



## Application of VIIRS land products for agricultural drought monitoring

Sur, Chanyang<sup>a</sup> · Nam, Won-Ho<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Senior Researcher, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Anseong, Korea

<sup>b</sup>Associate Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, Institute of Agricultural Environmental Science, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University, Anseong, Korea

Paper number: 23-056

Received: 7 September 2023; Revised: 16 October 2023; Accepted: 19 October 2023

### Abstract

The Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is a multispectral sensor that has been actively researched in various fields using diverse land and atmospheric products. MODIS was first launched over 20 years ago, and the demand for novel sensors that can produce data comparable to that obtained using MODIS has continuously increased. In this study, land products obtained using the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) of the Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) satellite launched in 2011 were introduced, including land surface temperature and vegetation indices such as the normalized difference vegetation index and enhanced vegetation index. These land products were compared with existing data obtained using MODIS to verify their local applicability in South Korea. Based on spatiotemporal monitoring of an extreme drought period in South Korea and the application of VIIRS land products, our results indicate that VIIRS can effectively replace MODIS multispectral sensors for agricultural drought monitoring.

**Keywords:** MODIS, VIIRS, LST, NDVI, Agricultural drought condition

## 농업가뭄 모니터링을 위한 VIIRS 센서 지표산출물 적용성 분석

서찬양<sup>a</sup> · 남원호<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>한경국립대학교 국가농업융수연구센터 책임연구원, <sup>b</sup>한경국립대학교 사회안전시스템공학부 부교수

### 요 지

다중분광센서인 Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)는 지표 및 대기 산출물을 통해 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되어 왔다. MODIS는 발사된지 20년이 지났고, 비슷한 특성의 이를 대체할 만한 자료의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 본 연구에서는 2011년에 발사된 Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) 위성의 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 센서에서 제공하는 지표 산출물 중 지표면 온도(Land Surface Temperature, LST)와 식생 지수인 정규식생지수(Normalized Differences Vegetation Index, NDVI)를 소개하고, 기존의 MODIS에서 제공되는 자료와의 비교 및 검증을 통해 연구 지역인 남한에서의 지역적인 적용성을 파악하고자 한다. 지표면 온도와 식생 활력은 농업적인 가뭄을 발생시키는 주요한 인자로서, 남한의 극심한 가뭄기간인 2014년과 2015년을 대상으로 가뭄의 시공간적인 변동성을 분석하여, VIIRS 산출물의 활용 가능성을 파악하였다.

**핵심용어:** MODIS, VIIRS, 지표면 온도, 정규식생지수, 농업 가뭄

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-670-5137  
E-mail: wonho.nam@hknu.ac.kr (Nam, Won-Ho)

## 1. 서론

위성영상을 통해 제공되는 지표면 온도(Land Surface Temperature, LST)와 식생지수 같은 지표 관련 산출물들은 수문 순환에 있어서 필수적인 요소이다(Arkin *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2020). 지표면 온도의 경우, 유입되는 태양복사에너지와 대기층의 구름의 양 등에 의해 결정되며, 기후변화와 같은 이상 현상을 파악하기 위한 기초적인 요소로 활용 된다(Zhao *et al.*, 2019). 식생지수의 경우, 지표의 식생 분포를 분광 특성으로 지수화 한 것으로서, 가뭄과 같은 재난재해에 대한 모니터링에 필수적으로 활용 된다(Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Zhang and Jia, 2013; Nam *et al.*, 2018; Sur *et al.*, 2019; Yoon *et al.*, 2020).

지표면 온도를 통한 도시열섬 분석 연구(Wang *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019), 식생지수를 활용한 농업적 가뭄 분석 연구(Keshavarz *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2021) 등 지표 산출물을 활용한 연구 분야는 다양한 분야에서 소개되었다. Das *et al.* (2020)은 Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)와 ECMWF ReAnalysis (ERA)-Interim 위성자료를 이용하여 도시열섬 현상의 시공간적 변동성에 관한 연구를 소개하였고, Liu *et al.* (2019)은 Landsat 8에서 제공하는 지표면 온도를 활용하여 중국의 10개 거대도시에서의 도시 열 환경 변화를 토지 피복에 따라 분석하는 연구를 수행하였다. Zhang and Jia (2013)는 식생지수와 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)에서 제공하는 강수량 자료를 등을 조합하여 가뭄 분석을 수행하였다.

기존 연구들은 다중분광 센서인 Landsat과 MODIS에서 제공되는 지표 산출물을 활용하는 연구들이 대부분이다. Landsat의 경우, 다중분광 센서와 열적외선을 동시에 활용하고, 열적외선 센서는 복사에너지에 민감하게 작용하기 때문에 열섬 분석과 같이 지표면 온도와 관련된 연구에서 주로 활용된다(Liu *et al.*, 2019). 다중분광 광학센서인 MODIS는 시공간 해상도가 행정구역 단위를 분석할 수 있기 때문에 광역적인 분석을 필요로 하는 가뭄 분석에서 주로 활용된다.

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)는 2011년에 발사된 Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP)에 탑재되어 있는 다중분광 센서이다. VIIRS 자료를 활용한 연구는 지표 산출물의 평가 및 검증에 대한 연구들이 소개된 바 있다(Li *et al.*, 2014; Skakun *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2019). Li *et al.* (2014)는 중국의 건조 지역에서 VIIRS와 MODIS 지표면 온도를 비교 및 검증하는 연구를 수행하였으며, Skakun *et al.* (2018)은 VIIRS NDVI와 MODIS NDVI를

비교하는 연구를 수행하였다. Ma *et al.* (2019)는 중국의 지점 관측된 지표면 온도와 VIIRS 지표면 온도의 검증 결과를 소개하였다. 본 연구에서는 남한 지역을 대상으로 MODIS와 VIIRS에서 제공되는 지표면 온도와 식생 지수를 활용하여 농업적 가뭄지수인 식생 건강 지수(Vegetation Health Index, VHI)를 산정하고, 상관 분석을 통해 VIIRS의 적용성을 파악하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 대상 지역

본 연구에서는 남한 전역을 연구 대상지역으로 선정하였다. 위성 영상 자료의 공간적인 분포를 분석할 때에는 남한 전체 지역을 포함하고, 각 요소들의 검증을 수행할 때에 지점 관측자료를 활용하였다. 본 연구에서 수행한 지표 산출물 중 지표면 온도의 경우, 기상청에서 제공하는 일 단위 지표면 온도(°C)를 활용하였다. 기상청에는 101개 관측소에서 자료를 제공하는데, Fig. 1과 같이 MODIS와 VIIRS 자료가 겹치는 2012년부터 2019년까지의 20개 관측소를 선정하였다.

### 2.2 다중분광광학센서 자료

MODIS 센서는 36개의 다중분광 밴드를 통해 산정된 다양한 지표 및 기상 산출물을 제공한다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 지표 산출물 중 지표면 온도를 제공하는 MOD11A1와 식생 지수를 제공하는 MOD13A3를 활용하였다. MOD11A1의 경우, 일 단위 시간 해상도에 1 km의 공간 해상도를 갖는다. MOD13A3는 공간 해상도 1 km이며, 월 단위로 제공 된다. VIIRS 센서는 22개의 이미징 방사밴드를 통해 산출물을 제공한다. 본 연구에서는 지표면 온도를 위한 VNP21A1D와 VNP21A1N를, 식생 지수를 위한 VNP13A3를 활용하였다. 지표면 온도의 경우, 낮 시간과 밤 시간에 대한 산출물이 따로 제공되며, 모두 일 단위 1 km의 공간 해상도로 제공된다. 식생 지수를 제공하는 VNP13A3의 경우 지표면 온도와 같은 시공간 해상도를 갖는다. MODIS와 VIIRS 산출물 모두 <https://earthdata.nasa.gov/>를 통해 획득하였다.

### 2.3 Vegetation Health Index (VHI)

농업적 가뭄 상황을 발생시키는 여러 요인 중, 지표면 온도와 식생 지수를 활용한 가뭄지수인 VHI를 산정하였다. VHI는 Kogan (1997)에서 제안한 지수로서, 위성영상자료 기반의 농업적 가뭄을 모니터링 하는 데에 있어 가장 많이 활용된

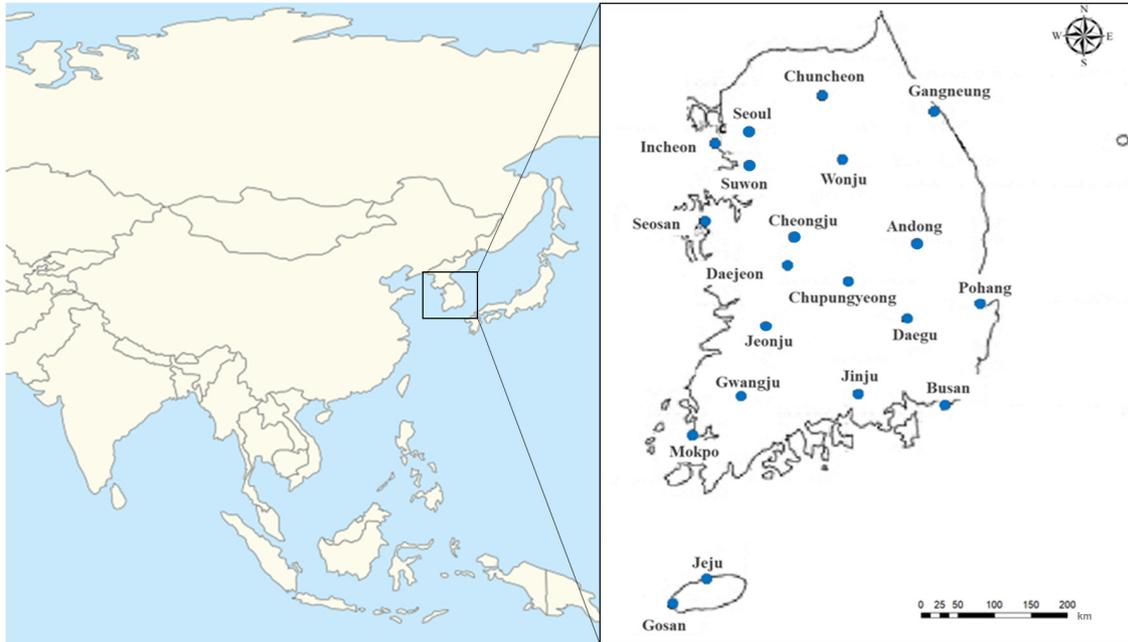


Fig. 1. Geographical locations of the study area and observational ground stations

Table 1. Characteristics of MODIS and VIIRS products

Sensor	Product ID	Product	Spatial resolution	Temporal resolution
MODIS	MOD11A1	Land surface temperature	1.0 km	Daily
	MCD13A3	Vegetation Indices	1.0 km	Monthly
VIIRS	VNP21A1D	Daytime land surface temperature	1.0 km	Daily
	VNP21A1N	Nighttime land surface temperature	1.0 km	Daily
	VNP13A3	Vegetation Indices	1.0 km	Daily

다. VHI는 식생 지수인 NDVI의 정규화를 통해 산정된 식생 조건 지수(Vegetation Condition Index, VCI)와 지표면 온도의 정규화를 통해 산정된 온도 조건 지수(Temperature Condition Index, TCI)의 조합으로 산정한다.

$$VCI = 100 \times \frac{(NDVI - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})} \quad (1)$$

$$TCI = 100 \times \frac{(LST - LST_{\min})}{(LST_{\max} - LST_{\min})} \quad (2)$$

$$VHI = 0.5 \times (VCI + TCI) \quad (3)$$

여기서,  $NDVI_{\max}$ 와  $LST_{\max}$ 는 픽셀 내에서의 식생지수와 지표면 온도의 최대값을 나타내며,  $NDVI_{\min}$ 와  $LST_{\min}$ 는 픽셀 내 최소값을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 지표면 온도의 비교 분석

##### 3.1.1 지점 관측 자료를 통한 지표면 온도의 시간 변동성 분석

MODIS와 VIIRS에서 제공되는 지표면 온도를 비교 검증하기 위하여, 기상청에서 제공되는 20개의 관측소에서 측정된 일 단위 지표면 온도를 활용하였다. 기상청 지표면 온도는 섭씨온도(°C)로 제공되고, 위성 영상에서 제공되는 지표면 온도는 절대온도(K)이기 때문에, 섭씨온도로 단위를 변환하여 비교하였다. 본 연구지역은 지형학적으로 북반구 중위도에 위치하기 때문에, 봄, 여름, 가을, 겨울의 4계절이 뚜렷하다 (Sur *et al.*, 2015). 여름으로 갈수록 온도가 높아지고, 겨울로 갈수록 온도가 낮아지는 주기적인 패턴이 나타났으며, 7월과 8월 사이에 최댓값, 12월과 1월 사이에 최솟값을 나타낸다.

Fig. 2는 서울관측소 자료와 MODIS, VIIRS에서 제공된 지표면 온도 자료 간의 상관관계 분석 결과를 나타낸다. Li *et*

al. (2014)은 건조지역에서 VIIRS와 MODIS를 비교하여 상관 계수 0.6 이상의 결과를 보였으며, Ma et al. (2019)에서도 중국의 여러 토지피복 지역에 대해 지표면 온도 값을 비교하여 모두 높은 상관성을 갖는다는 것을 확인하였다. 관측소 자료와 MODIS, VIIRS 자료 간의 상관 분석을 통해, 두 위성 자료가 관측소 자료보다 다소 과소 산정되는 경향을 확인하였다. 회귀식에서 산정된 기울기와 편차를 통해 0-20°C 사이에서는 위성자료가 과대 산정되고, 여름철 높은 온도에서는 위

성자료가 상대적으로 과소 산정되는 것을 확인하였다.

위성 데이터는 1 km \* 1 km의 범위를 한 값으로 대표하고, 상승/하강 시간에 2번 측정된 값을 기반으로 일 단위 지표면 온도가 측정되기 때문에, 온도가 급격하게 변하지 않는다. 이러한 이유로, 여름철과 같이 한 낮에 발생하는 순간적인 극치 온도값을 포착하지 못하는 한계점이 발생한다(Tomlinson et al., 2011; Solanky et al., 2018). 하지만, MODIS와 VIIRS 두 위성에서 제공되는 자료의 경우 상관 계수가 모든 지점에서

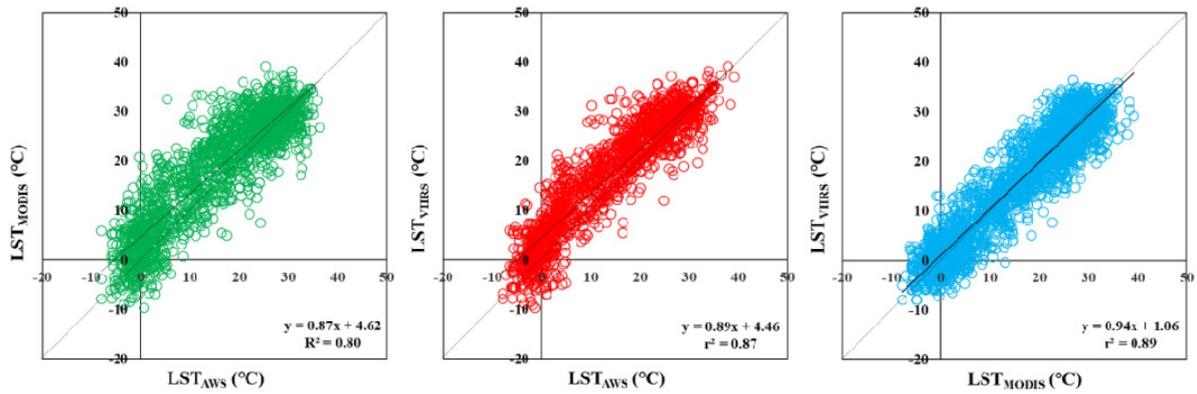


Fig. 2. Comparisons between observed and RS-based estimated LST at Seoul station

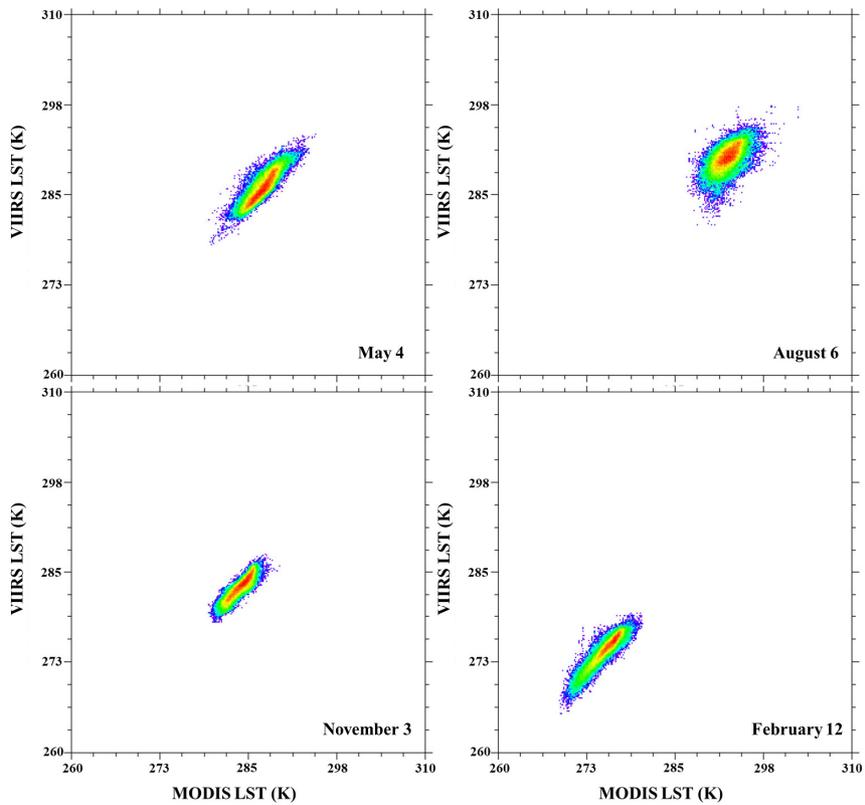


Fig. 3. Spatial relationship between MODIS and VIIRS LST

0.70 이상을 나타내기 때문에, VIIRS 지표면 온도값의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

### 3.1.2 지표면 온도의 공간 변동성 분석

VIIRS를 통해 산정된 지표면 온도값의 지역적 적용성을 확인하기 위하여, MODIS 지표면 온도와의 공간 변동성을 비교하였다. 일 단위로 산정된 MODIS와 VIIRS 지표면 온도의 공간 지도를 제작하고, 각 픽셀별 값의 상관 분석을 수행하였다. Fig. 3은 해당 날짜의 두 가지 이미지의 픽셀 별 상관 분포를 나타낸다. 붉은 점으로 표시된 부분은 MODIS와 VIIRS 지표면 온도값의 상관 계수값이 높은 것을 의미한다. 4계절 모두, 붉은 점의 분포가 MODIS와 VIIRS 값이 같은 1:1 선상에 위치하기 때문에, VIIRS 지표면 온도값이 남한 지역에서 적용성을 갖는다고 판단할 수 있다.

### 3.2 식생 지수의 비교 분석

MODIS와 VIIRS에서는 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)를 제공한다. NDVI는 적색 스펙트럼과 근적외선 영역 대의 분광특성에 따라 산정된다(Kogan, 1997). 지표면 온도와 달리, 식생 지수는 지상 관측 데이터가 없기 때문에, MODIS 자료와의 비교를 통한 검증이 수행되었다. NDVI는 일 단위로 산정되며, 공간 해상도는 지표면 온도와 같이 1 km \* 1 km로 산정되었다. 식생 지수는 지표면의 식생 분포밀도를 포착하여 산정되기 때문에, 식생 생장기인 3월부터 11월까지의 자료만 활용하였다. Fig. 4는 해당 기간의 두 가지 이미지의 픽셀 별 상관분석 결과를 나타낸다. 두 위성 NDVI값의 계절별 상관성을 확인하기 위해, 3개월씩 평균한 값을 활용하였다. 3계절 모두, 상관 분포가 MODIS와 VIIRS 값이 같은 1대1 선상에 위치하기 때문에, VIIRS NDVI 값이 남한 지역에 대한 적용성을 갖는다고 판단할 수 있다.

식생 지수 결과를 통해, 산정된 전 구간에 걸쳐 범위를 벗어난 이상치 결과는 발견할 수 없으며, 봄철에 서서히 증가하기 시작하여 여름철에는 절정에 다다르고 가을철이 되면서 서서히 감소하는 전형적인 온대 기후의 특징을 보여준다. 지표면 온도와 식생 지수 모두 MODIS와 VIIRS 값의 상관성이 높게 산정되기 때문에, 향후 MODIS 센서의 수명이 종료된 시점에 이르렀을 때, VIIRS 자료가 대안이 될 수 있으리라 판단된다.

### 3.3 MODIS와 VIIRS 자료를 통해 산정된 농업적 가뭄 지수를 활용한 가뭄 분석

Fig. 5는 MODIS와 VIIRS에서 제공되는 지표면 온도와 식생 지수를 조합하여 산정한 농업적 가뭄지수인 VHI를 가뭄 기간인 2014년부터 2015년까지의 시계열을 도시한 결과이다. 해당 가뭄 기간 중, 가장 가뭄이 심각하게 발생한 지점은 충남 해안가 지역에 위치한 곳이다. 본 연구의 주요 목표는 VIIRS 산출물의 적용성을 파악하는 것이기 때문에, 가뭄이 발생한 여러 지역 중 지형학적인 요인이 적은 곳을 검증 지역으로 선정하였다. 20개 관측소 중, 전주와 안동 관측소에 대한 결과를 도시하였으며, 각 관측소에서 산정된 MODIS와 VIIRS VHI의 상관 분석 결과도 같이 제시하였다. 기존 VHI의 경우, 0에서 100까지 사이의 값의 분포를 갖는 반면, 본 연구에서는 표준화를 적용하여 값의 분포를 -2에서 2 사이로 오게끔 재설정하였다. MODIS와 VIIRS VHI의 시간적인 변동 패턴은 비슷하며, 2014년 7-8월부터 2015년 4월까지 가뭄 상태를 확인하였다. Sur *et al.* (2019)에서 농업적 가뭄지수와 식량 생산량과의 비교 및 검증을 통해 해당 기간에 농업적 가뭄 상황이 발생했음을 증명하였으며, 상관 분석 결과, 두 지점 상관 계수가 0.89와 0.91로 산정되었다.

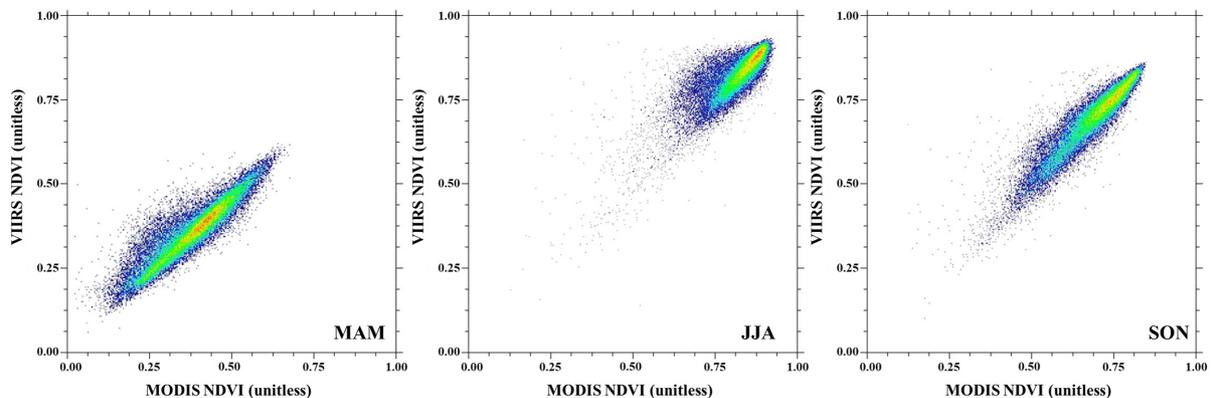


Fig. 4. Spatial relationship between MODIS and VIIRS NDVI

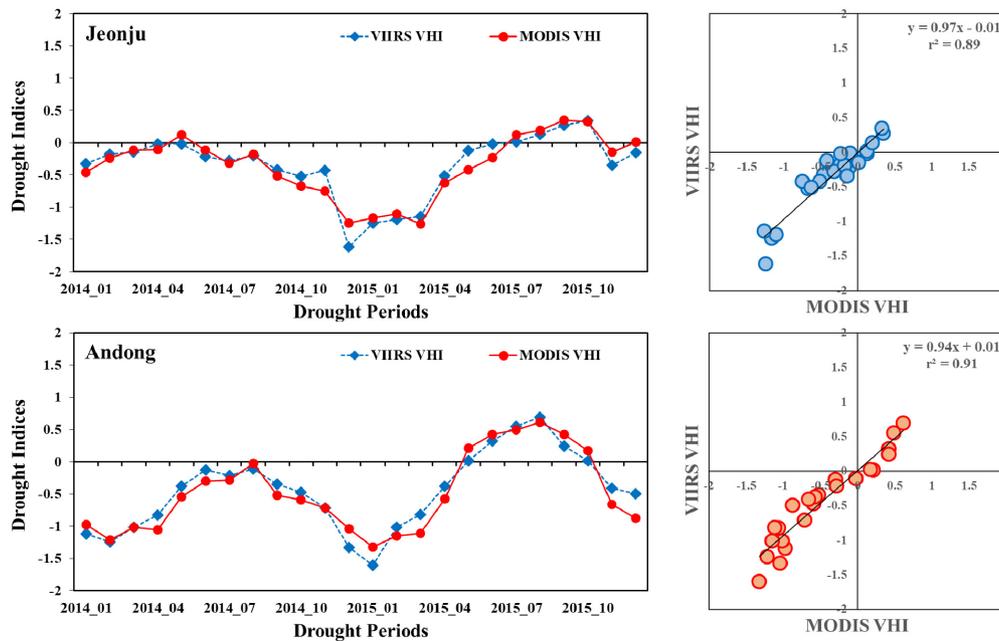


Fig. 5. Temporal variations of MODIS and VIIRS VHI for two representative stations

#### 4. 결론

본 연구에서는 1999년부터 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 다중분광 센서인 MODIS를 대체할 수 있는 VIIRS 센서의 지표 산출물을 소개하고, 한국 내에서의 지역적인 적용성을 파악하는 것이 주요 목적이다. 지표 산출물은 지표면 온도와 식생 지수인 NDVI를 대상으로 선정하였고, 각각의 인자를 MODIS에서 제공되는 산출물과 시공간적으로 비교 및 분석하였다.

지표면 온도의 경우, 기상청의 20개 AWS에서 제공되는 일 평균 지표면 온도 자료를 활용하여, MODIS와 VIIRS 지표면 온도 자료를 비교 및 검증하였다. 지점 관측 자료와 위성 기반의 지표면 온도는 상관계수 0.7 이상의 높은 상관성을 보였으며, 두 위성 자료인 MODIS와 VIIRS 지표면 온도는 상관계수 0.85 이상의 높은 유사성을 나타냈다. 공간 상관 분석 결과도 마찬가지로, 두 위성 자료의 값이 일대일로 매칭 되는 45도 선 상에서 가장 높은 상관성을 보였다. 식생 지수의 경우에는, 지점에서 관측되는 자료가 없기 때문에, 두 위성에서 제공되는 NDVI의 공간 상관 분석만 수행하였다. 두 지수 모두, 45도 선 상부근에서 가장 높은 상관성을 보였다. 이러한 두 가지 작업을 통해 VIIRS 센서에서 제공하는 지표 산출물의 지역적 적용성이 충분히 확보되었다고 판단하였다. 지표면 온도와 식생 지수를 조합하여 농업적 가뭄지수인 VHI를 산정하였고, 가뭄에 대한 시공간 변동성을 확인하였다. 실제로 2014년 후반

부터 2015년 중반까지 극심한 농업적 가뭄 상태가 지속되었는데, MODIS와 VIIRS VHI 모두 해당 기간의 가뭄 상황을 포착하였다.

본 연구에 포함되지 않은 VIIRS에서 제공하는 지표 산출물 중 지표 반사도가 있다. 지표 반사도와 지표면 온도를 조합하여 열전도 기반의 토양수분을 산정하는 연구들이 많이 진행되어 왔다. 차세대 다중분광센서로서의 VIIRS를 활용한 토양수분 산정 연구를 현재 수행 중에 있으며, MODIS와 VIIRS 자료의 조합을 통해 장기간 물 순환 관련 연구들을 수행할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술 개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다(202305020001).

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Arkin, P.A., Smith, T.M., Sapiano, M.R.P., and Janowiak, J. (2010). "The observed sensitivity of the global hydrological cycle to changes in surface temperature." *Environmental Research Letters*, Vol. 5, No. 3, 035201.
- Das, P., Vamsi, K.S., and Zhenke, Z. (2020). "Decadal variation of the land surface temperatures (LST) and urban heat island (UHI) over Kolkata City projected using MODIS and ERA-interim datasets." *Aerosol Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 200-209.
- Keshavarz, M.R., Vazifedoust, M., and Alizadeh, A. (2014). "Drought monitoring using a soil wetness deficit index (SWDI) derived from MODIS satellite data." *Agricultural Water Management*, Vol. 132, pp. 37-45.
- Kogan, F.N. (1997). "Global drought watch from space." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 78, No. 4, pp. 621-636.
- Lee, H.J., Nam, W.H., Yoon, D.H., Svoboda, M.D., and Wardlow, B.D. (2021). "Detection of flash drought using evaporative stress index in South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 8, pp. 577-587.
- Li, H., Sun, D., Yu, Y., Wang, H., Liu, Y., Liu, Q., Du, Y., Wang, H., and Cao, B. (2014). "Evaluation of the VIIRS and MODIS LST products in an arid area of Northwest China." *Remote sensing of Environment*, Vol. 142, pp. 111-121.
- Liu, T., Yu, L., and Zhang, S. (2019). "Land surface temperature response to irrigated paddy field expansion: A case study of semi-arid western Jilin province, China." *Scientific Reports*, Vol. 9, 5278.
- Ma, J., Zhou, J., Zhang, X., Li, M., Luo, M., and Huang, Q. (2019). "VIIRS LST product validation based on spatial representativeness evaluation of the ground measurements." *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, pp. 1797-1800.
- Nam, W.H., Tadesse, T., Wardlow, B.D., Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Hong, E.M., Pachepsky, Y., and Jang, M.W. (2018). "Developing the vegetation drought response index for South Korea (VegDRI-SKorea) to assess the vegetation condition during drought events." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, No. 5, pp. 1548-1574.
- Skakun, S., Justice, C.O., Vermote, E., and Roger, J.C. (2018). "Transitioning from MODIS to VIIRS: An analysis of inter-consistency of NDVI data sets for agricultural monitoring." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, No. 4, pp. 971-992.
- Solanki, V., Singh, S., and Katiyar, S.K. (2018). "Land surface temperature estimation using remote sensing data." *Water Science and Technology Library*, Vol. 81, pp. 343-351.
- Sur, C., Kang, S., Kim, J.S., and Choi, M. (2015). "Remote sensing-based evapotranspiration algorithm: A case study of all sky conditions on a regional scale." *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 627-642.
- Sur, C., Park, S., Kim, T., and Lee, J.H. (2019). "Remote sensing-based agricultural drought monitoring using hydrometeorological variables." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 5244-5256.
- Tomlinson, C.J., Chapman, L., Thornes, J.E., and Baker, C. (2011). "Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review." *Meteorological Applications*, Vol. 18, pp. 296-306.
- Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., Lopez-Moreno, J.I.A. (2010). "Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of Climate*, Vol. 23, pp. 1696-1718.
- Wang, W., Liang, H., Yang, L., Liu, K., Su, H., and Li, X. (2017). "Analyzing the urban heat island using time series land surface temperature (LST) data." *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Fort Worth, TX, U.S., pp. 5874-5876.
- Yan, Y., Mao, K., Shi, J., Piao, S., Shen, X., Dozier, J., Liu, Y., Ren, H.L., and Baoet, Q. (2020). "Driving forces of land surface temperature anomalous changes in North America in 2002-2018." *Scientific Reports*, Vol. 10, 6931.
- Yoon, D.H., Nam, W.H., Lee, H.J., Hong, E.M., Feng, S., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., and Kim, D.E. (2020). "Agricultural drought assessment in East Asia using satellite-based indices." *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 3, 444.
- Zhang, A., and Jia, G. (2013). "Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data." *Remote sensing of Environment*, Vol. 134, pp. 12-23.
- Zhao, W., He, J., Wu, Y., Xiong, D., Wen, F., and Li, A. (2019). "An analysis of land surface temperature trends in the central Himalayan region based on MODIS products." *Remote sensing*, Vol. 11, No. 8, 900.