

## 탄소중립 달성시기에 따른 동아시아 극한기후의 영향 분석

성현민\*† · 김지선\*\* · 이재희\*\* · 심성보\*\*\* · 이효미\* · 장필훈\*\*\*\* · 변영화\*\*\*\*

\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, \*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원,

\*\*\*기상청 기후변화감사과 사무관, \*\*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관

### The impact of carbon neutrality timing on climate extremes in East Asia

Sung, Hyun Min\*† · Kim, Jisun\*\* · Lee, Jae-Hee\*\* · Shim, Sungbo\*\*\* · Lee, Hyomee\* ·  
Chang, Pil-Hun\*\*\*\* and Byun, Young-Hwa\*\*\*\*

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

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

\*\*\*Deputy Director, Climate Change Monitoring Division, KMA, Daejeon, Korea

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

#### ABSTRACT

This study analyzes future climate change in East Asia using carbon neutral scenarios (Shared Socioeconomic Pathways [SSP]1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4, and SSP5-3.4-OS) and evaluates how earlier carbon neutrality could mitigate extreme climate risks. The SSP1-1.9, which successfully attains the objectives of the Paris Agreement, demonstrates temperature stabilization at a 1.5°C warming level by the end of the 21st century. Conversely, other scenarios indicate higher levels of warming, with SSP1-2.6 resulting in 2.0°C and both SSP4-3.4 and SSP5-3.4-OS leading to a 2.5°C warming level. In East Asia, the frequency and intensity of climate extremes are expected to be more severe if the timeline for achieving carbon neutrality is delayed. Additional warming of 0.5°C and 1.0°C could lead to an approximately 35% and 50% increase, respectively, in vulnerabilities associated with extreme temperatures. Furthermore, vulnerabilities related to extreme precipitation could increase by approximately 25% and 40%, respectively. These findings emphasize the importance of early and active carbon neutrality policies in reducing the vulnerability of East Asian countries to extreme climate events, contributing to more effective regional climate risk management and adaptation strategies. It is recommended that future research focuses on conducting higher-resolution regional studies and a more comprehensive analysis of carbon reduction scenarios.

Key words: Carbon Neutral, Climate Risk, SSP Scenarios, East Asia, CMIP6

### 1. 서론

기후변화는 21세기에 인류가 직면한 가장 심각한 도전 과제 중 하나로, 문제해결을 위한 국제적 노력의 일환으로 2015년 파리기후변화협약(이하 파리협약)이 체결되었다. 파리협약의 핵심 목표 중 하나는 산업화 이전 수준과 비교하여 전지구 평균기온 상승을 2°C 이하로 유지하고, 더 나아가 1.5°C 이하로 억제하는 것이다(UN, 2015;

UNFCCC, 2022). 이 목표를 달성하기 위해 세계 각국에서는 다양한 정책과 전략이 도입되고 있으며, 탄소중립은 기후변화 완화를 위한 필수적인 접근 방식으로 파리협약 이행의 핵심적인 역할로 자리잡고 있다. 탄소중립이란 대기 중으로 배출되는 온실가스의 양을 흡수되거나 제거되는 양과 동일하도록 조절하여 실질적인 배출을 '0'으로 만드는 것을 의미한다(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2018). 이러한 국제동향에 따르면, 우리나라

†Corresponding author : [sunghm122@korea.kr](mailto:sunghm122@korea.kr) (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6784)

ORCID 성현민 0000-0003-3120-7912  
김지선 0000-0002-8238-3521  
이재희 0000-0003-3227-923X  
심성보 0000-0002-3533-5818

이효미 0000-0001-7491-345X  
장필훈 0000-0003-1665-1273  
변영화 0000-0002-6074-4461

라가 포함된 동아시아 지역은 경제성장과 함께 온실가스 배출량이 큰 폭으로 증가하였기 때문에, 이 지역의 탄소 중립 대응 노력은 글로벌 차원의 기후변화 억제에 증대한 영향을 미칠 수 있다(IPCC, 2018).

지구온난화에 따른 최신 기후변화 미래전망은 주로 결합모델 상호비교 프로젝트(The Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)를 통해 산출된 기후변화 시나리오를 기반으로 분석되어왔다. CMIP6 프로젝트에서는 기후변화 대응정책 지원을 위해 공통사회경제경로(Shared Socio-economic Pathway, SSP)와 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 결합한 새로운 기후변화 시나리오를 산출하여 기후변화연구 커뮤니티에 제공하고 있다. 이 시나리오는 CMIP6 단계에서 새롭게 도입된 개념으로써 사회경제변화를 기반으로 미래 기후변화에 대한 완화와 적응 노력을 단계별로 포함하고 있다(O'Neill et al., 2014, 2016). 이 중 탄소중립 시나리오를 활용한 연구는 글로벌뿐만 아니라, 동아시아 지역의 기후변화에 대한 과학정보를 제시할 수 있고, 관련된 변화전망을 바탕으로 지역별 기후변화 대응정책을 수립하는데 필수적인 정보를 제공하고 있다. IPCC AR6 (Assessment Report)에 따르면, 최근 10년(2011 ~ 2020 평균)까지 나타난 인간이 유발한 지구온난화는 약 1.09°C 수준이며, 2030년까지 전지구 탄소배출량을 절반 수준으로 감축하고, 2050년 탄소중립을 통해 1.5°C 온난화 제한목표 달성할 수 있다(IPCC, 2018). 또한, 향후 몇십 년 동안 온실가스 배출량을 극적으로 감축하지 않을 경우, 21세기 내에 지구온난화 수준이 산업화 이전 대비 3°C 이상 상승할 것으로 우려된다(Hohne et al., 2016; Rogelj et al., 2016). 뿐만 아니라, 1.5°C 온난화 수준에서 0.5°C만 더 상승한다고 하더라도 극한기후에 노출될 가능성이 커지고, 기후 취약성이 증가할 수 있다(Schleussner et al., 2018; Shim, Kwon et al., 2019; Sung et al., 2021). 특히 아시아 지역은 다수의 인구가 밀집되어 있기 때문에, 식량, 물 문제 등 기후변화의 부정적 영향에 가장 취약한 지역들 중 하나이다(Jung et al., 2024; Kim et al., 2022; Park et al., 2023; Sung et al., 2023). 온실가스 감축 및 탄소중립 정책 이행 지연으로 인한 천문학적인 사회경제적 피해가 발생을 방지하기 위해 기후변화 연구커뮤니티의 탄소중립 시나리오 기반 연구가 필요하다(Biesbroek et al., 2022; Heal, 2009; World Bank, 2012).

따라서 기후변화에 대한 사회·경제적인 정책 수준 및 탄소중립 시기를 고려한 지역별 온난화 수준과 극한기후

영향 및 취약성에 대한 과학적 분석이 요구된다. 기후변화로 인해 발생하는 극한기후 현상의 변화를 정량적으로 이해하기 위해서, 다양한 선행연구에서 ETCCDI (Expert Team on Climate Detection and Indices) 극한기후 지수를 활용한 분석이 활발하게 진행되고 있다(Joh et al., 2012; Kim and Choi, 2020; Seo et al., 2019). 이러한 선행 연구들은 한반도 온난화에 대한 과학적 분석을 제시하고 있으며, 극한기후 현상이 더욱 빈번하고 강하게 발생하고 있음을 보여준다. 하지만, 시나리오의 종류나 극한기후의 정의에 기반하여 미래전망을 분석하였기 때문에, 탄소중립을 빠른 시기에 달성함에 따른 극한기후 변화가 미치는 영향에 대한 정량화는 여전히 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 CMIP6 모델의 미래전망 자료를 기반으로 동아시아 지역의 극한기후 변화와 탄소중립 경로에 따라 회피 가능한 극한기후 영향정도를 살펴보고자 하였다. 특히, SSP 시나리오를 기반으로 탄소중립을 달성하는 경로에 따라 온난화 수준의 차이를 살펴보았으며, 기온과 강수에 대한 극한기후 지수를 산출하고 미래 변화 및 모델 간 불확실성을 평가하였다. 또한, 파리협약을 달성하는 시나리오를 기준으로 탄소중립이 지연될 경우 발생할 수 있는 극한기후의 취약성에 대해 분석하였다. 이는 다양한 커뮤니티의 효과적인 기후변화 적응대책을 수립하고 이행하는데 중요한 과학적 근거를 제공할 수 있다. 2장에서는 분석에 사용한 CMIP6 모델과 실험, 분석 방법 등을 제시하였다. 3장에서는 CMIP6 모델의 과거 모의 성능 평가 및 탄소중립 시나리오에 따른 극한기후 변화에 대해 분석하였으며, 마지막으로 4장에서는 요약 및 결론 순으로 정리하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. CMIP6 모델 및 탄소중립 시나리오

본 연구에서는 탄소중립 경로에 따른 동아시아 극한기후 변화를 살펴보기 위하여, CMIP6 프로젝트에 참여한 8개 지구시스템모델의 실험 결과를 사용하였다(Table 1). 또한, 국립기상과학원에서 산출한 UKESM1-0-LL 지구시스템모델 자료도 앙상블 분석에 포함되었다(Sellar et al., 2019; Sung et al., 2021). 각 모델의 자료는 연구그룹의 전문가사용자를 위해 ESGF (Earth System Grid Federation) 국제자료공유센터를 통해 제공되고 있다(<https://esgf-node.llnl.gov>; Lee et al., 2020). 모델 간 직접적인 비교와 분석 편의를 위해 모든

자료는 UKESM1-0-LL 모델 격자와 같은 수평 해상도  $1.875^\circ \times 1.25^\circ$  (격자 수:  $192 \times 145$ )로 선형 내삽해서 사용하였다. 또한, CMIP6 모델 간 불확실성을 이해하기 위해 사용한 모델에 동일 가중치를 적용한 다중모델 앙상블 (Multi-Model Ensemble, MME) 분석을 수행하였다. SSP 시나리오는 IPCC AR6에서 새롭게 도입된 개념으로써, 사회경제변화 중 기후변화에 대한 완화와 적응의 노력수준에 따라 5개 그룹으로 구성되어 있다. SSP1은 친환경 지속성장의 미래사회를 나타내며 기후변화에 대한 완화와 적응의 부담이 낮은 경로이다 (Table 2). SSP4와 SSP5는 각각 기후변화에 대한 완화와 적응의 부담이 큰 미래사회를 나타내며, 특

히, SSP5의 경우에는 화석연료에 의존하여 높은 기술성장을 보유한 미래사회를 나타내기 때문에 시나리오 중 배출량이 가장 높은 경로이다 (O'Neill et al., 2014, 2016). 이러한 사회경제경로를 기반으로 개발된 CMIP6의 탄소중립 시나리오는 ScenarioMIP에서 산출된 SSP1-2.6 (Tier 1 experiment), SSP1-1.9, SSP4-3.4 및 SSP5-3.4-OS (Tier 2 experiment)의 4종이다 (Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016). 사용한 자료는 과거기후(Historical)와 4종 미래전망 시나리오이며, 탄소중립 시나리오의 자세한 설명은 2.2절에 기술하였다. 또한, 미래 기간을 AR6에서 사용된 21세기 후반(2081~2100년)의 20년 평균값을 현재기후(1995~2014년)와 비교하였다.

Table 1. List of CMIP6 models used in this study

No.	Model	Grid size	Ensemble	Reference
1	CNRM-ESM2-1	256×128, L91	rli1p1f2	Séférian et al. (2019)
2	CanESM5	128×64, L49	rli1p1f1	Swart et al. (2019)
3	EC-Earth3	512×256, L91	r10i1p1f1	Döscher et al. (2022)
4	FGOALS-g3	180×80, L26	rli1p1f1	Li et al. (2020)
5	IPSL-CM6A-LR	144×143, L79	rli1p1f1	Boucher et al. (2020)
6	MIROC6	256×128, L81	rli1p1f1	Tatebe et al. (2019)
7	MRI-ESM2-0	320×160, L80	rli1p1f1	Yukimoto et al. (2019)
8	UKESM1-0-LL	192×144, L85	rli1p1f2	Sellar et al. (2019)

## 2.2. 시나리오에 담긴 온실가스 배출량 변화

Fig. 1은 본 연구에 사용한 탄소중립 시나리오에 포함된 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 배출량을 보여주는 그림으로, 이산화탄소 연간배출량이 2050~2100년 기간내에 '0' 이하로 낮아지는 시나리오임을 확인할 수 있다 (Fig. 1a). SSP1-1.9 시나리오에서 2050년 즈음에 전지구 이산화탄소 배출량이 0 이하로 낮아지면서 가장 빠른 탄소중립을 달성하는 시나리오임을 확인할 수 있고, 이는 파리협약의 2도 온난화 이내 및 1.5℃ 온난화의 억제 목표를 달성하기 위한 매우 도전적으로 이산화탄소 배출을 감소하는 저탄소 미래 사회의 시나리오를 의미한다. 반면, SSP5-3.4-OS 시나리오는 2040년까지는 배출을 완화하지 않는 SSP5-8.5 시나리오를 따르기 때문에 이산화탄소의 연간 배출이 증가하고 있지만, 이후 적극적인 감축을 통해 2070년대까지는 탄소중립을 달성하겠다는 오버슈

Table 2. List of CMIP6 experiments used in this study. Detailed descriptions are explained in O'Neill et al. (2016)

No.	Experiment	MIP	Description
1	Historical	DECK	The historical forcing are based as far as possible on observations over the past period
2	SSP1-1.9	ScenarioMIP Tier 2	Low radiative forcing ( $1.9 \text{ W/m}^2$ ) at end of 2100 and based SSP1. Informing the Paris Agreement target of $1.5^\circ\text{C}$ above pre-industrial
3	SSP1-2.6	ScenarioMIP Tier 1	Designed with the aim of simulating a development that is compatible with the $2^\circ\text{C}$ target
4	SSP4-3.4	ScenarioMIP Tier 2	Low radiative forcing ( $3.4 \text{ W/m}^2$ ) near 2100. Fills gap in RCP forcing pathway between $4.5$ and $2.6 \text{ W/m}^2$
5	SSP5-3.4-OS	ScenarioMIP Tier 2	Mitigation scenario types based on SSP5 and having the $3.4 \text{ W/m}^2$ radiative forcing near 2100. The scenario follows SSP5-8.5, an unmitigated baseline scenario, through 2040, and then substantially negative net emissions thereafter

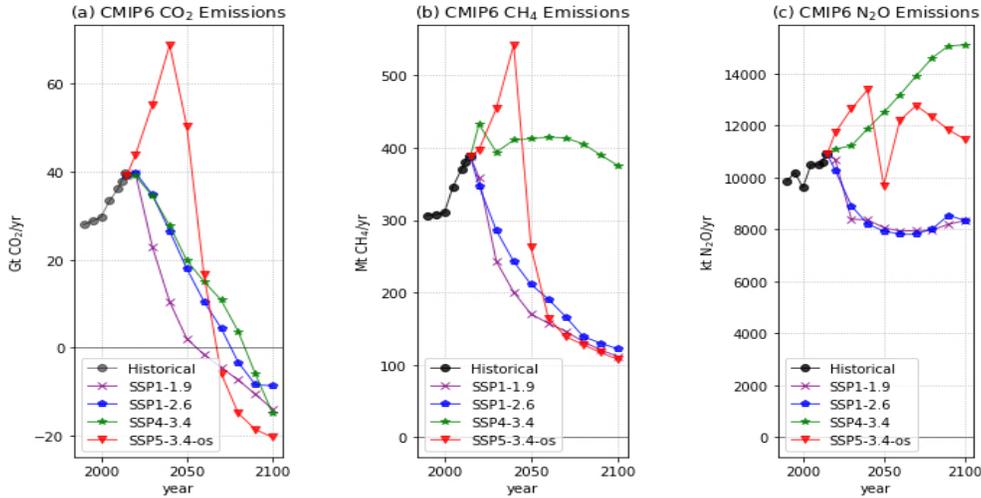


Fig. 1. Emissions of (a) CO<sub>2</sub>, (b) CH<sub>4</sub>, and (c) N<sub>2</sub>O for the present-day (1995 ~ 2014; black) and future scenarios (2015 ~ 2100; colors) in CMIP6

(Overshoot) 경로를 의미한다. SSP1-2.6과 SSP4-3.4의 경우 SSP1-1.9에 비해 상대적으로 느리지만, 이산화탄소 배출을 크게 감축해 21세기 후반에는 탄소중립 경로를 달성한다는 점에서 유사한 경향을 보였다. 메탄의 배출량은 대부분의 시나리오에서 이산화탄소와 유사한 경향을 보였지만, SSP4-3.4 시나리오에서는 2080년대 이후부터 약한 감소 경향을 보였다(Fig. 1b). 아산화질소의 배출량은 21세기 중반에는 감소수준이 유지되다가 21세기 말에 다소 증가하는 경향을 보이는 가운데, SSP5-3.4-OS 시나리오에는 2050년 이후 급격한 증가를 보인 후 재차 감소하는 경향이 포함되어 있음을 확인할 수 있다(Fig. 1c). 또한, SSP4-3.4 시나리오에서는 21세기 말까지 지속적으로 증가하는 내용이 담겨 있음을 확인할 수 있다. 두 시나리오에서 나타난 배출량 경향성의 차이는 시나리오에서 고려하고 있는 인구수에 따른, 경작 및 산림 개관 등 지면 사용과 연관된 온실가스 배출량 변화에 대한 차이 때문이다(Gidden et al., 2019; Popp et al., 2017).

SSP 데이터베이스에서 제공하는 이산화탄소 총배출량의 변화를 부문별로 살펴보면(Riahi et al., 2017), 21세기 초기에는 발전(Energy, 약 39%), 산업(Industrial, 약 23%), 수송(Transportation, 약 16%), 지면사용(Agriculture, Forestry and Other Land Use; AFOLU, 약 9%) 순으로 크기가 나타나고 있다(Fig. 2). 시나리오 별 탄소중립 시기에는 차이가 있지만, 큰 비중을 차지하는 부문을 포함한 전반적인 부문에서 배출량 감소의 내용을 담고 있다. 특히,

모든 시나리오의 21세기 후반에 나타난 음의 배출량에 가장 큰 영향을 끼친 부문은 에너지 부문이다. 그 중에서도 2040년까지 배출량을 전혀 줄이지 않는 SSP5-8.5 시나리오에서 나타난 에너지 사용에 따른 배출량의 뚜렷한 감소는 90% 이상을 설명할 수 있을 정도가 크게 기여하고 있다. 이와 같은 온실가스 감축의 내용을 토대로 탄소중립 시나리오에 포함되어 있는 주요 에너지 사용량의 변화를 Fig. 3에 나타냈다. SSP1-1.9와 SSP1-2.6 시나리오에서는 현재 대비 연간 사용량이 유사한 수준으로 유지되었고, SSP4-3.4와 SSP5-3.4-OS 시나리오에서 각각 21세기 중반과 후반까지 총 에너지 사용량이 증가하는 경향을 보였다. 현재는 화석연료에 대부분 의존하고 있지만, 바이오연료와 친환경에너지의 비율을 21세기 후반까지 80% 이상 증가시키는 목표를 시나리오에 포함하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 탄소중립을 달성하더라도 온난화 수준이 되돌아오지 않기 때문에 대기 중 온실가스 농도를 줄이기 위한 탄소 포집 기술(Carbon Capture Storage, CCS)이 반드시 요구된다(Gidden et al., 2019). Fig. 3에서 빗금친 부분은 각 섹터별 탄소 포집량을 나타낸 것으로 탄소중립 시나리오에서는 21세기 중반 이후로 탄소 포집 기술이 상용화될 것을 가정하였으며, 21세기 후반에는 화석연료로 인한 배출량보다 더 많은 양을 흡수하는 미래사회를 가정하였다. 이 시나리오가 가능한 이유는 석탄, 석유, 천연가스과 같은 화석연료의 사용을 점차 줄이고, 화석연료 및 바이오연료의 연소과정에서 배출되는 이산화탄소의 상당

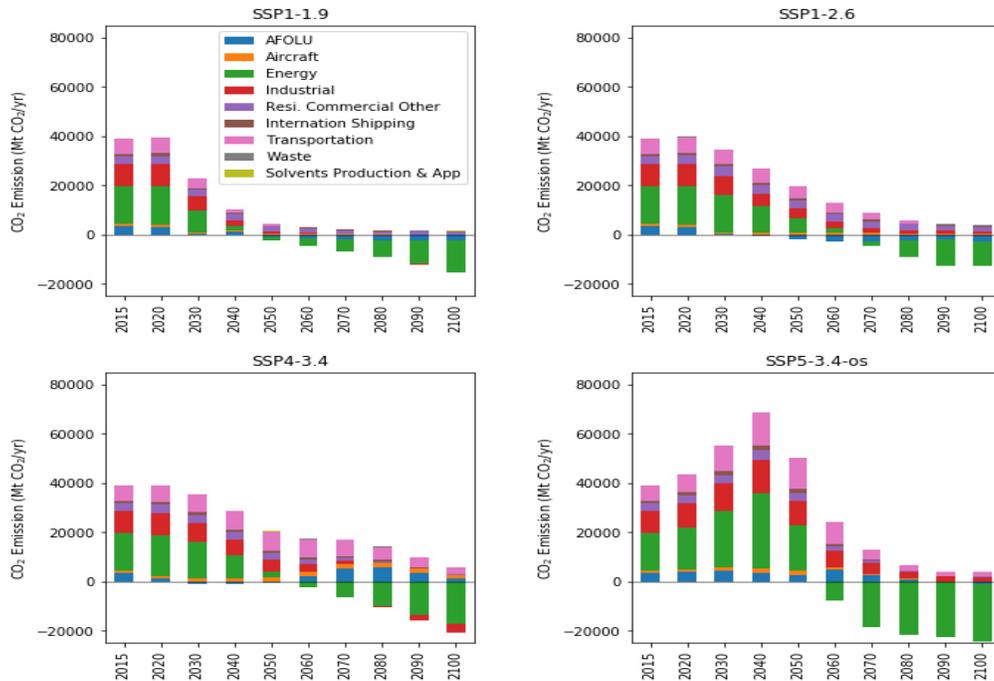


Fig. 2. The sectoral contribution to CO<sub>2</sub> emissions for Carbon net-zero scenarios (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4, and SSP5-3.4)

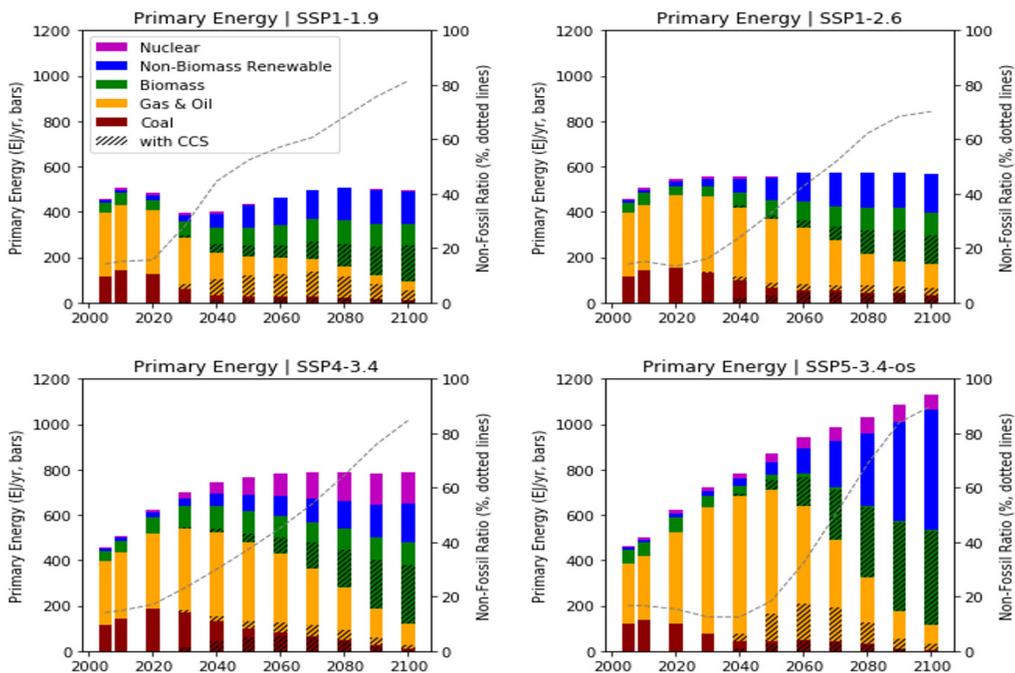


Fig. 3. The primary energy by source for carbon net-zero scenarios. Dotted lines denote the non-fossil energy (Nuclear, Renewable, and Biomass) ratio. Hatched lines mean carbon capture and storage (CCS) by type at the year

부분을 포집해서 제거하기 때문이다(Gidden et al., 2019).

### 2.3. 분석 방법

본 연구에서는 탄소중립 시나리오에 따른 동아시아 평균기온과 평균강수량 및 극한기후의 강도와 빈도에 대한 분석을 수행하였다. 극한기후는 과거에 발생하지 않았거나 드물게 발생하던 기상 현상이기 때문에, 월 단위의 평균을 살펴보는 것으로는 극한기후 분석이 제한적이기 때문에 일 자료를 이용한다. 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)에서는 극한기후 변화를 탐지할 수 있도록 표준화된 극한기후지수 ETCCDI (Expert Team an Climate Detection and Indices)를 정의하고 있으며, 기온과 강수에 대해 총 27개의 지수를 선정하고 그에 대한 가이드 라인을 제시하고 있다(Shim et al., 2021). 탄소중립 경로에 따른 극한기후의 빈도, 강도특성에 대한 차이를 살펴보기 위해, ETCCDI 지수 중 극한기온과 관련된 지수 6개와 극한강수와 관련된 지수 4개를 분석에 사용하였다(Table 3). 분석을 위한 동아시아 영역은 20~50°N, 110~145°E으로 설정하였으며 UKESM1-0-LL 지구시스템모델의 육지-해양

구분 자료(land-sea mask)를 이용해 육지에 대한 극한기후 지수의 변화를 분석하였다(Fig. 4).

탄소중립 달성이 늦어진다면 온실가스 농도와 기온은 계속해서 증가할 것이기 때문에, 극한기후에 노출될 가능성과 그 취약성을 줄이기 위해서는 온실가스 감축속도와 이른 시기의 탄소중립 달성이 중요하다(IPCC, 2018; Shim, Kwon et al., 2019). 따라서, 본 연구에서는 가장 빠른 경로(SSP1-1.9)와 동일하게 탄소중립을 달성했다라면 피할 수 있는 극한기후 영향(Fraction of Avoidable Impact, FAI)을 식 (1)을 통해 강도와 빈도로 나누어서 살펴보았다. 여기에서 회피 가능 영향(Avoidable impact)이란 기후변화 시나리오를 통해 예상할 수 있는 부정적인 영향을 적극적인 사회의 대응으로 피할 수 있는 경우를 의미한다.

$$FAI_{SSPn} = \frac{C_{SSPn} - C_{SSP1.9}}{C_{SSPn}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

식 (1)에서 CSSPn는 극한기후의 강도 및 빈도에 대하여 현재기후 대비 탄소중립 시나리오 3종(SSP1-2.6, SSP4-3.4, SSP5-3.4-OS)에서의 변화량을 의미한다. 이를 통해, 각 탄소중립 시나리오를 기준(분모가 CSSPn)으로, 보다 적극적인 온실가스 감축 노력을 통해 파리협약을 달성하였다면 피할 수 있는 극한기후 영향을 정량화함으로써 기후변화에 따른 취약성을 얼마나 줄일 수 있는지 분석할 수 있다.

Table 3. List of 10 extreme climate indices and their definitions

Index	Description	Units
TXx	Annual maximum value of daily maximum temperature	℃
TNn	Annual minimumvalue of daily minimum temperature	℃
TX90p	Annual count when daily maximum temperature > 90 thpercentile (Warmdays)	day
TN90p	Annual count when daily minimum temperature > 90 thpercentile (Warmnights)	day
TX10p	Annual count when daily maximum temperature < 10 thpercentile (Cool days)	day
TN10p	Annual count when daily minimum temperature < 10 thpercentile (Cool nights)	day
Rx5day	Annual maximum consecutive 5-day precipitation	mm
R95pTOT	Annual total precipitation whendaily precipitation > 95 thpercentile	mm
R95	Annual count when daily precipitation > 95 thpercentile	day
R99	Annual count when daily precipitation > 99 thpercentile	day

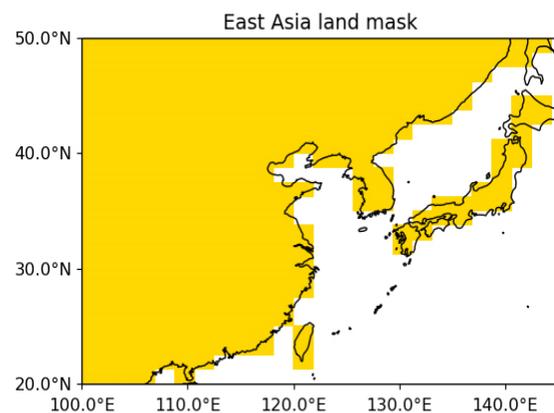


Fig. 4. Domain area of East Asia (20~50°N, 100~145°E) in this study. The yellow color indicates land mask grid cells in UKESM1-0-LL Earth system model

### 3. 결과

#### 3.1. CMIP6 모델의 현재기후 모의

현재 기후에 대한 평균기온, 일 최고기온, 일 최저기온 및 평균강수량 자료는 유럽중기기상예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 고해상도 재분석 자료인 ERA5 (ECMWF ReAnalysis version 5) 자료를 사용하였다. 먼저, CMIP6 모델들로부터 산출된 미래전망의 신뢰성을 확인하기 위하여, 현재 기후에 대한 모의성능을 ERA5 자료와 비교하였다(Sung et al., 2021). 전지구 규모에서의 기온 변수들에 대한 다중모델 앙상블 결과와 ERA5 자료가 유사한 것으로 나타났지만, 동아시아 영역에서는 다중모델 앙상블이 다소 낮게 모의하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5a~5c). 특

히, IPSL-CM6A-LR 모델은 기온 변수들을 전반적으로 낮게 모의하는 특징을 보였고, MIROC6 모델은 높게 모의하는 경향성을 보였다. 이러한 비교 결과는 CMIP6 개별 모델의 편차가 크게 나타났기 때문에 미래 기후변화 분석에 다중모델 앙상블의 전망 값과 불확실성의 해석이 필요함을 의미한다. 또한, CMIP6 모델의 미래전망은 각 모델의 현재기후의 모의성능 뿐만 아니라, 기후민감도를 고려하여 분석할 필요가 있다(Meehl et al., 2020; Scafetta, 2022; Sun et al., 2020). 따라서, 본 연구에서는 낮은 수준의 기후민감도를 가지는 MIROC6 모델과 중간 수준의 IPSL-CM6A-LR 모델의 결과를 다중모델 앙상블 분석에 포함하였다. 현재기후의 평균강수량도 CMIP6 다중모델 앙상블이 전지구 값인 ERA5 자료와 유사하게 모의하였지만, 동아시아에서는 과소모의 경향을 보였다(Fig. 5d). 특히, 동아시아 지역의 평균강수에 대한 개별모델의 편차

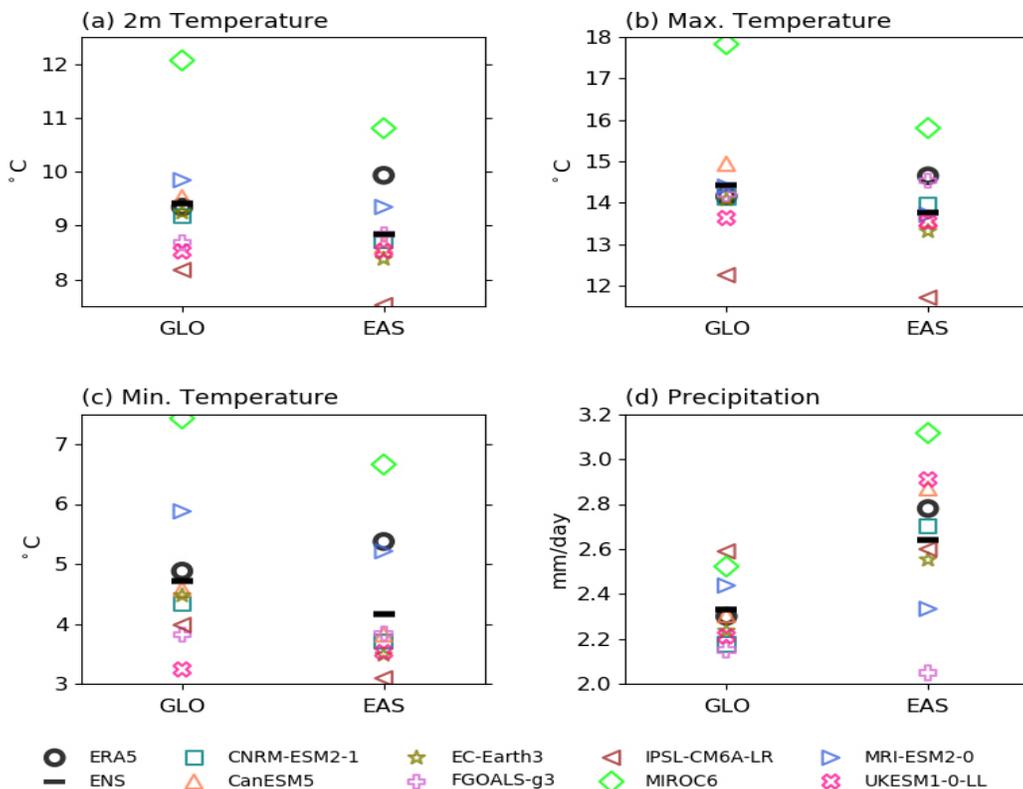


Fig. 5. Comparison of the global (GLO) and East Asia (EAS) domain averaged annual (a) mean temperature, (b) maximum temperature, (c) minimum temperature, and (d) precipitation. The black circles represent the ERA5 reanalysis data and the colored symbols indicate data obtained from CMIP6 historical simulations for the present-day (1995 ~ 2014). The thick horizontal black lines indicate the ensemble mean of the CMIP6 models

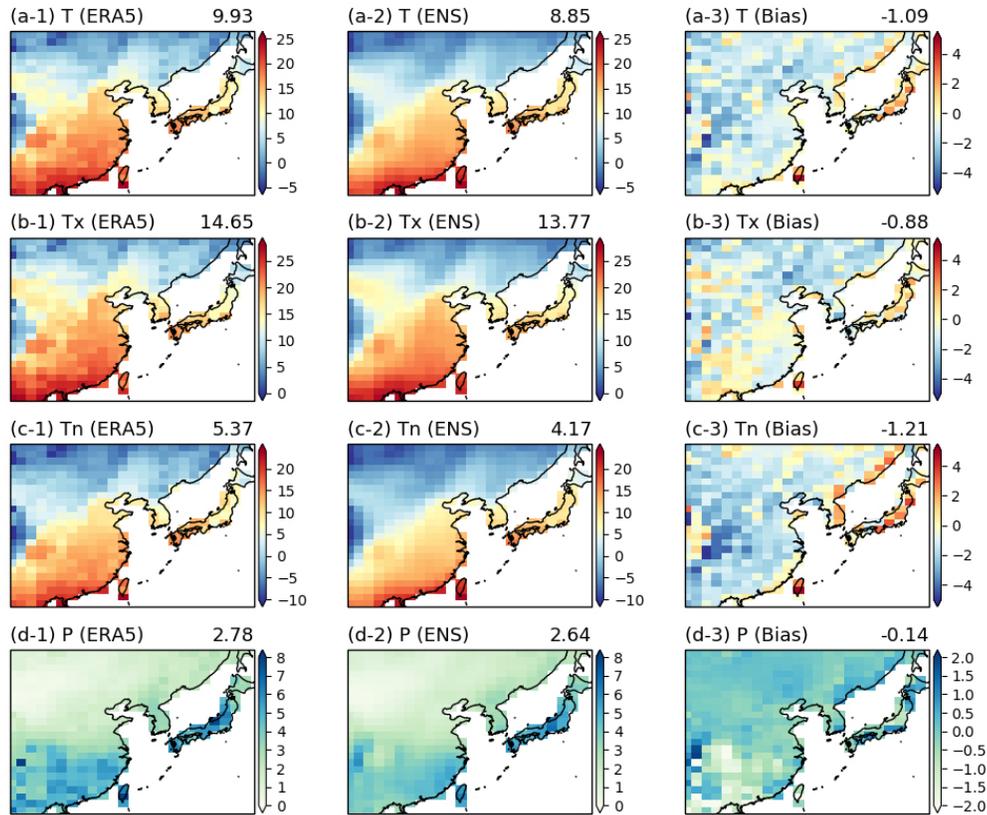


Fig. 6. Spatial distribution of the annual mean temperature (a1 ~ a3), daily maximum temperature (b1 ~ b3), daily minimum temperature (c1 ~ c3), and daily precipitation (d1 ~ d4), respectively averaged in the present-day (1995 ~ 2014) from ERA5 reanalysis in left panel (a1 ~ d1), CMIP6 model ensemble mean in center (a2 ~ d2), and their differences in right panel (a3 ~ d3). The domain average values are shown in the right corner

가 전지구에 비해 약 2배 정도의 크게 나타났는데, 이는 CMIP6 개별모델의 불확실성이 큰 것으로 의미하기 때문에 동아시아 지역 미래 강수량 전망에 대한 해석에 주의가 필요함을 시사한다.

공간분포를 살펴보면, 다중모델 앙상블에서 모의된 평균기온은 ERA5 재분석 자료 대비 음의 편차(-1.09°C)가 나타났지만, 공간적 경향성은 유사함을 확인할 수 있다 (Fig. 6a). 평균기온은 중국 내륙지역을 중심으로 과소 모의하는 경향을 보였지만, 일 최고기온은 과대 모의 경향이 나타났다(Fig. 6b). 일 최저기온의 경우, 평균기온과 유사하게 중국 내륙지역을 중심으로 과소 모의 경향이 나타났고, 한국과 일본 지역을 중심으로 과대 모의 경향이 나타났다(Fig. 6c). 평균강수량의 경우에는 몬순 시스템의

영향으로 중국과 일본 남부지역에 높은 강수량이 집중되는 특징이 보였다(Fig. 6d). CMIP6 모델의 강수 모의는 강수가 집중되는 저위도에서 재분석 자료에 비해 다소 음의 편차가 나타났으며, 반면 상대적으로 강수량이 적은 고위도 지역에서는 양의 편차가 나타났다. 종합해보면, 강수량이 많은 지역에서 나타난 음의 편차 영향으로 동아시아 지역 평균강수량은 음의 편차(-0.14 mm/day)가 나타남을 확인하였다. 종합해보면, 개별모델은 다소 불확실성을 가지고 있지만, 다중모델 앙상블은 동아시아 기후를 잘 모의하는 것으로 판단할 수 있다. 이는 CMIP6 다중모델 앙상블 기반의 동아시아 전망결과가 신뢰성을 가짐을 시사하는 결과이다.

### 3.2. 탄소중립 경로에 따른 미래 온난화 수준 전망

파리협약 목표 이행을 위해 이산화탄소의 배출을 감축한다고 하더라도, 탄소중립을 달성하기 전까지는 결과적인 양(+)의 배출량으로 인해 대기 중 이산화탄소 농도가 점차 증가할 수밖에 없다. 가장 빠른 탄소중립 경로인 SSP1-1.9 시나리오에 따르면, 2040년 부근에 온실가스 농도의 최고점이 나타났으며(Fig. 7; 보라색 점선), 점차 감소하여 21세기 후반에 약 400 ppm 수준으로 회복하는 것으로 전망된다. 이에 따라, 2020년 이후에 파리협약 목표를 초과하였고, 약 1.7°C 수준까지 상승했다가 점차 감소하여 21세기 후반에 1.5°C 온난화 수준이 회복될 것으로 전망된다. 이산화탄소의 농도를 현재 기후 수준으로 되돌렸지만, 기온은 이전 수준만큼 완전하게 회복되지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 7; 보라색 실선). 왜냐하면, 메탄, 아산화질소 등 이산화탄소 이외의 온실가스는 배출되고 있기 때문이며(Fig. 1), 이는 종합적인 온실가스의 감축 방안을 고려해야만 향후 온난화를 효과적으로 억제할 수 있다는 것을 시사한다(Shim, Kim et al., 2019; Shim, Kwon et al., 2019).

SSP1-1.9 시나리오를 제외한 다른 탄소중립 시나리오에 따르면, 21세기 내에 탄소중립에 달성하더라도 파리협약 목표를 달성하지 못할 것으로 나타났다(Fig. 7). SSP1-2.6 시나리오에서는 탄소중립을 달성 이후 완만한 기온 감소 경향이 나타나고 있지만, 21세기 후반에도 2.0°C 온난화를 초과하는 수준이 유지되는 것으로 전망된다. 탄소중립의 시점이 가장 늦은 SSP4-3.4 시나리오에서는 기온이 지속적으로 상승하여 2.5°C 온난화 수준을 초과하였다. SSP1-2.6 시나리오와 비교해보면(Fig. 1), 이산화탄소의 배출량은 유사하였지만, SSP4-3.4 시나리오에서 다른 온실가스인 메탄과 아산화질소의 배출량이 현재 수준으로 유지되거나 증가하였다. 반면, 2040년 이후의 강력한 감축 정책을 통해 탄소중립을 달성하는 SSP5-3.4-OS 시나리오의 경우, 21세기 중반에는 기온 상승은 모든 경로 중에 가장 크게 나타났지만, 점차 감소하여 21세기 후반에는 SSP4-3.4 시나리오보다 낮을 것으로 전망된다(2.5°C 온난화 이하). SSP5-3.4-OS 시나리오에 포함된 모든 온실가스의 배출 감축과 대규모 이산화탄소 제거 기술의 영향으로 탄소중립 시나리오 중 가장 큰 기온감소 경향이 나타난 것으로 해석할 수 있다. 결과적으로 시나리오 내포된 정책의 차이에 따라 더 높은 수준의 온난화가 유도된다고 해석할 수 있으며, 온실가스 배출의 종합적이고 강

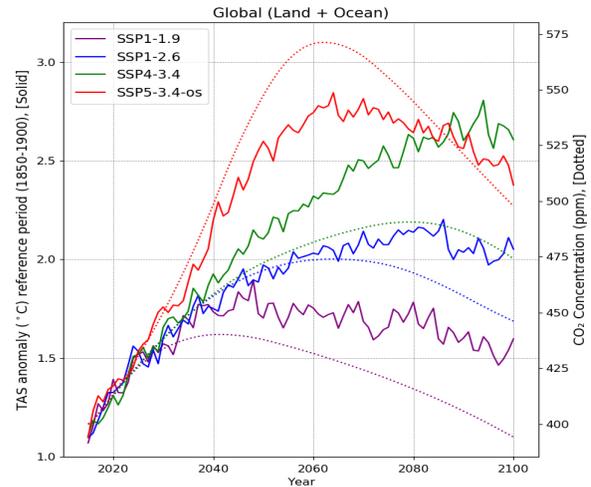


Fig. 7. Global surface air temperature changes relative to the pre-industrial period 1850 ~ 1900 (solid lines) and CO<sub>2</sub> concentration (dotted lines) for the SSP scenarios

한 감축이 온난화 수준 억제를 위한 중요한 요인임을 보여준다.

### 3.3. 동아시아 지역의 극한기후 미래전망

Fig. 8은 탄소중립 시나리오 4종에 대한 극한기후지수의 미래 전망을 보여준다. 전반적으로 2040년 부근까지는 시나리오에 따른 극한기후의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 가까운 미래의 기후변화는 시나리오와 상관없이 유사하다는 선행연구와 일치하는 결과이다(Sung et al., 2021). 동아시아 지역의 극한기후지수도 가까운 미래에는 시나리오 종류와 관계없이 유사한 상승(증가) 경향이 나타난다. 모든 온실가스를 감축하는 SSP1-1.9와 SSP1-2.6 시나리오는 극한기온과 강수의 상승(증가) 경향이 완만하고, 21세기 후반에는 일부 회복되는 특징을 보였다. 하지만, 이산화탄소 배출량만 감축하는 SSP4-3.4 시나리오는 21세기 후반까지 지속적으로 극한기후가 상승(증가)하는 경향이 나타났고, 더 많은 배출이 이루어진 뒤 강력하게 감축하는 SSP5-3.4-OS 시나리오에서는 21세기 중반에 최고 변화폭에 도달한 뒤에 회복되는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 극한기후의 발생빈도와 강도 지수들에서 모두 공통적으로 나타났다. 시나리오에 내포된 탄소중립의 시점은 SSP1-1.9, SSP5-3.4-OS, SSP1-2.6, SSP4-3.4 시나리오 순서대로 빨리 나타난다. 이를 극한기후지수의 미래 전망과 연결해보면, 빠른 탄소중

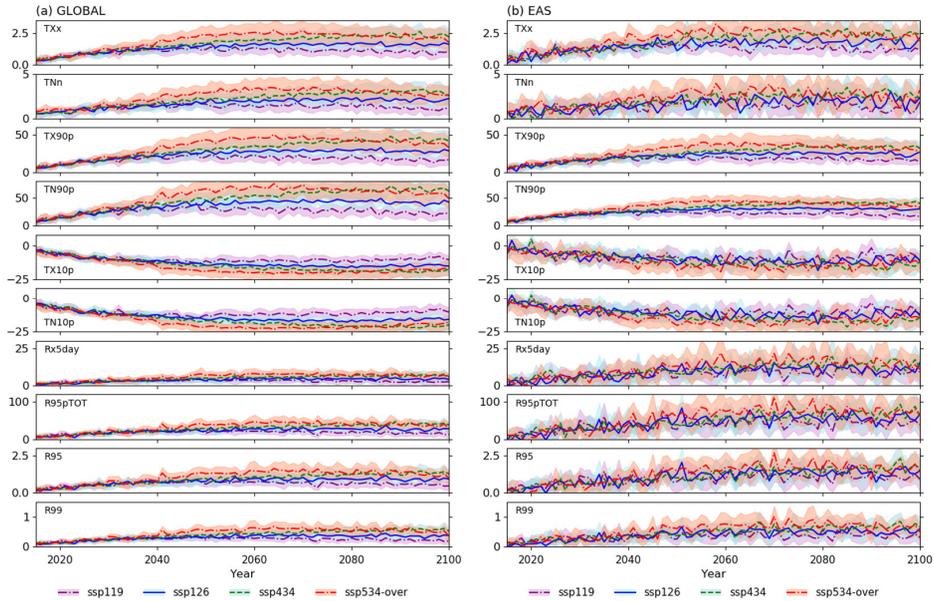


Fig. 8. Future changes in anomaly of 10 extreme climate indices averaged over (a) global and (b) east Asia during 2015 to 2100 from SSP scenarios. Each line represents the MME mean, and the shaded areas represent a  $\pm 1$  standard deviation of the mean

립 달성시점, 이산화탄소 이외의 온실가스 감축, 강한 배출량 억제가 극한기후의 발생빈도와 강도를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

탄소중립 시나리오 경로에 따른 21세기 후반 동아시아 지역의 연 최고기온(TXx)과 연 최저기온(TNn)은 시나리오에 따라 각각 1.22~2.33°C, 1.28~2.74°C 상승할 것으로 전망되었다. 최고/최저 기온의 상위 10 퍼센타일의 극한 고온 발생빈도는 시나리오에 따라 각각 16.75~32.04일, 20.06~40.88일 증가할 것으로 전망되었다. 하지만, 극한 저온 현상은 발생 강도와 빈도가 점차 약해질 것으로 전망되었다. 특히, 21세기 후반의 평균기온이 가장 높게 나타난 SSP4-3.4 시나리오에서 극한 저온 발생일수가 15일 이상 줄어들 것으로 전망되었으며, SSP1-1.9 시나리오에서도 현재 대비 약 25% 이상 발생일수가 줄어들 것으로 전망된다. 이는 탄소중립을 달성한다고 하더라도 현재 수준의 극한 저온 현상은 지속적으로 줄어든다는 분석 결과이다(Fig. 8). 또한, 모든 시나리오에서 최저기온의 극한지수가 최고기온보다 상승폭과 CMIP6 모델 편차가 다소 크게 나타났다. SSP5-3.4-OS에서 나타난 극한기온지수의 상승폭은 SSP1-1.9와 SSP1-2.6의 경우보다 많게는 약 2배 정도 크게 나타났다. 또한, SSP4-3.4에 비해서는

다소 작은 상승폭을 보였다(Table 4). 현재기후 대비 21세기 후반 동아시아 극한강수의 발생강도는 R×5 day(5일 최대강수량)이 약 9.2~15.0 mm 정도, R95pTOT(상위 5%의 최대강수량)은 46.1~74.3 mm 증가할 것으로 전망된다(Table 4). 발생빈도와 관련된 극한강수지수인 R95와 R99도 온난화 수준이 높아지면서 각각 1.1~1.7일, 0.4~0.7일 정도 증가할 것으로 나타났다. 또한, 극한강수의 강도가 증가한 지역에서 유의미한 빈도의 증가도 나타났다(not shown). 이러한 결과는 탄소중립을 늦게 달성할수록 극한강수의 강도와 발생빈도가 증가한다는 것을 시사하며, 폭염 뿐만 아니라 집중호우의 피해도 커질 수 있음을 의미하는 분석 결과이다.

### 3.4. 탄소중립 경로에 따른 회피 가능한 극한기후의 변화

앞서 살펴본 바와 같이 탄소중립을 달성하더라도 21세기 후반의 동아시아의 극한기후현상은 현재 기후 대비 강도와 빈도가 큰 폭으로 증가할 것임을 확인하였다. 이번 절에서는 각 탄소중립 시나리오에서 나타난 21세기 후반의 극한기후 변화량을 파리협약 달성 유무를 기준(SSP1-1.9)으로 얼마나 더 큰 폭으로 증가하는지를 정량

Table 4. Changes in 10 extreme temperature and precipitation indices (MME and standard deviation) over East Asia for the late 21st century (2081 ~ 2100) relative to the present-day (1995 ~ 2014)

	Present-day	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP4-3.4	SSP5-3.4-os
TXx (°C)	34.4±2.0	1.2±0.4	1.8±0.5	2.5±0.9	2.3±1.0
TNn (°C)	-19.9±2.4	1.3±1.0	2.0±1.1	2.7±1.5	2.45±1.5
TX90p (day)	36.5±0.2	16.8±5.6	24.8±7.9	33.5±13.2	32.0±14.5
TN90p (day)	36.5±0.2	20.1±8.1	29.9±9.0	40.9±10.5	37.2±14.2
TX10p (day)	36.5±0.2	-8.5±4.2	-11.4±4.6	-15.1±6.3	-13.6±7.0
TN10p (day)	36.5±0.2	-9.2±4.9	-12.5±5.5	-17.5±6.3	-15.2±7.9
R×5day (mm)	101.1±16.9	9.2±7.8	11.3±7.0	14.4±7.9	15.0±10.2
R95pTOT (mm)	223.7±38.6	46.1±30.8	57.9±30.3	70.2±31.0	74.3±38.1
R95 (day)	6.0±0.6	1.1±0.6	1.4±0.6	1.6±0.7	1.7±0.7
R99 (day)	1.2±0.1	0.4±0.2	0.5±0.2	0.7±0.3	0.7±0.3

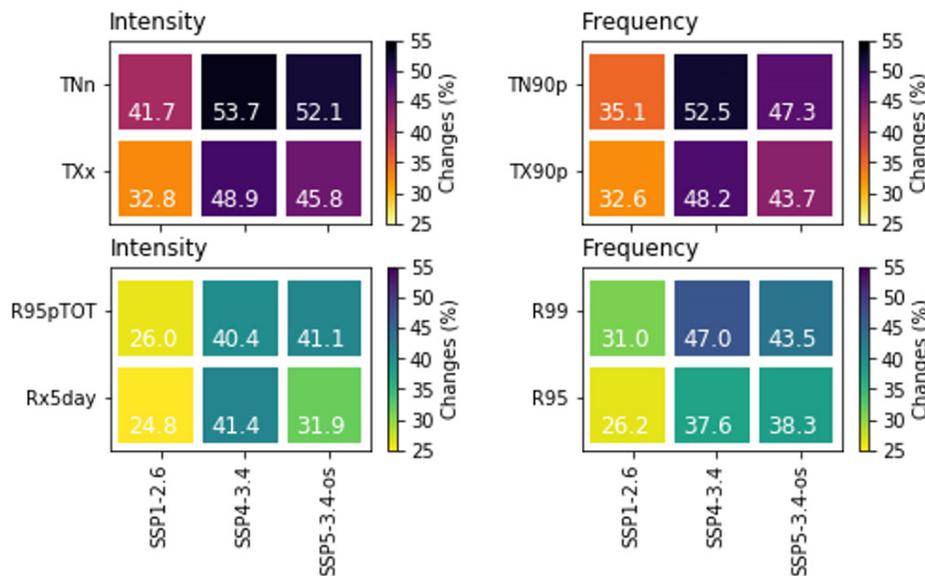


Fig. 9. Changes of extreme climate events avoided over East Asia in limiting global warming below 1.5°C under the Paris agreement target experiment (SSP1-1.9) compared with other SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP4-3.4, and SSP5-3.4-os) (unit: %)

적으로 파악하고자 하였다(식 1). 이는 각 시나리오 (SSP1-2.6, SSP4-3.4, SSP5-3.4-OS)의 극한기후 변화량에 대한 비율환산을 통해 탄소중립 조기 달성이 연 최고/최소기온, 5일 최대강수량 및 상위 퍼센타일의 기온과 강수 극한기후현상을 얼마나 피할 수 있게 해주는가를 의미한다(Fig. 10). 또한, SSP1-1.9의 21세기 후반 온난화 수준(1.5°C)를 기준으로 각 시나리오에서 나타난 추가 온난화 수준을 이용하여 정리하였다.

SSP1-1.9 대비 0.5°C 추가 온난화 수준(SSP1-2.6)에서

는 연 최고(TXx)/최저(TNn) 기온이 각각 32.8%, 41.7% 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 추가 온난화가 1.0°C 이상이 되면(SSP4-3.4, SSP5-3.4-OS), 극한기온의 강도는 45.8~53.7%까지 증가할 것으로 나타났다. 상위 10 퍼센타일에 해당하는 극한고온의 출현 빈도는 0.5°C, 1.0°C 추가 온난화 수준에 따라 각각 32.6~35.1%, 43.7~52.5% 증가할 것으로 전망되고, 출현 빈도의 증가보다 강도 증가폭이 상대적으로 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 다시 말하면, 탄소중립을 앞당길 경우, 낮시간의 폭염

과 야간의 열대야 현상의 강도가 약해지고, 발생 횟수가 줄어들어서 기후변화의 영향을 줄일 수 있다는 의미이다. 극한강수의 경우에도 기온과 유사한 경향이 나타났다. 0.5°C 추가 온난화 수준에서는 약 25% 정도 극한강수량이 증가하고, 최대 약 30% 정도까지 출현 빈도가 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 추가 온난화가 1.0°C 수준까지 상승할 경우, 동아시아 지역의 극한강수는 약 40% 수준 정도로 강도와 빈도가 증가할 것으로 전망된다. 특히, 상위 1 퍼센타일 극한강수(R99)의 출현 빈도가 최대 약 47% 증가할 것으로 전망된다. 이는 탄소중립 달성시기를 파리협약 목표달성에 준하는 시기로 앞당긴다면, 인간사회에 재난을 불러일으키는 강한 집중호우를 최대 약 47% 정도 회피할 수 있다는 의미이다. 종합해보면, 이 분석 결과는 가까운 미래에 탄소중립 사회를 만들기 위해 신속하고 강력한 온실가스의 감축 행동이 필요함을 시사함과 동시에, 탄소중립의 지연에 따른 극한기후의 영향에 대한 대비책 논의가 필요함을 보여준다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 탄소중립 시나리오에 기반한 동아시아 지역의 기후변화 미래 전망을 분석하고, 파리협약 목표달성 수준으로 탄소중립을 앞당길 경우, 각 시나리오에서 21세기 후반에 회피할 수 있는 극한기후의 영향을 정량화하고자 하였다. 분석에 사용된 탄소중립 시나리오는 총 4종으로, 파리협약 목표를 달성한 SSP1-1.9 시나리오 및 탄소중립 달성이 지연된 3종 시나리오(SSP1-2.6, SSP4-3.4, SSP5-3.4-OS)이며, CMIP6 다중모델 앙상블을 활용하였다. 가장 빠른 탄소중립 경로를 포함하고 있는 SSP1-1.9 시나리오에 따르면, 약 1.7°C 수준까지 상승했다가 점차 감소하여 21세기 후반에 1.5°C 온난화 수준에 이를 것으로 전망된다. 이산화탄소의 농도를 400ppm 미만 수준으로 되돌렸지만, 기온은 이전 수준만큼 완전하게 회복되지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 7; 보라색 실선). 이는 다른 3종 시나리오와 비교하여 원인을 파악해보면, 메탄, 아산화질소 등 이산화탄소 이외에 배출되는 온실가스의 영향으로 판단된다. SSP1-1.9 시나리오를 제외한 다른 탄소중립 시나리오에 따르면, 21세기 내에 탄소중립에 달성하더라도 파리협약 목표는 달성하지 못할 것으로 전망되며, SSP1-2.6 시나리오는 21세기 후반에 2.0°C 온난화, SSP4-3.4와 SSP5-3.4-OS 시나리오는 2.5°C 온난화 수준이 나타났다. 결과적으로 탄소중립 지연에 따라 더 높은 수준의 온

난화가 유도된다고 해석할 수 있으며, 종합적인 온실가스 배출 억제와 보다 빠른 시기의 강한 감축이 향후 온난화 수준을 억제하기 위한 중요한 요인임을 확인하였다.

탄소중립 시나리오에 따른 21세기 후반의 동아시아 기후변화를 살펴보면, 21세기 내에 탄소중립을 달성하더라도 동아시아 극한기온과 강수의 강도 및 출현 확률이 상승하고(SSP1-1.9 시나리오 포함), 그 시점이 늦어질수록 상승 경향이 더욱 크게 나타남을 확인할 수 있다. SSP1-1.9(파리협약 달성) 대비 탄소중립 지연에 따른 0.5°C 수준의 추가 온난화가 발생할 경우, 동아시아 지역의 극한기온과 극한강수는 각각 약 35%, 25% 정도 증가할 것으로 전망된다. 또한, 1.0°C 수준의 추가 온난화가 발생할 경우에는 극한기온과 극한강수 분야에서 각각 약 50%, 약 40% 정도 증가할 것으로 전망된다. 종합해보면, 탄소중립이 지연에 따라 강한 극한기온과 잦은 극한강수의 영향이 증가할 것으로 전망된다. 이러한 분석결과는 파리협약 목표달성을 위해 탄소중립 시기를 앞당길 경우, 우리사회가 마주하게 될 극한기후의 영향은 그만큼 줄어들 것임을 시사한다.

본 연구의 결과는 최신의 CMIP6 탄소중립 시나리오를 활용한 미래 전망의 분석이지만, 전지구 규모의 지구시스템모델 기반의 자료이므로 낮은 해상도(약 100 km)를 가지고 있다. 또한, 동아시아 지역에 대한 연구 사례가 적은 편이기 때문에 정책결정자 등의 수요자에게 과학정보를 제공할 것으로 기대되지만, 극한기후의 지역적 특성을 고려하거나 기후변화 취약성에 대한 개념을 포괄하지 못하기 때문에 정책적 근거로서의 활용을 위해서는 해석에 주의가 요구된다. 뿐만 아니라, 지역상세화 기법을 통한 고해상도 과학정보의 산출과 더불어 국가 탄소감축 계획 등이 고려된 시나리오들을 추가로 분석하는 등 방법론에 대한 지속적 발전도 요구된다.

#### 사사

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

#### References

Biesbroek R, Sarah JW, Stefanie KE, Anita B, Ioannis

- NA. 2022. Policy attention to climate change impacts, adaptation and vulnerability: A global assessment of National Communications (1994-2019). *Clim Policy* 22(1): 97-111.
- Boucher O, Servonnat J, Albright AL, Aumont O, Balkanski Y, Bastrikov V, Bekki S, Bonnet R, Bony S, Bopp L, et al. 2020. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *J Adv Model Earth Syst* 12(7): e2019MS002010. doi: 10.1029/2019MS002010
- Döscher R, Acosta M, Alessandri A, Anthoni P, Arsouze T, Bergman T, Bernardello R, Boussetta S, Caron L-P, Carver G, et al. 2022. The EC-Earth3 earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geosci Model Dev* 15(7): 2973-3020. doi: 10.5194/gmd-15-2973-2022
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9(5): 1937-1958. doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016
- Gidden MJ, Riahi K, Smith SJ, Fujimori S, Luderer G, Kriegler E, van Vuuren DP, van den Berg M, Feng L, Klein D, et al. 2019. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geosci Model Dev* 12(4): 1443-1475. doi: 10.5194/gmd-12-1443-2019
- Heal G. 2009. The economics of climate change: A post-stern perspective. *Clim Change* 96(3): 275-297. doi: 10.1007/s10584-009-9641-z
- Hohne N, Kuramochi T, Wamecke C, Roser F, Fekete H, Hagemann M, Day T, Tewari R, Kurdziel M, Sterl S, et al. 2016. The Paris Agreement: Resolving the inconsistency between global goals and national contributions. *Clim Policy* 17(1): 16-32. doi: 10.1080/14693062.2016.1218320
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, et al. (eds). *Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 3-24. doi: 10.1017/9781009157940.001
- Joh CH, Lee S, Jang DH. 2012. Extreme climate indices appropriate for climate studies in Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 7(2): 136-145.
- Jung JH, Lim H, Hwang SI, Yu JA. 2024. Analyzing and assessing the current status of heat-related illnesses in the South Korean military. *Mil Med: usae115*. doi: 10.1093/milmed/usae115
- Kim Y, Choi Y, Min SK. 2022. Future changes in heat wave characteristics and their impacts on the electricity demand in South Korea. *Weather Clim Extrem* 37: 100485. doi: 10.1016/j.wace.2022.100485
- Kim Y, Choi Y. 2020. An examination on characteristics of extreme high temperature events by their types of the geographic extent over the Republic of Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Geogr Soc* 55(2): 83-95. doi: 10.22776/kgs.2020.55.2.83
- Lee JH, Sung HM, Shim S, Boo KY. 2020. International data node system for CMIP6 climate change projections (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 11(4): 247-257, doi: 10.15531/KSCCR.2020.11.4.247
- Li L, Yu Y, Tang Y, Lin P, Xie J, Song M, Dong L, Zhou T, Liu L, Wang L, et al. 2020. The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model Grid-Point Version 3 (FGOALS-g3): Description and evaluation. *J Adv Model Earth Syst* 12(9): e2019MS002012. doi: 10.1029/2019MS002012
- Meehl GA, Senior CA, Eyring V, Flato G, Lamarque JF, Stouffer RJ, Taylor KE, Schlund M. 2020. Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient

- climate response from the CMIP6 earth system models. *Sci Adv* 6(26): eaba1981. doi: 10.1126/sciadv.aba1981
- O'Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, Mathur R, van Vuuren DP. 2014. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Change* 122: 387-400. doi: 10.1007/s10584-013-0905-2
- O'Neill BC, Tebaldi C, van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J-F, Lowe J, et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9(9): 3461-3482. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016
- Park H, Lee SM, Kim WJ, Chae Y. 2023. Analysis of compound health impacts of heatwave and COVID-19 in Korea from May to September in 2020. *Sci Rep* 13(1): 14880. doi: 10.1038/s41598-023-41880-1
- Popp A, Calvin K, Fujimori S, Havlik P, Humpenöder F, Stehfest E, Bodirsky BL, Dietrich JP, Doelmann JC, Gusti M, et al. 2017. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Glob Environ Change* 42: 331-345. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.10.002
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill BC, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, et al. 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Change* 42: 153-168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Rogelj J, Den Elzen M, Hohne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M. 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature* 534(7609): 631-639. doi: 10.1038/nature18307
- Scafetta N. 2022. Advanced testing of low, medium, and high ECS CMIP6 GCM simulations versus ERA5-T2m. *Geophys Res Lett* 49(6): e2022GL097716. doi: 10.1029/2022GL097716
- Schleussner CF, Deryng D, Muller C, Elliott J, Saeed F, Folberth C, Liu W, Wang X, Pugh TAM, Thiery W, et al. 2018. Crop productivity changes in 1.5°C and 2°C worlds under climate sensitivity uncertainty. *Environ Res Lett* 13(6): 064007. doi: 10.1088/1748-9326/aab63b
- Séférian R, Nabat P, Michou M, Saint-Martin D, Vol Doyle A, Colin J, Decharme B, Delire C, Berthet S, Chevallier M, et al. 2019. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of earth system processes in present-day and future climate. *J Adv Model Earth Syst* 11(12): 4182-4227. doi: 10.1029/2019MS001791
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy J, 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(12): 4513-4558. doi: 10.1029/2019MS001739
- Seo GY, Choi YW, Ahn JB. 2019. Near future projection of extreme temperature over CORDEX-East Asia phase 2 region using the WRF model based on RCP scenarios (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 29(5): 585-597. doi: 10.14191/Atmos.2019.29.5.585
- Shim S, Kim J, Sung HM, Lee JH, Kwon SH, Sun MA, Ha JC, Byun YH, Kim YH. 2021. Future changes in extreme temperature and precipitation over East Asia under SSP scenarios (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 12(2): 143-162. doi: 10.15531/kscrcr.2021.12.2.143
- Shim S, Kim J, Yum SS, Lee H, Boo KO, Byun YH. 2019. Effects of anthropogenic and natural forcings on the summer temperature variations in East Asia during the 20th century. *Atmosphere* 10(11): 690. doi: 10.3390/atmos10110690
- Shim S, Kwon SH, Lim YJ, Yum SS, Byun YH. 2019. Understanding climate change over East Asia under stabilized 1.5 and 2.0°C warming scenarios (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 29(4): 391-401. doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.391
- Sun MA, Sung HM, Kim J, Boo KO, Lim YJ, Marzin C,

- Byun Y-H. 2020. Climate sensitivity and feedback of a new coupled model to idealized CO<sub>2</sub> forcing. *Atmosphere* 11(11): 1218. doi: 10.3390/atmos11111218
- Sung HM, Kim J, Shim S, Seo J, Kwon SH, Sun MA, Moon H, Lee J-H, Lim Y-J, Boo K-O, et al. 2021. Climate change projection in the twenty-first century simulated by NIMS-KMA CMIP6 model based on new GHGs concentration pathways. *Asia-Pac J Atmos Sci* 57(4): 856-862. doi: 10.1007/s13143-021-00225-6
- Sung HM, Lee JH, Kim JU, Shim S, Chung CY, Byun YH. 2023. Changes in thermal stress in Korea using climate-based indicators: Present-day and future projections from 1km high resolution scenarios. *Int J Environ Res Public Health* 20(17): 6694. doi: 10.3390/ijerph20176694
- Swart NC, Cole JNS, Kharin VV, Lazare M, Scinocca JF, Gillet NP, Anstey J, Arora V, Christian JR, Hanna S, et al. 2019. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geosci Model Dev* 12(11): 4823-4873. doi: 10.5194/gmd-12-4823-2019
- Tatebe H, Ogura T, Nitta T, Komuro Y, Ogochi K, Takemura T, Sudo K, Sekiguchi M, Abe M, Saito F, et al. 2019. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci Model Dev* 12(7): 2727-2765. doi: 10.5194/gmd-12-2727-2019
- UN (United Nations). 2015. Paris Agreement.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2022. Decision -/CMA.3: Glasgow climate pact.
- World Bank. 2012. Turn down the heat: Why a 4°C warmer world must be avoided. Washington, DC: Author.
- Yukimoto S, Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K, Urakawa S, Tsujino H, Deushi M, Tanaka T, Hosaka M, et al. 2019. The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J Meteorol Soc Jpn* 97(5): 931-955. doi: 10.2151/jmsj.2019-051