



Estimation of soil moisture based on Sentinel-1 SAR data: Assessment of soil moisture estimation in different vegetation condition

Cho, Seongkeun^a · Jeong, Jaehwan^b · Lee, Seulchan^c · Choi, Minha^{d*}

^aGraduate Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^bPh.D Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^cGraduate Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^dProfessor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 20-102

Received: 30 October 2020; Revised: 23 December 2020; Accepted: 23 December 2020

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) is attracting attentions with its possibility of producing high resolution data that can be used for soil moisture estimation. High resolution soil moisture data enables more specific observation of soil moisture than existing soil moisture products from other satellites. It can also be used for studies of wildfire, landslide, and flood. The SAR based soil moisture estimation should be conducted considering vegetation, which affects backscattering signals from the SAR sensor. In this study, a SAR based soil moisture estimation at regions covered with various vegetation types on the middle area of Korea (Cropland, Grassland, Forest) is conducted. The representative backscattering model, Water Cloud Model (WCM) is used for soil moisture estimation over vegetated areas. Radar Vegetation Index (RVI) and in-situ soil moisture data are used as input factors for the model. Total 6 study areas are selected for 3 vegetation types according to land cover classification with 2 sites per each vegetation type. Soil moisture evaluation result shows that the accuracy of each site stands out in the order of grassland, forest, and cropland. Forested area shows correlation coefficient value higher than 0.5 even with the most dense vegetation, while cropland shows correlation coefficient value lower than 0.3. The proper vegetation and soil moisture conditions for SAR based soil moisture estimation are suggested through the results of the study. Future study, which utilizes additional ancillary vegetation data (vegetation height, vegetation type) is thought to be necessary.

Keywords: Soil moisture, Synthetic aperture radar, Vegetation, Water cloud model, Backscattering coefficient

Sentinel-1 SAR 토양수분 산정 연구: 식생에 따른 토양수분 모의평가

조성근^a · 정재환^b · 이슬찬^c · 최민하^{d*}

^a성균관대학교 수자원학과 석박통합과정, ^b성균관대학교 수자원학과 박사수료생, ^c성균관대학교 수자원학과 석박통합과정,

^d성균관대학교 수자원학과 교수

요 지

Synthetic Aperture Radar (SAR)를 활용하여 토양수분을 산출 할 시 기존의 위성기반 자료에 비해 고해상도의 공간 자료를 생산할 수 있다. 고해상도의 광역 토양수분 자료는 기존의 위성 기반 토양수분 대비 보다 세밀한 지표면 토양수분 변동 관측이 가능하게 하므로, 산사태, 산불 및 홍수와 같은 자연재해 연구에 활용성이 뛰어나다. 하지만 SAR 신호인 후방산란계수는 토양수분 뿐만 아니라, 식생에 의한 영향도 포함하기 때문에 정확한 토양수분을 산정하기 위해서는 이러한 영향을 고려하는 단계가 요구된다. 본 연구에서는 한반도 중부의 농지, 산지, 및 초지의 식생조건 하에서 Sentinel-1 위성 SAR 자료를 활용하여 토양수분을 산정하기 위한 연구를 수행하였다. 식생의 영향을 고려하기 위해 대표적인 지표면 레이더 신호 산란 모형인 Water Cloud Model (WCM)을 사용하였으며, 식생 인자로 Radar Vegetation Index (RVI)를 활용하였다. 연구 지역으로는 토지피복도에 따라 농지와 초지, 산지 각각 2개 지역, 총 6개 대상 지역을 선정하였다. WCM의 매개변수 모의를 위해 지상 관측 토양수분 자료를 활용하였다. 관측 토양수분과의 검증 결과 초지, 산지, 농지 순으로 높은 정확도가 나타났으며, 특히 산지에서는 짙은 식생에도 불구하고 상관계수 값이 0.5 이상으로 나타난 반면 농지에서는 0.3 미만의 매우 낮은 값이 관측되었다. 연구 결과를 통해 다양한 식생 피복에서 SAR 기반 토양수분 산정에 적합한 관측 토양수분 조건을 제시 하였다. 향후 식생 높이, 식생 종류 등 과 융합한 연구가 수행된다면 보다 정확한 토양수분을 산정 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 토양수분, 합성개구레이더, 식생, Water Cloud 모형, 후방산란계수

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

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

1. 서론

토양수분은 수문 인자 중 시공간 변동성이 큰 인자로서, 적은 양에도 불구하고 수문 순환에 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며 이에 관한 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다(Choi *et al.*, 2007; Choi and Jacobs, 2011; Lee *et al.*, 2015; Western *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 1998). 이러한 토양수분은 그 시공간적인 분포를 관측할 수 있을 때, 범람, 기후변화, 관개와 같은 수자원 관리 분야에서 관측 자료로 활용이 가능하다(Heathman *et al.*, 2003; Im *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2010; Choi and Hur, 2012; Ahmad and Kim, 2019; Kim and Lee, 2020). 최근 먼 단위 토양수분 관측이 가능한 원격탐사 분야에서는 날씨에 의한 영향이 적은 Active Microwave 센서가 주목받고 있다(De Zan *et al.*, 2013; Gherboudj *et al.*, 2011; Le Hégarat-Masclé *et al.*, 2002). Active Microwave 센서 중 Synthetic Aperture Radar (SAR)는 지표면에서 산란되고 센서로 돌아오는 후방산란계수 값을 제공하며, 센서의 신호가 부딪히는 대상에 따라서 값이 상이하게 나타난다(Crevier *et al.*, 1996). 이러한 센서의 특징을 활용하여 토양수분을 관측하기 위한 연구가 꾸준히 수행되어 왔고, 항공기 및 위성을 플랫폼으로 한 C-band, L-band, X-band, 그리고 P-band Active Microwave 센서 기반의 토양수분 산출 연구가 수행되고 있다(Beaudoin *et al.*, 1990; Chapin *et al.*, 2012; El Hajj *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 1997).

C-band는 파장이 L-band 다음으로 긴 Microwave로, 식생과 같은 지표면 특성 및 Radio Frequency Interference (RFI)에 의한 영향을 적게 받으면서 2-5 cm의 투과성을 가져 지형이 복잡한 연구지역에서 사용하기에 적합하다(Koyama *et al.*, 2010). C-band Microwave 센서를 탑재한 대표적인 위성으로는 Advanced SCATterometer (ASCAT)와 Sentinel-1이 있으며 이 중 Sentinel-1은 매우 높은 해상도(10 m ~ 1 km)의 자료를 제공한다. 공간해상도가 높다는 장점 때문에 해외에서는 Sentinel-1 위성 자료를 활용한 토양수분 산정 연구가 활발히 이루어지고 있다(Balenzano *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2017; Paloscia *et al.*, 2013). Sentinel-1은 ESA에서 2015년 발사한 대표적인 SAR 센서를 탑재한 위성들 중 하나로 Sentinel-1A와 B, 총 2개의 보조위성을 이용하여 12-6일 간격의 자료를 제공하고 있다(Torres *et al.*, 2012).

Sentinel-1 위성 자료를 활용한 토양수분 산출 연구들은 기본적으로 토양수분과 후방산란계수 간의 양의 상관관계를 이용한다. 하지만 후방산란계수는 토양수분에 의해서만 영향을 받는 것이 아니라 지표면의 거칠기 및 식생과 같은 환경적인 요인에 의해서도 크게 영향을 받는다(Beaudoin *et al.*, 1990). 특

히 지표면 거칠기와 식생은 토양수분에 의한 신호를 방해하는 가장 주요한 요소이다. 대표적인 SAR 자료 기반의 토양수분 산출 방법은 Change Detection 방법과 Water Cloud Model (WCM)을 활용한 방법, 그리고 기계학습 및 인공지능을 활용한 방법이 있다. 그 중 Change Detection 방법은 시간에 따른 후방산란계수의 변동이 토양수분의 변동을 나타낸다는 가정하에 토양수분을 산출하는 방법으로, 높은 시간해상도 및 장기간의 SAR 자료를 필요로 한다(Bartalis *et al.*, 2007). WCM을 이용한 토양수분 산출은 식생을 고려한 산출 방법으로, 식생에 의한 단일 간섭을 제거하여 토양에 의한 후방산란계수를 계산한다(Lievens and Verhoest, 2011). 또한 기계학습 및 인공지능 기법의 경우, 지표면 식생과 거칠기 등의 다양한 보조자료를 후방산란계수와 함께 모형에 입력하여 토양수분을 산출하는 방법이다(Paloscia *et al.*, 2013). Change Detection 방법의 경우 높은 시간해상도의 자료를 필요로 하며, 기계학습 및 인공지능 기법의 경우 후방산란계수의 물리적인 거동을 고려하지 못한다는 한계를 지니고 있어, 이 중 WCM을 이용한 토양수분 산출 방법이 식생이 분포되어 있는 지형에서 가장 보편적으로 사용되고 있다. 대표적으로 ASCAT 토양수분 자료는 토양 위에 존재하는 식생을 균질한 수분 덩어리로 가정하여 WCM을 적용한 토양수분을 산정하고 있다(Bartalis *et al.*, 2007). 하지만 SAR 센서의 경우도 이와 마찬가지로 WCM을 통해 토양수분을 산정할 수 있으나, 공간해상도가 높은 만큼 원 자료의 후방산란계수가 지형 및 식생조건에 더 민감하므로 관측 지점 정보에 대한 더 높은 이해를 바탕으로 매개변수를 산정하는 것이 필수적이다(Jagdhuber *et al.*, 2014).

후방산란계수를 이용한 토양수분 산출 방법은 다양한 조건의 연구지역에서 수행되어 왔으나, 식생이 존재하는 시기가 명확한 농업 지역이나, 동일한 종류의 식생이 분포되어 있는 지역, 그리고 식생이 전혀 없는 지역으로 제한되어 왔다(Dabboor *et al.*, 2019; Pierdicca *et al.*, 2008; Sahebi *et al.*, 2003). 이러한 선행 연구 결과는 식생이 질게 분포되어 있고 지형이 복잡한 한반도 지역에 직접적으로 적용하기에는 다소 부적절하다. 한반도와 같이 SAR 센서의 후방산란계수의 지역특성에 따른 영향에 대한 연구가 이루어지지 않은 지역에서는 다양한 식생 조건을 포함한 여러 지역에서의 매개변수 산정연구가 선행 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 한반도 중부 지역의 다양한 식생조건(농지, 산지, 초지)을 가지는 6개 연구지점을 선정하여 토양수분 산출 연구를 수행하였다. 복잡한 지형 조건을 고려하기 위해 식생 정보인 RVI (Radar Vegetation Index)가 사용되었다. 해당 인자를 WCM 방법에 대입하여 지점 토양수분 자료를 기준으로 매개변수를 모의하였다. 매개변수 모의를 위해서는 총 2년의 자료 중 1년간의 자

료가 사용되었고, 각 산출 결과를 나머지 1년간의 지점 토양수분 자료와 비교하여 검증하였다. 검증을 위해 Spearman, Kendall, Pearson 상관계수(r , τ , ρ)와 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), 편차(Bias)와 같은 통계 값을 사용하였으며, 토양의 습윤 정도에 따라 지점 별로 산출 토양수분 결과를 분석하였다. 또한 다양한 식생 조건 하에서 물리적인 후방산란계수의 거동을 고려한 WCM이 어떤 토양수분 조건에 보다 적합한지 살펴보고자 각 산출 결과를 비교하였다.

2. 연구지역 및 연구 방법

2.1 연구지역

SAR 자료를 기반으로 한반도에서 식생 조건에 따른 토양수분 산정 결과를 평가하기 위해 산지, 농지, 초지로 구성된 지점들을 활용하였다. 각 토지 피복은 환경부에서 제공 중인 토지 피복자료를 바탕으로 확인하였고, 각 식생 조건 별로 2개 지점씩, 총 6개 지점을 선정하였으며, 지점의 분포는 Fig. 1과 같다.

각 지점의 식생 조건, 평균 고도, 위치와 같은 정보들을 Table 1을 통하여 확인할 수 있다. 각 지점의 관측 토양수분 자료는 농촌진흥청 및 기상청에서 제공 중인 토양수분 자료가 활용되었으며, 토양수분의 단위는 용적토양수분이므로 무차원의 단위인 m^3/m^3 으로 표현한다.

2.2 Sentinel-1

Sentinel-1 SAR 관측 자료는 European Space Agency (ESA;

<https://scihub.copernicus.eu/>)에서 제공 중에 있으며, 본 연구에서는 Level-1 자료가 활용되었다. Sentinel-1 자료는 기본적으로 6일-12일 단위로 제공되는데 이는 총 2개(A, B) 보조위성을 이용하여 관측된 결과이다. 2개의 보조위성은 각각 Ascending path way와 Descending path way를 따라서 동일한 지역을 관측하며, 이로 인해 관측 시의 시간의 차이가 발생한다. 이러한 관측 시점의 차이가 후방산란계수에 영향을 미치는 토양수분, 식생 내 수분과 같은 인자들의 조건을 다르게 할 수 있기 때문에 본 연구에서는 Sentinel-1B Ascending path way 자료만이 활용되었다. 연구 기간은 2018년 7월부터 2020년 6월 까지이며 2년간 관측된 총 58장의 관측 영상을 활용하였다. Sentinel-1 영상을 Apply orbit file, Thermal Noise Removal, Radiometric Calibration, Speckle Filtering, Terrain correction의 총 5개 전처리 과정을 통해 준비하였고, 이후 각 지점 별 후방산란계수 자료를 추출하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 총 2개의 편파(VV, VH) 후방산란계수가 사용되었는데 그 중 VH 편파 후방산란계수는 식생 내 수분에 의한 영향을 크게 받고(Vreugdenhil *et al.*, 2018), VV 편파 후방산란계수는 토양수분에 의해 영향을 크게 받는다(Joseph *et al.*, 2008). 따라서 식생을 고려하기 위한 RVI 값의 계산을 위해 VH, VV 편파 후방산란계수를 사용하였고, 토양수분 산정을 위하여 VV 편파 후방산란계수를 WCM에서 레이더 신호 인자로 사용하였다. 또한 후방산란계수는 LIA (Local Incidence Angle)에 의해 영향을 받는데, 이를 고려하여야 후방산란계수와 토양수분 및 식생 간의 관계성을 보다 뚜렷하게 관측할 수 있다(Mladenova *et al.*, 2012). Sentinel-1B 위성으로 관측한 한반도의 영상에서는 연구 지점 별로 LIA 값이 25°부터 60°

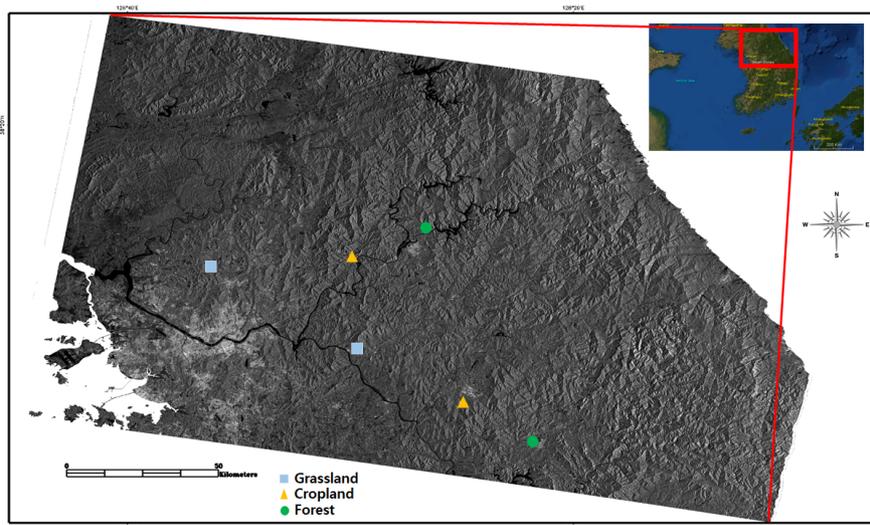


Fig. 1. Study sites for each land cover classification

Table 1. Information of research sites

Site Number	Site Name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Land Cover Type	Elevation (m)
1	Yangju	37.8205	126.973	Grassland	134
2	Yangpyeong	37.5095	127.5134	Grassland	178
3	Gapyeong	37.8462	127.501	Cropland	97
4	Wonju	37.2958	127.915	Cropland	174
5	Jecheon	37.1615	128.1768	Forest	340
6	Chuncheon	37.9546	127.7763	Forest	167

로 다양하게 나타나고, LIA값과 후방산란계수는 반비례 한다 (Bouman and van Kasteren, 1990; Ardila *et al.*, 2010). 따라서 LIA의 후방산란계수에 대한 영향을 줄이기 위해 Mladenova *et al.* (2012)에서 제시한 Cosine Method를 활용하여 후방산란계수 값을 정규화하였다.

연구에 사용된 지점들은 지표면 위에 식생이 존재하기 때문에 이에 의한 영향을 고려하기 위해 RVI를 활용하였다. WCM을 활용하여 토양수분을 산정한 선행 연구들은 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Leaf Area Index (LAI), Enhanced Vegetation Index (EVI) 등의 식생 지수들을 인자로 활용하고 각 인자들을 평가 하였으나(Bao *et al.*, 2018; Baghdadi *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019), 광학센서를 이용하여 관측된 식생 지수들이 식생 내 수분을 대표하기에 한계가 있다는 점을 지적하였다. 또한 광학센서기반 자료는 Sentinel-1 위성의 원 자료와 공간해상도의 차이가 크다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 Mandal *et al.* (2020)이 제시한 방법에 따라 SAR 기반 자료로 계산이 가능하며, 식생 내 수분량과 밀접한 관계에 있는 것으로 알려져 있는 RVI 값을 사용하였다. RVI 값의 계산을 위해서는, Sentinel-1 자료에서 제공하는 자료만을 사용하기 위해 Holtgrave *et al.* (2020)에서 제시한 VV 편파 후방산란계수와 VH 편파 후방산란계수를 이용한 식 (Eq. 1)을 활용하였다.

$$RVI = \frac{4\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0} \tag{1}$$

2.3 연구 방법

2.3.1 지점 환경에 따른 후방산란계수 변동 분석

본 연구에서는 토지피복에 따른 토양수분 산출 결과를 평가하고자 하였다. 따라서 각 지점 별 RVI와 VV 편파 후방산란계수 그리고 토양수분 간의 관계성을 분석하였다. 이후 각 인자간의 관계성을 바탕으로 WCM을 이용한 토양수분 산정 결과를 분석하였고, 관측 토양수분 값의 분포에 따른 산정 토양

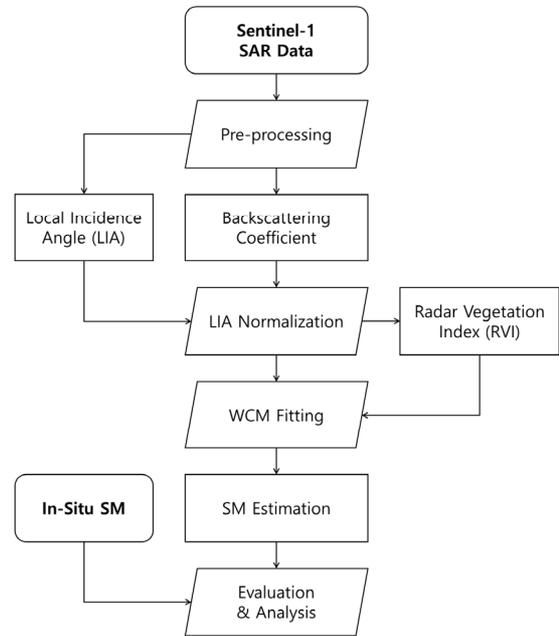


Fig. 2. Flow chart of the research

수분 정확도를 구간 별로 평가하였다. Fig. 2에는 연구의 Flow Chart가 나타나있다.

2.3.2 Water Cloud Model (WCM)

본 연구에서 활용된 WCM은 지표면 위에서 SAR 센서 신호가 식생, 지표면과 충돌한 후 센서로 돌아오는 과정을 물리적으로 표현한 모형이다. 초기에 WCM은 Attema and Ulaby (1978)에 의하여 제시되었으며, 이후 Prevot *et al.* (1993)에 의해 토양수분 산정을 위한 방법으로 활용되어 왔다. WCM은 총 후방산란계수를 2개의 후방산란계수로 나눈다(Attema and Ulaby, 1978). Eq. 2에는 총 후방산란계수 σ_T^0 를 식생에 의한 후방산란계수 σ_{veg}^0 와 토양에 의한 후방산란계수 σ_{soil}^0 로 나눈 식이 나타나있다. t^2 는 식생에 의한 2중 간섭, 즉 지표면에 충돌하기 전에 식생을 먼저 통과하고 충돌 후에도 식생을 거쳐 돌아오는 것을 의미한다(Bernard *et al.*, 1987).

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

WCM에서는 식생에 의한 후방산란계수 σ_{veg}^0 를 Eq. (3)와 같이 나타낸다. σ_{veg}^0 를 계산하기 위한 인자로는 SAR 신호의 LIA인 θ 와 식생 내 수분을 의미하는 V_1 , 2중 간섭을 의미하는 t^2 , 그리고 1번째 식생 매개변수 A 가 사용된다.

$$\sigma_{veg}^0 = AV_1 \cos \theta (1 - t^2) \quad (3)$$

$$t^2 = \exp(-2BV_2 \sec \theta) \quad (4)$$

$$\sigma_{soil}^0 = CM_v + D \quad (5)$$

Eq. (4)에서 2중 간섭을 의미하는 t^2 는 신호가 지표면에 도달한 후 다시 센서로 돌아가는 도중 식생에 충돌하는 것의

미하며, 이를 계산하기 위해서는 두 번째 식생 매개변수 B 와 식생 내 수분량 V_2 , 그리고 LIA인 θ 가 사용된다. 또한 토양으로부터의 후방산란계수인 σ_{soil}^0 은 토양으로부터의 신호가 토양수분과 선형 관계를 가진다는 가정 하에(Kumar *et al.*, 2015), 토양수분량 M_v 와 토양 매개변수 C 와 D 를 이용하여 계산한다.

3. 연구 결과

3.1 RVI, 토양수분, 후방산란계수 간 관계성 분석

WCM을 이용해 SAR 센서 후방산란계수를 기반으로 토양 수분을 산출하기 위해서는 사용되는 각 인자 간의 관계성이 뚜렷하게 나타나야 한다(Bindlish and Barros, 2001). Fig. 3에는 각 연구 지역 별 RVI와 VV 편광 후방산란계수 그리고 토양 수분 간의 관계성이 나타나 있다. 선행 연구에 따르면, VV 편광 후방산란계수와 토양수분은 비례하며 RVI 값과 VV 편광

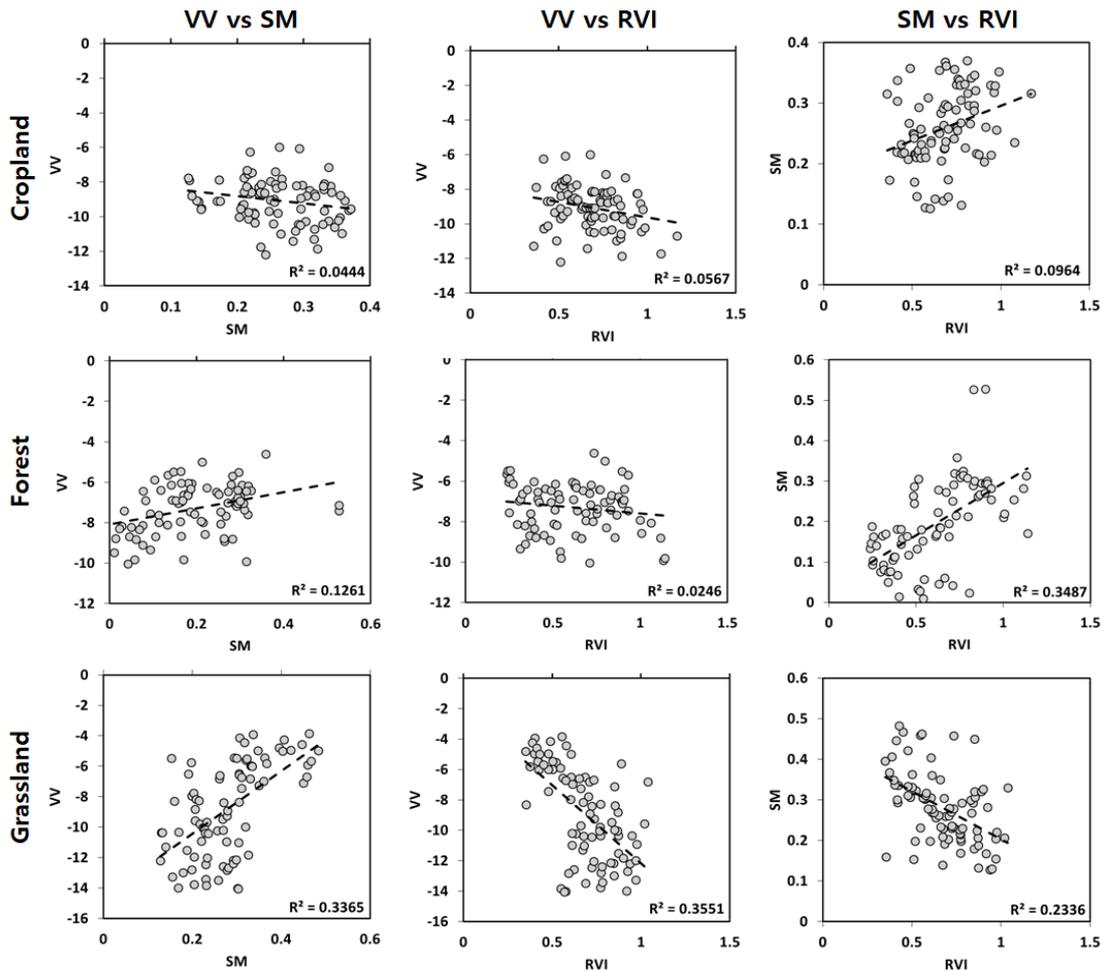


Fig. 3. Relation between each variables on Cropland, Forest and Grassland

후방산란계수는 식생의 특성에 따라서 관계가 다양하게 나타난다(Kim *et al.*, 2011; Rötzer *et al.*, 2017).

농지에서는 RVI와 토양수분 값이 양의 상관관계를 가지는 반면 후방산란계수와 토양수분은 음의 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 농지로 사용된 두 개 지역들은 모두 벼농사를 짓는 지역 인근으로, 농작물이 자라는 시기의 습윤한 환경이 토양수분과 후방산란계수의 반비례 관계에 주요한 영향을 미치는 것으로 판단된다. Kasischke *et al.* (2003)에 따르면 벼농사가 이루어지는 지역에서는 벼가 성장하는 시기에 후방산란계수가 포함되어 -12 dB 미만의 값으로 나타난다. 이는 농사가 이루어지지 않는 시기에 나타나는 -12 dB ~ -3 dB 사이의 후방산란계수 관측 값과는 상이하며, SAR를 이용한 관측 지역에 벼농사 지역이 존재할 시 토양수분에 의한 신호가 혼동될 수 있음을 의미한다. 특히 벼 작물 성장기의 더욱 습윤한 환경은 후방산란계수 값을 포화시켜 작은 후방산란계수 값을 유도하고 이로 인해 토양수분과 후방산란계수 간의 관계성이 잘 나타나지 않는다.

산지에서는 토양수분과 후방산란계수간의 관계성이 비례 관계로 나타나고 있다. 이는 해당 지역의 토지피복이 산지임에도 불구하고 SAR 신호가 토양에 도달하고 있음을 의미한다. 반면 RVI 값과 토양수분, VV 편파 후방산란계수간의 관계성을 보면, RVI와 토양수분이 정비례 관계를 보이고 있음에도 불구하고 RVI와 후방산란계수는 반비례 관계를 갖는 것을 볼 수 있다. 이것은 산림 지역의 RVI가 증가할 시 후방산란계수를 감소시키는 관목에 의한 Double backscattering 영향 또한 증가하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

초지에서 토양수분과 후방산란계수의 관계는 뚜렷한 양의 상관관계를 나타내고 있는데, 이것은 SAR 센서에서 투사된 레이더 신호가 식생에 큰 영향을 받지 않고 토양에 도달하는 것을 의미한다. El Hajj *et al.* (2016)에 따르면 초지에서는 식

생의 두께가 열계 형성되어 있고, 겨울 및 가을철 지표면이 레이더 신호에 충분히 노출되기 때문에 토양수분에 의한 후방산란계수 값이 뚜렷하게 증가한다. 반면 후방산란계수와 RVI는 반비례 관계를 나타내는데, 이것은 초지에서 RVI가 높게 나타나는 시기에 낮은 토양수분 관측 값으로 인해 감소한 VV 편파 후방산란계수 값이 나타나는 결과로 판단된다. 이것은 토양수분에 영향을 크게 받는 VV 편파 후방산란계수 값이 건조한 조건의 토양수분에 의해 작아지기 때문이다.

3.2 식생 조건 별 WCM 기반 토양수분 산정 결과

Fig. 4에는 각 식생 조건 별로 WCM을 통해 산정된 토양수분과 관측 토양수분 간의 관계성이 나타나 있다. 선형적인 상관관계를 나타내는 r 값의 경우 농지에서 0.258로 가장 작고, 산지와 초지가 각각 0.568, 0.579로 기존의 선형 연구와 유사한 상관성을 나타내고 있다(El Hajj *et al.*, 2016; Saradjian and Hosseini, 2011; Xu *et al.*, 2020).

농지의 경우 두 값 간의 선형 및 비선형 관계성(r , τ)이 모두 매우 낮게 나타나고 있는데, 이것은 후방산란계수와 토양수분의 반비례 관계에 의한 결과라 할 수 있다. WCM 토양수분 산정 방법의 기본적인 가정은 토양수분과 후방산란계수가 정비례 관계성을 가진다는 것이며, 이러한 가정이 충족되지 않을 시 열악한 산정 결과가 나타날 수 있음이 Graham and Harris (2003)의 연구에서 언급되었다. Fig. 3에서 농업 지역에서의 후방산란계수의 거동을 보면 일정 구간의 토양수분과 RVI 값에서 다양한 후방산란계수 값을 확인할 수 있다. 이는 후방산란계수를 감소시키는 농업 지역의 과도한 수분에 의한 영향으로 보이며, 농지와 같은 습윤한 환경에서 포화된 후방산란계수 값이 WCM 적용 시에 좁은 범위의 토양수분 값을 도출하는 것을 Fig. 4와 Table 2의 작은 RMSE와 Bias 값을 통해 확인할 수 있다.

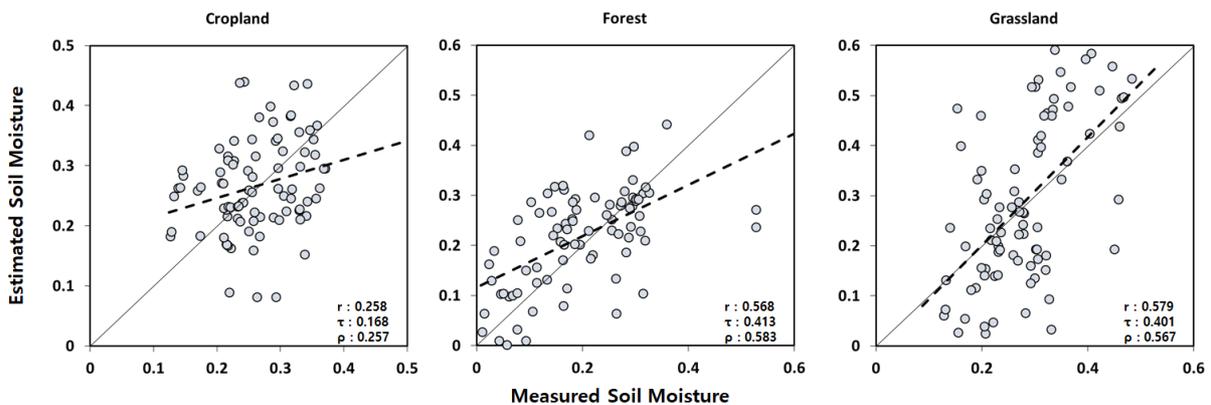


Fig. 4. Results of the WCM based soil moisture estimation for each LCC

Table 2. Statistical values for each vegetation types

Vegetation Type	r	τ	ρ	RMSE (m^3/m^3)	Bias (m^3/m^3)
Cropland	0.26	0.17	0.26	0.007	0.005
Forest	0.57	0.41	0.58	0.009	0.02
Grassland	0.58	0.4	0.57	0.017	0.008

반면 초지와 산지의 0.5 이상의 높은 상관관계는 Fig. 3에서의 후방산란계수와 토양수분간의 정비례 관계성의 결과인 것으로 보인다. 산지에서는 과대 산정 경향이 초지에 비해 약하게 나타나고 있는데, 이것은 산지에서 토양수분의 증가와 함께 나타나는 높은 RVI 값이 Double backscattering을 발생시키기 때문인 것으로 보인다. 식생 내 수분을 포함하는 잎뿐만 아니라 레이더 신호가 통과하지 못하는 가지와 줄기가 풍부한 산지에서는 RVI가 높을수록 다른 지역에 비해 복잡한 간섭이 일어나게 된다(Mahdavi *et al.*, 2017; Saatchi and McDonald, 1997). 이러한 조건에서는 SAR 센서 신호가 습윤한 토양에도 달해 증가한 이후 센서로 복귀하는 과정에서 Double backscattering에 의해 감소하게 된다. 이로 인해 산정 토양수분이 비교적 크게 나타나는 것으로 판단되며, 이러한 현상은 RVI 값이 1을 초과할 시 더 뚜렷하게 관찰된다. 또한 초지에서는 관측 토양수분 값이 높아질수록 산정 토양수분 값이 과대 산정되는 경향을 볼 수 있는데, 이것은 Fig. 3에서 알 수 있듯 높은 토양수분 조건에서 RVI 값이 작아 관측 후방산란계수가 식생에 의한 간섭 없이 토양수분에 의해 매우 민감하게 반응하기 때문인 것으로 보인다.

3.3 식생 조건 별 토양수분 산정 결과의 통계 값 분석

Fig. 5와 Table 2에는 각 연구지역 별 RMSE, Bias, r, τ 그리고 ρ 값이 제시되어 있다. 관측 토양수분 값과의 관계성은 농지에서 매우 작게 나타난 반면 오차를 의미하는 RMSE, Bias 값의 경우에는 초지와 산림이 농지에 비하여 큰 값으로 계산되었다. 이러한 결과는 농지의 매우 습윤한 환경이 WCM의 비선형회귀 과정에 크게 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. 농지의 경우 지점 관측 토양수분 값의 대부분이 $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 에서 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 사이에 분포하며 산정 토양수분 또한 해당 범위에서 나타나고 있다. 하지만 Fig. 4에서 포화된 후방산란계수에 의해 과소 산정된 토양수분이 관측 토양수분과의 선형 관계성을 감소 시키며, 이로 인해 부정확한 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

산지와 초지의 경우 RMSE 값은 초지가 높게 나타났고, Bias 값은 산지에서 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 4를 보면 초지에서는 지점 관측 토양수분 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 을 기준으로 더 낮

을 시에 과소 산정 경향이, 더 높을 시에는 과대 산정 경향이 나타난다. 이를 통해 식생 성장시의 후방산란계수에 대한 식생의 영향이 초지에서 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 산지에서 나타나는 높은 Bias 값은 지점 관측 토양수분이 낮은 시기에 관찰되는 과대 산정 경향과 이후 식생 성장 시기에 나타나는 과소 산정 경향 때문인 것으로 판단된다. 앞서 Fig. 3에서 확인한 것과 같이 산지에서의 관목에 의한 후방산란계수 값의 감소가 과소 산정 경향의 원인으로 판단된다.

각 식생 종류 별 토지피복으로 통계값을 살펴보았을 때, WCM의 가정 조건과 부합하는 환경을 가진 초지에서 높은 r 값이 나타났다. 관목으로 인해 토양수분 산정이 어려운 것으로 알려져 있는 산지에서도 초지와 비슷한 수준의 r 값이 계산되었는데, 이를 통해 해당 지역이 SAR 신호가 지표면에 도달할 수 있는 수준의 관목으로 덮여있다는 것을 추정할 수 있다. 반면 농지에서는 오차를 제외한 관계성을 나타내는 통계수치에서 매우 낮은 값을 확인할 수 있는데, 이는 인근 벼농사 지역에 의해 레이더 신호가 교란되었기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

3.4 식생 조건 별 관측 토양수분 값의 범위에 따른 오차 분석

관측 토양수분 범위에 따른 각 식생 피복에서의 토양수분 산정 결과를 분석하기 위해 이를 Fig. 6와 같이 나타내었다. 각 연구지역 별로 관측 토양수분 값을 5개 구간으로 나누었고, 해당 구간에서 산정 토양수분의 오차를 나타내는 RMSE 값을 계산하였다.

관측 토양수분 구간에 따른 RMSE는, 농지와 초지에서는 두 번째 구간에서 가장 낮은 값이 나타났고, 산지에서는 세 번째 구간에서 가장 낮은 값이 나타났다. Moran *et al.* (2000)은 토양수분 값이 매우 낮은 경우($< 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 토양수분에 의한 신호가 매우 작아져 토양수분 산정이 어려울 수 있음을 언급하고 있다. 또한 토양수분이 매우 높은($> 0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 경우에는 후방산란계수의 포화 현상이 일어날 수 있고(Zribi *et al.*, 2013), 높은 토양수분으로 인한 식생 성장으로 토양수분 산정 정확도가 낮아질 수 있다.

농지에서는 세 번째 구간에서 RMSE 값이 증가한 이후 네

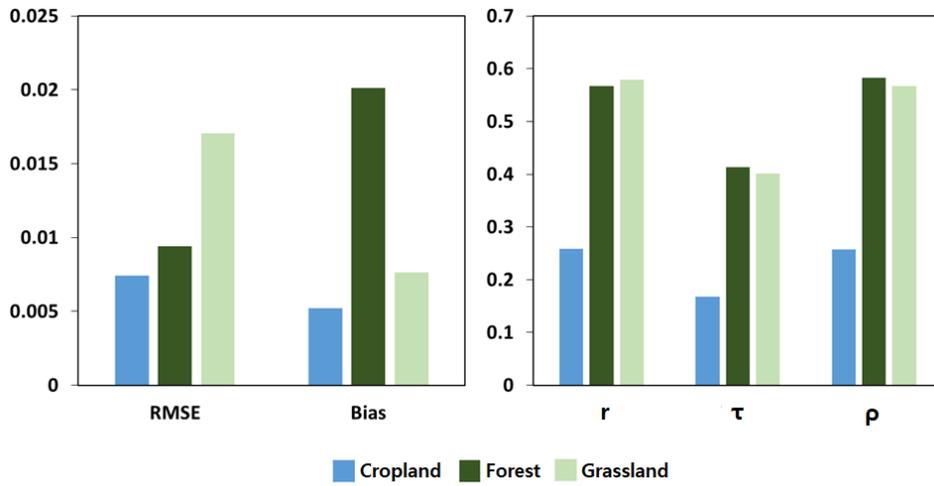


Fig. 5. Statistical results for each LCC

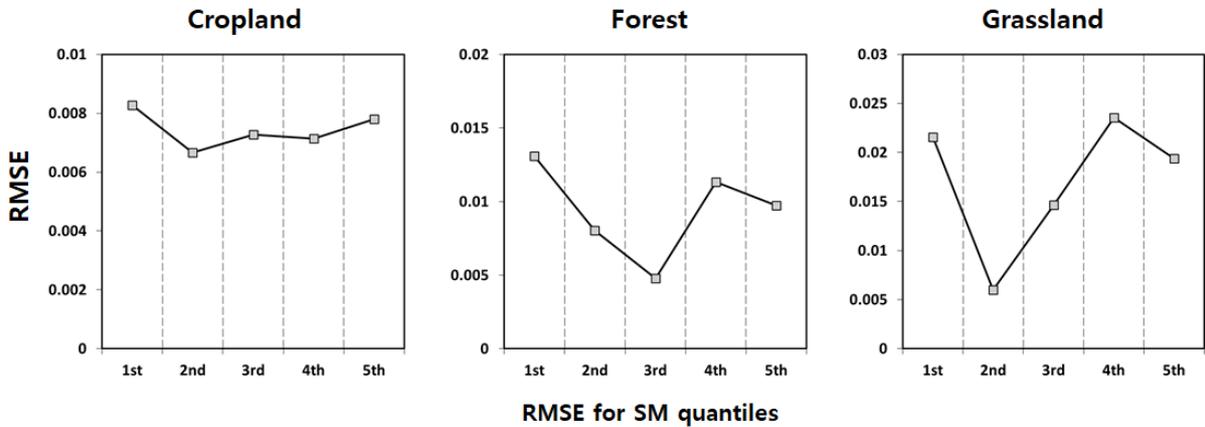


Fig. 6. RMSE value of estimated soil moisture for SM and RVI quantiles on each LCC

번째 구간에서 미세하게 감소하고 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 해당 지역에서 두 번째 구간 이후 높은 토양수분 조건에서 주변 지역의 비농사로 인한 후방산란계수의 포화가 지배적인 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 특히 비농사가 이루어지는 지역은 식생 성장 시기에 토양수분이 높게 유지되고, 이로 인해 식생 성장 시기로 판단되는 세 번째 토양수분 구간부터 RMSE의 증가 추세가 나타나고 있다.

산지와 초지의 경우 관측 토양수분 네 번째 구간에서 RMSE 값이 상승하고, 다섯 번째 구간에서 낮아지고 있다. 산지의 경우 토양수분이 매우 높은 조건에서 높은 식생 내 수분에 의한 Volume backscattering의 영향이 원인이 되는 것으로 판단된다. 식생에서의 수분은 일반적으로 후방산란계수의 증가를 일으키고 이러한 신호 강도의 상승이 토양수분 값에 의한 영향으로 인식될 수 있다(Lievens and Verhoest, 2011). 초지의 다섯 번째 구간에서의 RMSE 값의 감소는, 토양수분이 증가

함에 따라 식생내 수분량의 영향보다 토양수분에 의한 영향이 보다 직접적으로 작용했기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 선정된 총 6개 연구지역의 식생 조건별 토양수분 산정 결과를 분석하였다. 연구의 목표는 Sentinel-1 위성 자료의 가장 작은 공간해상도인 10 m 단위에서 토지피복 별 후방산란계수의 거동이 토양수분 및 식생 지수에 반응하는 정도를 평가하기 위함이며, 해당 연구 결과를 한반도 전 지역의 토양수분 공간 분포도 작성 알고리즘 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다. 연구 결과 토지 피복도 상에서 산지와 초지로 분류된 지점에서 r 값 0.5 이상의 상관성이 나타났고, 벼 작물을 재배하는 농지에서는 r 값 0.3 미만의 결과가 나타났

다. 이를 통해 다양한 식생 조건을 가진 한반도에서 SAR 센서를 기반으로 한 토양수분 산정 시에 고려해야 할 사항을 찾아내고자 하였으며, 본 연구 결과를 통해 알 수 있는 사항은 아래와 같다.

- 1) 식생 조건 별로 RVI 값과 토양수분, 후방산란계수 간의 관계가 상이하게 나타나고, RVI 값이 증가함에 따라 SAR 센서 신호가 지표면에 닿지 못하여 후방산란계수 값이 토양수분에 의한 신호를 잡아내지 못하는 경향이 나타난다.
- 2) 농지의 경우 습윤한 조건으로 인한 후방산란계수 포화가 발생하여 토양수분이 과소 산정될 수 있고, 산지의 경우 관목에 의한 Double backscattering에 의한 영향으로 과소 산정 경향이 나타날 수 있다.
- 3) 농지, 산지 및 초지에서 적정 토양수분 조건($0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 하에 가장 작은 오차 값이 발생한다.

위 세 가지 사항은 SAR 센서 기반의 토양수분 산정을 위해서는 관측 지역의 토양수분과 후방산란계수 간의 관계성을 우선적으로 검증해야 하고, 이후 식생에 의한 후방산란계수의 거동을 파악해야 한다는 것을 시사한다. 나아가 연구 지역의 식생의 종류와 지역에서 관측된 SAR의 원 자료가 지표면 토양수분 정보를 포함하고 있는가에 대한 확인이 필요하며, 이를 위한 연구가 보다 세부적인 사항을 고려하여 수행되어야 할 것이다. 특히 농지의 경우 벼농사 지역으로, 습윤한 주변 환경에 의해 SAR 신호의 교란이 크게 일어난 것을 확인할 수 있는데, 이와 같이 작물의 특성에 따라 자료의 특성을 파악하고 이에 알맞은 후방산란계수 보정 기법이 개발되어야 할 것으로 보인다. 또한 본 연구를 통해 도출한 토지 피복 별 식생 및 토양 매개변수는 해당 토지피복 종류에 제한되는 값이며, 전 지역의 토양수분 공간 분포도 작성을 위해서는 다양한 토지피복 및 지점 정보를 고려한 토양수분 복원 알고리즘 개발이 이루어져야 할 것이다. 현재 SAR 자료를 활용한 토양수분 기법으로 활발히 이용되는 인공지능 및 기계학습 기법은 지점 자료와 기타 보조자료를 필요로 하고 일정 기간의 반복학습을 요구하며, 반복학습 된 값을 광범위한 지역에 범용적으로 적용하는 데 한계가 있다. 즉, 지점 자료의 관측이 어려운 지역에서의 토양수분 값을 위성을 통해 산출하기 위해서는 SAR 기반의 후방산란계수와 토양수분 및 식생 간의 물리적인 관계를 본질적으로 고려한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 2014년부터 12일 주기로 현재까지 제공하고 있는 약 180여 장의 영상 중 2년에 해당하는 58장의 영상을 활용하였으며, 이를 통해 도출된 매개변수의 일반성을 확보하고자 하였다. 추후

다양한 식생 및 토양조건에서의 매개변수 일반화에 대한 연구가 활발히 수행된다면, 실질적인 SAR 기반 토양수분 복원 방안을 확보할 수 있을 것이다.

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 자료를 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.

We acknowledge the European Space Agency (ESA) for providing free-access of Sentinel-1 satellite data.

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.
- Ardila, J.P., Tolpekin, V., and Bijker, W. (2010). “Angular backscatter variation in L-band ALOS ScanSAR images of tropical forest areas.” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 821-825.
- 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.
- Balenzano, A., Mattia, F., Satalino, G., Pauwels, V., and Snoeij, P. (2012). “SMOSAR algorithm for soil moisture retrieval using Sentinel-1 data.” *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, Munich, Germany, pp. 1200-1203.
- Bao, Y., Lin, L., Wu, S., Deng, K. A.K., and Petropoulos, G.P. (2018). “Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas

- from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 72, pp. 76-85.
- Bartalis, Z., Wagner, W., Naeimi, V., Hasenauer, S., Scipal, K., Bonekamp, H., Julia, F., and Anderson, C. (2007). "Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT)." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 20, L20401.
- Beaudoin, A., Le Toan, T., and Gwyn, Q.H.J. (1990). "SAR observations and modeling of the C-band backscatter variability due to multiscale geometry and soil moisture." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 5, pp. 886-895.
- Bernard, R., Frezal, M. E., Vidal-Madjar, D., Guyon, D., and Riom, J. (1987). "Nadir looking airborne radar and possible applications to forestry." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 21, No. 3, pp. 297-309.
- Bindlish, R., and Barros, A.P. (2001). "Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76, No. 1, pp. 130-137.
- 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.
- Chapin, E., Chau, A., Chen, J., Heavey, B., Hensley, S., Lou, Y., Machuzak, R., and Moghaddam, M. (2012). "AirMOSS: An airborne P-band SAR to measure root-zone soil moisture." *2012 IEEE Radar Conference*, IEEE, Atlanta, U.S., pp. 693-698.
- Choi, M., and Hur, Y. (2012). "A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 124, pp. 259-269.
- Choi, M., and Jacobs, J.M. (2011). "Spatial soil moisture scaling structure during Soil Moisture Experiment 2005." *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 6, pp. 926-932.
- Choi, M., Jacobs, J.M., and Cosh, M.H. (2007). "Scaled spatial variability of soil moisture fields." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 1, L01401.
- Crevier, Y., Pultz, T.J., Lukowski, T.I., and Toutin, T. (1996). "Temporal analysis of ERS-1 SAR backscatter for hydrology applications." *Canadian journal of remote sensing*, Vol. 22, No. 1, pp.65-76.
- Daboor, M., Sun, L., Carrera, M. L., Friesen, M., Merzouki, A., McNairn, H., Powers, J., and Bélair, S. (2019). "Comparative analysis of high-resolution soil moisture simulations from the Soil, Vegetation, and Snow (SVS) land surface model using SAR imagery over bare soil." *Water*, Vol. 11, No. 3, p. 542.
- De Zan, F., Parizzi, A., Prats-Iraola, P., and López-Dekker, P. (2013). "A SAR interferometric model for soil moisture." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 1, pp. 418-425.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Belaud, G., Cheviron, B., Courault, D., and Charron, F. (2016). "Soil moisture retrieval over irrigated grassland using X-band SAR data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 176, pp. 202-218.
- Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M.J., and Baghdadi, N. (2017). "Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for soil moisture mapping at 100 m resolution." *Sensors*, Vol. 17, No. 9, p. 1966.
- Gherboudj, I., Magagi, R., Berg, A.A., and Toth, B. (2011). "Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 1, pp. 33-43.
- Graham, A.J., and Harris, R. (2003). "Extracting biophysical parameters from remotely sensed radar data: A review of the water cloud model." *Progress in Physical Geography*, Vol. 27, No. 2, pp. 217-229.
- Heathman, G.C., Starks, P.J., Ahuja, L.R., and Jackson, T.J. (2003). "Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil water content." *Journal of Hydrology*, Vol. 279, No. 1-4, pp. 1-17.
- Holtgrave, A.K., Röder, N., Ackermann, A., Erasmi, S., and Kleinschmit, B. (2020). "Comparing Sentinel-1 and-2 data and indices for agricultural land use monitoring." *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 18, p. 2919.
- Im, E.S., Kwon, W.T., and Bae, D.H. (2006). "A study on the regional climate change scenario for impact assessment on water resources." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 637-642.
- Jagdhuber, T., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K.P. (2014). "An iterative generalized hybrid decomposition for soil moisture retrieval under vegetation cover using fully polarimetric SAR." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 8, No. 8, pp. 3911-3922.
- 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.
- Kasischke, E.S., Smith, K.B., Bourgeau-Chavez, L.L., Romanowicz, E.A., Brunzell, S., and Richardson, C.J. (2003). "Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 88, No. 4, pp. 423-441.
- Kim, K., and Lee, Y. (2020). "Analysis on the characteristics of soil water storage by the precipitation in the Sulma Basin." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 269-269.
- Kim, S., Jo, H.B., Lee, S.O., and Choi, M. (2010). "The study of application of drought index using measured soil moisture at KoFlux Tower." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 6B, pp. 541-549.
- Kim, Y., Jackson, T., Bindlish, R., Lee, H., and Hong, S. (2011). "Radar vegetation index for estimating the vegetation water content of rice and soybean." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 9, No. 4, pp. 564-568.

- Koyama, C.N., Korres, W., Fiener, P., and Schneider, K. (2010). "Variability of surface soil moisture observed from multi-temporal C-band synthetic aperture radar and field data." *Vadose Zone Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 1014-1024.
- Kumar, K., Suryanarayana Rao, H.P., and Arora, M.K. (2015). "Study of water cloud model vegetation descriptors in estimating soil moisture in Solani catchment." *Hydrological Processes*, Vol. 29, No. 9, pp. 2137-2148.
- Lee, J., Choi, M., Cho, E., and Kim, D. (2015). "Performance of conditional merging spatial interpolation technique combining AMSR-E soil moisture and In-situ soil moisture data over the Korean peninsula." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 185-185.
- Le Hégarat-Masclé, S., Zribi, M., Alem, F., Weisse, A., and Loumagne, C. (2002). "Soil moisture estimation from ERS/SAR data: Toward an operational methodology." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 12, pp. 2647-2658.
- Lievens, H., and Verhoest, N.E. (2011). "On the retrieval of soil moisture in wheat fields from L-band SAR based on water cloud modeling, the IEM, and effective roughness parameters." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 8, No. 4, pp. 740-744.
- Mahdavi, S., Maghsoudi, Y., and Amani, M. (2017). "Effects of changing environmental conditions on synthetic aperture radar backscattering coefficient, scattering mechanisms, and class separability in a forest area." *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 11, No. 3, 036015.
- 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.
- 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.
- Moran, M.S., Hymer, D.C., Qi, J., and Sano, E.E. (2000). "Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semiarid rangeland." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 105, No. 1-3, pp. 69-80.
- Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., Notarnicola, C., Pasolli, L., and Reppucci, A.J.R.S.O.E. (2013). "Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 134, pp. 234-248.
- Pierdicca, N., Castracane, P., and Pulvirenti, L. (2008). "Inversion of electromagnetic models for bare soil parameter estimation from multifrequency polarimetric SAR data." *Sensors*, Vol. 8, No. 12, pp. 8181-8200.
- Rötzer, K., Montzka, C., Entekhabi, D., Konings, A.G., McColl, K. A., Piles, M., and Vereecken, H. (2017). "Relationship between vegetation microwave optical depth and cross-polarized backscatter from multiyear aquarius observations." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 10, No. 10, pp. 4493-4503.
- Saatchi, S.S., and McDonald, K.C. (1997). "Coherent effects in microwave backscattering models for forest canopies." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 4, pp. 1032-1044.
- Sahebi, M.R., Bonn, F., and Gwyn, Q.H.J. (2003). "Estimation of the moisture content of bare soil from RADARSAT-1 SAR using simple empirical models." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 12, pp. 2575-2582.
- Saradjian, M.R., and Hosseini, M. (2011). "Soil moisture estimation by using multipolarization SAR image." *Advances in Space Research*, Vol. 48, No. 2, pp. 278-286.
- Shi, J., Wang, J., Hsu, A.Y., O'Neill, P.E., and Engman, E.T. (1997). "Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 5, pp. 1254-1266.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., and Rostan, F. (2012). "GMES Sentinel-1 mission." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 120, pp. 9-24.
- 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.
- Wang, L., He, B., Bai, X., and Xing, M. (2019). "Assessment of different vegetation parameters for parameterizing the coupled water cloud model and advanced integral equation model for soil moisture retrieval using time series Sentinel-1A data." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 85, No. 1, pp. 43-54.
- Xu, C., Qu, J.J., Hao, X., and Wu, D. (2020). "Monitoring surface soil moisture content over the vegetated area by integrating optical and SAR satellite observations in the permafrost region of tibetan plateau." *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 1, p. 183.
- Zribi, M., Gorraeb, A., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., and Mougenot, B. (2013). "Influence of radar frequency on the relationship between bare surface soil moisture vertical profile and radar backscatter." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 11, No. 4, pp. 848-852.