

## 한국기상학회 기후역학 분야 학술 발전 현황

안순일<sup>1)\*</sup> · 예상욱<sup>2)</sup> · 서경환<sup>3)</sup> · 국종성<sup>4)</sup> · 김백민<sup>5)</sup> · 김대현<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>한양대학교, <sup>3)</sup>부산대학교 대기환경과학과, 기후과학연구소,  
<sup>4)</sup>포항공과대학교 환경공학부, <sup>5)</sup>부경대학교 환경대기과학과, <sup>6)</sup>워싱턴 주립 대학교 대기과학과

(접수일: 2022년 10월 9일, 수정일: 2022년 11월 13일, 게재확정일: 2022년 11월 18일)

## Academic Development Status of Climate Dynamics in Korean Meteorological Society

Soon-Il An<sup>1)\*</sup>, Sang-Wook Yeh<sup>2)</sup>, Kyong-Hwan Seo<sup>3)</sup>, Jong-Seong Kug<sup>4)</sup>,  
Baek-Min Kim<sup>5)</sup>, and Daehyun Kim<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Department of Marine Sciences and Convergence Technology, Hanyang University, ERICA, Ansan, Korea

<sup>3)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Research Center for Climate Sciences,  
Pusan National University, Busan, Korea

<sup>4)</sup>Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science  
and Technology (POSTECH), Pohang, Korea

<sup>5)</sup>Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>6)</sup>Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle, U.S.A.

(Manuscript received 9 October 2022; revised 13 November 2022; accepted 18 November 2022)

---

**Abstract** Since the Korean Meteorological Society was organized in 1963, the climate dynamics fields have been made remarkable progress. Here, we documented the academic developments in the area of climate dynamics performed by members of Korean Meteorological Society, based on studies that have been published mainly in the Journal of Korean Meteorological Society, Atmosphere, and Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. In these journals, the fundamental principles of typical ocean-atmosphere climatic phenomena such as El Niño, Madden-Julian Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, and Atlantic Multi-decadal Oscillation, their modeling, prediction, and its impact, are being conducted by members of Korean Meteorological Society. Recently, research has been expanded to almost all climatic factors including cryosphere and biosphere, as well as areas from a global perspective, not limited to one region. In addition, research using an artificial intelligence (AI), which can be called a cutting-edge field, has been actively conducted. In this paper, topics including intra-seasonal and Madden-Julian Oscillations, East Asian summer monsoon, El Niño-Southern Oscillation, mid-latitude and polar climate variations and some paleo climate and ecosystem studies, of which driving mechanism, modeling, prediction, and global impact, are particularly documented.

**Key words:** MJO, El Niño, East Asian summer monsoon, mid-latitude climate variation, polar climate variation

---

\*Corresponding Author: Soon-Il An, Department of Atmospheric Sciences, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea.  
Phone: +82-2-2123-5684, Fax: +82-2-365-5163  
E-mail: sian@yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

기후란 어떤 지역의 기상현상이 보편적으로 반복되는 것을 의미하며, 30년간 누적된 기상의 평균을 대체로 기후값으로 정하고 있다. 이러한 개념은 기후를 변하지 않는 정상 상태(stationary state)로 보는 관점이다. 과거 기후 강제력(climate forcing)이 매우 천천히 변했을 시에는 이러한 개념이 문제없이 받아들여질 수 있었으나, 현재와 같이 인위적인 요인에 의한 기후 강제력 즉, 온실가스가 급격하게 증가하고 있는 상황에서는 기후를 정상 상태로 보기가 어려워졌다. 또한 컴퓨터 발달로 인해 기후 수치 모델링이 보다 수월해지고, 지구 규모의 광범위한 관측 자료의 축적으로 기후에 대한 연구가 보다 가속화되면서, 기후역학(Climate Dynamics)이라는 개념이 정립되었고, 20세기 중반에 들어서 동역학적 관점에서 기후의 현상을 다루는 학문으로 자리 매김하게 되었다.

기상/기후 연구의 선도적인 역할을 하고 있는 미국 기상학회(American Meteorological Society)에서 기후역학 관련 논문이 기존의 전통적인 대기과학관련 저널(예, 'Journal of Atmospheric Sciences' 또는 'Monthly Weather Review')에서 분리된 것은 1988년 'Journal of Climate'이 발간되면서부터이다. 이는 기후 및 기후역학 분야가 그만큼 늦게 관심을 받고 발전했으며, 동시에 매우 빠르게 발전하고 있음을 의미한다. 한국기상학회에서는 아직 기후역학분야 또는 기후변화분야만을 분리한 저널을 출간하고 있지는 않지만, 2010년부터 봄학회를 분과별로 개최하는 등 기상학회의 분과 활동이 본격화되었고, 현재 5개 분과 중에서도 기후분과는 질적 그리고 양적 모두 매우 빠르게 성장한 분과로 알려져 있다. 그만큼 대기과학분야에서 기후 관련 분야의 발전이 괄목했음을 의미한다.

한국기상학회 발간 학회지들(대기지, 한국기상학회지(APJAS의 전신), Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences (APJAS))을 중심으로 기후역학의 주요 주제인 기후 변동 모드 관련 논문의 최초 출판 년도를 제목에 대한 키워드를 중심으로 찾아보면, 열대지역 계절 내 변동인 매든-줄리안 진동(또는 30~60일 진동)은 1989년(Kang et al., 1989)에, 강한 계절변화를 의미하는 몬순 관련 논문은 1981년(Moon, 1981), 열대 동태평양지역 해수면 온도의 경년 변동 현상인 엘니뇨 관련 논문은 1995년(Kang et al., 1995)에 출판된 것을 알 수 있다. 즉, 한국에서 이루어진 기후역학의 주요 주제인 계절 내 진동, 몬순 그리고 경년 변동에 관한 연구는 약 30~40년 전에 시작되었다고 할 수 있다.

본 논문에서는 기후 역학의 주요 주제인 매든-줄리안 진동, 계절 내 진동, 동아시아 여름 몬순, 엘니뇨, 중위도 해양-대기 장주기 변동, 그리고 극지역 기후

변동에 대한 학술적 발전 현황을 한국기상학회 회원들의 연구 결과 및 발행 학회지에 게재된 논문을 중심으로 서술하였다. 매든-줄리안 진동 절에서는 관측, 모델링 그리고 예측에 관련된 연구가 소개됐으며, 동아시아 여름 몬순 절에서는 몬순 발생의 특징, 그 예측과 미래 변화 그리고 예측의 경제효과가 소개되었다. 엘니뇨 절에서는 엘니뇨의 역학, 다양성, 대양간의 상호작용, 평균장 및 기후 변화와 엘니뇨의 관계 그리고 엘니뇨 영향과 예측에 관하여 소개하였다. 중위도 해양-대기 장주기 변동 절에서는 중위도에서의 해양-대기 피드백 과정, 열대-중위도 원격상관, 지면 강제력의 영향 그리고 중위도 제트의 변화에 대하여 소개하였고, 극지역 기후 변동 절에서는 극지 기후변동성, 북극 고온 현상, 북극 중위도 상호작용, 그리고 극지역 예측 및 모델링에 관한 내용을 소개하였다. 마지막 절에서는 고기후 연구와 식생 관련 연구를 소개하였다.

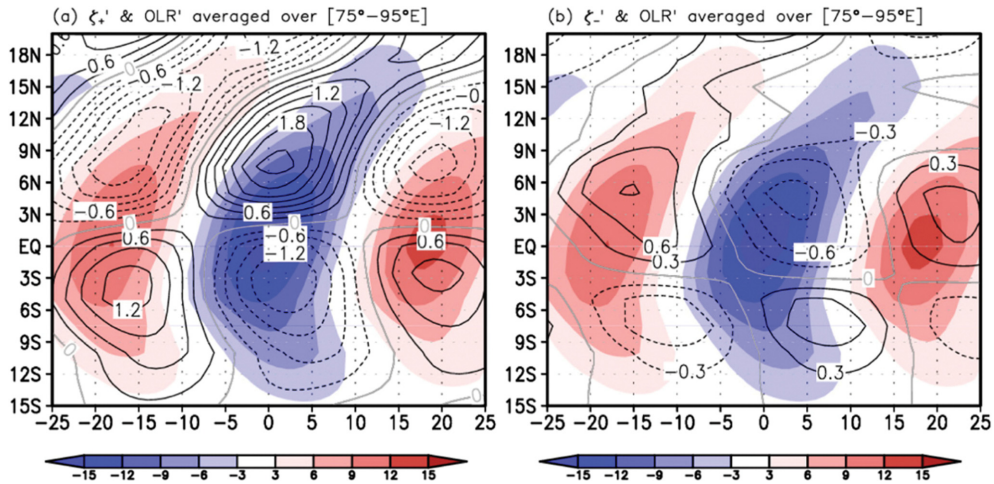
## 2. 본 문

### 2.1 매든-줄리안 진동과 열대 계절 내 진동

본 단원에서는 지난 60여 년간 대기지와 APJAS지에 출판된 내용을 중심으로 계절 내 진동에 대한 연구들을 관측, 모델링, 예측 분야로 나누어 정리하였다. 계절 내 진동은 주기가 날씨 규모보다 길고 계절 규모보다는 짧은 현상들을 일컫는다. 열대 지역에서 일별 관측자료가 충분히 축적되어 분석되기 시작한 1970년대 이래로 20일에서 100일 사이의 계절 내 주기를 가지는 여러 모드들이 열대지역에서 발견되었으며, 그 대표적인 예로는 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO, Madden and Julian, 1971; 1972)과 북반구 여름철 계절 내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO, Wang and Xie, 1997)이 있다. MJO와 BSISO는 각각 북반구 겨울철과 여름철의 주요 계절 내 모드로, 엘니뇨, 태풍, 몬순 등과 같은 현상들에 영향을 미치며, 원격상관을 통해 중위도 지역의 날씨에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 때문에 그 기작을 이해하여 수치모형의 품위를 향상시키고, 궁극적으로 현상의 예측성을 높이기 위한 노력이 꾸준히 이루어져 왔다. 한편 동아시아 여름 몬순의 강수변동성에도 계절 내 진동 성분이 존재함이 보고 되었으며, 성층권 돌연승온과 같은 극지역 성층권의 계절 내 변동이 중위도에 미치는 영향 또한 조사되었다.

#### 2.1.1 관측

계절 내 진동에 대한 관측기반 연구는 크게 현상의 메커니즘을 이해하기 위한 연구와 계절 내 진동 모드



**Fig. 1.** Time-Latitude cross section of OLR (Colors, Units:  $Wm^{-2}$ ), (a) the barotropic mode of the relative vorticity (Contours, Units:  $s^{-1}$ ), and (b) the baroclinic mode of the relative vorticity (Contours, Units:  $s^{-1}$ ) regressed onto time-series averaged over Indian Ocean ( $75^{\circ}$ - $95^{\circ}$ E). Note that the blue (red) indicates the enhanced (suppressed) convection. Contour's interval is  $0.3 \times 10^{-6}$ , solid line means cyclonic (anti-cyclonic) vorticity in the Northern (Southern) Hemisphere, the gray line means zero. Adapted from Song and Seo (2012).

들이 중위도의 날씨와 기후에 미치는 영향을 분석한 연구로 나눌 수 있다.

메커니즘 연구는 BSISO와 MJO를 중심으로 이루어졌다. Drbohlav and Wang (2003)은 2층의 자유대기와 경계층으로 이루어진, 동서방향으로 대칭인 모형을 이용하여 BSISO의 북진 기작을 조사하였다. 모형 결과에 따르면 BSISO의 상승운동은 평균장의 연직 시어와의 상호작용을 통해 상승운동이 일어나는 지역의 북쪽 자유대기에 순압 발산을 유도하고, 이는 경계층의 수렴을 통해 그 지역에서 대류활동의 발달을 돕는다. Drbohlav and Wang (2003)에서 제안한 기작은 Jiang et al. (2004)에서 재분석 자료와 3차원 모형을 통해 확인되었다. Song and Seo (2012)는 ERA40 재분석 자료에 나타난 BSISO의 구조를 분석하였으며, BSISO가 강하게 발달했을 때 경압와도 보다 순압와도가 더 크게 나타남을 확인하고(Fig. 1) 그 메커니즘을 와도 방정식 분석을 통해 조사하였다. 그들은 순압발산의 남북 경도가 동풍 시어를 가진 평균장에 만들어졌을 때 발생하는 순압 와도 편차를 주 원인으로 제시하였다. 한편, Lee and Seo (2011)은 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용하여 1950~2005년 기간에 나타난 MJO 특성의 장주기 변화를 분석하였으며, 과거에 비해 최근 들어서 더 강한 MJO의 발생 빈도수가 증가함을 보였다. 그 원인으로는 과거부터 지속되고 있는 해수면 온도의 상승을 제시하였다. 최근 Roxy et al. (2019)은 해수면 온도의 상승이 MJO의 진행속도를 인도양과 서태평양에서 다르게 조절하여 과거에 비해

최근 기간에 MJO와 연관된 대류활동이 인도양에 머무르는 시간은 줄어들고 서태평양에 머무르는 시간은 늘어났음을 보였다.

지난 20여년간 대기지와 APJAS에 MJO가 동아시아 및 중위도 날씨에 미치는 영향에 관한 연구가 여럿 보고되었으며, MJO와 연관되어 만들어지는 열대 지역의 적운 활동 및 순환장 아노말리가 어떠한 과정을 통해 중위도 순환장 아노말리를 만들어내지에 중점을 두고 관측 및 재분석 자료가 분석되었다. Moon and Ha (2002, 2003)는 NCEP/NCAR 재분석자료와 NOAA 위성자료를 사용하여 MJO와 관련하여 발생하는 열대 대류활동과 중위도 순환장의 변화를 분석하였다. 두 논문에서는 MJO의 구조가 엘니뇨 해에 동서방향으로 늘어나는 반면 라니냐 해에는 남북방향으로 늘어남을 보였고, MJO가 만들어내는 상층 발산장이 절대와의 이류를 통해 로스비 파를 유도함을 보였다. Kim et al. (2003)은 Cyclo-Stationary EOF 기법을 사용하여 MJO가 1) 경압성 vortex와 평균장의 시어 간의 상호작용으로 만들어지는 순압성 vortex, 2) MJO의 life-cycle에서 만들어지는 Rossby wave source라는 두가지의 다른 메커니즘으로 중위도 순환장에 영향을 미침을 보였다.

한편 MJO가 고위도 변동성에 미치는 영향과 MJO와 고위도 변동성이 함께 중위도 기온에 미치는 영향이 조사되었다. Jeong and Ho (2003)는 MJO가 북극 진동(Arctic Oscillation, AO)에 미치는 영향을 1979~2002년의 기간에 대해 분석하였다. 그들은 30~60일의

주기를 가지는 계절 내 변동성이 AO 지수의 전체 변동성의 14~21%를 설명함을 보이고, MJO와 AO 지수 간의 통계적으로 유의한 상관관계가 24년의 조사기간 동안 13개의 해에서 나타남을 보였다. Lee et al. (2019)은 열역학 에너지 수지를 분석하여 MJO와 AO가 아시아지역의 기온에 미치는 영향을 조사하였다. MJO와 AO는 각각 아시아 남쪽과 북쪽에 상대적으로 더 강한 영향을 미치는 것으로 나타났다. AO가 음의 위상을 가지는 시기에 MJO와 관련한 대류활동이 서태평양에서 발달하고 나서 약 25일 후 남쪽 아시아 지역에 단열 냉각에 의한 강한 온도의 감소가 나타났다.

동아시아 여름 몬순 기간에 나타나는 계절 내 진동과 평균 강수 간의 관계는 주로 강수 자료를 이용하여 분석되었다. Kwon and Jhun (2003a, b)은 CMAP 강수자료를 사용하여 동아시아 여름 몬순과 계절 내 진동 간의 경년변동을 조사하였으며, 계절 내 진동의 강도가 상대적으로 강한 해에 여름 몬순의 강도가 약해짐을 보였다. Chu and Ha (2011)는 자기조직화지도(Self-Organizing Map, SOM) 기법을 이용하여 동아시아 지역의 일별 강수 분포를 9개의 클러스터로 나누어 분석하였다. SOM 기법이 여름철 동아시아 몬순의 계절 내 변동과 관련된 모드들을 추출할 수 있음을 확인하였고, 각 모드들의 계절 내 변동을 보았다.

이 외에 Chaudhari and Oh (2003)은 NCEP-NCAR 재분석 자료 강수를 인도 몬순의 계절 내 변동이라는 측면에서 관측자료와 비교 분석하였고, Mansouri et al. (2021)은 MJO의 예측에 많이 활용되고 있는 Real-time Multivariate MJO (RMM) 지수를 변형하여 서남아시아 지역에 적용하였고 새 지수를 활용해 MJO가 이란지역의 강수에 미치는 영향을 분석하였다. 이들은 새 지수를 활용하였을 때 RMM 지수기반 강수에 측 성능이 향상됨을 보고하였다.

### 2.1.2 모델링

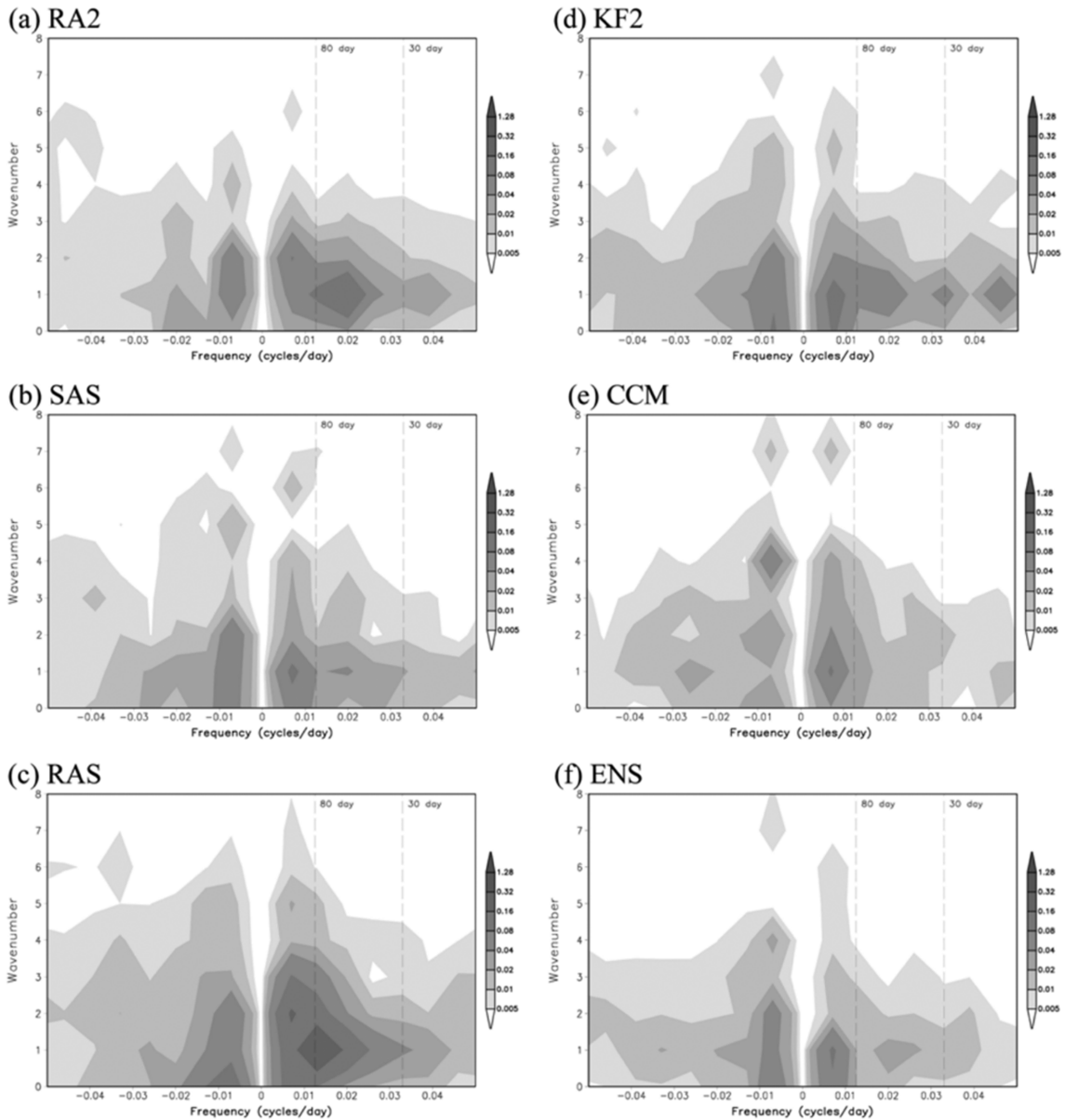
MJO와 BSISO는 아직까지도 많은 전 지구 기후 모형들에서 현실적으로 모의되고 있지 못하며(Ahn et al., 2020), 모형 개발 과정에서 물리 모수화, 특히 적은 모수화가 계절 내 변동 모의 성능에 미치는 영향이 1990년대 후반 이후로 많은 연구자들에 의해 연구되었다(Jiang et al., 2020). 또한 여러 모형들을 이용하여 동일한 경계조건 하에서 적분을 수행하고 그 결과를 상호 비교하는 연구가 지속적으로 이루어져왔다.

Kang et al. (1987)은 GFDL 모형의 15년 적분 결과에 나타난 북반구 여름철 동아시아 지역에서 나타나는 계절 내 변동성을 분석하였으며, 한반도 주변의 강수가 계절 내 시간규모로 변동함을 보였다. 나아가 Kang et al. (1999)은 관측자료 분석을 통해 기후장의 연변화 안에 계절 내 변동의 존재를 보이고 그 특징

을 기술하였다.

전 지구 대기 대순환 및 대기-해양 모형을 이용한 계절 내 변동성 및 그 원격상관에 대한 연구가 지난 20여년간 몇 편의 논문을 통해 대기지와 APJAS에 발표되었다. Lee and Kang (2001)은 서울대학교 대기 대순환 모형에 세가지 다른 적은 모수화 방안을 적용하고 동서방향으로 대칭적인 경계조건을 처방하여 실험을 수행하였다. Moist Convective Adjust 방안을 사용하였을 때 열대 계절 내 변동의 동진하는 경향이 가장 뚜렷하게 나타났으며, Relaxed Arakawa-Schubert 방안에서 흡기율의 하한 값을 주었을 때에도 MJO와 유사한 현상이 모형에서 모의됨을 보였다. 나아가 Lee (2001)는 원래의 Relaxed Arakawa-Schubert 방안을 탑재한 모형의 실험에서 서진하는 성분이 주로 나타나지만, 구름-복사 상호작용을 약하게 하거나 제거할 경우, 동진하는 계절 내 진동 성분이 뚜렷하게 나타남을 보고하였다. Jin et al. (2003)은 같은 모형에 흡기율의 하한 값과, 구름-복사 상호작용을 약하게 만드는 조정을 동시에 적용하고, 대기모형에 혼합층 모형을 접합해 대기-해양 상호작용이 작동하도록 하였을 때 모형의 계절내 변동성 모의 성능이 향상됨을 보였다. Ham and Hong (2013)은 Global/Regional Integrated Model system (GRIMs) 모형에 4가지의 다른 적은 모수화 방안을 적용하여 적은 모수화 방안이 여름철 계절 내 변동 모의에 미치는 영향을 분석하였다. Simplified Arakawa-Schubert 방안과 New Kain-Fritsch 방안을 적용한 결과에서 다른 실험에 비해 우수한 성능이 나타남을 보고하였다(Fig. 2). Moon et al. (2005)는 Moon and Ha (2002, 2003)에서 분석한 관측 결과의 연장선 상에서 ECHAM4 모형 실험을 분석하여 MJO 변동성 및 MJO 원격상관이 엘니뇨와 라니냐 시기에 어떻게 다르게 나타나는지 분석하였다. 모형 결과에서 MJO의 변동성은 관측에서와 비슷한 변화를 보였지만 모형은 태평양-북아메리카 지역으로의 원격상관이 관측에서 라니냐 시기에 더 강해지는 측면을 잡아내지 못했다.

한편, 여러 전 지구 대기 대순환 및 대기-해양 접합 모형들의 품위를 비교하는 연구들이 최근까지 대기지와 APJAS에 발표되었다. Jin and Kang (2001)은 1996년 9월부터 1998년 8월까지 관측 해수면 온도 자료를 10개의 대기 대순환 모형에 처방한 실험자료를 분석하여 모형들의 계절내 변동 모의성능을 평가하였다. 그들의 결과에서 대부분의 모형들은 열대지역 상층 발산장에 나타나는 동진하는 변동성을 관측보다 약하게 모의하였다. Konda and Vissa (2021)는 5번째 Coupled Model Intercomparison Project에 참여한 22개의 모형 결과에 나타나는 BSISO의 대류활동과 대기-해양 상호작용을 조사하였다. 이들은 평균장의 품



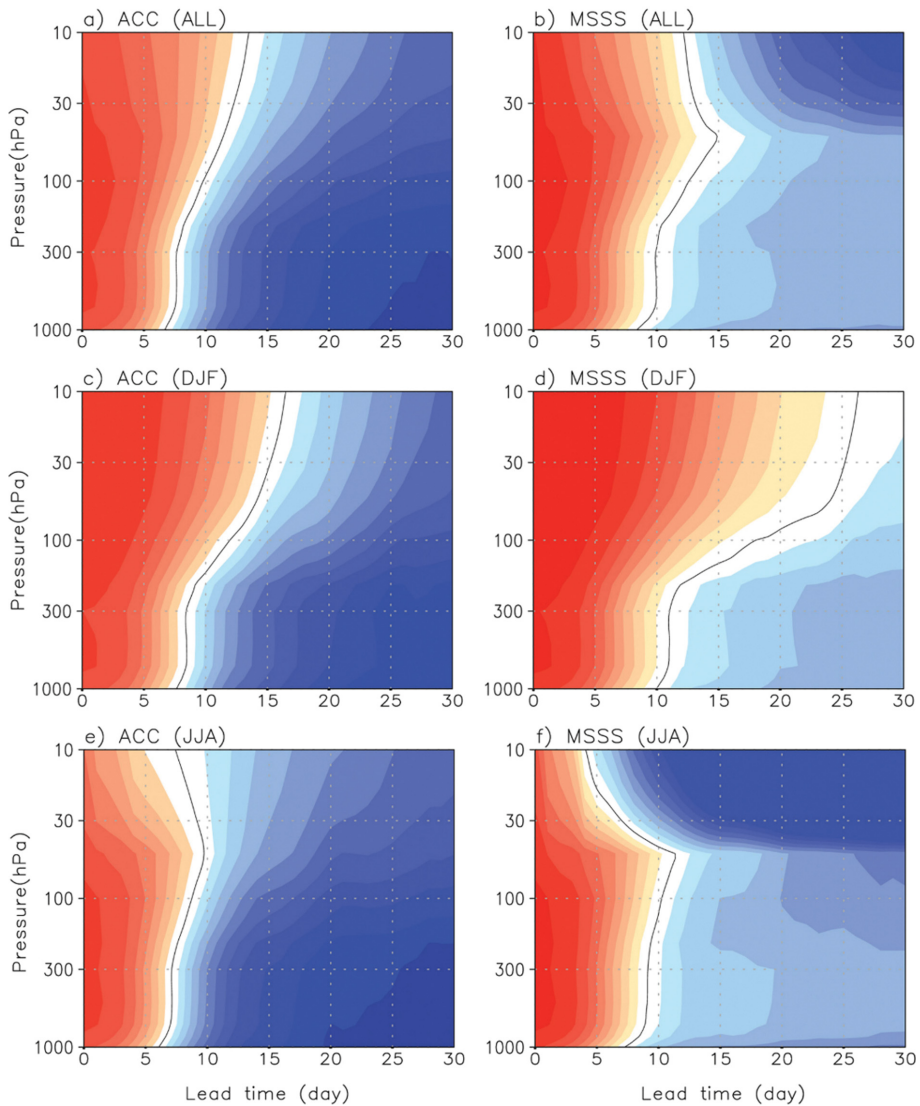
**Fig. 2.** May-September wavenumber-frequency spectra of  $10^{\circ}\text{N}$ - $10^{\circ}\text{S}$  averaged 850-hPa zonal wind ( $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ) for the (a) RA2, (b) SAS, (c) RAS, (d) KF2, (e) CCM, and (f) ENS experiments. Individual May-September spectra were calculated for each year and then averaged over all years of data. Only the climatological seasonal cycle and time mean for each May-September segment were removed before calculation of the spectra. The bandwidth is  $(180 \text{ days})^{-1}$ . Adapted from Ham and Hong (2013).

위와 BSISO 성능에 상관관계가 있음을 보였고, 대부분의 모형들이 BSISO와 관련된 해수면 온도와 잠열 속의 변화를 현실적으로 모의하고 있지 못함을 보였다.

**2.1.3 예측성**

계절 내 변동성의 예측성과 관련해서는 현업에 사

용되는 예측 시스템에서 나타나는 계절 내 변동성의 예측 성능이 조사되었으며, 시계열을 이용하여 강수의 계절 내 변동성을 예측하는 통계적인 기법이 고안되었다. Seo (2004)는 미국 환경 예측청(National Center for Environmental Prediction, NCEP)의 연장 증기 예측자료에 나타나는 계절 내 진동 예측 성능을 평가하



**Fig. 3.** ACC (left) and MSSS (right) of GPH in the NH  $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$  for GloSea5 hindcast experiments initialized in (a-b) all seasons, (c-d) DJF, and (e-f) JJA as a function of lead time and pressure level. Adapted from Kim et al. (2018a).

였다. NCEP모형의 결과에서 예측 초반 7주일 가량 MJO 지수의 상관계수가 0.6 이상이 나타나는 것으로 나타났으며, 동진하는 성분이 강한 북반구 겨울보다는 북반구 여름에 성능이 더 높게 나타남을 보고하였다. 한편 Kim et al. (2018a)는 한국 기상청의 현업 시스템을 이용한 예측결과에 나타나는 북반구 중위도 지위고도의 계절 내 예측성을 평가하였다. 중위도 순환장의 예측성능은 여름보다 겨울에, 대류권보다 성층권에서 더 높게 나타났으며(Fig. 3), 여름철에 나타나는 예측성의 저하는 동서평균장의 오차에 기인함을 보였다. Song et al. (2018)는 같은 자료에서 성층권

돌연 승온의 예측성을 평가하였다. 이들은 현업 예측 시스템에서 성층권 돌연 승온이 약 12~13일 전에 예측 가능함을 보였고, 파수가 1인 성분의 에러가 주요하게 작용함을 보고하였다. 또한 성층권 돌연 승온이 잘 예측이 된 경우에 대류권의 예측성 또한 향상됨을 보였다.

Singh et al. (2002)는 Harmonic 분석과 외삽을 통해 시계열 예측을 수행하는 기법을 제안하고, 그 기법을 이용하여 인도지역 강수의 계절 내 변동성 예측을 수행하였으며, 예측결과와 성능을 평가하였다. 이들이 개발한 기법이 여름철 강수에 대해서는 어느 정



도 성능이 있으나, 겨울철 강수는 예측이 어려운 것으로 나타났다.

**2.2 동아시아 여름 몬순**

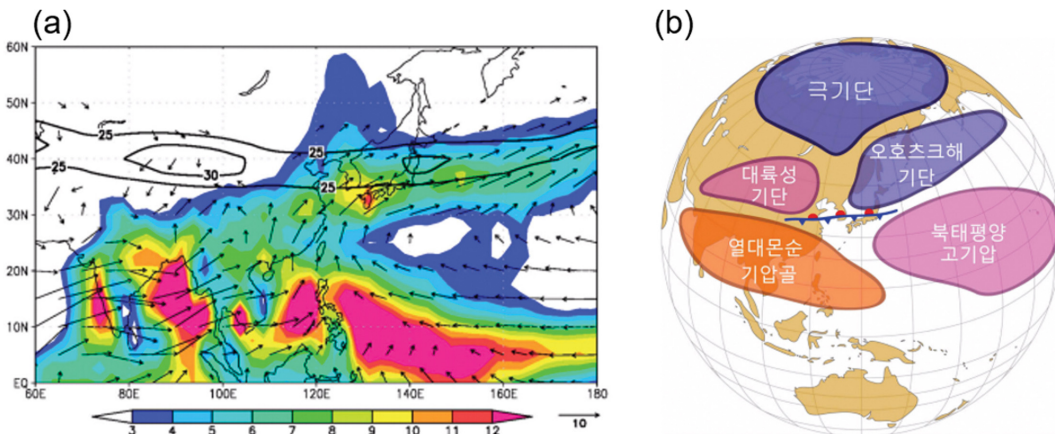
몬순의 과학적인 개념과 그 이해는 17세기 중반 이후부터 시작되었다. 대륙과 해양의 열용량 차이와 지구의 자전에 의한 영향에 의해서 계절에 따라 바람의 방향이 크게 바뀌는 현상인 몬순은 그간 세계 과학계의 연구를 통하여 계절에 따른 강수량의 큰 사이클 현상으로 인식되었다. 물론 전 기후 시스템의 대기-해양-지면 상호작용에 의한 계절적인 기후의 변화로 이해하기도 한다. 특히 우리나라는 장마라는 독특한 여름철 몬순 현상과 북풍이 지배하는 겨울철 몬순 현상에 의해, 여름철은 강수의 변화에 겨울철은 지상기온의 변화에 주목하여 연구가 진행되어 왔다. 이번 절에서는 한반도를 포함하는 동아시아 지역의 여름철 몬순을 주로 하여 그간의 한국기상학회 논문에서 다루어진 연구 결과를 간단히 요약하고자 한다. 특히 기후변화에 따라 한반도의 기상-기후의 변화 또한 뚜렷이 나타나고 있으므로 이에 대한 연구는 현재까지도 여전히 가장 중요한 주제에 해당한다.

**2.2.1 동아시아 여름 몬순의 발생 특징 및 변동성**

한국기상학회의 몬순연구가 시작된 1980년대와 1990년대에는 주로 3차원 자료 및 관측 자료를 통하여 한반도 장마를 중심으로 하여 특정한 한 해 또는 몇몇 해에 대한 사례 연구가 많이 진행되었고 또한 과우장마와 다우장마를 구분하여 분석한 연구도 존재한다. 가령 Park et al. (1986, 1988), Chun and Park (1990), Lee (1991)를 들 수 있는데 이를 통해 장마 시스템의

대체적인 수평 구조가 밝혀졌다. 즉 장마는 북태평양 고기압의 확장에 따라 그 연변을 타고 발달한 하층제트에 의하여 동서로 길게 형성된 띠모양의 정체전선을 따라 남북 폭이 좁은 강수현상으로 이해되었다. 이 하층강풍대는 인도지역에서 동중국해까지 이른 후 북태평양 고기압을 따르는 강풍대와 한반도로 합류하기도 한다(Fig. 4a). 비단열가열 수지 및 수분 수지 분석을 통해서 장마전선상에서는 잠열방출에 의해 열적인 측면에서 열원이 되고 수증기 측면에서 수증기의 소멸에 해당한다. 몬순의 남동쪽 아열대 고기압에서는 복사에 의한 냉각지역이기도 하다(Han and Sohn, 1996). Kim et al. (2017b)은 2016년 7월 1일에서 6일까지 226 mm의 많은 강수는 경압과 형태의 상층 기압골의 전파와 태풍 네파탁에 의해 북태평양 고기압이 북쪽으로 밀리면서 온난습윤한 기류와 북쪽의 찬기단이 부딪히면서 형성된 것으로 분석하였다.

장마는 기후학적으로 일정한 시간대에서 매년 반복적으로 발생하는 계절 내 진동 성분이기도 하다(Kang et al., 1989; Yun et al., 2001). 즉 기후학적 계절내 진동(CISO, climatological intraseasonal oscillation)이라 일컫는다. 6월 15~20일경에 우리나라 남쪽에 위치한 강수 아노말리가 우리나라 쪽으로 북상하고 7월 말경 북한쪽으로 진출한 후 8월 말경 다시 남하하는 구조를 보이고 있는 것이다(Seo et al., 2011; KMA, 2012). 또한 이러한 시간 진행은 상당온위 및 이의 남북 경도 분석을 통해서도 잘 밝혀졌다(Seo et al., 2011; Son and Seo, 2012). 한편 순(10일)별 대규모 강수밴드의 이동을 통하여도 위에서 언급한 6월 하순에서 7월 하순의 기간이 우리나라의 장마시기(또는 1차우기)에 해당함을 보였다(Ha et al., 2003). 동아시아 전체로 보



**Fig. 4.** (a) Climatological mean precipitation (color, mm day<sup>-1</sup>), 200 hPa zonal wind (thick line, m s<sup>-1</sup>) and 850 hPa wind (vector, m s<sup>-1</sup>) during average Changma period (6/21~7/20). (b) Schematic diagram of five air masses influencing Changma (from Seo et al., 2011).

왔을 때 몬순은 시기별 및 공간별로 메이유-바이우, 장마, 포스트-장마, 건조기(대략 서북태평양 몬순 시기를 의미함)의 네 가지 형태를 가지고 있음을 밝혔다(Chu and Ha, 2011).

중위도에 위치한 동아시아에서의 여름몬순 발생 근원은 풍상측에 위치한 티베트 고원의 존재 때문이다(Son et al., 2019). 티베트 고원을 점차적으로 높이는 수치 실험을 통하여 풍상측 고원이 높아질수록 계절 사이클이 빨라져서 몬순 강수 기간이 길게 되는 특징이 규명되었다(Lee et al., 2015). 한편 여름철 강수의 일별 최대는 서해안과 남해안 지역에서는 새벽에 나타나는 해양성 특징을 보이고, 내륙지역에서는 늦은 오후와 새벽 2번의 최대치가 나타나는 대륙성 기후의 특징을 보인다(Jung and Suh, 2005).

장마는 5개의 서로 다른 기단의 대치와 관련 있는데(Seo et al., 2011) (Fig. 4b) 초여름에는 오호츠크해 기단이 발달하는 시기이므로(Lim and Byun, 2000), 남쪽의 북태평양 고기압과 대치하면서 장마가 시작되기도 한다. 티베트 고원의 풍하측에서 기압골이 강화하거나 또는 중국 북부지역에서 발생한 기압골이 동남쪽으로 진행하면 북태평양 고기압 주변 하층제트에 의한 습윤 기류의 이유와 더불어 한기와 난기가 부딪히므로 동서로 뻗은 정체전선이 발달하거나 또는 영역이 좁은 지역에서 집중호우가 발생하기도 한다(Hwang and Park, 2000; Yun et al., 2001).

한편 장마나 동아시아 여름 몬순은 원격상관을 통해 지구 전역으로부터 영향을 받고 있음이 연구되어 왔다. Lee and Kim (1992)은 장마가 필리핀해에서의 대류현상과 연관되는 소위 말하는 일본-태평양(PJ) 또는 동아시아-태평양(EAP) 패턴에 대한 원격상관을 연구하였다. 북서태평양 또는 남중국해, 아라비아 해의 양의 해수면 온도 아노말리에 의해 동아시아 여름 몬순이 강해지기도 한다(Sohn and Han, 1995; Heo et al., 1997; Jang and Jhun, 2004). 참고로 Jang and Yeh (2013)에서는 남중국해는 1990년대 후반 이후 시기에 해양에서 대기로의 잠열 방출을 통해 해양 강제력이 대기 변동성을 유도함을 보였다. 우리나라 장마는 대체로 적도 중태평양의 해수면 온도와 반비례의 관계를 가져(Kim et al., 2017a) 라니냐가 성장하는 여름에 강해지는 경향을 보인다(Ha et al., 2001). 또한 엘니뇨가 겨울을 지나 쇠퇴하는 경우에도 강해지는 특징을 보이기도 한다(Oh, 1996). 가령 엘니뇨가 강했던 1997, 1998년 겨울 후 여름철은 동아시아 몬순은 강하게 나타났다(Yim et al., 2006). 아주 특정한 시기인 7월 15일에서 8월 15일 정도에서만 이러한 서북태평양 고기압(WNPSH)의 서쪽 확장이 뚜렷함을 보인다는 연구도 있다(Yeo et al., 2012). 하지만 이렇게 엘니뇨 쇠퇴 여름은 중국남부와 일본, 한반도 이남 해

상에만 영향을 미치기도 해서 반드시 장마 강수가 증가한다고는 볼 수 없다.

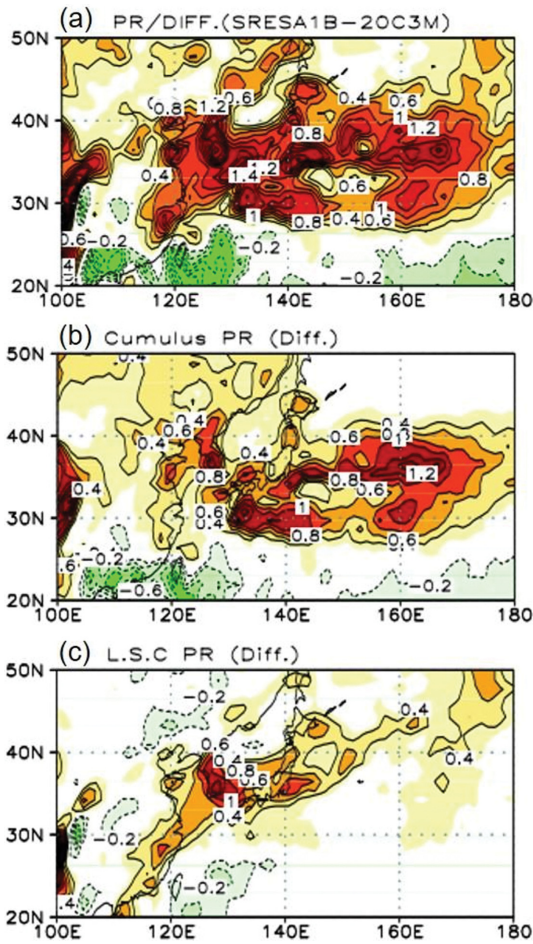
집중호우 시 한반도에 영향을 주는 중규모 및 중관 규모 시스템에 대한 현상학적 분류도 시도되었다(Lee and Kim, 2007; Jo et al., 2020). 고립뇌우, 대류밴드, 구름무리, 스콜선의 네 가지 형태로 그 중 스콜선은 빈도가 낮은 편으로 나머지 세 유형이 93% 이상을 차지한다. 구름무리가 약 47%를 차지하고 대류밴드형 호우계 역시 많이 나타나는 유형으로 27%를 차지한다. 고립뇌우형은 12%의 빈도를 나타내고 있다.

### 2.2.2 동아시아 여름 몬순의 예측 및 미래 변화

봄철 초기자료를 사용한 역할모델에 의한 동아시아 몬순 강수의 예측 스킬은 상관계수 0.2~0.3 정도로 낮은 편이다. 이를 극복하기 위해 통계예측 모델이 개발되었다. 봄철 북대서양, 북태평양, 열대 태평양, 북인도양 등의 해수면 온도, 유라시아 대륙 눈덮임, 북서태평양 지역의 심층대류(Outgoing Longwave Radiation으로 표현) 등은 동아시아 몬순 또는 장마의 주요한 선행인자(Ha et al., 2005; Son and Seo, 2012)로 밝혀졌다. 현재 기상청 계절예보를 위한 전문가 회의에서도 이러한 통계 모델의 결과를 활용하고 있다. 최근에는 쿠로시오 지역 해수면 온도 또한 한반도 강수에 영향을 주는 인자로 파악되기도 하였다(Ham et al., 2019). 한편 기상청의 기후예측시스템인 GloSea6의 GC3.1 버전의 모델은 동아시아지역 WNPSH의 모의에 있어서 보다 향상이 되었고, 우기 시작일도 관측과 비슷하게 개선되어 예측 성능이 초기 1개월에서는 향상된 결과를 보이고 있다(Kim et al., 2021).

대기-해양 결합모델을 사용한 지구온난화에 따른 미래 기후에서의 모사를 통해 동아시아 여름 몬순의 시작 시기가 더 빨라져서 전반적으로 길게 될 것으로 예상하고 있고, 수증기의 증가에 따라 그 강도 또한 세질 것으로 예상하고 있다(Min and Jhun, 2010) (Fig. 5a). CMIP3, CMIP5, CMIP6 참가 모델, 개별모델 또는 1.5°C/2.0°C HAPPI (Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts) 모델의 미래 기후 시나리오에서 모두 장마 지역을 포함한 동아시아 지역에서 21세기 후반에 대체로 15~30%의 강수 증가를 예상했다(Cha et al., 2007; Seo et al., 2013; Kwon et al., 2017; Shim et al., 2019). 특히 Figs. 5b, c에서 보이는 것처럼 대류성 강수량의 증가가 대규모 강수(모델에서 격자에서 내리는 강수)보다 더 크게 증가함을 보여주고 있어 대기 불안정의 역할이 크게 작용할 것으로 전망된다. 전체 아시아 몬순영역은 22.6% 확장될 것으로 예측되었다(Moon and Ha, 2017). NCAR의 WRF 모델을 사용할 경우에도 중국 동남부, 한반도의 남쪽 해역, 일본 규슈까지 강수량이 증가하





**Fig. 5.** The spatial distributions of the East Asian summer monsoon rainfall for (a) the difference of outputs between SRESA1B scenario and 20C3M scenario using the MIROC3.2 (hires). Those for (b) cumulus convection and (c) large-scale condensation (from Min and Jhun 2010).

는 것으로 전망되었다(Jung et al., 2015).

**2.2.3 장마철 첫 강수의 경제적 효과**

최근에 Seo and Choi (2022)는 장마철 첫 강수의 경제적 효과에 대하여 연구하였다. 수자원 확보, 대기질 개선, 산불 예방 효과 및 가뭄 경감 효과의 네 항목에 대해서 그 가치를 추산한 결과 6월 말경에 내리는 장마 첫 강수는 500억에서 1500억 정도의 경제적 효과가 있는 것으로 추산되었다. 이 네 요소 중 대기질 개선 효과가 평균 85%를 차지하며 가장 큰 경제적 효과 요인으로 작용함을 보였다. 참고로 강수 1 mm당 액수로 환산하면 30억에서 110억으로 추산된다.

**2.3 엘니뇨와 열대 해양-대기 상호작용**

**2.3.1 엘니뇨 역학**

엘니뇨의 발달 과정은 열대 태평양의 대기와 해양의 강한 상호작용에 의한 비아크니스 피드백(Bjerknes Feedback)에 의한 것으로 잘 알려져 있지만, 진동역학을 설명하기 위하여 지연진동자 이론(Delayed Oscillator)과 재충전 이론(Recharge Oscillator)이 1980년대 후반과 1990년대 후반에 각각 제안되었다. 이 후에 두 주요 이론들은 대양규모의 해양 적응 현상을 서로 다른 각도로 보고 있음을 동서 평균성분과 에디성분을 나눈 간단화된 엘니뇨 모형을 통해 제시되었다(An and Kang, 2000, 2001). 또한 재충전 이론에서 제시한 적도와 아적도 사이의 질량교환에 있어서 남반구와 북반구 사이에 강한 비대칭성이 존재함이 제시되었다(Kug et al., 2003).

해양과 대기의 강한 상호작용에 의한 비아크니스 피드백에 대한 상세 역학도 심도있게 연구되었다. 열대 태평양의 해수면 온도 방정식을 관측과 모형결과를 이용해서 각 항의 크기를 정량적으로 분석하여, 수온약층 피드백과 동서해류 이류 피드백이 가장 주요한 프로세스 임이 제시되었다(An et al., 1999). 또한, 수온약층 피드백과 동서해류 이류 피드백이 각각 엘니뇨 진동 역학의 특징을 어떤 식으로 조절할 수 있는지에 대한 이론도 제시되었다(Jin and An, 1999; An et al., 1999; An and Jin, 2001). 예를 들면, 수온약층 피드백이 강한 경우 동쪽방향 전파와 장주기 특성이 강화되지만, 동서해류 이류 피드백이 강한 경우 서쪽 방향 전파와, 단주기 특성이 강화됨이 제시되었다.

엘니뇨의 선형 진동 역학 뿐만 아니라 비선형성에 대한 연구도 심도 있게 진행되었다. 엘니뇨와 라니냐의 비대칭성을 설명하기 위하여 해수면 온도 강제력에 대한 적도 대기의 비대칭적 반응이 주요한 원인으로 제시되었다(Kang and Kug, 2002; An and Kim, 2017). 양의 해수면 온도 아노말리에 대한 대기의 반응이 음의 해수면 온도 아노말리에 대한 대기 반응보다 적도 동쪽에 발달하기 때문에 강한 비아크니스 피드백을 만들 수 있다는 것이다. 또한, 해수면 온도 방정식의 비선형 이류항이 비선형역학가열항(Nonlinear dynamical heating)으로 엘니뇨-라니냐 위상에 관계없이 항상 양으로 존재하여 엘니뇨의 크기가 라니냐에 비해 강할 수 있음이 제시되었다(Jin et al., 2003; An and Jin, 2004). 비선형 이류항 중 동태평양 지역의 동서이류항이 엘니뇨/라니냐 발달기에 양의 값으로 존재하여 비대칭을 야기한다는 주장도 제시되었다(Su et al., 2010). Im et al. (2015)은 엘니뇨 피드백 과정을 분석하여 비대칭성의 원인을 정량적으로 분석하였다. 또한, 이러한 비대칭 과정이 수십년 변동에 의해 변

화하고 있음을 제시하였고, 그 지배 메커니즘이 제안되었다(An, 2004; An and Hong, 2015).

엘니뇨와 라니냐는 그 절정기가 대부분 이른 겨울에 발생하여 강한 계절잠김 현상을 갖는 특징이 있다. An and Wang (2001)은 중간단계 열대 태평양 해양-대기 접합 모형을 이용하여 봄철에 발생한 해양의 로스비파가 동태평양에 도달하여 양의 해수면 온도의 성장을 막기 시작하는 초겨울에 엘니뇨의 절정기가 나타남을 제시하였고, 이런 역학적 이해를 통해 모형의 계절잠김 모의 능력을 개선하였다. 이러한 계절잠김 현상은 수십 년 주기로 변해 왔으며, 이는 계절변동의 크기와 관련될 수 있음이 제시되었다(An and Choi, 2009). Ham and Kug (2014)는 다양한 기후모형들의 계절잠김현상 모의를 분석하여, 모형 기후값의 편차(bias)가 어떻게 계절잠김현상 모의에 영향을 주는지 분석되었다.

엘니뇨는 westerly wind burst (WWB)와 같은 단기 대기현상에 의해 발달이 시작되거나, 발달 과정도 영향 받는다. Kug et al. (2008)은 이러한 단기 바람 강제력이 랜덤하게 발생하기 보다는 엘니뇨와 라니냐의 위상에 의해 강하게 연관됨을 발견하였다. 즉, 엘니뇨 시기 장주기 서풍 아노말리가 발달할 때 단주기 바람 강제력이 강한 변동성을 동반하여 엘니뇨의 발달을 강화시키는 역할을 하는데, 이는 하층 서풍과 관련된 동풍방향 연직시어와 수평 바람 경도에 의한 에너지 변화에 의한 것이라고 다양한 모형 결과와 이상화된 실험을 통해 제시되었다(Kug et al., 2009a; Sooraj, 2009a; Kug et al., 2010a).

### 2.3.2 엘니뇨의 다양성

2000년대 후반 들어 엘니뇨의 패턴이 매우 다양하게 존재할 수 있다는 엘니뇨 다양성 연구가 매우 활발하게 진행되었다. 초기에는 동태평양의 해수면 온

도가 강하게 나타나는 전형적인 엘니뇨와 다르게 중태평양의 해수면 온도가 강하게 발달하는 중태평양 엘니뇨에 대한 연구가 집중되었다(Kug et al., 2009b, 2010b). 중태평양 엘니뇨는 동서해류 이류 피드백 및 대기의 열속 피드백이 발달에 주요한 역할을 함이 제시되었다. 또한, 북태평양의 대기 순환 및 북반구 아적도 지역의 해수면 온도가 중태평양 엘니뇨의 발달 과정 및 영향에 중요한 역할을 할 수 있음이 제시되었다(Yeh et al., 2015; Jin et al., 2013). Kim et al. (2011)은 강하게 발달한 중태평양 엘니뇨인 2009/10 엘니뇨의 특징을 분석하였다.

2000년 이후 중태평양 엘니뇨가 과거에 비해 자주 발생하였다. Yeh et al. (2009)는 관측 및 기후모형의 기후변화 실험을 분석하여 지구온난화에 의해 중태평양 엘니뇨가 자주 발생할 수 있음을 제시하여 많은 주목을 받았다. 또한 중태평양 엘니뇨와 동태평양 엘니뇨의 독립성도 지구온난화 시나리오에서 더욱 강화됨이 보고 되었다(Ham et al., 2015). 지구 온난화 뿐만 아니라, 평균장의 변화(Choi et al., 2011), 북대서양의 자오면 순환(Yu et al., 2015)와 같은 다양한 요소와 내부 변동성(Yeh et al., 2011; Kim et al., 2012; Lee et al., 2019)에 의해 두 가지 형태의 엘니뇨 발생 경향은 변할 수 있음이 제시 되었다. Jang et al. (2013)은 기후 모형 내에서도 모형의 물리모수화 방안에 의해 두 가지 형태의 엘니뇨 발생이 조절되며, 이는 기후장의 변화에 기인한다고 제시하였다. 최근에는 단순한 두 가지 형태의 엘니뇨 뿐만 아니라, 좀 더 다양한 패턴을 고려한 엘니뇨 다양성 연구로 이어지고 있다(e.g. Shin et al., 2021). 엘니뇨에 비해 라니냐는 이러한 패턴의 다양성이 약하다고 보고 되었다(Kug et al., 2014). 이와 같은 엘니뇨 다양성에 대한 연구는 Yeh et al. (2014a)에서 리뷰 형태로 정리되었다 (Fig. 6).

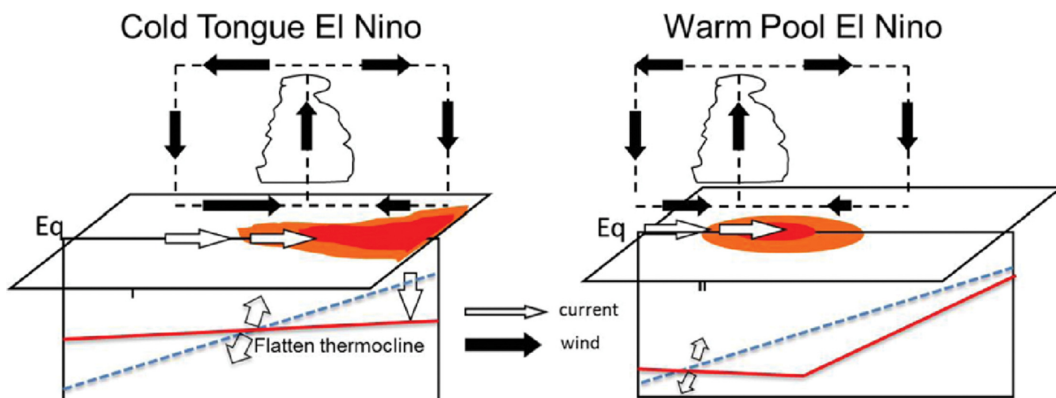


Fig. 6. Schematic diagrams for two types of El Niño (from Yeh et al., 2014).

### 2.3.3 대양간 상호작용

엘니뇨는 열대 태평양에서 발생하는 현상이지만, 다른 대양의 해양 및 대기 변동에 밀접한 영향을 미치고, 영향을 받기도 한다. 특히, 서태평양 온난역과 연결되어 있는 인도양 변동은 엘니뇨 변동성과 연관성이 깊어서, 엘니뇨/라니냐의 예측 가능인자로 사용되고 있다(Kug et al., 2005; Soorja et al., 2009b). Kug and Kang (2006)은 엘니뇨와 인도양이 서로 상호작용하며, 인도양의 해수면 온도 상승이 강한 엘니뇨의 경우 라니냐로의 빠른 위상 전환이 나타남을 제시하였고, 이 가설은 기후 모형 모의에서도 입증되었다(Kug et al., 2006a, b). 대부분의 기후모형은 이러한 인도양 피드백을 모의하고 있으나, 다소 과소 모의하는 경향이 있으며, 모형의 모의 능력은 모형의 기후평균장 모의와 관련 있음이 제시되었다(Kug and Ham, 2012). Ham et al. (2017)은 인도양의 다이폴 모드와 ENSO와의 관련성이 최근 들어 약화되고 있음을 보고하기도 하였다.

인도양 뿐만 아니라 대서양의 해양 변동도 ENSO 변동과 밀접하게 관련 있음이 제안되었다. Ham et al. (2013a)은 열대 북대서양의 해수면 온도가 엘니뇨와 라니냐의 발달에 영향을 주고, 열대 북대서양의 영향을 많이 받은 엘니뇨는 중태평양 엘니뇨로 발달할 가능성이 있음을 최초로 제시하였다. 이러한 특징은 다양한 기후모형에서도 발견되어 관측의 가설을 뒷받침하였다(Ham et al., 2015). 이상화된 모형 실험을 통해 대서양니노(Atlantic Nino)와 열대북대서양 해수면 온도는 서로 다른 메커니즘을 통해 다른 형태의 엘니뇨 발달에 영향을 미침을 제시하였다(Ham et al., 2013b).

중위도 태평양의 대기변동도 엘니뇨 진행에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 기존의 북태평양진동(North Pacific Oscillation)이 엘니뇨의 시작에 영향을 줄 수 있다는 연구에 이어, 이와 관련된 특정 패턴이 엘니뇨 진행에 효율적으로 영향을 미친다는 연구가 제시되었다(Park et al., 2013; Zhao et al., 2020). 또한, 열대수렴대의 위치 및 강도 또한 엘니뇨 진행에 영향을 준다는 연구가 보고되었다(Park et al., 2021). 뿐만 아니라, 북태평양 아열대 고기압(Yun et al., 2015)과 아열대 동태평양의 변동(Yeh et al., 2021; Park et al., 2020)도 엘니뇨 전이에 영향을 준다는 연구도 발표되었다.

### 2.3.4 엘니뇨와 평균장 변동 및 기후변화

엘니뇨의 변동성 및 특성은 배경장에 의해 크게 좌우된다. 열대 지역 계절변동의 크기와 엘니뇨의 변동성 크기가 음의 상관관계가 있다고 알려져 있다(An et al., 2010, 2011; An and Choi, 2013). 1970년대 말

이후 엘니뇨의 특성이 유의미한 변화를 겪었는데, 이는 평균장의 변화로 설명될 수 있음이, 다양한 연구 접근법을 통해 제시되었다(An and Jin 2000; An and Wang 2000; Wang and An, 2001, 2002; An et al., 2006; Lee et al., 2012; An and Bon, 2015). 뿐만 아니라, 다양한 수십 년 주기의 태평양 해양 및 대기의 변동이 엘니뇨의 특성에 영향을 주는 것으로 보고되었다(Yeo et al., 2017a; Kim et al., 2022).

배경장의 변화에 의해 엘니뇨의 특성이 변화되고, 엘니뇨의 특성 변화가 다시 배경장에 영향을 주는 양방향 상호작용이 존재함이 제시되었다(Choi et al., 2009; Choi and An, 2013). Kim et al. (2020)은 엘니뇨-라니냐에 의한 해양의 비선형 이류함에 의한 승온 효과가 축적되어 배경장의 수십 년 주기를 유도할 수 있음이 제시되었다. Choi et al. (2012)은 엘니뇨와 수십 년 주기 변동과의 관련성이 두 가지 형태 엘니뇨의 발생 변화와 밀접하게 관련될 수 있음을 제시하였다.

엘니뇨와 배경장과의 강한 관련성 때문에, 기후변화는 엘니뇨의 특성의 유의미한 변화를 유도한다(An et al., 2008; Yeh et al., 2014b, c; Yun et al., 2019). 특히, Kim et al. (2014)은 엘니뇨 비아크니스 불안정성 지수 분석을 통하여, 기후변화에 따른 엘니뇨 크기의 변화가 선형적이지 않으며, 인도양과 태평양의 온도차이가 중요한 요소로 작용할 수 있음을 제시하였다. 또한 기후변화에 의한 대기의 비선형 반응의 변화가 엘니뇨의 크기 변화에 영향을 줄 수 있음이 보고되었다(Watanabe et al., 2012; Ham et al., 2016). 열대 북대서양의 변동이 극한 엘니뇨 변동에 영향을 줄 수 있음이 또한 제시되었다(Ham et al., 2018).

### 2.3.5 엘니뇨 영향

엘니뇨는 대기 원격상관을 통해 전지구적인 영향을 미치고, 기후변화에 의해 그 패턴은 달라진다(Kim et al., 2014; Zhang et al., 2016; Yeh et al., 2018). 기후요소뿐만 아니라, 지역규모의 오존 및 미세먼지 농도에도 영향을 미치는 것으로 나타났다(Jeong et al., 2018; Wie et al., 2021). 또한, 엘니뇨 다양성은 다양한 기후 요소와 지역기후에 다른 영향을 주는 것으로 나타났다(Song et al., 2011; Yun et al., 2012; Kim et al., 2020). 엘니뇨와 지역기후와의 관련성은 수십년 주기의 변동에 따라 달라지기도 한다(Yoon and Yeh, 2010; Kim et al., 2016; Lee et al., 2018). 엘니뇨의 영향은 미래 기후 변화(Kug et al., 2010c) 및 고기후 기간(An et al., 2017)에 따라 달라지는 것으로 보고되었다.

엘니뇨와 라니냐의 발생은 한반도 기후에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Fig. 7). 엘니뇨 시기 9월 한반도 기온은 감소하고, 강수도 감소하는 경향이 나타

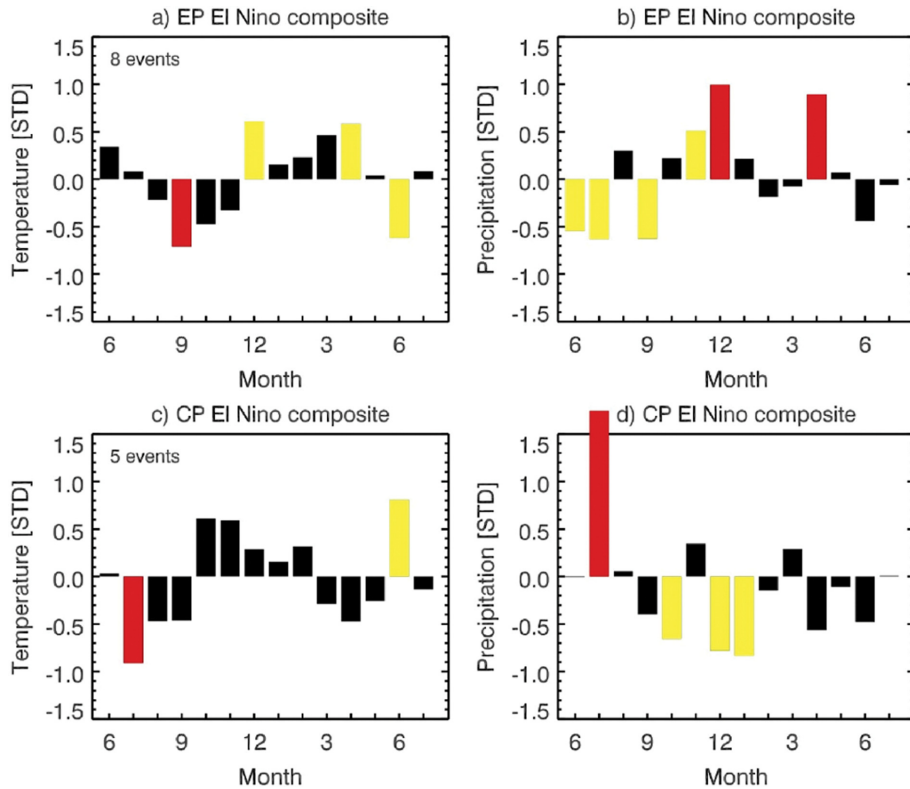


Fig. 7. Korean Temperature (a, c) and precipitation (b, d) associated with two types of El Niño (from Kim et al., 2014).

난다(Son et al., 2016). 이른 겨울에는 서태평양 강수 감소에 의한 쿠로시오 고기압의 영향을 받아 기온과 강수가 증가하지만, 늦은 겨울에는 쿠로시오 고기압이 약해지면서 그 영향이 약해지는 경향이 있다(Son et al., 2014; Kim et al., 2015, 2017, 2018a, b). 엘니뇨가 쇠퇴하는 봄철에는 겨울철 아열대 해수면 온도에 따라 영향이 달라지는 것으로 알려져 있다(Kim and Kug, 2019). 두 가지 형태의 엘니뇨가 한반도 기후에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구도 진행되었다(Kug et al., 2010; Yeo et al., 2017b). 하지만, 두 가지 형태의 엘니뇨의 관측 샘플 개수가 작아서, 통계적 유의성은 두 가지 엘니뇨 정의에 민감한 것으로 나타났다(Kim et al., 2014).

### 2.3.6 엘니뇨 예측

엘니뇨 역학 연구 뿐만 아니라 예측성 개선을 위한 연구도 꾸준히 진행되었다. 엘니뇨 예측을 향상시키기 위한 새로운 인자들이 인도양과 대서양에서 발견되었다(Kug et al., 2005, 2010d; Park et al., 2018). 2000년 대 초반에는 중간단계 복잡성을 가진 대기-해양 모형에 기반한 엘니뇨 예측 모형이 개발되어 기상

청 현업모형으로 사용되었다(Kang and Kug, 2000; Kug et al., 2001, 2005). 이후 대기-해양 결합 대순환모형의 성능이 향상되면서, 이를 이용한 엘니뇨 예측이 연구되었다(Jin et al., 2008; Ham et al., 2012). 뿐만 아니라, 엘니뇨 예측의 최적섭동법을 개발하기 위한 시도도 진행되었다(Kug et al., 2011; Ham et al., 2012).

최근에는 딥러닝을 이용한 엘니뇨 예측 연구가 활발히 진행되고 있다. Ham et al. (2019)은 Convolution Neural Network (CNN) 기법을 이용하여, 기존의 기후모형을 이용한 엘니뇨 예측보다 예측성이 더 향상될 수 있음이 제시되었다. 이 연구가 전세계적으로 많은 주목을 받은 이후, 딥러닝 기법을 이용하여 엘니뇨 예측성을 향상시키고 역학을 이해하려는 연구가 활발히 진행되고 있다(Ham et al., 2021; Kim et al., 2022; Shin et al., 2022).

### 2.4 중위도 해양-대기 장주기 변동

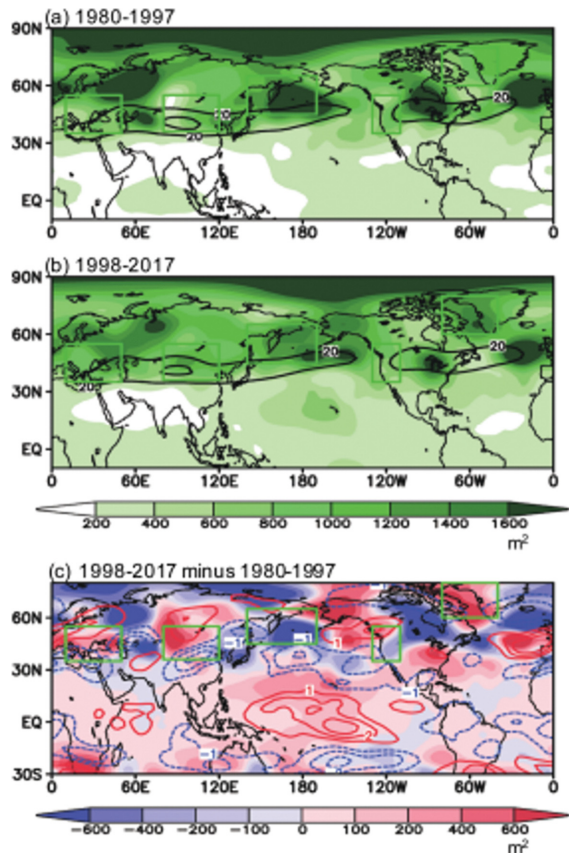
중위도 해양-대기 장주기 변동성은 이 지역의 일기 및 기후 변동성에 다양한 물리 및 역학과정을 통해 직·간접적인 영향을 미치고 있다. 중위도 해양은 열대



해양과 다르게 남북 방향의 온도 경도가 크고 혼합층이 깊으며 해양-대기 상호작용의 결과로 해양 표층 수온의 re-emergency 과정이 존재하는 특성을 가지고 있다. 또한 중위도 해양은 일반적으로 대기 강제력에 대해 반응하는 특징을 가지고 있지만 대기와 상호작용을 통해 중위도 일기와 기후 변동성에 영향을 준다. 특히 중위도에 위치하고 있는 북태평양 및 북대서양 제트의 강도 및 남북방향 위치는 중위도 해양 표층 수온의 구조에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Song et al., 2021). 중위도 지역에는 열대와는 다른 독특한 해양-대기 상호작용의 되먹임들 - 바람-수증기-해수면 온도 되먹임, 에크만 해류 이류 되먹임, 해류-바람의 상호작용 되먹임 그리고 바람-해양 로스비파 되먹임-이 존재하고 있으며 이 지역의 해양-대기 장주기 변동성은 열대-중위도 대기 원격상관성의 특성보다도 밀접한 관련성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 중위도 지역의 해양-대기 변동성이 다양한 물리-역학적 과정을 통해 이 지역의 일기와 기후에 미치는 영향에 대한 연구는 현재까지도 지속되고 있다.

**2.4.1 열대-중위도 원격상관 특성**

북반구 중위도 기후는 열대-중위도 원격상관의 패턴에 따라 달라진다(Ding et al., 2011; Wang et al., 2013; Lee, 2018). 특히 여름철에는 두 개의 고유한 열대-중위도 원격상관 패턴이 알려져 있다(Ding et al., 2011). 첫 번째는 북서태평양-북미(Western Pacific North America; WPNA) 패턴으로 주로 ENSO가 소멸되는 시기에 잘 발현되며 북서태평양 지역 대류 활동 변동성과 큰 연관성이 있다. 특히 북서태평양에서 아시아로 이어지는 파동은 태평양-일본 패턴(Pacific-Japan pattern; PJ pattern)으로 불리기도 한다(Nitta, 1987). 두 번째는 북반구 중위도에서 전체적으로 나타나는 파동 형태로 전 지구 원격상관(circumglobal teleconnection, CGT) 패턴이라 부른다. 일반적으로 ENSO가 시작되는 여름철에 발현되는 경향이 강하며 인도 몬순, 아프리카 몬순, 혹은 인도네시아-적도 서태평양 지역 대류 활동 변동성과 큰 관계가 있다. 최근 연구 결과들은 1970년대 중후반을 기점으로 두 원격상관 패턴의 변동성, 예측성, 영향 등이 통계적으로 유의하게 변화하였음을 보였다(Wang et al., 2012; Lee and Ha, 2015). 특히 Lee (2018)는 1990년대 중후반을 기점으로 북반구 중위도 원격상관 패턴의 변화 특성을 분석하였다. 1980년부터 2017년까지 38년 동안 여름철 북반구 중위도 전역의 지표 기온 및 대류권 지위고도가 통계적으로 유의하게 상승하고 있으며 상승 패턴은 지역적으로 균질하지 않으며, 파수 5의 로스비파 형태로 주요 다섯 지역을 중심으로 순압적 형



**Fig. 8.** Interannual variance (shading) of JJA Z200 for the period of (a) 1980~1997 and (b) 1998~2017, respectively, and (c) its difference between (a) and (b). In (a) and (b), climatological mean of JJA zonal wind at 200 hPa (U200) during each period is superimposed with contour levels of 20 and 30 m s<sup>-1</sup>. In (c), the difference of climatological U200 (contour) between 1980~1997 and 1998~2017 is also shown. The contour interval for U200 is 1 m s<sup>-1</sup>. Green solid boxes in each panel represent the five key regions (from Lee, 2018).

태로 나타남을 보였다(Fig. 8). 특히 한반도 북서쪽에 위치한 몽골 지역과 북동쪽 캄차카 반도의 고기압성 순환 강화가 우리나라 지역 기온상승에 기여한 것으로 판단하였다. 주요 다섯 지역에서 지표 기온과 대류권 지위고도의 상승이 점진적인 추세로 나타나고 있으나 이와 더불어 1990년대 중후반을 기점으로 한 수십 년 주기 장기 변화가 뚜렷이 나타나고 있음을 밝혔다.

**2.4.2 중위도 지면 강제력과 기온 변동성**

열대-중위도 원격 상관성뿐만 아니라 중위도 지역



지면 강제력의 변동 또한 원격 상관성을 통해 중위도 지역 일기 및 기후 변동성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 봄철 북대서양에 형성되는 삼극 표층 수온 패턴은 그 지역에서의 대기-해양 간의 상호작용과 ENSO 쇠퇴기의 적도 동태평양의 표층 수온의 영향과 함께(Wu et al., 2011) 유라시아 대륙을 가로지르는 대기 순환장을 유도하여 동아시아 여름철 기온에 영향을 준다고 알려져 있다(Zuo et al., 2013). 또한 봄철 남반구 극진동은 북인도양 표층 수온의 변화와 그에 따른 대기 순환장의 변화를 통해 중국 북동부 지역을 포함하는 동아시아 지역에 구름을 감소시키고 도달하는 태양 복사열을 증가시켜 기온을 상승시킨다는 연구 결과가 있다(Zheng et al., 2015). 특히 유라시아 지역 봄철 눈덮임은 동아시아 강수 뿐만 아니라 동아시아 기온과도 매우 높은 연관성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Wu et al., 2014).

Won et al. (2017) 등은 유라시아 봄철 눈덮임의 주요 변동성을 경험적 직교 함수 분석을 통해 어떤 메커니즘을 통해 우리나라 여름철 월별 기온 변동성과 상관성을 가지는 지 분석하였다. 그 결과 첫 번째 모드에서는 동서방향으로 동일한 부호가 나타나며, 두 번째 모드에서는 유라시아 동쪽의 중국 대륙에는 상대적으로 양의 편차가, 유라시아 서쪽의 유럽 지역에서는 음의 편차가 나타나는 쌍극 구조가 나타났다. 한편 첫 번째 모드는 한반도 6월 기온과 높은 상관성을 가지는데 북극 진동의 약화로 인해 유라시아 눈덮임이 봄철 동안 지속되고 늦은 봄과 초여름 다량의 눈이 녹아 토양 수분이 증가하며, 이 때 수분의 증발산 작용이 대기 강제력으로 작용하여 한반도 부근에는 고기압성 흐름, 오후흐크해 주변에는 저기압성 흐름을 형성하여 우리나라 6월 기온 상승에 기여하는 것으로 분석되었다. 두 번째 모드는 봄철 북대서양 지역 삼극 패턴의 해수면 온도 강제력과 연관성을 가지고 있는 것으로 추정하였고 이 강제력이 여름철까지 지속되면서 8월 유라시아 패턴의 대기 순환장이 한반도 부근의 고기압성 흐름을 유도하여 기온 상승에 기여하는 것으로 나타났다.

### 2.4.3 중위도 제트

중위도 제트는 대류권계면 근처에서 전 지구를 사행하며 빠른 속도로 동진하는 대상의 좁은 공기 흐름으로, 대류권에서 가장 중요한 현상 중 하나이며, 대류권-성층권 운동량 및 물질 교환에서도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Holton, 2004). 또한 최근 지구온난화와 관련된 제트기류의 시·공간적 변화에 대해 많은 관심이 집중되고 있으며, 제트기류 특성들의 변화 경향은 기후변화의 잠재적 지표로 간주되고 있다(e.g., Pena-Ortiz et al., 2013). 지금까지 중

위도 상층 제트기류의 특성 변화에 대해 재분석 및 고층관측자료들을 이용한 많은 연구들이 수행되었다. So and Suh (2017) 또한 현재 활용 가능한 재분석자료들 중 품질이 우수한 4종의 재분석자료들(CFSR, ERA-Int., JRA-55, MERRA)을 사용하여 아시아-북태평양지역에서 최근 30(1979~2008)년 동안 상층제트의 강도(풍속)와 3차원적 위치(고도, 위도, 경도)의 변화 특성을 분석하였다. 그 결과 재분석자료 및 계절, 지리적 위치에 따라 차이는 있지만, 아시아-북태평양지역에서 상층제트는 겨울철을 제외한 모든 계절에서 풍속은 약화되고(특히 여름철), 고도는 높아지고 있으며(전 계절), 중심 위치는 전 계절에서 북상하며, 여름과 가을에 서쪽으로 이동하는 반면, 유의수준은 낮지만 봄과 겨울에 동쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 또한 아시아 대륙 고위도 지역에서 온난화가 상대적으로 강하게 발생하고 있는 것이 제트기류에서 관측된 의미 있는 변화 경향들의 원인이 될 수 있음을 제시하였다.

또한 Lee et al. (2021)은 정량화된 실험을 바탕으로 극 성층권 평균장에 따른 대류권 순환 반응을 살펴보고 있다. 특히, 역학코어 모형을 활용해 극 성층권 평균장을 한랭 상태에서 온난 상태로 체계적으로 조절함에 따라 중위도 대류권 제트의 반응을 역학적인 관점에서 분석하였다. 그들의 결과에 의하면 극 성층권 기온 증가에 따라 극 소용돌이의 강도는 선형적으로 감소함을 확인하였으며, 대류권 중위도 제트와 아열대 제트의 반응은 냉각 및 가열 실험에 따라 비대칭적임을 확인하였다. 극 성층권이 가열됨에 따라 대류권 중위도 제트는 저위도로 이동하며 강도가 증가하였으나, 냉각에 대해서는 위치와 강도 모두 크게 변하지 않았다. 극 성층권 가열에 따라 중위도 제트는 위치 변화가 강도 변화보다 더 뚜렷하게 나타나 중위도 제트 특성은 성층권-대류권 연직 접합과정에 의해 변조될 수 있다.

## 2.5 극 지역 기후변동 특성에 관한 연구 동향

### 2.5.1 극 지역 기후변동 연구의 발전 현황

기후 연구 분야에서 극지역이 본격적으로 주목받기 시작한 것은 2000년대 이후 북극의 지표 기온이 급상승하기 시작하면서부터였다. 북극의 해빙(Sea-ice)이 녹아 내리는 속도 역시 2000년대 이후 가속화되었으며 그 경향성은 현재까지 이어지고 있다. 학계에서는 전지구 평균 기온 증가 속도에 비해 북극 지역의 기온이 빠르게 상승하는 현상을 북극 증폭(Arctic amplification)이라고 명명하고 있다(Cohen et al., 2014). 최근 연구결과에 따르면 북극의 온도 상승 속도는 전지구 평균 온도 증가 속도의 4배에 달한다(Rantanen et al., 2022).

북극증폭의 원인에 대해서는 많은 연구결과들이 출판되고 있으며, 최근 북극지역에 대한 국내 연구 결과들은 북극 지역의 해빙감소와 중위도에서 북극으로 유입되는 열과 수증기의 증가를 북극 증폭의 주요 원인으로 지목하고 있다(Park et al., 2015a; Park et al., 2015b; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2017a; Kim and Kim, 2017; Kim and Kim, 2019; Kim et al., 2019). 특히 하향 장파복사량의 뚜렷한 증가 경향은 겨울철 지면온도 상승에 핵심적인 역할을 하는 것으로 알려지고 있다(Park et al., 2015; Kim and Kim, 2017; Kim et al., 2019). 해빙감소에 의해 증가된 해양으로부터의 열속 증가와(Kim et al., 2016) 대기순환에 의한 온도이류에 의한 열 유입의 증가는 대류권 하부 온난화를 통해 하향 장파 복사 증가에 기여하고 이러한 변화는 북극 해빙 변동에도 기여하고 있음이 잘 알려져 있다.

한편, 북극 증폭은 극지역과 중위도 지역 사이의 남북 온도 경도를 약화시키고 따라서 중위도 상층의 제트기류의 세기와 연직시어를 약화시켜 중위도 날씨와 극한기상 현상에 영향을 준다고 알려져 있다(Cohen et al., 2014). 특히 그린란드 해, 바렌츠·카라 해, 동시베리아 해와 척치 해의 고온 현상은 인근 중·고위도 지역의 대기 흐름을 정체시키고 블로킹 발생을 증가시킬 수 있음이 최근 연구들에서 밝혀지고 있다(Kug et al., 2015; Kim et al., 2017). 한편, 북극의 온도 상승과 함께 빠르게 줄어든 북극의 해빙면적은 대기가 차가워지는 북극의 겨울철 대기-해양 상호작용을 강화하여 2000년대 이전에 비해 지면에서 대기로 전달되는 에너지 플럭스와 대기에서 지면으로 들어가는 하향 장/단파 복사 모두를 증가시키고 있다(Overland et al., 2011). 이로 인해 과거에 비해 극지역 대류권과 성층권의 대기 변동성이 크게 증가하는 경향이 있다(Kim et al., 2014). 최근 10여 년간은 학계에서 극지역의 기온 변동성 증가와 중위도 지역이 어떻게 연결되는지, 그 영향이 명확한지에 대한 학계에서 많은 논란이 있어 왔으며 이 논란은 현재에도 진행 중이다(Cohen et al., 2020).

국내 연구진들은 최근 10여년간 국제학술지에 주로 북극-중위도 원격상관 분야에서 두각을 나타내고 있다. 북극의 해빙감소가 성층권 폴라볼텍스 약화를 유도할 수 있음을 밝힌 연구(Kim et al., 2014)와 북극의 지역적인 고온 현상이 동아시아와 북미의 한랭 온도 편차를 유도할 수 있음을 밝힌 연구(Kug et al., 2015)를 시작으로 국제 학술지에 다양한 연구들 출판하며 동 분야 국제 학계에서 주도적인 역할을 해오고 있다. 북극 증폭, 강수 등이 인위적 영향(Min et al., 2011), 해빙(Park et al., 2015; Olson et al., 2019), 중위도 스톱, 북극 증폭이 어떻게 제트기류 사행을 유

도하는지에 대한 이론적 연구(Moon et al., 2022), 극지연구소에서는 아라온 호를 활용한 극지역 자료동화 연구를 수행 중에 있으며 스발바드 니알슨 과학기지의 플럭스 타워, 에어로졸·구름 관측 장비 등을 이용한 대기 관측 연구 등이 수행되고 있다.

남극의 경우, 2000년대 중반까지 뚜렷한 기온 증가 경향성을 보이지는 않았으나 2000년대 중반 이후 증가된 경년 변동성과 함께 남극 전체로 볼 때는 오히려 약한 기온 하강 경향이 나타나고 있다(한국 기후 변화 평가보고서, 2020). 한편, 남극 대륙의 대부분의 면적을 차지하는 동남극 지역과 남미와 맞닿아 있는 서남극 지역은 상이한 기온 경향을 보이고 있다. 서남극의 경우, 전반적인 남극대륙의 온도 하강 경향과는 달리 빠른 속도로 지표 기온이 상승하고 있다(Nicolas and Bromwich, 2014). 이러한 동남극과 서남극의 상이한 온도 변동 경향성에 대해 국내 연구진이 관측자료 분석과 수치 실험을 통해 설명한 바 있다(Jun et al., 2020). Kwon et al. (2020)은 서남극 기온 변동이 남극 성층권 폴라볼텍스 변동과 서로 관련이 있음을 밝힌 바 있으며, Kim et al. (2017)은 엘니뇨·라니냐와 남극진동의 관련성에 기반하여 서남극·동남극 기온 편차의 원인을 설명한 바 있다. 국내 연구진들은 특히 극지연구소를 중심으로 남극과 남반구 고위도 지역에서 일어나고 있는 극한 고온 현상, 극한 강풍 현상 등 극단적 기상현상의 원인에 대해 집중적으로 연구하고 있다(Kwon et al., 2021; Bae et al., 2022).

이상, 국제 학계에서 극지역의 기후 변동성에 관한 연구가 어떻게 진행되고 있는지 동향을 요약해 보았고, 다음 섹션에서는 국내에서 출판된 논문들 중 국내 저자가 주저자인 논문들을 중심으로 극지역 기후 변동성에 관한 연구를 정리해 보았다.

## 2.5.2 국내 학술지에 출판된 극지역 기후변동 연구

극지 기후변동성 연구의 경우, 대부분의 연구성과가 국외 국제학술지에 게재되고 있으며 국내학술지에 출판된 논문의 개수는 19편 정도로 조사되었다. 국내 출판된 논문의 분야를 조사해 본 결과 아래와 같은 다섯 주제로 분류할 수 있었다.

1. 극지 기후변동성의 이해(3편)
2. 북극 고온 현상의 원인 규명(2편)
3. 북극-중위도 관련성(5편)
4. 극지역 예측성(3편)
5. 남극 관측/모델링 연구(6편)

괄호 안의 숫자는 지금까지 분야별로 출판된 국내 논문들의 편수이다. 분야별로 연구들의 내용과 현재 극지기후연구의 맥락에서 그 의의를 간략히 소개한다.

### 2.5.2.1 극지 기후변동성의 이해

성층권 돌연승온 현상은 겨울철 극지 성층권에서

발생하는 대표적인 계절 내 변동이다. Song et al. (2015)와 Song et al. (2018)에서는 성층권 돌연승온의 계절 내 예측성과 돌연승온이 동아시아 지표 기온에 미치는 영향에 관해 분석하여 성층권 돌연 승온에 대한 향상된 예측성이 대류권 예측성 향상에도 기여할 수 있음을 확인하였다(자세한 내용은 2.1.2절 참조). Chun and Ryoo (2005)는 성층권 돌연승온 전 후 대류권-성층권 연계에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구를 통해 대류권의 행성파가 성층권 돌연승온을 유발하고 또 성층권 돌연승온 발생 이후 유의미한 대류권 시그널이 나타날 수 있음을 보였다.

Choi and Kim (2010)은 북극지역의 대류권계면 기압의 연변화와 변동성에 대해 조사하였다. 학계에서 대류권계면의 기압을 구하는 방식은 크게 열역학적 방식과 역학적 방식으로 대별된다. 조사 결과 북극 대류권계면의 고도가 4월에 가장 크게 상승하고 있음을 확인하였다. 이는 잠재적으로 오존층 파괴로 인한 성층권 냉각과 대류권 온난화가 복합적으로 작용하고 있음을 확인하였다.

#### 2.5.2.2 북극 고온현상의 원인규명

북극 증폭의 원인을 규명하기 위한 본격적인 연구들이 2010년대부터 많이 출판되기 시작하였지만 이론적 관점에서 북극 증폭의 원인을 조망한 연구는 드물었다. 이들 중 APJAS에 출판된 논문인 Lee (2014)는 대기대순환 관점에서 북극 증폭의 원인을 다루었다는 점에서 그 의의가 크다. Lee (2014)는 라니냐와 유사한 형태의 열대 가열이 중위도 지역의 가용잠재 에너지를 증가시켜 로스비 파의 북향 수송을 증가시킴으로써 북극을 따뜻하게 만들 수 있음을 보였다. 즉, 적도 지역의 대기 순환장 패턴이 극지역의 온도 변화를 직접적으로 초래할 수 있음을 이론적인 연구를 통해 제시하였다.

북극 증폭이 북극 해빙 감소와 같은 북극 내부 조건 변화에 기인하는지 아니면 지구 온난화에 따른 열과 수증기의 극향 수송에 관한 변화에 기인하고 있는지에 대한 많은 논쟁이 이어지고 있다(Serreze and Barry, 2011; Previdi et al., 2021). APJAS에 출판된 Hong et al. (2020)은 이들 가운데에서 북대서양 스톱 트랙을 따라 북극으로 유입되는 스톱이 수송하는 강력한 열과 수증기의 역할에 대해 관측자료와 해양-대기 결합 모델 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 특히 북반구 겨울철 강도가 매우 강한 범주에 속하는 스톱의 경우 북극의 온도를 하루 이들 사이에 급격하게 상승시킬 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 북극으로 유입되는 수증기와 열의 수송이 극한 스톱에 의해 상당부분 이루어지고 있음을 보였다.

#### 2.5.2.3 북극-중위도 관련성

Kim et al. (2014)은 북반구 겨울철 북반구 두 번째

EOF 모드가 2000년대 북극 증폭에 크게 기여하고 있음에 주목하여 이를 바렌츠 진동(Barents Oscillation, BO)이라 명명하였고, 이는 첫 번째 모드인 북극진동과 구별되는 특징을 조사하였다. 이들은 연구를 통해 BO가 북극 해빙 감소와 우랄지역의 블로킹 증가와 일치하고 있음을 확인하여 BO에 대한 더 깊은 이해가 북극 증폭과 중위도 극한 기상 증가의 연관성을 이해하는데 도움이 될 수 있음을 보였다.

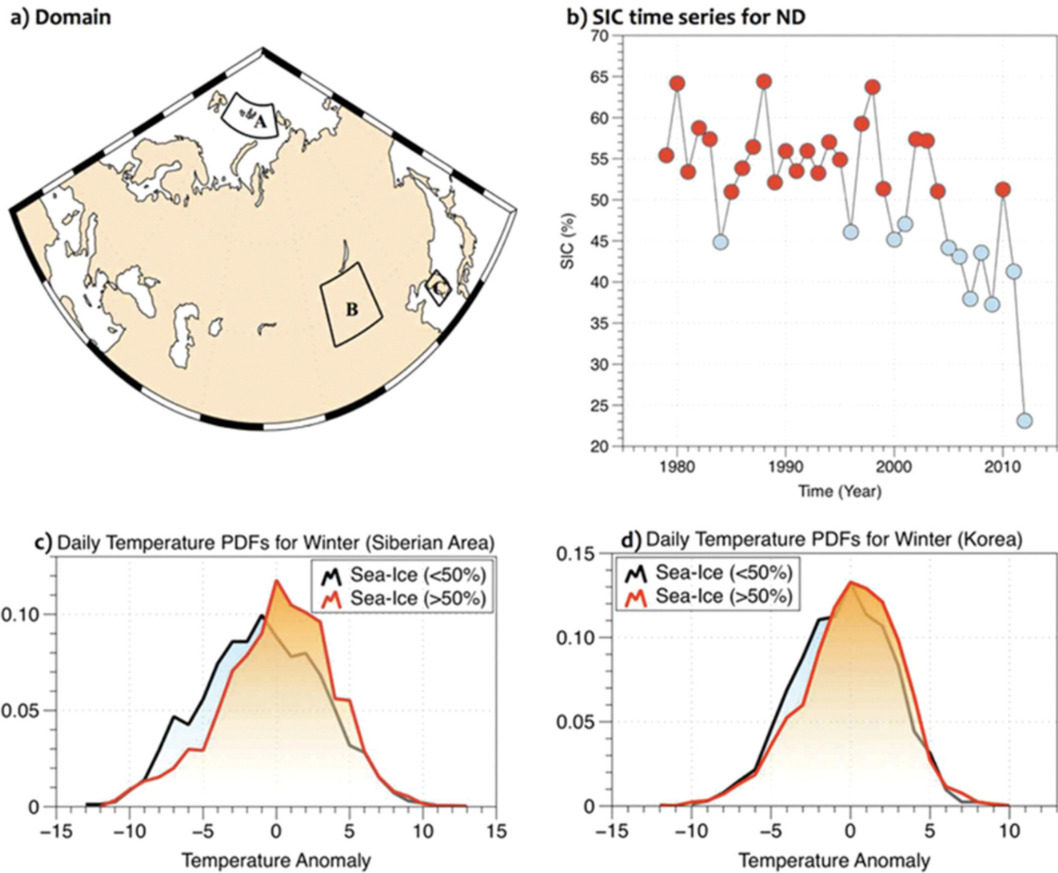
Yook and Choi (2022)는 재분석자료를 이용하여 북극의 해빙 면적과 이듬해 여름철 동아시아 지역과 북서 태평양 지역의 대기온도와 상관성을 조사하여 이들 사이에 유의미한 관련성이 있음을 보였다. 특히 이러한 관계는 북극 해빙이 급격히 감소하기 시작한 2007년부터 두드러지게 관찰되었다.

기상 및 극한 기후의 관측된 변화의 현황을 평가하고 가능한 메커니즘을 논의하기 위해 Min et al. (2015)은 한국과 동아시아 지역에서의 극한 기후 현상 증가 원인에 대한 리뷰 논문을 APJAS에 출간한 바 있다. 이 연구에서 한반도의 경우 전반적으로 더 빈번한 극한 고온 현상과 장기간 온난화 경향이 뚜렷했지만 북극 증폭에 따른 북극 해빙 감소가 겨울철 한랭일 빈도의 유의미한 증가를 보였음을 확인한 바 있다(Fig. 9).

Lee et al. (2018)은 지구 온난화에 따른 북극 영구 동토층의 특징과 생지화학적 변화의 미래 변화를 조사하였다. 생지화학 과정을 사용한 지면 모형을 SRES A2 시나리오에 기반한 대기 강제력을 주고 2005년부터 2099년까지 실행한 결과를 분석하였다. 분석 결과 토양 얼음 감소, 식물 광합성 증가로 인한 대기 중 이산화탄소 증가 및 토양 호흡 증가에 따른 이산화탄소 증가가 관측되었으며 대부분의 북극 지역 토양, 특히 영구 동토층 지역에서 메탄이 방출되었으며 하천 범람 가능성 역시 높아지는 것으로 확인되었다.

#### 2.5.2.4 남극 관측/모델링 연구

국내 연구진이 출판한 남극관련 연구는 남극에 대한 접근성 확보의 어려움으로 인해 그 중요성에도 불구하고 국내 유일의 극지역 전문 출연연구기관인 극지연구소를 통해서만 제한적으로 이루어졌다. Lee et al. (2006)은 남극 세종과학기지가 설립된 1988년 이후 2004년까지 17년간 축적된 데이터를 바탕으로 남극 세종기지에서 측정된 전지구 일조량, 기온, 비습도 및 흐림의 장기적 경향을 조사하였다. 이 기간동안 지표기온의 경향은 연평균 0.03 K의 약한 증가를 보였으며 여름철 한랭화, 겨울철 온난화의 계절별로 상반된 경향성을 확인하였다. 조도와 온도 경향 사이의 정확한 관계는 확인되지 못하였고 같은 기간 비습도 유의한 경향은 발견되지 않았다. 또한, 같은 기간 자료를 활용한 남극 세종과학기지에서의 지표면 에너지 수지가 분석된 바 있다(Kim et al., 2006).



**Fig. 9.** (b) Early winter (Nov~Dec) mean arctic sea-ice concentration averaged over Box A of figure (a). Probability distribution of wintertime (Nov~Mar) daily temperature averaged over (c) Siberian region (Box B of (a)) and (d) Korean Peninsula (Box C of (a)) with years of sea-ice less than 50% (blue) and with years of sea-ice more than 50% (red) (from Min et al., 2015).

북극에 비해 온도 증폭 정도가 약했던 남극은 최근 해빙 최소 면적을 경신하고 지역별로 극한 고온 현상이 나타나는 등 증폭의 경향이 심화되고 있다(Raphael et al., 2022). 특히 최근 발생한 남극반도 seymor 섬의 극한 고온 현상의 경우, 국내연구진이 국제학술지에 그 원인을 추적해 보았는데 블로킹에 의한 남극쪽으로의 온도/습도 이류와 주변 지형에 의한 편 현상이 복합적 원인으로 지목되었다(Bae et al., 2022). 국내 연구진들은 극지연구소를 중심으로 남극에서 발생하고 있는 극단적인 기상현상에 주목하고 있다. Kwon et al. (2016)은 남극 장보고기지 주변 강풍 사례에 대해 중규모 수치모델 실험을 통해 재현해 보았으며 세종과학 기지를 통과한 극 저기압(Polar Low)에 의해 발생한 남극 세종과학기지 강풍 사례에 대해서도 연구하였다. 남극지역의 경우 결국 지구온난화에 따라 북극과 같이 남극 증폭 현상이 뚜렷이 관측될 것으로 예상되고 있고, 관련하여 남극 대륙의 빙상 붕괴와 해

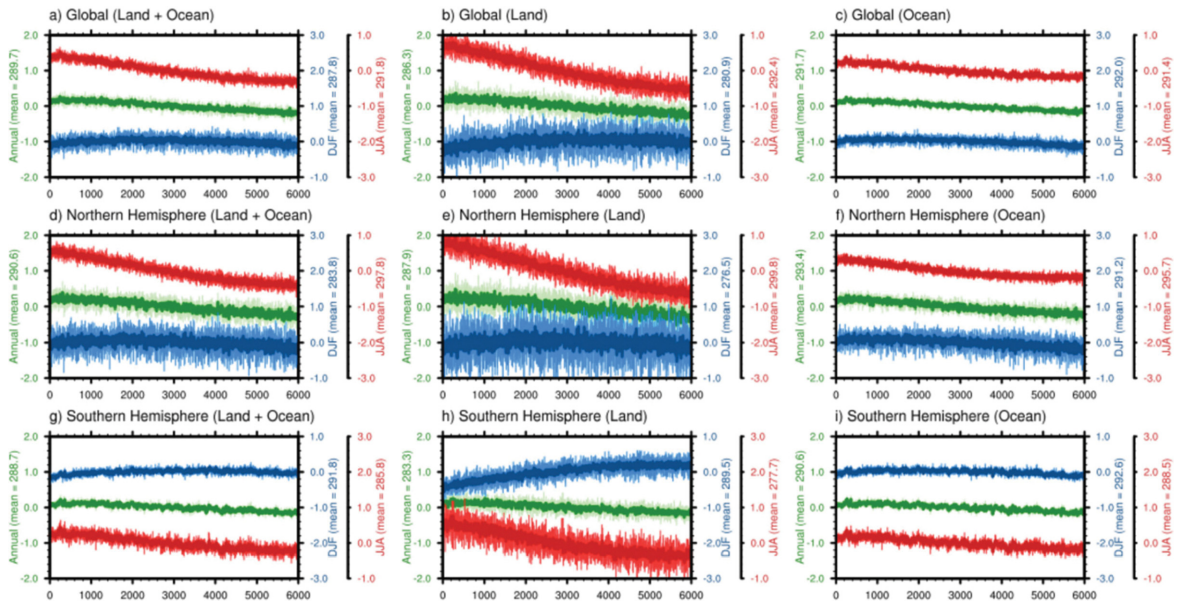
수면 상승 이슈가 국제적으로 주목받을 것으로 기대되어 극지연구소 중심으로 진행되고 있는 동 분야 국내 연구의 저변확대와 학계 활성화가 필요해 보인다.

## 2.6 그 밖의 기후 역학 관련 연구

본 절에서는 앞 절에서 다루지 못한 기후역학 관련 연구를 몇 가지를 소개하고자 한다.

### 2.6.1 고기후 연구

과거 기후 변화를 탐구하는 것은 기후 변화의 원리를 이해하고, 미래의 기후 변화를 예측하는데 크게 도움이 된다. 그럼에도 불구하고 다른 분야에 비해서 고기후 분야는 국내학회에서 활발히 다루어지지 못하고 있다. Shin et al. (2005)에서는 고기후의 관점에서 현재의 기후변화를 재조명하였다. 지난 45만년 동안 지구평균 기온의 변화는 약 8도 범위에서 변화했고, 이때 이산화탄소의 변화는 200~300 ppm 정도의 범위로



**Fig. 10.** Time series of annual (green), boreal winter (December-January-February, blue), and boreal summer (June-July-August, red lines)-mean surface temperature anomalies averaged over (a) the globe, (b) Northern Hemisphere, and (g) Southern Hemisphere from mid-Holocene (6 kyr BP) to present (0 BP) by LOVECLIM transient climate simulation. Area-averaging for the land and ocean is considered separately (shown by middle and right panels). From Jun (2019).

관측되었다(Shin et al., 2005). 한편 산업혁명 이전 280 ppm 정도였던 대기 중 이산화탄소의 농도는 현재 400 ppm을 육박한다. 이는 지난 45만년 동안에 나타난 이산화탄소 농도 보다 훨씬 높은 수준이다. 이에 반해 현재 지구평균 기온은 산업혁명이전과 비교하여 약 1도 정도 증가했다. 이는 현재 증가된 이산화탄소의 영향이 기후 변화에 100% 반영된 것이 아닐 수도 있음을 암시한다. 한편 Yi and Shin (2010)에서는 고기후 관점에서 현재의 기후변화가 해양에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 연구에서는 고기후에 진행되었던 해양의 변화와 현재 온난화로 인한 해수면 온도의 상승, 그리고 빙하의 녹음으로 인한 담수의 유입이 해양의 물순환에 미치는 영향을 연관 지어 설명하고 있으며, 이렇게 느려진 해수의 순환은 해양의 산소농도를 낮추고 있음을 지적했다. 이 같은 현상은 팔레오세-에오세 경계(5,780만 년 전)과 마이오세 중기(1,660만 년 전~1,120만 년 전)에 발생한 저서성 유공충의 급격한 종 조성, 그리고 에오세 초기(5,780만 년 전~5,200만 년 전)와 올리고세 말기(3,000만 년 전~2,370만 년 전)의 낮은 용존산소량, 높은 해수 온도 그리고 느려진 심층순환이 발생한 시기와 연관된다. 그 밖에도 해수의 산성화, 생태계의 괴멸, 몬순의 변화 등 과거 온난기의 발생했던 현상과 현재 진행 중인 변화간의 유사성을 Yi and Shin (2010) 연구에서 지적하고 있다. 고기

후 모의 실험 연구는 한국기상학회 저널에서는 매우 드물게 소개되고 있는데, Jun (2019)는 중간 복잡도를 지닌 지구시스템 모델, LOVECLIM을 이용하여 과거 6천년 동안의 기후 모의를 수행하였다(Fig. 10). 과거 6천년 동안의 기후는 주로 지구공전운동으로 유도된 태양복사 강제력의 변화에 대한 지구 기후 시스템의 반응을 보기 위한 것으로, 18,000년 전 존재했던 거대 빙하가 녹고, 현재와 같은 빙하의 분포를 갖기 시작한 시기부터, 인위적 이산화탄소 증가 전인 산업혁명 이전까지가 이에 해당한다. 이 연구는 이전에 행해졌던 고정된 기후 강제력에 대한 반응 실험(perpetual run)이 아닌, 기후 강제력이 시간에 따라서 변하는 실험(transient run)이라는 점에서 의미가 있다.

### 2.6.2 식생 연구

식생의 변화는 기후에 영향을 미치고, 기후는 식생에 영향을 미치는 피드백 관계가 존재한다. Suh et al. (2005)는 동아시아 지역의 식생지수를 분석하여, 기온의 상승(하강)이 빨리 시작되면 식생의 개엽(낙엽)도 빨라짐을 보였고, 최근의 온난화로 인해 식생의 성장일수 또한 길어짐을 확인하였다. 또한 남한의 경우 식생의 계절변화와 기온과는 높은 상관성(상관계수 0.7 이상)을 보였으나, 몽고와 중국 국경지대의 반사막(semi-desert) 지역, 중국 북서부 및 남서부 일부 지역



의 상관성은 비교적 낮았다(상관계수 0.4 이하). 즉, 식생의 계절변화의 경우, 기온만, 강수만 또는 기온과 강수에 모두에 영향을 받는 지역이 각기 다르게 존재함을 알 수 있었다. Sun et al. (2017) 는 순생태계 생산량 자료를 분석하여, 탄소흡수와 기후의 상관관계를 분석하였다. 예를 들면, 북위 30도 이북 지역, 특히 침엽수림, 열대 사바나, 활엽수림 등의 식생이 위치한 지역에서 탄소 흡수가 나타난 반면, 호주 중북부, 아프리카 북부, 중국 북서부 지역 등 기온과 일사량이 다소 높은 지역에서 탄소 흡수가 낮게 나타났다. 일사량은 모든 위도대에서 탄소 흡수와 양의 상관관계를 보였으나, 저위도에서는 그 상관성에 대체로 약했다. 기온, 강수, 일사량 모두 탄소흡수와 높은 상관성을 보이고 있지만, 특히 열대 지역에서는 강수와의 상관성이 높았다. 대표농도경로(RCP) 시나리오 결과에 따르면 이산화탄소의 증가로 인해 21세기 말까지 지구 연평균 기온과 강수의 증가가 전망되고 있으며, 이에 따라 식물의 생산량과 호흡량의 증가 또한 전망된다(Lee et al., 2014). 특히, 기온 상승과 강수의 증가로 인해 식생 면적이 증가하여, 이산화탄소의 흡수 작용이 강화될 것으로 전망되었다. 미래에는 순생태계교환(Net Ecosystem exchange)에서 흡수는 특히 유라시아와 북미 대륙에서의 증가가 뚜렷해지고, 식생의 성장 기간 또한 길어져서, 식생 지대가 점차 북상할 것으로 전망되었다. 한반도의 경우 기온 및 강수의 증가로 인해, 같은 위도대의 평균치보다 식생에 의한 이산화탄소 흡수량도 증가할 것으로 전망되었다.

### 3. 제 언

지난 반 세기 동안 한국에서의 기후 역학 분야는 양과 질 양면으로 매우 크게 성장하였으며, 그 결과 기후 분야에서는 학문적으로 선진국 대열에 들어섰다고 자평할 수 있을 것 같다. 최초 기후 역학 분야에서의 연구 중심은 한반도의 기후 변동에 관한 것이었다. 즉, 한반도의 기후 특징인 장마, 태풍 등의 변화를 유도하는 여름철 동아시아 몬순과 타 지역으로부터의 원격 영향에 관한 연구가 주였었다. 그러나 시간이 지나면서 기후를 연구하는 한국 학자들의 수도 증가하고, 그 연구의 범위도 넓어지고 다양해졌다. 엘니뇨, 매든-줄리안 진동, 태평양 10년 주기 변동(Pacific Decadal Oscillation) 그리고 대서양 장주기 변동(Atlantic Multi-decadal Oscillation)과 같은 전형적인 해양-대기 기후 현상에 관한 근본 원리를 규명하는 연구에서부터 기후 모델링, 예측 그리고 그 영향에 관한 연구에 이르기까지 매우 다양한 주제의 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 한 지역에 국한 된 것이 아닌 전 지구적 관점에서의 연구, 그리고 빙권, 생권을

포함한 거의 모든 기후 요소에 관한 연구를 수행되고 있다. 아울러 첨단 분야라 할 수 있는 인공지능(AI)를 이용한 연구도 최근에 매우 활발히 진행되어오고 있다. 비록 기후 및 기후역학 분야 연구에 전념하고 있는 한국 연구원 수는 절대적으로 보면 적은 편이지만, 이들로부터 도출되는 연구 성과는 양적으로 또는 질적으로도 매우 높은 수준으로 평가될 수 있을 것이다.

현재 진행되고 있는 지구온난화는 의심할 여지 없이, 인위적으로 유도된 기후 변화이며, 인류가 직면한 가장 중차대한 문제임에 틀림없다. 이에 대한 해결 없이는 인류와 다양한 동식물들의 생존 또한 보장이 어려울 것이다. 이 시점에서 한국의 기후학자들은 현 인류에게 당면한 문제를 보다 과학적으로 정확하게 풀이하고, 그 방어책과 해결책을 제시해야 한다는 사명감으로 연구에 전념해야 하며, 이로서 한국의 기후 학문의 발전을 넘어서, 인류의 끊임없는 발전 및 지구의 위기를 극복하는데 일조하게 될 것이다.

### 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 안순일은 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받았음(NRF-2018R1A5A1024958). 서경환은 과학기술정보통신부의 한국연구재단의 기초연구사업(No. NRF-2020R1A2C2009414)와 기상청의 연구개발사업(KMI2020-01114)의 지원을 받았음. 김대현은 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 「해외우수 과학자유치사업」의 지원을 받았음(NRF-2021H1D3A2 A01039352).

### REFERENCES

- Ahn, M.-S., and Coauthors, 2020: MJO propagation across the maritime continent: are CMIP6 models better than CMIP5 models? *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi: 10.1029/2020GL087250.
- An, S.-I., 2004: Interdecadal changes in the El Niño-La Niña asymmetry, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi: 10.1029/2004GL021699.
- \_\_\_\_\_, and H. Bong, 2015: Inter-decadal change in El Niño-Southern Oscillation examined with Bjerknes stability index analysis. *Clim. Dyn.*, **47**, 967-979, doi: 10.1007/s00382-015-2883-8.
- \_\_\_\_\_, and J. Choi, 2009: Seasonal locking of the ENSO asymmetry and its influence on the seasonal cycle of the tropical eastern Pacific sea surface temperature. *Atmos. Res.*, **94**, 3-9.

- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2013: Inverse relationship between the equatorial eastern Pacific annual-cycle and ENSO amplitudes in a Coupled General Circulation Model. *Clim. Dyn.*, **40**, 663-675, doi: 10.1007/s00382-012-1403-3.
- \_\_\_\_\_, Y.-G. Ham, J.-S. Kug, A. Timmermann, J. Choi, and I.-S. Kang, 2010: The inverse effect of annual mean state and annual cycle changes on ENSO. *J. Climate*, **23**, 1095-1110.
- \_\_\_\_\_, W. W. Hsieh, and F.-F. Jin, 2005: A nonlinear analysis of ENSO cycle and its interdecadal changes. *J. Climate*, **18**, 3229-3239.
- \_\_\_\_\_, S.-H. Im, and S.-Y. Jun, 2018: Changes in ENSO activity during the last 6,000 years modulated by background climate state. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 2497-2475, doi: 10.1002/2017GL076250.
- \_\_\_\_\_, and F.-F. Jin, 2000: An eigen analysis of the interdecadal changes in the structure and frequency of ENSO mode. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1573-1576.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2001: Collective role of thermocline and zonal advective feedbacks in the ENSO mode. *J. Climate*, **14**, 3421-3432.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2004: Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *J. Climate*, **17**, 2399-2412.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2011: Linear solutions for the frequency and amplitude modulation of ENSO by the annual cycle. *Tellus. A.*, **63**, 238-243, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00482.x.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and I.-S. Kang, 1999: The role of zonal advection feedback in phase transition and growth of ENSO in the Cane-Zebiak model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1151-1160.
- \_\_\_\_\_, and I.-S. Kang, 2000: A further investigation of the recharge oscillator paradigm for ENSO using a simple coupled model with the zonal mean and eddy separated. *J. Climate*, **13**, 1987-1993.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2001: Tropical Pacific basin-wide adjustment and oceanic waves. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3975-3978.
- \_\_\_\_\_, H.-J. Kim, W. Park, and B. Schneider, 2017: Impact of ENSO on East Asian winter monsoon during interglacial periods: effect of orbital forcing. *Clim. Dyn.*, **49**, 3209-3219, doi: 10.1007/s00382-016-3506-8.
- \_\_\_\_\_, and J.-W. Kim, 2017: Role of nonlinear ocean dynamic response to wind on the asymmetrical transition of El Niño and La Nina. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 393-400, doi: 10.1002/2016GL071971.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Kug, Y.-G. Ham, and I.-S. Kang, 2008: Successive modulation of ENSO to the future greenhouse warming. *J. Climate*, **21**, 3-21, doi: 10.1175/2007JCLI1500.1.
- \_\_\_\_\_, and B. Wang, 2000: Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency. *J. Climate*, **13**, 2044-2055.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2001: Mechanisms of locking the El Niño and La Nina mature phases to boreal winter. *J. Climate*, **27**, 2164-2176.
- \_\_\_\_\_, Z. Ye, and W. Hsieh, 2006: Changes in the leading ENSO modes associated with the late 1970s climate shift: Role of surface zonal current. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: 10.1029/2006GL026604.
- Bae, H.-J., S.-J. Kim, B.-M. Kim, and H. Kwon, 2022: Causes of the extreme hot event on February 9, 2020, in Seymour Island, Antarctic Peninsula. *Front. Environ. Sci.*, **10**, 1-9, doi: 10.3389/fenvs.2022.865775.
- Cha, Y.-M., H.-S. Lee, J. Moon, W.-T. Kwon, and K.-O. Boo, 2007: Future climate projection over East Asia using ECHO-G/S. *Atmosphere*, **17**, 55-68.
- Chaudhari, H. S., and J. H. Oh, 2003: Validation of intraseasonal and interannual variability of Indian summer monsoon in NCEP/NCAR reanalysis. *Atmosphere*, **13**, 226-227.
- Choi, J., and S.-I. An, 2013: Quantifying the residual effects of ENSO on low-frequency variability in the tropical Pacific. *Int. J. Climatol.*, **33**, doi: 10.1002/joc.3470.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, B. Dewitte, and W.-W. Hsieh, 2009: Interactive feedback between the tropical Pacific decadal oscillation and ENSO in a coupled general circulation model. *J. Climate*, **22**, 6597-6611, doi: 10.1175/2009JCLI2782.1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, J.-S. Kug, and S.-W. Yeh, 2011: The role of mean state on changes in El Niño's flavor. *Clim. Dyn.*, **37**, 1205-1215, doi: 10.1007/s00382-010-0912-1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and S.-W. Yeh, 2012: Decadal amplitude modulation of two types of ENSO and its relationship with the mean state. *Clim. Dyn.*, **38**, 2631-2644, doi: 10.1007/s00382-011-1186-y.
- Choi, W., and H. Kim, 2010: Annual variation and trends of the Arctic tropopause pressure. *Atmosphere*, **20**, 355-366.
- \_\_\_\_\_, and S. Yook, 2022: Relationship between Arctic sea ice in autumn and subsequent July air temperature over East Asia and the Western North Pacific. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 197-205, doi: 10.1007/s13143-021-00249-y.
- Chu, J.-E., and K.-J. Ha, 2011: Classification of intraseasonal oscillation in precipitation using Self-Organiz-

- ing Map for the east Asian summer monsoon. *Atmosphere*, **21**, 221-228, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.3.221.
- Chun, H.-Y., and J.-M. Ryoo, 2005: A case study of dynamical linkage between the troposphere and stratosphere associated with stratospheric major sudden warmings in 1979 and 1984. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 415-430.
- Chun, Y.-S., and S.-U. Park, 1990: Characteristics of the regional circulation over Asia during the dry Changma period in 1982. *J. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 12-24.
- Cohen, J., and Coauthors, 2014: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat. Geosci.*, **7**, 627-637, doi: 10.1038/ngeo2234.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2020: Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nat. Clim. Change*, **10**, 20-29, doi: 10.1038/s41558-019-0662-y.
- Ding, Q., B. Wang, 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.
- Drbohlav, H.-K. L., and B. Wang, 2003: The mechanism of the northward propagating intraseasonal oscillation: insights from a zonally symmetric model. *Atmosphere*, **13**, 68-69.
- Ha, K.-J., S.-K. Park, and K.-Y. Kim, 2003: Interannual variability in summer precipitation around the Korean Peninsula and its associated East Asian summer circulation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 575-586.
- \_\_\_\_\_, Y.-K. Seo, A.-S. Suh, H.-S. Chung, and B.-J. Sohn, 2001: Interaction between the land surface condition and El-Niño associated with the interannual variation of Monsoon rainfall in the East Asia. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 381-398.
- \_\_\_\_\_, K.-S. Yun, J.-G. Jhun, and C.-K. Park, 2005: Definition of onset/retreat and intensity of Changma during the boreal summer monsoon season. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 927-942.
- Ham, S., and S.-Y. Hong, 2013: Sensitivity of simulated intraseasonal oscillation to four convective parameterization schemes in a coupled climate model. *Asia-Pac J. Atmos. Sci.*, **49**, 483-496, doi: 10.1007/s13143-013-0043-9.
- Ham, Y.-G., J.-Y. Choi, and J.-S. Kug, 2017: The weakening of the ENSO-Indian Ocean Dipole (IOD) coupling strength in recent decades. *Clim. Dyn.*, **49**, 249-261, doi: 10.1007/s00382-016-3339-5.
- \_\_\_\_\_, Y. Jeong, and J.-S. Kug, 2015: Changes in interdependency between two types of El Niño events under greenhouse warming scenario in CMIP5 models. *J. Clim.*, **28**, 7561-7575, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00721.1.
- \_\_\_\_\_, I.-S. Kang, D. Kim, and J.-S. Kug, 2012: El Niño Southern Oscillation simulated and predicted in the SNU coupled GCMs. *Clim. Dyn.*, **38**, 2227-2242, doi: 10.1007/s00382-011-1171-5.
- \_\_\_\_\_, J. H. Kim, and J. J. Luo, 2019: Deep learning for multi-year ENSO forecasts. *Nature*, **573**, 568-572, doi: 10.1038/s41586-019-1559-7.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and J. J. Luo, 2021: Recent progress in ENSO forecast using deep learning. *Clivar. Exchanges*, **81**, doi: 10.36071/clivar.81.2021.
- \_\_\_\_\_, and J.-S. Kug, 2014: ENSO phase-locking to the boreal winter in CMIP3 and CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, **43**, 305-318, doi: 10.1007/s00382-014-2064-1.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2015: Role of North Tropical Atlantic SST on the ENSO simulated using CMIP3 and CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, **45**, 3103-3117, doi: 10.1007/s00382-015-2527-z.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2016: ENSO amplitude changes due to greenhouse warming in CMIP5: Role of mean tropical precipitation in the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 422-430, doi: 10.1002/2015GL066864.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and J.-Y. Park, 2013b: Two distinct roles of Atlantic SSTs in ENSO variability: North Tropical Atlantic SST and Atlantic Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1-6, doi: 10.1002/grl.50729.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and F.-F. Jin, 2013a: Sea surface temperature in the North Tropical Atlantic as a trigger for El Niño. *Nat. Geosci.*, **6**, 112-116, doi: 10.1038/NGEO1686.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, W.-H. Yang, and W.-J. Cai, 2018: Future changes in extreme El Niño events modulated by North Tropical Atlantic variability. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 6646-6653, doi: 10.1029/2018GL078085.
- \_\_\_\_\_, H.-Y. Na, and S.-H. Oh, 2019: Role of sea surface temperature over the Kuroshio extension region on heavy rainfall events over the Korean Peninsula. *Asia-Pac J. Atmos. Sci.*, **55**, 19-29, doi: 10.1007/s13143-018-0061-8.
- Han, J.-W., and B.-J. Sohn, 1996: Climate characteristics of the east Asian monsoon related to heat budget. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 619-633.
- Heo, S.-J., K.-J. Ha, and S.-E. Moon, 1997: Characteristic features of the east Asian summer monsoon during 1993 and 1994. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 737-751.
- Holton, J. R., 2004: An Introduction to Dynamic Meteorology, **88**, International Geophysics Series. Elsevier

- Academic Press, 535 pp.
- Hong, J.-Y., B.-M. Kim, E.-H. Baek, H.-J. Kim, X. Zhang, and S.-J. Kim, 2020: A critical role of extreme Atlantic windstorms in Arctic warming. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 17-28, doi: 10.1007/s13143-019-00123-y.
- Hwang, J.-D., and C.-K. Park, 2000: Characteristics of circulation pattern over East Asia associated with heavy rainfall events in Korea during the summer 1999. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 573-582.
- Im, S.-H., S.-I. An, S. T. Kim, and F.-F. Jin. 2015: Feedback processes responsible for El Niño-La Nina amplitude asymmetry. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 5556-5563, doi: 10.1002/2015GL064853.
- Jang, H.-Y., and S.-W. Yeh, 2013: Analysis of atmosphere-ocean interactions over South China Sea and its relationship with northeast Asian precipitation variability during summer. *Atmosphere*, **23**, 283-291, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.3.283.
- Jang, Y.-K., and J.-G. Jhun, 2004: Variation of western North Pacific convection and its influence on East-Asian summer monsoon. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 259-271.
- Jang, Y.-S., D. Kim, Y.-H. Kim, D.-H. Kim, M. Watanabe, F.-F. Jin, and J.-S. Kug, 2013: Simulation of two types of El Niño from different convective parameters. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 193-199, doi: 10.1007/s13143-013-0020-3.
- Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2003: The Madden-Julian Oscillation signal in the Arctic oscillation. *Atmosphere*, **13**, 374-377, doi: 10.3389/feart.2021.787680.
- Jeong, J. I., R. J. Park, and S. W. Yeh, 2018: Dissimilar effects of two El Niño types on PM<sub>2.5</sub> concentrations in East Asia. *Environ. Pollut.*, **242**, 1395-1403, doi: 10.1016/j.envpol.2018.08.031.
- Jiang, X., and Coauthors, 2020: Fifty years of research on the Madden-Julian Oscillation: recent progress, challenges, and perspectives. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, doi: 10.1029/2019JD030911.
- \_\_\_\_\_, T. Li, and B. Wang, 2004: Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation. *J. Clim.*, **17**, 1022-1039, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<1022:SAMOTN>2.0.CO;2.
- Jin, C. S., C. H. Ho, J. H. Kim, D. K. Lee, D. H. Cha, and S. W. Yeh, 2013: Critical role of northern off-equatorial sea surface temperature forcing associated with central Pacific El Niño in more frequent tropical cyclone movements toward East Asia. *J. Climate*, **26**, 2534-2545, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00287.1.
- Jin, E. K., and Coauthors, 2008: Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models. *Clim. Dyn.*, **31**, 647-664, doi: 10.1007/s00382-008-0397-3.
- Jin, F.-F., and S.-I. An, 1999: Thermocline and zonal advection feedbacks within the equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2989-2992.
- \_\_\_\_\_, A. Timmermann, and J. Zhao, 2003: Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1120.
- Jin, K., and I.-S. Kang, 2001: Intercomparison of intraseasonal oscillations in 10 AGCMs during the 1997-98 El Niño. *Atmosphere*, **11**, 373-375.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and M.-I. Lee, 2003: An investigation for the improvement of MJO simulations in SNU GCM. *Atmosphere*, **13**, 218-219.
- Jo, E., C. Park, S.-W. Son, J.-W. Roh, G.-W. Lee, and Y.-H. Lee, 2020: Classification of localized heavy rainfall events in South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 77-88.
- Jun, S.-Y., 2019: Simulation of past 6000-year climate by using the Earth system model of intermediate complexity LOVECLOM. *Atmosphere*, **29**, 87-103, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.1.087.
- \_\_\_\_\_, J.-H. Kim, J. Choi, S.-J. Kim, B.-M. Kim, and S.-I. An, 2020: The internal origin of the west-east asymmetry of Antarctic climate change. *Sci. Adv.*, **6**, doi: 10.1126/sciadv.aaz1490.
- Jung, C.-Y., H.-J. Shin, C. J. Jang, and H.-J. Kim, 2015: Projected change in East Asian summer monsoon by dynamic downscaling: Moisture budget analysis. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 77-89, doi: 10.1007/s13143-015-0061-x.
- Jung, J.-H., and M.-S. Suh, 2005: Characteristics and types of the diurnal variation of hourly precipitation during rainy season over South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 533-546.
- Kang, I.-S., and S.-I. An, 1998: Kelvin and Rossby wave contributions to the SST oscillation of ENSO. *J. Climate*, **11**, 2461-2469.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and F.-F. Jin, 2001: A Systematic Approximation of the SST Anomaly Equation for ENSO. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 1-10.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, C.-H. Jeong, S.-C. Yoon, and S.-M. Lee, 1989: 30-60 day oscillation appearing in climatological variation of outgoing longwave radiation around east Asia during summer. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **25**, 221-232.

- \_\_\_\_\_, C.-H. Ho, Y.-K. Lim, and K.-M. Lau, 1999: Principal modes of climatological seasonal and intraseasonal variations of the Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 322-340, doi: 10.1175/1520-0493(1999)127<0322:PMOCSA>2.0.CO;2.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and S. S. Kim, 1987: Interannual and intraseasonal variations of summer precipitation simulated by a GCM and the influence of tropical Pacific SST on the interannual variability. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **23**, 12-24.
- \_\_\_\_\_, and J.-S. Kug, 2000: An El Niño prediction model with an intermediate ocean and statistical atmosphere system. *Geophys. Res. Letter.*, **27**, 1167-1170.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2002: El Niño and La Nina SST anomalies: asymmetric characteristics associated with their wind stress anomalies. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4372, doi: 10.1029/2001JD000393.
- \_\_\_\_\_, Y.-M. Lee, and S.-I. An, 1995: Interannual variability of Typhoon activity over the western Pacific and El Niño. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **31**, 15-26.
- Kim, B.-M., K.-Y. Kim, and G.-H. Lim, 2003: Evidence of the interaction between intraseasonal oscillation of the midlatitude flow and tropical convection deduced by CSEOF. *Atmosphere*, **13**, 224-225.
- \_\_\_\_\_, H. Choi, S.-J. Kim, and W. Choi, 2017: Amplitude-dependent relationship between the Southern Annular Mode and the El Niño Southern Oscillation in austral summer. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 85-100, doi: 10.1007/s13143-017-0007-6.
- \_\_\_\_\_, J.-Y. Hong, S.-Y. Jun, X. Zhang, H. Kwon, S.-J. Kim, J.-H. Kim, S.-W. Kim, and H.-K. Kim, 2017a: Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016: Critical role of an Atlantic windstorm. *Sci. Rep.*, **7**, 40051, doi: 10.1038/srep40051.
- \_\_\_\_\_, E. Jung, G.-H. Lim, and H. Kim, 2014: Analysis on winter atmospheric variability related to arctic warming. *Atmosphere*, **24**, 131-140, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.2.131.
- \_\_\_\_\_, S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.*, **5**, 4646, doi: 10.1038/ncomms5646.
- Kim, G.-I., and J.-S. Kug, 2020: Tropical Pacific decadal variability induced by nonlinear rectification of El Niño-Southern Oscillation. *J. Climate.*, **33**, 7289-7302, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0123.1.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2022: Process-based analysis of El Niño/Southern Oscillation decadal modulation. *J. Climate*, **35**, 4753-4769, doi: 10.1175/JCLI-D-21-0181.1.
- Kim, H.-K., K.-H. Seo, S.-W. Yeh, N.-Y. Kang, and B.-K. Moon, 2020: Asymmetric impact of Central Pacific ENSO on the reduction of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific since the late 1990s. *Clim. Dyn.*, **54**, 661-673, doi: 10.1007/s00382-019-05020-8.
- Kim, J., H.-K. Cho, Y.-J. Jung, Y.-G. Lee, and B.-Y. Lee, 2006: Surface energy balance at Sejong Station, King George Island, Antarctica. *Atmosphere*, **16**, 111-124.
- \_\_\_\_\_, M. Kwon, S.-D. Kim, J.-S. Kug, J.-G. Ryu, and J. Kim, 2022: Spatiotemporal neural network with attention mechanism for El Niño forecast. *Sci. Rep.*, **12**, 7204, doi: 10.1038/s41598-022-10839-z.
- Kim, J.-S., K. Y. Kim, and S. W. Yeh, 2012: Statistical evidence for the natural variation of the central Pacific El Niño. *J. Geophys. Res.-Oceans.*, **117**, doi: 10.1029/2012JC008003.
- \_\_\_\_\_, and J.-S. Kug, 2019: Role of subtropical SST in El Niño teleconnection to East Asia during the decaying phase. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-016-3473-0.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S.-W. Yeh, H.-K. Kim and E.-H. Park, 2014: Relation between climate variability in Korea and two types of El Niño, and their sensitivity to definition of two types of El Niño. *Atmosphere*, **24**, 89-99, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.1.089.
- Kim, J. W., S.-I. An, S.-Y. Jun, H.-J. Park, and S.-W. Yeh, 2016: ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone. *Clim. Dyn.*, **49**, 1157-1179, doi: 10.1007/s00382-016-3371-5.
- \_\_\_\_\_, S. W. Yeh, and E. C. Chang, 2014: Combined effect of El Niño-Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on the East Asian winter monsoon. *Clim. Dyn.*, **42**, 957-951, doi: 10.1007/s00382-013-1730-z.
- Kim, J.-Y., Y.-K. Hyun, J. Lee, and B.-C. Shin, 2021: Assessment on the East Asian summer monsoon simulation by improved Global Coupled (GC) model. *Atmosphere*, **31**, 563-576, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.563.
- \_\_\_\_\_, K.-H. Seo, J.-H. Son, and K.-J. Ha, 2017a: Development of statistical prediction models for Changma precipitation: An Ensemble Approach. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 207-216, doi: 10.1007/s00382-016-3371-5.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S.-W. Yeh, H.-K. Kim, S.-Y. Yim, H.-S. Lee, M. Kwon, and Y.-G. Ham, 2017b: Analysis of characteristics for 2016 Changma rainfall. *Atmosphere*, **27**, 277-290, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.3.277.



- Kim, K.-Y., B. D. Hamlington, H. Na, and J. Kim, 2016a: Mechanism of seasonal Arctic sea ice evolution and Arctic amplification. *Cryosphere*, **10**, 2191-2202, doi: 10.5194/tc-10-2191-2016.
- \_\_\_\_\_, J.-Y. Kim, J. Kim, S. Yeo, H. Na, B. D. Hamlington, and R. R. Leben, 2019: Vertical feedback mechanism of winter Arctic amplification and sea ice loss. *Sci. Rep.*, 1184, doi: 10.1038/s41598-018-38109-x.
- \_\_\_\_\_, and Y. Kim, 2017: A comparison of sea level projections based on the observed and reconstructed sea level data around the Korean Peninsula. *Climate Change*, **142**, 23-36, doi: 10.1007/s10584-017-1901-8.
- Kim, S., H.-S. Kim, S.-K. Min, H.-Y. Son, D.-J. Won, H.-S. Jung and J.-S. Kug, 2015: Intra-winter atmospheric circulation changes over East Asia associated with ENSO in a seasonal prediction model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 49-60, doi: 10.1007/s13143-014-0059-9.
- Kim, S.-W., H.-Y. Son, and J.-S. Kug, 2017: How well do climate models simulate atmospheric teleconnection over East Asia and the North Pacific associated with ENSO? *Clim. Dyn.*, **48**, 971-985, doi: 10.1007/s00382-016-3121-8.
- \_\_\_\_\_, H. Kim, K. Song, S.-W. Son, Y. Lim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018a: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction skills of GloSea5 model: part 1. geopotential height in the Northern hemisphere Extratropics. *Atmosphere*, **28**, 233-245, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.3.233.
- Kim, S.-T., W. Cai, F.-F. Jin, A. Santoso, L. Wu, E. Guilyardi, and S.-I. An, 2014: Response of El Niño sea surface temperature variability to greenhouse warming. *Nat. Clim. Change*, **4**, doi: 10.1038/nclimate2326.
- Kim, S.-Y., and J.-S. Kug, 2018: What controls ENSO teleconnection to East Asia? role of western North Pacific precipitation in ENSO teleconnection to East Asia. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **123**, 10406-10422, doi: 10.1029/2018JD028935.
- \_\_\_\_\_, H.-Y. Son, and J.-S. Kug, 2018b: Relative roles of equatorial central Pacific and western North Pacific precipitation anomalies in ENSO teleconnection over the North Pacific. *Clim. Dyn.*, **51**, 11-12, doi: 10.1007/s00382-017-3779-6.
- Kim, W. M., S. W. Yeh, J. H. Kim, J. S. Kug, and M. H. Kwon, 2011: The unique 2009–2010 El Niño event: a fast phase transition of warm pool El Niño to La Niña. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi: 10.1029/2011GL048521.
- Kim, Y., H.-R. Kim, Y.-S. Choi, W.-M. Kim, and H.-S. Kim, 2016: Development of statistical seasonal prediction models of Arctic Sea Ice concentration using CERES absorbed solar radiation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 467-477, doi: 10.1007/s13143-016-0031-y.
- KMA, 2012: White Note on Changma 2011, Korea Meteorological Administration, 267 pp (in Korean).
- Konda, G., and N. K. Vissa, 2021: Assessment of ocean-atmosphere interactions for the boreal summer intraseasonal oscillations in CMIP5 models over the Indian Monsoon Region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 717-739, doi: 10.1007/s13143-021-00228-3.
- Kug, J.-S., M.-S. Ahn, M.-K. Sung, S.-W. Yeh, H.-S. Min, and Y.-H. Kim, 2010b: Statistical relationship between two types of El Niño events and climate variation over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 467-474.
- \_\_\_\_\_, S.-I. An, F.-F. Jin, and I.-S. Kang, 2005: Preconditions for El Niño and La Niña onsets and their relation to Indian Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi: 10.1029/2004GL021674.
- \_\_\_\_\_, S.-I. An, Y.-G. Ham, and I.-S. Kang, 2010c: Changes in El Niño and La Niña teleconnections over North Pacific-America in the global warming simulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **100**, 275-282, doi: 10.1007/s00704-009-0183-0.
- \_\_\_\_\_, J. Choi, S.-I. An, F.-F. Jin, and A.-T. Wittenberg, 2010a: Warm pool and cold tongue El Niño events as simulated by the GFDL2.1 coupled GCM. *J. Climate*, **23**, doi: 10.1175/2009JCLI3293.1.
- \_\_\_\_\_, and Y.-G. Ham, 2011: Are there two types of La Niña events? *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi: 10.1029/2011GL048237.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2012: Indian Ocean feedback to the ENSO transition in a multimodel ensemble. *J. Climate*, **25**, 6942-6957, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00078.1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, E.-J. Lee, and I.-S. Kang, 2011: Empirical singular vector method for ensemble El Niño-Southern Oscillation prediction with a coupled general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **116**, doi: 10.1029/2010JC006851.
- \_\_\_\_\_, J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min, and S.-W. Son, 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nat. Geosci.*, **8**, 759-762, doi: 10.1038/ngeo2517.
- \_\_\_\_\_, F.-F. Jin, and S.-I. An, 2009b: Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J. Climate*, **22**, 1499-1515.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, K. P. Sooraj, and I.-S. Kang, 2008:

- State-dependent atmospheric noise associated with ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L05701, doi: 10.1029/2007GL032017.
- \_\_\_\_\_, and I.-S. Kang, 2006: Interactive feedback between the Indian Ocean and ENSO. *J. Climate*, **19**, 1784-1801.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and S.-I. An, 2003: Symmetric and anti-symmetric mass exchanges between the equatorial and off-equatorial Pacific associated with ENSO. *J. Geophys. Res.-Oceans.*, **108**, 3284, doi: 10.1029/2002JC001671.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and S. E. Zebiak, 2001: Impact of the model assimilated wind stress data in the initialization of an intermediate ocean model and the ENSO predictability. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3713-3716, doi: 10.1029/2000GL012793.
- \_\_\_\_\_, B. P. Kirtman, and I.-S. Kang, 2006b: Interactive feedback between the Indian Ocean and ENSO in an interactive coupled model. *J. Climate*, **19**, 6371-6381.
- \_\_\_\_\_, T. Li, S.-I. An, I.-S. Kang, J.-J. Luo, S. Masson, and T. Yamagata, 2006a: Role of the ENSO-Indian Ocean coupling on ENSO variability in a coupled GCM. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: 10.1029/2005GL024916.
- \_\_\_\_\_, K.-P. Sooraj, D. Kim, F.-F. Jin, I.-S. Kang, Y. Takayabu, and M. Kimoto, 2009a: Simulation of state-dependent high-frequency atmospheric noise associated with ENSO in climate models. *Clim. Dyn.*, **32**, 635-648, doi: 10.1007/s00382-008-0434-2.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, T. Li, and F.-F. Jin, 2010d: Precursors of El Niño/La Niña onset and their interrelationship. *J. Geophys. Res.*, **115**, doi: 10.1029/2009JD012861.
- Kwon, H., H. Choi, B.-M. Kim, S.-W. Kim, and S.-J. Kim, 2020: Recent weakening of the southern stratospheric polar vortex and its impact on the surface climate over Antarctica. *Environ. Res. Lett.*, **15**, 3-9, doi: 10.1038/ngeo2517.
- \_\_\_\_\_, S. Kim, S. Kim, and S. Kim, 2021: Topographical effect of the Antarctic Peninsula on a strong wind event. *Antarct. Sci.*, **33**, 674-684, doi: 10.1017/S0954102021000444.
- \_\_\_\_\_, S.-W. Kim, S. Lee, S.-J. Park, T. Choi, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, and B.-M. Kim, 2016: A numerical simulation study of strong wind events at Jangbogo Station, Antarctica. *Atmosphere*, **26**, 617-633, doi: 10.14191/ATMOS.2016.26.4.617.
- \_\_\_\_\_, S.-J. Park, S. Lee, S.-J. Kim, and B.-M. Kim, 2016: A numerical simulation of blizzard caused by polar low at King Sejong Station, Antarctica. *Atmosphere*, **26**, 277-288, doi: 10.14191/ATMOS.2016.26.2.277.
- Kwon, M.-H., and J. Jhun, 2003a: Interannual variability of summer precipitation over East Asia associated with intraseasonal variability in the northwestern Pacific. *Atmosphere*, **13**, 230-231, doi: 10.1029/2021JD034607.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2003b: Impacts of intraseasonal variability in the northwestern Pacific on Interannual variability of summer precipitation over East Asia. *Atmosphere*, **13**, 350-353.
- Kwon, S.-H., K.-O. Boo, S. Shim, and Y.-H. Byun, 2017: Evaluation of the East Asian summer monsoon season simulated in CMIP5 models and the future change. *Atmosphere*, **27**, 133-150, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.2.133.
- Lee, B.-Y., H.-K. Cho, J. Kim, Y.-J. Jung, and Y.-G. Lee, 2006: Recent changes in solar irradiance, air temperature and cloudiness at King Sejong Station, Antarctica. *Atmosphere*, **16**, 333-342.
- Lee, C., K.-O. Boo, J. Hong, H. Seong, K.-H. Seol, J. Lee, and C. Cho, 2014: Future changes in global terrestrial carbon cycle under RCP scenarios. *Atmosphere*, **24**, 303-315, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.3.303.
- Lee, D.-K., 1991: Characteristics of East Asian summer monsoon circulation associated with rainfalls over the Korean Peninsula in 1985. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 205-219.
- \_\_\_\_\_, and Y.-A. Kim, 1992: Variability of East Asian summer monsoon during the period of 1980~1989. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 315-331.
- Lee, H.-J., K.-H. Seo, Q. Wu, S.-S. Lee, and H.-S. Park, 2019: Combined effect of the Madden-Julian Oscillation and Arctic Oscillation on cold temperature over Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 75-89, doi: 10.1007/s13143-018-0091-2.
- Lee, J.-W., S.-W. Son, S.-Y. Kim, and K. Song, 2021: The sensitivity of the extratropical jet to the stratospheric mean state in a dynamic-core general circulation mode. *Atmosphere*, **31**, 171-183, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.2.171.
- \_\_\_\_\_, S.-W. Yeh, and H.-S. Jo, 2016: Weather noise leading to El Niño diversity in an ocean general circulation model. *Clim. Dyn.*, **52**, 7235-7247, doi: 10.1007/s00382-016-3438-3.
- Lee, J.-Y., 2015: 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.
- \_\_\_\_\_, 2018: Interdecadal changes in the boreal tropical-extratropical teleconnections occurred around mid-to-

- late 1990s. *Atmosphere*, **28**, 325-336, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.3.325.
- \_\_\_\_\_, and K.-J. Ha, 2015: Understanding of interdecadal changes in variability and predictability of the Northern Hemisphere summer tropical-extratropical teleconnection. *J. Climate*, **28**, 8634-8647, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0154.1.
- \_\_\_\_\_, M.-H. Cho, Y. Koh, B.-M. Kim, and J.-H. Jeong, 2018: Projection of circum-Arctic features under climate change. *Atmosphere*, **28**, 393-402, doi: 10.14191/Atmos.2018.28.4.393.
- \_\_\_\_\_, B. Wang, K.-H. Seo, K.-J. Ha, A. Kitoh, and J. Liu, 2015: Effects of mountain uplift on global monsoon precipitation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 275-290, doi: 10.1007/s13143-015-0077-2.
- Lee, M.-I., 2001: Influence of cloud-radiation interaction in AGCM simulations of tropical intraseasonal oscillation. *Atmosphere*, **11**, 13-16.
- \_\_\_\_\_, and I.-S. Kang, 2001: Impacts of cumulus parameterization in AGCM simulations of tropical ISO. *Atmosphere*, **11**, 389-392.
- Lee, S., 2014: A theory for polar amplification from a general circulation perspective. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 31-43, doi: 10.1007/s13143-014-0024-7.
- Lee, S.-H., and K.-H. Seo, 2011: A multi-scale analysis of the interdecadal change in the Madden-Julian Oscillation. *Atmosphere*, **21**, 143-149, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.2.143.
- Lee, S. K., H. Lopez, E. S. Chung, P. DiNezio, S. W. Yeh, and A. T. Wittenberg, 2018: On the fragile relationship between El Niño and California rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 907-915, doi: 10.1002/2017GL076197.
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean Peninsula and their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 367-396.
- Lee, Y. K., S. W. Yeh, B. Dewitte, B. K. Moon, and J. G. Jhun, 2012: The influences of interannual stratification variability and wind stress forcing on ENSO before and after the 1976 climate shift. *Theor. Appl. Climatol.*, **107**, 623-631, doi: 10.1007/s00704-011-0514-9.
- Lim, J.-H., and H.-R. Byun, 2000: Characteristics of the development of the Okhotsk High and Its relation to the atmospheric circulation over East Asia. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 507-518.
- Madden, R. A., and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708, doi: 10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123, doi: 10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2.
- Mansouri, S., M. Masnadi-Shirazi, S. Golbahar-Haghighi, and M. J. Nazemosadat, 2021: An analogy toward the real-time multivariate MJO index to improve the estimation of the impacts of the MJO on the precipitation variability over Iran in the boreal cold months. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 207-222, doi: 10.1007/s13143-020-00188-0.
- Min, H.-J., and J.-G. Jhun, 2010: The Change in the East Asian summer monsoon simulated by the MIROC3.2 high-resolution coupled model under global warming scenarios. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 73-88, doi: 10.1007/s13143-010-0008-1.
- Min, S. K., and Coauthors, 2015: Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: a review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 103-121, doi: 10.1007/s13143-015-0066-5.
- \_\_\_\_\_, X. Zhang, F. W. Zwiers, and G. C. Hegerl, 2011: Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, **470**, 378-381, doi: 10.1038/nature09763.
- Moon, J.-Y., and K.-J. Ha, 2002: Coherent life cycle of intraseasonal tropical convection and extratropical circulation during El Niño and La Niña years: Diagnostic study. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **38**, 547-563.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2003: The coherent life cycle of intraseasonal tropical and extratropical circulation during ENSO. *Atmosphere*, **13**, 396-397.
- \_\_\_\_\_, B. Wang, and K.-J. Ha, 2005: Coherent life cycle of intraseasonal tropical convection and extratropical circulation during El Niño and La Niña years. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 201-216.
- Moon, S., 1981: A classification of flow patterns of summer monsoon at 850mb level in east Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **17**, 22-27, doi: 10.1007/s13143-017-0024-5.
- \_\_\_\_\_, and K.-J. Ha, 2017: Temperature and precipitation in the context of the annual cycle over Asia: model evaluation and future change. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 229-242, doi: 10.1007/s13143-017-0024-5.
- Moon, W., B.-M. Kim, G.-H. Yang, and J. S. Wettlaufer, 2022: Wavier jet streams driven by zonally asymmetric surface thermal forcing. *P. Natl. Acad. Sci.*, **119**, doi: 10.1073/pnas.2200890119.
- Nicolas, J. P., and D. H. Bromwich, 2014: New reconstruction of Antarctic near-surface temperatures: multidecadal trends and reliability of global reanalysis.

- J. Climate*, **27**, 8070-8093, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00733.1.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **65**, 373-390, doi: 10.2151/jmsj1965.65.3\_373.
- Oh, J.-H., 1996: Study of the Asian summer monsoon for the El Niño event of 1987 and the La Niña event of 1988 with the METRI/YONU GCM. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 111-129.
- \_\_\_\_\_, S. Woo, and S.-I. Yang, 2017: Ship accessibility predictions for the Arctic Ocean based on IPCC CO2 emission scenarios. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 43-50, doi: 10.1007/s13143-017-0003-x.
- Olson, R., S.-I. An, Y. Fan, W. Chang, J. P. Evans, and J.-Y. Lee, 2019: A novel method to test non-exclusive hypotheses applied to Arctic ice projections from dependent models. *Nat. Commun.*, **10**, 3016, doi: 10.1038/s41467-019-10561-x.
- Overland, J. E., K. R. Wood, and M. Wang, 2011: Warm Arctic—cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea. *Polar. Res.*, **30**, 15787, doi: 10.3402/polar.v30i0.15787.
- Park, D.-S., S. Lee, and S. B. Feldstein, 2015a: Attribution of the recent winter sea ice decline over the Atlantic sector of the Arctic Ocean. *J. Climate*, **28**, 4027-4033, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0042.1.
- Park, H., S. Lee, S.-W. Son, S. B. Feldstein, and Y. Kosaka, 2015b: The impact of poleward moisture and sensible heat flux on Arctic winter sea ice variability. *J. Climate*, **28**, 5030-5040, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0074.1.
- Park, J.-H., S.-I. An, J.-S. Kug, Y.-M. Yang, T. Li, and H.-S. Jo, 2020: Mid-latitude leading double-dip La Niña. *J. Int. Climatol.*, **41**, E1353-E1370, doi: 10.1002/joc.6772.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Kug, T. Li, and S.-K. Behera, 2018: Predicting El Niño beyond 1-year lead: effect of the western hemisphere warm pool. *Sci. Rep.*, **8**, 14957, doi: 10.1038/s41598-018-33191-7.
- \_\_\_\_\_, M.-K. Sung, Y.-M. Yang, J. Zhao, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2021: Role of climatological intertropical convergence zone in seasonal footprinting mechanism of El Niño-Southern Oscillation. *J. Climate*, **34**, 5243-5256, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0809.1.
- Park, J., H.-S. Kang, Y.-K. Hyun, and T. Nakazawa, 2018: Predictability of the Arctic Sea ice extent from S2S multi model ensemble. *Atmosphere*, **28**, 15-24, doi: 10.14191/ATMOS.2018.28.1.015.
- Park, S.-J., T.-J. Choi, and S.-J. Kim, 2013: Heat flux variations over sea ice observed at the coastal area of the Sejong Station, Antarctica. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 443-450, doi: 10.1007/s13143-013-0040-z.
- Park, S.-U., H.-J. Ahn, and Y.-S. Chun, 1988: Evolutionary features of the large-scale circulation over East Asia during the Changma period of 1985. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 22-43.
- \_\_\_\_\_, I.-H. Yoon, and S. K. Chung, 1986: Heat and moisture sources associated with the Changma front during the summer of 1978. *J. Korean Meteor. Soc.*, **22**, 1-27.
- Park, J. Y., S. W. Yeh, J. S. Kug, and J. Yoon, 2013: Favorable connections between seasonal footprinting mechanism and El Niño. *Clim. Dyn.*, **40**, 1167-1181, doi: 10.1007/s00382-012-1477-y.
- Pena-Ortiz, C., D. Gallego, P. Ribera, P. Ordóñez, and M. D. C. Alvarez-Castro, 2013: Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **118**, 2702-2713, doi: 10.1002/jgrd.50305.
- Previdi, M., K. L. Smith, and L. M. Polvani, 2021: Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environ. Res. Lett.*, **16**, 093003, doi: 10.1088/1748-9326/ac1c29.
- Rantanen, M., A. Y. Karpechko, A. Lipponen, K. Nordling, O. Hyvärinen, K. Ruosteenoja, T. Vihma, and A. Laaksonen, 2022: The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth. Environ.*, **168**, doi: 10.1038/s43247-022-00498-3.
- Raphael, M. N., and M. S. Handcock, 2022: A new record minimum for Antarctic Sea ice. *Nat. Rev. Earth. Environ.*, **3**, 215-216, doi: 10.1038/s43017-022-00281-0.
- Roxy, M. K., P. Dasgupta, M. J. McPhaden, T. Suematsu, C. Zhang, and D. Kim, 2019: Twofold expansion of the Indo-Pacific warm pool warps the MJO life cycle. *Nature*, **575**, 647-651, doi: 10.1038/s41586-019-1764-4.
- Seo, K.-H., 2004: Prediction Skill of the Tropical Intraseasonal Oscillation in the NCEP Dynamical Extended Range Forecasts. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 649-663.
- \_\_\_\_\_, and J.-H. Choi, 2022: An economic value for the first precipitation event during Changma period. *Atmosphere*, **32**, 61-70, doi: 10.14191/Atmos.2022.32.1.061.
- \_\_\_\_\_, J. Ok, J.-H. Son, and D.-H. Cha, 2013: Assessing future changes in the East Asian summer monsoon

- using CMIP5 coupled models. *J. Climate*, **26**, 7662-7675, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00694.1.
- \_\_\_\_\_, J.-H. Son, and J.-Y. Lee, 2011: A new look at Changma. *Atmosphere*, **21**, 109-121, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.109.
- Serreze, M. C., and R. G. Barry, 2011: Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis. *Global. Planet. Change*, **77**, 85-96, doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Shim, S., S.-H. Kwon, Y.-J. Lim, S. S. Yum, and Y.-H. Byun, 2019: Understanding climate change over East Asia under stabilized 1.5 and 2.0°C global warming scenarios. *Atmosphere*, **29**, 391-401, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.391.
- Shin, I. C., H.-I. Yi, W.-T. Kwon, and H.-S. Chung, 2005: Current climate change in the view of paleoclimatology. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 229-237.
- Shin, N.-Y., Y.-G. Ham, J.-H. Kim, M.-S. Cho, and J.-S. Kug, 2022: Application of deep learning to understanding ENSO dynamics. *Artif. Intell. Earth. Syst.*, **1**, doi: 10.1175/AIES-D-21-0011.1.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Kug, F. S. McCormack, and N. J. Holbrook, 2021: The double peaked El Niño and its physical processes. *J. Climate*, **34**, 1291-1303, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0402.1.
- Singh, N., S.-K. Baek, and W.-T. Kwon, 2002: Seasonal/subseasonal rainfall prediction through time series modelling and extrapolation using harmonic analysis. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 131-145.
- So, E.-M., and M.-S. Suh, 2017: Trends of upper jet streams characteristics (intensity, altitude, latitude and longitude) over the Asia-North Pacific region based on four reanalysis datasets. *Atmosphere*, **27**, 1-16, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.001.
- Sohn, B.-J., and J.-W. Han, 1995: Some climatological features associated with extremes of East Asian summer monsoon. *J. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 477-488.
- Son, H.-Y., J.-Y. Park, and J.-S. Kug, 2016: Precipitation variability in September over the Korean Peninsula during ENSO developing phase. *Clim. Dyn.*, **46**, 3419-3430, doi: 10.1007/s00382-015-2776-x.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, J. Yoo, and C.-H. Kim, 2014: Winter Precipitation variation over Korean Peninsula associated with ENSO. *Clim. Dyn.*, **42**, 3171-3186, doi: 10.1007/s00382-013-2008-1.
- Son, J.-H., and K.-H. Seo, 2012: Dominant modes of the East Asian summer monsoon using equivalent potential temperature. *Atmosphere*, **22**, 483-488, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.4.483.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and B. Wang, 2019: Dynamical control of the Tibetan Plateau on the East Asian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 7672-7679, doi: 10.1029/2019GL083104.
- Song, E.-J., and K.-H. Seo, 2012: Vertical vorticity structure associated with the boreal summer intraseasonal oscillation: barotropic or baroclinic? *Atmosphere*, **22**, 259-265, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.259.
- \_\_\_\_\_, E. Choi, G. H. Lim, Y. H. Kim, J. S. Kug, and S. W. Yeh, 2011: The central Pacific as the export region of the El Niño-Southern Oscillation Sea surface temperature anomaly to Antarctic Sea ice. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **116**, doi: 10.1029/2011JD015645.
- Song, K., H. Kim, S.-W. Son, S.-W. Kim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) prediction of GloSea5 model: part 2. stratospheric sudden warming. *Atmosphere*, **28**, 123-139, doi: 10.14191/ATMOS.2018.28.2.123.
- \_\_\_\_\_, S.-W. Son, and S.-H. Woo, 2015: Impact of sudden stratospheric warming on the surface air temperature in East Asia. *Atmosphere*, **25**, 461-472, doi: 10.14191/ATMOS.2015.25.3.461.
- Song, S.-Y., S.-W. Yeh, and H.-S. Jo, 2021: Changes in the characteristics of North Pacific Jet as a Conduit for US surface air temperature in boreal winter across the late 1990s. *J. Climate*, **34**, 6841-6853, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0353.1.
- Sooraj, K. P., D. Kim, J.-S. Kug, S.-W. Yeh, F.-F. Jin, and I.-S. Kang, 2009a: Effects of the low frequency zonal wind variation on the high-frequency atmospheric variability over the tropics. *Clim. Dyn.*, **33**, 495-507, doi: 10.1007/s00382-008-0483-6.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Kug, T. Li, and I.-S. Kang, 2009b: Impact of El Niño onset timing on the Indian Ocean - Pacific coupling and subsequent El Niño evolution. *Theor. Appl. Climatol.*, **97**, 17-27, doi: 10.1007/s00704-008-0067-8.
- Su, J., R. Zhang, T. Li, X. Rong, J.-S. Kug, and C.-C. Hong, 2010: Causes of the El Niño and La Niña amplitude asymmetry in the equatorial eastern Pacific. *J. Climate*, **23**, 605-617, doi: 10.1175/2009JCLI2894.1.
- Suh, M.-S., J.-R. Lee, J.-H. Kang, D.-K. Lee, and M.-H. Ahn, 2005: On the relationship between seasonal change of vegetation and climate elements in east Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 557-570.
- Sun, M., C.-H. Cho, Y. Kim, J. Lee, K.-O. Boo, and Y.-H. Byun, 2017: Response of the terrestrial carbon exchange to the climate variability. *Atmosphere*, **27**, 163-175.
- Sung, M.-K., S.-I. An, B.-M. Kim, and J.-S. Kug, 2015:

- Asymmetric impact of Atlantic Multidecadal Oscillation on El Niño and La Niña characteristics. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4998-5004, doi: 10.1002/2015GL064381.
- Wang, B., and S.-I. An, 2001: Why the Properties of El Niño changed During the Late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3421-3432.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2002: A mechanism for decadal changes of ENSO behavior: roles of background wind changes. *Clim. Dyn.*, **18**, 475-486.
- \_\_\_\_\_, J. Liu, H.-J. Kim, P. J. Webster, S.-Y. Yim, and B. Xiang, 2013b: Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/Southern Oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**, 4347-5352, doi: 10.1073/pnas.1219405110.
- \_\_\_\_\_, and X. Xie, 1997: A model for the boreal summer intraseasonal oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 72-86.
- Wang, H., B. Wang, F. Huang, Q. Ding, and J.-Y. Lee, 2012: Interdecadal change of the boreal summer circumglobal teleconnection (1958~2010). *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi: 10.1029/2012GL052371.
- Watanabe, M., J.-S. Kug, F.-F. Jin, M. Collins, M. Ohba, and A. Wittenburg, 2012: Uncertainty in the ENSO amplitude change from the past to the future. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi: 10.1029/2012GL053305.
- Wie, J., B.-K. Moon, S.-W. Yeh, R. J. Park, and B.-G. Kim, 2021: La Niña-related tropospheric column ozone enhancement over East Asia. *Atmos. Environ.*, **261**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118575.
- Won, Y.-J., S.-W. Yeh, B.-Y. Yim, and H.-K. Kim, 2017: Relationship between Korean monthly temperature during summer and Eurasian snow cover during spring. *Atmosphere*, **27**, 55-65, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.055.
- Wu, R., S. Yang, S. Liu, L. Sun, Y. Lian, and Z. Gao, 2011: Northeast China summer temperature and North Atlantic SST. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **116**, doi: 10.1029/2011JD015779.
- Yeh, S.-W., and Coauthors, 2018: ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. *Rev. Geophys.*, **56**, 185-206, doi: 10.1002/2017RG000568.
- \_\_\_\_\_, B. P. Kirtman, J. S. Kug, W. Park, and M. Latif, 2011: Natural variability of the central Pacific El Niño event on multi-centennial timescales. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi: 10.1029/2010GL045886.
- \_\_\_\_\_, H.-S. Jo, S.-H. Hyun, W. Cai, and Y.-G. Ham, 2021: Role of the eastern subtropical North Pacific Ocean on the El Niño's transition processes. *Clim. Dyn.*, **56**, 1285-1301, doi: 10.1007/s00382-020-05530-w.
- \_\_\_\_\_, Y. G. Ham, and B. P. Kirtman, 2014b: A possible explanation on the changes in the spatial structure of ENSO from CMIP3 to CMIP5. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 140-145, doi: 10.1002/2013GL058478.
- \_\_\_\_\_, H. Kim, M. Kwon, and B. Dewitte, 2014c: Changes in the spatial structure of strong and moderate El Niño events under global warming. *Int. J. Climatol.*, **34**, 2834-2840, doi: 10.1002/joc.3876.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Kug, and S.-I. An, 2014a: Recent progress on two types of El Niño: observations, dynamics, and future changes. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 69-81, doi: 10.1007/s13143-014-0028-3.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, **461**, 511-514.
- Yeh, S. W., X. Wang, C. Wang, and B. Dewitte, 2015: On the relationship between the North Pacific climate variability and the Central Pacific El Niño. *J. Climate.*, **28**, 663-677, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00137.1.
- Yeo, S.-R., J.-G. Jhun, and W. Kim, 2012: Intraseasonal variability of western North Pacific subtropical high based on the El Niño Influence and its relationship with East Asian summer monsoon. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 43-53, doi: 10.1007/s13143-012-0005-7.
- \_\_\_\_\_, S.-W. Yeh, Y. Kim, and S.-Y. Yim, 2017b: Monthly climate variation over Korea in relation to the two types of ENSO evolution. *Int. J. Climatol.*, **38**, 811-824, doi: 10.1002/joc.5212.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, K.-Y. Kim, and W. Kim, 2017a: The role of low-frequency variation in the manifestation of warming trend and ENSO amplitude. *Clim. Dyn.*, **49**, 1197-1213, doi: 10.1007/s00382-016-3376-0.
- Yi, H.-I., and I. C. Shin, 2010: Impact of climate change on the ocean environment in the viewpoint of paleoclimatology. *Atmosphere*, **20**, 379-386.
- Yim, S.-Y., J.-G. Jhun, and E.-J. Lee, 2006: The comparison of characteristics between 1982/83 and 1997/98 El Niño events in terms of the East Asian summer monsoon. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 329-338.
- Yoon, J., S.-W. Kim, Y.-H. Kug, J.-S. Min, and H. Min, 2012: Understanding the responses of sea surface temperature to the two different types of El Niño in the Western North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **105**, 81-89, doi: 10.1016/j.pocean.2012.04.007.
- \_\_\_\_\_, and S. W. Yeh, 2010: Influence of the Pacific Decadal Oscillation on the relationship between El Niño and the northeast Asian summer monsoon. *J.*



- Climate*, **23**, 4525-4537, doi: 10.1175/2010JCLI3352.1.
- Yu, J.-Y., P.-K. Kao, H. Paek, H.-H. Hsu, C.-W. Hung, M.-M. Lu, and S.-I. An, 2015: Linking emergence of the Central-Pacific El Niño to the Atlantic multi-decadal oscillation. *J. Climate.*, **28**, 651-662, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00347.1.
- Yun, K. S., K. J. Ha, S. W. Yeh, B. Wang, and B. Xiang, 2015: Critical role of boreal summer North Pacific subtropical highs in ENSO transition. *Clim. Dyn.*, **44**, 1979-1992, doi: 10.1007/s00382-014-2193-6.
- \_\_\_\_\_, S. W. Yeh, and K.-J. Ha, 2019: Underlying mechanisms leading to El Niño-to-La Niña transition are unchanged under global warming. *Clim. Dyn.*, **52**, 1723-1738, doi: 10.1007/s00382-018-4220-5.
- Yun, W.-T., C.-K. Park, J.-W. Lee, H.-S. Lee, and S.-K. Min, 2001: Analysis of the Korean heavy rainfall features in summer 1998. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 181-194.
- Zhang, W., F.-F. Jin, M. F. Stuecker, T. Wittenberg, A. Timmermann, H.-L. Ren, J.-S. Kug, W. Cai, and M. Cane, 2016: Unraveling El Niño's impact on the East Asian monsoon and Yangtze River summer flooding. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 11375-11382, doi: 10.1002/2016GL071190.
- Zhao, J., J.-S. Kug, J.-H. Park, and S.-I. An, 2020: Diversity of North Pacific Meridional Mode and its distinct impacts on El Niño-Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi: 10.1029/2020GL08899.
- Zuo, J., W. Li, C. Sun, L. Xu, and H.-L. Ren, 2013: Impact of the North Atlantic Sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 1173-1186, doi: 10.1007/s00376-012-2125-5.