

RegCM4가 모의한 RCP 시나리오에 따른 동북아시아 지역의 고해상도 미래기후 변화

홍송이¹ · 오석근¹ · 서명석¹ · 이동규² · 안중배³ · 강현석⁴

¹공주대학교 대기과학과 · ²서울대학교 기초과학연구원,

³부산대학교 대기환경과학과 · ⁴기상청 국립기상연구소 기후연구과

(2012년 12월 7일 접수, 2013년 1월 4일 수정, 2013년 1월 11일 게재 확정)

Future Climate Changes over North-East Asian Region Simulated by RegCM4 Based on the RCP Scenarios

Song-Yee Hong¹ · Seok-Geun Oh¹ · Myoung-Seok Suh¹ · Dong-Kyou Lee² ·

Joong-Bae Ahn³ · Hyun-Suk Kang⁴

¹Department of Atmospheric Science, Kongju National University

²Seoul National University

³Department of Atmospheric Science, Pusan National University

⁴Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA

(Received 7 December 2012, Revised 4 January 2013, Accepted 11 January 2013)

Abstract : In this study, long term simulations for current(1979-2010) and future(2019-2050) climate over North-East Asian region were performed using RegCM4 driven by HadGEM2-AO provided by the KMA(Korean Meteorological Administration). The spatial resolution is 12.5km and two RCP scenarios(4.5, 8.5) are applied for the future climate simulation. The RegCM4 simulates well the spatial and temporal variations of air temperature of current climate. However, it weakly simulates the intensity of rain band associated with the seasonal march of the East Asian summer monsoon and thereby significantly under simulates the summer rainfall and fails in reproducing the seasonal and spatial variations of precipitation. The 20-year averaged differences between current(1986-2005) and future(2031-2050) simulations showed that the temperature increases are generally greater in RCP8.5(1.93K) than RCP4.5(1.86K) and all the changes are statistically significant at 1% level. In general, the temperature increases are greater in the northern region(autumn, winter) than in the southern region(spring, summer) irrespective of RCP scenarios. The temperature over South Korea is expected to increase by 1.53K to 1.87K irrespective of RCP scenarios and seasons. The precipitation changes vary significantly according to the season and region irrespective of RCP scenarios and the changes of spring and autumn in the certain regions are statistically significant at 5% level. The precipitation over South Korea is expected to increase by +0.42mm/day in RCP4.5 during spring but it is expected to significantly decrease during autumn(-0.35mm/day) and in RCP 8.5 during summer(-0.30mm/day).

Key Words : Regional climate, North-East Asia, RCP scenario, RegCM4, HadGEM2-AO

1. 서론

최근 들어 지구 온난화로 인한 전 지구적 기후 변화뿐만 아니라 지역규모의 기후 변화에도 관심이 점차 높아지고 있다(Giorgi and Mearns, 1999a, 1999b; Lee and Suh, 2000; Cha and Lee, 2009). 특히 인위적 요인에 의한 전 지구적 기후 변화는 지역에 따라 폭염 및 가뭄, 호우 등과 같은 극한기후 현상의 발생빈도 및 강도에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Im and Kwon, 2007a; IPCC, 2007; Oh *et al.*, 2012). 따라서 기후 변화에 대한 효율적 대응 및 적응방안을 수립하기 위해서는 전 지구적인 기후 변화에 대한 연구와 함께 지역적 기후 변화에도 많은 관심과 연구가 필요하다(성장현 외, 2012). 기상청에서는 우리나라에서의 기후 변화에 대한 범부처적 대응 및 적응방안 수립에 필요한 신뢰성 있는 고해상도 기후 변화 정보를 산출하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다(이효신 외, 2009).

전 지구 모델(Global Climate Model: GCM)은 1970년대 이후 기후 변화 예측 등의 연구를 위해 이용되어 왔으며 공간적으로는 지구 규모와 대륙 규모, 시간적으로는 연 평균, 계절 평균의 기후에 있어 비교적 신뢰성 있는 기후 예측자료를 생산할 수 있는 것으로 평가되고 있다(Charney, 1975; Latif *et al.*, 1998). 하지만 수평 해상도가 수백 km에 이르는 전 지구 모델을 이용하여 동아시아 영역 및 남한에 대한 보다 상세한 기후 변화 정보를 얻는 것은 매우 힘들다. 따라서 1990년대 이후 보다 제한된 관심 지역의 기후 정보를 얻기 위해서 역학적 규모 축소(Downscaling) 방안인 지역 기후 모델에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Giorgi and Mearns, 1999a; Lee and Suh, 2000; Cha and Lee, 2009; Suh *et al.*, 2012). 이러한 지역 기후 모델(Regional Climate Model: RCM)은 특

정지역 또는 국지규모의 기후 변화에 대한 연구에 있어 매우 유용한 도구로 활용되고 있으며, 신뢰성 있는 전구기후 모델 자료를 경계조건으로 처방하면 보다 상세한 미래기후 변화 정보를 생산할 수 있다(오석근 외, 2011a, 2011b; Im *et al.*, 2007b; Feng *et al.*, 2011).

국립기상연구소는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서(이하 IPCC AR5)에 참여하고 우리나라 국가 표준 기후 변화 시나리오를 구축하기 위해 영국 해들리 센터의 HadGEM2-AO(Hadley Centre Global Environmental Model, version 2)를 이용하여 대표 농도경로(Representative Concentration Pathway: RCP)에 의한 전 지구 기후 시나리오 자료를 산출하였다(이효신 외, 2009; 오석근 외, 2011b). HadGEM2-AO는 기본적으로 대기, 해양, 해빙 모델로 구성되어 있어 기후계 구성요소간의 에너지, 운동량, 수분속 등의 상호작용을 현실적으로 모의할 수 있으며 HadGEM2-AO에 대한 상세한 것은 Hewitt *et al.*(2010)과 Collins *et al.*(2011)을 참고하기 바란다. 최근 국립기상연구소는 HadGEM2-AO에 자연적인 것과 인위적인 강제력을 적용하여 과거 156년(1850–2005)에 대해 모의 실험을 수행하였다(CCIC Portal, 2012). 이를 기반으로 하여 새로운 기후 변화 시나리오인 RCP 시나리오 4종(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)으로 2100년까지의 미래기후 자료들을 생산하였다.

본 연구에서는 우리나라를 포함한 동북아시아 지역에서의 보다 상세한 지역기후 변화 및 신뢰성 있는 미래 기후 정보를 생산하기 위해 국립기상연구소의 HadGEM2-AO 자료를 12.5km의 해상도를 가진 RegCM4의 경계조건으로 처방하였다. 모의기간은 현재 32년(1979–2010)과 미래 32년(2019–2050)으로 하였으며 미래기후 적분에는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 이용하였다.

본 논문의 다음 절부터는 본 연구에서 사용한 모델과 실험설계에 대해 설명하고, HadGEM2-AO를 경계조건으로 처방한 RegCM4의 동북아시아 및 남한에서의 현재 지역기후모의에 대한 분석 결과를 기술하였다. 또한 대표농도경로(RCP) 시나리오에 따른 미래기후 변화를 전망하였다. 끝으로 현재기후에 대한 모델의 모의성능 및 미래기후 전망에 대하여 본 연구결과를 요약하였다.

2. 모델 및 실험설계

본 연구에서 사용한 지역기후모델은 ICTP (International Centre for Theoretical Physics)에서 2010년 7월에 공개한 RegCM4이다. RegCM3와 비교할 때, RegCM4에서는 새로운 지면모수화 및 행성경계층 방안이 추가되었고, 기존의 복사

전달 및 경계층 방안을 개선하였다. 또한 모델의 소스코드를 전면 개선하여 기중간의 호환성과 계산 효율성을 크게 향상시켰다(ICTP Portal, 2010; Giorgi *et al.*, 2012).

Table 1은 본 연구에서 사용한 지역기후모델 RegCM4의 구성을 나타낸다. 모의영역은 동북아시아 지역으로 37.50°N과 127.50°E를 중심으로 200×180(2,500×2,250km)개의 수평 격자로 이루어져 있다(Figure 1). 모델의 수평 해상도는 12.5km이고 연직 좌표계는 23층의 시그마 좌표계이며 적분 시간간격은 30초이다. 경계조건(ERA-Interim, R2) 및 적운 모수화 방안(Emanuel, 1991; Grell, 1993)을 조합한 1년간의 민감도 실험을 통해, 상대적으로 남한의 강수모의에 있어 더 좋은 모의성능을 보였던 Emanuel(1991)방안을 적운 모수화 방안으로 채택하였다(오석근 외, 2011a). 그리고 행성 경계층 물리 방안으로

Table 1. Model 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) X 180 (Lat)
Map projection	Lambert Conformal
Vertical layers	23 vertical sigma levels
PBL scheme	Holtslag
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. Current period: Jan, 1979~Dec, 2010 2. Future period: Jan, 2019~Dec, 2050
Analysis period	1. Current period: Jan, 1986~Dec, 2005 2. Future period: Jan, 2031~Dec, 2050 (RCP4.5, RCP8.5 Scenarios)

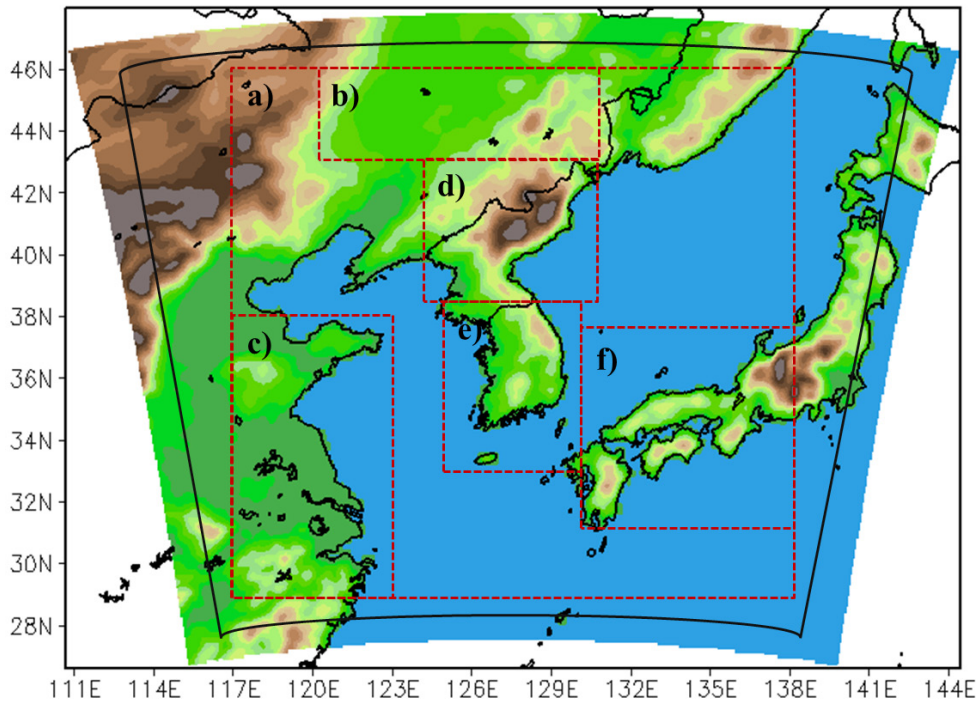


Figure 1. Model domain and topography. a) Entire domain, b) North-China, c) South-China, d) North-Korea, e) South-Korea, and f) Japan.

Holtslag *et al.* (1990) 방안을, 복사전달 방안으로 NCAR CCM3(Kiehl *et al.*, 1996)을, 지면 모형으로 NCAR CLM3.5를 사용하였다(Oleson *et al.*, 2008).

국립기상연구소에서 제공하고 있는 Had-GEM2-AO 자료를 경계조건으로 처방하였으며 현재기후 32년(1979–2010)과 미래기후 32년(2019–2050)에 대해 장기적분을 수행하였으며 장기적분 과정에서는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 이용하였다. 동북아시아 지역에 대한 모의수준 및 변화 전망을 살펴보기 위하여 모의기간 중 최근 20년(1986–2005)과 가장 먼 미래 20년(2031–2050)을 분석기간으로 설정하여 연구를 수행하였다. 여기서 20년간의 자료만을 이용한 것은 전체 적분자료 중 최근 기후 대비 가장 먼 미래지역기후변화 정보를 산출하기 위함이었다. 현

재기후에 대한 모의수준을 검증하기 위하여 기상청의 지상관측 자료, CRU-TS(Climatic Research Unit Time-Series) 3.0 자료(CGIAR CSI Portal, 2010)와 상·하층 바람장 및 기온 분석을 위해 NCEP-DOE(National Center For Environment Prediction-Department Of Energy) R2 자료를 이용하였다(Kanamitsu *et al.*, 2002).

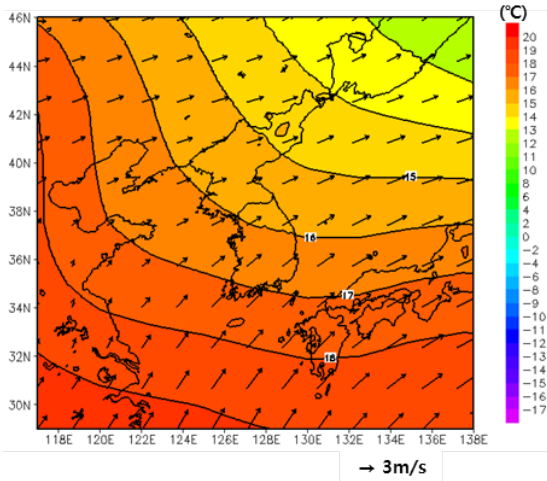
3. 연구 결과

1) 현재기후에 대한 모의성능

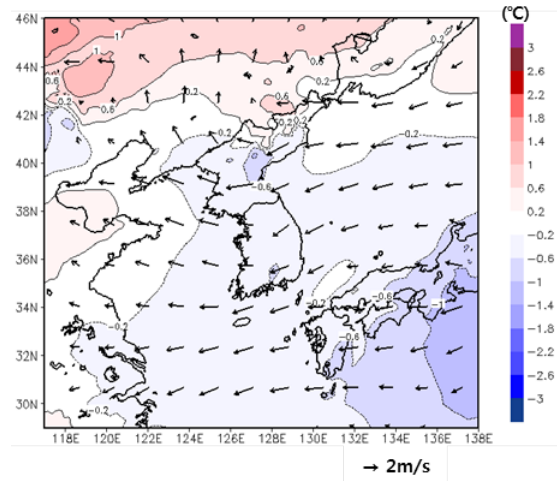
Figure 2는 현재기간 20년(1986–2005) 평균 여름(JJA)과 겨울(DJF) 동안의 850hPa 하층 평균 바람장 및 기온에 대한 재분석 자료(R2), 그리고 RegCM4와 R2와의 차이를 나타낸 것이다. 우리

A. Summer

a-1) Reanalysis (R2)

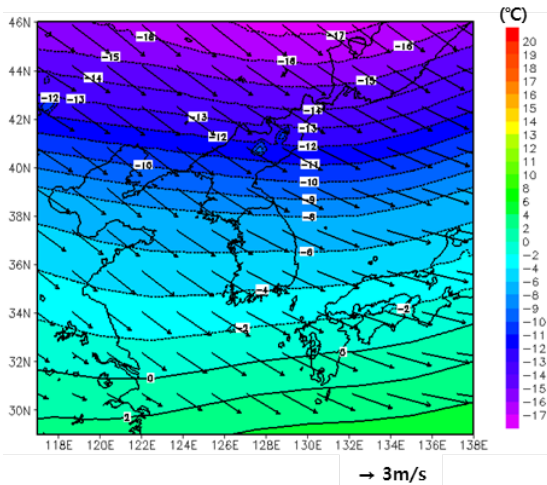


a-2) RegCM4 - R2



B. Winter

b-1) Reanalysis (R2)



b-2) RegCM4 - R2

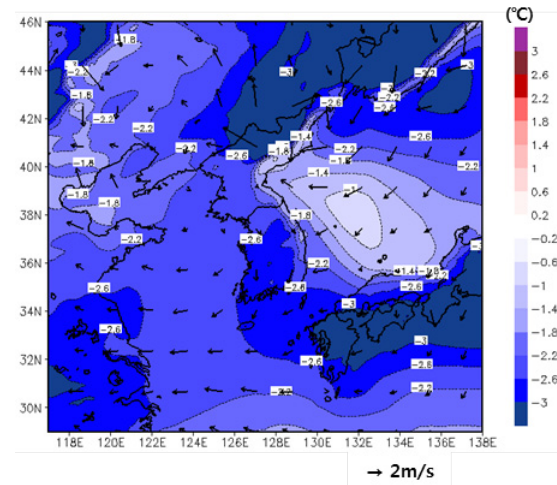


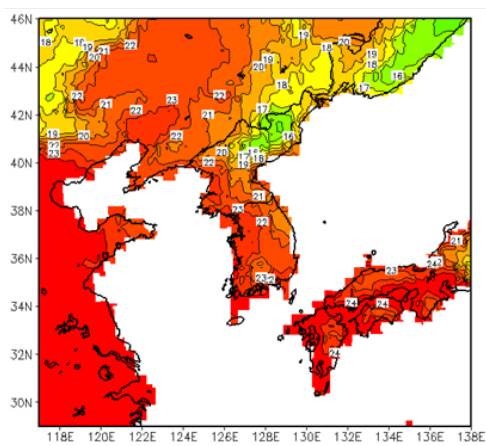
Figure 2. 20-year (1986-2005) averaged winds (m/s) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) of reanalysis data (R2: left) and differences between RegCM4 driven by HadGEM2-AO and reanalysis data (right) at 850hPa for summer (JJA) and winter (DJF).

나라를 비롯한 동북아시아의 여름에는 온도경도가 남서에서 북동방향으로 나타나고 있으며 남서풍이 탁월하게 불고 있다. 하지만 겨울에는 온도경도가 남북방향으로 강하게 발달하고 있으며 시베리아 고기압의 영향으로 북서계절풍이 탁월하게 발달하고 있다. 여름철의 경우 RegCM4는 R2

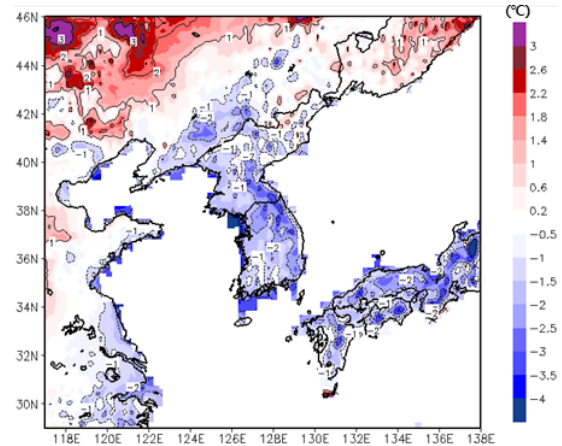
의 경우보다 고위도 지역($>40^{\circ}\text{N}$)에서는 기온을 약 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 정도 높게, 저위도 지역($\leq 40^{\circ}\text{N}$)에서는 약 $-0.2\sim -1^{\circ}\text{C}$ 정도 기온을 더 낮게 모의하여 남북온도경도차를 약화시켜 결과적으로 남서풍도 크게 약화시키고 있다. 겨울에는 전체적으로 기온을 낮게 모의하였지만 그 강도가 지역에 따라

A. Summer

a-1) CRU

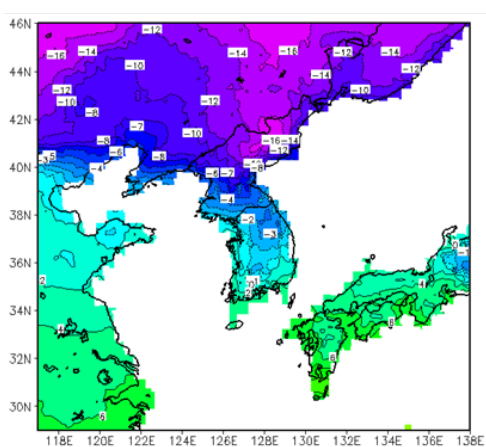


a-2) RegCM4 - CRU



B. Winter

b-1) CRU



b-2) RegCM4 - CRU

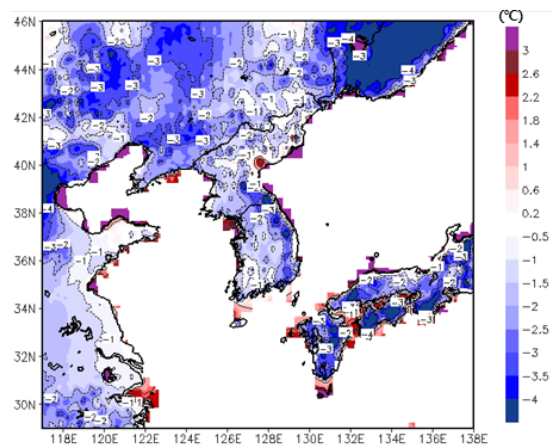


Figure 3. Spatial distribution of 20-year (1986-2005) averaged CRU air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and air temperature differences ($^{\circ}\text{C}$) between RegCM4 and CRU during summer (JJA) and winter (DJF).

달라서 우리나라의 동쪽과 남쪽에서는 동풍성분이 강화되고 북쪽에서는 남풍성분이 강하게 모의되고 있다.

Figure 3은 최근 20년(1986-2005) 평균 CRU 기온, 그리고 RegCM4와 CRU 사이의 기온 차를 여름과 겨울에 대해 나타낸 것이다. 전반적으로 동북아시아 지역의 여름 및 겨울철 기온은 지

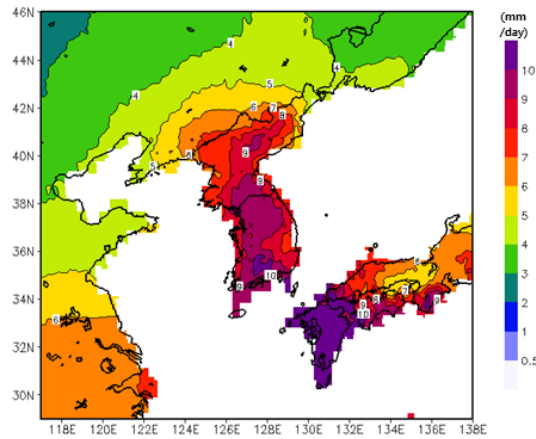
리적 위치와 지형에 따른 특징이 잘 나타나고 있다. 즉, 고위도로 갈수록 기온이 낮아지며, 백두산과 같은 높은 지형에서 기온이 낮게 분포한다. RegCM4는 여름철 기온의 경우 만주지역을 포함한 고위도 지역에서 관측보다 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 정도 높게, 한반도를 포함한 저위도 지역에서 관측보다 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 모의하였지만 기온의 공간분포

를 비교적 잘 모의하였다. 겨울철 기온의 경우 지역에 따라 다소 차이는 있지만 대부분의 지역에서 기온을 약 1~4℃ 정도 관측보다 낮게 모의하는 특성을 보였다. 이는 RegCM3를 이용하여 한반도 및 동아시아 지역에서의 모의수준을 분석하였던 선행연구들의 연구결과와 유사하다(Im *et al.*, 2007a; Zhang *et al.*, 2008). Im *et al.*(2007a)는 20km 해상도를 갖는 RegCM3를 이용하여 한

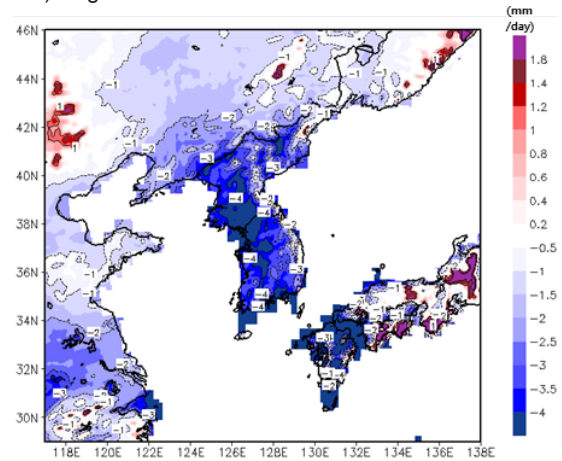
반도에서의 기온과 강수의 모의수준을 평가하였으며, 그 결과 RegCM3가 기온의 공간분포를 잘 모의하지만 대부분의 지역에서 cold bias가 나타난다. Zhang *et al.*(2008)에서는 RegCM3가 겨울철의 경우 중국 전 지역에서 cold bias가, 여름철의 경우 북동지역에서는 warm bias가, 그 이외의 지역에서는 cold bias가 나타난다. 이로 보아 RegCM3에서 나타났던 기온에 대한 모의특성은

A. Summer

a-1) CRU

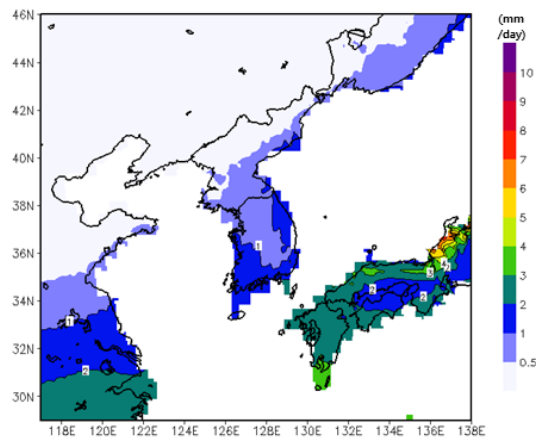


a-2) RegCM4 - CRU



B. Winter

b-1) CRU



b-2) RegCM4 - CRU

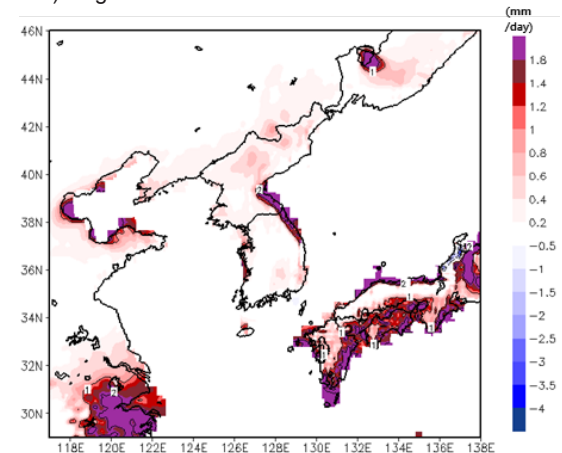


Figure 4. Same as Figure 3 except for precipitation (mm/day).

RegCM4에도 유사하게 나타남을 알 수 있다.

Figure 4는 현재 20년(1986–2005) 평균 여름과 겨울의 CRU 강수분포, 그리고 RegCM4와 CRU 사이의 강수 분포차를 나타낸 것이다. 여름에는 일본과 우리나라에서 10mm/day 이상의 많은 강수가 내리고 있으며 만주 등 모의영역 북쪽에서는 5mm/day 이하의 강수가 내리고 있다. 겨울에는 중국 양쯔강 유역, 남한 그리고 일본지역에서 상대적으로 많은 강수가 내리고 있으나 만주 등에서는 0.5mm/day 이하로 매우 적은 양만 내리고 있다. RegCM4는 모의영역 전체에서 여름 강수를 현저히 과소하게 모의하고 있으며 특히 한반도와 일본 일부영역에서는 4mm/day 정도 과소하게 강수를 모의하고 있다. 이렇게 강수를 현저히 적게 모의한 것은 Figure 2에서 설명한 바와 같이 동아시아 여름 몬순 강수대의 이동 및 발달에 매우 중요한 하층 제트를 실제보다 매우 약하게 모의한 것과 관련된 것으로 판단된다. 반면, 겨울철 강수의 경우 RegCM4는 동북아시아 지역의 대부분 지역에서 관측과 유사하게 모의하였고, 겨울 몬순과 관계되어 일본의 북서지역에서 나타나는 강수대의 패턴을 잘 모의하였다. 하지만 상대적으로 관측보다 강수대를 강하게 모의하면서 일본을 비롯한 남한, 남중국 지역에서의 강수를 관측보다 약 0.2~1mm/day 정도 과대하게 모의하였다. 전반적으로 RegCM4는 RegCM3와 유사하게 한반도에서의 여름철 강수를 현저히 과소하게 모의하

는 특성을 보였으며, 반면 겨울 강수는 관측보다 약 0.2~1mm/day 정도 과대하게 모의하는 특성을 보였다(Im *et al.*, 2007c; Park *et al.*, 2008)

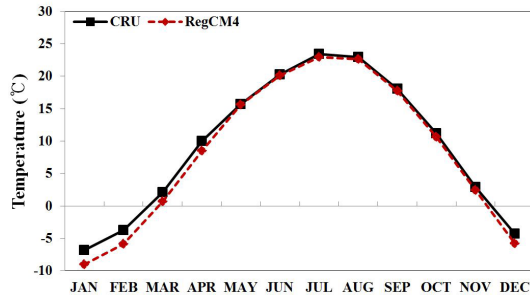
Figure 5와 6은 CRU와 RegCM4가 모의한 동북아시아 전체 분석영역 및 각 지역별 기온과 강수의 계절변동을 나타낸 것이다. 기온과 강수 모두 육지지역에 대해서만 분석을 실시하였으며, 각 분석영역에 대한 위·경도 정보는 Table 2와 같다. 각 분석영역에서의 기온과 강수의 계절변동 특성을 보다 잘 표현하기 위해 y 축 크기를 각 분석영역별로 달리 적용하였다. 전반적으로 RegCM4는 지역에 관계없이 기온의 계절변동을 CRU와 매우 유사하게 모의하였다(Figure 5). 그러나 지역에 따라 다소 차이는 있지만 대부분의 지역에서 RegCM4는 CRU보다 기온을 약 $-0.2 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 정도 낮게 모의하는 특성을 보이며, 특히 겨울철에 이러한 현상이 크게 나타났다. 남한과 일본의 경우 RegCM4는 계절에 관계없이 약 -2°C 정도 기온을 낮게 모의하는 특성을 보여 상대적으로 다른 지역에 비해 낮은 모의성능을 보였다. 강수의 경우 RegCM4는 동북아시아 지역의 계절변동 패턴은 어느 정도 모의하였지만, 여름에는 현저히 적게, 겨울에는 많게 모의하여 계절변동 폭을 적절히 재생산하지 못하고 있다(Figure 6).

동북아시아 지역에서 HadGEM2-AO를 경계조건으로 처방하였을 때 RegCM4의 계절평균 기온과 강수에 대한 모의성능은 Figure 7과 같다.

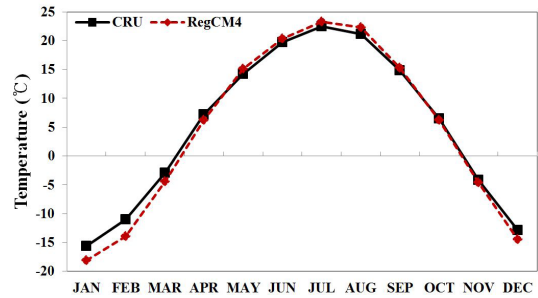
Table 2. Geographic information of the subregions.

Analysis region	Latitude ($^{\circ}\text{N}$)	Longitude ($^{\circ}\text{E}$)
Entire domain	29–46	117–138
North China	43–46	120–130.5
South China	29–38	117–123
North Korea	38.5–43	124–130.5
South Korea	33–38.5	125–130
Japan	31–37.5	130–138

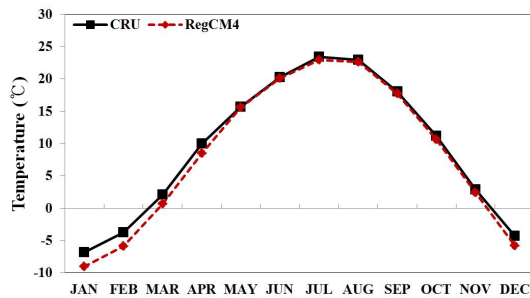
a) Entire domain



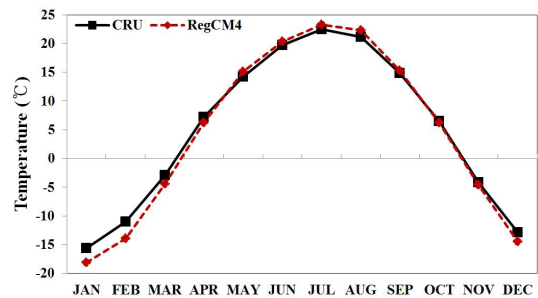
b) North China



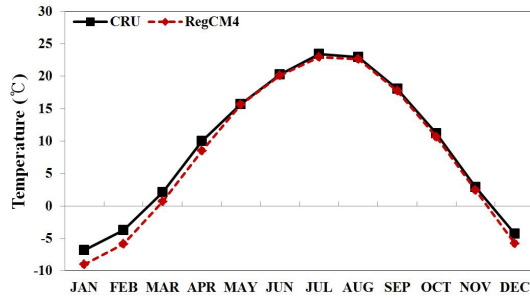
c) South China



d) North Korea



e) South Korea



f) Japan

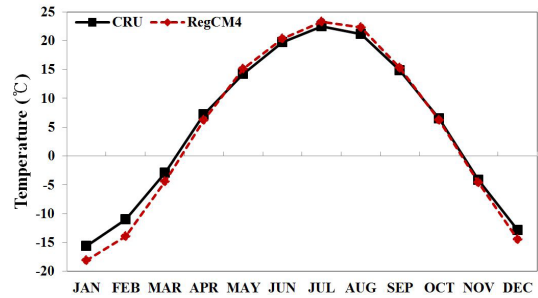
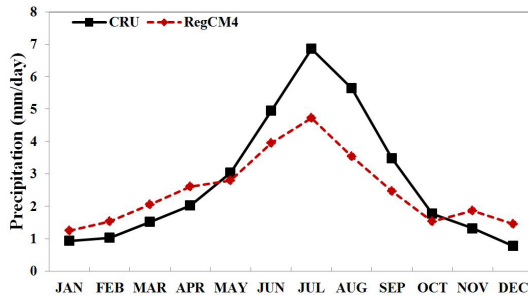


Figure 5. Seasonal variation of 20-year averaged monthly mean air temperature (°C) of CRU (solid line) and RegCM4 (dashed line) driven by HadGEM-AO for each sub-region.

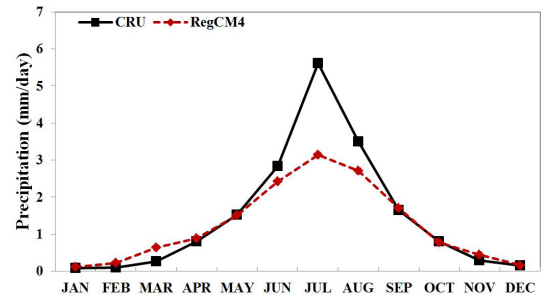
Figure 7은 BCR(Bias, Correlation, and RMSE) Diagram으로 가로축은 편의(Bias)를, 세로축은 상관계수(Spatial correlation coefficient)를, 그리고 각원의 크기는 평균 제곱근 오차(RMSE)의 크기를 의미한다. 기온의 경우 계절 및 분석영역에 관계없이 상관계수가 0.75 이상으로 비교적 높게 모의하였지만 여름철에는 편의의 지역차를 크게,

겨울에는 상관계수의 지역차를 크게 모의하고 있다. 또한 RMSE의 경우 여름보다 겨울에 약 2배 정도 크게 나타나고 있다. 강수의 경우 RegCM4는 여름에는 편의, 상관계수 그리고 RMSE가 지역에 따라 차이를 크게 모의하고 있다. 이것은 RegCM4가 동북아시아 지역에서의 여름 강수의 공간변동 특성을 적절히 모의하지 못함을 제시한

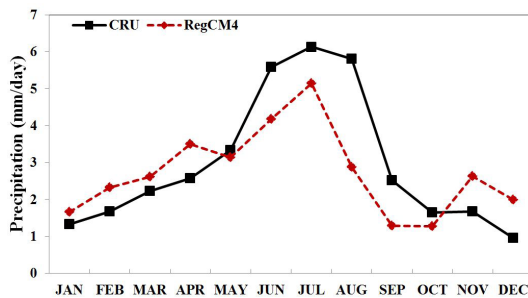
a) Entire domain



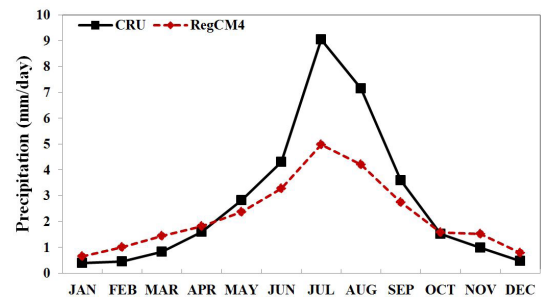
b) North China



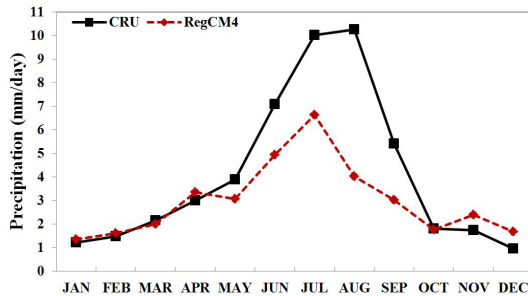
c) South China



d) North Korea



e) South Korea



f) Japan

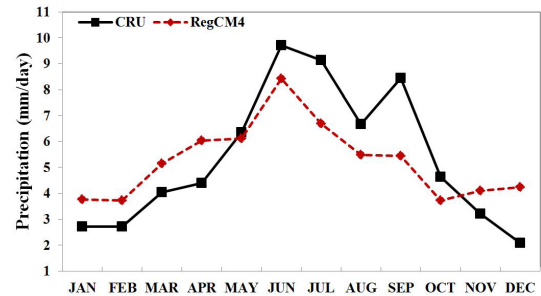


Figure 6. Same as Figure 5 except for precipitation (mm/day).

다. 또한 겨울에는 대부분의 분석영역에서 편의는 약 1.0mm/day 이하로 작게 나타났지만 상관계수와 RMSE는 지역차가 크게 나타나고 있다. 하지만 상관계수는 대부분 지역에서 0.5 이상으로 나타나 겨울철 강수의 공간분포는 어느 정도 모의하는 것으로 볼 수 있다. 우리나라의 경우 여름철 강수에 대한 모의수준을 살펴보면, 편의는

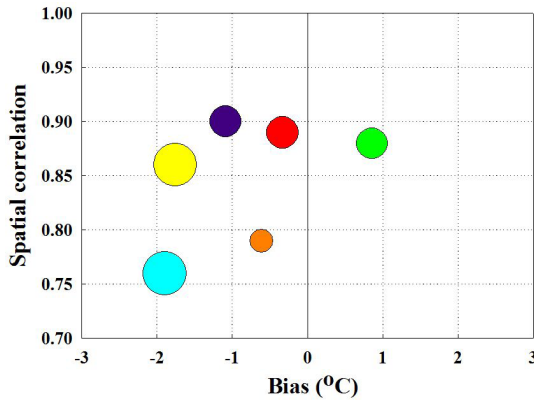
-4.1mm/day, RMSE는 4.3mm/day, 상관계수는 약 0.25로 다른 분석영역에 비해 매우 낮은 모의 성능을 보였다.

2) RCP 시나리오별 미래기후변화

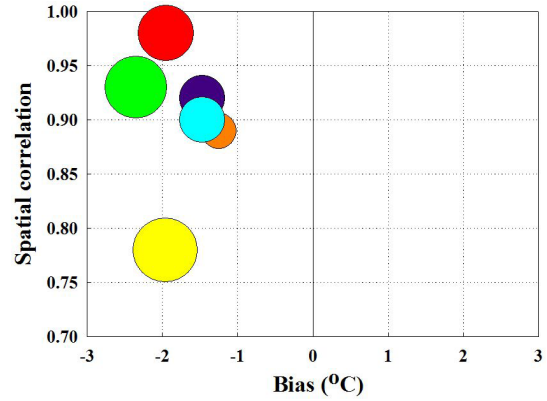
본 연구에서는 IPCC 5차 평가보고서를 위해 이용되는 새로운 미래기후변화 시나리오인 RCP 시

A. Temperature

a-1) Summer

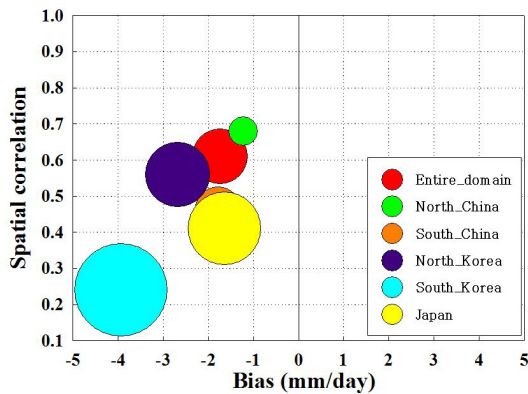


a-2) Winter



B. Precipitation

b-1) Summer



b-2) Winter

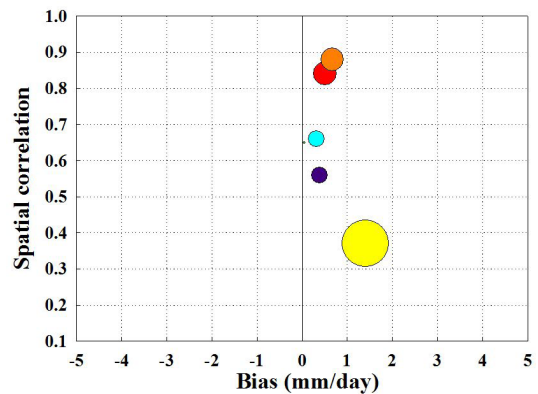


Figure 7. Statistical validation of surface air temperature (°C) and precipitation (mm/day) simulated by RegCM4 using CRU 3.0 data for 20 years (1986–2005). The size of circles are proportional to the RMSE values.

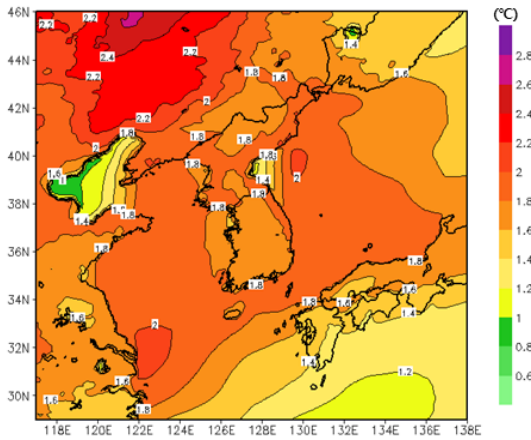
나리오를 이용하였다. RCP 시나리오는 대기의 온실가스, 에어로졸 등에 의해서 받는 순 에너지의 양, 즉 복사강제력을 기준으로 8.5, 6.0, 4.5, 2.6(W/m²) 시나리오로 나누어지며 본 연구에서는 4.5와 8.5 시나리오를 이용하였다. RCP4.5 시나리오는 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되었음을 가정하는 배출 시나리오로서 IPCC 4차 평가보고서의 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 배출 시나리오 중 B1과 유사하며,

RCP8.5 시나리오는 온실가스 저감정책이 전혀 시행되지 않음을 가정하는 시나리오로서 SRES의 A2~A1FI에 상응하는 배출 시나리오이다.

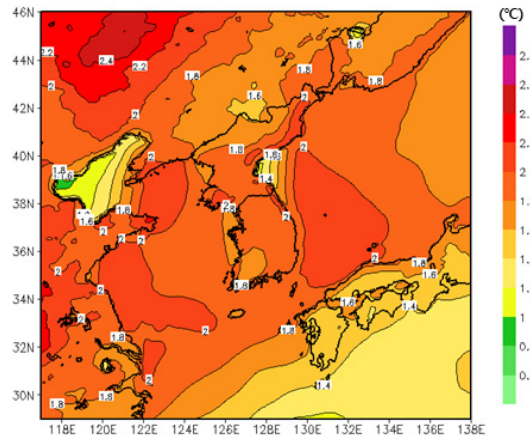
Figure 8은 현재기후(1986–2005) 대비 RCP 시나리오별 미래(2031–2050) 기온의 변화량을 여름과 겨울에 대해 나타낸 것이다. 전반적으로 동북아시아 지역에서 기온은 RCP 시나리오에 관계없이 모의영역 남쪽보다는 북쪽에서, 여름보다는 겨울에 기온의 상승폭이 크게 나타나고 있다. 또

A. Summer

a-1) RCP4.5 - Current

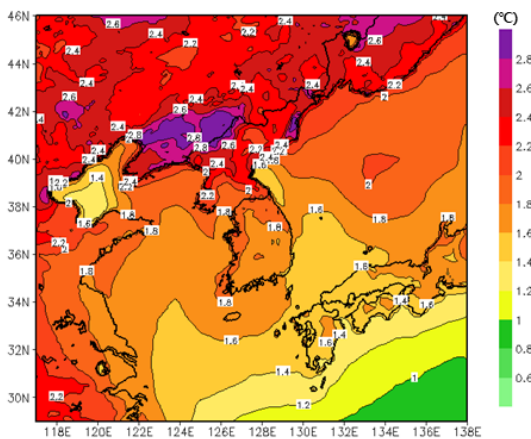


a-2) RCP8.5 - Current



B. Winter

b-1) RCP4.5 - Current



b-2) RCP8.5 - Current

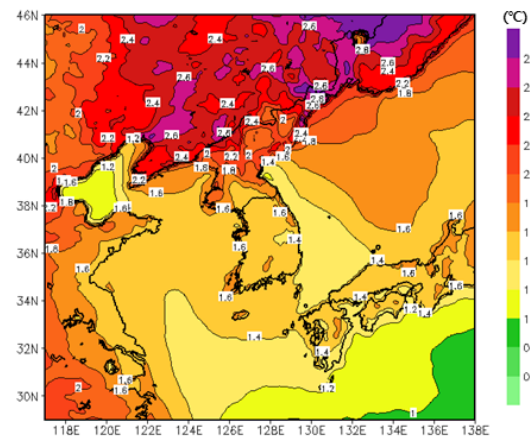


Figure 8. Spatial distribution of temperature changes from current (1986-2005) to future (2031-2050)] according to the RCP scenarios (4.5/8.5) and season.

한 지역에 따라 조금의 차이는 있지만 RCP4.5 보다 RCP8.5에서 기온 상승폭이 크게 나타나고 있다. Table 3은 RCP 시나리오 및 지역별로 현재 대비 미래의 계절평균 기온 변화량을 나타낸 것이다. 연평균 기온의 경우 모든 지역에서 RCP4.5 보다 RCP8.5에서 상승폭이 크게 나타나고 있지만 그 차이는 대부분 0.16K 이내로 작게 나타나고

있다. RCP8.5 시나리오에서 기온상승이 가장 크게 전망되는 영역은 북중국으로 겨울에 약 2.5K 상승할 것으로 전망되었으며, 가장 작게 기온상승이 전망되는 지역은 일본으로 겨울에 약 1.49K로 나타났다. RCP4.5 시나리오의 경우 북한영역에서 겨울에 약 2.45K 정도 기온상승이 가장 클 것으로 전망되었다. 반면, 일본에서 가을에 약

Table 3. Temperature differences (ΔT , unit: $^{\circ}\text{C}$) between future (2031-2050) and current (1986-2005) according to the RCP scenarios and subregions.

Analysis region	Scenarios	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
Entire_domain	RCP8.5	1.93**	1.73**	1.88**	2.07**	2.04**
	RCP4.5	1.86**	1.62*	1.82**	1.84**	2.17**
North_China	RCP8.5	2.18**	1.74*	2.00**	2.49**	2.50**
	RCP4.5	2.02**	1.39	2.12**	2.20**	2.38**
South_China	RCP8.5	1.86**	1.84**	1.93**	1.90**	1.76**
	RCP4.5	1.80**	1.88**	1.69*	1.67**	1.96**
North_Korea	RCP8.5	1.96**	1.72*	1.78**	2.09**	2.23**
	RCP4.5	1.92**	1.56	1.83**	1.86**	2.45**
South_Korea	RCP8.5	1.70**	1.59*	1.87**	1.80**	1.53
	RCP4.5	1.68**	1.63**	1.75**	1.54**	1.79**
Japan	RCP8.5	1.54**	1.55*	1.56**	1.56**	1.49*
	RCP4.5	1.51**	1.65**	1.57**	1.25	1.57**

* Significance level: 5%

** Significance level: 1%

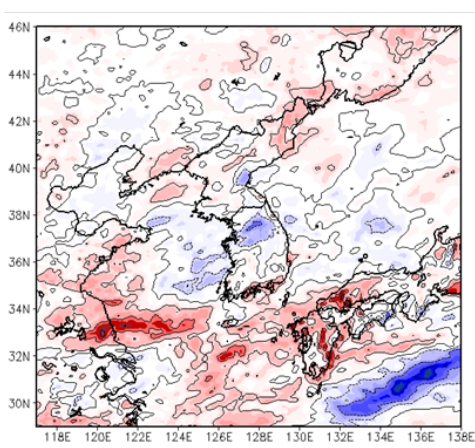
1.25K로 기온상승이 가장 적게 나타날 것으로 전망되었다. 우리나라의 경우 RCP8.5 시나리오에서는 여름(1.87K)과 겨울(1.53K)에 각각 최대와 최소의 기온상승이 전망된 반면, RCP4.5 시나리오에서는 겨울(1.79K)과 가을(1.54K)에 각각 최대와 최소의 기온상승이 전망되었다. Table 3에 제시된 현재(1986-2005) 대비 미래(2031-2050) 기온 변화 값은 미래 기온이 현재기온보다 유의수준 1% 또는 5%에서 대부분 증가하는 것으로 나타났다.

Figure 9는 Figure 8에서와 같이 강수의 변화량을 여름과 겨울에 대해 나타낸 것이다. 전반적으로 여름 강수는 RCP 시나리오에 관계없이 우리나라를 제외한 동북아시아 지역에서 증가될 것으로 전망된다. 특히 RCP4.5에서는 중국 양쯔강 유역과 일본열도 그리고 연해주 지역에서 강수의 증가가 전망되고 있다. RCP8.5의 경우 특히 대만에서 일본 류슈에 이르는 해역에서 매우 큰 강수의 증가($\sim +1.6\text{mm/day}$)가 전망되고 있다. 하지

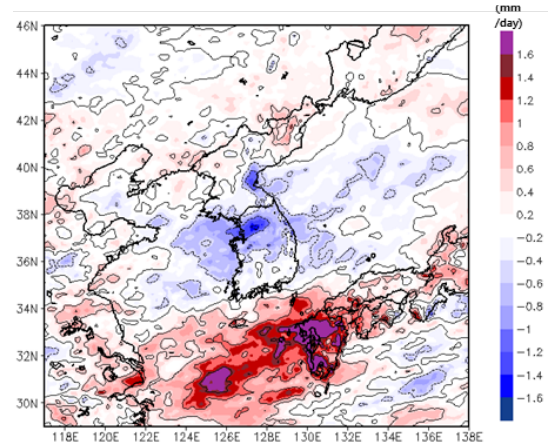
만 겨울에는 RCP 시나리오에 관계없이 일본 북쪽 해역에서만 강수의 증가가 전망될 뿐 산둥반도 북쪽 해역, 우리나라 동해 그리고 모의영역 남쪽 해역에서 강수의 감소가 예상되고 있다. 특히 RCP8.5에서는 모의영역 남쪽 해역에서 강수의 큰 감소($\sim -1.4\text{mm/day}$)가 예상되고 있다. Table 4는 RCP 시나리오 및 지역별로 현재 대비 미래의 계절평균 강수의 변화량을 나타낸 것이다. 연평균 강수의 경우 우리나라와 일본을 제외한 영역들에서는 RCP4.5보다 RCP8.5에서 상승폭이 크게 나타나고 있지만 그 차이는 대부분 0.14mm/day 이내로 작게 나타나고 있다. RCP8.5 시나리오에서 강수의 증가가 가장 크게 전망되는 영역은 남중국으로 봄에 약 $+0.71\text{mm/day}$ 이며, 강수의 증가가 가장 작게 전망되는 영역은 일본으로 가을에 약 -0.57mm/day 이다. 이 변화량은 유의수준 1%와 5%에서 각각 유의한 값으로 나타났다. 또한 RCP4.5 시나리오에서 강수의 증가가 가장 크게 전망되는 영역은 남한으로 봄에 약

A. Summer

a-1) RCP4.5 - Current

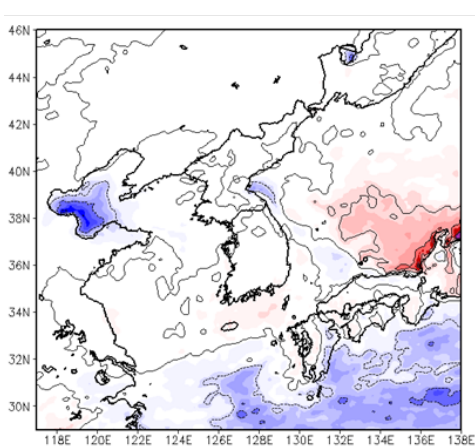


a-2) RCP8.5 - Current



B. Winter

b-1) RCP4.5 - Current



b-2) RCP8.5 - Current

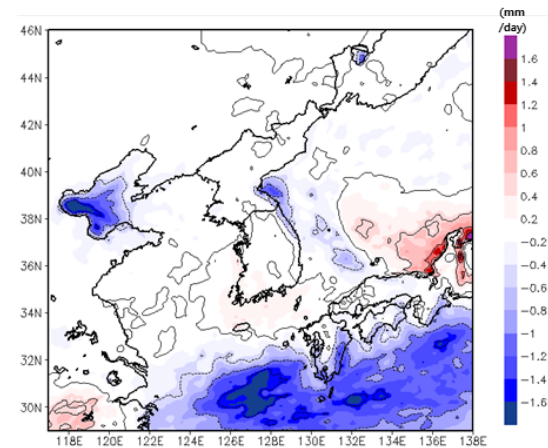


Figure 9. Same as Figure 8 except for precipitation (mm/day).

+4.2mm/day이며, 반면 강수의 증가가 가장 작게 전망되는 영역은 일본으로 가을에 약 -0.64mm/day 이다. 이 변화량은 유의수준 10%와 5%에서 각각 유의한 값으로 나타났다. 우리나라의 경우 RCP8.5 시나리오에서는 봄(+0.12mm/day)과 여름(-0.30mm/day)에 각각 최대와 최소의 강수량 증가가 전망되었고, RCP4.5 시나리오에서는 봄(+0.42mm/day)과 가을(-0.35mm/day)에 각각

최대와 최소의 강수량 증가가 전망되었다. 이 변화량은 유의수준 10%에서 유의하게 나타났다. 전반적으로 미래 강수 변화량은 봄과 가을의 일부 영역을 제외하곤 강수의 변화량 값이 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Table 4. same as Table 3 except for precipitation changes (ΔP , unit: mm/day).

Analysis region	Scenarios	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
Entire_domain	RCP8.5	0.06	0.28***	0.17	-0.11	-0.09
	RCP4.5	0.03	0.18*	0.21	-0.27***	0.00
North_China	RCP8.5	0.04	0.24*	0.02	-0.06	-0.02
	RCP4.5	0.04	0.11	0.18	-0.16*	0.04*
South_China	RCP8.5	0.22**	0.71***	0.24	0.02	-0.08
	RCP4.5	0.08	0.32*	0.26	-0.19	-0.07
North_Korea	RCP8.5	0.01	0.20*	0.08	-0.13	-0.10
	RCP4.5	0.00	0.04	0.16	-0.23*	0.01
South_Korea	RCP8.5	-0.02	0.12	-0.30	0.05	0.04
	RCP4.5	0.03	0.42*	-0.01	-0.35*	0.08
Japan	RCP8.5	-0.03	0.00	0.65	-0.57**	-0.20
	RCP4.5	0.01	0.32	0.32	-0.64**	0.03

* Significance level: 10%

** Significance level: 5%

*** Significance level: 1%

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라를 비롯한 동북아시아 지역의 보다 상세한 기후변화 정보를 생산하기 위해 12.5km의 고해상도 지역기후모델 RegCM4를 이용하여 연구를 수행하였다. 국립기상연구소에서 제공하는 HadGEM2-AO를 경계조건으로 처방하여 동북아시아 지역에 대하여 현재 32년(1979-2010)과 미래 32년(2019-2050)에 대해 장기적분을 수행하였다. 미래기후를 적분하는 과정에서 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 이용하였다. 모의기간 중 최근 20년(1986-2005) 자료를 이용하여 모의수준을 평가하였고 가장 먼 미래 20년(2031-2050)과 최근 20년의 평균 차이로 미래기후변화를 전망하였다. 또한 RegCM4의 동북아시아 지역 및 남한에서의 모의수준 검증에는 CRU-TS 3.0과 기상청 소속 59개 관측지점의 강수자료를 이용하였다.

현재기후(1986-2005)에 대하여 RegCM4는 지

형 및 지리적 특성에 따른 기온의 공간분포를 잘 모의하였지만 대체적으로 여름철의 고위도에서는 CRU보다 높게, 저위도에서는 CRU보다 낮게 모의하였고, 겨울철에는 모든 분석 영역에서 CRU보다 낮게 모의하였다. 강수의 경우 동아시아 여름 몬순발달에 중요한 하층 제트류를 약하게 모의한 결과 전체적으로 여름철 동아시아 몬순과 관련한 강수대를 약하게 모의하였다. 그 결과 한반도 및 일본 남부지역에서 강수를 과소 모의하였다. CRU와 비교할 때 지역에 따라 다소 차이를 보였지만 RegCM4는 기온의 계절변동을 비교적 현실성 있게 모의하였다. 하지만 동북아시아 전체에서 여름철 강수를 현저히 적게 모의하고 겨울철 강수는 대부분 지역에서 많게 모의하여 강수의 계절변동은 적절히 재생산하지 못하고 있다.

미래기후(2031-2050)에 대하여 RegCM4는 시나리오에 관계없이 저위도보다 고위도 지역에서, 여름철보다 겨울철에 기온상승을 더 크게 모의하였다. 전체적으로 RCP4.5보다 RCP8.5 시나리오

에서 기온 상승이 더 클 것으로 전망되며 특히 중국 만주지역에서의 기온 상승을 크게(약 2K 이상) 전망하였다. 우리나라의 경우 RCP4.5에서는 가을과 겨울에 각각 최소(+1.54K)와 최대(+1.79K)로 기온이 상승하는 것으로 전망되었다. 반면에 RCP8.5에서는 겨울과 여름에 각각 최소(+1.53K)와 최대(+1.87K)로 기온이 상승하는 것으로 전망되었다. 전반적으로 현재 대비 미래기온의 변화량은 시나리오, 계절 및 지역에 관계없이 유의수준 1%에서 유의한 것으로 나타났다. 강수의 경우 RCP 시나리오 및 계절에 따라 변화경향이 매우 상이하게 전망되고 있다. 동북아시아 전체적으로는 시나리오에 관계없이 봄과 여름철에는 강수가 증가될 것으로 전망되나 가을과 겨울철에는 강수가 감소될 것으로 전망된다. 우리나라의 경우 RCP4.5 시나리오에서는 봄에는 강수가 크게 증가될 것(+0.42mm/day)으로 전망되나 가을에는 반대로 크게 감소될 것(-0.35mm/day)으로 전망되었고 이 변화량은 유의수준 10%에서 유의한 값으로 나타났다. 반면 RCP8.5 시나리오에서는 여름에만 강수가 크게 감소될 것(-0.30mm/day)으로 전망되었다. 따라서 RCP4.5 시나리오에서는 우리나라에 가을가뭄이 심화될 것으로 전망된다. 일본의 경우 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 모두에서 여름에는 강수가 크게 증가(+0.32mm/day, +0.65mm/day, 유의하지 않음)되지만 가을에는 감소폭을 매우 크게(-0.64, -0.57mm/day, 유의수준 5%에서 유의함) 전망하고 있다. 그러나 현재 대비 미래 강수 변화량은 봄과 가을의 일부 지역을 제외하곤 대부분 유의하지 않은 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 우리나라를 비롯한 동북아시아 지역에서의 미래 상세 지역기후변화 정보로 활용될 수 있을 것이다. 하지만 현재 기후에 대한 RegCM4의 모의수준, 특히 강수에 대한 모의수

준이 낮은 점, HadGEM2-AO의 한계 등을 고려할 때 본 연구결과만을 이용하기 보다는 다른 지역기후모델 결과와 종합적으로 이용할 필요가 있을 것이다. 특히 최근 컴퓨팅 파워의 증가로 다수의 지역기후모델 결과를 이용한 앙상블 기법, 베이저언 통계를 이용한 확률예보기법 그리고 선형 회귀기법들이 개발되고 있으므로 이들을 이용하여 예측수준을 향상시킬 필요가 있다(명지수 외 2012; Kim and Suh, 2012; Suh *et al.*, 2012).

사사

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

참고문헌

- 명지수 · 오석근 · 서명석, 2012, 선형 회귀 기법을 이용한 지역기후모델의 기온 모의자료 수준 개선, 기후연구, 7(3), 255-270.
- 성장현 · 강현석 · 박수희 · 조천호 · 배덕효 · 김영오, 2012, 대표농도경로(RCP)에 따른 21세기 말 우리나라 극한강수 전망, 대기, 22(2), 221-231.
- 오석근 · 서명석 · 명지수 · 차동현, 2011a, CORDEX 동아시아 영역에서 경계조건 및 적운모수화방안이 RegCM4를 이용한 남한 지역 기후모의에 미치는 영향 분석, 한국지구과학회지, 32(4), 373-387.
- 오석근 · 서명석 · 차동현 · 최석진, 2011b, CORDEX 동아시아 영역에서 HadGEM2-AO를 경계조건으로 처방한 RegCM4의 상세 지역기후 모의성능, 한국지구과학회지, 32(7), 732-749.

- 이효신 · 간순영 · 변영화 · 강현석 · 현유경 · 백희정 · 권원태, 2009, IPCC AR5 시나리오 산출을 위한 HadGEM2-AO 성능평가, 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 272-273.
- Cha, D. H. and Lee, D. K., 2009, Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique, *Journal of Geophysical Research*, 114, D14108, doi: 10.1029/2008JD011176.
- Charney, J. G., 1975, Dynamics of deserts and drought in Sahel, *Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 193-202.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward S., 2011, Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2, *Geoscientific Model Development Discussions*, 4, 997-1062, doi: 10.5194/gmdd-4-997-2011.
- Emanuel, K. A., 1991, A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 2313-2335.
- Feng, J. M., Wang, Y. L., 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., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Guttler, 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 multi CORDEX domains, *Climate Research*, 52, 7-29.
- Grell, G. A., 1993, Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization, *Monthly Weather Review*, 121, 764-787.
- Hewitt, H. T., Copsey, D., Culverwell, I. D., Harris, C. M., Hill, R. S. R., Keen, A. B., McLaren, A. J., and Hunke, E. C., 2010, Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modeling system, *Geosci. Model Dev. Discuss*, 3, 1861-1937.
- Holtzlag, A. A. M., De Bruijin, 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.
- Im, E. S. and Kwon, W. T., 2007a, 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., 2007b, 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.
- Im, E. S., Ahn, J. B., and Kwon, W. T., 2007c, Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part 2: Future climate projection (2021-2050), *Climate Dynamics*, 30, 239-254.
- 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, 104.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fopprono, M., and Potter, G. L., 2002, NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *American Meteorological Society*, 93, 1631-1643.
- 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. S. and Suh, M. S., 2012, Prospects of Using Bayesian model averaging for the calibration of one-month forecasts of surface air temperature over South Korea, accepted to *APJAS*.
- Latif, M., Anderson, D., Barnett, T., Care, M., Kleeman, R., Leetmaa, A., O'Brien, J., Rosati, A., and Schneider, E., 1998, A Review of the predictability and prediction of ENSO, *Journal of Geophysical Research*, 103, 14375-14393.
- 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.
- Oh, S. G., Suh, M. S., and Cha, D. H., 2012, Impact of Boundary Conditions on Precipitation and Temperature Extremes over South Korea in the CORDEX Regional Climate Simulation Using RegCM4, accepted in *APJAS*.
- 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.
- 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.
- 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*, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00457.1, 25, 7067-7082.
- 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.
- <http://ccs.climate.go.kr/>
- <http://www.cgiar-csi.org/data/uea-cru-ts-v3-10-01-historic-climate-database>
- <http://www.ictp.it/research/esp/models/regcm4>