



## Estimation of soil moisture based on sentinel-1 SAR data: focusing on cropland and grassland area

Cho, Seongkeun<sup>a</sup> · Jeong, Jaehwan<sup>b</sup> · Lee, Seulchan<sup>c</sup> · Choi, Minha<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Graduate Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>b</sup>Ph. D Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>c</sup>Graduate Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 20-083

Received: 27 August 2020; Revised: 21 September 2020; Accepted: 21 September 2020

### Abstract

Recently, SAR (Synthetic Aperture Radar) is being highlighted as a solution to the coarse spatial resolution of remote sensing data in water resources research field. Spatial resolution up to 10 m of SAR backscattering coefficient has facilitated more elaborate analyses of the spatial distribution of soil moisture, compared to existing satellite-based coarse resolution (>10 km) soil moisture data. It is essential, however, to multilaterally analyze how various hydrological and environmental factors affect the backscattering coefficient, to utilize the data. In this study, soil moisture estimated by WCM (Water Cloud Model) and linear regression is compared with in-situ soil moisture data at 5 soil moisture observatories in the Korean peninsula. WCM shows suitable estimates for observing instant changes in soil moisture. However, it needs to be adjusted in terms of errors. Soil moisture estimated from linear regression shows a stable error range, but it cannot capture instant changes. The result also shows that the effect of soil moisture on backscattering coefficients differs greatly by land cover, distribution of vegetation, and water content of vegetation, hence that there're still limitations to apply preexisting models directly. Therefore, it is crucial to analyze variable effects from different environments and establish suitable soil moisture model, to apply SAR to water resources fields in Korea.

**Keywords:** Synthetic aperture radar (SAR), Soil moisture, Sentinel-1 satellite, Backscattering coefficient

## Sentinel-1 SAR 토양수분 산정 연구: 농지와 초지지역을 중심으로

조성근<sup>a</sup> · 정재환<sup>b</sup> · 이슬찬<sup>c</sup> · 최민하<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>성균관대학교 수자원학과 석박통합과정, <sup>b</sup>성균관대학교 수자원학과 박사수료생,

<sup>c</sup>성균관대학교 수자원학과 석박통합과정, <sup>d</sup>성균관대학교 수자원학과 교수

### 요지

최근 인공위성 자료를 기반으로 한 수자원 관측 분야에서는 공간해상도의 한계를 극복하기 위한 방안으로 SAR (Synthetic Aperture Radar) 센서에 대한 관심이 높아지고 있다. 토양수분을 관측하는 기존 위성 자료가 10 km 이상의 공간해상도를 지닌 반면, SAR 센서는 후방산란계수를 10 m 까지 관측할 수 있으므로 공간적인 분포를 보다 세밀하게 분석할 수 있다. 이러한 자료를 활용하기 위해서는 관측된 후방산란계수에 다양한 수문인자 및 환경적 요인이 미치는 영향을 다각적으로 분석하여 토양수분을 산출하는 과정이 필요하다. 본 연구는 토양수분 산정에 주로 적용되고 있는 WCM (Water Cloud Model)과 선형회귀 기법을 국내 5개 지점에 적용함으로써, SAR 영상을 기반으로 토양수분을 산정하고 이를 지점 관측 자료와 비교하여 평가하고자 하였다. WCM의 경우 토양수분의 즉각적인 변화를 관측하기에 용이하나 오차에 대한 보정이 필요한 것으로 판단되며, 선형회귀 방법은 순간적인 토양수분의 변동이 크게 나타나지 않았으나 안정적인 오차 범위를 나타내었다. 또한 토양수분이 후방산란계수에 미치는 영향은 토지 피복, 식생의 분포, 식생 내 수분량의 정도에 따라 모델별로 크게 상이한 결과를 나타냄을 알 수 있으며, 기존의 모델을 동일하게 적용하기에는 한계점이 많음을 알 수 있다. 따라서 복잡한 지형적, 수문학적 특성을 가진 한반도에서 SAR 영상을 수자원 분야에 적용하기 위해서는, 추후 각 지점 별 특성에 따른 영향을 다각적으로 분석하는 과정이 필수적이며 한반도에 적합한 토양수분 모델을 구축하기 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** Synthetic Aperture Radar (SAR), 토양수분, Sentinel-1 위성, 후방산란계수

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7527

E-mail: mhchoi@skku.edu (M. Choi)

## 1. 서론

국민의 안전과 재산을 위협하는 기후변화는 최근 홍수, 산사태 등 다양한 형태로 발생하며, 수문순환에 대한 보다 정확한 이해와 분석을 필요로 하고 있다(Kim *et al.*, 2004b; Kim *et al.*, 2010a; Lee *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2020). 대기 중에 존재하는 물과 지표수를 연결하는 인자인 토양수분은 홍수, 산사태와도 밀접한 관련이 있으며(McColl *et al.*, 2017), 최근 토양수분을 효과적으로 관측하고, 활용하고자 하는 노력이 국내에서도 활발히 이루어지고 있다(Kim *et al.*, 2004a; Choi *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010b; Kim *et al.*, 2016; Kwak *et al.*, 2018; Chun *et al.*, 2020). 한국수자원조사기술원에서는 수문조사연보(<http://www.hrfco.go.kr>)와 국가수자원관리정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)을 통해 유전율식 센서가 설치된 한강 유역의 토양수분 관측소를 운영하여 토양수분 자료를 제공하고 있으며(Kim *et al.*, 2019), 기상청에서는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmnn/main.do>)을 통해 방재목적으로 기상관측소에서 관측되는 지점 토양수분 자료를 제공하고 있다. 농촌진흥청에서는 농업기상정보서비스(<http://weather.rda.go.kr/weather/observation.jsp>)를 통해 전국 215개 지점에서 토양수분을 관측하여 자료를 제공하고 있다. 또한 최근 환경부에서는 2025년 수자원위성 발사를 목적으로, 토양수분 산출에 활용되는 C-band SAR 센서 탑재 위성 개발을 진행 중에 있다.

해외에서는 일찍이 활용성 높은 토양수분 자료를 생산하기 위한 연구들이 진행되어 왔으며, 인공위성을 활용한 토양수분 관측에 대한 연구도 1990년대부터 활발히 진행되어 왔다(Charpentier *et al.*, 1992; Jackson *et al.*, 1993; Njoku *et al.*, 1996). 인공위성을 활용한 토양수분 관측 기법은 주로 Passive/Active Microwave 센서를 활용하는 방식으로, AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System), SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity), FY3C (Feng-Yun 3C) 등이 대표적인 Passive Microwave 센서를 활용하는 위성이다. 주로 Passive Microwave는 높은 시간해상도의 자료를 제공하지만, 15 km 이상의 낮은 공간해상도를 가진다. 반면 Active Microwave 센서는 6일 이상의 낮은 시간해상도를 가지지만 100 m 이하의 고해상도 영상을 제공할 수 있다는 장점이 있으며 날씨에 대한 영향을 크게 받지 않고 토양수분을 관측할 수 있다. 따라서 복잡한 지형적 특성이 나타나는 한반도에서 보다 효율적인 토양수분 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대되며, 충분한 연구를 통해 토양수분 자료의 신뢰성을 확보한다면 방재, 농업 등 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것이다. Active Microwave 센서 중 대표적인 SAR 센서를 활용

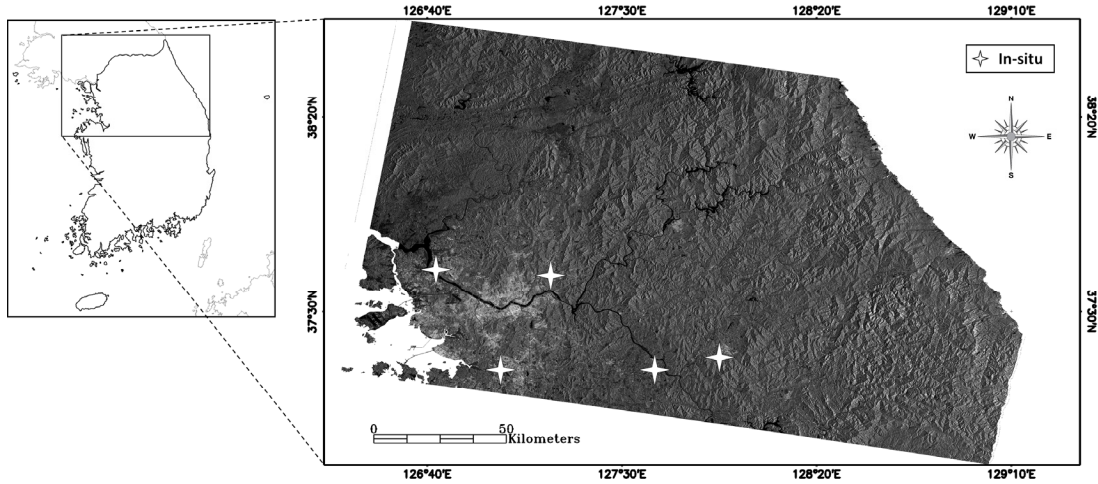
하는 위성으로는 유럽 ESA (European Space Agency) 의 ERS-1&2, Envisat, Sentinel-1, 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 NISAR, 독일 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V)의 TerraSAR-X와 일본 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)의 ALOS-1&2가 대표적이며, SAR 영상은 주로 지표의 고도 변화와 토양수분 관측, 식생의 변화와 하천 및 호수의 수량 변화 관측 및 하천 유량 예측에 사용되고 있다(Ohkura, 1998; Twele *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2018; Ahmad and Kim, 2019; Ban *et al.*, 2020).

SAR 영상의 다양한 관측 대상 중, 토양수분은 후방산란계수와 토양수분 간의 관계성을 분석하여 수행되고 있다. Ulaby (1982)는 나지에서 후방산란계수가 지표면 거칠기와 토양수분에 크게 영향을 받는 것을 확인하였으며, 특히 후방산란계수가 토양수분과 양의 상관관계를 가지는 것을 밝혀냈다. 이에 따라, 나지에서 지표면 거칠기에 의한 영향을 고려하여 토양수분 산정하는 Oh model (Oh, 2004)과 Dubois Model (Dubois *et al.*, 1995)이 제시되었다. 이러한 모델을 기반으로 후방산란계수와 토양수분의 상관성을 이용하는 Change Detection 방법(Bauer-Marschallinger *et al.*, 2018)과 식생과 지표면에서 SAR 신호의 거동을 분석하는 WCM (Water Cloud Model; Liu and Shi, 2016)방법이 농지와 초지에서 토양수분을 산출하는데 이용되었다. 이와 더불어 통계기법 및 기계학습을 활용한 방법 또한 선형회귀 방법, SVM (Support Vector Machine), ANN (Artificial Neural Network), Bayesian Inversion Approach 등을 이용한 토양수분 산출이 시도되었다 (Notarnicola *et al.*, 2008; Srivastava *et al.*, 2009; Ezzahar *et al.*, 2020). Ulaby (1982)의 연구를 통해 토양수분에 대한 SAR의 민감도는 확립되었지만, 식생이 비교적 적고 지표면 거칠기가 심하지 않은 지역을 대상으로 한 연구가 주로 수행되고 있으며(Huang *et al.*, 2019; Zhuo *et al.*, 2019), 여전히 복잡한 지형 조건에서 SAR 데이터로부터 토양수분에 의한 신호를 찾아내는 것은 과제로 남아있다(Pierdicca *et al.*, 2013).

본 연구는 향후 발사될 예정인 수자원 위성의 활용에 대비하여, 기존의 SAR 위성 영상을 활용하여 한반도 지역에서의 토양수분 산정에 대한 연구를 수행하고, 이에 따른 문제점 및 대비책에 대해 분석하고자 하였다. Sentinel-1 SAR 관측 자료를 활용하였으며, 지점 자료로는 기상자료개방포털(기상청) 및 농업기상정보서비스(농촌진흥청)의 5개 지점 관측 토양수분 데이터를 사용하였다. 토양수분의 산정은 WCM과 선형회귀식을 적용하여 각 지점별 결과를 비교하였으며, 한반도에서의 SAR 영상 기반 토양수분 산정의 적용 가능성을 확인하고, 보다 신뢰도 있는 자료를 생산하기 위한 방안을 모색하고자 한다.

**Table 1.** Information of soil moisture measurement sites

Site Number	Site Location	Lat (°N)	Lon (°E)	Land Cover
1	Suwon	37.257	126.983	Cropland
2	Goyang	37.675	126.701	Cropland
3	Namyangju	37.65	127.193	Grassland
4	Yeoju	37.252	127.638	Cropland
5	Wonju	37.296	127.915	Cropland



**Fig. 1.** Location of the study sites with Sentinel-1 VV polarized image

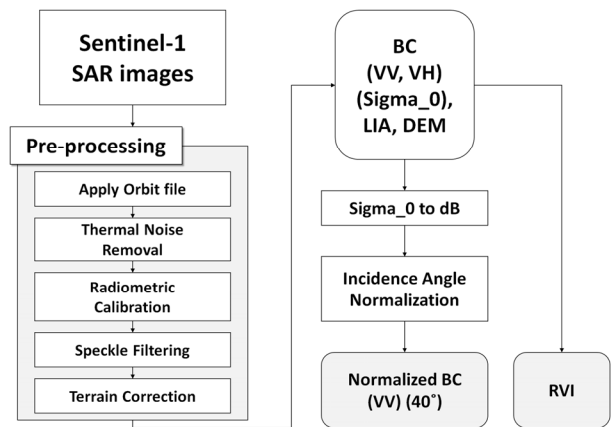
## 2. 연구지역 및 연구 방법

### 2.1 연구지역

SAR 영상을 기반으로 하여 한반도 토양수분 산정 가능성을 평가하기 위해, 후방산란계수에 대한 주변 환경에 의한 영향이 적은 지점을 선정하고자 농지와 초지로 구성된 지점을 활용하였다. 연구지역으로 선정된 5개 지점은 기상청에서 운영하는 지점 토양수분 관측소인 수원 지점과 농촌진흥청에서 운영 중인 고양시 구산동, 남양주 진건읍, 여주시 상거동, 원주시 흥업면이다(Table 1, Fig. 1).

### 2.2 Sentinel-1

Sentinel-1 데이터는 유럽의 ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>)와 미국의 Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>)를 통해 제공되고 있으며, 본 연구에서는 Level-1 (Interferometric Wide Swath, Ground Range Detected) 자료를 활용하였다. 해당 자료로부터 토양수분 산정에 사용되는 VV 편파 후방산란계수와 RVI (Radar Vegetation Index) 산정을 위한 VH 편파 후방산란계수를 구하기 위해 전처리를 Fig. 2와 같이 수행하였다.



**Fig. 2.** Flow Chart of Sentinel-1 pre-processing

본 연구에서는 식생에 의한 영향을 최소화하기 위해 VV 편파 후방산란계수를 사용하였다(Joseph *et al.*, 2008), LIA (Local Incidence Angle)는 영상별로 25°부터 60°까지 다양하게 나타나는데, Incidence Angle 이 60° 이하일 때 후방산란계수와 Incidence Angle은 반비례하므로(Bouman *et al.*, 1990) LIA의 후방산란계수에 대한 영향을 줄이고자 Mladenova *et al.* (2012)에서 제시한 Cosine Method를 사용하여 정규화하였다.

식생은 토양수분에 의한 후방산란계수에 영향을 줄 수 있으므로, Normalized Difference Vegetation Index, Leaf Area Index, Enhanced Vegetation Index 등 다양한 식생지수를 활용하여 토양수분을 산정하는 연구가 수행되어 왔다(Lievens *et al.*, 2011; Baghdadi *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019). 하지만 해당 지수들은 타 위성 자료로부터 산정되기 때문에 Sentinel-1 자료와의 공간해상도 및 overpass time이 일치하지 않는다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 Eq. (1)를 통해 Sentinel-1 자료로부터 식생 내 수분량을 반영하는 지수인 RVI (Radar Vegetation Index) 값을 사용하였다(Chang *et al.*, 2018; Mandal *et al.*, 2020).

$$RVI = \frac{4\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{VV}^0$ 와  $\sigma_{VH}^0$ 는 VV 편파 후방산란계수와 VH 편파 후방산란계수이다.

### 2.3 회귀분석을 활용한 SAR 데이터 기반의 토양수분 산정

SAR 자료로부터 토양수분을 산정하기 위한 방법 중 하나로, 선형회귀 방법을 활용할 수 있다. 선형회귀 방법은 토양수분의 변동과 식생 내 수분량이 SAR 데이터의 후방산란계수 ( $\sigma_{VV}^0$ )에 영향을 미치는 것으로 보고, 각 지점에서의 회귀식을 결정한다. 선형회귀식의 형태로 후방산란계수를 표현하면 Eq. (2)와 같다(Hajsek *et al.*, 2009; Millard and Richardson, 2018).

$$\sigma_{VV}^0[dB] = a_0M_v + a_1RVI + a_2 \quad (2)$$

여기서  $M_v$ 는 지점 토양수분이다. 토양수분의 단위는 지점 FDR 센서에 의해 측정된 용적 토양수분 함량의 단위인  $m^3/m^3$ 이며, 토양 공극의 용적을 수분이 차지하는 용적으로 나눈 무차원의 물리량이다(Leib *et al.*, 2003).

### 2.3 Water Cloud Model (WCM)

WCM은 후방산란계수 모델 중 식생을 고려하기 위한 대표적인 모델로서, 식생으로 덮인 관측 지역에서의 후방산란계수의 거동을 표현한다. Prevot *et al.* (1993)에 의하면, WCM에서는 지표면의 식생을 구름과 같은 수분으로 가정하며, 전체 후방산란계수를 지표면 위의 식생과 SAR 신호가 충돌하여 발

생하는 후방산란계수와 지표면 아래 식생의 간섭에 의해 2중으로 간섭을 받는 토양에서의 후방산란계수로 나눈다(Attema and Ulaby, 1978). 전체 후방산란계수를 Eq. (3)과 같이 표현한다.

$$\sigma_T^0 = \sigma_{veg}^0 + t^2\sigma_{soil}^0 \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_T^0$ 는 전체 후방산란계수를 의미하고,  $\sigma_{veg}^0$ 는 식생에서의 후방산란계수,  $t^2$ 는 식생에 의한 2중 감쇠를 의미한다.  $\sigma_{veg}^0$ 는 Eq. (4),  $t^2$ 는 Eq. (5)로 나타낼 수 있으며,  $\sigma_{soil}^0$ 는 토양에서의 후방산란계수로 Eq. (6)과 같이 표현된다(Bernard *et al.*, 1982).

$$\sigma_{veg}^0 = AV_1\cos\theta(1-t^2) \quad (4)$$

$$t^2 = \exp(-2BV_2\sec\theta) \quad (5)$$

$$\sigma_{soil}^0 = CM_v + D \quad (6)$$

$\theta$ 는 LIA (Local Incidence Angle)이며,  $V_1$ 과  $V_2$ 는 식생의 수분량을 의미한다.  $A, B, C, D$ 는 각각 식생에 의한 영향과 토양 특성에 의한 매개변수이다. 토양 매개변수는 토양에서의 후방산란계수가 주를 이루는 기간에서 모의되고, 식생 매개변수는 식생에 의한 간섭이 존재하는 기간을 포함하여 모의하고, 이후 검증 지점의 후방산란계수와 식생 지수를 대입하여 토양수분을 모의한다(Kumar *et al.*, 2012).

## 3. 연구 결과

### 3.1 식생 수분량에 따른 SAR 후방산란계수와 토양수분 관계성 분석

선형회귀 방법과 WCM의 적용을 위해서는 우선적으로 후방산란계수와 토양수분 간의 선형 관계를 확인하여야 한다. Fig. 3은 지점별 RVI 값의 분포를 나타내며, Fig. 4에서는 토양수분과 후방산란계수의 관계성을 RVI 0.8 미만인 기간과 전체 기간으로 나누어 나타내었다. 전체 연구 기간은 2018년 7월부터 2020년 6월 까지이며, 총 58개의 Sentinel-1B (Ascending) 영상이 지점 데이터 추출을 위해 활용되었다. 추출된 후방산란계수 값이 지나치게 높거나 낮은 경우는 Bauer-Marschallinger *et al.* (2018)에서 제시한 기준( $-22 < \sigma_T^0 < -5$ )에 따라 제거한

후 관계성을 분석하였다.

Fig. 4를 보면, 토양수분과 후방산란계수 간의 상관성이 0.17(4번 지점)에서 0.57(3번지점)까지 분포하는 것을 확인할 수 있다. Bousbih *et al.* (2017), Vreugdenhil *et al.* (2018)에 의하면 토양수분과 후방산란계수 간의 상관계수가 식생이 짙은 농지에서 0.4 이하, 작물 수확 이후 식생이 없는 농지에서 최대 0.8 이상까지 분포한다. 본 연구에서 사용된 지점들은 모두 RVI 값이 0.2에서 0.9까지 다양하게 나타나며(Fig. 3), Fig. 4를 통해 짙은 식생이 후방산란계수와 토양수분 간의 관계성을

교란시키고 있는 것으로 판단 할 수 있다.

또한 Fig. 4에서 알 수 있듯이, RVI가 0.8 미만인 자료에서 토양수분과 후방산란계수는 더 높은 상관성을 나타내고 있다. 즉, RVI가 0.8 이상인 경우 식생이 후방산란계수에 미치는 영향이 증가하고, 이로 인해 토양수분의 변동에 따른 후방산란계수의 신호가 오염될 수 있다는 것을 알 수 있다. 각 지점에서 RVI가 0.8 이상으로 높은 값들이 제거되는 경우, RVI가 0.8보다 큰 자료의 수가 많을수록 토양수분과 후방산란계수가 더 높은 상관성을 나타내었다. 3, 4번 지점의 경우 Fig. 3에 나타난 것과 같이 전반적인 RVI값이 높아 25% 이상의 값이 제외되었으며, 상관계수가 각 0.17 증가하였다. 반면, RVI가 0.8 이상인 자료가 가장 적은 1번 지점은 상관계수가 0.02 증가하였다. 따라서 RVI의 절대적인 값이 높다고 하더라도 식생 영향을 직접적으로 평가하기는 어려우며, 특히 관측 대상 지점에 대한 식생과 표면 거칠기 등의 세부적인 정보가 없는 경우 RVI의 상대적인 값 분포를 확인하는 과정이 요구된다.

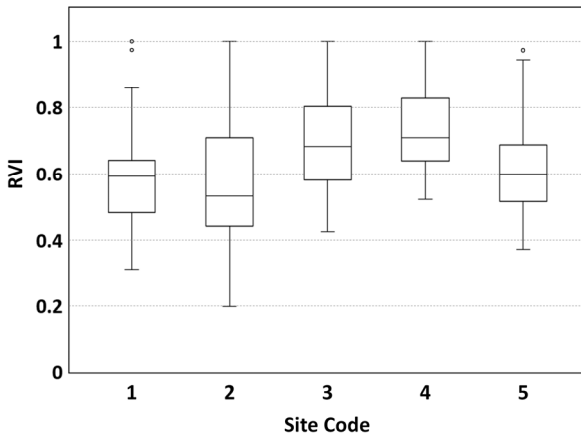


Fig. 3. Distribution of the RVI values on each site

### 3.2 SAR 영상 기반 토양수분 산정

Fig. 5와 Table 2는 선형회귀 및 WCM을 적용하여 토양수분을 산정한 결과를 보여주고 있다. 선형회귀의 경우, 전체 자료와 RVI가 0.8 미만인 자료로 각각 회귀분석을 수행하여 토양수분을 산정하였다. 회귀분석 결과에서 토양수분은 식생 수분량과는 별개로 전체기간에 대해 수행했을 때 더 좋은 결

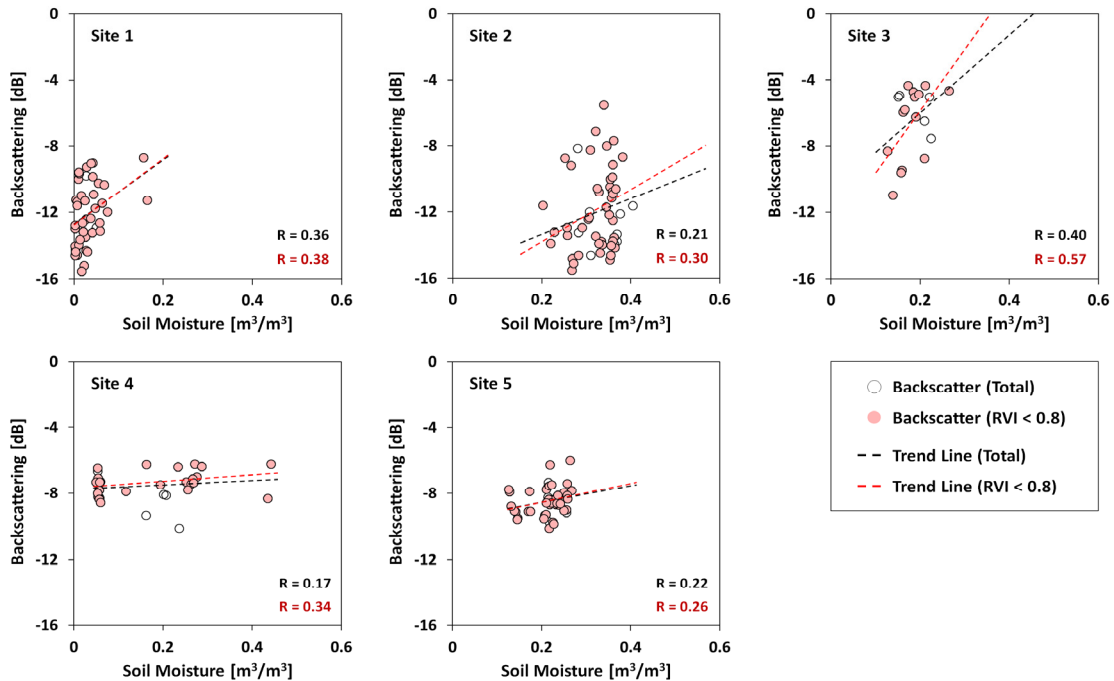


Fig. 4. Relation between soil moisture and backscattering coefficient for total and RVI under 0.8 periods

과를 나타냈으나, 초지인 3번 지점에서는 RVI가 0.8 미만인 경우에 더 좋은 값을 나타냈다. 회귀분석을 이용할 경우 4가지의 가정이 전제되는데, 이것은 선형성, 정규성, 등분산성, 그리고 독립성이다(Poole and O'Farrell, 1971). 4가지 가정을 만

족시키지 못할 경우, 자료의 통계적 특성에 의해 선형회귀식의 신뢰도가 낮아져 산정 결과가 열악할 수 있다(Millard and Richardson, 2018). Fig. 5의 결과를 통해 자료가 많은 전체 기간에서 4가지 통계적 가정이 충족되는 것으로 추정할 수 있

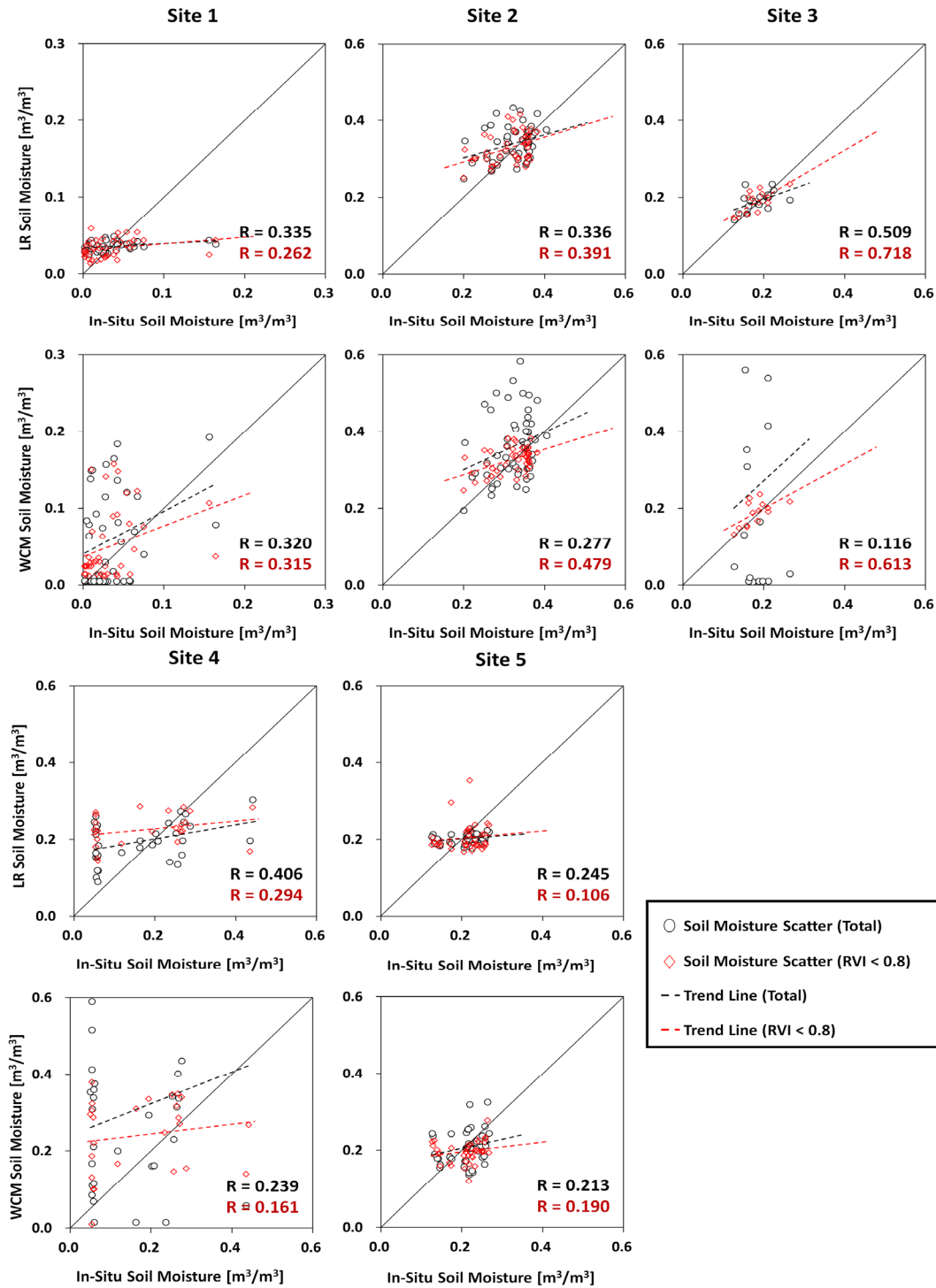


Fig. 5. Scatter plot of estimated soil moisture for total and RVI under 0.8 periods

Table 2. Statistical results for each site and method

Site No.	Method	r	RMSE	Bias	Land Cover
1	Linear Regression	0.262	0.034	-0.001	Cropland
	WCM	0.315	0.050	-0.017	
2	Linear Regression	0.391	0.050	-0.013	Cropland
	WCM	0.479	0.044	-0.009	
3	Linear Regression	0.718	0.025	-0.007	Grass Land
	WCM	0.613	0.030	-0.008	
4	Linear Regression	0.294	0.128	-0.052	Cropland
	WCM	0.161	0.158	-0.068	
5	Linear Regression	0.106	0.051	0.005	Cropland
	WCM	0.190	0.047	0.013	

며, 특히 RVI가 0.8보다 낮은 시기에 자료의 등분산성 가정을 충족시키지 못하는 것이 주요한 문제로 작용한 것으로 판단된다. RVI의 분포가 다른 지점에 비해 넓게 나타나는 2번 지점의 경우, 식생 수분량의 변화에 따라 후방산란계수에 미치는 영향의 범위가 크고, 이로 인해 회귀분석을 통해 토양수분과 후방산란계수 간의 관계를 얻기 어려움을 알 수 있다. 따라서 계절에 따른 식생 변화가 큰 지역에서 회귀분석을 활용하여 산정한 토양수분은 신뢰도가 부족할 것을 예측할 수 있다. SAR 센서로 관측된 원 자료의 후방산란계수가 식생과 토양수분 및 거칠기에 모두 영향을 받는 특성과 전처리 과정에서 발생하는 불확실성 또한 산정 결과의 신뢰성에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

WCM을 통해 산정한 토양수분은 전체기간에 대해 산정되었을 때, 선형회귀방법을 통한 토양수분보다 낮은 상관관계를 보였다. 하지만, RVI가 0.8 미만인 기간에서는 1, 2, 5번 지점에서 선형회귀방법보다 좋은 상관관계를 보이고 있으며, 회귀분석에서의 한계가 나타났던 2번 지점에서 훨씬 좋은 상관관계를 나타냈다. WCM은 식생에 대한 영향과 토양수분에 의한 영향을 구분하기 위한 모델이므로, 계절이나 기후적 변화가 큰 지점에서는 WCM을 활용하는 것이 유리하다고 할 수 있다. 특히 지점 3에서 WCM을 이용한 결과의 경우 RVI 값이 지나치게 높은 시기를 제외하였을 때, R값이 크게 개선된 결과를 확인할 수 있다. 이것은 WCM이 초지와 같은 지점에서 RVI가 0.8을 초과하는 높은 값을 가진 자료가 WCM의 식생 매개변수를 최적화 할 때, 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 하지만, RVI의 변동이 크지 않은 농지의 경우는 1, 4, 5번 지점과 같이 WCM보다는 선형회귀방법을 사용하는 것이 더 좋은 결과를 나타낼 수 있다.

위의 검증에서 사용된 4개의 농지 및 1개의 초지에서는, SAR 기반으로 최적의 토양수분 자료를 생산하는 방안을 선정

하기 위한 일괄적인 결론을 얻을 수 없었다. 이는 식생과 지표면 거칠기 등 매우 복잡한 주변인자가 복합적으로 작용한 결과이며, SAR 기반의 광범위한 토양수분 자료를 생산하기 위해서는 토지 피복, 식생의 종류, 계절적 변동 등 다양한 인자들에 대한 심층적 분석이 선행되어야 함을 시사한다.

### 3.3 SAR 기반 토양수분의 시계열 변동성 분석

SAR 영상은 시간해상도가 뛰어난 데이터가 아니므로 산포도만으로 자료의 적합성을 판단하기에는 무리가 있으므로, 지점 토양수분 자료와의 시계열 분석을 통해 토양수분의 변동성을 적절히 모의할 수 있는지 평가한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. Sentinel-1B (Ascending) 영상의 관측 주기가 12일 인 것을 고려하였을 때 Fig. 6에 나타난 산정 토양수분 값이 일부 누락된 것을 확인할 수 있는데, 이는 1) 지점 토양수분이 관측되지 않은 기간이기 때문이거나(e.g. 1번 지점, 2019.07~10), 2) 관측된 후방산란계수 중 오염된 값을 제거하였기 때문이다(e.g. 2018.12~2019.01, 2019.12~2020.01). 각 지점 토양수분 자료는 강우에 따른 반응이 적절하게 나타나 있으나, 1번 지점의 경우 토양수분이 지나치게 낮은 값을 기록하고 있으며, 4번 지점의 경우  $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$  부근에서 수평인 그래프를 나타내고 있어 지점 자료의 품질관리 과정이나 센서 점검이 필요하다고 판단된다.

두 가지 방법으로 산정된 SAR 기반 토양수분 결과는 지점 자료와 크게 벗어나지 않는 경향을 보이며 토양수분을 모의하는 것으로 나타난다. WCM의 경우, 식생 수분량에 대한 영향과 토양에 대한 영향을 따로 고려하므로 토양수분의 변동성을 보다 잘 모의하는 것으로 나타났다. 반면 선형회귀 방식은 WCM에 비해 안정적인 패턴을 보이고 있으나, 전체적인 값의 회귀 분석을 통해 산정되므로, 강우 등에 의한 순간적인 토양수분 증가를 모의하기에는 어려움이 있다. 보다 신뢰성 높은 회귀

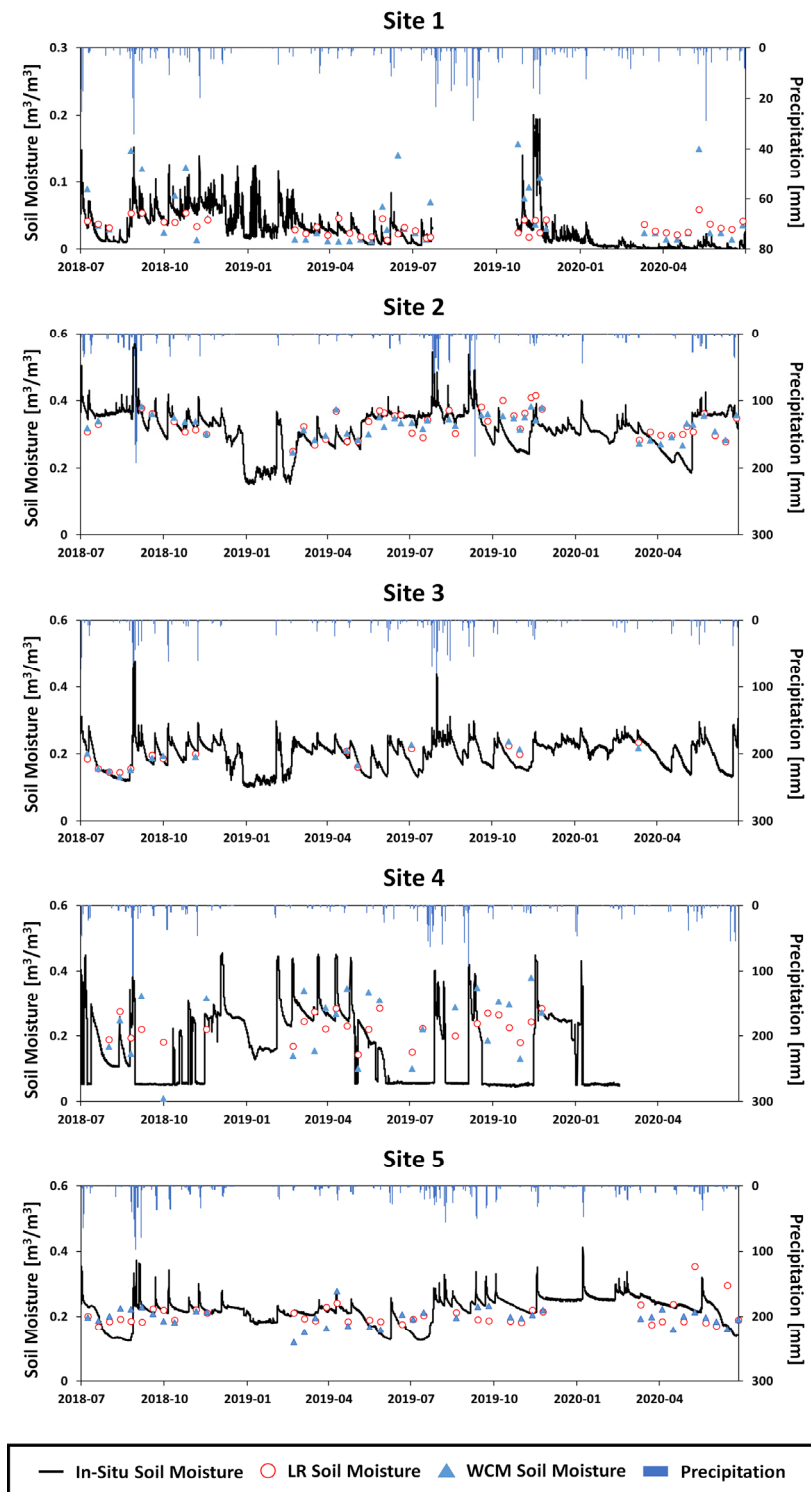


Fig. 6. Time series graph of estimated soil moisture using linear regression method

식을 구하기 위해 향후 Weighted Least Square Method와 Generalized Least Square Method와 같은 방법을 활용하여 (Olsson *et al.*, 2000) 토양수분 산정 및 분석이 수행해야 할 것

으로 사료된다. 그리고 4번 지점의 경우, 비정상적인 지점 토양수분 값이 발생함에 따라, SAR 기반 토양수분 자료가 강우에 대한 반응을 적절히 나타내지 못하고 있음을 확인할 수 있



다. 따라서 신뢰성 있는 SAR 기반의 토양수분 자료를 생산하기 위해서는 지점 토양수분 자료의 관리가 필수적이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 Sentinel-1 SAR 다중 편파 영상을 활용하여 WCM 및 선형회귀 방법을 통해 농지 및 초지를 포함한 5개 지점에서 고해상도의 토양수분을 산정하고 활용성을 평가하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) SAR 영상에서 얻을 수 있는 후방산란계수는 토양수분과 밀접한 상관성을 보이고 있으나, 계절에 따른 식생의 변화가 많은 한반도 지역에서는 식생 수분량에 대한 고려가 충분히 이루어져야 한다.
- 2) 각 지점에서의 적절한 토양수분 산정 방안을 적용하기 위해서는, 지점의 토지 피복 특성과 식생 분포 등 다양한 환경적 조건에 대한 다각적 분석이 반드시 선행되어야 하며, 이에 따라 토양수분 자료의 신뢰도가 크게 달라질 수 있다.
- 3) WCM은 식생과 토양에 의한 영향을 독립적으로 고려할 수 있으므로, 순간적인 토양수분의 변동을 적절히 모의할 수 있는 특징이 있다. 반면 선형회귀를 활용한 토양수분은 보다 안정적으로 오차가 적은 토양수분을 산정할 수 있다.
- 4) 지점 토양수분 자료의 품질관리에 따라 SAR 기반 토양수분 산정 결과가 크게 달라질 수 있으므로, 범용적인 SAR 토양수분 산정 모델을 구축하기 위해서는 지점 토양수분 네트워크의 구축이 필수적이다.

그간 해외에서 수행된 SAR 기반의 토양수분 연구는 주로 나지 혹은 농지에서 이루어졌으며, 계절에 따른 식생의 변화가 적은 지역에서 수행되어왔다. 하지만, 한반도에서의 SAR 기반 토양수분 산정을 위해서는 복잡한 지형과 식생의 종류 및 계절적 변화를 모두 고려할 수 있는 지점 분석이 반드시 선행되어야 한다. 또한 지역 특성에 알맞은 전처리 과정을 통해 Speckle Noise와 위성의 Path way에 따른 Radar 그림자의 영향을 충분히 검토하여야 한다. 특히 후방산란계수에 큰 영향을 미치는 식생 수분량 및 표면 거칠기에 대한 분석은 원자료인 후방산란계수의 특성을 파악하여 정확한 토양수분량을 산정하기 위해 필수적이다. 또한, 다양한 조건에서의 분석을 통해 식생의 종(種), 토양 특성 등 충분한 보조 자료를 산정할 수 있도록, 보다 많은 검증 지점을 활용한 분석이 요구된다. 향후 충분한 검증지점을 활용하여 각 지점에 적절한 모델을 통해

SAR 기반 토양수분 자료를 활용할 수 있게 된다면 SAR 영상의 높은 공간해상도는, 기존 토양수분 자료와의 융합 및 단일 자료로써 활용성이 높을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2B5B01070196).

본 저작물은 기상청에서 '2018년부터 2020년까지 작성하여 공공누리 제 1유형으로 개방한 지상관측 토양수분 데이터를 이용하였으며, 해당 저작물은 기상청, 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)에서 무료로 다운받을 수 있습니다.

This work was supported by the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01351201)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

- Ahmad, W., and Kim, D. (2019). “Estimation of flow in various sizes of streams using the sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) data in Han River Basin, Korea.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 83, 101930.
- Attema, E.P.W., and Ulaby, F.T. (1978). “Vegetation modeled as a water cloud.” *Radio science*, Vol. 13, No. 2, pp. 357-364.
- Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M., and Bousbih, S. (2017). “Calibration of the water cloud model at C-band for winter crop fields and grasslands.” *Remote Sensing*, Vol. 9, No. 9, p. 969.
- Ban, Y., Zhang, P., Nascetti, A., Bevington, A.R., and Wulder, M.A. (2020). “Near real-time wildfire progression monitoring with sentinel-1 SAR time series and deep learning.” *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-15.
- Bauer-Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schaufler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Brocca, L., and Wagner, W. (2018). “Toward global soil moisture monitoring with sentinel-1: Harnessing assets and overcoming obstacles.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 1, pp. 520-539.
- Bouman, B.A., and van Kasteren, H.W. (1990). “Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. I. Sugar beet and potato; backscattering and crop growth.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 34, No. 2, pp. 93-105.

- Bousbih, S., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Baghdadi, N., El Hajj, M., Gao, Q., and Mougenot, B. (2017). "Potential of Sentinel-1 radar data for the assessment of soil and cereal cover parameters." *Sensors*, Vol. 17, No. 11, p. 2617.
- Chang, J.G., Shoshany, M., and Oh, Y. (2018). "Polarimetric radar vegetation index for biomass estimation in desert fringe ecosystems." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 56, No. 12, pp. 7102-7108.
- Charpentier, M.A., and Groffman, P. M. (1992). "Soil moisture variability within remote sensing pixels." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 97, No. D17, pp. 18987-18995.
- Choi, D. Ahn, J.H., Jo, D., and Kim, S. (2010). "Estimating climate change impact on drought occurrence based on the soil moisture." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 8, pp. 709-720.
- Chun, J.A., Kim, S.T., Lee, W.S., and Kim, D. (2020). "Assessment of Noah land surface model-based soil moisture using GRACE-observed TWSA and TWSC." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 4, pp. 285-291.
- Dubois, P.C., Van Zyl, J., and Engman, T. (1995). "Measuring soil moisture with imaging radars." *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 33, No. 4, pp.915-926.
- Ezzahar, J., Ouadi, N., Zribi, M., Elfarkh, J., Aouade, G., Khabba, S., Er-Raki, S., Chehbouni, A., and Jarlan, L. (2020). "Evaluation of backscattering models and support vector machine for the retrieval of bare soil moisture from Sentinel-1 data." *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 1, p. 72.
- Hajnsek, I., Jagdhuber, T., Schon, H., and Papathanassiou, K.P. (2009). "Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of PolSAR." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 2, pp. 442-454.
- Huang, J., Hartemink, A.E., Arriaga, F., and Chaney, N.W. (2019). "Unraveling location-specific and time-dependent interactions between soil water content and environmental factors in cropped sandy soils using Sentinel-1 and moisture probes." *Journal of Hydrology*, Vol. 575, pp. 780-793.
- Jackson, T.J. (1993). "III. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing." *Hydrological processes*, Vol. 7, No. 2, pp. 139-152.
- Joseph, A.T., van der Velde, R., O'Neill, P.E., Lang, R.H., and Gish, T. (2008). "Soil moisture retrieval during a corn growth cycle using L-band (1.6 GHz) radar observations." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 8, pp. 2365-2374.
- Kim, B., Kim, S., Kim, H., and Jun, H. (2010a). "An impact assessment of climate and landuse change on water resources in the Han River." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-323.
- Kim, G., and Park, H. (2010b). "Soil moisture estimation using CART algorithm and ancillary data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 7, pp. 597-608.
- Kim, G.S., and Lee, E.R. (2004a). "Development a downscaling method of remotely-sensed soil moisture data using neural networks and ancillary data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 1, pp. 21-29.
- Kim, K., Lee, Y., Jung, S., and Lee, Y. (2019). "An analysis of runoff characteristic by using soil moisture in Sulma basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 9, pp. 615-626.
- Kim, S., Kim, H., and Choi, M. (2016). "Evaluation of satellite-based soil moisture retrieval over the Korean Peninsula: Using AMSR2 LPRM algorithm and ground measurement data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 5, pp. 423-429
- Kim, U.T., Lee, D.R., and Yoo, C.S. (2004b). "Effects of climate change on the streamflow for the Daechung dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 305-314.
- Kumar, K., Hari Prasad, K.S., and Arora, M.K. (2012). "Estimation of water cloud model vegetation parameters using a genetic algorithm." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, No. 4, pp. 776-789.
- Lee, D., Lee, G., Song, B., and Lee, S. (2019). "Analysis of climate change impact on flow duration characteristics in the Mekong River." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 1, pp. 71-82.
- Lee, J., Kim, Y., and Chae, Y. (2020). "Projecting future hydrological and ecological droughts with the climate and land use scenarios over the Korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 6, pp. 427-436.
- Leib, B.G., Jabro, J.D., and Matthews, G.R. (2003). "Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors." *Soil Science*, Vol. 168, No. 6, pp. 396-408.
- Liu, C., and Shi, J. (2016). "Estimation of vegetation parameters of water cloud model for global soil moisture retrieval using time-series L-band Aquarius observations." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 9, No. 12, pp. 5621-5633.
- Mandal, D., Kumar, V., Ratha, D., Dey, S., Bhattacharya, A., Lopez-Sanchez, J.M., McNairn, H., and Rao, Y.S. (2020). "Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 247, 111954.
- McColl, K.A., Alemohammad, S.H., Akbar, R., Konings, A.G., Yueh, S., and Entekhabi, D. (2017). "The global distribution and dynamics of surface soil moisture." *Nature Geoscience*, Vol. 10, No. 2, pp. 100-104.
- Millard, K., and Richardson, M. (2018). "Quantifying the relative contributions of vegetation and soil moisture conditions to polarimetric C-Band SAR response in a temperate peatland." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 206, pp. 123-138.
- Mladenova, I.E., Jackson, T.J., Bindlish, R., and Hensley, S. (2012). "Incidence angle normalization of radar backscatter data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 3, pp. 1791-1804.
- Njoku, E.G., and Entekhabi, D. (1996). "Passive microwave remote

- sensing of soil moisture.” *Journal of hydrology*, Vol. 184, No. 1-2, pp. 101-129.
- Notarnicola, C., Angiulli, M., and Posa, F. (2008). “Soil moisture retrieval from remotely sensed data: Neural network approach versus Bayesian method.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 2, pp. 547-557.
- Oh, Y. (2004). “Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 3, pp. 596-601.
- Ohkura, H. (1998). “Application of SAR data to monitoring earth surface changes and displacement.” *Advances in Space Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 485-492.
- Olsson, U.H., Foss, T., Troye, S.V., and Howell, R.D. (2000). “The performance of ML, GLS, and WLS estimation in structural equation modeling under conditions of misspecification and nonnormality.” *Structural equation modeling*, Vol. 7, No. 4, pp. 557-595.
- Pierdicca, N., Pulvirenti, L., and Pace, G. (2013). “A prototype software package to retrieve soil moisture from Sentinel-1 data by using a bayesian multitemporal algorithm.” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 7, No. 1, pp. 153-166.
- Poole, M.A. (1971). “The assumptions of the linear regression model.” *Transactions of the Institute of British Geographers*, Vol. 52, pp. 145-158.
- Prevot, L., Champion, I., and Guyot, G. (1993). “Estimating surface soil moisture and leaf area index of a wheat canopy using a dual-frequency (C and X bands) scatterometer.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 46, No. 3, pp. 331-339.
- Seo, M., Kim, D., Ahmad, W., and Cha, J.H. (2018). “Estimation of stream flow discharge using the satellite synthetic aperture radar images at the mid to small size streams.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 12, pp. 1181-1194.
- Srivastava, H.S., Patel, P., Sharma, Y., and Navalgund, R.R. (2009). “Large-area soil moisture estimation using multi-incidence-angle RADARSAT-1 SAR data.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 8, pp. 2528-2535.
- Twele, A., Cao, W., Plank, S., and Martinis, S. (2016). “Sentinel-1-based flood mapping: A fully automated processing chain.” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 37, No. 13, pp. 2990-3004.
- Ulaby, F.T. (1982). *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2 - Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*. Artech House, Norwood, M.A., U.S., pp. 848-902.
- Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C., and Strauss, P. (2018). “Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study.” *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 9, p. 1396.
- Zhuo, W., Huang, J., Li, L., Zhang, X., Ma, H., Gao, X., Huang, H., Xu, B., and Xiao, X. (2019). “Assimilating soil moisture retrieved from Sentinel-1 and Sentinel-2 data into WOFOST model to improve winter wheat yield estimation.” *Remote Sensing*, Vol. 11, No.13, p. 1618.