

탄소중립과 대기질 개선 정책이 동아시아 근 미래 기후변화에 미치는 영향

김윤아 · 최정* · 손석우

서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2023년 8월 24일, 수정일: 2023년 10월 12일, 게재확정일: 2023년 10월 30일)

Impacts of Carbon Neutrality and Air Quality Control on Near-term Climate Change in East Asia

Youn-Ah Kim, Jung Choi*, and Seok-Woo Son

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 24 August 2023; revised 12 October 2023; accepted 30 October 2023)

Abstract This study investigates the impacts of carbon neutrality and air quality control policies on near-term climate change in East Asia, by examining three Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenarios from five climate models. Specifically, low carbon and strong air quality control scenario (SSP1-1.9), high carbon and weak air quality control scenario (SSP3-7.0), and high carbon and strong air quality control scenario (SSP3-7.0-lowNTCF) are compared. For these scenarios, the near-term climate (2045-2054 average) changes are evaluated for surface air temperature (SAT), hot temperature extreme intensity (TXx), and hot temperature extreme frequency (TX90p). In all three scenarios, SAT, TXx, and TX90p are projected to increase in East Asia, while carbon neutrality reduces the increasing rate of SAT and hot temperature extremes. Air quality control strengthens the warming rate. These opposed mitigation effects are robustly forced in all model simulations. Nonetheless, the impact of carbon neutrality overcomes the impact of air quality control. These results suggest that fast carbon neutrality, more effective than an air quality control policy, is necessary to slowdown future warming trend in East Asia.

Key words: Near-Term climate forcers, Carbon neutrality, Air quality control, Extreme climate

1. 서론

지구온난화 현상은 극한기상의 발생 빈도 및 강도 증가, 해수면 상승, 생태계 파괴 등 많은 피해를 야기하고 있다(IPCC, 2018). 지구온난화의 심각성을 파악하기 위해 전 지구 평균 지표대기온도를 사용하는데, 2017년을 기준으로 산업화(1850년) 이전 대비 약 1.0°C 증가한 것으로 보고되었다. 지구온난화 1.5°C 특별보고서(IPCC, 2018)에 의하면, 온난화가 심해질수록 전

지구 기후시스템이 급격하고 비가역적인 변화를 할 가능성이 매우 증가한다. 만약 아무런 대응 없이 현재 상황이 지속된다면 2030년에서 2050년 사이에 지구온난화가 약 1.5°C 초과할 것이라고 예측하였다. 따라서 기온 상승을 일으키는 원인 중 하나인 온실가스 배출을 규제하는 기후 정책 수립 및 이행이 절실한 상황이다(Tang et al., 2022).

이에 2015년 유엔기후변화협약 당사국총회에서 195 개국이 참여하여 채택한 파리협정(Paris Agreement)은 전 지구 평균 기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C보다 낮은 수준을 유지하고, 1.5°C를 넘지 않도록 노력하는 것을 목표로 내걸고 있으며, 이에 따라 당사국들은 온실가스 감축목표를 제출하고 이행을 위한 국가 정책 등을 수립하고 있다. 특히 온실가스 중에서도 전 지

*Corresponding Author: Jung Choi, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-8152, Fax: +82-2-883-4972
E-mail: jungchoi@snu.ac.kr

구적으로 많이 배출되고, 지구온난화에 상대적으로 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 탄소 배출 규제에 큰 관심이 쏠리고 있다(Li et al., 2022). 탄소화합물 중 지구온난화를 일으키는 주범으로 여겨지는 CO₂는 방출되었을 때, 대기 중에 오래 체류하여 전 세계적인 기후에 막대한 영향을 미치는 물질이다. 이에 파리협정의 성공적인 이행을 위하여 모든 국가가 CO₂ 순 배출량 제로(탄소중립)를 목표로 하여 기후변화 대응에 대처하고자 노력하고 있다. 우리나라의 경우, 2030년까지 2017년 대비 온실가스 배출량을 24.4% 감축하는 것을 목표로 제시하였으며(ME, 2020), 2050 탄소중립을 위하여 “에너지 전환 및 저탄소화 정책”, “기업의 탄소중립 의무화” 등 탄소 배출량 감소를 위한 다양한 정책을 시행하고 있다. 이와 같은 노력을 감안하여 탄소중립의 실현으로 발생하는 기후변화에 대한 분석 또한 활발히 이뤄지고 있다(Shim et al., 2021; Tebaldi et al., 2021; Kong et al., 2022; Li et al., 2022; Tang et al., 2022). 그러나 이들 연구는 음의 복사 강제력을 갖고 있는 에어로졸의 저감효과를 함께 고려한 연구들으로써, 탄소 배출량 규제의 효과를 독립적으로 평가하기에 어려움이 있다. 따라서 탄소중립에 의한 동아시아 및 한반도의 기후변화 시나리오를 보다 정확하고 구체화하기 위해서는 탄소 배출량의 조절 효과만을 고려한 정량적인 분석이 필요하다. 지구온난화와 더불어 대기오염 또한 인류 건강을 해치는 가장 큰 요인으로 보고되었다. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에 따르면, 2016년 당시 대기 오염으로 인하여 뇌졸중, 심장병, 폐암 및 만성 호흡기 질환으로 약 170만명이 사망하는 등 전 세계 대부분의 인구(99%)가 권고 농도 이상의 대기오염물질에 노출되고 있다(WHO, 2016). 따라서 인간의 생명에 직접적인 영향을 미치는 대기오염을 해결하기 위해 많은 국가들이 관심을 갖고 있으며, 우리나라 또한 이를 위해 “미세먼지 저감 대책”, “대기질 개선 행동 계획” 등 다양한 대기질 개선 정책을 추진하고 있다(ME, 2019).

대기오염을 유발하는 물질인 NO_x, SO_x, OC (Organic Carbon), BC (Black Carbon), O₃, CH₄ 등은 주로 배출 후 첫 10년 이내로 지구 복사 균형에 영향을 끼치기 때문에 근기 기후변화유발물질(Near-Term Climate Forcers, NTCFs)이라 불린다(Shindell et al., 2013; Allen et al., 2021). Fu et al. (2020)에 따르면, 전 지구 평균 NTCFs의 복사 강제력(Effective Radiative Forcing, ERF)은 인간 활동에 의해 발생하는 황산염, 질산염 등과 같이 태양빛을 산란시키는 에어로졸들은 음의 복사 강제력을 갖으며, 먼지, 오존 전구체, BC, CH₄ 등과 같이 태양빛을 흡수하는 에어로졸들은 양의 복사 강제력을 갖는다. 음의 복사 강제력은 대기

의 냉각 효과를 유발하고, 양의 복사 강제력은 대기의 온난화를 유발한다. 이와 같이 서로 반대되는 복사 강제력으로 인해 에어로졸 효과는 복잡하고 종종 불확실한 결과를 야기한다. NTCFs는 대기에 10년 이내로 머무르기 때문에 즉각적인 효과는 주로 배출 지역 근방에서 발생하나, 지구 복사 균형과 기후에 미치는 영향은 넓은 범위에서 심각한 결과를 초래할 수 있다(Li et al., 2022).

NTCFs 강제력은 공간적으로 균일하게 나타나지 않아 지역 단위의 NTCFs가 각 지역과 전 지구에 미치는 영향이 다를 수 있다(Shindell et al., 2013). 각 지역에서 배출된 에어로졸로 인한 영향이 나타난 지역적 차이는 지역 순환을 바꿀 수도 있다. 따라서 각 지역에서의 NTCFs가 대기질 및 기후에 미치는 영향에 대해 알기 위해서는 지역적인 관점에서 분석하는 것이 필요하다. NTCFs 감축으로 인한 대기질 및 기후와 관련한 많은 연구가 진행되고 있으나(Kloster et al., 2010; Collins et al., 2013; Collins et al., 2017; Allen et al., 2020; Fu et al., 2020; Allen et al., 2021; Hassan et al., 2022; Li et al., 2022; Xie et al., 2023), 한반도를 포함한 동아시아 근 미래 기후에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구는 부재하다. 우리나라의 경우 중국에서 발생한 에어로졸의 장거리 이동에 막대한 영향을 받기 때문에 NTCFs 농도가 한반도 대기질 및 기후에 미치는 영향에 대해 알기 위해서는 동아시아 영역에 집중해서 분석할 필요가 있다.

따라서 탄소 배출량이 전 지구적으로 균일하게 감소하여도 지역별로 불균일한 효과가 나타날 수 있고, 지역적으로 오염물질의 배출량이 다르더라도 대기의 수송에 의해 효과가 확산될 수 있다(Shindell et al., 2013; IPCC, 2021; Liu et al., 2022; Li et al., 2023). 본 연구는 탄소중립과 대기질 개선 정책을 독립적으로 고려하여 각 정책이 한반도 및 동아시아 근 미래 기온에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 살펴보았다. 다음 2장에서는 사용된 미래 기후변화 시나리오 및 실험 자료, 분석 방법을 제시하였고, 3장에서는 기후인자들의 분석 결과를 제시하였다. 마지막으로 4장은 본 연구를 통해 내포하고자 하는 내용을 요약 및 토의로 결론지었다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 공통사회 경제 시나리오(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 자료

탄소중립과 대기질 개선 정책을 실현하였을 때의 근 미래 동아시아 기후변화를 살펴보기 위하여 공통사회 경제 시나리오(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)를 고려한 Coupled Model Intercomparison Project

phase 6 (CMIP6)의 실험들을 바탕으로 분석을 진행하였다. SSPs는 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 6차 평가보고서를 위해 제안되었으며, 2100년을 기준으로 복사강제력, 사회 경제적 구조 및 기후변화에 대한 완화, 적응에 따라 크게 5개의 미래 기후변화 시나리오로 나뉘어져 있다. SSP1은 친환경 성장 발전으로 저탄소 에너지원을 사용하고, 빠르게 대기질 개선 정책을 실행하는 시나리오이다. 반면, SSP3는 탄소 배출량이 SSP1에 비해 높고, 느린 대기질 개선 정책을 실행하는 시나리오이다. SSP2는 중도 성장 경로로 SSP1과 SSP3의 중간 시나리오이다. 양극화 성장 경로인 SSP4는 주요 배출 지역에선 저탄소 에너지원에 대한 기술을 빠르게 개발하지만 나머지 지역에선 개발 속도가 느리며 대기질 개선에도 느린 시나리오이다. 마지막으로 SSP5는 화석연료 의존 발전 시나리오이자 광범위하게 대기질을 개선하는 시나리오이다.

이러한 SSP 시나리오 중에서 본 연구는 기후변화 완화 및 대응 정책에 소극적인 고 탄소 배출 시나리오 SSP3-7.0, 강한 대기질 개선 정책 시나리오인 SSP3-7.0-lowNTCF, 탄소중립 및 대기질 개선 정책이 동시에 고려된 시나리오인 SSP1-1.9를 비교 분석하였다 (Fig. 1a, Table 1). CH₄는 대기 중 체류시간이 짧아 NTCF로 분류되지만, 본 연구에서는 CO₂와 함께 ‘탄소’의 범위로 분류하였다. 즉, 고 탄소 배출 시나리오

는 CO₂와 CH₄ 모두가 높은 농도상태를 의미하며, 탄소중립 시나리오는 CO₂와 CH₄ 모두 저감했을 경우를 가정한다. 고 탄소 배출이자 대기질 개선 정책에 소극적인 시나리오인 SSP3-7.0의 경우, 2100년 CO₂의 농도가 2025년의 2배가 되게 지속적으로 증가하며, NTCF 물질 농도는 2050년까지 증가하다 이후 감소한다(Fig. 1a 빨간색 선). SSP3-7.0-lowNTCF 시나리오의 경우, SSP3-7.0과 동일한 고 탄소 배출 시나리오이나 CH₄를 제외한 non-methane NTCFs (NMNTCFs)의 배출을 강력히 규제하여 각 물질의 농도가 SSP1 시나리오를 따라 감소하는 것을 가정한 시나리오이다 (Fig. 1a 노란색 선). 친환경 성장 발전 SSP1의 한 종류인 SSP1-1.9 시나리오에는 화석 연료 사용을 감소하고, 재생 가능 에너지와 효율적인 에너지 사용을 추진하는 시나리오로 2050년대에 이르러 탄소 순 배출량이 0이 되는 상황을 가정한다(Fig. 1a 파란색 선).

세 시나리오 모두 5개의 기후 모델 자료(Table 2)를 사용하였으며, 각 모델 자료의 수평 해상도를 2.5° × 2.5°로 내삽 후 다중 모형 앙상블(multi-model mean, MMM)을 하여 분석하였다. MMM 방식은 개별적인 모델의 편이로부터 발생한 불확실성의 효과를 줄일 수 있다. 폭염 극한기온지수는 일 최고기온 자료를 제공하지 않는 GISS-E2-1-G 모델을 제외한 4개의 기후 모델을 사용하였다. MMM 값의 통계적 유의성은 bootstrap re-sampling 방법을 이용하여 검증하였다. 중복을 허

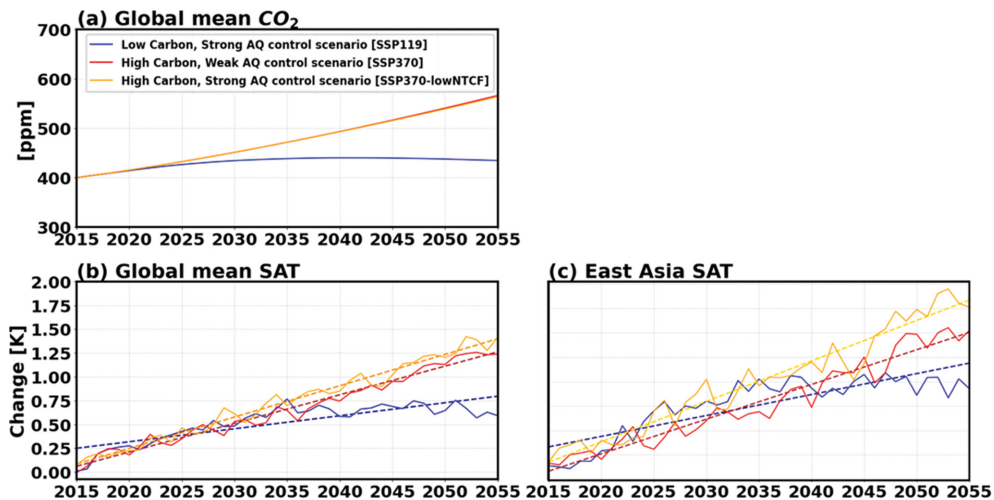


Fig. 1. (a) Time series of annual mean global CO₂ concentration, surface air temperature (SAT) changes averaged over the (b) globe and (c) East Asia (15~60°N, 70~150°E) from the three SSP scenarios. Changes are defined by a departure from 10-year climatology over the period of 2005~2014. The blue, red, and yellow lines indicate the SSP1-1.9 (low carbon and strong air quality control scenario), SSP3-7.0 (high carbon and weak air quality control scenario), and SSP3-7.0-lowNTCF (high carbon and strong air quality control scenario). In respectively, (b) and (c), the solid and dashed lines denote the multi-model mean (MMM) and their linear trends.

Table 1. List of SSP scenarios used in this study and definition of mitigation effects.

SSP scenarios	Description
SSP3-7.0	High carbon emissions (CO ₂ emissions double by 2100) Weak air quality control
SSP1-1.9	Low carbon emissions (CO ₂ emissions cut to net zero around 2050) Strong air quality control
SSP3-7.0-lowNTCF	High carbon emissions (same to SSP3-7.0) Strong air quality control (same to SSP1-1.9)
Mitigation effects	Description
SSP1-1.9 minus SSP3-7.0-lowNTCF	Carbon neutrality effect only
SSP3-7.0-lowNTCF minus SSP3-7.0	Air quality control effect only

Table 2. List of climate models used in this study.

Model	Institution	Country	Resolution
CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Météorologiques of the Earth System Model	France	1.4° × 1.4°
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	1° × 1.25°
GISS-E2-1-G	NASA Goddard Institute for Space Studies	USA	2.5° × 2.0°
MIROC6	The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japan	1.4° × 1.4°
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute	Japan	1.1° × 1.1°

용한 무작위 추출로 1,000개의 MMM 값을 생성하고, 이 값들의 2.5~97.5 백분위가 0을 지나지 않을 때 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의미한 결과인 것으로 해석하였다.

2.2 분석방법

동아시아의 근 미래 기온변화를 살펴보기 위해 본 연구에서는 15~60°N, 70~150°E 영역을 분석하였다. 분석은 관측 기후강제력이 처방된 과거 기후 실험 (Historical experiments, 2005~2014년)과 SSP 시나리오의 근 미래 기후(2045~2054년)의 비교를 통해 이루어졌다. 특히 근 미래 기후변화는 SSP 시나리오와 과거 기후 차이로 정의하였다.

본 연구에서는 평균기온 분석을 위한 월별 지표면 대기 온도(surface air temperature, SAT)와 폭염의 특성 분석을 위한 일 최고기온(daily maximum temperature, TX) 자료가 사용되었다. 폭염의 강도와 빈도는 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)에서 제안한 정의와 약어를 사용하였다(Klein Tank et al., 2009). 즉, 폭염의 강도는 각 해마다 가장 높은 일 최고기온(annual maximum value of TX, TX_x)으로 정의되었으며, 폭염의 빈도는 각 해마다 산출된 일 최고기온의 90 백분위수에 대한 과거 기후 평균값

을 구하고, 이 보다 높은 일 최고기온을 나타내는 각 해의 날 수(count of days where TX > 90th percentile, TX90p)를 뜻한다. 지표면 대기 온도는 해양을 포함한 동아시아 전 지역(15~60°N, 70~150°E)의 평균 변화에 대해 살펴보았으며, 폭염과 관련된 극한기온지수는 육지에서의 변화만을 고려하였다.

대기질 개선 정책 실현에 의한 기후변화 완화효과(mitigation effects)는 탄소 배출량이 같지만 대기질 개선 정책이 다른 두 시나리오인 SSP3-7.0 (고 탄소 배출, 약한 대기질 개선 정책)과 SSP3-7.0-lowNTCF (고 탄소 배출, 강한 대기질 개선 정책)의 차이로 정의하였다. 탄소중립 정책 실현에 의한 완화효과는 대기질 개선 정책은 같지만 탄소 배출량이 다른 두 시나리오인 SSP3-7.0-lowNTCF (고 탄소 배출, 강한 대기질 개선 정책)와 SSP1-1.9 (저 탄소 배출, 강한 대기질 개선 정책)의 차이로 정의하였다(Table 1의 요약 참조).

3. 결 과

3.1 동아시아 평균기온 변화

각 시나리오에서 나타나는 전 지구 기온 변화를 확인하기 위하여 과거 기온 평균(2005~2014년)에 대한 편차를 시계열로 나타냈다(Fig. 1b). 모든 시나리오에

Table 3. Linear trends of surface air temperature (SAT), annual maximum of daily maximum temperature (TXx), and warm days (TX90p) for each SSP scenario.

Variables	Region	SSP scenarios	Linear trend	Unit
SAT	Global	SSP1-1.9	0.14	[K decade ⁻¹]
		SSP3-7.0	0.30	
		SSP3-7.0-lowNTCF	0.33	
SAT	East Asia	SSP1-1.9	0.21	[K decade ⁻¹]
		SSP3-7.0	0.36	
		SSP3-7.0-lowNTCF	0.41	
TXx	East Asia	SSP1-1.9	0.22	[K decade ⁻¹]
		SSP3-7.0	0.36	
		SSP3-7.0-lowNTCF	0.43	
TX90p	East Asia	SSP1-1.9	2.21	[days decade ⁻¹]
		SSP3-7.0	4.01	
		SSP3-7.0-lowNTCF	5.03	

[2045-2054] minus [2005-2014]

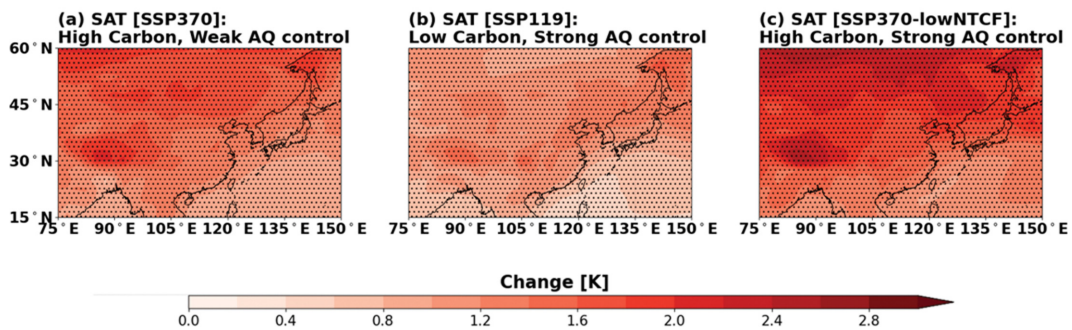


Fig. 2. The MMM SAT changes in the period of 2045–2054 (unit: K) for (a) the SSP3-7.0, (b) SSP1-1.9, and (c) SSP3-7.0-lowNTCF scenarios. Statistically significant changes at the 95% confidence level are dotted.

서 지구평균 기온이 유의미하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 대기질 개선 시나리오(SSP3-7.0-lowNTCF)에서 가장 크게 증가하는 추세를 보였으며(0.33 K decade⁻¹), 탄소중립 및 대기질 개선 복합시나리오(SSP1-1.9)에서 가장 작은 추세를 보였다(0.14 K decade⁻¹; Table 3). 이는 대기질 개선 정책으로 지구온난화가 가속될 수 있음을 시사하며, 선행연구와 일치한 결과이다(Allen et al., 2020; Allen et al., 2021; Hassan et al., 2022; Li et al., 2023). 동아시아 지상기온 변화에서도 지구평균 기온과 유사하게 탄소중립 실현 및 대기질 개선 복합시나리오에서 가장 작은 상승 추세를 보이며(0.21 K decade⁻¹), 대기질 개선 시나리오에서 가장 큰 온난화가 나타났다(0.41 K decade⁻¹; Table 3). 모든 시나리오에서 동아시아 영역의 기온 상승이 지구평균 기온 상승보다 크고, 빠르게 나타났으며, 이로 인해 2050년대에 이르렀을 때는, 지구 영역에 비해 기

온 변화가 보다 큰 것을 확인하였다.

Figure 1에서 탄소중립 및 대기질 개선 복합 시나리오의 경우, 2030년대 후반 이후의 온도 반응이 뚜렷하다(Figs. 1b, c의 파란색 선). 따라서 2015~2055년 전 기간에 걸친 선형적 추세분석은 각 정책의 단일 완화효과를 정량적으로 분석하기에 어려움이 있다. 이에 각 정책의 효과가 뚜렷해지는 2050년대(2045년부터 2054년까지의 평균)의 동아시아 지상기온의 변화를 Fig. 2에 표시하였다. 세 시나리오 모두 과거 대비 기온이 모든 동아시아 지역에서 유의미하게 증가함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 기준이 되는 고 탄소 배출 시나리오에서는 티베트 지역과 60°N 부근의 고위도 지역에서 기온 증가가 보다 두드러졌다(Fig. 2a). 탄소중립 및 대기질 개선 복합 시나리오는 상대적으로 작은 변화를 보여 과거 대비 기온 변화가 비교적 약하게 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 2b). 반면, 대

기질 개선 시나리오의 경우, 전반적으로 큰 기온의 변화를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 특히 중국 내륙 지방과 고위도 지역에서 과거 대비 기온 변화가 약 +2°C 이상인 것을 볼 수 있다(Fig. 2c).

탄소중립과 대기질 개선 정책에 의한 기후변화 완화효과를 Fig. 3에 나타냈다. 탄소중립 정책의 완화효과를 살펴보면, 일부 지역을 제외하고 전반적으로 음

의 값을 가져 온난화가 유의미하게 감소하는 경향을 보인다(Fig. 3a). 이는 대기 중으로 방출 시 장기간 체류하여 온난화를 일으키는 CO₂뿐만 아니라 단기간 체류하는 CH₄가 제거됨으로써 나타나는 결과로 해석할 수 있다. 반면, 대기질 개선 정책의 완화효과는 중국 화북 일부 지역과 온난화가 상대적으로 약한 위도 30°N 이하의 저위도 지역을 제외한 동아시아 전역의

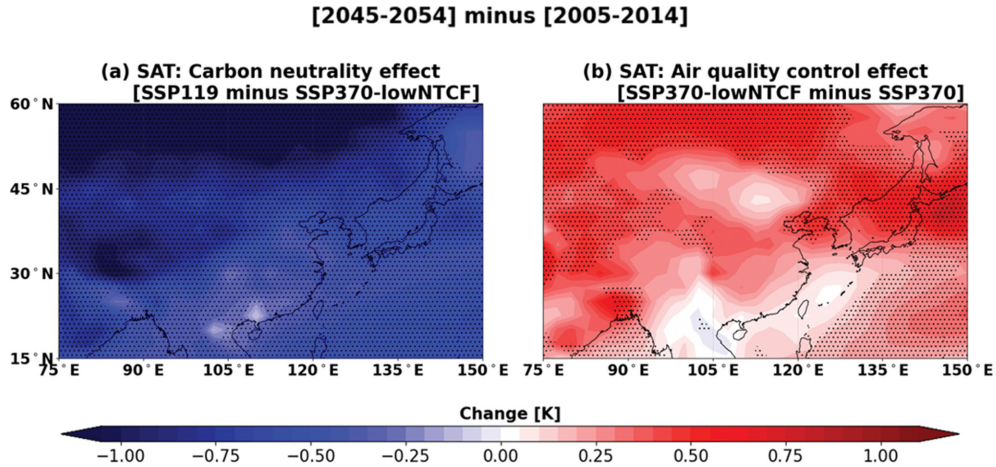


Fig. 3. Mitigation effects of (a) carbon neutrality and (b) air quality control in MMM SAT changes in the period of 2045~2054 (unit: K). Carbon neutrality effect is defined as the difference between the SSP1-1.9 and SSP3-7.0-lowNTCF scenarios (i.e., Fig. 2b minus 2c). Air quality control effect is defined as the difference between the SSP3-7.0-lowNTCF and SSP3-7.0 scenarios (i.e., Fig. 2c minus 2a). Statistically significant differences at the 95% confidence level are dotted.

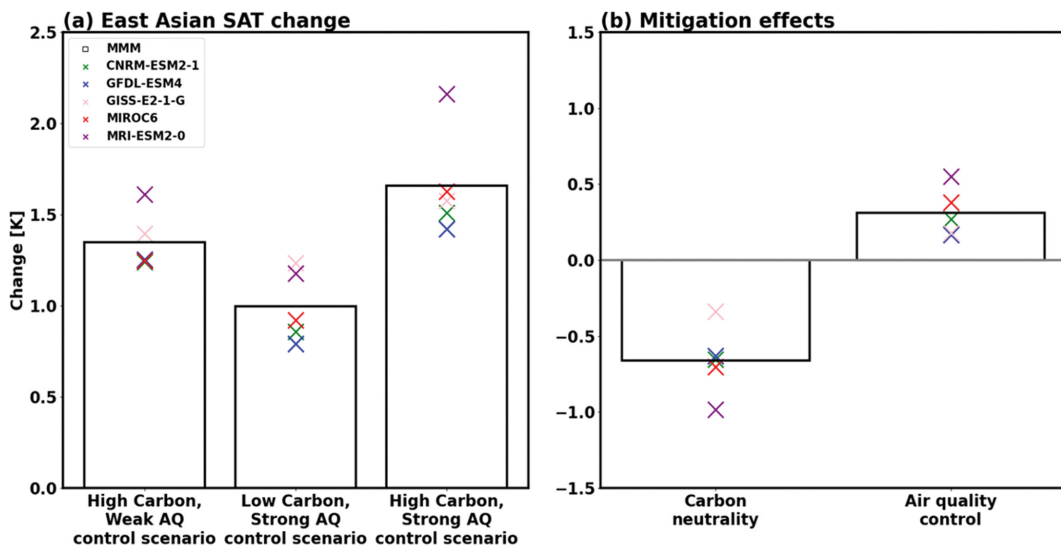


Fig. 4. (a) East Asian SAT changes (15~60°N, 70~150°E) for each SSP scenario in the period of 2045~2054. (b) Mitigation effects of carbon neutrality and air quality control on East Asian SAT changes in the period of 2045~2054. MMM and individual models are shown by box and crosses, respectively. Individual model names are listed in the legend.

온난화를 유의미하게 증가시키는 것으로 확인되었다 (Fig. 3b). 중국 화북 일부 지역과 위도 30°N 이하 지역, 즉 남동 아시아는 오존 전구체인 질소 산화물(NO_x)의 배출로 인해 대류권 내 오존 농도가 1990년대 이후 급격히 증가하고 있다(Wang et al., 2022; S. Li et al., 2023). 양의 복사강제력을 갖는 대류권 오존의 감축으로 인해 온난화가 약화하는 것으로 볼 수 있다. 이 두 지역에서 MMM의 결과가 유의미하지 않은 것은 다른 지역에 비해 큰 모델간 반응 편차로부터 기인할 수 있는데, 이는 에어로졸에 의한 국지적 반응이 에어로졸 수송 또는 순환장 변화에 의한 반응 보다 모델간 불확실성이 크다는 것을 의미한다.

Figures 2, 3을 통해 각 정책의 실현이 과거 대비 근 미래 기후에 미치는 효과가 상반된다는 결론을 얻었다. Figure 4는 정량적인 분석을 위해 동아시아 지역에서 평균 된 값을 표시하였다. 분석에 사용된 5개의 기후 모델 별 값을 나타내어 개별 모델의 불확실성을 확인하고, 평균 된 MMM과의 차이를 나타내었다. 세 시나리오 모두 과거 기온 대비 기온이 1°C 이상 상승하였다(Fig. 4a). GFDL-ESM4 모델(파란색)은 모든 시나리오에서 MMM에 비해 기온 변화를 과소모의 하였고, MRI-ESM2-0모델(보라색)의 경우 다소 과대모의하는 경향을 보였다. 모델 간 최대-최소의 차이는 대기질 개선 정책만을 고려한 시나리오에서 가장 크게 나타났다. Figure 4b는 탄소중립 및 대기질 개선 정책 각각의 단일 완화효과를 나타낸다. 이는 에어로졸의 효과가 모델별로 다소 상이함을 의미한다. 탄소중립 정책의 실현효과는 약 -0.66°C의 크기로 동아시아 온난화를 약화시키는 반면, 대기질 개선 정책만을 실현하였을 때는 약 0.31°C의 크기로 동아시아 온난화가 강화되었다. 이 결과는 대기질 개선 정책은 동아시아 온난화에 부정적인 영향을 미침을 의미한다.

3.2 동아시아 폭염 강도 및 빈도 변화

지구온난화는 기온의 평균 변화 뿐만 아니라 극한 기후의 강도 및 빈도에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Stott et al., 2004; Trenberth et al., 2012; Shepherd et al., 2016; Stott et al., 2016; Diffenbaugh et al., 2017; Wang et al., 2017). 온난화가 진행됨에 따라 극한기후의 강도가 더욱 세지고, 오래 지속되는 현상이 발생하고 있다(Easterling et al., 2000; Trenberth et al., 2015). 극한기후의 강도 및 빈도 증가 추세는 인간의 건강 뿐만 아니라 수자원, 생태계, 농업, 산업, 에너지 등 다양한 영역에 걸쳐 직접적인 피해가 급증할 것으로 우려되므로(Sillmann et al., 2008; KEI, 2011), 탄소중립 및 대기질 개선 정책 실현에 의한 효과에 대한 분석이 필요하다.

Figure 5는 동아시아 육지에서 평균 된 폭염 강도(TXx) 및 빈도(TX90p)의 시계열 변화를 보여준다. 두 변수 모두 2035년까지는 시나리오 간 차이가 다소 미미하다가, 이후부터 각 시나리오의 효과가 커진다. 두 폭염 변수 모두 지상기온의 변화를 나타낸 Fig. 1과 유사한 결과를 보였다. 탄소중립 및 대기질 개선 복합 시나리오의 경우, 2015~2055년 동안 폭염 강도 및 빈도는 각각 약 0.22 K decade⁻¹ 및 2.21 days decade⁻¹로 세 시나리오 중 가장 작게 증가한다(Table 3). 대기질 개선 정책만이 고려된 시나리오의 경우, 가장 가파르게 증가하여 약 0.43 K decade⁻¹ 및 5.03 days decade⁻¹에 이르는 것을 확인하였다. 결과적으로 탄소중립 및 대기질 개선 정책이 성공적으로 실현되어도, 과거 기후에 비해 2055년의 동아시아 폭염 강도는 1.2 K 증가할 것이며, 폭염 빈도는 10일 이상 증가할 것으로 나타났다(Figs. 5a, b).

동아시아 지역 별 효과와 각 정책에 의한 완화효과를 살펴보기 위해 폭염 지수(TXx, TX90p)의 2045~

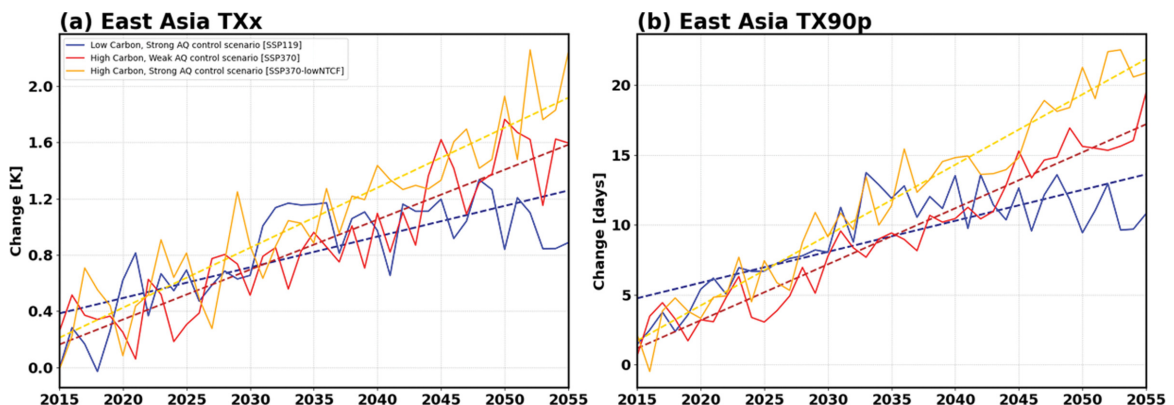


Fig. 5. Same as Fig. 1c but for (a) annual maximum of daily maximum temperature changes (TXx, unit: K) and (b) number of days with maximum temperature above the 90th percentile of the base period (TX90p, unit: days) averaged over East Asia.

2054년 변화를 공간장 분포로 나타내었다(Fig. 6). 평균기온의 변화가 고위도에서 크게 나타났다면(Fig. 2), 폭염 강도의 변화는 중국 화북 및 서북(30-50°N) 지역에서 크게 나타나며, 각 지역별 기준(90th percentile)

으로 정의된 상대적 폭염 빈도는 이보다 저위도 지역에서 강하게 나타났다. 가장 약한 동아시아 온난화를 보인 탄소중립 및 대기질 개선 복합 시나리오의 경우, 전반적으로 폭염 강도는 약 0.5-1.5°C, 빈도는 약 10~

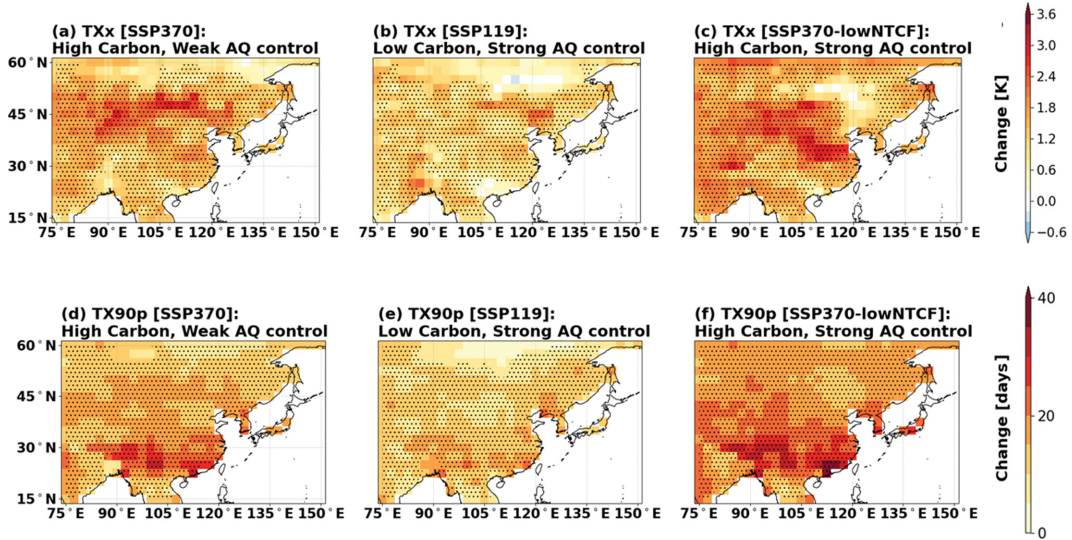


Fig. 6. (top) TXx and (bottom) TX90p changes in the period of 2045~2054 for (a, d) the SSP3-7.0, (b, e) SSP1-1.9, (c, f) SSP3-7.0-lowNTCF. Statistically significant changes at the 95% confidence level are dotted.

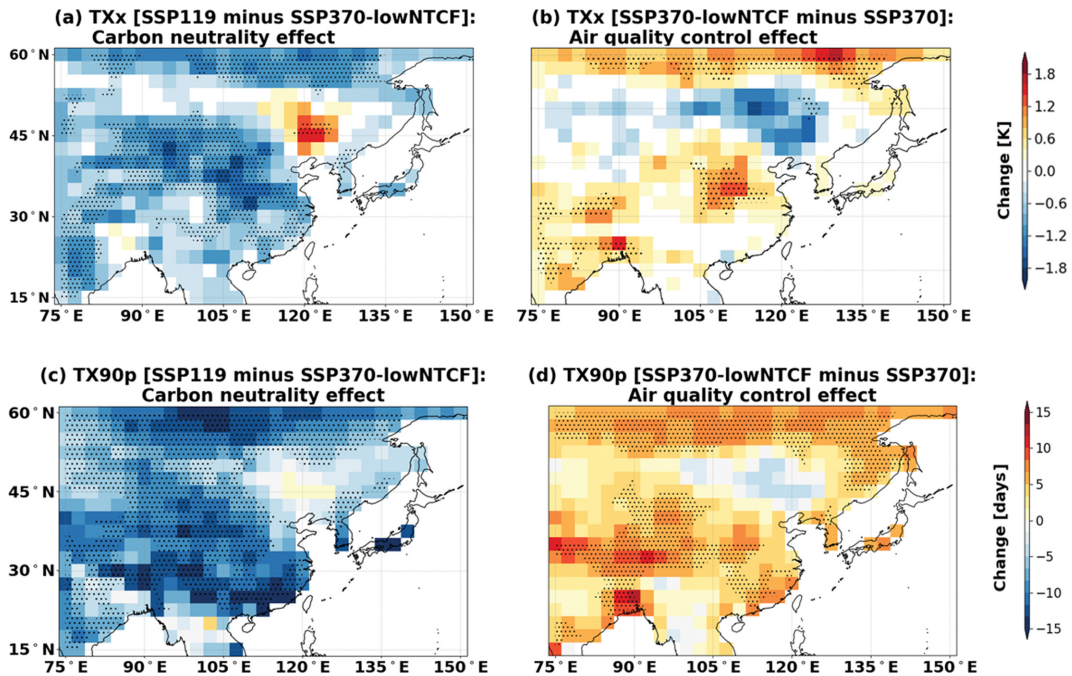


Fig. 7. Same as Fig. 3 but for (a, b) TXx and (c, d) TX90p changes in the period of 2045~2054. Statistically significant changes at the 95% confidence level are dotted.

20일 정도 증가하는 것으로 나타났다(Figs. 6b, e). 이에 반해 가장 강한 온난화가 나타난 대기질 개선 시나리오는 전반적으로 최대 약 3.5°C 이상, 약 40일 이상의 폭염 지수의 증가를 보인다(Figs. 6c, f). 고 탄소 배출 시나리오의 경우 평균기온과 유사하게 이들 두 시나리오의 중간 값을 보인다(Figs. 6a, d). 한반도와 일본의 경우, 모델 간 편차가 커서 MMM 값이 통계적으로 유의미하지 않은 특성이 나타난다.

Figure 7은 탄소중립 및 대기질 개선 각 정책에 의한 기후변화 완화효과를 나타낸다. 탄소중립 정책의 완화효과는 폭염 강도 및 빈도에 대해 만주 일부 지역을 제외하고 동아시아 전 영역에서 유의미한 음의 값을 보인다(Figs. 7a, c). 고 탄소 배출시나리오보다

탄소중립을 실현하였을 때, 과거 대비 근 미래의 폭염 강도는 최대 1.5°C 작아지고, 빈도는 최대 15일 덜 발생하는 것으로 나타났다. 대기질 개선 정책에 의한 완화효과는 50°N 근처와 30°N 이하 일부 지역을 제외하고 동아시아 대부분의 지역에서 양의 값을 보였다(Figs. 7b, d). 대기질 개선 정책에 의한 효과가 유의미하지는 않지만 음의 값으로 나타나는 중국 화북 지역은 대류권 오존에 의한 대기오염이 큰 지역이다(Wang et al., 2022). 대류권 오존은 양의 복사강제력을 갖는 NTCF의 한 종류이므로, 오존 농도의 감소가 온난화 약화에 일부 기인했을 것으로 유추할 수 있다. 또한 Figs. 7b, d에서 서 벵골이 위치한 부근에서 강한 양의 편차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 서 벵

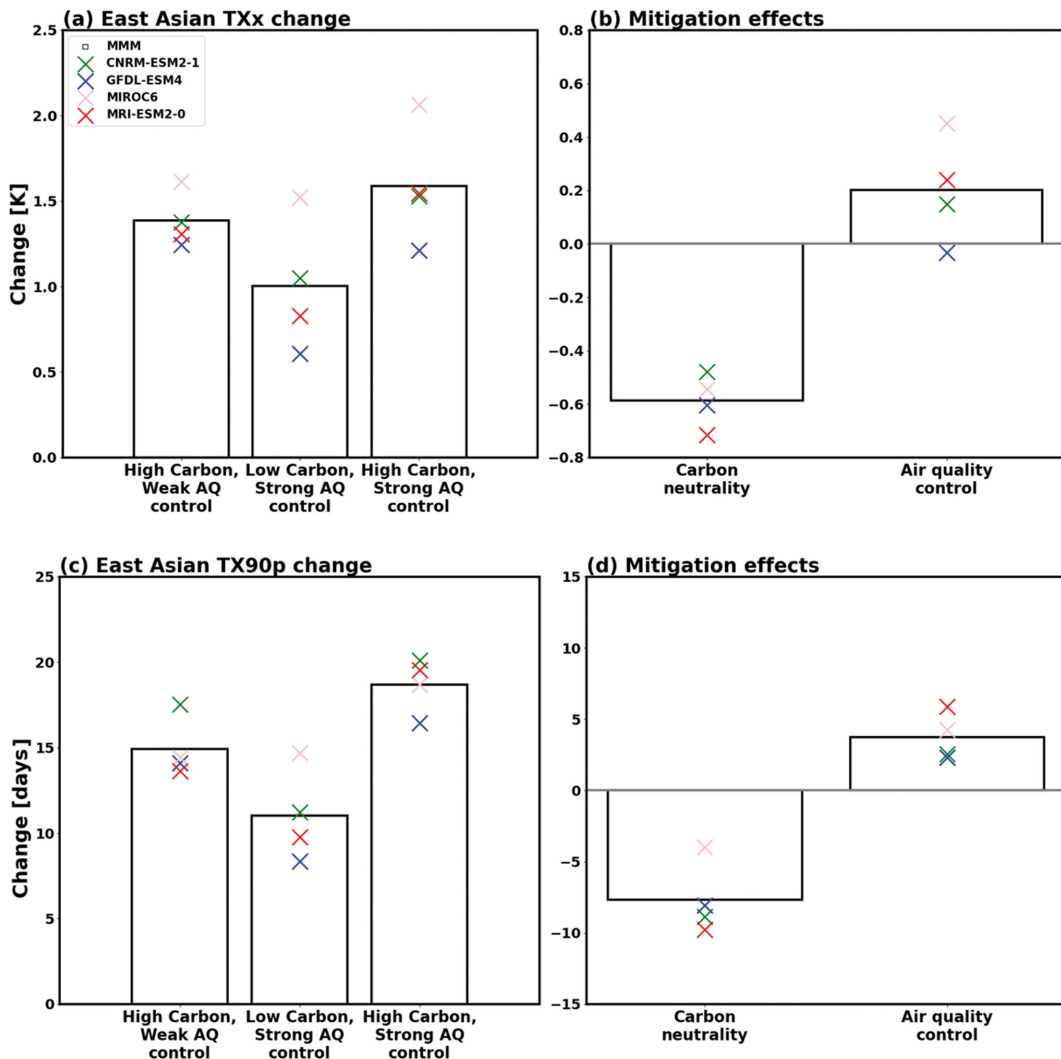


Fig. 8. Same as Fig. 4 but for (a, b) TXx and (c, d) TX90p.

골의 수도인 콜카타 지역은 대기 오염이 매우 심각한 도시 중 하나로, 주 오염원은 자동차 배기가스에 의한 황산염과 질산염이다(Haque et al., 2017). 이 물질들은 음의 복사강제력을 갖기 때문에, 이들의 농도 감소에 의한 온난화 강화효과가 나타난 것으로 유추할 수 있다. 한반도의 경우, 북한 일부 지역에서 탄소중립에 의한 폭염 지수의 감소 변화와 대기질 개선에 의한 폭염 빈도의 증가 변화가 유의미한 것으로 나타났다, 남한에서의 유의미한 변화는 보이지 않았다.

동아시아 육지에서 평균 된 폭염 지수의 MMM과 개별모델 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 과거 대비 근 미래에 세 시나리오 모두 동아시아 지역의 폭염 강도가 1°C 이상 증가하는 것을 보이며, 고 탄소 배출 시나리오에 비해 다른 두 시나리오에서의 모델 간 차이가 다소 크다(Fig. 8a). 폭염 빈도의 경우, 과거 대비 근 미래에 세 시나리오 모두 10년 동안 10일 이상 증가하는 것을 보인다. 폭염 강도와 마찬가지로 고 탄소 배출 시나리오에서 모델 간 편차가 가장 작다(Fig. 8c). MRI-ESM2-0 모델은 모든 시나리오에서 MMM에 비해 큰 평균기온의 변화를 모의했지만(Fig. 4a), 폭염 강도(TXx)의 경우 MMM에 비해 작거나 비슷한 반응을 보였고(Fig. 8a), 폭염 빈도의 경우 시나리오에 따라 다른 반응을 보였다. 한편 MIROC6는 평균기온은 모든 시나리오에서 MMM과 비슷한 반면, 폭염 강도는 MMM에 비해 매우 강우 강하게 증가하였다. 이는 기후강제력에 따른 평균기온과 폭염 지수의 반응이 선형적으로 나타나지 않음을 의미한다.

탄소중립과 대기질 개선 정책이 폭염 지수에 미치는 완화효과를 Fig. 8b와 8d에 보였다. 폭염 강도에 대한 탄소중립 실현의 완화효과는 약 -0.59°C로 대기질 개선 정책의 효과(약 0.20°C)보다 약 3배정도 큰 것으로 나타났으며, 폭염 빈도에 대해서는 약 2배의 크기로 나타났다(7.7일 감소 대 3.8일 증가). GFDL-ESM4를 제외한 나머지 3개의 모델에서 탄소중립과 대기질 개선 정책이 폭염 강도 및 빈도에 대해 반대 부호의 완화효과 즉, 탄소중립 정책에 의해서는 감소, 대기질 개선 정책에 의해서는 증가를 갖는 것으로 나타났다. GFDL-ESM4도 폭염 빈도에 대해서는 두 정책의 완화효과가 반대 부호인 것으로 나타났지만, 폭염 강도에 대한 완화효과는 두 정책 모두에서 줄어드는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 토의

본 연구는 CMIP6에서 제공하는 SSP 시나리오를 기반으로 탄소중립과 대기질 개선 정책이 동아시아 근 미래 기후변화에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 기후 변화 완화 및 대응 정책에 소극적인 고 탄

소 배출 시나리오인 SSP3-7.0를 중심으로 2050년대 탄소중립 및 대기질 개선 실현을 가정한 SSP1-1.9와 강력한 대기질 개선 정책만을 고려한 SSP3-7.0-lowNTCF 시나리오를 비교하여 각 정책이 동아시아 근 미래(2050년대)의 평균기온, 폭염 강도 및 폭염 빈도에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보았다.

2005년부터 2055년까지의 전구 및 동아시아 영역의 지표면 대기 온도 변화를 분석한 결과, 탄소중립과 대기질 개선 정책을 동시에 실현할 때 전구 및 동아시아에서의 평균기온은 증가하는 것으로 확인되었다. 탄소중립의 실현은 온난화를 약화시키는 반면, 대기질 개선 정책의 완화효과는 온난화를 강화시킨다. 이에 대기질 개선 시나리오에서 고 탄소 배출 시나리오보다도 큰 가장 강한 온난화가 나타났다. 또한, 전구보다 동아시아 영역에서 각 정책의 효과가 더욱 두드러지는 것을 확인하였다. 이러한 특징은 폭염 강도(TXx) 및 폭염 빈도(TX90p) 분석에서도 유사하게 나타났다. 폭염 강도 및 빈도 또한 모든 시나리오에서 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 탄소중립 및 대기질 개선을 고려한 시나리오의 경우, 2040년대부터 증가 경향이 완만해지는 반면, 고 탄소 배출 시나리오와 대기질 개선 시나리오의 경우, 지속적으로 가파르게 증가하는 양상을 보였다.

시나리오 간의 비교 분석을 통해 탄소중립과 대기질 개선 정책의 완화효과를 평가하였다. 동아시아의 평균기온의 경우, 탄소중립 실현의 완화효과는 -0.66°C, 대기질 개선의 완화효과는 +0.31°C로 평가되었다. 폭염 강도의 경우, 탄소중립 실현시 -0.59°C, 대기질 개선 시 +0.20°C로 나타났고, 폭염 빈도는 각 정책에 대해 7.7일 감소와 3.8일 증가의 완화효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 완화효과는 모형별로 다소 상이함을 확인하였고, 대체로 대기질 개선(NTCFs 배출량 감축)이 고려된 시나리오에서 모델 간 편차가 크게 나타났다. 이는 지역에 따라 배출되는 오염 물질의 종류와 모델별로 다른 반응에 일부 의존하는 결과라 생각된다.

본 연구 결과는 탄소중립 정책의 경우, 근 미래 동아시아 평균기온과 폭염 강도 및 빈도는 과거 기후 대비 증가하나 가까운 미래에 약화하는 추세를 가짐을 확인하였다. 그러나 에어로졸과 같은 NTCFs 감축을 통한 대기질 개선 정책의 경우, 근 미래 동아시아 전반의 온난화와 폭염 지수를 강화시키는 것으로 나타났다. 즉, 대기질이 개선되면 근 미래 동아시아 온난화가 가파르게 증가할 것으로 예상된다. 이는 지구 온난화 약화에 있어서 대기질 개선 정책과 탄소중립 정책이 양립하기 어려움을 시사한다. 그럼에도 불구하고 대기질 개선은 국민건강과 환경을 위해 반드시 실행되어야 하는 정책이다. 이 것은 한반도 및 동

시아의 온난화가 예상보다 더 강하게 나타날 수 있음을 의미하며, 탄소중립 정책을 보다 적극적으로 강력하게 실행 및 실현되어야 한다는 것을 시사한다. 본 연구 결과는 현재 주목받고 있는 두 기후정책을 시행하였을 때, 30년 후 동아시아 기후에 대한 효과를 정량적으로 설명하고 있으며, 이는 관련 기업과 해당 정책 수립의 배경 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

연구는 한국연구재단 해양-육상-대기 탄소순환시스템 연구사업 “동아시아 지역 탄소 순환 불확실성 진단 연구(2021M3I6A1086807)”와 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “관측기반 온실가스 공간정보 지도 구축 기술개발사업(RS-2023-00232066)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Acosta Navarro, J. C., and Coauthors, 2016: Amplification of Arctic warming by past air pollution reductions in Europe. *Nature Geosci.*, **9**, 277-281, doi:10.1038/NGEO2673.
- Allen, R. J., and Coauthors, 2020: Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 9641-9663, doi:10.5194/acp-20-9641-2020.
- _____, and Coauthors, 2021: Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions. *Environ. Res. Lett.*, **16**, 034010, doi:10.1088/1748-9326/abe06b.
- Bossolasco, A., F. Jegou, P. Sellitto, G. Berthet, C. Kloss, and B. Legras, 2021: Global modeling studies of composition and decadal trends of the Asian Tropopause Aerosol Layer. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 2745-2764, doi:10.5194/acp-21-2745-2021.
- Brauer, M., and Coauthors, 2012: Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution. *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 652-660, doi:10.1021/es2025752.
- Collins, W. J., M. M. Fry, H. Yu, J. S. Fuglestedt, D. T. Shindell, and J. J. West, 2013: Global and regional temperature-change potentials for near-term climate forcers. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 2471-2485, doi:10.5194/acp-13-2471-2013.
- _____, and Coauthors, 2017: AerChemMIP: quantifying the effects of chemistry and aerosols in CMIP6. *Geosci. Model Development*, **10**, 585-607, doi:10.5194/gmd-10-585-2017.
- Cong, Z., S. Kang, S. Gao, Y. Zhang, Q. Li, and K. Kawamura, 2013: Historical trends of atmospheric black carbon on Tibetan Plateau as reconstructed from a 150-year lake sediment record. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 2579-2586, doi:10.1021/es3048202.
- Diffenbaugh, N. S., and Coauthors, 2017: Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **114**, 4881-4886, doi:10.1073/pnas.1618082114.
- Easterling, D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, and L. O. Mearns, 2000: Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, **289**, 2068-2074, doi:10.1126/science.289.5487.2068.
- Fu, B., and Coauthors, 2020: Short-lived climate forcers have long-term climate impacts via the carbon-climate feedback. *Nature Climate Change*, **10**, 851-855, doi:10.1038/s41558-020-0841-x.
- Griffiths, P. T., and Coauthors, 2021: Tropospheric ozone in CMIP6 simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 4187-4218, doi:10.5194/acp-21-4187-2021.
- Haque, M. S., and R. B. Singh, 2017: Air pollution and human health in Kolkata, India: A case study. *Climate*, **5**, 77, doi:10.3390/cli5040077.
- Hassan, T., and Coauthors, 2022: Air quality improvements are projected to weaken the Atlantic meridional overturning circulation through radiative forcing effects. *Commun. Earth Environ.*, **3**, 149, doi:10.1038/s43247-022-00476-9.
- IPCC, 2018: *Global warming of 1.5°C*. Masson-Delmotte V. et al. (ed). World Meteorological Organization, 32 pp.
- _____, 2021: *Climate Change 2021*. Masson-Delmotte, V. et al. (ed). World Meteorological Organization, 2391 pp.
- KEI, 2011: Economic analysis of climate change in Korea. Korea Environment Institute, 165 pp (in Korean).
- Klein Tank, A. M. G., F. W. Zwiers, and X. Zhang, 2009: Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation (Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72). WMO/TD-No1500, [Available online at https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9419].
- Kloster, S., F. Dentener, J. Feichter, F. Raes, U. Lohmann, E. Roeckner, and I. Fischer-Bruns, 2010: A GCM study of future climate response to aerosol pollution reductions. *Climate Dyn.*, **34**, 1177-1194, doi:10.1007/s00382-009-0573-0.
- Kong, R., Z. Zhang, R. Huang, J. Tian, R. Feng, and X. Chen, 2022: Projected global warming-induced ter-

- restrial ecosystem carbon across China under SSP scenarios. *Ecological Indicators*, **139**, 108963, doi:10.1016/j.ecolind.2022.108963.
- Li, B., and Coauthors, 2016: The contribution of China's emissions to global climate forcing. *Nature*, **531**, 357-361, doi:10.1038/nature17165.
- Li, L., and Coauthors, 2022: Mitigation of China's carbon neutrality to global warming. *Nature Commun.*, **13**, 5315, doi:10.1038/s41467-022-33047-9.
- Li, S., and Coauthors, 2023: Rapid increase in tropospheric ozone over Southeast Asia attributed to changes in precursor emission source regions and sectors. *Atmos. Environ.*, **304**, 119776, doi:10.1016/j.atmosenv.2023.119776.
- Li, Y., Z. Wang, Y. Lei, H. Che, and X. Zhang, 2023: Impacts of reductions in non-methane short-lived climate forcers on future climate extremes and the resulting population exposure risks in eastern and southern Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **23**, 2499-2523, doi:10.5194/acp-23-2499-2023.
- Liu, Z., Z. Deng, G. He, H. Wang, X. Zhang, J. Lin, Y. Qi, and X. Liang, 2022: Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. *Nature Rev. Earth Environ.*, **3**, 141-155, doi:10.1038/s43017-021-00244-x.
- Luo, N., Y. Guo, J. Chou, and Z. Gao, 2022: Added value of CMIP6 models over CMIP5 models in simulating the climatological precipitation extremes in China. *Int. J. Climatol.*, **42**, 1148-1164, doi:10.1002/joc.7294.
- ME, 2019: *Ministry of Environment comprehensive plan for managing particulate matter (2020~2024)*. Ministry of Environment Report, 92 pp (In Korean).
- _____, 2020: *2030 National Greenhouse Gas Reduction Target (NDC)*. Ministry of Environment Report, 13 pp (In Korean).
- Polson, D., M. Bollasina, G. C. Hegerl, and L. J. Wilcox, 2014: Decreased monsoon precipitation in the Northern Hemisphere due to anthropogenic aerosols. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6023-6029, doi:10.1002/2014GL060811.
- Shepherd, T. G., 2016: A common framework for approaches to extreme event attribution. *Current Climate Change Reports*, **2**, 28-38, doi:10.1007/s40641-016-0033-y.
- Shim, S. B., S. B. Seo, S.-H. Kwon, J. H. Lee, H. M. Sung, K.-O. Boo, J. C. Ha, J. Y. Byon, and Y.-H. Kim, 2020: Impact of Future Air Quality in East Asia under SSP Scenarios. *Atmosphere*, **30**, 439-454, doi:10.14191/Atmos.2020.30.4.439 (In Korean with English abstract).
- _____, J. Kim, H. M. Sung, J.-H. Lee, and Y.-H. Kim, 2021: Future Changes in Extreme Temperature and Precipitation over East Asia under SSP Scenarios. *J. Climate Change Rese.* 2021, **12**, 143-162, doi:10.15531/KSCCR.2021.12.2.143 (In Korean with English abstract).
- Shindell, D. T., and Coauthors, 2013: Radiative forcing in the ACCMIP historical and future climate simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 2939-2974, doi:10.5194/acp-13-2939-2013.
- Sillmann, J., and E. Roeckner, 2008: Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic Change*, **86**, 83-104, doi:10.1007/s10584-007-9308-6.
- Stott, P. A., D. A. Stone, and M. R. Allen, 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, **432**, 610-614, doi:10.1038/nature03089.
- _____, and Coauthors, 2016: Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wiley Interdisciplinary Rev. Climate Change*, **7**, 23-41, doi:10.1002/wcc.380.
- Tang, R., J. Zhao, Y. Liu, X. Huang, Y. Zhang, D. Zhou, A. Ding, C. P. Nielsen, and H. Wang, 2022: Air quality and health co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030. *Nature Commun.*, **13**, 1008, doi:10.1038/s41467-022-28672-3.
- Tebaldi, C., and Coauthors, 2021: Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth Syst. Dyn. Discussions*, **12**, 253-293, doi:10.5194/esd-12-253-2021.
- Trenberth, K. E., 2012: Framing the way to relate climate extremes to climate change. *Climatic Change*, **115**, 283-290, doi:10.1007/s10584-012-0441-5.
- _____, J. T. Fasullo, and T. G. Shepherd, 2015: Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, **5**, 725-730, doi:10.1038/NCLIMATE2657.
- Wang, P., and Coauthors, 2022: North China Plain as a hot spot of ozone pollution exacerbated by extreme high temperatures. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 4705-4719, doi:10.5194/acp-22-4705-2022.
- Wang, X., D. Jiang, and X. Lang, 2017: Future extreme climate changes linked to global warming intensity. *Sci. Bull.*, **62**, 1673-1680, doi:10.1016/j.scib.2017.11.004.
- Wang, Y., T. Le, G. Chen, Y. L. Yung, H. Su, J. H. Seinfeld, and J. H. Jiang, 2020: Reduced European aerosol emissions suppress winter extremes over northern Eurasia. *Nature Climate Change*, **10**, 225-230, doi:10.1038/s41558-020-0693-4.
- WHO, 2016: Burden of disease from the joint effects of

- household and ambient Air pollution for 2016. Accessed August 2, 2020, [Available online at <https://www.ccacoalition.org/resources/burden-disease-joint-effects-household-and-ambient-air-pollution-2016>].
- Xia, X., P. Wang, Y. Wang, Z. Li, J. Xin, J. Liu, and H. Chen, 2008: Aerosol optical depth over the Tibetan Plateau and its relation to aerosols over the Taklimakan Desert. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi:10.1029/2008GL034981.
- Xie, B., H. Zhang, X. Yu, and Z. Wang, 2023: Fast and slow responses of surface air temperature in China to short-lived climate forcers. *Sci. Total Environ.*, **882**, 162888, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162888.
- Yu, Z., and X. Li, 2015: Recent trends in daily temperature extremes over northeastern China (1960–2011). *Quat. Int.*, **380**, 35-48, doi:10.1016/j.quaint.2014.09.010.
- Zhu, X., S.-Y. Lee, X. Wen, Z. Ji, L. Lin, Z. Wei, Z. Zheng, D. Xu, and W. Dong, 2021: Extreme climate changes over three major river basins in China as seen in CMIP5 and CMIP6. *Climate Dyn.*, **57**, 1187-1205, doi:10.1007/s00382-021-05767-z.