

## 기후변화 적응지원을 위한 미래전망 연구 - 국립기상과학원 연구사례를 중심으로 -

성현민\*\* · 김진욱\*\* · 이재희\* · 김민해\* · 심성보\*\* · 정주용\*\*\* · 변영화\*\*\*†

\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, \*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 기상연구사,  
\*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 기상연구관

## A study on the future projections for climate change adaptation in Korea - Focusing on research reports from NIMS -

Sung, Hyun Min\* · Kim, Jin-Uk\* · Lee, Jae-Hee\*\* · Kim, Min-Hae\*\* · Shim, Sungbo\* ·  
Chung, Chu-Yong\*\*\* and Byun, Young-Hwa\*\*\*†

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

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

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

### ABSTRACT

Climate change on the Korea in the last 10 years (2011 ~ 2020) has been greater than that of the last 30 years (1991 ~ 2020). Against this background, our society continues to make efforts to reduce green house gas emissions (mitigation), and the importance of adapting to climate change has also been emphasized in recent years. The scientific information of climate change should be the basis for effective adaptation efforts. Considering this, the National Institute of Meteorological Sciences provides climate change scenarios and future climate information to support scientific evidence for establishing local government's climate change adaptation policies. The projected changes of temperature and precipitation in the long-term future period relative to present-day period in CMIP6 scenarios are expected to increase by approximately 1.3 times more than in the CMIP5 scenarios. This means that the evidence indicating the recent acceleration of climate change may be said to be a preview of future unimaginable climate change risks. Additionally, the timing of 2.0 degree global warming level is projected to reach around 2030 ~ 2040 period using 21-year moving average temperature from CMIP6 scenarios. In the 2.0 degree global warming level, the increase amount of extreme climates will be larger than that of mean climatology, and the summer season is expected to be approximately 3 weeks longer compared to present-day climatology. The importance of adapting to climate change in our society is gradually being felt. The results of this study is expected to be used as scientific basis for responding to the climate crisis.

*Key words: Climate changes, Climate change adaptation, Global warming level, Climate risk, Future projecton*

### 1. 서론

최근 폭염, 폭우 등과 같은 극한기상 현상으로 인한 자연재해가 급증함에 따라 기후변화와 그 피해 대응에 대해

전세계적으로 관심이 높아지고 있다. 산업화 이후, 과학기술은 급진적인 발전을 이루었고, 최근까지도 인간사회는 끊임없이 성장하고 있다. 이 과정에서 석탄과 석유 등 화석연료에 의존한 에너지의 소모가 빠른속도로 증가하였

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

ORCID 성현민 0000-0003-3120-7912  
김진욱 0000-0001-9892-9915  
이재희 0000-0003-3227-923X  
김민해 0009-0009-4760-6281

심성보 0000-0002-3533-5818  
정주용 0000-0001-5330-9456  
변영화 0000-0002-6074-4461

고, 동반되는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량도 빠른속도로 증가해왔다(Ripple et al., 2020). 이에 따라, 국제사회는 2015년 파리협정에서 신기후체제 기반의 인류 생존을 위한 목표 온도에 합의하였고, 2021년 8월에 승인된 “기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)” 제6차 평가보고서(AR6)의 제1실무그룹(WG1) 보고서에 따르면, 최근 10년(2011~2020년) 전지구 평균기온은 산업화 이전시기(1850~1900년) 대비 1.09℃ 상승하였고, 이는 인간 영향에 의한 온난화 기여도와 일치한다고 하였다(IPCC, 2023a). 현재의 온난화 수준에서도 기후변화로 인한 피해는 생태계, 건강, 산업과 사회 기반시설 피해 등 우리사회의 전반적인 부문에 영향을 미치고 있고, 기후변화로 인한 극한현상이 더욱 빈번해지고 강해질 것을 고려한다면, 1.5℃, 2.0℃ 이상의 온난화 수준에 도달 시 발생하는 기후변화 리스크의 심각수준은 짐작하기 어려울 정도이다.

국제사회는 2050 탄소중립 사회실천 및 기후변화에 대응을 위한 다양한 정책의 수립·이행을 통해 기후변화 악화를 막고(완화), 피해를 예방하며, 줄이기 위한(적응) 지속적인 노력을 기울이고 있다. 하지만, 지금 당장 온실가스 순배출량이 0이 되더라도, 대기 체류 및 해양에 저장된 온실가스 영향의 관성에 의해 기후위기가 심화될 것(IPCC, 2023a)이기 때문에, 온난화가 일정 수준으로 수렴되기까지는 변화되는 기후체계에 적응할 필요가 있다. 기후변화 현황과 그에 따른 영향, 취약성의 피해는 지역마다 다르게 나타나고 있기 때문에, 효과적인 기후변화 적응을 위해서는 지역적인 기후변화 영향의 특수성을 잘 파악하는 것이 중요하다. 또한, 기후변화 리스크에 대한 적응노력의 효과가 나타나기까지 중장기적인 시간이 소요되기 때문에 지역 맞춤형 적응의 중요성도 강조되고 있다(IPCC, 2022). 이러한 관점에서의 국제사회가 말하는 “기후위기 경고”는 현재와 가까운 미래의 나타날 기후변화의 부정적 영향을 최소화하고, 직접적으로 대응하기 위한 기후변화 적응의 중요성을 한층 더 강조하고 있음을 알 수 있다.

국제동향에 발맞추어, 2022년 3월 「탄소중립 기본법」의 시행에 따라 우리나라는 기후변화 대응을 법으로 명시한 14번째 국가가 되었고, 기후변화 적응이 중요해지고 있다는 사회의 필요성이 부각되고 있다. 또한, 이러한 적응노력의 주춧돌이 되는 것은 기후변화 적응 정보이며, 기후변화 미래전망에 대한 정보를 생산·분석하고 제공하는 것이 필요하다. 국립기상과학원은 IPCC 평가보고서 대응을 위한 국제기후프로젝트(Coupled Model

Intercomparison Project, CMIP)를 지속적으로 대응해오면서, 온실가스 배출에 따라 2100년까지 한반도의 기후가 어떻게 변화할지 전망할 수 있는 기후변화 시나리오 자료를 산출하여 제공하고 있다. 특히, 최초의 법정 적응대책인 ‘제1차 국가 기후변화 적응대책(’11~’15)’부터 고해상도(1 km) 남한상세 기후변화 시나리오를 제공함으로써, 국가와 지자체 기후변화 적응대책 수립에 활용할 수 있는 과학적 근거를 제공하고 있다(Lee et al., 2020; Sung et al., 2021). 최근 수립된 ‘제3차 국가위기 적응 강화대책(’23~’25)’에서는 부문화된 기후변화 리스크 연구가 추진되었고, 다양한 분야의 정보수요 급증에 대응하기 위해서는 관련 기관이나 연구그룹 등을 통해 니즈를 조사하고, 맞춤형 과학적 근거를 분석·제공할 필요가 있다.

본 연구에서는 최신 페이즈인 CMIP6를 통해 산출된 신규 기후변화 시나리오를 기반으로 국립기상과학원에서 수행한 한반도의 기후변화 적응과 관련된 미래전망 연구에 대한 내용을 기술하고자 한다. 이는 기상/기후학적 관점에서의 신뢰성이 확보된 기후변화 미래전망 정보 및 레퍼런스 제공을 통해 적응대책 수립 시 선행되는 기후변화 취약성 평가를 지원하고, 기후변화 적응을 위한 종합적인 의사결정과정에 효율적인 기여하고자 한다.

## 2. 관측에서 나타난 한반도의 기후변화

IPCC AR5에서는 1880~2012년의 기간동안 약 0.85℃의 전지구 평균 지표기온의 상승이 보고되었고, IPCC AR6에서는 1850~1900년 대비 현재(2011~2020년)에 약 1.1℃ 상승이 나타남이 보고되었다. 이러한 기온상승 추세는 최근 기간일수록 기온변화율이 크게 증가함을 말해준다. 이와 유사하게, 1951~2018년까지의 전지구 평균 지표기온 변화율은 약 +0.14℃/10년으로 1951~2012년의 기온변화율(약 +0.12℃/10년)에 비해 다소 높아졌다는 미국 해양대기청(NOAA)의 결과도 있다(NOAA, 2019). 우리나라 평균 지표기온은 관측이 시작된 1912년부터 2020년(109년) 관측자료가 존재하는 6개 지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 부산, 목포)의 연 평균기온을 기준으로 +0.20℃/10년의 기온변화율(Fig. 1)로 뚜렷하게 상승하였다(KMA, 2021, p. 68). 선행연구들에서 보고된 우리나라 관측지점 기반의 기온변화율을 살펴보면, 1954~1999년 기간에 +0.23℃/10년(Jung et al., 2002), 1973~2014년 기간에 +0.24℃/10년(Park et al., 2017)를 기록했고, 1973~

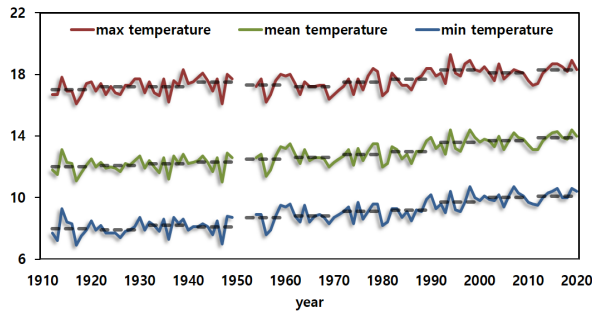


Fig. 1. Changes in min, mean, max temperature for the last 109 years (1912 ~ 2020).

(unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

2017년 동안에는  $+0.26^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ (KMA, 2018, p. 173)을 보이고 있다. 이는 한반도의 온난화는 가속되고 있음을 확인할 수 있는 과학적 근거이며, 이러한 온난화 추세는 연평균 일 최고기온( $+0.13^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ )보다 연평균 일 최저기온( $+0.24^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ )에서 더 뚜렷하게 나타났다(KMA, 2021, p. 68).

KMA (2021, p. 68)에 따르면, 지난 109년간(1912 ~ 2020년)의 계절별 지표기온 상승률은 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로  $+0.26^{\circ}\text{C}$ ,  $+0.12^{\circ}\text{C}$ ,  $+0.17^{\circ}\text{C}$ ,  $+0.24^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 으로, 겨울철과 봄철의 기온변화가 더 뚜렷하게 나타났다. 최근 10년(2011 ~ 2020년)과 최근 30년(1991 ~ 2020년)을 비교한 결과, 최근 10년의 여름철과 겨울철 지표기온 상승률이 약  $+0.5^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ , 약  $-0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$  정도 높고 낮게 나타났다(Fig. 2). 이는 2010년 이후의 한반도 지표기온 상승률은 주로 여름철 평균기온의 상승추세에 의해 주도되고 있다고 말할 수 있는 결과이다(KMA, 2021, p. 68). 겨울철의 지표기온 변화율은 시베리아 고기압의 강화주기(Jeong et al., 2011), 음의 북극진동 경향 및 북극 해빙감소(Cohen et al., 2014) 등의 원인에 따른 극한저온의 변화경향에 영향을 많이 받는다는 선행연구들이 있지만, 시기별 특성과 그에 대한 명확한 원인을 밝히기 위한 노력은 여전히 필요하다.

지난 109년간(1912 ~ 2020년)의 계절별 강수량 증가경향은 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로  $+1.83\text{mm}/10\text{년}$ ,  $+17.71\text{mm}/10\text{년}$ ,  $+5.16\text{mm}/10\text{년}$ ,  $-0.65\text{mm}/10\text{년}$ 으로 나타났다. 여름철에 통계적 유의성을 가진 뚜렷한 증가가 나타났고, 나머지 계절에서는 증가경향이 뚜렷하게 나타나지는 않았다(KMA, 2021, p. 68). 또한, 강수일수의 경우에는 모든계절에서 약  $+0.6\text{day}/10\text{년}$  정도로 고르게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 강수가 발생할 때, 강수량이 크

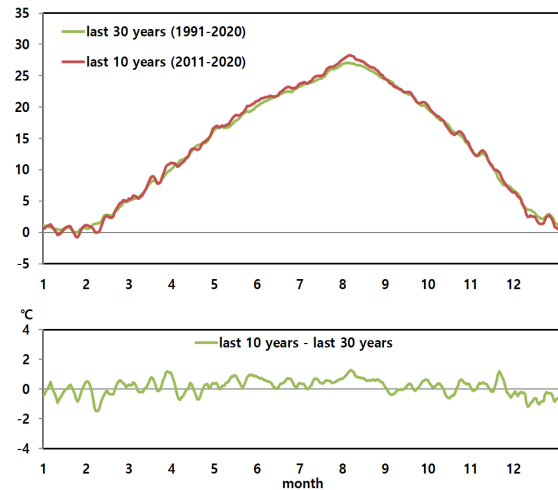


Fig. 2. Monthly variation in the climatological mean of daily temperature for last 30 years (green) and 10 years (red) period (top), and their differences (bottom).

(unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

게 나타날 확률이 증가했다고 볼 수 있는 과학적 근거이며, 강수량 증가와 강수일수의 감소경향은 동아시아의 변화경향과 유사하다고 알려져있다(Chou et al., 2013; Tian et al., 2018). 또한, 한반도의 여름철 몬순기간은 두 번의 집중기간이 나타나는 특성이 있는데, 온난화에 따라 몬순 집중기간의 발생시기가 빨라짐에 따라 두 번의 집중기간 사이의 휴식기가 짧아지고(Lee et al., 2017), 종료시기가 늦어짐에 따라 전체적인 여름철 몬순기간이 늘어나는 특성변화가 보고되고 있다(Baek et al., 2017; Sun et al., 2022). 하지만, 기후변화로 인해 영향을 주는 주요 인자들도 변할 수 있기 때문에 적응의 관점에서 극한강수의 변화뿐만 아니라, 강수의 기후적 특성 변화에 대한 지속적인 연구는 필수적이라고 할 수 있다.

### 3. 시나리오에서 나타난 한반도 미래전망

#### 3.1. RCP와 SSP 시나리오의 미래전망 비교

CMIP에서 채택하는 농도경로 시나리오는 온실가스의 배출량이 시간에 따라 변화하는 것을 강조하기 위해 명칭에 '경로'를 포함한다(Baek et al., 2017). CMIP5는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 4종(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)을 채택

하여 제공하였고, 최근 CMIP6에서는 공통사회경제경로 (Shared Socioeconomic Pathway; SSP) 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 채택하여 기후변화 모델링 커뮤니티에 제공하였다. 국립기상과학원은 이를 활용하여 국제권고사항을 만족하는 국가 기후변화 표준시나리오를 산출하여 제공하였다(Lee et al., 2020; Sung et al., 2021). 또한, 국내 대학연구그룹과의 협력을 기반으로 CORDEX(the COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment)에 참여하여 역학적 상세화 기법을 통해 동아시아-한반도의 미래전망 과학정보를 생산해오고 있다(Kim et al., 2023; Suh et al., 2016).

RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오에 따른 21세기 후반기(2071~2100년)의 한반도 평균기온은 1981~2010년 대비 +1.8°C/4.7°C 상승할 것으로 전망된다. 또한, 한반도의 평균 강수량의 전망은 21세기 후반기에 +5.5%/+13.1% 증가할 것으로 전망된다(KMA, 2018, p. 173). CMIP6 참여를 통해 산출한 SSP1-2.6, SSP5-8.5 시나리오에서 나타난 21세기 후반기(2081~2100년) 한반도의 평균기온은 현재(1995~2014년) 대비 +2.6°C/+7.0°C 상승할 것으로 전망되고, 평균강수량은 +3%/+14% 증가할 것으로 전망된다(NIMS, 2020, p. 58). 하지만, 두 시나리오에서 사용되는 현재기후와 21세기 후반기를 정의하는 기간이 다르기 때문에, 기간을 동일하게 맞춘 현재기후와 현재 대비 21세기 후반의 상승폭(괄호)을 Table 1에 나타냈다. SSP 시나리오에서 나타난 한반도의 평균기온 상승전망이 RCP 시나리오보다 약 +1.2~2.3°C 정도 더 높게 나타나고, 최고/최저기온 전망도 평균기온과 유사한 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 또한, SSP 시나리오에서의 21세기 후반기 평균강수량 전망은 RCP 시나리오에 비해 약 1.3배 정도 큰 폭으로 증가할 것으로 전망된다(NIMS, 2020, p. 58). 이러한 비교결과는 최근의 기후변화 경향이 과거보다 점점 더 커지고 있음을 고려할 때, 미래 기후변화는 예상보다 훨씬 크게 나타날 수도 있음을 짐작해 볼 수 있는 과학적 근거이다.

### 3.2. 온난화 제한목표에 따른 미래전망

국제사회는 2015년 12월, 기후변화에 대응하기 위하여 산업화 이전 대비 전지구 평균기온 상승을 2.0°C보다 낮은 수준인 1.5°C로 제한하는 파리협정을 채택하였다(UNFCCC, 2015). 이에 따라 IPCC 1.5°C 특별보고서가 발간되었고, 제한목표 수준에 따른 기후리스크에 대한 많

은 연구들이 수행되어왔다. 이러한 국제동향에 발맞추어, 우리나라에서도 온난화 수준별 기후변화 전망 연구가 이루어지고 있다(Kim et al., 2020; Kim, Kim, et al., 2022). 하지만, 이러한 선행연구에 활용된 기후변화 시나리오 자료의 해상도가 수십km 수준이었기 때문에 우리나라 상세 지역별 미래 전망을 분석하기에는 한계가 존재한다(Kim et al., 2012, 2013, 2023). 지자체의 기후변화 적응대책 수립에 필요한 과학적 기반정보를 제공하기 위해서, 국립기상과학원에서는 통계적 상세화 기법을 이용하여 1km 수평해상도의 남한상세 시나리오를 산출하였다(Kim and Kim 2018; Kim et al., 2016; Kim, Sang et al., 2022). 또한, 온난화 제한목표에 도달하는 시점(1.5°C, 2.0°C, 3.0°C)은 21년 이동 평균된 기온자료로부터 산업화 이전 대비 전지구 평균기온이 1.5°C, 2.0°C, 3.0°C 상승한 것으로 나타나는 연도로 정의하였다(Table 2). SSP1-2.6 시나리오에

Table 1. Changes in mean, min, max temperature, and precipitation from RCP and SSP scenarios compared to 1981–2010 period over South Korea.

	Long term future (2071 ~ 2100)			
	RCP2.6	RCP8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Mean Temp.	12.8 (+1.8)	15.7 (+4.7)	14.0 (+3.0)	18.0 (+7.0)
Max Temp.	18.4 (+1.8)	21.5 (+4.9)	19.6 (+3.0)	23.7 (+7.1)
Min Temp.	8.0 (+1.8)	10.8 (+4.6)	9.3 (+3.1)	13.3 (+7.1)
Precip.	1226.5 (+64.3)	1314.7 (+152.5)	1242.2 (+80.0)	1367.1 (+204.9)

Table 2. Simulated timing for global warming level of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C from each scenario.

Scenario	Global Warming Level (GWL, °C)		
	1.5	2.0	3.0
SSP1-2.6	2021	2032	-
	(2011 ~ 2031)	(2022 ~ 2042)	
SSP2-4.5	2021	2031	2056
	(2011-2031)	(2021 ~ 2041)	(2046 ~ 2066)
SSP3-7.0	2024	2032	2050
	(2014 ~ 2034)	(2022 ~ 2042)	(2040 ~ 2060)
SSP5-8.5	2021	2029	2046
	(2011 ~ 2031)	(2019 ~ 2039)	(2036 ~ 2056)

서는 3.0℃ 온난화에 도달하지 않는 것으로 나타났다. 추가적으로, 우리나라를 6개 권역(수도권(Capital area; CP), 강원권(GangWon-do; GW), 충청권(ChungCheong-do; CC), 전라권(JeolLa-do; JL), 경상권(GyeongSang-do; GS), 제주권(JeJu-do; JJ))으로 나누어 미래 전망 분석 결과를 정량적으로 제시하였으며, 6개 권역에 대한 정보는 Fig. 3a에 제시하였다.

이 절에서는 제한온도 도달 시점에서의 한반도 및 6개 권역의 연 평균기온과 연 평균강수량, 절대적 기준 극한 현상인 HW(폭염일; 일 최고기온이 33℃ 이상인 날 수)과 D80(호우일수; 일 강수량이 80mm 이상인 날 수), 극한지수인 TXx(연중 최고기온)와 RX1D(연중 최다 일 강수량)의 미래전망을 제시하였다. 또한, 극한지수로 분류되는 TXx와 RX1D의 미래전망에 대한 확률 밀도함수 분포도 수록하였으며, 더 많은 극한지수들과 지역별 상세 내용은 Kim et al. (2023)을 통해 관련정보를 확인할 수 있다.

1.5℃/2.0℃/3.0℃ 온난화 시기의 한반도 연 평균기온은 현재(1995~2014년) 대비 +0.7℃/+1.4℃/+2.6℃ 상승할 것으로 전망된다. 이는 파리협정의 제한목표로부터 +0.5℃/+1.5℃의 추가 온난화가 진행되면, 한반도의 연 평균기온은 +0.7℃/+1.9℃ 상승할 것으로 전망되는 결과이며, 한반도의 평균기온 추가상승폭은 전지구에 비해 다소 클 것임을 의미하는 결과이다. 한편, 연 평균강수량(PR) 변화는 1.5℃ 온난화 시기에서는 현재기후와 유사할 것으로 전망되고, 2.0℃/3.0℃ 온난화 시기에는 +4.0%/+5.8%로 증가할 것으로 전망된다(Fig. 3b, Table 3). 미래 강수량 증가 폭이 가장 큰 시기는 7~9월이며, 6월과 10월에는 강수량이 큰 변화가 없거나 다소 감소할 것으로 전망된다(Kim et al., 2023). 지역별로 살펴보면, 평균기온의 상승은 세부권역별 차이가 두드러지게 나타나지는 않았다. 하지만, 강수량의 증가폭은 제주권(+6.0%/+8.0%/+8.9%)에서 가장 크게 나타났고, 충청권(-2.4%/+2.6%/+4.6%)에서 가장 작게 나타났다(Table 3). 특히, 제주권은 1.5℃ 온난화 시기에서도 다른지역에 비해 급격한 평균강수량의 증가경향이 나타났다. 하지만, 섬 지역이라는 점과 동아시아 지역 강수경향의 변화는 불확실성이 높다는 점을 감안하여 지역별 비교결과를 언급할 경우에는 유의할 필요가 있다.

고온 극한지수인 TXx와 HW는 현재 대비 1.5℃/2.0℃/3.0℃ 온난화 시기에 각각 +1.5℃/+2.7℃/+3.9℃ 상승, +5.8일/+11.4일/+23.0일 증가할 것으로 전망된다(Table 3). 이는 온난화가 진행될수록 연 평균기온에 비해 극한

고온의 상승폭이 더 클 것으로 전망된다는 결과이다. 또한, TXx는 지역별 차이가 크게 나타나지는 않았지만(제주권 제외), HW는 수도권과 충청권에서 다른지역에 비해 큰 상승폭이 나타남을 통해 온난화에 따른 지역별 고온현상의 증가형태가 다름을 확인할 수 있다. 반면, 제주권에서는 TXx와 HW 모두 다른지역에 비해 상승/증가폭이 작은 것으로 전망되었고, 지역적 특색영향(섬 지역 및 한라산)의 결과로 볼 수 있다.

호우 극한지수인 RX1D는 현재 대비 1.5℃ 온난화 시기에 +6.4% 증가하였지만 D80은 뚜렷한 변화가 나타나지 않는 것으로 전망된다. 2.0℃/3.0℃ 온난화 시기에는 각각 +16.8%/+22.5%, +0.4일/+0.5일 증가할 것으로 전망된다(Table 3). 분석에 사용된 두 강수극한지수는 상위 1% 정도의 강도로 발생하는 호우 수준을 나타내므로, 온난화가 진행될수록 기록적인 호우가 더욱 빈번하게 발생할 수 있다는 것을 의미하는 전망결과이다. 또한, 지역적으로는 제주권에서 호우의 강도와 빈도가 뚜렷하게 증가하는 경향이 전망되었고, 강원권과 경상권에서는 호우의 강도가 다른지역에 비해 다소 낮은 증가폭을 보였지만 발생빈도의 증가는 유사한 것으로 전망된다. 이 연구에서 한반도 극한기후의 미래전망을 분석하기 위해 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)에서 제시한 극한지수 뿐만 아니라 절대적 기준의 극한기후도 사용한 것은 과학원의 1km 시나리오와 극한분석 연계를 통해 기존의 극한지수를 사용하기 어려운 분야에 맞는 과학정보를 얻을 수 있다는 레퍼런스를 제공하기 위함이며, 이러한 정보는 지역별로 다르게 나타는 기후변화 영향의 대응방안을 위한 과학적 근거 기반 마련에 활용될 수 있을 것이다.

또한, 이 연구에서는 확률밀도함수 기반의 극단 분포 분석도 수행하였다. 이 분석은 극한기후의 강도별 분포 변화를 비교하기에 활용성이 높고, 많은 선행연구들에서 재현 수준에 기반된 극한기후의 미래전망을 분석하는데 널리 활용되고 있는 기법이다. 현재기후의 20년 재현수준의 TXx는 36.6℃이고, 1.5℃/2.0℃/3.0℃ 온난화 시기에는 각각 39.6℃/40.6℃/41.6℃로 나타났다. 발생빈도는 1.5℃ 온난화 시기에 약 2.8년마다 발생할 것으로 전망되며, 2.0℃/3.0℃ 온난화 시기에는 발생빈도가 약 1.6년/약 1.2년으로 줄어들 것으로 전망된다(Fig. 4a). 마찬가지로 방법으로 분석해보면, RX1D의 20년 재현 수준 강수량은 216.4mm이고, 1.5℃/2.0℃/3.0℃ 온난화 시기에는 246.7mm/285.1mm/302.5mm까지 증가할 것으로 전망된다. 20년 재현 수준의 RX1D 발생빈도는 1.5℃ 온난

Table 3. Changes in regional climate element from three global warming level (GWL) of 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C compared to present-day (2000 ~ 2019) over South Korea.

Var.	GWL	KOR	CP	GW	CC	JL	GS	JJ
TAS (°C)	1.5	+0.7	+0.7	+0.7	+0.8	+0.6	+0.7	+0.6
	2.0	+1.4	+1.3	+1.3	+1.4	+1.3	+1.3	+1.2
	3.0	+2.6	+2.6	+2.6	+2.6	+2.5	+2.6	+2.4
PR (%)	1.5	-1.1	-0.8	-2.4	-2.4	-0.2	-1.1	+6.0
	2.0	+4.0	+6.1	+4.3	+2.6	+4.3	+3.3	+8.0
	3.0	+5.8	+7.9	+6.2	+4.6	+5.6	+5.2	+8.9
TXx (°C)	1.5	+1.5	+1.3	+1.4	+1.5	+1.5	+1.6	+0.5
	2.0	+2.7	+2.5	+2.7	+2.7	+2.6	+2.9	+1.1
	3.0	+3.9	+3.8	+4.0	+4.0	+3.7	+4.0	+2.2
RX1D (%)	1.5	+6.4	+8.3	+3.9	+4.8	+8.1	+5.3	+25.2
	2.0	+16.8	+21.3	+15.1	+15.4	+18.2	+14.1	+36.0
	3.0	+22.5	+24.7	+20.7	+22.2	+22.9	+21.5	+35.3
HW (days)	1.5	+5.8	+7.1	+3.5	+7.4	+6.7	+5.3	+1.9
	2.0	+11.4	+13.8	+7.1	+14.3	+12.6	+10.9	+3.9
	3.0	+23.0	+28.2	+14.7	+27.9	+25.7	+22.0	+12.1
D80 (days)	1.5	+0.0	+0.0	+0.0	+0.0	+0.1	+0.0	+0.7
	2.0	+0.4	+0.5	+0.4	+0.3	+0.4	+0.3	+0.8
	3.0	+0.5	+0.5	+0.5	+0.4	+0.5	+0.4	+1.0

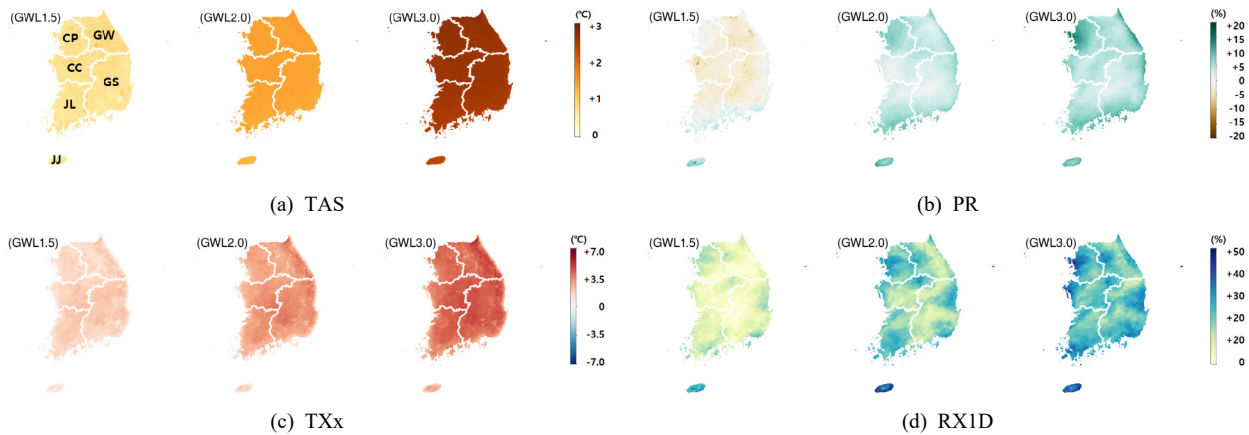


Fig. 3. Spatial distribution for anomalies of annual mean temperature (TAS), precipitation (PR), The maximum mean temperature in each year (TXx) and The maximum 1-day PR in each year (RX1D). The anomalies are from three global warming level (GWL) of 1.5°C, 2.0°C and 3.0°C compared to present-day (2000 ~ 2019).

화 시기에 약 11.4년마다 발생할 것으로 전망되며, 2.0°C /3.0°C 온난화 시기에는 발생빈도가 약 7.5년/6.3년으로 줄어들 것으로 전망된다(Fig. 4b). 종합해보면, 온난화가 진행될수록 재난급 극한의 발생빈도가 약 2~3배 정도 빈번해진다는 전망결과는 미래에 마주하게 될 기후변화 리스크는 우리가 가늠하는 것보다 훨씬 위험성이 클 수 있다

는 의미를 내포하고 있다.

#### 4. 한반도 계절길이의 미래전망

우리나라는 사계절이 뚜렷하며, 대부분의 기후변화 연구들은 일반적으로 계절을 고정된 3달 간격의 기간으로



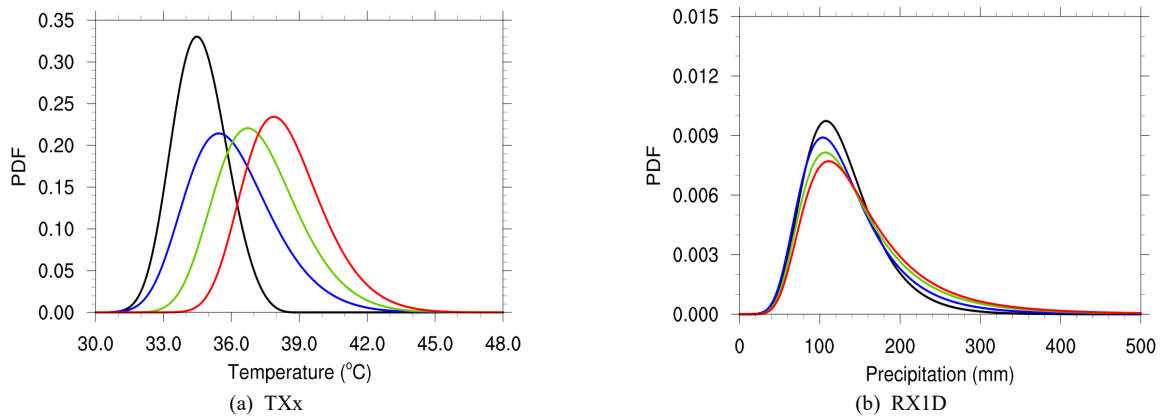


Fig. 4. Probability distribution functions (PDF) for extreme climate indices under present-day (black) and 1.5°C (blue), 2.0°C (green), and 3.0°C (red) global warming level (GWL) over South Korea.

간주하여 적용해 오고 있다(봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 12~2월). 하지만, 실제로 우리가 주변에서 느끼는 계절은 현실적으로 차이가 존재하기 때문에 계절의 시작과 끝은 3달 간격으로 고정된 것이 아니라, 매년마다 그리고 지역마다 다르다고 할 수 있다. 최근에 뚜렷하게 나타나고 있는 계절별 평균기온의 변화는 농업, 보건, 에너지 등의 다양한 분야에 사회경제적 영향을 미치며, 기후변화 적응을 위해서는 향후 미래의 계절길이 변화에 대한 신뢰성 있는 예측과 이를 기반한 영향평가 및 적응 조치 개선이 필수적이다. 특히, 가장 빠르게 체감되는 폭염은 주로 여름철에 나타나기 때문에 여름철의 시기가 앞당겨지거나 기간이 길어지는 등의 변화는 우리 사회에 매우 중요하다(Ruosteenoja et al., 2019).

기후변화에 따른 계절길이 변화에 대한 선행연구들은 지상관측 기온자료를 근거로 진행되어 왔다. 기온은 전 지구적으로 넓은 지역에 걸쳐 장기간 관측되어 자료가 축적되어있는 가장 대표적인 요소이고, 인간사회의 의식주에 해당하는 기본적인 생활에 가장 민감하게 영향을 주는 요소이기 때문에 계절변화를 잘 반영한다고 할 수 있다. 하지만, 이러한 선행연구들은 수십 km 해상도 자료를 활용하고, 북반구 혹은 대륙규모를 중점적으로 수행되었기 때문에, 우리나라의 기후변화 적응을 위한 과학적 근거로 활용하기에는 한계점이 존재한다. 이와 같은 한계점을 개선하기 위하여 국립기상과학원에서는 신규 산출된 고해상도(1 km) 해상도 시나리오를 활용하여 한반도의 계절길이 변화에 대한 미래전망을 분석하였다(NIMS, 2020). 계절변화의 시작을 평균기온이 일정 수준을 기준으로 상승하거나 하강하여 다시 되돌아오지 않은

첫날을 계절의 시작으로 정의하여 사계절의 길이를 산출하였다. 사용된 사계절의 기준은 각각 일 평균기온 5°C 이상, 20°C 이상, 20°C 미만, 5°C 미만이다(NIMS, 2021). 현재기후(2000~2019년)의 한반도에 나타나는 사계절의 길이는 봄, 여름, 가을, 겨울 순서대로 각각 90일, 97일, 71일, 107일이다. 봄과 여름은 약 3달 정도의 기간이지만 가을은 3달보다 짧고, 겨울은 3달보다 긴 것을 확인할 수 있다. 이는 20세기 초반보다 여름이 약 20일 정도 길어지고, 겨울은 약 22일 정도 짧아진 계절변화이다(NIMS, 2020). 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)의 경우, 겨울은 21세기 후반기에 68일 짧아져서 39일간 유지되며, 여름은 73일 증가하여 170일간 유지될 것으로 전망된다(Fig. 5). 반면에, 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우, 겨울은 21세기 후반기에 25일 짧아져서 82일간 유지되며, 여름은 32일 증가하여 129일간 유지될 것으로 전망된다. 또한, 21세기 중반기를 기점으로 전후의 계절길이 변화정도를 비교해보면, 시나리오의 종류에 상관없이 21세기 중반기 이후에 이전의 계절길이 변화정도가 2배정도 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 21세기 중반기는 2.0°C 온난화가 나타날 시기임을 고려한다면(Table 1), 2.0°C 온난화 시기에는 현재보다 여름이 약 3주 정도 길고 겨울은 약 2~3주 정도 짧아질 전망이며, 2.0°C 온난화 수준을 초과하게 되면, 1년 중 절반이 여름과 유사한 날씨가 나타날 것으로 전망된다.

한반도는 복잡한 지형의 영향으로 지역에 따른 기후 특색이 뚜렷하다. 이와 더불어, 사계절이 뚜렷하다는 점을 종합해보면, 기후변화 적응을 위한 방안은 지역 특성을 반영한 다양한 관점에서 접근을 해야 할 필요가 있다. 하

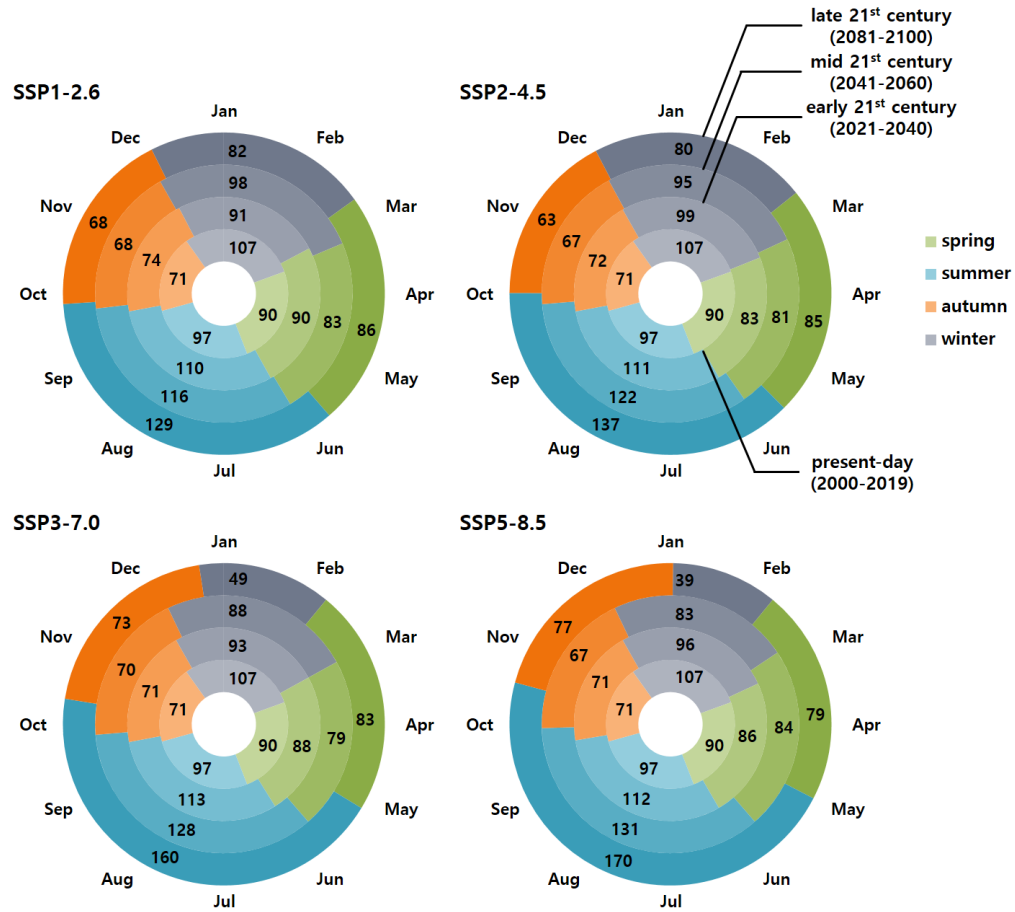


Fig. 5. Changes in natural season in Korea relative to present-day period (2000 ~ 2019).

(unit: day)

지만, 우리나라에서 이행된 기후변화 적응대책은 폭염과 건강부문에 많은 비율을 가지고 있기 때문에(Park, 2023) 계절길이 변화에 따라 지역적으로 나타날 수 있는 호우, 가뭄, 폭설, 강풍 등의 극한현상으로부터 발생할 수 있는 재해/재난에 대한 적응 노력을 확장할 필요가 있다. 또한, 산업적인 관점에서 관광분야가 계절의 의존도가 높기 때문에 매우 민감하게 기후변화가 체감될 수 있다(Yang and Eom, 2010). 기후변화와 관광산업에 미치는 영향에 대한 정보해석을 통해 기후변화 적응에 대한 인식을 제고하고, 특성에 따라 국가, 지자체 등의 협력을 통해 적절한 방안을 마련이 필요할 것이다(Yang and Cho, 2023).

### 5. 요약 및 토의

미래 기후변화에 대한 정보는 불확실성을 담고 있으며,

기후변화 적응의 노력으로 인한 사회적 파급효과는 적응 노력을 수행하는 당사자에게만 그 효과가 돌아가는 것이 아니기 때문에 국가차원에서 기후변화 적응의 노력을 추진해야 한다. ‘2050 탄소중립’은 우리나라 기후변화 대응의 비전이 되었지만, 온실가스 배출량을 줄이는 기후변화 완화노력에 초점이 맞추어진 키워드라고 할 수 있다. 하지만, 2022년 3월 탄소중립 기본법의 시행에 따라 우리나라는 기후변화 대응을 법으로 명시한 14번째 국가가 되었고, 온실가스 감축 위주보다는 기후변화 적응도 고려하는 사회의 필요성이 부각되었다. 이 글에서는 국립기상과학원에서 최근 수행한 기후변화 과학분야의 연구결과들 중에서 기후변화 적응과 연관성이 있는 결과들에 대해서 간략하게 보였다. 수행된 연구 결과들은 국내외 연구저널에 논문으로 출판되어 기후변화 커뮤니티에 활용되고 있는 중이며, 환경부 ‘제3차 국가 기후위기 적응 강화 대책’



의 이행지원을 위한 기초 과학정보로 활용될 것으로 기대된다.

기상청에서 운영하는 지상관측망의 장기간 관측자료를 통해 한반도의 기후변화를 분석한 결과, 최근 10년(2011~2020년)의 기후변화가 최근 30년(1991~2020년)의 기후변화보다 더욱 큰 폭으로 나타남을 확인할 수 있었다. 평균기온 뿐만 아니라, 일 최저/최고기온 및 평균강수량에서도 최근 10년의 상승/증가 추세가 더 뚜렷하게 나타났다. 북반구 중위도에 위치한 동아시아 지역은 기후변화의 영향이 다른 지역에 비해 상대적으로 크다고 알려져 있기 때문에(IPCC, 2021), 한반도의 최근 온난화 추세의 가속화는 잠재되어 있는 기후변화 영향은 더욱 심화될 것이라는 의미를 내포하고 있다고 할 수 있다. 일반적으로 기후변화의 영향에 대한 정량적인 분석과 이해의 수요에 대응하기 위해서 기후변화 시나리오를 많이 사용하고 있다 (Chung et al., 2015; Kang et al., 2013). 전세계적으로는 기후변화 시나리오와 과학정보의 신뢰성 향상을 위해서 국제 기후변화 프로젝트(CMIP)을 통한 연구그룹 간 협력이 이루어지고 있다. 국립기상과학원에서는 CMIP3부터 참여하여 기후변화 연구커뮤니티 활동을 하고 있고, 이를 기반으로 기후변화 시나리오를 산출하여 제공하였다. 지난 CMIP5의 시나리오와 최근 CMIP6의 시나리오를 비교해보면, CMIP6 시나리오에서 나타난 21세기 후반기의 한반도 평균기온 상승전망이 이전 시나리오보다 약 +1.2~2.3℃ 정도 더 높게 나타나고, 평균강수량도 약 1.3배 정도 큰 폭으로 증가할 것으로 전망됨을 알 수 있다. 이 비교결과를 현재 조금씩 가속되고 있는 기후변화가 미래에 가져올 영향은 상상하는 것보다 더 크게 다가올 수도 있다는 것을 의미한다.

국립기상과학원에서는 지자체별 기후변화 적응대책 수립을 위한 과학적 근거자료 지원을 위해 1km 남한상세 기후변화 시나리오를 산출하였고, 미래전망에 대해서 제공하였다(Kim, Sang, et al., 2022). 또한, 단일 시나리오의 불확실성을 보완하고, 온난화 제한목표에 따른 기후변화 전망을 제공하기 위하여 국제 연구 네트워크에서 활용되는 방법을 이용한 앙상블 체계를 구축하고 기초과학정보를 산출하였다(Kim et al., 2023). 1.5℃, 2.0℃ 온난화 수준에 도달할 경우, 우리나라의 연 평균기온과 연 평균강수량의 상승폭은 전지구 평균에 비해 다소 높을 것으로 전망되고, 평균상승보다 극한기후의 상승폭이 더 크게 나타날 것으로 전망된다. 이러한 평균기온의 상승은 우리나라의 여름철 기간을 더욱 장기화시킬 것으로 전망된다.

2.0℃ 온난화에서는 현재보다 여름이 약 3주 정도 길고 겨울은 약 2~3주 정도 짧아질 것으로 전망된다.

기후변화의 적응은 기후변화로 인한 피해에 대비하고 사회경제의 성장과 안정이 균형을 이루는 노력을 포함하고 있다. 기후변화로 인한 피해가 증가하고 있는 현재사회에서 적응의 중요성은 체감되고 있다고 할 수 있다. 국립기상과학원에서 산출한 1 km 남한상세 시나리오와 과학 정보들이「탄소중립 기본법」아래 신설되고 있는 다양한 정책들의 과학적 근거로 널리 활용되어 기후위기를 대응하는데 기여할 수 있기를 기대한다.

## 사사

이 연구는 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가(KMA 2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Baek HJ, Kim MK, Kwon WT. 2017. Observed short- and long-term changes in summer precipitation over South Korea and their links to large-scale circulation anomalies. *Int J Climatol* 37(2): 972-986. doi: 10.1002/joc.4753
- Chou C, Chiang JCH, Lan CW, Chung CH, Liao YC, Lee CJ. 2013. Increase in the range between wet and dry season precipitation. *Nat Geosci* 6: 263-267. doi: 10.1038/ngeo1744
- Chung U, Cho J, Lee EJ. 2015. Evaluation of agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean J Agric For Meteorol* 17(2): 108-125 (in Korean with English abstract). doi: 10.5532/KJAFM.2015.17.2.108
- Cohen J, Screen JA, Furtado JC, Barlow M, Whittleston D, Coumou D, Francis J, Dethloff K, Entekhabi D, Overland J, Jones J. 2014. Recent arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci* 7: 627-637. doi: 10.1038/ngeo2234
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023a. Climate change 2021 - The physical science basis: Working group I contribution to the sixth

- assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023b. Climate change 2022 - Impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844
- Jeong JH, Ou T, Linderholm HW, Kim BM, Kim SJ, Kug JS, Chen D. 2011. Recent recovery of the siberian high intensity. *J Geophys Res* 116: D23102. doi: 10.1029/2011JD015904
- Jung HS, Choi Y, Oh JH, Lim GH. 2002. Recent trends in temperature and precipitation over South Korea. *Int J Climatol* 22(11): 1327-1337. doi: 10.1002/joc.797
- Kang JY, Kim YD, Kang BS. 2013. Effect of change in hydrological environment by climate change on river water quality in Nam River watershed. *J Korea Water Resour Assoc* 46(8): 873-884 (in Korean with English abstract). doi: 10.3741/JKWRA.2013.46.8.873
- Kim DH, Kim JU, Kim TJ, Byun YH, Chang EC, Cha DH, Ahn JB, Min SK. 2022. Future projection of temperature over the Korean peninsula under global warming targets of 1.5 and 2.0°C, using the multi-RCM ensemble in CORDEX-EA phase 2. *J Clim Change Res* 13(5): 525-543 (in Korean with English abstract). doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.607
- Kim J, Kim MK, Kim YH. 2013. Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate. *J Clim Res* 8(3): 203-215 (in Korean with English abstract). doi: 10.14383/cri.2013.8.3.203
- Kim JB, Im ES, Bae DH. 2020. Intensified hydroclimatic regime in Korean basins under 1.5 and 2°C global warming. *Int J Climatol* 40(4): 1965-1978. doi: 10.1002/joc.6311
- Kim JU, Kim MH, Chung CY, Byun YH, Kim TJ. 2023. High-resolution projection of future climate change over South Korea under global warming levels of 1.5°C, 2°C, and 3°C based on shared socioeconomic pathways scenarios. *J Clim Change Res* 14(4): 501-520 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.4.501
- Kim JU, Sang J, Kim MK, Byun YH, Kim DH, Kim TJ. 2022. Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling. *J Clim Res* 17(2): 89-106 (in Korean with English abstract). doi: 10.14383/cri.2022.17.2.89
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S. 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution. *J Clim Res* 7(1): 55-68 (in Korean with English abstract).
- Kim MK, Kim S, Kim J, Heo J, Park JS, Kwon WT, Suh MS. 2016. Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: Part 1, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia Pac J Atmos Sci* 52(2): 79-89. doi: 10.1007/s13143-016-0010-3
- Kim S, Kim MK. 2018. Verification of PRIDE model version 2.0. *J Clim Res* 13(1): 71-86 (in Korean with English abstract). doi: 10.14383/cri.2018.13.1.71
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2018. Assessment report of climate change projection over Korea. Daejeon, Korea: Author.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2021. Assessment report of 109yr(1912-2020) climate change over Korea. Daejeon, Korea: Author.
- Lee JH, Sung HM, Shim S, Boo KO. 2020. International data node system for CMIP6 climate change projections. *J Clim Change Res* 11(4): 247-257 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2020.11.4.247
- Lee JY, Kwon MH, Yun KS, Min SK, Park IH, Ham YG, Jin EK, Kim JH, Seo KH, Kim WM, Yim SY, Yoon JH. 2017. The long-term variability of changma in the east asian summer monsoon system: A review and revisit. *Asia Pac J Atmos Sci* 53(2): 257-272. doi: 10.1007/s13143-017-0032-5
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences). 2020. Climate change report of South Korea. Jeju,

- Korea: Author.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2019. State of the climate: Global climate report for 2018. Asheville, USA: National Centers for Environmental Information.
- Park BJ, Kim YH, Min SK, Kim MK, Choi Y, Boo KO, Shim S. 2017. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: An updated assessment. *Atmosphere* 122(20): 10637-10654. doi: 10.1002/2017JD027167
- Park JH. 2023. The status and characteristics of local climate change adaptation plans in Korea. *J Clim Change Res* 14(5): 561-568 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.5.561
- Ripple WJ, Wolf C, Newsome TM, Barnard P, Moomaw WR. 2020. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience* 70(1): 8-12. doi: 10.1093/biosci/biz088
- Ruosteenoja K, Markkanen T, Räisänen J. 2020. Thermal seasons in Northern Europe in projected future climate. *Int J Climatol* 40(10): 4444-4462. doi: 10.1002/joc.6466
- Suh MS, Oh SG, Lee YS, Ahn JB, Cha DH, Lee DK, Hong SY, Min SK, Park SC, Kang HS. 2016. Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: Surface air temperature. *Asia Pac J Atmos Sci* 52(2): 151-169. doi: 10.1007/s13143-016-0017-9
- Sun MA, Sung HM, Kim J, Lee JH, Shim S, Byun YH. 2022. Present-day and future projection of East Asian summer monsoon in coupled model intercomparison project 6 simulations. *PLoS ONE* 17(6): e0269267. doi: 10.1371/journal.pone.0269267
- Sung HM, Kim J, Shim S, Seo JB, Kwon SH, Sun MA, Moon H, Lee JH, Lim YJ, Boo KO, Kim Y, Lee J, Lee J, Kim J, Marzin C, Byun YH. 2021. Climate change projection in the twenty-first century simulated by NIMS-KMA CMIP6 model based on new GHGs concentration pathways. *Asia Pac J Atmos Sci* 57(4): 851-862. doi: 10.1007/s13143-021-00225-6
- Tian F, Dong, B, Robson, J, Sutton R. 2018. Forced decadal changes in the East Asian summer monsoon: The roles of greenhouse gases and anthropogenic aerosols. *Clim Dyn* 51(9-10): 3699-3715. doi: 10.1007/s00382-018-4105-7
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2015. Report of the conference of the parties on its twenty-first session. Paris, France: Author.
- Yang H, Cho H. 2023. A study on current status of the tourism industry and its climate adaptation strategies. *J Clim Change Res* 14(1): 11-19 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.1.011
- Yang MG, Eom SG. 2010. A study on the establishment of the concept of ecotourism and the classification of resources. Proceedings of 2010 Korea Environmental Policy and Administration Society Fall Conference; 2010 Oct 8; Seoul National University. Seoul, Korea: Korea Environmental Policy and Administration Society. p. 141-156.