

우리나라 상세 기후변화 시나리오의 지역별 기온 전망 범위 - RCP4.5, 8.5를 중심으로 -

한지현* · 심창섭*[†] · 김재욱**

*한국환경정책·평가연구원 기후대기연구부, **한국환경정책·평가연구원 물국토연구부

Variance Analysis of RCP4.5 and 8.5 Ensemble Climate Scenarios for Surface Temperature in South Korea

Jihyun Han*, Changsub Shim*[†] and Jaekuk Kim**

*Department of atmospheric and climate change research, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

**Department of land and water environment research, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

ABSTRACT

The uncertainty of climate scenarios, as initial information, is one of the significant factors among uncertainties of climate change impacts and vulnerability assessments. In this sense, the quantification of the uncertainty of climate scenarios is essential to understanding these assessments of impacts and vulnerability for adaptation to climate change. Here we quantified the precision of surface temperature of ensemble scenarios (high resolution (1km) RCP4.5 and 8.5) provided by Korea Meteorological Administration, with spatiotemporal variation of the standard deviation of them. From 2021 to 2050, the annual increase rate of RCP8.5 was higher than that of RCP4.5 while the annual variation of RCP8.5 was lower than that of RCP4.5. The standard deviations of ensemble scenarios are higher in summer and winter, particularly in July and January, when the extreme weather events could occur. In general, the uncertainty of ensemble scenarios in summer were lower than those in winter. In spatial distribution, the standard deviation of ensemble scenarios in Seoul Metropolitan Area is relatively higher than other provinces, while that of Yeongnam area is lower than other provinces. In winter, the standard deviations of ensemble scenarios of RCP4.5 and 8.5 in January are higher than those of December. Especially, the standard deviation of ensemble scenarios is higher in the central regions including Gyeonggi, and Gangwon, where the mean surface temperature is lower than southern regions along with Chungbuk. Such differences in precisions of climate ensemble scenarios imply that those uncertainty information should be taken into account for the implementation of national climate change policy.

Key words: Regional government, RCP, ensemble climate scenarios, standard deviation, extreme weather

1. 서 론

제5차 IPCC 보고서 (The fifth assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change; 이하 IPCC AR5) 는 20세기 동안 지구 평균 지표 기온이 약 0.85°C 증가하였으며, 이러한 변화는 자연적 요인보다는 인위적인 온실가스 배출에 기인함을 보여주었다 (IPCC, 2013). 또한

미래 기후전망 모델의 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways; 이하 RCP) 시나리오를 분석한 결과 이산화탄소 농도를 2000년 수준으로 유지하더라도 21세기 동안 지구 온난화는 지속되며, 폭염과 한파 등 극한 기후 현상의 발생 빈도 또한 증가할 것으로 전망되었다 (Park, 2015; IPCC, 2013).

선행연구에 의하면, 기후변화는 인간의 질병 발생률과 사

[†]Corresponding author: marchell@gmail.com

Received February 14, 2018 / Revised March 19, 2018 / Accepted March 23, 2018

망률 증가에 기여하며 (Patz et al., 2005), 지구 온난화로 인해 발생한 가뭄과 기근 등 이상 기후 현상은 수단, 시리아, 소말리아 등 세계 각 지역의 사회적 분열과 혼란을 가중시키고 있다 (Cook et al., 2016; Kelly et al., 2015; von Uexkull et al., 2016).

북반구 중위도에 위치한 동아시아 지역은 기후변화의 영향이 다른 지역에 비해 상대적으로 크다 (IPCC, 2013). 우리나라는 다른 나라에 비해 기온 상승이 두드러져, 1912년부터 2008년까지 기온 상승률이 전 지구 평균 상승률 (0.7°C)의 두 배가 넘는 1.7°C에 이른다 (NIMR, 2009; Park, 2015). 또한, 폭염과 같은 극한 기후 현상이 자주 발생함에 따라 (Lee et al., 2012) 이로 인한 사회·경제적 피해 또한 증가하고 있다 (KMA, 2017b). 그 예로, 2016년에는 연평균 기온이 평년보다 1.1°C 높았으며, 이는 여름철의 기록적인 폭염과 열대야를 동반하여 폭염 질환자 증가, 가축 폐사, 침엽수종 고사, 녹조 등 다양한 문제를 야기하였다 (KMA, 2017b). 이에 우리나라에서는 중앙정부, 지자체 그리고 공공 기관을 중심으로 기후변화에 대한 적응을 위해 부문별 (예, 산림, 농업, 리스크 등) 영향과 취약성 평가를 시행하고 있으며, 이를 위한 기초 자료로 기후변화 시나리오가 활용되고 있다.

일반적으로 기후변화 영향과 취약성 평가의 불확실성은 주로 기후변화 시나리오에 의한 것으로 알려져 있으며 (Lee and Kim, 2012; Prudhomme and Davies, 2009; Wilby and Harris, 2006), 따라서 기후변화 시나리오의 불확실성에 대한 정량적 분석과 이해의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다 (Chung et al., 2015; Kang et al., 2013). 이에 세계 주요 기관에서는 기후변화 시나리오의 시공간적 변화특성과 기후 시나리오들의 신뢰수준을 파악하기 위해 기후변화 시나리오에 대한 주요 통계적 변수 (예, 평균, 표준 편차)를 정량적으로 분석하여 제공하고 있다 (Flato et al., 2013; Knutti and Sedláček, 2013). 그 예로, IPCC AR5에서는 기후변화 전망 결과의 표출시 평균, 중앙값과 더불어 표준편차와 백분위수를 함께 보여줌으로써 기후변화 시나리오들의 기후 전망시 편차 범위에 대한 정보를 함께 제공하고 있다 (IPCC, 2013). Sheffield et al. (2013)은 기후모델 비교연구 사업 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5; 이하 CMIP5)에 의해 생산된 기후변화 시나리오들을 이용하여 북아메리카 지역의 기온과 강수에 대한 기후변화 전망 시 계절별, 지역별 시나리오들의 전망 범주 그리고 관측자료와 비교 시 시나리오들의 편차 (bias) 정도를 분석하였다. 호주 기상청 또한 지역별 그리고 계절별로 기후변화 시나

리오들의 온도와 강수량 변화에 대한 평균, 백분위수 그리고 사분위수 등을 분석하여 기후변화 시나리오들의 편차를 정량적으로 파악할 수 있는 기초 자료로 제공하였다 (CSIRO and Bureau of Meteorology, 2015). Lee and Kim (2012)는 최고 엔트로피 방법을 이용하여 전지구 기후 모델 (Global Climate Model, 이하 GCM)로 생산된 기후변화 시나리오들의 한반도 강우에 대한 불확실성을 정량적으로 계산하였다. Pan et al. (2001)은 기후변화 시나리오들의 시공간적 표준 편차를 이용하여 지역 기후 모델 (Regional Climate Model, 이하 RCM)로 생산된 강우 자료의 불확실성을 정량적으로 분석하였다. 이러한 결과들은 기후변화 시나리오들의 시공간적 변화에 대한 시나리오 간 편차 분석이 기후변화 시나리오의 불확실성을 정량적으로 파악하는데 유용함을 보여 준다.

우리나라는 기단의 변화로 인해 계절별 날씨변화가 뚜렷하며, 면적에 비해 토지피복 및 지형의 변화가 다양하고 복잡해 지역 간 날씨의 변화도 크다 (Park, 2015; Ho et al., 2011). 따라서 지자체 수준의 기후변화 적응 및 취약성 평가가 필요하며, 이를 위해서는 고해상도의 기후 시나리오가 요구된다. 이에 기상청과 국립기상과학원에서는 국제표준 기후 시나리오인 RCP 시나리오를 한반도 규모로 상세화한 중·고해상도 자료 (12.5km, 1km)를 생산 및 제공하고 있다 (KMA, 2017a; Kim et al., 2016).

Suh et al. (2016)와 Oh et al. (2016)은 그 중 12.5 km 공간해상도의 앙상블 기후변화 시나리오 간의 상관분석 (편향성, 상관성, RMSE (root mean square error) 분석 등)을 통해 RCP 시나리오의 종류와 계절에 따른 한반도의 기온과 강우 전망 특성과 시나리오의 불확실성을 분석하였다. 그러나 이러한 선행연구들은 한반도 전역에 대한 기후변화 시나리오들의 불확실성 정보만을 제공하며, 상대적으로 낮은 공간해상도로 인해 지자체별로 시나리오의 불확실성을 파악하는데 한계가 있다.

기상청에서는 지자체별 기후변화 적응대책 수립을 위한 과학적 근거 자료 지원을 위해 고해상도 시나리오를 바탕으로 기초 지자체 수준의 상세 기후변화 분석 결과를 발표하였다 (KMA, 2017a). 그러나 단일 시나리오를 이용한 기후 전망 결과로 불확실성에 대한 정보가 포함되어 있지 않다. 지자체 차원의 기후변화 대응 정책의 수립을 위해서는 고해상도 시나리오를 이용한 영향 및 취약성 평가 결과뿐만 아니라 그 기초 자료인 고해상도 시나리오 앙상블에 대한 불확실성 정보도 같이 제공되어야 한다.

그런 의미에서 고해상도 앙상블 시나리오 간의 정량적

편차는 기후전망의 불확실성과 관련된 중요한 정보가 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 1km 해상도의 기상청 앙상블 시나리오 (RCP4.5와 8.5 시나리오(각 5종)) 중 지표 기온에 대한 시공간적 편차 분석을 통해 계절별, 지역별 시나리오에 대한 불확실성의 특성과 광역 지자체 수준의 정량적 편차 정보를 제공하고자 한다.

2. 모델 및 시나리오 자료 분석

본 연구에서는 2021년부터 2050년까지 기상청에서 제공하는 남한지역에 대한 1km 고해상도 RCP4.5와 8.5 앙상블 기후 시나리오 자료를 사용하였다. 본 연구에 사용된 앙상블 시나리오의 상세화 과정은 다음과 같다.

IPCC AR5에서는 CMIP5와 연계하여 국제표준 기후변화 시나리오로 RCP 시나리오를 채택하여 활용하고 있다 (IPCC, 2013). RCP 시나리오는 인간 활동에 의해 배출되는 온실가스의 농도 변화를 고려하여 2100년 후에 복사강제력이 $8.5W/m^2$ 를 초과하는 고농도 시나리오 (RCP8.5), $6W/m^2$ 로 안정화되는 중간 농도 시나리오 (RCP6.0), $4.5W/m^2$ 로 안정화되는 저농도 시나리오 (RCP4.5), 2050년경에 복사강제력이 $3W/m^2$ 에 도달 후 2100년 후에 $2.6W/m^2$ 로 감소하는 초저농도 시나리오 (RCP2.6)를 대표농도경로로 선정한 시나리오로 온실가스의 배출량이 시간에 따라 변화하는 것을 강조하기 위해 명명에 ‘경로’를 포함한다 (Baek et al., 2011; KMA, 2017a).

우리나라는 RCP 시나리오를 기반으로 지역별, 분야별 기후변화에 대한 영향을 예측하고 이에 대한 적응을 위해 고해상도 (1km)의 국가 표준 시나리오 개발을 위한 중장기 계획을 기획하였다 (Baek et al., 2011). 그리고 이를 위해 기상청과 국립기상과학원은 CMIP5에 참여하여 GCM인 HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environmental Model version 2 - Atmosphere and Ocean)를 이용하여 전지구 RCP 기후 시나리오 자료를 생산하였다 (Ahn et al., 2013; Baek et al., 2011). HadGEM2-AO 모델은 영국기상청에서 개발한 전지구 대기-해양-해빙 결합 모델이다 (Martin et al., 2011). 대기모델의 수평격자는 N96 ($1.875^\circ \times 1.25^\circ$), 아라카와 (Arakawa) C 격자계를 적용하였으며, 연직격자는 38층으로 Charney-Phillips 격자를 사용하였으며, 고도는 약 38km이다 (Baek et al., 2013; Martin et al., 2006).

생산된 전지구 시나리오는 모델 초기장의 불확실성 감소와 모델 성능 개선을 위해 (Suh et al. 2012; Christensen et al. 2010; Feng et al. 2011) 5종의 RCM을 이용하여 12.5km로 역

학적 상세화하였다 (Baek et al., 2013; Lee et al., 2012). 이들 RCM은 지역 규모 기후 시나리오 상세화를 위한 공동 연구인 CORDEX-EA (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment in East Asia)에 참여하고 있다. 앙상블 분석을 위한 RCM의 생산 기관과 환경설정 조건은 Table 1과 같다. 5개의 앙상블 모델들은 크게 비정수계 모델인 HadGEM3-RA, SNURCM, WRF와 정수계 모델인 RegCM4, GRIMs로 구분된다.

HadGEM3-RA는 GCM인 HadGEM3의 RCM 버전으로 모델의 역학적 구조 등은 HadGEM3와 동일하다. SNURCM은 중규모 모델인 MM5을 바탕으로 지표면 물리과정 모사를 위해 지표 모델인 NCAR/LSM을 접합한 모델이다 (Lee et al., 2004). WRF는 미국 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 에서 개발한 중규모 모델이다 (Skamarock et al., 2005). RegCM4는 기존의 RegCM3에 지표와 행성경계층 (planetary boundary layer schemes) 정보가 추가된 대기 모델이다 (Suh et al., 2016). 마지막으로 GRIMs는 전구 모델과 지역 모델이 함께 포함된 다중 응용 모델로 섭동법 (perturbation method)을 사용해 경제자료의 대규모 형태 (pattern)을 유지한 역학적 상세화가 가능하다 (Hong et al., 2013). 12.5km 해상도의 기후 시나리오의 역학적 상세화시 사용된 RCM의 특징과 앙상블 방법은 Suh et al.(2016)과 그 참고문헌에 보다 자세히 서술되어 있다. 그리고 Suh et al. (2016)는 관측 자료가 있는 1981년부터 2005년까지 RCM을 모의하여 모델의 성능을 파악하였는데 25년 동안 모사된 RCM의 월평균 기온은 주로 여름과 겨울철에 관측치보다 다소 낮게 산출되었다.

1km 기후 시나리오 앙상블은 위 5종의 RCM 결과를 입력자료로 사용하여, MK-PRISM (Modified Korean-Parameter elevation Regressions an Independent Slopes Model) 방법으로 생산되었다 (Kim et al., 2016). MK-PRISM은 Korean-PRISM에 기초하며, PRISM은 지표고도 자료 (digital elevation model; DEM), 위경도, 해양도, 사면방향 등을 이용하여 통계적으로 상세화 하는 방법이다 (Kim et al., 2016). KMA (2015)에 의하면 2001년부터 2010년까지 MK-PRISM으로 추정된 1km 시나리오의 남한 평균 기온이 관측 값인 $12.4^\circ C$ 보다 $0.8^\circ C$ 낮은 $11.6^\circ C$ 로 산출되었으며, 이를 고도에 의한 영향으로 보았다.

우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법 제 48조와 그 시행령 제 38조에 따라 관련부처와 지방자치 단체장은 기후변화 적응대책의 세부시행계획을 5년마다 수립하여야 한다. 이

Table 1. Overview of five regional climate models (adapted and rearranged from Suh et al., (2016))

	HadGEN3-RA	SNURCM	WRF	RegCM4	GRIMs
Institute	National Institute of Meteorological Research	Seoul National University	Seoul National University	Kongju National University	Yonsei University
Period	2011-2100	2021-2050	2021-2050	2021-2050	2021-2050
Vertical levels	Hybrid-38	σ -24	Eta-28	σ -23	σ -28
Dynamic framework	Non-hydrostatic	Non-hydrostatic	Non-hydrostatic	Hydrostatic	Hydrostatic
PBL scheme	Nonlocal scheme	YSU	Yonsei University	Holtslag	YSU+ stable BL
Convective scheme	Revised mass flux scheme	Kain-Fritsch II	Kain-Fritsch	MIT-Emanuel	SAS+CMT
Land surface	MOSES-II	CLM3.0	Noah	CLM3.5	OML climatology value
Reference	Hewitt et al. (2010)	Lee et al. (2004)	Skamarock et al. (2005)	Giorgi et al. (2012)	Hong et al. (2013)

와 같이 단기로 기후변화 적응대책을 수립할 시에는 기존 적응 대책을 수정 및 보완하는 수준에서 진행되므로 장기적인 영향을 고려하되 가까운 미래인 약 20~30년 정도의 기후변화에 초점을 맞추어 적응 계획을 수립할 필요가 있다 (Jung and Lee, 2013 and references therein). 그리고 지표 기온은 지역별, 부문별 기후 변화의 영향 및 취약성을 위한 가장 중요한 기초자료로 활용되며 (Kong et al., 2012), 폭염과 한파 등 미래의 극한기온의 전망시 직접적 근거자료로 활용될 수 있다 (Park et al., 2013).

따라서 본 연구에서는 이상 5종의 앙상블 시나리오 자료가 유효하고 지자체 수준의 기후변화 영향 및 취약성 평가시 활용되는 1km 고해상도의 2021년부터 2050년까지 RCP4.5와 8.5 기후 시나리오 자료 중 지표 기온에 대해 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기후 앙상블 시나리오의 기온 평균과 표준편차의 변화

2021년부터 2050년까지 생산된 우리나라의 RCP4.5와 8.5 앙상블 시나리오들의 연평균 기온 변화 전망을 10년 단위로 살펴보았다 (Fig. 1). RCP4.5와 8.5 앙상블 시나리오의 평균 기온은 각각 2020년대 (2021년부터 2030년) 12.2°C에서 2040년대 (2041년부터 2050년) 12.9°C와 13.2°C

로 증가하여 RCP8.5의 기온 증가율 (0.3°C/10년)이 RCP4.5 (0.2°C/10년)에 비해 상대적으로 높았다. 부분적으로 2030년대에는 RCP4.5의 평균 기온이 12.8°C로 RCP8.5의 12.6°C보다 상대적으로 높았다. RCP 시나리오의 온실가스 배출량은 시간에 따라 변화하며 20세기 초에는 시나리오별 온실가스 배출량의 차이가 적어 복사강제량의 차이도 20세기 후반에 비해 상대적으로 작다 (IPCC, 2013). 따라서 20세기 초 시나리오 간의 작은 복사강제량의 차이가 상대적으로 낮은 농도 시나리오의 기온 역전 현상에 영향을 미친 것으로 생각되며, 이는 다른 선행연구에서도 관찰되었다 (Knutti and Sedláček, 2013; Xu and Xu, 2012). 반면, 시대별 표준 편차는 모든 시대에서 RCP4.5 (~0.8)가 RCP8.5 (~0.6)보다 높아, 연간 변동성은 RCP4.5가 더 큼을 보여준다.

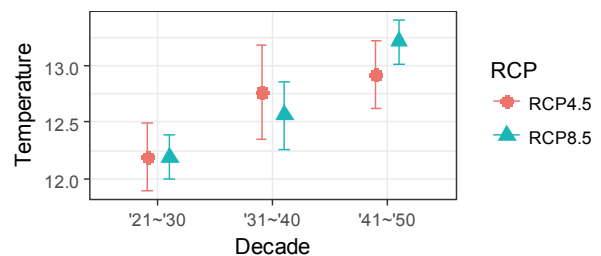


Fig.1. Decadal variations of mean temperature projected by the five ensemble scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 from 2021 to 2050 along with standard deviations of 10 years.

2021년부터 2050년까지 앙상블 시나리오들의 월평균 기온은 여름에 높고 겨울에 낮은 전형적인 계절변화를 보였다 (Fig. 2). 이러한 변화는 최고 기온과 최저 기온의 월 변화에서도 공통적으로 나타났다. RCP4.5와 8.5 앙상블 시나리오 모두 8월에 약 24.5°C의 가장 높은 평균 기온을 보였으며, 1월에 RCP4.5와 8.5가 각각 -0.8°C, -1.8°C로 가장 낮았다. Fig. 2의 막대는 남한지역의 평균기온에 대한 RCP4.5와 8.5 시나리오의 수평 격자별 최댓값과 최솟값의 범위를 나타내며, 이는 남한지역에 대한 격자별 월평균 기온의 상승 변화를 의미한다. 실험 기간 동안 격자별 월평균 기온의 변화 폭은 최대 24.8°C의 차이를 보였으며, 여름으로 갈수록 감소하여, 7월에 최소 11.6°C의 차이를 보였다.

선행 연구에 의하면, 기온과 관련된 극한 기후 현상인 폭염과 한파는 각각 여름인 7월과 8월 그리고 겨울인 12월과 1월에 주로 발생하며 (KMA, 2017b), 폭염과 한파의 빈도는 점차 증가하고 있다 (NIMR, 2009; Jeon and Cho, 2015). 따라서, 여름철 작은 격자별 최댓값과 최솟값의 차이는 폭염이 전국에 걸쳐 광범위하게 발생할 수 있음을 암시하며, 반대로 겨울철 큰 격자별 차이는 지역에 따라 한파의 발생 가능성에 차이가 있음을 의미한다.

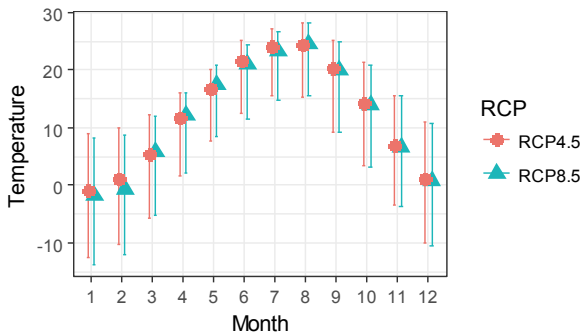


Fig. 2. Long-term (2021-2050) monthly mean variations of surface temperature projected by the five ensemble regional scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 over South Korea. (The mean values displayed with red circles for RCP4.5 and green triangles for RCP8.5. Upper bars and bottom bars represent the maximum values and the minimum values of total pixels, respectively).

연구기간 동안 앙상블 시나리오 간의 상관성은 상관계수 (r) 값이 0.99 이상으로 높았으며, 그 중 GRIMs 모델의 시나리오가 RMSE 0.43으로 상대적으로 가장 큰 편차를 보였다. 일반적으로 기후 시나리오의 불확실성에서 GCM의 차이가 가장 큰 부분을 차지한다 (Lee and Kim, 2012

and references therein). 본 연구에 사용된 앙상블 시나리오들은 하나의 GCM (HadGEM2-AO)을 근간으로 생산되었기 때문에 GCM의 차이에 따른 시나리오의 불확실성이 없으므로 시나리오 간 상관성이 매우 높다. 따라서 상세화된 앙상블 시나리오들의 편차 분석을 통해 계절별, 공간별로 시나리오들의 불확실성을 파악하는 것이 유용하다.

본 연구에서는 월별로 기온에 대한 앙상블 시나리오들의 표준 편차를 분석하여 시나리오들의 편차를 정량적으로 파악하고자 하였다. Fig. 3은 RCP4.5와 8.5의 월별 최고, 평균, 최저 기온에 대한 앙상블 시나리오들의 표준 편차를 비교한 것이다. 최고, 평균, 최저 기온의 월별 표준 편차 변화 양상은 유사하였으며, 주로 RCP8.5에 비해 RCP4.5에서 시나리오 간 표준 편차가 높게 나타났다. 이는 RCP4.5 앙상블 시나리오 간 기온 값의 분포가 RCP8.5에 비해 상대적으로 큰 것을 보여주며, 따라서 RCP4.5 앙상블 시나리오 간의 불확실성이 상대적으로 더 높음을 암시한다.

앙상블 시나리오 간 표준 편차는 극한 기온 현상이 주로 나타나는 1월과 7월에 두드러지게 증가하였다 (Fig. 3). 겨울과 여름의 앙상블 시나리오 간 편차 증가는 Suh et al. (2012)에서도 보고되었다. 일반적으로 RCM 모의 성능의 차이는 주로 모델 특성 (역학, 경압성, 구름 물리, 난류 등)과 입력 자료 (경계, 초기 조건 등)에 의해 결정된다 (Suh et al., 2012). 본 연구에 사용된 1km 시나리오는 RCM을 이용하여 전지구 시나리오를 12.5km로 상세화한 후 다시 통계적으로 상세화한 것이다. 그 과정에서 중해상도 (12.5km) 자료의 생산에 사용된 RCM의 입력자료인 전지구 시나리오와 경계 조건 등은 동일하다. 그러므로 중해상도 시나리오의 생산에 사용된 RCM들의 알고리즘의 차이가 상대적으로 기온의 극한 값을 포함하는 겨울과 여름의 시나리오의 편차 증가에 크게 기여하였을 것으로 사료된다. 이에 극한 기온 현상이 주로 나타나고 표준 편차가 증가했던 7월과 1월을 포함한 여름 (7월, 8월)과 겨울 (12월, 1월)을 중심으로 살펴보았다.

여름에는 7월의 RCP4.5 시나리오에 대한 표준 편차가 뚜렷하게 높은 것을 제외하면, 다른 시나리오의 표준 편차는 대체로 낮았다. 특히, 폭염이 가장 빈번하게 발생하는 8월에는 RCP4.5와 8.5 시나리오 모두 7월에 비해 표준 편차가 낮았다 (Fig. 3). 특히 극한 시나리오인 RCP8.5의 여름철 기온에 대한 표준 편차 범위가 약 0.6에서 1.2로 RCP4.5의 범위 (0.8~2.1)보다 더 낮아 RCP8.5 시나리오의 불확실성이 RCP4.5에 비해 더 낮음을 보여주었다. 앙상블 시나리오를 통해 전망된 지속적인 기온의 증가 (Fig. 1)와 여름철 상대적으로 적은 지역 간의 기온 차이 (Fig. 2), 그리고 8월의 상대적으로 낮은 불확실성은 여름철 폭염이

광범위하고 빈번하게 발생할 가능성이 상대적으로 큼을 암시한다. 따라서, 우리나라에서 8월을 중심으로 한 여름철 폭염 대응에 보다 주의할 필요가 있음을 의미한다. 이는 시나리오들의 전망 범위를 통한 시나리오의 신뢰성에 기인한 것으로 미래 폭염의 발생 강도와 빈도를 파악하기 위해서는 폭염 지수와 같은 극한 지수에 대한 면밀한 통계적 분석이 추가적으로 실행되어야 한다.

반면, RCP4.5와 8.5 시나리오 모두 1월에 가장 높은 표준 편차 값을 보였다. 1월에 지역별 기온의 차이가 가장 큰 것을 고려할 때 (Fig. 2), 높은 앙상블 시나리오 간의 편차는 지역별기후 시나리오의 불확실성을 더욱 가중시킬 수 있다. 12월 앙상블 시나리오 간의 표준 편차는 1월에 비해서는 작았으나 7월과 5월 다음으로 높았다. 그리고 RCP8.5 시나리오들의 표준편차 범위인 0.9에서 1.1에 비해 RCP4.5는 그 범위가 약 1.1에서 1.4로 그 편차가 더욱 컸다.

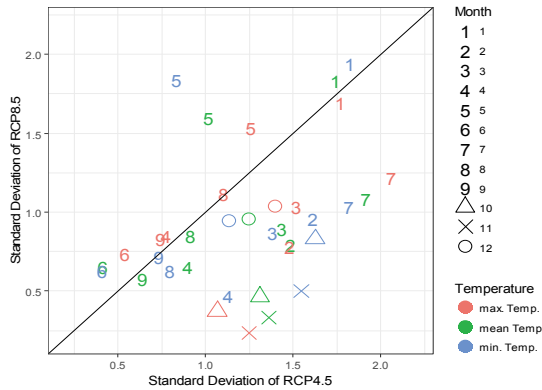


Fig. 3. Comparison of standard deviations for monthly maximum, average and minimum temperatures for five ensemble scenarios of the RCP 4.5 and 8.5 scenarios from 2021 to 2050. Solid line represent that the ratio between standard deviation of RCP4.5 and that of RCP8.5 is 1.

3.2 여름과 겨울의 앙상블 시나리오 간 표준 편차의 공간적 분포 특성

월별 시나리오의 표준 편차 분석을 통해 극한 기후 현상이 빈번히 발생하는 여름과 겨울에 앙상블 시나리오의 표준 편차가 주로 증가하였음을 알았다. 이에 앙상블 시나리오 간 표준 편차의 공간 분포를 통해 여름과 겨울 지역별 표준편차의 변화 특성을 살펴보았다.

여름철 앙상블 시나리오 간 표준 편차는 폭염의 지표가 될 수 있는 최고 기온에서 상대적으로 더 높았으며, 7월 RCP4.5 앙상블 시나리오에서 가장 두드러지게 높았다. 이는 동해안 지역과 대구를 포함한 영남 내륙지역의 높은 표준 편차 값에 기인한 것이다 (Fig. 4). 동해안 지역의 상대적으로 높은 표준 편차 값은 7, 8월 RCP8.5 앙상블 시나리오에서도 나타났으나 상대적으로 그 값이 적어 전반적인 지역별 차이 또한 작았다 (Fig. 4). 특히, 높은 인구밀도와 도시화로 인해 극한 기후의 영향이 클 것으로 전망되는 수도권 지역은 모든 시나리오에서 전국 평균에 비해 앙상블 시나리오 간의 표준 편차가 최대 -0.9 더 낮아 앙상블 시나리오들의 불확실성이 다른 지역에 비해 상대적으로 적었다.

따라서 예외적으로 높은 7월 RCP4.5 앙상블 시나리오의 표준 편차를 제외하면, 여름철 앙상블 시나리오 간의 표준 편차는 상대적으로 낮았다. 이는 앞으로 우리나라의 기온이 지속적으로 증가하며 (Fig. 1), 여름에 상대적으로 지역 간 차이가 작음 (Fig. 2)을 고려할 때 여름에 폭염이 전국적으로 빈번하게 발생할 가능성이 있음을 보여준다.

겨울에는 RCP4.5와 8.5 모두 1월에 앙상블 시나리오 간의 표준 편차가 가장 높게 나타났다 (Fig. 5). 특히, 최저 기온에서 표준 편차의 증가가 두드러졌다. 1월은 기온이 가

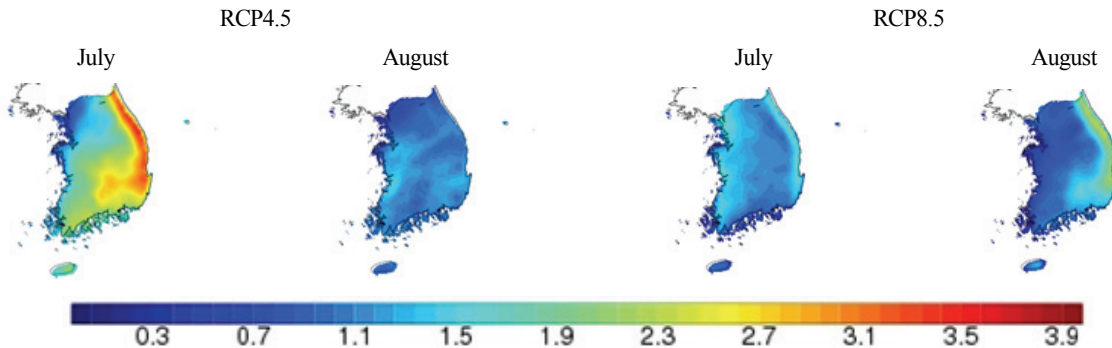


Fig. 4. Spatial distribution of standard deviation among five ensemble scenarios for monthly maximum temperature of RCP4.5 and 8.5 during July - August.

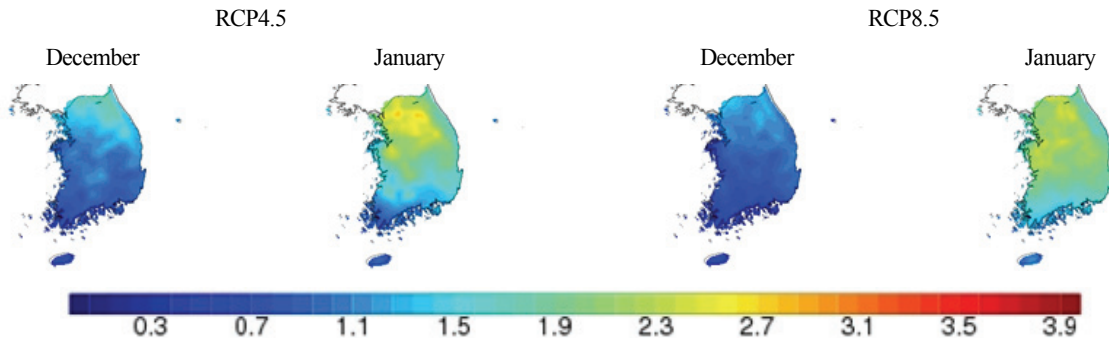


Fig. 5. Spatial distribution of standard deviation among five ensemble scenarios for monthly minimum temperature of RCP4.5 and 8.5 during December - January.

장 낮은 달로 지역에 따라 최저 기온이 최대 -19.7℃까지 내려갈 것으로 전망되었다. Jeon and Cho (2015)에 의하면, 2004년부터 2014년까지 한반도의 겨울 평균 기온은 점차 증가하고 있으나, 지역에 따라 한파 발생일 또한 증가하고 있다. 따라서 한파와 폭설 등 겨울철 극한 기상에 의한 재난 대책 수립 시 이러한 시나리오들의 높은 편차에 유의할 필요가 있다. 지역적으로는 서울, 경기도를 포함한 수도권 지역과 춘천, 원주 등을 포함한 강원도 서쪽 지역에서 시나리오 간 표준편차가 뚜렷하게 커졌으며, 충청북도와 경상북도가 그 뒤를 이었다 (Fig. 4).

결과적으로 앙상블 시나리오 간 표준 편차의 공간 분포는 지역과 계절에 따라 기후전망의 신뢰성에 차이가 있으므로 지자체별 극한 기후에 대한 대응 전략 수립 시 이를 고려해야함을 보여준다. 즉, 상대적으로 이상기후 전망에 대한 시나리오 간 편차가 적다면 이상기후 현상의 실현 확률이 더욱 높을 것을 고려하여 대응 정책 수립과 이행의 필요성이 더욱 크다는 것을 의미한다.

3.3 광역지자체별 앙상블 시나리오에 대한 표준 편차의 특성

17개 광역지자체의 여름 최고 기온과 겨울 최저 기온 그리고 앙상블 시나리오 간의 표준편차를 전국 평균에 대한 상대적 증감으로 살펴보았다 (Fig. 6 and 7). Fig. 6과 Fig. 7에서 음의 값은 전국 평균에 비해 해당 지자체에 대한 기온과 앙상블 시나리오의 표준 편차가 상대적으로 낮음을 나타내며, 반대로 양의 값은 기온과 앙상블 시나리오의 표준 편차가 전국 평균에 비해 상대적으로 높음을 나타낸다.

여름에는 비록 기온의 지자체별 차이가 겨울에 비해 적으나 주로 서울, 광주, 대구, 세종, 대전의 최고 기온이 다른 지자체에 비해 높을 것으로 전망되었다 (Fig. 6). 앙상블 시나리

오 간 편차가 가장 컸던 7월의 RCP4.5 시나리오를 살펴보면, 서울, 대구, 광주, 세종 순으로 기온이 높을 것으로 전망되었다.

주목할 점은 서울은 다른 지자체에 비해 최고 기온이 높을 것으로 전망되나 앙상블 시나리오 간의 표준 편차는 오히려 다른 지자체에 비해 매우 낮았다. 이는 8월 RCP4.5와 8.5에서도 공통적으로 나타났다. 인천과 경기 역시 전국 평균에 비해 기온이 다소 높을 것으로 전망되었으며, 앙상블 시나리오 간 표준 편차도 상대적으로 낮았다. 결과적으로 수도권 지역의 최고 기온은 다른 지자체에 비해 상대적으로 높을 것으로 예상되며 (Shim et al., 2017), 다른 지역에 비해 여름철 시나리오 간 불확실성 또한 상대적으로 낮으므로 이들 지역에 대한 폭염과 같은 여름철 이상기후 관련 대책 수립과 이행이 더욱 중요하다.

광주 또한 다른 지자체에 비해 기온이 높을 것으로 전망되었으며, 앙상블 시나리오의 불확실성은 서울, 경기도에 비해서는 높았으나, 대구에 비해서는 낮았다.

반면 대구는 모든 시나리오에서 기온 증가가 두드러졌으며, 기후 시나리오들의 편차 또한 컸다. 대구는 전통적으로 주변지역인 경산, 영천 등지와 함께 여름철 고온 현상이 빈번한 곳으로 (KMA, 2017b), 이들 지역에 대한 기후 시나리오의 높은 불확실성은 미래에 전망된 최고 기온보다 더 높은 기온 현상이 발생할 수도 있음을 의미한다. 따라서, 기후 전망 자료의 정밀한 분석과 더불어 보다 광범위한 기온 변화를 염두에 둔 적응 대책 수립이 필요하다.

Fig. 7에서는 겨울철 최저 기온이 가장 낮은 지자체부터 가장 큰 지자체 순으로 전국 평균에 대한 광역 지자체별 최저 기온의 상대적 변화와 앙상블 시나리오의 표준 편차의 상대적 변화를 도시하였다. 겨울은 여름에 비해 지자체간 기온의 차이가 컸으며, 앙상블 시나리오들의 표준 편차도 컸다. 겨울

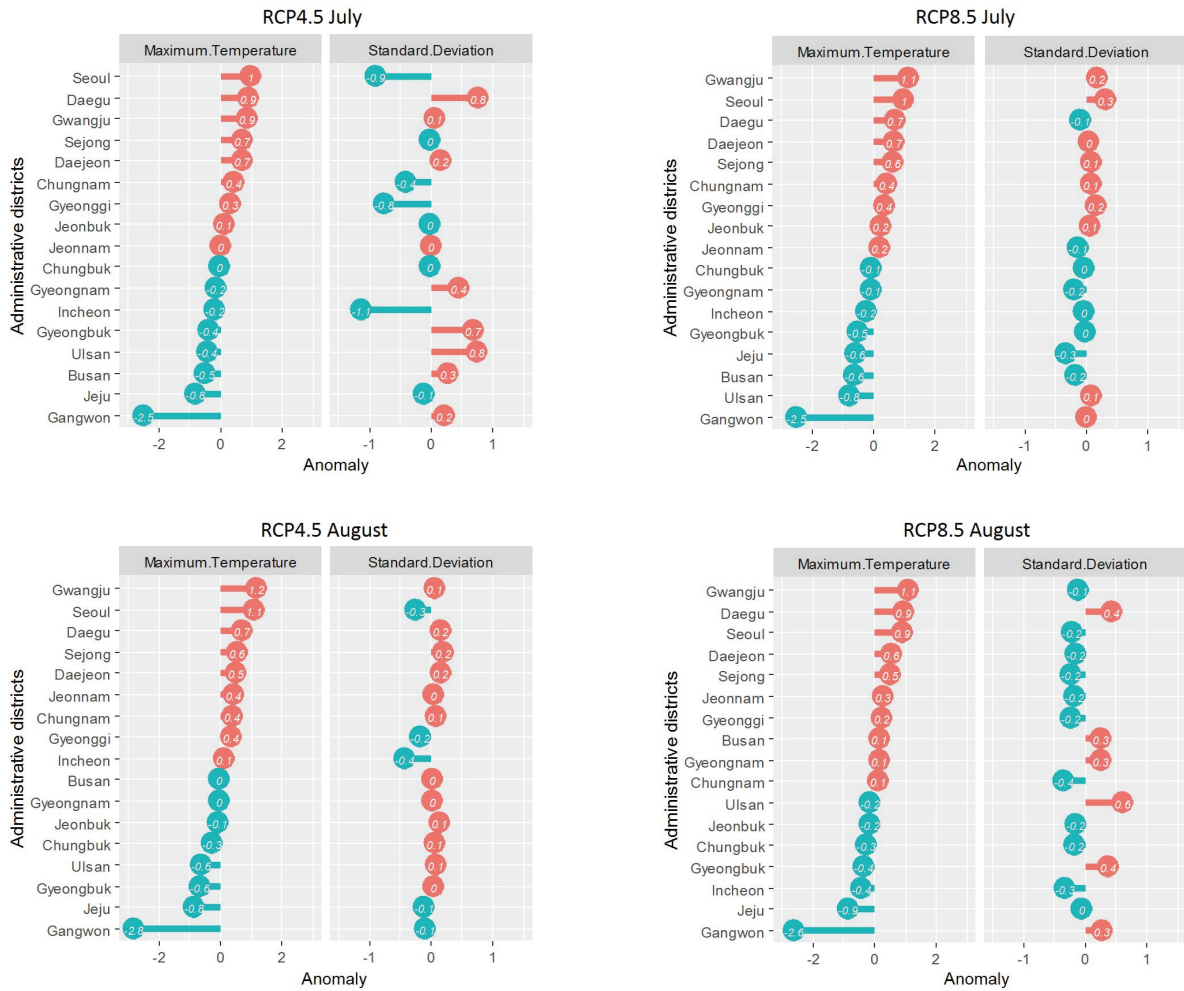


Fig. 6. The relative variation of the maximum temperature and the standard deviation in the administrative districts based on the national average in the RCP 4.5 and 8.5 ensemble scenarios in summer. The administrative districts were displayed in order from the highest value to the lowest value of the maximum temperature.

철 최저기온은 강원, 경기, 충북, 경북, 세종이 다른 지자체에 비해 상대적으로 더 낮을 것으로 전망되었으며, 특히 이들 지자체는 앙상블 시나리오들의 표준 편차도 높게 나타나 겨울철 최저 기온에 대한 기후변화 시나리오의 신뢰성 향상이 시급함을 보여주었다. 또한 경기와 세종은 겨울 최저 기온이 다른 지자체에 비해 낮을 뿐만 아니라 여름 최고기온 또한 비교적 다른 지자체에 비해 높게 나타나 한파와 폭염에 대한 대비가 동시에 이루어져야 할 것으로 생각된다.

결과적으로 여름에는 겨울에 비해 상대적으로 낮은 앙상블 시나리오의 불확실성을 바탕으로 최고 기온이 다른 지자체에 비해 더욱 높을 것으로 전망되는 서울과 광주 그리고 대구를 중심으로 이상 기후에 대한 대응이 필요하며, 겨울에는

최저 기온이 다른 지자체에 비해 상대적으로 낮을 것으로 전망되는 강원, 경기, 충청을 중심으로 겨울철 이상 기후에 대한 대응과 함께 높은 앙상블 시나리오의 불확실성에 대한 추가적 분석이 필요할 것으로 생각 된다.

Jung and Lee (2013)는 기후변화에 대한 지자체 적응 대책 수립 시 기후 시나리오 자료의 활용에 대한 연구에서 국가와 지자체의 기후변화 대응을 위한 접근 방법이 서로 달라야 함을 지적하였다. 특히, 지자체는 기후 시나리오 결과를 바탕으로 경제적 자원, 인구 구조 등 상대적으로 제한적인 사회적 환경의 영향을 고려한 의사결정을 통해 적응 대책의 수립을 권고하였다 (Jung and Lee, 2013). 따라서 본 연구와 같이 지자체별 앙상블 시나리오들에 대한

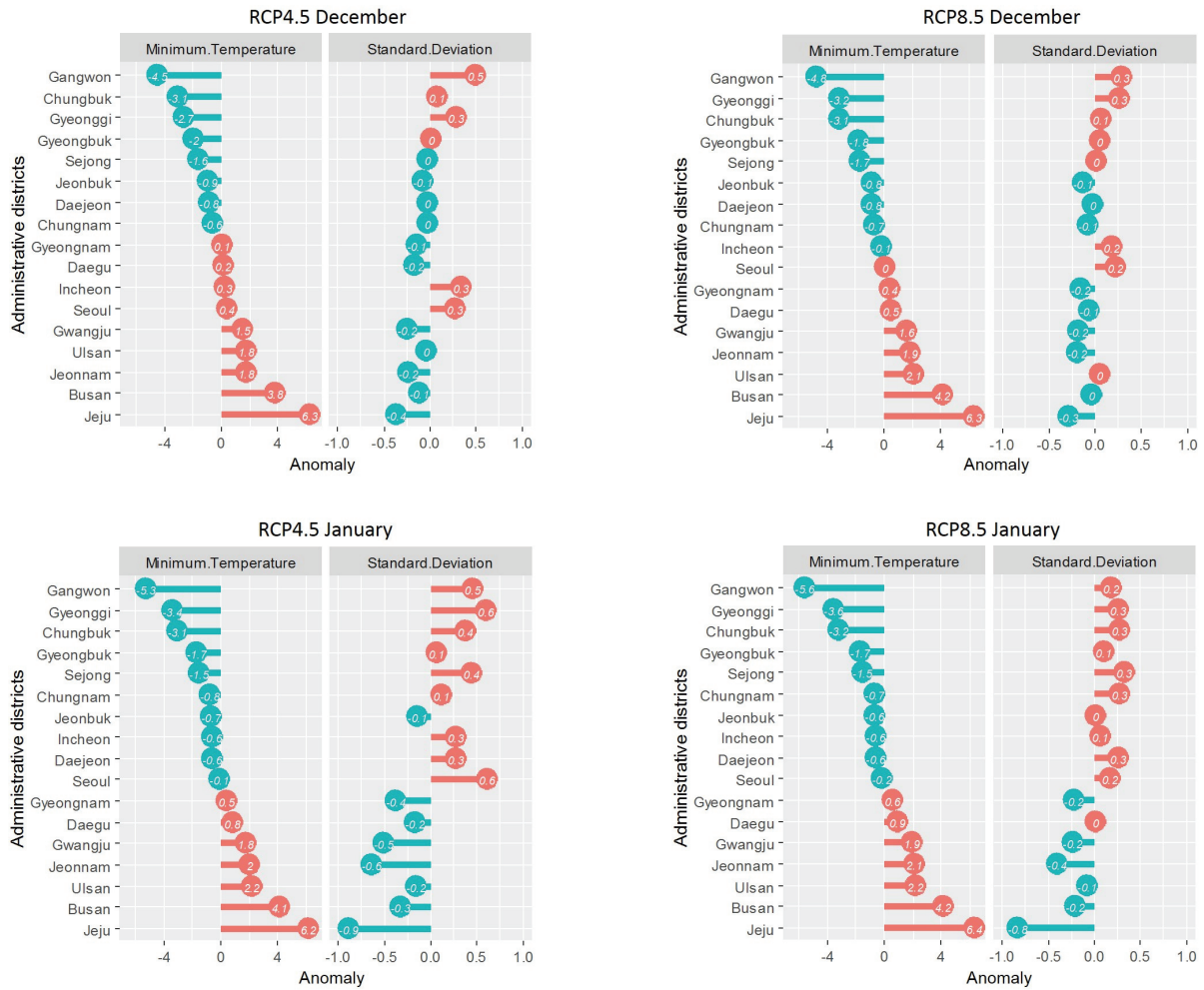


Fig. 7. The relative variation of the minimum temperature and the standard deviation in the administrative districts based on the national average in the RCP 4.5 and 8.5 ensemble scenarios in winter. The administrative districts were displayed in order from the lowest value to the highest value of the minimum temperature.

편차 연구의 결과는 이러한 지자체별 적응 대책의 우선순 위 선정을 위한 자료로 활용가치가 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 2021년부터 2050년까지 남한지역에 대해 1km 공간해상도의 기상청 RCP4.5와 8.5 기후변화 앙상블 시나리오의 지표 기온 자료를 이용하여, 광역지자체별 기온의 계절 변화시 앙상블 시나리오의 불확실성을 정량적으로 분석하였다.

분석기간 동안 우리나라 기온 증가율은 RCP8.5 (0.3℃

/10년)가 RCP4.5 (0.2℃/10년)에 비해 높았으며, 연간 변동율은 RCP4.5가 더 컸다. 그리고 본 연구의 실험 기간인 21세기 중반은 시나리오에 따른 배출량의 차이가 상대적으로 적어 그로 인한 복사강제량의 차이 또한 적을 것으로 전망되어 21세기 후반의 기온 변화량과는 차이가 있다 (IPCC, 2013).

시나리오 수평격자별 최댓값과 최솟값의 범위는 겨울에 가장 컸으며, 여름으로 갈수록 감소하였다. 이는 겨울철 환파는 상대적으로 국지적으로 발생할 가능성이 높은 반면, 여름철 폭염은 전국적으로 발생할 수 있음을 보여준다.

계절별로는 극한 기후 현상이 빈번하게 발생하는 여름철과 겨울철에 시나리오 간 표준 편차가 증가하였으며, 월

별 기후 양상블 시나리오 간 표준 편차는 RCP8.5에 비해 RCP4.5에서 높아 전체적으로 RCP8.5 시나리오의 불확실성이 상대적으로 낮음을 보여주었다 (Fig 3).

여름에는 7월에 특히 RCP4.5 양상블 시나리오에서 표준 편차가 상대적으로 컸으며, 그 외 7월 RCP8.5와 8월 RCP4.5와 8.5는 시나리오 간의 표준 편차가 상대적으로 적었다. 주로 영남 내륙 지방에서 표준 편차가 증가하였으며, 수도권 지역에서는 상대적으로 표준 편차가 감소하였다. 겨울에는 RCP4.5와 8.5 모두 1월에 높은 표준 편차를 보였다.

광역 지자체별로는 여름철에 상대적으로 기온이 높을 것으로 예상되는 서울은 양상블 시나리오의 불확실성이 낮았다. 이는 폭염이 발생할 가능성이 높음을 암시하므로 이에 따른 기후 적응 대책 이행의 시급성을 의미한다. 반면 대구는 상대적으로 폭염이 빈번히 일어날 가능성이 있음에도 양상블 시나리오의 불확실성이 상대적으로 높았다. 광주, 대전 그리고 세종은 다른 지자체에 비해 기온이 높을 것으로 전망되었으나, 양상블 시나리오의 불확실성은 대구에 비해 낮았으며, 서울에 비해 높거나 같았다. 따라서 이들 지역에 대한 정책 대응시 기후전망 자체의 높은 불확실성을 감안할 필요가 있다.

겨울에는 제주, 부산, 울산, 광주, 전남과 같이 상대적으로 따뜻한 지역은 양상블 시나리오의 불확실성이 낮았다. 반면, 강원, 경기, 충북, 경북과 같이 최저 기온이 낮고 한파가 자주 발생할 것으로 예상되는 지역은 양상블 시나리오의 불확실성이 높아 모델 결과의 신뢰성 향상이 필요하다.

이러한 결과는 계절별로 극한 기후 현상의 발생정도와 범위가 지역에 따라 상이하며, 기후 시나리오의 불확실성의 정도에 따라 지역별 대응에서 이를 고려해야함을 의미한다. 특히 지자체마다 경제적 자원과 인프라, 인구 구성비 등 사회·문화적 기반이 다르므로 기후 전망 자료와 함께 기후변화 시나리오의 불확실성 정보를 같이 제공함으로써 지자체에 맞는 정책적 우선순위를 선정하는데 도움이 될 것이다. 즉, 극한 기후현상에 대한 상대적으로 낮은 시나리오 간 편차는 관련 정책에 대한 시급성이 상대적으로 높다고 판단할 수 있는 것이다.

또한 기후 시나리오의 고해상도화에 따른 불확실성의 증가에 대한 정량적 평가와 분석이 필요할 것이다. 그리고 미래 기후 전망 자료의 불확실성의 보다 신뢰있는 평가를 위해 향후 기상청 양상블 시나리오와 더불어 다른 기후 시나리오들을 추가로 분석하는 등 기후전망 자료들에 대한 검증 및 분석 방법론에 대한 지속적 발전도 요구 된다.

사 사

본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업” 및 한국 기상산업 진흥원의 “지상위성관측, 자료동화기반의 탄소추적시스템 성능향상 기술 개발 사업” (KMIPA2015-2022)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구의 기후 시나리오 자료는 기상청 기후변화감시과의 기후정보포털을 통해 제공받았습니다. 자료를 제공해 주신 기상청 관계자분들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn JB, Hong JY, Seo MS. 2013. Present-Day Climate of the Korean Peninsula Centered Northern East Asia Based on CMIP5 Historical Scenario Using Fine-Resolution WRF. *Atmosphere* 23 (4): 527-538. (in Korean with English abstract)
- Baek HJ, Cho C, Kwon WT, Kim SK, Cho JY, Kim Y. 2011. Development strategy for new climate change scenarios based on RCP. *Clim Change Res* 2:55-68. (in Korean with English abstract)
- Baek HJ, Lee J, Lee HS, Hyun YK, Cho CH, Kwon WT, Marzin C, Gan SY, Kim MJ, Choi DH, Lee J, Lee J, Boo KO, Kang HS, Byun YH. 2013. Climate Change in the 21st Century Simulated by HadGEM2-AO under Representative Concentration Pathways. *Asia-Pacific J Atmospheric Sci* 49(5):603-618, DOI:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Christensen JH, Kjellstrom E, Giorgi F, Lenderink G, Rummukainen M. 2010. Weight Assignment in Regional Climate Models. *Clim Res* 44:179-194, DOI:0.3354/cr00916.
- Choi YW, Ahn JB, Suh MS, Cha DH, Lee DK, Hong SY, Min SK, Park SC, Kang HS. 2016. Future Changes in Drought Characteristics over South Korea Using Multi Regional Climate Models with the Standardized Precipitation Index. *Asia-Pacific J Atmospheric Sci* 52(2):209-222, DOI:10.1007/s13143-016-0020-1.
- 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): 108-25. DOI:10.5532/KJAFM.2015.17.2.108. (in Korean with English abstract)
- Cook BI, Anchukaitis KJ, Touchan R, Meko DM, Cook ER. 2016. Spatiotemporal Drought Variability in the Mediterranean over the Last 900 Years. *J Geophys Res* 121(5):2060-2074. DOI:10.1002/2015JD023929.
- CSIRO and Bureau of Meteorology. 2015. Climate Change in Australia Information for Australia's Natural Resource Management Regions: Technical Report, CSIRO and Bureau of Meteorology, Australia.
- Feng J, Lee DK, Fu C, Tang J, Sato Y, Kato H, Mcgregor JL, Mabuchi K. 2011. Comparison of four ensemble methods combining regional climate simulations over Asia. *Meteorol Atmos Phys* 111(1):41-53, DOI:10.1007/s00703-010-0115-7.
- Flato G, Marotzke J, Abiodun B, Braconnot P, Chou SC, Collins W, Cox P, Driouech F, Emori S, Eyring V, Forest C, Gleckler P, Guilyardi E, Jakob C, Kattsov V, Reason C, Rummukainen M. 2013. Evaluation of Climate Models. In: *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, TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 741-866, DOI:10.1017/CBO9781107415324.020.
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla MB, Bi X, Elguindi N, Diro GT, Nair V, Giuliani G, Turuncoglu UU, Cozzini S, Güttler I, O'Brien TA, Tawfik AB, Shalaby A, Zakey AS, Steiner AL, Stordal F, Sloan LC, Brankovic C. 2012. RegCM4: Model Description and Preliminary Tests over Multiple CORDEX Domains. *Clim Res* 52:7-29, DOI:10.3354/cr01018.
- Ho CH, Lee MH, Park TW, Lee S. 2011. A Review of Observed Climate Change in Korean Peninsula. *Clim Change Res* 2(4):221-235.
- Hong SY, Park H, Cheong HB, Kim JEE, Koo MS, Jang J, Ham S, Hwang SO, Park BK, Chang EC, Li H. 2013. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pacific J Atmospheric Sci* 49(2):219-243, DOI:10.1007/s13143-013-0023-0.
- Hewitt HT, Copsey D, Culverwell ID, Harris CM, Hill RSR, Keen AB, McLaren AJ, Hunke EC. 2011. Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system. *Geosci Model Dev* 4:223-253, DOI:10.5194/gmd-4-223-2011.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jeon MJ, Cho Y. 2015. An analysis of a winter-time temperature change and an extreme cold waves frequency in Korea, *J Clim Change Res* 6(2):87-94, DOI:10.15531/kscrcr.2015.6.2.87. (in Korean with English abstract)
- Jung H, Lee SM. 2013. Use of climate change scenario data to support local government adaptation planning. Korea Environment Institute, Sejong, Korea. (in Korean with English abstract)
- 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. DOI:10.3741/JKWRA.2013.46.8.873. (in Korean with English abstract)
- Kelley CP, Mohtadi S, Cane MA, Seager R, Kushnir Y. 2015. Climate Change in the Fertile Crescent and Implications of the Recent Syrian Drought. *Proc Natl Acad Sci* 112 (11):3241-3246, DOI:10.1073/pnas.1421533112.
- 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-Pacific J Atmospheric Sci* 52(2):79-89, DOI:10.1007/s13143-016-0010-3.
- 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* 7:55-68. (in Korean with English abstract)
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2015. Production of Fine-Scale Climate Change Data over the Korean Peninsula Using RCP Scenarios.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2017a. Korea Global Atmosphere Watch Center, <http://www.climate.go.kr/>, [2018-02-01]
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2017b. 2016 abnormal climate report, Seoul
- Knutti R, Sedláček J. 2013. Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections. *Nat Clim Change* 3:369-373, DOI:10.1038/nclimate1716.
- Kong WS, Lee S, Park H, Yu JA. 2012. Ecosystem Vulnerability Assessment of Local Government Due to Climate Change. *J Clim Change Res* 3(1):51-69. (in Korean with English abstract)
- Lee DK, Cha DH, Kang HS. 2004. Regional Climate Simulation of the 1998 Summer Flood over East Asia. *J Meteor Soc Japan* 82(6):1735-1753, DOI:10.2151/jmsj.82.1735.
- Lee IH, Park SH, Kang HS, Cho CH. 2012. Regional climate projections using the HadGEM3-RA. In 3rd International Conference on Earth System Modeling, 3:236-242.
- Lee JK, Kim YO. 2012. Selecting Climate Change Scenarios Reflecting Uncertainties. *Atmosphere* 22 (2): 149-161. DOI : 10.14191/Atmos.2012.22.2.149. (in Korean with English abstract)
- Martin GM, Ringer MA, Pope VD, Jones A, Dearden C, Hinton TJ. 2006. The physical properties of the atmosphere in the new Hadley Centre global environmental model (HADGEM1), Part I: Model description and global climatology. *J Clim* 19:1274-1301, DOI:10.1175/JCLI3636.1.
- Martin GM, Bellouin N, Collins WJ, Culverwell ID, Halloran PR, Hardiman SC, Hinton TJ, Jones DC, McDonald RE, McLaren AJ, O'Connor FM, Roberts MJ, Rodriguez JM, Woodward S, Best MJ, Brooks ME, Brown AR, Butchart N, Dearden C, Derbyshire SH, Dharssi I, Doutriaux-Boucher M, Edwards JM, Falloon PD, Gedney N, Gray LJ, Hewitt HT, Hobson M, Huddleston MR, Hughes J, Ineson S, Ingram WJ, James PM, Johns TC, Johnson CE, Jones A, Jones CP, Joshi MM, Keen AB, Liddicoat S, Lock AP, Maidens AV, Manners JC, Milton SF, Rae JGL, Ridley JK, Sellar A, Senior CA, Totterdell IJ, Verhoef A, Vidale PL, Wiltshire A. 2011. The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. *Geosci Model Dev* 4 (3):723-757, DOI:10.5194/gmd-4-723-2011.
- NIMR (National Institute of Meteorological Research). 2009. Understanding Climate Change II- Climate Change on the Korean Peninsula: Present and Future, Seoul
- Oh SG, Suh MS, 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 2: Precipitation. *Asia-Pacific J Atmospheric Sci* 52(2):171-189, DOI:10.1007/s13143-016-0018-8.
- Pan Z, Christensen JH, Arritt RW, Gutowski WJ, Takle ES, Otieno F. 2001. Evaluation of Uncertainties in Regional Climate Change Simulations. *J Geophys Res* 106(D16): 17735-17751, DOI:10.1029/2001JD900193.
- Park CY, Choi YE, Kwon YA, Kwon JI, Lee HS. 2013. Studies on Changes and Future Projections of Subtropical Climate Zones and Extreme Temperature Events over South Korea Using High Resolution Climate Change Scenario Based on PRIDE Model, *J Korean Assoc Regional Geographers* 19(4):600-614. (in Korean with English abstract)
- Park CY. 2015. The classification of extreme climate events in the Republic of Korea, *J Korean Assoc Regional Geographers* 21(2):394-410. (in Korean with English abstract)
- Patz JA, Campbell-Lendrum D, Holloway T, Foley JA. 2005. Impact of Regional Climate Change on Human Health. *Nature* 438:310-317, DOI:10.1038/nature04188.
- Prudhomme C, Davies H. 2009. Assessing Uncertainties in Climate Change Impact Analyses on the River Flow Regimes in the UK. Part 2: Future Climate. *Clim Change* 93(1):197-222, DOI:10.1007/s10584-008-9461-6.
- Sheffield J, Barrett AP, Colle B, Nelun Fernando D, Fu R, Geil KL, Hu Q, Kinter J, Kumar S, Langenbrunner B,

- Lombardo K, Long LN, Maloney E, Mariotti A, Meyerson JE, Mo KC, David Neelin J, Nigam S, Pan Z, Ren T, Ruiz-Barradas A, Serra YL, Seth A, Thibeault JM, Stroeve JC, Yang Z, Yin L. 2013. North American Climate in CMIP5 Experiments. Part I: Evaluation of Historical Simulations of Continental and Regional Climatology. *J Climate* 26:9209-9245, DOI:10.1175/JCLI-D-12-00592.1.
- Shim C, Seo J, Han J, Ha J, Ro TH, Hwang YS. 2017. Projection of Future Hot Weather Events and Potential Population Exposure to This in South Korea. *Clim Res* 72(1):29-38, DOI:10.3354/cr01446.
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Wang W, Powers JG. 2005. A Description of the Advanced Research WRF Version 2, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, DOI:10.5065/D68S4MVH.
- Suh MS, Oh SG, Lee DK, Cha DH, Choi SJ, Jin CS, Hong SY. 2012. Development of New Ensemble Methods Based on the Performance Skills of Regional Climate Models over South Korea. *J Clim* 25(20):7067-7082, DOI:10.1175/JCLI-D-11-00457.1.
- 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-Pacific J Atmospheric Sci* 52(2):151-169, DOI:10.1007/s13143-016-0017-9.
- von Uexkull N, Croicu M, Fjelde H, Buhaug H. 2016. Civil Conflict Sensitivity to Growing-Season Drought. *Proc Natl Acad Sci* 113(44):12391-12396, DOI:10.1073/pnas.1607542113.
- Wilby RL, Harris I. 2006. A Framework for Assessing Uncertainties in Climate Change Impacts: Low-Flow Scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour Res* 42:W02419, DOI:10.1029/2005WR004065.
- Xu CH, Xu Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble, *Atmos Oceanic Sci Lett* 5:527-533, DOI:10.1080/16742834.2012.11447042.