

위성영상기반 증발산량 및 토양유효수분을 활용한 밭가뭄 평가 Drought Risk Assessment for Upland Crops using Satellite-derived Evapotranspiration and Soil Available Water Capacity

전민기* · 남원호** · 이희진*** · 홍은미**** · 황선아***** · 허승오*****

Jeon, Min-Gi*, Nam, Won-Ho**, Lee, Hee-Jin***, Hong, Eun-Mi****, Hwang, Seonah*****,
and Hur, Seung-Oh*****

Abstract

Agricultural drought can have long-lasting and harmful impacts on both the agricultural ecosystem and economy. Recently, as climate change has increased global warming, the frequency and intensity of droughts are increasing as weather and environmental factors that directly affect agriculture are rapidly changing. In South Korea, severe droughts have occurred every year for the past seven years. Compared to paddies supplied with water from agricultural reservoirs, upland crops are highly vulnerable to drought due to a lack of irrigation facilities. The consumption requirements for upland crops cannot be satisfied by rainfall alone and require supplementation through irrigation. The amount of upland crop consumption and irrigation water should be calculated not only by the amount of evaporation but also by taking into account the soil moisture movement. Soil moisture is a key variable for defining the agricultural drought index; however, in situ soil moisture observations are unavailable for many areas. Remote sensing techniques can allow surface soil moisture observations at different tempo-spatial resolutions. Soil available water content is an important factor used in evaluating upland drought impacts. It is recognized as a major factor in water resource circulation. This study proposes a practical method to perform drought risk assessments for upland crops based on evaporation and soil moisture by utilizing Famine Early Warning Systems Network evaporation acidity satellite images provided by the United States Geological Survey.

Key words : Drought, Upland Crop, Evapotranspiration, Satellite Image, Soil Moisture

요 지

최근 기후변화로 인해 전 세계적으로 온난화 현상이 야기되고 있으며, 농업에 직접적인 영향을 주는 기상 및 환경요인의 변화가 급격하게 진행됨에 따라 가뭄의 발생 빈도와 강도가 증가하는 추세이다. 우리나라의 경우 최근 7년 동안 극심한 가뭄이 국지적으로 발생하고 있으며, 농업용 저수지 및 양수장 등 다양한 농업수리시설물로부터 용수를 공급받는 논벼 작물과 비교하여, 밭작물의 경우 관개시설이 부족하여 가뭄에 대한 취약성이 높다. 밭작물은 자연 강우만으로는 작물에 필요한 용수를 충족시킬 수 없는 수분 부족량은 관개를 통해 공급하며, 작물의 생육 시기와 기후 환경, 수자원 환경에 민감하고 토양수분을 흡수함으로써 생육하기 때문에 이러한 밭작물의 소비수량 및 관개용수량은 증발산량 뿐만 아니라 토양내 수분의 이동을 고려하여 수분 부족량을 산정해야 한다. 토양유효수분은 밭가뭄 평가에 활용되는 중요한 인자 중 하나로, 물순환의 중요한 인자로 인식되고 있다. 본 연구에서는 미국지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 기근조기경보 시스템네트워크(Famine Early Warning Systems Network, FEWS NET)의 증발산량 위성영상자료를 활용하여 증발산량 및 토양유효수분 기반의 밭가뭄 평가 및 분석을 수행하였다.

핵심용어 : 밭가뭄, 증발산량, 위성영상, 토양유효수분, FEWS NET

*정회원, 한경대학교 융합시스템공학과 박사과정(E-mail: mingi.jeon@hknu.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Convergence of Information and Communication Engineering, Hankyong National University

**교신저자, 정회원, 한경대학교 사회안전시스템공학부 부교수(Tel: +82-31-670-5137, Fax: +82-31-670-5139, E-mail: wonho.nam@hknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, Institute of Agricultural Environmental Science, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University

***정회원, 한경대학교 지역자원시스템공학과 석사과정(E-mail: heejin.lee@kangwon.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Bioresources and Rural Systems Engineering, Hankyong University

****강원대학교 환경융합학부 에코환경과학전공 조교수(E-mail: eunmi.hong@kangwon.ac.kr)

Assistant Professor, School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University

*****농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 농업연구사(E-mail: hsa9697h@korea.kr)

Junior Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

*****농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과 농업연구관(E-mail: soilssohur@korea.kr)

Senior Researcher, Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

1. 서론

가뭄은 홍수, 지진, 산사태 등 다른 자연재해와 다르게 진행속도가 느리고 광범위하게 발생하여 가뭄 발생 시 피해가 크다. 기후변화로 인해 기온상승, 기상이변, 강우패턴 변화 등으로 극치 수문사상의 불확실성이 야기되고 있으며, 이로 인해 가뭄의 발생빈도 및 피해 규모가 증가하고 있다(Sung et al., 2012; Nam et al., 2018; Kim et al., 2019). 최근 기후변화로 인해 전 세계적으로 지구온난화 및 기온상승 야기되고 있으며, 농업의 경우 작물 및 물관리와 직접적인 영향을 주는 기상학적 및 수문학적 변화가 급격하게 진행되고 있다(Hwang et al., 2013; Jun et al., 2013; van der Linden et al., 2019; Lee et al., 2020). 우리나라의 경우 최근 7년 동안 매년 국지적으로 극심한 가뭄이 발생하고 있고, 가뭄의 발생 빈도와 강도가 증가하는 추세이다. 가뭄 피해를 줄이기 위해서는 기후변화에 맞춘 효율적인 수자원 정책이 필요하며, 해당 지역의 가뭄상황을 모니터링 할 수 있는 요소들을 통합하는 지표들이 요구된다(Kang et al., 2008; Yoon et al., 2018; Lee et al., 2019).

밭작물의 경우 농업용 저수지 및 양수장과 같은 농업수리 시설물로부터 용수를 공급받는 논벼 작물과 달리 자연 강우를 통해 필요한 용수량을 공급받는 천수답이 대부분이기 때문에, 기후변화로 인해 야기되는 수문학적 변화에 의한 가뭄의 취약성이 높다(Mun et al., 2020; Yoon et al., 2020). 따라서, 밭작물은 작물의 생육 시기와 기후 환경, 수자원 환경에 민감하고 토양수분을 흡수함으로써 생육하기 때문에 밭가뭄을 분석하기 위해서는 기상인자뿐만 아니라 작물의 종류, 증발산량 및 토양의 특성도 반영되어야 한다.

토양수분(soil moisture)은 지표 및 대기 사이의 물순환을 연결하는 인자로 수리·수문해석 시 주요지표 중 하나로 사용되며, 특히 기후변화, 수문 분석, 가뭄 및 작물생산 등 농업관련 분야에 직간접적으로 영향을 미친다(Berg and Sheffield, 2018; Ruosteenoja et al., 2018). 현재 우리나라에서 제공되는 토양수분 실측자료는 기상청 농업기상관측자료(<http://www.weather.go.kr/>)와 농촌진흥청 농업기상정보서비스(Agricultural weather information service, <http://weather.rda.go.kr/>)에서 제공되고 있으나, 재배작물 및 작물 계수를 고려하지 않고 해당 지역의 토성 특성별 포장용수량 및 영구위조점과 같은 토양 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 또한, 토양수분의 경우 가장 오래된 관측기간이 기상청 2002년, 농촌진흥청 2015년으로 관측시기가 짧아 장기변동성 분석에 활용하는 것에는 한계가 있다.

본 연구에서는 우리나라 56개 기상관측소를 대상으로 기상데이터를 활용하여 FAO-56 Penman-Monteith 공식 기반 증발산량을 산정하고, 미국 기근조기경보시스템네트워크(USGS Famine Early Warning Systems Network, USGS FEWS NET)에서 제공하는 위성영상기반의 증발산량 데이터와 비교를 통해 공간적 분포와 경향성을 분석하였다. 또한,

농촌진흥청에서 제공하는 토양 및 작물의 특성을 반영하여 토양유효수분용(Soil Available Water Capacity, SAWC)을 산정하였으며, 공간보간을 통해 우리나라 공간 분포 및 경향성을 분석하였으며, Runs 이론을 기반으로 가뭄 지속기간, 강도, 크기를 파악하여 지역별, 시기별 토양유효수분용을 기반으로 밭가뭄을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구자료 구축

2.1.1 연구 대상 지역

본 연구에서는 기상관측소 기상데이터를 기반으로 산정한 증발산량 데이터와 USGS FEWS NET 위성영상기반 증발산량 데이터의 비교 분석을 통해 USGS FEWS NET 증발산량의 적합성을 평가 및 검증하고자 한다. 연구 대상 지역인 우리나라의 경우 기상청에서 운영하는 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 무인자동 기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)에서 지상 기상관측을 실시 및 기상데이터를 제공하고 있으며, 전국적으로 ASOS 관측소 80지점, AWS 관측소 468지점이 있다(Cho et al., 2013). 위성영상기반의 증발산량의 적합성 평가 및 검증을 위해 2009년부터 2018년까지 10년간의 데이터를 수집하였으며, 사용한 ASOS 56개 지점을 Fig. 1에 나타내었다.

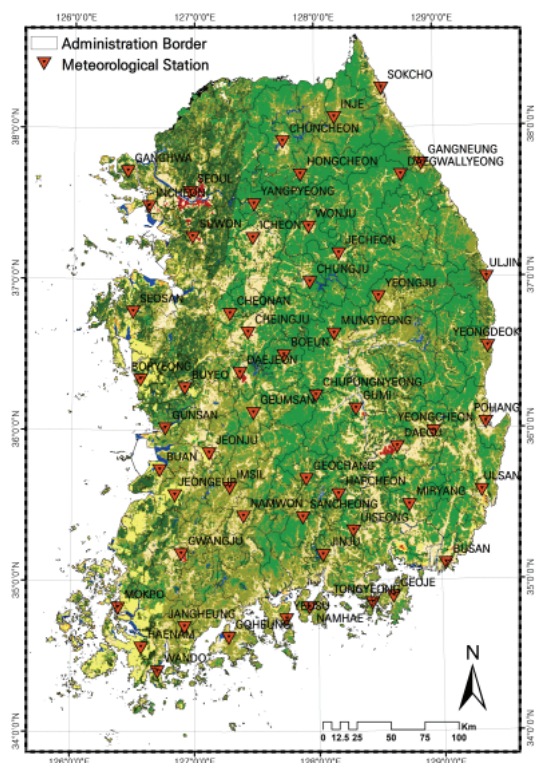


Fig. 1. Spatial Distribution of Meteorological Stations from KMA in South Korea

2.1.2 실측기반 증발산량 산정

ASOS 56개 지점에서 수집한 기상데이터를 활용하여 연구에 활용할 증발산량 및 토양유효수분을 데이터를 산정하였다. 증발산량 데이터의 경우 세계식량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO), 세계관개배수위원회(International Commission on Irrigation and Drainage, ICID), 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 추천하는 모델인 FAO-56 Penman-Monteith (PM)을 사용하여 산정하였으며(Chiew et al., 1995; Allen et al., 1998; Garcia et al., 2004; López-Urrea et al., 2006; Cai et al., 2007; Suleiman and Hoogenboom, 2009; Jeon et al., 2019), 아래 Eq. (1)과 같다.

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \left[\frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T_{mean} + 273} \right]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

ET 는 증발산량(mm/day), Δ 는 포화증기압과 온도곡선의 기울기(kPa/°C), R_n 은 이용가능 복사열($MJm^{-2}day^{-1}$), G 는 토양열 플럭스($MJm^{-2}day^{-1}$), γ 는 건습계상수(kPa/°C), U_2 는 2 m 높이에서의 풍속(m/s), T_{mean} 는 일평균기온(°C), e_s 는 포화증기압(kPa), e_a 는 실제증기압(kPa)이다.

2.1.3 위성영상 기반 증발산량 자료

USGS FEWS NET 증발산량 데이터는 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)의 EROS (Earth Resources Observation and Science)에서 FEWS NET을 지원하기 위해 제공하는 위성영상 데이터이다. 본 연구에서는 FEWS NET에서 제공하는 1 km 해상도의 일별, 월별, 연별 증발산량 및 아노말리 데이터(anomaly) 중 월별 증발산량 데이터를 사용하였으며, 전지구 데이터 중 우리나라 관할지역 격자의 데이터를 추출하여 ASOS 지점의 증발산량 데이터와 해당 지점의 증발산량을 비교 및 분석하였다.

2.1.4 실측기반 토양유효수분을 산정

토양유효수분율은 수분보유량, 유효강우량, 증발산량 및 토성의 특성인 포장용수량, 영구위조점을 고려하여 산정한 인자로 토양의 특성뿐만 아니라 작물 및 기상 요인을 포함하여 특성을 반영한 인자이다(Nam et al., 2014; Hong et al., 2015). 토양유효수분율은 현재 유효수분량에 총 유효수분량을 나누어 산정하며, 포장용수량(Field Capacity, FC), 영구위조점(Wilting Point, WP) 등 토양 특성의 경우 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공하는 데이터를 이용하였다. 토양유효수분을 산정 공식은 Eqs. (2)~(4)와 같다(Hong et al., 2016).

$$SAWC = (AWC_{pre} / AWC_{total}) \times 100 \quad (2)$$

$$AWC_{pre} = (SMC + ER - ET) - WP \quad (3)$$

$$AWC_{total} = FC - WP \quad (4)$$

AWC_{pre} (Available Water Capacity)는 현재 유효수분량, AWC_{total} 는 총유효수분량, SMC (Soil Moisture Content)는 수분보유량, ER (Effective Rainfall)은 유효우량, ET (Evapotranspiration)는 증발산량을 나타낸다.

2.2 연구 방법

2.2.1 Runs 이론 기반 가뭄 판단

본 연구에서는 토양수분을 기반으로 가뭄의 특성을 분석하는 방법으로 Runs 이론을 선정하여 가뭄을 분석하였으며, 토양수분 60%를 가뭄 판단의 기준인 기준 수준(Threshold)으로 선정하였으며(Hunt et al., 2009; Nam et al., 2012; Nam et al., 2015), 토양수분이 60% 이하로 내려가는 지점을 가뭄 발생, 가뭄 발생 후 토양수분이 60% 이상이 되는 지점을 가뭄 해갈로 정의하였다. Runs 이론은 가뭄의 특성을 지속기간(Duration, D), 크기(Magnitude, M), 강도(Severity, S) 세 가지 특성치로 구분하여 분석하며(Eqs. (5)~(7)), 가뭄의 세 가지 특성들은 기본수준(truncation level)에 대한 음의 부분에서 산정한다. 가뭄강도는 토양수분 60% 이하일 경우의 기간과 토양수분 60%에서 현재의 토양수분의 차이 값의 곱으로 정의하였다. 토양수분과 지속기간의 곱으로 가뭄강도를 산정하였으며, 가뭄크기는 가뭄강도에서 가뭄기간을 나눈 값으로 정의하였다.

$$D(\text{day}) = \text{end day of SM60\%} - \text{start day of SM60\%} \quad (5)$$

$$S(\text{mm} \times \text{day}) = \sum_{i=\text{start}}^{\text{end}} SMD_i \quad (6)$$

$$M(\%) = S/D \quad (7)$$

SM 60% (Soil Moisture, SM)는 토양수분 60% 이하, SMD (Soil Moisture Deficit, %)는 토양수분 결핍으로 토양수분 60%에서 현재 토양수분을 뺀 값을 나타낸다.

2.2.2 통계적 분석방법을 이용한 위성영상 검증

FEWS NET 증발산량 위성영상의 적용성 파악을 통한 검증을 위하여 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error, RMSE), 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)를 활용하였으며, Eqs. (8), (9)에 나타내었다. RMSE는 0에 가까울수록 비교한 두 데이터가 유사하며, 결정계수는 1에 가까울수록 비교한 두 데이터가 유사함을 의미한다. 본 연구에서는 RMSE와 결정계수를 기반으로 연구에 활용한 FEWS NET

위성영상기반 증발산량의 적용성을 검증하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{obs} - x_{sat})^2}{N}} \quad (8)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (x_{obs} - \bar{x}_{obs}) \times (x_{sat} - \bar{x}_{sat})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{sat} - \bar{x}_{sat})^2}} \right)^2 \quad (9)$$

x_{obs} 는 기상관측소에서 수집한 데이터, x_{sat} 는 위성영상에서 수집한 데이터, \bar{x} 는 수집한 데이터의 평균값을 의미한다.

3. 적용 및 결과

3.1 위성영상 기반 증발산량 검증

FEWS NET 월별 증발산량 데이터와 기상관측소 실측 데이터 기반 PM 공식을 활용하여 산정한 증발산량 데이터를 FEWS NET 데이터를 기반으로 일 증발산량을 산정하였으며, 월별 증발산량으로 누적하여 FEWS NET 월별 증발산량과 비교하여 Fig. 2에 도시하였다. 증발산량 분석 결과 여름철(6월, 7월, 8월) 기간이 다른 계절보다 상대적으로 높게 산정되었으며, FEWS NET 증발산량의 경우 2010년 8월 약 85.3 mm로 기상관측소 데이터 기반 증발산량의 경우 2018년 7월 약 143.8 mm로 가장 높게 나타났다. PM 공식으로 산정한 증발산량이 FEWS NET 증발산량보다 높게 나타났으며, 봄철 RMSE가 43.8 mm, 여름철 36.3 mm, 가을철 32.4 mm, 겨울철 20.4 mm로 봄철에 그 차이가 더욱 크게 나타났다. Fig. 3과 같이 RMSE 및 결정계수 산정 결과 RMSE는 약 40.8 mm, 결정계수는 약 0.58로 선행연구(Lee et al., 2015)의 결정계수 0.45를 참조하여, 본 연구에서 사용한 FEWS NET 위성영상이 우리나라 적용에 적합하다고 판단된다.

3.2 실측데이터 기반 증발산량 공간분포

본 연구에서는 2009년 1월부터 2018년 12월까지 기상관측소 데이터를 활용하여 PM 공식기반 일 증발산량 데이터를

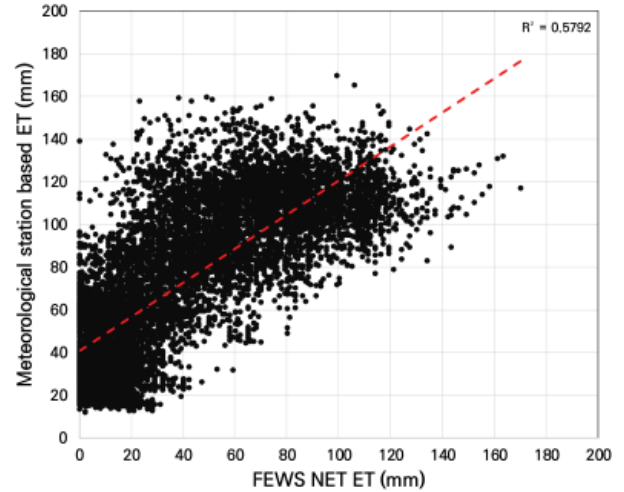


Fig. 3. Scatter Plot Analysis Between FEWS NET ET and Meteorological Station-Based ET

산정하였으며, 산정한 일 증발산량 데이터를 월 단위로 누적하여 월별 증발산량 데이터를 구축하였다. 구축한 56개 지점 월별 증발산량의 평균값을 산정하여 시간에 따른 증발산량 변화를 분석하였다. 분석결과 여름철인 6월, 7월, 8월에서 상관계수 0.74로 강한 증가추세가 나타났으며, 봄철(3월, 4월, 5월)과 겨울철(12월, 1월, 2월)에서 각각 0.46, 0.44로 다소 강한 상관관계가 나타났다. 반면 가을철(9월, 10월, 11월)의 경우 상관계수가 -0.54로 감소하는 경향이 나타났다. 연별 증발산량의 경우 2009년부터 2018년까지 상관계수가 0.77로 강한 증가추세가 나타났으며, 2017년 증발산량이 76.8 mm, 2018년 76.7 mm로 전체 기간 중 가장 높게 나타났다.

본 연구에서는 공간보간 방법 중 하나인 역거리가중법(Inverse Distance Weight, IDW)을 활용하여 우리나라 전역의 증발산량 데이터를 산정하였다. 2009년 연평균 증발산량이 101.9 mm에서 2018년 143.8 mm로 증가폭이 가장 큰 7월 증발산량 데이터를 2009년부터 2018년의 평균값을 산정하여 Fig. 4에 도식화 하였다. 2012년, 2013년과 2016년에 우리나라 남부지역에서 다른 지역에 비해 10~20 mm 증발산량이 크게 나타났으며, 2014년은 강원도 지역에서 증발산량이

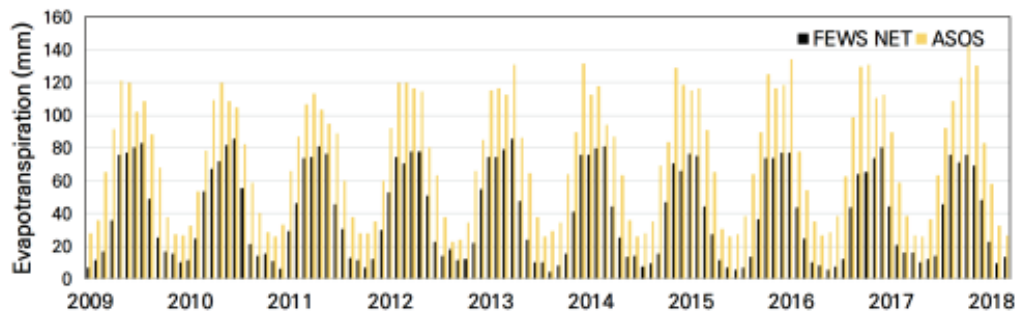


Fig. 2. Comparison of Temporal Trend for Evapotranspiration Between FEWS NET and ASOS

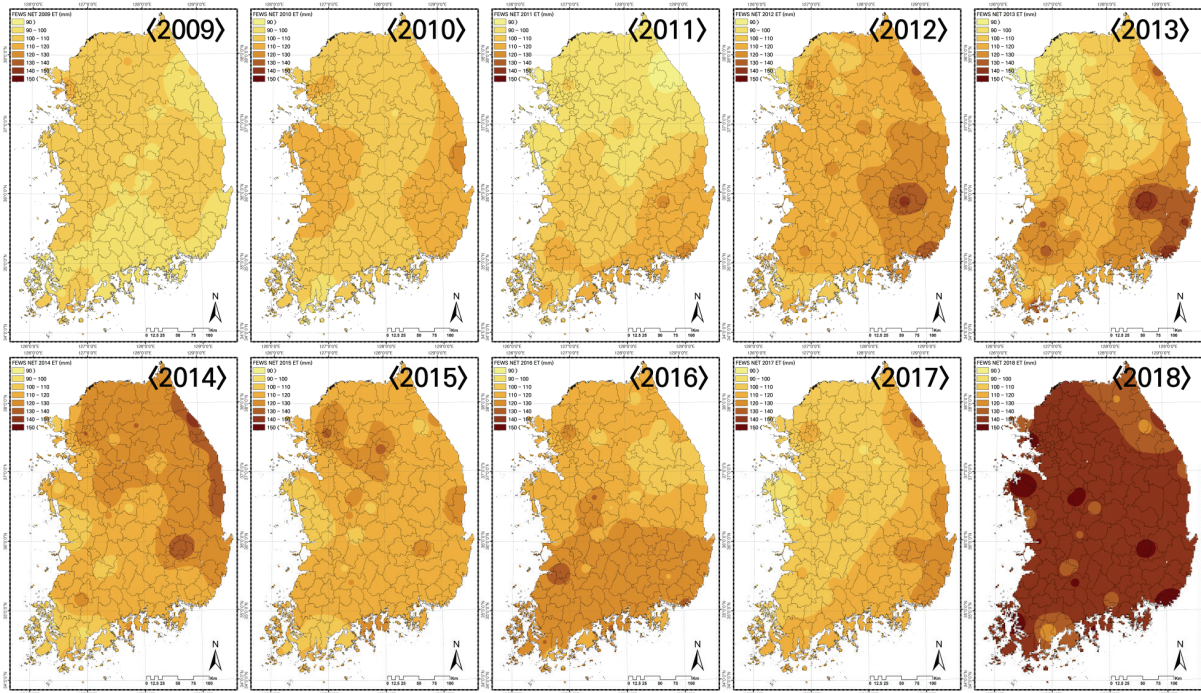


Fig. 4. Spatial Trend of Meteorological Station-Based ET Map in July 2009 to 2018

전라도보다 20 mm, 다른 지역과는 10 mm 크게 나타났다. 시간이 흐름에 따라 증발산량이 높게 산정되는 정도와 지역의 규모가 커지고 있으며, 2018년에는 우리나라 전역에서 다른 기간보다 증발산량이 30~40 mm 크게 나타났다.

3.3 위성영상 데이터 기반 증발산량 공간분포

위성영상기반 증발산량의 경우 FEWS NET에서 제공하는 월별 증발산량을 활용하였으며, 우리나라 전역의 면적 데이터 평균값을 산정하여 추세를 분석하였다. 기상관측소 데이터 기반 증발산량과는 달리 여름철 기간에서 상관계수가 -0.78로 강한 감소추세가 나타났으며, 그중 7월 증발산량 감소가 2009년 79.8 mm에서 2018년 75.8 mm, 상관계수 -0.84로 가장 크게 감소하였다. 봄철과 겨울철에 각각 -0.50, -0.41로 다소 감소하는 추세가 나타났으며, 가을철의 경우 상관계수가 -0.91로 아주 강한 감소추세가 나타났다.

2009년부터 2018년까지 7월 증발산량 분포를 도식화하여 Fig. 5에 나타내었다. 2009년부터 2018년까지 매년 우리나라 남부지역에서 다른 지역보다 증발산량이 30~40 mm 높게 나타났으며, 2011년 및 2014년에 강원도에서 증발산량이 크게 증가하여 우리나라 남부지역과 비슷한 크기의 증발산량이 나타났다. 지역별 추세의 경우 기상관측소 데이터 기반 증발산량 추세와 유사하게 나타났으며, 계절별 추세의 경우 전체 데이터를 평균하여 추세를 분석하는 과정에서 증발산량이 과소 산정되는 지역의 분포가 넓게 나타나 생긴 결과로 판단된다.

3.4 토양유효수분을 공간분포 및 경향성 분석

본 연구에서 산정한 증발산량 및 농촌진흥청에서 제공하는 데이터를 바탕으로 일 토양유효수분을 산정하였으며, 월 단위 평균값을 산정하여 월별 토양유효수분을 데이터를 구축하였다. 여름의 경우 상관계수가 -0.82로 토양유효수분이 감소하는 경향이 나타났으며, 가을철 0.56으로 증가하는 경향이 나타났다. ASOS 데이터 기반 PM 공식을 활용한 증발산량 데이터와 유사한 결과가 나타났으며, 증발산량의 증가로 토양유효수분이 감소하였음을 의미한다. 또한, 구축한 월 토양유효수분을 데이터를 기상관측소 데이터 기반 증발산량 데이터와 같이 공간보간을 진행하였으며, 2009년부터 2018년 사이 7월 토양유효수분을 Fig. 6에 나타내었다.

2014년에 경기도와 강원도에 토양유효수분이 크게 감소한 것으로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 전반적으로 토양유효수분이 감소하는 것으로 나타났다. 증발산량의 증가추세로 증발산량과 직접적인 영향을 받는 토양유효수분이 감소하였다. 2009년부터 2018년의 증발산량이 크게 나타나는 3월~7월기간의 평균 증발산량 및 토양유효수분을 Table 1에 비교하였다. FEWS NET 증발산량의 경우 3월 19.0 mm에서 7월 78.1 mm로 증가하였으며, ASOS 증발산량의 경우 63.1 mm에서 114.7 mm로 증가하였다. 반면 토양유효수분의 경우 3월 97.0%에서 6월 71.5%까지 감소하였으며, 7월에 다시 98.9%로 토양유효수분이 증가하였다.

여름철 증발산량 증가 및 토양유효수분 감소결과, 우리

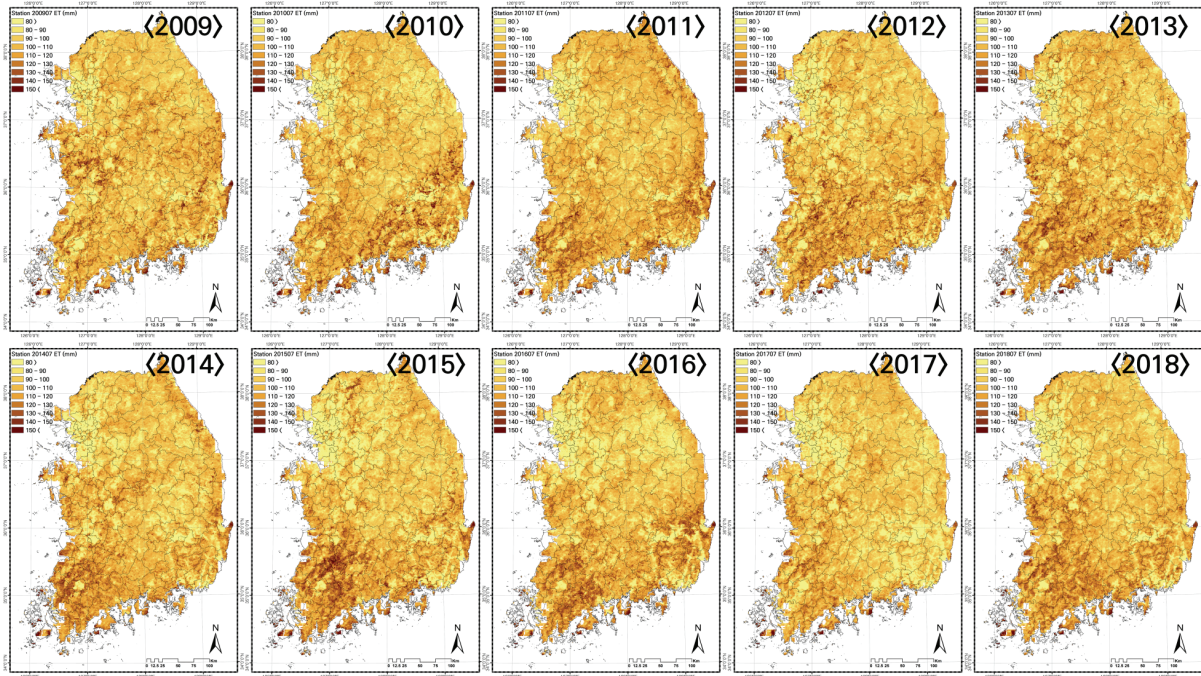


Fig. 5. Spatial Trend of FEWS NET ET map in July 2009 to 2018

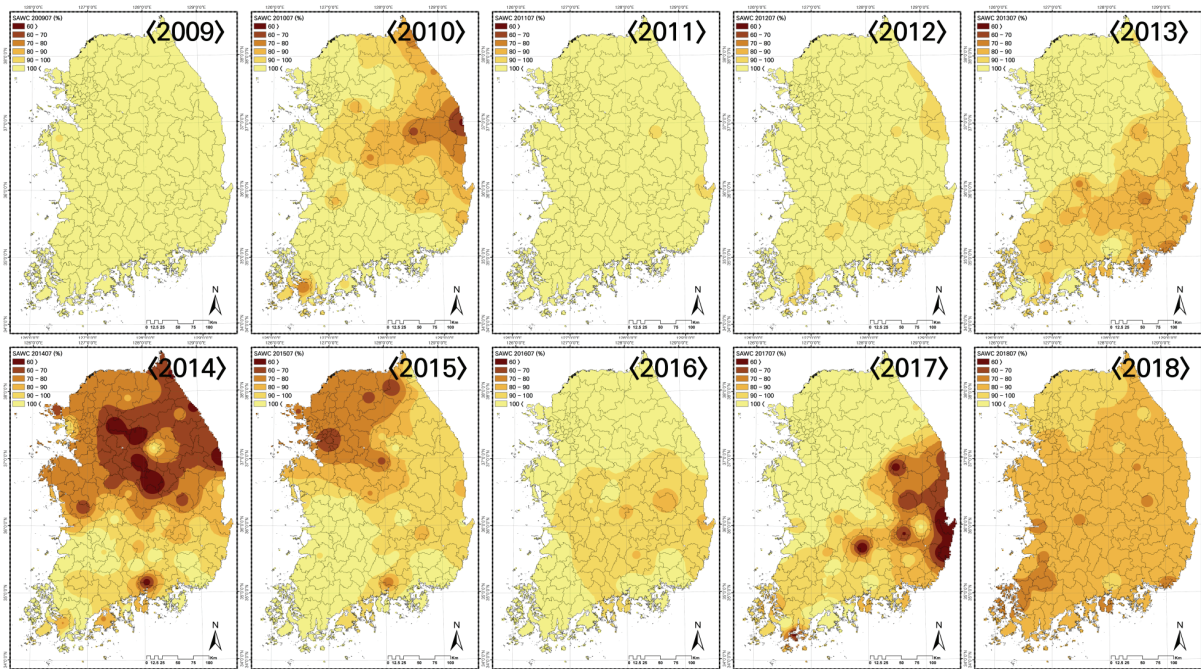


Fig. 6. Spatial Trend of Soil Available Water Capacity (SAWC) Map in July 2009 to 2018

Table 1. Monthly Evapotranspiration and SAWC of 2009-2018

| Month | FEWS NET (mm) | ASOS (mm) | SAWC (%) |
|-------|---------------|-----------|----------|
| March | 19.0 | 63.1 | 97.0 |
| April | 45.5 | 88.6 | 94.4 |
| May | 72.2 | 119.4 | 90.4 |
| June | 71.7 | 118.8 | 71.5 |
| July | 78.1 | 114.7 | 98.9 |

나라 발작물의 증발산량 증가로 인해 토양유효수분율을 감소로 이어져 가뭄 크기가 증가한 것으로 판단된다.

3.5 토양유효수분율 기반 가뭄 특성 분석

가뭄 특성을 파악하기 위하여 토양유효수분율을 기반으로 Runs 이론을 적용하여 일단위 가뭄 크기를 산정하였으며, Fig. 7과 같이 2009년부터 2018년까지 연별 가뭄 크기를 산정하였다. 2009년 우리나라 남부지역에서 다른 지역보다 5-6배 가뭄 크기가 높게 산정되었으며, 2017년의 경우 다른 기간보다 여름철 가뭄 크기가 전국적으로 가뭄 크기가 높게 나타났다. 또한, 남부지역보다 경기도와 강원도 지역에서 가뭄 크기가 높게 나타났다.

계절별 분석 결과 여름철 상관계수가 0.66으로 증가하는 경향이 나타났으며, 겨울철의 경우 -0.49로 감소하는 경향이 나타났다. 월별 분석결과 1월부터 4월까지 상관계수가 각각 -0.47, -0.50, -0.40, -0.45로 감소하는 경향이 나타났으나 5월부터 상관계수가 증가하여 6월 0.45, 7월 0.53, 8월 0.66으로 증가하는 경향이 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 기상관측소에서 수집한 기상데이터를 활용하여 FAO-56 Penman-Monteith 기반 증발산량을 산정하였으며, USGS FEWS NET에서 제공하는 위성영상기반 증발산량을 비교하였다. 분석 결과 RMSE는 40.8 mm 및 결정계수 0.58로 적합성이 있다고 판단하였으며, FEWS NET

증발산량보다 ASOS 기상데이터로 산정한 증발산량이 크게 나타났다.

기상관측소 데이터 기반 증발산량의 공간적 시간적 변화 분석의 경우 여름철 뚜렷한 증가추세가 나타났으며, 봄, 가을 및 겨울철 시기에는 증가 추세가 나타났다. 우리나라 남부지역에서 증발산량이 크게 나타났으며, 강원도 지역에서 증발산량이 크게 나타났다. 또한, 시계열 분석 결과 증발산량이 증가하는 경향이 나타났으며, 2018년에는 우리나라 전역에서 증발산량이 크게 나타났다. USGS FEWS NET 증발산량의 공간적 시간적 변화분석 결과 여름철 기간에서 증발산량 감소추세가 나타났으며, 우리나라 남부지역에서 지속적으로 높은 증발산량이 나타났다. 전반적인 공간분포는 FEWS NET 증발산량과 ASOS 기상데이터 기반 증발산량이 유사한 분포를 나타냈으며, 시계열 분석 결과 증가하는 경향이 나타났다. 이는 지구온난화로 인해 증발산량 산정 시 고려되는 기온이 증가하여 증발산량도 증가한 것으로 판단되며, 발가뭄의 빈도와 크기가 증대될 것으로 사료된다.

증발산량 및 토양특성을 고려하여 산정한 토양유효수분율 분포의 경우 증발산량이 높게 나타난 지역은 토양유효수분율이 낮게 나타났고 증발산량이 낮게 나타난 지역은 토양유효수분율이 높게 나타나 토양유효수분율과 증발산량이 반비례 관계인 것으로 나타났다. 공간적분포 역시 우리나라 남부지역에서 토양유효수분율을 낮게 나타났으며, 시간에 따라 토양유효수분율이 감소하는 경향이 나타났다. Runs 이론을 적용하여 토양유효수분율 60% 이하인 지점을 가뭄으로 판단하여 가뭄 지속기간, 크기, 강도를 산정하여 가뭄의

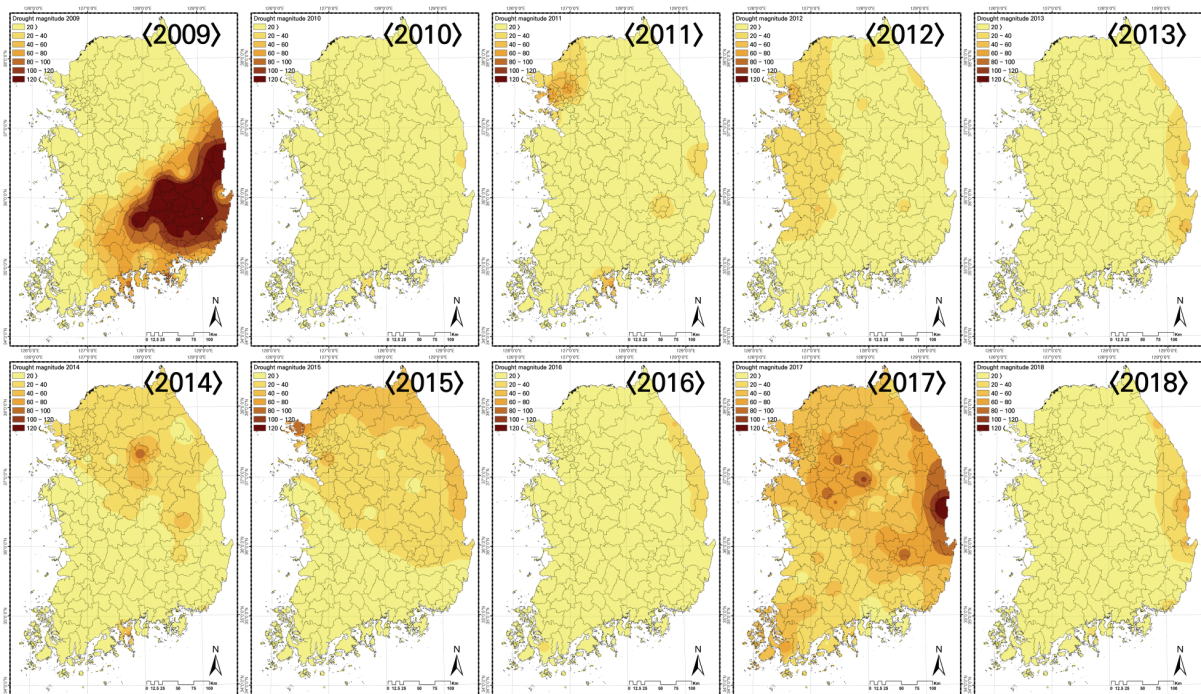


Fig. 7. Spatial Trend of Annual Drought Magnitude Based on Soil Available Water Capacity (SAWC) Using Runs Theory

특성을 분석하였다. 분석결과 증발산량 분포와 달리 경기도와 강원도 지역에 가뭄 크기가 높게 나타났다. 이는 증발산량 산정 시 고려되지 않은 강수량 같은 다른 인자들로 인해 생긴 차이로 판단되며, 발가뭄 분석 결과 우리나라의 경우 중부지역인 경기도와 강원도에서 가뭄이 나타났다.

본 연구의 결과 위성영상기반의 증발산량 및 이를 활용한 토양유효수분율 기반의 발가뭄 평가기법은 격자기반의 고해상도 가뭄정보를 제공함으로써 미세측지역 및 행정구역별 발가뭄 대책 의사결정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 향후 과거 위성영상 자료의 장기적인 자료를 축적하여 활용한다면 가뭄분석 및 가뭄예측의 신뢰성 있는 결과를 도출할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 공동연구사업의 연구비지원(과제번호: PJ014813022020)에 의해 수행되었습니다.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop Water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56*, Roma, Italy: FAO.
- Berg, A., and Sheffield, J. (2018). Soil moisture-evapotranspiration coupling in CMIP5 models: Relationship with simulated climate and projections. *Journal of Climate*, Vol. 31, No. 12, pp. 4865-4878.
- Cai, J., Liu, Y., Lei, T., and Pereira, L.S. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 145, No. 1-2, pp. 22-35.
- Chiew, F.H.S., Kamaladasa, N.N., Malano, H.M., and McMahon, T.A. (1995). Penman-Monteith FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-a pan data in Australia. *Agricultural Water Management*, Vol. 28, No. 1, pp. 9-21.
- Cho, H., Hwang, S., Cho, Y., and Choi, M. (2013). Analysis of spatial precipitation field using downscaling on the Korean Peninsula. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 11, pp. 1129-1140.
- Garcia, M., Raes, D., Allen, R., and Herbas, C. (2004). Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian Highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 125, No. 1-2, pp. 67-82.
- Hong, E.M., Nam, W.H., and Choi, J.Y. (2015). Climate change impacts on agricultural drought for major upland crops using soil moisture model -Focused on the Jeollanam-do-. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 3, pp. 65-76.
- Hong, E.M., Nam, W.H., Choi, J.Y., and Pachepsky, Y.A. (2016). Projected irrigation requirements for upland crops using soil moisture model under climate change in South Korea. *Agricultural Water Management*, Vol. 165, pp. 163-180.
- 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, No. 5, pp. 747-759.
- Hwang, S.W., Her, Y.G., and Chang, S.W. (2013). Uncertainty in regional climate change impact assessment using bias-correction technique for future climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 4, pp. 95-106.
- Jeon, M.G., Nam, W.H., Hong, E.M., Hwang, S., Ok, J., Cho, H., et al. (2019). Comparison of reference evapotranspiration estimation methods with limited data in South Korea. *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol. 46, No. 1, pp. 137-149.
- Jun, S.M., Chung, E.S., Lee, S.H., and Kim, Y. (2013). Development and application of robust decision making technique considering uncertainty of climatic change scenarios. *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 46, No. 9, pp. 897-907.
- Kang, M.G., Lee, K.M., Ko, I.H., and Jeong, C.Y. (2008). Development of a integrated indicator system for evaluating the state of watershed management in the context of river basin management using factor analysis. *Journal of Water Resource Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 277-291.
- Kim, S., Lee, T., and Shin, Y. (2019). Estimation of high-resolution soil moisture based on Sentinel-1A/B SAR sensors. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 61, No. 5, pp. 89-99.
- Lee, H.J., Nam, W.H., Yoon, D.H., Hong, E.M., Kim, D.E., Svoboda, M.D., et al. (2019). Satellite-based Evaporative Stress Index (ESI) as an indicator of agricultural drought in North Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 61, No. 3, pp. 1-14.
- Lee, H.J., Nam, W.H., Yoon, D.H., Hong, E.M., Kim, T., Park, J.H., et al. (2020). Percentile approach of drought severity classification in Evaporative Stress Index

- for South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 63-73.
- Lee, Y.G., Kim, S.H., Ahn, S.R., Choi, M.H., Lim, K.S., and Kim, S.J. (2015). Estimation of spatial evapotranspiration using Terra MODIS satellite image and SEBAL model -A case of Yongdam Dam watershed. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 18, No. 1, pp. 90-104.
- López-Urrea, R., de Santa Olalla, F.M., Fabeiro, C., and Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, Vol. 85, No. 1-2, pp. 15-26.
- Mun, Y.S., Nam, W.H., Jeon, M.G., Kim, H.J., Kang, K., Lee, J.C., et al. (2020). Evaluation of regional drought vulnerability assessment based on agricultural water and reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 97-109.
- Nam, W.H., Choi, J.Y., Yoo, S.H., and Engel, B.A. (2012). A real-time online drought broadcast system for monitoring soil moisture index. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 357-365.
- Nam, W.H., Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Tadesse, T., and Wilhite, D.A. (2015). Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agricultural Water Management*, Vol. 160, pp. 106-117.
- Nam, W.H., Hong, E.M., Jang, M.W., and Choi, J.Y. (2014). Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 5, pp. 77-87.
- Nam, W.H., Tadesse, T., Wardlow, B.D., Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Hong, E.M., et al. (2018). Developing the vegetation drought response index for South Korea (VegDRI-SKorea) to assess the vegetation condition during drought events. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, No. 5, pp. 1548-1574.
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P., and Peltola, H. (2018). Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, Vol. 50, pp. 1177-1192.
- Suleiman, A.A., and Hoogenboom, G. (2009). A comparison of ASCE and FAO-56 reference evapotranspiration for a 15-min time step in humid climate conditions. *Journal of Hydrology*, Vol. 375, No. 3-4, pp. 326-333.
- Sung, J.H., Kang, H.S., Park, S.H., Cho, C.H., Bae, D.H., and Kim, Y.O. (2012). Projection of extreme precipitation at the end of 21st century over South Korea based Representative Concentration Pathways (RCP). *Atmosphere*, Vol. 22, No. 2, pp. 221-231.
- van der Linden, E.C., Haarsma, R.J., and van der Schrier, G. (2019). Impact of climate model resolution on soil moisture projections in central-western Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, pp. 191-206.
- Yoon, D.H., Nam, W.H., Lee, H.J., Hong, E.M., and Kim, T. (2020). Drought hazard assessment using MODIS-based Evaporative Stress Index (ESI) and ROC analysis. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 3, pp. 51-61.
- Yoon, D.H., Nam, W.H., Lee, H.J., Hong, E.M., Kim, T., Kim, D.E., et al. (2018). Application of Evaporative Stress Index (ESI) for satellite-based agricultural drought monitoring in South Korea. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 60, No. 6, pp. 121-131.

| | |
|-----------------|-------------------|
| Received | December 1, 2020 |
| Revised | December 2, 2020 |
| Accepted | December 16, 2020 |