



Terra MODIS 및 Sentinel-2 NDVI의 식생 및 농업 모니터링 비교 연구

A Comparative Analysis of Vegetation and Agricultural Monitoring of Terra MODIS and Sentinel-2 NDVIs

손무빈^a · 정지훈^{b,†} · 이용관^c · 김성준^d

Son, Moo-Been · Chung, Jee-Hun · Lee, Yong-Gwan · Kim, Seong-Joon

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the compatibility of the vegetation index between the two satellites and the applicability of agricultural monitoring by comparing and verifying NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) based on Sentinel-2 and Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Terra MODIS NDVI utilized 16-day MOD13Q1 data with 250 m spatial resolution, and Sentinel-2 NDVI utilized 10-day Level-2A BOA (Bottom Of Atmosphere) data with 10 m spatial resolution. To compare both NDVI, Sentinel-2 NDVIs were reproduced at 16-day intervals using the MVC (Maximum Value Composite) technique. As a result of time series NDVIs based on two satellites for 2019 and compare by land cover, the average R^2 (Coefficient of determination) and RMSE (Root Mean Square Error) of the entire land cover were 0.86 and 0.11, which indicates that Sentinel-2 NDVI and MODIS NDVI had a high correlation. MODIS NDVI is overestimated than Sentinel-2 NDVI for all land cover due to coarse spatial resolution. The high-resolution Sentinel-2 NDVI was found to reflect the characteristics of each land cover better than the MODIS NDVI because it has a higher discrimination ability for subdivided land cover and land cover with a small area range.

Keywords: Terra MODIS; MVC; NDVI; remote sensing; Sentinel-2

1. 서론

최근 위성영상을 활용한 원격탐사 (Remote Sensing) 기술이 급격히 발전함에 따라 국내외 다양한 분야에서 활용되고 있다. 원격탐사기술은 단기간에 넓은 면적의 정밀한 정보를 획득할 수 있어 선진국에서는 작물의 재배면적 및 작황량을 산출하는 등 농업 분야에 이를 활용해 왔다. 지금까지 농업 분야에서는 Landsat TM (Thematic Mapper), NOAA AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 등 중·저해상도의 위성영상을 이용한 연구가 주로 이루어졌으나 (Xin

et al., 2002; Kalubarme et al., 2003; Doraiswamy et al., 2004; Mkhabela et al., 2011; Amorós-López et al., 2013; Liu et al., 2020; Sakamoto, 2020), 최근에는 SPOT (System Pour l'Observation de la Terre), Sentinel-2, COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite), KOMPSAT (Korea Multi-Purpose SATellite) 등의 고해상도 위성영상을 활용한 연구가 활발히 수행되고 있다 (Kim et al., 2010; Lee et al., 2011; Yang et al., 2011; Park et al., 2014; Jamshidi et al., 2021; Yeom et al., 2021).

농업 관측에서 작황량의 추정은 광학 위성에서 얻어지는 식생지수 (Vegetation Index, VI)를 이용하여 이루어진다 (Oguro et al., 2001). 다수의 연구에서 농작물의 식생지수와 생산량 사이의 선형적 관계가 입증되었고, 현재까지도 국내외 많은 연구자들이 이를 활용한 생산량 예측 연구를 지속하고 있다 (Na et al., 2012). 식생지수는 식물체 내 엽록소가 주로 적색 (Red), 청색 (Blue) 파장은 흡수하는 반면 근적외 (Near Infra Red, NIR) 파장은 반사하는 분광학적 특성을 이용한 지수로서 산림 모니터링 및 농업 모니터링, 가뭄, 증발산 추정 등에 이용된다 (Thomas and Gausman, 1977; Na et al., 2016). 특히, 정규식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)는 장기적인 식생 특성을 잘 표현할 수 있어 가장 널리 사용된다 (Seong et al., 2020).

^a Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University

^b Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University

^c Ph.D. Candidate, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University

^d Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-450-3749, Fax: +82-2-444-0186

E-mail: gop1519@konkuk.ac.kr

Received: August 11, 2021

Revised: September 29, 2021

Accepted: November 18, 2021

NDVI는 가시광선과 근적외선의 파장대를 가지고 있는 모든 영상자료에서 산출이 가능하며 (Shin and An, 2007), Terra 위성의 MODIS 센서에서 얻어진 NDVI는 미항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서 가공된 형태의 자료를 무료로 제공하여 가장 널리 사용되고 있다. 우리나라는 국토의 약 65% 이상이 산지로 이루어져 있어 (Chung et al., 2020) 식생의 양과 변화 양상에 의해 지역의 특성이 결정된다고 할 수 있기 때문에 (Shin and An, 2007), 시간 해상도가 높은 Terra 위성의 적용성이 매우 높다. 그러나, Terra 위성의 낮은 공간 해상도 (250~1,000 m)는 국소지역의 식생 모니터링에 한계를 가지기 때문에 (Kim and Park, 2019), 포구 단위의 분석과 필지 내 시설재배지, 배수로 등의 판별이 어려워 작물 고유의 NDVI 추출이 어렵다 (Na et al., 2012). 따라서, 정확한 식생 및 농업 모니터링을 위해서는 고해상도 위성영상의 활용에 초점을 맞출 필요가 있다.

고해상도 위성영상의 활용을 위해 Kim et al. (2011)이 KOMPSAT-2 위성영상에서 추출한 NDVI와 MODIS NDVI, 현장 NDVI의 비교를 통해 적용성을 평가하였으며 Park et al. (2014)은 COMS 위성에서 산출된 8일, 16일 간격 NDVI와 MODIS 센서에서 관측된 NDVI를 비교·검증하여 COMS NDVI의 적용성을 판별한 바 있다. 또한, Landsat 위성영상을 활용한 NDVI 분석 연구 (Choi et al., 2014; Chae et al., 2017; Yoon et al., 2017)가 다수 진행된 바 있으나, 비슷한 파장대로 구성된 Sentinel-2 위성영상을 활용한 국내 연구사례는 미진하다 (Lee et al., 2017).

농업 및 산림 분야 활용에 특화된 탑재체 사양과 위성궤도

로 설계된 Sentinel-2 위성은 유사한 해상도와 분광밴드를 가진 Landsat이나 SPOT 위성에 비해 동일 지역의 촬영주기 단축을 위해 확장된 290 km의 촬영폭 (Swath width)을 가지는 2기의 위성을 운영함으로써 5일의 촬영주기를 가진다 (Lee et al., 2018). 또한, Sentinel-2의 공간 해상도 범위는 10~60 m 이지만, 농업전용 band의 경우 10~20 m로, 16일마다 대부분 30 m 해상도로 촬영되는 Landsat에 비해 비교적 높은 해상도로 전 지구 규모의 농업 및 식생 정보 획득 및 모니터링이 가능하다 (Segarra et al., 2020). Sentinel-2는 개선된 다중 스펙트럼 대역, 높은 재방문주기, 높은 공간 해상도로 인해 농업 모니터링 및 농작물 관리 능력이 향상되어 농업생태계 수준에서부터 현장 규모에 이르기까지 더 정밀한 sub-field 모니터링이 가능하다. 해외에서는 최근 Sentinel-2 위성영상을 정밀농업 모니터링 (Segarra et al., 2020; Bukowiecki et al., 2021), VI를 통한 식생 상태 모니터링 (Guerini Filho et al., 2020), 작물분류 (Sonobe et al., 2018; Chakhar et al., 2021)에도 활용하고 있다.

본 연구에서는 Sentinel-2 위성영상을 활용한 식생 및 농업 모니터링의 국내 적용성 평가를 위해 Sentinel-2 위성영상기반 NDVI를 산출하고, MODIS 기반 NDVI와 비교 및 검증하여 두 위성 간 식생지수의 호환성을 분석하고, 토지피복별 공간 해상도 차이에 따른 분석을 수행하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 Sentinel-2 위성을 기반으로 용담댐 유역의 2019년 NDVI를 산출하고, MODIS NDVI와 비교 및 검증하였

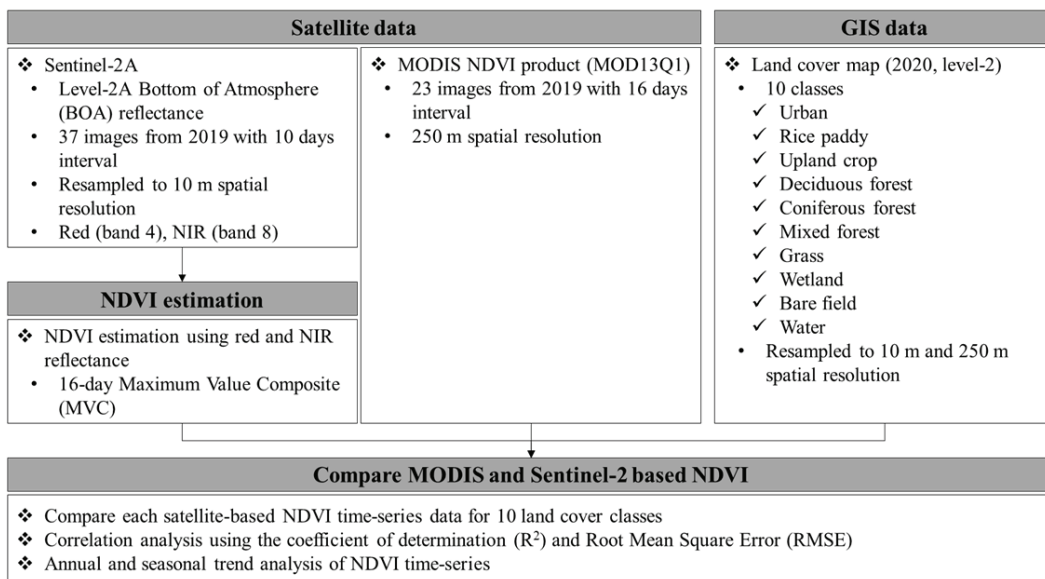


Fig. 1 Flowchart of this study

다. Sentinel-2 위성자료는 대기 보정된 10 m 공간 해상도의 Level-2A BOA (Bottom Of Atmosphere) 자료를 사용하였고, MODIS 위성자료는 250 m 공간 해상도의 MODIS MOD13Q1 자료를 활용하였다. Sentinel-2 NDVI는 SNAP (SentiNel Application Platform)을 활용하여 산출하였으며, 최대치합성법 (Maximum Value Composite, MVC)을 통해 16일 간격으로 재생성한 후, MODIS NDVI와의 토지피복별 상관성 분석 및 통계 분석을 수행하였다. 목적함수로는 결정계수 (Coefficient of determination, R^2)와 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)를 활용하였다. 또한, 위성별 NDVI의 연간 및 계절별 시계열 분석을 수행하였다 (Fig. 1).

1. 연구대상 지역

본 연구에서는 금강 상류의 용담댐 유역을 포함한 40×50 km² 영역 (N35°35′~36°00′, E127°20′~127°45′)을 연구대상 지역으로 선정하였다. 해당 지역은 전라북도 무주군, 진안군, 장수군을 포함하며, 토지피복의 대부분이 산림과 농경지로 구성되어 있으며 (산림 71.0%, 논 3.5%, 밭 7.3%), 표고가 최소 190 EL.m인 산악지역이다 (Fig. 2). 또한, 대상 지역은 논보다 밭이 많은 전형적인 산간 농업의 특성이 나타나며 주요 재배 작물은 인삼, 표고버섯, 사과, 천마 등 지역 특화작물이다 (Jinan country, 2020).

토지피복별 위성 간 NDVI의 비교를 위해 연구지역을 대상으로 환경부에서 제공하는 2020년 세분류 토지피복도를 구축하였다. 세분류 토지피복도는 1 m 급 공간 해상도의 벡터 (Vector) 자료로 제공되며, Sentinel-2 및 MODIS 위성과의 직접적인 비교를 위해 각 위성의 공간 해상도인 10 m, 250 m 해상도의 래스터 (Raster) 자료로 변환 및 재구축 (Resample)하였다. 토지이용도의 재구축은 Esri 社의 ArcGIS software의 Feature to Raster Tool을 활용하여 벡터 자료를 래스터로 변환한 후, Resample Tool의 최근린보간법 (Nearest-neighbor interpolation)을 통해 두 가지 해상도의 토지피복도를 생성하였다. 토지피복 항목은 총 10개의 항목 (시가지, 논, 밭, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 초지, 습지, 나지, 수역)으로 재분류 (Reclassify)하여 연구에 활용하였다.

2. NDVI

NDVI는 식생지표피복비율 (Vegetation percent cover), 잎면적지수 (Leaf Area Index, LAI), 유효광합성 복사량비 (fraction of Photosynthetically Active Radiation, fPAR) 등 식물 활동과 강한 상관성을 가져 식물의 분포나 식생의 생산성과 활력도를 추정하는데 가장 널리 이용되는 식생지수이다 (Tucker and Sellers, 1986; Wan et al., 2004; Jiang et al., 2006). NDVI는 근적외 파장과 적색 파장의 반사율을 반영하여 계산

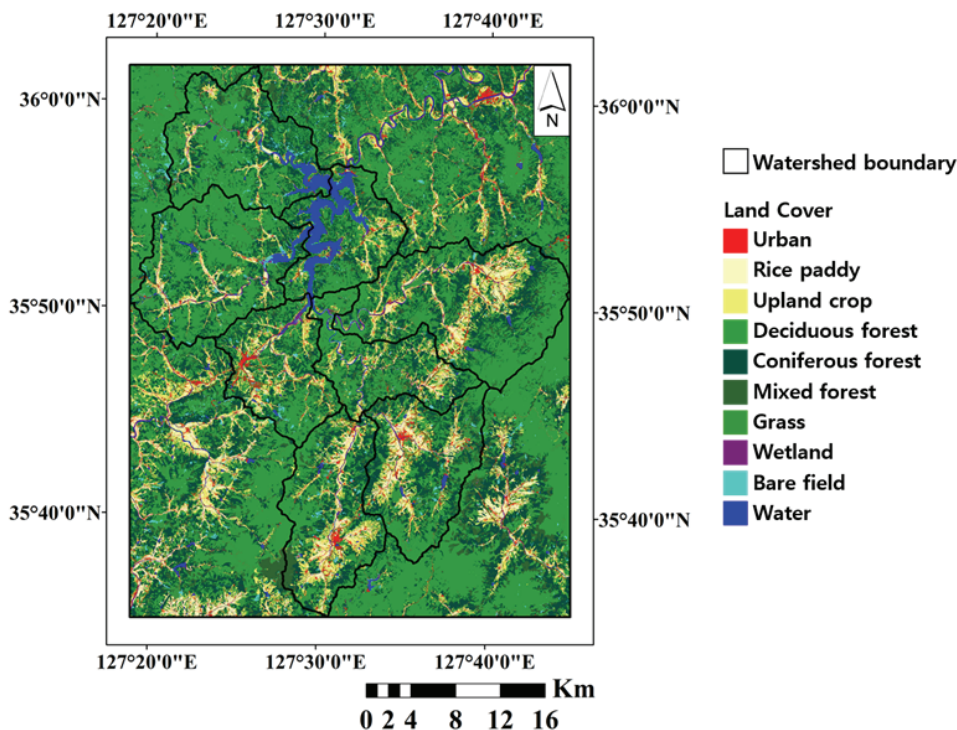


Fig. 2 Level-3 land cover of the study area in 2020

되며 계산식은 다음 식 (1)과 같다.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

여기서, *NIR*은 근적외 파장, *RED*는 적색 파장이다. NDVI 값은 -1.0~1.0 사이의 범위를 가지며, 식생 지역의 경우 0.1~0.7의 값을, 밀도가 높은 식생 지역은 적색 반사율은 낮고 근적외 반사율은 높아 0.5 보다 큰 값을, 식생이 없는 나지, 암석, 모래, 눈에서는 0.1 미만의 값을 가진다 (Knipling et al., 1970; Tucker, 1979; Rulinda et al., 2012).

가. Terra MODIS NDVI

MODIS는 Terra EOS (Earth Observation System) 위성의 핵심 센서로 0.4~14.4 μm 파장 범위의 36개의 분광 밴드를 이용하여, 250 m (bands 1-2), 500 m (bands 3-7), 1,000 m (bands 8-36)의 공간 해상도로 다양한 지표, 해양, 대기 관련 자료를 제공한다 (NASA, 2021). Terra 위성은 전 지구를 1~2일마다 관측하며 705 km 고도에서 일 2회 한반도 상공을 지나며, 북쪽에서 남쪽 방향으로 (Descending node) 오전 10시 30분경에 적도를 통과한다. 관측범위는 남북방향으로 5,000 km, 동서방

향으로 2,300 km 이다 (Lee et al., 2015).

NASA에서는 MODIS의 적색, 근적외 및 청색 파장 반사율에서 파생된 VI Products를 16일~1개월 주기로 합성하여 제공하고 있다. 본 연구에서는 250 m 공간 해상도의 16일 주기 Level-3 VI Products인 MOD13Q1의 NDVI 자료를 활용하였다. MOD13Q1 Products는 일반적으로 널리 사용되는 NDVI와 높은 Biomass 지역에 대한 민감도를 개선한 Enhanced Vegetation Index (EVI)의 2가지 주요 Vegetation Layer를 제공한다. MOD13Q1은 Vegetation Layer 및 2개의 Quality Layer와 함께 MODIS 반사 밴드 1 (Red), 2 (NIR), 3 (Blue), 7 (Mid-infrared, MIR)과 4개의 Observation Layer를 포함한다 (Table 1).

MODIS NDVI의 산정은 먼저 16일 동안의 VI를 수집 후, MODIS 식생지수 합성 알고리즘인 MVC를 통해 16일 중 VI가 가장 높은 pixel을 선택하여 이뤄진다 (Didan et al., 2015). NDVI는 구름이나 태양 각도, 강수 후의 지표 상태 등 대기 상태와 물에 의한 영향으로 감소할 수 있으나 식생의 활력도에 의해서만 증가하기 때문에, MVC는 합성기간 동안 동일한 위치의 화소 값에 대하여 식생지수가 크게 변하지 않는다는 가정하에 합성 기간 내 식생지수 관측치 중 가장 높은 값을 합성 단위 주기의 대푯값으로 배정한다 (Lee and Han, 2014;

Table 1 The Scientific Data Sets (SDS) of MOD13Q1 (Didan et al., 2015)

SDS name	Description	Units	Data type	Valid range	Scale factor
250 m 16 days NDVI	16 day NDVI	NDVI	Int16	-2,000 to 10,000	0.0001
250 m 16 days EVI	16 day EVI	EVI	Int16	-2,000 to 10,000	0.0001
250 m 16 days VI Quality	VI quality indicators	Bit Field	UInt16	0 to 65,534	N/A
250 m 16 days red reflectance	Surface reflectance Band 1 (red)	N/A	Int16	0 to 10,000	0.0001
250 m 16 days NIR reflectance	Surface reflectance Band 2 (NIR)	N/A	Int16	0 to 10,000	0.0001
250 m 16 days blue reflectance	Surface reflectance Band 3 (blue)	N/A	Int16	0 to 10,000	0.0001
250 m 16 days MIR reflectance	Surface reflectance Band 7 (MIR)	N/A	Int16	0 to 10,000	0.0001
250 m 16 days view zenith angle	View zenith angle of VI pixel	Degree	Int16	0 to 18,000	0.01
250 m 16 days sun zenith angle	Sun zenith angle of VI pixel	Degree	Int16	0 to 18,000	0.01
250 m 16 days relative azimuth angle	Relative azimuth angle of VI pixel	Degree	Int16	-18,000 to 18,000	0.01
250 m 16 days composite day of the year	Day of year VI pixel	Julian day	Int16	1 to 366	N/A
250 m 16 days pixel reliability	Quality reliability of VI pixel	Rank	Int8	0 to 3	N/A

Table 2 MOD13Q1/A1 Pixel Reliability (Didan et al., 2015)

Rank key	Summary QA	Description
-1	Fill/No data	Not processed
0	Good data	Use with confidence
1	Marginal data	Useful, but look at other QA information
2	Snow/Ice	Target covered with snow/ice
3	Cloudy	Target not visible, covered with cloud

Park et al., 2014).

MOD13Q1은 Quality Assessment (QA) 정보와 더불어 16일 중 오차가 가장 작은 날짜에 대한 정보를 함께 제공하며 구름이나 구름에 의한 그림자 등에 의한 자료의 불확실도를 제공한다 (USGS, 2021). 본 연구에서는 2019년 1년간 총 23개의 영상자료를 수집하여 NDVI 및 pixel reliability 자료를 추출하였다. 자료의 품질정보를 나타내는 pixel reliability 자료는 -1부터 3까지의 rank key를 가지며 (Table 2), NDVI 영상에 중첩하여 생성되지 않거나 눈, 얼음 및 구름에 가려진 오염된 pixel인 -1, 2, 3의 rank를 가지는 경우 해당 NDVI pixel을 제거하여 보정을 수행하였다.

나. Sentinel-2 NDVI

Sentinel-2는 전 지구적 모니터링을 위한 유럽우주국 (European Space Agency, ESA)의 GMES (Global Monitoring for Environment and Security) program의 일환으로 발사한 두 번째 Sentinel 위성군이다. MSI (MultiSpectral Instrument)를 탑재한 Sentinel-2는 가시·근적외선 (Visible and Near Infra-Red, VNIR)과 단파적외선 (Short Wave Infra-Red,

SWIR) 13개 대역에서 10, 20, 60 m의 고해상도 광역 (290 km) 영상을 제공한다 (Table 3). Sentinel-2는 2A와 2B 쌍둥이 위성이 각각 10일 주기로 지구를 관측해 높은 재방문 주기 (Revisit time)를 가지며, 지속적인 식생 및 토양 모니터링이 가능하다.

ESA에서 운영 중인 Copernicus Open Access Hub에서는 방사 및 기하 보정된 Level-1C TOA (Top-of-Atmosphere) 및 Sen2Cor 프로세서를 통해 대기 보정 (Atmospheric Corrections)된 Level-2A BOA 반사율 자료를 제공한다. Sen2Cor는 Level-1C를 자료를 기반으로 전처리와 권운 및 지형보정 (Cirrus clouds and terrain correction)을 포함하는 대기 보정, scene classification 등을 수행한다 (Mueller-Wilm, 2017; Sola et al., 2018). 본 연구에서는 대기 보정이 수행된 Sentinel-2A 위성의 Level-2A BOA 자료를 활용하였다.

구름이나 적설 등의 대기 영향은 NDVI에 noise를 발생시킬 수 있어, MODIS NDVI 생성에 활용되는 MVC를 통해 Sentinel-2 NDVI를 재생산하였다. Sentinel-2 NDVI의 합성주기는 MODIS NDVI와 비교하기 위해 동일한 16일 간격으로 설정하였다. 이러한 전처리 과정을 거침에도 불구하고 NDVI 시계열에서 미처 제거하지 못한 얇은 구름, 강수, 적설, 대기

Table 3 Wavelengths, bandwidths, and spatial resolutions of the Sentinel-2A (ESA, 2021)

Spatial resolution (m)	Band number	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
10	2 (Blue)	492.4	66
	3 (Green)	559.8	36
	4 (Red)	664.6	31
	8 (NIR)	832.8	106
20	5 (Red edge)	704.1	15
	6 (Red edge)	740.5	15
	7 (Red edge)	782.8	20
	8a (Narrow NIR)	864.7	21
	11 (SWIR)	1,613.7	91
	12 (SWIR)	2,202.4	175
60	1 (Coastal aerosol)	442.7	21
	9 (Water vapour)	945.1	20
	10 (SWIR cirrus)	1,373.5	31

나 지표 중의 수분 등의 이유로 여전히 단기간에 급격하게 NDVI 값이 낮아지는 noise가 불규칙적으로 발생하기 때문에 Lee and Han (2014)의 선행연구를 참고하여 추가적인 보정을 수행하였다. NDVI의 보정은 먼저 Sentinel-2 원본 영상의 RGB 영상을 근거로 대기 영향에 의한 NDVI 시계열의 noise를 제거한 후, 2019년 NDVI 시계열 영상의 시점별 평균값의 최댓값 및 최솟값 시점을 탐지한 후 최솟값에서 최댓값으로 시점이 이동하는 경우 해당 시점의 NDVI가 전의 시점보다 낮은 경우 low peak로 탐지하고, 최댓값에서 최솟값으로 시점이 이동하는 경우에는 해당 시점의 NDVI가 다음 시점의 값보다 낮은 경우 low peak로 탐지하여 제거하였다. 마지막으로 제거되지 않은 시점의 값만을 선형적으로 보간하여 최종적인 보정을 수행하였다.

다. Sentinel-2 NDVI의 검증

본 연구에서는 Sentinel-2 NDVI의 MODIS NDVI와의 호환성 분석 및 활용성 검증을 위해 토지피복별 상관성 분석을 실시하였다. 상관성 분석에는 R^2 와 RMSE를 목적함수로 사용하였으며, 각 함수는 다음과 같이 표현된다 (식 2, 3).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

여기서, P_i 는 Sentinel-2 NDVI, O_i 는 MODIS NDVI, \bar{P} 과 \bar{O} 는 각각 Sentinel-2 NDVI와 MODIS NDVI의 평균이며 n 은 각 요소의 개수이다. R^2 의 범위는 0~1이며 값이 클수록 오차 분산이 적고 일반적으로 0.5 이상이면 허용 가능한 것으로 간주하며 R^2 의 경우 1에 가까울수록, RMSE의 경우 0에 가까울

수록 예측값과 관측값이 유사하다는 것을 의미한다 (Santhi et al., 2001; Van Liew et al., 2003; Moriasi et al., 2007).

III. 결과 및 고찰

1. Sentinel-2 및 MODIS NDVI 통계 분석

MODIS 및 Sentinel-2 NDVI의 비교 및 검증을 위해 통계 분석을 수행하였다. 통계량 분석은 각 토지피복별 상관성 분석 및 사분범위 (Interquartile Range, IQR), 표준편차 (Standard Deviation, SD)를 분석하였다. 먼저, 2019년에 대한 MODIS NDVI와 Sentinel-2 NDVI의 상관성 분석 수행결과를 Table 4에 나타내었다. 10개 토지피복에 대한 평균 R^2 는 0.86, RMSE는 0.11로 Sentinel-2 NDVI와 MODIS NDVI가 높은 상관성을 가지는 것으로 분석되었다. 활엽수림, 침엽수림, 혼효림의 R^2 , RMSE는 각각 0.84~0.86, 0.06~0.11로 산림에서 두 자료 간 오차가 가장 작고, 수역, 시가지의 R^2 , RMSE는 각각 0.80~0.83, 0.23~0.43으로 오차가 가장 크게 나타났다.

Fig. 3과 Table 5는 토지피복에 따른 위성별 NDVI의 범위 분포 파악을 위해 통계량 분석결과를 boxplot 및 표로 나타낸 것이다. MODIS NDVI의 경우 IQR은 0.28~0.36, SD는 0.15~0.18로 모든 토지피복에서 값의 범위 차이가 균일한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 반면, Sentinel-2 NDVI의 IQR은 0.17~0.40, SD는 0.09~0.22로 MODIS NDVI와 달리 토지피복에 따라 값의 범위가 차이가 있었다. 또한, 모든 토지피복에 대해 MODIS NDVI가 Sentinel-2 NDVI보다 전반적으로 높게 나타났다. 이는 80% 이상이 산림 및 농경지로 구성된 연구지역의 특성상, 상대적으로 낮은 공간 해상도를 가지는 MODIS NDVI의 pixel에 주변 식생 지역의 큰 NDVI 값이 포함되어 분광학적 혼재 양상 (Mixed pixel effect)이 나타난 것으로 보인다 (Chen et al., 2018). 산림지역의 경우 밀집된 식생이 넓은 범위에 걸쳐 분포하기 때문에 분광학적 혼재가 완화되어 다른 토지이용과 마찬가지로 Sentinel-2 NDVI가 MODIS NDVI

Table 4 Correlation analysis results between MODIS NDVI and Sentinel-2 NDVI

Land cover	R^2	RMSE	Land cover	R^2	RMSE
Urban	0.83	0.23	Grass	0.87	0.11
Rice paddy	0.93	0.14	Wetland	0.91	0.15
Upland crop	0.86	0.15	Bare field	0.84	0.20
Deciduous forest	0.86	0.11	Water	0.80	0.43
Coniferous forest	0.85	0.06	Average	0.86	0.11
Mixed forest	0.84	0.08			

* R^2 : Coefficient of determination, RMSE: Root Mean Square Error

보다 낮은 값을 가지나, 차이가 크지 않았다. 활엽수림, 침엽수림, 혼효림의 IQR과 SD는 MODIS NDVI가 각각 0.36, 0.28, 0.30과 0.18, 0.15, 0.16으로 나타났고, Sentinel-2 NDVI는 0.40, 0.23, 0.27과 0.22, 0.15, 0.18로 나타나 두 자료가 유사하였다.

MODIS의 식생지수 자료 분석을 통한 한반도의 식물계절학적 패턴에 관한 연구는 Park (2013)의 논문에서 자세히 다루고 있다. 연중 식생지수의 변동 폭을 나타내는 진폭(Amplitude)이 활엽수림이 가장 크고, 혼효림이 가장 낮았으며 활엽수림, 상록수림, 초지는 서로 유사한 연도별 변화 패턴을 보인 반면, 혼효림의 경우 다른 식생 피복과 구별되는 양상을 보여주었다. 본 연구에서도 마찬가지로 MODIS NDVI에서 활엽수림의 IQR이 가장 넓어 선행연구와 유사한 결과가 도출되었으나, 혼효림의 양상이 다른 수종과는 다소 다르게 나타났던 선행연구와 달리 활엽수림, 침엽수림, 초지, 혼효림이 모두 유사하였다. Fig. 3(b)를 살펴보면 Sentinel-2 NDVI도 마찬가지로 활엽수림의 변동 폭이 가장 크게 나타났으나, 연간 큰 변화 없이 높은 NDVI를 유지하는 침엽수림의 특성이 더 잘 반영된 NDVI가 산정되어 침엽수림의 IQR이 0.23, SD가 0.15로 변동 폭이 가장 작게 나타났다. 또한, 활엽수림과 침엽수림이 섞인 혼효림에서는 두 수종의 특성이 혼합되어서 활엽수

림과 침엽수림 사이의 값이 나타났다 (IQR=0.27, SD=0.18).

시가지와 수역의 경우, MODIS NDVI는 각각 0.33~0.77, 0.32~0.79로 일반적인 수역과 시가지의 NDVI 값 범위를 벗어나 식생 지역과 유사한 범위로 과대산정되었으며, Sentinel-2 NDVI는 각각 0.13~0.46, -0.02~0.28로 식생 지역보다 낮게 산정되었다. 또한, MODIS NDVI는 시가지, 수역의 IQR과 SD가 모두 0.28, 0.16으로, 다른 토지피복의 IQR, SD 범위와 차이가 크지 않았으나, Sentinel-2 NDVI의 경우 각각 0.19, 0.17과 0.11, 0.09로 다른 토지피복에서 나타났던 IQR과 SD에 비해 상대적으로 좁은 범위를 나타냈다. MODIS 및 Sentinel-2 NDVI 자료 간 오차가 크게 발생한 것은 낮은 해상도의 MODIS NDVI가 다른 토지피복 대비 작은 면적 범위를 차지하는 시가지와 수역의 NDVI를 잘 분별하지 못하여 주변 식생 지역의 NDVI가 혼합되어 산정된 반면 고해상도인 Sentinel-2 NDVI에서는 잘 식별하여 정확도 높은 NDVI를 산출하였기 때문으로 판단된다. 농경지, 습지 및 나지도 유사한 경향을 나타냈으며, 토지피복의 면적이 작을수록, 밀집도가 낮을수록 MODIS NDVI의 정확도가 감소하여 두 위성자료 간 차이가 증가하는 경향을 보였다. 선행연구 또한 MODIS NDVI 자료가 식생 패턴의 지역적 평가 및 시계열 분석에 유

Table 5 Statistical analysis results of Sentinel-2 NDVI and MODIS NDVI by land cover

Satellite	Land cover	*Min.	*Q1	*Med.	*Q3	*Max.	*IQR	*SD
MODIS	Urban	0.33	0.42	0.55	0.70	0.77	0.28	0.16
	Rice paddy	0.31	0.39	0.50	0.69	0.78	0.30	0.17
	Upland crop	0.35	0.44	0.58	0.73	0.80	0.29	0.16
	Deciduous forest	0.44	0.51	0.76	0.87	0.90	0.36	0.18
	Coniferous forest	0.47	0.55	0.73	0.83	0.87	0.28	0.15
	Mixed forest	0.47	0.55	0.75	0.85	0.88	0.30	0.16
	Grass	0.40	0.49	0.67	0.78	0.84	0.30	0.16
	Wetland	0.34	0.44	0.59	0.73	0.80	0.29	0.16
	Bare field	0.40	0.49	0.66	0.78	0.83	0.29	0.16
	Water	0.32	0.43	0.57	0.72	0.79	0.28	0.16
	Average	0.43	0.51	0.71	0.82	0.87	0.32	0.17
Sentinel-2	Urban	0.13	0.25	0.36	0.43	0.46	0.19	0.11
	Rice paddy	0.14	0.26	0.40	0.49	0.70	0.23	0.16
	Upland crop	0.16	0.31	0.46	0.56	0.67	0.25	0.15
	Deciduous forest	0.23	0.42	0.73	0.81	0.89	0.40	0.22
	Coniferous forest	0.36	0.59	0.77	0.82	0.84	0.23	0.15
	Mixed forest	0.31	0.53	0.76	0.80	0.87	0.27	0.18
	Grass	0.19	0.37	0.63	0.72	0.74	0.35	0.19
	Wetland	0.14	0.26	0.48	0.59	0.66	0.34	0.18
	Bare field	0.17	0.31	0.49	0.57	0.59	0.26	0.15
	Water	-0.02	0.08	0.11	0.25	0.28	0.17	0.09
	Average	0.24	0.42	0.67	0.75	0.78	0.33	0.19

*Min.: Minimum, Q1: 1st quartile, Med.: Median, Q3: 3rd quartile, IQR: Interquartile range(Q3-Q1), SD: Standard deviation

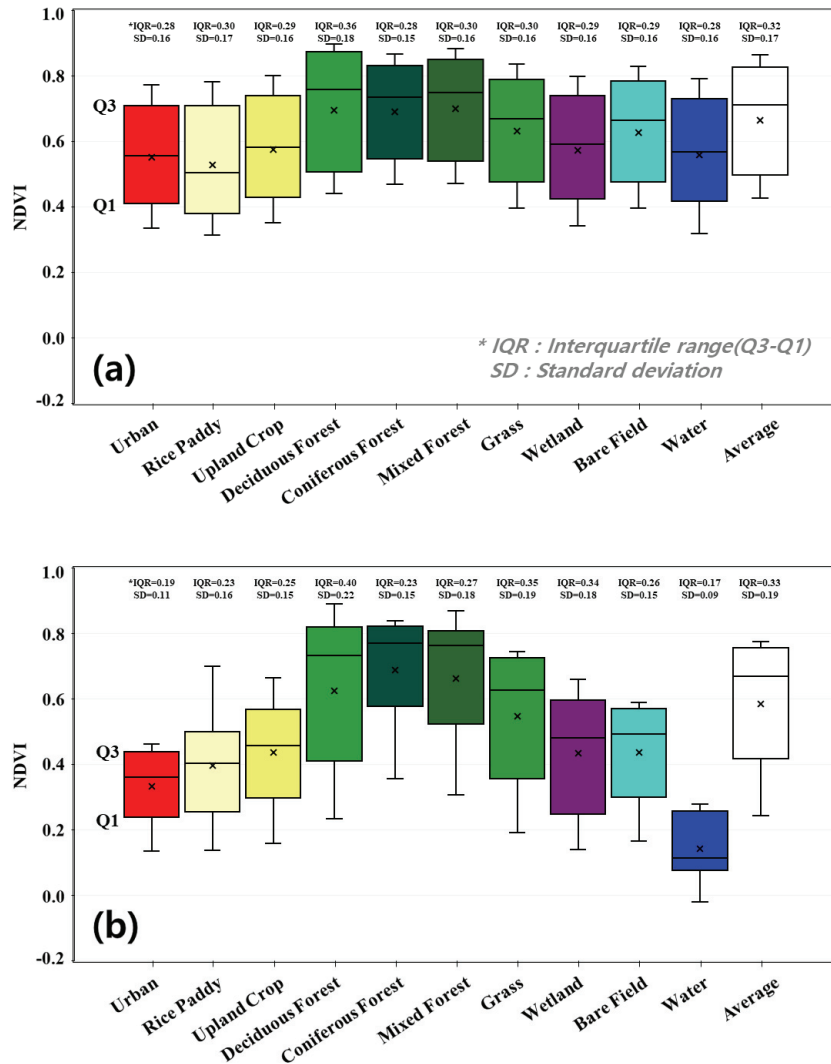


Fig. 3 Box plots of NDVI for land cover based on (a) MODIS and (b) Sentinel-2

용하나 pixel 크기가 증가함에 따라 고도로 세분화된 토지피복 분류나 면적 범위가 작은 토지피복 분류의 식별력이 떨어지기 때문에 시가지의 생태학적 특성 파악 및 모니터링 연구에는 적합하지 않다는 결과를 도출한 바 있다 (Stefanov and Netzband, 2005).

연구지역의 MODIS NDVI 평균값의 변동범위는 0.43 ~ 0.87, Sentinel-2 NDVI는 0.24~0.78로 MODIS 대비 다소 낮게 나타났다. IQR과 SD의 경우 MODIS NDVI는 각각 0.32, 0.17, Sentinel-2 NDVI는 각각 0.33, 0.19로 두 자료의 유사도가 높았다. 이는 연구지역의 70% 이상이 산림으로 구성되어 있어, 공간 해상도에 의한 영향이 적기 때문에 두 자료 간 평균적인 오차가 작은 것으로 판단된다.

2. 시계열 분석

가. 연간 시계열 분석

Fig. 4는 각 토지피복별 MODIS 및 Sentinel-2 NDVI 시계열 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 4의 색상별 실선은 10개 항목의 토지피복별 NDVI를 나타내며, 검은색 굵은 실선은 연구지역의 평균 NDVI를 나타낸다. 먼저, 산림 수종별 MODIS NDVI 시계열을 살펴보면 겨울 (2월 18일)에 활엽수림, 침엽수림, 혼효림이 각각 0.44, 0.46, 0.47로 연중 최솟값을 가져 일 년 중 가장 식생 활력도가 낮았으며, 봄에는 이전 시점 (16일 전) 대비 증가율이 가장 큰 4월 23일을 기점으로 식생의 성장이 지속되었다. 늦봄부터 여름과 가을에 걸쳐 (5월 25일~9월 30일) 0.81 이상의 높은 NDVI 값을 유지하고, 여름 (8월 13일)에 연중 최댓값을 나타내 식생 활력도가 가장 높았다. 연중 최대

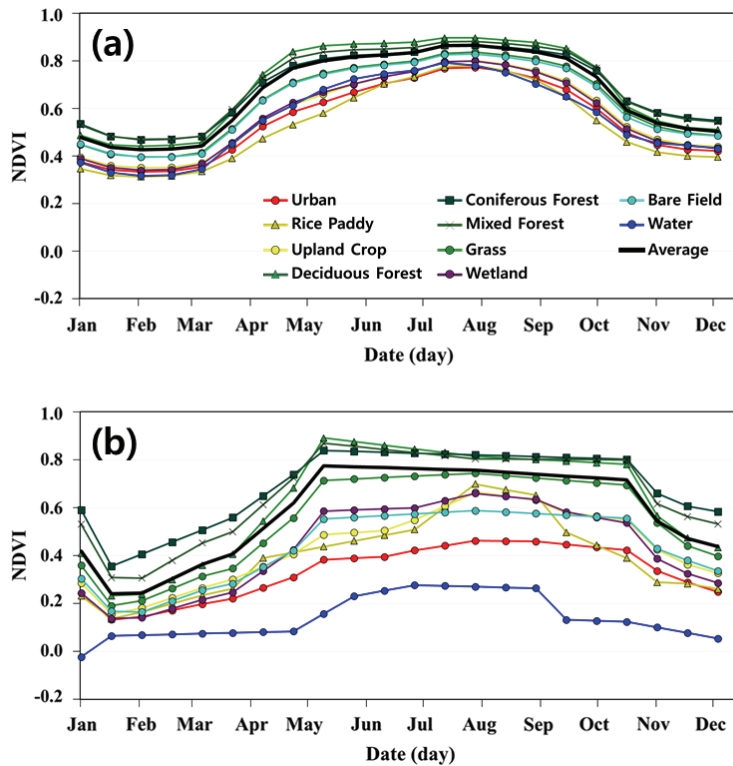


Fig. 4 Comparison of 16-day composite NDVI of (a) MODIS (b) Sentinel-2

NDVI는 활엽수림 (0.90), 혼효림 (0.88), 침엽수림 (0.87) 순으로 높게 나타났다. 10월 16일 이후부터는 NDVI가 급격히 감소하며, 가을이 되어도 잎이 떨어지지 않는 침엽수의 경우 비교적 감소율이 작아 겨울철에도 0.47 이상의 값을 유지했다. 활엽수림, 혼효림의 경우 침엽수보다 감소율이 크지만 모두 0.44 이하로 감소하지 않아 3종류의 산림의 겨울철 NDVI 차이는 근소한 것을 알 수 있다. MODIS의 낮은 공간 해상도로 인해, 연구지역 내에 산발적으로 분포하는 침엽수림과 혼효림은 수종별 고유 NDVI를 산출하지 못하고 활엽수림 등의 주변 토지피복과 혼합된 NDVI를 산출하였기 때문에 산림 수종별 계절적 특성 차이가 두드러지게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

Sentinel-2 NDVI의 시계열은 MODIS와 마찬가지로 혼효림에서 2월 18일에 0.31로 연중 가장 낮은 값을 나타내며, MODIS보다 16일 이른 2월 2일에 활엽수림, 침엽수림에서 각각 0.23, 0.36으로 연중 최솟값을 나타냈다. 이후, NDVI가 점차 증가하여 5월 25일에 연중 최댓값을 보였으며, 활엽수림 (0.89), 혼효림 (0.87), 침엽수림 (0.84) 순으로 높았다. 온도, 강수량 등의 기후인자가 식생의 계절 변화 및 경년변동에 영향을 미쳐 (Suh et al., 2005; Hong et al., 2011) 5월 말에 산림의 식생 활력도가 최대가 되었을 가능성이 있지만, 일반적으로

한반도는 식생 성장이 시작되는 4월부터 NDVI가 상승세를 나타내 7월~8월에 식생 활력도가 가장 높고, 9월부터 식물의 잎이 상당히 쇠락하여 NDVI가 하강세를 보이는 시계열특성을 가지기 때문에 (Yeom et al., 2008; Cha et al., 2009; Kim et al., 2011), 실제로는 5월 25일 이후로도 계속 NDVI가 증가하여 7월~8월 사이에 최댓값을 가졌을 것으로 추측할 수 있다.

MODIS에 비해 낮은 시간 해상도를 가지는 Sentinel-2 영상은 여름철 기상 상태로 인한 구름에 영향을 더 크게 받게 된다. 실제 연구에 활용한 Sentinel-2 영상은 여름철에 해당하는 6월에서 8월까지의 8개 영상 중 1개 영상 (8월 13일)을 제외하고 모두 구름으로 인한 영상의 오염이 있어, 시계열 모니터링에는 주의가 필요할 것으로 보인다. MODIS 등의 높은 재방문 빈도를 가지는 위성의 시계열 자료와의 융합 혹은 동일 위성 군인 Sentinel-2B 및 추후 발사 예정인 Sentinel-2C, Sentinel-2D의 시계열 자료가 충분히 확보되는 경우 시간 해상도로 인한 문제점을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

Sentinel-2 NDVI 시계열의 논 그래프를 살펴보면, 논외 NDVI는 모내기가 시작되기 전 4월까지 0.26 이하로 시가지와 유사한 매우 낮은 값을 갖지만, 5월~6월 모내기 이후 식생 활력도가 급격히 증가하여 8월 13일에 연중 최댓값 (0.70)을 가진다. 9~10월 추수 이후 식생 활력도가 급격히 감소하여

(Kim, 2000) 11월 1일에 다시 낮은 NDVI 값을 나타낸다. MODIS NDVI 시계열의 논 그래프의 경우 동일한 날짜에 대해 Sentinel-2 NDVI보다 평균적으로 0.13 높고, Sentinel-2 NDVI가 겨울철에 0.16까지 감소하는 것과 달리, MODIS는 연간 높은 NDVI를 유지하여 0.31 이하로 감소하지 않는 차이점이 있다. 하지만, 4월 23일부터 점차 증가하며 8월 13일에 최댓값을 나타내고, 9월 이후 급격히 감소하는 시계열 패턴은 유사하였으며 두 자료 모두 벼 생육 기간 중 작황 상태에 따른 NDVI 차이를 잘 나타내는 것으로 판단된다.

마찬가지로 밭도 MODIS NDVI가 Sentinel-2 보다 평균적으로 0.14 높았지만, 두 NDVI 시계열 그래프 개형이 매우 유사하고 최댓값 시점 또한 8월 13일로 일치하였다. 수확기 이후부터 비교적 짧은 시간 내에 식물 생육이 빠르게 종료되는 논과 비교했을 때, 밭의 NDVI는 상대적으로 천천히 증가했다가 천천히 감소하여 증감률이 논보다 작게 나타났다. 한편, 연구지역 대부분 산림 피복으로 구성되어 있으므로, MODIS, Sentinel-2 모두 공통적으로 평균 NDVI 시계열 그래프 개형이 산림과 유사하게 나타났다. 평균 NDVI 범위는 산림과 산림 이외 토지피복 사이의 값이 나타났다.

MODIS NDVI는 연간 NDVI 시계열 변화 양상이 토지피복

에 상관없이 거의 유사하였고, 산림, 초지, 농경지와 같은 식생 지역의 계절적인 변화 추세는 비교적 잘 반영한 반면, 면적이 적은 비 식생 지역은 NDVI 변화특성을 잘 반영하지 못해 나지가 농경지보다 NDVI가 크고 수역, 시가지도 범위가 비정상적으로 높게 나타나는 등 토지이용에 따른 불확실성이 높았다. 반면 Sentinel-2는 작은 면적을 차지하는 토지피복의 NDVI도 더 잘 판별하는 것으로 나타났다.

나. 계절별 시계열 분석

Fig. 5는 식생 지역인 논, 밭, 초지, 그리고 산림의 MODIS NDVI 및 Sentinel-2 NDVI의 계절별 (봄: 3~5월, 여름: 6~8월, 가을: 9~11월, 겨울: 12~2월) 산점도를 나타낸 것이다. 각 계절의 구분은 봄을 황색 원으로, 여름은 녹색 원으로, 가을은 적색 원으로, 겨울은 청색 원으로 표현하였다. 모든 토지 이용에서 계절에 따른 NDVI의 변화 양상이 잘 나타나는 것을 확인할 수 있다. 봄철의 경우 MODIS NDVI가 Sentinel-2 NDVI에 비해 과대산정되는 경향은 있지만 4개 토지 이용에서 공통적으로 선형적인 거동을 보인다. 여름철에는 상대적으로 식생이 많이 분포해 있는 초지와 산림의 경우 NDVI의 변화가 거의 없었다. 이는, MODIS의 경우 일별 NDVI를 MVC를 활

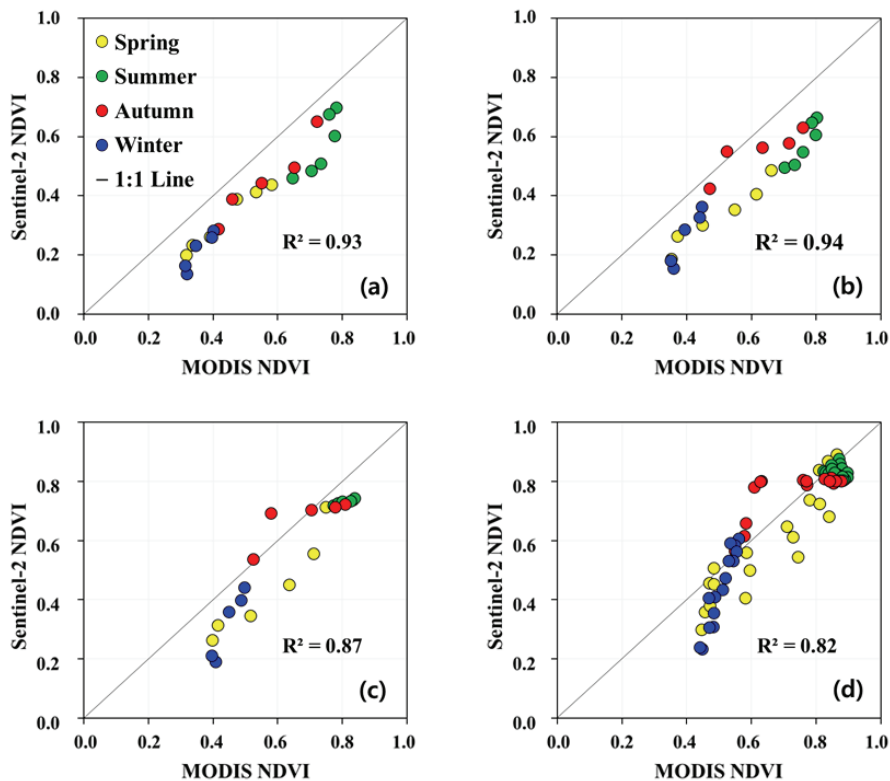


Fig. 5 Scatter plots of seasonal NDVI based on MODIS and Sentinel-2 for (a) Rice paddy, (b) Upland crop, (c) Grass, and (d) Forest

용하여 최종적으로 산출물을 제공하기 때문에 비교적 균일하게 증가하는 양상을 보이지만 Sentinel-2의 경우 10일 간격의 영상을 합성하기 때문에 noise 제어를 위해 수행한 선형 보간의 한계에서 기인하는 결과로 판단된다. MVC를 활용하더라도 장기간 구름이 낀 경우, 여전히 신뢰도 낮은 NDVI가 생성되기 때문에 구름의 영향을 제거하거나, 이동평균 (Moving average), Savitzky-Golay filter (Chen et al., 2004), Wavelet 변환 (Sakamoto et al., 2005) 등의 smoothing 기법을 적용해 신뢰도 높은 시계열 NDVI를 생산하는 연구가 이루어진 바 있다. 본 연구에서는 구름에 영향을 받은 자료를 모두 제외하고 연구를 진행하였기에 다년간의 자료를 수집하고, 구름 영향을 제거 후 결손 내삽 (Lee et al., 2015) 및 상기 기술된 smoothing 기법의 적용을 고려한다면 더욱 정확한 Sentinel-2 NDVI 시계열 자료를 구축할 수 있을 것으로 사료 된다.

논을 제외한 가을철에 Sentinel-2 NDVI가 과대산정되는 시점이 존재했는데, 마찬가지로 선형 보간의 결과로 NDVI가 감소하는 시점의 차이가 발생하여 비롯된 것으로 판단된다. 겨울철의 경우 논, 밭, 초지에서는 0.5 이하의 낮은 값이 나타났으나 산림의 경우 침엽수림의 영향으로 일부 겨울철에도 0.6 이상의 값이 나타났다. 초지와 산림에 비해 농경지의 상관성이 높아 선형적인 거동을 보일 뿐만 아니라, 우리나라와 같이 소~중규모의 농경지를 대상으로 하였을 때 상대적으로 고해상도인 Sentinel-2 NDVI의 활용성이 매우 클 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 Sentinel-2 위성영상을 기반으로 NDVI를 산출하고 MODIS NDVI 토지피복별로 비교 및 검증하여 두 자료 간 호환성 분석과 식생 및 농업 모니터링의 적용성을 평가하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. MODIS NDVI는 Sentinel-2 NDVI에 비해 모든 토지피복에 대해 전반적으로 더 높은 값을 나타냈고, 토지피복 종류가 NDVI 시계열 변화에 미치는 영향이 적어 모든 토지피복에서 연간 NDVI 시계열 분포 경향이 유사하게 나타났다. 또한, IQR은 토지피복에 따라 0.28~0.36, SD=0.15~0.18을 보여 모든 토지피복에서 NDVI의 범위가 유사하였다.
2. MODIS NDVI의 경우 낮은 해상도로 인해 작은 면적 범위를 차지하는 수역, 시가지 및 논, 밭으로 세분류된 농경지의 NDVI 식별력이 떨어져 주변의 다른 토지피복 유형과 혼합되어 과대추정되었다. 10 m 해상도의 Sentinel-2 NDVI는 MODIS NDVI에 비해 고해상도로 토지피복을 명확히 구분하여 각 토지피복별 NDVI 특성을 잘 나타냈다. 산림

지역의 경우 밀집된 식생이 넓은 범위에 걸쳐 분포하여 공간 해상도가 낮더라도 큰 영향을 받지 않기 때문에 산림에 대한 Sentinel-2 NDVI와 MODIS NDVI 자료 간 통계량은 전반적으로 유사하게 나타났다.

3. NDVI의 시계열 분석 결과 MODIS NDVI는 공간 해상도의 한계로 산림지역에서 수종별 고유의 NDVI를 추출하지 못하는 결과를 보였다. Sentinel-2 NDVI는 수종별 NDVI의 차이가 MODIS NDVI에 비해 두드러졌으나, 여름철에 1개 영상만 사용 가능하여 시계열 분석에는 한계점을 보였다. 논과 밭의 경우 두 자료의 시계열 패턴이 유사하게 나타나 작물의 생육 기간 중 작황 상태에 따른 NDVI의 차이를 잘 나타냈다.
4. 식생 지역의 계절별 NDVI 분석결과, 계절별 변화 양상이 두 자료에서 잘 나타났으나 전체적으로 MODIS NDVI가 Sentinel-2 NDVI에 비해 과대산정되는 경향을 보였다. 봄철의 경우 모든 토지이용에서 선형적인 거동을 보였으며, 여름철에는 초지와 산림에서 NDVI 변화가 없는 모습을 보였다. 일부 가을철에서 Sentinel-2 NDVI가 과대산정되는 경향을 보였으며, 이는 선형 보간의 한계로 NDVI 감소 시점의 차이로 인해 비롯된 것으로 판단되어 smoothing 기법 등의 적용이 필요함을 시사하였다. 겨울철에는 산림에서 침엽수림의 영향으로 다른 토지이용에 비해 높은 값을 보였다.

결론적으로, Sentinel-2 NDVI는 높은 공간 해상도로 토지이용별 NDVI는 물론 산림의 수종별 NDVI의 차이까지 판별 가능해 식생 및 작물 모니터링에 활용할 가치가 매우 높아 보인다. 하지만, MODIS에 비해 Sentinel-2는 자료의 제공 시기가 비교적 짧고, 시간 해상도가 더 크다는 한계점이 있다. 긴 시간 해상도로 인해 시계열적 보간이 필수적이고, 보간을 수행하였더라도 일별 자료를 활용해 보간을 수행하는 MODIS 등의 위성자료에 비해 불확실성이 클 가능성이 있다. 그럼에도, 중소규모 단위의 농경지와 형태가 다양하고 복잡한 산림지역을 가지는 우리나라를 대상으로 Sentinel-2 NDVI의 활용은 적합하다고 볼 수 있다. 향후 Sentinel-2 NDVI 자료가 식생 및 농업 모니터링은 물론 다양한 분야에서 활용될 것을 기대해 본다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원 (2020003050001) 과 물관리연구사업의 지원 (79617)의 지원을 받아 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Amorós-López, J., L. Gómez-Chova, L. Alonso, L. Guanter, R. Zurita-Milla, J. Moreno, and G. Camps-Valls, 2013. Multitemporal fusion of Landsat/TM and ENVISAT/MERIS for crop monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23: 132-141. doi:10.1016/j.jag.2012.12.004.
2. Bukowiecki, J., T. Rose, and H. Kage, 2021. Sentinel-2 Data for Precision Agriculture?-A UAV-based assessment. *Sensors* 21(8): 2861. doi:10.3390/s21082861.
3. Cha, S. Y., D. J. Seo, and C. H. Park, 2009. Monitoring Vegetation Phenology using MODIS in Northern Plateau region, North Korea. *Korean Journal of Remote Sensing* 25(5): 399-409 (in Korean).
4. Chae, S. H., S. H. Park, and M. J. Lee, 2017. A study on the observation of soil moisture conditions and its applied possibility in agriculture using land surface temperature and NDVI from Landsat-8 OLI/TIRS satellite image. *Korean Journal of Remote Sensing* 33(6-1): 931-946 (in Korean). doi:10.7780/kjrs.2017.33.6.1.3.
5. Chakhar, A., D. Hernández-López, R. Ballesteros, and M. A. Moreno, 2021. Improving the accuracy of multiple algorithms for crop classification by integrating Sentinel-1 observations with Sentinel-2 data. *Remote Sensing* 13(2): 243. doi:10.3390/rs13020243.
6. Chen, J., P. Jonsson, M. Tamura, Z. Gu, B. Matsushita, and L. Eklundh, 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment* 91(3): 332-344. doi:10.1016/j.rse.2004.03.014.
7. Chen, X., D. Wang, J. Chen, C. Wang, and M. Shen, 2018. The mixed pixel effect in land surface phenology: A simulation study. *Remote Sensing of Environment* 211: 338-344. doi:10.1016/j.rse.2018.04.030.
8. Choi, S., S. Lee, and B. Wang, 2014. Analysis of Vegetation Cover Fraction on Landsat OLI using NDVI. *Journal of the Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* 32(1): 9-17 (in Korean). doi:10.7848/ksgpc.2014.32.1.9.
9. Chung, J., Y. Lee, W. Jang, S. Lee, and S. Kim, 2020. Correlation analysis between air temperature and MODIS land surface temperature and prediction of air temperature using TensorFlow long short-term memory for the period of occurrence of cold and heat waves. *Remote Sensing* 12(19): 3231. doi:10.3390/rs12193231.
10. Didan, K., A. B. Munoz, R. Solano, and A. Huete, 2015. MODIS vegetation index user's guide(MOD13 series). *University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab*.
11. Doraiswamy, P. C., J. L. Hatfield, T. J. Jackson, B. Akhmedov, J. Prueger, and A. Stern, 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment* 92(4): 548-559. doi:10.1016/j.rse.2004.05.017.
12. ESA, Spectral bands for the SENTINEL-2 sensors. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guide/s/sentinel-2-msi/msi-instrument>. Accessed 7 Aug. 2021.
13. Guerini Filho, M., T. M. Kuplich, and F. L. D. Quadros, 2020. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing* 41(8): 2861-2876. doi:10.1080/01431161.2019.1697004.
14. Hong, J. Y., C. S. Shim, M. J. Lee, G. H. Baek, W. K. Song, S. W. Jeon, and Y. H. Park, 2011. Net primary production changes over Korea and climate factors. *Korean Journal of Remote Sensing* 27(4): 467-480 (in Korean). doi:10.7780/kjrs.2011.27.4.467.
15. Jamshidi, S., S. Zand-Parsa, and D. Niyogi, 2021. Assessing crop water stress index of citrus using in-situ measurements, Landsat, and Sentinel-2 Data. *International Journal of Remote Sensing* 42(5): 1893-1916. doi:10.1080/01431161.2020.1846224.
16. Jiang, Z., A. R. Huete, J. Chen, Y. Chen, J. Li, G. Yan, and X. Zhang, 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 101(3): 366-378. doi:10.1016/j.rse.2006.01.003.
17. Jinan Country, 2020. Land and Climate Data. https://www.jinan.go.kr/stats/synap/skin/doc.html?fn=161942663069452.xlsx&rs=/upload_data/Synap/BBS_0000114/&cpath=%2Fstats. Accessed 7 Aug. 2021.
18. Kalubarme, M. H., M. B. Potdar, K. R. Manjunath, R. K. Mahey, and S. S. Siddhu, 2003. Growth profile based crop yield models: a case study of large area wheat yield modelling and its extendibility using atmospheric corrected NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 24(10): 2037-2054. doi:10.1080/01431160210156018.
19. Kim, B. S., M. S. Park, S. W. Song, and B. K. Min, 2010.

- A Pilot Study on Estimating Rice Acreage with Satellite Images. *Korea Rural Economic Institute* (in Korean).
20. Kim, D. S., 2000. Korean vegetation types using NOAA/AVHRR data. *Journal of the Korean Geographical Society* 35(1): 39-51 (in Korean).
 21. Kim, G. H., J. S. Lee, J. H. Jung, and S. Y. Won, 2011. A comparative analysis of field surveying vegetation data and NDVI from KOMPSAT-2 satellite imagery. *Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* 29(4): 405-411 (in Korean). doi:10.7848/ksgpc.2011.29.4.405.
 22. Kim, H. O., J. M. Yeom, and Y. S. Kim, 2011. The multi-temporal characteristics of spectral vegetation indices for agricultural land use on RapidEye satellite imagery. *Aerospace Engineering and Technology* 10(1): 149-155 (in Korean).
 23. Kim, Y., and N. W. Park, 2019. Comparison of spatio-temporal fusion models of multiple satellite images for vegetation monitoring. *Korean Journal of Remote Sensing* 35(6-3): 1209-1219 (in Korean). doi:10.7780/kjrs.2019.35.6.3.5.
 24. Knipling, E. B., 1970. Physical, and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1(3): 155-159. doi:10.1016/S0034-4257(70)80021-9.
 25. Lee, G. S., T. J. Kim, N. W. Park, J. H. Lee, E. M. Jang, B. G. Kang, G. H. Gwak, H. S., Lee, Y. H. Jeong, H. G. Kim, Y. Y. Park, D. J. Son, Y. S. Yoon, J. W. Jeong, and S. R. Hwang, 2018. Planning the payload system development for the Agriculture and Forestry Satellite and the establishment and operation of the Aerospace Image Applications Center for Agriculture. *Rural Development Administration* (in Korean). doi:10.23000/TRKO201800 043706.
 26. Lee, J. W., G. Park, H. K. Joh, K. H. Lee, S. I. Na, J. H. Park, and S. J. Kim, 2011. Analysis of relationship between vegetation indices and crop yield using KOMPSAT(KoreaMulti-Purpose SATellite)-2 imagery and field investigation data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(3): 75-82 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2011.53.3.075.
 27. Lee, J., S. Kang, K. Jang, and S. Y. Hong, 2015. A comparative study for reconstructing a high-quality NDVI time series data derived from MODIS surface reflectance. *Korean Journal of Remote Sensing* 31(2): 149-160. doi:10.7780/kjrs.2015.31.2.9.
 28. Lee, K. S., and K. S. Han, 2014. An improved method of NDVI correction through pattern-response low-peak detection on time series. *Korean Journal of Remote Sensing* 30(4): 505-510 (in Korean). doi:10.7780/kjrs.2014.30.4.8.
 29. Lee, S., K. Kim, Y. Kim, J. Kim, and Y. Lee, 2017. Development of FBI (Fire Burn Index) for Sentinel-2 images and an experiment for detection of burned areas in Korea. *Journal of the Association of Korean Photo-geographers* 27(4): 187-202 (in Korean).
 30. Lee, Y. G., S. H. Kim, S. R. Ahn, M. H. Choi, K. S. Lim, and S. J. Kim, 2015. Estimation of spatial evapotranspiration using Terra MODIS satellite image and SEBAL model - A case of Yongdam dam watershed. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(1): 90-104 (in Korean). doi:10.11108/kagis.2015.18.1.090.
 31. Liu, J., T. Huffman, B. Qian, J. Shang, Q. Li, T. Dong, and Q. Jing, 2020. Crop yield estimation in the Canadian prairies using Terra/MODIS-derived crop metrics. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 2685-2697. doi:10.1109/JSTARS.2020.2984158.
 32. Mkhabela, M. S., P. Bullock, S. Raj, S. Wang, and Y. Yang, 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(3): 385-393. doi:10.1016/j.agrformet.2010.11.012.
 33. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900. doi:10.13031/2013.23153.
 34. Mueller-Wilm, U., O. Devignot, and L. Pessiot, 2017. S2 MPC Sen2Cor Configuration and User Manual (No. S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2. 4). *ESA*.
 35. Na, S. I., C. W. Park, Y. K. Cheong, C. S. Kang, I. B. Choi, and K. D. Lee, 2016. Selection of optimal vegetation indices for estimation of barley & wheat growth based on remote sensing-An application of unmanned aerial vehicle and field investigation data. *Korean Journal of Remote Sensing* 32(5): 483-497 (in Korean). doi:10.7780/kjrs.2016.32.5.7.
 36. Na, S. I., J. H. Park, and J. K. Park, 2012. Development of Korean Paddy Rice Yield Prediction Model (KRPM)

- using Meteorological Element and MODIS NDVI. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 141-148 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.3.141.
37. NASA, Data Products of MODIS. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>. Accessed 7 Aug. 2021.
 38. Oguro, Y., Y. Suga, S. Takeuchi, M. Ogawa, T. Konishi, and K. Tsuchiya, 2001. Comparison of SAR and optical sensor data for monitoring of rice plant around Hiroshima. *Advances in Space Research* 28(1): 195-200. doi:10.1016/S0273-1177(01)00345-3.
 39. Park, J., J. Baik, S. J. Kim, and M. Choi, 2014. Application of normalized vegetation index for estimating hydrological factors in the Korea Peninsula from COMS. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(10): 935-943 (in Korean). doi:10.3741/JKWSA.2014.47.10.935.
 40. Park, S., 2013. Satellite-Measured Vegetation Phenology and Atmospheric Aerosol Time Series in the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society* 48(4): 497-508 (in Korean).
 41. Rulinda, C. M., A. Dilo, W. Bijker, and A. Stein, 2012. Characterising and quantifying vegetative drought in East Africa using fuzzy modelling and NDVI data. *Journal of Arid Environments* 78: 169-178. doi:10.1016/j.jaridenv.2011.11.016.
 42. Sakamoto, T., 2020. Incorporating environmental variables into a MODIS-based crop yield estimation method for United States corn and soybeans through the use of a random forest regression algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 160: 208-228. doi:10.1016/j.isprsjprs.2019.12.012.
 43. Sakamoto, T., M. Yokozawa, H. Toritani, M. Shibayama, N. Ishitsuka, and H. Ohno, 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 96(3): 366-374. doi:10.1016/j.rse.2005.03.008.
 44. Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck, 2001. Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 37(5): 1169-1188. doi:10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x.
 45. Segarra, J., M. L. Buchailot, J. L. Araus, and S. C. Kefauver, 2020. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy* 10(5): 641. doi:10.3390/agronomy10050641.
 46. Seong, N. H., D. Jung, J. Kim, and K. S. Han, 2020. Evaluation of NDVI estimation considering atmospheric and BRDF correction through Himawari-8/AHI. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 1-10. doi:10.1007/s13143-019-00167-0.
 47. Shin, S. C., and T. Y. An, 2007. Development of estimating method for areal evapotranspiration using satellite data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(2): 71-81 (in Korean).
 48. Sola, I., A. García-Martín, L. Sandonis-Pozo, J. Álvarez-Mozos, F. Pérez-Cabello, M. González-Audicana, and R. M. Llovería, 2018. Assessment of atmospheric correction methods for Sentinel-2 images in Mediterranean landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 73: 63-76. doi:10.1016/j.jag.2018.05.020.
 49. Sonobe, R., Y. Yamaya, H. Tani, X. Wang, N. Kobayashi, and K. I. Mochizuki, 2018. Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning. *Journal of Applied Remote Sensing* 12(2): 026019. doi:10.1117/1.JRS.12.026019.
 50. Stefanov, W. L., and M. Netzband, 2005. Assessment of ASTER land cover and MODIS NDVI data at multiple scales for ecological characterization of an arid urban center. *Remote Sensing of Environment* 99(1-2): 31-43. doi:10.1016/j.rse.2005.04.024.
 51. Suh, M. S., J. R. Lee, J. H. Kang, D. K. Lee, and M. H. Ahn, 2005. On the relationship between seasonal change of vegetation and climate elements in East Asia. *Journal of Korean Meteorological Society* 41(4): 557-570 (in Korean).
 52. Thomas, J. R., and H. W. Gausman, 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops 1. *Agronomy Journal* 69(5): 799-802. doi:10.2134/agronj1977.00021962006900050017x.
 53. Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8(2): 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
 54. Tucker, C. J., and P. J. Sellers, 1986. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing* 7(11): 1395-1416. doi:10.1080/01431168608948944.
 55. United States Geological Survey (USGS), MOD13Q1 Data. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006>.

- Accessed 7 Aug. 2021.
56. Van Liew, M. W., J. G. Arnold, and J. D. Garbrecht, 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE* 46(6): 1539. doi:10.13031/2013.15643.
 57. Wan, Z., P. Wang, and X. Li, 2004. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing* 25(1): 61-72. doi:10.1080/0143116031000115328.
 58. Xin, J., Z. Yu, L. van Leeuwen, and P. M. Driessen, 2002. Mapping crop key phenological stages in the North China Plain using NOAA time series images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4(2): 109-117. doi:10.1016/S0303-2434(02)00007-7.
 59. Yang, C., J. H. Everitt, and D. Murden, 2011. Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification. *Computers and Electronics in Agriculture* 75(2): 347-354. doi:10.1016/j.compag.2010.12.012.
 60. Yeom, J. M., K. S. Han, C. S. Lee, Y. Y. Park, and Y. S. Kim, 2008. A detection of vegetation variation over North Korea using SPOT/VEGETATION NDVI. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(2): 28-37 (in Korean).
 61. Yeom, J. M., S. Jeong, R. C. Deo, and J. Ko, 2021. Mapping rice area and yield in northeastern asia by incorporating a crop model with dense vegetation index profiles from a geostationary satellite. *GIScience & Remote Sensing* 58(1): 1-27. doi:10.1080/15481603.2020.1853352.
 62. Yoon, S. Y., H. Choi, and G. H. Kim, 2017. Estimation of Vegetation Cover Fraction Using Landsat 8 OLI imagery and Field Survey Data. *Korean Society for Geospatial Information Science* 25(3): 95-100 (in Korean). doi:g/10.7319/kogsis.2017.25.3.095.