ECHAM6 모의자료를 경계자료로 한 RegCM4의 남한지역 상세기후 모의 수준

성민규 · 오석근 · 서명석

공주대학교 대기과학과

(2014년 10월 28일 접수, 2014년 11월 12일 수정, 2014년 11월 15일 게재 확정)

Simulation Skills of RegCM4 forced by ECHAM6 for Fine-scale Regional Climate over South Korea

Min-Gyu Seong · Seok-Geun Oh · Myoung-Seok Suh

Department of Atmospheric Science, Kong-ju National University, Korea

(Received 28 October 2014, Revised 12 November 2014, Accepted 15 November 2014)

Abstract : In this study, 25-year (1981–2005) fine-scale climate over North-East Asian region was reproduced using RegCM4 with 12.5 km of horizontal resolution driven by ECHAM6 output (hereafter, RG4_EH6), and the model's simulation skills were evaluated in terms of temperature, precipitation, and atmospheric field. The model configuration is same as the study of Hong *et al.*(2013) except for lateral boundary condition (LBC), HadGEM2-AO (hereafter, RG4_HG2). Simulation skills of RG4_EH6 were evaluated with observations and compared with the that of RG4_HG2. In general, the RegCM4 well simulated the spatial and temporal variations of temperature and precipitation as compared with CRU observation, regardless of LBC. The RG4_EH6's simulation skills for temperature and precipitation over South Korea are better than that of RG4_HG2, in particular summer precipitation and winter temperature. And RG4_EH6 reproduced more precipitation during June and August than RG4_HG2. The better simulation of wind and moisture fields during June and thermal environments during August by RG4_EH6 than RG4_HG2 resulted in the better simulation of summer precipitation over South Korea. However, RG4_EH6 also showed a dry bias during summer over South Korea as in the RG4_HG2. Also RG4_EH6 overestimated of weaker precipitation (< 10mm/day) but underestimated of stronger precipitation (> 50mm/day) compared to observation. In addition to that, RG4_EH6 significantly overestimated the precipitation by about +1.36–1.84mm/day in spring and winter. The overestimation of precipitation was caused by the overestimation of south-westerly wind and moisture during winter.

Key Words : RegCM4, climate, ECHAM6, HadGEM2-AO, South Korea, evaluation

주요어 : RegCM4, 기후, ECHAM6, HadGEM2-AO, 남한, 평가

1. 서론

사회·경제 발전과 함께 기후변화 정보에 대한 수요자의 요구가 다변화되면서 보다 신뢰성 높은 고해상도의 기후변화 정보가 수문, 농업, 방재 등의 다양한 분야에서 요구되고 있다. 특히, 온실기체의 급격한 증가 등 인위적 요인이 지구 온난화의 가속화에 크게 기여함이 밝혀지면서 이로 인해 발생하는 지역규모의 기후변화에도 관심이 점차 높아지고 있다(e.g., Easterling *et al.*, 2000; Lee and Suh, 2000; IPCC, 2014). 또한 많은 선행 연구들은 지구온난화와 관련하여 폭염 및 가뭄, 호우 등과 같은 극한기후 현상의 발생빈도 및 강도가 지역에 따라 증가하고 있음을 보였고(Easterling *et al.*, 2000; Klein Tank and Können, 2003; WMO website, 2009; IPCC, 2014), 남한 역시 지난 20세기 동안 평균기온의 상승(약 1.5°C)과 함께 강우강도와 낙뢰강도가 증가되고 있는 것으로 보고되고 있다(Kwon, 2005; Yoon *et al.*, 2006; Kim and Suh, 2009; Myoung and Suh, 2010). 따라서 현재 진행되고 있는 기후변화와 관련하여 나타나게 될 위험요소들에 대한 효율적인 대응 및 적응방안을 준비하기 위해서는 전 지구 및 지역규모의 기후변화 전망 자료에 대한 신뢰도를 높이는 연구가 필요하다.

이러한 노력을 일환으로 최근에는 신뢰성 높은 전 지구 및 지역기후변화 정보생산 및 불확실성 평가를 위해 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)와 CORDEX(Coordinated experiment Regional Climate Downscaling)와 같은 다양한 국제 공동연구들이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Giorgi *et al.*, 2012; Suh *et al.*, 2012; Taylor *et al.*, 2012; Baek *et al.*, 2013). 특히, 이러한 국제 공동연구들은 1개의 특정 전구 및 지역기후모델이 아닌 다수의 전구 및 지역기후모델

들을 활용하고, 최근의 관측과 온실기체 저감 기술들을 복합적으로 고려한 새로운 기후변화 시나리오(대표농도경로: Representative Concentration Pathway; RCP, Moss *et al.*, 2008)를 이용함으로써 보다 신뢰성 있는 기후변화 정보를 산출하기 위해 노력하고 있다(Giorgi *et al.*, 2012; Suh *et al.*, 2012; Taylor *et al.*, 2012; Baek *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2014). 또한, 편의보정 및 다중모델 앙상블 기법 개발을 통해 모의정보들이 갖는 불확실성을 감소시키려는 연구들도 활발히 진행 중이다(e.g., Christensen *et al.*, 2008; Feng *et al.*, 2011; Suh *et al.*, 2012; Oh and Suh, 2014). 우리나라 또한 CORDEX 프로젝트 참여와 국가표준 기후변화 시나리오를 구축하기 위한 노력으로 전구기후모델인 HadGEM2-AO(Hadley Center Global Environmental Model version 2 coupled with the Atmosphere-Ocean)의 모의결과를 5개의 지역기후모델들의 경계자료로 처방하여 CORDEX 동아시아 영역(수평해상도: 50km)에 대한 72년(1979~2050년)간의 기후변화정보를 생산하고, 산출된 정보의 모의수준 및 변화전망에 대한 불확실성을 평가하였다(e.g., KMA, 2012; Lee *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2014). 하지만 수문, 농업, 방재 등의 응용 연구 분야에서 보다 고해상도의 기후변화정보(~12.5km 이하)가 요구됨에 따라 Hong *et al.*(2013)은 HadGEM2-AO를 강제력으로 한 RegCM4를 이용하여 남한 중심의 동북아시아 지역에 대한 12.5km 해상도의 현재 30년(1981~2010년) 및 미래 30년(2021~2050년)간의 기후변화 정보를 생산하였다. 그리고 남한영역을 포함한 6개의 분석영역(전체 모의영역, 북중국, 남중국, 북한, 남한, 일본)에 대한 현재기후에 대한 모의수준 및 21세기 중반의 미래 기후변화를 전망하였다.

전구 및 지역기후모델들은 서로 다른 계통오차 및 모의특성을 가지기 때문에 특정 모델이 생

산한 미래 기후변화 정보만을 이용하여 응용 연구 및 기후관련 정책결정에 활용하는 데는 한계가 있다. 특히 지역기후 모델들의 모의 특성이 경제조건의 영향을 많이 받기 때문에 신뢰성 높은 지역기후 변화정보를 산출하기 위해서는 다수의 전구모델 사용이 필요하다(e.g., Amengual *et al.*, 2007; Moufouma-Okia and Rowell, 2009; Oh *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2013). 따라서 본 연구에서는 한반도에서의 보다 신뢰성 높은 기후변화 전망 정보를 제공하기 위하여 CMIP5 참가 전구모델 중 동북아시아 지역에서 모의수준이 상대적으로 높고 HadGEM2-AO와 다른 계열의 전구모델인 ECHAM6의 모의자료를 경계자료로 선정하였다. 양상별 기후전망 자료 산출 및 경계조건이 모의수준에 미치는 영향 분석 등을 위해 모의 기간, 해상도, 모의영역 등은 Hong *et al.*(2013)와 동일하게 하였다. 다음절에서는 본 연구에서 이용한 지역기후모델과 실험설계, 그리고 경계자료로 이용된 전구기후 모의자료를 설명하고, 남한지역을 중심으로 현재기후에 대한 RegCM4의 모의수준을 분석하였다. 끝으로 본 연구 결과를 요약하고 RegCM4를 이용한 미래 기후변화정보 산출의 가능성을 평가하였다.

2. 모델 및 실험설계

본 연구에서 이용한 지역기후모델은 Hong *et al.*(2013)에서와 같이 ICTP(International Centre for Theoretical Physics)에서 2010년에 공개한 RegCM4.0(Regional Climate Model version 4.0)이다. RegCM4.0은 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 3차원 대기모형으로, 정수 역학과정을 따르며 연직 및 수평 좌표계로 각각 시그마 좌표계와 Arakawa B 격자 좌표계를 이용한다. RegCM4.0

에 대해서는 Giorgi *et al.*(2012)에 상세히 기술되어 있다. 또한, 개발자와 모델 이용자들과의 끊임 없는 정보 교류를 통해 지속적으로 모델개선이 이루어지고 있으며, 현재는 버전 4.4가 테스트용으로 제공되고 있다(<http://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/>). 본 연구에서는 Hong *et al.*(2013)의 연구결과와 상호비교하기 위해 동일한 모의환경을 갖는 RegCM4.0을 이용하였다. Figure 1과 Table 1은 본 연구와 Hong *et al.*(2013)에서 설정한 모의영역과 모의환경을 보여준다. 모의영역은 한반도를 중심으로 한 동북아시아 지역이며, 수평해상도는 12.5km 이다. 연직 좌표계는 23층 시그마 좌표계이며 모델의 최상층의 기압을 50hPa 수준으로 설정하였다. 적운모수화 방안(Emanuel, 1991), 지면 모델(CLM3.5; Community Land Model version 3.5, Oleson *et al.*, 2008), 행성경계층방안(Holt-slag *et al.*, 1990), 그리고 복사전달방안(NCAR CCM3; NCAR Community Climate Model version 3, Kiehl *et al.*, 1996)등의 모의환경은 Hong *et al.*(2013)의 연구와 동일하다.

본 연구에서는 CMIP5에 참여하는 전구모델 중 동북아시아 지역 기후에 대한 모의수준이 상대적으로 높고, HadGEM2-AO와 다른 계열이며 방대한 양의 자료수집이 용이한 전구기후 모의자료를 경계자료로 선정하고자 하였다. 이러한 조건이 충족된 전구모델이 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecasts)의 대기모형을 근간으로 독일 함부르크의 MPI-M(Max Planck Institute for Meteorology)에서 개발한 ECHAM6이다. ECHAM이란 명칭은 ECMWF의 앞의 두 글자 “EC”와 함부르크(Hamburg)의 약어 “HAM”을 병합하여 만들어 졌으며, 현재 버전 6.0이 공개되어 전 지구 기후변화 모의, MJO(Madden-Julian Oscillation) 모의, Sea-Ice 해양모델과의 결합 등 다양한 연구 분야에서 널리 이용되고 있다

Table 1. RegCM4's configuration used in this study.

Contents	Description
Domain	12.5-km horizontal resolution Central Lat. and Lon. : 37.50°N, 127.50°E 200 (Lon)×180 (Lat)
Map projection	Lambert Conformal
Vertical layers (top)	23 vertical sigma levels (50 hPa)
PBL scheme	Holtslag
Cumulus parameterization scheme	MIT-Emanuel
Land surface model	NCAR CLM3.5
Short/Longwave radiation scheme	NCAR CCM3
Boundary data	ECHAM6, HadGEM2-AO
Spectral nudging	Yes
Simulation periods	Jan, 1979~Dec, 2005

Figure 1. Model domain and topography (m).

(e.g., Crueger *et al.*, 2013; Stevens *et al.*, 2013; Sidorenko *et al.*, 2014). Stevens *et al.* (2013)은 ECHAM6가 이전 버전인 ECHAM5보다 단파복사 전달과정, 새로운 지면 반사도 값과 에어로졸의 기후값, 식생역학모형 등의 개선이 이루어졌음을 언급하였고, 현재기후에 대한 모의수준 평가를 통해 중위도 지역에서의 열대순환 및 강수모의, 그

리고 계절변동성 모의가 향상되었음을 보였다. 본 연구에서는 ECHAM6의 상·하층 대기 기후요소들(U, V, T, relative humidity, geopotential height)과 해수면온도(SST)를 RegCM4의 경계자료로 이용하였다. 이때, 저해상도의 ECHAM6는 동북아시아 지역의 복잡한 해안선을 충분히 표현하지 못하고 원산만과 발해만과 같은 지역을 육지로 표

현하면서 이 지역에서의 해수면온도 값이 0°C 가 되는 문제를 보였다. 따라서 이를 해결하기 위해 NCL(Ncar Command Language)의 “Poisson Grid Fill” 함수를 이용하여 문제가 되는 영역의 해수면 온도를 인근 정상적인 값을 가진 해수면온도로 외삽하여 수정하였다(http://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/poisson_grid_fill.shtml).

Figure 2는 1979년 8월 15일에 대한 ECHAM6 모의자료 원본의 해수면 온도 분포와 “Poisson Grid Fill” 함수를 이용하여 수정한 해수면 온도 분포를 관측결과와 비교한 것이다. 관측결과는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 OISST(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였고(Reynolds *et al.*, 2002), Figure 2a는 10년(1982~1991년) 평균된 8월의 해수면 온도 공간분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 수정된 해수면 온도에서는 원산만, 발해만, 일본지역에서 나타나는 이상값이 제거되었고 원본 자료에서의 해수면 온도의 특성을 최대한 유지하면서 관측에서 나타나는 위도에 평행한 해수면 온도의 분포를 잘 반영하고 있다. 이렇게 수정된 해수면 온도자료를 포함한 ECHAM6

의 상·하층 대기 기후요소들을 RegCM4의 경계자료로 처방하여 현재 27년(1979~2005년, 제어적분기간: 1979~1980년)간의 장기적분을 수행하였다. 현재 기후 동안의 기온과 강수에 대한 RegCM4의 모의수준 평가는 CRU-TS(Climatic Research Unit Time-Series) 3.21(수평해상도: 50km, 시간해상도: 월평균) 자료와 남한 59개 관측지점 (수평해상도: 약 20km, 시간해상도: 1시간 간격)의 강수자료를 이용하였다. 850hPa에서의 바람장과 혼합비, 그리고 지위고도에 대한 검증은 재분석 자료인 NCEP(National Centers for Environmental prediction)/DOE(Department of Energy) Reanalysis 2(이하: R2)를 이용하였다. 본 연구에서는 각 검증자료와 모의자료간의 시간일치를 위해 월평균 (CRU와 R2 비교시) 또는 일평균 (남한 강수자료 비교시) 값으로 후처리 한 후 분석을 수행하였으며, 공간일치의 경우 CRU와 R2자료는 모델의 격자점으로, 모델의 모의자료는 남한 관측지점의 위경도 값으로 재 산출한 후 각각 분석을 수행하였다. 이때, 공간일치는 이중선형보간법(Bilinear interpolation)을 이용하여 수행하였으며, 기온의 경우 고도보정($\pm 0.65/100\text{m}$)을 수행

Figure 2. Spatial distribution of (a) OISST for 10-year (1982-1991) average in August, (b) the original sea surface temperature (SST) simulated by ECHAM6 for Aug. 15. 1979, and (c) the SST of ECHAM6 modified by using the function “poisson grid fill” in NCL (Ncar Command Language) for Aug. 15. 1979.

하였다. ECHAM6를 이용한 역학적 상세화(이하 RG4_EH6)와 HadGEM2-AO를 이용한 역학적 상세화(이하 RG4_HG2)간의 비교 분석을 위해 동일 기간(1981-2005)의 Hong *et al.* (2013)의 연구결과와 함께 분석하였다.

3. 연구 결과

1) 기온과 강수의 공간분포

Figures 3과 4는 현재 25년(1981~2005년) 평균 여름(JJA)과 겨울(DJF) 동안의 기온에 대한 RegCM4의 모의수준을 CRU-TS 3.21 기온자료와 비교하여 나타낸 것이다. 육지 지역의 정보만을 제공하는 CRU 자료의 특성을 고려하여 두 역학적 상세화 실험결과(RG4_HG2, RG4_EH6) 또한 육지지역에서의 결과만을 나타내었다. 전반적으로 RegCM4는 두 경계자료에 관계없이 개마고원, 태백산맥, 소백산맥 등과 같은 높은 지형에서 기온을 낮게 모의하고 고위도로 갈수록 기온이 낮아지는 공간분포 특성을 비교적 잘 모의하였다(Figures 3b, 3c, 4b, and 4c). 그러나 여름철 기온의 경우 두 실험 모두 남한을 포함한 대부분의 지역에서 기온을 약 $-2\sim-3.5^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 모의하였으며, RG4_HG2의 경우 모의영역의 북서지역에서 CRU 보다 약 $+0.5\sim+1.5^{\circ}\text{C}$ 정도 높게 모의하는 특성을 보였다(Figures 3e and 3f). 남한의 여름철 기온모의에 대한 두 실험의 모의수준은 매우 유사하게 나타났으나 만주를 포함한 북중국 지역에서는 RG4_EH6가 RG4_HG2 보다 기온을 약 $-0.5\sim-3.5^{\circ}\text{C}$ 정도 더 낮게 모의하는 특성을 보였다(Figure 3d). 겨울철 기온의 경우 두 실험 간의 차이가 뚜렷이 나타났다. RG4_HG2의 경우 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 CRU보다 기온을 약 $-0.5\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ 낮게 모의하는 특성을 보였다

(Figure 4e). 반면, RG4_EH6의 경우 대부분의 지역에서 CRU 보다 기온을 약 $0.5\sim2.5^{\circ}\text{C}$ 높게 모의하는 특성을 보였으며(Figure 4f), 그 결과 남한을 포함한 모든 지역에서 RG4_HG2 보다 기온을 높게 모의하는 특성을 보였고, 고위도로 갈수록 이러한 특성이 뚜렷이 나타났다. 겨울철 기온에 대한 RG4_EH6의 산출수준은 RG4_HG2와 서로 반대되는 경향을 보이지만 그 크기가 약 $0.5\sim2.5^{\circ}\text{C}$ 정도로 유사하게 나타나 비교적 유사한 모의수준을 보임을 알 수 있다.

Figures 5와 6은 현재 25년(1981~2005년) 평균 여름(JJA)과 겨울(DJF) 동안의 강수에 대한 RegCM4의 모의수준을 CRU-TS 3.21 강수자료와 함께 나타낸 것이다. CRU 강수자료를 통해 여름에는 한반도와 일본 전 지역에서 약 10mm/day 이상의 많은 강수가 내리고 만주 등 북중국지역에서는 5mm/day 이하의 상대적으로 적은 강수가 내리고 있음을 알 수 있다. 겨울철의 경우 중국 양쯔강 유역, 남한의 서남부지역, 그리고 일본 규슈지역에서 상대적으로 많은 강수가 내리고 있으나 만주 등 북중국 지역에서는 0.5mm/day 이하로 매우 적은 강수가 내리고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 RegCM4는 계절 및 경계자료에 관계없이 CRU에서 나타나는 강수의 공간분포 특징을 비교적 잘 모의하였다(Figures 5b, 5c, 6b, and 6c). 그러나 여름철 강수의 경우 두 실험 모두 한반도에서의 강수를 약 $-1.0\sim-3.5\text{mm/day}$ 정도 과소하게 모의하는 특성을 보였으며 상대적으로 RG4_HG2가 강수를 더 과소하게 모의하고 있다(Figures 5e and 5f). RG4_EH6의 경우 한반도와 일본 규슈지역에서 강수를 각각 $-0.5\sim-1.5\text{mm/day}$, $-2\sim-3\text{mm/day}$ 정도 과소하게 모의하였으나, 일본 본토지역과 중국 선양지역, 러시아 연해주 지방에서는 CRU 보다 약 $+0.5\sim+2\text{mm/day}$ 정도 과다하게 모의하고 있다(Figure 5f). 전반적으로 RG4_EH6

Figure 3. Spatial distribution of summer mean temperature (°C) of CRU-TS 3.21, the simulated summer mean temperature (°C) by RegCM4 driven by HadGEM2-AO and ECHAM6, and difference (°C) between RegCM4 and CRU-TS 3.21 for 25-year (1981-2005).

Figure 4. Same as Figure 3 except for winter mean temperature (°C).

Figure 5. Same as Figure 3 except for summer mean precipitation (mm/day).

Figure 6. Same as Figure 3 except for winter mean precipitation (mm/day).

은 RG4_HG2 보다 모든 지역에 대해 여름철 강수를 약 $+0.5 \sim +2.5 \text{ mm/day}$ 정도 강수를 과다하게 모의하고 있으며(Figure 5d), 남한의 여름철 강수모의는 상대적으로 나은 모의수준을 보이고 있다. 겨울철 강수의 경우 두 실험 모두 CRU 보다 $+0.5 \sim +1.5 \text{ mm/day}$ 정도 강수를 과다하게 모의하고 있으며(Figures 6e and 6f), RG4_EH6가 RG4_HG2보다 모든 지역에서 약 $+0.5 \sim +1 \text{ mm/day}$ 정도 강수를 더 과다하게 모의하고 있다(Figure 6d).

2) 하층 대기 기후요소들의 공간분포

기온과 강수의 공간분포 결과에서 RG4_EH6 실험은 RG4_HG2의 경우보다 겨울철 기온을 높게, 여름 및 겨울 강수를 상대적으로 많이 모의하는 특성을 보였다. 이러한 원인을 분석하기 위해 여름과 겨울동안의 평균 하층대기의 기후요소들의 공간분포를 분석하였다. Figures 7과 8은 현재 25년(1981~2005년) 평균 여름(JJA)과 겨울(DJF) 동안의 850hPa 하층대기의 평균 바람장(m/s), 지위고도(gpm), 그리고 혼합비(g/kg)에 대한 재분석자료(R2)와 두 경계자료를 강제력으로 한 RegCM4의 모의결과, 그리고 RegCM4와 R2 또는 두 실험 간의 차이를 나타낸 것이다. 동북아시아의 여름철 하층대기는 북태평양 고기압의 확장파와 함께 850hPa의 기준 지위고도인 1460gpm이 한반도 중심에 남서 방향으로 위치하여 이에 따라 남서풍이 탁월하게 불고 있다. 또한, 많은 수증기의 유입으로 하층대기가 습윤한 상태이며, 특히 한반도를 중심으로 수증기의 분포가 뚜렷하게 나타나고 있다(Figure 7a).

전반적으로 RegCM4는 경계자료에 관계없이 동북아시아의 여름철 하층대기 기후요소들의 공간분포를 비교적 잘 모의하였다. 그러나 RG4_HG2의 경우 북태평양 고기압의 확장을 잘 모의하지 못하면서 상대적으로 기준 지위고도인 1460gpm을

일본 남해안 지역에 위치하게 하면서 한반도 지역에서의 지위고도를 약 $-12 \sim -21 \text{ gpm}$ 정도 낮게 모의하고 있다. 또한 지위고도가 남북방향으로 분포되어 남서풍보다는 남풍계열의 바람이 모의되는 특성을 보이고 있으며, 지위고도의 정도 또한 R2보다 작아 상대적으로 약한 바람이 모의되어 한반도 지역으로의 수증기 이류를 약화시키고 있다(Figures 7b and 7e). 반면, RG4_EH6의 경우 RG4_HG2 보다 상대적으로 북태평양 고기압의 확장을 잘 모의하면서 기준 지위고도 1460gpm의 위치를 비교적 잘 모의하였고, 그 결과 남서풍도 상대적으로 우수하게 모의하고 있다. 하지만 상대적으로 1460gpm 위치를 북쪽으로, 가을기는 동서방향에 가깝게 모의하여 R2의 경우보다 남서풍을 약하게 모의하였고, 그 결과 한반도 주변의 수증기를 적게 모의하였다(Figures 7c and 7f). 두 실험 간의 결과를 비교하면, RG4_EH6는 RG4_HG2 보다 제주도를 중심으로 북서쪽은 수증기를 적게, 남동쪽은 상대적으로 수증기를 많게 모의하였고 남중국 해역에서 들어오는 남서풍계열의 바람은 비교적 유사하게 모의하였다(Figure 7d). 그러나 이 결과만으로 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 여름철 남한에서의 강수를 상대적으로 더 많이 모의하는 원인(Figures 5c and 5d)을 설명하기에는 한계가 있다. 따라서 두 실험이 모의한 여름철 6, 7, 8월 동안의 4개의 기후요소들의 연직구조 차를 비교해 보았다(Figure 9). 남한의 여름철 강수는 6월부터 7월 중순까지는 장마전선과 같은 종관규모 현상에 의해 주로 발생되고, 7월 중순부터 8월 말 또는 9월 초까지는 강한 일사에 의한 지표 가열로 발생하는 중규모 대류계(Mesoscale Convective System: MCS)와 태풍의 직/간접 영향에 의해 발생됨을 많은 선행연구들로부터 밝혀진바 있다(e.g., Park *et al.*, 2008(a); Kim and Suh, 2009; Ho, *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2011). 남한의 여름철

Figure 7. The 850hPa winds (m/s; vector), geopotential height (gpm; contour), and mixing ratio (g/kg; shaded) of the 25-year (1981-2005) summer (JJA) season obtained from (a) R-2, (b) RegCM4 driven by HadGEM2-AO (RG4_HG2), and (c) RegCM4 driven by ECHAM6 (RG4_EH6). The bottom panel indicate (d) the difference results between RG4_EH6 and RG4_HG2, and (e-f) between RegCM4 and CRU, respectively. The reference vectors for the mean field (a-c) and difference field (d-f) are the 3 m/s and 1 m/s, respectively.

Figure 8. Same as Figure 7 except for winter (DJF).

Figure 9. Vertical profile of 25-year (1981-2005) monthly averaged differences between simulation of RegCM4 driven by ECHAM6 and HadGEM2-AO over South Korea during summer(JJA) for selected four climate elements. The solid, dashed, and dotted line indicate the result for June, July, and August, respectively.

강수에 대한 두 실험 간의 차는 상대적으로 7월 보다는 6월과 8월에 더 많이 나타났다(Figure 10b). Figure 9에서 나타나듯이, 6월의 경우 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 중·하층대기에서의 서풍과 남풍을 상대적으로 더 강하게 모의하고, 하층에서의 수증기가 더 많이 나타나는 것으로 보아 종관규모 현상에 의해 지배되는 남서풍에 의한 수증기의

공급을 상대적으로 더 잘 모의함을 알 수 있다. 반면, 8월의 경우 6월과 유사하게 RG4_EH6가 상대적으로 중·하층대기에서의 서풍과 남풍을 더 강하게 모의하나 하층대기에서의 수증기를 상대적으로 적게 모의하고 있다. 하지만 점차 중층대기로 갈수록 수증기가 많아지는 연직구조를 보이고 있다. 또한, 기온의 연직구조는 하층을 더 높게, 상

Figure 10. Seasonal variation of 25-year (1981-2005) averaged monthly mean surface air temperature (°C) and precipitation (mm/day) over South Korea. The black, red, and blue line indicate the results of CRU and RegCM4 driven by HadGEM2-AO and ECHAM6, respectively.

층을 더 낮게 모의하여 상대적으로 RG4_HG2보다 더 열적 불안정을 가지는 대기 환경을 모의하고 있다. 이로 미루어 볼 때, 8월에는 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 상대적으로 지표가열 등에 의한 열적 불안정을 더 유도하고 이로 인해 중층 대기까지 강한 대류활동이 발달되어 상대적으로 더 많은 강수가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 두 실험 간의 여름철 강수의 차이는 6월과 8월 강수의 차에 의한 것이며, 상대적으로 RG4_EH6가 남한의 여름철 강수발생에 주된 영향을 주는 중관 및 중규모 시스템과 관련된 대기현상을 잘 모의하는 것으로 보인다.

겨울철 동북아시아 지역의 하층대기는 시베리아 고기압의 영향으로 북서방향의 지위고도들의 분포가 나타나고 그 결과 북서계절풍이 탁월하게 발달하고 있다. 그리고 하층대기 또한 매우 건조한 상태를 알 수 있다(Figure 8a). RegCM4는 두 경계자료에 관계없이 겨울철 동북아시아 지역의 하층대기를 잘 모의하였다(Figures 8b and 8c). 그러나 두 실험 모두 R2보다 지위고도를 약 $-6 \sim -12\text{gpm}$ 정도 낮게 모의하였고 상대적으로 RG4_EH6가 약 2배 정도 더 낮게 모의하는 특성을 보였다. 그 결과, RG4_EH6는 대부분의 지역에서 남서풍 성분을 강하게 모의하면서 상대적으로 온난 습윤한 저위도 지역의 공기 유입을 유도하여 R2보다 더 온난 습윤한 대기환경을 갖도록 모의하였다(Figure 8f). 이러한 ECHAM6의 모의특성이 RegCM4에 영향을 주어 상대적으로 겨울철 기온이 CRU보다 높게, 겨울철 강수가 CRU보다 과다하게 모의된 것으로 판단된다(Figures 4f and 6f).

3) 남한에서의 기온과 강수의 계절변동 및 통계 분석

Figure 10과 Table 2는 RegCM4가 모의한 남한에서의 기온과 강수의 계절변동과 각 계절별 통계

분석을 나타낸 것이다. 전반적으로 RegCM4는 경계조건에 관계없이 기온의 계절변동을 CRU 기온과 매우 유사하게 모의하였다(Figure 10a). 그러나 대부분의 계절에서 기온을 낮게 모의하였으며 다른 계절에 비해 여름철 기온을 더 낮게 모의하는 특성을 보였다. 각 계절별 통계분석 결과를 살펴보면, 경계조건에 따라 조금씩 차이는 있지만 여름철에 약 $-2.18 \sim -2.65^{\circ}\text{C}$ 로 편의가 가장 크고 평균제곱근오차 또한 $2.26 \sim 2.73^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타나 상대적으로 더 낮은 모의수준을 보였다. 반면 겨울철의 경우 다른 계절에 비해 편의가 $-0.41 \sim -0.88^{\circ}\text{C}$, 평균제곱근오차가 $1.08 \sim 1.23^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮게 나타나 상대적으로 우수한 모의수준을 보였다. 두 실험결과 간 모의수준을 살펴보면, 봄철을 제외한 모든 계절에서 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 편의 및 평균제곱근 오차가 작고 공간 상관계수 또한 같거나 유사하게 나타나 상대적으로 더 나은 모의수준을 보였다(Table 2). 강수의 계절변동 모의에서 RegCM4는 여름에 최대가 되고 겨울에 최소가 되는 강수의 계절변동 패턴을 어느 정도 모의하나 상대적으로 여름철 강수를 과소하게, 겨울철 강수를 과다하게 모의하면서 강수의 계절변동 폭을 작게 모의하였다(Figure 10b). RG4_HG2는 겨울철을 제외한 모든 계절에서 강수를 과소하게 모의하는 특성을 보였고, 특히 여름철 강수를 약 -3.09mm/day 정도 과소하게 모의하였다. 또한, 공간 상관계수가 0.29로 나타나 남한의 여름철 강수량 및 분포특성을 잘 모의하지 못하였다. 반면, RG4_EH6는 여름철 강수의 편의가 -1.71mm/day , 평균 제곱근 오차가 2.43mm/day , 공간 상관계수가 0.31로 나타나 상대적으로 RG4_HG2(Bias: -3.09mm/day , RMSE: 3.43mm/day , Spatial corr.: 0.29)보다 더 나은 모의수준을 보였다. 하지만 봄철과 겨울철 강수를 CRU보다 상대적으로 과다하게(봄철: $+1.84\text{mm/}$

day, 겨울철: 1.36mm/day) 모의하면서 RG4_HG2보다 낮은 모의수준을 보였다(Table 2).

지역기후모델들의 강수에 대한 모의수준을 평가하는데 있어 평균 강수량에 대한 분석도 중요하지만 강수강도 및 빈도수에 대한 연구들도 필요하다. 왜냐하면 강수강도와 강수 빈도수는 강수의 시간 및 공간분포와 함께 지면과 대기 사이의 상호작용(에너지 수지, 토양의 열용량), 물수지(식생에 의한 강수 차단량, 도양 수분 유출 등), 홍수와 같은 재해기상 발생 등과 밀접하게 관련되어 있기 때문이다(Chen *et al.*, 1996). Figure 11은 현재 25년(1981~2005년) 여름기간인 6월, 7월, 8월에 대해 RegCM4가 모의한 남한에서의 강수강도 별 강수빈도 및 강수량의 분포를 관측과 함께 나타낸 것이다. 이때, 관측 강수량은 남한 59개 관측지점의 일 누적 강수자료를 이용하였으며, RegCM4의 모의강수는 관측지점의 위·경도로 내삽한 일 강수 모의결과를 이용하였다. 전반적으로 강수빈도수 모의에서 RegCM4는 두 경계자료 및 월에 관계없이 5mm/day보다 약한 강수는 관측보다 많고, 상대적으로 5~10mm/day보다 강한 강수는 관측보다 적게 모의하는 특성을 보였다. 강수량 모의의 경우 관측과 유사하게 25~100mm/day 구간에서 강수의 약 50%가 발생하는 분포 특성을 비

교적 잘 모의하였지만 25mm/day보다 약한 강수에서는 관측보다 많이, 25mm/day보다 강한 강수에서는 관측보다 적게 모의하는 특성을 보였다. 이 결과는 지역기후모델이 약한 강수에서는 관측보다 과다하게, 상대적으로 강한 강수에서는 관측보다 과소하게 모의함을 보였던 선행 연구들의 연구결과와 일치한다(Oh and Suh, 2013; Lee *et al.*, 2013). 6월 강수의 경우 RG4_EH6는 RG4_HG2보다 100mm/day 이상의 강한 강수 구간에서 강수 빈도수 및 강수량을 상대적으로 적게 모의하였지만 그 외 대부분의 강수구간에서 RG4_HG2보다 강수빈도 및 강수량을 많이 모의하였다(Figures 11Aa and 11Ba). 특히, 10~100mm/day 구간은 6월 강수량의 약 60% 이상을 차지하고 있어, 이 구간에서의 강수빈도 및 강수량을 RG4_EH6가 더 많이 모의하면서 RG4_HG2보다 남한의 6월 강수를 더 많이 모의한 것으로 판단된다(Figure 10b). 7월 강수의 경우 두 실험 간의 차가 6, 8월에 비해 상대적으로 작았는데 이는 10~100mm/day 구간내의 각 구간별 강수에 대한 두 실험들의 모의강수가 서로 상충되면서 나타난 결과로 판단된다(Figures 11Ab and 11Bb). 8월 강수의 경우 강한 강수 구간으로 갈수록 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 강수빈도 및 강수량을 더 많이 모의하는 분포를

Table 2. Statistical evaluation of surface air temperature (°C) and precipitation (mm/day) over South Korea simulated by RegCM4 driven by ECHAM6 and HadGEM2-AO against CRU 3.21 data for 25-year (1981-2005). The values in parentheses indicate the results of RegCM4 driven by HadGEM2-AO.

Eval.	Variable (unit)	RG4_EH6 (RG4_HG2)				
		Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
Bias	Temp (°C)	-1.01 (-1.59)	-1.10 (-1.09)	-2.18 (-2.65)	-1.15 (-1.72)	-0.41 (-0.88)
	Precip (mm/day)	0.26 (-0.83)	1.84 (-0.08)	-1.71 (-3.09)	-0.45 (-0.66)	1.36 (0.53)
RMSE	Temp (°C)	1.53 (1.77)	1.42 (1.28)	2.26 (2.73)	1.36 (1.86)	1.08 (1.23)
	Precip (mm/day)	1.76 (1.52)	1.96 (0.60)	2.43 (3.43)	1.23 (1.32)	1.41 (0.72)
Spatial corr.	Temp (°C)	0.92 (0.92)	0.92 (0.89)	0.88 (0.88)	0.94 (0.95)	0.95 (0.95)
	Precip (mm/day)	0.53 (0.57)	0.71 (0.75)	0.31 (0.29)	0.55 (0.59)	0.56 (0.64)

Figure 11. Fractional distribution of (A) precipitation frequency and (B) precipitation amount according to precipitation intensity (mm/day) over South Korea for June, July, and August during 25-year (1981-2005).

보인다. 특히, 100mm/day 이상의 강한 강수 구간에서 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 관측에 더 가깝게 강수빈도 및 강수량을 모의하였다. 이는 중·하층 대기 기후요소 분석에서 설명했듯이 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 하층 기온을 더 높게, 중·상층 기온을 더 낮게 모의하면서 열적 대류활동이 더 활발하게 유도되어 상대적으로 강한 대류활동이 더 잘 발생될 수 있는 환경을 모의하였기 때문인 것으로 보인다.

4. 요약

본 연구에서는 한반도에서의 다양한 기후변화 정보 생산 및 앙상블 기후변화 정보 산출을 위한 하나의 앙상블 멤버로서 ECHAM6를 경계자료로 이용한 RegCM4를 이용하여 동북아시아 지역에서의 현재 25년(1981~2005년)간의 상세 기후 정보를 생산하였다. ECHAM6를 강제력으로 한 RegCM4(이하 RG4_EH6)의 현재기후의 재현성에 대한 객관적 비교를 위해 RegCM4의 모의한 결과를 Hong *et al.* (2013)의 연구와 동일하게 적용하였으며, Hong *et al.* (2013)에서 생산한 동일기간(1981~2005년)의 모의자료(HadGEM2-AO를 강제력으로 한 RegCM4, 이하 RG4_HG2)를 함께 비교 분석하였다. 생산된 기후 정보의 검증자료로 CRU-TS 3.21 기온/강수 자료와 기상청 소속 59개 관측지점의 강수자료, 그리고 R2 재분석 자료를 이용하였다.

전반적으로 RegCM4는 두 경계자료와 관계없이 CRU 기온, 강수자료와 비교하여 지형 및 지리적 위치에 따른 기온과 강수의 공간분포를 비교적 잘 모의하였다. 그러나 Hong *et al.* (2013)에서 언급한 바와 같이 RG4_HG2는 계절에 관계없이 기온을 낮게, 강수를 과소하게 모의하는 특성을 보였

으며, 특히 여름철 남한강수를 약 -3mm/day 정도 과소하게 모의하였다. 반면, 본 연구의 RG4_EH6는 RG4_HG2보다 여름철 기온의 음의 편의를 작게 모의하는 특성을 보였으며, 겨울철 기온은 지역에 따라 CRU 기온보다 약 $+0.5\sim+2.5^{\circ}\text{C}$ 정도 높게 모의하는 특성을 보였다. 강수 또한 여름과 겨울 모두 RG4_HG2보다 많이 모의하는 특성을 보여, 여름철 강수 모의는 개선되었지만 겨울철 강수를 상대적으로 과다하게 모의하는 문제를 보였다. 여름철 강수에 대한 두 실험의 차는 6월과 8월 모의강수 차에 의한 것이며 상대적으로 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 남한의 여름철 강수 발생에 주된 영향을 주는 종관(예: 장마전선) 및 중규모 시스템(예: 열적불안정에 의한 대류활동)과 관련된 대기현상을 비교적 잘 모의하였기 때문인 것으로 보인다. 반면, 겨울철 강수의 경우 RG4_EH6가 RG4_HG2보다 상대적으로 남서풍 성분을 강하게 모의함에 따라 저위도의 온난 습윤한 공기의 이류가 강하게 발생한 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

RegCM4는 경계자료에 관계없이 여름에 최대가, 겨울에 최소가 되는 기온의 계절변동 패턴을 비교적 잘 모의하였으나 대부분의 계절에서 기온을 낮게 모의하는 특성을 보였다. 강수의 경우 여름철 강수를 과소하게, 상대적으로 겨울철 강수를 과다하게 모의하면서 강수의 계절변동 폭을 상대적으로 작게 모의하였다. RG4_EH6는 봄철을 제외한 모든 계절에서 RG4_HG2보다 기온에 대한 편의 및 평균제곱근 오차는 작게, 공간 상관계수는 유사한 모의수준을 보였다. 또한 여름철 강수를 많이 모의하면서 RG4_HG2보다 개선된 결과를 보였다. 그러나 상대적으로 봄철과 겨울철 강수를 약 $1.36\sim1.84\text{mm/day}$ 정도 과다하게 모의하는 특성을 보였다. 강수강도별 강수량 및 강수빈도 또한 RG4_HG2와 유사하게 약한 강수는 많이,

강한 강수를 적게 모의하는 특성을 보였으며, 8월 강수의 경우 상대적으로 100mm/day 이상의 강한 강수모의에서 RG4_HG2보다 더 나은 모의수준을 보였다.

본 연구결과는 앙상블 기후변화 전망자료 산출을 위한 하나의 앙상블 멤버로서 의의가 있으며 향후 수문과 농업, 방재 등과 같은 남한에서의 상세 기후정보를 필요로 하는 응용 연구 분야에서 기초자료로 활용 될 수 있을 것이다. 그러나 여름철 강수의 과소모의와 봄철 및 겨울철 강수의 과대 모의에서 나타나듯이 본 연구의 RG4_EH6의 모의 강수 또한 많은 선행연구들(Im *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2008(b); Oh *et al.*, 2014)의 결과와 유사하게 자료 내에 계통적 오차가 존재함을 보였다. 그러나 이는 대부분의 지역기후모델들이 갖는 한계로 향후 편의 보정 또는 다중 모델 앙상블 기법 등의 후처리 방법 등을 통해 어느 정도 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구결과는 Hong *et al.*(2013)의 RG4_HG2 결과와 비교할 만한 모의수준을 보였으며, 기온모의에 있어서는 대부분에 계절에서 개선된 결과를 보였다. 현재 본 연구에서는 RCP4.5와 RCP8.5에 근거한 미래 32년(2019–2050)간의 미래기후 변화 전망 정보를 RG4_EH6를 이용하여 생산 중에 있으며 본 연구 결과를 바탕으로 현재 대비 미래 기후변화 전망 자료를 산출할 계획이다.

사사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 (재)기상기술개발관리단(CATER 2012-3081)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Amengual, A., Romero, R., Homar, V., Ramis, C., and Alonso, S., 2007, Impact of the lateral boundary conditions resolution on dynamical downscaling of precipitation in mediterranean spain, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-007-0242-0.
- Baek, H.J., Lee, J.H., Lee, H.S., Hyun, Y.K., Cho, C.H., Kwon, W.T., Marzin C., Gan S.Y., Kim, M.J., and Choi, D.H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(5), 603-618, doi:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Chen, M., Dickinson, R.E., Zeng, X., and Hahmann, A.N., 1996, Comparison of precipitation observed over the continental united states to that simulated by a climate model, *Journal of Climate*, 9, 2233-2249.
- Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., and Lucas-Picher, P., 2008, On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation, *Geophysical Research Letter*, 35, L20709, doi:10.1029/2008GL035694.
- Crueger, T., Stevens, B., and Brokopf, R., 2013, The Madden-Julian Oscillation in ECHAM6 and the Introduction of an Objective MJO Metric, *Journal of Climate*, 26, 3241-3257.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., and Mearns, L.O., 2000, Climate extreme: Observation, modeling, and impacts, *Science*, 289, doi:10.1126/science.289.5487.206.
- Emanuel, K.A., 1991, A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 2313-2335.
- Feng, J., Lee, D.K., Fu, C., Tang, J., Sato, Y., Kato, H., McGregor, J.L., and Mabuchi, K., 2011, Comparison of four ensemble methods combining

- regional climate simulations over Asia, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 111, 47-53.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M.B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G.T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U.U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T.A., Tawfik, A.B., Shalaby, A., Zakey, A.S., Steiner, A.L., Stordal, F., Sloan, L.C., and Brankovic, C., 2012, RegCM4: Model description and preliminary test over multiple CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7-29.
- Ho, C.-H., Lee, J.-Y., Ahn, M.-H., and Lee, H.-S., 2003, A sudden change in summer rainfall characteristics in Korea during the late-1970s, *International Journal of Climatology*, 23, 117-128.
- Holtzlag, 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., Oh, S.G., Suh, M.S., Lee, D.K., Ahn, J.B., and Kang, H.S., 2013, Future climate changes over North-East Asian region simulated by RegCM4 based on the RCP scenarios, *Journal of Climate Research*, 8(1), 27-44 (in Korean).
- Im, E.-S., Kwon, W.-T., Ahn, J.-B., and Giorgi, F., 2007, Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part 1: recent climate simulation(1971-2000), *Climate Dynamics*, 38, 759-780.
- IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, 688.
- 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.
- Kim, C., and Suh, M.S., 2009, Change-point and change pattern of precipitation characteristic using bayesian method over South Korea from 1954 to 2007, *Atmosphere*, 19(2), 199-211 (in Korean).
- Klein Tank, A.M.G., and Können, G.P., 2003, Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, *Journal of Climate*, 16, 3665-3680.
- KMA, 2012, Assessment of uncertainties in regional climate models and prediction of detailed regional climate change over Korea, Korea Meteorological Administration report, 440 (in Korean).
- Kwon, W.T., 2005, Current status and perspective of climate change sciences, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 325-336 (in Korean).
- 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(22), 29565-29577.
- Lee, J.W., Hong, S.Y., Chang, E.C., Suh, M.-S., and Kang, H.-S., 2013, Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP, *Climate Dynamic*, 42, 733-747, doi:10.1007/s00382-013-1841-6.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D.,

- Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J.P., and Zurek, M., 2008, *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25.
- Moufouma-Okia, W., and Rowell, D.P., 2009, Impact of soil moisture initialisation and lateral boundary condition on regional climate model simulations of the West African Monsoon, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0638-0.
- Myoung, J.S., and Suh, M.S., 2010, Characteristics by the cloud to ground lightning polarity occurred over South Korea, *Journal of Korean Earth Society*, 31(4), 335-347 (in Korean).
- Oh, S.G., and Suh, M.S., 2013, Projection of fine-scale climate changes over South Korea based on the RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) scenarios using RegCM4, *Journal of Climate Research*, 8, 1-17 (in Korean).
- Oh, S.G., and Suh, M.S., 2014, Development and evaluation of deterministic ensemble methods using pseudo-simulation data, *Journal of Applied Meteorological and Climatology*, in submitted.
- Oh, S.G., Park, J.H., Lee, S.H., and Suh, M.S., 2014, Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios, *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 119, 2913-2927.
- Oh, S.G., Suh, M.S., and Cha, D.H., 2013, Impact of lateral boundary conditions on precipitation and temperature extremes over South Korea in the CORDEX regional climate simulation using RegCM4, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 46(4), 497-509.
- 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(G1), doi: 10.1029/2007JG 000563.
- Park, C.Y., Moon, J.Y., Cha, E.J., Yun, W.T., and Choi, Y.G., 2008(a), Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(3), 234-336 (in Korean).
- Park, D.-S.-R., Ho, C.-H., Kim, J.-H., and Kim, H.-S., 2011, Strong landfall typhoons in Korea and Japan in a recent decade, *Journal of Geophysical Research*, 116, doi:10.1029/2010JD014801.
- Park E.-H., Hong S.-Y., and Kang, H.-S., 2008(b), Characteristics of an East-Asian summer monsoon climatology simulated by the RegCM3, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100, 139-158.
- Park, J.H., Oh, S.G., and Suh, M.S., 2013, Impacts of boundary conditions on the precipitation simulation of RegCM4 in the CORDEX East Asia domain, *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, doi:10.1029/2012JD 018371.
- Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., and Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate, *Journal of Climate*, 15, 1609-1625.
- Sidorenko, D., Rackow, T., Jung, T., Semmler, T., Barbi, D., Danilov, S., Dorn, W., Dethloff, K., Goessling, H.F., Handorf, D., Harig, S., Hiller, W., Juricke, S., Schroeter, J., Wang, Q., and Fieg, K., 2014, Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6-FESOM. Part 1: model formulation and mean climate, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-014-2290-6.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I.,

- Kinne, S., Kornblueh, L., Lohmann, U., Pincus, R., Reichler, T., and Roeckner, E., 2013, Atmospheric component of MPI-M Earth System Model: ECHAM6, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 146-172.
- Suh, M.S., Oh, S.G., 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, *Journal of Climate*, 25, 7067-7082.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- WMO website, cited 2009, Experts recommend ways coping with increasing droughts [Available online at http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_837_en.html].
- Yoon, H.J., Kim, H.J., and Yoon, I.H., 2006, On the study of the seasonality precipitation over South Korea, *Journal of Korean Earth Society*, 27(2), 149-158 (in Korean).

책임 편집: 박창용
영문 교열: 이은걸