GRIMs-RMP를 이용한 지역기후모형의 동아시아 극한지수 모의 성능 검증

양유빈

APEC 기후센터

(2016년 5월 26일 접수, 2016년 8월 23일 수정, 2016년 8월 26일 게재 확정)

Evaluation of Regional Climate Model using the GRIMs-RMP for Trends of Extreme Indices over East Asia

Yoo-Bin Yhang

APEC Climate Center

(Received 26 May 2016, Revised 23 August 2016, Accepted 26 August 2016)

Abstract : We examined temporal and spatial structure of trends in precipitation-based and temperature-based extreme indices simulated by the Regional Model Program of Global/Regional Integrated Model System (GRIMs-RMP). The extreme indices were selected to consider the frequency, intensity, and persistence of extreme events. During the Last 30 years from 1979 to 2008, the model reasonably have simulated the temporal and spatial pattern of the trend. Although overestimation of minimum temperature and underestimation of maximum temperature occurred, the regional climate model captured observed direction and magnitude well in the indices based on temperature. The indices related to rainfall tended to be overestimated over East Asia except for Korea and Japan. However, the trend showed agreement with observation.

The results allow us to be optimistic about the RCM ability in the simulation of important extreme event of precipitation and surface temperature in East Asia. This type of study can also provide meaningful climate statistics and insight into climate change impact study.

Key Words : extreme indices, regional climate model, GRIMs-RMP, evaluation

주요어 : 극한지수, 지역기후모형, GRIMs-RMP, 검증

1. 서론

기후변화는 전지구적으로 발생하고 있으며, 이는 극한기후 발생의 증가로 이어진다. 극한기후의 발생은 평균 기후의 변화에 비해 작은 변화일 수

있으나, 농작물의 재배나 물공급, 그리고 생태의 변화를 초래함으로써 인간 생활에 큰 영향을 줄 수 있다(Kim, 2005; Trenberth *et al.*, 2007). 그러므로, 기후변화에 따른 극한기후의 변화를 평가하는 것은 기후 연구에서 중요한 부분이 될 것이다.

극한기후의 변화가 기후변화의 영향 평가에 중요한 요인임에도 불구하고 그에 대한 심도깊은 연구는 제한적이었다. 그 이유 중 하나가 데이터의 부재로, 기후변화의 영향을 살펴볼 수 있을 정도로 장기간의 일단위 데이터가 부족하였다. 또한, 극한기후현상은 시간적, 공간적으로 복잡하게 나타날 수 있기 때문에 이에 대한 이해도를 높이고 극한기후 영향 평가에 대한 연구를 위해서는 고해상도의 지역 데이터가 필요하다(Boo *et al.*, 2006).

관측데이터가 가지고 있는 이러한 한계를 극복하기 위해 지역기후모형을 이용한 극한기후 연구가 이루어져왔다. Hui *et al.*(2015)는 중국에 대한 RegCM3의 온도와 강수 극한지수 모의 성능을 두가지의 적운모수화 과정을 적용하여 검증하였고, Zhou *et al.*(2016)은 동아시아 영역에 대해 COSMO-CLM(CCLM)이 모의한 극한기후값을 관측과 비교하여 지역기후모형의 특징을 조사하였으며, Im *et al.*(2011)는 현재 기후와 미래 기후에 대해 극한기후값의 변화를 살펴보았다. 또한 COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX)를 통해 여러 지역의 기후변화 시나리오가 생산되고 있으며, 기후변화 시나리오의 불확실성을 개선하기 위해 현재 기후 모의 성능에 대한 평가가 이루어지고 있다(Ahn *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2016; Suh *et al.*, 2016). 이러한 연구를 통해 다양한 관점에서 지역기후모형의 특징을 파악하여 모형을 개선하고 불확실성을 줄일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Yhang(2013)의 검증 결과를 바탕으로 지역기후모형의 극한기후값 모의성능을 검증하고자 하였다. 지역기후모형의 성능 검증은 모형을 기후 예측 및 기후 변화 연구에 이용하기 전 이루어져야 할 가장 기본적인 연구이다. 동아시아 지역에 대한 평균적인 기후값의 관점에서 여러 지역기후모형에 대한 성능 검증 연구가 이루어져 왔으나, 극한기후에 대한 연구는 제한적이었

다. 이 연구에서는 최고/최저 기온과 강수 극한값의 시간적, 공간적인 변화에 대해 분석하고 모형이 변동추세를 잘 모의하는지 조사하여 극한기후 연구에서의 지역기후모형의 효용성을 평가하고자 하였다.

2장에서는 본 연구에 사용된 모형과 극한지수, 검증 자료를 설명하고, 3장에서는 온도와 강수의 모의 결과를 재분석 자료와 비교하여 4장에서 결과를 요약하였다.

2. 실험 방법

1) 모델

이 연구에서 사용된 모형은 Global/Regional Integrated Model System(GRIMs; Hong *et al.*, 2013)으로 전구 모형과 지역 기후 모형이 한 시스템에 들어있는 multi-scale 모형이다. 그 중 지역기후모형(Regional Model Program; GRIMs-RMP)은 전구분광모형과 같은 역학 및 물리과정을 가지고 있어서 자원을 절약할 수 있으며 측면 경계 문제가 감소되는 장점을 가지고 있다(Juang *et al.*, 1997). 또한 perturbation method(spectral filter)를 사용함으로써 경계자료의 large-scale 패턴은 유지하면서 고분해능 자료를 생산할 수 있다. 실험에 적용된 GRIMs-RMP의 물리과정은 v3.1로, Simplified Arakawa-Schubert(SAS; Park and Hong, 2007) 적운모수화 과정, Noah 지면모수화 과정(Ek *et al.*, 2003) 등이 적용되었다. 물리과정에 대한 설명은 Hong *et al.*(2013)에 제시되어 있으며, GRIMs-RMP의 물리과정은 동아시아 지역에 대한 계절규모의 기후 모의(Yhang and Hong, 2008a; Yhang and Hong, 2008b), 지역기후 시나리오 생산(Lee *et al.*, 2013), 집중호우와 같은 극한 기후값의 모의(Lee and Hong, 2013)에서 그 성능이 검증되었다.

2) 극한지수

모형의 검증을 위해 사용된 극한지수는 Table 1과 같다. 온도와 강수에 대해 빈도와 강도, 기간을 고려한 5개의 지수를 선정하였으며, 상대적으로 재현 기간(return period)이 짧은 지수들을 선택하여 실험 기간 동안 나타난 변동추세 분석을 용이하게 할 수 있게 하였다. 모든 지수는 연단위로 계산되었다.

온도 지수들 중 Frost Days(FD)는 일최저온도가 0℃ 이하인 날의 수를 정의한 것이고, Hot Days(HD)는 일최고기온이 30℃ 이상인 날의 수로 정의하였다. 특정 임계값보다 높거나 혹은 낮은 날의 수를 살펴보는 것은 빈도의 변화와 최대온도, 최저온도의 분포 변화를 알아보는 가장 간단한 방법이다. 더운 날과 추운 날의 강도 변화를 평가하기 위해 백분위수의 임계값을 살펴보았다. TX95는 백분위수 95보다 높은 값에 해당하는 최고온도의 평균을 계산한 것이고, 반면 TN5는 백분위수 5보다 낮은 값의 최저온도들의 평균으로 정의되었다. TX95와 TN5의 변화는 최고온도와 최저온도의 분포 변화를 반영할 수 있다. 또한, 더운 날의 지속기간을 나타내는 HW와 추운 날의 지속기간을 나타내는 FW를 통해 폭염과 한파로 인한 스트

레스를 측정할 수 있다.

강수 지수들로는 일강수가 50mm 이상인 날수(PN50)를 계산하여 집중호우의 빈도를 평가하였고, 강수의 강도를 평가하기 위해 PPL95과 PX1D를 계산하였다. PPL95는 기후값의 95 백분위수에 해당되는 강수량을 기준값으로 정했을 때 매 해 이 기준값보다 높은 강수량의 비율로 정의되며, PX1D는 일 최대 강수량을 계산한 값이다. 또한, 건조한 날(MDRY)과 습한 날(MWET)의 지속일수를 계산하여 강수 기간에 대한 특징을 살펴보았다. 건조한 날과 습한 날은 일 강수량 1.0mm을 기준으로 이하인 날은 건조한 날로, 이상인 날을 습한 날로 정의하였다.

3) 실험설계 및 자료

GRIMs-RMP를 통해 1979년부터 2008년까지 30년간의 동아시아 지역기후값을 생산하였다. 초기 및 경계조건으로는 GRIMs-RMP의 전신인 RSM과 유사한 역학 및 물리과정을 가지고 있는 NCEP-Department of Energy(DOE) Atmospheric Model Intercomparison Project(AMIP) Reanalysis II(R2; Kanamitsu *et al.*, 2002) 자료를 이용하여 경계조건의 변환 과정에서 발생할 수 있는 문제점

Table 1. Abbreviation and definition of the indices of extremes based on maximum and minimum temperature and precipitation used in this study.

Variable	Abbreviation (unit)	Definition of extreme indices
Temperature	FD (days)	Number of frost days with Tmin below 0℃
	HD (days)	Number of hot days with Tmax above 30℃
	TX95 (℃)	Averaged Tmax above 95 th percentile
	TN5 (℃)	Average Tmin below 5 th percentile
	HW (days)	Maximum duration of consecutive hot days
	FW (days)	Maximum duration of consecutive frost days
Precipitation	PN50 (days)	Number of days with precipitation above 50mm
	PX1D (mm)	Greatest 1-day total precipitation
	MDRY (days)	Maximum duration of consecutive dry days
	MWET (days)	Maximum duration of consecutive wet days

을 최소화하였다. 실험 영역은 우리나라, 일본, 중국 일부를 포함한 동아시아 영역이며, 수평해상도는 약 50km이다.

강수 검증에 사용된 자료는 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 해상도를 가진 CPC 일강수자료이고(Xie *et al.*, 2007), 온도의 극한지수의 검증을 위해서는 NASA Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications(MERRA; Rienecker *et al.*, 2011) 데이터를 사용하였다. MERRA 데이터의 해상도는 동서방향 $2/3^\circ \times$ 남북방향은 $1/2^\circ$ 로, 강수와 온도 데이터는 내삽과정(interpolation) 없이 모형결과와 비교하였다.

3. 연구 결과

모형의 전반적인 성능은 Yhang(2013)에서 검증되었으며, GRIMs-RMP는 계절 평균장, 경년변동성, 계절 내 변동성을 전반적으로 잘 모의하였다. 강수의 오차가 육지에서 0.35mm/day , 해양을 포함한 실험 영역 전체에서 -0.27mm/day 로 나타나는 다른 지역기후모형과 비교하였을 때 동아시아 지역에 대해 유사한 실험을 수행한 다른 연구에 비해 개선되었거나 혹은 비교할만한 결과를 보였다. 특히, 몬순 강수가 집중되는 지역에 대해 일평균 강수 변화를 잘 모의하였으며, 폭염이 있었던 1994년 여름의 최대/최저기온의 검증 결과는 극한기후 연구에의 이용 가능성을 보여주었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 온도와 강수에 대한 극한기후값 모의 성능을 살펴보았다.

1) 온도

모형이 극한지수의 변화를 잘 모의하는지 평가하기 위해 극한지수의 선형추세(linear trend)를 비교하였다. Figure 1은 최저온도와 관련된 지수들

을 비교한 것이다. 0°C 보다 낮은 온도를 기록한 날의 수는 한반도를 비롯한 동아시아 전역에서 감소하는 추세를 보이며(Figure 1a), 이러한 특징은 모형 결과에서도 잘 나타나고 있다(Figure 1d). 모형과 재분석 자료의 변화추세는 동아시아 전역에서 95% 이상의 높은 신뢰구간을 보인다. 일최저기온이 0°C 보다 낮은 날이 지속되는 기간을 나타내는 FW에서도 최저기온이 상승되는 추세가 반영되어 나타난다(Figure 1b). 중국과 러시아 일부를 제외한 대부분의 지역에서 영하의 기온이 지속되는 기간이 짧아지고 있으며, 이러한 감소 추세는 북위 40도와 50도 사이에서 특히 뚜렷하게 나타난다. 모형 역시 감소 추세를 뚜렷하게 모의하고 있으나, 중국과 러시아 일부에서 나타나는 증가 추세가 관측에 비해 약하게 모의되고 있다(Figure 1e). 1979년부터 2008년까지 연간 변화를 살펴보았을 때 최저온도값의 분포 또한 점점 상승하는 모습을 보이며, 고위도에서의 상승 추세가 뚜렷하다(Figure 1c). 반면 지역기후모형은 동아시아 전반의 최저온도 상승은 잘 모의하고 있으나, 고위도 지역에서의 상승은 관측만큼 뚜렷하게 나타내지 못하였다(Figure 1f).

일최고온도에 기반한 극한지수들의 최근 30년간 추세는 Figure 2에 나타나있다. 최근 30년 동안 일최고기온이 30°C 이상인 일수는 상승하는 추세로 나타난다(Figure 2a). 북위 40도와 50도 사이의 고위도 지역과 북위 30도 근방 지역에서 특히 뚜렷하게 나타나며, 모형 역시 이러한 상승 추세를 잘 모의하고 있으나, 고위도의 상승 추세가 관측만큼 뚜렷하지 않다(Figure 2d). 고온이 지속되는 기간 역시 길어지는 양상을 보이며, HD의 상승 추세가 나타나는 지역과 유사한 지역에서 HW의 증가 추세가 두드러진다(Figure 2b). GRIMs-RMP는 실험영역 전반에서의 증가 추세를 잘 나타내고 있으나(Figure 2e), 북위 40도 이상에서 유의미

Figure 1. Linear trend of minimum temperature-based indices from reanalysis (a-c), and the model (d-f). Contour lines indicate the 95% confidence levels based on a two-sided Student's *t* test.

Figure 2. Same as in Figure 1 except for maximum temperature.

Figure 3. Time-series of temperature-based indices averaged over East Asia.

한 결과를 보인다. 더운 날이 나타나는 빈도, 지속 기간의 증가와 더불어 최고기온의 분포도 상승하는 특징을 보이고 있다(Figure 2c). HD, HW와 마찬가지로 고위도 지방의 상승이 상대적으로 더 큰 것으로 나타나며, 이는 모형 결과에서도 동일하게 나타난다(Figure 2f).

Figure 1과 2에서 극한지수의 변화를 공간적으로 살펴본다면 Figure 3에서는 1979년부터 2008년까지 30년 동안 극한지수의 변화를 시계열로 살펴본다. GRIMs-RMP는 최저기온과 최고기온에 기반한 극한지수의 연변화를 전반적으로 잘 모의하고 있으나, 최저기온과 관련된 극한지수들

에 대해서는 모형이 재분석 자료에 비해 최저기온을 다소 낮게 모의하는 특징을 보인다(Figure 3a-3c). 그 결과 최저기온이 0℃ 이하인 날을 더 많이(Figure 3a), 영하로 내려가는 날이 지속되는 기간을 더 길게(Figure 3b), 그리고 최저 기온의 하위 5%에 해당하는 기온을 더 낮게 모의하였다(Figure 3c). 최고기온의 경우 최저기온과 관련된 극한지수에 비해 관측값과 더 유사한 시계열을 보인다(Figure 3d-3f). 일최고기온이 30℃ 이상인 날이 점점 증가하는 추세를 나타나고, 모형 역시 이러한 경향을 잘 나타내고 있다(Figure 3d). 그러나, 관측값에 비해 다소 과소모의하는 경향을 보인다. 더운 날의 지속 기간과 최고기온의 상위 5%의 평균기온은 관측과 모형이 매우 유사한 결과를 나타내며, 모형 결과와 관측에서 모두 최고기온이 증가하는 경향을 보였다(Figure 3e, 3f). 최근 30년 동안 나타난 이러한 변동성은 모두 99% 이상의 신뢰수준을 보이는 것을 확인하였다.

GRIMs는 온도와 관련된 극한 지수의 변화 추세를 전반적으로 잘 모의하는 것으로 보인다. 다만, 고위도 지방에서 일최고기온이 상승 정도를 재분석 자료에 비해 상대적으로 낮게 모의하며, 동아시아 전반에서 최저기온을 낮게 모의하는 구조적인 오차를 가지고 있는 것으로 나타났다.

2) 강수

이번 장에서는 강수와 관련된 극한지수를 살펴 보았다. 일강수량이 50mm 이상인 날수는 중국과 한반도, 일본에 걸친 여름강수대 전역에서 증가하는 것으로 나타났다(Figure 4a). 모형도 전반적인 집중호우 증가 추세는 잘 모의하였으나, 한반도와 일본의 시그널은 나타내지 못하였다(Figure 4e). 강도를 나타내는 PX1D 지수는 PN50과 유사한 분포를 보인다(Figure 4b). 모형의 PX1D 역시 PN50과 유사한 분포를 보여 관측에 비해 양의 값이 약

하게 나타나고 있다(Figure 4f). 여름철 몬순 강수대가 위치하는 지역에서의 강수 빈도와 강도가 증가함에도 불구하고 중국 남부지방에서는 습한 날이 지속적으로 나타나는 일수가 감소하는 추세를 보인다(Figure 4c). 반면 남한에서는 습한 날이 증가하는 추세이고, 일본은 지역적으로 각기 다른 양상이 나타난다. 이러한 특징들은 모형에서도 잘 모의되고 있다(Figure 4g). 반면 모형은 MWET 지수에 비해 MDRY 지수를 잘 모의하지 못하는 것으로 보인다(Figure 4h). 관측과 모형 모두 고위도 지역에서의 변화 양상이 뚜렷하지만 그 시그널이 일치하지 않는다(Figure 4d, 4h). 관측에서는 한반도를 포함한 북위 40도 이상의 고위도 지역에서 MDRY 지수가 증가하고 그 외 지역에서는 감소하는 추세가 나타나지만, GRIMs-RMP의 모의 결과는 북위 50도 근처에서 감소하는 경향을 나타내었다. 강수와 관련된 극한지수의 전반적인 변화 추세를 종합해보면 동아시아 전역에서 집중호우가 발생하는 빈도와 최대강수량이 증가하는 추세를 보였다. 그러나 이를 지역별로 보면 중국 남쪽과 일본의 경우 MWET과 MDRY가 모두 감소하여 짧은 기간동안 내리는 비가 자주 발생하는 추세가 강한 반면 한반도에서는 강수가 발생하면 오랜 기간 내리지만 강수가 발생하지 않는 날도 길어지는 특징을 보이는 것으로 나타났다. 모형은 최근 30년 동안의 이러한 변화추세를 전반적으로 잘 모의하고 있으나, 한반도와 일본의 시그널을 상대적으로 약하게 나타내었다. 이는 50km의 해상도가 한반도나 일본과 같은 좁은 지역에 대한 강수를 모의하기에 부족하기 때문이라 생각된다. 또한 불확실성이 높은 강수의 경우 온도에 비해 신뢰구간이 크지 않았다.

Figure 5에서는 동아시아 지역에서 강수와 관련된 지수들의 경년변동을 살펴보았다. 해양 관측데이터 부재로 인해 강수 극한 지수의 시계열은 육지

Figure 4. Same as in Figure 1 except for precipitation.

Figure 5. Same as in Figure 3 except for precipitation.

평균으로 계산되었다. GRIMs-RMP는 강수량을 과다모의하는 특징을 보이며, 이는 PN50와 PX1D에서 확인할 수 있다(Figure 5a, 5b). 50mm 이상의 강수가 발생하는 날이 관측에 비해 빈번하게 나타나고, 일최대 강수량 역시 관측보다 많은 양을 모의하고 있다. 그러나, 연변동성의 추이를 잘 모의하고 있으며, 1983년, 1990년, 1998년 등 극한지수의 최고값 또한 잘 나타낸다. MWET의 경우 관측과 모형은 매우 유사한 시계열을 보인다(Figure 5c). 이는 강수량의 차이는 있지만 강수 지속 기간은 관측과 유사하게 모의하고 있음을 의미한다. 그러나, 비가 오지 않은 날의 지속일수는 관측에 비해 낮게 모의함으로써 모형이 강수량을 과대모의함과 동시에 강수빈도도 잦은 것으로 나타났다(Figure 5d). 온도의 경년변동과 마찬가지로

강수 극한지수의 연변동 역시 99% 이상의 신뢰수준을 보이는 것을 확인하였다.

기온과 강수의 극한지수를 모의하는 지역기후모형의 성능을 검증하기 위해 극한지수의 변동에 대한 상관계수를 Figure 6에 나타내었다. 공간 및 시간 상관계수는 각각 Figure 1, 2, 4와 Figure 3, 5에 제시된 패턴과 시계열에서의 관측과 모형의 상관관계로 계산되었다. GRIMs-RMP는 최저기온의 극한지수 변동을 가장 잘 모의하였으며, 강수와 관련된 극한지수의 경년변동(temporal correlation)을 잘 모의하지 못하였다. TX95를 제외한 극한지수들에 대해서는 시간상관계수보다 공간상관계수가 높게 나타났으며 이는 모형이 지역별 변동을 잘 모의함을 의미한다. 일부 강수 극한지수의 공간상관계수를 제외하면 0.6 이상의 높은 상관관계를

Figure 6. Temporal and spatial correlation of minimum and maximum temperature-based, and precipitation-based extreme indices.

보여 GRIMs-RMP가 극한기후값을 현실적으로 모의하고 있음을 보였다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 최저/최고 기온과 강수와 관련된 극한지수의 관점에서 GRIMs-RMP의 성능을 검증하였다. 최저 기온과 연관된 극한 현상의 발생 빈도와 강도는 동아시아 전역에서 감소하였고, 0℃ 이하의 최저기온 지속기간 또한 짧아졌다. 반면 더운 날이 나타나는 빈도와 지속기간, 최고기온의 분포는 증가하는 경향을 보였다. 모형은 최저기온을 높게, 최고기온을 낮게 모의하여 극한 지수값 자체는 관측과 차이를 보였으나, 30년 동안의 극한지수 변동성은 잘 모의하는 것으로 평가된다. 지역적으로 북위 40도 부근과 남중국의 변동 추세를 관측만큼 강하게 나타내지 못하는 것은 모형이 남중국 전역의 온도를 전반적으로 낮게 모의

하는 반면 북위 40도 부근의 온도는 높게 모의하는 것과 관련이 있다(Yhang, 2013). 이는 경계조건으로 처방된 재분석 자료의 오차가 지역기후모형의 결과에 영향을 미친 것이라 볼 수 있다. 강수는 온도에 비해 예측성이 낮은 변수이므로 극한지수의 변동성 역시 최저/최고 기온의 극한지수보다 오차가 크게 나타난다. 모형은 강수량을 과다하게 모의하여 강수 강도와 빈도를 강하게 모의하고, 습한 날의 지속기간을 길게, 건조한 날이 지속되는 기간을 짧게 나타내는 경향을 보였다. 지역기후모형이 동아시아 지역의 육지 강수를 과다하게 모의하는 것은 다른 지역기후모형에서도 나타나는 현상으로, 모형에서 쓰이는 적운모수화 과정 등의 물리과정의 불확실성에서 기인하는 것이라 생각된다(Yhang and Hong, 2008b; Park *et al.*, 2013)

이러한 구조적인 오차를 가지고 있음에도 불구하고, GRIMs-RMP 모형은 전반적인 극한지수의 변동성을 잘 모의하였다. 지역기후모형의 성능을 검증하고 구조적인 오차를 이해하는 것은 기후변

화 시나리오나 기후 예측 결과를 정확하기 해석하기 위해 선행되어야 할 중요한 과정이다. 기후의 평균값에 대한 검증과 더불어 극한기후 모의에 대한 검증이 이루어짐으로써 기후변화로 인해 증가하고 있는 극한 사상에 대한 이해를 높이고 모형의 성능 개선에도 도움이 될 것이다.

사사

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- Ahn, J.-B., Jo S., Suh, M.-S., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., Kang, H.-S., and Shim K.-M., 2016, Changes of precipitation extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 52, 223-236.
- Boo, K. O., Kwon, W. T., and Baek, H. J., 2006, Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional climate projection of future climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01701, DOI:10.1029/2005GL023378.
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., and Tarpley, J. D., 2003, Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model, *J. Geophys. Res.*, 108, 8851.
- Hong, S.-Y., Park, 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., 2013, The Global/Regional Integrated Model System (GRIMs), *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 49, 219-243.
- Hui, P., Tang, J., Wang, S., and Wu, J., 2015, Sensitivity of simulated extreme precipitation and temperature to convective parameterization using RegCM3 in China, *Theor. Appl. Climatol.*, 22, 315-335.
- Im, E. S., Jung, I. W., and Bae, D. H., 2011, The temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indices over Korea from a regional climate projection. *Int. J. Climatol.*, 31, 72-86.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Juang, H.-M. H., Hong, S.-Y., and Kanamitsu, M., 1997, The NCEP Regional Spectral Model: An update, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2125-2143.
- Kanamitsu, M. and Coauthors, 2002, NCEP dynamical seasonal forecast system 2000, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1019-1037.
- Kim, J., 2005, A projection of the effects of the climate change induced by increased CO₂ on extreme hydrologic events in the western U.S., *Climatic Change*, 68, 153-168.
- Lee, J.-W. and Hong, S.-Y., 2013, Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model, *Theor. Appl. Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-013-1034-6.
- 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, *Clim Dyn.*, 42, 733-747, doi:10.1007/s00382-013-1841-6.
- Oh, S.-G., Suh, M.-S., Lee, Y.-S., Ahn, J.-B., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., and Kang, H.-S., 2016, Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 2: Precipitation, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 52, 171-189.
- Park, H. and Hong, S.-Y., 2007, An evaluation of a mass-flux cumulus parameterization scheme in the KMA global forecast system, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 151-169.
- 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, doi:10.1002/jgrd.50159.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, S., Kim, G.-K., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., da Silva, A., *et al.*, 2011, MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, *J. Climate*, 24, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Suh, M.-S., Oh, S.-G., Lee, Y.-S., Ahn, J.-B., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., and Kang, H.-S., 2016, Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: Surface air temperature, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 52, 151-169.
- Xie, P., Yatagai, A., Chen, M., Hayasaka, T., Fukushima, Y., Liu, C., and Yang, S., 2007, A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia, *J. Hydrometeor.*, 8, 607-626.
- Yhang, Y. -B., 2013, Evaluation of regional climatology over the East Asia using GRIMs-RMP, *APCC research report 2013-01*.
- Yhang, Y. -B. and Hong, S.-Y., 2008a, Improved physical processes in a regional climate model and their impact on the simulated summer monsoon circulations over East Asia, *J. Climate*, 21, 963-979.
- Yhang, Y. -B. and Hong, S.-Y., 2008b, A simulated climatology of the East Asian summer monsoon using a regional spectral model, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 44, 325-339.
- Zhou, W., Tang, J., Wang, X., Wang, S., Niu, X., and Wang, Y., 2016, Evaluation of regional climate simulations over the CORDEX-EA-II domain using the COSMO-CLM model, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 52, 107-127.

책임편집: 박창용

영문교열: 최영은