

APEC기후센터

# 고해상도 계절예측: 불확실성과 가치 검증

양유빈 기후분석팀

APEC기후센터  
연구보고서

---

# 고해상도 계절예측: 불확실성과 가치 검증

High Resolution Forecast: Uncertainty and Added Value Assessment

양유빈 기후분석팀

연구보고서 2015-05

# 발간사

계절 예보는 국가의 정책을 결정하는 데 있어 중요한 정보이므로 보다 고해상도의 신뢰도 높은 계절 예측 정보의 중요성이 높아지고 있습니다. 세계 여러 현업 기관에서 전지구 모형을 이용하여 계절 예측 정보를 생산하고 있지만 기후 연구는 물론 수자원, 농업과 같은 응용연구에서 필요로 하는 지역적 특성이 고려된 예측 정보가 부족하며, 악기상과 같은 기상 이변에 대한 예측력은 높지 않은 것으로 알려져 있습니다.

고해상도의 예측 정보는 일반적으로 통계적 규모축소법을 통해 생산됩니다. 통계적 규모축소법은 과거 자료를 바탕으로 경험식을 찾아내어 계절 예측 정보를 생산하는 방법이므로 예측 정보의 생산이 비교적 용이하고 예측 산출의 시간이 짧다는 장점이 있습니다. 그에 비해 지역기후모형을 사용하는 역학적 기법은 지형적인 특성을 고려할 수 있고, 물리적인 유기성을 가지고 있는 정보를 생산할 수 있습니다.

본 연구에서는 지역기후모형을 이용하여 전지구 모형에서 제공되는 자료보다 시간적/공간적으로 고해상도의 동아시아 예측 자료를 생산하고, 그 신뢰도를 검증하여 예측성을 조사하였습니다.

컴퓨팅 소스의 발달이 이루어지고 있음에도 불구하고 지역기후모형을 이용한 계절예측정보의 생산은 시간 대비 예측성을 담보하기 힘들다는 이유로 잘 이루어지지 않고 있습니다. 고해상도 예측정보의 필요성은 점점 증가하고 있지만, 대부분의 기관에서 통계적 기법을 통해 예측자료를 생산하고 있습니다. 그러나, 통계모형을 통한 예측 역시 역학모형의 예측력이 담보되어야만 한다는 점에서 본 연구에서 시도한 지역기후모형을 통한 계절 예측정보의 생산과 오차보정 기법의 개발과 통계모형의 개발은 같이 이루어져야 할 것입니다.

끝으로 본 연구의 수행을 위해 애쓰신 양유빈 박사와 정여민, 조현영, 이효진 연구원에게 감사드립니다.

2015. 3월  
APEC 기후센터 소장  
정진승

## ABSTRACT

This study investigates the potential to improve regional seasonal forecast for the East Asia during cold season using the Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). The GRIMs is forced by the Climate Forecast System (CFS) seasonal prediction data for 25 years from 1983 to 2007.

This dynamically downscaled forecast is compared with the CFS produced by global forecast model. Results of the comparison suggest that the RCM add value in seasonal prediction application, but the improvements largely depend on location, forecast lead time, variables, and skill metrics used for evaluation. Generally, more improvements are found over the oceans for the shorter lead time. This results allow us to be cautiously optimistic about the model ability in the forecast of important climatological features as well as extreme event of precipitation and temperature in East Asia.

# 목차

## 고해상도 계절예측: 불확실성과 가치 검증

발간사	i
ABSTRACT	iii
<b>1. 서론</b>	<b>1</b>
<b>2. 연구 방법</b>	<b>3</b>
2.1 Global/Regional Integrated Model System (GRIMs)	3
2.2 실험 설계	3
2.3 Scale-Selective Bias Correction (SSBC)	4
<b>3. 연구 결과</b>	<b>7</b>
3.1 전구 예측 자료의 검증	7
3.2 고해상도 예측 자료의 예측성	18
3.3 Spectral nudging이 계절예측에 미치는 영향	27
<b>4. 요약 및 논의</b>	<b>33</b>
REFERENCES	35

# 1. 서론

계절 예보는 국가의 정책을 결정하는데 있어 중요한 정보이므로 보다 고해상도의 신뢰도 높은 계절 예측 정보의 중요성이 높아지고 있다. 그러나, 전지구 모형은 일반적으로 기후나 수자원 응용연구에서 필요한 지역기후의 특성이나 기상 이변과 같은 현상을 모의하는 능력은 부족한 것으로 알려져 있다(Gutowski et al., 1997; Wood et al., 2002; Zhu et al., 2004). 이것은 지역적 기후 특성을 특성화하는 데 중요한 역할을 하는 지형과 같은 지역 강제력을 표현하기에는 GCM의 공간 해상도가 낮기 때문이다. 이런 제한을 해결하기 위해, 지역 기후 모델(Regional Climate Models: RCMs)이 전지구 기후 모델(대순환) 또는 재분석 자료를 기반으로 높은 공간 해상도의 기후 시뮬레이션을 생산하는 "역학적 다운스케일링"의 도구로 사용되어왔다(Leung et al., 1999, 2004; Leung and Qian 2005; Roads et al., 2003; Castro et al., 2005; Liang et al., 2007; De Sales and Xue 2011).

자원 관리와 계획에서의 실제 응용을 위해서는 고해상도 계절 예측이 많이 필요하다. 극한 현상을 포함한 기후 아노말리를 한 달 혹은 한 시즌 미리 예측할 수 있다면 제한된 자원을 할당하고 준비하는데 있어 시간을 매우 효율적으로 쓸 수 있을 것이다(Hurrell et al. 2009). 최근 수십 년동안 이루어진 관측자료의 발달, 자료 동화 및 모델 예측 시스템의 개선 등은 결합 대순환 모델이 경년변동성, 엘니뇨와 같은 중요한 변동성들을 예측하는 능력을 향상시켰다(Saha et al. 2006). 따라서, 대규모의 계절 변동을 예측하는 것이 어느정도 가능해졌다. 그러나 대규모 순환의 예측성 향상 뿐 아니라 강수, 지표 온도의 지역적인 상세값의 모의와 같은 부분에서의 예측성 향상은 여전히 개선되어야 할 부분이다. 이를 위해 다양한 다운 스케일링 방법이 개발되어 사용되고 있다.

최근 지역기후모형을 이용하여 고해상도의 계절 예측 정보를 생산하여 계절별, 지역별로 그 성능을 검증하는 연구들이 진행되고 있다(Yoon et al. 2012). 현재 APCC의 계절 예측 정보는  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 해상도로 전구 및 동아시아 지역에 대해 예측자료를 제공하고 있으나, 수자원 및 농업과 같은 응용연구에 사용하기에는 지역적 특성을 잘 반영하지 못하는 저해상도 자료이고, 특히 한반도를 포함한 동아시아 지역은 유라시아 대륙의 남동쪽에 위치하여 스케일 간의 상호작용이 복잡하게 일어나는 지역으로 저해상도의 전구모형의 예측성이 낮은 지역으로 지역에 특화된 예측 정보 제공이 필요하다.

따라서 이 연구에서는 지역기후모형을 이용하여 전구 재분석 자료보다 시간적/공간적으로 고해상도의 동아시아 예측 자료를 생산하여 재분석 자료 또는 전지구 예측자료와 비교 검증하고, 지역적 상세 예측 자료로 활용될만한 신뢰도를 가지는지를 조사하였다.

2장에서는 실험에 사용된 지역기후모형과 실험 방법을 설명하고, 3장에서는 기후값, 경년변동성의 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 Leetma (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 1983년부터 2007년까지 25년간의 동아시아 지역에 대한 겨울 기후를 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 경계조건을 변환 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 최소화하여, 모형 자체의 오차를 분석할 수 있게 하였다. 계절 예측실험에 사용된 초기 및 경계조건은 NCEP Climate Forecast System (CFS) 으로 2004년부터 NCEP에서 계절 예측 현업으로 사용되고 있는 대기-해양 결합모형이다. 2011년 3월 이후 version 2로 업그레이드 되었으나, 이 연구에서는 초기 버전의 CFS 데이터를 사용하였다 (Saha et al. 2006). CFS는 대기모형으로 Global Forecast

System(GFS; Moorthi et al. 2001), 해양 모형으로 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) Modular Ocean Model(MOM3; Pacanowski and Griffies 1998), 지면 모형으로 two-layer land surface model(Mahrt and Pan 1984)를 사용하고 있다. 대기 초기조건은 R2, 해양 초기조건은 NCEP Global Ocean Data Assimilation(GODAS; Behringer et al. 1998)로부터 제공받는다. 지역기후모형을 통한 계절예측자료를 생산하기 위해 11월 11일-15일, 11월 21일-25일, 11월 29일-12월 3일의 초기조건을 가진 15개의 앙상블 멤버를 재생산 하였으며, 이 연구에서는 12월 1일 초기조건의 자료를 이용하였다.

실험 영역은 그림 1과 같이 겨울철의 대규모 순환을 고려하여 우리나라, 일본, 중국, 인도를 포함한 아시아 전역을 포함하였으며, 수평해상도는 약 30 km이다. 사용된 물리 과정은 Table1과 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.

### 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 자료동화를 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 수정되었으며 다음 3가지 요소로 구성된다.

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

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

F: perturbation,  $\alpha$  =damping 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.  $\alpha$ 는 damping 계수이고 선행연구에서 여러번의 테스트를 거쳐 0.9로 정해졌다. 이 계수에  $(1 - \sigma^2)$  항이 곱해져 고도가 높아질수록( $\sigma$  값이 작아질수록)  $F^{old}$ 의 값이 작아지게 되어  $\sigma = 0$ 일 때 SSBC 적용후 얻어지는  $F^{nw}$ 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 2007; Yhang and Hong 2011).

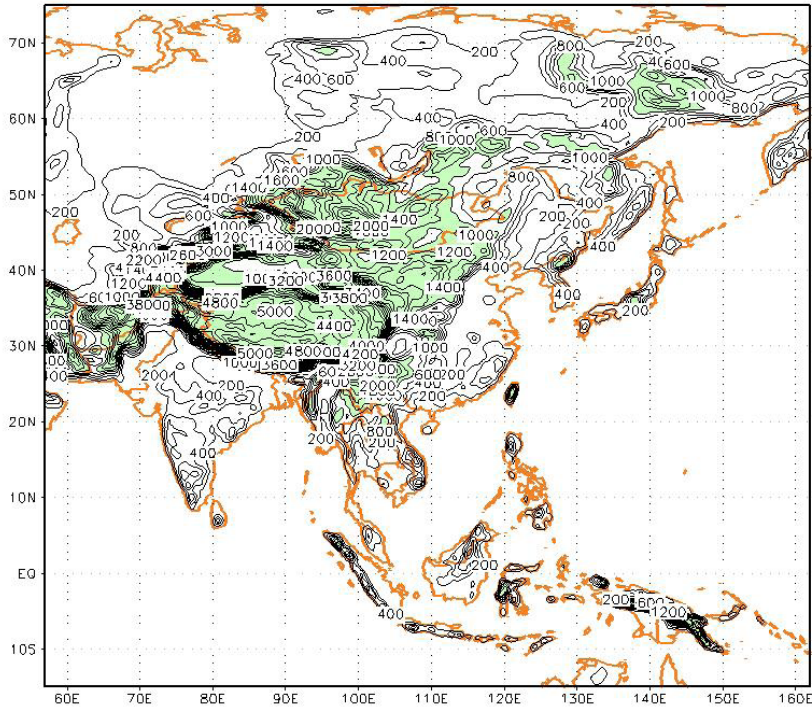


Figure 1. Regional model domain with terrain heights.

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)
Vertical diffusion	Hong et al. (2006), Noh et al. (2003)
Stabl 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 전구 예측 자료의 검증

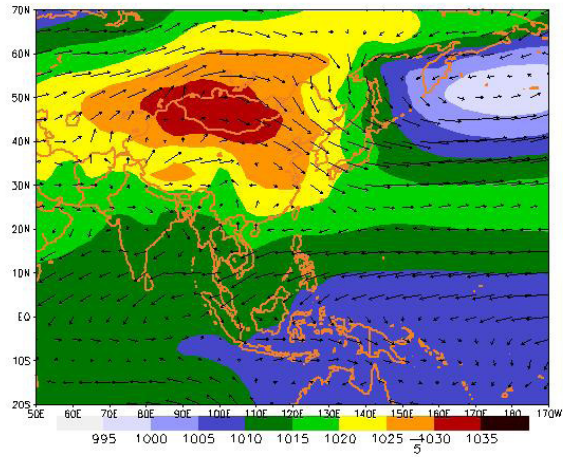
이번 장에서는 지역기후모형이 생산해 내는 계절예측을 검증하기에 앞서 지역기후모형의 경계조건으로 사용된 전구 예측 자료의 예측성을 검증하였다. 지역기후모형의 결과는 경계조건의 영향을 많이 받으므로 고해상도 예측자료의 예측성을 담보하기 위해서는 경계조건의 예측성이 보장되어야 하며, 따라서 이 연구의 초기 및 경계조건으로 사용된 NCEP CFS 데이터의 겨울철 기후에 대한 예측성을 살펴보았다. 그림 2는 25년 평균된 겨울의 대규모 순환장을 나타낸 것으로, 전지구모형은 재분석 자료에 나타난 겨울철 순환의 특징을 잘 나타내고 있다. 몽골 지역의 시베리아 고기압과 서쪽의 알류시안 저기압이 위치하여 서고동저 형태의 패턴을 보여주고 있으며, 고기압에서 불어나오는 북서풍과 저기압의 가장자리에서의 저기압성 회전이 나타난다(그림 2a, 2b). 그러나, 시베리아 고기압의 강도를 약하게, 알류시안 저기압은 약하게 모의하고 있다(그림 2c).

상층 지위고도와 바람의 경우 한반도 상공에 기압골과 한반도 남쪽에 상층 제트의 중심이 위치하는 형태를 보인다(그림 3a, 3b). CFS에서도 이러한 패턴이 나타나고 있지만, 하층 기압 패턴에서 나타난 것과 유사하게 고기압은 약하게, 저기압은 강하게 모의하며 제트의 중심을 약하게 모의하는 경향이 나타난다(그림 3c).

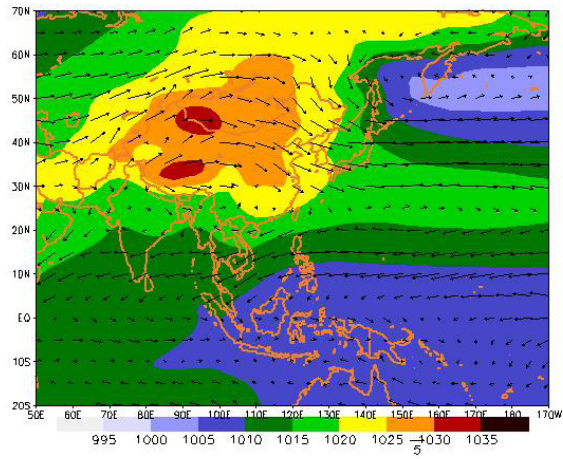
겨울철 지표온도는 북위 35도를 기준으로 북쪽은 영하, 남쪽은 영상의 기온 분포를 보이며 이러한 특징은 기후모형의 결과에서도 유사하게 나타난다(그림 5a, 5b). 보다 고해상도의 관측자료에서는 티벳고원과 같은 지형적인 분포를 더욱 상세하게 나타내고 있으나(그림 5c), CFS의 경우  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 해상도를 가지고 있기 때문에 이러한 상세한 온도분포는 표현하지 못하고 있다. 재분석 자료와 비교했을 때 전지구 예측자료는 북쪽의 기온을 더 차게 모의하는 경향을 보인다(그림 5d).

겨울철 아시아 지역의 강수는 주로 해양에서 나타난다. 적도를 따라 큰 강수 밴드와 일본 동쪽 해상에서 강수 코어의 형태를 보인다(그림 6a). CFS 예측자료에서도 이러한 강수 형태가 나타나고 있으나, 최대값이 나타나는 지역은 차이를 보이고 있다(그림 6b). CFS는 전반적으로 관측값에 비해 많은 양의 강수를 모의하고 있으며, 남반구에서는 호주 부근에서 강수를 과소모의하는 특징을 나타내고 있다(그림 6c).

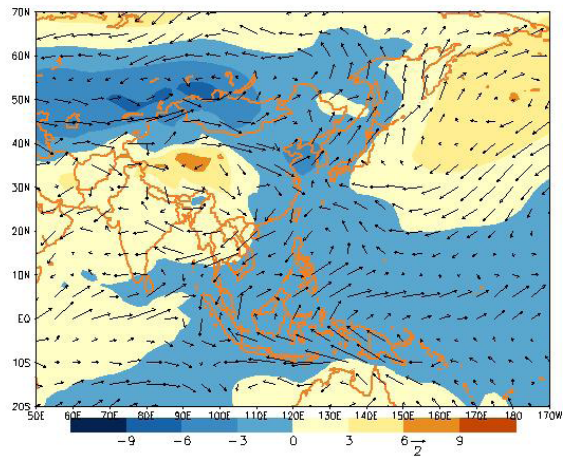
a) R2



b) CFS

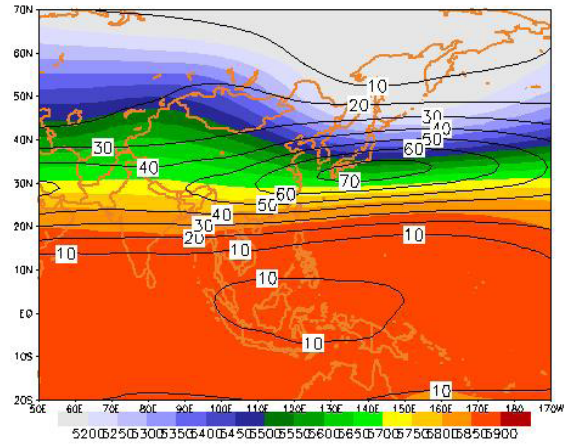


c) GRIMs-R2

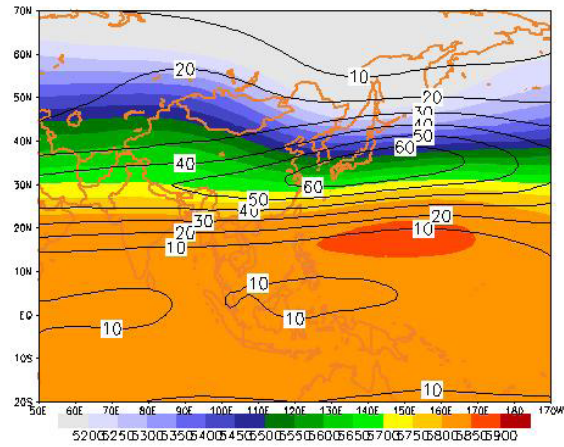


**Figure 2.** 25-year winter mean 850-hPa wind (m/s, vector) and sea level pressure (hPa, shaded) from (a) the reanalysis, (b) CFS, and (c) difference between reanalysis and CFS.

a) R2



b) CFS



c) CFS-R2

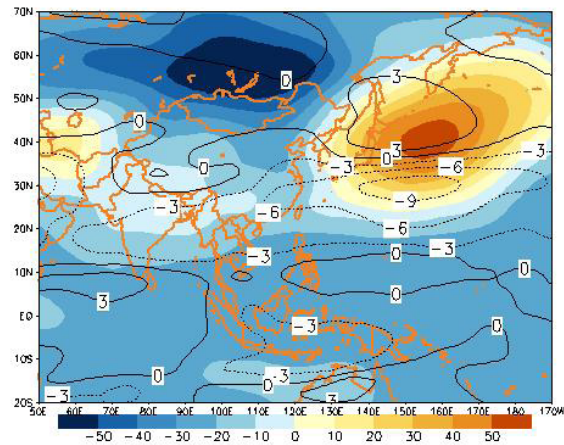
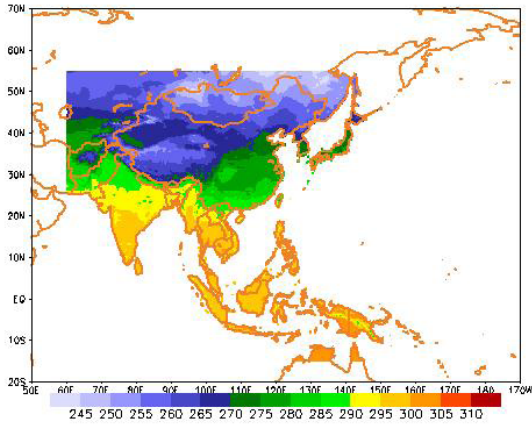
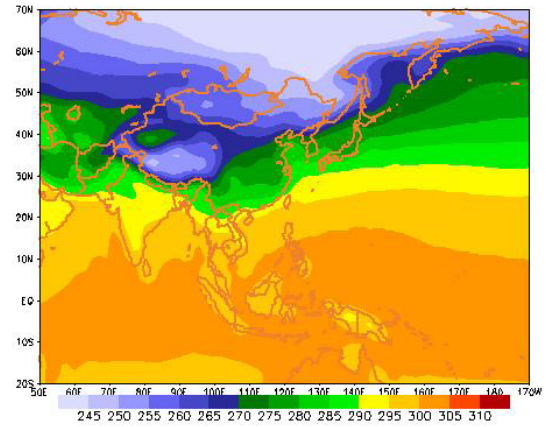


Figure 3. Same as in Figure 2 except for 500-hPa geopotential height (m, shaded) and 200-hPa wind (m/s, contour).

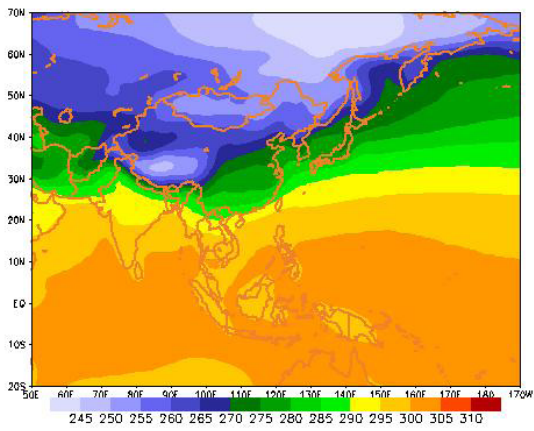
a) APHRODITE



c) CFS



b) R2



d) CFS-R2

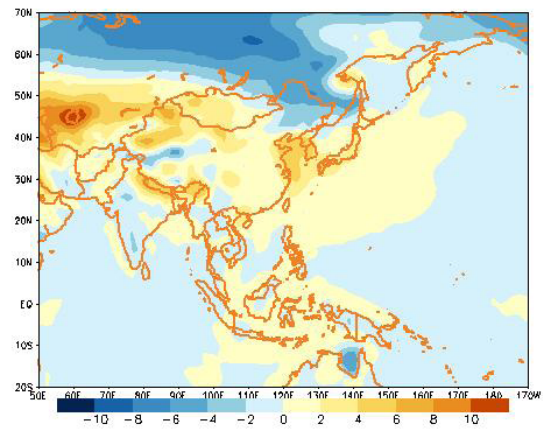
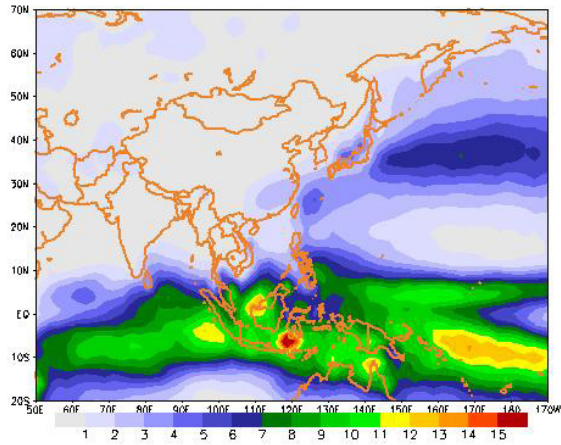
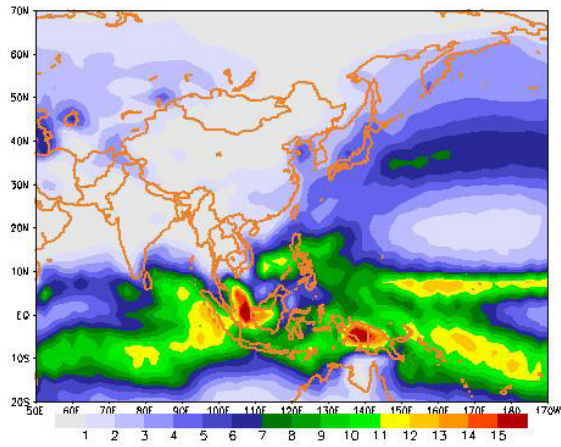


Figure 4. 25-year winter mean surface temperature (K) of (a) APHRODITE, (b) reanalysis, (c) CFS, and (d) difference between reanalysis and CFS.

a) CMAP



b) CFS



c) CFS-CMAP

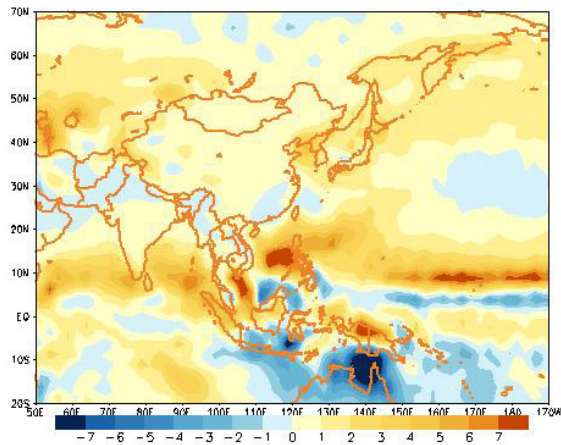


Figure 5. 25-year winter mean precipitation (mm/day) from the (a) CMAP observation , (b) CFS, and (c) difference between CMAP and CFS.

전지구 예측 모형의 예측성을 경년변동성 관점에서 살펴보기 위해 동아시아 겨울몬순 지수를 계산하였다. 그림 6은 Li and Yang (2010)에서 제안된 동아시아 겨울몬순 지수를 나타낸 것으로, 이 지수는 아래와 같은 식에 의해 200hPa 층에서의 동서방향 바람의 수평 변화율로 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{IEAWM} &= (U1 - U2 + U1 - U3)/2, \text{ where} \\ U1 &= U200(30-35^\circ\text{N}/90-160^\circ\text{E}) \\ U2 &= U200(50-60^\circ\text{N}/70-170^\circ\text{E}), \text{ and} \\ U3 &= U200(5^\circ\text{S}-10^\circ\text{N}/90-160^\circ\text{E}) \end{aligned}$$

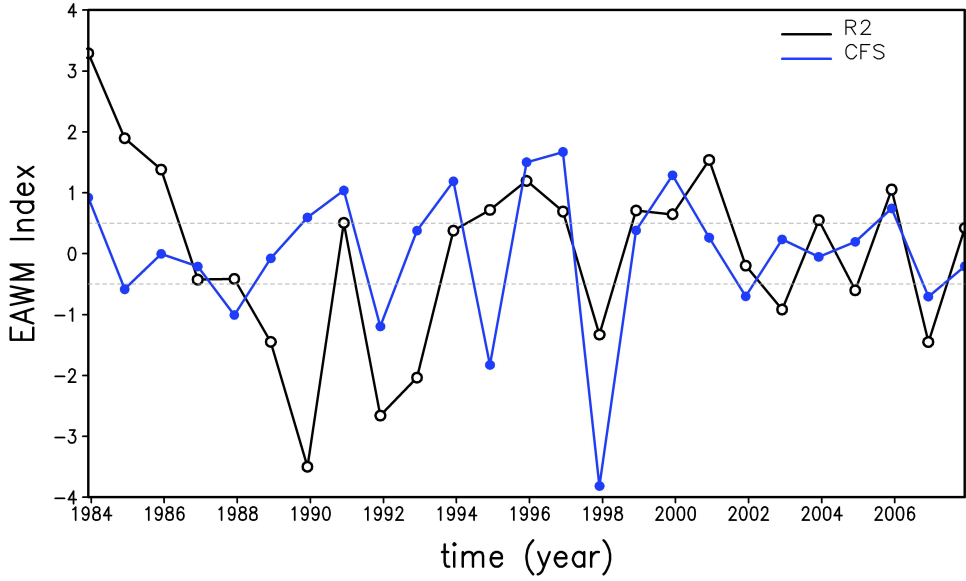
재분석 자료의 경우 1983년과 1995년, 2000년, 2005년에 높은 값을, 1989년, 1991년, 1992년, 1997년, 2006년에 낮은 값을 보이고 있다. CFS는 1983년, 1995년, 1996년, 1999년, 2005년에 높은 지수값을, 1991년, 1997년, 2006년에 낮은 지수값을 보이며 이는 재분석 자료와 일치하는 시그널을 나타내는 해이다. 반면, 1989년, 1994년의 경우 재분석 자료와 반대의 시그널을 보이며, CFS와 재분석 자료의 동아시아 겨울 몬순 지수의 시계열 상관계수는 0.32로 나타났다. 그림 6의 표는 재분석 자료와 CFS에서 계산된 지수의 시그널을 정리한 것으로, 지수값이 각각 1과 -1을 넘을 경우 강몬순해와 약몬순해로 정의하고 붉은색과 푸른색으로 나타내었으며, 1과 -1을 넘지 않은 경우 +와 -의 부호로 표시하였다.

몬순지수의 경우 어떤 변수로 계산하느냐에 따라 강몬순해와 약몬순해가 달라지는 경향이 있으므로 하층의 해면기압으로 정의된 또다른 지수를 이용하여 경년 변동성을 검증하였다. 그림 7은 Wang and Chen (2014)가 제안한 해면기압을 이용한 동아시아 겨울몬순 지수이다. 이 지수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{IEAWM} &= (2*\text{SLP1} - \text{SLP2} - \text{SLP3})/2, \text{ where} \\ \text{SLP1} &= \text{SLP}(40-60\text{N}/70-120\text{E}), \\ \text{SLP2} &= \text{SLP}(30-50\text{N}/140-170\text{E}), \\ \text{SLP3} &= \text{SLP}(20\text{S}-10\text{N}/110-160\text{E}). \end{aligned}$$

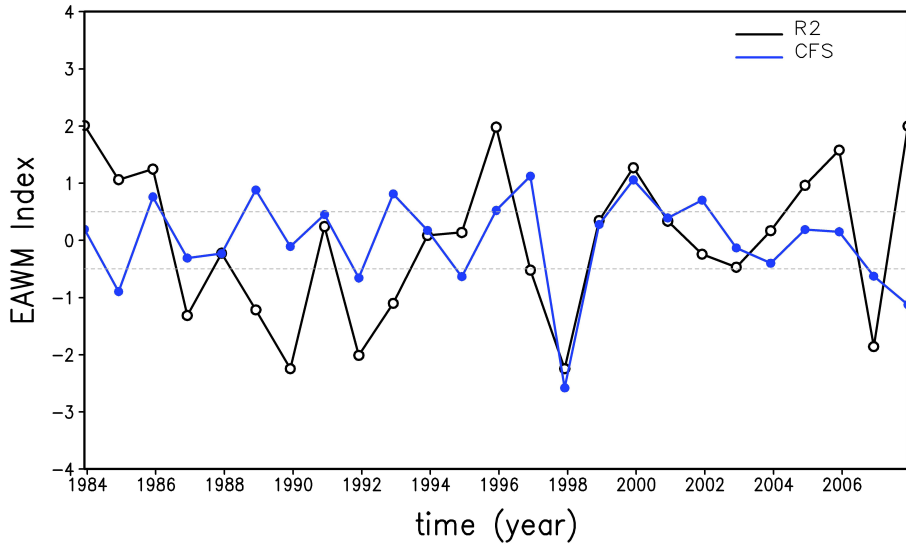
해면기압으로 계산된 동아시아 겨울몬순 지수는 상층 바람을 이용한 지수에 비해 변동성이 크지 않으며, 1983년, 1984년, 1985년, 1995년, 1999년, 2004, 2005, 2007년이 강한 몬순해로 나타난다.

두 데이터에서 계산된 인덱스가 같은 시그널을 나타낸 해를 정리하여 1983년, 1985년, 1995년, 1999년, 2005년을 강몬순해로, 1991년, 1997년, 2006년을 약몬순해로 정하고 약몬순해의 샘플수를 늘리기 위해 지수값이 -1을 넘지 않지만 두 데이터가 두 겨울몬순인덱스에서 음의 값을 가지는 1986년과 1987년을 약몬순해로 추가하였다.



	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
R2				-	-			+			+								-		+	-			+
CFS		-	-	-		-				+						+		+		+	0	+			-

Figure 6. East Asian winter monsoon index proposed by Li and Yang (2010). The year colored by red (blue) box indicates that East Asian winter monsoon is strong (weak).



	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
R2	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
CFS	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+

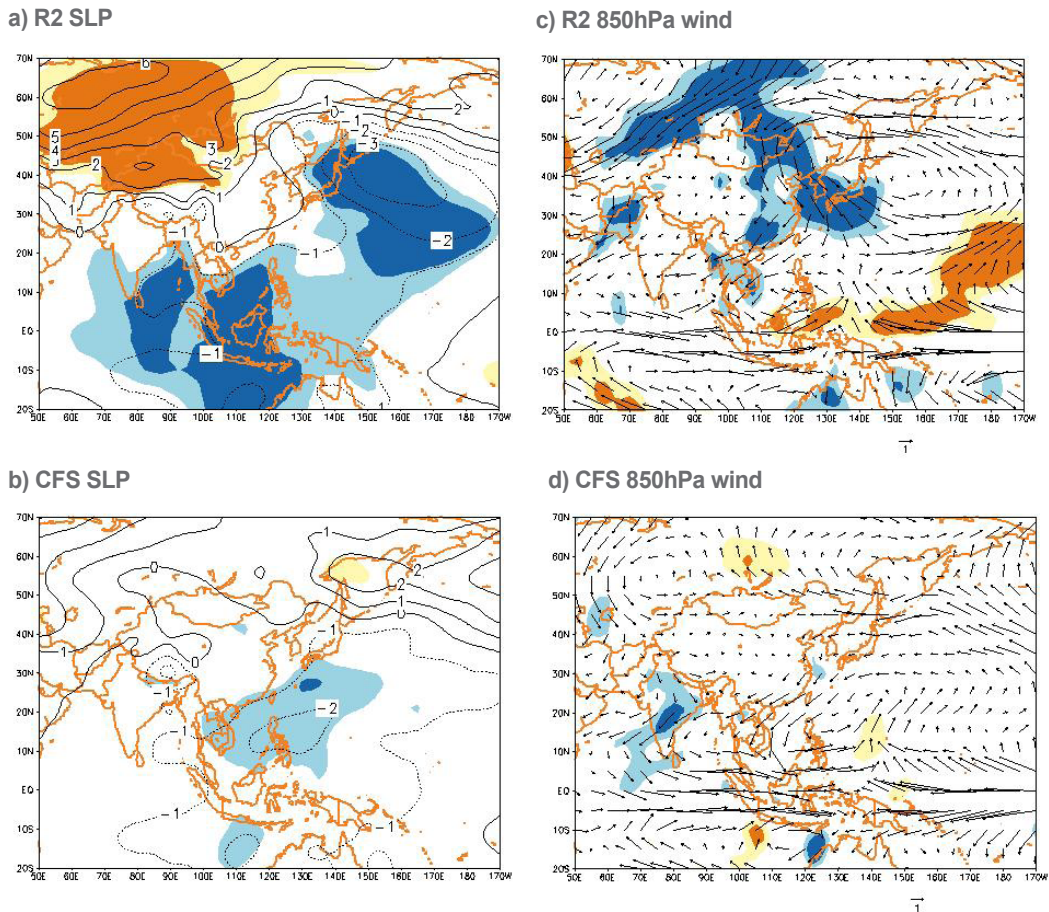
Figure 7. Same as in Figure 6, but for Wang and Chen (2014).

그림8-그림10은 강몬순해와 약몬순해의 composite difference를 분석한 그림으로 CFS가 몬순이 강한 해와 약한 해의 특징을 잘 잡아낼 수 있는지를 검증하였다. 몬순이 강한 해에는 시베리아 고기압이 강해지고 알류시안 저기압이 약해서 서고동저 형태의 기압 배치가 더욱 뚜렷해지는 특징을 보인다(그림 8a). CFS에서도 이러한 특징은 나타나고 있으나, 재분석 자료에서 95%의 신뢰도를 보이는 반면 전지구예측자료는 높은 신뢰도를 보이지 못하고 있다(그림 8b). 하층 바람의 경우 시베리아 고기압을 중심으로 고기압성 회전을 보이며 알류시안 저기압을 중심으로 저기압성 회전이 강해지는 형태가 나타난다(그림 8c). CFS는 알류시안 저기압 부근의 저기압성 회전은 약하게 잡아내고 있으나, 시베리아 고기압 근처에서는 재분석 자료와는 반대의 회전을 보인다(그림 8d).

상층 지위고도의 배치 역시 해면기압과 유사한 형태로 나타난다(그림 9a). 고기압이 강해지고 저기압이 약해지는 패턴이 높은 신뢰도를 가지는 것으로 보이며, 적도 부근의 기압도 다소 낮아지는 형태를 보인다. CFS 데이터는 적도 부근의 기압이 낮아지는 특징은 나타나고 있으나 고위도와 중위도에 나타나는 특징은 나타내지 못하고 있다(그림 9b). 상층 제트의 경우 고위도에서부터 적도쪽으로 바람이 낮아졌다 높아지는 웨이브 형태를 보이고 있으며(그림 9c), 전지구예측자료에서도 이러한 웨이브 형태가 나타나고 있으나 재분석 자료와는

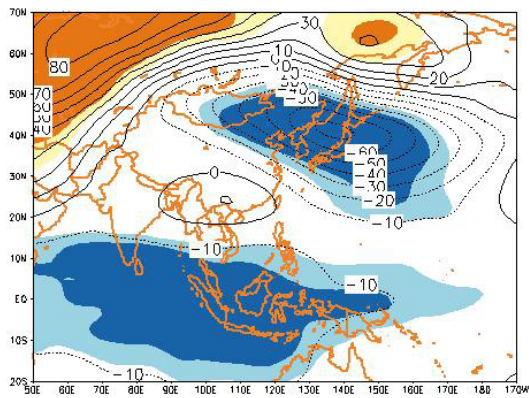
중심의 위치가 동-서 방향으로 차이를 보인다(그림 9d).

몬순이 강한 해의 지면 온도는 고위도 지방은 상승하고 중국을 비롯한 한국, 일본 지역에서는 몬순이 약한 해에 비해 낮아지는 특징을 보인다(그림 10a). 이는 강몬순해에 시베리아 고기압이 확장되어 찬 기운이 남하하기 때문인 것으로 생각된다. 예측자료는 일본 북쪽의 상승된 온도는 나타내고 있으나, 중국 내륙의 온도를 높게, 시베리아의 온도를 낮게 모의하여 재분석 자료와는 반대되는 특징을 보인다(그림 10b). 이는 예측 자료가 강몬순해의 강해지는 시베리아 고기압을 잘 표현하지 못하여, 찬 공기의 남하가 뚜렷하게 나타나지 않은 것으로 보인다. 강수의 경우 몬순이 강한 해에는 적도 부근의 강수량이 증가하는 특징을 보이며(그림 10c), 이는 모형 예측 결과에서도 잘 나타나는 것으로 보인다(그림 10d).

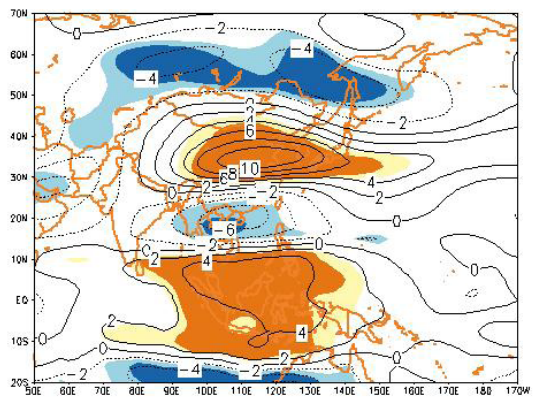


**Figure 8.** Composite difference (strong minus weak monsoon years) of the (a) R2, (b) CFS for sea level pressure, and (c) R2 and (d) CFS for 850-hPa wind. Shaded areas indicate 90% and 95% confidence levels.

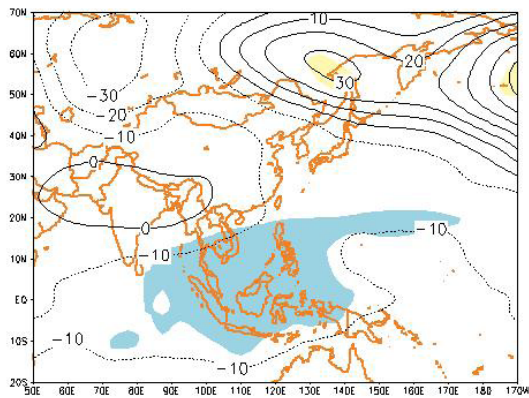
a) R2 500hPa height



c) R2 200hPa wind



b) CFS 500hPa height



d) CFS 200hPa wind

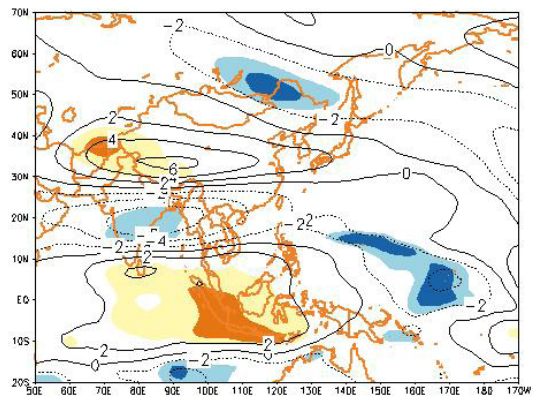
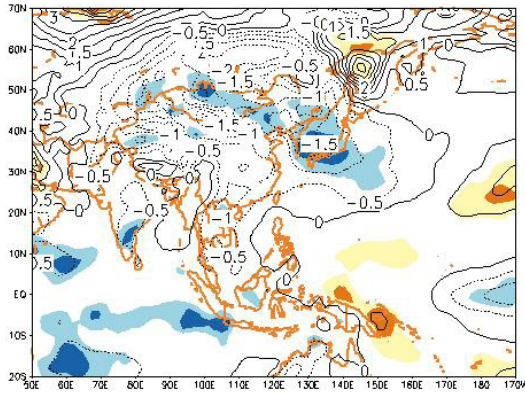
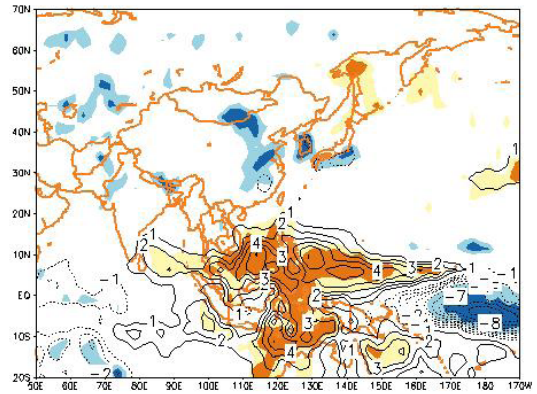


Figure 9. Same as in Figure 8 but 500hPa height and 200hPa wind.

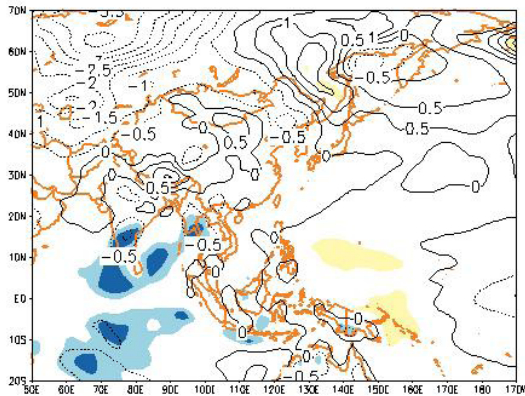
a) R2 2m temperature



c) CMAP



b) CFS 2m temperature



d) CFS precipitation

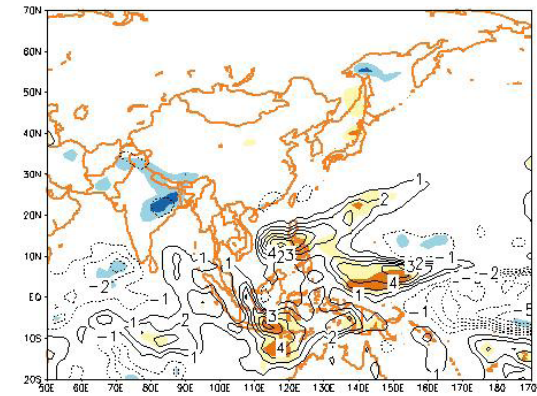


Figure 10. Same as in Figure 8 but 2-m temperature and precipitation.

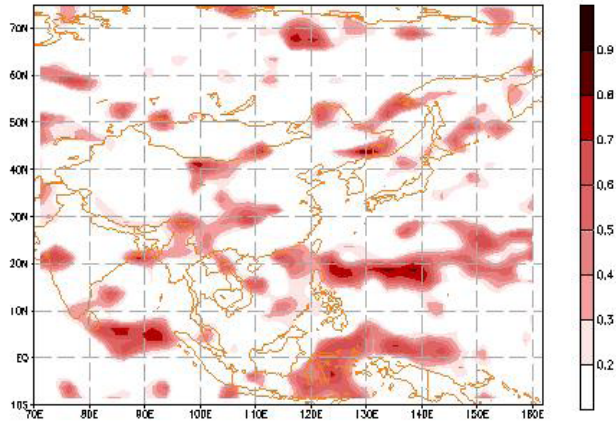
### 3.2 고해상도 예측 자료의 예측성

앞 장에서 지역기후모형을 이용한 고해상도 예측 자료를 생산할 때 사용된 전지구예측 모형의 예측성을 살펴보았다. 기후값의 측면에서 CFS는 겨울 기후값을 재분석 자료와 유사하게 모의하고 있으나, 경년변동성의 관점에서는 강한 몬순이 나타나는 해와 약한 몬순이 나타나는 해의 차이를 뚜렷하게 나타내지 못하는 것으로 보인다. 경계조건으로 사용된 CFS 데이터가 이러한 계통적 오차를 갖고 있다는 것을 고려한다면 고해상도 예측자료의 예측 오차 발생 소스를 분석하는데 도움이 될 것이라 생각된다.

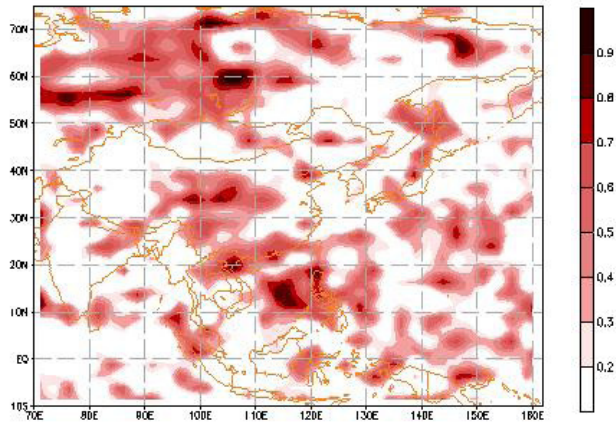
이번 장에서는 CFS와 이를 경계조건으로 한 지역기후모형이 생산한 예측자료의 예측성을 비교하였다. 각 데이터의 예측성은 아노말리의 시간상관성에 초점을 두었으며, 아노말리는 10년 평균 기후값으로부터 계산되었다. 실험설계에서 언급하였듯이 1983년부터 2007년까지 25년간의 겨울철 기후를 예측하려 하였으나 CFS를 경계조건으로 한 실험 수행시 상층 바람이 갑자기 강해져 모형이 blow-up하는 현상이 자주 발생하여 10년의 기후값으로만 예측성을 검증하였다. 대상이 된 10년은 1986년, 1989년, 1991년, 1993년, 1994년, 1996년, 1998년, 2000년, 2002년, 2005년이며 이는 강한 몬순해나 약한 몬순해에 치우치지 않으므로 기후값의 검증에 있어서는 25년 기후값을 사용한 결과와 크게 차이를 보이지 않을 것이라 생각된다.

그림 11-13은 강수의 아노말리의 상관계수를 월별로 나타낸 것이다. 12월, 즉 예측 첫 번째달의 결과는 지역기후모형을 이용한 고해상도 예측 자료를 사용했을 때 예측성이 더 높아지고 있음을 보여준다(그림 11a, 11b). CFS와 관측자료와의 상관계수와 비교할 때 지역적인 차이는 있으나 전반적으로 지역기후모형의 결과가 높은 상관계수를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 고위도 지역에서의 상관계수가 높게 나타나는데 이 지역은 겨울철 강수량이 많지 않은 지역이다. 내륙의 북쪽에서 높은 상관계수가 나타나는 경향은 재분석 자료에서도 나타나는데(그림 11c) 추후 그 원인을 분석해 볼 필요가 있을 것이다. 예측 두 번째 달인 1월의 경우 CFS는 12월과 비슷한 예측성을 보이나(그림 12a) 지역기후모형의 예측 결과는 12월에 비해 상관계수가 매우 낮아지는 경향을 보인다(그림 12b). 2월에는 1월에 비해 상관계수가 높아지지만 예측 첫 번째달만큼의 예측성을 보이지는 못하고 있다(그림 13b). 전지구 예측자료는 lead time에 관계없이 일정한 예측성을 보이고 있으나 그 예측성이 높지 않은 반면, 지역기후모형을 통해 생산된 고해상도 예측자료는 lead time이 짧을 때는 높은 상관계수를 보이지만 lead time이 길어질수록 예측성이 급격히 낮아지는 특징을 보였다.

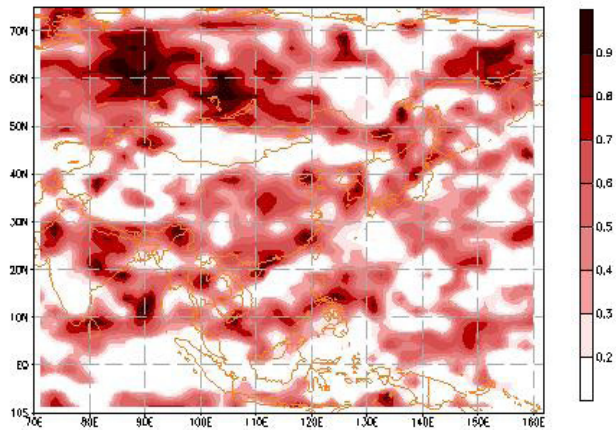
a) CFS



b) RCM\_CFS



c) RCM\_R2



**Figure 11.** Correlation of precipitation between the CMAP observation and (a) CFS, and (b) RCM with CFS forcing and (c) RCM with the reanalysis forcing for December, i.e., first month forecast.

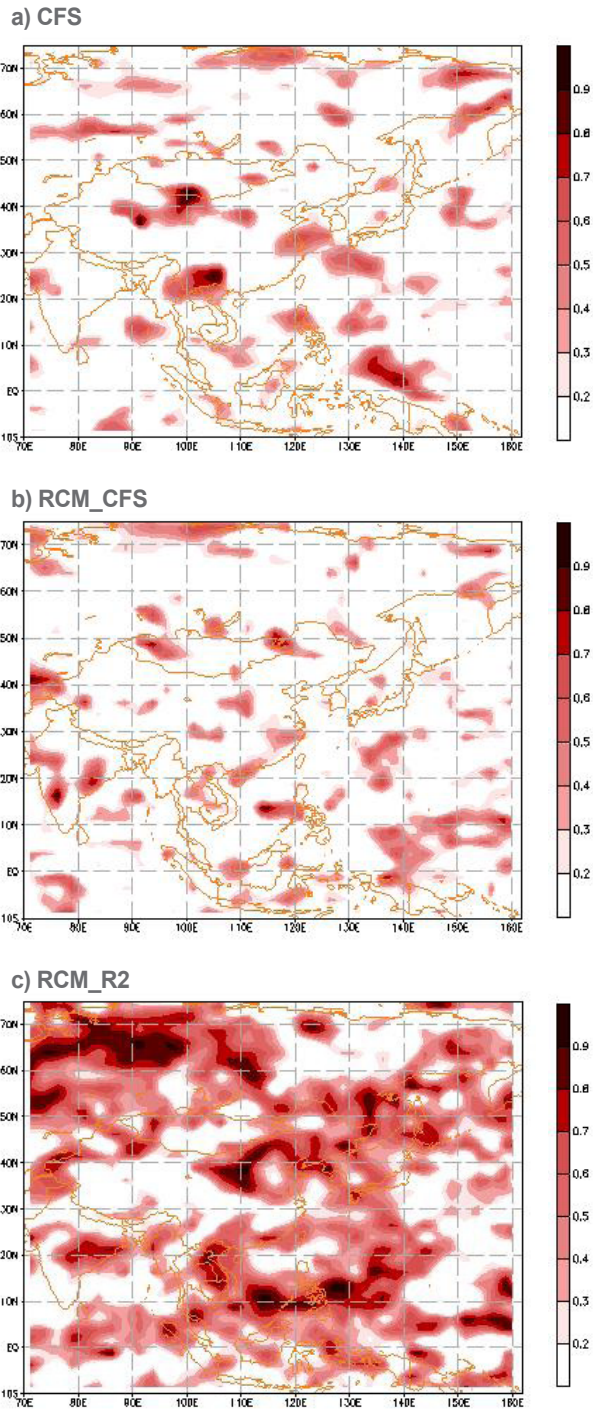
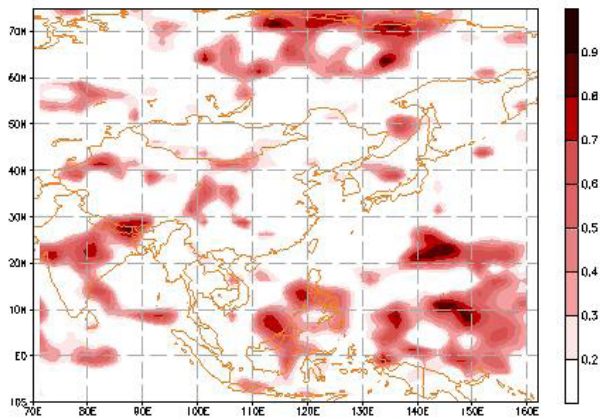
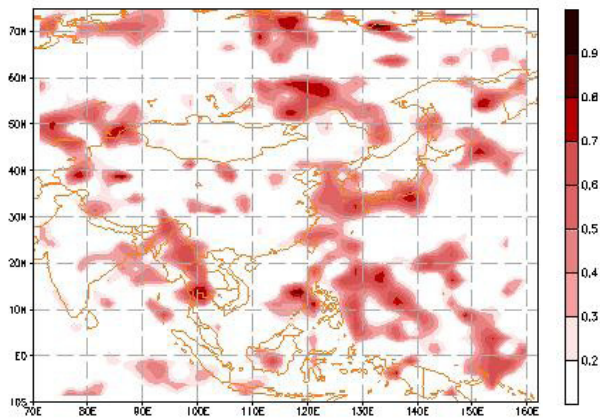


Figure 12. Same as in Fig. 11, but for January, i.e., second month forecast.

a) CFS



b) RCM\_CFS



c) RCM\_R2

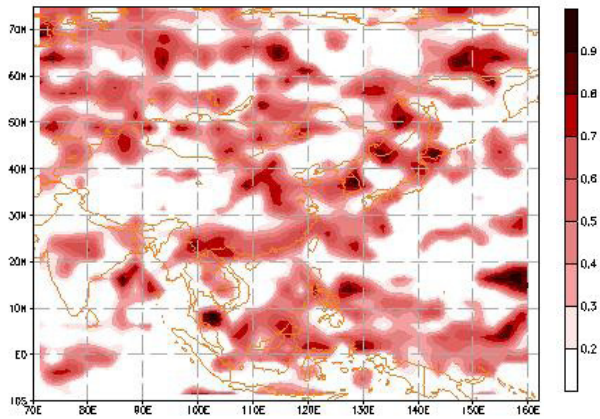
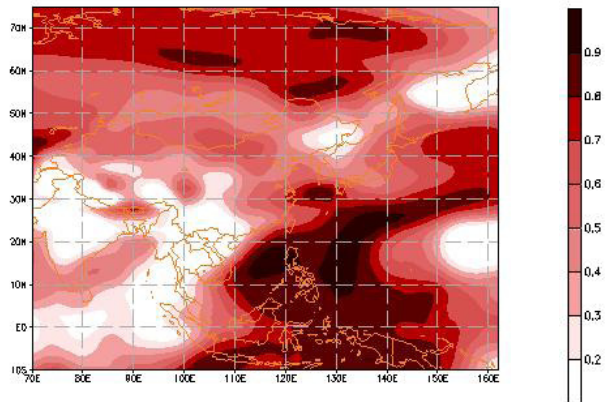


Figure 13. Same as in Fig. 11, but for February, i.e., third month forecast.

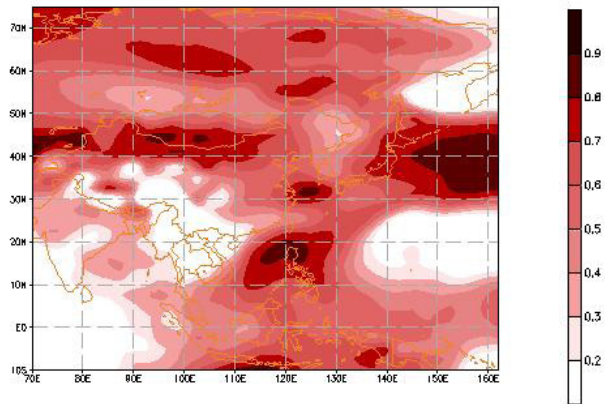
그림 14-16에서는 해면기압의 예측성을 살펴보았다. CFS는 12월에 실험영역의 북쪽과 한반도 남쪽 해상에서 높은 예측력을 보인다(그림 14a). 해양에서의 높은 상관계수는 1월에도 계속 유지되며(그림 15a), 2월에는 상관계수값은 낮아지지만 다른 지역에 비해 높은 예측력을 보인다(그림 16a). GRIMs를 통한 고해상도 예측 데이터는 아시아 전역에서 상관계수 0.3 이상을 보이지만 전지구예측데이터에 비해 예측성이 높아지는 결과는 보이지 못하고 있다(그림 14b). 하지만 몽고 지역과 같이 지역에 따라 예측성의 향상이 나타나고 있다. 강수 예측에서 나타난 것과 마찬가지로 예측 두 번째 달의 예측성은 첫 번째 달보다 현저히 낮아지는 경향을 보인다(그림 15b). CFS에서 높은 예측성을 보이는 일본 남쪽 해상에서의 상관계수가 가장 높게 나타나며, 2월에는 실험영역의 동쪽의 예측성이 상대적으로 높은 것으로 보인다(그림 16b).

하층 온도에 대한 예측성은 CFS와 GRIMs에서 매우 유사한 공간적 분포를 보인다(그림 17). 12월에는 러시아에서부터 한반도, 일본에 높은 예측성을 보이며, 북위 10-20도 사이에서도 높은 상관계수가 나타난다(그림 17a, 17d). 1월에는 내륙에서의 상관계수가 매우 감소하며, 적도부근에서의 예측성만이 유지되고 있다(그림 17b, 17e). 예측력은 2월에 오히려 다소 상승하는 특징을 보이며, 이때 고해상도 예측자료의 인도 지역에 대한 예측성이 높아진다(그림 17c, 17f).

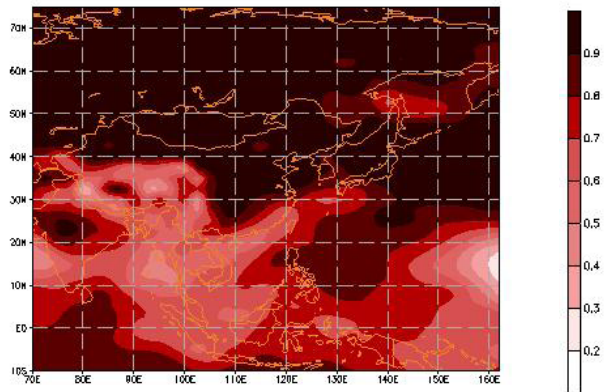
a) CFS (Dec)



b) RCM\_CFS (Dec)



c) RCM\_R2 (Dec)



**Figure 14.** Correlation of sea level pressure between the NCEP/DOE reanalysis and (a) CFS, and (b) RCM with CFS forcing and (c) RCM with the reanalysis forcing for December, i.e., first month forecast.

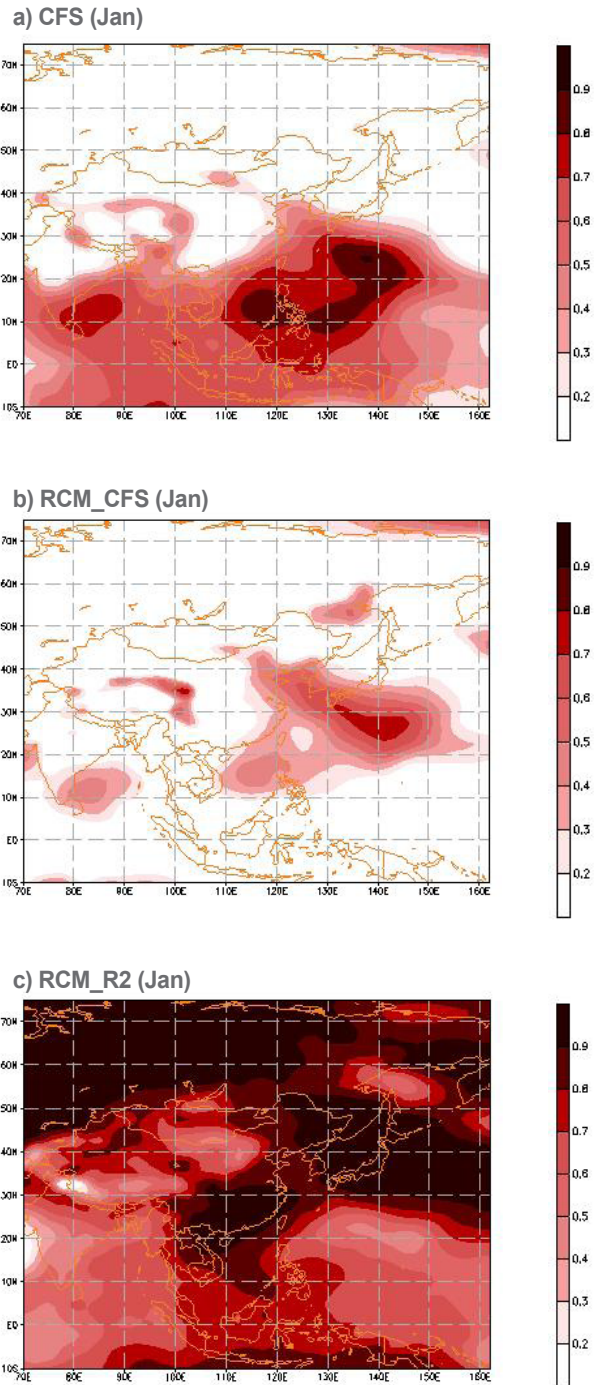
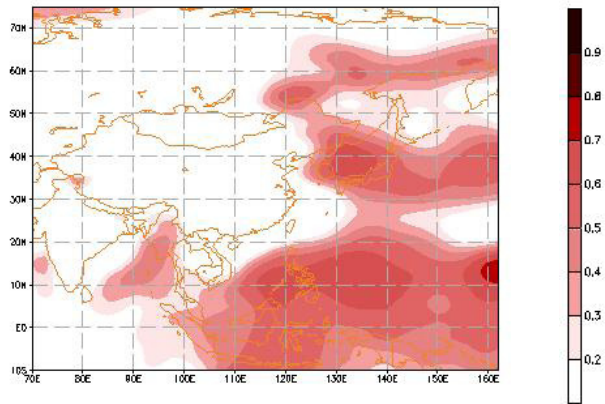
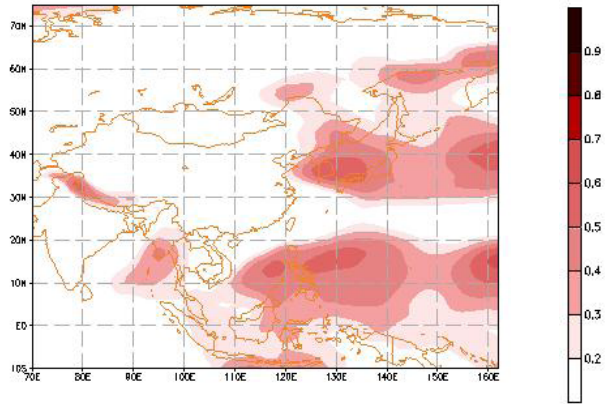


Figure 15. Same as in Fig. 14 except for January i.e., second month forecast.

a) CFS (Feb)



b) RCM\_CFS (Feb)



c) RCM\_R2 (Feb)

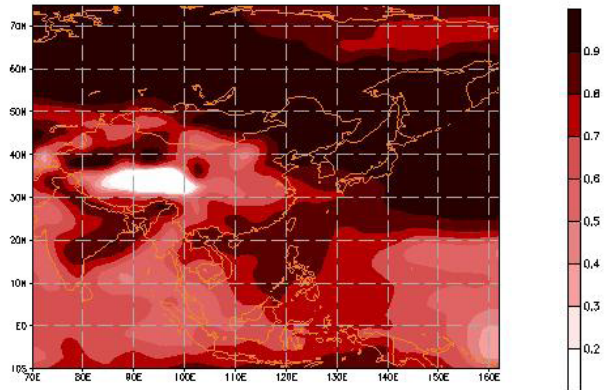
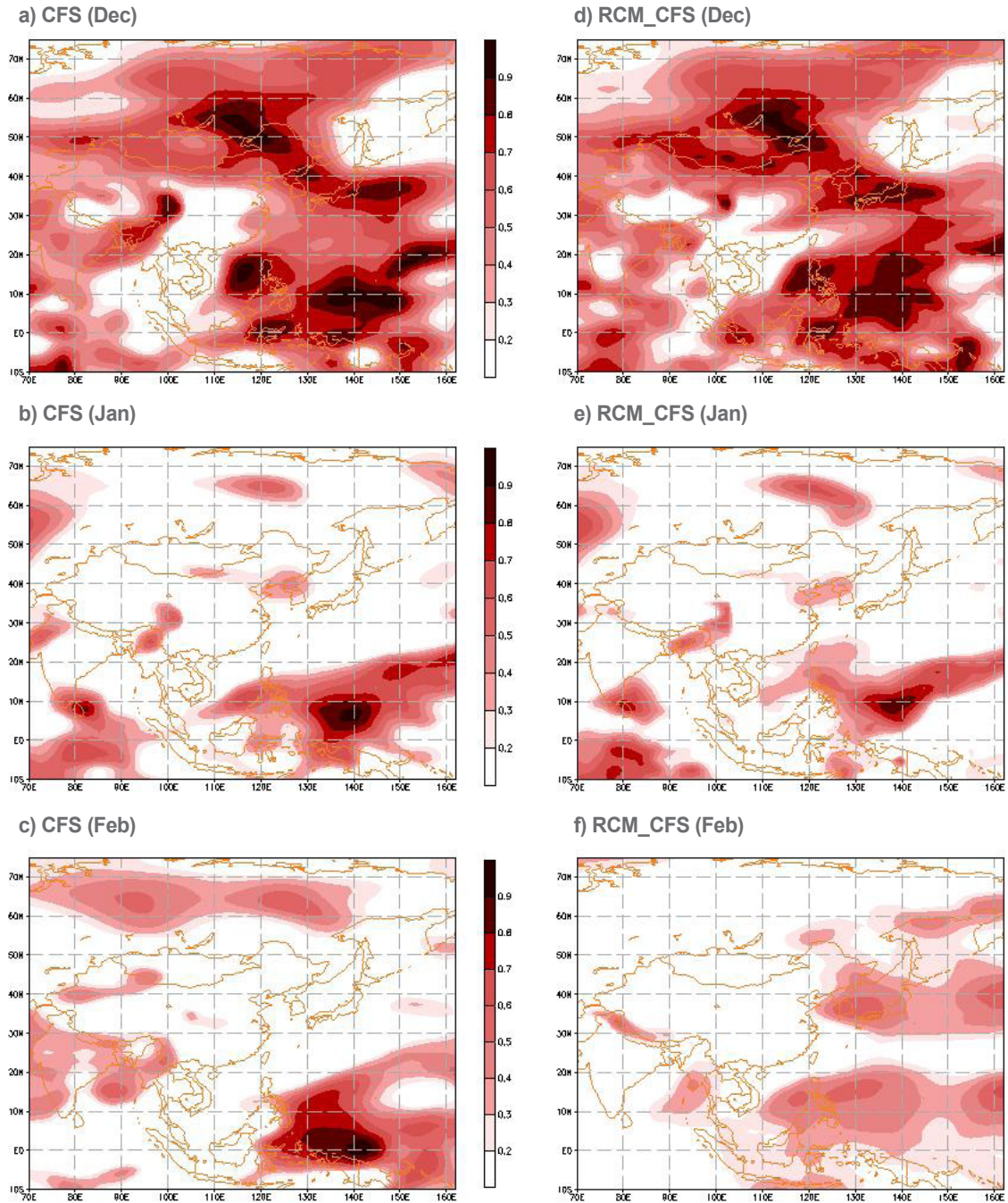


Figure 16. Same as in Fig. 14 except for February i.e., third month forecast.



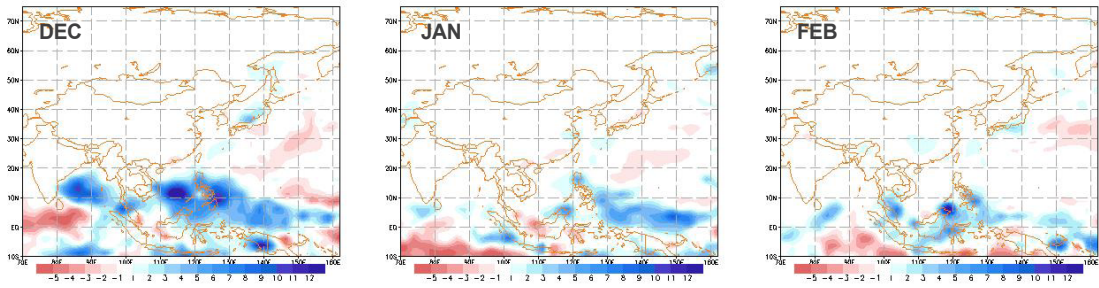
**Figure 17.** Correlation of temperature at 850 hPa level between the NCEP/DOE reanalysis and CFS in (a) December, (b) January, and (c) February, and RCM with CFS forcing in (d) December, (e) January, and (f) February.

### 3.3 Spectral nudging이 계절예측에 미치는 영향

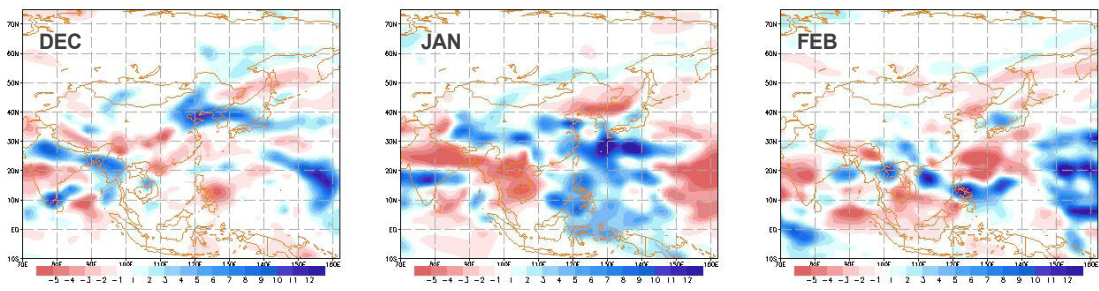
Spectral nudging은 경계조건에서 지역기후모형에 전달되는 대규모장의 정보를 강력하게 처방해줌으로써 지역기후모형 자체가 가지고 있는 계통적 오차를 줄여주는 역할을 한다. 그러나 이러한 효과는 경계조건으로 처방되는 정보가 참값이라는 가정이 전제된 것이고, spectral nudging을 사용할 경우 지역기후모형의 자유도는 줄어들게 된다. 재분석 자료를 경계조건으로 설계되는 실험의 경우 spectral nudging을 사용하면 대규모장의 오차가 줄어들어 그에 파생되는 중규모/소규모 현상의 오차 역시 줄어드는 효과를 볼 수 있다. 그러나, 이 연구에서와 같이 예측자료를 생산하는 실험의 경우, 즉 경계조건으로 처방되는 전지구예측 데이터가 참값이 아닌 경우 spectral nudging을 사용하는 것이 더 좋은 예측결과를 보장하지는 확신할 수 없다. 따라서 이번 장에서는 spectral nudging이 계절 예측성에 미치는 효과를 알아보기 위해 spectral nudging을 적용하여 생산된 예측값과 적용하지 않고 생산된 결과를 비교하였다. 실험은 2005년 한해에 대해 수행되었다.

그림 18은 관측값과 전지구예측자료, spectral nudging을 적용한 고해상도 예측자료, nudging option을 적용하지 않은 고해상도 예측자료의 강수 아노말리를 월별로 살펴본 그림이다. 관측자료에서 강수의 아노말리는 12월에 벵갈만과 남중국해에 강한 양의 아노말리가 나타나고 1월, 2월로 갈수록 양의 아노말리가 약해지는 경향을 보인다(그림 18a). CFS의 경우에는 관측과 매우 다른 아노말리를 보이고 있다(그림 18b). 관측자료는 해양에 아노말리가 나타나는 반면, CFS 예측값은 육지에서도 뚜렷한 아노말리가 나타나는 것으로 강수를 모의하고 있으며, 최대값의 위치 역시 관측과 상이하다. Spectral nudging을 사용한 고해상도 예측값의 경우 12월 양의 아노말리가 나타나는 지역을 관측과 매우 유사하게 나타내며, 관측자료에 비해 상세한 분포를 보여준다(그림 18c). 1월에는 관측자료에 비해 음의 아노말리를 넓게 모의하며, 2월에는 1월과 유사한 패턴이 유지되고 있다. Spectral nudging을 사용하지 않고 겨울철 예측자료를 생산한 경우 강수량이 매우 달라지는 결과를 보인다(그림 18d). 12월 예측값은 spectral nudging을 사용하였을 때와 유사하게 인도와 중국 남쪽, 한반도와 일본의 남쪽 해상에 양의 아노말리를, 그보다 남쪽에는 음의 아노말리가 나타나지만, 그 값은 매우 크게 모의되어 관측과는 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 패턴과 극대화된 강수량은 1월, 2월에도 계속 나타나 spectral nudging을 사용할 때와 하지 않을 경우 매우 다른 예측값을 도출할 수 있음을 시사하고 있다.

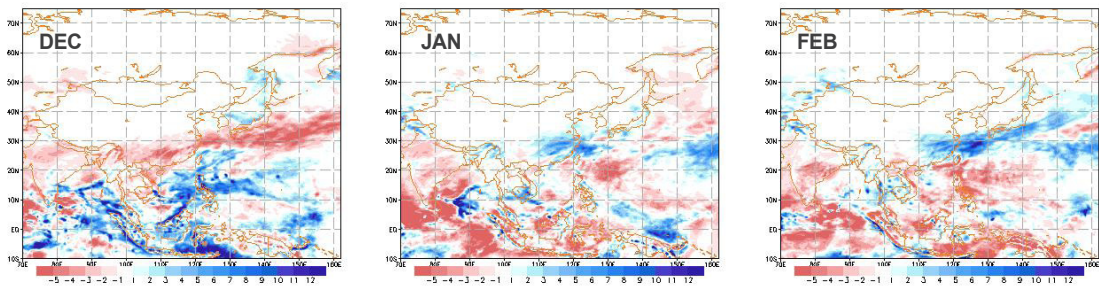
a) CMAP



b) CFS



c) RCM\_CFS (SN)



d) RCM\_CFS (No SN)

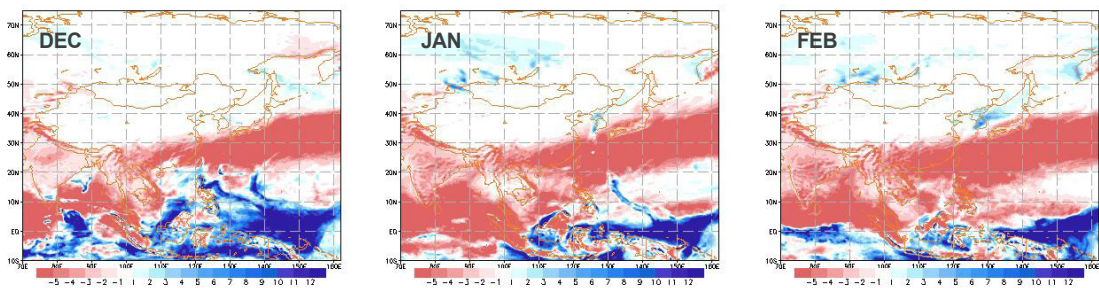
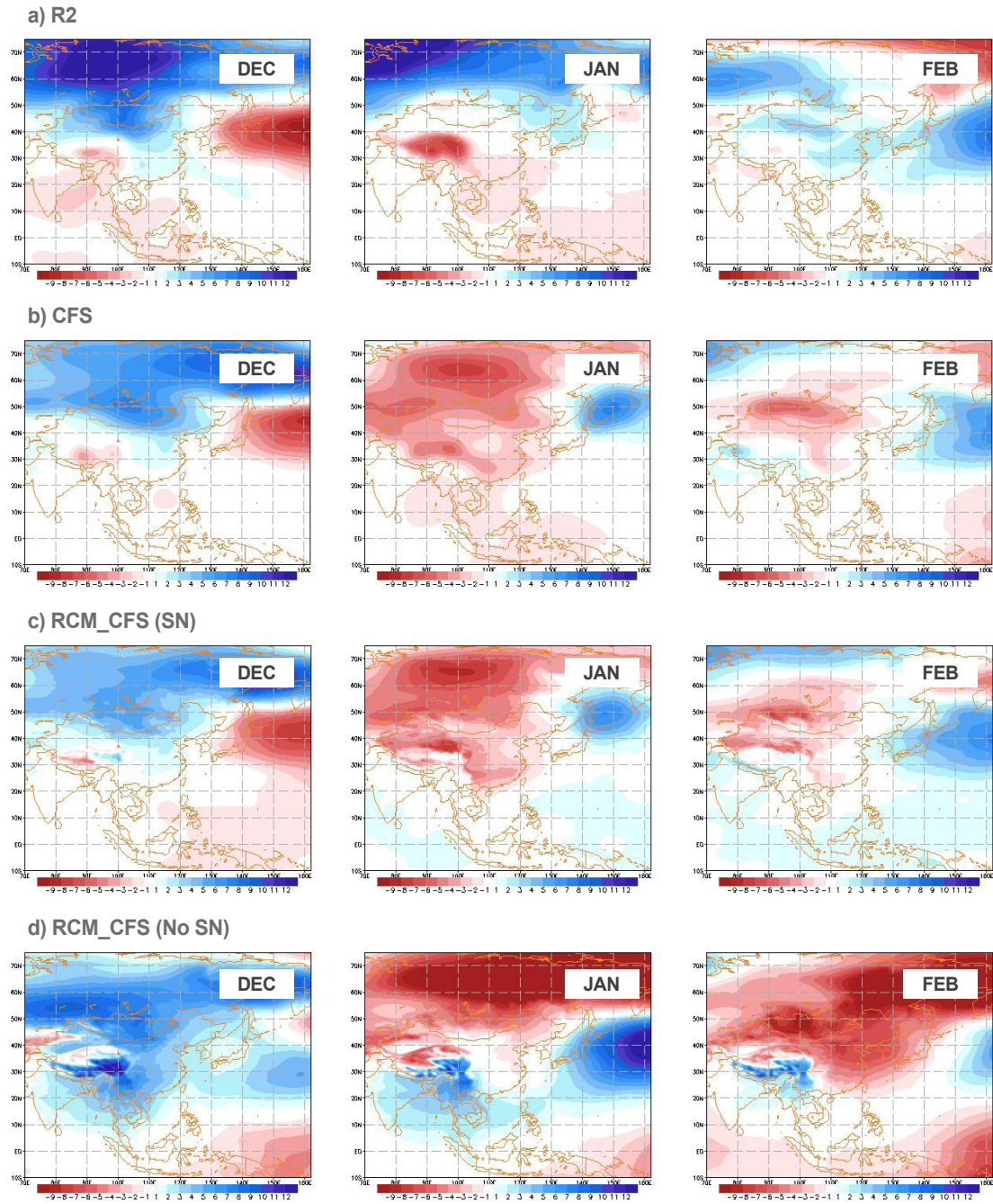


Figure 18. Precipitation anomaly (mm/day) for (a) CMAP observation, (b) CFS, (c) RCM with spectral nudging, and (d) RCM without spectral nudging.

그림 19와 그림 20에서는 spectral nudging의 영향을 더 직접적으로 받는 대규모장 변수의 아노말리 값을 살펴보았다. 그림 19는 해면기압의 월별 아노말리 값으로 spectral nudging을 사용하면 경계조건으로 처방된 CFS와 매우 유사한 순환장을 모의하고 있음을 보여준다(그림 19b, 19c). Spectral nudging을 사용하지 않은 경우 예측 첫 번째 달인 12월과 두 번째 달 1월에는 유사한 패턴을 보이지만, lead time이 길어질수록 지역기후모형 자체가 생산해내는 값이 커지면서 2월에는 전혀 다른 패턴을 나타내는 것을 알 수 있다(그림 19d). 그러나, 1월의 경우 경계조건을 강력하게 처방함에 따라 전지구예측자료가 가지고 있는 오차가 지역기후모형에도 강제되어 재분석 자료에서 나타나는 양의 아노말리를 전혀 나타내지 못하는 단점 또한 보이고 있다.

Spectral nudging이 지표보다 더 강력하게 처방되는 850hPa level에서의 온도를 살펴보면, 해면기압보다 더 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다(그림 20). Spectral nudging을 사용한 경우 아노말리 패턴은 해면기압과 마찬가지로 CFS와 매우 유사하게 나타난다(그림 20b, 20c). 그러나, spectral nudging을 사용하지 않은 경우 첫 번째 달인 12월부터 매우 다른 결과를 보이며, lead time이 길어질수록 그 차이가 커지는 것을 볼 수 있다(그림 20d).

월별 아노말리 패턴의 상관계수를 구해보면 변수별로 다른 결과를 보인다(그림 21). 강수의 경우 예측 첫 번째 달에는 spectral nudging을 쓴 경우가 가장 높은 상관계수를 나타내었으나, lead time이 길어질수록 예측력이 감소하는 경향을 보이는 반면 spectral nudging을 사용하지 않은 경우 예측성이 크게 높지는 않지만 lead time에 크게 경향을 받지 않는 것으로 보인다(그림 21a). 해면기압의 상관계수는 세 예측데이터에서 모두 1월이 가장 낮은 것으로 나타났다(그림 21b). CFS와 spectral nudging을 사용한 실험은 12월에 매우 높은 상관계수를 보이지만 1월에는 음의 값으로 예측력이 떨어지고 오히려 2월에 다시 높아지는 특징을 보인다. 이러한 특징은 spectral nudging을 사용하지 않은 실험에서도 마찬가지로 나타나며, lead time에 상관없이 CFS가 다소 높은 상관계수를 나타내었다. 온도의 경우는 spectral nudging을 사용한 고해상도 예측자료가 가장 높은 예측성을 보이며, 해면기압과 마찬가지로 1월에 가장 낮은 값을 나타내고 2월에 다소 상승하는 특징을 보인다(그림 21c). 그러나 변동폭이 크지 않고 가장 낮은 값을 보이는 1월에도 양의 상관계수를 나타내었다. Spectral nudging을 사용하지 않은 경우 12월과 1월에 매우 낮은 상관계수를 보이며, 2월에는 두 데이터와 유사한 값을 보인다.



**Figure 19.** Sea level pressure anomaly (hPa) for (a) R2, (b) CFS, (c) RCM with spectral nudging, and (d) RCM without spectral nudging.

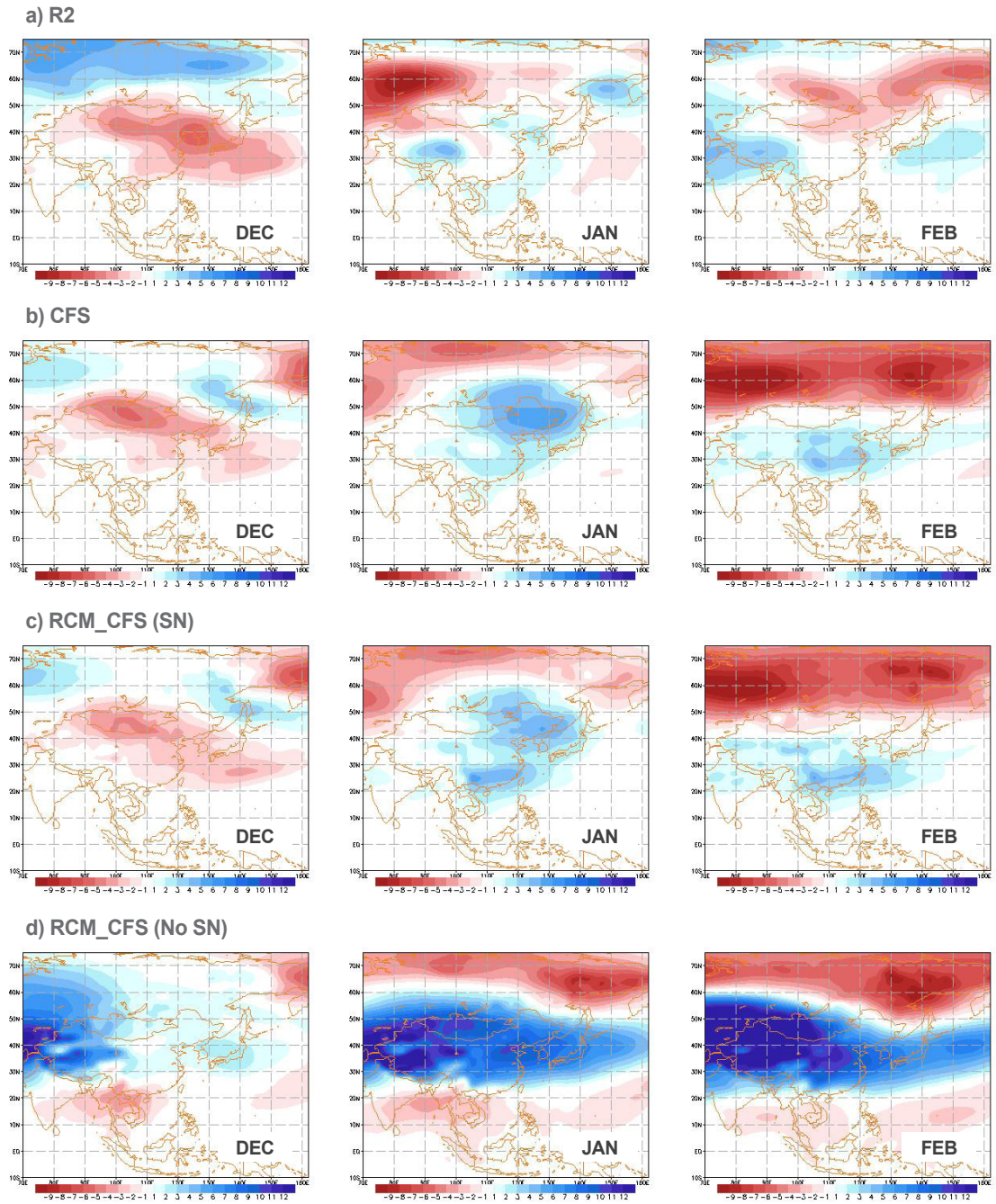
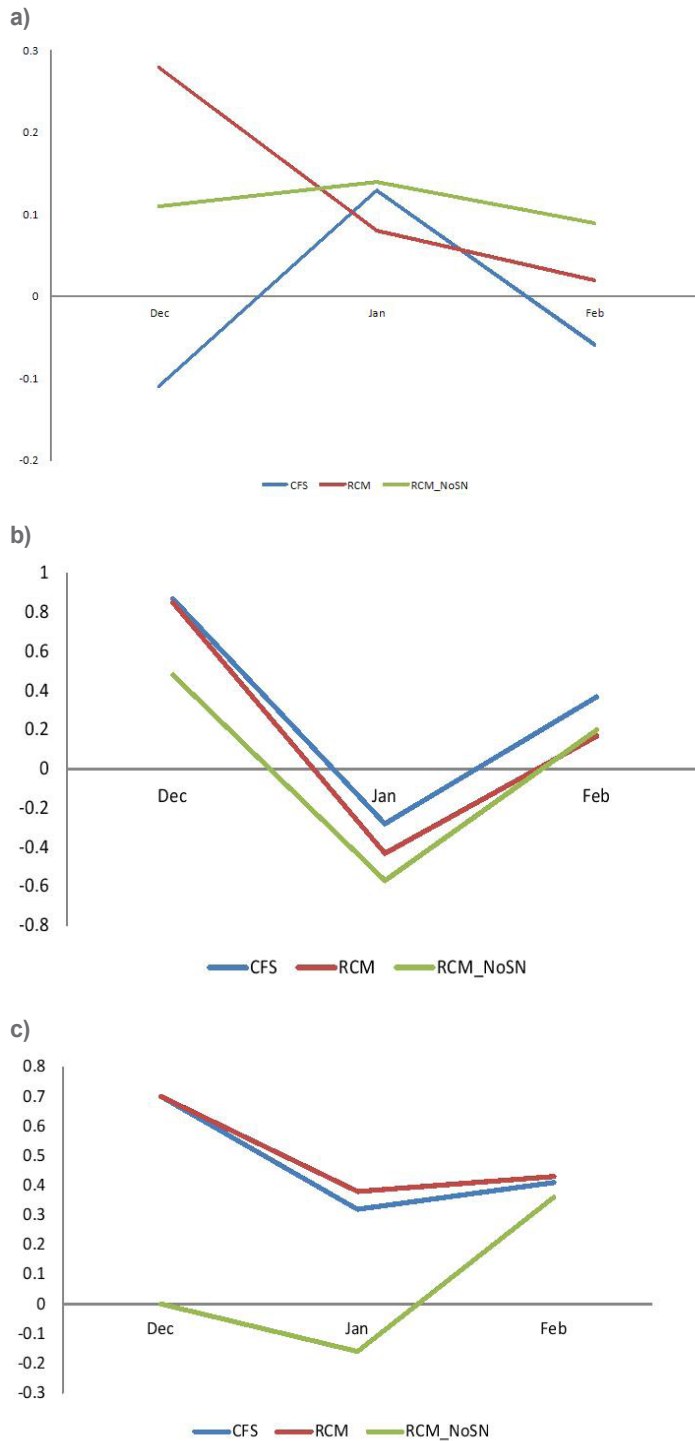


Figure 20. Same as in Fig. 18 except for temperature at 850 hPa.



**Figure 21.** Anomaly correlation of (a) precipitation, (b) sea level pressure and (c) temperature at 850hPa level.

## 4. 요약 및 논의

본 연구에서는 지역기후모형을 이용해 동아시아 계절예측자료를 생산하고 이를 검증하였다. 실험은 1983년부터 2007년까지 25년에 대해 약 30km의 해상도로 이루어졌고, 생산된 결과에 대해 기후값, 경년변동성, lead time에 따른 예측성의 변화를 검증하였다. 이러한 검증을 통해 지역기후모형을 이용한 고해상도 계절 예측자료의 효용성을 타진하고, 보다 신뢰성 있는 예측자료를 제공하고자 하였다.

지역기후모형은 전지구 예측모형과 달리 초기 조건 외에도 6시간마다 경계조건이 처방되어야 하므로 경계조건의 예측성이 담보되어야만 한다. 따라서 고해상도 예측자료를 생산하기 전에 경계조건으로 사용될 NCEP CFS 예측자료의 동아시아 겨울 기후에 대한 예측 성능을 살펴보았다. 기후값의 관점에서 CFS는 대규모 순환장을 전반적으로 잘 모의하였다. 하지만, 경년변동성의 관점에서 동아시아 겨울몬순 지수를 계산하여 변동성을 살펴보았을 때 재분석 자료와는 다른 변동성을 보였으며, 강한 몬순해와 약한 몬순해의 특징을 뚜렷하게 구별하지 못하였다.

이러한 특징을 가지고 있는 전지구 예측자료를 경계조건으로 처방하여 고해상도 계절 예측 정보를 생산하였다. 생산된 10년의 겨울 예측값으로 시간 변동성에 대한 상관계수를 구해 예측성을 살펴보았다. 온도나 해면 기압과 같은 대규모 변수들은 lead time에 따라 예측성이 급격히 감소하는 경향을 보였고, 이는 CFS의 특성이 그대로 반영된 것으로 보인다. 지역기후모형은 lead time이 짧을 때 강수와 같이 모형이 예단하는 변수의 예측에 있어 장점을 가지고 있는 것으로 보인다. 이는 고해상도 예측 자료가 가지는 added value의 가능성을 보여주는 것으로, 지표온도나 최저기온의 extreme index 분석과 같은 고해상도 예측자료의 효용성이 잘 보여줄 수 있는 분석을 통해 그 가능성을 입증할 수 있을 것이라 생각된다.

지역기후모형은 경계조건이 주는 대규모 순환장의 정보를 바탕으로 중규모 현상들을 모의하게 되는데, 이때 대규모 순환장에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 하기 위해 large-scale nudging 기법을 적용하였다. 경계조건의 정보가 참값이라면 이로 인해 강수나 지표온도와 같이 모형이 예단하는 변수들의 정확도가 높아지지만, 그렇지 않은 경우 오히려 정확도가 떨어지는 경우가 발생하기도 한다. 2005년 겨울에 대한 실험을 통해 예측의 관점에서

spectral nudging의 필요성 유/무에 대한 결론을 내리기는 어렵다. Lead time이 길어짐에 따라 모의되는 대규모장의 차이가 점점 뚜렷해지지만 그것이 예측성의 감소로 직결되는 것은 아니기 때문이다. 이는 추후 다양한 조건을 고려한 실험을 통해 좀 더 신뢰성 있는 결론을 낼 수 있을 것이라 생각된다.

기후값의 측면에서 CFS가 재분석 자료에서 나타난 특징들을 전반적으로 잘 모의하고 있음에도 불구하고, 각 해의 특징들은 잘 예측하지 못하는 경향을 보였다. 이러한 오차는 CFS가 지역기후모형의 경계조건으로 처방되었을 때 더 증가하여 실험 중 모형이 blow-up 되는 현상으로 나타났다. 이러한 현상을 피하기 위해 경계조건에 bias correction 기법을 적용하여 경계조건에서 발생하는 오차를 최소화하고 고해상도 예측자료의 예측성을 향상시키는 과정이 필요할 것이다.

컴퓨팅 소스의 발달이 이루어지고 있음에도 불구하고 지역기후모형을 이용한 계절예측 정보의 생산은 시간 대비 예측성을 담보하기 힘들다는 이유로 잘 이루어지지 않고 있다. 고해상도 예측정보의 필요성은 점점 증가하고 있지만, 대부분의 기관에서 통계적 기법을 통해 예측자료를 생산한다. 그러나, 통계모형을 통한 예측 역시 역학모형의 예측력이 담보되어야만 한다. 따라서, 해상도가 높은 지역기후모형과 통계모형의 개발은 같이 이루어져야 한다.

신뢰할 수 있는 계절예보 자료를 잘 활용하면 국가, 산업, 기업의 경제에서 엄청난 혜택을 얻을 수 있다. 그러나, 수자원, 농업 등 기후자료를 이용한 응용연구에 이용될 수 있는 공간적, 시간적 고해상도의 전구 자료를 구하는 것은 여전히 용이하지 않다. 현재 APCC에서는 앙상블 기법을 이용한 신뢰도 높은 계절예측자료를 제공하고 있지만 이는  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 공간 해상도와 월평균의 시간 해상도를 가진 자료이다. 올해 연구에서는 30km, 3시간 간격의 예측자료의 전반적인 예측성을 검증하는데 그쳤지만, bias correction 기법의 개발, 앙상블 예측의 적용 등을 통해 고해상도 예측자료의 예측성을 높인다면 계절예보 측면을 넘어 좀 더 상세화된 예측정보를 제공할 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- Behringer, D. W., M. Ji, and A. Leetmaa, 1998: An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The Ocean Data Assimilation System, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1013–1021, doi:10.1175/15200493(1998)126<1013:AI CMFE>2.0. CO;2.
- 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.
- Castro, C. L., R. A. Pielke, and G. Leoncini, 2005: Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), *J. Geophys. Res.*, 110, D05108, doi:10.1029/2004JD004721.
- 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.
- \_\_\_\_\_, and M. J. Suarez, 1999: A solar radiation parameterization for atmospheric studies. Vol. 15, NASA/TM-1999-104606, 38 pp.
- 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.
- De Sales, F., and Y. Xue, 2011: Assessing the dynamic-downscaling ability over South America using the intensity-scale verification technique, *Int. J. Climatol.*, **31**, 1205–1221, doi:10.1002/joc.2139.
- 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.
- Gutowski, W. J., Y. B. Chen, and Z. Otles, 1997: Atmospheric water vapor transport in NCEP-NCAR reanalyses: Comparison with river discharge in the central United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 1957–1969.

- 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.
- 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.
- \_\_\_\_\_, and E.-C. Chang, 2012: Spectral nudging sensitivity experiments in a regional climate model. *Asia–Pacific J. Atmos. Sci.*, **48**, 345-355.
- \_\_\_\_\_, 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.
- \_\_\_\_\_, 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.
- \_\_\_\_\_, 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.
- \_\_\_\_\_, Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- \_\_\_\_\_, and A. Leetmaa, 1999: An Evaluation of the NCEP RSM for Regional Climate Modeling. *J. Climate*, **12**, 592–609.
- \_\_\_\_\_, H.-M. H. Juang, and Q. Zhao, 1998: Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2621-2639.
- Hurrell, J., G. A. Meehl, D. Bader, T. L. Delworth, B. Kirtman, and B. Wielicki, 2009: A unified modeling approach to climate system prediction, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **90**, 1819–1832, doi:10.1175/2009BAMS2752.1.
- 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.
- 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.
- \_\_\_\_\_, 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.
- \_\_\_\_\_, 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, 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.
- Leung, L. R., and Y. Qian, 2005: Downscaling extended weather forecasts for hydrologic prediction, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **86**, 332–333.
- Leung, L. R., A. F. Hamlet, D. P. Lettenmaier, and A. Kumar, 1999: Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the Pacific Northwest Columbia River basin, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **80**, 2313–2329, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2313:SOTEHS>2.0.CO;2.

- Li, Y., and S. Yang, 2010: A dynamical index for the east Asian winter monsoon, *J. Climate*, **23**, 4255-4262.
- Liang, X.-Z., M. Xu, K. E. Kunkel, G. A. Grell, and J. S. Kain, 2007: Regional climate model simulation of U.S.-Mexico summer precipitation using the optimal ensemble of two cumulus parameterizations, *J. Climate*, **20**, 5201–5207, doi:10.1175/JCLI4306.1.
- Mahrt, L., and H. Pan, 1984: A 2-layer model of soil hydrology, *Boundary Layer Meteorol.*, **29**, 1–20, doi:10.1007/BF00119116.
- Moorthi, S., H.-L. Pan, and P. Caplan, 2001: Changes to the 2001 NCEP operational MRW/AVN global analysis/forecast system, 14 pp., Natl. Weather Serv., Silver Spring, Md.
- 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.
- Pacanowski, R. C., and S. M. Griffies, 1998: MOM3 manual, Geophys. Fluid Dyn. Lab., NOAA, Princeton, N. J.
- 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.
- Roads, J., S. C. Chen, and M. Kanamitsu, 2003: U.S. regional climate simulations and seasonal forecasts, *J. Geophys. Res.*, **108**, 8606, doi:10.1029/2002JD002232.
- Saha, S., et al., 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **91**, 1015–1057, doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Saha, S., et al., 2006: The NCEP Climate Forecast System, *J. Climate*, **19**, 3483–3517, doi:10.1175/JCLI3812.1.
- 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., and W. Chen, 2014: An intensity index for the east Asian winter monsoon, *J. Climate*, **27**, 2361-2374.
- Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar, and D. P. Lettenmaier, 2002: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *J. Geophys. Res.*, **107**, 4429, doi:10.1029/2001JD000659.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge 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.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 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.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2008b: A simulated climatology of the East Asian summer monsoon using a regional spectral model. *Asia–Pacific J. Atmos. Sci.*, **44**, 325-339.
- Yoon, J.-H., L. R. Leung, and J. Correia Jr., 2012: Comparison of dynamically and statistically downscaled seasonal climate forecasts for the cold season over the United States. *J. Geophys. Res.*, **117**, D21109, doi:10.1029/2012JD017650.
- Zhu, C. M., D. W. Pierce, T. P. Barnett, A. W. Wood, and D. P. Lettenmaier, 2004: Evaluation of hydrologically relevant PCM climate variables and large-scale variability over the continental US, *Clim. Change*, **62**, 45–74, doi:10.1023/B:CLIM.0000013677.37040.28.

연구보고서 2015-05

---

**고해상도 계절예측: 불확실성과 가치 검증**

**High Resolution Forecast: Uncertainty and Added Value Assessment**

양유빈 기후분석팀



**APEC Climate Center**

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

[www.apcc21.org](http://www.apcc21.org)

 [www.facebook.com/apcc21](http://www.facebook.com/apcc21)

 [www.youtube.com/APECClimateCenter21](http://www.youtube.com/APECClimateCenter21)

 [www.twitter.com/apcc21](http://www.twitter.com/apcc21)

 [www.plus.google.com/+APECClimateCenter21](http://www.plus.google.com/+APECClimateCenter21)

 [www.flickr.com/apcc21](http://www.flickr.com/apcc21)