



A study on spatial onset characteristics of flash drought based on GLDAS evaporative stress in the Korean Peninsula

Kang, Minsun^a · Jeong, Jaehwan^b · Lee, Seulchan^c · Choi, Minha^{d,e*}

^aMaster Student, Department of Global Smart City, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^bResearch Professor, Center for Built Environment, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^cPh.D Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^dProfessor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^eProfessor, School of Civil, Architecture Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 23-053

Received: 2 September 2023; Revised: 23 September 2023; Accepted: 4 October 2023

Abstract

Flash drought (FD), characterized by the rapid onset and intensification, can significantly impact ecosystems and induce immediate water stress. A more comprehensive understanding of the causes and characteristics of FD events is required to enhance drought monitoring. Therefore, we investigated the FD events took place over the Korean peninsula using Global Land Data Assimilation System (GLDAS) data from 2012 to 2022. We first detected FD events using the stress-based method (Standardized Evaporative Stress Ratio, SESR), and analyzed the frequency and duration of FDs. The FD events were classified into three cases based on the variations in Actual Evapotranspiration (AET) and potential Evapotranspiration (PET), and spatially analyzed. Results revealed that there are regional disparities in frequency and duration of FDs, with a mean frequency of 6.4 and duration of 31 days. When classified into Case 1 (normal condition), Case 2 (AET-driven), and Case 3 (PET-driven), we found that Case 2 FDs emerged approximately 1.5 times more frequently than those driven by PET (Case 3) across the Korean peninsula. Case 2 FDs were found to be induced under water-limited conditions, and led both AET and PET to be decreased. Conversely, Case 3 FDs occurred under energy-limited conditions, with increase in both. Case 2 FDs predominantly affected the northwestern and central-southern agricultural regions, while Case 3 occurred in the eastern region, characterized by forested land cover. These findings offers insights into our understanding of FDs over the Korean peninsula, considering climate factors, land cover, and water availability.

Keywords: Flash droughts, Standardized evaporative stress ratio, Evapotranspiration, GLDAS

GLDAS 증발 스트레스 기반 한반도 돌발가뭄의 공간적 발생 특성 연구

강민선^a · 정재환^b · 이슬찬^c · 최민하^{d,e*}

^a성균관대학교 글로벌스마트시티융합전공 석사과정, ^b성균관대학교 건설환경연구소 연구교수,

^c성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 박사수료, ^d성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 교수, ^e성균관대학교 건설환경공학부 교수

요 지

돌발가뭄(Flash drought, FD)은 기존 가뭄과는 달리 급작스러운 발생이 대표적인 특징으로, 즉각적인 수분 스트레스를 유발하여 생태계에 주요한 영향을 미친다. 보다 효과적인 돌발가뭄의 모니터링을 위해서는 돌발가뭄의 특징과 원인에 대한 보다 종합적인 이해가 필요하다. 이에, 본 연구에서는 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 자료를 사용하여 2012년부터 2022년 사이 한반도 전역에서 발생한 돌발가뭄에 대해 분석하고자 하였다. 스트레스 기반 탐지 기법인 표준 증발 스트레스 비율(Standardized Evaporative Stress Ratio, SESR)의 변화를 바탕으로 돌발가뭄을 탐지하였으며, 발생 빈도와 기간에 대해 분석하였다. 또한, 탐지된 돌발가뭄 사건들을 실제 증발산(Actual Evapotranspiration, AET)과 잠재 증발산(Potential Evapotranspiration, PET)의 변화를 기반으로 세 가지 케이스로 분류하였으며, 각 케이스 별 발생 특성 및 공간 분포에 대해 분석하였다. 그 결과, 돌발가뭄의 발생 빈도와 기간에 지역적인 편차가 있는 것을 확인하였으며, 평균 빈도는 6.4회, 평균 발생 기간은 31일로 나타났다. 일반적인 돌발가뭄인 Case 1, AET의 감소가 주 원인이 되어 발생한 Case 2, PET의 증가에 의해 발생한 Case 3으로 돌발가뭄 사건들을 분류하였을 때, 한반도에서는 Case 1 돌발가뭄이 1,448건으로 가장 많이 발생했으며, Case 2 돌발가뭄이 Case 3 돌발가뭄보다 약 1.5배 더 많이 일어난 것을 확인할 수 있었다. Case 2 돌발가뭄은 수분 제한 조건(water-limited condition)에서 발생하여 AET와 PET가 모두 감소하는 결과로 이어졌으며, Case 3 돌발가뭄은 에너지 제한 조건(energy-limited condition)에서 발생한 이후 AET와 PET가 모두 증가하였다. Case 2 돌발가뭄은 주로 북서부와 중남부에 위치한 농경지에 영향을 주었으며, Case 3 돌발가뭄은 산지에 해당하는 동부에서 집중적으로 발생하였다. 본 연구의 결과들은 기후 요소, 토지 피복 및 수분 가용성을 고려한, 돌발가뭄에 대한 이해를 돕고, 보다 효과적인 가뭄 대응 방안 수립에 기여할 수 있다.

핵심용어: 돌발가뭄, 표준 증발 스트레스 비율, 증발산, GLDAS

*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7527

E-mail: mhchoi@skku.edu (Choi, Minha)

1. 서론

기후변화로 인해 수문 순환이 가속화됨에 따라 극한 강우, 폭염 등 예측이 어려운 이상기후 현상이 빈번하게 발생하고 있다(Benestad *et al.*, 2022). 가뭄은 대표적인 수문학적 재해로, 발생과 해소의 시점이 불분명하고 광범위한 지역에 걸쳐 나타나기 때문에 생태계, 수자원, 식량 안보에 막대한 악영향을 끼친다(Dai, 2011). 일반적으로 가뭄은 장기적인 강수 부족에 의해 서서히 발생하여 오랜 기간 지속되는 특징을 가지고 있으나, 최근 기후변화에 의한 영향으로 빈도와 심도가 증가하고 있을 뿐 아니라 발생 특성 또한 변화하고 있다(Trenberth *et al.*, 2014). 돌발가뭄(Flash Drought, FD)은 Otkin *et al.* (2013)에 의해 정의된 새로운 종류의 가뭄으로, 빠르게 발생하여 급격하게 심화되는 특징을 가지고 있으며, 2012년 미국 중부 가뭄 이후 주목받기 시작했다(Basara *et al.*, 2019; De-Angelis *et al.*, 2020). 급작스럽게 발생하는 특성에 의해 돌발가뭄은 전통적인 방법으로는 예측 및 관리하기 어렵다는 것이 밝혀졌으며, 미국(Basara *et al.*, 2019), 러시아(Hunt *et al.*, 2021), 중국(Yuan *et al.*, 2019) 및 아프리카(Yuan *et al.*, 2018) 대륙 등 전 세계 다양한 지역에서 이를 위한 연구가 이루어졌다. 한반도에서 또한 강수 부족 현상이 일어나고 있으며, 이로 인해 심한 가뭄의 영향을 받고 있다(Zhang and Zhou, 2015). 최근에는 심각한 가뭄과 함께 새로운 유형의 돌발가뭄이 국내에도 발생하고 있으며, 상당한 경제적 및 농업적 피해를 초래하고 있다(Lee *et al.*, 2022a, 2022b; Kang *et al.*, 2023).

돌발가뭄의 발생에는 다양한 기상학적, 수문학적 요인들이 영향을 끼치며, 특히 강수량의 감소와 증발 수요의 증가가 돌발가뭄의 급격한 심화에 큰 원인이 될 수 있는 것으로 알려졌다(Otkin *et al.*, 2018). 돌발가뭄 발생 시, 강수량의 부족으로 지표와 대기가 건조해짐에 따라 토양수분과 증발산이 감소하며, 증발 수요는 증가하여 높은 증발 스트레스로 이어진다. 이와 같이 가용 수량, 에너지와 돌발가뭄 간의 관계를 파악하고 돌발가뭄의 발생 기작을 파악하기 위해 앞선 연구들에서는 토양수분(Liu *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2019), 증발 수요(Ha *et al.*, 2020; Hobbins *et al.*, 2016), 증발산량과 증발 스트레스(Hunt *et al.*, 2021; Nguyen *et al.*, 2019), 그리고 대기 온도(Mo and Lettenmaier, 2015)를 포함한 다양한 수문기상학적 인자들을 활용하여 돌발가뭄을 분석하였다.

돌발가뭄이 발생하는 시점을 특정하기 위해, 선행연구들은 특정 수문 인자의 스트레스가 발생하는 것에 초점을 맞춘 스트레스 기반(stress-based) 기법과 가뭄 상황에 발생하는 수문 인자의 변화 정도와 속도에 초점을 맞춘 변화 기반(change-based) 기법을 중심으로 수행되었다(Christian *et al.*, 2019;

Mahto and Mishra, 2020; Qing *et al.*, 2022). Christian *et al.* (2019)은 대표적인 스트레스 기반 돌발가뭄 분석 연구로, 증발 스트레스의 정도에 따라 돌발가뭄 발생 여부를 판단하였고, 표준 증발 스트레스 비율(Standardized Evaporative Stress Ratio, SESR)의 사용을 제안하였다. 변화 기반 돌발가뭄 연구는 주로 토양수분의 급격한 감소를 의미하는 rate of intensification (RI) 지수를 활용하였으며, 토양수분 백분위수(percentile)의 변화에 따라 돌발가뭄의 발생 시점을 정의하였다(Mahto and Mishra, 2020; Qing *et al.*, 2022).

SESR을 이용한 돌발가뭄 탐지 기법은 실제 증발산(Actual Evapotranspiration, AET)과 잠재 증발산(Potential Evapotranspiration, PET)의 비율로부터 증발 스트레스를 추정하여 돌발가뭄을 분석한다. 이 방법은 AET와 PET만을 활용하여 돌발가뭄을 탐지할 수 있어 매우 효과적이며, 수분 제한 환경(Water-limited condition)과 에너지 제한 환경(Energy-limited condition)에서 발생한 가뭄을 모두 탐지할 수 있다. 복잡하거나 다양한 인자를 요구하지 않는다는 점은 북한 등 미계측 지역을 탐지하는 데 있어서 매우 유리한 장점으로 작용한다. 또한 수분 및 에너지 제한 환경을 모두 탐지할 수 있으므로, 계절적 변화가 큰 한반도의 돌발가뭄을 탐지하는 데 적합하다. 이러한 특성을 활용하여, 본 연구에서는 2012년부터 2022년까지 한반도에서 발생한 돌발가뭄의 공간적 분포 특성과 발생 메커니즘을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 재분석자료 기반 AET와 PET 데이터를 활용하였으며, 증발 스트레스를 계산하여 돌발가뭄을 탐지하였다. 또한, 돌발가뭄에 대한 AET와 PET의 서로 다른 기여도에 따라 가뭄 사건을 분류하여 한반도에서 발생한 돌발가뭄의 원인을 분석하고, 각 유형별 돌발가뭄이 발생하는 조건과 메커니즘의 차이를 파악하고자 하였다.

2. 연구지역 및 데이터

2.1 연구지역

한반도는 북위 33°에서 43°, 동경 124°에서 131°에 걸쳐 있으며, 전체 면적은 약 223,516 km²이다(Fig. 1). 한반도의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)은 미국 항공우주국(NASA)의 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 데이터를 활용하여 해상도 30 m 자료를 제공받았으며, 토지피복 데이터는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)의 International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) 분류로부터 획득하였다. 북부, 동부 및 중남부 지역은 산맥이 위치하고 고도는 약 1,000~2,000 EL.m이며, 서부의 저고도 평야 지대는 주로 농지로 이루어져 있다. 지리적으로

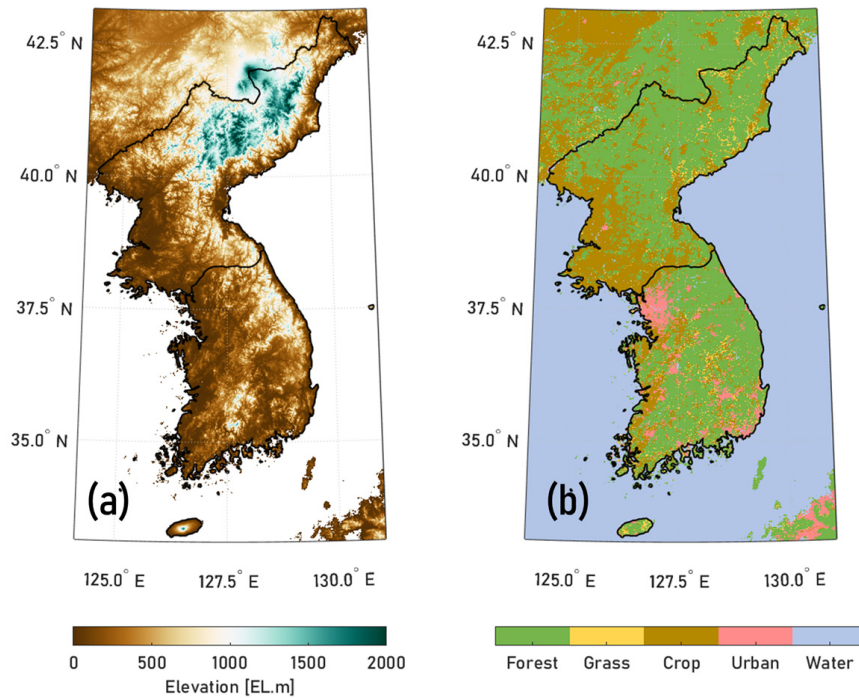


Fig. 1. (a) Elevation and (b) land cover classification map of the Korean peninsula

는 중위도 온대성 기후대에 위치하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 연강수량은 1,100~1,300 mm로, 여름철 강수량이 연강수량의 60% 이상을 차지하며 계절적, 지역적 편차가 크게 나타난다는 특징이 있다. 한국은 동아시아 몬순(monsoon) 기후대에 영향을 받아 강수량의 변동이 불규칙적이며, 가뭄 또한 매우 큰 시공간적 변화와 함께 나타난다. 특히 2015년 이후 매년 가뭄이 발생하고 있으며, 극심한 가뭄 현상이 지속적으로 나타나고 있다. 최근에는 전 세계적으로 문제가 되는 새로운 유형의 가뭄인 돌발가뭄 또한 발생하고 있으며, 이에 국내에서도 돌발가뭄을 분석하기 위한 연구가 수행되고 있다(Kang *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022a).

2.2 데이터

본 연구는 증발산 자료를 기반으로 돌발가뭄을 탐지, 돌발가뭄의 발생 특성을 파악하고 돌발가뭄의 발생에 영향을 미치는 인자를 분석하는 것을 목적으로 하며, 급격하게 발생하는 돌발가뭄의 탐지가 가능하도록 짧은 시간해상도의 자료를 사용하고자 하였다. 이에, 국내 지점 기반 정확도가 확보된(Lee *et al.*, 2020) 지표 모델(Land Surface Model, LSM) 기반 재분석자료(reanalysis data)인 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 데이터를 사용하였다. GLDAS는 위성 및 지상 관측 데이터를 함께 사용하여 지표면 상태(state)와 플럭스(flux) 등의 기후 자료를 제공한다(Rodell *et al.*, 2004). 본 연

구에서 사용된 데이터셋은 Noah 모델 기반 2.1버전(GLDAS_NOAH025_3H_2.1)으로, 3시간, 0.25°의 시공간 해상도를 가지고 있다. 본 연구에서는 AET 및 PET 자료를 분석에 활용하였으며, 3시간 간격 데이터를 일 단위로 평균하여 사용하였다.

3. 방법론

3.1 표준 증발 스트레스 기반 가뭄지수(Standardized Evaporative Stress Ratio)

돌발가뭄은 빠르게 시작하고 강도가 급격하게 심화된다는 특징을 가지고 있으며, 증발 스트레스 지수를 사용하여 탐지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 돌발가뭄 식별을 위해 AET와 PET를 기반으로 하는 SESR (Christian *et al.*, 2019) 지수를 사용하였다. 앞선 연구에서 제안된 바에 따라 일 단위 AET와 PET 데이터를 pentad (5일) 시간 단위로 평균하여 사용하였다. SESR을 계산하기 위한 첫 번째 단계는 Eq. (1)을 사용하여 AET와 PET의 비율인 ESR (Evaporative Stress Ratio)를 계산하는 것이다. ESR은 일반적으로 [0, 1]에서 정의되며, 0에 가까울수록 증발 수요가 높고 건조한 환경임을 의미한다.

$$ESR = \frac{AET}{PET} \quad (1)$$

이후, ESR의 상대적 증/감을 보다 효과적으로 파악하기 위해 각 지점에서 pentad ESR을 표준화(standardize)한 SESR을 계산한다. SESR은 다음과 같이 계산된다:

$$SESR_{ijt} = \frac{ESR_{ijt} - \overline{ESR_{ijt}}}{\sigma_{ESR_{ijt}}} \quad (2)$$

여기서, i, j 는 GLDAS의 픽셀 좌표를, t 는 시간(pentad)을 의미한다. 돌발가뭄을 탐지하는 데에는 SESR의 변화량 및 변화 속도가 사용되므로, SESR의 변화량($SESR_t - SESR_{t-1}$)인 $\Delta SESR$ 을 먼저 계산하였으며, Eq. (3)에 따라 이를 표준화하여 사용하였다.

$$S(\Delta SESR_{ijt}) = \frac{\Delta SESR_{ijt} - \overline{\Delta SESR_{ijt}}}{\sigma_{\Delta SESR_{ijt}}} \quad (3)$$

3.2 돌발가뭄 정의

일반적인 가뭄과의 구분을 위해, Otkin *et al.* (2018)은 가뭄이 강화되는 속도를 기반으로 돌발가뭄을 정의하였다. SESR 기반 기법은 가뭄 강도(증발 스트레스)의 신속한 증가율을 고려하여 돌발가뭄의 시작과 종료 시점을 탐지하며, 다음의 네 가지 기준을 충족할 경우 돌발가뭄 사건으로 정의된다:

- 1) 돌발가뭄은 최소 5개의 SESR 변화($\Delta SESR$)를 포함한다(30일 이상의 시간).

- 2) 최종 SESR 값은 전체 SESR 시계열의 20번째 백분위수(percentile) 이하여야 한다.
- 3) 돌발가뭄의 시작과 종료 시점 사이 $\Delta SESR$ 은 전체 SESR의 40번째 백분위수 이하여야 한다.
- 4) 돌발가뭄 기간 동안의 평균 $\Delta SESR$ 은 25번째 백분위수보다 작아야 한다.

여기서, 돌발가뭄으로서 정의되는 기간은 SESR이 감소하는 기간으로, 돌발가뭄 사건이 탐지될 경우 돌발가뭄의 시작은 SESR이 가장 높은 시점, 돌발가뭄의 종료는 SESR이 최소가 되는 시점으로 정의된다. 기준 1은 순간적인 단기 건조 기간을 제외함으로써 실질적인 수자원의 감소 및 생태계에 스트레스가 발생하는 경우에만 돌발가뭄이 감지되도록 한다. 기준 2는 가뭄 강도가 가장 심할 때(ESR의 최솟값이 발생한 시점) 증발 스트레스가 일정 기준 이상 높아야 한다는 것을 의미하며, 기준 3과 4는 빠르게 발달하는 돌발가뭄의 특징을 반영하는 조건이 된다.

4. 연구 결과 및 토의

4.1 한반도 돌발가뭄 발생 현황 분석

한반도의 돌발가뭄 발생 현황을 파악하기 위해 SESR 및 $\Delta SESR$ 기반 4가지 조건을 적용하여 2012년부터 2022년까지 돌발가뭄을 탐지한 결과(발생 횟수, 평균 발생 기간)를 Fig. 2

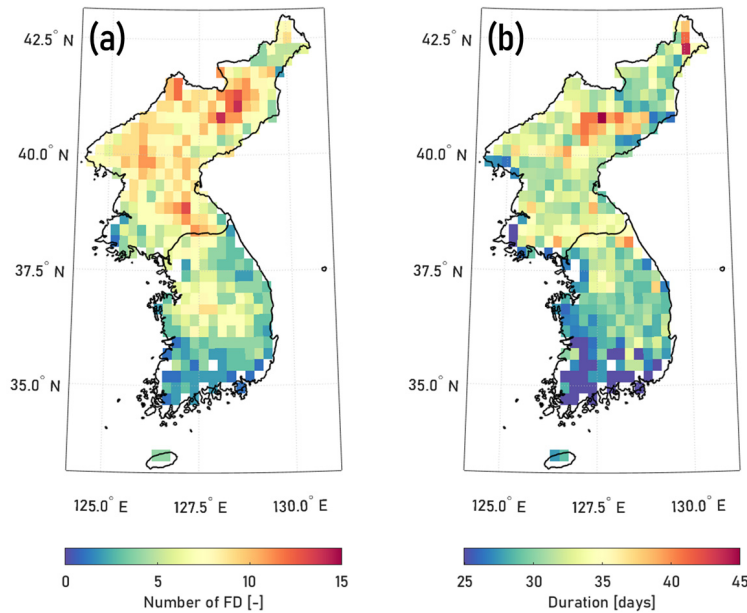


Fig. 2. (a) Number and (b) mean duration of Flash Drought (FD) events over the Korean peninsula from 2011 to 2022

에 나타났다. 11년간 한반도에서 돌발가뭄은 평균 약 6.4회 발생하였고, 평균적으로 31일에 걸쳐 발생하였다. 특히, 남한과 비교하면 북한 지역이 증발 스트레스에 취약하여 돌발가뭄의 발생 횟수가 더 많고 지속기간이 더 긴 것으로 나타났다. 11년간 한반도 북부 산간 지역에서 돌발가뭄은 최대 15회 발생했으며, 최장 45일까지 지속되었다. 남한의 경우 경기 남부와 충청도를 비롯한 중부 내륙 지역에서 더 많은 돌발가뭄이 발생하였다. 서해 및 남해 연안 지역에서는 상대적으로 돌발가뭄의 발생 빈도와 지속기간이 짧게 나타났다. Fig. 2의 돌발가뭄 발생 빈도와 지속기간 패턴을 비교해보면, 지리적, 기후적 특성에 영향을 받아 돌발가뭄의 빈도와 기간 사이 관련성이 일반적으로 나타나지는 않지만, 전반적으로 위도에 따라 발생 빈도의 분포와 지속기간의 분포가 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Mukherjee and Mishra, 2022; Pendergrass *et al.*, 2020). 따라서, 본 절의 결과는 돌발가뭄 취약성에 대한 지역적 편차는 존재하나, 돌발가뭄에 더 자주 노출되는 지역일수록 더 오래 가뭄이 지속될 수 있음을 보인다.

4.2 돌발가뭄 발생 원인에 따른 분류: 실제증발산과 잠재증발산의 영향

가뭄은 일반적으로 강수량의 부족에 따른 토양수분과 AET의 감소, 증발 수요 및 PET의 증가에 따른 증발 스트레스의 증가가 복합적 원인으로 작용하여 발생한다. 본 장에서는 돌발가뭄이 발생한 원인 중 수분량의 부족에 따른 AET 감소에 의한 영향과 외부 스트레스 증가(PET의 증가)에 의한 영향을 살펴보고자 하였으며, 이를 위해 4.1장에서 탐지된 돌발가뭄 사건들을 세 가지 케이스(이하 Case 1, 2, 3)로 분류하였다. Fig. 3은

돌발가뭄 발생 전, 후 AET, PET, ESR의 증/감에 따라 사건을 분류한 결과를 나타내며, Case 1은 AET는 감소하고 PET는 증가하여 ESR이 감소한 일반적인 돌발가뭄, Case 2는 일반적인 경우와는 달리 PET가 감소한 사건, Case 3은 AET가 증가한 사건을 나타낸다. 상대적인 증/감 정도를 파악하기 위해 모든 boxplot은 백분위수를 사용하였다. 돌발가뭄은 ESR이 일정 수준 이상 감소한 경우 탐지되기 때문에, Fig. 3(b)의 AET는 PET가 감소한 정도보다 크게 감소하였으며(AET에 의해 주도적으로 발생), Fig. 3(c)의 PET는 AET가 증가한 정도보다 크게 증가하였음을 알 수 있다(PET에 의해 주도적으로 발생).

과거 대다수의 돌발가뭄은 증발 수요 및 PET가 먼저 증가하고 토양수분이 감소하는, energy limited condition에서 water limited condition으로의 전환기에 발생하였다(Otkin *et al.*, 2018). 한편, water limited condition에서 발생하는 돌발가뭄의 경우 강수량의 감소로 인해 주로 발생하고, PET가 미치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 알려져 있다(Kang *et al.*, 2023; Pendergrass *et al.*, 2020). Case 2의 경우는 PET가 일부 감소하였음에도 돌발가뭄이 발생한 것으로 나타난다. 이는 AET의 급격한 감소에 의해 발생한 것으로 판단할 수 있다. 즉, 강수량과 토양수분의 부족이 AET의 감소로 이어지는 수분 제한 환경에서 발생한 돌발가뭄에 해당한다. 반면, PET의 급격한 증가를 AET가 충족시키지 못해 증발 스트레스가 커진 Case 3의 경우 에너지 제한 환경에서 발생한 돌발가뭄인 것으로 판단할 수 있다. 2012년부터 2022년까지 Case 1 돌발가뭄은 1,448건, Case 2는 482건, Case 3은 328건 발생하였으며, 한반도에서는 강수량의 부족에 의한 돌발가뭄이 PET의 증가에 지배적인 영향을 받아 발생한 돌발가뭄보다 약 1.5배 많이

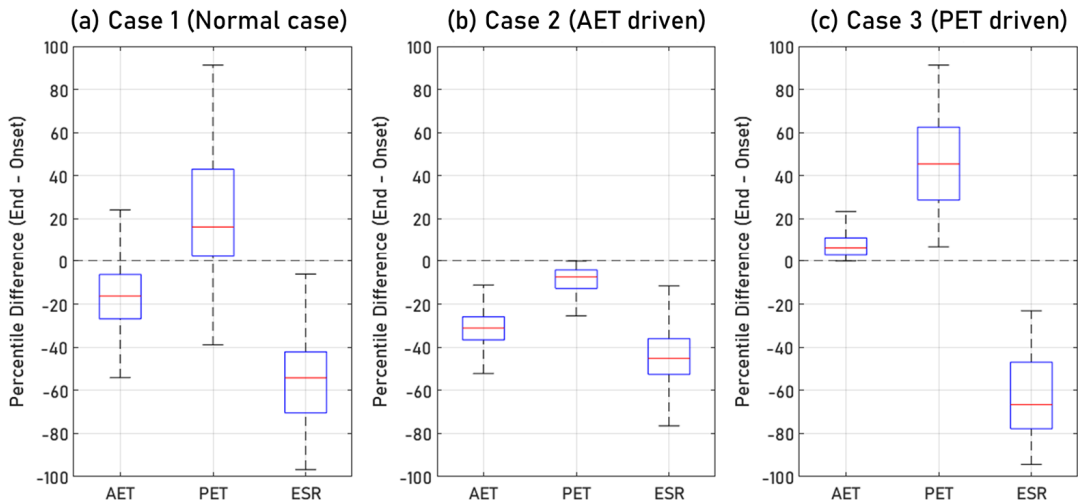


Fig. 3. Differences of AET, PET and ESR percentiles between time steps at the end and onset of the FD events (end point minus onset point), driven by (a) AET and PET, (b) mainly AET, and (c) mainly PET

일어났음을 알 수 있다. 일반적으로, ESR이 낮다는 것은 증발에 대한 대기 수요가 높아지는 것에 비해 이용 가능한 수분이 부족한 환경을 의미하며, 높은 증발 스트레스를 유발한다. Fig. 3은 Case 1에 비해 Case 2의 ESR이 적게 감소하고 Case 3의 ESR이 가장 많이 감소한다는 것을 나타내는데, 이는 ESR의 감소에 AET의 감소가 미치는 영향보다 PET의 증가가 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미한다. 이러한 결과를 통해, 기후변화와 함께 대기 수분 수요가 변화함에 따라 가뭄을 분석하는데 있어 PET가 매우 중요한 기후 인자임을 확인할 수 있다(Wang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022).

4.3 한반도 돌발가뭄의 특성: 공간적 분석

본 장에서는 앞선 4.2장에서 분류한 세 가지 돌발가뭄 케이스의 공간적 특징을 분석하고자 한다. Figs. 4 and 5는 2012년부터 2022년까지 한반도에서 발생한 세 가지 돌발가뭄 케이스의 전, 후 각각 AET와 PET의 변화를 나타낸다. 발생 지역을 먼저 살펴보면, Case 1은 한반도 전역에 걸쳐 발생하였으며, Case 2는 북한 지역과 남부 내륙 지역(충청도)에서, Case 3은 북부 지역 일부(함경도)와 남동부 지역(경상도)에서 주로 발생하였다. GLDAS 픽셀 기준, Case 2는 한반도의 약 67% 지역에서, Case 3은 약 54% 지역에서 발생하였다. 한반도 백터 내 흰 영역은 각 Case에 해당하는 돌발가뭄 사건이 발생하지 않은 지역을 의미한다. Case 1의 경우 AET는 돌발가뭄 발생 후 평균 약 0.59 mm/day 감소하였으며(Fig. 4(a)), PET는 약

2.20 mm/day 증가하였다(Fig. 5(a)). AET가 감소하는 정도는 한반도 전역에 걸쳐 균일한 모습을 보였으나, PET의 경우 북부 고지대에서 더욱 크게 증가하였으며, 최대 약 5 mm/day 증가하는 것을 확인할 수 있다. Case 2 돌발가뭄 사건에서 Δ PET는 평균 약 -0.70 mm/day, Δ AET는 -1.16 mm/day였으며, 북서부(평안도) 지역에서 최대 -2 mm/day인 것으로 나타났다(Figs. 4(b) and 5(b)). Case 3 돌발가뭄 전후 AET의 변화는 미미하였고, PET는 전체적으로 약 3.94 mm/day 증가하였다. PET가 가장 크게 증가한 곳은 북부 지역으로, 최대 6 mm/day 이상 크게 증가하였다(Figs. 4(c) and 5(c)).

Case 2 돌발가뭄의 경우 PET가 감소하였지만 AET가 더 큰 폭으로 감소하기 때문에 수분 스트레스는 증가하게 되고 수분 제한 환경에 의한 가뭄 피해가 발생한다. 반면 Case 3의 경우, AET와 PET가 모두 증가하며, PET가 AET에 비해 큰 폭으로 증가하여 에너지 제한 환경에 의한 돌발가뭄 피해가 발생한다. Figs. 4(b) and 4(c)와 Figs. 5(b) and 5(c)의 분포에서 한반도 북서부 지역 및 중남부 지역, 특히 농경지에서는 Case 2 돌발가뭄이 주로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 산림이 주된 토지 피복인 북부 지역에서는 돌발가뭄의 주요 원인이 PET이며, AET의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 즉, Figs. 4 and 5는 전반적으로 AET의 영향은 북서부 저지대를 포함한 농경지에서 비교적 크며, 산지에서는 PET가 주 영향 인자인 것을 나타낸다. Case 3 돌발가뭄에서 Δ PET가 크게 나타난다는 것은 증발 수요가 크게 증가하였다는 것을 의미하며, 증발 수요가

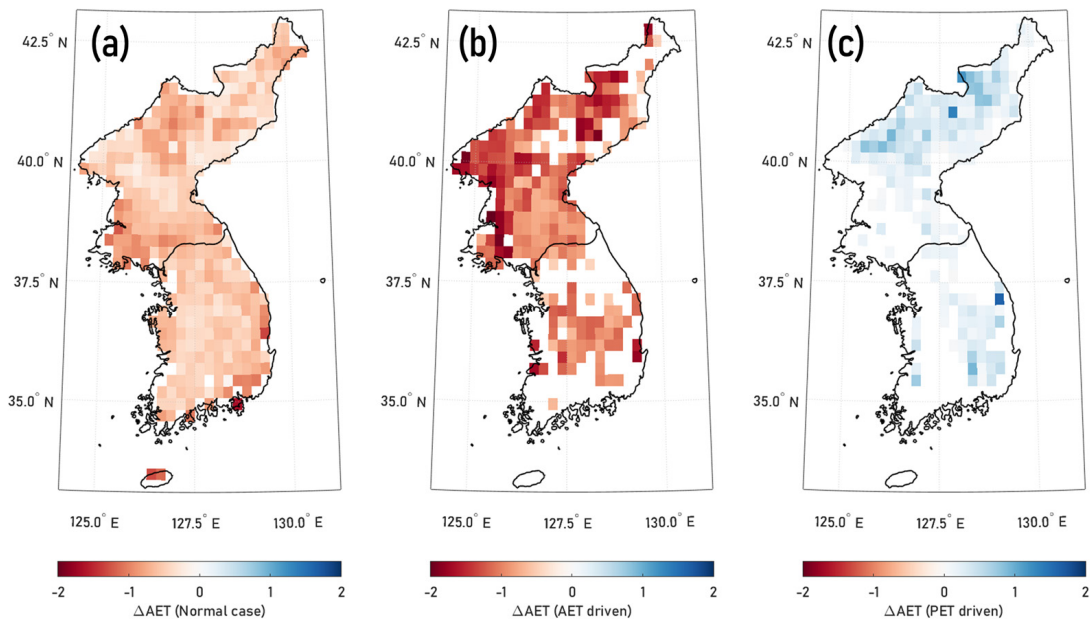


Fig. 4. Distributions of the differences in AET before and after the FD events (end - onset), categorized as in Fig. 3: (a) normal cases, (b) cases driven by AET, and (c) cases driven by PET

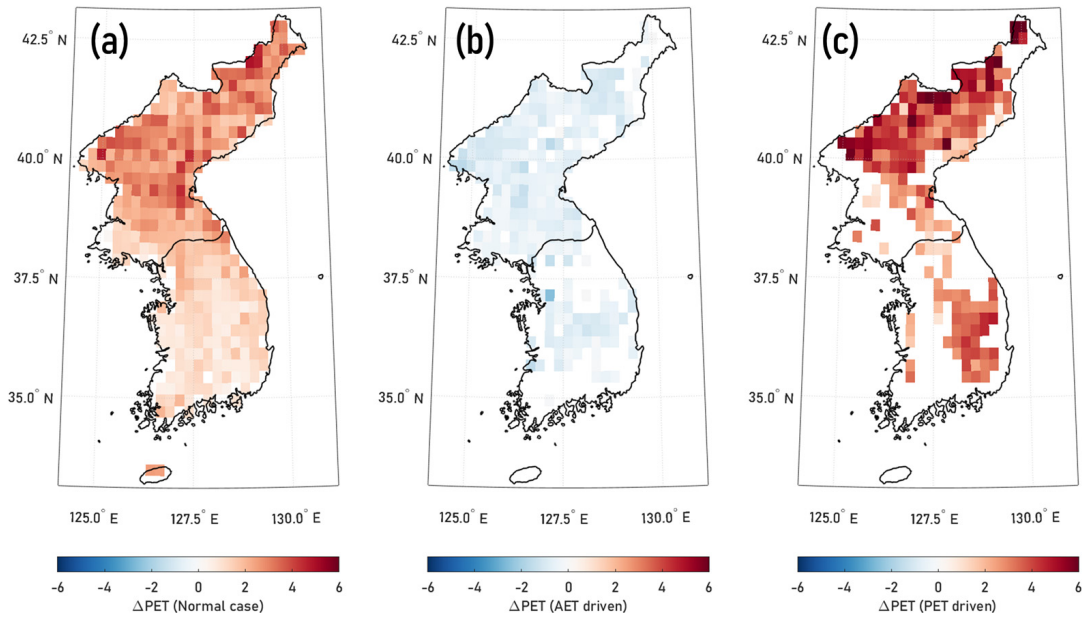


Fig. 5. Same with Fig. 4, but for PET

극도로 높을 경우 돌발가뭄이 종료되는 시점이 다소 지연될 수 있다(Mahto and Mishra, 2020). 이에 따라 Δ PET가 높게 나타난 지역에서 돌발가뭄이 비교적 장기간에 걸쳐 발생한 것을 Fig. 2에서 또한 확인할 수 있다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 한반도에서 발생하는 돌발가뭄의 발생 원인과 특성을 분석하기 위해 GLDAS 데이터 중 AET와 PET를 기반으로 한 돌발가뭄 지수인 SESR을 활용하였다. 연구지역은 북한 지역을 포함한 한반도 전역이며, 2012년부터 2022년까지 발생한 돌발가뭄 사건을 감지하였다. 또한, AET와 PET의 증감에 따라 돌발가뭄을 세 가지로 분류하고, 돌발가뭄이 발생한 시점부터의 증발산 변화 특성을 조사하여 각 케이스별 특성을 분석하였다.

GLDAS의 SESR를 기반으로 Otkin et al. (2018)의 돌발가뭄 정의에 따라 한반도 전역에서 발생한 돌발가뭄의 횟수와 발생 기간을 분석하였으며, 돌발가뭄의 발생 빈도와 지속 기간은 지역적으로 유의미한 편차가 있는 것으로 판단되었다. 특히 북한은 남한에 비해 돌발가뭄에 취약한 것으로 나타났으며, 남한에서는 경기도 및 충청도 내륙지역이 비교적 발생 빈도가 높게 나타났다.

케이스별 돌발가뭄의 분석에서는, Case 1 (Normal Condition)은 한반도 전역에서 발생하고 가뭄이 진행됨에 따라 증발

수요가 증가하는 것을 확인하였다. 반면, Case 2 (AET driven)은 북한 지역과 남부 내륙 지역에서 주로 나타나며, Case 3 (PET driven)은 북부 지역 일부와 주로 남동부 지역에서 관측되었다. 이러한 결과를 통해 돌발가뭄의 발생 원인을 수분량 부족과 외부 스트레스의 증가에 의한 영향으로 분류할 수 있으며, 한반도 전역에 걸쳐 수분량 부족에 의한 돌발가뭄(Case 2)이 PET 증가에 의한 돌발가뭄(Case 3)보다 약 1.5배 더 많이 발생하는 것을 확인하였다.

Case 2 돌발가뭄은 북서부 지역과 중남부 농경지에서 주로 발생하고, Case 3는 산림이 주된 토지피복인 동부 지역에서 발생하는 경향을 보였다. 앞선 결과를 통해 해당지역에서는 AET의 감소, 즉 수분량의 부족으로 인해 돌발가뭄이 발생하는 것을 확인할 수 있었는데, 농경지에서 강수량이 감소하고 온도가 상승하여 가뭄이 발생한다는 것이 전 세계적인 현상인 것을 Mahto and Mishra (2023)의 연구에서도 확인할 수 있다. 반면, 산림이 주된 토지 피복인 북부 지역에서는 돌발가뭄의 주요 원인이 PET이며, AET의 변화는 미미하다는 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 연안의 산림에서는 건조한 기간에도 식물들이 깊은 뿌리 체계를 통해 수분을 충족시켜 상대적으로 안정된 AET를 유지한다는 선행 연구 결과와도 일치한다(Liu et al., 2018). 즉, 돌발가뭄 유형에 따라 가뭄 발생 시점 이후 AET와 PET의 변화가 다르게 나타났는데, 토지피복에 따른 가뭄 원인 인자의 차이가 있는 것으로 판단할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 돌발가뭄의 매커니즘과 특성을 세 가지로 분류할 수 있는 기준을 제시하였으며, 또한 미세측

유역으로 여겨지는 북한의 돌발가뭄 특성을 남한의 돌발가뭄 특성과 비교하여 분석한 데 의의가 있다. 추후 토지피복별 분석이나 토양수분 등 다양한 인자를 활용한 정밀한 돌발가뭄 모니터링에 대한 연구가 수행된다면, 가뭄 유형에 따른 효과적인 가뭄 대응 방안 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업)으로 지원된 연구입니다. 이 논문은 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다. 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(202305020001).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Basara, J.B., Christian, J.I., Wakefield, R.A., Otkin, J.A., Hunt, E.H., and Brown, D.P. (2019). "The evolution, propagation, and spread of flash drought in the Central United States during 2012." *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 8, 084025.
- Benestad, R.E., Lussana, C., Lutz, J., Dobler, A., Landgren, O., Haugen, J.E., Mezghani, A., Casati, B., and Parding, K.M. (2022). "Global hydro-climatological indicators and changes in the global hydrological cycle and rainfall patterns." *PLoS Climate*, Vol. 1, No. 5, e0000029.
- Christian, J.I., Basara, J.B., Otkin, J.A., Hunt, E.D., Wakefield, R.A., Flanagan, P.X., and Xiao, X. (2019). "A methodology for flash drought identification: Application of flash drought frequency across the United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 20, No. 5, pp. 833-846.
- Dai, A. (2011). "Drought under global warming: A review." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 2, No. 1, pp. 45-65.
- DeAngelis, A.M., Wang, H., Koster, R.D., Schubert, S.D., Chang, Y., and Marshak, J. (2020). "Prediction skill of the 2012 US great plains flash drought in subseasonal experiment (SubX) models." *Journal of Climate*, Vol. 33, No. 14, pp. 6229-6253.
- Ha, K.J., Moon, S., Timmermann, A., and Kim, D. (2020). "Future changes of summer monsoon characteristics and evaporative demand over Asia in CMIP6 simulations." *Geophysical Research Letters*, Vol. 47, No. 8, e2020GL087492.
- Hobbins, M.T., Wood, A., McEvoy, D.J., Huntington, J.L., Morton, C., Anderson, M., and Hain, C. (2016). "The evaporative demand drought index. Part I: Linking drought evolution to variations in evaporative demand." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 17, No. 6, pp. 1745-1761.
- Hunt, E., Femia, F., Werrell, C., Christian, J.I., Otkin, J.A., Basara, J., Anderson, M., White, T., Hain, C., and Randall, R. (2021). "Agricultural and food security impacts from the 2010 Russia flash drought." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 34, 100383.
- Kang, M., Hao, Y., and Choi, M. (2023). "The effects of flash drought on the terrestrial ecosystem in Korea." *Journal of Hydrology*, Vol. 624, 129874.
- Lee, H.-J., Nam, W.-H., Yoon, D.-H., Svoboda, M.D., Wardlaw, B.D., and Otkin, J.A. (2022a). "Flash drought mechanism and characteristics in South Korea." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 22, No. 3, pp. 25-35.
- Lee, J.-W., Hong, E.-M., Kim, J.-U., Jang, W.-J., Jung, C.-G., and Kim, S.-J. (2022b). "Evaluation of agricultural drought in South Korea using socio-economic drought information." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 74, 102936.
- Lee, Y., Im, B., Kim, K., and Rhee, K. (2020). "Adequacy evaluation of the GLDAS and GLEAM evapotranspiration by eddy covariance method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 10, pp. 889-902.
- Liu, X., Sun, G., Mitra, B., Noormets, A., Gavazzi, M.J., Domec, J.-C., Hallema, D.W., Li, J., Fang, Y., King, J.S., and McNulty, S.G. (2018). "Drought and thinning have limited impacts on evapotranspiration in a managed pine plantation on the southeastern United States coastal plain." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 262, pp. 14-23. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.06.025.
- Liu, Y., Zhu, Y., Zhang, L., Ren, L., Yuan, F., Yang, X., and Jiang, S. (2020). "Flash droughts characterization over China: From a perspective of the rapid intensification rate." *Science of the Total Environment*, Vol. 704, 135373.
- Mahto, S.S., and Mishra, V. (2020). "Dominance of summer monsoon flash droughts in India." *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 10, 104061.
- Mahto, S.S., and Mishra, V. (2023). "Increasing risk of simultaneous occurrence of flash drought in major global croplands." *Environmental Research Letters*, Vol. 18, No. 4, 044044.
- Mo, K.C., and Lettenmaier, D.P. (2015). "Heat wave flash droughts in decline." *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 8, pp. 2823-2829.
- Mukherjee, S., and Mishra, A.K. (2022). "A multivariate flash drought indicator for identifying global hotspots and associated climate controls." *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, No. 2, e2021GL096804.
- Nguyen, H., Wheeler, M.C., Otkin, J.A., Cowan, T., Frost, A., and Stone, R. (2019). "Using the evaporative stress index to moni-

- tor flash drought in Australia.” *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 6, 064016.
- Otkin, J.A., Anderson, M.C., Hain, C., Mladenova, I.E., Basara, J.B., and Svoboda, M. (2013). “Examining rapid onset drought development using the thermal infrared - based evaporative stress index. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14, No. 4, pp. 1057-1074. doi: 10.1175/JHM-D-12-0144.1.
- Otkin, J.A., Svoboda, M., Hunt, E.D., Ford, T.W., Anderson, M.C., Hain, C., and Basara, J.B. (2018). “Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 99, No. 5, pp. 911-919.
- Pendergrass, A.G., Meehl, G.A., Pulwarty, R., Hobbins, M., Hoell, A., AghaKouchak, A., Bonfils, C.J., Gallant, A.J., Hoerling, M., and Hoffmann, D. (2020). “Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction.” *Nature Climate Change*, Vol. 10, No. 3, pp. 191-199.
- Qing, Y., Wang, S., Ancell, B.C., and Yang, Z.-L. (2022). “Accelerating flash droughts induced by the joint influence of soil moisture depletion and atmospheric aridity.” *Nature Communications*, Vol. 13, No. 1, 1139.
- Rodell, M., Houser, P., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., and Bosilovich, M. (2004). “The global land data assimilation system.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 85, No. 3, pp. 381-394.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., and Sheffield, J. (2014). “Global warming and changes in drought.” *Nature Climate Change*, Vol. 4, No. 1, pp. 17-22.
- Wang, C., Chen, J., Gu, L., Wu, G., Tong, S., Xiong, L., and Xu, C.-Y. (2023). “A pathway analysis method for quantifying the contributions of precipitation and potential evapotranspiration anomalies to soil moisture drought.” *Journal of Hydrology*, Vol. 621, 129570. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129570.
- Yuan, X., Wang, L., and Wood, E.F. (2018). “Anthropogenic intensification of southern African flash droughts as exemplified by the 2015/16 season.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 99, No. 1, pp. S86-S90.
- Yuan, X., Wang, L., Wu, P., Ji, P., Sheffield, J., and Zhang, M. (2019). “Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China.” *Nature Communications*, Vol. 10, No. 1, 4661. doi: 10.1038/s41467-019-12692-7
- Zhang, L., and Zhou, T. (2015). “Drought over East Asia: A review.” *Journal of Climate*, Vol. 28, No. 8, pp. 3375-3399.
- Zomer, R.J., Xu, J., and Trabucco, A. (2022). “Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database.” *Scientific Data*, Vol. 9, No. 1, 409.