

APCC In-House 모형(SCoPS)의 운영 및 개선

Operation and Improvement of the APCC In-House Model (SCoPS)

함수련, 김해정, 정유림 예측기술팀

정여민 융합기술팀

발간사

정확하고 신뢰도 높은 전지구적 혹은 지역적 중장기 계절 예측 정보 제공을 위해 전지구 접합 모델은 필수적이며, 세계적 기관 및 대학에서도 지속적으로 모델 개발 및 개선을 통한 예측성 향상에 힘쓰고 있습니다. 우리 센터는 매월 전세계 유수기관으로부터 제공되는 계절 예측 정보를 활용하여 전지구 다중 모델 앙상블(MME) 예측 시스템을 운영하고 있습니다. 아울러 우리 센터에서는 MME 예측성 향상에 기여하고 응용분야의 활용연구 등을 위해 지난 수년간 고해상도 전지구 접합 모델인 Seamless Coupled Prediction System(SCoPS)을 개발하였습니다.

이 연구보고서는 SCoPS로부터 생산된 과거 예측 자료를 이용하여 매달 안정적인 계절예측 정보 생산 및 APCC MME 계절예측 시스템 참여를 위한 일련의 과정을 소개합니다. SCoPS는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하는 등 최신 기법을 포함하고 높은 해상도를 가지고 있어 일반적으로 안정된 예측 성능을 보여주고 있지만, 모델 자체가 가지고 있는 계통적 오차에 의해 발생하는 초기값의 오차로 인한 예측 성능 저하가 발견된 바 있습니다. 이에 이 연구에서는 초기값이 가지고 있는 오차의 특성을 파악하고 그것을 줄일 수 있는 방안을 모색하였습니다. 또한 이 연구는 최근 중요성이 강조되고 있는 계절내 예측의 기본 구성을 고안하고 검증하는 등 SCoPS의 활용성을 넓히고자 하였습니다.

이 연구보고서가 발간되기까지 많은 분들의 도움이 있었습니다. 무엇보다도 연구가 순조롭게 진행될 수 있도록 다방면으로 도와준 정여민 연구원, 정유림 연구원, 김해정 선임연구원, 그리고 본 연구보고서를 총괄하고 최종 집필한 함수련 선

임연구원에게 깊은 감사를 드립니다. 이 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

This study introduces processes to operate and improve the newly developed APEC Climate Center (APCC) in-house model (Seamless Coupled Prediction System; SCoPS) for the APCC multi-model ensemble (MME) system for predicting seasonal forecasts. The SCoPS is a state-of-the-art global prediction system for seasonal time scales, based on a fully coupled climate model with integrated initialization processes for the atmosphere, ocean, and sea ice. The SCoPS initialized data for 10-member ensembles was assimilated by NCEP CFS data and several observational subsurface profile data. Real-time forecast runs are started at fixed calendar dates, the 1st and 5th of each month, with five perturbed ensemble members by gaussian spread and integrated for up to seven months. In previous study, there was evaluation of prediction skill compared to the operation model (the APEC Climate Center Community Climate System Model version 3; APCC CCSM3) using 32 year (1982–2013) ensemble hindcast runs. As a result, we found that seasonal climate forecasts using SCoPS are useful for simulating climate variability, especially in East Asian monsoon system. Furthermore, prediction results from hindcasts and forecasts show perform well in current MME participant models. Based on these studies, we have provided newly developed SCoPS seasonal forecast data to the APCC multimodel ensemble (MME) system as the APCC operational model every month since November 2017.

The SCoPS system has been updated and the initial processes have been improved. In previous studies, we found that there were significant systematic biases in subsurface ocean temperature and that these lead to excessive or weak ENSO signals with long lead times. Now, some ocean initialization processes related to

subsurface temperature has been corrected. However, systematic biases in subsurface ocean temperature are still significant, especially in terms of the excessive positive anomaly below the thermocline in the eastern Pacific. This study evaluates some variables related to the ocean temperature biases. The initial condition of SCoPS tends to have cold biases in surface heat fluxes and deepens the thermocline. To improve the ocean circulation feature in SCoPS, we have suggested modification of vertical diffusivity profile in the ocean model to change the thermal structure of the ocean. Increasing and decreasing the ocean diffusivity coefficient leads to reductions in the sea surface temperature biases and precipitation in seasonal forecasts even causes minor changes in the thermal structure of the ocean. However, because the spin-up time of the equatorial ocean is about 10–20 years and the timescale of subtropical–tropical exchange is about 20–30 years, the sensitivity experiment needs a longer integration time.

Meanwhile, because of the recent increase in the occurrence of extreme weather and climate events, data on the prediction of extreme events in various time frames is being requested. Therefore, by developing the SCoPS subseasonal forecast processes, the predictability is being evaluated. It can expect to expand the application for prediction data such as APCC BSISO. Discussions with APCC BSISO working group determine the configuration of subseasonal predictions based on information from the NMME group discussion, which is part of the S2S project. In one case study (MJJAS 2014–2015), we found that the result of predictions with a 1–3 week lead time shows a reasonable spatial distribution of large scale circulations and precipitation related to the East Asian monsoon system, although the TCC of the predicted variables is lower than those based on a lead time of 4–5 weeks. Furthermore, these subseasonal forecast data have been provided to the APCC BSISO forecast system. A figure that validates the prediction skill of the BSISO index is given in this study.

목 차

1. 서론	1
2. 모형 및 계절 예측 시스템	4
2.1 Seamless Coupled Prediction System(SCoPS)	4
2.2 Hindcast and Forecast System	6
3. SCoPS 모형의 계절내 예측 성능 평가	12
3.1 계절내 예측 시스템 시험 버전 구축	14
3.2 계절내 예측 성능 평가	16
4. SCoPS 모형의 계절 예측 성능 개선	23
4.1 양상불 증분 영향 평가	23
4.2 해양 초기장 오차 원인 진단	26
4.3 해양 연직 확산 계수 영향 평가	39
4.4 향후 개선을 위한 제안	47

5. 결론 및 제언-----	50
-----------------	----

Ⅱ REFERENCES-----	54
-------------------	----

1. 서론

장기 예측과 관련한 기후 정보는 최근 들어 산업 생산성 향상 및 사회경제 활동에 있어서 매우 필요한 정보로 인식되어오고 있으며, 이러한 추세는 장기예측 정확도에 대한 요구로서 반영되고 있는 실정이다. 전지구 기후 모형은 계절내 예측에서 계절 예측에 이르기까지 기본적으로 사용되고 있는 필수적인 존재이다. 이에 전세계 현업 기관들내에서 기후예측모형은 중장기 예측 성능 향상을 목표로 끊임없이 발전해 오고 있다. 한국 기상청에서도 1999년부터 대기대순환 모형(GCM)에 근거한 장기예보 생산체계를 구축하고 역학적 방법에 의한 장기 예측자료를 생산하였다. 국립기상과학원에서도 2000년대에 들어서 기후예측모형을 구축, 역학적 방법에 의한 장기예측자료를 생산하였다. 최근에는 한국 기상청과 국립기상과학원은 계절규모에서 한영 공동 기후예측시스템을 정착하고 현업으로 이용하기 위해 영국 기상청과 협력해왔고, 그 결과 2010년부터 영국 기상청의 전지구 대기-해양-해빙 결합모형(HadGEM3)을 기반으로 한 계절예측 시스템 Global Seasonal Forecasting System version 4(GloSea4)를 도입하고 구축하였다. 또한, 기상청은 향상된 계절 예보를 위해 2014년부터 GloSea4에서 모델 물리과정과 수평분해능을 개선한 고해상도 기후모형인 GloSea5(GloSea version 5)를 현업에 도입하였다.

미국 기상청(National Center for Environmental Prediction; NCEP)에서는 2004년 이래로 대기-해양-지면이 결합된 Climate Forecast System(CFS)를 통해 계절 예측을 수행해 오고 있다(Saha et al. 2006). 초기장 개선을 위한 자료동화 시스템을 비롯해 개선된 지면모형과 해빙모형, CO₂예단 등을 개선 및 수정한 CFS version 2(CFSv2)를 2012년에 도입하여 예측성 향상을 가져온 바 있다(Saha et al. 2014). CFSv2의 수평·연직 해상도는 대기 모형이 약 100km, 64층이며 해양모형이 약 50km, 40층이다. 영국 기상청은 계절예측 시스템인 GloSea4를 2009년에 첫 도입하였으며, 2013년까지 동일 시스템에 대해 1) 성층권고려, 2) 대기-해양-해빙 결합 주기 단축, 3) 물리과정 개선, 4) 해상도 향상 등의 방법을 통해 발전시켜 왔다. 2011년부터는 2-6주의 계절내 시간규모를 포함한 시스템으로 확장하였으며, 2013년부터 자료동화 시스템이 포함된 고해상도 대기-해양-해빙 모형인 새로운 계절/계절내 예측시스템 GloSea5를 도입하여 예측성 향상을 가져온 바 있다(MacLachlan et al. 2015).

APCC는 기후 집합 모형을 운영 중인 세계 유수기관으로부터 계절 예측 모형 결과를 제공 받고, 다중모델앙상블 기법을 기반으로 하여 매달 아태지역을 상대로 고품질의 계절 예측 정보를 생산 및 배포하고 있다(Min et al. 2014). 그러나 예측성의 향상을 위하여 모형 운영 기관의 제제 모델 향상 계획에 의존해야 하며, 월별 자료만 제공하는 등의 data availability에 대한 한계가 존재하므로, 궁극적인 기후 응용분야에 사용하기에 어려운 점이 있다. 2012년부터 APCC는 자체 개선한 Community Climate System Model version 3(CCSM3)를 이용하여 매달 계절예측 정보를 생산하고, APCC MME 시스템을 위해 그 자료를 제공하였으나, 낮은 모형 해상도(약 200km)와 단순한 초기조건(해양 온도 nudging) 등의 한계로 인하여 APCC MME 시스템의 참여 모델 중 낮은 성능을 기록하고 있다. 예측성 향상을 위해서 최신 자료동화 기법을 통한 초기화 방법을 포함하는 고해상도 전지구 집합 시스템, Seamless Coupled Prediction System(SCoPS)을 하와이 대학교와 공동으로 개발한 바 있다.

새롭게 개발된 SCoPS는 계절/계절내 예측을 목표로 개발이 된 대기-해양-해빙 결합 모형이며, 약 80km 정도의 높은 수평해상도를 가지고 있다. 또한 자료동화 기법은 최근 그 필요성이 강조되고 있는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하고 있다. SCoPS를 통해 생산된 과거 예측 자료를 이용한 예측 성능 평가들을 통해 전지구 기온 및 강수뿐만 아니라, 동아시아 몬순 모의에 이르기까지 예측성 향상의 가능성을 확인한 바 있다. 이러한 연구를 바탕으로 2017년 11월부터 기존의 CCSM3를 대체하여 새롭게 개발된 SCoPS를 통해 매달 계절 예측 자료를 안정적으로 APCC MME 시스템에 제공하고 있다(Ham et al. 2018). SCoPS는 최근 그 필요성이 강조되고 있는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하는 등 최신 기법을 포함하고 있지만, 예측성 향상을 위해서는 성분 모형들의 개선이 필요하다. 또한 고품질의 계절예측 자료를 위해서는 계통적 오차 분석을 기반으로 하는 초기장 및 개선과정이 필수적이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그동안의 SCoPS 예보장으로부터 분석된 문제점들 가운데 해양 초기장이 가지고 있는 계통적 오차의 원인을 파악해 보고자 한다. 파악된 문제점들의 개선을 통해 SCoPS 예보장이 어떻게 변하는지도 알아본다. 또한 초기 앙상블 멤버의 수에 대한 민감도 실험을 통해 예측 성능에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 살펴보고자 한다.

한편, 계절내 예측은 end-user의 요구와 맞물려 사회경제적으로 매우 중요한 요소로

부각되고 있으며, 현재 센터에서도 세계적 기관에서 제공하는 계절내 예측자료를 활용하여 계절내 진동(BSISO; boreal summer intraseasonal oscillation) 지수 예측 정보를 제공하고 있다. 이에, 날씨부터 기후까지 이음새 없는 예측을 위해 개발된 SCoPS를 통해 구축된 계절내 예측 시스템의 시험버전을 통해 BSISO 지수 예측 성능 및 전반적인 계절내 예측 성능을 살펴보고자 한다.

2. 모형 및 예측 시스템

2.1 Seamless Coupled Prediction System(SCoPS)

하와이 대학교와 International Pacific Research Center(IPRC)는 2012년에 대기-해양 결합모형인 POEM을 자체 개발하였고, 이 모형은 해수면 온도, 기온, 대기 대순환 등의 평균장, 변동성을 현실적으로 모의하였다(Xiang et al. 2012). 따라서 POEM 모형을 기반으로 많은 부분을 개선/추가하여 새로운 모형인 SCoPS를 개발하게 되었다. POEM 모형과 비교하여 개선 및 개발된 부분은 다음과 같다.

- 1) 결합시스템을 OASIS3.0에서 OASIS-MCT(Model Coupling Toolkit; Larson et al. 2005)로 교체(MCT는 재격자 방안이 모두 병렬화 되어 있어 변수들을 동시에 병렬로 주고받을 수 있게 고안되어 있어 OASIS3.0보다 더 효율적임).
- 2) CICE4.1 해빙모형 결합
- 3) 해양 모형의 해상도 개선($3^{\circ} \rightarrow 1^{\circ}$)
- 4) 대기 모형의 상위 버전 적용 및 해상도 증가(T42L19 $\rightarrow$ T159L31)
- 5) 지면 모형의 개선

대기모형은 독일 MPI 연구소에서 개발된 ECHAM5이다. 이 모형은 분광 역학 코어를 사용하며 semi-implicit leapfrog 시간차분법을 사용한다. 와도, 발산, 기온, 지표기압 등이 spherical harmonics의 truncation에 의해 수평방향으로 표현되며, triangular truncation이 159 wavenumber에서 사용된다. 연직 방향으로 10hPa까지 지표근처에서는 sigma system으로 지형이 사라지는 높이에서 점차 pressure system으로 전환되는 하이브리드 격자 시스템이 적용된다. 또한 모든 water 및 화학 성분에 한해 semi-Lagrangian 방안(Lin and Rood 1996)이 사용된다. 지면 기온은 지면 에너지 밸런스 식을 사용하여 예단변수 및 지표 플럭스에 의해 동시적으로 계산되며, 이는 5-layer 토양 모델 안에서 연직 열속을 계산하기 위한 경계 자료로 사용된다. 대기 모형과 지면 모형의 더 자세한 설명은 Roeckner et al.(2003) 및 Hagemann et al.(2006)을 참고하기 바란다.

해양모형은 미국 Los Alamos National Laboratory에서 개발된 POP version 1.4.3을 기반으로 구성되었다. 모형 해상도는 320(동서)×384(남북) 격자로 구성이 되어 있으며, 40개의 연직 층으로 이루어져있다. 적도 지역에서의 해상도는 수평 0.3°정도이며 연직으로는 100m 상층으로는 약 10m의 해상도를 가지고 있다. 월평균 지표 광합성 성분을 고려하는 단파복사 과정 역시 포함되어 있다. 같은 그룹에서 개발된 해빙모형인 CICE version 4.1이 결합되었다. 해빙 모형은 1) 연직 열전도, 복사, 난류 플럭스, 눈내림 등으로 인해 눈과 해빙의 성장률을 계산하는 열역학 성분, 2) ice pack의 와도를 예측하는 역학 성분, 3) ice volume과 다른 변수들의 이류를 모의하는 transport모형, 4) ice의 이동 및 압착에 관한 모수화 등을 포함하고 있다. 자세한 내용은 Hunk and Lipscomb(2010)에서 확인할 수 있다.

대기-지면-해양-해빙의 성분은 미국 Argonne National Laboratory에서 개발된 OASIS3-MCT(Larson et al. 2005)를 통해 결합된다. MCT는 미리 계산된 재격자 가중치와 정보를 바탕으로 병렬 재격자 작업 및 결합 변수들의 병렬 배치들을 설정하는 툴이다. 모든 과정은 MPI를 통한 병렬화가 적용된다. SCoPS는 대기-해양-해빙의 모델사이에서 SST, 지표 플럭스, ice component 관련 36개의 변수들을 OASIS-MCT를 통해 하루에 한번씩 주고받는다. heat flux 보존 방안 적용을 통해 에너지 보존을 유도하고 결합시스템 내의 climate drift를 피하고 있다.

고품질의 기후예측 자료를 제공하기 위해서는 기후 모형의 자체 개선뿐만 아니라 모형에 사용되는 정확한 초기장이 필요하다. 최근 결합 초기화에 대한 중요성이 커지고 있다. Lea et al.(2015)에 따르면, 각각의 성분 모델에서 초기장을 만드는 것은 결합 모델 안에서의 불일치성 및 부조화로 인한 오차가 커질 수 있다고 언급했다. SCoPS는 정확한 초기장을 생산하기 위해서 3D 대기 자료동화 및 Ensemble Adjustment Kalman Filter(EAKF) 해양 자료 동화를 이용하여 대기-해양 결합 방법을 적용하였다. 대기 초기장은 실시간으로 사용할 수 있는 NCEP CFS 재분석 자료를 3D nudging을 통해 동화한 후, 앙상블 스프레드를 위해 가우시안 분포에 따라 섭동을 주어 초기장을 생산한다. 자세한 방법은 다음 장에서 설명한다. 해양 자료동화를 위해서 Zhang et al.(2007)의 방법을 적용하였으며, EAKF의 자세한 산술식의 정보는 Anderson(2001)에서 찾을 수 있다.

2.2 Hindcast and Forecast System

SCoPS는 계절 예측 자료를 제공하기 위한 대기-해양-해빙 결합 모형이다. 실시간 계절 예측 시스템을 위해 우선 32년(1982-2013)동안의 과거 재현 자료(Hindcast)를 생산하였다. Hindcast는 매달 1일, 5일에 5개의 섭동으로 구성된 초기장으로 7개월 적분을 통해 이루어진다. 100년 free run을 통해 생산된 자료를 1982년 1월 1일의 초기 추정치로 주어 CFS 재분석자료와 다양한 해양 연직 프로파일 데이터를 사용해 1982년 1월 2일의 초기장을 생산하였다. 이후의 초기장 생산을 위해서는 실시간으로 사용할 수 있는 재분석자료 및 관측 자료를 활용한다. 대기변수를 위해 NCEP에서 실시간으로 제공하는 CFS 재분석 자료를 사용한다. CFS의 재분석 자료는 연직으로 1000-10hPa까지의 동서 바람장, 남북 바람장, 온도, 비습, 해면 기압의 대기 변수와 해수면 온도가 이용된다. 대기 변수의 연직 해상도는 isobaric 1000-10hPa이며, 수평해상도는 0.5°, 시간해상도는 6시간이다. 다운받은 대기 자료들은 모델에 맞게 내삽 작업을 거쳐 netcdf 포맷의 daily 파일로 변환된다. 변환된 자료는 매월 5일까지의 자료이며 1일과 5일에 해당하는 모델 리스타트 파일에 넣힌다. 해양모형을 위한 전구 해양 자료동화의 과정에는 크게 해수면 온도, 해수면고도, 해양 프로파일 관측 자료가 주로 이용된다. 프로파일 자료의 경우 상대적으로 자료 수가 제한적이었으나, 2000년 국제 Argo 프로젝트(Roemmich and Owens 2000)이 시작된 이래로 최근에는 전구 규모로 매일 350개 이상의 해양 프로파일 데이터가 수집되고 있다. 최근 관측시스템 실험(Observing System Experiment) 등을 이용한 다양한 연구들을 통해 Argo 관측망이 수치모델의 초기장을 개선하여 예측성을 향상시키는데 기여하는 것이 제시되고 있다(Huang et al. 2008; Balmaseda and Anderson 2009). 특히 방대한 양의 해양정보가 실시간으로 제공되고 있기 때문에 다수의 현업기관에서 수치예보 분야에 Argo 자료를 활용하고 있다(<http://argo.ucsd.edu>). SCoPS 또한 real-time forecast를 위해 실시간으로 제공되는 Argo 자료를 활용하여 매월 5일까지의 실시간 온도와 염분 데이터를 다운받아 모델에 맞게 내삽 작업을 거쳐 netcdf 포맷으로 변환한다. 사용되는 데이터는 하루당 전체(태평양, 인도양, 대서양) 약 700개 포인트 정도이며, 그림 1에서 2015년 9월 5일에 태평양 지역에서 실제 적용된 파일의 분포를 확인할 수 있다. 변환된 파일은 ENKF 자료동화 방법을 통해 모델에 적용된다. 또한, 관측된 해양 기온과 염도는 TS-balance

conservation을 통해 수정 적용된다. 연직 해양 프로파일은 깊은 수심에서는 계절 예측 스کیل에 큰 영향을 주지 않기 때문에 400m까지 사용된다. 수평적으로 관측 자료는 50°S-50°N까지 사용된다. 다시 요약하면, 1982년 1월 1일 초기장으로부터 2012년 12월 31일까지 NCEP CFS 재분석 자료와 사용가능한 Mechanical bathythermograph data(MBT), expendable bathythermograph data(XBT), profiling float data(PFL), ocean station data(OSD), conductivity-temperature-depth data(CTD), drifting buoy data(DRB), Moored buoy data(MRB) 등을 사용하여 일 단위로 자료동화 시스템을 통해 초기장을 생산하며, 2013년 1월 1일부터 현재까지는 NCEP CFS 재분석 자료와 ARGO profiles 데이터를 실시간으로 다운받아 초기장을 생산해오고 있다. 지면 및 해빙의 초기장은 기후값을 사용한다. 추후 실시간으로 가용한 데이터가 수집될 경우 초기장 생산 방법을 개선될 여지가 있다.

매달 15일을 전후로 전세계 유수기관의 계절 예측 정보를 이용하여 운영되는 APCC MME 예측 시스템에 SCoPS로부터 생산된 기후 예측 정보를 제공하기 위해, SCoPS는 매월 13일까지 예보장을 생산하고 그룹토의를 통해 예보장을 검증한다. 간략한 타임스케줄을 그림 2에 나타내었다. 매월 초 재분석 자료 및 해양 데이터를 실시간 다운받아 초기장을 동화하여 매일의 초기장을 생산한다. 생산된 초기장은 다시 가우시안 분포를 따르는 5개의 섭동으로 구성된다. 이 중에서 매달 1일/5일 각 5개 세트로 총 10개의 앙상블 멤버로 구성하여 7개월 적분을 통해 향후 6개월 동안의 계절 예측 자료가 생산된다.

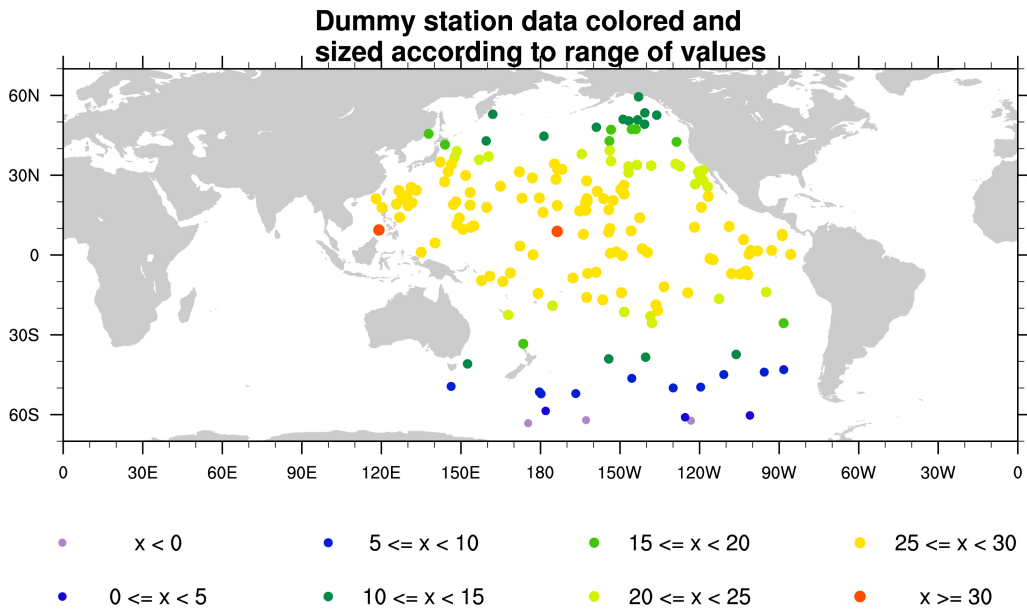


Figure 1. Numbering distribution of used Argo data over Pacific Ocean in SCoPS data assimilation for 5th September 2015.

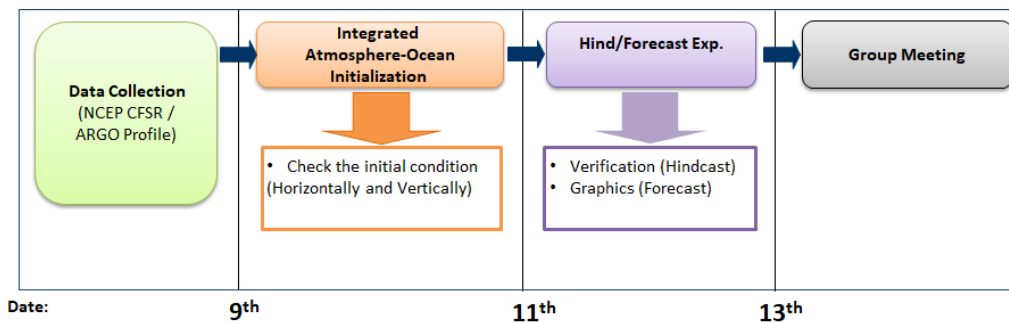


Figure 2. Time schedule of SCoPS seasonal forecast system for every month.

10개의 앙상블 멤버로 예측된 결과를 결정론/확률론적으로 제공하게 된다. 결정론적 방법은 10개의 앙상블 멤버의 단순 평균값이며, 확률론적 방법은 다음과 같이 구성된다. 과거재현자료 전 기간(1982~2013년; 32년)에 해당하는 10개 앙상블 멤버를 이용하여 매달 총 320개 값을 target month에 대해 Probability Density Function(PDF)을 수행한다. PDF에서 33.3%로 3분위하여 threshold값을 지정하여 below/normal/above를 결정하고 예측된 달의 10개 앙상블 멤버가 각각 어느 범주에 포함되었는지를 정하여

확률로 환산하여 계산한다. 예를 들면, 예측 기간의 10개의 앙상블 멤버가 각 below 3개, normal 1개, above 6개로 계산되었을 때 확률 예보는 above 60%로 계산된다. 기온 및 강수의 결정론/확률론적 결과의 예시를 그림 3-6에 제시한다. 실제 생산된 자료의 일반적인 예측성 및 동아시아 기후 모의에 대한 평가는 Ham et al.(2018), 함수련(2016, 2017)에 제시되어 있다.

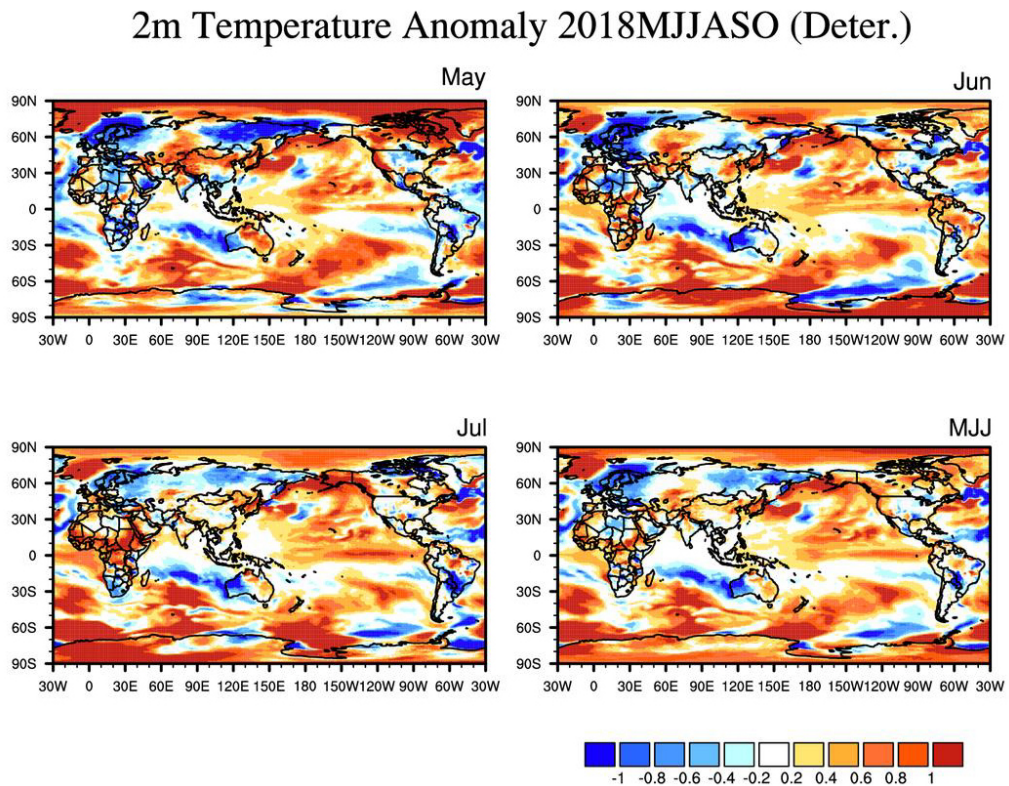


Figure 3. Spatial distribution of forecasted 2m temperature anomaly for May to July 2018, initialized April 2018.

2m Temperature Anomaly 2018MJJASO (Prob.)

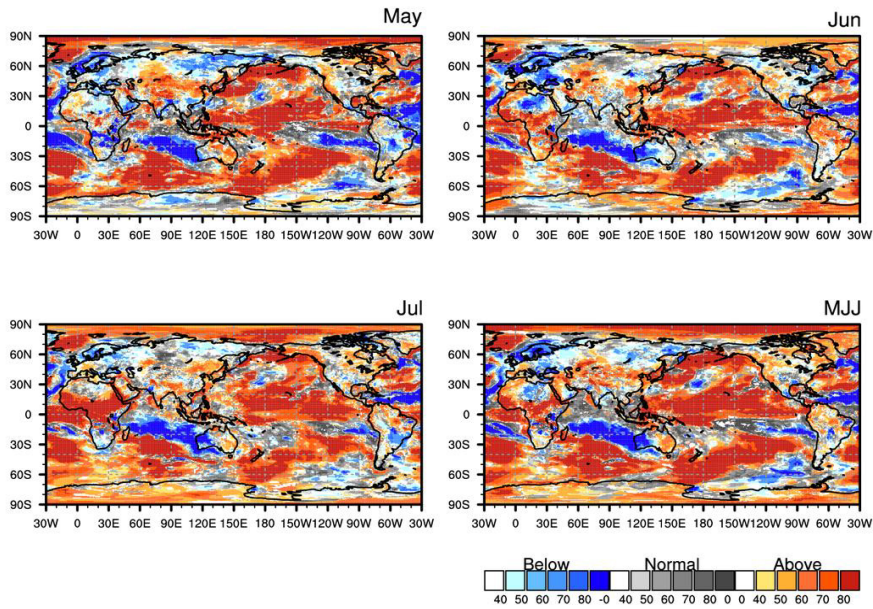


Figure 4. Probability spatial distribution of forecasted 2m temperature anomaly for May to July 2018, initialized April 2018.

Precipitation Anomaly 2018MJJASO (Deter.)

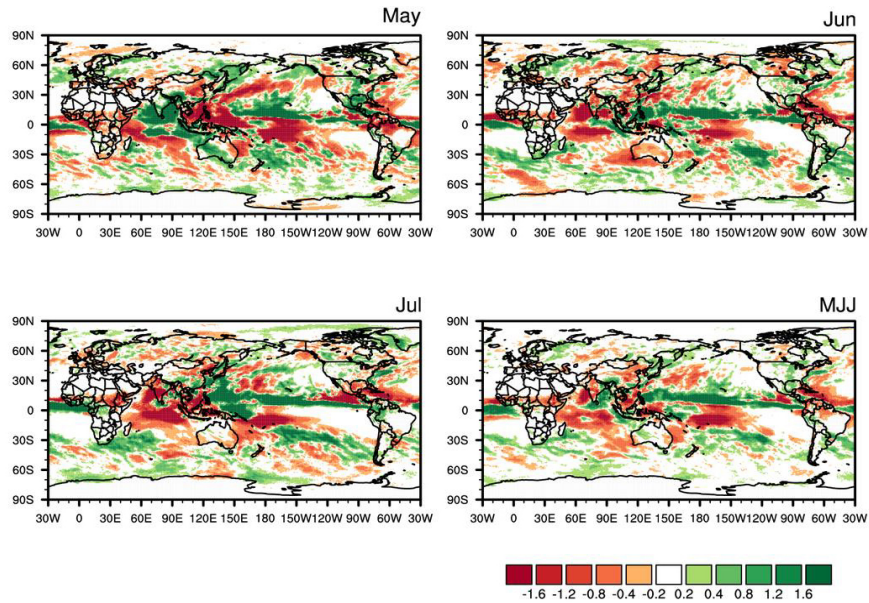


Figure 5. Spatial distribution of forecasted precipitation anomaly for May to July 2018, initialized April 2018.

Precipitation Anomaly 2018MJJASO (Prob.)

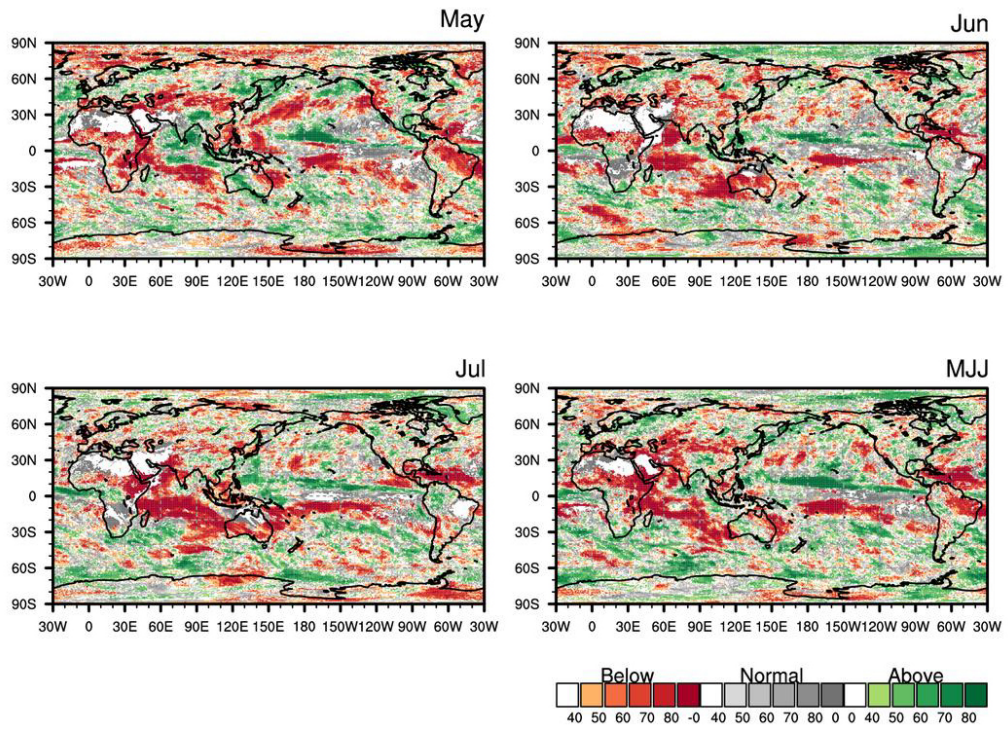


Figure 6. Probability spatial distribution of forecasted precipitation anomaly for May to July 2018, initialized April 2018.

3. SCoPS 모형의 계절내 예측 성능 평가

계절내예측은 중기날씨예측(medium-range weather forecasting)과 계절예측(seasonal forecasting)의 사이의 시간범주에 해당하며, 대기 초기장의 메모리의 한계에 속한다. 해양의 변동성을 표현하기에는 충분히 길지 못하기 때문에, 예측력의 한계가 있다고 많이 알려져 있다. 하지만, 계절내예측은 end-user의 요구와 맞물려 사회·경제적으로 매우 중요한 요소로 부각되고 있다. 계절내예측의 예측성과 관련한 중요한 요소로 알려진 Madden-Julian Oscillation(MJO, Madden and Julian 1971)를 통해 역학모형들의 계절내예측의 검증 및 발전이 이루어져 왔으며, 최근에는 아시아 몬순과 관련한 Boreal Summer Intra-Seasonal oscillation(BSISO)과 더불어 계절내 예측이 발전해 오고 있다. 계절내 기후와 관련된 중요한 요소들은 MJO, BSISO 뿐만 아니라, 성층권 및 지면/빙권의 초기장 등을 들 수 있다. 계절내 예측과 관련한 과학적 연구와 현업적 적용의 더 효과적인 발전을 위해 World Weather Research Program(WWRP)과 World Climate Research Program(WCRP)은 Sub-seasonal to Seasonal(S2S) 예측 프로젝트를 최근 시작한 바 있다. S2S 예측 프로젝트의 설립은 날씨과 기후예측 사이를 이어줄 수 있는 계기를 마련할 수 있기 때문에 중요하다고 할 수 있다. 최근, 약 11개의 현업 혹은 연구 기관에서 60일 정도의 예측자료를 공동으로 제공하고 있다.

현재 S2S 예측 프로젝트의 핵심 현상 중 하나는 MJO의 예측과 관련된다. MJO는 적도지역에서 계절내 변동과 관련된 잘 알려진 현상이며, 적도 및 중위도 지역의 계절내 기후 예측성과 관련된 주요 소스로 판단되어 왔다. 이에 많은 연구 기관 및 현업 기관에서 중요한 업무로 여겨져 왔다. 이런 이유로 계절내 예측은 MJO를 기반으로 한 많은 연구들에서 이루어져 왔다. 많은 통계모형에서는 2주에서 길게는 30일까지의 결과를 MJO 예측에 사용하고 있다(Seo et al. 2009; Kang and Kim 2010; Hsu et al. 2015). 역학모형은 MJO의 강도, 구조, 전파 등의 주요 특성을 조사할 수 있기 때문에 state-of-the-art climate model이 MJO 예측에 널리 사용되고 있다(Kim et al. 2009; Hung et al. 2013; Jiang et al. 2015). 최근에는 많은 역학모형에서 동일한 검증 메트릭스를 기반으로 2-3주 선행시간까지 유용한 예측성을 보인다고 밝혔다(Vitart and Molteni 2010; Wang et al. 2014; Xiang et al. 2015; Liu et al. 2017). 다중모델

양상블을 사용할 경우는 약 4주의 선행시간 정도까지도 MJO의 예측 성능을 개선한다고 밝힌바 있다(Zhang et al. 2013). 그럼에도 불구하고 MJO를 비롯한 계절내예측은 여전히 큰 도전과제라고 할 수 있다.

역학모형을 통해 이루어지는 계절내예측은 모형의 개선을 통해 함께 발전해오고 있다. 예를 들어 NCEP에서는 Climate Forecast System(CFS) version 1에서 10-15일 정도의 예측성을 보였지만(Seo et al. 2009), version 2로 교체 후 20-21일의 예측성을 보여주고 있다(Wang et al. 2014). 호주 기상청의 기후 예측 모형인 POAMA는 21일 선행시간내에서 MJO를 성공적으로 모의하는 것으로 조사된 바 있다(Rashid et al. 2011). 또한, 영국의 ECMWF 예측 시스템에서는 2002년부터 점진적으로 1년에 약 1일정도의 예측성 향상을 보여왔으며, 현재 27일 선행시간 내에서 MJO를 잘 예측할 수 있다고 밝힌 바 있다(Vitart 2014). 최근에는 GFDL 결합 모형 역시 27일 선행시간내에서 안정적인 모의를 보인다고 밝혔다(Xiang et al. 2015).

겨울철 변동으로 많이 알려진 MJO와 비교하여, ISO는 적도에서 10-20°N으로 치우쳐서 진동하는 여름철 변동이다. 인도양에서 발생하여 동쪽으로 이동하며 중앙 태평양으로 이동하기 전에 소멸하는 MJO와는 달리, ISO는 전파 특성이 더욱 복잡하다. ISO는 Indian 여름 몬순과 관련된 지역에서는 북쪽/북동쪽으로 전파를 보이며, 북서태평양과 동아시아 지역에서는 북쪽/북서쪽으로의 전파가 두드러진다(Wang et al. 2005; Yun et al. 2009). MJO는 전 계절에 적용 가능하지만, 여름철엔 변동성이 약하게 나타난다. 반면, BSISO는 여름철 적도지역의 ISO의 특정 모드로 설명될 수 있다. 따라서, 겨울철(12월-4월)은 MJO가, 여름철(6월-10월)은 BSISO가 우세하며 5월과 11월은 두 모드가 모두 나타나는 과도기적 시기라고 할 수 있다.

특히, BSISO는 동아시아 여름 몬순과 관련된 짧은 주기의 기후 변동성의 중요한 모드로 알려져 있다(Webster et al. 1998; Wheeler et al. 2017; Lee et al. 2013). 또한, 강수 및 중위도 대기 순환에 대한 계절기후 예측성의 주요 소스로 알려져 있다(Lee et al. 2010; Wang et al. 2012; Lee et al. 2017). 10-20일(Kikuchi and Wang 2010)과 30-60일(Wang et al. 2005)의 두 가지 다른 BSISO의 주기성이 알려져 있다. BSISO의 중요성과 함께, 실시간 index가 예측 및 감시에 활용되어 오고 있다. MJO 현상을

기반으로 개발된 Real-time Multivariate MJO(RMM) index는 Wheeler and Hendon(2004)에 의해 개발되었으며, 그 응용 분야에서도 가장 많이 사용되어왔다(Wheeler et al. 2009; Gottschalck et al. 2010; Rashid et al. 2011). RMM index는 outgoing longwave radiation(OLR), 850hPa과 200hPa에서의 동서 바람장의 적도 지역(15°S-15°N)의 평균장으로 구해지는 multivariate EOF 모드의 처음 두 모드의 PC time series에 의해 정의된다. RMM index는 MJO의 주요 특징인 적도지역의 동쪽 전파는 매우 잘 설명할 수 있지만, 한해 전체 MJO 활동을 기반으로 계산되기 때문에 ISO의 계절적 특징을 잘 표현하기에는 한계가 있으며, 특히 BSISO의 경우 그 활동이 적도로부터 중위도로 확장되기 때문에 표현되지 않는 부분이 많아진다. 이에 Lee et al.(2013)에서는 동아시아에 영향을 줄 수 있는 BSISO의 특성을 잘 표현할 수 있는 새로운 index를 개발하여 BSISO의 실시간 예측 및 감시에 도움이 되고자 하였다.

현재 APCC에서는 2013년부터 세계적 기관에서 제공하는 계절내 예측자료를 활용하여 Lee et al.(2013)에서 개발된 BSISO index를 활용한 BSISO 지수 예측을 하고 있으며, 관련 예측장 및 활용 정보를 웹페이지를 통해 실시간으로 제공하고 있다(김해정 2013; <http://www.apcc21.org>). 최근에는 계절내진동 지수 예측에서 확장하여, 지수로부터 강수 및 대기 변수의 필드를 재구성하고 계절내진동과 관련된 대기 순환장을 분석하여 그 활용성을 높이고 있다(김해정 2017). 본 연구에서는 날씨부터 기후까지 이음새없는 예측을 위해 개발된 SCoPS를 통해 계절내 예측 시스템을 구축하여 그 예측성을 조사해보고자 한다. 예측 시스템의 활용성을 높이기 위해 APCC 계절내진동 지수 예측 시스템에 참여 모델로 포함될 수 있는 가능성을 조사해 보고자 한다. 이를 위해 우선 계절내 예측 시스템의 기본 구성을 설정하고, 여름철 케이스에 대한 시험 적분 및 검증을 수행하였다.

3.1 계절내 예측 시스템 시험버전 구축

계절내 예측 시스템을 구성하기 위해 우선 S2S 프로젝트에 포함되어 있는 세계 기관들의 시스템을 살펴보았다(그림 7). 최근 여러 기관에서 계절내 예측의 필요성을 가지고 계절예측과 함께 계절내 예측 자료도 생산하고 있다. Huang et al.(2015)은 North-American Multi-Model Ensemble(NMME) 역시 2015년부터 확률 예측을 통한 3-4주 온도 및 기온의

정보를 제공하고 있다고 언급했다. 또한, NMME를 위한 계절내 예측 시스템은 적어도 1999-2015의 Hindcast 자료를 가지고 4개 이상의 앙상블 멤버, 32일 이상의 예측 기간 등을 요구한다. 그림 7에 WCRP/WWRP S2S 프로젝트에 참여하는 전 세계 기관들의 계절내 예측 시스템 구성을 나타내었다. NMME 멤버들과 유사하게 최저 조건들을 가지고 있다. 예를 들어, ECMWF는 예보기간은 32일로 가장 짧지만 해상도는 T639/319로 가장 높다. 또한 앙상블멤버도 51개로 가장 많다. 1주일에 2번의 예보장을 생산한다. 한국기상청은 앙상블 멤버 4개로 많지 않지만 하루 한번 60일의 예보기간을 가지고 예보장을 생산한다.

계절예측과 비교하였을 때, 계절내 예측장에서는 초기장의 효과가 더욱 크게 나타난다. 실시간 예측을 위해서 가장 최근의 관측장을 사용하는 것을 추천하며, 또한 대기 및 지면 초기화 과정이 요구된다. 대기-해양 결합 모형의 경우에는 해양 초기화 과정도 필요하다. NMME 그룹에서 제안한 내용 및 다른 기관들의 구성을 참조하여 SCoPS 계절내 예측 시스템을 다음과 같이 구성하였다. 추후 SCoPS 계절내 예측의 활용을 고려하여 APCC 내 계절내진동 지수예측 시스템 관련 실무진 그룹과의 협의를 통해 결정 되었다.

- 1) 예측 기간: D0-60
- 2) 해상도: T159L31
- 3) 앙상블 사이즈: 10
- 4) 예측 주기: weekly
- 5) Forecast 기간: 2014-2015 MJJAS

기존의 계절 예측에 사용되던 초기장의 앙상블 수는 날짜 별로 가우시안 분포를 따르는 5개의 섭동장을 가지고 생산되었다. 각 1일, 5일에 해당하는 5개의 섭동장으로 10개의 멤버를 구성하게 된다. 계절내 예측 시스템에서는 한주에 한번 예측장을 생산하고 선행시간 0주부터 사용되어야 하기 때문에 기존의 시간차를 두고 앙상블 멤버를 구성하기에는 제약이 있다고 판단된다. 따라서, 섭동장을 10개로 늘려 매주 월요일에 해당하는 10개의 초기장을 사용하여 60일의 적분을 수행한다. 섭동장을 10개로 증가한 초기장은 2013년의 리스타트 파일을 사용하여 계절내 예측시스템과 동일한 관측자료를 사용하여 동화

시치고 2015년까지의 초기장을 생산하였다.

WCRP/WWRP S2S Project

	Time-range	Resol.	Ens. Size	Freq.	Hcsts	Hcst length	Hcst Freq	Hcst Size
ECMWF	D 0-32	T639/319L91	51	2/week	On the fly	Past 20y	weekly	5
UKMO	D 0-60	N216L85	4	daily	On the fly	1996-2009	4/month	3
NCEP	D 0-45	N126L64	4	4/daily	Fix	1999-2010	4/daily	1
EC	D 0-35	0.6x0.6L40	21	weekly	On the fly	Past 15y	weekly	4
CAWCR	D 0-60	T47L17	33	2/week	Fix	1981-2013	6/month	33
JMA	D 0-34	T159L60	25	2/week	Fix	1979-2009	3/month	5
KMA	D 0-60	N216L85	4	daily	On the fly	1996-2009	4/month	3
CMA	D 0-45	T106L40	4	daily	Fix	1992-now	daily	4
Met.Fr	D 0-60	T127L31	51	monthly	Fix	1981-2005	monthly	11
CNR	D 0-32	0.75x0.56 L54	40	weekly	Fix	1981-2010	6/month	1
HMCRC	D 0-63	1.1x1.4 L28	20	weekly	Fix	1981-2010	weekly	10

Figure 7. Framework of each subseasonal model system on WCRP/WWRP S2S project (<https://www.ecmwf.int/en/research/projects/s2s>).

3.2 계절내 예측 성능평가

SCoPS의 계절내예측에 대한 기본 예측력 검증 및 활용도 평가를 위해 동아시아 몬순 및 계절내진동과 연관이 있는 여름철에 대해 검토해 보고자 한다. 시험 구축된 2014년 5월부터 9월까지의 계절내 예측장에 대한 검증을 진행하였다. 그 중 동아시아 여름몬순과 관련된 대기 순환장 및 변수들의 예측성을 일부 소개한다.

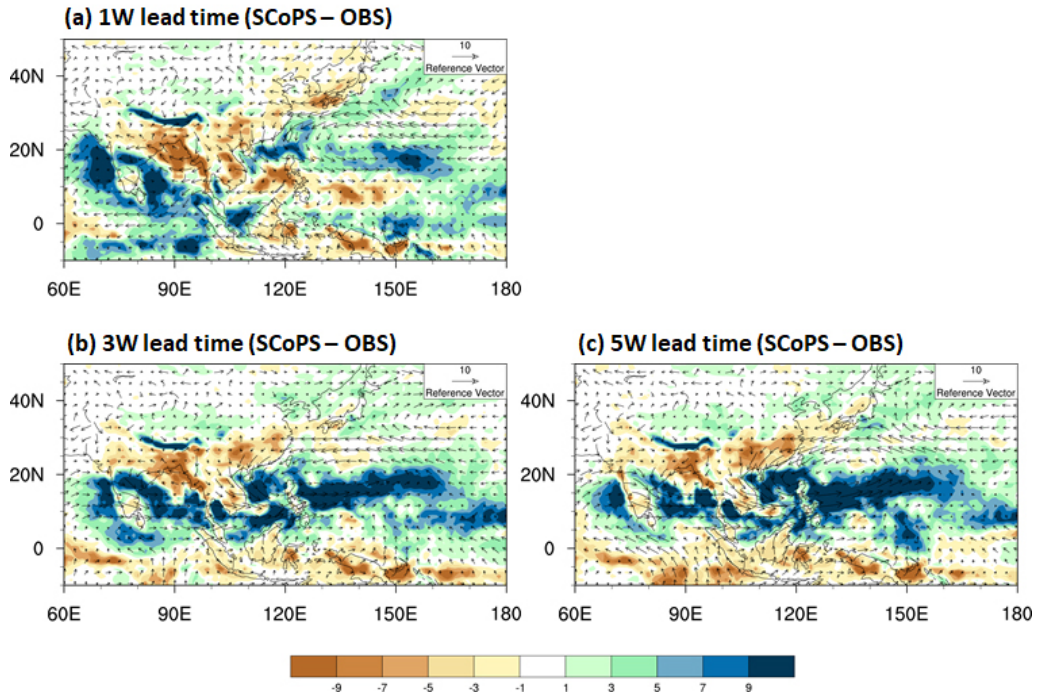


Figure 8. Difference between predictions and observation for precipitation (shadings) and 850 hPa winds (vectors) in averaged summer monsoon season periods (same as Figs. 8 - 10) for predicted ensemble averages with (a) 1 week lead time (7 to 13 days), (b) 3 weeks lead time (21 to 27 days), and (c) 5 weeks lead time (35 to 41 days).

그림 8에서는 아시아 여름 몬순과 관련된 강수와 하층 바람장의 오차를 기간별로 선행 시간 주별 예측장의 평균으로 나타내었다. 선행시간이 길어질수록 예측성이 떨어지지만 오차의 특성을 파악할 수 있다. 3 weeks, 5 weeks 선행시간의 예측 결과에서도 같은 패턴의 계통적 오차가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 인도양에서 북서태평양까지 이르는 강수의 wet biases는 확연히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 주목할 만 한 점은, 선행시간이 길어질수록 오차가 계속 증가하지 않고 오히려 줄어드는 지역도 있다는 점이다. 기간별로 자세히 살펴봤을 때는 선행시간에 따른 오차가 감소하는 지역도 존재했지만, 전체 기간의 평균으로 살펴보면 선행시간별로 오차가 증가하며 특히 1 week에서 3 weeks 선행시간으로 넘어갈 때 그 오차가 크게 증가함을 알 수 있다.

선행시간이 증가하면서 동아시아 몬순 지역의 강수 바이어스가 계속 증가하지 않는 특징은 다른 연구에서 비슷하게 나타난다. Liu et al.(2013)에 따르면, NCEP CFSv2 기

후 예측 모형을 기반으로 연구한 결과, 선행시간이 길어질수록 계통적 오차인 동서 바람의 약화는 심해지지만 실제 강수의 건조 오차는 심해지지 않음을 보인다. 이러한 오차의 특성은 Western Pacific Subtropical High(WPSH)의 위치와 아시아 여름 몬순의 발달 시기와 관련이 있음을 언급했다. 더 자세한 분석이 필요하겠지만, SCoPS에서 보이는 오차 분포가 동아시아 몬순 발달과 연관된 순환장의 변화와 연관이 있을 것으로 생각된다.

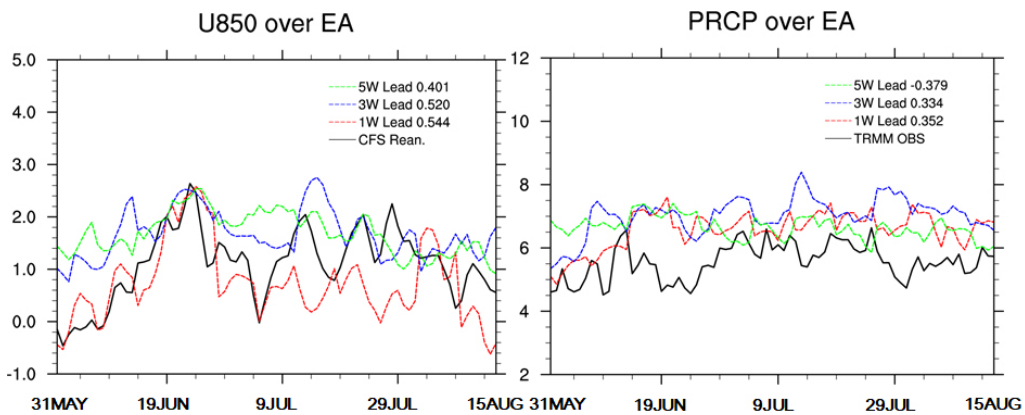


Figure 9. Variation of 850 hPa zonal wind (left) and precipitation (right) averaged over the East Asia region (10°S – 50°N , 60°E – 180°) for observation and SCoPS with different lead time.

그림 8에 사용된 동아시아 전체 지역(위도 10°S – 50°N , 경도 60°E – 180°)의 평균 강수 및 하층 동서 바람을 관측/재분석 자료와 비교하여 선행시간별로 그림 9에 나타내었다. 검은 실선으로 나타낸 CFS 재분석 자료의 하층 동서 바람의 시계열을 살펴보면, 5월 31일부터 서서히 증가하는 추세를 보이며 6월 20일 경에 피크를 보이다가 다시 감소한다. 이후 7월 중순부터 8월 초까지 변동을 증가한 값에서 변동을 보이고 있다. 7월 초까지의 시계열 변동을 1 week 선행시간 예측 결과(빨간 점선)에서 잘 보여주고 있으며 이후의 변동은 다소 약하게 모의하지만 비교적 잘 모의하고 있음을 볼 수 있다. 3 weeks 선행시간 예측 결과(파란 점선)는 변동의 범위가 다소 줄어들었지만 그 패턴은 비교적 잘 모의하고 있다. 5 weeks 선행시간 예측 결과(녹색 점선)는 변동의 범위가 줄어들고 패턴 역시 재분석자료에서 보였던 것과 멀어지고 있는 것을 알 수 있다. 상관관계 역시

1 week 선행시간 예측 결과에서 0.544로 가장 높게 나타나며 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 강수의 시계열에서도 선행시간별로 비슷한 경향을 보인다. 다만 하층 동서바람 보다 예측력이 떨어진다. 7월 20일 경의 하층 동서바람 최고치는 모든 선행시간별 결과에서 나타난 반면 동시기의 강수의 변동은 모든 선행시간별 예측 결과에서 찾아볼 수 없다. 특히 5 weeks 선행시간 예측결과에서는 지역 평균된 강수의 범위가 거의 변하지 않고 작은 변동값만 가지고 있음을 알 수 있다. 상관관계도 1 week 선행시간 예측 결과에서 0.352의 작은 값을 보이고 있으며, 5 weeks 선행시간 예측 결과에서는 음의 상관관계를 보이고 있다.

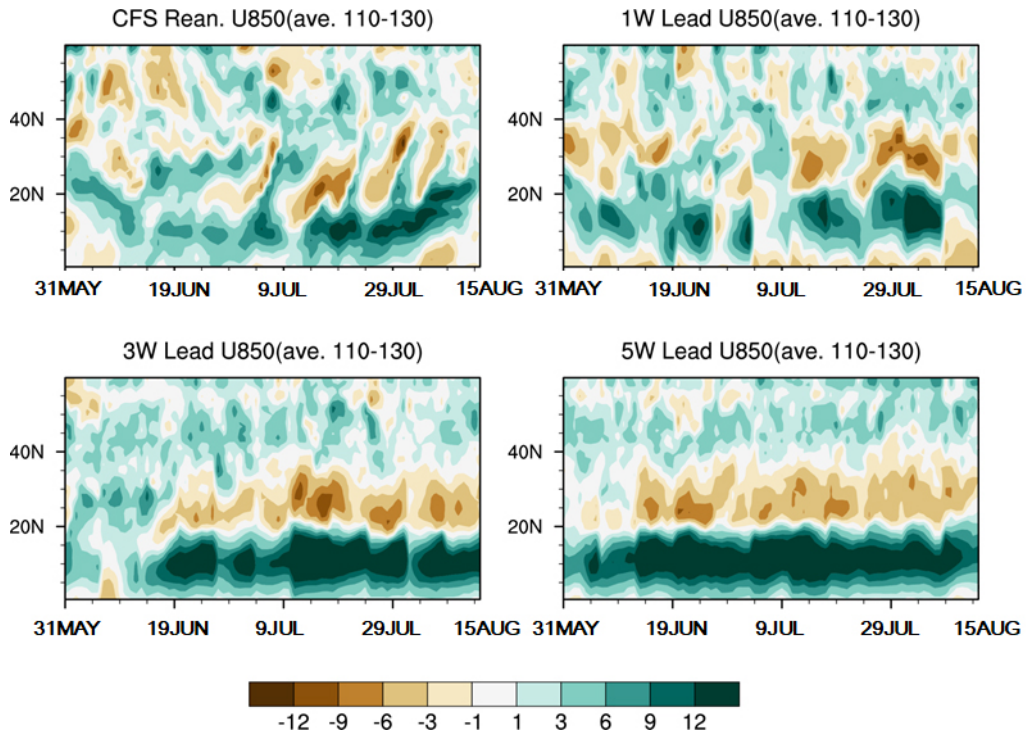


Figure 10. Latitude-time cross sections of 850 hPa zonal wind along 110°–130°E for reanalysis and ensemble averaged predictions with different leads of time.

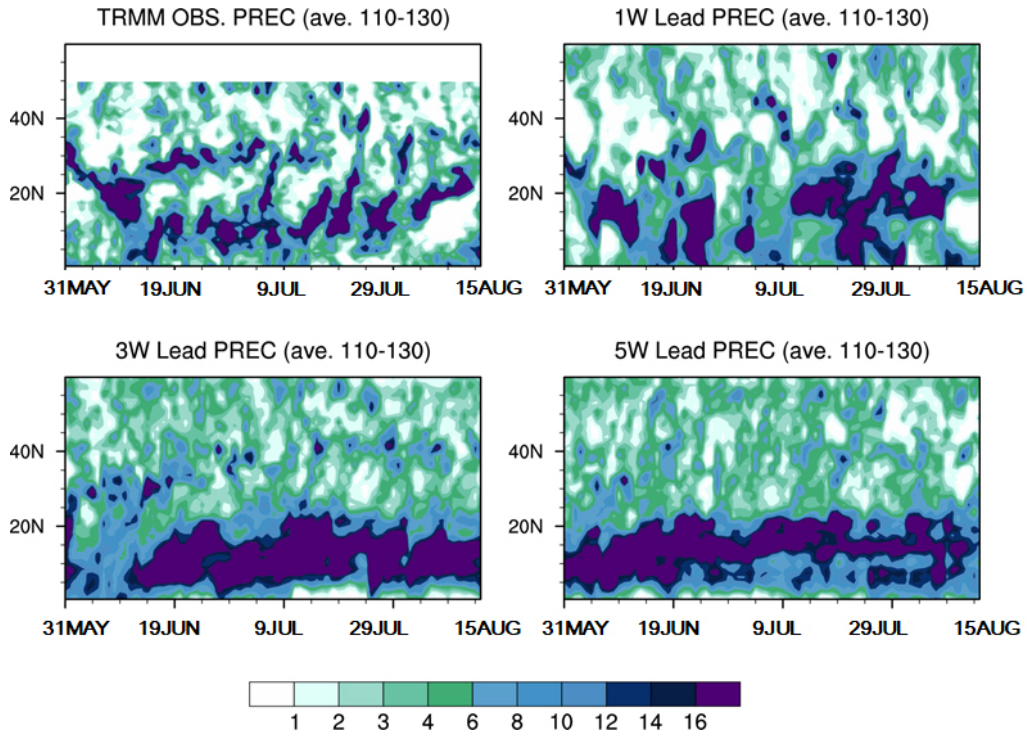


Figure 11. Latitude-time cross sections of precipitation along 110°-130°E for TRMM observation and ensemble averaged predictions with different leads of time.

동아시아 몬순 지역에서의 선행시간별 예측성능을 좀 더 자세하게 살펴보기 위하여 그림 10과 11에서 동아시아 몬순 지역(110°-130°E)에 해당하는 하층 동서 바람장과 강수의 평균을 위도-시간 단면도를 나타내었다. 하층 동서 바람의 재분석 자료의 결과를 보면 적도지역에서 동쪽으로의 바람장이 우세함을 볼 수 있으며 동남아시아 몬순에서 동아시아 몬순(e.g. 장마)과 관련된 바람장의 전파가 5월부터 7월에 이르기까지 20°N 근처에서부터 40°N 이상까지 연결됨을 볼 수 있다. 1 week와 3 weeks 선행시간 예측 결과에서도 동아시아 몬순과 관련된 북동진하는 패턴을 확인할 수 있으나, 선행시간이 길어질수록 적도지역의 바람장과 중위도의 바람장이 분리되어 북쪽으로 전파하는 패턴이 사라진다. 이는 강수의 위도-시간 단면도에서도 확인할 수 있다. TRMM 위성 자료를 보면 적도 강수 외에도 6-7월에 걸친 동아시아 몬순 밴드의 이동이 뚜렷이 나타나고 있고, 1 week 선행시간의 예측 결과에서도 과대모의가 보이지만 관측에서 보이는 동아시아 몬순 밴드가 잘 모의되고 있다. 이러한 결과는 3 weeks 선행시간 예측 결과에서 희미하

게 나타나며 5 weeks 선행시간 예측 결과에서는 아주 약하게 남아 있다. 선행시간이 길어질수록 동아시아 몬순밴드의 과소모의는 뚜렷하지만 적도 강수의 과대모의는 그렇지 않다는 것이 주목할 만한 특징이다. 7월 이후로는 오히려 적도 강수의 과대모의는 5 weeks 선행시간의 예측 결과보다 3 weeks 선행시간의 예측 결과에서 더 두드러진다.

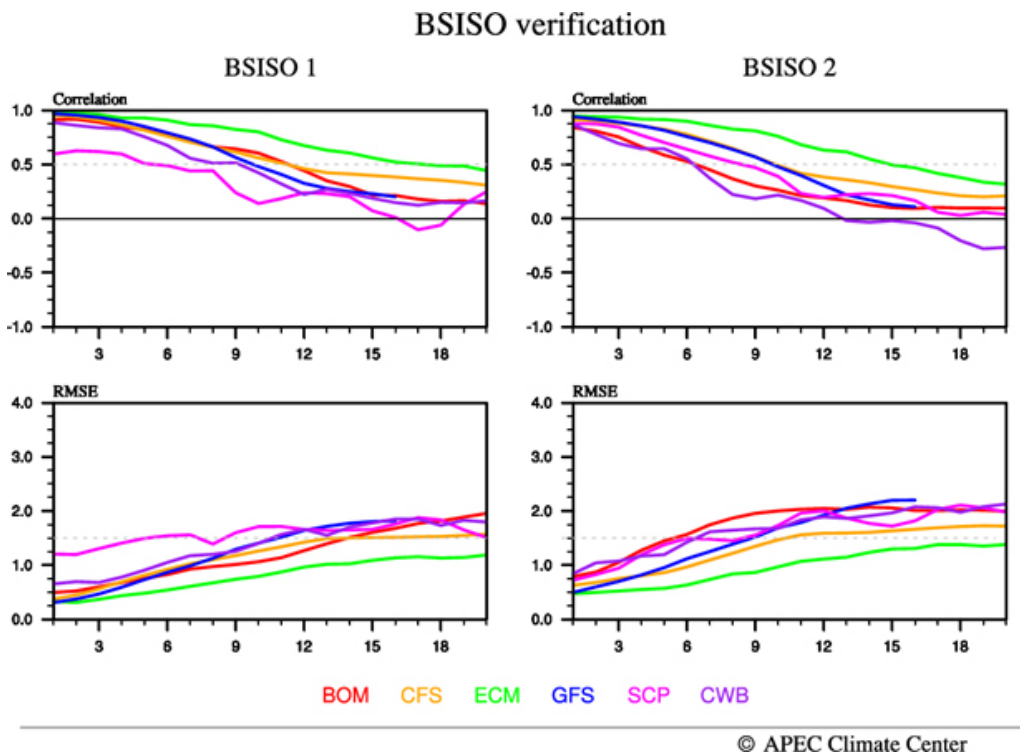


Figure 12. Correlation and RMSE of BSISO 1 and BSISO 2 prediction from SCoPS and other participant model in APCC BSISO forecast system.

이러한 전반적인 성능을 토대로 APCC 계절내진동 지수 예측 시스템에 참여하고 있는 다른 모형들과의 비교를 진행하였다. BSISO 지수 예측을 위해 2014-2015년 5-9월 매주 월요일에 해당하는 날짜의 초기장이 사용된 40일 예측장이 사용되었다. 그림 12에서는 호주 기상청의 BOM, 미국 NCEP CFS와 GFS, 유럽 ECMWF, 대만 기상청의 CWB 모형을 포함한 BSISO 지수 예측에 사용되는 5개의 모형 결과와 SCoPS의 BSISO 지수 1, 2에 대한 상관계수 및 RMSE를 나타내었다. Lee et al.(2013)에 따르면, BSISO 1은

아시아 여름 몬순 지역에서의 북쪽으로는 전파를 표현하는 지수로 많은 연구에서 30-60 일 주기를 표현한다고 언급한 바 있다. 반면 BSISO 2는 주로 북/북서 방향의 전파를 표현하며 30일 주기 및 10-20일 주기를 모두 표현한다고 알려져 있다. 그림 12를 살펴보면, SCoPS는 BSISO 1에서 다른 참여 모형의 결과와 비교하여 상관계수가 0.6정도에서 시작하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 0.5에 다다르는 리드타임 역시 6-7일 정도로 매우 짧다. 반면, BSISO 2에서는 0.9 정도의 상관계수로 다른 모형들과 비교하여 비슷한 정도의 예측성을 보이고 있으며 0.5에 다다르는 리드타임 역시 9일 정도를 보이고 있다. 가장 좋은 예측성능을 보이고 있는 ECMWF는 BSISO 1, 2 모두 1에 가까운 상관계수로 시작하며 15일 이상까지도 0.5 이상을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 다른 모형들이 대부분 BSISO 1에서 2보다 좋은 성능을 보이고 있는 반면, SCoPS는 BSISO 1에서 현저히 떨어지는 성능을 보이고 있다. 이는 SCoPS의 초기장이 가지고 있는 특징으로 인한 영향으로 생각된다. SCoPS는 계절 예측을 목표로 개발된 모형이기 때문에 현재 초기장은 대기는 CFS로부터, 해양은 ARGO 데이터를 통해 대기-해양 자료동화를 사용하고 있다. 현재 자료동화의 특성상 초기장에는 모형의 계통적인 오차가 포함되어 있고, SCoPS의 특징적인 계통적 오차로는 해수면 온도 및 순열속(net heat flux)의 음의 편차가 있다. 이로 인한 Maritime continent에서의 대류활동 약화와 더불어 대기 순환장에서의 오차가 나타나고, 이는 BSISO 지수 예측에서의 오차를 야기한다고 판단된다. 초기장 및 계절 예측장에서 나타나는 SCoPS의 계통적 오차에 대해서는 다음 장에서 더욱 자세하게 다루기로 한다.

이러한 결과를 바탕으로 SCoPS가 가지고 있는 계통적 오차를 파악하였고, 추후 BSISO 지수 예측과 관련한 바람장 및 복사 플럭스(OLR) 예측 성능 향상을 위한 발판을 마련하였다. 최종적으로는 APCC 모형의 개선과 더불어 APCC 계절내 예측 시스템을 안정적으로 구축함과 동시에 APCC BSISO 시스템에 참여모델로서 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

4. SCoPS 모형의 계절 예측 성능 개선

4.1 앙상블 증분 영향 평가

현재 SCoPS는 계절 예측 자료 생산을 위해 매월 재분석 자료 및 해양 데이터를 실시간 다운받아 초기장을 동화하여 매일의 초기장을 생산한다. 생산된 초기장은 다시 가우시안 분포를 따르는 5개의 섭동으로 구성된다. 이 중에서 매달 1일/5일 각 5개 세트 총 10개의 앙상블 멤버로 구성하여 7개월 적분을 통해 향후 6개월 동안의 계절 예측 자료가 생산된다. 앙상블 멤버 수의 영향을 간단히 살펴보기 위해 실시간 예측기간 중 2014-2015년 5월의 초기장을 사용하여 여름철(JJA)의 오차에 대해 조사하였다. 각 해의 5월 1일 초기장을 사용한 5개 앙상블 멤버의 실험을 5ens, 5월 1일, 3일, 5일의 초기장을 사용한 15개 앙상블 멤버의 실험을 15ens라고 명하고, 기존과 동일하게 1일, 5일 초기장을 사용한 10개 앙상블 멤버의 실험을 10ens라 한다.

그림 13 (a)-(c)는 각 실험으로부터 예측된 해수면 온도와 관측과의 차이를 나타내었다. 세 실험 모두 관측과의 오차는 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 적도 태평양 및 북태평양 전반에 걸쳐 음의 오차를 보이고 있으며, 반면 동태평양 일부와 한반도 연안에서 양의 오차를 보이고 있다. 인도양 및 대서양에서도 일부 지역을 제외하고는 음의 오차가 특징적으로 나타난다. 관측과의 패턴 상관관계 역시 소수점 셋째 자리에서 반올림한 결과 0.87로 동일하게 나타나고 있다. 앙상블 증분에 대한 영향이 전체적으로는 미미하지만, 어떠한 효과를 나타내는지 살펴보기 위해 각각의 실험들 사이의 차이를 그림 13 (d)-(e)에 나타내었다. 전반적으로 1도 이내의 편차를 보이고 있지만, 10ens 실험은 5ens 실험과 비교하였을 때, 북서태평양에서 나타나는 오차를 줄여주는 방향으로 보여주고 있다. 또한 15ens 실험은 10ens 실험과 비교하였을 때, 그 오차를 더 줄여주는 방향을 보여주고 있다.

그림 14 (a)-(c)는 각 실험으로부터 예측된 강수와 관측과의 차이를 나타낸 그림이다. 해수면 온도와 마찬가지로 세 실험 모두 강수에 대한 관측과의 오차는 거의 유사하게 나타나고 있다. 적도 태평양, 서태평양 및 인도양에 이르는 강수 밴드에서는 양의 편차가 나타나고 있으며, 북서태평양, 남서태평양 일부 및 인도양 적도인근에 걸쳐 음의 편차를

보이고 있다. 관측과의 패턴 상관관계 역시 소수점 셋째 자리에서 반올림한 결과 0.87로 동일하게 나타나고 있다. 각각의 실험들 사이의 차이를 나타낸 그림 14 (d)-(e)를 살펴보면, 전반적으로 차이는 미미하지만 관측과의 오차를 줄여주는 효과를 나타내고 있다. 5ens 실험보다는 10ens 실험이, 10ens 실험보다는 15ens 실험이 관측과 더 가까운 결과를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

현재 사용되고 있는 앙상블 스프레드는 하루에 5개의 멤버이다. 또한 앙상블 증분 역시 1일-5일 사이의 값을 이용하고 있다. 따라서 앙상블 구성은 time lag 방법 및 가우시안 분포를 모두 사용하고 있다. 하지만, 이 역시 모두 1982년 1월 초기장으로부터 하루 주기로 자료동화를 사용해서 현재에 해당하는 날짜까지 만든 것으로 앙상블 스프레드 사이에 초기장의 차이는 아주 미미하다. 물론 예측장에서 미미한 차이 역시 스프레드를 생성하긴 하지만, 5개-15개 사이의 예측장의 효과는 크지 않은 것으로 보인다. 그럼에도, 앙상블 멤버가 늘어남에 따라 노이즈를 줄여주는 효과는 동일하게 나타나고 있으므로, 추후 컴퓨팅 소스가 확보될 시 앙상블 멤버 및 스프레드를 늘리는 것은 충분히 예측 성능을 높이는 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

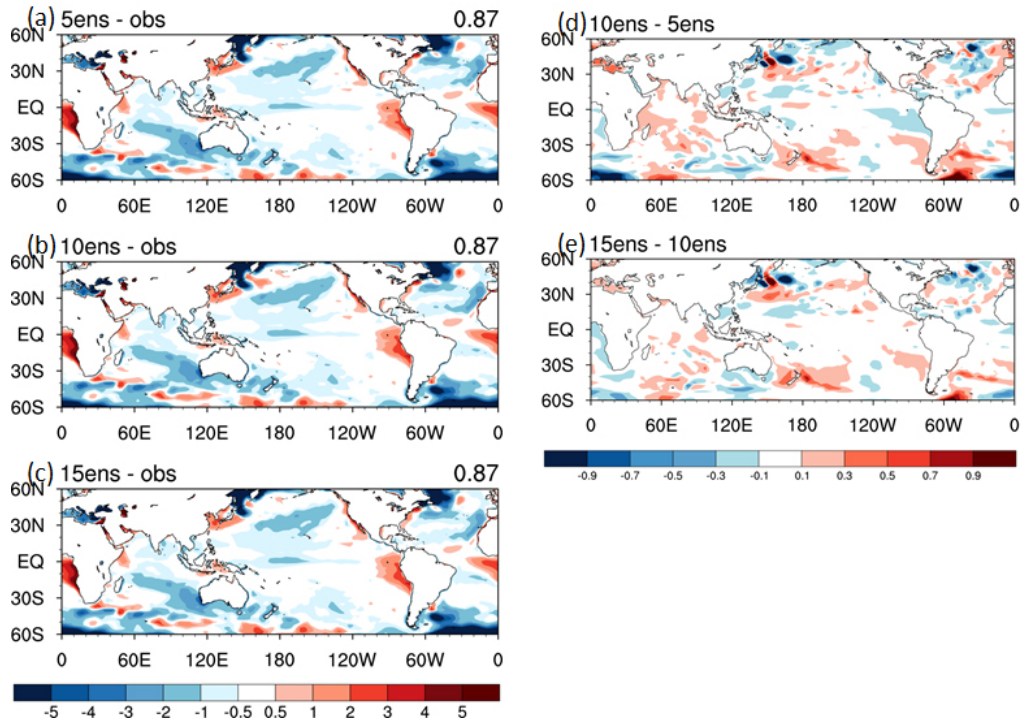


Figure 13. Difference distribution of sea surface temperature between (a), (b), (c) each experiment and OISST observation, and (d), (e) each experiment. Right top score indicates their pattern correlation coefficient.

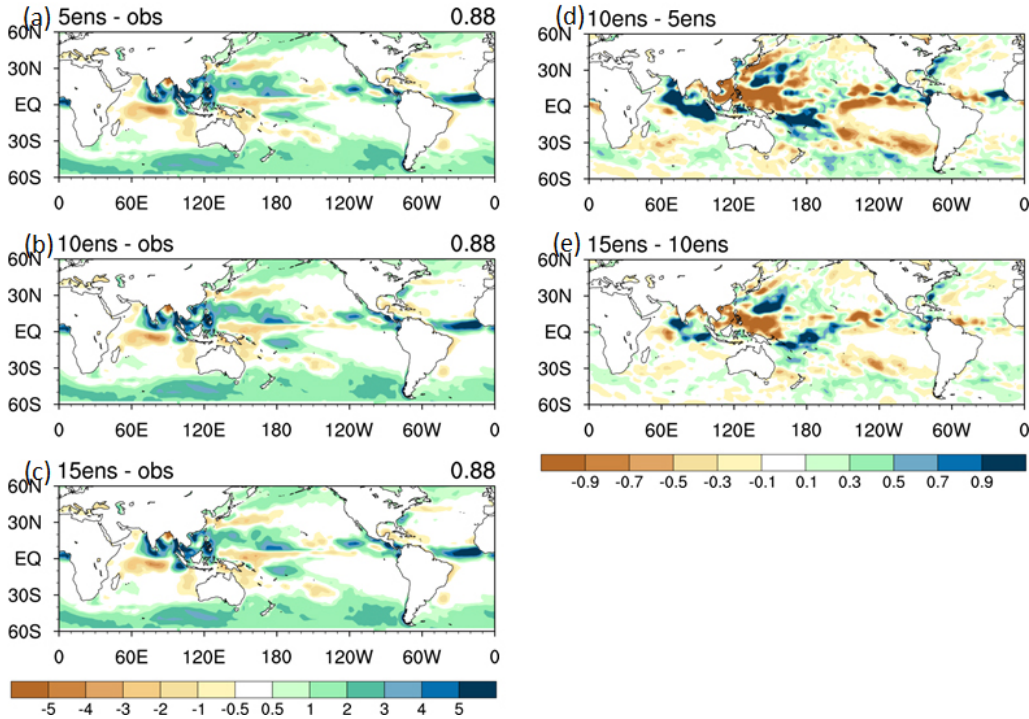


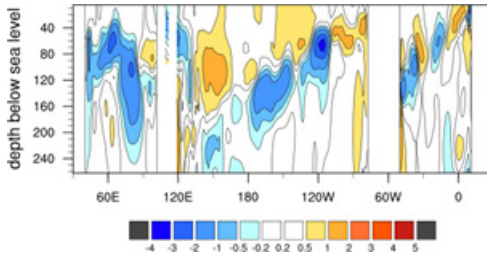
Figure 14. Difference distribution of precipitation between (a), (b), (c) each experiment and GPCP observation, and (d), (e) each experiment. Right top score indicates their pattern correlation coefficient.

4.2 해양 초기장 오차 원인 진단

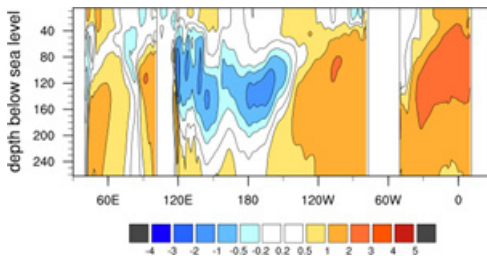
SCoPS는 최근 그 필요성이 강조되고 있는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하고 있다. 초기화에 필요한 대기 기본 변수(u , v , t , q , p) 및 해수면 온도(sst)는 NCEP에서 실시간으로 제공되는 CFS 재분석 자료를 사용하며, 해양 연직 기온(t) 및 염분(s) 데이터는 실시간 업데이트되는 국제 Argo 프로젝트로부터 가져오고 있다. 또한 초기장은 1982년 1월 1일 리스타트 파일로부터 2012년 12월 31일까지 NCEP CFS 재분석 자료와 사용가능한 해양 연직 프로파일 자료들을 사용하여 일 단위로 자료동화 시스템을 통해 초기장을 생산하며, 2013년 1월 1일부터 현재까지는 NCEP CFS 재분석 자료와 Argo 기온 및 염분 데이터를 실시간으로 다운받아 초기장을 생산해오고 있다. 초기화에 사용되는 해양자료는 Argo 웹페이지를 통해 다운 받고 있으며, 그 후 Matlab 코드를 통해 SCoPS

의 격자로 내삽이 이루어지고 있다. 재격자화 된 데이터는 Netcdf 포맷으로 자료동화 과정을 거치게 되며 동화가 완료된 후 모델 적분을 위한 리스타트 파일로 변환된다.

(a) GODAS (JUN2017)



(b) SCoPS (JUN2017)



(c) SCoPS - GODAS (JUN2017)

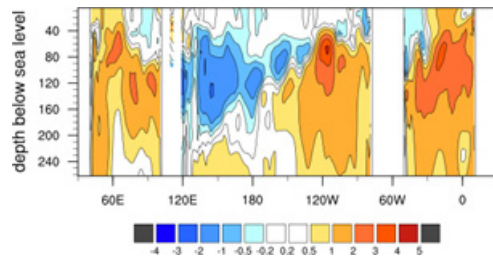
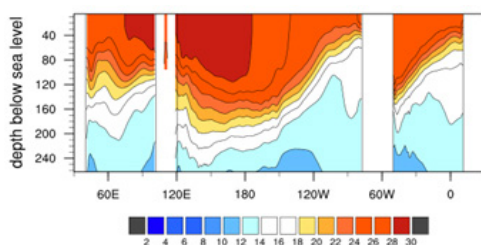


Figure 15. Vertical anomaly distribution of ocean subsurface temperature averaged $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$ for (a) GODAS reference, (b) SCoPS assimilated initial data, and (c) Its difference. Climatology period is from 1982 to 2013.

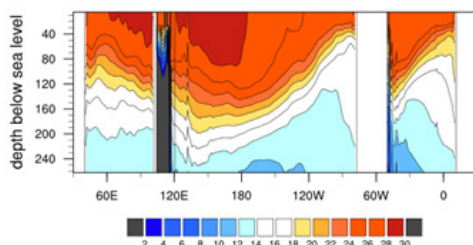
그림 15 (a)와 (b)에서 보이는 결과는 실시간 예측에 사용된 2017년 6월 평균 GODAS 재분석 자료와 SCoPS의 초기장의 subsurface 온도의 연직 분포 그림이다. 위도 $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$ 에서 평균되었으며 하얗게 나타나는 부분이 육지지역이다. 자료동화가 진행되는 연직 200m 근처까지 비교하였다. GODAS에서는 서태평양에서 중태평양 표층으로는 warm 아노말리가 중태평양에서 thermocline 아래로는 cold 아노말리가 지배적이다. 인도양 약 120m 수심의 해양에서는 cold 아노말리가 중점적으로 나타나고 있다. GODAS 재분석 자료와 Argo 관측데이터 사이에 차이가 다소 존재하지만 큰 패턴은 동일하게 나타나고 있다(보이지 않음). SCoPS 초기장에서 보이는 해양 연직 온도 아노말리에서는 서태평양 상층의 warm 아노말리와 동태평양 연직으로의 warm 아노말리가 잘 표현이 되고 있다. 하지만, 동태평양 약 50m 정도에서부터 태평양 전역의 약 200m 까지

나타나는 넓은 영역의 warm 아노말리는 관측 및 재분석 자료에서 찾아볼 수 없는 패턴이다. 또한 인도양 및 대서양 전체에 과도하게 나타나는 warm 아노말리 역시 관측과는 비교되는 현상이다. 이러한 계통적 오차는 SCoPS 모델로부터 기인한 것으로 보이며, 1982년 초기장 이래로 꾸준히 나타나고 있는 것이 특징이다. 이에 본 연구에서는 초기장의 계통적인 warm 아노말리의 특징을 좀 더 자세히 살펴보고자 한다.

(a) GODAS (JAN1982)



(b) SCoPS (JAN1982)



(c) SCoPS - GODAS (JAN1982)

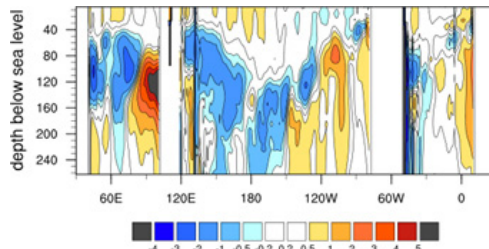


Figure 16. Vertical distribution of ocean subsurface temperature averaged 5°S - 5°N for (a) GODAS reference, (b) SCoPS assimilated initial data, and (c) Its difference for January 1982.

그림 16은 초기장을 생산하기 위한 초기추정치로 사용된 1982년 1월 1일을 포함한 1982년 1월의 평균장을 GODAS 자료와 비교한 그림이다. 그림 16 (a), (b)에서 알 수 있듯이 SCoPS 초기 추정치의 해양 연직 온도의 분포는 GODAS와 비교하였을 때도 thermocline 형태 및 warm pool의 위치 등을 잘 표현하고 있다. 그림 16 (c)에서 보이는 추정치의 오차 역시 주로 2-3도 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 17은 SCoPS의 1982년 2월의 초기장 평균값과 1982년 1월의 초기장 평균값의 차이와 실제 GODAS의 월 차이를 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 SCoPS 초기장은 GODAS에서 나타나는 subsurface 연직온도의 월변화를 잘 표현하고 있다. 초기추정

치에서 나타났던 서태평양 해수면 온도의 양의오차를 줄여주고 있으며 (그림 16 (c) 참고), thermocline을 따라 나타나는 차가운 해양 온도 변화 및 동태평양 해수면에서의 따뜻한 해양 온도 변화 등을 잘 표현하고 있다. 특히 인도양에서의 온도변화 역시 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

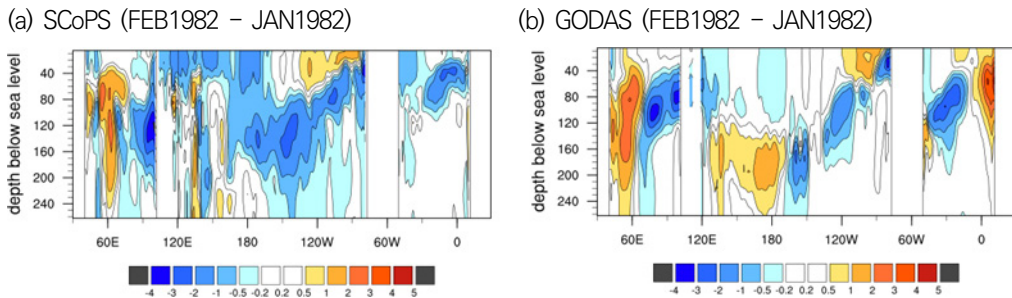


Figure 17. Difference vertical ocean subsurface temperature distribution averaged 5°S - 5°N between for JAN1982 and FEB1982 from (a) SCoPS and (b) GODAS reference.

이를 바탕으로, 초기추정치를 포함하는 1982년의 해양 초기장은 GODAS와 비교하였을 때 큰 오차를 가지고 있지 않다고 판단된다. 따라서 실제 예보장에 사용되는 2014년 이후의 초기장 오차가 언제부터 보이는지 살펴보기 위해 1982년부터 1993년까지 1월에 해당하는 초기장 평균값과 GODAS 1월 평균값과의 차이를 그림 18에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 추정치가 포함된 1982년 1월 초기장부터 초기 2-3년까지는 초기장의 에러가 계통적으로 나타나기 보다는 thermocline 주변으로 다양하게 나타나고 있다. 하지만 시간이 지날수록, 특히 7-8년 정도 이후부터 동태평양은 thermocline 아래로, 서태평양은 해수면을 제외하고는 전반적으로 GODAS 보다 높은 온도를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 반면에 thermocline 위로 해수면 근처에서는 전반적으로 낮은 온도를 보이는 것이 특징이다. 이러한 계통적 오차는 1993년 이후의 초기장에서도 동일하게 나타나고 있으며, 특히 엘니뇨가 발생했던 해에는 더욱 두드러지게 나타나고 있다 (보이지 않음). 그림 15에서 보였듯 실시간 예보를 위한 초기장에서 까지 이러한 계통적 오차가 두드러지고 있다.

결국 이 오차는 모형이 수행하면서 계속적으로 발생하는 오차라고 볼 수 있다. 이는

SCoPS의 초기장을 생산하는 방식에서 기인한다고 볼 수 있다. 현재 초기장 생산 방식은 1982년 1월 1일 초기추정치로부터 일단위로 관측자료가 넷징/동화 되면서 모형이 적분되는 방식으로 초기장이 생산되기 때문에 초기장에 모형의 오차가 포함될 수 밖에 없다. 세계 유수 현업기관에서는 자체의 초기장을 생산할 때 보통 모형의 오차가 최소화 되기 위해 자료동화의 간격이 매우 조밀하며 모형의 적분기간은 최소화 시키고 있는 반면, SCoPS의 초기장은 가용 가능한 관측장의 한계와 현실적인 문제로 인해 모형의 오차가 크게 적용이 되고 있는 것이 사실이다.

한편, 모형에서 계통적인 오차가 나타나는 것은 당연한 일이라고 할 수 있다. 계통적 오차가 늘 동일한 패턴으로 나타나 기후값을 제거한 anomaly를 계산할 때 오차를 제거할 수 있다면, 초기장에서 보이는 오차는 무시할 수 있을 것이다. 하지만, 그림 15에서 보이듯, 아노말리 초기장 역시 일부의 오차는 제거되었지만 계통적 오차에서 보이는 특징이 여전히 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 SCoPS의 초기장 생산을 위한 초기 추정치 값이 1982년 1월 1일인데 비해 초기장 생산을 위한 spin-up 기간이 따로 없음을 생각해 볼 수 있다. 물론 초기추정치를 위해 100년의 SCoPS continuous run을 통해 값을 생산하였지만, 초기 5년 정도의 초기장에서의 오차 패턴과 그 이후로 동일하게 나타는 오차 패턴이 다름을 주목해 볼 만 하다. 따라서 SCoPS의 기후값을 기존의 기간인 1982-2013년이 아닌, 1987-2013년으로 설정하여 실시간 예보장의 연직 해양 온도 아노말리에 어떤 영향을 주는지 조사해 보았다.

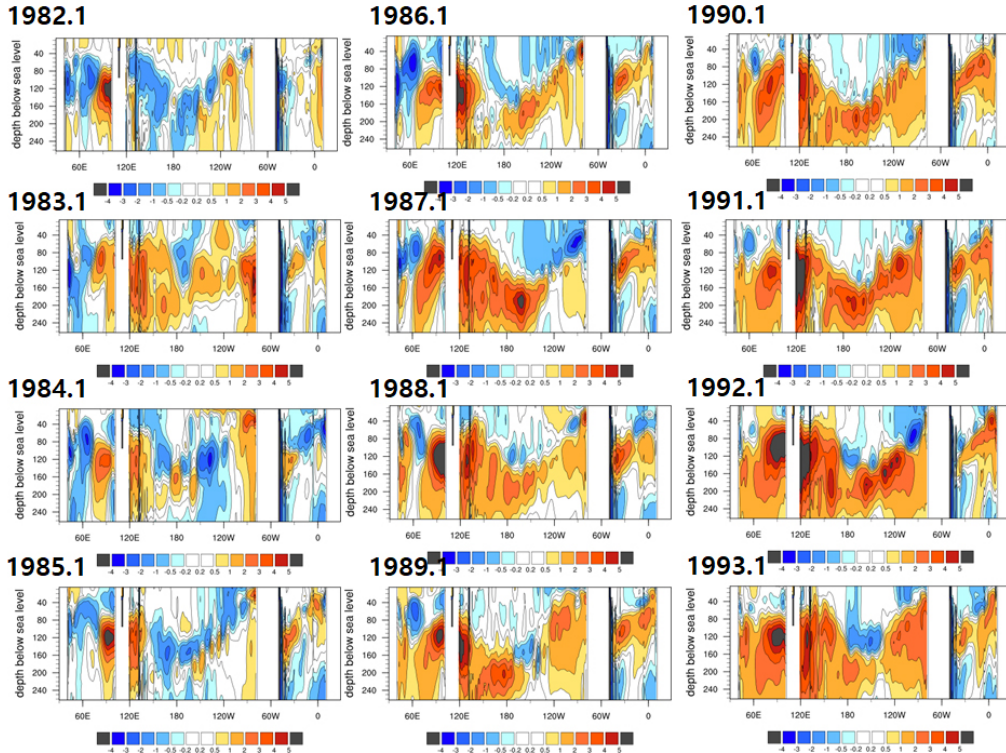


Figure 18. Difference vertical ocean subsurface temperature distribution averaged 5°S - 5°N for JAN1982 between SCoPS and GODAS reference.

그림 19는 실시간 예보장을 위한 초기장인 2017년 6월의 초기장과 GODAS와의 오차를 나타낸 그림이다. 그림 15 (b), (c)와 동일하며 차이는 기후값 기간 설정이다. 즉, 기존의 기간 중 초기 5년을 제외한 1987-2013년을 기후값으로 설정하여 계산한 해양 연직 온도의 아노말리이다. SCoPS의 초기장의 오차는 태평양에서 thermocline을 중심으로 동쪽아래쪽으로는 양의 온도 오차가, 서쪽 위쪽으로는 음의 온도 오차가 뚜렷하게 나타나고 있다. 그림 15와 비교하여 살펴보면, 그 오차가 아주 조금 줄어들었지만, 그 특징은 그대로 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

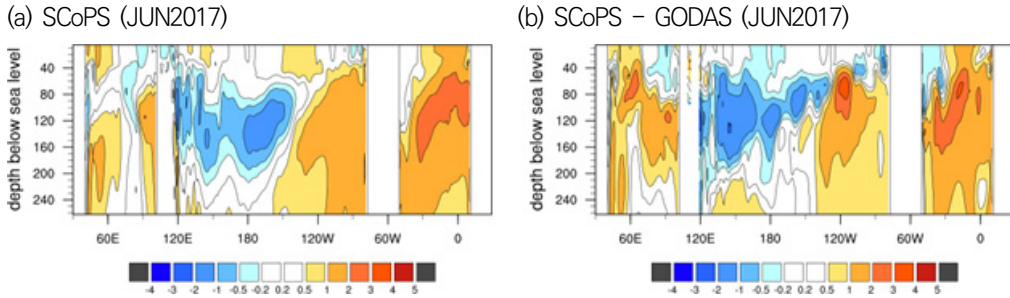


Figure 19. Same as Fig. 15, but climatology period is from 1987 to 2013.

한번 더 정리하면, 현재 보이고 있는 초기장의 오차는 초기장 생산 시스템의 한계에서 오는 모형 자체의 오차가 크게 영향을 주기 때문에 판단되며, 초기장 생산 시 부족한 spin-up 기간 또한 일부 영향을 주고 있는 것으로 생각된다. 아주 작은 차이이긴 하지만 해양 초기장에서의 미미한 개선도 예보장에서는 큰 영향을 가져올 수 있기 때문에 추후 기후값 기간 설정, 혹은 초기장 재생산시 spin-up 기간 설정은 필히 고려해야할 사항이라고 판단된다. 또한 모형의 오차가 초기장에 포함되는 특성상 모형의 개선은 초기장에도 크게 영향을 줄 수 있으므로, 추후 모형 개선과 초기장 개선은 함께 고려되어야 한다고 할 수 있다.

즉, 초기장의 오차의 원인은 모형의 오차로 인함을 확인할 수 있다. 이에 초기장 및 예측장의 특성을 조금 더 분석해 보기위해 Hindcast 기간의 전체 평균장 및 2 months 리드타임 예측장의 결과를 살펴보기로 한다. 해양 초기장의 영향은 서서히 반응하기 때문에 2 months 리드타임 예측장을 분석에 사용하였다. 그림 20은 Hindcast 기간 평균된 SCoPS의 1월 초기장과 11월 초기장을 사용한 2 months 리드타임의 예측장의 1월 평균장을 GODAS와 비교하여 나타낸 그림이다. 그림 20 (a)-(c)에서 굵은 선은 수온약층 깊이(thermocline depth)로 고려될 수 있는 20도 등온선이다. 32년 평균 초기장을 GODAS와 비교하여 보면, thermocline 아래로 양의 온도 오차가 두드러지는 것을 알 수 있다. 하지만 해수면에서의 온도는 GODAS와 거의 유사하게 나타나고 있다. 하지만, 2 months 리드타임의 예측장에서는 초기장에서 보이는 양의 온도 오차와 함께 태평양 해수면 근처에서 음의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

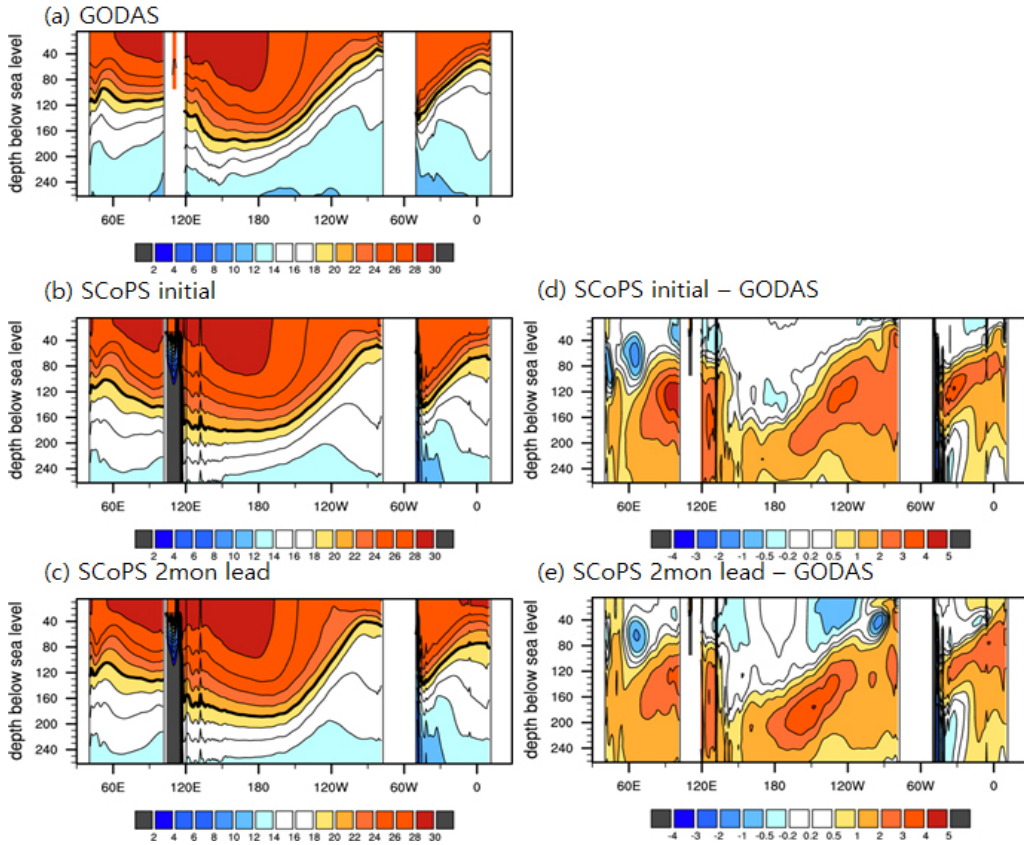


Figure 20. Vertical distribution of ocean subsurface temperature averaged 5°S - 5°N for (a) GODAS, (b) SCoPS initial data, (c) SCoPS 2 months lead time forecast data and (d), (e) Its biases.

이러한 오차의 특징을 좀 더 살펴보고자 해양 변동에 크게 중요한 요소로 판단되는 20도 등온선의 깊이를 SCoPS와 GODAS와의 차이로 그림 21에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 적도 태평양을 중심으로 SCoPS의 수온약층의 깊이가 깊게 나타나고 있다. 또한 인도양 전반 및 서태평양에 걸쳐 깊이가 깊게 나타나고 있으며, 적도태평양을 중심으로 위·아래로는 그 깊이가 얇게 나타나는 것을 알 수 있다. 수온약층 깊이가 깊게 나타나는 것은 다른 해양모델에서도 흔히 나타나는 문제로 알려져 있다(Maes et al. 1997; Jochum et al. 2008; Jochum 2009). 이미 잘 알려져 있듯이, 동태평양은 무역풍에 의해 서태평양으로의 해수 이동이 일어나는 지역으로 상대적으로 차가운 해수가 용승하는 지역이다. 동태평양의 수온약층 깊이가 상대적으로 깊게 나타나면 이러한 해양 순환에 크게 영향을 미치게 된다.

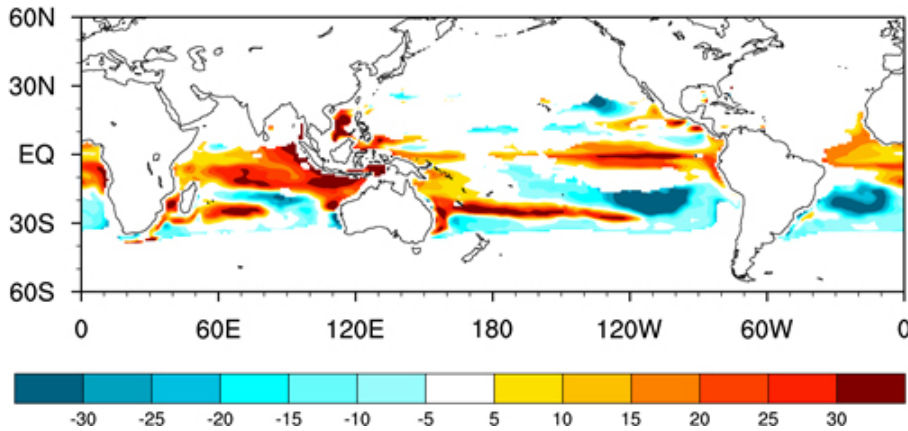


Figure 21. Difference distribution of 20 degree Isotherm depth between SCoPS and GODAS for climatology period (1987-2013).

수온약층 형성과 밀접한 연관이 있는 해수면에서의 해수 흐름 및 바람장의 변화를 검증해보기 위해 해수면 바람 응력(taux)과 10m 동서 바람을 재분석 자료와 비교하여 그림 22에 나타내었다. 그림 22 (a)에서 볼 수 있듯이, SCoPS 초기장의 바람응력은 서태평양 및 북동태평양을 중심으로 관측대비 약하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 서태평양의 약한 동서바람 특징은 그림 22 (c)에 보이는 지표 동서 바람에서도 확인할 수 있다. 동서 바람의 약화는 warm pool 지역인 서태평양지역으로의 해수 흐름을 약하게 할 수 있으며, 해수 흐름의 약화는 상대적으로 동태평양의 용승을 약하게 만들어 동태평양 subsurface를 중심으로 양의 온도 오차를 유발시킨다. 이는 수온약층의 깊이가 깊어진 것과도 연결되는 현상이다. 초기장과 비교하여 예측장에서는 이러한 현상이 더 뚜렷하게 나타나고 있다. 그림 22 (b), (d)를 살펴보면, 해수면 바람 응력 및 지표 바람의 오차는 더욱 크게 나타나고 있다. 반면, 동태평양을 중심으로 무역풍은 더 강해진 특징을 보이며, 이로 인해 초기장과는 반대되는 양상으로 지표의 해수 온도가 낮게 나타나며 동태평양 subsurface의 오차는 초기장보다 더 작게 나타나고 있음을 알 수 있다(그림 20). 하지만, 예보장 역시 중앙태평양 표층 온도 오차는 더욱 커졌으며, 해수면의 음의 온도 오차 역시 두드러진다(그림 20).

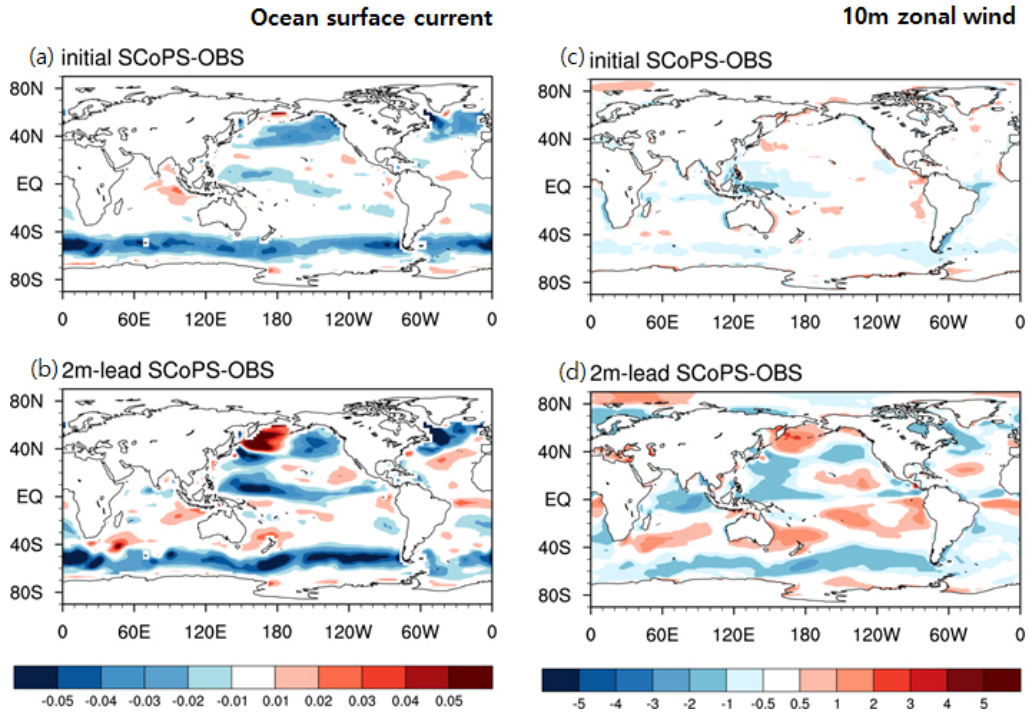


Figure 22. Difference distribution of (a), (b) ocean surface current and (c), (d) 10 m zonal wind between (a), (c) SCoPS initial data, (b), (d) SCoPS 2 months lead time forecast data and GODAS.

이러한 특성과 연계하여 지표 플럭스의 오차는 어떤 특성을 보이는지 살펴보기 위해 SCoPS의 초기장 및 2 months 리드타임의 예측장의 오차를 살펴보았다. 그림 23 (a), (b)에서 나타난 총 운량의 비교는 ISCCP 위성 자료를 기반으로 한 관측데이터와, 순 지표 열속(heat flux)은 OAFLUX를 기반으로 비교되었다.

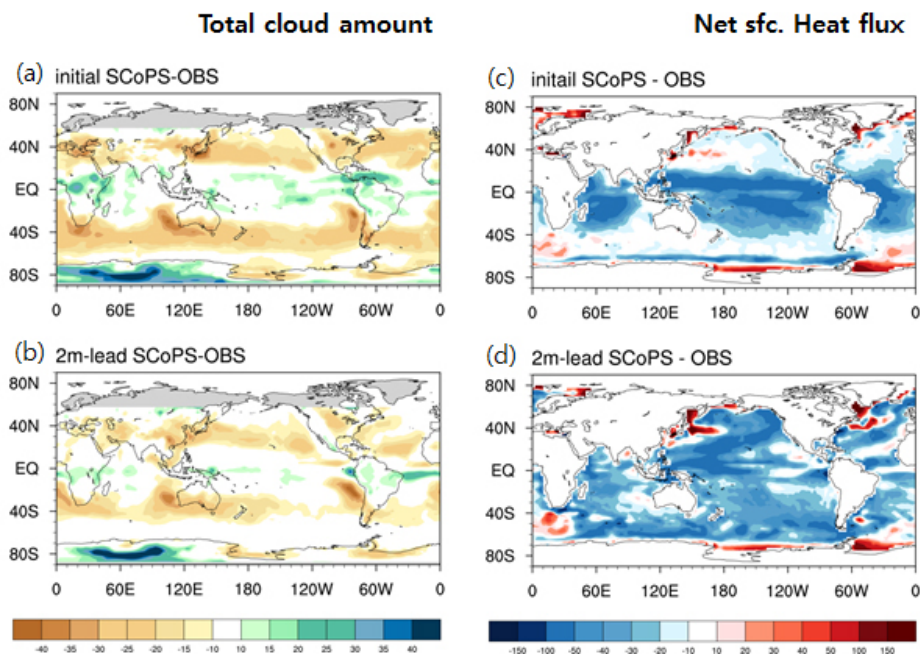


Figure 23. Difference distribution of (a), (b) total cloud amount and (c), (d) net surface heat flux between (a), (c) SCoPS initial data, (b), (d) SCoPS 2 months lead time forecast data and observation (ISCCP cloud, OAFLUX).

관측과 비교하여 SCoPS의 총 운량은 중위도와 저위도에 반대되는 오차를 보이고 있다. SCoPS 초기장을 살펴보면, 중태평양에서 동태평양에 걸쳐 관측대비 다소 많은 양의 운량이 분포하고 있으며 북반구·남반구 모두 중위도 전반에 걸쳐 적은 양의 운량이 분포하고 있다. 이는 예측 결과에서도 동일한 패턴을 보이지만 오차는 오히려 줄어드는 특징을 보인다. 초기장에서의 순 지표 열플럭스 분포를 관측과 비교하여 보면, 관측대비 저위도에서 중위도에 이르기까지 전체적으로 음의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 중위도에서 고위도 일부 육지와 근접한 해안에서만 양의 오차가 나타나고 있다. 이러한 음의 오차는 예측장에서는 더욱 넓은 지역으로 나타난다. 일부 해안지역을 제외하고는 해수면 전체적으로 음의 오차가 나타나고 있으며 동태평양 일부에서는 초기장보다 약한 오차를 보이고 있다. 이는 복사량과도 큰 연관이 있는데, 초기장에서의 지표 복사 플럭스는 운량과 반대되는 양상으로 나타나고 있다(보이지 않음). 상대적으로 운량이 많게 나타난 저위도에서는 구름의 반사로 인해 지표 태양 복사가 적게 입사되고 있으며, 상대적으로 상층에서 빠져나가는 지구 복사 역시 적게 나타난다.

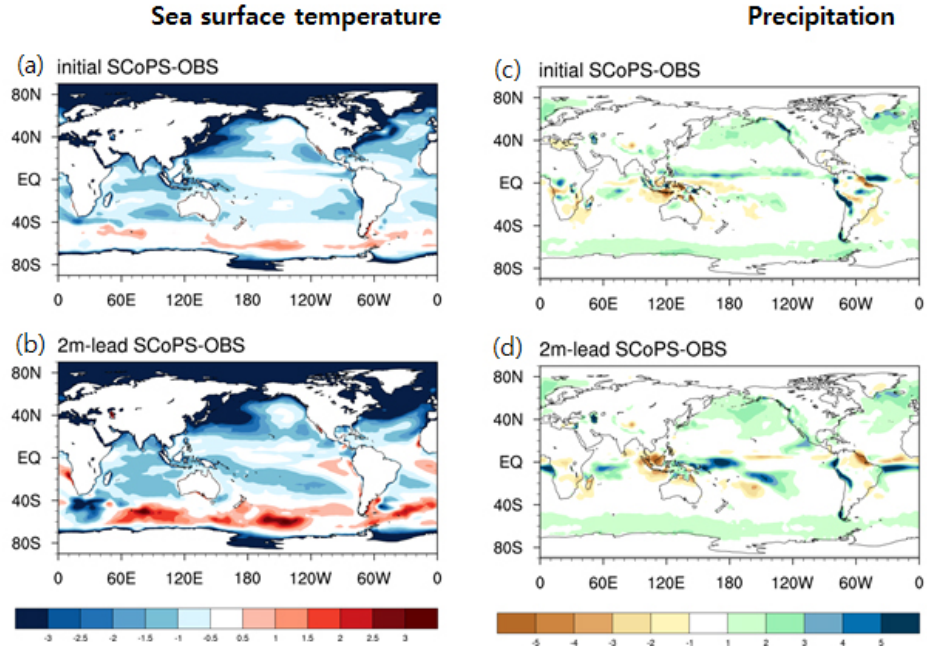


Figure 24. Difference distribution of (a), (b) sea surface temperature and (c), (d) precipitation between (a), (c) SCoPS initial data, (b), (d) SCoPS 2 months lead time forecast data and observation (OISST, GPCP).

구름-복사의 상호작용은 지표 온도 및 강수와도 밀접하게 관련이 있다. 그림 24에서 SCoPS 해수면 온도 및 강수의 초기장과 예측장을 관측과 비교하여 나타내었다. SCoPS의 초기장 생산시 자료동화 시스템에 실시간으로 업데이트 되는 CFS 재분석자료 해수면 온도를 사용하고 있지만, 모형의 계통적 오차 및 CFS 자료의 불확실성 등으로 OISST와 비교하였을 때 남반구 일부를 제외하고는 전체적으로 음의 편차를 보이고 있다. 이는 예측장에서 비슷한 패턴을 보이며, 그 값은 더 증가하였다. 해수면온도의 오차 패턴은 강수와도 크게 연관이 된다. 초기장에서의 강수 오차 패턴은 적도 태평양을 중심으로 좁게 양의 오차를 보이고 있지만, 예측장에서는 ITCZ 지역을 중심으로 양의 오차가 적도 태평양에서는 초기장과는 달리 음의 오차가 나타나는 것이 특징이다.

대부분의 예측 변수에서는 초기장의 계통적 오차와 동일한 패턴이 유지되고 더욱 심화되는 것을 알 수 있다. 하지만, 일부 지표 플럭스 및 동태평양의 해수면 온도, ITCZ에서의 강수 패턴 등 반대되는 양상을 예측장에서 보이기도 한다. 초기장의 오차와 예측장의 오

차의 패턴이 다른 것은 자료동화의 특징으로 판단된다. 현재 해양 자료동화 시스템은 일 주기로 해수면 온도 및 해양 표층온도를 관측에 동화하며 30년 이상 적분을 이어오며 초기장을 생산하고 있다. 현재와 같은 표층온도 오차 특성은 앞에서도 보였지만, 5년 정도의 적분을 수행한 이후로 뚜렷하게 나타나고 있다. 해양 흐름의 slow-varying의 특성 상 예보장에서는 해양프로세스가 6개월 이내로 짧기 때문에 계통적 오차 역시 다른 패턴을 보이고 있다. 이러한 특징은 그림 25에서도 확인할 수 있다. 그림 21에서 보인 초기장의 계통적 오차와 다르게 예측장은 동태평양에서의 수온약층이 초기장보다 얇게 나타나고 중태평양에서 더 깊게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 패턴은 적도 태평양의 해수면 온도를 더 차게 만들고, 강수를 줄여주는 역할을 한다. 이러한 특징을 고려하여 자료동화 시스템 내의 해양 프로세스와 예측시스템내의 해양 프로세스를 분리하여 개선이 되어야 할 것으로 판단된다.

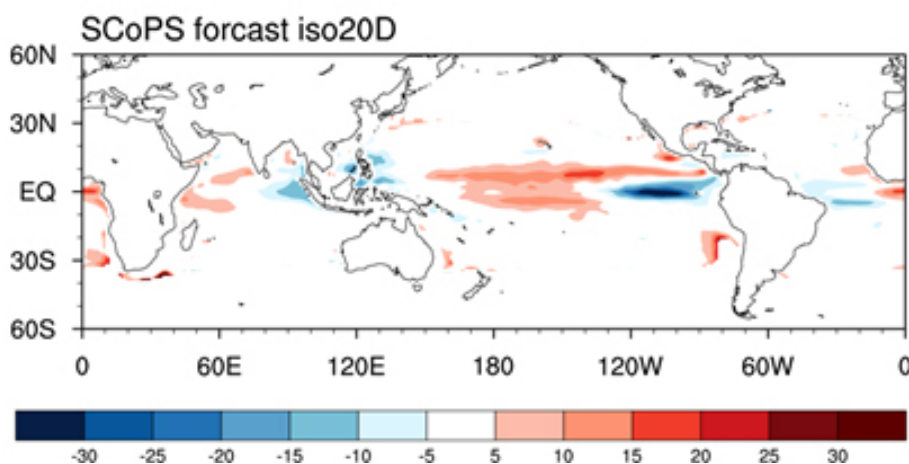


Figure 25. Difference distribution of 20 degree Isotherm depth between SCoPS initial data and 2-month lead forecast data.

4.3 해양 연직 확산 계수 영향 평가

해양 모형에서 연직 혼합 모수화는 지표내 혼합층의 K profile 모수화(Large et al. 1994), 심해의 tidal mixing 모수화(Jayne 2008), 전 층에 거친 background 확산의 3가지로 구성된다. 과거 처음으로 전구 확산은 관측을 기반으로 한 $1\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 의 추정치로 Munk(1966)의 제안이었다. 이후 수온약층에서의 확산은 심해보다 약하다는 Gregg(1977)에 의한 관측 연구를 바탕으로 Bryan and Lewis(1979)는 수온약층에서 $0.3\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$, 심해에서 $1.3\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 의 확산계수를 갖는 연직 프로파일을 제시하였다. 그 후 Ledwell et al.(1993, 1998)에 의해 수온약층의 확산 계수는 $0.12\pm0.02\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$, $0.17\pm0.02\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 로 측정되었고, 이를 바탕으로 많은 모형 개발자들은 수온약층의 확산 계수를 $0.3\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 에서 $0.1\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 의 값으로 줄이게 되었다(Large et al. 1994). 그러나 그 후 관측들에 의해 $0.17\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 의 값이 전구 대표 값으로 알려졌고, 많은 모형들이 0.15 와 $0.17\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 의 값을 사용하고 있다.

최근, 관측들에 의해 확산은 시간·공간적으로 변화하고 있음이 알려졌다. 또한 해양 상층에서의 확산은 대륙면 혹은 위도 20° - 30° 의 중위도 지역에서 증가하고 있으며, 적도지역으로 갈수록 줄어든다고 밝혔다(Moum et al. 2002; Hibiya and Nagasawa 2004; Gregg et al. 2003). 해양 확산은 공간적 분포에 따른 해양 순환 뿐만 아니라, 위도별 역학과정에 의해서도 변화할 수 있다. 확산의 위도별 구조는 여러 관측 및 모형 연구에 의해 알려져 왔다(MaComas, 1977; Stammer 2005; Jochum 2009). Jochum(2009)는 적도에서의 확산계수를 $0.01\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$, 중위도지역을 $0.5\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$, 그리고 전구적으로는 $0.17\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 의 값을 주어 위도별 변동을 가진 확산계수를 해양모형 및 결합모형에 적용하였다. 기존에 전구 모두를 $0.1\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$ 로 적용한 결과에 비해 위도별 변화를 준 결과는 적도지역의 해수면 온도에서 약간의 변화만을 가져오지만, 강수에 대해서는 여러 teleconnections로 인한 변화를 가져온다. 또한, 적도에서의 연직 온도 변화에 있어서는 해양 상층보다 수온약층에서 더 큰 변화를 가져온다. 결과적으로는 수온약층을 더 알게 만들어 주는 효과가 있다.

이러한 선행연구를 바탕으로 SCoPS의 연직 확산 계수에 대해 조사하였다. SCoPS는

POP 해양 모형에서 기본으로 사용하고 있는 방법으로, Large et al.(1994)을 바탕으로 하는 KPP 방식을 바탕으로 Ledwell et al.(2000)에서 제안한 심해에서의 지형 효과를 고려하여 계산하고 있다. 현재 수평적으로는 위도별 구분없이 동일하게 확산계수를 적용하지만, 연직적으로는 다음과 같은 식(Eq. 1)을 따라 해수면 근처에서 혼합층까지는 $0.1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 수온약층으로 갈수록 $1.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 까지 증가하며, 심해에서는 $1.0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 로 유지되는 연직 분포를 가지고 있다.

$$VDC = vdc1 + vdc2 \times \text{atan}(|z| - \text{depth}) * \text{linv} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, $vdc1$ 은 0.524로 250m 깊이에서의 확산계수를 의미하며, $vdc2$ 는 0.313으로 연직 변화를 위한 계수이다. 또한, linv 는 inverse length scale이며, $4.5e^{-5}$ 을 뜻한다.

해양 연직 확산 계수의 일반적인 영향을 살펴보기 위해, 본 연구에서는 $vdc1$ 의 확산계수를 0.262, 0.786으로 변경하고 2015년 11월 초기장을 사용하여 6개월 예보장을 시험 생산하였다. 각각의 실험을 SDIFF, LDIFF로 명명하였다. 또한 분석은 2 months 리드타임인 2016년 1월에 대해 진행하였다. 연직 확산 계수의 변화는 수온약층 형성에 변화를 가져오게 되는데, 그 영향은 단기간에 해양변화로 나타나지 않는다. Jochum(2009)의 결과에서도 알 수 있듯이, 처음 1년과 100년 적분후 마지막 20년의 결과는 매우 다르게 나타난다. 적분 시간이 짧을 때에는 확산 계수의 영향보다 초기장의 영향이 더욱 크게 나타나며, 적분 시간이 길어질수록 해양 순환에 의한 영향이 더 커지게 됨을 알 수 있다. 따라서 현재 수행된 실험의 결과는 해양 초기장의 오차 개선에 직접적으로 사용할 수 없는 한계가 존재한다. 다만, 해양 연직 계수의 변화가 현재 SCoPS의 예측장에 어떠한 영향을 주는지 알 수 있고, 그것이 추후 초기장 재생산시 어떠한 영향을 줄 수 있는지 유추할 수 있을 것이다.

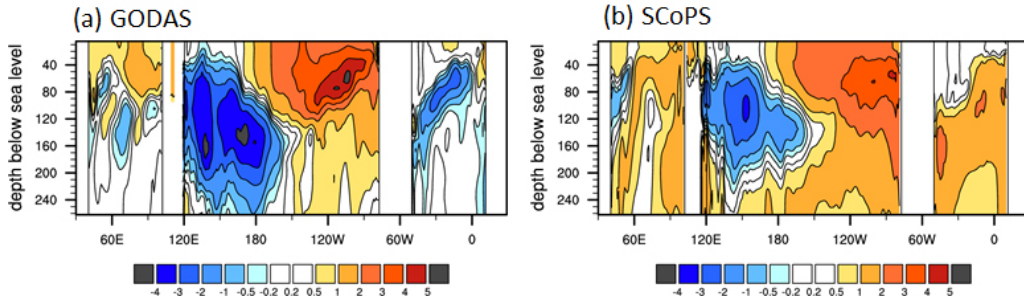


Figure 26. Vertical distribution of ocean subsurface temperature averaged 5°S - 5°N for (a) GODAS, (b) SCoPS 2-month lead time forecast for January 2016.

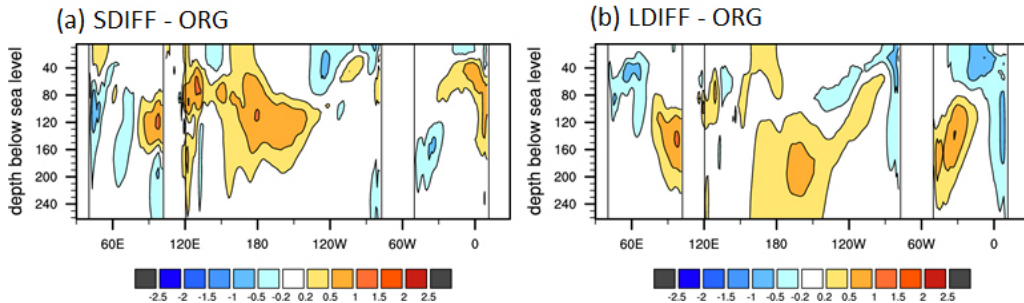


Figure 27. Difference distribution of ocean subsurface temperature averaged 5°S - 5°N between original SCoPS and (a) SDIFF, (b) LDIFF 2-month lead time forecast.

그림 26은 시험분석에 사용된 2016년 1월의 적도지역 연직 표층 온도의 분포를 GODAS와 SCoPS에 대해 나타낸 그림이다. 2016년 1월은 슈퍼 엘니노가 발달하던 단계로 동태평양과 중태평양에 걸쳐 해수면 온도 및 표층온도가 매우 상승하였고, 서태평양 표층에 걸쳐 매우 낮은 아노말리를 가지고 있는 것이 특징이다. GODAS를 reference로 볼 때, SCoPS 역시 엘니노의 패턴을 매우 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 GODAS와 비교하여 서태평양의 음의 아노말리는 다소 약하게 나타나며 동태평양의 양의 아노말리의 최대치도 다소 약하고 동쪽으로 치우쳐져 있다. 또한, 수온약층 아래로는 온도가 더 높게 나타나는 특징을 보인다. 높은 온도는 대서양에서 더욱 두드러진다. GODAS에서 대서양은 음의 아노말리가 지배적이지만, SCoPS에서는 양의 아노말리가 전체적으로 나타나고 있다. 이러한 패턴은 앞서 살펴보았던 Hindcast의 계통적 오차와도 동일하다(그림 20 (e)).

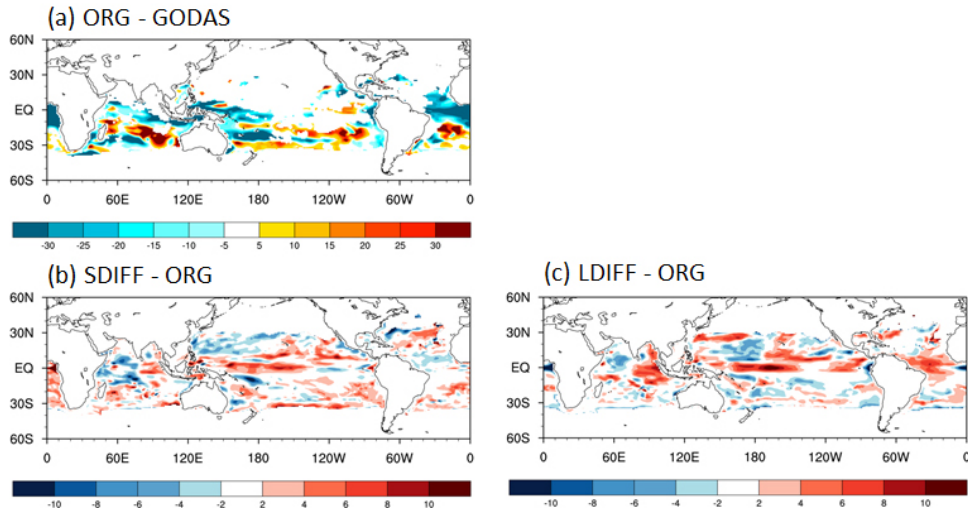


Figure 28. Difference distribution of 20 degree Isotherm depth between original SCoPS and (a) GODAS, (b) SDIFF, (c) LDIFF 2-month lead time forecast.

각각의 실험으로부터의 연직 해양 표층온도 분포를 기존의 SCoPS의 결과와 비교하여 그림 27에 나타내었다. 예상과는 달리 SDIFF, LDIFF의 결과가 서로 반대되는 효과를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 두 실험 모두 동태평양 해수면 근처에서 온도 하강을 보이고 있다. 하지만 LDIFF 실험에서는 좀 더 연직으로 온도 하강이 나타난다. 또한 서태평양 해수면 근처에서는 두 실험 모두 온도 상승을 보이고 있다. SDIFF 실험은 서태평양 수온 약층 위로 온도 상승을 보이지만, LDIFF 실험은 중태평양 수온약층 아래로 온도 상승을 보인다. 이는 수온약층의 깊이 변화와도 연관되는데, 두 실험 모두 적도 서태평양에서 중태평양에 이르기 까지 더욱 깊어진 수온약층을 보이고 있다. 이는 그림 28 (a)에서 보였던 기존의 오차를 줄여주는 방향이다. 두 실험의 차이는 주로 동태평양 용승 지역 및 중위도 북서태평양 지역에서 나타난다.

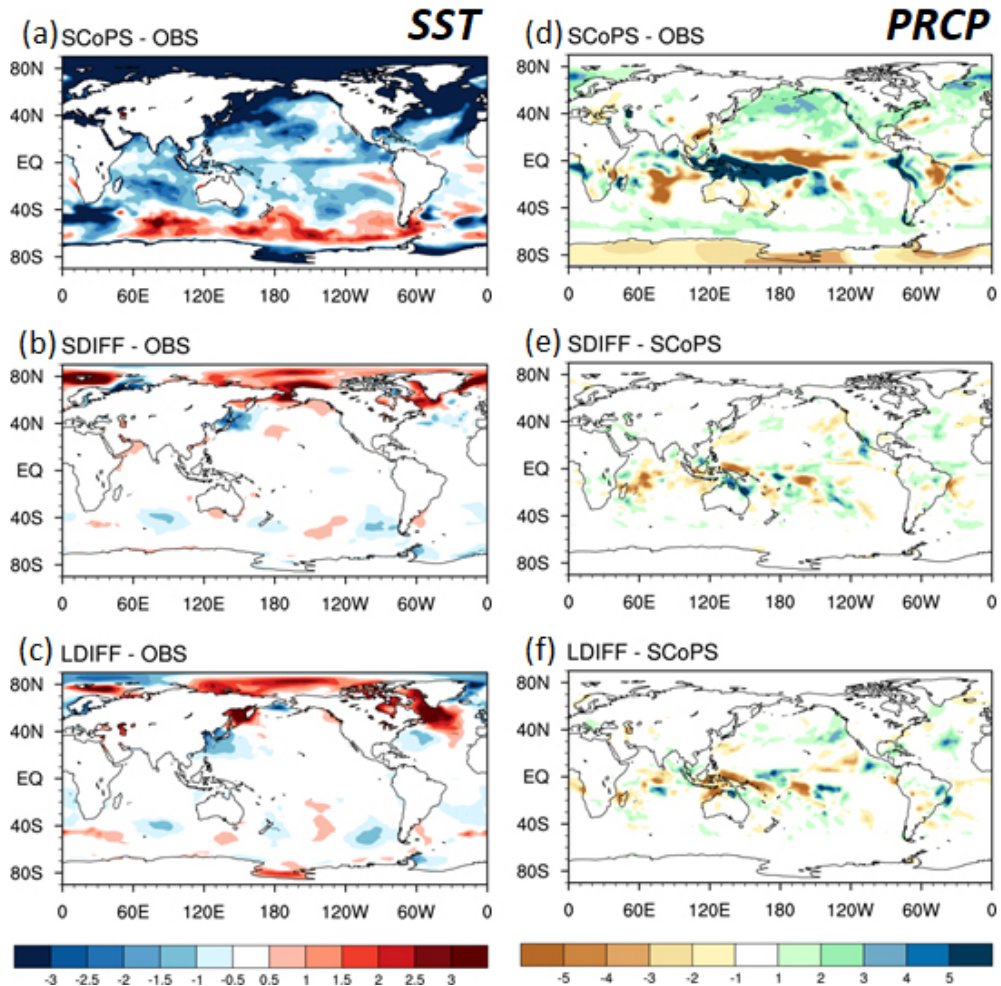


Figure 29. Difference distribution of (a), (b), (c) sea surface temperature and (d), (e), (f) precipitation between (a), (d) SCoPS initial data and observation, between (b), (e) SCoPS 2-month lead time forecast data, (c), (f) LDIFF 2-month lead time forecast data and SCoPS.

해양 표층 온도의 분포 변화가 다른 예측변수에는 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위해 그림 29에서 해수면 온도 및 강수에 대한 변화를 나타내었다. 그림 29 (a), (d)에서는 기존의 SCoPS의 오차를 나타내었다. 이와 비교하여 SCoPS와 LDIFF와 기존의 SCoPS와의 해수면 온도 및 강수의 차이를 (b), (c), 그리고 (e), (f)에 각각 나타내었다. SCoPS의 2-month 리드타임의 예측장의 오차를 살펴보면, 우선 극지역의 차가운 해수면 온도의 오차가 두드러진다. 또한 인도양, 태평양, 대서양 북부에 걸쳐 전반적으로 차가운 해수면

온도를 가지고 있음을 알 수 있다. 반면 남반구 고위도 지역에서는 양의 온도 편차가 나타나고 있다. 이러한 해수면 온도는 적도 지역의 강수 오차와도 관련된다. 적도 태평양의 강수는 음의 편차를 보이고 있으며, 남서 태평양을 중심으로 양의 강수 편차를 보이고 있다. 흥미롭게도 두 실험 모두가 기존의 SCoPS에서 보였던 북반구 고위도 지역의 음의 해수면 온도 편차를 줄여주고 있다. 다만, 약간의 위치차이를 보이며 한반도 주변의 해수면 온도를 더 차갑게 만드는 특징을 보인다. LDIFF 실험에서는 북대서양의 해수면 온도 증가 역시 보이고 있다. LDIFF 실험은 남서 태평양의 강수를 효과적으로 줄이고 있으며, 적도 태평양의 강수도 다소 증가시키는 양상을 보이고 있다. 약간의 지역적 차이가 있지만 두 실험 모두 긍정적인 효과를 가져 오고 있음을 알 수 있다.

한편, SCoPS의 기존의 초기장에서는 동태평양의 수온약층의 깊이가 너무 깊게 나오는 오차를 보이고 있어, 연직 확산 계수의 감소가 필요해 보였지만(그림 21), 예측장에서는 오히려 동태평양의 수온약층 깊이가 얇게 나타나고 있다(그림 28). 따라서, 초기장의 오차를 개선하기 위해서는 해양 연직 확산계수를 줄여야 하는 것이 필요해 보이지만, 오히려 예측장에서는 확산계수를 늘리는 것이 더 큰 효과를 가져오는 것으로 판단된다. 하지만, 이는 초기장 재생산을 통한 장기적분 등의 더욱 다양한 실험이 필요하다. 현재 새롭게 수행된 두 실험 및 기존의 SCoPS는 Ledwell et al.(2000)에서 제안한 심해에서의 지형 효과를 고려하여 심해로 내려갈수록 확산 계수가 더욱 커지는 방식을 사용하고 있다. 이러한 연직 변화가 가져오는 효과를 좀 더 알아 보기 위해 추가로 VMIX 실험을 구성하였다. VMIX 실험에서의 연직 확산 계수는 기존의 많은 연구에서 제시되었던 $0.17 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 로 적용하고 깊이에 따른 변화를 주지 않고 동일하게 적용하였다. 따라서 기존의 SCoPS의 연직 확산 계수보다 해수면 및 혼합층에서는 더 큰 계수를 가지고 수온약층 이하로는 더욱 작은 계수를 가지게 된다.

VMIX 실험과 기존의 SCoPS의 적도지역 평균된 해양 연직온도 분포 차이를 그림 30에 나타내었다. VMIX 실험은 기존의 SCoPS 결과와 비교하여 해양 연직 온도의 오차를 줄여주지는 못한다(그림 20 (e)). 동태평양 상층 일부 및 대서양 일부지역에서 양의 온도 오차를 줄이지만, 그 외의 다른 지역에서는 오히려 오차를 크게 만드는 것으로 확인 된다. 또한, 동태평양과 중태평양의 수온약층 지역에서 온도를 감소시키는 것으로 보인다. 변화된 수온약층의 깊이는 그림 31에서 20도 등온선 깊이로 유추할 수 있다. 기존의 SCoPS

와 GODAS의 20도 등온선 깊이 오차와 비교하여 볼 때(그림 28 (a)), VMIX 실험은 서태평양 및 동인도양에 걸친 대류활동 지역에서 큰 개선을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 남태평양에서 깊게 모의되던 20도 등온선 깊이를 효과적으로 감소시키고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 동태평양 및 대서양에서는 여전히 오차가 크게 나타나고 있다. 서태평양 및 인도양에서의 해양 연직 온도 분포에서는 오차가 더 커지지만, 20도 등온선 깊이는 크게 개선하는 특징을 보이고 있다.

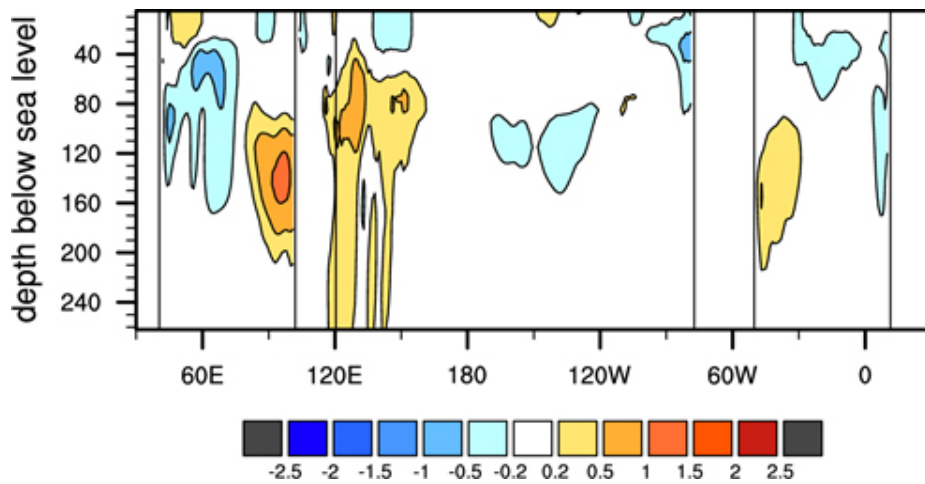


Figure 30. Difference distribution of ocean subsurface temperature averaged 5°S - 5°N between VMIX experiment and original SCoPS for January 2016.

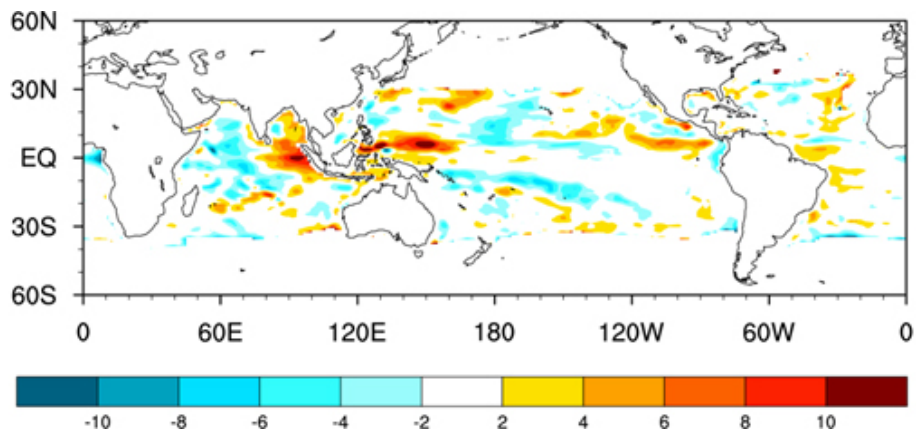


Figure 31. Difference distribution of 20 degree Isotherm depth between VMIX experiment and original SCoPS for January 2016.

이러한 해양 순환의 변화가 해수면 온도 및 강수에 주는 효과를 그림 32를 통해 알 수 있다. 적도 태평양, 인도양, 대서양, 전반에 걸쳐 해수면 온도의 변화는 크지 않다. 하지만 북서태평양에서 해수면온도의 상승을 보이며, 이는 기존의 SCoPS의 오차를 줄여주는 효과이다(그림 29 (a)). 반면, 강수에서의 효과는 주목할 만하다. VMIX 실험은 적도태평양에서의 강수를 증가시키며, 서태평양에서 남태평양으로의 강한 양의 강수 오차를 줄여 주어 관측과 더욱 가까워지는 효과를 보인다(그림 29 (d)).

해양 연직 확산계수의 여러 실험을 통해 얻은 결과로, 애초에 기대했던 해양 연직 온도 분포의 개선은 미미하지만 대기장에서의 효과는 확실해 보인다. 앞서서도 언급했듯이 해양 초기장의 생산에는 장기간의 해양 모형의 적분이 포함 되고, 해양 순환의 변화는 장기간이 요구되기 때문에, 이러한 시험 분석으로 결론을 내기에는 한계가 있다. 다만, 예측장과 초기장에서의 계통적 오차의 특성이 다르고, 대기·해양 반응 역시 다르게 나타나기 때문에, 각각의 모듈을 처방할 때 주의를 기울여야 할 것이다. 또한, 연직 확산 계수의 변화로 인한 해양장에서의 효과에는 장기 적분이 필요하기 때문에, 실제 초기장을 생산하여 그 효과를 확인해 볼 필요가 있다. 현재 생산된 초기장 역시 5년 이후로 계통적 오차가 뚜렷해지는 것을 고려하여, 10년 정도의 적분을 통해 그 효과를 조사해 볼 필요가 있다. 또한, 최근 연구를 고려하여 위도별 연직확산 계수를 처방하는 것도 현재 SCoPS의 계통적 오차를 줄이는 것에 도움이 될 것으로 판단된다. 이러한 연구들이 계속되어 진행될 예정이다.

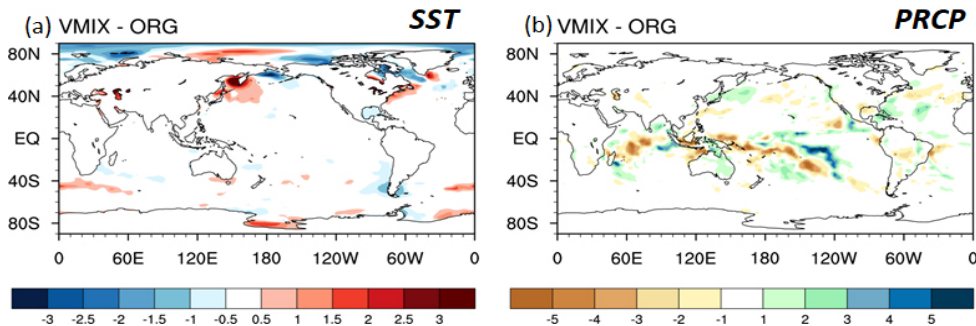


Figure 32. Difference distribution of (a) sea surface temperature, and (b) precipitation between VMIX experiment and original SCoPS for January 2016.

4.4 향후 개선을 위한 제안

2015년 처음 개발된 SCoPS는 2016년 과거 기후 재현 자료 생산을 통해 예측성 검증이 이루어져 왔으며, 그 결과 전지구 기온 및 강수를 비롯한 동아시아 기후 변동성 모의에도 우수한 결과를 보임을 확인하였다(Ham et al. 2018). 하지만, 과거 기후 재현 자료 및 실시간 예측 자료 생산을 통해 SCoPS의 subsurface의 온도가 과도하게 높게 나타나고 있음을 확인하였고, 높은 온도로 인해 나타나는 대기의 반응은 lead-time이 길어질수록 더욱 강해짐을 확인한 바 있다. 이러한 이유로 초기장 생성 프로세스에 대한 검토가 진행되었고, 그 결과 일련의 개선을 통해 향상된 초기장을 적용 및 예측성 성능을 가져온 바 있다. 정확하고 신뢰도 높은 중장기 계절 예측 정보의 제공을 위해서는 계속적인 모형의 개선이 필수적이라고 할 수 있다. SCoPS 모형의 개선은 단일 모형으로부터 제공되는 계절 예측 성능의 향상뿐만 아니라, APCC MME로부터 제공되는 계절 예측 자료의 성능 향상에도 기여할 수 있다. 따라서 본 장에서는 SCoPS 모형의 향후 개선점들에 대한 제안을 다루고자 한다.

SCoPS는 대기-해양-해빙 결합 모형이며 약 80km 수평해상도와 31층의 연직해상도를 가지고 있다. 또한 자료동화 기법은 최근 필요성이 제기되고 있는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하고 있다. 대기 및 해양 모형의 수평해상도 증가에 따른 평균 기후 및 모의 성능 개선은 이미 여러 연구들을 통해 잘 알려진 사실이며 전 세계 현업 기후 예측 모델 운영기관들은 지속적으로 해상도를 증가시키기 위한 노력을 해오고 있다. 수평해상도 증가와 더불어 대기모형의 연직해상도 증가는 최근 그 필요성이 제기되고 있다. 해상도 증가 및 성층권까지의 확대는 QBO(Quasi-Biennial Oscillation)를 비롯한 여러 기후 변동성 모의 능력을 향상시켜 대기 대순환의 모의 성능을 향상시킨다. NCEP과 ECMWF를 비롯한 많은 현업기관에서도 최근 성층권을 포함하는 높은 해상도를 가지고 있다. SCoPS는 현재 31층의 연직해상도를 가지고 있으며, 가장 높은 층에 해당하는 연직 레벨이 10hPa로 성층권과 관련된 기후변동성을 모의하기에는 무리가 있다. SCoPS에 대기 성분 모형이 독일 MPI에서 개발된 ECHAM5이며, 현재 MPI에서는 ECHAM6까지 개발이 되어 연직 해상도도 64층으로 확장되었으므로 이를 기반으로 SCoPS도 개선 가능성을 고려해 볼 수 있다. 하지만, 컴퓨팅 자원 및 계산 비용을 고려하지 않을 수 없다. 여러

비교를 통해 적절한 방법을 생각해야 할 것이다.

양상블 예측은 기후 모형이 가지고 있는 불확실성을 줄여줄 수 있는 방안으로 많이 사용되고 있으며, 양상블 평균을 사용할 때 그 예측성이 향상되는 것은 많은 연구를 통해 증명되었다. 대부분의 현업 기관(예를 들어, 호주 기상청, 미국 기상청(NCEP), 일본 기상청(JMA) 등)에서 양상블 멤버는 30개 이상으로 구성되어 있다. ECMWF의 현업 모형의 경우 51개의 양상블 멤버를 사용하고 있다. 최근 ECMWF NWP모형을 이용한 연구에서는 온도 예측은 3개 이상, 강수 예측은 5-7개의 양상블 멤버가 요구된다고 밝힌 바 있다(Hamill and Whitaker 2015). 또한 Hamill et al.(2004)은 양상블 멤버의 증가가 2주 예측 성능을 향상시킴을 보인바 있다. 즉, 증가된 양상블 멤버의 장점은 선행시간이 길어 질수록 증가하는 예측 노이즈를 줄이고 예측 시그널의 범위를 줄이는 데에 있다고 할 수 있다. 현재 SCoPS는 가우시안 스프레드를 따르는 섭동을 구성하여 5개의 양상블 멤버를 생성하고, 매월 1일/5일에 해당하는 시간차 초기장을 사용하여 총 10개의 양상블 멤버를 구성하고 있다. 본 연구에서도 보였듯이 양상블 멤버의 확장은 예측 성능을 향상시킬 수 있다. 컴퓨팅 자원이 보장될 경우 가장 쉽게 접근할 수 있는 개선 방법으로 양상블 멤버 증가를 고려할 수 있다.

계절예측에서 지면 수분 초기화에 대한 영향이 Koster et al.(2010)에서 조사된 이후 대기 모형뿐만 아니라 많은 결합 모형에서도 그 중요성이 커지고 있다. 실제로 계절예측 모형의 지표 기온 예측성은 해양을 제외한 대부분의 내륙에서 현저히 떨어지고 있으며, 이는 지면 초기화 기법을 통해 일부 해결될 수 있다고 연구되어 왔다. 현재 SCoPS는 개발 당시 접합되었던 지면 초기화 기법이 병렬화의 문제로 배제되었다. 지면 초기화 통해 SCoPS의 지표 기온 및 관련 열속들의 개선을 가져올 수 있다. 하지만, 그전에 현재 4개 층의 프로세스로 구성된 지면 모형의 업그레이드 및 지면 초기화와의 연관성을 먼저 고려할 필요가 있다. 한편, 해빙과 관련된 북극-동아시아 기후변동성 관계는 대부분의 모델들이 역학적으로 잘 모의하고 있는 편이다. 하지만 해빙의 직접 초기화 및 이를 적용한 현업 운영은 국제적으로도 실험적 단계라고 할 수 있다. 최근 온난화 추세와 맞물린 해빙의 변화를 적용 및 영향을 파악하기 위해서 해빙 모형의 개선 및 초기화가 고려될 수 있다.

현재 SCoPS는 하루에 한번 대기와 해양, 해빙모형으로부터 계산되는 플렉스 및 결과 값을

상호교환하고 있다. 따라서 해양모형으로부터 계산되는 SST의 일주기는 대기 모형에 반영될 수 없다. SST의 일주기는 기후 평균값에는 큰 영향을 주지 않지만, MJO나 ISO 등의 짧은 주기를 가지는 기후 변동성에는 큰 영향을 줄 수 있다고 알려져 있다. 따라서 계절내 예측의 효과적인 성능 개선을 위해서는 결합주기를 4회/1일 등으로 축소하거나, 해양 혼합층과 관련된 모듈을 고려하여 해수면온도의 일주기 변동을 적용할 수 있다.

또한 최근 적도지역의 SST의 에러를 줄이기 위한 방안으로 많이 알려져 있는 연구는 담수와 관련된 것이다. 첫 번째로 대기-하천-해양의 상호작용을 들 수 있다. 하천흐름으로 인한 담수의 해양 유입은 해양의 연직 염분 프로파일을 크게 변화시키고, 그 결과 해양 혼합층의 변화를 가져오게 한다. 이러한 변화는 해수면 온도를 바꾸게 된다. 예를 들어, 담수효과로 인한 적도 태평양의 해수면 온도는 1°C이상의 변화를 보인다고 알려져 있다. 두 번째로, 해수면 증발로 인한 플럭스 변화는 대기 순환에 직접적으로 영향을 준다. 하지만 대부분의 기후 모형에서 해수면 증발은 대기모형의 모듈을 사용하기 때문에 담수의 임계치를 그대로 사용하는 경우가 많다. 최근 한국형수치예보모델개발사업단(KIAPS)에서는 이에 대한 적절한 개선을 통해 적도 태평양의 한랭오차를 줄일 수 있다고 제안했다 (Lee and Hong 2017, 5th WGNE workshop). 비록 NWP 모형에서 적용된 방법이지만 결합모델에도 고려해 볼만한 사항이다.

마지막으로 장기예측 성능에 가장 크게 영향을 줄 수 있는 방안은 대기 모형의 모수화 과정들의 개선이라고 할 수 있다. 동아시아 기후 예측에 가장 민감하게 작용할 수 있는 모수화 방안인 적운 대류과정 모수화의 개선이 있을 수 있다. 또한 최근 많이 연구되어 적용되고 있는 적운모수화 및 구름물리 과정의 상호 작용 고려를 통해 구름-복사 상호작용의 개선을 가져올 수 있다. 또한 많은 결합모형에서 나타나고 있는 동태평양 하층운의 오차는 운량모수화를 현실적인 예단 방안으로 처방하면 개선을 가져올 수 있다. 하지만, 이러한 모수화 과정의 현실적인 고려는 예측성 측면에서는 평가가 어려울 수 있다는 단점을 가지고 있어, 많은 민감도 실험들이 필요하다.

5. 결론 및 제언

정확하고 신뢰도 높은 전지구적 혹은 지역적 중장기 계절 예측 정보 제공을 위해서 전지구 접합 모형은 필수적이며, 세계적 기관 및 대학에서도 지속적으로 모형개발/개선 및 예측성 향상을 위해 노력하고 있다. APCC는 매월 전세계 우수기관의 계절 예측 정보를 이용하여 전 지구 다중 모형 앙상블(MME) 예측 시스템을 운영하여 기후 예측 정보를 제공하고 있다. MME 예측성 향상에 기여하고자 in-house 모델인 APCC CCSM3를 이용하여 계절 예측 정보를 생산하였고, 아울러 지난 수년간 고해상도 전지구 접합 모델인 SCoPS를 개발하였다. 또한 SCoPS를 통해 생산된 과거 예측 자료를 이용한 예측 성능 평가들을 통해 전지구 기온 및 강수뿐만 아니라, 동아시아 몬순 모의에 이르기까지 예측성 향상의 가능성을 확인하였다. 이에 APCC CCSM3와 SCoPS의 성공적 교체를 위해 계절예측정보를 매달 안정적으로 생산하여 APCC MME 시스템에 제공하는 현업시스템이 2017년 11월 구축되었고, 이후로 매달 안정적으로 제공하고 있다.

APCC는 매달 전세계 우수기관의 계절 예측 정보를 이용하여 전지구 다중모형 앙상블(MME) 예측 시스템을 운영하여 기후 예측 정보를 제공하고 있다. 매월 15일전까지 예보장을 MME 시스템으로 제공하기 위해서 SCoPS는 매월 13일까지 예보장을 생산하고 그룹 토의를 통해 예보장을 검증한다. 대기변수를 위해 NCEP에서 실시간으로 제공하는 CFS 재분석 자료를 사용한다. CFS의 재분석 자료는 연직으로 1000-10hPa 까지의 등서 바람장, 남북 바람장, 온도, 비습, 해면 기압의 대기 변수와 해수면 온도가 이용된다. 다운받은 대기 자료들은 모델에 맞게 내삽 작업을 거쳐 netcdf 포맷의 daily 파일로 변환된다. 변환된 자료는 매월 5일까지의 자료이며 1일과 5일에 해당하는 모델 리스타트 파일에 넛징된다. 해양모형을 위한 전구 해양 자료동화의 과정에는 크게 해수면 온도, 해수면고도, 해양 프로파일 관측자료가 주로 이용된다. 실시간으로 제공되는 Argo 자료를 활용하여 매월 5일까지의 실시간 온도와 염분 데이터를 다운받아 모델에 맞게 내삽 작업을 거쳐 netcdf 포맷으로 변환한다. 사용되는 데이터는 하루당 전체(태평양, 인도양, 대서양) 약 700개 포인트 정도이며, 변환된 파일은 ENKF 자료동화 방법을 통해 모델에 적용된다. 대기/해양 모두 동화된 초기장은 1일/5일 각 5개 세트로 총 10개의 앙상블 멤버로 구성되며, 초기장으로부터 7개월 적분을 통해 향후 6개월 동안의 계절 예측 자료가 생산된다.

SCoPS로부터 생산된 계절 예측 자료는 매달 13일 경 그룹토의를 통해 결과를 공유하고 있다. 예측장의 특징을 파악하기 위해 해당 계절의 과거재현자료의 성능 평가와 예측 자료의 특성을 나타내는 분석 자료를 새롭게 구성하여 매달 생산하고 있다. 매달 SCoPS의 계절예측자료의 적분이 완료되면 다음 3개월(혹은 6개월)에 대한 주요 변수 및 현상에 대한 예측 결과를 분석 한다. 예측에 앞서 과거재현 자료의 예측 스킬을 Temporal Correlation Coefficient(TCC)와 Root Mean Square Error(RMSE) 등으로 검토한다. 변수는 주요 대기 순환장 변수인 500hPa 지위고도, 해면 기압, 2m 기온, 강수이다. 과거 재현자료의 평가 및 특성분석에 대한 검증 단계가 끝나면 실제 해당되는 기간의 예측장을 살펴보게 된다. 예측 결과는 다음 3개월에 대한 대기 순환장 및 ENSO의 변화 예측장에 대한 그림이 포함된다. 최종적으로는 3개월 예측변수인 기온과 강수를 결정론/확률론적으로 제공한다. 또한, 지난 예측들도 관측과 함께 분석하여 SCoPS의 예측 성능에 대해 논의하고 있다. 예측이 관측과 다르게 나타난 경우에는 그에 대한 이유가 무엇인지에 대해서도 일부 분석하고 있다.

한편, SCoPS는 최근 그 필요성이 강조되고 있는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하는 등 최신 기법을 포함하고 있지만, 예측성 향상을 위해서는 성분 모형들의 개선이 필요하며, 고품질의 계절예측 자료를 위해서는 계통적 오차 분석을 기반으로 하는 초기장 및 개선과정이 필수적이라고 할 수 있다. SCoPS 초기장내 해양 연직 온도 아노말리에서는 수온약층 아래로 동태평양에서 서태평양에 걸쳐 넓은 지역에서 warm 아노말리가 두드러진다. 또한 대서양 전체 및 인도양 약 100m 아래로 과도하게 나타나는 warm 아노말리 역시 관측과는 비교되는 현상이다. 이러한 오차는 1982년 초기장 이래로 5년 정도 지나면서 꾸준하게 나타나고 있는 것이 특징이다. 이러한 오차는 초기장 생산 시스템의 한계에서 오는 모형 자체의 오차가 크게 영향을 주기 때문으로 판단되며, 초기장 생산 시 부족한 spin-up 기간 또한 일부 영향을 주고 있는 것으로 생각된다. 아주 작은 차이이긴 하지만 해양 초기장에서의 미미한 개선도 예보장에서는 큰 영향을 가져올 수 있기 때문에 추후 기후값 기간 설정, 혹은 초기장 재생산시 spin-up 기간 설정은 필히 고려해야 할 사항이라고 판단된다. 또한 모형의 오차가 초기장에 포함되는 특성상 모형의 개선은 초기장에도 크게 영향을 줄 수 있으므로, 추후 모형 개선과 초기장 개선은 함께 고려되어야 한다고 할 수 있다.

또한, 해양 초기장의 오차의 원인에 연관이 있는 변수들의 계통적 오차들 조사되었다. SCoPS 역시 다른 해양 모형에서 흔히 나타나는 깊은 수온약층의 문제가 발생하고 있고, 수온약층 형성과 밀접한 연관이 있는 해수면에서의 해수 흐름 역시 약하게 나타나고 있다. 해수 흐름의 약화는 상대적으로 동태평양의 용승을 약하게 만들어 동태평양 subsurface를 중심으로 양의 온도 오차를 유발시킨다. 다만, 해수면 온도는 초기화 과정에서 CFSR 자료로 동화되고 있고, 구름-복사 과정과 같은 다른 대기 상호작용에 의해 크게 영향을 받고 있기 때문에 다른 양상으로 나타나고 있다. 초기장에서의 순 지표 열플럭스 분포를 관측과 비교하여 보면, 관측대비 저위도에서 중위도에 이르기까지 전체적으로 음의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 중위도에서 고위도 일부 육지와 근접한 해안에서만 양의 오차가 나타나고 있다. 이는 복사량과도 큰 연관이 있는데, 초기장에서의 지표 복사 플럭스는 운량과 반대되는 양상으로 나타나고 있다. 상대적으로 운량이 많게 나타난 저위도에서는 구름의 반사로 인해 지표 태양 복사가 적게 입사되고 있으며, 상대적으로 상층에서 빠져나가는 지구 복사 역시 적게 나타나고 있다.

본 연구에서는 SCoPS의 초기장에서 나타나는 subsurface의 양의 온도 편차와 해수면의 음의 편차를 줄이기 위한 방법으로 해양 연직 확산 계수의 조정을 제시한다. 기본적인 효과를 보기위해 2015년 11월에 사용된 같은 초기장을 사용하여 7개월의 적분을 수행하였고 2개월 리드타임을 가지는 1월 예보장을 관측과 비교하여 살펴보았다. 해양 연직 확산 계수의 변화는 짧은 시간 적분에서 해양 연직 온도에 큰 영향을 주지는 않는다. 다만 수온약층 근처에서 일부 온도가 증가/감소하는 경향을 보였고, 이는 해수면 온도와 특히 강수에서 오차를 줄여주는 영향을 보여 주었다. 해양의 온도가 대기에 반응하기에는 시간이 필요하기 때문에, 짧은 리드타임에서 보이는 영향이 초기화 과정에서는 동일하게 적용되지 않을지도 모른다. 하지만, 해양 연직 확산 계수를 줄인 실험이나 늘린 실험 모두가 기존의 결과의 오차를 줄여주고 있어 충분히 고려해볼 방법임에는 틀림없다. 또한, 초기화 과정 및 예측 시스템에 사용되는 해양 모형이 동일하기 때문에 짧은 시간에서의 반응 역시 예측 성능 향상을 위해 필요한 실험 과정이다. 추후 긴 시간 적분을 통한 초기장 생산에서의 연직확산계수의 영향에 대해서도 조사될 예정이다.

한편, 최근 계절내예측은 end-user의 요구와 맞물려 사회·경제적으로 매우 중요한 요소로 부각되고 있다. 계절내예측과 관련한 과학적 연구와 현업적 적용의 더 효과적인

발전을 위해 WWRP와 WCRP는 Sub-seasonal to Seasonal(S2S) 예측 프로젝트를 최근 시작한 바 있다. S2S 예측 프로젝트의 설립은 날씨과 기후예측 사이를 이어줄 수 있는 계기를 마련할 수 있기 때문에 중요하다고 할 수 있다. 최근, 약 11개의 현업 혹은 연구 기관에서 60일 정도의 예측자료를 공동으로 제공하고 있다. 현재 APCC에서는 2013년부터 세계적 기관에서 제공하는 계절내 예측자료를 활용하여 BSISO 지수 예측을 하고 있으며, 관련 예측장 및 활용 정보를 웹페이지를 통해 실시간으로 제공하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 SCoPS를 통해 계절내 예측 시스템을 구축하였다.

우선 NMME 그룹에서 제안한 내용 및 다른 기관들의 구성을 참조하여 SCoPS 계절내 예측 시스템을 구성하였다. 추후 SCoPS 계절내 예측의 활용을 고려하여 APCC 내 BSISO 업무진과의 협의를 통해 결정 되었다. 또한 SCoPS의 계절내예측에 대한 기본 예측력 검증 및 활용도 평가를 위해 동아시아 몬순 및 BSISO와 연관이 있는 여름철에 대해 검토하였다. 모형의 계통적 오차는 짧은 선행시간에서도 존재하였으며, 선행시간이 길어질수록 예측성이 떨어지지만 같은 패턴의 계통적 오차가 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 주목할 만 한 점은, 선행시간이 길어질수록 오차가 계속 증가하지 않고 오히려 줄어드는 지역도 있다는 점이다. 이는 동아시아의 몬순의 발달 및 쇠퇴와 관련한 순환장의 변화와 연관이 있을 것으로 생각된다. 또한 APCC BSISO 예측 시스템에 참여하고 있는 다른 기관들과의 비교를 통해 SCoPS BSISO 예측 성능의 위치를 파악하였다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 센터 내 환경이 마련될 때, APCC 계절내 예측 시스템을 안정적으로 구축함과 동시에 APCC BSISO 시스템에 참여모델로서 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

REFERENCES

- 김해정, 2013: Construction of BSISO Forecast System and Application to Summer Monsoon Prediction, APCC 연구보고서
- 김해정, 2017: 여름철 계절내 진동 예측 시스템 개선(III) : BSISO 예보 해석 및 활용 가이드스 마련
- 함수련, 2016: Seasonal prediction skill of APCC in-house models retrospective seasonal forecasts
- 함수련, 2017: 계절 예측을 위한 APCC in-house 모형의 현업 운영 및 활용
- Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884–2903.
- Balmaseda, M., and D. Anderson, 2009: Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01701.
- Bryan, K., and L. J. Lewis, 1979: A water mass model of the world ocean, *J. Geophys. Res.*, **84**, 2503–2516.
- Gottschalck, J., M. Wheeler, K. Weickmann, F. Vitart, N. Savage, and Coauthors, 2010: A framework for assessing operational Madden–Julian oscillation forecasts: a CLIVAR MJO working group project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **91**, 1247–1258.
- Gregg, M. C., 1977: Variations in the intensity of small-scale mixing in the thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 436–454.
- Gregg, M. C., T. B. Sanford, and D. P. Winkel, 2003: Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters, *Nature*, **422**, 513–515.
- Hagemann, S., K. Arpe, and E. Roeckner, 2006: Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model. *J. Climate*, **19**, 3810–3827.
- Ham, S., A-Y. Lim, S. Kang, H. Jeong, and Y. Jeong, 2018: A newly developed APCC SCoPS and its prediction of East Asia seasonal climate variability. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-018-4516-5.
- Hamill, T. M., J. S. Whitaker, and X. Wei, 2004: Ensemble reforecasting: Improving medium-range forecast skill using retrospective forecast. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1434–1447.
- Hamill, T. M., and J. S. Whitaker, 2015: Exploring sample size issues for 6–10 day forecasts using ECMWF’s reforecast data set. Accessed 14 August 2015. [Available online at http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/tom.hamill/CTB_Hamill_Whitaker_ECMWF_results.ppt.]

- Hibiya, T., and M. Nagasawa, 2004: Latitudinal dependence of diapycnal diffusivity in the thermocline estimated using a fine-scale parameterization, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L01301, doi:10.1029/2003GL017998.
- Huang, J., K. Pegion, and B. Kirtman, 2015: NMME Plans for subseasonal forecasts, 40th Climate Diagnostic and Prediction Workshop, Denver, CO, USA.
- Huang, Y.-P., L.J. Kao, and F.-E. Sandnes, 2008: Efficient mining of salinity and temperature association rules from ARGO data. *Expert Systems with Applications*, **31(1-2)**, 59–68.
- Hung, M.P., J.L. Lin, W. Wang, and Coauthors, 2013: MJO and convectively coupled equatorial waves simulated by CMIP5 climate models. *J. Climate*, **26**, 6185–6214.
- Hunk, 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.
- Hsu, P.C., T. Li, L. You, J. Gao, and H. Ren, 2015: A spatial-temporal projection model for 10–30 day rainfall forecast in South China. *Clim. Dyn.*, **26**, 6185–6214.
- Jayne, S. R., 2008: The impact of abyssal mixing parameterizations in an ocean general circulation model, *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1756–1775.
- Jiang, X., D.E. Waliser, P.K. Xavier, and Coauthors, 2015: Vertical structure and physical processes of the Madden-Julian oscillation: exploring deq model physics in climate simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 4718–4748.
- Jochum, M., G. Danabasoglu, M. Holland, Y.-O. Kwon, and W. Large, 2008: Ocean viscosity and climate, *J. Geophys. Res.*, **113**, C06017, doi:10.1029/2007JC004515.
- Jochum, M., 2009: Impact of latitudinal variations in vertical diffusivity on climate simulations, *J. Geophys. Res.*, **114**, C01010, doi:10.1029/2008JC005030.
- Kang, I.S., and H.M. Kim, 2010: Assessment of MJO predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models. *J. Climate*, **23**, 2368–2378.
- Koster, R. D., and Coauthors, 2010: Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L02402.
- Kim, D., K. Sperber, W. Stern, and Coauthors, 2009: Application of MJO simulation diagnostics to climate models. *J. Climate*, **22**, 6413–6436.
- Kikuchi, K., and B. Wang, 2010: Formation of tropical cyclones in the northern Indian Ocean associated with two types of tropical intraseasonal oscillation modes. *J. Meteorol. Soc.*

- Jpn.*, **88**, 475–496.
- Large, W. G., J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994: Oceanic vertical mixing – A review and a model with nonlocal parameterization, *Rev. Geophys.*, **32**, 363–403.
- Larson, J., R. Jacob, and E. Ong, 2005: The Model Coupling Toolkit: A new fortran90 toolkit for building Multiphysics parallel coupled models. *Int. J. High Perf. Comp. App.*, **19**, 277–292.
- Lea, D.J., I. Mirouze, M. J. Martin, R.R. King, A. Hines, D. Walters, and M. Thurlow, 2015: Assessing a new coupled data assimilation system based on the Met Office coupled atmosphere–land–sea ice model. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4678–4694.
- Ledwell, J. R., A. J. Watson, and C. S. Law, 1993: Evidence for slow mixing across the pycnocline from an open ocean tracer release experiment, *Nature*, **364**, 701–703.
- _____, _____, and _____, 1998: Mixing of tracer in the pycnocline, *J. Geophys. Res.*, **103**, 21,499–21,529.
- _____, E. T. Montgomery, K. L. Polzin, L. C. St. Laurent, R. W. Schmitt, and J. M. Toole, 2000: Evidence of enhanced mixing over rough topography in the abyssal ocean, *Nature*, **403**, 179–182, doi:10.1038/35003164.
- Lee, E., and S.-Y. Hong, 2017: Impact of sea surface salinity on numerical weather prediction, poster presentation in 5th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models, Canada.
- Lee, J.-Y., B. Wang, I.-S. Kang, J. Shukla, and Coauthors, 2010: How are seasonal prediction skills related to models' performance on mean state and annual cycle? *Clim. Dyn.*, **35**, 267–283.
- _____, B. Wang, M.C. Wheeler, X. Fu, D. E. Waliser, and I.-S. Kang, 2013: Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Clim. Dyn.*, **40**, 493–509.
- Lee, S.-S., J.-Y. Moon, B. Wang, and Kim, H.-J., 2017, Sub-seasonal prediction of extreme precipitation over Asia: Boreal summer intraseasonal oscillation perspective. *J. Climate*, **30**(8), DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0206.1
- Liu, X., S. Yang, A. Kumar, S. Weaver, and X. Jiang, 2013: Diagnostics of subseasonal prediction biases of the Asian summer monsoon by the NCEP climate forecast system. *Clim. Dyn.*, **41**, 1453–1474.
- Liu, X., T. Wu, S. Yang, and Coauthors, 2017: MJO prediction using the sub-seasonal to

- seasonal forecast model of Beijing Climate Center. *Clim. Dyn.*, **48**, 3283–3307.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **141**, 1072–1084. doi:10.1002/qj.2396.
- Maes, C., G. Madec, and P. Delecluse, 1997: Sensitivity of an equatorial Pacific OGCM to the lateral diffusion. *J. Phys. Oceanogr.*, **125**, 958–971.
- MaComas, C. H., 1977: Equilibrium mechanisms within the ocean internal wave field, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 836–845.
- Madden, R.A., and P.R. Julian, 1971: Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702–709.
- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, and S. M. Oh, 2014: Assessment of APCC multimodel ensemble prediction in seasonal climate forecasting: Retrospective (1983–2003) and real-time forecasts (2008–2013), *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 12,132–12,150, doi:10.1002/2014JD022230.
- Moum, J. N., D. R. Caldwell, J. D. Nash, and G. D. Gunderson, 2002: Observations of boundary mixing over the continental slope, *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2113–2129.
- Munk, W., 1966: Abyssal Recipes, *Deep Sea Res.*, **13**, 707–730.
- Rashid, H.A., H.H. Hendon, M.C. Wheeler, and O. Alves, 2011: Prediction of the Madden-Julian oscillation with the POAMA dynamical prediction system. *Clim. Dyn.*, **36**, 649–661.
- Roeckner, E., G. Buml, L. Bonaventura, and Coauthors, 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. MPI Reprot 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 127pp.
- Roemmich, D. and W. B. Owens, 2000: The Argo Project: global ocean observations for the understanding and prediction of climate variability. *Oceanography*, **13**, 45–50.
- Saha, S., and Coauthors, 2006: The NCEP climate forecast system. *J. Climate*, **19**, 3483–3517.
- _____, and Coauthors, 2014: The NCEP climate forecast system version 2. *J. Climate*, **27**, 2185–2208.
- Seo, K.H, W. Wang, J. Gottschalck, and Coauthors, 2009: Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models. *J. Climate*, **22**, 2372–2388.
- Stammer, D., 2005: Adjusting internal model errors through ocean state estimation, *J. Phys.*

- Oceanogr.*, **35**, 1143–1153.
- Vitart, F., and F. Molteni, 2010: Simulation of the Madden-Julian oscillation and its teleconnections in the ECMWF forecast system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 842–855.
- Vitart, F., 2014: Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **140**, 1889–1899.
- Wang, B., P.J. Webster, and H. Teng, 2005: Antecedents and self-induction of the active-break Indian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L04704.
- _____, M.P. Hung, S.J. Weaver, A. Kumar, and X. Fu, 2014: MJO prediction in the NCEP climate forecast system version 2. *Clim. Dyn.*, **42**, 2509–2520.
- Wang, H., B. Wang, F. Huang, Q. Ding, and J.-Y. Lee, 2012: Interdecadal change of the boreal summer circumglobal teleconnection (1958–2010). *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L12704.
- Webster, P.J., and Coauthors, 1998: Monsoon: processes, predictability and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14451–14510.
- Wheeler, M.C., and H.H. Henden, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917–1932.
- _____, H.H. Henden, S. Cleland, H. Meinke, and A. Donald, 2009: Impacts of the Madden-Julian oscillation on Australian rainfall and circulation. *J. Climate*, **22**, 1482–1498.
- _____, Kim, H.-J., J.-Y. Lee, and J.C. Gottschalck, 2017, Real-time forecasting of modes of tropical intraseasonal variability: The Madden-Julian and boreal summer intraseasonal oscillations In: C.-P. Chang, Y.H. Ding, N.-C. Lau, R. Johnson, B. Wang, and T. Yasunari (eds), *The Global Monsoon System: Research and Forecast* (3rd edition). World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol. 7, pp.131–138, DOI: 10.1142/9789813200913_0010
- Xiang, B., B. Wang, Q. Ding, F.-F. Jin, and Coauthors, 2012: Reduction of the thermocline feedback associated with mean SST bias in ENSO simulation. *Clim. Dyn.*, **39**, 1413–1430.
- _____, M. Zhao, X. Jiang, and Coauthors, 2015: The 3–4 week MJO prediction skill in a GFDL coupled model. *J. Climate*, **28**, 5351–5364.
- Zhang, C. J. Gottschalck, E.D. Maloney, and Coauthors, 2013: Cracking the MJO nut.

- Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1223–1230.
- Zhang, S., M. J. Harrison, A. Rosati, and A. Wittenberg, 2007: System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic climate studies. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3541–3564.

【연구자】

함수련 선임연구원

김해정 선임연구원

정여민 연구원

정유림 연구원

연구보고서 2018-05

APCC In-House 모형(SCoPS)의 운영 및 개선

I S B N 979-11-5698-237-1

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.