

기술노트

## AR7 대응 동아시아 지역 기후 시나리오 산출체계 구축 연구

김진옥\*<sup>†</sup> · 김태준\*\* · 심재관\*\*\* · 정주용\*\*\* · 김도현\* · 부경은\*\*\*\* · 민승기\*\*\*\*\* · 차동현\*\*\*\*\* · 장은철\*\*\*\*\* · 심성보\*\*\*\*\*

\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, \*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, \*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관, \*\*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장, \*\*\*\*\*포항공과대학교 환경공학부 교수, \*\*\*\*\*울산과학기술원 기후환경도시건설공학과 교수, \*\*\*\*\*공주대학교 대기과학과 교수, \*\*\*\*\*기상청 기후과학국 기후위기협력팀 사무관

### Development of a next-generation regional climate scenario system toward IPCC AR7 for East Asia

Kim, Jin-Uk\*<sup>†</sup> · Kim, Tae-Jun\*\* · Shim, Jae-Kwan\*\*\* · Chung, Chu-Yong\*\*\* · Kim, Do-Hyun\* · Boo, Kyung-On\*\*\*\* · Min, Seung-Ki\*\*\*\*\* · Cha, Dong-Hyun\*\*\*\*\* · Chang, Eun-Chul\*\*\*\*\* and Shim, Sungbo\*\*\*\*\*

\*Research Scientist, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

\*\*Researcher, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*Senior Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*\*Director, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Division of Environmental Science and Engineering, POSTECH, Pohang, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Dept. of Civil Urban Earth and Environmental Engineering, UNIST, Ulsan, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Dept. of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

\*\*\*\*\*Deputy Director, Climate Crisis Cooperation Division, KMA, Daejeon, Korea

### ABSTRACT

In preparation for the IPCC Seventh Assessment Report (AR7), this study presents a high-resolution regional climate scenario framework for East Asia that incorporates the latest scientific advances and policy demands. The framework, referred to as EAS-11, employs the WRF version 4.4 regional climate model at a horizontal resolution of 12 km, offering four times finer detail than the preceding EAS-22 experiments. Ten ensemble members will be generated through combinations of two microphysics schemes (WSM6, P3), two cumulus parameterization schemes (MSKF, BMJ), two planetary boundary layer schemes (YSU, MYJ), and two coupled ocean - atmosphere configurations using the COAWST system. The coupled model integrates WRF version 4.2.2 with ROMS 3.9. For the EAS-11 experiments, the K-ACE2 global model outputs will be used as the boundary forcing for both historical (1950 - 2021) and scenario (2022 - 2100) experiments based on six CMIP7 greenhouse gas emission pathways. The modeling domain aligns with the CORDEX-EA Phase 2 boundaries, with refined topography, 35 vertical layers, and spectral nudging to maintain large-scale circulation. The resulting dataset, approximately 1 PB in NetCDF4 format, includes more than 50 atmospheric and land-surface variables at temporal resolutions ranging from hourly to daily. The EAS-11 delivers a standardized and high-resolution climate dataset, providing a critical foundation for climate impact assessments, adaptation and mitigation strategies, and collaborative research across East Asia.

Key words : IPCC AR7, CORDEX, East Asia, EAS-11

<sup>†</sup>Corresponding author : [jukim86@korea.kr](mailto:jukim86@korea.kr) (National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6783)

ORCID	김진옥 0000-0001-9892-9915	부경은 0000-0002-1505-578X
	김태준 0000-0002-5452-4796	민승기 0000-0002-6749-010X
	심재관 0009-0006-7808-3805	차동현 0000-0001-5053-6741
	정주용 0000-0001-5330-9456	장은철 0000-0002-5784-447X
	김도현 0000-0002-3829-5532	심성보 0000-0002-3533-5818

Received: August 19, 2025 / Revised: September 5, 2025 / Accepted: September 29, 2025

## 1. 서론

전 지구적인 기후변화는 점차 가속화되고 있으며, 이에 따른 다양한 영향이 전 세계적으로 관측되고 있다. IPCC 제6차 평가보고서(Sixth Assessment Report; AR6)에 따르면, 산업화 이전(1850~1900) 대비 최근 10년(2011~2020)의 전지구 평균기온은 약 1.1°C 상승하였으며, 이로 인해 폭염, 집중호우, 가뭄, 해수면 상승 등 다양한 극한기상 및 기후재해가 증가하고 있다(IPCC, 2023). 이러한 변화는 인류 사회의 생존 기반과 경제활동 전반에 심각한 영향을 미치고 있으며, 앞으로도 온실가스 배출 시나리오에 따라 기후위험은 더욱 심화될 것으로 전망된다.

아시아 지역은 인구 밀집 지역과 주요 경제권이 분포하고 있는 동시에, 지형적·기후적 특성으로 인해 온난화가 빠르게 진행되어 다양한 기후 재난 발생의 가능성이 높은 대표적인 취약 지역이다(WMO, 2025). 최근 동아시아 지역에서는 폭염, 한파, 태풍, 집중호우 등 기상 재해의 발생 빈도와 강도가 증가하고 있으며, 기후변화로 인한 사회·경제적 피해도 점차 확대되고 있다(Choi et al., 2009; Zhou and Ren, 2011). 이러한 지역 특성으로 인해 동아시아에서는 국가별 및 지역별 맞춤형 기후위험 분석과 대응 전략 수립의 필요성이 더욱 강조되고 있다.

지역적 기후 특성을 고려한 고해상도 지역 기후실험은 효과적인 기후변화 대응 전략 수립의 필수적인 기반 자료로 활용되고 있다. 전지구 기후모델(Global Climate Model; GCM)은 대규모 기후변화 경향을 파악하는 데 유용하지만, 공간해상도가 상대적으로 낮아 지역 차원의 세밀한 기후정보 제공에는 한계가 있다. 이에 따라 지역 기후모델(Regional Climate Model; RCM)과 다양한 다운스케일링 기법을 활용한 고해상도 지역 기후 시나리오 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 이는 농업, 방재, 에너지 등 다양한 분야에서 국가 기후변화 영향·취약성 평가, 기후위험 리스크 분석을 위해 활용되고 있다(Jo et al., 2023; Kim et al., 2023a, 2024).

이러한 노력의 일환으로, 기상청 국립기상과학원은 국내 학계와 공동으로 세계 기후연구 프로그램(World Climate Research Program; WCRP) 산하의 지역 상세화 국제 프로젝트(COordinated Regional climate Downscaling Experiment; CORDEX)의 동아시아(East Asia; EA) 연구 그룹에 참여하고 있다(Choi and Ahn, 2017; Kim et al., 2022; Lee et al., 2014; Oh et al., 2014; Park et al., 2013). CORDEX-EA는 IPCC AR5 및 AR6 과정에서 동아시아

지역 기후 시나리오 생산의 핵심적인 역할을 수행하며, 다중 지역 기후모델 기반의 기후변화 전망자료를 제공하고 있다. 또한 CORDEX-EA의 산출물을 입력자료로 활용하는 기상청 남한상세 기후변화 시나리오는 학술 연구뿐만 아니라, 지역 기후 영향평가와 기후변화 적응대책 수립 등에 폭넓게 활용되고 있다(KMA, 2025).

그러나 더욱 상세하고 다양한 지역별 기후변화 적응대책 수립을 위하여, 보다 향상된 공간해상도, 최신 온실가스 시나리오, 다중 앙상블 기반의 불확실성 고려 등 기존 대비 한층 고도화된 지역 기후 시나리오 제공이 요구되고 있다. 또한, 동아시아 지역 내 기후위험 대응 수요의 증가와 더불어 IPCC AR7 Fast Track의 추진 일정을 고려하면, 보다 정교하고 체계적인 지역 기후 시나리오 생산 시스템의 구축이 시급한 과제로 대두되고 있다(Dunne et al., 2024).

이에 본 연구에서는 AR7 대응을 위하여 새롭게 구축되고 있는 동아시아 지역 기후 시나리오 산출체계를 소개하고자 한다. 본 논문의 2장에는 기상청 국립기상과학원의 기존 동아시아 지역 기후연구 활동 내역을 소개하고 3장에는 신규 동아시아 시나리오 산출 전략을 제시하였다. 4장에는 시나리오 산출을 위한 지역 기후모델의 구축 정보 및 기술적 특징을 소개하고, 5장에는 요약 및 결론을 기술하였다. 이를 통해 향후 AR7 평가 과정 및 동아시아 지역, 한반도의 기후변화 영향평가와 적응정책 수립에 본 시스템 자료의 이용을 증진하고자 한다.

## 2. 기존 동아시아 지역 기후변화 전망 연구 활동

국제사회가 기후변화에 대응하기 위한 정책과 연구 방향을 설정하는 과정에서, IPCC 기후변화 평가보고서는 중요한 과학적 근거를 제공해왔다. 이에 따라 국내에서도 IPCC의 평가보고서에 맞춰 한반도 및 동아시아 지역의 상세 기후변화 시나리오 산출 연구가 단계적으로 추진되어왔다.

첫 번째로 2007년 출간된 IPCC 4차 평가보고서(AR4)에 대응하기 위한 시도로, 2000년대 중반부터 국내 연구 기관들이 본격적으로 지역 기후모델을 활용하여 한반도 및 동아시아의 미래기후를 더욱 세밀하게 전망하기 시작하였다. 먼저, 국립기상과학원은 독일 막스플랑크연구소에서 개발한 ECHO-G 전지구 기후모델을 기반으로 SRES (Special Report on Emission Scenarios)의 시나리오 3종(A1B, A2, B2)에 따른 수평해상도 350 km 규모의 전지구

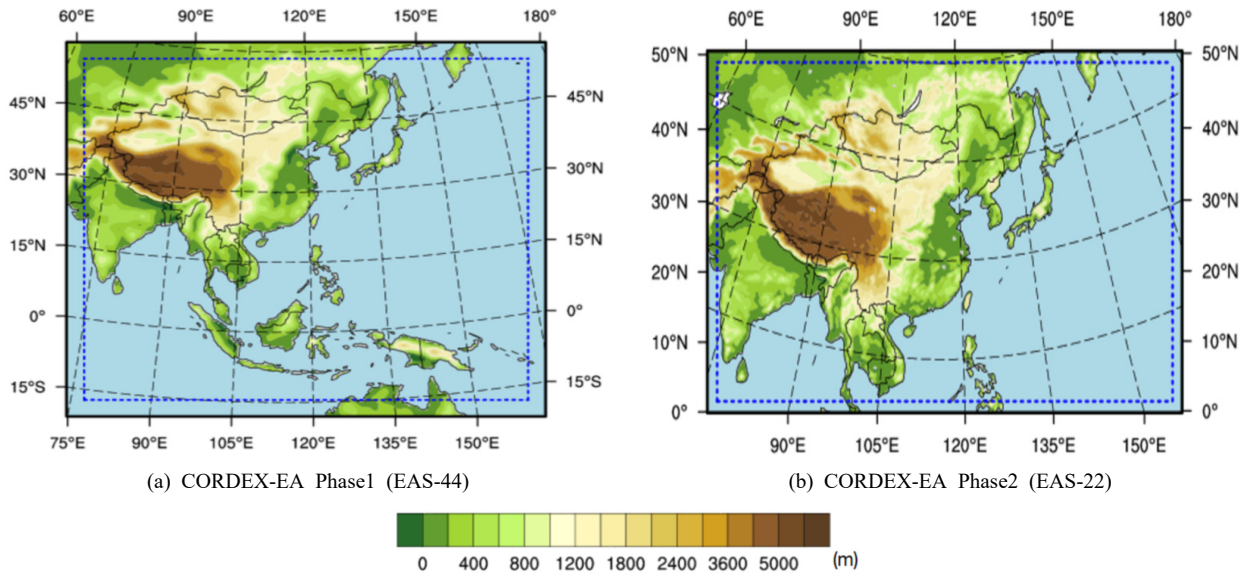


Fig. 1. Topographic elevation and simulation domains of (a) the CORDEX-East Asia Phase 1 (EAS-44) and (b) the CORDEX-East Asia Phase 2 (EAS-22) experiments

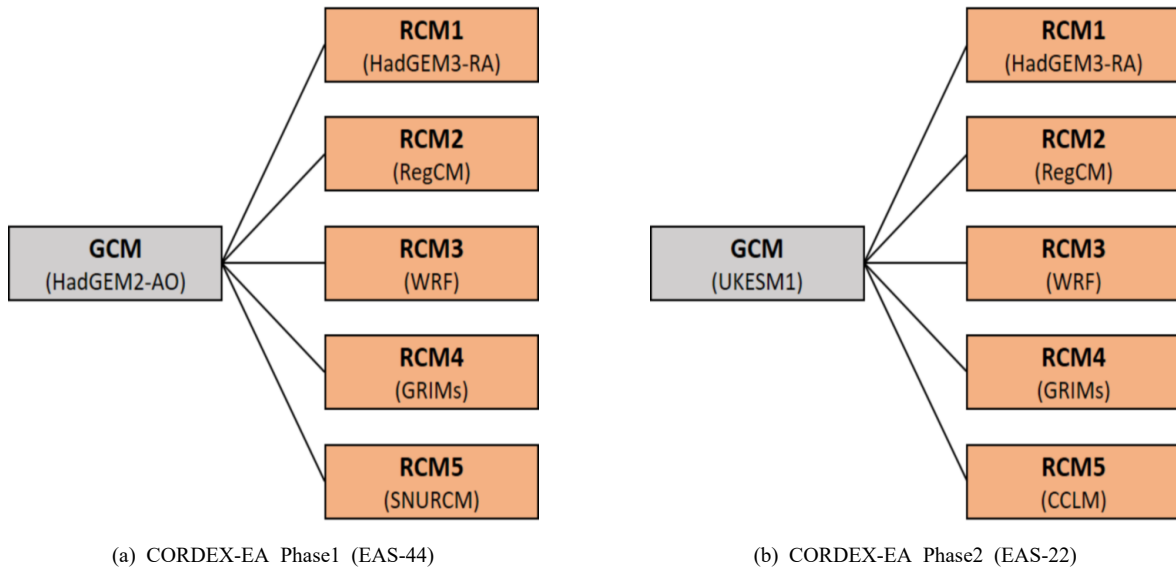


Fig. 2. Configuration of the regional climate model ensemble used in (a) the CORDEX-East Asia Phase 1 (EAS-44) experiment and (b) the CORDEX-East Asia Phase 2 (EAS-22) experiment

기후변화 시나리오를 생산하였다(Min et al., 2005, 2006). 국립기상과학원과 부경대학교는 이를 MM5와 RegCM3 등의 RCM을 활용하여 한반도 영역에 대하여 약 20~27 km 해상도로 상세화하였다(Im and Kwon, 2007; Oh et al., 2004). 이 연구는 국내에서 본격적으로 지역 기후 상세화 연구를 추진하였다는 면에서 의미가 있다.

2010년대 초중반, IPCC 제5차 평가보고서(AR5) 출간의 시기에는 기상청 국립기상과학원을 중심으로 공주대학교, 서울대학교, 연세대학교 연구진과의 협업을 통해서 더욱 체계적으로 고해상도의 상세 기후변화 시나리오가 생산되었다. 특히, 2009년에 발족한 CORDEX-EA 그룹에 주도적으로 참여하여 지역 기후변화 연구에 대한 국제적인 위상

Table 1. Configurations of Regional Climate Models (RCM) used for CORDEX-EA Phase1 (EAS-44) &amp; CMIP5 chain

	HadGEM3-RA	RegCM	WRF	GRIMs	SNURCM
Vertical layers	60 hybrid	18 sigma	27 sigma	22 sigma	24 sigma
Number of grids	183×220	197×243	179×233	198×241	197×233
Radiation	General 2	NCAR CCM3	RRTM and Dudhia	Chou's scheme	CCM2 package
Microphysics	Mixed phase scheme	SUBEX	WSM3	diagnostic microphysics scheme	Reisner II
Land surface model	MOSES II	CLM3	Noah	Noah	CLM3
Convection scheme	Revised mass flux	MIT-Emmanuel	Kain-Fritsch II	Simplified Arakawa-Schubert	Kain-Fritsch II
Reference	Davies et al. (2005)	Giorgi et al. (2012)	Skamarock et al. (2005)	Hong et al. (2013)	Cha and Lee (2009)

과 공신력을 확보하였다. AR5에서는 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오가 도입되었으며, 국립기상과학원은 한영 협력을 바탕으로 영국의 HadGEM2-AO 전지구 기후모델을 기반으로 수평해상도 135 km 규모의 전지구 기후변화 시나리오를 생산하였다(Baek et al., 2013). 이를 지역 기후모델 5종(HadGEM3-RA, RegCM4, SNURCM, WRF, GRIMs)을 이용하여 CORDEX-EA 1단계 영역에 대하여 수평해상도 50 km 수준의 동아시아 기후변화 시나리오(EAS-44 실험)를 산출하였다(Kim et al., 2014; Suh et al., 2012). EAS-44 실험의 수행 영역은 Fig. 1(a)에 제시하였고, 이는 CORDEX-EA phase1 영역이라고 명명되었다. EAS-44 실험은 5종 RCM 기반의 다중모델 앙상블 기법이 적용되어 AR4 대응 연구에 비해서 시나리오의 신뢰성을 높였고, RCM 앙상블 구성과 앙상블 멤버의 구성 정보는 Fig. 2(a)와 Table 1에 제시하였다. 산출된 자료는 국립기상과학원에서 운영하는 CORDEX-EA 홈페이지를 통해서 제공되고 있다(<https://cordex-ea.climate.go.kr>). 또한 한반도 지역에 대하여 더욱 상세한 기후변화 전망 분석을 위하여 수평해상도 12.5 km의 상세 시나리오(KOR-11 실험)를 추가로 생산하였다(Suh et al., 2016).

EAS-44 실험을 기반으로 Suh et al. (2012)은 기후모델의 현재기후 모의 성능평가를 수행하였고, Kim et al. (2014)은 21세기 초반(2025 ~ 2049년)에 대한 미래기후 전망 결과를 분석하였다. Park et al. (2016)은 RCM 5종의 동아시아 여름 극한기후 재현성을 평가하였고, Park and Min (2019)은 여름철 21세기 초반(2025 ~ 2049년)에 기온, 강수의 평균과 극한기후 현상이 증가함을 밝혔다. KOR-11 실험을 활용한 연구 중에서 Suh et al. (2016)과 Oh et al. (2016)은 5종의 RCM을 기반으로 한반도의 계절

별 기온, 강수의 모의 성능평가와 미래 변화를 분석하였다. Lee et al. (2017)은 미래 한반도에 아열대의 증가와 극한 고온 현상의 발생 증가를 전망하였고, Park et al. (2020)은 서울을 대상으로 고해상도 기후모델에서 나타나는 미래 기온, 강수 전망에서의 불확실성을 평가하였다. 특히 한반도 시나리오의 경우, 통계적 상세화 기법을 기반으로 우리나라 전역에 대하여 수평해상도 1 km 수준의 상세한 기후변화 전망자료를 생산하는 과정에서 입력자료로 활용되었다(Kim et al., 2016).

다음으로, 2020년대 초반에 출간된 IPCC 제6차 평가보고서(AR6)를 위한 연구에서는 SSP(Shared Socioeconomic Pathways) 배출 시나리오가 적용되었으며, 기상청 국립기상과학원은 UKESM1(United Kingdom Earth System Model1)을 이용하여 수평해상도 135 km 규모의 전지구 시나리오를 생산하였다(Sellar et al., 2019). 이를 기반으로 국립기상과학원, 울산과학기술원, 부산대학교, 포항공과대학교, 공주대학교는 지역 기후모델 5종(HadGEM3-RA, RegCM4, WRF, CCLM, GRIMs)을 이용하여 CORDEX-EA 2단계 영역에 대하여 수평해상도 25 km 수준의 동아시아 기후변화 시나리오(EAS-22 실험)를 산출하였다(Kim et al., 2021, 2022). EAS-22 실험의 RCM 앙상블 구성과 앙상블 멤버의 구성 정보는 Fig. 2(b)와 Table 2에 제시하였다. Fig. 1(b)는 EAS-22 실험 영역을 나타내며, 이는 EAS-44의 영역에 비해 적도 이남 지역을 제외한 영역으로, CORDEX-EA phase2 영역이라고 명명되었다. Table 2는 EAS-22 실험에 참여한 5개 RCM의 구성 정보를 나타낸다.

EAS-22 실험을 기반으로 Kim et al. (2020)은 GCM-RCM 조합에 따른 현재기후 모의 성과와 불확실성을 평가하였고 Kim et al. (2021)과 Kim et al. (2022)은 한반도와 동아

Table 2. Configurations of Regional Climate Models (RCM) used for CORDEX-EA Phase2 (EAS-22) &amp; CMIP6 chain

	HadGEM3-RA	RegCM	WRF	GRIMs	CCLM
Vertical layers	63 eta levels	23 sigma	27 sigma	28 sigma	40 hybrid
Number of grids	251×396	249×394	250×395	252×401	251×396
Radiation	General2	NCAR CCM3	CAM	Chou's scheme	Ritter & Geleyn
Microphysics	Single moment bulk	SUBEX	WSM3	WSM1	Extended DM
Land surface model	JULES	CLM3.5	NOAH	NOAH	TERRA-ML
Convection scheme	Revised mass flux	MIT-Emmanuel	Kain-Fritsch II	SAS + CMT	Tiedtke
Reference	Davies et al. (2005)	Giorgi et al. (2012)	Powers et al. (2017)	Hong et al. (2013)	Rockel et al. (2008)

시아 영역에 대하여 모의 성능을 제시하고 21세기 말 기온과 강수의 극한 기후변화를 분석하였다. Seo et al. (2023)과 Lee et al. (2023a)은 동아시아 여름철 몬순의 변동성을 모의하는 데 있어서 EAS-22 역학적 상세화 실험의 유용성을 제시하였고, Kim et al. (2023b)은 21세기 말 동아시아 전역에서 극한 폭염의 강도와 빈도가 증가할 것으로 전망하였다. AR6 기반 연구에서는 CORDEX의 FPS (Flagship Pilot Studies) 실험 중에서 수 km 이하의 해상도를 갖는 초고해상도 CPM (Convection Permitting Model)을 활용한 실험도 시도되었으며, 이는 미래 수 시간 규모의 극한 강수 예측 등 국지적 기후변화 분석의 정밀도를 개선 시키는 것에 목적이 있다(Lee et al., 2022; Seo et al., 2025).

IPCC 기후변화 평가보고서에 맞춘 국내 상세 기후변화 시나리오 연구는 2000년대 이후 비약적인 발전을 거듭해 왔으며, 전지구-동아시아-한반도-남한의 다단계 시나리오 생산체계를 정립하고 있다. 이는 기후변화 과학 연구뿐만 아니라 국가의 기후변화 대응 정책 수립 및 영향평가에 필수적인 과학 기반 정보를 제공하는 데 중추적 역할을 하고 있다.

### 3. AR7 대응 신규 동아시아 지역 기후변화 시나리오 산출 계획

2020년대 후반에 출간될 IPCC 제7차 평가보고서(AR7)에 대응하기 위해서는 기후변화 과학의 최신 연구성과와 정책적 요구를 반영한 보다 정교하고 고도화된 지역 기후 시나리오가 필요하다. 특히, 동아시아 지역은 복잡한 지형, 인접한 해양, 대륙성 기후 등의 요소가 상호 작용함에 따라 기후모델에서 국지적인 기후 특성이 나타난다(Park

et al., 2016; Kim et al., 2023b). 이러한 지역적 특성을 더욱 정밀하게 반영하기 위해서는 향상된 공간해상도와 다양한 물리 과정이 적용된 새로운 실험의 체계가 요구되고 있다. 본 연구에서 구축하고자 하는 새로운 동아시아 지역 기후 시나리오 산출체계의 주요 목표는 다음과 같다.

첫째, 국립기상과학원에서 AR7 대응을 위해 새롭게 개발 중인 K-ACE2 (KMA Advanced Community Earth-System model ver2) 모델을 입력자료로 활용하여 IPCC의 신규 온실가스 경로를 적용하는 것이다. K-ACE2는 기존의 K-ACE (Lee et al., 2020) 모델에서 구름-에어로졸 물리 과정과 해양 생지화학 모델 등을 개선하여 CMIP7 대응에 활용하기 위해 개발 중인 모델이다. CMIP7의 Fast Track 일정에 따르면, 신규 전지구 기후모델 수행을 통해서 2026년부터 과거기후 재현실험(historical) 자료를 산출·제공하는 것을 목표로 하고 있다(Dunne et al., 2024). 신규 동아시아 지역 기후 시나리오 연구도 이러한 전지구 기후자료의 자료 산출과 제공 일정을 고려하여 신속하게 추진하고자 한다.

둘째, 기존 CORDEX-EA 실험 대비 향상된 수평해상도 (12 km; EAS-11 실험)의 지역 기후실험을 수행하여 국지적인 기후 특성 재현성능의 개선을 목표로 한다. 이는 EAS-44 실험과 EAS-22 실험에 비해 각각 16배, 4배 향상된 수준의 수평해상도이며, 향후 수평해상도가 수백 m 수준인 신규 기상청 남한상세 기후변화 시나리오 산출에 입력자료로 활용될 것이다.

셋째, 국내 연구진 간의 유기적인 연구 협력을 위하여 단일 지역 기후모델을 사용하며, 기후모델의 불확실성 최소화를 위하여 다양한 물리 과정 조합을 통해 다중 앙상블 실험을 수행하는 것이다. EAS-11 실험에서는 WRF 지역 기후모델을 사용하여 역학적 상세화 수행 시에 물리

Table 3. Overview of high-priority CMIP7 scenarios

Scenario	Description
High (H)	High emission scenario to explore potential high-end impacts
Medium (M)	Medium emission scenario consistent with current policies
Medium-Low (ML)	Scenario with delayed increase in mitigation effort, insufficient to meet Paris Agreement objectives
Low (L)	Scenario consistent with staying likely below 2°C
Very Low with Limited Overshoot (VLLO)	Scenario consistent with limiting warming to 1.5°C by 2100 AD with limited overshoot (as low as plausible) of 1.5°C during the 21st century
Very Low after High Overshoot (VLHO)	Scenario with similar end-of-century temperature impact to VLLO, but with less aggressive near-term mitigation and large reliance on net negative emissions, resulting in a higher overshoot.

과정 중 CPS (Cumulus scheme) 2종, PBL (Planetary boundary layer scheme) 2종, MPS (Microphysics scheme) 2종을 결합하여 8종의 물리 과정 앙상블 체계를 구축하였다. 기후모델에서 CPS의 다중 조합은 강수 편차를 좌우하고 MPS- PBL의 다중 조합은 기온, 바람, 습도 등의 편차를 좌우한다고 알려져 있으므로(Liu et al., 2020; Stergiou et al., 2023), 본 연구의 물리 과정 앙상블은 동아시아 기후 변화 모의에서의 불확실성을 고려할수 있는 방법으로 사료된다. 또한, 동아시아 지역의 대기와 해양의 상호작용을 고려하는 대기-해양 결합모델(Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport; COAWST)의 앙상블 2종을 더하여, 총 10종의 다중 앙상블 체계를 구축하였다. 이는 기존 AR6 대응에 활용된 EAS-22 실험에 비해 앙상블 수가 2배 증가한 구성이며, 이에 대한 자세한 설명은 4장에 기술하였다.

넷째, 국제 기준(CORDEX 권고사항)과 국내 사용자 수요조사를 통해 파악된 실질적 활용 요구를 반영하여 신규 지역 기후자료의 산출 변수를 보다 체계적으로 결정하고 제공하는 것이다. 특히 최근에는 기후정보 활용의 정밀도가 높아짐에 따라, 시공간적으로 고해상도를 갖는 기후자료에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 산출 변수뿐 아니라, 기후모델 수행을 위한 전산 자원과 자료 저장·운영 인프라까지 함께 고려한 통합적 계획을 바탕으로 자료 산출체계를 구축하였다. 이를 통해 EAS-11 실험의 산출 변수는 지상, 대기 하층(~ 150 m), 대기 고층(~ 50 hPa), 지면의 자료들을 모두 포함하여 약 50종으로 구성되며, 국내·외 적인 수요를 고려하여 변수에 따라 자료의 시간해상도를 1시간 간격부터 24시간 간격까지 달리 적용하여 산출을 수행하고 있다. 결과적으로 AR7 대응 EAS-11 실험을 통해 제공될 예상 자료 용량은 NetCDF4 형식 기준으로 약 1PB이며, AR5 대응 EAS-44 실험(약 10 TB)의 100배, AR6 대응 EAS-22 실험(약 50 TB)

의 20배가량 증가할 것으로 예상된다.

AR7 대응을 위한 지역 기후자료 산출에서는 Table 3에 제시된 바와 같이 6종(High (H), Medium (M), Medium-low (ML), Low (L), Very Low after High Overshoot (VLHO), Very Low with Limited Overshoot (VLLO))의 온실가스 배출경로(Van Vuuren et al., 2025)를 활용할 예정이며, 과거 기후 재현실험의 기간은 총 72년(1950~2021)이고 미래기후 전망실험(scenario)은 총 79년(2022~2100)이다. 2025년 현재, 국내의 CORDEX-EA에 참여 중인 연구진(국립기상과학원, 포항공과대학교, 울산과학기술원, 공주대학교)은 CMIP7 전지구 기후모델을 입력자료로 사용하는 실험 수행에 앞서, ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) 재분석자료를 입력자료로 활용한 지역 기후 재현성 평가실험(evaluation)을 수행하고 있으며, 2026년부터 과거기후 재현실험, 미래기후 전망실험을 CORDEX-EA phase2 영역에 대하여 순차적으로 수행할 예정이다.

그 밖에, 대류구름을 명시적으로 모사할 수 있는 CPM 실험의 고도화를 통해 최근 빈번한 극한 호우 발생과 관련한 기후모델의 모의 성능을 향상시키고자 한다. 기존 지역 기후실험이 수십 km의 수평해상도에서 대류를 모수화(parameterization)에 의존했던 것과 달리, CPM은 수km의 수평해상도를 사용하여 대규모 대류 모식 없이 강수 등의 미세 기상 현상을 직접 모사할 수 있다는 점에서 정밀한 기후정보 생산에 있어 중요한 진전을 의미한다(Ban et al., 2021; Kwon et al., 2025; Lee et al., 2023b). 한반도 영역에 대하여 수평해상도 3 km의 CPM 실험을 통해 미래 중반의 국지적 극한기후 분석 등 다양한 부문별 영향 평가에 핵심 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

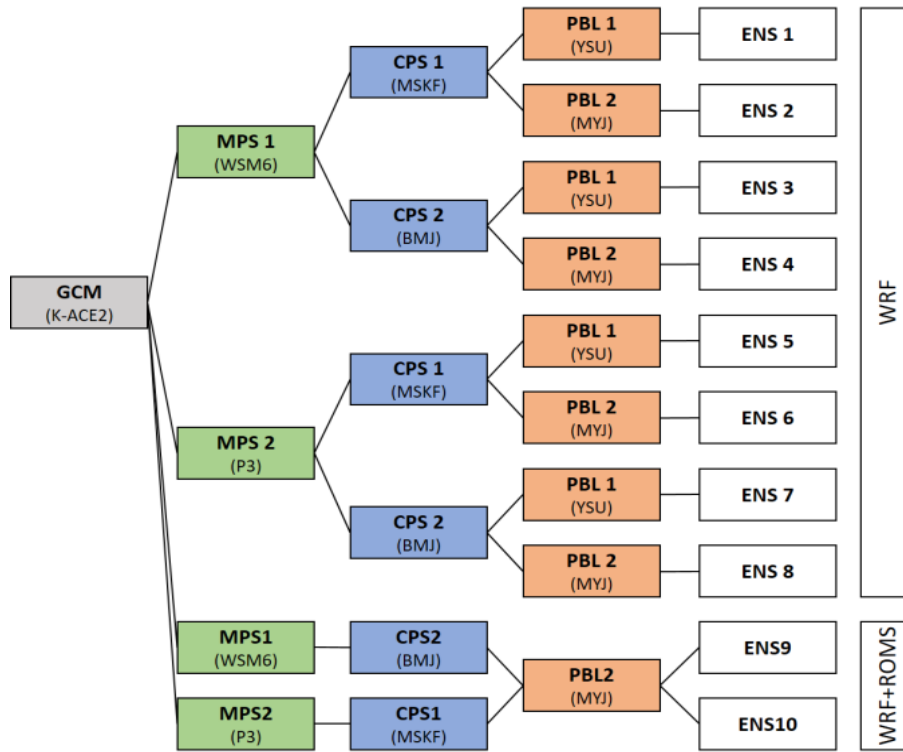


Fig. 3. Configuration of the eight-member ensemble simulations using the WRF regional climate model. The ensemble members were generated by combining two options each for the microphysics scheme (MPS), cumulus parameterization scheme (CPS), and planetary boundary layer scheme (PBL)

Table 4. Comprehensive model configuration and physical processes for the EAS-11 experiment

Contents	Description	
Horizontal resolution	825×521 (Lon.×Lat.)	
Map projection	Lambert Conformal	
Reference position	116.57°E, 34.40°N (True Lat.1: 20°N, Lat.2: 40°N)	
Vertical layer (top)	35 hybrid sigma-pressure levels (50 hPa)	
Microphysics scheme	WSM6	P3
Cumulus scheme	MSKF	BMJ
Planetary boundary layer scheme	YSU	MYJ
Surface layer scheme	Revised MM5 / Monin-Obukhov-Janjić	
Land surface model	Unified Noah	
Long/Short wave radiation scheme	RRTMG	
Time step	36 second	
Spectral nudging	Yes	
Buffer zone	20 grid points	

#### 4. AR7 대응 신규 동아시아 지역 기후모델 구축

최근에는 미래기후 시나리오에 대한 각기 다른 분야의 관심이 증가함에 따라 다양한 변수에 대한 수요가 증가하고 있다. 하지만 기존의 EAS-44, EAS-22 등 지역 기후 시나리오 산출체계에서는 여러 종류의 지역 기후모델을 사용하여 공통된 규격의 자료를 제공하는 과정에 어려움이 있었다. 또한 지역 기후 시나리오와 관련한 공동연구의 원활한 수행을 위하여 새로운 형태의 산출체계 구축 필요성이 제기되고 있다. 따라서 AR7 대응을 위한 신규 EAS-11 동아시아 지역 기후 시나리오 산출체계에서는 WRF 4.4 버전의 지역 기후모델을 기반으로 다양한 물리 과정 조합을 통해 모델이 가진 불확실성을 최소화하면서 공통된 산출 규격으로 미래 전망자료를 산출하고자 한다. 지역 기후모델의 물리 과정 중에서 구름 미세물리 과정(MPS) 2종, 적운모수화 과정(CPS) 2종, 행성 경계층 과정(PBL) 2종을 각기 다르게 설정한 8개 물리 과정 조합을 구성하였다(Fig. 3). 또한 대기-해양 결합모델의 2개 물리 과정 조합을 추가하여 총 10개의 앙상블 멤버를 구성하였다(Table 4).

앙상블 멤버를 구성한 물리 과정 조합 중에서 구름 미세물리 과정으로는 WRF Single-Moment 6-Class (WSM6; Hong and Lim, 2006)와 Predicted Particle Properties (P3; Morrison and Milbrandt, 2015)를 사용하였다. WSM6 물리 과정은 기후모델에서 주로 사용되며, 구름 물리 입자를 6가지(cloud water, cloud ice, rain, snow, graupel, vapor)로 분류하는 특징이 있다. P3의 경우는 구름 물리 입자를 밀도와 입자 크기, 형태 등으로 분류하여, 정밀한 강수와 구름 미세물리 과정을 재현하는 것이 필요한 극한 강수 관련 연구에 적합한 물리 과정이다. 적운모수화 과정으로는 Multi-Scale Kain-Fritsch (MSKF; Zheng et al., 2016)와 Betts-Miller-Janjić (BMJ; Janjić, 1994) 물리 과정을 사용하였다. MSKF는 널리 사용되던 Kain-Fritsch (KF) 방식에서 아격자 규모의 구름-복사 상호작용, 구름 내 상승 공기의 이동에 따른 수직속도 등을 반영해 더 조밀한 수평해상도에서 대류 현상을 모의할 수 있도록 개선된 물리 과정이다. BMJ는 대기의 열역학적 상태를 관측 기반의 연직 분포에 수렴시켜 대류 과정을 모의하는 방법을 사용하며, 물리 과정을 복잡하게 계산하지 않아 구조가 안정적이고 계산 속도가 빠른 장점이 있어 다양한 실

험에서 널리 사용된 방안이다. 행성 경계층 과정으로는 Yonsei University Scheme (YSU; Hong et al., 2006)과 Mellor-Yamada-Janjić Scheme (MYJ; Janjić, 1994)을 선정하였다. YSU는 난류 확산 과정에서 국지적/비국지적 확산을 모두 고려하면서 계산해 지표 가열에 의한 경계층 내부의 혼합과정을 잘 모의하는 특징이 있으며, MYJ는 방정식을 통해 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy; TKE)를 직접 계산해 야간의 안정한 상태에서의 약한 혼합과정을 잘 모의하며 복잡한 지형을 잘 반영하는 특징이 있다. 다만 WRF의 행성 경계층 물리 과정과 지표층 물리 과정의 경우에는 개발 과정에서 사용한 이론이 유사해 수치/물리적 계산을 안정적으로 수행할 수 있는 조합이 권장된다. 따라서 YSU에서는 지표층 물리 과정을 Revised MM5 (Jiménez et al., 2012)로 설정하였고, MYJ의 경우는 Monin-Obukhov-Janjić (Janjić, 1994) 방안을 지표층 물리 과정으로 사용하였다. 구름 미세물리, 적운모수화, 행성 경계층 방안 및 지표층 물리 과정을 제외한 나머지 실험 조건은 동일하게 설정하였으며, 복사모델은 Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG; Iacono et al., 2008), 지면모델은 Unified Noah (Tewari et al., 2004)를 사용하였다.

EAS-11 실험의 모델 모의 영역은 기존 EAS-22 실험과 동일한 CORDEX-EA Phase2 영역이나, 약 4배 증가한 수평해상도로 인해 더욱 상세한 지형 조건을 반영하여 825개의 동서 격자와 521개의 남북 격자를 설정하였으며, 외부 경계조건과 내부 계산 결과의 불연속을 방지하기 위해 4개 방위의 바깥 측면마다 20개 격자의 버퍼존을 설정하였다(Fig. 4). 모델의 적분 간격은 36초, 복사 물리 과정의 계산 간격은 15분, 적운/행성경계층/미세물리 과정의 계산 간격은 36초이며, 연직 층수는 35개로 설정하였다. 지역 기후모델 내부 계산에서도 외부 강제력에서 주어진 대규모 순환 흐름을 유지할 수 있도록 스펙트럴 넷징(spectral nudging)을 적용하였으며, 30분 주기로 수평 바람(U, V)에 대하여 행성 경계층 상부 대기에서 1000 km 이상 장파장의 성분을 대상으로 수행된다.

대기 모델에서는 강제력으로 주어진 해수면 온도를 단순 처방하기 때문에, 해양과 대기 사이에 발생하는 열, 수증기, 운동량 등에 대한 상호작용을 모의하는 과정에 한계가 있다. 따라서 대기 모델에 해양을 결합한 실험을 추가로 진행하고자 하였고, COAWST 시스템을 이용하여 WRF 4.2.2 버전의 대기 모델과 Regional Ocean Modeling System (ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005) 3.9

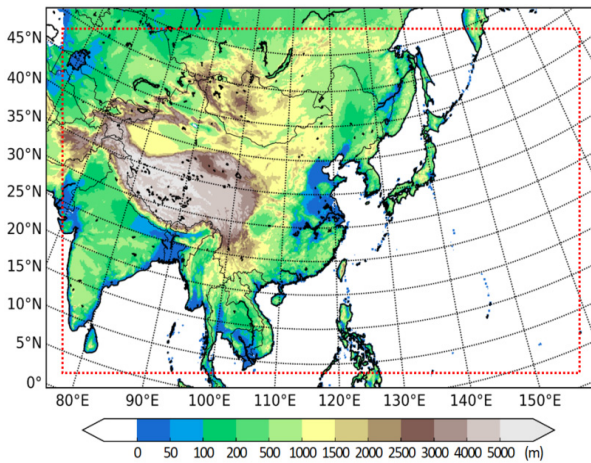


Fig. 4. Topographic elevation and simulation domains of the EAS-11 experiments used in this study. The area outside the red box represents the buffer zone

버전의 해양 모델을 결합하였다. 본 연구에서 활용한 ROMS 모델의 연직해상도는 50층이며,  $1^\circ \times 1^\circ$  수평해상도의 2-minute Gridded Global Relief Data (Bathymetry and Topography, ETOPO2; National Geophysical Data Center, 2006) 수심 자료를 기반으로 Generic Length Scale 연직 혼합 기법을 적용하였다. 재현성 평가실험 단계에서는 ROMS 해양 모델의 초기 및 경계 조건으로 Global Ocean Physics Reanalysis (GLORYS; Lellouche et al., 2021) 12V1 버전의 전지구 재분석 해양 자료를 처방하였고, 시나리오 생산 과정에서는 K-ACE2 전지구 모델의 해양 자료가 처방될 것이다.

## 5. 요약 및 결론

가속화되는 기후변화 추세에서 지역적인 기후변화 대응이 주요 이슈가 되고있다. 전 지구적 기후변화의 지역 규모에서의 반응은 매우 다를 수 있고 이에 지역별 농업, 방재, 에너지 등 다양한 분야에서 기후변화 영향, 취약성 평가, 기후 위기 리스크 분석을 위해 지역 고해상도 시나리오의 가치는 매우 크다. 기상청 국립기상과학원은 국내 학계와 공동으로 고해상도 지역 기후변화 시나리오의 산출을 지속해왔다. IPCC AR4 대응을 위하여 한반도 미래 기후변화 시나리오를 산출하였으며, 이후 2009년 발족한 CORDEX-EA 그룹에 참여하면서 IPCC AR5부터 AR6을

거쳐 동아시아 지역 기후 시나리오 생산을 주도하며, 다중 지역 기후모델 기반의 기후변화 전망자료를 제공하여 왔다. 이는 학술 연구뿐만 아니라, 지역 기후 영향평가와 기후변화 적응대책 수립 등에 폭넓게 활용되고 있다 (KMA, 2025).

IPCC AR7 대응을 앞두고, 더욱 상세하고 다양한 지역별 기후변화 적응대책 수립을 위하여 한층 고도화된 지역 기후변화 시나리오 제공이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 AR7 대응을 위해 새롭게 구축되고 있는 동아시아 지역 기후변화 시나리오 산출체계를 소개하였다. AR7 동아시아 지역 기후변화 산출 계획은, 최신 기후 시나리오를 기반으로 한 고해상도 지역 기후자료 생산과 활용성 제고를 목표로 한다. 이를 위해 기존 EAS-44 (CORDEX-EA Phase1) 및 EAS-22 (CORDEX-EA Phase2) 체계의 한계를 분석하고, 최신의 온실가스 시나리오 적용과 산출 자료의 시-공간 해상도 향상, 변수 다양성 확대, 다중 앙상블 기반의 불확실성 최소화 방안을 마련하였다. 특히, 기후변화 영향평가 및 적응·완화 연구의 수요에 부합하도록, 자료 품질 관리와 데이터 공유 체계 강화가 병행된다. 이러한 계획은 동아시아 기후변화 연구 협력과 과학적 기반 강화를 촉진하는 데 기여할 것으로 기대된다.

이러한 계획을 구체화하기 위해, 신규 EAS-11 산출체계가 구축되었다. 본 체계는 WRF 4.4 버전의 단일 지역 기후모델을 기반으로 하며, 구름 미세물리 2종(WSM6, P3), 적운모수화 2종(MSKF, BMJ), 행성 경계층 2종(YSU, MYJ)의 조합을 통해 총 8개의 물리 과정 실험을 구성하였다. 여기에 COAWST 시스템을 이용한 대기-해양 결합모델 2종을 추가하여, 총 10개의 앙상블 멤버로 구성하였다. 각 물리 과정은 구름 입자 분류, 대류 현상 재현, 경계층 혼합 특성 등에서 차별성을 가지며, 이를 통해 불확실성을 저감하고 다양한 연구 목적에 대응할 수 있도록 설계되었다.

EAS-11의 모의 영역은 CORDEX-EA Phase 2와 동일하나, 수평해상도를 약 4배 개선한 12 km 격자를 적용하여 세밀한 지형 조건을 반영하였다. 경계조건 불연속 방지를 위해 각 측면에 20개 격자의 버퍼존을 두었고 35개 연직 층, 36초 적분 간격, 스펙트럴 넷징을 적용하여 안정성과 일관성을 확보하였다. 대기 모델의 해수면 온도 처방 방식에 대한 한계를 보완하기 위해, WRF 4.2.2와 ROMS 3.9를 결합한 대기-해양 결합 실험을 구성하였다. 2025년 현재, ERA5 재분석자료를 입력자료로 하는 기후 재현성 평가실험을 수행하고 있으며, 2026년부터 수행될 과거

기후 재현실험과 미래기후 전망실험 단계에서는 K-ACE2 전지구 모델의 대기, 해양 자료가 사용될 예정이다. 다만, 미래기후 전망에서 단일 GCM을 입력자료로 사용하는 점에서 한계점이 있으므로, 추후 다중 GCM 기반의 실험을 통한 미래 전망의 불확실성 저감을 추진하고자 한다.

본 연구를 통해 구축된 국립기상과학원의 지역 기후 시나리오 산출체계를 기반으로 보다 상세하고 신뢰도 높은 AR7 대응 기후변화 시나리오를 생산하기 위해 노력할 것이다. 생산된 시나리오 자료는 CORDEX-EA 홈페이지 (<https://cordex-ea.climate.go.kr>) 및 이와 연계된 글로벌 데이터 인프라(Earth System Grid Federation,; ESGF)를 통해서 제공될 예정이며, 기후변화 시나리오 승인과정을 통해 국가 기후변화 표준시나리오 자료 생산에 기여할 것이다. 이를 통해 국가 및 지자체, 공공기관 등의 기후위기 적응대책 수립 및 기후변화 영향평가를 위한 과학적 근거 자료를 제공함과 동시에, 기상·기후 분야뿐만 아니라 농업·물환경, 산림·생태, 건강·보건, 방재 등 다양한 분야에 대한 분석 및 활용을 지원할 예정이다. 생산된 지역 기후 시나리오 자료는 기상청 기후정보포털을 포함하여 최근 구축되고 있는 기후위기적응 통합플랫폼 등 여러 부처 기후 대응 정보시스템의 기초자료로 제공함으로써 활용 가치를 높이기 위해 노력할 것이다.

## 사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가 (KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

## Reference

Baek H-J, Lee J, Lee H-S, Hyun Y-K, Cho C, Kwon W-T, Marzin C, Gan SY, Kim M-J, Choi D-H, Lee J, Lee J, Boo K-O, Kang H-S, Byun Y-H. 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

Ban N, Caillaud C, Coppola E, Pichelli E, Sobolowski S, Adinolfi M, Ahrens B, Alias A, Anders I, Bastin S, et al. 2021. The first multi-model ensemble of

regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: Evaluation of precipitation. *Clim Dyn* 57: 275-302. doi: 10.1007/s00382-021-05708-w

Cha DH, Lee DK. 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

Choi G, Collins D, Ren G, Trewin B, Baldi M, Fukuda Y, Afzaal M, Pianmana T, Gomboluudev P, Huong PTT, Lias N, Kwon W-T, Boo K-O, Cha Y-M, Zhou Y. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955-2007. *Int J Clim* 29(13): 1906-1925.

Choi YW, Ahn JB. 2017. Impact of cumulus parameterization schemes on the regional climate simulation for the domain of CORDEX-East Asia phase 2 using WRF model (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 27: 105-118. doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.105

Davies T, Cullen MJP, Malcolm AJ, Mawson MH, Staniforth A, White AA, Wood N. 2005. A new dynamical core for the Met Office's global and regional modeling of the atmosphere. *Quart J Roy Meteor Soc* 131: 1759-1782.

Dunne JP, Hewitt HT, Arblaster J, Bonou F, Boucher O, Cavazos T, Durack PJ, Hassler B, Juckes M, Miyakawa T, Mizielinski M, Naik V, Nicholls Z, O'Rourke E, Pincus R, Sanderson BM, Simpson IR, Taylor KE. 2024. An evolving Coupled Model Intercomparison Project phase 7 (CMIP7) and Fast Track in support of future climate assessment. *EGUsphere* [preprint]. doi: 10.5194/egusphere-2024-3874

Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla MB, Bi X, Elguindi N, Diro GT, Nair B, Giuliani G, Tyruncoyu UU, Cozzini S, Güttler I, O'Brien TA, Tawfik AB, Shalaby A, Zakey AS, Steiner AL, Stordal F, Sloan LC, Brantovic C. 2012. RegCM4:

- Model description and preliminary test over multi CORDEX domain. *Clim Res* 52: 7-29.
- Hong SY, Lim J-OJ. 2006. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J Korean Meteorol Soc* 42(2): 129-151.
- Hong SY, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Weather Rev* 134(9): 2318-2341. doi: 10.1175/MWR3199.1
- Hong SY, Park HH, Cheong HB, Kim JEE, Koo MS, Jang J, Ham S, Hwang SO, Park BK, Chang EC, Li HQ. 2013. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pac J Atmos Sci* 49: 219-243.
- Iacono MJ, Delamere JS, Mlawer EJ, Shephard MW, Clough SA, Collins WD. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res: Atmos* 113(D13): D13103. doi: 10.1029/2008JD009944
- Im ES, Kwon WT. 2007. Characteristics of extreme climate sequences over Korea using a regional climate change scenario. *SOLA* 3: 17-20, doi: 10.2151/sola.2007-005
- IPCC. 2023. Summary for policymakers. In: *Climate change 2023: Synthesis report. A report of the intergovernmental panel on climate change. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Core Writing Team, Lee H, Romero J (eds). Geneva, Switzerland: IPCC. p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Janjić, ZI. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon Weather Rev* 122(5): 927-945. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2
- Jiménez, PA, Dudhia J, González-Rouco JF, Navarro J, Montávez JP, García-Bustamante E. 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon Weather Rev* 140(3): 898-918. doi: 10.1175/MWR-D-11-00056.1
- Jo S, Kim Y-S, Hur J, Lee J, Kim E-S, Shim K-M, Kang M. 2023. Climatic yield potential changes under climate change over Korean Peninsula using 1-km high resolution SSP-RCP scenarios (in Korean with English abstract). *Korean J Agric For Meteorol* 25(4): 284-301. doi: 10.5532/KJAFM.2023.25.4.284
- Kim D-H, Kim J-U, Byun Y-H, Kim T-J, Kim J-W, Kim Y-H, Ahn J-B, Cha D-H, Min S-K, Chang E-C. 2021. Future projection of extreme climate over the Korean Peninsula using Multi-RCM in CORDEX-EA phase 2 project (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 31(5): 607-623. doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.607
- Kim G, Kim J, Kim CJ, Jin CS, Cha DH, Suh MS, Park SC. 2014. Climate change projections over CORDEX East Asia domain using Multi-RCMs (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 9(4): 257-268. doi: 10.14383/cri.2014.9.4.257
- Kim JU, Kim DH, Kim TJ, Chung CY, Byun YH, Suh MS. 2023a. Future projection of photovoltaic potential over South Korea based on high-resolution shared socioeconomic pathways (SSP) scenarios (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(4): 465-480. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.4.465
- Kim JU, Kim TJ, Kim DH, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022. Performance evaluation and future projection of East Asian climate using SSP scenario-based CORDEX-East Asia phase 2 multi-RCM simulations (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(3): 339-354. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.3.339
- Kim J-U, Kim T-J, Kim D-H, Kim J-W, Cha D-H, Min SK, Kim Y-H. 2020. Evaluation of performance and uncertainty for Multi-RCM over CORDEX-East Asia phase 2 region (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 30(4): 361-376. doi: 10.14191/Atmos.2020.30.4.361
- Kim MJ, Park SM, Lee K, So BJ, Kim TW. 2024. Analysis of domestic water usage patterns in Chungcheong using historical data of domestic water usage and climate variables (in Korean with English

- abstract). *J Korea Water Resour Assoc* 57(1): 1-8. doi: 10.3741/JKWRA.2024.57.1.1
- Kim MK, Kim S, Kim J, Heo J, Park JS, Kwon WT, Suh MS. 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(2): 79-89. doi: 10.1007/s13143-016-0010-3
- Kim YH, Ahn JB, Suh MS, Cha DH, Chang EC, Min SK, Byun YH, Kim JU. 2023b. Future changes in extreme heatwaves in terms of intensity and duration over the CORDEX-East Asia Phase Two domain using multi-GCM and multi-RCM chains. *Environ Res Lett* 18: 034007. doi: 10.1088/1748-9326/acb727
- KMA. 2025. Casebook of climate change scenario applications 2025. Daejeon, Korea: Korea Meteorological Administration.
- Kwon D, Min SK, Lee M, Seo GY, Son SW. 2025. Attribution of 2022 August heavy precipitation event in South Korea using high-resolution pseudo global warming simulations: Sensitivity to vertical temperature changes. *Geophys Res Lett* 52: e2024GL112392. doi: 10.1029/2024GL112392
- Lee D, Min SK, Ahn JB, Cha DH, Shin SW, Chang EC, Suh MS, Byun YH, Kim JU. 2023a. Uncertainty analysis of future summer monsoon duration and area over East Asia using a multi-GCM/multi-RCM ensemble. *Environ Res Lett* 18: 064026. doi: 10.1088/1748-9326/acd208
- Lee D, Min SK, Park IH, Ahn JB, Cha DH, Chang EC, Byun YH. 2022. Enhanced role of convection in future hourly rainfall extremes over South Korea. *Geophys Res Lett* 49: e2022GL099727. doi: 10.1029/2022GL099727
- Lee H, Kim G, Park C, Cha DH. 2017. A study of future changes of climate classification and extreme temperature events over South Korea in multi regional climate model simulations (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 12(2): 149-164. doi: 10.14383/cri.2017.12.2.149
- Lee J, Kim J, Sun MA, Kim BH, Moon H, Sung HM, Kim J, Byun YH. 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 JW, Hong SY, Chang EC, Suh MS, Kang HS. 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, Min SK, Cha DH. 2023b. Convection-permitting simulations reveal expanded rainfall extremes of tropical cyclones affecting South Korea due to anthropogenic warming. *npj Clim Atmos Sci* 6: 176. doi: 10.1038/s41612-023-00509-w
- Lellouche J-M, Greiner E, Bourdallé-Badie R, Gilles G, Melet A, Drévillon M, Bricaud C, Hamon M, Le Galloudec O, Regnier C, Candela T, Testut C-E, Gasparin F, Ruggiero G, Benkiran M, Drillet Y, Le Traon P-Y. 2021. The Copernicus global 1/12° oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis. *Front Earth Sci* 9: 698876. doi: 10.3389/feart.2021.698876
- Liu Y, Chen X, Li Q, Yang J, Li L, Wang T. 2020. Impact of different microphysics and cumulus parameterizations in WRF for heavy rainfall simulations in the central segment of the Tianshan Mountains, China. *Atmos Res* 244: 105052. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105052
- Min SK, Legutke S, Hense A, Cumasch U, Kwon WT, Oh JH, Schlese U. 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): 1-26. doi: 10.3402/tellusa.v57i4.14712
- Min SK, Legutke S, Hense A, Kwon WT. 2005. Internal variability in a 1000-yr control simulation with the coupled climate model ECHO-G - I. Near-surface temperature, precipitation and mean sea level pressure. *Dyn Meteorol Oceanogr* 57(4): 605-621. doi: 10.3402/tellusa.v57i4.14712

- Morrison H, Milbrandt JA. 2015. Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part 1: Scheme description and idealized tests. *J Atmos Sci* 72(1): 287-311. doi: 10.1175/JAS-D-14-0065.1
- National Geophysical Data Center. 2006. 2-minute gridded global relief data (ETOPO2) v2. National Geophysical Data Center, NOAA. doi: 10.7289/V5J1102Q
- Oh JH, Kim T, Kim MK, Lee SH, Min SK, Kwon WT. 2004. Regional climate simulation for Korea using dynamic downscaling and statistical adjustment. *J Meteorol Soc Japan* 82(6): 1629-1643. doi: 10.2195/jmsj.82.1629
- Oh SG, Park JH, Lee SH, Suh MS. 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
- Oh S-G, Suh M-S, Lee Y-S, Ahn J-B, Cha D-H, Lee D-K, Hong S-Y, Min S-K, Park S-C, Kang H-S. 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(2): 171-189. doi: 10.1007/s13143-016-0018-8
- Park C, Kim G, Shin SW, Cha DH. 2020. Assessment of the Uncertainty for future climate change using bias-corrected high-resolution multi-regional climate models over Seoul Metropolitan City (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 15(4): 229-242. doi: 10.14383/crj.2020.15.4.229
- Park C, Min SK. 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
- Park C, Min S-K, Lee D, Cha D-H, Suh M-S, Kang H-S, Hong S-Y, Lee D-K, Baek H-J, Boo K-O, Kwon W-T. 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
- Park JH, Oh SG, Suh MS. 2013. Impacts of boundary conditions on the precipitation simulation of RegCM4 in the CORDEX East Asia domain. *J Geophys Res Atmos* 118: 1652-1667. doi: 10.1002/jgrd.50159
- Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, Coen JL, Gochis DJ, Ahmadov R, Peckham SE, Grell GA, Michalakes J, Trahan S, Benjamin SG, Alexander CR, Dimego GJ, Wang W, Schwartz CS, Romine GS, Liu ZQ, Snyder C, Chen F, Barlage MJ, Yu W, Duda MG. 2017. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull Amer Meteor Soc* 98: 1717-1737. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00308.1
- Rockel B, Will A, Hense A. 2008. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorol Z* 17: 347-348. doi: 10.1127/0941-2948/2008/0309
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy JP, Tang Y, Yool A, Wiltshire A, O'Connor FM, Stringer M, Hill R, Palmieri J, et al. 2019. UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *J Adv Model Earth Syst* 11: 4513-4558. doi: 10.1029/2019MS001739
- Seo GY, Ahn JB, Cha DH, Suh MS, Min SK, Chang EC, Byun YH, Kim JU. 2023. Evaluation of multi-RCM ensembles for simulating spatiotemporal variability of Asian summer monsoon precipitation in the CORDEX-East Asia Phase 2 domain. *Int J Climatol* 43: 3710-3729. doi: 10.1002/joc.8054
- Seo GY, Min SK, Lee D, Son SW, Park C, Cha DH. 2025. Hourly extreme rainfall projections over South Korea using convection permitting climate simulations. *npj Clim Atmos Sci* 8: 209. doi: 10.1038/s41612-025-01067-z
- Shchepetkin AF, McWilliams JC. 2005. The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model* 9(4): 347-404. doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3. In NCAR Tech

15 Note NCAR/TN-475+STR. p. 113.

Clim Res 50(2): 125-139.

- Stergiou I, Tagaris E, Sotiropoulou REP. 2023. WRF physics ensemble performance evaluation over continental and coastal regions in Germany. *Atmosphere* 14(1): 17. doi: 10.3390/atmos14010017
- Suh MS, Oh SG, Lee DK, Cha DH, Choi SJ, Jin CS, Hong SY. 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
- Suh M-S, Oh S-G, Lee Y-S, Ahn J-B, Cha D-H, Lee D-K, Hong S-Y, Min S-K, Park S-C, Kang H-S. 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(2): 151-169. doi: 10.1007/s13143-016-0017-9
- Tewari MF, Chen F, Wang W, Dudhia J, LeMone MA, Mitchell K, Ek M, Gayno G, Wegiel J, Cuenca RH. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. p. 11-15.
- Van Vuuren D, O'Neill B, Tebaldi C, Chini L, Friedlingstein P, Hasegawa T, Riahi K, Sanderson B, Govindasamy B, Bauer N, et al. 2025. The Scenario Model Intercomparison Project for CMIP7 (ScenarioMIP-CMIP7). *EGUsphere* [preprint]. doi: 10.5194/egusphere-2024-3765
- WMO. 2025. State of the climate in Asia 2024. WMO-No. 1373.
- Zheng Y, Alapaty K, Herwehe JA, Genio AD, Niyogi D. 2016. Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) model with an updated Kain-Fritsch scheme. *Mon Weather Rev* 144(3): 833-860. doi: 10.1175/MWR-D-15-0005.1
- Zhou Y, Ren G. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961–2008.