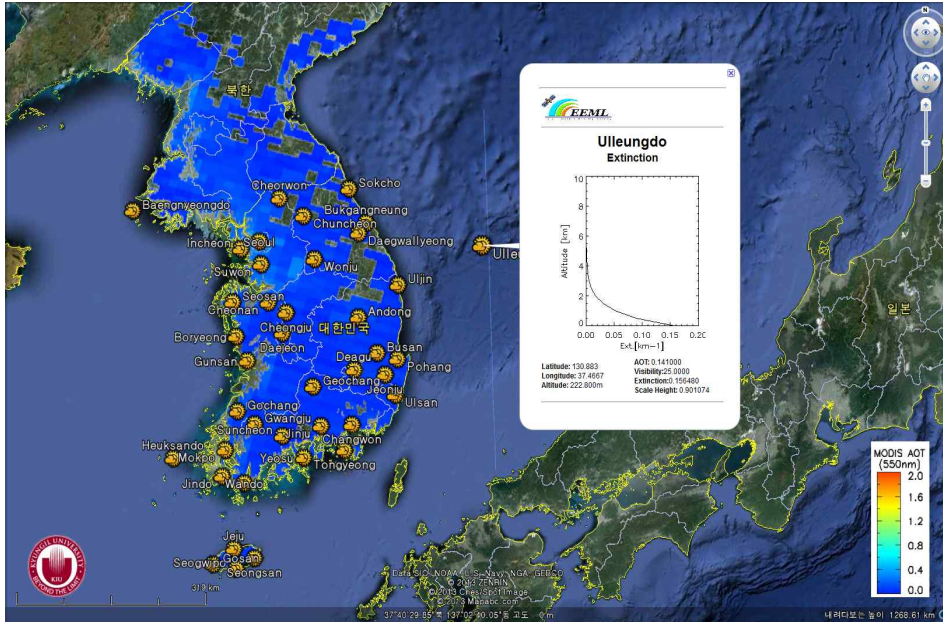
선형 그래프로서, png 이미지 형식으로 저장하였다. IDL을 이용한 입력자료처리 과정에서 생성되는 결과 수치와 이미지 형식의 자료는 구글 어스로 가시화하기 위하여 KML 형식의 파일로 재 코딩되었다. 그림 4는 2012년 4월 26일과 5월 9일의 분석 결과를 구글 어스로 가시화한 결과로서, 기본 배경에 중첩된 τ_{MODIS} 가 전국적인 에어러솔의 분포양상에 관한 정보를 제공해주며, 기상관측지점에 대한 아이콘을 선택 시 각 지점에 해당하는 위치정보와 τ_{MODIS} , 시정거리, 광 소산계수, 척도 고도에 관한 정보가 수치값으로 제공되며 에어러솔 연직분포도도 함께 보여진다. 따라서, 인공 위성 관측자료와 지상관측자료 그리고 이를 해석한 수치모델링과정을 통하여 대기 에어러솔에 관한 정보를 보다 편리하게 종합적으로 가시화할 수 있다.

기상 관측을 통한 시정거리와 인공위성으로부터 획득된 AOT는 모두 에어러솔에 의한 함수이지만, 관측 기기의 특성상 관측방향이



(a)

FIGURE 4. Google earth result for MODIS AOT map with modeled aerosol extinction profile for (a)24 April 2012 and (b)9 May 2012



(b)

FIGURE 4. Continued

지면에 수평 방향(시정관측)과 연직 방향(인공위성)이므로 서로 다른 차이점이 존재한다. 시정거리의 관측은 넓은 지역을 대상으로 지표에서 수행되므로 광 경로상의 에어러솔 부하량의 변화 특성을 제대로 반영하지 못하며, 방위각에 따라 서로 다른 시정거리값이 제시되지 못하고 있다. 반면에 인공 위성이 관측한 AOT는, 위성 탑재 센서의 공간적 해상도에 따라 픽셀별 해당 영역에 존재하는 모든 에어러솔 입자와 관련되어 있으므로 공간적 분포를 표현하는데 더욱 적합하다. 비록, 인공 위성 관측자료가 모든 대기 연직분포상에 존재하는 에어러솔의 양을 종합한 결과이지만, 적절한 가정을 통하여 에어러솔의 연직구조를 도출할 수 있다.

요약 및 결론

본 연구는 MODIS 위성의 대기 에어러솔 분석자료인 τ_{MODIS} 와 국내 40개 기상관측소에서 측정되고 있는 시정거리자료를 이용하여

대기 에어러솔의 연직분포를 산출하였다. 자료처리 과정은 IDL을 이용하여 위성자료의 전처리 및 지상관측자료의 입출력, 그리고 구글 어스에서 가시화를 위한 KML 코딩까지 포함되어 있는 시스템을 구축하였다. 사례 연구를 통하여 τ_{MODIS} 와 시정거리 자료는 물리적 방정식을 이용한 에어러솔 소산계수의 연직 분포 모델링 기법을 이용하여 에어러솔 척도 고도와 고도별 소산계수를 계산하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 인공위성으로부터 관측된 AOT는 대기 연직 경로상에 존재하는 에어러솔의 총량을 대표하는 물리량이지만, 지상에서 관측된 시정거리 값을 이용하여 에어러솔의 척도 고도와 소산계수의 연직분포를 계산할 수 있었다.

둘째, 사례 연구결과, 비교적 에어러솔의 영향이 적고 청명한 대기상태인 경우($\tau_{\text{MODIS}} = 0.12 \pm 0.07$, 시정거리 = $21.13 \pm 3.31 \text{ km}$), 척도 고도의 전국 평균값은 $0.63 \pm 0.33 \text{ km}$ 의 결과를 보였다. 이에 반해 연무현상이 심했던 경


우 ($\tau_{\text{MODIS}}=1.71\pm 0.85$, 시정거리=13.33±5.66km)는 대기가 혼탁한 경우로서 척도 고도의 값이 $1.71\pm 0.84\text{km}$ 로 나타났으며, 이러한 범위의 척도 고도 값은 중국의 대도시 지역에서 관측된 결과와 비교할 만 하였다.

셋째, 인공위성 관측 자료를 이용하여 대기 에어러솔의 척도 고도를 산출한 결과는 국내에서는 최초 사례이며, 향후 다양한 위성 센서 자료를 이용하여 시공간적 해상도를 높이기 위한 추가연구의 필요성이 있다. 이러한 결과는 대기 에어러솔에 의한 환경변화감시 및 기후에 미치는 영향에 관한 모델링에 필요한 기본 자료로 활용가능할 것이다.

넷째, 본 연구의 단점으로는, 지상에서 관측된 시정거리의 해상도가 다소 간략히 표현되어 있는 점과 인공위성 관측 시 구름의 영향을 많이 받는 점이다. 그리고 에어러솔 연직구조 산출 모델링에서 사용된 가정으로서 에어러솔의 연직분포가 지수함수라는 가정을 사용하였기 때문에, 황사 현상과 같이 높은 고도에서 빠르게 이동하는 에어러솔 현상에 대해서는 오차가 커진다는 점이 있지만, 비교적 안정된 대기조건 하에서는 이러한 가정이 충분히 활용 가능함을 증명하였다.

다섯째, 또한 프로그래밍 과정을 통하여 대용량 자료의 수치적 계산과정과 결과 DB구축 과정, 그리고 GIS를 이용한 대기환경 자료의 가시화 과정이 동시에 진행되므로, 준 실시간으로 관련 정보를 제공할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

Elterman, L. 1970. Relationships between vertical attenuation and surface

meteorological range. *Applied Optics* 9 (8):1804-1810.

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(16):2495-2509.

Hess, M., P. Koepke and I. Schult. 1998. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(5):831-844.

Kaufman, Y.J., D. Tanré, H.R. Gordon, T. Nakajima, J. Lenoble, R. Frouin, H. Grassl, B.M. Herman, M.D. King and P.M. Teillet. 1997. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research* 102(D14):16815-16830.

Kim, N.S. and S.Z. Jin. 2011. A study on the web-based representation of thematic maps using geoweb platform. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(1): 107-117 (김남신, 김석주. 2011. GIS와 지오웹 플랫폼을 활용한 웹기반 주제도 표현에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 14(1): 107-117).

Koschmieder, H. 1924. Theorie der horizontalen Sichtweite. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre* 12(33-53):171-181.

Lee, K.H. 2011. Spatial analysis of major atmospheric aerosol species using earth observing satellite data. *Journal of the Korean Association of Geographic*

- Information Studies 14(2):109-127 (이권호. 2011. 지구관측 위성자료를 이용한 주요 대기 에어러솔 성분의 공간분포 분석. 한국지리정보학회지 14(2):109-127).
- Lee, K.H. 2012. Aerosol direct radiative forcing by three dimensional observations from passive- and active-satellite sensors. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 28(2):159-171 (이권호. 2011. 수동형-능동형 위성센서 관측자료를 이용한 대기 에어러솔의 3차원 분포 및 복사강제 효과 산정. 한국대기환경학회지 28(2):159-171).
- Lee, K.H. 2013. Three dimensional monitoring of the Asian dust by the COMS/GOCI and CALIPSO satellites observation data. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 29(2):199-210 (이권호. 2013. 천리안 위성 해양탐재체와 위성탐재 라이다 관측자료를 이용한 황사 에어러솔의 3차원 모니터링. 한국대기환경학회지 29(2):199-210).
- Lee, K.H., J.E. Kim, Y.J. Kim, A.S. Suh, and M.H. Ahn. 2002. Monitoring of atmospheric aerosol using GMS-5 satellite remote sensing data. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 5(2):1-15 (이권호, 김정은, 김영준, 서애숙, 안명환. 2002. GMS-5 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 대기 에어러솔 모니터링. 한국지리정보학회지 5(2):1-15).
- Lee, K.H. and S.S. Park. 2012. Relationship between PM2.5 mass concentrations and MODIS aerosol optical thickness at Dukjuk and Jeju island. Korean Journal of Remote Sensing 28(4):449-458 (이권호, 박승식. 2012. 제주도와 덕적도에서 관측된 초미세 입자(PM2.5) 농도와 MODIS 에어러솔 광학 두께와의 관계. 대한원격탐사학회지 28(4):449-458).
- Lee, K.H., Z. Li, Y.J. Kim and A. Kokhanovsky. 2009. Atmospheric aerosol monitoring from satellite observations: a history of three decades. In: Y.J. Kim et al.(Eds.). Atmospheric and Biological Environmental Monitoring. Springer, pp.13-38.
- McClatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz and J.S. Garin. 1972. Optical properties of the atmosphere. 3rd Ed. AFCRL Environ. Res. Papers No.411,108pp.
- Middleton, W. 1952. Vision Through the Atmosphere. University of Toronto Press. 250pp.
- Nichol, J.E., M.S. Wong and J. Wang. 2010. A 3D aerosol and visibility information system for urban areas using remote sensing and GIS. Atmospheric Environment 44(21-22):2501-2506.
- Qiu, J., X.M. Zong and X.Y. Zhang. 2005. A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile. Journal of Aerosol Science 36(3):361-371.
- Remer, L.A., Y.J. Kaufman, D. Tanré, S. Mattoo, D.A. Chu, J.V. Martins, R.-R. Li, C. Ichoku, R.C. Levy, R.G. Kleidman, T.F. Eck, E. Vermote and B.N. Holben. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products and validation. Journal of the Atmospheric Sciences 62(4):947-973. doi:http://dx.doi.org/10.1175/JAS3385.1.
- Retalis, A., D.G. Hadjimitsis, S. Michaelides,

- F. Tymvios, N. Chrysoulakis, C.R.I. Clayton and K. Themistocleous. 2010. Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(3):421-428. doi:http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-421-2010.
- Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman and J.J. Morcrette. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(3):675-686.
- Wong, M.S., J.E. Nichol and K.H. Lee. 2009. Modeling of aerosol vertical profiles using GIS and remote sensing. *Sensors* 9(6):4380-4389. doi:http://10.3390/s90604380. **KAGIS**