

원격탐사자료를 이용한 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분산정 및 가뭄평가: (II) 가뭄

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: (II) Drought

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

*Department of Agricultural Civil Engineering, 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

Based on the soil moisture data assimilation suggested in the first paper (I), we estimated root zone soil moisture and evaluated drought severity using remotely sensed (RS) data. We tested the impacts of various spatial resolutions on soil moisture variations, and the model outputs showed that resolutions of more than 2 – 3 km resulted in over-/under-estimation of soil moisture values. Thus, we derived the 2 km resolution-scaled soil moisture dynamics and assessed the drought severity at the study sites (Chungmi-cheon sites 1 and 2) based on the estimated soil/root parameters and weather forcings. The drought indices at the sites were affected mainly by precipitation during the spring season, while both the precipitation and land surface characteristics influence the spatial distribution of drought during the rainy season. Also, the drought severity showed a periodic cycle, but additional research on drought cycles should be conducted using long-term historical data. Our proposed approach enabled estimation of daily root zone soil moisture dynamics and evaluation of drought severity at various spatial scales using MODIS data. Thus, this approach will facilitate efficient management of water resources.

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

1. Introduction

가뭄은 기후변화로 인하여 발생하는 자연재해 중 하나이며 농업, 자연 생태계, 식량 안보에 큰 영향을 미치기 때문에 경제적 손실을 야기시킨다. 우리나라의 경우 국토의 65% 이상이 산림으로 구성되어 있으며 산림의 식물뿌리는 토양입자와 함께 토양의 지지작용을 하는 동시에 토양수를 저장 할 수 있기 때문에 산림의 토양수분은 산사태뿐만 아니라 장기간의 가뭄이 지속될 경우 수분부족(water stress)으로 인한 산불발생에도 큰 영향을 미친다(Bartsch et al., 2009). 또한 토양수분은 농작물의 뿌리에 수분을 공급하기

때문에 특히 밭농업에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 평야지역에서 재배되는 논은 경우 수리답률(수리시설이 설치되어 관개용수가 안정적으로 확보된 논)이 80.6% 정도로 가뭄발생시 대처방안(관개시설)이 밭에 비해 잘 구축되어 있다. 그러나 밭농업의 경우 산림유역내의 개간지 혹은 관개용수의 이용성을 고려하여 하천 주변의 토지에서 경작되고 있다. 강원도 홍천군은 대표적인 고랭지 밭 지역으로 다양한 작물(무, 감자, 배추, 등)을 재배하고 있으며, 무강우 기간이 지속될 경우 대부분 하천에서 필요한 관개용수를 공급하고 있다. 따라서 기후변화로 인해 발생하는 가뭄피해는 쌀 농업에 비해 밭작물(채소, 과일, 등)이 더욱 취약한 실정이다. 가뭄발생시 이용 가능한 주요 관개용수원인 하천의 유량은 제한되어 있기 때문에 가뭄의 정도에 따라 이용 가능한 수자원을 효율적으로 이용하는 것이 필요하다.

가뭄평가를 위한 다양한 가뭄지수(Palmer Drought Severity Index-PDSI [Palmer, 1965; 1968], Standardized Precipi-

† 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.

tation Index-SPI [McKee et al., 1993], Soil Moisture Deficit Index-SMDI [Narasimhan and Srinivasan, 2005], 등)들이 사용되고 있다. 이중 가장 많이 사용되고 있는 가뭄지수는 PDSI와 SPI이다. PDSI는 장기간 기상의 비정상적인 건조/습윤상태에 따른 가뭄상태를 평가하며, SPI 역시 강수량에 따른 기상학적 가뭄을 평가하는데 많이 사용되고 있다. 농업 가뭄은 기상특성뿐만 아니라 지표특성(토양, 작물, 지형, 등)에서도 영향을 받기 때문에 기상자료에 근거하여 가뭄지수를 산정하는 PSDI와 SPI 가뭄지수를 이용하여 실제 농작물에 영향을 미치는 농업가뭄을 평가하는데 적합하지 않다. 따라서, 기상특성과 지표특성(토양 및 작물)을 함께 고려할 수 있는 토양수분을 이용하여 가뭄을 평가할 수 있는 SMDI 지수가 농업가뭄에 더욱 적합할 것으로 판단된다.

최근 advanced microwave scanning radiometer-earth observing system-AMSR-E (Njoku, 2003), soil moisture ocean salinity-SMOS (Kerr et al., 2001) 등과 같은 원격탐사된 토양수분 관측자료가 효율적인 수자원관리를 위하여 많이 사용되고 있다. 원격탐사기법은 1~2일 간격으로 전 지구적으로 지표면의 토양수분을 관측할 수 있으나, 공간적인 해상도 약 25~40 km 정도로 제공되고 있어서 우리나라와 같이 산림이 우세한 산악지형에 적용할 경우 많은 불확실성이 증가하게 된다(Engman, 1991; Entekhabi et al., 1999; Ines et al., 2013; Shin and Mohanty, 2013). 비록 다양한 상세화 알고리즘(Crow, 2000; Ines et al., 2013; Shin and Mohanty, 2013)이 개발되었으나, 여전히 필지 단위에서 발생하는 농업활동에 적용하기 위해서는 공간적인 해상도 문제가 해결되어야 한다.

우리나라의 경우 상당수의 밭작물(가뭄발생시 관개용수를 위한 비용과 농작물의 판매단가 단가를 고려하여 이윤이 발생할 수 있는 작물)을 재배하는 농경지가 관개용수의 접

근성을 고려하여 산림지역의 저지대 하천 인근에 위치하고 있다. 따라서 인공위성 기반의 토양수분 자료를 산악지형인 우리나라에 적용하는 것은 많은 불확실성(소규모 농경지, 경사도 및 지표피복정도, 등)을 고려해야 하며 현실적으로 많은 제약이 따른다. 특히 10 km 격자단위의 경우 픽셀 내부가 약 40~80% 이상이 산림지역이기 때문에 평야지역을 제외한 10 km 이상의 해상도를 지닌 격자단위의 토양수분의 경우 농업가뭄을 제대로 반영하지 못한다. 따라서 이러한 지형적 특성을 고려하여 가뭄을 평가할 수 있는 가뭄평가 기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 우리나라의 복잡한 지형특성을 고려하기 위하여 MODIS 이미지 자료와 수문모형 기반의 자료동화 기법을 연계하여 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분산정 및 농업·산림 가뭄을 평가하였으며, 이를 위해 1) 우리나라 지형특성을 고려한 공간 해상도 결정, 2) 토양수분 자료동화기법(Shin and Mohanty, 2015) 기반의 토양의 수리학적 매개변수/작물(뿌리) 변수 추출 및 3) 산정된 수리학적 매개변수/작물(뿌리) 변수와 기상자료를 이용한 장기간의 일별 토양수분 및 가뭄을 평가하였다.

2. Materials and Methods

본 연구에서는 첫 번째 논문에서 산정된 원격탐사 자료 기반의 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분 자료를 이용하여 장기간의 가뭄을 평가하였다. 토양수분자료동화기법(Shin and Mohanty, 2015)을 이용하여 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 기반의 토양수분 이미지 자료로부터 토양 및 작물 매개변수를 추출하였으며, 추출된 매개변수들과 장기간의 기상관측 자료를 연계하여 일별 토양수분 및 주별 가뭄을 평가하였다.

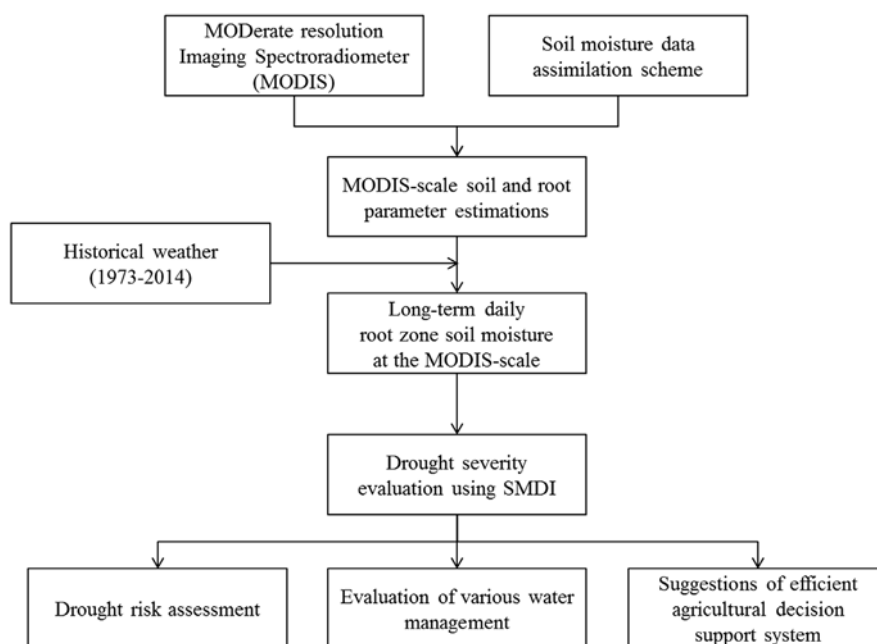


Fig. 1. Flow chart of drought severity assessment using MODIS data based on the soil moisture data assimilation scheme.

2.1. 토양수분 기반의 가뭄평가지수

토양수분가뭄평가지수(Soil Moisture Deficit Index-SMDI, Narasimhan and Srinivasan, 2005)는 일별 토양수분을 이용하여 주별 가뭄을 평가한다. SMDI 지수는 -4에서 +4의 범위를 가지며 - 값이 클수록 극심한 가뭄을 나타낸다.

$$SMDI_m = 0.5 \times SMDI_{m-1} + \frac{SD_m}{50} \quad (1)$$

$$SD_{l,m} \begin{cases} = \frac{SW_{l,m} - MSW_m}{MSW_m - \min SW_m} \times 100, \text{ if } SW_{l,m} = MSW_m \\ = \frac{SW_{l,m} - MSW_m}{\max SW_m - MSW_m} \times 100, \text{ if } SW_{l,m} > MSW_m \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $SD_{l,m}$: 토양수분 부족량(%), $SW_{l,m}$: 주별 평균 토양수분($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), MSW_m : 장기간의 주별 중간값($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $\max SW_m$: 장기간의 주별 최대값($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $\min SW_m$: 장기간의 주별 최소값($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), l: 모의기간(1973-2014), 및 $m = 1-52$ 주(일년).

2.2. 원격탐사자료 기반의 토양수분산정

첫 번째 논문에서는 Scott et al. (2003)이 제안한 회귀식을 MODIS 이미지 자료에 적용하여 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 해상도의 토양수분을 도출하였다. 산림과 농업지역이 혼합되어 있는 지역의 지표특성을 나타낼 수 있는 해상도를 결정하기 위하여 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 고해상도의 LANDSAT 이미지 자료를 이용하여 토양수분을 산정하였다. Table 1은 LANDSAT 및 MODIS 자료의 제원을 나타낸다.

Table 1. LANDSAT and MODIS information

Image characteristics		Values
LANDSAT	Satellite	LANDSAT7
	Day of Year	216
	Coordinate system	Latitude, Longitude
	Resolution	Bands 1-7 ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)
MODIS	Satellite	AQUA/TERRA
	Day of Year	86, 95, 98, 105, 155, 173, 219
	Coordinate system	Latitude, Longitude
	Resolution	Bands 1-7 ($500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$) Land surface temperature ($1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$) Emissivities ($1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$)

2.3. 연구유역 및 실험방법

연구유역은 첫 번째 논문에서 선택한 청미천 유역을 대상으로 하였다. 경사지와 평야지역에서 다양한 해상도에 따른 토양수분변동특성을 분석하기 위하여 경사지에서 토양수분이 측정된 지점을 청미천 지점1 그리고 인근에 평야지

역을 청미천 지점2로 선정하였다. 각 지점의 면적은 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 로 하였다. 우리나라의 경우 논은 평야지역에서 재배되는 반면에 밭작물은 산림지역과 혼합되어 재배되는 경우가 많다. LSM 모형 혹은 원격탐사 기반의 토양수분 이미지의 경우 해상도가 $10 \sim 40 \text{ km}$ 정도이며 산림과 밭작물이 혼합되어 있는 경우 밭작물과 산림지역을 구분하는데 있어서 제약이 따른다. 따라서 우리나라의 지형특성을 고려하여 산림과 밭작물을 구분할 수 있는 해상도가 먼저 결정되어야 한다. 본 연구에서는 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 해상도의 LANDSAT 이미지 자료를 이용하여 공간적으로 분포되어 있는 토양수분을 산정하였다. 이후 Resampling을 통하여 고해상도(finerscale)를 저해상도(coarse-scale)로 변환하였다. 해상도에 따른 토양수분의 변화특성을 분석하여 우리나라의 지표특성을 고려할 수 있는 공간해상도를 결정하였다. LANDSAT 이미지 자료는 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 의 상대적으로 고해상도 자료를 제공하지만 약 한달에 1~2회 정도 지표면을 측정하기 때문에 연속적인 시계열 특성을 나타내는데 있어서 큰 제약이 따른다. 따라서, LANDSAT 이미지 자료를 이용하여 공간적인 해상도가 결정되면 상대적으로 연속적인 시계열 자료를 제공할 수 있는 MODIS 이미지 자료를 이용하여 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분을 도출하였다.

3. Results and Discussion

3.1. 공간적으로 분포된 토양의 수리학적 및 작물 매개변수

Fig. 2는 청미천 유역의 산악지형(청미천 지점1, Fig. 2(a))과 평야지역(청미천 지점2, Fig. 2(b))의 공간적으로 분포되어 있는 토양수분 분포를 나타낸다. 청미천 지점1에서는 전체 유역의 좌측 상단, 중간 및 하단 부분에서 지형특성에 따라 토양수분이 높게 나타났으며, 청미천 지점2에서는 전체적으로 건조한 수분특성을 보였다. Fig. 3은 Fig. 2의 LANDSAT ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$) 자료의 해상도를 Resample하여 $30 \sim 9,600 \text{ m}$ 해상도로 변환했을 때 토양수분이 $0.2 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 이하인 격자들의 비율 변화를 나타낸다. 여기서 각 격자의 토양수분값이 $0.2 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 이하이면 가뭄의 영향을 받는 것으로 가정하였다(Shin and Jung, 2014). 청미천 지점1과 지점2에서 약 3 km 해상도로 낮출 때까지는 면적비율($\sim < 0.2 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$)이 크게 변화하지 않았으나, $3 \sim 4 \text{ km}$ 이후부터는 과대 및 과소평가되는 경향을 보였다. Fig. 4는 해상도의 변화에 따른 토양수분 이미지 자료의 최대, 최소 및 중앙값의 변화를 보여준다. 고해상도($30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$)에서 최대값과 최소값의 차이는 $0.1 \sim 0.7 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 까지 상당히 높은 것으로 나타났다. 그러나 해상도가 낮아질수록 최대값과 최소값의 차이가 약 $0.7 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 에서 약 $0.3 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 그리고 약 $0.05 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 에서 약 $0.1 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ 로 점차 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 감소 및 증가하는 추세는 해상도 $2 \sim 3 \text{ km}$ 정도에서 점차로 완만해 지는 것으로 나타났다. 이는 해상도가 $2 \sim 3 \text{ km}$ 이상일 경우 원격탐사된 토양수분 이미지가 지표특성을 반영하지 못하는 것으로 판단된다. MODIS

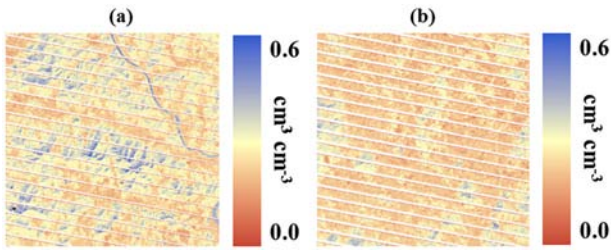


Fig. 2. Soil moisture distributions using LANDSAT image data (Oct. 16 2012); (a) Chungmi-cheon 1 site a mountainous region and (b) Chungmi-cheon 2 site a relatively flat region.

해상도(500 m × 500 m)에서 토양 및 작물의 매개변수를 산정할 경우 우리나라 전역 혹은 넓은 지역에 적용할 경우 과도한 매개변수 산정이 필요할 것이다. 따라서 2~3 km 해상도에서 최소한의 불확실성과 함께 가뭄평가시 지표특성을 고려할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 제공할 예정인 Soil Moisture Active and Passive (SMAP)자료가 3 km 해상도의 radar 자료를 제공할 예정인 것을 고려할 때, 2~3 km 해상도에서 최소한의 불확실성 범위 내에서 우리나라의 공간적인 토양수분분포를 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 2~3 km 해상도 중에서 좀더 정확한 토양수분을 고려하기 위하여 2 km 해상도를 이용하여 가뭄을 평가하고자 한다.

LANDSAT 자료는 30 m × 30 m의 상대적으로 고해상도 자료를 제공하지만 한달에 1~2회 정도 지구 표면을 관측하기 때문에 연속적인 시계열 측면에서 제약이 따른다. 본 연구에서는 MODIS 이미지 자료를 이용하여 토양수분을 산정하였으며 위에서 제안한 것처럼 2 km × 2 km 해상도로 변환

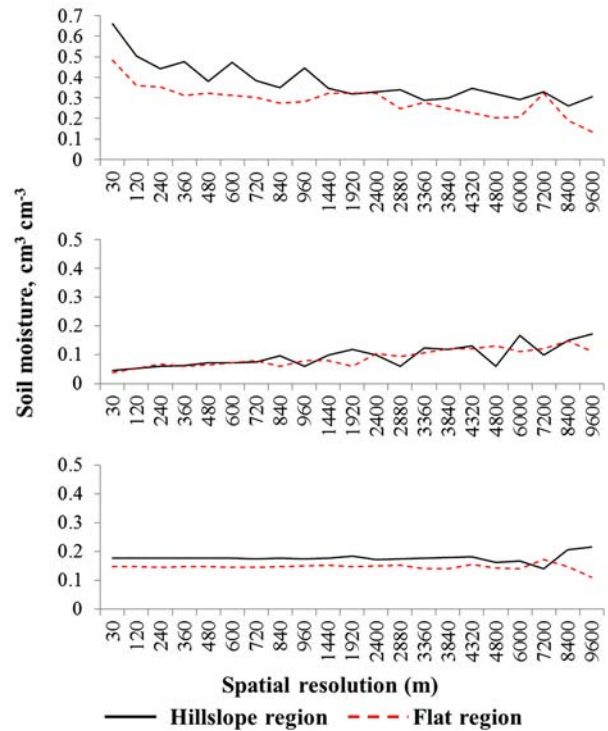


Fig. 4. Variability in the maximum, minimum, and median values at different spatial resolutions from 30 × 30 m to 9.6 × 9.6 km (Oct. 16 2012); (a) Chungmi-cheon 1 site, a mountainous region and (b) Chungmi-cheon 2 site, a relatively flat region.

하여 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 도출하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 2 km × 2 km 해상도에서 청미천 지점1과 지점2에서 자료동화기법을 이용하여 도출한 토양의 수리학적 및 작물 매개변수 분포를 나타낸다. 공간적으로 분포되어 있는

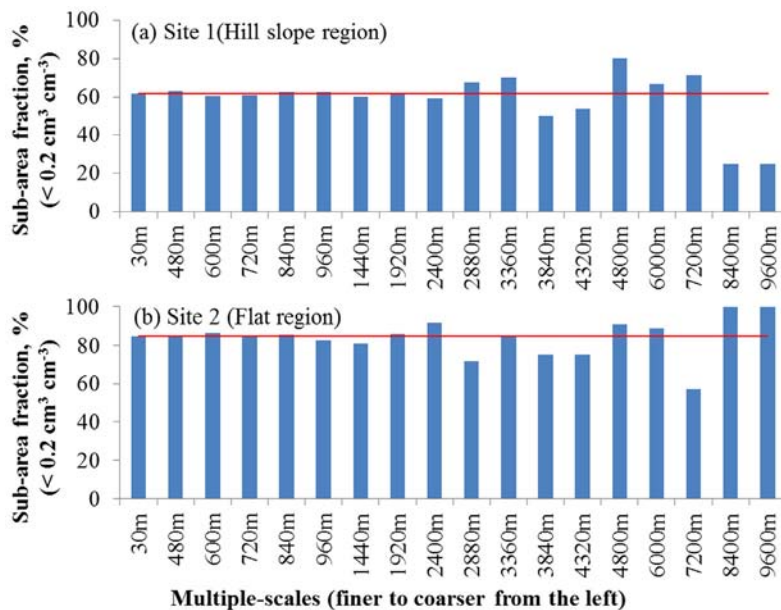


Fig. 3. Variability in the sub-area fraction below the root zone soil moisture value of 0.2 cm³ cm⁻³ due to different spatial resolutions from 30 × 30 m to 9.6 × 9.6 km (Oct. 16 2012); (a) Chungmi-cheon 1 site, a mountainous region and (b) Chungmi-cheon 2 site, a relatively flat region.

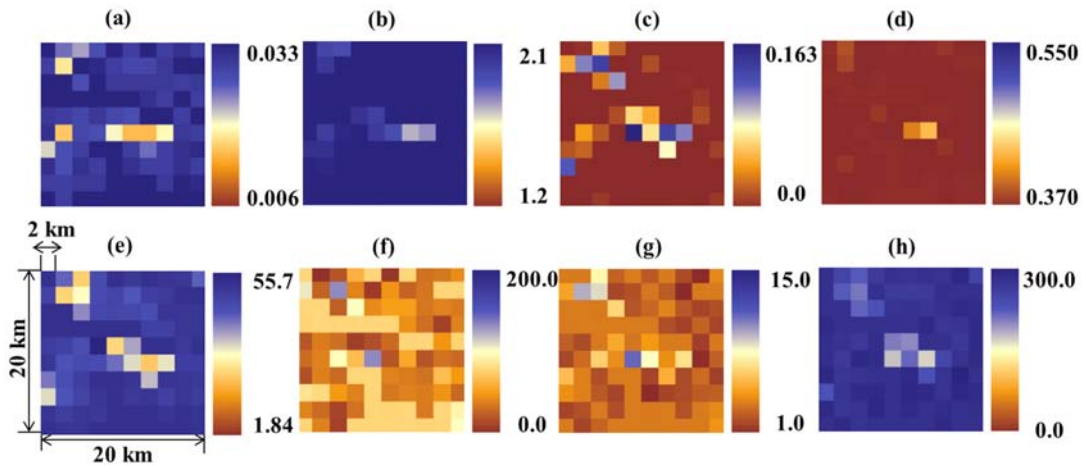


Fig. 5. Estimated soil and root parameters at the Chungmi-cheon site 1; (a-h) a , n , θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , Z^* , p_z , Z_{max} . a and n : the shape parameters [-]; $\theta_{res}/\theta_{sat}$: scaling parameter [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], and K_{sat} : saturated hydraulic conductivity [or mm/d-1]; Z^* and P_z : parameter values for various water uptake distribution under non stress conditions [-]; Z_{max} : maximum rooting depth [or cm]

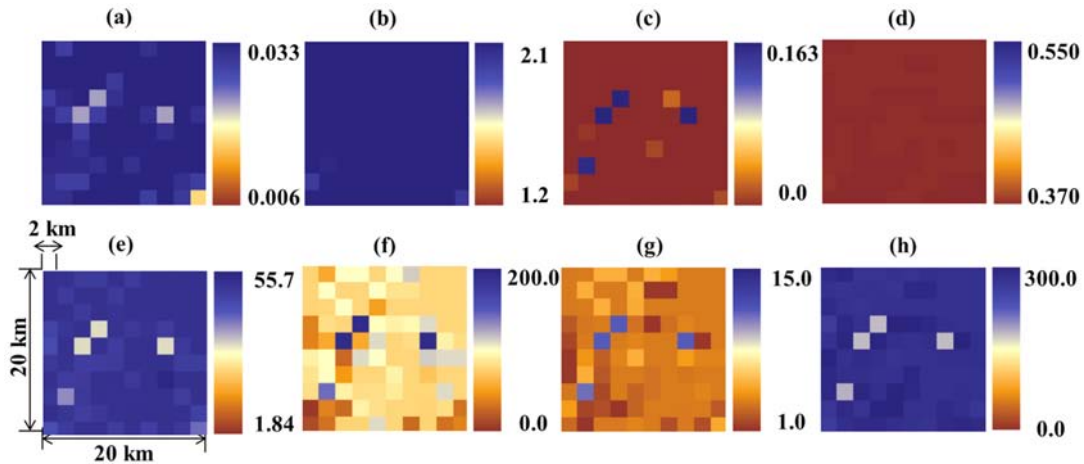


Fig. 6. Estimated soil and root parameters at the Chungmi-cheon site 2; (a-h) a , n , θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , Z^* , p_z , Z_{max} . a and n : the shape parameters [-]; $\theta_{res}/\theta_{sat}$: scaling parameter [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$], and K_{sat} : saturated hydraulic conductivity [or mm/d-1]; Z^* and P_z : parameter values for various water uptake distribution under non stress conditions [-]; Z_{max} : maximum rooting depth [or cm]

토양의 수리학적 및 작물 매개변수는 실측자료가 없기 때문에 검정이 불가능하나, Fig. 8의 LANDSAT 기반의 토양수분 분포와 비교하였을 때 도출된 매개변수 분포가 LANDSAT 기반의 토양수분과 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

Figs. 7-8은 Fig. 5와 Fig. 6에서 산정된 2 km × 2 km 해상도의 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 이용하여 Pixel (지점 1: 1, 2, 3, 4 및 지점 2: 31, 97, 99, 100)별 MODIS 및 모의 토양수분을 나타낸다. 청미천 지점1에서 3번 및 청미천 지점2에서 31번 Pixel의 경우 Pixel 3에서 DOY 100~110 사이 그리고 Pixel 31에서 DOY 90~100에서 MODIS 기반의 토양수분이 모의값과 큰 차이를 보였으나 전체적으로 MODIS 기반의 토양수분과 모의값이 일치하는 것으로 나타났다. 또한 청미천 지점1의 경우 Pixel 별로 강우 전·후로 토양수분의 증가/감소되는 속도의 변화가 상당히 높은 것으로 나타났으나 청미천 지점2의 경우 값의 차이가

상대적으로 크게 나타나지 않았다. 이는 경사지에 위치하고 있는 청미천 지점1에서 시간에 따른 토양수분의 이동이 상대적으로 평야지역인 청미천 지점2보다 빠르기 때문인 것으로 판단되었다. 청미천 지점1의 Pixel 1, 2, 3, 4와 청미천 지점2의 Pixel 31, 97, 99, 100을 제외한 Pixel의 토양수분은 본문에 포함하지 않았다.

3.2. Pixel-scale 가뭄평가

자료동화기법을 이용하여 청미천 지점이 위치하고 있는 MODIS 토양수분 이미지 자료로부터 도출된 토양의 수리학적 및 작물 매개변수와 기상청에서 제공하는 장기간의 기상자료를 이용하여 1973년부터 2014년까지의 토양수분을 산정하였다. Figs. 9-12는 1973년부터 2014년까지 청미천 지점1과 지점2에서 가장 많은 강우가 발생한 1990 (2313.3 mm)년과 가장 적은 강우가 발생한 2001 (884.9 mm)년의 3

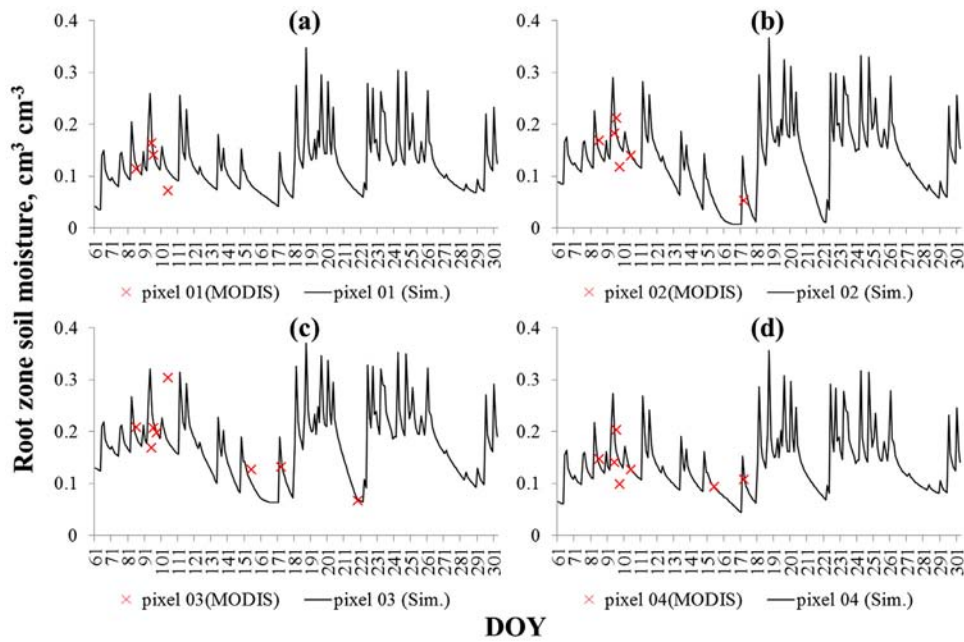


Fig. 7. Comparison of MODIS and estimated root zone soil moisture dynamics for the pixels 1, 2, 3, and 4 based on the estimated soil and root parameters at Chungmi-cheon site 1.

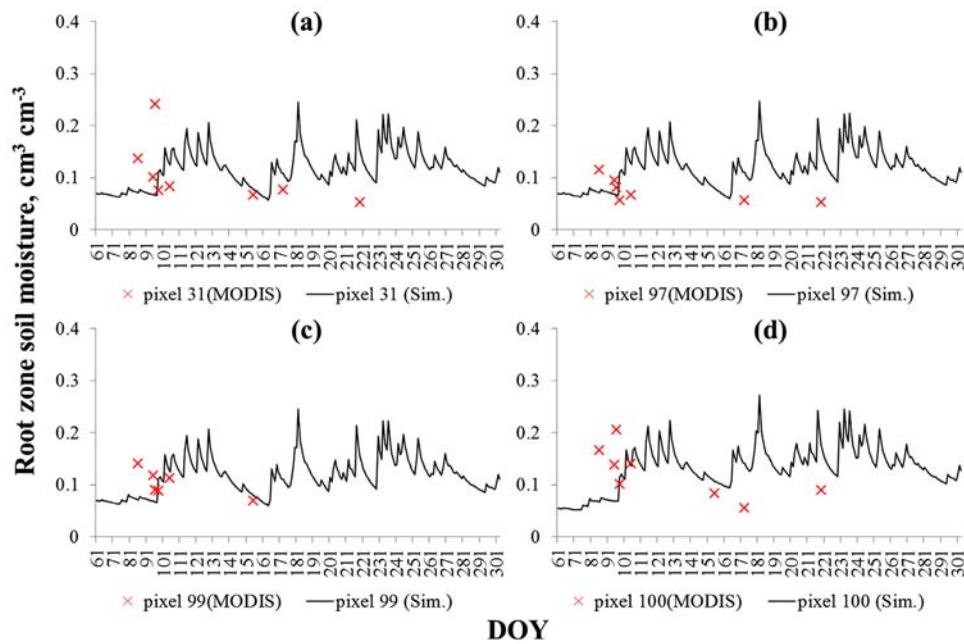


Fig. 8. Comparison of MODIS and estimated root zone soil moisture dynamics for the pixels 31, 97, 99, and 100 based on the estimated soil and root parameters at Chungmi-cheon site 2.

월부터 10월까지의 월별 가뭄지수(SMDI)를 나타낸다. 많은 강우가 발생한 1990년 3~9월에는 청미천 지점1과 지점2의 가뭄지수는 전체적으로 0~4의 값으로 나타났다. 그러나 10월에는 다소 가뭄의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 적은 강우가 발생한 2001년에는 3월부터 10월까지 가뭄지수가 0이하로 나타나며 극심한 가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 3~6월까지의 가뭄지수의 분포가 큰 차이를 보이지 않았으나, 7~10월의 경우 가뭄지수분포의 차이가 상당히 크게 나타났다. 봄 기간에는 온도가 높지 않기

때문에 강우량의 발생 유무에 지점들의 가뭄상태가 결정되는 것으로 판단된다. 그러나 고온이 지속되는 여름철의 경우 강우의 유무뿐만 아니라 지표의 특성(지형, 작물, 토양 특성, 증발산량, 등)에 따라라도 가뭄이 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 특히 이러한 특성은 적은 강우가 발생한 2001년도에 Figs. 10과 12를 1990년의 Figs. 9와 11과의 비교를 통하여 더욱 명확히 나타난다. 따라서 농업 및 산림의 가뭄을 평가하는데 있어서 강우 뿐만 아니라 지표의 특성이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

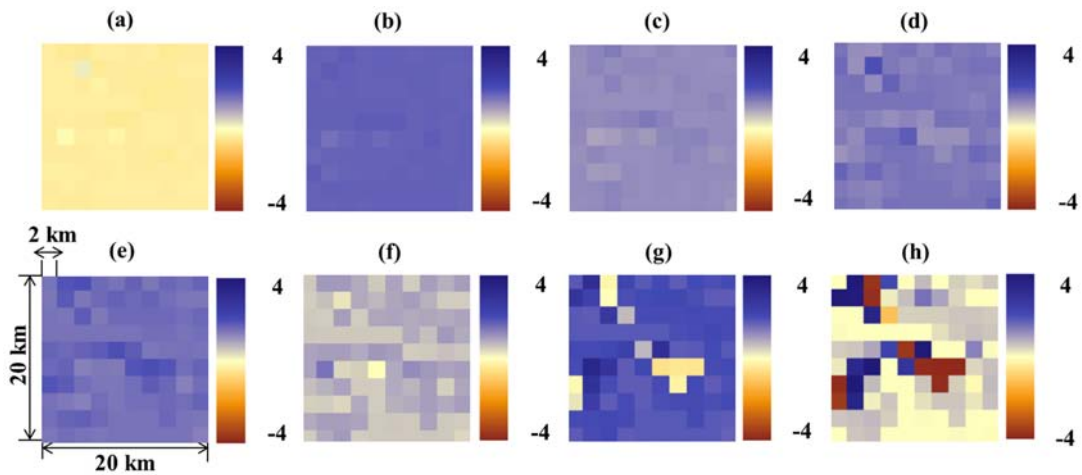


Fig. 9. Monthly soil moisture deficit index (SMDI) at Chungmi-cheon site 1 in 1990; (a-h) March to October.

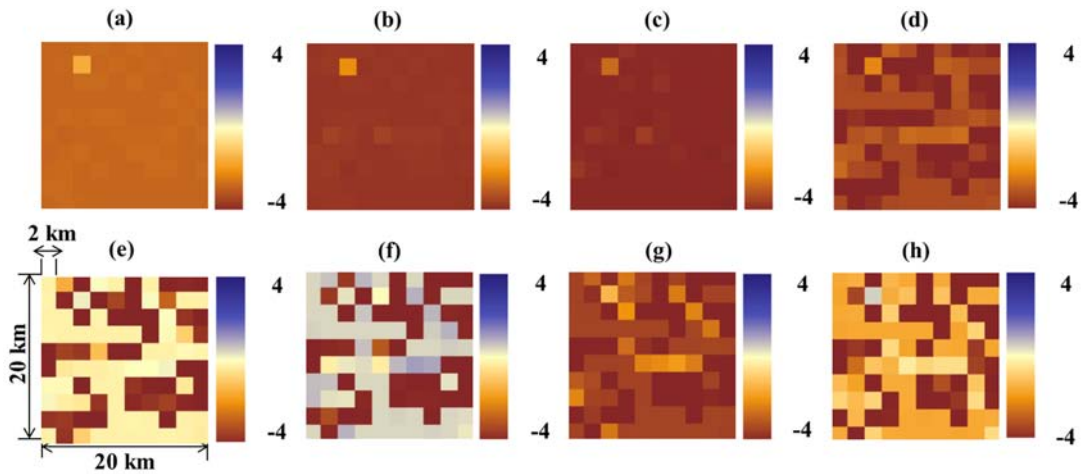


Fig. 10. Monthly soil moisture deficit index (SMDI) at Chungmi-cheon site 1 in 2001; (a-h) March to October.

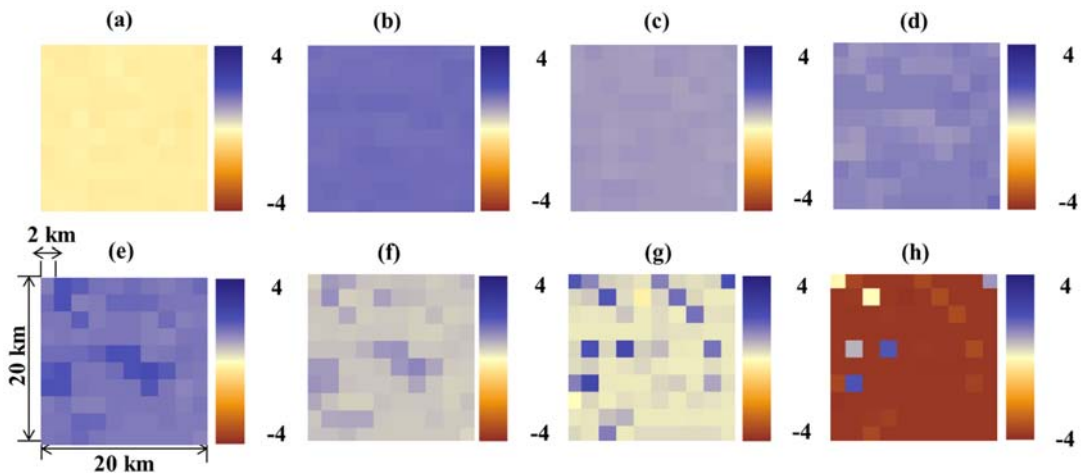


Fig. 11. Monthly soil moisture deficit index (SMDI) at Chungmi-cheon site 2 in 1990; (a-h) March to October.

Fig. 13과 Fig. 14는 청미천 지점1과 지점2의 강수, 토양 수분 및 가뭄지수(SMDI)를 나타낸다. 전체 모의기간동안 토양수분과 가뭄지수가 강우변동에 따라 변화하는 것으로 나타났다. Fig. 13(c)와 Fig. 14(c)의 SMDI 값의 변화에서 나타난 것처럼 가뭄지수는 1973년부터 약 1980년까지 감소

하는 경향을 보였으나 이후 1990년까지는 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 약 10년 전·후로 증가 및 감소하는 가뭄변동성은 2014년까지도 유사한 변동 특성을 보였다. 비록 42년 동안의 토양수분 모의 자료를 이용하였기 때문에 백년 단위의 긴 주기의 가뭄특성을 분석하지는 못

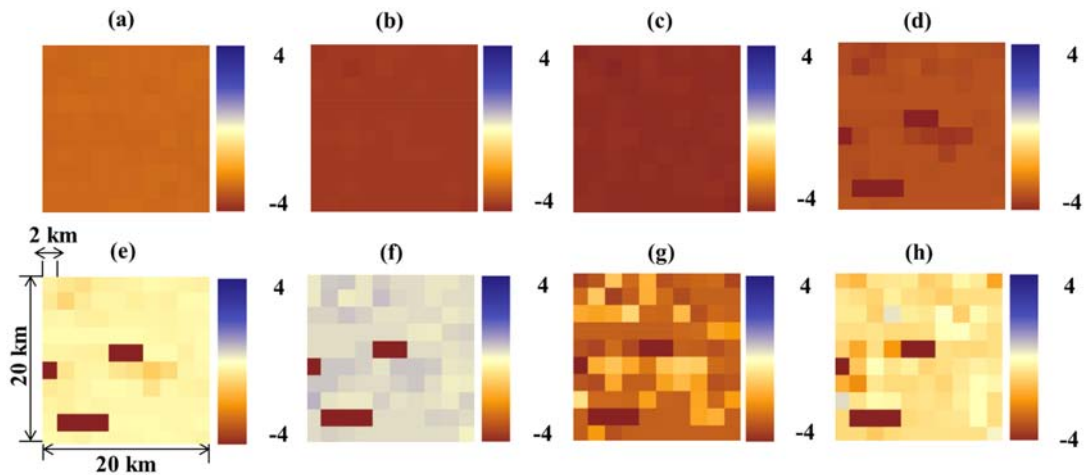


Fig. 12. Monthly soil moisture deficit index (SMDI) at Chungmi-cheon site 2 in 2001; (a-h) March to October.

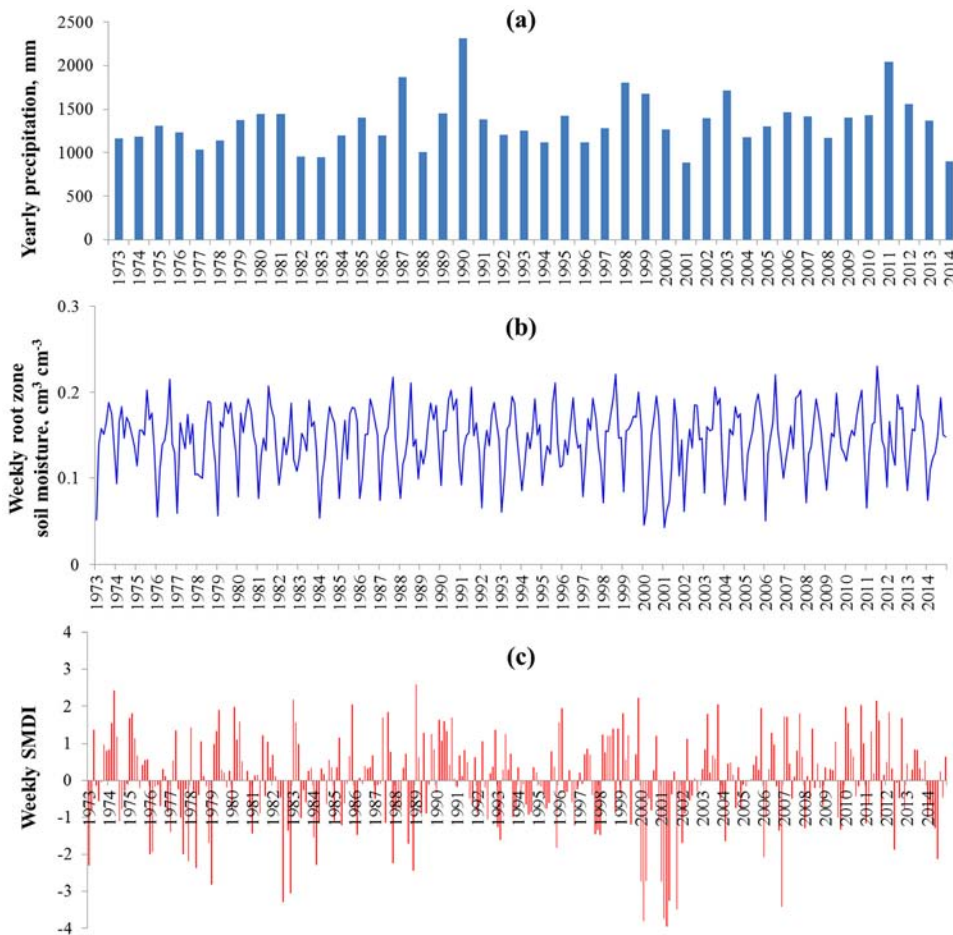


Fig. 13. Yearly precipitation and monthly root zone soil moisture/SMDI values from 1973 to 2014 (average of all pixels) at Chungmi-cheon site 1.

하였지만, 이러한 가뭄변동성/주기성이 과거와 유사하게 변화할 경우 2010~2011년을 전환점으로 가뭄의 영향이 증가할 것으로 판단된다. 2014~2015년 현재까지 우리나라의 가뭄이 심화되고 있는 것을 고려할 때 약 2020년까지 가뭄에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 15는 1973년부터 2014년까지 월별(3~10월) 토양수

분 및 가뭄지수(SMDI)의 통계치를 나타낸다. 전체적으로 청미천 지점 1과 지점2의 평균 토양수분과 가뭄지수의 통계치는 유사한 특성을 보였다. 2개 지점 모두 강수량이 적은 3월 봄가뭄이 매우 심한 것으로 나타났으나, 많은 강우가 발생하는 8월에 가뭄지수의 변동성이 가장 작으로 나타났다.

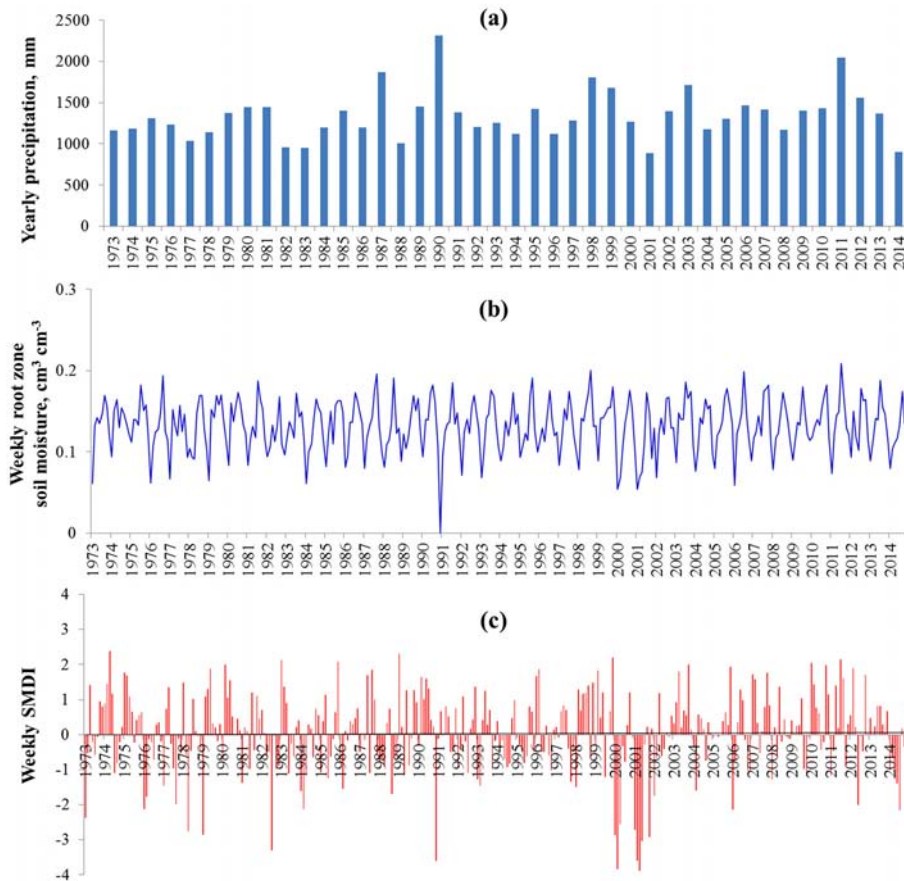


Fig. 14. Yearly precipitation and monthly root zone soil moisture/SMDI values from 1973 to 2014 (average of all pixels) at Chungmi-cheon site 2.

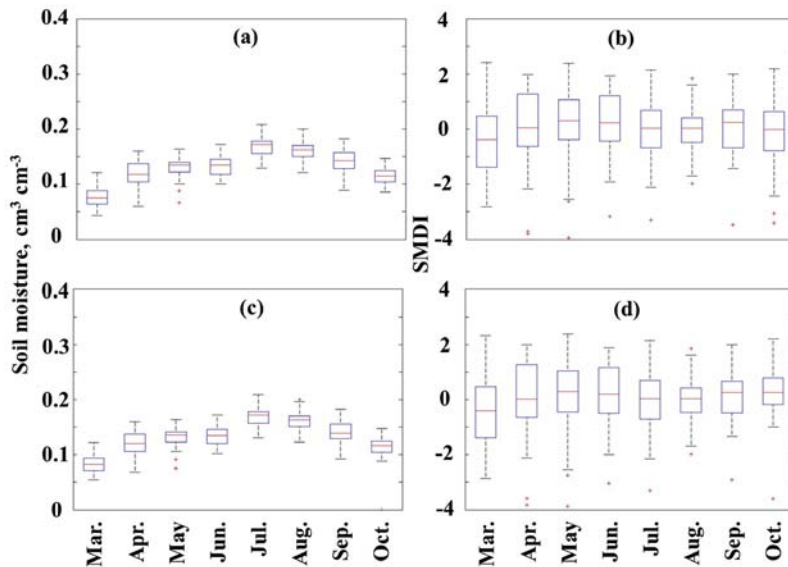


Fig. 15. Statistics of the monthly root zone soil moisture and SMDI values from 1973 to 2014; (a-b) at the Chungmi-cheon site 1 (c-d) at Chungmi-cheon site 2.

4. Conclusion

본 연구에서는 원격탐사 자료를 이용하여 토양수분산정 및 가뭄을 평가하였다. 가뭄평가를 위해서 인공위성(MODIS)

기반의 토양수분 이미지로부터 토양수분자료동화기법(Shin and Mohant, 2015)을 이용하여 토양의 수리학적($a, n, \theta_{res}, \theta_{sat}, K_{sat}$) 및 작물(z^*, p_z, z_{max}) 매개변수를 추출하였다. MODIS 기반 격자크기의 추출된 매개변수와 장기간(1973-2014)의

기상자료를 이용하여 시·공간적으로 분포되어 있는 토양수분을 산정하였다. 우리나라의 지형 및 지표특성을 나타낼 수 있는 공간해상도를 결정하기 위하여 고해상도의 LANDSAT (30 m × 30 m) 기반의 토양수분 이미지를 다양한 해상도로 변환하여 토양수분값이 $0.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 이하인 격자들의 비율을 산정하였으며, 약 2~3 km 이상의 해상도에서 모의값이 과대 및 과소 산정 되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 최소한의 불확실성을 고려 할 수 있는 2 km 해상도로 MODIS 자료의 해상도를 조정한 이후 자료동화기법을 이용하여 토양의 수리학적 및 작물 매개변수를 추출하였다. 청미천 지점1과 지점2에서 MODIS 토양수분 이미지로부터 추출된 매개변수의 공간적인 분포는 실측치가 없기 때문에 검증이 불가능하다. 따라서 LADNSAT 기반의 토양수분 이미지 자료하고 비교하였으며, 매개변수 기반의 산정된 토양수분 분포가 LANDSAT 기반의 이미지자료와 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 공간적으로 분포되어 있는 매개변수와 장기간(1973-2014)의 기상 자료를 이용하여 각 격자별로 일별 토양수분을 산정하고 가뭄(SMDI)을 평가하였다. 청미천 지점1과 지점2의 가뭄지수는 봄철에는 주로 강우의 유무에 의해 가뭄지수가 변화하였으나 여름철의 경우에는 공간적으로 분포되어 있는 가뭄지수의 변동이 강우뿐만 아니라 지표의 특성에 의해서도 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 농업 및 산림가뭄 평가시에는 강우뿐만 아니라 지형 및 지표특성이 고려되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 청미천 유역의 1973년부터 2014년까지의 강우 및 가뭄지수를 분석한 결과 가뭄의 주기가 변화하는 것으로 나타났다. 그러나 이용가능한 자료가 부족하여 약 42년간의 토양수분과 가뭄을 평가하였기 때문에 가뭄의 주기성을 명확히 분석하기 위해서는 우리나라의 역사 기록을 이용하여 좀 더 장기간의 가뭄의 주기에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 토양수분산정 및 가뭄평가 기법은 격자의 크기의 조정이 가능하며 또한 격자별 연속적인 시계열의 토양수분 및 가뭄지수를 산정 할 수 있다. 또한 미계측 유역에 적용시 예측가능한 불확실성 범위안에서 적용가능하다. 따라서 본 연구에서 제안한 기법은 수자원 및 가뭄 등의 평가를 위해 매우 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 APEC기후센터, 경북대학교 신입교수정착연구비 및 한국환경산업기술원 GAIA Project (No:2014000540003) “한국형 포도 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Bartsch, A., Balzter, H., and George, C. (2009). The Influence of Regional Surface Soil Moisture Anomalies on Forest Fires

- in Siberia Observed from Satellites, *Environmental Research Letters*, 4, 045021 (9pp) doi:10.1088/1748-9326/4/4/045021.
- 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.
- 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.
- 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.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, *In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim, CA, Boston, MA, 17-22, January, pp. 179-184.
- Narasimhan, B. and Srinivasan, R. (2005). Development and Evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for Agricultural Drought Monitoring, *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, pp. 69-88.
- Njoku, E. G., Jackson, T. L., Lakshmi, V., Chan, T., and Nghiem, S. V. (2003). Soil Moisture Retrieval from AMSR-E, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), pp. 215-229.
- Palmer, W. C. (1965). *Research Paper*, 45, U.S. Dept. of Commerce, pp. 58.
- Palmer, W. C. (1968). Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: the New Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21(4), pp. 156-161.
- 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*.
- Shin, Y. and Jung, Y. (2014). Development of Irrigation Water Management Model for Reducing Drought Severity Using Remotely Sensed Soil Moisture Footprints, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(7), pp. 1-11 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000736, 04014021.