

Article

Landsat-8 OLI 영상정보의 대기 및 지표반사도 산출을 위한 OTB Extension 구현과 RadCalNet RVUS 자료를 이용한 성과검증

김광섭 ¹⁾ · 이기원 ^{2)†}

An Implementation of OTB Extension to Produce TOA and TOC Reflectance of LANDSAT-8 OLI Images and Its Product Verification Using RadCalNet RVUS Data

Kwangseob Kim ¹⁾ · Kiwon Lee ^{2)†}

Abstract: Analysis Ready Data (ARD) for optical satellite images represents a pre-processed product by applying spectral characteristics and viewing parameters for each sensor. The atmospheric correction is one of the fundamental and complicated topics, which helps to produce Top-of-Atmosphere (TOA) and Top-of-Canopy (TOC) reflectance from multi-spectral image sets. Most remote sensing software provides algorithms or processing schemes dedicated to those corrections of the Landsat-8 OLI sensors. Furthermore, Google Earth Engine (GEE), provides direct access to Landsat reflectance products, USGS-based ARD (USGS-ARD), on the cloud environment. We implemented the Orfeo ToolBox (OTB) atmospheric correction extension, an open-source remote sensing software for manipulating and analyzing high-resolution satellite images. This is the first tool because OTB has not provided calibration modules for any Landsat sensors. Using this extension software, we conducted the absolute atmospheric correction on the Landsat-8 OLI images of Railroad Valley, United States (RVUS) to validate their reflectance products using reflectance data sets of RVUS in the RadCalNet portal. The results showed that the reflectance products using the OTB extension for Landsat revealed a difference by less than 5% compared to RadCalNet RVUS data. In addition, we performed a comparative analysis with reflectance products obtained from other open-source tools such as a QGIS semi-automatic classification plugin and SAGA, besides USGS-ARD products. The reflectance products by the OTB extension showed a high consistency to those of USGS-ARD within the acceptable level in the measurement data range of the RadCalNet RVUS, compared to those of the other two open-source tools. In this study, the verification of the atmospheric calibration processor in OTB extension was carried out, and it proved the application possibility for other satellite sensors in the Compact Advanced Satellite (CAS)-500 or new optical satellites.

Key Words: Atmospheric Correction, Landsat-8 OLI, Orfeo Toolbox, Open-source, TOA/TOC Reflectance

Received June 11, 2021; Revised June 17, 2021; Accepted June 20, 2021; Published online June 22, 2021

¹⁾ 한성대학교 전자정보공학과 시간강사 (Part-time Lecturer, Department of Electronics and Information Engineering, Hansung University)

²⁾ 한성대학교 전자정보공학과 정교수 (Professor, Department of Electronics and Information Engineering, Hansung University)

[†] Corresponding Author: Kiwon Lee (kilee@hansung.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.

요약: 광학 위성정보에 대한 분석대기자료(ARD)는 각 센서 별 분광특성과 촬영각 등을 적용하는 전처리 작업에 의한 성과물이다. 대기보정 처리과정은 통하여 얻을 수 있는 대기반사도와 지표반사도는 기본적으로 복 잡한 알고리즘을 요구한다. 대부분 위성 정보처리 소프트웨어에서는 Landsat 위성 대기보정 처리 알고리즘 및 기능을 제공하고 있다. 또한 사용자는 클라우드 환경에서 Google Earth Engine(GEE)을 통하여 USGS-ARD와 같은 Landsat 반사도 성과에 직접 접근할 수 있다. 이번 연구에서는 고해상도 위성정보 처리에 활용되고 있는 Orfeo ToolBox(OTB) 오픈 소스 소프트웨어의 대기보정 기능을 확장 구현하였다. 현재 OTB 도구는 어떠한 Landsat 센서도 지원하지 않기 때문에, 이 확장 도구는 최초로 개발된 사례이다. 이 도구를 이용하여 RadCalNet 사이트의 Railroad Valley, United States(RVUS) 반사율 자료 값을 이용한 결과 검증을 위하여 같은 지역의 Landsat-8 OLI 영상의 절대 대기보정에 의한 반사도 성과를 산출하였다. 산출된 결과는 RVUS 자료를 기준으로 반사도 값과의 차이가 5% 미만으로 나타났다. 한편 이 반사도 성과는 USGS-ARD 반사도 값뿐만 아니라 QGIS Semi-automatic Classification Plugin과 SAGA GIS와 같은 다른 오픈 소스 도구에서 산출된 성과를 이용한 비교 분석을 수행하였다. OTB 확장도구로부터 산출한 반사도 성과는 RadCalNet RVUS의 자료와 높은 일치도를 나타내는 USGS-ARD의 값과 가장 부합되는 것으로 나타났다. 이 연구에서 OTB 대기보정 처리의 다양한 위성센서 적용 가능성을 입증한 결과로 이 모듈을 다른 센서정보로 확장하여 구현하는 경우에도 정확도가 높은 반사도 산출이 가능한 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 연구 방법은 향후 차세대중형위성을 포함하는 다양한 광학위성에 대한 반사도 성과 산출 도구개발에도 활용할 수 있다.

1. 서론

최근 여러 나라의 위성정보 공급주체와 사용자그룹에서는 더욱더 경제적이면서 우수한 성능의 지구관측 위성센서로부터 얻은 영상정보를 활용하고자 하는 노력과 함께 그동안 축적된 위성정보를 사용자가 원하는 시계열 분석작업에 편리하게 사용할 수 있도록 하는 분석대기자료(Analysis Ready Data: ARD)에 대한 관심도 증가하고 있다.

광학위성의 경우 센서 밴드별 분광특성을 활용하여 대기에 따른 영향을 제거하는 대기보정을 위한 전처리 작업에 의하여 Top of Atmosphere(TOA) Reflectance(대기 반사도)와 Top of Canopy(TOC) Reflectance(지표 반사도)와 같은 실제 과학분석에 적용할 수 있는 성과물을 생산하게 된다. 2016년 국제기구인 Committee on Earth Observation Satellites(CEOS)에서 광학 위성정보로부터 산출하는 지표반사도(Surface Reflectance)를 지표온도도(Surface Temperature)와 함께 CEOS ARD for Land(CARD4L ARD)라는 지침에 포함되는 기본유형자료로 제정하였다. 이후 구체적인 ARD 제품에 대한 수요가 증가하게 되었고 위성 전처리 과정과 관련된 알고리즘 분석 및 개발과 함께 이를 이용하는 처리기법에 대한 연구사례 또한 증가하고 있다(Lee and Kim, 2019; Qiu et al., 2019; Siqueira et al., 2020).

위성정보 처리기능을 제공하는 모든 상용 소프트웨어는 대표적인 광학영상 정보인 Landsat 센서영상에 대하여 사용자가 직접 처리할 수 있도록 하는 다양한 방식의 대기 보정처리 기능을 제공하고 있다(Young et al., 2017). 대기보정을 통하여 산출되는 지표반사도 자료의 정확도 산정과 성과(Product)에 대한 품질평가에 대한 연구도 지속해서 발표되고 있다. Feng et al. (2012)는 MODIS 데이터를 사용해 지표반사도 값을 직접 계산하여 품질평가를 수행하였고, Houborg and McCabe (2017)는 사막지역에서 Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum(6S) 복사모델과 다른 알고리즘을 비교하면서 지표반사도 값의 비교검증을 수행하였다. Bernardo et al. (2017)도 하천 부유물질의 농도산출을 위한 최적의 대기보정 방법을 찾기 위해 Dark Object Subtraction(DOS)나 Quick Atmospheric Correction(QUAC) 등과 같은 상용도구에서 지원하는 여러 가지 방법을 적용한 결과를 비교하였다. 또한 이러한 Landsat-8 영상의 지표반사도 성과는 산림 변화탐지와 식생지수 추출을 위한 중요한 자료로 다시 부각되고 있으며(Hermosilla et al., 2017; Zhang et al., 2018), Fan et al. (2019)은 재해 및 재난 피해지역을 파악하는데 지표반사도 값을 활용하였다. 또한 Wei et al. (2018)은 육상 뿐만 아니라 하천지역의 생태환경 분석에도 Landsat 반사도 성과가 의미 있는 결과를 도출할 수 있다고 하였다.

한편 United States Geological Survey(USGS)에서는 2010년대 중반부터 미국 전역을 대상으로 Landsat TM, ETM+, OLI 센서로부터 얻은 과거 영상에 대하여 자체 대기보정 알고리즘을 적용하여 여러 시기의 대기 및 지표반사도를 생성하는 Landsat ARD 구축사업을 실시하고 있다. 그 결과 2017년부터 아마존 웹 서비스(Amazon Web Service: AWS) 클라우드 환경을 이용하여 이러한 성과들을 관리하는 동시에 EarthExplorer 사이트를 통하여 이 성과물들을 일반에게 공급하기 시작하였고 Google은 자체 GEE 플랫폼을 통해 온라인상에서 사용자가 이 자료들을 접근할 수 있도록 하였다(USGS, 2018a).

이 연구에서는 Orfeo Tool Box(OTB)의 오픈소스 엔진을 기반으로 하여 Landsat-8 OLI 위성정보에 대한 대기보정을 처리할 수 있도록 도구를 개발하고 이로부터 얻어진 결과를 검증하고자 하였다. 일반적으로 상업 소프트웨어는 개발 모듈에 대하여 여러 단계의 성능테스트를 수행하고 사용자들에게 그 결과를 제시하지만 오픈소스는 개발소스를 적용한 검증결과를 찾기가 어렵거나 사용자가 직접 검증을 해야 하는 경우도 많다. 또한 과학분야에서는 같은 응용목적을 위하여 개발된 여러 가지 오픈소스 도구에서 응용에 필요한 공통적인 기능이라고 하더라도 실제 입력변수나 내부 알고리즘의 차이로 다른 결과를 생성하는 경우도 있다. 따라서 여러 도구의 처리결과를 대상으로 하는 상호검증이 필요하지만 이러한 주제에 대한 연구결과나 실험 분석사례가 발표된 경우는 많지 않다.

이 연구에서 개발된 도구로부터 도출한 성과검증을 위하여 Radiometric Calibration Network(RadCalNet) 포털(Bouvet *et al.*, 2019)에서 제공하는 Railroad Valley, United States(RVUS)의 현장측정 반사율 자료를 사용하였다. 광학 위성영상의 반사도 성과를 검증하거나 정상운영에서 품질확인을 위하여 RadCalNet 포털 자료를 직접 사용하는 사례가 계속 증가하고 있다(Badawi *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021).

주요한 연구 내용은 우선 두 시기의 Landsat-8 OLI 영상으로부터 이 연구에서 구현한 OTB Extension을 통하여 얻은 대기 및 지표반사도 성과에 대하여 동일한 시기에 해당하는 RadCalNet RVUS 자료를 기준으로 하여 성과의 정확도를 비교해 보았다. 이후 USGS에서 제공

하는 ARD(USGS-ARD) 성과와 함께 이 산출 성과값과의 차이를 확인해 보고자 하였다. 또한 같은 Landsat-8 OLI 영상정보를 가지고 다른 오픈소스 도구를 통하여 얻은 반사도 성과 결과값의 비교분석을 수행하여 도구별로 결과가 어떠한 차이가 있는지 비교해 보았다.

2. Landsat-8 OLI OTB Extension을 이용한 대기 및 지표반사도 성과산출

Landsat 위성정보는 EarthExplorer(<https://earthexplorer.usgs.gov>)를 통해 모든 데이터를 내려받을 수 있다. 특히 2016년부터 USGS는 Landsat 아카이브를 자체적으로 계층화된 수집구조로 재구성하여 2017년 Landsat Collection 1을 제공하였다. Collection 1에는 모든 Landsat 시리즈의 영상정보가 제공되고 있으며, 2020년 기준으로 구축되고 있는 Collection 2 성과는 Collection 1보다 센서 방사보정 및 기하학적 정확도가 향상된 결과를 나타낸다(Pinrtto *et al.*, 2020). 이 Collection은 Level-1과 Level-2로 구분되어 있는데, Level-1 성과는 다중 분광영상 정보로 기본보정이 처리된 Digital Number(DN) 값으로 구성되어 있다. Landsat의 모든 밴드가 포함되어 있으며, 메타정보 자료는 MTL과 ANG 텍스트 파일에서 제공되기 때문에 사용자가 처리 도구가 있는 경우에는 직접 분광방사 값(radiance), 대기 및 지표반사도 성과를 산출할 수 있다. 한편 Level-2는 주문형(On-demand) 제품으로 지표반사도 성과물을 제공한다. Landsat-8을 제외한 시리즈들은 6S 복사 전달 모델을 사용해 처리하여 1~5 밴드와 7 밴드 결과를 제공하며, Landsat-8은 내부에서 자체 알고리즘이 포함된 Land Surface Reflectance Code(LaSRC)를 사용하여 1~7 밴드에 대한 반사도 성과를 제공한다. 추가로 픽셀 품질(Pixel Quality), 방사측정 품질(Radiometric Saturation Quality) 결과 값이 이미지 파일로 처리되어 있으며 Landsat-8은 LaSRC 품질에 대한 성능결과를 제품에 포함한다. Martins *et al.* (2018)은 China-Brazil Earth Resources Satellite로부터 산출한 지표반사도 성과검증 시에 Landsat-8 Level-2 지표반사도 성과를 같이 활용하였다.

상용 소프트웨어들은 대부분 절대 대기보정 처리기능을 지원하고 있다. 몇 가지 사례로 Harris Geospatial

ENVI는 MODTRAN 복사전달 코드를 사용한 Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes(FLAASH)를, Hexagon Geospatial ERDAS Imagine은 Atmospheric and Topographic Correction(ATCOR)을 제공한다. 대기보정 처리를 지원하는 오픈소스 도구로는 GRASS, QGIS Semi-Automatic Classification Plugin(이하 QGIS로 약칭함), SAGA GIS, Sentinel Toolbox을 포함하는 Sentinel Application Platform (SNAP) (Sen2Cor 기능), 그리고 이 연구에서 다루는 OTB가 있다. 그러나 이러한 오픈소스 도구가 모든 센서모델을 지원하지 않기 때문에 SNAP의 경우와 같이 Landsat 대기보정 처리를 위하여 별도의 iCOR라는 추가적인 도구를 설치해야 하는 경우도 있다. OTB의 경우도 기본 엔진에서 몇 가지 고해상도 위성의 센서모델을 위한 절대 대기보정 기능은 지원하고 있지만, Landsat 센서를 위한 대기보정 기능은 지원하지 않는다.

1) Landsat-8 OLI 영상 정보를 위한 OTB Extension

2010년대 중반 프랑스국립우주센터(Centre National D'études Spatiales: CNES)에서 개발 프로그램이 시작되어 현재는 Open Source GeoSpatial(OSGeo)에서 관리되

고 있는 OTB는 오픈소스 Apache 라이선스로 100개가 넘는 전문적인 고해상도 위성정보 처리 알고리즘을 제공하고 있으며 2021년 5월 기준 버전 7.3.0이 발표되었다.

OTB가 제공하는 영상처리 도구기능을 이용하는 데 특정 센서에 제한을 갖지 않지만, 광학 대기보정(Radiometric Calibration) 기능에 한하여 QuickBird, WorldView-2, FORMOSAT, SPOT 5~7, Pleiades 센서 영상정보만 지원한다. Lee and Kim (2019)은 KOMPSAT-3A 센서에 대한 지표반사도 성과 산출을 위해 OTB 소스코드에 직접 메타정보를 추가하여 이 센서를 지원하는 확장도구(Extension)를 개발하였다. 또한 이 도구에서 얻은 처리 결과를 가지고 RadCalNet BTCN 자료를 이용하는 비교 검증을 수행하였고, 식생지수 산출에 적용하면서 지표 반사도 성과의 유효성 검사를 수행하였다(Kim and Lee, 2020a; Kim and Lee, 2020b).

이번 연구에서 OTB의 KOMPSAT-3A 센서 지원도구를 개발한 Lee and Kim (2019), Lee and Kim (2020)과 같은 방식으로 Landsat-8 OLI 센서를 지원하는 OTB 확장 도구를 개발하였다. 먼저, OTB 내부소스에 기본 메타정보를 읽을 수 있는 소스코드를 추가하면서 Blue, Green, Red, NIR 밴드 자료를 한 번에 읽을 수 있도록 하

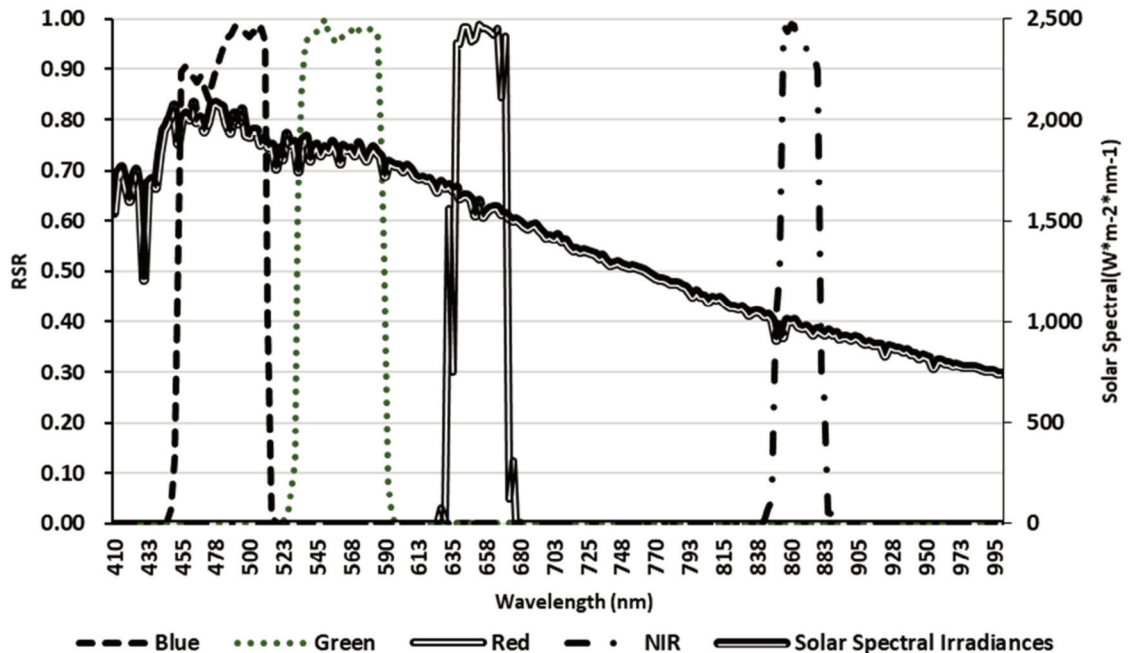


Fig. 1. Solar spectral irradiance and Relative Spectral Response (RSR) for Blue, Green, Red, and NIR bands of Landsat-8 OLI sensor.

였다. 이 도구에서는 OTB에서 어떠한 메타정보가 필요한 경우 내부적으로 사용하고 있는 Open Source Software Image Map(OSSIM)을 통해 촬영일자, 위성 센서정보 등을 GEOM 포맷으로 생성하여 처리할 수 있도록 하였다. 메타정보의 파일 안에 지표반사도 처리에 필요한 메타정보 입력값으로 Relative Spectral Response(RSR) 자료, 태양복사 조도값, 위성각도, 태양각도 등 여러 가지가 필요하다. RSR 자료는 NASA Landsat Science에서 제공하는 자료(NASA, 2013)를 적용하였다. 또한 태양 복사 조도값은 미국 재생에너지연구소와 시험재료학회(American Society for Testing and Materials: ASTM)가 공동으로 개발한 태양 스펙트럼 표준분포인 G-173-03 자료(Marzo *et al.*, 2016)를 OTB 입력 포맷에 맞게 가공하였다.

Fig. 1은 OTB에 적용된 RSR 값 및 태양복사 조도값이다. 위성센서의 각도값은 Landsat 데이터 셋의 ANG 파일에서 제공하지만 OTB에서는 이 값은 바로 사용할 수 없기 때문에 USGS-The Landsat Angles Creation Tool (USGS, 2018b)을 이용하여 래스터(Raster) 유형으로 결과를 추출한 뒤에 OTB에서 요구하는 단일값으로 입력하기 위하여 래스터의 평균값을 사용하였다.

2) 실험 자료 및 방법

개발 도구로부터 산출한 성과의 정확도 검증실험을 위하여 RadCalNet 자료를 이용하였다. 이 연구에서는

RadCalNet에서 제공하는 다섯 개의 측정 사이트 중에서 RVUS 지점(위도: 38.497, 경도: -115.690) 데이터를 사용하였다. RVUS 지역은 사막 지역이며, 현지 시간 기준으로 09:00~15:00 30분 간격으로 400 m~2500 m 분광자료를 측정한다. Coordinated Universal Time(UTC) 기준으로는 17:00~23:00으로 Landsat-8 영상 촬영시기와 겹치는 것을 확인하였다. 실험과정에서 RadCalNet RVUS 자료를 기준값으로 하여 OTB Extension을 이용하여 Landsat-8 OLI 영상정보에서 산출한 대기 및 지표반사도 결과 값의 정확도를 파악하면서 USGS-ARD에서 제공하고 있는 반사도 성과와 대기보정 처리를 제공하고 있는 QGIS, SAGA GIS 오픈소스 도구를 사용하여 얻은 반사도 결과값과의 비교분석을 실시하였다.

RadCalNet RVUS 지역은 측정소 위치를 중심으로 하여 1 * 1 km² 범위내 값을 측정 결과값으로 제공하고 있음으로(RadCalNet, 2018), 실험자료에서도 동일한 위치값과 1 * 1 km² 범위에 해당하는 값을 비교할 수 있도록 영역 범위를 설정하였다(Fig. 2). 실험 영상으로는 Landsat-8 영상과 RadCalNet RVUS 측정 데이터가 동시에 존재하는 일자에 Landsat-8 데이터 지역을 덮는 구름 영역이 최소인 Scene 단위의 영상정보를 선택하였다. 또한, OTB Extension에서 대기보정을 처리할 때 필요한 대기조건에 대한 입력값을 제공하는 Aerosol Robotic Network(AERONET) 자료의 가용성도 동시에 만족해야 한다. 이러한 조건들을 고려하여 두 날짜(2017년 10월

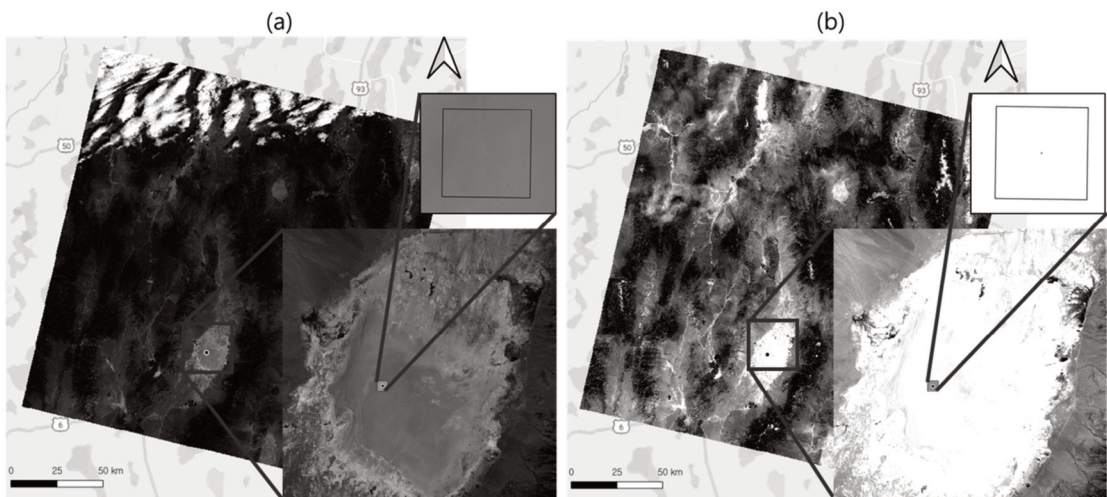


Fig. 2. Point location of RVUS site (Lat.: 38.497, Lon.: -115.69) and unit square area of 1 * 1 km² in Landsat-8 OLI images: (a) 2017-10-18 18: 21: 13, and (b) 2018-05-04. 18: 20: 05.

Table 1. Input parameters of Landsat-8 OLI images used in the OTB Extension

Key	Values	
	2017. 10. 08.	2018. 05. 04
Sensor	Landsat-8 OLI	
Solar irradiance	2067 1893 1603 972.6	
Date	2017-10-08T18:21:13.8692189	2018-05-04T18:20:05.5308410
Gain (B/G/R/N)	77.616, 84.232, 99.880, 163.225	79.083, 85.822, 101.776, 166.315
Bias (B/G/R/N)	-64.4197, -59.3622, -50.058, -30.633	-63.223, -58.260, -49.128, -30.064
Satellite azimuth angle (B/G/R/N)	7.310, 5.741, 6.001, 6.326	7.290, 5.718, 5.978, 6.303
Satellite elevation angle (B/G/R/N)	3.064, 3.062, 3.058, 3.053	3.067, 3.065, 3.061, 3.057
Sun azimuth angle	156.80746150	137.41928817
Sun elevation angle	42.24131893	61.42108424

8일, 2018년 5월 4일)의 영상정보를 실험자료로 사용하였다.

Landsat-8 OLI 센서 영상정보 중에서 이번 실험에 사용한 밴드는 총 네 개의 밴드로 Blue(450 nm~510 nm), Green(520 nm~600 nm), Red(630 nm~680 nm), Near-infrared(840 nm~890 nm)이다. RadCalNet RVUS 데이터는 400 nm~2,500 nm 분광범위의 값을 수집하고 있으므로 네 개의 밴드에 대한 영역을 모두 포함하고 있기 때문에 실험과정에서는 분광범위의 값을 모두 고려하면서 동시 평균값을 같이 사용하였다. Table 1은 절대 대기보정 알고리즘을 지원하는 OTB Extension의 입력값으로 두 영상정보를 정리한 것이다.

이번 연구에서 적용한 오픈소스 도구의 대기보정 기능의 비교분석에는 상대 및 절대 대기보정 처리가 모두 포함되어 있다. 상대 대기보정 처리는 QGIS Semi-Automatic Classification Plugin 기능을 사용하였으며, 이 도구는 Sun Elevation, Earth-Sun Distance, Radiance Multi, Radiance Add, Radiance Maximum 등과 같은 총 7개의 입력값을 요구하며(Lee and Kim, 2020), 이 변수들은 MTL 파일에서 자동으로 입력된다. 한편 SAGA GIS에서는 ‘Top of Atmosphere Reflectance’ 기능을 사용하였으며, 이 도구도 MTL 파일에서 필요한 변수값을 자동으로 읽어서 사용한다.

두 도구가 모두 지표반사도 처리는 DOS 기반의 알고

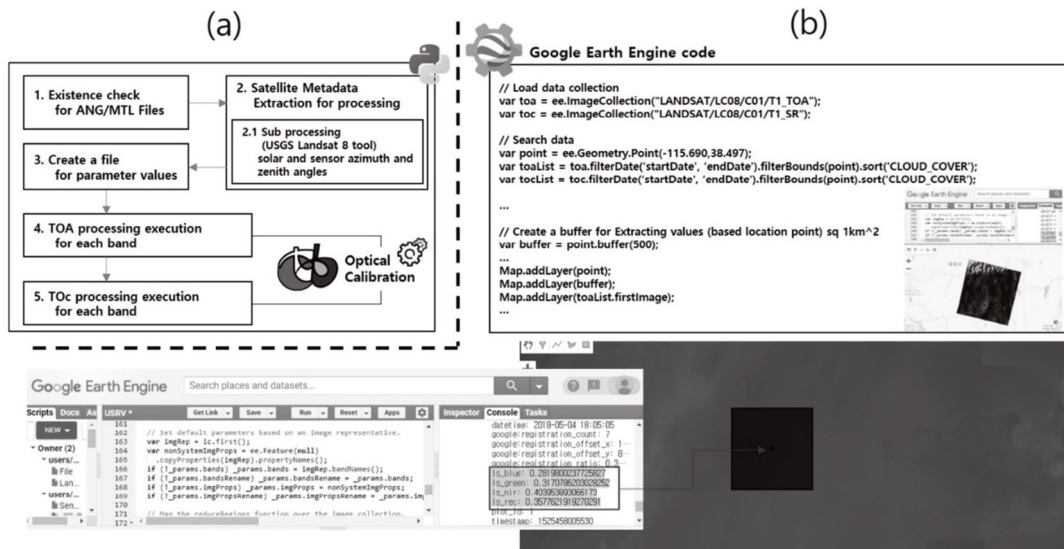


Fig. 3. (a) Flow of process automation scripts for the OTB Extension, and (b) Accessing Landsat-8 OLI reflectance products form Google Earth Engine (GEE) to compare with the results by the OTB extension.

리즘을 사용하기 때문에 촬영일자에 해당하는 대기과 관련된 입력값은 요구하지 않는다. 반면에 이번 연구에서 개발한 OTB Extension에 포함된 Optical Calibration 기능은 절대 대기보정 처리를 수행한다. Fig. 3(a)은 Landsat-8 OLI 영상 센서정보에 대한 대기보정에 필요한 여러 입력값과 기타 센서모델에 대한 입력값을 자동으로 읽어 처리하는 과정을 정리한 것으로 이러한 입력처리 시스템은 Python 스크립트로 구현하였다. 이 기능을 통하여 지표반사도 처리에 필요한 입력값(Table 1)은 모두 자동으로 입력된다. 네 개의 밴드는 하나의 파일로 병합된 상태에서 처리하는 데 각 밴드별로 자료가 있는 경우에는 Blue, Green, Red, NIR 밴드 순서대로 값을 입력한다. 이렇게 처리된 결과는 USGS-ARD에서 제공하는 반사도 자료와 비교하기 위하여 GEE 플랫폼에 접근하는 별도의 스크립트 코드(Fig. 3(b))를 통해 비교 대상이 되는 데이터를 직접 Comma Separated Values(CSV) 유형으로 읽도록 하였다. 한편 RadCalNet RVUS 지점의 위치(Point location)과 단위면적 영역($1 \times 1 \text{ km}^2$)에 대한 값을 별도로 추출하여 비교를 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

Landsat-8 OLI 영상정보에 대하여 OTB Extension 도구를 적용한 실험결과는 RadCalNet RVUS 사이트 자료를 기준으로 하여 정확도를 검증하였다. 사이트의 지리 위치에 대한 값과 해당 위치를 중심으로 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 범위의 사각형 범위를 설정하고 이 범위 내에 분포하는 반사도 성과의 평균값을 계산하였다.

Table 2는 RadCalNet RVUS 값과 OTB Extension을 통해 처리된 Landsat-8 OLI에 대한 대기 및 지표반사도 결과 값(Value)의 차(Difference)를 정리한 것이다. 2017년 가을 영상 자료의 경우 단위면적($1 \times 1 \text{ km}^2$)에 대한 평균값을 보면 대기반사도 값의 차이는 0.010~0.030로 나타나고, 지표반사도 값의 차이는 0.003~0.024인 것으로 나타났다. 한편 지리 위치에 따른 지점 위치의 값의 비교 결과도 평균값과 거의 동일한 값으로 나타났다. 2018년 여름 자료의 경우 단위면적에 대한 평균값을 보면 대기 반사도 값 차이는 위치 지점값을 기준으로 0.010~0.021 사이, 지표 반사도 값 차이는 0.020~0.053 사이인 것을 확인할 수 있다. 따라서 OTB Extension을 통하여 얻은 성과는 모두 RadCalNet RVUS 자료를 기준으로 했을 때

Table 2. Results of the reflectance products using Landsat-8 OLI images (2017-10-08 and 2018-05-04). RadCalNet and the value in the type mean the on-site measurement one and computed one by the OTB Extension, respectively. The number in the parenthesis means the average value of reflectance product within unit area of $1 \times 1 \text{ km}^2$

Type		Blue	Green	Red	NIR
TOA Reflectance (2017)	RadCalNet	0.252	0.283	0.317	0.352
	Value	0.263 (0.262)	0.302 (0.301)	0.337 (0.337)	0.382 (0.381)
	Difference (%)	0.010 (0.010)	0.019 (0.018)	0.020 (0.020)	0.030 (0.030)
		1.0% (1.0%)	1.9% (1.8%)	2.0% (2.0%)	3.0% (3.0%)
TOC Reflectance (2017)	RadCalNet	0.228	0.295	0.330	0.356
	Value	0.233 (0.232)	0.290 (0.289)	0.334 (0.334)	0.381 (0.381)
	Difference (%)	0.005 (0.005)	0.005 (0.006)	0.004 (0.003)	0.025 (0.024)
		0.5% (0.5%)	0.5% (0.6%)	0.4% (0.3%)	2.5% (2.4%)
TOA Reflectance (2018)	RadCalNet	0.296	0.328	0.362	0.409
	Value	0.277 (0.276)	0.313 (0.311)	0.351 (0.349)	0.405 (0.398)
	Difference (%)	0.019 (0.021)	0.015 (0.017)	0.011 (0.012)	0.004 (0.010)
		1.9% (2.1%)	1.5% (1.7%)	1.1% (1.2%)	0.4% (1.0%)
TOC Reflectance (2018)	RadCalNet	0.279	0.352	0.383	0.418
	Value	0.248 (0.246)	0.299 (0.298)	0.346 (0.345)	0.399 (0.397)
	Difference (%)	0.031 (0.033)	0.053 (0.055)	0.037 (0.039)	0.018 (0.020)
		3.1% (3.3%)	5.3% (5.5%)	3.7% (3.9%)	1.8% (2.0%)

Table 3. Results of TOA and TOC reflectance products using Landsat-8 OLI image (2017-10-08) by USGS, QGIS, and SAGA GIS. The value in the type means the computed one by each tool. The number in the parenthesis means the average value of reflectance product within unit area of 1 * 1 km². The difference is different value with RadCalNet value at the same position

Type			Blue	Green	Red	NIR
TOA Reflectance	USGS	Value	0.267 (0.268)	0.305 (0.306)	0.344 (0.345)	0.384 (0.386)
		Difference (%)	0.015 (0.016)	0.022 (0.023)	0.027 (0.028)	0.033 (0.035)
			1.5% (1.6%)	2.2% (2.3%)	2.7% (2.8%)	3.3% (3.5%)
	QGIS	Value	0.268 (0.268)	0.307 (0.306)	0.345 (0.345)	0.386 (0.386)
		Difference (%)	0.016 (0.015)	0.024 (0.023)	0.029 (0.028)	0.035 (0.034)
			1.6% (1.5%)	2.4% (2.3%)	2.9% (2.8%)	3.5% (3.4%)
	SAGA GIS	Value	0.268 (0.268)	0.307 (0.306)	0.345 (0.345)	0.386 (0.386)
		Difference (%)	0.015 (0.016)	0.024 (0.023)	0.029 (0.028)	0.035 (0.034)
			1.5% (1.6%)	2.4% (2.3%)	2.9% (2.8%)	3.5% (3.4%)
TOC Reflectance	USGS	Value	0.246 (0.245)	0.317 (0.319)	0.355 (0.356)	0.382 (0.384)
		Difference (%)	0.018 (0.017)	0.023 (0.024)	0.025 (0.026)	0.026 (0.028)
			1.8% (1.7%)	2.3% (2.4%)	2.5% (2.6%)	2.6% (2.8%)
	QGIS	Value	0.216 (0.216)	0.280 (0.280)	0.332 (0.332)	0.380 (0.379)
		Difference (%)	0.011 (0.012)	0.014 (0.015)	0.002 (0.001)	0.023 (0.023)
			1.1% (1.2%)	1.4% (1.5%)	0.2% (0.1%)	2.3% (2.3%)
	SAGA GIS	Value	0.417 (0.417)	0.455 (0.455)	0.494 (0.493)	0.535 (0.535)
		Difference (%)	0.189 (0.189)	0.161 (0.160)	0.164 (0.163)	0.179 (0.178)
			18.9% (18.9%)	16.1% (16.0%)	16.4% (16.3%)	17.9% (17.8%)

Table 4. Results of TOA and TOC reflectance products using Landsat-8 OLI image (2018-05-04) by USGS, QGIS, and SAGA GIS. The value in the type means the computed one by each tool. The number in the parenthesis means the average value of reflectance product within unit area of 1 * 1 km². The difference is different value with RadCalNet value at the same position

Type			Blue	Green	Red	NIR
TOA Reflectance	USGS	Value	0.284 (0.282)	0.318 (0.317)	0.359 (0.358)	0.406 (0.404)
		Difference (%)	0.012 (0.014)	0.010 (0.011)	0.002 (0.004)	0.003 (0.005)
			1.2% (1.4%)	1.0% (1.1%)	0.2% (0.4%)	0.3% (0.5%)
	QGIS	Value	0.370 (0.368)	0.416 (0.414)	0.469 (0.467)	0.530 (0.527)
		Difference (%)	0.074 (0.072)	0.088 (0.086)	0.108 (0.106)	0.122 (0.119)
			7.4% (7.2%)	8.8% (8.6%)	10.8% (10.6%)	12.2% (11.9%)
	SAGA GIS	Value	0.283 (0.282)	0.318 (0.317)	0.359 (0.358)	0.406 (0.404)
		Difference (%)	0.013 (0.014)	0.010 (0.011)	0.002 (0.004)	0.005 (0.005)
			1.3% (1.4%)	1.0% (1.1%)	0.2% (0.4%)	0.5% (0.5%)
TOC Reflectance	USGS	Value	0.261 (0.259)	0.332 (0.330)	0.373 (0.371)	0.405 (0.403)
		Difference (%)	0.018 (0.020)	0.021 (0.022)	0.011 (0.013)	0.013 (0.015)
			1.8% (2.0%)	2.1% (2.2%)	1.1% (1.3%)	1.3% (1.5%)
	QGIS	Value	0.290 (0.288)	0.365 (0.363)	0.433 (0.431)	0.507 (0.504)
		Difference (%)	0.011 (0.009)	0.012 (0.010)	0.049 (0.047)	0.089 (0.086)
			1.1% (0.9%)	1.2% (1.0%)	4.9% (4.7%)	8.9% (8.6%)
	SAGA GIS	Value	0.397 (0.396)	0.432 (0.431)	0.473 (0.471)	0.520 (0.518)
		Difference (%)	0.118 (0.117)	0.080 (0.078)	0.090 (0.088)	0.102 (0.100)
			11.8% (11.7%)	8.0% (7.8%)	9.0% (8.8%)	10.2% (10.0%)

$\pm 5\%$ 이내 범위에 포함되어 개발 도구로부터 얻은 결과의 신뢰도가 높은 수준임을 알 수 있다.

Table 3과 Table 4는 OTB Extension이 아닌 오픈소스 도구를 이용하여 얻는 결과를 RadCalNet RVUS 자료와의 차이값으로 정리한 것이다. USGS-ARD 자료의 경우는 GEE 플랫폼을 통하여 필요한 결과값을 얻었고, QGIS와 SAGA GIS는 직접 도구를 이용하여 처리한 결과값이다. 2017년 영상 정보를 가지고 처리한 대기반사도 값은 세 가지 경우가 모두 $\pm 5\%$ 이내 범위에 포함되면서 큰 차이가 없는 값을 나타냈다. 그러나 지표 반사도의 경우 SAGA GIS를 가지고 처리한 결과에서 예외적으로 RadCalNet RVUS 자료와의 차이가 위치 지점값을 대상으로 하여 절대값으로 나타냈을 때 0.161~0.189의 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(Table 3). 이는 SAGA-GIS가 사용하는 대기보정 방식이 영상정보의 상태에 직접 영향을 받는 상대 대기보정 방식이기 때문에 나타난 결과로 해석할 수 있다. 그러나 같은 상대대기 보정방법을 이용하는 QGIS의 경우는 오히려 지표 반사도가 절대 값으로 0.002~0.023으로 높은 정확도를

보이는 것으로 나타났기 때문에 상대 대기보정 방식을 적용하는 도구의 특성에 기인한 것으로 생각한다. 특히 이는 응용분야에 따라 대기 반사도보다 지표반사도를 우선 고려하는 경우에는 도구선택과 처리방식 등을 확인해 볼 필요가 있다는 점을 시사한다.

한편 2018년 영상정보를 적용한 대기반사도의 경우 2017년 결과와는 상이한 결과를 보이는 데 SAGA와 USGS-ARD의 값은 비슷한 범위내에 포함되지만 QGIS의 경우는 RadCalNet RVUS 자료와의 차이가 절대값으로 0.074~0.122로 나타나서 $\pm 5\%$ 범위를 벗어나는 것을 알 수 있다(Table 4). 또한 지표반사도의 경우 SAGA-GIS에서 얻은 결과는 2017년도 마찬가지로 0.080~0.118의 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있고, QGIS의 경우도 NIR 밴드에서 0.089 정도의 허용범위를 벗어난 차이를 보이는 것으로 나타났다. 한편 USGS-ARD의 경우는 대기반사도와 지표반사도의 차이가 각각 0.002 ~ 0.012, 0.011 ~ 0.021로 나타나서 OTB Extension과 마찬가지로 높은 수준의 신뢰도를 보이는 것으로 나타났다. 이 결과는 상대 대기보정 방식을 사용하는 오픈소스 도구의 경우도

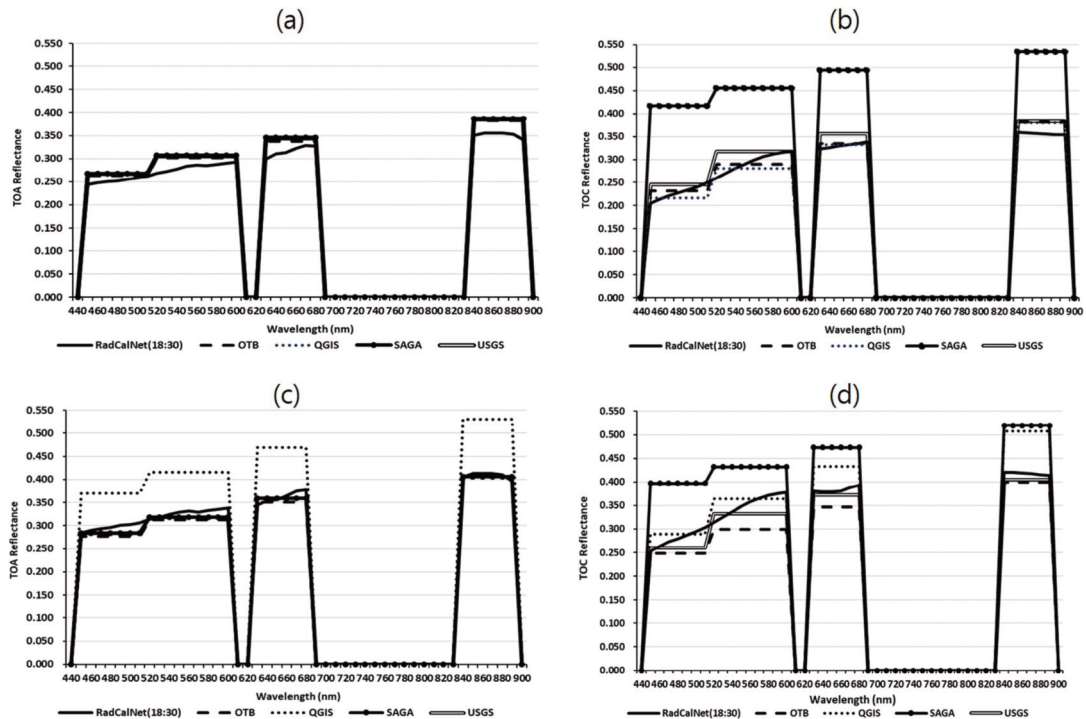


Fig. 4. Reflectance products by OTB Extension, USGS, QGIS, and SAGA GIS with RadCalNet RVUS data: (a) TOA reflectance (2017-10-08), (b) TOC reflectance (2017-10-08), (c) TOA reflectance (2018-05-04), and (d) TOC reflectance (2018-05-04).

구 별로 처리하는 영상정보에 따라 처리결과가 안정적으로 신뢰할 수 있는 범위를 벗어나는 결과를 산출할 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 Table 2에서 Table 4의 내용 중에서 위치지점의 결과를 모아서 Landsat-8 OLI 분광대역 별로 시각화한 곳이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 2017년 10월 8일, Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 2018년 5월 4일의 영상자료로부터 얻은 반사도 결과이다.

2017년 대기반사도의 경우는 Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 네 가지 도구에서 얻은 결과가 모두 RadCalNet RVUS 자료와 부합되는 것을 볼 수 있다. 그러나 2018년 대기반사도의 경우 QGIS로 얻은 결과가 큰 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 지표 반사도의 경우 SAGA-GIS의 경우 2017년 자료와 2018년 자료의 모든 밴드에서 RadCalNet과 차이가 크게 나타났고, QGIS의 경우 2017년 자료(Fig. 4(b))에서는 일치도가 높게 나타나지만 2018년 자료(Fig. 4(d))에서는 Red 밴드와 NIR 밴드가 차이를 보여서 안정적인 결과를 생성한다고 보기는 어렵다. OTB Extension이나 USGS-ARD의 반사도 성과는 어느 경우에도 RadCalNet 현장 측정자료와 비교할 때 허용범위 내에서 안정적으로 높은 일치도를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 단위면적($1 \times 1 \text{ km}^2$)에 대하여 30 m 해상도를

가진 Landsat-8 영상이기 때문에 약 1,000개 픽셀의 값을 평균값으로 나타낸 것이지만, 이 범위에 포함되는 모든 반사도성과에 대하여 세부사항을 나타내기 위하여 Fig. 5와 Fig. 6에서 각각 2017년과 2018년 성과를 박스플롯(Box plot) 또는 상자그림으로 시각화하였다. 한편 RadCalNet RVUS 자료는 밴드별 분광 영역에 있는 모든 데이터를 사용하였으며 측정간격이 10 nm이므로 Blue 밴드는 7개, Green 밴드는 9개, Red 밴드는 6개, NIR 밴드는 6개의 자료를 사용하였다.

Fig. 5(a)~(d)는 2017년 영상 정보의 대기반사도를 Blue, Green, Red, NIR 밴드별로 구분하여 나타낸 것이고, Fig. 5(e)~(h)는 2017년 영상정보의 지표반사도를 밴드별로 나타낸 것이다. 마찬가지로 Fig. 6(a)~(d)는 2018년 영상정보의 대기반사도를 Blue, Green, Red, NIR 밴드별로 나타낸 것이고, Fig. 6(e)~(h)는 2018년 영상정보의 지표반사도를 나타낸 것이다. 전체적인 분포 양상은 한 개 지점 값을 나타내는 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)와 유사하지만, 상자그림이 중앙값(Median)을 중심으로 4분위로 자료를 구분하여 나타내기 때문에 밴드별 자료의 상태를 파악하는 데 유리하다.

2017년 대기반사도 성과의 경우 네 가지 모두 일정한 범위에서 거의 동일한 양상으로 RadCalNet RVUS 자료와 잘 부합되는 것을 알 수 있다(Fig. 5(a)~(d)). 그러나

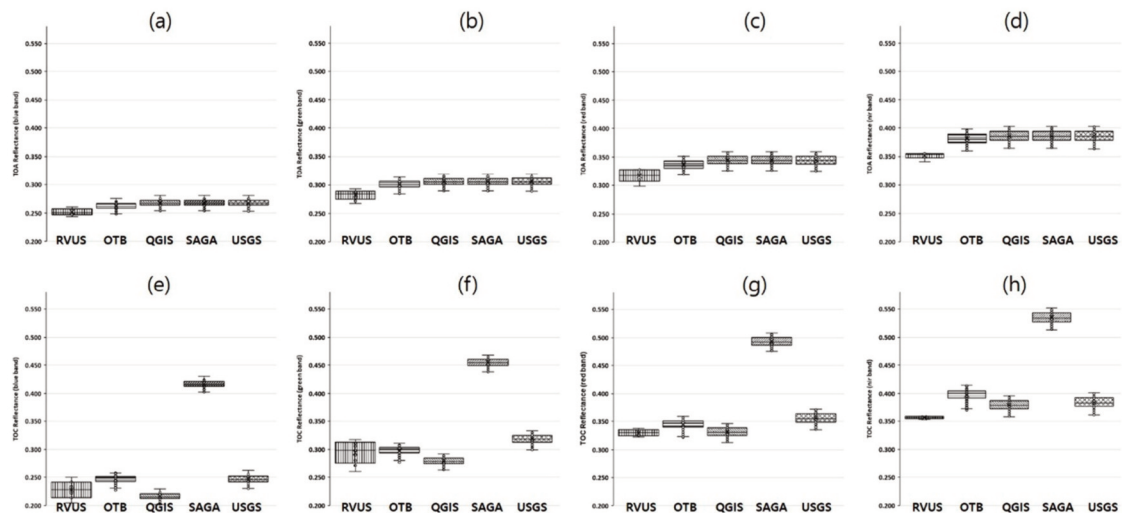


Fig. 5. Box plot of each band results by OTB Extension, USGS-ARD, QGIS, and SAGA GIS, with RadCalNet RVUS data (2017-10-08): (a) B band of TOA reflectance, (b) G band of TOA reflectance, (c) R band of TOA reflectance, (d) NIR band of TOA reflectance, (e) B band of TOA reflectance, (f) G band of TOA reflectance, (g) R band of TOA reflectance, and (h) NIR band of TOA reflectance.

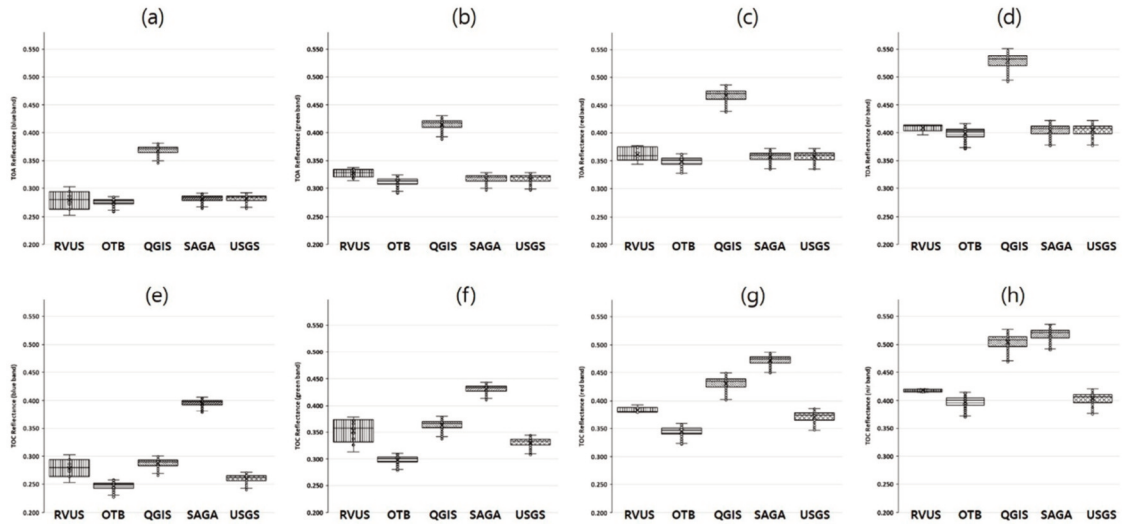


Fig. 6. Box plot of each band results by OTB Extension, USGS-ARD, QGIS, and SAGA GIS, with RadCalNet RVUS data (2018-05-04): (a) B band of TOA reflectance, (b) G band of TOA reflectance, (c) R band of TOA reflectance, (d) NIR band of TOA reflectance, (e) B band of TOA reflectance, (f) G band of TOA reflectance, (g) R band of TOA reflectance, and (h) NIR band of TOA reflectance.

SAGA-GIS로부터 산출한 2017년 영상 정보의 지표반사도 성과는 다른 도구로부터 얻은 결과와 확연하게 차이가 나는 것을 알 수 있고, 이는 위치 지점에서 보인 차이 결과를 다시 나타낸 것이며 특별한 오류 값(Outlier)은 없지만 전체적으로 성과값이 RadCalNet RVUS 현장 측정 기준값과 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 RadCalNet RVUS 자료 중 Fig. 5(e)와 Fig. 5(f)와 같이 Blue 밴드와 Green 밴드의 상자그림이 넓은 면적으로 나타나는 것으로 볼 수 있는 데, 이는 자료 개수가 10개 미만이기 때문에 일부 자료가 약간 차이를 보이는 영향이 반영된 것이다. 이는 같은 밴드에 해당하는 2018년 자료(Fig. 6(e), Fig. 6(f))에서도 비슷한 양상으로 나타난다. Fig. 5(e)~(h)에 나타난 것과 같이 SAGA-GIS의 2017년 지표반사도 성과가 많은 차이를 보이는 양상은 Fig. 4의 결과가 동일하다.

2018년 영상정보의 경우 QGIS로부터 산출한 대기반사도 성과가 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있는데 (Fig. 6(a)~(d)), 이것도 일부 성과값이 오류를 갖기 때문이 아니고 성과에 나타난 분포가 RadCalNet RVUS 자료와 차이를 보이기 때문이라는 것을 확인할 수 있다. 또한 2018년 영상 정보로부터 산출한 지표 반사도(Fig. 6(e)~(h))는 다소 복잡한 양상을 보이는데, QGIS 결과가 Blue 밴드와 Green 밴드에서는 기준 값과 일정 범위에서

서 좋은 일치도를 보이지만 Red 밴드와 NIR 밴드에서는 차이가 크게 나기 때문이다. 이는 같은 영상정보라고 하더라도 밴드별로 차이가 나타날 수 있다는 사실을 보여준다. 그리고 RadCalNet RVUS 사이트가 주변 여건이 거의 같은 사막지대에 있기 때문에 식생의 영향이 거의 없음에도 이러한 차이를 보이는 것은 식생이 왕성한 시기의 영상정보나 식생분포가 복잡한 지역의 영상정보로부터 산출한 반사도 성과는 예상하기 어려운 오류가 포함될 수 있음을 의미한다. 따라서 오픈소스 도구를 이용하여 반사도 성과를 산출하고자 하는 경우에는 가능한 OTB와 같이 절대 대기보정 알고리즘을 지원하는 도구를 사용하는 것이 바람직하다.

4. 결론

이 연구에서 오픈소스 도구인 OTB에서 구동되는 Landsat-8 OLI 위성정보의 절대 대기보정 작업과 반사도 성과를 산출하는 확장도구를 최초로 개발하였다. 이 도구로부터 얻은 대기 및 지표반사도 성과 RadCalNet RVUS의 자료를 기준값으로 하여 검증하였으며, USGS-ARD, QGIS, SAGA GIS와 같은 오픈소스 도구로 얻은 결과와도 비교분석하였다. 실험결과로 OTB Extension

의 반사도 산출성과는 USGS-ARD 성과와 마찬가지로 RadCalNet RVUS 자료를 기준으로 하여 $\pm 5\%$ 내의 차이를 보이기 때문에 결과 정확도가 신뢰할 수 있는 수준으로 나타났다. 이 연구는 동일한 영상정보를 가지고 대기보정과 반사도 성과산출의 공통목적을 위한 기능을 제공하는 몇 가지 오픈소스 도구에서 얻은 결과간의 비교분석을 하였고, 그 결과로 도구별로 안정성과 일관성 측면에서 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

이 연구에서 개발된 모듈은 Landsat-7 ETM+ 센서를 포함하여 나머지 Landsat 센서를 지원하는 기능까지 확장할 예정이다. 또한 추가실험으로 SNAP 도구의 iCOR 모듈이나 GRASS의 i.landsat.toar 모듈 등과 같이 국제적으로 사용자가 많은 오픈소스 도구로부터 얻어진 결과와의 상호검증도 필요하다. 한편 이 연구에서 개발한 도구는 우분투(Ubuntu) 운영체제에서 OTB 빌드과정을 요구하기 때문에 일반 사용자가 이용하기는 쉽지 않기 때문에 오픈소스 클라우드 환경에서 사용자가 온라인으로 접속하여 이 대기보정 모듈을 사용하는 방식을 고려하고 있다.

대기보정과 같은 처리과정은 위성정보 활용을 증대시킬 수 있는 ARD 제작을 위해서 필요한 과정이기 때문에 위성운용과 동시 고려되어야 한다. 반사도 성과를 산출하는 OTB Extension은 이번 연구에서 대기보정 처리에 대한 확장 가능성이 있는 것으로 나타났으므로 이 연구의 성과는 차세대중형위성(Compact Advanced Satellite-500)을 포함하여 앞으로 발사될 위성센서를 위한 확장 도구개발이 가능할 것으로 예상된다.

사사

본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.

References

Badawi, M., D. Helder, L. Leigh, and X. Jing, 2019. Methods for Earth-Observing Satellite Surface Reflectance Validation, *Remote Sensing*, 11(13): 1543.

Bernardo, N., F. Watanabe, T. Rodrigues, and E. Alcântara, 2017. Atmospheric Correction Issues for Retrieving Total Suspended Matter Concentrations in Inland Waters using OLI/Landsat-8 Image, *Advances in Space Research*, 59(9): 2335-2348.

Bouvet, M., K. Thome, B. Berthelot, A. Bialek, J. Czapl-Myers, N.P. Fox, P. Goryl, P. Henry, L. Ma, S. Marcq, A. Meygret, B.N. Wenny, and E.R. Woolliams, 2019. RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range, *Remote Sensing*, 11(20): 2401.

Chen, Y., K. Sun, W. Li, X. Hu, P. Li, and T. Bai, 2021. Vicarious Calibration of FengYun-3D MERSI-II at Railroad Valley Playa Site: A Case for Sensors with Large View Angles, *Remote Sensing*, 13(7): 1347.

Feng, M., C. Huang, S. Channan, E.F. Vermote, J.G. Masek, and J.R. Townshend, 2012. Quality Assessment of Landsat Surface Reflectance Products using MODIS Data, *Computers & Geosciences*, 38(1): 9-22.

Hermosilla, T., M.A. Wulder, J.C. White, N.C. Coops, and G.W. Hobart, 2017. Updating Landsat Time Series of Surface-reflectance Composites and Forest Change Products with New Observations, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63: 104-111.

Houborg, R. and M.F. McCabe, 2017. Impacts of Dust Aerosol and Adjacency Effects on the Accuracy of Landsat 8 and RapidEye Surface Reflectances, *Remote Sensing of Environment*, 194: 127-145.

Kim, K. and K. Lee, 2020a. Validation of Surface Reflectance Product of KOMPSAT-3A Image Data Application of RadCalNet Baotou(BTCN) Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-2): 1509-1521 (in Korean with English abstract).

Kim, K. and K. Lee, 2020b. A Validation Experiment of the Reflectance Products of KOMPSAT-3A Based on RadCalNet Data and Its Applicability

- to Vegetation Indexing, *Remote Sensing*, 12(23): 3971.
- Kuhn, C., A. de Matos Valerio, N. Ward, L. Loken, H.O. Sawakuchi, M. Kampel, J. Richey, P. Stadler, J. Crawford, R. Striegl, E. Vermote, N. Pahlevan, and D. Butman, 2019. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 Surface Reflectance Products for River Remote Sensing Retrievals of Chlorophyll-a and Turbidity, *Remote Sensing of Environment*, 224: 104-118.
- Lee, K. and K. Kim, 2019. An Experiment for Surface Reflectance Image Generation of KOMPSAT 3A Image Data by Open Source Implementation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(6-4): 1327-1339 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. and K. Kim, 2020. Validation of Surface Reflectance Product of KOMPSAT-3A Image Data Using RadCalNet Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2-1): 167-178 (in Korean with English abstract).
- Marzo, A., P. Ferrada, F. Beiza, J. Alonso-Montesinos, J. Ballestrín, and R. Román, 2016. Comparison of Atacama Desert Solar Spectra vs. ASTM G173-03 Reference Spectra for Solar Energy Application, <http://proceedings.ises.org/paper/eurosun2016/eurosun2016-0144-Marzo.pdf>, Accessed on Jun. 6, 2021.
- NASA(National Aeronautics and Space Administration), 2013. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/spectral-response-operational-land-imager-band-band-average-relative-spectral-response>, Accessed on May 6, 2021.
- Pinto, T.C., X. Jing, and L. Leigh, 2020. Evaluation Analysis of Landsat Level-1 and Level-2 Data Products Using in Situ Measurements, *Remote Sensing*, 12(16): 2597.
- Qiu, S., Y. Lin, R. Shang, J. Zhang, L. Ma, and Z. Zhu, 2019. Making Landsat Time Series Consistent: Evaluating and Improving Landsat Analysis Ready Data, *Remote Sensing*, 11(1): 51.
- RadCalNet(Radiometric Calibration Network), 2018. RadCalNet Quick Start Guide, https://www.radcalnet.org/resources/RadCalNetQuickstartGuide_20180702.pdf, Accessed on Jun. 6, 2021.
- Siqueira, A., A. Lewis, M. Thankappan, Z. Szantoi, B. Killough, P. Goryl, S. Labahn, J. Ross, T. Tadono, A. Rosenqvist, J. Lacey, and M. Steventon, 2020. CEOS Analysis Ready Data for Land: Implementation Phase and Next Steps, *Proc. of 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Waikoloa, HI, Sep. 29, pp. 3376-3378.
- USGS(United States Geological Survey), 2018a. Landsat Collections. <https://pubs.usgs.gov/fs/2018/3049/fs20183049.pdf>, Accessed on Jun. 6, 2021.
- USGS(United States Geological Survey), 2018b. Landsat8 Operational Land Imager-Thermal Infrared Sensor Solar and View Angle Generation Algorithm Description Document Version 2.0, https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1928_L8-OLI-TIRS_Solar-View-Angle-Generation_ADD-v2.pdf, Accessed on April 6, 2021.
- Wei, J., Z. Lee, R. Garcia, L. Zoffoli, R.A. Armstrong, Shang, Z., R.A. Armstrong, Z. Shang, P. Sheldon, and R.F. Chen, 2018. An Assessment of Landsat-8 Atmospheric Correction Schemes and Remote Sensing Reflectance Products in Coral Reefs and Coastal Turbid Waters, *Remote Sensing of Environment*, 215: 18-32.
- Young, N.E., R.S. Anderson, S.M. Chignell, A.G. Vorster, R. Lawrence, and P.H. Evangelista, 2017. A Survival Guide to Landsat Preprocessing, *Ecology*, 98(4): 920-932.