

한반도 2016년 폭염에 여름철 계절안진동이 미친 영향

이준이^{1)2)*} · 김해정³⁾ · 정유림³⁾

¹⁾부산대학교 기후과학연구소 및 기후시스템전공, ²⁾기초과학연구원 기후물리연구단,
³⁾APEC 기후센터

(접수일: 2019년 10월 11일, 수정일: 2019년 11월 25일, 게재확정일: 2019년 11월 29일)

Influence of Boreal Summer Intraseasonal Oscillation on the 2016 Heat Wave over Korea

June-Yi Lee^{1)2)*}, Hae-Jeong Kim³⁾, and Yoo-Rim Jeong³⁾

¹⁾Research Center for Climate Sciences and Department of Climate System, Pusan National University, Busan, Korea

²⁾Institute for Basic Science (IBS) Center for Climate Physics (ICCP), Busan, Korea

³⁾APEC Climate Center, Busan, Korea

(Manuscript received 11 October 2019; revised 25 November 2019; accepted 29 November 2019)

Abstract Severe and long-lasting heat waves over Korea and many regions in the Northern Hemisphere (NH) during the 2016 summer, have been attributed to global warming and atmospheric teleconnection coupled with tropical convective activities. Yet, what controls subseasonal time scale of heat wave has not been well addressed. Here we show a critical role of two dominant boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO) modes, denominated as BSISO1 and BSISO2, on modulating temporal structure of heat waves in the midst of similar climate background. The 2016 summer was characterized by La Niña development following decay of strong 2015/2016 El Niño. The NH circumglobal teleconnection pattern (CGT) and associated high temperature anomalies and heat waves were largely driven by convective activity over northwest India and Pakistan during summer associated with La Niña development. However, the heat wave event in Korea from late July to late August was accompanied by the phase 7~8 of 30~60-day BSISO1 characterized by convective activity over the South China Sea and Western North Pacific and anticyclonic circulation (AC) anomaly over East Asia. Although the 2010 summer had very similar climate anomalies as the 2016 summer with La Niña development and CGT, short-lasting but frequent heat waves were occurred during August associated with the phase 1~2 of 10~30-day BSISO2 characterized by convective activity over the Philippine and South China Sea and AC anomaly over East Asia. This study has an implication on importance of BSISO for better understanding mechanism and temporal structure of heat waves in Korea.

Key words: Boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO), heat wave, global warming, El Nino and Southern Oscillation (ENSO), circumglobal teleconnection (CGT)

*Corresponding Author: June-Yi Lee, Research Center for Climate Sciences and Department of Climate System, Pusan National University, 30 Jangjeondong, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-2217, Fax: +82-51-510-7694
E-mail: juneyi@pusan.ac.kr

1. 서 론

2016년은 관측 역사상 가장 더운 해로 기록되었다. 산업 혁명 전 대비(1850~1900) 연평균 전 지구 평균 지표 기온 상승은 2016년에 약 1.1°C에 달하였고(Masson-Delmotte et al., 2018), 육상 평균 지표 기온 상승은 약 1.8°C에 달했다(IPCC, 2019a). 그에 따라 유럽, 동아시아, 인도, 호주, 북미 등 지구촌 곳곳에 기록적 폭염이 발생하였다(Blunden and Arndt, 2017; Knutson et al., 2018). 위성 자료 분석에 의하면 육상에 발생한 폭염뿐만 아니라 해양 열파(Marine heatwaves)도 2016년 발생 횟수가 1982년 대비 두 배로 증가했을 뿐만 아니라 강도, 지속시간, 발생 면적이 모두 증가하였다(Frölicher et al., 2018; IPCC, 2019b).

우리나라의 경우 2016년 연평균 기온은 평년(1981~2010년) 보다 1.1°C 높아 1973년 이래 최고를 기록했으며, 8월의 경우는 평년에 비해 1.6°C 높았다(KMA, 2017). 산업혁명 전과 비교 한다면 우리나라 연평균 기온 상승은 2°C를 훌쩍 뛰어넘어 전 지구 평균 지표 기온 상승의 2배 이상이 된 것으로 추정된다. 2016년 7월 말부터 8월 중후 반까지 극심한 폭염과 열대야가 지속되었고, 서울의 경우 폭염과 열대야 일수는 각각 24일과 32일에 달했다(KMA, 2017; Blunden and Arndt, 2017). 서울의 경우 질병관리 본부는 2016년 폭염에 의한 사망자를 17명으로 집계하였으나(Park et al., 2016), Lim et al. (2019)은 실제로 그 20배에 달하는 343명이 온열 질환 관련으로 사망하였다고 제시하였다.

최근 여러 연구들이 2016년을 포함 빈번하고 지속적이고 극심한 폭염 발생은 상당 부분 현재 진행되고 있는 인위적 온난화에 기인할 가능성이 매우 높다고 제시하고 있다(Imada et al., 2018; Knutson et al., 2018; IPCC, 2019a; Vogel et al., 2019). 모델 실험 비교를 통해 Knutson et al. (2018)은 인위적 지구온난화가 없다면 2016년의 기록적 온도 상승이 가능하지 않았을 것이라고 지적하였으며, Imada et al. (2018)은 아시아 지역 2016 폭염의 주 원인이 인위적 지구온난화라고 제시하였다. Perkins-Kirkpatrick and Gibson (2017)은 전 지구 지표 기온이 1°C 상승할 때 마다 폭염 발생일 수가 지역과 계절에 따라 4일에서 34일까지 증가할 수 있으며, 동아시아 지역은 약 20일 정도 증가할 수 있음을 보였다.

지구온난화에 따른 상승 경향에 더불어 2015/2016년 슈퍼 엘니뇨 발생이 2016년 전 지구적 온도 상승과 폭염 발생에 크게 기여한 것으로 보인다(Blunden and Arndt, 2017). Knutson et al. (2018)과 Imada et al. (2018)은 비록 인위적 온난화가 주요 원인이지만 2015/2016년 엘니뇨도 일정 부분 폭염 발생에 기여하였다고 평가하였다. Hu and Fedorov (2017)은 1997/

1998년 및 2015/2016년과 같은 강한 엘니뇨 발생이 지구온난화 추세를 가속시키는 반면 2000년부터 2013년 기간에 발생한 약한 엘니뇨 발생은 지구온난화 추세를 약화시켜 온난화 중지기의 특성을 보이는 데 기여한다고 제시하기도 하였다.

엘니뇨/라니냐의 위상에 따른 열대 및 아열대 몬순 지역 대류 활동은 다양한 원격상관을 통해 중위도 폭염 및 집중호우 발생에 영향을 미칠 수 있다(Ding et al., 2011; Lee et al., 2011, 2017b; Lee and Ha, 2015; Ha et al., 2018; Lee, 2018; Yeo et al., 2019; and many others). 북서태평양 몬순 지역 대류활동이 활발하면 서태평양-북미(Western Pacific-North America, WPNA) 원격상관(혹은 태평양-일본(P-J) 원격상관으로 불리기도 함)이 발현되어 동아시아 지역(혹은 캄차카 반도 지역)에 고기압성 순환 편차가 발생해 폭염이 발생할 가능성이 높아진다(Ding et al., 2011). 북서태평양과 동아시아 지역에서는 남북방향(meridional direction)으로 로스비파가 전파되기 때문에 Yeo et al. (2019)는 이를 M-파 원격상관으로 명명하였다. 북서태평양 몬순은 엘니뇨/라니냐가 소멸되는 여름철에 활발한 변동성을 보인다. 반면 인도 몬순 지역 대류활동이 활발하면 북반구 전역을 아우르는 전 지구 원격상관(Circumglobal teleconnection; CGT)이 발현되어 동아시아 지역 폭염 발생을 증가시킬 수 있다(Ding et al., 2011). 이 경우 동서방향(zonal direction)으로의 로스비파 전파가 우세하기 때문에 Yeo et al. (2019)는 Z-파 원격상관으로 명명하였다. 2010년과 2016년과 같이 엘니뇨가 소멸하면서 라니냐가 발달하는 여름철(Fig. 1)에는 WPNA 원격상관과 CGT가 함께 동아시아 폭염에 영향을 줄 수 있다(Lee, 2018).

Yeh et al. (2018)은 좀 더 구체적으로 두 원격상관 패턴이 어떻게 우리나라 폭염에 영향을 주었는지 분석하였다. 첫째, 아열대 북서태평양 대류활동에 의해 유도된 캄차카 반도의 고기압성 순환 편차가 블라킹으로 작용해 몽골 지역 고기압성 순환 편차가 유도되었다. 둘째, 인도 몬순 지역 활발한 대류활동에 의해 유도된 CGT에 의해 몽골 지역과 캄차카 반도에 고기압성 순환 편차가 지속적으로 유지되었다. 두 효과는 모두 몽골 지역과 캄차카 반도에 각각 고기압성 순환 편차를 강화 시켰으며 그에 따라 대류권 상층에서 고온 건조한 북풍이 우리나라로 유입되어 온도를 증가시키고 폭염을 발생시켰다.

2016년 우리나라를 포함하는 동아시아 폭염에 관한 연구들은 아열대 몬순 지역 대류 활동의 역할을 제시하고 있지만, 경년 변동과 계절안 진동 시간 규모 변동의 역할에 대한 구체적인 이해가 동반되지 않았다. 엘니뇨/라니냐의 위상과 관련된 아열대 몬순 지역 대류 활동은 주로 경년 변동 시간 규모에서 대부분 여

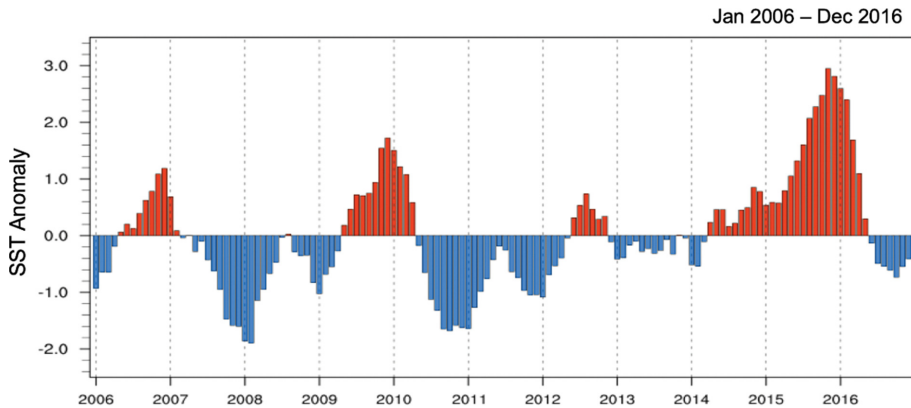


Fig. 1. Time series of Niño 3.4 SST anomaly from Jan 2006 to December 2016 with respect to 1981~2010 climatology.

름철에 걸쳐서 지속적으로 영향을 주게 되지만, 아시아 몬순 지역에서 북진 혹은 북서진하는 북반구 여름철 계절안진동(boreal summer intraseasonal oscillation; BSISO)의 주요 두 모드(BSISO1과 BSISO2)는 계절안진동 시간 규모에서 그 위상에 따라 폭염과 집중호우 발생에 영향을 미치게 된다(Hsu et al., 2016, 2017; Lee et al., 2017a). 두 BSISO 모드는 서로 독립적이며 발생 위치와 주요 시간 규모에서 큰 차이를 보인다. BSISO1은 적도 서인도양에서 발생하여 30~60일 주기로 적도를 따라 동진하다가 인도양에서 인도 몬순 지역으로 북진할 뿐만 아니라 북서태평양에서 동아시아 지역으로 북진하는 특성을 보인다. 반면 BSISO2는 적도 서태평양에서 발생해 10~30일 시간 규모를 가지고 아시아 대륙 쪽으로 북서진하는 특성을 보인다(Lee et al., 2013). 우리나라 폭염 가능성은 BSISO1의 7에서 8 위상일 때와 BSISO2의 1에서 2 위상일 경우 높아지게 되는 데 두 가능성은 다소 독립적으로 나타난다(Hsu et al., 2017). 폭염의 지속이 일반적으로 수 일에서 수 주 내에 일어난다는 것을 감안할 때 계절안진동이 미치는 영향에 대한 이해가 더욱 필수적이다. 하지만 경년변동에 비해 이 부분에 대한 연구가 아직 부족하다.

본 연구는 2016년 여름 BSISO 특성 및 우리나라 폭염 발생과의 관련성을 조사하였다. 그리고 2010년 우리나라 폭염 사례와의 유사점 및 차이점에 대해서 살펴보았다. 2절에서는 자료 및 분석 방법, 3절에서는 2016년 BSISO와 우리나라 폭염의 특징, 4절에서는 2010년 폭염 사례와의 비교, 마지막으로 5절에서는 요약 및 토의를 제시한다.

2. 자 료

본 연구에 사용된 관측 혹은 재분석 자료는 다음과

같다. 2 m 지표 기온 및 850-hPa 동서방향 바람장(zonal wind at 850 hPa, U850)은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Department of Energy (DOE) 재분석 자료 version 2 (Kanamitsu et al., 2002)가 사용되었다. 상향장파복사(outgoing longwave radiation, OLR)는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 극 궤도 위성에서 측정된 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) OLR 자료가 이용되었다(Liebmann and Smith, 1996). 해수면 온도(sea surface temperature, SST)는 NCEP Extended Reconstructed SST version 5 (ERSST5)이 사용되었다(Huang et al., 2017). 모든 자료는 1981년부터 2016년 기간이 이용되었으며, 2.5° 수평 해상도로 격자화되었다. 본 연구는 세계기상기구 정의에 따라 1981~2010 기간을 평년(climatology)으로 정의하고 편차(anomaly)를 계산하였다(WMO, 2017).

BSISO 지수는 Lee et al. (2013)에서 제안된 BSISO1과 BSISO2가 이용되었다. 두 지수는 아시아 지역(10°S-40°N, 40°-160°E) 일평균 OLR과 850-hPa 동서방향 바람(U850) 자료에 다중 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)를 적용해 구한다. BSISO1은 30~60일 시간 규모를 가지고 인도양-인도 몬순 지역과 북서태평양-동아시아 몬순 지역에서 각각 북진하는 특성을 가지며, 두 영역에서 대류 활동이 반대 위상을 나타내는 특성을 가진다. 즉, 북서태평양 몬순 지역에서 대류활동이 활발할 경우 인도 몬순 지역과 동아시아 몬순 지역에서 고기압성 순환 편차 발생에 의해 대류활동이 억제된다. BSISO2는 10~30일 시간 규모를 가지고 아시아 몬순 지역에서 북서진 하는 특성을 가지며, 북서태평양 몬순과 인도 몬순 지역에서 대류 활동이 같은 방향을 나타내는 특성이 있다. 하지만 북서태평양 몬순 지역에서 대류활동이 강화되면 동아시아 몬순 지역에서는 고기압성 순환 발생에 의

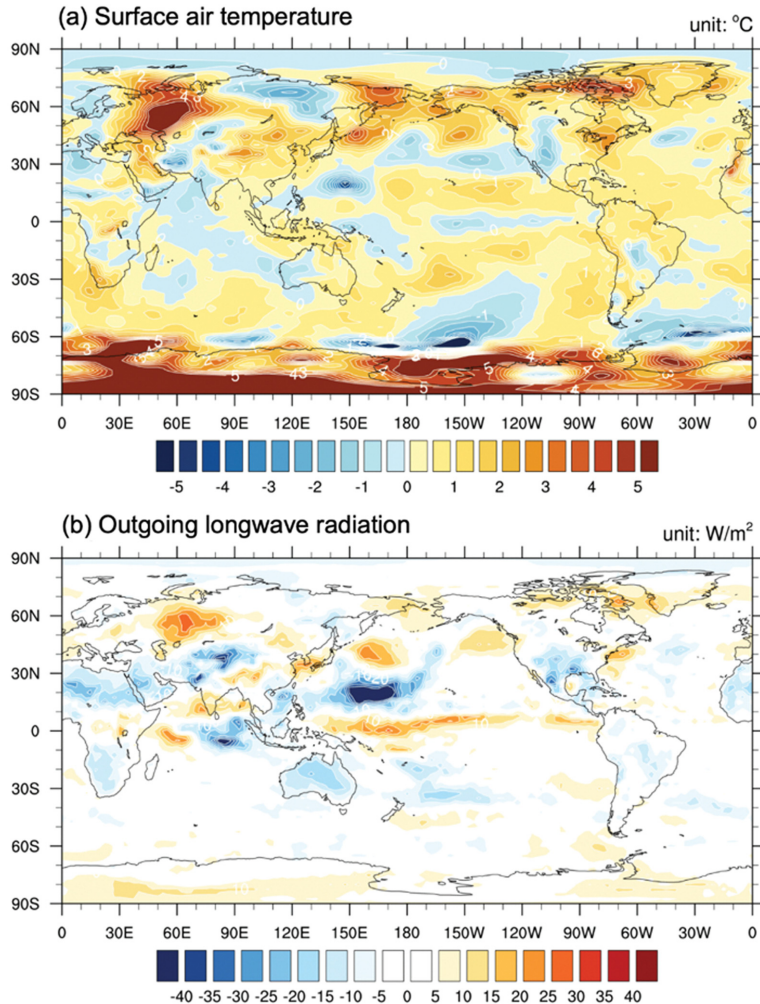


Fig. 2. Spatial distribution of surface air temperature (unit: °C) and (b) outgoing longwave radiation (OLR, unit: W m⁻²) anomaly during 2016 August with respect to 1981~2010 climatology.

해 대류활동이 억제된다(Lee et al., 2013). 즉, BSISO1의 경우 인도 몬순과 동아시아 몬순이 양의 상관관계를 나타내지만, BSISO2의 경우 두 몬순은 음의 상관관계를 나타내는 특성을 보인다. 하지만 BSISO1과 BSISO2 경우 모두 북서태평양 몬순과 동아시아 몬순 지역 대류 활동은 항상 음의 상관관계를 나타낸다. 이러한 BSISO 모드에 따른 각 몬순 사이의 상관 관계의 변화는 실제로 북반구 원격상관 패턴에 큰 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 APEC 기후 센터에서 제공하는 BSISO 모니터링 자료를 사용하였다(Wheeler et al., 2017). APEC 기후 센터는 또한 BSISO 실시간 예측을 진행하고 있으며 여러 응용에 사용하고 있다(<https://apcc21.org/ser/meth.do?lang=ko>).

3. 2016년 8월 기후 특성 및 BSISO 영향

기슬한 바와 같이 2015/2016년 슈퍼 엘니뇨는 2016년 봄철부터 소멸하기 시작해 여름철에는 약한 라니냐 상태로 접어들었다(Fig. 1). 8월 2 m 지표 기온은 한반도를 포함해 북반구 전역에서 평년보다 높은 수치를 보였다. 특히 동유럽, 러시아 서부 및 캄차카 반도 유역, 동아시아, 캐나다 북부, 미국 동부 등지에서 온도 상승이 크게 나타났다(Fig. 2a). 남중국해와 북서태평양 지역에서 대류 활동이 평년보다 활발하게 나타난 반면 우리나라를 포함하는 동아시아 지역에서는 대류활동이 억제되었다(Fig. 2b). 북서태평양 지역의 활발한 대류활동에 따라 동아시아 지역과 캄차카 반도 지역 고기압 순환 편차가 강화되어 대류활동이 억

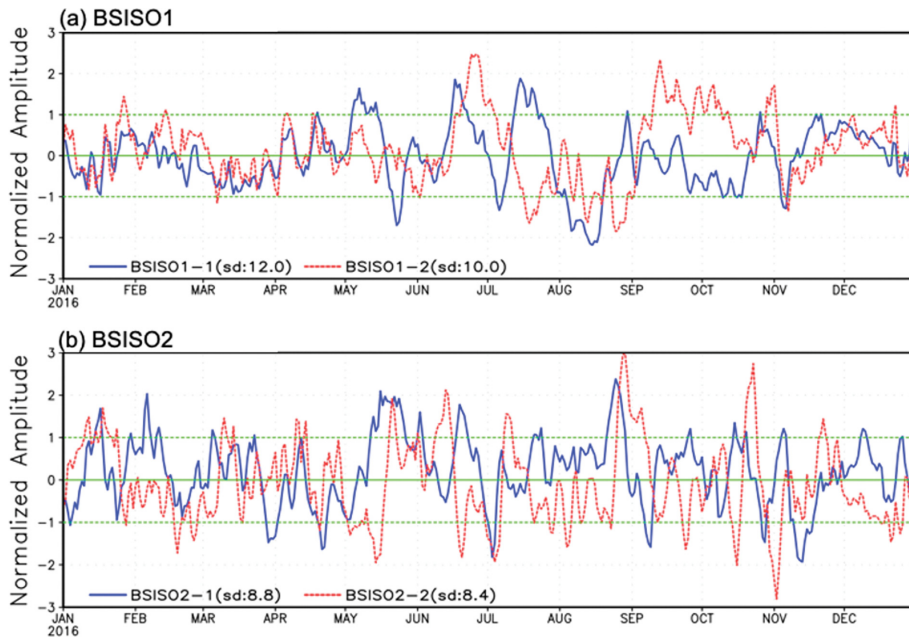


Fig. 3. The normalized time series of daily (a) BSISO1 and (b) BSISO2 anomaly, respectively, with respect to 1981-2010 climatology during 2016. Each index consists of two EOF modes.

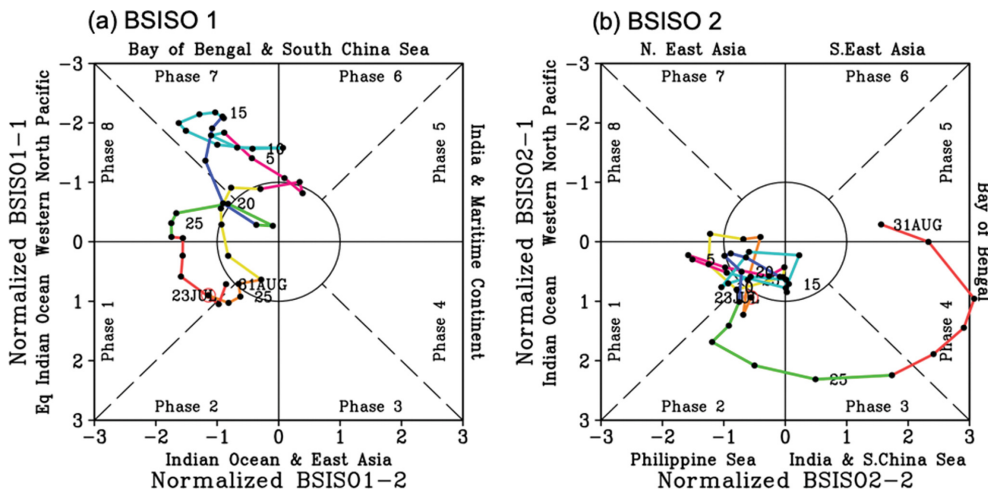


Fig. 4. Phase space curves obtained from the two EOF modes of (a) BSISO1 and (b) BSISO2, respectively from 23 July to 31 August, 2016. Each BSISO component was normalized by its respective standard deviation. Each closed circle represents daily evolution indicating the location of convective activity.

제된 것으로 보인다(Yeh et al., 2018; Yeo et al., 2019). 더불어 인도 서북부와 파키스탄 지역에서 대류 활동이 평년보다 활발하게 나타났는데 이는 양의 CGT 발현을 통해 몽골 지역과 캄차카 반도 유역 고기압 순환 편차를 강화시키는데 기여한 것으로 보인다(Yeh et al., 2018; Yeo et al., 2019).

KMA (2017) Fig. 2-17에서 제시된 바에 따르면 우리나라 평균 기온의 경우 7월 초반에는 평년보다 약 1°C 정도 높았으나 중반에는 평년보다 다소 낮았다가 7월 후반부터 강해져 약 8월 24일까지 평년보다 1.6°C 이상 높은 온도를 기록하였다. 하지만 그 이후부터 9월 초까지 온도가 평년보다 낮게 유지되었다(KMA, 2017).

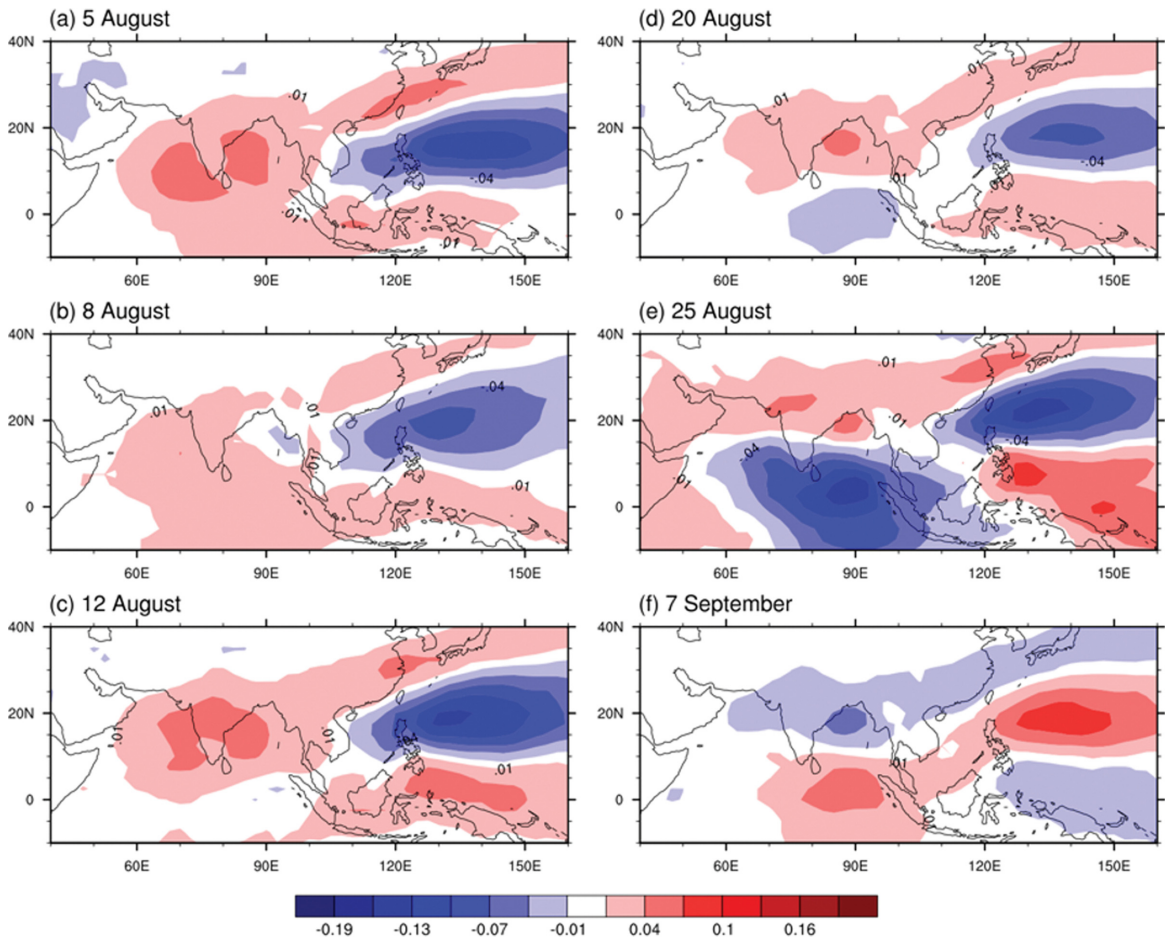


Fig. 5. Reconstructed OLR anomaly (unit: $W\ m^{-2}$) based on the BSISO indices during (a) 5 August, (b) 8 August, (c) 12 August, (d) 20 August, (e) 25 August, and (f) 7 September, 2016, with respect to 1981~2010 climatology.

즉, 이 시기 강한 폭염이 약 30일 정도 지속된 것이다.

30~60일 주기를 가지고 인도 몬순 지역과 북서태평양-아시아 지역에서 북진하는 BSISO1은 2016년 5월부터 8월까지 매우 활발한 활동을 나타낸 것을 볼 수 있다(Fig. 3a). 10~30일의 상대적으로 짧은 주기를 가지고 주로 북서태평양-아시아 지역에서 북진하는 BSISO2는 5월과 6월 초에 강하게 활동하다가 다소 약해 진후 8월 말 이후 강한 진폭을 나타내었다(Fig. 3b). 우리나라와 동아시아에 폭염이 극심하게 나타났던 7월 후반부터 8월 중반까지 BSISO1이 7~8 위상에서 매우 강한 진폭을 나타낸 반면, BSISO2는 약한 진폭을 가지고 위상 1~2에서 머물러 있었다(Fig. 4). BSISO1 위상 7~8은 남중국 해와 북서 태평양 몬순 지역에서 대류 활동이 활발하지만 인도 몬순 지역과 동아시아 지역에서는 고기압성 순환과 함께 대류 활동이 약화되는 특성을 가진다. Figure 5는 8월 5일부터

25일까지 BSISO1이 7~8 위상을 가졌으며, 그에 따라 남중국해와 북서 태평양에 위치하던 대류 활동이 느리게 북쪽으로 전파되고, 고기압 편차 지역이 우리나라 남쪽에서 북쪽으로 이동되는 것을 보여준다. Hsu et al. (2017)은 그와 같은 고기압 편차가 우리나라 위쪽에 자리잡을 경우 그에 따른 단열 하강에 의한 온도 상승으로 폭염이 발생할 수 있음을 보였다. 8월 후반에는 인도 몬순과 북서태평양 몬순 지역에서 대류 활동이 같은 위상을 나타내는 BSISO2가 빠르게 발달하며 빠른 속도로 북상해 9월 초반에는 우리나라 지역에 대류 활동이 강화 된 것을 볼 수 있다(Fig. 5f).

즉, 2016년 8월에는 남중국해와 북서태평양 몬순 지역의 대류활동과 함께 BSISO1의 7~8 위상이 크게 나타났으며, 이는 우리나라를 포함하는 동아시아 지역 폭염 발생에 크게 기여한 것을 볼 수 있다. 반면 인도 서북부와 파키스탄 지역의 활발한 대류 활동은

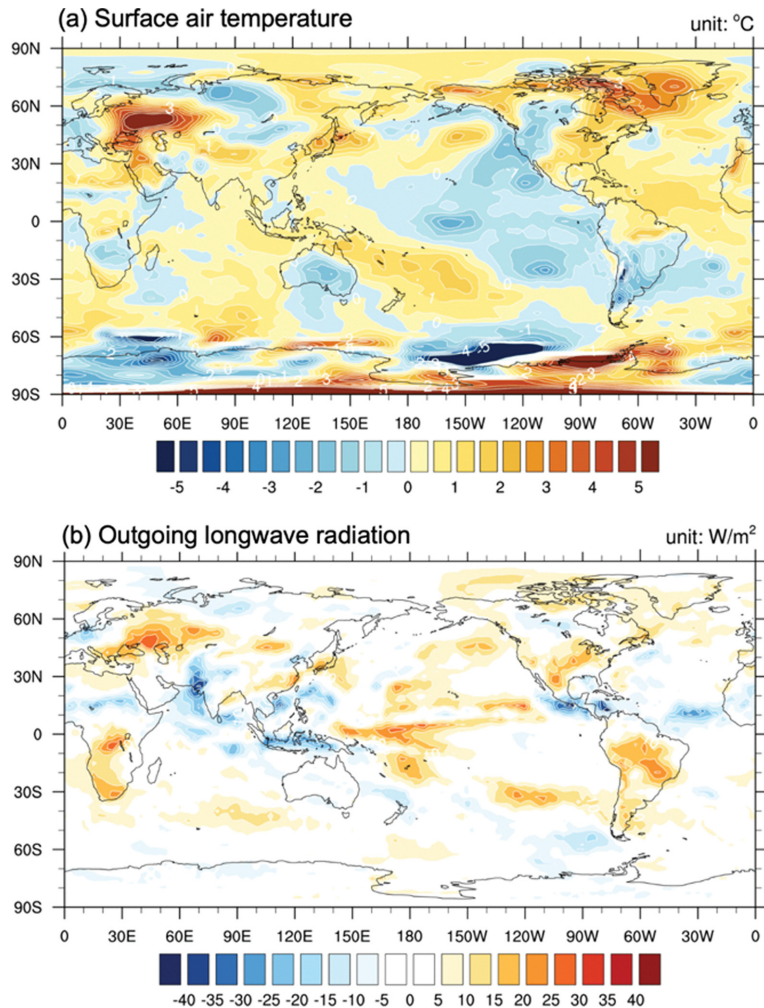


Fig. 6. Same as Fig. 2 except for the August of 2010.

BSISO1과 큰 관련이 없으며, 당시 라니냐 발달에 의해 강화된 위커 순환에 기인 한 것으로 추정된다. 일반적으로 위커 순환은 라니냐가 발달하는 여름철에 강화되며, 엘니뇨가 발달할 때에는 약화된다(e.g., Cherchi and Navarra, 2013). 따라서 2016년 8월 우리나라 폭염은 계절안 시간 규모에서 BSISO1 7~8 위상과 경년변동 시간 규모에서 라니냐 발생에 따른 CGT의 양의 위상 강화가 함께 기여한 것으로 보인다. 하지만 주요한 폭염의 시간 규모는 BSISO1에 의해 결정된 것으로 나타났다.

4. 2010년 8월 폭염 사례와의 비교

2010년 8월 우리나라는 평년과 비교해 약 1.8°C 기온이 높았으며 2016년 8월과 비교해도 0.2°C 높았다.

하지만 2016년의 경우 8월 초반에서 24일까지 1°C 이상의 고온이 꾸준히 지속된 반면 2010년 8월에는 지속기간이 짧은 폭염이 여러 번 발생하였다(KMA, 2010).

2010년 8월은 2016년 8월과 매우 유사한 기후 패턴을 나타내었다. 특히 2009/2010년 엘니뇨가 2010년 봄철에 소멸하고 여름철에 라니냐로 전환되어 경년변동 측면에서 2016년 사례와 매우 유사한 특성을 보였다(Fig. 1). 그에 따라 비록 지역적으로 다소 차이가 있으나 2016년 8월과 유사하게 동유럽, 러시아 서부 및 캄차카 반도 유역, 동아시아, 캐나다 북부, 미국 동부 등지에서 온도 상승이 크게 나타났다(Fig. 6a). 인도 서북부, 파키스탄, 남중국 해에서 대류활동이 강화된 것도 2016년 사례와 유사하다. 하지만 2016년 8월의 가장 큰 특징 중 하나인 북서태평양 몬순 지역의 강한 대류 활동은 2010년 사례에서는 발생하지 않았

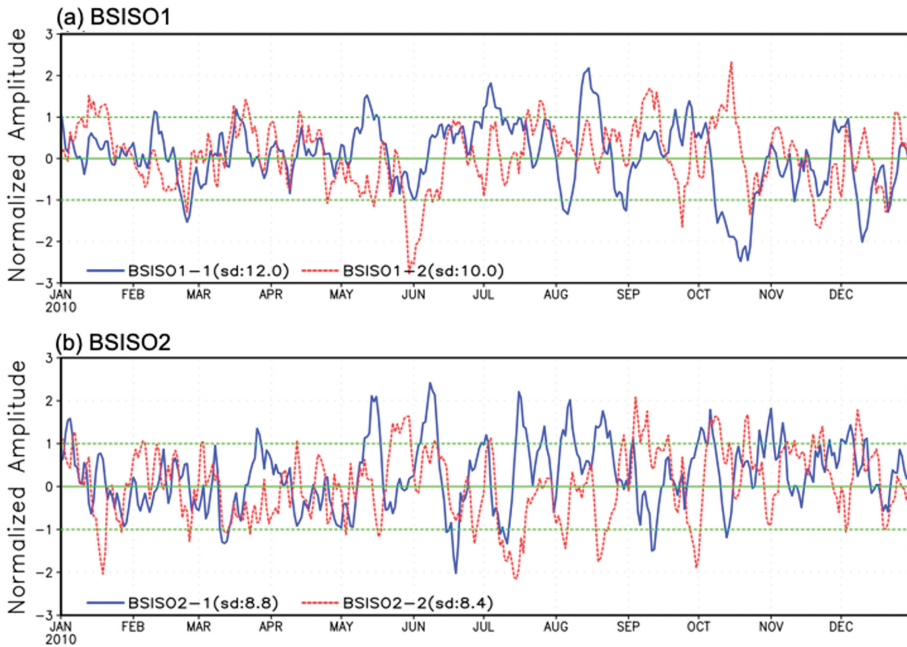


Fig. 7. Same as Fig. 4 expect for the year of 2010.

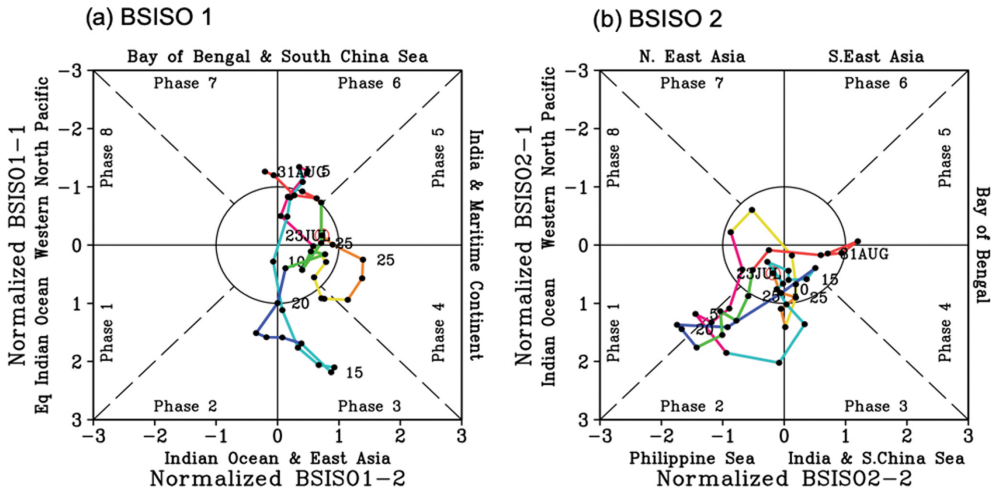


Fig. 8. Same as Fig. 2 expect for 23 July~31 August, 2010.

다(Fig. 6b).

2010년과 2016년 8월 사례의 가장 큰 차이점은 BSISO 특성에서 찾아볼 수 있다. 2016년과 달리 2010년 8월에는 BSISO1보다 BSISO2가 더 큰 진폭으로 발생하였으며(Fig. 7), 8월 중 1~2 위상에서 강화와 약화를 여러 번 반복하였다(Fig. 8b). BSISO2의 위상이 급속도로 약화된 8월 10에서 20일 사이에는 BSISO1이 매우 강한 2~3 위상을 나타내었는데 이 시기는 우

리나라에 집중호우가 크게 발생하고 폭염이 주춤한 때이다. Lee et al. (2017a)은 BSISO1의 2~3 위상에서 우리나라에 집중호우 발생 가능성이 높아짐을 보인바 있다.

즉, 경년 변동의 측면에서 2010년과 2016년 8월 폭염은 큰 유사성을 보이지만 계절안 진동에 의한 기여는 매우 달랐음을 알 수 있다. BSISO1의 영향을 받을 때는 좀더 지속적인 폭염이, BSISO2의 영향을 받

을 때는 지속기간은 짧으나 여러 번에 걸쳐 폭염이 나타날 수 있는 것으로 해석된다. 따라서 본 연구는 우리나라 여름철 폭염 메커니즘의 더욱 명확한 이해를 위해서는 계절안진동이 미치는 기여와 또한 계절안진동과 경년변동과의 상호작용에 대한 이해가 더욱 필요하다는 것을 제시한다.

5. 요약 및 토의

본 연구는 2016년 8월 사례를 2010년 8월 사례와 비교해 우리나라 여름철 폭염 발생에 경년 시간 규모에서 엘니뇨/라니냐와 연관된 원격상관 패턴이 영향을 줄 뿐만 아니라 계절안 시간 규모에서 주요한 두 BSISO 모드가 위상에 따라 영향을 줄 수 있음을 보였다. 특히 경년 시간 규모에서 기후 편차 패턴이 유사하더라도 서로 다른 특성의 계절안 진동이 폭염의 시간 규모에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다.

2016년과 2010년 여름철에는 모두 엘니뇨 소멸 후 라니냐가 시작되었으며, 그에 따른 위커 순환 강화에 의해 인도 서북부와 파키스탄 지역 대류 활동이 여름철 내내 강화되었다. 이는 북반구 전역에 영향을 미칠 수 있는 양의 CGT 패턴을 발현시켰으며, 그에 따른 몽골 지역과 캄차카 반도 유역 고기압성 순환 편차는 우리나라 지표 기온 증가와 폭염 발생에 기여하였다. 두 시기 모두 엘니뇨가 소멸한 여름철이었지만 이미 라니냐로 들어서며 북서태평양 지역 몬순 지역에서의 대류 활동은 경년 시간 규모에서 크게 나타나지 않은 것으로 보인다.

2016년과 2010년 폭염은 BSISO의 기여 부분에서 뚜렷한 차이를 보였다. 2016년 8월의 경우 30~60일 시간 규모로 다소 느리게 전파되는 BSISO1의 7~8 위상이 남중국해와 북서태평양 몬순 지역의 활발한 대류활동과 연계되어 우리나라 폭염에 기여하였다. 하지만 2010년 8월의 경우는 10~30일 시간 규모로 다소 빠르게 전파되는 BSISO2 1~2 위상의 영향을 받으며 여러 번 폭염 발생과 소멸이 지속되었다. 8월 초반과 후반 부의 폭염 사이에는 BSISO1의 2~3 위상과 맞물려 우리나라 지역에 집중호우가 발생하기도 하였다.

즉, 본 연구는 폭염이 유사하게 발생하고 8월 평균 기온이 비슷한 수준으로 나타난다고 해도 어떤 BSISO의 영향을 받느냐에 폭염의 시간 규모가 다르게 나타날 수 있음을 시사하고 있다. 기존의 연구들은 주로 경년 시간 규모에 치중 되어 있다. 따라서 차후 폭염 발생과 지속의 상세 메커니즘을 이해하기 위해서는 BSISO와의 연관성에 대한 연구가 더 필요함이 제시된다. 더불어 BSISO가 엘니뇨/라니냐를 포함하는 경년 변동과 어떻게 상호작용 하는지에 대한 추가 연구

가 필요한 것으로 보인다. 경년 변동의 일환으로 나타난 CGT가 두 BSISO 발생에 완전히 독립적으로 볼 수 없으며, CGT또한 인도 몬순의 계절안 변동성과 맞물려 계절안 변동 특성을 나타낼 수 있기 때문이다 (Ding and Wang, 2005). 또한 장기 자료 분석 및 모델 실험을 통해 유사한 기후 평균 상태에서 왜 특정 해에는 BSISO1 7~8 위상이, 다른 해에는 BSISO2 1~2 위상에 우리나라 폭염에 영향을 주었는지에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

APEC 기후센터는 매년 5월부터 10월까지 두 BSISO 모드의 시계열과 위상 공간 변화를 실시간으로 감시하고 있으며, 여러 현업 기관들과 협업하여 실시간 예측을 수행하고 있다. 지난 수년 간의 실시간 예측 정보에 따르면 두 BSISO 모드는 약 10~20일 정도의 시간 규모에서 예측가능 하다(Wheeler et al., 2017). 따라서 차후 BSISO 예측 정보를 우리나라 폭염 발생 예측에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 경년과 계절안 시간 규모에서의 폭염 메커니즘을 주로 논의했다. 하지만 최근 폭염의 발생 및 지속기간 증가에는 서론에서 논의한 바와 같이 인위적 지구온난화가 크게 영향을 미치고 있다는 것은 매우 확실해 보인다. 현재 산업 혁명 이후 약 1°C 정도 지구온난화가 진행되었으나 만약 적극적 기후 행동이 없다면 2040년 전후로 1.5°C 상승을 넘어설 전망이다(Masson-Delmotte et al., 2018). 전 지구 지표 기온이 1°C 상승할 때 동아시아 지역의 폭염 발생일수가 20일 정도 증가할 수 있다는 최근 연구를 고려할 때(Perkins-Kirkpatrick and Gibson, 2017) 앞으로도 폭염 발생, 강도, 지속 기간은 계속 증가할 것으로 전망된다. 지구 온난화는 또한 BSISO의 발생 및 구조에 영향을 줄 수 있기 때문에 그에 따른 폭염의 구조 변화도 나타날 가능성이 높다. 따라서 지구온난화에 따른 BSISO의 변화에 대한 연구도 차후 더욱 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Blunden, J., and D. S. Arndt, 2017: State of the Climate in 2016. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, Si-S277, doi: 10.1175/2017BAMSStateoftheClimate.1.
- Cherchi, A., and A. Navarra, 2013: Influence of ENSO and of the Indian Ocean dipole on the Indian summer monsoon variability. *Climate Dyn.*, **41**, 81-103,

- doi:10.1007/s00382-012-1602-y.
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, **18**, 3483-3505.
- _____, _____, J. M. Wallace, and G. Branstator, 2011: Tropical-extratropical teleconnections in boreal summer: Observed interannual variability. *J. Climate*, **24**, 1878-1896, doi:10.1175/2011JCLI3621.1.
- Frölicher, T. L., E. M. Fischer, and N. Gruber, 2018: Marine heatwaves under global warming. *Nature*, **560**, 360-364, doi:10.1038/s41586-018-0383-9.
- Ha, K.-J., Y.-W. Seo, J.-Y. Lee, R. H. Kripalani, and K.-S. Yun, 2018: Linkages between the South and East Asian summer monsoons: a review and revisit. *Climate Dyn.*, **51**, 4207-4227, doi:10.1007/s00382-017-3773-z.
- Hsu, P.-C., J.-Y. Lee, and K.-J. Ha, 2016: Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1403-1412, doi:10.1002/joc.4433.
- _____, _____, _____, and C.-H. Tsou, 2017: Influences of boreal summer intraseasonal oscillation on heat waves in Monsoon Asia. *J. Climate*, **30**, 7191-7211, doi:10.1175/JCLI-D-16-0505.1.
- Hu, S., and A. V. Fedorov, 2017: The extreme El Nino of 2015-2016 and the end of global warming hiatus. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 3816-3824, doi:10.1002/2017GL072908.
- Huang, B., and Coauthors, 2017: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*, **30**, 8179-8205, doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- Imada, Y., H. Shiogama, C. Takahashi, M. Watanabe, M. Mori, Y. Kamae, and M. Shuhei, 2018: Climate change increased the likelihood of the 2016 heat extremes in Asia. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, S97-101, doi:10.1175/BAMS-D-17-0109.1.
- IPCC, 2019a: Climate Change and Land. IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 864 pp [Available online at <https://ipcc.ch/report/srcccl>].
- IPCC, 2019b: Summary for Policymakers. IPCC Special report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 3-35 [Available online at <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers>].
- Kanamitsu, M., and Coauthors, 2002: NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1019-1037.
- KMA, 2010: 2010 extreme climate report, Korea Meteorological Administration, 114 pp (in Korean) [Available online at http://web.kma.go.kr/images/focus_pcmr/down/report_201012.pdf].
- _____, 2017: 2016 extreme climate report (in Korean), Korea Meteorological Administration, 190 pp. [Available online at http://www.climate.go.kr/home/cc_data/2017/2016_abnormal_climate_report_high.pdf].
- Knutson, T. R., J. Kam, F. Zeng, and A. T. Wittenberg, 2018: CMIP5 model-based assessment of anthropogenic influence on record global warmth during 2016. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, S11-15, doi:10.1175/BAMS-D-17-0104.1.
- Lee, J.-Y., 2018: Interdecadal changes in the boreal summer tropical-extratropical teleconnections occurred around mid-to-late 1990s. *Atmosphere*, **28**, 325-336, doi:10.14191/Atmos.2018.28.3.325 (in Korean with English abstract).
- _____, and K.-J. Ha, 2015: Understanding of interdecadal changes in variability and predictability of the Northern Hemisphere summer tropical-extratropical teleconnection. *J. Climate*, **23**, 8634-8647, doi:10.1175/JCLI-D-15-0154.1.
- _____, B. Wang, Q. Ding, K.-J. Ha, J.-B. Ahn, A. Kumar, B. Stern, and O. Alves, 2011: How predictable is the Northern Hemisphere summer upper-tropospheric circulation? *Climate Dyn.*, **37**, 1189-1203, doi:10.1007/s00382-010-0909-9.
- _____, _____, M. C. Wheeler, X. Fu, D. E. Waliser, and I.-S. Kang, 2013: Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Climate Dyn.*, **40**, 493-509, doi:10.1007/s00382-012-1544-4.
- _____, P.-C. Hsu, S. Moon, and K.-J. ha, 2017a: Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on Korean precipitation and its long-term changes. *Atmosphere*, **27**, 435-444, doi:10.14191/Atmos.2017.27.4.435 (in Korean with English abstract).
- _____, and Coauthors, 2017b: The long-term variability of Changma in the East Asian summer monsoon system: A review and revisit. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 257-272, doi:10.1007/s13143-017-0032-5.
- Liebmann, B., and C. A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275-1277.
- Lim, Y.-H., K.-S. Lee, H.-J. Bae, D. Kim, H. Yoo, S. Park, and Y.-C. Hong, 2019: Estimation of heat-related deaths during heat wave episodes in South Korea

- (2006-2017). *Int. J. Biometeorol.*, **63**, 1621-1629, doi: 10.1007/s00484-019-01774-2.
- Masson-Delmotte, V., and Coauthors, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report. IPCC, 32 pp [Available online at https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf].
- Park, S.-W., S. Park, H.-I. Lee, and S.-W. Lee, 2016: Results of heat-related illnesses surveillance, 2016. Korea Centers for Disease Control and Prevention (in Korean with English abstract) [Available online at https://www.cdc.go.kr/board.es?mid=a20602010000&bid=0034&act=view&list_no=75530].
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., and P. B. Gibson, 2017: Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Sci. Rep.*, **7**, 12256, doi:10.1038/s41598-017-12520-2.
- Vogel, M. M., J. Zscheischler, R. Wartenburger, D. Dee, and S. I. Seneviratne, 2019: Concurrent 2018 hot extremes across Northern Hemisphere due to human-induced climate change. *Earth's Future*, **7**, 692-703, doi:10.1029/2019EF001189.
- Wheeler, M. C., H.-J. Kim, J.-Y. Lee, and J. C. Gottschalck, 2017: Chapter10: Real-time forecasting of modes of tropical intraseasonal variability: The Madden-Julian and boreal summer intraseasonal oscillation. In C.-P. Chang et al. Eds., *The Global Monsoon System*, 3rd ed, World Scientific, 131-138.
- WMO, 2017: WMO Guidelines on the calculation of climate normal. WMO-No. 1203, 18 pp [Available online at https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20130#.XZrg2uczbuUJ].
- Yeh, S.-W., Y.-J. Won, J.-S. Hong, K.-J. Lee, M. Kwon, K.-H. Seo, and Y.-G. Ham, 2018: The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1463-1474, doi:10.1175/MWR-D-17-0205.1.
- Yeo, S.-R., S.-W. Yeh, and W.-S. Lee, 2019: Two types of heat wave in Korea associated with atmospheric circulation pattern. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 7498-7511.