

새로운 APCC 모형의 예측성 평가: 열대 태평양과 인도양, 그 인접한 나라들

Assessment of Forecast Skill of New APCC in-house Model: Tropical Pacific
and Indian Oceans and its Adjacent Countries

김선태

새로운 APCC 모형의 예측성 평가: 열대 태평양과 인도양, 그 인접한 나라들

Assessment of Forecast Skill of New APCC in-house Model: Tropical Pacific
and Indian Oceans and its Adjacent Countries

김선태

발간사

이상기후 현상의 사회적, 환경적인 상당한 영향 때문에 정확한 계절 예측에 대한 요구들이 증가하고 있다. 정확하고 신뢰도 높은 전지구적 혹은 지역적 중장기 계절 예측 정보 제공을 위해서 전지구 접합 모형은 궁극의 도구이며, 세계적 기관 및 대학에서도 지속적으로 모형개발/개선 및 예측성 향상을 위해 노력하고 있다. 아시아-태평양 국가들에 계절 예측 정보를 제공하기 위해서 매월 전세계 기후관련 기관들의 계절 예측 정보를 이용하여 전 지구 다중모형 앙상블 예측시스템을 운영하고 있는 APEC 기후센터는 다중모형앙상블 예측성 향상에 기여하고자 최근에 하와이대 연구팀과 협업으로 최신의 초기장 기법을 사용하는 새로운 고해상도 예측모형을 개발하였다. 아울러 개발된 새로운 모형의 예측성능 향상 및 현업화를 위해서 지속적인 노력을 하고 있다.

본 연구보고서는 새로운 계절 예측 모형의 현업 활용을 위해서 생산된 과거 예측 자료를 관측치와 비교하여 그 모형의 전반적인 예측 성능을 평가하였다. 특히 열대 인도양과 열대 태평양에서의 예측성 평가에 중점을 뒀는데, 열대 태평양과 인도양의 해수면 온도 변화는 태평양 도서국들을 포함하는 근거리의 적도 지역뿐만 아니라 먼 거리의 중위도 지역 등에 평년과는 다른 기후 (홍수, 극한 가뭄 등)를 경험하게 하여, 사회, 경제적인 피해를 유발할 수 있기 때문에, 두 대양에서의 예측성 평가는 필수적이라 할 수 있다. 새로운 모형의 예측성 평가 결과들은 실제 현업 계절 예측의 보정을 위해서 활용될 수 있으며, 아울러 평가된 예측성은 실제 현업을 위해서 새로운 계절 예측 모형이 유용한가를 결정하는데 도움을 줄 수 있다. 그러므로 본 연구를 통해서 APEC 기후센터의

좀 더 정확한 예측 정보 제공을 위해 기여하고자 한다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었다. 무엇보다도 연구결과가 나오기까지 본연구를 수행해 주신 김선태 박사의 노고에 감사드린다. 또한 자문위원으로서 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 안중배 교수와 장은철 교수에게 깊은 감사를 표하는 바이다. 그리고 보고서의 수준을 제고하도록 좋은 논평을 해주신 익명의 검토자들과 연구가 순조롭게 진행될 수 있도록 특히 모형의 과거 예측된 수행 및 데이터 후처리 등에 힘써준 임아영 연구원, 예측 모형 운영을 총괄한 함수련 박사에게도 감사의 뜻을 전한다. 본 연구 보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바란다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

In this study, we assessed the prediction skills of climate variables in the tropical Pacific and Indian Oceans using retrospective forecasts from the new APCC in-house seasonal forecast model, the Seamless Coupled Prediction System (SCoPS). In the retrospective forecasts, a 7-month integration was made for each of the 12 calendar months over a period of 33 years, from 1982 to 2014. The prediction skills from SCoPS are compared with those from the existing APCC in-house model, CCSM3. Firstly, SCoPS has better overall skill for prediction of global 2m air temperature and precipitation. Particularly, SCoPS has significant skill in predicting precipitation at 6-month lead time over the tropical Pacific Ocean, whereas the CCSM3 has no skill at all. However, precipitation and air temperatures over the land regions beyond the Tropics fail to be predicted in both models, even with an early lead forecast time.

Next, we evaluated the prediction skills for El Niño–Southern Oscillation (ENSO). With SCoPS, there is improvement in predicting all of the ENSO related indices from 1 to 6-month lead times. In terms of the prediction of the extreme 1997/98 El Niño event, when SCoPS starts from July and September initial conditions, it can successfully simulate the amplitude of the Niño 3.4 index, while CCSM3 predicts a much weaker 1997/98 El Niño event. However, when SCoPS is initialized in March and May, namely spring season, it cannot simulate the intensity of the observed Niño 3.4 index. It is speculated that the prediction error in ENSO amplitude is partly related to the cold bias in the tropical Pacific Ocean, which peaks in the summer season after the forecast model starts from the initial conditions in Spring.

This study also estimates the skill in predicting two types of ENSO, Eastern Pacific (EP) and Central Pacific (CP) type. It was found that the EP type is better predicted in SCoPS and the CP type is better predicted in CCSM3. In both models, the two types of ENSO are not separated well, as they were in the actual observations.

When estimating skills in the Pacific Island Countries, in addition to the prediction skill of the dominant mode in the tropical Pacific, we separated the Pacific Island countries into four climatic regions; the Western Pacific (WP), North Western Pacific (NWP), South Western Pacific (SWP), and Equatorial Pacific (EQP). Overall, SCoPS has better performance when predicting 2m air temperature and precipitation over their regions from 1 to 6-month lead times. It was found that the EQP region has better skills than other climatic regions for both precipitation and 2m temperatures. In terms of seasonal dependence of the prediction skills, SCoPS has better capability when predicting air temperature and precipitation in the Spring or Winter seasons.

We also evaluated the skills for the Indian Ocean Dipole (IOD) and Indian Ocean basin-wide (IOBW) mode related SST anomalies, and found that SCoPS significantly improves prediction capability for the IOD and IOBW modes when compared with CCSM3. We also verified the prediction skill for ENSO and IOD impact on local precipitation change, and identified that there is increased teleconnection error with forecast lead times.

Lastly, the SCoPS prediction skills were compared with those in the nine APEC Climate Center (APCC) Multi Model Ensemble (MME) system seasonal forecast models in terms of ENSO, IOD, IOBW mode, and precipitation over the globe, South Asia, East Asia, and the five climatic regions of the Pacific island countries. Overall, we found that SCoPS has comparable prediction skills to the APCC MME models.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	5
2.1 관측 자료	5
2.2 과거 예측 자료 생산	5
2.2.1 모형 개요	5
2.2.2 과거 예측 런	6
2.3 예측성 검증	7
2.4 다른 계절 예측 모델과 비교 검증	11
3. APCC in-house 모형들의 예측 성능 비교	12
3.1 전 지구 기온과 총 강수량	12
3.2 태평양에서 예측 성능	14
3.2.1 ENSO 예측	14
3.2.2 ENSO 다양성 예측	20
3.2.3 태평양 도서국 지역의 예측	25

3.3 인도양에서 예측 성능-----	31
3.4 주요 기후 모드와 지역 강수변화 관계 예측성능-----	34
3.4.1 ENSO와 지역 강수 변화-----	34
3.4.2 IOD와 지역 강수변화-----	35
4. APCC MME 시스템 모형들과 예측성 비교-----	40
5. 요약 및 결론-----	44
Ⅱ REFERENCE-----	47

1. 서론

APEC 기후센터 (APEC Climate Center, 이하 APCC)는 APEC 회원국 기후 센터들로부터 계절 예측 자료를 제공 받아서 APCC 다중 모형 앙상블 (Multi-Model ensemble, 이하 MME; Jeong et al. 2012) 시스템을 운영, 6개월까지 계절 예측 정보를 생산하고 있다. 아울러 APCC 자체 계절 예측 모형인 APCC CCSM3를 현업 운영하여 역시 계절 예측 정보를 생산하고 있으며, APCC MME 계절 예측에 기여하고 있다. 그러나 현재 현업 운영하고 있는 APCC in-house 모형은 2004년에 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration (이하 NCAR)에서 공개된 기후 접합 모형인 CCSM3 (Collins et al. 2006)를 현업화 한 것이며, 상당히 단순한 초기화 과정 (예: 단순 너징 방안; Rosati et al. 1997; Kleenside et al. 2005; Luo et al. 2005)에 의해서 초기값이 생산되며, 더군다나 대기-해양 모형의 해상도가 그렇게 높지 않다. 그래서 APCC는 지난 수 년 동안 미국의 하와이 대학교와 최신의 향상된 초기화 방안을 갖고, 고해상도인 대기-해양-지면-해빙 접합 모형인 SCoPS (Seamless Coupled Prediction System)를 개발 하였다. 계절 예측 모형에서 기후 예측성은 느린 대기-해양-지표-해빙 접합 역학들과 해양과 대기의 초기 메모리들로부터 발생한다 (Wang et al. 2009). 모형의 계절 예측 향상을 위해서 좀 더 완벽한 모형 구축도 중요하지만, 초기 조건 혹은 자료 동화의 중요성은 이전 연구들에서 (Ji et al. 1998; Jin et al. 2008; Fu et al. 2009, 2011; Hudson et al. 2010; Kim et al. 2015) 강조되고 있으며, 따라서 개발된 APCC SCoPS에서 해양, 대기 초기화 개선은 이전 APCC CCMS3에서 보다 훨씬 향상된 예측성을 기대할 수 있다. 그런데, SCoPS의 현업 활용을 위해서는, 생산된 과거 예측 자료를 관측과 비교하여 모형의 전반적인 예측 성능을 평가해야 한다. 이는 실제 현업 계절 예측의 calibration을 위해서 중요하며, 평가된 예측성은 역학적 예측 모형이 실제 현업을 위해서 유용한가를 결정하기 위해서 중요하다. 그와 같은 평가를 위해서 1982년에서 2014년까지 매년 12개월에서 매월 시작하는 6개월 과거 예측 자료를 생산하였다.

본 연구에서는 열대 인도양과 열대 태평양에서 예측성 평가에 중점을 두었다. 열대 태평양은 2년에서 7년 주기로 양의 phase (즉 엘니뇨)와 음의 phase (라니냐)사이를 진동하며, 북반구 겨울에 강도가 가장 절정에 이르는 대기-해양 결합 지배 기후

모드인 엘니뇨-남방진동 (El Nino-Southern Oscillation, 이하 ENSO)이 존재하는 지역이다. ENSO는 동적도 태평양에서 해수면 온도(sea surface temperature, 이하 SST) 변화와 관련 되지만, 지역적인 SST 변화는 태평양 도서국들을 포함하는 근거리의 적도 지역뿐만 아니라 먼 거리의 중위도 지역 등에 평년과는 다른 기후 (홍수, 극한 가뭄 등)를 경험하게 하여, 사회, 경제적인 피해를 유발할 수 있다 (Philander 1983; McPhaden 1999; McPhaden et al. 2006; Power et al. 2013; Cai et al. 2014). 그리고 산호 백화 현상, 페루 앞바다에 멸치 떼죽음 같은 해양 생태계에도 상당한 영향을 미친다고 알려져 있다 (McPhaden et al. 2006; Chavez et al. 2003). 그러므로 좀 더 긴 예측 선행 시간에서 정확도가 높은 ENSO 예측을 위해 기후 접합 모형의 개선이 필요하며, 계절 예측 모형에서 ENSO 예측 성능 분석은 필수적이라 할 수 있다. 더군다나 접합 모형에서 ENSO 예측 성능은 전 지구 계절 예측능력에 영향을 미친다는 과거 연구들이 있다 (예: Kim et al. 2012; Peng et al. 2009; Jia et al. 2015).

그런데 ENSO 예측에서 더 복잡하게 만드는 것은 최근 연구들에 의하면 ENSO는 동적도 태평양에서 SST 아노말리가 변동하는 일반적인 conventional ENSO (Rasmusson and Carpenter 1982) 외에 주로 SST 변동 action center가 중적도 태평양에 위치하는 non-conventional ENSO 두가지 타입이 존재한다고 최근 10년간 여러 연구들에서 밝혀내었다 (Larkin and Harrison 2005; Yeh et al. 2009; Kao and Yu 2009; Ashok et al. 2007; Kug et al. 2009; Ren and Jin 2013; Capotondi et al. 2015). 한편 non-conventional 타입 ENSO에 대하여 여러 연구들에서 다른 용어들 즉, Central Pacific (이하 CP, Kao and Yu 2009) 엘니뇨, date line 엘니뇨 (Larkin and Harrison 2005), 엘니뇨 Modoki (Ashok et al. 2007), 그리고 warm pool 엘니뇨 (Kug et al. 2009)등을 제안 하였다. 본 연구에서는 Kao and Yu (2009)가 제안한 CP ENSO 라는 용어를 사용하며, conventional ENSO에 대하여 역시 그 연구에서 제안한 Eastern Pacific (이하 EP) ENSO 라는 용어를 사용하였다.

CP 타입 엘니뇨는 1990년 대 이후로 EP 타입보다 더욱 빈번하게 발생하였으며, 전 지구 기후에 미치는 영향이 다르다고 보고되었다 (Kao and Yu 2009; Yeh et al. 2009; Xiang et al. 2013; Zhang et al. 2014). 다시 말해서, CP 타입과 EP 타입 엘니뇨와 관련된 SST 변화의 action center가 다르고, 그러므로 엘니뇨 타입과 관련된 deep convection의 위치도 변하기 때문에, 중위도로의 원격 상관이 변할 수 있다

(Yeh et al. 2009). 최근 연구 Yu et al. (2012)은 두 ENSO 타입의 미국 겨울철 기온에 대한 영향이 다름을 보였다. 즉 EP 타입 엘니뇨는 미국의 Great Lakes, 남동 및 남서 지역의 겨울철 기온에 상당한 영향을 미치며, 반면에 CP 타입 엘니뇨는 주로 북서 및 남동 지역의 기온에 주로 영향을 미침을 보였다. 동아시아에서는 CP 엘니뇨가 발달할 때 EP 엘니뇨가 발달할 때보다 여름철 강수에 더 강한 영향을 미치며, 엘니뇨가 쇠퇴하는 여름에는 EP 타입 엘니뇨가 동아시아의 강수와 좀 더 강한 상관관계를 갖는다 (Yuan and Yang 2012). Zhang et al. (2014)은 최근 남 중국의 가을 가뭄 증가의 원인은 최근 빈번 했던 CP 엘니뇨와 관련이 있다고 보였다. 원격상관의 차이 이외에도 엘니뇨 타입이 가을철에 북서 태평양에서 발생하는 열대 저압부 (Tropical Cyclone, 이하 TC) 강도 혹은 이동경로 와도 관련이 있을 수 있다. 즉 CP 타입 엘니뇨가 발달할 때 더 강한 TC들이 발생할 가능성이 EP 타입 엘니뇨 발달할 때보다 더 높으며 (Zhang et al. 2015), CP 엘니뇨가 발달할 때, 동아시아에서는 일본이나 한반도 해안으로 향하는 TC들이 더욱 빈번하게 발생할 수 있다 (Zhang et al. 2012). 북아메리카에서는 미국 동쪽 해안과 캐리비안 쪽으로 landfall하는 TC들이 더 많아지게 된다 (Kim et al. 2009). 그러므로 집합 계절 예측 모형에서 ENSO 다양성에 대한 예측성 검증은 필수적이라 할 수 있다.

인도양의 SST는 남아시아 몬순뿐만 아니라, 동 아시아 여름 몬순에도 상당한 영향을 미친다고 알려져 있다 (예: Xie et al. 2009; Annamalai and Murtugudde 2004). 특히 열대 인도양은 엘니뇨 peak 이후 즉 엘니뇨 발달 이후 다음 해 여름 까지 남서 인도양 basin에서 downwelling 해양 로스비 파동 발생 (Xie et al. 2002)과 heat flux의 변화 (즉 잠열 혹은 구름 변화로 인한 solar radiation 변화; Klein et al. 1999)로 인하여 SST가 상승하는데, 이로 인하여 북서 태평양에서 고기압 대 형성, 동아시아 여름 장마 동안 강수량 증가 등 아시아 여러 지역의 기후에 영향을 미친다 (Xie et al. 2009). 그리고 인도양에서도 태평양처럼 IOD (Indian Ocean Dipole; Saji et al. 1999)라 하는 대기-해양 결합 지배 기후 모드가 존재한다. 양의 IOD는 남동인도양의 자바-수마트라 해안에 음의 SST 아노말리와 서인도양에 양의 SST 아노말리의 특징을 가지며, 음의 IOD일 때 반대의 SST 아노말리 분포를 보인다. 각각의 phase에서 중앙 적도 인도양에서 뚜렷한 동풍과 서풍을 동반한다. 그 IOD 이벤트들은 항상 북반구 여름철에 빠르게 발달하고 가을에 peak에 도달하고, 다가오는 겨울에 급

격히 감소하며, 아프리카, 남아시아, 동아시아, 그리고 다른 remote 지역에서의 기후 변동에 상당한 영향을 끼친다 (Ashok et al. 2004; Annamalai and Murtugudde 2004; Behara et al. 2005; Cai et al. 2011). 그러므로 전체 인도양에서 SST 예측성 평가 및 IOD에 대한 평가가 본 연구에서 수행 되었다.

태평양과 인도양에서 SST 변동성과 관련된 예측성 평가뿐만 아니라, 최근 APCC에서 기후 예측 정보 제공 및 활용을 위한 관심 지역 들 중 태평양 도서국들도 포함이 되며, 이들 지역에 대한 기온 및 강수량에 대하여 예측성 검증도 수행하였다. 적도 북쪽으로는 계절적으로 남북 방향으로 변동하는 Intertropical Convergence Zone (ITCZ) 존재하며, 적도 북쪽에 위치해 있는 태평양 도서 국가들의 계절 강수 패턴에 영향을 미치며, 적도 남쪽의 도서 국가들은 South Pacific Convergence Zone (SPCZ)의 확장 정도에 따라 강수량의 계절 변화가 결정될 수 있다. 그러므로 태평양 도서국의 기온 및 강수량에 대한 모형 예측성의 계절적 변화도 살펴볼 필요가 있다. 즉 강수량 관련 건기와 우기 때 예측성능 비교는 필요하며, 이는 태평양 도서국가들에서 SCoPS 기후 예측 자료 활용을 위해서 필요한 정보라고 사료된다.

섹션2에서 모형 개요, 모형 과거예측 자료 생산, 분석 방법에 대하여 다루며, 섹션3에서는 태평양과 인도양에서 SST변동성, 기온, 강수량, ENSO 다양성에 대한 예측성 검증 및 기존의 APCC 예측 모형인 CCSM3와 예측성능 비교가 다루어지고, 섹션 4에서는 APCC MME 시스템 모형들과 예측성 비교를 다루었다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 관측 자료

과거 예측 자료의 검증을 위해서, SST 예측은 optimum interpolation SST version 2 (OISSTv2; Reynolds et al. 2007)의 SST 자료와 비교되었다. 강수량 예측에 대한 검증을 위해서 Global Precipitation Climatology Project (GPCP; Adler et al. 2003)의 관측 강수량 자료가 사용되었다. 2미터 기온에 대하여 National Centers for Environmental Prediction (이하 NCEP) 재분석 (Kalnay et al. 1996) 자료를 사용 하였다. 사용된 재분석 자료의 기간은 과거 예측 자료의 기간과 동일한 기간인 1982년에서 2014년까지 이다.

2.2 과거 예측 자료 생산

2.2.1 모형 개요

SCoPS는 대기, 해양, 지면, 해빙 성분 모형들로 구성되어 있다. 대기모형은 European Centre Hamburg Model (ECHAM, v5.3; Roeckner et al. 2003)이며 수평 해상도는 T159이고 연직으로 31층을 갖는다. 그 수평 해상도는 약 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 해상도의 가우시안 격자에 상응한다. 지면 모형은 향상된 bucket 모형 버전이다. 해양 성분 모형은 POP 버전 2.0.1 (Smith et al. 1992)이며, $1^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 수평 해상도와 연직으로 40층을 갖는다. 해빙 모형은 Los Alamos Sea Ice Model (CICE, v4.1)이며 해양 모형과 같은 $1^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 수평 해상도를 갖는다 (Hunke and Lipscomb 2010). 그 대기-해양-지면-해빙 성분 모형들은 Ocean-Atmosphere-Sea Ice-Soil (OASIS, v3.0)-Model Coupling Toolkit (Valcke et al. 2012)이라는 coupler에 의해서 연결되며, 하루 간격으로 서로 필요한 변수들을 교환하게 된다.

2.2.2 과거 예측 런

6개월 과거 예측 자료는 1982년부터 2014년까지 매년 12개월에서 매월 1일과 5일의 초기 조건으로 부터 시작하여 7개월 동안 적분을 수행함으로써 생산된다. 1일과 5일에 각각 5개씩 총 10개의 앙상블 멤버 예측 런들이 수행되어 매달 10개의 앙상블 예측 자료가 생산 되었다. 초기 조건들은 3-D 대기 초기화와 Ensemble Adjustment Kalman Filter 해양 초기화를 결합하는 결합 대기-해양 초기화 방안을 사용하여 얻어졌다. 대기 초기화를 위해서 NCEP Climate Forecast System Reanalysis (이하 CFSR, Saha et al. 2010) 실시간 재분석 자료가 사용되었으며 해양 초기화를 위해서 XBT, ARGO와 같은 해양 profile 자료가 사용되었다. Figure 1은 결합 대기-해양 초기화 과정에 의해서 생산된 SST와 두 SST 재분석 자료, 즉 OISST와 CFSR과의 각 격자점들에서 계산된 시간 상관 계수 분포를 보여준다. 먼저 OISST와 비교될 때 (Fig. 1a) 오호츠크 해, 남극해 근처, 서태평양 일부 지역, 한국과 일본 근처 해안에서 제외하고 거의 모든 태평양 지역에서 0.9 이상의 상관계수를 갖는다. 인도양에서는 0.8 이상의 상관계수를 가지며, 남 인도양 (40°S 이상 남극방향)에서 상관계수가 0.7 이하로 감소한다. 대서양에서는 북아메리카 해안 지역, 남대서양 에서 0.7 이하의 상관계수를 갖는다. 이 결과는 특히 남반구에서 사용된 자료 동화 과정에서 어떤 오류들이 존재 할 가능성에 대해 누군가가 제안할 수 있다. 그러나, 자료 동화 과정에서 사용된 CFSR에서 제공된 SST 자료와 비교하면 일부 지역 (예: 오호츠크 해, 라브라도 해, 남극해 근처지역 등)들을 제외하고 대부분 해양 지역에서 0.9 이상의 상관계수를 가짐을 확인 할 수 있다. (Fig. 1b). 이는 재분석 자료들 간의 불확실성이 존재 하며, 아울러 어떤 관측 혹은 재분석 자료를 사용하느냐 예측성 분석 결과가 다소 달라질 수 있음을 의미한다. 그럼에도 불구하고, 본 연구 결과들은 OISST와 예측성 분석을 기반으로 하였다.

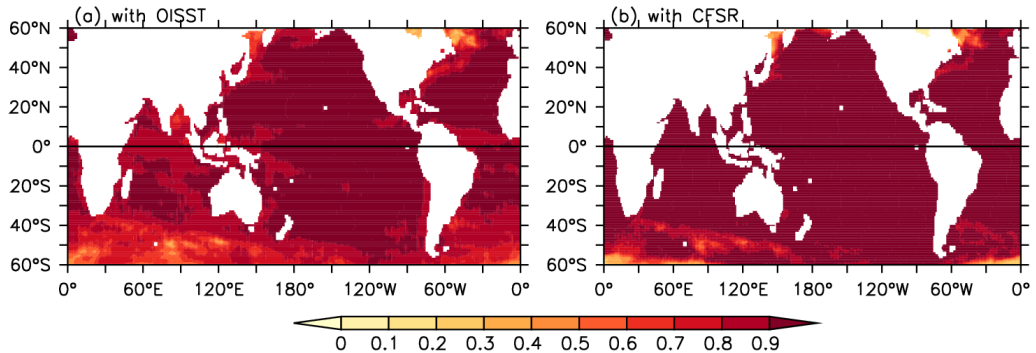


Figure 1 Spatial patterns of temporal correlation coefficients between observations and initial conditions. Observations correspond to sea surface temperatures taken from (a) OISST and (b) CFSR.

모든 분석들은 각 앙상블 멤버 예측들을 단순 평균한 앙상블 평균 예측 자료들을 기반으로 수행되었다. 앙상블 평균 예측 자료들은 각 예측 선행시간 별로 33년 12개월 자료로 재구성 되었으며, 재구성된 자료에서 예측 선행 시간 별로 계절 평균을 제거함으로써 아노말리 자료들이 생산 되었다.

2.3 예측성 검증

열대 인도양 및 태평양에서 주요 기후 변수들 (즉 SST, 기온, 강수량 등)의 예측성 평가는 아노말리 시간 상관 계수 (anomaly Temporal Correlation Coefficient, 이하 TCC), 제곱 평균 에러 (Root Mean Square Error, 이하 RMSE) 분석을 통하여 수행되었다.

또한 인도양에서 주요 기후 모드인 IOD와 인도양 basin-wide (이하 IOBW) 모드들과 태평양에서 주요 모드인 ENSO에 대하여 SCoPS의 예측성능을 평가하였다. IOD는 서 인도양 (이하 WIO, 50°E-70°E, 10°S-10°N)에서 지역 평균된 SST 아노말리와 동 인도양 (이하 EIO, 90E-110E, 10°S-0°)에서 지역 평균된 SST아노말리의 차이 (Saji et al.1999)로서 정의 되었다. IOBW 모드와 관련된 인도양 SST의 변화는 열대 인도양 전체지역 (이하 TIO, 40°E-100°E, 20°S-20°N)에서 평균된 SST 아노말리로서 표현되었다. 열대 인도양의 subsection들인 북 인도양 (이하 NIO, 40°E-100°E, 0°-20°N)과 남서 인도양 (이하 SWIO, 50°E-80°E, 15°S-5°S)에서 SST 아노말리의 변화에 대한 예측성도 평가하였다. 서론에서 언급했듯이 이들 지역 SST를 결정하는 물리

적, 역학적 원인들이 다르므로, 이들 지역에서 예측성 검증을 통해서 모형의 문제점을 일부 파악할 수 있을 것으로 사료된다. ENSO는 NINO3.4 (170°W - 120°W , 5°S - 5°N)지수로서 정의하였으며, 다른 ENSO 지수들인 NINO4 (160°E - 150°W , 5°S - 5°N), NINO3 (150°W - 90°W , 5°S - 5°N), NINO1+2 (90°W - 80°W , 10°S - 0°)지수들에 대하여도 예측성 평가를 수행 하였다.

그러한 ENSO 지수들에 대한 예측성 평가에 추가하여, ENSO 타입 혹은 flavor들에 대한 예측성도 평가되었다. ENSO 타입의 classification에 대하여 최근 10년간 많은 연구들에서 여러 방법들이 제안 [예, Kug et al. 2009; Ren and Jin 2013, Kao and Yu 2009, Ashok et al., 2004; 그리고 그 방법론에 대한 review는 Capotondi et al. (2015)를 참조 할 것 되었으며, 본 연구에서는 Kao and Yu (2009)에서 제안된 combined regression-Empirical Orthogonal Function (EOF) 방법을 사용하였다. EP 관련된 SST 패턴은 먼저 NINO4 지수와 회귀된 열대 태평양 SST 아노말리를 선형적으로 제거한 후, 그 residual SST 아노말리에 EOF를 적용하여 얻어졌다. 비슷한 방법으로 NINO1+2 지수와 회귀된 SST 아노말리들을 제거한 후, 그 residual SST 아노말리에 EOF를 적용하여 CP 관련 SST 패턴이 얻어졌다. 여기서 NINO4 와 NINO1+2 지수들은 각각 CP ENSO와 EP ENSO를 표현한다고 가정하였다. 결과적으로 얻어진 EP와 CP ENSO 관련 leading EOF 모드들을 열대 태평양 SST 아노말리들에 projection함으로써 EP와 CP ENSO 타입의 상대적인 강도를 설명하는 지수 (즉 각 leading EOF 모드의 Principal Component, PC) 들이 정의된다. Figure 2는 combined regression-EOF 방법을 OISST 관측 자료에 적용하여 얻어진 EP와 CP ENSO와 관련된 leading EOF 패턴과 지수들의 시계열들을 보여준다. EP ENSO는 남 아메리카 해안에서 중앙 적도 태평양으로 SST 아노말리가 확장하는 특징을 갖고 있으며, CP ENSO는 중앙 적도 태평양에서 중심이 되며 미국 캘리포니아 해안 방향으로 확장하는 SST 아노말리의 패턴을 보인다. 그리고 두 지수의 시계열에서는 대표적인 EP 타입 엘니뇨인 1982/83 이벤트와 1997/98 이벤트 그리고 CP 타입 엘니뇨인 2009/10 이벤트에 대하여 상대적으로 높은 지수값을 보이고 있다.

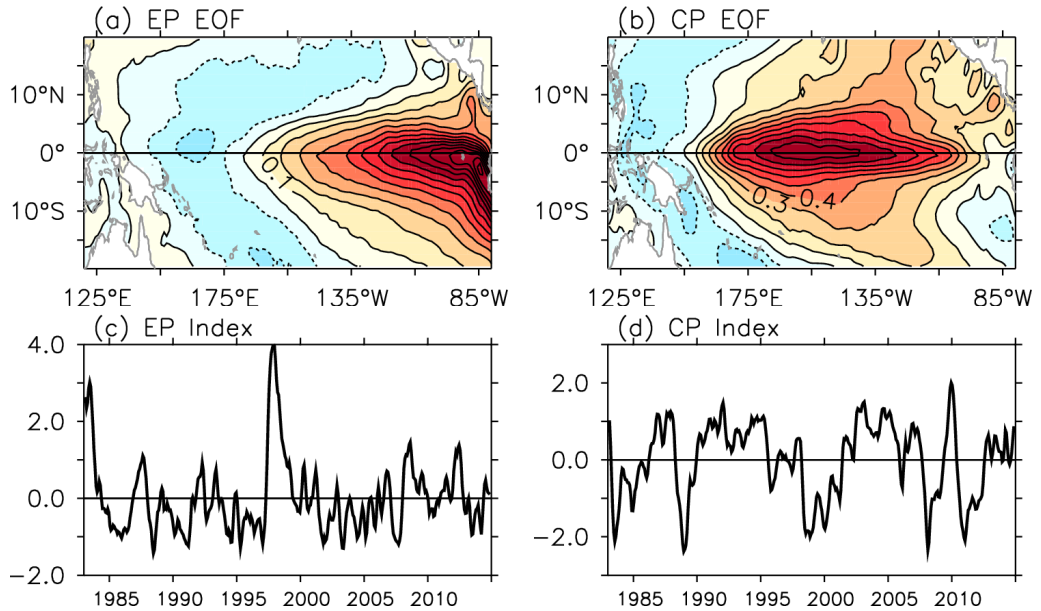


Figure 2 EOF patterns for (a) EP and (b) CP ENSO type from OISST, and time series of (c) EP and (d) CP indices represented by the principal components of each leading EOF pattern.

SCoPS에서 ENSO 타입 예측성능 검증은 관측 EOF 패턴에 1 개월에서 6 개월까지 예측 선행 시간에서의 SST 아노말리들을 projection 하여 얻어진 지수들을 관측과 비교하여 수행 되었다.

본 연구에서 수행 하고자 하는 지역적인 예측성 검증들 중 하나인 태평양 도서국가에서 기온, 강수량 예측성 분석은 SCoPS의 수평 해상도 때문에 각각의 태평양 도서국가별로 분석이 어려우므로 4개의 기후학적 지역 (Murphy et al. 2014; Fig. 3 와 Table 1)에서 TCC 값들을 평균하여 예측성 검증이 이루어졌다. 4개의 기후학적 지역들은 동 티모르, 파푸아뉴기니, 솔로몬 아일랜드를 포함하는 서 태평양 지역 (120°E-160°E, 12°S-2°N, 이하 WP), 팔라우, 미크로네시아, 마셜 아일랜드를 포함하는 열대 북서 태평양 지역 (130°E-180°, 5°N-13°N, 이하 NWP), 나우루, 키리바티, 투발루를 포함하는 적도 태평양 지역 (165°E-155°W, 10°S-5°N, 이하 EQP), 바누아투, 피지, 사모아, 니우에, 통가, 쿡 아일랜드를 포함하는 남서 태평양 지역 (165°E-155°W, 22°S-10°N, 이하 SWP)들로 구성된다.

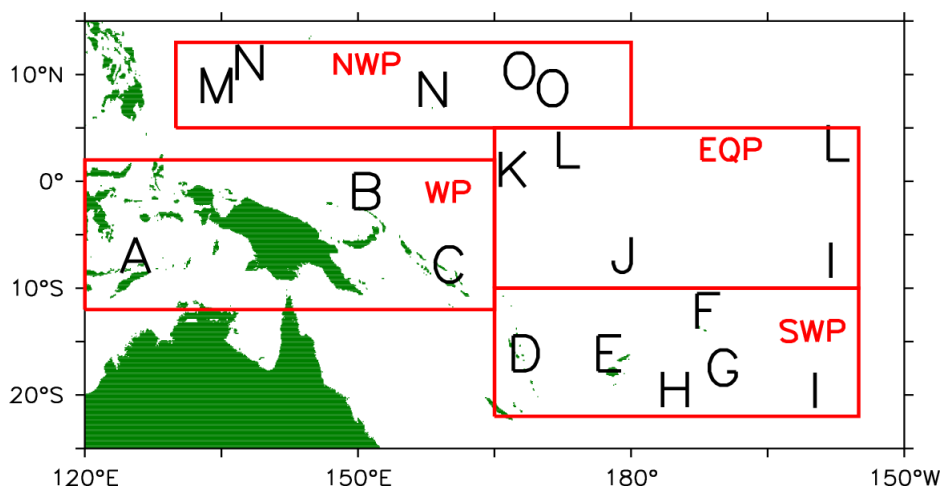


Figure 3 Approximate areas of four climatic regions (Murphy et al. 2014) to isolate the 15 Pacific Island Countries and East Timor; WP stands for Western Pacific region, NWP for North Western Pacific region, EQP for Equatorial Pacific region, and SWP for Southwestern Pacific region. The countries are marked in Alphabet based on location of stations listed in Table 1.

Table 1 Lists of Pacific Island Countries.

	Country	Station	Lon	Lat
A	East Timor	Dili	125.57°E	8.57°S
B	Papua New Guinea	Kavieng	150.82°E	2.57°S
C	Solomon Islands	Honiara	159.97°E	9.42°S
D	Vanuatu	Port Vila	168.32°E	17.74°S
E	Fiji	Nadi	177.45°E	17.75°S
F	Samoa	Apia	171.78°W	13.80°S
G	Niue	Hanan	169.93°W	19.08°S
H	Tonga	Nuku-alofa	175.18°W	21.13°S
I	Cook Islands	Rarotonga (south) Penrhyn (north)	159.80°W 158.05°W	21.20°S 9.03°S
J	Tuvalu	Funafuti	179.22°E	8.52°S
K	Nauru	Nauru	166.92°E	0.52°S
L	Kiribati	Tarawa Kiritmati (Line Islands)	172.92°E 157.48°W	1.35°N 1.98°N
M	Palau	Koror	134.48°E	7.33°N
N	Federated States of Micronesia	Yap (west) Pohnpei (east)	138.08°E 158.22°E	9.48°N 6.97°N
O	Marshall Islands	Kwajalein (north) Majuro (south)	167.73°E 171.38°E	8.73°N 7.08°N

2.4 다른 계절 예측 모델과 비교 검증

본 연구에서 SCoPS의 예측성능 분석들은 주로 기존 APCC 현업 운영 모형인 CCSM3에서 SCoPS와 같은 기간 (1982-2014)의 6개월 과거 예측 자료 분석과 비교 검증 되었다. APCC CCSM3는 미국의 National Centers for Atmospheric Research (NCAR)에서 만든 대기-해양-지면-해빙 접합모형 이다. 대기는 Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3, Collins et al. 2004)이며, $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ 의 수평 해상도에 상응하는 T85와 연직으로 26층을 갖는다. 지면 모형은 Community Land Surface Model 3 (CLM3, Oleson et al. 2004)이고 해빙 모형은 Community Sea Ice Model 5 (CSIM5, Briegleb et al. 2004)이다. 해양 모형은 Parallel Ocean Program version 1.4.3 (POP)이며 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (적도 근처에서 $1/3^{\circ}$) 수평해상도와 연직으로 40층을 갖는다.

추가적으로 APCC MME 참여 모형들 (Table 2) 과도 일부 기후 인자들, 즉 ENSO, IOD, IOBW 모드에 대하여 예측성 비교가 이루어졌고, 태평양 도서국의 4개의 기후학적 지역에서 강수량예측에 대한 예측 선행 시간 증가에 따른 TCC score 변화를 비교하였다. 그리고 전 지구 (0° - 360° , 60° S- 60° N) 와 특정 지역 즉 동아시아 (90° E- 120° E, 20° N- 50° N)와 남아시아 (60° E- 130° E, 10° S- 30° N)지역 에서 강수량의 예측성능을 비교하였다. 전 지구와 특정 지역들에서 예측성 검증은 그 지역에서 평균된 TCC의 비교를 통해서 수행 되었다. 그런데 MME 참여 모형들과 SCoPS와 과거 예측 자료의 기간이 서로 다르므로, 공통기간 즉 1984년부터 2005년에서 6개월 예측자료에 대하여 분석 되었다.

Table 2 Lists of 8 APCC MME Seasonal Forecast Models including APCC CCSM3 indicated by alphabet letters from B to I.

	Models	Institute
A	SCoPS	APCC, Korea
B	POAMA	Bureau of Meteorology, Australia
C	NASA	NASA, USA
D	NCEP	NCEP/NOAA/CPC, USA
E	PNU	Pusan National University, Korea
F	CMCC	Euro-Mediterranean Center on Climate Change
G	MSC-CANCM3	Meteorological Service of Canada
H	MAS-CANCM4	
I	CCSM3	APCC, Korea

3. APCC in-house 모형들의 예측 성능 비교

3.1 전 지구 기온과 총 강수량

Figure 4와 5는 1개월, 3개월, 6개월 예측 선행시간에서 2미터에서 기온과 강수량에 대한 TCC 분포를 보여준다. 두 figure들에서 전반적으로 SCoPS에서 기존의 CCSM3에서 보다 전 예측 선행 시간에서 예측 성능이 향상 되었음을 확인할 수 있다. 먼저 Figure 4에서 보여지는 것처럼 SCoPS에서 기온 예측 성능이 상당히 향상되었다. SCoPS는 1개월 예측 선행 시간에 인도양, 태평양, 대서양의 더 넓은 지역에서 TCC 0.4 이상의 예측성을 갖는다. 그리고 SCoPS에서는 전 예측 선행 시간에서 동적도 태평양, 그리고 동 인도양 지역의 기온 예측에 대하여 전반적으로 예측성 증가가 있었지만, 서 인도양에서 예측성 감소가 보였다.

기온 예측에 비교해서 다른 예측 모형들에서 보여주는 것처럼 (예: Saha et al. 2006; Jia et al. 2015) 두 예측 모형들에서도 역시 강수량 예측 (Fig. 4)은 좀 더 어려운 것처럼 보인다. 그럼에도 불구하고 강수량 예측에 있어서 1개월 선행시간에서 인도양 (특히 남서 및 동인도양), 서적도 대서양, maritime continent들을 포함하는 더 많은 지역에서 TCC 0.3이상의 예측 성능을 SCoPS에서 보여주고 있으며, 남아메리카의 서쪽 해안 근처 (NINO1+2 지역)에서 상당한 예측성을 2개월 예측 선행시간 까지 유지하고 있다. 그리고 6개월 예측 선행시간에서 적도 태평양에서 SCoPS는 TCC 값이 0.4 이상의 예측 성능을 가지며, 이는 같은 예측 선행 시간에서 강수량에 대한 예측성을 거의 보이지 않는 기존의 APCC CCSM3에서 보다 상당히 예측성 향상이 이루어졌음을 보여준다. 특히, 필리핀을 포함하는 일부 maritime continents 지역에서 6개월 예측 선행시간에서 강수에 대하여 SCoPS에서 예측성 향상을 보이기 때문에 APCC에서 그들 지역에 대한 기후 예측 서비스 제공에서 SCoPS의 기후 예측 자료 활용이 가능할 것으로 보인다.

육지나 중위도 지역에서 기온 뿐만 아니라 강수량 예측에 있어서 SCoPS는 여전히 1개월 예측 선행 시간에 조차도 (TCC 값에서 약간의 증가가 있지만) 상당한 예측성 향상을 보여주지 못하고 있다. 중위도 지역에서 낮은 예측성은 다른 예측 모델에서도 나타나는 해결해야할 어려운 도전과제 이다. 지면에서의 낮은 예측성은 지면 초기화에

의해서 어느 정도 해결될 수 있다는 선행 연구들이 존재하며 (예: Koster and Suarez, 2003), SCoPS 예측성 향상을 위해서 추후에 모형 개선계획에서 고려되어야 할 것으로 사료된다.

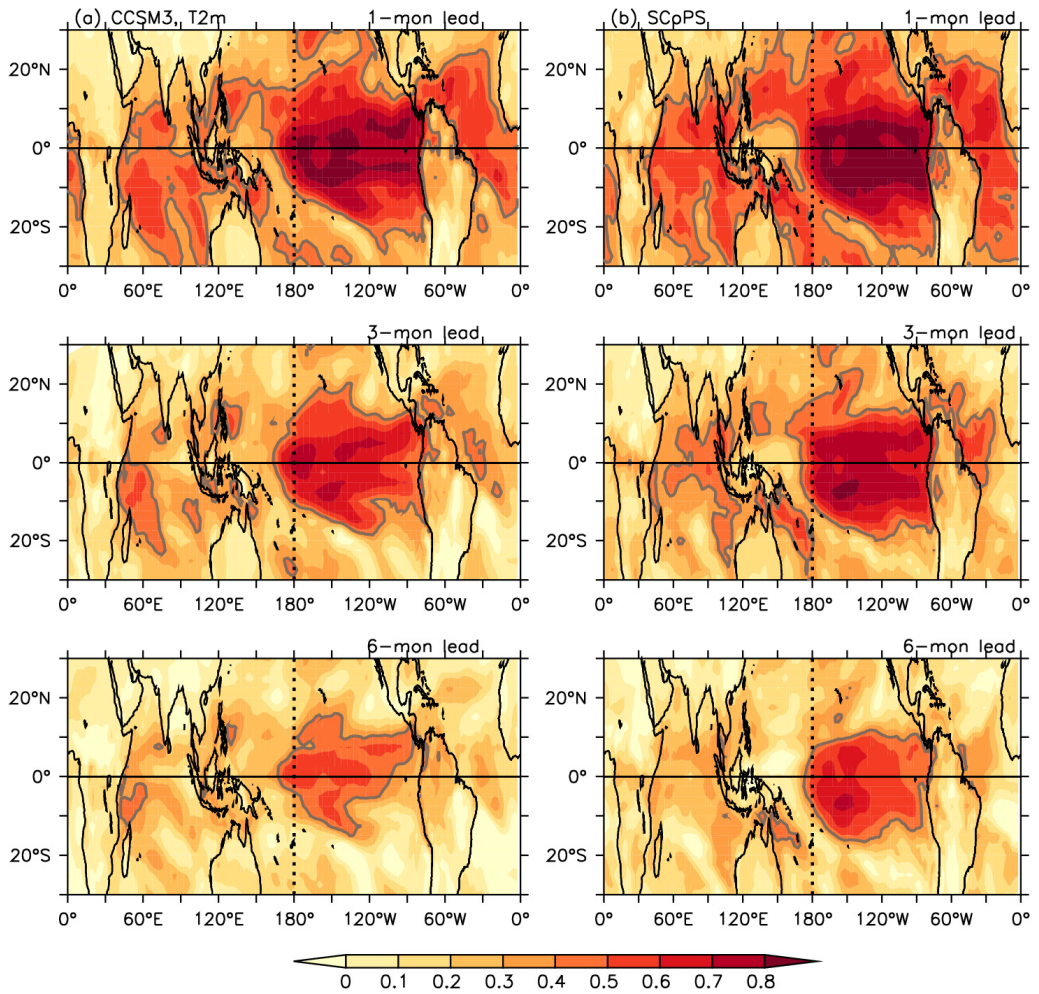


Figure 4 Spatial distribution of TCCs between 2m air temperatures predicted at 1-(upper panels), 3-(middle), and 6-(lower) month lead times in (a) CCSM3 and (b) SCoPS, and observations. The observations correspond to 2m air temperatures taken from NCEP reanalysis data. TCCs that are greater than 0.4 are contoured in gray.

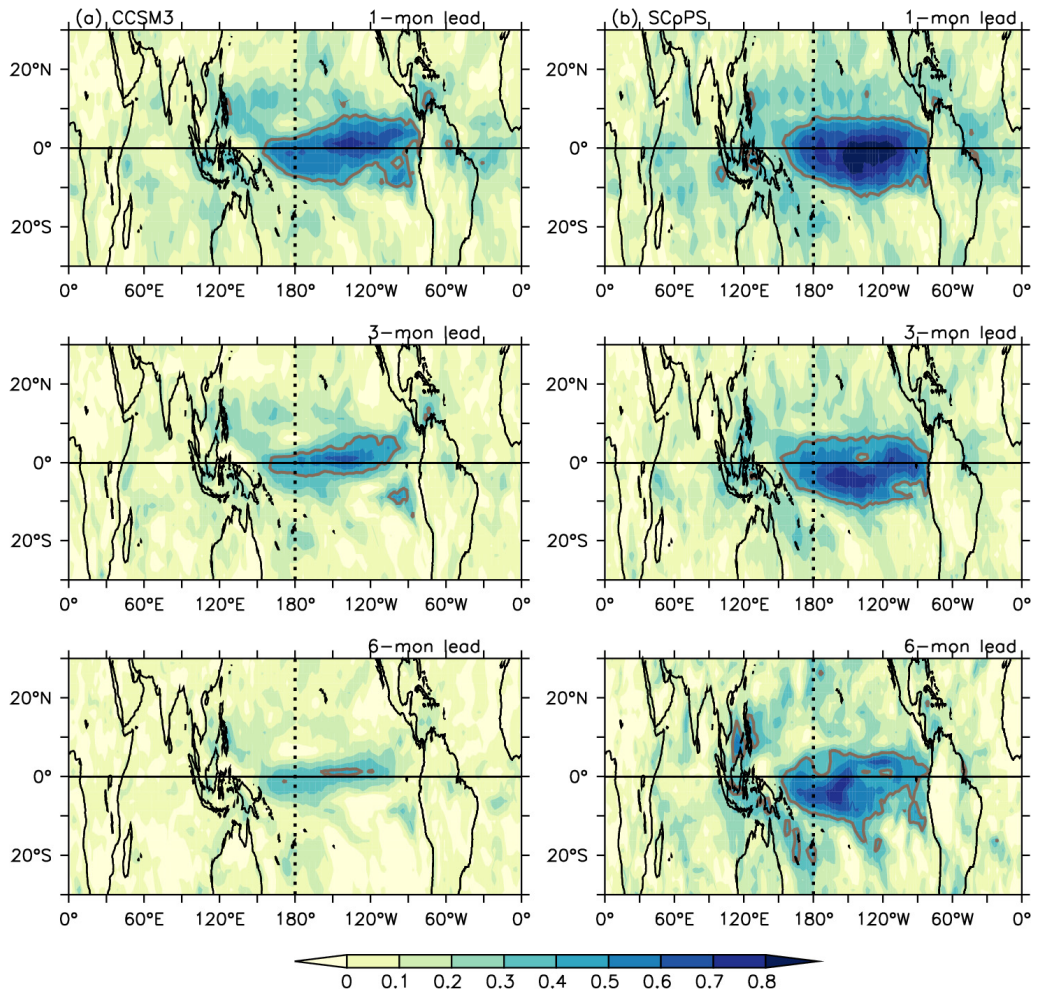


Figure 5 Same as Fig.4 except for total precipitation. For observations, GPCP data is used.

3.2 태평양에서 예측 성능

3.2.1 ENSO 예측

Figure 6는 SCoPS에서 예측된 여러 ENSO 지수에 대한 1개월에서 6개월까지 예측 선행시간에서 TCC와 RMSE를 보여준다. 이 figure에서 SCoPS의 예측 성능은 APCC CCSM3에서 예측과 persistence 예측 성능 (ENSO 지수의 auto correlation) 들과 비교되었다. 전 예측 선행 시간에 걸쳐서 SCoPS가 가장 높은 TCC와 가장 낮은

RMSE 값을 가졌음을 보여준다. 최근 들어 좀더 ENSO 다양성 (즉 EP와 CP 타입 ENSO)을 표현할 수 있어서 ENSO 강도 지수로 주로 사용되는 NINO3.4 지수 예측에 대한 1개월 예측 선행 시간에서 TCC는 SCoPS에서 0.93, APCC CCSM3에서 0.89 이었으며, 6개월 예측 선행 시간에서는 각각 0.67, 0.59 이었다. 중태평양에서 SST의 변동성을 모니터 하기 위해서 사용되는 NINO4 지수는 양쪽 모형에서 5개월 예측 선행 시간까지 비슷한 예측 성능을 보이고, 6개월 예측 선행시간에서 SCoPS가 더 나은 TCC score (SCoPS에 대하여 0.68, CCSM3에 대하여 0.61)를 보였다. 과거에 일반적으로 ENSO 모니터를 위해서 사용했던 NINO3 (동태평양 ENSO를 표현하기 위해서 주로 사용함)지수 예측은 SCoPS에서 4개월 이후 예측 선행시간들에서 CCSM3보다 훨씬 나은 예측성을 보였다. 다시 말해서 5개월 예측 선행시간 에서 SCoPS는 TCC가 0.7, CCSM3는 0.58 그리고 6개월에서 각각 0.68, 0.52 이었다. 좀 더 먼 동태평양 (즉 남아메리카 서쪽 해안 지역)에서 SST 변동성 모니터를 위해 사용하는 NINO1+2 지수 예측은 다른 지수들보다 양쪽 모형에서 예측성은 떨어지지만, SCoPS에서 persistence 예측보다 TCC 값들은 더 컸으며, 이에 반해서 CCSM3는 그 persistence 예측보다 5개월 예측 선행 시간까지 TCC값이 작았다. 중앙 태평양에서 동태평양으로 갈수록 CCSM3의 SST 아노말리 예측성 감소는 Figure 4에서도 잘 보여주고 있다.

Figure 7은 예측 target 월별로 ENSO 지수 (즉, NINO3.4 지수)의 예측 선행 시간 증가에 따라 SCoPS의 예측성 변화를 보여준다. 먼저 관측에서 persistence 예측은 5 월에서 11월까지의 NINO3.4 지수예측을 target으로 할 때 예측 3개월 예측 선행 시간 이후 TCC가 급격히 감소하는데, 특히 늦은 봄에서 여름철의 (즉 5월에서 8월) NINO3.4 지수 예측에 대하여 초기 예측 선행 시간에서조차도 TCC가 0.6 이었고 2 개월 예측 선행 시간에서 TCC가 0.35로 감소한다. 그 예측들은 11월에서 2월에 시작한 예측으로서 봄철이 지나면서 ENSO 지수의 예측성이 급격히 감소함을 의미하는데 이는 ENSO 예측의 spring barrier (Webster and Yang 1992) 라고 알려져 있다. 6 월에서 9월 시작하는 ENSO 성숙 계절인 겨울철 ENSO 지수에 대한 persistence 예측에서는 0.7 이상의 상관계수를 유지함을 보여준다 (Fig. 7a). 결국 이는 관측에서 긴 예측 선행 시간에서도 ENSO 관련 SST 아노말리에 대하여 상당한 예측성을 유지 하게 하는 해양 메모리가 강함을 의미하는데, 이러한 메모리 덕분에 모형들에서 6개월 이상의 예측 선행 시간에서도 상당히 높은 TCC를 갖게 된다 (Fig. 7b, c). SCoPS

나 CCSM3에서는 ENSO 지수 예측에 있어서 spring barrier의 영향을 받고 있어서 5월에서 7월 ENSO 지수 예측에서 1개월 예측 선행 시간에서 0.8 이상의 TCC가 2개월 예측 선행시간에서 0.6 이하로 급격히 감소하였다. 겨울철 ENSO 지수에 대한 예측성은 SCoPS에서 더 나았고, 여름철 ENSO 지수 예측에서는 CCSM3에서 다소 TCC가 더 높았다.

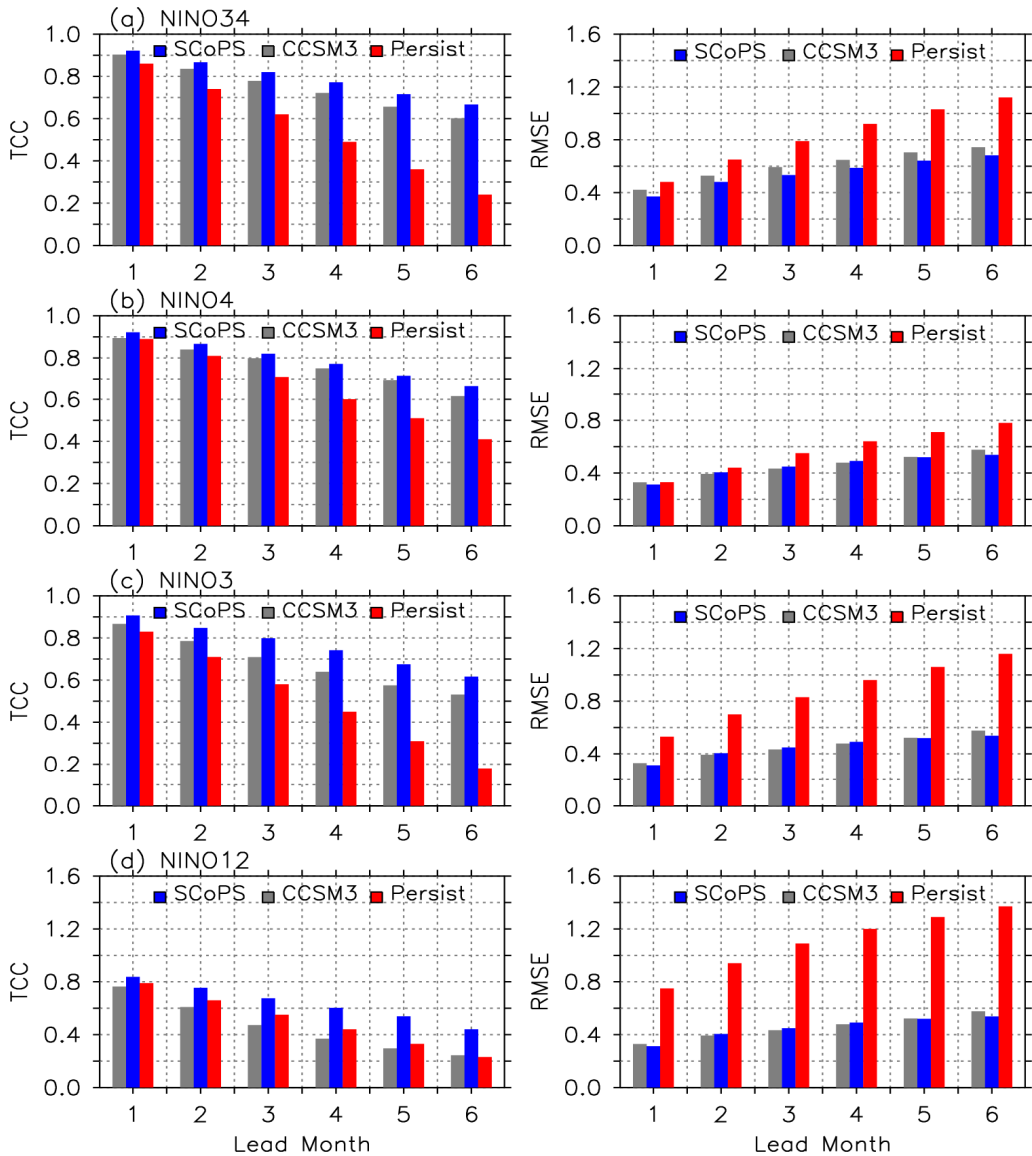


Figure 6 (Left) TCCs and (Right) RMSEs for (a) NINO3.4, (b) NINO4, (c) NINO3, and (d) NINO1+2 index between forecasts from 1-to 6-month lead times and OISST. Blue bars are for SCoPS prediction, gray bars for CCSM3, and red bars for persistence prediction.

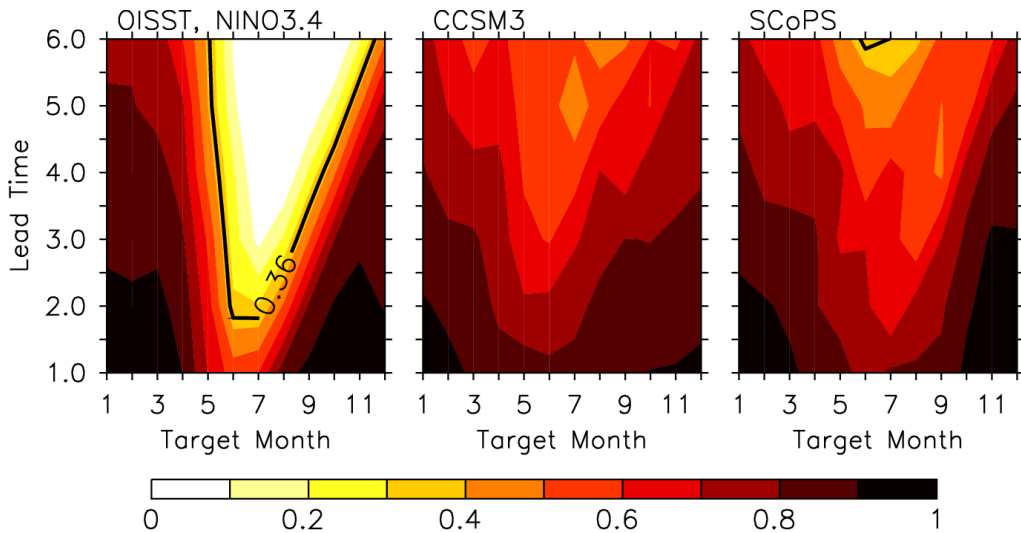


Figure 7 (left) auto correlations of NINO3.4 index (persistence forecast) and TCCs between model [(middle) CCSM3 and (right) SCoPS] forecasts and observations as a function of lead time and target month. Contours indicate 95% significance level for positive correlations according to two-sided student's t-tests.

관측에서는 다양한 강도의 ENSO 이벤트들이 존재한다. 특히 extreme 엘니뇨 (예: 1997/98 엘니뇨) 동안 동태평양에서 SST 아노말리는 3°C 를 훨씬 넘어버렸고 SPCZ는 적도 쪽으로 이동하여 남태평양의 섬 국가들은 심각한 홍수 혹은 가뭄을 겪었고, 에콰도르와 페루는 대 재해의 홍수가 발생 했었다. 특히 1997/98 엘니뇨는 인도양에서 강한 양의 IOD를 동반해서 인도양 인접 국가들에 심각한 사회적, 경제적 영향을 미쳤다. 그러므로 예측 모형에서 extreme 엘니뇨 이벤트의 예측 가능 여부는 중요한 이슈들 중 하나이다. Figure 8은 3, 5, 7, 9 월 초기조건으로 했을 때 1982년 이후 2014년 까지 발생했던 엘니뇨 중 가장 강했던 1997/98 엘니뇨에 대한 SCoPS와 CCSM3의 예측 결과를 보여준다. 7월과 9월 초기 조건으로 SCoPS는 관측과 상당히 가까운 NINO3.4 지수 값들을 재현하고 있음을 확인 할 수 있다. 특히 겨울 시즌 (즉 12월)에 다가갈수록 그 NINO3.4 지수의 강도가 관측에서 보여주는 것처럼 증가하였다. 이에 반해서 CCSM3는 7월 초기조건으로 12월까지 NINO3.4 지수가 증가하지 못하고, 4개월 이후 (즉, 11 월 이후) 급격히 감소 하였다. 9월 초기조건에서도 2개월 이후 즉 11월 이후 엘니뇨 강도가 감소 경향을 보였다. 3월과 5월에서 시작할 때, 양 쪽 모형에서 엘니뇨 발달을 잘 예측하지 못하였으며, 이는 Figure 7의 결과와 일치한

다. 특히, SCoPS에서 3월과 5월 초기조건 이후 계속 해서 관측과 가깝게 NINO3.4 지수가 증가하다가 7월 이후 다소 감소하거나, 더 이상 증가하지 못하는 경향을 보였다.

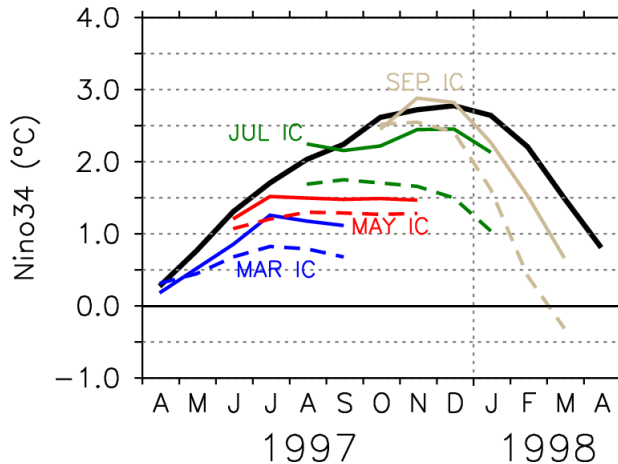


Figure 8 Time series of NINO3.4 index from observations (black solid line) over the period of April 1997 to April 1998 and from model forecasts stating from March (blue lines), May (red lines), July (green lines), and September (brown). Dashed color lines are for CCSM3 forecasts and solid color lines for SCoPS.

이는 한 가지 가능한 이유로서 모형에서 과소모의하는 엘니뇨 강도는 모형의 적도 태평양에서 cold bias와 관련이 있다는 연구들이 있는데 (예, Kim et al. 2014), 적도 태평양에서 모형이 예측 선행 시간이 증가할수록 cold bias를 갖는 모형 기후장으로 다가가려는 경향이 있는 모형 drift와 관련이 있을 수 있다. Figure 9는 모형이 예측 선행 시간이 증가함에 따라 bias가 선형적으로 증가하는 것이 아니라, 모형이 언제 시작하든지 모형 기후장의 cold bias가 강해지는 특정 계절이 존재함을 보여준다. 7월 이전에 시작한 예측에서는 7월 이후 cold bias가 증가하기 시작하여, 9월쯤에는 -3°C 이상 관측과 차이가 나며, 이후 cold bias가 감소하는 경향을 보였다. 즉 현저하게 bias가 증가하는 시기가 7월이며, 이는 3월과 5월 초기장에서 출발하는 엘니뇨 예측에서 NINO3.4 지수가 발달하지 못하는 시기와 일치한다. 7월 출발 예측인 경우 역시 9월에 동적도 태평양 cold bias가 최대로 증가하고 이후 감소하는 경향이 있는데, Figure 8에서 7월 출발 예측에 대한 NINO3.4 지수는 조금 감소했다가 10월 이후 다시 증가하는 경향을 보인다. 이 시기에서는 bias 증가가 예측된 초반에 발생했고 그

bias를 극복할 정도로 모형의 대기-해양 결합이 충분이 컸던 것으로 사료된다. 9월 출발 예측은 3, 5, 7월 출발 보다는 약하지만 cold bias에 대한 두 peak들이 나타나는데 하나는 11월과 또 다른 하나는 3월경이다. 9월 출발인 경우 그 두 개의 cold bias peak들이 12월 이후 ENSO지수의 급격한 감소에 기여했을 것으로 보인다. 특정 계절 모형 bias와 엘니뇨 예측성에 대한 관계는 좀 더 분석이 필요하며, 관계가 있다면 정확한 extreme 엘니뇨를 예측하기 위한 접합모형의 개선 방향에 가이드를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

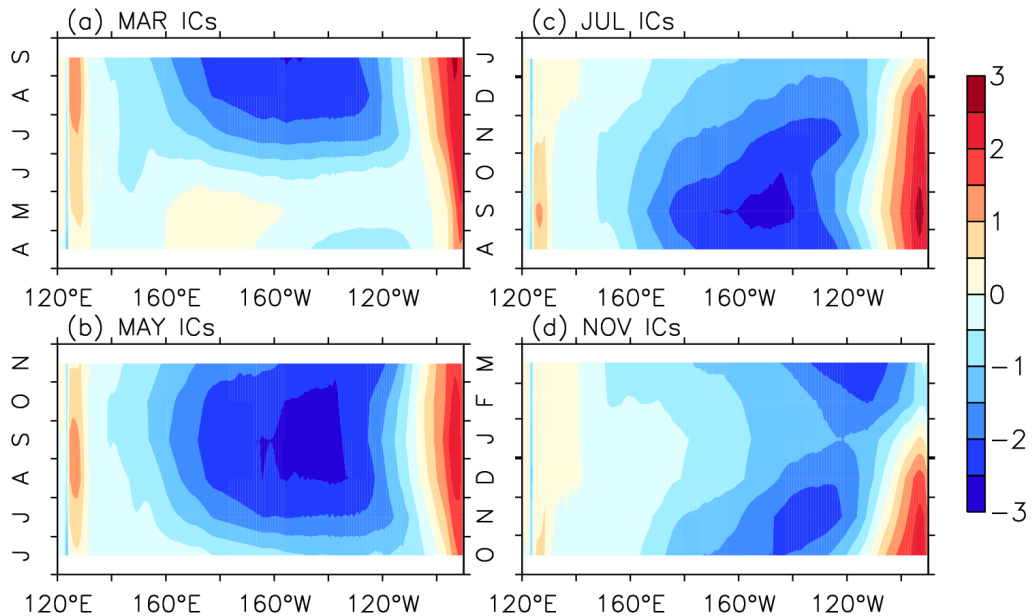


Figure 9 Model climate drift (bias) of SSTs averaged along the equatorial Pacific (2°S-2°N) for forecast from initial conditions of (a) March, (b) May, (c) July, and (d) October. The bias is difference between forecasts and monthly OISST.

정리하자면, 적도 태평양의 중앙에서 먼 동쪽까지 SST 변동성을 예측하는데 있어서, CCSM3 보다 APCC 새로운 모형인 SCoPS에서 더 나은 예측성을 보이며, 특히 extreme 엘니뇨 이벤트에 대한 예측에 있어서 현저한 향상이 있었다는 것이 확인되었다. 그러므로 추후 SCoPS의 현업화 이후 APCC MME 시스템의 ENSO 예측성 향상에 많은 기여를 할 것으로 보인다.

3.2.2 ENSO 다양성 예측

섹션 2에서 언급 한 것처럼, 공간적 패턴에 대한 ENSO 다양성 즉 CP 와 EP 타입 ENSO 예측성 검증을 위해서 관측에서 두 가지 타입에 대한 leading EOF 모드에 예측된 열대 태평양에서 SST 아노말리들을 projection함으로써 얻어진 CP와 EP ENSO 지수를 관측에서 지수들과 전 예측 선행 시간에서 TCC를 계산하였다. Figure 10은 전 예측 선행 시간에서 관측과 예측된 두 가지 타입 ENSO 지수 사이의 TCC 변화를 보여준다. EP ENSO 예측에 있어서 SCoPS가 CCSM3 보다 전 예측 선행 시간에서 다소 높았다. 이는 관측에서 전형적인 EP 타입은 SST 변화의 action center 가 먼 동적도태평양에 위치되어 있어서, 동태평양으로 갈수록 SST 예측성능이 SCoPS보다 상대적으로 CCSM3가 더 작아지는 앞선 결과를 고려하면, 당연한 결과 이다 (Fig. 6). 그런데 CP 타입 ENSO 예측에 있어서는 CCSM3가 전 선행 예측 시간 에서 다소 더 높은 TCC들을 보였다. CP 타입 ENSO의 주 SST 변동성 지역인 NINO4 혹은 NINO3.4 지역에서 SCoPS가 예측성능이 더 높은 점을 고려하면, 다소 놀라운 결과이다. 한 가지 가능한 이유로서 Figure 11-13에서 설명 될 것이다.

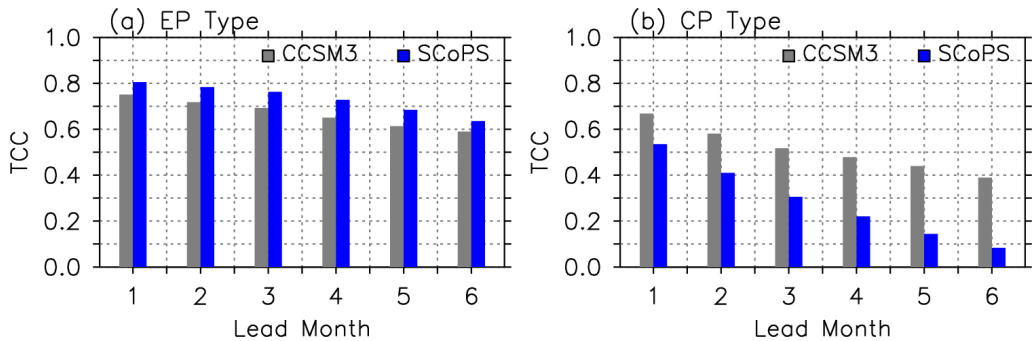


Figure 10 TCCs for (a) EP index and (b) CP index between forecasts from 1-to 6-month lead times and OISST. Blue bars are for SCoPS prediction, and gray bars for CCSM3.

Figure 11은 관측과 CCSM3와 SCoPS에서 1개월과 3개월 예측 선행시간에서 북반구 겨울철 평균된 (12월에서 2월 평균) EP와 CP ENSO 지수의 scatter plot들을 보여준다. 우선 관측에서는 타입별 warm 과 cold 이벤트 사이의 강도에 대하여 대칭성이 작음을 보여준다. 통계적인 skewness 값은 EP 와 CP 타입에 대하여 각각 1.86과

-0.34이었다. 이는 상대적으로 강한 엘니뇨 이벤트는 EP 타입인 경향이 있고, 이에 반해서 상대적으로 강한 라니냐 이벤트는 CP 타입인 경향이 있음을 의미한다. 그러한 타입 별 특정 ENSO phase에 skewed되는 경향은 과거 연구들 (Kao and Yu 2009; Yu et al. 2011)에서도 확인되었다. SCoPS에서 skewness는 EP 와 CP ENSO에 대하여 1개월 예측 선행시간에 각각 1.13 과 -0.19 이었다. 관측보다는 그 값이 작지만 어느 정도 강도에서 보이는 비대칭성을 SCoPS에서 잘 모의하고 있음을 의미한다. 그러나 3개월 예측 선행 시간에서 EP에 대하여 skewness정도가 0.79로 감소하였으며, CP는 0.12로 증가하였다. CCSM3에서는 예측 선행 시간이 증가할수록 cold 이벤트 강도에 skewed되는 정도가 증가하는 경향을 보이는데, 1개월 예측 선행시간에 skewness 값은 EP와 CP ENSO에 대하여 각각 0.31과 -0.19였으며, 3개월 예측 선행시간에서 각각 0.14 와 -0.69였다.

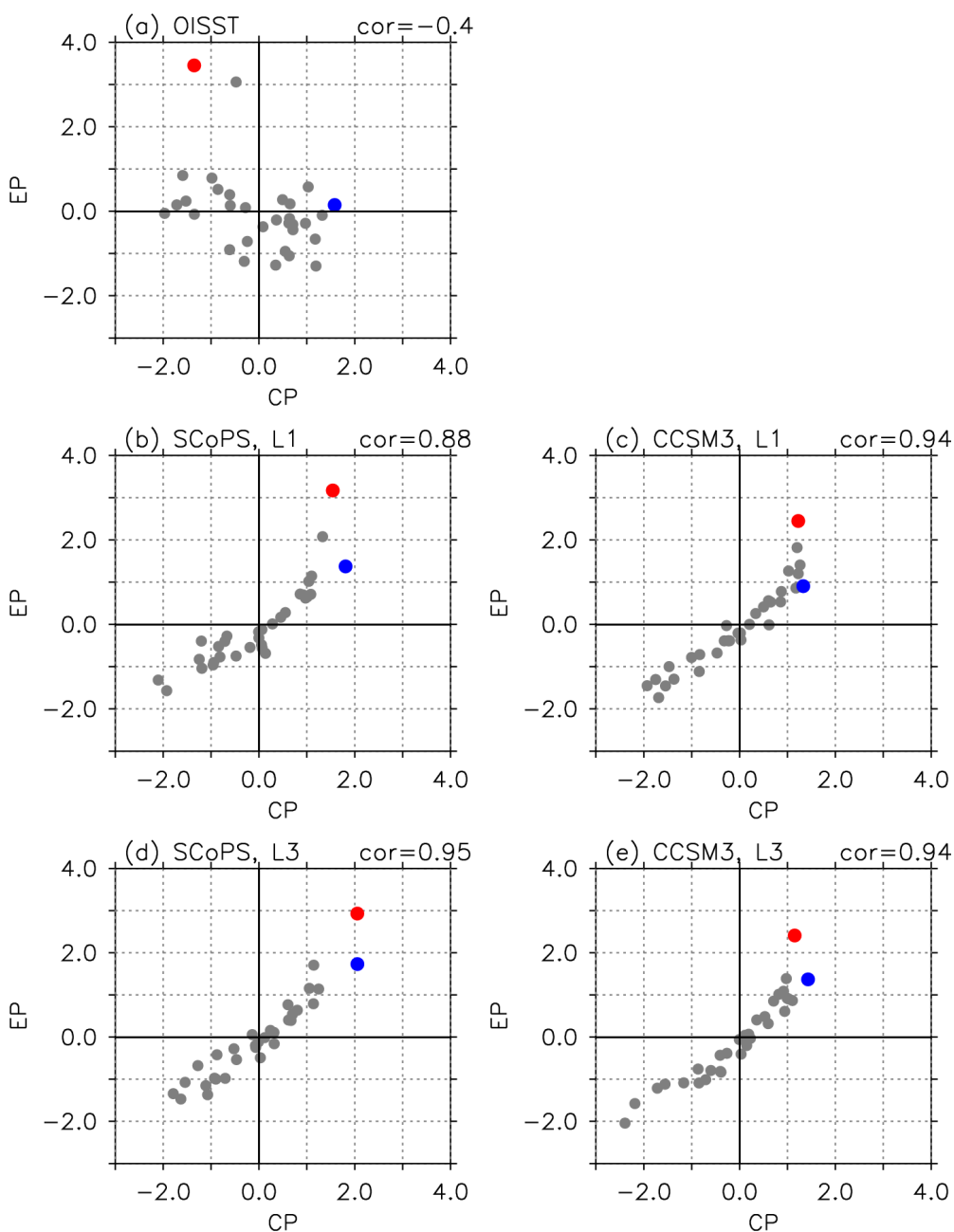


Figure 11 Scatter plots of December-January-February (DJF) season averaged EP vs CP index from (a) observations and (b, c) 1-month and (d, e) 6-month lead forecasts of (b, d) SCoPS, and (c, e) CCSM3.

또한 Figure 11은 관측에서 EP 와 CP ENSO 지수가 음의 상관관계를 갖는다는 것을 나타내는데, 이는 두 ENSO 타입 사이의 관측에서 separation 혹은 서로서로의 독립성 정도를 보여주는 것으로서 두 가지 타입의 ENSO가 독립적으로 잘 분리되어 존재함을 알려준다. 그런데 두 모형에서는 두 지수간의 강한 양의 상관관계를 보이며, 이는 두 모형에서 두 타입의 ENSO가 잘 분리 되지 못함을 의미한다. 1개월 예측 선행 시간에서 SCoPS에서 EP와 CP ENSO 지수 사이의 상관계수가 0.88 이었으며, 3개월 예측에서 0.95로 증가 하였다. CCSM3에서는 두 예측 선행시간에서 동일하게 0.94 이었다.

1982년부터 2014년도까지 major 엘니뇨 이벤트들 중에 가장 강했던 EP 타입은 1997/98 엘니뇨 (Fig. 11에서 빨간색 점)이었고, CP 타입은 2009/10 엘니뇨 이벤트 (Fig. 11에서 파란색 점)가 가장 강했다. 관측에서 1997/98 엘니뇨는 4 이상의 큰 양의 EP ENSO 지수와 상대적으로 작은 음의 CP ENSO 지수를 갖으며, 2009/10 엘니뇨는 거의 0에 가까운 EP 지수와 1.5 이상의 CP 지수를 갖는다. 그런데 두 모형들에서는 1997/98 엘니뇨에 상응하는 두 지수가 같은 부호이며, 2009/10 엘니뇨에 대하여 EP 지수가 약 1.0 이상이었다. SCoPS에서는 1개월에서 3개월 예측 선행 시간으로 증가 할 때 1997/98 엘니뇨에 대하여 EP 지수값이 감소하고 CP 지수값이 증가하는 경향을 보였으며, 2009/10 엘니뇨의 양쪽 EP 와 CP 지수값이 다소 증가하는 경향을 보였다. CCSM3에서는 1997/98 엘니뇨에 대해서는 변화가 없었고, 2009/10 엘니뇨 경우에는 EP 지수가 다소 증가하는 경향을 보였다. 두 모형에서 두 엘니뇨 이벤트의 예측에 있어서 관측과 차이를 보이는 이유는 특히 1997/98 엘니뇨에 대하여 CP 지수가 양의 값을 갖는 것은 Figure 12a 에서 보여주는 것처럼 두 모형이 서쪽으로 치우치는 엘니뇨를 모의 하는 경향 때문인 것으로 보인다, 그리고 Figure 12b에서 확인되는 것처럼, 2009/10 엘니뇨에 대하여 관측보다 EP 지수가 더 큰 양의 값을 갖는 이유는 관측에서는 SST 아노말리가 중앙 태평양에서 peak을 갖고, 동 태평양으로 갈수록 SST 아노말리가 크게 감소하는 경향을 보이는 반면에, 모형들에서는 동서방향으로 상당히 완만하게 변하는 특징을 가지며, 이로 인하여 SCoPS에서는 동태평양에서 관측 보다 더 큰 양의 SST 아노말리를 모의하기 때문인 것으로 보인다.

위에서 언급했듯이 SCoPS에서 두 엘니뇨 모드에 대하여 1개월에서 3개월로 예측 선행 시간이 증가할 때 CP 지수가 증가하는 데 그 이유는 엘니뇨의 action center

(혹은 양의 SST 아노말리 최대값 지역)가 서쪽으로 더욱더 shift 되기 때문이다. 서쪽에서의 SST 아노말리의 shift에 대한 한 가지 가능한 원인으로서는, 두 모형들에서 1개월과 3개월 예측 선행 시간에 겨울철 SST 기후장의 관측과 차이를 보여주는 Figure 13에서 확인 할 수 있듯이, SCoPS에서 예측 선행 시간 증가에 따라 동 태평양 지역에서 cold bias가 증가 하는 것과 관련이 있을 수 있다. 거의 shift가 없거나 (Fig. 12a) 오히려 동쪽으로 shift하는 (Fig. 12b) CCSM3 에서는 겨울철 SST 기후장이 오히려 더 따뜻해지는 경향을 보인다 (Fig. 13a, b). 더욱이 SST 변화 action center 위치는 적도에서 convection activity의 동서방향의 위치와 연결이 되며, 그것으로 인하여 중위도 지역으로 teleconnection에도 영향을 미쳐서 계절 예측 모형의 중위도 지역의 예측성에 상당히 영향을 미칠 것으로 보인다 (예: Yeh et al. 2009; Capotondi et al 2015). 그러므로, 차후연구에서 적도 지역에서 SST 기후장의 bias와 엘니뇨 다양성 예측 성능에 미치는 영향을 규명하는 역학적인 분석들이 수행되어야 할 것으로 보인다.

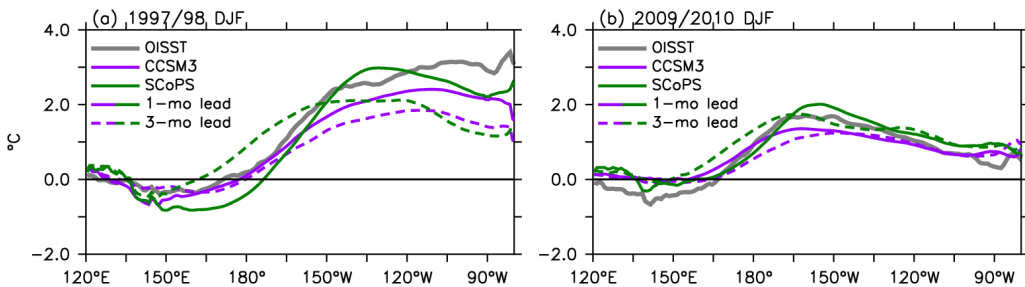


Figure 12 DJF-season averaged SST anomalies along the equator for (a) 1997/98 El Niño event and (b) 2009/2010 El Niño event.

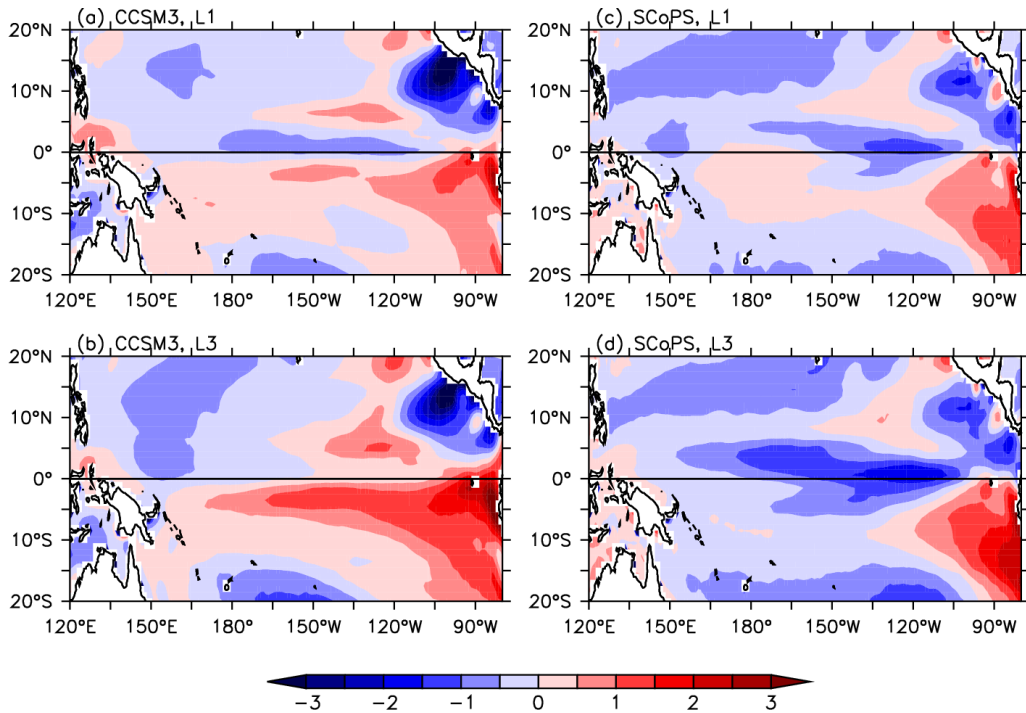


Figure 13 Difference of climatological DJF season averaged SST between forecasts of (left panels) CCSM3 and (right panels) SCoPS at (upper) 1-month and (lower) 3-month lead times and observations.

3.2.3 태평양 도서국 지역의 예측

Figure 14는 1개월에서 6개월까지 예측 선행 시간에 따라 태평양 도서국들이 포함된 4개의 기후학적 지역들에서의 2미터 기온 (Fig. 14a-d)과 총강수량 (Fig. 14e-g)의 TCC 지역 평균을 보여준다. 이 결과는 두 모형 모두 전반적으로 열대 태평양 지역에서 기온보다는 강수량 예측이 더 어렵다는 것을 보여준다. 먼저 ENSO가 존재하는 EQP 지역에서 평균된 TCC가 다른 기후 지역들보다 높았다 (Fig. 14b, f). EQP 지역에서 다른 지역들 보다 더 나은 예측성을 보이는 이유는 EQP 기후 지역에서 발달하는 ENSO가 강한 대기-해양 결합과정을 동반하기 때문인 것으로 보인다. 그러므로 예측성이 좋은 SST에 대한 기온이나 강수의 종속성이 다른 지역보다 클 가능성이 있으며, 이 때문에 이 지역에서 더 나은 예측성을 보이는 것으로 사료된다. 이 기후 지역에서는 기온 예측에 대하여 대체로 양쪽 모형이 비슷한 예측 성능을 보였고 (Fig. 14b), 강수량에 대하여 SCoPS에서 CCSM3에 비하여 상당히 향상되었음을 확인할 수

있다 (Fig. 14f). 강수량 예측에 대하여 1개월 과 6개월 예측 선행시간에서 SCoPS의 지역 평균된 TCC는 각각 0.59, 0.38이고, CCSM3에서는 0.46, 0.27이었다.

NWP 기후 지역에서는 3개월 선행시간까지는 SCoPS가 CCSM3보다 기온 예측에 대하여 TCC가 다소 컸지만, 그 선행시간 이후부터는 CCSM3의 예측성이 더 나아지는 경향을 보였다 (Fig. 14a). 이 지역에서 강수량에 대한 TCC는 SCoPS가 전반적으로 다소 높았다 (Fig. 14e). WP 기후지역에서는 1개월 예측 선행 시간을 제외하고 CCSM3가 다소 더 높은 TCC 값을 보였지만, 강수량 예측에 있어서는 SCoPS에서 CCSM3보다 전 예측 선행 시간에서 지역 평균된 TCC가 0.1 정도 더 높았다. CCSM3와 비교해서 SCoPS에서 기온에 대하여 예측성의 상당한 증가를 보이는 지역은 SWP 기후 지역이다. 그러나 이 기후 지역에서 강수량 예측은 비록 SCoPS에서 향상이 있었지만 다른 기후 지역들보다 예측성이 낮았다.

Figure 14는 SCoPS에서 전반적으로 태평양 도서국 지역들에서의 1개월에서 6개월까지 예측 선행 시간에 기온과 강수에 대한 예측성이 향상이 되었음을 보여 주었다. 더 나아가서 서론에서도 언급했듯이 계절적으로 남북방향으로 이동하여 건기, 우기를 지배하는 ITCZ 혹은 SPCZ 같은 계절적으로 지역 기후에 영향을 미치는 중요한 인자들이 존재하기 때문에 태평양 도서국에서 계절별 강수, 기온에 대한 예측성을 조사하는 것이 역시 중요해 보인다. Figure 15는 SCoPS에서 예측 target 월별로 기온에 대한 예측 선행시간에 따른 4개의 기후 지역에서 평균된 TCC의 분포와 기후 지역에서 면적 평균된 기온의 계절 변화를 보여준다. NWP 기후지역에서 북반구 늦겨울에서 봄철 (2월-4월) 기온을 예측할 때 더 긴 예측 선행 시간에서 더 높은 예측성을 가질 수 있었는데, 4개월 예측 선행 시간까지 지역 평균된 TCC가 0.5이상을 유지하였다. 그러나 그 기후 지역에서의 북반구 여름철 (7월-9월) 기온은 좋은 예측성을 얻지 못하였다. NWP 기후 지역과는 반대로 WP 기후 지역에서는 남반구 겨울 기온 예측에 대하여 더 긴 예측 선행시간 (즉 3개월까지)까지 TCC가 0.4이상 유지되었으며, 11월-1월 기온 예측에서는 예측성이 좋지 않았다. 다른 기후 지역에 비해서 더 긴 예측 선행시간에서도 좋은 예측성을 갖는 EQP 기후 지역에서 북반구 겨울철 기온 예측은 6개월 예측 선행 시간까지 지역 평균된 TCC가 0.6이상 유지되었으며, 여름철 기온예측은 4개월까지 0.5이상의 TCC를 보였다. EQP 지역에서 더 남쪽으로 떨어져 있는 SWP 기후 지역에서 겨울철 (남반구; 8월-10월) 기온예측은 4개월 예측 선행

시간까지 0.4이상의 TCC를 가지며, 상대적으로 남반구 여름철 기온 예측성은 좋지 않았다.

NWP와 WP 기후 지역에서 강수량 예측 (Fig. 16) 은 역시 기온처럼 높은 예측성을 갖지는 않지만, 일반적으로 건기 때, 즉 NWP 기후 지역은 1월-4월, WP 기후 지역은 8월-10월 강수 예측이 다른 시기들보다 TCC가 높으며, 특히 2개월 예측 선행 시간까지 95%에서 유의한 TCC (≥ 0.36)이상의 값을 유지하였다. 다른 기후 지역보다 기온에 대한 상당한 예측성을 보여주었던, EQP 기후 지역에서 역시 다른 지역보다 강수에 대한 예측성이 높았다. 전 계절에서 4개월 예측 선행 시간까지 TCC가 0.4 이상이었으며, 9월에서 2월까지 강수량 예측은 5개월 선행 시간까지 TCC가 0.5 이상이였다. SWP 기후 지역에서는 강수에 대한 유의한 예측성을 갖는 계절은 없었다.

정리하자면, 일반적으로 SCoPS는 태평양 도서국의 겨울 혹은 봄철의 기온과 강수량 예측이 여름철의 기온, 강수량보다 더 높은 예측성을 보이는 것으로 판단된다. 특히 쿡 아일랜드, 투발루, 나우루, 키리바티를 포함하는 EQP 기후 지역은 예측성이 좋은 그리고 강한 대기-해양 접합과정을 동반하는 ENSO가 발달하는 지역이어서, 긴 예측 선행 시간까지 겨울철 기온, 강수에 대하여 다른 계절을 target했을 때 보다 좀 더 높은 TCC값을 보인 것으로 사료되고, 파울루, 미크로네시아, 마샬 아일랜드를 포함하는 NWP 기후지역도 ENSO가 peak에 이르고 쇠퇴하는 시기에 기온과 강수량에 대한 예측성이 좋은데, 이것도 ENSO 예측성과 관련이 있는 것이 아닌가 추측된다. 좀 더 분석이 필요하다. 그리고 태평양 도서국의 우기와 건기는 ITCZ와 SPCZ의 남하 혹은 북향과 관련이 있는데, 그 때의 태평양 도서국들에서 강수량에 대한 예측성 감소는 모형의 double ITCZ, cold tongue bias문제와 연관이 있을 것으로 사료된다. 예측성과 모형 자체 오류와 관계에 대한 좀 더 다각적인 역학적 분석이 필요하다.

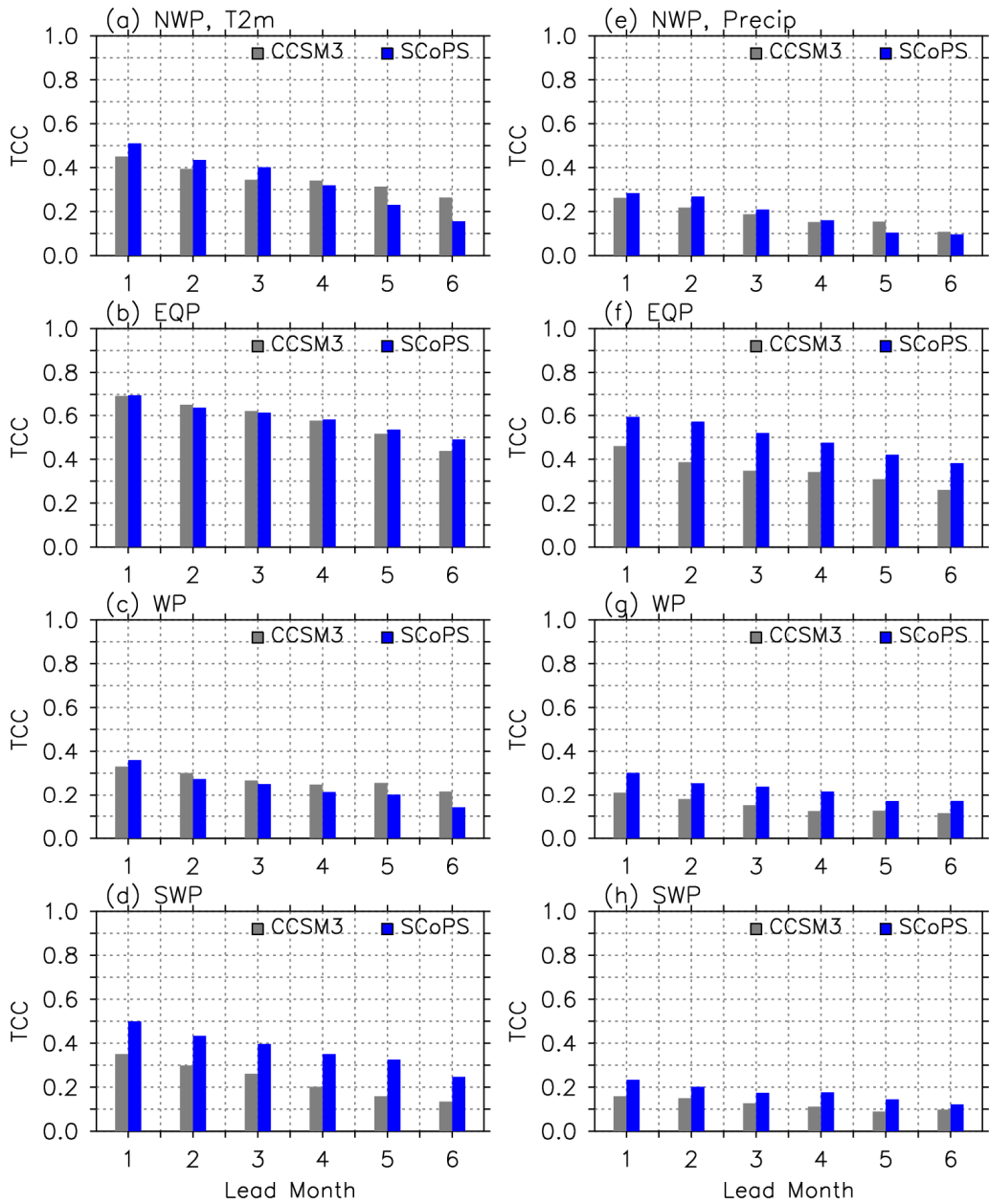


Figure 14 TCCs area-averaged over the four climatic regions (see Fig. 2) from 1- to 6-month lead times. Left panels are for 2m air temperature and right panels for precipitation. Blue bars show TCCs between SCoPS forecasts and observations, and gray bars are for CCSM3 forecasts. Observations are taken from NCEP reanalysis and GPCP.

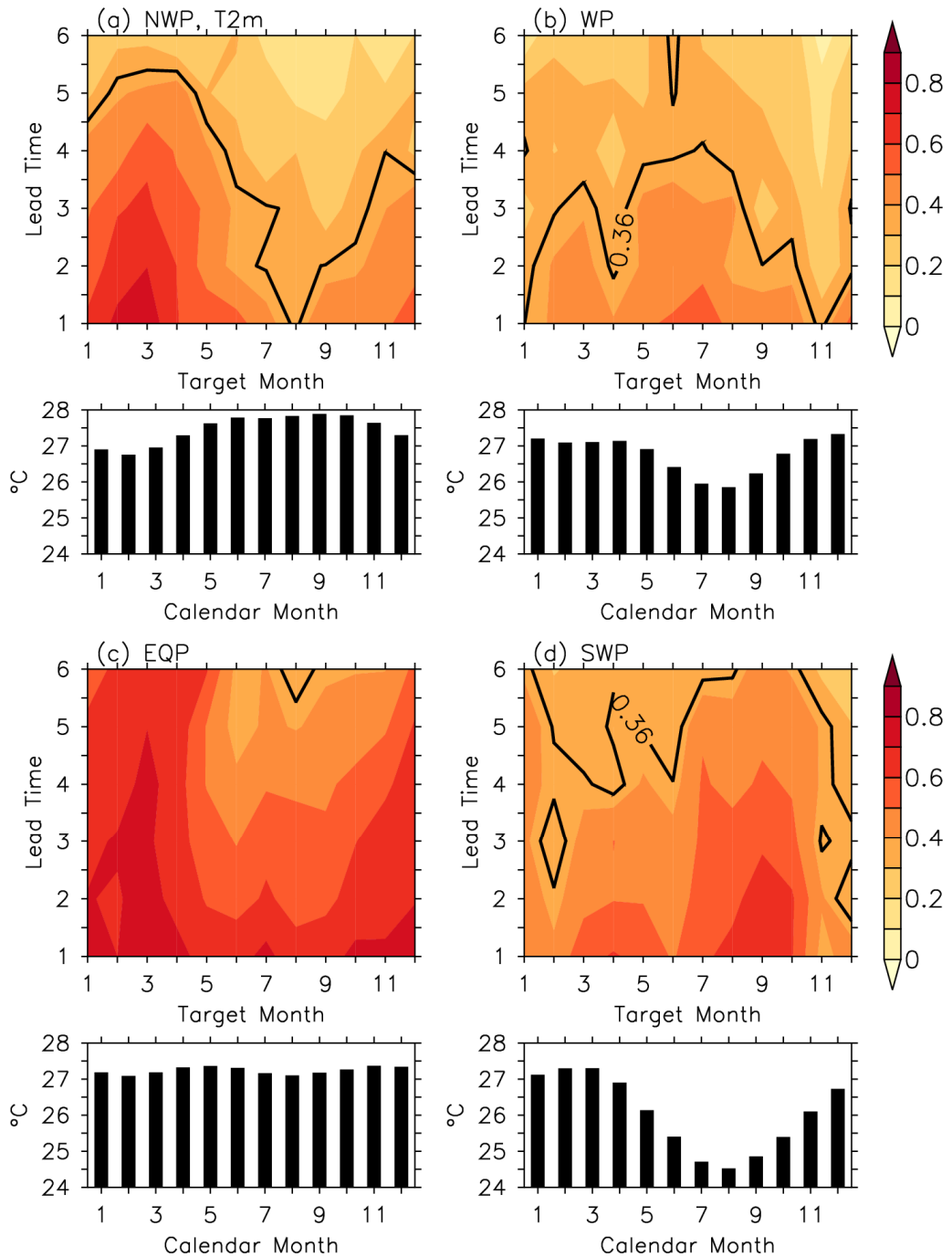


Figure 15 Area-averaged TCCs between SCoPS forecasted and observed 2m air temperatures in four climatic regions, (a) NWP, (b) WP, (c) EQP, and (d) SWP, as a function of lead times and target months. Climatological seasonal cycles of 2m air temperature area-averaged over the climatic regions are also shown in black bars.

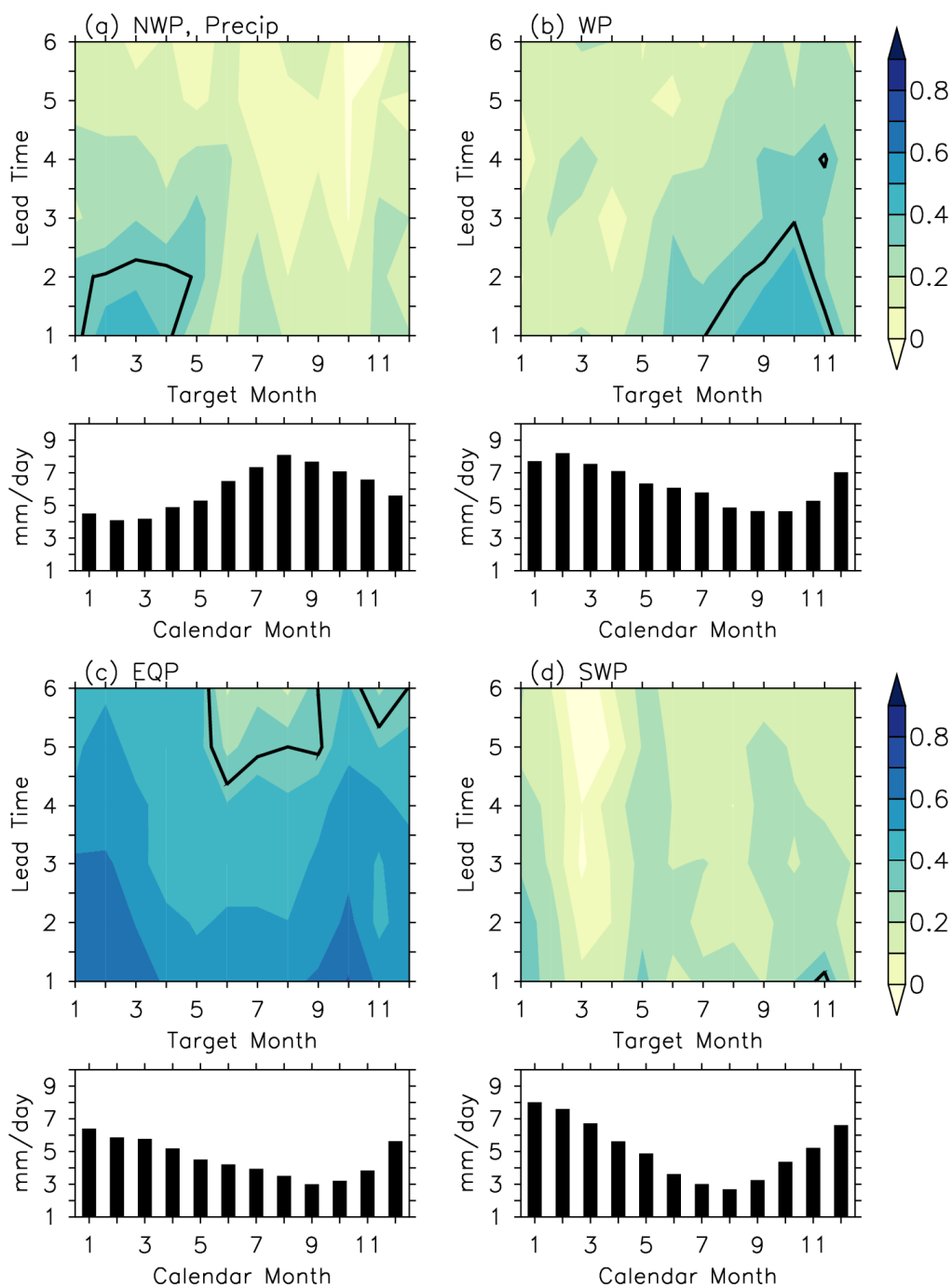


Figure 16 Same as Fig. 15 except for precipitation.

3.3 인도양에서 예측 성능

Figure 17은 서론에서 소개한 인도양에서 지배 기후 모드인 IOD와 IOD를 정의하는 동인도양 박스 지역 (EIO)에서 평균된 SST 아노말리와 서인도양 박스 지역 (WIO)에서 평균된 SST 아노말리에 대한 두 모형과 persistence 예측으로부터 1개월에서 6개월 예측 선행시간까지 TCC값들의 변화를 보여준다. 우선 IOD 지수에 대한 예측성은 SCoPS에서 훨씬 높았다 (Fig. 17a). 1개월 예측 선행 시간에서 SCoPS는 TCC가 0.67, CCSM3는 0.55, persistence 예측은 0.50 이었다. 6개월 예측 선행 시간에서는 CCSM3와 persistence 예측에서는 모두 TCC가 0.0으로 감소하였으며, SCoPS에서는 TCC가 0.26으로 감소하였다. 이러한 IOD 지수에 대한 SCoPS에서 상당한 예측성 향상은 동인도양 SST 아노말리에 대한 예측과 관련이 있다 (Fig. 17b, c). 1개월 예측 선행 시간에서 동인도양 SST 아노말리에 대한 TCC는 SCoPS에서 0.72, CCSM3에서 0.61 이었고, 3개월 예측 선행 시간 이후부터 두 모형의 TCC 차이가 상당히 증가 하였다 (SCoPS에 대하여 TCC=0.59, CCSM3에서 TCC=0.29). 6개월 예측 선행 시간에서도 SCoPS는 상당한 예측성 (TCC=0.4)을 갖는 반면에, CCSM3는 예측성 (TCC=0.06)이 거의 없었다. 서인도양 SST 아노말리에 대한 예측성은 SCoPS에서 다소 높았으며, 동인도양에서처럼 TCC가 상당한 차이를 갖지는 않았다.

NINO3.4 지수 예측에서 수행된 것처럼 IOD 지수에 대해서도 예측 target 월별로 예측성의 차이를 비교하였다 (Fig. 18). 우선 persistence 예측 (즉 IOD 지수의 auto correlation)은 1월에서 6월까지 IOD 지수 예측을 target으로 할 때 높은 예측성은 기대할 수 없음을 보여주며, 9월에서 12월 IOD 지수를 target으로 할 때, 다소 긴 예측 선행시간에서 유의한 (95%에서) 예측이 가능함을 보여주고 있다 (Fig. 18a). 그러한 persistence 예측에 비하여 두 모형에서는 IOD 지수 예측에 있어서 더 나은 예측성을 보였다. 서론에서 언급된 것처럼, IOD 이벤트들은 보통 5월 혹은 6월경 시작을 하여 8월에서 10월쯤 성숙단계에 이르며, 이후 북반구 겨울철 동안 빠르게 쇠퇴한다. 그러므로, IOD 이벤트 시작은 두 모형 모두 2개월 예측 선행 시간에서 유의한 예측이 가능하고, IOD 이벤트 peak은 CCSM3에서 2개월에서 3개월, 이보다 더 나은 SCoPS에서 4개월에서 6개월까지 유의한 예측성을 보였다.

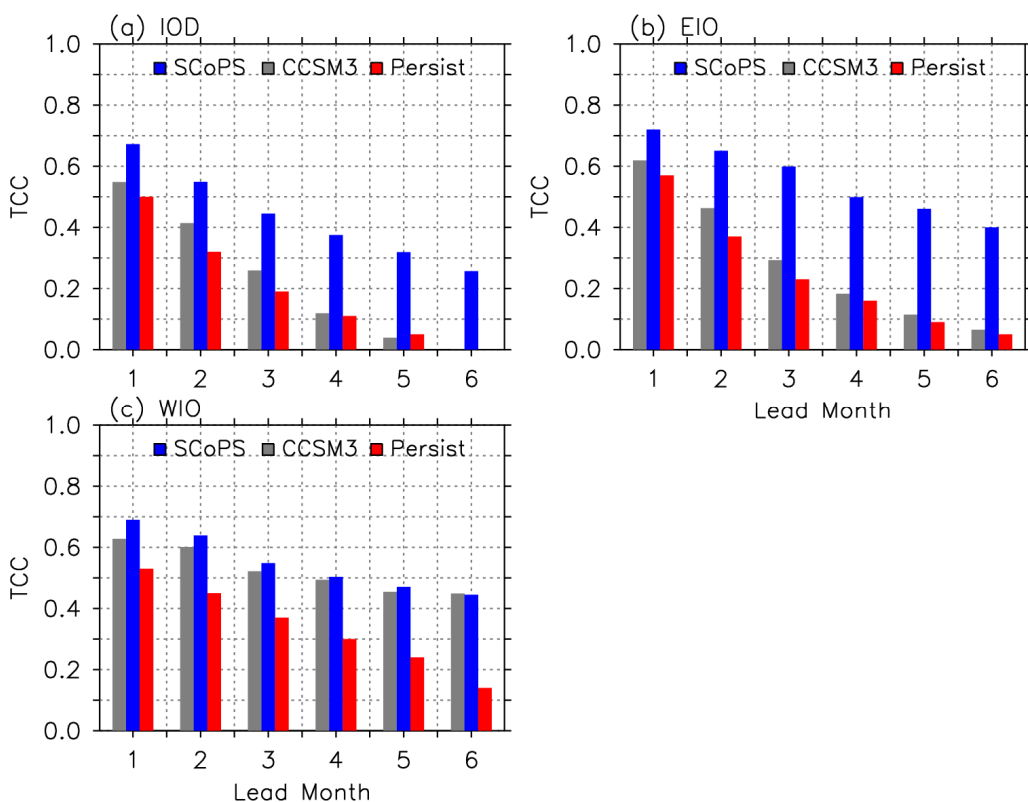


Figure 17 TCCs for (a) IOD, (b) EIO, and (c) WIO between forecasts from 1-to-6-month lead times and OISST. Blue bars are for SCoPS prediction, gray bars for CCSM3, and red bars for persistence prediction. For detail definition, see main text.

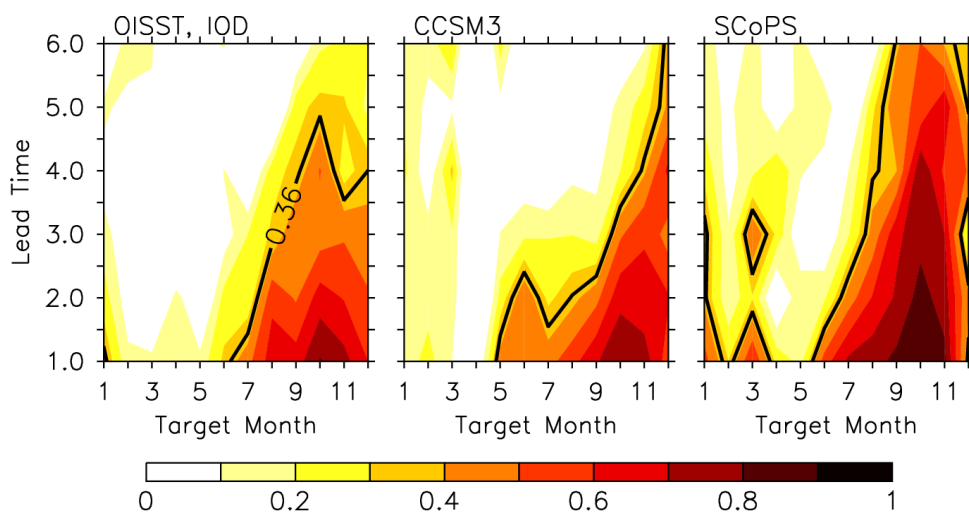


Figure 18 Same as Fig. 7 except for IOD index.

Figure 19는 IOBW 모드를 나타내는 전체 열대 인도양 (TIO)과 인도양의 subsection, 즉 북 인도양 (NIO)과 남서인도양 (SWIO)에서 면적 평균된 SST 아노말리에 대한 persistence, CCSM3, SCoPS 예측에 대한 1개월에서 6개월 예측 선행 시간까지 TCC를 보여준다. 먼저, TIO SST 아노말리 예측에 대하여 SCoPS에서 CCSM3보다 전 예측 선행 시간에서 TCC가 다소 높았다. 1개월 선행 시간에서 SCoPS의 TCC는 0.79, CCSM3는 0.76 이었고, 6개월 선행 시간에서는 SCoPS가 0.52, CCSM3가 0.47 으로 감소하였다. 인도양의 subsection들 중에서는 SWIO에서 보다 NIO에서 SST 아노말리에 대한 예측성이 두 모형에서 더 높았다. NIO 와 SWIO에서 SST 변화와 관련된 기작이 차이가 있는데, NIO에서 SST는 대기-해양의 경계층에서 heat flux 교환 혹은 구름에 의한 태양 복사의 조절에 의해서 지배되고, SWIO에서는 thermocline 변화를 동반하는 해양의 역학이 SST 변화를 지배한다고 알려져 있다 (Schott et al. 2009). 그 두 지역에서 어떤 역학적, 물리적 오류가 존재하는지 추후 분석이 필요하다.

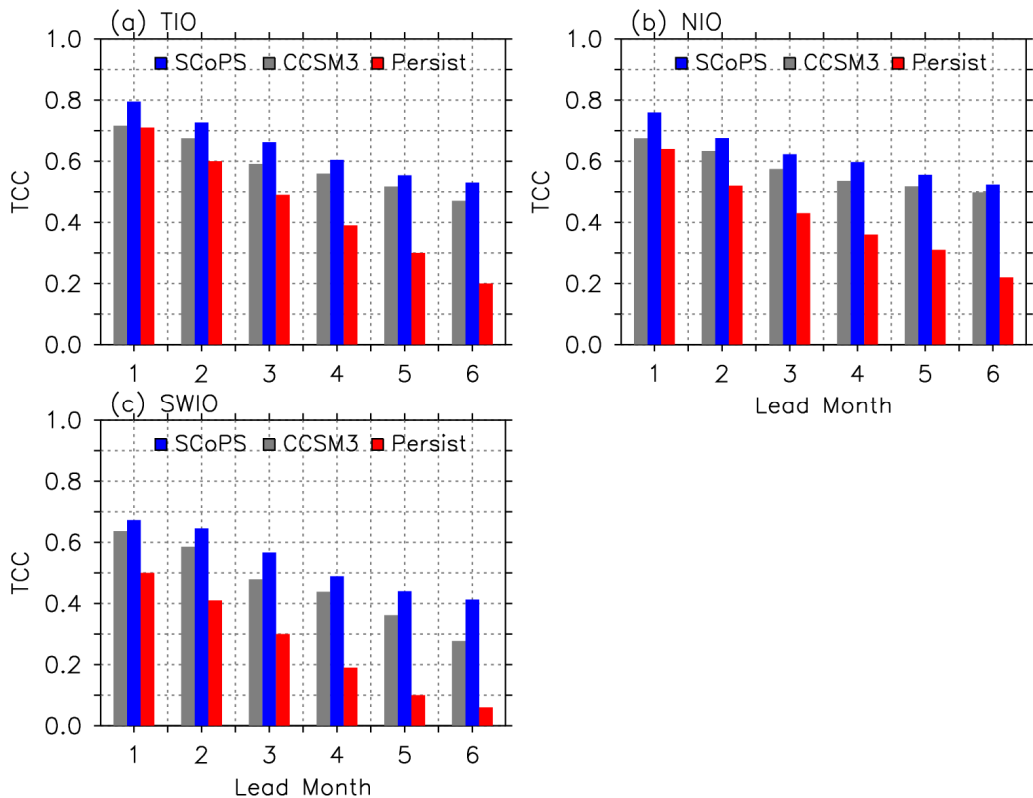


Figure 19 Same as Fig. 17 except for (a) TIO, (b) NIO, and (c) SWIO.

3.4 주요 기후 모드와 지역 강수변화 관계 예측성능

이전 섹션들에서 태평양과 인도양에서 주요 기후 모드인 ENSO와 IOD 지수들의 전반적인 예측성을 주로 보였다. 기후 모드들 자체의 예측성도 중요하지만, 그와 관련된 local 과 remote 지역의 강수, 기온 같은 기후 변수들의 변화에 대한 예측성 및 오류들도 분석이 필요하다. 기후 모드들이 발달할 때 지역 기후에 영향을 미치므로, 그러한 오류들을 감안하여 계절 예측 정보를 제공해야 할 것으로 보인다.

3.4.1 ENSO와 지역 강수 변화

Figure 20은 1개월 예측 선행시간에 겨울철 (12월-1월) 평균 ENSO (NINO3.4 지수)와 지역 강수 변화에 대한 관계를 보여준다. 먼저 관측에서 겨울철 ENSO와 특히 ENSO의 양의 phase인 엘니뇨를 중심으로 지역 강수변화와 관계를 보면 적도 태평양에서 엘니뇨가 존재할 때 서쪽에서 동쪽 페루 해안 지역 그리고 중앙 적도 에서부터 남반구 중앙 태평양 20°S 까지 확장하는 지역에서 양의 강수가 나타나며, 말레이반도, 필리핀을 포함하는 일부 남아시아 지역에서 가뭄이 우세하게 된다. 그리고 엘니뇨 동안 SPCZ가 적도 쪽으로 이동하기 때문에 SW 기후 지역에 속하는 태평양 도서국들 중 일부는 가뭄을 겪는다. 또한 우리나라 반도 아래쪽 남 중국해에서 양의 강수, 남 아프리카의 소말리아, 케냐, 탄자니아에서 양의 강수, 미국 남쪽 및 멕시코 지역에서 양의 강수, 남아메리카 북쪽 지역에 가뭄과 관련이 있음을 관측에서 보여준다.

SCoPS에서는 멕시코 및 미국 남쪽 지역, 남아메리카 북쪽, 적도 지역, 남중국해 등에서 관측과 비슷한 엘니뇨와 지역 강수변화의 관계를 보여주고 있다. 이에 반해서 CCSM3에서 브라질 지역의 가뭄 밴드는 잘 모의 하고 있으나, 적도 지역에서 양의 강수 밴드가 관측 보다 좀 더 서쪽으로 확장하며, 멕시코 지역의 양의 강수 밴드는 잘 모의하지 못하였다. CCSM3에서 이와 같은 예측 오류는 파푸아 뉴기니아등을 포함하는 WP 기후지역 및 멕시코 지역에 강수 예측 오류, 즉 모형에서 그들 지역의 양의 강수 과대 혹은 과소모의에 기여할 가능성 있다. 관측에서 적도를 기준으로 북서 태평양과 호주 북동쪽으로 분포하고 있는 가뭄 밴드는 SCoPS에서 더 잘 예측하고 있지만, 엘니뇨와 관련된 북서 태평양 가뭄 밴드는 동쪽으로 약간 치우쳐서 양쪽 모형에

서 모의하고 있다. 관측의 남중국해에서 양의 강수는 SCoPS에서 더 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 21에서 보여주는 것처럼 여름철 강수와 엘니뇨와의 동시상관관계에 대하여도 분석 하였다. 관측에서는 그 둘의 관계가 열대 지역에서 한정되어 있음을 보여 준다. 겨울철과 비슷하게 엘니뇨 동안 대부분의 maritime continents 지역에 가뭄과, 그 지역의 동쪽으로 양의 강수를 동반한다. 이와 같은 특징은 두 모형에서 어느 정도 잘 모의하고 있지만, SCoPS에서는 관측에서와 달리 적도에서 남쪽방향으로 더 넓게 확장된 가뭄 밴드를 예측하고 있으며, 1개월 예측 선행 시간에서, 말레이 반도 및 그 반도 서쪽 해안에 엘니뇨 동안 양의 강수를 동반할 수 있다고 SCoPS에서 엘니뇨 원격상관 관련 예측오류를 보여주고 있다. 그리고 CCSM3에서는 관측에서 나타나는 SPCZ가 존재하는 지역에 엘니뇨 관련 가뭄 밴드를 모의하지 못하고 있고, 오히려 동쪽으로 다소 shift 되었다.

3.4.2 IOD와 지역 강수변화

Figure 22에서 보여주는 것처럼 인도양에서 IOD와 지역 강수 변화의 관계에 대한 예측성을 분석하기 위해서, IOD peak 시즌인 가을철 (9월-11월) 평균 IOD와 강수와 의 상관관계를 조사 하였다. 양의 IOD 즉 서 인도양에서 양의 SST 아노말리, 동 인도양에서 음의 SST 아노말리를 가질 때를 기준으로 관측에서 양의 강수와 가뭄 지역을 살펴보면, IOD와 엘니뇨와 관계를 보여주는 동 적도 태평양에서 양의 강수를 보이고, 대부분의 남아시아에서 가뭄을 유발하며, 남아메리카 해안 국가들 및 동 인도양, 사우디아라비아, 이란, 이라크 등을 포함하는 일부 중동 국가 에서 가을철 양의 강수가 부분적으로 IOD와 관계가 있음을 보여준다.

1개월 예측 선행 시간에 SCoPS 모형은 CCSM3 보다 열대 태평양, 인도양에서 관측에서 보이는 IOD 관련 가뭄 및 양의 강수 지역을 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 SCoPS에서는 더 넓은 지역에서 강수 변화와 유의한 관계가 있다고 보여주고 있다. 특히 모형에서 maritime continents 지역에 가뭄을 잘 모의하고 있지만, IOD가 호주를 포함 남반구 쪽으로 더 넓은지역의 가뭄과 관계가 있다고 보여주고 있다. CCSM3에서는 서적도 지역에서 관측 보다 더 좁은 지역에서 가뭄과 유의한

관계가 있음을 보여주고 있으며, 동적도 태평양에서 관측보다 상당히 좁은 지역에서 IOD와 상관계수가 유의한 강수 지역을 예측 하고 있다. 그리고 양쪽 모형은 중동 지역에서 IOD 관련 양의 강수를 잘 모의하지 못하고 있다.

그러므로 3.4 섹션에서 결과를 정리하자면 SCoPS에서 CCSM3 보다 향상은 있었지만, SCoPS 예측에서 ENSO, IOD의 지역 강수의 과소 혹은 과대 영향이 있으며, 그러한 측면들을 고려하여 SCoPS로부터의 예측 정보를 활용해야 할 것으로 사료된다.

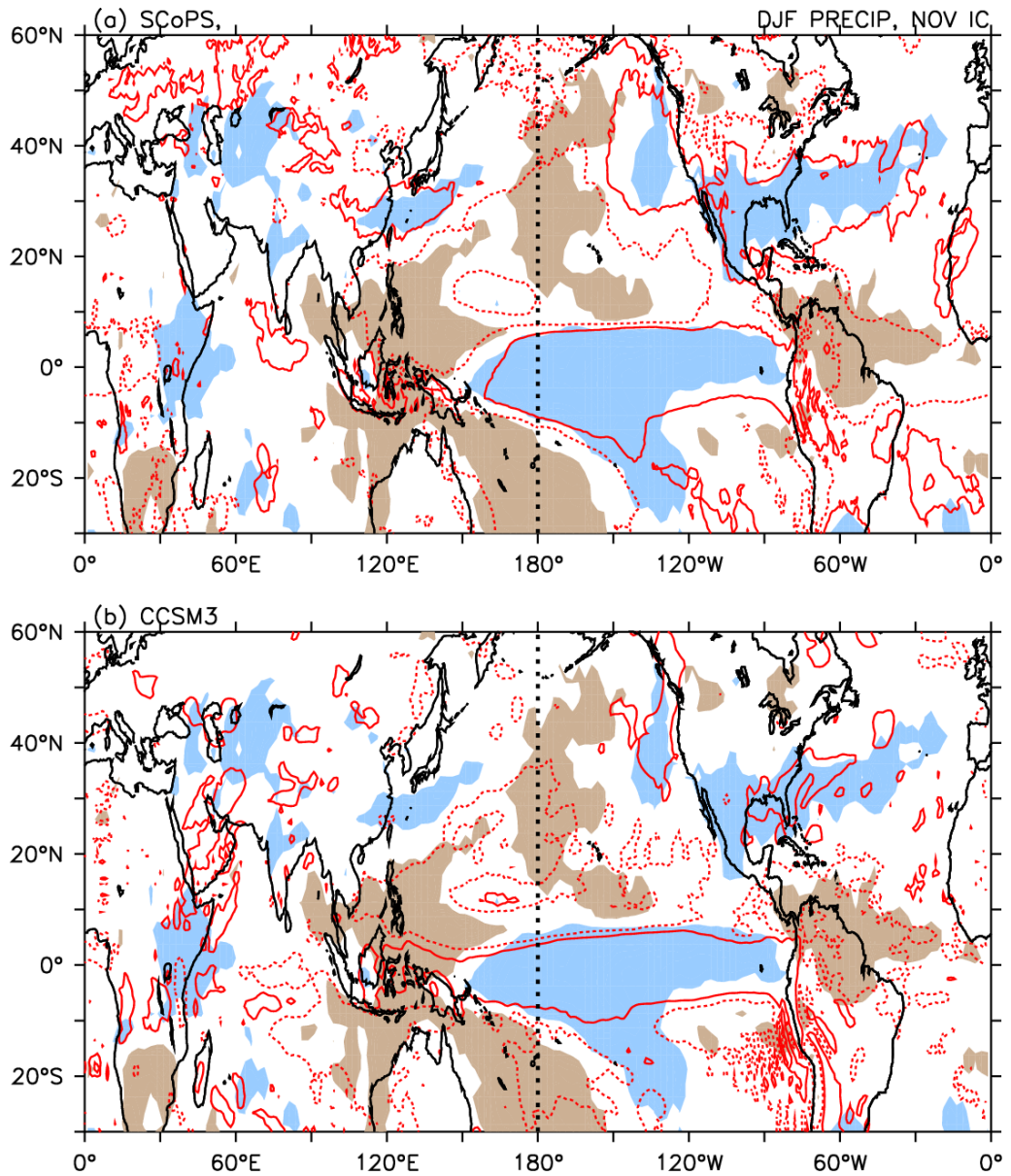


Figure 20 Spatial distribution of correlation coefficients between December–January–February (DJF) season-averaged precipitation and NINO3.4 index from observations (shade) and forecasts (red contour) at 1-month lead (starting from November initial condition) from the SCoPS and CCSM3. Values (0.37) that are significant at 95% level (according to student's *t*-test) are only contoured and shaded. Solid (dashed) lines and blue (brown) shade indicate wetness (dryness).

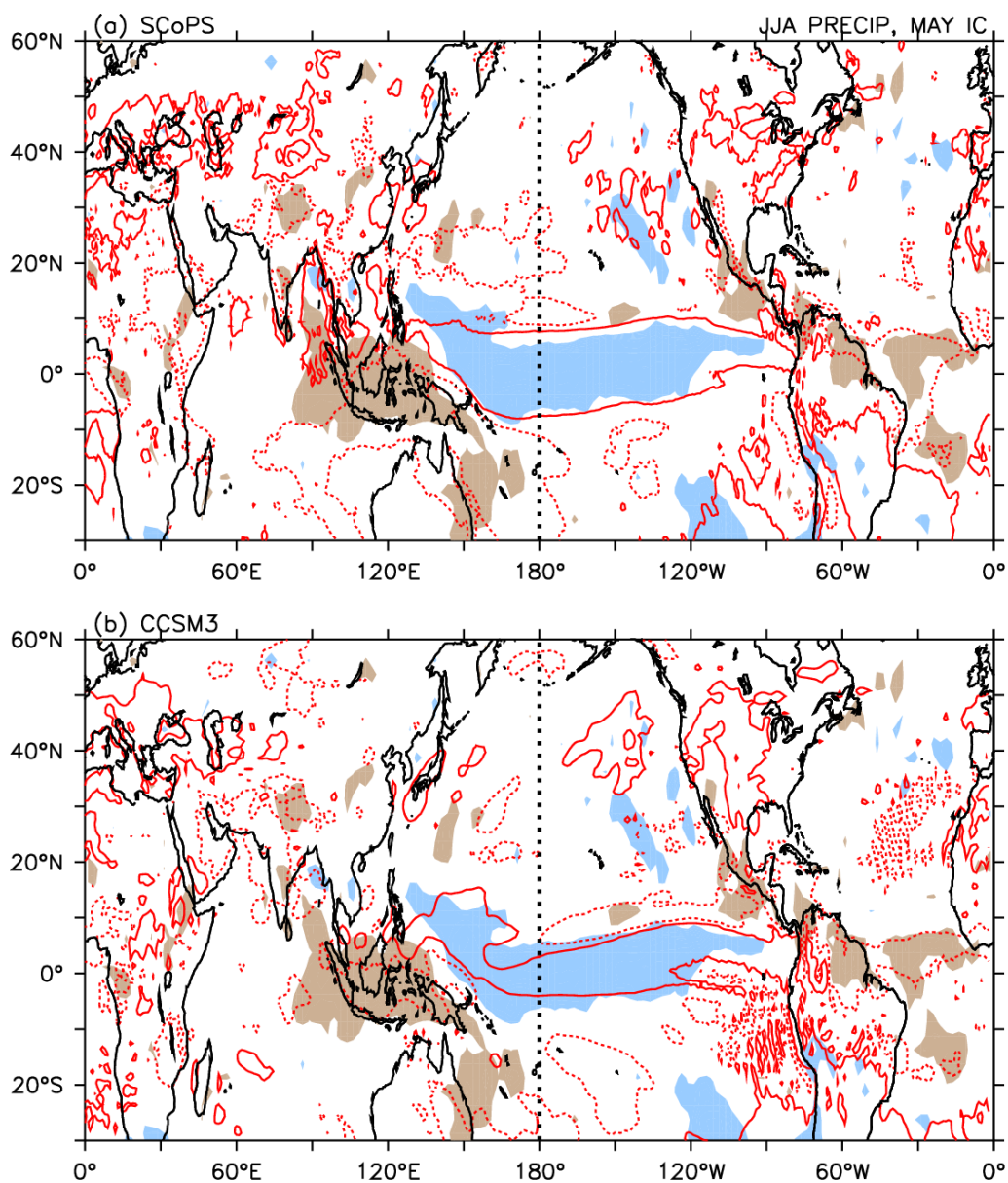


Figure 21 Same as Fig. 20 except for June-July-August (JJA) season-averaged precipitation and NINO3.4 index.

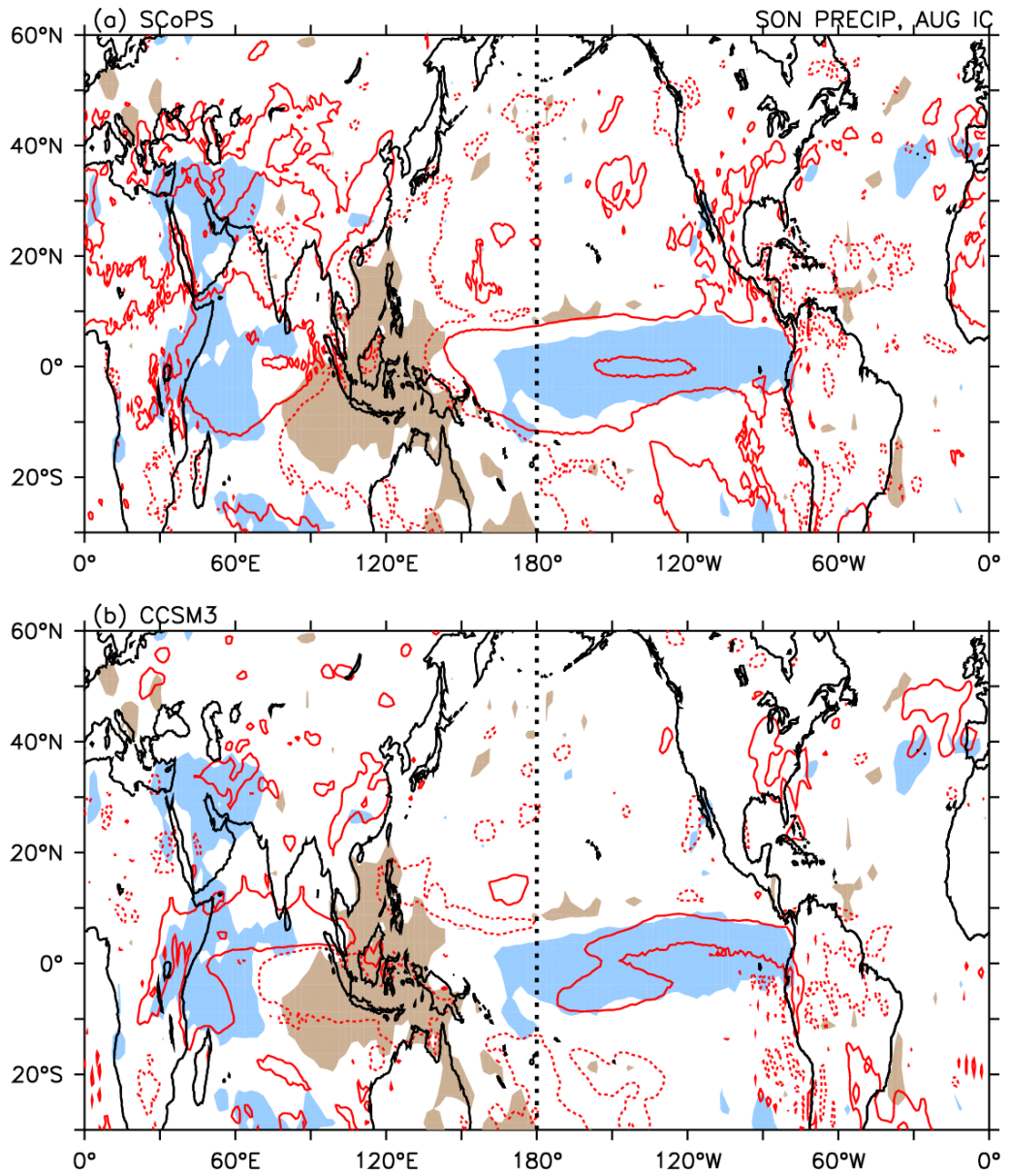


Figure 22 Same as Fig. 20 except for September–October–November (SON) season-averaged precipitation and IOD index.

4. APCC MME 시스템 모형들과 예측성 비교

이 섹션에서는 ENSO, IOD, IOBW 모드, 그리고 강수량의 예측성능을 APCC MME 시스템 모형들과 비교 분석 하였다. 먼저 Figure 23에서 보여주듯이, ENSO 지수들의 1개월에서 6개월 선행시간에서 8개의 APCC MME 계절 예측 모형들 (B-I) 과 SCoPS (A)에 대하여 TCC들을 계산하였다. 예측 모형들은 일반적으로 NINO1+2 지수 예측에서 다른 지수들 예측보다 예측 성능이 떨어지며, 모형들 간의 편차가 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 반해서 NINO3.4 지수에 대하여 모형간의 예측성 차이는 다른 ENSO 지수에 비해 상대적으로 다소 작았다. SCoPS의 NINO4와 NINO3.4 지수의 예측에서 다른 예측 모형들보다 예측성에서 우위를 보여주지 않았으며, NINO3와 NINO1+2 지수 예측에서는 중간 정도의 예측 능력을 갖는 것으로 분석된다.

Figure 24는 IOD 지수와 IOBW 모드와 관련된 지수들에 대한 APCC MME모형들과의 예측성능 비교를 보여준다. 인도양에서 SST 변화와 관련된 지수들의 예측에서 전반적으로 ENSO 지수 예측 보다는 모형들 간의 예측성능 차이가 더 크며, 전체적으로 예측성이 작다. IOD 지수 예측에 있어서 예측 선행 시간에 따른 TCC의 감소 폭 또한 ENSO 지수보다도 훨씬 크며, 모든 예측 모형들이 6개월 예측 선행 시간에서 TCC 값이 0.3 이하로 감소하였다. 그런데 IOBW 모드에 관해서는 예측 모형들이 좀 더 나은 예측 성능을 보였으며, 북인도양 (즉 NIO) SST 아노말리 변동성에 대한 예측성능이 서남인도양 (SWIO)에서 SST 아노말리 변동성을 예측 하는 것보다 다소 더 나았다. SCoPS는 IOD 지수 및 IOBW 모드 예측에서 APCC 예측 모형들 중 상위권의 예측성능을 보였다. 그러므로, SCoPS는 인도양에서 SST 변동성을 예측하는 데 있어서 APCC MME 예측 성능 향상에 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로, 특정 지역들 즉, 태평양 도서국의 4개의 기후 지역들 (Fig. 25)과, 전 지구, 남아시아, 그리고 동아시아 (Fig. 26)에서 강수량 예측성능을 비교하였다. 먼저 태평양 도서국의 기후 지역에서 강수량 예측성에 대하여 비교하면, EQP 기후 지역에서 다른 지역들 보다 기후 예측 모형들이 더 나은 예측성을 보이지만, 모형들 간의 예측 성능 차이가 컸다. NWP와 SWP 기후 지역에서는 다른 지역 보다 예측성이 낮았지만, 모형들 간의 예측성 차이가 상대적으로 작았다. 전반적으로 4개의 기후 지역에서 SCoPS는 APCC MME 예측 모형 들 중에 중간 이상의 상당히 좋은 예측성을

보였다. 이는 태평양 도서국에 계절 예측 정보를 제공하는데 있어서, APCC MME 예측 시스템의 향상을 기대할 수 있는 결과이다.

그런데, 전 지구, 남아시아, 그리고 동아시아에서 강수량에 대하여 모든 APCC MME 모형들에서 예측성은 아주 작았으며, 특히 동아시아에서 예측성이 가장 낮았다. SCoPS에서도 다른 계절 예측 모형들처럼 그 지역들에서 강수량 예측에 대하여 역시 예측능력이 없었다. APCC MME 시스템의 예측 성능 향상, 특히 그 지역들에서 강수량에 대한 예측 성능 향상을 위해서 SCoPS의 기여는 그렇게 높지 않을 것으로 사료된다.

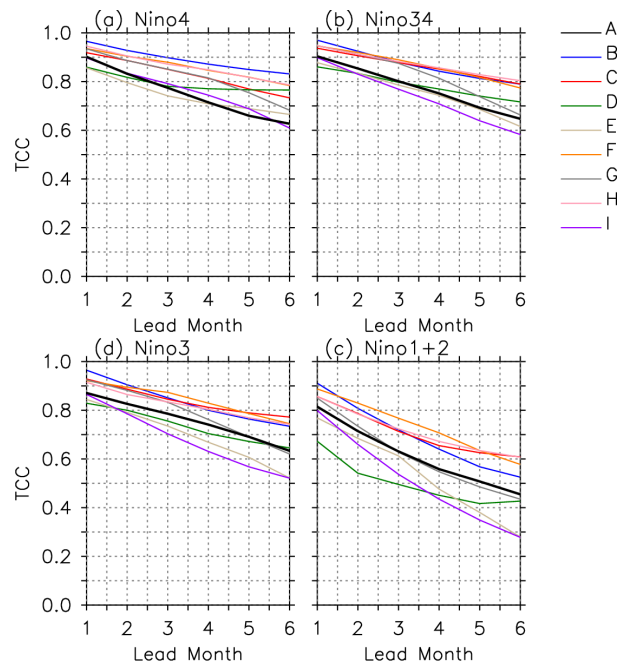


Figure 23 TCCs for (a) NINO4, (b) NINO3.4, (c) NINO1+2, and (d) NINO3 between observations and forecasts from 1-to-6 month lead times. Alphabets indicate the seasonal forecast models listed in Table 2. Black lines are for the SCoPS.

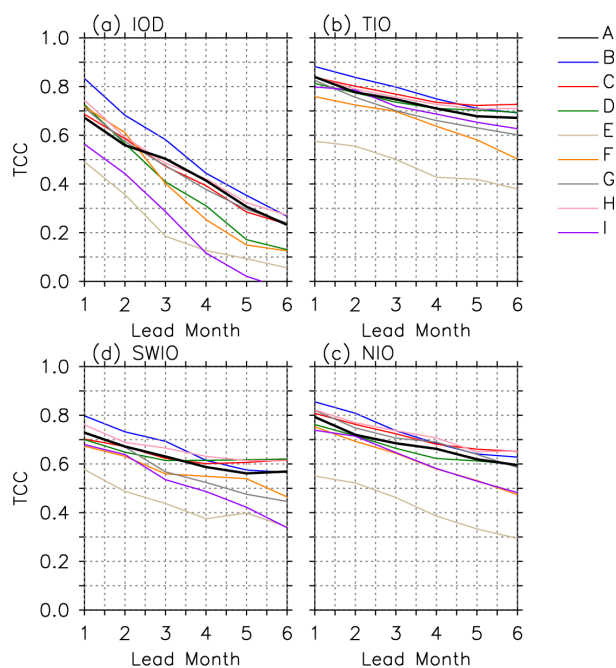


Figure 24 Same as Fig. 23 except for (a) IOD, (b) TIO, (c), NIO, and (d) SWIO indices.

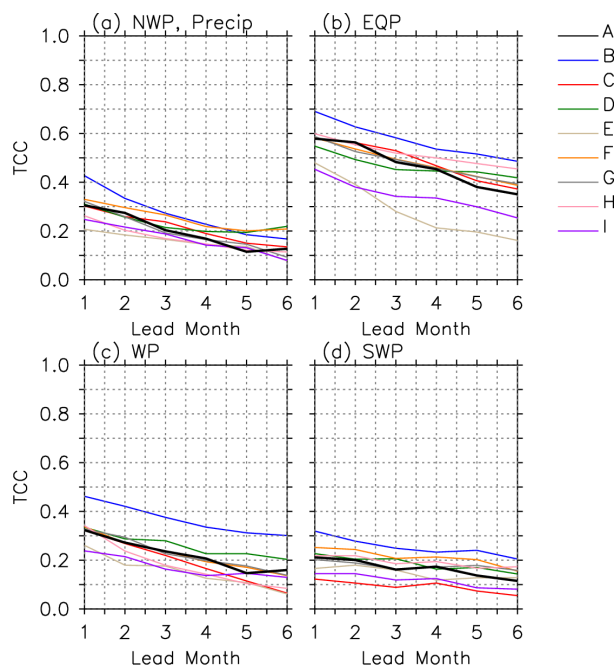


Figure 25 TCCs area-averaged over the four climatic regions (see Fig. 2), namely (a) NWP, (b) EQP, (c) WP, and (d) SWP, TCCs between observations and models' forecasts from 1-to 6-month lead times are computed at each grid.

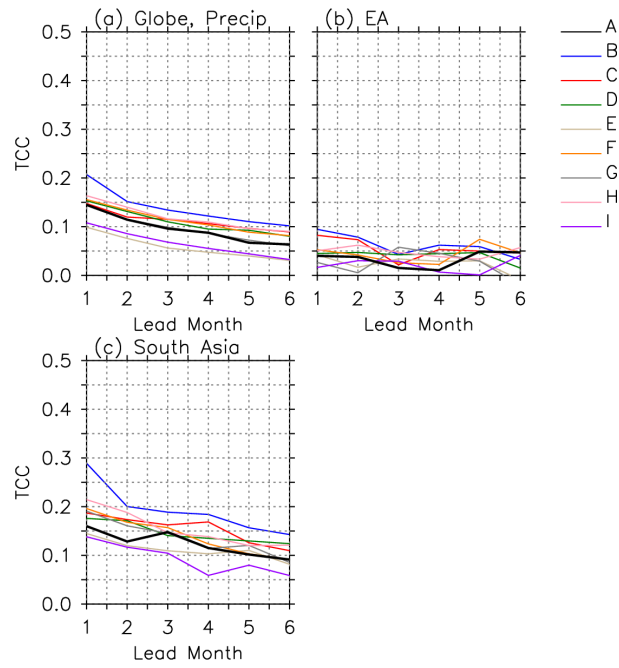


Figure 26 Same as Fig. 25 except for (a) Global, (b) East Asian, (c) South Asian regions.

5. 요약 및 결론

본 연구에서 새로운 APCC in-house 계절 예측 모형인 SCoPS에서 생산된 1982년부터 2014년까지 33년 동안 6개월 과거 예측 자료의 열대인도양과 열대 태평양에서 예측성을 평가하였다. 예측성 검증을 위해서 주로 기존 APCC 현업 예측 모형인 CCSM3의 같은 기간 과거 예측 자료와 예측성 비교를 수행하였다. 먼저 전 지구 기온, 강수량에 대한 예측성능을 비교하였다. SCoPS는 1개월 예측 선행 시간에 인도양, 태평양, 대서양의 더 넓은 지역에서 상당히 더 높은 예측성을 보였으며, 그리고 SCoPS에서는 전 예측 선행 시간에서 동적도 태평양, 그리고 동 인도양 지역의 기온 예측에 대하여 전반적으로 예측성 증가가 있었다. 강수량에 대한 예측에서도 SCoPS가 CCSM3보다 예측성이 훨씬 좋았으며, 특히 긴 예측 선행시간에서 열대 태평양에서 CCSM3는 예측성을 보이지 않았으나, SCoPS에서는 상당히 유의한 예측성을 보였다. 그러나, 육지에서 초기 예측 선행 시간에서 조차도 기온과 강수량에 대해서 두 모형 모두 예측성이 없었다.

본 연구에서는 전 지구 기후에 상당히 영향을 미치는 적도 태평양에서 지배 대기-해양 결합 모드인 ENSO의 예측성을 평가하였다. 대체적으로 일반적인 ENSO를 모니터링하기 위해 사용되는 NINO3.4 지수를 포함해서 다른 ENSO 지수들의 예측에 있어서, 1개월에서 6개월 예측 선행 시간까지 CCSM3보다 SCoPS에서 더 나은 예측성을 보였다. 특히 extreme 엘니뇨 이벤트에 대한 예측에 있어서 현저한 향상이 있었다는 것이 확인되었다. 특히 1997/98 이벤트에 대하여 7월과 9월 초기 조건으로 SCoPS는 12월에 다가갈수록 NINO3.4 지수의 강도가 관측에서 보여주는 것처럼 증가하였다. 이에 반해서 CCSM3는 7월 초기조건으로 12월까지 NINO3.4 지수가 증가하지 못하고, 4개월 이후 급격히 감소 하였다. 9월 초기조건에서도 2개월 이후 즉 11월 이후 엘니뇨 강도가 감소 경향을 보였다. 그런데 SCoPS에서 3월과 5월초기 조건으로 엘니뇨 발달을 잘 예측하지 못하였는데, 이는 특정 계절에 강해지는 모형 기후장의 열대 태평양에서 cold bias와 관련이 있을 수 있으며, 만일 엘니뇨 예측성과 모형 bias와의 관계를 규명한다면, 엘니뇨 예측성 향상에 기여를 할 수 있을 것으로 보인다. 또한 ENSO 다양성, 즉 CP 와 EP 타입 ENSO에 대한 예측성도 검증하였다. 1개월에서 6개월 예측 선행 시간에서 EP 타입에 대하여는 SCoPS에서 더 나은 예측능력을

보였고, CP 타입에 대해서는 CCSM3가 더 나은 예측성을 보였다. 그러나 두 모형 모두 관측에서처럼 두 타입에 대하여 separation이 잘 이루어지지 않았다. 두 가지 타입 ENSO 예측성은 부분적으로 기후장 bias와 관련이 있었다.

1개월에서 6개월까지 예측 선행 시간에 따라 태평양 도서국들이 포함된 4개의 기후 지역들에서의 2미터 기온과 강수량에 대한 예측성도 평가 되었다. 두 모형 모두 전반적으로 열대 태평양 지역에서 기온보다는 강수량 예측에서 문제점을 보였다. 다른 기후 지역들보다 EQP 지역에서 기온과 강수량의 예측성이 높았다. 이 기후 지역에서는 기온 예측에 대하여 대체로 양쪽 모형이 비슷한 예측 성능을 보였고, 강수량에 대하여 CCSM3에 비하여 SCoPS에서 상당히 향상되었다. WP 기후지역에서는 1개월 예측 선행 시간을 제외하고 CCSM3가 다소 더 나은 예측성을 보였지만, 강수량 예측에 있어서는 SCoPS에서 CCSM3보다 전 예측 선행 시간에서 더 나은 예측성을 보였다. SWP 기후 지역에서는 SCoPS에서 기온에 대하여 예측성의 상당한 증가를 보였으며 이 기후 지역에서 강수량 예측은 비록 SCoPS에서 향상이 있었지만 다른 기후 지역들보다 예측성이 낮았다. 역시 태평양 도서국에서 계절별 강수, 기온에 대한 예측성을 조사하였다. 일반적으로 SCoPS는 태평양 도서국의 겨울 혹은 봄철의 기온과 강수량 예측이 여름철의 기온, 강수량보다 더 높은 예측성을 보였다. 특히 쿡 아일랜드, 투발루, 나우루, 키리바티를 포함하는 EQP 기후 지역은 다른 기후 지역들에 비해서 더 긴 예측 선행 시간에서 전 계절 기온과 강수량에 대한 좋은 예측성을 보였다.

본 연구에서는 아시아 몬순에 상당한 영향을 미치는 인도양에서 SST 변동성에 대하여도 예측성을 평가 하였다. 먼저 태평양에서처럼 대기-해양 접합 모드인 IOD의 예측성을 평가하였는데, CCSM3에 비하여 SCoPS에서 상당한 예측성 증가가 있었다. 이와 같은 예측성 향상은 SCoPS에서 동인도양 SST에 대한 상당한 예측성 증가와 관련이 있었다. 그리고, IOBW 모드를 나타내는 인도양 SST 아노말리에 대한 예측에 대해서도 역시 SCoPS가 더 나았다.

ENSO와 IOD지수 자체에 대한 예측성 이외에 그 기후 모드들과 local 과 remote 지역에서 강수 변화와 원격상관관계에서의 예측성 및 오류들에 대하여 분석을 시도 하였으며, 관측에서 보이는 원격상관관계의 많은 측면을 모형 예측에서 잘 나타내고 있었지만, 관계에서 오류들이 존재하는 지역들이 많았다. 그 모드들이 발달할 때 원

격상관관계 문제를 갖고 그 지역 기후에 영향을 미치므로, 그점들을 고려하여 SCoPS의 예측 정보를 활용해야 할 것으로 사료된다.

마지막으로, ENSO, IOD, IOBW 모드 관련 SST, 그리고 강수량의 예측성능을 APCC MME 시스템 9개의 모형들과 비교 분석 하였다. 전반적으로 SCoPS는 10개의 모형들 중에 우월한 ENSO 예측성을 보여주지는 못했지만, IOD 지수와 IOBW 모드와 관련된 SST 아노말리 지수들에 대하여서는 예측 모형들 중 상위권에 속하는 예측성을 보였다. 태평양 도서국에서 강수량에 대한 예측성은 SCoPS가 중간 이상이었으며, 그러므로 이 지역에서 향상된 기후 예측 정보제공이 가능할 것으로 보인다. 아울러 전 지구, 동아시아, 남아시아에서 강수량 예측에 대하여도 예측성 비교를 하였는데, SCoPS를 포함해서 모든 APCC MME 시스템의 모형들 모두 강수량 예측 향상을 위해서 더 많은 노력이 필요해 보인다.

정리하자면, APCC에서 개발된 고해상도, 향상된 대기-해양 결합 자료동화를 사용하는 SCoPS의 열대 인도양과 태평양에서 기존의 APCC in-house모형보다 전반적인 예측성 향상을 확인할 수 있었으며, 그러므로 추후 APCC MME 계절 예측 시스템에서 좀더 향상된 계절 예측 정보 제공을 위해 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 여전히 모형에 cold bias같은 계통오류가 존재하며, 열대 태평양에서 ENSO 포함 여러 가지 기후 변수들의 예측성에 영향을 미치고 있는 것으로 보인다. 그 bias를 완화시킬 수 있는 방법을 강구해야하며, 그리고 열대 지역 이외 육지에서 거의 초기 예측 선행 시간에서 조차도 예측성이 거의 없는데, 이를 향상시키기 위해서 지면 초기화의 도입이 필요해 보인다.

REFERENCE

- Adler, R. F., and Coauthors, 2003: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147–1167.
- Annamalai, H., and R. Murtugudde, 2013: Role of the Indian Ocean in Regional Climate Variability. *Earth's Climate*, American Geophysical Union, 213–246.
- Ashok, K., Z. Guan, N. H. Saji, and T. Yamagata, 2004: Individual and combined influences of ENSO and Indian Ocean Dipole on the Indian summer monsoon. *J. Climate*, 17, 3141–3155.
- _____, Behera, A. S. Rao, H. Y. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Nino Modoki and its teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112:C11007.
- Behera, S. K., J. J. Luo, S. Masson, P. Delecluse, S. Gualdi, and A. Navarra, 2005: Paramount impact of the Indian Ocean dipole on the east African short rains: a CGCM study. *Journal of Climate*, 18, 4514–4530.
- 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.
- Cai, W., P. van Rensch, T. Cowan, and H. H. Hendon, 2011: Teleconnection Pathways of ENSO and the IOD and the Mechanisms for Impacts on Australian Rainfall. *Journal of Climate*, 24, 3910–3923.
- Cai, W. et al., 2014: Increasing frequency of El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change* 4, 111–116.
- Capotondi, A., and Coauthors, 2015: Understanding ENSO Diversity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 921–938.
- Chavez, F. P., Ryan, J., Lluch-Cota, S. E. & Ñiquen, M., 2003; From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science* 299, 217–221.
- Collins, W. D., and Coauthors, 2006: The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, 19, 2122–2143.
- Fu, X., B. Wang, Bao Q., P. Liu, and J.-Y. Lee 2009: Impacts of Initial Conditions on Monsoon Intraseasonal Forecasting. *Geophysical Research Letters*, 36, L08801.
- Hudson, D., O. Alves, H. H. Hendon, and G. Wang, 2010: The impact of atmospheric

- initialisation on seasonal prediction of tropical Pacific SST. *Climate Dynamics*, 36, 1155-1171.
- Hunke, E. C., and W. H. Lipscomb, 2010: CICE: The Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 4.1. LA-CC-06-012, T-3 Fluid Dynamics Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos N.M.
- Jeong, H.-I., and Coauthors, 2012: Assessment of the APCC coupled MME suite in predicting the distinctive climate impacts of two flavors of ENSO during boreal winter. *Climate Dynamics*, 39, 475-493.
- Ji, M., D. W. Behringer, and A. Leetmaa, 1998: An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part II: The coupled model. *Monthly Weather Review*, 126, 1022-1034.
- Jia, L., and Coauthors, 2015: Improved Seasonal Prediction of Temperature and Precipitation over Land in a High-Resolution GFDL Climate Model. *Journal of Climate*, 28, 2044-2062.
- Jin, E. K., and J. L. Kinter III, 2008: Characteristics of tropical Pacific SST predictability in coupled GCM forecasts using the NCEP CFS. *Climate Dynamics*, 32, 675-691.
- Jin, F.-F., 1997: An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 54, 811-829.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kao, H.-Y., and J.-Y. Yu, 2009: Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO. *Journal of Climate*, 22, 615-632.
- Klein, S. A., 1999: Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate*, 12, 917-932.
- Kim, S. T., W. Cai, F.-F. Jin, and J.-Y. Yu, 2014: ENSO stability in coupled climate models and its association with mean state. *Climate Dynamics*, 42, 3313-3321.
- Kim, H.-J., and J.-B. Ahn, 2015: Improvement in Prediction of the Arctic Oscillation with a Realistic Ocean Initial Condition in a CGCM. *Journal of Climate*, 28, 8951-8967.
- Kim H.-M. et al., 2009: Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on North Atlantic tropical cyclones. *Science*, 325(5936):77
- _____, P. J. Webster, and J. A. Curry, 2012: Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere Winter. *Climate Dynamics*, 39, 2957-2973.

- Kleenlyside, N., M. Latif, M. Botzet, and J. Jungclaus, 2005: A coupled method for initializing El Niño Southern Oscillation forecasts using sea surface temperature. *Tellus A*, 57, 340–356.
- Kug, J.-S., F.-F. Jin, and S.-I. An, 2009: Two Types of El Niño Events: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño. *Journal of Climate*, 22(6), 1499–1515.
- Larkin, N. K., and D. E. Harrison, 2005: Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophysical Research Letters*, 32.
- Luo, J.-J., S. Masson, E. Roeckner, G. Madec, and T. Yamagata, 2005: Reducing Climatology Bias in an Ocean-Atmosphere CGCM with Improved Coupling Physics. *Journal of Climate*, 18, 2344–2360.
- McPhaden, M. J., 1999: Genesis and Evolution of the 1997–98 El Niño. *Science*, 283, 950–954.
- _____, S. E. Zebiak, and M. H. Glantz, 2006: ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 314, 1740–1745.
- Murphy, B. F., S. B. Power, and S. McGree, 2014: The Varied Impacts of El Niño–Southern Oscillation on Pacific Island Climates. *Journal of Climate*, 27, 4015–4036.
- Oleson and Coauthors, 2004: Technical description of the Community Land Model (CLM). Tech. Rep. NCAR/TN-461+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 174 pp.
- Peng, P., A. Kumar, and W. Wang (2009), An analysis of seasonal predictability in coupled model forecasts, *Climate Dynamics*, 36(3–4), 637–648.
- Philander, S. G. H., 1983: Anomalous El Niño of 1982–83. *Nature* 305, 16–16.
- Ren, H.-L., and F.-F. Jin, 2011: Niño indices for two types of ENSO. *Geophysical Research Letters*, 38, L04704. 과
- _____, and _____, 2013: Recharge Oscillator Mechanisms in Two Types of ENSO. *Journal of Climate*, 26, 6506–6523.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473–5496
- Roeckner, E., G. Buml, L. Bonaventura et al., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5. PART I: Model description. MPI Report 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, P. 127.
- Rosati, A., K. Miyakoda, and R. Gudgel, 1997: The impact of ocean initial conditions on ENSO

- forecasting with a coupled model. *Monthly Weather Review*, 125, 754–772.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401, 360–363.
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015–1057.
- Schott, F. A., S.-P. Xie, and J. P. McCreary, 2009: Indian Ocean circulation and climate variability. *Reviews of Geophysics*, 47.
- Smith, R. D., J. K. Dukowicz, and R. C. Malone, 1992: Parallel ocean general circulation modeling. *Physica D*, 60, 38–61.
- Valcke, S., V. Balaji, A. Craig, C. Deluca, R. Dunlap, R. Ford, R. Jacob, J. Larson, R. O’Kuinghttons, G. Riley, M. Vertenstein, 2012: Coupling technologies for Earth System Modelling. *Geoscientific Model Development*, 5, 1589–1596.
- Wang, B., Lee, J.-Y., et al., 2009: Advance and prospectus of seasonal prediction: Assessment of APCC/ClIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004). *Climate Dynamics*, 33, 93–117.
- Webster, P. J., and S. Yang, 1992: Monsoon and ENS: Selectively interactive systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 118, 877–926.
- Xiang, B., B. Wang, and T. Li, 2013: A new paradigm for predominance of standing Central Pacific Warming after the late 1990s, *Climate Dynamics*, 41, 327–340.
- Xie, S.-P., H. Annamalai, F. A. Schott, and J. P. McCreary, 2002: Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability. *J. Climate*, 15, 864–878.
- _____, K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean Capacitor Effect on Indo-Western Pacific Climate during the Summer following El Niño. *Journal of Climate*, 22, 730–747.
- Yeh, S. W., J. S. Kug, B. Dewitte, M. H. Kwon, B. P. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate, *Nature*, 461, 511–514.
- Yuan, Y., and S. Yang, 2012: Impacts of different types of El Nino on East Asian climate: Focus on ENSO cycles. *Journal of Climate*, 25, 7702–7722,
- Yu, J.-Y., H.-Y. Kao, and T. Lee, 2010: Subtropics-related interannual sea surface temperature variability in the equatorial central Pacific. *J. Climate*, 23, 2869–2884.
- _____, Y. Zou, S. T. Kim, and T. Lee, 2012: The changing impact of El Niño on US winter temperatures. *Geophysical Research Letters*, 39, L15702.
- Zhang W, Graf H, Leung Y, Herzog M, 2012: Different El Niño types and tropical cyclone

- landfall in East Asia. *Journal of Climate*, 25(19):6510–6523.
- _____, F.-F. Jin, and A. Turner, 2014: Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift, *Geophysical Research Letter*, 41, 4020–4026,
- _____, Y. Leung, and K. Fraedrich, 2015: Different El Niño types and intense typhoons in the Western North Pacific. *Climate Dynamics*, 44, 2965–2977.

연구보고서 2016-01

**새로운 APCC 모형의 예측성 평가:
열대 태평양과 인도양, 그 인접한 나라들**

Assessment of Forecast Skill of New APCC in-house Model: Tropical
Pacific and Indian Oceans and its Adjacent Countries

김선태



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

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

www.apcc21.org



9 791156 981527

ISBN 979-11-5698-152-7