RegCM4를 이용한 RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 시나리오 별 남한에서의 상세 기후변화 전망

오석근 · 서명석

공주대학교 대기과학과

(2013년 11월 11일 접수, 2013년 11월 25일 수정, 2013년 12월 2일 게재 확정)

Projection of Fine-Scale Climate Changes over South Korea Based on the RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) Scenarios Using RegCM4

Seok-Geun Oh · Myoung-Seok Suh

Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Korea

(Received 11 November 2013, Revised 25 November 2013, Accepted 2 December 2013)

Abstract : In this study, we analyzed the simulation skills of RegCM4 for the temperature and precipitation over South Korea for the 30-year period(1981-2010) and projected mid-21st century(2021-2050) climate change, based on RCP(Representative Concentration Pathway) scenarios(2.6, 4.5, 6.0, 8.5). The HadGEM2-AO data provided by the National Institute of Meteorological Research were used as the lateral boundary conditions for the RegCM4 with 12.5km of horizontal resolution. In general, the RegCM4 well simulated the temporal and spatial variations of temperature and precipitation compared with CRU(Climatic Research Unit) data. However, the RegCM4's simulation skills are clearly dependant on the seasons and geographic locations. The RegCM4 well simulated daily variation of observed precipitation from June to mid-July before the full activation of the Changma front(bias: -1.09mm/day, Corr.: 0.84). But the model's performance drastically decreased(bias: -4.02mm/day, Corr.: 0.41) after mid-July to the end of August. It means that the heavy rainfalls that occurred due to the meso-scale convective systems or typhoons were not properly simulated. However, the RegCM4's performance is better than that of HadGEM2-AO for heavy rainfalls greater than 50mm/day. The annual mean temperature over South Korea in the mid-21st century is expected to increase by about +1.42°C to +1.50°C against the present irrespective of RCP scenarios. The future precipitation change over South Korea is projected to be very small regardless of RCP scenarios and seasons. However, the spring precipitation in the RCP4.5 and 6.0 scenarios are projected to increase.

Key Words : RegCM4, HadGEM2-AO, RCP scenario, South Korea, future climate change

1. 서론

관측 및 다양한 규모/유형의 기후변화 모델링 연구를 통해 현재 진행 중인 기후변화가 인위적 요인에 의한 것임이 확실히 되고 있다(Giorgi and Mearns, 1999a, 1999b; Im and Kwon, 2007; IPCC, 2007). 이러한 기후변화와 관련하여 나타나게 될 위험요소들에 대한 효율적 대응 및 적응 방안을 수립하기 위해 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 최근의 관측과 온실기체 저감기술들을 복합적으로 고려한 새로운 기후변화 시나리오(대표농도경로; Representative Concentration Pathway; RCP)를 개발하여 기후변화 영향 평가 등 관련 연구의 기본 자료로 활용할 것을 권장하고 있다. IPCC에서 권장하는 RCP 시나리오는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오로 나누어지며, 각 숫자들의 의미는 대기 중 온실기체, 에어로졸 등에 의해서 받는 순 복사에너지의 양(복사강제력)이 현재를 기준으로 2100년에 2.6, 4.5, 6.0, 8.5W/m² 정도 증가되는 경우를 나타낸다(Moss *et al.*, 2008). RCP2.6 시나리오는 인간 활동에 의해 배출되는 온실가스의 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우를 가정한 시나리오이며, RCP4.5와 RCP6.0 시나리오는 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우, RCP8.5 시나리오는 온실가스 저감 정책 없이 현재 추세로 온실가스를 배출하는 경우를 가정한 미래 기후변화 시나리오이다. 이러한 새로운 기후변화 시나리오와 함께 불확실성이 큰 모델들이 갖는 근본적인 한계를 극복하고 지구규모의 미래 기후변화정보 제공을 목적으로 일찍이 전구기후모델링 그룹에서는 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)와 같은 국제공동연구들을 수행하여 왔으며, 최근 들어 지역기후모델링 분야에서도 다양한 국제 공동연구(예: COordinated Regional

CLimate Downscaling EXperiment; CORDEX; <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>)들이 조직화 되어 수행되고 있다.

IPCC 5차보고서, CORDEX 프로젝트 참여와 우리나라 국가표준 기후변화 시나리오를 구축하기 위한 노력으로 국립기상연구소와 국내 대학들(서울대학교, 연세대학교, 공주대학교)은 전구기후모델인 HadGEM2-AO(Hadley Center Global Environmental Model version 2 coupled with the Atmosphere-Ocean)의 모의결과를 5개의 지역기후모델들에 경계조건으로 처방하여 CORDEX 동아시아 영역에 대한 72년(1979–2050)간의 현재 및 미래기후정보를 생산하였다(기상청, 2013; Lee *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2013). 이 연구는 국내 최초로 공통된 모의환경(경계조건, 모의영역, 해상도, 모의기간 등)을 다수의 지역기후모델들에 적용하여 상호 비교실험과 함께 양상을 기후변화정보를 제공하였다는데 의의가 있지만, 수문, 농업, 방재 등과 같이 보다 상세한 기후정보를 필요로 하는 응용 연구 분야에서 직접적으로 활용하기에는 어느 정도 한계가 있었다(Suh *et al.*, 2012). 모델의 해상도(50km)가 갖는 문제점을 개선하기 위해 홍송이 외(2013)은 한반도 중심의 동북아시아 지역에 대해 RegCM4(Regional Climate Model version 4)의 해상도를 12.5km로 하여 현재 32년(1979–2010)과 RCP4.5와 8.5 시나리오 별 미래 32년(2019–2050)에 대해 상세기후정보를 생산하였다. 그리고 현재(1986–2005) 대비 21세기 중반(2031–2050)에 대해 남한을 포함한 6개 분석영역(전체 모의영역, 북중국, 남중국, 북한, 남한, 일본)에서의 기온과 강수의 상세변화 정보를 제공하였다.

본 연구에서는 향후 한반도에서의 다양한 미래 기후변화 정보를 제공하기 위해 RCP2.6과 6.0 시나리오에 근거한 HadGEM2-AO 자료를

RegCM4의 경계자료로 처방하여 남한을 중심으로 한 동북아시아지역에서의 미래 32년(2019–2050)간의 상세 기후변화정보를 생산하였다. 본 연구에서는 미래 기후변화 전망 자료 산출환경의 일관성을 위해 홍송이 외(2013)과 동일한 모의환경을 RegCM4에 적용하였으며, 홍송이 외(2013)에 의해 생산된 현재 및 RCP4,5/8.5 미래 기후정보를 함께 이용하여 현재 30년(1981–2010) 대비 미래 30년(2021–2050)간의 기온/강수 변화를 4개의 RCP 시나리오(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 별로 분석하였다. 본 논문의 다음 절 부터는 본 연구에서 이용한 지역기후모델과 실험설계를 설명하고, 현재 기후에 대한 RegCM4의 모의수준 분석, 그리고 RCP 4종 시나리오에 따른 미래기후 변화결과를 남한을 중점적으로 기술하였다. 끝으로 본 연구의 결과를 요약하였다.

2. 모델 및 실험설계

본 연구에서 이용한 지역기후모델은 ICTP(Inter-national Centre for Theoretical Physics)에서 개발한 RegCM4로 2010년 7월에 처음 공개되었다. RegCM4는 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 3차원 대기모델로서 이전 버전인 RegCM3와 비교하여 새로운 지면 모수와 및 행성경계층 방안이 추가되었고, 모델의 소스코드가 전면 개선되어 기종간의 호환성 및 계산 효율성, 그리고 이용자의 편의성이 크게 향상되었다(Giorgi *et al.*, 2012). Figure 1과 Table 1은 RegCM4에 처방된 모의영역과 모의환경을 보여준다. 모의영역, 수평해상도, 적운모수와 방안 등의 모의환경은 미래 기후변화 전망 자료 산출환경의 일관성을 위해 홍송이 외(2013)과 동일하게 적용하였으며 각 항목에 대한 상세한 설명은 홍송이 외(2013)을 참고하길 바

Table 1. Model configuration used in this study. The shaded part indicates the difference between current study and Hong *et al.*(2013)'s study.

Contents	Description
Domain	12.5km 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	Holtstag
Cumulus parameterization scheme	MIT-Emanuel
Land surface model	NCAR CLM3.5
Short/Longwave radiation scheme	NCAR CCM3
Boundary data	HadGEM2-AO
Spectral nudging	Yes
Simulation period	1. Present period: Jan, 1979~Dec, 2010 2. Future period: Jan, 2019~Dec, 2050
Analysis period	1. Present period: Jan, 1981~Dec, 2010 2. Future period: Jan, 2021~Dec, 2050 (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5 Scenarios)

Figure 1. Model domain and topography (m)

란다. 남한에서의 보다 다양한 미래기후 변화 정보를 제공하기 위해 본 연구에서는 국립기상연구소에서 제공하고 있는 RCP2.6과 RCP6.0 시나리오에 근거한 HadGEM2-AO 자료(국립기상연구소, 2011; Baek *et al.*, 2013)를 RegCM4의 경계자료로 처방하여 32년(2019–2050)간의 미래기후 변화 정보를 추가적으로 생산하였다. 본 연구에서는 현재와 미래기후에 대한 정의를 각각 30년(1981–2010, 2021–2050)으로 하였으며, IPCC에서 권고하는 RCP 4종(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 시나리오별 남한에서의 기온과 강수 변화를 살펴보고자 하였다. 또한 여름에 강수가 집중되는 남한의 강수 특성을 고려하여 여름철 일강수의 변동 특성과 강수강도별 강수빈도 및 강수량에 대한 RegCM4의 모의수준을 분석하였으며, 이와 함께 미래전망을 제시하고자 하였다. 모의영역 전체에 대한 RegCM4의 모의수준 검증은 최근에 공개된 CRU-TS(Climatic Research Unit Time-Series) 3.21 기온, 강수자료를 이용하였으며, 이 자료는 월평균 자료로 공간해상도는 50km이고 육지에서의

정보만을 제공한다(<http://www.cru.uea.ac.uk/data/>). 남한의 여름강수에 대한 모의수준 검증은 기상청 소속 59개 관측지점의 강수자료를 이용하였으며, 이 자료는 1시간 간격으로 정보가 제공되고 공간 해상도는 약 20km이다. 본 연구에서는 각 검증자료와 모의자료간의 시간일치를 위해 월평균(CRU와 비교시) 또는 일평균(남한 강수자료와 비교시) 값으로 후처리 한 후 분석을 수행하였으며, 공간일치의 경우 CRU 자료는 모델의 격자점으로, 모델의 모의자료는 남한 관측지점의 위경도 값으로 재 산출한 후 각각 분석을 수행하였다. 이때, 공간일치는 기준점(모델/관측)을 중심으로 4개의 격자점(CRU/모델)이 육지에서의 값일 경우 이중선형보간법(Bilinear interpolation)을 이용하였고, 2~3개만이 육지의 값일 경우 기준점과 격자점간의 거리 자승의 반비례로 가중치를 주어 보간법(interpolation)을 수행하였다.

3. 연구 결과

1) 현재기후에 대한 모의성능

Figure 2는 현재 30년(1981-2010) 평균 여름과 겨울동안의 기온과 강수에 대한 RegCM4의 모의수준을 CRU-TS 3.21 기온/강수 자료와 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 RegCM4는 지

형 및 지리적 특성에 따른 기온의 공간분포 특성을 비교적 잘 모의하였다. 그러나 여름철 기온의 경우 고위도에서는 CRU보다 기온을 약 $+0.5 \sim +3.0^{\circ}\text{C}$ 높게, 남한을 포함한 저위도에서는 CRU보다 기온을 약 $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 낮게 모의하여 남북의 온도경도차를 상대적으로 약하게 모의하였다. 겨울철 기온의 경우 모든 영역에서 약 $-1 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 정도 기온을 낮게 모의하는 특성을 보였다. 여름

A. Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

a) RegCM4-CRU, JJA

b) RegCM4-CRU, DJF

B. Precipitation (mm/day)

a) RegCM4-CRU, JJA

b) RegCM4-CRU, DJF

Figure 2. Spatial distribution of 30-year (1981-2010) mean differences between RegCM4 and CRU-TS 3.21 for temperature ($^{\circ}\text{C}$) and precipitation (mm/day).

철 강수모의에서는 대부분의 영역에서 강수를 과소하게 모의하였으며, 특히 남한에서의 강수를 약 -3mm/day 정도 과소하게 모의하였다. 이는 동아시아 여름 몬순 발달에 중요한 하층 제트류를 약하게 모의하는 HadGEM2-AO의 모의특성이 RegCM4에 영향을 주어, 동아시아 여름몬순과 관련된 강수대의 발달-쇠퇴과정을 RegCM4가 적절히 모의하지 못하면서 나타난 결과로 판단된다(오석근 외, 2011; 홍송이 외, 2013). 반면, 겨울철 강수의 경우 대부분 지역에서 CRU보다 과다하게 모의하여, 결과적으로 강수의 계절변동을 적절히 재생산하지 못하였다. 이 결과는 RegCM3 이용하여 한반도에서의 기온과 강수에 대한 모의수준을 분석하였던 선행 연구들의 연구결과와 유사하다(Im *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008). 특히, Im *et al.*(2007)은 20km 수평 해상도를 갖는 RegCM3를 이용하여 한반도에서의 기온과 강수에 대한 모의수준을 분석하였으며, 전반적으로 RegCM3가 관측보다 기온을 낮게, 강수를 과소하게 모의함을 보였다. 또한, 한반도에서 나타나는 여름강수의 과소모의는 RegCM3가 여름몬순과 관련된 강수대를 상대적으로 저위도에서 강하게 모의한 것과 관련이 있음을 보였다. 전반적으로 본 연구결과는 CRU-TS 3.0 기온/강수 자료(CGIAR, CSI Portal, 2010; Harris *et al.*, 2013)를 이용하여 현재 20년(1986-2005)에 대한 RegCM4의 모의수준을 검증한 홍송이 외(2013)의 연구결과와도 일치한다. 그러나 본 연구결과는 기존의 홍송이 외(2013)보다 최신의 CRU 자료를 이용하였다는 점과 상대적으로 더 장기간을 현재기후(30년, 1981-2010)로 정의하여 기온과 강수에 대한 RegCM4의 모의수준을 분석하였다는 점에서 의의가 있다 할 수 있다. 본 연구에서는 남한에서의 여름철 강수 특성 모의에 대해 보다 상세한 분석을 수행하고자

여름철 강수의 계절내 변동 및 강수강도별 강수빈도와 강수량 분포 분석을 수행하였다.

기후학적으로 남한의 강수현상은 시공간적으로 변동성이 매우 크지만 주로 여름철에 집중되며, 이 기간 동안 크게 3개의 메카니즘에 의해 강수가 발생된다(기상청, 1995; 정지현·서명석, 2005; 박창용 외, 2008; 김찬수·서명석, 2009; 김재훈·이태영, 2012; Ha *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2010). 첫 번째는 북태평양의 덥고 습한 고기압과 오호츠크 해의 차고 습한 고기압이 만나거나 북태평양 고기압과 대륙 열저기압이 만날 때 발생하는 장마전선에 의한 것으로, 6월부터 7월 중순까지 남한을 비롯한 중국, 일본지역에서 많은 강수가 발생된다. 두 번째는 강한 일사에 의한 지표 가열로 발생하는 중규모 대류계(Mesoscale Convective System; MCS)에 의한 것으로 7월 중순 이후부터 8월 말까지 중규모 대류계에 의한 대류성 강수가 자주 발생된다. 그리고 세 번째는 경년변동이 매우 크지만 우리나라를 통과하거나 중국에 상륙하는 태풍의 직/간접 영향에 의해 강수가 발생된다(기상청, 1995; 송혜진·허창희, 2003; 박창용 외, 2008; Ho *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2011).

Figure 3은 RegCM4와 HadGEM2-AO가 모의한 남한에서의 현재 30년 평균 여름철 강수의 일 변동을 관측과 함께 나타낸 것이다. 그리고 RegCM4가 모의한 총 강수 대비 대류성 강수비율의 일 변동도 함께 제시하였다. 전반적으로 RegCM4는 여름기간 동안의 강수를 관측보다 약 -2.59mm/day (RMSE: 3.39mm/day) 정도 과소하게 모의하였지만 HadGEM2-AO 보다는 상대적으로 더 나은 모의성능(bias: -2.80mm/day , RMSE: 3.51mm/day)을 보였다. 남한 전체가 본격적인 장마의 영향을 받기 전인 7월 초-중순까지 RegCM4는 관측과 유사한 강수량 (bias:

Figure 3. Time series of 30-year (1981-2010) mean observed and simulated summer (JJA) daily precipitation (mm/day) in South Korean region. Convective precipitation ratio 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.

-1.09mm/day)과 계절내 변동(Corr.: 0.84)을 보였으나 장마가 최대로 활성화 되는 7월 중순, 그리고 중규모 대류계와 태풍 등의 영향으로 국지성 집중호우가 주로 발생되는 8월말까지 모의수준이 현저히 낮아졌다(bias: -4.02mm/day, Corr.: 0.41). 그러나 한 가지 흥미로운 점은 남한의 여름철 강수 발생과정이 변하는 7월 중순 이후부터 RegCM4가 대류성 강수의 비중을 크게 모의하는 것이다. 특히, 8월에는 대류성 강수의 비중이 약 70%로 크게 모의되었다. 이는 이 기간 동안 모델 내에서 적은 모수화 방안에 의한 아격자 규모의 대류성 강수가 보다 활발히 발생될 수 있는 환경이 만들어 진 것을 의미한다. 그럼에도 불구하고 7월 중순 이후의 총 강수량을 현저히 과소하게 모의한 것은 여름철 후반부 강수의 상당 부분을 유발하는 태풍의 모의 실패와 모델에 처방된 수평 해상도(12.5km)의 영향으로 수 km 크기와 단 시간(예: 2~3시간)에 발생하는 국지성 호우를 모의하는데 있어 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다(Ninomiya and Aliyama, 1992; Ho *et al.*, 2003;

Hong, 2004; Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2013).

Figure 4는 현재 30년(1981-2010) 여름(JJA)동안 RegCM4와 HadGEM2-AO가 모의한 남한에서의 강수강도별 강수빈도 및 강수량의 분포를 관측과 함께 나타낸 것이다. 이때, 관측 강수량은 남한에서 관측된 일 누적강수자료를 이용하였으며, RegCM4와 HadGEM2-AO의 모의강수는 관측지점의 위·경도로 내삽한 일 강수 모의결과를 이용하였다. 전반적으로 강수빈도수 모의에서 RegCM4와 HadGEM2-AO는 10mm/day 보다 약한 강수는 관측보다 많이, 상대적으로 10mm/day 보다 강한 강수에서는 관측보다 적게 모의하였다. 반면, 강수량 모의에서는 30mm/day 보다 약한 강수에서는 대체적으로 관측보다 과다하게 모의한 반면 50mm/day 이상의 강한 강수에서는 관측보다 과소하게 모의하는 특성을 보였다. 이 결과는 지역기후모델이 약한 강수에서는 관측보다 과다하게, 상대적으로 강한 강수에서는 관측보다 과소하게 모의함을 보였던 선행 연구들의 연구결

Figure 4. Fractional distribution of (a) precipitation frequency and (b) precipitation amount in terms of precipitation intensity over South Korea for summer (JJA).

과와 일치한다(오석근 외, 2011; Lee *et al.*, 2013). 전반적으로 50mm/day 이상의 강한 강수 모의에서 RegCM4는 HadGEM2-AO보다 강수 빈도와 강수량을 보다 관측과 가깝게 모의하였다. 이는 고해상도의 지역기후모델이 전구기후모델 보다 국지적으로 강한 강수 현상을 보다 잘 모의할 수 있음을 보여주며 향후 극한 강수에 대한 미래 전망에 있어 더 나은 결과를 보일 수 있음을 의미한다(Wang *et al.*, 2003; Im and Kwon, 2007; Feng *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013).

2) RCP 시나리오 별 미래기후변화

Figure 5와 Figure 6은 RegCM4가 모의한 현재 30년(1981–2010) 대비 RCP 시나리오(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 별 미래 30년(2021–2050) 평균 기온의 변화량을 여름과 겨울에 대해 나타낸 것이다. 전반적으로 RegCM4는 RCP 시나리오에 관계없이 모든 모의영역에서 기온이 상승될 것으로 전망하고 있으며, 상대적으로 저위도보다는 고위도에서 기온이 더 크게 상승될 것으로 전망하고 있다. 지역에 따라 다소 차이는 있지만 고위도 지역의 경우 대체적으로 여름보다는 겨울에 기온 상승폭이 더 클 것으로 나타났다. RCP6.0 시나리오의 경

우 다른 RCP 시나리오(2.6, 4.5, 8.5)에 비해 상대적으로 기온 상승폭이 작게 나타나는데, 이는 RCP6.0 시나리오에서의 이산화탄소 농도변화가 21세기 중반(~2050)까지는 RCP2.6, 4.5 시나리오보다 작다가 그 이후에 커지는 것과 관련이 있는 것으로 보인다(국립기상연구소, 2011). 그림으로 제시하지는 않았지만 HadGEM2-AO가 모의한 기온결과에서도 상대적 RCP6.0의 경우가 다른 시나리오에 비해 낮은 기온 상승폭을 보였다.

Table 2는 RCP 시나리오 별 남한에서의 현재 대비 미래 연평균 및 계절별 평균 기온 변화량을 나타낸 것이다. 21세기 중반 남한의 연평균 기온은 대부분의 시나리오에서 현재보다 약 +1.42~+1.50℃ 상승될 것으로 전망되었으며, RCP6.0 시나리오의 경우만 +0.97℃ 상승될 것으로 전망되었다. 계절적으로 살펴보면 RCP 시나리오에 따라 조금씩 차이가 나타난다. 예를 들어, RCP2.6 시나리오에서는 봄에 +1.50℃로 다른 계절에 비해 기온 상승이 더 클 것으로 나타났으며, RCP4.5에서는 겨울에 +1.59℃로, RCP6.0에서는 봄에 +1.26℃로, RCP8.5에서는 여름에 +1.55℃로 다른 계절에 비해 기온 상승이 더 클 것으로 나타났다. 그러나 각 시나리오별 계절 평균 기온변

Figure 5. Spatial distribution of prospected temperature changes ($^{\circ}\text{C}$) during mid-21st (2021-2050) century compared to present (1981-2010) climate according to RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) scenarios in the summer (JJA).

화 차이는 약 0.5°C 이내로 작게 나타나고 있어 21세기 중반까지는 시나리오별 기온상승 변화 차이가 뚜렷하지 않을 것으로 전망된다. 전반적으로 Table 2에 제시된 남한에서의 현재 대비 미래 기온변화 값은 대부분 유의수준 1%에서 유의하게 나타났다.

Figure 7과 Figure 8은 Figure 5와 Figure 6에서와 같이 현재(1981-2010) 대비 RCP 시나리오 별 미래(2021-2050) 평균 강수의 변화량을 여름과

겨울에 대해 나타낸 것이다. 전반적으로 RCP 시나리오에 관계없이 여름강수는 중국 양쯔강 유역에서 일본열도에 이르는 남해상 지역(약 $+0.2 \sim 1.6\text{mm/day}$)과 연해주 지역(약 $+0.2 \sim 1.3\text{mm/day}$)에서 증가될 것으로 전망되었고, 남한의 중부지역에서는 약 $-0.2 \sim -1.0\text{mm/day}$ 정도 감소될 것으로 전망되었다. RCP 시나리오 별로 살펴 보았을 때, RCP8.5 시나리오에서는 일본 규슈지역에서의 강수가 크게 증가될 것으로 전망되었으

Figure 6. Same as Figure 5 except for winter (DJF).

Table 2. Prospect of climate changes during the mid-21st (2021-2050) century compared to present climate (1981-2010) over South Korea according to the RCP scenarios.

Variables	Scenarios	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	RCP2,6	1,42***	1,50***	1,38***	1,34***	1,45***
	RCP4,5	1,50***	1,40***	1,50***	1,49***	1,59***
	RCP6,0	0,97***	1,26***	0,97***	0,94***	0,71***
	RCP8,5	1,50***	1,43***	1,55***	1,63***	1,38***
$\Delta P(\text{mm/day})$	RCP2,6	0,16*	0,25	0,12	0,18	0,07
	RCP4,5	0,04	0,31*	-0,04	-0,19	0,06
	RCP6,0	0,02	0,38**	-0,36	0,09	-0,02
	RCP8,5	0,00	0,06	-0,15	0,06	0,03

*** Significance level: 1%, ** Significance level: 5%, * Significance level: 10%

a) RCP2.6 - Present

b) RCP4.5 - Present

c) RCP6.0 - Present

d) RCP8.5 - Present

Figure 7. Same as Figure 5 except for precipitation.

며, RCP6.0 시나리오에서는 다른 시나리오에 비해 남한의 중부지역에서의 강수의 감소가 상대적으로 크고 넓게 전망되었다. 겨울강수의 경우 일본 북쪽 해역에서만 강수의 증가가 전망될 뿐 대부분의 모의영역에서 강수의 감소가 전망되었다. 특히, RCP2.6과 RCP8.5 시나리오에서는 다른 시나리오에 비해 일본 남쪽해역에서의 겨울강수의 감소($-0.5 \sim -1.5 \text{ mm/day}$)가 크게 전망되었다.

남한의 평균 강수의 변화량을 계절별로 살펴보면, 기온의 경우와는 달리 강수의 증가 또는 감소

가 뚜렷하게 나타나지 않았다(Table 2). 앞의 공간분포 결과에서 나타났듯이, 남한의 여름강수는 RCP 시나리오에 관계없이 남부지역은 약 $+0.2 \sim +0.8 \text{ mm/day}$ 정도 증가될 것으로, 반면 중부지역은 약 $-0.2 \sim -1.0 \text{ mm/day}$ 정도 감소될 것으로 전망되었다. 그 결과, 남한에서의 현재 대비 미래 평균 강수의 변화는 대부분의 시나리오에서 작게 나타났으며, 상대적으로 RCP6.0 시나리오에서 약 -0.31 mm/day 정도 강수가 감소될 것으로 전망되었으나 이는 유의하지 않는 것으로 나타났

Figure 8. Same as Figure 5 except for precipitation and winter (DJF).

다. 겨울강수 또한 시나리오에 관계없이 강수의 변화량이 약 $-0.02 \sim 0.07 \text{ mm/day}$ 로 매우 작았으며 이 변화는 유의하지 않았다. 한편, 남한의 봄 강수의 경우 RCP4.5와 RCP6.0 시나리오에서 각각 $+0.31 \text{ mm/day}$ 와 $+0.38 \text{ mm/day}$ 정도 증가될 것으로 전망되었으며 이 변화는 유의수준 5% 또는 10%에서 유의하게 나타났다.

Figure 9는 RegCM4가 모의한 현재(1981–2010) 및 미래(2021–2050) 30년 평균 여름철 강수의 계절내 변동을 나타낸 것이다. 21세기 중반

의 남한의 여름철 강수는 현재와 유사한 강수량과 계절내 변동을 보일 것으로 전망되며, 7월 중순 이후 대류성 강수의 비율이 현재보다 더 증가될 것으로 나타났다. 시나리오에 따라 차이는 있지만 모든 시나리오에서 7월 이후의 강수에서 대류성 강수의 비율이 현재보다 증가($+3.85 \sim +11.62\%$)될 것으로 전망되며, 상대적으로 RCP6.0에서 더 큰 증가(11.62%)가 전망되었다. 특히, 이러한 증가폭은 6월~7월 중순사이의 대류성 강수 비율의 증가보다 약 2~3배 정도 더 큰

Figure 9. Intraseasonal variation of the daily mean precipitation (mm/day) in the summer (JJA) over South Korea for the future 30-year (2021-2050) period along with the present 30-year (1981-2010) data. Convective precipitation ratio to the simulated total precipitation is given by dotted line. A 5-day running mean is applied to the data.

것으로, 이는 RegCM4가 7월 중순 이후의 미래 대기를 현재보다 더 불안정한 조건을 갖는 환경으로 모의하고 있음을 제시한다. 그러나 앞의 강수의 미래 공간분포에서도 나타났듯이 남한의 중부와 남부지역에서의 서로 상반되는 강수변화로 인해 남한 평균 여름철 강수량의 변화는 뚜렷이 나타나지 않았다.

Figure 10은 RCP 시나리오에 근거하여 RegCM

4가 전망한 남한에서의 강수강도별 강수빈도 및 강수량의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 21세기 중반까지 남한에서의 강수강도별 강수빈도는 시나리오에 관계없이 현재와 유사할 것으로 보이며 그 변화가 뚜렷이 나타나지 않았다. 반면, 강수량의 변화에서는 시나리오에 따라 조금씩 차이를 보였다. 즉, RCP2.6 시나리오에서는 현재와 유사한 강수량의 분포를 보일 것으로 전망되

Figure 10. Comparison of fractional distributions according to the RCP scenarios for (a) precipitation frequency and (b) precipitation amount in terms of precipitation intensity over South Korea for summer (JJA).

나 상대적으로 20mm/day 보다 약한 강수에서 현재보다 근소하게 강수량이 증가될 것으로 전망되었다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 경우 상대적으로 50mm/day 보다 강한 강수에서 현재보다 강수량이 증가될 것으로 전망되었고, 이러한 증가는 상대적으로 RCP4.5에서 더 뚜렷이 나타났다. RCP6.0 시나리오의 경우 20mm/day 보다 약한 강수에서는 현재보다 증가될 것으로, 반면 50mm/day 보다 강한 강수에서는 현재보다 감소될 것으로 전망되었다.

4. 요약

본 연구에서는 RCP2.6과 RCP6.0 시나리오에 근거한 HadGEM2-AO 자료를 RegCM4의 경계 자료로 처방하여 남한을 중심으로 한 동북아시아 지역에서의 미래 32년(2019-2050)간의 상세 기후변화정보를 생산하였다. RegCM4에 처방된 모의영역, 수평해상도(12.5km), 적운모수화방안 등의 모의환경은 미래 기후변화 전망 자료 산출환경의 일관성을 위해 RCP4.5와 8.5 시나리오에 대해 분석한 홍송이 외(2013)과 동일하게 하였다. 또한 홍송이 외(2013)에서 생산된 현재 및 미래(RCP4.5, RCP8.5) 기후정보를 함께 이용하여 현재 30년(1981-2010) 대비 미래 30년(2021-2050)간의 기온/강수 변화를 4개의 RCP 시나리오(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 별로 분석하였다. 본 연구에서는 모의결과와의 검증자료로 CRU-TS 3.21 기온/강수 자료와 기상청 소속 59개 관측지점의 강수자료를 이용하였다.

전반적으로 RegCM4는 CRU 자료와 비교하여 지형 및 지리적 위치에 따른 기온, 강수의 공간분포를 잘 모의하였다. 그러나 상대적으로 기온을 낮게, 강수를 과소하게 모의하는 특성을 보

였으며, 특히, 남한의 경우 RegCM4는 기온을 약 0.5~2℃ 정도 낮게, 여름철 강수를 약 -3mm/day 정도 과소하게 모의하는 특성을 보였다. 남한의 여름철 강수의 계절내 변동 모의에서 RegCM4는 남한 전체가 본격적인 장마의 영향을 받기 전인 7월 초-중순까지는 관측과 유사한 강수량(bias: -1.09mm/day)과 계절내 변동(Corr.: 0.84)을 보였으나, 장마가 최대로 활성화 되는 7월 중순, 그리고 중규모 대류계와 태풍 등의 영향으로 국지성 집중호우가 주로 발생하는 8월 말까지 모의수준이 현저히 낮아졌다(bias: -4.02mm/day, Corr.: 0.41). 한편 7월 중순 이후 모의강수 중 대류성 강수 비율을 크게 모의하고 있어 RegCM4가 7월 중순이후 강수의 발생과정 변화는 남한의 강수특성을 어느 정도 모의하고 있는 것으로 판단된다. 또한, RegCM4는 50mm/day 이상의 강한 강수 모의에서 HadGEM2-AO 보다 더 나은 모의능을 보였다.

현재(1981-2010) 대비 21세기 중반(2021-2050) 남한의 연평균 기온은 대부분 시나리오에서 현재보다 약 +0.97~+1.50℃ 상승될 것으로 전망되었으며, 기온이 가장 크게 상승되는 계절은 RCP 시나리오에 따라 서로 상이하게 나타났다(봄: RCP2.6, 6.0, 여름: RCP8.5, 겨울: RCP4.5). 그러나 각 시나리오 별 계절 평균 기온변화 차이가 약 0.5℃ 이내로 작게 나타나고 있어 21세기 중반까지는 시나리오 별 남한의 기온 상승변화 차이가 뚜렷하지 않을 것으로 전망되었다. 남한에서의 강수는 대부분의 계절에서 증가 또는 감소가 뚜렷이 나타나지 않았다. 그러나 봄 강수의 경우 RCP4.5와 6.0 시나리오에서 증가가 전망되었고 이는 유의수준 5% 또는 10%에서 유의하게 나타났다. 여름강수의 경우 RCP 시나리오에 관계없이 남부지역에서는 약 +0.2~+0.8mm/day 정도 증가되는 반면 중부지역은 약 -0.2~-1.0mm/

day 정도 감소될 것으로 전망되어 공간적으로 서로 다른 변화가 나타날 것으로 전망되었다. 21세기 중반 남한의 여름철 강수의 계절내 변동은 RCP 시나리오에 관계없이 현재와 유사할 것으로 전망되며, 상대적으로 7월 중순 이후 대류성 강수의 비율이 현재 보다 더 증가될 것으로 전망되었다(RCP2.6: +9.54%, RCP4.5: +3.85%, RCP6.0: +11.62%, RCP8.5: +4.89%). RCP 시나리오 별 남한에서의 강수강도 별 강수빈도 현재와 유사할 것으로 전망되며, 강수량에서는 RCP 시나리오에 따라 상이하게 나타났다. 즉, RCP6.0에서는 약한 강수는 증가되나 강한 강수는 감소가 전망되며, RCP4.5와 RCP8.5에서는 강한 강수에서 강수량이 상대적으로 크게 증가될 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 수문과 농업, 방재 등과 같이 남한에서의 상세 미래 기후변화 정보를 필요로 하는 응용 연구 분야에서 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 그러나 강수에 대한 낮은 모의 성능과 경계자료(예: HadGEM2-AO)에 따라 지역기후모델의 모의성능이 상이하게 나타날 수 있다는 점을 고려했을 때 본 연구결과만을 이용하기 보다는 다른 경계자료를 처방한 다양한 지역기후모델들의 모의결과를 함께 이용할 필요가 있다. 그리고 향후 다양한 통계적 기법(편의보정, 결정론적/확률론적 앙상블)들을 결합하여 모의결과의 예측수준을 향상시키는 연구를 수행한다면 평균 기후뿐만 아니라 집중호우, 가뭄 등과 같은 극한기후들에 대한 신뢰성 있는 정보도 함께 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 (재)기상기술개발관

리단(CATER 2012-3081)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립기상연구소, 2011, IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.
- 기상청, 1995, 장마백서.
- 기상청, 2012, 지역기후모델의 불확실성평가 및 한반도 상세 기후변화 예측정보 생산.
- 김재훈·이태영, 2012, 1993/1994을 기점으로 나타난 한반도 여름철 강수량 변동의 종관기후학적 원인, 대기, 22(4), 401-413.
- 김찬수·서명석, 2009, 베이지안 방법을 이용한 우리나라 강수특성(1954-2007)의 변화시점 및 변화유형 분석, 대기, 19(2), 199-211.
- 박창용·문자연·차은정·윤원태·최영은, 2008, 최근 한반도 여름철 강수특성의 변화, 대한지리학회지, 43(3), 234-336.
- 송혜진·허창희, 2003, 태풍이 한반도 여름철 2차 우기 발생에 끼치는 영향에 관한 연구, 대기, 13(1), 362-365.
- 오석근·서명석·명지수·차동현, 2011, CORDEX 동아시아 지역에서 HadGEM2-AO를 경계조건으로 처방한 RegCM4의 상세 지역기후 모의 성능, 한국지구과학회지, 32(7), 732-749.
- 정지현·서명석, 2005, 우리나라 우기 (6-9월) 시간강수의 일변화 특성과 그 유형, 한국기상학회지, 41(4), 533-546.
- 홍송이·오석근·서명석·이동규·안중배·강현석, 2013, RegCM4가 모의한 RCP 시나리오에 따른 동북아시아 지역의 고해상도 미래기후 변화, 기후연구, 8(1), 27-44.
- 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., Choi, 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 simu-

- lated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, DOI:10.1007/s13143-013-0053-7.
- 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.
- Feng, J.M., Wang, Y.L., and Fu, C.B., 2011, Simulation of extreme climate events over China with different regional climate models, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4, 47-56.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O., 1999a, Introduction to special section: regional climate modeling revisited, *Journal of Geophysical Research*, 104, 6335-6352.
- Giorgi, F. and Mearns, L.O., 1999b, Tests of precipitation parameterization available in the latest version of the NCAR regional climate model(RegCM) over the continental U.S., *Journal of Geophysical Research*, 104, 6353-6376.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., and others, 2012, RegCM4: model description and preliminary test over multi CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7-29.
- Ha, K.-J., Park, S.-K., and Kim, K.-Y., 2005, On interannual characteristics of climate prediction center merged analysis precipitation over the Korean peninsular during the summer monsoon season, *International Journal of Climatology*, 25(1), 99-116.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., and Lister, D.H., 2013, Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.3711.
- 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.
- Hong, S.-Y., 2004, Comparison of heavy rainfall mechanisms in Korea and the central US, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(5), 1469-1479.
- Im, E.-S. and Kwon, W.-T., 2007, Characteristics of extreme climate sequences over Korea using a regional climate change scenario. *SOLA*, 3, DOI:10.2151/sola.2007-005.
- 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, 2007, *Climate Change 2007*, Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland. 104p.
- Kim, J.-H., Ho, C.-H., Lee, M.-H., Jeong, J.-H., and Chen, D., 2006, Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s, *Geophysical Research Letters*, 33:L18706. Doi:10.1029/2006GL027430.
- 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 Dynamics*, 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, 25pp.
- Ninomiya, K. and Akiyama, T., 1992, Multi-scale features of Baiu, the summer monsoon over Japan and the East Asia, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 70, 467-495.
- Oh, S.-G., Park, J.-H., Lee, S.-H., and Suh, M.-S., 2013, Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios, *Journal of Geophysical Research*, in revision.
- 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, 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*, 118, 1652-1667.
- 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.
- Wang, Y., Sen, O.L., and Wang, B., 2003, A highly resolved regional climate model (IPRC-RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: Model description and verification of simulation, *Journal of Climate*, 16, 1721-1738.
- Zhang, D.F., GAO, X.J., Ouyang, L.C., and Dong, W.J., 2008, Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model. *Journal of Tropical Meteorology*, 14, 19-23.
- CGIAR CSI Portal, 2010, CRU-TS3.0. <http://www.cgiar-csi.org/data/item/55-cru-ts-30-climate-database> (검색일: 2011. 6. 30)