



Assessment of Noah land surface model-based soil moisture using GRACE-observed TWSA and TWSC

Chun, Jong Ahn^a · Kim, Seon Tae^b · Lee, Woo-Seop^c · Kim, Daeha^{d*}

^aResearch Fellow, Climate Analytics Department, Climate Services and Research Division, APEC Climate Center, Busan, Korea

^bResearch Fellow, Climate Analytics Department, Climate Services and Research Division, APEC Climate Center, Busan, Korea

^cResearch Fellow, Climate Analytics Department, Climate Services and Research Division, APEC Climate Center, Busan, Korea

^dResearch Fellow, Climate Analytics Department, Climate Services and Research Division, APEC Climate Center, Busan, Korea

Paper number: 20-015

Received: 24 February 2020; Revised: 18 March 2020; Accepted: 18 March 2020

Abstract

The Noah 3.3 Land Surface Model (LSM) was used to estimate the global soil moisture in this study and these soil moisture datasets were assessed against satellite-based and reanalysis soil moisture products. The Noah 3.3 LSM simulated soil moistures in four soil layers and root-zone soil moistures defined as a depth-weighted average in the first three soil layers (i.e., up to 1.0 m deep). The Noah LSM soil moisture products were then compared with a satellite-based soil moisture dataset (European Space Agency Climate Change Initiatives (ESA CCI) SM v04.4) and reanalysis soil moisture datasets (ERA-interim). In addition, the five major basins (Yangtze, Mekong, Mississippi, Murray-Darling, Amazon) were selected for the assessment with the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)-based Total Water Storage Anomaly (TWSA) and TWS Change (TWSC). The results revealed that high anomaly correlations were found in most of the Asia-Pacific regions including East Asia, South Asia, Australia, and North and South America. While the anomaly correlations in the Murray-Darling basin were somewhat low, relatively higher anomaly correlations in the other basins were found. It is concluded that this study can be useful for the development of soil moisture based drought indices and subsequently can be helpful to reduce damages from drought by timely providing an efficacious strategy.

Keywords: Noah land surface model, Soil moisture, GRACE, TWSA, TWSC

GRACE 관측 TWSA와 TWSC를 활용한 Noah 지면모형기반 토양수분 평가

전종안^a · 김선태^b · 이우섭^c · 김대하^{d*}

^aAPEC 기후센터, 기후사업본부 기후분석과 선임연구원, ^bAPEC 기후센터, 기후사업본부 기후분석과 선임연구원

^cAPEC 기후센터, 기후사업본부 기후분석과 선임연구원, ^dAPEC 기후센터, 기후사업본부 기후분석과 선임연구원

요 지

이 연구에서는 Noah 3.3 지면모형을 이용하여 표층과 근역층(root-zone)의 토양함수비를 추정하고, 이를 위성기반 및 재분석 토양수분자료와 비교-검증하였다. 먼저, Noah 3.3 지면모형으로부터 추정된 4개 토양층 중 지면에 가까운 3개층(즉, 표층으로부터 1 m 깊이까지) 토양함수비를 이용하여 3개층의 깊이 가중평균값을 근역층 토양 함수비로 정의하였다. 이렇게 Noah 3.3 지면모형으로 추정한 토양함수비를 위성기반 표층 토양함수비(European Space Agency Climate Change Initiatives Soil Moisture Product v04.4, ESA CCI SM v04.4)와 ERA-interim 재분석 표층 및 근역층 토양함수비와 비교-검증하였다. 또한, 전지구의 주요 5개 유역(Yangtze, Mekong, Mississippi, Murray-Darling, Amazon)에 대해 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 관측 Total Water Storage Anomaly (TWSA) 와 TWS Change (TWSC)를 이용하여 비교-검증하였다. Noah 3.3 지면모형으로 산정한 토양수분 자료는 동아시아 지역과 남아시아 지역, 호주, 북미와 남미 등 대부분의 아시아태평양지역에서 높은 아노말리 상관관계를 보였으며, 5개 유역에서 호주의 머레이-달링(Murray-Darling)유역에서 다소 낮은 상관관계를 보였으나, 나머지 4개 유역에서는 대체로 높은 상관성을 보였다. Noah 3.3 지면모형은 현실시간 토양수분 모의가 가능하기 때문에 이에 기반한 가뭄감시가 가능하며, 선제적 가뭄 대응 대책 마련에 활용성이 클 것으로 기대된다.

핵심용어: Noah 지면모형, 토양수분, GRACE, TWSA, TWSC

*Corresponding Author. Tel: +82-51-745-3983

E-mail: d.kim@apcc21.org (D. Kim)

1. 서론

최근 이상기후는 그 강도와 빈도가 증가하고 있다(Perkins *et al.*, 2015). 이와 같이 갈수록 심각해지는 이상기후현상으로 인한 사회·경제적 피해를 줄이기 위한 노력의 일환으로 국제협력이 강조되고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 APEC 기후센터가 설립이 되었다(<https://www.apcc21.org>). APEC 기후센터는 고품질의 기후정보를 활용하여 아시아태평양지역(이하, 아태지역)의 이상기후를 감시하며, 사회·경제적 손실을 경감하고, 아태지역의 지속가능한 성장을 지원한다.

일반적으로 가뭄은 기상학적, 농업적, 수문학적, 사회·경제적 가뭄으로 구분되며(Dai, 2010; Dracup *et al.*, 1980), 반복적으로 발생하는 자연재해로써, 수문순환에 불균형을 초래하는 원인이 되기도 한다(Dai, 2011; Heim, 2002). 토양수분은 수문순환의 주요한 성분중의 하나이며, 토양으로부터 대기로 되먹임작용에 의해 기후시스템에 영향을 주는, 환경과 기후시스템에 중요한 요소 중의 하나이기도 하다. 특히, 근역층 토양수분은 식생에 의한 증산작용과 밀접한 관련이 있으며, 증산량을 제한하는 요소로써, 물과 에너지 순환 모두에 관련되어 있다. 이러한 이유로 표층의 토양수분뿐만 아니라 근역층(root-zone) 토양수분도 매우 중요한데, 표층과 근역층 토양수분 모두 Essential Climate Variable (ECV)로 World Meteorological Organization (WMO)에 의해 지정되어 있다(<https://public.wmo.int>). 따라서 토양수분은 위의 4개의 가뭄의 구분 중 농업적가뭄을 감시하는데 주로 사용되지만, 물과 에너지 순환에 모두 관련이 되어 있는 만큼, 수문학적 가뭄을 감시하는 데도 중요한 성분이다.

토양수분을 측정하기 위한 방법은 지점별로 측정하는 방법부터 위성기반의 전지구를 측정하는 방법까지 매우 다양하다(Tucker and Choudhury, 1987). 하지만 지점별 관측 네트워크는 매우 성긴 단점이 있고, 위성기반 토양수분자료는 토양표면으로부터 수 cm의 깊이까지 밖에 제공이 되지 못하여, 근역층의 토양수분을 제공하지 못한다. 예를 들어, European Space Agency Climate Change Initiatives (ESA CCI) Soil Moisture Product v04.4(이하, ESA CCI SM v04.4) 자료는 토양표면으로부터 수 mm에서 수 cm깊이의 토양함수비를 제공한다(Kuria *et al.*, 2007). 이러한 단점을 극복하고, 장기간의 토양수분 자료를 추정하기 위해 지면모형이 많이 이용된다(Balsamo *et al.*, 2009; Miralles *et al.*, 2011; Orth and Seneviratne, 2015; Davis *et al.*, 2017). 예를 들어, Cammalleri *et al.* (2016)은 Lisflood 모형(de Roo *et al.*, 2000)을 사용하여 유럽지역에 대해 18년 기간(1995-2012)의 토양함수비를 5 km 격자크기

로 생산한 바 있다. Xia *et al.* (2016)은 미전역에 대해 토양수분을 포함한 유출량, 증발산량 등 다양한 수문성분에 대해 Noah, SAC, VIC, Mosaic의 4개 지면모형의 성능을 평가한 바 있다.

따라서 이 연구의 목적은 Noah 3.3 지면모형을 이용하여 표층과 근역층(root-zone)의 토양함수비를 추정하고 위성기반 토양수분자료와 재분석 토양수분자료를 활용하여 Noah 3.3 지면모형으로 추정한 표층과 근역층 토양함수비를 비교·검증하는 데 있다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 자료수집

2.1.1 Noah 지면모형 입력자료

지면모형(Land Surface Model, LSM)을 이용하여, 토층별 토양수분을 모의하고 이를 이용하여 근역층(root-zone) 토양함수비를 추정하였다. 이번 연구에서는 NASA's Goddard Space Flight Center의 Hydrological Sciences Laboratory가 주도적으로 개발에 참여한 Land Information System (LIS)을 사용하였다. LIS시스템은 위성과 지상 기반 관측자료와 여러 모델링 기법을 통합하여 지표면 상태나 플럭스를 최적화하여 모의할 수 있는 소프트웨어 프레임워크(Software framework)(Kumar *et al.*, 2006)이다. LIS 시스템은 GitHub LIS framework (LISF) web-page (<https://github.com/NASA-LIS/LISF/>)에서 내려받기 한 7.2버전을 사용하였다. LIS 7.2에서는 CLSF f2.5, MOSAIC, Noah 3.3, RUC 3.7 등 총 18개의 지면모형이 포함되어 있으며, 이번 연구에서는 Noah 3.3 지면모형을 사용하였다. LIS 시스템을 이용하면, LIS에 포함되어 있는 18개 지면모형을 최대 1 km 공간해상도와 15분 시간간격으로 모의할 수 있다(GSFC, 2017).

Noah 3.3 지면모형 구동을 위해 기상자료뿐만 아니라 토양, 지형, 식생 등의 입력자료가 필요하다. 이번 연구에서 사용한 기상자료는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Data Assimilation System (GDAS) near-realtime analysis (이하, GDAS 준실시간 자료) 자료로써, National Aeronautics and Space Administration (NASA) Center for Climate Simulation (NCCS) dataportal (<https://portal.nccs.nasa.gov>)에서 내려받기 하여 사용하였다(Rodell *et al.*, 2004). GDAS자료는 준실시간자료로써, 6-hourly 대기온도, 비습, 일사량, 표면 대기압, 풍속, 강수 등 총 9개의 기상 변수를 입력 기상자료로 사용하였으며, Table 1에 제시하였다. GDAS의 기상변수는 2중 선형보간법(bilinear interpolation)을 사용하

Table 1. Meteorological variables used in this study

Standard name (Short name)	Units
Near surface air temperature (Tair)	K
Near surface specific humidity (Qair)	kg kg ⁻¹
Incident shortwave radiation (total) (Swdown)	W m ⁻²
Incident longwave radiation (Lwdown)	W m ⁻²
Eastward wind (Wind_E)	m s ⁻¹
Northward wind (Wind_N)	m s ⁻¹
Surface pressure (Psurf)	Pa
Rainfall rate (Rainf)	kg m ⁻²
Convective rainfall rate (Crainf)	kg m ⁻²

Table 2. Input parameters (soil, topographic, vegetative parameters) used in this study

Input	Data source	Source
Landcover	AVHRR	http://glcf.umd.edu/data/landcover/
Landmask	AVHRR	http://www.geog.umd.edu/landcover/1km-map.html
Soil texture	STATSGOFAO	http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/lsm.php
Elevation	SRTM_Native	http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version21/SRTM30
Slope type	NCEP	Zobler (1986)
Albedo	NCEP	Csiszar and Gutman (1999)
Max snow albedo	NCEP	Robinson and Kukla (1985)
Greenness	NCEP	Gutman and Ignatov (1997)
Bottom temperature	NCEP	http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/lsm/sfc_fields/TBOT/READ_ME

여 Noah 3.3 지면모형의 격자 크기인 1°×1°로 격자 크기로 조정하였으며, lapse-rate을 이용하여 고도 보정하였다. 이외에도 Noah 3.3 지면모형 구동을 위해서 사용한 토양, 지형, 식생 등의 자료와 출처를 Table 2에 요약하여 제시하였다.

2.1.2 토양수분자료

위성 기반 토양수분자료와 재분석 토양수분 자료를 활용하여 Noah 3.3 지면모형으로 생산한 토양수분을 검증하였다. 이번 연구에서 수집한 위성 기반 토양수분은 ESA CCI SM v04.4로써, ESA CCI 홈페이지(<https://www.esa-soilmoisture-cci.org/>)에서 내려받기가 가능하다. ESA CCI 토양수분자료는 Active 센서자료 및 Passive 센서자료와 이 두 개의 자료를 통합한 Combined 자료의 3종류 자료로 나누어지며, 매년 업데이트되고 있다. 이번 연구에서는 자료기간이 가장 긴 Combined 자료를 사용하였으며, 자료기간은 1978년 11월부터 2018년 6월까지 일별 자료이고, 해상도는 0.25°×0.25°이다. 이렇게 수집한 일별 자료를 월별로 변환하여 사용하였다. Active 센서자료와 Passive 센서자료를 통합하는 방법에 대해서는 Gruber

et al. (2019)에 자세히 설명되어 있다. ESA CCI 토양수분자료와 같은 위성 기반 토양수분자료는 표층자료로 국한되어 있으므로, Noah 3.3 지면모형으로 생산한 표층 토양수분 자료를 비교·검증하는 데 사용되었다.

근역층(root-zone) 토양수분 자료는 수문순환에서 증산에 직접적으로 관여하는 층으로써, 표층 토양수분과 함께 ECV에 지정이 되어있는 중요한 자료이다. 위성기반 토양수분 자료에서는 근역층 자료를 얻을 수 없으므로, 이번 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-interim (<https://www.ecmwf.int/>) 토양수분 재분석자료를 사용하여 표층 뿐만 아니라 근역층 토양수분 자료를 비교·검증하였다. ECMWF ERA-interim 토양수분 재분석자료는 0.75°×0.75°의 해상도로 1979년부터 자료를 내려받기 할 수 있다. ECMWF ERA-interim 토양수분 재분석 자료는 총 4개층(표층부터 각각의 두께는 0.07, 0.21, 0.72, 1.89 m이다.)으로 이루어져 있다. 이러한 4개층의 토양수분 자료는 Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land (HTESSEL) 지면모형을 이용하여 생산하는데,

HTESSEL에 대한 자세한 정보는 Balsamo *et al.* (2009)에 제시되어 있다. 표층은 0.07 m로, Noah 3.3 지면모형의 0.1 m와 다소의 차이가 있다. 이러한 표층의 두께의 차이는 ECMWF ERA-interim과 Noah 3.3 지면모형에 의한 표층 토양수분의 차이의 원인이 될 수 있다. 하지만, 이번 연구에서 정의한 근역층(말하자면, 표층으로부터 1.0 m까지의 깊이)은 표층으로부터 3개층까지이므로, 근역층에 대해서는 근역층의 두께에 따른 차이가 발생할 소지가 없다.

위와 같이 표층과 근역층의 토양수분을 직접비교하는 방법 이외에도 토양수분은 Total Water Storage (TWS)를 구성하는 주요한 성분이므로, TWS를 활용하여 Noah 3.3 지면모형의 토양수분 자료를 검증하였다. 월별 TWS는 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Tellus 웹사이트(ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/land_mass/RL05/netcdf/)에서 수집하였다. 2002년에 발사한 쌍둥이 위성으로 구성되어 있는 GRACE는 지구의 중력장을 정확하게 측정하여 TWS Anomaly (TWSA)를 추정한다. Landerer and Swenson (2012)에 GRACE에 대한 상세한 설명이 제시되어 있다. 이번 연구에서는 Center for Space Research (CSR), Jet Propulsion Laboratory (JPL), and GeoForschungsZentrum (GFZ)의 3개 기관에서 생산한 TWS Anomaly (이하, TWSA)를 수집하였다.

2.2 토양수분산정 및 Total Water Storage 활용 검증방법

이번 연구에서 토양수분을 모의하기 위해 사용한 Noah 3.3 지면모형(Ek *et al.*, 2003)은 표층으로부터 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 m 깊이(즉, 각각 0.1, 0.4, 0.6, 1.0 m 두께)의 4개층의 토양수분을 모의할 수 있다. 실제 근역층의 두께는 식생피복에 따라 달라질 수 있는데, 일반적으로 식생의 키가 클수록 근역층의 깊이는 더 깊어진다. 하지만 전지구에 대해 이러한 식생 및 근역층 두께의 자료수집에는 한계가 있어서, 이번 연구에서는 표층으로부터 1.0 m까지를 근역층으로 정의하였으며, 깊이가 중평균값을 근역층의 토양수분으로 정의하였다. 이를 수식으로 표현한 근역층의 토양함수비(θ_r)는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\theta_r = \frac{\sum_i^n d_i \theta_i}{\sum_i^n d_i} \quad (1)$$

여기서, n 은 토층개수이며 이번 연구에서는 $n=3$ (따라서 $i=1, 2, 3$)이다. d_i 는 i 토층의 두께(m)이며, θ_i 는 i 토층의 토양함수

비($m^3 m^{-3}$)이다.

일반적으로 TWS에 포함되는 성분으로는 total column soil moisture, snow water equivalent, canopy water storage, groundwater, explicit reservoir storage이지만, Noah 3.3 지면모형에서는 지하수유출을 모의하지 않고, 호수는 고려되지 않는다. 따라서 이번 연구에서는 지하수유출과 호수 성분은 Noah 3.3 지면모형으로 산정한 TWS에 포함되지 않았다. 따라서 Noah 3.3 지면모형에 의한 TWS 산정 값은 지하수유출이나 호수에 대한 제한으로 오차에 대한 원인이 될 수 있음을 유의해야 한다. GRACE 관측 TWSA는 CSR, JPL, GFZ의 3개 기관에서 생산한 TWSA를 산술평균한 값을 사용하였으며, Noah 3.3 지면모형에 의한 TWSA는 total column soil moisture, snow water equivalent, canopy water storage의 3개 성분의 합으로 구하였다. GRACE 관측 TWSA는 Eq. (2)와 같이 중앙차분법(Centered difference approximation)을 사용하여 산정하였다. 일반적으로 중앙차분법은 전방차분법(Forward difference approximation)보다 noise를 효과적으로 줄일 수 있다고 알려져 있다(Long *et al.*, 2014). Noah 3.3 지면모형에 의한 TWSA는 물수지방정식(Eq. (3))을 이용하여 구하였다.

$$GRACE\ TWSA = \frac{TWSA(t+1) - TWSA(t-1)}{2} \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - ET \quad (3)$$

일반적으로 토양수분의 경우 관측 네트워크가 매우 성기고, 전지구 격자형 자료와 직접 비교하기에는 적합하지 않다. 따라서 이번 연구에서는 위성기반 및 재분석자료의 토양수분자료와 Noah 3.3 지면모형에 의한 토양수분을 직접 비교하였으며, 추가적으로 전지구 주요 유역에 대해 TWSA와 TWSA를 비교하여 검증하였다. WMO에서 선정한 도메인을 기준으로 아태지역에서 주요 5개 유역(Basin)을 선정하였다(Fig. 1). 동아시아($15-60^\circ N$, $75-150^\circ E$) 도메인에서는 양쯔강(Yangtze)유역을 선택하였으며, 남아시아($10^\circ S-35^\circ N$, $60-140^\circ E$) 도메인에는 메콩강(Mekong)유역을 선택하였다. 호주($50^\circ S-0^\circ$, $110-180^\circ E$) 도메인에는 머레이-달링(Murray-Darling)유역을 선택하였고, 북아메리카($10-75^\circ N$, $190-310^\circ E$) 도메인에는 미시시피강(Mississippi)유역을 선택하였으며, 남아메리카($60^\circ S-10^\circ N$, $270-330^\circ E$) 도메인에는 아마존강(Amazon)유역을 각각 선택하였다.

먼저, 격자형 자료인 ESA CCI SM v04.4와 ECMWF ERA-interim의 토양수분자료는 Noah 3.3 지면모형에 의한 토양수

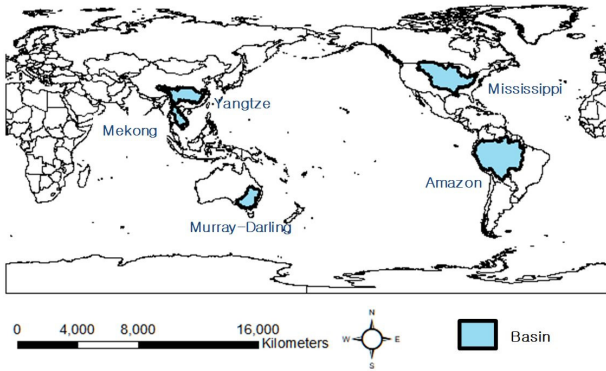


Fig. 1. Selected five basins in this study

본 자료와 2000-2018기간에 대해 월별 Anomaly Correlation (AC)를 구하여 비교하였다. ESA CCI SM v04.4 자료는 Noah 3.3 지면모형에 의한 표층(0~0.1 m 깊이)의 토양수분 AC를 구하였고, ECMWF ERA-interim 토양수분자료는 표층과 지표면으로부터 1 m까지의 3개층을 깊이 가중 평균 토양수분 값을 근역층 토양수분으로 구한 다음 Noah 3.3 지면모형에 의한 표층과 근역층의 토양수분을 각각 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 위성기반 및 재분석 토양수분자료 활용 검증

ESA CCI SM v04.4의 위성기반 표층 토양수분의 아노말리(2000-2018 자료기간의 월별 토양수분 평균과 각 월의 토양수분의 차)와 Noah 3.3 지면모형으로 추정된 전지구 표층 토양수분 아노말리를 비교하였으며, 각 격자별 상관계수를 Fig. 2에 도시하였다. 동아시아, 호주, 미주 등을 포함하는 대부분의 아-태 지역에서 비교적 높은 양의 상관관계를 보였으나, 시베리아 북부와 캐나다 북부 등의 일부 지역에서는 비교적 낮은 양의 상관계수 값을 보였다. ERA-interim (Fig. 3(a))의 표층 토양수분과의 비교한 결과에서도 시베리아 북부 등 유라시아, 캐나다 북부 등 표층에서 상관계수가 비교적 낮았고, 이를 제외한 대부분의 아-태 지역에서 비교적 높은 양의 상관계수의 값을 보이는 등, 전반적으로 ESA CCI SM v04.4의 비교 결과와 유사하게 나타났다. 한편, 근역층에서 토양수분 아노말리에 대한 비교결과(Fig. 3(b))도 표층 토양수분 아노말리와 비교한 결과와 유사하였다. 이러한 결과를 바탕으로, Noah 3.3 지면모형에 의해 추정된 토양수분이 동아시아 지역과 남아시아 지역, 호주와 미국 등 대부분의 아-태 지역에서 적용성이 비교적 클 것으로 판단된다. 다만, 근역층의 경우 몽

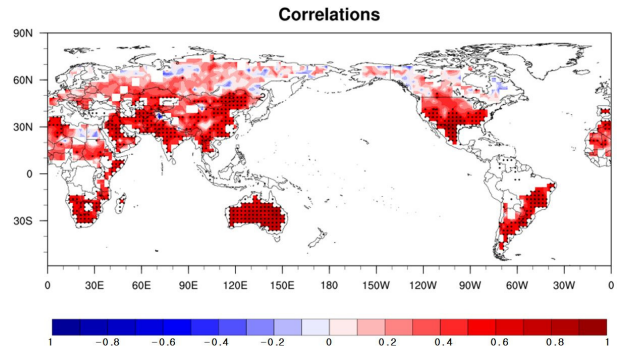


Fig. 2. Anomaly correlation coefficients of the ESA CCI and the Noah LSM-simulated soil moistures at the top soil layer

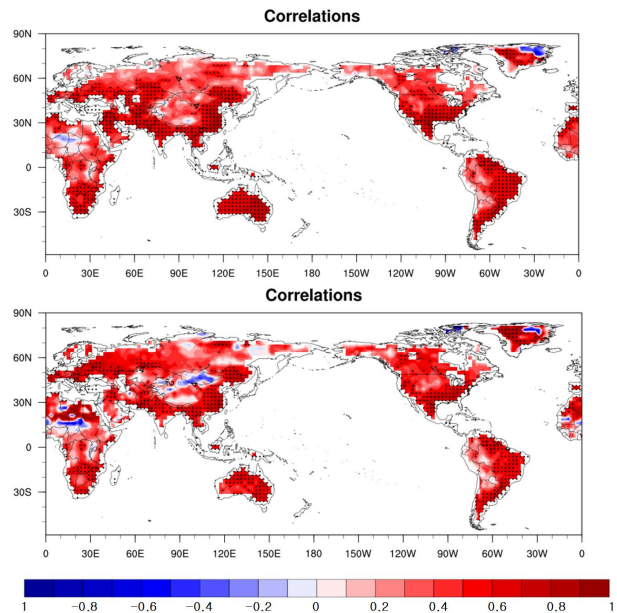


Fig. 3. Anomaly correlation coefficients of the ECMWF ERA-interim and the Noah LSM-simulated soil moistures at the top soil layer (a) and the root-zone soil layer (b)

고지역에서 음의 상관관계를 보이거나, 유라시아와 캐나다 북부 등의 비교적 낮은 상관관계를 나타내는 지역에서 다중모델 앙상블 기법이나, 자료동화기법 등을 활용하여 지면모형에 의한 토양수분을 개선하기 위한 연구가 필요해 보인다.

3.2 GRACE TWS 활용 검증

Noah 3.3 지면모형으로 모의한 토양수분자료를 기반으로 이번 연구에서 선정한 5개 유역(Yangtze, Mekong, Mississippi, Murray-Darling, Amazon)의 TWSA와 TWSC를 산정하였다. 이렇게 산정한 유역별 TWSA와 TWSC를 유역별 GRACE 관측 TWSA와 이로부터 산정한 유역별 TWSC와 비교하였으

Table 3. Anomaly correlations of the GRACE-observed and the Noah LSM-simulated TWSAs and TWSCs for the five selected basins

The five selected basins	TWSA	TWSC
Yangtze	0.70	0.56
Mekong	0.79	0.72
Mississippi	0.80	0.70
Murray-Darling	0.54	0.53
Amazon	0.83	0.79

며, 유역별 아노말리 상관계수를 Table 3에 요약하여 제시하였다. GRACE의 총 자료기간은 12년(2003-2014)이고, 기후값(climatology)은 2004-2009 평균값으로 제공된다. 따라서 이번 연구에서 GRACE 관측 TWSA와 TWSC와 Noah 3.3 지면모형에 의한 TWSA와 TWSC를 비교하기 위해, GRACE와 동일한 자료기간에 대해 2004-2009의 격자별 월평균값에 대한 차를 아노말리로 구하였다.

TWSA의 경우, 아마존유역에서 아노말리 상관계수가 0.83로써 가장 높았으나, 머레이-달링유역의 아노말리 상관계수는 0.54로 가장 낮은 값을 보였다. 전체적으로 유역별 TWSA의 경우는 머레이-달링유역을 제외하고는 0.7이상의 상당히 높은 상관계수를 보였다. 유역별 TWSC도 유역별 TWSA와 상당히 유사한 결과를 보였는데, 가장 낮은 아노말리 상관계수는 머레이-달링유역(0.53)에서 나타났고, 아마존유역이 0.79로 가장 높은 상관계수 값을 보였다. Xia *et al.* (2016)이 Noah 지면모형을 사용하여 미국 전역을 12개 National Weather Service (NWS) River Forecast Centers (RFCs) 지역으로 나누어 GRACE 관측 TWSA와 TWSC와 비교하였는데, 이번 연구와 비교하기 위해 미주지역의 대표유역으로 선정된 미시시피유역의 결과와 비교하였다. 이를 위해 12개 RFC 중 미시시피유역을 포함하는 MBRFC, ABRFC, NCRFC, LMRFC, OHRFC의 5개 RFC를 선별하여 아노말리 상관계수의 평균과 비교하였다. Xia *et al.* (2016)의 연구결과에서 5개 RFC의 TWSA의 아노말리 상관계수는 0.83-0.90의 범위를 보였으며 평균은 0.85로 이번 연구 결과와 거의 동일하였다. 또한, 5개 RFC의 TWSC 아노말리 상관계수의 평균은 0.70(범위: 0.65-0.77)의 값을 보여, 이번 연구의 아노말리 상관계수의 값(0.70)과 거의 일치하였다. 다만, Xia *et al.* (2016)은 5개 RFC이외에서 TWSA 아노말리 상관계수가 최소값 0.75와 최대값 0.92로 이번 연구의 아노말리 상관계수 값 보다 다소 높았으며, TWSC의 경우에는 최소값이 0.47과 최대값이 0.86으로 이번 연구의 TWSC 아노말리 상관계수 값과 대체로 유사한 값을 보였다. 이와 같이 각 유역별로 TWSA와 TWSC 아노

말리 상관계수가 다르게 나타나므로, 좀더 정확한 토양수분을 모의하기 위해서는 각 유역의 지형학적 특성과 기후 특성 차이가 토양수분이나 주요한 수문성분에 대한 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

이번 연구에서는 Noah 3.3 지면모형을 이용하여 전지구에 대하여 표층과 근역층의 토양수분을 추정하였으며, ESA CCI SM v04.4의 위성기반 표층 토양수분과 GRACE의 TWSA와 TWSC를 활용하여 추정한 토양수분을 비교·검증하였다. 이번 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) Noah 3.3 지면모형으로 산정한 토양수분의 경우, 위성기반 및 재분석 토양수분자료와 직접비교에서 동아시아 지역과 남아시아 지역, 호주, 북미와 남미 등 대부분의 아태 지역에서 높은 상관관계를 보였다.
- 2) 5개 유역에서 Noah 3.3 지면모형으로 산정한 TWSA와 TWSC는 GRACE 관측 TWSA와 TWSC와의 비교에서 머레이-달링유역에서 다소 낮은 상관관계를 보였으나, 나머지 유역에서는 대체로 높은 상관관계를 보였다.
- 3) 각 유역별 상관관계가 다르게 나타나거나 지역별 아노말리 상관관계가 상이한 결과를 바탕으로 상관관계가 다소 낮은 지역에 대해, 다중모형앙상블기법이나 자료동화기법과 같은 개선 방안에 대한 후속 연구가 필요해 보인다.
- 4) 토양수분은 주요한 수문성분 중의 하나이므로 농업적 가뭄 뿐 만 아니라 수문학적 가뭄해석에도 이번 연구의 활용성이 매우 클 것으로 기대된다.

이 연구를 바탕으로 토양수분자료에 기반한 가뭄지수는 전 세계 가뭄 감시에 활용할 수 있다. 따라서 이 연구결과는 시의 적절한 가뭄감시를 통해 가뭄의 피해를 줄이기 위한 대책을 마련하는 등 다양한 분야에서 활용성이 클 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 APEC 기후센터의 지원에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Balsamo, G., Beljaars, A., Scipal, K., Viterbo, P., Van den Hurk, B.J.J.M., Hirschi, M., and Betts, A.K. (2009). "A revised hydrology for the ECMWF model: Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the integrated forecast system." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 10, No. 3, pp. 623-643.
- Cammalleri, C., Micale, F., and Vogt, J. (2016). "A novel soil moisture-based Drought Severity Index (DSI) combining water deficit magnitude and frequency." *Hydrological Processes*, Vol. 30, pp. 289-301.
- Csiszar, I., and Gutman, G. (1999). "Mapping global land surface albedo from NOAA AVHRR." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. D6, pp. 6215-6228.
- Dai, A. (2010). "Drought under global warming: A review." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 2, pp. 45-65.
- Dai, A. (2011). "Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, D12115.
- Davis, T.W., Prentice, I.C., Stocker, B.D., Thomas, R.T., Whitley, R.J., Wang, H., Evans, B.J., Gallego-Sala, A.V., Sykes, M.T., and Cramer, W. (2017). "Simple processed algorithms for simulating habitats (splash v.1.0): Robust indices of radiation, evapotranspiration and plant-available moisture." *Geoscientific Model Development*, Vol. 10, pp. 689-708.
- de Roo, A.P.J., Wesseling, C., and van Deussen, W. (2000). "Physically based river basin modelling within a GIS: The LISFLOOD model." *Hydrological Processes*, Vol. 14, pp. 1981-1992.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson Jr., E.G. (1980). "On the definitions of droughts." *Water Resources Research*, Vol. 16 No. 2, pp. 297-302.
- Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grummann, 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*, Vol. 108, p. 8851.
- Gruber, A., Scanlon, T., van der Schalie, R., Wanger, W., and Dorigo, W. (2019). "Evolution of the ESA CCI soil moisture climate data records and their underlying merging methodology." *Earth System Science Data*, Vol. 11, pp. 717-739.
- Gutman, G., and Ignatov, A. (1997). "The derivation of green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 8, pp. 1533-1543.
- Heim, R.R.Jr. (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, pp. 1149-1165.
- Kumar, S.V., Peters-Lidard, C.D., Tian, Y., Houser, P.R., Geiger, J., Olden, S., Lighty, L., Eastman, J.L., Doty, B., Dirmeyer, P., Adams, J., Mitchell, K., Wood, E.F., and Sheffield, J. (2006). "Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling." *Environmental Modelling and Software*, Vol. 21, pp. 1402-1415.
- Kuria, D.N., Koike, T., Hui, L., Tsutsui, H., and Graf, T. (2007). "Field-supported verification and improvement of a passive microwave surface emission model for rough, bare, and wet soil surfaces by incorporating shadowing effects." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 5, pp. 1207-1216.
- Landerer, F.W., and Swenson, S.C. (2012). "Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates." *Water Resources Research*, Vol. 48, W04531.
- Long, D., Longuevergne, L., and Scanlon, B.R. (2014). "Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites." *Water Resources Research*, Vol. 50, pp. 1131-1151.
- Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., de Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., and Dolman, A.J. (2011). "Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 453-469.
- NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) (2017). Land Information System (LIS) LIS 7.2 Users' Guide, accessed 11 January 2020, <<https://modelingguru.nasa.gov/docs/DOC-2634>>.
- Orth, R., and Seneviratne, S.I. (2015). "Introduction of a simple-model-based land surface dataset for Europe." *Environmental Research Letter*, Vol. 10, 044012.
- Perkins, S.E., Argueso, D., and White, C.J. (2015). "Relationships between climate variability, soil moisture, and Australian heatwaves." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 120, pp. 8144-8164.
- Robinson, D.A., and Kukla, G. (1985). "Maximum surface albedo of seasonally snow-covered lands in the northern hemisphere." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 24, No. 5, pp. 402-411.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., and Toll, D. (2004). "The global land data assimilation system." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 85, No. 3, pp. 381-394.
- Tucker, J.J., and Choudhury, B.J. (1987). "Satellite remote sensing of drought conditions." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 23, pp. 243-251.
- Xia, Y., Cosgrove, B.A., Mitchell, K.E., Peters-Lidard, C.D., Ek, M.B., Kumar, S., Mocko, D., and Wei, H. (2016). "Basin-scale assessment of the land surface energy budget in the National Centers for Environmental Prediction operational and research NLDAS-2 systems." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 121, pp. 196-220.
- Zobler, L. (1986). *A world soil file for global climate modeling*. NASA Technical Memorandum #87802, NASA Goddard Institute for Space Studies, N.Y., U.S.