



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

Development of a Dynamical Downscaling System for Improved Simulation of the Regional Climate over the Indonesian Maritime Cotinent

■■ 정여민 | 기후분석팀

1. 서론	76
2. 연구 자료 및 방법	78
2.1 전구기후모델	78
2.2 지역기후모델	78
2.3 관측자료	79
2.4 연구 지역	80
3. 연구결과 및 분석	82
3.1 지역기후모델 예측성 평가	82
3.2 여름철 maritime continent 지역의 ENSO 영향 분석	94
4. 결론	102

■ 정혜인, 기후분석팀

1. 서론	40
2. 연구 자료 및 방법	43
2.1 사용된 집합 모형	43
2.2 예측성 검증 기법	45
3. 해양 초기화 기법	45
3.1 해수면온도 Nudging	45
3.2 해양 자료 동화된 3차원 재분석 자료의 적용	46
4. APCC CCSM3의 기후예측 성능	47
4.1 해수면 온도 및 강수의 예측성 비교	47
4.2 해수면온도 예측성의 경년변동성	48
4.3 두 가지 종류의 ENSO 예측성 비교	50
4.4 고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨에 대한 특정해 비교	52
5. 3차원 해양 재분석 자료를 처방한 실험의 예측성이 낮은 이유는?	58
5.1 초기충격	58
5.2 모델자체의 결함	61
6. APCC에서 수집중인 집합 모형들과의 비교	63
7. 요약 및 결론	67

Development of a Dynamical Downscaling System for Improved Simulation of the Regional Climate over the Indonesian Maritime Continent

정여민 | 기후분석팀

ABSTRACT

This study investigates the performance of a dynamical downscaling system based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model in simulating the regional climate over the Indonesian Maritime Continent. The domain covers the whole region of the Indonesian Maritime Continent at a 45 km horizontal resolution and the simulation spans three months (June-July-August, JJA) for every year in a 20-year period (1989-2008). The initial and lateral boundary conditions to drive the WRF modeling system are provided using the Community Climate System Model (CCSM3), which APCC has improved the seasonal predictability of, through SST initialization using GODAS (Global Ocean Data Assimilation System) data.

To assess the dynamically downscaled results, the seasonal mean field and interannual variability of APCC/CCSM3 and the WRF results were compared to MERRA reanalysis data. The comparison between the observations and model simulations shows that the WRF can improve the ability of regional climate simulation. The regional details about the temperature produced by WRF are much better than those produced by the APCC/CCSM3. The 20-year mean spatial distribution of daily precipitation from APCC/CCSM3 and WRF showed a dry bias compared to MERRA data. However, the pattern correlation coefficient of dynamically downscaled results are higher than that of the boundary forcing data.

The results from the EOF analysis for the seasonal daily mean precipitation indicate that WRF is able to reproduce the dominant mode of interannual variability when compared to the MERRA reanalysis data. However, the results for temperature do not show the dominant mode of observation. From the interannual variability of the temperature anomalies, it appears that dynamically downscaled precipitation depends on the lateral boundary data, namely APCC/CCSM3. However, precipitation anomalies are identified similarly to variability in observations.

Statistical validation examined the pattern correlation coefficient for the simulation period for the MERRA, APCC/CCSM3, and WRF results. The seasonal mean temperature and precipitation predictions from the regional climate model, WRF, showed high spatial correlation, better than the lateral boundary conditions, APCC/CCSM3 forecast over the land region. It has been confirmed that the regional climate predictability of a dynamically downscaled model performed better than the forcing data for the Indonesia Maritime Continent.

To investigate the regional impacts of ENSO, the research period was classified into Normal, El Niño and La Niña year, depending on the summer sea surface temperature (SST) anomalies in the Niño 3.4 region. Indonesian climatology is divided into three types, depending on the regional characteristics of the precipitation. The division of analyzed areas is monsoon pattern (Region A), equatorial pattern (Region B), and local pattern (Region C).

The cumulative rainfall for the entire regions is the largest (lowest) during the La Niña (El Niño) period. Region C shows the most significant deviation and in Region B appears the least significant variation, according to the concerned ENSO period. WRF generally can simulate similar features to MERRA data. However, the regional climate model results underestimate accumulated precipitation.

We analyzed the vertical distribution of the wind field and relative humidity and the lower atmosphere divergence fields for the El Niño, La Niña, and Normal years. The easterly winds



of the Western Pacific during a La Nina year flowed into Region C. During the El Niño period, that easterly flow weakened.

According to the results, there are systematic biases in the dynamically downscaled model but the seasonal mean climatology and interannual variability of regional climate models are comparable to observations. This may indicate that APCC/CCSM3 can produce optimal seasonal forecasts at high resolution for the Indonesian Maritime Continent.

In the future, improvements in the predictive power of APCC/CCSM3 and the application of statistical post-treatments are expected to produce more realistic regional scale predictions.

1. 서론

기후 변화에 따라 보다 정확한 기후 예측 자료가 요구되고 있으며, 장기 기후 예측을 위한 대순환모델(General Circulation Model, GCM)의 지속적인 발전이 이루어져 왔다. 그러나 대순환모델은 200km 내외의 낮은 공간 분해능과 단순화된 물리 과정의 한계로 지역적인 규모의 현상을 재현하기에는 많은 한계를 가지고 있다(IPCC, 2007). 기후 변화의 영향은 지역적 특징에 따라 다양하게 발생하므로, 지역규모의 현상 모의에 적합하며 지구 규모의 대규모 강제력을 고려할 수 있는 고해상도 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)의 연구가 활발히 진행되고 있다(Qian et al., 2010). 지역기후모델은 대순환 모델의 예측 자료를 통해 초기 조건과 측면 경계 조건, 지표 경계 조건을 입력 자료로 사용하여 역학적 규모 축소 방법을 실시한다. 이러한 규모 축소 방법으로 특정 지역에 대해 고분해능과 특성화된 물리 모수화 과정을 고려하여 보다 상세한 지역 기후를 모의 할 수 있다(Liang et al., 2004).

Soares et al.(2012)등은 지역적으로 강수량의 편차가 크게 발생하는 포르투갈 지역에 대해 재분석 자료를 초기·경계 자료로 사용하여 역학적 규모 축소 연구를 진행하였으며, 지역기후모델로 사용된 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델의 결과는 지표 관측 결과와 매우 유사한 지역적 특징을 재현하였다. 또한 YU et al.등은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 CAM(Community Atmosphere Model)과 CLM(Community land Model version3)을 접합한 대순환모형(GCM)의 예측자료를 이용하여

중국 지역의 상세한 기후 자료를 생산하였으며 60 km 수평해상도를 가지는 지역기후예측 결과는 지상관측자료와 비교했을 때 경계입력자료로 사용된 GCM의 예측결과보다 공간패턴의 상관성이 향상됨을 보였다. 국내에서도 한반도 상세기후 통합시스템 구축을 위해 CCSM3 예측자료를 통한 역학적 규모축소를 실시하였고 상세기후예측의 가능성을 제시하였다(Choi et al., 2011). 그러나 지역기후모델의 역학적 규모 축소 실험은 지형이 매우 복잡한 영역을 대상으로 50 km 이상의 높은 수평 해상도를 가지는 경우 지역적 대기 순환의 기후 특성을 재현하는 데 어려움이 지적되고 있다(Christensen et al., 1998). 또한 모델 적분 영역의 크기와 물리 모수화 과정의 채택에 매우 의존적이므로 계통적 오차를 증폭시킬 가능성도 있다(Antic et al., 2004).

계절 예측을 위해 선정한 연구지역은 적도에 위치한 Indonesian Maritime Continent (IMC) 로 1,800개 이상의 섬과 복잡한 해안선으로 이루어져 있으며, 적도의 인도양과 남중국해, 태평양 해수면의 영향을 직접적으로 받는다(Aldrian and Susanto, 2003). 이 지역은 많은 섬들과 반도, 얇은 해수면으로 이루어지며, 복잡한 지형과 해양의 영향, 그리고 강한 대류불안정으로 발생하는 열과 수증기의 수송 및 재분배 과정 등으로 인해 수치모델의 기후 모사 성능에 대한 불확실성이 전통적으로 큰 지역이기도 하다. IPCC 보고서에 의해 기후 변화에 취약한 지역으로 선정되었고 태평양의 해수면 온도, 대규모의 순환장인 ENSO와 계절풍의 영향을 받는다. 1997년의 강력한 엘니뇨는 인도네시아 지역에 전기동안 심각한 가뭄과 산불의 피해를 입혔으며, 연기와 연무로 인한 피해는 주위의 다른 지역까지 영향을 미쳤다(D'Arrigo and Wilson, 2008). 그러나 이러한 지역적 특성으로 기후 예측에 계통적 오차가 큰 지역으로 대순환모델을 이용한 IMC의 예측 성능을 향상시키기 위한 노력이 이루어지고 있다(Richard and Julia, 2003).

최근 APCC(Asia Pacific Economic Cooperation Climate Center)는 NCAR의 접합 대순환모델인 CCSM3(Community Climate System Model)에 3차원 GODAS(Global Ocean Data Assimilation System) 자료의 SST initialization 수행하여 예측성을 개선하였다. 따라서 본 연구에서는 IMC 지역의 상세 기후 예측을 위해 APCC/CCSM3 계절예측 자료를 WRF의 초기 및 경계 조건으로 이용하여 역학적 규모축소 실험을 20년 동안 실시하였다. 다양한 시·공간적 특성에 대한 재분석자료와의 비교·분석을 통해 APCC/CCSM3-WRF 로 구성된 역학적 규모축소 시스템의 IMC 적용가능성을 평가하고자 한다.



2. 연구 자료 및 방법

2.1 전지구기후모델

NCAR에서 개발된 CCSM3은 과거와 현재, 미래를 모의할 수 있는 전 지구 규모의 기후 모델로 전 세계의 우수한 연구기관에서 사용 중인 접합 대순환 모형이다. CCSM3은 대기, 해양, 해빙, 지면을 구성하는 4개의 독립된 모형들로 이루어져 있고 이들을 통합하는 하나의 coupler(Coupler version 6, CPL6)로 연결된다. 대기는 CAM(version 3; Collins et al, 2004) 해양은 POP(Parallel Ocean Program; Smith and Gent 2002) 모델, 해빙은 CSIM5(Community Sea Ice Model version 5; Briegleb et al. 2004) 모델, 지면은 CLM3(version 3; Dickinson et al. 2006) 모델을 이용하였다. 대기 및 지면 모델의 해상도는 T85(약 $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$) 역직으로 26개 층을 채택하였으며, 해양 및 해빙 모델은 해상도는 gx1v3(약 $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$), 연직으로 약 10~250m에 대해 40개의 층을 갖도록 설정하였다. 본 연구에서는 APC가 3차원 GODAS자료의 SST initialization 수행하여 예측성을 개선시킨 APCC/CCSM3 결과를 이용하였다. 모델의 장기 예측성 평가를 위해 계절예측자료의 월별 자료와 지역기후 모델에 제공될 6시간 자료를 산출하였다.

2.2 지역기후모델

본 연구에서 역학적 규모축소를 위해 사용한 지역기후모델은 미국 국립대기연구소(NCAR)와 미국 해양대기관리청(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction)에서 개발한 WRF로 전 세계적으로 연구와 현업에서 광범위하게 사용되고 있다. WRF 모형은 완전 압축성 비정수계 방정식을 사용하고, 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며, 지형에 근거한 정역학 기압 연직 좌표를 사용한다. WRF 모델의 전처리 과정(WRF Preprocessing System; WPS)에서는 지형과 토지피복 등의 지형자료와 연구 영역을 설정하고, Grib 형식의 입력 자료인 기상장 자료를 모델에서 사용할 수 있는 형식으로 변형시키기 위한 과정이 포함된다. 그리고 초기자료와 경계 자료를 수평 격자 해상도에 맞게 내삽하는 과정을

수행한다. WRF 적분 과정에서는 모델의 연직 격자 값을 내삽 시킨 후 적분을 실시한다. 본 연구의 지역 기후 모델의 적분 영역은 민감도 실험을 통해 배경장의 특징을 반영하도록 45 km (220×120) 수평해상도로 설정하였으며, Fig. 1 에서 적분 영역과 지형 고도를 나타내었다. 연직으로 28개 층의 sigma level을 가지고 대기 꼭대기 층은 50 hPa로 설정하였다. 모델의 중심 위·경도는 적도(0도), 125도이며 적분 간격은 180초로 적분을 수행하였다. 수치모의에서 사용된 물리 모수화 방안은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 적운 모수화 방안으로는 적분 영역에 대한 convective scheme 민감도 실험을 수행하여 Simplified Arakawa-Schubert scheme(Pan and Wu, 1995)을 채택하였다. 대기 경계층에 관한 모수화 방안으로는 국지 규모의 수치모의에 적합한 Yonsei University scheme(Hong et al., 2006)을 사용하였다. 미세 물리 과정은 WSM(WRF Single_Moment) 3-class simple ice scheme(Hong et al., 2004)을 사용하였고, 지표모형은 4개 층의 토양 온도를 사용하는 Noah LSM scheme(Chen and Dudhia, 2001)을 적용하였다. 그리고 장파복사에는 RRTM(Rapid Radiative Transfer Model) long-wave scheme(Mlawer et al., 1997), 단파복사에는 Dudhia short-wave scheme(Dudhia, 1989)을 사용하였다. 이와 같은 실험 설계를 바탕으로 Indonesian Maritime Continent 지역을 대상으로 과거 20년(1989~2008) 여름철(6~8월)에 대해 APCC/CCSM3 6시간 예측 자료를 초기입력·경계 자료로 이용하여 실험을 실시하였다. 매 연도의 실험은 비연속적으로 수행하였고, spin up time은 매번 120시간으로 설정하였다.

2.3. 관측자료

APCC/CCSM3 및 WRF의 기후재현성을 비교·분석하기 위해 사용한 관측자료는 장기 기후 변화를 연구하기 위해 만들어진 NASA의 재분석 자료인 MERRA(Modern Era-Retrospective Analysis for Research and Applications; Rienecker et al., 2011)이다. 수평해상도가 $0.5^\circ \times 0.66^\circ$ 인 고해상도 재분석 자료인 MERRA는 GEOS-5(Goddard Earth Observing System Model, Version 5)의 관측 자료를 통해 자료동화(Data assimilation system)를 실시하였고, 시·공간적인 일관성을 가지는 자료를 생산하기 위한 모델 시스템을 최적화 시켰다. 물 순환 체제(Hydrological cycle)에 대한 자료동화 부분을

특화시켜 이전 저해상도의 장기 재분석 자료의 강수와 경년 변동성에서 나타나던 불확실성을 감소시킨 장점을 가지고 있다. 지역기후모델 결과와의 비교를 위해 선형 보간법(Linear Interpolation)을 이용하여 0.5° 로 설정하여 사용하였다. 연직 대기 자료의 검증을 위해서는 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 의 해상도를 가지는 NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis(R-2; Kanamitsu et al, 2002) 재분석자료의 바람성분과 상대습도를 사용하였다. 연구지역의 누적 강수량을 검증하기 위해 열대와 아열대 강수량을 모니터 하는 고해상도($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 위성자료 TRMM 3B42(Tropical Rainfall Measuring Mission, Simpson et al, 1996)을 이용하였다.

2.4. 연구 지역

인도네시아와 필리핀, 파푸아 뉴기니 섬 등을 포함하고, 동남아시아와 유사한 기상학적 특징을 가지는 지역을 maritime continent라고 표현한다(Richard and Julia, 2003). 이 지역은 많은 섬들과 반도, 얇은 해수면으로 이루어지며, 복잡한 지형과 해양의 영향, 그리고 강한 대류불안정으로 발생하는 열과 수증기의 수송 및 재분배 과정 등으로 인해 수치모델의 기후 모사 성능에 대한 불확실성이 전통적으로 큰 지역이다(Richard and Julia, 2003). 또한, 인도양과 태평양 사이에 위치하는 지리적 특징과 열대 warm pool의 영향으로 전 지구 순환 시스템의 중요한 에너지의 근원이 된다. 최근 발표된 IPCC 4차 보고서는 인도네시아를 포함하는 동남아시아 지역을 기후 변화에 취약한 지역으로 밝힌 바 있으나, 이 지역의 기후예측에 대한 선행연구가 미진한 실정이다. 본 연구에서는 Indonesian Maritime Continent(이하 IMC)을 연구 대상 지역으로 선정하였다.

이 지역의 강수 패턴은 Hadley Walker 순환과 monsoon, ENSO의 영향을 받는다(Lau and Nath, 2000). 동남아시아의 기후변동성과 열대 태평양 해수면 온도 변화의 밀접한 관련성은 대순환 모형의 예측자료나 재분석 자료 등을 통해 연구되었으나(Aldrian and Susanto, 2003), 보다 상세한 고해상도 지역기후예측 연구가 요구된다. 인도네시아 기상청(Indonesian Bureau of Meteorology, Climatology, and Geophysics, BMKG)의 선행 연구에서는 강수 패턴에 따라 IMC 지역을 다음과 같이 세 세부 지역으로 분류 하였다(Fig. 1). Region A($1^\circ - 10^\circ\text{S}$, $102^\circ - 120^\circ\text{E}$)는 수마트라 섬의 남부와 자바 섬, 칼리만탄 섬의 남부, 그리고 술라웨시 섬의 서쪽 일부 지역을 포함한다. 겨울철에는 습한 북서 계절풍의

영향을 받아 최대 강수량이 나타나고, 여름철에는 건조한 남동 계절풍의 영향으로 연간 강수량 중 가장 적은 강수가 발생한다. 이 지역은 계절적 특성이 뚜렷하게 나타나 monsoon pattern으로 분류된다(Aldrian and Susanto, 2003). Region B(0° – 7° N, 95° – 120° E)는 수마트라 섬의 북부 지역과 칼리만탄 섬의 북부 지역을 포함한다. 적도의 특성을 가지는 이 지역의 강수는 열대 수렴대(Inter-tropical convergence zone, ITCZ)의 남-북 방향의 이동과 관련되어 4, 11월에 최대 강수량이 나타나며(Davidson et al., 1984), 연간 강수 주기가 Region A와 유사하여 equatorial pattern 또는 sub-monsoon pattern으로 분류된다. Region C(5° S– 2° N, 121° – 133° E)는 술라웨시 섬 일부와 말루쿠 섬을 포함하는 지역으로 지형과 해안선이 매우 복잡하다. 태평양과 인도양의 연결 지점인 술라웨시 섬 동쪽의 말루쿠 해의 해수면 온도가 따뜻해지는 여름철에 대류 현상이 활발해 지면서 6, 7월의 강수량이 최대로 나타나고 차가운 해수면 온도로 상승 기류가 억제되는 11월부터 2월까지 최저 강수량이 나타난다(Gordon et al., 1996). 이 지역의 해수면 온도의 영향을 크게 받고, 연간 강수 변화가 다른 두 지역과 상이하여 local pattern으로 분류된다. 이러한 지역 분류를 상세 예측 결과로 ENSO 영향을 분석·검증 하는 데 사용하고자 한다.

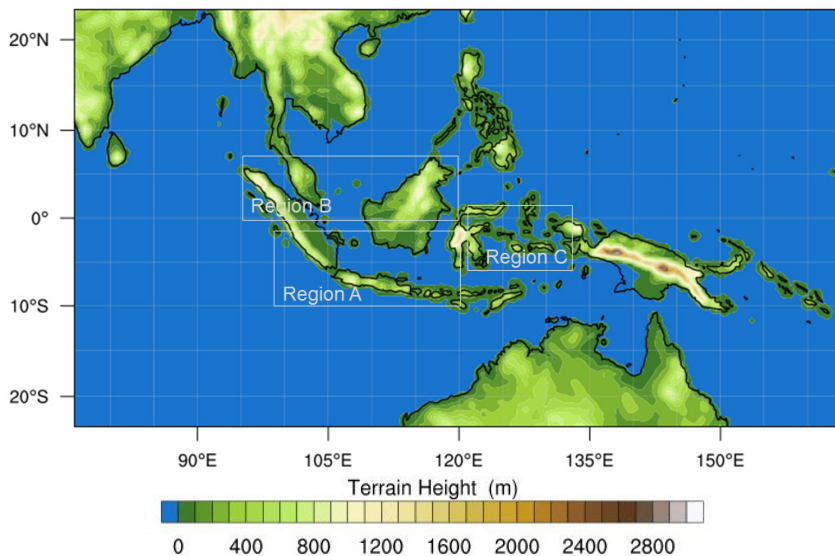


Figure 1 Domain and topography for model simulation. Here, three rectangles indicate subregions for the detailed analysis.

**Table 1** The configuration of regional climate modeling(WRF)

Contents	WRF model
Horizontal grid dimension	220(East-west) × 120(North-south)
Horizontal resolution	45 km
Center of model	the equator, 125°E
Vertical layers/Top	28 layers / 50 hPa
Physical options	WRF Single-Moment 3-class scheme
	RRTM long-wave scheme
	Dudhia short-wave
	Yonsei University scheme
	Simplified Arakawa-Schubert scheme
Initial Data	APCC/CCSM3 6hourly data
Study Period	1989 JJA ~ 2008 JJA

3. 연구결과 및 분석

3.1 지역기후모델 예측성 평가

3.1.1 계절 평균장

3.1.1.1 기온

Fig. 2는 WRF의 초기 및 경계조건으로 사용된 APCC/CCSM3와 지역기후모델 WRF의 결과, 그리고 검증용 MERRA 관측자료의 여름철 평균 지표 기온 분포와 관측과의 차이를 나타내었다. MERRA는 인도네시아의 섬 중 가장 서쪽에 위치하는 수마트라 섬의 산악 지대와 말레이시아와의 국경 지대에 있는 보르네오 섬의 산악지대, 그리고 인도네시아 동쪽의 술라웨시 섬과 뉴기니 섬의 높은 지형을 가진 영역에서 낮은 기온 분포를 나타낸다(Fig. 2a). 그러나 저해상도의 APCC/CCSM3 결과는 고도에 따른 기온의 변화를 상세히 모의하지 못하는 것으로 나타났다(Fig. 2b). 특히 2000m 이상의 산악지형으로 이루어진 지역의 공간 분포 예측 능력이 상당히 낮은 것으로 확인되었다(Fig. 2d). APCC/CCSM3

을 초기·경계자료로 사용한 WRF 의 결과에서는 다소 cold bias가 나타났으나, 고도에 따른 기온 변화를 관측자료와 매우 유사하게 모사하였다(Figs. 2c and 2e). 보다 객관적인 성능 비교를 위해 공간 분포의 표준편차와 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error), 공간 상관 계수(Pattern correlation coefficient, PCC)를 Table 2에 제시하였다. MERRA의 표준편차는 전체영역(1.487)에 비해 육지(1.868)에서 더 큰 값을 보였으나 배경장에서는 전체영역(1.029)과 육지(1.113)의 차이가 크지 않았다. WRF의 표준편차는 전체 영역 1.571, 육지에서 2.133로 나타났다. 이는 역학적 상세화를 통한 결과에서 육지 영역의 지역 특징을 보다 상세하게 모의 할 수 있음을 의미한다. NRMSE값은 전체영역과 육지에서 WRF의 상세 예측 결과가 APCC/CCSM3 계절 예측 결과 보다 작게 나타났다. 그리고 WRF결과의 기온 공간상관성이 전체 영역에서 0.891, 육지 영역에서 0.906으로 나타나고 배경장으로 사용된 APCC/CCSM3의 관측값과의 공간상관계수는 전체 영역에서 0.785, 육지에서 0.738로 나타남으로써, 상세한 격자구조의 WRF 모사 결과가 상대적으로 저해상도의 APCC/CCSM3 보다 우월한 성능을 보였다.

IMC 지역의 육지에 대한 모사 능력을 검증하기 위해 모델 수행 기간(1989~2008) 동안의 공간 상관 계수의 시계열을 Fig. 3에 제시하였다. 공간 상관 계수는 배경장(0.73) 보다 역학적 상세화를 실시한 결과(0.90)에서 평균적으로 0.17 정도 공간 상관성이 향상되었다. 이는 *t*-test를 통해 90%, 95%, 99%의 신뢰구간 내에서 0.264, 0.312, 0.403의 값이 유의한 수준을 나타내므로 통계적으로 유의미한 결과로 확인되었다. 지표 기온의 경우 역학적 규모 축소를 통한 상세 기후 예측 성능이 향상된다고 사료된다.

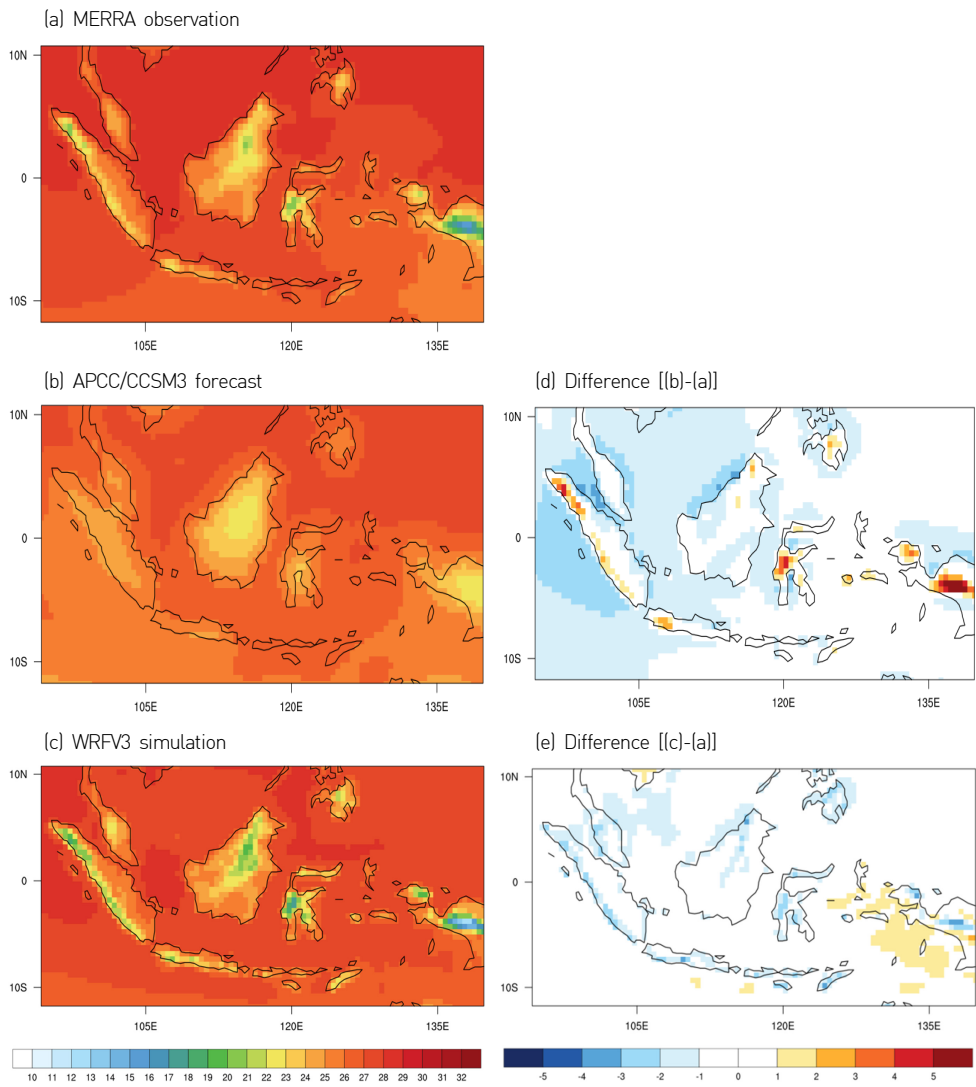


Figure 2 The 20-year summer mean surface temperature(°C) of the (a) MERRA observation, (b) APCC/CCSM3 forecast (c) the WRF simulation, (d) corresponding difference (APCC/CCSM3 minus MERRA), and (e) corresponding difference (WRF minus MERRA)

Table 2 Statistics of the standard deviation, normalized RMSE, and pattern correlation for a 20-year summer climatology of surface temperature

	MERRA		APCC/CCSM3		WRF	
	whole	land	whole	land	whole	land
STD	1.487	1.868	1.029	1.113	1.621	2.169
NRMSE			0.863	0.715	0.507	0.585
PCC			0.785	0.738	0.891	0.906

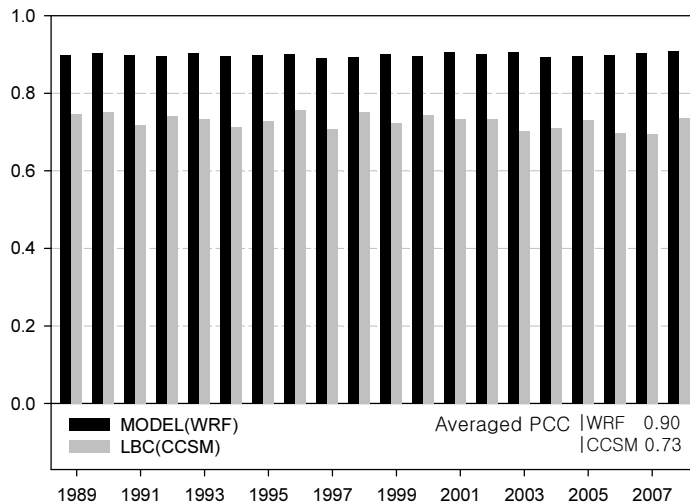


Figure 3 The pattern correlation coefficient (PCC) of the summer mean surface temperature from 1989-2008

3.1.1.2 강수량

MERRA 관측값과 APCC/CCSM3의 계절예측자료, 그리고 WRF결과의 강수 계절 평균장을 Fig. 4에 나타내었다. MERRA 관측자료는 수마트라 섬과 보르네오 섬, 술라웨시 섬과 뉴기니 섬의 산악 지형에서 많은 강수 분포를 나타내었다(Fig. 4a). 배경장으로 사용된 APCC/CCSM3 계절 예측 자료는 산악 지형의 강수를 대부분 모의하지 못하고 술라웨시 섬 북쪽의 술라웨시 해, 동쪽의 말루쿠 해와 말레이시아 동쪽 해양에서 최대 강수가 나타났 다(Fig. 4b). 지역기후모델 WRF의 결과에서는 MERRA에서 나타난 산악 지형의 강수가 유사하게 나타났고, 말루쿠 해 부근에 최대 강수량을 모사하였다(Fig. 4c). APCC/CCSM3 와 MERRA의 공간분포 차이를 살펴보면, 지형적 특징이 나타나는 육지에서는 대부분 dry

bias가 나타났고, 말루쿠 해와 칼리만탄 섬 부근의 해양에서 wet bias가 발생하였다(Fig. 4d). WRF와 관측과의 차이는 APCC/CCSM3과 관측과의 차이에서 보이는 패턴이 다소 남쪽으로 편향되어 나타난다(Fig. 4e). 육지영역에 대해서는 칼리만탄 섬 일부를 제외한 대부분 영역에서 dry bias가 나타난다. 말루쿠 해 부근의 강한 wet bias는 대순환 모형이 가지는 계통적 오차가 역학적 상세화 과정을 통하여 지역 기후에 반영되는 것으로 보여진다. 관측자료와 배경장, 지역기후모델 결과의 표준편차와 NRMSE, 공간상관계수를 Table 3에 제시하였다. 관측의 표준편차는 전체영역(3.205) 보다 육지(3.666)에서 큰 값이 나타났고, 역학적 상세화 결과도 전체역역에서 3.185, 육지에서 3.886로 유사하게 나타났다. 그러나 APCC/CCSM3의 표준편차는 전체영역(3.266)이 육지(2.669)보다 크게 나타나 육지의 특징을 모사하는 데 어려움이 있는 것으로 보여진다. NRMSE값은 APCC/CCSM3가 WRF보다 작은 값이 나타났는데, 이는 배경장의 bias가 역학적 상세화 과정을 통해 계통적 오차를 증폭시킨 것으로 보여진다. 공간상관계수는 전체영역에서는 WRF가 APCC/CCSM3 보다 더 작은 상관성을 보였으나, 육지에서는 WRF의 공간상관계수 값이 더 높게 나타났다. 지역기후모델은 배경장의 계통적 오차에 영향을 받으나 지역 특성 모사능력은 대순환 모델에 비해 좋은 성능을 보였다.

IMC 지역의 육지에 대한 모사 능력을 검증하기 위해 모델 수행 기간(1989~2008) 동안의 공간 상관 계수의 시계열을 Fig. 5에 제시하였다. 공간 상관 계수는 APCC/CCSM3(0.28) 보다 역학적 상세화를 실시한 WRF(0.39)에서 평균적으로 0.11 정도 공간 상관성이 향상되었다. 이는 지표 기온의 공간 상관성에 지표 기온에 비해 낮은 값이나, 통계적으로 95%의 신뢰구간 내에서 유의한 수준으로 확인되었다. 일 평균 강수량은 모델 내에서 해양의 계통적 오차가 크게 반영되었다. 그러나 육지를 중심으로 살펴본 결과, 역학적 규모 축소를 통한 상세 기후 예측 성능이 개선되는 것을 확인하였다.

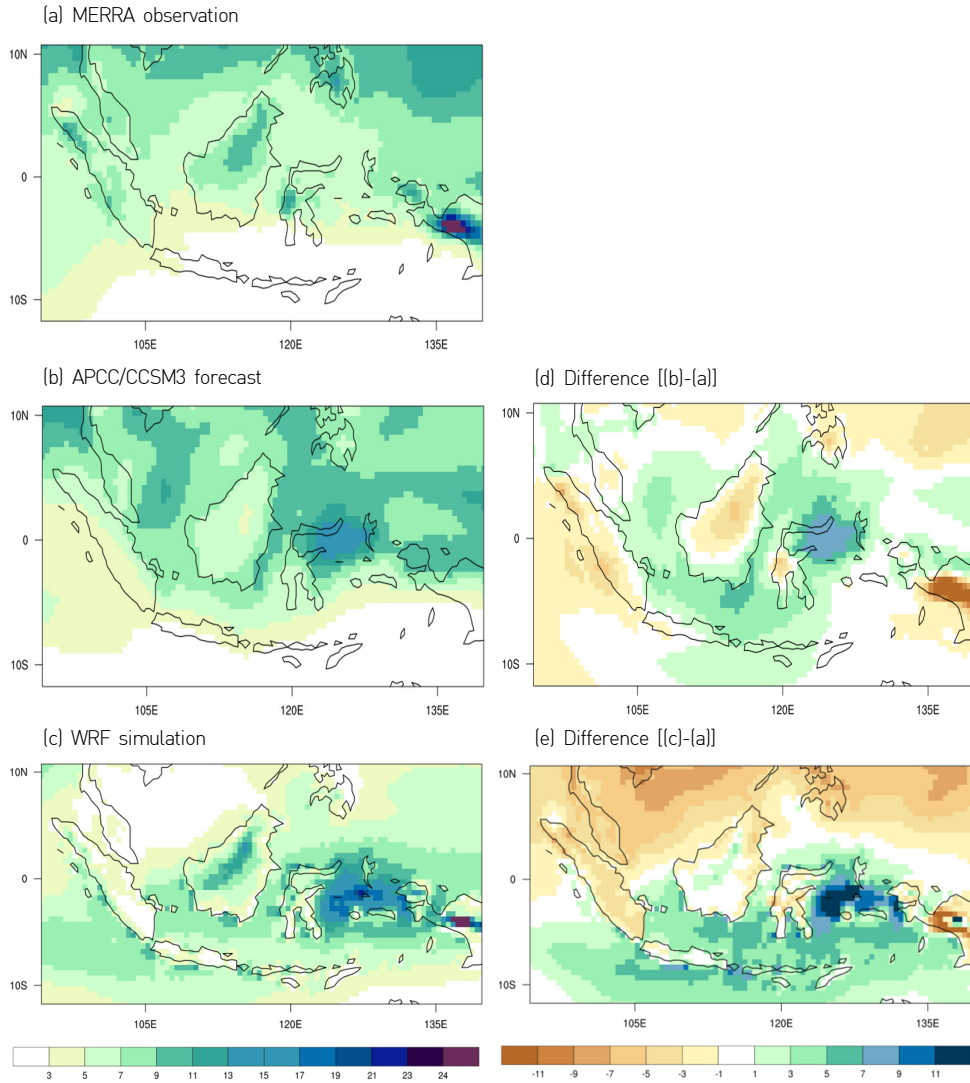


Figure 4 The 20-year summer mean daily precipitation (mm) of the (a) MERRA data, (b) APCC/CCSM3 forecast (c) the WRF simulation, (d) corresponding difference (APCC/CCSM3 minus MERRA), and (e) corresponding difference (WRF minus MERRA)



Table 3 Statistics of the standard deviation, normalized RMSE, and pattern correlation for a 20-year summer climatology of daily precipitation

	MERRA		APCC/CCSM3		WRF	
	whole	land	whole	land	whole	land
STD	3.205	3.666	3.266	2.669	3.185	3.886
NRMSE			0.890	1.075	1.266	1.302
PCC			0.625	0.266	0.215	0.510

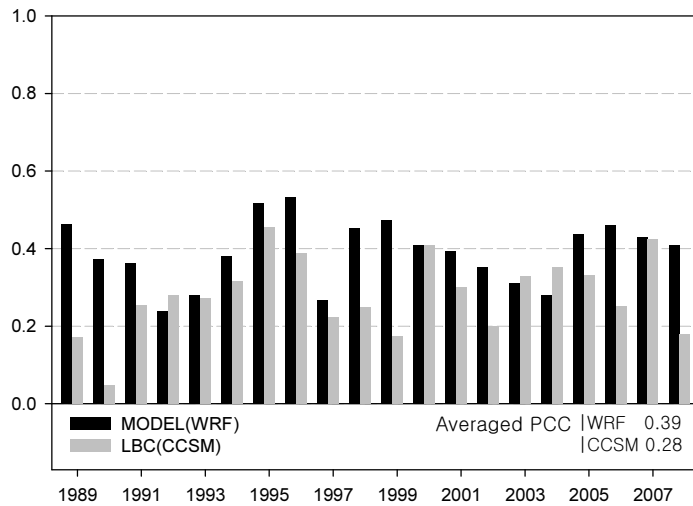


Figure 5 The pattern correlation coefficient(PCC) of the summer mean daily precipitation from 1989-2008

3.1.1.3 하층 대기

IMC 지역의 여름철 20년 평균된 850 hPa 바람장과 700 hPa 상대습도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 재분석자료(R2)는 수마트라 섬 지역에서 고기압성 흐름이 나타나고 말레이시아 지역으로 서풍류의 바람장이 나타났다(Fig. 6a). 자바섬과 인도양 부근으로 동풍이 우세하게 나타나고 술라웨시 섬과 뉴기니 섬으로 남동풍의 기류가 나타났다. APCC/CCSM3의 바람장 또한 재분석자료의 바람장과 유사한 850 hPa 바람장의 특징이 나타나 인도네시아 남쪽으로는 동풍이 우세하고, 칼리만탄 섬의 동쪽과 술라웨시 섬, 뉴기니 섬 부근으로 남동풍의 기류가 나타나고, 말레이시아 부근으로 서풍류의 바람이, 필리핀 부근으로 남서풍의 바람이 나타났다(Fig. 6b). WRF의 바람장은 배경장과 유사한 특징이 나타나고 인도양 부근

의 고기압성 흐름은 더 강하게, 뉴기니 섬의 남태평양 부근의 풍속은 다소 약하게 묘사되었다 (Fig. 6c). 700 hPa의 수증기의 경우 재분석자료와 APCC/CCSM3의 분포는 유사하지만 WRF의 경우 지형 고도의 영향이 반영되어 나타나고, 강수 분포에서 살펴본 바와 같이 남쪽으로 편향된 계통적 오차가 보여 졌다.

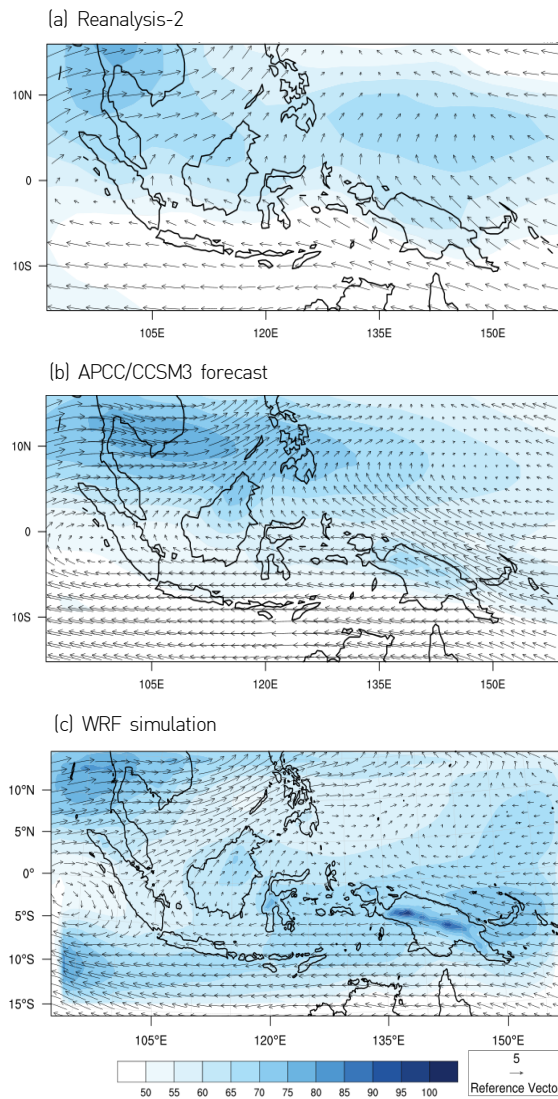


Figure 6 The 20-year summer mean 850 hPa wind vector(m/s), and 700 hPa relative humidity shading(%) from the (a) Reanalysis-2 data, (b) APCC/CCSM3 and (c) WRF

3.1.2 기후 변동성

3.1.2.1 EOF

예측자료와 관측자료의 시·공간적 변동성을 비교하기 위해 경험적 직교함수(Empirical orthogonal function, EOF) 분석을 일 평균 기온과 강수에 대하여 실시하였다. 또한 EOF mode에 상응하는 주성분 시계열(Principle Component time series)을 함께 나타내었다. 관측 자료인 MERRA의 여름철 20년간의 기온에서 첫 번째 두 번째 모드는 전체 분산의 57.4%와 14.5%를 각각 설명한다(Fig. 7a). 첫 번째 모드는 전체영역에서 음의 값이 나타나고, 자바 섬 인근의 인도양에서 강한 음의 값을 가진다. 두 번째 모드에서는 인도네시아 섬 전역에서 양의 값, 남위 2°S 아래에는 인도양에서 음의 값이 dipole 패턴(북-남의 양-음 패턴)이 나타난다. APCC/CCSM3는 첫 번째 모드에서 49.1%의 변동성을 설명하며 전체영역에서 음의 값을 보이고 있으며, 특히 수마트라 섬 인근의 인도양에서 강한 음의 값을 가진다(Fig. 7b). 총 분산의 12.8%를 설명하는 두 번째 모드의 경우 북동-남서의 음-양 패턴이 약하게 나타났다. WRF의 경우, 전체 분산의 50.7%를 설명하는 첫 번째 모드가 전체 영역에서 음의 값을 보이며, 12.9%를 설명하는 두 번째 모드는 MERRA의 북-남의 양-음 패턴과 유사하게 나타났다(Fig. 7c). 주성분 시계열 분석 결과, 첫 번째 모드의 MERRA-APCC/CCSM3, MERRA-WRF의 상관계수는 각각 0.48, 0.48로 나타났고, 두 번째 모드에서는 0.42, 0.04로 나타났다. APCC/CCSM3-WRF의 첫 번째 모드의 상관계수는 0.68로 나타났다. EOF 분석 결과 WRF 지표 기온은 배경장의 영향을 받으나 주요 모드의 signal은 약하게 모사하는 것으로 나타난다.

Fig. 8은 MERRA와 APCC/CCSM3, WRF 결과들로 부터 유도된 일 평균 강수량을 이용한 EOF분석 결과를 나타낸 것으로 지표 기온에 비해 signal이 강하게 나타났다. MERRA 여름철 평균 강수량에서 첫 번째, 두 번째 모드는 각각 47.3%, 14.5%를 설명한다(Fig. 8a). 첫 번째 모드는 적도에 걸쳐진 보르네오 섬, 술라웨시 섬, 뉴기니 섬을 잇는 동서 방향의 넓은 지역에 강한 양의 값이 나타난다. 두 번째 모드는 남위 10도 부근의 수마트라 섬 인근 인도양에 강한 양의 값, 셀레베스 해에서 음의 값이 나타나는 동북-남서의 음-양 패턴이 나타난다. APCC/CCSM3의 첫 번째 모드는 전체 분산의 33.6%를 설명하고 남위 5도 부근의 동서 방향의 넓은 지역에 강한 양의 값을 가지며, 이는 관측 자료와 비교했을 때 다소 남쪽으로 치우친 패턴이다(Fig. 8b). 전체 분산의 21.2%를 설명하는 두 번째

모드의 경우 적도 부근의 동서 방향으로 양의 값이 나타나 남-북으로 음-양-음의 공간분포가 나타났다. WRF의 경우 첫 번째, 두 번째 모드에서 각각 전체 분산의 39.6%, 19.9%를 설명한다(Fig. 8c). WRF 결과에서는 배경장으로 사용된 APCC/CCSM3의 첫 번째 모드보다 남쪽으로 치우친 남위 7도 지역에서 동서로 뺀 양의 패턴이 강하게 나타났다. 그리고 수마트라 섬 부근의 인도양과 칼리만탄 섬의 서쪽 말레이시아 부근, 셀레베스 해 부근으로 음의 값이 나타났다. 두 번째 모드에서는 셀레베스 해에서 강한 음의 값, 인도양에서 양의 값이 나타나 MERRA의 두 번째 모드와 유사한 북동-남서의 음-양의 패턴이 나타났다. 주성분 시계열 분석 결과 첫 번째 모드의 MERRA-APCC/CCSM3, MERRA-WRF의 상관계수는 각각 0.45, 0.39로 나타났고, 두 번째 모드에서는 -0.20, 0.35로 나타났다. 강수의 계절 평균장 공간 분포에서 배경장의 bias가 역학적 상세화를 통해 편향되어 나타났는데, 기후 변동성의 signal 또한 유사한 영향을 받는 것으로 사료된다.

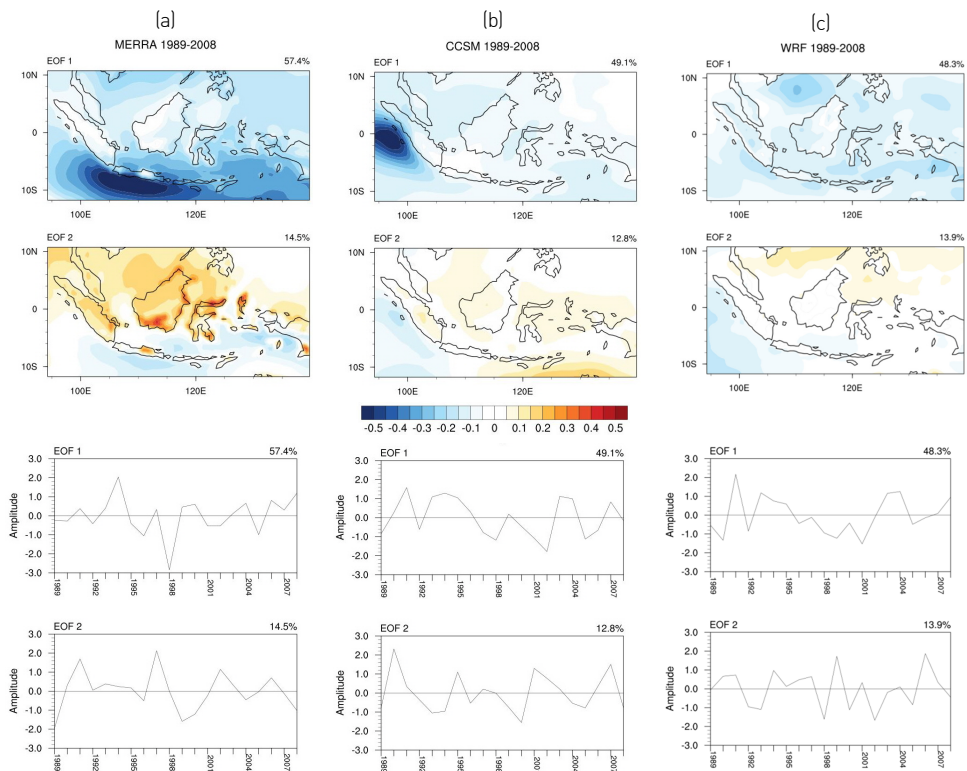


Figure 7 The EOF modes(1st mode : first low, 2nd mode : second low) and principal component (PC) time series of surface temperature from (a) MERRA observation, (b) APCC/CCSM3 forecast and (c) WRF simulation

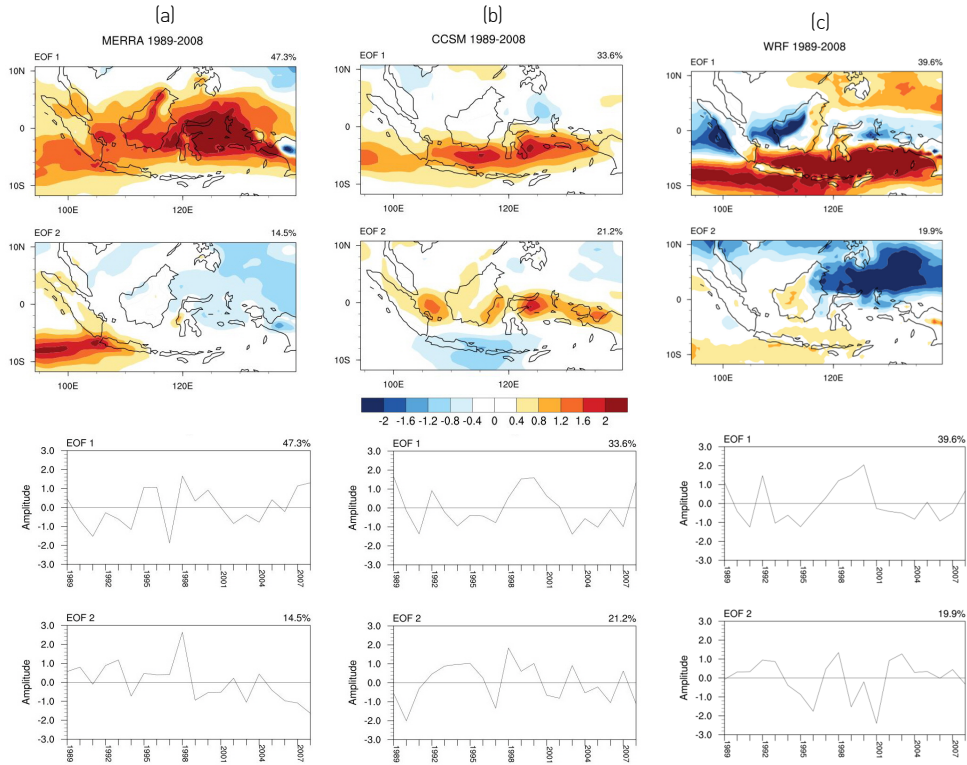


Figure 8 The EOF modes(1st mode : first low, 2nd mode : second low) and principal component (PC) time series of daily precipitation from (a) MERRA observation, (b) APCC/CCSM3 forecast and (c) WRF simulation

3.1.2.2 아노말리 분석

관측자료 MERRA와 지역기후모델의 배경장으로 사용된 APCC/CCSM3의 계절예측자료, 역학적 상세화를 통한 WRF결과의 경년 변동성을 비교하기 위해 Fig 9에 20년간의 여름철 지표 기온과 일평균 강수의 아노말리 시계열을 나타내었다. WRF의 지표 기온의 아노말리 변화는 배경장인 APCC/CCSM3의 변동성에 의존적인 것으로 나타났으며(상관계수 0.73), 관측 자료와의 상관관계는 APCC/CCSM3와 WRF에서 각각 0.553, 0.407으로 나타났다(Fig. 9a). MERRA와 APCC/CCSM3, WRF의 표준편차는 각각 0.213, 0.106, 0.108로 나타나 APCC/CCSM3와 WRF의 변동성이 관측에 비해 작게 나타났다. 지표 기온의 경우 여름철 기후의 공간적인 상관성은 APCC/CCSM3에 비해 WRF의 모사능력이 높게 나타났으나, 아노말리 분석과 EOF 분석을 통한 기후 변동성의 예측 능력은 상대적으로

낮게 확인되었다. 지역기후모델의 결과는 초기·경계 조건에 절대적인 영향을 받게 되는데 배경장이 포함하는 계통적 오차와 모델 자체의 불확실성으로 인해 경년 변동성의 예측 성능이 저하 된 것으로 사료된다. 강수량의 경년 변동성의 경우 MERRA와 APCC/CCSM3, WRF의 표준편차가 각각 0.826, 0.342, 0727로 나타나 APCC/CCSM3 계절예측자료의 변동성이 가장 작게 나타났다. 이는 상대적으로 저해상도를 가지는 전구모델의 보편적 특징으로 보여 진다. 관측자료인 MERRA의 아노말리와 비교한 상관관계수 값은 APCC/CCSM3이 0.506, WRF가 0.519로 역학적 상세화를 통한 모델 결과의 성능이 더 높은 것으로 확인되었다(Fig. 9b).

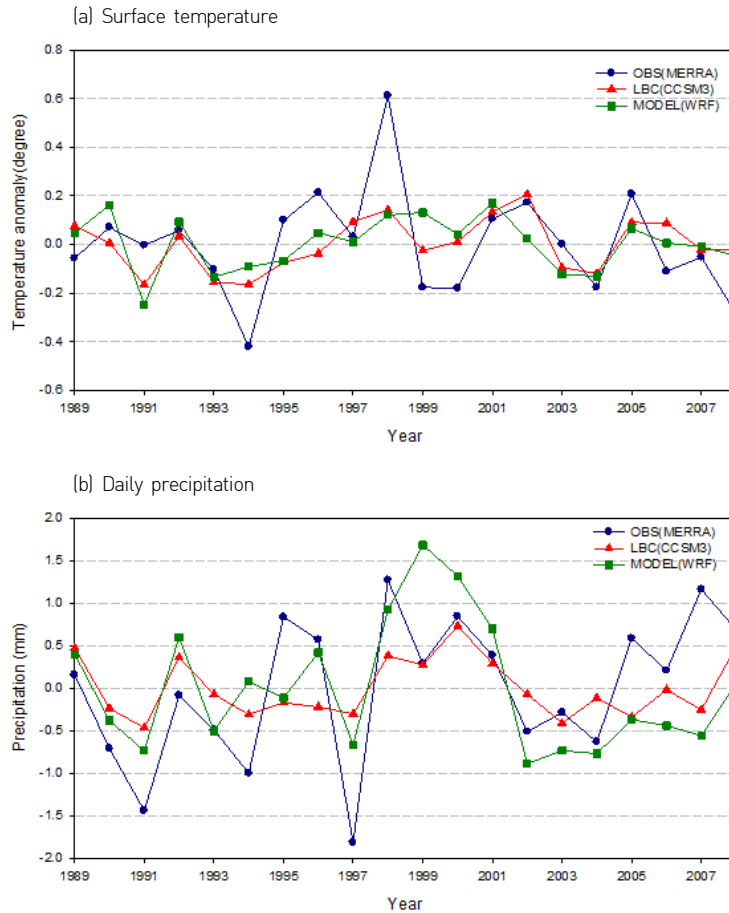


Figure 9 The interannual variability of summer mean (a) surface temperature and (b) daily precipitation from 1989-2008



3.2 여름철 maritime continent 지역의 ENSO 영향 분석

역학적 규모 축소 실험을 통해 상세 기후 자료를 생산하고 MERRA 관측자료와 APCC/CCSM3 계절 예측 자료와 비교·검증하였다. 육지에 대해 통계적으로 유의한 결과를 확인하였고, 앞선 결과를 바탕으로 제 2.4장 연구 지역 설명에서 분류한 IMC 세 세부 지역의 ENSO 영향에 따른 강수 특성을 분석하고자 한다.

3.2.1 Niño 3.4 region SST anomalies

ENSO 기간 분류는 NOAA의 기후 예측 센터에서 제공하는 ONI(Oceanic Nino Index) 지표를 이용하였다. ONI에 따라 Niño 3.4 지역 해수면온도의 아노말리가 평년에 비해 0.5 이상이면 엘니뇨, -0.5 이하이면 라니냐로 분류하고 나머지 해를 평년으로 분류하였다. 지역기후모델의 실험기간인 1989-2008년간의 Niño 3.4 region(5°S-5°N, 120°-170°W)의 SST 아노말리를 Fig. 10에 나타내었다. Fig 10.에 나타낸 해수면 온도는 Fig. 9(b)의 강수 아노말리의 변동성과 비교해보면 흥미로운 점이 발견된다. Niño 3.4 region SST 아노말리는 강수의 관측자료 MERRA와 지역기후모델 배경장인 APCC/CCSM3, 그리고 지역기후모델 WRF 과 각각 -0.85, -0.59, -0.74의 상관계수 값을 가진다. 계절예측자료의 결과보다 역학적 규모축소를 실시한 결과에서 더 높은 상관관계를 확인할 수 있다. 이러한 상관계수 값은 IMC 지역의 강수와 ENSO의 관련성을 나타낸다고 사료되며, 이는 Hendon(2003)의 연구에서 IMC 지역의 강수와 태평양의 SST의 관련성의 동일한 결과이다. Table 5는 Niño 3.4 index에 따라 실험기간을 분류한 것으로 지역적 강수 특징을 살펴보기 위해 분류된 각 연도를 평균하여 사용하였다.

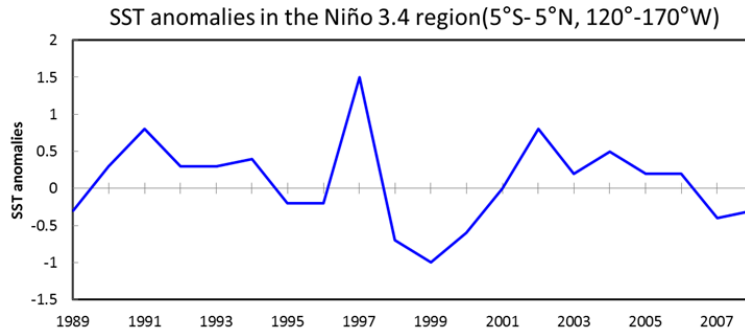


Figure 10 The sea surface temperature anomalies in Niño 3.4 region from 1989 - 2008

Table 4 The classification of ENSO period based on SST anomalies in Niño 3.4 region

Classification	Years
El Nino	1991 1997 2002 2004
La Nina	1998 1999 2000
Normal	1989 1990 1992 1993 1994 1995 1996 2001 2003 2005 2006 2007 2008

3.2.2 지역적 강수 특징

Fig. 11은 IMC 지역 중 육지에서의 관측자료 MERRA와 역학적 상세화 실험의 강수량 아노말리 시계열을 나타내었다. 20년간 수행된 WRF 결과는 MERRA 관측과 비교했을 때 변동성을 작게 모사하나, 99%의 신뢰구간 내에서 유의한 수준으로 나타났다(상관계수 0.52). WRF 강수결과의 경년 변동성은 MERRA 관측과 유의한 수준으로 확인되었다. 그러나 복잡한 지형적 특성을 가지는 IMC지역의 강수 특징을 비교하기 위해 보다 상세한 관측자료와의 비교·검증이 필요하다고 판단되어, 2.5°×2.5° 수평 해상도를 가지는 TRMM 3B42 자료를 사용하여 역학적 규모 축소결과와 비교하려고 한다. 1997년 11월에 발사된 TRMM 위성자료는 1997년 12부터 자료가 생산되어, 1998년~2008년 까지 여름철 ENSO을 분류하여 평균한 누적강수를 사용하였다.

제 2.4장에서 언급되었듯이 IMC 지역은 강수 특징에 따라 Region A(1°-10°S, 102°-120°E)는 monsoon pattern, Region B(0°-7°N, 95°-120°E) equatorial 또는 sub-monsoon pattern, Region C(5°S-2°N, 121°-133°E)는 local pattern으로 분류 된

다. WRF를 통한 역학적 상세화 실험 결과와 TRMM의 관측자료에서 지역적 특징이 나타나는 지 살펴보고자 ENSO 기간에 따른 지역별 누적 강수량과 그 차이를 Fig. 12와 Table 5에 나타내었다. TRMM 자료에서는 IMC 전 영역과 세부 지역에서 공통적으로 엘리뇨 기간의 강수량이 가장 적었고, 라니냐 기간 동안 강수량이 가장 많았다(Fig. 12a). 이는 선행 연구(Lau and Nath, 2000)와 동일한 패턴이며, 엘리뇨(라니냐) 발생시 서태평양의 해수면 온도가 평년보다 낮아져서(높아져서) convection 활동이 줄어들면서(활발해지고) 강수량의 감소(증가)를 초래하는 것으로 분석할 수 있다. ENSO 기간에 따라 총강수량의 편차는 Region C에서 가장 크게 나타났고, Region B에서 가장 적었다. WRF의 결과는 Region B를 제외한 영역에서 라니냐 기간 동안 강수량이 많고 엘리뇨 기간 동안 강수량이 적은 패턴이 TRMM과 동일하게 나타났다(Fig. 12b). WRF 결과는 Region A와 Region C의 강수를 전반적으로 과대모의 하였다(Fig. 12c). Region B에서는 ENSO의 강수 특징이 나타나지 않았는데, 이는 강수량이 지형에 의존적인 WRF의 특징으로 인해 산악지형에 집중되는 칼리만탄 섬의 강수가 ENSO의 조건보다 우세하게 작용한 결과로 사료된다(Soares et al., 2012). IMC 전체 누적강수량의 ENSO에 따른 차이는 엘리뇨 사례에서 WRF가 과대모사하는 것으로 나타나는 데, 이는 TRMM 자료가 Region C의 엘리뇨 기간 강수량을 매우 작게 관측한 것과 관련이 있다.

ENSO 기간별 지역기후모델 WRF의 지역 강수량 예측 성능을 관측자료 MERRA와 TRMM으로 비교하기 위해 누적 강수량의 변동성을 엘리뇨와 라니냐 기간으로 나누어 Fig. 13에 제시하였다. ENSO 기간별 지역 평균 누적 강수량과 평년과의 편차는 Table 6에 제시하였다. MERRA와 TRMM의 두 관측자료는 전체 영역에서 동일하게 엘리뇨 기간의 평균 강수량과 평년의 평균 강수량의 편차는 음의 값, 라니냐 기간과 평년의 강수량의 편차는 양의 값이 나타났다. ENSO 기간별 편차는 Region C에서 가장 크게 나타났다. WRF의 결과는 Region B를 제외한 지역에서 유사한 패턴을 보였으나, 편차는 상대적으로 작게 나타났다. Region B는 지형적 특징으로 인한 강수가 ENSO의 강제력보다 모델 내에서 우세한 것으로 사료된다. WRF를 통한 역학적 규모 축소 실험의 결과는 계절 평균장과 아노말리 변동성에서 통계적으로 유의한 수준으로 검증이 되었으나, 배경장의 계통적 오차와 모델 자체의 특성으로 ENSO 기간별 세부 지역의 강수 특징을 관측과 동일한 수준으로 모사하는 데 어려움이 있는 것으로 보여 진다.

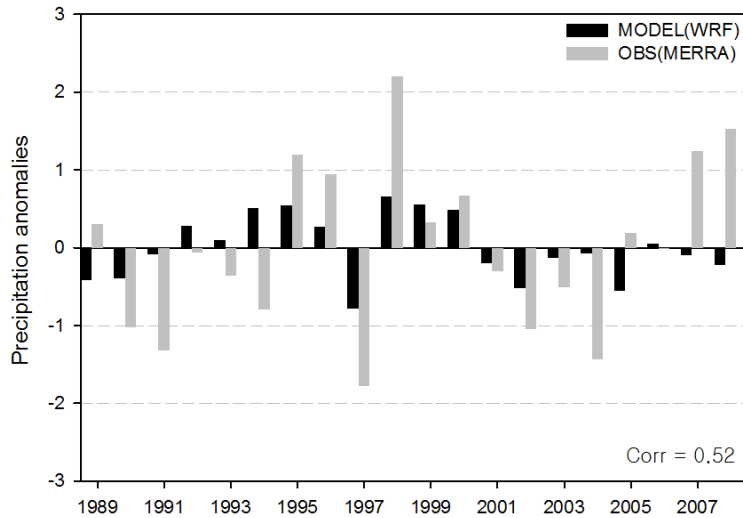


Figure 11 The anomalies of the summer mean precipitation for MERRA data and WRF results from 1989-2008 over IMC land

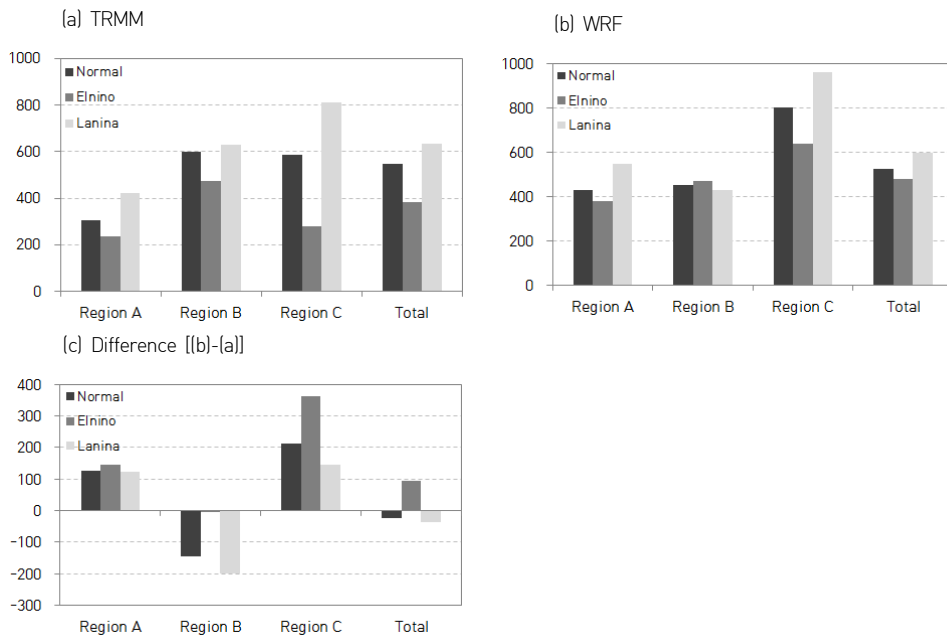


Figure 12 The cumulative precipitation according to the ENSO classification from the (a) TRMM observation, (b) WRF simulation (c) corresponding difference (WRF minus TRMM) over the total area and sub-regions are depicted in Fig.1



Table 5 The seasonal mean accumulated precipitation over total and sub_regions according to the ENSO classification

		Region A	Region B	Region C	Total
RCM(WRF)	Normal	429.11	453.06	800.62	522.59
	Elnino	380.68	469.90	639.82	477.12
	Lanina	546.89	429.15	957.93	595.96
OBS(TRMM)	Normal	302.91	597.20	587.39	545.09
	Elnino	236.71	472.31	277.32	383.92
	Lanina	423.61	627.49	812.36	632.00
Deviation (RCM-OBS)	Normal	126.20	-144.13	213.23	-22.50
	Elnino	143.97	-2.40	362.50	93.20
	Lanina	123.28	-198.33	145.57	-36.04

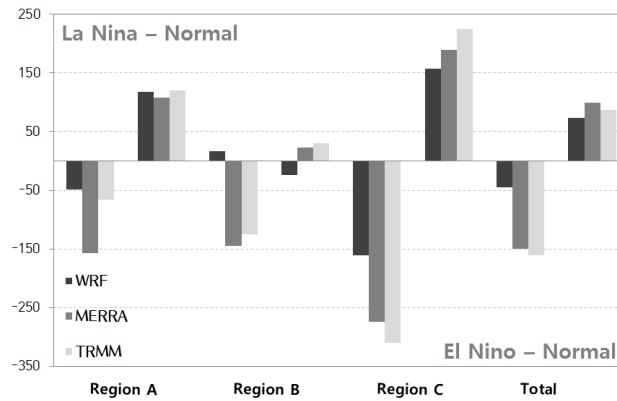


Figure 13 The difference of the accumulated precipitation associated with ENSO effect from the TRMM observation, MERRA observation and WRF simulation

Table 6 The difference of the accumulated precipitation associated with ENSO effect from the TRMM observation, MERRA observation and WRF simulation

		Region A	Region B	Region C	Total
El Nino -Normal	WRF	-48.42	16.8394	-160.801	-45.4722
	MERRA	-156.91	-144.53	-274.54	-149.83
	TRMM	-66.19	-124.89	-310.07	-161.17
La Nina -Normal	WRF	117.78	-23.9102	157.3113	73.373
	MERRA	107.90	22.29	189.18	99.16
	TRMM	120.70	30.29	224.98	86.91

3.2.3 연직 순환 특성 분석

제 3.2.1 장에서 ONI 지표를 사용하여 WRF 결과를 엘니뇨, 라니냐, 평년으로 분류하였고(Table 4). 제 3.2.2 장에서는 분류된 결과를 MERRA 재분석 자료와 TRMM 위성 관측자료를 이용하여 비교하였다. WRF 강수결과는 지역적으로 계통적 오차를 포함하고 있으나, 관측과 유사한 ENSO의 영향을 모사하였다. 본 장에서는 엘니뇨, 라니냐, 평년 사례에 대해 WRF모델이 모사하는 연직 순환 특성을 살펴보고자 한다.

Fig. 14는 남위 3도를 기준으로 연직 바람장과 상대습도를 나타낸 것이다. w-성분은 가시화시키기 위해 10^3 배 하였다. 엘니뇨 해는 평년에 비해 서태평양 상층의 동풍이 약하게 모사되고 평년 동안 130도 부근에서 상승 기류가 나타나는 데 엘니뇨 해에는 상대적으로 동쪽으로 치우쳐서 나타난다(Figs. 14a, 14c). 라니냐 해에는 서태평양 상층의 동풍이 강하게 모사되고, 그에 따라 평년에 비해 상승기류도 서쪽에서 나타난다(Figs. 14b, 14c). Region C(120° - 130° E)의 상대습도를 살펴보면 평년에 비해 80%의 상대습도를 나타내는 고도가 엘니뇨 발생시 약 0.6km 정도 낮게 나타난다. 라니냐 발생시 동일한 경도에서 80% 이상의 상대습도를 나타내는 고도가 평년보다 0.2km정도 높게 나타났다. 이는 엘니뇨(라니냐) 기간 동안 서태평양의 동풍이 약하게(강하게) 모사되어 Region C 지역의 상승기류의 영향이 평년에 비해 작아져서(강해져서) 강수량이 작게(많게) 모사되는 것으로 사료된다.

700 hPa의 수렴발산장(velocity potential)장을 Fig. 15에 제시하였다. 엘니뇨 기간 동안 Fig. 14(a)의 연직 바람장과 동일하게 서태평양의 동풍계열의 바람이 평년에 비해 다소 약하게 모의되어 평년에 비해 수렴이 약하게 나타나는 것을 볼 수 있고(Figs. 14a, 14c), 라니냐 기간 동안에는 서태평양의 동풍이 더욱 강하게 유입되어 IMC의 동쪽에 해당 하는 Region C의 수렴이 더 강하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. ENSO 기간으로 분류하여 살펴보았을 때 서태평양 부근에서 연직 바람장과 저층 대기 발산장의 차이가 나타났고, ENSO의 영향으로 인한 강수량의 차이가 Region C에서 가장 강하게 나타나는 이유를 살펴볼 수 있었다.

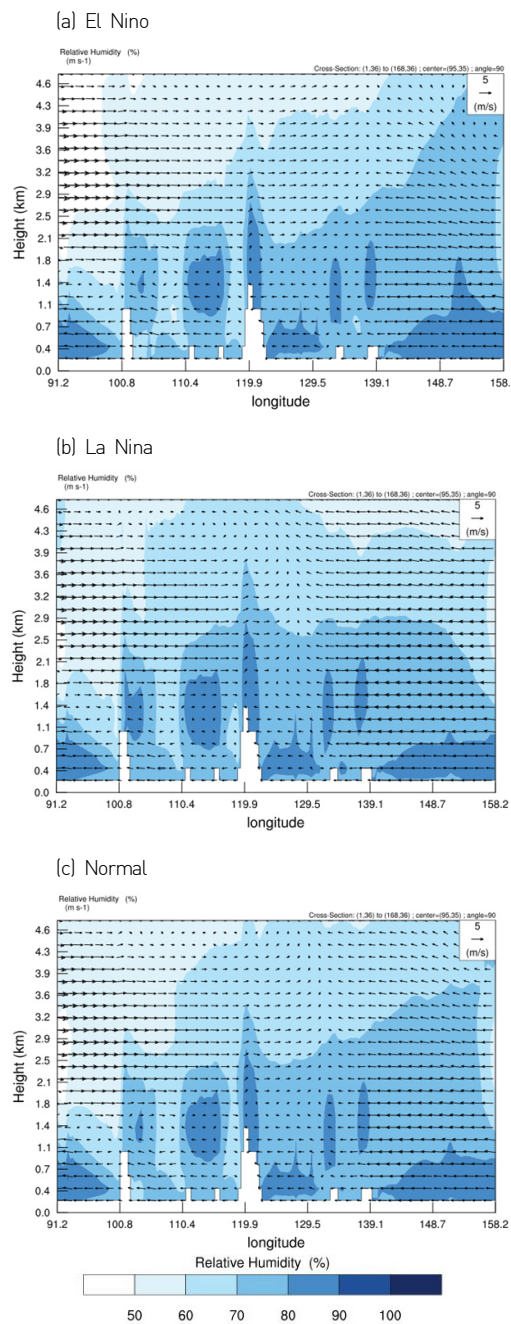


Figure 14 The vertical distribution of relative humidity and wind field according to 3°S line from the (a) El Nino, (b) La Nina and (c) Normal years

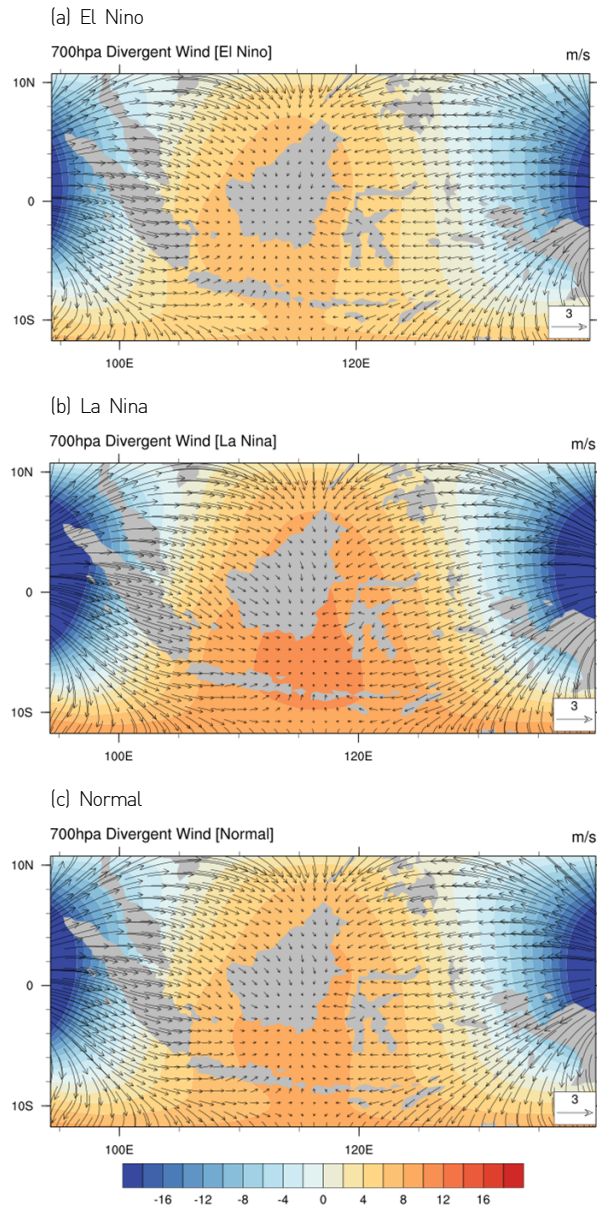


Figure 15 The 700 hPa divergence(velocity potential) fields from the (a) El Nino, (b) La Nina and (c) Normal years

4. 결론

본 연구에서는 Indonesian Maritime Continent 영역에 대하여 접합 대순환모델인 APCC/CCSM3 계절예측 자료를 대규모 강제력으로 하여 지역기후모델인 WRF을 이용하여 1989~2008년 동안 여름철에 대한 역학적 규모축소 실험을 수행하였다.

배경장으로 사용된 대순환 모형인 APCC/CCSM3의 계절예측 자료와 지역기후모델인 WRF의 지역예측자료를 고해상도의 재분석 자료인 MERRA와 계절 평균장, 기후 변동성을 비교·분석하고 통계적 검증을 통해 지역기후모델의 예측성능을 평가하였다.

APCC/CCSM3와 WRF의 예측자료를 MERRA의 관측자료와 비교해 본 결과 기온 계절 평균장의 분포는 역학적 규모축소를 통한 WRF의 결과가 APCC/CCSM3 보다 고도에 따른 기온의 변화를 상세히 모의하여 낮은 오차와 높은 공간상관성을 나타내었다. 육지를 대상으로 연도별 공간 상관 계수를 구한 결과 통계적으로 유의한 수준에서 WRF의 결과가 배경장보다 우월한 성능을 보였다. 일평균 강수량의 계절 평균장의 분포는 APCC/CCSM3의 계통적 오차가 WRF에 반영되었으나, 육지의 공간 상관성은 배경장 보다 높게 나타났다. 연도별 공간 상관 계수도 APCC/CCSM3 보다 WRF 결과의 모사성능이 높게 확인되었다. 850 hPa 바람장은 APCC/CCSM3와 WRF의 공간 분포가 관측과 유사한 패턴을 보였고, 700 hPa 상대습도 분포에서는 WRF가 지형 고도의 영향을 잘 반영하나 계통적 오차를 나타내었다.

EOF 주성분모드 분석에서는 대순환 접합 모델인 APCC/CCSM3의 기온 결과가 관측과 유사한 공간 패턴과 주성분 요소의 시간 변동성을 보였고, WRF의 기온 결과는 배경장의 특징을 모사하지만 signal을 작게 모사하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 9(a)에서와 나타난 것과 같이 규모 축소된 기온의 변동성의 작은 것과 관련이 있다. 아노말리의 경년변동성 비교에서 역학적 규모축소 결과인 WRF의 기온 기후변동성이 배경장인 APCC/CCSM3의 변동성에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 일평균 강수량의 EOF 분석의 경우, 배경장의 계통적 오차가 증폭되어 나타나는 것을 확인하였다. 아노말리 분석 결과에서는 WRF의 경년 변동성 예측력이 APCC/CCSM3 보다 관측과 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

여름철 IMC 지역의 ENSO 영향의 살펴보기 위해 Niño 3.4 지역의 여름철 해수면 온도

에 따라 엘리뇨, 라니냐, 평년으로 ENSO기간을 분류하였고, 지역은 앞서 제 2.4장에서 언급한 바와 같이 세 세부 지역으로 나누어 분석하였다. Region B를 제외한 모든 지역의 누적 강수량은 라니냐 기간 동안 가장 많았고, 엘리뇨 발생 시 가장 적었다. 이러한 편차는 관측 자료와 동일하게 Region C에서 가장 크게 나타났다. 지역기후모델의 누적강수량 결과는 관측자료 보다 전반적으로 과소모의 되는 것으로 나타났다. 그리고 Region B의 강수량은 배경장의 경계 입력값 보다 지형특징에 의존적인 WRF모델의 특징이 우세하게 나타났다. 엘리뇨, 라니냐, 평년의 연직 바람장, 상대습도, 하층대기 발산장을 살펴본 결과, 라니냐 기간 동안 서태평양의 동풍계열의 바람이 강하게 유입되면서 Region C의 수렴에 영향 미쳐 ENSO의 영향으로 인한 강수량의 차이가 Region C에서 가장 강하게 나타나는 이유를 살펴볼 수 있었다.

본 연구에서 APCC/CCSM3 계절예측 자료를 초기 및 경계자료로 사용한 WRF 역학적 규모 축소 실험 결과는 IMC 지역의 기온과 강수 계절 평균장을 통계적으로 유의한 수준에서 생산하였다. 그러나 역학적 상세화 과정을 통하여 배경장의 계통적 오차가 지역기후에 반영되는 단점과, 모델 자체의 불확실성의 문제점을 여전히 포함하고 있다. 앞으로 대순환 모형의 계절예측자료의 예측 성능이 향상되고 지역기후모델의 개선과 통계적 후처리 방법의 적용이 이루어진다면, APCC/CCSM3-WRF 로 구성된 역학적 규모축소 시스템의 계통적 오차를 보완하여 향상된 지역 기후 예측 자료를 생산 할 수 있을 것으로 기대된다.

**REFERENCES**

- Aldrian, E., Susanto, R. D., 2003: Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23, 1435–1452.
- Briegleb, B. P., C. M. Bitz, E. C. Hunke, W. H. Lipscomb, M. M. Holland, J. L. Schramm, and R. E. Moritz, 2004: Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, Version Three. Tech. Rep. NCAR/TN-463STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 78 pp.
- Bukovsky, Melissa S., David J. Karoly, 2011: A Regional Modeling Study of Climate Change Impacts on Warm-Season Precipitation in the Central United States. *J. Climate*, 24, 1985–2002.
- Bukovsky, M. S., and D. J. Karoly, 2009: Precipitation simulations using the WRF as a nested regional climate model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2152–2156.
- Chan, Steven C., Vasubandhu Misra, 2011: Dynamic Downscaling of the North American Monsoon with the NCEP–Scripps Regional Spectral Model from the NCEP CFS Global Model. *J. Climate*, 24, 653–673.
- Chen, F., Dudhia, J., 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review* 129, 569e585.
- Choi, J. Y., Song, C. G., Lee, J. B., Hong, S. S., Bang, C. H., 2011: Development of a dynamic downscaling method using a general circulation model (CCSM3) of the regional climate model (MM5). *climate change research*, 2(2), 79–91.
- Collins WD, Bitz CM, Blackmon ML, Bonan GB, Bretherton CS, Carton JA, Chang P, Doney SC, Hack JJ, Henderson TB, Kiehl JT, Large WG, McKenna DS, Santer BD, Smith RD, 2006, The community climate system model version 3 (CCSM3). *J Clim* 19(11), 2122–2143.
- Collins, W. D., and Coauthors, 2004: Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3). Tech. Rep. NCAR/TN-464STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 226 pp.
- Davidson N. E., McBride J. L., McAvaney B. J., 1984. Divergent circulations during the onset of the 1978–79 Australian monsoon. *Monthly Weather Review* 112: 1684–1696.
- Denis, B., R. Laprise, J. Côté, and D. Caya, 2002: Downscaling ability of one-way nested regional models: The big-brother experiment. *Climate Dyn.*, 18, 627–646.
- Dickinson, R. E., K. W. Oleson, G. Bonan, F. Hoffman, P. Thornton, M. Vertenstein, Z.-L. Yang, and X. Zeng, 2006: The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. *J. Climate*, 19, 2302–2324.
- Druyan, Leonard M., Matthew Fulakeza, Patrick Lonergan, 2002: Dynamic Downscaling of Seasonal Climate Predictions over Brazil. *J. Climate*, 15, 3411–3426.
- Dudhia, J., 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Science* 46, 3077e3107.

- Espinoza Villar, J. C., et al. (2009), Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador), *Int. J. Climatol.*, 29, 1574-1594.
- Feser, Frauke, Hans von Storch, 2008: A Dynamical Downscaling Case Study for Typhoons in Southeast Asia Using a Regional Climate Model. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 1806-1815.
- Ghan, Steven J., Timothy Shippert, Jared Fox, 2006: Physically Based Global Downscaling: Regional Evaluation. *J. Climate*, 19, 429-445.
- Gordon A, Fine R. 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian Oceans in the Indonesian seas. *Nature* 379: 146-149.
- Hack, James J., Julie M. Caron, G. Danabasoglu, Keith W. Oleson, Cecilia Bitz, John E. Truesdale, 2006: CCSM-CAM3 Climate Simulation Sensitivity to Changes in Horizontal Resolution. *J. Climate*, 19, 2267-2289.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S, H., 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103-120.
- Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006. A new vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* 134, 2318e2341
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis*, Working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996pp.(eds.).
- Hendon, Harry H., 2003: Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air-Sea Interaction. *J. Climate*, 16, 1775-1790.
- Kanamitsu, Masao, Wesley Ebisuzaki, Jack Woollen, Shi-Keng Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631-1643.
- Kiladis, G. N., and H. F. Diaz, 1989, Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation, *J. Clim.*, 2, 1069-1090,
- Kothawale, D. R., A. A. Munot, and K. K. Kumar, 2010, Surface air temperature variability over India during 1901-2007, and its association with ENSO, *Clim. Res.*, 42, 89-104, doi:10.3354/cr00857.
- Laprise, R., M. R. Varma, B. Denis, D. Caya, and I. Zawadzki, 2000, Predictability of a nested limited-area model. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 4149-4154
- Lau, N, G., and M, J, Nath, 2000: Impact of ENSO on the variability of the Asian-Australian monsoons as simulated in GCM experiments. *J. Climate*, 13, 4287-4308.
- Liang, Xin-Zhong, Li Li, Kenneth E. Kunkel, Mingfang Ting, Julian X. L. Wang, 2004: Regional Climate Model Simulation of U.S. Precipitation during 1982-2002. Part I: Annual Cycle. *J. Climate*, 17, 3510-3529.
- Luffman, James J., Andréa S. Taschetto, Matthew H. England, 2010, Global and Regional Climate Response to Late Twentieth-Century Warming over the Indian Ocean. *J. Climate*, 23, 1660-1674.
- Misra, Vasubandhu, Paul A. Dirmeyer, Ben P. Kirtman, 2003, Dynamic Downscaling of Seasonal Simulations over South America. *J. Climate*, 16, 103-117.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research* 102, 16663e16682.



- Nel, W. (2009), Rainfall trends in the KwaZulu-Natal Drakensberg region of South Africa during the twentieth century, *Int. J. Climatol.*, 29, 1634–1641, doi:10.1002/joc.1814.
- Philander, S. G., and A. Fedorov, 2003, Is El Niño sporadic or cyclic? *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 31, 579–594, doi:10.1146/annurev.earth.31.100901.141255.
- Qian, Jian-Hua, Lareef Zubair, 2010, The Effect of Grid Spacing and Domain Size on the Quality of Ensemble Regional Climate Downscaling over South Asia during the Northeasterly Monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 2780–2802.
- Redmond, K. T., and R. W. Koch, 1991, Surface climate and streamflow variability in the Western United States and their relationship to large-scale circulation indices, *Water Resour. Res.*, 27, 2381–2399, doi:10.1029/91WR00690.
- Richard, N., Julia S., 2003: The Maritime Continent and Its Role in the Global Climate: A GCM Study. *J. Climate*, 16, 834–848.
- Rienecker, Michele M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624–3648.
- Rosanne D’Arrigo and Rob Wilson, 2008: El Niño and Indian Ocean influences on Indonesian drought: implications for forecasting rainfall and crop productivity, *Int. J. Climatol*, 28, 611–616.
- Simpson, J., C. Kummerow, W. Tao, and R. Adler, 1996: On the tropical rainfall measuring mission (TRMM). *Meteorology and Atmospheric physics*, 60(1), 19–36.
- Smith, R. D., and P. R. Gent, 2002: Reference manual for the Parallel Ocean Program (POP), ocean component of the Community Climate System Model (CCSM2.0 and 3.0). Tech. Rep. LA-UR-02-2484, Los Alamos National Laboratory [Available online at <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm3.0/pop>]
- Soares P. M. M., Cardoso R. M, Miranda PMA, Medeiros J, Belo-Pereira M, Espírito-Santo F (2012), WRF High Resolution Dynamical Downscaling of ERA-Interim for Portugal, *Climate Dynamics*, 39:2497–2522
- S. Antic, R. Laprise, B. Deni, R. de Elia, 2004: Testing the downscaling ability of a one-way nested regional climate model in regions of complex topography, *Climate Dynamics*. 23, 473–493
- Xue, Yongkang, Ratko Vasic, Zavis Janjic, Fedor Mesinger, Kenneth E. Mitchell, 2007: Assessment of Dynamic Downscaling of the Continental U.S. Regional Climate Using the Eta/SSiB Regional Climate Model. *J. Climate*, 20, 4172–4193.
- Yu, E. T., Wang, H. J., and Sun J, Q, 2010: A Quick Report on a Dynamical Downscaling Simulation over China Using the Nested Model. *Atmospheric and oceanic science letters*, 3(6), 325–329



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



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