

원격탐사자료를 이용한 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분산정 및 가뭄평가: (I) 토양수분

신용철* · 최경숙* · 정영훈**† · 양재의*** · 임경재****

*경북대학교 농업토목·생물산업공학부

**한국수자원공사 수자원연구소

***강원대학교 바이오자원환경학과

****강원대학교 지역건설공학과

Soil Moisture Estimation and Drought Assessment at the Spatio-Temporal Scales using Remotely Sensed Data: (I) Soil Moisture

Yongchul Shin* · Kyung-Sook Choi* · Younghun Jung**† · Jae E. Yang*** · Kyoung-Jae Lim****

*Department of Agricultural Civil Eng. Kyungpook National University

**Water Resources Research Center, K-water

***Department of Biological Environment, Kangwon National University

****Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(Received 2 December 2015, Revised 28 December 2015, Accepted 29 December 2015)

Abstract

In this study, we estimated root zone soil moisture dynamics using remotely sensed (RS) data. A soil moisture data assimilation scheme was used to derive the soil and root parameters from MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Based on the estimated soil/root parameters and weather forcings, soil moisture dynamics were simulated at spatio-temporal scales based on a hydrological model. For calibration/validation, the Little Washita (LW13) in Oklahoma and Chungmi-cheon/Seolma-cheon sites were selected. The derived water retention curves matched the observations at LW 13. Also, the simulated soil moisture dynamics at these sites was in agreement with the Time Domain Reflectometry (TDR)-based measurements. To test the applicability of this approach at ungauged regions, the soil/root parameters at the pixel where the Seolma-cheon site is located were derived from the calibrated MODIS-based (Chungmi-cheon) soil moisture data. Then, the simulated soil moisture was validated using the measurements at the Seolma-cheon site. The results were slightly overestimated compared to the measurements, but these findings support the applicability of this proposed approach in ungauged regions with predictable uncertainties. These findings showed the potential of this approach in Korea. Thus, this proposed approach can be used to assess root zone soil moisture dynamics at spatio-temporal scales across Korea, which comprises mountainous regions with dense forest.

Key words : Data assimilation, MODIS, Remotely sensed data, Root zone soil moisture, Soil and root parameters

1. Introduction

최근 원격탐사 기술의 향상과 함께 인공위성기반의 토양 수분 자료가 관측되고 있으며 전 지구적 단위에서의 수자 원관리를 위해 많이 사용되고 있다. 이러한 인공위성기반의 토양수분자료들은 넓은 평야지역에서 공간적으로 분포되어 있는 토양수분특성을 나타내는데 있어서 매우 유용하지만, 우리나라와 같이 산악지형과 밀집된 산림으로 구성되어 있

는 지역에 적용할 경우 불확실성이 증가하게 된다. 또한 토양수의 물리적인 흐름을 구현할 수 있는 수문 모형들(Common Land Model-CLM (Oleson et al., 2010), Noah-Land Surface Model-Noah-LSM (Ek et al., 2003), Variable Infiltration Capacity-VIC (Liang et al., 1994), 등)이 개발되어 사용되고 있으나, 이러한 모형들의 경우 Global Climate Models (GCMs) 모형 구동 시 지표특성을 반영하기 위해 개발되었으며 입력자료와 결과값 역시 GCMs 자료 스케일(1~2°, 100~200 km)로 제공된다. 따라서 이러한 인공위성 및 수문모형 기반의 토양수분에 상세화기법을 적용하여 해상도를 높이는 연구가 수행되었으나 필지(수십~수백 m)단위에서 발생하는 농작물에 적용하기에는 한계가 있다(Engman, 1991; Entekhabi et al., 1999; Ines et al., 2013; Shin and

† To whom correspondence should be addressed.
younghun@kwater.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Mohanty, 2013). 이처럼 인공위성 기반의 토양수분 이미지 자료의 해상도 문제를 해결하기 위하여 상세화기법(down-scaling algorithm)들이 개발되었다. Crow et al. (2000)은 위성기반의 토양수분을 상세화하기 위하여 토양의 유전체 기반의 역추적기법을 이용하였다. Merlin et al. (2005)과 Merlin et al. (2012)은 Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS, Kerr et al., 2001) 자료를 상세화하기 위하여 고해상도의 광학자료를 이용하였으며, Ines et al. (2013)은 인공위성 기반의 토양수분 이미지로부터 토양과 작물특성 조합과 그에 따른 면적비를 추출하였다. Shin and Mohanty (2013)은 LANDSAT 기반의 증발산 자료를 이용하여 위성기반의 토양수분 이미지 자료를 상세화 하였다. 이렇듯 다양한 인공위성 기반의 토양수분 자료의 불확실성을 최소화하기 위한 많은 연구들이 수행되었으나, 여전히 인공위성 기반의 토양수분 자료를 현실적으로 적용하는데 있어서 시·공간적 해상도를 더욱 높이는 연구의 필요성이 제기되고 있다.

상당수의 발작물(가뭄발생시 관개용수를 위한 비용과 농작물의 판매단가 단가를 고려하여 이윤이 발생할 수 있는 작물)을 재배하는 농경지의 경우 관개용수의 접근성을 고려하여 산림지역의 저지대 하천 인근에 위치하고 있다. 따라서 인공위성 및 수문모형 기반의 저해상도(25 km~40 km) 토양수분자료를 산악지형인 우리나라에 적용할 경우 많은 불확실성(소규모 농경지, 경사도 및 지표피복정도, 등)을 고려해야 하며 현실적으로 많은 제약이 따른다. 또한 원격탐사 자료의 경우 기상상태 및 지표면 관측 주기로 인하여 수문분야에서 필요한 일별 토양수분을 제공하지 못하며, 일별 토양수분을 산정할 수 있는 토양수분 모형(CLM, VIC, LSM 등)의 경우 공간적인 해상도가 낮기 때문에 그 이용성이 제한된다. 따라서 우리나라의 공간적으로 복잡한 지형적 특성을 고려하고 시계열의 연속적인 일별 토양수분산정 기법의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라의 복잡한 지형특성을 고려하기 위하여 상대적으로 고해상도의 원격탐사 자료인 MODIS 이미지 자료와 수문모형 기반의 자료동화기법을 연계하여 시·공간적으로 연속적인 토양수분을 산정하였으며, 이를 위해 1) 인공위성 기반의 토양수분 이미지(MODIS) 자료와 토양의 물리적 특성에 기반한 토양수분자료동화기법을 연계한 MODIS 격자크기의 토양의 수리학적 매개변수/작물(뿌리) 변수 추출 및 2) 추출된 토양의 수리학적 및 작물 매개변수와 기상자료를 연계한 MODIS 격자크기의 일별 토양수분을 산정하였다. 본 연구결과는 우리나라와 미계측 유역의 시·공간적으로 연속적인 일별 토양수분을 모의하여 농업가뭄평가를 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. Materials and Methods

본 연구에서는 인공위성 기반의 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 이미지 자료와 Scott et al. (2000)이 제시한 경험식을 이용하여 공간적으로 분포되어 있는 토양수분을 산정하였다. 토양수분 자료동화기법(Shin

and Mohanty, 2015)을 연계하여 MODIS 기반의 토양수분 이미지(500 m × 500 m)로부터 공간적으로 분포되어 있는 토양의 격자 크기의 수리학적($k_1 = \{a, n, \theta_{res}, \theta_{sat}, K_{sat}\}$) 및 작물($k_2 = \{z^*, p_z, z_{max}\}$) 매개변수를 산정한다. 토양의 수리학적/작물(뿌리) 매개변수를 입력자료로 사용하는 one-dimensional(1D) HYDRUS (version 4.16, Šimunek et al., 2013) 기반의 자료동화기법은 MODIS 이미지(각 pixel)의 해상도 격자크기에서 매개변수($\mathbf{P} = \{k_1, k_2\}$, 공식 1)를 도출하여 시·공간적으로 연속적인 일별 토양수분자료를 모의한다. Iteration Algorithm (IA, Shin and Mohanty, 2015)을 자료동화기법에 연계하여 실측 및 모의 토양수분 값의 차이가 최소화되는 최적의 매개변수(\mathbf{P})를 도출하였다. 이를 위한 목적함수(Z)와 Fitness는 공식 (2-3)과 같다. 장기간의 토양수분을 산정하기 위하여 기상청에서 제공하는 일별 관측자료(강우 및 최고·최소 온도)를 수집하여 토양수분을 모의하였다. Fig. 1은 본 연구에서 제시한 기법의 모식도를 나타낸다.

$$P = (k_1 = \{a, n, \theta_{res}, \theta_{sat}, K_{sat}\}, k_2 = \{z^*, p_z, z_{max}\}) \quad (1)$$

$$Z_i(P) = \min \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |\theta_{obs}(t) - \theta_{i,-}(t;P)| \right\} \quad (2)$$

$$Fitness_i(P) = \frac{1}{Z_i(P)} \quad (3)$$

여기서, θ_{res} 및 θ_{sat} : 잔존 및 포화된 토양수분($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), a (-), n (-), m (-), 및 λ (-): 수분함량과 수리전도도의 형상계수, θ_{obs} : 실측된 토양수분($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ : 모의된 토양수분($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), t : 시간 및 T : 일별 최대 모의기간, i : running index, I : 총 반복 횟수.

2.1. 1D-HYDRUS 모형

프로세스 기반의 1D-HYDRUS 모형은 Richards 공식을 이용하여 토양수의 흐름을 모의한다(Šimunek, 1991; Šimunek et al., 2013). 1D-HYDRUS 모형은 입력 자료인 토양의 매개변수($a, n, \theta_{res}, \theta_{sat}, K_{sat}$), 작물특성 및 기상자료를 이용하여 일별 토양수분을 산정한다.

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = C(h(z,t)) \frac{\partial h(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial [K(h(z,t)) (\frac{\partial h(z,t)}{\partial t} + 1)]}{\partial z} - S(h,z,t) \quad (4)$$

여기서 K : 수리 전도도(cm d^{-1}), h : 토양의 압력수두(-cm), z : 뿌리 깊이, C : 미분된 수수분양(cm^{-1}), 및 $S(h,z,t)$: 뿌리에 의해 흡수되는 실제 토양수분($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$).

$$S(h,z,t) = \begin{cases} \alpha_w(h,z,t) \frac{T_{pot}(t)}{Z_r}; & z < Z_r \\ 0; & z > Z_r \end{cases} \quad (5)$$

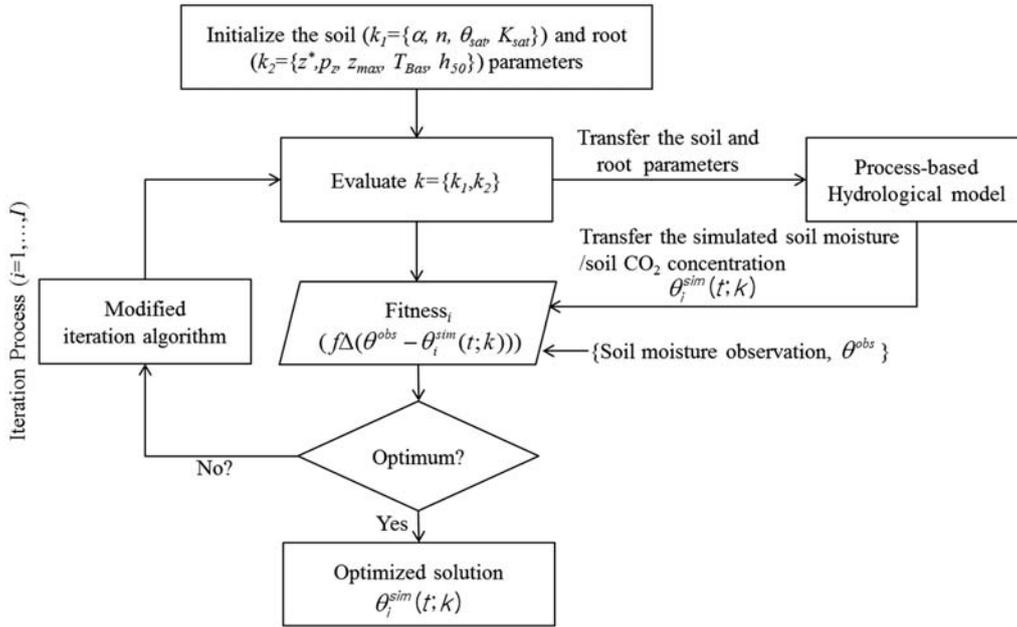


Fig. 1. Flow chart of the proposed approach.

여기서 T_{pot} : 잠재 증산량(cm d^{-1}), Z_r : 뿌리 성장 깊이(cm), 및 a_w : 깊이(z)와 시간(t)에서 토양의 압력수두에 따른 감소계수(Feddes et al., 1978).

토양의 수리학적 함수들은 van Genuchten (1980)과 Mualem (1976)에 의해 제시된 해석공식에 의해 해석된다.

$$S_e(h, z, t) = \frac{\theta(h(z, t)) - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha h(z, t)|^n} \right]^m \quad (6)$$

$$K(h, z, t) = K_{sat} S_e(h, z, t)^\lambda [1 - (1 - S_e(h, z, t)^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

S_e : 상대적인 포화도(-), θ_{res} 및 θ_{sat} : 잔존 및 포화된 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $\alpha(-)$, $n(-)$, $m(-)$, 및 $\lambda(-)$: 수분함량과 수리전도도의 형상계수, 및 K_{sat} : 포화 상태의 수리전도도, 및 $m=1-1/n$.

HYDRUS 모형에서 토양층은 총 60개의 층으로 구성하였으며, 총 토양 깊이는 지표면으로부터 500 cm로 하였다. 각 토양층은 $2 \times 0.5 \text{ cm}$, $2 \times 1 \text{ cm}$, $2 \times 1.5 \text{ cm}$, $12 \times 2 \text{ cm}$, $4 \times 2.5 \text{ cm}$, $2 \times 3 \text{ cm}$, 4 cm , $6 \times 5 \text{ cm}$, $4 \times 7.5 \text{ cm}$, $9 \times 10 \text{ cm}$ 및 $15 \times 20 \text{ cm}$ 로 구성하였다. 또한 HYDRUS 모형의 토양층 초기조건(initial condition)과 하부층 지하수면(bottom boundary condition)은 각각 지표면으로부터 -500 cm로 하였으며 초기조건은 지하수면과 동일한 것으로 가정하였다. Fig. 2는 토양층의 내부 구조를 보여준다.

2.2. Iteration Algorithm

본 연구에서 최적화된 토양의 수리학적(k_1) 및 작물(k_2) 매개변수를 도출하기 위하여 Modified-Iteration Algorithm (Modified-IA, Shin and Mohanty, 2015)을 선택하였다. 기본적

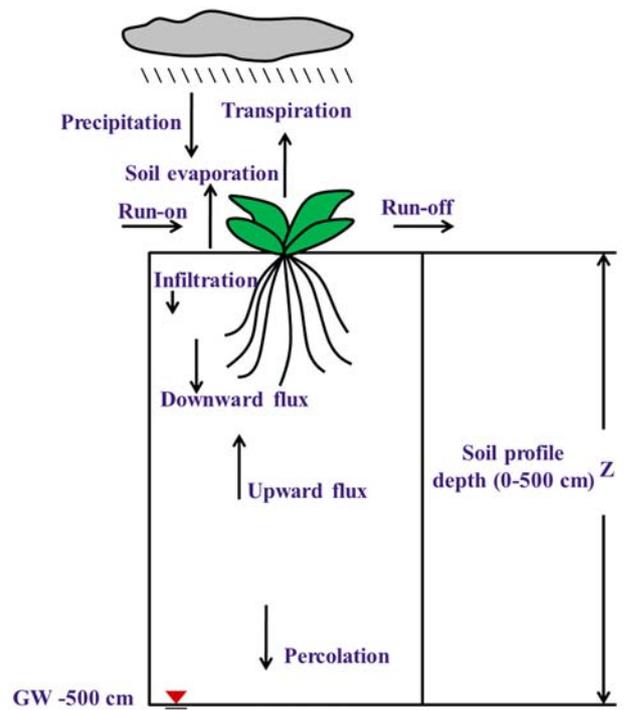


Fig. 2. Soil column with the bottom boundary condition (GW -500cm).

인 IA 기법은 단순한 과정에 의해서 계산, 실행 및 분석을 통하여 근사해를 구한다. 주어진 평균(μ)과 표준편차(σ)가 주어질 경우 정규분포($N(\mu, \sigma)$)에 기반하여 무작위로 매개변수를 발생시킨다. Modified-IA 기법은 elite (Ines and Honda, 2005)와 restart (Carroll, 2015; Ines and Droogers, 2002) 함수와 연계하여 해에 근접하는 모의값을 효율적으로 찾아 낼 수 있다. 매개변수의 최소 및 최대 탐색 범위는 Table 1과 같다.

Table 1. Searching ranges of the soil and root parameters for the Modified-Iteration Algorithm

	a	n	Θ_{res}	Θ_{sat}	K_{sat}	z^*	p_z	Z_{max}	Iteration(I)	Restart	SD	SEED
Min.	0.006	1.2	0	0.37	1.84	0	1	0	1000	3	0.5	-1000
Max.	0.033	2.1	0.163	0.55	55.7	200	15	300				

SD: 표준편차, SEED: 무작위 변수 초기 위치값

2.3. 원격탐사자료 기반의 토양수분산정

Scott et al. (2003)은 HYDRUS 모형에서 토양층은 총 60 개의 층으로 구성하였으며, 총 토양 깊이는 지표면으로부터 500 cm로 하였다. 각 토양층은 2×0.5 cm, 2×1 cm, 2×1.5 cm, 12×2 cm, 4×2.5 cm, 2×3 cm, 4 cm, 6×5 cm, 4×7.5 cm, 9×10 cm 및 15×20 cm로 구성하였다. 또한 HYDRUS 모형의 토양층 초기조건(initial condition)과 하부층 지하수면(bottom boundary condition)은 각각 지표면으로부터 -500 cm로 하였으며 초기조건은 지하수면과 동일한 것으로 가정하였다. Fig. 2는 토양층의 내부 구조를 보여준다.

$$R_n G + H + \lambda E \tag{8}$$

$$\Lambda = \lambda E / (\lambda E + H)$$

$$\theta / \theta_{sat} = \exp(\Lambda - a) / b, a = 1.0, b = 0.421$$

여기서 R_n : 지표 순복사량(net radiation, [W/m²]), G: 토양의 열 이동(soil heat flux, [W/m²]), H: 대기로 향하는 현열 이동(sensible heat flux, [W/m²]), λE : 잠열 이동(물의 증발에 사용된 에너지, [W/m²]), a,b: 곡선적합계수(curve-fitting parameters), Θ : 토양수분(cm³ cm⁻³), Θ_{sat} : 포화 상태의 토양수분(cm³ cm⁻³), Λ : 증발량(soil evaporation) 비율. MODIS 위성의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. MODIS information

Image characteristics	Values
Day of Year	86, 95, 98, 105, 155, 173, 219
Coordinate system	Latitude, Longitude
MODIS	Bands 1-7 (500 m × 500 m)
	Resolution

2.4. 연구구역 및 실험방법

자료동화기법의 검·보정을 위해서는 실측된 토양수분과 토양시료에서 측정된 토양의 수리학적 매개변수값이 필요하다. 그러나 우리나라에서는 현재 추출된 매개변수값을 검·보정을 위한 실측값이 없기 때문에 미국 Oklahoma에 위치하고 있는 Little Washita(LW 13) 지역의 실측값을 이용하여 검·보정을 수행하였다. Fig. 3은 미국 Oklahoma주에 위치하고 있는 LW13 지역을 나타낸다.

우리나라의 경우 실측된 토양수분 관측자료가 극히 제한되어 있다. 공간적으로 분포되어 있는 MODIS 기반의 토양수분 이미지 자료를 검·보정하기 위해서는 MODIS 자료의 해상도를 나타낼 수 있는 실측자료를 사용해야 하지만 실

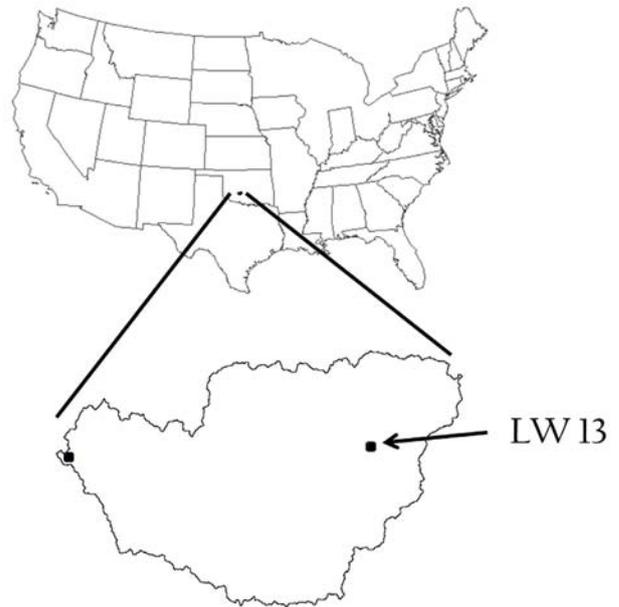


Fig. 3. The little Washita 13 site located in Oklahoma, USA.

측치가 없기 때문에 설마천 및 청미천 지점(MOLIT, 2012)에서 검·보정을 수행하였다. 설마천 유역은 경기도 파주시 설마리 설마천의 상류부에 위치하고 있으며 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험구역으로 선정하여 수문조사를 수행하고 있다. 설마천 유역은 유역면적은 8.5 km², 유로연장 5.8 km, 및 유로경사 2.3%로 전형적인 급경사 유역이다. 청미천 유역은 음성군 수례의산에 위치하고 있으며 유역면적은 569.6 km², 유로연장 60.8 km, 유역경사는 17.01%이다. 국제수문관측사업(IHP)의 일환으로 수문관측이 이루어지고 있으며 토심은 30~100 cm, 토질은 사양토가 주류를 이루고 있다. 또한 산지지역의 식생은 잡목 등의 밀도가 상당히 높은 지역이다. 설마천 유역내에서 토양수분 측정지점은 감악산 범륜사 우측 산지사면에 위치하고 있으며 사면의 면적은 약 4,000 m²이며 비교적 급경사 사면에 위치하고 있다. Fig. 4는 설마천 유역의 토양수분 측정지점을 나타내며 대상유역의 위도와 경도는 각각 37° 55' 25"와 126° 57' 25"이다. 측정지점의 식생분포는 침엽수림과 활엽수림이 혼합되어 있으며 지질학적으로 화강암 구조의 기반암위에 편마암 복합체로 구성되어 있다. FAO 분류기준에 따른 토양특성은 Leptosols로 구성되어 있는 광물성 토양이다. 토심의 깊이는 약 40~120 cm의 분포를 보이며, 급격한 경사와 비교적 낮은 함수능을 보이는 특성을 보이고 있다. 청미천 유역은 충청북도 음성군 수례의산내의 청소년 수련원내에 위치하고 있는 산지의 사면에서 특정되었다(Fig. 4). 설마천 유역에 비해 토양층의 심도가 깊고 급경사와 완경사가 폭넓게 포함되어 있다. 식생은 최상



Fig. 4. The Chunmi-cheon and Seolma-cheon sites located in Chungcheongbuk-do and Kyungki-do.

단부에는 침엽수림이 부분적으로 분포되어 있으며 최상단부 이하 지역에는 떡갈나무 등의 활엽수림이 대부분을 구성하고 있다.

모형의 검·보정 수행은 Synthetic/실측 자료와 모의값의 비교를 통하여 수행되었다. Synthetic 조건은 현장에서 채취한 모래, 실트, 및 점토를 실험을 통하여 토양수분모형(1D-HYDRUS)의 입력변수를 측정하며, 측정된 토양의 수리학적 매개변수값(reference-based)과 토양수분모형을 이용하여 가정(Synthetic)토양수분을 산정한다. 이후 토양수분자료동화기법은 Synthetic 실측값으로부터 수리학적 매개변수를 도출 및 토양수분을 모의하여 Synthetic 실측값과 비교·검증하였다. Synthetic 토양수분은 현장에서 토양수분 실측

시 발생하는 실측오차를 배제 할 수 있기 때문에 자료동화기법의 성능을 명확하게 검증할 수 있는 장점이 있으며, 이후 실측된 토양수분에 적용하여 모의 결과에 내재되어 있는 실측오차와 자료동화기법 자체의 불확실성을 구분하였다. LW13 지점과 설마천/청미천 지점의 경우 Time Domain Reflectometry (TDR) 장비를 이용하여 토양수분이 실측되었다. LW13 지점은 지표토층 0-5 cm 및 설마천/청미천 지점의 경우 지표토층 0-90 cm에서 토양수분이 실측되었다.

3. Results and Discussion

3.1. 자료동화기법의 검·보정

MODIS 기반의 토양수분 이미지로부터 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 추출하기 위한 자료동화기법의 검·보정을 수행하기 위하여 LW13 지역을 선택하였다. Fig. 5는 Synthetic 실측값과 추출된 매개변수 기반의 모의값(water retention curve: 토양수분함유곡선)을 나타낸다. 모래, 실트, 및 점토의 실측 및 모의된 토양수분함유곡선을 비교한 결과 다양한 토양특성별 모의값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 수리전도도 결과값에서는 모래와 실트질의 모의값이 실측값과 비교하여 다소 과대·과소 산정되었으나 전체적으로 토양수분함유곡선 및 수리전도도값이 잘 산정된 것으로 나타났다.

Fig. 6에서 실제 LW13 현장에서 실측된 토양수분과 모의값을 비교하였다. 자료동화기법은 토양의 수리학적 매개변수와 작물변수를 근역층에서의 토양수분으로부터 추출한다. 토양의 수리학적 매개변수와 작물 변수 산정시 발생할 수 있는 불확실성을 분석하기 위하여 LW 13지역에서 실측된 작물의 작물정보를 수문모형에 입력하여 토양의 수리학

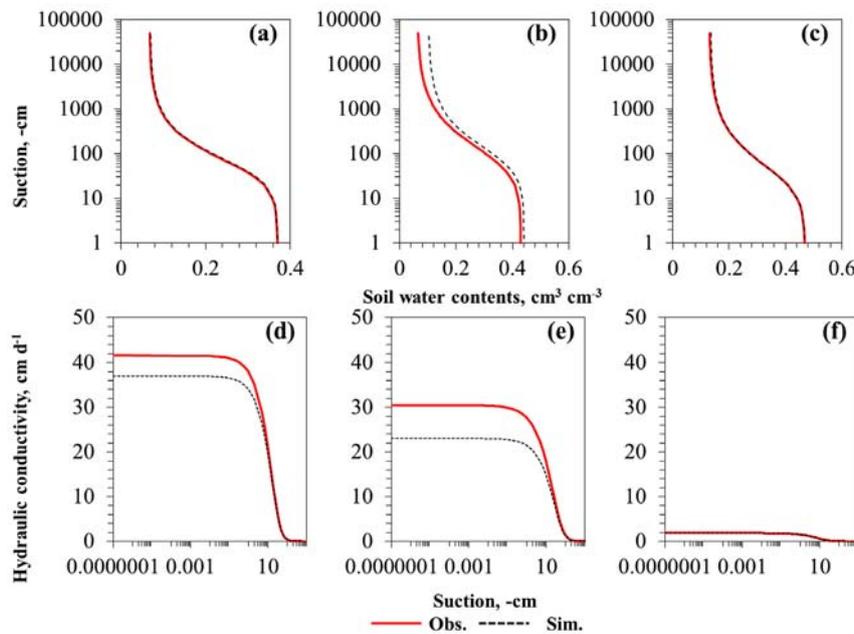


Fig. 5. (a-c) Water retention curves for sandy, silt, and clay loam soils and (d-f) Hydraulic conductivity for sandy, silt, and clay loam soils.

적 매개변수 산정시 발생하는 불확실성을 분석하였다. 전체적으로 실측과 모의값의 상관성($R: 0.876$)이 높은 것으로 나타났으며 불확실성(RMSE)값이 0.024로 나타나 모의값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한 실측 및 모의 토양수분함유곡선 역시 다소 불확실성이 존재하지만, 실측값의 경향을 잘 나타내는 것으로 나타났다. Fig. 5의 Synthetic 조건에서 도출된 토양수분함유곡선의 경우 실측 오차가 배제되기 때문에 자료동화기법 자체의 성능을 테스트 할 수 있으나, 현장에서 채취된 토양시료의 경우 실측 및 실험오차가 발생하기 때문에 Synthetic 상태에서의 모의값과 비교했을 때 상대적으로 높은 불확실성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 토양의 수리학적 매개변수와 작물 변수를 함께 산정할 경우 모의된 토양수분함유곡선의 불확실성이 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 6(b),(d)). 이는 토양특성 및 작물의 성장을 함께 모의 할 때에 최적화 알고리즘이 찾아야 하는 해의 경우의 수가 복잡해지기 때문에 동일하게 주어진 Iteration 기간 동안에 상대적으로 높은 불확실성을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 모의된 토양수분의 상관성(R)은 0.876으로 나타났으며 불확실성(RMSE) 역시 0.024로 나타나 토양수분을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이렇듯 모의된 토양의 수리학적(Fig. 6(b),(d)) 및 작물(Fig. 7) 매개변수 값이 비록 불확실성을 포함하고 있지만 토양수분을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 청미천 수레의산 사면에서 실측, MODIS(500 m × 500 m), 및 모의된 토양수분을 나타낸다. TDR 기반의 실측 토양수분을 이용하여 MODIS 이미지 자료를 보정하였다. Fig. 8에 나타난 것처럼 기상상태에 영향을 받는 MODIS

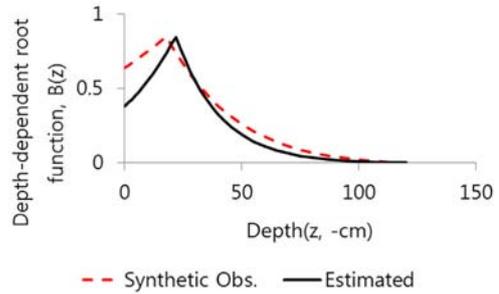


Fig. 7. (a-b) Measured and estimated depth-dependent root distributions.

자료는 실험기간(2012년 03월 01일 - 2012년 10월 31일)동안 이용가능한 자료는 8일 정도로 일별 토양수분을 제공하는데 있어서 큰 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서 제안한 자료동화기법을 이용하여 불연속적인 시계열 MODIS 자료로부터 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 도출하여 HYDRUS 기반 일별 토양수분을 모의하였다. 일별 토양수분 모의값이 실측 MODIS 기반의 토양수분 이미지 자료($R: 0.965$ 및 $RMSE: 0.007$)를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한 MODIS 이미지(500 m × 500 m) 내에 위치(Fig. 9)하고 있는 실측지점에서 측정된 TDR 기반의 토양수분과 비교한 결과 상관계수와 불확실성이 각각 0.642 및 0.038로 상관계수가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8에 나타난 것처럼 DOY 240~300까지 실측 토양수분의 변동성이 큰 폭으로 변화하였기 때문이다. 특히 DOY 260 전·후로 강우가 발생하였음에도 불구하고 토양수분은 증가하지 않았다. 따라서 DOY 240~300 기간 동안에 실측 토양

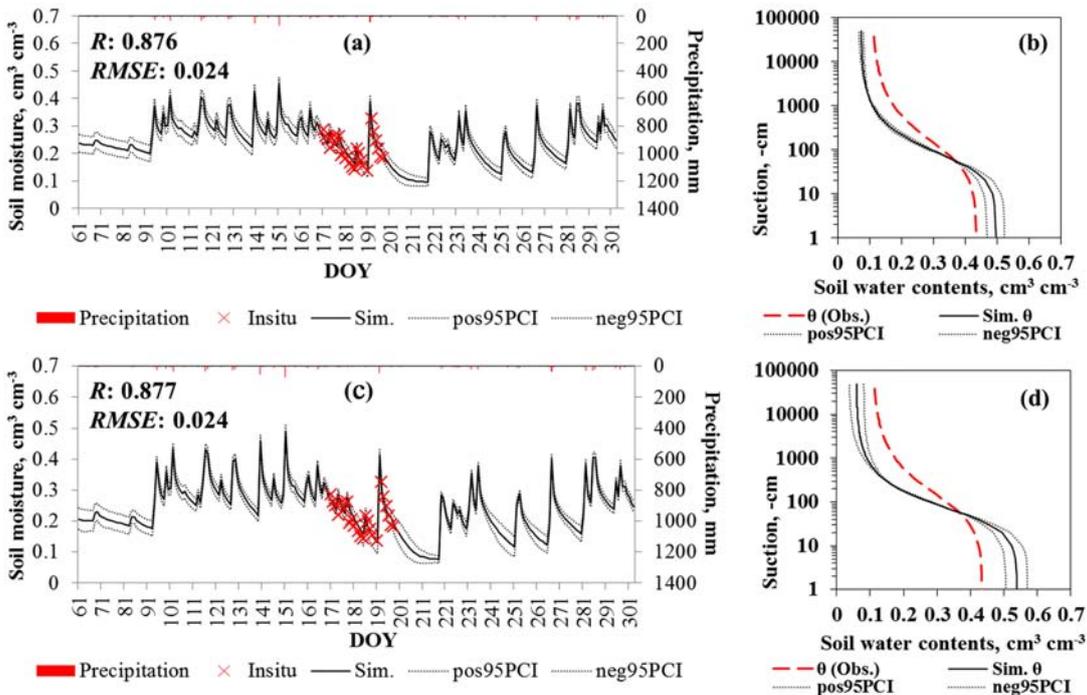


Fig. 6. (a-b) Comparison of measured and estimated soil moisture dynamics and water retention curves based on the estimated soil parameters (measured root parameters were used) and (c-d) comparison of measured and estimated soil moisture dynamics and water retention curves based on the estimated soil and root parameters.

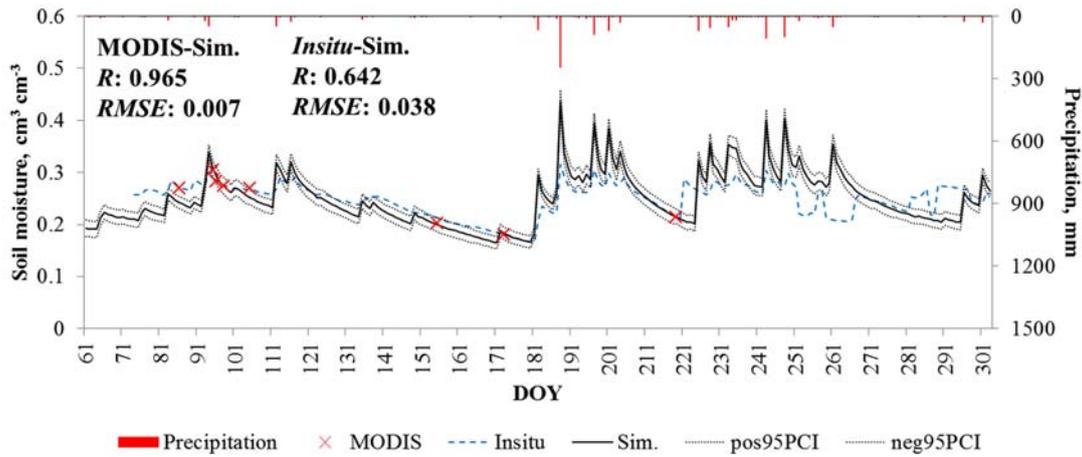


Fig. 8. (a-b) Comparison of daily simulated-, MODIS-, and TDR (in-situ)-based root zone soil moisture dynamics based on the soil moisture data assimilation.

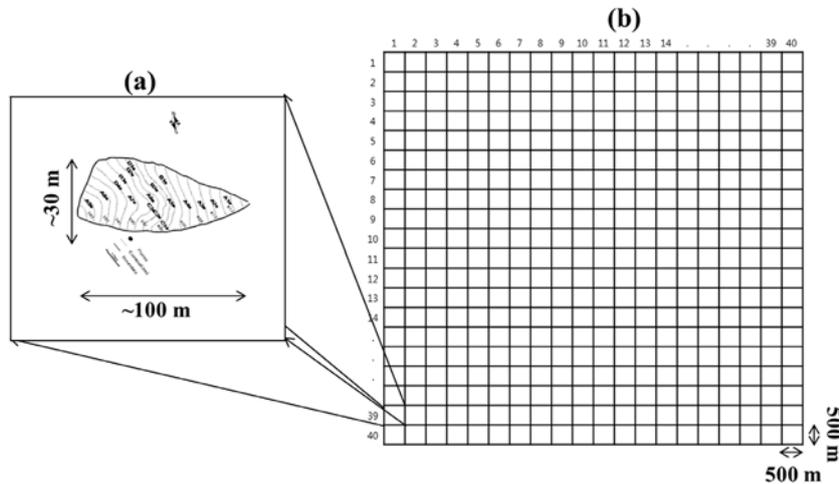


Fig. 9. (a) Chungmi-cheon site located within the MODIS pixel and (b) MODIS data comprised of 20 columns and 20 rows.

수분 자료에 실측오차가 발생하였으며 이로 인하여 상관계수 값이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. LW13 및 청미천 지점에서 검·보정 결과 본 연구에서 제시한 자료동화기법과 불연속적인 시계열 특성을 지닌 MODIS 기반의 토양수분 이미지 자료를 연계하여 산정된 일별 토양수분값이 실측지점의 토양수분 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

3.2. 미계측 유역 적용성 평가

MODIS 자료와 연계된 자료동화기법의 미계측 유역에 대한 적용성을 평가하기 위하여 청미천 지점과 설마천 지점을 선정하였다. 청미천 지점의 TDR 기반의 실측 토양수분을 이용하여 우리나라 전지역의 MODIS 기반의 토양수분 이미지 자료를 보정하였다. 이후 보정된 MODIS 토양수분 자료로부터 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 도출하여 일별 토양수분을 모의하였으며 설마천 지점의 TDR 기반의 실측값과 비교하였다(Fig. 10). 청미천 지점의 상관계수(R)와 불확실성(RMSE)이 각각 0.642 및 0.038인 것에 비하여 설마천 유역의 상관계수(R)와 불확실성(RMSE)은 각각 0.763 및 0.074로 상관계수는 설마천 유역에서 다소

높았으나 불확실성은 설마천 지점이 청미천 지점보다 2배 정도 높게 나타났다. 또한 Fig. 10(b)에서 나타난 것처럼 모의값이 상대적으로 과대산정 되는 경향을 보였다. 청미천 지점과 설마천 지점은 토양, 작물 특성 및 기상 특성이 다르기 때문에 청미천 지점에서 보정된 결과를 이용하여 설마천에 직접적으로 보정하기에는 무리가 따른다. 그러나 이외에 검·보정할 수 있는 자료가 없기 때문에 본 연구에서는 부득이하게 2개 지점에 대하여 검·보정을 수행하였다. 비록 토양수분의 양적인 측면에서는 불확실성이 존재하지만 상관계수(R)가 0.763으로 나타나 미계측 유역에 대하여 어느정도 토양수분의 증가 및 감소 경향은 모의할 수 있는 것으로 판단되었다. 후속 연구에서 우리나라 지역을 대표할 수 있는 실측 토양수분 네트워크가 구성이 되면 좀 더 정확한 검·보정 과정을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 남한과 미계측 유역인 북한의 2012년 03월 26일 및 2012년 10월 16일에 측정된 MODIS 기반의 토양수분 이미지자료를 나타낸다. 남한과 북한 모두 산림이 밀집되어 있는 곳에서 토양수분 값이 0.3 cm³ cm⁻³ 이상으로 높게 나타났으며 평야지역에서 낮은 토양수분 분포를 나타냈

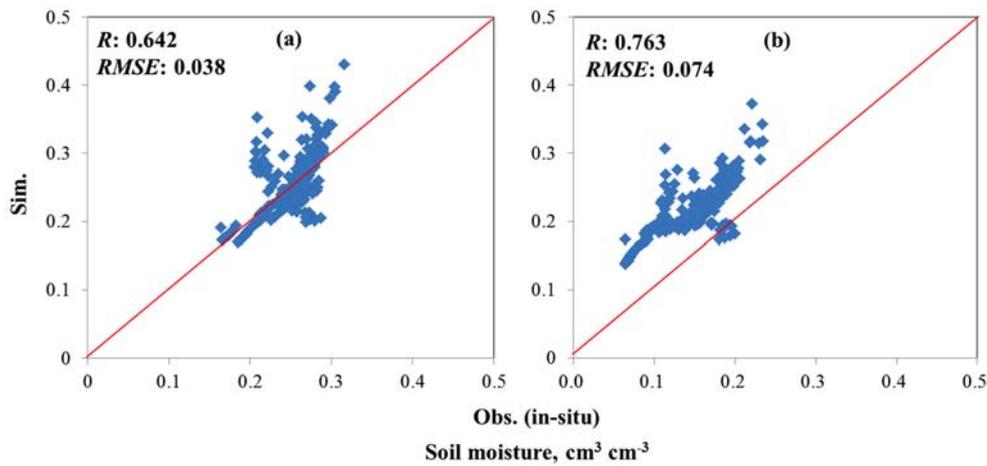


Fig. 10. (a) Calibrated root zone soil moisture dynamics at the Chungmi-cheon site and (b) Validated root zone soil moisture dynamics at the Seolma-cheon site.

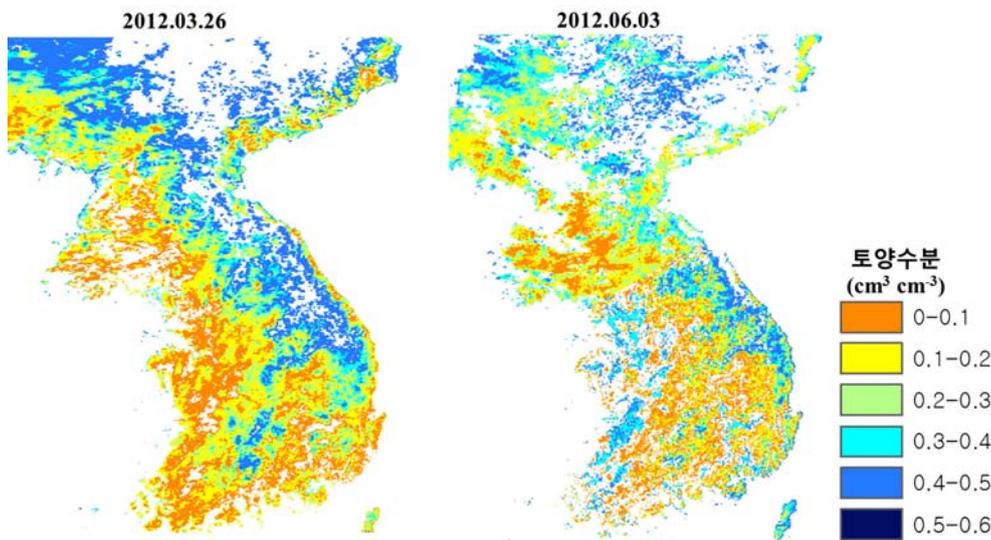


Fig. 11. Spatially distributed root zone soil moisture across the country (March 26 2012 and June 3 2012).

다. 또한 날씨 등의 이유로 토양수분 이미지가 오염된 지역이 많은 것으로 나타났다. 따라서 이용 가능한 원격탐사 자료로부터 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 도출하여 연속적인 일별 토양수분을 모의할 수 있는 자료동화기법이 이러한 원격탐사자료의 제약을 극복하는데 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

4. Conclusion

본 연구에서는 원격탐사 자료를 이용하여 토양수분을 산정하였다. 토양수분 자료동화기법(Shin and Mohant, 2015)을 이용하여 인공위성(MODIS) 기반의 토양수분 이미지로부터 토양의 수리학적(α , n , θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat}) 및 작물(z^* , p_z , z_{max}) 매개변수를 추출한다. MODIS 기반 격자크기의 추출된 매개변수와 기상자료를 이용하여 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분을 평가하였다. 본 기법은 일별 토양수분을 모의하기 위하여 1D-HYDRUS 모형을 선정하였으며, 실

제 지표특성에 가까운 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 도출하기 위하여 Iteration Algorithm (IA)을 연계하였다. 본 연구에서 제안한 기법을 검·보정하기 위하여 LW13 및 청미천/설마천 지점을 선정하였다. 연계된 자료동화 기법이 도출한 토양의 수리학적 및 작물 매개변수는 미국 Oklahoma 주의 Little Washita (LW 13)의 실측 자료를 이용하여 검증하였다. 모의결과 매개변수를 이용하여 도출된 수분함량 함수와 작물 모의값이 실측값을 잘 반영 것으로 나타났다. 또한 모의된 토양수분값의 상관계수(R)가 0.876~0.877 및 불확실성(RMSE)가 0.024~0.024로 나타나 실측 토양수분과 유사한 것으로 나타났다. 청미천 지점에서도 실측값을 이용하여 검증하였으며 모의값(R: 0.965 및 0.642 그리고 RMSE: 0.007 및 0.038)이 MODIS 토양수분 이미지와 TDR 기반 실측값을 잘 반영하였다. 다양한 조건하에서의 검·보정 결과 본 기법이 국내에서도 적용가능한 것으로 판단되었다. 미계측 유역에서의 적용성을 평가하기 위하여 청미천 지점에서 보정된 토양수분을 설마천 유역에서 검증하였다. 설마

천 유역에서의 모의값이 실측값에 비하여 과대산정 되는 것으로 나타났다. 그러나 검·보정 결과 상관계수(R)과 불확실성(RMSE) 값이 각각 0.642 및 0.038 그리고 0.763 및 0.074로 나타나 예측가능한 불확실성 범위내에서 미계측 유역에 적용이 가능한 것으로 판단된다. 비록 본 연구에서 제시한 기법을 다양한 실험을 통하여 검·보정하였으나 청미천과 설마천 2개 지점의 실측 토양수분 자료를 이용하여 공간적으로 분포되어 있는 인공위성 기반의 토양수분 이미지의 신뢰도를 평가하기에는 미흡한 것으로 판단된다. 따라서 인공위성 기반의 토양수분 이미지 자료의 국내 적용성 평가를 위해서는 다양한 지점에서 토양수분을 실측할 수 있는 네트워크 구성이 필요한 것으로 사료된다. 비록 제한된 실측 자료로 인하여 본 연구에서 제안된 기법의 검·보정 과정이 충분히 수행되지 못하였으나, 도출된 결과값을 기반으로 국내에서도 충분히 적용 가능한 것으로 판단되었다. 따라서 본 기법은 산림밀도가 높고 산악지형으로 구성되어 있는 우리나라의 토양수분을 평가하데 있어서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 APEC기후센터, 경북대학교 신입교수정착연구비 및 한국환경산업기술원 GAIA Project (No:2014000540003) “한국형 표토 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었습니다. 국토해양부(수문조사사업)의 자료 제공에 감사드립니다.

References

- Carroll, K. L. (2015). *Genetic Algorithm*, <http://www.cuaerospace.com/carroll/ga.html>. (Accessed 9 Nov. 2015).
- Crow, W. T., Wood, E. F., and Dubayah, R. (2000). Potential for Downscaling Soil Moisture Maps Derived from Space Borne Imaging Radar Data, *Journal of Geophysical Research*, 105, pp. 2203-2212.
- Ek, M., K. Mitchell, E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., and Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model, *Journal of Geophysical Research*, 108(D22), 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Engman, T. (1991). Application of Microwave Remote Sensing of Soil Moisture for Water Resources and Agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 35, pp. 213-226.
- Entekhabi, D. G. R., Asrar, A. K., Betts, K. J., Beven, R., Bras, L., and Duffy, C. J. (1999). An Agenda for Land Surface Hydrology Research and a Call for the Second International Hydrological Decade, *Bulletin of American Meteorological Society*, 80(10), pp. 2043-2058.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., and Zarandy, H. (1978). *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*, Simulation Monograph, PUDOC, Wageningen, Netherlands.
- Ines, A. V. M. and Droogers, P. (2002). Inverse Modeling in Estimating Soil Hydraulic Functions; A Genetic Algorithm Approach, *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), pp. 49-65.
- Ines, A. V. M. and Honada, K. (2005). On Quantifying Agricultural and Water Management Practices from Low Spatial Resolution RS Data using Genetic Algorithm: A Numerical Study for Mixed Pixel Environment, *Advances in Water Resources*, 28, pp. 856-790.
- Ines, A. V. M., Mohanty, B. P., and Shin, Y. (2013). An Un-Mixing Algorithm for Remotely Sensed Soil Moisture, *Water Resources Research*, 49, doi:10.1029/2012WR012379.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Martinuzzi, J. M., Font, J., and Berger, M. (2001). Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), pp. 1729-1735.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burgs, S. J. (1994). A Simple Hydrologically Based Model of Land Surface Water, Energy Fluxes for General Circulation Models, *Journal of Geophysical Research*, 99(D7), pp. 14415-14428, doi:10.1029/94JD00483.
- Merlin, O., Chehbouni, G., Kerr, Y., Njoku, E. G., and Entekhabi, D. (2005). A Combined Modeling and Multi-Spectral/Multi-Resolution Remote Sensing Approach for Disaggregation of Surface Soil Moisture: Application to SMOS Configuration, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9), pp. 2036-2050, doi:10.1109/tgrs.2005.853192.
- Merlin, O., Rudiger, C., Al Bitar, A., Walker, J. P., and Kerr, Y. H. (2012). Disaggregation of SMOS Soil Moisture in Southeastern Australia, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), pp. 1556-1571.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2012). *Hydrologic investigation report II-2. Soil moisture investigation in 2012*, 11-1611000-002213-10, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 21-268. [korean Literature]
- Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resources Research*, 12, pp. 513-522.
- Oleson, K. W., Lawrence, D. M., Bonan, G. B., Flanner, M. G., Kluzek, E., Lawrence, P. J., Levis, S., Swenson, S. C., and Thornton, P. E. (2010). *Technical Description of Version 4.0 of the Community Land Model (CLM)*, NCAR TECHNICAL NOTES (NCAR/TN-478+STR).
- Scott, C. A., Bastiaanssen, W. G. M., and Ahmad, M. D. (2003). Mapping Root Zone Soil Moisture Using Remotely Sensed Optical Imagery, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), pp. 362-335.
- Shin, Y. and Mohanty, B. P. (2013). Development of a Deterministic Downscaling Algorithm for Remote Sensing Soil Moisture Footprint Using Soil and Vegetation Classifications, *Water Resources Research*, 49, pp. 1-21, doi:10.1002/wrcr.20495.
- Shin, Y. and Mohanty, B. P. (2015). *Soil Moisture Controls of Soil Carbon Sequestration in the Unsaturated Zone under Different Hydro-Climatic Conditions*, in the revision to Water Resources Research.
- Šimůnek, J. (1991). Numerical Simulation of the Transport Processes in Soil, *Vodohosp. Cas.*, 39, pp. 20-34 (in Czech).
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., and van Genuchten,

M. T. (2013). *The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.16*, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University

of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 340.
van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp. 892-898.