CORDEX 동아시아 영역에서 경계조건 및 적운모수화방안이 RegCM4를 이용한 남한 지역 기후모의에 미치는 영향 분석

오석근¹ · 서명석^{1,*} · 명지수¹ · 차동현²

¹공주대학교 대기과학과, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

²International Pacific Research Center, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822

Impact of Boundary Conditions and Cumulus Parameterization Schemes on Regional Climate Simulation over South-Korea in the CORDEX-East Asia Domain Using the RegCM4 Model

Seok-Geun Oh¹, Myoung-Seok Suh^{1,*}, Ji-Su Myoung¹, and Dong-Hyun Cha²

¹Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Chungnam, 314-701, Korea

²International Pacific Research Center, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822

Abstract: In this study, four types of sensitivity experiments (EG, EE, NG, NE; E: ERA-Interim, N: NCEP/DOE2, G: Grell scheme, E: Emanuel scheme) were performed to evaluate the simulation skills of RegCM4 released in July 2010 over the CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment) East Asia domain based on the combinations of boundary conditions (BC: ERA-Interim, NCEP/DOE2) and the cumulus parameterization schemes (CPS: Grell, Emanuel) for the 1989. The surface air temperature and precipitation data observed by the Korea Meteorological Administration were used to validate the simulation results over South Korea. The RegCM4 well simulates the seasonal and spatial variations of temperature but it fails to capture the seasonal and spatial variations of precipitation without consideration of the BC and CPS. Especially the simulated summer precipitation amount is significantly less in EG, NG, and NE experiments. But the seasonal variation of precipitation including summer precipitation is relatively well simulated in the EE experiment. The EE experiment shows a better skill in the seasonal march of East Asia summer monsoon, distribution of precipitation intensity and frequency than other experiments. In general, the skills of RegCM4 for temperature and precipitation are better during winter than summer, and in Emanuel than Grell schemes. The simulation results are more impacted by cumulus parameterization schemes than boundary conditions.

Keywords: RegCM4, CORDEX, boundary condition, cumulus parameterization scheme, simulation skills

요약: 본 연구에서는 CORDEX 동아시아 영역에서 경계조건(ERA-Interim, NCEP/DOE2) 및 적운모수화방안(Grell, Emanuel)이 2010년 7월에 공개된 지역기후모델(RegCM4)의 모의성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 1989년에 대해 총 4개의 민감도 실험(EG, EE, NG, NE)을 수행하였다. 남한에서의 기온, 강수에 대한 RegCM4의 모의성능을 분석하기 위해 기상청의 기온, 강수자료를 이용하였다. RegCM4는 경계조건 및 적운모수화방안에 관계없이 기온의 공간분포, 계절변동을 잘 모의한 반면, 모든 실험에서 강수의 시·공간 분포를 적절히 모의하지 못하였다. 특히, EG, NG, NE 실험은 여름 강수를 관측보다 현저히 적게 모의하는 등 강수의 계절변동을 전혀 모의하지 못하고 있다. 하지만 EE 실험에서는 여름 강수를 포함하여 계절변동을 상대적으로 잘 모의하였다. 동아시아 여름 몬순 및 강수강도별 강수량, 강수빈도 모의에서도 EE 실험이 우수한 모의성능을 보였다. RegCM4는 경계조건에 관계없이 기온, 강수 모두 여름보다는 겨울에, Grell 보다는 Emanuel 방안을 적용할 때 높은 모의성능을 보였다. 또한 전체적으로 모의성능은 경계조건보다는 적운모수화방안에 더 큰 영향을 받는다.

주요어: RegCM4, CORDEX, 경계조건, 적운모수화방안, 모의성능

*Corresponding author: sms416@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8533

Fax: 82-41-856-8527

서론

최근 사회·경제적 발전에 따라 기후변화 자료에 대한 수요자의 요구가 다변화 되면서 현재 및 미래에 대한 신뢰성 있는 고분해능의 기후정보가 수문, 농업 등 다양한 분야에서 요구되고 있다. 특히, 자연적, 인위적 요인에 의한 지구 온난화가 과학적 사실로 점차 인정됨에 따라 지구 기후 변화에 대한 관심이 증가되고 있다(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2007). 지난 20세기 동안 남한은 급속한 도시화와 지구 온난화로 인해 평균기온이 약 1.5°C 상승하였고, 이는 전 지구 평균 기온 상승보다 약 2배 이상 높은 것이다(김승옥 외, 2005; Kwon, 2005). 또한 집중호우와 같은 극한 강우현상의 발생일수가 증가되고 있으며 강우강도 및 낙뢰강도도 강해지고 있는 것으로 보고되고 있다(김찬수와 서명석, 2009; 명지수와 서명석, 2010; 윤희정 외, 2006). 21세기인 현재도 계속해서 지구 평균 온도가 상승할 것으로 예상되기 때문에 이와 관련하여 남한에서도 낙뢰와 집중호우 같은 재해기상의 발생 빈도 및 강도에 영향이 있을 것으로 보인다.

이러한 기후 변화의 예측을 위해 1970년대부터 대기 대순환 모형(General Climate Model: GCM)을 이용한 연구들이 진행되어 왔다(Charney, 1975). 최근에는 대기뿐만 아니라 해양, 지면, 빙하 등 모든 기후시스템을 포함하는 접합 대순환 모형(Coupled General Circulation Model: CGCM)이 개발되어 기후 시나리오의 산출, 기후 변화의 영향 평가 등 매우 중요한 정보를 제공하고 있다. 일반적으로 대기 또는 접합 대순환 모형은 지구 규모에 해당하는 연 평균 및 계절 평균의 기후자료 생산에 있어 비교적 신뢰성 있는 기후 예측 자료를 생산하는 것으로 평가되고 있다. 하지만 공간 분해능이 수 백 km이고 계산의 편의성 및 낮은 공간 분해능으로 인해 물리 과정이 단순화 되어 지역 규모 또는 국지 규모의 기후현상을 포착할 수 없다는 한계를 가지고 있다(Giorgi and Mearns, 1999).

남한 영역은 그 면적이 99,585 km²으로 매우 작고, 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 높은 산맥이 남북방향으로 영동지역에 위치한 가운데 여기서 파생된 작은 산맥들이 동서로 형성되어 있어 기상현상이 지역에 따라 매우 다양하게 나타난다. 따라서 대기 대순환 모형보다 보다 상세한 지역기후 정보를 생산할

수 있는 지역기후모델들(Regional Climate Models: RCMs)을 이용한 연구들이 우리나라에서도 많이 이루어져 왔다(Hong et al., 2010; Im et al., 2007a; Kang et al., 2005; Lee and Suh, 2000; Lee et al., 2004; Suh and Lee, 2004). 그러나 위의 선행 연구들은 서로 다른 지역기후모델들(RegCM2, SNU-RCM, MM5, RegCM3, NCEP RSM, NCEP WRF 등)과 모의영역, 해상도, 경계조건 및 적운모수화방안 등을 연구목적에 맞게 설정함에 따라 각 모델들의 결과를 비교, 평가하는데 어느 정도 한계를 가진다.

최근 이러한 지역기후모델들의 결과를 비교하고 모델이 갖는 불확실성 평가 및 미래 기후변화 예측의 신뢰 수준을 높이기 위한 국제적인 노력들이 진행되고 있다. 그 중 CORDEX(COordinated Regional Climate Downscaling Experiment)는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) AR5(Fifth Assessment Report)에 지역기후모델들을 활용하여 생산한 전 세계 각 지역의 상세 기후변화 예측정보를 포함시키기 위한 국제 상호 비교 프로젝트로 2009년 프랑스 툴루즈와 스웨덴 룬데에서 지역기후모델 전문가들이 모여 각 세부영역 및 해상도 등의 권장사항을 결정하고 현재까지 진행되고 있다(CORDEX website, 2009).

본 연구는 향후 IPCC AR5에 연구 결과를 반영하기 위해 CORDEX에서 권고하는 동아시아 모의영역 및 해상도, 그리고 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ERA-Interim 재분석 관측자료를 지역기후모델(RegCM4)에 적용하였다. 모델의 불확실성을 평가하기 위해서는 다양한 환경에서 지역기후모델의 결과를 비교할 필요가 있다. 따라서 동일 기간(1989-2008)의 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/DOE(Department of Energy) 2 재분석 관측자료를 추가 수집하여 모델의 경계자료로 적용하였다.

본 연구에서는 RegCM4를 이용하여 20년(1989-2008)간의 장기 지역기후모의를 수행하기 앞서 동아시아를 포함한 한반도 남한에서의 최적의 모의 환경을 구축하기 위해 RegCM4에 경계조건 및 적운모수화방안을 달리 적용하여 1년(1989)간의 민감도 실험을 수행하였다. 주로 남한에서의 기온과 강수에 대한 RegCM4의 모의성능을 분석하였다. 한반도 남한영역은 모델에 적용되는 CORDEX 동아시아 모의영역에 비해 매우 좁고 작지만 우리나라의 경우 실제 한반

도에서의 기후변화가 가장 관심이 있고, 향후 한반도에서의 신뢰성 있는 미래 지역기후정보를 생산하기 위해서는 한반도 남한에서 가장 좋은 모의성능을 보이는 모의 환경을 탐색할 필요가 있다. 따라서 기온과 강수의 공간분포, 계절변동, 동아시아 여름 몬순 모의, 강수강도별 강수량 및 강수빈도에 대한 RegCM4의 모의성능 분석을 통해 한반도 남한에서의 최적의 모의환경을 찾고자 하였다. 그리고 마지막으로 간단한 통계적 분석을 통해 RegCM4의 남한에서의 기온과 강수에 대한 모의 성능을 정량적으로 평가하였다.

본 논문의 다음 절부터는 본 연구에서 사용한 모델과 실험설계에 대해 설명하고, 경계조건 및 적운모수화방안에 따른 남한 지역 기후모의에 대한 분석결과를 기술하였다. 마지막으로 본 연구에서 밝혀진 결과를 요약하고, 향후 필요한 연구 내용 및 계획을 제시하였다.

모델 및 실험설계

본 연구에서 사용한 지역기후모델은 ICTP (International Centre for Theoretical Physics)에서 2010년 7월에 공개한 RegCM4로 SST(Sea Surface Temperature), Sea ice, Community Land Model (CLM) 결합 등 지면경계에서의 물리적 특징들이 새롭게 추가된 모델이다(ICTP Portal, 2010).

Table 1은 본 연구에서 사용한 지역기후모델 RegCM4의 구성을 나타낸다. 모의 영역은 CORDEX

Table 1. Simulation conditions of RegCM4

	CORDEX framework
	• 50-km horizontal resolution
	• Central Lat. and Lon.: 22.04°N, 118.98°E
	• 197 (Lat)×243 (Lon)
Domain	
Map projection	Lambert Conformal
Vertical layers (top)	18 sigma (74 hPa)
PBL scheme	Holtzlag
Cumulus parameterization scheme	Grell, MIT-Emanuel
Land surface model	NCAR CLM3.5
Short/Longwave radiation scheme	NCAR CCM3
Boundary data	ERA-Interim, NCEP/DOE2
Simulation period	Jan.-Dec. 1989

에서 권고한 동아시아 영역으로 남북 방향으로 호주 북단에서 러시아까지, 동서방향으로 티벳고원 서쪽에서부터 서태평양까지의 광범위한 영역에 해당되며 22.04°N과 118.96°E를 중심으로 50 km 수평 해상도를 갖는 243×197(12150 km×9850 km)개의 수평 격자로 이루어졌다(Fig. 1). 연직 좌표계는 18층의 시그마 좌표계이며 적분 시간간격은 100초이다. 모델의 측면 경계자료로 ECMWF의 ERA-Interim 및 NCEP/DOE2 재분석 자료를 이용하였고, 적운모수화방안으로 Grell(1993)과 MIT-Emanuel(1991) 방안을, 행성 경계층 물리 방안으로 Holtzlag et al.(1990) 방안, 그리고 NCAR CCM3(Kiehl et al., 1996) 복사전달 방안, 지면 모형으로 NCAR CLM3.5를 사용하였다(Oleson et al., 2008). 본 연구에서는 향후 20년(1989-2008) 장기 지역기후모의를 위한 최적의 모의 환경을 구축하기 위해 RegCM4에 2개의 경계조건

Fig. 1. Model domain and topography (m) for the 50 km grid spacing and the distribution of 60 observation stations in South Korea.

Table 2. Experiment design used in this study

Experiment name	Lateral boundary data	Cumulus scheme
EG	ERA-Interim	Grell
EE	ERA-Interim	Emanuel
NG	NCEP/DOE2	Grell
NE	NCEP/DOE2	Emanuel

(ERA-Interim, NCEP/DOE2)과 2개의 적운모수화방안 (Grell, 1993; Emanuel, 1991)을 조합한 4개의 실험에 대해 각각 1년(1989)간 민감도 실험을 수행하였고 각 실험에 대한 명칭은 Table 2에 나타내었다.

RegCM4의 각 실험별 남한에서의 모의성능을 검증하기 위해 남한 전역에 분포하는 기상청 소속 60개 관측지점의 기온, 강수자료를 이용하였다(Fig. 1). 일

정한 간격을 갖는 모델 격자점의 모의값과 불규칙적으로 분포한 관측값을 비교하기 위해 2중 선형 보간법(Bilinear interpolation)을 이용하여 모델의 모의값을 관측지점의 위·경도 값으로 산출하였다. 그리고 동아시아 여름 몬순의 발달·쇠퇴에 대한 모델의 모의 성능을 분석하기 위해 위성 관측 기반의 강수자료인 GPCP(Global Precipitation Climatology Project) 자료를 이용하였다.

연구 결과

Figs. 2와 3은 각각 1989년 여름(JJA)과 겨울(JF)동안 지상 관측 기온의 공간분포와 각 실험들과 관측

Fig. 2. Spatial distribution of observed air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and air temperature differences ($^{\circ}\text{C}$) between observation and each experiment during summer (JJA), 1989.

Fig. 3. Same as Fig. 2 except for winter(JF).

사이의 공간분포 차를 나타낸다. 이때 겨울의 경우 시간의 연속성을 고려하여 1월과 2월의 자료만 이용하였다. 남한에서의 기온의 공간분포는 태백산맥과 소백산맥 등 지형의 영향을 크게 받는다. Fig. 2에서 (a)는 여름철 지상 관측 기온의 공간분포로 태백산맥 지역에서 가장 낮은 기온 분포가 존재하고 그 주변을 따라 기온의 변화가 나타나며 소백산맥을 따라 23°C 기온선이 남서-북동 방향으로 분포 하는 등 지형의 영향이 잘 나타난다. 50 km 수평 해상도를 고려했을 때, RegCM4는 경계조건 및 적운모수화방안에 관계없이 한반도 여름철 평균 기온을 잘 모의하였다. 각 실험들마다 조금씩 차이는 있지만, RegCM4는 태백산맥 주변지역을 관측보다 1-2°C정도 높게, 그 외의 지역은 관측보다 1-2°C정도 낮게 모의하였

다. 공간 분포로만 보았을 때 Emanuel(1991) 적운모수화방안을 적용한 EE와 NE 실험이 관측과 차이가 가장 적었으며, Grell(1993)을 적용한 실험은 Emanuel(1991)을 적용한 실험들보다 대체적으로 기온을 1°C 정도 더 낮게 모의하는 특징을 보였다.

Fig. 3에서 (a)는 남한에서의 겨울철 기온의 공간분포를 나타낸 것으로 겨울철 기온도 지형의 영향을 잘 나타낸다. 각 실험들은 태백산맥과 동해안, 서해안 등 해안가 지역에서 관측보다 1-2°C정도 높게 모의하였고 그 외의 내륙지역에서는 관측보다 1-2°C정도 낮게 모의하였다. 여름 기온에서와 마찬가지로 Emanuel(1991) 방안을 적용한 실험이 관측과 차이가 가장 적었으며 그 중에서도 EE 실험이 가장 우수한 성능을 보이고 있다. 이는 등지격자를 적용한

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

RegCM3의 한반도 기온 모의에서 Emanuel(1991) 방안이 Grell(1993) 방안을 적용한 경우보다 더 작은 음의 편의가 나타났음을 보인 Im et al.(2007b)의 결과와 유사하다. 전반적으로 RegCM4의 기온 모의는 경계조건 및 적운모수화방안에 관계없이 지형의 영향에 의한 공간적 패턴을 잘 모의하였고, 태백산맥 지역을 제외하고 대체적으로 관측보다 낮게 모의하였으며 여름보다 겨울에, 그리고 Grell(1993) 보다는 Emanuel(1991) 방안을 적용한 실험이 더 좋은 모의 성능을 보였다.

Figs. 4와 5는 각각 1989년 여름(JJA)과 겨울(JF)동안의 지상 관측 강수량의 공간분포와 각 실험들과 관측사이의 공간분포 차를 나타낸다. RegCM4의 여

름철 강수모의는 경계조건 및 적운모수화방안에 따라 상이하게 나타났고 전체적으로 강수의 공간분포를 잘 모의하지 못하고 있다. 4개의 실험 모두 관측보다 4mm/day 이상 강수를 적게 모의하였으며 특히, 남부 지역의 많은 강수현상을 잘 모의하지 못하였다. 다만, EE 실험의 경우 다른 실험들에 비해 강수편차가 작았으며 중부지역 중 일부 지역에서는 관측과 유사하게 모의하였다. 이 결과는 ERA-Interim 자료가 NCEP/DOE2 자료보다 강수의 공간분포를 관측과 더 유사하게 나타냈음을 보였던 Chen et al.(2011)의 결과 그리고 Emanuel(1991) 방안을 RegCM3에 적용할 때 Grell(1993) 방안보다 강수를 관측과 더 유사하게 모의함을 보였던 Im et al.(2007b)의 연구결과와 일치

Fig. 5. Same as Fig. 2 except for winter (JF) precipitation (mm/day).

된다. 특히, Im et al.(2007b)은 대류가 활발히 일어나는 여름동안에 Emanuel(1991) 방안이 Grell(1993) 방안보다 대류성 강수를 더 많이 발생시키고 그 결과, 총 강수에서도 Emanuel(1991) 방안을 적용한 RegCM3에서 더 많은 강수가 모의되었음을 보였다. 그리고 이러한 현상은 Emanuel(1991) 방안이 대류운 동시 주위 공기와의 에너지(열, 운동량, 수증기 등) 교환을 가정하기 때문에 상대적으로 연직으로의 에너지 수송만을 고려하는 Grell(1993) 방안보다 구름내 잠재 수증기 에너지가 더 크기 때문인 것으로 해석하였다.

Fig. 5는 RegCM4의 겨울철 강수모의 결과를 나타내며 각 실험들 모두 전반적으로 여름보다 강수의

공간분포를 잘 모의하고 있다. 대체적으로 각 실험에 따라 RegCM4는 $-2-2$ mm/day 정도 관측과 차이를 보였으며, Emanuel(1991) 방안은 관측보다 $0-2$ mm/day 과대하게, Grell(1993) 방안은 $0-2$ mm/day 과소하게 강수가 모의되도록 하는 특징을 보였다. 전반적으로 경계조건 및 적운모수화방안에 따른 RegCM4의 모의성능은 기온보다 강수모의에, 경계조건보다는 적운모수화방안에 더 큰 영향을 받았으며, 4개의 실험 중 EE 실험이 가장 좋은 모의성능을 보였다.

Fig. 6은 남한 전체 관측지점에서의 각 실험별 월 평균기온과 강수량에 대한 계절변동을 관측과 비교하여 나타낸 것이다. RegCM4는 경계조건 및 적운모수화방안에 관계없이 기온의 계절변동을 관측과 거의

Fig. 6. Time series of monthly mean (a) air temperature and (b) precipitation of observation (bar) and simulated results of RegCM4 (lines).

유사하게 잘 모의하였다. 기온의 공간분포에서 확인하였듯이 RegCM4는 대체적으로 관측보다 기온을 낮게 모의하며 특히 봄에 관측보다 매우 낮게 모의하고 있다(Fig. 6a).

강수의 계절변동 또한 강수의 공간분포 모의결과에서 나타났듯이 경계조건 및 적운모수화방안에 따라 상이하게 모의하였고 관측보다 강수를 적게 모의하고 있다. 특히, EG, NG, NE 실험의 경우 관측과 비교하여 여름철 강수를 현저히 과소하게 모의하고 있다. EE 실험은 다른 실험에 비해 비교적 강수의 계절변동을 잘 모의하였지만 4월과 9월에 각각 지나치게 과대, 과소 모의를 하고 있다(Fig. 6b). 위의 결과를 통해 RegCM4는 기온보다 강수모의에서 경계조건 및 적운모수화방안에 영향을 더 크게 받으며 과거 선행 연구들(이영호 외, 2008; Im et al., 2007b; Kang et al., 2005; Suh and Lee, 2004)에서 이용된 지역기후 모델(RegCM2, RegCM3 등)들과 유사하게 여름철 강수를 잘 모의하지 못하고, 기온을 관측보다 대체로

낮게 모의함을 알 수 있다.

평균적으로 동아시아 여름 몬순은 세 번의 정체와 3단계의 급격한 북쪽 이동에 의하여 저위도에서 고위도로 이동하고 정체와 이동을 반복하면서 발달·소멸한다(Ding, 1991; Huang et al., 1997). 첫 번째 이동은 5월 초기에 중국 남부 지역(16-18°N)에서 일어나고, 두 번째 이동은 6월초 양쯔강 유역에서 발생하여 일본 열도까지 주요 강수대가 발달하고, 세 번째는 7월초에 일어나며 주요 강수대가 한반도 중북부와 중국 동북부 지역으로 이동한다. 이중 7월초 한반도 중북부지역까지 발달하는 강수대를 RegCM4가 잘 모의하는지 알아보기 위하여 경도 126-130°E 사이를 수평 평균하여 강수대의 시간-위도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 이 때 모델의 모의성능을 비교·검증하기 위해 2.5° 수평해상도를 갖는 위성 관측 기반의 강수 자료인 GPCP 자료를 모델 격자에 맞게 내삽하여 이용하였다. 여름 몬순에 의한 강수대의 발달은 5월 중순부터 7월 중순까지 북상하다가 그 이후 점점 쇠퇴

Fig. 7. Time-latitude cross section of zonally averaged precipitation (mm/day) along 126-130°E for one-year (1989) period. The area within the two dotted line is corresponded to the area of South-Korea.

하고 8월말에서 9월 중순에 잠시 정체하다 다시 쇠퇴하는 특징을 보인다. 이때 동아시아 몬순은 6월-8월 말, 9월 초까지 한반도(두 점선 내부영역)에 영향을 주고 있다(Fig. 7a).

RegCM4는 경계조건 및 적운모수화방안에 관계없이 동아시아 몬순에 의한 강수대의 발달과 쇠퇴과정을 잘 모의하지 못하고 있다(Fig. 7b-d). 특히, EG와 NE 실험은 6-8월 동안 중위도(30-40°N) 지역에까지 강수대를 발달시키지 못하고 30°N 보다 낮은 위도에

서 강한 강수대를 정체하는 것으로 모의하고 있다(Fig. 7b and e). NG 실험의 경우 6-7월 사이에 한반도 중부 지역에 강수대를 모의하고 있지만 GPCP 보다 과소모의하고 있고 저위도로부터 확장시키기 보다는 중위도 지역에서 독자적으로 생성된 것으로 모의하고 있다(Fig. 7d). 이 결과는 Fig. 6b의 강수의 계절변동 결과에서 EG, NG, NE 실험이 한반도에서의 여름철 강수를 잘 모의하지 못했던 것과 연결된다. 반면, EE 실험은 다른 실험들에 비해 6-7월 까지 몬

순의 발달을 비교적 잘 모의하였다. 그러나 여전히 25°N 보다 낮은 위도에 강한 강수대가 위치하고 8월 말-9월초까지의 강수대의 정체현상을 잘 모의하지 못하고 있다(Fig. 7c). RegCM4에서도 RegCM3와 마찬가지로 위도 50°N 부근의 고위도에서 새로운 강수 셀이 모의되고 있다(Im et al., 2007a).

지금까지 지역기후모델을 이용한 강수 특성에 대한 모의 수준 연구는 주로 평균 강수량을 중심으로 이루어졌다. 지역별 상세 기후 특성에 대한 모의 수준을 향상시키기 위해서는 공간 및 시간 평균의 강수 특성도 중요하지만 강수강도, 강수 빈도수 등에 대한 모의 수준에 대해서도 분석할 필요가 있다. 왜냐하면 강수강도와 강수 빈도수는 강수의 시간 및 공간분포와 함께 지면과 대기 사이의 상호작용(에너지 수지, 토양의 열용량), 물수지(식생에 의한 강수 차단량, 토양 수분 유출 등), 홍수와 같은 재해기상 발생 등과 밀접하게 관련되어 있기 때문이다(Chen et al., 1997).

Fig. 8은 1989년 여름동안의 지상 관측 강수량과 RegCM4의 4개 실험으로 모의한 강수를 강수 강도별 강수량과 빈도수 분포로 월별과 여름 전체에 대해서 나타낸 것이다. 관측 강수량은 50-100 mm/day에서 가장 많이 발생한 반면, EE 실험은 25-50 mm/day에서, 그 외의 실험들은 10-25 mm/day 이하에 71% 이상, 25-50 mm/day 이하에서는 90% 이상이 편중되어 발생하였음을 알 수 있다. RegCM4의 4개 실험 모두 강수강도가 25-50 mm/day 이하에서는 관측보다 현저히 많이 모의하고 있으나 강수강도가 25 mm/day 이상에서는 반대로 관측보다 적게 모의하고 있다. 여름철 전체로 보았을 때 월별, 강수강도별 조금씩 차이는 있지만 대체적으로 EE 실험이 다른 실험들에 비해 관측과 유사하게 모의하고 있다. 특히, 강수강도가 25 mm/day 이상의 강수모의에서 좋은 모의성능을 보이고 있다. 모의 강수의 강수 강도별 빈도수 분포 또한 관측과 유사하게 분포하고 있으나 10-25 mm/day 이하에서는 관측보다 2배 이상 많게, 10-25 mm/day 이상에서는 관측보다 적게 모의하고 있다. 우리나라에서 강수 강도가 큰 집중 호우 현상이 특히 7-8월에 자주 발생하고 있는데 비하여 RegCM4의 각 실험들은 이를 제대로 모의하지 못하고 있다. 특히, EG, NG, NE 실험은 7-8월에 50 mm/day 이상의 집중호우 현상을 전혀 모의하지 못하고 있다. 여전히 관측에 비해 적게 강수를 모의하고 있지만 EE 실험

이 강수강도가 강한 강수현상에 대해 더 나은 모의 성능을 보이고 있다.

경계조건 및 적운모수화방안에 따른 RegCM4의 모의성능을 정량적으로 분석하기 위해 기온과 강수에 대한 각 실험의 모의결과와 지상 관측 자료간의 통계적 검증(편의: Bias, 평균 제곱근 오차: Root Mean Square Error(RMSE), 공간상관계수: Spatial correlation coefficient)을 실시하였다. Fig. 9를 보면 기온에 대한 편의와 평균 제곱근 오차는 모델의 각 실험 및 계절에 따라 상이하게 나타났다. 특히 Emanuel(1991) 적운모수화방안을 적용한 실험이 Grell(1993)을 적용한 실험보다 약 1/2 정도로 더 작은 편의와 평균 제곱근 오차를 보였다. 각 실험에 따라 모델은 연 평균 0.5-1.2°C 사이의 음의 편의를 보였고 공간상관계수는 계절 및 각 실험에 상관없이 0.5 이상으로 나타났으며 겨울에는 최소 0.80 이상의 높은 상관성을 보였다. RegCM4는 각 실험에 관계없이 봄철(3-5월)에 모의 성능이 가장 낮았다. 특히, 3월부터 5월까지 편의와 평균 제곱근 오차(공간상관계수)가 커지고(작아지고), 그 이후에 다시 작아(커)지는 패턴을 보이고 있다. 앞의 Fig. 6a에서 설명하였듯이 RegCM4는 각 실험에 관계없이 1989년 봄철 기온을 관측과 비교하여 매우 낮게 모의하였다. 봄철에 낮은 모의성능이 이상기온 발생과 관련이 있는지 분석하기 위해 60개 관측지점의 30년(1979-2008) 기온자료를 이용하여 각 월 별 30년간의 아노말리를 분석해 보았지만 1989년 3, 4, 5월 모두 0.2-1°C 정도로 30년 평균 기온보다 높게 나타났으나 이상기온으로 판단하기에는 다소 무리가 있었다. 다만, 이때의 각 실험의 모의기온이 30년 평균 기온보다 0.2-3°C 낮게 모의하고 있어 1989년의 관측기온과 큰 차이를 보였다. 앞서 Fig. 6b에서 RegCM4는 1989년 봄철 강수를 관측보다 많이 모의하였음을 보였다. 즉, RegCM4가 1989년 봄철 기후를 모의하는 과정에서 강수를 관측보다 많이 모의하여 그 영향으로 기온을 낮게 모의한 것으로 추정되며 이에 대해서는 좀 더 세부적인 연구를 통한 분석이 필요하다. 전반적으로 기온에 대한 RegCM4의 모의성능은 EE, NE 실험이 좋은 모의성능 보이고 있다.

Fig. 10은 강수에 대한 모델과 관측간의 통계적 검증 결과이다. RegCM4는 여름에 강수의 모의성능이 가장 낮으며 겨울에 강수를 가장 잘 모의하였다. 이는 우리나라에서 여름에는 중규모, 겨울에는 중관 규

Fig. 8. Ratio distribution of daily precipitation rate and frequency over South Korea according to the precipitation intensity for June, July, August, and Summer of one-year (1989) period. 'OBS' represents the observed daily precipitation.

Fig. 9. (a) Bias, (b) RMSE, and (c) Spatial correlation coefficients between RegCM4 and observation for surface air temperature over South Korea. Left and right panels show the seasonal mean and monthly variation, respectively

모 이상의 시스템에 의해 강수가 발생되기 때문에 50 km 해상도를 갖는 RegCM4가 여름보다 겨울에 더 좋은 모의성능을 보이는 것으로 판단된다. 전반적으로 RegCM4는 관측보다 강수를 적게 모의하며 특히 모델의 각 실험에 따라 여름철에 2-6 mm/day 정도 과소 모의하고 있다. 공간 상관성은 여름철에 최대 0.21로 매우 낮은 모의성능을 보여준다. 우리나라 강수현상이 여름에 집중되는 특성을 고려하면, EE 실험이 다른 EG, NG, NE 실험보다 좋은 모의성능을 보이는 것을 알 수 있다. 통계값들의 계절변동을 통해서도 겨울(NE 실험)을 제외하고 EE 실험이 전반

적으로 작은 편차와 평균 제공근 오차를 보였으며, 높은 공간상관계수를 갖는 것을 확인할 수 있다.

요약 및 토의

본 연구에서는 2010년 7월에 공개된 지역기후모델 RegCM4에 2개의 경계조건 (ERA-Interim, NCEP/DOE2)과 2개의 적운모수화방안(Grell, 1993; Emanuel, 1991)을 조합 한 총 4개의 실험(EG, EE, NG, NE)을 CORDEX에서 지정한 동아시아 모의영역에 대하여 1년(1989년)간 적분을 수행하였다. RegCM4의 남한

Fig. 10. Same as Fig. 9 except for precipitation.

지역기후 모의성능을 분석하기 위해 기상청 소속 60개 관측지점의 기온과 강수량자료를 이용하여 4개 실험에 대한 모의성능을 분석하였다.

RegCM4는 경계조건 및 적운모수화방안에 관계없이 지형의 영향에 의한 기온의 공간분포 및 계절변동을 잘 모의한 반면, 강수모의의 경우 경계조건 및 적운모수화방안에 크게 영향을 받았으며 전반적으로 관측보다 강수를 과소하게 모의하였다. 특히, EG, NG, NE 실험들은 여름철 강수를 현저히 과소하게 모의하였다. 이는 위 세 실험에서 RegCM4가 동아시아 여름 몬순에 의한 강수대의 남북진동을 잘 모의하지 못하고 25°N 보다 낮은 위도에서 강수를 강하

게 모의한 것과 관련이 된다. 반면에, 관측보다 과소하게 모의하지만 EE 실험이 다른 실험들에 비해 강수의 공간분포 및 계절변동, 그리고 동아시아 여름 몬순 발달·쇠퇴를 잘 모의하였다. 강수강도별 강수량 및 강수빈도에서도 EE 실험이 다른 실험들에 비해 관측과 유사하게 강수량 및 강수빈도를 잘 모의하였고 특히, 강수강도가 25 mm/day 이상의 강수모의에 있어 좋은 모의성능을 보였다. 그러나 RegCM4는 각 실험에 관계없이 강수강도가 25 mm/day 이하인 약한 강수에서는 관측보다 많게, 25 mm/day 이상인 강한 강수에서는 관측보다 적게 모의하였고, 특히 7-8월에 강수강도가 50 mm/day 이상인 집중호우 현상을 잘

모의하지 못하였다. RegCM4는 대체적으로 기온과 강수모의에서 경계조건보다는 적운모수화방안에 더 크게 영향을 받으며, 여름보다는 겨울에, Grell(1993) 보다는 Emanuel(1991) 적운모수화방안을 적용할 때 좋은 모의성능을 보였다.

본 연구의 결과는 향후 신뢰성 있는 미래 기후변화 시나리오 산출을 위한 첫 번째 과정으로 남한을 포함한 CORDEX 동아시아 모의영역에 적합한 지역 기후모델을 구축하는 데 의의가 있다. 여름철 강수모의에 있어 모델의 모의성능이 현저히 좋지 않았는데, 이는 모델에 적용하는 CORDEX 동아시아 영역이 분석영역보다 지나치게 넓기 때문인 것으로 보인다. 따라서 RegCM4의 모의성능을 보다 향상시키기 위해 대규모 강제자료와 모델해의 편차를 줄여주는 스펙트럴 너징 기법(Spectral nudging technique)을 RegCM4에 도입할 계획이다. 네 개의 실험 중 가장 좋은 모의성능을 보였던 EE 실험에 스펙트럴 너징 기법을 적용하여 동일 기간(1989) 동안의 모의성능을 평가한 후 이를 바탕으로 20년(1989-2008) 장기적분을 수행할 계획이다. 또한, RegCM4를 포함한 CORDEX 권고사항을 적용한 다양한 지역기후모델들의 기후정보를 이용하여 앙상블 기법 개발 및 이용을 통해 한반도에서의 신뢰성 있는 기후정보 생산을 최종 목표로 하고 있다.

사 사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 기후과학연구관리단(RACS 2010-2014)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김승욱, 서명석, 박종흠, 2005, 우리나라 지중온도 변동의 기후학적 특성. 한국지구과학회지, 26, 93-105.
- 김찬수, 서명석, 2009, 베이저안 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.
- 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.
- Charney, J.G., 1975, Dynamics of deserts and drought in Sahel. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101, 193-202.
- Chen, T., Henderson-Sellers, A., Milly, P., Pitman, A., Beljaars, A., Abramopoulos, F., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Desborough, C., Dickinson, R., Duóbenil, L., Ek, M., Garratt, J., Gedney, N., Gusev, Y., Kim, J., Koster, R., Kowalczyk, E., Laval, K., Lean, J., Lettemmaier, D., Liang, X., Mahfouf, J., Mengelkamp, H.-T., Mitchell, K., Nasonova, O., Noilhan, J., Polcher, J., Robock, A., Rosenzweig, C., Schaake, J., Schlosser, C., Schulz, J.-P., Shao, Y., Shmakin, A., Verseghy, D., Wetzel, P., Wood, E., Xue, Y., Yang, Z.-L., and Zeng, Q., 1997, Cabauw experimental results from the Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes. Journal of Climate, 10, 1194-1215.
- Chen, L., Johannessen, O.M., Wang, H., and Ohmura, A., 2011, Accumulation over the Greenland ice sheet as represented in reanalysis data. Advances in Atmospheric Sciences, 28, doi:10.1007/s00376-010-0150-9.
- Ding, Y.H., 1991, Summer monsoon rainfall in china. Journal of the Meteorological Society of Japan, 70(1B) (Special Edition on Asian Monsoon), 243-266.
- Emanuel, K.A., 1991, A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. Journal of the Atmospheric Sciences, 48, 2313-2335.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O., 1999, Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. Journal of Geophysical Research, 104, 6335-6352.
- Grell, G.A., 1993, Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. Monthly Weather Review, 121, 764-787.
- Holtlag, A.A.M., De Bruijn, E.I.F., and Pan, H.L., 1990, A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. Monthly Weather Review, 118, 1561-1575.
- 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.
- Huang, R.H., Moon, S.E., Kim, B.J., and Yoo, C.S., 1997, Recent progresses and problems in the study of east Asia summer monsoon. Journal of the Korean Meteorological Society, 33, 627-639.
- Im, E.S., Kwon, W.T., and Ahn, J.B., 2007a, Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part1: recent climate simulation (1971-2000). Climate Dynamics, 28, 759-780.
- Im, E.S., Kim, M.H., Kwon, W.T., and Bae, D.H., 2007b, 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*. IPCC, 104 p.
- 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.
- Kiehl, J.T., Hack, J.J., Bonan, G.B., Boville, B.A., Briegleb, B.P., Williamson, D.L., and Rasch, P.J., 1996, Description of NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR Technical Note NCAR/TN-420+STR, 152 p.
- 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 Kang, H.S., 2004, Regional Climate Simulation of the 1998 Summer Flood over East Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 1735-1753.
- Oleson, K.W., Niu, G.Y., Yang, Z.L., Lawrence, D.M., Thornton, P.E. Lawrence, P.J., Stöckli, R., Dickinson, R.E., Bonan, G.B., Levis, S., Dai, A., and Qian, T., 2008, Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 113, doi:10.1029/2007JG000563.
- Suh, M.S. and Lee, D.K., 2004, Impact of land/cover changes on surface climate over east Asia of extreme climate cases using RegCM2. *Journal of Geophysical Research*, 109, D02108, doi:10.1029/2003JD003681.
- CORDEX website, 2009, <http://www.meteo.unican.es/en/projects/CORDEX> (검색일: 2011. 7. 4)
- ICTP Portal, 2010, RegCM4. <http://esp.ictp.it/research/esp-models/regcm3> (검색일: 2010. 8. 30)

2011년 6월 9일 접수
 2011년 7월 1일 수정원고 접수
 2011년 7월 12일 채택