

## 2022년 발생한 기록적인 유럽 폭염 발생의 역학적 원인 규명 연구

김주현<sup>1)</sup> · 양군환<sup>1)</sup> · 성현준<sup>1)</sup> · 박정현<sup>1)</sup> · 서은교<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공,  
<sup>2)</sup>조지메이슨대학교 Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies

(접수일: 2023년 4월 11일, 수정일: 2023년 5월 17일, 게재확정일: 2023년 5월 23일)

### Understanding Physical Mechanism of 2022 European Heat Wave

Ju Heon Kim<sup>1)</sup>, Gun-Hwan Yang<sup>1)</sup>, Hyun-Joon Sung<sup>1)</sup>, Jung Hyun Park<sup>1)</sup>, and Eunkyo Seo<sup>1),2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>2)</sup>Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, George Mason University, Fairfax, Virginia, United States

(Manuscript received 11 April 2023; revised 17 May 2023; accepted 23 May 2023)

**Abstract** This study investigates the physical mechanisms that contributed to the 2022 European record-breaking heatwave throughout May-August (MJJ). The European climate has experienced surface warming and drying in the recent decade (1979~2022) which influences the development of the 2022 European heatwave. Since its spatial pattern resembles the 2003 European heatwave which is a well-known case developed by the strong coupling of near-surface conditions to land surface processes, the 2022 heatwave is compared with the 2003 case. Understanding heatwave development is carried out by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis version 5 (ERA5) and daily maximum surface temperature released by NCEP (National Centers for Environmental Prediction) CPC (Climate Prediction Center). The results suggest that the persistent high pressure along with clear sky tends to increase the downward shortwave radiation which leads to enhanced sensible heat flux with the land surface dryness. Terrestrial Coupling Index (TCI), a process-based multivariate metric, is employed to quantitatively measure segmented feedback processes, separately for the land, atmosphere, and two-legged couplings, which appears to the development of the 2022 heatwave, can be viewed as an expression of the recent trends, amplified by internal land-atmosphere interactions.

**Key words:** 2022 European heatwave, Land-atmosphere interactions, Terrestrial Coupling Index

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 발생하는 이상 고온 현상인 폭염은 인명 피해를 포함한 생명 피해, 농업과 노동 생산성 감소에 따른 재산 피해, 산불의 빈도와 강도 증

가에 따른 생태계 훼손 등 여러 방면으로 악영향을 미치고 있다(Westerling et al., 2006; WMO, 2011; Coumou and Rahmstorf, 2012). 또한, 지구온난화에 의해 1950년대 이후 폭염의 지속 기간, 강도와 빈도의 증가추세가 전 세계적으로 가속화되고 있다(Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020; Seo et al., 2020; Yoon et al., 2023). 특히, 유럽 지역은 1979~2020년까지 북반구 중위도 지역의 다른 지역에 비해 폭염 발생 빈도와 강도 모두 평소보다 3~4배 더 높아졌다(Rousi et al., 2022).

\*Corresponding Author: Eunkyo Seo, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.  
Phone: +82-51-629-6637, Fax: +82-51-629-6638  
E-mail: eseo@pknu.ac.kr

유럽 지역의 폭염 발생에 영향을 미치는 요인들은 크게 상층 블로킹, 해수면 온도, 토양 수분(Soil Moisture; SM)으로 볼 수 있다(Garcia-Herrera et al., 2010; Seo et al., 2019). 상층 블로킹은 아열대 제트와 한대 제트 사이의 온도차가 작아지면서 중위도 제트 기류가 약화되고, 고기압이 정체되어 발생한다. 1994, 2003, 2006, 2018년 7~8월 서유럽 지역의 폭염 사례는 제트 기류의 약화로 인한 블로킹 현상이 폭염을 발생시킨 주요 원인 중 하나로 지목되었다(Rousi et al., 2022). 2015년 서유럽 지역의 폭염은 북대서양 해수면 온도 편차로 인해 강한 온도 경도가 생성되고, 이는 제트 기류의 정체를 유발하여 찬 공기가 북대서양에, 따뜻한 공기가 서유럽에 유입되며 서유럽에 고기압이 형성되었다(Duchez et al., 2016).

SM은 약 1~2달의 메모리를 갖는 subseasonal 시간 규모 내의 예측성능에 영향을 미치는 수문 및 기상 과정의 핵심 변수이다(Seo and Dirmeyer, 2022a). 축적된 직접 관측 자료를 기반으로 microwave 파장대의 위성에서 탐지한 SM 산출물과 모델에서 모의하는 변수를 비교 분석하여 자료의 품질이 향상되고 있으며(Reichle et al., 2017; Seo et al., 2021), 이러한 SM 자료 품질 향상으로 SM과 지면 물-에너지 교환 사이의 관계에 대한 연구 범위가 더 정교해지고 있다. 특히, SM의 변화에 따른 지면-대기 상호작용과 폭염 발생 사이의 관련성이 최근 주목받고 있다(Fischer et al., 2007a, b; Seo et al., 2020). 지면-대기 상호작용은 에너지-물 수지 균형 방정식에 기반하여 SM의 변화가 지면 플럭스 변화에 영향을 주어 지면 근처 대기 상태를 통제하는 과정을 말한다. SM이 감소한다면 잠열 플럭스(Latent Heat Flux; LH)의 비율이 감소하고 현열 플럭스(Sensible Heat Flux; SH) 비율이 증가하므로 지면 근처의 기온이 증가한다. 그리고 SM 감소로 대기가 건조해지면서 상승 응결 고도(Lifted Condensation Level; LCL)가 상승한다. LCL의 상승은 강수량의 감소로 이어지며, 지면의 건조한 상태가 지속된다. 위의 예시로 SM과 기온은 한쪽이 증가하면 다른 쪽이 감소하는 음의 상관관계를, SM과 강수량은 한쪽이 감소하면 다른 쪽도 감소하는 양의 상관관계가 있음이 밝혀져 있다(Seneviratne et al., 2010; Seo and Dirmeyer, 2022b). 예시로 Fischer et al. (2007b)는 과거 1976, 1994, 2003, 2005년 서유럽에서 발생했던 사례에 대한 SM 민감도 실험을 통해 지면-대기 상호작용이 폭염 일(Heat Wave Day; HWD) 발생에 50~80% 정도 기여함을 보였다. 해당 연구에 따르면, SM이 감소된 상태에서 기온이 증가하는 것은 지면으로 많은 순 복사 에너지가 들어왔음을 의미하고, 이는 건조한 지면 상태를 유발하며 증발산량을 감소시키며 SH 증가를 도와 결과적으로 HWD가 증가하게 된다.

SM과 증발 효율(evaporative fraction; EF)와의 관계를 기준으로 water-, energy-limited regime으로 분류할 수 있는데, water-limited regime은 SM가 감소함에 따라 증발 효율이 감소하는 과정이고, energy-limited regime은 SM이 감소해도 증발 효율이 감소하지 않는 과정이다. 유럽은 SM 변화가 대기에 영향을 미치는 water-limited regime에 우세한 지역으로 폭염 발생에 지면-대기 상호작용이 중요한 역할을 한다(Seneviratne et al., 2010; Whan et al., 2015). 예를 들어 Fishcer et al. (2007a)은 CHRМ (Climate High-Resolution Model) 2.3을 사용하여 2003년 서유럽 폭염사례의 경우 봄철부터 건조했던 SM 조건이 여름철까지 유지되어, SM 퇴막임 과정을 통해 순 복사량이 증가하여 SH가 비정상적인 양의 편차로 증가하는 경향이 존재하였음을 확인했다. 또한, 2018년 남부 스칸디나비아, 북유럽 평원, 영국의 SM 변화와 일사량 증가가 폭염 발생에 중요한 역할을 하였고, 특히 일 변동 측면에서 낮시간의 행성 경계층에 건조하며 온위가 높은 공기가 유입됨으로 폭염 발생에 큰 영향을 주었다(Dirmeyer et al., 2021).

본 연구에서는 2022년 유럽지역의 폭염 발생에 지면-대기 상호작용이 어떻게 영향을 미쳤는지 확인하고자 한다. 특히 대표적 사례인 2003년과 2022년 MJJA(5~8월) 기간 폭염 현상의 공간분포의 유사성을 고려하여, 본 연구에서는 2022년도 유럽 폭염을 2003년도 현상과 비교 분석하여 지면-대기 상호작용 측면에서 폭염 발생 메커니즘을 이해하고자 한다.

SM과의 유럽 폭염 발생 간의 연관성을 확인하기 위해 관련 변수 자료들과 폭염 분석에 사용된 기법들을 Section 2에서 기술하였다. Section 3에서 2022년과 2003년 유럽 폭염의 SM과 일 지상 최대기온(Tmax)의 추세를 확인하였고, 각 년도에 지면-대기 상호작용이 얼마나 발생하였는지 SM-SH, SM-LH와의 상관관계를 다양한 측면에서 확인하였다. 마지막으로 Section 4에서 본 연구의 내용을 정리하였다.

## 2. 자료 및 방법

재분석자료로 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA5를 사용하였다(Hersbach et al., 2020). 본 연구에 사용한 ERA5 자료의 공간 해상도는  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 이다. ERA5는 2019년의 자료까지 제공된 ERA-Interim (Dee et al., 2011)보다 모델 물리과정이 개선되었고 자료동화 시스템에 훨씬 더 많은 수의 재가공된 위성 자료와 새로운 관측자료가 포함되어 있으며, ERA-Interim에 적용된 IFS (Integerated Forecasting System) cycle 31r2보다 시·공간 해상도를 대폭 높인 새로운 통합 예보 수치 모델

버전인 IFS cycle 41r2를 적용하여 생산된다는 장점이 있다. 본 연구에서는 1979년부터 2022년까지의 SM, SH, LH, 하향 단파 복사에너지(Downward SW), 행성 경계층 고도 (PBLH) 자료를 활용하였다.

폭염 일수 탐색을 위해 NOAA PSL (National Oceanic and Atmospheric Administration Physical Sciences Laboratory, <https://psl.noaa.gov>)에서 제공하는 NCEP CPC (National Centers for Environmental Prediction Climate Prediction Center) Global Unified maximum temperature (Tmax) 데이터를 사용하였다. 공간 해상도는  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 시간 해상도는 일 간격이며 1979년부터 2022년까지의 자료를 활용하였다. CPC Tmax 데이터는 Climate Anomaly Monitoring System (CAMS)와 Global Historical Climatology Network Version 2 (GCHN), 10978개의 지점관측자료를 Inverse Distance Weighting (IDW) 방법을 사용하여 내삽한 데이터이다. 해당 관측자료를 이용, 각 그리드별로 일별 폭염 기준 값을 계산하여 폭염을 정의하였다(Russo et al., 2014).

$$A_d = \bigcup_{y=1979}^{2022} \bigcup_{i=d-12}^{d+12} T_{y,i} \quad (1)$$

식(1)에서  $d$ 는 기준이 되는 날짜를 의미한다.  $A_d$ 는 기준 날짜의 일별 Threshold를 계산하기 위한 날짜의 표본을 의미하며,  $T_{y,i}$ 는  $y$ 년도  $i$ 일의 일평균 최대 기온을 의미한다. 25일의 window를 설정하기 위해 1979년부터 2022년까지의 기간 동안 기준이 되는 날짜 12일 이전부터 12일 이후까지의 Tmax를 표본으로 사용하여 90 백분위수를 구하였으며, 이 값을 일별 Threshold로 사용하였다.

지면 에너지 균형과정에서 LH에 의한 에너지 교환 비율을 확인하기 위해 증발 효율을 사용하였다.

$$EF = \frac{LH}{R_n} \cong \frac{LH}{SH + LH} \quad (2)$$

증발 효율은 지면 에너지 방정식에서 계산되는 장파 복사에너지와 단파 복사 에너지를 고려한 순 복사량 ( $R_n$ )과 LH의 비율을 통해 계산된다. 이를 통해 지면에 들어오는 에너지 중 LH로 방출되는 에너지 비율을 확인할 수 있으며, 순 복사량의 경우 LH와 SH의 합으로 대체할 수 있다.

증발 효율과 함께 구름의 생성 유무를 판단할 수 있는 LCL-deficit을 도입하였다(Santanello et al., 2011; Dirmeyer et al., 2021).

$$LCL = \frac{T - T_d}{\Gamma_d - \Gamma_{dew}} \quad (3)$$

$$LCL \text{ deficit} = -LCL + PBLH \quad (4)$$

LCL-deficit은 ERA5 재분석 자료에서 지상 기온, 지상 이슬점 온도, 행성 경계층 데이터를 사용하여 상승 응결고도(LCL; Lawrence, 2005)와 행성 경계층 고도(Planetary Boundary Layer Height; PBLH)의 차로 확인할 수 있으며, LCL은 각각 건조 단열 감률( $\Gamma_d = 9.8 \text{ K km}^{-1}$ )과 습윤 단열 감률( $\Gamma_{dew} = 1.8 \text{ K km}^{-1}$ )의 차이, 지상 기온( $T$ )과 지상 이슬점 온도( $T_d$ ) 차이 사이의 비를 의미한다. LCL-deficit에서 지면의 온도와 습도는 LCL 변화에 영향을 미치고, 지면 가열이나 바람 시어는 PBLH 변화에 영향을 미친다. 지면의 온도가 증가하면 지면이 가열된 상태로 PBLH가 높아지고, 반대로 지면 온도가 감소하면 지면이 냉각된 상태로 PBLH가 낮아지게 된다. 만약, LCL보다 PBLH 값이 높아지게 된다면, 지면에서 올라오는 습도의 영향을 받아 수증기가 응결되며 비가 내릴 수 있는 상황이 형성된다. 반대로 낮아지게 된다면, 지면에서 올라오는 습도의 양이 적어져 수증기가 응결되지 않으며, 강수의 감소와 지면의 습도 감소로 지면이 건조한 환경을 형성하는데 도와주게 된다.

유럽 지역의 2022, 2003년의 폭염에 SM이 미친 영향에 대해서 살펴보기 위하여 Terrestrial Coupling Index (TCI) 개념을 사용하였다(Dirmeyer, 2011). TCI는 지면 플럭스가 SM 변화에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타내는 민감도 지수이다. 이 지수는 SM과 지면 플럭스 사이의 상관 관계뿐만 아니라, 일반적인 SM 변화 범위에서 강제되는 지면 플럭스 크기를 고려한다. 본 연구에서는 이를 활용하여 소스 항으로 타겟 항으로 나누어 분석하며, 소스 항과 타겟 항의 상관관계와 타겟 항의 표준편차로 민감도 지수를 활용했다. 높은 민감도 지수는 작은 소스 항 변화에도 타겟 항의 변화에 큰 영향을 미치는 것을 나타내며, 낮은 민감도 지수는 타겟 항의 변화에 미치는 영향이 낮은 것을 의미한다. 본 연구에서는 지면 변화가 지면 플럭스를 통해 대기에 미치는 영향을 확인하기 위하여 land, atmosphere, two-legged couplings을 분석하였다. SM 변화가 지면 플럭스에 미치는 영향을 확인하기 위하여 SM과 SH를 각각 소스 항, 타겟 항으로 설정한 민감도 지수를 Land Coupling Index (LCI)라 지칭하였다:

$$LCI = \rho(SM, SH) \sigma_{SH} \quad (5)$$

$\rho(SM, SH)$ 은 SM과 SH의 상관관계,  $\sigma(SH)$ 는 SH의 표준편차이다(식(5)). LCI는 SH의 표준편차에 의해 가중된 SM과 SH 사이의 선형 회귀의 기울기로 해석할 수 있다. SH 변화가 Tmax에 미치는 영향을 확인하기 위하여 SH와 Tmax를 각각 소스 항, 타겟 항으로 설정하여 민감도 지수를 구성하였으며, 대기-지면 플럭스는 SH와 Tmax로 계산하여 Atmosphere Coupling

Index (ACI)라 지칭하여 사용하였다(Dirmeyer et al., 2014).

$$ACI = \rho(SH, T_{max})\sigma_{T_{max}} \quad (6)$$

$\rho(SH, T_{max})$ 는 SH와  $T_{max}$ 의 상관관계,  $\sigma(T_{max})$ 는  $T_{max}$ 의 표준편차이다. ACI는  $T_{max}$ 의 표준편차에 의해 가중된 SH와  $T_{max}$  사이의 선형 회귀의 기울기로 해석할 수 있다. Dirmeyer et al. (2014)는 SH에 대한 SM의 영향과 SH에 대한 상승 응결 고도에 대한 영향에 대한 결과를 제시했다. 본 연구에서는 육지-대기 결합을 분석하기 위해서 앞선 두 민감도 지수를 결합하여 Two-legged Coupling Index (TLCI)라 지칭하여 사용하였다.

$$TLCI = \rho(SM, SH)\rho(SH, T_{max})\sigma_{T_{max}} \quad (7)$$

본 연구에서는 LCI를 육지 상태에 대한 지면 플럭스의 영향으로, ACI를 대기 상태에 대한 지면 플럭스의 영향으로 분석한다. TLCI는 SM의 변화가 SH를 변화시켜  $T_{max}$ 에 주는 영향을 분석한다.

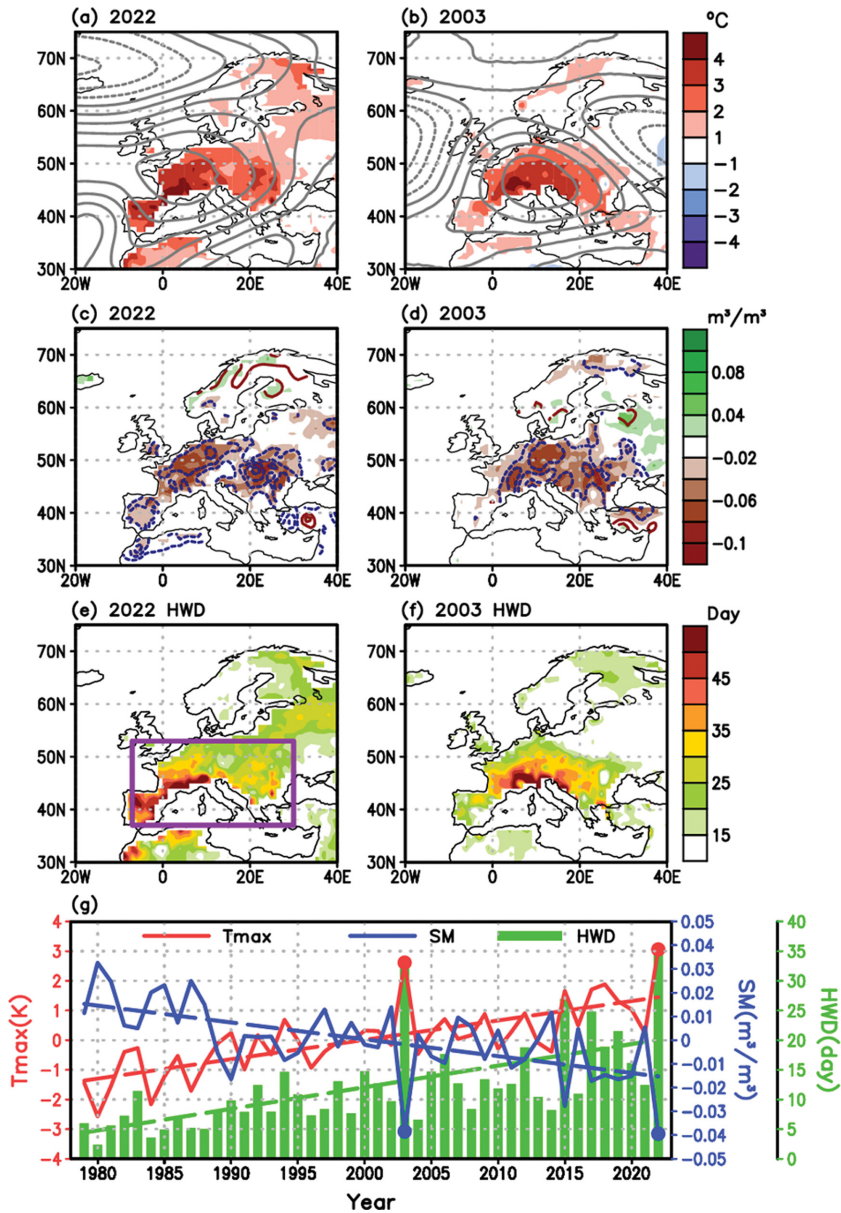
본 연구에서는 모든 분석 자료의 공간해상도를  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 으로 변환하여 사용하였고, 경도  $7^\circ W \sim 30^\circ E$ , 위도  $37^\circ N \sim 53^\circ N$ 를 유럽 지역으로 정의하였다.

### 3. 결 과

2022년도 5~8월(MJJA)까지 지속되었던 유럽 폭염은 2003년 발생한 폭염 현상과 유사한 공간분포를 나타냈기 때문에 두 현상을 상호비교 하여 지면-대기 상호작용에 측면에서의 폭염 발생 원인을 이해하고자 하였다. 2022년도 5월부터 8월까지 유럽 지역에서 양의  $T_{max}$ 의 편차(3 K)를 보이며 상층 지위고도장의 경우 고기압성 편차를 보인다(Fig. 1a). 2003년도에서도 최대 2.6 K의  $T_{max}$  양의 편차 및 상층 지위고도 편차가 확인되며(Fig. 1b), 지속적인 고기압성 지위고도 편차는 하강기류에 의한 단열 승온 및 수분 이류량을 감소시켜 LCL-deficit 감소로 이어진다(Min et al., 2020; Dirmeyer et al., 2021). 또한, 동시에 유발된 구름 양 감소는 지면으로 들어오는 단파 복사량 증가로 이어지며, 이는 기온을 상승시키고 SM을 감소시키는 되먹임 작용을 유발한다(Ha et al., 2022). 2022년도와 2003년도에 폭염이 발생한 지역의 SM의 음의 편차 ( $-0.039 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,  $-0.038 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )로 인해 EF의 음의 편차가 발생하였으며, 이는 폭염 발생과 유지에 영향을 미쳤다(Figs. 1c, d). 2022년의 경우 이베리아 반도와 프랑스, 스위스 인근 지역에서 MJJA 기간 총 HWD가 가장 높았으며, 2003년도의 경우 스위스, 오스트리아, 크로아티아 인근 지역에서 MJJA 기간 총 HWD가 높은 양상을 보였다(Figs. 1e, f). 총 HWD 일수를

기준으로 유의미한 값이 발생한 중부 유럽 남쪽 지역(Fig. 1e purple box)에 대해서 44년간(1979~2022) MJJA 기간의  $T_{max}$ , SM의 기후 값과 폭염 발생 일수의 경년 변동을 확인하였다(Fig. 1g). 그 결과, 2022, 2003년도에 각각 첫 번째와 두 번째로 가장 큰  $T_{max}$  양의 편차와 SM 음의 편차를 각각 가지는 것으로 확인된다. 지역 평균의 연간 변동에서  $T_{max}$ 와 SM의 상관계수를 확인할 때,  $-0.92$ 로 매우 높은 상관성을 보였으며 추세를 제거하였을 때 또한  $-0.88$ 의 큰 상관성을 확인하였다. 또한,  $T_{max}$ 와 폭염 일수의 상관관계를 확인할 경우 0.88, 선형 추세를 제거할 경우 0.86의 큰 상관성을 보였다. 이와 같은 상관관계들을 통해 SM의 감소는  $T_{max}$  증가로 이어지며, 평균적인  $T_{max}$ 의 증가뿐만 아니라 폭염탐지 기준에 부합하는 이상고온이 발생빈도의 증가로 이어진다는 점을 파악하였다. 2022년도는 가장 큰  $T_{max}$  및 SM 편차를 보여주지만(Fig. 1g), 추세를 제거할 경우 2003년도의 편차가 가장 컸다. 즉, 2003년도의 경우 내부 변동성에 의한 영향이  $T_{max}$ 와 SM의 편차에 크게 기여한 것으로 생각되며, 2022년은  $T_{max}$  선형 추세( $0.66 \text{ K decade}^{-1}$ )의 영향으로 약 1.3 K 정도의 온도 편차가, SM은 선형 추세( $-0.005 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ decade}^{-1}$ )의 영향으로  $-0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  정도의 SM 편차가 유발되었다고 할 수 있다.

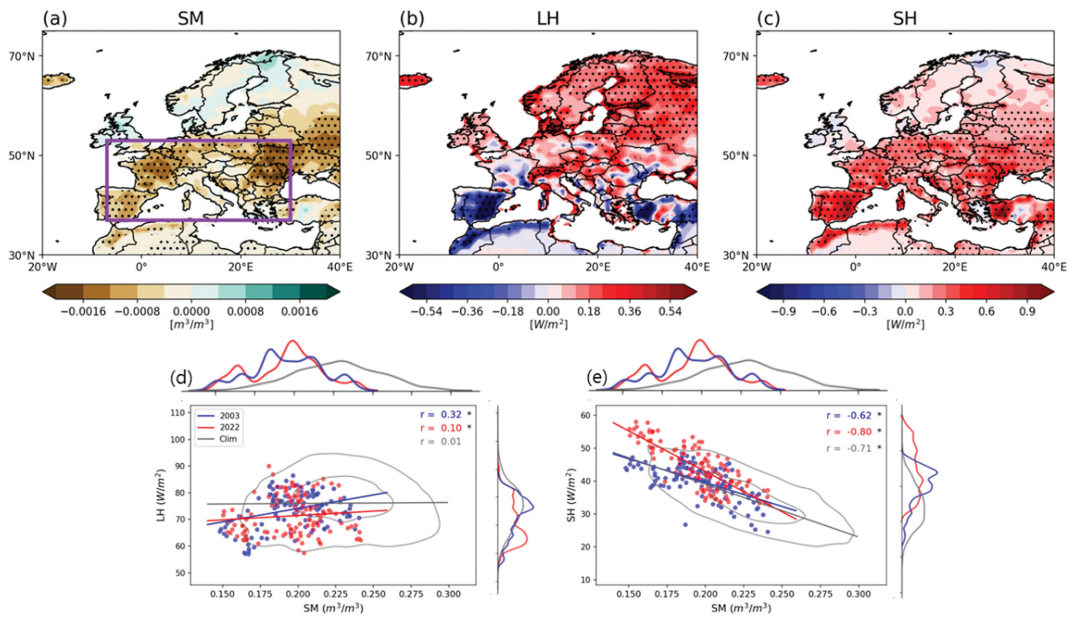
Figure 2에서 MJJA 평균 SM와 지표 플럭스 변수에 대한 44년(1979~2022)의 연간 추세를 공간적으로 확인해보았다. 앞서 보인 바와 같이, 본 연구에서 주목하는 지역(purple box in Fig. 1g)에서 SM이 95% 신뢰수준으로 유의미하게 감소하였다(Fig. 2a). LH는 SM 감소가 뚜렷한 지역과는 공간분포가 달랐으며, 특히 알프스 산맥 부근 지역에서 유의미하게 증가하였다. 이는 온난화로 알프스 산맥의 기온도 상승하여, 그로 인해 눈의 두께가 감소함을 보인 결과와 유사하다(Hoelzle et al., 2022). 이베리아 반도에서는 LH가 급격하게 감소하는 추세를 보였으며(Fig. 2b), 동일한 지역에서 SH는 크게 증가하였다(Fig. 2c). 이베리아 반도의 총 복사량의 추세는 소폭 증가하며 크게 변하지 않았다(not shown). 이와 같이, 토양이 상대적으로 건조하여 SM 변화에 따라 지표 플럭스 변동이 활발한 지역(water-limited area)은 온난화로 인해 다른 지역보다 SH가 증가하고, LH는 감소하는 추세가 두드러지게 나타났다. 두 연도간 SM 평균값은 유사하지만, 2022년의 경우 2003년보다 SM이 건조한 날이 더 증가하였다(Fig. 2d). 2003년의 경우, SM과 LH는 강한 양의 상관성(0.32)을 나타내지만, 2022년도에는 water-limited area인 이베리아 반도 지역에서의 LH 감소로 인해 양의 상관성이 감소하였다. 평년의 경우 유럽 내 여러 지역적 특성이 혼재되어 산악 지역에서는 상승하고, SM이 적은 지역에서는 LH가 감소하여 SM과 LH의 관



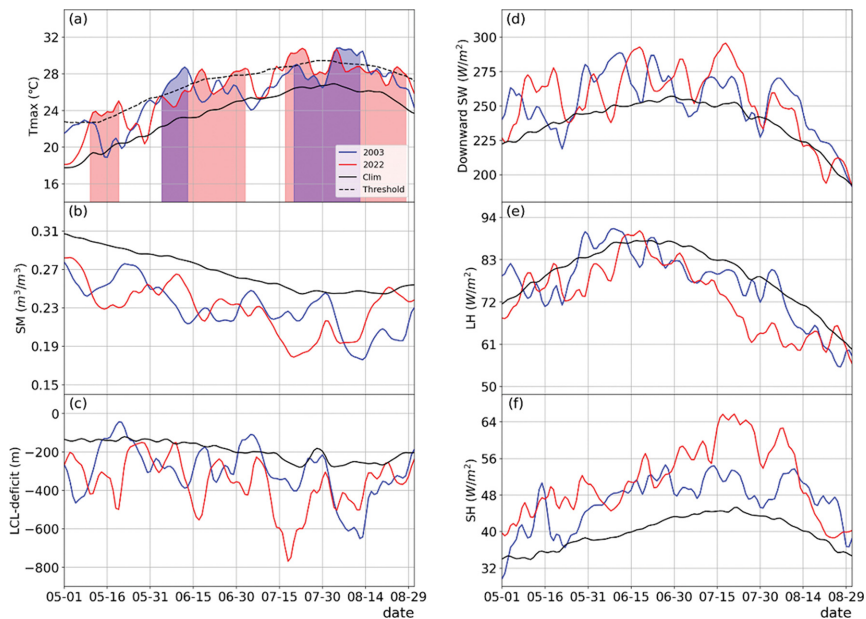
**Fig. 1.** During May-August, Tmax anomalies (shaded) and 500 hPa geopotential height anomaly (contour, interval is 100 hPa) in the (a) 2022, (b) 2003. SM anomalies (shaded) and evaporative fraction (contour, interval is 0.05) in the (c) 2022, (d) 2003. Total number of heat wave days in the (e) 2022, (f) 2003. (g) Interannual variation of Europe (purple box,  $-7\sim 20^{\circ}\text{E}$ ,  $37\sim 53^{\circ}\text{N}$ ) area-averaged Tmax (red solid line), SM (blue solid line), HWD (green bar graph) and each trend line (dotted line).

계는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 반면, 같은 지역에서 SM과 SH간의 음의 상관성이 유의미하게 나타나며, 2003년의 경우(-0.62) 평년(0.71) 보다 그 정도가 더 약했던 것으로 이해됩니다(Fig. 2e). 연구 기간 사이 유럽지역에서 통계적으로 유의미한 SM의 감소와 함께 SH의 증가로 인해 2003년도 보다 2022년도의 상

관성이 더 강하게 나타났다. 이는 Benson and Dirmeyer (2021)에서 보인 breakpoint 이상의 건조한 지면에서 SH가 급증하는 경향과 동일한 결과로 볼 수 있다. 정량적으로 SM이 2022년 분석기간 평균  $0.195\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 로 평년의 평균 SM ( $0.227\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ ) 대비 86%로 감소하였고, SH는 분석기간 평균  $44.08\text{ W m}^{-2}$ 로 2003년



**Fig. 2.** Recent (1979~2022) trends of MJJA mean (a) SM, (b) LH, and (c) SH over the Europe, in which black dots indicate the regression coefficient is significant at a 95% confidence level in two-tailed test. Scatter plot of (d) LH (y-axis) and (e) SH (y-axis) against SM (x-axis) along with the distribution of the kernel density estimations corresponding to each axis. Gray, blue, and red color denotes the result of climatology, 2003, and 2022, respectively, where correlations are denoted in the upper-right corners and asterisk indicates the statistical significance at a 99% confidence level.



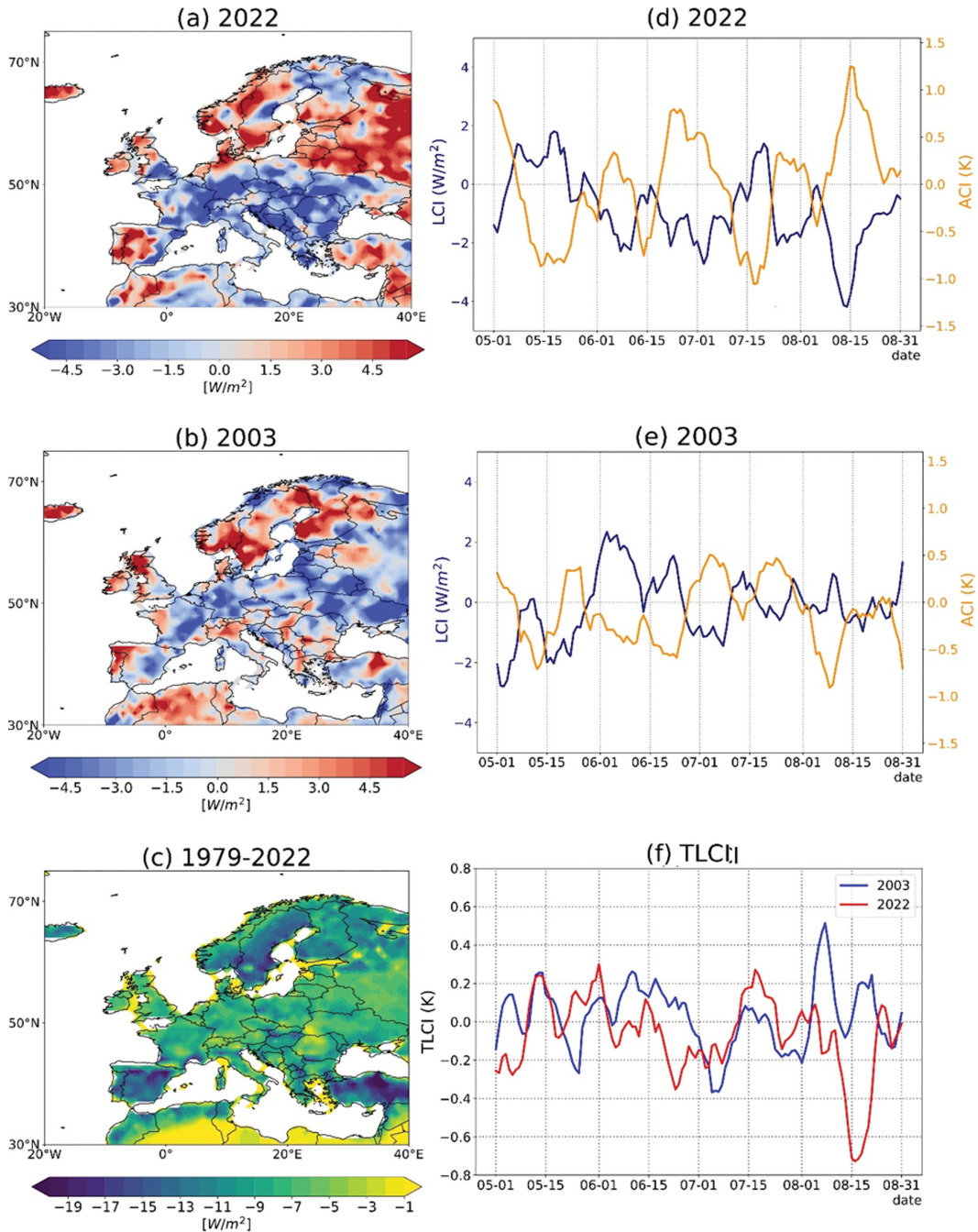
**Fig. 3.** Daily time series of (a) Tmax, (b) surface SM, (c) LCL-deficit, (d) downward SW radiation, (e) LH and (f) SH through MJJA of 2003 (blue line) and 2022 (red line). Black solid and dashed line indicates the daily climatology of each variable and 90% threshold value of Tmax for 44-year (1979~2022), respectively. Red and Blue shaded area indicates heat wave period in 2022 and 2003.

의 평균 SH ( $40.14 \text{ W m}^{-2}$ )보다는  $3.94 \text{ W m}^{-2}$ 가 증가하였고, 평년의 평균 SH ( $34.55 \text{ W m}^{-2}$ ) 대비  $9.53 \text{ W m}^{-2}$  (27%) 증가하였다.

유럽 폭염의 발생과 관련 변수들의 MJJA 기간의 일평균 시계열을 확인하였다(Fig. 3). 2022년과 2003년의 기후 값 대비 편차를 확인하기 위해 1979~2022년(44년) 일 별 기후 값과 비교하였다. Tmax (Fig. 3a)의 2022, 2003년 값과 일별 Threshold를 활용하여 Threshold에 기후 값을 빼고, 1 sigma를 더한 값을 기준으로 그 기간 내에 Threshold 이상의 값이 3일 이상 지속되었을 때를 포함하여 폭염 기간을 선정하였다. 2022년은 5월 10일~5월 21일(2022\_HW1), 6월 4일~7월 4일(2022\_HW2), 7월 17일~8월 29일(2022\_HW3)로 총 3번의 기간에, 2003년은 6월 4일~6월 14일(2003\_HW1), 8월 3일~8월 14일(2003\_HW2)로 총 2번의 기간에 폭염이 발생하였다. 폭염 기간 중 2022\_HW3과 2003\_HW2에 SM이 가장 건조한 경향을 보였는데, 기후 값 대비 각각 평균  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,  $0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  정도로 낮았으며, 2022년 7월 20일, 2003년 8월 13일에 일 최저 값( $0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )을 기록하였다. SM의 감소의 원인을 강수량의 감소, 특히 LCL과 PBL 높이의 차이인 LCL-deficit으로 확인할 수 있다(Fig. 3c). LCL-deficit 값이 음의 값이면 구름이 없고 고기압성이 지배적이라는 것을 의미한다. 특히 폭염 기간에 기후 값과의 편차가 최대 일 때를 확인하였을 때, 2022\_HW2는 403 m, 2022\_HW3은 542 m, 2003\_HW2는 409 m였으며, 모두 단기간에 큰 감소 폭을 보였다. LCL-deficit 값이 음의 값으로 큰 편차를 나타내면 고기압성 순환이 강해져 Downward SW가 증가하기에 좋은 조건임을 의미하고, 따라서 LCL-deficit 값이 감소할 때 Downward SW가 증가하는 추세를 확인할 수 있다(Fig. 3d). Downward SW 증가는 지면에 들어오는 순 복사량 증가의 원인이 된다. 에너지 평형식에 따라 증가한 순 복사에너지는 LH와 SH로 방출이 되는데, SM이 적은 지역에서는 LH가 적게 방출되어 대부분의 순 복사에너지가 SH를 통해 방출되므로 Tmax가 증가하게 된다. 따라서, 폭염 기간 동안 SM이 건조한 상황에서 Downward SW 증가로 인한 지면의 순 복사에너지가 증가하면, 기후 값과 비교하여 LH, SH 각각 음과 양의 편차를 나타낸다. 특히, 2003년의 폭염과는 달리 2022년의 폭염의 LH, SH 편차가 더 컸다. 예를 들어 2022\_HW3 기간에 LH는 기후 값 대비 평균  $16.29 \text{ W m}^{-2}$  감소했으며, 최저 값은  $61.48 \text{ W m}^{-2}$ 였다. 또한 SH는  $10.81 \text{ W m}^{-2}$ 의 증가를 보이며,  $65.69 \text{ W m}^{-2}$ 의 최대 값을 보였다.

2022년과 2003년의 폭염에서 지면-대기 상호작용이 미친 영향에 대한 분석을 TCI 분석을 통해 수행하였다(Fig. 4). LCI의 음의 값은 수분 플럭스가 줄었을 때,

SH가 방출되어 나왔음을 뜻하며, 음의 값이 커짐은 결합이 강해진 것을 의미한다. 유럽지역의 SM-SH 기반 LCI 기후 값으로 보았을 때, 지면-대기는 주로 스페인 부근에서 가장 강하게 결합하였고, 프랑스와 독일 부근에서는 비교적 결합이 약했다(Fig. 4a). 본 연구에서 정의한 유럽지역의 평균 LCI를 비교하였을 때, 스페인 부근을 제외하고는 2003년보다 2022년도의 SM-SH 결합이 더 강하게 나타났다(Figs. 4a, b). 특히, 2022년은 2003년과 비교하여 더 넓은 영역에서, 그리고 더 강하게 SM-SH가 결합했다. SM-SH의 상관관계와 SH의 표준편차를 분석하면, 2022년과 2003년의 상관관계는 큰 차이가 없지만, 2022년 SH의 표준편차가 더 커졌음을 확인하였으며, 이는 2022년 LCI가 더 강하게 결합된 요인이 SH의 표준편차 때문임을 의미한다. MJJA 기간 내 기준으로부터  $\pm 5$ 일로 LCI, ACI와 TLCI를 산출하여 기후 값을 빼고, 본 연구에서 정의한 유럽 지역을 평균하여 시계열 분석하였다. ACI 양의 값이 커진다는 것은 Tmax-SH의 결합이 강해진다는 점을 의미한다. TLCI는 LCI와 ACI를 활용하여 살펴보면 육지와 대기가 지면 플럭스로 결합된 강도에 기여한 정도를 확인할 수 있다. 즉, Coupling Index 분석 결과 2022년은 2003년에 비해서 육지-대기 결합이 강했다고 할 수 있다. 2022\_HW1 발생에 선행하여 강한 음의 LCI와 양의 ACI 편차가 존재하였으며, 2022\_HW2 기간 동안 음의 LCI가 유지되었으며 ACI는 6월 중순에 결합도가 약해진 기간을 제외하고 전반적으로 양의 결합을 보여준다. 2022\_HW3 기간도 전반적인 음의 LCI와 양의 ACI를 보여주지만, 폭염이 다소 약화된 8월 초에 LCI, ACI 모두 결합이 약해지는 경향을 보여준다. 2022년 LCI와 ACI의 두 Coupling index는 분석기간인 5월 1일부터 8월 31일까지 반대 위상을 나타낸다. 그러나 2003년은 두 Coupling index 사이에 상관성이 크지 않다. 2003년의 LCI는 2003\_HW1, 2003\_HW2에는 전반적으로 양의 관계로 결합했으며, 이를 제외하고는 전반적으로는 음의 관계가 존재하지만, 2022년에 비해서 그 강도가 약했다. LCI와 마찬가지로 ACI는 2003\_HW1, 2003\_HW2에서 음의 관계가 존재하며 이를 제외하고는 전반적으로는 양의 관계로 결합했지만, 2022년에 비해서 그 강도가 약했다. TLCI 분석을 통해서 2022년이 2003년에 비해서 LCI에 영향을 크게 받았음을 이해할 수 있다. 2022년 TLCI는 5월은 LCI의 양상을 따라가며, 6월은 ACI의 양상을 다시 7월부터는 LCI의 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 유럽 지역에서 6월을 제외한 나머지 달에서 육지-대기 결합에서 육지-지면 플럭스 결합이 지면 플럭스-대기 결합에 비해서 강했음을 알 수 있다. 2003년 TLCI는 전반적으로 ACI의 양상을 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 이는 대



**Fig. 4.** The spatial distribution of LCI anomaly in (a) 2022 and (b) 2003 over the Europe and (c) its climatology. The daily time series of the area averaged LCI, ACI, and TLCI over the Europe is calculated from the center date to  $\pm 5$  days to obtain temporal samples. The LCI and the ACI through MJJA season of (d) 2022 and (e) 2003 are displayed with blue and yellow lines, respectively. (f) The daily time series of the TLCI for 2022 and 2003 are displayed by red and blue, respectively.

부분의 유럽 지역에서 대부분 육지-지면 플럭스 결합이 지면 플럭스-대기 결합보다 약했음을 의미한다. 이

는 2022년이 2003년에 비해 더 넓은 영역에 SM가 부족하여 SH가 강하게 발생되었을 수 있다. 이는 2022



년 폭염이 더 강하게 발생할 수 있는 조건을 마련했으며, 이로 인해서 SM이 2022년의 전반적인 폭염에 영향을 미쳤을 수 있음을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 지구온난화가 지속됨에 따라 폭염 일수가 증가하였는지, 과거 폭염 사례와 2022년 유럽 폭염이 비슷한 경향성을 보였는지 살펴보았다. 2022년과 2003년의 사례가 비슷한 점을 확인하여 두 사례를 비교 분석하고, SM의 감소에 따라 폭염이 가속화되었는지 상관관계를 살펴보았다.

MJJA 기간 유럽 SM가 2022년과 2003년 각각 기 후 값 대비  $0.039 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,  $0.38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  적었으며, Tmax는 기 후 값 대비 3 K, 2.6 K 양의 편차를 보였다. Tmax와 상관관계에서 HWD는 0.88, SM는 -0.92의 값으로 SM의 감소는 HWD와 Tmax의 평균 값과 극한 값을 증가시켰다. 본 연구에서 정의한 유럽 지역에서 SM 감소는 LH와의 관계는 뚜렷하지 않았다. 하지만, SM 감소에 따라 SH는 2022년에 2003년보다  $3.96 \text{ W m}^{-2}$  증가하는 경향을 보였다. 실제 유럽 지역에 발생했던 폭염 기간을 Tmax 기반의 Threshold를 사용하여 구하면, 2022년에 3번, 2003년에 2번의 폭염 기간을 정의할 수 있다. 이 기간 동안 SM 감소에 의한 SH 증가, 운량 감소에 따른 Downward SW 증가와 LCL-deficit 감소를 확인할 수 있다. 이에 따라 Downward SW 증가에 따라 지면에 순 복사량이 증가하여 에너지 보존 방정식에 의하여 LH, SH에 의해 에너지가 대기중으로 방출된다. 다만 SM가 건조한 경우 LH를 통해 에너지 방출이 제한되고, SH를 통해 에너지가 전달되어 Tmax가 증가하는 결과를 나타낸다. 앞서 설명한 지면-대기 상호작용을 통해 되먹임 작용이 발생하여 HWD 증가 및 지속으로 이어졌다. LCI, ACI, TLCI를 시계열로 확인하였을 때, 전반적으로 LCI는 음의 상관관계를 보였고, ACI는 양의 상관관계를 보였지만, 비교적 높은 상관관계를 보인 2022년과 다르게 2003년에는 뚜렷한 관계를 찾을 수 없었다. TLCI 시계열 분석에서 2022년이 2003보다 LCI의 영향을 크게 받아 2022년의 폭염은 SM가 큰 영향을 주었다는 점을 확인할 수 있다.

다만, NAO (North Atlantic Oscillation) (Yoon et al., 2020), AO (Arctic Oscillation) (Lee and Lee, 2016), 제트기류, 블로킹(Yoon et al., 2021)과 같은 대기 순환 변화와 온도 및 습도 이류의 변화로 인해 발생하는 폭염 과정은 본 연구에서 탐구하지 않았다. 지면-대기 상호작용 강도에 따라 지면을 water-, energy-limited regimes으로 분류하는데, 최근 유럽지역은 water-limited 과정에 지배적이므로 앞선 원격상관의 영향보

다는 지면과정에 의한 영향이 뚜렷하다. 과거 2010년 이전까지는 energy-limited 과정이 우세한 경향을 보였지만, 2003년과 2022년 유럽 폭염 사례를 비교하였을 때, SM이 지속적으로 감소하는 추세를 확인할 수 있었다(Seneviratne et al., 2010). 이는 유럽 지역이 점차 Soil moisture-limited가 우세한 지역으로 변화하고 있으며, 폭염의 빈도, 강도의 증가할 수 있다는 점을 시사한다. 최근 UK Met Office에서 모델링을 이용한 유럽지역 미래 온도 예측실험 결과에서 2022년 발생한 폭염의 경우 2035년에는 유럽의 평균 온도가 될 것이라는 예측을 제시하여, 기후변화에 대응하기 위한 시간이 얼마 남지 않았다는 심각성을 시사하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(202212460001).

#### REFERENCES

- Benson, D. O., and P. A. Dirmeyer, 2021: Characterizing the relationship between temperature and soil moisture extremes and their role in the exacerbation of heat waves over the contiguous United States. *J. Climate*, **34**, 2175-2187, doi:10.1175/JCLI-D-20-0440.1.
- Coumou, D., and S. Rahmstorf, 2012: A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, **2**, 491-496, doi:10.1038/nclimate1452.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Dirmeyer, P. A., 2011: The terrestrial segment of soil moisture-climate coupling. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, 1-5, doi:10.1029/2011GL048268.
- \_\_\_\_\_, G. Balsamo, E. M. Blyth, R. Morrison, and H. M. Cooper, 2021: Land-Atmosphere Interactions Exacerbated the Drought and Heatwave Over Northern Europe During Summer 2018. *AGU Adv.*, **2**, 1-16, doi:10.1029/2020av000283.
- \_\_\_\_\_, J. Wei, M. G. Bosilovich, and D. Mocko, 2014: Intensified land surface control on boundary layer growth in a changing climate. *Geophysical*, **41**, 1-5, doi:10.1002/2013GL058826.
- Duchez, A., E. Frajka-williams, S. A. Josey, D. G. Evans, and J. P. Grist, 2016: Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave. *Environ. Res. Lett.*, **11**, 074004, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074004.

- Fischer, E. M., S. I. Seneviratne, D. Lüthi, and C. Schär, 2007a: Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, 1-6, doi:10.1029/2006GL029068.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, P. L. Vidale, D. Lüthi, and C. Schär, 2007b: Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *J. Climate*, **20**, 5081-5099, doi:10.1175/JCLI4288.1.
- Garcia-Herrera, R., J. Díaz, R. M. Trigo, J. Luterbacher, and E. M. Fischer, 2010: A review of the European summer heat wave of 2003. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, **40**, 267-306, doi:10.1080/10643380802238137.
- Ha, K. J., Y. W. Seo, J. H. Yeo, A. Timmermann, E. S. Chung, C. L. E. Franzke, J. C. L. Chan, S. W. Yeh, and M. Ting, 2022: Dynamics and characteristics of dry and moist heatwaves over East Asia. *npj Climate and Atmos. Sci.*, **5**, 1-11, doi:10.1038/s41612-022-00272-4.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Hoelzle, M., C. Hauck, T. Mathys, J. Noetzi, C. Pellet, and M. Scherler, 2022: Long-term energy balance measurements at three different mountain permafrost sites in the Swiss Alps. *Earth System Science Data*, **14**, 1531-1547, doi:10.5194/essd-14-1531-2022.
- Lawrence, M. G., 2005: The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air, A simple conversion and applications, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 225-233, doi:10.1175/BAMS-86-2-225.
- Lee, W.-S., and M.-I. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *Int. J. Climatol.*, **36**, 4815-4830, doi:10.1002/joc.4671.
- Min, K. H., C. H. Chung, J. H. Bae, and D. H. Cha, 2020: Synoptic characteristics of extreme heatwaves over the Korean Peninsula based on ERA Interim reanalysis data. *Int. J. Climatol.*, **40**, 3179-3195, doi:10.1002/joc.6390.
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., and S. C. Lewis, 2020: Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Commun.*, **11**, 1-8, doi:10.1038/s41467-020-16970-7.
- Reichle, R. H., and Coauthors, 2017: Assessment of the SMAP level-4 surface and root-zone soil moisture product using in situ measurements. *J. Hydrometeorol.*, **18**, 2621-2645, doi:10.1175/JHM-D-17-0063.1.
- Rousi, E., K. Kornhuber, G. Beobide-Arsuaga, F. Luo, and D. Coumou, 2022: Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nature Commun.*, **13**, 1-11, doi:10.1038/s41467-022-31432-y.
- Russo, S., and Coauthors, 2014: Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 12500-12512, doi:10.1002/2014JD022098.
- Santanello, J. A., C. D. Peters-Lidard, and S. V. Kumar, 2011: Diagnosing the sensitivity of local land-atmosphere coupling via the soil moisture-boundary layer interaction. *J. Hydrometeorol.*, **12**, 766-786, doi:10.1175/JHM-D-10-05014.1.
- Seneviratne, S. I., T. Corti, E. L. Davin, M. Hirschi, E. B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, and A. J. Teuling, 2010: Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Sci. Rev.*, **99**, 125-161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- Seo, E., and Coauthors, 2019: Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: mid-latitude surface air temperature and heat wave events. *Climate Dyn.*, **52**, 1695-1709, doi:10.1007/s00382-018-4221-4.
- \_\_\_\_\_, and P. A. Dirmeyer, 2022a: Improving the ESA CCI daily soil moisture time series with physically based land surface model datasets using a Fourier time-filtering method. *J. Hydrometeorol.*, **23**, 473-489, doi:10.1175/JHM-D-21-0120.1.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2022b: Understanding the diurnal cycle of land-atmosphere interactions from flux site observations. *Hydrology and Earth Sys. Sci.*, **26**, 5411-5429, doi:10.5194/hess-26-5411-2022.
- \_\_\_\_\_, M. I. Lee, and R. H. Reichle, 2021: Assimilation of SMAP and ASCAT soil moisture retrievals into the JULES land surface model using the Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Remote Sens. Environ.*, **253**, 112222, doi:10.1016/j.rse.2020.112222.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S. D. Schubert, R. D. Koster, and H. S. Kang, 2020: Investigation of the 2016 Eurasia heat wave as an event of the recent warming. *Environ. Res. Lett.*, **15**, 114018, doi:10.1088/1748-9326/abb-ae.
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan, and T. W. Swetnam, 2006: Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, **313**, 940-943, doi:10.1126/science.1128834.
- Whan, K., J. Zscheischler, R. Orth, M. Shongwe, M. Rahimi, E. O. Asare, and S. I. Seneviratne, 2015: Impact of soil moisture on extreme maximum temperatures in Europe. *Weather and Climate Extremes*,

- 9, 57-67, doi:10.1016/j.wace.2015.05.001.
- WMO, 2011: *Weather extremes in a changing climate: Hindsight on foresight*. World Meteorological Organization, 20 pp.
- Yoon, D., D.-H. Cha, M.-I. Lee, K.-H. Min, S.-Y. Jun, and Y. Choi, 2021: Comparison of Regional Climate Model Performances for Different Types of Heat Waves over South Korea. *J. Climate.*, **34**, 2157-2174, doi:10.1175/JCLI-D-20-0422.1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, J. Kim, S.-Y. Jun, and Y. Choi, 2020: Recent changes in heatwave characteristics over Korea. *Climate Dyn.*, **55**, 1685-1696, doi:10.1007/s00382-020-05420-1.
- Yoon, D., T. Kang, D. Cha, C. Song, M. Lee, K. Min, J. Kim, J. A. Chun, and E. Seo, 2023: Role of Land – Atmosphere Interaction in the 2016 Northeast Asia Heat Wave: Impact of Soil Moisture Initialization. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, 1-16, doi:10.1029/2022JD037718.