

기후변화 연구에 관한 한국기상학회 60년사

안중배^{1)*} · 변영화²⁾ · 차동현³⁾

¹⁾부산대학교 대기환경과학과, ²⁾국립기상과학원 기후변화예측연구팀,
³⁾울산과학기술원 도시환경공학과

(접수일: 2023년 2월 17일, 수정일: 2023년 3월 21일, 게재확정일: 2023년 3월 22일)

60 Years of Korean Meteorological Society on Climate Change

Joong-Bae Ahn^{1)*}, Young-Hwa Byun²⁾, and Dong-Hyun Cha³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

²⁾Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

³⁾Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea

(Manuscript received 17 February 2023; revised 21 March 2023; accepted 22 March 2023)

Abstract This paper aims to examine from various perspectives how domestic research studies and projects related to climate change have been conducted to mark the 60th anniversary of the Korean Meteorological Society (KMS). The 『50-year History of the Korean Meteorological Society』, published more than a decade ago, has never dealt with the history of development of individual fields of meteorology such as climate change. Therefore, it is of significance to look at the history of research activities and studies achieved by KMS members in the area of climate change over the past 60 years. The research on climate change in KMS is classified by era from the beginning to the latest and the contents are examined by major research projects at that time. During the past 60 years, climatological research in KMS has been mainly focused on general climate, synoptic climate, and applied climate (urban climate) until the 2000s. However, since the 1990s, climate change has become an important area for climate research. The 2000s are the beginning era of climate change research, since the major projects and researches for climate change has begun in the period. The 2010s can be a time when climate change prediction and monitoring are expanded and refined to meet the rapidly increasing demands for climate information from a wide range of areas. We concluded that the development of the research capabilities of the society over the past 60 years, in particular in the past two decades, in the field of climate change research is remarkable.

Key words: climate change, Korean Meteorological Society, climate prediction, coupled model intercomparison project, scenarios

1. 서론

우리나라 근대 기상학 연구에서 기후변화라는 용어가 사용되기 시작한 시기는 지난 1990년대로 비교적

최근이다. 우리나라뿐만 아니라 1995년 정부간 기후변화협약체인 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)가 2차보고서를 통해 기존의 기후에 대한 정의인 『30년간 평균한 날씨의 상태』라는 통념을 깨고 『변화하는 기후』에 대해 본격적인 언급하기 전까지 학계에서는 기후를 오랜 기간 동안 변하지 않는 것으로 여겨왔다. 그러나 1980년대 말부터 단순한 복사수지 모형을 이용하여 인간의 화석연료 사용에 따른 온실기체의 증가가 기후의 변화에 지대한 영향을 미칠

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busandaehak-ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-514-1932, Fax: +82-51-514-1932
E-mail: jbahn@pusan.ac.kr

수 있다는 연구결과들이 나오기 시작하면서 변화하는 기후에 대한 인식이 재고되기 시작했다. 실제로 당시 물리기상학의 교재로도 많이 쓰였던 Wallace and Hobbs (1977)의 저서에서도 인간이 화석연료를 1년간 사용함으로써 대기 중에 방출하는 탄소의 양은 식물들이 탄소동화작용으로 1,000년 정도 생산하여 저장한 양에 해당하는데, 이 탄소동화작용이 과거 수 억년 동안 일어난 것을 고려하면 염려할 수준이 아니라고 언급하였다. 그 정도로 당시 학자들은 화석연료의 사용에 따른 온실기체의 증가와 지구 기온 상승에 관해서 알지 못했다.

본 논문에서는 학회 창립 60주년을 맞아 그 동안 한반도 기후변화와 관련된 연구와 이와 관련된 연구 사업이 어떻게 진행되어 왔는지를 시대별로 구분하여 살펴보고자 하였다. 10여년 전에 발간된 『한국기상학회 50년사』에서 기후변화와 관련된 언급이 여러 장에 걸쳐서 짧게 언급되기는 했지만 기후변화를 주제로 하여 학회가 중심이 되어 그동안의 연구활동을 정리한 적은 없었다. 따라서 본 연구에서 정리될 기후변화와 관련한 그 동안의 연구활동의 내용들은 향후 더 빠르게 진행될 기후변화 위기에 대비하여 우리 학회가 과거의 활동을 되돌아보고 이 분야에 대한 발전과 비전을 제시하는데 중요한 계기가 될 것이라 본다.

본문의 2절에서는 우리나라 기후변화에 관한 연구를 태동기부터 최근에 이르기까지를 시대별로 구분하고 당시의 주요 연구사업별로 살펴보았는데, 이는 대부분의 기후 관련 연구들이 이들 사업들의 결과물과 밀접히 연관되어 있기 때문이다. 또한 지난 10여년 전부터 활발히 연구되고 있는 한반도의 기후변화 시나리오 개발과 관련 연구에 관한 내용은 따로 3장에 상세히 기술하였다. 마지막으로 4장에서는 요약과 결론으로 논문을 마무리를 지었다.

2. 기후변화 연구의 시대별 발전

2.1 기후변화 연구의 태동

1963년 3월 발행된 한국기상학회지 창간호부터 기후변화에 관한 연구를 살펴본 결과, “기후변화”에 관해서 최초로 언급한 논문은 Kim and Ha (1987)의 “Climatic Change and Interannual Fluctuations in the Monthly Amounts of Precipitation at Seoul”이었다. 논문에 “Climate Change”가 아닌 “Climatic Change”라는 표현을 쓴 것이 이색적인데 이는 Climate Change라는 단어가 당시에 잘 쓰이지 않았음을 의미한다. 또한 학회 창립 후 약 30년간 기후변화와 관련한 연구는 없었음을 알 수 있는데, 그 기간 동안의 기후와 관련한 연구들은 주로 지리기후학적인 것들이었다(e.g., Cho, 1968; Kim, 1979). 이후에 1990년대 들어서 연세대학교 환경연구소를 중심으로 선도기술개발사업을 통

해 기후를 모의하거나 이해하기 위한 차원에서 기후 모형의 개발이 활발히 진행되면서 기후모형 개발과 관련한 연구들이 많이 발표되었다(e.g., Lee et al., 1991; Ahn, 1992; Ha and Kim, 1993; Heo and Kang, 1996).

이후에 지구온난화에 따른 기후변화 시나리오에 관한 연구가 90년대 중반부터 한국기상학회지에 실리기 시작했는데, 연구는 주로 이산화탄소 배증이나 매년 1%씩 이산화탄소가 증가했을 경우에 따른 대기대순환 모형(Atmospheric General Circulation Model, AGCM)의 반응을 살펴보는 수준이었다(e.g., Kang, 1994; Oh et al., 1994a, 1994b). 한편 Meehl (1995)에 의하면 기후예측은 대기-해양 접합 대순환모형(Coupled General Circulation Model, CGCM)에 의해서만 가능하다고 하였는데 CGCM의 개발과 활용에 대한 연구도 90년대 중반에 시작되었다. Ahn et al. (1997)은 YONU (Yonsei University) AGCM과 오레곤주립대학교 해양모형을 결합시킨 CGCM Tr7W6을 개발하여 계절안 진동을 모의하고자 하였고, Ahn and Kim (1998)은 이 CGCM을 이용하여 매년 1%씩 증가하는 이산화탄소에 따른 전구적인 기후변화를 최초로 살펴보았다. 모형을 이용한 기후변화 연구는 다음 절에서 자세히 살펴본다.

근래 들어 변화하는 한반도 기후를 분석한 연구들도 90년대 중반부터 나타나기 시작하는데 Kim and Ha (1987)는 서울에서의 강수량을 분석해 기후변화를 살펴보았지만 그 이후 10년간 한반도에서의 기후변화를 분석한 논문은 없었다. 이후 Lee and Kang (1997)이 한반도의 기온변동성과 온난화에 대해서 논했고 Kim et al. (1999)는 40년 자료를 활용해서 한반도의 기온 상승에 관해 정리한 바 있다.

2.2 기후변화 연구의 시작: 2000년대 이전

1989년 IPCC의 설립 이후 1990년과 1995년에 걸쳐 제1차 및 제2차 기후변화에 관한 평가보고서가 발간되면서 국내에서도 기후변화 연구에 대한 관심도가 높아져 오던 시기에, 정부는 과학기술 분야의 세계 경쟁력을 높이고자 “선도기술개발사업(이하 G7 프로젝트)” 계획을 밝히고 1992~2001년에 이르는 기간 동안 본 프로젝트를 추진한 바 있다. G7 프로젝트는 특정 제품이나 기술 분야에서 세계 7대 과학기술 선진국 수준으로 경쟁력을 확보하겠다는 목표를 가지고 과학기술부를 중심으로 8개 정부 부처가 내놓은 연구개발 프로젝트이다. 과학기술부와 환경부는 본 프로젝트 내 환경공학 분야의 연구과제 중 하나로서 ‘지구 환경감시 및 기후변화 예측기술’ 과제를 추진하였는데(MIST et al., 1996), 이 과제가 우리나라에서 기후 변화와 관련한 최초의 사업이라 할 수 있다.

‘지구 환경감시 및 기후변화 예측기술’ 과제는 연세대학교를 주축으로 하여 총 3개의 세부 과제로 구성되

었는데 첫 번째는 산성비 감시 및 예측기술 개발, 두 번째는 기후변화 예측기술, 세 번째는 지구대기 조성 변화 감시 과제이다(MIST et al., 1996). 기후변화와 관련하여 이 과제에서는 기후변화 예측을 위한 전지구 기후모형인 YONU GCM (Global Circulation Model)을 개발한 것으로서 본 모형은 기후모형 상호비교 검증 을 위한 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 프로그램에도 참여하였다(Lee, 1993). YONU GCM은 당시 미국 일리노이 대학교 모형과 일본 기상연구소 모형의 역학과정을 모체로 하여 개발된 것으로서(Jung et al., 2006), 초기엔 연직 높이가 약 100 hPa까지의 대류권만을 포함하는 모형(YONU GCM Tr7)이었으나 차후 성층권을 포함하는 YONU GCM St14 및 St15 버전을 개발하였고 또한 복사과정 및 중력과 항력 모수화 방안과 다층 지면과정 접목 등의 물리과정 개선을 수행하였다(Jung et al., 1995; Song et al., 1999; Oh et al., 2000; Kim and Shin, 2005). 이 시기에 해양혼합층 모형이 결합된 OSU (Oregon State University) 해양대순환 모형(OGCM)을 개선한 PNU (Pusan National University) OGCM이 개발되었는데(Ahn and Lee, 1998), YONU AGCM과 PNU OGCM을 접합한 YONU CGCM Tr7W6가 개발되어 이산화탄소 점증에 따른 전구적인 21세기 대기와 해양의 변화를 우리나라 최초로 예측한 바 있다(Ahn and Kim, 1998). 이후 사업에서는 YONU GCM에 미국 지구유체역학연구소(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)가 개발한 해양 모형인 MOM (Modular Ocean Model)을 결합시켜 YONU CGCM Tr7W12을 완성하였고 이 모형을 사용한 50년 장기 적분을 통해 엘니뇨 등 해양 현상에 대한 검증을 수행하였다(Lee, 1999). 또한 1999년부터 2001년까지 지속된 3단계 사업을 통해 세계기후연구프로그램의 WGCM (Working Group on Coupled Model)에서 주관하는 결합모형 상호 비교실험 프로젝트인 CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) 표준 실험을 수행하여 결과를 제출한 바 있고(ME, 2002) 이산화탄소 배출에 따른 지구온난화 실험을 수행하였다(Park, 2000).

그러나 그 이후 기후변화 예측기술개발과 관련된 사업비가 끊기면서 우리나라의 독자적인 모형에 대한 지속적인 개발·개선 작업도 중단됨으로써 CMIP 등의 국제적 프로그램에 대한 우리나라 모형의 참여와 기여는 상당 기간 중단되었다.

2.3 기후변화 시나리오 산출과 체계적 지구대기감시의 시작: 2000년대

2.3.1 전구·지역 규모 시나리오 산출과 분석

YONU CGCM을 이용한 미래기후 변화에 대한 예측 연구(Park, 2000; Lee et al., 2002)와 더불어 IPCC

SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오에 따른 연구가 진행되면서 전구와 동아시아의 21세기 기후변화에 대한 연구가 활기를 띠기 시작한 시기이다(Min et al., 2005; 2006). 이와 더불어 CGCM을 이용한 과거의 기후 재현과 고기후(Paleoclimatology) 연구도 활발히 진행되었다(Kim et al., 2002, 2003; Kim, 2004, 2005). G7 프로젝트를 통해 개발된 YONU CGCM은 2000년대 초반에 온실가스 배증 실험 수행 등 성과를 거두면서 관련 전문 인력의 배출 등 기후변화 예측기술의 초석을 쌓았다고 평가될 수 있다.

한편, 기후변화에 관한 국제적인 연구 활동이 증가한 가운데 국내에서도 기후변화 연구에 대한 관심이 증가하여 기후 감시 및 예측 연구개발 사업을 확장하려는 움직임이 시작된다. 2000년대 초반 기상청 기후국이 설립되고 국립기상과학원(당시 기상연구소)에 기후연구소가 만들어지면서 IPCC 및 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change) 등 기후변화에 관한 국제사회의 기술적, 정책적 흐름을 주시하고 이에 대응하려는 움직임이 기상청 및 국립기상과학원이 주도하는 연구개발 사업에서도 나타나게 된다. 2002년에 과학기술부의 온실가스저감기술개발 사업 내의 한 분야로 ‘기후변화 시그널 검출기술 개발(1998~2001)’ 사업이 추진된 바 있는데, 이어진 ‘기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출기술 개발(2002~2004)’ 및 ‘기후변화협약대응 지역기후 시나리오 활용기술 개발(2005~2007)’ 사업은 기후모형을 통해 전지구 및 동아시아 지역 단위의 기후변화 전망 자료를 산출하는 사업이었다. 이는 현재의 기상청 기후변화 시나리오 산출체계의 모태를 태동하게 한 사업이라 할 수 있다. 기후변화 시그널 검출기술개발 사업은 크게 최적지문법 및 베이스 접근법을 사용한 기후변화 탐지기술의 개발, 전지구 및 한반도 관측자료를 사용한 기온 추세 분석과 기후지수 개발, 그리고 마지막으로 연구 활용을 위한 관측·기후모형 자료 데이터베이스 구축과 기후변화 정보시스템 구축이 주요 내용이었다(NIMS, 2001). 즉 기존 국립기상과학원의 연구들이 주로 관측자료, 또는 선진국 기후모형 결과를 사용한 기후변화의 탐지와 진단을 통해 분석 기술을 축적하고 정보를 생산해왔다면, 2000년대부터는 미래 전망 정보를 산출하기 위한 자립적인 방안을 모색하고 이를 사업화하였다는 것에 의의가 있다고 할 수 있다.

2002년부터 2008년까지 지속된 연구개발사업에서 가장 주목할 만한 것은 CMIP 참여를 통한 미래 기후변화 전망정보의 개발을 통해 IPCC 보고서에 기여하고 또한 점차 늘어가는 국내 기후변화 정보 수요에 대응하기 시작하였다는 점이다. 우선 2002년에 시작된 ‘기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출기술 개

발(2002~2004)' 사업에서는 동 기간 동안 함께 수행된 과학기술부의 수탁사업인 온실가스저감기술개발사업 세부과제 '온실가스 증가로 인한 한반도 주변의 기후변화 탐지(2002~2003)'를 통해 산출된 IPCC SRES 기반의 미래 전망 자료를 사용하여 동아시아 지역의 상세화 자료를 산출하였다(NIMS, 2003, 2004). 국립기상과학원에서 생산한 IPCC SRES의 전지구 시나리오인 독일 막스플랑크연구소(Max Planck Institute for Meteorology, MPI)의 전지구 기후모형인 ECHO-G를 통해 산출된 것으로서 1860~2000년까지의 20세기 기후 모의 및 2001년부터 2100년의 미래 전망을 위한 SRES A1B, B1, A2 실험들이다(Min et al., 2006). ECHO-G 모형은 약 3.75°의 수평해상도를 갖는 저해상도 모형으로서 한반도 부근의 상세 시나리오 생산을 위해서는 상세화 기법 적용을 통한 정보 산출이 필요하다. 때문에 본 사업에서는 미국 국립기상연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)와 펜실베이니아 주립대학에서 공동 개발한 MM5 (Mesoscale Model Version 5)를 이용하여 지역기후 상세화를 위한 모형 체계를 구축하였고 SRES A1B, B1, A2의 미래 전망 실험에 대한 27 km 수평 해상도의 지역기후 시나리오를 산출하여 한반도를 포함한 동아시아 지역의 상세 미래 전망 정보를 산출하였다(NIMS, 2004). 한편 ECHO-G를 사용하여 산출된 SRES 기반의 전지구 시나리오 자료는 CMIP에 제출되어 IPCC 제4차평가보고서(4th Assessment Report, AR4)의 전지구 모형 결과 자료 목록에 포함되는 성과를 이룬다(IPCC, 2007). 본 연구사업 이후 이어진 '기후변화 협약대응 지역기후 시나리오 활용기술 개발(2005~2007)' 사업에서는 산출된 시나리오들을 기반으로 동아시아 몬순, 열대저기압, 연직 기온분포와 대규모 순환장, ENSO (El Nino-Southern Oscillation), NAO (North Atlantic Oscillation) 미래 변화 분석 및 우리나라의 아열대화 전망, 자연계절 변화 등의 다양한 정보를 개발하였다.

한편 선진국의 기후모형 도입에 의한 전지구 시나리오의 생산과 지역기후 시나리오의 연계 산출 사업이 성공하면서 기후 미래 전망 자료를 개발하기 위한 시나리오 생산체계의 개선·운영에 관한 정책적 관심도가 서서히 늘어가기 시작하였다. 특히, 외국에 의존해있는 전지구 기후모형의 공동 활용 부분에 대한 개선 의지들이 표출되면서 자체 개발을 통한 지구시스템모형 구축 사업들이 추진되기 시작한다. 그 첫 번째로 국립기상과학원은 2007년 지구시스템모형 개발에 관한 기획연구를 통해 전지구 시나리오 생산을 위한 자체 기후변화 예측모형 개발 방향을 설정하였다(NIMS, 2007). 이 시기 기상청은 영국기상청과 영국통합모형(Unified Model, UM) 사용 및 개발 협력에

대한 협약을 체결하면서 UM을 기반으로 한 전지구 예보시스템의 구축이 진행된 바, 국립기상과학원은 2008년부터 영국기상청의 UM을 사용한 '지구시스템모형 개발' 사업을 추진하였다(NIMS, 2008). 이와 유사하게 2009년부터 2019년까지 11년간 과학기술정보통신부의 기후변화대응기술개발사업의 일환으로 추진된 '통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측' 사업은 한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science & Technology, KIOST)을 주축으로 하여 지구시스템모형인 KIOST ESM을 개발하였다. 사업 초기에 이 지구시스템모형은 GAIA 시뮬레이터라고 불리기도 하면서 대기-해양 결합모형을 구축하고 해양모형 내 난류모수화와 대기모형 내 적운 모수화 개선 등을 수행하였으며, 사업 중반인 2010년대 초반부터는 대기-지면간 탄소 순환 모의를 위한 동적식생과정 개발·진단, 그리고 미래 기후전망 자료 산출을 위한 기후과정의 진단과 피드백 연구를 수행한 것으로 나타난다(KIOST, 2019).

2.3.2 지구대기 감시

기후변화 시나리오의 자체 생산, 그리고 독자 기술 확보를 위한 지구시스템모형 개발 등 기후변화 예측 기술 고도화를 위한 연구개발사업뿐만 아니라 선진 수준의 기후변화 감시 역량을 확대하기 위한 사업들도 꾸준히 지속되어 왔다. 지난 1990년대에 G7 프로젝트를 통해서 수행된 지구대기 조성변화 감시 과제에서는 주로 한반도 상공의 오존층 및 자외선 감시와 성층권 및 대류권 오존 생성·소멸 메커니즘 연구 및 오존 측정기 개발 등의 연구와 함께 제주도 고산에서 측정된 온실기체 농도 변화분석 등의 연구를 수행했다. 그러나 배경대기 관측소가 소백산에서 안면도로 이전한 1996년 이후 안면도 지구대기감시관측소가 1998년 세계기상기구의 지역급 관측소로 지정되면서 지구대기 감시 관련 연구 활동들이 점차 증가하였다(NIMS, 2007). 1990년대 말부터 2000년대 초까지 안면도 지구대기감시센터(2007년 명칭 변경)의 연구동 신축 및 선진 관측장비 도입 등 연구 인프라의 확충을 통한 연구 기반이 조성되면서 지속적인 관측·감시 업무와 함께 연구사업이 수행되어 왔다. 특히 2000년대에 들어서 과학기술부의 국가지정 연구실사업으로 추진된 국립기상과학원의 '한반도 배경대기 측정 및 기후변화 감시기술 개발' 과제에서는 제주도 고산의 관측자료와 안면도 지구대기감시센터의 관측자료에서 나타난 온실기체의 추세 분석을 포함하여 대기 중 에어로졸의 물리·화학적 특성 분석과 대기화학수송모형을 활용한 지역 및 지구 규모 감시 기술개발 등의 다양한 연구가 수행하였다(NIMS, 2005).

2.4 정책 수요 대응 기후변화 감시·예측 기술 개발의 확대: 2010년대 이후

1990년대부터 2000년대를 거치면서 다양한 분야의 기후 연구 전문인력들이 늘어남과 동시에 녹색성장 5개년 계획, 국가 기후변화대응 기본계획, 국가 기후변화 적응대책 등 국가 차원의 기후변화 정책이 전 정부 부처에 걸쳐 수립되고 이행되는 과정을 거치면서 기후변화의 현황과 미래 전망에 대한 보다 상세한 정보를 요구하는 정책 수요가 증가되어 왔다. 따라서 복잡하고 다양한 수요를 충족하기 위해 제공되어야 하는 기후변화 과학정보는 더욱 그 내용이 방대해지고 또한 이를 개발하기 위한 기반 기술 수준도 더욱 고도화되어야 한다. 때문에 기상청은 부처 내 정책 및 현업 지원을 위한 기반 기술 강화를 목적으로 2000년대 후반부터 출연 연구개발사업인 ‘기상지진기술개발사업’을 추진하였다. 그리고 2010년부터는 ‘기상씨앗 기술개발사업’ 내 기후변화 관련 내역사업인 ‘기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원개발사업’을 수행하고, 2020년부터는 ‘기후 및 기후변화 감시예측정보 응용 기술개발’ 사업을 지속적으로 추진하여 왔다. 이 출연 연구개발 사업들은 국립기상과학원에서 자체적으로 수행하는 연구사업과의 기술 교류 및 성과 공유가 가능하도록 기상청과 국립기상과학원에서 필요한 연구수요를 반영하여 기획된 것으로서 과제 담당관 지정을 통해 연구내용 및 일정, 성과 등에 대한 소통이 이루어져 왔다.

기상청에서 수행한 기후변화 관련 출연 연구개발 사업은 주로 국립기상과학원에서 수행하는 핵심 예측 기술 개발을 지원할 수 있으며 또한 기후변화 감시, 원인규명 등의 과학정보 생산을 함께 할 수 있는 과제로 구성되었다. 예를 들어 출연사업에서 수행된 ‘지구시스템모형의 구름물리, 지면생태, 해양모듈 개발 및 진단’ 과제에서는 국립기상과학원의 지구시스템모형 개발·구축 업무 추진과 관련하여 대기 및 해양의 주요 물리과정에 대한 진단 및 모듈 개선을 수행하였다. ‘RCP 시나리오와 한반도 및 동아시아 상세 기후변화 전망 산출 및 분석’ 과제에서는 지역 상세화 국제 프로젝트(Coordinated Regional Downscaling Experiment, CORDEX; <https://www.cordex.org>)와의 연계하에 한반도를 포함한 동아시아 지역의 상세 기후변화 시나리오 산출을 위한 역학·통계모형의 구축 및 다중모형에 의한 앙상블 자료를 생산하여 극한기후 현상에 대한 연구를 수행하였다. 또한 ‘다중위성정보를 활용한 탄소 플럭스 감시기법 고도화’ 및 ‘3차원 입체 탄소 관측자료에 대한 탄소추적시스템 자료동화 체계 개발’ 등에서는 일본의 GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) 위성 자료를 활용하여 온실가스 배출·흡수량을 산정하는 기술 개발 및 미국에서 도입된 탄소추적

시스템(Carbon Tracker)의 구동과 전지구 탄소 플럭스 산출을 위한 자료동화 기법 개선 등을 수행하였다. 이를 통해 최근 WMO (World Meteorological Organization)에서 적극 추진하는 통합전지구온실가스정보시스템(Integrated Global Greenhouse Gas Information System, IG3IS; <https://www.ig3is.wmo.int>)의 요소 기술에 대한 기반을 확충하는 성과를 보였다. 그 외에 한반도의 에어로졸 유출입 감시 및 3차원 분포 특성 파악을 통한 한반도 에어로졸 복사강제력 산정을 위한 ‘한반도 배경대기 에어로졸 기후효과 산출 기법 개발’ 과제를 추진하였으며, 또한 ‘비접촉식 기상측정 장치를 이용한 기초 기후변수(대기물리량) 추정 기술 개발’ 과제를 통하여 적외선 대기광 측정장비 교정 기술 및 관측자료 기반의 복사강제력 산출 기술 등을 개발하였다(SNU, 2015; NIMS, 2018).

한편 이 시기 기후변화 감시와 관련된 사업들도 다양하게 진행되면서 기술 개발 및 관측망 확충 등 선진 수준의 기후변화 감시 기술 기반이 조성되었다. 우선, 1996년에 신설되어 1998년에 세계기상기구의 지역급 관측소로 지정된 안면도 지구대기감시센터에 이어 2008년 제주도 고산 및 2013년 울릉도독도 기후변화감시소를 신설하여 감시 관측망을 확충하였다. 또한 1990년대부터 성층권 오존 관측을 지속해오던 연세대학교를 포함하여 광주과학기술원, 서울대학교, 제주대학교, 숙명여자대학교와 극지연구소를 위탁관측소로 지정해 운영해오면서 각기 에어로졸, 이산화탄소, 성층권 오존, 라돈 등의 요소를 지속적으로 감시해오고 있다(NIMS, 2020b). 온실가스 및 에어로졸, 강수화학 및 대기 복사 등의 관측자료가 늘어나면서 기상청은 온실가스 관측장비 최적화, WMO 권고에 따른 온실가스 및 강수화학 분석 등 자료 품질관리 체계 구축, 기후변화 원인물질의 배경농도 산출 최적 알고리즘 개발 등을 포함하는 감시센터 운영 사업을 수행하면서 기후변화 원인물질에 관한 관측 감시 기술의 향상을 이루었다. 특히 안면도에서 2007년부터 관측을 시작한 육불화황(SF₆)의 경우는 2012년 안면도 기후변화감시센터가 WMO의 육불화황 세계표준센터로 지정되는 성과를 이루고 이후 전세계 육불화황 측정 및 분석 분야의 선도 역할을 수행하고 있다(NIMS, 2020b; Lee et al., 2021). 또한 이산화탄소의 직접 관측뿐만 아니라 위성 등 원격관측장비를 통한 온실가스 관측에 대한 관심도도 높아가면서 안면도 기후변화감시센터는 2014년 전지구 탄소전랑관측망(Total Carbon Column Observing Network, TCCON) 중 하나로 지정되면서 고분해 태양흡수분광간섭계 관측 장비를 통해 안면도 상공의 탄소 정량이 꾸준히 관측되기 시작하였다. 국립기상과학원은 이렇게 관측된 탄소 전랑 관측자료를 활용하여 ‘기후변화 예측기술 지

원 및 활용 연구' 과제를 통해 한반도 상공을 지나는 GOSAT 온실가스 위성을 활용한 탄소 전량 분석 결과와 상호 비교를 하는 등 관측 품질과 분석 기술 향상을 추진하였다. 이를 통해 이 시기의 연구개발 사업들은 다양한 관측을 수행하고 기후변화 현황을 분석, 진단하기 위한 기술 개발로 다원화되어가기 시작하였다(NIMS, 2012a; Oh et al., 2018).

기후변화 예측을 위한 연구개발 사업들도 이 시기에 좀 더 조직화되기 시작한다. 국립기상과학원은 기존의 예보, 관측, 기후, 응용 분야의 과제들을 통합하여 '기상업무지원기술개발연구' 사업으로 정리하였다. 따라서 기후변화 시나리오의 개발과 지구시스템모형을 개발하는 국립기상과학원의 기후변화 예측 관련 과제가 '기후변화 예측기술 지원 및 활용 연구'로 통합되면서 IPCC 5차평가보고서(5th Assessment Report, AR5)의 온실가스 경로인 RCP (Representative Concentration Pathways)를 따르는 전지구-지역-남한상세 시나리오 개발이 진행되었으며 영국의 UM을 사용한 지구시스템모형의 개발이 지속적으로 포함되었다(NIMS, 2012a). 본 사업에서는 기후변화 시나리오 산출을 위해 2008년 영국기상청과의 협력을 통해 도입된 영국의 기후모형인 HadGEM2-AO를 활용하여 약 135 km 수평 해상도의 전지구 시나리오를 산출하였으며 이 자료가 CMIP에 제출되어 IPCC AR5의 미래 전망을 산출하는 기후모형 자료 중 하나로 수록되는 성과를 이루었다(IPCC, 2013; Baek et al., 2013). 또한 기후변화 정책의 수립 및 이행과 관련한 국내 수요가 증가하면서 영국 지역기후모형인 HadGEM3-RA를 통해 50 km/12.5 km의 동아시아/한반도 지역기후변화 시나리오를 산출하였으며 이 자료들은 1 km 해상도의 남한 상세 시나리오를 개발하기 위한 입력자료로서도 활용되었다(NIMS, 2012b). 특히 기후변화 영향평가 등 적응 분야 활용도 제고를 위해 기상청 출연 사업을 통해 개발된 1 km 지역 상세화 기법(Kim et al., 2012)은 기상청의 종관관측 및 자동기상관측망 자료를 활용하여 관측자료를 기반으로 한 남한지역의 관측격자자료를 만들었다. 본 관측자료를 기반으로 지역기후모형에서 나온 미래 모의 결과를 보정하는 방법을 통해 고품질의 미래 전망 자료를 생산하는 기틀을 마련한 것이다. 기상청은 이러한 기술로 생산된 1 km 해상도의 시나리오 자료를 분석하여 2010년대 초반부터 기상청에서 발간하는 각종 전망 보고서들을 통해 지역별 미래 전망을 평가하고 자료를 배포하고 있으며(KMA, 2017), 이러한 자료들은 각 분야 기후변화 영향평가 등의 연구 수행 및 정책 수립 시 매우 유용하게 활용되고 있다(KMA, 2012, 2022).

IPCC의 RCP 기반 시나리오 자료가 생산된 이후 '기후변화 예측기술 지원 및 활용 연구'에서는 기존의

온난화 추세 분석 및 동아시아 미래 기후의 평가뿐만 아니라 영국기상청의 또다른 기후모형인 HadGEM2-ES를 활용하면서 에어로졸, 탄소순환 및 해양생지화학과정과 관련된 다양한 변수들을 분석하고 각 요소에 의한 기후과정의 변화에 대한 연구를 확장하게 된다(NIMS, 2015, 2017). 또한 출연 사업과의 공조를 통해 지구시스템모듈에 대한 진단·개선을 추진하면서 차기 IPCC 평가보고서를 대비한 기술 기반을 마련하여 왔다. IPCC AR5 종합보고서가 발간된 2014년 이후, WGCM은 6번째의 결합모형상호비교프로젝트(CMIP6)를 착수하였고 이에 따라 CMIP6에 참여하기 위한 준비가 시작되었다. CMIP6에 참여하기 위해 국립기상과학원은 '기후변화 예측기술 지원 및 활용 연구'를 통해 새로운 지구시스템모형을 개발함과 동시에 CMIP의 자료 프로토콜을 준수하기 위한 후처리 및 품질관리 시스템을 구축하고 기후모형 장기적분 상황을 모니터링하기 위한 모니터링 체계 및 모형 진단 매트릭스 개발 등을 추진하였다(NIMS, 2018). 본 사업을 통해 개발된 지구시스템모형을 사용하여 IPCC 6차평가보고서(6th Assessment Report, AR6)의 신규 온실가스 경로인 SSP (Shared Socioeconomic Pathways)를 기반으로 한 전지구 시나리오가 2019년에 산출되어 전지구 기후변화 전망보고서 발간 및 자료 제공이 시작되었다(NIMS, 2019). 전지구 시나리오를 산출하기 위해 사용된 모형은 2가지로서 하나는 위 사업을 통해 자체 개발된 K-ACE (Korea Meteorological Administration Advanced Community Earth-System model) 이며(Lee et al., 2020; Sung et al., 2021), 나머지는 영국기상청과의 공동 활용을 위해 도입된 UKESM (United Kingdom Earth System Model)이다. K-ACE의 결과는 과거와 마찬가지로 CMIP6에 제출되어 IPCC AR6의 기어모형으로서 등록되었으며, 2009~2019년 동안 한국해양과학기술원에서 추진한 '통합 기후예측 시스템을 위한 기후예측 시뮬레이터 개발 및 대양 관측' 사업을 통해 개발된 KIOST ESM도 AR6 미래 전망 산출을 위한 기후모형 중 하나로서 기여하였다(IPCC, 2021).

늘어나는 기후변화 정보에 대한 수요와 탄소중립 녹색성장 등 국가 핵심 정책의 지원을 위하여 SSP에 기반한 상세 시나리오 개발 또한 수행되었다. 국립기상과학원은 '기후변화 예측기술 지원 및 활용 연구'뿐만 아니라 기상청 지역기후모형 개선 및 극한기후 분석에 관한 출연 사업인 '기후 및 기후변화 감시·예측 정보 응용 기술개발'의 '국가 기후변화대응정책 지원을 위한 지역기후 상세화 기법 고도화 및 상세 기후 변화정보 산출'과 'AR6 기반 상세 기후변화 정보 생산 기반기술 개발' 과제와의 협업을 통해 지역기후모형 5개를 사용한 25 km 해상도의 AR6 동아시아 지역기후 시나리오를 생산하고 이를 1 km까지 상세화한

시나리오 자료를 산출하였다(NIMS, 2020a, 2021b). 또한 ‘기상업무지원기술개발연구’ 사업 내의 세세부과제인 ‘한반도 대기조성물질 장기변화 특성 연구’ 과제를 통해 안면도, 고산, 울릉도에서 관측된 감시 자료에 대한 장기간 특성 분석 및 기원 추적을 위한 모형 기반을 구축하여 왔다. 특히 대기조성물질의 기원 추적은 온실가스 배출·흡수량 감시를 위한 상향(온실가스 인벤토리) 및 하향식(온실가스 농도 관측) 측정 방법 간의 상호 보완적 비교를 위해 필요한 것으로서 기상청 출연 사업인 ‘기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술 개발’ 중 ‘WMO IG3IS 이행사업’, ‘온실가스 동위원소 유출입 감시를 위한 연속추적 기술 개발’ 과제 등을 통해 학계와의 기술 개발 협력을 추진하고 있다(NIMS, 2021a).

그 외에 「국제과학비즈니스벨트 조성 및 지원에 관한 특별법」이 2011년 제정되면서 과학기술정보통신부 산하에 기초물리연구원(Institute of Basic Science, IBS)이 설립되어 수학, 물리, 화학, 생명과학, 융합 등 다양한 분야에서 세계 수준의 기초과학연구를 수행하기 시작하였다. 이 중 2017년 부산에 설립된 기후물리연구단은 미국 NCAR와의 협력 하에 기후모형인 CESM2 (Community Earth System Model 2)를 사용한 앙상블 시나리오를 산출하고 기후 전망 및 변동성에 관한 연구를 수행하여 왔으며 또한 수평해상도 약 0.1°의 고해상도 CESM을 사용한 적분을 통해 온난화에 따른 기후변동성 및 극한기후의 메커니즘 연구를 수행해오고 있다(Rodgers et al., 2021; Wengel et al., 2021).

3. 한반도 기후변화 연구

3.1 지역기후모델링 연구

IPCC는 세계 유수기관의 전지구기후모형을 이용하여 기후변화 예측 시나리오를 산출하고 이를 바탕으로 미래 기후변화를 전망하였다. 하지만 전지구기후모형은 낮은 해상도와 간단한 물리과정 등의 한계점을 갖기 때문에 특정지역의 상세 기후를 예측하기에는 적합하지 않을 수 있다. 특히, 우리나라를 포함하는 동아시아 지역은 복잡한 지형과 높은 티벳 고원이 위치하고 북서태평양이 인접하고 있으며, 열대우림에서 사막에 이르는 다양한 종류의 지면피복으로 이루어져 있다. 이러한 지역에서 상세한 지역기후를 재현하고 예측하는 것은 수백 km의 공간 해상도를 가지는 전지구기후모형만으로는 거의 불가능하다. 따라서 보다 정확하고 상세한 한반도 및 동아시아의 기후를 연구하기 위해서 전지구기후모형의 한계를 극복할 수 있는 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)이 필요하다. 지역기후모형은 전지구기후모형 또는 전지

구재분석자료에 내재되어 있는 지역적 상세 특성을 중규모 제한지역모형을 이용하여 역학적 상세화(dynamical downscaling)하는 방법이다. 지역기후모형은 수십 킬로미터의 수평해상도를 갖는 중규모 지역모형을 기반으로 하기 때문에 한반도에 막대한 피해를 초래하는 태풍, 집중호우 등의 중규모 대기현상을 보다 정확하게 모의할 수 있다. 또한, 지역기후모형은 전지구기후모형에 비하여 중규모 기상현상에 적합한 정교한 물리과정을 포함하기 때문에 다양한 규모의 대기현상을 현실적으로 모의할 수 있다. 이외에도 지역기후모형은 소규모의 강제력(고해상도의 지형고도 및 지면해양 경계 정보), 대기-해양-지면 사이의 에너지와 물의 복잡한 교환과정, 다양한 대기수적의 상세한 되먹임(feedback)과정, 정교한 구름-에어로졸-기후 상호작용 등의 요소를 갖기 때문에 전지구기후모형의 결과에는 없는 부가정보(added value)를 생산할 수 있다.

국내외에서는 이러한 지역기후모형을 개발 및 개선하기 위한 다양한 노력이 이뤄져 왔다. 1980년대 후반 Dickinson et al. (1989)와 Giorgi (1990)의 연구를 시작으로 전지구적 기후변화와 더불어 나타나게 될 특정 관심 영역의 구체적인 지역 기후 모델링에 관한 연구는 1990년대 이후부터 급속히 발전해 왔다. 국내에서는 1990년대 말부터 국립기상과학원, 서울대학교, 연세대학교, 울산과학기술원, 공주대학교, 부산대학교, 포항공과대학교를 중심으로 지역기후모형이 연구되고 있으며 Regional Climate Model (RegCM), MM5, Regional Spectral Model (RSM), Weather Research and Forecasting (WRF) model, COSMO Climate Limited-area Model (CCLM), HadGEM3-RA 등이 동아시아와 한반도 여건에 맞게 개선되어 사용되고 있다.

국내에서는 독자적인 지역기후모형 개발을 위한 연구가 서울대와 연세대를 중심으로 수행되었다. 서울대학교에서는 NCAR의 대표적 중규모 대기 모형인 MM5를 기반으로 서울대학교 지역기후모형을 개발하였다. 서울대학교 지역기후모형의 동아시아와 한반도 기후에 대한 모의 성능을 향상시키기 위하여 다양한 개선점이 추가되었다. 상세한 지면 및 토양 물리과정을 위하여 최신 지면 모형을 접합하고(Kang et al., 2005), 측면 경계 조건을 보완하기 위하여 대규모 강제자료와 모형해의 편차를 줄여주는 스펙트럴 너징(spectral nudging)을 도입하였다(Lee et al., 2004). 또한, 지역기후모형의 물리과정모수화 방안을 개선하기 위하여 적은 모수화 방안에 대한 민감도(Lee et al., 2005)와 개선된 대기경계층 방안의 영향(Cha et al., 2008)에 대한 연구가 수행되었다. 서울대학교에서는 지역기후모형을 태풍(Ahn and Lee, 2002), 집중호우(Lee et al., 2004; Choi et al., 2008), 동아시아 여름몬순(Lee and Suh, 2000; Cha and Lee, 2009; Cha et

al., 2011) 등의 기후현상 모의와 장기적분을 통한 동아시아와 한반도에 미래 기후변화와 물순환 예측 연구에 활용하였다.

연세대학교에서는 RSM을 활용하여 동아시아 몬순의 모의 가능성을 연구해 왔으며, 지역기후모형이 관측된 경계자료를 사용할 수 있다는 특수한 장점을 활용하여 아시아 몬순과 관련된 역학적 특징에 대한 연구가 진행되었다(Park and Hong, 2004; Kim and Hong, 2007; Yhang and Hong, 2008; Seol and Hong, 2009).

이러한 독자 지역기후모형들뿐만 아니라 해외의 우수한 모형들을 도입해 동아시아 지역에 맞게 구축한 후 지역기후를 이해하거나 미래 기후변화를 전망하는 연구들이 활발하게 수행되어왔다. 특히, 국가 기후변화 대응을 위한 상세 기후변화 정보 산출이라는 목표를 달성하기 위해 기상청과 국내 여러 대학들이 함께 IPCC 기후변화 평가보고서에 맞는 상세 기후변화 시나리오를 산출 및 분석하는 연구개발 사업이 2000년대부터 추진되어 왔다. 다음 절에서는 IPCC 기후변화 평가보고서에 따른 상세 기후변화 시나리오 산출 연구들을 소개한다.

3.2 IPCC 기후변화 평가보고서 별 상세 기후변화 시나리오 산출 연구

3.2.1 4차 기후변화 평가보고서 기반 시나리오 산출 연구

2007년 출간된 IPCC AR4에 기여하기 위해 국내에서 최초로 지역기후모형을 이용한 상세 기후변화 시나리오 산출 연구가 본격적으로 시작되었다. 국립기상과학원, 부경대학교, 서울대학교, 연세대학교 등에서 활발히 연구가 수행되었는데 AR4의 온실가스배출 시나리오인 SRES에 해당하는 한반도 기후변화 시나리오를 지역기후모형으로 산출하였다. 부경대와 국립기상과학원은 과학원에서 직접 생산한 ECHO-G 전지구 시나리오를 지역기후모형으로 역학적으로 상세화하여 한반도 기후변화 시나리오를 산출하였다. 부경대학교에서는 ECHO-G A2 시나리오를 27 km의 수평 해상도를 갖는 MM5 모형으로 상세화하여 2001년부터 2030년까지 30년의 한반도 기후변화 시나리오를 산출하였다(Oh et al., 2004). 국립기상과학원에서는 MM5를 이용하여 ECHO-G의 A2 및 A1B 시나리오와 ECHAM4의 A1B 시나리오를 각각 27 km 수평해상도와 18 km 수평해상도로 상세화하였다. 또한, ECHO-G 모형의 B2 시나리오를 Regional Climate Model Version 3 (RegCM3) 모형으로 상세화하여 20 km 해상도의 현재 30년(1971~2000)과 미래 30년(2021~2050) 한반도 기후변화 시나리오를 산출하였다(Im et al., 2007).

서울대학교와 연세대학교에서는 전지구 기후변화 시나리오를 직접 생산하지 않고 IPCC AR4에 참여한 기관의 자료를 수집하여 한반도 지역기후 시나리오 산출에 강제장으로 사용하였다. 서울대학교에서는 한반도 물순환 예측을 위하여 NCAR Community Climate System Model version 3 (CCSM3) 모형의 B1 시나리오를 다중 네스팅 기법이 적용된 서울대학교 지역기후모형으로 상세화하여 동아시아와 한반도에 대하여 각각 60 km와 20 km 수평 해상도의 기후변화 시나리오를 산출하였다(Lee et al., 2013). 또한 연세대학교와 서울대학교는 각각 RSM과 MM5을 기반으로 하는 지역기후모형을 가지고 Regional climate Models Intercomparison Project (RMIP) 국제상호비교 프로젝트에 참여해 독일 ECHAM5 모형의 A1 전지구기후시나리오를 상세화하여 아시아 지역에 대한 60 km 수평 해상도의 기후변화 시나리오를 산출하였다(Wu et al., 2016).

3.2.2 5차 기후변화 평가보고서 기반 시나리오 산출 연구

2014년에 출간된 IPCC AR5에 기여하기 위하여 국내에서는 기상청, 국립기상과학원, 대학(공주대, 울산과학기술원, 부산대, 포항공대, 서울대, 연세대)이 공동으로 다중 지역기후모형을 이용하여 상세 기후변화 시나리오를 산출하는 연구를 2009년부터 2019년까지 수행하였다. 기상청과 국립기상과학원은 HadGEM2-AO 기후모형을 이용하여 5차 기후변화 평가보고서에서 적용된 RCP 배출 시나리오 기반 전지구 기후변화 시나리오를 산출하였다. 이후 5개의 지역기후모형(HadGEM3-RA, RegCM4, MM5, RSM, WRF)로 역학적 상세화하여 50 km 수평해상도의 동아시아 상세 기후변화 시나리오(EAS-44)와 12.5 km 수평해상도의 한반도 상세 기후변화 시나리오(KOR-11)를 각각 산출하였다. 지역기후모형을 이용한 역학적 상세화 시 5개의 지역기후모형을 사용하는 이유는 다중모형 앙상블(Ensemble) 기법을 적용해 시나리오의 신뢰도를 높이기 위해서이다. 특히, EAS-44 실험은 World Climate Research Program (WCRP)의 핵심 프로그램 중 하나인 CORDEX의 일환으로 한국, 중국, 일본 등의 국가들이 국제 공동으로 동아시아의 지역기후를 전망하려는 연구이다. KOR-11 실험은 한반도에 대한 고해상도 기후변화 전망 자료에 대한 요구를 해결하기 위해 수행된 연구로서, 지역기후모형으로 12.5 km 해상도의 결과를 산출한 후 통계적 상세화를 적용해 남한 지역에 대해 1 km 해상도의 시나리오를 생산하였다(Fig. 1).

EAS-44 실험을 통해 다양한 기후변화 연구들이 수행되었는데 Suh et al. (2012)는 실험 결과들을 최초

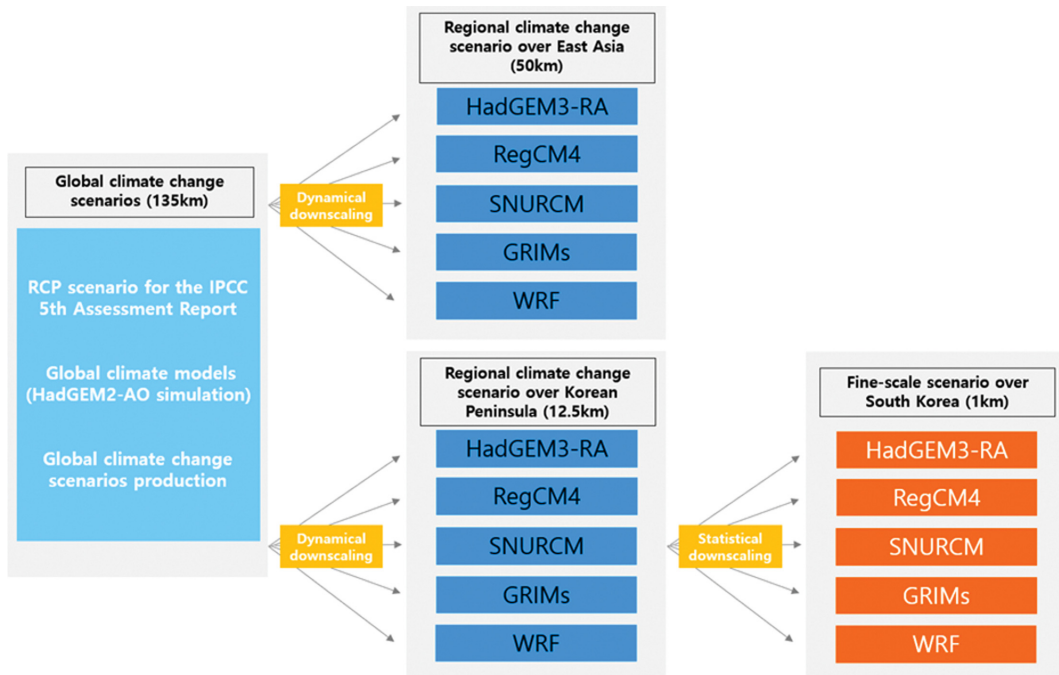


Fig. 1. Production of climate change scenarios for EAS-44 (50 km horizontal resolution) and KOR-11 (12.5 km horizontal resolution) experiments in AR5.

로 정리한 연구로서, 최적 앙상블 기법을 개발해 남한지역의 지역기후 예측에 적용하였다. Oh et al. (2014)과 Lee et al. (2014)는 각각 RegCM4와 GRIMs-RMP 모형의 EAS-44 결과를 이용해 동아시아의 미래 지역기후변화를 분석하였다. 또한 Jin et al. (2016)은 실험에 참여한 4개 RCM 결과의 북서태평양 태풍활동 모의성능을 검증하고, Lee et al. (2019)는 21세기 중미래에 RCP8.5 시나리오 하의 태풍활동 변화를 전망하였다. Park et al. (2016)은 5개 RCM 결과를 분석하여 근미래 동아시아 여름철 강수와 온도 평균 변화와 극한 변화가 일치하게 변한다는 것을 보였고, Park and Min (2019)은 동아시아 여름철 극한 강수와 온도가 모두 증가한다는 것과 그 이유를 분석하였다. Kim et al. (2021)은 EAS-44에 참여한 5개 RCM 결과에 편의보정(Bias correction) 기법을 동아시아 지역의 온도와 강수 모의결과에 적용한 후 현재 기후 검증과 미래 기후 전망을 수행하였다.

한반도의 지역기후변화를 보다 상세하게 예측하는 목표를 갖는 KOR-11 실험 결과를 활용한 기후변화 연구도 매우 활발하게 수행되었다. KOR-11 실험은 다른 CORDEX 실험에 비해 높은 해상도를 갖기 때문에 한반도 주변의 강수 전망에 대한 연구가 온도 전망보다 많이 수행되었다. Oh et al. (2016)은 KOR-11 실험에 참여한 5개 RCM 결과를 분석해 RCP 시나리

오에 따른 남한지역의 평균 강수 변화를 예측하였고, Ahn et al. (2016a)은 50년 재현기간 기준의 확률강수량을 계산하여 미래 남한의 극한 강수가 증가될 것으로 전망하였다. 또한, Im et al. (2016)은 KOR-11 실험의 앙상블 결과를 분석하여 미래 극동아시아의 강수강도가 유의미하게 강해진다는 것을 보였다. Kim et al. (2018)은 STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes (STARDEX) 극한강수인자를 이용해 중배출 시나리오인 RCP4.5 시나리오보다 고배출 시나리오인 RCP8.5에서 집중호우와 연관된 극한 강수의 빈도와 강도가 미래 남한지역에 증가한다는 것을 보였다. Lee et al. (2017)은 미래 온난화로 극동아시아와 한반도의 여름철 강수 변화의 원인을 열역학적·역학적 요인으로 규명하였고, Park et al. (2022)는 남한의 강수 특성에 따라 구분된 지역별 강수 특성 변화를 전망하였다. 또한 Choi et al. (2016)은 다중 RCM 결과의 Standardized Precipitation Index (SPI)를 계산하여 가뭄 특성의 변화를 분석하였는데, 배출시나리오와 지역에 따라 미래 변화가 다를 수 있다는 것을 보였다.

미래 강수 변화뿐만 아니라 온도의 변화를 분석한 연구도 다수 수행되었는데 Suh et al. (2016)은 KOR-11 실험에 참여한 5개 RCM 결과를 분석해 남한 지역의 지상온도 변화를 전망하였고, Lee et al. (2016)

은 한반도를 포함한 극동아시아 지역의 미래 온난화 경향을 예측하였다. 또한, Im et al. (2017)은 KOR-11 실험의 다중 RCM 결과를 기반으로 남한의 열스트레스가 온난화로 미래에 증가한다는 것을 보였다.

이외에도 KOR-11 실험에 참여한 개별 모형 결과를 분석하여 한반도 지역기후변화를 전망한 연구들도 수행되었다. Cha et al. (2016)은 MM5 모형의 다양한 RCP 시나리오에 따른 미래 한반도 강수 변화를 분석하였는데 대류성 강수량은 시나리오의 배출 농도 정도에 비례해 증가하지만, 대규모 환경 변화의 영향을 받는 비대류성 강수량은 배출 농도와 연관성이 높지 않다는 것을 보였다. Oh and Suh (2018)은 21세기 후반 남한의 여름철 강수량의 일변화를 RegCM4를 이용해 분석하였고, Hong and Ahn (2015)는 한반도 주변의 초여름 강수의 미래 변화를 전망하였다. 또한 Ahn et al. (2014)과 Im et al. (2015)는 WRF 모형이 생산한 다양한 RCP 시나리오를 이용해 한반도의 온도와 강수량 변화를 예측하였다.

또한, KOR-11 실험 결과는 기후변화 과학 분야 연구뿐만 아니라 적응 및 정책과 같은 응용 연구에도 널리 활용되었다. Hur and Ahn (2017)은 다중 RCM 앙상블 결과를 이용하여 온난화에 따른 한반도의 주요 과수의 개화시기 변화를 전망하였고, Jeon et al. (2018)은 RCM 앙상블 결과를 수질모형의 입력자료로 사용해 태화강 유역의 미래 수질 변화를 예측하였다. 이외에도 Ahn et al. (2016b)은 WRF 모형 결과를 이용해 다양한 RCP 시나리오에 따른 극동아시아의 농업기후의 변화를 전망하였는데 미래 온난화로 한반도 북동지역을 제외한 대부분의 지역에서 잠재 쌀 생산량이 감소할 수 있다는 것을 보였다. 또한 Kim et al. (2022)는 HadGEM3-RA 모형의 시나리오를 이용해 미래 폭염 변화와 연관된 전력수요가 증가할 수 있다고 예측하였다.

이외에도 KOR-11 결과를 통계적 기법으로 추가 상

세화하여 남한지역에 대한 고해상도 기후변화 시나리오를 산출한 연구도 수행되었다. Kim et al. (2016)은 12.5 km 수평해상도를 가지는 지역기후모형 자료를 PRISM-based Dynamic downscaling Error correction (PRIDE) 모형과 Quantile Mapping (QM) 기법을 이용해 통계적으로 상세화하여 1 km 수평해상도를 갖는 한반도 자료를 생산하였다. 또한, So et al. (2017)은 완전한 Bayesian 체계 안의 조건적인 Copula function 기반 상세화 모형을 개발하고, 이를 KOR-11 실험 자료에서 나타나는 남한 강수의 intensity-duration frequency (IDF)의 미래 변화 분석에 활용하였다.

하지만 앙상블 기법을 위해 다중 지역기후모형을 이용하였음에도 불구하고, EAS-44와 KOR-11 실험은 단일 전지구 기후변화 시나리오를 상세화했다는 한계점이 있었다. 이를 극복하기 위하여 3개의 전지구 기후변화 시나리오를 동아시아 지역에 대해 다중 지역기후모형으로 역학적 상세화한 후 통계적 기법으로 남한지역에 대해 추가 상세화하는 EAS-22 실험이 후속 연구로 수행되었다(Fig. 2). Park et al. (2020)은 EAS-44와 EAS-22 실험에서 모의된 동아시아와 남한의 강수 차이를 비교해 고해상도 EAS-22에서 부가정보(added value)가 모의된다는 것을 보였다. Lee et al. (2020)는 EAS-44와 EAS-22 실험의 북서태평양 태풍 활동 모의 성능을 비교했는데 고해상도가 태풍 강도와 태풍 동반 강수 모의에 유리하다는 것을 보였다. Seo et al. (2019)는 EAS-22 실험의 WRF 모형 결과를 이용해 근미래 동아시아 지역의 극한 온도 증가를 전망하였다. EAS-22 실험 결과를 이용한 기후변화 응용 연구도 활발하게 이루어졌는데 Jo et al. (2019)는 미래 2도와 3도 온난화에 따라 쾨펜의 기후대 변화를 전망하였고, Jo et al. (2020)은 농업기후와 폭염의 미래 변화를 예측하였다. 또한 Ahn et al. (2020)은 EAS-22 실험의 결과를 이용해 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래 한반도의 쌀 생산 잠재량을 전망하였고,

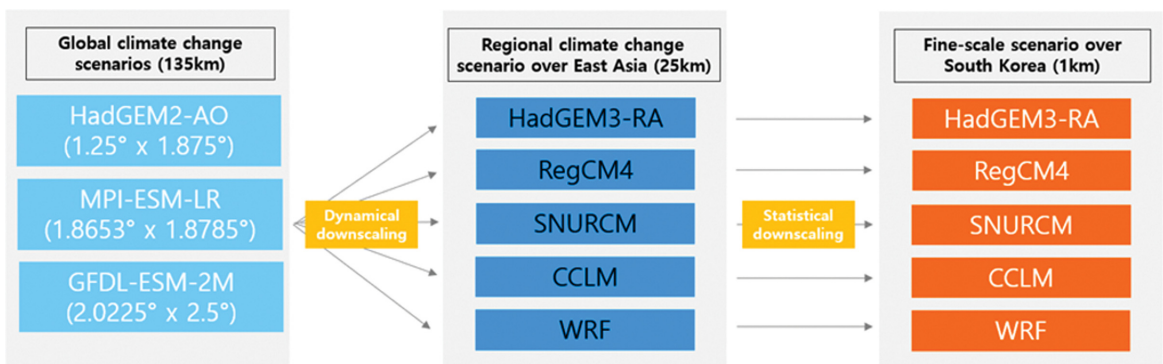


Fig. 2. Production of climate change scenarios for EAS-22 (25 km horizontal resolution) experiments in AR5.

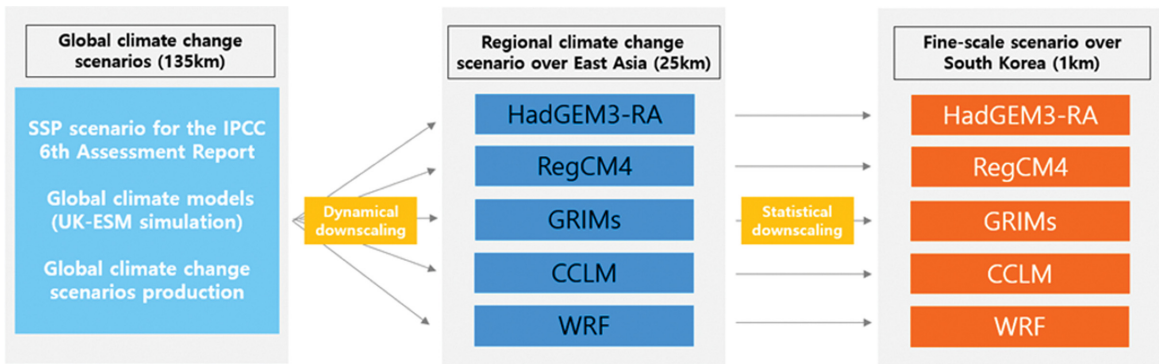


Fig. 3. Production of climate change scenarios for EAS-22 (25 km horizontal resolution) experiments in AR6.

Park et al. (2022)는 RCP8.5 시나리오 하에서 미래 온난화로 태양광 발전 효율이 다소 떨어져 발전 잠재력이 다소 감소할 수 있다는 것을 보였다. 이외에도 Kim et al. (2019)는 EAS-22 실험에 참여한 RegCM4 개별 모형 결과를 분석해 21C 중반과 후반의 동아시아 지역기후변화를 전망하였다.

3.2.3 6차 기후변화 평가보고서 기반 시나리오 산출 연구

2021년 출간된 AR6를 위해서 기상청과 국립기상과학원은 SSP 배출 시나리오를 기반으로 한 UKESM 기후모형을 이용해 전지구 기후변화 시나리오를 산출하였고, 이를 5개의 지역기후모형으로 역학적 상세화하여 동아시아 지역 기후변화 시나리오를 산출하였다 (Fig. 3).

SSP 배출 시나리오를 기반으로 수행된 상세 기후변화 시나리오 연구는 현재 진행 중인 연구들이 많아 아직 출간된 논문의 수가 많지는 않다. Juzbasic et al. (2022)는 SSP와 RCP 기반의 상세 시나리오들을 모두 이용해 동아시아의 미래 열스트레스 변화를 전망하였다. Lee et al. (2022)는 2.5 km 해상도의 Convection Permitting Model (CPM)을 이용하여 SSP5-8.5 시나리오 하의 미래 남한지역 극한 강수의 변화를 예측하였는데 21세기 후반 기온의 상승으로 인해 대류강도가 증가하여 전례 없는 극한 강수가 늦여름에 발생할 수 있다는 것을 보였다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 학회 창립 60주년을 맞아 그 동안 한반도 기후변화와 관련된 연구와 관련된 연구사업이 어떻게 진행되어 왔는지를 시대별로 구분하여 살펴보고자 하였다. 10여년전에 발간된 『한국기상학회 50년사』에는 기후변화 등 기상학의 세부분야 별로 따로

발전사를 다뤄본 적이 없었다. 따라서 50년사에서 다루지 못했던 특정 분야별 내용들을 포함해서 지난 60년 동안 각 분야별 연구활동의 발전사를 살펴보는 것은 특별한 의미가 있다. 기후변화와 관련한 문제는 21세기 환경분야에서 가장 큰 이슈가 될 수 있는 주제가 되기 때문에 본 논문에서는 그 동안의 연구활동의 내용들을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 우리나라 기후변화에 관한 연구를 태동기부터 최근에 이르기까지를 시대별로 구분하고 당시의 주요 연구사업별로 살펴본 있는데, 이는 대부분의 기후 관련 연구들이 이들 사업들의 배경과 추진 그리고 결과물과 밀접히 연관되어 있기 때문이다.

『한국의 기후(2004)』에 의하면 한국기상학회지가 발간된 후 37년간(1965~2002년) 학회지에 투고된 781편의 논문 중 102편(13.1%)이 기후 관련 논문이고 이들 중 37편(36.3%)이 기후변화 관련 논문이었다. 그러나 IPCC 1, 2차 보고서 이후 기후에 대한 개념이 정적인 것에서 동적인 것으로 바뀌면서 기상과 변화하는 기후에 대한 명확한 경계가 사라짐으로써 연간 게재되는 논문에서 기후 관련 논문이 차지하는 비중을 따지는 것 자체가 의미가 없어졌다. 더불어 2000년대 이전에 한국 기상학자들이 『한국기상학회지』 등 국내 학술지에 주로 투고를 한 것에 비해 2000년대 이후에는 국내뿐만 아니라 SCI급 국제학술지에 연구 결과물을 게재함으로써 한반도를 포함한 여러 지역에서의 기후변화에 관한 연구결과가 널리 공유되고 있다. 따라서 기후변화 연구의 부문에 있어서 최근 20여년 간의 학회의 연구 역량의 발전은 괄목할 만하다 할 수 있다.

지난 60년 기간 중, 2000년대 전까지 한국에서의 기후학 연구는 주로 일반기후, 종관기후, 응용기후(도시기후)가 주를 이루었다. 특히, 1990년대부터 기후변화가 기후연구에 활력을 불어일키며 중요한 분야로 자리를 차지하기 시작했다. 본문에서 살펴본 바와 같

이 2000대 이전을 기후변화 연구의 태동기라 한다면 2000년대는 지구대기 감시와 전지구-지역 시나리오를 산출을 시작하는 등 기후변화를 위한 사업과 연구를 시작하는 단계라 할 수 있다. 그리고 2010년대는 급격히 증가한 기후정보 수요에 대응하기 위한 기후변화 감시와 예측 기술이 확대되고 정교화되는 시기라 할 수 있다.

기상청과 한국기상학회가 주축이 되어 산출한 한반도 기후변화 상세 시나리오 정보는 기후변화 과학뿐만 아니라 적응, 정책, 완화 등 기후변화 연구의 기반이 되는 자료로 활용되고 있다. 따라서 상세 기후변화 시나리오의 신뢰도를 높이거나 불확실성을 명확하게 제시하는 것이 기후변화 연구를 위해서 반드시 필요하다. 현재 국내에서 AR6를 위해 산출된 상세 기후변화 시나리오는 하나의 전지구기후모형(UKESM)을 이용해 5개의 지역기후모형으로 역학적 상세화하였기에 불확실성을 분석하기에 한계가 있다. 따라서 다중 전지구 기후변화 시나리오를 다수의 지역기후모형으로 상세화하는 과정(Multi-GCM - Multi-RCM Chain)을 AR6 시나리오에 적용하는 연구가 향후 추진되어야 할 것이다.

또한 역학적 상세화에 활용되는 지역기후모형의 고도화가 추진되어야 한다. AR5와 AR6에 적용된 모형들의 해상도는 12.5~50 km이기 때문에 중규모대류계나 태풍중심의 강한 대류와 같은 중규모 현상들을 모형 격자 규모에서 직접 모의하는 것이 불가능하다. 최근 컴퓨팅 자원이 급격하게 발달하고 있기 때문에 대류를 모형이 직접 모의할 수 있는 CPM을 시나리오 산출에 활용하는 것을 고려할 필요가 있다. 이외에도 우리나라는 바다로 둘러싸여 있기 때문에 해양이 지역기후에 미치는 영향이 매우 크지만, 현재까지 대부분의 지역기후모형은 해양모형이 접합되어 있지 않아 장기 기후적분 시 비현실적인 대기-해양 상호작용 모의로 계통적 오차가 발생하는 문제가 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 해양모형이 접합된 지역지구시스템 모형(Regional Earth System Model)을 역학적 상세화에 활용할 필요가 있다.

또한 IPCC는 7차 기후변화 평가보고서(7th Assessment Report, AR7)를 위한 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP7) 기반의 시나리오를 새롭게 생산할 예정이다. 따라서 이에 맞춰 상세 기후변화 시나리오를 생산하기 위해 모형의 모의영역과 해상도, 참여모형의 구성, 산출할 변수의 종류와 시간간격 등의 산출 계획을 미리 준비해야 할 것이다.

본 논문에서 제시된 여러 기후변화 관련 연구나 사업 이외에도 독립된 연구사업이나 연구 등을 통해서 진행된 훌륭한 결과나 논문, 저서 등 다양한 성과들이 많다. 그러나 본 논문에서 주어진 지면을 통해서

소개될 수 있는 사업과 성과가 제한되어 있는 만큼 미진한 부분은 추후 기획 사업 등을 통해 소개될 기회가 있어야 할 것이다. 이 논문을 통해 향후 빠르게 진행될 기후변화와 이에 따를 위기에 대한 과학적 근거를 제시하려는 우리 학회의 그 동안의 연구활동 내용을 뒤돌아보으로써 기후변화 분야의 탁월한 발전사와 중요성을 새롭게 인식하는 계기가 될 것이라 본다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., 1992: A heat Flux Correction Method Applicable to a Climate Model Experiment. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **28**, 183-191.
- _____, H.-S. Park, and J.-W. Kim, 1997: On the intraseasonal oscillation in CGCM Tr7W6. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 709-723. (in Korean with English abstract).
- _____, and J.-W. Kim, 1998: Long-term responses of CGCM Tr7W6 to gradual increase of CO₂: part I. annual trends of climate variables. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 263-271 (in Korean with English abstract).
- _____, Y.-W. Choi, S.-R. Jo, and J.-Y. Hong, 2014: Projection of 21st century climate over Korean Peninsula: temperature and precipitation simulated by WRFV3.4 based on RCP4.5 and 8.5 scenarios, *Atmosphere*, **24**, 541-554, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.4.541 (in Korean with English abstract).
- _____, and Coauthors., 2016a: Changes of precipitation extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 223-236, doi: 10.1007/s13143-016-0021-0.
- _____, J.-H. Hong, and K.-M. Shim, 2016b: Agro-climate changes over Northeast Asia in RCP scenarios simulated by WRF. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1278-1290, doi: 10.1002/joc.4423.
- _____, and Coauthors., 2020: Climatic yield potential of Japonica-type rice in the Korean Peninsula under RCP scenarios using the ensemble of multi-GCM and multi-RCM chains. *Int. J. Climatol.*, **41**, E1287-E1302, doi: 10.1002/joc.6767.
- Ahn, Y.-I., and D.-K. Lee, 2002: Impact of bogus tropical cyclones on summertime circulation in regional climate simulation. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4303, doi: 10.1029/2001JD000416.
- Baek, H.-J., and Coauthors., 2013: Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 603-618, doi: 10.1007/s13143-013-0053-7.

- Cha, D.-H., D.-K. Lee, and S.-Y. Hong, 2008: Impact of boundary layer processes on seasonal simulation of the East Asian summer monsoon using a regional climate model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **100**, 53-72, doi: 10.1007/s00703-008-0295-6.
- _____, and D.-K. Lee, 2009: Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique. *J. Geophys. Res.*, **114**, D14108, doi: 10.1029/2008JD011176.
- _____, C.-S. Jin, and D.-K. Lee, 2011: Impact of local SST anomaly over the western North Pacific on extreme East Asian summer monsoon. *Clim. Dyn.*, **37**, 1691-1705, doi: 10.1007/s00382-010-0983-z.
- _____, D.-K. Lee, C.-S. Jin, G. Kim, Y.-H. Choi, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2016: Future changes in summer precipitation in regional climate simulations over the Korean Peninsula forced by Multi-RCP scenarios of HadGEM2-AO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 139-149, doi: 10.1007/s13143-016-0015-y.
- Cho, H.-K., 1968: Radiation balance over Korea, *J. Korean Meteorol. Soc.*, **4**, 8-12 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., D.-H. Cha, and D.-K. Lee, 2008: Simulation of the 18-day summer heavy rainfall over East Asia using a regional climate model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12101, doi: 10.1029/2007JD009213.
- Choi, Y.-W., J.-B. Ahn, M.-S. Suh, D.-H. Cha, D.-K. Lee, S.-Y. Hong, S.-K. Min, S.-C. Park, and H.-S. Kang, 2016: Future changes in drought characteristics over South Korea using multi regional climate models with the standardized precipitation index. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 209-222, doi: 10.1007/s13143-016-0020-1.
- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi, and G. T. Bates, 1989: A regional climate model for the western United States. *Climate Change*, **15**, 383-342.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, **11**, 3204-3229.
- Ha, K.-J., and J.-W. Kim, 1993: An experimental study of long-range forecasts: I. monthly mean forecast. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **29**, 37-52 (in Korean with English abstract).
- Heo, C.-H., and I.-S. Kang, 1996: A parameterization of the terrestrial radiation suitable for a climate model: absorption bands of water vapor. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **32**, 29-39 (in Korean with English abstract).
- Hong, J.-H., and J.-B. Ahn, 2015: Changes of early summer precipitation in the Korean Peninsula and nearby regions based on RCP simulations. *J. Clim.*, **28**, 3557-3578, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00504.1.
- Hur, J., and J.-B. Ahn, 2017: Assessment and prediction of the first-flowering dates for the major fruit trees in Korea using a multi-RCM ensemble. *Int. J. Climatol.*, **37**, 1603-1618. doi: 10.1002/joc.4800.
- Im, E.-S., and W.-T. Kwon, 2007: Characteristics of extreme climate sequences over Korea using a regional climate change scenario. *SOLA*, **3**, 17-20, doi: 10.2151/sola.2007-005.
- _____, J.-B. Ahn, and S.-R. Jo, 2015: Regional climate projection over South Korea simulated by the HadGEM2-AO and WRF model chain under RCP emission scenarios. *Clim. Res.*, **63**, 249-266, doi: 10.3354/cr01292.
- _____, Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2016: Robust intensification of hydroclimatic intensity over East Asia from multi-model ensemble regional projections. *Theor. Appl. Climatol.*, **129**, 1241-1254, doi: 10.1007/s00704-016-1846-2.
- _____, _____, and _____, 2017: Worsening of heat stress due to global warming in South Korea based on Multi-RCM ensemble projections. *J. Geophys. Res., Atmosphere*, **122**, 11444-11461, doi: 10.1002/2017JD026731.
- IPCC, 2007: Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.
- _____, 2013: Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1585 pp.
- _____, 2021: Climate Change 2021, The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2391 pp.
- Jeon, D.-J., M. Ligaray, M. Kim, G. Kim, G. Lee, Y. A. Pachepsky, D.-H. Cha, and K. H. Cho, 2019: Evaluating the influence of climate change on the fate and transport of fecal coliform bacteria using the modified SWAT model. *Sci. Total Environ.*, **658**, 753-762, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.213.
- Jin, C.-S., D.-H. Cha, D.-K. Lee, M.-S. Suh, S.-Y. Hong, H.-S. Kang, and C.-H. Ho, 2016: Evaluation of climatological tropical cyclone activity over the western North Pacific in the CORDEX-East Asia multi-

- RCM simulations. *Clim. Dyn.*, **47**, 765-778, doi: 10.1007/s00382-015-2869-6.
- Jo, S., J.-B. Ahn, D.-H. Cha, S.-K. Min, M.-S. Suh, Y.-H. Byun, and J.-U. Kim, 2019: The Köppen Trewartha climate-type changes over the CORDEX-East Asia phase 2 domain under 2 and 3°C global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 14030-14041, doi: 10.1029/2019GL085452.
- Jung, I.-W., H.-J. Kim, H.-J. Shin, J.-Y. Choi, M.-H. Kim, and J.-W. Kim, 2006: Development status of YONU AGCM, *Proceedings of the spring meeting of the Korean Meteorological Society*, 90-91 [Available online at <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00944746>] (in Korean).
- Jung, J.-H., J.-H. Oh, and J.-W. Kim, 1995: Preliminary verification of YONU GCM St14, *Proceedings of the spring meeting of the Korean Meteorological Society*, 35 pp (in Korean).
- Juzbasic, A., J.-B. Ahn, D.-H. Cha, E.-C. Chang, and S.-K. Min, 2022: Changes in heat stress considering temperature, humidity, and wind over East Asia under RCP8.5 and SSP5-8.5 scenarios. *Int. J. Climatol.*, **42**, 6579-6595. doi: 10.1002/joc.7636.
- Kang, H.-S., D.-H. Cha, and D.-K. Lee, 2005: Evaluation of the MM5/LSM coupled model for East Asian summer monsoon simulations, *J. Geophys. Res.*, **110**, D10105, doi: 10.1029/2004JD0005266.
- Kang, I.-S., 1994: The scenario of temperature change in Korea associated with global warming (I). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 247-260 (in Korean with English abstract).
- Kim, G., and Coauthors, 2018: Future change in extreme precipitation indices over Korea. *Int. J. Climatol.*, **38**, e862-e874, doi: 10.1002/joc.5414.
- _____, and Coauthors, 2021: Evaluation and projection of regional climate over East Asia in CORDEX-East Asia phase I experiment, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 119-134, doi: 10.1007/s13143-020-00180-8.
- Kim, J.-E., and S.-Y. Hong, 2007: Impact of soil moisture anomalies on summer rainfall over East Asia: a regional climate model study. *J. Climate*, **20**, 5732-5743.
- Kim, J.-W., and K.-J. Ha, 1987: Climatic change and inter-annual fluctuations in the monthly amounts of precipitation at Seoul. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **23**, 54-69.
- _____, and H.-J. Shin, 2005: Development of YONU AGCM. *Proceedings of the spring meeting of the Korean Meteorological Society*, 466-467 (in Korean).
- Kim, M.-K., I.-S. Kang, and C.-H. Kwak, 1999: The estimation of urban warming amounts due to urbanization in Korea for the recent 40 years. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **35**, 118-126 (in Korean with English abstract).
- _____, M.-S. Han, D.-H. Jang, S.-G. Baek, W.-S. Lee, Y.-H. Kim, and S. Kim, 2012: Production technique of observation grid data of 1km resolution. *J. Clim. Res.*, **7**, 55-68 (in Korean with English abstract).
- _____, S. Kim, J. Kim, J. Heo, J.-S. Park, W.-T. Kwon, and M.-S. Suh, 2016: Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: Part 1, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 79-89, doi: 10.1007/s13143-016-0010-3.
- Kim, S.-S., 1979: Weather conditions with snowfall of more than 10 cm in South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **15**, 1-10 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.-J., M.-S. Suh, and E.-C. Chang, 2019: Prospect of climate changes for the mid and late 21st century using RegCM4.0 over CORDEX II East Asian region. *Atmosphere*, **29**, 165-181, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.2.165 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Y. Choi, and S.-K. Min, 2022: Future changes in heat wave characteristics and their impacts on the electricity demand in South Korea. *Weather. Clim. Extremes*, **37**, 100485, doi: 10.1016/j.wace.2022.100485.
- Kim, Y.-H., J.-B. Ahn, M.-S. Suh, D.-H. Cha, E.-C. Chang, S.-K. Min, Y.-H. Byun, and J.-U. Kim, 2023: Future changes in extreme heatwaves in terms of intensity and duration over the CORDEX-East Asia phase 2 domain using multi-GCM and multi-RCM chains. *Environ. Res. Lett.* (accepted).
- KIOST, 2019: Development of Climate Prediction Simulator and Ocean Observation for the Integrated Climate Prediction System. Korea Institute of Ocean Science & Technology, 25 pp (in Korean).
- KMA, 2012: 2012 Understanding Climate Change Scenarios and Use Casebook. Korea Meteorological Administration, 65 pp (in Korean).
- _____, 2017: Climate Change Prospect Report on the Korean Peninsula in Preparation for the New Climate Regime. Korea Meteorological Administration, 153 pp (in Korean).
- _____, 2022: 2022 Understanding Climate Change Scenarios and Use Casebook. Korea Meteorological Administration, 69 pp (in Korean).
- KMI, 2019: Meteorological?Earthquake See-At Technology Development Research Project Technology Introduction. Korea Meteorological Institute, 452 pp (in

- Korean).
- KMS, 2007: 50th anniversary. Korean Meteorological Society, 357 pp (in Korean).
- Lee, D., and Coauthors, 2016: Time of emergence of anthropogenic warming signals in the Northeast Asia assessed from multi-regional climate models. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 129-137, doi: 10.1007/s13143-016-0014-z.
- _____, and Coauthors, 2017: Thermodynamic and dynamic contributions to future changes in summer precipitation over Northeast Asia and Korea: A multi-RCM study. *Clim. Dyn.*, **49**, 4121-4139, doi: 10.1007/s00382-017-3566-4.
- _____, _____, I.-H. Park, J.-B. Ahn, D.-H. Cha, E.-C. Chang, and Y.-H. Byun, 2022: Enhanced role of convection in future hourly rainfall extremes over South Korea. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, e2022GL099727, doi: 10.1029/2022GL099727.
- Lee, D.-K., and M.-S. Suh, 2000: Ten-year Asian summer monsoon simulation using a regional climate model (RegCM2). *J. Geophys. Res.*, **105**, 29565-29577, doi: 10.1029/2000JD900438.
- _____, _____, and H. S. Kang, 2004: Regional climate simulation for the 1998 summer flood over East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1735-1753.
- _____, _____, and S.-J. Choi, 2005: A sensitivity study of regional climate simulation to convective parameterization schemes for 1998 East Asian summer monsoon. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **16**, 989-1015, doi: 10.3319/TAO.2005.16.5.989(RCS).
- _____, _____, C.-S. Jin, and S.-J. Choi, 2013: A regional climate change simulation over East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 655-664, doi: 10.1007/s13143-013-0058-2.
- Lee, H., C.-S. Jin, D.-H. Cha, M. Lee, D.-K. Lee, M.-S. Suh, S.-Y. Hong, and H.-S. Kang, 2019: Future change in tropical cyclone activity over the western North Pacific in the CORDEX-East Asia multi-RCMs forced by HadGEM2-AO. *J. Climate*, **32**, 5053-5067, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0575.1.
- Lee, H.-Y., J. S. Lee, B. Hall, E. Dlugokencky, S. M. Kim, and Y.-H. Kim, 2021: Inter-comparison activities of the WMO/GAW world calibration centre for SF6: a strategy for the high precision atmospheric measurements. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **37**, 512-522, doi: 10.5572/KOSAE.2021.37.3.512 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., J. Kim, M.-A. Sun, B.-H. Kim, H. Moon, H. M. Sung, J. Kim, and Y.-H. Byun, 2020: Evaluation of the Korea Meteorological Administration Advanced Community Earth-System model (K-ACE). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **56**, 381-395, doi: 10.1007/s13143-019-00144-7.
- Lee, J.-W., S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2014: Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Clim. Dyn.*, **42**, 733-747, doi: 10.1007/s00382-013-1841-6.
- Lee, M., D.-H. Cha, M.-S. Suh, E.-C. Chang, J.-B. Ahn, S.-K. Min, and Y.-H. Byun, 2020: Comparison of tropical cyclone activities over the western North Pacific in CORDEX-East Asia phase I and II experiments. *J. Climate*. **33**, 10593-10607, doi: 10.1175/JCLI-D-19-1014.1.
- Lee, M.-I., and I.-S. Kang, 1997: Temperature variability and warming in the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 429-443 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-M., J.-W. Kim, H.-K. Cho, and T.-Y. Lee, 1991: Research on the parameterized processes in climate models: I. the change of surrounding by a transient shallow cumulus. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **27**, 257-266 (in Korean with English abstract).
- _____, 1993: The future of Korean atmospheric science. *Atmosphere*, **3**, 28-34. [Available online at <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00942559>] (in Korean).
- Lee, T. Y., J. W. Kim, H. K. Cho, S. M. Lee, and K. H. Lee, 1992: Research on the parameterized processes in climate models: II. diurnal variation of stratocumulus-topped marine boundary layer. *J. Korean Meteorol. Soc.*, **28**, 9-28 (in Korean with English abstract).
- Lee, W.-S., 1999: A study on the ENSO using CGCM (Doctoral dissertation). Yonsei University, 170 pp (in Korean).
- NIMS, 2001: Advancement of Greenhouse Gas Reduction Technologies to Mitigate Climate Change; Development of Detection Techniques of Climate Change Signals. National Institute of Meteorological Sciences, 346 pp (in Korean).
- _____, 2003: Detection of Regional Climate Change Induced by Greenhouse Gas. National Institute of Meteorological Sciences, 380 pp (in Korean).
- _____, 2004: The Development of Regional Climate Change Scenario for the National Climate Change Report (III), National Institute of Meteorological Sciences. 510 pp (in Korean).
- _____, 2005: Development of Monitoring Technology for

- Background Atmosphere and Climate Change over Korean Peninsula. National Institute of Meteorological Sciences, 255 pp (in Korean).
- _____, 2007a: Korea's Climate. National Institute of Meteorological Sciences, 417 pp (in Korean).
- _____, 2007b: The Application of Regional Climate Change Scenario for the National Climate Change Report (III). National Institute of Meteorological Sciences, 178 pp (in Korean).
- _____, 2007c: 30th anniversary. National Institute of Meteorological Sciences, 411 pp (in Korean).
- _____, 2008: Development of Earth System Model. National Institute of Meteorological Sciences, 469 pp (in Korean).
- _____, 2012a: Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction (IV). National Institute of Meteorological Sciences, 355 pp (in Korean).
- _____, 2012b: Global Climate Change Report 2012. National Institute of Meteorological Sciences, 100 pp (in Korean).
- _____, 2015: Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction (VII). National Institute of Meteorological Sciences, 102 pp (in Korean).
- _____, 2018: Development and Application of Methodology for Climate Change Prediction (X). National Institute of Meteorological Sciences, 155 pp (in Korean).
- _____, 2019: Global Climate Change Prospect Report in response to IPCC 6th Assessment Report. National Institute of Meteorological Sciences, 33 pp (in Korean).
- _____, 2020a: Korean Peninsula Climate Change Prospect Report 2020. National Institute of Meteorological Sciences, 38 pp (in Korean).
- _____, 2020b: Report of Global Atmosphere Watch Special Edition. National Institute of Meteorological Sciences, 22 pp (in Korean).
- _____, 2021a: Development and application of technology for Asian dust and haze: research and development for KMA weather, climate, and earth system services. National Institute of Meteorological Sciences, 118 pp (in Korean).
- _____, 2021b: South Korea Detailed Climate Change Outlook Report. National Institute of Meteorological Sciences, 58 pp (in Korean).
- Min, S.-K., S. Legutke, A. Hense, U. Cubach, W.-T. Kwon, J.-H. Oh and U. Schlese, 2006: East Asian climate change in the 21st century as simulated by the coupled climate model ECHO-G under IPCC SRES scenarios. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **84**, 1-26.
- MSIT, MOTIE, MOLIT, ME, and MOHW, 1996: List of leading technology development projects for 1995 (G7 project). Ministry of Science and ICT, Ministry of Trade, Industry and Energy, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Ministry of Environment, Ministry of Health and Welfare, 376 pp [Available online at https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?sessionId=rVxKbfjScsUGKrkH6BGtvMu0QehjhC0ZkCQAVJWfdVPU95uHjph91gY8j7oXJT61.codil_servlet_engine1?pMetaCode=OTMCRK050796&gubun=rpt] (in Korean).
- Oh, H.-T., H.-J. Kim, and J.-W. Kim, 2000: A Study on the Improvement of the Surface Scheme and the Performance of YONU AGCM, *Proceedings of the spring meeting of the Korean Meteorological Society*, 73-76 (in Korean).
- Oh, J.-H., J.-H. Jung, and J.-W. Kim, 1994a: Radiative transfer model for climate studies. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 261-287.
- _____, C.-E. Park, J.-W. Kim, and H.-J. Seang, 1994b: Impact of climatic change in Korea due to CO₂ doubling (scenarios for the precipitation change). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 335-362 (in Korean with English abstract).
- _____, T. Kim, M.-K. Kim, S.-H. Lee, S.-K. Min, and W.-T. Kwon, 2004: Regional climate simulation for Korea using dynamic downscaling and statistical adjustment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1629-1643.
- Oh, S.-G., J.-H. Park, S.-H. Lee, and M.-S. Suh, 2014: Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 2913-2927, doi: 10.1002/2013JD020693.
- _____, and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. part 2: precipitation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 171-189, doi: 10.1007/s13143-016-0017-9.
- _____, and M.-S. Suh, 2018: Changes in seasonal and diurnal precipitation types during summer over South Korea in the late twenty-first century (2081~2100) projected by the RegCM4.0 based on four RCP scenarios. *Clim. Dyn.*, **51**, 3041-3060, doi: 10.1007/s00382-017-4063-5.
- Oh, Y., and Coauthors, 2018: Characteristics of greenhouse gas concentration derived from ground-based FTS spectra at Anmyeondo, South Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 2361-2374, doi: 10.5194/amt-11-

- 2361-2018.
- Park, C., S.-K. Min, D. Lee, D.-H. Cha, M.-S. Suh, H.-S. Kang, S.-Y. Hong, D.-K. Lee, H.-J. Baek, K.-O. Boo, and W.-T. Kwon, 2016: Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia. *Clim. Dyn.*, **46**, 2469-2486, doi: 10.1007/s00382-015-2713-z.
- _____, and _____, 2019: Multi-RCM near-term projections of summer climate extremes over East Asia. *Clim. Dyn.*, **52**, 4937-4952, doi: 10.1007/s00382-018-4425-7.
- _____, D.-H. Cha, G. Kim, G. Lee, D.-K. Lee, M.-S. Suh, S.-Y. Hong, J.-B. Ahn, and S.-K. Min, 2020: Evaluation of summer precipitation over far East Asia and South Korea simulated by multiple regional climate models. *Int. J. Climatol.*, **40**, 2270-2284, doi: 10.1002/joc.6331.
- _____, S.-W. Shin, G. Kim, D.-H. Cha, S.-K. Min, D. Lee, Y.-H. Byun, and J.-U. Kim, 2022: What determines future changes in photovoltaic potential over East Asia? *Renew. Energ.*, **185**, 338-347, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.029.
- Park, J., 2000: Prediction of Global Warming in the Period of Double Increase of CO₂ Using YEONU CGCM. (Doctoral dissertation, Yonsei University). 144 pp (in Korean).
- Park, S.-H., and S.-Y. Hong, 2004: The role of surface boundary forcing over south Asia in the Indian summer monsoon circulation: a regional climate model sensitivity study. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L12112, doi: 10.1029/2004GL019729.
- Rodgers, K.-B., and Coauthors, 2021: Ubiquity of human-induced changes in climate variability. *Earth Syst. Dynam.*, **12**, 1393-1411, doi: 10.5194/esd-2021-50.
- Seo, G.-Y., Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2019: Near future projection of extreme temperature over CORDEX-East Asia phase 2 region using the WRF model based on RCP scenarios. *Atmosphere*, **29**, 585-597 (in Korean with English abstract).
- Seol, K.-H., and S.-Y. Hong, 2009: The relation between the Tibetan snow in spring and the East Asia summer monsoon in 2003: A Global and regional model study. *J. Climate*, **22**, 2095-2110.
- SNU, 2015: Estimation of Background Aerosol Climate Forcing over the Korean Peninsula, Seoul National University, 154 pp (in Korean).
- So, B.-J., J.-Y. Kim, H.-H. Kwon, and C. H. R. Lima, 2017: Stochastic extreme downscaling model for an assessment of changes in rainfall intensity-duration-frequency curves over South Korea using multiple regional climate models. *J. Hydrol.*, **553**, 321-337, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.061.
- Song, M.-D., H.-Y., Jeon, and J.-W. Kim, 1999: A study on the development of parametric method of Gravity Wave Drag Induced by Convection (GWDC) and its effect on YUGCM ST15. *Proceedings of the spring meeting of the Korean Meteorological Society*, 141-144 (in Korean).
- Suh, M.-S., S.-G. Oh, D.-K. Lee, D.-H. Cha, S.-J. Choi, C.-S. Jin, and S.-Y. Hong, 2012: Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea. *J. Clim.*, **25**, 7067-7082, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00457.1.
- _____, and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. part 1: surface air temperature. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 151-169, doi: 10.1007/s13143-016-0017-9.
- Sung, H. M., and Coauthors, 2021: Climate change projection in the 21st century simulated by NIMS-KMA CMIP6 model based on new GHGs concentration pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 851-862, doi: 10.1007/s13143-021-00225-6.
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 1977: Atmospheric Science: An Introductory Survey. Academic Press, 467 pp.
- Wengel, C., S.-S. Lee, M. F. Stuecker, A. Timmermann, J.-E. Chu and F. Schloesser, 2021: Future high-resolution El Nino/Southern Oscillation dynamics. *Nat. Clim. Change*, **11**, 758-765, doi: 10.1038/s41558-021-01132-4.
- Wu, F.-T., S.-Y. Wang, C.-B. Fu, Y. Qian, Y. Gao, D.-K. Lee, D.-H. Cha, J.-P. Tang, and S.-Y. Hong, 2016: Evaluation and projection of summer extreme precipitation over East Asia in the regional model inter-comparison project. *Clim. Res.*, **69**, 45-58, doi: 10.3354/cr01384.
- Yhang, Y.-B., and S.-Y. Hong, 2008: A simulated climatology of the East Asian summer monsoon using a regional spectral model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 325-339.