

우리나라에서 최근(1982 ~ 2020) 발생한 여름철 급성가뭄의 특성 및 변화에 대한 연구

김경민* · 우성호** · 백은혁** · 정지훈***†

*전남대학교 지구환경과학부 박사과정학생, **전남대학교 지구환경과학부 연구교수,
***전남대학교 지구환경과학부 교수

Characteristics of and Changes in Summertime Flash Droughts in South Korea, 1982 ~ 2020

Kim, Kyungmin* · Woo, Sung-Ho** · Baek, Eun-Hyuk** · Jeong, Jee-Hoon***†

**Doctoral Student, Faculty of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea*

***Research Professor, Faculty of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea*

****Professor, Faculty of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea*

ABSTRACT

A flash drought is a rapidly evolving drought, unlike general meteorological droughts that develop over months to years due to persistent precipitation deficits. This study investigated the characteristics of summertime flash droughts in South Korea for the period of 1982 ~ 2020. Flash droughts can be classified into heatwave flash droughts and precipitation deficit flash droughts, with the former occurring most frequently in South Korea. Both the occurrence and duration of flash droughts increased during the analysis period, especially heatwave flash droughts. Composite analysis results of reanalysis dataset and land surface model simulation revealed that large-scale anticyclonic atmospheric circulation and positive temperature anomalies contribute to increased evapotranspiration and reduced soil moisture, which lead to flash droughts in South Korea. In the summer of 2016 and 2018, when flash droughts occurred most frequently with record-breaking heatwaves, these characteristics were prevalent. Land-atmosphere interactions associated with the anticyclonic circulation might influence the development of summer heatwave flash droughts in South Korea.

Key words: Flash Drought, Soil Moisture, Climate Factors, Heatwave, Land-atmosphere Interaction

1. 서론

급성가뭄은 수주 또는 수개월 만에 급격하게 발생하는 가뭄으로 수개월에서 수년까지 장기간 강수부족이 누적되며 발생하는 일반적인 가뭄과 구별된다(Svoboda et al., 2002; Mo and Lettenmaier, 2015; Otkin et al., 2018). 급성가뭄은 2012년 미국 중부에서 발생한 대가뭄 사례를 통해 그 중요성이 알려지기 시작하였고, Mo and Lettenmaier (2015, 2016)는 처음으로 급성가뭄을 객관적으로 진단하여 그 발생 메커니즘에 따라 급성가뭄을 폭염형과 강수부족형으로 분류하였다. 폭염형 급성가뭄은 지속되는 높은 기온에 의해 증발산량이 증가하여 토양수분이 급격하게 감소하면서 발생한다. 이러한 특성으로 폭염

형 급성가뭄은 주로 농경지대와 같이 적당한 강수와 비교적 많은 토양수분이 존재하는 지역에서 봄, 여름에 주로 발생한다(Mo and Lettenmaier, 2015; Wang and Yuan., 2018). 강수부족형 급성가뭄은 급격한 강수 부족으로 인해 증발산량이 감소하고 지표 현열 방출이 증가함에 따라 기온이 상승하고 토양은 더욱 건조해지면서 발생한다. 이러한 특성으로 강수부족형 급성가뭄은 연강수량이 비교적 작은 반건조지대에서 주로 발생한다(Mo and Lettenmaier, 2015; Wang and Yuan., 2018).

급성가뭄은 상대적으로 짧은 시간 안에 발생하는 까닭에 그 예측과 대비가 어려워 큰 피해를 유발한다. 2012년 여름 미국 중부에 발생한 급성가뭄은 수십억 달러의 농작물 및 가축 등의 경제적 피해를 야기하였다(Wallander et al.,

†Corresponding author : jjechoon@jnu.ac.kr (Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea. Tel. +82-62-530-3466)

ORCID 김경민 0000-0003-3565-4613
우성호 0000-0002-4833-1111

백은혁 0000-0002-2897-0784
정지훈 0000-0002-3358-3949

2013). 급성가뭄은 북미지역 뿐만 아니라 동아시아(Yuan et al., 2015; Wang and Yuan., 2018), 유럽(Mozny et al., 2012; Potop et al., 2014), 남아프리카(Yuan et al., 2018) 등 전세계적으로 그 발생이 탐지되고 있으며 기후변동에 따른 발생의 변화가 뚜렷하다. 특히 지난 수십 년간 전세계 많은 지역, 특히 중국과 남아프리카 지역에서 뚜렷한 증가추세가 나타나고 있는데(Wang et al., 2016; Yuan et al., 2018), 대부분 지구온난화와 관련된 폭염형 급성가뭄 발생의 증가와 관련되어 있다(Yuan et al., 2019; Christian et al., 2021).

우리나라에서는 과거 급성가뭄이 연구를 통해 자세히 보고된 바 없으나, 지난 2016년 기록적인 폭염 발생시에 장마철 이후임에도 불구하고 이례적인 가뭄이 발생하여 여름철 농업활동에 일부 피해가 발생한다(KMA, 2017). 우리나라에는 최근 여름철 폭염 발생이 뚜렷하게 증가하고 있어(Lee and Lee, 2016; Yeh et al., 2018; Min et al., 2020) 이러한 폭염형 급성가뭄의 발생과 증가가 예상된다. 특히 여름철 생장이 농경에 매우 중요한 우리나라에서는 이러한 급성가뭄은 큰 피해를 야기할 수 있지만, 아직 급성가뭄의 탐지나 그 발생과 관련된 기상 및 대규모 기후 조건 등에 대한 연구는 이루어진 바 없다.

본 연구에서는 관측 및 재분석 자료를 사용하여 1982년부터 2020년까지 우리나라에서 여름철에 발생한 급성가뭄을 객관적으로 탐지하고 그 발생과 관련된 기후학적 지면-대기 특성을 분석하였다. 2장에서는 연구에 사용된 자료 및 분석 방법을, 3장에서는 우리나라에서 발생한 급성가뭄의 발생 추세와 특성에 대해 서술하고, 대표적인 사례도 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1. 자료

급성가뭄 발생과 관련된 대기 변수의 분석에는 European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)에서 제공하는 ERA5 (Hersbach et al., 2020) 재분석 자료가 사용되었다. 자료의 수평해상도는 위, 경도 0.5°이고 1982년부터 2020년까지 여름철(6~8월) 2 m 기온, 500 hPa 지위고도, 200 hPa 지위고도, 강수량을 사용하였다. 평년 편차를 계산하는 평년기간은 1982년~2020년을 사용하였다.

토양수분은 급성가뭄 탐지에 있어 중요한 인자이다(Mo and Lettenmaier, 2015; Liu et al., 2020). 하지만 충분한 공간대표성이 확보된 토양수분의 장기간 관측자료는 전세계적으로도 매우 제한적이다. 최근 위성관측을 활용한 토양수

분 추정치가 가능해졌으나, 이는 표층 수 cm 정도의 토양수분에 한정되어 있어 급성가뭄의 탐지에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 자료가 풍부하고 정확성이 높은 대기 관측 및 재분석 자료를 강제력으로 사용하여, 오픈라인 지면 모델을 구동해 토양수분 및 증발산량 재분석 자료를 추정하여 연구에 사용하였다. 본 연구에서 사용한 지면 모델은 기상청 현업계열 예측 모델인 GloSea5 모델의 지면 모델 JULES (Joint UK Land Environment Simulator; Best et al., 2011)이며, 수평해상도는 0.5° × 0.5°이다. 사용된 지면모델의 대기강제력은 1982~2020년 기간의 ERA5 재분석 자료의 6시간 간격 2 m 대기온도, 습도, 10 m 풍속, 강수량, 지상기압, 복사량이 사용되었다. 이중 강수량은 토양수분 산출 값에 매우 중요한 요소이나 재분석 자료는 관측에 비해 크게 편향(biased)되어 있음이 알려져 있다(Lorenz and Kunstmann, 2012). 이를 감안하여, ERA5 강수량의 월 평균 값이 GPCP (Global Precipitation Climatology Project; Adler et al., 2003) 관측 월 평균 강수량과 일치하도록 아래 식 (1) 과 같이 편향보정(bias correction)하여 사용하였다.

$$\text{precip}_{\text{ERA5}}^{\text{scaled}} = \frac{\text{precip}_{\text{GPCP}}^{\text{monthly}}}{\text{precip}_{\text{ERA5}}^{\text{monthly}}} \times \text{precip}_{\text{ERA5}}^{\text{6hourly}} \quad (1)$$

2.2. 급성가뭄 정의

Mo and Lettenmaier (2015, 2016)의 방법론을 적용하여 우리나라 지역 격자지점에서 폭염형 급성가뭄(heatwave flash drought)과 강수부족형 급성가뭄(precipitation deficit flash drought)을 탐지하였다. 먼저 폭염형 급성가뭄의 발생은 1) 기온의 평년 편차(anomaly)가 1 표준편차보다 크고, 2) 증발산량 편차가 양수, 그리고 3) 토양수분이 평년 기간 값의 40 퍼센타일(percentile)보다 작을 때로 정의하였다. 강수부족형 급성가뭄의 발생은 1) 기온의 편차가 1 표준편차보다 크고, 2) 증발산량 편차가 음수이며, 3) 강수량 퍼센타일이 40퍼센타일보다 작을 때로 정의하였다. 본 연구에서 평년기간은 분석 전체기간인 1982~2020년을 사용하였다.

급성가뭄의 발생 및 평균적 지속성을 고려하여 각 변수의 5일 평균값(pentad) 기준으로 위 발생기준을 모두 만족할 때를 급성가뭄으로 탐지하였다. 급성가뭄의 빈도와 지속기간의 경향 분석을 위한 급성가뭄 탐지는 남한 영역(33-38°N, 125-130°E) 내 지상 52개 격자점에서 독립적으로 이루어진다. 급성가뭄 발생과 전후 기후학적 지면-대기 특성을 조사하기 위한 합성분석에서는 각 변수들의 우리나라(33-38°N,

125-130°E) 지역 평균값이 위 발생기준을 만족할 때를 급성 가뭄 시기로 정의하였고, 급성가뭄이 두 pentads 이상 연속하여 탐지되는 경우 발생한 급성가뭄이 지속되는 것으로 정의하였다.

2.3. 토양수분-기온 결합강도

본 연구에서는 급성가뭄의 발생과 관련된 지면-대기 상호작용을 파악하기 위해, Miralles et al.(2012)에서 제시한 토양수분-기온 결합강도(soil moisture-temperature coupling strength)를 사용하였고, 수식은 아래 식 (2)와 같다.

$$\pi = \frac{T - \bar{T}}{\sigma_t} \left(\frac{H - \bar{H}}{\sigma_H} - \frac{H_p - \bar{H}_p}{\sigma_{H_p}} \right) \quad (2)$$

식 (2)는 실제 증발(E)을 기반으로 하는 에너지 균형을 나타내는 H, 잠재적 증발(E_p)을 기반으로 하는 에너지 균형을 나타내는 H_p 그리고 기온을 나타내는 T로 이루어져 있다. H와 H_p는 각각 $H = R_n - \lambda E$, $H_p = R_n - \lambda E_p$ 의 식으로

나타낼 수 있는데, 이때 E, E_p, R_n, λ는 각각 증발, 잠재증발량, 표층 순 복사에너지와 기화잠열을 의미한다. 즉 H_p는 지면에서의 순 복사에너지가 잠재 증발량만큼 토양수분을 증발시키는데 사용하고 남은 에너지를 의미하고, H는 실제 토양수분을 증발시키는데 에너지를 사용하고 남은 복사에너지를 의미한다. 즉 이 둘의 차는 토양수분 부족에 의해 남은 에너지로 기온과의 커플링에 기여하는 부분을 의미한다.

토양수분이 대기의 수분 수용량만큼 증발할 충분한 양이 있을 때는 H와 H_p가 같아지므로 π는 0이 되고, 토양수분이 적어 건조할 경우 H와 H_p사이의 차가 커져 π는 증가하는 특성을 가진다. 즉, π는 토양수분과 복사에너지, 기온의 상태로부터 토양수분-기온 되먹임의 상태(diagnosis)를 지수로 표현한 것이다.

3. 결과

3.1. 우리나라 급성가뭄 발생 및 지속기간 특성

Fig. 1은 분석기간 동안 우리나라 격자지점(총 52개)

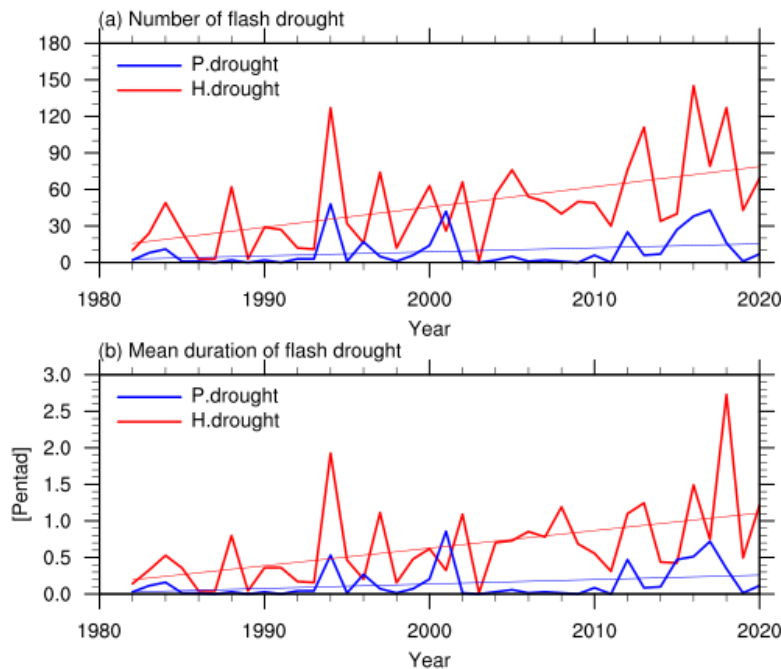


Fig. 1. (a) Total of occurrences and (b) mean duration (pentads) for heat wave flash drought (red line) and precipitation deficit flash drought (blue line) during 1982~2020 over summer (June~August) in South Korea (33-38°N, 125-130°E). Thin solid line of individual time series denotes its linear trend

에서 발생한 여름철 급성가뭄의 전체 발생횟수와 그 평균적 지속시간을 나타낸다. 1982~2020기간동안 여름철 급성가뭄 평균 발생횟수는 폭염형 급성가뭄이 52개 격자지점에서 47.5회, 강수부족형 급성가뭄이 9.1회로 폭염형 급성가뭄이 약 5배 많이 발생하였다. 우리나라 여름철은 강수량이 많고 식생이 풍부하여 비교적 습윤하기 때문에 두 가지 급성가뭄 중 폭염형 급성가뭄이 주로 발생하는 것으로 판단된다. 급성가뭄의 연평균 지속기간은 폭염형 급성가뭄이 0.63 pentad, 강수부족형 급

성가뭄이 0.14 pentad로 폭염형 급성가뭄의 지속기간이 월등히 길었다. 우리나라에서 급성가뭄이 가장 많이 발생했던 해로는 1994년(129회 발생, 2.1 pentad 지속), 2016년(140회 발생, 1.6 pentad 지속), 그리고 2018년(127회 발생, 2.5 pentad 지속)이 있다. 이 해들은 모두 우리나라에 여름철 기록적인 폭염이 발생했던 해들로 (Lee and Lee, 2016; Yeh et al., 2018; Min et al., 2020), 우리나라의 여름철 급성가뭄이 폭염과 밀접하게 관련되어 있음을 나타낸다. 특히 2010 이후 폭염형 급성가뭄의

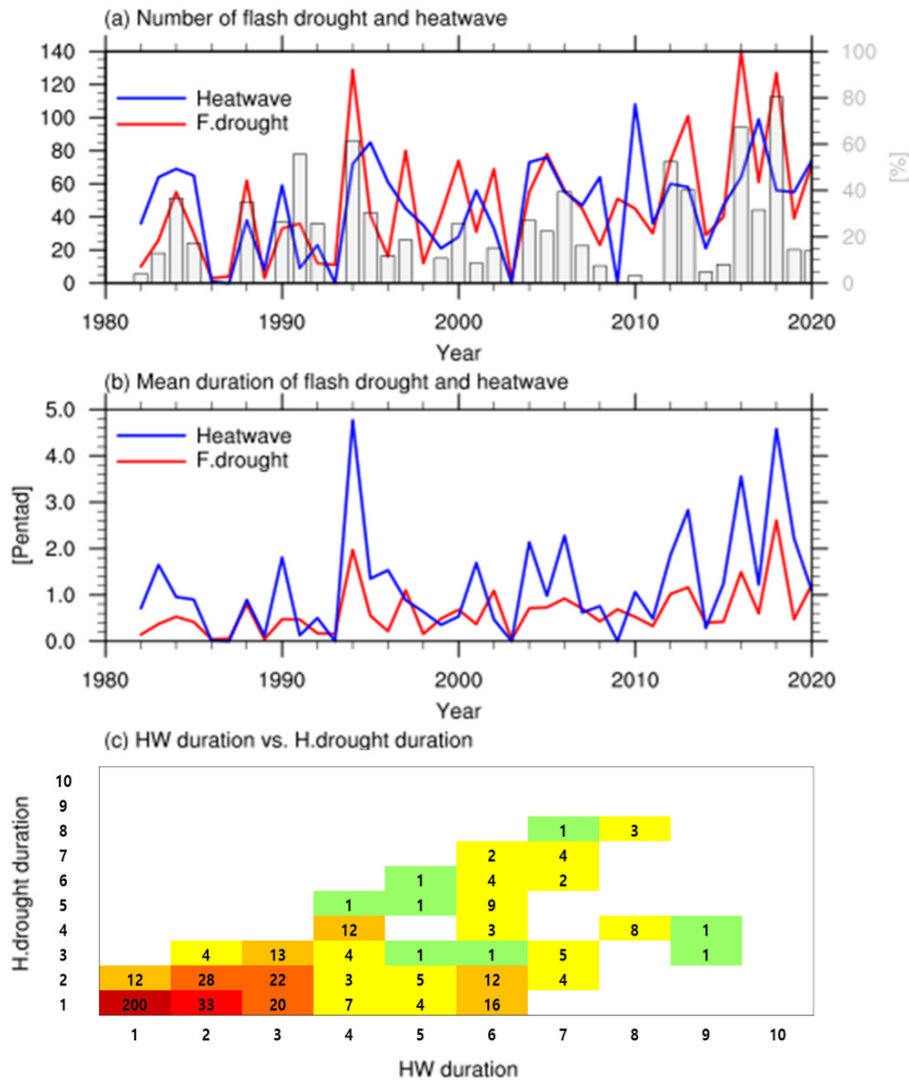


Fig. 2. (a) Total of occurrences and (b) mean duration (pentads) for heat wave flash drought (red line) and heat wave (blue line) during 1982~2020 over summer (June~August) in South Korea (33~38°N, 125~130°E). (c) Occurrences of heat wave flash drought according to mean duration for heat wave flash drought and heat wave. Gray bar denotes rate of heat wave accompanied by heat wave flash drought

발생횟수와 지속기간 모두 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이며, Mann-Kendall 검정기법(Mann, 1945; Kendall, 1975)을 사용하여 그 선형추세의 통계적 유의성을 검증한 결과 폭염형 급성가뭄의 발생횟수와 지속기간의 추세는 99% 이상, 강수부족형 급성가뭄의 발생횟수와 지속기간의 추세는 90% 이상 유의미한 것으로 나타났다. 이러한 특징은 인위적 기후변화에 따른 폭염 발생의 증가 추세(Hong et al., 2018; Yoon et al., 2020)와 관련이 있는 것으로 추정할 수 있다.

폭염과 폭염형 급성가뭄의 사이에 관계를 알아보기 위해 폭염 발생 시 폭염형 급성가뭄이 발생하는 비율(폭염-급성가뭄 동시발생률)을 조사하고, 발생 횟수 및 지속기간 사이의 관련성도 조사하였다. 이를 위해 먼저 pentad 자료를 기반으로 폭염의 발생과 기간을 정의하였다. 분석 전체 기간의 기온 pentad 자료에서 90퍼센타일보다 높은 pentad를 폭염의 발생으로 정의하고 두 pentad 이상 연속하여 탐지되는 경우 발생한 폭염이 지속되는 것으로 정의하였다. 또한 폭염 발생 시 폭염형 급성가뭄이 발생한 사례는 폭염 기간과 급성가뭄 기간이 한 pentad 이상 겹칠 경우로 정의하였다.

전체 분석기간에서 폭염-급성가뭄 동시발생률을 조사한 결과, 34.8%로 나타나 적지 않은 폭염 사례에서 급성가뭄이 발생한 것으로 보인다. Fig. 2는 우리나라에서 발생한 폭염과 폭염형 급성가뭄의 발생 횟수(Fig. 2a)와 지속기간(Fig. 2b) 및 폭염-급성가뭄 동시발생률의 시계열을 나타낸다. 전반적으로 폭염이 많이 발생하는 해에 급성가뭄도 많이 발생하는 경향을 보이나, 폭염 발생횟수와 폭염-급성가뭄 동시발생률과 관련성은 그렇게 높지 않다(상관계수 0.36). 하지만 폭염형 급성가뭄의 발생은 폭염의 발생 횟수에 비해 상대적으로 지속기간이 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. Fig. 2b에서 폭염의 지속기간과 폭염-급성가뭄 동시발생률은 매우 높은 관련성을 보인다(상관계수 0.75). 실제 2010년의 경우, 폭염은 많이 발생하였지만 폭염형 급성가뭄은 거의 발생하지 않았는데, 이는 발생한 폭염들의 지속기간이 짧아(Fig. 2b) 급성가뭄으로 진행되지 않은 것으로 판단된다. 또한 폭염 발생 횟수가 많고 지속기간도 길었던 1994년, 2016년, 2018년의 경우 폭염 발생 기간 중 폭염형 급성가뭄의 발생률이 각각 60%, 65%, 80%로 매우 높았다(Fig. 2a, b).

폭염 지속기간과 급성가뭄 지속기간 사이의 관계를 조사하기 위해 동시 발생 사례에 대해 폭염 및 급성가뭄 지

속 기간에 따른 발생 횟수를 조사하였다(Fig. 2c). 폭염과 급성가뭄의 지속 기간을 비교하면 전반적으로 폭염의 기간이 길수록 가뭄의 기간도 길어지는 선형적인 관련성을 나타낸다. 또한 선형적인 관계와 더불어 폭염의 지속기간이 가뭄의 지속기간보다 긴 사례의 발생 횟수가 뚜렷하게 많은 특징이 나타나는데, 이는 폭염의 오랜 지속이 폭염형 급성가뭄의 발생에 유리한 조건임을 의미할 수 있다. 폭염이 장기간 지속되어 토양이 건조해지는 시간이 충분해야만 지면-대기 상호작용이 작동하여 급성가뭄으로 진행될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

폭염형 급성가뭄이 우리나라 여름철 전체 급성가뭄 발생의 대다수를 차지하고 있고, 최근 증가추세 및 변동성도 대부분 설명하고 있어, 아래에서는 폭염형 급성가뭄의 특성 및 발생 메커니즘에 대해 좀 더 자세히 분석하였다.

3.2. 폭염형 급성가뭄 발생시 특성

우리나라에서 폭염형 급성가뭄 발생시 나타나는 대기 및 지면 조건의 공통적 특성을 파악하기 위해 폭염형 급성가뭄 발생 및 그 전후 기간에 대해 기온, 강수, 500 hPa 지위고도, 토양수분 및 증발산량 편차의 합성도 분석을 수행하였다. Fig. 3은 폭염형 급성가뭄 발생 전후 합성된 기온, 500 hPa 지위고도, 강수량 편차를 나타낸다. 급성가뭄 발생 2 pentad 전부터 우리나라 주변에서 발달하기 시작한 고기압성 편차는(Fig. 3f) 1 pentad 전, 중국 동부에서 우리나라에 이르는 고기압성 편차가 급격히 발달하면서 우리나라에서도 평년보다 높은 기온과 강수 부족이 시작된다(Fig. 3b, g, l). 급성가뭄 기간 동안(0 pentad), 우리나라는 이 고기압의 중심에 들면서, 높은 기온과 강수부족이 지속되어 폭염형 급성가뭄이 발생하고 지속되는 것으로 분석된다. 폭염형 급성가뭄 기간 직후(+1 pentad) 고기압성 순환이 약해지고 강수량이 증가하며 급성가뭄이 해소된다.

폭염형 급성가뭄 기간 및 전후 시기에서의 토양수분 및 증발산량 편차와 토양수분-기온 결합강도를 살펴보면(Fig. 4), 급성가뭄 발생 1 pentad 이전 토양수분은 평년과 비슷하지만 증발산량이 급격히 증가(지면으로부터 대기로 수분 증발)하기 시작한다. 이는 같은 시기 높은 기온과 비가 오지 않는 건조한 대기 상태가 그 원인이라 할 수 있다(Fig. 3g, l). 급성가뭄 발생시기에 고기압성 순환이 강해지고 높은 기온이 지속적으로 유지되면서

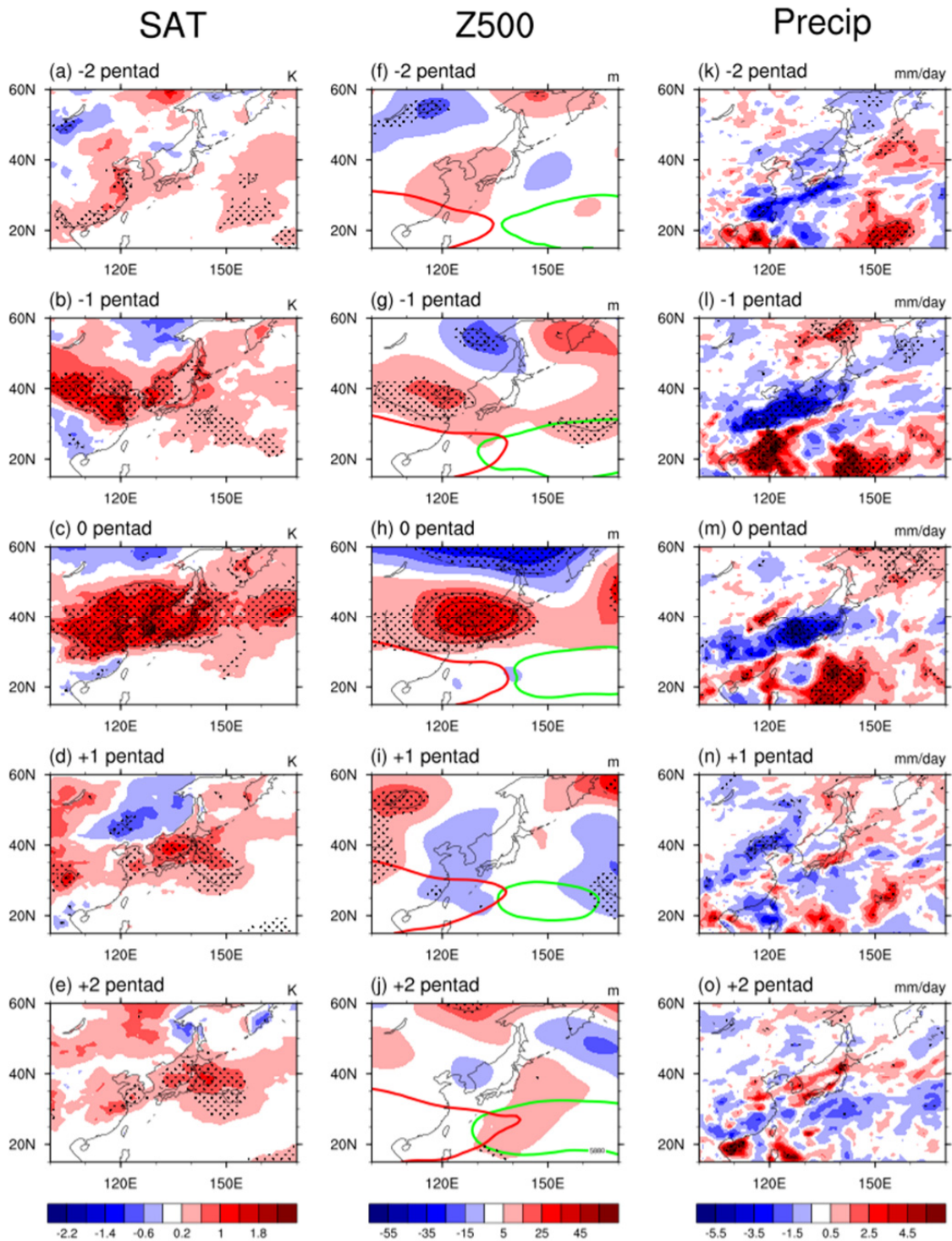


Fig. 3. Composite anomalies of (a–e) SAT, (f–j) geopotential height at 500 hPa (green and red contour line indicates North Pacific high (5880 gpm) and Tibet high (12480 gpm), respectively) and (k–o) evapotranspiration during heatwave flash drought. Black dots denote the statistical significance at the 95% confidence level

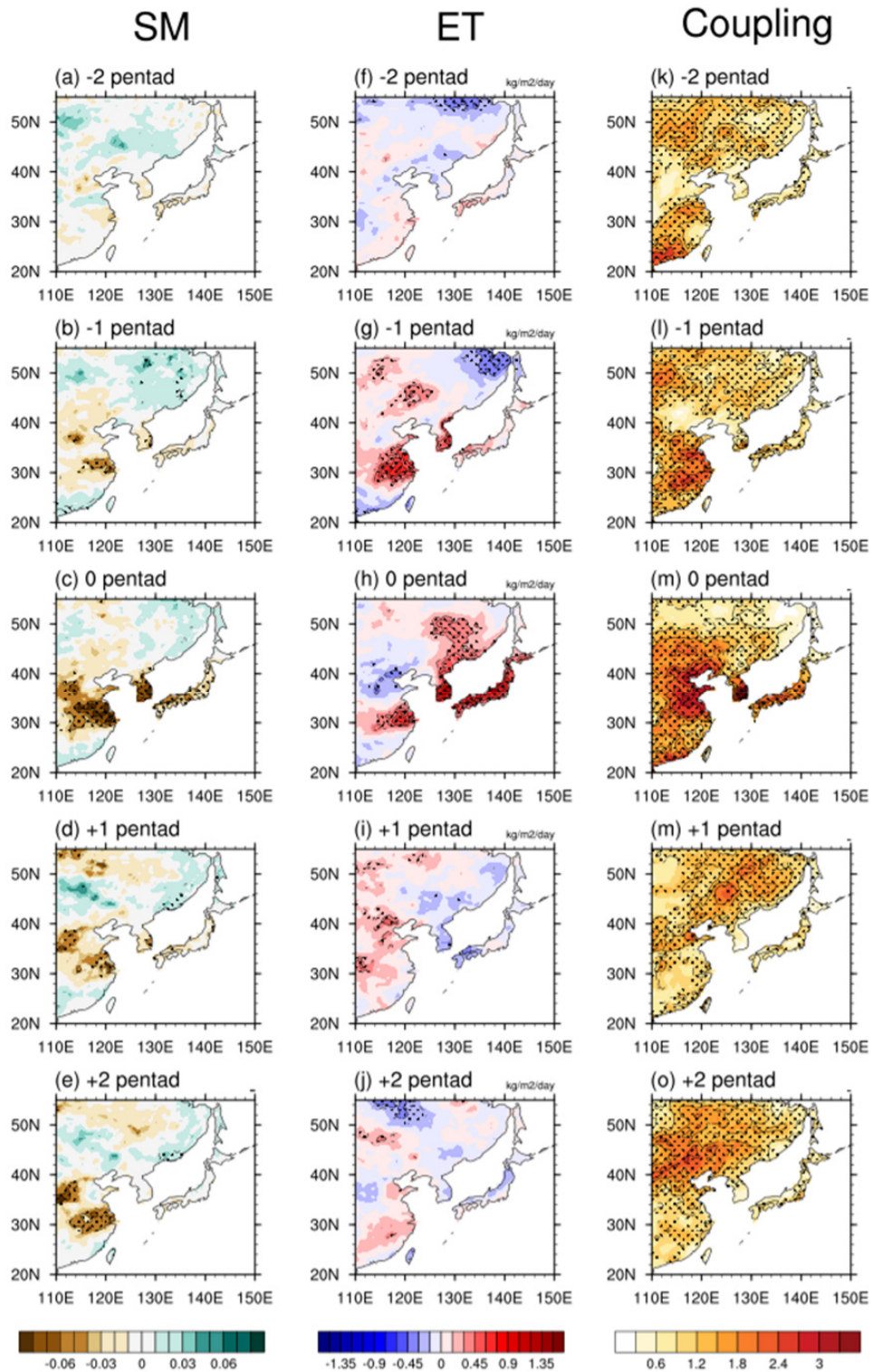


Fig. 4. Composite anomalies of (a–e) soil moisture, (f–j) evapotranspiration and (k–o) soil moisture–temperature coupling strength during heatwave flash drought. Black dots denote the statistical significance at the 95% confidence level

(Fig. 3c, h) 증발산량이 더욱 증가하게 되며, 토양수분은 급격하게 감소하여 급성가뭄이 발생한다. 이러한 과정 중 우리나라 토양수분-기온 결합강도가 급격히 강해지는데(Fig. 4l, m), 이는 고기압성 순환이 지속되며 높아진 기온과 이로 인한 증발산량의 증가가 토양수분의 부족을 발생시키고 다시 기온을 높이는 토양수분-기온 상호작용에 의한 양의 되먹임이 폭염형 급성가뭄의 성장 및 유지에 중요한 기작임을 의미한다. 이후 고기압 순환은 약해지고 강수가 발생하면서(Fig. 3i, n), 토양수분이 서서히 회복되고 토양수분-기온 결합강도가 약해지며 급성가뭄이 해소된다.

다음 장에는 우리나라 폭염형 급성가뭄 발생시 대기과 지면 변수들에서 나타났던 위와 같은 대표적인 특성들이 개별 사례에서도 나타나는지 확인하고자 분석기간 중 2010년 이후 폭염형 급성가뭄이 가장 강하고 오래 지속되었던 상위 2개 사례(2018년과 2016년)를 추가적으로 분석하였다.

3.3. 2018, 2016년 폭염시 발생한 급성가뭄 사례 분석

2018년은 기록적인 폭염과 함께 분석기간 중 가장 강하고 오랫동안 폭염형 가뭄이 진행되었던 해이다(KMA, 2019). 2018년 우리나라에서 발생한 폭염형 급성가뭄의 발생 및 지속과 관련된 대기 및 지면 기후인자들 분석을 통해 폭염형 급성가뭄의 특성을 조사하였다. 먼저 2018년 폭염형 급성가뭄의 발생과 소멸 특성을 조사하기 위해 2018년 6~8월 우리나라 지역(33-38°N, 125-130°E)에서

평균된 기온, 토양수분, 증발량 및 강수량 편차 시계열을 분석하였다(Fig. 5). 6월말에서 7월초 사이 지속적인 강수로 토양수분은 평년 이상을 나타냈다. 그러나 7월 10일 이후 급격한 기온 상승에 의한 증발산량의 급격한 증가에 의해 토양수분은 급격히 감소하였고, 이로 인해 폭염형 급성가뭄이 발생하였다. 이 기간 평년보다 2도 이상 높은 기온과 토양수분 부족이 지속되었고, 증발산량 또한 8월 초까지 양의 편차를 지속하며 폭염형 급성가뭄은 한달 이상 지속되었다. 8월 중순 이후 강수가 발생하고, 기온이 감소하며 급성가뭄이 해소되었다.

2018년 폭염형 급성가뭄 발생 및 지속과 관련된 중관적인 대기특성과 지면상태를 조사하기 위해 급성가뭄 시기(7월 21일 ~ 8월 25일) 및 그 전후의 기온, 500 hPa 지위고도, 강수량 편차를 분석하였다(Fig. 6). 급성가뭄 발생 1 pentad 전 북태평양 고기압과 티벳 고기압이 우리나라로 확장하기 시작하였고, 급성가뭄 발생 시기 북태평양 고기압과 티벳 고기압이 겹치며 우리나라 대기 하층부터 상층까지 키가 크고 강한 고기압성 순환을 만들었다. 지속적인 고기압성 순환의 영향으로 높은 기온과 강수의 부족이 이어져 폭염형 급성가뭄이 발달하고 지속된 것으로 판단된다. Fig. 7은 2018년 폭염형 급성가뭄 발생 전후 토양수분, 증발산량 편차와 토양수분-기온 결합강도를 보여준다. 급성가뭄 이전 시기에는 강수의 영향으로 평년보다 많은 수준의 토양수분 편차를 보였지만, 이후 지속적인 고기압성 편차의 영향으로 폭염이 지속되며 증발산량의 증가와 함께 토양수분이 급격히 감소

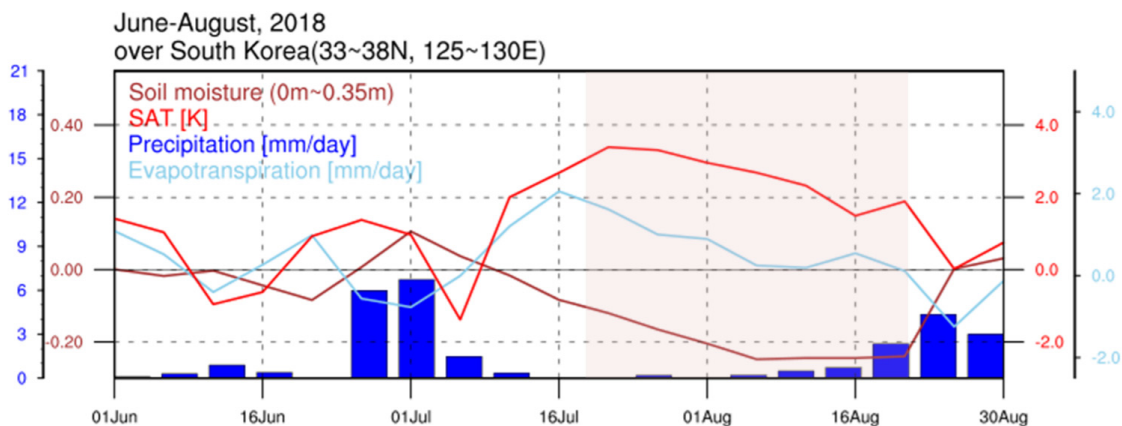


Fig. 5. Time-series of soil moisture (brown line), SAT (red line), evapotranspiration (sky blue line) anomaly and precipitation (blue bar) in 2018 summer (June-August) over South Korea (33-38°N, 125-130°E). The shaded square indicates the period of heatwave flash drought occurrence

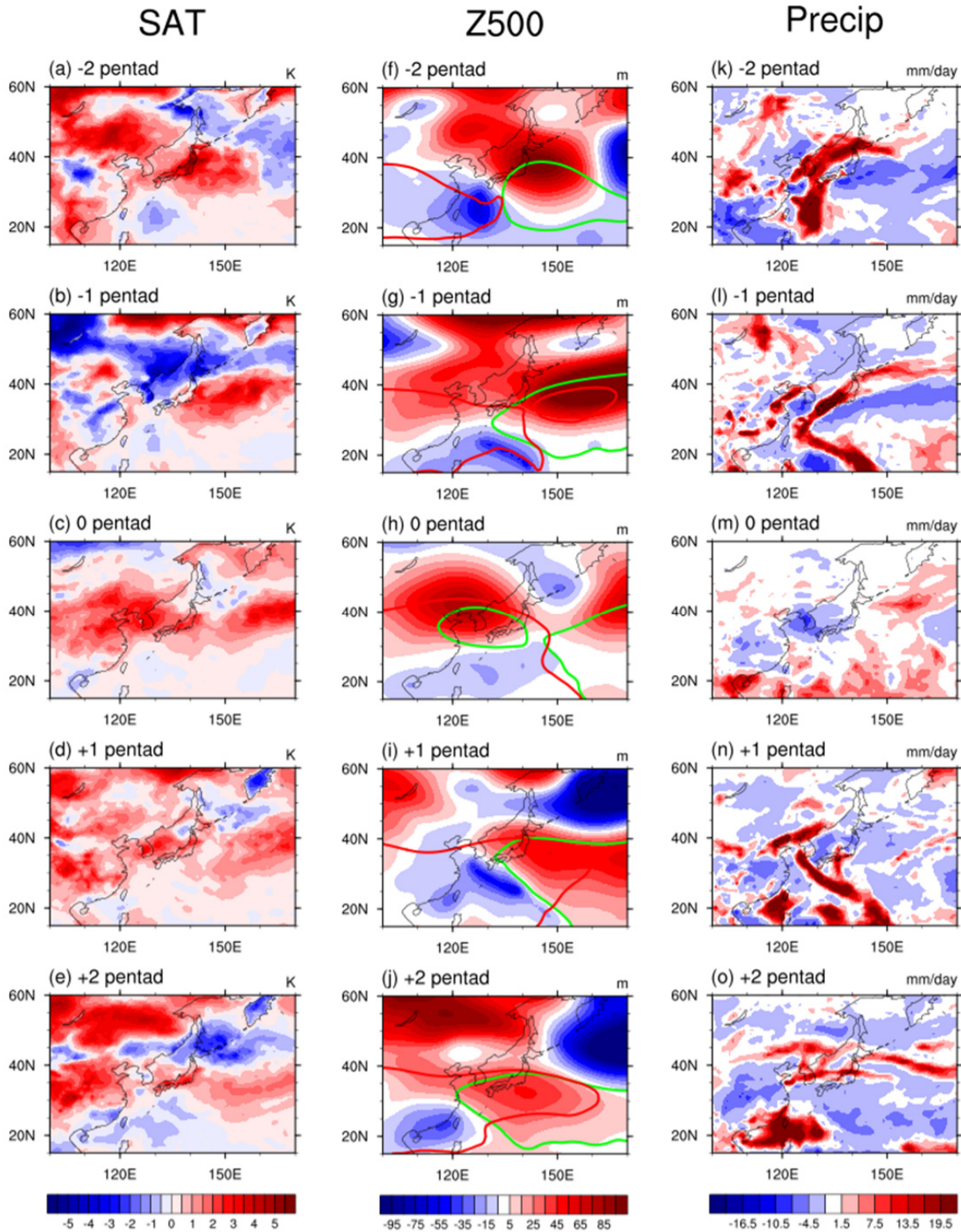


Fig. 6. Anomalies of (a-e) SAT, (f-j) geopotential height at 500hPa (green and red contour line indicates North Pacific high (5880 gpm) and Tibet high (12480 gpm), respectively) and (k-o) precipitation during 2018 summer heatwave flash drought

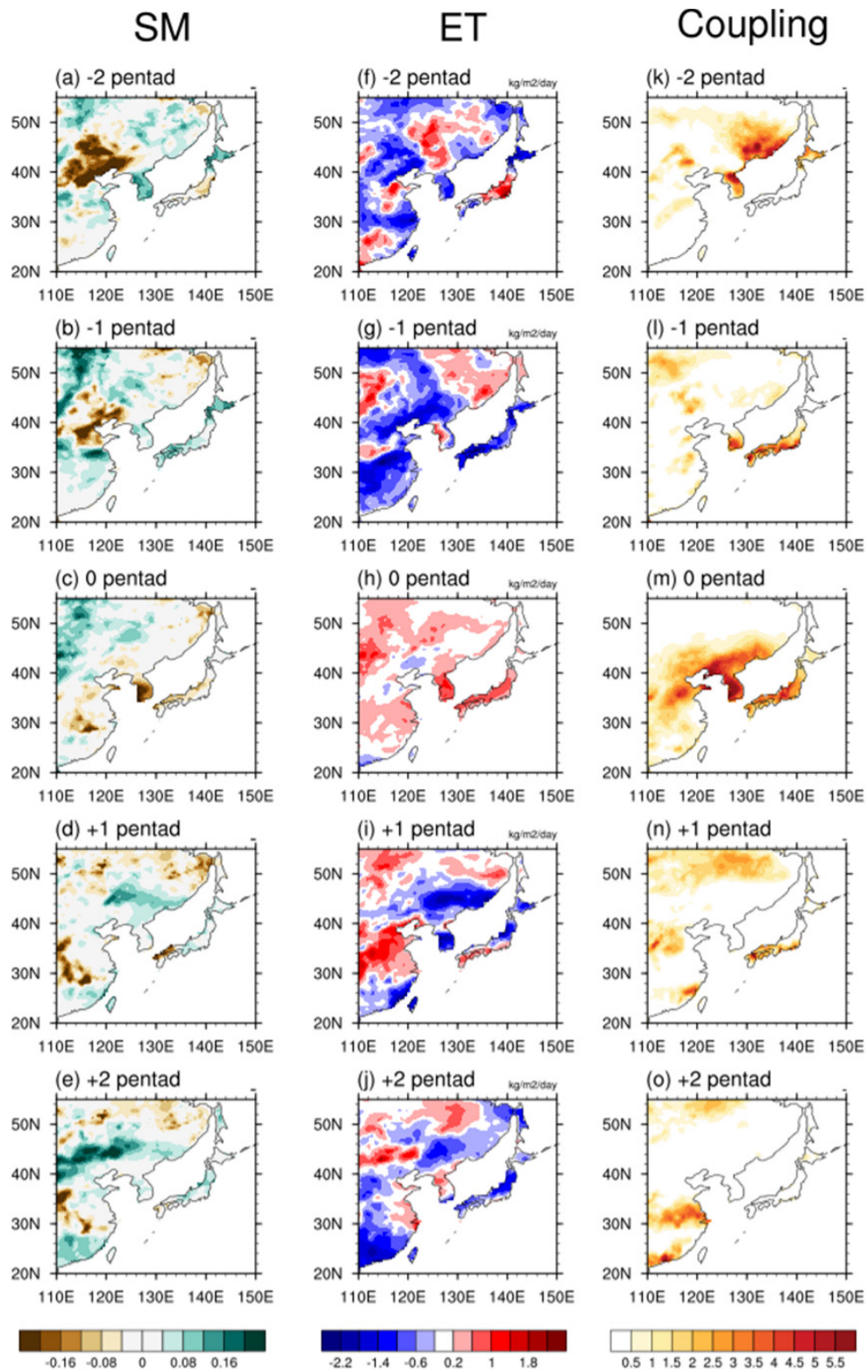


Fig. 7. Anomalies of (a–e) Soil moisture, (f–j) evapotranspiration and (k–o) soil moisture–temperature coupling strength during 2018 summer heatwave flash drought

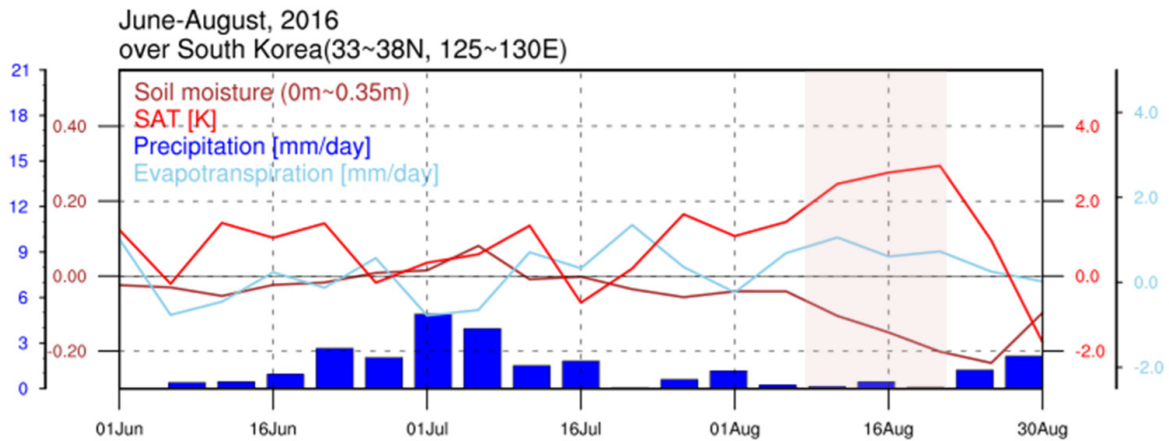


Fig. 8. Same as Fig. 5 except for during 2016 summer heatwave flash drought

하였다(Fig. 7b, c, g, h). 이와 함께 토양수분-기온 결합 강도가 강해지며(Fig. 7l, m), 기온상승이 다시 증발산량을 증가시키고 토양수분의 감소를 야기하는 토양수분-기온 상호작용에 의한 양의 되먹임에 의해 급성가뭄이 지속되었다. 급성가뭄 발생 이후 고기압 순환이 약해지고 강수의 발생으로 인해 토양수분 증가 및 증발산량 감소가 나타나며 급성가뭄이 해소되었다(Fig. 6d, e, i, j). 이러한 2018년의 급성가뭄 발생 패턴(Fig. 6, 7)의 경우 합성도 분석(Fig. 3, 4)에서 나타났던 전형적인 폭염형 급성가뭄 발생 패턴과 매우 유사하게 나타나지만, 티벳 고기압 및 북태평양 고기압이 한반도 지역까지 확장하며 더욱 강한 고기압의 지배를 받아 전례 없는 폭염형 급성가뭄을 발생시켰다.

2016년 또한 기록적인 폭염과 함께 폭염형 급성가뭄이 발생했던 해로 기록되었고(KMA, 2017), 2018년 사례와 같은 방식으로 우리나라 지역에서 평균된 기온, 토양수분, 증발량 및 강수량 편차 시계열을 분석하였다(Fig. 8). 6~7월에 지속적인 강수로 토양수분은 평년과 유사한 수준을 유지하였고, 기온과 증발산량 또한 평년과 유사한 수준이었다. 8월 1일 이후 높은 기온에 의한 증발산량의 증가에 의해 토양수분이 감소하였고, 8월 10일부터 급성가뭄이 발생하였다. 이 기간 평년보다 2도 이상 높은 기온과 양의 증발산량으로 토양수분의 부족이 지속되었고, 폭염형 급성가뭄은 약 15일 정도 지속되었다. 8월 25일 이후 강수가 많아지고, 기온이 감소하며 급성가뭄이 해소되었다.

Fig. 9는 2016년 폭염형 급성가뭄 발생 전후 기온, 지위고도, 강수량 편차이다. 급성가뭄 발생 2 pentad 전 중

국 북동부 지역에 고기압성 순환이 발달해 있고, 티벳 고기압과 북태평양 고기압이 우리나라로 확장되었다. 이후 급성가뭄 1 pentad 전 중국 북동부 지역의 고기압성 순환이 우리나라로 확장되고 티벳 고기압과 북태평양 고기압 또한 겹쳐지며 강한 고기압성 순환을 만들었고, 급성가뭄 발생시기까지 우리나라에 영향을 미쳤다. 선행 연구에 의하면, 이 기간 동안 캄차카 반도의 강한 블로킹 현상이 이 고기압의 이동을 정체시키며, 우리나라에 장기간 폭염을 발생시키는데 기여하였다(Yeh et al., 2018). 이러한 지속적인 고기압성 순환의 영향으로 높은 기온과 강수 부족이 이어져 폭염형 급성가뭄이 발달하였고 이는 2주이상 지속되었다. Fig. 10은 2016년 폭염형 급성가뭄 발생 전후 토양수분, 증발산량 편차와 토양수분-기온 결합강도이다. 급성가뭄 이전 평년과 비슷한 수준이었던 토양수분이 지속적인 고기압성 순환의 영향으로 고온이 지속되며 증발산량의 증가와 함께 급격히 감소하였다(Fig. 10b, c, g, h). 이와 함께 토양수분-기온 결합강도가 강해지며(Fig. 10l, m), 토양수분-기온 상호작용에 의한 양의 되먹임에 의해 급성가뭄이 성장 및 유지되었다. 이후 고기압성 순환이 약해지고 강수가 발생하며 급성가뭄이 해소되었다(Fig. 9i, j, n, o).

2016년과 2018년 사례 모두 북태평양 고기압과 티벳 고기압이 우리나라로 확장하며 우리나라를 중심으로 강한 고기압성 순환이 발달하였다는 공통점이 있지만, 2018년의 경우 중국 동부에서부터 발달된 전형적인 급성가뭄 고기압 발달 패턴인 반면, 2016년의 경우 중국 북동부에서부터 발달된 고기압이 캄차카 지역의 블로킹에 의해 정체되어 우리나라는 고기압성 순환의 지속적

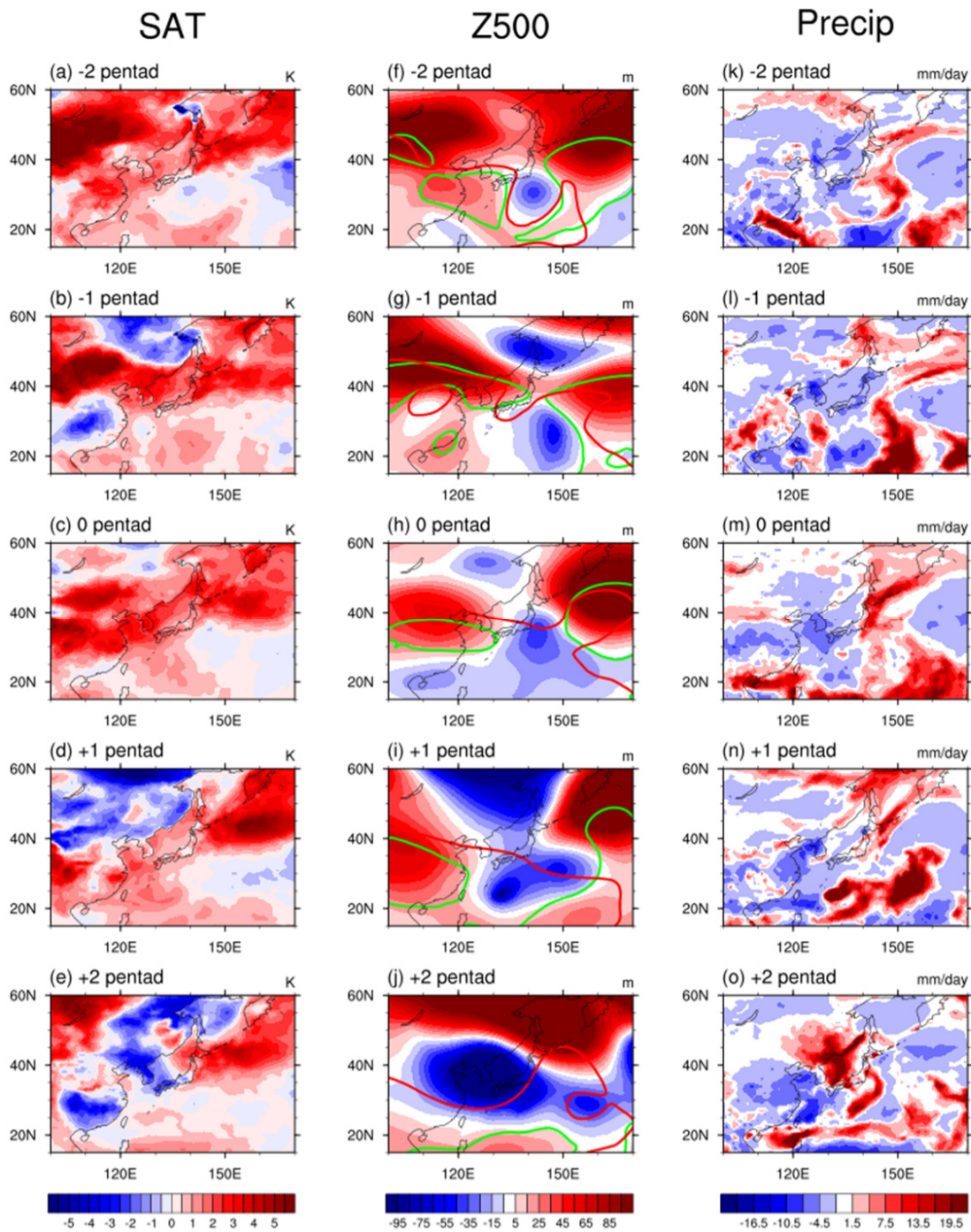


Fig. 9. Same as Fig. 6 except for during 2016 summer heatwave flash drought

인 영향을 받은 특징이 있다. 하지만 두 사례 모두 하층부터 상층까지 크게 발달한 고기압성 순환의 지배하에 높은 기온과 강수부족이 지속되어 증발산의 증가와 함께 토양수분이 급격하게 감소하는 공통적인 특징이 나

타났다. 이에 따라 토양수분-기온 결합 강도가 강해지며, 토양수분-기온 상호작용에 의한 양의 되먹임이 급성가뭄을 발생시키는 전형적인 폭염형 급성가뭄의 특징을 보였다.

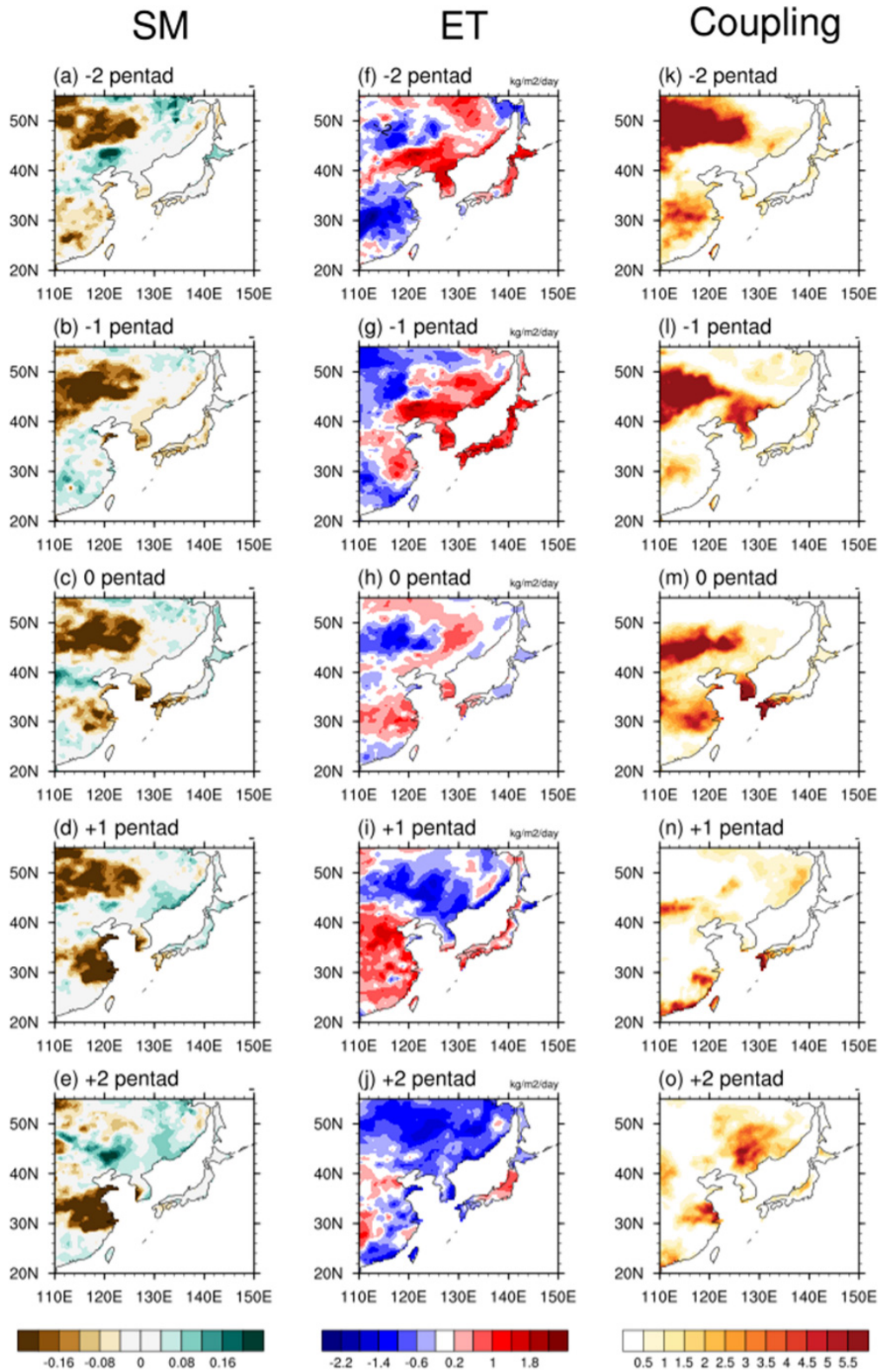


Fig. 10. Same as Fig. 7 except for during 2016 summer heatwave flash drought

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 우리나라에서 발생하는 급성가뭄의 발생 추세와 특성에 대해 조사하였다. 우리나라에서는 급성가뭄의 두 형태인 폭염형 급성가뭄과 강수부족형 급성가뭄 중, 폭염형 급성가뭄이 주로 발생하고 2010년 이후 그 발생 횟수와 지속기간 모두 상승하는 추세를 보인다. 폭염과 폭염형 급성가뭄의 관계는 폭염의 발생횟수가 많은 것 보다 폭염의 지속기간이 얼마나 길었는지가 중요한 것으로 판단된다. 합성도 분석을 통해, 폭염형 급성가뭄 발생 1 pentad 이전, 한반도 남쪽에 티벳 고기압과 북태평양 고기압이 확장하며, 중국 동부지역을 중심으로 고기압이 형성되기 시작하는 것으로 나타났다. 이후 급성 가뭄 발생시, 우리나라는 이 고기압성 편차의 중심에 위치하며, 높은 기온과 강수 부족으로 인해 증발산량 증가 및 토양수분 감소가 나타난다. 이 때 토양수분-기온 결합강도 강화되는 것을 볼 때, 두 변수의 상호작용에 의한 양의 되먹임이 폭염형 급성가뭄의 성장 및 유지에 기여하는 것으로 판단된다.

폭염형 급성가뭄 사례 중 가장 강하고 오래 지속되었던 2018년과 2016년 사례를 조사하였다. 2018년과 2016년 두 사례 모두 지속적인 고기압성 순환에 의해 높은 기온과 강수부족이 지속되고, 이로 인해 증발산량의 증가와 함께 토양수분의 감소를 발생시켜 급성가뭄이 발생하는 전형적인 폭염형 급성가뭄의 특성을 보였다. 또한 두 사례 모두 토양수분-기온 결합강도가 강해지는 특성을 보였으며, 이는 토양수분-기온 상호작용에 의한 양의 되먹임이 폭염형 급성가뭄 성장 및 유지에 있어서 중요함을 나타낸다.

그러나 2018년과 2016년 사례의 고기압 발달 특성은 구조적인 차이를 보였는데, 2018년의 경우 중국 동부에서부터 발달된 전형적인 급성가뭄 고기압 발달 패턴인 반면, 2016년의 경우 중국 북동부에서부터 발달된 고기압이 캄차카 지역의 블로킹에 의해 정체되어 발달하였다. 특히 최근 연구에 의하면 2016년 폭염형 급성가뭄 발생에 영향을 미친 중국 북동부 지역과 캄차카 반도의 고기압성 순환은 최근 증가하고 있는 패턴으로 알려져 있다(Lee et al., 2017). 또한 중국 북동부 지역은 토양수분의 감소추세가 강하고 대기와의 상호작용이 강하게 일어나는 지역으로 알려져 있다(Erdenebat and Sato, 2016). 이는 앞으로 우리나라에 2016년과 같은 형태의 폭염형 급성가뭄의 발생이 증가할 수 있음을 나타내며, 이에 대한 지속적인 모니터링과 추가적인 연구가 필요하다.

또한 IPCC 등에 따르면 미래에는 지구온난화와 기후변동성의 증가로 인해 많은 지역에서 폭염의 발생 빈도와 강도, 지속기간 모두 증가할 것으로 예측하고 있고(Meehl and Tebaldi, 2004; IPCC, 2013), 최근 연구 결과에서 우리나라 또한 미래 기후에 폭염의 발생이 증가할 것으로 예상하고 있어(Lee and Lee, 2016; Yeh et al., 2018; Min et al., 2020) 폭염형 급성가뭄 발생도 증가할 가능성이 있다. 하지만 일부 연구에서는 미래 기후 전망에서 동아시아 여름 몬순이 강화되어 전반적으로 여름철 강수가 증가할 것을 전망하여(Endo and Kitoh, 2014) 현재보다 다소 습해질 가능성도 제시된 바 있어, 향후 미래 기후에서의 급성가뭄 발생 및 지속기간의 변화 경향 전망에는 그 불확실성이 큰 편으로 이에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 여름철 우리나라에서 발생하는 급성가뭄과 관련된 지면-대기 특성 분석을 통해 고기압성 순환의 발달과 지면-대기 상호작용이 급성가뭄 발생에 중요한 요소임을 제시하였지만, 폭염형 급성가뭄을 유발하는 고기압성 순환의 발달이 전지구적으로 어떤 기후인자와 관련되어 있는지에 대한 기후학적 분석까지 수행하지는 못하였다. 향후 급성가뭄을 발생시키는 기압계의 발달이 어떤 전지구적인 기후변동성이나 강제력과 관련되어 있는지에 대한 분석이 필요하고 이를 통해 우리나라 급성가뭄에 대한 기후학적 이해를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 한계에도 불구하고 본 연구에서 제시한 급성가뭄의 발생 경향 및 관련 대기-지면 특성의 결과는 우리나라에서 발생하는 급성가뭄에 대한 이해를 높이고, 향후 급성가뭄 예측을 위한 기본 정보로서의 가치도 크다고 판단된다.

사사

이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술개발연구」 KMI2018-07010의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Adler RF, Huffman GJ, Chang A, Ferraro R, Xie PP, Janowiak J, Nelkin E. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *Journal of hydrometeorology* 4(6): 1147-1167.

- Best MJ, Pryor M., Clark DB, Rooney GG, Essery R, Ménard CB, Harding RJ. 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description-Part 1: energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development* 4(3): 677-699.
- Christian JI, Basara JB, Hunt ED, Otkin JA, Furtado JC, Mishra V, Randall RM. 2021. Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. *Nature communications* 12(1): 1-11.
- Endo H, Kitoh A. 2014. Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate. *Geophysical Research Letters* 41(5): 1704-1711.
- Erdenebat E, Sato T. 2016. Recent increase in heat wave frequency around Mongolia: role of atmospheric forcing and possible influence of soil moisture deficit. *Atmospheric science letters* 17(2): 135-140.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Thépaut JN. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730): 1999-2049.
- Hong JS, Yeh SW, Seo KH. 2018. Diagnosing physical mechanisms leading to pure heat waves versus pure tropical nights over the Korean Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(14): 7149-7160.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. T. F. Stocker et al. Eds. Cambridge University Press, p. 1535.
- Kendall MG. 1975. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin. London.
- KMA. 2017. 2016 Abnormal climate report. Korea Meteorological Administration.
- KMA. 2019. 2018 Abnormal climate report. Korea Meteorological Administration.
- Lee MH, Lee S, Song HJ, Ho CH. 2017. The recent increase in the occurrence of a boreal summer teleconnection and its relationship with temperature extremes. *Journal of Climate* 30(18): 7493-7504.
- Lee WS, Lee MI. 2016. Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology* 36(15): 4815-4830.
- Liu Y, Zhu Y, Ren L, Otkin J., Hunt ED, Yang X, Jiang S. 2020. Two different methods for flash drought identification: Comparison of their strengths and limitations. *Journal of Hydrometeorology* 21(4): 691-704.
- Lorenz C, Kunstmann H. 2012. The hydrological cycle in three state-of-the-art reanalyses: Intercomparison and performance analysis. *Journal of Hydrometeorology* 13(5): 1397-1420.
- Mann HB. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica. Journal of the econometric society* 245-259.
- Meehl GA, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305(5686): 994-997.
- Min KH, Chung CH, Bae JH, Cha DH. 2020. Synoptic characteristics of extreme heatwaves over the Korean Peninsula based on ERA Interim reanalysis data. *International Journal of Climatology* 40(6): 3179-3195.
- Miralles DG, Van Den Berg MJ, Teuling AJ, De Jeu RAM. 2012. Soil moisture-temperature coupling: A multiscale observational analysis. *Geophysical Research Letters* 39(21).
- Mo KC, Lettenmaier DP. 2015. Heat wave flash droughts in decline. *Geophysical Research Letters* 42(8): 2823-2829.
- Mo KC, Lettenmaier DP. 2016. Precipitation deficit flash droughts over the United States. *Journal of Hydrometeorology* 17(4): 1169-1184.
- Mozny M, Trnka M, Zalud Z, Hlavinka P, Nekovar J, Potop V, Virag M. 2012. Use of a soil moisture network for drought monitoring in the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology* 107(1): 99-111.
- Otkin JA, Svoboda M, Hunt ED, Ford TW, Anderson MC, Hain C, Basara JB. 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 99(5): 911-919.
- Potop V, Boroneanț C, Možný M, Štěpánek P, Skalák P. 2014. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theoretical and applied climatology* 115(3): 563-581.
- Svoboda M, LeComte D, Hayes M, Heim R, Gleason K, Angel J, Stephens S. 2002. The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8): 1181-1190.
- Wallander S, Aillery M, Hellerstein D, Hand M. 2013. The role of conservation programs in drought risk adaptation. *Economic Research Service ERR*. 148.
- Wang L, Yuan X, Xie Z, Wu P, Li Y. 2016. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific reports* 6(1): 1-8.
- Wang L, Yuan X. 2018. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought. *Advances in Atmospheric Sciences* 35(12): 1478-1490.
- Yeh SW, Won YJ, Hong JS, Lee KJ, Kwon M, Seo KH, Ham YG. 2018. The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism. *Monthly Weather Review* 146(5): 1463-1474.
- Yoon D, Cha DH, Lee MI, Min KH, Kim J, Jun SY, Choi Y. 2020. Recent changes in heatwave characteristics over Korea. *Climate Dynamics* 55(7): 1685-1696.
- Yuan X, Ma Z, Pan M, Shi C. 2015. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons. *Geophysical Research Letters* 42(11): 4394-4401.
- Yuan X, Wang L, Wood EF. 2018. Anthropogenic intensification of southern African flash droughts as exemplified by the 2015/16 season. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99: 586-589.
- Yuan X, Wang L, Wu P, Ji P, Sheffield J, Zhang M. 2019. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. *Nature communications* 10(1): 1-8.