천리안위성 기상 탑재체의 가시 채널 관측을 이용한 지표면 반사도 산출 - 배경광학두께 보정의 효과 분석 -

김미진* · 김 준*[†] · 윤종민**

*연세대학교 대기과학과/지구환경연구소

**Atmospheric Chemistry Department, Max-Planck-Institute for Chemistry(Otto Hahn Institute),
Hahn-Meitner-Weg 1,D-55128 Mainz, Germany

Estimation of Surface Reflectance by Utilizing Single Visible Reflectance from COMS Meteorological Imager - Analysis of BAOD correction effect -

Mijin Kim*, Jhoon Kim*[†] and Jongmin Yoon**

*Global Environment Laboratory, Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University

**Atmospheric Chemistry Department, Max-Planck-Institute for Chemistry(Otto Hahn Institute),
Hahn-Meitner-Weg 1,D-55128 Mainz, Germany

Abstract : Accurate correction of surface effect from back scattered solar radiance is one of key issue to retrieve aerosol information from satellite measurements. In this study, two different methods are applied to retrieve surface reflectance by using single visible channel measurement from meteorological imager onboard COMS. The first one is minimum reflectance method, which composes the minimum value among previously measured reflectances at each pixel over a certain search window length. This method assumes that the darkest pixel corresponds to the aerosol-free condition, and deduces surface reflectance by correcting atmospheric scattering from the measured visible reflectance. The second method, named as the “atmospheric correction method” in this study, estimates the result by correcting aerosol and atmospheric scattering with ground-based observation of aerosol optical properties. The purpose of this study is to investigate the retrieval accuracy of the widelyused minimum reflectance method. Also, the retrieval error caused by the loading of background aerosol is mainly estimated. The comparison between surface reflectances retrieved from the two methods shows good agreement with the correlation coefficient of 0.87. However, the results from the minimum reflectance method are slightly overestimated than the values from the atmospheric correction method when surface reflectance is lower than 0.2. The average difference between the two results is 0.012 without the background aerosol correction. By considering

접수일(2014년 9월 18일), 수정일(1차 : 2014년 10월 2일), 게재확정일(2014년 10월 10일).

[†] 교신저자: 김 준(jkim2@yonsei.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

the background aerosol effect, however, the difference is reduced to 0.010.

Key Words : COMS, MI, Surface Reflectance, AERONET, Background aerosol optical depth

요약 : 인공위성의 가시 영역 관측으로부터 에어로솔의 정량적인 정보를 산출하는데 있어, 지표면 반사도의 보정은 매우 중요한 역할을 한다. 이에 본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 천리안위성의 기상탑재체로부터 관측된 가시채널의 반사도로부터 지표면 반사도를 산출하고, 상호 비교 하여 정확도를 검증하고자 하였다. 첫 번째 방법은 최소 반사도법으로, 동일한 화소에서 일정 기간 동안 관측된 반사도 중 최소값이 에어로솔에 의한 영향 없이 지표반사에 의한 영향만을 포함한다는 가정을 기반으로, 대기산란 효과를 보정하여 지표면 반사도를 산출하는 방법이다. 두 번째 방법은 미리 알고 있는 에어로솔 정보를 고려하여 대기-에어로솔 효과를 보정함으로써 지표면 반사도를 얻는 것으로 본 연구에서 대기 보정법이라 칭한다. 두 번째 방법을 적용하기 위해서는 정확한 에어로솔 정보가 요구되므로, 에어로솔 광학두께의 오차범위가 0.01 (≥ 440 nm) 이내인 것으로 알려진 AERONET의 산출물을 이용하였다. 본 연구의 주요 목적은 최소 반사도법을 통하여 산출되는 지표면 반사도가 어느 정도의 정확도를 가지는지를 파악하는데 있어, 대기 보정법을 통하여 산출되는 값을 기준 값으로 두고 비교 분석을 수행하였다. 또한, 대기 중 존재하는 배경광학두께가 최소 반사도법의 정확도에 미치는 영향을 분석해보고자 하였다. 서울 지역에서 2012년 봄철 기간(3월 ~ 5월) 동안 AERONET 관측지점에서 산출된 결과를 분석 한 결과, 대기 보정법을 통해 산출된 지표면 반사도의 평균이 0.108로 나타났고, 배경광학두께에 대한 고려 없이 최소 반사도법을 통하여 산출된 지표면 반사도는 그에 비해 약 0.012 높은 값을 보였다. 한 편 배경광학두께를 고려하였을 경우 그 차이는 0.010으로 감소하여, 정확도 향상에 기여하였음을 확인하였다.

1. 서론

대기 중 존재하는 에어로솔은 태양에너지를 흡수/산란시켜 지구 대기의 복사 수지에 직접적인 영향을 미치는 한편, 구름 입자로서의 역할을 하여 간접적인 기후변화 효과를 야기한다(Stocker *et al.*, 2013). 에어로솔이 산업활동이나 인제건강 면에 미치는 영향 또한 매우 크다. 호흡을 통하여 인체에 유입된 에어로솔이 건강에 영향을 미치거나, 정밀함을 요구하는 산업 등에 피해를 줌으로써 경제적인 불이익을 유발할 수 있다. 이에 위성관측을 이용한 에어로솔의 정량적 측정 및 특성분석은 다양한 분야에서 관심을 집중 받고 있다. 특히 동북아시아 지역에서는 다량의 에어로솔이 발생할 뿐 아니라, 편서풍에 의한 원거리 수송이 활발하여 기후변화에 큰 역할을 하므로 집중적 관측이 요구된다(e.g. Lee *et al.*, 2004).

위성에서 관측되는 대기상한반사도는 공기 분자에 의한 레일리 산란, 에어로솔에 의한 미 산란, 그리고 지표면 반사도에 따라 결정되며, 파장이 적외선 영역으로 근접해 갈수록, 지표면 반사에 의한 비중이 증가한다(Hsu *et al.*, 2004). 이에 따라, 위성 관측으로부터 에어로

솔 정보를 산출하기 위한 첫걸음은 지표면 반사도 효과를 제거하는 것에서부터 시작되어야 한다. Zhang *et al.*(2001)에 따르면, 에어로솔 광학두께(aerosol optical depth, AOD)가 0.5 일 경우 1%의 지표면 반사도 오차는 10%의 에어로솔 광학두께 산출 오차를 유발한다. 또한, 지표가 밝을수록, 에어로솔 광학두께가 낮을수록 그 영향력은 더 증가한다. 따라서 다양한 연구들이 에어로솔 산출의 정확도를 높이기 위한 지표면 반사도 산출 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 에어로솔 산출 알고리즘은 에어로솔 산란에 의한 영향이 적은 근적외 채널($2.1 \mu\text{m}$)에서 관측된 반사도와 가시 영역의 지표면 반사도 사이에 선형 상관관계가 있음을 가정하여 지표 정보를 산출한다(Levy *et al.*, 2007; Remer *et al.*, 2005). 다중 각도 관측을 이용하여 지표의 양방향 반사율(bidirectional reflectance)을 고려하여 지표면 반사도를 보정해주는 알고리즘 또한 개발된 바 있다(Lyapustin *et al.*, 2011). 이 외에 최소 반사도법(minimum reflectance method)이 지표 정보 보정을 위해 널리 사용되고 있는데(Kim *et al.*, 2014; Knapp *et al.*, 2002; Lee *et al.*,

2010; Wong *et al.*, 2010), 가시 채널 관측만을 이용하거나, 정지궤도 위성 관측을 이용할 경우 유용하다.

본 연구는 천리안위성에 탑재된 기상탐체채 (meteorological imager, MI)관측으로부터 동아시아영역의 에어로솔 광학두께를 산출하는 과정에서 추정되는 지표면 반사도의 정확도를 분석하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서 사용된 방법은 최소 반사도법으로, 정지궤도상에서 단일 가시 채널만을 통하여 관측을 수행하는 MI로부터 결과를 얻어내기에 적합하다. 또한 황해를 둘러싼 해안영역에서 빈번하게 발생하는 탁류지역의 지표면 반사도를 구하는데 있어서도 최소 반사도법이 선호되고 있다(Lee *et al.*, 2010). 최소 반사도법은 일정 기간 동안 최소 하루 이상은 에어로솔의 영향을 받지 않는 날이 존재함을 가정하고, 동일한 화소에서 관측된 대기상한반사도로부터 대기산란효과를 보정한 후 그 최소값을 지표면 반사도로 정의하는 방법이다. 이는 대기 중 에어로솔 광학두께를 미리 알 수 없을 때 사용되기에 적합하나, 대기 중 에어로솔에 의한 영향을 받지 않는 날이 존재한다는 가정을 만족하지 않을 경우 산출 오차가 발생한다는 단점이 있다. 특히 산업발달로 인해 지속적인 에어로솔 배출이 이루어지고 있는 동아시아 영역의 경우 이러한 가정이 만족되기 어렵다. 이에 본 연구에서는 동아시아 영역의 배경광학두께, 즉, 대기 중에 최소한 존재하는 에어로솔 광학두께를 분석하여 이를 최소 반사도법에 적용함으로써 산출의 정확도를 높이고자 하였다. 배경광학두께를 적용하여 MI 에어로솔 광학두께 산출물의 정확도를 높이는 연구는 Kim *et al.*(2014)에서 수행되어 보여진 바 있으나, 해당 연구에서 지표면 반사도의 정확도 변화는 제시되지 않았다. 이에 본 연구에서는 지상관측을 통하여 얻어진 에어로솔 광학두께 및 특성을 이용하여 에어로솔과 공기분자에 의한 산란 효과를 관측된 대기상한반사도로부터 보정해줌으로써 지표면 반사도를 산출하여 이를 기준값으로 정의하였다. 이러한 방법은 Knapp *et al.* (2005)에서 GOES 가시 채널로부터 에어로솔 정보를 산출하기 위해 얻어진 지표면 반사도를 검증하기 위해서 사용된 바 있다. 본 연구에서는 이를 “대기 보정법”으로 명명하였다.

지표면 반사도의 산출 및 검증은 2012년 3월부터 월 동안 서울 부근에서 수행된 Aerosol Robotic Network (AERONET) 태양 광도계(sun photometer)의 집중관측

자료를 이용하여 수행되었다. 대기 보정법을 적용하는데 있어 높은 정확도를 가지는 지상 에어로솔 관측값이 요구되는데, 잘 보정된 태양 광도계를 조밀한 간격으로 배치해서 서울부근 전반의 에어로솔 광학특성을 산출한 해당 자료가 정확도 및 활용도가 높을 것으로 기대할 수 있다. 또한 인구밀도가 높고, 편서풍 기류를 따라 에어로솔이 유입되는 빈도가 높은 서울지역에서 배경광학두께에 의한 효과를 확인하기에 적합할 것으로 기대된다.

2. 연구자료 및 방법

1) MI, COMS

천리안위성은 기상관측, 해양관측, 통신서비스 임무를 수행하기 위해서 2010년 6월 27일 발사되었으며, 한국 최초의 정지궤도위성으로서 지구적도 상공 36000 km 고도, 동경 128.2도에 위치해 관측을 수행하고 있다. 그 중 MI는 시공간적인 고해상도 관측을 통하여 기상현상을 연속감시하고 기상요소를 산출하는데 그 목적이 있다. MI에는 하나의 가시 채널과 4개의 적외 채널(단파적외, 수증기, 적외1, 적외2 채널)이 존재하는데, 가시채널의 공간해상도는 $1 \times 1 \text{ km}^2$, 적외채널의 공간해상도는 $4 \times 4 \text{ km}^2$ 이며, 전구관측의 경우 27분, 북반구관측의 경우 15분 이내의 시간간격을 가지고 관측을 수행한다. MI의 각 채널별 파장범위 및 반응함수를 Fig.1에서 보았다.

본 연구에서는 구름 화소 탐지를 위해서 적외채널이 이용되었고, 지표면 반사도 산출은 가시채널 정보를 이

Fig. 1. Relative spectral response of MI.

Table 1. Summary of location and average aerosol optical properties at each AERONET site; (Refr.: refractive index). Unlike other AOPs were obtained from AERONET measurement, BAOD was obtained from MODIS measurement

Site	lat. (°N)	lon. (°E)	elev. [m]	AOD [550 nm]	BAOD [550 nm]	SSA [675 nm]	Re[Refr.] [675 nm]	Im[Refr.] [675 nm]
DRAGON_Guwol	37.45	126.72	38	0.42 ± 0.24	0.128	0.95 ± 0.02	1.48	0.0040
DRAGON_Hankuk_UFS	37.34	127.27	16	0.38 ± 0.22	0.017	0.93 ± 0.02	1.48	0.0065
DRAGON_Konkuk_Univ	37.54	127.08	40	0.40 ± 0.22	0.053	0.95 ± 0.02	1.47	0.0046
DRAGON_Korea_Univ	37.59	127.03	65	0.44 ± 0.24	0.053	0.94 ± 0.02	1.46	0.0049
DRAGON_NIER	37.57	126.64	26	0.37 ± 0.21	0.090	0.95 ± 0.02	1.48	0.0039
DRAGON_Sanggye	37.66	127.07	35	0.46 ± 0.27	0.014	0.94 ± 0.02	1.48	0.0052
DRAGON_Sinjeong	37.52	126.86	27	0.39 ± 0.23	0.128	0.94 ± 0.02	1.49	0.0054
DRAGON_Soha	37.45	126.89	48	0.42 ± 0.24	0.053	0.93 ± 0.02	1.47	0.0057
Seoul_SNU	37.46	126.95	11	0.40 ± 0.23	0.053	0.95 ± 0.02	1.46	0.0043
Yonsei_University	37.56	126.94	88	0.38 ± 0.23	0.053	0.95 ± 0.02	1.46	0.0043

Fig. 2. Map of deployed sun-photometer around Seoul during the DRAGON-Asia 2012 campaign.

용하여 산출 되었다.

2) AERONET sun-photometer

AERONET은 전구 범위로 분포하는 태양 광도계 관측을 통하여 에어로솔의 광학적 특성을 산출하는 관측망으로, NASA Goddard Space Flight Center(GSFC)를 통하여 운영 되고 있다(Holben *et al.*, 1998). 직달 관측을 이용한 에어로솔 광학두께와 등고도권 관측(almucantar scenario)을 이용한 에어로솔 광학특성 산출물(단일산란알베도[single scattering albedo, SSA], 입자크기분포[volume size distribution]) 등을 제공하며, 관측 및 산출의 정확도가 높아 에어로솔 특성 분석 및 위성 산출물 검증

에 널리 이용되고 있다. 에어로솔 광학두께의 경우 440 nm 이상에서 0.01이내의 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다(Eck *et al.*, 1999). 본 연구에서는 대기 보정법 사용을 위하여 2012년 수행된 Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks(DRAGON)-Asia 캠페인 기간 동안 서울 부근에서 측정/산출된 에어로솔 광학두께 및 에어로솔 광학특성을 이용하였으며, 사용된 관측지점의 위치 및 자료의 요약을 Table 1, Fig. 2를 통하여 보았다. Table 1에는 각 지점에서 관측된 평균 에어로솔 광학두께, 단일산란알베도, 굴절율(실수부, 허수부)이 표기되어 있고, Fig. 2에 각 지점의 위치를 보인다. 봄철에 서울지역 에어로솔 광학두께의 평균값은 0.37~0.46 사

이에 분포하며, 단일산란알베도는 0.93~0.95 내외의 값을 보인다. 각 지점에서 산출된 에어로솔 입자크기분포는 전반적으로 미세입자와 조대입자, 두 가지 모드를 가지는 것으로 나타나며, 황사 유입의 영향을 반영하여 에어로솔 광학두께가 높아질수록 조대입자가 더 우세함을 보인다. 또한 에어로솔 광학두께가 증가할수록 미세입자의 중심반경이 증가하고, 조대입자의 중심반경이 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같이 에어로솔의 광학적 특성은 발생 사례에 따라 큰 차이를 보여, 대기보정법 사용시 관측 날짜별 일평균 에어로솔 광학특성을 적용하여 분석을 수행하였다.

3) 지표면 반사도 산출

MI 가시채널 관측으로부터 지표면 반사도를 산출하는 흐름도를 Fig. 3을 통하여 보았다. 대기 중 구름이 존재할 경우 지표 및 대기 정보의 산출이 어렵기 때문에 적외채널 밝기온도 경계값과 가시채널 반사도 경계값을 이용하여 구름으로 추정되는 화소를 우선 제거한다. 그 후, 대기 중 에어로솔 광학두께를 가정하여 대기산란효과를 식(1)을 통하여 보정한다.

$$R = (I_{\text{meas.}} - I_0) / (T + S_b(I_{\text{meas.}} - I_0)) \quad (1)$$

식 (1)은 Fraser and Kaufman (1985)에 제시된 것으로, 대기상한반사도와 지표면 반사도, 그리고 대기 산란효과와의 상호관계를 보인다. 식에서 R은 지표면 반사도이며, $I_{\text{meas.}}$ 는 관측된 대기상한반사도를 의미하고, I_0 는 공기분자 및 에어로솔을 포함한 대기층 매질에 의한 반사도를 의미한다. T와 S_b 는 대기 투과율(atmospheric transmittance)과 대기층의 평균반사도(spherical reflectance)를 의미하는 것으로 지표에서 반사된 태양광을 투과/산란시키는 정도를 나타낸다. 대기산란 보정을 위해 사용되는 I_0 , T, S_b 등은 복사전달방정식을 통하여 계산되어 적용되는데, 본 연구에서는 Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum-Vector(6SV)가 사용되었다(Kotchenova and Vermote, 2007; Kotchenova *et al.*, 2006; Vermote *et al.*, 1997).

최소 반사도법을 사용할 경우 에어로솔 광학두께는 배경광학두께로 정의되는데, 이때 배경광학두께는 0으로 가정되거나, Fig. 4에 보인 것과 같이 MODIS 에어로솔 산출물로부터 얻어진 각 화소별 최소 에어로솔 광학두께를 사용한다. 배경광학두께 산출을 위하여 사용된

Fig. 3. Flowchart of the algorithm to retrieve surface reflectance based on the minimum reflectance method.

Fig. 4. Minimum value of AOD retrieved from MODIS measurement from 2006 to 2012.

MODIS 산출물의 기간은 2006년부터 2012년이며, $10 \times 10 \text{ km}^2$ (nadir 기준)의 공간해상도를 가지는 산출물을 0.25×0.25 도 간격으로 격자화한 뒤 이용되었다. MODIS 에서 산출되는 에어로솔 광학두께의 오차 범위는 $\pm(0.05 + 15\%)$ 이내 일 것으로 기대되고, AERONET 관측자료와의 상관지수는 0.9인 것으로 나타나고 있다 (Levy *et al.*, 2010). 대부분의 지역에서 배경광학두께는 0.05 이하의 값을 가지지만, 서울, 오사카, 동경 등 대도시 지역에서는 0.1 이상의 값을 보이며 특히 홍콩 부근과 양쯔강 부근 산업지역은 0.2 이상의 매우 높은 값이 나타나고 있다. 본 연구에서 각 산출지점에 적용된 배경광학두께는 Table 1에 요약되어있다.

한편, 대기 보정법을 이용할 때에는 각 AERONET 지점에서 MI 관측시간에 산출된 에어로솔 광학두께를 적용하게 된다. 앞서 언급되었듯 에어로솔 광학특성은 각 지점별 daily inversion 자료를 이용하여 날짜별로 적용되었다.

대기 보정법을 이용할 경우 식 (1)을 푸는 것으로 지표면 반사도 산출이 완료되지만, 최소 반사도법의 경우 30일 동안 동일한 시간에 산출된 대기상한반사도로부터 대기산란을 보정한 후, 각 화소별 최소값을 찾아 지표면 반사도를 산출하게 된다. 즉, 지표면 반사도 산출을 위해서는 관측 시점 이전의 30일 간 관측된 대기상한반사도가 요구되며, Fig. 3에서 $N(\text{관측일수}) \geq 30$ 이 만족

될 경우에 최소 반사도가 산출됨을 보인다. 최소 반사도법은 어두운 지표 위에서 대기 중 에어로솔 농도가 증가할 때 위성에서 반사도가 증가한다는 점에 기반하므로, 지표가 밝을 경우 적용될 수 없다. 밝은 지표 위에서는 에어로솔 농도가 증가하면서 대기상한반사도가 감소하는 현상이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 최소 반사도법을 통하여 산출되는 지표면 반사도는 0.2 이하의 값을 가질 때 유의미하다고 가정한다.

3. 결과

Fig. 5는 최소 반사도법을 통하여 산출된 지표면 반사도의 한 예시를 보인다. 그림에서 흰색으로 표시된 영역은 지표면 반사도가 0.2 이상으로 산출된 영역으로 사막이나 눈으로 덮인 부분을 나타낸다. 산결 결과는 육지와 해양의 뚜렷한 경계를 드러내며, 한반도 서해안과 중국 양쯔강 하류 부근에서 탁류로 인한 반사도 증가 현상을 잘 드러내고 있다. 또한 중국 산둥반도 안쪽의 산업 지역 또한 매우 높은 지표면 반사도를 가짐을 알 수 있다.

한편, Fig. 6은 대기 보정법을 통한 산출 결과를 보이는 것으로, DRAGON-Asia 캠페인 기간 동안 각 AERONET 지점별로 관측된 대기상한반사도, 에어로솔 광학두께, 그리고 산출된 지표면 반사도의 일 평균 값을

Fig. 5. An example of retrieved surface reflectance by using the minimum reflectance method.

Fig. 6. Daily average of (a) MI TOA reflectance, (b) AERONET AOD, and (c) the AR.

Table 2. Summary of retrieved surface reflectance (AR) by using AOPs obtained from AERONET sun-photometer measurement : Atmospheric correction method.

Site	Mean (AR)	STD (AR)
DRAGON_Guwol	0.106	0.008
DRAGON_Hankuk_UFS	0.093	0.007
DRAGON_Konkuk_Univ	0.092	0.012
DRAGON_Korea_Univ	0.102	0.01
DRAGON_NIER	0.132	0.014
DRAGON_Sanggye	0.095	0.009
DRAGON_Sinjeong	0.107	0.009
DRAGON_Soha	0.104	0.011
Seoul_SNU	0.097	0.009
Yonsei_University	0.096	0.011

보인다. 대기상한반사도와 에어로솔 광학두께는 각각 MI와 AERONET 관측을 통하여 얻어진 값이다. 그림에서 대기상한반사도는 3월에서 5월로 갈수록 전반적으로 감소하는 경향을 보이지만 4월 28일에 황사가 유입되면서 에어로솔 광학두께가 크게 증가하는 동시에 반사도 역시 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 지표면 반사도는 봄철 식생 증가의 영향으로 시간에 따라 감소하는 것으로 나타난다. 대기상한반사도의 지속적인 감소는 지표면 반사도의 감소에 의존하는 것으로 분석된다. 또한 10개의 AERONET 사이트에서 산출된 결과를 비교할 때, 변화의 경향성은 매우 유사하지만 절대

값에서 다소 차이가 있음을 보인다. 각 지점별로 산출된 지표면 반사도의 평균값과 표준편차는 Table 2에 요약되었다. 산업단지 인근에 위치한 국립환경과학원이 0.132로 가장 높은 지표면 반사도를 보였고, 녹지를 많이 포함하는 대학교 캠퍼스 내에 설치된 AERONET 지점, 즉, 한국외국어대학교 (DRAGON_Hankuk_UFS), 건국대학교(DRAGON_Konkuk_Univ.), 서울대학교(Seoul_SNU), 연세대학교(Yonsei_Univ.)에서 비교적 낮은 지표면 반사도를 보였다. 서울 부근의 지표면 반사도는 평균적으로 0.092에서 0.132 범위 내에 분포하는 것으로 보인다.

대기 보정법을 통하여 산출된 지표면 반사도를 기준으로 가정하고, 최소 반사도법을 통하여 산출된 지표면 반사도와의 비교를 보인 산포도가 Fig. 7과 같다. 앞서 언급하였듯 최소 반사도법을 통한 산출은 배경광학두께를 0으로 가정하였을 경우와 MODS에서 얻어진 최소 에어로솔 광학두께를 적용한 두 가지 경우로 나뉘어 산출되는데, Fig. 7 (a)와 (b)는 각각의 산출물을 대기 보정법 산출물과 비교한 결과를 보인다. 그림에서 점의 색깔은 자료 밀집도를 나타낸다. 에어로솔 광학두께가 높을 경우 에어로솔 광학특성의 가정에 따른 지표면 반사도 산출의 오차가 커질 가능성이 증가하므로, 에어로솔 광학두께가 0.5 이상일 경우는 산출 결과 비교검증 시 제외되었다. 또한, 대기 보정법을 이용한 지표면 반사도 산출시, 구름에 의한 오차를 피하기 위하여 대기상한반사도

Fig. 7. Comparisons between AR (x-axis) and R (y-axis). Figure (a) and (b) are comparing results those without BAOD correction and with the correction. The color of symbol indicates data count.

가 0.2 이상일 경우는 산출에서 제외하였다. 이때, 그 경제값은 산출 기간 중 구름이 없을 경우 각 관측지점에서 관측되는 대기상한반사도의 평균값이 0.14인 점에 근거하여 결정되었다.

먼저 배경광학두께가 0으로 가정되었을 경우, 두 지표면 반사도 사이에 상관관계는 0.87로 비교적 높으나 RMSE가 0.009로 추세선을 중심으로 다소 산포되어있는 것을 알 수 있다. 산출물 사이의 선형회귀식은 식 (2)와 같다.

$$R = 0.025 + 0.89 \cdot AR \quad (2)$$

여기서 R과 AR은 각각 최소 반사도법과 대기 보정법을 통하여 산출된 지표면 반사도를 의미한다. 식을 통해 볼 때 지표면반사도가 약 0.23 이하일 경우 R이 AR에 비하여 높게 산출되며, 특히 y 절편이 0.025로 지표면 반사도가 낮을 경우 과대 추정 되는 경향이 더 크다. 한편 Fig. 7(b)와 같이 배경광학두께가 각 화소 별로 0 이상의 값이 적용되었을 경우, y 절편이 0.022로 줄어드는 반면, 기울기는 0.90으로 다소 향상되어, 지표면 반사도가 0.22 이하일 경우 AR과 R사이의 차이가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 8를 통하여 좀 더 자세히 확인할 수 있다. 그림은 R - AR을 관측 시간에 따라 보인 것으로, R이 AR에 비해 전반적으로 높은 경향이 잘 드러나고 있다. 또한 배경광학두께가 적용되지 않았을 경우 평균적

차이가 0.012 인 반면, 적용되었을 경우 0.010으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 비록 그 값의 차이는 크지 않으나, 이를 통하여 배경광학두께를 고려함으로써 대기 산란 보정을 증가시켜 지표면 반사도의 과대 추정을 개선시키는 것을 확인할 수 있다.

한편, 시간 별 분포를 볼 때, 정오에 비하여 태양 천정각이 커질수록 두 산출 값의 차이가 더 넓은 범위 내에서 나타나고 있는데, 이는 태양 천정각이 커질 때 광학경로가 길어지면서 AERONET과 MI관측의 정확도가 감소되는 것에 의한 영향을 반영하는 것으로 여겨진다. 또한, R과 AR간의 차이가 평균치 이상으로 높게 나타나는 경우는 걸러지지 않은 구름에 의한 오차에 기인하는 것으로 추정된다.

Fig. 9(a)와 (b)는 지표면 반사도와 에어로솔 광학두께가 각각 배경광학두께와 지표면 반사도 오차에 대하여 가지는 민감도를 보인다. 민감도 실험을 위하여, 배경광학두께는 0.15, 지표면 반사도는 0.05, 0.10, 0.15, 에어로솔 광학두께는 0.30, 0.45, 0.80, 1.20 일 경우에 대한 대기상한반사도의 계산이 수행되었고, 이를 통해 산출된 값과 가정된 값을 비교함으로써 산출오차를 추정하였다. 앞서 언급된 바와 같이, 배경광학두께가 참값보다 낮은 값으로 가정 될 경우(BAOD error < 0) 지표면 반사도는 높게 산출되는 반면 높은 값으로 가정 될 경우에는 대기산란이 과다 모의 되어 지표면 반사도가 과소 추정 된

Fig. 8. Difference between R and AR [R-AR] with respect to local time. The result in the right panel includes effect of the BAOD correction. Dashed lines in figure (a) and (b) indicate average difference of 0.011 and of 0.009, respectively.

Fig. 9. Retrieval uncertainties (left) in surface reflectance caused by BAOD assumption error, and (right) in AOD caused by the surface reflectance error.

다. 또한 지표면 반사도가 낮을수록 배경광학두께에 대한 민감도는 더 커지는 것으로 나타나, 대기 오염도가 높지 않은 녹지에서도 배경광학두께에 대한 고려가 요구됨을 알 수 있다. 도심지역의 경우 지표면 반사도가 높아 배경광학두께에 대한 민감도가 비교적 낮지만, 높은 배경광학두께로 인하여 그에 대한 고려가 반드시 요구된다. 본 연구에서 적용된 배경광학두께는 산출 지점에 따라 0.014에서 0.128의 분포를 보인다. AR의 평균값에 따라, 지표면 반사도가 0.1 일 경우를 기준으로 하면, 배경광학두께에 0.1만큼의 오차가 발생할 경우 산출되는 지표면 반사도는 0.0025(2.5%) 만큼의 오차를 보인다. Fig. 9(b)에 따르면 이와 같은 오차가 0.45 이하의 값을 가지는 에어로솔 광학두께 산출에 적용되었을 경우, 에어로솔 광학두께는 약 10% 이상의 오차를 가지게 된다. 일반적으로 지표면 반사도의 과소 추정 은 에어로솔 광학두께의 과대 추정을 야기하며, 에어로솔 광학두께가 낮아질수록 그 영향이 크다.

4. 요약 및 결론

위성 관측으로부터의 에어로솔 정보 산출은 대기상한반사도로부터 지표면 반사도 정보를 구분하는 것로부터 시작되어야 한다. 에어로솔 산출 알고리즘 개발

에 있어, 최소 반사도법은 에어로솔에 대한 정보 없이 지표면 반사도를 안정적으로 산출할 수 있으므로 널리 이용되고 있다. 이에 본 연구는 천리안 위성 기상탐체체의 가시광 관측에 최소 반사도법을 적용하여 지표면 반사도를 산출하고, 이를 지상관측을 기반으로 산출한 기준값과 비교하여 정확도를 분석해 보았다. 본 연구에서 지상관측을 기반으로 한 지표면 반사도의 산출은 대기 보정법이라 칭하였는데, 이는 AERONET 관측을 통하여 얻어진 에어로솔 광학두께 및 광학특성을 적용하여 대기 정보를 보정함으로써 지표면 반사도를 산출하는 방법으로 식 (1)을 풀기 위한 모든 입력자료가 존재하므로 높은 정확도를 기대할 수 있다.

최소 반사도법은 어두운 지면 위에서 에어로솔이 증가할 경우 산란 증가효과에 의해 대기상한반사도가 증가한다는 점에 기반하여 개발된 것으로, 가정된 일정 기간 내에 에어로솔의 영향을 받지 않는 날이 하루 이상 존재함을 가정하여, 관측된 반사도의 최소값이 에어로솔 효과를 포함하지 않은 지표면 반사도 효과에 상응한다고 여긴다. 하지만 지속적으로 에어로솔 배출이 이루어지는 산업지역이나 도로 부근 같은 경우 에어로솔의 영향을 받지 않는 날을 찾기 어렵다. 따라서 본 연구는 장기간 동안 MODIS 관측을 통하여 산출된 에어로솔 광학두께의 최소값을 분석하여 이를 배경광학두께라 정의하고, 대기상한반사도의 최소값이 배경광학두께와 지

표면 반사도에 의한 영향으로 결정된다고 가정하였다. 이와 같이 산출된 결과 역시 기준 값과 비교검증 하여, 배경광학두께를 고려하지 않았을 때와의 차이를 비교하였다. MODIS 관측으로부터 배경광학두께를 정의함으로써 그 공간적 변화를 고려할 수 있다는 장점이 있으나, 극궤도위성 관측의 특성 상 에어로솔 광학두께의 일 변화 및 기하학적 특성 변화에 따른 관측신호의 민감도 변화 등이 고려되지 못함은 본 연구의 한계성으로 지적된다.

최소 반사도법을 통하여 산출된 결과는 동아시아의 일반적인 지표 특성을 반영하여 지표면 반사도 분포를 타당하게 추정하는 것으로 보인다. 특히 해안에서 탁류로 인하여 반사도가 증가하는 현상을 잘 포착하고 있어, 해당 영역에서의 에어로솔 정보 산출 정확도 향상에 기여할 것으로 기대된다. 한 편, 대기 보정법은 서울 부근에 밀집된 AERONET 지점에서 2012년 3~5월 동안 산출되었는데, 봄철 식생 성장을 반영하여 시간이 흐를수록 지표면 반사도가 감소하는 경향을 보인다. 대기 보정법을 이용하기 위하여 실시간으로 산출되는 에어로솔 광학두께와 일평균 광학특성이 적용되었지만, 에어로솔 광학두께가 높아질수록 산란효과를 추정하는데 있어 광학특성 가정에 대한 민감도가 커지기 때문에 지표면 반사도 산출에 오차를 유발할 수 있다. 이에 따라, 산출결과와의 비교검증 시 에어로솔 광학두께가 0.5 이하일 때 산출된 결과만을 이용하였다.

지표면 반사도의 비교검증 결과 최소 반사도법을 통하여 산출된 결과는 대기 보정법에 의한 결과와 상관계수 0.87로 높은 상관도를 가짐을 볼 수 있지만, 배경광학두께를 고려하지 않았을 경우 평균적으로 0.012 가량 과대 추정 되는 경향을 보인다. 다만, 태양천정각이 커지는 오전과 오후시간에 기준 값에 대한 산출 오차의 범위가 증가하여 향후 개선이 요구된다.

배경광학두께에 대한 지표면 반사도의 민감도조사에 따르면, 배경광학두께가 실제보다 작은 값으로 가정되었을 경우 지표면 반사도는 과대추정 되는 것으로 나타나고, 그 효과는 지표가 어두울수록 뚜렷하다. 이에 상응하여, 최소 반사도법에 배경광학두께를 고려하였을 경우에는 산출물 간 상관계수는 0.87으로 유사하지만 평균 오차가 0.010으로 감소하여, 기준 값을 대상으로 산출정확도가 향상되는 경향을 보였다.

비록 대기 보정법을 통하여 산출된 지표면 반사도가 높은 정확도를 가질 것으로 기대된다 하더라도, 원격탐사를 이용하여 추정된 결과이므로 절대적인 기준값을 제시한다고 보기 어렵다. 하지만 지표면 반사도 산출에 있어 요구되는 에어로솔 정보가 높은 정확도를 가지는 것으로 알려진 지상관측에 근거하여 입력되는 대기 보정법이 최소 반사도법에 비하여 참값에 가까운 결과를 제시할 것으로 기대할 수 있다. 본 연구는 서울 지역에 봄철에 국한되어 결과를 제시하였지만, 향후 동아시아 전반에서의 지표면 반사도 검증 및 배경광학두께 보정 효과의 검증이 수행되어야 하겠다. 또한 미처 제거되지 않은 눈/구름 화소나 강수에 의한 지표면 반사도 감소 효과 등이 최소 반사도법의 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 향후 개선이 요구된다.

사 사

본 연구는 기상기술개발원 CATER 2012-2065과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Eck, T.F., B.N. Holben, J.S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N.T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne, 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *J. Geophys Res-Atmos.*, 104(D24): 31333-31349.
- Fraser, R.S. and Y.J. Kaufman, 1985. The Relative Importance of Aerosol Scattering and Absorption in Remote-Sensing, *IEEE T Geosci. Remote.*, 23(5): 625-633.
- Holben, B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66(1):

- 1-16.
- Hsu, N.C., S.C. Tsay, M.D. King, and J.R. Herman, 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions, *IEEE T Geosci. Remote.*, 42(3): 557-569.
- Kim, M., J. Kim, M.S. Wong, J. Yoon, J. Lee, D. Wu, P.W. Chan, J.E. Nichol, C.-Y.C. Chung, and M.-L. Ou, 2014. Improvement of aerosol optical depth retrieval over Hong Kong from a geostationary meteorological satellite using critical reflectance with background optical depth correction, *Remote Sens. Environ.*, 142(25): 176-187.
- Knapp, K.R., R. Frouin, S. Kondragunta, and A. Prados, 2005. Toward aerosol optical depth retrievals over land from GOES visible radiances: determining surface reflectance, *Int J. Remote Sens.*, 26(18): 4097-4116.
- Knapp, K.R., T.H. Vonder Haar, and Y.J. Kaufman, 2002. Aerosol optical depth retrieval from GOES-8: Uncertainty study and retrieval validation over South America, *J. Geophys Res-Atmos.*, 107(D7): AAC 2-1 - AAC 2-12.
- Kotchenova, S.Y. and E.F. Vermote, 2007. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces, *Applied optics*, 46(20): 4455-4464.
- Kotchenova, S.Y., E.F. Vermote, R. Matarrese, and F.J. Klemm, 2006. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Applied optics*, 45, 6762-6774.
- Lee, J., J. Kim, C.H. Song, J.H. Ryu, Y.H. Ahn, and C.K. Song, 2010. Algorithm for retrieval of aerosol optical properties over the ocean from the Geostationary Ocean Color Imager, *Remote Sens. Environ.*, 114(5): 1077-1088.
- Lee, K.H., C.S. Hong, and Y.J. Kim, 2004. Atmospheric Aerosol Monitoring Over Northeast Asia During 2001 from MODIS and TOMS data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 20(2): 77-89 (in Korean with English abstract).
- Levy, R.C., L.A. Remer, R.G. Kleidman, S. Mattoo, C. Ichoku, R. Kahn, and T.F. Eck, 2010. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land, *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 10399-10420.
- Levy, R.C., L.A. Remer, S. Mattoo, E.F. Vermote, and Y.J. Kaufman, 2007. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance, *J. Geophys Res-Atmos.*, 112(D13).
- Lyapustin, A., Y. Wang, I. Laszlo, R. Kahn, S. Korkin, L. Remer, R. Levy, and J.S. Reid, 2011. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm, *J. Geophys Res-Atmos*, 116(D3).
- Remer, L.A., Y.J. Kaufman, D. Tanre, 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, *J. Atmos. Sci.*, 62(4): 947-973.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*, Cambridge Univ Press, New York.
- Vermote, E.F., D. Tanre, J.L. Deuze, M. Herman, and J.J. Morcrette, 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview, *IEEE T Geosci Remote*, 35(3): 675-686.
- Wong, M.S., K.H. Lee, J.E. Nichol, and Z.Q. Li, 2010. Retrieval of Aerosol Optical Thickness Using

- MODIS 500×500 m(2), a Study in Hong Kong and the Pearl River Delta Region, *IEEE T Geosci Remote*, 48: 3318-3327.
- Zhang, J.L., S.A. Christopher, and B.N. Holben, 2001. Intercomparison of smoke aerosol optical thickness derived from GOES 8 imager and ground-based Sun photometers, *J. Geophys Res-Atmos.*, 106: 7387-7397.