

SSP-RCP 기후변화 시나리오 기반 한반도의 평균 기온 및 온량지수 변화

허지나 · 김용석* · 조세라 · 김응섭 · 강민구 · 심교문 · 홍승길

국립농업과학원 기후변화평가과

(접수일: 2024년 2월 23일, 수정일: 2024년 3월 13일, 게재확정일: 2024년 3월 21일)

Changes in Mean Temperature and Warmth Index on the Korean Peninsula under SSP-RCP Climate Change Scenarios

Jina Hur, Yongseok Kim*, Sera Jo, Eung-Sup Kim, Mingu Kang,
Kyo-Moon Shim, and Seung-Gil Hong

Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju-gun, Korea

(Manuscript received 23 February 2024; revised 13 March 2024; accepted 21 March 2024)

Abstract Using 18 multi-model-based a Shared Socioeconomic Pathway (SSP) and Representative Concentration Pathways (RCP) climate change scenarios, future changes in temperature and warmth index on the Korean Peninsula in the 21st century (2011~2100) were analyzed. In the analysis of the current climate (1981~2010), the ensemble averaged model results were found to reproduce the observed average values and spatial patterns of temperature and warmth index similarly well. In the future climate projections, temperature and warmth index are expected to rise in the 21st century compared to the current climate. They go further into the future and the higher carbon scenario (SSP5-8.5), the larger the increase. In the 21st century, in the low-carbon scenario (SSP1-2.6), temperature and warmth index are expected to rise by about 2.5°C and 24.6%, respectively, compared to the present, while in the high-carbon scenario, they are expected to rise by about 6.2°C and 63.9%, respectively. It was analyzed that reducing carbon emissions could contribute to reducing the increase in temperature and warmth index. The increase in the warmth index due to climate change can be positively analyzed to indicate that the effective heat required for plant growth on the Korean Peninsula will be stably secured. However, it is necessary to comprehensively consider negative aspects such as changes in growth conditions during the plant growth period, increase in extreme weather such as abnormally high temperatures, and decrease in plant diversity. This study can be used as basic scientific information for adapting to climate change and preparing response measures.

Key words: SSP-RCP scenario, Warmth index, Mean temperature, Climate change

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 2022년 제6차 평

가보고서(The Sixth Assessment Report, AR6)를 통해 지구 평균 온도가 산업화 이전 대비 약 1.1°C 상승하였고, 2015년 파리기후변화협약에서 목표한 온도 상승 한계치인 1.5°C가 가까운 미래(2021~2040년)에 도달할 것으로 전망하였다(IPCC, 2023). IPCC 제6차 평가보고서에서 SSP (Shared Socioeconomic Pathways), RCP (Representative Concentration Pathway) 배출량 시나리오로 추정된 21세기 후반(2081~2100년)의 지구 온도 상승폭(1.4~4.4°C)이 지난 IPCC 제5차 평가보고

*Corresponding Author: Yongseok Kim, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, 166, Nongsaeongmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Korea.
Phone: +82-63-238-2519, Fax: +82-63-238-3823
E-mail: cyberdoli@korea.kr

서(The Fifth Assessment Report, AR5)에서 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오로 추정된 상승폭(1.0~3.7°C)보다 더 높게 전망하고 있다.

전지구적 온난화 현상 및 장기적인 기후 변동성은 한반도의 기후변화에도 직접적으로 영향을 미친다(KMA, 2020). 우리나라 평균 기온은 관측이 시작된 1912년부터 2017년까지(106년) 평균 0.18°C/10년의 변화율로 전지구 평균 지표 온도 변화(0.14°C/10년)보다 더 빠르게 상승했다(KMA, 2020). 기상청 국립기상과학원의 분석 결과에 따르면, 21세기 후반기(2081~2010년) 남한지역의 평균기온은 현재(2000~2019년) 대비 RCP에서 1.5~4.3°C, SSP-RCP에서 2.3~6.3°C 정도 더 상승하는 것으로 전망하고 있다(NIMS, 2022). 기후변화가 지역적으로 명백히 관측되고 가속화가 예상되는 상황에서 지역적인 미래 기후 변화 가능성을 이해하고, 기후변화로 예상되는 영향을 평가하는 것은 기후 적응 관점에서 중요하다.

기후 변화로 인해 온대기후대로 분류되는 한반도가 아열대 기후대로 변화할 것으로 전망되고(Yun et al., 2020), 기후 변화에 따른 식물종(Kong et al., 2015), 작물의 재배적지(Moon et al., 2017), 생육 환경(Jo et al., 2023) 등 농림분야에 다양한 변화가 나타날 것으로 전망되고 있다. 특히 온난화에 의해 감귤, 단감과 같은 난대성 작물의 재배가능지역이 점차 북상하고 미래에 지속적으로 확대될 것으로 전망되고 있다(Shim et al., 2014; Moon et al., 2017). 우리나라의 난대성 작물 증가는 온대성 작물과 한대성 작물의 감소를 의미하고 식물의 다양성을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 기후변화에 대한 대응 방안 마련을 위해 식생분포에 영향을 미칠 수 있는 환경 변화에 대한 지속적인 감시 및 평가가 필요하다(Yun et al., 2020).

작물재배 한계지를 판단하는 방법 중의 하나로 식물이 잘 성장하기 위해서 기준온도 이상의 온도가 일정 기간 이상 유지되어야 한다는 개념(Kira, 1945)을 기반으로 한 온량지수(Warmth Index, WI)가 많이 활용된다. Cho et al. (2020)은 기상 관측값(1980~2010)을 이용하여 한반도 남부의 기후 식생 분포도를 새롭게 갱신하였으며, Shim et al. (2014)는 과거 40년(1973~2012년) 동안의 온량지수의 변화 추세를 살펴보고, Kong et al. (2015)는 RCP 시나리오 기반으로 미래 온량지수 변화에 따른 적응 가능 식물종을 연구하였다. 선행 연구 결과들은 분석 영역에 대해 온량지수가 과거 기간 동안 높아졌고, 21세기 후반까지 높아질 것으로 전망된다는 결과를 제시하였다.

하지만 RCP보다 기온 상승폭이 더 클 것으로 예상되는 SSP-RCP 시나리오 기반으로 우리나라 지역의 미래 온량지수의 변화를 살펴본 연구는 부족한 실정이다. 온량지수 외에도 최신의 SSP-RCP 시나리오 기

반으로 우리나라 상세 기후 변화를 전망한 선행 연구들(Kim et al., 2022; Kim et al., 2023a; Kim et al., 2023b)은 대부분 1~2개의 전지구 모형 자료를 기반으로 하고 있어, 전지구 기후변화 시나리오에서 발생 가능한 불확실성을 고려하기에는 앙상블 멤버의 수가 적은 편이다. 또한 분석 영역이 남한지역이나 일부 지역에 국한되어 있어 한반도 전역에 대한 전체적인 기온 및 온량지수의 변화를 이해하기에는 다소 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 최근 국립농업과학원에서 생산한 18종 전지구 모형 기반의 1 km 격자형 SSP-RCP 기후변화 시나리오 자료(RDA, 2021)를 이용하여 한반도 전체 영역에 대한 평균 기온의 변화와 이에 따른 온량지수의 변화를 분석하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 미래 기후변화 시나리오

기후변화에 따른 한반도 영역의 온량지수 변화를 살펴보기 위해, 국립농업과학원에서 생산한 1 km 해상도의 SSP-RCP 기후변화 시나리오 자료를 이용하였다(RDA, 2021). 이 자료는 기상청으로부터 2022년 국가 표준시나리오로 인증 받은 자료로, 현재 기후(1981~2010)에 대한 과거 모의 실험자료(Historical, HIS)와 미래 기후(2011~2100년)에 대한 SSP-RCP 시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) 전망 자료를 포함한다. SSP1-2.6은 화석연료 사용이 최소화되고 지속가능한 경제성장을 가정하는 저탄소 시나리오, SSP2-4.5는 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도를 중간 단계로 가정하는 시나리오, SSP3-7.0은 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술 개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 시나리오 그리고 SSP5-8.5는 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정하는 고탄소 시나리오이다(NIMS, 2022).

이 시나리오 자료는 국제기후실험인 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 결합모델 상호비교 사업에 참여한 18개의 Global Climate Model (GCM) 모형(Table 1)에서 생산된 전지구 기후변화 시나리오 자료를 한반도 영역으로 통계적 상세화한 시나리오이다. 통계적 상세화 자료는 다음의 3단계를 거쳐 생산된다. 첫 번째 단계로, ERA5 재분석 자료와 중관기상관측 자료를 활용하여 한반도 영역에 대해 1 km 해상도의 전자기후도(1981~2010년)를 생산한다(Hur et al., 2023). 두 번째 단계로, 1 km 한반도 전자기후도의 격자가 포함되어있는 GCM 격자로부터 과거 및 미래 기간에 대한 일단위 시계열 자료를 추출한다. 과거 30년(1981~2010년) 동안의 일단위 관측 자료와 HIS 자료를 단순 분위사상(Simple Quantile

Table 1. List of 18 General Circulation Models (GCMs) used in the study.

Institute (Nation)	GCM	Reference
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	GFDL-ESM4	(John et al., 2018)
Meteorological Research Institute (Japan)	MRI-ESM2-0	(Yukimoto et al., 2019)
Centre National de Recherches Météorologiques (France)	CNRM-CM6-1	(Voldoire, 2019)
	CNRM-ESM2-1	(Séférian, 2019)
Institute Pierre-Simon Laplace (France)	IPSL-CM6A-LR	(Boucher et al., 2019)
Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	MPI-ESM1-2-HR	(Schupfner et al., 2020)
	MPI-ESM1-2-LR	(Wieners et al., 2019)
Met Office Hadley Centre (UK)	UKESM1-0-LL	(Tang et al., 2019)
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (Australia)	ACCESS-CM2	(Dix et al., 2019)
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)	ACCESS-ESM1-5	(Ziehn et al., 2020)
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	CanESM5	(Swart et al., 2019)
Institute for Numerical Mathematics (Russia)	INM-CM4-8	(Volodin et al., 2019a)
	INM-CM5-0	(Volodin et al., 2019b)
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	(Döscher et al., 2022)
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology/ Atmosphere and Ocean Research Institute/ National Institute for Environmental Studies/ RIKEN Center for Computational Science (Japan)	MIROC6	(Tatebe et al., 2019)
	MIROC-ES2L	(Hajima et al., 2020)
NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO (Norway)	NorESM2-LM	(Seland et al., 2020)
National Institute of Meteorological Sciences/ Korea Meteorological Administration (Korea)	KACE-1-0-G	(Lee et al., 2020)

Mapping, SQM)을 이용하여 분위별 편의를 산정하고 보정한다. 세 번째 단계로, 두 번째 단계에서 산정된 분위별 편의를 이용하여 미래 기간의 동일한 분위에 대하여 편의를 보정한다. 제공 변수는 농업전망에 활용 가능한 일단위의 기후요소 6종(최고기온, 최저기온, 강수량, 일조시간, 상대습도, 풍속)이며, 상세화 과정 및 자료에 대한 상세한 설명은 RDA (2021)에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 모형간 불확실성을 고려하기 위해 18개 GCM기반의 앙상블 기후변화 정보를 이용하였다. 분석 시나리오는 SSP-RCP 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 이용하였으며, 분석 기간은 현재 기간(REF, 1981~2010년), 21세기 초반(FUT1, 2011~2040년), 21세기 중반(FUT2, 2041~2070년), 21세기 후반(FUT3, 2071~2100년)으로 선정하였다. 현재 기간에 대한 자료는 과거모의 실험인 HIS와 관측자

료 기반의 전자기후도(Observation, OBS)로 구성된다. 본 연구에서는 전자기후도를 관측 정보로 가정하였다. 분석 영역은 한반도(Korean Peninsula) 및 남한(S. Korea)과 북한(N. Korea) 영역으로 선정하였다.

2.2 온량지수(Warmth Index, WI)

본 연구에서는 현재 기간에 대한 OBS, HIS와 미래 기간에 대한 SSP-RCP 4종의 기온 자료를 이용하여 온량지수를 계산하였다. 온량지수(°C·month)는 월평균 기온이 5°C 초과하는 달에 대해서 월평균기온에서 5°C를 뺀 값을 모두 합친 값이다[Shim et al., 2014; 식(1)].

$$WI = \sum_{t=1}^n (t - 5), t > 5 \quad (1)$$

여기서 t 는 월평균 온도를 의미하며, n 은 월평균 온도가 5°C를 초과하는 달의 수를 의미한다. 기후모형들은 계통적 오차를 포함하고 있기 때문에, 미래 변

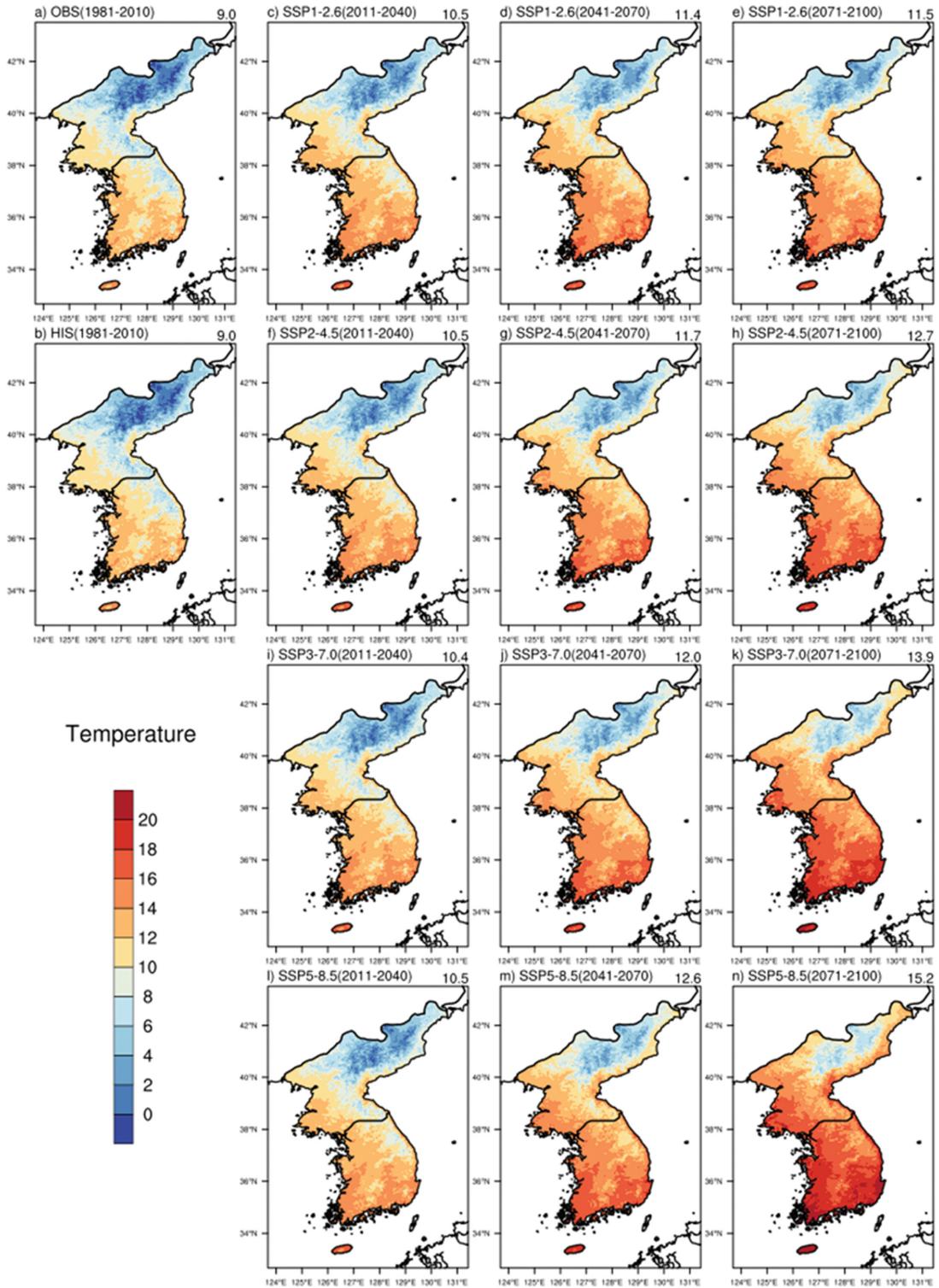


Fig. 1. Climatology of annual mean temperature (°C) during REF period (a, b), FUT1 (c, f, i, l), FUT2 (d, g, j, m), and FUT3 (e, h, k, n) under SSP-RCP scenarios.

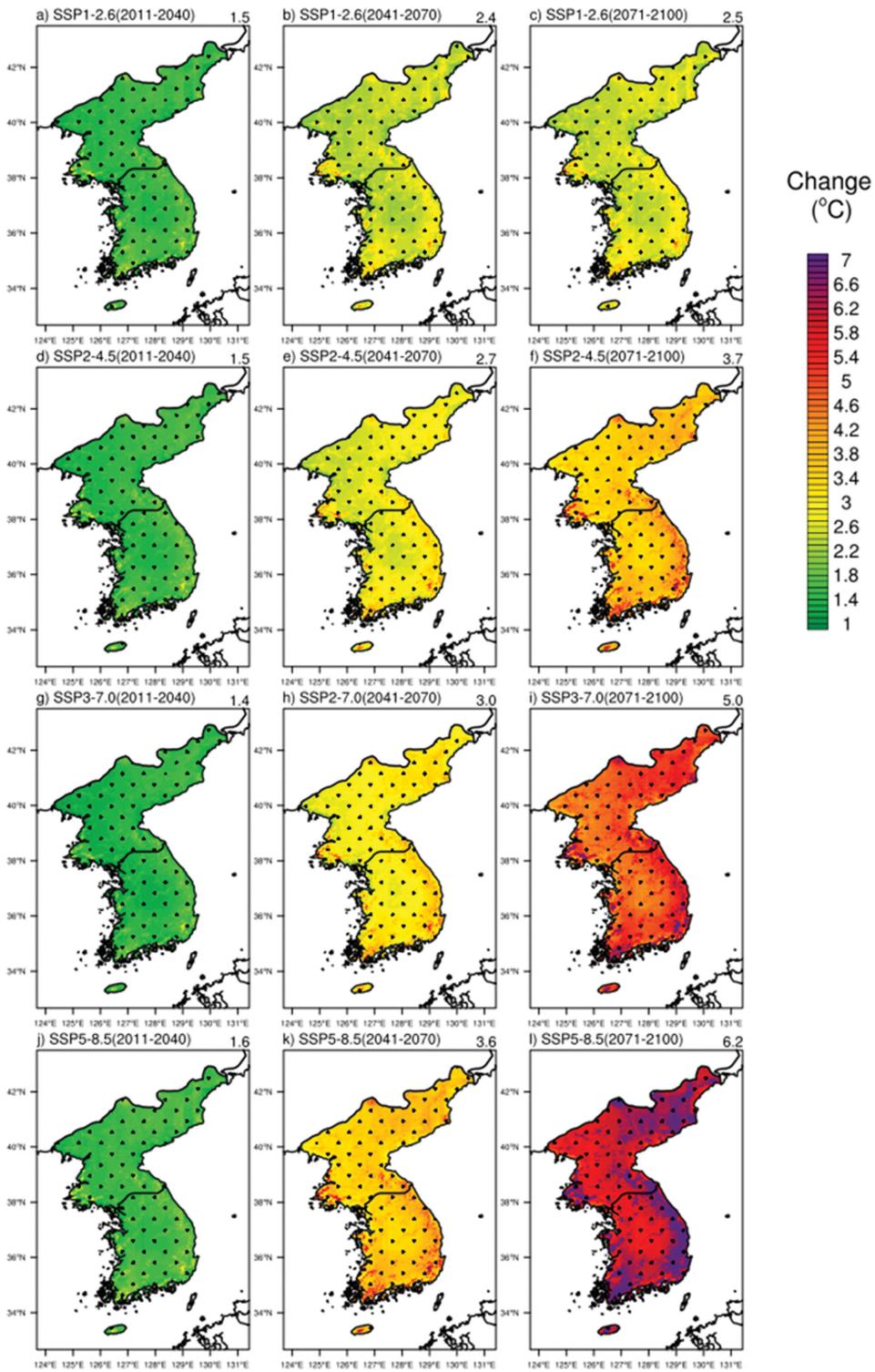


Fig. 2. Changes of annual mean temperature with respect to HIS (1981~2010) during FUT1 (2011~2040), FUT2 (2041~2070), and FUT3 (2071~2100) under SSP-RCP scenarios. The dot denotes significant changes at 95% confidence level.

화를 분석하기 위해 일반적으로 현재 대비 미래 변화량으로 분석한다(Oh et al., 2014; Ahn et al., 2016). 본 연구에서도 온량지수의 변화를 분석하기 위해 과거 기간(HIS) 대비 미래 기간의 변화(FUT1~3)를 비율(%)로 분석하였다. 변화율(%) 식은 식(2)와 같다.

$$\text{Change rate (\%)} = [(FUT-HIS)/HIS]*100 \quad (2)$$

단, 기온의 경우 미래(FUT)에서 과거(HIS)를 뺀 변화(FUT-HIS)를 살펴보았다. 또한 미래 변화에 대한 통계적 유의성을 살펴보기 위해 1년 단위로 계산된 값을 이용해 30년에 대한 평균적인 기온기에 대해 t-test를 수행하였으며, 95% 신뢰구간에서 유의한 변화는 표와 공간 분포도에 표시하였다. 또한 농업분야 활용성 측면에서 난지성 과수의 안전재배 한계지의 변화를 살펴보기 위해 단감의 안전재배 조건 중의 하나인 온량지수 100°C·month 이상(Shim et al., 2014)을 기준으로 온량지수의 미래 변화도 함께 살펴보았다.

3. 결 과

3.1 평균 기온의 변화

온량지수의 변화를 분석하기에 앞서 18개 GCM의 앙상블 평균(MME)을 이용하여 한반도 전체영역에 대한 평균기온의 변화를 살펴보았다. 먼저 연평균 기온의 연대별 변화를 공간적으로 살펴보았다(Fig. 1). 현재 기후(1981~2010)의 특성을 살펴보면, OBS (Fig. 1a)와 HIS (Fig. 1b)는 한반도 평균 값이 모두 9.0°C으로 유사한 값을 가지고 있으며, 모형이 관측의 공간적 분포 특성을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이는 분위수 매핑 방법의 특성상 통계적 상세화된 모형이 관측의 통계 특성과 비슷해졌다는 것을 의미한다. 연대별 평균 기온은 먼 미래인 FUT3의 경우 SSP-RCP 시나리오에 따라 11.5~15.2°C의 평균값을 가지고, 연평균 10°C 이하(10°C 이상)인 지역이 점차 축소(확대)되는 것으로 분석되었다. 특히 고탄소 시나리오로 알려진 SSP5-8.5의 경우, 21세기 후반기에서는 태백산맥 인근 고지대에서도 연평균 기온이 10°C 이상일 것으로 전망된다. 지역별로 살펴보면, 현재 평균 기온이 11.9°C (6.8°C)인 남한(북한)은 21세기 후반 SSP5-8.5에서 18.1°C (13.0°C)의 평균 기온을 가질 것으로 전망된다.

현재 기간(1981~2010) 대비 SSP-RCP 시나리오 별 평균기온의 변화량(°C)를 분석하면(Fig. 2), 시나리오에 따라 현재 기후 대비 21세기 전반에는 1.4~1.6°C, 21세기 중반에는 2.4~3.6°C, 21세기 후반에는 2.5~6.2°C 정도 상승하는 것으로 전망되었다. 즉, 먼 미래로 갈수록, 고농도 시나리오(SSP5-8.5)로 갈수록 기온 상승 폭이 커지는 것으로 분석되었다. 이러한 변화는 모든

시나리오, 모든 기간, 모든 영역에 대해 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하게 나타났다. 지역적으로는 현재 기후에서 주변 지역보다 상대적으로 기온이 낮은 남한의 태백산맥, 북한의 개마고원, 함경산맥 등 고지대에서 상대적으로 기온 상승이 더 높게 나타났다. 남한은 21세기 후반, 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 2.6°C, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 6.2°C의 기온 상승이 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하게 나타나는 것으로 전망되었다. 북한은 21세기 후반, 저

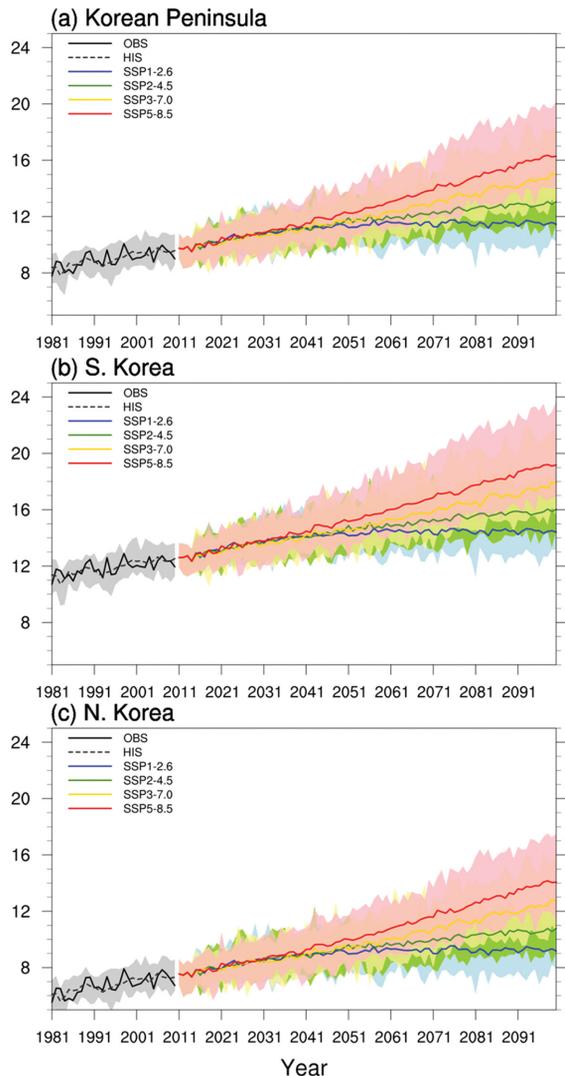


Fig. 3. Time series of annual mean temperature for OBS (1981~2010), HIS (1981~2010), and SSP-RCP scenarios (2011~2100). The shaded areas and lines indicate the spread of each ensemble member (18 models) and the ensemble mean, respectively.

탄소 시나리오에서 2.5°C, 고탄소 시나리오에서 6.2°C의 기온 상승이 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하게 나타나는 것으로 전망되었다. 남한과 북한 영역에 대한 평균 기온 상승폭은 거의 유사하게 나타났다. 이 기온 상승폭은 21세기 후반기(2081~2100), 우리나라 평균 기온이 현재 대비 2.3~6.3°C 상승하는 것으로 전망한 기상청 국립기상과학원(NIMS, 2022)의 분석결과와 비슷하다.

한반도, 남한, 북한 지역에 대한 지역별 공간 평균값을 이용하여 연평균 기온의 변동성을 살펴보았다(Fig. 3). 또한 모형의 불확실성을 나타내기 위해 모형간 편차를 음영으로 표시하였다. Figure 3의 음영 범위는 모형의 최고 값과 최저 값의 차이를 의미하며, 범위가 넓을 수록 모형간 평균 기온의 차이가 크다는 것을 의미한다. 즉, 음영의 범위가 클수록 기후변화 시나리오 자료의 불확실성이 크다고 해석될 수 있다. 먼저 현재 기후를 살펴보면, 앙상블 평균값(HIS)이 관측값(OBS)보다 낮은 연 변동성을 가지지만, 관측에서 나타난 과거기간(1981~2010)의 기온 상승 패턴 및 30년 평균 값을 유사하게 모의하였다. 모형간 편차가 모든 시나리오에서 미래로 갈수록 커지는 경향이 나타나는데, 이는 먼 미래의 시나리오 자료일수록 불확실성이 커진다는 것을 의미한다. 변화 경향성은 SSP1-2.6의 21세기 후반 구간을 제외하고 모두 95% 신뢰구간에서 유의하였다. 21세기 전반기까지 모든 시나리

오에서 한반도 기온이 비슷한 변화율(0.5~0.6°C/10 yr)로 상승하지만, SSP5-8.5 시나리오는 중반기(0.8°C/10 yr)부터 후반기(0.9°C/10 yr)까지 급격하게 기온이 상승하는 것으로 나타났다. SSP1-2.6 시나리오에서 한반도 기온은 21세기 후반기까지 현재 대비 2.5°C 상승하는데 그칠 것으로 전망되어, 온실가스 배출을 현저히 감축한다면 기온 상승을 억제시킬 수 있을 것으로 기대된다.

평균 기온에 대한 18개 모형의 분포를 모두 살펴보기 위해, Fig. 4와 같이 상자 백분위수 그림(box-percentile plot; Esty and Banfield, 2003)을 분석하였다. 상자 백분위수 그림은 상자 도표(box plot)의 수정 버전으로 기존 상자 도표의 정보에 데이터의 백분위수 정보(분포 모양)까지 함께 제공한다. 어떤 높이에서든 불규칙한 상자의 너비는 해당 높이의 백분위수에 비례한다. 단, 50번째 백분위수 이상에서는 너비가 100에서 백분위수를 뺀 값에 비례한다. 상자 백분위수 그림에서 데이터의 중앙값, 25번째 및 75번째 백분위수는 상자 안의 하얀색 선으로 표시하고, 평균값은 검은색 점으로 표시하였다. 앙상블 멤버(18개 모형)에 대한 30년 평균 기온의 분포를 살펴보면, HIS 결과는 통계적 보정에 의해 모형간 차이가 거의 없다. 21세기 전반기를 살펴보면, 데이터의 분포는 중앙값을 중심으로 비교적 수직 대형 형태를 가지는 단일모드(single mode)와 유사한 형태를 가진다. 21세기 후반으로 갈수록 상자는 편향된 형태로 바뀌어, 하단보다 상단이 좁고 긴 형태를 가진다. 중앙값보다 낮은 모형값들은 다소 조밀하고 균일하게 분포하나, 중앙값보다 큰 데이터들은 불균일하고 데이터 간 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 21세기 후반으로 갈수록, 고탄소 시나리오로 갈수록 기온의 변화가 크지만 동시에 모형 앙상블의 범주(불확실성)도 함께 커진다는 것을 의미한다.

온량지수와 직접적으로 연관이 있는 월평균 기온의 변화량(°C)을 살펴보았다(Fig. 5). 막대그래프는 21세기 전반기부터 후반기까지 각 연대별 한반도 영역에 대한 월평균 기온의 변화량을 나타낸 것으로, 변화량이 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하면 막대그래프 위에 별 모양(*)으로 표시하였다. 21세기 전반기에는 모든 월에 대해 시나리오 별 뚜렷한 차이가 없이 1.2~1.9°C 정도의 기온 상승이 나타났다. 기온 상승은 모든 월에 대해서 나타났으며 모든 시나리오, 모든 분석 기간에서 통계적으로 유의하였다. 가장 기온 상승폭이 크고, 시나리오간 차이가 컸던 21세기 후반기 SSP5-8.5 시나리오 결과를 살펴보면, 현재 대비 기온 상승폭이 5월(5.7°C)에 가장 낮았으며, 2월(6.9°C)에 가장 높게 나타났다. 온량지수 기준으로 이용된 월평균 기온 5°C 이상이 나타난 기간이 현재 기후에서는

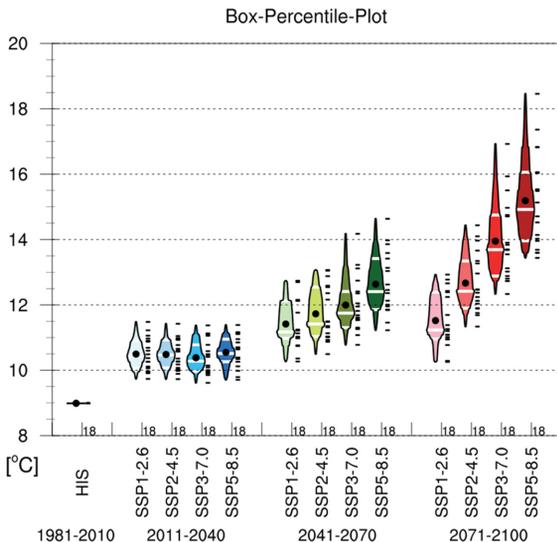


Fig. 4. The box-percentile plot for the 30-year mean temperature over the Korean Peninsula, derived from the 18 models. The median, 25th and 75th percentiles are indicated by white lines, and the average is represented by a black dot in the box.

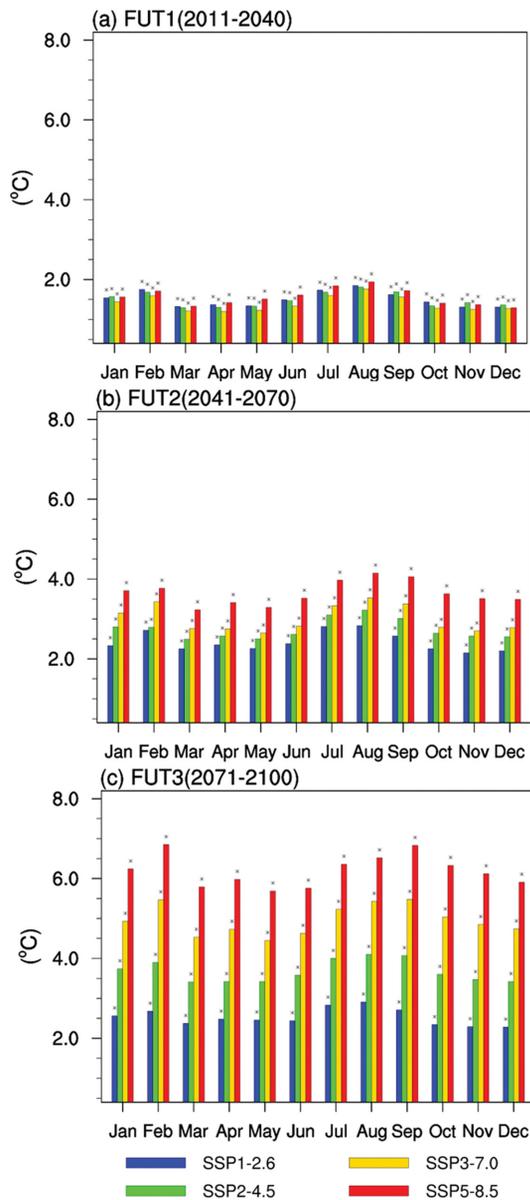


Fig. 5. Changes of monthly mean temperature with respect to (a) FUT1 (2011~2040), (b) FUT2 (2041~2070), and (c) FUT3 (2071~2100) under SSP-RCP scenarios. The asterisk (*) denotes significant changes at 95% confidence level.

7개월(4~10월)이었으나, 21세기 후반기 SSP-RCP 3종(SSP2-4.5, 3-7.0, 5-8.5) 시나리오에서는 9개월(3~11월)로 현재 대비 2개월이 길어질 것으로 분석되었다. SSP1-2.6는 21세기 후반기에 월평균 기온 5°C 이상인 달이 현재 대비 1개월(4~11월) 길어질 것으로 전망되었다.

3.2 온량지수의 변화

18개 GCM의 앙상블 평균을 이용하여 한반도 전체 영역에 대한 SSP-RCP 시나리오 기반의 미래 온량지수 변화를 살펴보았다. Figure 6는 SSP-RCP 시나리오에 따른 연대별 평균 온량지수의 공간 분포도를 나타낸다. 현재 온량지수의 특성을 살펴보면, HIS (Fig. 6b)는 한반도 평균 온량지수를 OBS (Fig. 6a)와 유사하게 85.1°C·month로 모의하였으며, 기온과 마찬가지로 온량지수에 대해 높은 재현성을 보였다. 현재 기간에 대해 남한(북한)의 온량지수 평균값은 한반도 평균보다 높은(낮은) 100.8°C·month (73°C·month)으로 분석되었다. 이 값은 Shim et al. (2014)에서 우리나라 전국 61개 지점에서 10년(2003~2012) 동안 관측된 기온을 기반으로 계산한 온량지수(107.3°C·month)보다 낮은 수치이다. 그 이유는 활용된 61개 관측 지점 중 대관령(842.5 m)을 제외한 모든 관측 지점이 해발고도 300 m 이하의 낮은 고도에 위치하기 때문에 61개 지점으로 계산된 온량지수가 해발고도가 높은 지역까지 조밀하게 반영된 HIS로 계산된 온량지수보다 상대적으로 높게 계산되었을 것으로 판단된다.

연대별 평균 온량지수는 먼 미래인 FUT3의 경우 SSP-RCP 시나리오에 따라 105.3~137.3°C·month의 평균값을 가지고, 온량지수가 100°C·month 이하(100°C·month 이상)인 지역이 점차 축소(확대)되는 것으로 분석되었다. 기온과 마찬가지로 21세기 후반기 고탄소 시나리오 SSP5-8.5에서는 우리나라 전역이 온량지수가 100°C·month 이상일 것으로 전망된다. 지역별로 살펴보면, 남한(북한)의 평균 온량지수가 21세기 후반기 SSP5-8.5에서 161.2°C·month (119.0°C·month)가 될 것으로 전망된다. 이렇게 전망된 온량지수는 Kong et al. (2015)에서 RCP8.5 시나리오 기반으로 21세기 후반(2099) 우리나라 평균 온량지수를 131.4±17.0°C·month로 분석한 결과보다 더 크다. 이는 분석 기간 및 방법에서 다소 차이가 있지만, SSP5-8.5 시나리오에서의 현재 대비 21세기 하반기 기온 상승이 RCP8.5 시나리오에서의 기온 상승보다 약 2°C 높을 것으로 전망(NIMS, 2022) 되고 있어, 시나리오에 따른 기온 상승폭의 차이가 온량지수 변화량의 차이를 야기한 것으로 보여진다.

현재 기간(1981~2010) 대비 SSP-RCP 시나리오 별 온량지수의 변화(%)를 분석하면(Fig. 7), 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 21세기 전반기에는 13.3~15.3%, 21세기 중반기에는 23.6~36.1%, 21세기 후반기에는 24.6~63.9% 상승하는 것으로 전망되었다. 이러한 변화는 모든 시나리오와 영역에서 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의하게 나타났으며, 그 변화는 21세기 후반기로 갈수록 커지는 것으로 분석되었다. 남한은 21세기 후반기, 저탄소 시나리오에서 23.6%,

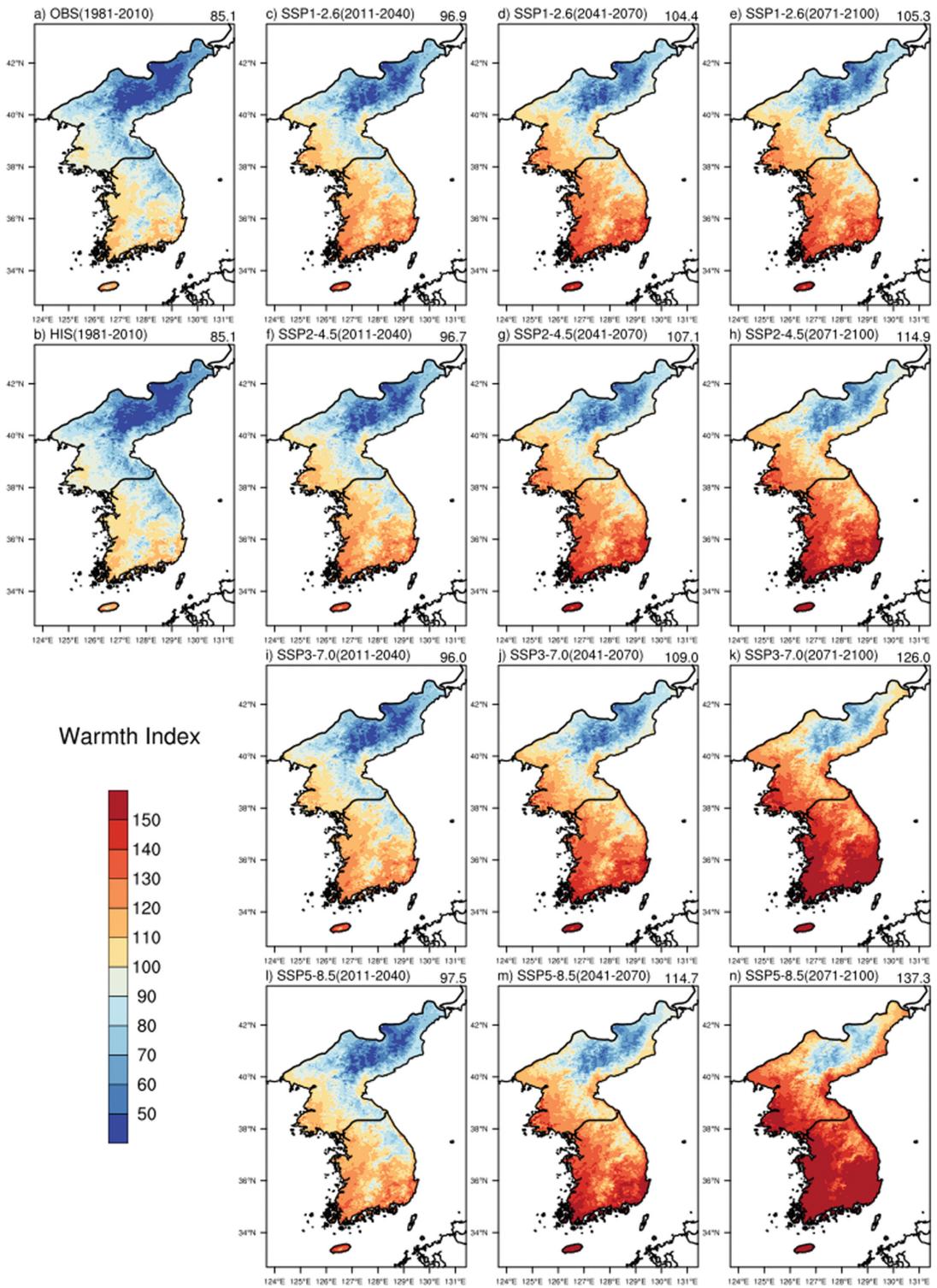


Fig. 6. Climatology of Warmth Index during REF period (a, b), FUT1 (c, f, i, l), FUT2 (d, g, j, m), and FUT3 (e, h, k, n) under SSP-RCP scenarios.

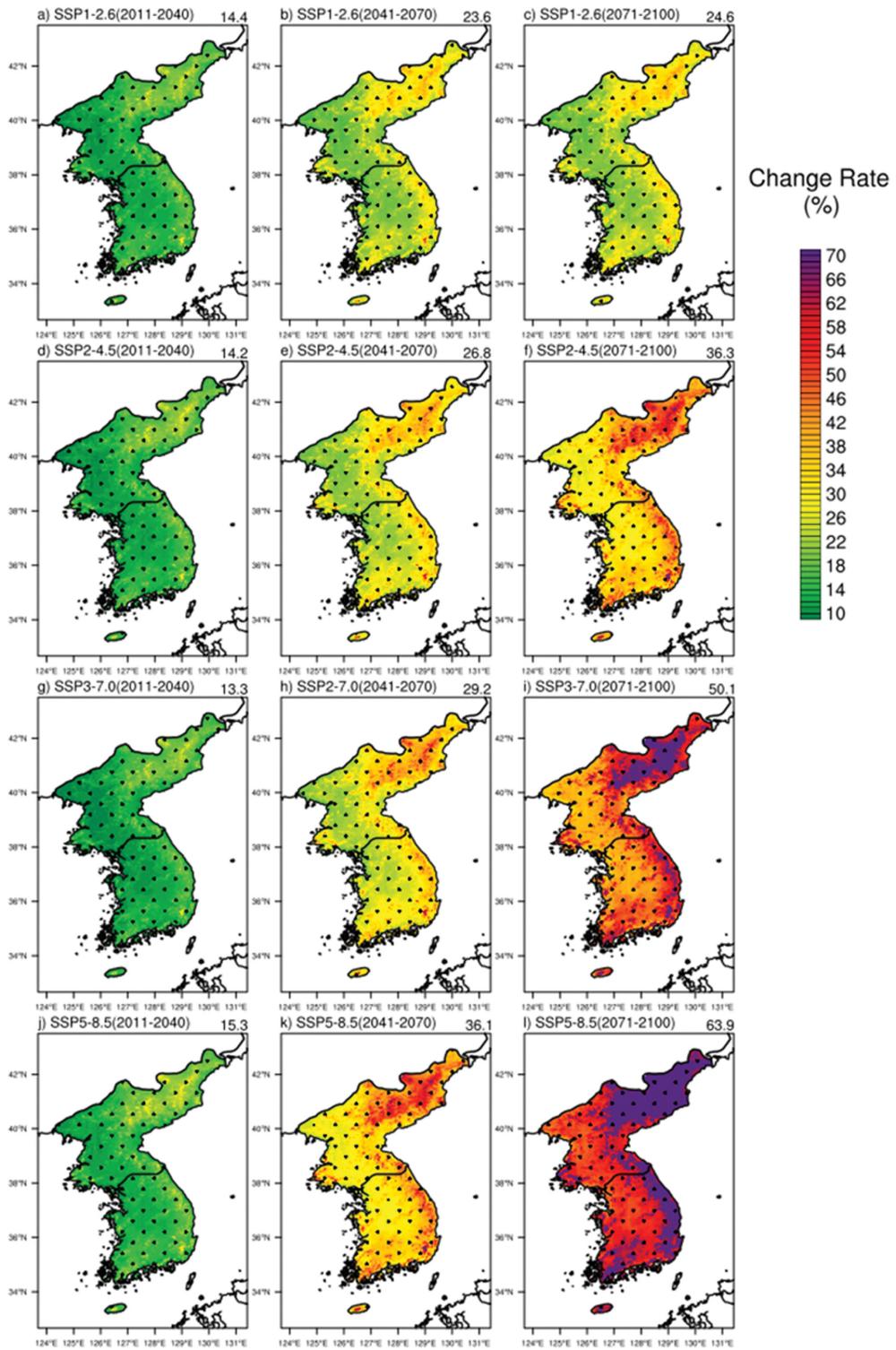


Fig. 7. Changes of Warmth Index with respect to HIS (1981~2010) during FUT1 (2011~2040), FUT2 (2041~2070), and FUT3 (2071~2100) under SSP-RCP scenarios. The dot denotes significant changes at 95% confidence level.

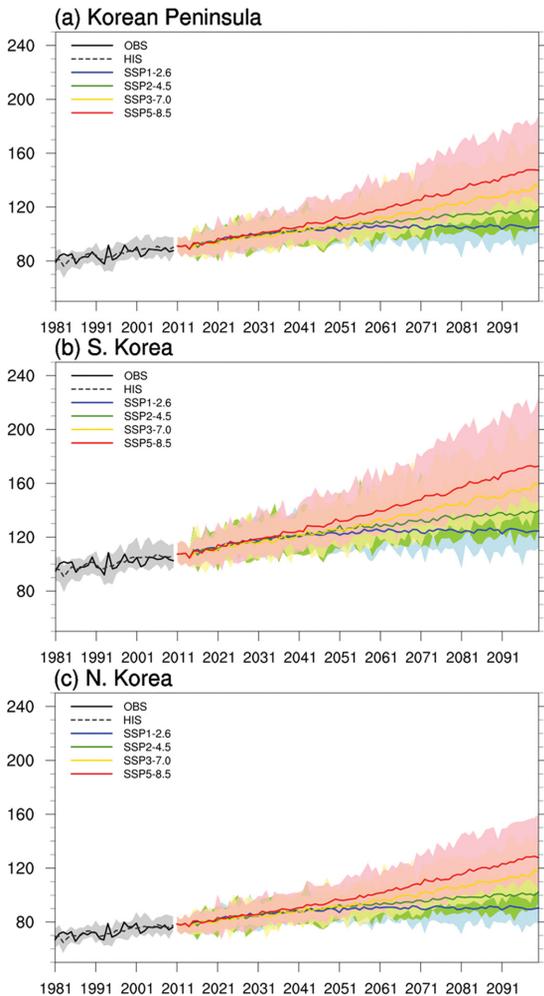


Fig. 8. Time series of Warmth Index for OBS (1981~2010), HIS (1981~2010), SSP-RCP scenarios (2011~2100). The shaded areas and lines indicate the spread of each ensemble member (18 models) and the ensemble mean, respectively.

고탄소 시나리오에서 59.7%의 온량지수 변화가 통계적으로 유의하게 나타나는 것으로 전망되었다. 북한은 21세기 후반기, 저탄소 시나리오에서 23.8%, 고탄

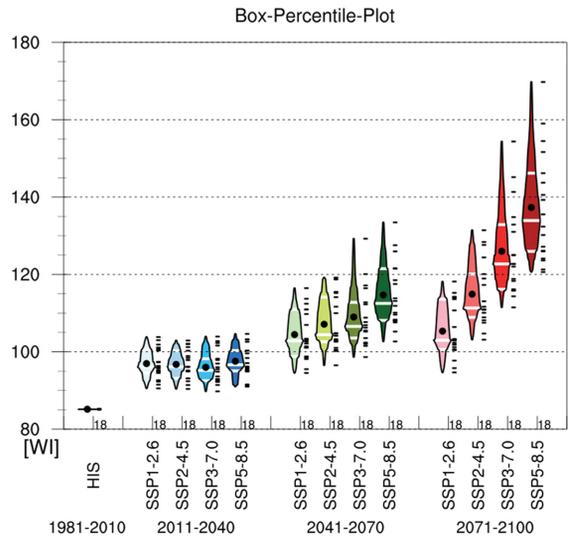


Fig. 9. Same as the Fig. 4, but for the Warmth Index.

소 시나리오에서 62.9%의 온량지수 변화가 통계적으로 유의하게 나타나는 것으로 전망되었다. 지역적으로는 남한보다 북한에서 상대적으로 온량지수의 변화가 더 크게 나타났으며, 기온과 유사하게 태백산맥, 개마고원 등 고지대에서 상대적으로 변화폭이 더 크게 나타났다.

연변동성과 변화 추세를 살펴보기 위해 현재와 미래 기간에 대하여 지역별(한반도, 남한, 북한) 온량지수의 면적평균값을 시계열로 나타내고(Fig. 8), 분석 기간에 대한 변화 추세를 분석하였다(Table 2). 먼저 남한, 북한이 포함된 한반도 전체에서 온량지수의 변화가 모든 기간에서 증가하는 추세를 가졌으며, SSP1-2.6을 제외한 시나리오에서 통계적으로 유의하게 나타났다. 특히 21세기 후반기 SSP5-8.5 시나리오에서의 한반도 온량지수 변화 경향은 8.0°C·month/10 yr, 남한지역은 9.1°C·month/10 yr, 북한지역은 7.1°C·month/10 yr로 현재 기간(1981~2010)보다 약 2배 빠르게 변화할 것으로 분석되었다. 21세기 후반기로 갈수록 모든 시나리오에서 양상불 범주가 커지고 있다(Fig. 8). 즉, 온량지수의 미래 변화를 분석 시 단일모형을 선

Table 2. The slope (°C·month/10 yr) of the ensemble mean Warmth Index time series during the HIS, FUT1, FUT2 and FUT3 period. The asterisk (*) refers to a statistically significant change rate at a 95% confidence interval.

	OBS	HIS	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
			FUT1	FUT2	FUT3									
Korean Peninsula	2.5*	3.8*	4.4*	1.2*	0.1	4.4*	2.9*	2.0*	4.0*	4.9*	5.8*	5.1*	6.6*	8.0*
S. Korea	2.2*	4.5*	5.2*	1.4	0.1	5.2*	3.6*	2.2*	4.8*	5.7*	6.6*	6.2*	7.6*	9.1*
N. Korea	2.7*	3.4*	3.7*	1.1*	0.0	3.8*	2.5*	1.8*	3.5*	4.2*	5.3*	4.3*	5.8*	7.1*

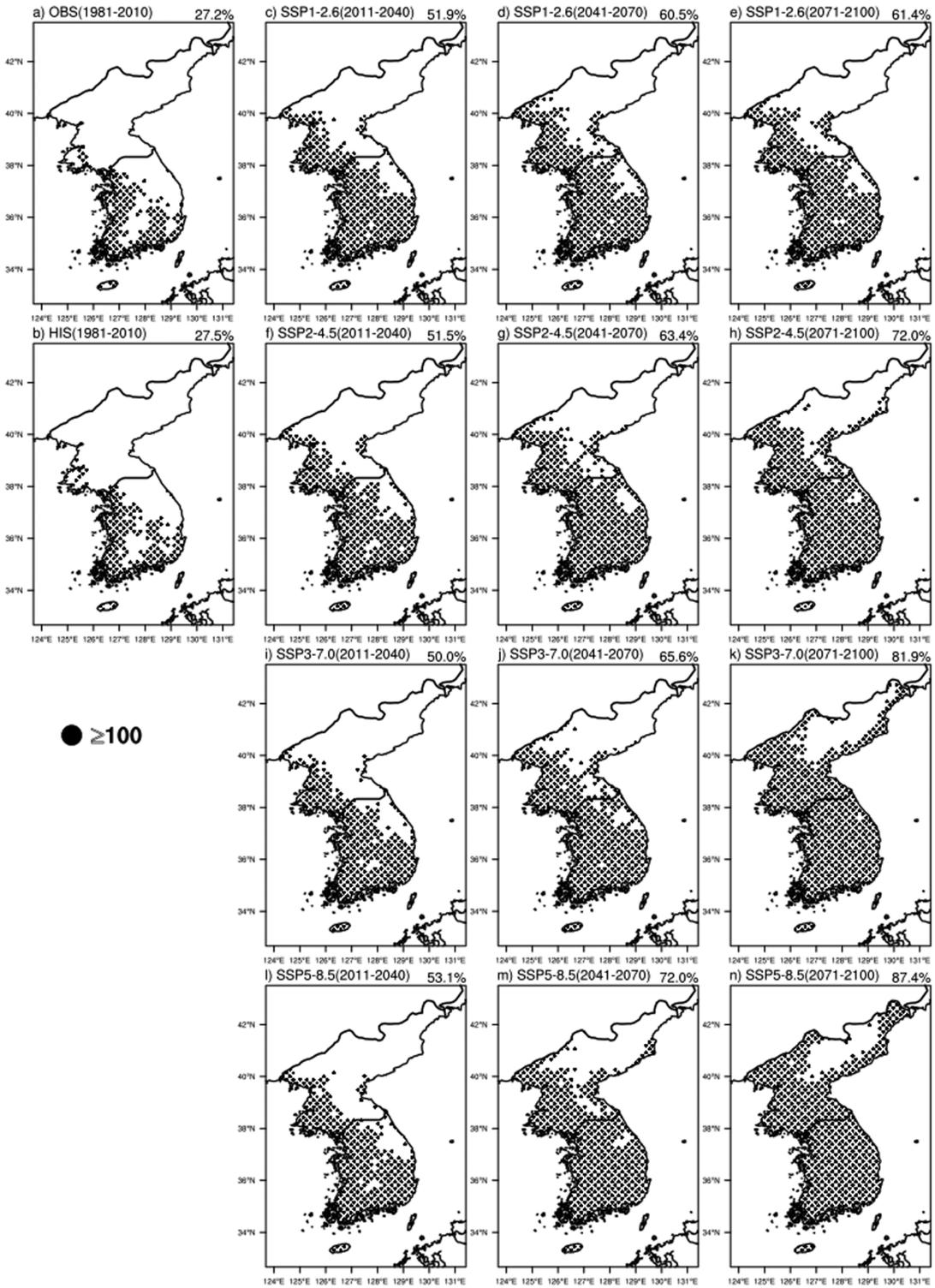


Fig. 10. Area with the Warmth Index above 100 during REF period (a, b), FUT1(c, f, i, l), FUT2 (d, g, j, m), and FUT3 (e, h, k, n) under SSP-RCP scenarios.

택할 경우 발생할 수 있는 불확실성을 의미하며, 발생할 수 있는 변화의 범위를 제시함으로써 앙상블 연구의 중요성을 확인할 수 있다(Jo et al., 2023).

온량지수에 대한 18개 모형의 분포를 모두 살펴보기 위해 백분위수 그림을 분석하였다(Fig. 9). 앙상블 멤버(18개 모형)에 대한 30년 평균 온량지수의 분포를 살펴보면, 평균 기온과 유사하게 HIS 기간에는 모형간 차이가 나타나지 않다가, 21세기 전반에는 데이터 분포가 중앙값을 중심으로 비교적 고른 다이아몬드 형태를 가진다. 21세기 후반으로 갈수록 상자는 꼬리가 긴 편향된 형태로 바뀐다. 21세기 전반(모형간 차이: 12.5~14.2°C·month), 중반(21.9~30.8°C·month), 후반(23.5~49.1°C·month)으로 갈수록 데이터 분포의 폭이 더 넓어져 시간에 따라 변동성이 커지는 것으로 나타났다. 특히 21세기 후반기 SSP5-8.5 시나리오 하에서는 모형 간 차이가 최대 49.1°C·month (최대값: 169.7, 최솟값: 120.6°C·month)까지 나타난다. 즉 18개 모형의 온량지수(평균 기온) 중앙값이 133.9°C·month (14.9°C) 임을 고려할 때, 특정한 단일 모형만 사용할 경우 중앙값과 최대 35.8°C·month (3.5°C) 정도 차이가 날 수 있다. 전지구 모형이 가지는 불확실성을 최소화하기 위해서는 독립적으로 생산된 각각의 모형 예측자료를 통합적으로 분석하는 집단지성과 유사한 다중모형 앙상블 자료를 활용할 필요가 있다.

단감의 안전재배 한계지로 활용되는 온량지수 100°C·month의 공간적 분포의 변화를 살펴보면(Fig. 10), 먼저 현재 기간에 대해 관측 값은 온량지수 100°C·month 이상인 영역은 한반도 전체 영역 중 27.2%, 모형(HIS)은 27.5%로 나타났다. 특히 온량지수 100°C·month 이상인 영역은 남한에서 기온이 상대적으로 높은 남부 저지대 및 서부 해안가 주변 지역에서 나타났다. 미래 기간을 살펴보면 온량지수 100°C·month 이상인 영역이 21세기 후반기로 갈수록 점차 확대되는 것으로 나타났다. 21세기 후반기 SSP5-8.5 시나리오에서는 한반도 전체 영역의 87.4%에서 온량지수가 100°C·month 이상일 것으로 전망된다. 지역적으로 살펴보면, 남한은 현재 기후에서 저지대 및 해안가에 나타나던 100°C·month 이상의 온량지수가 21세기 후반기 고탄소 시나리오에서는 태백산맥, 소백산맥 등 해발고도가 높은 영역에서도 나타날 것으로 전망된다. 북한은 경우, 현재 기후에서 거의 나타나지 않았던 100°C·month 이상의 온량지수가 21세기 후반기 고탄소 시나리오에서는 개마고원과 같은 고산지대를 제외한 대부분의 영역에서 나타날 것으로 전망된다. 이 결과는 한반도에서 식물 생장에 필요한 유효열량이 다소 안정적으로 확보될 수 있음을 의미하며, 단감 안전재배 한계지 구분의 기후 조건 중의 하나인 온량지수 측면에서 단감의 안전재배 가능 지점이 확대되는

것으로 분석된다(Shim et al., 2014).

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 18개 다중모형 기반의 SSP-RCP 기후 변화 시나리오를 이용하여 한반도 기온 및 온량지수의 미래 변화를 살펴보았다. 현재 기후(1981~2010) 분석에서는 앙상블 평균된 모형 결과(HIS)의 기온이 관측(OBS)과 유사하게 나타났다. 모형은 분위수 매핑 방법을 활용하여 관측과 통계적으로 일치하는 결과를 도출하였다. 미래 기후 전망에서는 SSP-RCP 시나리오에 따라 현재 기후 대비 21세기 전반에 상승하는 것으로 전망되고, 먼 미래로 갈수록 기온 상승폭이 커지는 것으로 분석되었다. 특히 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서는 21세기 중반(0.8°C/10 yr)부터 한반도 기온이 급격하게 상승하여, 21세기 후반기에는 현재 대비 약 6.2°C 상승할 것으로 전망되었다. 반면에 SSP1-2.6 시나리오는 21세기 후반기에 현재 대비 약 2.5°C 상승할 것으로 전망되었다. 이러한 기온 상승은 모든 월에서 나타났고, 온량지수 기준 온도인 5°C 이상이 나타나는 기간이 현재 7개월(4~10월)인 반면, 21세기 후반기(SSP2-4.5, 3-7.0, 5-8.5)에서는 9개월(3~11월)로 증가하였다.

현재 기간에 대해 앙상블 평균된 모형은 관측의 온량지수 특성을 잘 재현하였다. 미래 온량지수는 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 21세기 전반에는 13.3~15.3%, 21세기 중반에는 23.6~36.1%, 21세기 후반에는 24.6~63.9% 상승하는 것으로 전망되었다. 특히 남한보다 북한 지역, 저지대보다 고지대에서 뚜렷한 상승이 예측되어, 미래 기후의 변화가 지역적으로 다르게 영향을 미칠 것으로 분석되었다. 21세기 후반기 SSP5-8.5 시나리오에서 단감 안전재배 한계지 기준 중의 하나인 온량지수 100°C·month 이상인 지역이 한반도 전체 영역의 87.4%에서 나타날 것으로 전망되었다. 즉, 한반도에서 식물 생장에 필요한 유효열량이 많은 영역에서 다소 안정적으로 확보될 수 있을 것으로 분석된다.

IPCC AR6 (IPCC, 2023)에 따르면 인간 활동으로 인한 온실가스 배출이 표면 대기 온도 상승의 주요 원인으로 평가된다. 미래 추가적인 기온 상승은 향후 온실가스의 배출량과 과거부터 미래까지의 누적 순 이산화탄소에 큰 영향을 받는다. SSP5-8.5는 매우 높은 온실가스 배출 시나리오로 약 2050년까지 현재 수준의 대략 두배의 이산화탄소 배출을 포함하고, SSP1-2.6은 낮은 온실가스 배출 시나리오로 이산화탄소 배출량이 약 2070년에 넷제로로 감소한 후 음의 이산화탄소 순 배출량이 뒤따른다(IPCC, 2023). 본 연구에서도 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5에서의 기온 상승폭

이 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6에서의 기온 상승폭보다 더 크게 나타나, 높은 탄소 배출량이 큰 기온 상승에 기여한 것으로 분석되었다. 이러한 배출 시나리오에 따른 미래 기온 전망 결과는 미래 온난화를 제한하기 위해서는 장기적으로 온실가스 배출량을 줄이기 위한 노력이 필요하다는 것을 암시한다(IPCC, 2023).

기온이 상승한다고 긍정적인 영향만 있는 것은 아니다. 식물성장 기간의 생육조건 변화에 의한 수량 및 품질 변화가 발생할 수 있으며, 이상고온과 같은 극한기상 증가에 따른 재해 피해 증가가 야기될 수 있다(Jo et al., 2023). 또한 단감과 같은 난대성 작물의 재배 가능 지역이 확대되는 반면 온대성, 한대성 작물이 감소될 수 있어 식물의 다양성 측면에서도 영향 평가가 필요하다(Yun et al., 2020). 본 연구는 온량지수만의 변화를 살펴본 것으로, 기후변화에 따른 작물별 재배기간 동안의 극한기상, 작물체계의 변화, 다양한 기후 및 토양 조건, 품질 변화, 병해충 및 잡초 피해 등 종합적인 연구가 필요하다. 그럼에도 다중모형 기반의 SSP-RCP 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 한반도 전역에 대한 잠재적인 기온과 온량지수의 미래 변화에 대한 정보는 단일모형이 가지는 불확실성을 최소화하고, 기후변화 적응 및 대응책 마련을 위한 과학적인 기초정보로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다. 본 연구는 농촌진흥청 “신농업기후변화대응체계구축사업(과제번호: RS-2021-RD009055)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., and Coauthors, 2016: 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.
- Boucher, O., S. Denvil, G. Levassasseur, A. Cozic, A. Caubel, M.-A. Foujols, Y. Meurdesoif, P. Cadule, M. Devilliers, E. Dupont, and T. Lurton, 2019: *IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP*. Earth System Grid Federation, doi: 10.22033/ESGF/CMIP6.1532.
- Cho, Y.-C., S.-H. Jung, D.-H. Lee, H.-G. Kim, and J.-H. Kim, 2020: *Forest of Korea (VI) Biogeography of Korea? flora and vegetation*. Korea Nation Arboretum. Pocheon, 1-196.
- Dix, M., and Coauthors, 2019: *CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 Scenario-MIP*. Earth System Grid Federation, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.2285.
- Döscher, R., and Coauthors, 2022: The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geosci. Model Dev.*, **15**, 2973-3020, doi:10.5194/gmd-15-2973-2022.
- Esty, W. W., and J. Banfield, 2003: The box-percentile plot. *J. Statistical Software*, **8**, 1-14, doi:10.18637/jss.v008.i17.
- Hajima, T., and Coauthors, 2020: Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, **13**, 2197-2244, doi:10.5194/gmd-13-2197-2020.
- Hur, J., J.-P. Cho, K.-M. Shim, S. Jo, Y.-S. Kim, M.-G. Kang, C.-S. Oh, S.-B. Seo, and E.-S. Kim, 2023: Production of digital climate maps with 1 km resolution over Korean peninsula using statistical downscaling model. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **25**, 404-414, doi:10.5532/KJAFM.2023.25.4.404 (in Korean with English abstract).
- IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds)]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 35-115, doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Jo, S., Y.-S. Kim, J. Hur, J. Lee, E.-S. Kim, K.-M. Shim, and M. Kang, 2023: Climatic yield potential changes under climate change over Korean peninsula using 1-km high resolution SSP-RCP scenarios. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **25**, 284-301, doi:10.5532/KJAFM.2023.25.4.284 (In Korean with English Abstract).
- John, J. G., and Coauthors, 2018: *NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 Scenario-MIP*. Earth System Grid Federation, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.1414.
- Kim, C., J. Kim, M. Hong, C. Song, and W.-K. Lee, 2023a: Prediction of the future distribution of tree species based on the Representative Concentration Pathways (RCP) and Shared Socioeconomic Pathways (SSP) climate change scenarios in Korea, *J. Climate Change Res.*, **14**, 119-134, doi:10.15531/ksccr.2023.14.2.119 (In Korean with English Abstract).
- Kim, S., D. Kim, S. Kim, S. Hwang, and M.-S. Kang, 2023b: Future runoff characteristics of ganwol estu-

- ary reservoir watershed based on SSP scenarios. *J. the Korean Soc. Agric. Engineers*, **65**, 25-35, doi:10.5389/KSAE.2023.65.5.025 (In Korean with English Abstract).
- Kim, J., J. Sang, M.-K. Kim, Y.-H. Byun, D.-H. Kim, and T.-J. Kim, 2022: Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling, *J. Climate Res.*, **17**, 89-106 (In Korean with English Abstract).
- Kira, T., 1945: A new classification of climate in eastern asia as the basis for agricultural geography. Horticultural Institute, Kyoto University, 23 pp.
- KMA, 2020: Korean Climate Change Assessment Report 2020, Korea Meteorological Administration, 335 pp (in Korean).
- Kong, S.-J., J.-S. Kim, K.-C. Yang, and K.-J. Kim, 2015: The study of adaptable plant species to the change of warmth index by using RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in Seoul City, *J. Wetlands Res.*, **17**, 273-282, doi:10.17663/JWR.2015.17.3.273 (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.
- Moon, Y.-E., S.-B. Kang, H. Lee, Y.-H. Choi, I.-C. Son, D.-H. Lee, S.-K. Kim, and M.-I. Ahn, 2017: Projection of potential cultivation region of satsuma mandarin and 'Shiranuhi' mandarin hybrid based on RCP 8.5 emission scenario. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **19**, 215-222, doi:10.5532/KJAFM.2017.19.4.215 (In Korean with English Abstract).
- NIMS, 2022: South Korea Detailed Climate Change Outlook Report (Revised Edition), National Institute of Meteorological Science, 70 pp [Available online at <http://www.climate.go.kr/>].
- 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. Geophysical Research: Atmospheres*, **119**, 2913-2927, doi:10.1002/2013JD020693.
- RDA, 2021, Guideline on produce high-resolution climate change data based on SSP scenarios for Agricultural Applications. Rural Development Administration, 49 pp [Available online at <https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=39829>].
- Schupfner, M., and Coauthors, 2020: *CMIP6 CMIP DKRZ MPI-ESM1-2-HR amip - RCM-forcing data*. World Data Center for Climate. doi:10.26050/WDCC/RCM_CMIP6_AMIP-HR.
- Séférian, R., and Coauthors, 2019: Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth system processes in present-day and future climate. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **11**, 4182-4227, doi:10.1029/2019MS001791.
- Seland, Ø., and Coauthors, 2020: Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 6165-6200, doi:10.5194/gmd-13-6165-2020.
- Shim, K. M., Y. S. Kim, M. P. Jung, I. T. Choi, and J. Hur, 2014: Assessment of safety cultivation zones for sweet persimmon by warmth index change in South Korea. *J. Climate Change Res.*, **5**, 367-374, doi:10.15531/KSCCR.2014.5.4.367 (in Korean with English abstract).
- Swart, N. C., and Coauthors, 2019: The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geosci. Model Dev.*, **12**, 4823-4873, doi:10.5194/gmd-12-4823-2019.
- Tang, Y., S. Rumbold, R. Ellis, D. Kelley, J. Mulcahy, A. Sellar, J. Walton, and C. Jones, 2019: *MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical*. Earth System Grid Federation, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6113.
- Tatebe, H., and Coauthors, 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 2727-2765, doi:10.5194/gmd-12-2727-2019.
- Voltaire, A., and Coauthors, 2019: Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. *J. Adv. Modeling Earth Syst.*, **11**, 2177-2213, doi:10.1029/2019MS001683.
- Volodin, E., and Coauthors, 2019a: *INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6 CMIP*. Earth System Grid Federation, doi:10.22033/esgf/cmip6.1422.
- _____, and Coauthors, 2019b: *INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 CMIP*. Earth System Grid Federation, doi:10.22033/esgf/cmip6.1423.
- Wieners, K.-H., and Coauthors, 2019: *MPI-M MPIESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP*. Earth System Grid Federation, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.793.
- Yukimoto, S., and Coauthors, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of

- the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, **97**, 931-965, doi:10.2151/jmsj.2019-051.
- Yun, E.-J., J.-H. Kim, and K. H. Moon, 2020: Future projection of climatic zone shifts over Korean peninsula under the RCP8.5 scenario using high-definition digital agro-climate maps. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **22**, 287-298, doi:10.5532/KJAFM.2020.22.4.287 (In Korean with English Abstract).
- Ziehn, T., and Coauthors, 2019: IPCC DDC: CSIRO ACCESS-ESM1. 5 model output prepared for CMIP6 CMIP. World Data Center for Climate, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.2288.