



Evaluation of near-realtime weekly root-zone Soil Moisture Index (SMI) for the extreme climate monitoring web-service across East Asia

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

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

^bResearcher, 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

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

Paper number: 20-027

Received: 24 March 2020; Revised: 6 April 2020; Accepted: 6 April 2020

Abstract

An extreme climate monitoring is essential to the reduction of socioeconomic damages from extreme events. The objective of this study was to produce the near-realtime weekly root-zone Soil Moisture Index (SMI) on the basis of soil moisture using the Noah 3.3 Land Surface Model (LSM) for potentially monitoring extreme drought events. The Yangtze basin was selected to evaluate the Noah LSM performance for the East Asia region (15-60°N, 70-150°E) and the evapotranspiration (ET) and sensible heat flux (SH) were compared with ET and SH from FluxNet and with ET from FluxCom, Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM), ERA-5, and Generalized Complementary Relationship (GCR). For the ET, the coefficients of determination (R^2) were higher than 0.96, while the R^2 value for the SH was 0.71 with slightly lower than those. A time series of the weekly root-zone SMI revealed that the regions with Extreme drought had been expanded from the northern part of East China to the entire East China between July to October 2019. The trend analysis of the number of extreme drought events showed that extreme drought events in spring had reduced in South Korea over the past 20 years, while those in fall had a tendency to increase. It is concluded that this study can be useful to reduce the socioeconomic damages resulted from climate extremes by comprehensively characterizing extreme drought events.

Keywords: Noah land surface model, Soil moisture index, Evapotranspiration, Sensible heat flux

동아시아 이상기후 감시 서비스를 위한 지면모형 기반 준실시간 토양수분지수평가

전종안^a · 이은정^b · 김대하^{c*} · 김선태^d · 이우섭^e

^aAPEC 기후센터 기후사업본부 기후분석과 선임연구원, ^bAPEC 기후센터 기후사업본부 기후분석과 연구원, ^cAPEC 기후센터 기후사업본부 기후분석과 선임연구원, ^dAPEC 기후센터 기후사업본부 기후분석과 선임연구원, ^eAPEC 기후센터 기후사업본부 기후분석과 선임연구원

요 지

최근 증가하고 있는 이상기후현상으로 인한 사회·경제적 피해를 줄이기 위해 이상기후 감시가 필수적이다. 이 연구의 목적은 Noah 3.3 지면모형으로 추정된 토양수분자료를 활용하여 준실시간 주간 근역층 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)를 산정하는데 있다. 동아시아영역(15-60°N, 70-150°E)에 대해 Noah 3.3 지면모형의 적용성을 평가하기 위해 양쯔강유역을 선정하였으며, 해당 유역에서 증발산과 현열을 FluxNet, FluxCom, Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM), ERA-5, Generalized Complementary Relationship (GCR)자료를 이용하여 비교·평가하였다. 양쯔강 유역에서 Noah 지면모형으로 추정된 증발산은 FluxNet, FluxCom, GLEAM, ERA-5, GCR에 의한 증발산과 0.96이상의 매우 높은 결정계수의 값을 보였으며, 현열의 경우에는 FluxNet 현열 자료와 0.71의 결정계수로 증발산 보다 다소 낮은 값을 보였다. 주간 근역층 SMI 시계열로부터 2019년 7월부터 10월까지 중국의 동부지역에서 극한가뭄(Extreme drought)이 확장되는 현상이 관측되었다. 월별 극한가뭄 발생 일수의 트렌드 분석결과, 우리나라의 경우 봄철에는 극한가뭄이 지난 20년 동안 대체로 감소하는 경향이 나타났으나, 가을철에는 한반도 전역에 걸쳐 증가하는 경향이 나타났다. 이 연구가 가뭄의 시·공간적 지속성 및 확장성과 최근 가뭄발생의 경향성 등을 종합적으로 분석하고 판단하여, 가뭄으로 인한 사회·경제적 피해를 줄이기 위한 적절한 대책 마련에 활용성이 클 것으로 기대된다.

핵심용어: Noah 지면모형, 토양수분지수, 증발산, 현열

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

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

1. 서론

전 지구 여러 곳에서 발생하는 이상기후 현상은 그 강도와 빈도가 최근 들어 증가하고 있으며(Perkins *et al.*, 2015), 이러한 현상과 더불어 이상기후에 의한 사회·경제적 피해도 증가하고 있다. 이상기후현상으로 인한 사회·경제적 피해를 줄이기 위해 이상기후에 대한 감시가 필수적이다. 여러 국가의 다양한 기구에서 이상기후를 감시하고 있으나, 신속한 감시정보의 업데이트가 이루어지지 않은 경우가 많아, 즉각적 대응에 한계가 있는 실정이다. 이에 APEC 기후센터(이하, APCC)에서는 준실시간 이상기후 정보를 제공하는 동아시아 이상기후 모니터링 웹서비스(<https://apcc21.org/ser/eastasia/climteExtremes.do?lang=ko>)를 운영하고 있다. 현재 APCC는 월간 감시정보와 주간 감시정보로 나누어 이상기온 및 강수, 가뭄 등을 제공하고 있다.

가뭄은 보통 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회·경제적 가뭄으로 구분된다(Dai, 2010). 가뭄현상을 감시기 위해 목적하는 가뭄 분류 별로 다양한 가뭄지수가 개발되었다. 일반적으로 토양수분을 기반으로 한 가뭄지수는 농업적 가뭄 및 수문학적 가뭄에 주로 사용된다. 예를 들면, Woli *et al.* (2012)은 간단한 토양물수지방정식을 사용한 Agricultural Reference Index for Drought (ARID)를 제안한 바 있고, Narasimhan and Srinivasan (2005)은 SWAT모형으로 추정된 토양수분을 활용하여 Soil Moisture Deficit Index (SMDI)를 산정하고 농업적 가뭄을 감시하였다. Mishra *et al.* (2015)은 Standardized Soil Moisture Index (SSMI)를 위성기반 토양수분자료와 식생자료를 함께 사용하기도 하였다. Martinez-Fernandez *et al.* (2015)은 스페인의 관측지점으로부터 수집한 토양수분자료를 활용하여 Soil Water Deficit Index (SWDI)를 개발하고 가뭄 현상을 분석한 바 있다.

Sridhar *et al.* (2008)은 총유효수분량(Total Available Water Content)에 대한 실제 수분량(Actual Water Content)의 비를 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)라 정의하였다. 이렇게 정의한 SMI는 0에서 1의 값을 가지게 되는데, Hunt *et al.* (2009)은 SMI의 범위가 -5에서 5가 되도록 조정하여 미국 네브라스카주의 6개 지점에 대해 작물생장기동안의 농업적 가뭄을 분석한 바 있다. 현재 APCC가 운영하고 있는 동아시아영역과 같이 광범위한 지역에 대해서는 충분한 수의 토양수분 관측망을 구성하기 어렵다. 이와같이, 대상지역이 매우 넓거나 토양수분 관측자료의 수집이 제한된 지역의 경우, 지면모형이나 수문모형을 이용하여 토양수분을 추정하기도 한다(예, Chun *et al.*, 2020; Hogg *et al.*, 2013; Narasimhan and Srinivasan, 2005). Narasimhan and Srinivasan (2005)은 미국

텍사스주의 2개 유역에 대해 SMDI를 산정하는데 SWAT모형을 사용하여 토양수분을 추정한 바 있다. Chun *et al.* (2020)은 전지구의 토양수분을 Noah 3.3 지면모형(Ek *et al.*, 2003)을 사용하여 추정하고, 위성기반 토양수분자료와 토양수분 재분 석자료 등과 비교·평가하였다. Chun *et al.* (2020)은 Noah 지면모형으로 준실시간 토양수분자료 생산이 가능하므로, Noah 지면모형으로 이상기후 감시정보 업데이트가 가능한 준실시간 이상기후지수 산정에 활용성이 크다고 결론지었다.

따라서 이 연구의 목적은 동아시아 가뭄을 준실시간 감시기 위해 주간 근역층 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)를 산정하는데 있으며, 이를 위하여 증발산과 현열을 이용하여 Noah 지면모형을 평가하였다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 대상지역 및 자료

APEC 기후센터(이하 APCC)는 동아시아지역(15-60°N, 70-150°E, Fig. 1)을 대상으로 이상기후 모니터링 웹서비스(<https://apcc21.org/ser/eastasia/climteExtremes.do?lang=ko>)를 운영하고 있다. 해당 영역은 한반도를 포함하는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 기준의 동아시아 영역(15-60°N, 75-150°E)을 참고하여 선정하였다. APCC는 웹서비스를 통해 이상기온, 이상강수, 가뭄 등의 이상기후 감시정보를 제공하고 있으며, 각 이상기후 지수들에 대한 자세한 설명은 위의 웹페이지에 제시되어 있다.

APCC가 제공하고 있는 이상기후지수들 중, 준실시간 주별 근역층(root-zone) 토양수분지수를 산정하기 위해 Noah 지면모형으로 추정된 토양수분을 이용하였다. Noah 지면모형을 구동하기 위해 기상, 토양, 지형, 식생 등의 다양한 입력자료가

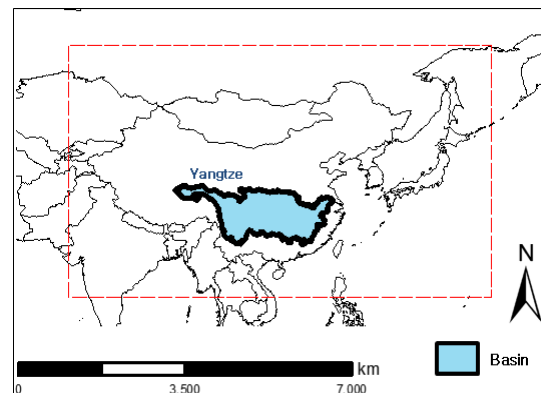


Fig. 1. East Asia domain (Red line: 15-60°N, 70-150°E) for the extreme climate monitoring web-service

필요하다. 대기온도(Near surface air temperature), 비습(Near surface specific humidity), 일사량(Incident shortwave radiation, Incident longwave radiation), 표면 대기압(Surface pressure), 풍속(Eastward winde, Northwaord wind), 강수(Rainfall rate, Convective rainfall rate)) 등 총 9개의 기상변수를 준실시간으로 제공하는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Data Assimilation System (GDAS) near-realtime analysis (이하, GDAS 준실시간 자료, Rodell *et al.*, 2004)를 기상입력자료로 사용하였다. 이 연구에서 사용한 GDAS 준실시간 자료는 6시간 간격자료로써, National Aeronautics and Space Administration (NASA) Center for Climate Simulation (NCCS) dataportal (<https://portal.nccs.nasa.gov>)에서 내려받기 하였다. 기상자료이외의 주요한 입력자료로는 Advanced Very High Resolution Radiometer 토지피복자료(AVHRR, <http://glcf.umd.edu/data/landcover/>), STATSGO 토양자료(<http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/lsm.php>), Shuttle Radar Topography Mission 고도자료(SRTM30, <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version21/SRTM30>), NCEP greenness 식생자료(Gutman and Ignatov, 1997) 등이 있다.

2.2 증발산 및 현열 활용 Noah 지면모형 평가

이 연구에서는 Noah 3.3 지면모형을 선정하여 2000년부터 2019년까지 토양수분을 산정하였으며, 1 hr 시간스텝과 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 공간해상도로 모의했다. Chun *et al.* (2020)은 위성기반 토양수분자료와 재분석 토양수분 자료를 활용하여 Noah 지면모형으로 추정된 토양수분을 직접 비교하여 평가한 바 있으며, 이 연구에 해당하는 동아시아영역에서 비교적 높은 상관성(상관계수 ≥ 0.52)을 보였다고 발표하였다. 이러한 토양수분을 직접 비교하는 방법 외에 증발산과 현열자료를 활용하여 Noah 지면모형을 평가하였다. 토양수분은 수문순환과 에너지순환에 모두 관여하는 주요한 수문성분이므로 증발산과 현열자료를 이용하여 간접적으로 토양수분 자료를 평가할 수 있다.

이 연구에서 수집한 증발산자료와 현열 자료를 Table 1에 요약하여 제시하였다. FluxNet (Jung *et al.*, 2011) 증발산자료와 현열자료를 수집하였으며, ERA5 (C3S, 2017), FluxCom (Jung *et al.*, 2019), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM, <https://www.gleam.eu/>), General Complementary Relationship (GCR, Kim *et al.*, 2019)으로부터는 증발산자료만을 수집하였다. Fluxnet과 FluxCom 증발산 자료는 에다공분산 지점 관측자료, 위성기반 원격탐사자료, 기상자료를 기계학습(Machine Learning)기법으로 통합하여 생산한 자료이다. GLEAM 증발산 자료는 Priestley and Taylor (1972)방법에 의해 구한 잠재증발산량에 0에서 1사이의 값을 가지는 스트레스지수(Stress factor)를 곱한 값에 canopy rainfall interception에 의한 interception loss를 고려하여 산정한다(Martens *et al.*, 2017; Miralles *et al.*, 2011). GCR자료는 Bouchet (1963)이 제안한 잠재증발산(potential ET, ET_p)과 실제증발산(ET_a)사이의 상호보완관계(Complementary relationship)를 활용하여 실제증발산을 구한다(Chun and Kim, 2019; Kim *et al.*, 2019). 각 자료에 대한 상세한 설명은 Table 1의 참고문헌에 제시되어있다. 각 자료의 격자 크기가 0.25° 에서 0.75° 까지 서로 같지 않아서, 격자별로 직접 비교할 수가 없다. Xia *et al.* (2016)은 이러한 격자의 크기가 서로 달라 생기는 문제를 피하기 위해 유역 평균값으로 물수지와 에너지 수지를 비교한 바 있다. 이 연구에서도 Xia *et al.* (2016)이 사용한 유역 평균값으로 증발산과 현열을 비교하기 위해 해당 영역에서 주요 유역인 양쯔강 유역을 선정하여, 1:1 그래프의 기울기와 결정계수(R^2)를 각각 비교하였다. 증발산과 현열자료는 5개 자료의 공통기간인 2001-2011의 기간 자료를 사용하였다.

2.3 근역층 토양수분지수(SMI) 산정

근역층 토양수분은 식생의 증산에 관여하는 토층이므로 표층 토양수분과 함께 Essential Climate Variable (ECV)로 세계기상기구(WMO)에 의해 지정되어 있다(<https://public>).

Table 1. Evapotranspiration and sensible heat flux datasets collected for this study

Data source	Period	Resolution	Source
FluxNet ^a	1982-2011	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	Jung <i>et al.</i> , 2011
FluxCom ^b	2001-2013	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	Jung <i>et al.</i> , 2019
ERA5 ^b	1979-2018	$0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$	C3S, 2017
GLEAM ^b	1980-2018	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	Martens <i>et al.</i> , 2017; Miralles <i>et al.</i> , 2011
GCR ^b	1980-2018	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	Kim <i>et al.</i> , 2019

^aBoth evapotranspiration and sensible heat flux datasets were collected from this data source.

^bOnly evapotranspiration datasets were collected from this data source.

wmo.int). Noah 지면모형으로 추정된 4개층(0.1, 0.4, 0.6, 1.0 m 두께) 중 표층으로부터 1 m 깊이까지의(즉, 표층으로부터 3개층) 토양함수비를 각각의 토층 두께로 가중평균한 값을 근역층 토양함수비로 정의하였다. 포장용수량(θ_{FC})은 작물이 토양수분을 이용할 수 있는 함수량이고, 위조점(θ_{WP})은 작물이 시들어 죽게 되는 시점의 함수량을 의미한다. 근역층 토양수분지수(Root-zone SMI)는 유효수분비로 정의되는 가뭄지수으로써, 총유효수분량($\theta_{FC} - \theta_{WP}$)에 대한 실제 수분량($\theta - \theta_{WP}$)의 비를 나타낸다(Sridhar *et al.*, 2008). 일반적으로 작물은 실제 함수량이 포장용수량의 절반이하일 때부터(즉, 유효수분비가 0.5미만일 때) 수분부족에 의한 스트레스를 받기 시작한다고 알려져 있다. Baier (1969)는 증발산이 지수적으로 감소하다가 유효수분비가 0.5이하부터 선형적으로 감소한다고 하였다. 유효수분비는 이론적으로 0에서 1의 값을 가지게 된다. 다만, 가뭄의 시작점을 0보다 작은 값인 음수로 나타내기 위해 다음 Eq. (1)과 같이 변형하여 SMI를 산정하였다(Hunt *et al.*, 2009). 여기서, SMI는 -5에서 5의 값을 가지고,

0보다 작은 값을 가뭄으로 정의하며, 각 가뭄심도에 대한 상세한 구간은 Table 2와 같다. 예를 들어, SMI가 -4보다 작은 구간에서 극한 가뭄상태(Extreme drought)로 정의한다. 일반적으로 포장용수량과 위조점과 같은 토양의 물리적 특성은 토양시험에 의해 측정되지만, 동아시아 영역과 같이 넓은 지역에서 충분한 측정값을 얻기 어렵다. 이 연구에서는 Hunt *et al.* (2009)이 제안한 토양함수비의 5백분위수(5th percentile)를 위조점으로 정의하고, 95백분위수(95th percentile)를 포장용수량으로 정의하여 사용하였다. 이러한 백분위수 방법은 포장용수량과 위조점을 추정하는데 널리 사용된 방법이다(예, Esch *et al.*, 2018; Martnez-Fernandez *et al.*, 2015; 2016).

$$\text{Root-zone SMI} = -5 + 10 \frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} \quad (1)$$

여기서, θ 는 토양의 체적함수비(Volumetric soil moisture, m^3/m^3), θ_{FC} 는 포장용수량(Field capacity, m^3/m^3), θ_{WP} 는 위조점(Wilting point, m^3/m^3)이다.

Table 2. Drought conditions according to the SMI range

Drought condition	SMI
Extreme	$\text{SMI} < -4.0$
Severe	$-4.0 \leq \text{SMI} < -3.0$
High intense	$-3.0 \leq \text{SMI} < -2.0$
Moderate	$-2.0 \leq \text{SMI} < -1.0$
Less intense	$-1.0 \leq \text{SMI} < 0.0$

3. 결과 및 고찰

3.1 증발산 및 현열 활용 토양수분 평가

Noah 지면모형으로 추정된 증발산을 양쯔강 유역에서 FluxNet, FluxCom, GLEAM, ERA-5, GCR에 의한 증발산값

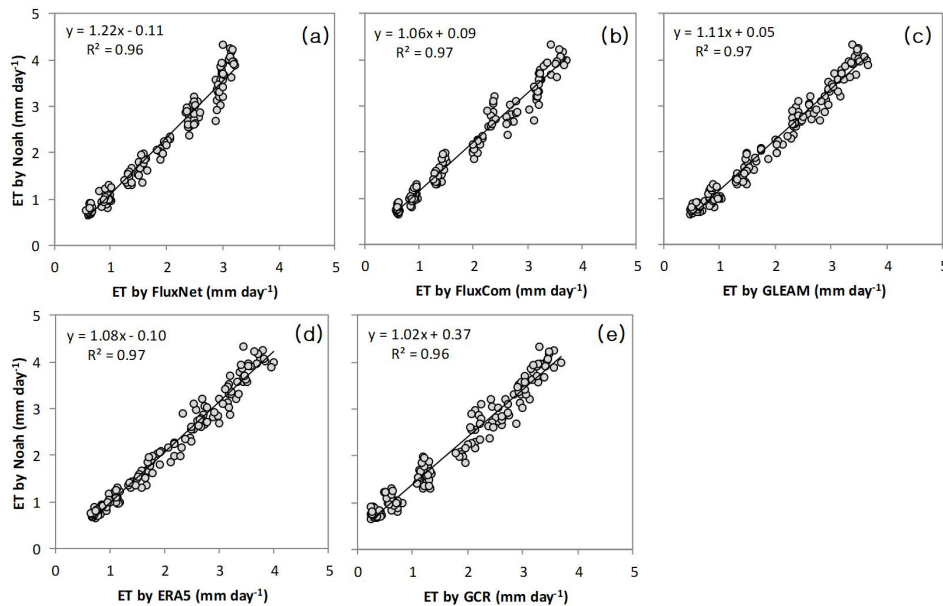


Fig. 2. Scatter plots for the Noah LSM-simulated evapotranspiration and the (a) FluxNet and (b) FluxCom, (c) GLEAM, (d) ERA-5, and (e) GCR evapotranspiration

과 비교하여 결과를 Fig. 2에 도시하였다. Noah 지면모형으로 산정한 증발산은 GCR에 의한 증발산의 경우, 1:1 그래프의 기울기가 1.02로 1과 가장 가까운 값을 보였으며, 반면에, FluxNet에 의한 증발산과 비교한 1:1 그래프의 기울기가 1.22로 가장 큰 차이를 보였다. 결정계수(R^2)는 5개 자료와 모두 0.96이상으로 매우 큰 값을 보였다. 이와 같이, Noah 지면모형은 증발산을 FluxNet, FluxCom, GLEAM, ERA-5, GCR에 의한 증발산보다 다소 과추정하는 것으로 나타났다.

Noah 지면모형으로 추정된 현열의 경우, FluxNet에 의한 현열과는 1:1 그래프의 기울기가 1.02로 1과 매우 가까운 값을

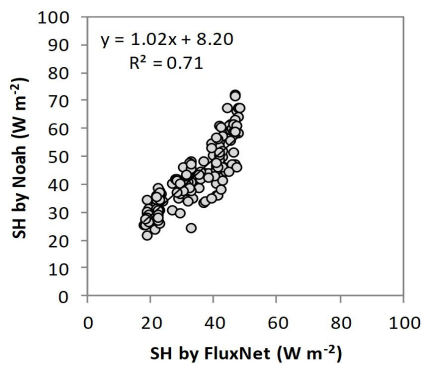


Fig. 3. Scatter plots for the Noah LSM-simulated sensible heat fluxes and the FluxNet sensible heat fluxes

보였고, 결정계수도 FluxNet 현열자료와는 0.71으로 비교적 높은 값을 보였다(Fig. 3). 이와 같이, Noah 지면모형에 의해 추정된 증발산과 현열은 이 연구에서 수집한 자료들과 매우 유사한 결과를 보였다. Chun *et al.* (2020)은 Noah 지면모형에 의한 토양수분을 위성기반 토양수분자료 및 토양수분 재분석자료와 직접 비교하여 평가하였는데, 동아시아 영역에서 비교적 높은 상관성(상관계수 ≥ 0.52)을 보인다고 보고하였다. 토양수분을 직접 비교한 결과와 함께 증발산 및 현열자료와의 비교한 결과로 미루어 볼 때, Noah 지면모형으로 산정한 동아시아 영역의 주간 근역층 토양수분지수의 신뢰성이 비교적 클 것으로 판단된다. 다만, 현열의 경우 Noah 지면모형의 추정값이 다소 과대추정하는 경향이 있는데, 이는 증발산 모의와 관련하여 향후 추가적인 연구가 필요할 것이다.

3.2 동아시아 토양수분지수 분석

동아시아 이상기후 모니터링 웹서비스에 제공하기 위해 동아시아지역의 주별 근역층 토양수분지수를 산정하였다. Fig. 4는 2019년 주별 근역층 토양수분지수 중 1월초, 4월초, 7월초 10월초의 자료이다. 대상지역에서 1월(Fig. 4(a))에서 인도와 인도서쪽부분에서 주로 나타났던 극한가뭄(Extreme drought)지역이 4월(Fig. 4(b))에는 인도 전역과 미얀마와 북부인도차이나반도에 걸쳐 나타났다. 7월초(Fig. 4(c))에는 한

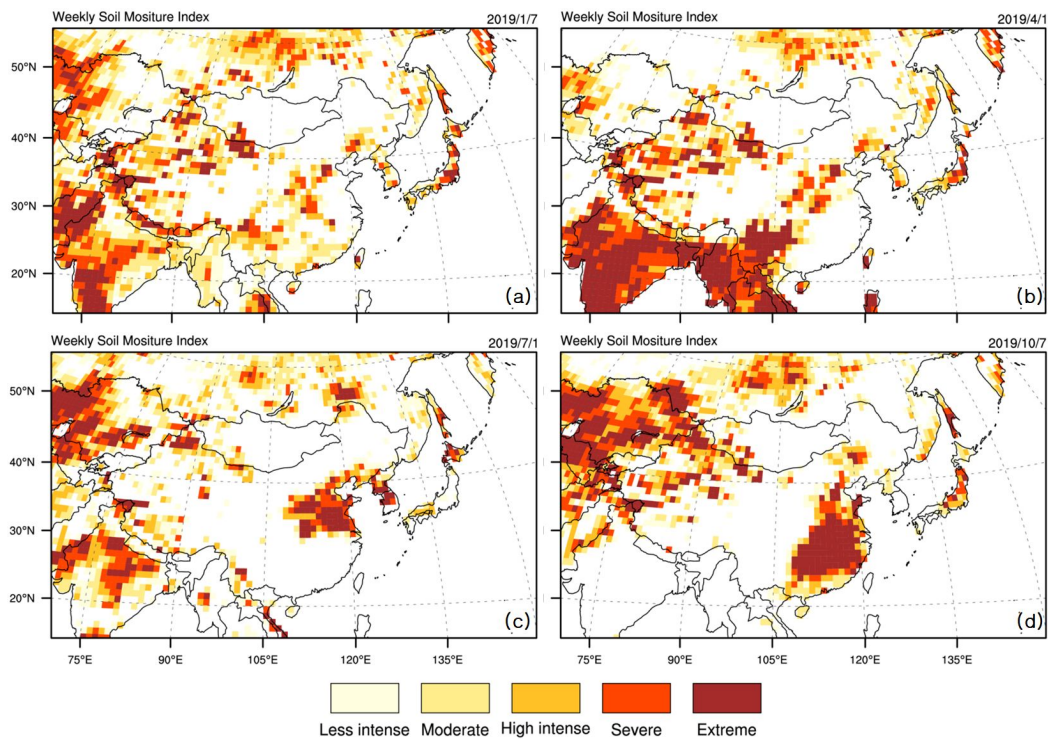


Fig. 4. Weekly SMI in East Asia: for (a) the 1st week, (b) the 13th week, (c) the 26th week, and (d) the 40th week of the year 2019

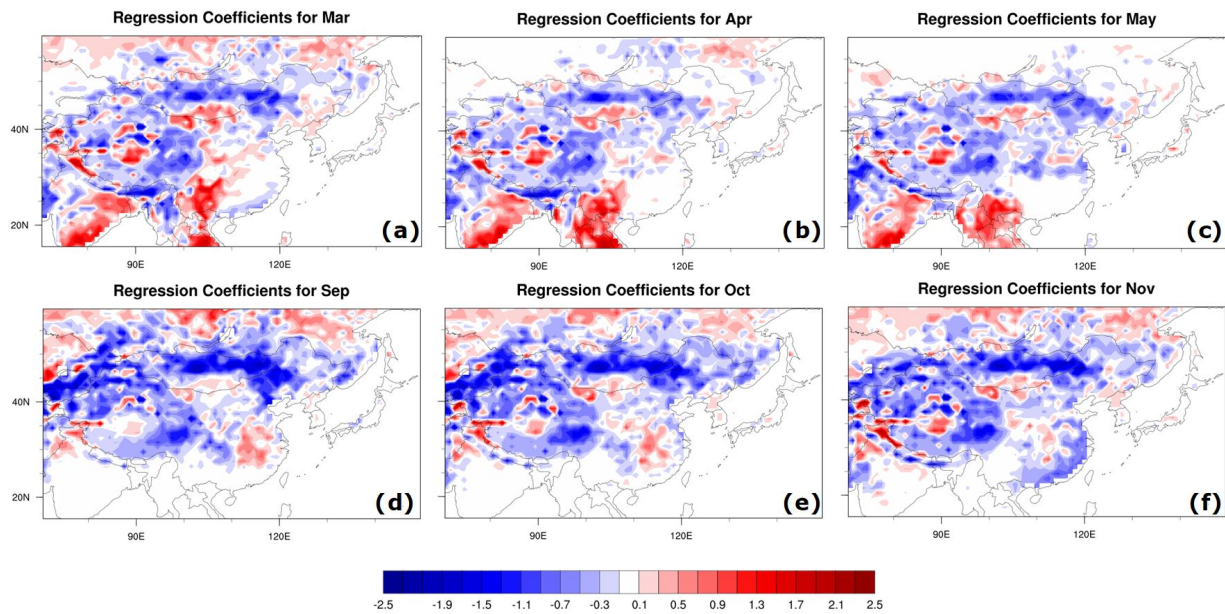


Fig. 5. Monthly trends of the weekly SMI for East Asia for (a)-(c) spring and (d)-(f) fall

반도와 동중국의 북부지역에 분포하던 극한가뭄지역이 10월 초(Fig. 4(d))에 동중국 남부까지 확장되었다. 따라서 근역층 토양수분지수는 동아시아 이상기후 모니터링 웹서비스로부터 가뭄이 확장되는 지역을 파악할 수 있고, 이러한 지역을 향후 지속적으로 모니터링 해야 할 주요감시지역으로 선정하는데 이용할 수 있다. 주별 근역층 토양수분지수는 동아시아 이상기후 모니터링 웹페이지에 매주 준실시간으로(3~5일 지연(latency)시간) 제공되므로, 가뭄에 대한 시의성 있는 적절한 대책을 수립하는데 활용이 가능하다.

동아시아지역에서 각 격자에서 월별 극한가뭄(Extreme drought) 발생일수를 구하였으며, 이 연구의 전체 자료기간(2000-2019)에 대해 월별 극한가뭄 발생일수의 월별 트렌드를 구하여, 한반도에서 가뭄이 주로 발생하는 봄철(3-5월, Figs. 5(a)-5(c))과 가을철(9-11월, Figs. 5(d)-5(f))의 결과를 도시하였다. 3월에서 5월에 걸쳐 인도의 북부와 태국, 베트남, 라오스 북부 등 인도차이나반도의 북부지역에서 극한가뭄 발생일수가 주로 증가하는 경향이 나타났다(Figs. 5(a)-5(c)). 반면에, 우리나라와 만주 동쪽지역과 몽골의 북부지역에서 극한가뭄 발생일수가 감소하는 경향을 보였다. 만주 동쪽지역과 몽골의 북부지역에서는 봄철과 가을철 모두 극한가뭄 발생일수가 감소하는 경향이 나타났는데, 가을철의 감소하는 경향이 봄철보다 더욱 강하게 나타났다. 가을철에는 봄철과는 다르게 인도와 미얀마와 북부인도차이나반도에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 남부 몽골지역에서는 봄철과 가을철 모두 극한가뭄 발생일수가 증가하는 추세를 보였다. 우

리나라 봄철에는 주로 감소하는 경향이 나타났고, 가을철에는 대체로 증가하는 경향을 보였다(Figs. 5(d)-5(f)). 우리나라의 봄철 가뭄은 저수율과 상당히 큰 관계가 있는데, 이 연구결과와 같이 가을철 극한가뭄현상이 증가하는 경향은 저수율에 영향을 끼칠 수 있으므로, 봄철 가뭄에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 우리나라에서 농업용수의 수요가 높은 봄철에 적절한 수자원 관리를 위해서는 계절별 가뭄발생 경향성의 저수율에 대한 영향 등에 대한 종합적 분석이 필요하다.

4. 결 론

이 연구에서는 동아시아영역(15-60°N, 70-150°E)에 대해 증발산과 현열을 이용하여 Noah 3.3 지면모형을 평가하였으며, Noah 지면모형에 의해 추정된 토양수분을 활용하여 주별 근역층 토양수분지수를 산정하였다. 이번 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) Noah 3.3 지면모형으로 산정한 증발산은 양쯔강 유역에서 FluxNet, FluxCom, GLEAM, ERA-5, GCR에 의한 증발산과 0.96이상의 높은 결정계수의 값을 보였으며, 현열의 경우에도 FluxNet 자료와 0.71의 비교적 높은 결정계수의 값을 보였다.
- 2) 2019년 7월부터 10월까지 극한가뭄(Extreme drought)지역이 한반도와 동중국 북부지역에서 남부지역까지 확장

되었으며, 이러한 시계열은 지속적으로 모니터링 해야 할 주요감시지역을 선정하는데 이용될 수 있다.

- 3) 월별 극한가뭄 발생일수의 트렌드를 전 기간(2000부터 2019년까지)에 대해 분석한 결과 우리나라 봄철에는 대체로 감소하는 경향이 나타난 반면, 가을철에는 한반도 전역에서 증가하는 경향이 나타났다.

가뭄의 피해를 줄이기 위한 대책을 시의성 있게 마련하기 위해서는 현재의 가뭄상태뿐만 아니라, 가뭄의 시·공간적 지속성 및 확장성, 과거의 가뭄발생의 경향성 등을 종합적으로 분석하고 판단하여야 한다. 이 연구가 이러한 가뭄을 종합적으로 분석하고 판단하는데 활용성이 클 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 APEC 기후센터의 지원에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Baier, W. (1969). "Concepts of soil moisture availability and their effect on soil moisture estimates from a meteorological budget." *Agricultural Meteorology*, Vol. 6, pp. 165-178.
- Bouchet, R.J. (1963). "Evapotranspiration reelle et potentielle, signification climatique." *International Association of Scientific Hydrology Publication*, Vol. 62, pp. 134-142.
- Chun, J.A., Kim, S.T., Lee, W.-S., and Kim, D. (2020). "Assessment of Noah land surface model-based soil moisture using GRACE-observed TWSA and TWSC." *Journal of Korea Water Resources Association* (forthcoming) (in Korean with English abstract), Vol. 53, No. 4, pp. 285-291.
- Chun, J.A., and Kim, D. (2019). "A drought assessment using the generalized complementary principle of evapotranspiration." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 5, pp. 325-335. (in Korean with English abstract)
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), assessed 5 January 2020, <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>>.
- Dai, A. (2010). "Drought under global warming: a review." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 2, pp. 45-65.
- Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rodgers, E., Grunman, 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, No. D22, p. 8851.
- Esch, S., Korres, W., Rechenau, T.G., and Schneider, K. (2018). "Soil moisture index from ERS-SAR and its application to the analysis of spatial patterns in agricultural areas." *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 12, No. 2, 022206.
- 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.
- Hogg, E.H., Barr, A.G., and Black, T.A. (2013). "A simple soil moisture index for representing multi-year drought impacts on aspen productivity in the western Canadian interior." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 178-179, pp. 173-182.
- Hunt, E.D., Hubbard, K.G., Wilhite, D.A., Arkebauer, T.J., and Dutcher, A.L. (2009). "The development and evaluation of a soil moisture index." *International Journal of Climatology*, Vol. 29, pp. 747-759.
- Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H.A., Cescatti, A., Richardson, A.D., Arain, M.A., Arneth, A., Bernhofer, C., Bonal, D., Chen, J., Gianelle, D., Gobron, N., Kiely, G., Kutsch, W., Lasslop, G., Law, B.E., Lindroth, A., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E.J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., and Williams, C. (2011). "Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, G00J07, doi : 10.1029/2010JG001566.
- Jung, M., Koirala, S., Weber, U., Ichii, K., Gans, F., Camp-Valls, G., Papale, D., Schwalm, C., Tramontana, G., and Reichstein, M. (2019). "The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes." *Scientific Data*, Vol. 6, No. 74, doi: 10.1038/s41597-019-0076-8.
- Kim, D., Lee, W.-S., Kim, S.-T., and Chun, J.A. (2019). "Historical drought assessment over the contiguous United States using the generalized complementary principle of evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 55, pp. 6244-6267, doi: 10.1029/2019WR024991.
- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R.A.M., Fernandez-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., and Verhoest, N.E.C. (2017). "GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture." *Geoscientific Model Development*, Vol. 10, pp. 1903-1925.
- Martnez-Fernandez, J., Conzalez-Zamora, A., Sanchez, N., and Cumuzzio, A. (2015). "A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator." *Journal of Hydrology*, Vol. 522, pp. 265-273.
- Martnez-Fernandez, J., Conzalez-Zamora, A., Sanchez, N., Cumuzzio, A., and Herrero-Jimenez, C.M. (2016). "Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 177, pp. 277-286.
- 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.
- Mishra, A.K., Ines, A.V.M., Das, N.N., Khedun, C.P., Singh, V.P., Sivakumar, B., and Hansen, J.W. (2015). "Anatomy of a local-scale drought: Application of assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study." *Journal of Hydrology*, Vol. 526, pp. 15-29.
- 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*, Vol. 133, pp. 69-88.
- 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, doi: 10.1002/2015JD023592.
- Priestley, C.H., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.
- 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.
- Sridhar, V., Hubbard, K.G., You, J., and Hunt, E.D. (2008). "Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its user friendliness in severity-area-duration assessment." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 9, pp. 660-676.
- Woli, P., Jones, J.W., Ingram, K.T., and Fraisse, C.W. (2012). "Agricultural reference index for drought (ARID)." *Agronomy Journal*, Vol. 104, pp. 287-300.
- Xia, Y., B. Cosgrove, 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, doi: 10.1002/2015JD023889.