다중 지역기후모델을 이용한 한반도 강수 모의에서 수평해상도의 영향

김가영¹ · 차동현¹ · 이길¹ · 진천실¹ · 이동규² · 서명석³ · 안중배⁴ · 민승기⁵ · 홍성유⁶ · 강현석⁷

¹울산과학기술원 도시환경공학부, ²기상청, ³공주대학교 대기과학과, ⁴부산대학교 대기환경과학과,

⁵포항공과대학교 환경공학부, ⁶한국형수치예보모델개발사업단, ⁷국립기상과학원

(2016년 2월 29일 접수, 2016년 4월 29일 수정, 2016년 5월 24일 게재 확정)

Impact of Horizontal Resolution on Precipitation Simulation over South Korea with Multi Regional Climate Models

Gayoung Kim¹ · Dong-Hyun Cha¹ · Gil Lee¹ · Chun-Sil Jin¹ · Dong-Kyou Lee² · Myoung-Seok Suh³ ·

Joong-Bae Ahn⁴ · Seung-Ki Min⁵ · Song-You Hong⁶ · Hyun-Suk Kang⁷

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

²Korea Meteorological Administration

³Department of Atmospheric Science, Kongju National University

⁴Department of Atmospheric Science, Pusan National University

⁵School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

⁶Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems

⁷National Institute of Meteorological Sciences

(Received 29 February 2016, Revised 29 April 2016, Accepted 24 May 2016)

Abstract : In this study, global climate change scenario by Hadley Centre Global Environmental Model version 2-Atmosphere and Ocean (HadGEM2-AO) is dynamically downscaled using four regional climate models (RCMs). All RCMs with 12.5-km and 50-km resolution are integrated for continuous 27 years (1979-2005). In general, RCMs with higher horizontal resolution more reasonably capture the spatial distribution of precipitation over South Korea compared to those with lower resolution. In particular, heavy precipitation regions related to complex mountain ranges are well simulated due to detailed topography in RCMs with higher resolution. Difference between RCMs with dissimilar resolutions is relatively robust in summer compared to other seasons. This could be associated with that higher resolution and detailed topography lead to more realistic simulation of heavy summer precipitation related to mesoscale phenomena.

Key Words : climate change, horizontal resolution, precipitation, regional climate model

주요어 : 기후변화, 수평해상도, 강수, 지역기후모델

1. 서론

최근 극심한 기후 변화로 인해 자연 재해의 강도 및 빈도가 증가하고 있으며, 이로 인한 피해 또한 함께 증가하고 있다(Stocker *et al.*, 2013). 이러한 피해를 줄이기 위하여 현재보다 더 정확한 기후 예측 기술이 요구되고 있는 실정이다. 일반적인 미래 기후변화 전망 자료는 전구기후모델을 이용하여 생산되어 다양한 분야에 활용되는 것으로 알려져 있다. 그러나 낮은 해상도를 갖는 전구기후모델만을 사용하여 좁은 지역의 상세 기후 정보를 생산하는 것은 한계가 있으며, 특히 동아시아 지역은 지형 및 해안선이 복잡하고 다양한 규모의 기상 현상이 발생하기 때문에 이 지역의 기후 정보를 생산하기 더욱 힘들다(Hong and Kanamitsu, 2014). 이를 보완하기 위해, 역학적 상세화 기법인 지역기후모델(RCM; Regional Climate Model)을 사용하여 상세 기후 정보를 생산하는 연구가 1980년대 말부터 활발하게 이루어지고 있다(Cha and Lee, 2009; Cha *et al.*, 2011).

일반적으로 지역기후모델은 전구기후모델보다 중규모 기상현상을 현실적으로 모의하는 것으로 알려져 있다(Im *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2013). 이것은 부가 정보(added value)로 인한 것으로, 경계 자료로 사용되는 전구기후모델에서 생산되지 못했으나 지역기후모델에서 생산된 정보를 말한다. 지역기후모델은 상대적으로 높은 해상도로 인해 지형에 의한 기상 현상을 현실적으로 반영하며, 또한 전구기후모델보다 상세한 극한 기후 정보를 생산할 수 있다(Giorgi, 2006). 이러한 이유로 지역기후모델이 생산한 상세 기후변화 시나리오는 타 분야 응용 및 정책 반영의 기초 자료로 활용될 수 있다(Hong and Kalnay, 2002). 그러나 단일 지역기후모델을 사용하면 계통 오차와 불확실성이 존재하기 때문에 이를 통해 산출된 미래 시나리오의

신뢰도는 낮을 수 있다(Cha *et al.*, 2016; Suh *et al.*, 2012). 이러한 한계를 극복하기 위해 전 세계적으로 다중 지역기후모델을 사용하여 앙상블 기후변화 시나리오를 생산하는 국제 공동 프로젝트가 수행되고 있다. 대표적으로 세계기후연구프로그램(World Climate Research Programme, WCRP) 주관으로 CORDEX(COordinated Regional climate Downscaling EXperiment)가 구축되어 지역별 기후변화 시나리오를 생산하고 있다. 반면, 같은 지역기후모델을 사용하더라도 수평해상도에 따라 부가 정보가 달라질 수 있다. 일반적으로 모델의 수평해상도가 높을수록 상세한 지형을 반영하여 더 자세한 기후변화 정보를 생산할 수 있지만(Mo *et al.*, 2000), 고해상도 모의 시 오히려 계통 오차가 커질 수도 있다(Nobre *et al.*, 2001). 따라서 지역에 따라 기후정보를 생산하기 적절한 수평해상도를 찾는 것이 중요하다. 최근 복잡한 지형과 다양한 기상 현상이 존재하는 동아시아 지역 모의 시 모델 수평해상도가 미치는 영향에 관한 연구가 활발히 진행 중이다(Stone *et al.*, 2003; Carvalho *et al.*, 2010). 그러나 다중지역기후모델을 이용한 한반도 지역기후모의에서 수평해상도가 미치는 영향을 조사한 연구는 아직까지 수행된 적이 없다.

본 연구에서는 4개의 지역기후모델을 이용하여 남한 강수 모의 시 수평해상도의 영향을 알아보고자 한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 본 연구에 사용된 모델과 자료를 소개하고, 3장에서 실험 결과에 대해 논의한다. 마지막으로 4장에서 연구결과를 요약한다.

2. 자료 및 모델

본 연구에서 사용된 4개 지역기후모델은, Had-GEM3-RA(Hadley Centre Global Environmental

Table 1. Configurations of RCMs used.

	HadGEM3-RA	RegCM4	SNURCM	WRF
Number of grids (Lat. × Lon.)	50 km horizontal resolution			
	183×220	197×243	197×233	197×233
	12.5 km horizontal resolution			
	184×164	198×178	199×179	201×180
Vertical Coordination	38 hybrid	18 sigma	24 sigma	27 sigma
Radiation	General 2-stream radiation	NCAR CCM3	CCM2 package	RRTM and Dudhia
Microphysics	Mixed phase scheme	SUBEX	Reisner II	WSM3
Convection parameterization	Revised mass flux scheme	MIT-Emanuel	Kain-Fritsch II	Kain-Fritsch II
Land surface model	MOSES II	CLM3	CLM3	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)

Model version3-Atmospheric regional climate model), RegCM4(Regional Climate Model version 4.0), SNURCM(Seoul National University Regional Climate Model), WRF(Weather Research and Forecasting model version 3.4)이다. 이 4개의 지역 기후모델은 동아시아 지역의 기후 재생산에 적합한 모델로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2014). 사용된 모델의 설정은 Table 1에서 확인할 수 있으며, 역학체계 및 물리과정은 Suh *et al.* (2012)에 소개되어 있다. 이 4개의 지역기후모델은 전구기후모델인 HadGEM2-AO로부터 역학적으로 상세화(Down-scaling)되었다. 본 연구에서는 2가지의 실험(R12, R50)이 수행되었다. R12 실험은 고해상도 모의 실험으로, 모든 모델의 수평 해상도는 12.5km다. R50 실험은 저해상도 모의실험으로, 모든 모델의 수평 해상도는 50km다. 모델마다 격자체계가 다소 다르기 때문에 분석의 용이함을 위해 R12, R50 실험의 모의 결과를 각각 0.1°, 0.5° 격자의 동일한 영역으로 내삽하였다(Figure 1). 본 연구에서는 남한의 육지지역(33–39°N, 125–131°E)의 강수

Figure 1. RCM domain of R50 (blue dashed line), R12 (red dashed line) with topograph (m) and analysis area (green dashed line).

모의를 주로 분석하였다. 모든 모델의 모의 기간은 27년(1979~2005년)이며, 스핀업 기간인 2년을 제외한 실제 분석 기간은 25년(1981~2005년)이다. 모델 검증을 위하여 0.25° 해상도의 관측강수

자료인 APHRODITE(Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources) 자료를 보완하여 사용하였다. APHRODITE 자료는 한반도 극한강수를 과소모의하는 계통적 오차를 가지기 때문에 기상청 정규관측자료와 APHRODITE 자료를 Barnes Schemes(Barnse, 1964)을 기반으로 하는 객관분석방법으로 결합함으로써 APHRODITE 자료를 보완하였다. 두 실험 모두 단순 평균 방법을 이용하여 앙상블을 산출하였다.

3. 연구 결과

Figure 2는 R12, R50 실험에서 사용된 지형 자료를 나타낸 것으로, 해상도가 높아질수록 지형을 더 상세하게 묘사할 수 있음을 알 수 있다. 최고 높이의 경우 R12 실험은 2199m, R50 실험은 1566m로 큰 차이를 보였으며, 특히 남부 지역 강수에 영향을 미치는 소백산맥 등이 R50실험보다

R12 실험에서 보다 상세하게 표현되었다.

Figure 3은 4개 지역기후모델과 관측 자료의 남한 25년 연평균 강수를 보이고 있다. 관측 자료의 결과에서 호남 지역은 다우지, 영남지역은 상대적으로 소우지인 것을 확인할 수 있다. R50 실험의 모든 모델 모의 결과는 낮은 해상도 탓에 지역별 강수 차이가 크지 않다. 특히, 모든 모델은 호남 지역의 다우지를 모의하지 못하는데 이는 소백산맥의 산악효과로 인한 강수가 R50 실험에서 저해상도 지형자료로 인하여 현실적으로 모의되지 못하기 때문이다. 또한 모든 모델은 전반적으로 대부분 지역의 강수를 관측에 비하여 과소 모의하였다. 반면 R12 실험의 모든 모델은 강수의 공간분포를 R50 실험보다 보다 현실적으로 모의하였다. 모든 지역기후모델은 소백산맥의 영향으로 인한 호남지역의 다우지역을 관측과 유사하게 모의하였으며, 특히 HadGEM3-RA에서 매우 우수한 공간분포 모의를 보였다. 남한 25년 연평균 강수에 관한 통계치 또한 높은 해상도에서 강수 분포와 강수량 모의가 개선되었다(Table 2). 강수량 공간분

a) R12

b) R50

Figure 2. Topography (m) in analysis area for R12 and R50 experiments.

Table 2. Statistics of 25-year (1981-2005) climatology of annual mean precipitation over South Korea.

		HadGEM3-RA	RegCM4	SNURCM	WRF
R12	Bias	-0.08	-0.44	0.03	0.58
	RMSE	0.31	0.68	0.57	0.86
	Pattern Corr.	0.70	0.34	0.17	0.34
R50	Bias	-0.49	-0.65	-0.95	-0.26
	RMSE	0.61	0.84	1.06	0.59
	Pattern Corr.	0.47	0.13	0.11	0.14

Figure 3. 25-year (1981-2005) climatology of annual mean precipitation over South Korea.

포 개선은 고해상도일수록 더 상세한 지형 정보를 표현할 수 있는 것과 관련이 있으며, 강수량 개선은 해상도가 높을수록 더 작은 규모의 대류계 모의가 가능한 것과 연관 지을 수 있다(Lee and Hong, 2014).

모델 앙상블과 관측 자료의 남한 25년 계절 평균 강수를 분석하였다(Figure 4). 동아시아 여름 몬

순의 영향을 받는 한반도는 여름철 강수가 연평균 강수의 70%를 차지하기 때문에 이 시기의 정확한 강수 모의가 중요하다. 여름을 제외한 계절 강수는 해상도에 관계없이 전 지역에 걸쳐 봄과 겨울 강수를 다소 과다 모의하고 가을 강수를 과소 모의한다. 반면 여름 강수의 경우 개별 모델과 앙상블 모두 관측에 비하여 강수량을 현저히 적게 모

Figure 4. 25-year (1981-2005) mean seasonal precipitation from 4 RCMs ensemble.

의한다. R50 실험의 강수 양상불에서 낮은 해상도로 인하여 강수량의 지역별 차이가 작으며, 이 결과는 Figure 3과 일치한다. 또한, 모의된 영역평균 강수량 범위가 $4 \sim 6 \text{ mm day}^{-1}$ 로 $6 \sim 10 \text{ mm day}^{-1}$ 의 범위를 갖는 관측에 비하여 약 60% 정도로 적다. 모델 양상불은 영남권의 소우지 지역의 강수를 현실적으로 모의하지 못하였으며, 다우지 지역인 수도권 지역의 강수 분포도 적절히 모의하지 못하였다. R12 실험의 양상불 강수 모의결과는 관측에 비하여 과소 모의되었지만, 강수량과 공간분포 측면에서 R50 실험보다 관측과 유사하게 모의되었다. R12 실험 결과는 강수량 범위가 $5 \sim 7.5 \text{ mm day}^{-1}$ 로 R50 실험의 경우보다 훨씬 많은 강수량을 모의하고, 수도권, 호남 지역의 다우지, 영남 지역

의 소우지와 같은 강수 공간분포 특성을 보다 현실적으로 모의하였다. 이처럼 개선된 강수량 모의와 공간분포 모의는 Figure 3의 결과와 마찬가지로 지역기후모델의 해상도 증가로 인한 상세한 지형 정보를 통하여 생산되는 부가 정보(added value)에 의한 것으로 해석할 수 있다. 또한 한반도 여름철은 중규모 기상현상에 의한 강수가 상당 부분을 차지하는데(Park *et al.*, 2008) 고해상도 모델이 이러한 중규모 기상현상을 보다 잘 모의할 수 있기 때문에 여름철 강수가 개선된다.

Figure 4에서 알 수 있듯이, 여름 강수 모의 시 고해상도를 갖는 R12 실험에서 부가 정보가 뚜렷하게 나타났다. 여름 강수의 부가 정보에 대해 집중적으로 분석하기 위하여 5~8월의 남한 강수

Figure 5. Time-longitude graph of 25-year (1981-2005) mean daily precipitation averaged between 33°N and 39°N.

의 시공간 변화를 분석하였다(Figure 5). 관측에서 7월 중순 경 첫 번째 피크가, 8월 중순에서 8월 말 사이 두 번째 피크가 한반도 서쪽 지역에서 나타난다. 첫 번째 피크는 장마 최성기에 속하고 두 번째 피크는 가을장마기에 속한다(Lee and Kwon, 2004). R50 실험에서 대부분의 모델이 두

번째 강수 피크를 제대로 모의하지 못하였다. 또한 RegCM4를 제외한 모든 모델이 첫 번째 피크의 강수량, 강수 지속 기간 등을 관측보다 과소 모의하였다. 반면 R12 실험에서도 지역기후모델은 두 번째 피크를 적절히 모의하지 못하였지만, 모든 모델이 첫 번째 피크의 강수량과 강수 지속 기

간 등을 R50 실험보다 관측에 근접하게 모의하였다. 이는 Figure 3과 일치하게 R12 실험의 모델들이 상세한 지형효과로 인하여 산악효과로 인한 강수 모의를 개선하였기 때문이다. 두 번째 피크는 장마 이후의 북서태평양 고기압 확장 시 고기압 연변에서 발생하는 중규모 대류현상과 태풍으로 인한 강수와 연관될 수 있는데(Park *et al.*, 2008), HadGEM2-AO는 태풍의 강도와 빈도를 과소하게 모의하는 것으로 알려져 있기 때문에(Jin *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015) 이를 강제자료로 이용한 지역기후모델 또한 약하게 모의되는 태풍의 영향을 받아 두 번째 피크 기간의 강수를 과소모의 할 수 있다.

앞서 언급했듯 미래 재해 피해를 줄이기 위하여, 극한 기후를 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 이에 극한 강수의 지표 중 하나인 여름철 강수의 경년변동성을 분석하였다(Figure 6). 강제자료인 HadGEM2-AO는 모델평형상태를 맞추기 위한 수백 년간의 규준실험뿐만 아니라 산업화 이전

부터 선행모의가 포함되기 때문에 관측과 일치하는 경년변동성을 기대할 수 없다. 따라서 이를 강제자료로 사용한 지역기후모델 결과와 관측 사이의 시간 상관관계는 의미가 없으므로 강수 평균과 표준 편차 위주로 경년변동성을 분석하였다. 관측 결과, 남한 여름철 강수가 $4 \sim 11 \text{ mm day}^{-1}$ 범위 내 변동하는 것을 확인할 수 있다. R12 실험의 모든 모델이 R50 실험보다 양적인 측면에서 강수를 우수하게 모의하였으며, 이는 Figure 4와 Figure 5의 결과와 일치한다. 또한 R12 실험에서 모든 모델의 강수 경년변동성이 R50 실험보다 높게 나타났다. Figure 6의 결과를 정량화한 Table 3에서 모든 모델이 R50 실험보다 R12 실험에서 더 적은 평균 강수 오차를 보이고, 더 높은 표준편차를 보여 모델 해상도 증가가 강수 평균과 경년변동성을 개선시키는 부가 정보를 야기할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 고해상도 모의 결과에서 보여준 높은 표준편차는 저해상도 때보다 더 높은 극한 강수 모의 가능성을 보여준다.

Figure 6. Time-series of summer mean precipitation (mm day^{-1}) averaged over South Korea for 25 years (1981-2005).

Table 3. 25-year summer (JJA) mean precipitation (mm day^{-1}) and standard deviation over South Korea.

		Mean		S.D	
		R12	R50	R12	R50
RCM	HadGEM3-RA	6.20	5.28	2.07	1.89
	RegCM4	5.57	4.09	1.56	1.57
	SNURCM	6.65	4.42	2.13	1.97
	WRF	6.90	4.51	2.31	1.28
OBS		7.50		1.62

Figure 7. Summer (JJA) mean precipitation averaged for WET & DRY years.

여름철 극한 강수 모의에서 부가 정보를 분석하기 위하여 연평균 강수량에 따라 다우해(WET year)와 소우해(DRY year)를 구분하여 합성 분석(composite analysis)을 수행하였다(Table 4). 다우해와 소우해는 여름 평균 강수가 25년 평균값보다 +1 표준편차 이상인 해와 -1 표준편차 이하인 해

로 각각 선정하였다. Figure 6은 모델 앙상블과 두 관측 자료의 다우해와 소우해의 composite 결과를 나타낸 것이다. 관측 결과에서 다우해와 소우해의 강수량은 남한 전 지역에 걸쳐 $5 \sim 6 \text{ mm day}^{-1}$ 의 차이를 보였으나, 공간분포는 서로 유사하였다. 소우해에 R50 실험의 강수량은 관측에 비해 매우 과

Table 4. Definition of WET & DRY year used in this study.

Year	Description
WET	yearly composite of JJA precipitation $> 25\text{-year JJA mean} + S.D$
DRY	yearly composite of JJA precipitation $< 25\text{-year JJA mean} - S.D$

Figure 8. Probability density function of daily precipitation (mm day^{-1}) over South Korea for 25-year (1981-2005) summer (JJA).

소 모의되었으며, 지형효과로 인한 강수가 모의되지 못하였다. 반면 R12 실험의 모델 앙상블은 강수 공간분포를 보다 현실적으로 모의하였고, 강수량도 R50 실험에 비하여 적은 오차로 모의하였다. 즉, 소우해에 공간분포뿐만 아니라 양적인 측면 모두 우수한 부가 정보가 R12 실험에서 생성된다. 다우해에 R50 실험의 모델 앙상블은 소우해에 비하여 지형효과에 의한 소우지와 다우지 구분이 상대적으로 명확하지만 여전히 관측에 비하여 강수량을 과소 모의하였다. R12 실험의 모델 앙상블은 중부 지역의 강수를 과다 모의하여 R50 실험보다 오히려 공간분포 결과가 좋지 않지만, 남부 지역은 상세한 지형효과로 강수 공간분포가 개선되었다.

극한 강수의 빈도를 분석하기 위하여, 남한 여

름 강수의 확률밀도함수를 분석하였다(Figure 8). R50과 R12 실험 모두 약한 강수를 관측 자료보다 많이 모의하는 경향을 가지는 반면 강한 강수는 적게 모의하는 경향을 갖는다. 고해상도 모델은 약한 강수는 저해상도 모델 결과보다 적게 모의하고 강한 강수는 많게 모의하여 관측에 더욱 근접하게 강수 강도를 개선하였다. 이는 해상도의 증가로 인하여 중규모 기상현상의 모의가 향상되어 국지적인 집중호우 모의가 개선되기 때문이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 HadGEM2-AO를 강제장으로 사용한 4개의 지역기후모델을 이용하여 현재 25년

(1981~2005년) 남한 강수 모의 시 수평해상도에 따른 부가 정보(added value)에 대하여 분석하였다. 이를 위하여 12.5km 고해상도와 50km 저해상도를 갖는 두 개의 실험을 수행하여 모의결과를 비교하였다.

모델에서 모의한 남한의 25년 연평균 강수를 관측 자료와 비교한 결과 고해상도 모의 시 모든 지역기후모델은 강수의 공간분포를 보다 현실적으로 모의하였으며, 강수량 또한 저해상도보다 적은 오차로 모의하였다. 강수량 공간분포 개선은 고해상도일수록 더 상세한 지형 정보를 표현할 수 있는 것과 관련이 있으며, 강수량 개선은 해상도가 높을수록 중규모 기상현상의 모의가 향상되는 것과 연관 지을 수 있다. 모델 앙상블과 관측 자료의 남한 25년 계절 평균 강수를 분석하였을 때, 여름철을 제외한 계절 강수는 일반적으로 종관규모 이상의 대기현상과 연관되기 때문에 저해상도의 지역기후모델에 의해서도 어느 정도 모의된다. 그러나 종관규모뿐만 아니라 중규모 기상현상의 영향을 받는 여름철 강수는 해상도가 증가할수록 보다 현실적으로 모의된다.

해상도 증가로 인하여 발생하는 여름철 부가 정보를 집중적으로 분석하기 위하여 5~8월의 남한 강수의 시공간 변화를 분석한 결과, 정교한 지형 효과로 인하여 고해상도 모의 시 저해상도보다 지형에 의한 강수량과 강수지속기간이 우수하게 모의되었다. 극한 기후 모의 평가를 위하여 극한 강수 지표 중 하나인 여름철 강수 경년변동성을 분석한 결과, 고해상도 모의 시 평균값은 개선되었으나 표준 편차는 다소 오차가 증가하였다. 연강수가 적은 해의 강수는 고해상도로 모의했을 시 공간분포가 매우 우수하게 모의되었으나, 연강수가 많은 해의 강수는 중부지방에서 관측보다 과다하게 모의되었다. 남한 여름 강수의 확률밀도함수 분석에서 고해상도 모델은 약한 강수는 저해상도 모

델 결과보다 적게 모의하고 강한 강수는 많게 모의하여 관측에 더욱 근접하게 강수 강도를 모의하였다. 이는 해상도의 증가로 인해 중규모 기상현상의 모의가 향상되어 국지적인 집중호우 모의가 개선된다는 것을 의미한다.

본 연구를 통하여 복잡한 지형을 갖고 다양한 규모 기상/기후 현상이 발생하는 한반도의 상세 기후를 모의하기 위해서는 지역기후모델의 해상도 증가로 인한 부가 정보가 필요하다는 것을 알 수 있다. 즉, 지역기후모델을 이용한 한반도 미래 상세 기후변화 연구를 수행하기 위해서는 다중 모델 앙상블 등과 같은 통계적인 기법의 적용도 중요하지만 모델 해상도 증가를 통한 모의 성능 개선도 동반되어야 한다. 본 연구에서는 강수 모의에서 발생하는 부가 정보를 중점적으로 분석하였다. 향후 연구에서는 강수 외에 다양한 종관 변수에 대한 추가 분석을 통해 태풍, 폭설, 한파, 폭염 등과 같은 특정 재해기상 현상에 대한 해상도 증가의 효과를 조사할 예정이다.

사사

이 논문은 UNIST(울산과학기술원) 연구비(1.12 0043.01)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Barnes, S. L., 1964, A technique for maximizing details in numerical weather map analysis, *Journal of Applied Meteorology*, 3(4), 396-409.
- Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K. A., Goman, L. M., Miranda, A., I., and Borrego, C., 2010, The impact of spatial resolution on area burned and fire occurrence projections in Por-

- tugal under climate change, *Climatic Change*, 98(1-2), 177-197.
- 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: Atmospheres*, 114(D14).
- Cha, D.-H., Jin, C.-S., and Lee, D.-K., 2011, Impact of local sea surface temperature anomaly over the western North Pacific on extreme East Asian summer monsoon, *Climate dynamics*, 37(9-10), 1691-1705.
- Cha, D.-H., Jin, C.-S., Moon, J.-H., and Lee, D.-K., 2016, Improvement of regional climate simulation of East Asian summer monsoon by coupled air-sea interaction and large-scale nudging, *Int. J. Climatol.*, 36, 334-345.
- 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.
- Kim, G., Kim, J., Kim, C.-J., Jin, C.-S., Cha, D.-H., Suh, M.-S., and Park S.-C., 2014, Climate Change Projections over CORDEX East Asia Domain using Multi-RCMs, *Journal of Climate Research*, 9(4), 257-268 (in Korean).
- Giorgi, F., 2006, Regional climate modeling: Status and perspectives, *In Journal de Physique IV*, 139, 101-118
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, B., Giuliani, G., Tyrcuncoy, 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 Brantovic, C., 2012, RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 2(7).
- Hong, S.-Y. and Kalnay, E., 2002, The 1998 Oklahoma-Texas drought: Mechanistic experiments with NCEP global and regional models, *Journal of climate*, 15(9), 945-963.
- Hong, S.-Y. and Kanamitsu, M., 2014, Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 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.
- Jin, C.-S., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Suh, M.-S., Hong, S.-Y., Kang, H.-S., and Ho, C.-H., 2015, Evaluation of climatological tropical cyclone activity over the western North Pacific in the CORDEX-East Asia multi-RCM simulations, *Climate Dynamics*, 1-14.
- 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(6), 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. 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, S. and Kwon, W.-T., 2004, A variation of Summer Rainfall in Korea, *Journal of the Korean Geographic Society*, 39(6), 819-832 (in Korean).
- Mo, K., Kanamitsu, M., Juang, H. M. H., and Hong,

- S.-Y., 2000, Ensemble regional and global climate prediction for the 1997/1998 winter, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D24), 29609-29623.
- Nobre, P., Moura, A. D., and Sun, L., 2001, Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's Regional Spectral Models at IRI, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(12), 2787.
- 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 Geographic Society*, 43(3), 324-336 (in Korean).
- 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.
- Song, Y., Wang, L., Lei, X., and Wang X., 2015, Tropical Cyclone Genesis Potential Index over the Western North Pacific Simulated by CMIP5 Models, *Advances in Atmospheric Sciences*, 32, 1539-1550.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, B. M., 2013, *Climate Change 2013: the physical science basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*, Cambridge univ. Press, New York.
- Stone, M. C., Hotchkiss, R. H., and Mearns, L. O., 2003, Water yield responses to high and low spatial resolution climate change scenarios in the Missouri River Basin, *Geophysical Research Letters*, 30(4).
- 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(20), 7067-7082.

책임편집: 이경미

영문교열: 이은결