



# Assessment of soil moisture-vegetation-carbon flux relationship for agricultural drought using optical multispectral sensor

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: 23-055

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

## Abstract

Agricultural drought is triggered by a depletion of moisture content in the soil, which hinders photosynthesis and thus increases carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations in the atmosphere. The aim of this study is to analyze the relationship between soil moisture (SM) and vegetation activity toward quantifying CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. To this end, the MODerate resolution imaging spectro-radiometer (MODIS), an optical multispectral sensor, was used to evaluate two regions in South Korea for validation. Vegetation activity was analyzed through MOD13A1 vegetation indices products, and MODIS gross primary productivity (GPP) product was used to calculate the CO<sub>2</sub> flux based on its relationship with respiration. In the case of SM, it was calculated through the method of applying apparent thermal inertia (ATI) in combination with land surface temperature and albedo. To validate the SM and CO<sub>2</sub> flux, flux tower data was used which are the observed measurement values for the extreme drought period of 2014 and 2015 in South Korea. These two variables were analyzed for temporal variation on flux tower data as daily time scale, and the relationship with vegetation index (VI) was synthesized and analyzed on a monthly scale. The highest correlation between SM and VI (correlation coefficient (r) = 0.82) was observed at a time lag of one month, and that between VI and CO<sub>2</sub> (r = 0.81) at half month. This regional study suggests a potential capability of MODIS-based SM, VI, and CO<sub>2</sub> flux, which can be applied to an assessment of the global view of the agricultural drought by using available satellite remote sensing products.

**Keywords:** Agricultural drought; Soil moisture; Vegetation activity; Carbon dioxide flux; Remote sensing; Optical multispectral sensor

## 다중분광광학센서를 활용한 농업가뭄의 토양수분-식생-이산화탄소 플럭스 관계 분석

서찬양<sup>a</sup> · 남원호<sup>b\*</sup>

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

## 요 지

농업적 가뭄이 발생하면 토양의 수분이 감소하여 식생의 광합성 및 성장을 저해한다. 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소가 흡수되며 산소 생산량이 증가하는데, 이러한 광합성에 부정적인 영향이 생긴다면 대기 중의 이산화탄소 농도가 증가한다. 본 연구에서는 다중분광광학센서인 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 산출물을 이용하여 토양수분, 식생 활력 및 대기 중의 이산화탄소 농도 간의 관계를 분석하였다. 토양수분의 경우, 기존의 마이크로웨이브 센서는 낮은 공간 해상도로 제공되는 특징으로 인해 소규모 연구 지역 분석에 한계가 있어서 상대적으로 고해상도인 광학센서를 이용한 토양수분 산정 방법을 적용하였다. 또한, MODIS 총일차생산량(Gross Primary Productivity, GPP) 산출물을 이용하여 식생의 호흡과의 관계식을 이용하여 이산화탄소 플럭스를 계산하였다. 원격탐사 기반의 토양수분, 식생지수와 이산화탄소 플럭스를 국내의 극한 가뭄 발생시기인 2014년과 2015년도에 대하여 지점 관측 자료인 플럭스타워 값과 비교 분석하였다. 분석한 결과 토양수분과 식생지수 사이에는 한 달의 지체시간, 식생지수와 이산화탄소 플럭스 사이에는 2주 지체시간이 발생했을 때, 상관성이 높게 나타났다.

**핵심용어:** 농업가뭄, 토양수분, 식생 활력, 이산화탄소 플럭스, 원격탐사, 다중분광광학센서

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-670-5137

E-mail: wonho.nam@hknu.ac.kr (Nam, Won-Ho)

## 1. 서론

기후변화의 영향으로 인해 전 세계에 가뭄 발생이 급증하고 있다. 가뭄은 학술적인 정의에 따라 다양하게 분류되며, 농업적 가뭄은 단기간의 강수부족으로 인해 토양수분이 감소하여 식생 활력에 영향을 준다(Wilhite *et al.*, 2007; Sivakumar *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2017; Sur *et al.*, 2019). 농업적 가뭄을 분석하기 위하여 원격탐사 자료 기반의 토양수분이나 식생지수를 이용하여 가뭄지수를 산정하였으며, Kogan (1997)은 식생지수를 이용하여 식생 건강 지수(Vegetation Health Index, VHI)와 식생 조건 지수(Vegetation Condition Index, VCI)를 개발하였고, Keshavarz *et al.* (2014)은 토양수분을 이용하여 토양 습윤 부족 지수(Soil Wetness Deficit Index, SWDI)를 개발하였다. 원격탐사 기법은 미세측 지역을 포함한 넓은 지역을 모니터링 할 수 있다는 장점 때문에 가뭄 모니터링 관련 연구에서 활용되고 있다. 원격탐사자료는 위성에 결합되어 있는 센서들의 특징에 따라 다양한 시공간 해상도로 산출물이 제공되기 때문에 연구자들은 연구목적에 따라 산출물을 선택할 수 있다.

농업적 가뭄과 관련된 인자 중 식생지수의 경우, 광학 센서에서 제공되는 산출물을 활용한다. MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)에서 제공되는 정규 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 향상 식생 지수(Enhanced Vegetation Index, EVI) 등이 연구에서 활용되었다(Peters *et al.*, 2002; Hu *et al.*, 2019). 토양수분의 경우, passive microwave sensor에서 제공되는 산출물을 활용한다. 마이크로웨이브를 통한 토양수분 산정은 지표면의 밝기 온도를 관측하여 관계식을 이용해 추산하는 방식으로 산출된다(Njoku *et al.*, 2003). 지표면의 물리적인 특성에 따라 토양수분을 산정하기 때문에 값의 높은 정확성의 장점이 있지만 광학센서 산출물에 비해 공간 해상도가 낮다. 따라서, 대륙 단위 공간 범위와 같이 광활한 지역에 대해 분석하기에는 적합하나 유역이나 지역 단위 범위에서는 한계가 발생한다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 광학 센서를 통한 토양수분 산정 방법에 대한 연구들이 소개되었다(Verstraeten *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2012). 광학센서를 통한 토양수분의 산정 기법은 지표면 온도와 지표 반사도(land surface albedo)의 관

계식을 통해 산정하는 방법으로 입력 자료에 따라 공간 해상도 0.5 km의 토양수분을 산정할 수 있다.

농업적 가뭄 분석과 관련된 연구들은 토양수분과 식생지수를 통해 가뭄지수들을 개발하고, 가뭄 상태를 모니터링 및 분석하였고, 식생 활력과 광합성의 관계를 분석한 연구들이 많이 수행되었다(Running and Nemani, 1988; Muraoka *et al.*, 2013). 하지만 토양수분, 식생지수와 광합성 사이의 관계에 대한 분석과 관련된 연구는 미흡하다. 농업적 가뭄이 장기간으로 지속된다면 식생 활력이 활발하지 못하기 때문에 광합성에 부정적인 영향을 받아 대기 중으로 배출되는 이산화탄소의 양이 증가한다. 본 연구에서는 가뭄과 같이 극한 기후 조건인 경우에 한정했을 때, 인자들의 관계를 분석하고자 한다.

본 연구의 목적은 2014년부터 2015년까지 우리나라에서 발생한 가뭄 기간일 때, 다중분광 광학 센서인 MODIS 자료를 통해 생산된 토양수분과 플렉스타워에서 관측된 토양수분을 비교하여 광학센서 기반으로 산정된 토양수분의 적용성을 평가하고자 한다. 또한 MODIS 산출물인 총 일차생산량(Gross Primary Productivity, GPP)를 통해 이산화탄소 플럭스를 산정하고, 플렉스타워에서 관측된 결과와 비교 분석하여 원격탐사 기반 탄소 모니터링의 가능성을 파악하고자 한다. 농업 가뭄이 발생할 때, 토양수분이 감소하여 식생 생장에 부정적인 영향이 가해지고, 이에 따라 광합성을 활발하게 하지 못하게 되어 이산화탄소 배출이 증가하게 된다는 가설을 증명하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 대상 지역

본 연구의 대상지역은 남한지역을 대상으로 인공위성 자료 기반의 이산화탄소 플럭스(CO<sub>2</sub> flux)와 토양수분을 검증하기 위하여 Table 1과 같이 한국수자원조사기술원의 설마천과 청미천 플렉스타워의 CO<sub>2</sub> flux와 토양수분 자료를 활용하였다. 설마천 플렉스타워는 경기도 파주시 적성면에 위치하며, 해발고도 293 m의 높은 고지대에 위치한 전형적인 산지 지형이다. 청미천 플렉스타워는 경기도 이천시 장호원읍에 위치하며, 논에 위치하고 있다.

Table 1. Characteristics of the selected sites in study area

Site	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)	Land cover	Leaf Area Index	Terrain
Cheonmicheon (CMC)	37.16	127.65	141	Rice paddy	1-2	Flat
Sulmacheon (SMC)	37.94	126.95	293	Mixed forest	6-8	Mountainous

## 2.2 다중분광광학센서 자료

토양수분, 식생지수 및 총일차생산량(GPP)을 산정하기 위해 Table 2와 같이 다중분광광학센서인 MODIS 자료를 활용하였다. MOD11A1의 지표면 온도와 MCD43A3의 지표 반사도를 이용하여 토양수분을 산정하였다. 식생지수는 MOD13A1의 NDVI를 사용하였으며, MOD17A2H의 GPP를 통해 식생 활력에 따른 CO<sub>2</sub> 발생 여부를 분석하였다. MODIS 자료는 모두 공간 해상도 0.5 km로 제공되며, 시간 해상도는 MOD11A1와 MCD43A3은 1일, MOD17A2H는 8일, MOD13A1은 16일로 제공된다. MODIS 자료는 ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/에서 2001년부터 자료를 획득할 수 있다.

## 2.3 이산화탄소 플럭스 산정 방법

위성영상으로부터 직접적인 CO<sub>2</sub>를 산출할 수 없기 때문에 CO<sub>2</sub>와 GPP사이의 관계를 통해 간접적으로 산출할 수 있다. CO<sub>2</sub>와 GPP의 관계를 Eq. (1)로 표현할 수 있다.

$$NEE = R_c - GPP \quad (1)$$

여기서, NEE (Net Ecosystem Exchange)는 생태계와 대기 간 탄소의 순 교환을 측정하는 것으로, 탄소 생태계 흡수 강도를 나타내는 주요 척도로 활용되며, 플럭스타워에서 측정된 CO<sub>2</sub> 플럭스 자료를 의미한다(Amthor *et al.*, 2001). R<sub>c</sub>는 생태계 내에서의 식생의 호흡량을 의미하며 CO<sub>2</sub> flux와 GPP사이의 관계는 R<sub>c</sub> 값을 통해 산출할 수 있다. R<sub>c</sub>는 Eq. (2)를 통해 산정 된다(Lloyd and Taylor, 1994).

$$R_c = R_{ref} \exp \left( E_0 \left[ \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right] \right) \quad (2)$$

여기서, R<sub>ref</sub>는 생태계 내에서의 기준 호흡량, T<sub>ref</sub>는 기준 온도 (10°C), E<sub>0</sub>는 활성 에너지, T<sub>0</sub>는 -46.02°C, T<sub>a</sub>는 대기 온도이다. R<sub>ref</sub>와 E<sub>0</sub>는 경험상수이다.

## 2.4 다중분광광학센서를 활용한 토양수분 산정 방법

본 연구에서는 Verstraeten *et al.* (2006)에서 제시한 광학센서 산출물을 활용하여 토양수분을 산출하는 방법을 적용하였다.

$$\Delta LST = LST_D - LST_N \quad (3)$$

$$ATI = \frac{1 - \alpha}{\Delta LST} \quad (4)$$

$$Soil\ moisture = \frac{ATI_i - ATI_{min}}{ATI_{max} - ATI_{min}} \quad (5)$$

여기서, ΔLST는 LST<sub>D</sub>과 LST<sub>N</sub>의 차이를 의미하며, LST<sub>D</sub>은 낮 시간 동안의 지표면 온도, LST<sub>N</sub>은 밤 시간 대의 지표면 온도를 의미한다. ATI는 겉보기 열관성(Apparent Thermal Inertia)을 의미하며, 열 관성은 온도 변화에 대한 임피던스를 설명하는 재료의 물리적 특성이다. α는 지표 반사도를 의미하며, 음수값이 적용되었기 때문에 물리적으로 흡수되는 상태를 나타낸다. ATI 값의 최대/최소값을 통해 정규화 기법을 적용하면 체적 토양수분(m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)값을 산출할 수 있다. 지표면 온도와 지표 반사도 모두 일별로 제공되기 때문에 토양수분의 경우에도 일별로 산정된다.

## 2.5 농업적 가뭄 지수

본 연구에서 적용한 가뭄지수는 식생조건지수(VCI)와 표준토양수분지수(Standardized Soil Moisture Index, SSMI)이며, 가뭄이 발생했을 때, 토양수분, 식생활동, 탄소발생의 관계를 분석하기 위하여 활용하였다.

농업적 가뭄상태를 분석하기 위하여 VI를 이용하였으며, MODIS 센서의 MOD13A1에서 제공되는 정규식생지수(NDVI)를 정규화하여 식생조건지수(VCI)를 산정하였다(Kogan, 1997).

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (6)$$

Table 2. Remote sensing data used in this study

Product ID	Product	Spatial resolution (km)	Temporal resolution
MOD11A1 v061	Land surface temperature	1	Daily
MCD12Q1 v061	Land cover	0.5	Yearly
MOD13A1 v061	Vegetation Indices	0.5	16-day
MOD17A2H v061	Gross Primary Productivity	0.5	8-day
MCD43A3 v061	Land surface albedo	0.5	Daily

VCI를 같은 기간에 산정된 NDVI와 비교하였을 때, %값으로 표시되며, 이전 연도의 극단값(최대값과 최소값) 사이에 위치한다. VCI 값의 범위에 따라 가뭄의 등급을 결정할 수 있다.

표준 토양수분 지수(SSMI)는 체적 토양수분을 표준 정규화하여 지수로 가공하였으며, SSMI의 산정방법은 Eq. (7)과 같다.

$$SSMI = Z \left( \frac{SM_i - SM_{min}}{SM_{max} - SM_{min}} \right) \quad (7)$$

여기서, Z는 표준 정규화를 의미하며,  $SM_{max}$ 는 최대 토양수분 값,  $SM_{min}$ 은 최소 토양수분 값,  $SM_i$ 는 i 시점의 토양수분 값을 의미한다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 광학센서 산출물의 비교 분석

##### 3.1.1 토양수분의 시간적 변동 및 지상관측자료와의 비교 검증

광학센서 산출물을 활용한 토양수분 산정 방법을 활용해 토양수분을 산정하고(SM<sub>MODIS</sub>) 검증 지점인 SMC와 CMC에서

관측된 토양수분(SM<sub>fluxtower</sub>)와 비교 분석하였다. Fig. 1은 2014년부터 2015년까지 SM<sub>MODIS</sub>와 SM<sub>fluxtower</sub>를 비교한 결과로 같은 기간에 관측된 강수량 값과 같이 비교하였다. 해당 기간은 남한 전역에서 극심한 가뭄상태이기 때문에 강우 발생이 평년보다 적지만, 강우가 발생했을 때 토양수분의 값도 같이 증가하는 경향을 확인하였다. 두 지역 모두 2014년 9월-10월, 2015년 7월 이후의 구간에서 상대적으로 낮은 값을 보인다.

Bias와 RMSE의 결과를 보면(Table 3), CMC에서 SM<sub>MODIS</sub>의 결과가 SMC보다 상대적으로 좋은 결과를 나타내는 반면, 상관성은 SMC에서 다소 높게 산정되었다. 두 지역의 결과 값 모두 통계적으로 유의성을 보이고 있고, SMC에서 bias가 상대적으로 높게 관측되는 이유는 지형학적인 특징 때문이다. SMC는 산악지형으로 혼효림 지역에 위치하고 있으며, 이러한 지역은 지표 반사도값이 비균질하여 위성영상으로 측정하게 될 경우 bias가 발생한다(Sur *et al.*, 2019).

##### 3.1.2 이산화탄소 플럭스의 시간적 변동 및 지상관측자료와의 비교 검증

GPP와 CO<sub>2</sub>의 관계식에 따라 MODIS GPP로부터 CO<sub>2</sub>(CO<sub>2</sub><sub>MODIS</sub>)를 산정하고, 이를 플럭스타워에서 관측된 CO<sub>2</sub>

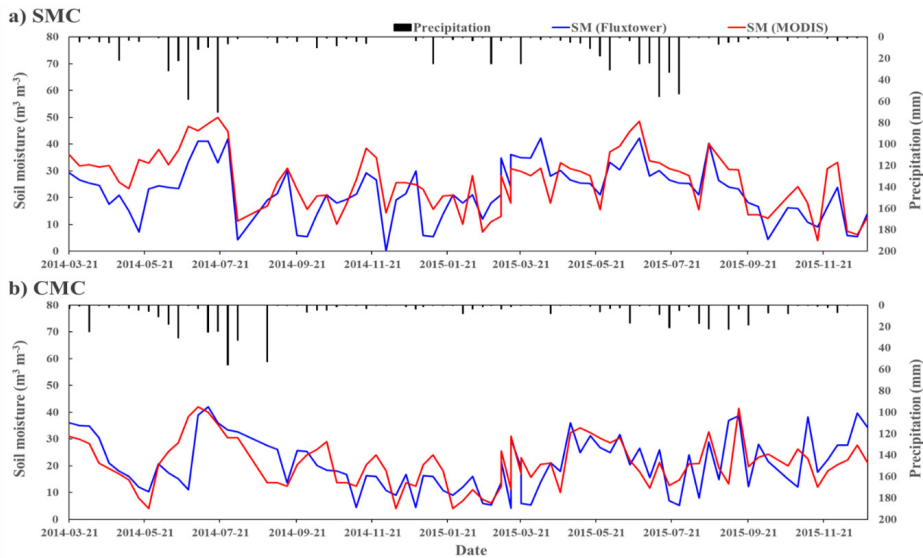


Fig. 1. Temporal variations of average daily SM at two study sites

Table 3. Statistical comparison between estimated and in-situ measurements of soil moisture

Site	bias	RMSE	a	Coefficients of Correlation
SMC	-1.36	3.37	0.81	0.75
CMC	-0.20	1.71	0.58	0.66

\* a: gradients of 1:1 plot.

(CO<sub>2</sub>\_fluxtower)와 비교 분석하였다. CO<sub>2</sub>\_MODIS와 CO<sub>2</sub>\_fluxtower는 8일 단위 산출물로 구성되었다. Fig. 2는 2014년부터 2015년까지 CO<sub>2</sub>\_MODIS와 CO<sub>2</sub>\_fluxtower를 비교한 결과로 같은 기간에 관측된 강우량 값과 같이 비교하였다. 같은 기간의 토양수분 결과와 비교했을 때, 강우 발생 시점에서 지체시간이 발생한 후에 비슷한 양상을 나타낸다. 이는 토양수분이 식생 활동에 영향을 준 뒤 발생하는 광합성과 관련이 있기 때문에, 일정 시간 지체시간이 발생하는 것이다(Sur and Choi, 2013).

Table 4는 두 검증 지역에서의 CO<sub>2</sub>\_MODIS와 CO<sub>2</sub>\_fluxtower의 통계 분석 결과이다. 통계분석 결과, CO<sub>2</sub> flux의 결과는 토양수분의 결과와 다소 다른 점을 보인다. CO<sub>2</sub> flux의 통계분석 결과 모두 통계적 유의성을 보이며, SMC와 CMC 두 지점 모두에서 bias, RMSE, 1:1 그래프의 기울기와 상관계수가 거의 유사하게 산정되었다. SMC의 결과가 좋게 나타난 이유는, 식생 밀집도 때문이다. 두 지점의 식생 밀집도는 잎 면적 지수(Leaf Area Index, LAI)로 판별할 수 있는데, SMC의 경우 LAI는 6-8 사이의 값을 나타내며, CMC의 경우 1-2의 LAI를 나타

낸다. LAI의 차이가 다소 크지만, CMC의 경우 관개시스템이 구축되어 있는 논에 위치하고 있어 가뭄상태에 다소 덜 민감하게 반응 한다(Sur *et al.*, 2019). 이러한 특성으로 인해 SMC와 CMC의 통계 분석 결과의 차이가 다소 줄어들었다.

### 3.2 토양수분-식생지수-이산화탄소 플럭스 간 상관 분석

SSMI와 VCI는 60-80%의 가뭄 정확도를 나타낸다(Table 5). SSMI의 경우 토양수분으로 만든 가뭄지수로 현재 토양의 수분상태에 민감하게 반응하여 일반적인 가뭄상태일 때, 높은 정확도를 보인다. 반면 VCI의 경우, 토양수분의 부족으로 인해 식생 활력이 약해지는 것을 포착하는 지수로, 가뭄이 장기적으로 지속될 때 정확도가 높아진다. 농업적 가뭄이 얼마나 오랫동안 발생하는지에 따라 각각의 지수를 적절하게 활용할 수 있다.

가뭄 발생 기간일 때, 토양수분, 식생지수와 CO<sub>2</sub>는 밀접한 연관성이 있다. 이 인자들의 연관성 사이에는 지체 시간이 있는 것으로 판단되어 지체상관분석을 수행하였다(Table 6). 각 인자들끼리의 균질한 비교를 위하여 표준 정규화된 인자인

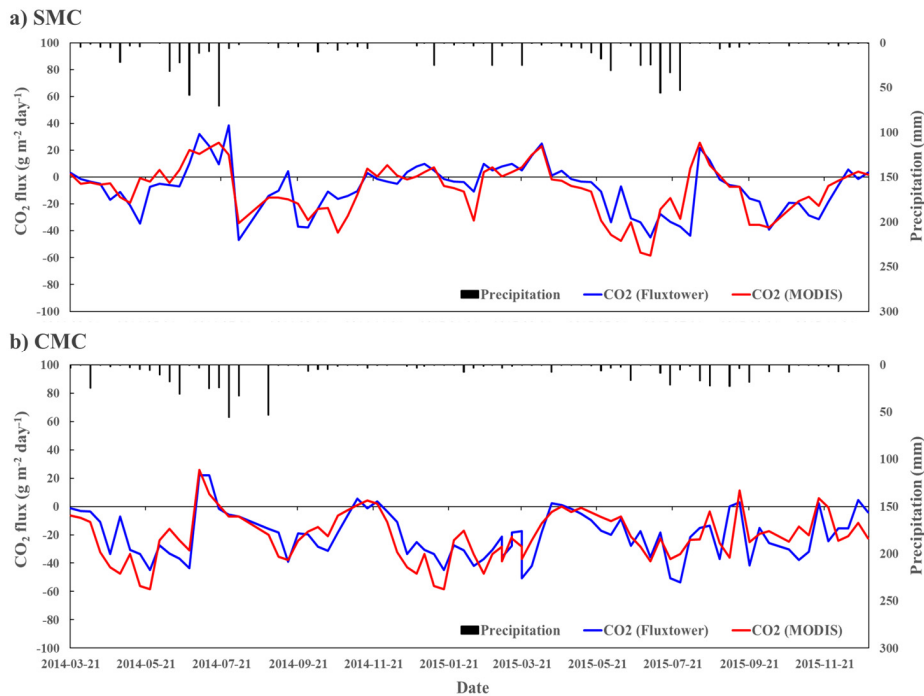


Fig. 2. Temporal variations of average 8-day CO<sub>2</sub> flux at two study sites

Table 4. Statistical comparison between estimated and in-situ measurements of CO<sub>2</sub> flux

Site	bias	RMSE	a	Coefficients of Correlation
SMC	0.93	5.32	0.79	0.76
CMC	-1.37	6.12	0.74	0.72

\* a: gradients of 1:1 plot.

Table 5. Error analysis for the study area

(a) SMC		Soil moisture		Sum	Drought Accuracy
		Drought	No Drought		
<i>Moderate drought ((SM<sub>fluxtower_median</sub>) = 23.14 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</i>					
SSMI	Drought	8	3	11	8 / 11 = 72.73%
	No drought	3	10	13	
	Sum	11	12	24	
VCI	Drought	7	4	11	7 / 11 = 63.64%
	No drought	5	8	13	
	Sum	12	12	24	
<i>Severe drought ((SM<sub>fluxtower_lower quartile</sub>) = 8.34 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</i>					
SSMI	Drought	6	6	12	6 / 12 = 50.00%
	No drought	4	8	12	
	Sum	10	14	24	
VCI	Drought	7	5	12	7 / 12 = 58.33%
	No drought	3	9	12	
	Sum	10	14	24	
(b) CMC		Soil moisture		Sum	Drought Accuracy
		Drought	No Drought		
<i>Moderate drought ((SM<sub>fluxtower_median</sub>) = 25.37 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</i>					
SSMI	Drought	7	2	9	7 / 9 = 77.78%
	No drought	3	12	15	
	Sum	10	14	24	
VCI	Drought	6	3	9	6 / 9 = 66.67%
	No drought	6	9	15	
	Sum	12	12	24	
<i>Severe drought ((SM<sub>fluxtower_lower quartile</sub>) = 9.28 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</i>					
SSMI	Drought	5	3	8	5 / 8 = 62.50%
	No drought	8	8	16	
	Sum	13	11	24	
VCI	Drought	6	4	10	6 / 10 = 60.00%
	No drought	8	6	14	
	Sum	14	10	24	

Table 6. Lag correlation for study area

(a) SMC	Lag time (month)								
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0
SSMI - VCI	-0.12	0.04	0.11	0.21	0.61	<b>0.78*</b>	<b>0.81*</b>	0.52	0.24
SSMI - CO <sub>2</sub>	-0.21	-0.03	0.22	0.45	0.64	0.67	<b>0.86*</b>	<b>0.88*</b>	0.31
VCI - CO <sub>2</sub>	-0.02	0.12	0.34	0.55	<b>0.78*</b>	<b>0.82*</b>	0.62	0.53	0.21
(b) CMC	Lag time (month)								
	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0
SSMI - VCI	-0.43	-0.15	-0.05	0.45	0.65	<b>0.72*</b>	<b>0.77*</b>	0.57	0.06
SSMI - CO <sub>2</sub>	-0.21	-0.03	0.13	0.45	0.63	0.63	<b>0.83*</b>	<b>0.78*</b>	0.42
VCI - CO <sub>2</sub>	-0.14	0.12	0.39	0.65	<b>0.83*</b>	<b>0.82*</b>	0.57	0.42	0.18

SSMI와 VCI를 적용하고 CO<sub>2</sub> flux도 값의 범위를 -1에서 1까지 통일시켰다. 지체상관분석을 통해 SSMI를 기준으로 VCI와 CO<sub>2</sub> 모두 지체 시간이 발생한 후에 가장 높은 상관성을 보였다. VCI의 경우, 지체 시간 0.5-1개월일 때 가장 높은 상관성을, CO<sub>2</sub>는 1-1.5개월 지체시간에서 가장 높은 결과를 보였다. 토양수분의 변동이 가장 먼저 시작된 후, 일정시간이 지나고 식생지수와 CO<sub>2</sub> flux의 변동이 발생하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 토양수분, 식생 활력과 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도의 관계를 다중분광센서인 MODIS 산출물을 이용하여 분석하였다. 토양수분의 경우, 고해상도 자료를 이용한 분석을 위해 광학 센서를 이용한 토양수분 산정 방법을 적용하였다. 산정된 토양수분의 상관 분석 결과, 0.7 이상의 상관성을 보였다. 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 경우, MODIS GPP를 이용하여 호흡량과의 관계식을 이용하여 산정하였다.

두 플렉스타워 지점에서 관측한 값과 비교 분석하여 높은 적용성을 보였다. 산정된 CO<sub>2</sub> 플렉스는 설마천 지점의 결과가 상대적으로 적용성이 높게 분석되었는데, 이는 일면적 지수의 영향으로 설마천이 식생분포 밀집도가 높기 때문이다. 또한 국내에서 발생한 극한 가뭄사상인 2014년과 2015년도에 대하여 토양수분, 식생지수와 CO<sub>2</sub>의 교차분석을 통해 각 인자들 사이의 관계성을 파악하였다. 분석 결과 토양수분과 식생지수 사이에는 1개월의 지체시간, 식생지수와 CO<sub>2</sub> 사이에는 0.5개월의 지체시간이 발생했을 때, 가장 높은 상관성을 보였다. 지표면의 토양수분과 식생지수를 대기 중의 CO<sub>2</sub>의 관계를 분석함으로써 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 변하게 되면 지표면 및 지표하에 저장되어 있는 탄소 농도에도 영향을 받는 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A2C1093245).

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

#### References

- Amthor, J.S., Chen, J.M., Clein, J.S., Frohling, S.E., Goulden, M.L., Grant, R.F., Kimball, J.S., King, A.W., McGuire, A.D., Nikolov, N.T., Potter, C.S., Wang, S., and Wofsy, S.C. (2001). "Boreal forest CO<sub>2</sub> exchange and evapotranspiration predicted by nine ecosystem process models: Intermodal comparisons and relationships to field measurements." *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, Vol. 106, No. D24, pp. 33623-33648.
- Chang, T.Y., Wang, Y.C., Feng, C.C., Ziegler, A.D., Giambelluca, T.W., and Liou, Y.A. (2012). "Estimation of root zone soil moisture using apparent thermal inertia with MODIS imagery over a tropical catchment in Northern Thailand." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 5, pp. 752-761.
- Hu, X., Ren, H., Tansey, K., Zheng, Y., Ghent, D., Liu, X., and Yan, L. (2019). "Agricultural drought monitoring using European Space Agency Sentinel 3A land surface temperature and normalized difference vegetation index imagery." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 279, 107707.
- 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.
- Kim, J.S., Seo, G.S., Jang, H.W., and Lee, J.H. (2017). "Correlation analysis between Korean spring drought and large-scale teleconnection patterns for drought forecast." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, pp. 458-466.
- Kogan, F.N. (1997). "Global drought watch from space." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 78, pp. 621-636.
- Lloyd, J., and Taylor, J.A. (1994). "On the temperature dependence of soil respiration." *Functional Ecology*, Vol. 8, pp. 315-323.
- Muraoka, H., Noda, H.M., Nagai, S., Motohka, T., Saitoh, T.M., Nasahara, K.N., and Saigusa, N. (2013). "Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest." *Journal of Plant Ecology*, Vol. 6, pp. 393-407.
- Njoku, E.G., Jackson, T.J., Lakshmi, V., Chan, T.K., and Nghiem, S.V. (2003). "Soil moisture retrieval from AMSR-E." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, pp. 215-229.
- Peters, A.J., Walter-Shea, E.A., Ji, L., Vliiia, A., Hayes, M., and Svoboda, M.D. (2002). "Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation - index." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 68, pp. 71-75.
- Running, S.W., and Nemani, R.R. (1988). "Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, pp. 347-367.
- Sivakumar, M.V.K., Motha, R.P., Wilhite, D.A., and Qu, J.J. (2011). "Towards a compendium on national drought policy." *In Proceedings of an Expert Meeting on the Preparation of a*

*Compendium on National Drought Policy*, World Meteorological Organization, Washington DC, U.S., pp. 1-135.

- Sur, C., and Choi, M. (2013). "Evaluating ecohydrological impacts of vegetation activities on climatological perspectives using MODIS gross primary productivity and evapotranspiration products at Korean regional flux network site." *Remote Sensing*, Vol. 5, pp. 2534-2553.
- Sur, C., Park, S.Y., Kim, T.W., and Lee, J.H. (2019). "Remote sensing-based agricultural drought monitoring using hydro-meteorological variables." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 5244-5256.
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., van der Sande, C.J., Grootaers, I., and Feyen, J. (2006). "Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 101, pp. 299-314.
- Willhite, D.A., Svoboda, M.D., and Hayes, M.J. (2007). "Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness." *Water Resources Management*, Vol. 21, pp. 763-774.