다중 지역기후모델을 이용한 동아시아 상세 기후변화 전망

김가영¹ · 김진은¹ · 김춘지² · 진천실¹ · 차동현¹ · 서명석³ · 박성찬⁴

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부 · ²이화여자대학교 환경공학과 · ³공주대학교 대기과학과 · ⁴기상청 기후협력서비스팀

(2014년 12월 5일 접수, 2014년 12월 18일 수정, 2014년 12월 22일 게재 확정)

Climate Change Projections over CORDEX East Asia Domain using Multi-RCMs

Gayoung Kim¹ · Jineun Kim¹ · Chun-Ji Kim² · Chun-Sil Jin¹ · Dong-Hyun Cha¹ ·

Myoung-Seok Suh³ · Seong-Chan Park⁴

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science & Technology

³Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

³Department of Atmospheric Science, Kongju National University

⁴Climate Cooperation and Service Team, Korea Meteorological Administration

(Received 5 December 2014, Revised 18 December 2014, Accepted 22 December 2014)

Abstract : In this study, global climate change scenario by HadGEM2-AO is dynamically downscaled using 5 Regional Climate Models (RCMs) for the Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) - East Asia. All RCMs with 50-km horizontal resolution are integrated for continuous 71 years (1979-2049). In the evaluation of historical runs, all models tend to overestimate precipitation over the subtropical western North Pacific. For the surface air temperature, all models have cold biases over the East Asian continent compared to the observation. In the future projections, all models show similar changes in precipitation such as increasing precipitation over the tropical oceans and slightly decreasing precipitation over the East China Sea. In the mid-latitudes, convective precipitation tends to increase due to the enhanced convective instability, while non-convective precipitation tends to decrease slightly due to the changes in subtropical high and monsoon circulation. For surface air temperature, the warming tendency over the entire domain is captured by all models and it is larger in high latitude regions. The warming temperature is related to the increase in longwave radiation, which leads to prominent increase in minimum surface air temperature.

Key Words : climate change projection, East Asia, CORDEX, Regional Climate Model, RCP scenario

주요어 : 기후변화전망, 동아시아, CORDEX, 지역기후모델, RCP 시나리오

1. 서론

최근 기후변화와 연관되어 재해 기상현상의 발생과 강도가 증가하고 있으며, 이로 인하여 미래 기후변화에 대한 예측 정보가 더욱 더 중요해지고 있다(Solomon *et al.*, 2007). 세계 각국은 전 인류가 직면한 기후변화 문제를 해결하고자 국제연합(United Nations, UN) 산하 국가간기후변화협약체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 중심으로 미래 기후변화를 예측할 수 있는 기후변화 시나리오를 생산하고 있다. IPCC 4차 기후변화보고서에서는 SRES(Special Report on Emission Scenario) 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 미래 기후변화를 예측하였고, 5차 보고서에서는 상호 피드백을 고려하여 산출한 RCP(Representative Concentration Pathways) 배출 시나리오를 기반으로 새롭게 기후변화 시나리오를 산출하였다. RCP 기반 기후변화 시나리오는 전지구순환모델(Global Circulation Models, GCMs)에 의해 산출되고, 일반적인 기후변화 전망자료로서 다양한 분야에서 활용되고 있다. RCP 기반 시나리오 생산에 참여한 전지구순환모델들의 수평해상도는 SRES 기반 시나리오에 비해 다소 증가하였지만 여전히 수백 km 정도의 낮은 해상도로 인하여 다양한 분야에서 실제 활용가능한 상세 기후변화 정보를 도출하기 어려운 문제가 있다. 특히 지형과 해안선이 복잡하고 다양한 규모의 기상현상이 혼재되어 나타나는 동아시아 지역의 기후를 전지구순환모델로 전망하는 것은 많은 한계가 있다(Hong and Kanamitsu, 2014). 더구나 현재의 컴퓨팅 성능으로 수십 km 정도의 고해상도 전지구순환모델을 수십 년 이상 적분하는 것은 현실적으로 힘들다.

이러한 전지구순환모델의 한계를 보완하고자 지역기후모델 기반 역학적 상세화 방법을 이용한 상

세 기후변화 시나리오가 산출되고 있다(Im *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2013). 지역기후모델은 전지구순환모델의 결과에서 관심 영역에 대해서만 상세화를 수행하기에 효율적이고 해당 영역에 최적화된 모델로 상세 시나리오를 생산할 수 있는 장점이 있다. 이렇게 생산된 상세 시나리오는 미래 기후변화에 대한 적응전략수립의 기초자료로 사용되고, 농업, 수자원 등의 타분야로 활용될 수 있기에 매우 중요하다. 하지만 기존의 상세 시나리오를 산출하기 위해 이용된 단일 지역기후모델은 계통적 오차와 불확실성을 내포하고 있기 때문에 미래 전망의 신뢰도를 평가하기 힘든 한계가 있다(Suh *et al.*, 2012). 이러한 한계를 극복하기 위해 지난 십년동안 여러 국제 프로젝트에서 다중 지역기후모델을 이용한 상세 기후변화 시나리오가 산출되고 있다(Fu *et al.*, 2005; Christensen *et al.*, 2007). 최근 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 산하 세계기후연구프로그램(World Climate Research Programme, WCRP) 주관으로 보다 조직적으로 개선된 상세 기후변화 시나리오 생산을 위해 CORDEX(Coordinated Regional Climate Downscaling EXperiment)가 구축되어 전 세계 14개 지역별로 활발히 수행되고 있다(Giorgi *et al.*, 2009; Jones *et al.*, 2011). 이 중 동아시아 영역에 대한 상세 시나리오는 기상청의 주도로 CORDEX-East Asia에 의해 생산되고 있다. 하지만 CORDEX-East Asia의 개별 지역기후모델을 이용한 검증과 기후변화 연구가 수행되고 있을 뿐 다중 모델의 결과를 동시에 비교한 연구가 미비한 실정이다(Suh *et al.*, 2012; Oh *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014).

따라서 본 연구에서는 CORDEX-East Asia에 참여한 지역기후모델이 생산한 강수와 온도에 대한 상세 기후변화 시나리오를 관측과 검증하고, 이를 기반으로 미래 기후변화를 전망하고자 한다. 논문

의 구성은 다음과 같다. 2장에서 본 연구에서 사용된 모델과 자료를 소개하고, 3장에서 동아시아 강수와 온도의 검증과 변화에 대해 논의한다. 마지막으로 4장에서 연구결과에 대한 요약을 한다.

2. 자료 및 모델

본 연구에서 사용된 지역기후모델들은 HadGEM3-RA(Hadley Centre Global Environmental Model version 3), RegCM4(Regional Climate Model version 4.0), SNURCM(Seoul National University Regional Climate Model), WRF(Weather Research and Forecasting model), GRIMs(Global/Regional Integrated Model System)이다. 이들 지역기후모델들은 동아시아 기후 및 극한 기후 자료 재생산, 전지구모델 자료의 상세화 연구에 적합한 모델로 잘 알려져 있다(Oh *et al.*, 2013; Cha *et al.*, 2011a; Cha *et al.*, 2011b; Lee

et al., 2014). Table 1은 이 지역기후모델들의 모의 환경을 보여주고 있고, 자세한 역학체계 및 물리 과정은 Suh *et al.*(2012)에 소개되어 있다. 모든 지역기후모델은 50-km 수평 해상도의 CORDEX-East Asia 영역에서 수행되었고, 관측결과 검증과 모델간 상호비교를 위해 0.5° 격자로 동일한 영역으로 내삽하였다(Figure 1). 모든 지역기후모델은 Historical 실험과 RCP(Representative Concentration Pathway) 8.5 시나리오 실험에 대해 각각 27년(1979~2005년)과 44년(2006~2049년) 동안 연속적으로 적분되었고, 스핀업 기간을 제외하고 효율적인 분석을 위해 현재 25년(1981~2005년)과 미래 25년(2025~2049년) 기간에 초점을 맞추었다. 현재기후에 대한 지역기후모델의 강수와 온도의 모의수준을 검증하기 위하여 GPCP(Global Precipitation Climatology Project)와 CRU(Climatic Research Unit) 자료를 각각 사용하였다. 미래기후 적분에 사용된 RCP 8.5 시나리오는 오랜 시간 동안 지속적으로 증가하는 온실가스를 배출하며 높

Table 1. Configurations of RCMs.

	HadGEM3-RA	RegCM4	SNURCM	WRF	GRIMs
Institution	Korea Meteorological Administration	Kongju National Univ.	Seoul National Univ.	Seoul National Univ.	Yonsei Univ.
Number of grids (Lat. × Lon.)	183×220	197×243	197×233	197×233	198×241
Resolution	50km				
Radiation	General 2-stream radiation	NCAR CCM3	CCM2 package	RRTM and Dudhia	Chou's scheme
Microphysics	Mixed phase scheme	SUBEX	Reisner II	WSM3	diagnostic microphysics scheme
Convection parameterization	Revised mass flux scheme	MIT-Emanuel	Kain-Fritsch II	Kain-Fritsch II	Simplified Arakawa-Schubert
Land surface model	MOSES II	CLM3	CLM3	Noah	Noah
Reference	Davies <i>et al.</i> (2005)	Giorgi <i>et al.</i> (2012)	Lee <i>et al.</i> (2004)	Skamarock <i>et al.</i> (2008)	Hong <i>et al.</i> (2013b)

Figure 1. The CORDEX-East Asia domain with topography and analysis area (dashed line).

은 온실가스 농도를 초래하는 대표적인 시나리오다(Riahi *et al.*, 2011).

3. 연구 결과

1) 동아시아 강수와 온도의 모의수준 검증

동아시아 강수와 온도에 대한 개별 모델의 모의 성능을 검증하기 위하여 Historical 실험 결과를 관측 자료와 비교하였다. Figure 2는 5개 지역기후모델과 관측 자료인 GPCP 자료 사이의 25년 연평균 강수 편차를 보이고 있다. 모든 모델이 남중국해를 포함한 아열대 태평양 지역의 강수를 과다 모의하면서 주로 대륙보다 해양에서 강수 편차가 크게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 특히 SNURCM과 GRIMs에서 이러한 현상이 두드러지고, GRIMs는 다른 모델들과 달리 오호츠크해 주변의 강수를 관측에 비해 과다 모의하는 경향을 보였다. 반면 전반적으로 모델 모두 벵골 만 부근에서 강수를 과소 모의하였으며 RegCM4와 SNURCM에서 이러한 경향이 두드러졌다. 또한 RegCM4, GRIMs는

적도 부근의 북서태평양 지역을 과소 모의하는 모습을 보였다. 그러나 한반도에 큰 영향을 미치는 동아시아 몬순 강수대는 시베리아 지역과 함께 모든 모델에서 비교적 현실적으로 모의되어 중위도 지역의 강수 오차는 그리 크지 않지만, 한반도 부근에서는 GRIMs를 제외한 4개의 모델이 한반도 부근의 강수를 과소 모의하는 경향이 있다. 이렇게 모델별로 계통적인 오차를 보임에도 불구하고 25년 평균 강수에 대한 통계에서 모든 모델이 0.7 이상의 공간상관관계를 보이는 것은 이 모델들이 동아시아 강수의 공간 분포를 현실적으로 모의할 수 있다는 것을 의미한다(Table 2). 특히 RegCM4는 0.26mm day^{-1} 의 강수 편차를 생산하여 다른 모델들의 편차들보다 1mm day^{-1} 이상 적고 0.8 이상의 공간상관관계를 보이는 등 동아시아 지역의 강수를 가장 우수하게 모의하였다.

지상온도의 경우 5개 모델 모두 관측 자료인 CRU 자료에 비하여 동아시아 대륙 대부분에서 한랭편차를 가지는 계통적 오차가 나타났다(Figure 3). 특히 GRIMs는 다른 모델들에 비해 동아시아 대륙에서 전반적으로 매우 큰 한랭편차를 모의하

Figure 2. Bias of annual mean precipitation (mm day^{-1}) between models and observation for 25-year present periods (1981-2005).

Table 2. Statistics of 25-year annual mean precipitation (mm day^{-1}).

	HadGEM3-RA	RegCM4	SNURCM	WRF	GRIMs
RMSE	2.56	1.76	3.89	2.48	2.07
Bias	1.25	0.26	1.82	1.36	3.71
Spatial Correlation	0.75	0.82	0.73	0.82	0.71

였고, 다른 4개의 모델들은 티베트 부근에서 한랭 편차를 두드러지게 모의하였다. RegCM4의 티베트 고원 지역 일부와 45°N 이상의 고위도 지역에서 온난편차가 크게 나타나기도 했다. 다른 지역에 비해 한반도에서는 모든 모델이 편차를 비교적 작게 모의하였다. 25년 평균 온도에 대한 통계에서 RegCM4가 가장 작은 한랭편차를 모의하였고, GRIMs가 가장 큰 한랭편차를 모의하였다. 모든 모델이 -1°C 이상의 한랭편차를 보이지만, 0.9 이상의 매우 높은 공간상관관계를 보이며 동아시아 지역의 온도 모의를 비교적 적절히 하였다는 것을

확인하였다(Table 3).

현재의 동아시아 강수와 온도에 대해 모든 모델이 지역적인 편차를 모의하였지만, 비교적 높은 공간상관관계를 보이며 성공적으로 모의하였다. 이것은 CORDEX-East Asia에 참여한 지역기후모델을 이용하여 산출된 미래 기후변화시나리오가 신뢰할 만하다는 것을 의미하기도 한다.

2) 동아시아 강수와 온도의 상세 전망

동아시아 강수와 온도의 상세 기후변화 전망을 위하여 RCP8.5 시나리오를 상세화한 미래 25년

Figure 3. Same as in Fig. 2 except for surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$).Table 3. Same as in Table 2 but for surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

	HadGEM3-RA	RegCM4	SNURCM	WRF	GRIMs
RMSE	3.75	3.20	3.27	3.91	6.39
Bias	-2.38	-1.39	-2.17	-2.55	-4.39
Spatial Correlation	0.97	0.97	0.98	0.97	0.94

(2025–2049) 모의 결과와 Historical 실험을 상세화한 현재 25년(1981–2005) 결과의 편차를 분석하였다(Figure 4). 강수의 경우, 모든 모델은 시베리아 지역의 편차를 작게 모의하여 이 지역의 미래 강수량이 현재 강수량과 크게 달라지지 않을 것이라고 예상할 수 있다. 반면 5개 지역기후모델 모두 아열대 북서태평양의 강수가 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 모든 모델이 동아시아 몬순 강수대인 만주지역, 한반도, 일본 지역에서 강수 증가를 모의하는데 이는 미래에 강화된 동아시아 여름 몬순과 연관될 수 있다. 모델마다 강수량이

현재보다 감소하는 지역이 조금씩 다르게 모의된다. 상대적으로 HadGEM3-RA는 중위도 부근의 태평양 지역에서, RegCM4는 남중국해와 중위도 부근의 북서태평양 지역에서 미래 강수량을 다소 감소하게 모의하였다. 오호츠크해는 모델 별로 다른 결과를 보이는데, HadGEM3-RA와 RegCM4, WRF에서 미래 강수는 더 많게 모의되는 반면 SNURCM과 GRIMs는 적게 모의되는 경향을 보인다.

미래의 강수 변화 요인을 알아보기 위하여, RCP8.5 시나리오를 상세화한 미래 25년(2025~

Figure 4. Differences in 25-year annual mean precipitation (mm day^{-1}) between future (2025-2049) and present (1981-2005) climates.

Figure 5. Differences in annual mean (a) convective precipitation (mm day^{-1}), (b) non-convective precipitation (mm day^{-1}), and (c) 850-hPa wind vector (m s^{-1}) between future (2025-2049) and present (1981-2005) climates for multi-model ensemble mean.

2049년) 모의 결과와 Historical 실험을 상세화한 현재 25년(1981~2005년) 강수 편차를 대류성 강수와 비대류성 강수로 나누어 분석하였고, 비대류성 강수 변화의 원인을 파악하기 위하여 하층 바람장의 변화를 조사하였다(Figure 5). 모든 모델의 전반적인 변화 경향을 분석하기 위하여 5개 모델 결

과를 단순 평균 이상불하였다. 대부분의 지역에서 대류성 강수의 변화가 비대류성 강수의 변화보다 크게 나타났다. 대류성 강수는 적도 부근의 북서태평양 지역, 벵골 만 지역과 함께 동아시아 지역 대부분에서 증가하였고, 특히 중국 동북부와 한반도, 일본 동해안까지 이어지는 몬순 강수대에 강

Figure 6. Same as in Fig. 4 except for surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

수가 두드러지게 증가하였다. 이러한 대류성 강수의 증가는 온난화로 인한 대류불안정도의 증가와 연관될 수 있다. 비대류성 강수는 일본 동해안과 중위도 부근 태평양에서 감소하고 캄차카 반도 남부 지방은 약하게 증가하는 양상을 보인다. 특히 한반도 주변에서 비대류성 강수가 다소 감소하는 경향을 보이는데, 이는 남북온도차의 감소로 인한 제트기류의 2차 순환 약화가 하나의 원인이 될 수 있다. 이러한 강수 특성의 변화 분석을 통해 중관장의 변화로 인한 비대류성 강수의 감소보다 대류불안정도 증가로 인한 대류성 강수의 증가 정도가 더 크기 때문에 한반도의 미래 강수량이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 RCP8.5 시나리오를 상세화한 미래 25년 모의 결과와 Historical 실험을 상세화한 현재 25년 결과의 연평균 지상온도 차이를 보여준다. 비록 각각의 지역기후모델은 아시아 상세 지역에

대해 온도 상승 값을 다르게 생산하였지만, 대체적으로 모든 모델이 모의 영역의 미래 지상온도를 1°C 이상 높게 전망하였을 뿐만 아니라 공간적으로 유사한 변화 패턴을 전망하였다. 특히, 이들 모델들은 공통적으로 고위도로 갈수록 온도 상승 폭이 증가하는 것을 분명하게 볼 수 있다. 다시 말하면, 지역기후모델들은 모두 미래에 저위도의 온도 증가량보다 고위도의 온도 증가량이 커져 결과적으로 지구 온난화 영향으로 남북 위도별 온도 차이가 감소할 것으로 전망하였다(Hong *et al.*, 2013b). 이러한 남북온도 정도의 감소는 한반도 주변의 상층 제트기류의 약화를 초래하여 제트기류 주변의 2차 순환이 강수 감소를 야기할 수 있다. 또한 티베트고원이 포함된 중앙아시아의 온도 상승은 겨울철 북극 온난화가 이 지역으로 확장되는 것과 관련될 수 있다(Solomon *et al.*, 2007). HadGEM3-RA와 RegCM4는 상대적으로 동아시아 대륙에

Figure 7. Same as in Fig. 5 except for (a) downward and (b) upward longwave radiations at the surface, and (c) minimum and (d) maximum air temperatures.

서 온도 상승을 약하게 전망한 반면 SNURCM, WRF, GRIMs는 온도 상승을 강하게 전망하였다.

5개 지역기후모델이 모두 대부분의 모의 영역에서 온도 상승을 전망한 원인을 분석하기 위해서 각 모델의 지면 에너지 복사량과 온도 변화량에 대한 단순 평균 양상불을 계산하였다. Figure 7은 미래 25년에서 현재 25년의 지표면 유입 장파 복사, 지표면 유출 장파 복사, 지표면 최저 온도와 지표면 최고온도의 양상불 차이를 보여준다. 지표면 유

입 장파 복사량과 유출 장파 복사량의 증가하는 패턴은 고위도로 갈수록 온도 상승폭이 커지는 공간 패턴과 유사하였다. 특히, 5개의 모델의 온도 모의 결과 대륙에서의 온도 증가량이 오�호츠크해 이남 부분을 제외한 대부분의 해양에서의 온도 증가량 보다 크게 나타났다. 이것은 비열이 큰 해양보다 비열이 작은 육지에서 온난화에 의한 반응 시간이 더 짧기 때문이다(Solomon *et al.*, 2007). 티베트고원과 오토츠크해 이남 지역을 제외하고 대부

분의 모의 영역에서 지표면 유입 장파 복사 증가량이 지표면 유출 장파 복사 증가량보다 많다. 특히, 중국과 한반도의 온도 증가율이 큰 이유는 지구온난화로 인한 대륙 부근의 장파 복사량이 크게 증가하였기 때문이다. 이는 SNURCM의 70년 장기 모의에서 보여준 CO₂ 증가에 따른 장파 복사 증가가 온도 상승을 유도한 것과 동일한 결과를 보여준다(Lee *et al.*, 2013). 5개 지역기후모델은 대부분에 대륙에서 최저온도가 최고온도보다 상대적으로 0.3°C 이상 뚜렷하게 증가하였다. 이것은 최고온도에 비해 최저온도의 온도 상승이 더 빨리 진행되어 일교차가 감소하게 되는 것을 의미하는데, 지구온난화로 인해 증가된 대기 하층 수증기가 지표에서 복사 냉각을 감소시키는 것과 관련이 있을 수 있다.

4. 요약

본 연구에서는 신뢰할 만한 기후변화정보를 생산하기 위하여 CORDEX 권고사항을 바탕으로 5개의 지역기후모델을 이용하여 동아시아 지역의 상세 기후변화 시나리오를 생산하였고, 관측과의 비교를 통하여 모델 성능을 평가하였다. 이후 현재(1981~2005년)와 미래(2025~2049년) 기후전망 자료의 비교를 통하여 강수와 지상온도에 대한 기후변화 전망을 수행하였다.

동아시아 강수와 온도에 대한 개별 모델의 모의 성능을 검증하기 위하여 Historical 실험 결과를 관측자료와 비교하였다. 모든 모델이 남중국해를 포함한 아열대 태평양의 강수를 과다 모의하고, 벵골만 부근에서 강수를 과소 모의하였다. 동아시아 몬순 강수대는 모든 모델에서 비교적 현실적으로 모의되어 중위도 지역의 강수 오차는 작게 나타났다. 그리고 모든 모델이 0.7 이상의 공간상관관계

를 보이며 동아시아 지역의 강수 공간 분포를 현실적으로 모의하였다. 지상온도의 경우 모델 모두 관측자료에 비하여 동아시아 대륙에서 한랭편차를 갖는 공통된 문제점이 나타났지만, 높은 공간상관관계를 보이며 비교적 현실적인 동아시아 온도를 모의하였다. 이러한 결과는 지역기후모델을 이용하여 산출된 미래 기후변화시나리오가 신뢰할 만하다는 것을 의미하기도 한다.

미래 기후변화에서 강수의 경우 모델 모두 전반적으로 열대지역에서 강수가 증가하고, 아열대 북서태평양 부근에서 강수가 감소하는 패턴을 보였다. 5개 모델 결과를 단순 평균 앙상블한 결과, 중위도 부근에서 대륙성 강수는 증가하는 반면 비대륙성 강수는 감소하였다. 대륙성 강수의 증가는 지구 온난화에 의한 대기불안정도의 증가, 비대륙성 강수의 감소는 제트기류의 약화뿐만 아니라 북서태평양 고기압의 확장과 관련이 있을 수 있다. 지상온도의 경우에 모든 모델에서 전반적인 온도 상승이 나타나고 고위도에서 상승이 뚜렷한 패턴을 보였다. 이들 모델의 앙상블 평균 결과 해양에 비해 대륙에서 온도가 크게 증가되었는데, 지구온난화에 의해 비열이 작은 대륙에서 장파 복사량이 크게 증가하여 온도 증가율이 더 크게 나타나는 것으로 추정된다. 그리고 대륙에서 최저온도가 최고온도보다 상대적으로 뚜렷하게 증가하였다.

기존의 단일 지역기후모델 대신 다중 지역기후모델을 이용함으로써 동아시아 강수와 온도 전망의 불확실성이 감소되어 신뢰할 만한 기후변화전망 자료 생산이 가능해졌다. 이를 기반으로 동아시아 몬순, 태풍, 가뭄, 열파 등의 극한 기후에 대한 전망을 산출할 계획이다. 더 나아가 이렇게 신뢰도가 확보된 기후변화전망자료는 농업, 수산업 등 다양한 분야에 기초자료로 활용될 것이다.

사사

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업”의 일환으로 (재)기상기술개발관리단 (CATER 2012-3084)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Cha, D.-H., Jin, C.-S., and Lee, D.-K., 2011a, Impact of local sea surface temperature anomaly over the western North Pacific on extreme East Asian summer monsoon, *Clim. Dyn.*, 37, 1691-1705.
- Cha, D.-H., Jin, C.-S., Lee, D.-K., and Kuo, Y.-H., 2011b, Impact of intermittent spectral nudging on regional climate simulation using Weather Research and Forecasting model, *J. Geophys. Res.*, 116, D10103.
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., and Amanatidis, G., 2007, Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project, *Climatic Change*, 81, 1-6.
- Davies, T., Cullen, M.J.P., Malcolm, A.J., Mawson, M.H., Staniforth, A., White, A.A., and Wood, N., 2005, A new dynamical core for the Met Office's global and regional modeling of the atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 1759-1782.
- Fu, C.-B., Wang, S.-Y., Xiong, Z., Gutowski, W.J., Lee, D.-K., McGregor, J.L., Sato, Y., Kato, H., Kim, J., and Suh, M.-S., 2005, Regional climate model intercomparison project for Asia, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 257-266.
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G.R., 2009, Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bull.*, 58, 175-183.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., mariotti, L., Sylla, M.B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G.T., Nair, B., Giuliani, G., Tyruncoyu, U.U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T.A., Tawfik, A.B., Shalaby, A., Zaakey, A.S., Steiner, A.L., Stordal, F., Sloan, L.C., and Brantovic, C., 2012, RegCM4: model description and preliminary test over multi CORDEX domain, *Clim. Res.*, 52, 7-29.
- Hong, S.-Y., Oh, S.-G., Suh, M.-S., Lee, D.-K., Ahn, J.-B., and Kang, H.-S., 2013a, Future climate changes over North-East Asian region simulated by RegCM4 based on the RCP scenarios, *Journal of Climate Research*, 8(1), 27-44 (in Korean).
- Hong, S.-Y., Park H.H., Cheong, H.-B., Kim, J.-E., E, Koo, M.-S., Jang, J., Ham, S., Hwang, S.-O., Park, B.-K., Chang, E.-C., and Li, H.-Q., 2013b, The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs), *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49, 219-243.
- Hong, S.-Y. and Kanamitsu, M., 2014, Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 50, 83-104.
- Im, E.-S., Ahn, J. B., Kwon, W. T., and Giorgi, F., 2008, Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part 2: future climate projection (2021-2050), *Climate. Dyn.*, 30, 239-254.
- Jones, C.G., Giorgi, F., and Asrar, G., 2011, The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX; An international downscaling link to CMIP5, *CLIVAR Exchanges*, International CLIVAR Project Office, No. 56, Southampton, United Kingdom, 34-40.
- Lee, D.-K., Cha, D.-H., and Kang, H.-S., 2004, Regional climate simulation of the 1998 summer flood over East Asia, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 82, 1735-1753.
- Lee, D.-K., Cha, D.-H., Jin, C.-S., and Choi, S.-J.,

- 2013, A regional climate change simulation over East Asia, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49, 655-664.
- 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.
- Oh, S.-G., Suh, M.-S., and Cha, D.-H., 2013, Impact of lateral boundary conditions on precipitation and temperature extremes over South Korea in the CORDEX regional climate simulation using RegCM4, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49, 497-509.
- 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, *J. Geophys. Res.*, 118, 1652-1667.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., and Rafaj, P., 2011, RCP8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Climatic Change*, 109(1-2), 33-57.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., and Powers, J.G., 2008, *A description of the Advanced Research WRF Version 3*, In NCAR Tech 15 Note NCAR/TN-475+STR., 113pp.
- Solomon, S. D. Q., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., H. L. M. Jr., and Chen, Z., 2007, *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 996 pp.
- 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, *J. Clim.*, 25, 7067-7082.

책임 편집: 허인혜

영문 교열: 이은걸