APCC
APEC CLIMATE CENTER

RESEARCH REPORT

APCC
APEC CLIMATE CENTER

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

CCSM3 모형에서의 두 가지 엘니뇨 예측에 대한 해양 초기조건의 영향

■■ 정혜인 | 기후분석팀

1. 서론 40

2. 연구 자료 및 방법 43
   2.1 사용된 접합 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 접합 모형들과의 비교 63

7. 요약 및 결론 67

APCC
RESEARCH REPORT 2013-01

CCSM3 모형에서의 두 가지 엘니뇨 예측에 대한 해양 초기조건의 영향

정혜인 | 기후분석팀

ABSTRACT

The impact of ocean initial conditions on the seasonal climate forecasts of two major types of El Niño, namely canonical (or cold tongue) and a new type of El Niño (El Niño Modoki, Warm pool El Niño, or Central-Pacific El Niño), using the APEC Climate Center (APCC) in-house coupled model is assessed for the boreal winter. We use the Community Climate System Model version 3 (CCSM3), developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR), as an APCC in-house coupled model. This APCC/CCSM3 coupled model is composed of the Community Atmospheric Model version 3 (CAM3), the Parallel Ocean Program (POP), with the Community Land Model (CLM) as the land surface model and the Community Sea Ice model version 4 (CSIM4) as the sea ice component.

In this study, two different ocean initialization approaches are involved in working toward improved forecast skill for the prediction of ENSO. The first method is to integrate the coupled GCM with Sea Surface Temperature (SST) nudging, which is an empirical method for data assimilation.The hindcast simulation with the initial conditions from the SST nudging method is hereafter referred to as the "*Nudging experiment*". The second method is to use three dimensional ocean assimilated reanalysis data from the Global Ocean Data Assimilation System (GODAS), which is assimilated with a 3-dimensional variational method using the GFDL MOM3 ocean circulation model. The hindcast simulation with the initial conditions from GODAS will hereafter be referred to as the "*GODAS experiment*". With these two different ocean initial conditions, we simulate a relatively long-term seasonal prediction for 7-months, starting from February, May, August and November of each year between 1983 and 2010 in the APCC/CCSM3 model. Each 7-month retrospective forecast consists of 5 ensemble members.

To more precisely understand the predictability of two types of El Niño according to two different ocean initial conditions, we examined the predicted performance of tropical Pacific SST anomalies. We used the Niño3 index (ENSO Modoki Index; EMI) to characterize the canonical El Niño (a new type of El Niño) event. Except for the August initial condition, the temporal correlation coefficients of the *GODAS experiment* for the Niño3 with a forecast lead-time perform better than those of the Nudging experiment. However, for the EMI, the *Nudging experiment* is slightly better than *GODAS experiment*. To assess the interannual predictability of the tropical Pacific SST anomalies, we calculated the pattern correlation coefficients over the tropical Pacific region in November. The results indicate that the skill of the *Nudging experiment* are higher than that of the *GODAS experiment* at each lead-time with different initial conditions. We also investigated the composite analysis for the canonical El Niño years (1986-87, 1997-98, and 2006-07) and the new types of El Niño years (1987-88, 1991-92, 1994-95, 2002-03, 2004-05, and 2009-10) within the study period. For the canonical El Niño years, the *GODAS experiment* represents the thermodynamic structure of the tropical ocean interior well. On the other hand, the intensities of SST, rainfall, and 500 hPa geopotential height anomalies in the *GODAS experiment* are relatively weak compared to the observational data or the *Nudging experiment*. For the new types of El Niño years, the *Nudging experiment* matches relatively well with the observed ocean dynamic features, demonstrating that the warm ocean temperature shifted westward. However, it is

noteworthy that both the *Nudging* and *GODAS* experiments do not separate the distinct climate features in terms of the new types of El Niño years.

In this study, we demonstrate that the reason for the low predictability for ENSO prediction in the *GODAS experiment* is the initial shock due to the differences in climatology between the GODAS data and the CCSM3 model. Further, we also indicate that there are limitations in ENSO prediction influenced by a systematic model bias in the APCC/CCSM3 model through the EOF analysis of SST anomalies over the tropical Pacific, based on three experiments, namely the *GODAS*, *Nudging* and Control experiments. Nevertheless, the APCC in-house coupled model prediction has some strength as far as the canonical and new types of El Niño predictions when compared to other coupled model predictions collected by APCC for multi-model ensemble (MME) prediction. The temporal correlation coefficients of Niño3 and EMI at a forecast lead-time in the *GODAS experiment* show considerably high values for up to a 6-month lead time. The APCC/CCSM3 indicates better performance in terms of composite SST anomalies associated with the two types of El Niño, in comparison to other coupled models. We conclude that the APCC/CCSM3 has considerable usefulness once long-term ENSO prediction is implemented as a part of the APCC MME prediction system.

1. 서론

전 지구적인 기후와 생태계 그리고 많은 국가들의 경제활동에 영향을 주는 많은 기후 요인 중 대표적인 현상이 El Niño Southern Oscillation (이하 ENSO)의 발생이다 (Latif 2001). ENSO는 기본적으로 적도 동 태평양에서 발생하는 현상으로 그 지역에서 이상 고온 또는 이상 저온 현상을 보이면서 2~10년 주기를 가지면서 1~2년간 지속 된다 (Barnett 1985; Philander 1985). 비록 ENSO의 발생은 열대 해역에 한정되어 있으나 ENSO와 관련된 열대 열원의 시·공간적 변동은 열대 지역 뿐 아니라 우리나라를 비롯한 전지구 기후계에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (박혜선 2003; Horel and Wallace 1981; Rasmusson and Wallace 1983). 최근 들어 고전적인 ENSO와 확연히 구별되는 변형된 ENSO에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 새로운 종류의 ENSO는 여러 가지 이름으로 불리는데 날짜변경선 엘니뇨 (Dateline El Niño) (Larkin and Harrison 2005b), 엘니뇨 모도키 (El Niño Modoki) (Ashok et al. 2007), 난기풀 엘니뇨 (Warm pool El Niño) (Kug et al. 2009, 2010) 등으로 불리고 있다. 이름은 여러 가지 이지만 공통적으로 나타나는 특징은 적도

동태평양에서 발생하던 이상 고온의 해수면온도 아노말리가 중앙태평양으로 이동되면서 온난한 해수면온도 양 옆으로 한랭한 해수면온도 아노말리가 존재하는 3극의 패턴이 수개월동안 지속되는 특징을 가진다. 변형된 엘니뇨현상은 최근 들어 나타나는 현상으로 실제로 1980년대 이후 8번이 발생했다는 선행 연구가 있다 (Ashok et al. 2007). 적도 태평양에서 발생하는 고전적인 엘니뇨와 변형된 엘니뇨의 구조와 특성이 다른 만큼 (Kao and Yu 2009) 중·고위도 지역으로의 원격상관 또한 다른 양상을 보인다. 한 예로, 고전적인 엘니뇨 동안에는 강했던 동아시아 겨울 몬순이 변형된 엘니뇨 동안에는 저층의 고기압이 남중국해로 이동되면서 겨울 몬순이 약화되는 모습을 보인다 (Weng et al. 2009).

이러한 고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨를 포함하는 ENSO의 발생은 열대 태평양에서의 대기와 해양의 상호작용의 대표적인 예이다 (Bjerknes 1969). 따라서 이들의 생성과 발달 그리고 소멸을 예측하기 위해서 해양과 대기간의 상호 작용을 물리적 원리에 근거해서 다루는 대기-해양 접합 대순환 모형 (Coupled General Circulation Model, 이하 CGCM)을 이용한 예측이 불가피하다. 실제로 지난 30여 년 동안 ENSO 역학에 대한 이해와 더불어 접합 대순환 모형을 이용한 ENSO 예측의 성능이 상당히 향상되었다 (Neelin et al. 1998; Achutarao and Sperber 2002). 1980년대 중반부터 비교적 단순한 형태의 적도 대기-해양 접합 모형을 이용한 ENSO 예측이 국내·외적으로 시도되면서 역학 모형을 이용한 장기 예측의 가능성이 활발히 연구된 바 있다. Zebiak and Cane (1987)은 중간 형태의 접합 모형 (Intermediate Coupled Model)을 사용하여 외부 강제력 없이 3~4년의 불규칙한 주기를 가지는 ENSO의 주요 변동을 재현해 냄으로써 처음으로 ENSO와 유사한 경년 변동성을 모의했다. Barnett et al. (1993)은 열대 해양과 단순 대기 모형을 접합 시킨 Hybrid Coupled Model (이하 HCM)을 이용하여 가을과 겨울철 동안의 열대 태평양의 해수면온도를 리드 18개월까지 미리 예측함으로써 장기 예측에 있어서의 가능성을 고취시켰다. 또한 Latif et al. (1993)은 열대 태평양 지역의 해양 대순환 모형과 전지구 대기 대순환 모형을 결합한 TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) 접합 모형을 이용하여 저주기 기후변동과 관련된 ENSO 현상의 상당부분이 적도 해양의 열용량과 지표 바람장에 의해서 느린 전파를 포함하는 주기와 관련이 있다고 주장하면서 이러한 저주기의 존재로 말미암아 열대 지역에서는 대략 1년 정도의 리드타임을 가지고 ENSO를 예측할 수 있다고 주장했다. 이후 대기-해양 대순환 모형의 결합뿐만 아니라 지면모형, 해빙모형, 더 나아가 탄소모형 등이

결합된 더 복잡하고 고급화된 모형의 개발이 이어졌고 ENSO 예측뿐만 아니라 다양한 목적을 가지면서 예측 및 산업화에 따른 미래 기후정보 생산 등에 활용 하고 있다.

대기-해양 접합 대순환 모형의 개발과 더불어 접합 모형의 입력자료로 사용되는 초기장의 에러를 최소화 시키는 것 또한 성공적인 장기 기후예측을 위한 결정적인 요소이다 (Rosati et al. 1997; Behringer et al. 1998; Kirtman 2003; Jin and Kinter 2009). 특히, 장기 ENSO 예측을 위한 접합 모형의 예보 능력은 해양의 초기장을 어떻게 처방하느냐에 따라 다르다 (Rosati et al. 1997; Behringer et al. 1998). 해양 초기화 기법 중 고전적이고 경험적인 한 가지 방법은 예측에 사용된 접합 모형을 이용해서 해수면 온도를 Nudging 시키는 것이다. 이 방법의 성패는 ENSO를 포함한 기후 변동성에 대한 모형의 예측 성능에 달려있다. 해수면 온도 Nudging방법을 이용해서 Keenlyside et al. (2005)에서는 6개월 앞서 ENSO의 발생을 성공적으로 예보해 냈다. 또한 Cane-Zebiak 모형을 이용해서는 1년의 리드타임을 가지면서 성공적인 예측을 이뤄냈다 (Chen et al. 2004). 물론 Cane-Zebiak 모형은 통계적인 수정을 기하면서 모형 내부의 물리과정을 관측에 맞춘 작업을 병행했다 (Chen et al. 2000; Barnett et al. 1993). 보다 최근 Luo et al. (2005)에 의해서는 SINTEX-F 전구 모형을 이용한 ENSO 지수의 예측을 12개월 리드 앞서서 0.7 이상의 매우 높은 상관관계를 보이면서 성공적인 예측을 수행한 바 있다. APCC 또한 2008년부터 미국 대기과학 연구소 (이하 NCAR)에서 개발한 커뮤니티 기후 시스템 모델 버전 3 (Community Climate System Model version 3; 이하 CCSM3)를 도입하여 해수면 온도 Nudging 기법을 이용한 APCC 센터 고유의 장기 기후예측 자료를 생산하고 APCC에서 수행하는 다중 모델간 앙상블 기법에 적용 하였다 (Jeong et al. 2008). 해수면 온도 Nudging 기법 이외에도 고도의 기술을 요하는 변분법, 칼만 필터 기법 등의 해양을 초기화시키는 여러 종류의 기법들이 존재한다. Kirtman and Min (2009)에서는 CCSM3 모형에 3차원적인 해양을 변분법으로 동화시킨 해양 재분석 자료를 초기장으로 입력하여 ENSO 발생지역에서의 높은 해수면 온도 예측성을 보였다. 이는 이중 적도 수렴대 (Double ITCZ), 2년 주기의 ENSO 발생을 모의하는 결점을 가진 CCSM3 모형에 적용한 결과로써 해양 초기치의 처방만으로 ENSO 예측성을 높인 매우 고무적인 결과였다. 이 결과로부터 동기를 얻어 2012년부터 APCC에서는 NCEP에서 거의 실시간으로 제공하는 3차원 변분법을 사용하여 해양 내부를 동화한 재분석 자료를 CCSM3의 해양모형에 적용하

여 장기 기후 예측 정보를 생산 및 활용해 오고 있다.

본 연구에서는 CCSM3 전구 모형을 이용하여 센터 내에서 생산된 두 가지 해양 초기화 기법 (Nudging 기법과 3차원 해양 재분석자료의 적용)에 따른 두 가지 ENSO (고전적인 엘니뇨와 변형된 엘니뇨)의 예측성을 비교해 보고자 한다. 이를 통해 CCSM3 기후 모사에서의 두 가지 종류의 ENSO 예측에 대한 기본적인 모형의 성능을 평가하고 두 가지 ENSO 현상에 대한 해양 초기화의 중요성을 이해하는데 그 목표가 있다. 2장에서는 연구에 사용된 자료와 연구 방법을 소개하고 두 가지 해양 초기화 기법에 대한 간단한 설명이 3장에서 다뤄질 것이다. 4장에서 본격적으로 CCSM3 모형에서의 두 가지 종류의 ENSO 예측 성능에 대해서 다루고 있으며 5장에서는 ENSO 모의에서의 한계점과 그 원인에 대해서 논의해보고자 한다. 6장에서는 APCC에서 수집중인 접합 기후모형들과의 비교를 통해 센터 내 자체적으로 활용중인 CCSM3 모형의 유용성을 확인하고 7장에서는 요약 및 결론을 다룬다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 사용된 접합 모형

2.1.1 APCC CCSM3

본 연구에서 사용된 접합 기후 모형은 NCAR에서 개발한 CCSM3이다. 본 모델은 대기, 해양, 지면, 그리고 빙권 총4개의 성분모형으로 구성되어 있는데 각 성분모형들은 접합자를 통해 각 성분모형들이 필요한 플럭스를 교환하고 있다. 대기 성분모형인 CAM3 모형은 전구 모형으로서 26개의 연직층을 다루고 있으며 오일러리안 스펙트럴 계산법을 사용하며 위도, 경도 방향으로 약 1.4° 간격의 T85의 수평해상도를 가지고 있다. 해양 성분 모형은 POP1.4.3 으로 Los Alamos National Laboratory에서 개발하였다. 본 해양 모형은 연직으로 40개의 층을, 적도 부근에서는 1/3°의 간격을 가지며 극에서는 1° 가량의 수평 해상도로 계산된다. 지면모형은 CLM, 해빙모형은 Elastic-viscous-plastic EVP 역학을 다루는 CSIM4를 사용하며 이들 각 모형들은 플럭스 보정방법은 사용하지 않는다.

2.1.2 APCC가 수집중인 접합 모형들

본 연구에서 평가하고자 하는 접합 기후 모형 CCSM3의 예측성 비교를 위해 현재 APCC에서 수집중인 6개의 접합 기후 모형들로부터의 과거 계절기후예측자료와 두 가지 종류의 ENSO 예측성을 비교하였다. 예측성 비교에 사용된 모형은 미국 NCEP (CFSv2), 미국 NASA (GMAO), 캐나다 MSC (CanCM3 와 CanCM4), 한국 부산대 (PNU), 그리고 호주기상청 (POAMA) 모형이다. 본 모형들은 접합 기후 모형으로서 APEC 기후센터가 다중 모델간 앙상블 예측 (정 등. 2012)을 위해 수집 및 활용하고 있다. 모형에 대한 주요 특징은 Table 1에 제시되어 있다.

Table 1 Description of the coupled prediction models collecting by APEC Climate Center

Institutes/Country (model name)	Atmos initialization	Ocean initialization	Ensemble size	References
NCEP/USA (CFSv2)	CFS data assimilation	3D-Var GODAS	20	Saha et al. 2013
NASA/USA (GMAO)	MERRA reanalysis	GEOS ODAS-2	10	Molod et al. 2012
MSC/Canada (CanCM3)	4D-Var	3D-Var GODAS	10	Kim et al. 2003
MSC/Canada (CanCM4)	4D-Var	3D-Var GODAS	10	Simmons et al. 2004
PNU/Rep. of Korea (PNUCGCM)	NCEP/DOE reanalysis II	Forecasted from Ocean model	10	Ahn and Kim 2013
BMRC/Australia (POAMA)	ERA40 Nudging	Optimal Interpolation	30	Lim et al. 2012

2.1.3 관측 자료

과거 기후예측자료에 대한 검증을 위해 사용된 관측 및 재분석 자료는 미국 대기 해양청 (이하 NOAA)에서 거의 실시간으로 제공하는 해수면온도 (OISST, Reynolds et al. 2002), 해양내부의 수온 분포 비교를 위해서 NCEP에서 제공하는 전구 해양 자료 동화 시스템 (GODAS, Behringer et al. 1998), 전구 강수 기후값 프로젝트의 일환으로 생성된 GPCP 강수자료 (Adler et al. 2003), 그리고 대기 순환 변수로는 NCEP/DOE 재분석자료 2

(Kanamitsu et al. 2002)를 사용하였다. 검증 기간은 과거기후예측자료의 기간과 동일한 1983년부터 2010년까지 총 28년이다.

2.2 예측성 검증 기법

모형이 모사한 기후변수의 예측 성능을 비교해보고자 1~3개월의 리드타임에서의 해수면온도 및 강수 아노말리에 대한 시간 상관계수를 통해 전반적인 예측성을 비교하고 고전적인 엘니뇨 지수로 사용되는 Niño3과 변형된 엘니뇨 지수로 사용되는 EMI 지수에 대한 각각의 시간 상관계수에 대한 예측성을 비교하였다. 또한 관측과 예측된 해수면 온도 패턴에 대한 공간적인 상관계수를 비교함으로써 모형의 경년변동성에 대한 예측성을 검증한다. 또한, 고전적인 엘니뇨 해와 변형된 엘니뇨 해, 각각의 해에 대한 합성장 분석을 수행함으로써 두 현상이 얼마나 독립적으로 재현 되는지를 평가한다. 모형의 초기 충격(Initial Shock)에 대한 검증은 20세기 최대 엘니뇨로 기록된 1997/98년도의 해수면온도 아노말리에 대한 관측과의 에러를 비교하고, 모형 자체의 결함을 보기위해서는 경험적 직교함수 분석 (EOF)를 통해 적도 태평양 해수면 온도 변동성의 주요한 공간 분포를 확인하였다. 마지막으로 APCC에서 수집중인 접합 기후 모형들과 두 가지 종류의 ENSO 예측성에 대한 시간 상관계수, 합성장 분석을 통해 그 예측성을 비교하였다.

3. 해양 초기화 기법

3.1 해수면온도 Nudging

Nudging은 자료 동화 기법 중 간단한 경험적인 방법이면서 (Hoke and Anthes 1976; Kalney 2003; Luo et al. 2005) 적용이 쉬워 널리 사용되고 있다. 이 방법은 진단 방정식의 Nudging항에 모델 해상도로 내·외삽 과정을 통해 관측 자료를 인위적으로 입력한다. 해양모형 최상층에서의 열역학 방정식은 다음과 같이 Nudging 항을 첨가하는데, 즉, 다음과 같은 수식으로 설명할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cdot \cdot \cdot = -\lambda (T - T_{obs}) \qquad (1)$$

여기서 T 는 해양모형의 최상층에서의 온도 즉, 모의된 해수면온도이며, T_{obs} 는 관측된 매일의 해수면온도, 그리고 λ는 Newtonian damping 계수 (5day−1)이다. Newtonian damping 계수는 보통 변수에 따라 경험적으로 정해지는데 본 연구에서는 센터 자체적으로 실시한 민감도 실험 (Jeont et al. 2008)을 통해서 얻어진 1/5일의 계수를 사용하여 Nudging을 실시하였다.

Nudging에 앞서 CCSM3의 대기 성분 모형인 CAM3를 1971년부터 1981년까지 총 11년에 대해 관측 해수면온도를 경계조건으로 적분하고, AMIP−type 실험을 통해서 산출된 대기 플럭스들을 경계조건으로 해양 성분 모형인 POP을 동일한 기간에 대해서 적분한다. 일종의 AMIP실험과 OMIP 실험을 통해 생산된 최종적인 마지막 상태 (1982년 1월 1일 상태)가 CCSM3 Nudging 실험의 초기조건으로 사용된다. Nudging 실험에서 관측 강제력으로 OISST (Optimal Interpolated Sea Surface Temperature, Reynolds et al. 2002) 자료가 쓰이는데 우선, 일주일 단위로 제공되는 자료를 선형적인 내·외삽 과정을 거쳐 매일의 해수면 온도 자료로 재생산한다. 이렇게 생산된 매일의 관측자료를 Nudging항에 매 time step마다 강제로 삽입한다. 과거 기후예측 및 미래 기후예측을 위해 1982년 1월 1일부터 최근까지 Nudging 실험을 실시하여 매년, 매월, 매일의 대기, 해양, 지면, 해빙 성분 모형의 초기조건을 생산한다. 편의상 Nudging 기법을 통해 해양 초기화된 과거기후예측실험을 “Nudging 실험” 이라고 명명한다.

3.2 해양 자료 동화된 3차원 재분석 자료의 적용

사용된 3차원 해양 재분석 자료는 NCEP 전지구 해양 자료 동화 시스템 (Global Ocean Data Assimilation System, GODAS)를 통해 생산된 자료를 사용한다. 본 재분석 자료는 MOM3 해양 모형을 이용하여 3차원 변분법을 이용하여 자료 동화한다. 자료 동화하는 지역은 남위 75도에서 북위 65도까지 거의 전구에 대해서 수행된다. 자료동화를 위한 초기 입력 자료로는 매주 관측되는 해수면 온도, 고도계, XBT, 무어링, ARGO로부터 수집된 여러 자료가 사용되며 연평균 염분 기후값이 처방된다. GODAS에서는 여러 가지 변수

들을 생산 및 제공하는데 그 중에서도 염분, 수온, 경도 방향의 바람, 위도 방향의 바람 자료를 제공받아 CCSM3의 해양모형인 POP 모형의 해상도에 맞게 내·외삽 과정을 거쳐 과거 및 미래 기후예측 실험의 해양 초기치로 재생산했다.

예측자료는 1년에 4번 (2월, 5월, 8월, 11월초) 출발하여 7개월간 적분을 통해서 과거 및 미래 기후예측자료를 생산해 내는데 앙상블 멤버 생산 방식은 이들의 시간 지연을 둔 기법 (Brankovic et al. 1990)을 사용했다. 대기, 지면, 해빙 성분모형의 초기장은 Nudging 실험으로부터 산출된 초기장과 동일하며, 오직 해양 초기장만 GODAS 해양 재분석 자료로 대체하여 적분하였다. 과거 기후예측실험은 1983년부터 2010년까지 총 28년에 걸쳐 실시하였다. "Nudging 실험"과 마찬가지로 GODAS 해양초기장을 통해 과거 기후에 대해 예측한 실험을 "GODAS 실험"이라고 명명한다.

4. APCC CCSM3의 기후예측 성능

4.1 해수면 온도 및 강수의 예측성 비교

고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨의 예측성을 비교하기에 앞서 전반적인 해양의 해수면온도와 강수의 시간상관을 그림 1과 2에 각각 나타내었다. 적분시작 1~3개월의 리드타임에서의 예측된 해수면온도의 예측성 (그림 1)은 GODAS와 Nudging 두 실험에서 ENSO가 빈번히 발생하는 중앙·동 태평양 지역에서 0.7이상의 높은 시간 상관계수를 보인다. 북반구 및 남반구의 중·고위도 해역에서는 GODAS실험보다는 Nudging실험의 상관계수가 더 높게 나타나며 두 실험의 예측성 차이에서도 이는 쉽게 확인할 수 있다.

해수면 온도의 시간상관 계수는 전 해역에 걸쳐 비교적 높은 상관관계를 보이는 반면 강수에 대한 예측성 (그림 2)은 두 실험 모두에서 좁은 적도 태평양 지역에 한정되어 나타나는 모습을 보인다. 이는 ENSO 발생에 의한 강수 아노말리의 발생을 모형들이 잘 모의하는 결과로 사료되며, ENSO의 시작 및 소멸 시기에 비해 최대치를 이루는 가을철 및 겨울철 기간 동안이 예측성이 더 높음을 알 수 있다. 두 실험의 예측성 차이는 구별하기 어려우나 지역적으로 Nudging 실험의 예측성이 GODAS실험의 그것 보다는 더 높음을 확인 할 수 있다.

4.2 해수면온도 예측성의 경년변동성

접합 모형을 이용한 계절예측성은 일반적으로 엘니뇨 및 라니냐와 같은 이상기후가 뚜렷한 현상에 대해서 그렇지 않은 보통인 해에 비해 예측성이 높다. 매해 모형이 모의한 해수면온도 아노말리가 관측과 비교해 얼마나 잘 모사하는지를 판단하기 위해 그림 3에 매년 11월의 적도태평양 해수면온도 아노말리장에 대한 공간적인 패턴 상관 계수를 나타내었다. 11월 초기장을 사용하여 적분 첫 달에 대한 패턴 상관계수를 비교해 보면 Nudging실험이 GODAS실험보다 평균적으로 0.22 정도의 높은 상관계수를 모의한다. 일관적으로 적분 시작 세 번째 달 (8월의 초기조건)과 여섯 번째 달 (5월의 초기조건)에서도 Nudging 실험이 GODAS실험보다는 우월한 해수면온도 패턴 예측성을 보인다.

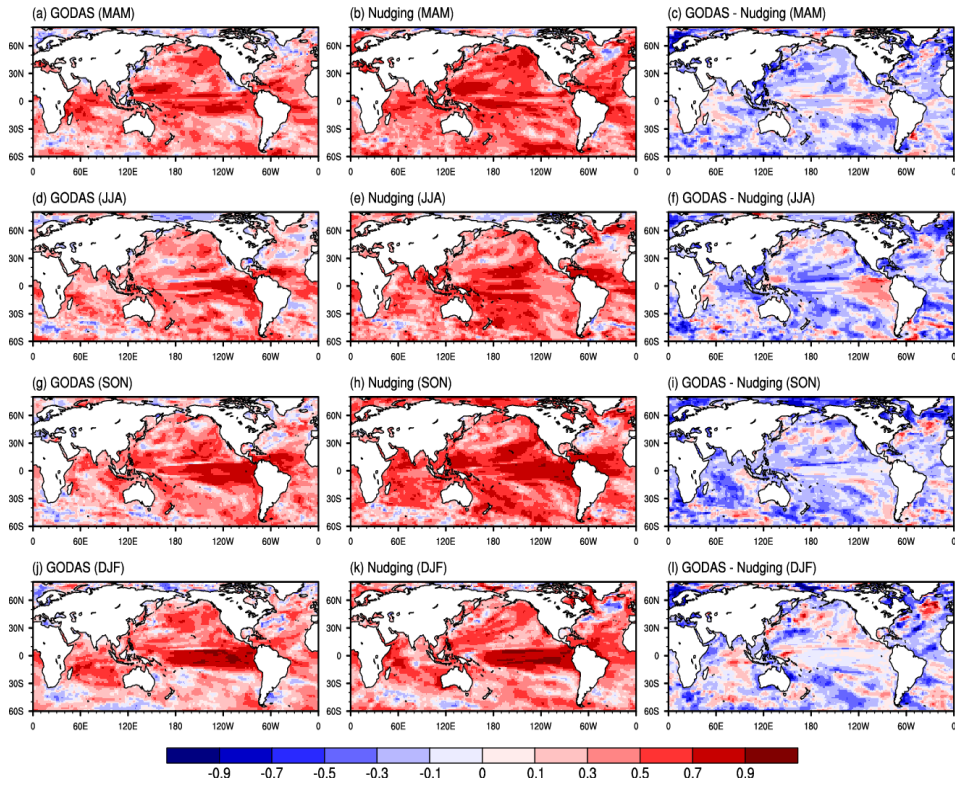

Figure 1 Temporal correlation coefficients between predicted and observed Sea Surface Temperature anomalies at the 1-3 month lead time. Left and middle columns (a-k) show the skills of GODAS and Nudging experiments. Right columns (c-l) shows the skill difference between GODAS and Nudging experiments.

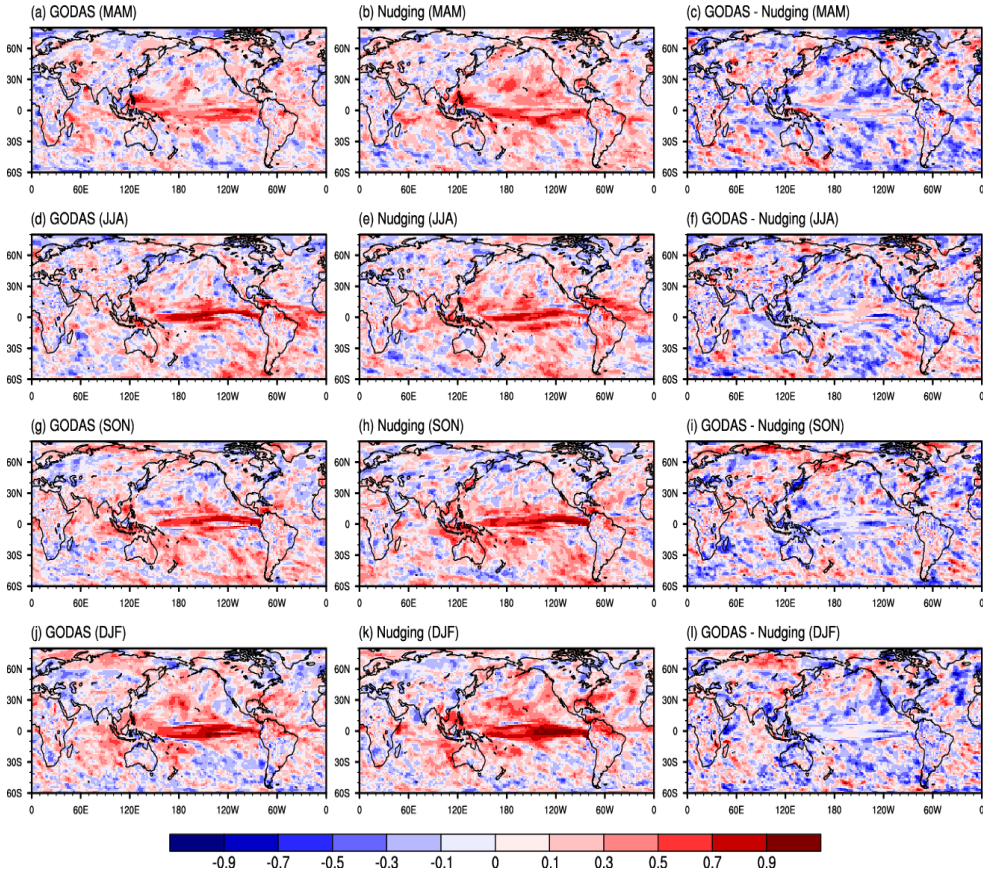

Figure 2 Same as Figure 1, except for rainfall.

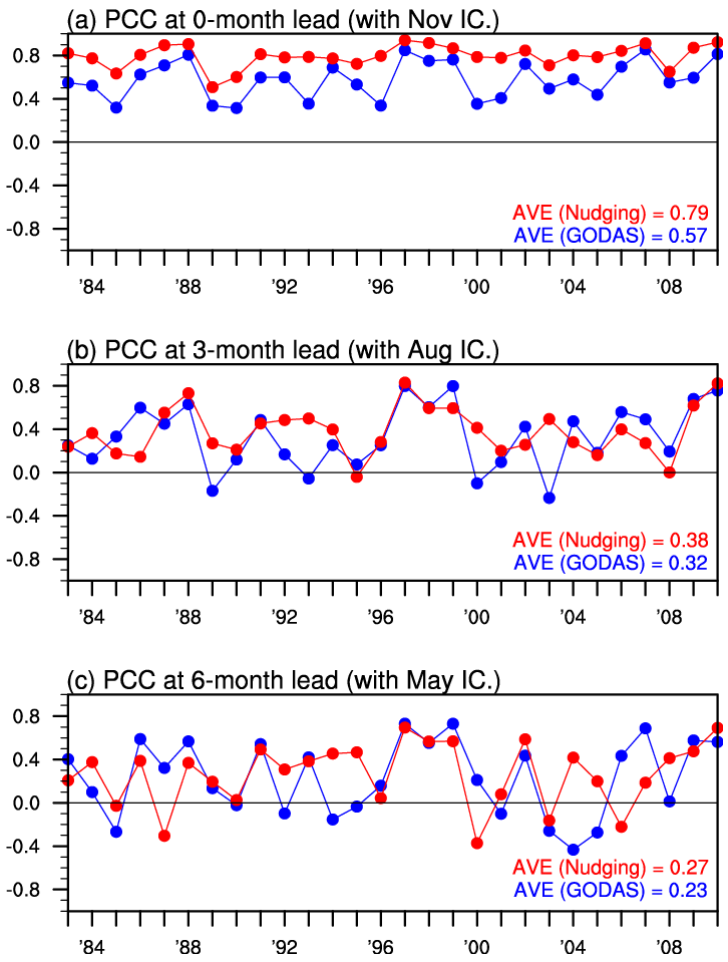

Figure 3 Interannual variation of pattern correlation coefficients between predicted and observed sea surface temperature anomalies over tropical Pacific (120°E-60°W, 30°S-30°N) for November (a) at 0-month lead time with November initial condition, (b) at the 3-month lead time with August initial condition, and (c) at the 6-month lead time with May initial condition for Nudging (red) and GODAS (blue) simulations.

4.3 두 가지 종류의 ENSO 예측성 비교

고전적인 엘니뇨 지수로 널리 사용되는 Niño3 지수와 새로운 종류의 엘니뇨 즉, 변형된 엘니뇨 지수로 사용되는 ENSO Modoki 지수 (EMI)의 리드타임에 따른 예측성 (그림 4)을 비교했다. 고전적인 엘니뇨의 경우 8월 출발을 제외하고는 GODAS 실험이 Nudging

실험보다 더 높은 예측성을 보인다. 특히, 11월 출발 런 6개월의 리드타임에서 시간 상관계수를 비교해 보면 GODAS 초기화 효과가 뚜렷하게 나타난다. 변형된 엘니뇨의 경우에는 대부분의 리드타임에서 GODAS보다는 Nudging이 더 높은 예측성을 보인다. 주목할 점은 일반적으로 접합 모형을 이용한 두 가지 종류의 ENSO 예측성을 비교해보면 고전적인 ENSO에 대한 예측성이 변형된 ENSO 보다 상당히 뛰어난 예측성을 보이지만 (Hendon et al. 2009; Jeong et al. 2012) APCC CCSM3를 이용한 계절기후예측에서는 고전적인 엘니뇨의 예측성이 현저하게 뛰어난 형상이 아니라 변형된 엘니뇨의 예측성과 비슷한 수준에서의 예측성을 보인다는 것이다.

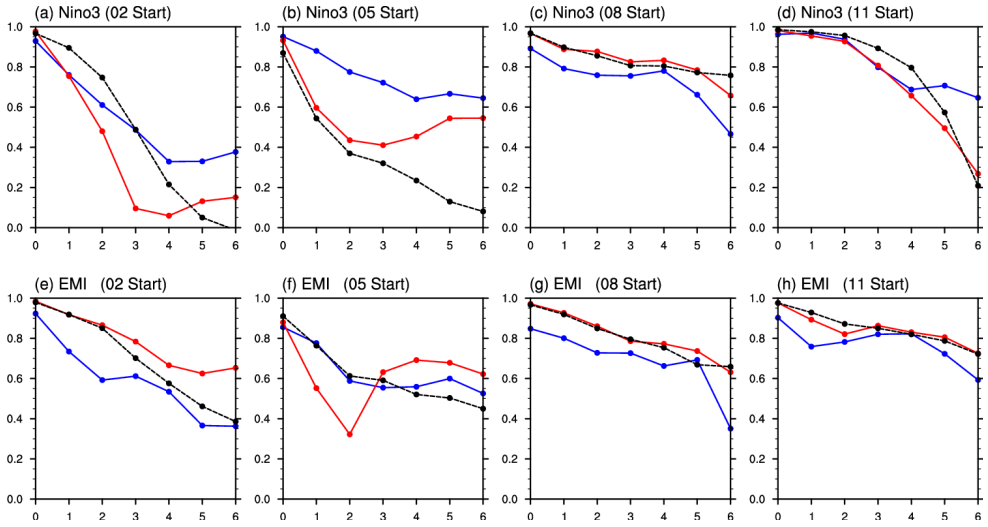

Figure 4 Temporal correlation coefficients between predicted and observed ENSO indices with forecast lead times. Above panels (a-d) show the skills of Niño3 and below ones (e-h) are those of EMI index. Blue lines indicate the skills of GODAS experiments, red ones are those of SST Nudging experiments, and black dotted ones are those of persistence.

관측 및 두 실험이 모의한 고전적인 엘니뇨 지수 Niño3과 변형된 엘니뇨 지수 EMI에 대한 산포도를 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 ENSO가 가장 최대로 나타나는 북반구 겨울철을 대상으로 11월 출발의 1~3개월의 리드타임에서 모의된 결과이다. 관측에서는 Niño3지수와 EMI지수의 시간 상관계수가 0.42로 나오는 반면, GODAS실험에서는 0.71, Nudging실험에서는 0.51의 상관을 보인다. 모형의 결과들에서는 신뢰수준 98% (two tailed t-test)를

초과하는 높은 시간 상관계수를 보이는데 이는 두 가지 서로 다른 해양초기화 기법을 처방한 모형이 두 가지 종류의 ENSO를 구분하여 예측하지 못하고 있다는 것을 나타낸다.

북반구 겨울철 관측에서의 시간 상관계수 0.42는 Niño3과 EMI 두 지수가 어느 정도 상관을 가진다고 볼 수 있다. 하지만 여름철 동안의 두 지수의 시간 상관계수는 0.1, 가을철 동안에는 0.2의 비교적 낮은 시간 상관계수를 보이는데, 이는 고전적인 엘니뇨 지수로 널리 쓰이는 Niño3과 변형된 엘니뇨 지수로 대변되는 EMI가 서로 독립적인 현상임을 증명한다. 반면 Niño4와의 상관 계수는 계절에 따라 차이가 있지만 0.58 이상의 높은 시간 상관 계수를 보이면서 서로 독립적이지 않다는 것을 증명한다. 이와 같은 분석은 Ashok et al. (2007)에서도 수행된 바 있다.

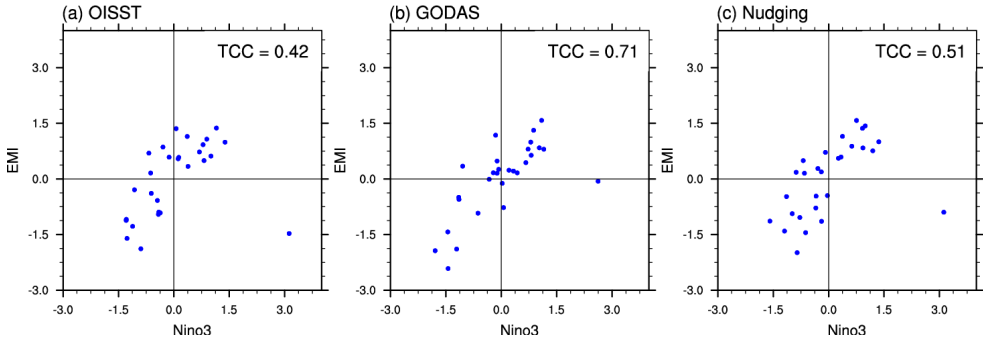

Figure 5 Distribution of the observed and predicted two types of ENSO indices. Left figure (a) shows the skill of observation, middle one (b) is that of GODAS simulation, and Left one (c) is that of Nudging simulation.

4.4 고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨에 대한 특정해 비교

고전적인 엘니뇨 해와 변형된 엘니뇨 해에서 공통적으로 나타나는 기후 특징을 어떤 해양초기화가 잘 모사하는지를 확인하기 위해 특정해만을 평균한 합성장 분석을 해보았다. Yu 등 (2012)에서 1950년 이후에 존재했던 주요 엘니뇨 현상들을 현존하는 여러 가지 ENSO지수를 사용해서 고전적인 엘니뇨 해와 변형된 엘니뇨 해를 구분한 자료를 표2에 제시했다. 두 가지 종류의 ENSO를 구분 짓는 기준은 3가지 종류로 압축되는데 첫 번째는 Kao 와 Yu (2009)에 의해서 CP 지수와 EP 지수의 상대적인 크기 비교를 통해 고전적인

엘니뇨와 변형된 엘니뇨 해로 구분한다. 두 번째는 Yeh 등 (2009)에 의해서 Niño3 지수와 Niño4 지수의 상대적인 크기로 엘니뇨 해를 구분하고, 마지막으로 Ashok 등 (2007)에 의해서는 중앙태평양의 온난한 해수면온도와 양 옆에 위치한 필리핀 해와 페루 근해의 한랭한 해수면온도 차이로 정의하는 EMI (ENSO Modoki Index) 지수가 0.7 표준편차 이상이면 변형된 엘니뇨 해라고 정의한다. Yu 등 (2012)에서 세 가지 기준으로부터 정리한 엘니뇨 해들 중에서 2개 이상 공통적인 합의를 이루는 해들을 본 연구에서는 고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨해로 선정하였다. 선정된 고전적인 엘니뇨 해에는 1986–87, 1997–98, 2006–07 총 3해이며 변형된 엘니뇨 해에는 1987–88, 1991–92, 1994–95, 2002–03, 2004–05, 2009–10 총 6해이다.

Table 2 Major El Niño events since 1983 and their types Identified by the majority consensus from the EP/CP-Index Method, the Niño Method, and the EMI Method

El Niño Years	Type			
	EP/CP method	Niño3/4 method	EMI method	Consensus
1986-87	CP	EP	EP	EP
1987-88	CP	CP	EP	CP
1991-92	CP	EP	CP	CP
1994-95	CP	CP	CP	CP
1997-98	EP	EP	EP	EP
2002-03	CP	EP	CP	CP
2004-05	CP	CP	CP	CP
2006-07	EP	EP	EP	EP
2009-10	CP	CP	CP	CP

※ EP는 고전적인 엘니뇨 해, CP는 변형된 엘니뇨 해를 의미함

4.4.1 고전적인 엘니뇨 해

북반구 겨울철 동안의 고전적인 엘니뇨 해에서의 적도 태평양 해양 내부의 온도, 해수면 온도, 강수량, 그리고 500 hPa 지위고도 아노말리의 합성장을 그림 6에 나타내었다. Nudging실험에서는 온난한 해수역이 관측에 비해 더 강하게, GODAS 실험에서는 더 약하게 모사를 하고 있다. 두 실험에서 온난 해수역이 서 태평양쪽으로 뻗어있는 양상을 보이고

있으나 비교적 적절한 수준에서 고전적인 엘니뇨 해의 패턴을 모사하고 있다. 하지만 GODAS 실험에서는 온난한 해수역이 남북방향으로 좁혀져 나타나면서 해수면온도 아노말리의 크기가 관측에 비해 매우 약화되어 모의된다.

이는 적도 태평양에서의 강수 아노말리의 패턴과 크기에도 직접적인 영향을 미치는데 관측에 비해서 GODAS 실험은 남북방향으로 더 좁게 적도에 치우쳐 강수를 모의하고 있으며 Nudging실험에서는 관측에 비해 서 태평양쪽으로 치우치며 더 강한 강수 아노말리를 모의하고 있다. 적도 태평양을 제외한 지역에서는 평년보다 건조한 상태를 두 실험에서 모두 적절히 모의하고 있다.

수온약층의 기울기는 ENSO발생과 매우 밀접한 관련을 가지고 있다 (Latif et al. 1993; Meehl et al. 2001). 따라서 해양 초기화 기법에 따른 수온약층 및 해양 내부에서의 구조를 확인하는 작업은 필요하다. 적도 태평양을 따라 해양 연직 Cross Section을 그림 6j~6l에 나타냈다. 본 그림을 통해서 GODAS 초기화의 장점을 확인 할 수 있는데 관측에서 동 태평양의 페루 근해에서 존재하는 온난한 해수역이 깊이 200m까지 뻗어있으나 Nudging실험에서는 그 깊이가 대략 140m로 해양 내부에서의 예측에는 한계점을 보인다. 하지만 GODAS실험에서는 Nudging실험에서 보다도 더 깊게 대략 160m까지 온난한 해수역이 자리 잡고 있음을 확인 할 수 있다. 서 태평양 해저에서도 Nudging 실험에서는 음의 시그널이 거의 나타나지 않는데 비해 GODAS실험에서는 관측과 비슷한 수준에서 한랭한 해수역을 잘 예측해내고 있음을 확인 할 수 있다.

북반구 중·고위도 지역으로의 원격 상관을 500 hPa 지위고도 아노말리를 통해 확인하였다 (그림 6a-c). 고전적인 엘니뇨 해에서의 원격 상관 패턴에 대한 분석은 Yu et al. (2012)에서도 언급하였는데, 통상적인 엘니뇨 해에 전형적으로 나타났던 PNA (Pacific-North America; Wallace and Gutzler, 1981) 패턴이 고전적인 엘니뇨 해 동안에 더 이상 존재하지 않고 적도 동 태평양으로부터 시작하여 미국 남서쪽 (한랭한 기후) 지역을 거쳐 미국의 북동쪽 (온난한 기후) 지역으로 전파되는 형태의 북극방향의 파동 행렬 (Poleward propagation)이 관측된다고 지적한 바 있다. 이러한 북극방향의 파동 전파 패턴은 GODAS 실험과 Nudging실험 모두에서 0.7 이상의 공간 상관 분포를 보이며 적절히 모의하고 있다.

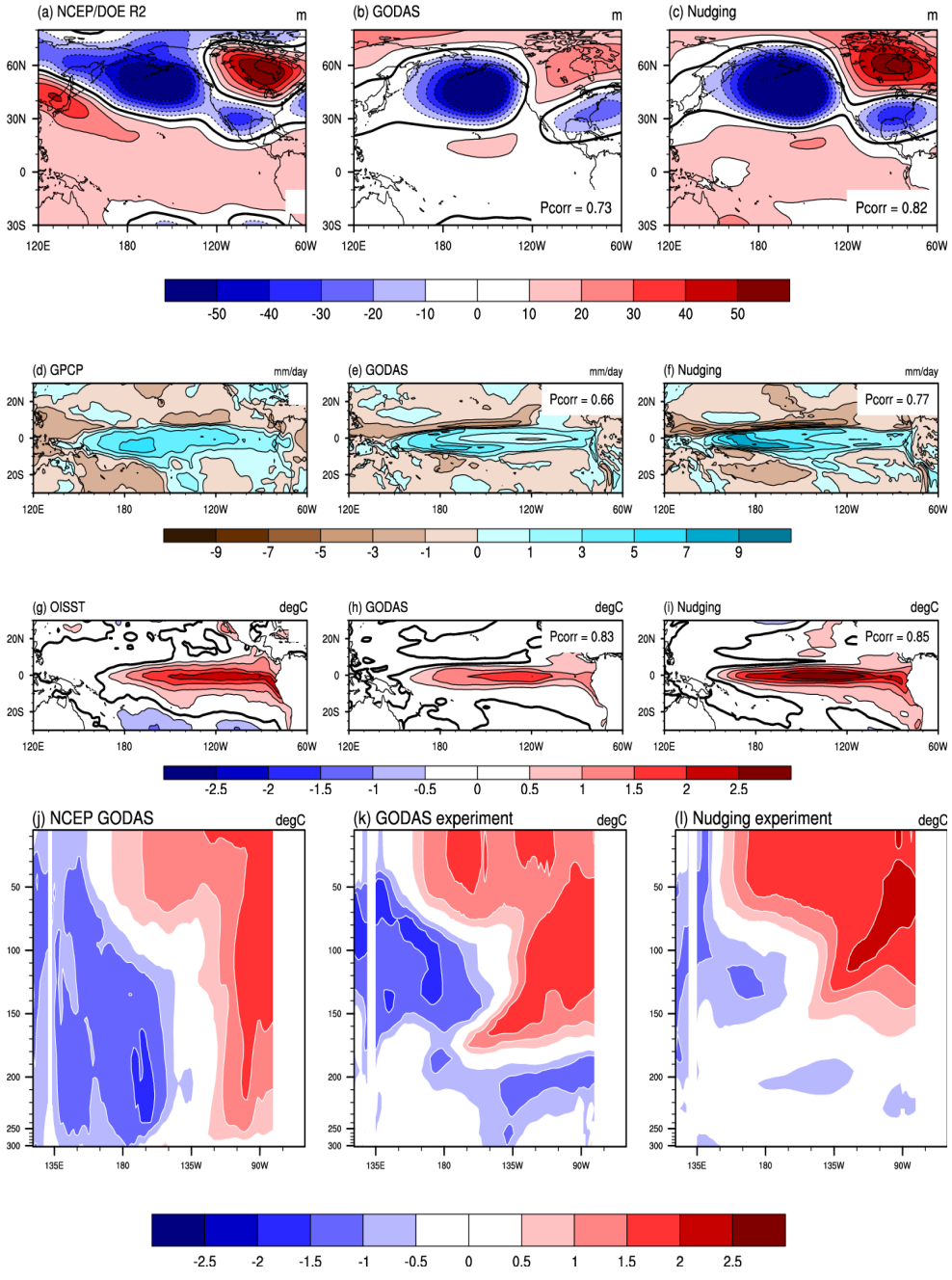

Figure 6 Composite patterns of (a-c) geopotential height at 500 hPa, (d-f) precipitation, (g-i) SST, and (j-l) ocean temperature anomalies for canonical El Niño years. Left columns are observations, Middle ones are GODAS experiments, and Right ones are Nudging experiments.

4.4.2 변형된 엘니뇨 해

고전적인 엘니뇨 해에서는 적도 동 태평양에서 온난한 해수면 온도 아노말리가 존재했다면 변형된 엘니뇨 해에는 그 온난한 해수면 온도가 중앙 태평양 또는 서 태평양쪽으로 이동되면서 양쪽에는 한랭한 해수면 온도를 보이는 현상을 일컫는다. 관측에서 날짜변경선에서부터 서경 150도에 이르는 지역에서 해수면온도 아노말리의 최대치를 보이고 있다 (그림 7g). 하지만 GODAS와 Nudging실험에서는 해수면온도 아노말리의 패턴이 고전적인 엘니뇨 해의 그것과 크게 다르지 않은 양상을 보이면서 예측에서의 한계점이 드러난다.

변형된 해수면온도 아노말리의 패턴에 따라 적도 태평양에서의 강수 아노말리도 그 양상이 고전적인 엘니뇨 해와 뚜렷이 구별되는데 날짜 변경선 부근에서 최대치를 보이면서 남태평양 수렴대 (South Pacific Convergence Zone) 방향으로의 강수 패턴이 두드러지게 보인다. 모형의 강수 아노말리 패턴 또한 접합 모형 고유의 결함인 Double ITCZ (InterTropical Convergence Zone) 형태의 강수밴드를 적도 중·동 태평양에서는 평년에 비해 적게, 적도 서 태평양으로 치우쳐진 강수 아노말리 패턴을 보이고 있다.

해양 내부에서의 수온분포에서는 해수면 온도에서와 마찬가지로 대략 날짜변경선 부근에서 해수 온도의 최대치를 보이면서 그 온난한 해수역이 대략 100m 까지 내려와 있음을 관측 (그림7j)에서 볼 수 있다. Nudging 실험에서는 관측보다는 더 서쪽에서 온난한 해수면 온도를 보이면서 연직으로 약 80~90m까지 순압 (Barotropic mode)의 분포를 보인다. 하지만 GODAS 실험에서는 온난한 해수역이 넓게 분포를 하고 있지만 그 정도가 약하게 모의되고 있다.

고전적인 엘니뇨 해에서 북극으로의 원격 상관 패턴이 형성되었다면 변형된 엘니뇨 해 동안에는 전형적인 PNA패턴을 보이면서 파동 행렬이 형성되는 양상을 보인다 (그림 7a). PNA패턴에 의해 알래스카 동쪽 지역에서부터 미국 북서지역에 이르기까지 양의 지위고도 아노말리가 존재하게 되고, 미국 남동쪽에는 반대로 음의 지위고도 아노말리 분포를 보임에 따라 미국 북서쪽은 온난하고, 남동쪽은 한랭한 기후를 가지게 된다. Nudging 실험에서는 비교적 관측과 매우 유사한 패턴 (공간 상관 계수 0.86)을 보이면서 PNA패턴이 적절히 모의되고 있으나 GODAS 실험에서는 관측 또는 Nudging실험과는 꽤 차이를 보인다. 오히려 약화된 북극방향 파동 전파 형태를 보이면서 공간 상관 계수 0.49의 낮은 예측성을 보인다.

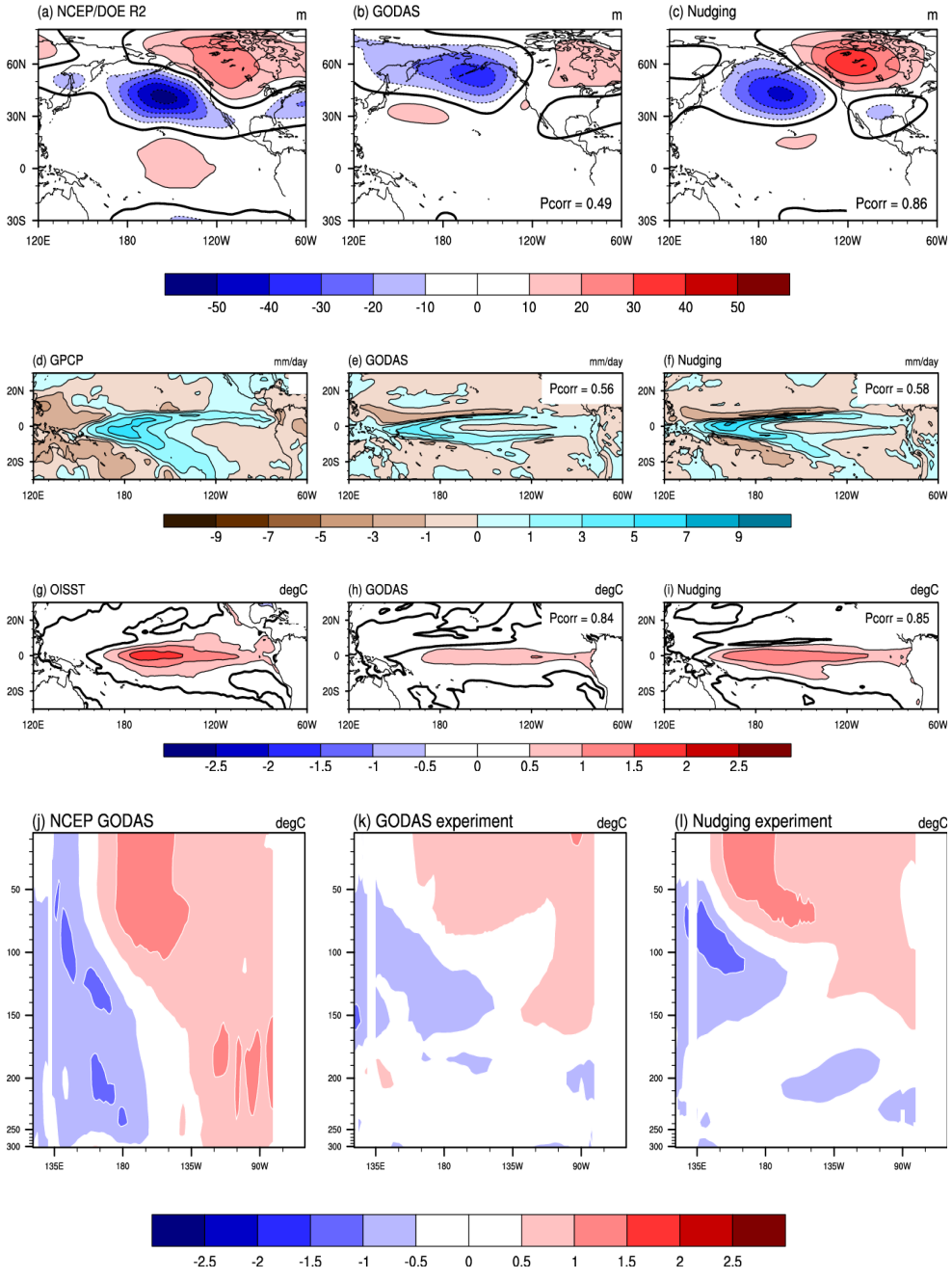

Figure 7 Same as Figure 6, except for new types of El Niño years

5. 3차원 해양 재분석 자료를 처방한 실험의 예측성이 낮은 이유는?

본 연구에서는 두 가지 독립된 해양 초기조건을 이용한 예측들이 고전적인 엘니뇨와 변형된 엘니뇨의 예측에 있어서 그 특징들을 얼마나 잘 구분해 내는지를 살펴보고자 하였다. 전반적으로 두 가지 서로 다른 해양 초기조건으로부터 출발한 예측은 두 가지 종류의 엘니뇨현상을 구분해내지 못하고 있다. 즉, 현 시점에서는 한 가지 종류의 ENSO를 모의하고 있다. 특이한 점은 GODAS 실험에서는 고전적인 엘니뇨 해와 관련된 해양의 연직 구조를, Nudging실험에서는 변형된 엘니뇨 해와 관련된 해양 내부에서의 연직 구조를 어느 정도 모의하고 있다는 점이다. 북반구 겨울철 중위도 지역으로의 원격 상관을 북미 대륙으로의 기후 영향을 고려해본다면 GODAS실험에서 고전적인 엘니뇨 해와 변형된 엘니뇨 해 동안의 그 패턴들이 크게 다르지 않았다. 또한 GODAS 실험이 3차원적으로 해양 자료동화된 재분석자료를 CCSM3의 해양초기조건에 적용한 방법임에도 불구하고 해수면온도 아노말리의 크기가 관측 또는 Nudging실험보다 크기가 약화되어 나타났다. 따라서 본 장에서는 두 가지 종류의 ENSO 현상 모의에 대해서 3차원 해양 재분석자료가 적용된 실험의 예측성이 낮은 이유에 대해 살펴보고자 한다.

5.1 초기충격

접합 모형을 이용한 신뢰도 있는 계절 기후예측자료를 생산하기 위해서는 각 성분 모형들이 얼마나 적절한 균형을 이루면서 결합되어 있는지도 중요하지만 이 것 이외에 초기치를 얼마나 적절히 처방했는지 또한 기후와 날씨의 예측에 있어서 간과 할 수 없는 절대적으로 중요한 문제이다 (Pielke 1998; 정과 안 2007). 해양을 3차원 변분법으로 충분히 동화 시킨 재분석자료를 센터 접합 모형의 해양 초기치로 적용시킴으로서 1000년 이상의 해양 모델의 스핀 업 런 시간을 단축시키고, 비교적 최신의 기술을 사용하여 동화 시킨 재분석 자료를 사용함으로서 안정적이고 신뢰 가능한 기후예측 자료를 생산하고자 했다. 하지만 해양 재분석 자료를 처방한 GODAS 실험의 ENSO 예측성은 예상 밖으로 Nudging실험보다 떨어졌다.

그림 8에 적분 리드타임에 따른 Niño3 지수와 EMI 지수에 대한 RMSE (Root Mean Square Error)를 나타내었다. RMSE는 값이 0에 가까울수록 모형의 결과가 관측과 매우

흡사하다고 판단하면서 모형의 정밀도를 진단하는데 유용하게 쓰이는 예측검증 기법중 하나이다. 5월 출발 적분을 제외하고는 GODAS실험의 RMSE가 Nudging 실험 또는 Persistence 보다 적분 첫 달에서 조차 매우 증가되어 있는 상태로 출발한다. 11월 출발의 경우 Nudging 실험과 Persistence의 첫 달 Niño3지수의 RMSE가 0.3에 못 미치지만, GODAS 실험의 경우는 0.6 정도로 거의 Nudging 실험의 결과에 비해 2배 정도 높은 수치를 보이고 있다. 적분이 진행될수록 GODAS 실험의 RMSE가 줄어드는 양상을 보이기는 하지만 적분 첫 달에 나타나는 초기 충격은 두드러지게 나타나고 있다. 모형의 초기 충격은 관측의 기후로부터 모형의 기후가 서로 다르기 때문에 나타나는 현상이며 모형으로 입력된 초기장과 모형이 서로 적응하는데 걸리는 시간은 2~4개월 정도라고 일반적으로 알려져 있다 (Ben Kirtman 2005). 즉, GODAS 기후와 CCSM3 모형의 기후가 달라서 생기는 현상이며 이러한 초기충격을 완화시키는 여러 가지 방법이 제안되어왔다 (Ben Kirtman 2005).

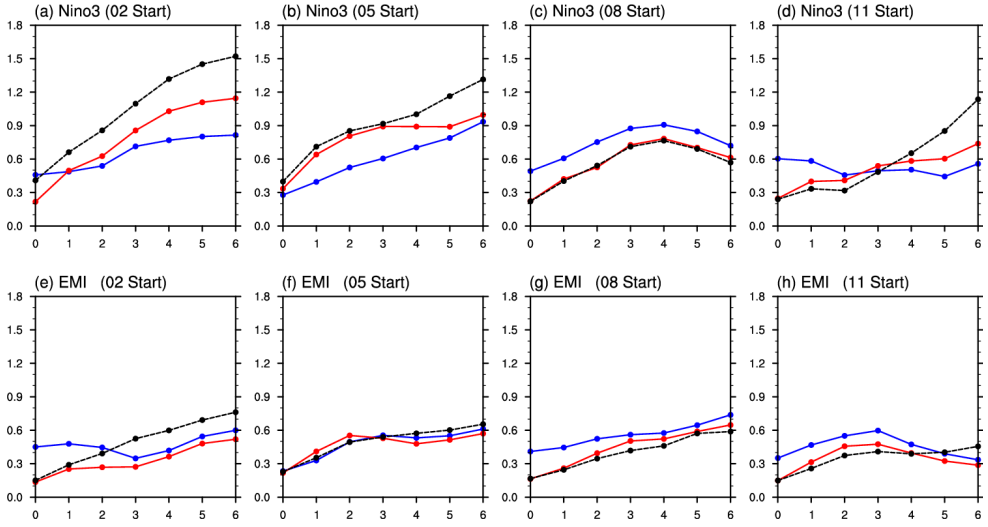

Figure 8 Same as Figure 4, except for RMSE

20세기 최대 엘니뇨해로 기록된 1997/98년의 해를 대상으로 적도 태평양지역에서의 해수면온도 아노말리를 적분 리드타임에 따라서 나타내보았다 (그림 9). 11월 1일로부터 출발한 해수면온도 아노말리가 5일 뒤, 15일 뒤 어떤 양상으로 변화되는지를 관측, GODAS 실험, 그리고 Nudging 실험을 동시에 나타내보았다. Nudging 실험의 경우는 과거에 실험

할 당시 월별로 결과 값을 산출해서 일별로 해수면온도 변화가 어떻게 변하는지 GODAS 실험과 동일한 비교는 할 수 없지만 (그림 9의 f와 I에서 그림이 그려지지 않은 이유) 11월 월평균 아노말리를 제시함으로써 GODAS실험과 Nudging 실험의 예측성을 비교했다. 관측은 OISST 자료로써 Nudging 실험의 초기장과 거의 동일한 패턴을 보이고 있다. GODAS 실험의 초기장은 GODAS 자료로써 OISST자료와는 약간의 차이가 있으나 1997년 11월 1일의 상태를 비교하기에는 손색이 없다. 적분 5일 뒤, GODAS 실험에서는 양의 해수면온도 아노말리의 값이 줄어들고 패턴 또한 좁혀져서 나타나고 있다. 특히 페루와 접해있는 해역에서의 온난한 해수면온도 아노말리가 전혀 보이지 않으면서 서태평양에 존재했던 음의 해수면온도 아노말리 또한 없어졌다. 이러한 패턴은 적분 15일에서도, 11월 한 달 동안 평균된 그림에서도 그대로 나타나고 있다. 하지만 Nudging 실험의 경우는 11월의 평균된 해수면온도 아노말리가 관측에서 보이는 패턴과 매우 유사하게 모의하고 있다. Nudging 실험의 경우, 해양 초기장이 OISST 자료를 1982년부터 최근까지 30여 년간 매일 강제적으로 Nudging 시켜서 산출된 결과로 모형과 해양 초기장이 어느 정도 균형을 맞추어져 있는 상태이며 안정적이고 신뢰 가능한 수준에서 적분 되었다라고 할 수 있다.

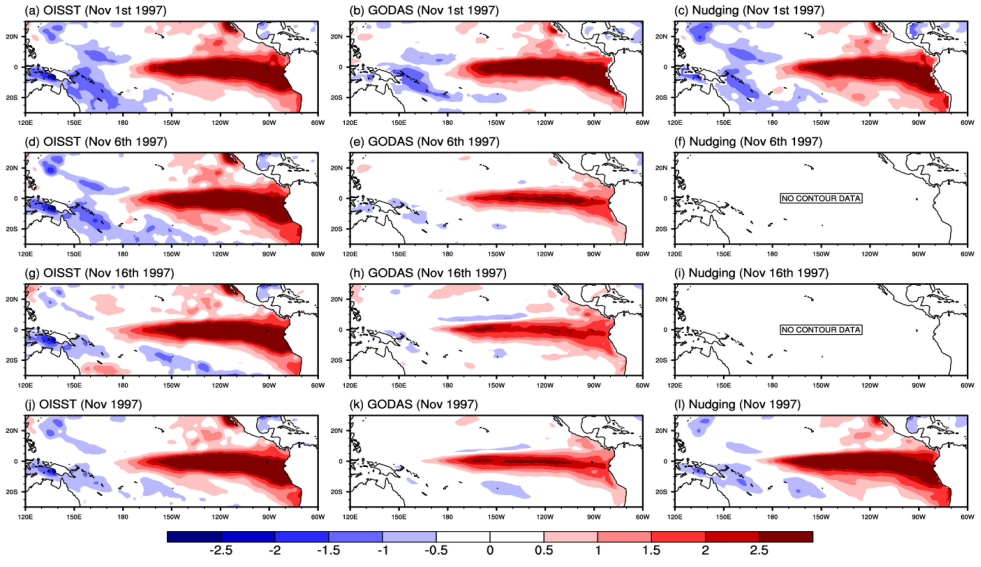

Figure 9 Change of spatial pattern distribution for observed and two simulated sea surface temperature anomalies (SSTA) for November 1997.

5.2 모델자체의 결함

모형의 초기장이 적절히 처방되었다고 할지라도 모형 자체적으로 두 가지 종류의 ENSO의 변동성을 모의할 능력이 없다면 이 것 또한 예측에서의 한계점을 유발한다. CCSM3 모형 자체의 변동성 모의 능력을 평가하기 위해 제어 (Control) 실험을 과거에 센터 자체적으로 수행한 바 있다. 제어 실험은 NCAR,에서 자체적으로 600년의 기간 동안 스핀업을 하고 난 이후 마지막 상태로부터 출발하여 아무런 강제력 없이 모형을 약 30여 년간 적분하였다.

그림 10과 11에 경험적 직교함수 (EOF) 분석을 통해 고전적인 엘니뇨 모드 (그림 10)와 변형된 엘니뇨 모드 (그림 11)에 대한 변동성을 각각 비교하였다. 적도 태평양 해수면온도 변동성의 대부분을 차지하는 요소가 두 가지 종류의 ENSO 현상이다. 즉, 첫 번째 모드는 고전적인 엘니뇨 변동이며 두 번째 모드가 변형된 엘니뇨이다. 두 모드의 합이 계절에 따라 전체 변동성의 56~78%를 차지한다.

첫 번째 모드의 경우는 고전적인 엘니뇨 모드를 GODAS 실험과 Nudging실험에서 비교적 높은 공간 상관계수를 보이면서 잘 모의하고 있다. 제어 실험의 경우 또한 공간 상관 계수 0.73 이상을 나타내며 적절한 수준에서 모의하고 있다. 봄철을 제외하고 Nudging실험이 GODAS 실험보다는 약간의 높은 공간 상관계수를 보이면서 고전적인 엘니뇨 모드를 잘 예측한다.

두 번째 모드 즉, 변형된 엘니뇨 모드의 예측성능에서는 CCSM3 모형 자체의 한계가 존재함을 알 수 있다. 관측에서 보이는 온난한 해수면 온도 아노말리가 날짜 변경선 부근의서 태평양으로 이동되고 이 온난한 해수면온도 주변으로 한랭한 해수면온도 아노말리가 존재하는 3극의 패턴이 제어실험에서는 전혀 나타나지 않는다(봄철을 제외하고 공간 상관계수 대략 0.1). Nudging 실험에서는 해양 초기화의 효과로 인해 어느 정도 관측에서 보이는 변형된 엘니뇨의 패턴이 보이기는 하나 모델 자체적인 결함으로 인해 적도를 기준으로 남반구와 북반구가 갈리는 양상을 보인다. GODAS 실험 또한 Nudging 실험과 유사한 범위에서 변형된 엘니뇨를 모의하고 있다.

결과적으로 CCSM3 모형 자체는 두 가지 종류의 엘니뇨 변동을 모의 할 능력이 없지만 어떠한 형태로든 해양 초기화 기법을 적용함으로서 고전적인 엘니뇨뿐만 아니라 변형된 엘니뇨현상의 모의능력이 향상되었음을 확인할 수 있다.

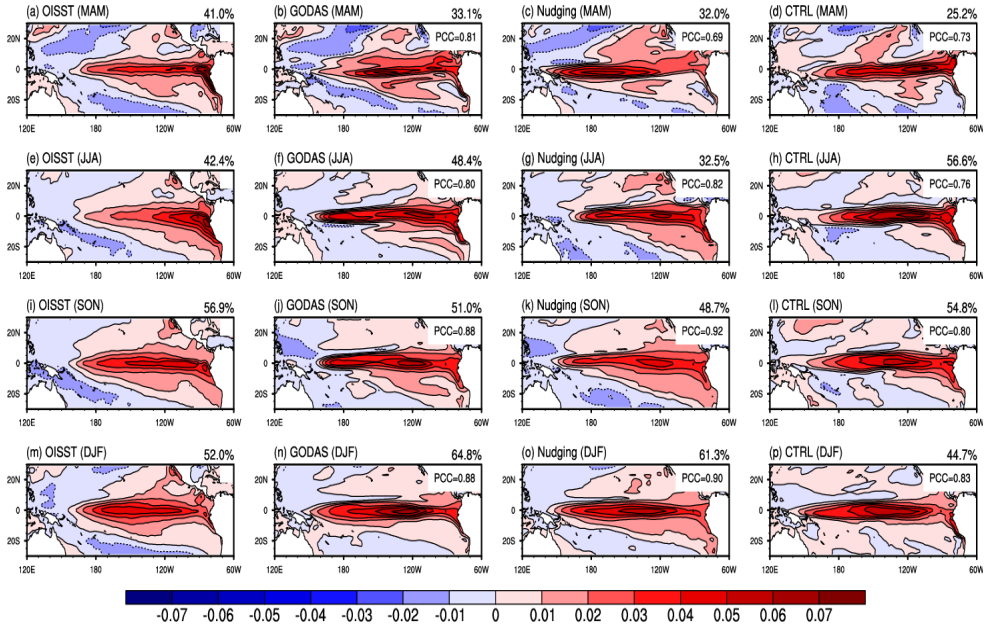

Figure 10 The distribution of spatial pattern of the first EOF mode for sea surface temperature from observation and model simulations at 1~3 month lead time over the tropical Pacific in the four seasons.

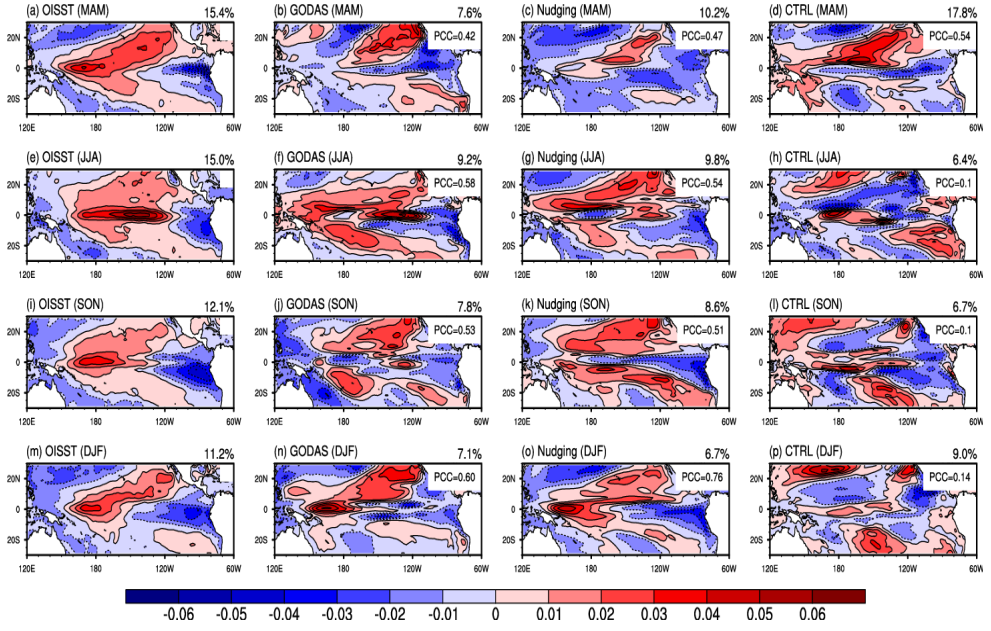

Figure 11 Same as Figure 10, except for the second EOF mode.

6. APCC에서 수집중인 접합 모형들과의 비교

앞장에서는 CCSM3 모형에 두 가지 해양 초기화 기법을 적용시켜 두 가지 종류의 엘니뇨현상 모의에 대한 효과를 보고자 했다. 해양 표면만 동화시키는 해수면온도 Nudging (2-D) 기술보다는 보다 복잡하고 정교한 기술을 적용한 변분법 (3-D)을 이용해서 해양을 초기화 하는 방식은 앞으로도 우리가 지향해야할 방향이다. 널리 알려진 해수면온도 Nudging 기법을 2008년부터 센터 내 자체적으로 접합 모형에 적용하여 기후 예측 자료를 생산해 왔고, 보다 최근인 2012년부터 3차원 자료 동화된 GODAS 재분석 자료를 모형에 적용시킴으로서 3차원적으로 해양을 초기화 시키려는 노력을 해 왔다. Nudging 기법과 비교해서 Niño3 지수에 대한 시간 상관계수, 그리고 고전적인 엘니뇨 해에서 나타나는 해양 내부의 역학적인 구조 모사는 GODAS 초기화를 적용 시킨 실험의 결과가 좋았다. 하지만 적도 태평양에서의 해수면 온도 경년 변동성, 변형된 엘니뇨현상 자체의 모의, 전반적인 기후장 모의에서는 Nudging 실험이 GODAS 실험 보다는 결과가 더 좋았다.

본 장에서는 센터 자체적으로 활용중인 CCSM3 모형과 센터에서 다중 모델간 앙상블 장기 예측을 위해 수집중인 전 세계 유수의 접합 기후모형들과의 ENSO 예측 성능을 비교해 보고자 한다. 공통적으로 기후모형들이 보유하고 있는 과거 기후예측 기간 1983년~2006년까지에 대해 예측성을 평가해 보았다. 그림 12에 리드타임에 따른 Niño3 지수와 EMI 지수의 시간 상관 계수를 5월 출발 및 11월 출발에 대해서 나타내었다. 전반적으로 GODAS 기법을 적용한 CCSM3 모형의 예측성이 APCC가 수집중인 접합 모형과 비교해서 나쁘지 않은 예측성을 보여주고 있다. Niño3 지수에 대한 예측성은 Nudging 실험을 제외하고 5월 출발에서 접합 모형들이 매우 높은 상관계수를 보이는데, 4월의 관측이 그 이후에도 지속 된다는 가정으로 본 Persistence 예측성과 비교해 매우 높은 ENSO 예측성을 보인다.

그림 13에 그림5와 마찬가지로 접합 모형들이 모의하는 고전적인 엘니뇨 지수 (Niño3)과 변형된 엘니뇨 지수 (EMI)에 대한 산포도를 제시하였다. 관측에서는 두 지수의 시간상관계수가 0.47 이지만 NCEP 모형을 제외하고 대부분의 모형들에서 0.6 이상의 높은 시간상관 계수 분포를 보인다. NCEP 모형은 비선형적인 분포를 보이면서 Niño3과 EMI지수는

시간상으로 전혀 관련이 없는 현상으로 모의하고 있다. CCSM3를 이용한 Nudging 실험이 다른 모형들과 비교해서 가장 적절히 모의된 결과라고 판단할 수 있다.

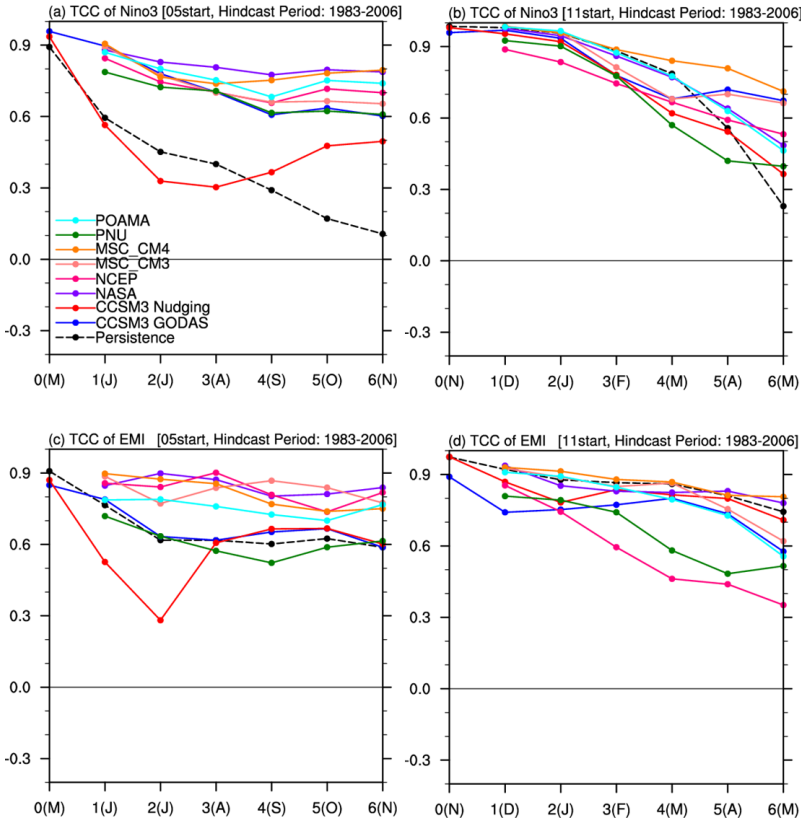

Figure 12 Temporal correlation coefficients for (a-b) Niño3 index and (c-d) EMI from (left) May and (right) November initial conditions with forecast lead times

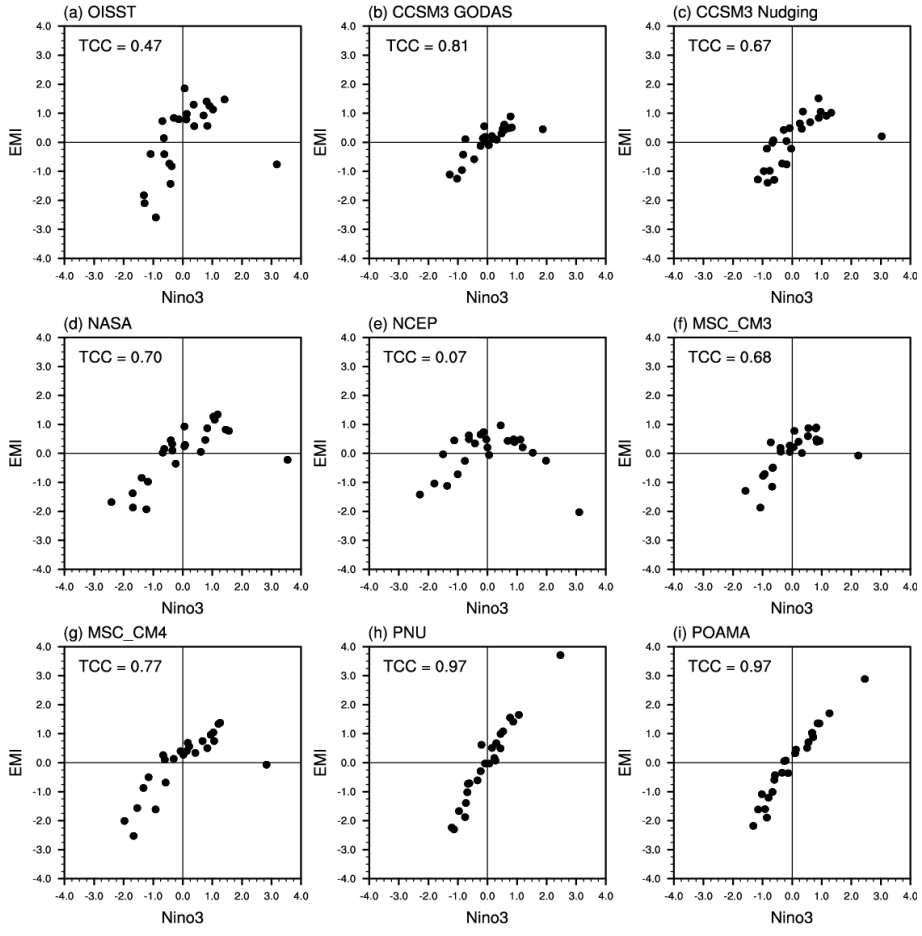

Figure 13 Distribution of two types of ENSO indices from (a) observation and (b-i) model simulations.

고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨의 시간에 따른 진행을 접합 모형들이 얼마나 잘 예측하는지를 보기위해 그림 14과 15에 적도 태평양을 기점으로 경도-시간 그림(Hovemoller)을 나타내었다. 4가지 서로 다른 출발 중에서 한 예로 고전적인 엘니뇨가 가장 극명하게 출현되는 11월 출발 자료를 나타내었다 (그림 14). PNU 모형을 제외하고는 관측에서 보이는 고전적인 엘니뇨의 진행을 접합 모형들이 잘 모사하고 있다. 해수면 온도 아노말리의 크기 또한 GODAS 실험을 제외하고는 관측의 크기와 유사한 범위에서 모의되고 있다. PNU 모형에서 보이는 해수면온도 아노말리의 서쪽 진행은 모델 내부 역학의 문제로 느린 해면온도 모드와 동태평양의 동쪽 경계에서 반사되어 서진하는 로스비파의

오차에 기인 한다 (Neelin 1991)고 알려져 있다. 즉, 자연에서는 아노말리가 서서히 동진하는 불안정파에 의해 진행되지만 모형에서는 불안정한 적도 서진파에 의해서 자연에서 보이는 모습과 반대 방향으로 진행됨을 의미하며 이는 엘니뇨 및 라니냐 현상의 특징과 위상이 중앙 태평양쪽으로 치우치게 되는 것으로 모형이 개선되어야 할 점이다 (정과 안 2007). 변형된 엘니뇨 해 (그림 15) 또한 PNU 모형을 제외하고는 관측에서 보이는 서태평양에서의 온난한 해수면온도의 진행을 잘 모의하고 있다. NASA 모형의 경우 관측과 매우 유사하게 온난한 해수면 온도 아노말리가 진행함을 알 수 있다. NCEP 모형의 경우, 온난한 해수면 온도 아노말리가 중앙태평양에서부터 동태평양에 이르기까지 매우 넓은 범위의 온난역을 형성하는데 NCEP 모형 또한 두 가지 종류의 엘니뇨를 구분 하는 데는 한계가 있어 보인다.

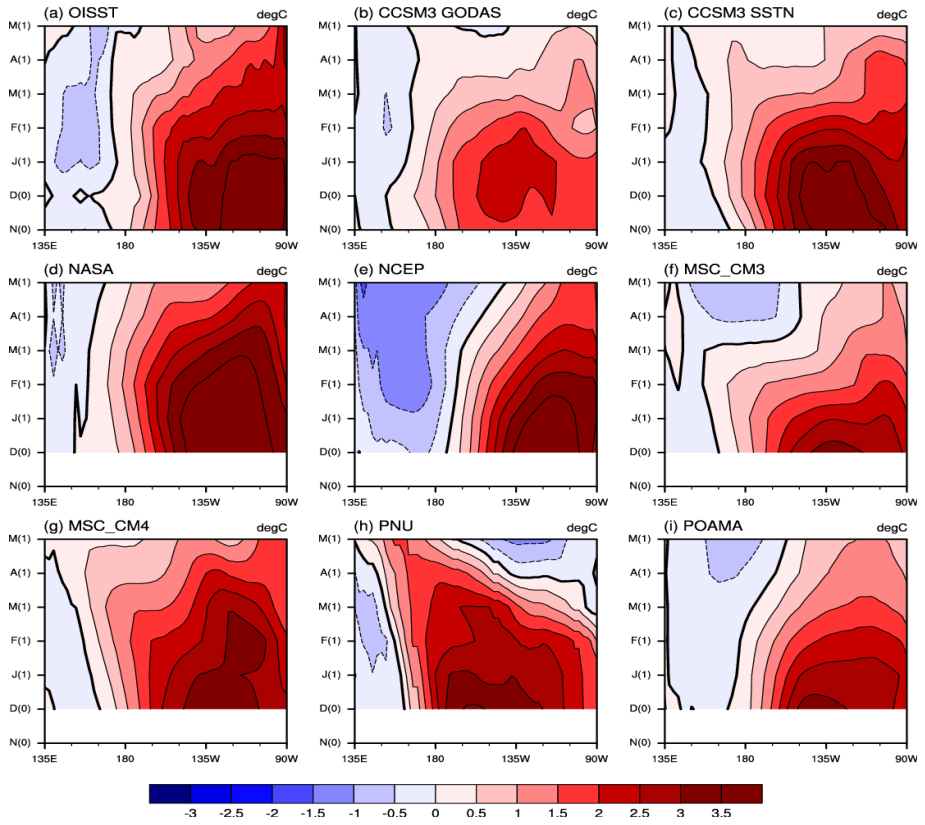

Figure 14 Time-longitude diagrams of the composite sea surface temperature anomaly (SSTA) patterns from (a) observation and (b-i) model simulations at the tropical Pacific (average from 5°S to 5°N) for canonical El Niño years.

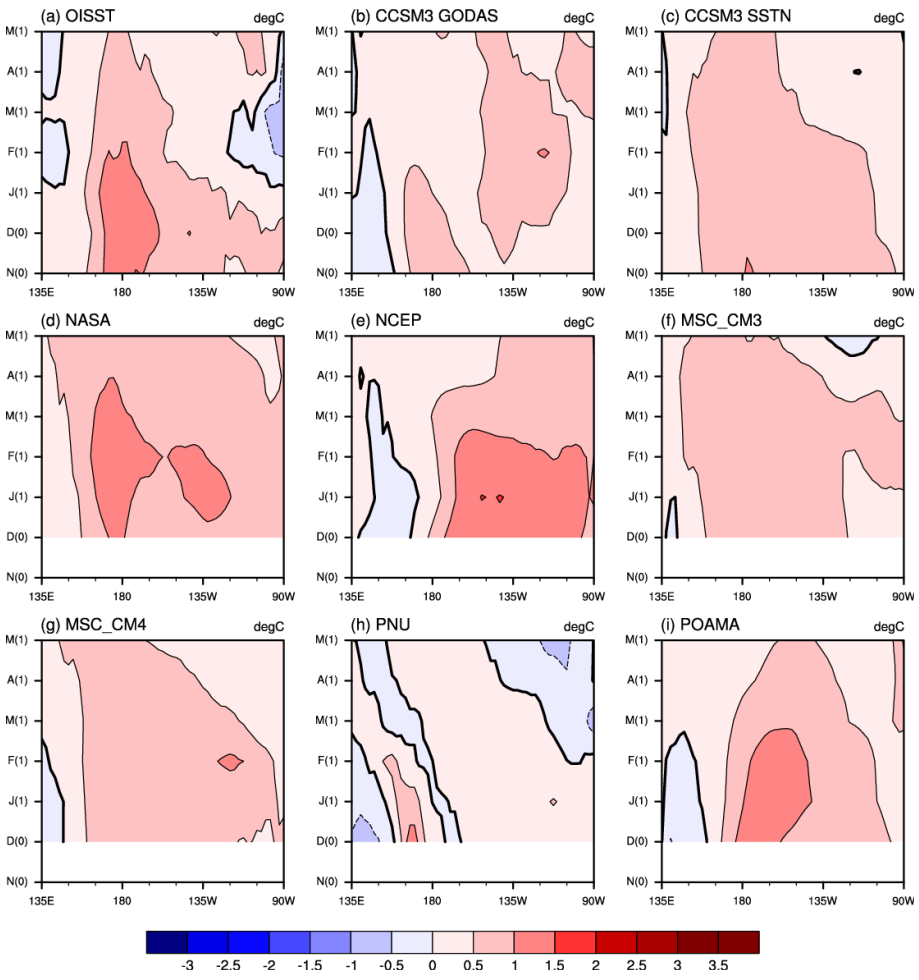

Figure 15 Same as Figure 14, except for new types of El Niño years

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 NCAR에서 개발된 CCSM3 접합대순환 모형 (CGCM)을 이용하여 두 가지 해양 초기화 기법의 적용을 통해 생산된 과거 기후예측자료에 대해서 적도 태평양에서 발생하는 두 가지 ENSO 현상에 대한 예측성을 여러 평가 지수를 통해 살펴보았다.

사용된 두 가지 해양 초기화 기법은 2차원적으로 해수면의 표면 온도를 동화시키는 Nudging 방법과 해양 내부를 3차원적으로 변분법을 이용해 동화시킨 NCEP GODAS 재분석 자료의 적용 두 가지이다. 두 가지 해양 초기치를 이용해서 CCSM3 모형의 전구규모 기후 예측을 위해 1983년부터 2010년까지 매해 2월, 5월, 8월, 11월초를 초기조건으로 하여 7개월 후보 적분을 수행했다. 또한 각 7개월의 후보 적분은 5개의 앙상블 멤버로 구성되었다. 괄목할 만한 결과는 다음과 같다.

1. 두 가지 서로 다른 해양 초기화 기법을 적용한 CCSM3 기후예측은 고전적인 엘니뇨와 변형된 엘니뇨현상을 독립적으로 구분해 내지 못하고 있다. 즉, 두 가지 종류의 ENSO예측이 아니라 한 가지 종류의 ENSO를 모의하고 있다.
2. 적도 태평양의 해수면 온도 변동성과 관련하여 중·고위도 지역으로의 원격 상관 패턴 또한 고전적인 엘니뇨 및 변형된 엘니뇨 해에서 뚜렷이 나타나는 고유의 기후 패턴을 구분해 내지 못하고 있다.
3. 하지만, GODAS 실험의 경우는 고전적인 엘니뇨 지수로 널리 쓰이는 Niño3 지수의 정확한 예측에 탁월한 능력을 보이면서 고전적인 엘니뇨 해와 관련된 적도 태평양 내부에서의 열역학적 구조를 관측과 비교해 어느 정도 모의해 내고 있다.
4. 반면, 변형된 엘니뇨 지수로 널리 사용되는 EMI 지수의 예측성에 있어서는 GODAS 실험보다는 Nudging 실험의 결과가 더 우수했으며 해양 내부의 연직 구조 역시 서태평양 방향으로 이동되어 나타나는 온난한 해수역을 Nudging실험이 잘 모사해 냈다.
5. 전반적으로 GODAS 실험의 결과가 관측이나 Nudging 실험의 그것보다 해수면온도, 강수, 지위고도 등의 기후 아노말리의 강도가 약했고, 모형이 모의해 낸 공간 패턴에 대해서 관측과의 상관관계를 구해봤을 때 GODAS 실험보다는 Nudging 실험의 결과가 예측성이 더 높았다.

본 연구 결과는 해양을 3차원적으로 동화시킨 재분석자료의 초기장이 해양 표면만 동화시킨 초기장을 사용했을 때 보다 기후 예측성이 높아질 것이라는 암묵적 가정이 성립되지 않았다. 이는 3차원으로 동화된 GODAS 재분석 자료를 CCSM3 모형에 적용시켜 적분할 때 "초기충격"이 존재하기 때문이다. GODAS 실험의 적분 첫 달부터 Niño3 지수의

RMSE가 Nudging 실험의 그것보다 매우 증가된 상태로 런이 수행되었음을 알 수 있었고, 20세기 최대의 엘니뇨로 기록된 1997/98해에서의 해수면온도 아노말리의 진행을 비교해 보면 GODAS 실험의 해수면 온도 아노말리가 적분 시작 후 1일 이후부터 강도가 매우 약화되고 온난한 해수면 온도의 영역 역시 줄어드는 양상을 보임을 알 수 있었다. 이러한 초기 충격을 발생시키는 원인에는 여러 가지 가능성이 존재한다. GODAS 재분석 자료 적용의 경우, 해양 초기조건 이외의 대기, 지면, 해빙의 초기조건은 SST Nudging 실험에서 가져왔기 때문에 초기조건간의 불균형이 존재할 수 있다. 또한, GODAS 자료는 본 보고서에서 사용된 해양 모형과 다른 모형을 이용하여 동화된 자료이기 때문에 모형 및 변수간 불균형을 가질 가능성이 존재한다. 마지막으로 GODAS 재분석 자료를 본 접합 모형의 격자로 변환할 때 내삽 및 물리과정 불일치에 의해서 초기 충격을 유발 할 가능성이 있다.

접합 모형의 예측성을 결정하는 요인은 적절한 초기치의 처방 이외에도 모형 자체의 예측 능력이다. 초기화의 효과가 아닌 CCSM3 모형 자체의 예측성을 알아보기 위한 제어실험의 결과에서는 CCSM3 모형이 고전적인 엘니뇨 모드와 관련된 변동성은 관측과 비교해 공간적·시간적 규모에서 잘 예측해 내고 있었지만 변형된 엘니뇨 모드와 연관된 변동성의 예측능력은 현저히 떨어졌다. 하지만, 어떠한 형태로든 해양의 초기화 기법을 적용한 이후 변형된 엘니뇨 모드에 관한 변동성은 모형자체의 변동성과 비교해 향상됨을 알 수 있었다.

센터에서 다중 모델간 앙상블 장기 예측을 위해 수집중인 세계 여러 기관의 접합 모형들과의 예측성 또한 비교해본 결과 Niño3 지수와 EMI 지수의 예측성에 관한한 세계 유수의 접합 모형들의 예측성과 견줄 만한 예측성을 CCSM3 모형이 가지고 있음을 확인했다. 따라서 Niño3과 EMI 지수의 예측에 있어서는 센터에서 자체적으로 사용 중인 CCSM3 모형이 활용도가 있으며 이 두 가지 지수들을 이용하여 통계적으로 중·고위도의 기후 예측에 활용한다면 어느 정도 성과가 있으리라 판단된다.

본 연구 결과는 앞으로 센터 고유의 전지구 접합 대순환 모형을 개발하고 활용하기에 앞서 무엇보다도 각 성분 모형들이 잘 결합된 좋은 모형을 만드는 것이 우선이고, 좋은 모형을 개발 했다손 치더라도 해양의 초기조건을 비롯하여 각 성분 모형의 입력 자료를 주의 깊게 처방하여 질 좋은 고품질의 기후 예측 정보를 생산해 내야 한다는 원론적인 결과를 뒷받침 한다.

REFERENCES

박혜선, 2003: 대기-해양-해빙 접합 모형 개발과 ENSO 예측성 연구. 부산대학교, 박사학위논문, 109pp.

정혜인, 안중배, 2007: PNU/CME CGCM을 이용한 엘니뇨/라니냐 장기 예측성 연구. 한국해양학회지(바다). 12(3):170-177

Achutarao, K., and K. R. Sperber, 2002: Simulation of the El Niño Southern Oscillation: Results from the Coupled Model Intercomparison Project. Climate Dyn., 19, 191–209.

Adler RF, GJ Huffman, A Chang, R Ferraro, P Xie, J Janowiak, B Rudolf, U Schneider, S Curtis, D Bolvin, A Gruber, J Susskind, P Arkin, E Nelkin, 2003: The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). J Hydrometeorol 4:1147–1167

Ahn JB, and HJ Kim, 2013: Improvement of one-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM. Meteorol. Appl. DOI: 10.1002/met.1372

Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection, J. Geophys. Res., 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.

Barnett, T. P., 1985: Variations in near Global Sea Level Pressure. J. Atmos. Sci., 42, 478-501.

Barnett, T. P., M. Latif, N. Graham, M. Flugel, S. Pazan, and W. White, 1993. ENSO and ENSO-related Predictability. Part I: Prediction of Equatorial Pacific Sea Surface with a Hybrid Coupled Ocean-Atmosphere model. J. Climate, 6: 1545—1566.

Behringer, David, Ming Ji, and Ants 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

Bjerknes, J., 1969: Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific. Mon. Wea. Rev., 97: 163—172.

Brankovic C, Molteni F, Tibaldi S, Cubasch U, 1990: Extendedrange predictions with the ECMWF models: time-lagged ensemble forecasting. Q J R Meteorol Soc 116: 867–912

Chen, D., M. A. Cane, S. E. Zebiak, R. Cañizares, and A. Kaplan, 2000: Bias correction of an ocean–atmosphere coupled model. Geophys. Res. Lett., 27, 2585–2588.

Chen, D., M. A. Cane, A. Kaplan, S. E. Zebiak, and D. Huang, 2004: Predictability of El Niño over the past 148 years. Nature, 428, 733–736.

Hendon, H. H., E. Lim, G. Wang, O. Alves, and D. Hudson, 2009: Prospects for predicting two flavors of El Niño, Geophys. Res. Lett., 36, L19713, doi:10.1029/2009GL040100.

Hoke, J. E., and R. A. Anthes, 1976: The initialization of numerical models by a dynamical initialization technique. Mon. Wea. Rev., 104, 1551–1556.

Horl, D. J, and J. M. Wallace, 1981: Planetary-scale Atmospheric Phenomena associated with the Southern Oscillation. Mon. Wea. Rev., 109, 813-829.

Jeong, H. I., et al., 2008: Experimental 6-month hindcast and forecast simulations using CCSM3, APCC 2008 Technical Report, APEC Climate Center.

Jeong, H.-I., D. Y. Lee, K. Ashok, J.-B. Ahn, J.-Y. Lee, J.-J. Luo, J.-K. E. Schemm, H. H. Hendon, K. Braganza, and Y.-G. Ham, 2012: Assessment of the APCC coupled MME suite in predicting the distinctive climate impacts of two flavors of ENSO during boreal winter, Clim. Dyn., 39, 475–493, doi:10.1007/s00382-012-1359-3.

Jin, Emilia K. and James L. Kinter III, 2008: Characteristics of Tropical Pacific SST Predictability in Coupled GCM Forecasts Using the NCEP CFS. Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-008-0397-3

Kalney, E, 2003: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability, Cambridge University Press, 341 pp.

Kanamitsu M, Kumar A, Juang HMH, Wang W, Yang F, Schemm J, Hong SY, Peng P, Chen W, Ji M, 2002: NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. Bull Am Meteorol Soc 83:1019–1037

Kao HY, and Yu JY, 2009: Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. J Clim 22:615–632. doi:10.1175/2008JCLI2309.1

Keenlyside, N., M. Latif, M. Botzet, J. Jungclaus, and U. Schulzweida, 2005: A coupled method for initializing El Niño–Southern Oscillation forecasts using sea surface temperature. Tellus, 57A, 340–356.

Kim, S.-J., G.M. Flato, G.J. Boer, 2003: A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: approach to equilibrium Climate Dynamics, 20, 635-661.

Kirtman, BP, 2003: The COLA anomaly coupled model: ensemble ENSO prediction. Mon Weather Rev 131:2324–2341

Kirtman, BP, 2005: Initialization Strategies for climate forecast system. 30th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction workshop. (presentation)

Kirtman, B. P., and D. Min, 2009: Multi-model ensemble ENSO prediction with CCSM and CFS. *Mon. Wea. Rev.*, DOI: 10.1175/2009MWR2672.1.

Kug JS, Jin FF, An SI, 2009: Two types of El Nin˜o events: cold tongue El Nin˜o and warm pool El Nin˜o. J Clim 22:1499–1515

Kug JS, Ahn MS, Sung MK, Yeh SW, Min HS, Kim YH, 2010: Statistical relationship between two types of El Nin˜o events and climate variation over the Korean Peninsula. Asia Pac J Atmos Sci 46:467–474. doi:10.1007/s13143-010-0027-y

Larkin NK, and Harrison DE, 2005b: Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. Geophys Res Lett 32:L16705. doi:10.1029/2005GL022860

Latif, M.A., S.E. Maier-Reimer, and M.M. Junge, 1993. Structure and Predictability of the El Niño/Southern Oscillation Phenomenon in a Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model, J. Climate, 6: 700—708.

Latif M, Sterl A, Maier-Reimer E, Junge WM, 1993: Climate variability in a coupled GCM. Part I: the tropical Pacific. J Clim 6:5-21

Latif M, and coauthors, 2001: ENSIP: The El Niño simulation intercomparison project. *Climate Dyn.,* **18,** 255–276.

Lim EP, Hendon HH, Langford S, Alves O, 2012: Improvements in POAMA2 for the prediction of major climate drivers and south eastern Australian rainfall. CAWCR Tech. Rep. No. 051. Available from http://www.cawcr.gov.au/publications/technicalreports.php

Luo, Jing-Jia, Sebastien Masson, and Swadhin Behera, 2005: Seasonal Climate Predictability in a Coupled OAGCM Using a Different Approach for Ensemble Forecasts, J. Climate, pp. 4474-4497.

Meehl, G. A., P. Gent, J. M. Arblaster, B. Otto-Bliesner, E. Brady, and A. Craig, 2001: Factors that affect amplitude of El Nin˜o in global coupled climate models. *Climate Dyn.,* **17,** 515–526.

Molod, A., L. Takacs, M. Suarez, J. Bacmeister, I.-S. Song, and A. Eichmann, 2012: The GEOS-5 atmospheric general circulation model: Mean climate and development from MERRA to Fortuna. NASA Tech. Memorandum 104606 Volume 28, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.

Neelin, J.D., 1991: A Hybrid Coupled General Circulation Model for El Niño Studies. J, Atmos. Sci., 47: 674—693.

Neelin, J. D., D. S. Battisti, A. C. Hirst, F.-F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata, and S. E. Zebiak, 1998: ENSO theory. J. Geophys. Res., 103, 14 261–14 290.

Philander, S. G. H., 1985: El Niño and La Nina. J. Atmos. Sci., 42, 2652-2662.

Pielke, R.A., 1998. Climate prediction as an initial value problem. Bull. Am. Meteorol. Soc., 79: 2743—2746.

Rasmusson, E. M., and J. M. Wallace, 1983: Meteorological Aspects of the El Niño/Southern Oscillation. Science, 222, 1195-1202.

Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. J Clim 15:1609–1625

Rosati, A., K. Miyakoda, and R. Gudgel, 1997: The impact of ocean initial conditions on ENSO forecasting with a coupled model. Mon. Wea. Rev., 125: 754-772

Saha S, Moorthi S, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Behringer D, Hou Y-T, Chuang H, Iredell M, Ek M, Meng J, Yang R, van den Dool H, Zhang Q, Wang W, and Chen M, 2013: The NCEP climate forecast system version 2. Submitted to J Clim

Simmons, H, L. St. Laurent, S. Jayne and A. Weaver, 2004: Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean general circulation. Ocean Modelling, doi:10.1016/S1463-5003(03)00011-8.

Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the potential height field during the Northern Hemisphere winter, Mon. Weather Rev., 109, 784–812, doi:10.1175/1520-0493

Weng H, Behera SK, Yamagata T, 2009: Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Nin˜o Modoki and El Nin˜o events. Clim Dyn 32:663–674. doi:10.1007/s00382-008-0394-6

Yeh SW, Kug JS, Dewitte B, Kwon MH, Kirtman BP, Jin FF, 2009: El Niño in a changing climate. Nature 461:511–514. doi: 10.1038/nature08316

Yu, J.-Y., Y. Zou, S. T. Kim, and T. Lee, 2012: The changing impact of El Niño on US winter temperatures, Geophys. Res. Lett., 39, L15702, doi:10.1029/2012GL052483.

Zebiak, S.E. and M.A. Cane, 1987: A Model El Niño/Southern Oscillation. Mon. Wea. Rev., 115: 2262—2278.

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 788997 333936
ISBN 978-89-97333-93-6
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)