다중지역기후모델을 이용한 남한 지역의 미래 기후대 분포와 극한기온사상의 변화에 대한 연구

이현재 · 김가영 · 박창용 · 차동현

울산과학기술원 도시환경공학부

(2017년 2월 20일 접수, 2017년 4월 12일 수정, 2017년 4월 14일 게재 확정)

A Study of Future Changes of Climate Classification and Extreme Temperature Events over South Korea in Multi Regional Climate Model Simulations

Hyeonjae Lee · Gayoung Kim · Changyong Park · Dong-Hyun Cha

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology,
(Received 20 February 2017, Revised 12 April 2017, Accepted 14 April 2017)

Abstract : Regional climate simulations for the CORDEX East Asia domain were conducted between 1981 and 2100 using five models to project future climate change based on RCP2.6, 4.5, 6.0, and 8.5 scenarios. By using the ensemble mean of five model results, future changes in climate zones and four extreme temperature events of South Korea were investigated according to Köppen-Trewartha's classification criteria. The four temporal periods of historical (1981-2005), early future (2021-2040), middle future (2041-2070), and late future (2071-2100) were defined to examine future changes. The analysis domain was divided into 230 administrative districts of South Korea. In historical (1981-2005) period, the subtropical zones are only dominant in the southern coastal regions and Jeju island, while those tend to expand in the future periods. Depending on the RCP scenarios, the more radiative forcing results in the larger subtropical zone over South Korea in the future. The expansion of the subtropical zone in metropolitan areas is more evident than that in rural areas. In addition, the enlargement of the subtropical zone in coastal regions is more prominent than that of inland regions. Particularly, the subtropical climate zone for the late future period of RCP8.5 scenario is significantly dominant in most South Korea. All scenarios show that cold related extreme temperature events are expected to decrease and hot related extreme temperature events to increase in late future. This study can be utilized by administrative districts for the strategic plan of responses to future climate change.

Key Words : climate change, CORDEX-East Asia, subtropical climate zone, extreme temperature events, RCP, South Korea

주요어 : 기후변화, 코덱스 동아시아, 아열대 기후대, 극한기온사상, 대표농도경로, 남한

1. 서론

1950년 이래로 온난화 현상이 더욱 심화함에 따라 기후 시스템을 이루는 모든 구성요소가 장기적으로 변화하여, 결과적으로 인간과 생태계에 심각하고 광범위하며 돌이킬 수 없는 영향을 미치고 있다. 특히 생태계에 비가역적인 변화가 갑작스럽게 나타나면서 다수의 지역에서 폭염의 발생 빈도 및 지속 기간 뿐만 아니라 극한 강수 현상의 발생 빈도 및 강도 또한 증가할 가능성이 매우 높아질 것이라는 연구결과가 제시되었다(IPCC, 2013).

우리나라의 경우 지난 30년(1981~2010년)간 연평균 기온이 1.2℃ 상승하였고, 대부분의 지역에서 여름철 강수량은 증가하고 봄철과 가을철의 강수량은 감소하는 등 기후 특성 변화가 분명하게 나타나고 있다(KMA, 2012). 따라서 정부는 2011년부터 15년까지 제1차 국가 기후변화 적응대책을 실시하였고, 2016년부터 2020년까지 과학적 위험관리, 안전한 사회건설, 산업계 경쟁력 강화, 지속 가능한 자연자원관리의 4대 정책 부문으로 구성된 제2차 국가 기후변화 적응대책을 마련하였다. 과학적 위험관리 부문의 경우 기후변화 감시 및 예보 시스템 구축, 한국형 기후 시나리오 개발 및 활용 기반 마련, 기후변화로 인한 생태계 및 건강 영향 모니터링, 기후변화 취약성 통합평가 및 사회·경제적 위험성 관리, 기후변화 적응정보 제공시스템 등을 마련할 예정이다(Korea government, 2015).

최근 들어 기후변화 시나리오를 사용하여 대륙 규모에서 미래 기후대의 변화를 분석한 여러 연구가 수행되었다. Gallardo *et al.* (2013)은 SRES A1B 시나리오 기반의 15개 지역기후모델 앙상블 평균 자료를 이용하여 쾨펜-트레와다(Köppen-Trewartha) 기후 지역 구분 기준(Trewartha and Horn, 1980)에 따른 유럽 대륙의 미래 기후대 변화를 분석하였다. 그 결과 1971~2000년의 현재

기후보다 2021~2050년 동안 21.3%, 2061~2090년 동안 45.2%의 지역에서 기후대가 온난해지거나 건조해졌다. 특히 대륙 중앙에서 연중 월 평균 기온이 10℃를 초과하는 달이 4~7개인 경우에 정의되는 온대기후대는 북동쪽으로 확장하는 동시에 대륙 중앙에서 후퇴하였으며 유럽 남서부에서는 아열대기후가 확장할 것으로 분석하였다.

Feng *et al.* (2012)은 SRES B1, A1B, A2 시나리오를 사용한 16개의 전구기후모델을 이용하여 1900년부터 2099년까지 모의 후 평균하여 북극(북위 50℃ 이상) 지방의 쾨펜-트레와다 기준 미래 기후대 변화를 분석하였다. 그 결과 툰드라지대가 B1에서 33.0%, A1B에서 42.6%, A2에서 44.2% 감소할 것으로 전망하였다. 또한 연중 월 평균기온이 10℃를 초과하는 달이 4~7개이면서 최한월이 0℃ 미만인 Dc(온대 대륙성 기후대) 기후대가 B1에서 84.6%, A1B에서 126.4%, A2에서 149.6% 증가할 것이라고 분석하였다.

Belda *et al.* (2016)에서는 IPCC 5차 보고서에서 새로운 기후변화 시나리오인 RCP시나리오를 채택함에 따라, RCP4.5와 RCP8.5를 사용한 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5(CMIP5)의 전구기후모델 결과를 앙상블 평균하여 쾨펜-트레와다 기준의 미래 기후대 변화를 분석하였다. 그 결과 미래에 빙관 기후대, 툰드라, 아한대 기후대의 면적은 줄어들었으며, 온대기후대, 건조 기후대, 사바나 지역의 면적은 증가하였다. 또한 21세기 말 대륙지역은 RCP4.5에서 14%, RCP8.5에서 20%의 면적에서 기후대의 변화가 일어날 것이라고 분석하였다.

국내에서는 Kwon *et al.* (2007)은 A1B 시나리오에 근거한 MM5(Mesoscale Model Version 5) 모델로 생산한 1971년부터 2100년까지의 기온 자료를 이용하여 쾨펜-트레와다 기준의 아열대 기후구의 변화를 전망하였다. 그 결과 현재는 제주도를 포

함한 남해안 일부 지역(부산, 통영, 거제, 여수, 완도, 목포)만 아열대 기후에 속해있지만, 2100년에는 태백산맥과 소백산맥의 산지 주변을 제외한 대부분 지역이 속하게 된다고 분석하였다.

Park *et al.* (2013)은 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 기반의 HadGEM3-RA 지역기후모델 결과를 통계적 공간 상세화 모델을 통해 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 공간해상도로 변환한 상세 기후변화 시나리오를 활용하여 쾨펜-트레와다 기준의 한반도 미래 기후대와 극한기온사상 변화를 분석하였다. 그 결과 미래 아열대 기후대는 해안지역을 따라 북쪽으로 확장하며, 대도시에서 나타날 것이라고 분석하였다. 극한기온사상의 경우 미래로 갈수록 두 시나리오 모두 추위와 관련된 지수는 감소하며, 더위와 관련된 지수는 증가할 것으로 예상하였다.

이처럼 미래 기후대 분포 분석은 기후변화로 인한 영향에 적응하고 대응하기 위한 국가적인 위험 관리 프로세스에 중요한 역할을 한다. 그러나 미래 기후대의 변화 예측은 불확실성이 크기 때문에 신뢰할 만한 예측을 도출하기 위한 노력이 필요하다. 기존의 연구들은 대부분 단일 모델이 산출한 결과를 기반으로 기후대 변화를 예측하거나, 모델 모의 결과에 편차보정을 적용하지 않은 경우가 대부분이었다. 또한 최근 기술 수준이 고도화됨에 따라 고해상도 다중기후모델을 활용하여 더 신뢰할 수 있는 남한 기후대 전망에 대한 요구가 늘어나고 있어 각 시·군·구 지자체 단위에 맞춘 기후대 변화를 제시할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 CORDEX-East Asia project에 참여한 모델이 생산한 상세 기후변화 시나리오에 편차보정 기법을 적용한 후 산출한 앙상블 결과를 기반으로 남한지역의 230개 시·군·구에 대한 미래 기후대 변화와 극한기온사상 변화를 분석하였다.

2. 연구자료 및 방법

IPCC는 5차 평가보고서(AR5)를 위해 새로운 국제표준 온실가스 시나리오인 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathways: RCP) 4종(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)을 확정하였다. RCP는 인간의 활동이 대기에 미치는 복사량으로 나타낸 시나리오이다. RCP2.6, 4.5, 8.5는 각각 2100년 복사강제력이 2.6Wm^{-2} , 4.5Wm^{-2} , 8.5Wm^{-2} 임을 나타낸다. 기상청은 우리나라의 상세 지역 기후변화 시나리오 개발을 위해 세계 기후연구프로그램(World Climate Research Programme: WCRP)이 주관하는 CORDEX(Coordinated Regional climate Downscaling Experiment) 프로그램에 2009년부터 참여하였다. CORDEX 프로그램에 참여한 5개 지역기후모델을 이용하여 동아시아에 대한 50km 해상도의 상세 기후변화 시나리오를 산출하였다. 이후, 보다 고해상도 시나리오가 필요하여 한반도를 중심으로 하는 12.5km 해상도의 기후변화 시나리오를 산출하였다(Suh *et al.*, 2012; Cha *et al.*, 2016; Suh *et al.*, 2016). Figure 1은 CORDEX의 동아시아 모의영역과 한반도 상세 모의영역을 나타낸다. 상세 기후변화 시나리오 산출에 활용된 5개 지역기후모델은 기상청의 Hadley Centre Global Environmental Model version3-Atmospheric regional climate model(HadGEM3-RA), 공주대의 Regional Climate Model version 4.0(RegCM4), 울산과학기술원의 Seoul National University Regional Climate Model(SNURCM), 부산대의 Weather Research and Forecasting model version 3.4(WRF), 연세대/포항공대의 Global/Regional Integrated Model System(GRIMs)이다. 본 연구에서는 남한 미래기후대 변화를 예측하기 위하여 12.5km 해상도의 5개의 모델로 산출한 상세 기후변화 시나리오의 단

Figure 1. RCM domains for East Asia with 50 km horizontal resolution (big dashed box) and the Korean Peninsula with 12 km horizontal resolution (small dashed box) with topography (m).

Table 1. Configurations of RCMs used.

	HadGEM3-RA	RegCM4	SNURCM	WRF	GRIMs
Number of grids (Lat. X Lon.)	184x164	198x178	199x179	201x180	201x182
Vertical coordination	38 hybrid	18 sigma	24 sigma	27 sigma	28 sigma
Radiation	General 2-stream radiation	NCAR CCM3	CCM2 package	CAM	GSFC
Microphysics	Single moment bulk scheme	SUBEX	Reisner II	WSM3	WSM1
Convection parameterization	Revised mass flux scheme	MIT-Emanuel	Kain-Fritsch II	Kain-Fritsch II	SAS+CMT
Land surface model	MOSES II	CLM3.5	CLM3.0	Noah	OML-climatology value
Reference	Davies <i>et al.</i> (2005)	Giorgi <i>et al.</i> (2012)	Lee <i>et al.</i> (2004)	Skamarock <i>et al.</i> (2008)	Hong <i>et al.</i> (2013)

순평균 앙상블을 사용하였다. Table 1은 각 모델의 설정을 나타낸다. 모델의 오차를 줄이기 위해 편차보정 기법을 적용하였다. 기온에 대해서는 평균 보정 후 표준편차의 비율을 곱하는 방법인 variance scaling 기법을, 강수에 대해서는 관측과 모델의 평균의 비율을 이용하여 보정하는 power transformation 기법을 각각 적용하였다(Teutschbein *et al.*, 2012).

Variance scaling 기법의 식은 다음과 같다.

$$T_{model}^{*2}(d) = T_{model}^{*1}(d) - \mu_m(T_{model}^{*1}(d)) \quad (1)$$

$$T_{model}^{*3}(d) = T_{model}^{*2}(d) \cdot \left[\frac{\sigma_m(T_{obs}(d))}{\sigma_m(T_{model}^{*2}(d))} \right] \quad (2)$$

$$T_{model}^{*}(d) = T_{model}^{*3}(d) + \mu_m(T_{model}^{*1}(d)) \quad (3)$$

각 문자의 정의는 Table 2와 같다. 식(1)에서 평균을 모델 값에서 평균을 뺀다. 식(2)에서 나머지 값에 관측과 모델의 표준편차 비율을 곱한다. 마지막으로 식(1)에서 뺀 초기 평균 값을 더해 최종 보정을 한다. 이 기법은 관측과 모델의 평균이 같아지며, 온도의 분포가 관측과 유사하게 보정되는 장점이 있다.

Power transformation 기법의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(b_m) &= 0 = CV_m(P_{obs}(d)) - CV_m(P_{model}^{b_m}(d)) \\ &= \frac{\sigma_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{obs}(d))} - \frac{\sigma_m(P_{model}^{b_m}(d))}{\mu_m(P_{model}^{b_m}(d))} \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_{model}^{*1}(d) = P_{model}^{b_m}(d) \quad (5)$$

$$P_{model}^{*}(d) = P_{model}^{*1}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{model}^{*1}(d))} \right] \quad (6)$$

식(4)에서 관측과 모델의 변동계수 차이를 만족하는 b_m 값을 구한 후, 식(5)와 같이 강수 값에 지수로 곱한다. 식(5)에서 나온 값에 관측과 모델의 평균 비율을 곱하여 최종 보정을 한다. 이 기법은 모

Table 2. Definition of symbols and sub-/superscripts used in text.

Symbols	Definition
b	Parameter
CV	Coefficient of variation
(d)	Daily
μ	Mean
P	Precipitation
σ	Standard deviation
T	Temperature
Sub-/superscripts	Definition
*	Final bias-corrected
*1, 2 or 3	Bias-corrected in an intermediate step
model	Model simulated
m	Within monthly interval
obs	Observation

델 강수의 평균이 관측과 같아지며, 강수 극한 값이 효과적으로 보정되는 장점이 있다.

미래 기후대와 극한기온사상의 변화에 대한 기존 연구(Kwon *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2013)에서는 단일 모델의 결과를 기반으로 기후대와 극한기온사상의 미래 변화를 구하였다. 하지만 본 연구에서는 CORDEX 프로그램에 참여한 5개의 모델 결과에 편차보정을 적용한 후 앙상블을 산출해 기후대 변화를 분석하였기 때문에 이전 연구보다 불확실성을 줄인 것으로 판단된다.

미래 기후대의 변화를 보기에 앞서 편차보정의 필요성을 확인하기 위하여, 편차보정을 적용하지 않은 모델 앙상블자료와 편차보정을 적용한 앙상블자료를 기반으로 산출된 현재 기후대를 관측 기반으로 산출된 현재 기후대와 비교하였다. 230개 지자체의 관측값은 전국 73개 관측소 자료를 0.25°의 공간해상도를 가진 격자로 만든 다음 각 지역의 시청, 군청, 구청의 위치로 내삽하여 산출하였다. 내삽 기법은 이중선형보간법을 적용하였다. Table 3은 콰펜-트레와다 기후 구분의 정의를 보여준

다(Belda *et al.*, 2014). 기후대 구분은 쾨펜-트레와 다 기후구분의 아열대기후인 C 기후대와 온대기후대인 D 기후대를 기준으로 구분하였다. C 기후대는 최한월의 평균기온이 18°C 미만이고, 월 평균기온이 10°C를 초과한 달이 8개에서 12개 사이에 해당하는 지역으로서 아열대 기후에 해당한다. D 기후대는 월 평균기온이 10°C를 초과한 달이 4개에서 7개 사이에 해당하는 지역으로서 온대 기후에 해당한다. 또한 이들 기후대는 각자 Cs, Cw, Cf와 Do, Dc의 소분류로 나뉜다. 이를 기준으로 2021년부터 2100년까지 3개의 기간(2021~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년)의 월 평균기온 기후값을 계산하여 기간별로 세 가지(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) 시나리오에 대한 한반도 미래

기후대 변화를 분석하였다. 특히 2015년 12월에 채택된 ‘파리협정’의 21세기 말 전지구 기온상승 2°C 이하 목표에 가장 근접한 RCP2.6 시나리오를 분석에 포함하였다. 또한 지자체별 기후변화 대응 연구에 기초자료로 활용할 수 있도록 전국 230개 지자체에 대한 기후대 변화 자료를 산출하였다.

본 연구에서는 다중모델의 앙상블을 이용한 극한기온사상의 미래 변화도 분석하였다. 이를 위하여 기상청에서 제시한 극한지수의 정의인 서리일수(일최저기온이 0°C 미만인 날의 연중 일수), 결빙일수(일최고기온이 0°C 미만인 날의 연중 일수), 열대야일수(일최저기온이 25°C 이상인 날의 연중 일수), 폭염일수(일최고기온이 33°C 이상인 날의 연중 일수)를 사용하였다. 기후대 분석과 유사하

Table 3. Climate types and subtypes defined by the Köppen-Trewartha climate classification (Trewartha and Horn, 1980). T: mean annual temperature (°C); T_{mo} : mean monthly temperature (°C); P_{mean} : mean annual rainfall (cm); P_{dry} : monthly rainfall of the driest summer month; R: Patton’s precipitation threshold, defined as $R = 2.3T - 0.64P_w + 41$, where P_w is the percentage of annual precipitation occurring in winter; T_{cold} (T_{warm}): monthly mean air temperature of the coldest (warmest) month.

Type / Subtype	Criteria Rainfall/Temperature regime
A	$T_{cold} > 18^{\circ}\text{C}$; $P_{mean} \geq R$
Ar	10 to 12 mo wet; 0 to 2 mo dry
Aw	Winter (low-sun period) dry; > 2 months dry
As	Summer (high-sun period) dry; rare in type A climates
B	$P_{mean} < R$
BS	$R/2 < P_{mean} < R$
BW	$P_{mean} < R/2$
C	$T_{cold} > 18^{\circ}\text{C}$; 8 to 12 months with $T_{mo} > 10^{\circ}\text{C}$
Cs	Summer dry; at least 3 times as much rain in winter half-year as in summer half-year; $P_{dry} < 3\text{cm}$; total annual precipitation < 89cm
Cw	Winter dry; at least 10 times as much rain in summer half-year as in winter half-year
Cf	No dry season; difference between driest and wettest month less than required for Cs and Cw; $P_{dry} > 3\text{cm}$
D	4 to 7 months with $T_{mo} < 10^{\circ}\text{C}$
Do	$T_{cold} > 0^{\circ}\text{C}$
Dc	$T_{cold} < 0^{\circ}\text{C}$
E	1 to 3 months with $T_{mo} > 10^{\circ}\text{C}$
F	$T_{warm} < 10^{\circ}\text{C}$
Ft	$T_{warm} > 0^{\circ}\text{C}$
Fi	$T_{warm} < 0^{\circ}\text{C}$

계 RCP2.6, RCP4.5와 RCP8.5 세 가지 시나리오에 따른 극한기온사상의 한반도 미래 변화를 분석하였다.

3. 연구결과

1) 모델 평가

Figure 2는 1981~2005년 동안 전국 230개 시·군·구에 대하여 관측, 5개 모델의 앙상블, 편차보정을 적용한 모델 앙상블을 이용하여 산출한 한반도 기후대이다. 관측 기후대에서는 제주도와 남부해안, 포항지역이 아열대 기후대로 구분된다. 또한 최한월의 평균기온이 0℃ 초과인 Do 기후대는 전라남도과 경상남도 남부, 대구 그리고 동해안을 따라 영덕과 울진에서 나타난다. 편차보정을 적용하지 않은 모델 앙상블을 기반으로 산출한 기후대에서는 제주도와 남해안 도서 지역에서 아열대 기

후대가 분포하고 있으며, Do 기후대는 영광, 영암, 강진에서만 나타난다. 이에 반해 편차보정을 적용한 모델 앙상블을 기반으로 산출된 기후대에서는 모든 지역에서 관측값과 일치하는 기후대가 나타난다. 이는 앙상블 기법이 모델 불확실성을 줄인다고 하더라도 정확한 기후대 구분을 위해서는 추가적인 편차보정이 필요하다는 것을 의미한다. 온도와 강수 기준값을 이용하여 기후대를 구분할 때 모델의 오차가 크다면 기후대를 현실적으로 구분하기 어렵기 때문이다.

2) 미래 기후대 변화

Figure 3은 편차보정을 적용한 앙상블을 이용하여 쾨펜-트레와다 기준에 따라 산출한 미래 기후대이다. RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 세 개 시나리오에 대하여 분석하였고, 미래를 전기(2021~2040년), 중기(2041~2070년), 후기(2071~2100년)로 구분하였다. 모든 시나리오에서 미래 전기보다 미

Figure 2. Climate types of 230 administrative districts according to the Köppen-Trewartha climate classification during 1981~2005 year from (a) observation, (b) ensemble of 5 RCMs that no bias correction, (c) ensemble of 5 RCMs that bias correction.

래 후기에 온대 기후대의 면적이 좁아졌고, 아열대 기후대의 면적은 넓어졌다. RCP2.6 시나리오에서는 중기부터 대구지역에서 아열대 기후대가 나타나며, 서해안과 동해안을 따라 아열대 기후대가 나타났으나 전체적으로 크게 확장하지는 않았다. 미래 후기에는 대전, 인천과 서울 일부 지역에서 Do 기후대가 나타나지만 진안, 임실, 장수 지역은 소백산맥의 영향을 받아 Dc 기후대를 그대로 유지했다. RCP4.5 시나리오에서 미래 후기로 갈수록 서해안을 따라서 아열대 기후대가 확장하는데, 특히 미래 중기부터 인천과 서울이 아열대 기후대에 속하게 된다.

RCP4.5 시나리오의 미래 전기 기후대 공간분포는 RCP2.6의 미래 후기와 유사하다. 동해안의 양양, 강릉, 삼척 등 강원도의 대부분 지역과 곡성구례 등 지리산 부근 지역은 각각 태백산맥과 소백산맥의 영향을 받아 아열대 기후대에 속하지 않았다.

RCP8.5 시나리오의 미래 전기에는 대구가 이미 아열대 기후대에 속해 있고, 중기에는 아열대 기후대가 점점 내륙으로 확장하여 후기에는 중부 내륙 지역을 제외한 우리나라 대부분의 지역이 아열대 기후대로 변했다. Do 기후대는 철원, 포천, 홍천, 평창에서만 나타났다. RCP8.5 시나리오에서도 미래 중기까지 소백산맥의 영향으로 온대 기후대에 속한 지역이 나타나지만, 미래 후기에는 대부분의 지역이 아열대 기후대로 변하였다. 우리나라에서 나타난 아열대 기후대는 모두 Cf 기후대로, 강수량의 변화가 기후대 결정에 영향을 미치지 못하였다.

미래 전기에는 RCP 시나리오별로 차이가 크지 않지만, 미래 중기에는 RCP2.6보다 RCP4.5와 RCP8.5에서 아열대 기후대가 명확하게 확장하였다. RCP2.6과 RCP4.5 시나리오에서는 중기와 후기의 아열대 지역 변화 차이가 크지 않았지만,

RCP8.5 시나리오에서는 시간에 따른 아열대 기후대 확장이 뚜렷하였다. 모든 기간에 대하여 전반적으로 RCP 시나리오의 복사강제력이 클수록 아열대 기후대는 더 넓게 확장하였다. 또한 지방보다 대도시에서, 내륙보다 해안을 따라서 확장하는 경향을 보였다. 태백산맥과 소백산맥 부근에 위치한 지역은 상대적으로 아열대 기후대가 늦게 나타나거나 나타나지 않았다. 주목할 점은 파리협정 목표에 가장 근접한 RCP2.6 시나리오에서 시간에 따른 기후대 변화가 다른 시나리오에서 보다 상대적으로 작다는 것이다.

3) 극한기온사상 변화

본 절에서는 편차보정을 적용한 다중 모델 앙상블을 이용하여 산출한 남한지역의 극한기온사상 변화를 분석하였다. 극한기온사상으로는 저온 현상과 연관된 서리일수, 결빙일수와 고온 현상과 관련된 열대야일수, 폭염일수를 선택하여 미래 변화를 분석하였다. 그림으로 제시하지는 않았지만 극한기온사상에 대한 모델의 검증을 위하여 1981~2005년 동안 편차보정을 적용한 모델 앙상블로 산출된 극한기온사상의 공간 분포를 분석하였다. 모델 앙상블이 일부 극한기온사상이 크게 나타난 곳에서 약간의 과소모의를 보이고 있으나 대부분의 지역에서 관측과 매우 유사한 공간분포를 보였다. Figure 4에서 세 개의 RCP 시나리오를 따라 세 개의 기간으로 나누어 서리일수를 구하였다. RCP2.6 시나리오에서는 전체적으로 서리일수의 변화가 시간에 따라 크지 않았지만, 나머지 두 시나리오에서는 미래 후기로 갈수록 서리일수가 현저하게 감소하는 경향이 나타났다. 특히 RCP8.5 시나리오의 미래 후기에는 거제, 남해, 여수 등의 남해안 일부지역에서 서리일수가 연 15회 미만으로 나타났다.

Figure 4와 유사하게 Figure 5에서는 결빙일수

Figure 3. Climate types of 230 administrative districts according to the Köppen-Trewartha climate classification calculated from 5 RCMs' ensemble. Each row indicates RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 and each column indicates early future (2021~2040), middle future (2041~2070), late future (2071~2100) respectively.

Figure 4. The annual number of days with frost calculated from 5 RCMs' ensemble. Each row indicates RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5, and each column indicates early future (2021~2040), middle future (2041~2070), and late future (2071~2100), respectively.

변화를 분석하였다. 다른 시나리오에 비교하여 RCP2.6 시나리오는 기간에 따른 서리일수의 변화가 크지 않았다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 미래 후기로 갈수록 강원도 정선을 제외한 모든 지역에서 결빙일수가 감소하는 경향을 보였다. 또한 시나리오의 복사강제력이 클수록 결빙일수가 상대적으로 더 많이 감소하였다. RCP8.5 시나리오의 미래 후기에는 강원도 평창을 제외한 모든 지역에서 연 4회 이하로 나타났다.

Figure 6에서는 시나리오 및 기간별 미래 열대야일수 변화를 조사하였다. RCP2.6 시나리오에서는 다른 시나리오들에 비해 상대적으로 열대야일수가 많이 증가하지 않았지만 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서는 열대야일수가 유의미하게 늘어났으며, 특히 RCP8.5 시나리오의 미래 후기에는 산악 지역을 제외한 대부분의 남한지역에서 열대야일수가 매우 증가하였다.

열대야일수와 유사하게 폭염일수 변화를 Figure 7에 나타냈다. RCP2.6 시나리오에서는 다른 시나리오들에 비하여 상대적으로 시간에 따른 폭염일수 변화가 크지 않았다. 하지만, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서는 폭염일수가 현저하게 늘어났으며, 특히 RCP8.5 시나리오의 미래 후기에는 대구광역시와 전라북도 전주, 완주 지역에서 폭염일수가 연 75일 이상으로 증가하였다. 주목할 점은 RCP8.5 시나리오의 미래 후기에 대한 분석에서 열대야일수는 제주도, 포항을 포함한 남해안 지역에서 가장 많아 전반적으로 내륙보다 해안 지방에서 많이 증가했지만, 폭염일수는 전주, 완주, 대구광역시와 같이 내륙지역에서 더 많이 증가하였다. 유사하게 제주도는 우리나라 최남단에 위치함에도 불구하고 폭염일수는 상대적으로 많이 증가하지 않지만, 열대야일수는 뚜렷하게 증가하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 RCP 시나리오를 기반으로 5개 지역기후모델이 생산한 모의 결과의 양상들을 이용하여 남한지역의 미래 기후대 변화와 극한기온사상 변화를 조사하였다. 정확한 기후대 변화 조사를 위하여 지상온도와 강수에 대하여 편차보정 기법을 적용한 후 괴펜-트레와다 기후 구분 기준에 근거한 남한 지역의 기후대 변화와 기상청 기준에 근거한 극한기온사상 변화를 분석하였다. 남한 230개 지자체 지역에 대하여 RCP시나리오(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)와 기간(미래 전기: 2021~2040년, 미래 중기: 2041~2070년, 미래 후기: 2071~2100년) 별 기후대 변화와 극한기온사상 변화를 조사하였다.

1980년부터 2005년까지 우리나라에서는 제주도와 남해안 일부, 울산과 포항이 아열대 기후대에 해당하였다. 모든 시나리오에서 미래 후기로 갈수록 우리나라의 아열대 기후대의 면적은 서해안과 동해안을 따라 확장하였고, 온대 기후대의 면적은 축소하였다. 아열대 기후대의 확장은 내륙보다 해안가에서, 지방보다 대도시에서 뚜렷하였다. 또한 태백산맥과 소백산맥 주변의 산악지역은 아열대 기후대 확장이 다른 지역보다 늦게 나타났다. RCP2.6 시나리오는 다른 시나리오들과 비교하여 아열대 기후대의 면적이 크게 증가하지 않았다. 그러나 서울의 경우 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 미래 중기부터 온대 기후대에서 아열대 기후대로 변화하였다. RCP8.5 시나리오의 미래 후기에는 산악지역과 중부 내륙지방을 제외한 대부분 지역에서 아열대 기후대가 나타났다. 우리나라에서 나타난 아열대 기후대는 모두 Cf 기후대로 미래 강수의 변화가 미래 기후대 변화까지 영향을 주지는 않았다.

저온과 관련한 극한기온사상인 서리일수와 결빙

Figure 5. The same as Figure 4 except for freezing days.

Figure 6. The same as Figure 4 except for days with tropical night.

Figure 7. The same as Figure 4 except for days with heat wave.

일수의 변화를 살펴본 결과, RCP2.6 시나리오에서는 기간에 따라 서리일수와 결빙일수가 크게 변하지 않았으나, RCP8.5 시나리오에서는 현저하게 감소하였다. 이와는 반대로 고온과 관련한 극한기온사상인 열대야일수와 폭염일수의 변화를 살펴본 결과, RCP2.6 시나리오에서는 기간에 따라 열대야일수와 폭염일수의 변화가 크지 않았으나, RCP8.5 시나리오에서는 뚜렷하게 증가하였다. 열대야일수는 내륙지역보다 해안지역에서 더 큰 증가를, 폭염일수는 해안지역보다 내륙지역에서 더 큰 증가를 보였다.

본 연구에서는 CORDEX 동아시아 프로그램에 참여한 5개 지역기후모델이 산출한 상세 기후변화 시나리오를 기반으로 남한의 미래 기후대와 극한기온사상 변화를 조사하였다. 기존 연구(Kwon *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2013)와 유사하게 미래 온난화로 인하여 아열대 기후대가 확장할 가능성과 고온 관련 기상재해 발생일수가 증가할 가능성이 높다는 것을 확인하였다. 반면 기존연구와는 다르게 본 연구에서는 기후변화 전망의 불확실성을 줄이기 위하여 편차보정 기법과 다중모델 앙상블 기법을 적용하였다. 또한, 파리 기후협약 목표 기준에 근접한 RCP2.6 시나리오에서만 기후대와 극한기온사상의 시간 변화가 크지 않기 때문에 협약 목표를 달성하기 위한 기후변화 대응/저감 대책 수립이 필요하다는 것을 알 수 있다. 특히 남한을 230개의 시·군·구로 나누어 각 지자체의 변화를 분석하였기 때문에 본 연구결과를 지자체 별 기후변화 대응/저감 정책 계획 수립에 유용한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

사사

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난 안

전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MPSS-자연-2013-63].

References

- Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T., and Kalvová, J., 2014, Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha, *Climate Research*, 59(1), 1-13.
- Belda, M., Holtanová, E., Kalvová, J., and Halenka, T., 2016, Global warming-induced changes in climate zones based on CMIP5 projections, *Climate Research*, 71(1), 17-31.
- Cha, D.-H., Lee, D.-K., Jin, C.-S., Kim, G., Choi, Y.-H., Suh, M.-S., Ahn, J.-B., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., and Kang, H.-S., 2016, Future Changes in Summer Precipitation in Regional Climate Simulations over the Korean Peninsula Forced by Multi-RCP Scenarios of HadGEM2-AO, *Asian-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 52(2), 139-149.
- Feng, S., Ho, C. H., Hu, Q., Oglesby, R. J., Jeong, S. J., and Kim, B. M., 2012, Evaluating observed and projected future climate changes for the Arctic using the Köppen-Trewartha climate classification, *Climate Dynamics*, 38(7-8), 1359-1373.
- Gallardo, C., Gil, V., Hagel, E., Tejeda, C., and De Castro, M., 2013, Assessment of climate change in Europe from an ensemble of regional climate models by the use of Köppen-Trewartha classification, *International Journal of Climatology*, 33(9), 2157-2166.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

- Korea government, 2015, *Second National Climate Change Adaptation Measures*, Seoul.
- Korea Meteorological Administration, 2012, *Climate Change Outlook Report on the Korean Peninsula*, Korea Meteorological Administration, 151p.
- Kwon, Y.-A., Kwon, W.-T., Boo, K.-O., and Choi, Y., 2007, Future Projections on Subtropical Climate Regions over South Korea Using SRES A1B Data, *Journal of The Korean Geographical Society*, 42(3), 355-367 (in Korean with English abstract).
- Park, C.-Y., Choi, Y.-E., Kwon, Y.-A., Kwon, J.-I., and Lee, H.-S., 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, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 19(4), 600-614 (in Korean).
- Suh, M.-S., Oh, S.-K. Lee, D.-K. Cha, D.-H. Choi, S.-J. Jin, C.-S., and Hong, S.-Y., 2012, Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea, *J. Clim.*, 25(20), 7067-7082.
- Suh, M.-S., Oh, S.-G., Lee, Y.-S., Ahn, J.-B., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., and Kang, H.-S., 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, *Asian-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 52(2), 151-169.
- Teutschbein, C. and Seibert, J., 2012, Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, *Journal of Hydrology*, 456, 12-29.
- Trewartha, G. T. and Horn, L. H., 1980, *An Introduction to climate*, McGraw-Hill, New York, 397-403.

책임편집: 이경미

영문교열: 이은걸