



A global-scale assessment of agricultural droughts and their relation to global crop prices

Kim, Daeha^{a*} · Lee, Hyun-Ju^b

^aAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

^bResearcher, Climate Prediction Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

Paper number: 23-082

Received: 18 October 2023; Revised: 20 November 2023; Accepted: 22 November 2023

Abstract

While South Korea's dependence on imported grains is very high, droughts impacts from exporting countries have been overlooked. Using the Evaporative Stress Index (ESI), this study globally analyzed frequency, extent, and long-term trends of agricultural droughts and their relation to natural oscillations and global crop prices. Results showed that global-scale correlations were found between ESI and soil moisture anomalies, and they were particularly strong in crop cultivation areas. The high correlations in crop cultivation areas imply a strong land-atmosphere coupling, which can lead to relatively large yield losses with a minor soil moisture deficits. ESI showed a clear decreasing trend in crop cultivation areas from 1991 to 2022, and this trend may continue due to global warming. The sharp increases in the grain prices in 2012 and 2022 were likely related to increased drought areas in major grain-exporting countries, and they seemed to elevate South Korea's producer price index. This study suggests the need for drought risk management for grain-exporting countries to reduce socioeconomic impacts in South Korea.

Keywords: Drought monitoring, Agricultural production, economic impacts, Exporting and importing countries

전 지구 농업가뭄 발생특성 및 곡물가격과의 상관성 분석

김대하^{a*} · 이현주^b

^a전북대학교 토목환경자원에너지공학부 조교수, ^bAPEC 기후센터 예측운영과 연구원

요 지

2020년 기준 한국의 곡물자급률은 20.2%에 불과하지만 곡물수출국에서 발생하는 가뭄이 국내에 미치는 영향은 아직 면밀히 분석되지 않았다. 본 연구에서는 증발산 기반 가뭄지수인 Evaporative Stress Index (ESI)를 이용해 세계 주요 곡물생산지역의 농업가뭄의 발생빈도, 장기추세, 자연진동과의 상관성을 분석하였다. 또한 국제 곡물거래가격과 작물생산지역의 가뭄면적을 비교하여 해외에서 발생한 가뭄이 한국 경제에 미치는 영향을 정성적으로 평가하였다. ERA5 기후재분석자료로 산정된 ESI는 전지구적으로 토양수분과 강한 상관성을 보였으며 특히 작물재배 지역에서의 둘의 상관성이 매우 강하게 나타났다. 작물재배지역에서의 높은 상관성은 강한 지면-대기결합을 의미하며, 이 때문에 작은 토양수분 부족이 상대적으로 큰 수확량 손실로 연결될 가능성이 크다. 1991-2022 기간 작물재배지역에서 ESI는 뚜렷한 감소추세를 보였으며 지구온난화와 함께 가뭄면적이 증가할 가능성이 있다. 2012년과 2022년에 급격히 상승한 국제곡물가격은 수출국에서 발생한 대규모 가뭄과 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었으며 한국의 생산자물가지수를 상승시킨 주요 원인 중 하나로 판단된다. 본 연구는 해외지역에서 일어나는 가뭄의 영향을 줄이기 위해 감시와 위험관리 전략이 필요함을 시사한다.

핵심용어: 농업가뭄위험, 장기추세, 기후변화 및 변동성, 국제곡물가격

*Corresponding Author. Tel: +82-63-270-2426
E-mail: daeha.kim@jbnu.ac.kr (Kim, Daeha)

1. 서론

1970년 이후 전 지구 농업생산량은 약 두 배 증가했지만 2050년 전지구 인구 98억명의 식량수요를 만족시킬 수 있을지는 아직 불확실하다(Bennetzen *et al.*, 2016; He *et al.*, 2019). 지난 50년 동안 식량공급난은 지구 전역에서 더 빈번히 발생하고 있고 그 중 절반은 가뭄과 같은 기후재난의 영향이었다(Cottrell *et al.*, 2019). 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 탄소기반 에너지 사용이 극한기후의 빈도를 높여 식량안보를 크게 위협할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2023). 추가 온실가스 배출을 500 GtCO₂로 제한하더라도 +1.5°C 목표가 달성될 확률은 50% 수준이고(IPCC, 2021), 강도 높은 완화(mitigation) 정책이 즉각 시행된다 하더라도 미래 가뭄의 빈도와 강도는 줄어들지 않을 가능성이 크다(IPCC, 2021; Thinda *et al.*, 2020; Trenberth *et al.*, 2014).

증가하는 농산물 수요와 가뭄 위험은 국제교역을 통해 식량공급을 의존하는 국가에게는 큰 부담이 아닐 수 없다. Tamea *et al.* (2016)은 2008-09년 국제금융위기로 야기된 아르헨티나의 교역정책 변화가 브라질, 스페인, 프랑스, 리비아, 남아프리카공화국, 인도, 중국의 곡물수입량에 크게 영향을 미친 것으로 분석하였다. 세계 최대 농산물 수출국인 미국에서 유사한 수준의 거래 제한이 일어날 경우 한국, 중국, 일본에 매우 큰 가상수(Virtual water) 부족이 일어날 것으로 예측하고 있고, 한국은 남아프리카 공화국에서의 수출제한에도 상당히 큰 영향을 받는 것으로 평가되었다(Tamea *et al.*, 2016). 국제교역을 통해 한국이 곡물수입으로 절약한 농업용수는 2000-2017 기간 평균 18,116 Mm³ y⁻¹ 수준으로(Odey *et al.*, 2023), 2020년 국내 총 농업용수 수요량 15,460 Mm³ y⁻¹보다 많은 양이다(ME, 2021). 이 중 주요 곡물인 옥수수, 밀, 대두의 수입을 가상수량으로 환산하면 17,588 Mm³ y⁻¹이고 농업용수 가상수 수입량의 97%를 차지한다(Odey *et al.*, 2023). 당연히 한국에 곡물을 수출하는 국가에 거래 제한이 요구되는 상황이 발생했을 경우, 한국의 식량안보는 크게 위협받을 수밖에 없다. 심지어 무역개방성(trade openness)이 1% 증가할 때, 교역국가의 농업용수 물발자국(water footprint)은 5% 가량 감소하기 때문에(Dang and Konar, 2017), 수입곡물 부족량을 국내생산으로 전환하는데 필요한 농업용수는 수출국에서의 사용량보다 크다.

높은 곡물수입의존도(Lee *et al.*, 2016; Odey *et al.*, 2023)에도 불구하고 2000년 이후 한국에 식량안보를 위협할만한 상황은 많지 않았다. 하지만 모든 국가가 식량안보를 위해 국

내공급을 우선 시하고 4-5개의 수출국가가 70% 이상의 곡물 수출을 주도하는 상황에서(Seo *et al.*, 2011) 수출국가 어느 곳이라도 대규모의 가뭄이 일어나게 되면 한국에 미치는 경제적 파장은 작지 않을 가능성이 크다. Kim *et al.* (2021b)은 비선형 경제모형을 이용해 국제곡물가격이 10% 상승할 때 한국의 소비자물가지수가 0.39% 상승하는 것으로 분석했다.

식량안보를 소수의 수출국가가 주도하는 과점시장에 강하게 의존함에도 불구하고 한국에서의 가뭄 관련 연구는 국내 기상변화에 대한 해석에 치중되어 있다. 관측기반 가뭄위험 해석(Kim *et al.*, 2011; 2018), 미래 기후변화 전망(Nam *et al.*, 2015; Rhee and Cho, 2016) 모두 한반도 지역의 기상변화에 주로 초점이 맞춰져 있다. 그러나 증가하는 세계곡물수요와 기후위험을 고려할 때 향후 한국에 큰 사회경제적 영향을 미칠 가뭄은 한국에 곡물을 수출하는 지역에서 발생할 가능성이 매우 높다. 2020년 이전에도 극한기후에 의해 국제곡물가격은 큰 변동성을 보였지만(De Winne and Peersman, 2021), 한국의 쌀수확량은 강수량변화에 크게 민감하지 않다(Chung *et al.*, 2011).

따라서 본 연구에서는 과거 32년간 전 지구적으로 발생했던 농업가뭄이 국내에 미친 경제적 영향을 국제곡물가격을 이용해 평가하였다. 농업가뭄을 정량화하기 위해 증발산기반 가뭄지수로 주요 곡물생산지역에서 발생했던 가뭄 빈도를 파악하고 장기추세 분석으로 미래 가뭄위험을 전망하였다. 이와 함께 국제곡물가격과 주요 곡물생산지역의 가뭄지수와 상관관계를 분석해 국제곡물가격 상승이 한국의 생산자물가지수에 미치는 영향을 정성적으로 평가하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 기후재분석 자료 및 대기증발요구량 산정

가뭄의 전 지구적 발생특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 Evaporative Stress Index (ESI; Otkin *et al.*, 2014)를 이용하였다. ESI는 지면 위 실제증발량(Actual Evapotranspiration, E)과 대기증발요구량(Potential Evapotranspiration, E_p)의 비율을 표준정규화한 가뭄지수로 물수요대비 사용량을 개념적으로 나타낸다. 유사한 종류의 가뭄지수로 Standardized Evaporative Deficit Index (Kim and Rhee, 2016)를 들 수 있으며 수요량을 넘어서는 강수량을 가용한 물공급으로 보지 않기 때문에 강수량 부족만으로 가뭄의 크기를 결정하는 방법보다 현실적인 가뭄지수로 볼 수 있다(Kim *et al.*, 2021a; Vicente-Serrano *et al.*, 2018).

ESI를 계산하기 위해서는 대기증발요구량 E_p 의 추정이 필요하며 본 연구에서는 표준방법이라 할 수 있는 Food and Agriculture Organization (FAO) Penman-Monteith (PM) 공식(Allen *et al.*, 1998)을 사용하였다.

$$E_p = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 VPD}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}, \quad (1)$$

여기서, R_n 은 토양에너지(Soil heat flux)를 제외한 지면순복사량($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Δ 는 포화수증기압곡선 기울기($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ 는 건습계상수(Psychrometric constant, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T 는 평균기온($^\circ\text{C}$), u_2 는 2 m 높이 풍속(m s^{-1}), VPD (vapor pressure deficit)는 포화수증기압과 실제증기압의 차이(kPa)이다.

Eq. (1)을 이용해 E_p 를 산정하기 위해서는 순복사량, 평균기온, 상대습도(혹은 이슬점온도), 풍속자료가 필요하며 이를 위해 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)의 ERA5 기후재분석 자료를 Copernicus Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu>)에서 수집하였다. 최근 32년 전지구 월평균 잠열(Latent heat flux), 현열(Sensible Heat Flux) 자료로 R_n 을 산정하였고, 2 m 평균기온과 2 m 이슬점온도(dew point temperature) 자료를 Tetens equation에 적용해 VPD를 계산하였다. 아울러 ERA5의 10 m 풍속자료는 멱함수 풍속분포(Ma *et al.*, 2021)로 2 m 풍속으로 변환하였다. 전 지구 ESI 계산에 소요되는 비용을 줄이기 위해 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 해상도로 수집된 재분석자료는 bilinear 방법으로 $1^\circ \times 1^\circ$ 로 재격자화(regrid)되었다.

FAO PM 공식은 일반적으로 사용되는 계산방법이기는 하지만 기상조건 이외 변화가 E_p 에 미치는 영향을 고려할 수 없는 단점을 가지고 있다. 특히 지면저항(surface resistance)을 70 s m^{-1} 로 고정하기 때문에 대기이산화탄소 증가가 식생반응에 미치는 영향을 고려할 수 없어 미래 물 부족 위험을 과대추정할 가능성이 있다(Milly and Dunne, 2016; Swann *et al.*, 2016; Vremec *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2019). 하지만 식생의 대기이산화탄소 농도변화에 대한 반응은 매우 불확실하고(Vicente-Serrano *et al.*, 2022), 실험에서 얻어진 식생반응의 민감도로 판단했을 때 기상외적 요소가 E_p 에 미치는 영향은 과거 기간에 대해서는 제한적이다(Kim *et al.*, 2023). 따라서 본 연구에서는 기상외적 요소를 고려해 새롭게 제시된 E_p 계산방법(e.g., Liu *et al.*, 2023)은 사용되지 않았다.

2.2 ESI 계산 및 가뭄발생 특성 분석

ESI는 대기증발요구량 E_p 와 실제증발량 E 의 비율을 표준정규화한 지수이다. 이를 위해 E_p 는 Eq. (1)로 추정하고 E 는 ERA5 잠열자료를 직접 사용할 수 있다. 농업가뭄 발생특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 6개월 누적 E 와 E_p 을 이용해 아래와 같이 ESI 계산하였다.

$$r_E = \frac{\sum E}{\sum E_p}, \quad (2a)$$

$$ESI = \Phi^{-1}[F(r_E)], \quad (2b)$$

여기서, Φ^{-1} 는 표준정규분포의 역함수, $F(r_E)$ 는 r_E 의 누가확률(cumulative probability)이다. 확률분포형의 시공간적 변화를 반영하기 위해 본 연구에서는 Kim *et al.* (2003)이 제안한 Kernel density function 기반 확률분포를 월별로 따로 적용하여 누가확률 $F(r_E)$ 를 계산하였다.

ESI가 실제 물스트레스와 일관되는지 확인하기 위해 ERA5 Layer1, Layer2 토양수분 재분석자료를 수집해 동일한 방법으로 6개월 평균 토양수분 시계열을 표준정규화하여 Standardized Soil moisture Index (SSI)를 계산하였다. Layer1, Layer2 토양수분자료는 각각이 나타내는 깊이(0-7 cm, 7-28 cm)를 이용해 가중평균 되었다. 전지구 ESI와 SSI 시계열을 이용해 지난 32년간 지면에서의 평균 물부족 스트레스의 추세변화를 분석하였고 두 가뭄지수가 -1.3 이하로 나타난 면적의 변화도 함께 파악하였다. 참고로 U.S. Drought Monitor (<https://droughtmonitor.unl.edu/>)에서는 표준정규화된 가뭄지수가 -1.3보다 작은 경우를 심한 가뭄(severe drought)으로 정의하고 있다. 아울러 지역별 가뭄위험의 장기추세를 확인하기 위해 비모수적 Mann-Kendall test를 픽셀별로 수행해 가뭄위험이 증가했던 지역을 파악하였다.

작물재배지역의 ESI와 SSI 변화를 따로 확인하기 위해 Potapov *et al.* (2022)의 작물재배면적 자료를 이용하였다. Potapov *et al.* (2022)는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Net Primary Production 자료를 분석해 2000년부터 2019년까지의 작물재배지역의 변화를 4년 간격으로 추적하였다. 2016-2019 기간 작물재배가 집중적으로 이루어진 지역(Fig. 1)은 북반구에서는 미국 대평원, 중국 동북부 평원, 인도 중서부 및 북부, 태국, 우크라이나와 러시아 서부지역 등이었고 남반구에서는 호주 Murray-Darling 유역, 브라질 남부, 아르헨티나 동부지역 등으로 나타났다. 아프리카의 경우 중위도 일부지역과 큰 호수 주변지역에서 작물재

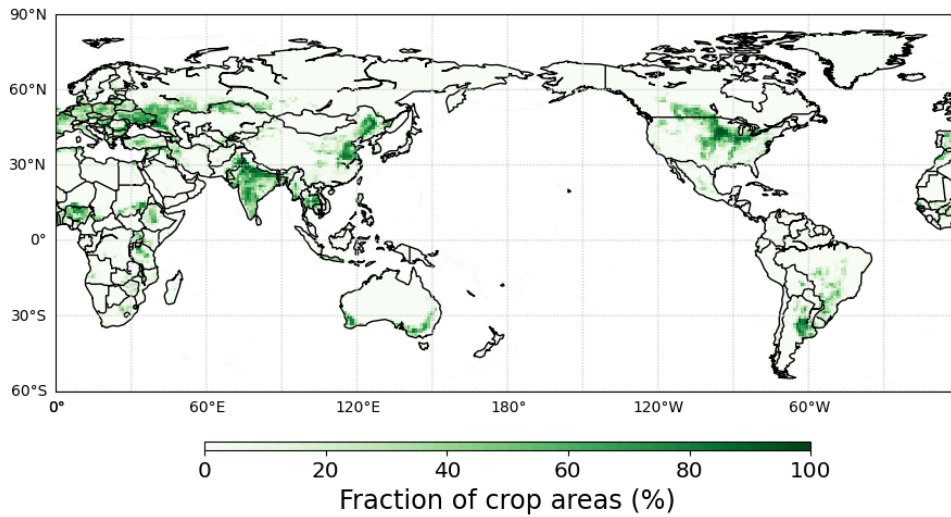


Fig. 1. Distribution of mean crop areas across the globe during 2016-2019. The fraction indicates the percentage of crop areas within a 1°x1° pixel

배가 상대적으로 많았지만 울창한 숲과 넓은 건조지역으로 인해 다른 대륙보다 면적이 넓지 않았다. 본 연구에서는 최근 4년 2016-2019 기간의 평균 작물재배면적이 10%가 넘는 픽셀(이하 작물재배지역)에서의 가뭄발생 특성을 분석하였다.

2.3 곡물선물가격 자료 및 상관분석

20세기 후반 급격해진 세계화 추세로 농산물 국제교역량은 매우 빠르게 증가했고 이에 따라 아시아 주요국가 식량안보(food security)는 미국, 호주, 남미, 유럽 등 주요 농산품 생산국의 수출량에 상당히 의존하게 되었다(D’Odorico *et al.*, 2019). 국제교역은 생산성이 높은 지역에서 낮은 지역으로 상품을 이동시키고 생산성이 낮은 지역의 총 물사용량을 줄이는 기능을 한다. 하지만 수출지역의 기상학적 위험이 수입지역에 전달되는 부작용을 수반할 수밖에 없다. 수출량이 많은 지역에서 큰 가뭄이 발생하면 국제곡물시장의 공급량 부족으로 이어지기 때문에 그 영향은 가뭄발생지역으로 제한되지 않는다(Tamea *et al.*, 2016).

주요곡물 수출국가에서 발생하는 가뭄이 국제곡물가격에 미치는 영향을 확인하기 위해 본 연구에서는 시카고상품거래소(Chicago Board of Trade, CBOT)의 옥수수, 밀, 대두 선물 가격 자료를 KREI 해외곡물시장정보(<http://www.krei.re.kr:18181/>)를 통해 수집하였다. CBOT은 가격변동성이 큰 농산품의 위험 관리를 위해 생산자와 구매자가 수확 이전에 상품의 가격을 확정할 수 있는 선물시장으로 상장된 상품의 선물 가격은 현재가치와 미래가치를 함께 반영한다. 이 때문에 작물재배 지역에 발생한 물부족의 영향은 추수 전에도 CBOT 거래가격에 실시간으로 반영되고 이 가격이 상승하는 시기에

는 일반적으로 식품가격도 함께 비싸지게 된다(Tadasse *et al.*, 2014). ESI와의 CBOT선물가격의 상관분석을 위해 본 연구에서는 일 단위 곡물가격을 월평균가격으로 집계하였고 픽셀별로 Pearson 상관계수(r)를 산정해 국제곡물가격에 직접적인 영향을 미치는 작물재배지역을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ESI의 토양수분부족 감시능력 평가

Fig. 2는 32년간 ESI와 SSI의 Pearson 상관계수의 공간분포를 나타낸다. Pearson r 값의 범위는 0.45 ± 0.39 (평균±표준편차)이고 전 지구 평균 ESI와 SSI의 상관계수는 0.88로 나타났다. 작물재배지역에서 ESI와 SSI의 Pearson r의 범위는 훨씬 높은 0.82 ± 0.15 였고, 이 지역 평균 ESI와 SSI의 Pearson r은 0.95였다. ESI와 SSI의 높은 상관성은 증발산부족과 토양수분 변화가 긴밀히 연결되어 있음을 의미한다. 증발산상호보완관계(complementary relationship of evapotranspiration)를 이용할 경우 기상자료만으로 토양수분 부족을 추적하는 것이 충분히 가능함을 함께 의미한다(Kim *et al.*, 2019; 2021a). ESI와 SSI의 상관성이 낮은 지역은 주로 매우 건조하거나 추운 지역이었고 Zhou *et al.* (2019) 연구에서 지면-대기 상호작용이 상대적으로 약한 위치와 대략 일치한다.

ESI와 SSI의 강한 상관성은 두 가지 물리적 메커니즘으로 설명할 수 있다. 첫째로 강수 빈도가 높아져 토양수분은 증가하고 높은 운량으로 인해 태양 복사에너지가 줄어들어 E_p 가 감소하는 경우로 Lesk *et al.* (2021)은 이 과정을 순환 결합

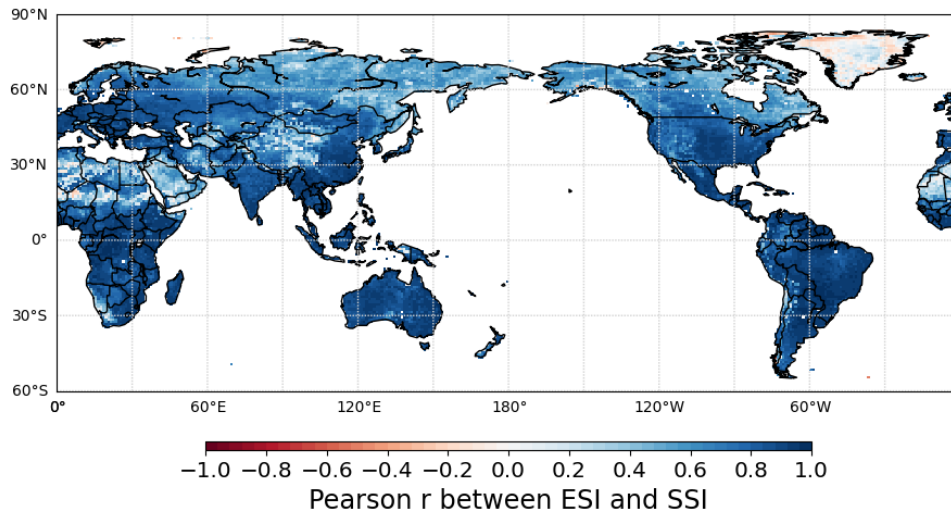


Fig. 2. Distribution of Pearson r between ESI and SSI over 1991-2022

(circulation coupling)으로 정의하였다. 다른 하나는 강수량 부족으로 줄어든 토양수분으로 인해 현열이 증가하여 VPD가 증폭되는 지면-대기결합(land-atmosphere coupling)과정이다. 순환결합과 지면-대기결합 모두 ESI와 SSI의 상관성을 설명하지만 후자의 경우 물 부족 스트레스와 열 스트레스가 동시에 작용하기 때문에 작물의 생산성을 훨씬 더 떨어뜨릴 수 있다. Lesk *et al.* (2021)은 1970-2013기간 지면-대기 결합강도가 큰 지역에서 강수부족이 발생했을 때 옥수수과 대두 수확량이 상대적으로 더 줄어든 것을 확인했다. Corn belt 지역을 포함한 미국 중부지역은 지면-대기 결합강도가 매우 강한 지역이기 때문에(Koster *et al.*, 2011), 작은 물 부족이 작물 생산성을 크게 떨어뜨릴 수 있다.

3.2 1991-2022 전세계 가뭄발생 특성 분석

Fig. 3(a)는 ESI가 경작기간 동안 -1.3 아래로 떨어질 확률을 나타낸다. 북반구의 경작기간은 4월에서 9월, 남반구의 경작기간은 10월에서 3월로 정의한 결과이다. 가뭄빈도가 상대적으로 높았던 지역은 미국 북중부, 브라질 중남부, 유럽 남중부, 러시아 서남부, 튀르키예 동부, 적도 아프리카 지역 등이었고 사하라 이남 지역에서 가뭄도 상당히 잦았음을 확인할 수 있다. 전 세계 평균 ESI는 지속적으로 감소했으며 작물재배면적에서는 조금 더 가파른 감소추세를 보였다(Fig. 3(b)). 지난 32년 동안 평균강수량은 증가했음에도 불구하고(Brutsaert, 2017), 지면 건조화는 지속된 것으로 보이며 지면-대기 결합이 상대적으로 더 강한 작물재배지역에서 가뭄빈도는 더 빠르게 증가했을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Mann-Kendall test로 얻어진 각 픽셀의 32년간

ESI 시계열의 선형 추세이다. 증가추세보다 감소추세가 더 많은 것을 확인할 수 있고 특히 작물생산성이 높은 중위도 지역에서 감소추세가 뚜렷히 나타났다. 주요 작물재배지역 중 ESI의 감소추세가 나타나지 않는 곳은 인도와 동남아시아와 같은 쌀 생산 중심지역으로 물부족 스트레스가 점진적으로 감소한 것으로 보인다. 이에 반해 중국 동북부 쌀 생산지역과 미국, 유럽, 남미의 옥수수, 대두, 밀 재배지역에서는 물부족 스트레스가 증가해 국제 식량안보에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 작물재배지역에서의 ESI 증가 추세가 Pacific Decadal Oscillation이나 Atlantic Multi-decadal Oscillation과 같은 장기진동의 영향이 아니라면 지구온난화의 영향일 가능성이 크며(Kim *et al.*, 2019; McCabe *et al.*, 2004), 온난화는 현재 가속화되고 있기 때문에 작물재배지역의 물 부족은 더 자주 발생할 것으로 전망할 수 있다.

Fig. 5는 1991-2022 기간 ESI와 Oceanic Niño Index (ONI) 사이의 상관관계 분포이다. ONI는 Niño 3.4(5°N-5°S, 120°-170°W) 지역 3개월 평균 해수면온도의 편이이며 El Niño Southern Oscillation (ENSO) 강도를 나타내는 대표적인 지수이다. ENSO와 가뭄발생 지역의 상관성은 여러 연구에서 확인된 바 있으며 미국, 남미, 호주의 경우 장기 가뭄과 밀접한 관련이 있다(Vicente-Serrano *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2019; Cook *et al.*, 2007). Fig. 5에서 미국 중남부지역은 ONI와 유의한 양의 상관성을 보이며 서태평양 해수면 온도가 평균보다 높을 때(La Niña 발생 시) 물 부족이 증가함을 의미한다. 같은 조건에서 오스트레일리아와 인도네시아 주변 지역에서는 강수량 과잉으로 인한 피해가 발생할 가능성이 높다. 반대로 동태평양 해수면 온도가 평균보다 높을 때는(El Niño 발생 시)

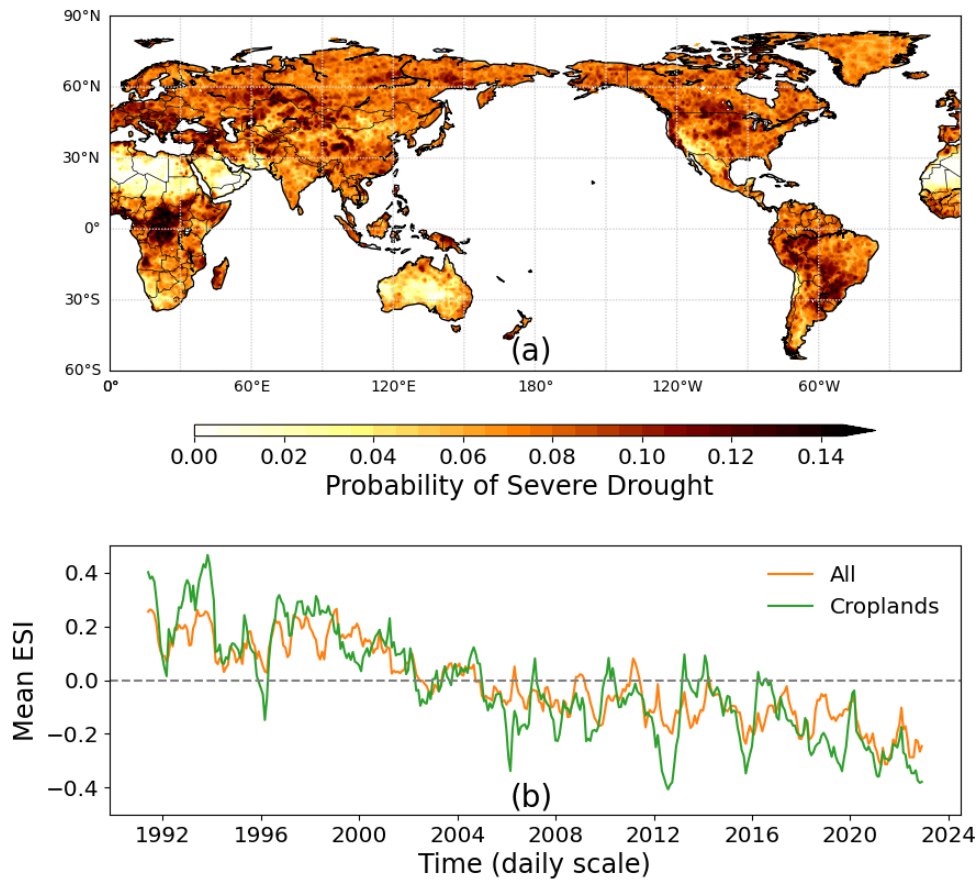


Fig. 3. (a) Distribution of the probabilities of sever drought (ESI < -1.3) over 1991-2022, and (b) changes in the mean ESI over the globe (orange) and at the pixels with the fraction of crop areas higher than 10%

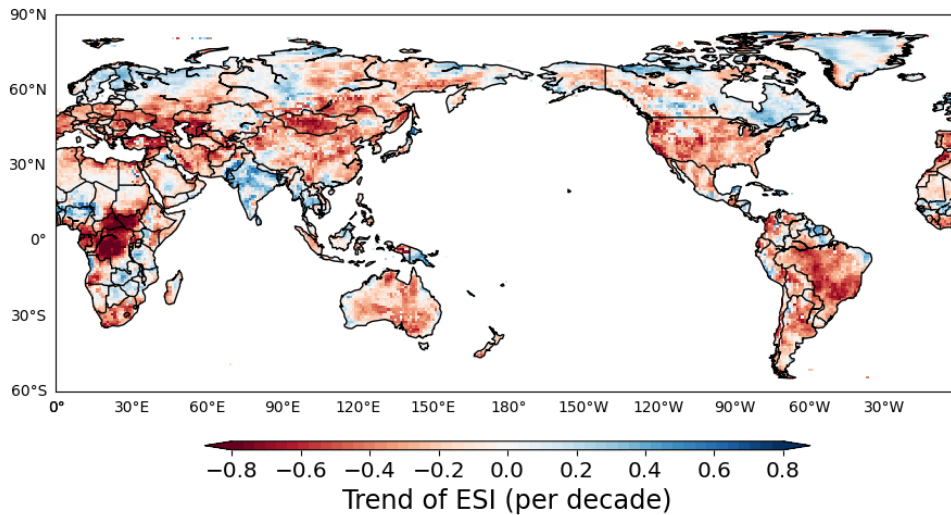


Fig. 4. Distribution of the median linear trends of ESI during 1991-2022 obtained by the Mann-Kendall tests

오스트레일리아와 인도네시아 주변 지역의 강수량은 크게 감소하여 물 부족 스트레스가 극심해질 수 있다. Fig. 5는 표준

강수-증발산 지수와 같은 전통적인 가뭄지수와 마찬가지로 ESI 역시 원격상관의 영향을 반영할 수 있음을 의미한다.

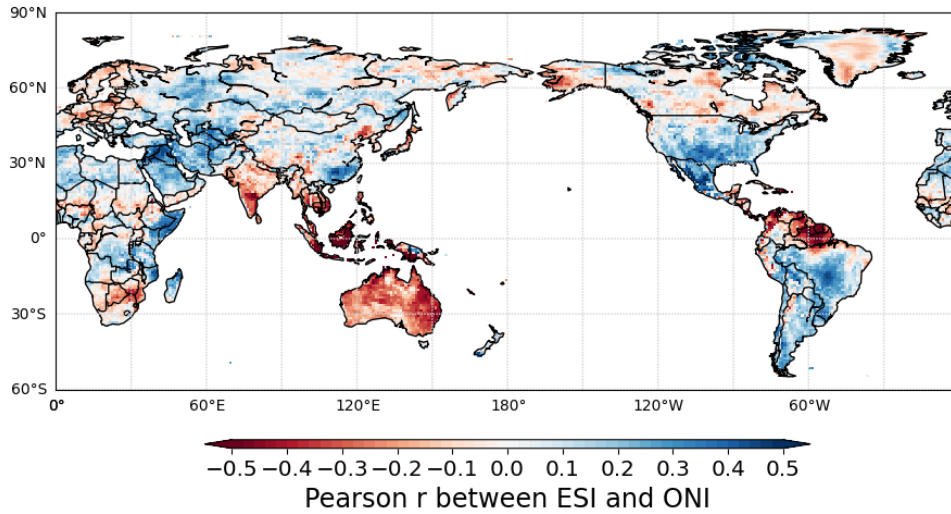


Fig. 5. Distribution of pearson r between ESI and ONI during 1991-2022

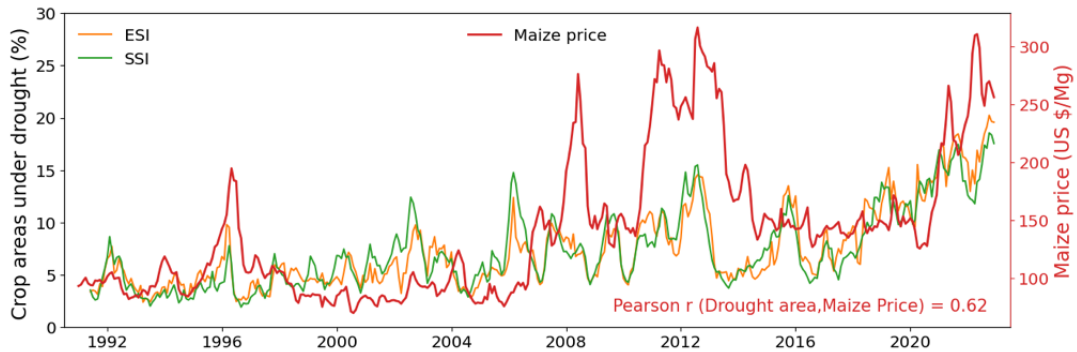


Fig. 6. Changes in the CBOT maize price and crop areas under severe drought (ESI and SSI < -1.3) during 1991-2022

3.3 ESI와 국제곡물가격의 상관성 분석

Fig. 6는 월평균 옥수수 선물가격과 작물재배지역 가뭄면적의 변화를 나타낸다. 두 시계열에 유의미한 상관성이 있음을 확인할 수 있다(Pearson $r = 0.62$). 옥수수 가격과 밀, 대두 가격 사이의 상관성은 매우 높았으며(Pearson $r > 0.9$) 이는 한 작물의 작황이 좋지 않을 경우 다른 작물의 작황도 함께 나빠지는 것을 의미한다. 2010년 러시아지역 돌발가뭄(Hunt *et al.*, 2021)과 2010-2013 미국 중남부지역 가뭄(Rippey, 2015)의 영향과 함께 바이오 연료 수요 증가와 투기 거래의 증가가 2010-2013 기간 옥수수 가격을 급등시켰다(von Braun and Tadesse, 2012). 이 시기 작물재배지역 가뭄면적의 변화는 선물가격의 변화와 상당히 유사하며 2016년 이후 가뭄면적과 옥수수 선물가격이 함께 증가해 온 것을 확인할 수 있다. 가격 상승의 모든 원인을 가뭄에 의한 공급 부족으로 볼 수는 없지만 미국의 2012년 가뭄은 이전 50년 기간 중 가장 심각한 수준이었고 1984년 이후 옥수수 수출가격을 심각하게 올린 원인

중 하나였다(Boyer *et al.*, 2013).

Fig. 7은 2011-2022 기간에 대해 Pearson r 값을 이용하여 옥수수 선물가격과 ESI의 최근 상관성을 확인한 결과이다. 유럽, 북미, 중국, 남미지역의 곡창지대에서 모두 ESI와 유의미한 상관성이 나타났고 지난 12년간 국제곡물가격에 직접적인 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 특히 한국의 수입 의존도가 높은 미국, 브라질, 오스트레일리아, 우크라이나, 러시아에서(Odey *et al.*, 2023) ESI와 옥수수 선물가격은 뚜렷한 음의 상관성을 가지고 있었다. 2기작 재배가 가능한 남반구의 브라질과 아르헨티나에서도 계절이 반대임에도 불구하고 동일한 음의 상관성이 나타났다. 옥수수 선물가격과 유의한 음의 상관성이 나타나지 않은 지역은 오스트레일리아와 아시아 쌀재배 지역과 아프리카 일부 지역 뿐이었다. 중국 동북부 평원에서 ESI와 국제곡물가격 사이에 음의 상관성이 발견됐는데 이는 2010년 이후 곡물수입국이 된 중국(Boyer *et al.*, 2013)에 가뭄이 발생하면 수입곡물이 대체재 역할을 하기 때문으로 판단된다.

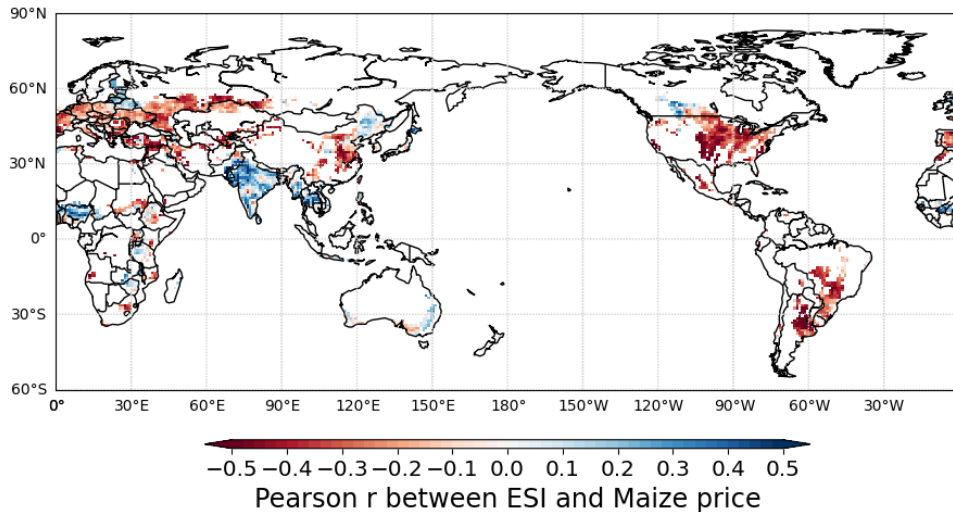


Fig. 7. Distribution of pearson r between ESI and maize future price during 2011-2022 at locations with the fraction of crop areas higher than 10%

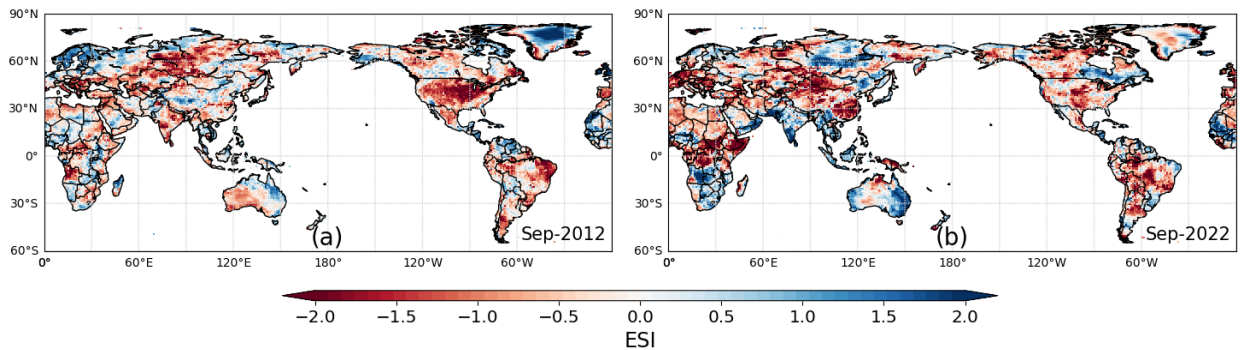


Fig. 8. Distributions of ESI in (a) September, 2011 and in (b) September, 2022

3.4 고찰

증발산 기반 가뭄지수인 ESI와 농업생산성의 상관성은 이미 Anderson *et al.* (2016)의 연구에서 확인된 바 있다. 브라질 농업지역에서 인공위성 자료로 계산된 ESI는 농작물 biomass와 높은 상관성을 보였고 강수량 기반 가뭄지수보다 더 직접적으로 식생의 물스트레스를 나타낸다. Anderson *et al.* (2016)은 수확량과 ESI의 상관성은 강수량과의 상관성보다 더 이른 시기에 나타날 수 있어 농업가뭄 위험관리에 효용이 클 것으로 평가하였다. 본 연구에서는 ESI가 돌발가뭄 뿐만 아니라(Nguyen *et al.*, 2019; Parker *et al.*, 2021), 계절 가뭄(seasonal drought)과 원격상관의 영향까지 감시할 수 있음을 검증하였다. 장기추세를 제거한 분석이 필요하기는 하지만 Fig. 5에서 ESI와 ONI가 음의 상관을 보이는 지역은 Vicente-Serrano *et al.* (2011)의 El Niño 시기에 가뭄 발생이 잦아지는 지역과 대략 일치한다.

또한 주요 작물재배지역의 ESI 변화는 국제곡물가격과 밀

접한 관계를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 한국의 높은 수입곡물의존도를 고려했을 때 이 지역에 대한 가뭄감시는 특별히 중요하다고 할 수 있다. 2017년 한국의 1인당 연간 가상수 수입량은 $405.5 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ 에 달하며 2011년($349.6 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$)과 비교했을 때 급증한 상태로 볼 수 있다(Odey *et al.*, 2023). 이 중 옥수수, 밀, 대두 수입에 대한 가상수량이 95% 이상이기 때문에 주요 작물재배지역에서의 가뭄은 한국의 경제상황에 직접적인 영향을 주게 된다. 옥수수, 밀, 대두에 대한 가상수는 90% 이상이 녹색 물발자국(Green water footprint)이기 때문에(Odey *et al.*, 2023) 관개시설로 보호되지 않는다. 다시 말해 미국, 브라질, 유럽지역에서 발생하는 자연적 토양수분 부족은 그대로 거의 그대로 한국에 전파될 가능성이 높다.

옥수수 선물가격이 급상승했던 2012년과 2022년 9월의 ESI의 공간분포는 Fig. 8와 같다. 두 시기 모두 미국 중부지역, 남미, 유럽지역에 심한 가뭄이 발생했던 것을 확인할 수 있고 국제곡물가격 역시 급등했다. 2012년 4월 한국의 생산자물가

지수는 107.95으로 2010년대 최고치이고 2022년 생산자물가지수는 4월 이후 120 이상으로 유지되고 있는 상태이다. 국제곡물가격과 생산자물가지수는 다른 사회경제적 요인에도 영향을 받지만 한국의 곡물수입국가에서 발생하는 가뭄의 영향은 분명히 유의해 보인다. 준실시간으로 사용이 가능한 재분석기상자료로 곡물수입국 작물재배지역의 가뭄상황을 모니터링하는 것은 한국의 경제상황에서는 필수적일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 증발산 기반 가뭄지수인 Evaporative Stress Index (ESI)를 이용해 전지구 농업가뭄의 시공간적 발생특성을 분석하였고 ESI가 한국의 곡물수입국가의 토양수분 상태를 감시하는데 사용할 수 있음을 확인하였다. ESI는 지면-대기 상호작용이 강한 지역에서 토양수분과 상관성이 매우 강했고 El Niño Southern Oscillation과 같은 자연진동의 영향을 평가할 수 있었다. 지난 32년간 작물재배 지역의 ESI는 감소추세를 보였으며 국제곡물가격 상승과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) ESI와 토양수분은 전지구적인 상관성을 보이며 특히 작물재배 지역에서 매우 강한 상관성을 보이는 것으로 확인됐다. 주요 곡물수출국가에서는 강한 지면-대기결합 강도로 인해 ESI와 토양수분의 상관성이 훨씬 크게 나타났다.
- (2) 2012년, 2022년에 있었던 국제곡물가격 급상승은 작물재배지역에서 발생한 가뭄과 밀접한 관계가 있으며 한국의 생산자물가지수를 상승시킨 주요 원인 중 하나로 판단된다.
- (3) 1991-2022 기간 동안 주요 작물재배지역에서 ESI는 지속적으로 감소했고 온난화와 함께 주요 수출국의 가뭄빈도는 향후 더 커질 가능성이 높다. 한국의 식량안보를 위해서는 가뭄감시지역을 전세계로 넓히고 수입국 다변화 전략을 마련할 필요가 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00230286).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Anderson, M.C., Zolin, C.A., Sentelhas, P.C., Hain, C.R., Semmens, K., Yilmaz, M.T., Gao, F., Otkin, J.A., and Tetrault, R. (2016). "The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 174, pp. 82-99.
- Bennetzen, E.H., Smith, P., and Porter, J.R. (2016). "Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions - The major trends over 40 years." *Global Environmental Change*, Vol. 37, pp. 43-55.
- Boyer, J.S., Byrne, P., Cassman, K.G., Cooper, M., Delmer, D., Greene, T., Gruis, F., Habben, J., Hausmann, N., Kenny, N., and Lafitte, R. (2013). "The US drought of 2012 in perspective: A call to action." *Global Food Security*, Vol. 2, pp. 139-143.
- Brutsaert, W. (2017). "Global land surface evaporation trend during the past half century: Corroboration by Clausius-Clapeyron scaling." *Advances in Water Resources*, Vol. 106, pp. 3-5.
- Chung, S.O., Rodríguez-Díaz, J.A., Weatherhead, E.K., and Knox, J.W. (2011). "Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea." *Irrigation and Drainage*, Vol. 60, pp. 263-273.
- Cook, E.R., Seager, R., Cane, M.A., and Stahle, D.W. (2007). "North American droughts: Reconstructions, causes, and consequences." *Earth-Science Reviews*, Vol. 81, pp. 93-134.
- Cottrell, R.S., Nash, K.L., Halpern, B.S., Remenyi, T.A., Corney, S.P., Fleming, A., Fulton, E.A., Hornborg, S., Johne, A., Watson, R.A., and Blanchard, J.L. (2019). "Food production shocks across land and sea." *Nature Sustainability*, Vol. 2, pp. 130-137.
- D'Odorico, P., Carr, J., Dalin, C., Dell'Angelo, J., Konar, M., Laio, F., Ridolfi, L., Rosa, L., Suweis, S., Tamea, S., and Tuninetti, M. (2019). "Global virtual water trade and the hydrological cycle: Patterns, drivers, and socio-environmental impacts." *Environmental Research Letters*, Vol. 14, 053001.
- Dang, Q., and Konar, M. (2018). "Trade openness and domestic water use." *Water Resources Research*, Vol. 54, pp. 4-18.
- De Winne, J., and Peersman, G. (2021). "The adverse consequences of global harvest and weather disruptions on economic activity." *Nature Climate Change*, Vol. 11, pp. 665-672.
- He, X., Estes, L., Konar, M., Tian, D., Anghileri, D., Baylis, K., Evans, T.P., and Sheffield, J. (2019). "Integrated approaches to under-

- standing and reducing drought impact on food security across scales." *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 40, pp. 43-54.
- Hunt, E., Femia, F., Werrell, C., Christian, J.I., Otkin, J.A., Basara, J., Anderson, M., White, T., Hain, C., Randall, R., and McGaughey, K. (2021). "Agricultural and food security impacts from the 2010 Russia flash drought." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 34, 100383.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Summary for policymakers. In: climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). *Summary for policymakers. In: Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Kim, D., and Rhee, J. (2016). "A drought index based on actual evapotranspiration from the Bouchet hypothesis." *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 10277-10285.
- Kim, D., Chun, J.A., Yeo, J.-Y., and Ha, K.-J. (2023). "Divergent flash drought risks indicated by evaporative stress and soil moisture projections under warming scenarios." *Environmental Research Letters*, Vol. 18, 094023.
- Kim, D., Ha, K.J., and Yeo, J.H. (2021a). "New drought projections over East Asia using evapotranspiration deficits from the CMIP6 warming scenarios." *Earth Future*, Vol. 9, e2020EF001697.
- 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.
- Kim, D.H., Yoo, C., and Kim, T.W. (2011). "Application of spatial EOF and multivariate time series model for evaluating agricultural drought vulnerability in Korea." *Advances in Water Resources*, Vol. 34, pp. 340-350.
- Kim, J., Kim, S., Lee, Y., and Choi, J. (2021b). *Analysis and challenges of imported grain value chains*. Policy Research Report, Rural Development Administration of Korea.
- Kim, S.M., Kang, M.S., and Jang, M.W. (2018). "Assessment of agricultural drought vulnerability to climate change at a municipal level in South Korea." *Paddy and Water Environment*, Vol. 16, pp. 699-714.
- Kim, T.W., Valdes, J.B., and Yoo, C. (2003). "Nonparametric approach for estimating return periods of droughts in arid regions." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, pp. 237-246.
- Koster, R.D., Mahanama, S.P.P., Yamada, T.J., Balsamo, G., Berg, A.A., Boisserie, M., Dirmeyer, P.A., Doblas-Reyes, F.J., Drewitt, G., Gordon, C.T., and Guo, Z. (2011). "The second phase of the global land-atmosphere coupling experiment: soil moisture contributions to subseasonal forecast skill." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 12, pp. 805-822.
- Lee, S.H., Yoo, S.H., Choi, J.Y., and Shin, A. (2016). "Evaluation of the dependency and intensity of the virtual water trade in Korea." *Irrigation and Drainage*, Vol. 65, pp. 48-56.
- Lesk, C., Coffel, E., Winter, J., Ray, D., Zscheischler, J., Seneviratne, S.I., and Horton, R. (2021). "Stronger temperature-moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields." *Nature Food*, Vol. 2, pp. 683-691.
- Liu, Z., Wang, T., Li, C., Yang, W., and Yang, H. (2023). "A physically-based potential evapotranspiration model for global water availability projections." *Journal of Hydrology*, Vol. 622, 129767.
- M/a, N., Szilagyi, J., and Zhang, Y. (2021). "Calibration-free complementary relationship estimates terrestrial evapotranspiration globally." *Water Resources Research*, Vol. 57, No. 9, e2021WR029691.
- McCabe, G.J., Palecki, M.A., and Betancourt, J.L. (2004). "Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 101, pp. 4136-4141.
- Milly, P.C., and Dunne, K.A. (2016). "Potential evapotranspiration and continental drying." *Nature Climate Change*, Vol. 6, pp. 946-949.
- Ministry of Environment (ME) (2021). *The first national water management plan (2021-2030)*. Inter-Agency Joint Report.
- 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.
- Nguyen, H., Wheeler, M.C., Otkin, J.A., Cowan, T., Frost, A., and Stone, R. (2019). "Using the Evaporative Stress Index to monitor flash drought in Australia." *Environmental Research Letters*, Vol. 14, 064016.
- Odey, G., Adelodun, B., Lee, S., Adeyemi, K.A., and Choi, K.S. (2023). "Assessing the impact of food trade centric on land, water, and food security in South Korea." *Journal of Environmental Management*, Vol. 332, 117319.
- Otkin, J.A., Anderson, M.C., Hain, C., and Svoboda, M. (2014). "Examining the relationship between drought development and rapid changes in the Evaporative Stress Index." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 15, pp. 938-956.
- Parker, T., Gallant, A., Hobbins, M., and Hoffmann, D. (2021). "Flash drought in Australia and its relationship to evaporative demand." *Environmental Research Letters*, Vol. 16, 064033.
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M.C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., Song, X.P., Pickens, A., Shen, Q., and Cortez, J. (2022). "Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century." *Nature Food*, Vol. 3, pp. 19-28.
- Rhee, J., and Cho, J. (2016). "Future changes in drought characteristics: Regional analysis for South Korea under CMIP5 projections." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 17, pp. 437-451.
- Rippey, B.R. (2015). "The US drought of 2012." *Weather and Cli-*

- mate Extremes*, Vol. 10, pp. 57-64.
- Seo, J., Lee, J., and Kim, H. (2011). *Analysis of factors affecting international grain prices and Korea's policy responses*. Institute for International Economic Policy Research.
- Swann, A.L., Hoffman, F.M., Koven, C.D., and Randerson, J.T. (2016). "Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 113, pp. 10019-10024.
- Tadasse, G., Algieri, B., Kalkuhl, M., and Von Braun, J. (2014). "Drivers and triggers of international food price spikes and volatility." *Food Policy*, Vol. 47, pp. 59-82.
- Tamea, S., Laio, F., and Ridolfi, L. (2016). "Global effects of local food-production crises: a virtual water perspective." *Scientific Reports*, Vol. 6, 18803.
- Thinda, K.T., Ogundeji, A.A., Belle, J.A., and Ojo, T.O. (2020). "Understanding the adoption of climate change adaptation strategies among smallholder farmers: Evidence from land reform beneficiaries in South Africa." *Land Use Policy*, Vol. 99, 104858.
- 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, pp. 17-22.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Gimeno, L., Nieto, R., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Beguería, S., and Azorin-Molina, C. (2011). "A multiscalar global evaluation of the impact of ENSO on droughts." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 116, D20109.
- Vicente-Serrano, S.M., Miralles, D.G., Domínguez-Castro, F., Azorin-Molina, C., El Kenawy, A., McVicar, T.R., Tomás-Burguera, M., Beguería, S., Maneta, M., and Peña-Gallardo, M. (2018). "Global assessment of the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI) for drought analysis and monitoring." *Journal of Climate*, Vol. 31, pp. 5371-5393.
- Vicente-Serrano, S.M., Miralles, D.G., McDowell, N., Brodribb, T., Domínguez-Castro, F., Leung, R., and Koppa, A. (2022). "The uncertain role of rising atmospheric CO₂ on global plant transpiration." *Earth-Sciences Reviews*, Vol. 230, 104055.
- von Braun, J., and Tadesse, G. (2012). *Global food price volatility and spikes: An overview of costs, causes, and solutions*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy, p. 161.
- Vremec, M., Forstner, V., Herndl, M., Collenteur, R., Schaumberger, A., and Birk, S. (2023). "Sensitivity of evapotranspiration and seepage to elevated atmospheric CO₂ from lysimeter experiments in a montane grassland." *Journal of Hydrology*, Vol. 617, 128875.
- Yang, Y., Roderick, M.L., Zhang, S., McVicar, T.R., and Donohue, R.J. (2019). "Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections." *Nature Climate Change*, Vol. 9, pp. 44-48.
- Zhou, S., Williams, A.P., Berg, A.M., Cook, B.I., Zhang, Y., Hagemann, S., Lorenz, R., Seneviratne, S.I., and Gentile, P. (2019). "Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 116, pp. 18848-18853.