

1.5/2.0°C 지구온난화 시나리오 기반의 동아시아 기후변화 분석

심성보^{1),2)} · 권상훈¹⁾ · 임윤진¹⁾ · 염성수²⁾ · 변영화^{1)*}

¹⁾국립기상과학원 기후연구과, ²⁾연세대학교 대기과학과

(접수일: 2019년 7월 8일, 수정일: 2019년 8월 10일, 게재확정일: 2019년 8월 31일)

Understanding Climate Change over East Asia under Stabilized 1.5 and 2.0°C Global Warming Scenarios

Sungbo Shim^{1),2)}, Sang-Hoon Kwon¹⁾, Yoon-Jin Lim¹⁾, Seong Soo Yum²⁾, and Young-Hwa Byun^{1)*}

¹⁾Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 8 July 2019; revised 10 August 2019; accepted 31 August 2019)

Abstract This study first investigates the changes of the mean and extreme temperatures and precipitation in East Asia (EA) under stabilized 1.5°C and 2°C warming conditions above preindustrial levels provided by HAPPI project. Here, five model with 925 members for 10-year historical period (2006~2015) and 1.5/2.0°C future warming scenarios (2091~2100) have been used and monthly based data have been analyzed. The results show that the spatial distribution fields over EA and domain averaged variables in HAPPI 1.5/2.0°C hindcast simulations are comparable to observations. It is found that the magnitude of mean temperature warming in EA and Korea is similar to the global mean, but for extreme temperatures local higher warming trend for minimum temperature is significant. In terms of precipitation, most subregion in EA will see more increased precipitation under 1.5/2.0°C warming compared to the global mean. These attribute for probability density function of analyzed variables to get wider with increasing mean values in 1.5/2.0°C warming conditions. As the result of vulnerability of 0.5°C additional warming from 1.5 to 2.0°C, 0.5°C additional warming contributes to the increases in extreme events and especially the impact over South Korea is slightly larger than EA. Therefore, limiting global warming by 0.5°C can help avoid the increases in extreme temperature and precipitation events in terms of intensity and frequency.

Key words: HAPPI 1.5/2.0, East Asia, climate change of mean and extreme, vulnerability

1. 서 론

유엔기후변화협약(UNFCCC, UN Framework Convention on Climate Change 2015)에서 체결된 파리협정은 지구의 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C 보다 상당히 낮은 수준(well below 2°C)으로 유지하

고, 기온 상승을 1.5°C로 제한하도록 노력할 것을 규정하고 있으며, 기후변화협약의 이행을 증진함에 있어 기후변화의 위협에 대한 범지구적 대응 강화를 목표로 선언하고 있다. 이와 관련하여 최근 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 ‘지구온난화 1.5°C 특별 보고서’를 공개하였다. 보고서에 따르면 기온 상승 억제 목표인 ‘산업혁명 이후 1.5°C 온난화 수준’으로 안정화 시키기 위해서는 늦어도 2050년까지 ‘탄소 순배출 제로’에 도달해야하며, 2030년까지 전지구적으로 탄소배출량을 절반으로 감축해야 한다. 또한 목표치인 1.5°C에서 0.5°C만 더 오른다고 할지라도 폭염,

*Corresponding Author: Young-Hwa Byun, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6652, Fax: +82-64-738-9072
E-mail: yhbyun@korea.kr

기뭄 등 더욱 극심하고 갑작스러운 기상현상 및 극한 기후에 노출될 가능성이 높을 뿐만 아니라, 생물다양성감소, 해수면상승, 농업 및 어업 생산량 감소 등으로 인한 지역적인 기후 취약성이 크게 증가할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2018). 따라서 이러한 기온 상승 억제 목표는 지구환경 보전 뿐만 아니라 인류의 지속 가능한 발전 및 빈곤 근절 측면에서도 중요한 역할을 할 것으로 평가되고 있으며, 이와 관련된 적응 대책 수립을 위해 지구온난화에 따른 지역규모의 기후특성 및 극한 현상에 대한 과학적인 분석이 필수적으로 요구된다.

1.5/2.0°C 지구온난화에 따른 전지구, 지역규모에서 기후특성 및 극한 현상 분석에 대한 이전 연구들은 주로 결합모델비교프로젝트(The Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)를 통해 산출된 미래 기후모의 자료를 기반으로 진행되어 왔다(Knutti et al., 2016; Schleussner et al., 2016; Dosio and Fischer, 2018; King and Karoly, 2017; Xu et al., 2017; Lee and Min, 2018; Tayler et al., 2018). 미래 시나리오들 가운데 타겟 온도까지 상승하며 평형을 이루는 ‘Equilibrium world’나 타겟 온도를 지나가는 ‘Transient world’에 대한 분석을 통해 지구온난화에 따른 기후시스템의 변화와 이와 관련된 영향을 이해하고자 하였다. 예를 들면, Dosio and Fischer (2018)은 1.5°C와 2.0°C를 지나가는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 비교하여 0.5°C 상승시에 유럽대륙에서의 극한지수(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) 변화를 분석한 결과, 여름 최저온도의 경우 유럽의 70% 지역에서 상승을 나타내고 있었으나 다른 요소들의 경우 지역적인 차이가 존재함을 밝혔다. 또한, 강수량의 경우 0.5°C 상승으로 의미있는 차이를 보이지는 않았지만, 극한 강수 발생에 있어서는 큰 차이가 나타나는 것을 확인하였다. Lee and Min (2018)은 CMIP5 모델 중 1.5°C와 2°C에 수렴하는 RCP2.6, RCP4.5 시나리오들을 선택적으로 분석함으로써, 1.5°C 온난화는 2°C 온난화에 비해 열스트레스를 느끼는 동아시아 지역이 약 20% 감소 한다는 결과를 제시하였다.

그러나 CMIP5 실험은 특정한 복사강제력에 반응하는 미래 기후 전망을 위해 설계되어 있으므로 엄밀하게 1.5°C와 2°C에 적응된 기후반응이라 보기 어렵다. 또한, 강제력에 반응하여 타겟 온도에 수렴한 CMIP5 모델 결과를 선택적으로 취합하더라도 50개 미만의 적은 양상을 실험만으로는 극한기상에 대한 신뢰도 높은 분석을 수행하기에 한계가 있었다(Mitchell et al., 2016). 최근에는 이러한 결점을 보완하기 위해 1.5°C 및 2°C 온난화에 평형을 이루는 100개 이상의 기후 모델 양상을 자료를 생산하여 제공하는 Half a degree

Additional warming, Prognosis and Projected Impacts (HAPPI) (Mitchell et al., 2017) 프로젝트를 통한 기후 특성 및 극한기상 영향 분석이 활발히 이루어지고 있으나(Lee et al., 2018; Ruane et al., 2018; Wehner et al., 2018), 국내 적용을 위한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히, 선행 연구들로부터 온난화에 따른 영향이 변수별, 지역별로 다르게 나타나고 있어, 신기후체계 아래 미래 기후변화에 대비한 국내 정책수립에 과학적 근거 자료로 활용하기 위해서는 동아시아 및 우리나라 지역에 대해 보다 상세한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 앞서 언급한 HAPPI 기후모델 자료를 활용하여 1.5/2.0°C 지구온난화에 따른 동아시아 및 우리나라 지역의 기후특성 및 극한기상 변화를 분석하고자 하였다. 각 온난화 시나리오에 따른 주요 기후변수의 평균 및 확률 특성의 변화와 0.5°C 추가 상승에 따른 기후 취약성 분석을 수행 하였으며, 이를 통해 신기후체계 대비 기후변화 적응대책 수립 지원을 위한 과학적 자료를 제공하고자 한다. 2장에서는 사용된 HAPPI 모델 자료 및 분석 변수와 방법을 제시하고, 3장에서는 HAPPI 자료에 대한 관측 모의 성능 및 기후변화 따른 주요 변수와 극한기상에 대한 영향을 분석하였다. 또한, 기온과 강수의 확률 분포의 변화 경향 및 전지구 기온의 추가 상승에 따른 지역적인 기후 취약성을 알아보았으며, 4장은 요약 및 결론 순으로 정리하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 모델 자료

본 연구에서는 기온상승 억제 목표인 전지구 1.5°C와 그보다 0.5°C가 추가 상승했을 때의 동아시아 기후 변화 및 기후 취약성에 대한 이해를 위해, Table 1과 같이 HAPPI (Half A degree additional warming Prognosis and Projected Impacts) 프로젝트에 참가한 다섯개의 전지구 대기모델(AGCM) 실험 결과를 이용하였다. 각 모델은 현재 기후(2006~2015년, All-HIST)와 산업혁명 이후 1.5°C 온난화 (Plus15-Future) 및 2°C 온난화(Plus20-Future) 시나리오에 대해 10년 동안의 타임슬라이스 실험을 수행하였다(Mitchell et al., 2017). 현재기후 실험에서 2006~2015년 해수면온도 및 해빙은 관측자료로부터 처리하고 있으며, 1.5°C와 2°C 온난화 시나리오에서의 해수면온도는 RCP2.6 및 RCP4.5 시나리오 기반으로 CMIP5 23개 다중모델로부터 현재대비 증가한 폐단을 계산하여 관측자료에 더하여 처리하였다. 다만 해빙의 경우는 현재 기후에 대한 CMIP5 모델의 낮은 재현성으로 인해 미래 전망에 대한 신뢰가 낮기 때문에, 해수면온도와 해빙 간의 선형 관계를 이용하여 온난화 시나리오에서의 극지역

Table 1. List of HAPPI AGCM used in this study. All ensemble members provide 10 years' simulation data for the HIST, Plus15, and Plus20 experiments.

Model name	Experiment name	Horizontal resolution (#longitude X #latitude)	No. of ensemble members
CanAM4	All-HIST	128×64	100
	Plus15-Future		100
	Plus20-Future		100
CAM4-2degree	All-HIST	144×96	500
	Plus15-Future		500
	Plus20-Future		500
MIROC5	All-HIST	256×128	100
	Plus15-Future		100
	Plus20-Future		100
ECHAM6-3-LR	All-HIST	192×96	100
	Plus15-Future		100
	Plus20-Future		100
NorESM1-HAPPI	All-HIST	288×192	125
	Plus15-Future		125
	Plus20-Future		125

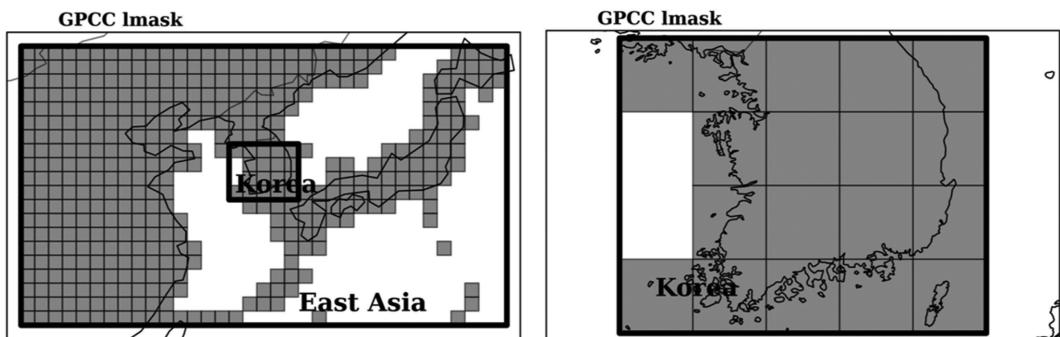


Fig. 1. Domain area of East Asia ($25\text{--}45^\circ\text{N}$, $100\text{--}145^\circ\text{E}$) and Korea ($34\text{--}38^\circ\text{N}$, $125\text{--}130^\circ\text{E}$). All model data were interpolated into the identical observed grid ($1^\circ \times 1^\circ$, based on GPCC).

해빙을 사용하였다. 각 실험은 모델 내부 변동성에 대한 불확실성을 설명하기 위해 많은 양상을 멤버를 포함하고 있으며, 본 연구에서는 100개 이상의 양상을 멤버를 가진 모델들을 분석하였다.

2.2 관측 자료

현재 기후에 대한 HAPPI 모델의 기온과 강수의 유효성 확인을 위하여 두가지 관측 자료를 사용하였다. 지표 기온은 CRU-TS (Climate Research Unit-Time-series) 버전 4.02의 월평균, 월최댓값, 월최솟값 자료를 이용하였으며, 해당 자료의 수평 해상도는 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (격자수: 360×720)이다. 강수량은 수평해상도가 $1^\circ \times 1^\circ$ (격자수: 180×360)인 GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) 버전 1.2의 월평균 자료를 사용

하였다. 사용된 기간은 HAPPI 모델의 현재 기후 실험과 동일한 2006년부터 2015년까지의 총 10년이며, HAPPI 모델 자료를 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자에 선형 내삽하여 전지구, 동아시아($25\text{--}45^\circ\text{N}$, $110\text{--}145^\circ\text{E}$) 및 우리나라($34\text{--}38^\circ\text{N}$, $125\text{--}130^\circ\text{E}$)의 육지 영역에 대해 월평균기온, 월최고기온, 월최소기온과 연평균 강수량에 대한 변화를 분석하였다. 육지와 해양의 구분은 GPCC의 지면마스크 자료를 사용하였다(Fig. 1).

2.3 분석 방법

본 연구에서는 1.5°C 및 2°C 온난화에 따른 온도 및 강수량의 확률 빈도 비교분석을 위해 연평균(기온, 강수) 및 월최고기온, 월최소기온을 각 양상을 멤버별로 먼저 계산하고 분석 영역에 대해 평균 한 후, 25

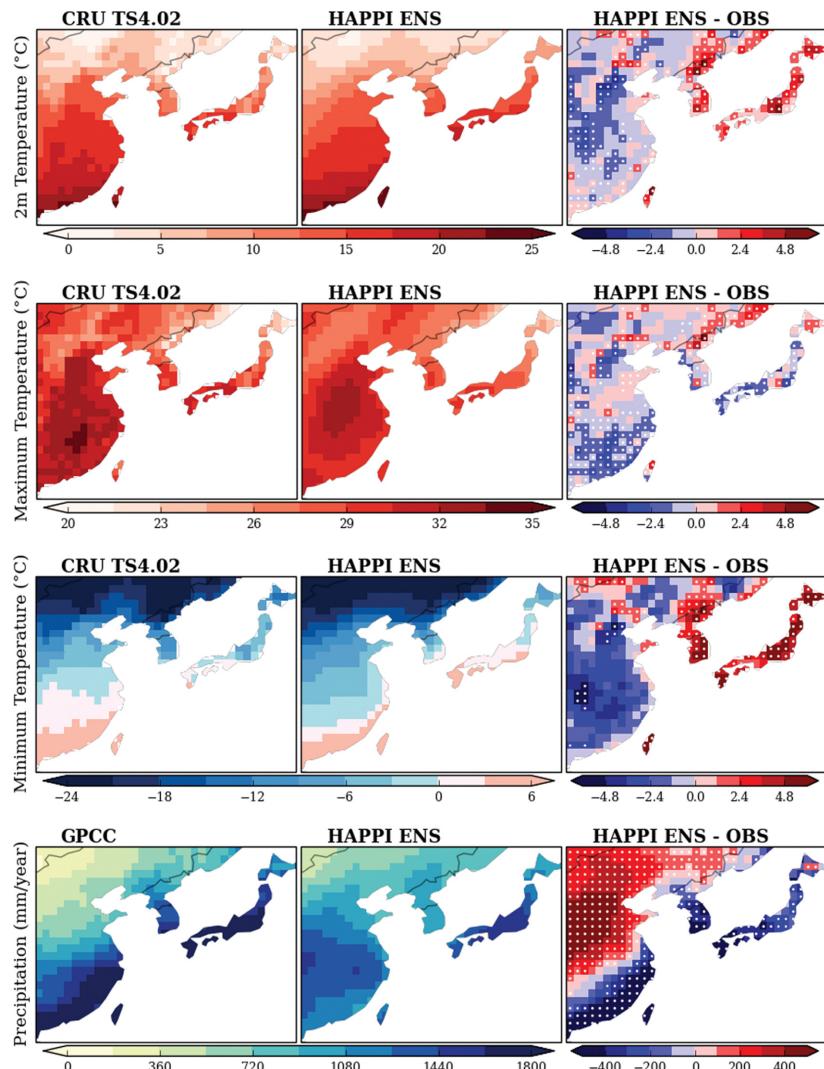


Fig. 2. Comparison of the spatial distribution (left two panels) and the difference (right panel) between the observation and HAPPI hist simulations. The white dots in the right panel represent the area where 80% of the used AGCMs agree with the change sign.

개의 bin에 대한 확률밀도함수를 계산하였다. 평균과 표준편차를 이용해서 정규분포로 근사하여 히스토그램과 함께 정규분포곡선을 표시하였다.

기후변화에서 사용되는 일반적인 취약성의 개념은 특정 시스템이 기후의 변화와 극한 사상을 포함한 기후변화의 악영향을 쉽게 받거나 대처하지 못하는 정도로서, 기후변화에 대한 시스템의 노출 수준(강도 및 빈도)과 그 시스템이 가지는 민감도와 적응능력의 합수로 결정된다. 본 연구에서는 파리 협정의 목표인 1.5°C 수준으로 지구온난화를 억제하지 못하고 2°C 까지 상승하는 경우, 나타날 수 있는 추가 영향(Fraction

of Additional Impact, FAI)을 아래 식을 통해 강도와 빈도로 나누어 계산하고, 이를 통해 동아시아 및 우리나라 지역에서 0.5°C 추가 온난화에 대한 기후 취약성을 이해하고자 하였다.

$$FAI = \frac{C2.0 - C1.5}{C2.0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

식(1)에서 $C1.5$ 와 $C2.0$ 은 분석 변수에 대하여 현재 기후 대비 1.5°C 와 2.0°C 지구온난화 시나리오에서의 변화량을 의미한다. 이를 통해, 2°C 를 기준으로 0.5°C 상승시에 평균 및 극값이 얼마나 급격하게 변화하는

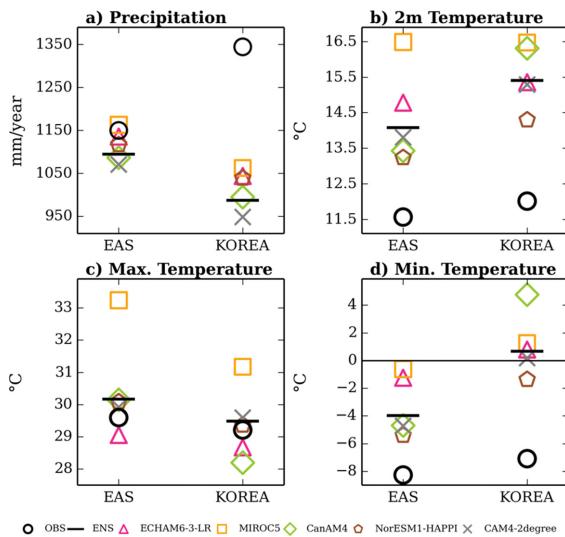


Fig. 3. Comparison of the domain averaged value between the observation and HAPPI hist simulations, (a) Precipitation, (b) 2 m temperature, (c) Maximum temperature and (d) Minimum temperature. The black circles are observation and the others represent the HAPPI models. And the thick horizontal black lines represent the ensemble mean of HAPPI models.

지를 정량화함으로써 기후변화에 따른 취약성을 분석할 수 있다. 각 값들의 최대, 최소 및 90 퍼센타일 값에 대하여 노출 빈도에 대하여 분석하였으며, 특히 90 퍼센타일 변수에 대해서는 대상값 이상이 발생할 확률을 빈도에 대한 변화량을 계산하였다.

3. 결 과

3.1 지표기온 및 강수량의 변화

먼저, HAPPI 현재기후에 대한 평균기온 및 강수량, 월최대/최솟값에 대해 CRU 및 GPCC 자료와의 비교 검증을 수행하였다(Figs. 2, 3). 모델의 현재기후에 대한 모의 성능은 평균기온과 강수량이 위도에 따라 차이를 특징을 잘 보여주고 있었지만, 평균 기온과 최저기온에서는 한반도 및 일본에서 과대모의 및 중국에서 과소모의 경향이 나타났다. 또한 강수량의 경우는 한반도 일본 및 남중국에서 과소모의 하며 중국 중부, 몽고, 만주 등 고위도에서 과대모의 경향이 나타났다(Fig. 2). 특히 우리나라를 강수를 과소 모의(Fig. 3a) 하는 경향이 있으며, 지표 기온과 최저기온의 경우 우리나라 및 동아시아 모두 다소 과대하게 모의하고 있었다(Figs. 3b, d). 또한 전지구에 비해 동아시아와 우리나라 지역 평균에 대한 모델 간 편차가 크

게 나타나고 있었는데, 특히 MIROC5 모델(주황색 사각형)이 크게 NorESM1 모델(갈색 오각형)이 작게 모의하는 경향을 보였다.

이를 기반으로 현재 기후(HIST) 대비 1.5°C (Plus15) 와 2°C (Plus20) 온난화 시나리오에 대한 동아시아 월 평균 지표 기온, 월최고/최소 기온 및 강수 변화를 확인하였으며(Fig. 4), 온난화 시나리오 간의 차이를 통해 전지구 온난화 억제목표인 1.5°C 보다 0.5°C 가 더 상승하게 되었을 때의 지역적인 증가 경향을 살펴보았다. 현재 대비 온난화 1.5°C 및 2°C 시나리오에서 동아시아 지역 평균 기온은 각각 $0.86 \pm 0.14^{\circ}\text{C}$ 와 $1.47 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ 가 상승하여 전지구 기온상승(온난화 시나리오 별 각 $0.85 \pm 0.06^{\circ}\text{C}$, $1.47 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$)과 비교하여 유사한 수준으로 증가하였으며, 전지구에 비해 동아시아와 우리나라에서 모델 간 편차는 크게 나타났다(Table 2). 전지구적으로 기온의 최댓값은 평균보다 작게, 최솟값은 평균보다 크게 증가하는 경향이 나타났지만, 동아시아지역의 경우 기온의 월최댓값의 변화는 온난화 시나리오별로 각각 $0.94 \pm 0.21^{\circ}\text{C}$ 와 $1.51 \pm 0.22^{\circ}\text{C}$ 로 전지구 보다 약 7% 더 높은 수준으로 증가하였으나, 반대로 동아시아 기온의 월최솟값 변화는 전지구에 비해 약하게 증가하는 것으로 나타났다. “전지구 0.5°C 에 대한 추가 온난화”는 동아시아 및 한반도 평균 기온을 약 0.6°C 상승시켰으며(Table 3), 지역적으로는 한반도, 몽골, 중국 화북 및 동북에서 뚜렷한 증가 경향을 보였다(Fig. 4). 이러한 결과는 다섯개의 모델 중 적어도 4개 이상이 동일한 변화 경향을 보이고 있었으며(Fig. 4의 dotted area). 이는 RCP 시나리오 기반 CMIP5 모델자료로 분석한 선행연구(KMA, 2017)에서 산업화 이후 증가된 동아시아 지역의 기온 상승이 전지구 기온 상승과 유사한 수준으로 나타난다는 분석과 일치한다. 모델별로는 HIST 자료와 비슷하게 전체적으로 MIROC 모델이 전지구/동아시아/한반도에서 지표기온을 다소 높게 모의하고 있었으며, NorESM 모델이 낮게 모의하는 경향을 확인하였으나, 한반도 지표기온의 월최솟값의 경우 CanAM4 모델이 특이하게 높게 모의되어 미래 증가율이 가장 낮게 나타났다(Fig. 5).

연강수량은 현재 대비 온난화 1.5°C 및 2°C 시나리오에서는 전체적으로 현재보다 증가하는 경향을 보이고 있었다. 특히, 전지구(온난화 시나리오 별 $11.91 \pm 5.38 \text{ mm}$ 및 $23.45 \pm 6.83 \text{ mm}$)에 비해 동아시아와 우리나라 지역에서 증가하는 경향이 크게 나타났다(동아시아: $54.35 \pm 33.22 \text{ mm}$, $75.04 \pm 33.26 \text{ mm}$, 우리나라: $62.26 \pm 27.09 \text{ mm}$, $87.39 \pm 30.23 \text{ mm}$) (Table 2). 이를 통해 전지구 보다 동아시아와 우리나라에서 보다 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. “전지구 0.5°C 에 대한 추가 온난화”에 대한 강수 변화는 동아

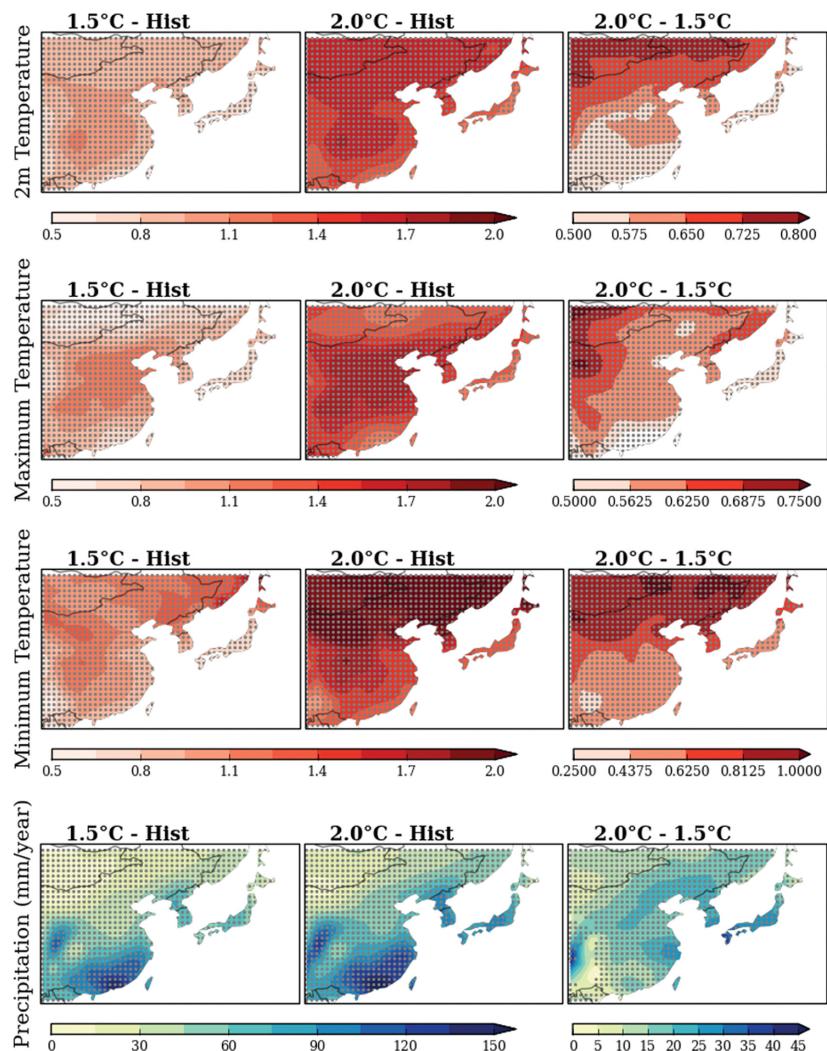


Fig. 4. Spatial distribution of the future changes of annual mean surface air temperature, maximum temperature, minimum temperature, and precipitation in HAPPI scenarios (Plus15 - Hist, Plus20 - Hist) and the impact of 0.5 increase (Plus20 - Plus15). Gray dotted grids represent the area where 80% of the used AGCMs agree with the change sign.

Table 2. The HAPPI-1.5/2.0 based future climate change by 2100 compared to the hindcast period 2006~2015. The number in parentheses mean the statistically 95% confidence interval (PR: Annual mean Precipitation rate, TAS: Annual mean Surface air temperature, TASMAX: Annual monthly maximum, and TASMIN: Annual monthly minimum).

	Plus15 minus All-Hist				Plus20 minus All-Hist			
	PR	TAS	TASMAX	TASMIN	PR	TAS	TASMAX	TASMIN
Global	11.91 (± 5.38)	0.85 (± 0.06)	0.77 (± 0.1)	1.11 (± 0.09)	23.45 (± 6.83)	1.47 (± 0.05)	1.4 (± 0.09)	1.79 (± 0.09)
EAS	54.35 (± 33.22)	0.86 (± 0.14)	0.94 (± 0.21)	0.99 (± 0.1)	75.04 (± 33.26)	1.47 (± 0.12)	1.51 (± 0.22)	1.69 (± 0.06)
KOREA	62.26 (± 27.09)	0.8 (± 0.11)	0.89 (± 0.16)	0.91 (± 0.12)	87.39 (± 30.23)	1.42 (± 0.1)	1.48 (± 0.13)	1.6 (± 0.14)

Table 3. The difference between the 2°C and 1.5°C scenarios. The number in parentheses mean the statistically 95% confidence interval (PR: Annual mean Precipitation rate, TAS: Annual mean Surface air temperature, TASMAX: Annual monthly maximum, and TASMIN: Annual monthly minimum).

	PR	TAS	TASMAX	TASMIN
Global	11.54 (± 2.337)	0.622 (± 0.009)	0.63 (± 0.027)	0.684 (± 0.025)
EAS	20.693 (± 4.096)	0.602 (± 0.038)	0.569 (± 0.047)	0.694 (± 0.053)
KOREA	25.132 (± 6.652)	0.614 (± 0.047)	0.584 (± 0.044)	0.695 (± 0.08)

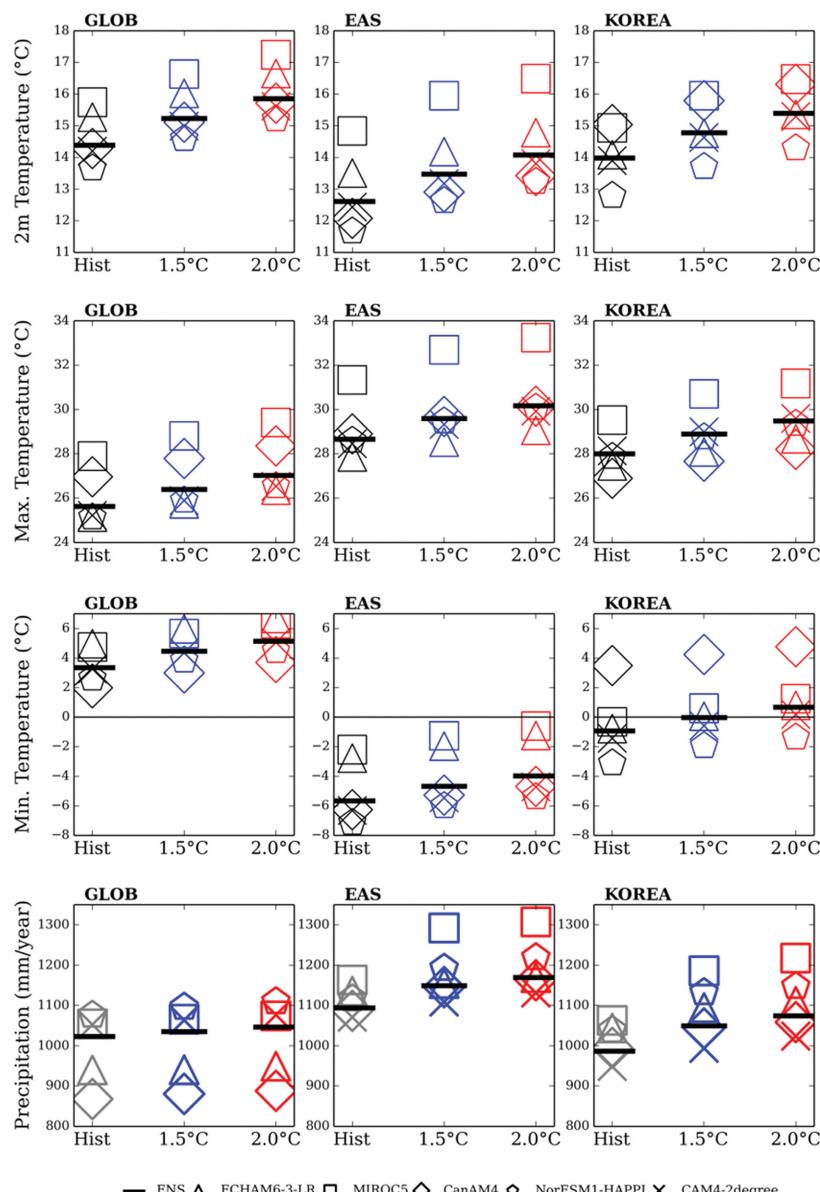


Fig. 5. Comparisons of the domain averaged values of five individual AGCMs (CanAM4, CAM4-2degree, MIROC5, ECHAM6-3-LR, and NorESM1-HAPPI) over global, East-Asia, and Korea regions. Differnt symbols denote the HAPPI models and the thick horizontal black lines represent the ensemble mean of HAPPI models.

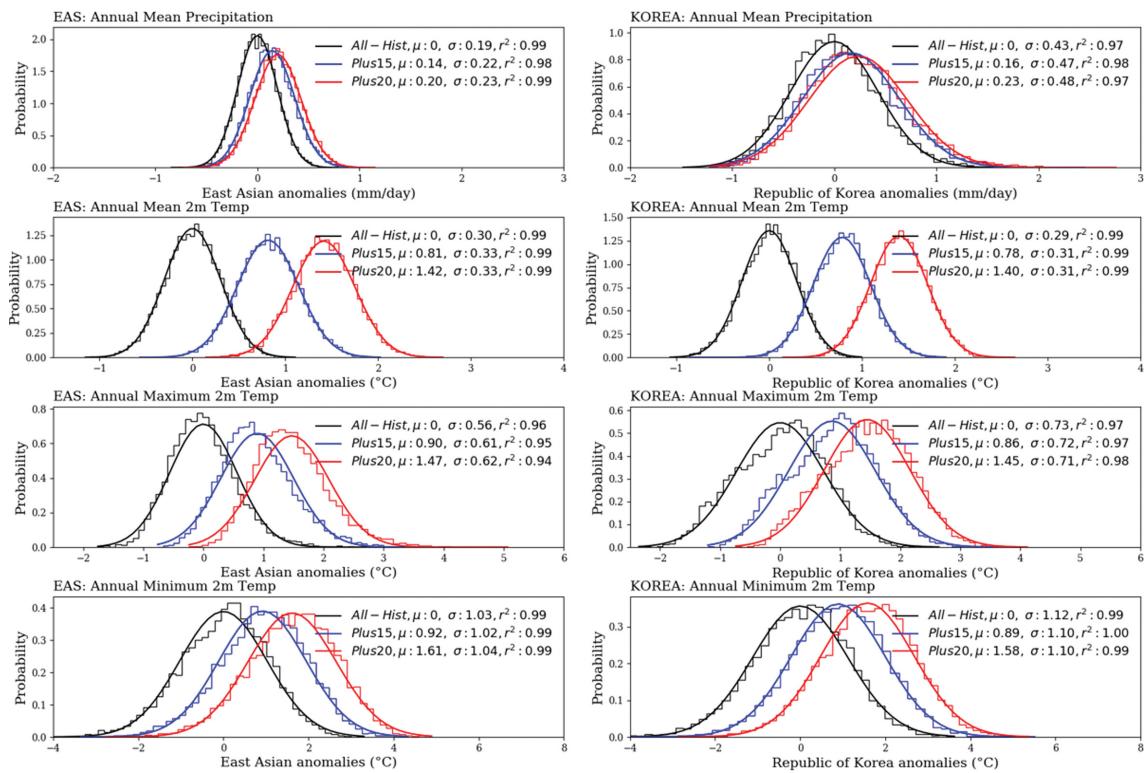


Fig. 6. Probability distributions functions of for annual surface air temperature and precipitation in the historical (HIST), 1.5 (Plus15) and 2.0 (Plus20) degree global warming future experiments (unit: %). The r^2 is the squared correlation coefficient between fitted and real values.

시아 및 한반도 영역에 대해 20.693 ± 4.096 mm, 25.132 ± 6.652 mm의 증가 경향이 나타났으며(Table 3), 지역적으로는 한반도, 중국 화동, 화북지역 및 일본에서 뚜렷한 증가 경향을 보였다(Fig. 4). 모델별 강수량 차이에서는 대상 영역이 세밀해질수록 저해상도 모델인 CAM4-2degree에서 과소 모의하는 경향을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

3.2 극한기후 특성 변화

일반적으로 기후 변화는 기상, 기후 현상의 빈도, 강도, 공간범위, 지속시간, 시기의 변화를 초래하면서, 전례가 없는 극한 현상을 야기할 수 있다. 즉, 평균적인 기후변화가 변동성 증가 및 대청성 변화를 수반하여 분포의 극단에 해당하는 극한값의 발생빈도와 규모의 증가를 야기한다는 것이다(IPCC, 2001). 그렇기 때문에 정교한 기후변화 적응대책 수립을 위해서는 온난화 시나리오에 대한 기온, 강수의 평균적인 변화뿐만 아니라, 이러한 극한기후 변화에 대한 이해가 포함되어야 한다. Fig. 6는 현재 기후 및 현재 기후 대비 1.5°C와 2°C 전지구 온난화 시나리오에서의 동아

시아 및 우리나라 영역의 지표기온 및 강수 아노말리에 대한 히스토그램과 그로부터 추정한 정규분포 곡선의 변화를 살펴본 것이다. 1.5°C 온난화 시나리오에서의 동아시아 평균 기온은 현재기후 대비 0.86°C (우리나라의 경우 0.80°C)으로 증가하였으며, 현재 대비 약 10% 정도의 확률 변화가 나타났다. 2°C 전지구 온난화에 따라 연평균 온도는 현재 기후 대비 1.47°C (우리나라의 경우 1.42°C)으로 크게 증가하였으나, 변동성의 변화는 1.5°C 온난화 시나리오와 유사한 증가 경향을 보였다. 월최대/최솟값은 1.5°C와 2°C 온난화 발생시 동아시아에서 $0.94/0.99$ 와 $1.51/1.69^{\circ}\text{C}$, 한반도에서 $0.89/0.91$ 와 $1.48/1.60^{\circ}\text{C}$ 증가하는 것으로 나타났다. 평균의 상승과 더불어 표준편차가 커져 확률분포 함수가 넓어지는 쪽으로 움직이고 있었으나, 1.5°C에서 2.0°C로의 추가 온난화에 대한 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

동아시아 연강수량은 1.5°C와 2°C 온난화 시나리오에서 현재 대비 각각 $54.35, 75.04 \text{ mm year}^{-1}$ (우리나라의 경우 $62.26, 87.39 \text{ mm year}^{-1}$)으로 증가하였다. 기온의 확률 분포 변화들과는 다르게 강수 평균값의

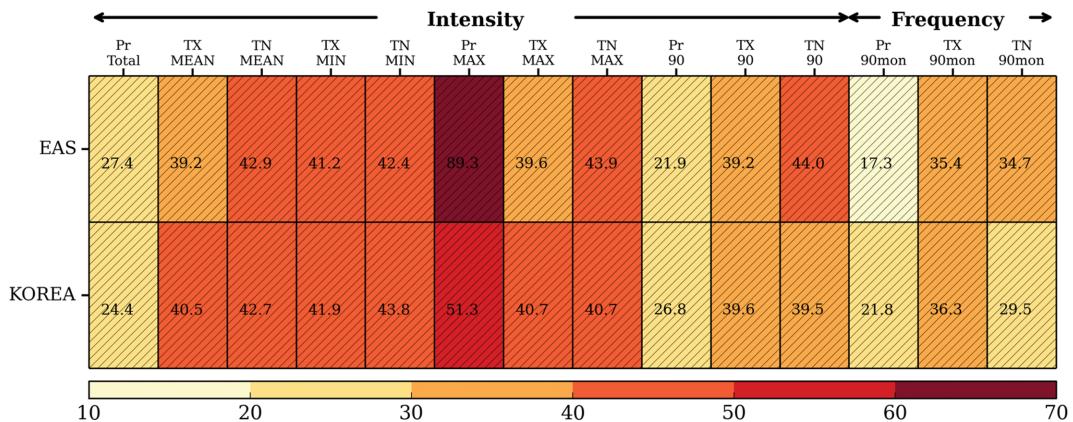


Fig. 7. Changes of extreme climate events avoided over East Asia and its sub-regions (box in Fig. 1) in 1.5°C compared with 2.0°C global warming future (unit: %). The hatched lines represent more than 80% of AGCM agreement on the change sign.

이동은 크지 않았으나 변동성은 현재 대비 약 10% 증가하는 것으로 나타나고 있어 온난화가 강해짐에 따라 변동성이 증가하는 경향을 보였다. 1.5/2.0°C 온난화 시나리오 모두에서 현재 기후에서 90 퍼센타일이 넘는 높은 지표기온과 강수의 확률 비율은 크게 증가하였으나, 반대로 현재 기후에서 10 퍼센타일 이하의 낮은 기온에서의 확률 비율은 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 확률 비율 변화는 월 평균 지표기온에서의 경향 보다 월최대/최솟값에서의 극한 변화가 훨씬 뚜렷하게 나타났다. 평균 강수 또한 현재 기후의 90 퍼센타일이 넘는 강한 강수의 확률 비율이 각 온난화 시나리오에서 약 20% 가량 증가하였다.

3.3 1.5°C 및 2°C 온난화에 따른 기후 취약성 분석
 앞서 살펴본 바와 같이 온난화 시나리오에서 동아시아 및 우리나라 지표기온 및 강수의 평균의 이동과 변동성 변화에 따라 90 퍼센타일 이상의 극한 기후의 출현 확률이 크게 상승할 수 있음을 확인하였다. 이번 장에서는 우리가 지구온난화 억제 목표인 1.5°C를 달성하지 못하여 0.5°C가 추가로 상승하는 경우, 월최고(TX), 월최소(TN) 지표기온 및 연평균강수(PR) 및 각 변수들의 90 퍼센타일 이상의 강도와 빈도에 대한 지역적인 취약성이 얼마나 증가하는지 알아보고자 한다. 이는 [2-3장] 분석방법에서 설명한 식 1을 이용하여, 분석변수에 대하여 전지구 2°C 온난화 시나리오 대비 1.5°C 온난화 시나리오의 변화량 차이로 계산하였다(Fig. 7). 강도에 대한 취약성에서 PR Total은 연간 총강수량, MEAN은 평균값의 변화율, 90은 90 퍼센타일에 대한 값의 변화율을 나타낸 것이다. 그래프에 표시한 사선은 사용한 HAPPI 5개 모델 중 4개 이상 동일한 경향이 나타난 경우를 의미한다.

전지구적인 기온이 0.5°C 추가 상승한다면, 동아시아 연강수량은 억제 목표인 1.5°C 온난화 시나리오에 비해 27.4% 증가하는 것으로 예상되었다. 특히 90퍼센타일의 강한 강수 강도에서 21.8%로 뚜렷한 변화를 확인할 수 있었으며, 우리나라가 동아시아에 비해 상대적으로 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 10 퍼센타일의 약한 강수 강도에 대한 취약성은 동아시아 및 우리나라 영역 모두 모델간 동의 수준이 낮게 나타났으나, 불확실성이 높은 것으로 판단되어 따로 표시 하지 않았다. 연최고기온의 평균 강도는 39.2% 증가하는 것으로 나타났으며, 90퍼센타일의 높은 기온의 강도 또한 유사한 수준인 약 40% 수준으로 증가할 것으로 전망되었다. 월최소기온의 평균 강도는 42.9%로 높게 나타났으며, 10 퍼센타일의 낮은 지표기온에서의 유사한 수준의 변화를 보였다. 연강수량은 평균적인 강수의 변화는 크지 않았지만, 최대강수량의 경우 특히 크게 상승하는 경향이 나타났다. 빈도와 관련해서는 0.5°C 추가 온난화가 일어나는 경우, 현재 기후의 90 퍼센타일 수준의 높은 기온의 출현 빈도(TX90mon, TN90mon)가 약 35% 이상 높아질 뿐만 아니라, 강한 강수(Pr 90mon)의 경우에도 동아시아에서 17.3%, 우리나라에서는 21.8% 출현할 확률이 높아지는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 파리협정에서 제시한 1.5와 2.0°C 지구온난화에 따른 한반도 미래 기후변화를 대비한 국내 정책수립을 위한 과학적 근거 자료로 제공을 위해 HAPPI 1.5/2.0 자료를 활용한 전지구/동아시아/한반도 영역에 대한 기후변화 특성을 분석하고자 하였다. HAPPI 자료는 모델별 100개 이상의 양상불을 가지고

1.5/2.0°C에 평형을 이루는 시나리오로서 ‘1.5도 지구 온난화 보고서’ 작성 및 최근 연구들에서 활용되고 있으나, 국내 적용 사례연구는 많지 않기 때문에 이에 대한 평균적인 적용가능성을 모의하고자 하였다.

HAPPI가 모의한 현재기후(HIST)의 기온과 강수량은 동아시아 및 한반도 지역에 대해 관측과 유사한 공간분포를 보이고 있었으나, 기온에 대해서는 과대 모의, 강수량에 있어서는 과소모의 경향을 보이고 있었다. 모델간의 편차도 전지구에 비해 동아시아와 우리나라 지역에서 높게 나타났다. 미래 1.5/2.0°C 온난화 시에는 전지구 기온상승과 비슷하게 동아시아 및 한반도 지역에서 온도 상승이 일어났으며, 극값에 있어 최소온도에 대한 증가 경향이 전지구에 비해 크게 나타나고 있었다. 강수량에 있어서는 전지구적으로 상승하는 추세보다 많은 강수량 증가를 보이고 있으며, 동아시아 및 한반도 지역으로 올수록 증가경향이 뚜렷하게 나타났다. 각 변수들에 대한 확률밀도함수는 기온의 경우 평균은 증가하고 표준편차가 커지는 방향으로 변화하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 강수량이 더 크게 나타나는 것을 확인하였다.

지구온난화 억제 목표인 1.5°C 보다 0.5°C가 더 상승하게 되는 경우, 동아시아 및 우리나라 지역은 기온에 있어서는 전지구와 비슷하게, 강수량은 조금 더 증가하는 것으로 확인되었다. 기온과 관련된 극값에서 최댓값에서는 조금 약하게 최솟값에서는 증가하는 경향이 크게 나타났다. 확률밀도함수 상에는 기온은 평균 상승 이외에 다른 변화는 거의 없었고, 강수는 극값 발생 확률이 조금씩 늘어가는 방향으로 변화하고 있었다. 전체적으로 요약하면 1.5/2.0°C 기후변화로 인해 동아시아 및 한반도 기온 변화는 전지구적으로 비슷한 수준으로, 강수량은 전지구에 비해 조금 더 강하게, 그리고 평균보다 극값에서, 극값 중에서는 최댓값의 변화가 최솟값의 변화에 비해 크게 나타나고 있었다. 0.5°C 추가 상승으로 인해서는 동아시아 및 한반도 지역은 전지구에 비해서 변화율이 크게 나타났을 뿐만 아니라, 극한 기온 및 강수의 강도는 더 강해지며 보다 자주 발생할 것으로 판단되었다.

본 결과는 CMIP5 모델 결과에 비해 안정화된 상태에서의 불확실성을 고려한 많은 양상을 개수의 모델을 활용하여 분석한 결과이지만, 기존의 CMIP5 모델 결과 뿐만 아니라 새로 업로드 되고 있는 CMIP6 자료와의 상호 비교 분석이 추가되어야 할 것이다. 또한, 강수량의 경우 HAPPI HIST 자료에 대한 동아시아 지역에 대한 전체적인 과소모의, HAPPI 자료에 대한 유의수준에 다소 멀어지는 경향을 보이고 있어 이 자료 기반의 해석에 주의를 요구한다. 뿐만 아니라, 추후 극한 값에 대해 일자료 결과를 이용한 심층분석 및 동아시아에 대표적인 기후 모드에 대한 분석 여부

가 추가되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발연구」 “AR6 기후변화시나리오 개발·평가(1365003000)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Dosio, A., and E. M. Fischer, 2018: Will half a degree make a difference? Robust projections of indices of mean and extreme climate in Europe under 1.5°C, 2°C, and 3°C global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 935-944, doi:10.1002/2017GL076222.
- IPCC, 2001: *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. T. Houghton et al. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.
- IPCC, 2018: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming 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. et al. Eds., World Meteorological Organization, 1-32.
- King, A. D., and D. J. Karoly, 2017: Climate extremes in Europe at 1.5 and 2 degrees of global warming. *Environ. Res. Lett.*, **12**, 114031. doi:10.1088/1748-9326/aa8e2c.
- KMA, 2017: Korea Climate Change Report for POST 2020. Korea Meteorological Administration, 153 pp (in Korean).
- Knutti, R., J. Rogelj, J. Sedláček, and E. M. Fischer, 2016: A scientific critique of the two-degree climate change target. *Nat. Geosci.*, **9**, 13-18, doi:10.1038/ngeo2595.
- Lee, D., S.-K. Min, E. Fischer, H. Shiogama, I. Bethke, L. Lierhammer, and J. F. Scinocca, 2018: Impacts of half a degree additional warming on the Asian summer monsoon rainfall characteristics. *Environ. Res. Lett.*, **13**, 044033, doi:10.1088/1748-9326/aab55d.
- Lee, S.-M., and S.-K. Min, 2018: Heat stress changes over East Asia under 1.5°C and 2.0°C global warming targets. *J. Climate*, **31**, 2819-2831, doi:10.1175/JCLI-D-17-0449.1.
- Li, D., T. Zhou, L. Zou, W. Zhang, and L. Zhang, 2018: Extreme high-temperature events over East Asia in

- 1.5°C and 2°C Warmer Futures: Analysis of NCAR CESM Low-Warming Experiments. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1541-1550, doi:10.1002/2017GL076753.
- Ma, S., T. Zhou, O. Angelil, and H. Shiogama, 2017: Increased chances of drought in southeastern periphery of the Tibetan Plateau induced by anthropogenic warming. *J. Climate*, **30**, 6543-6560, doi:10.1175/JCLI-D-16-0636.1.
- Mitchell, D., R. James, P. M. Forster, R. A. Betts, H. Shiogama, and M. Allen, 2016: Realizing the impacts of a 1.5°C warmer world. *Nat. Clim. Change*, **6**, 735-737, doi:10.1038/nclimate3055.
- _____, and Coauthors, 2017: Half a degree additional warming prognosis and projected impacts (HAPPI): background and experimental design. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 571-583, doi:10.5194/gmd-10-571-2017.
- Ruane, A. C., M. M. Phillips, and C. Rosenzweig, 2018: Climate shifts within major agricultural seasons for +1.5°C and +2.0°C worlds: HAPPI projections and AgMIP modeling scenarios. *Agric. Forest Meteorol.*, **259**, 329-344, doi:10.1016/j.agrformet.2018.05.013.
- Schleussner, C.-F., and Coauthors, 2016: Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5°C and 2°C. *Earth Syst. Dynam.*, **7**, 327-351, doi:10.5194/esd-7-327-2016.
- Taylor, M. A., L. A. Clarke, A. Centella, A. Bezanilla, T. S. Stephenson, J. J. Jones, J. D. Campbell, A. Vichot, and J. Charlery, 2018: Future Caribbean climates in a world of rising temperatures: the 1.5 vs 2.0 Dilemma. *J. Climate*, **31**, 2907-2926, doi:10.1175/JCLI-D-17-0074.1.
- Wehner, M., and Coauthors, 2018: Changes in extremely hot days under stabilized 1.5 and 2.0°C global warming scenarios as simulated by the HAPPI multi-model ensemble. *Earth Syst. Dynam.*, **9**, 299-311, doi:10.5194/esd-9-299-2018.
- Xu, Y., B.-T. Zhou, J. Wu, Z.-Y. Han, Y.-X. Zhang, and J. Wu, 2017: Asian climate change under 1.5-4°C warming targets. *Adv. Climate Change Res.*, **8**, 99-107, doi:10.1016/j.accre.2017.05.004.