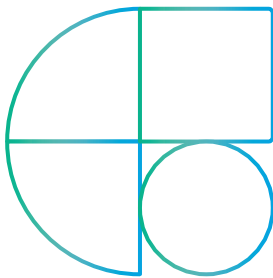


환경포럼

www.kei.re.kr



FORUM



제28권·제4호

통권 제279호

우리나라 다중 기후변화 시나리오를 활용한 탄소중립 이행에 따른 미래기후 혜택 전망과 시사점

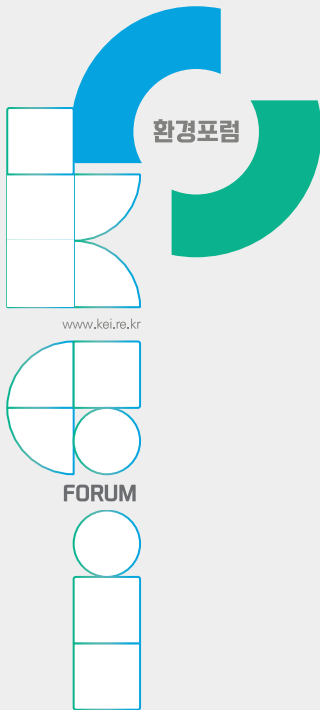
01 | 서론

02 | 연구자료 및 방법

03 | 다중 기후변화 시나리오에 따른 미래 전망

04 | 탄소중립 시나리오에 따른 기후학적 혜택 비교

05 | 요약 및 제언



제28권·제4호

통권 제279호

우리나라 다중 기후변화 시나리오를 활용한 탄소중립 이행에 따른 미래기후 혜택 전망과 시사점

이상민 초빙연구원 | 대기환경연구실 smlee@kei.re.kr

심창섭 선임연구위원 | 대기환경연구실 cshim@kei.re.kr

조재필 연구소장 | (주)유역통합관리연구원 jaepil.cho@iwmi.kr

홍제우 연구위원 | 대기환경연구실 jwhong@kei.re.kr

송영일 명예연구위원 | 대기환경연구실 yisong@kei.re.kr

요약

최근 전 지구적 기후위기 극복을 위해 우리나라도 탄소중립을 목표로 국가적 노력을 기울이고 있다. 본 연구는 탄소중립이 우리나라에 미치는 기후학적인 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9)와 신기후체제(AR6) 기반의 주요 기후변화 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5)를 비교하여 우리나라 탄소중립 달성에 따른 미래기후적인 혜택을 평가하였다. SSP2-4.5과 SSP5-8.5 기후 시나리오에서는 향후 기온 증가 및 강수 변동성이 매우 커지고, 극한기후 현상의 빈도와 강도가 크게 증가하는 것으로 전망되었다. 반면에 SSP1-1.9 시나리오에서는 기온 증가 및 강수 변동성 등이 안정적으로 억제 또는 감소하며, 기후변화로 인한 부정적인 영향이 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 우리나라가 파리협정의 목표를 달성하고 기후변화로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 SSP1-1.9 시나리오를 기반으로 한 강력한 온실가스 감축 및 기후변화 대응 정책 이행과 관련 국제 협력의 강화가 필수적임을 시사한다. 또한 현재 기후 수준으로 회복하기 위해서 금세기 이후에도 당분간 탄소중립 노력이 지속되어야 함을 암시하고 있다.

제28권·제4호 (통권 제279호)

발행일 2024년 11월 30일

발행인 이창훈

발행처 한국환경연구원
(30147) 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 B동

TEL 044-415-7777

홈페이지 www.kei.re.kr

© 2024 한국환경연구원

* 본 내용은 한국환경연구원이 수행한 한국환경산업기술원의 국가연구개발사업인 「통합 영향평가 플랫폼 구축 및 신기후체제(AR6) 기반 다중 기후 시나리오 앙상블 구축」의 일부 연구결과를 포함하고 있음을 밝힙니다.

01

서론

기후변화는 전 지구적 차원에서 가장 심각한 환경 문제 중 하나로, 현재까지 온실가스 배출 증가로 인한 지구온난화와 기후 시스템의 변동성이 극대화되고 있다(IPCC, 2013; IPCC, 2022). 이러한 변화는 폭염, 집중호우, 가뭄 등 극한기후 현상의 빈도와 강도를 증가시키며 우리나라를 포함한 전 세계의 환경, 경제, 사회 시스템에 큰 영향을 미치고 있으며 이러한 부정적 영향은 더욱 가속화될 것으로 전망되고 있다. 특히, 기후변화로 인한 온도 상승과 강수 패턴의 변화는 식량 안보, 수자원 관리, 에너지 공급 등 여러 분야에 걸쳐 심각한 문제를 초래할 가능성이 크다. '지구온난화 1.5°C 특별보고서'(IPCC, 2018)에 따르면, 전구 평균기온이 산업화 이전 대비 1.5°C 이상 상승할 경우 기후 재앙의 위험이 커진다고 경고하고 있다. 최근 연구에서는 전구 평균기온을 1.5°C로 제한하더라도 기후전환점(CTPs: Climate Tipping Points)을 넘을 가능성이 있기 때문에 안전하지 않으며 이미 2.0°C 이상의 지구온난화로 향하고 있음을 경고한 바 있다(McKay et al., 2022). 이에 따라 최근 기후변화 대응의 핵심 과제로 탄소중립이 주목받고 있으며 각국은 탄소중립 목표를 설정하고 온실가스 감축을 위한 정책을 적극적으로 추진 중이다. 탄소중립을 달성하지 못할 경우, 21세기 말까지 지구의 평균기온 상승이 파리협정에서 목표한 1.5°C를 훨씬 초과할 것으로 예상되며(IPCC, 2022), 이미 2024년 현재 전 지구 평균 관측기온이 1.5°C 상승에 도달할 것으로 예상되고 있다(WMO, 2024). 이는 우리나라를 포함해 전 세계적으로 돌이킬 수 없는 극심한 기후 재난을 초래할 수 있다.

우리나라는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」에 근거하여 2050년 탄소중립을 목표로 다양한 정책적 노력을 기울이고 있다. 이를 실현하기 위해서는 기후변화에 따른 지역 차원의 기후 예측을 정확히 이해하는 것이 필수적이다. 그러나 현재 사용되는 전지구기후모델(GCM: Global Climate Model)은 해상도가 낮아 국내 지역 차원의 특성을 반영하는 데 한계가 있다. 따라서 지역적 차원에서의 정밀한 기후 예측이 필요하며, 이를 위해 통계적 상세화

기법을 적용하여 기후모델의 오차를 극복하고 지역단위의 예측정보를 제공할 필요가 있다.

또한 신기후체제(AR6)의 공통사회경제 경로(SSP: Shared Socioeconomic Pathways) 기후 시나리오(SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5)를 통해 기후변화가 우리나라에 미치는 영향을 분석하고, 탄소중립을 달성할 경우 얻을 기후학적 혜택을 평가하는 것이 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 고해상도 기후변화 시나리오에 따른 우리나라의 기후 요소 및 극한 기후지수에 대한 변화를 분석하여, 탄소중립(SSP1-1.9) 달성 시 기후변화로 인한 부정적 영향이 얼마나 감소할 수 있는지를 평가하는 것이다. 특히, 주요 기후 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5)와 비교하여 우리나라에서 탄소중립이 가져오는 혜택을 정량적으로 분석함으로써, 파리협약의 목표 달성 여부와 관련된 기후학적 시사점을 도출하고 기후변화 대응 정책 수립의 과학적 근거를 제공하고자 한다.

02

연구자료 및
방법

1. 기후 시나리오 및 모델 선정

기후 시나리오는 온실가스 배출량 변화 등의 인위적인 원인에 따른 기후변화를 전망하기 위해서 예상되는 미래 온실가스 농도와 기후모델을 이용하여 계산한 미래기후 전망정보이다. 2021년에 발간된 IPCC 6차 평가보고서(AR6) 작성을 위해 국제사회는 여러 국가의 기후변화 모델이 참여하는 “국제 기후변화 시나리오 비교·검증 프로젝트(CMIP6: Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)”를 시작하면서 새로운 온실가스 경로인 공통사회경제 경로(SSP)를 개발했다(O’Neill et al., 2014, 2017).

SSP 시나리오는 복사강제력 정도뿐만 아니라 기후변화 적응과 온실가스 감축 수준에 따라 다양한 영역에서의 미래 사회경제 구조(인구, 경제, 토지이용, 에너지 사용 등)가 어떻게 변할지를 고려한 정량적인 변화를 담고 있다. 사회경제지표를 나타내는 첫 번째 숫자(SSP1~5)는 사회발전과 온실가스 감축 정도에 따라 구별하며, 두 번째 숫자는 2100년 기준의 복사강제력(1.9, 2.6, 4.5, 7.0, 8.5W/m²)을 나타낸다. 최근 탄소중립에 사회적인 관심이 집중됨에 따라 SSP1-2.6 시나리오와 같은 수준으로 경제성장을 이루지만 2050년 탄소중립을 달성하기 위해 온실가스 배출량을 보다 낮은 SSP1-1.9 시나리오가 있다. SSP1-1.9 시나리오는 탄소중립을 목표로 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 1.5°C 이하로 유지하기 위해 온실가스 배출을 급격히 줄이고 경제 및 사회적 발전이 지속 가능한 방식으로 이루어지는 세계를 가정하고 있다(표 1 참조).

표 1
SSP 시나리오 종류와 의미

종류	의미
SSP1-1.9	적극적인 탄소중립 정책을 통해 지구 평균기온 상승을 1.5°C 이하로 제한하여 2050년까지 전세계 순탄소 배출이 “0”에 도달하고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 가정
SSP1-2.6	재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 가정

종류	의미
SSP2-4.5	중간 단계의 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도를 가정
SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정

자료: 기후정보포털, “국가 기후변화 표준 시나리오”, 검색일: 2024.9.26, 참고하여 저자 재구성.

본고에서는 탄소중립에 따른 혜택을 전망하기 위해 탄소중립을 목표로 하는 SSP1-1.9 시나리오와 중간단계 정도의 발전 및 감축을 목표로 한 SSP2-4.5 시나리오, 탄소 감축이 전혀 이루어지지 않고 온실가스 배출이 계속 증가하여 지구 평균기온이 급격히 상승하는 SSP5-8.5 시나리오를 비교 분석하였다. SSP1-1.9 시나리오의 경우 신기후체제(AR6)의 핵심 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)가 아니기 때문에 CMIP6에 참여한 모든 GCM(Global Climate Model)이 제공하지는 않는다. 이에 따라 CMIP6의 기후모델 중 현재 SSP1-1.9 시나리오를 제공하는 7개 GCM을 수집하여 분석에 활용하였다(표 2 참조).

표 2
GCM 리스트

기관(국가)	GCMs	해상도(격자)	참고문헌
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	CanESM5	128×64	Swart et al.(2019)
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	512×256	Doscher et al.(2022)
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	GFDL-ESM4	360×180	John et al.(2018)
Institute Pierre-Simon Laplace (France)	IPSL-CM6A-LR	144×143	Boucher et al.(2020)
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	256×128	Tatebe et al., (2019)
Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	MPI-ESM1-2-LR	192×96	Wieners et al.(2019)
Meteorological Research Institute (Japan)	MRI-ESM2-0	320×160	Yukimoto et al.(2019)

자료: 저자 작성.

2. 기후모델 상세화

본고에서는 기후변화 시나리오의 지역적 해상도를 높이고, 한반도 기후변화 예측의 정확도를 향상시키기 위해 상세화 기법을 적용하였다. 기후변화 시나리오의 공간 해상도를 개선하는 상세화 기법은 크게 역학적 상세화 기법과 통계적 상세화 기법으로 나눌 수 있지만 비교적 간단하고 널리 사용되는 통계적 상세화 기법을 적용하였다. 통계적 상세화 기법에는 다양한 방법이 있지만 편의보정(bias correction) 중심 기법 중 하나인 분위사상법은 GCM의 모의결과와 관측 자료의 차이를 보정하기 위해 사용되는 대표적인 방법이며, 차이를 보정하는 효과가 큰 것으로 알려져 지역적으로 더 정확한 기후 예측을 제공하는 데 사용되고 있다(Dosiom and Paruolo, 2011; Gudmundsson et al., 2012). 본 지에서는 경험적 분위 사상법(EQM: Empirical Quantile Mapping)을 통해 GCM에서 발생하는 시스템 오차를 제거하고, 관측값과 모델값 간의 분위 분포를 맞추어 상세화를 수행하는 SQM(Simple Quantile Mapping) 기법을 사용하였다(조재필 외, 2018; 조재필 외 2020).

SQM 기법을 활용하여 7개 GCM으로부터 한반도 영역에 대해 추출한 NetCDF 파일을 이용하여 남한 영역을 대상으로 1km 해상도의 일단위 상세화 자료를 생산하였다. 1km 해상도의 격자점별 편이 보정을 포함한 상세화 자료 생산 절차는 3단계로 구분된다. 첫 번째는 특정 월의 동일한 과거 30년(1981~2010년) 기간에 대해 특정 격자의 일단위관측 자료와 이에 대응 하는 GCM 자료를 크기순으로 정렬한 후, 관측 자료와 GCM 자료의 비교를 통해 분위(Quantile)별 편의(bias)를 비율을 산정한다. 두 번째는 동일 격자점을 대상으로 과거기간 자료를 이용하여 산정한 분위별 비율을 미래 기간의 동일한 분위에 적용하여 편의를 보정 후 원자료의 순서대로 복원하는 과정을 거친다. 마지막으로 앞선 두 단계의 과정을 월별 및 미래 시나리오별로 반복하여 적용한다. SQM 기법은 편의 보정을 통해 기후모델의 지역별

예측 정확성을 높이고, 기후 변화 시나리오의 신뢰성을 확보하는 데 중요한 기법으로 활용될 수 있다.

3. 기후요소 및 극한기후지수

본고에서 SQM 기법을 활용하여 생산한 본 연구(DIRECTION)¹⁾ 남한 상세 자료에서 사용한 기후요소는 평균, 최고, 최저기온 및 강수이고 7개 GCM을 평균한 값이다. 극한기후지수는 표 3과 같이 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)의 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 기후변화지수를 기반으로 기상청에서 사용하고 있는 고온 관련 지수 4개, 강수 관련 지수 4개를 산출하여 사용하였다(국립기상과학원, 2022).

전망시기와 관련하여 본 연구에서 생산한 자료는 현재 기간이 1981~2010년이기 때문에 국립기상과학원(NIMS: National Institute of Meteorological Sciences)의 현재 기간(2000~2019년)과 맞추기 위해 2000~2010년까지는 현재 기간, 2011~2019년까지는 SSP2-4.5 시나리오의 값을 사용하여 2000~2019년을 현재 기간으로 정의하였다. 미래 기간의 경우 2050년 탄소중립 시기와 21세기 말의 변화를 비교하기 위해 2041~2060년을 중미래, 2081~2100년을 먼미래로 정의하였다. 모든 기후요소와 극한기후지수는 모델별, 격자별로 산출한 후 전국 평균한 값이다. 탄소중립의 기후학적 혜택을 전망하기 위해 SSP1-1.9 시나리오를 기준으로 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오의 차이를 비교하여 분석하였다.

1) DIRECTION은 한국환경연구원이 수행한 한국환경산업기술원의 국가연구개발사업인 「통합 영향평가 플랫폼 구축 및 신기후체제(AR6) 기반 다중 기후 시나리오 앙상블 구축」의 연구진을 가리킴

표 3

극한기후지수 목록 및 정의

요인	극한기후지수	변수명	정의	단위
고온	일최고기온 연최대	TXx	일최고기온의 연중 최댓 값	℃
	폭염일수	HW33	일최고기온이 33℃ 이상인 날의 연중 일수	일
	열대야일수	TR25	일최저기온이 25℃ 이상인 날의 연중 일수	일
	최대온난일 계속기간	WSDIx	일최고기온이 기준 기간의 90퍼센타일을 초과한 날의 연중 최대지속일수	일
강수	강수강도	SDII	연중 습윤일수(일강수량 1mm이상)로 나누어진 연 총강수량	mm/일
	5일최다 강수량	RX5DAY	연속된 5일 동안 기록된 강수량 중 연중 최다값	mm
	95퍼센타일 강수일수	RD95P	일강수량이 기준 기간의 상위 95퍼센타일보다 많 은 날의 연중 일수	일
	최대무강수 지속기간	CDD	일강수량이 1mm 미만인 날의 연중 최대 지속 일 수	일

자료: 국립기상과학원(2022, p7)을 참고하여 저자 재구성.

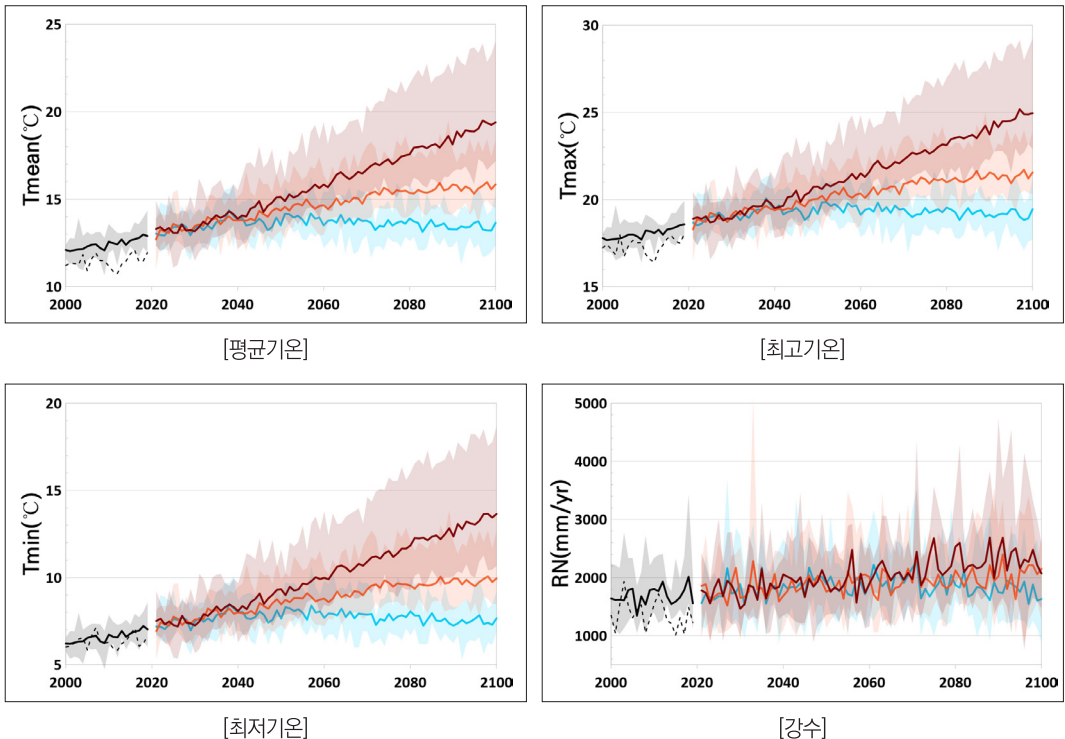
03

다중 기후변화 시나리오에 따른 미래 전망

1. 기후요소

다양한 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 기후요소(평균, 최고, 최저기온과 강수)의 현재(2000~2019년)와 미래(2020~2100년)의 변화를 살펴보았다(그림 1 참조). 본 연구(DIRECTION)에서 SQM 기법을 활용해 생산한 7개 GCM을 평균한 자료는 실선으로 나타냈고 색깔에 따라 검은색은 현재(historical), 하늘색은 미래 SSP1-1.9, 주황색은 미래 SSP2-4.5, 붉은색은 미래 SSP5-8.5를 의미한다. 검은색 점선은 국립기상과학원(NIMS)에서 MK-PRISM 기법(김병기 외, 2012)을 활용해 기상청 관측자료를 기반으로 생산한 현재 기간에 대한 남한 상세자료이다.

그림 1
국내 기후변화 시나리오에 따른 기후요소의 시계열 변화



주 : 범위는 모델의 최솟값, 최댓값임.
자료 : 저자작성.

평균기온(Tmean), 최고기온(Tmax), 최저기온(Tmin) 변화를 보면 탄소중립 달성을 목표로 하는 SSP1-1.9 시나리오에서는 온난화 억제에 따른 기온상승이 제한적이지만, SSP5-8.5 시나리오에서는 온실가스 배출이 지속해서 증가할 경우를 반영하여 기온상승이 크게 나타난다. 강수(RN) 변화는 시나리오에 따라 다소 복잡하게 나타나며, SSP1-1.9 시나리오에서는 강수량 변화가 상대적으로 안정적이지만, SSP5-8.5 시나리오에서는 극단적인 강수 증가와 변화가 전망된다.

표 4는 기후요소의 현재(2000~2019년)와 중미래(2041~2060년), 먼미래(2081~2100년)의 시나리오별 변화를 구체적으로 나타낸 것이다. 현재 평균기온(Tmean)은 12.4°C로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오에 따르면 중미래에는 13.8°C로 상승하고, 먼미래에는 13.5°C로 다소 하강할 것으로 보인다. 반면 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 14.4°C, 15.0°C, 먼미래에는 15.6°C, 18.6°C로 급격히 상승한다.

표 4

기후요소의 현재와 미래 시나리오별 전망(전국 연평균)

기간 요소	현재	SSP1-1.9		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	2000-2019	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
평균기온 (Tmean, °C)	12.4 (12.1-12.9)	13.8 (13-14.8)	13.5 (12.5-14.5)	14.4 (13.7-16.1)	15.6 (14.8-17.9)	15.0 (14-17.6)	18.6 (16.6-22.8)
최고기온 (Tmax, °C)	18.1 (17.8-18.6)	19.4 (18.7-20.5)	19.2 (18.2-20.2)	20.0 (19.3-21.7)	21.3 (20.5-23.5)	20.6 (19.6-23.2)	24.2 (22.7-28.1)
최저기온 (Tmin, °C)	6.6 (6.3-7.0)	7.9 (7.1-9.0)	7.5 (6.6-8.7)	8.5 (7.7-10.3)	9.7 (8.6-12.2)	9.2 (8.1-11.8)	12.8 (10.3-17.3)
강수 (RN, mm/yr)	1687.2 (1595.4-1773.5)	1873.5 (1678.3-2092.7)	1787.9 (1582.9-2115.8)	1905.7 (1786.8-2203.7)	2027.3 (1760.1-2539.7)	1921.1 (1657.3-2161.3)	2304.7 (1997.3-3186)

주 : 괄호는 모델의 최솟값, 최댓값임.

자료 : 저자작성.

최고기온(T_{max})의 경우 현재는 18.1°C 로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오의 중미래에는 19.4°C 까지 상승하고, 먼미래에는 19.2°C 로 평균기온과 마찬가지로 다소 하강한다. 반면 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 20.0°C , 20.6°C , 먼미래에는 21.3°C , 24.2°C 로 급격히 상승한다.

최저기온(T_{min})은 현재 6.6°C 에서 SSP1-1.9 시나리오의 중미래에는 7.9°C 까지 상승하고, 먼미래에는 7.5°C 로 역시 다소 하강하는 것으로 나타난다. SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 8.5°C , 9.2°C , 먼미래에는 9.7°C , 12.8°C 로 평균, 최고기온과 마찬가지로 크게 상승할 것으로 보인다.

현재 연간누적 강수량(RN)은 $1,687.2\text{mm/yr}$ 이고 SSP1-1.9 시나리오에서는 중미래 $1,873.5\text{mm/yr}$, 먼미래 $1,787.9\text{mm/yr}$ 로 비교적 안정적인 수준을 유지하지만, SSP5-8.5 시나리오의 먼미래에는 $2,304.7\text{mm/yr}$ 까지 변동 폭이 증가할 것으로 전망되었다.

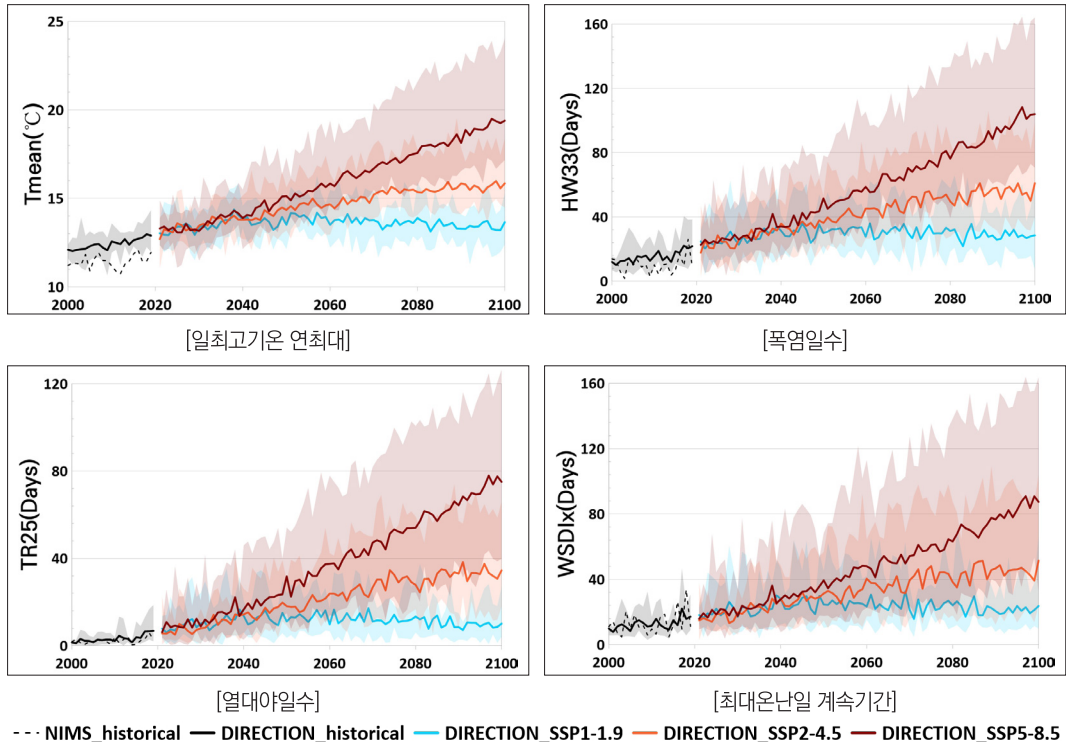
국립기상과학원의 남한상세 시나리오에 따르면 현재(2000~2019년) 우리나라 평균, 최고, 최저기온은 11.9°C , 17.3°C , 7.2°C 이고 강수는 $1,328.1\text{mm/yr}$ 로 나타난다(국립기상과학원, 2022). 시나리오에 따른 미래 전망에서도 평균, 최고, 최저기온과 강수는 각각 SSP2-4.5 시나리오에서 중미래(2041~2060년)는 14.1°C , 19.5°C , 9.4°C 와 $1,415.5\text{mm/yr}$, 먼미래(2081~2100년)는 15.4°C , 20.9°C , 10.8°C 와 $1,521.5\text{mm/yr}$ 이고 SSP5-8.5 시나리오에서 중미래(2041~2060년)는 14.7°C , 20.2°C , 10.1°C 와 $1,403.7\text{mm/yr}$, 먼미래(2081~2100년)는 18.2°C , 23.7°C , 13.6°C 와 $1,541.7\text{mm/yr}$ 이다. 기상청 시나리오는 본 연구 시나리오의 결과와 다소 차이가 있는데 이는 국립기상과학원의 남한상세 자료의 경우 한국과 영국기상청이 공동 활용 중인 영국기상청의 UKESM1(Sellar et al., 2019) 및 국립기상과학원의 K-ACE를 기반으로 산출된 반면에 본 연구 시나리오는 다른 GCM을 기반으로 산출하였기 때문이다. 따라서 각 GCM의 특성에 따라 남한상세 자료에 차이가 발생할 수 있다(이재희 외, 2021).

2. 고온 극한기후지수

기후요소와 마찬가지로 다양한 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 고온 관련 극한기후지수의 시계열 변화와 현재(2000~2019년)와 중미래(2041~2060년), 먼미래(2081~2100년)의 기간별 전망 값을 살펴보았다(그림 2, 표 5 참조). 고온의 강도와 관련된 일최고기온 연최대(TX_x)의 변화를 보면 현재 35.5°C로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오에 따르면 중미래에는 37.1°C로 상승하지만, 이후로 안정되어 먼미래에는 36.9°C로 완화될 것으로 보인다. 반면 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 37.5°C, 38.2°C, 먼미래에는 38.7°C, 40.9°C로 급격히 상승한다. SSP5-8.5 시나리오에서는 21세기 말까지 일최고기온이 약 45°C까지 도달할 가능성이 있으며 이는 현재 대비 극단적인 고온의 강도가 더욱 심각해질 수 있음을 나타낸다.

그림 2

고온 극한기후지수의 기후변화 시나리오에 따른 시계열 변화



주 : 범위는 모델의 최솟값, 최댓값임.

자료 : 저자작성.

표 5

고온 극한기후지수의 현재와 미래 시나리오별 전망(전국 연평균)

기간 지수	현재	SSP1-1.9		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	2000-2019	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
일최고기온 연최대 (TXx, °C)	35.5 (35.1-36.1)	37.1 (36.1-37.7)	36.9 (35.5-37.8)	37.5 (36.6-38.4)	38.7 (37.6-39.8)	38.2 (37.3-39.9)	40.9 (39.3-43.3)
폭염일수 (HW33, 일)	15.3 (12.1-21.8)	31.0 (22-48.6)	28.6 (17.3-45.7)	37.5 (23.5-63.7)	55.0 (38.9-89.8)	46.4 (32.6-85.4)	92.8 (64.4-147.3)
열대야일수 (TR25, 일)	3.2 (2.1-6.4)	12.7 (6.2-24.3)	10.1 (4.5-19.5)	17.8 (9.1-36.3)	32.5 (16.9-61.3)	26.9 (11.0-56.9)	66.6 (33.0-110.0)
최대온난일 계속기간 (WSDI _x , 일)	12.7 (8.4-17.0)	24.8 (16.4-44.2)	21.8 (14.6-38.8)	30.1 (17.0-58.4)	44.9 (21.8-90.5)	37.7 (20.6-85.3)	77.7 (43.2-146.8)

주 : 괄호는 모델의 최솟값, 최댓값임.

자료 : 저자작성.

고온의 빈도 중 최고기온과 관련된 폭염일수(HW33)는 현재 15.3일로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오의 중미래에는 31.0일까지 증가하지만 2050년대 이후로는 완화되어 먼미래에는 28.6일 정도로 전망된다. 이러한 폭염일수의 증가는 열대야일수(TR25)와도 밀접한 관련이 있다. 폭염의 빈도가 높아지면 야간에도 기온이 떨어지지 않아 열대야일수(TR25)가 더욱 증가할 가능성이 크다.

최저기온과 관련된 열대야일수(TR25)를 보면 현재 3.2일에서 SSP1-1.9 시나리오의 중미래에는 12.7일까지 증가하고, 먼미래에는 10.1일로 다소 감소하는 것으로 나타난다. 반면에 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에는 17.8일, 32.5일, 먼미래에는 26.9일, 66.6일로 현재 대비 매우 크게 증가할 것으로 전망되었다. 폭염이 극심했던 2024년 제주의 경우 열대야가 56일을 기록한 것을 감안하면 향후에도 비관적 시나리오를 능가하는 기후 재난 상황이 충분히 찾아올 수 있음을 염두 할 필요가 있으며 탄소중립의 시급성과

중요성을 암시한다.

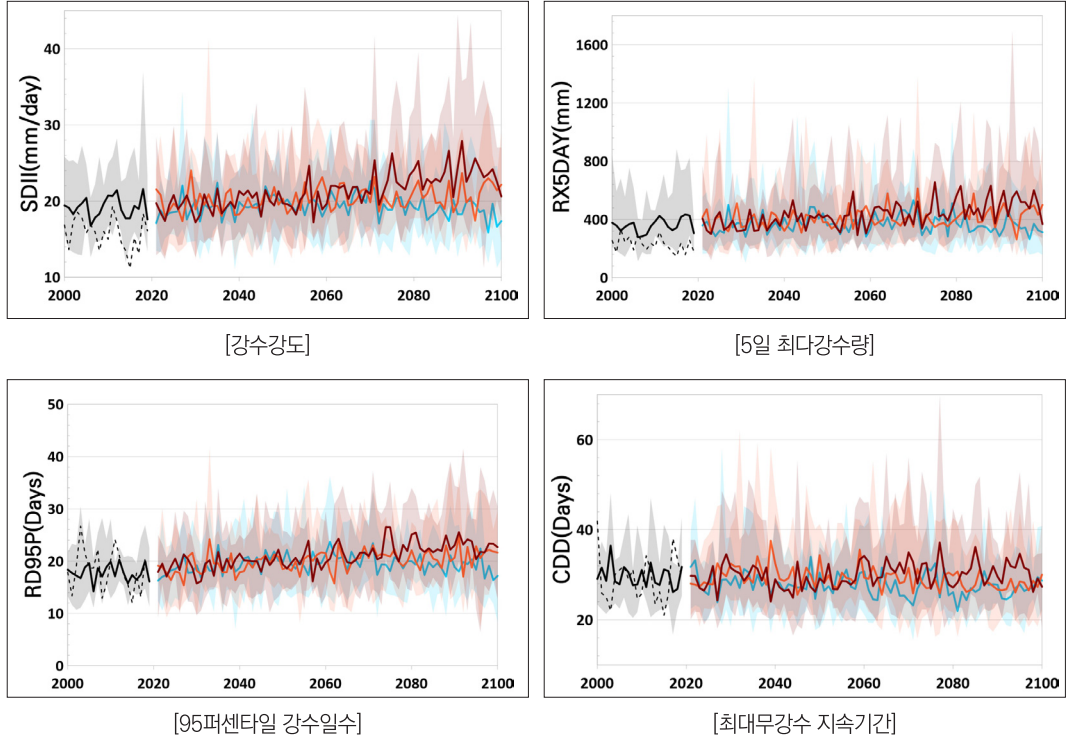
이와 같은 폭염과 열대야의 증가는 고온의 지속기간과도 연관이 있다. 고온의 지속기간과 관련된 최대온난일 지속기간(WSDI_x)은 현재 12.7일에서 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서는 기간이 많이 증가하여 중미래에는 30.1일, 37.7일, 먼미래에는 44.9일, 77.7일 정도 지속될 것으로 보인다. 반면에 SSP1-1.9 시나리오에서는 기간이 중미래는 24.8일까지 증가했다가 완화되어 먼미래는 21.8일로 감소하여 약 20일 내외 수준에서 유지될 것으로 보인다.

3. 강수 극한기후지수

앞서 살펴본 고온 관련 극한기후지수와 마찬가지로 다양한 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 강수 관련 극한기후지수의 시계열 변화와 현재(2000~2019년)와 중미래(2041~2060년), 먼미래(2081~2100년)의 기간별 전망 값을 살펴보았다(그림 3, 표 6 참조). 극한 강수의 강도와 관련된 강수강도(SDII)의 변화를 보면 현재 19.2mm/일로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오에 따르면 중미래에는 19.6mm/일로 증가하지만, 먼미래에는 18.6mm/일로 다소 감소할 것으로 보인다. 반면 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 20.3mm/일, 21.0mm/일, 먼미래에는 20.2mm/일, 23.5mm/일로 증가한다. 특히 SSP5-8.5 시나리오에서는 변동성이 극심해 21세기 말까지 강수강도가 약 40mm/일 이상 발생할 가능성이 있으며 이는 현재 대비 집중호우의 강도가 더욱 강해질 수 있음을 의미한다.

그림 3

강수 극한기후지수의 기후변화 시나리오에 따른 시계열 변화



--- NIMS_historical — DIRECTION_historical — DIRECTION_SSP1-1.9 — DIRECTION_SSP2-4.5 — DIRECTION_SSP5-8.5

주 : 범위는 모델의 최솟값, 최댓값임.

자료 : 저자작성.

표 6

강수 극한기후지수의 현재와 미래 시나리오별 전망(전국 연평균)

지수	기간	현재	SSP1-1.9		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2000-2019	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
강수강도 (SDII, mm/일)		19.2	19.6	18.6	20.3	21.0	20.2	23.5
		(17.9-20.5)	(17.8-21.4)	(17.4-20.7)	(18.7-22.8)	(19.5-24.1)	(18.2-21.8)	(21.1-29.5)
5일 최다 강수량 (RX5DAY, mm)		358.8	374.6	346.3	406.9	439.0	408.1	501.4
		(311.2-389.2)	(312.0-432.2)	(299.0-458.9)	(375.2-450.8)	(383.0-526.7)	(373.1-437.4)	(410.1-706.2)

기간 지수	현재	SSP1-1.9		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	2000-2019	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
95퍼센타일 강수일수 (RD95P, 일)	17.8	20.1	19.0	19.9	20.9	19.9	22.9
	(17.6-18.0)	(17.2-22.9)	(17.2-21.3)	(17.8-24.5)	(17.2-26.7)	(16.3-22.7)	(19.1-31.3)
최대무강수 지속기간 (CDD,일)	29.7	28.3	26.7	29.5	27.9	28.6	30.6
	(27.9-32.4)	(25.5-30.5)	(24.0-28.7)	(27.5-32.9)	(24.4-31.9)	(25.4-32.4)	(26.2-35.2)

주 : 괄호는 모델의 최솟값, 최댓값임.

자료 : 저자작성.

이와 함께 5일 최다강수량(RX5DAY)도 비슷한 양상을 보인다. 현재는 358.8mm로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오에서는 중미래에 374.6mm로 증가하지만, 먼미래에 346.3mm로 다소 감소한다. 하지만 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 406.9mm, 408.1mm, 먼미래에 439.0mm, 501.4mm로 증가한다. 우리나라 전국평균 5일 최다강수량(RX5DAY)이 현재 대비 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래에 약 40% 정도 증가하는 것으로 나타나 지역별로 발생하는 집중호우의 강도는 더욱 강해질 것으로 보인다.

극한 강수의 빈도와 관련된 95퍼센타일 강수일수(RD95P)는 현재 17.8일로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오에 따르면 중미래에는 20.1일로 증가하지만, 먼미래에는 19.0일로 다소 감소할 것으로 보인다. 반면 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 중미래에 19.9일, 19.9일, 먼미래에는 20.9일, 22.9일로 증가한다.

극한 가뭄과 관련된 최대무강수 지속기간(CDD)은 현재 29.7일로 나타나고 SSP1-1.9 시나리오에 따르면 중미래에 28.3일, 먼미래에 26.7일로 지속적으로 감소할 것으로 나타난다. SSP2-4.5 시나리오도 중미래에 29.5일, 먼미래에 27.9일로 약간 감소한다. 다만 SSP5-8.5 시나리오에서는 중미래에 28.6일로 다소 감소하다가 먼미래에는 30.6일로 증가할 것으로 전망된다. 강수 관련 극한기후지수는

변동성이 매우 크게 나타나지만 고온 관련 극한기후지수와 마찬가지로 SSP1-1.9 시나리오에서는 중미래 이후로 안정되어 현재보다 다소 감소하는 경향을 보인다.



04

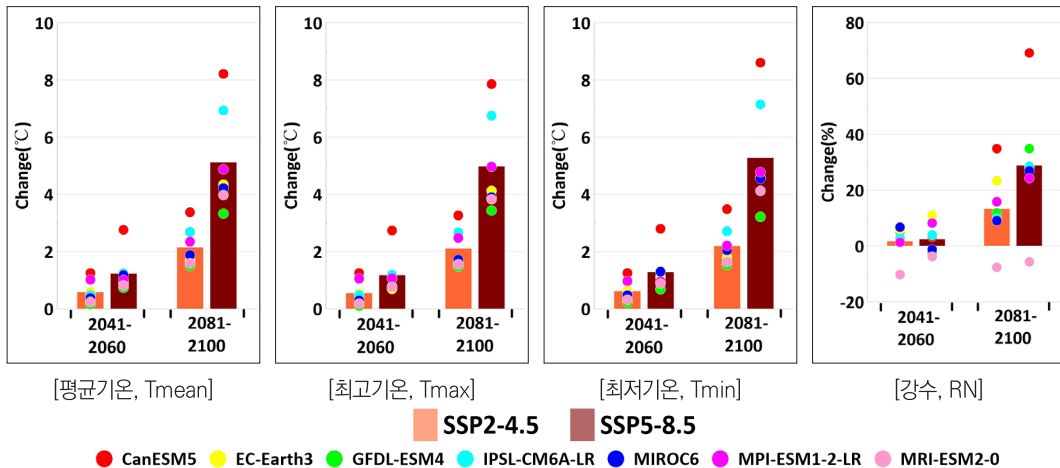
탄소중립
시나리오에 따른
기후학적 혜택
비교

1. 기후요소

주요 기후요소(평균기온, 최고기온, 최저기온과 강수)에 대해 탄소중립 달성에 기반한 SSP1-1.9 시나리오 대비 온실가스 배출이 지속해서 증가할 경우를 반영한 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오의 차이를 비교하여 우리나라가 탄소중립을 달성할 경우 얻게 될 기후학적 혜택을 살펴보았다(그림 4 참조). 평균기온은 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오는 각각 중미래에 0.6°C, 1.2°C, 먼미래에 2.2°C, 5.1°C의 차이가 나타난다. 모든 모델에서 저감 혜택이 있는 것으로 전망하였고 일부 모델(CanESM5)의 경우 SSP5-8.5 시나리오 먼미래에서는 8.2°C까지 차이가 나타나기도 한다.

그림 4

주요 기후요소의 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9) 대비 변화량



자료 : 저자작성.

최고기온은 각각 중미래에 0.6°C, 1.2°C, 먼미래에 2.1°C, 5.0°C의 차이가 나타나 평균기온과 유사한 저감 혜택이 있다. 최저기온의 경우에는 중미래에 0.6°C, 1.3°C, 먼미래에 2.2°C, 5.3°C의 차이가 나타나 평균, 최고기온에 비해 고배출 시나리오, 먼미래로 갈수록 저감 혜택이 가장 큰 것으로 보인다.

강수는 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오는

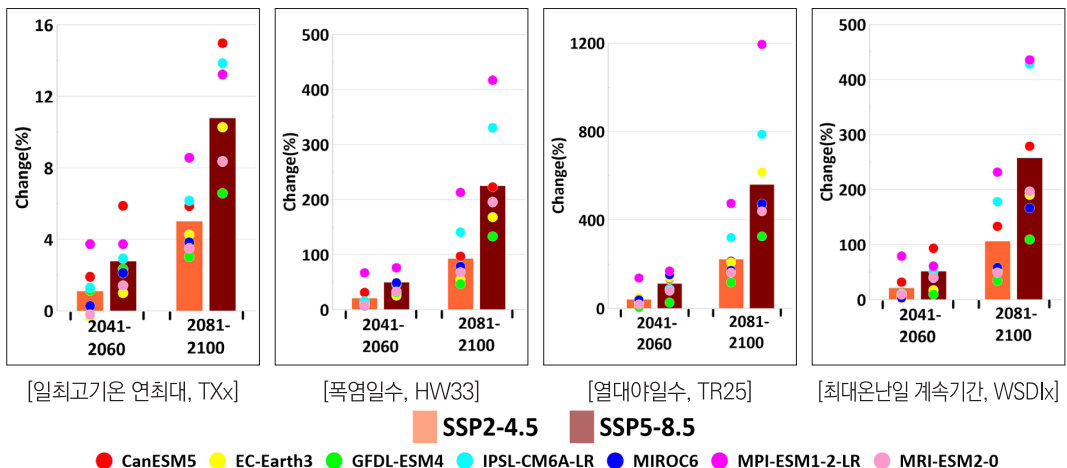
각각 중미래에 1.7%, 2.5%, 먼미래에 13.4%, 28.9%의 차이가 나타난다. 강수의 큰 변동성으로 인해 일부 모델의 경우 SSP1-1.9 시나리오보다 더 적게 모의하는 경우도 있지만 고배출 시나리오, 먼미래로 갈수록 대부분의 모델에서 강수량이 더 많아질 것으로 모의하는 경향을 보인다.

2. 고온 극한기후지수

고온 극한기후지수에 대해서도 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오의 변화를 살펴보았다(그림 5 참조). 일최고기온 연최대(TX_x)는 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서 각각 중미래에 약 1.1%, 2.8%, 먼미래에는 5.0%, 10.8%까지 더 크게 상승할 것으로 보인다. 고배출 시나리오, 먼미래로 갈수록 대부분의 모델에서 저감 혜택이 클 것으로 전망하고, 일부 모델(CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-LR)의 경우 SSP5-8.5 시나리오 먼미래에서는 13% 이상 차이가 나타날 것으로 전망된다. 이는 고온 강도의 증가를 의미하며 이로 인해 폭염의 빈도와 지속기간이 증가할 가능성이 크다.

그림 5

고온 극한기후지수의 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9) 대비 변화량



자료 : 저자작성.

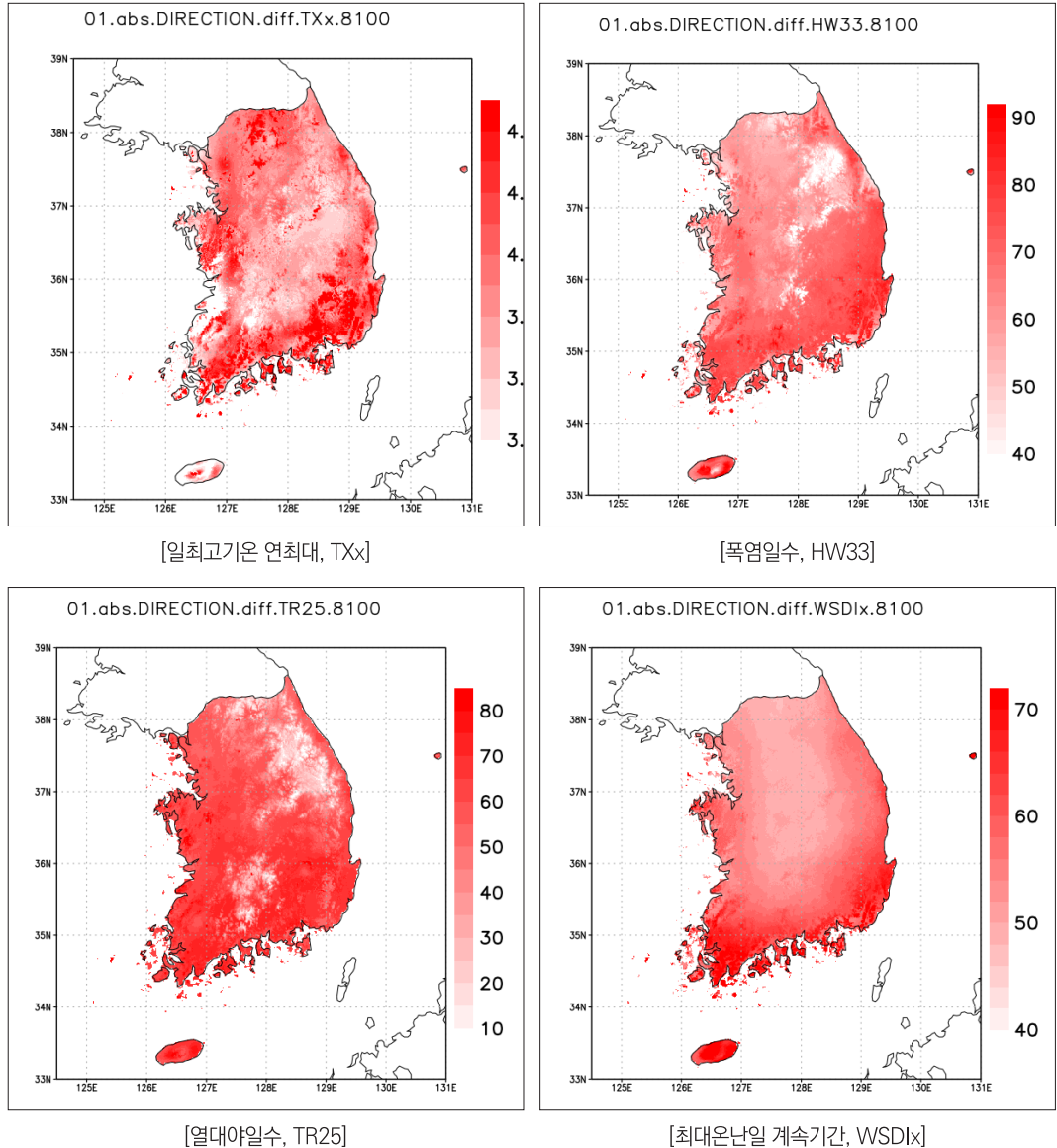
폭염일수(HW33)는 SSP5-8.5 시나리오에서 중미래에 49.7%, 먼미래에는 224.8% 더 많이 발생할 것으로 전망된다. 이는 폭염 현상이 더욱 빈번해질 것을 의미하며, SSP2-4.5 시나리오에서도 중미래에 21.2%, 먼미래에 92.6% 더 많이 발생하는 것으로 나타난다.

열대야일수(TR25)는 SSP5-8.5 시나리오에서 중미래에 약 111.5%, 먼미래에는 560.7%로 급격하게 더 많이 발생하는 것으로 나타나며, 일부 지역에서는 열대야가 더욱 자주 발생할 가능성이 크다. SSP2-4.5 시나리오에서도 중미래에 40.0%, 먼미래에 221.8% 더 많이 발생하는 것으로 나타난다. 일부 모델(MPI-ESM1-2-LR)의 경우 SSP5-8.5 시나리오 먼미래에서는 약 12배 정도 더 많이 발생할 것으로 전망되기도 함에 따라 열대야의 빈도는 저감 혜택이 매우 클 것으로 보인다. 현재 기후모델에 의한 전망을 기준으로 2024년의 기록적인 폭염과 열대야가 세기말적 양상을 보인 것을 감안한다면 탄소중립 이행의 시급성을 아무리 강조해도 지나치지 않음을 알 수 있다.

최대온난일 계속기간(WSDIx)은 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서 각각 중미래에 21.3%, 51.9%, 먼미래에 106.2%, 257.3% 더 길어질 전망이며, 이는 고온 현상이 장기적으로 지속될 수 있음을 시사한다.

그림 6

고온 극한기후지수의 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9) 대비 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래(2081-2100) 차이 공간 분포



자료 : 저자작성.

그림 6은 고온 극한기후지수에 대해 SSP1-1.9 시나리오와 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래 차이를 공간적으로 나타낸다. 고온 극한기후지수의 지역별 분포 차이를 통해 탄소중립 달성 시 따르는 기후학적 혜택을

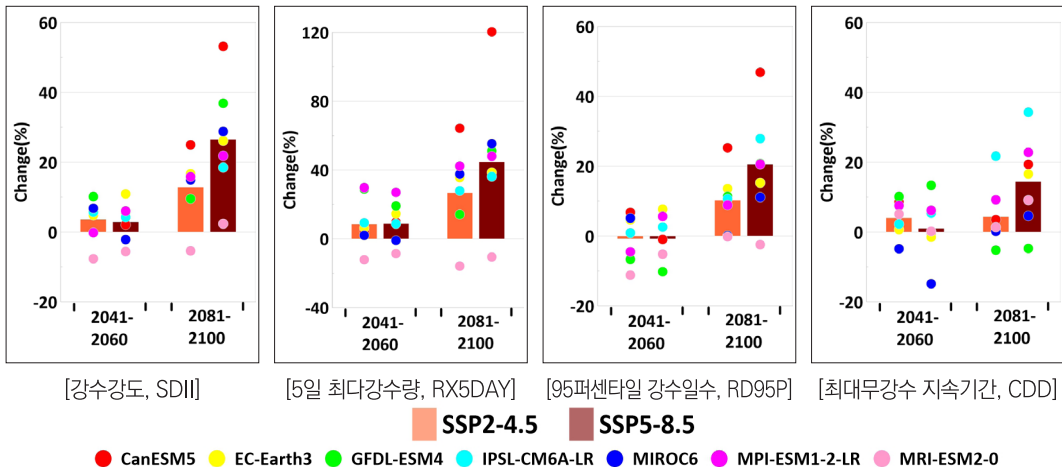
지역별로 살펴보았다. 일최고기온 연최대(TXx)는 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP5-8.5 시나리오에서 먼미래에 전국적으로 약 3.5~4.5°C까지 상승하는 것으로 나타난다. 특히 남부 해안 지역과 수도권 및 충청 지역에서 상대적으로 상승 폭이 크게 나타나 해당 지역의 고온 강도에 대한 저감 혜택이 큰 것으로 보인다.

폭염일수(HW33)는 약 40~90일 이상 더 많이 증가하는 것으로 나타난다. 저감 혜택이 가장 두드러지는 지역은 남부 해안 지역과 영남 중부권 도시지역으로 탄소중립 달성 시 고온 빈도가 상대적으로 많이 감소할 것으로 보인다. 열대야일수(TR25)는 약 10~80일까지 증가할 것으로 예상되며, 특히 제주도를 비롯한 전국 대부분의 지역에서 저감 혜택을 받을 수 있는 것으로 나타난다. 최대온난일 지속기간(WSDIx)은 약 40~70일 정도 증가할 것으로 보이며 내륙에 위치한 지역보다는 해안 지역을 중심으로 탄소중립 달성에 따른 혜택이 크게 나타난다.

3. 강수 극한기후지수

그림 7

강수 극한기후지수의 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9) 대비 변화량



자료 : 저자작성.

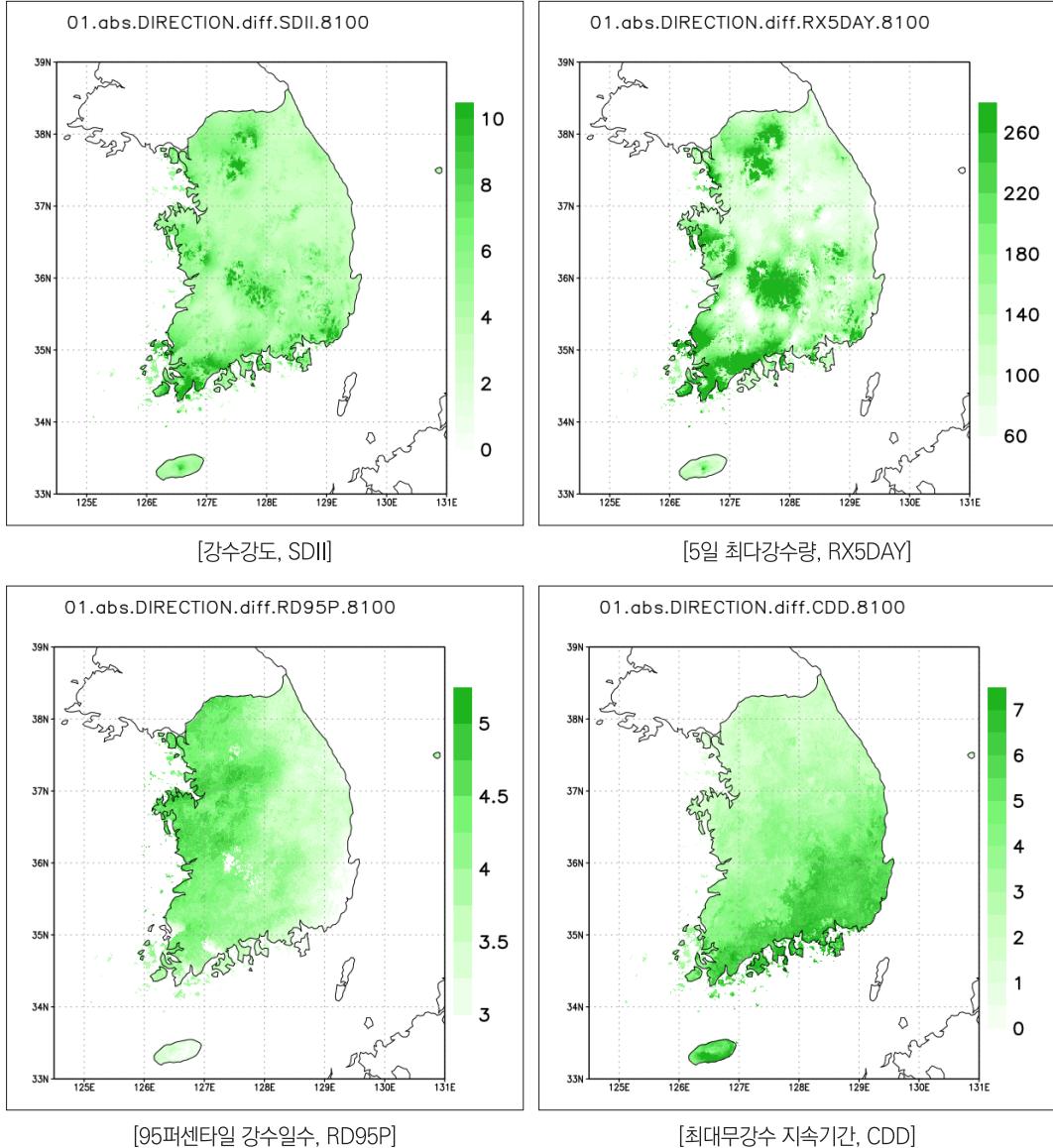
강수 극한기후지수에 대해서도 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오의 변화를 살펴보았다(그림 7 참조). 강수강도(SDII)는 SSP1-1.9 시나리오 대비 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서 각각 중미래에 약 3.7%, 2.9%, 먼미래에는 12.8%, 26.6%까지 증가할 것으로 보인다. 일부 모델(CanESM5)의 경우 SSP5-8.5 시나리오 먼미래에서는 약 50% 이상 증가하는 것으로 전망된다. 5일 최다강수량(RX5DAY)도 중미래에 약 8.6%, 8.9%, 먼미래에는 26.8%, 44.8%까지 증가할 것으로 보인다. 이는 SSP1-1.9 시나리오보다 집중호우에 대한 위험이 훨씬 심각해질 수 있음을 의미한다.

95퍼센타일 강수일수(RD95P)의 경우 중미래에 약 -0.7%, -0.8%로 다소 감소하였다가 먼미래에는 10.3%, 20.6%까지 증가하는 것으로 나타난다. 극한 강수의 빈도는 중미래까지는 저감 혜택이 미미하지만 먼미래로 갈수록 저감 혜택이 커지는 것으로 보인다. 최대무강수 지속기간(CDD)은 중미래에 약 4.1%, 1.1%, 먼미래에는 4.4%, 14.5%까지 증가하는 것으로 나타난다. 극한 가뭄의 경우 SSP2-4.5 시나리오에서는 기간에 따른 저감 혜택의 차이가 크지 않은 반면에 SSP5-8.5 시나리오에서는 먼미래로 갈수록 저감 혜택이 더욱 커지는 것으로 나타난다.

강수 극한기후지수의 경우 전반적으로 모델별로 변동성이 크게 나타나 일관된 방향성을 보이지 않는다. 5일 최다강수량(RX5DAY)의 경우 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래에 일부 모델은 약 120% 이상의 증가를 모의하는 반면에 다른 모델에서는 약 -10%로 오히려 감소하는 것을 모의하기도 한다. 이는 강수 패턴에 대한 불확실성이 크기 때문이고 지역별로 발생하는 집중호우와 같은 극한 강수 현상이 더욱 극단적일 수 있다는 점을 의미한다. 하지만 먼미래로 갈수록 모델 대부분이 SSP1-1.9 시나리오 대비 강수 극한기후지수가 증가할 것으로 모의하는 것으로 나타나, 탄소중립 달성에 따른 극한 강수의 완화 혜택은 전국적이며 그 정도도 상대적으로 커질 것으로 보인다.

그림 8

강수 극한기후지수의 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9) 대비 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래(2081-2100) 차이 공간 분포



자료 : 저자작성.

강수 극한기후지수에 대해서도 지역별 분포 차이를 통해 탄소중립 달성 시 따르는 기후학적 혜택을 지역별로 살펴보았다(그림 8 참조). 강수강도(SDII)는 SSP5-8.5 시나리오에서 전국적으로 약

2~10% 이상 증가할 것으로 보인다. 특히 남부 해안과 중부 내륙 지역을 중심으로 강수강도가 매우 증가하는 것으로 나타난다. 5일 최대강수량(RX5DAY)은 약 60~260mm까지 증가할 것으로 나타난다. 강수강도(SDII)와 마찬가지로 남부 해안과 중부 내륙 지역에서 상대적으로 많이 증가하여 이들 지역에서는 극한 강수의 강도 측면에서 탄소중립 달성에 따른 혜택이 클 것으로 보인다.

95퍼센타일 강수일수(RD95P)의 경우 약 3~5일 더 많은 극한 강수일수가 발생할 것으로 보인다. 강수일수가 더 많이 발생할 것으로 전망되는 지역은 중부 내륙 및 충청 지역으로 탄소중립 달성 시 극한 강수의 빈도를 크게 줄일 수 있을 것으로 나타난다. 최대무강수 지속기간(CDD)은 약 1~7일까지 무강수 기간이 증가할 것으로 보이며, 특히 남부 해안 지역과 영남 내륙에서 무강수 기간이 상대적으로 많이 증가해 저감 혜택이 큰 것으로 나타난다. 강수 극한기후지수에 대해 SSP1-1.9 시나리오와 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래 차이를 공간적으로 살펴본 결과, 강수 패턴의 불확실성으로 인해 지역별로 차이가 크게 나타나지만 먼미래에서는 많은 지역에서 탄소중립 달성에 따른 혜택이 존재하고 있음을 알 수 있다.

05

요약 및 제언

본고에서는 탄소중립 시나리오(SSP1-1.9)를 기준으로 다양한 기후변화 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5)를 비교하여 우리나라 기후요소 및 극한기후지수에 따른 미래 전망을 분석하고, 탄소중립 달성에 따른 혜택을 평가하였다. 기후변화 시나리오를 통해 전망된 평균기온, 최고기온, 최저기온 및 강수 등 주요 기후요소와 고온 및 강수 관련 극한기후 발생의 미래 변화를 살펴보았다. 그 결과 탄소중립을 달성할 경우, 다른 기후 시나리오에 비해 기후변화의 부정적인 영향이 크게 완화될 수 있음을 확인할 수 있었으며 그 혜택은 금세기 말로 갈수록 점점 커질 것으로 전망된다.

평균기온은 SSP1-1.9 시나리오에서 먼미래로 갈수록 완화된 상승을 보일 것으로 전망되며, 이로 인해 기후변화로 인한 피해가 다른 시나리오에 비해 크게 줄어듦으로 보인다. 반면, SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서는 각각 먼미래에는 평균기온이 급격히 상승하며, 탄소중립 미달성에 따른 부정적 영향이 매우 클 것으로 우려된다. 최고기온과 최저기온도 다른 시나리오에 비해 SSP1-1.9 시나리오에서는 상승이 제한적이었다. 최고기온은 SSP5-8.5 시나리오에서 먼미래에 5.0°C까지 차이가 나타났고, 특히 최저기온은 5.3°C까지 차이가 나타나 탄소중립 달성에 따른 혜택이 매우 큰 것으로 보인다. 이와 같은 결과는 최근 전지구 평균기온의 상승 속도가 매우 빠르고 파리협정에 따른 목표온도를 달성하기 어렵다는 연구 결과(McCulloch et al., 2024)와 마찬가지로 우리나라에서도 지구온난화에 따른 기온의 상승이 매우 크다는 점을 보여주며 탄소중립 실현을 위해서는 SSP1-1.9 시나리오만이 우리나라에서 회복 가능한 유일한 시나리오라는 점이 확인된다. 강수의 경우, SSP1-1.9 시나리오에서는 미래에 강수량 변동이 비교적 안정적으로 유지된 반면, SSP5-8.5 시나리오에서는 강수 변동성이 매우 커지고 SSP1-1.9 시나리오 대비 먼미래에 28.9%까지 증가할 것으로 전망되었다. 기온의 경우에는 모든 모델에서 저감 혜택이 있는 것으로 전망됐지만 강수는

큰 변동성으로 인해 일부 모델에서 저감 혜택이 나타나지 않는 경우도 있었다. 하지만 고배출 시나리오, 먼미래로 갈수록 많은 기후 모델들이 강수의 저감 혜택이 있는 것으로 전망하였다.

고온 관련 극한기후지수를 살펴보면, SSP1-1.9 시나리오에서 먼미래로 갈수록 안정될 것으로 보인다. 그러나 SSP5-8.5 시나리오에서는 먼미래에 일최고기온 연최대는 40.9°C까지 상승할 것으로 예측되며 SSP1-1.9 시나리오 대비 폭염일수는 약 3배, 열대야일수는 약 6배 정도 급격히 증가할 것으로 전망되었다. 2024년 기상청 보도자료에 따르면 여름철 전국평균 폭염일수는 24.0일로 2018년 31.0일, 1994년 28.5일 다음으로 역대 3위를 기록했으며 밀양, 합천 등 지역에 따라 49일까지 발생하는 등 전국 주요 기상관측지점의 약 15%(66개 중 총 10개)에 해당하는 지점에서 새로운 기록을 경신하였다. 열대야일수의 경우 20.2일로 역대 1위를 기록하며 2018년 16.5일의 기록을 경신하였다.

특히 제주 56일, 여수 42일, 청주 41일 등 약 55%(66개 중 총 36개)에 해당하는 지점에서 새로운 기록을 경신하였다. 이는 현재 기간의 시나리오에서는 나타나지 않았던 수준으로 이미 기후변화로 인한 부정적인 영향이 예상 수준을 넘어섰음을 의미한다. 특히 2024년에 나타난 열대야일수는 SSP2-4.5 시나리오의 중미래 수준까지 도달했으며 지역에 따라서는 SSP5-8.5 시나리오의 먼미래 수준까지 발생하는 것으로 나타나 일부 지역에서는 예측하기 어려울 정도의 극한기후가 발생할 수 있음을 보여준다.

이를 통해 우리나라의 극한 고온 현상이 강도, 빈도, 지속기간 측면에서 모두 심각하게 악화하는 양상을 나타내며, 특히 일부 지역에서는 극단적인 고온 현상이 발생할 수 있음을 보여준다. 탄소중립을 달성하지 못할 경우 기후변화의 부정적인 영향이 극대화될 수 있지만, SSP1-1.9 시나리오를 통해 탄소중립 실현이 극한 고온 현상을 크게 억제할 수 있으며 기후변화의 부정적 영향을 완화하는 데 필수적임을 시사한다.

강수 관련 극한기후지수를 살펴보면, 집중호우 강도가 강해짐에 따라 그 피해가 더욱 커질 수 있지만, 탄소중립 달성 시 집중호우의 강도와 변동성이 줄어들어 극한 강수 위험이 감소하는 저감 혜택이 있을 것으로 보인다. 2024년 기상청 보도자료에 따르면 여름철 전국 평균 강수량은 602.7mm로 평년보다 적었던 것으로 나타났다. 하지만 여름철 강수량 중 474.8mm(78.8%)가 장마철에 집중되어 1973년 이래 가장 큰 비율로 장마철에 많은 비가 내렸다. 지역에 따라 1시간 최다강수량이 100mm 이상인 곳이 9개 지점에서 관측되는 등 집중호우의 위험이 더욱 증가하는 추세이다. 이에 따라 연강수량의 변화보다는 극한 강수강도의 변화에 주목하고 특히 지역별로 변동성이 큰 지역에 대한 대비가 필요하다는 점을 고려해야 한다. 극한 강수 빈도의 경우 현재 또는 시나리오 간 변화가 상대적으로 크지 않다는 것을 감안하면 집중호우에 대한 위험이 더욱 커질 가능성이 있다는 점을 주목해야 한다.

SSP1-1.9 시나리오를 통해 탄소중립 달성 시 극한 강수 현상의 변동성을 줄임으로써 각 지역에서 발생할 수 있는 극단적 강수 및 가뭄을 완화할 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 탄소중립 실패 시 극한 강수 현상이 더욱 강화되고 변동성이 커질 가능성이 크기 때문에 이를 예방하기 위한 탄소중립 실현의 필요성을 시사한다.

본고에서 직접 다루지는 않았지만 AR6의 SSP1-2.6 시나리오 역시 SSP1-1.9 시나리오와 마찬가지로 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정한 시나리오이다. 다만 SSP1-2.6 시나리오는 SSP1-1.9 시나리오와 달리 2080년경에 탄소중립에 도달하는 것이 특징이다. 즉, 온실가스 배출 감소가 SSP1-1.9 시나리오보다 완만하고 늦게 이행되는 것이다. SSP1-2.6의 국내 평균기온은 중미래 14.0℃, 먼미래 14.1℃로 나타나 SSP1-1.9와는 중미래 0.2℃, 먼미래 0.6℃ 차이가 발생한다. 여기서 주목할 점은 중미래 이후 먼미래로 갈수록 감소하는

SSP1-1.9 시나리오와는 달리 SSP1-2.6 시나리오는 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오보다는 증가 폭이 작긴 하지만 금세기 말에도 기후요소들이 지속적으로 증가한다는 것이다. 이와 같은 특징은 고온 및 강수 극한기후지수에도 나타났다. 이는 SSP1-2.6 시나리오가 친환경적이며 지속가능한 탄소중립을 지향하는 시나리오 일지라도 금세기 말까지 현재 수준의 기후 상태로 완화될 가능성은 희박하다는 것을 의미하며 탄소중립 달성 시기 또한 매우 중요한 목표임을 시사한다.

본고에서 다양한 기후변화 고해상도 시나리오를 바탕으로 탄소중립이 우리나라에 미치는 긍정적인 영향을 실증적으로 분석한 결과, 국내에서도 SSP1-1.9 시나리오만이 심각한 기후변화의 부정적인 영향을 억제할 수 있는 유일한 시나리오임을 확인하였다. 즉, 탄소중립 이행만이 지구의 기후를 현재 이전의 상태로 되돌릴 수 있는 기후 회복력이 있음을 의미하는 것이다. 또한 탄소중립을 이행하더라도 금세기 말까지는 현재(2000~2019년) 수준보다는 다소 높은 기온이 유지되어 현재 수준의 기후로 회복하기 위해서는 다음 세기에도 당분간 탄소중립 상태를 계속 유지해야 함을 의미한다.

SSP5-8.5 시나리오뿐만 아니라 SSP2-4.5 시나리오에서도 극한 기후변화를 충분히 억제하기 어렵다는 결과는 탄소중립보다 완화된 수준의 온실가스 배출 감축 정책으로는 기후변화의 심각한 영향을 막기 힘들다는 것을 의미한다. 이는 기후변화의 심각한 피해를 감소하기 위한 기후 적응정책과 이행의 중요성을 재차 강조하는 것이다. 본고를 통하여 우리나라가 기후변화에 효과적으로 대응하고 파리협정 목표를 달성하기 위해서는 SSP1-1.9 시나리오를 기반으로 한 강력한 온실가스 감축 및 기후변화 대응 정책 이행과 이를 위한 국제 협력을 강화하는 것이 필요하다는 점을 시사한다.

참고문헌

국내문헌

- 국립기상과학원(2022), 「남한상세 기후변화 전망보고서」, p.7.
- 김맹기 외(2012), “1km 해상도의 관측 격자자료 생산 기술”, 「기후연구」, 7(1), 건국대학교 기후연구소, pp.55-68.
- 이재희 외(2021), “CMIP6 다중모델 기반 동아시아 현재기후 재현성 평가”, 「Journal of Climate Change Research」, 12(5-1), 한국기후변화학회, pp.461-478, <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2021.12.5.461>.
- 조재필 외(2018), “사용자 중심의 기후변화 시나리오 상세화 기법 개발 및 한반도 적용”, 「Journal of Climate Change Research」, 9(1), 한국기후변화학회, pp.13-29. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.1.13>.
- 조재필 외(2020), “다중모형 및 격자기반 CMIP5 기후변화 시나리오 상세화 자료를 이용한 극한기후지수 변동성 분석”, 「Journal of Climate Change Research」, 11(2), 한국기후변화학회, pp.123-132. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2020.11.2.123>.

국외문헌

- IPCC(2013), “*Climate Change 2013: The Physical Science Basis*”, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC(2018), “*Summary for Policymakers. In: 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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.
- IPCC(2022), “*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*”, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M.

- Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Boucher et al.(2020), "Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol.12, e2019MS002010. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.
- Döscher, R. et al.(2022), "The EC-Earth3 Earth System Model for the Coupled Model Intercomparison Project 6", *Geoscientific Model Development*, Vol.15, pp.2973–3020, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>.
- Dosio, A., and P. Paruolo(2011), "Bias Correction of the ENSEMBLES High-Resolution Climate Change Projections for Use by Impact Models: Evaluation on the Present Climate", *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, D16106, <https://doi.org/10.1029/2011JD015934>.
- Gudmundsson, L. et al.(2012), "Technical Note: Downscaling RCM Precipitation to the Station Scale Using Statistical Transformations – a Comparison of Methods", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol.16, pp.3383-3390, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>.
- John P. et al.(2018), "NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6", *.Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1407>.
- McCulloch, M. T. et al.(2024), "300 Years of Sclerosponge Thermometry Shows Global Warming Has Exceeded 1.5 °C", *Nature Climate Change*, Vol.14, pp.171–177, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01919-7>.
- McKay, D. I. A. et al.(2022), "Exceeding 1.5°C Global Warming Could Trigger Multiple Climate Tipping Points", *Science*, 377(6611), <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>.
- O'Neill, B. C. et al.(2014), "A New Scenario Framework for Climate Change Research: The Concept of Shared Socioeconomic Pathways", *Climatic Change*, 122(3), pp.387-400, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>.
- O'Neill, B. C. et al.(2017), "The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21st Century", *Global Environmental Change*, Vol.42, pp.169-180, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.
- Sellar, A. A. et al.(2019), "UKESM1: Description and Evaluation of the U.K.

Earth System Model", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol.11, pp.4513-1558, <https://doi.org/10.1029/2019MS001739>.

Swart, N. C. et al.(2019), "The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3)", *Geoscientific Model Development*, Vol.12, pp.4823-4873, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>.

Tatebe, H.(2019), "Description and Basic Evaluation of Simulated Mean State, Internal Variability, and Climate Sensitivity in MIROC6", *Geoscientific Model Development*, Vol.12, pp.2727-2765, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>.

Wieners, K.-H., et al.(2019), "MPI-M MPI-ESM1.2-LR Model Output Prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585", *Earth System Grid Federation*, <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6705>.

Yukimoto, S. et al.(2019), "The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component", *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, Vol.97, pp.931-965, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>.

온라인 자료

기상청 보도자료(2024.9.5), "2024년 여름철 기후특성", <https://www.kma.go.kr/kma/news/press.jsp?bid=press&mode=view&num=1194405&page=4&>, 검색일: 2024.9.26.

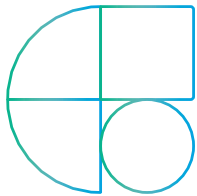
기후정보포털, "국가 기후변화 표준 시나리오", http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/Definition.html, 검색일: 2024.9.26.

WMO(2024.11.11), "2024 is on track to be hottest year on record as warming temporarily hits 1.5°C", [https://wmo.int/news/media-centre/2024-track-be-hottest-year-record-warming-temporarily-hits-15degc#:~:text=Baku%2C%20Azerbaijan%20\(WMO\)%20%2D,World%20Meteorological%-20Organization%20\(WMO\)](https://wmo.int/news/media-centre/2024-track-be-hottest-year-record-warming-temporarily-hits-15degc#:~:text=Baku%2C%20Azerbaijan%20(WMO)%20%2D,World%20Meteorological%-20Organization%20(WMO)), 검색일: 2024.11.12.



환경포럼

www.kei.re.kr



FORUM



제28권·제4호

통권 제279호

우리나라 다중 기후변화 시나리오를 활용한
탄소중립 이행에 따른
미래기후 혜택 전망과 시사점

