



PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung
Director, APEC Climate Center

CONTENTS

GRIMs-RMP를 이용한 동아시아 기후값의 검증

■ 양유빈 | 기후분석팀

1. 서론	3
2. 연구 방법	5
2.1 Global/Regional Integrated Model System (GRIMs)	5
2.2 실험 설계	6
2.3 Scale-Selective Bias Correction (SSBC)	6
3. 연구 결과	9
3.1 계절 평균 기후값	9
3.2 경년 변동성	17
3.3 계절내 변동성	29
4. 요약 및 결론	32

GRIMs-RMP를 이용한 동아시아 기후값의 검증

양유빈 | 기후분석팀

ABSTRACT

This study investigates the ability of a regional climate model to reproduce the characteristics of the East Asian climate, focusing on the summer and winter monsoons, using the Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). GRIMs is forced by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Department of Energy (DOE) reanalysis data for 30 years, from 1979 to 2008.

The model can reproduce large scale features associated with the East Asian summer and winter monsoon in terms of the 30-year seasonal mean climate. The precipitation and surface temperature from the regional climate model are evaluated against observational data. The simulated precipitation climatology reasonably agrees with that from the two analysis datasets based on station and remote-sensing data. Outstanding characteristics of precipitation, including the location of the main rainband, climatological mean, and the spatiotemporal variability, are well represented in the hindcast. The most notable bias in the simulated precipitation is an underestimation of summer rainfall over the oceans. However, the daily evolution and northward propagation of the summer precipitation are fairly well simulated. This suggests that GRIMs can be useful for subseasonal prediction. The simulated surface temperature agrees with observation as well. In particular, the maximum and minimum temperature in the summer of 1994, when a heat wave was observed in Korea, is well captured by the regional climate model. These results allow us to be cautiously optimistic about the models' ability to simulate important climatological features, as well as extreme events, as far as precipitation and temperature, in East Asia.

1. 서론

기후 자료를 이용한 연구들, 특히 수자원, 농업, 어업 및 에너지 관리와 같은 응용 연구에는 기상학적, 해양학적인 정보를 담고 있는 고해상도의 장기간 자료가 필요하다. 그러나 신뢰할만한 기상관측자료는 그 역사가 짧을 뿐 아니라 공간적 영역과 해상도 또한 부족하여 과거 기후의 변동성을 분석하기에는 부족하다. 또한 토양 수분, 지표 증발량, 복사량과 같은 응용 연구에 필요한 변수들은 관측치가 전무한 실정이다. 이에 대한 대안으로 수치모델에서 생산되는 재분석 자료가 이용되고 있다. 수치모델은 원하는 수준의 시공간적 기상/기후 변화 양상을 나타낼 수 있으며 가용한 관측자료를 동화하여 최대한 관측장에 가까운 3차원 기상장을 제공하고 있다. 이러한 재분석 자료는 기상/기후 모형의 성능향상을 위한 원천자료로 활용 가능할 뿐 아니라 기후변화 시나리오, 자연에너지(풍력, 태양열)지도 등의 완성도를 높일 수 있는 기본자료 및 검증자료로 활용이 가능한 매우 유용한

자료이다. 또한 친환경 녹색산업의 중요성이 점차 부각되고 있는 요즈음 기상/기후와 직간접적으로 관계된 분야에서도 재분석 자료는 필수적인 원천자료라고 할 수 있다.

미국, 유럽, 일본에서는 1990년대 후반에서 2000년대 초반에 걸쳐 NCEP/NCAR 재분석 자료 (Kalanay et al. 1996), NCEP/DOE 재분석 자료 (Kanatmitsu et al. 2002), ERA-40 (Uppala et al. 2005), JRA-25 (Onogi et al. 2007) 등 재분석 자료를 생산하였으며 컴퓨팅 능력의 향상, 수치모델 및 자료동화 방법의 진보에 힘입어 더욱 고해상도의 개선된 재분석 자료를 생산하고 있다. 그러나 현존하는 재분석 자료들은 대부분 전구를 대상으로 하여 공간적 해상도가 낮아 한반도의 복잡한 지형 등 우리나라의 기상특성을 상세하게 표현하는 데는 한계를 갖고 있다. 이에 따라 한반도를 포함한 동아시아 지역의 기상/기후 특성을 분석하는데에도 한계를 가질 수 밖에 없다. 결국 고해상도의 지역 재분석 자료의 생산이 필요하다고 볼 수 있다.

최근 전구 재분석 자료의 단점인 해상도를 높이고 향상된 물리과정을 적용하여 지역 규모에서 고해상도의 재분석 자료를 생산하려는 시도와 연구가 계속되고 있다. 미국에서는 1990년대 후반 논의가 시작되어 NARR (North American Regional Reanalysis) 프로젝트를 통해 캐나다, 미국, 멕시코를 포함한 북미 지역에 대해 32 km 해상도의 재분석 자료를 생산하였으며 (Mesinger et al. 2006), 유럽 지역에서도 Baltic sea 지역에 대한 지역 재분석 자료 생산 연구가 이루어졌으며 (Fortelius et al. 2002), 2010년부터는 유럽 지역 재분석 자료를 생산하기 위해 EURO4M 프로젝트가 진행되고 있다. 미국과 유럽의 재분석 자료 생산 및 활용에 주목하여 최근에는 남아시아 지역을 대상으로 한 재분석 자료 생산이 추진되고 있다 (Nigam et al. 2006).

국내에서는 독자적인 재분석 자료 생산을 위한 연구는 거의 전무하여 재분석 자료와 관련된 연구들은 외국에서 생산된 전구 재분석 자료들을 이용하고 있다. 적은대류에 의한 중력파 (Chun and Song 2003), 전구 지표에너지 수지 (Oh and Ha 2004), 폭설 사례 분석 (Heo et al. 2005) 등 다양한 주제에 걸쳐 재분석 자료가 요구되고 있으나 국내 연구자들의 수요를 충족시켜줄 수 있는 자체적인 고해상도의 재분석 자료는 아직 생산되지 못하고 있다. 기상/기후, 농업, 수자원 등 다양한 분야의 연구자들이 모여있는 APCC 내에서도 마찬가지로 응용연구에 필요한 시간적/공간적 해상도를 가진 자료에 대한 필요성이

제기되고 있지만 자체 생산되고 있는 전구모형의 결과나 MME 자료로는 그 요구를 충족시키지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 지역기후모형을 이용하여 전구 재분석자료보다 시간적/공간적으로 고해상도의 동아시아 기후 자료를 생산하여 재분석 자료와 비교 검증하고, 지역 재분석 자료로 활용될만한 신뢰도를 가지는지를 조사하였다.

2장에서는 실험에 사용된 지역기후모형과 실험 방법을 설명하고, 3장에서는 계절평균, 경년변동성, 계절내 변동성의 관점에서 실험 결과들이 검증되었다. 4장에서는 결과를 요약하고 이 연구의 활용방안을 제안하였다.

2. 연구 방법

2.1 Global/Regional Integrated Model System (GRIMs)

이 연구에 사용된 모형은 Global/Regional Integrated Model System (GRIMs; Hong et al. 2013)으로 전구 모형과 지역 기후 모형이 한 시스템에 들어있는 multi-scale 모형으로, 지역기후모형(Regional Model Program; RMP)은 Hong and Leetmaa (1999)에 의하여 그 열개가 확립된 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Regional Spectral Model (RSM; Juang et al. 1997)에서 발전된 모형이다. GRIMs-RMP는 전구분광모형과 같은 역학 및 물리과정을 가지고 있어서 자원을 절약할 수 있으며 측면 경계 문제가 감소되는 장점을 가지고 있다 (Juang et al. 1997). 또한 spectral 계산에 있어서 perturbation method (spectral filter)를 사용함으로써 경계자료의 large-scale 패턴은 유지하면서 고분해능 자료를 생산할 수 있다. 이러한 지역기후 수치모의는 역학적 down-scaling을 하는 방법으로 통계적 방법으로는 얻을 수 없는 large-scale 현상에 미치는 중규모의 비선형 과정을 표현할 수 있으며, 같은 컴퓨팅 자원으로 원하는 지역의 고해상도 정보를 제공할 수 있다. GRIMs-RMP의 물리과정은 동아시아 지역에 대해 이미 검증된 바 있으며 (Yhang and Hong 2008a, Yhang and Hong 2008b), 지역기후 시나리오 생산(Lee et al. 2013), 집중호우와 같은 극한 기후값의 모의(Lee and Hong 2013)에서도 그 성능이 검증되었다.



2.2 실험 설계

GRIMs-RMP를 통해 1979년부터 2008년까지 30년간의 동아시아 지역기후값을 생산하였다. 초기 및 경계조건으로는 GRIMs의 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 문제점을 최소화하였다. 실험 영역은 그림 1과 같이 우리나라, 일본, 중국 일부를 포함한 동아시아 영역이며, 수평해상도는 약 50 km이다. 사용된 물리 과정은 Table 1과 같고, GRIMs package version 3.1로 전구 및 지역 모의 실험에서 여러 차례 테스트 되어 동아시아에 적절하다고 판단된 물리과정들이다 (Yhang and Hong 2008a; Yhang and Hong 2008b).

강수의 검증에는 육지에 대해서는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 해상도를 가진 Asian Precipitation - Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE; Yasutomi et al. 2011) 자료가 이용되었고, 해양 강수를 포함한 강수 패턴 분석에는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 Climate Prediction Center (CPC) merged analysis of precipitation (CMAP; Xie and Arkin 1997)이 사용되었다. APHRODITE 데이터는 평균 지면온도의 비교에도 이용되었으며, 최대/최저 기온의 검증을 위해 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 해상도의 Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Ebita et al. 2011)를 사용하였다.

2.3 Scale-Selective Bias Correction (SSBC)

이 연구에서는 자료동화를 사용하지 않은 대신 경계자료에서 제공되는 대규모장에 대한 정보를 지역기후모형에 강력하게 처방해주는 large-scale nudging 기법을 사용하였다. 이 방법을 적용함으로써 지역기후모형 자체가 가지고 있는 에러의 발생을 줄여주는 효과를 기대할 수 있다. nudging 기법의 효과는 선행 연구에서 검증되어 왔으며 (Kanamitsu et al. 2010; Yhang and Hong 2011; Hong and Chang 2012) 최근 캘리포니아 지역을 대상으로 한 10 km 해상도의 지역자료 생산에 있어서는 전구 자료를 경계조건으로 이용한 역학적 다운스케일링 방법이 장기간의 지역 기후 자료를 얻기 위한 경제적인 접근이, 자료

동화를 사용한 지역 재분석 자료와 비교할 때 높은 신뢰도를 가질 수 있다는 결과를 보였다 (Kanamitsu and Kanamaru 2007).

대부분의 지역기후모형은 경계조건에서 처방되는 정보만으로 실험영역 전체값들을 생산해낸다. 경계에서 멀어질수록 경계조건이 제공하는 종관규모의 정보들이 반영되기 어려워지므로 에러가 발생하기 쉬워지고, 따라서 지역기후모형은 경계조건에서 주어진 정보들과 다른 종관규모장들을 모의할 가능성이 커진다. 이러한 오차 발생을 줄이기 위해 large-scale spectral nudging 방법이 제안되었다 (Waldron et al. 1996; von Storch et al. 2000).

Selective Bias Correction (SSBC) 기법은 일종의 large-scale nudging 방법으로 Kanamaru and Kanamitsu (2007)에 의해 제안되었고 Kanamitsu et al. (2010)과 Hong and Chang (2012)에서 수정되어 다음 3가지 요소로 구성된다.

1) Nudging은 전구모형과 지역기후모형의 차이값에 다음과 같은 식을 통해 적용된다.

$$F_t(m, n) = \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \sigma^2)} \right) F_t^{old}(m, n) \text{ for } m, n < m_c, n_c$$

F: perturbation, α = coefficient, m, n: wave # of x, y

F_t 는 시간 t에서 전구모형과 지역기후모형의 차이인 perturbation field를 의미한다. F_t^{old} 는 SSBC를 적용하기 전의 Perturbation field 값으로 x와 y 방향에서 각각 m개와 n개의 파장으로 이루어져 있고, 정해진 critical scale m_c, n_c 보다 큰 규모를 가지는 파장에 대해 위의 식이 적용된다. α 는 damping 계수이고 선행연구에서 여러번의 테스트를 거쳐 0.9로 정해졌다. 이 계수에 $(1 - \sigma^2)$ 항이 곱해져 고도가 높아질수록 (σ 값이 작아질수록) F_t^{old} 의 값이 작아지게 되어 $\sigma = 0$ 일 때 SSBC 적용후 얻어지는 F_t^{new} 의 값은 거의 1/2로 줄어들게 된다. 이것은 지면에 가까운 변수 모의에는 지역기후모형의 자유도를 높이고, 상층으로 갈수록 전구모형에 의한 강제력이 커지는 효과를 준다. 이 실험에서는 critical scale을 1000 km로 지정하였다.



- 2) 온도 perturbation의 영역 평균값이 매 적분시간마다 0이 되도록 하였다.
- 3) 지역기후모형과 전구모형의 해상도 차이에서 오는 지표기압차를 정역학 방정식에서 보정하였다.

2)와 3)의 효과는 1)에 비해 크지 않지만, 1)을 단독으로 사용하였을때보다 보정 효과가 큰 것으로 나타났다 (Kanamaru and Kanamitsu 2006; Yhang and Hong 2011).

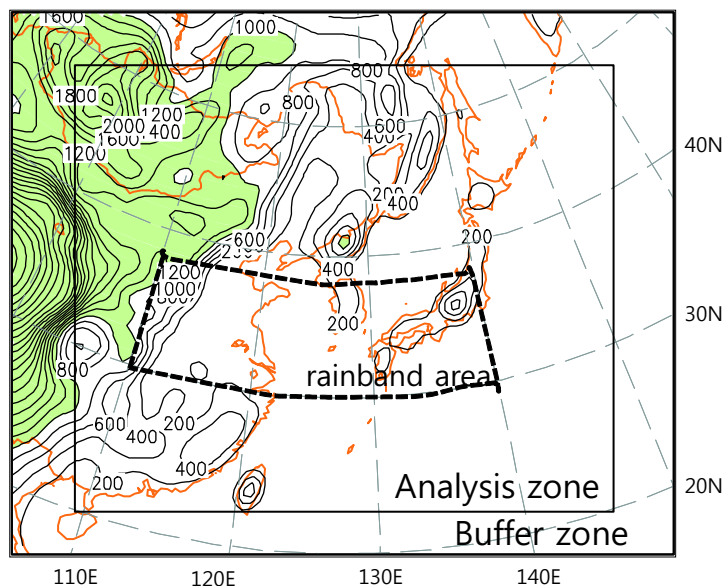


Figure 1 Regional model domain with terrain heights. All the statistics for evaluation of the simulated results over East Asia and the corresponding plottings are made in the inner box of analysis zone.

Table 1 GRIMs physics packages V3.1.

Physical parameterization	V3.1
Deep convection	Park and Hong (2007), Byun and Hong (2007)
Shallow convection	Hong et al. (2012)
Cloud microphysics	Hong et al. (1998)
Longwave radiation	Chou et al. (1999)
Shortwave radiation	Chou and Lee (2005), Chou and Suarez (1999)
Cloudiness	Ham et al. (2009), Hong et al. (1998)

Physical parameterization	V3.1
Vertical diffusion	Hong et al. (2006), Noh et al. (2003)
Stable boundary layer	Hong (2010)
Orographic gravity wave drag	Hong et al. (2008), Kim and Arakawa (1995)
Convective gravity wave drag	Jeon et al. (2010), Chun and Baik (1998)
Land surface layer	Yhang and Hong (2008a), Ek et al. (2003)
Ocean surface layer	Kim and Hong (2010)
Ozone chemistry	Prognostic

3. 연구 결과

3.1 계절 평균 기후값

이번 장에서는 가장 기본이 되는 계절 평균 기후값에 대한 검증을 수행하였다. 그림 2는 30년 평균된 여름의 대규모 순환장을 나타낸 것으로, 모형은 재분석 자료에 나타난 여름철 순환의 특징을 잘 나타내고 있다. 고기압의 가장자리를 따라 불어오는 하층의 남/남동풍과 도메인의 북쪽에서부터 서해까지 발달된 중위도 기압골의 형태가 뚜렷하게 나타난다 (그림 2a, 2b). 그러나, 상대습도의 경우 도메인 전체에서 약하게 모의되고 있으며, 특히 해양에서 재분석 자료에 비해 건조한 결과를 보인다 (그림 2c). 또한 전반적으로 지위 고도를 낮게 모의하는 경향이 나타나고 있다 (Table 2).

겨울철 대규모 순환장의 특징은 도메인의 북서쪽에 위치한 시베리아 고기압에서 불어오는 북서풍과 이 흐름을 따라 발달하는 기압골이다 (그림 3a). 모형은 이러한 특징을 잘 모의하고 있으나, 지면 바람을 다소 약하게 모의하고 일본과 한반도 남쪽의 기온을 낮게 모의하고 있다 (Table 2). 기온의 경우 재분석 자료의 해상도가 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 임을 감안할 때 모형에서 나타나는 기온차는 해상도 차이에서 오는 것이라 생각된다.

여름철 관측값의 지표온도는 북위 30도 아래에서 최대값을 보이고, 남중국 전역에서 높은 기온 분포를 보이고 있다 (그림 4a). 재분석 자료의 경우 기온 분포 형태는 관측과 유사하게 나타나고 있고 (그림 4b), 이러한 패턴은 모형 결과에서 지역적으로 더 상세화

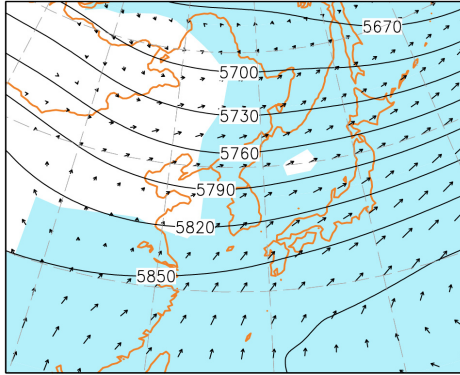


되어 나타나고 있다 (그림 4c). 그러나, 남중국 전역의 온도를 전반적으로 낮게 모의하고 있고, 관측과 달리 북위 40도 부근에서 최대값을 보인다. 이는 재분석 자료와 유사한 결과로 경계조건의 오차가 지역기후모형의 결과에 영향을 미친 것이라 볼 수 있다.

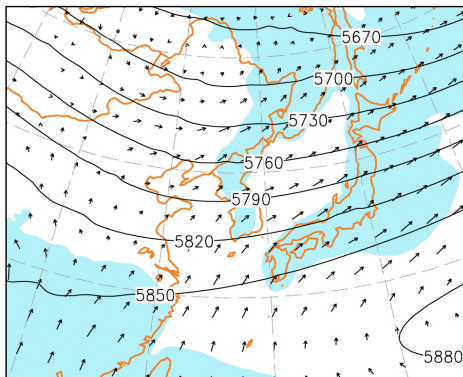
겨울철 지표온도는 여름철보다 좀 더 지역적인 분포를 보인다 (그림 5a). 북위 35도를 기준으로 북쪽은 영하, 남쪽은 영상의 기온 분포를 보이며 이러한 특징은 지역기후모형의 결과에서도 유사하게 나타난다 (그림 5c). 특히 재분석 자료가 한반도와 일본 열도의 기온은 높게 나타낸 반면, GRIMs 결과는 지역별로 상세한 기온 분포값을 모의하여 고해상도 재분석 자료로서의 효용성을 보이고 있다 (Table 2). 겨울철은 여름철에 비해 대규모 순환장의 영향이 큰 계절이므로, 모의된 온도값이 여름 기온에 비해 정확성이 높은 것으로 보인다.

주요 기후인자들에 대한 오차값과 공간분포에 대한 상관계수를 Table 2에 정리하였다.

a) R2


 \vec{v}

b) GRIMs


 \vec{v}

c) GRIMs-R2

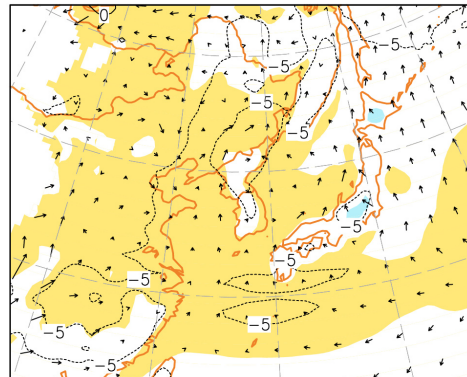
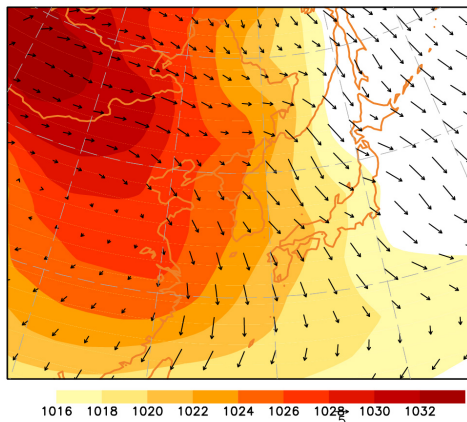

 \vec{v}

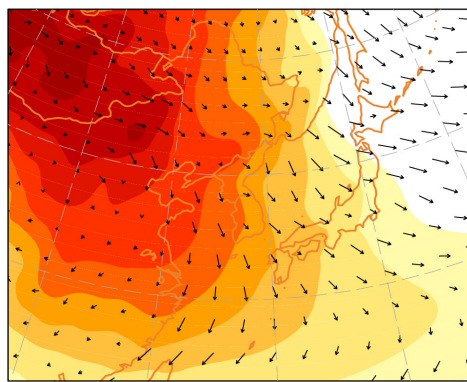
Figure 2 30-year summer mean 850-hPa wind (vector), relative humidity (%), and 500-hPa height (m, contour) from (a) the reanalysis, (b) GRIMs, and (c) difference between reanalysis and GRIMs. Shaded areas correspond to relative humidity over 65 % in (a) and (b). Yellow shaded areas in (c) denote that the model underestimates relative humidity by more than 5%.



a) R2



b) GRIMs



c) GRIMs-R2

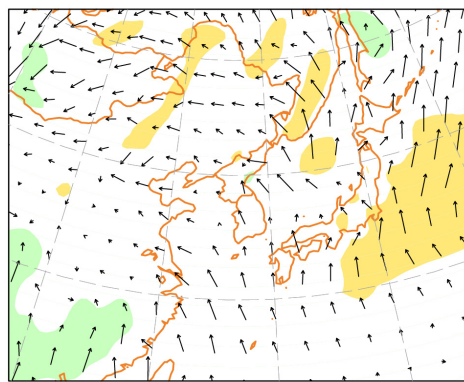


Figure 3 29-year winter mean 10-m wind (m/sec, vector), and sea level pressure (hPa, shaded) from (a) the reanalysis, (b) GRIMs, and (c) difference between reanalysis and GRIMs. Yellow (green) shaded areas in (c) denote that the model overestimates (underestimates) surface pressure by more than 1 hPa.

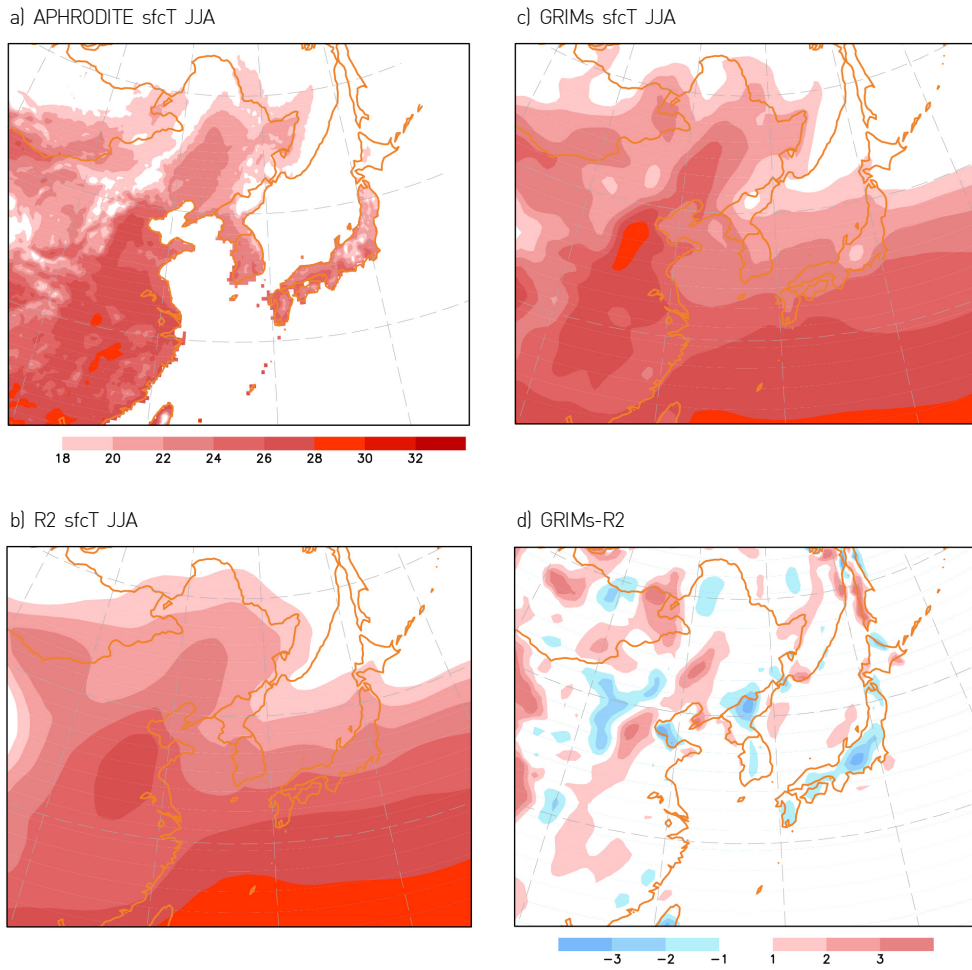
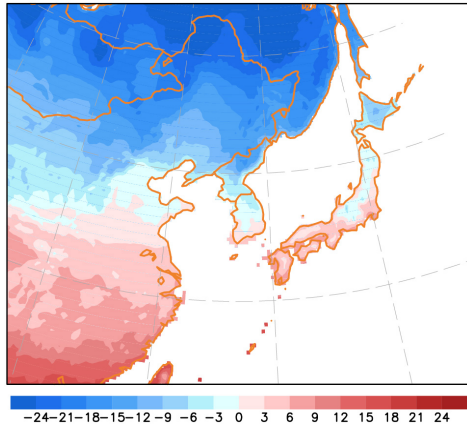


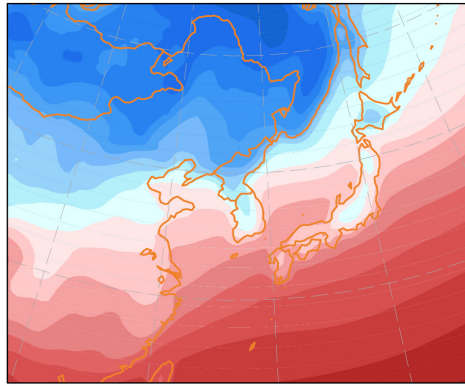
Figure 4 30-year mean summer surface temperature (°C) of (a) APHRODITE, (b) reanalysis, (c) GRIMs, and (d) difference between reanalysis and GRIMs.



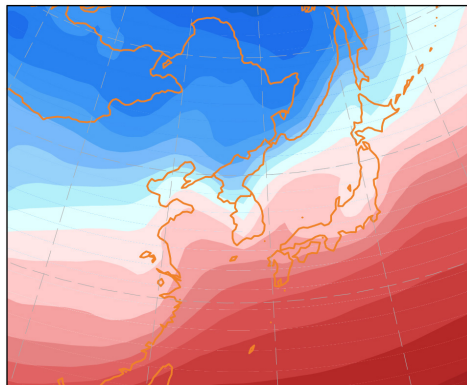
a) APHRODITE sfcT DJF



c) GRIMs sfcT DJF



b) R2 sfcT DJF



d) GRIMs-R2

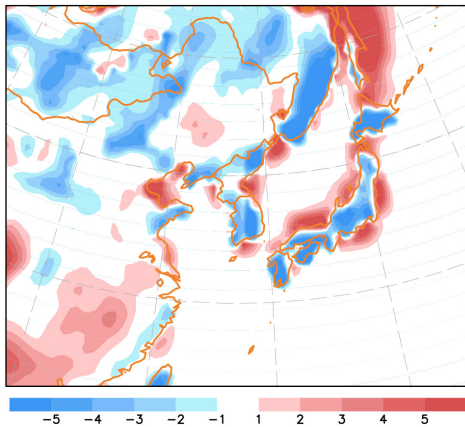


Figure 5 Same as in Figure 4, but for 29-year mean winter surface temperature.

그림 6와 그림 7는 각각 여름철 평균 강수와 겨울철 평균 강수이다. 관측 강수는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 해상도를 가진 APHRODITE 자료와 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 해상도의 CMAP 자료로 나타내었다. 여름철 강수의 최대값은 중국 남동쪽과 한국, 일본에 걸쳐있는 장마 전선을 따라 나타난다 (그림 6a). CMAP 데이터는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 저해상도이므로 최대값 지역을 상세하게 나타내지 못하고, 강수 밴드의 위치만 대략적으로 보여준다 (그림 6b). GRIMs는 강수의 최대값 지역을 APHRODITE와 유사하게 모의하고 있으나 (그림 6c), 전반적으로 육지 강수는 과다 모의하고 해양 강수는 과소 모의하는 경향을 보인다 (그림 6d). 이는

하층의 상대 습도 모의에서 나타났던 해양의 건조 오차와 일치하는 결과로 지역기후모형에서 해양 모형의 접합의 필요성을 시사한다. 모형은 겨울철 강수의 분포를 잘 나타내고 있으나, 최대값을 더 크게 모의하고 있다 (그림 7).

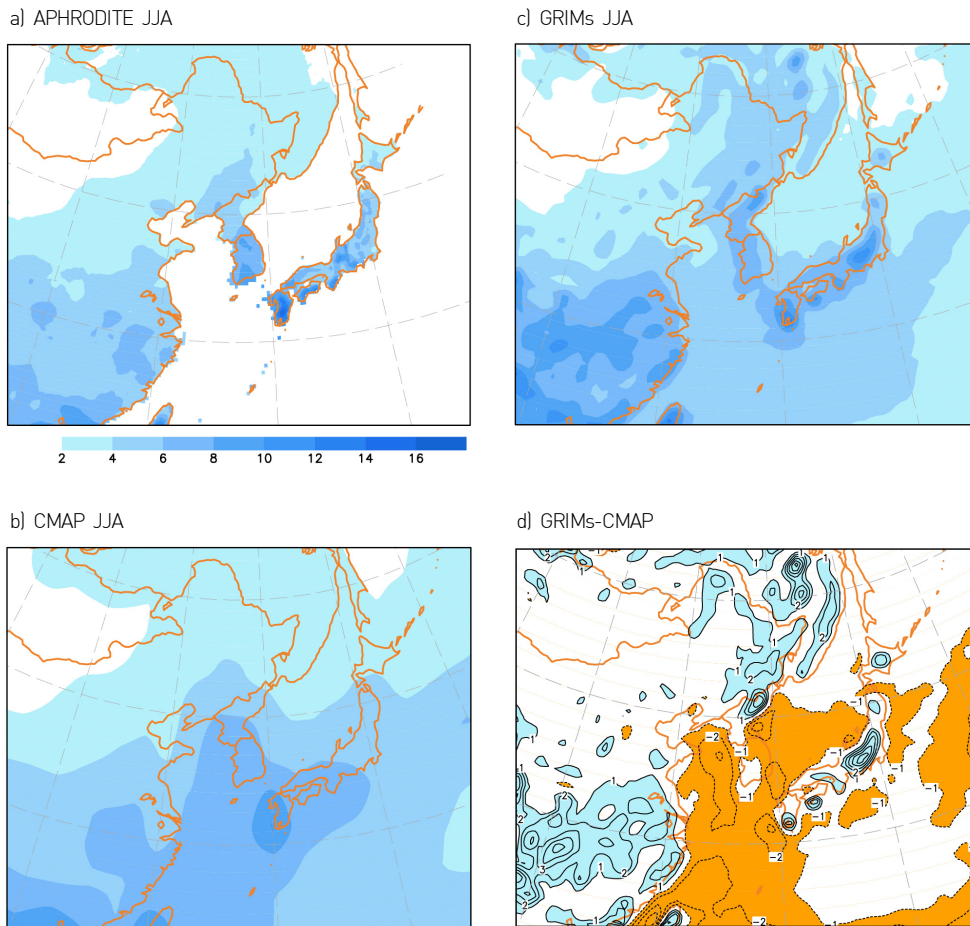
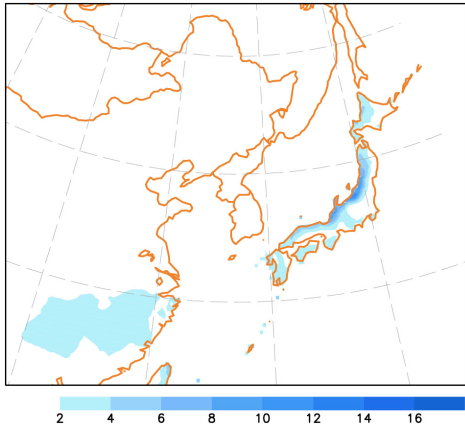


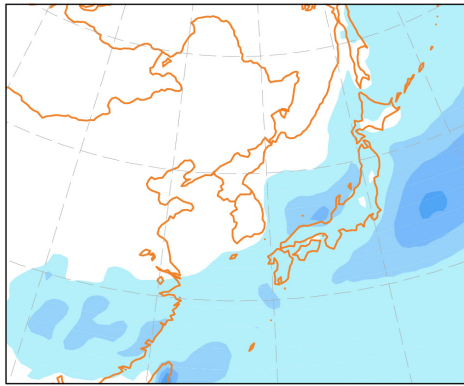
Figure 6 30-year summer mean precipitation (mm/day) from (a) APHRODITE, (b) CMAP, (c) GRIMs, and (d) difference between CMAP and GRIMs.



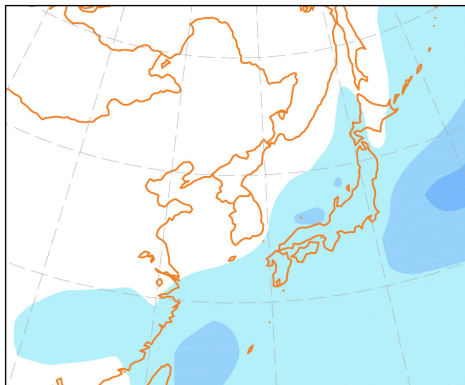
a) APHRODITE



c) GRIMs



b) CMAP



d) GRIMs-CMAP

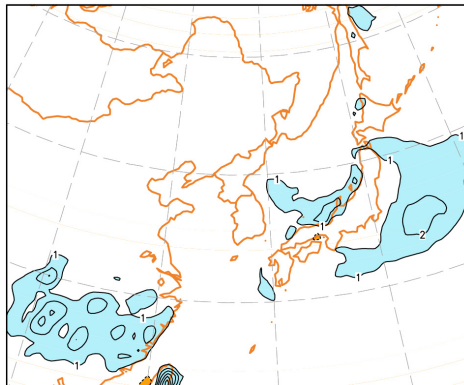


Figure 7 Same as in Figure 6, but for 29-year mean winter precipitation.

Table 2 Statistics of the bias, the root mean square error (RMSE), and pattern correlation for 30-year summer and winter mean over the whole domain.

	Bias		RMSE		Pattern corr.	
	Summer	Winter	Summer	Winter	Summer	Winter
precipitation (mm/day)	-0.27	0.24	1.53	0.71	0.74	0.94
surface temperature (K)	-0.03	0.16	1.19	1.59	0.97	0.99
500-hPa height (m)	-5.10	-3.94	5.29	4.34	0.99	0.99
sea level pressure (hPa)	2.70	21.12	83	78.31	0.98	0.99

3.2 경년 변동성

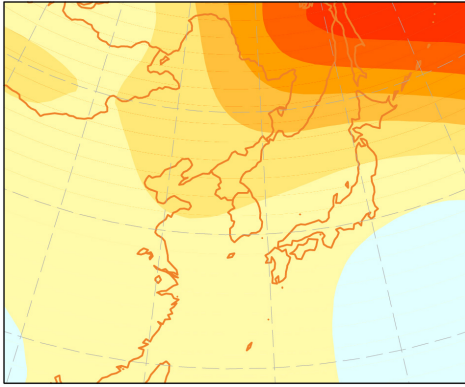
지역기후모형이 모의한 기후값을 경년 변동성 관점에서 검증하기 위해 EOF (Empirical Orthogonal Function) 분석을 실시하였다. 중관장 규모의 변수 중에서는 계절별로 여름철에는 500-hPa 고도, 겨울철에는 해면기압의 경년 변동성을 조사하였고, 모형이 예단하는 변수 중 지표기온과 강수는 여름과 겨울에 대해 모두 비교하였다.

그림 8은 여름철 500-hPa 고도의 EOF 첫 번째와 두 번째 모드이다. 첫 번째 모드에서는 재분석 자료와 모형 결과에서 공통적으로 실험 영역의 북동쪽에 강한 시그널을 보이고 있다 (그림 8a, 8b). 재분석 자료와 GRIMs 모의 결과의 첫 번째 모드는 전체의 약 30%를 설명한다. 두 번째 모드는 북서쪽에서 남동쪽으로 양의 시그널을, 그 외 지역은 음의 시그널이 퍼져 있는 형태를 보인다 (그림 8d, 8e). 두 번째 모드는 전체 변동성 중 약 20%를 설명하고 있다. 주성분의 시계열은 첫 번째 모드에서 0.99, 두 번째 모드에서 0.83의 상관 계수를 보이며 매우 유사하게 나타난다 (그림 8c, 8f).

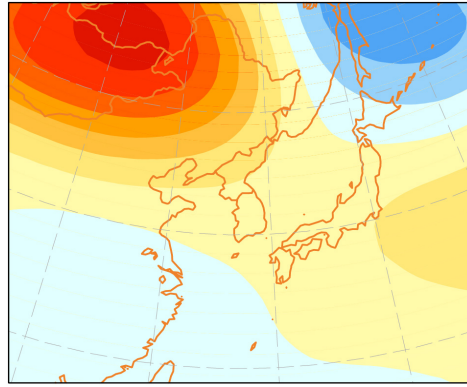
겨울철 해면기압에 대한 비교에서도 역시 고도에 대한 분석에서와 마찬가지로 재분석 자료와 매우 유사한 공간적 분포를 보이며, 시계열 분석에서도 0.99의 높은 상관 계수를 가진다 (그림 9). 고도와 해면기압의 경우 대규모장 변수이므로 large-scale nudging의 영향을 크게 받게 된다. 그러므로, SSBC를 사용함으로써 모형이 가지고 있는 오차를 줄여 계절 평균장의 경년 변동성을 재분석 자료와 매우 유사하게 개선되는 결과를 보인다 (Kanamitsu et al. 2010).



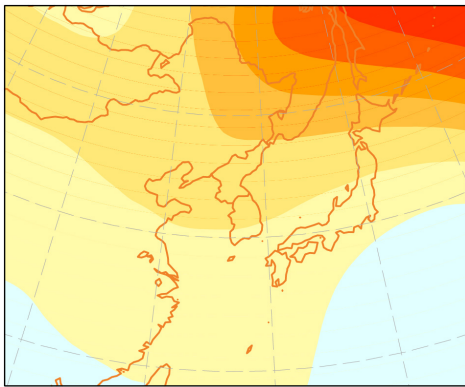
a) R2 EOF1 JJA HGT (29.66%)



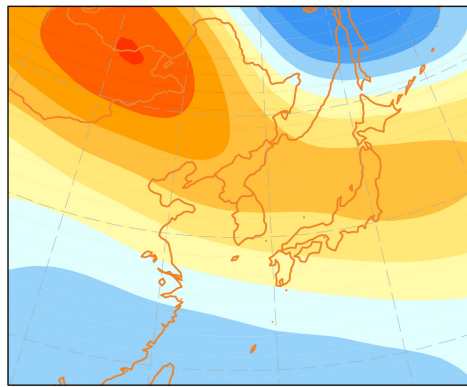
d) R2 EOF2 (19.72%)



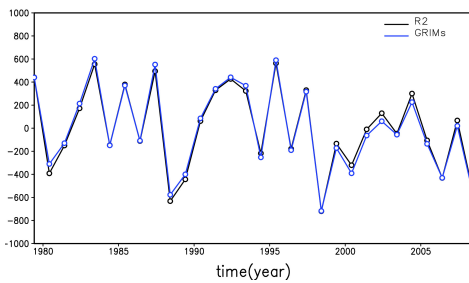
b) GRIMs EOF1 JJA HGT (29.79%)



e) GRIMs EOF2 (19.25%)



c) PC1 (corr: 0.99)



f) PC2 (corr: 0.83)

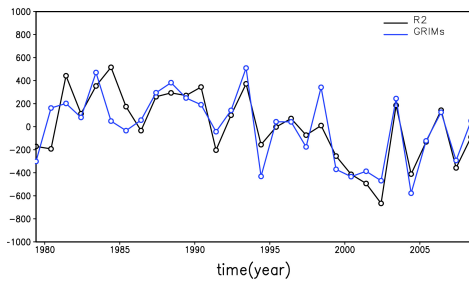
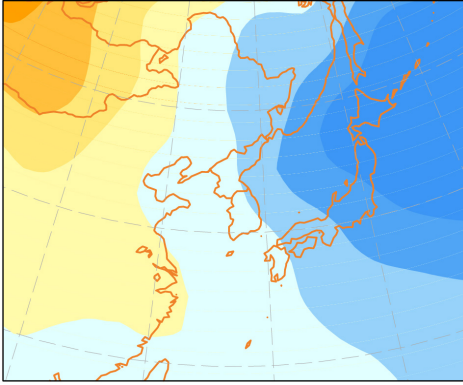
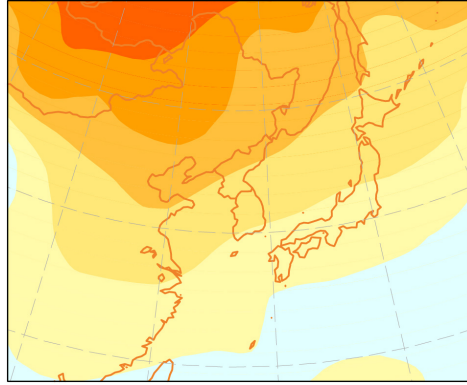


Figure 8 EOF 1st mode of the 500-hPa height in summer from the (a) reanalysis, (b) GRIMs, and (c) time series associated with the eigenvectors. EOF 2nd mode from (d) reanalysis, (e) GRIMs, and (f) time series associated with the Eigenvector.

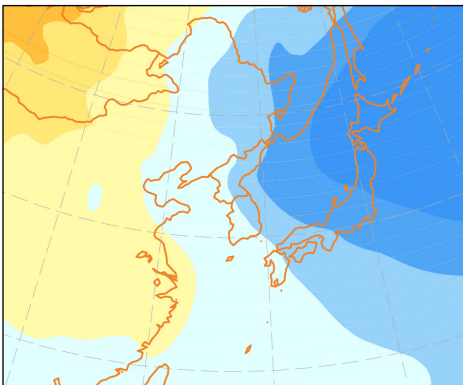
a) R2 EOF1 DJF SLP (37.95%)



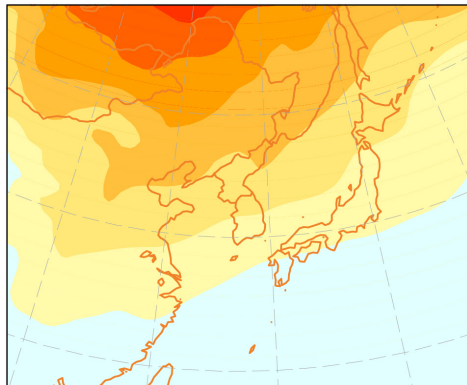
d) R2 EOF2 (19.84%)



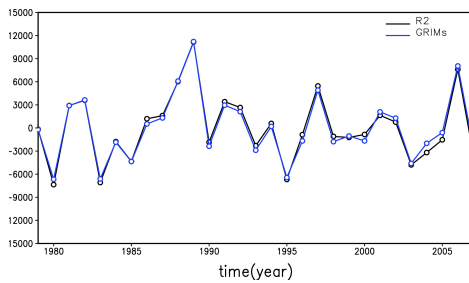
b) GRIMs EOF2 DJF SLP (37.38%)



e) GRIMs EOF2 (19.50%)



c) PC1 (corr: 0.99)



f) PC2 (corr: 0.98)

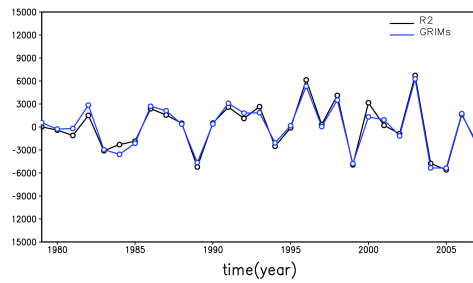


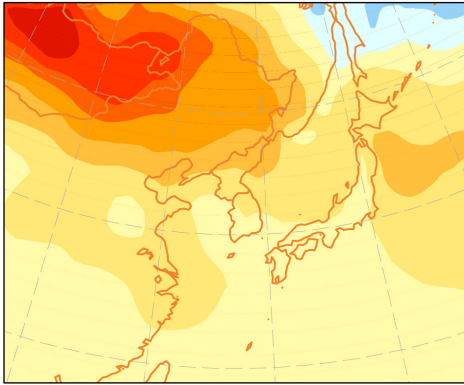
Figure 9 Same as in Figure 6, but for sea level pressure in winter



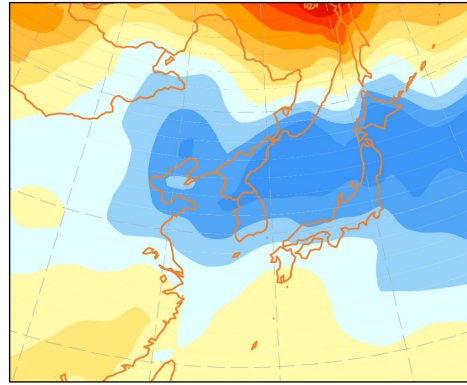
여름철 지표온도의 첫 번째 모드는 실험영역의 북동쪽을 제외한 동아시아 전체에서 같은 시그널을 보이며, 약 30% 정도를 대표하고 있다 (그림 10a, 10b). 두 번째 모드는 중국과 우리나라, 일본을 따라 밴드 모양의 음의 시그널을 보이며, 이는 동아시아 여름철 강수로 인한 지표온도의 감소를 나타내는 것으로 보인다 (그림 10d, 10e). 모형은 재분석자료에 비해 서쪽으로 치우친 음의 시그널을 모의하였다 (그림 10e). 따라서 첫 번째 모드의 시계열 상관계수는 0.96으로 매우 높게 나타난 반면 (그림 10c), 두 번째 모드의 시계열 상관계수는 0.73으로 감소하였다 (그림 10f).

겨울철 지표온도의 EOF는 첫 번째 모드에서 한반도 북쪽과 몽골 지방의 강한 시그널을 (그림 11a, 11b), 두 번째 모드에서는 북쪽에서 내려오는 찬 기온의 흐름을 나타내고 있다 (그림 11d, 11e). 첫 번째 모드의 변동성을 보면 1980년대 후반부터 첫 번째 모드의 시그널이 약해지는 것을 볼 수 있다 (그림 11c). 이는 선행 연구에서 밝혀진 동아시아 겨울 몬순의 약화가 모형 결과에서 역시 잘 나타나고 있다는 것을 의미한다 (Watanabe and Nitta 1999; Wang et al. 2009). 겨울철 지표온도는 재분석 자료와의 비교 관점에서 볼 때 앞서 살펴본 변수들만큼 유사한 결과를 보이지 못하고 있다. 그러나, 이는 계절 평균장 비교에서 살펴보았듯이 저해상도의 재분석 자료보다 모형 결과가 관측 자료 (APHRODITE)와 유사한 상세 분포를 보였기 때문에 EOF 분석에서 나타난 차이점이 모형의 계통적 오차라고 보기는 어렵다.

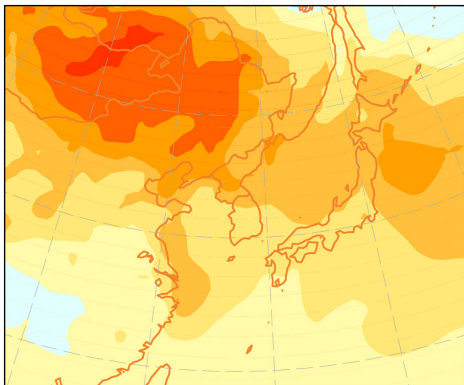
a) R2 EOF1 JJA sfcT (29.33%)



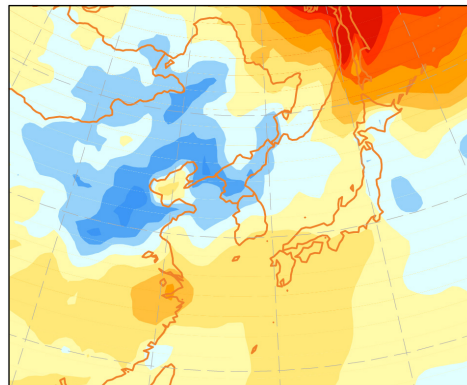
d) R2 EOF2 (12.66%)



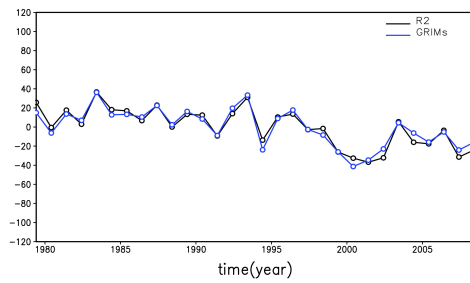
b) GRIMs EOF1 JJA sfcT (28.38%)



e) GRIMs EOF2 (12.40%)



c) PC1 (corr: 0.96)



f) PC2 (corr: 0.73)

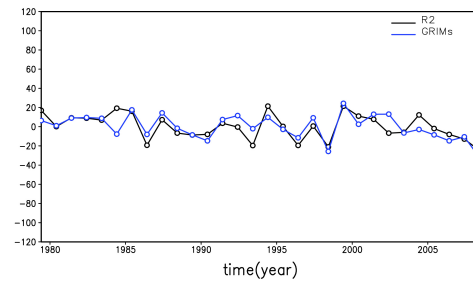
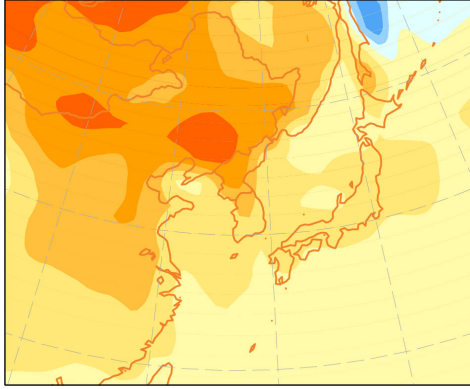


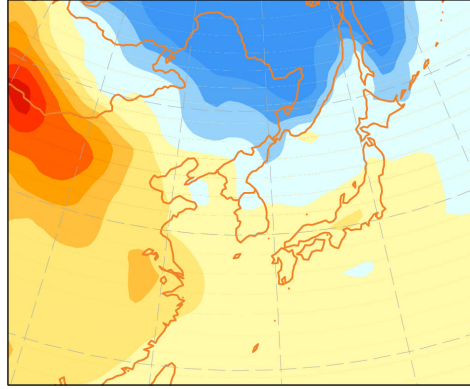
Figure 10 Same as in Figure 8, but for surface temperature in summer



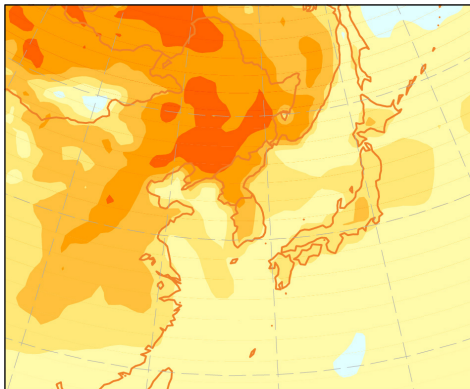
a) R2 EOF1 DJF sfcT (34.13%)



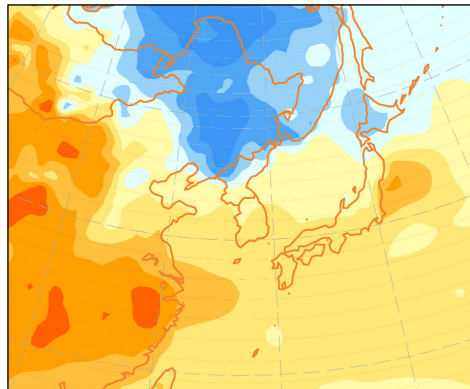
d) R2 EOF2 (18.94%)



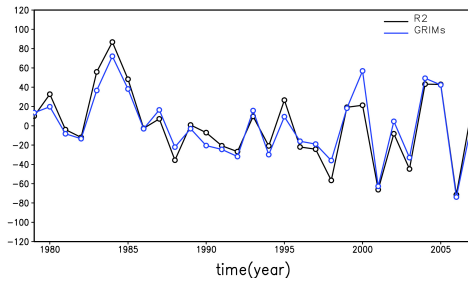
b) GRIMs EOF1 DJF sfcT (32.97%)



e) GRIMs EOF2 (15.01%)



c) PC1 (corr:0.95)



f) PC2 (corr: 0.81)

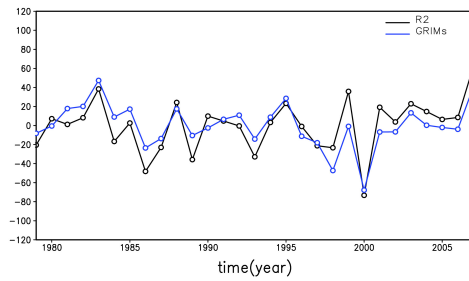


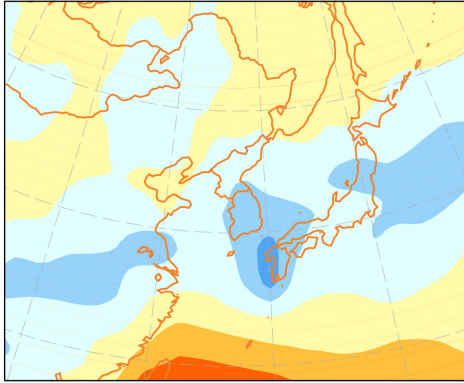
Figure 11 Same as in Figure 8 except for surface temperature in winter.

여름철 강수의 가장 대표적인 패턴은 중국, 한국, 일본에 걸쳐진 강수 밴드 형태로 나타난다. 관측과 모형 결과에서 모두 밴드 형태가 나타나고 있으나, 모형의 경우 관측에 비해 밴드 형태가 뚜렷하게 나타나지 않는다 (그림 12a, 12b). CMAP의 첫 번째 모드는 약 22%를, GRIMs의 첫 번째 모드는 약 15%를 대표한다. 강수는 다른 변수들에 비해 변동성이 크고 예측하기 어려운 변수 중 하나이다. 첫 번째 주성분의 시계열의 상관계수는 0.3으로 다른 변수들에 비해 현저히 낮게 나타난다. 이는 최근 여름철 강수가 국지성 호우로 발생하는 빈도가 높아져 50 km의 해상도로 모의하기 어렵기 때문이라 생각된다. 관측의 두 번째 모드는 남중국과 일본 주변의 해양에 동-서로 반대 시그널을 보이고 있다 (그림 12d). 그러나, 모형 결과는 해양의 음의 시그널을 매우 약하게 모의하며, 첫 번째 패턴에서 나타난 강수 밴드가 여전히 유지되는 형태를 보인다 (그림 12e). 첫 번째 모드가 전체의 약 15% 정도를 설명하는데 비해 두 번째 모드가 약 11%를 대표하므로 모형의 EOF 분석은 첫 번째 모드와 두 번째 모드가 완전하게 분리되지 않은 것으로 보인다.

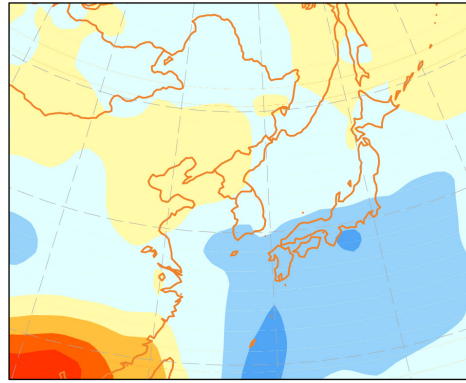
동아시아 겨울 강수는 여름만큼 지역적 특성이 강하지 않고, 북위 20도와 30도 사이에서 동-서 방향으로 뚜렷한 패턴을 보인다 (그림 13a). 모형의 첫 번째 모드는 관측에서만 동쪽으로 뻗어나가지 못하고 시그널의 강도 역시 관측보다 약하게 나타난다 (그림 13b). 그렇지만, 첫 번째 모드의 변동성은 매우 유사하게 나타나 시계열의 상관계수는 0.8으로 매우 높다 (그림 13c). 관측의 두 번째 모드는 일본 남쪽 해상으로 강한 시그널을 나타내고 있다 (그림 13d). 반면, 모형은 첫 번째 모드에서 나타났던 밴드 형태가 북쪽으로 이동하였고, 일본 남쪽 해상의 양의 시그널은 나타내지 못하고 있다 (그림 13e). 이는 CMAP의 세 번째 모드와 유사한 형태로 (not shown), 두 번째 모드의 시계열은 0.31의 낮은 상관관계를 보였다 (그림 13f).



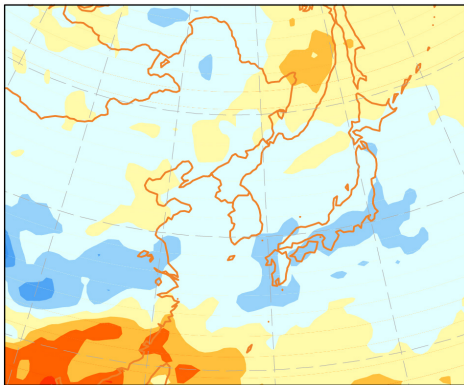
a) CMAP EOF1 JJA RAIN (22.41%)



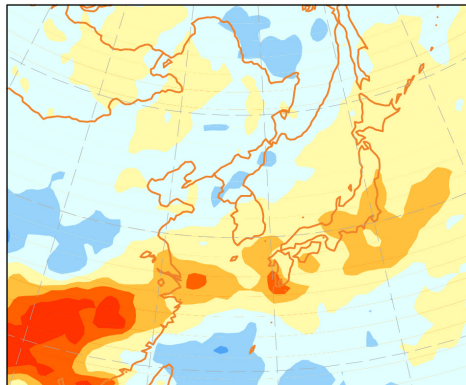
d) CMAP EOF2 (16.66%)



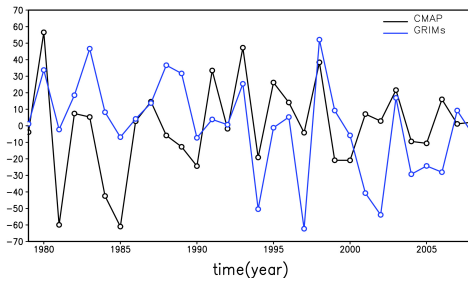
b) GRIMs EOF1 JJA RAIN (14.91%)



e) GRIMs EOF2 (11.19%)



c) PC1 (corr: 0.30)



f) PC2 (corr: 0.23)

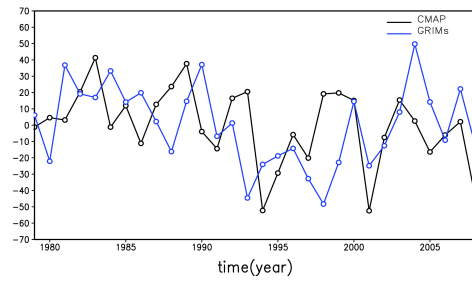


Figure 12 EOF 1st mode of the summer precipitation from (a) CMAP, (b) GRIMs, and (c) time series associated with the eigenvectors. EOF 2nd mode from (d) CMAP, (e) GRIMs, and (f) times series associated with the eigenvectors.

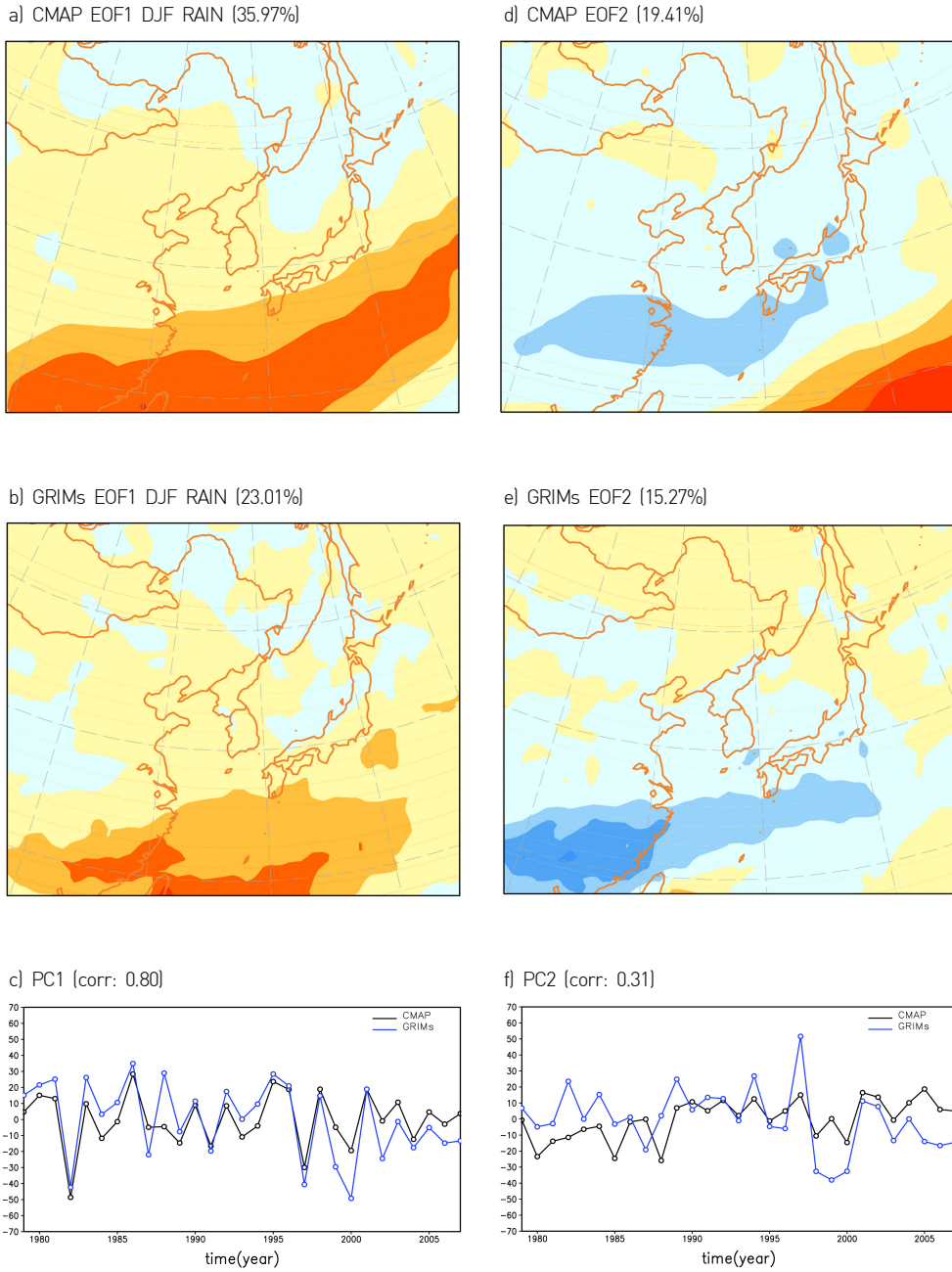


Figure 13 Same as in Figure 10 except for winter precipitation.



그림 14와 그림 15에서는 지면온도와 강수의 아노말리 분석을 통해 매년 여름철과 겨울철 변동성을 잘 모의하는지를 살펴보았다. 그림 14a와 14b는 실험영역 전체 평균에 대한 여름과 겨울의 지면온도 아노말리를 비교한 것으로 재분석 자료와 매우 유사한 변동 추이를 보이고 있다. 겨울 기온은 1980년대 후반부터 거의 매년 양의 아노말리 값을 나타내고 있으며 이는 여러 선행 연구에서 보였던 겨울 몬순의 decadal change를 반영하는 결과이다 (Zhang et al. 1997; Hong and Yhang 2010).

강수의 경우 실험영역 전체와 여름철 강수밴드가 위치하는 지역 (110°E - 140°E , 30°N - 38°N)으로 나누어 아노말리 값을 살펴보았다. 전체 실험영역에 대해 살펴보았을 때 시계열의 상관관계가 0.79이고 (그림 15a), 강수대가 위치하는 지역에 대해 분석하였을 때 상관계수가 0.87로 오히려 정확도가 높아지는 결과를 보인다 (그림 15b). 겨울철 강수 역시 0.89의 높은 상관관계를 나타낸다 (그림 15c). 이는 계절에 상관없이 지역기후모형의 결과가 관측과 유사한 변동성을 보이며 여름철 강수가 집중되는 지역에 대해서도 신뢰할만한 결과를 생산하고 있음을 시사한다.

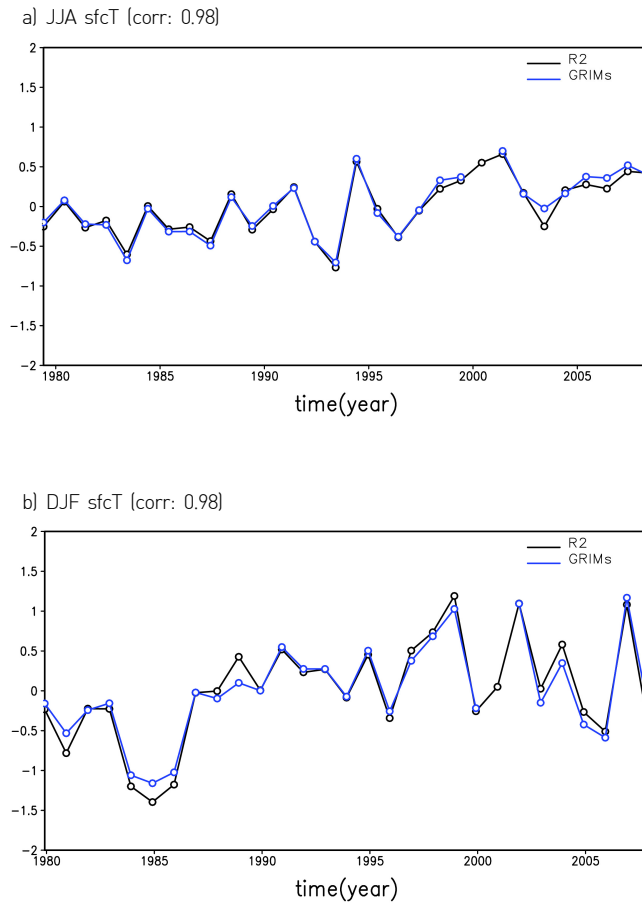


Figure 14 Surface temperature anomaly averaged over the whole domain for (a) summer, and (b) winter.

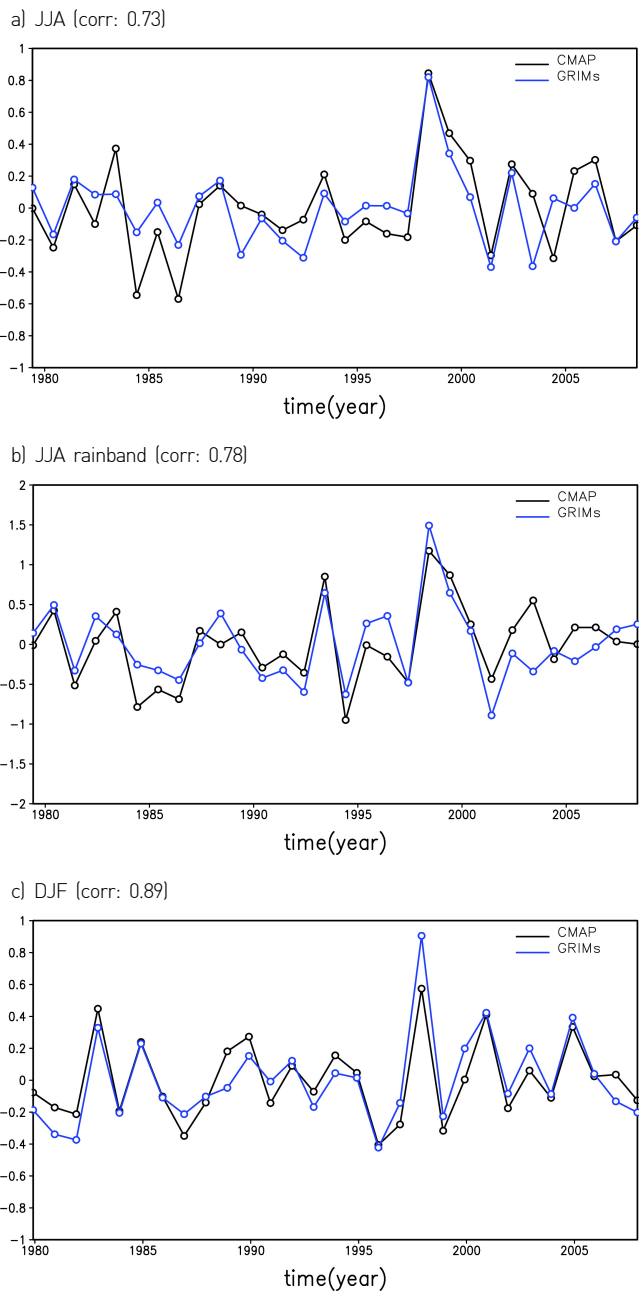


Figure 15 Precipitation anomaly averaged over (a) the whole domain for summer, (b) rainband region (110°E-140°E, 30°N-38°N) for summer, and (c) the whole domain for winter.

3.3 계절내 변동성

이 장에서는 계절내 변동성 분석을 통해 공간적, 시간적으로 고해상도의 자료가 가지는 장점을 검증하고자 하였다. 이를 위해 변동성이 가장 큰 변수인 여름 강수의 강수밴드 이동과 일강수량의 변동성을 조사하였다. 경년변동성 분석과 마찬가지로 전체 실험영역과 강수밴드 위치 지역으로 나누어 분석을 실시하였다 다만, 분석에 사용된 관측 자료가 APHRODITE이므로 지표강수만 고려되었다.

몬순 강수밴드는 보통 5월 초에 남중국에 위치하다가 서서히 북상하여 7월에 중국 북동쪽, 우리나라, 일본 주변에 머물다가 8월 이후 다시 남하하는 특징을 보인다. 강수대의 이동 추이는 그림 16에 잘 나타나 있다. 5월에는 북위 25도 부근에서 양의 값을 보이다가 6월초부터 북상하기 시작하여 7월 중순에는 35도 근방까지 이동하게 된다 (그림 16a). 7월 중순 이후 양의 시그널은 약해지고 25도-30도 영역에서 음의 아노말 리가 나타나고 있다. GRIMs는 아노말리 값들을 관측보다 강하게 나타내고 있기는 하지만, 강수밴드의 이동 경로와 여름철 강수의 특징을 잘 반영한다 (그림 16b).

여름철 강수량 변동에서도 역시 동아시아 몬순의 특징이 잘 나타나고 있다. 동아시아 영역 전체에서 5월 강수량은 평균 3mm/day 정도를 보이다가 6월부터 증가하기 시작하고 8월에는 다시 약간 감소하는 경향을 보인다 (그림 17a). 모형과 관측의 상관계수는 0.83으로 모형이 이런 추세를 전반적으로 잘 나타내고 있음을 의미한다. 여름철 강수가 집중되는 영역에 대한 시계열 분석에서는 강수량 증가 추세와 감소 추세가 더욱 명확하게 나타난다 (그림 17b). 5월부터 8월까지의 시계열 상관계수는 0.79로 나타났다. 앞서 살펴본 바와 같이 강수의 특징에 따라 5월, 6월 초-7월 중순, 7월 중순-8월로 기간을 나누어 상관계수를 살펴보면 5월에는 0.74, 6월 초-7월 중순에는 0.84, 7월 중순-8월은 0.51로 강수량이 많아지는 우기의 정확도는 높은 반면, 강수대가 남하하는 8월의 강수량 감소에 대한 모의 능력이 상대적으로 떨어지는 결과는 보인다. 모형의 이러한 약점은 동아시아 전체에 대해서도 마찬가지로 7월 중순부터는 관측에 비해 과다모의하는 성향을 나타낸다.

그림 18은 한반도에 폭염이 발생했던 1994년 여름의 일최대기온과 일최저기온의 시계열을 나타낸 것이다 (그림 14a 참고). 두 재분석 자료와 모형 결과가 공통적으로 7월 중순



에 가장 높은 온도를 보이고 있으며, 매우 유사한 변동성을 보인다. 두 재분석 자료와 비교할 때 GRIMs는 최저기온을 높게, 최고기온을 낮게 모의하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 시계열의 상관계수가 0.99로 매우 높게 나타나 폭염과 같은 극한기후에 대한 모의 가능성을 볼 수 있다.

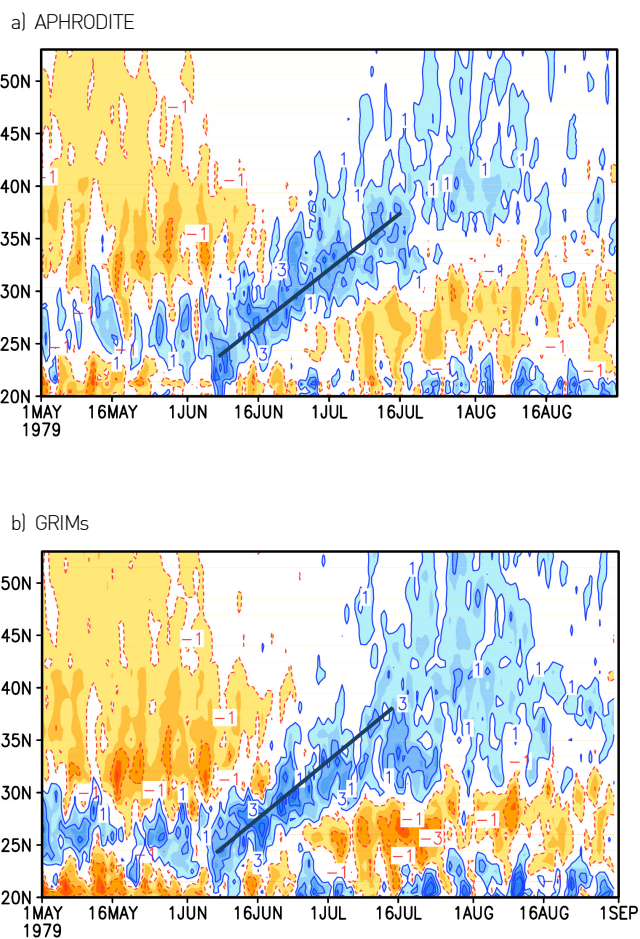


Figure 16 Hovmöller diagram of 30-year mean precipitation anomaly averaged over 109°E-145°E from the (a) APHRODITE, and (b) GRIMs.

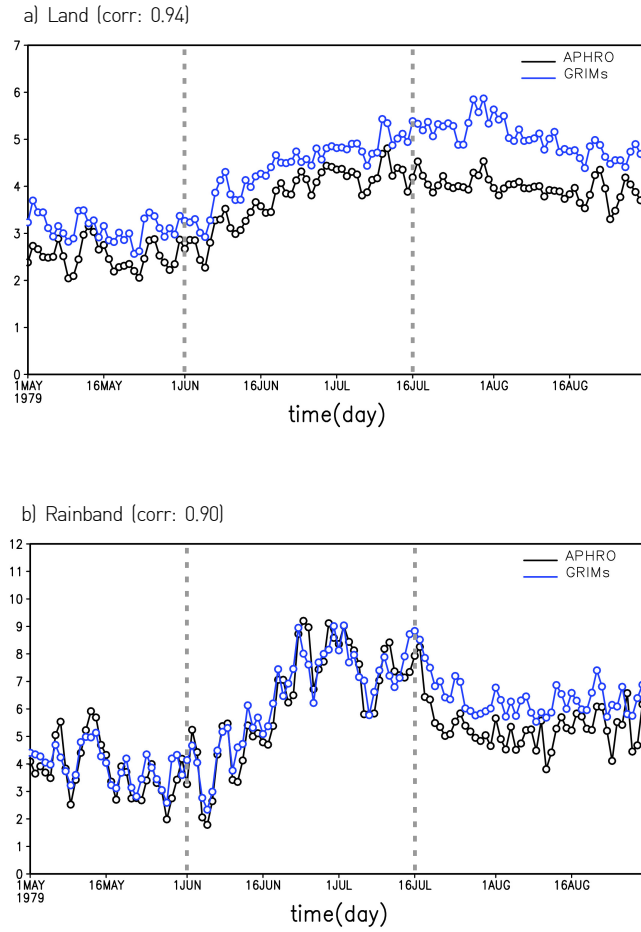


Figure 17 Daily precipitation averaged over (a) land, and (b) rainband region (110°E-140°E, 30°N-38°N).

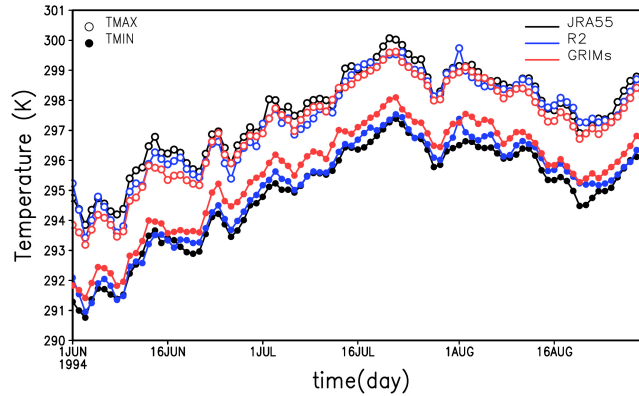


Figure 18 Daily maximum temperature (open circle) and minimum temperature (closed circle) in summer of 1994 from JRA55 (black), R2 (blue), and GRIMs (red).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지역기후모형을 이용해 동아시아 기후자료를 생산하고 이를 검증하였다. 실험은 1979년부터 2008년까지 30년에 대해 약 50 km의 해상도로 이루어졌고, 생산된 결과는 계절 평균, 경년변동성, 계절내 변동성 관점에서 검증하였다. 이러한 검증을 통해 재분석 자료보다 고해상도의 신뢰성 있는 자료를 제공하는 것이 이 연구의 목적이다.

GRIMs는 전반적으로 계절 평균장, 경년변동성, 계절내변동성을 모두 잘 모의하고 있다. SSBC라는 large-scale nudging 기법을 적용하여 대규모 순환장에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 하였으며 이로 인해 강수나 지표온도와 같이 모형이 예단하는 변수들의 정확도 역시 높아진 것으로 보인다. 그러나, 여름 강수의 경우 해양 강수를 현저히 약하게 모의하는 문제점을 나타냈다. GRIMs의 경우 간단한 해양 모형인 ocean mixed layer 모형이 포함되어 있으나, 지역기후모형의 모의 성능을 향상시키기 위해서는 해양 모형의 접합이 필요하다.

강수의 첫 번째 모드를 제외하면 여름과 겨울의 주요 기후인자들의 주성분 분석은 관측과 유사한 패턴, 시계열을 도출하였다. 강수의 경우 계절을 막론하고 첫 번째 모드가

설명하는 부분이 관측에 비해 낮고, 첫 번째 모드와 두 번째 모드가 완전히 분리되지 않은 형태 보였다. 그러나, 여름 강수의 계절 평균 오차값만을 비교하여 볼 때 과거 유사한 연구에 비해 향상된 결과를 보였다. Kim et al. (2008) 연구에서는 육지에서의 강수 오차가 1.1 mm/day였고, RegCM3를 이용한 Park et al. (2008)에서는 실험영역 전체 평균 0.54 mm/day의 오차값을 보인 반면, 이 연구에서는 육지에 대해서 0.35 mm/day, 해양을 포함한 전체 실험영역에 대해서는 -0.27 mm/day의 오차를 나타내었다. 이는 실험영역이나 기간 등의 실험설계가 같지 않으므로 직접적인 비교를 할 수는 없지만, 동아시아에 대한 GRIMs의 모의 성능이 현존하는 다른 지역기후모형에 비해 개선되었거나 혹은 비교할만하다는 것을 의미한다.

계절 평균, 경년변동성 검증에서 나타난 것처럼 강수는 여전히 다른 변수에 비해 예측이 어려운 기후인자이지만 일평균 강수량의 변화를 모의하는 모형의 능력은 매우 높은 것으로 나타났다. 특히 몬순 강수가 집중되는 지역에 대한 시계열 분석에서는 변동성이 큰 계절과 지역에 대해서도 신뢰할만한 결과를 보임을 증명하였다. 또한, 장마전선의 북상과 같은 강수대의 이동추이 역시 관측과 유사한 결과를 모의함으로써 공간적으로는 물론 시간적으로 유의미한 고해상도 데이터를 제공할 수 있음을 보였다. 폭염이 있었던 1994년 여름에 대한 최대/최저기온의 검증은 극한기후 연구에의 가능성을 보여준다.

컴퓨팅 소스의 발달과 전구모형의 해상도가 점점 높아짐에 따라 50 km 해상도의 지역 기후모형은 큰 장점이 될 수 없다. 그러나, 수자원, 농업 등 기후자료를 이용한 응용연구에 이용될 수 있는 공간적, 시간적 고해상도의 전구 자료를 구하는 것은 여전히 용이하지 않다. 관측자료 역시 관측기구의 노후, 관측지의 오염 등으로 인해 결측 데이터가 많고, 우리가 원하는만큼의 해상도를 가지고 있는 데이터를 찾기 힘든 실정이다. 또한, 관측이 제공하지 못하는 다양한 변수들을 제공할 수 있다는 점에서 지역기후모형이 생산한 검증된 자료의 이용가치가 커질 수 있다. 여전히 다양한 방면으로의 검증이 필요하지만, 동아시아 지역에 대해 검증된 50 km 격자의 신뢰할만한 자료는 다양한 방면으로 활용될 수 있을 것이다. 우선적으로 APCC 내에서 목적에 맞는 검증과 가이드라인이 논의되어 활용 가치를 높여야 할 것이다.

**REFERENCES**

- Byun, Y.-H, and S.-Y. Hong, 2007: Improvements in the subgrid-scale representation of moist convection in a cumulus parameterization scheme: The single-column test and its impact on seasonal prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2135-2154.
- Chou, M.-D., and K.-T. Lee, 2005: A parameterization of the effective layer emission for infrared radiation calculations. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 531-541.
- Chou, M.-D., and M. J. Suarez, 1999: A solar radiation parameterization for atmospheric studies. Vol. 15, NASA/TM-1999-104606, 38 pp.
- Chun, H.-Y., and I.-S. Song, 2003: An estimation of convective gravity wave momentum flux and drag using NCEP/NCAR reanalysis data. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **39**, 667-676.
- Chun, H.-Y., and J.-J. Baik, 1998: Momentum flux by thermally induced internal gravity waves and its approximation for large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3299-3310.
- Chun, H.-Y., J.-J. Baik, S.-C. Tsay, and Q. Fu, 1999: Parameterization for cloud longwave scattering for use in atmospheric models. *J. Climate*, **12**, 159-169.
- Ebita, A., S. Kobayashi, Y. Ota, M. Moriya, R. Kumabe, K. Onogi, Y. Harada, S. Yasui, K. Miyaoka, K. Takahashi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, M. Soma, Y. Oikawa, and T. Ishimizu, 2011: The Japanese 55-year Reanalysis "JRA-55": an interim report, *SOLA*, **7**, 149-152.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8851.
- Fortelius, C., U. Andrae, and M. Forsblom, 2002: The BALTEX regional reanalysis project. *Boreal Environmental Research*, **7**, 193-201.
- Ham, S., S.-Y. Hong, Y.-H. Byun, and J. Kim, 2009: Effects of precipitation physics algorithms on a simulated climate in a general circulation model. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **71**, 1924-1934.
- Heo, K.-Y., K.-J. Ha, and S.-H. Shin, 2005: On development mechanism of heavy snowfall event occurred in Busan on 5 March 2005. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **41**, 547-556.
- Hong, S.-Y., H. Park, H.-B. Cheong, J.-E. E. Kim, M.-S. Koo, J. Jang, S. Ham, S.-O., Hwang, B.-K. Park, E.-C. Chang, and H. Li, 2013: The Global/Regional Integrated Model System (GRIMs). *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **49**, 219-243.
- Hong, S.-Y., and E.-C. Chang, 2012: Spectral nudging sensitivity experiments in a regional climate model. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **48**, 345-355.
- Hong, S.-Y., J. Jang, H. H. Shin, and J. Lee, 2012: An explicitly-coupled shallow convection parameterization with planetary boundary processes. Preprints, The 12th WRF Workshop, Boulder, CO, NCAR.
- Hong, S.-Y., 2010: A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1481-1496.
- Hong, S.-Y., and Y.-B. Yhang, 2010: Implication of a decadal climate shift over East Asia in Winter: A modeling study. *J. Climate*, **23**, 4989-5001.

- Hong, S.-Y., J. Choi, E.-C. Chang, H. Park, and Y.-J. Kim, 2008: Lower-tropospheric enhancement of gravity wave drag in a global spectral atmospheric forecast model. *Wea. Forecasting*, **23**, 523-531.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Hong, S.-Y., H.-M. H. Juang, and Q. Zhao, 1998: Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2621-2639.
- Junag, H.-M. H., S.-Y. Hong, and M. Kanamitsu, 1997: The NCEP Regional Spectral Model: An update. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2125-2143.
- Jeon, J.-H., S.-Y. Hong, H.-Y. Chun, and I.-S. Song, 2010: Test of a convectively forced gravity wave drag parameterization in a general circulation model. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **46**, 1-10.
- Kalnay, E., and coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kanamaru, H., and M. Kanamitsu, 2007: Scale-selective bias correction in a downscaling of global analysis using a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 334-350.
- Kanamitsu, M., K. Yoshimura, Y.-B. Yhang, and S.-Y. Hong, 2010: Errors of interannual variability and trend in dynamical downscaling of reanalysis. *J. Geophys. Res.*, **115**, D17115, doi:10.1029/2009JD013511.
- Kanamitsu, M., and H. Kanamaru, 2007: 57-Year California Reanalysis Downscaling at 10km (CaRD10) Part 1. System Detail and Validation with Observations. *J. Climate*, **20**, 5527-5552.
- Kanamitsu, M., and Coauthors, 2002: NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1019-1037.
- Kim, E.-J., and S.-Y. Hong, 2010: Impact of air-sea interaction on East Asian summer monsoon climate in WRF. *J. Geophys. Res.*, **115**, D19118.
- Kim, J., and H.-S. Jung, C. R. Mechoso, and H.-S. Kang, 2008: Validation of a multidecadal RCM hindcast over East Asia. *Global Planet. Change*, **61**, 225-241.
- Kim, Y.-J., and A. Arakawa, 1995: Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1875-1902.
- Lee, J.-W., and S.-Y. Hong, 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., S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, 2013: Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Clim Dyn.* doi:10.1007/s00382-013-1841-6
- Mesinger, F., and Coauthors, 2006: North American Regional Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 343-360.
- Nigam, S. 2010: The South Asian regional reanalysis project: Motivation, objectives, and challenges. NOAA-MoES SARR Scoping Workshop.
- Noh, Y., W. G. Cheon, S. Y. Hong, and S. Raasch, 2003: Improvement of the profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, **107**, 401-427.



- Oh, H.-M., and K.-J. Ha, 2004: Scale analysis fo global surface energy budget term using NCEP/NCAR reanalysis data. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **40**, 29-47.
- Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Park, E.-H., and S.-Y. Hong, H.-S. Kang, 2008: Characteristics of an East-Asian summer monsoon climatology simulated by the RegCM3. *Meteor. Atmos. Phys.*, **100**, 139-158.
- Park, H., and S.-Y. Hong, 2007: An evaluation of a mass-flux cumulus parameterization scheme in the KMA global forecast system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 151-169.
- Uppala, S. M., and Coauthros, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961-3012.
- von Storch, H., H. Langenberg, and F. Feser, 2000: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3664-3673.
- Waldron, K. M., J. Paegle, and J. D. Horel, 1996: Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 529-547.
- Wang, L., R. Huang, L. Gu, W. Chen, and L. Kang, 2009: Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity. *J. Climate*, **22**, 4860-4872.
- Watanabe, M., and T. Nitta, 1999: Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemisphere winter. *J. Climate*, **12**, 494-510.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on guage observations, satellite estimates, and numerical model output. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.
- Yasutomi, N., A. Hamada and A. Yatagai, 2011: Development of a long-term daily gridded temperature dataset and its application to rain/snow discrimination of daily precipitation. *Global Environmental Research*, **V15N2**, pp.165-172.
- Yhang, Y.-B., and S.-Y. Hong, 2011: A study on large-scale nudging effects in regional climate model simulation. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **47**, 235-243.
- Yhang, Y.-B., and S.-Y. Hong, 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 S.-Y. Hong, 2008b: A simulated climatology of the East Asian summer monsoon using a regional spectral model. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **44**, 325-339.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP-NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.



APCC RESEARCH REPORT 2013-01

- Evaluation of Regional Climatology over the East Asia using GRIMs-RMP
- Impact of Ocean Initial Conditions on the Two Types of El Niño Prediction using CCSM3
- Development of a Dynamical Downscaling System for Improved Simulation of the Regional Climate over the Indonesian Maritime Continent

APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,
Republic of Korea
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949
www.apcc21.org

비매품



94550



9 788977 333336

ISBN 978-89-97333-93-6
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)