HadGEM2-AO를 강제자료로 사용한 SNURCM과 WRF의 동아시아 지역기후 모의

최석진¹ · 이동규^{1,*} · 오석근²

¹서울대학교 지구환경과학부, 151-742, 서울시 관악구 관악로 1

²공주대학교 대기과학과, 314-701, 충남 공주시 공주대학로 5

Regional Climate Simulations over East-Asia by using SNURCM and WRF Forced by HadGEM2-AO

Suk-Jin Choi¹, Dong-Kyou Lee^{1,*}, and Seok-Geun Oh²

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: In this study, the reproducibility of the simulated current climate by using two regional climate models, such as Seoul National University Regional Climate Model (SNURCM) and Weather Resuearch and Forecasting (WRF), is evaluated in advance to produce the standard regional climate scenario of future climate. Within the evaluation framework of a COordinated Regional climate Downscaling EXperiment (CORDEX), 28-year-long (1978-2005) regional climate simulation was conducted by using the Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM2-AO) global simulation data of the National Institute of Meteorological Research (NIMR) as a lateral boundary forcing. The simulated annual surface temperatures were in good agreement with the observation; the spatial correlation coefficients between each model and observation were over 0.98. The cold bias, however, were shown over the northern boundary in the both simulated results. In evaluation of the simulated precipitation, the skill was reasonable and good. The spatial correlation coefficients for the precipitation over the land area were 0.85 and 0.79 in SNURCM and WRF, respectively. It is noted that two regional climate models (RCMs) have different characteristics for the distribution of precipitation over equatorial and mid-latitude areas. SNURCM shows better distribution of the simulated precipitation associated with the East Asia summer monsoon in the mid-latitude areas, but WRF shows better in the equatorial areas in comparison to each other. The simulated precipitation is overestimated in summer season (JJA) rather than in spring season (MAM), whereas the spatial distribution of the precipitation in spring season corresponds to the observation better than in summer season. Also the RCMs were capable of reproducing the annual variability of the maximum amount and its timing in July, in which the skills over the inland area were in better agreement with the observation than over the maritime area. The simulated regional climates, however, have the limitation to represent the number of days for extremely hot temperature and heavy rainfall over South Korea.

Keywords: HadGEM2-AO, SNURCM, WRF, CORDEX East-Asia, Evaluation

요 약: 본 연구에서는 신뢰성 있는 국가표준 지역기후변화 시나리오 생산을 위해 현재기후에 대한 SNURCM과 WRF의 재현성을 검증하였다. 국립기상연구소에서 생산된 HadGEM2-AO 전구자료를 지역기후모형의 경계조건으로 사용하여 CORDEX 규준 하에 28년(1978-2005)간의 장기적분을 수행하였다. 두 모형은 연평균 지표 온도 분포를 관측과의 공간상관계수가 0.98 이상으로 매우 높은 일치성을 나타내었지만, 모형 영역의 북쪽 경계를 중심으로 한랭 편차를 공통적으로 보였다. 강수의 경우 또한 육지 지역을 대상으로 한 관측과의 공간 상관 계수는 SNURCM이 0.85, WRF가 0.79로 나타나 우수한 모의 결과를 보였다. 두 모형에서 모의된 강수 분포는 적도와 중위도 지역 간에 상반되는 특성을

*Corresponding author: dklee@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-6705

Fax: +82-2-872-4440

보였다. SNURCM은 WRF에 비교하여 중위도 동아시아 몬순 강수대의 분포를 적도 지역의 강수대보다 상대적으로 잘 모의하였으나, WRF는 그 반대의 결과를 나타내었다. 여름철(JJA) 보다 봄철(MAM)에 과다 모의되었지만 모의된 강수 분포의 일치성은 봄철에 높게 나타났다. 세부영역 별 분석에서 두 모형은 7월 강수 최대 시점과 양을 비교적 정확히 모의하였고, 특히 내륙 지역 강수량의 모의 정확도가 해양에 영향 받는 지역보다 높았다. 모의결과는 한반도 상의 높은 일평균 지표온도일수와 강한 강수일수를 표현하는데 한계를 보였다.

주요어: HadGEM2-AO, SNURCM, WRF, CORDEX East-Asia, 모의 검증

서론

최근 인위적 요인에 의한 이산화탄소 등 온실기체의 급격한 증가로 지구 온난화가 가속화되고 그 결과 일본, 인도, 호주 등 많은 지역에서 집중호우의 발생 빈도 및 강도가 크게 증가하고 있다(Easterling et al., 2000; IPCC, 2007; Iwashima and Yamamoto, 1993). 기후현상의 극값은 지난 수년 동안 갱신되어 왔으며, 특히 우리나라에 엄청난 피해를 야기한 태풍 ‘루사’의 예를 비롯하여 30년 이상 경험해보지 못했던 날씨가 전 세계적으로 잇달아 나타나고 있어 기후변화에 관한 사회적 관심이 더욱 높아지고 있다(Jung et al., 2002; Kwon, 2005; 윤희정 외, 2006; 김찬수와 서명석, 2009; 명지수와 서명석, 2010; Lee and Choi, 2010).

기후변화에 대한 대부분의 연구는 미래의 기후를 예측할 수 있는 전구기후모형을 이용하여 수행되고 있다. 하지만, 대부분의 전구기후모형은 상대적으로 저해상도의 공간 분해능과 물리 과정의 단순화로 인하여 지역 또는 국지 규모의 기후 현상을 현실적으로 표현하지 못하는 한계를 가지고 있다. 복잡한 기후시스템들의 상호작용으로 기후가 결정되는 동아시아와 같은 지역에서 수백 km 수평 해상도의 전구기후모형만으로 시·공간적으로 상세한 지역기후를 이해하고 미래 기후변화를 예측하는 것은 힘들다. 따라서 1990년대 이후부터, 전구기후모형에서 생산한 기후 정보로부터 상세하고 지역적인 기후 특성을 추출하기 위한 규모축소(downscaling) 방안인 지역기후모형(Regional Climate Model: RCM)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Giorgi 1990; Giorgi and Mearns, 1999a; Lee and Suh, 2000; Cha and Lee, 2009). 이러한 지역기후모형들은 전 지구 모형의 예측 능력과 양질의 분석장이 주어진다면 다양한 규모의 시·공간 변동성과 함께 극한 기후의 변동 특성까지 재생산할 수 있음을 보였다(Suh and Lee, 2004; Choi et al., 2008; Krichak, 2008; Yhang and Hong,

2008; Hong et al., 2010).

하지만 대부분의 지역기후모형은 제한지역모형을 기반으로 하기 때문에 내·외부적인 요인에 의한 불확실성을 갖는다. 이러한 불확실성은 지역기후모형의 경계조건 및 물리과정 불완전성, 모의영역과 해상도에 대한 의존성, 대규모 강제자료 자체의 불확실성 등에 기인할 수 있다(Giorgi and Mearns, 1999b; Lee et al., 2005; Im et al., 2007; 이영호 외, 2008; 오석근 외, 2011). 따라서 신뢰할 수 있는 미래 지역기후모형의 결과를 얻기 위해서는 모형의 불확실성을 파악하는 것이 우선되어야 한다.

이러한 노력 중 하나로, 지역기후모형의 불확실성 검증과 미래 기후변화 예측의 신뢰 수준을 높이기 위하여 북미지역의 NARCCAP(North America Regional Climate Change Assessment Program), 아시아 지역의 RMIP(Regional climate Models Intercomparison Project), 유럽의 PRUDENCE(Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects)와 같은 국제적인 상호비교 프로젝트가 여러 지역에 대하여 수행되고 있다. 최근 각 연구 그룹마다 다른 해상도와 영역 설정으로 공동의 연구에 어려움을 극복하기 위하여, 세계기후연구계획(World Climate Research Program: WCRP)이 후원하는 CORDEX(COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) 프로그램이 활발하게 추진되고 있다. CORDEX는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 AR5(Fifth Assessment Report)에 지역기후모형을 이용한 상세 기후변화 예측 결과를 포함시키고, 세계적인 규준을 확립하여 전구 규모의 지역기후 변화 전망을 비교하고 향상시키기 위한 프로그램이다.

현재 국립기상연구소는 IPCC AR5 및 CORDEX의 참여와 우리나라 국가표준 기후변화 시나리오를 구축하기 위해 HadGEM2-AO(Hadley Centre Global Environmental Model, version 2) 전구기후모형을 이용하여 4종의 대표농도경로 (Representative Concentration

Table 1. Model configurations used in this study

Contents	Description	
	SNURCM	WRF
Vertical layers (top)	24 sigma (70 hPa)	27 sigma (70 hPa)
Cumulus parameterization scheme (CPS)	Kain-Fritch	Kain-Fritch
Explicit moisture scheme (EMS)	Reisner2	WSM3
Radiation	CCM2 package	RRTM and Dudhia
Planetary boundary layer (PBL)	YSU	YSU
Land surface model (LSM)	NCAR CLM3	Unified Noah
Spectral nudging	Yes	Yes
Simulation period	Jan. 1978-Dec. 2005	Jan. 1978-Dec. 2005

Pathway, RCP)에 의한 시나리오 자료를 생산하고 (RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, RCP 2.X), 이를 강제력으로 HadGEM3-RA 지역기후모델을 이용하여 우리나라 지역기후 시나리오 자료를 산출하고 있다(이효신 외, 2009). 또한 국립기상연구소는 신뢰성 있는 동아시아 및 우리나라의 상세 기후전망을 구축하기 위하여, CORDEX 규준 하에 동아시아 영역에 대한 국내 우수 대학의 지역기후모델들이 생산한 지역기후 시나리오들과 함께 앙상블 결과를 도출하고 있다.

본 연구에서는 앙상블 멤버로써 모델의 불확실성 파악을 위하여, CORDEX 동아시아 영역에서 Seoul National University Regional Climate Model(SNURCM)과 Weather Research and Forecasting(WRF) 모델을 이용한 현재 기후 26년(1980-2005)의 재현성과 모의 성능을 기온과 강수의 계절 및 경년 변동을 중심으로 분석하였다. 초기 및 측면 경계 자료로서 HadGEM2-AO 모의자료를 사용하였다. 본 논문의 다음 절부터는 본 연구에서 사용한 모델과 실험설계에 대해 설명하고, HadGEM2-AO를 경계자료로 사용한 SNURCM과 WRF의 동아시아 및 남한에서의 현재 지역기후 모의 능력에 대한 검증 결과를 기술하였다. 마지막으로 본 연구에서 밝혀진 결과를 요약하고, 향후 필요한 연구 내용 및 계획을 제시하였다.

모델 및 실험설계

지역기후모델은 전구기후모델에 내재되어 있는 지역적 상세 특성을 중규모 제한지역모델을 이용하여 역학적으로 규모축소하는 방법이다. 본 연구에서는 전구기후모델자료로서 HadGEM2-AO 자료를 이용하고, 제한지역모델로서 SNURCM과 WRF모델이 사용되었다. SNURCM은 NCAR(National Center for

Fig. 1. Model domain and topography (m) for the 50 km grid spacing and the 8 subregions of Indochina (IC), Southern China (SC), Central China (CC), Northern China (NC), Mongolia (MG), Manchuria (MC), Korea (KR), and Japan (JP).

Atmospheric Research)의 대표적 중규모 대기 모델인 fifth-generation mesoscale model(MM5)을 기반으로 개발된 모델로, 서울대학교에서 동아시아와 한반도 기후에 대한 모의 성능을 향상시키기 위하여 지표모델과 행성경계층방안, 스펙트럴 너징 기법(spectral nudging technique)과 같은 개선점이 추가된 지역기후모델이다(Kang et al., 2005; Cha and Lee, 2009). WRF 모델은 NCAR를 중심으로 개발된 커뮤니티 모델로 연구와 현업 운용에의 활용을 모두 고려하여 개발되었으며, 본 연구에서는 측면 경계 조건을 보완하기 위하여 대규모 강제자료와 모델해의 편차를 줄여주는 스펙트럴 너징 기법을 적용하여 지역기후모델로 활용하였다(Choi, 2010).

Fig. 2. Spatial distribution of (Top) annual surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and (Bottom) its differences ($^{\circ}\text{C}$) between RCMs and OBS for 26 years (1980-2005).

Table 1은 본 연구에서 사용한 지역기후모델들의 구성을 나타낸다. SNURCM은 적운모수화방안과 명시적수분과정에 대하여 Kain-Fritsch와 Reisner II의 조합으로 사용하고, CCM2 복사방안, YSU 행성경계층 방안 및 NCAR CLM3 지면모델을 사용하였다. WRF 모델은 Kain-Fritsch와 WSM3의 조합으로 사용하고, RRTM/Dudhia 복사방안, YSU 행성경계층 방안 및 Unified Noah 지면모델을 사용하였다. 두 모델 모두 기후표류를 방지하고, 측면경계에서 들어오는 대규모 정보를 효과적으로 모의영역으로 받아들이는 동시에 지역기후모델이 생산하는 소규모 정보들을 유지하기 위한, 스펙트럴 너징 방안이 사용되었다.

모의 영역은 CORDEX에서 권고한 동아시아 영역으로 남북 방향으로 호주 북단에서 러시아까지, 동서 방향으로 티벳고원 서쪽에서부터 서태평양을 포함하는 광범위한 영역으로, 22.04°N 과 118.96°E 를 중심으

로 50 km 수평 해상도를 갖는 233×197 ($11650 \text{ km} \times 9850 \text{ km}$)개의 수평 격자로 이루어졌다(Fig. 1).

본 연구에서는 CORDEX 동아시아 영역에 대한 28년(1978-2005)간의 장기적분을 수행하였다. 모델 안정화 기간(spin-up time)을 고려하여 1978년과 1979년을 제외한 26년(1980-2005)에 대해 분석하였다. 비교 및 검증을 위한 관측 자료로서, 강수는 해양에서 CMAP 자료(Climatic Prediction Center Merged Analysis of Precipitation; Xie and Arkin, 1997)를 사용하고 육지에서는 CRU-TS(Climatic Research Unit Time-Series) 3.0 자료(CGIAR CSI Portal, 2010)를 사용하였다. 지상 기온 관측자료는 CRU-TS 3.0 자료를 사용하였다. 그리고 한반도의 상세 검증을 위해서 기상청 소속 59개 지상 관측소의 기온·강수자료를 이용하였으며, 대기 종관장 분석을 위해 NCEP/DOE2 재분석 자료(RA2)가 사용되었다.

Table 2. Statistical validation of surface air temperature and precipitation simulated by SNURCM (WRF) over the land area for 26 years (1980-2005)

Statistical valid.	Variable	Annual	Spring (MAM)	Summer (JJA)	Autumn (SON)	Winter (DJF)
Bias	Temp. (°C)	-1.33(-1.26)	-1.42(-1.66)	0.50(0.49)	-1.67(-0.98)	-2.96(-2.84)
	Precip. (mm/day)	1.69(1.42)	2.46(2.07)	1.04(0.75)	0.99(1.12)	2.06(1.63)
RMSE	Temp. (°C)	2.73(2.99)	3.12(3.65)	2.61(3.12)	2.93(2.90)	4.86(4.82)
	Precip. (mm/day)	3.16(2.88)	4.16(3.40)	3.85(3.87)	2.77(3.07)	3.79(3.29)
Spatial corr.	Temp.	0.99(0.98)	0.98(0.98)	0.93(0.91)	0.99(0.98)	0.99(0.98)
	Precip.	0.84(0.80)	0.87(0.79)	0.67(0.62)	0.84(0.78)	0.89(0.83)

연구 결과

지표 기온은 지리적 위치와 지형적 특성을 잘 반영하여 분포한다. 고위도로 갈수록 기온이 낮아지며 또한 티벳고원과 같은 높은 지형에서 낮게 분포한다. Fig. 2은 관측 및 두 지역기후모델의 연평균 온도 분포와 지역기후모델들의 편차 분포를 나타낸다. 두 모델은 지형의 분포를 따르며 온도 분포를 잘 모의하고 있다. 모의된 연평균 지표 기온의 분포는 관측과의 공간상관계수가 0.98 이상으로 매우 높은 일치성을 나타내고 있다(Table 2). 그러나 분석 관측 자료에서 불확실성이 존재하는 티벳 고원을 제외하고, 영역의 북쪽 경계를 중심으로 1-2°C 내외의 한랭 편차가 존재하며, 뉴기니섬 지역의 강한 한랭 편차를 공통적으로 보였다. 그러나 화남, 화중, 화북 지역과 한반도, 일본 영역에 있어서 두 모델은 1°C 내외의 비조직적인 지역적 편차를 보였다. SNURCM과 WRF의 영역평균 지표 온도 편차(bias)는 -1.33°C와 -1.26°C를 보였다.

강수에 대한 동아시아 지역기후의 재현성은 여름철 몬순과 관련한 순환의 올바른 모의와 밀접함에 따라, 두 지역기후모델인 SNURCM과 WRF의 결과와 강제자료인 HadGEM2-AO를 RA2 재분석 자료와 비교하였다. Fig. 3은 26년(1980-2005) 평균의 여름철(JJA) 850 hPa 지위고도와 바람을 나타낸다. Fig. 3a에서 보인 RA2 재분석 자료에서는 모델영역의 동쪽 경계 부분의 발달된 북태평양고기압 및 그와 관련된 고압성 동풍을 볼 수 있다. 또한 영역의 서쪽 경계 부분인 인도 대륙을 시점으로 하는 서풍을 볼 수 있다. 이 서풍과 동풍의 두 흐름은 남중국해 부근에 이르러 합류하며 남중국-한반도-일본으로 이어지는 여름철 동아시아 몬순 흐름을 이룬다. 이 여름철 동아시아 몬순의 흐름은 저위도에서 고위도로 강수과정에 중요한 열과 수분을 수송하고 이 흐름을 축으로 강

한 강수가 일어나게 된다. 그러나 HadGEM2-AO에서는 남중국으로부터 한반도로 불어오는 몬순의 흐름이 동쪽으로 이동되어 나타났다(Fig. 3b). 약화된 북태평양고기압 세력과 그에 따른 고압성 기류의 약화의 영향으로 흐름의 축은 일본 남쪽 해안을 향해 나타났다. SNURCM과 WRF에서 나타난 특징은 HadGEM2-AO와 유사하게 동쪽으로 이동된 여름 몬순의 흐름이 나타났다. SNURCM은 강제자료보다 해양에서 다소 약화된 기압을, WRF는 다소 강화된 기압을 나타내었다. 이것은 해양에서의 강수분포와 연관되어 나타난 결과이다.

Fig. 4는 관측 및 두 지역기후모델에서의 26년(1980-2005) 평균 강수량의 분포와 지역기후모델이 가지는 관측과의 편차 분포를 나타낸다. 관측은 해양에서 CMAP자료를 사용하고 육지에서 CRU-TS 3.0 자료를 함께 사용하여 나타낸 것이다. 관측에서 보면, 두 개의 주요 강수대가 나타나고 있으며, 적도 지역의 강수대와 동아시아 몬순 강수대가 그것이다. 두 지역기후모델은 적도 지역과 중위도 지역 간에 상반되는 특성을 가지며 강수분포를 모의하였다(Figs. 4b and c). SNURCM은 비록 적도 지역의 주요 강수대가 과장되어 모의되었으나, 동아시아 몬순 강수대의 분포는 관측과 잘 일치함을 보였다. SNURCM의 결과에 비해 WRF의 결과는 상대적으로 적은 적도 지역의 강수량을 보이고 남중국에서 일본 남부 해안을 잇는 동아시아 몬순 강수대가 강화되어 나타났다. 두 지역기후모델은 지표의 특성을 반영하여 히말라야 산맥, 인도차이나 반도와 인도네시아 열도 등의 바람 맞이 사면의 국지적 강수대를 잘 표현하고 있으며, 매우 우수한 공간 상관 계수를 보였다. 육지 지역을 대상으로 한 공간 상관 계수(Spatial correlation coefficient)는 SNURCM이 0.85를 보였으며, WRF는 0.79를 나타내었다(Table 2). 한편 모델의 결과 모두에서 강제자료인 HadGEM2-AO에서 기인한 약화된

Fig. 3. The 850hPa winds (m/s; vector) and geopotential height (m; contour) of the 26-year (1980-2005) summer (JJA) season, obtained from (a) RA2, (b) HedGEM2-AO, (c) SNURCM, and (d) WRF.

북서 태평양 고기압을 모의함에 따라, 관측에서 보이는 동쪽 경계의 상대적 건조 지역을 모두 모의해 내지 못하였다. 특히 SNURCM이 보인 적도 지역의 과장된 강수 모의는 발달한 대류 세포에 기인하며 이는 위에서 언급한 해양에서의 약화된 기압장을 유도하게 되었다.

Fig. 5은 지역기후모델들이 육지에서 모의한 연평균 지표기온의 경년변동을 관측과 비교하여 나타낸 것이다. 변동성에 집중하기 위하여 각각의 시계열에서 평균값을 제거한 후 결과를 나타내었다. 관측기온의 경우 지난 26년 동안 동아시아의 연평균 기온의 상승 경향을 뚜렷이 보이고 있으며, 두 지역기후모델

이 모의한 지표기온은 관측에서 보인 26년 동안의 상승 경향을 잘 나타내고 있다. 경년 변동 폭의 절대치에 있어서도 관측에 준하는 값으로, 산업혁명 이전에 임의의 초기조건으로부터 온실가스의 강제력으로 적분된 전지구후모델로부터 규모내림한 지표 기온의 장기 변동은 신뢰성을 나타내었다.

월별 변화 및 계절 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 겨울철(DJF)에 지표 온도의 한랭 편차(bias)가 두드러지게 모의되었다. SNURCM과 WRF에서 각각 -2.96°C 과 -2.84°C 였으며, 여름철(JJA)에는 각각 0.50°C 과 0.49°C 의 온난 편차가 모의되었다(Table 2). 강수는 여름철(JJA)보다는 봄철(MAM)에 과다 모의되었다.

Fig. 4. Same as Fig. 2 except for precipitation (mm/day).

SNURCM(WRF)의 봄철의 편차는 2.91(2.53) mm/day로 여름철의 편차인 1.54(1.26) mm/day에 두 배 정도 나타났다. 그러나 모의된 강수 분포의 일치성은 오히려 봄철이 높았다. 관측과의 공간 상관 계수는 SNURCM(WRF)에서 봄철에 0.86(0.80), 여름철에 0.68(0.62)로 나타났다.

자세한 지역별 특성을 살피기 위하여 주요 세부영역에서의 26년 평균 월별 강수량 시계열을 Fig. 7에 보였다. 몽고, 만주, 화북, 한반도에서 지역기후모델은 7월 강수 최대 시점과 양을 비교적 정확히 모의하고 있다. 몽고, 만주, 화북과 같은 내륙 지역의 강수량의 모의 정확도가 일본, 화남, 인도차이나와 같은 해안에 영향을 받는 지역보다 높았다. 일본, 화남, 인도차이나 영역은 두 지역기후모델에서 연중 강수량의 과다 모의를 보인다. 여름철 중위도 지역에서의 강수대를 비교적 정확하게 모의한 SNURCM은 몽고, 만주, 화북지방에서 관측과 유사한 결과를 나타낸 만

면, 여름철 적도 해양 지역에서 상대적으로 정확한 모의를 보였던 WRF모델은 인도차이나 지방에서 관측과 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 8은 남한에서 일평균 지표 기온과 일 누적 강수량의 구간별 발생빈도에 대한 확률 밀도 함수를 나타낸다. 즉, 26년 동안 각 구간에 해당하는 발생일을 구하고, 총 발생일 수로 나눔으로써 확률 밀도 함수로 표현한 것이다. 관측 자료는 남한의 기상청 소속 59개 관측 지점에서의 26년간 일 자료를 사용하였으며, 모의 결과도 관측 지점으로 내삽하여 재산출한 자료를 이용하였다. 온도의 확률 밀도는 관측에서 약 0-2°C 구간과 20-22°C 구간에서 두 개의 극대를 보이며, 최소값은 -16- -14°C 구간과 최대값은 30-32°C 구간인 분포를 보인다(Fig. 8a). 두 개의 극대 중 약 0-2°C 구간은 겨울철을 중심으로 한랭 및 냉량 기간의 최빈 온도로 이해될 수 있고, 20-22°C 구간은 여름철을 중심으로 온난 및 서열 기간의 최빈

Fig. 5. Inter-annual variation of surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) for OBS (black), SNURCM (blue), and WRF (red).

Fig. 6. Annual variation of surface temperature (lines with marks, $^{\circ}\text{C}$) and land precipitation (bar, mm/day) averaged for 26 years (1980-2005). Black, blue, and red line indicates the temperature of OBS, SNURCM, and WRF, respectively. White, blue, and red bar indicates the precipitation of OBS, SNURCM, and WRF, respectively.

온도로 이해될 수 있다. 지역기후모델은 지표 기온이 일평균 $24\text{--}26^{\circ}\text{C}$ 구간 이상인 날짜 수의 재현이 힘들었으며, $16\text{--}18^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 높은 확률 밀도를 보였다. 앞서 언급한 모델 영역 전반의 한랭 편차의 영향은 남한의 온도 모의에 있어서 연중 최고 온도에 영향을 끼쳤음을 알 수 있다. 강수의 경우 모델에서는 10 mm/day 이하에 해당하는 약한 강수의 빈도가 관측에 비하여 높게, 그리고 강한 강수의 빈도는 관측에 비하여 낮게 나타났다(Fig. 8b). 두 지역기후모델 중 WRF에서 약한 강수의 빈도가 상대적으로 높게, SNURCM에서 강한 강수의 빈도가 상대적으로 높게 나타나는 차이를 보였다.

요약 및 토의

국립기상연구소는 IPCC AR5 및 CORDEX의 참여와 우리나라 국가표준 기후변화 시나리오를 구축하기 위해 HadGEM2-AO 전지구기후모델을 이용하여 시나리오 자료를 생산하고, CORDEX 규준 하에 신뢰성 있는 동아시아 및 우리나라의 미래 상세 기후전망을 구축하기 위하여 지역기후 앙상블 결과를 도출하기 위해 노력하고 있다. 본 연구에서는 앙상블 멤

버로서 미래기후에 대한 전망을 생산하기에 앞서 현재기후에 대한 SNURCM과 WRF의 재현성을 검증하기 위해 HadGEM2-AO 전구자료를 모델의 경계조건으로 사용하여 28년(1978-2005)간의 장기적분을 수행하였다.

두 모델은 연평균 지표 온도 분포 모의에서 관측과의 공간상관계수가 0.98 이상으로 매우 높은 일치성을 나타내었다. 강수의 경우에도 모의 결과는 우수한 공간 상관 계수를 보였다. 육지 지역을 대상으로 한 공간 상관 계수는 SNURCM이 0.84를, WRF는 0.80를 나타내었다. 두 지역기후모델의 모의 강수 분포는 적도 지역과 중위도 지역 간에 상반되는 특성을 보였다. SNURCM은 적도 지역의 주요 강수대가 과장되어 모의되었으나, 동아시아 몬순 강수대의 분포는 관측과 잘 일치하였고, WRF는 상대적으로 적도 지역의 강수량을 적게 모의하였고 남중국에서 일본 남부 해안을 잇는 동아시아 몬순 강수대를 강하게 모의하였다. 두 모델의 결과는 강제자료인 HadGEM2-AO에서 기인한 약화된 북서 태평양 고기압의 영향으로 관측에서 보이는 동쪽 경계의 상대적 건조 지역을 모두 모의해 내지 못하였다.

지표 기온에 대한 경년 변동 재현에 있어 두 지역

Fig. 7. Annual variation of precipitation (mm/day) averaged for 26 years (1980-2005) for the 8 subregions. Black, blue, and red color indicates the results of OBS, SNURCM, and WRF, respectively.

기후모델에서 일관성과 신뢰성을 나타내었다. 경년 변동 폭의 절대치에 있어서도 관측에 준하는 값으로,

모의한 지표기온은 관측에서 보인 26년 동안의 상승 경향을 잘 나타내고 있다. 그러나 계절별 분석에서

Fig. 8. Probability density function of (a) daily averaged temperature and (b) daily precipitation for 26 years (1980-2006). Black, blue, and red color indicates the results of OBS, SNURCM, and WRF, respectively.

겨울철 지표 온도의 한랭 편차(bias)와 여름철 지표 온도의 온난 편차가 나타났다. SNURCM과 WRF에서 겨울철에는 각각 -2.96°C 과 -2.84°C 였으며, 여름철에는 각각 0.50°C 과 0.49°C 의 편차가 모의되었다. 강수는 여름철보다는 봄철에 과다 모의되었다. SNURCM(WRF)의 봄철의 편차는 $2.46(2.07)$ mm/day로 여름철의 편차인 $1.04(0.75)$ mm/day에 두 배 정도 나타났다. 그러나 모의된 강수 분포의 일치성은 오히려 봄철이 높았다. 관측과의 공간 상관 계수는 SNURCM(WRF)에서 봄철에 $0.87(0.79)$, 여름철에 $0.67(0.62)$ 이었다.

주요 세부영역에서 지역기후모델은 7월 강수 최대 시점과 양을 비교적 정확히 모의하였고, 특히 내륙 지역 강수량의 모의 정확도가 해안에 영향 받는 지역보다 높았다. 한반도의 경우 모델에서 7월에 극대값이 모의되었으나 상대적으로 과소 모의하였다. 또한 확률 밀도 함수를 이용하여 지역기후모델의 극한기후 재현성을 살펴본 결과 지표기온의 경우 모델 영역 전반적으로 나타난 한랭 편차의 영향으로 인해 관측에서 나타난 극대의 구간보다 낮은 구간에서 극대가 나타났다. 강수의 경우 10 mm/day 이하에 해당하는 약

한 강수의 빈도가 관측에 비하여 높게, 그리고 강한 강수의 빈도는 관측에 비하여 낮게 나타났다.

본 연구에서는 신뢰성 있는 국가표준 지역기후변화 시나리오 생산을 위해 현재기후에 대한 SNURCM과 WRF의 재현성을 검증하고 각 모델이 생산한 지역기후자료의 특성을 살펴본 데 의의가 있다. 이 결과를 바탕으로 미래 시나리오 결과의 해석과 다중 모델 앙상블 방법의 도입 시 기초 자료로 사용될 수 있다. 향후 본 연구는 국립기상연구소의 RCP 4.5와 RCP 8.5를 강제력으로 한 HadGEM2-AO의 미래기간의 모의자료를 사용하여 동아시아 및 남한에서의 미래(2005-2050) 상세 지역기후변화에 대한 연구를 진행할 계획이다.

사 사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 기후과학연구관리단(RACS 2010-2016)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김찬수, 서명석, 2009, 베이지안 방법을 이용한 우리나라 강우특성(1954-2007)의 변화시점 및 변화유형 분석. 대기, 19, 199-211.
- 명지수, 서명석, 2010, 남한 지역에서 발생한 구름-지면 낙뢰의 극성별 특성. 한국지구과학회지, 31, 314-326.
- 오석근, 서명석, 명지수, 차동현, 2011, CORDEX 동아시아 영역에서 경계조건 및 적운모수화방안이 RegCM4를 이용한 남한 지역 기후모의에 미치는 영향 분석. 한국지구과학회, 32, 373-387.
- 윤희정, 김희중, 윤일희, 2006, 남한의 강수 계절성에 관한 연구. 한국지구과학회지, 27, 149-158.
- 이영호, 차동현, 이동규, 2008, 지역 기후 모형을 이용한 한반도 강수 모의에서 수평 해상도의 영향. 대기, 18, 387-395.
- 이효신, 간순영, 변영화, 강현석, 현유경, 백희정, 권원태, 2009, IPCC AR5 시나리오 산출을 위한 HadGEM2-AO 성능평가. 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 272-273.
- Cha, D.H. and Lee, D.K., 2009, Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique. Journal of Geophysical Research, 114, D14108, doi:10.1029/2008JD011176.
- Choi, S.-J., Cha, D.-H., and Lee, D.-K., 2008, Simulation of the 18-day summer heavy rainfall over East Asia

- using a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 113, D12101, doi:10.1029/2007JD009213.
- Choi, S.-J., 2010, Effects of the spectral nudging on seasonal tropical cyclone simulation over the western North Pacific. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 144 p.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., and Mearns, L.O., 2000, Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289, DOI10.1126/science.289.5487.206.
- Giorgi, F., 1990, Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, 3, 941-963.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O., 1999a, Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104, 6335-6352.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O., 1999b, Tests of precipitation parameterization available in the latest version of the NCAR regional climate model (RegCM) over the continental U.S. *Journal of Geophysical Research*, 104, 6353-6376.
- Hong, S.Y., Moon, N.K., Lim, K.S.S., and Kim, J.W., 2010, Future climate change scenarios over Korea using a multi-nested downscaling system: A pilot study. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 26, 425-435.
- Im, E.S., Kim, M.H., Kwon, W.T., and Bae, D.H., 2007, Sensitivity of recent and future regional climate simulations to two convection schemes in the RegCM3 nesting system. *Journal of Korean meteorological society*, 43, 411-427.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007. Synthesis report, Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 104 p.
- Iwashima, T. and Yamamoto, R., 1993, A statistical analysis of the extreme events. Long-term trend of heavy daily precipitation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 71, 37-640.
- Jung, H.S., Choi, Y., Oh, J.H., and Lim, G.H., 2002, Recent trends in temperature and precipitation over South Korea. *International Journal of Climatology*, 22, 1327-1337.
- Kang H.S., Cha, D.H., and Lee, D.K., 2005, Evaluation of the mesoscale model/land surface model (MM5/LSM) coupled model for East Asian summer monsoon simulations. *Journal of Geophysical Research*, 110, D10105, doi:10.1029/2004JD005266.
- Krichak, S.O., 2008, Regional climate model simulation of present-day regional climate over the european part of Russia with RegCM3. *Russian Meteorology and Hydrology*, 22, 20-26.
- Kwon, W.T., 2005, Current status and perspectives of climate change sciences (in Korean with English abstract). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 325-336.
- Lee, D.K. and Suh, M.S., 2000, Ten-year east Asian summer monsoon simulation using a regional climate model (RegCM2). *Journal of Geophysical Research*, 105, 29565-29577.
- Lee, D.-K., Cha, D.-H., and Choi, S.-J., 2005, A sensitivity study of regional climate simulation to convective parameterization schemes for 1998 East Asian summer monsoon. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16, 989-1015.
- Lee, D.-K. and S.-J. Choi, 2010, Observatin and numerical prediction of torrential rainfall over Korea caused by Typhoon Rusa (2002). *Journal of Geophysical Research*, 115, D12105, doi:10.1029/2009JD012581.
- Suh, M.S. and Lee, D.K., 2004, Impact of land/cover changes on surface climate over east Asia for extreme climate cases using RegCM2. *Journal of Geophysical Research*, 109, D02108, doi:10.1029/2003JD003681.
- Xie, P. and Arkin, P.A., 1997, Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2539-2558.
- Yhang, Y.B. and Hong, S.Y., 2008, A simulated climatology of the east asian summer monsoon using a Regional Spectral Model. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 44, 325-339.
- CGIAR CSI Portal, 2010, CRU-TS3.0. <http://www.cgiar-csi.org/data/item/55-cru-ts-30-climate-database> (검색일: 2011. 12. 26)

2011년 12월 7일 접수
2011년 12월 15일 수정원고 접수
2011년 12월 20일 채택