CORDEX 동아시아 2단계 영역에서 RegCM4.0을 이용한 현재 기후(1981~2005년)에 대한 역학적 상세화

오석근 · 서명석

공주대학교 대기과학과

(2017년 2월 3일 접수, 2017년 3월 3일 수정, 2017년 3월 6일 게재 확정)

Dynamic Downscaling of Current Climate (1981-2005) over CORDEX-East Asia Phase 2 Domain using RegCM4.0

Seok-Geun Oh · Myoung-Seok Suh

Department of Atmospheric Science, Kongju National University

(Received 3 February 2017, Revised 3 March 2017, Accepted 6 March 2017)

Abstract : We conducted dynamic downscaling using the RegCM4.0 with 25 km of horizontal resolution over CORDEX-East Asia phase 2 domain for the current climate (1981-2005) and evaluated its performance using various reference datasets. The HadGEM2-AO with about 110 km of horizontal resolution provided by the Korea Meteorological Administration (KMA) was used as the forcing data of RegCM4.0. The RegCM4.0 generally well simulated the spatial patterns of temperature and precipitation by representing geographical and topographic conditions, compared with HadGEM2-AO. In particular, the warm biases in Mongolia, northern China, and Russia during summer and cold biases in Tibetan Plateau, Mongolia, northeast China, and northern India during winter were reduced. However, the systematic wet (dry) biases of summer precipitation in the most of model domain (South Korea) were still remained. It was associated with the southward shifting of low-level jet caused by the weakened North Western Pacific High in HadGEM2-AO. In South Korea, the RegCM4.0 showed a better performance than HadGEM2-AO in terms of the magnitude and spatial variability of both temperature and precipitation. In particular, the RegCM4.0 performed better in simulating the ratio of extreme precipitation over 100 mm/day to total precipitation than HadGEM2-AO. The RegCM4.0 reasonably reproduced the frequency and inter-annual variability of heavy rainfall, frost day, and tropical night over South Korea.

Key Words : CORDEX-East Asia, RegCM4.0, dynamic downscaling, performance, South Korea

주요어 : CORDEX 동아시아, RegCM4.0, 역학적 상세화, 모의수준, 남한

1. 서론

관측 및 모델링 연구를 통해 과학적 사실로 밝혀지고 있는 지구온난화와 관련하여 지역 별로 상이하게 나타나는 기온과 강수의 증감은 자연 및 사회경제에 큰 변화를 유발한다(Ono and Kazama, 2011; Zou and Zhou, 2013). 2014년에 발간된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서에서는 현재 진행 중인 기후변화가 인간 활동에 의한 것일 가능성이 95% 이상이라고 평가하고 있다(IPCC, 2014). 특히, IPCC 5차 평가보고서에서 이용된 4종의 미래 기후변화 시나리오(RCP: Representative Concentration Pathways) 중 온실기체 감축을 위한 인류의 최선의 노력을 가정한 RCP2.6 시나리오를 제외한 모든 시나리오(RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)에서 2100년에는 산업혁명 이후 보다 전 지구 평균 기온이 2°C 이상 상승할 가능성이 높다고 경고한 바 있다(IPCC, 2014). IPCC 5차 평가보고서의 성공적인 발간은 전 세계적으로 진행되었던 전구 및 지역기후 모델링 관련 국제 공동 연구들(CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CORDEX: COordinated Regional Downscaling EXperiment)의 성공적인 수행과 매우 밀접한 관련이 있다(Bao, 2012; Giorgi *et al.*, 2012; Zou and Zhou, 2013). 우리나라에서도 국가 표준 미래 기후시나리오 산출 및 IPCC 5차 평가보고서에 기여를 목적으로 HadGEM2-AO(Hadley Centre Global Environmental Model version 2 coupled with the Atmosphere-Ocean) 기후모델을 이용한 전 지구기후 모의정보 산출 연구를 수행하였고(Baek *et al.*, 2013), 더 나아가 HadGEM2-AO를 강제력으로 한 5개의 지역기후모델들을 이용하여 CORDEX 동아시아 지역에서의 현재 및 미래기후에 대한 역학적 상세화 연구들을 수행하였다(Lee *et al.*, 2014;

Oh *et al.*, 2014; Suh and Oh, 2015). 이러한 노력으로 현재는 동아시아 지역에 대한 50km 해상도의 약 70년(현재기후: 1981~2005년, RCP4.5와 8.5 시나리오 별 미래기후: 2006~2050년) 간의 기후정보를 서비스 중에 있다(<https://cordex-ea.climate.go.kr/>).

기후변화에 대한 과학적 이해와 고성능 컴퓨팅 기술의 발달은 전구 및 지역기후모델 분야의 급속한 발전에 기여하였고, 그 결과 대륙규모의 기후변화에 대해서는 상당한 정확도를 가지는 단계까지 도달하였다(Giorgi *et al.*, 2012; Baek *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2014). 그러나 좁은 지역의 상세 기후변화와 극한 기후현상에 대해서는 여전히 큰 불확실성을 가지고 있는 것이 현실이다(Giorgi, 1990; Gu *et al.*, 2012; Lee and Hong, 2014; Park, 2015; Suh *et al.*, 2016). 또한, 앞으로의 10~20년 후의 기후변화에 대한 전망은 100년 후와 같은 먼 미래의 기후변화 전망보다 상세하고 신뢰성 높은 정보를 요구하기 때문에 2022년 발간을 목표로 진행 중인 IPCC의 6차 평가보고서에서는 단기 기후변화전망의 정확도와 신뢰도를 높이기 위한 각국의 연구결과들을 포함할 계획이다(<http://wg1.ipcc.ch/AR6/AR6.html>).

이에 따라, 전 세계는 IPCC 6차 평가보고서를 위해 보다 개선된 국제공동연구사업 들을 추진 중에 있다. 그 중 전 지구 모델 상호 비교 프로젝트인 CMIP6는 현재 약 5년(2016~2020년)의 스케줄을 가지고 연구가 진행 중에 있으며(Eyring *et al.*, 2016), 3개의 과학적 질문들(How does the Earth system respond to forcing?, What are the origins and consequences of systematic model biases?, How can we assess future climate changes given climate variability, climate predictability, and uncertainties in scenarios?)을 근간으로 실험들이 구성되어 있다(Eyring *et al.*, 2016). 지역기후모델 분

야의 대표적인 국제 공동 연구인 CORDEX 또한 각 지역 별로 기존의 1단계 연구의 한계를 개선하기 위한 노력들이 진행되었다. 그 중 동아시아 지역의 주요 연구기관들은 기존의 광범위한 모의영역과 낮은 수평해상도로 인한 극한 기후현상 재현의 한계를 극복하기 위해 기존보다 상대적으로 작지만 고해상도의 모의영역을 공식적으로 채택하였다(NIMR, 2014; CORDEX, 2015; <http://www.cordex.org>). 그리고 극한기후 현상 재현 등과 같은 지역기후모델들의 추가적인 효용가치를 탐구하는 연구에 집중하고 있다(NIMR, 2014).

본 연구에서는 최근에 공개된 CORDEX 동아시아 2단계 모의영역에서의 현재 기후 25년(1981~2005년) 동안의 평균 및 극한 기후에 대한 역학적 상세화 기법의 모의수준을 평가하였다. 이를 위해, 기존의 1단계 연구에서 이용되었던 국립기상과학원의 전 지구 기후모델인 HadGEM2-AO 기후자료와 지역기후모델 RegCM4.0(Regional Climate Model version 4.0)을 이용하였다. 본 논문의 다음 절 부터는 본 연구의 지역기후모델인 RegCM4.0과 실험설계를 설명하고, 동아시아 및 남한에서의 평균 및 극한 기후에 대한 RegCM4.0의 모의수준 평가 결과를 제시하였다. 끝으로 본 연구의 결과를 요약하였다.

2. 모델 및 실험설계

본 연구에서는 HadGEM2-AO 기후모델의 모의 자료에 역학적 상세화를 적용하기 위해 지역기후 모델 RegCM4.0을 이용하였다. RegCM4.0은 정수 역학과정에 근거한 3차원 대기모델로 수평좌표계는 시그마 좌표계를, 연직좌표계는 Arakawa B 격자 좌표계를 이용한다. RegCM 모델은 1980년대 말에 초기모델인 RegCM1(Dickinson *et al.*,

1989; Giorgi, 1990)을 시작으로 모델의 역학 및 물리 방안들이 꾸준히 개발되고 개선된 지역기후 모델로서 현재까지 전 세계에서 널리 이용되고 있다(e.g., Gu *et al.*, 2012; Zou and Zhou, 2013; Suh *et al.*, 2016). RegCM4.0 모델의 보다 상세한 설명은 Giorgi *et al.*(2012)에 잘 나타나 있다.

Figure 1과 Table 1은 본 연구에서 설정한 모의 영역과 모의환경을 보여준다. 모의영역은 CORDEX 동아시아 2단계 연구에서 권고하는 영역으로 남북으로 말레이시아 북단에서 러시아까지, 동서방향으로 티벳고원 서쪽에서부터 서태평양까지 포함하고 있다. CORDEX 동아시아 1단계 연구에서 권고하는 영역에 비해 모의영역이 다소 작아졌지만 수평해상도가 25km로 향상되어 기존의 1단계 연구[수평해상도: 50km, 격자수: 200(Lon.) $\times$ 180(Lat.)] 보다 더 많은 수의 격자체계[396(Lon.) $\times$ 251(Lat.)]로 구성되어 있다. 연직으로는 23개 시그마 층으로 구성하였으며 모델의 최상층의 기압을 50hPa으로 설정하였다.

적운모수화방안(Emanuel, 1991), 지면 모델(CLM3.5; Community Land Model version 3.5, Oleson *et al.*, 2008), 행성경계층방안(Holtslag *et al.*, 1990), 그리고 복사전달방안(NCAR CCM3; National Center for Atmospheric Research Community Climate Model version 3, Kiehl *et al.*, 1996) 등의 모의환경은 기존의 CORDEX 동아시아 1단계 모의영역에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 평가한 Oh *et al.*(2011)의 연구를 참고하여 동일하게 설정하였다. RegCM4.0의 측면경계조건으로 기상청/국립기상과학원에서 제공한 400년 제어 적분된 HadGEM2-AO의 6시간 자료(수평해상도: 약 110km)를 이용하였다. 모의기간은 현재 27년(1979~2005년)이며, RegCM4.0의 안정화기간을 고려하여 초기 2년(1979~1980년)의 모의자료는 분석에서 제외하였다. 현재 기온과 강수에 대

Figure 1. Model domain and analysis subregions. (a) CORDEX-East Asia (Entire domain), (b) Northeast Asia (Latitude: 25°N~48°N, Longitude: 112°E~141°E), and (c) South Korea (Latitude: 33°N~38°N, Longitude: 125°E~130°E). Topography (m) is shaded.

Table 1. RegCM4.0's configuration used in this study.

Contents	Description
Domain	CORDEX-East Asia Phase II domain Central Lat. and Lon.: 34,40°N, 116,57°E 396 (Lon.)×251 (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	HadGEM2-AO (spinup period: 400 years)
Simulation periods	Jan, 1979 ~ Dec, 2005 (spinup period: 1979-1980)

한 RegCM4.0의 모의수준을 평가하기 위해 본 연구에서는 APHRODITE(Asian Precipitation High Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of water resources, Yatagai *et al.*, 2012) 기온 및 강수자료를 이용하였다. APHRODITE

(이하, APHR) 자료는 아시아 지역의 지상관측자료를 기반으로 산출된 격자형태의 관측자료로 다양한 수평해상도(25km, 50km 등)의 일(월)평균 자료를 제공하고 있다. 자료의 제공기간은 1950년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지이다.

그리고 관측 자료들 간의 불확실성 비교 및 본 연구의 상대적인 비교를 수행하기 위해 CORDEX 동아시아 1단계 연구에서 RegCM4.0의 기온, 강수 모의수준을 평가하는데 이용되었던(Oh *et al.*, 2011) CRU-TS(Climatic Research Unit Time-Series, Harris *et al.*, 2014) 3.21(정보 제공영역: 전 지구, 수평해상도: 50km, 시간해상도: 월평균, 제공기간: 1901. 01~2012. 12) 기온 및 강수 자료를 함께 이용하였다. 또한, 동아시아 지역의 하층 바람장과 혼합비 등의 대기장에 대한 분석을 위해 ERA-Interim 재분석 자료(Simmons *et al.*, 2006)를, 남한에서의 보다 신뢰성 있는 모의수준 평가를 위해 기상청에서 운용중인 59개 지상관측지점의 기온, 강수자료를 함께 이용하였다(http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp). 그리고 검증자료들과 함께 RegCM4.0의 모의수준의 상대적인 비교를 수행하기 위해 HadGEM2-AO의 일 평균기온, 최고/최저기온, 강수자료 또한 함께 이용하였다. 각 검증자료들은 본 연구의 분석 기간과 동일 기간(25년: 1981. 01~2005. 12)의 자료를 분석에 이용하였다. 이 때, 본 연구에서는 동일한 해상도의 APHR 자료를 기준검증자료로 선정하여 CRU 및 모델 자료들을 APHR의 격자로 내삽한 후 비교 분석하였다. RegCM4.0의 모의수준 분석은 모의영역 전체, 동북아시아 영역, 그리고 남한영역으로 세분화하여 분석을 수행하였다(Figure 1). 남한에서의 극한 기후 현상들(집중호우 일수, 폭염일수, 열대야 일수, 서리일수)에 대한 모의수준 평가는 이중선형보간법을 이용하여 격자 형태의 모의결과를 남한의 관측지점의 값으로 재산출한 후 수행하였으며, 이때 기온의 경우 격자점과 관측점간의 고도 차에 대해 고도보정($\pm 0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) 또한 함께 수행하였다.

3. 연구 결과

1) 기온과 강수의 공간분포

Figures 2와 3은 현재 25년(1981~2005년)의 여름(JJA)과 겨울(DJF) 평균 기온의 공간분포에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 APHRDITE, CRU 기온자료와 함께 나타낸 것이다. 이때, RegCM4.0의 모의수준에 대한 상대적인 비교를 위해 HadGEM2-AO의 결과도 함께 제시하였다(Figures 2d, 2e, 2f). 육지 지역의 정보만을 제공하는 두 검증자료들의 특성을 고려하여 전구 및 지역기후모의 결과 또한 육지지역의 결과만을 제시하였다. 전반적으로 동아시아 대륙의 여름과 겨울의 기온분포는 고위도로 갈수록, 티벳고원과 같은 높은 지형으로 갈수록 기온이 낮게 분포하는 지형 및 지리적 위치에 따른 특징이 잘 나타난다. 두 검증자료는 이러한 기온의 공간 분포특성을 유사하게 보여주고 있지만 티벳고원과 같이 고도가 높은 지형에서 약 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 정도로 큰 차이를 보여주고 있다. 즉, CRU가 APHRDITE보다 티벳고원 남부지역에서는 약 $-2\sim-5^{\circ}\text{C}$ 낮게, 티벳고원 북부 일부 지역에서 약 $+2\sim+5^{\circ}\text{C}$ 높게 나타내고 있으며, 이러한 특징은 여름과 겨울 모두에서 나타나고 있다. 이러한 검증자료간의 차이가 나타나는 원인은 두 자료의 수평해상도 차이(APHRDITE: 25km, CRU: 50km), 그리고 검증자료 산출과정에서 이용되는 자료 및 기법의 차이 등을 들 수 있다(Bhaskaran *et al.*, 1996; Bergant *et al.*, 2007). 상대적으로 관측자료가 부족한 티벳고원 지역의 경우 자료의 수평해상도와 이용된 지상관측 자료를 격자화 하는 내삽 기법간의 차이가 두 검증자료 간의 차이를 유도할 수 있다(Bergant *et al.*, 2007; Andermann *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2015). 그러나 상대적으로 지형이 낮고 관측자료가 많은 대부분 지역과 동북아시아 및 남한지역에서의 두 검증자료간의 차이는 $\pm 0.5^{\circ}$

Figure 2. Spatial distribution of observed and simulated surface air temperature (°C) during summer (JJA) for the current 25 years (1981-2005) period. (a) APHRODITE (APHR) data, (b) CRU data, (c) difference between CRU and APHR, (d) HadGEM2-AO (HG2-AO), (e) difference between HG2-AO and CRU, (f) difference between HG2-AO and APHR, (g) RegCM4.0, (h) difference between RegCM4.0 and CRU, and (i) difference between RegCM4.0 and APHR.

C 사이로 매우 유사하게 나타나고 있다. 전반적으로 전지구기후모델인 HadGEM2-AO의 여름철 기온 모의는 티벳고원 지역을 제외한 대부분의 지역에서 약 $+0.2 \sim +4^{\circ}\text{C}$ 정도 기온을 높게 모의하는 특성을 보이고 있으며 상대적으로 몽골, 북중국, 러시아 등 모의영역 북부 지역에서 기온의 양의 편차가 뚜렷하게 나타나고 있다. 반면, RegCM4.0은 HadGEM2-AO와 다르게 검증자료에서 나타

나는 지형에 따른 기온의 분포형태를 보다 상세하게 모의하고 있으며(Figure 2g), 모의영역 북부 지역에서 나타났던 양의 편차를 약화시키고 보다 검증자료와 유사한 기온분포를 보이고 있다(Figures 2h, 2i). 그러나 인도를 제외한 모의영역 남부 지역에서 약 -2°C 이상의 음의 편차를 보이고 있으며, 티벳고원 지역에서 -6°C 이상의 상대적으로 강한 음의 편차를 보이고 있다. 이러한 티벳고원 지역

Figure 3. Same as Figure 2 except for winter (DJF).

에서 나타나는 지역기후모델의 음의 편의는 오히려 이 지역에서의 부족한 관측정보로부터 산출된 검증자료가 갖는 불확실성이 하나의 원인으로 작용할 수 있다(Andermann *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2015). 따라서 티벳고원 지역에서의 지역기후 정보의 모의수준 평가 시에는 검증자료가 갖는 불확실성을 함께 고려할 필요가 있다.

겨울철 기온의 경우, HadGEM2-AO는 일부 지역(인도 남부, 한반도, 일본, 러시아 지역 등)을 제외한 대부분의 지역에서 약 -2°C 이상의 음의 편의가 크게 나타나고 있다. 특히, 티벳고원 북

부 지역에서 약 -8°C 이상의 음의 편의가 크게 나타나고 있다(Figures 3e, 3f). 반면, RegCM4.0은 HadGEM2-AO에서 나타났던 티벳고원 북부 및 몽골, 중국 북동부지역, 인도 북부 지역에서의 음의 편의를 약화시키고 검증자료들과 보다 유사한 기온 값을 모의하고 있다. 그러나 여전히 중국 남부, 인도차이나 반도 및 티벳고원 지역에서는 약 $-2\sim-6^{\circ}\text{C}$ 정도의 음의 편의가 나타나고 있으며, HadGEM2-AO에서 나타났던 러시아 지역에서의 양의 편의가 더 강화되어 몽골 및 중국 북부 지역까지 나타나고 있다. 그 결과 겨울철 남북 간

의 온도경도가 상대적으로 약하게 모의하고 있음을 알 수 있다. 겨울철 고위도 지역에서 나타난 기온의 양의 편의는 CORDEX 동아시아 1단계 연구에서 RegCM4.0을 이용한 Oh *et al.* (2011)의 연구와 동일하며, 북동유럽지역의 겨울철에 양의 편의를 보여주었던 Güttler(2011)의 연구결과와도 유사하다. 특히, Güttler(2011)은 겨울철 고위도 지역에서 나타나는 기온의 양의 편의가 RegCM4.0의 하층 구름 모의와 행성 경계층내의 난류 혼합에 대한 임계값 조정으로 약 20~50% 정도 지역에 따라 약화시킬 수 있음을 보였다. 따라서 향후 CORDEX

동아시아 지역에서 나타나는 RegCM4.0의 겨울철 양의 편의를 약화시키기 위한 후속 연구가 수행될 필요가 있다.

Figures 4와 5는 현재 25년(1981~2005년) 평균 여름(JJA)과 겨울(DJF) 동안의 강수에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 APHRODITE, CRU 강수자료와 함께 나타낸 것이다. 기온의 결과와 동일하게 HadGEM2-AO의 강수 모의자료를 함께 제시하였으며, 검증자료의 특성을 고려하여 육지 지역의 결과만을 제시하였다. 전반적으로 두 검증 자료는 동아시아 여름 및 겨울몬순에 의한 강수의

Figure 4. Same as Figure 2 except for summer (JJA) precipitation (mm/day).

공간분포 특성을 잘 나타내고 있다. 그러나 상대적으로 강수가 적은 겨울철의 경우 두 검증자료간의 강수량의 크기가 매우 유사하지만, 여름철 강수의 경우 두 검증자료 간에 뚜렷한 차이가 나타난다. 대체적으로 CRU 강수자료가 APHRODITE 자료보다 약 +1~+4mm/day 정도 강수를 더 많이 나타내고 있으며, 특히 인도북부, 히말라야 부근, 인도차이나 반도 지역과 같이 여름철 몬순지역에서 더 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 현재 활용 가능한 강수자료들의 특성을 분석한 선행 연구들은 APHRODITE 강수자료가 지상 관측지점

의 강수자료, 그리고 GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)와 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)와 같은 다른 강수 관측 자료들보다 강수를 약 19.7% 정도 과소하게 나타내는 특성을 보임을 제시하였다(Ono and Kazama, 2011; Nasrabadi *et al.*, 2013; Tan *et al.*, 2015). 특히, Ono and Kazama(2011)은 여름철 아시아 몬순 지역에서의 극한강수(>50mm/day)를 APHRODITE가 지상관측자료보다 약 34% 정도 과소하게 나타냄을 보여 편의보정이 필요함을 제시하였다. 선행 연구들의 결과와 유사하게 APHRODITE 강수자

Figure 5. Same as Figure 2 except for winter (DJF) precipitation (mm/day).

료는 CRU 강수자료보다 여름철 몬순지역에서의 강수를 과소하게 나타내는 특성을 보였다(Figure 4c). 이러한 점을 고려하여 전구 및 지역기후모델의 모의수준을 평가하면, HadGEM2-AO는 인도 지역과 인도차이나 반도 동부지역, 그리고 한반도 및 일본지역에서 약 $-2 \sim -4 \text{ mm/day}$ 정도 강수를 적게, 반면 티벳고원 및 중국 남부지역에서 약 $+4 \sim +6 \text{ mm/day}$ 정도 강수를 많게 모의하는 특성을 보였다. 그리고 이러한 특성은 RegCM4.0의 강수모의에서도 동일하게 나타났다. 그러나 상대적으로 티벳고원과 중국 남부지역에서의 강수 과다모의가 약화되어 두 검증자료들과 보다 유사하게 강수량을 모의하였다. 또한, 한반도와 일본지역에서의 강수의 과소모의도 HadGEM2-AO보다 약화되어 더 나은 모의성능을 보였다. 그러나 여전히 인도지역의 강수는 HadGEM2-AO와 유사하게 $-2 \sim -4 \text{ mm/day}$ 정도 검증자료들 보다 적게 모의하였다.

반면 겨울철 강수의 경우, 전반적으로 HadGEM2-AO와 RegCM4.0 모두 두 검증자료에서 나타나는 강수대의 위치를 비교적 잘 모의하였다. 즉, 일본과 남한, 그리고 중국 남부지역에 이르는 겨울 몬순과 관련된 강수대의 위치를 두 검증자료들과 유사하게 모의하고 있으며, 히말라야 부근에서 나타나는 약 $1 \sim 3 \text{ mm/day}$ 정도의 강수 현상 또한 비교적 잘 재현하였다. 그러나 HadGEM2-AO의 경우 두 검증자료들 보다 일본, 중국 남부, 그리고 히말라야 지역에서의 강수를 약 $+0.3 \sim +1.5 \text{ mm/day}$ 많게 모의하는 특성을 보였는데, 이러한 겨울철 강수의 과다모의 특성은 RegCM4.0에서도 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히, RegCM4.0은 인도와 인도차이나 반도 서부지역을 제외한 대부분의 동아시아 지역에서의 겨울철 강수를 두 검증자료들 보다 약 $+0.3 \sim +1.5 \text{ mm/day}$ 많게 모의하는 특성을 보였다. 그 결과, 상대적으

로 RegCM4.0은 한반도를 비롯한 대부분의 동아시아 내륙지역에서의 겨울철 강수를 HadGEM2-AO보다도 약 $+0.3 \text{ mm/day}$ 정도 더 많이 모의하는 특성을 보였다.

2) 기온과 강수의 계절변동 및 통계분석

Figure 6은 RegCM4.0이 모의한 각 분석영역에서의 기온과 강수의 계절변동을 검증자료 및 HadGEM2-AO의 모의결과와 함께 나타낸 것이다. 여기서 남한의 경우 보다 현실적인 비교를 위해 59개 지상관측지점(이하 KMA)의 평균 기온과 강수도 함께 제시하였다. 전반적으로 분석영역에 관계없이 기온의 계절변동은 검증자료들 간에 매우 유사하게 나타나고 있다. 그러나 남한의 겨울철 기온은 KMA의 결과가 다른 두 검증자료들 보다 약 $+1 \sim 2^\circ\text{C}$ 정도 더 높게 나타나고 있다. 전반적으로 전구기후모델인 HadGEM2-AO는 검증자료들과 유사하게 기온의 계절변동을 잘 모의하고 있지만, 동아시아 전 지역과 동북아시아 지역에서의 여름철 기온을 약 $+1 \sim +3^\circ\text{C}$ 정도 높게, 겨울철 기온을 약 $-3 \sim -5^\circ\text{C}$ 정도 낮게 모의하여 기온의 계절변동성을 상대적으로 더 크게 모의하는 특성을 보였다(Figures 6a, 6c). 반면, RegCM4.0은 대부분의 계절에서 약 $-0.5 \sim -2^\circ\text{C}$ 정도 기온을 낮게 모의하지만 검증자료들과 유사한 계절변동성을 모의하고 있다. 남한의 경우, KMA 결과와 비교하여 HadGEM2-AO는 1월부터 8월까지의 기온을 약 $-0.5 \sim -1.5^\circ\text{C}$ 정도 낮게, 9월부터 12월까지의 $+1.4 \sim +1.6^\circ\text{C}$ 정도 높게 모의하여 계절에 따라 모의성능이 변화함을 보였고, 관측보다 계절변동성 또한 작게 모의하였다. 반면, RegCM4.0은 모든 계절에 대해 계통적으로 약 $-1.3 \sim -2.5^\circ\text{C}$ 정도 기온을 낮게 모의하는 특성을 보여 계절에 따른 모의성능이 일정하고 계절변동성 또한 관측과 유사하게 모의하였다(Figure 6e). 앞의 공간

Figure 6. Seasonal variation of surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and precipitation (mm/day) for the current 25 years (1981-2005) period in APHRODITE (APHR), CRU, HadGEM2-AO (HG2-AO), and RegCM4.0. The observed temperature and precipitation by Korea Meteorological Administration (KMA) for South Korea are also presented.

분포에서 제시했듯이 강수에 대한 계절변동은 검증자료들 간의 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 특히, 여름철 강수에서 APHRODITE가 CRU보다 강수를 더 적게 나타내는 특성을 보이고 있다. 남한의 경우 전반적으로 CRU와 APHRODITE 모두 지상관측자료인 KMA 자료보다 더 적은 여름철 강

수를 보이고 있다. 이는 앞에서 언급했듯이, CRU와 APHRODITE 자료 모두 지상관측자료를 격자화하는 과정에서 극한 강수들이 평활화되면서 나타난 결과로 판단된다(Ono and Kazama, 2011; Nasrabadi *et al.*, 2013; Tan *et al.*, 2015). 전반적으로 전구 및 지역기후모델은 여름에 강수가 최대가

되고, 겨울에 강수가 최저가 되는 계절변동을 비교적 잘 모의하고 있다. HadGEM2-AO는 동아시아 전 지역과 동북아시아 지역에서의 강수를 상대적으로 과다하게 모의하는 특성을 보였으며 이러한 특성은 RegCM4.0에서도 유사하게 나타났다. 그러나 RegCM4.0은 동아시아 및 동북아시아 여름철 강수모의에서 HadGEM2-AO보다 상대적으로 강수를 더 적게 모의하면서 두 검증자료들과 비교적 유사한 여름철 강수량을 모의하였다. 반면, 남한의 경우 KMA 자료와 비교하여 전구 및 지역 기후모델 모두 여름철 강수를 약 $-2 \sim -5 \text{ mm/day}$ 정도 과소하게 모의하는 특성을 보였다. 그러나 HadGEM2-AO와 비교하여 RegCM4.0은 남한의 여름철 강수량을 더 많이 모의하여 상대적으로 더

나은 모의성능을 보였다.

전구 및 지역기후모델의 각 계절별 모의수준을 정량적으로 평가하기 위해 각 분석영역 별로 통계분석을 수행하였다(Table 2). 기온의 경우 계절 및 분석영역에 따라 다소 차이는 있지만 전반적으로 RegCM4.0이 HadGEM2-AO보다 RMSE(Root Mean Square Error)와 공간 상관계수(Spatial correlation) 측면에서 더 나은 모의성능을 보였다. 즉, 동아시아 전 지역의 경우 모든 계절에 대해 RegCM4.0의 RMSE(봄: 3.78°C , 여름: 2.58°C , 가을: 2.70°C , 겨울: 3.71°C)가 HadGEM2-AO의 RMSE(봄: 3.94°C , 여름: 2.71°C , 가을: 3.08°C , 겨울: 5.54°C)보다 더 작고 더 높은 공간 상관계수(RegCM4.0: $0.96 \sim 0.98$, HadGEM2-AO: $0.92 \sim$

Table 2. Statistical evaluation of surface air temperature ($^\circ\text{C}$) and precipitation (mm/day) for each sub-region in CORDEX-East Asia phase 2 domain simulated by RegCM4.0 driven by HadGEM2-AO against APHRODITE data for 25 years (1981-2005). The evaluation results of HadGEM2-AO (GCM) are also presented. The values in bold indicate the better performance of RegCM4.0 than that of HadGEM2-AO.

Variables (unit)	Regions	Eval.	Spring		Summer		Autumn		Winter	
			GCM	RegCM4.0	GCM	RegCM4.0	GCM	RegCM4.0	GCM	RegCM4.0
Temp. ($^\circ\text{C}$)	Entire domain	Bias	-1.30	-2.05	0.48	-0.76	-1.23	-1.26	-3.66	-1.14
		RMSE	3.94	3.78	2.71	2.58	3.08	2.70	5.54	3.71
		Spatial Corr.	0.95	0.98	0.92	0.96	0.96	0.98	0.97	0.98
	North-east Asia	Bias	0.18	-2.27	1.28	-1.54	-0.13	-1.25	-2.52	-0.19
		RMSE	1.97	3.35	2.09	1.94	1.90	1.67	3.81	2.15
		Spatial Corr.	0.95	0.98	0.89	0.95	0.96	0.99	0.97	0.99
	South Korea	Bias	-0.46	-2.61	-1.49	-2.44	1.62	-1.74	1.42	-1.37
		RMSE	1.65	3.58	2.44	3.02	2.24	2.17	2.08	2.04
		Spatial Corr.	0.31	0.81	-0.05	0.85	0.70	0.96	0.85	0.97
Precip. (mm/day)	Entire domain	Bias	0.86	0.53	0.85	0.28	0.25	0.27	0.06	0.10
		RMSE	1.78	1.74	3.09	3.04	1.34	1.96	0.83	1.15
		Spatial Corr.	0.75	0.69	0.70	0.71	0.77	0.66	0.70	0.61
	North-east Asia	Bias	0.94	0.57	0.13	-0.17	0.11	0.32	0.10	0.14
		RMSE	1.51	0.96	1.30	1.50	0.83	0.94	1.00	0.95
		Spatial Corr.	0.96	0.94	0.69	0.73	0.85	0.84	0.84	0.84
	South Korea	Bias	0.80	0.15	-2.38	-1.52	-0.60	-0.07	0.06	0.15
		RMSE	0.87	0.65	2.82	2.14	1.21	1.17	0.56	0.73
		Spatial Corr.	0.91	0.95	0.32	0.44	0.44	0.55	0.70	0.74

0.97)를 보여 기온의 물리량 및 공간 분포 모두에서 더 나은 모의성능을 보였다. 동북아시아 지역의 경우 봄철의 RMSE를 제외한 모든 계절에 대해 더 작은 RMSE와 더 높은 공간상관계수를 보여 RegCM4.0의 모의수준이 상대적으로 더 우수함을 알 수 있다. 특히, 좁고 복잡한 산악지형으로 구성된 남한의 경우 HadGEM2-AO는 봄철과 여름철 기온의 공간 상관계수를 각각 0.31과 -0.05로 나타내 남한에서의 기온의 공간 분포 특성을 적절히 모의하지 못하였다. 그러나 고해상도 RegCM4.0은 봄철과 여름철 모두 0.81 이상의 높은 공간 상관계수를 보여 남한에서의 지형에 의한 기온의 공간분포 특성을 상대적으로 잘 모의함을 알 수 있다.

반면, 강수의 경우 분석영역 및 계절에 따른 모의수준 차이가 상이하게 나타났다. 즉, 동아시아 전 지역의 경우 RegCM4.0이 HadGEM2-AO보다 봄/여름철 강수모의에서 더 적은 편의(Bias)와 RMSE, 그리고 더 높은 공간 상관계수를 보여 상대적으로 나은 모의수준을 보였지만, 가을/겨울철 강수 모의에서는 오히려 더 큰 편의와 RMSE, 더 낮은 공간 상관계수를 보여 상대적으로 더 낮은 모의수준을 보였다. 동북아시아 지역의 경우 봄철을 제외하고 대체적으로 HadGEM2-AO가 RegCM4.0보다 근소하게 더 나은 모의수준을 보이지만 이들의 차이는 매우 적게 나타났다(Bias: 0.02~0.20mm/day, RMSE: 0.05~0.20mm/day, Spatial corr.: 0.01~0.02). 반면, 남한의 경우 겨울철을 제외한 모든 계절에서의 강수량(Bias, RMSE) 및 공간분포 특성(Spatial corr.) 모의에서 RegCM4.0이 HadGEM2-AO보다 더 나은 모의성능을 보였다. 위의 결과를 종합해 보면 RegCM4.0은 기온과 강수 모의에서 HadGEM2-AO보다 물리량의 크기 및 공간분포 특성 모의에서 상대적으로 더 우수한 모의성능을 보이며, 특히 좁고 산악

지형으로 구성된 남한에서의 기온, 강수모의에서도 더 나은 모의성능을 보임을 알 수 있다.

3) 하층 대기 기후요소들의 공간분포

Figures 7과 8은 각각 현재 25년(1981~2005년) 평균 여름(JJA)과 겨울(DJF)동안의 850hPa의 하층 바람장과 혼합비의 분포를 나타낸 것이다. 이때, 모델들의 모의수준 평가를 위해 재분석 자료인 ERA-Interim(이하 ERA) 자료를 이용하였다. 동아시아 여름몬순의 주된 특징은 대륙과 해양 간의 열적 차이에 의해 동아시아 대륙에는 저기압이, 서태평양 부근에는 북서태평양고기압이 위치하면서 인도에서부터 남중국, 남한, 일본에 이어지는 남서풍 계열의 바람이 우세하게 나타나는 것이다(e.g., Yihui and Chan, 2005). 그리고 이때 저위도의 고온다습한 공기의 유입이 함께 이루어지면서 많은 강수가 발생된다. 전반적으로 ERA 재분석 자료는 동아시아 여름몬순의 대표적인 북서태평양고기압의 위치와 이에 따른 하층바람의 변화를 잘 나타내고 있다(Figure 7a). 특히, 몬순과 관련된 하층바람에 직접적인 영향을 받는 인도, 인도차이나반도, 남중국, 남한 및 일본 지역에 많은 수증기가 존재함을 알 수 있다. 전반적으로 HadGEM2-AO는 ERA 재분석 자료에서 나타나는 동아시아 여름몬순과 관련된 하층바람 및 수증기의 분포를 비교적 잘 모의하고 있다. 그러나 북서태평양고기압의 확장을 상대적으로 약하게 모의하면서 남중국으로 들어오는 남서풍을 상대적으로 동중국해 방향으로 치우치게 모의하면서 남한과 일본은 남서풍보다는 약한 남풍계열의 바람이 더 우세하도록 모의하였다(Figure 7b). 그 결과 상대적으로 동북아시아 지역으로의 수증기 유입이 약화되면서 ERA 재분석 자료보다 더 적은 수증기의 분포가 모의되었다(Figure 7e). 이러한 HadGEM2-AO의 모의특성은 RegCM4.0의 하층 바람 및 수증기

Figure 7. Spatial distribution of wind field (m/s) and moisture (g/kg) at 850hPa during summer (JJA) for the current 25 years (1981-2005) period. (a) ERA-Interim (ERA), (b) HadGEM2-AO (HG2-AO), (c) RegCM4.0, (d) difference between RegCM4.0 and HG2-AO, (e) difference between HG2-AO and ERA, (f) difference between RegCM4.0 and ERA.

모의에 영향을 주면서 RegCM4.0 또한 유사한 모의수준을 보였다(Figure 7f). 특히, HadGEM2-AO의 모의특성은 RegCM4.0를 이용한 역학적 상세화 과정 동안에 더 강화되면서 상대적으로 더 적은 양의 수증기가 동아시아 대륙에서 모의되었다. 그 결과 Figure 6에서 나타난 것처럼 동아시아 및 동북아시아 지역의 여름강수 모의에서 RegCM4.0이 HadGEM2-AO보다 더 적게 강수를 모의한 것으로 판단된다.

동아시아 겨울몬순은 동아시아 대륙에서는 시베리아 고기압이, 북서태평양에서는 알류션 저기압이 형성되어 대륙에서 북서태평양으로 향하는 북서 계절풍이 발달하고 이에 따라 동북아시아 지역에서의 한랭 효과가 나타나는 것이 주된 특징이다(Figure 8a). 전반적으로 HadGEM2-AO는 ERA

재분석 자료에서 나타나는 하층바람장의 패턴과 수증기의 분포를 유사하게 모의하고 있다. 그러나 상대적으로 동아시아 대륙에서 수증기를 ERA보다 더 적게 모의하는 특성을 보였고 이러한 특성은 RegCM4.0에서도 나타났다. 또한, 상대적으로 RegCM4.0은 한반도를 비롯한 동북아시아 지역, 그리고 몽골 등 동아시아 대륙의 고위도 지역에서의 수증기를 HadGEM2-AO보다 더 많이 모의하는 특성을 보였다. 그 결과 남한을 포함한 동아시아 지역에서의 겨울철 강수를 RegCM4.0이 HadGEM2-AO보다 더 많이 모의한 것으로 판단된다(Figure 6).

4) 여름철 강수강도 별 강수량

Figure 9은 각 분석영역에 대해 강수강도 별 강

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

수량 비율에 대한 모의수준을 나타낸 것이다. 이 결과는 APHRODITE의 일 강수량과 전구 및 지역기후모델이 모의한 일 강수량을 이용하여 계산하였으며, 남한의 경우 지상관측지점의 결과도 함께 나타내었다. 동아시아 전 지역 및 동북아시아 지역을 살펴보면, HadGEM2-AO와 RegCM4.0 모두 10mm/day 이하의 약한 강수 모의에서 APHRODITE와 유사한 강수량의 비율을 모의하고 있다. 반면, 50mm/day 이상의 강한 강수로 갈수록 RegCM4.0이 APHRODITE와 HadGEM2-AO보다 더 많은 강수량의 비율을 모의하고 있음을 알 수 있다(Figures 9a, 9b). 그러나 APHRODITE의 강수가 강한 강수보다 약한 강수에 더 많은 분포를 보인다는 선행연구들(Ono and Kazama, 2011; Nasrabadi *et al.*, 2013; Tan *et al.*, 2015)의 연구 결과를 고려했을 때, 강한 강수 구간에서 보이는 RegCM4.0의 모의결과가 보다 현실적임을 짐

작 할 수 있다. 그 예로, 남한의 지상관측자료인 KMA의 자료와 함께 비교한 남한에서의 강수강도 별 강수량의 비율결과를 살펴보면(Figure 9c), APHRODITE는 KMA의 비해 25mm/day 이하의 약한 강수를 약 30% 정도 더 많이, 50mm/day 이상의 강한강수는 약 30% 정도 더 적게 나타내는 특성을 보이고 있다.

특히, KMA의 경우 100mm/day 이상의 극한 강수량의 비율을 약 19.6%로 나타냈으나 APHRODITE는 약 7.3 %로 나타나 APHRODITE 강수자료가 남한에서의 극한 강수 현상을 잘 표현하지 못함을 알 수 있다. 많은 연구들(e.g., Oh and Suh, 2013; Lee *et al.*, 2014)이 제시한 것처럼 본 연구에서의 전구 및 지역기후모델들 또한 전반적으로 약한 강수는 더 많이, 강한 강수는 더 적게 모의하는 특성을 보이고 있다(Figure 9c). 그러나 지역기후모델 RegCM4.0은 100mm/day 이상의 극한 강수

Figure 9. Fraction distribution of precipitation amount according to precipitation intensity (mm/day) over CORDEX-East Asia (Entire domain) and sub-regions. The result from observed precipitation by Korea Meteorological Administration (KMA) is also presented in South Korea.

량의 비율을 12.3%로 모의하여 KMA 자료와 비교하여 HadGEM2-AO(극한강수량 비율: 3.2%) 보다 매우 높은 모의수준을 보이고 있다. 이는 비록 광범위한 CORDEX 동아시아 영역이지만 25km 수평해상도의 RegCM4.0를 이용하여 HadGEM2-AO 기후모델의 역학적 상세화를 수행하면 남한에서의 극한 강수를 비교적 잘 재현할 수 있음을 제시한다.

5) 남한의 여름철 강수의 일변동

Figure 10은 남한에서의 여름철 강수의 일 변동에 대한 RegCM4.0과 HadGEM2-AO의 결과를 KMA 관측과 함께 나타낸 것이다. 그리고 RegCM4.0이 모의한 총 강수 대비 대류성 강수비율의 일 변동 또한 함께 나타내었다. 많은 선행연구들이 밝힌 것처럼 남한의 강수현상은 주로 여름철(JJA)에 집중되며, 발생 메커니즘은 크게 동아시아 여름몬순과 관련된 장마전선(6~7월 중순)에 의한 강수, 강한 일사에 의한 중규모 대류계 발생에 따른 대류성 강수(7월 중순~8월 말), 그리고 경년 변동이 매우 크지만 우리나라와 중국 및 일본 등을 통과하는 태풍의 직/간접 영향에 의한 강수로 나눌 수 있다(e.g., Park *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2010). 전반적으로 HadGEM2-AO와 RegCM4.0은 장마전선과 관련된 강수발생이 주로 나타나는

6월과 7월 중순까지의 강수는 비교적 관측과 유사한 강수량을 모의하고 있지만 중규모 대류계와 태풍의 직/간접적인 영향에 의한 강수발생이 주로 나타나는 7월 중순 이후부터 모의수준이 현저히 낮아지는 특성을 보이고 있다. 이는 전구 및 지역기후모델 모두 남한의 여름철 후반부 강수의 상당부분을 유발하는 태풍과 수~수십 km 크기로 짧은 시간(약 3~6시간)에 발생하는 국지성 호우를 현실적으로 모의하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다(e.g., Oh and Suh, 2013; Jin *et al.*, 2016). 그러나 상대적으로 정교화된 적은 모수화 방안을 이용하는 고해상도 RegCM4.0은 HadGEM2-AO보다 7월 중순 이후의 남한의 강수량을 상대적으로 더 많이 모의하는 특성을 보이고 있다. 특히, 흥미로운 것은 남한의 여름철 강수 발생 메커니즘이 장마전선에서 중규모 대류계에 의한 대류성 강수 발생 메커니즘으로 전환되는 7월 중순 이후부터 RegCM4.0의 대류성 강수의 비중이 점차 높아지는 것이며, 8월에는 대류성 강수의 비중이 약 60% 이상으로 높게 나타나고 있다는 것이다. 이는 이 기간 동안 모델 내에서 적은 모수화 방안에 의한 아격자 규모의 대류성 강수가 보다 활발히 발생되는 것을 의미한다. 따라서 RegCM4.0이 HadGEM2-AO보다 여름철 하층 수증기의 이류를 상대적으로 약하게 모의함에도 불구하고(Figure

Figure 10. Time series of 25 years (1981-2005) mean observed (KMA) and simulated (HadGEM2-AO: HG2-AO, RegCM4.0) summer (JJA) daily precipitation (mm/day) in South Korea. Convective Precipitation Ratio (CPR) to the simulated total precipitation is given by dotted line. To reduce strong daily variation, a 5-day running mean is applied to the data.

7d) 남한에서의 7~8월 강수를 더 많이 모의한 것 (Figure 6)은 하층 가열과 관련된 대류 불안정에 의해 국지적으로 발생하는 강수 특성을 고해상도의 RegCM4.0이 저해상도의 HadGEM2-AO보다 현실적으로 모의하였기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 이는 Figure 9c에 나타난 것처럼 남한에서의 극한강수 모의에서 RegCM4.0이 HadGEM2-AO 보더 더 나은 모의수준을 보인 것과도 연결된다.

6) 남한에서의 극한 기후현상

남한의 KMA 관측 자료를 이용하여 기온과 강수와 관련된 극한 기후현상들에 대한 모의수준을 분석해 보았다. Figure 11은 현재 25년(1981~2005년) 동안의 남한에서의 극한기후 현상들(집중호우, 폭염, 열대야, 서리일수)의 각 년도 별 평균 발생빈도와 경년변동을 나타낸 것이다. 그리고 현재 25년에 대한 각 극한 기후현상들의 평균 및 표준편차를 Table 3에 정리하였다. 극한 기후현상들

의 정의는 기상청 공식 홈페이지(<http://web.kma.go.kr/communication/encyclopedia/list.jsp>)에서 제시한 임계값들을 이용하였으며, KMA자료와의 비교를 위해 이중선형보간법을 이용하여 격자형태의 모델자료를 관측지점의 위경도 값으로 재 산출한 후 분석을 수행하였다. 집중호우(일 강수량 ≥ 80 mm/day)의 경우, 전반적으로 전구 및 지역기후모델은 KMA 자료보다 모든 분석기간 동안의 집중호우 일수를 상대적으로 적게 모의하고 있다.

현재 25년(1981~2005년) 평균으로 보았을 때, KMA 자료는 2.43 ± 0.85 회, HadGEM2-AO는 0.53 ± 0.40 회, RegCM4.0은 0.94 ± 0.73 회 집중호우가 발생하여, RegCM4.0이 비록 KMA보다 집중호우 일수와 경년변동성을 작게 모의하지만 HadGEM2-AO와 비교하여 상대적으로 더 나은 모의수준을 보임을 알 수 있다(Figure 11a, Table 3). 폭염일수(일 최저기온 $\geq 32^\circ\text{C}$)의 경우 KMA는 약 16.29 ± 8.27 회의 폭염 발생일 및 경년변동성

Figure 11. Inter-annual variation of extreme events (heavy rainfall, hot day, tropical night, frost day) in South Korea.

을 보이는 반면, 전구 및 지역기후모델은 이와 같은 남한에서의 폭염일수의 발생빈도 및 변동특성을 잘 모의하지 못하였다(HadGEM2-AO: 1.1 ± 1.1 회, RegCM4.0: 1.01 ± 1.07 회). 이는 계절변동 결과에서 나타났듯이, 남한의 여름철 일평균 기온에 대한 음의 편의 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 특히, 그림으로 제시하지는 않았지만 여름철 일 최고기온 모의에서도 HadGEM2-AO와 RegCM4.0은 KMA 관측보다 약 $-1.5 \sim -2.5^{\circ}\text{C}$ 정도 최고 기온을 낮게 모의하는 특성을 보였고 이러한 최고 기온에 대한 음의 편의 특성이 남한의 폭염 모의에도 영향을 준 것으로 판단된다. 열대야(일 최저기온 $\geq 25^{\circ}\text{C}$)의 경우 KMA는 1.81 ± 0.92 회, HadGEM2-AO는 2.34 ± 1.58 회, RegCM4.0은 0.45 ± 0.47 회로, HadGEM2-AO는 관측보다 더 많은 발생빈도와 큰 변동성을 모의한 반면, RegCM4.0은 관측보다 상대적으로 적은 발생빈도와 작은 변동성을 모의하였다. 대체적으로

HadGEM2-AO는 관측보다 약 2배 이상의 더 많은 열대야 일수를 모의하는 특성을 보였다(Figure 11c).

그림으로 제시하지는 않았지만 HadGEM2-AO는 제주도와 같은 해양과 근접한 관측지점과 추풍령과 같은 산악지형에 위치한 관측지점에서도 상대적으로 많은 열대야를 모의하였다. 이는 해양이 인접하고 복잡한 산악지형으로 구성된 남한의 지형특성을 저해상도의 HadGEM2-AO의 모의결과가 잘 반영하지 못한 결과로 판단된다. 반면, 고해상도의 지역기후모델인 RegCM4.0은 HadGEM2-AO보다 지리 및 지형적 위치에 따른 최저기온의 분포를 보다 현실적으로 모의하면서 HadGEM2-AO에서 나타났던 열대야 일수의 과대모의를 상대적으로 적게 모의한 것으로 판단된다(Figure 11c). 최저기온에 대한 보다 현실적인 모의는 서리일수(일 최저기온 $\leq 0^{\circ}\text{C}$)에 대한 모의수준의 향상으로 나타났다. 즉, RegCM4.0(106.16 ± 8.78 회)은 Had-

Table 3. Comparison of mean and standard deviation (Stdv.) on extreme events in South Korea for current 25 years (1981-2005) period. The KMA, HG2-AO, and RegCM4.0 indicate the observation by Korea Meteorological Administration, simulated results by global climate model (HadGEM2-AO) and regional climate model, respectively. The values in bold indicate the better performance of RegCM4.0 than that of HadGEM2-AO.

Extremes(Units)	Eval.	KMA	HG2-AO (GCM)	RegCM4.0
Heavy rainfall (time/year)	Mean	2.43	0.53	0.94
	Stdv.	0.85	0.40	0.73
Hot day (time/year)	Mean	16.29	1.10	1.01
	Stdv.	8.27	1.10	1.07
Tropical night (time/year)	Mean	1.81	2.34	0.45
	Stdv.	0.92	1.58	0.47
Frost day (time/year)	Mean	101.29	56.43	106.16
	Stdv.	9.71	7.71	8.78

GEM2-AO(56.43 ± 7.71 회)보다 KMA(101.29 ± 9.71 회)와 유사한 서리일수 발생빈도 및 경년변동성을 모의하였다(Table 3). 따라서 극한기후 현상 모의에 대한 결과를 종합해 보면, 극한기후 현상에 따라 다소 차이는 있지만 대체적으로 고해상도의 RegCM4.0이 저해상도의 HadGEM2-AO보다 지리 및 지형적 특성에 영향을 받는 남한에서의 극한기후 현상들, 특히 집중호우와 서리일수의 발생빈도 및 경년변동성, 그리고 보다 현실적인 열대야 일수를 재현할 수 있음을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 HadGEM2-AO 기후모델의 전 지구 모의정보(약 110km)를 지역기후모델 RegCM4.0에 적용하여 CORDEX 동아시아 2단계 모의영역에서의 현재 25년(1981~2005년)에 대한 고해상도(25km) 지역기후 모의정보로 역학적 상세화를 수행하였다. RegCM4.0의 적은 및 지면 모수화 방안 등과 같은 모의환경은 CORDEX 동아시아 1단계 모의영역에 대한 선행연구인 Oh

et al. (2011)을 참고하여 동일하게 설정하였다. 현재 재기후에 대한 RegCM4.0의 모의수준 평가 및 상대적인 비교를 위해 다양한 검증자료들(APH-RODITE, CRU, 남한 지상관측자료: KMA)과 HadGEM2-AO의 일 평균 기온, 강수, 그리고 최고/최저 기온 자료 또한 함께 이용하였다. 그리고 850hPa의 하층 바람장과 혼합비에 대한 모의수준은 ERA-Interim 재분석 자료를 이용하여 비교 분석하였다.

전반적으로 고해상도의 RegCM4.0은 저해상도의 HadGEM2-AO에 비해 검증자료들에서 나타나는 지형 및 지리적 위치에 따른 기온의 공간분포 특성 및 계절변동을 상대적으로 잘 모의하였다. 특히, HadGEM2-AO에서 나타난 여름철 고위도 지역(몽골, 중국 북부, 그리고 러시아 등)에서의 기온의 양의 편의와 겨울철 티벳고원 북부 및 몽골, 중국 북동부, 인도 북부지역에서의 강한 음의 편의 현상을 상대적으로 약화시키고 보다 검증자료들과 유사한 기온 값을 모의하였다. 그러나 여름과 겨울 동안의 티벳고원과 중국 남부지역에서 나타나는 계통적인 음의 편의 현상이 RegCM4.0에서도 여전히 나타났다. 여름철 강수의 경우,

HadGEM2-AO에서 나타나는 습윤(티벳고원, 중국 남부) 및 건조(인도, 인도차이나, 남한, 일본) 편 특성들이 RegCM4.0에서도 유사하게 나타났다.

이러한 여름철 강수에 대한 유사한 모의수준은 하층 바람장 및 수증기 분포에 대한 HadGEM2-AO의 모의특성이 RegCM4.0의 역학적 상세화 과정에 영향을 주었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 각 분석영역 별로 모의 기온 및 강수에 대한 통계적 검증을 살펴보았을 때, RegCM4.0은 HadGEM2-AO보다 기온과 강수의 물리량(Bias, RMSE) 및 공간 변동성(Spatial correlation) 측면에서 더 나은 모의수준을 보였으며, 특히 복잡한 산악지형으로 구성된 남한에서의 기온, 강수의 공간 변동성 모의 측면에서 상대적으로 우수한 모의수준을 보였다. 또한, 강수강도별 강수량 비율에 대한 모의수준 분석에서 RegCM4.0은 HadGEM2-AO보다 50mm/day 이상의 강한 강수 모의에서 더 나은 모의수준을 보였다. 특히, 남한의 KMA 강수자료와 비교하여 100mm/day 이상의 극한 강수량의 비율을 HadGEM2-AO보다 현실적으로 재현하였다(KMA: 19.6%, HadGEM2-AO: 3.2%, RegCM4.0: 12.3%). 남한에서의 극한기후 현상들에 대한 모의에서도 RegCM4.0은 HadGEM2-AO보다 집중호우와 서리일수의 발생빈도 및 경년변동성을 KMA와 유사하게 모의하였으며, 열대야 일수 또한 HadGEM2-AO보다 현실적으로 재현하였다.

본 연구의 결과는 CORDEX 동아시아 2단계 연구에서 권고하는 공식 모의영역에 대한 RegCM4.0의 모의수준을 평가한 데에 의의가 있다. 특히, 본 연구는 모의영역이 동아시아 지역 대부분을 포함하는 광범위한 영역이지만 25km 해상도의 역학적 상세화를 통해 남한에서의 극한기후 현상 또한 현실적으로 재현할 수 있음을 제시하고

있다. 따라서 본 연구의 모의결과를 이용하여 남한에서의 다양한 극한 현상들에 대한 시공간 변동 특성 및 원인 규명을 수행하는 후속 연구가 진행될 필요가 있다. 이러한 연구들은 향후 RegCM4.0을 이용하여 미래 시나리오에 따른 동아시아와 남한에서의 평균 및 극한 현상들의 변화 전망에 대한 기준자료로 활용 될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 기상청 및 한국기상산업진흥원(KMIPA 2015-2084)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Andermann, C., Bonnet, S., and Gloaguen, R., 2011, Evaluation of precipitation data sets along the Himalayan front, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(7), published online, doi:10.1029/2011GC003513.
- 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., Cho, D. H., Lee, J. H., Lee, J. H., Boo, K. O., Kang, H. S., and Byun, Y. H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 49(5), 603-618.
- Bao, Q., 2012, Projected changes in Asian summer monsoon in RCP scenarios of CMIP5, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5(1), 43-48.
- Bergant, K., Belda, M., and Halenka, T., 2007, Systematic errors in the simulation of European

- climate (1961-2000) with RegCM3 driven by NCP/NCAR reanalysis, *International Journal of Climatology*, 27(4), 455-472.
- Bhaskaran, B., Jones, R. G., Murphy, J. M., and Noguer, M., 1996, Simulations of the Indian summer monsoon using a nested regional climate model: Domain size experiments, *Climate Dynamics*, 12, 573-587.
- Choi, K. S., Moon, J. Y., Kim, D. W., Byun, H. R., and Kripalani, R. H., 2010, The significant increase of summer rainfall occurring in Korea from 1998, *Theoretical and Applied Climatology*, 102, 275-286.
- CORDEX, 2015, *CORDEX domains for model integrations* (updated 23/06/15), World Climate Research Programme, 16 pp, <http://www.cordex.org/>
- Dickinson, R. E., Errico, R. M., Giorgi, F., and Bates, G. T., 1989, A regional climate model for the western United States, *Climatic Change*, 15, 383-422.
- Emanuel, K. A., 1991, A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 2313-2335.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E., 2016, Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.
- 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., 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.
- Gu, H., Wang, G., Yu, Z., and Mei, R., 2012, Assessing future climate change and extreme indicators in east and south Asia using the RegCM4 regional climate model, *Climatic Change*, 114(2), 301-317.
- Güttler, I., 2011, Reducing warm bias over the North-Eastern Europe in a regional climate model, *Croatian Meteorological Journal*, 44, 19-29.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., and Lister, D. H., 2014, Updated high-resolution grids of monthly climatic observation-The CRU TS3.10 dataset, *International Journal of Climatology*, 34(3), 623-642.
- 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.
- IPCC, 2014, *Climate Change, 2014: 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, Pachauri, R. K., and Meyer, L. A. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Jin, C. S., Cha, D. H., Lee, D. K., Suh, M. S., Hong, S. Y., Kang, H. S., and Ho, C.H., 2016, Evaluation of climatological tropical cyclone activity over the western North Pacific in the CORDEX-East Asia multi-RCM simulations, *Climate Dynamics*, 47(3), 765-778.
- 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, 152p.
- Lee, J. W. and Hong, S. Y., 2014, Potential for added value to downscaled climate extremes over

- Korea by increased resolution of a regional climate model, *Theoretical and applied climatology*, 117(3-4), 667-677.
- Lee, J. W., Hong, S. Y., Chang, E. C., Suh, M. -S., and Kang, H. -S., 2014, 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.
- Nasrabadi, E., Masoodian, S. A., and Asakereh, H., 2013, Comparison of gridded precipitation time series data in APHRODITE and Asfazari databases within Iran's territory, *Atmospheric and Climate Sciences*, 3, 235-248.
- NIMR, 2014, *Meeting summary, The third international workshop on CORDEX-East Asia*, National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea, 8pp.
- Oh, S. G., Suh, M. S., Cha, D. H., and Choi, S. J., 2011, Simulation skills of RegCM4 for regional climate over CORDEX East Asia driven by HadGEM2-AO, *Journal of Earth Science Society*, 32(7), 732-749 (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(4), 291-307 (in Korean).
- 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*, 119, 2913-2927.
- 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: 10.1029/2007JG000563.
- Ono, K. and Kazama, S., 2011, Analysis of extreme daily rainfall in southeast Asia with a gridded daily rainfall data set, *Hydro-Climatology: Variability and Change (Proceedings of symposium in Melbourne, Australia, July 2011)*.
- Park, C. Y., 2015, The classification of extreme climate events in the Republic of Korea, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 21(2), 394-410 (in Korean).
- Park, C., Moon, J. Y., Cha, E. J., Yun, W. T., and Choi, Y., 2008, Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(3), 234-336 (in Korean).
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., and Kobayashi, S., 2006, ERA-Interim: New ECMWF Reanalysis products from 1989 onwards, *ECMWF Newsletter*, 110, 25-35.
- Suh, M. S. and Oh, S. G., 2015, Impacts of boundary conditions on the simulation of atmospheric fields using RegCM4 over CORDEX East Asia, *Atmosphere*, 6, 783-804.
- 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, Projection of high resolution climate change for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios, Part 1: Surface air temperature, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, published online, doi:10.1007/s1314-016-0017-9.
- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Duan, Z., and Cracknell, A. P., 2015, Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over Malaysia, *Remote Sensing*, 7, 1504-1528.
- Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., and Kitoh, A., 2012, APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded

- precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1401-1415, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>
- Yihui, D. and Chan J., 2005, The East Asian summer monsoon: an overview, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 89, 117-142.
- Zou, L. and Zhou, T., 2013, Near-future (2016-2040) summer precipitation changes over China as projected by a regional climate model (RCM) under the RCP8.5 scenario: Comparison between RCM downscaling and the driving GCM, *Advances in Atmospheric Sciences*, 20(3), 806-818.
- <http://cordex.org>
- <http://cordex-ea.climate.go.kr>
- http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_col.jsp
- <http://web.kma.go.kr/communication/encyclopedia/list.jsp>
- <http://wgl.ipcc.ch/AR6/AR6.html>
- 책임편집: 박창용
영문교열: 이은결