

Article

## 모의영상을 이용한 농림위성 대기보정의 주요 파라미터 민감도 분석 및 타위성 산출물 활용 가능성 제시

강유진<sup>1)</sup> · 조동진<sup>1)</sup> · 한대현<sup>1)</sup> · 임정호<sup>2)†</sup> · 임중빈<sup>3)</sup> · 오금희<sup>4)</sup> · 권언혜<sup>4)</sup>

### Sensitivity Analysis for CAS500-4 Atmospheric Correction Using Simulated Images and Suggestion of the Use of Geostationary Satellite-based Atmospheric Parameters

Yoojin Kang<sup>1)</sup> · Dongjin Cho<sup>1)</sup> · Daehyeon Han<sup>1)</sup> · Jungho Im<sup>2)†</sup> ·  
Joongbin Lim<sup>3)</sup> · Kum-hui Oh<sup>4)</sup> · Eonhye Kwon<sup>4)</sup>

**Abstract:** As part of the next-generation Compact Advanced Satellite 500 (CAS500) project, CAS500-4 is scheduled to be launched in 2025 focusing on the remote sensing of agriculture and forestry. To obtain quantitative information on vegetation from satellite images, it is necessary to acquire surface reflectance through atmospheric correction. Thus, it is essential to develop an atmospheric correction method suitable for CAS500-4. Since the absorption and scattering characteristics in the atmosphere vary depending on the wavelength, it is needed to analyze the sensitivity of atmospheric correction parameters such as aerosol optical depth (AOD) and water vapor (WV) considering the wavelengths of CAS500-4. In addition, as CAS500-4 has only five channels (blue, green, red, red edge, and near-infrared), making it difficult to directly calculate key parameters for atmospheric correction, external parameter data should be used. Therefore, this study performed a sensitivity analysis of the key parameters (AOD, WV, and O<sub>3</sub>) using the simulated images based on Sentinel-2 satellite data, which has similar wavelength specifications to CAS500-4, and examined the possibility of using the products of GEO-KOMPSAT-2A (GK2A) as atmospheric parameters. The sensitivity analysis showed that AOD was the most important parameter with greater sensitivity in visible channels than in the near-infrared region. In particular, since AOD change of 20% causes about a 100% error rate in the blue channel surface reflectance in forests, a highly reliable AOD is needed to obtain accurate surface reflectance. The

Received October 8, 2021; Revised October 19, 2021; Accepted October 19, 2021; Published online October 26, 2021

<sup>1)</sup> 울산과학기술원 도시환경공학과 석·박사과정생 (Combined MS/PhD Student, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

<sup>2)</sup> 울산과학기술원 도시환경공학과 정교수 (Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

<sup>3)</sup> 국립산림과학원 국제산림연구과 임업연구사 (Researcher, Division of Global Forestry, National Institute of Forest Science)

<sup>4)</sup> (주)세트렉아이 지상사업부문 연구원 (Researcher, Division of Ground Systems, Satrec initiative)

† Corresponding Author: Jungho Im (ersgis@unist.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.

atmospherically corrected surface reflectance based on the GK2A AOD and WV was compared with the Sentinel-2 L2A reflectance data through the separability index of the known land cover pixels. The result showed that two corrected surface reflectance had similar Separability index (SI) values, the atmospheric corrected surface reflectance based on the GK2A AOD showed higher SI than the Sentinel-2 L2A reflectance data in short-wavelength channels. Thus, it is judged that the parameters provided by GK2A can be fully utilized for atmospheric correction of the CAS500-4. The research findings will provide a basis for atmospheric correction of the CAS500-4 in the future.

**Key Words:** Atmospheric correction, atmospheric parameter, aerosol optical depth, CAS500-4, Sentinel-2, GK2A

**요약:** 차세대 중형위성 사업의 일환으로 농지 및 산림에서의 원격 탐사를 위하여 농림위성 (차세대 중형위성 4호)이 발사 예정에 있다. 위성 영상에서 식생의 정량적인 정보를 얻기 위해서는 대기보정을 통한 지표 반사도 취득이 선행되어야 하므로 농림위성을 위한 대기보정 기술 개발은 불가피할 것으로 생각된다. 특히 대기에서의 흡수와 산란 특성은 파장에 따라 다르게 나타나므로 농림위성 파장 영역을 고려한 대기보정 파라미터 민감도 분석이 필요하다. 또한, 농림위성은 5개 채널(Blue, Green, Red, Red edge, Near-infrared)을 보유하고 있어 대기보정 주요 파라미터인 AOD (Aerosol optical depth)와 WV (Water vapor)를 직접 산출하기 어려우므로 이를 외부에서 제공할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 농림위성과 유사한 사양을 가진 Sentinel-2 위성 영상을 이용하여 주요 파라미터인 AOD, WV, O<sub>3</sub> 민감도 분석을 수행하고, 파라미터 제공을 위해 천리안 2A (GK2A; GEO-KOMPSAT-2A) 정지궤도 복합위성의 산출물을 이용하여 대기보정 파라미터로서의 활용 가능성을 살펴보았다. 민감도 분석 결과는 AOD가 가장 중요한 파라미터임을 보여주었으며, 근적외선 채널보다는 가시광 채널에서 더 큰 민감도를 가지는 것으로 나타났다. 특히 Blue 채널에서 AOD의 20%의 변화는 지표 반사도에서 약 100%의 오차율을 야기하므로 정확한 지표 반사도 취득을 위해서는 높은 신뢰성을 가진 AOD가 필요할 것으로 생각된다. GK2A AOD 산출물을 이용한 대기보정 결과는 토지피복별 분류 가능성을 이용하여 Sentinel-2 L2A 자료와 비교한 결과, 두 모델별 분류 가능성은 유사하였으나, 파장대가 짧은 영역일수록 GK2A AOD 산출물을 적용한 대기보정 결과가 Sentinel-2 L2A보다 높게 나타났다. 이를 통해 GK2A에서 제공되는 산출물이 향후 농림위성 대기보정 파라미터로서 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 추후 농림위성 발사 후 대기보정에 참고 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 서론

위성 영상은 비접근 지역을 비롯한 넓은 영역을 관측할 수 있어 농업, 산림, 수문, 식생 원격 탐사 등의 분야에서 활용이 지속적으로 이루어지고 있다. 2025년도 발사 예정인 5m급 공간해상도의 농림위성(차세대 중형위성 4호)은 가시광-근적외선 파장 영역에 대한 정보를 제공할 수 있어 농업 및 산림 분야에 기여를 할 것으로 기대된다(Kwon *et al.*, 2021). 농업 및 산림 분야에서의 위성 기반의 지표 반사도는 시계열 변화 분석, 산림의 수종 분류, 농작물 생육 모니터링, 식생 지수 산출 등 다양한 방면에서 활용된다. 식생 지수와 같이 정량적인 값을 필요로 하는 경우에는 주로 작은 값의 범위(-1, 1)를 가지게 되므로 지표 반사도의 작은 차이가 식생 지수 등

에 큰 영향을 미칠 수 있다(Maeda and Galvao, 2015). 뿐만 아니라, 장기간의 다시기 영상을 활용하고자 할 경우 대기보정의 중요성은 더욱 증가하게 된다(Lee, 2019). 따라서, 정확한 지표 반사도를 취득하기 위해서는 대기보정 과정이 필수적이며, 농림위성 영상의 활용을 위해 농림위성에 적합한 대기보정 방법에 대한 연구가 필요하다.

대기보정은 위성 영상에서 관측되는 대기 상한 복사휘도 또는 대기 상한 반사도에서 대기에 의한 영향을 제거함으로써 지표 반사도를 취득하는 것이 목적이며, 주로 대기 중의 에어로졸에 의한 산란, 수증기 및 오존에 의한 흡수 등을 고려할 수 있는 파라미터들을 복사 전달모델에 입력함으로써 얻을 수 있다(Lee and Yum, 2019; Zhang *et al.*, 2018). 대기보정의 주요 파라미터는

AOD (Aerosol optical depth), WV (Water vapor), O<sub>3</sub>, View geometry, 고도 등이 있다. 위성 영상의 파장 영역별로 투과 및 흡수 특성이 달라짐에 따라 대기보정 파라미터에 대한 민감도도 다르게 나타난다. 농림위성 파장 영역 구간인 가시영역-근적외선 파장 영역에서는 AOD, 고도에 대한 민감도가 다른 파라미터에 비하여 높게 나타났다(Vincent *et al.*, 2020). 민감도가 높은 파라미터의 값은 소폭 변화하더라도 지표 반사도 및 2차 산출물에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 이러한 파라미터를 미리 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서, 농림위성 영상의 대기보정에 있어서 파장에 대한 특성을 고려하고 적절한 파라미터 범위 설정 등을 위해서는 농림위성의 파장 영역과 분광 반응 함수(spectral response function) 등을 고려한 대기보정 파라미터 민감도 분석이 이루어질 필요가 있다.

대기보정의 성능 평가 및 대기보정의 주요 파라미터들의 민감도를 분석하기 위해서는 다양한 기상조건에서의 청천 광학영상자료들이 필요하다. 그러나 우리나라는 중위도 온대성 기후대에 속하여 구름과 강우로 인해 청천 영상을 획득하기 쉽지 않다. 간혹 청천 영상을 획득 가능하더라도 민감도 분석에 활용 가능한 실측 파라미터를 취득하기 어렵다는 한계점이 있다. 이를 극복하기 위해서 선행연구에서는 지표 반사도 영상으로부터 대기 상한 반사도를 생성한 모의 영상을 활용하고 있다(Lee *et al.*, 2015). 본 연구에서도 다양한 파라미터 조건에서의 대기 상한 반사도를 역으로 생성한 모의 영상을 이용하여 민감도를 분석하고자 하였다. 현재 농림위성이 발사 전이므로 농림위성과 비슷한 스펙을 가진 Sentinel-2를 모의 영상 제작에 활용하였다. Sentinel-2는 농림위성이 보유한 가시영역, Red edge, 근적외선 파장 밴드를 보유하고 있으며 10 m 공간해상도로 정보 제공이 가능하다.

Sentinel-2는 L1C (Level-1C) 자료로부터 구름에 의한 영향을 제거한 이후 AOD와 WV를 자체 산출한 뒤 이를 대기보정 파라미터로 사용하여 libRadtran 복사전달 모델로 대기보정된 L2A (Level-2A) 지표 반사도를 얻는다(Louis *et al.*, 2016). 그러나 농림위성은 AOD, WV를 자체 산출 가능한 파장 영역이 없으므로 파라미터를 외부에서 제공할 수 있는 방안을 마련해야 할 필요가 있다. 농림위성은 5 m의 높은 공간해상도를 가지며, 주요 파

장이 가시광 영역이므로 주간 관측이 추가 된다. 하루에 한 번 우리나라 상공을 지나지만 관측폭(swath)이 120 km 내외에 해당하므로 우리나라 전체를 관측하기 위해서는 약 3일이 소요될 것으로 보인다. 따라서, 한 지점에서 농림위성 관측 이미지를 얻기 위해서는 약 3일의 재방문 주기를 가진다고 볼 수 있으므로 이러한 시공간 해상도를 고려하여 파라미터를 제공할 필요가 있다. 본 연구에서는 우리나라를 2-10분마다 관측가능한 정지궤도 위성인 GK2A (GeoKompSat-2A)에서 산출되는 AOD 및 WV를 이용하여 대기보정 파라미터로서의 활용 가능성을 보고자 하였다.

본 연구에서는 농림위성 발사 전 대기보정을 위한 파라미터 민감도 분석 및 파라미터 제공 방안 마련에 대한 연구를 진행하였다. 파라미터 민감도 분석을 위해 6SV (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Vector) 복사전달 모델과 모의 영상을 이용하였으며, 주요 파라미터(AOD, WV, O<sub>3</sub>) 변화에 따른 지표 반사도의 변화를 살펴보았다. 나아가 대기보정의 주요 파라미터이지만 자체 수급이 불가능하다고 판단된 AOD, WV 제공 방안을 마련하고자 타위성(GK2A)의 산출물을 활용하였다. 타위성 산출물을 이용한 대기보정 결과는 토지 피복별 지표 반사도를 이용한 Separability index 계산을 통하여 간접적인 평가를 수행하였다.

## 2. 연구 지역 및 자료

### 1) Sentinel-2 위성 자료

농림위성 모의 영상의 대기보정 결과를 비교하기 위하여 본 연구에서는 Sentinel-2 자료를 활용하였다. 농림위성은 Sentinel-2 MSI (Multispectral Instrument) 센서의 3개 RGB 영역과 Red edge, NIR (Near-infrared) 채널의 파장 범위와 동일한 사양으로 제공될 것으로 예상되므로 Sentinel-2 MSI는 농림위성을 대체할 위성 영상으로 적합하다. 본 연구에서 사용된 5개 채널의 파장 정보는 Table 1과 같다. Sentinel-2는 유럽 우주국(ESA; European Space Agency)에서 운영하고 있으며, 같은 기능을 하는 두 개의 극궤도 위성인 2A와 2B로 이루어진다. 각 위성에는 광학 이미징 센서(MSI)가 장착되어 있으며, 가시 영역의 공간해상도는 10 m급이다. ESA에서는 Sentinel-2 전

Table 1. Specification of the Sentinel-2 Multispectral Instrument sensor used in this study

Channel		Central wavelength (nm)	Width (nm)	Spatial resolution (m)
Channel 2	Blue	490	65	10
Channel 3	Green	560	35	10
Channel 4	Red	665	30	10
Channel 5	Red edge	705	15	20
Channel 8	NIR	842	115	10

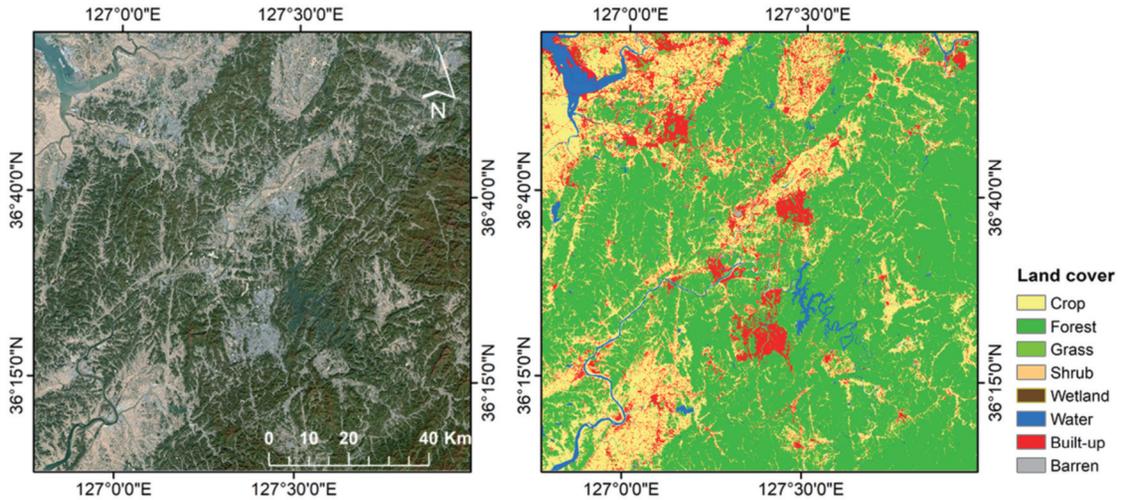


Fig. 1. The Sentinel-2 L2A RGB image (left) collected on October 24, 2020 and the land cover map (right) of the study area. Land cover data were derived from Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover 10 (From-GLC10) produced by Chen *et al.* (2019).

용 대기보정 프로그램인 Sen2cor를 제공한다. Sen2cor는 L1C TOA (top of atmosphere) 자료를 대기보정하여 L2A 결과를 산출한다. Sentinel-2 MSI 센서에서 WV와 O<sub>3</sub>에 비교적 민감한 채널은 각각 5번, 8번 채널과 2-5 채널이며, 분광 반응 함수와 채널별로 WV와 O<sub>3</sub>에 대한 민감도 정보는 J. Louis and L2A team (2021)에 자세히 서술되어 있다. 본 연구에서는 대기보정 전과 후를 비교하기 위하여 2020년 10월 24일의 충청북도 지역을 촬영한 Sentinel-2의 L1C 자료와 L2A 자료를 각각 1 장씩 사용하였다(Fig. 1). 해당 지역의 토지피복은 산림지역 60.6%와 농경지 26.3%, 도시지역 8.2%로 이루어져 있다.

## 2) Geo Kompasat-2A 위성 자료

차세대 기상위성인 GK2A는 2018년 12월에 발사되었으며 한반도를 2분 간격으로 관측할 수 있다. GK2A는 16개의 가시 및 적외 영역의 기본 밴드를 포함하여 총

52종의 산출물을 제공한다. 대기 보정에 필요한 AOD, WV, O<sub>3</sub> 등의 산출물을 실시간으로 제공하기 때문에 농림위성의 대기보정에 요구되는 파라미터로서 활용될 수 있다. GK2A AOD와 WV는 모두 2 km 공간 해상도로 제공되며, AOD는 2분, WV는 10분 간격으로 제공되고 있다. 본 연구에서는 대기보정의 주요 파라미터인 AOD와 WV를 제공하기 위하여 GK2A Level2 자료 산출물을 이용하여 농림위성 모의 영상의 관측 시점으로부터 10분 전까지의 이미지를 평균하여 사용하였다.

## 3) 토지피복 자료

대기보정을 통해 산출된 지표 반사도로부터 토지피복 분류 가능성을 평가하기 위해, 10 m 해상도의 FROM-GLC10 (Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover 10)의 토지피복 자료를 사용하였다. FROM-GLC10은 2017년 Sentinel-2 영상을 기반으로 만

들어진 자료로 산지, 농경지, 불투수 지역 등의 10가지 항목으로 제공된다(Chen *et al.*, 2019). FROM-GLC10의 전체 분류 정확도 (Overall accuracy)는 72.76%로 평가된다.

### 3. 연구 방법

#### 1) 6SV

위성 영상에서 지표 반사도를 취득하기 위해서는 복사전달모형을 통하여 대기에 의한 산란 및 흡수 효과를 제거할 수 있다. 복사전달모형은 위성 센서의 분광 반응 함수와 대기 조건 등을 이용하여 지표 반사도를 계산할 수 있는 모델이다. 주어진 위성 관측 및 환경 조건을 모두 고려하여 대기보정을 진행하기에는 상당한 시간이 소요되므로 주로 복사전달모형을 통하여 미리 구축된 조건표를 이용하여 대기보정을 수행한다(Jung *et al.*, 2020). 대표적인 복사전달모형로는 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), 6SV가 있다. 6SV는 6S 복사전달모형에서 편광 효과를 계산할 수 있도록 개선된 모델로서 successive orders of scattering 방법을 통하여 복사전달 방정식을 풀어가며, 0.3-4 μm 파장 범위를 2.5 nm 분광해상도 단위로 구분하여 모의할 수 있다(Kotchenova *et al.*, 2006; Vicent *et al.*, 2020). 특히 6SV는 무료 소프트웨어이며 Py6S 라이브러리를 통하여 python 환경에서 6SV를 구현할 수 있도록 잘 구축되어 있어 사용이 편리하다. 따라서, 본 연구에서는 6SV 복사전달모형을 이용하여 연구를 진행하였으며, python 3.7 버전에서 Py6S 라이브러리를 이용하여 구현하였다. 에어로졸 모델과 대기 연직 모델로는 각각 Py6S 라이브러리 내에서 제공되는 Continental aerosol profile과 US62 profile을 적용하였다.

#### 2) 파라미터 민감도 분석 방법

##### (1) Sentinel-2 모의 영상 생성

본 연구에서는 모의 영상을 바탕으로 대기보정의 성능을 평가하고 대기보정의 주요 파라미터들의 민감도를 분석하였다. 참조 영상으로는 대기보정이 수행된 Sentinel-2 L2A 지표 반사도 자료를 이용하였으며 참조 영상의 평균 관측 천정각과 방위각은 채널별로 3-4°, 225-227° 수준의 값을 가진다. 다양한 기상조건을 가정

Table 2. Parameters and their ranges used in the sensitivity analysis of the atmospheric correction model using the simulated images

Parameters	Range
AOD	0.01-0.3 / 0.3-0.6
WV	0.1-1.5 / 2-5 g/cm <sup>2</sup>
O <sub>3</sub>	200 / 300 / 400 / 500 DU

하여 MODTRAN6 복사전달모형을 통한 역방향 대기 보정 수행을 통해 대기보정 이전 상태의 대기상층 복사휘도(TOA radiance)를 모의하였다. 기상조건으로 550 nm 파장대의 AOD, WV, O<sub>3</sub>이 고려되었으며, 각 기상 변수별 농도 범위는 우리나라 산림에서의 기상 특성을 반영하여 에어로졸은 0.1-0.6, 수증기는 0.1-5 g/cm<sup>2</sup> 범위가 모의 영상 생성에 적용되었다. 파라미터는 이미지 내에서 좌우 방향으로 일정 범위 내에서 조금씩 값의 변동을 줌으로써 다양한 값을 가질 수 있도록 조정하였다. 다만, O<sub>3</sub>의 경우 대기전층에 대한 O<sub>3</sub>은 수평 방향으로 좁은 공간에서는 공간적으로 변동성이 크지 않다는 특성에 근거하여 모의 영상 전체에 대해서 단일 값으로 적용하는 방법으로 모의 영상을 제작하였다. O<sub>3</sub>은 300-330 DU (Dobson unit)를 기본으로 설정하는 경우가 일반적이므로 본 연구에서도 전지구적 규모에서 일반적으로 관측되는 규모 내에서 200부터 100씩 증가시켜 500 DU까지의 범위를 적용하였다. 각 파라미터 별로 사용된 범위는 Table 2에 나타내었다.

##### (2) 파라미터 민감도 분석 방법

모의 영상이 MODTRAN6 복사전달모형을 기반으로 구축되었으나 결과 산출 및 분석에 6SV 복사전달모형이 사용되었으므로 참조 영상과의 결과 비교는 정량적인 값의 차이를 발생시킨다. 따라서, 복사전달모형의 차이로 인한 결과의 오차를 사전에 방지하기 위하여 두 가지 스킴에 따른 대기보정 결과를 산출하였다. 첫 번째 스킴은 민감도 분석을 위한 대조 모델로서 활용하고자 모의 영상 내에 주어진 파라미터(AOD, WV 등)를 주어진대로 적용하여 지표 반사도를 산출하는 방식으로 대기보정을 진행하였다. 다만, 파라미터 중 고도 자료는 이미지 내에서 변동성이 매우 크기 때문에 이를 그대로 고려할 경우 대기보정에 상당한 연산 시간이 요구된다. 따라서, 고도 자료는 이미지 내 단일 평균값으로 적용

해주었다. 두 번째 스킴은 특정 파라미터의 민감도 분석을 위하여 모든 조건을 동일하게 유지하되 특정 파라미터만을 모의 영상 내의 단일 평균값으로 적용해주었다. 결과 분석에 있어서 참조 영상과의 비교가 아닌 대조 모델과 비교 모델 간의 차이 및 변화를 통하여 분석함으로써 복사전달모델의 차이에 의한 영향을 줄이고자 하였으며, 특정 파라미터 외 다른 조건이 모두 동일할 때에 특정 파라미터의 변화에 따른 대기보정 결과의 변화를 파악할 수 있었다.

AOD 민감도 분석은 낮은 AOD 환경을 가정하여 AOD 범위를 0.01-0.3으로 설정한 영상과 높은 AOD 환경을 가정하여 AOD 범위를 0.3-0.6으로 설정한 두 개의 모의 영상을 이용하여 진행하였다. 두 모의 영상을 이용하여 AOD 변화량에 따른 대기보정 결과의 영향 뿐 아니라 AOD 변화량이 같더라도 AOD 자체의 값이 낮을 때와 높을 때에 대한 파라미터 민감도를 알아보고자 하였다. WV 민감도 분석은 AOD 민감도 분석 방법과 유사하게 낮은 WV 환경을 가정하여 WV 범위를 0.1-1.5 g/cm<sup>2</sup>으로 설정한 영상과 높은 WV 환경을 가정하여 WV 범위를 2-5 g/cm<sup>2</sup>으로 설정한 두 개의 모의 영상을 이용하여 진행하였다.

### (3) 민감도 분석 평가 방법

최종적으로 파라미터에 따른 대기보정 결과는 파라미터의 변화량에 따른 지표 반사도의 차이 및 변화율(Percent error), 구조적 유사도 지수(SSIM; Structural Similarity Index)을 통하여 평가되었다. 지표 반사도의 차이는 단순 차이로 대조 모델과 비교 모델의 지표 반사도 차이를 의미하며, 변화율은  $x$ 가 대조 모델의 대기보정 결과,  $y$ 가 비교 모델의 대기보정 결과일 때에 식 (1)과 같이 계산되었다. SSIM은 왜곡된 영상이 가지는 원본 영상에 대한 유사도를 측정하는 지수로서 이미지 분석에 활용되는 지수이다(Wang *et al.* 2004). 이미지가 가지는 휘도(luminance), 대비(contrast), 구조(structure) 항목의 곱셈 조합을 통하여 계산된다. 대조 모델의 대기보정된 이미지  $x$ 와 비교 모델의 이미지  $y$ 에 대해서  $\mu_x$ 가 평균,  $\sigma_x$ 가 표준편차,  $C_x$ 가 휘도와 대비 항목의 정규화 상수일 때, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Percent\ error(x, y) = \frac{x - y}{y} \times 100\% \quad (1)$$

$$SSIM(x, y) = f(l(x, y), c(x, y), s(x, y)) \\ = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (2)$$

### 3) 파라미터 제공 방안 제시

#### (1) GK2A 영상 선정 및 전처리

향후 농림위성 영상의 대기보정을 위해서는 AOD와 WV 자료 취득이 필수적이다. Sentinel-2 위성의 대기보정 시에는 중심파장이 490, 665 및 2190 nm와 865 및 945 nm의 파장영역을 활용하여 자체적인 AOD와 WV 산출물을 사용하고 있다. 그러나 농림위성은 AOD와 WV 산출에 필요한 파장대의 정보가 제공되지 않기 때문에 자체적인 산출이 어렵다. AERONET (AErosol RObotic NETwork)을 통한 AOD와 WV 자료의 지상 관측이 있으나 공간적으로 불균일하고 드물게 분포하고 있어 영상 내 파라미터 제공으로 활용하기에는 한계가 있다. 농림위성 촬영 시간대의 AOD와 WV 자료를 취득하는 또 다른 방법은 타 위성으로부터 제공되는 산출물 활용이 있으며, 이는 공간적으로 연속적인 정보로 제공되는 장점이 있다. 본 연구에서는 높은 시간해상도를 가지는 정지궤도 위성이 극궤도 위성보다 농림위성 촬영시간대의 영상 취득에 적합하다고 판단하여 GK2A 위성에서 산출되는 AOD와 WV 산출물을 활용하였다.

농림위성 대기보정에 GK2A 위성의 AOD와 WV 산출물을 활용하기 위해 전처리를 수행하였다. 먼저, GK2A AOD와 WV 자료의 누락 값의 비율을 줄이기 위해 농림위성 모의 영상의 관측시간으로부터 앞선 10분 전까지의 이미지를 평균하였다. 그 다음, WV는 공간적으로 평균하여 영상 전체에 단일값을 적용하였으며, AOD는 누락된 지역에 대해서는 양선형 보간법(Bilinear interpolation)을 수행하여 농림위성 모의 영상의 공간해상도와 일치하도록 내삽을 수행하였다.

#### (2) 검증 방법

GK2A 산출물을 활용한 대기보정의 성능 평가를 위해서는 현장관측 지표 반사도를 이용한 직접적인 평가가 필요하다. 그러나 Sentinel-2 위성이 지나가는 동일한 시간대에 평가에 필요한 유의미한 샘플 수의 현장관측 지표 반사도를 취득하는 것은 어렵다. 선행 연구에서는 토지피복 간에는 지표 반사도 값에 유의미한 차이가 존

재한다는 가정을 바탕으로 채널별 반사도를 이용한 토지피복 분류 정도를 평가하였다(Ariza *et al.*, 2018). 대기 보정을 통한 지표 반사도 취득이 잘 수행되었을 경우 토지피복 간의 분류 가능성은 높아지게 된다. 본 연구에서도 GK2A 산출물을 활용한 대기보정의 성능평가를 분류가능성 지수(SI; Separability index)를 이용한 토지피복별 분류 가능성을 통해 간접적으로 평가하였다. SI는 원격탐사 연구에서 토지피복도의 식별 정도를 평가하기 위해 자주 사용되어진다(Pereira, 1999; Meng *et al.*, 2017). SI는 토지피복별 지표 반사도의 평균과 표준편차를 이용한 식 (3)을 통해 계산되었다.

$$SI = \frac{|\mu_A - \mu_O|}{\sigma_A + \sigma_O} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\mu_A$ 와  $\mu_O$ 는 임의의 토지피복 유형 A와 그 외의 나머지 토지피복 유형들의 평균을 각각 의미하며,  $\sigma_A$ 와  $\sigma_O$ 는 해당 표준편차를 의미한다. SI의 값이 높을수록 대기보정 모델의 토지피복 분류가능성이 높음을 나타내고, SI가 0에 가까울수록 토지피복들 사이의 지표 반사도가 유사하여 토지피복 분류하는 능력이 좋지 않음을 의미한다. 본 연구에서는 각 밴드별뿐만 아니라, 산

림 건강성과 산림 스트레스를 평가하는 식생지수인 NDVI (Normalized Different Vegetation index, 1974; Rouse *et al.*, 1974)와 GRVI (Green Red Vegetation Index, 2010; Motohka *et al.*, 2010)를 이용한 SI를 계산하여 대기보정 모델을 비교하였다. NDVI와 GRVI 산출 식은 각각 식 (4)와 식 (5)와 같다.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

$$GRVI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED} \quad (5)$$

## 4. 연구 결과 및 분석

### 1) 파라미터 민감도 분석

#### (1) AOD 민감도 분석 결과

AOD가 낮을 때 (AOD: 0.01-0.3)의 민감도 분석에 따른 SSIM index는 Blue (Channel 2)부터 NIR (Channel 8)까지 순서대로 0.78, 0.94, 0.97, 1, 1 이다. AOD가 높을 때 (AOD: 0.3-0.6)의 SSIM index는 순서대로 0.71, 0.93, 0.96,

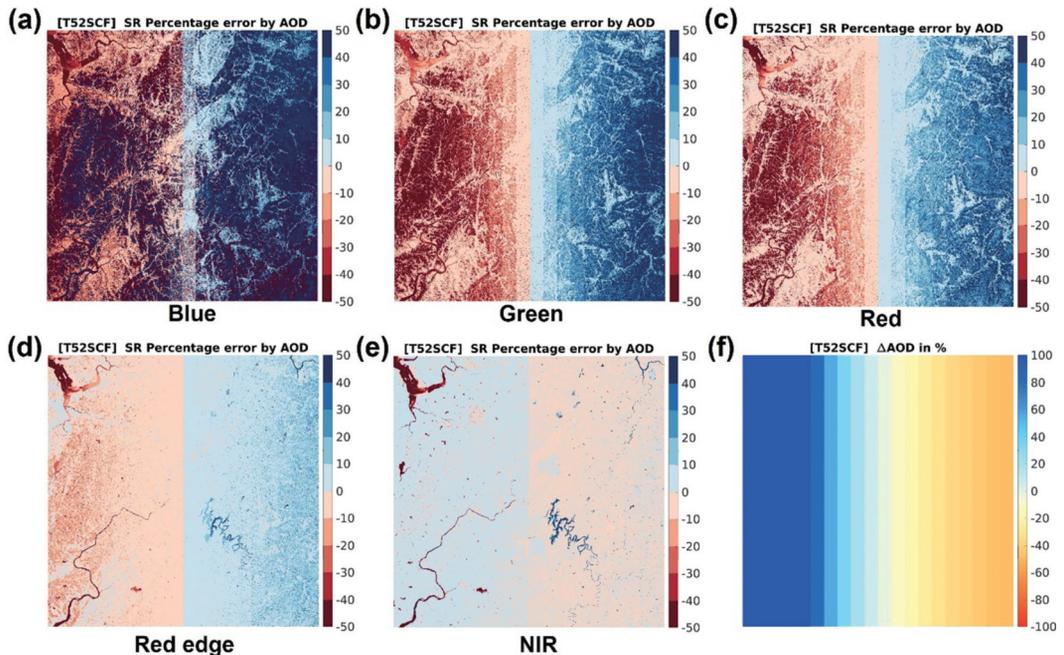


Fig. 2. AOD parameter sensitivity analysis results. (a-e) is the percent error for Blue, Green, Red, Red edge, and NIR channels, respectively. (f) is the distribution of the AOD parameter percent change in the image, which has a negative value when the adjusted AOD is lower than the original AOD.

1, 1이다. Blue는 다른 채널에 비하여 구조적 유사도가 눈에 띄게 낮았으며, 이외의 채널에서는 유사도가 0.9 이상으로 높다고 판단된다. 즉, Blue 채널이 AOD 파라미터의 변화에 가장 민감하게 반응한다고 해석할 수 있다.

Fig. 2는 AOD가 낮을 때에 AOD 파라미터에 변화를 준 민감도 분석 결과이다. 가장 두드러지는 특징은 기존의 AOD에 비하여 조정된 AOD 값이 낮을 경우(AOD의 변화율이 음수)에는 가시광 영역의 지표 반사도 percent

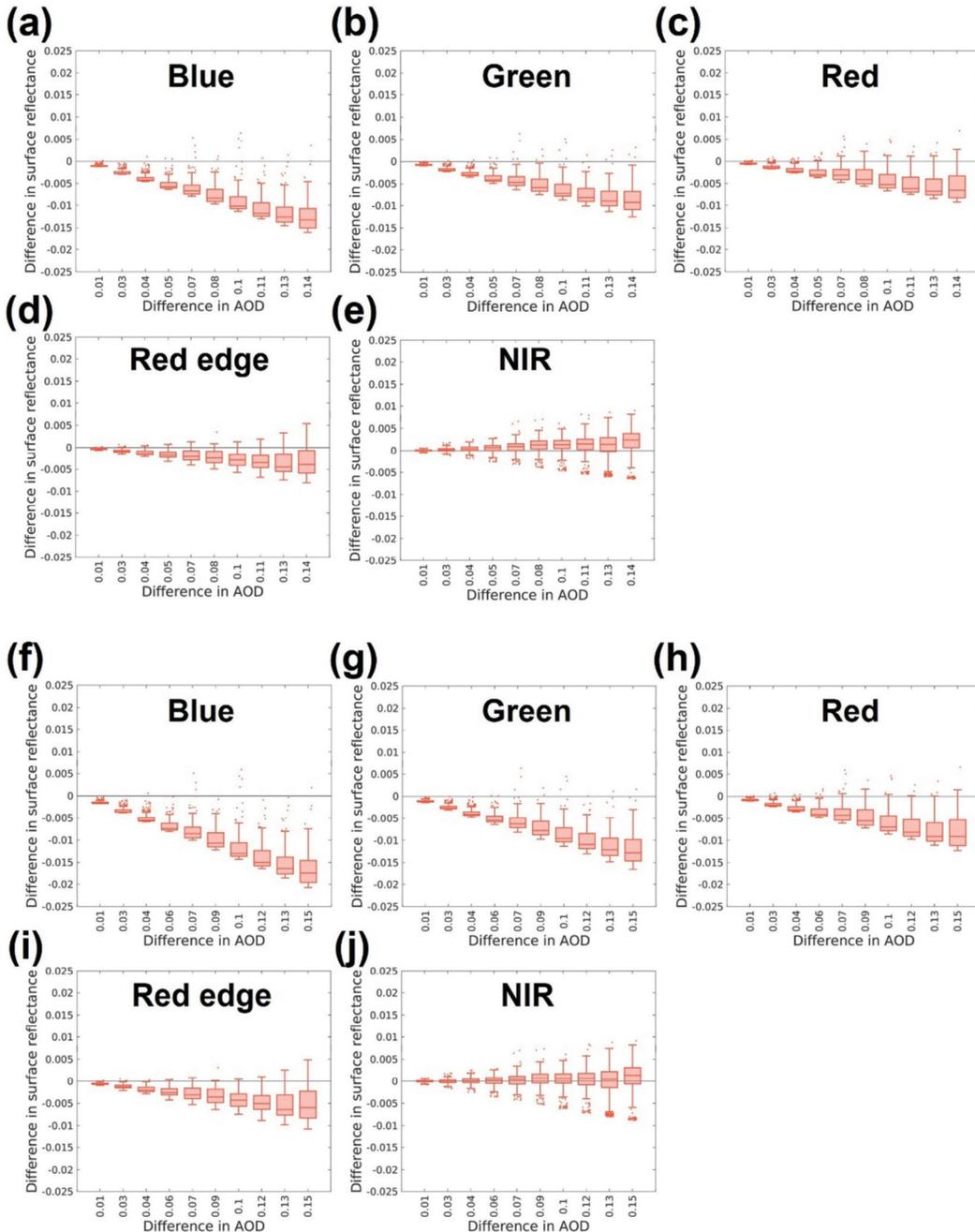


Fig. 3. Difference in surface reflectance according to the difference in AOD change when AOD is low (a, b, c, d, and e) and when AOD is high (f, g, h, i, j) for each channel (Blue (a, d), Green (b, e), Red (c, f), Red edge (g, i), and NIR (h, j)).

error가 양수이고 기존의 AOD에 비하여 AOD 값이 높을 경우에는 그 반대로 나타난다는 점이다. 이는 AOD 양이 적어질수록 대기의 영향이 줄어들어 지표의 반사도가 증가하는 일반적인 경향과 일치한다. 가시광 영역 중에서도 파장이 가장 짧은 Blue 채널의 변화가 가장 두드러졌는데, 일반적으로 파장대가 짧을수록 AOD에 대한 민감도가 크다고 알려져 있다(Jung *et al.*, 2020). 가시광 영역에서는 AOD의 변화율이 10% 이하인 경우에는 지표 반사도의 변화율도 10% 이하 수준으로 나타났지만 AOD의 변화율이 높아짐에 따라 지표 반사도의 변화율이 급격하게 증가하는 것이 관찰되었다. 반면에 Red edge와 NIR 채널에서는 AOD의 변화율이 50% 이상인 경우를 제외하고는 대부분 10% 이하의 변화율을 가지고 있으므로 AOD 파라미터에 대한 민감도가 낮다고 볼 수 있다.

파장에 따른 영향 외에 발견되는 점은 토지피복에 따라 AOD의 변화량이 같음에도 지표 반사도의 percent error가 다르게 나타난다는 것이다. Blue 채널에서 볼 수 있듯이 비교적 지표 반사도가 밝은 도심지에서는 AOD 파라미터가 변하더라도 지표 반사도의 변화가 대부분 10% 이내에서 변동하였으므로 변화가 크지 않다고 말할 수 있다. 그러나 식생 밀도가 높은 산림에서는 지표 반사도의 percent error가 50% 이상으로 매우 크다. 이는 AOD 변화량에 따른 대기보정 결과가 같더라도 도심지에 비해서 기존의 반사도가 낮은 산림에서는 작은 지표 반사도의 차이가 매우 크게 여겨지기 때문이다.

Fig. 3은 낮은 AOD 환경을 가정하였을 때와 높은

AOD 환경을 가정하였을 때의 파라미터 변화에 따른 지표 반사도의 차이이다. Fig. 2에서도 관찰되었듯이 가시광 영역과 NIR 영역에서의 AOD의 영향은 다소 차이가 있다. AOD가 변화율이 높아짐에 따라서 가시광 영역은 지표 반사도가 더 낮아지는 것이 확연하게 보였으나 NIR 채널의 지표 반사도는 특별한 경향성을 띠지 않았다. 이는 파장에 따라 파라미터에 따른 영향이 다르게 나타나며 NIR의 경우 AOD 파라미터에 대한 민감도가 높지 않음을 잘 반영하는 결과이다(Jung *et al.*, 2020).

AOD의 절대적인 값은 AOD의 변화율에 따른 지표 반사도의 변화에도 영향을 미치고 있었다. AOD가 높은 환경일 경우에는 파라미터에 따른 민감도가 높아 지표 반사도가 더 큰 폭으로 변하는 것을 발견하였다. 예를 들어, Blue (Fig. 3(a, f)) 채널의 결과에 따르면 AOD의 값이 낮을 경우에는 AOD 값의 차이가 약 0.14 일 때 지표 반사도에서 최소 약 -0.015의 차이가 났으나 AOD 값이 높을 경우에는 AOD 값의 차이가 0.1 일 때에 이미 약 -0.015 정도의 차이가 났다. 즉, AOD의 변화량과 지표 반사도의 변화량은 선형적으로 증가하는 것이 아니라 AOD 자체 값이 높아질수록 더 급격하게 증가하는 경향이 관찰되었다.

Fig. 2와 Fig. 3을 통하여 가시광 영역이 AOD 파라미터에 특히 민감하다는 사실과 토지 피복에 따른 percent error의 경향성이 다르다는 것이 발견되었다. 따라서, 본 연구에서는 도심지와 산림으로 구분하여 AOD의 변화율에 따른 가시광 영역 지표 반사도의 percent error를 세부적으로 살펴보았다. Fig. 4는 AOD 변화율에 따른 해

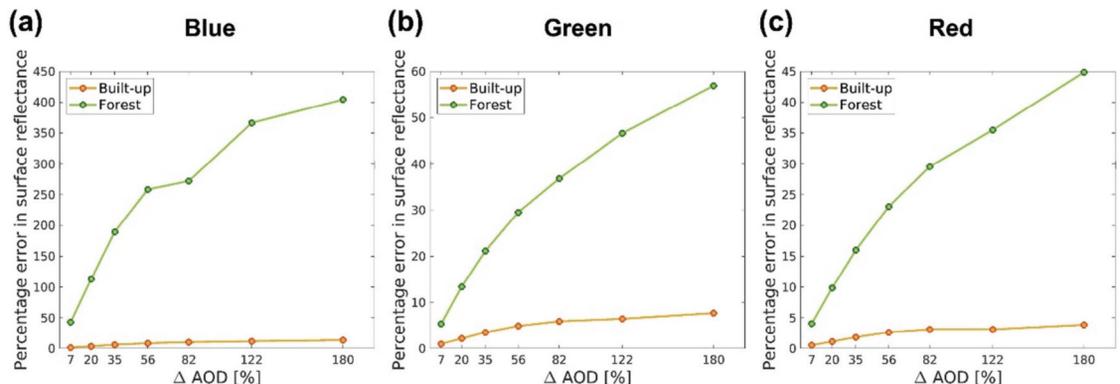


Fig. 4. The percent error of the surface reflectance according to the AOD percent change with low AOD conditions (AOD: 0.01-0.3). The X-axis is the adjusted AOD percent change compared to the original AOD, and the Y-axis is the absolute percent error of the surface reflectance. (a)-(c) correspond to blue, green and red channels, respectively.

당 토지피복의 percent error의 중앙값(median)을 보여 준다. 도심지에서는 AOD 변화율이 같음에도 산림과 비교하여 매우 낮은 percent error 분포를 보여주었다. AOD에 가장 민감하게 반응하는 Blue 채널에서도 AOD 변화율이 180%까지 변화함에도 불구하고 percent error는 15% 수준에 머물렀다. 산림에서는 모든 채널에서 AOD 변화율이 높아짐에 따라 percent error가 상당히 크게 변화하는 것이 관찰되었다. Blue 채널에서는 AOD 변화량이 180% 일 때 최대 400% 수준까지 지표 반사도에 영향을 미쳤으며, Green과 Red 채널에서는 순서대로 약 60%, 45% 수준까지 영향을 주었다. Fig. 4(a)에서 percent error가 중앙값 기반임을 감안하면 AOD의 변화량이 20% 일 때, 지표 반사도의 변화가 약 100% 수준이므로 Blue 채널에서 오차율 100% 이내의 정확한 지표 반사도 취득을 위해서는 적어도 80% 이상의 정확한 AOD 값이 필요하다고 판단된다.

(2) WV 민감도 분석 결과

WV가 낮을 때(WV: 0.1-1.5 g/cm<sup>2</sup>)와 높을 때(WV: 2-5 g/cm<sup>2</sup>)의 민감도 분석에 따른 SSIM index는 모든 채널

에 대해 1로서 구조적 유사도가 매우 높은 것으로 나타났다. 또한, WV가 낮을 때와 높을 때의 파라미터 변화에 따른 지표 반사도의 차이도 나타나지 않았다.

Fig. 5는 WV가 낮을 때에 WV 파라미터에 변화를 준 민감도 분석 결과이다. AOD의 percent error (Fig. 2)와 비교하면 파라미터의 변화에 따른 지표 반사도의 변화율이 매우 낮음을 알 수 있다. 다만, 눈에 띄는 특징은 기존의 WV에 비하여 조정된 WV가 높을 경우(WV의 변화율이 양수)에는 가시광 영역의 지표 반사도 percent error가 양수이고 기존의 WV에 비하여 WV 값이 낮을 경우에는 그 반대로 나타난다는 점이다. AOD의 경향 성과는 다소 다른데, WV가 높을수록 지표로부터 반사된 값의 대기 투과도가 낮아지므로 이를 보정해줌으로써 지표 반사도가 높아진 것으로 판단된다(Zhang *et al.*, 2010). 일반적으로 WV는 수증기 흡수와 관련된 파장 영역에서 민감하게 반응하며 가시광 및 NIR 영역에서는 무시할 만한 수준의 차이만 발생한다고 알려져 있다(Vincent *et al.*, 2020). 본 연구의 결과도 기존 연구 결과와 일치하며 농림위성에는 수증기 흡수 관련 채널을 제공하지 않으므로 농림위성 대기보정시에는 필수 고려사

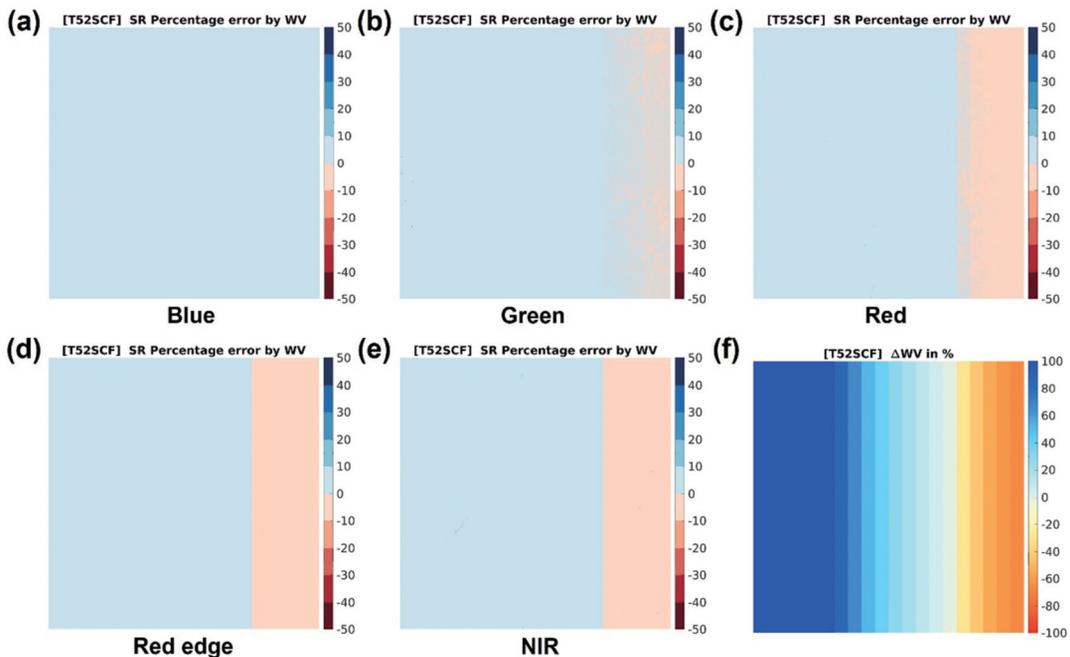


Fig. 5. Water Vapor (WV) sensitivity analysis results: (a)-(e) show the percent error of surface reflectance for Blue, Green, Red, Red edge, and NIR channels, respectively. (f) is the distribution of WV parameter percent change applied to the simulated image.

항이 아닌 것으로 판단된다.

(3) O<sub>3</sub> 민감도 분석 결과

O<sub>3</sub>은 가시광-근적외선 영역에서 근소한 영향력을 가지고 있으며, 해당 파장대에서는 600 nm 근처에서 가장 높은 영향력을 가진다(Richter *et al.*, 2014). 본 연구에서도 Green 채널(중심 파장 560 nm)에서 가장 차이가 컸으며, NIR 채널에서는 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 6). 대체로 대기의 O<sub>3</sub> 농도는 AOD와 WV에 비하면 공간적인 변동성이 크지 않아 약 100-500 km 공간 규모 단위로 변화가 관찰된다(Lee, 2019; Richter *et al.*, 2014). O<sub>3</sub> 전층 농도는 위도에 의존하는 경향이 있으며 저위도에서 농도가 낮고, 고위도로 갈수록 농도가 증가한다(Han *et al.*, 2019). 우리나라가 위치한 지역은 중위도 지역으로 O<sub>3</sub> 전층 농도는 약 300-350 DU 수준으로 200, 400, 500 DU의 O<sub>3</sub> 농도는 일상적으로 발생하기 어려운 농도로 생각할 수 있다(Tzortziou *et al.*, 2018). 이렇듯 매우 큰 차이에도 불구하고 O<sub>3</sub> 농도의 변화가 지표 반사도에 미치는 영향이 지극히 적으므로 농림위성 대기보정에 있어 O<sub>3</sub> 파라미터에 대한 민감도는 매우 낮다고 볼 수 있다.

2) 파라미터 제공 방안 제시

대기보정을 위한 GK2A 파라미터의 활용 가능성을 평가하기 위해, 네 가지 토지피복(산림, 농경지, 도심지,

수역)별 Sentinel-2 L2A와 GK2A 파라미터를 적용한 Py6S 모델(GK2A-Py6S)들의 SI를 비교하였다(Table 3). 각 채널별로 SI를 비교하였을때, 두 모델 모두 대기보정을 수행하였기 때문에, 전체적인 SI 값들은 유사하게 나왔다. 그러나 파장대가 짧아질수록 GK2A-Py6S 모델이

Table 3. Separability index values between Sentinel-2 L2A data and the reflectance data derived from the py6S model using AOD and WV extracted from GK2A (GK2A-py6S) for each land cover

Model	channel (index)	Separability Index			
		Forest	Crop	Built-up	Water
Sentinel-2 L2A	Blue	0.90	0.53	0.74	0.05
	Green	0.89	0.62	0.62	0.16
	Red	0.88	0.67	0.56	0.36
	Red edge	0.72	0.74	0.37	0.82
	NIR	0.08	0.36	0.20	1.81
	NDVI	1.05	0.48	0.91	1.90
GK2A-py6S	GRVI	0.50	0.61	0.33	0.85
	Blue	0.95	0.57	0.76	0.04
	Green	0.92	0.64	0.63	0.15
	Red	0.90	0.69	0.57	0.36
	Red edge	0.73	0.75	0.37	0.84
	NIR	0.08	0.36	0.20	1.83
	NDVI	1.04	0.47	0.93	1.83
GRVI	0.63	0.70	0.41	0.80	

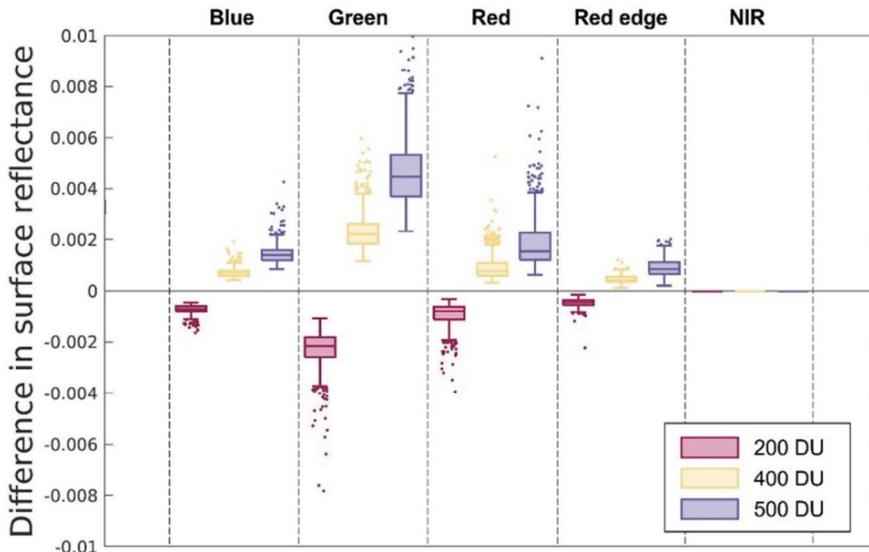


Fig. 6. O<sub>3</sub> sensitivity analysis results: the difference in surface reflectance by channel is depicted when O<sub>3</sub> is 200, 400, and 500 DU considering 300 DU as a control value.

Sentinel-2 L2A 보다 산림과 농경지에서의 SI 값이 커지는 결과를 보였다. 특히, 파라미터의 민감도가 가장 큰 Blue 채널에서 GK2A-Py6S가 산림에서 0.95, 농경지에서 0.57로 Sentinel-2 L2A (산림: 0.90, 농경지 0.53)와 가장 큰 차이를 보였다.

이러한 차이는 식생지수를 통한 SI 비교에서도 유사하게 나왔다. 비교적 높은 파장대로 산출된 NDVI의 경우, Sentinel-2 L2A와 GK2A-Py6S 모델들은 SI는 큰 차이를 보이지 않았다. 반면, GRVI를 통한 SI 비교에서는 GK2A-Py6S가 산림에서 0.63, 농경지에서 0.70으로 Sentinel-2 L2A (산림: 0.50, 농경지: 0.61)보다 높은 결과를 보여주었다. Sentinel-2 L2A가 GK2A-Py6S보다 파장대가 짧은 영역에서 낮은 SI를 가지는 이유 중 하나로는 Sentinel-2가 Sen2cor를 통해 고해상도의 AOD를 생산하지만, 타 위성 산출물과 비교하였을 때 비교적 높은 오차를 가지는 점을 들 수 있다(Oregon *et al.*, 2019). 이러한 결과는 GK2A에서 제공되는 AOD와 WV가 향후 농림위성 대기보정에 충분히 활용될 수 있음을 시사한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Sentinel-2 위성 영상을 이용하여 모의 영상 자료를 생성하고 농림위성 대기보정을 위한 주요 파라미터 민감도 분석을 수행하였다. 6SV 복사전달모델을 이용하여 주어진 파라미터를 이용하는 스킴과 임의로 파라미터를 조정하는 두 가지 스킴을 구축하였으며, 파라미터 변화에 따른 지표 반사도의 변화를 절대적인 값의 차이와 상대적인 변화율을 이용하여 분석하였다. 농림위성 제공 파장대인 가시광-근적외선 영역에서는 AOD가 가장 민감한 것으로 확인되었다. WV와 O<sub>3</sub>도 파장에 따른 고유의 민감도를 가지고 있지만 지표면 반사도에 미치는 영향을 고려하였을 때 민감한 파라미터라고 정의하기에는 영향이 적은 것으로 판단되었다. 특히 AOD는 가시광 영역에서 큰 민감도를 보여주었으므로 가시광 영역을 사용할 경우 AOD의 공간적인 변동 및 값을 정확히 고려할 필요가 있다고 사료된다.

파라미터 변화에 따른 지표 반사도의 상대적인 변화율은 토지피복에 따라서 차이를 나타냈다. 절대적인 반

사도가 낮은 산림에서는 작은 파라미터의 변화도 지표 반사도에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서, 농림위성 대기보정 시 산림에서의 활용을 위해서는 AOD 파라미터를 주의하여 사용할 필요가 있다. 특히 Blue 채널에서 오차율 100% 이내의 정확한 지표 반사도 취득을 위해서는 약 80% 정확도를 가진 위성 기반 AOD 자료 취득이 필수적이다.

농림위성 대기보정 시 필수적으로 고려되어야 할 파라미터 자료 취득을 위해서 본 연구에서는 GK2A에서 제공되는 AOD와 WV의 적용 가능성을 평가하였다. GK2A 파라미터를 적용한 Py6S 모델과 Sentinel-2 L2A를 토지피복별 SI를 통해 비교한 결과, 두 모델별 SI는 유사하였으나, 파장대가 짧은 영역일수록 GK2A 파라미터를 적용한 Py6S 모델이 Sentinel-2 L2A보다 높은 SI를 보였다. 이러한 결과를 통해 향후 GK2A 파라미터가 농림위성 대기보정에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 농림위성 발사 후 대기보정을 위해 농림위성과 유사한 분광 정보를 가진 Sentinel-2를 이용한 모의 영상으로 대기보정 파라미터 민감도 분석을 수행하고 파라미터 제공 방안을 제시하였으나 실제 농림위성과는 대기보정 결과에 큰 영향을 줄 수 있는 관측 각도나 분광 반응 함수 등 세부적인 조건이 다르다는 한계점이 있다. 또한, 본 연구에서는 대기보정에 필요한 대기 파라미터를 중심으로 민감도 분석을 수행했지만 농림위성에 최적화된 에어로졸 모델 선정 등을 위한 연구도 수행될 필요가 있다. 추후 농림위성 관측 영상이 확보되었을 때, 농림위성을 이용한 실제 분석이 수행된다면 농림위성 대기보정의 정확도 향상을 위한 구체적인 방안 마련이 가능할 것으로 기대된다.

## 사사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ0162342021)의 지원을 받아 수행하였고, 산림청 국립산림과학원 “농림위성정보 수신·처리·ARD 표준화 및 지능형 산림정보 플랫폼 개발(과제번호: FM0103-2021-01)” 과제의 일환으로 수행되었음.

## References

- Ariza, A., M.R. Irizar, and S. Bayer, 2018. Empirical line model for the atmospheric correction of sentinel-2A MSI images in the Caribbean Islands, *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 765-776.
- Gong, P., H. Liu, M. Zhang, C. Li, J. Wang, H. Huang, N. Clinton, L. Ji, W. Li, Y. Bai, B. Chen, B. Xu, Z. Zhu, C. Yuan, H.P. Suen, J. Guo, N. Xu, W. Li, Y. Zhao, J. Yang, C. Yu, X. Wang, H. Fu, L. Yu, and I. Dronova, F. Hui, X. Cheng, X. Shi, F. Xiao, Q. Liu, and L. Song, 2019. Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017, *Science Bulletin*, 64: 370-373.
- Han, B.R., J.Y. Oh., S.M. Park., and S.W. Son, 2019. Evaluation of the Total Column Ozone in the Reanalysis Datasets over East Asia, *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, 29(5): 659-669 (in Korean with English abstract).
- Jung, D.S., D.H. Jin., N.H. Seong., K.S. Lee., M.J. Seo., S.W. Choi., and B.R. Kim, 2020. Sensitivity Analysis of Surface Reflectance Retrieved from 6SV LUT for Each Channel of KOMPSAT-3/3A, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(5): 785-791 (in Korean with English abstract).
- Kotchenova, S.Y., E.F. Vermote, R. Matarrese, and F.J. Klemm Jr, 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(26): 6762-6774.
- Kwon, S.K., K.M. Kim., and J.B. Lim, 2021. A Study on Pre-evaluation of Tree Species Classification Possibility of CAS500-4 Using RapidEye Satellite Imageries, *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(2): 291-304 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S., 2019. Atmospheric Correction Issues of Optical Imagery in Land Remote Sensing, *Korean Journal of Remote Sensing*, 1299-1312. (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H. and J.M. Yum, 2019. A Review on Atmospheric Correction Technique Using Satellite Remote Sensing, *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(6): 1011-1030. (in Korean with English abstract).
- Lee, S.B., P.H. La., Y.D. Eo., and M.W. Pyeon, 2015. Generation of Simulated Image from Atmospheric Corrected Landsat TM Images, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 33(1): 1-9. (in Korean with English abstract).
- Louis, J. and L2A team, 2021. Level-2A Algorithm Theoretical Basis Document (S2-PDGS-MPC-ATBD-L2A), European Space Agency, Paris, FR.
- Louis, J., V. Debaecker, B. Pflug, M. Main-Knorn, J. Bieniarz, U. Mueller-Wilm, E. Cadau, and F. Gascon, 2016. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users, *Proc. of ESV Living Planet Symposium 2016*, Prague, CS, May. 09-13, pp. 1-8.
- Maeda, E.E. and Galvão, L.S, 2015. Sun-sensor geometry effects on vegetation index anomalies in the Amazon rainforest, *GIScience and Remote Sensing*, 52(3): 332-343.
- Meng, R., J. Wu, K.L. Schwager, F. Zhao, P.E. Dennison, B.D. Cook K. Brewster, T.M. Green, and S.P. Serbin, 2017. Using high spatial resolution satellite imagery to map forest burn severity across spatial scales in a Pine Barrens ecosystem, *Remote Sensing of Environment*, 191: 95-109.
- Motohka, T., K.N. Nasahara, H. Oguma, and S. Tsuchida, 2010. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology, *Remote Sensing*, 2(10): 2369-2387.
- Obregón, M.Á., G. Rodrigues, M.J. Costa, M. Potes, and A.M. Silva, 2019. Validation of ESA Sentinel-2 L2A Aerosol Optical Thickness and Columnar Water Vapour during 2017-2018, *Remote Sensing*, 11(14): 1649.
- Pereira, J.M., 1999. A comparative evaluation of NOAA/

- AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1): 217-226.
- Richter, R., T. Heege, V. Kiselev, and D. Schläpfer, 2014. Correction of ozone influence on TOA radiance, *International Journal of Remote Sensing*, 35(23): 8044-8056.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *NASA Special Publication*, 351(1974): 309.
- Tzortziou, M., O. Parker, B. Lamb, J.R. Herman, L. Lamsal, R. Stauffer, and N. Abuhassan, 2018. Atmospheric Trace Gas (NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>) variability in South Korean coastal waters, and implications for remote sensing of coastal ocean color dynamics, *Remote Sensing*, 10(10): 1587.
- Vicent, J., J. Verrelst, N. Sabater, L. Alonso, J.P. Rivera-Caicedo, Martino, L., J. Muñoz-Marí, and Moreno, J., 2020. Comparative analysis of atmospheric radiative transfer models using the Atmospheric Look-up table Generator (ALG) toolbox (version 2.0), *Geoscientific Model Development*, 13(4): 1945-1957.
- Wang, Z., A.C. Bovik, H.R. Sheikh, and E.P. Simoncelli, 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4): 600-612.
- Zhang, Z., G. He, and X. Wang, 2010. A practical DOS model-based atmospheric correction algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, 31(11): 2837-2852.
- Zhang, Z., G. He, X. Zhang, T. Long, G. Wang, and M. Wang, 2018. A coupled atmospheric and topographic correction algorithm for remotely sensed satellite imagery over mountainous terrain, *GIScience and Remote Sensing*, 55(3): 400-416.