

계절 예측을 위한 APCC in-house 모형의 현업 운영 및 활용

Operation and Application of the APCC In-House Models for Seasonal Prediction

함수련, 김선태, 임아영, 정여민, 정혜인 기후연구팀

발간사

정확하고 신뢰도 높은 전 지구적 혹은 지역적 중장기 계절 예측 정보 제공을 위해서 전 지구 접합 모형은 필수적이며, 세계적 기관 및 대학에서도 지속적으로 모형 개발 및 개선을 통한 예측성 향상에 힘쓰고 있다. 본 센터는 매월 전 세계 유수기관으로부터 제공되는 계절 예측 정보를 활용하여 전 지구 다중 모형 앙상블(MME) 예측 시스템을 운영하고 있다. 아울러 본 센터에서는 MME 예측성 향상에 기여하고 및 응용분야의 활용연구 등을 위해 지난 수년간 고해상도 전지구 접합 모형인 Seamless Coupled Prediction System(SCoPS)를 개발한 바 있다.

본 연구보고서는 새롭게 개발된 SCoPS로부터 생산된 과거 예측 자료를 이용하여 매달 안정적인 계절예측 정보 생산 및 APCC MME 계절예측 시스템 참여를 위한 일련의 과정을 소개한다. SCoPS는 대기-해양 결합 초기화 방법을 사용하는 등 최신 기법을 포함하고 높은 해상도를 가지고 있어 기존 시스템인 CCSM3와 비교하여 볼 때 기온 및 강수를 비롯한 대기 대순환장 및 기후 변동성에서 개선된 모의 성능을 보인다. 특히 동아시아 기후의 핵심인 여름·겨울 몬순의 예측 성능은 다른 MME 참여 모형들인 세계적 기관들의 계절기후 모형들과 비교하였을 때에도 상위권으로 나타나 SCoPS의 우수성을 확인한 바 있다. 이를 토대로 2017년 11월을 기점으로 기존의 in-house 모형인 CCSM3를 대체하여 SCoPS의 결과를 MME 시스템에 포함하였다. 또한 본 연구는 최근 중요성이 강조되고 있는 계절내 예측의 기본 구성을 고안하고 검증하는 등 SCoPS의 활용성을 넓히고자 하였다. 생산된 계절 및 계절내 예측 정보는 역학적·통계적 상세화가 가능하여 수문, 농업 등 응용분야에서도 활용 가능하다는 점에서 더욱 의의를 갖는다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었다. 무엇보다도 연구가 순조롭게 진행될 수 있도록 다방면으로 도와준 임아영 연구원, 정여민 연구원, 정혜인 연구원, 김선태 선임연구원, 그리고 본 연구보고서를 총괄하고 최종 집필한 본원의 함수련 선임연구원에게 깊은 감사를 표하는 바이다. 본 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되길 바란다.

2018년 3월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

This study introduces the newly developed APEC Climate Center (APCC) in-house model (Seamless Coupled Prediction System; SCoPS) and its operation process for APCC multi-model ensemble (MME) prediction system for 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 of atmosphere, ocean and sea ice. The SCoPS initialized data for 10-member ensembles is assimilated by the NCEP CFS data and several subsurface profile data. Real-time forecast runs are started at the first and fifth day of each month with five perturbed ensemble members by a Gaussian spread function and are integrated up to 7 months. Having obtained the prediction data, we analyzed the temperature and precipitation prediction maps based on predicted the large-scale circulation patterns and an ENSO forecast on group discussion.

In a previous study, an evaluation of the prediction skill compared to the current operational model (APEC Climate Center Community Climate System Model version 3 – APCC CCSM3) using 32-year (1982–2013) ensemble hindcast runs. We found that SCoPS seasonal climate forecasts are useful for simulating climate variability, especially the East Asian monsoon system. Moreover, prediction results from hindcast and forecast show reasonable performance over current MME individual models. Based on these studies, newly developed SCoPS seasonal forecast data has been provided to the APCC MME system as APCC operational model every month since November 2017.

Also, SCoPS has been updated with improved initial processes. We found that there were significant systematic biases in subsurface ocean temperature, and those biases lead to excessive or weak ENSO signals with long lead times. Currently, some processes related to the subsurface temperature in the ocean initialization have been fixed. The newly produced reforecast shows improved temperature and precipitation forecast ability over the East Asia region. Additionally, we suggest some processes for improving SCoPS.

Meanwhile, due to a recent increase in the occurrence of extreme weather and climate events, the prediction information on extreme events in various time frames is being requested. Therefore, through the development of SCoPS subseasonal forecast, the predictability is being evaluated and its application to prediction information. From discussions with the APCC Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO) working group, the configuration for subseasonal prediction was set based on information provided by the NMME group discussion, S2S project. In the MJJAS 2014 case study, we found that the results from 1–3 weeks prediction produce a reasonable spatial distribution of large-scale circulation, as well as precipitation related to the East Asian monsoon system. However, the temporal correlation coefficient of the predicted variables is lower than those from the 4–5 weeks prediction. Based on the analysis of this case study, we have expanded the reforecast periods from 2014 to 2016 and analyzed the prediction skill for the operational subseasonal forecast system. Moreover, real-time subseasonal forecast data will be provided to the APCC BSISO forecast system after various validation processes are applied.

목 차

1. 서론	1
2. 모형 및 예측 시스템	4
2.1 Seamless Coupled Prediction System (SCoPS)	4
2.2 Hindcast and Forecast System	6
3. 계절 예측을 위한 SCoPS 모형의 현업 운영 및 활용	8
3.1 SCoPS의 현업 운영	8
3.1.1 적분방법 및 일정	8
3.1.2 예측장 분석	9
3.2 SCoPS의 개선	21
3.2.1 해양 초기장의 영향	21
3.2.2 개선을 위한 제안	26
3.3 SCoPS의 계절내 예측의 활용성 검토	29
3.3.1 계절내 예측의 필요성 및 배경	29
3.3.2 계절내 예측 시스템 구성	32
3.3.3 시험 케이스 검증	34

4. 결론 및 제언-----	44
■ REFERENCES-----	49

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. 최근 중장기 기후 변동성에 대한 연구가 활발히 이루어져 모델을 기반으로 한 중장기 계절예측 시스템 또한 주목을 받고 있다. 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 기후모델인 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 계절예측을 수행해 오고 있다(Saha et al. 2006). 초기장 개선을 위한 자료동화 시스템을 비롯해 개선된 토양모형과 해빙모형, CO₂ 예단 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. 2014).

APCC는 기후 접합 모형을 운영 중인 세계 유수기관으로부터 계절 예측 모델 자료를 받아 다중모델앙상블 기법을 기반으로 하여 매달 아태지역을 상대로 고품질의 계절예측

정보를 제공하고 있다(Min et al. 2014). 그러나 예측성의 향상을 위하여 모델 운영 기관의 모델 향상 계획에 의존해야 하며, 월별 자료만 제공하는 등의 data availability에 대한 한계가 존재하므로, 궁극적인 기후 응용분야에 사용하기에 어려운 점이 있다. 또한, 아태지역 기후 네트워크 허브로서 선도 연구기관 역할을 위해서는 센터 자체 모델이 필요하다고 할 수 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 접합 시스템, Seamless Coupled Prediction System(SCoPS)를 하와이 대학교와 공동으로 개발하였다.

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(Ham et al. 2018, submitted). 본 연구에서는 새롭게 개발된 SCoPS를 사용하여 매달 계절 예측 자료를 안정적으로 생산하여 예측장을 표출하고 APCC MME 시스템에 제공하는 일련의 과정들을 구축하고자 한다.

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. 예를 들면, 지면 지역의 계통적 오차가 뚜렷이 나타나는 것은 지면 초기화 기법의 도입으로 개선을 꾀할 수 있으며, 낮은 대기 연직 해상도를 높여 연관된 대규모 순환장 오차를 줄일 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 그동안의 SCoPS 예보장으로부터 분석된 문제점들을 파악해 보고자 한다. 파악된 문제점들의 개선을 통해 SCoPS 예보장이 어떻게 변하는지도 알아본다.

한편, 계절내 예측은 end-user의 요구와 맞물려 사회경제적으로 매우 중요한 요소로 부각되고 있으며, 현재 센터에서도 세계적 기관에서 제공하는 계절내 예측자료를 활용하여 APCC BSISO 예측 정보를 제공하고 있다. 이에, 날씨부터 기후까지 이음새 없는 예측을 위해 개발된 SCoPS를 통해 계절내 예측 시스템을 구축하고자 한다. 최근 크게 필요성이 제기되고 있는 계절내 예측 시스템 구축을 통해 APCC BSISO 예측 시스템에도 기여를 할 수 있으며, 계절 예측으로 어려움이 있는 극한 기후 예측에도 큰 도움을 줄 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 계절내 예측 시스템 구축을 위한 방법 및 초기 결과들을 점검해 보고자 한다.

2. 모형 및 예측 시스템

2.1 Seamless Coupled Prediction System (SCoPS)

하와이 대학교와 International Pacific Research Center(IPRC)는 2012년에 대기-해양 결합모델인 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 모델인 SCoPS를 개발하게 되었다. POEM 모델과 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 구성되어 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 해빙 모형인 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 계절예측 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 - 10hPa 까지의 동서 바람장, 남북 바람장, 온도, 비습, 해면 기압의 대기 변수와 해수면 온도가 이용된다. 대기 변수의 연직 해상도는 isobaric 1000 - 10hPa 이며, 수평해상도는 0.5°, 시간 해상도는 6시간이다. 다운받은 대기 자료들은 모델에 맞게 내삽 작업을 거쳐 netcdf 포맷의 daily 파일로 변환된다. 변환된 자료는 매월 5일까지의 자료이며 1일과 5일에 해당 하는 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(e.g., Huang et al., 2008; Balmaseda and Anderson, 2009). 특히 방대한 양의 해양정보가 실시간으로 제공되고 있기 때문에 다수의 현업기관에서 수치예보 분야에 Argo자료를 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.

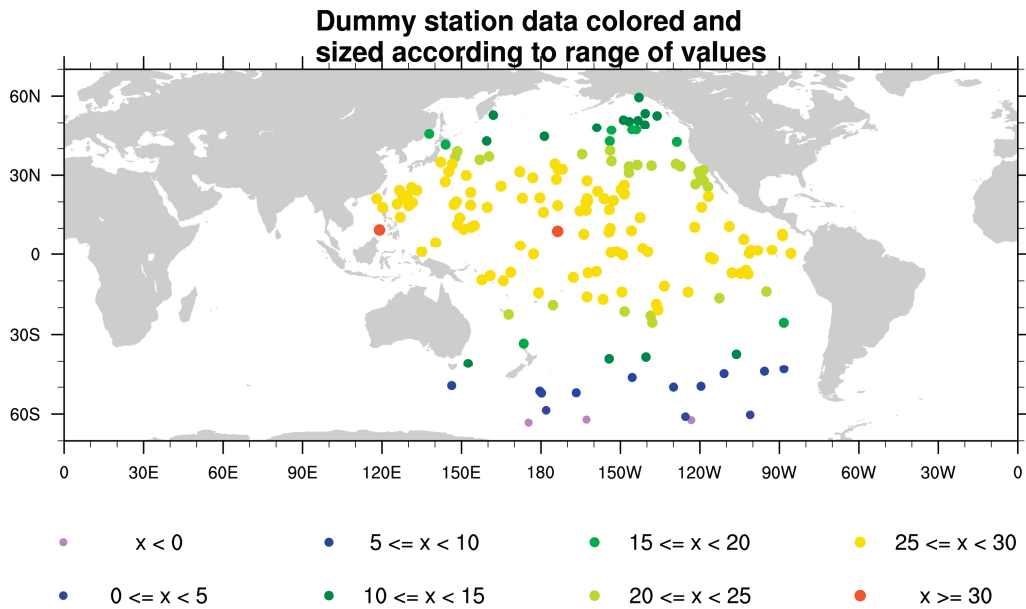


Figure 1. Numbering distribution of used Argo data over Pacific Ocean in SCoPS data assimilation for 5th September 2015.

3. 계절 예측을 위한 SCoPS 모형의 현업 운영 및 활용

3.1 SCoPS의 현업 운영

3.1.1 적분방법 및 일정

매달 15일을 전후로 전세계 유수기관의 계절 예측 정보를 이용하여 운영되는 APCC MME 예측 시스템에 기후 예측 정보를 제공하기 위해, SCoPS는 매월 13일까지 예보장을 생산하고 그룹토의를 통해 예보장을 검증한다. 간략한 타임 스케줄이 그림 2에 나타나 있다. 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 세트로 총 10개의 앙상블 멤버로 구성하여 7개월 적분을 통해 향후 6개월 동안의 계절 예측 자료가 생산된다.

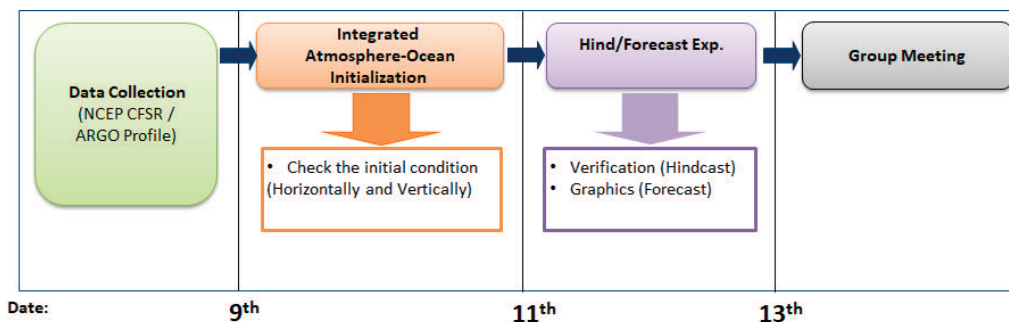


Figure 2. Time schedule of SCoPS seasonal forecast system for every month

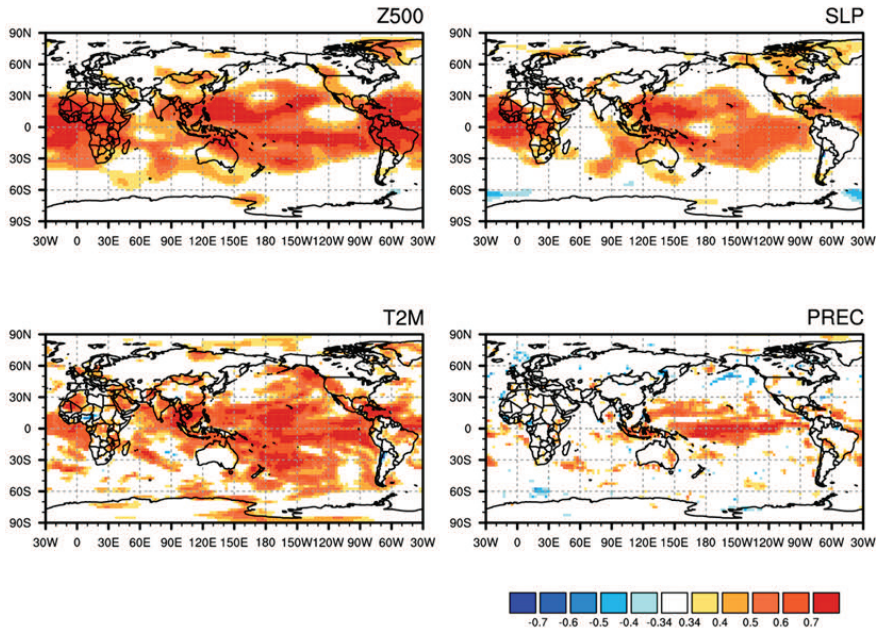
10개의 앙상블 멤버로 예측된 결과를 결정론/확률론적으로 제공하게 된다. 결정론적 방법은 10개의 앙상블 멤버의 단순 평균값이며, 확률론적 방법은 다음과 같이 구성된다. 과거재현자료 전 기간(1982~2013년; 32년)에 해당하는 10개 앙상블 멤버를 이용하여 매달 총 320개 값을 target month에 대해 Probability density function(PDF)를 수행한다. PDF에서 33.3%로 3분위하여 threshold값을 지정하여 below/normal/above를 결정하고 예측된 달의 10개 앙상블 멤버가 각각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

3.1.2 예측장 분석

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. 예를 위해 2017년 5월에 생산된 여름철(JJA) 계절 기후 결과를 일부 소개한다. 매월 SCoPS의 계절 예측자료의 적분이 완료되면 다음 3개월(혹은 6개월)에 대한 주요 변수 및 현상에 대한 예측 결과를 분석 한다. 주로 다음 3개월에 대한 기온 및 강수에 대한 예측을 위한 대기 순환장 및 ENSO의 변화 예측장에 대한 그림이 포함된다. 예측에 앞서 과거 재현 자료의 검증을 통해 해당되는 계절의 SCoPS의 예측 성능을 확인한다. 그림 3과 4는 여름철 계절 예측 자료에 대한 과거재현 자료의 예측 성능을 Temporal Correlation Coefficient(TCC)와 Root Mean Square Error(RMSE)로 나타낸 수평장이다. 변수는 주요 대기 순환장 변수인 500hPa 지위고도, 해면 기압, 2m 기온, 강수이다.

Hindcast Verification TCC (JJA)



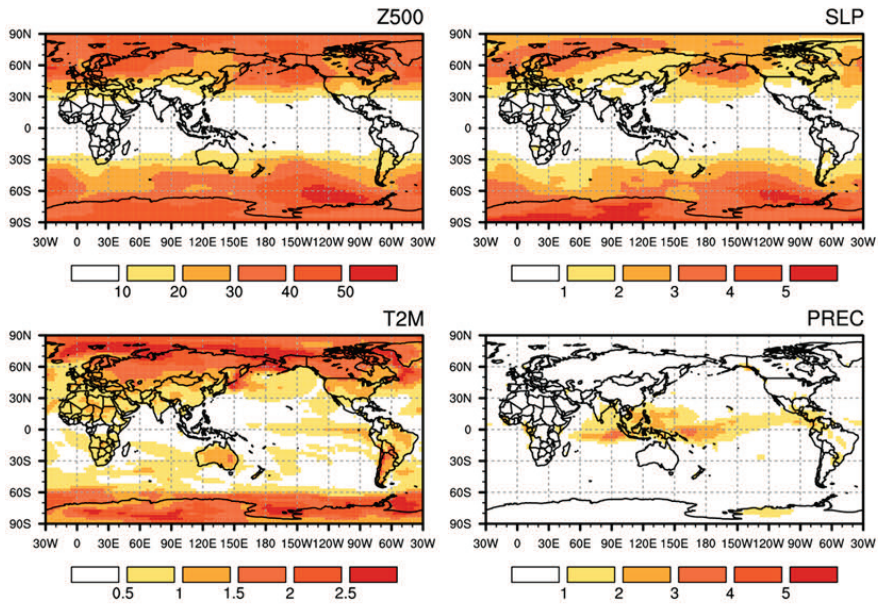
© Climate Research Team

Figure 3. Spatial distribution of temporal correlation of (a) 500 hPa geopotential height, (b) sea level pressure, (c) 2m temperature and (d) precipitation for the SCoPS JJA hindcast for the period of 1982–2013.

그림 3에서 시간에 따른 변동성의 성능을 검증한 TCC의 수평장을 확인할 수 있다. 500hPa 지위고도의 경우 저위도 지역에서 높은 성능을 가지고 있으며 고위도로 갈수록 TCC가 낮아진다. 한반도를 포함하는 동아시아 지역에서는 0.5정도의 TCC를 유지하고 있다. 해면 기압 역시 저위도 일부 지역에서만 높은 성능을 유지하고 있으며 한반도 지역은 성능이 떨어지는 가장자리 위치에 자리잡고 있다. 예측에 사용되는 변수인 기온과 강수에 대한 기본적인 성능도 살펴본다. 기온의 경우 역시 저위도 해양에서 높은 TCC를 보이고 있으며 한반도 지역에서는 약한 상관관계를 보이고 있다. 대부분의 육지에서는 0에 가까운 값을 보이고 있다. 강수의 성능은 적도 태평양 부분으로 한정된다. 이는 대부분의 강수가 집중되는 지역이기 때문이다. 그림 4에서는 JJA 예측장에서 각 변수의 RMSE의 평균 분석장을 확인할 수 있다. 각 변수들의 오차는 강수를 제외하고 고위도로 갈수록 증가하는 패턴이다. 특히 2m 기온의 경우 RMSE가 대부분의 육지 지역에서 크게 나타나며 극지역으로 갈수록 크게 증가한다. 강수는 주요 강수대인 적도 태평양지역

에서 오차를 가지고 있다. 특히 동태평양에서 인도양에 걸친 강수대에서 가장 큰 오차를 보이고 있다.

Hindcast Verification RMSE (JJA)



© Climate Research Team

Figure 4. Spatial distribution of Root mean square error of (a) 500 hPa geopotential height, (b) sea level pressure, (c) 2m temperature and (d) precipitation for the SCoPS JJA hindcast for the period of 1982–2013.

ENSO의 예측 성능을 분석하기 위해 Nino 3.4 지역의 해수면 온도에 대한 TCC를 6개월의 시계열로 나타낸다(그림 5). 관측장의 해양반응이 지속되는 것을 가정한 persistence와 각각의 앙상블 멤버가 나타내는 예측장 및 앙상블 평균값을 함께 표현한다. 앙상블 평균을 사용한 JJASON에 대한 예측 성능은 적분기간이 6개월이 지나도록 0.5이상을 유지한다. 4months 선행시간이 될 때까지 TCC는 0.8에서 0.5까지 떨어지지만 그 후 0.6까지 약간 증가한다. 관측 persistence보다 전 기간에서 높은 TCC를 보이고 있다. RMSE는 선행시간이 길어질수록 상승하는 패턴을 보이고 있다. 앙상블 평균은 처음 약 0.5°C 에서 시작해서 약 0.9°C 까지 상승하며, 개별 앙상블 멤버에서는 4months 선행시간 정도에 약 1.1°C 의 최고 오차를 보이고 있다. 첫 두 달 동안은 관측

persistence 보다 약간 높은 오차를 보이지만 선행시간이 길어질수록 낮은 오차를 보이고 있다.

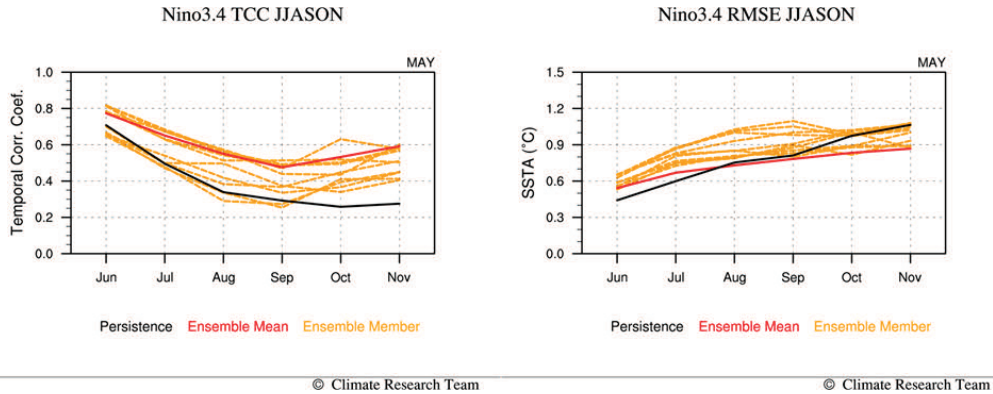
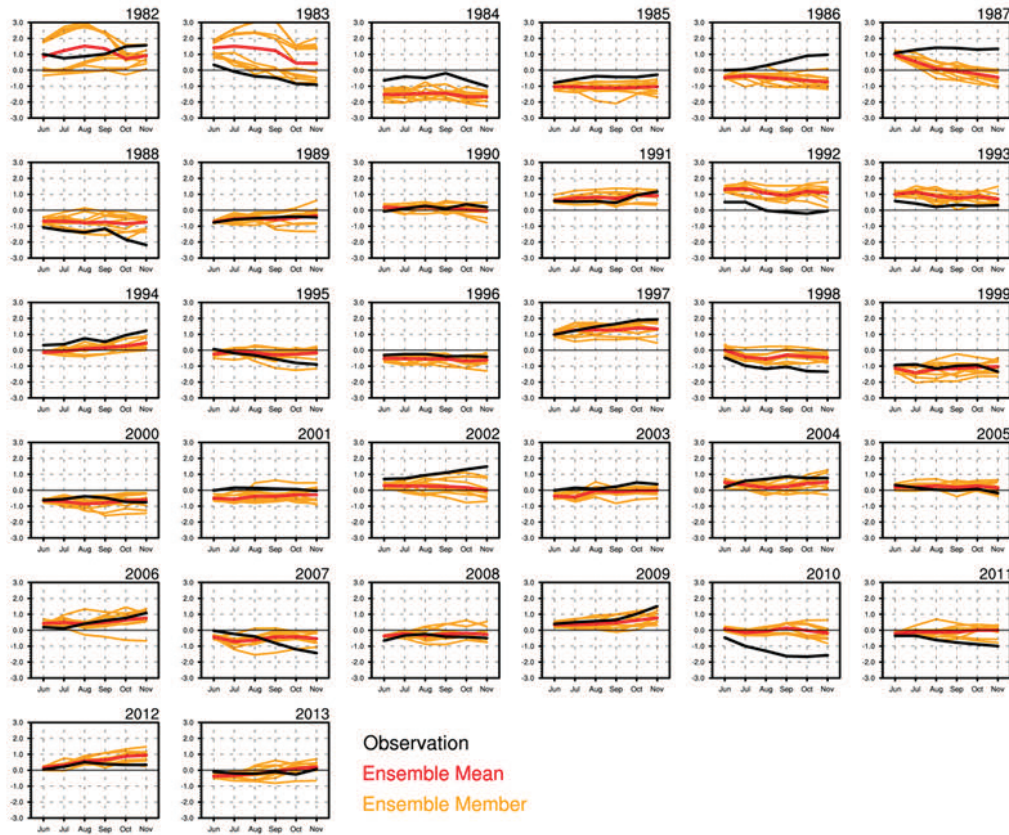


Figure 5. Comparison between the averaged observed persistence and forecasted Nino 3.4 index and its RMSE obtained from the SCoPS prediction for the period of JJASON (1982–2013).

그림 6은 예측된 Nino3.4 지수의 6개월의 패턴을 관측과 함께 각각의 연도별로 나타낸 그림이다. 이를 통해 ENSO의 특징이 나타났던 과거 연도에 대한 SCoPS의 예측 성능을 살펴볼 수 있다. 초기장이 처음 생성되어 적분되기 시작한 1982년부터 초기 2-3년 동안은 각각의 앙상블 멤버의 예측장이 큰 변동성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 대부분의 연도에서 관측(검은 실선)과 유사한 패턴으로 Nino3.4 지수를 예측하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 일부 해(특히 1987, 2002, 2010, 2011)에서는 관측과 매우 다른 양상을 예측하고 있다. 이러한 해는 엘니뇨 혹은 라니냐가 발달하고 있는 기간이라는 특징을 가지고 있다. 또한, SCoPS가 Nino 3이나 4, 혹은 1.2 지역보다 Nino 3.4 지역에서 SST의 계통적 오차가 크다는 점 역시 하나의 이유가 될 수 있을 것이다. 하지만, 무엇보다도 이러한 특징은 SCoPS의 subsurface의 연직 온도 아노말 리가 가지고 있는 계통적인 오차가 ENSO의 예측에 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 특히 선행시간이 길어질수록 subsurface의 반응이 나타나기 시작하면서 해수면 온도의 오차 역시 커지는 경향이 있다. subsurface의 계통적 오차에 대한 내용은 다음 섹션에서 자세히 다루기로 한다.

Hindcast Nino3.4 Timeseries JJASON



© Climate Research Team

Figure 6. Time series of observed and forecasted Nino 3.4 index from OISST and SCoPS hindcast for JJASON of each year

과거재현자료의 평가 및 특성분석에 대한 검증 단계가 끝나면 실제 해당되는 기간의 예측장을 살펴보게 된다. 예를 들어 2017년 JJASON에 대한 일부의 예측장을 제시해 보고자 한다. 첫 번째로 ENSO와 관련된 예측장을 살펴보게 된다. SST의 초기장 및 실시간으로 제공되는 관측자료들을 통해 현재의 SST의 상황에 대해 파악한 후, 앞으로 6개월 동안의 SST의 예보장을 살펴본다. 그림 7은 앞으로 6개월 동안의 SST의 예보장을 결정론/확률론적으로 살펴본 그림이다. 해당 예측장의 초기장은 2017년 5월 1일과 5일의 초기장이 적용되었고, 초기장 당시 ENSO의 상황은 적도 태평양 전반에 걸쳐 약하게 warm anomaly가 분포되어 있었다. 5월에 예측된 SCoPS의 예측장을 살펴보면, JJA,

SON에 걸쳐 적도 태평양 대부분의 해상에서 warm anomaly를, 인도양 일부에서 cold anomaly를 예측하고 있으며 확률예보에서도 동일한 결과를 보여주고 있다. Nino 3.4 지역에서의 시계열 예측에서도 6월에서 11월까지 계속해서 높은 SST 아노말리를 보일 것으로 예측하며, 이를 엘리뇨/중립/라니냐로 나누어서 생각했을 때 엘리뇨와 중립의 확률이 동일하게 나타나는 7월을 제외하고 모두 엘리뇨일 확률이 높게 나타나고 있다 (그림 8). 실제로 NCEP CPC에서 제공하는 관측치에서 6월 Nino 3.4 index가 0.55로 약한 엘리뇨로 발달되었다가 7월부터는 SST가 낮아지며 8월부터는 음의 아노말리로 진행되며 중립을 나타내고 있다. 참고로, 5월에 진행된 SCoPS의 6개월 예측장에서는 다음과 같이 나타났지만, 6월에 진행된 SCoPS의 예측장에서는 전 6개월을 중립상태로 예측하였다. 또한, 앙상블 멤버가 총 10개로 확률예측에 사용되는 샘플 사이즈가 매우 작다는 것도 고려해야할 사항 중에 하나이다.

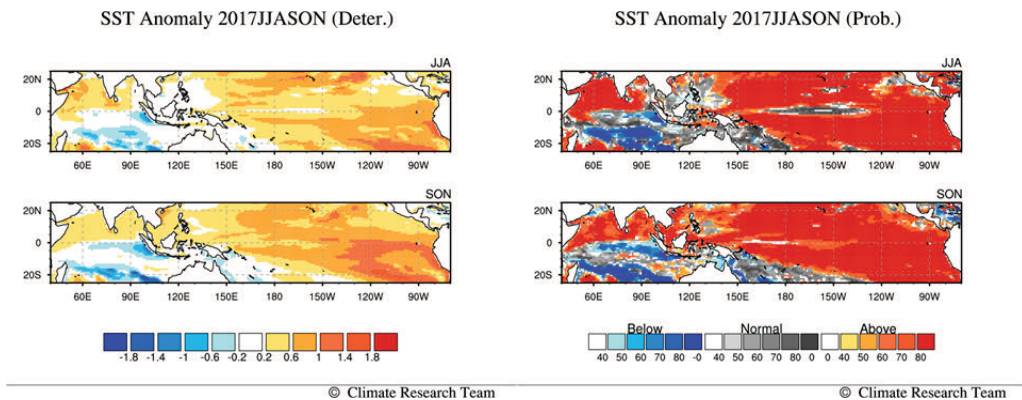


Figure 7. Spatial distribution of deterministic and probabilistic forecasted SST anomaly for the JJA (1month lead) and SON (4month lead).

그림 9에서 예측된 해면 기압의 아노말리에 대한 패턴을 월별 및 3개월 평균으로 나타내고 있다. JJA는 동아시아 여름 몬순과 관련된 계절으로 주로 북태평양 고기압의 위치를 눈여겨 볼 필요가 있다. 6월 예측장에서 살펴보면 북태평양 지역에서의 음의 아노말리와 동아시아 내륙에서의 양의 아노말리가 두드러진다. 또한 인도양에서 Maritime Continent에 이르기까지 양의 아노말리가 나타나고 있는 것이 특징이다. 7월예측장에서도 이러한 패턴이 유지가 되고 있지만, 적도 태평양까지 양의 아노말리가 확장이 되고,

북태평양에서 나타나던 음의 아노말리가 우리나라 아래까지 길게 나타나며 우리나라 북쪽으로 양의 아노말리가 이동하는 것이 특징이다. 8월 예측장에서는 고기압성 아노말리가 더욱 확장하고 음의 아노말리가 줄어들고 있는 모습을 보인다. 이러한 기압장의 패턴은 앙상블 멤버 중 하나라도 극한 값을 보이게 되면 평균장에서 영향을 받을 수 있다. 이를 위해 확률 예측을 통한 예측장을 함께 제시한다(그림 10). 결정론적 예측장에서 보였던 양의 아노말리와 음의 아노말리의 가장자리선은 확률예측장에서 그 모양이 사라지지만 두 패턴은 동일하게 나타나고 있다. 이러한 기압형태는 예측된 바람장에서도 연관하여 분석할 수 있다. 북태평양 지역에서의 음의 아노말리와 동아시아에서의 양의 아노말리로 인해 우리나라에서는 아노말리스 동풍이 예측되고 있다. 이러한 바람장을 견주어 볼 때 우리나라는 건조한 패턴이 우세함을 생각해 볼 수 있다.

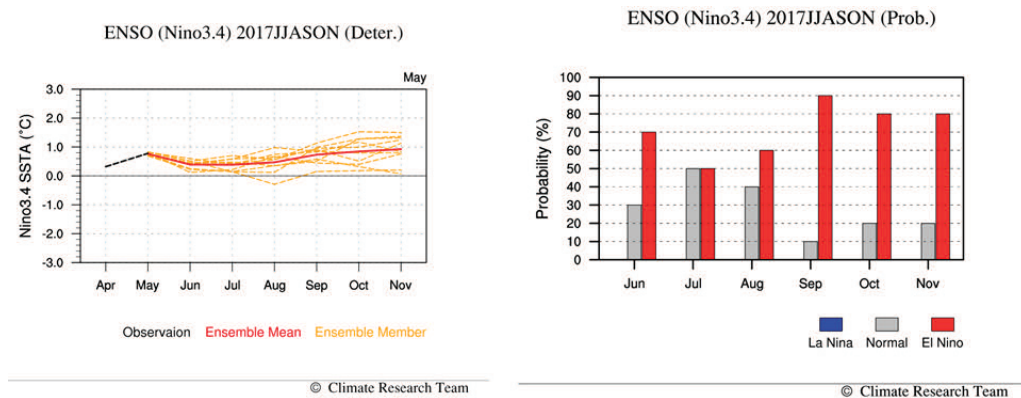
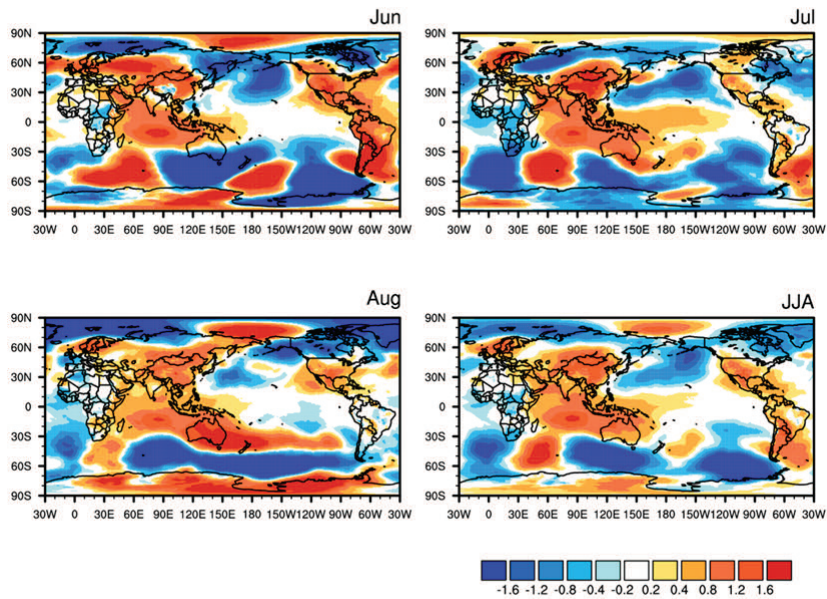


Figure 8. Time series of forecasted Nino 3.4 index and its probability for El-nino/Normal/La-nina for JJASON.

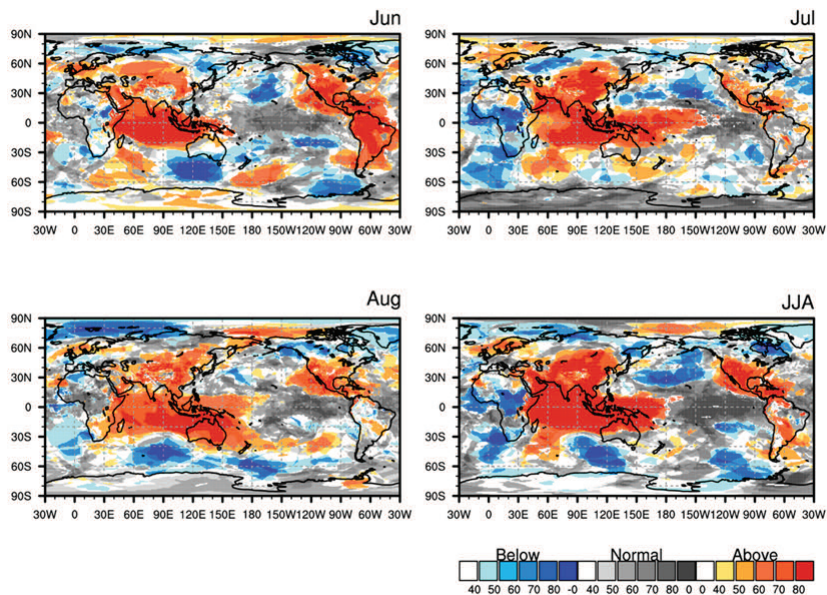
Sea Level Pressure Anomaly 2017JJASON (Deter.)



© Climate Research Team

Figure 9. Spatial distribution of forecasted SLP anomaly from SCoPS for JJA.

Sea Level Pressure Anomaly 2017JJASON (Prob.)



© Climate Research Team

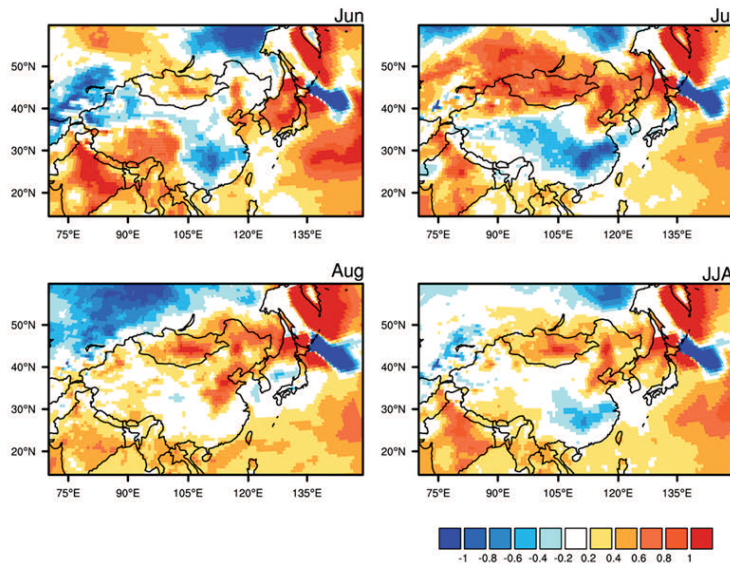
Figure 10. Probability spatial distribution of forecasted SLP anomaly from SCoPS for JJA.

그림 12-15는 최종적 예측변수인 기온과 강수를 결정론/확률론적으로 나타낸 예측장이다. 한반도 2m 기온의 각각의 월별 예측을 살펴보면 6월은 평년보다 높은 기온을 보이고 있으며 7, 8월은 큰 특징이 잡히지 않고 있다. 이는 확률예보에서도 동일하게 나타났다(그림 12, 13). 한반도 강수의 경우 결정론적 예측장에서는 6, 8월에 강한 건조 시그널을 예측하며 7월의 경우 남쪽으로 강수형태를 보이지만 북쪽으로는 건조함을 예측하고 있다. 하지만, 확률예측의 경우에는 강한 특성들이 앙상블 별로 상쇄되어 건조 형태의 일부가 한반도 주위로 나타나고 있다(그림 14, 15). 이를 토대로 6월은 고온건조한 북동풍의 영향을 받을 것으로 예측하고 7, 8월 한반도 남쪽에 위치한 저기압 밴드의 이동 및 발달을 주의해야 할 것으로 예측한 바 있다.

실제로 2017년 여름철 한반도 기온/강수를 살펴보면(그림 16, 17), 우리나라 동쪽 상층에 기압골이 위치하면서 북태평양 고기압이 서진하여 매우 건조하고 평년보다 다소 높은 기온을 보였다. 7월은 폭염이 두드러져 평년보다 매우 높은 기온을 나타냈으며, 강수는 중부에 집중되어 평균적으로는 평년과 비슷하게 나타났다. 8월의 경우 평년과 유사한 기온을 보였으며 강수는 평년대비 87% 정도로 건조하게 나타났다. SCoPS의 예측장과 비교해 보았을 때 아노말러스 동풍을 보이며 높은 기온과 건조한 시그널을 예측한 점에서 높은 평가를 줄 수 있지만, 상층 기압골의 패턴이나 중위도 기압계의 일부 패턴들은 계통적 오차를 띄며 예측성이 떨어지는 단점을 보이고 있다. 또한 앞선 연구에서 진행된 MME의 참여 모형들과의 비교에서도 SCoPS의 여름철 동아시아 몬순 예측 성능이 우수하게 나타났다는 점을 참고하여 여름철 예측에 신뢰도를 줄 수 있다.

2017년 여름철 예측을 예로 들었지만, 이와 같은 예측 및 분석 토의가 매월 중순 같은 형식의 예측장들을 이용하여 이루어지고 있으며, 지난 예측들도 관측과 함께 분석하여 SCoPS의 예측 성능에 대해 논의하고 있다. 또한 예측이 관측과 다르게 나타난 경우에는 그에 대한 이유가 무엇인지에 대해서도 일부 분석하고 있다. 약 1년에 걸친 SCoPS의 실시간 예측 및 여러 검증들을 통해 SCoPS가 동태평양 SST를 다소 높게 모의하고 있음을 확인하였고 그 결과 ENSO에 대한 대기의 반응을 과도 혹은 과소 모의하고 있음을 확인하였다. 이는 다음 섹션에서 다시 다루기로 한다. 또한 여러 기후 변동성들을 기반으로 SCoPS의 예측 특성이 어떻게 나타나는지도 진행되고 있다. 추후 real-time으로 예측된 자료의 성능 평가 역시 수행될 예정이다.

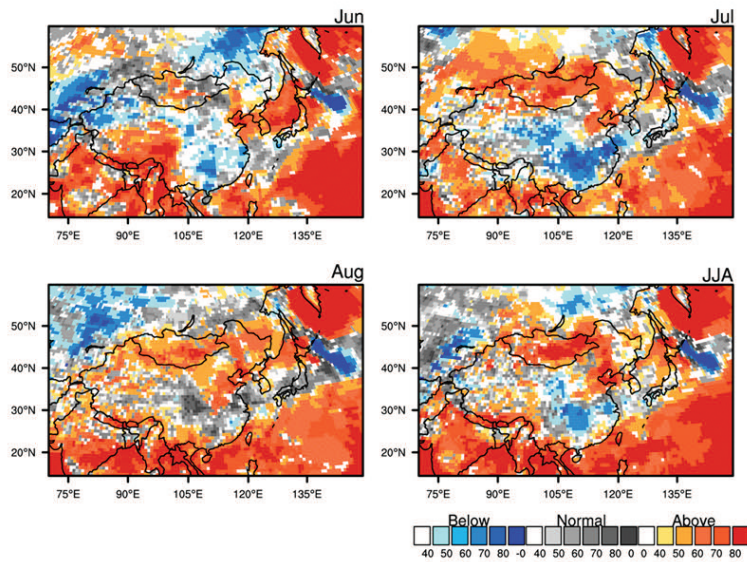
2m Temperature Anomaly 2017JJASON (Deter.)



© Climate Research Team

Figure 12. Spatial distribution of forecasted 2m temperature anomaly over East Asia from SCoPS for JJA.

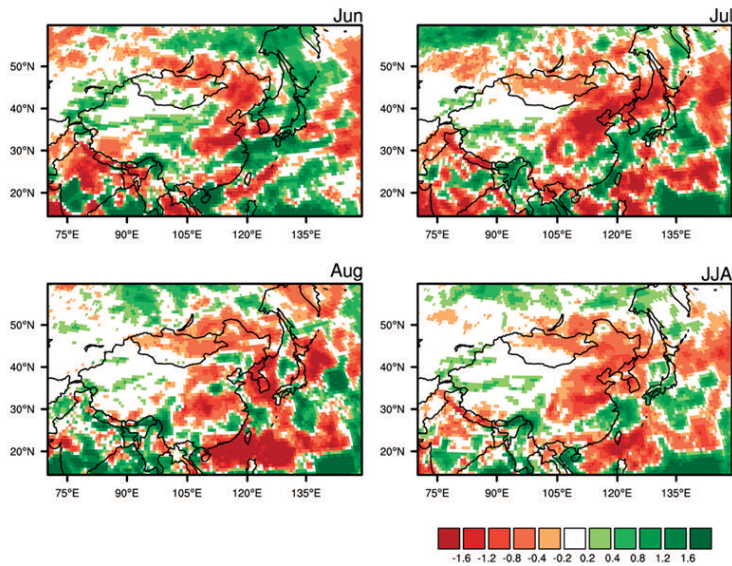
2m Temperature Anomaly 2017JJASON (Prob.)



© Climate Research Team

Figure 13. Probability spatial distribution of forecasted 2m temperature anomaly over East Asia from SCoPS for JJA.

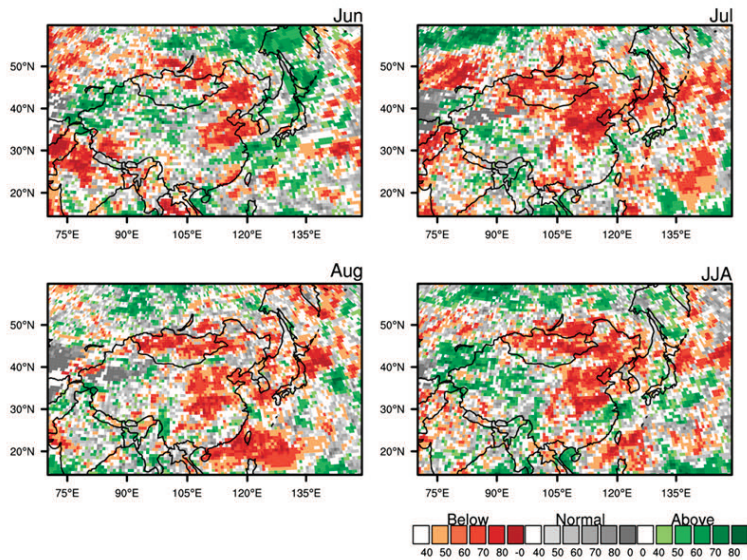
Precipitation Anomaly 2017JJASON (Deter.)



© Climate Research Team

Figure 14. Spatial distribution of forecasted precipitation anomaly over East Asia from SCoPS for JJA.

Precipitation Anomaly 2017JJASON (Prob.)



© Climate Research Team

Figure 15. Probability spatial distribution of forecasted precipitation anomaly over East Asia from SCoPS for JJA.

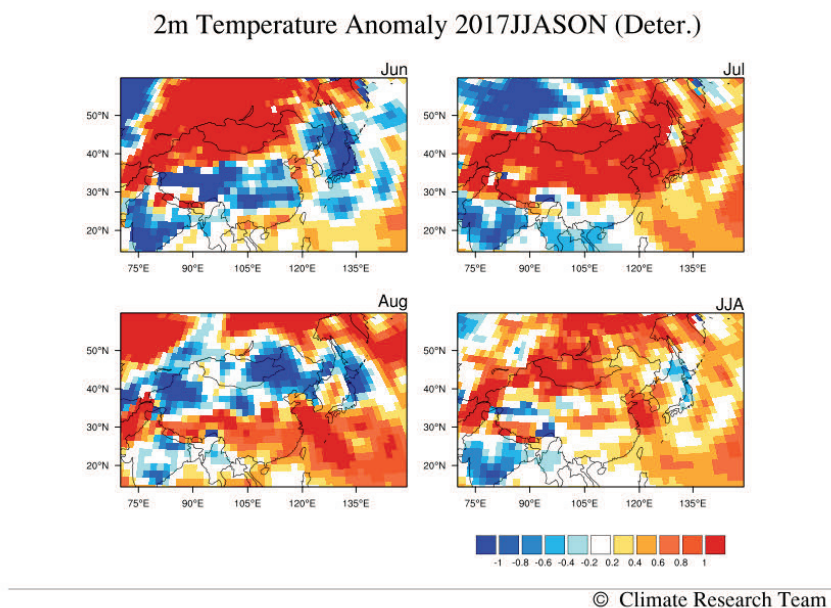


Figure 16. Spatial distribution of observed 2m temperature anomaly over East Asia from NCEP reanalysis data II for JJA.

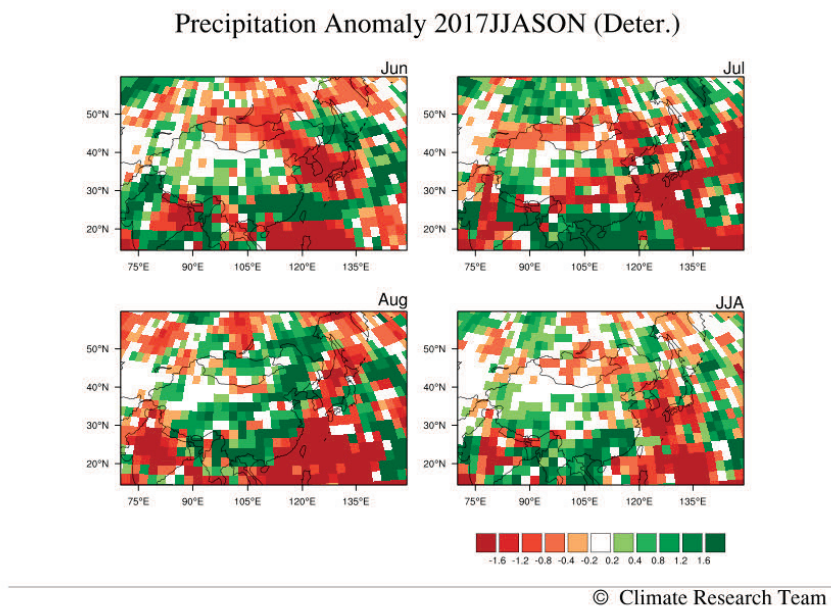


Figure 17. Spatial distribution of observed precipitation anomaly over East Asia from CMAP for JJA.

3.2 SCoPS의 개선

3.2.1 해양 초기장의 영향

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

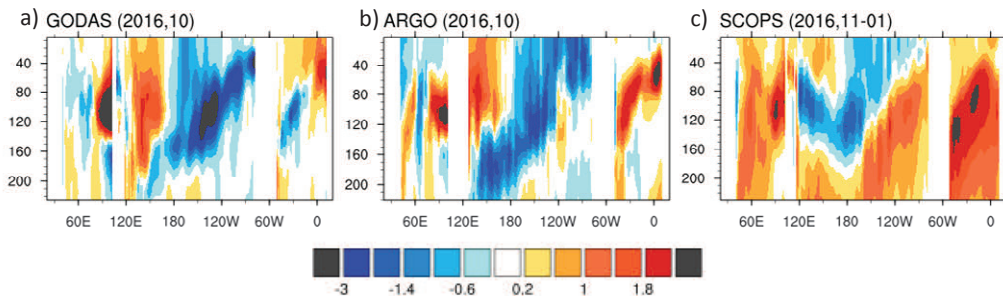


Figure 18. Vertical distribution of a) reanalysis, b) observed, and c) assimilated ocean subsurface temperature averaged $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$.

그림 18a와 b에서 보이는 결과는 2016년 10월 평균 GODAS 재분석 자료와 quality check가 진행된 Argo 기온 데이터의 연직 아노말리 분포 그림이다. SCoPS는 1일과 5일에 해당하는 초기장이 예측에 사용되기 때문에 가장 가까운 날짜인 11월 1일의 데이터를 비교하였다(그림 18c). 위도 $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$ 에서 평균되었으며 하얗게 나타나는 부분이

육지지역이다. 자료동화가 진행되는 연직 200m 근처까지 비교하였다. GODAS와 데이터에서는 서태평양 표층에서 warm 아노말리가 중태평양에서 동태평양에 이르기까지는 cold 아노말리가 지배적이다. 인도양 약 120m 수심의 해양에서도 warm 아노말리가 동일하게 나타나고 있다. 대서양 표층에서는 warm 아노말리가 동일하게 나타나며 Argo에서는 존재하지 않는 cold 아노말리가 GODAS 자료에서 약 100m 아래로 나타나고 있다. GODAS 재분석 자료와 Argo 관측데이터 사이에 차이가 다소 존재하지만 큰 패턴은 동일하게 나타나고 있다. SCoPS 초기장에서 보이는 해양 연직 온도 아노말리에서도 서태평양 상층의 warm 아노말리와 동태평양 상층의 cold 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 대서양 전체에 과도하게 나타나는 warm 아노말리 역시 관측과는 비교되는 현상이다. 이러한 계통적 오차는 SCoPS 모델로부터 기인한 것으로 보이며, 1982년 초기장 이래로 꾸준히 나타나는 것이 특징이다.

해양의 온도가 대기에 반응하기에는 시간이 필요하기 때문에, 해양의 subsurface 온도가 과도하게 따뜻하게 유지되고 있는 것은 짧은 선행시간에서는 큰 영향이 없을지도 모른다. 하지만, 동태평양 subsurface의 따뜻한 온도 아노말리는 용승작용을 통해 동태평양 해수면 온도 증가를 가져오게 되고 이는 엘니뇨 반응과 유사한 효과를 가져온다. 실제로, 과거재현자료로부터 SCoPS의 검증 및 특성분석을 통해 SCoPS의 ENSO 반응이 과대 혹은 과소하게 모의되고 있음을 확인하였다. 특히 강력한 엘니뇨로 기록되는 이번 2016-2017년 예측 결과에서 SCoPS는 특히 Nino3.4 지역의 SST가 실제보다 높게 나타났고, 선행시간이 길어질수록 더욱 강해짐을 확인한 바 있다.

이러한 이유로 해양 초기장의 오차를 줄일 수 있는 방법들이 조사되었다. 1982년부터 2013년까지는 현재 사용가능한 XBT, PFL 등의 해양 프로파일 데이터들을 자료동화에 사용한다. 하지만 2014년부터는 실시간 기후예측을 위해 실시간으로 사용 가능한 Argo 데이터만을 자료동화에 사용한다. 연직 station 격자로 이루어져 있는 Argo 데이터를 실시간으로 다운받아 SCoPS의 격자로 변환하는 과정이 Matlab 툴을 사용하여 진행되는데, 초창기 SCoPS 개발 코드에는 SCoPS 격자로 변환하는 해당 프로세스에서 위도와 경도를 입력하는 부분에 오류가 존재했다. 이러한 오류 인해 Argo 데이터가 실제 해당하

는 위·경도로 동화되지 못하는 문제가 발생했고, 현재 이러한 오류는 수정되었다. 수정된 코드는 Argo 데이터가 실제 적용되는 2013년 1월 1일에 해당하는 초기장부터 적용되어 다시 수행이 되었고, 2013년 1월부터 현재까지의 초기장이 새로 생산되었다.

새롭게 생산된 초기장으로부터 적분된 매월 6개월 예측장이 새롭게 적분되었다. 수정된 Argo 데이터로 인한 예측성능 차이를 살펴보기 위해 2016년 겨울철 계절예측 자료를 예로 들어 살펴보기로 한다. 우선 초기장의 차이를 살펴보기 위해 기존의 초기장과 새롭게 생산된 초기장, 두 초기장의 차이를 그림 19에 나타내었다. SST는 CFS의 데이터를 사용하기 때문에 두 실험 사이에 큰 차이가 존재하지 않지만, 데이터가 많이 분포되어 있는 지역에서 국소적으로 SST의 변화를 볼 수 있다. 실제적으로 데이터의 변화가 이루어지는 연직 온도 아노말리의 차이를 보면, 일정하게 나타났던 동태평양 상·하층에서 중태평양 하층까지 이어지는 warm 아노말리가 수정된 실험에서 다소 완화가 되는 것을 알 수 있다. 대서양에서 과도하게 나타나는 warm 아노말리 역시 일부 완화가 되고 있다. 하지만 최대 1도 내외의 차이로 여전히 큰 오차가 존재하고 있다.

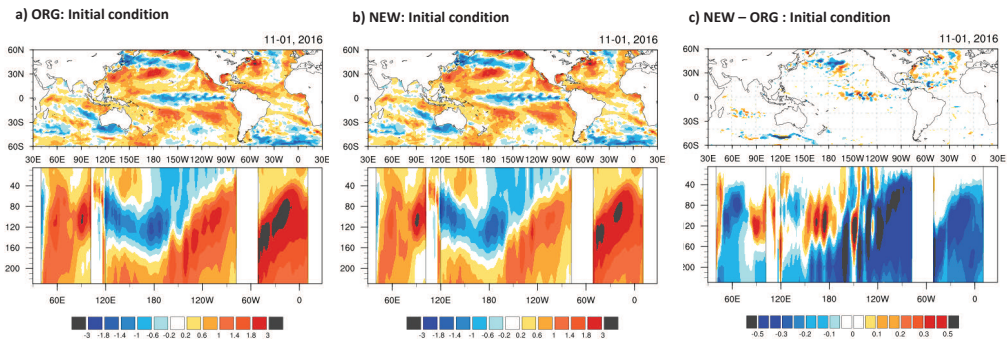


Figure 19. Spatial distribution of assimilated SST and vertical distribution of assimilated ocean subsurface temperature averaged 5°S – 5°N for (a) original version and (b) its difference between original and new version.

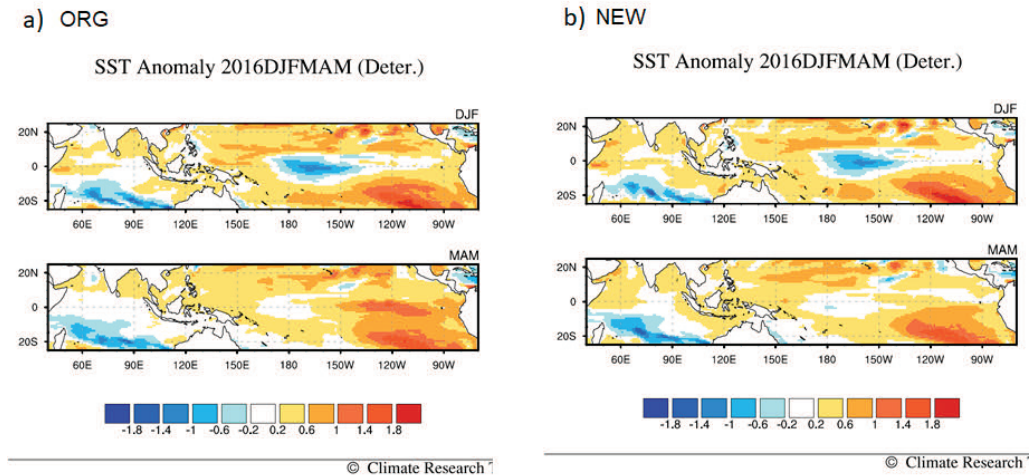


Figure 20. Spatial distribution of forecasted SST anomaly over Tropics from SCoPS for DJF (1mon lead) and MAM (4mon lead) from (a) original version and (b) new version.

새롭게 생산된 초기장과 기존의 초기장을 사용한 버전의 6개월 예측 SST 아노말리를 그림 20에 나타내었다. 첫 3개월 평균인 DJF의 SST는 수정된 버전의 결과와 기존의 결과가 거의 유사하게 나타난다. 하지만 다음 3개월 평균인 MAM의 결과는 적도 태평양 지역에서 제법 차이가 보인다. 기존의 MAM기간의 SST 예측장을 보면 동태평양에서 중앙까지 SST 아노말리가 최대 1.8°C 이상의 엘리뇨에 해당하는 예측치를 보이고 있다. 하지만, 수정된 프로세스로부터 예측된 결과에서 이러한 warming 아노말리는 찾아볼 수 없다. 기존의 결과에서 이러한 엘리뇨 반응은 subsurface의 warm 아노말리가 시간이 진행될수록 해수면에 영향을 주어 나타난 것이라고 볼 수 있다. 이로서 수정된 모델에서는 기존에 과도하게 모의가 되던 엘리뇨 반응을 다소 줄여줄 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

SST의 변화는 대기 변수의 예측에도 영향을 준다. 그림 21과 22에서 새롭게 예측된 기온과 강수의 결과를 기존의 결과와 비교하여 나타내었다. 적도지역에서 선행시간이 짧을 때 SST가 큰 차이가 없었던 것에 비해 한반도를 포함한 동아시아의 기온과 강수는 1-month 리드에도 큰 차이를 보이고 있다. 이는 초기장에서 북태평양의 SST의 차이가 중위도 대기 기압계에 영향을 주었기 때문이라고 생각할 수 있다. 특히 12월과 2월의 한반도 기온 아노말리는 큰 차이를 보이고 있다. 큰 패턴은 동일하지만 한반도와 시베리

아에 이은 아노말리 패턴이 바뀌면서 평년과 비슷하게 예측하던 12월 기온이 양의 아노말리로 바뀌었다. 또한 엘니뇨 반응으로 보이는 2월에 나타나는 강한 양의 아노말리가 수정된 결과에서는 사라졌다. 동아시아 겨울철 강수는 그 양이 크지 않지만, 새로운 버전의 예측 결과에서는 한반도를 중심으로 패턴이 일부 변화한 것을 알 수 있다. 기온의 변화가 컸던 12월, 2월은 물론이고 1월 역시 강수 패턴이 변화하였다. 1월 강수 예측의 경우 기존의 wet에서 dry로 그 결과가 바뀌었다.

실제 한반도 관측 결과를 되짚어 보면, 2016년 12월은 평년보다 1.5°C 가량 높아 1973년 관측 이래로 5번째 높은 기온을 기록하였으며, 강수는 평년 대비 270% 가량 많이 내려 역대 2위를 기록하였다. 1월의 경우 시베리안 고기압과 알류산 저기압의 약화에 의한 영향으로 평년 대비 1.1°C 높은 기록을 보였으며 강수는 50.3% 건조하였다. 2월의 경우 기온은 평년 대비 1.6°C 높았으며 강수는 85.7%로 평년과 유사하였다. 한 가지 경우에 대한 결과로 단정 지을 수는 없지만, 12월 기온 및 강수, 1월과 2월 강수 등 전체적으로 기온/강수 모두에서 예측 결과가 기존보다 관측과 더 유사해 졌음을 확인할 수 있다. 해양 초기장의 오류 수정으로 인해 변화된 SST 및 연직 기온은 불과 1°C 안팎이지만, 예측 결과의 차이는 무시할 수 없다는 것을 확인했으며, 앞으로 남아있는 연직 기온의 오차를 줄일 수 있는 방안을 더 모색할 예정이다.

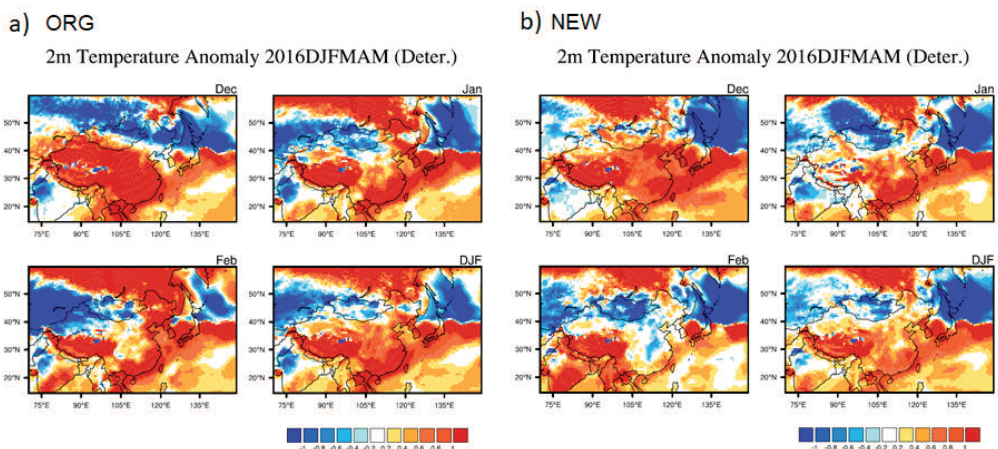


Figure 21. Spatial distribution of forecasted 2m temperature anomaly over East Asia from SCoPS for DJF from (a) original version and (b) new version.

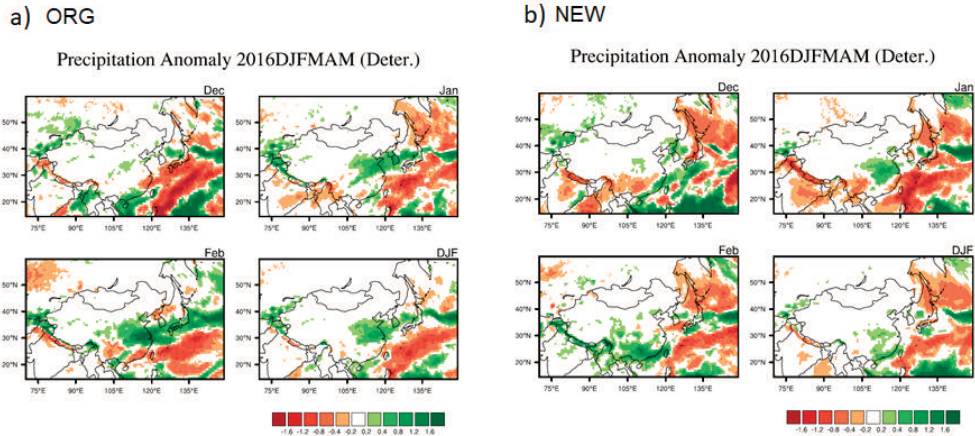


Figure 22. Spatial distribution of forecasted precipitation anomaly over East Asia from SCoPS for DJF from (a) original version and (b) new version.

3.2.2 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, submitted). 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 에러 수정을 통해 개선된 초기장을 적용 및 예측성 성능을 가져온 바 있다. 정확하고 신뢰도 높은 중장기 계절 예측 정보의 제공을 위해서는 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 QBO를 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.

앙상블 예측은 기후 모형이 가지고 있는 불확실성을 줄여줄 수 있는 방안으로 많이 사용되고 있으며, 앙상블 평균을 사용할 때 그 예측성이 향상되는 것은 많은 연구를 통해 증명되었다. 대부분의 현업 기관(예를 들어, 호주 기상청, 미국 NCEP, 일본 JMA 등)에서 앙상블 멤버는 30개 이상으로 구성되어 있다. ECMWF의 현업 모델의 경우 51개의 앙상블 멤버를 사용하고 있다. 최근 ECMWF NWP모형을 이용한 연구에서는 온도 예측은 3개 이상, 강수 예측은 5-7개 의 앙상블 멤버가 요구된다고 밝힌 바 있다(Hamill and Whitaker 2015). 또한 Hamill et al.(2004)는 앙상블 멤버의 증가가 2주 예측 성능을 향상시킬 것을 보인바 있다. 즉, 증가된 앙상블 멤버의 장점은 선행시간이 길어질수록 증가하는 예측 노이즈를 줄이고 예측 시그널의 범위를 줄이는 데에 있다고 할 수 있다. 현재 SCoPS는 가우시안 스프레드를 따르는 섭동을 구성하여 5개의 앙상블 멤버를 생성하고, 매월 1일/5일에 해당하는 시간차 초기장을 사용하여 총 10개의 앙상블 멤버를 구성하고 있다. 계절내 예측을 위해 가우시안 스프레드를 따르는 섭동을 10개로 구성하는 초기장을 이미 구성하였기 때문에 컴퓨팅 자원이 보장될 경우 가장 쉽게 접근할 수 있는 개선 방법으로 앙상블 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 플럭스 및 결과값을 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°C 이상의 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 KIAPS에서는 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.

3.3 SCoPS의 계절내 예측의 활용성 검토

3.3.1 계절내 예측의 필요성 및 배경

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)와 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 적

도지역에서 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). 역학 모형은 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 매트릭스를 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 앙상블을 사용할 경우는 약 4주의 선행시간 정도까지도 MJO의 예측 성능을 개선한다고 밝힌바 있다(Zhang et al. 2013). 그럼에도 불구하고 MJO를 비롯한 계절내 예측은 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 1일 정도의 예측성 향상을 보여왔으며, 현재 27일 선행시간 내에서 MJO를 잘 예측할 수 있다고 밝힌바 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/북서쪽에서의 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 모두가 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; Ding and Wang 2005; 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.(2012)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 BSISO 지수 예측에서 확장하여, 지수로부터 강수 및 대기 변수의 필드를 재구성하고 BSISO와 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 조사해

보고자 한다. 예측 시스템의 활용성을 높이기 위해 APCC BSISO에 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.

3.3.2 계절내 예측 시스템 구성

계절내 예측 시스템을 구성하기 위해 우선 S2S 프로젝트에 포함되어 있는 세계 기관들의 시스템을 살펴보았다(그림 23). 최근 여러 기관에서 계절내 예측의 필요성을 가지고 계절예측과 함께 계절내 예측 자료도 생산하고 있다. Huang et al.(2015)는 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 23에 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 BSISO 업무진과의 협의를 통해 결정되었다.

- 1) 예측 기간: D0-60
- 2) 해상도: T159L31
- 3) 앙상블 사이즈: 10
- 4) 예측 주기: weekly

5) Forecast 기간: 2014-2017

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 동화시키고 2017년 현재까지의 초기장을 생산하였다. 기존의 5개 섭동으로 구성된 초기장과 10개로 확장한 초기장의 비교는 추후에 더 진행될 예정이다.

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
HMCR	D 0-63	1.1x1.4 L28	20	weekly	Fix	1981-2010	weekly	10

Figure 23. Framework of each subseasonal model system on WCRP/WWRP S2S project.
(<https://www.ecmwf.int/en/research/projects/s2s>)

3.3.3 시험 케이스 검증

SCoPS의 계절내예측에 대한 기본 예측력 검증 및 활용도 평가를 위해 동아시아 몬순 및 BSISO와 연관이 있는 여름철에 대해 검토해 보고자 한다. Forecast 기간 중 첫 해에 해당하는 2014년 5월부터 9월까지의 계절내 예측장에 대한 검증을 진행하였다. 그 중 동아시아 여름몬순과 관련된 대기 순환장 및 변수들의 예측성을 일부 소개한다. 그림 24에서는 아시아 여름 몬순과 관련된 강수와 하층 바람장의 오차를 기간별로 선행시간 1 week 예측장의 평균으로 나타내었다. 선택된 기간은 5월 31일 - 6월 6일, 6월 14일 - 6월 20일, 6월 28일 - 7월 4일, 7월 12일 - 7월 18일, 7월 26일 - 8월 1일, 8월 9일 - 8월 15일이며, 동아시아 몬순 기간을 포함할 수 있게 구성되었다. 짧은 선행시간 에도 불구하고, 모형의 계통적 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 5월에서 7월까지 는 적도 몬순 지역에서 약한 동서 바람이 위치하고 있으며, 북서태평양에서 고기압성 순환 오차가 보인다. 또한 동아시아 몬순 기간과 연관하여 한반도를 중심으로 중위도엔 dry biases가 적도태평양으로는 wet biases가 우세하다.

선행시간이 길어질수록 예측성이 떨어지지만 오차의 특성을 파악할 수 있다. 그림 25 과 26은 3weeks, 5weeks 선행시간 예측장의 강수 및 하층 바람장 오차를 보여주고 있다. 그림 24와 비교하여 보았을 때, 3weeks, 5weeks 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. 5월 - 6월의 기간에서는 오차가 증가하는 지역이 지배적이지만, 7월 - 8월의 기간에 서는 오차가 오히려 감소하는 지역(특히 wet biases)이 존재하고 있다. 모형의 계통적 오차를 살펴보기 위해 그림 24-26에서 나타난 선행시간별 강수 및 바람의 오차를 평균 하여 그림 27에 나타내었다. 그림 24-26의 오차 패턴과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 더 smooth된 결과를 보이고 있다. 기간별로 자세히 살펴봤을 때는 선행시간에 따른 오차가 감소하는 지역도 존재했지만, 전체 기간의 평균으로 살펴보면 선행시간별로 오차가 증가하며 특히 1weeks에서 3weeks 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 기후 예측 모형을 기반으로 연구한 결과, 선행시간이 길어질수록 체계적 오차인 동서 바람의 약화는 심해지지만 실제 강수의 건조 오차는 심해지지 않음을 보인바 있다. 이러한 오차의 특성은 Western Pacific Subtropical High(WPSH)의 위치와 아시아 여름 몬순의 발달 시기와 관련이 있음을 언급했다. 더 자세한 분석이 필요하겠지만, SCoPS에서 보이는 5-6월, 7-8월의 오차 분포가 동아시아 몬순 발달과 연관된 순환장의 변화와 연관이 있을 것으로 생각된다.

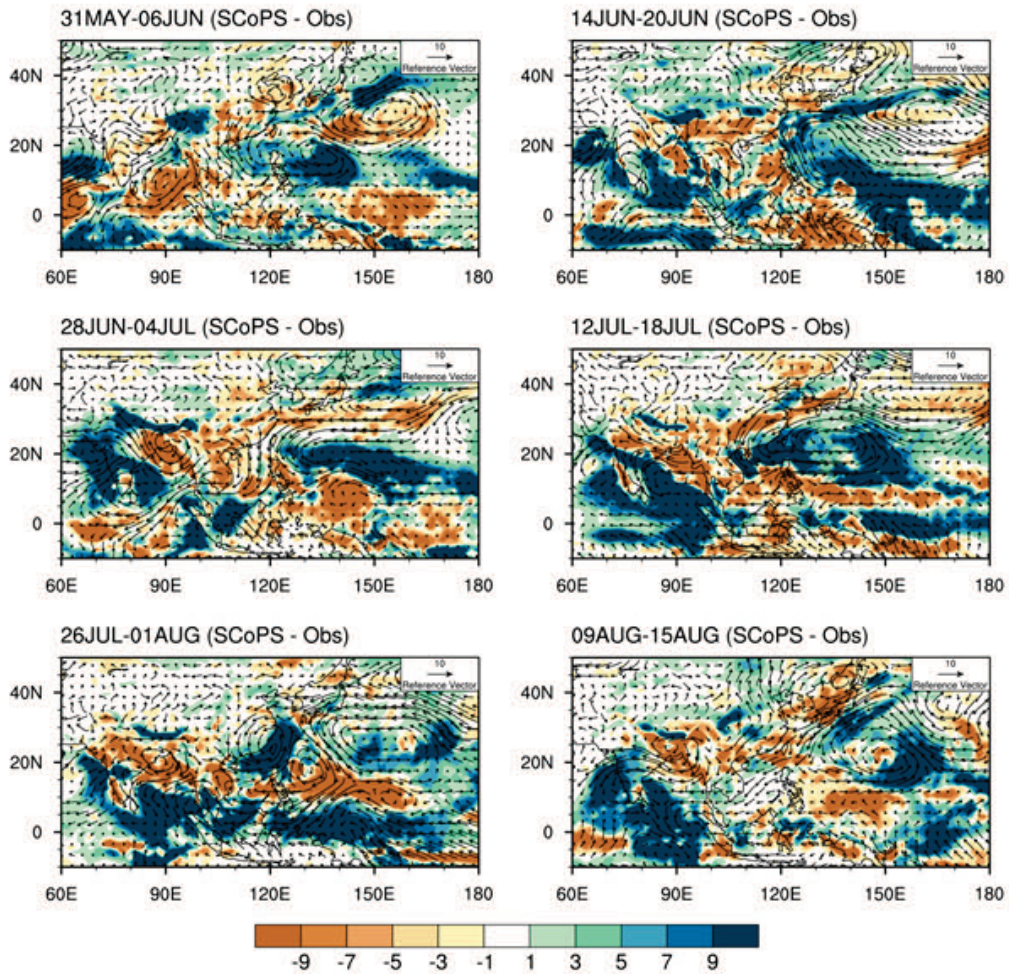


Figure 24. Difference between predictions and observation for precipitation (shadings) and 850 hPa winds (vectors) in different periods of summer monsoon season for predicted ensemble averages with 1 weeks lead time (7 to 13 days).

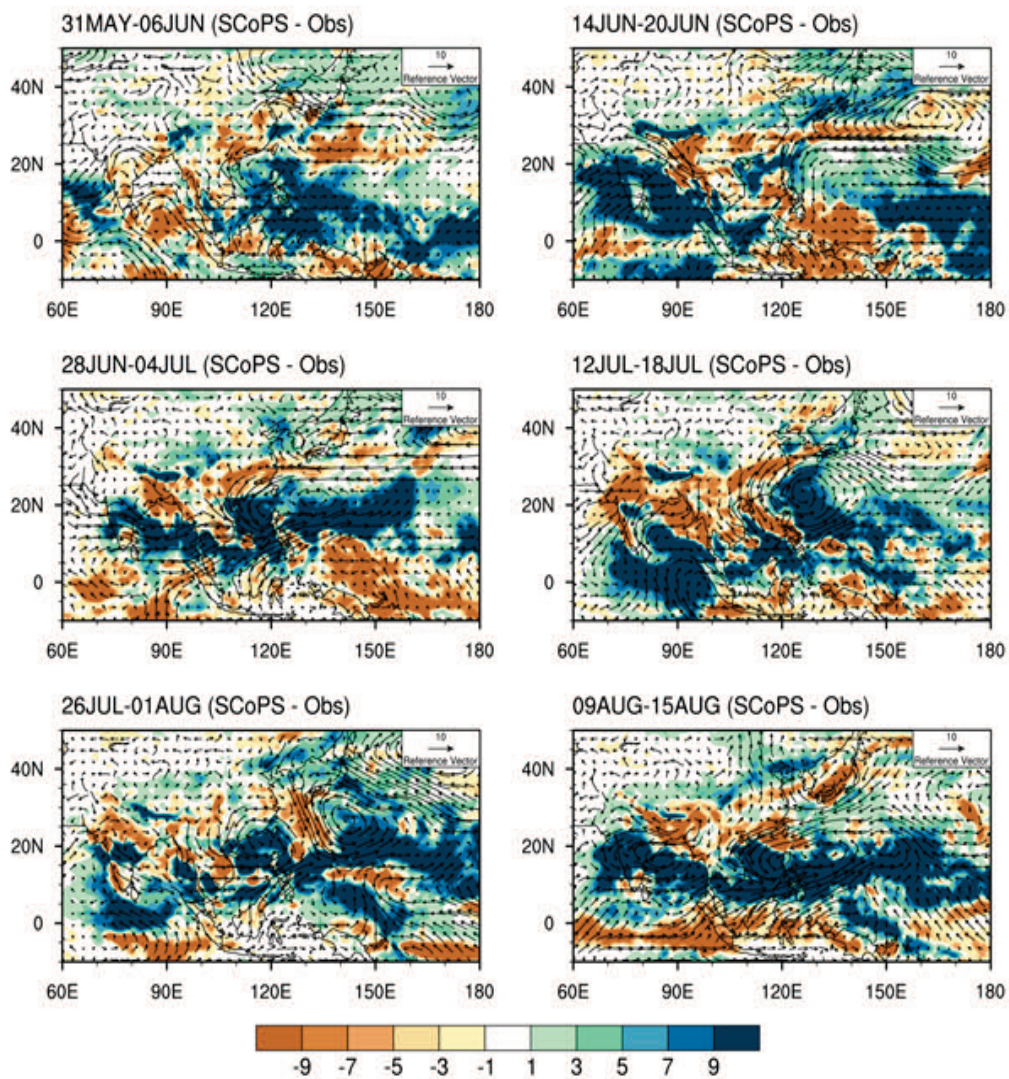


Figure 25. Same as Fig. 24 but for the ensemble predictions with 3 weeks lead time (21 to 27 days).

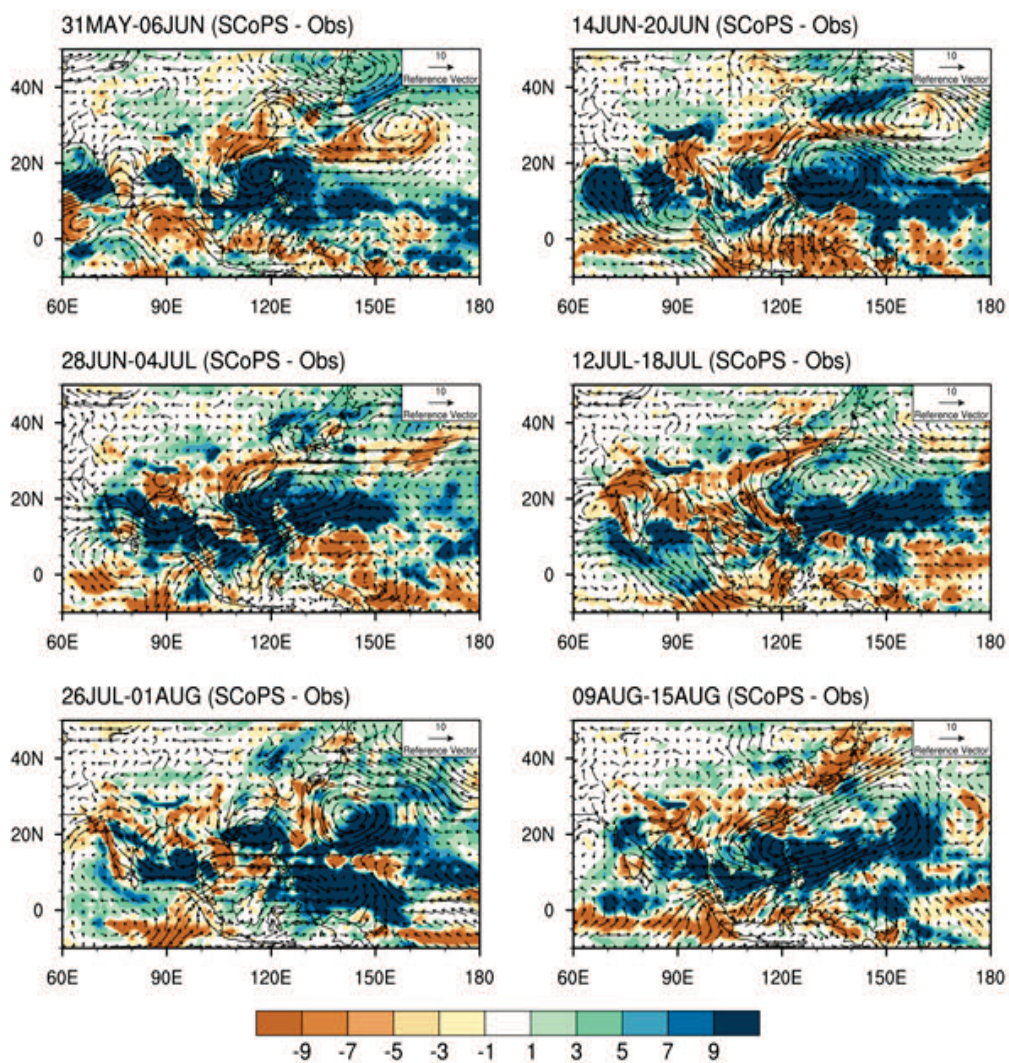


Figure 26. Same as Fig. 24 but for the ensemble predictions with 5 weeks lead time (35 to 41 days).

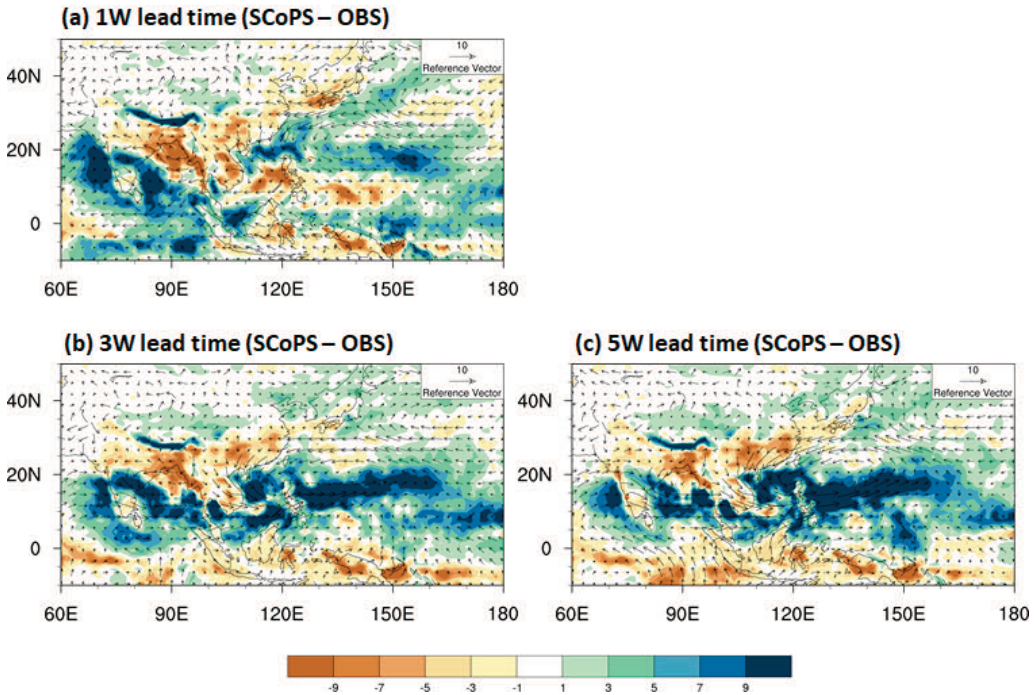


Figure 27. Difference between predictions and observation for precipitation (shadings) and 850 hPa winds (vectors) in averaged summer monsoon season periods (Same as Figs. 24-26) for predicted ensemble averages with (a) 1 weeks lead time (7 to 13 days), (b) 3 weeks lead time (21 to 27 days), and (c) 5 weeks lead time (35 to 41 days).

그림 24-27에 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 28에 나타내었다. 검은 실선으로 나타낸 CFS 재분석 자료의 하층 동서 바람의 시계열을 살펴 보면, 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 1weeks 선행시간 예측 결과(빨간 점선)에서 잘 보여주고 있으며 이후의 변동은 다소 약하게 모의하지만 비교적 잘 모의하고 있음을 볼 수 있다. 3weeks 선행시간 예측 결과(파란 점선)는 변동의 범위가 다소 줄어들었지만 그 패턴은 비교적 잘 모의하고 있다. 5weeks 선행시간 예측 결과(녹색 점선)는 변동의 범위가 줄어들고 패턴 역시 재분석자료에서 보였던 것과 멀어지고 있는 것을 알 수 있다. 상관관계 역시 1weeks 선행시간 예측 결과에서 0.544로 가장 높게 나타나며 점점 감소하는

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

분석된 동아시아 전체 영역이 동아시아 몬순뿐만 아니라 인도몬순 및 적도 태평양몬순 역시 포함된 것을 고려하여, 동아시아 몬순 지수를 통해 선행시간별 효과를 살펴보았다 (그림 29). 사용된 동아시아 몬순 지수는 Lee et al.(2014)에 의해 제안된 방법으로 두 지역(5° - 10° N, 130° - 150° E; 25° - 30° N, 110° - 130° E)의 하층 동서바람의 차이에 의해서 구해진다. CFS 재분석 자료로부터 구해진 동아시아 몬순 지수의 시계열을 살펴보면, 7월 초에 peak를 보인 후 7월 20일과 28일경에 각각 두 번째, 세 번째 peak를 보이고 있다. 1weeks 선행시간의 예측 결과를 보면, 6월 중순경과 8월 초의 과대모의를 제외하면 비교적 그 변동을 잘 모의하고 있다. 3weeks 선행시간 예측 결과의 경우 첫 번째, 세 번째 peak를 잘 모의하고 있는 반면 6월 중하순 및 7월 중순에 거쳐 전반적으로 과대 모의를 하고 있음을 알 수 있다. 하층 동서 바람과 마찬가지로 5weeks 선행시간 예측 결과에는 그 변동폭이 짧은 선행시간에 비해 크지 않으며 재분석 자료의 패턴과 차이가 있다. 상관관계 지수도 선행시간별로 각각 0.599, 0.430, 0.227로 선행시간이 길어질수록 값이 감소함을 보인다.

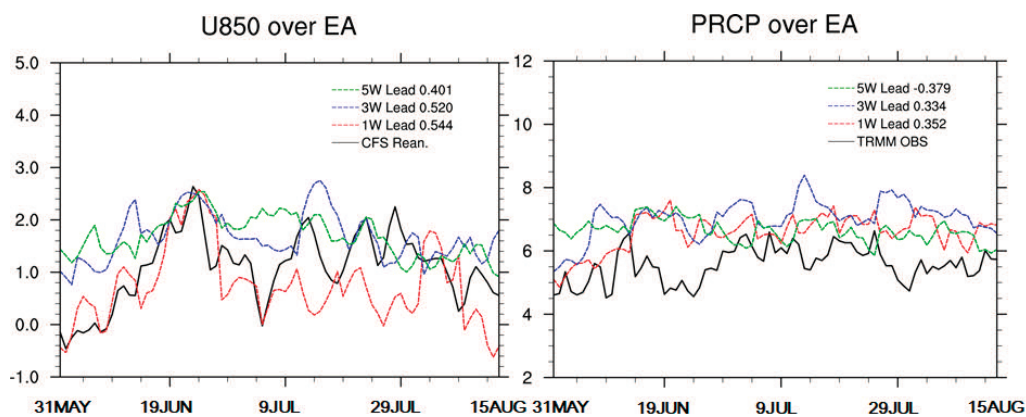


Figure 28. Variation of 850 hPa zonal wind (left) and precipitation (right) averaged over the East Asia region (10°S – 50°N , 60°E – 180°) for observation and SCoPS with different lead time

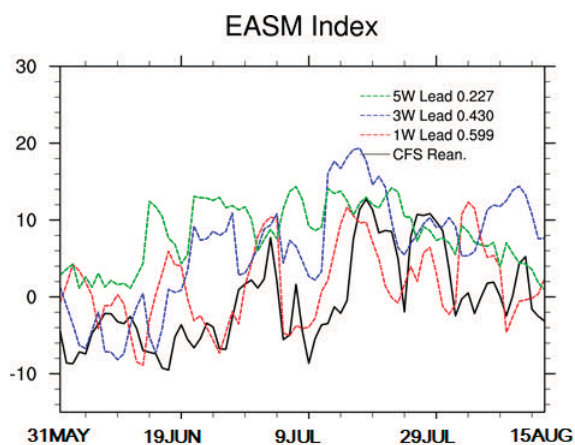


Figure 29. Variations of the East Asian Summer monsoon index for reanalysis and SCoPS prediction with different lead times

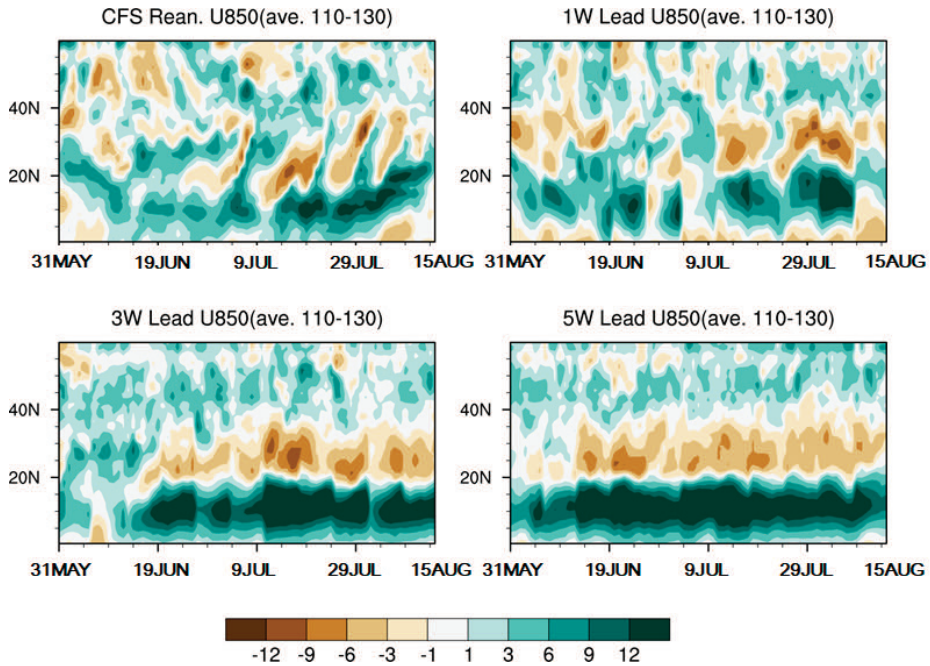


Figure 30. Latitude-time cross sections of 850 hPa zonal wind along 110° – 130° E for reanalysis and ensemble averaged predictions with different leads of time

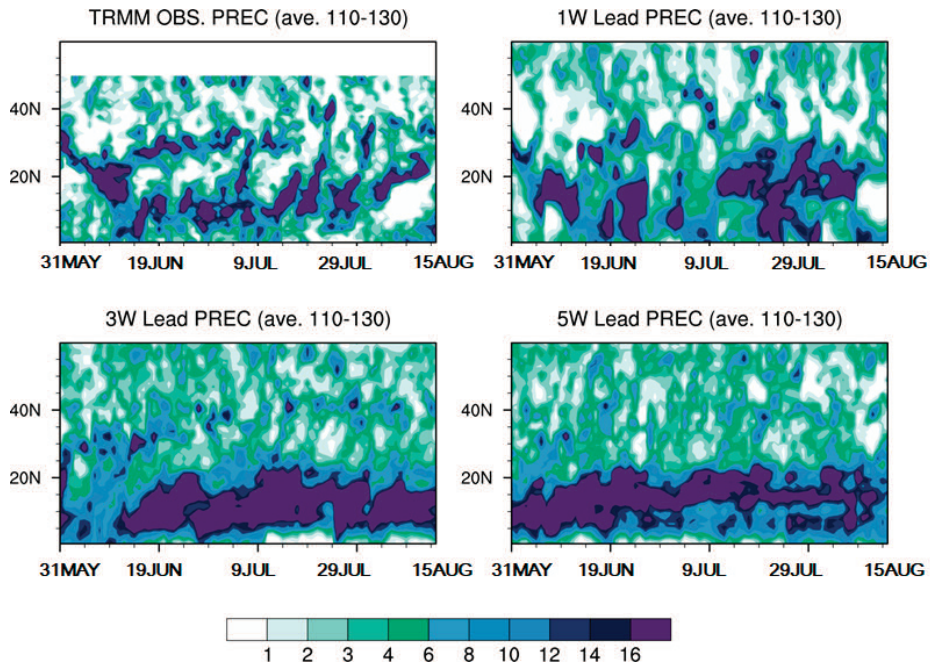


Figure 31. Latitude-time cross sections of precipitation along 110° – 130° E for TRMM observation and ensemble averaged predictions with different leads of time

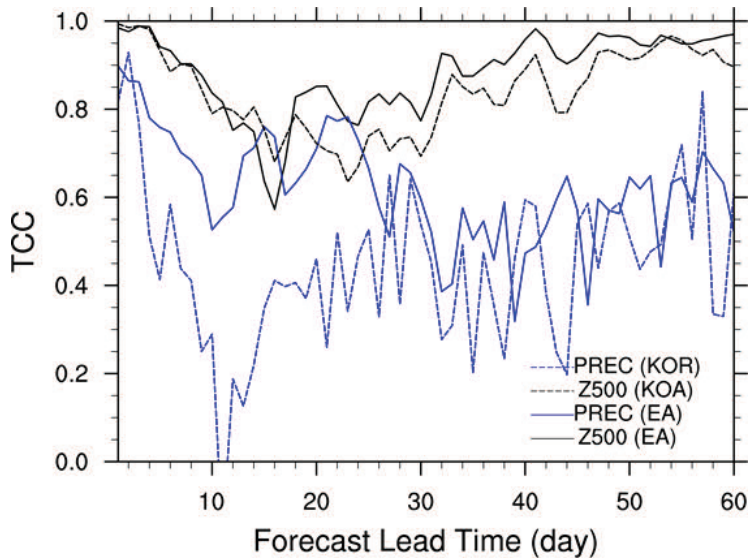


Figure 32. Evolution of temporal correlation coefficient of 500 hPa geopotential height and precipitation over EA (10°S–50°N, 60°E–180°) and KOR (20°N–50°N, 110°E–140°E) regions.

동아시아 몬순 지역에서의 선행시간별 예측성능을 좀 더 자세하게 살펴보기 위하여 그림 30과 31에서 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. 1weeks와 3weeks 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, 1weeks 선행시간의 예측 결과에서도 과대모의가 보이지만 관측에서 보이는 동아시아 몬순 밴드가 잘 모의되고 있다. 이러한 결과는 3weeks 선행시간 예측 결과에서 희미하게 나타나며 5weeks 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

5weeks 선행시간의 예측 결과보다 3weeks 선행시간의 예측 결과에서 더 두드러진다. 이러한 특징은 그림 24-26에서도 확인할 수 있다.

지역별, 시기별로 나타나는 선행시간별 오차를 종합해 보기 위해 아시아몬순 전체 지역(EA)과 실제 동아시아 몬순과 관련된 한반도 주변지역(KOR) 사이의 선행시간별 TCC를 500hPa 지위고도와 강수에 대해 나타내었다(그림 32). 각각 10개의 앙상블 멤버를 가지는 총 27개의 예보장으로부터 계산되었다(총 270cases). 역학모형으로부터 예측되는 대기 순환장의 예측력을 평가하는 지표로 많이 사용되는 500hPa 지위고도의 선행시간별 TCC는 60일 선행시간까지 0.5 이상의 상관관계를 보이고 있다. 동아시아 전체의 평균장으로부터 계산된 TCC가 한반도 주변지역의 평균으로부터 계산된 TCC보다 대부분의 기간에서 약간 높게 나타나고 있다. NWP의 한계라고 알려진 14days 선행시간으로 갈수록 결합 시스템의 초기 메모리가 소멸하기 때문에 TCC는 1에서 0.5까지 급격히 감소한다. 하지만, 대기-해양 상호작용 등의 기후시스템이 지배하기 시작하는 1months 선행시간 이후로 다시 0.8 이상의 TCC를 보이고 있다. 한편, 강수의 경우는 그 변동이 크게 나타나며 지역에 따라 특성도 다르게 나타난다. 동아시아 전체 영역의 경우 선행시간이 갈수록 TCC는 0.9 정도에서부터 서서히 감소하며, 1months 선행시간 이후로도 0.5정도의 TCC를 유지하고 있다. 한반도 지역의 TCC는 약 10days 선행시간까지 급격한 감소를 보이며 그 값은 0까지 떨어진다. 10days 선행시간 이후로 서서히 다시 증가하여 1months 선행시간부터 0.4~0.5 정도에서 변동성을 가지며 유지한다.

2-3weeks 선행시간에서 보였던 예측성능의 감소는 분명 고려해야 할 사항이지만, 공간 패턴(특히 동아시아 몬순 밴드의 북동 전파 패턴) 및 예측 변수들의 시계열 패턴에서 보이는 긍정적인 부분들은 계절내 예측시스템을 통해 충분히 신뢰도 있는 예측 정보를 기대할 수 있을 것이라고 사료된다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 2014-2016년의 예보기간 동안의 계절내 예측장을 생산하고 여름/겨울철 계절내 예측 성능을 검증할 것이다. 또한 APCC BSISO 예측 시스템에 참여하고 있는 다른 기관들과의 비교를 통해 SCoPS BSISO 예측 성능의 위치를 파악할 예정이다. 최종적으로는 APCC 계절내 예측 시스템을 안정적으로 구축함과 동시에 APCC BSISO 시스템에 참여모델로서 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 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 현업 시스템을 구축하였다.

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 그룹토의를 통해 예보장을 검증한다. 대기변수를 위해 NCEP에서 실시간으로 제공하는 CFS 재분석 자료를 사용한다. CFS의 재분석 자료는 연직으로 1000 - 10hPa 까지의 동서 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 리스트타트 파일에 넣힌다. 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. 과거재현자료의 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 서태평양 상층의 warm 아노말리와 동태평양 상층의 cold 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 대서양 전체에 과도하게 나타나는 warm 아노말리 역시 관측과는 비교되는 현상이다. 이러한 오차는 1982년 초기장 이래로 꾸준히 나타나고 있는 것이 특징이다. 해양의 온도가 대기에 반응하기에는 시간이 필요하기 때문에, 해양의 subsurface 온도가 과도하게 따뜻하게 유지되고 있는 것은 짧은 lead time에서는 큰 영향이 없을지도 모른다. 하지만, 과거재현자료로부터 SCoPS의 검증 및 특성분석을 통해 SCoPS의 ENSO 반응이 과다하게 모의되고 있음을 확인하였고, ENSO의 반응은 lead-time이 길어질수록 더욱 강해짐을 확인한 바 있다.

이러한 이유로 해양 초기장의 오차를 줄일 수 있는 방법들이 조사되었다. 1982년부터

2013년까지는 현재 사용가능한 XBT, PFL 등의 해양 프로파일 데이터들을 자료동화에 사용한다. 하지만 2014년부터는 실시간 기후예측을 위해 실시간으로 이용 가능한 Argo 데이터만을 자료동화에 사용한다. 연직 station 격자로 이루어져 있는 Argo 데이터를 실시간으로 다운받아 SCoPS의 격자로 변환하는 과정에서 위도와 경도를 입력하는 부분에 오류가 존재하여 동화가 제대로 이루어지지 못하는 현상이 발견되었다. 오류가 수정된 코드는 Argo 데이터가 실제 적용되는 2013년 1월 1일에 해당하는 초기장부터 적용되어 다시 수행이 되었고, 2013년 1월부터 현재까지의 초기장이 새로 생산되었다. 새롭게 생산된 초기장으로부터 적분된 매월 6개월 예측장이 새롭게 적분되었다. 수정된 Argo 데이터로 인해 예측성능이 향상됨을 확인하였다. 하지만 여전히 같은 위치에 큰 오차가 존재하여 추후 원인 파악 및 개선 작업이 더 필요할 것으로 보인다.

또한 본 연구에서는 SCoPS의 성능 향상에 도움이 될 만한 프로세스를 제안하였다. 앙상블 멤버의 확장 및 해상도 증가는 이미 계절 예측 모형의 개선에 많이 사용되고 있는 만큼 컴퓨터 자원의 확장과 고려하여 적용할 만하다. 또한 최근 많이 알려지고 연구되고 있는 지면 수분 초기화 기법을 통해 계절내예측 및 계절예측에서도 성능 향상을 가져올 수 있을 것이다. 하지만, SCoPS의 지면 모형이 우선적으로 개선되어야 할 것이며, 초기화에 사용된 모형과의 조화도 고려해야할 사항이다. 현재 SCoPS는 하루에 한번 대기와 해양, 해빙모형으로부터 계산되는 플럭스 및 결과 값을 상호교환하고 있다. 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 적용하여 예측성능을 가져올 수 있다. 이외에도 담수의 효과나 증발 프로세스의 개선, 적운모수화 및 운량모수화 등의 물리과정 개선을 통해 개선을 꾀할 수 있다.

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 기관

에서 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 구축하여 그 예측성을 조사하고, 그 활용성을 평가해보고자 한다.

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 결정되었다. 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. 지역별, 시기별로 나타나는 선행시간별 오차를 종합해 보기 위해 아시아몬순 전체 지역(EA)과 실제 동아시아 몬순과 관련된 한반도 주변지역(KOR) 사이의 선행시간별 TCC를 500hPa 지위고도와 강수에 대해 살펴보았다. 지위고도의 경우, NWP의 한계라고 알려진 14days 선행시간으로 갈수록 결합 시스템의 초기 메모리가 소멸하기 때문에 TCC는 급격히 감소한다. 하지만, 대기-해양 상호작용 등의 기후시스템이 지배하기 시작하는 1months 선행시간 이후로 다시 0.8 이상의 TCC를 보이고 있다. 하지만 강수의 경우, 동아시아 전체 영역에서는 1months 선행시간 이후로도 0.5정도의 TCC를 유지하고 있다. 한반도 지역의 TCC는 10days 선행시간 이후로 서서히 다시 증가하여 1months 선행시간부터 0.4~0.5 정도에서 변동성을 가지며 유지한다.

2-3weeks 선행시간 예측 결과에서 보였던 예측성능의 감소는 분명 고려해야 할 사항이지만, 공간 패턴(특히 동아시아 몬순 밴드의 북동 전파 패턴) 및 예측 변수들의 시계열 패턴에서 보이는 긍정적인 부분들은 계절내 예측시스템을 통해 충분히 신뢰도 있는 예측 정보를 기대할 수 있을 것이라고 사료된다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 2014-2016년의 예보기간 동안의 계절내 예측장을 생산하고 여름/겨울철 계절내 예측 성능을 검증할

것이다. 또한 APCC BSISO 예측 시스템에 참여하고 있는 다른 기관들과의 비교를 통해 SCoPS BSISO 예측 성능의 위치를 파악할 예정이다. 최종적으로는 APCC 계절내 예측 시스템을 안정적으로 구축함과 동시에 APCC BSISO 시스템에 참여모델로서 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

최근 APCC MME 예측 시스템 운영을 담당하는 실무진들과의 연구를 통해 SCoPS의 예측 성능 평가가 이루어졌다. 이러한 결과 및 약 1년에 걸친 준현업 시스템의 운영으로 SCoPS의 계절예측 성능에 대해 신뢰도를 가질 수 있었으며, 2017년 11월을 기점으로 APCC 대표 모델이 CCSM3에서 SCoPS로 교체될 예정이다. 따라서, 매월 APCC 공식 홈페이지를 통해 APCC MME 및 SCoPS의 6개월 예측 정보를 확인할 수 있다. 또한 계통적 오차가 뚜렷하게 나타나는 해양 초기장의 개선작업이 계속 진행될 예정이며, 그 외의 가능한 개선들도 계속 이루어 질 것이다. 시험 구축된 계절내 예측시스템은 2018년 자세한 검증이 진행될 것이며, 추후 APCC BSISO 지수 예측 시스템 및 계절내 예측 등에 활용될 것이다.

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
- Balmaseda, M., and D. Anderson, 2009: Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01701.
- Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. *Journal of Atmospheric Sciences*, **21** (3), 68–75.
- Anderson, J. L., 2001: An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2884–2903.
- Ding, Q., B. Wang, 2009: Predicting extreme phases of the Indian summer monsoon. *J. Climate*, **18**, 3483–3505.
- Gottschalck, J., M. Wheeler, K. Weickmann, F. Viart, 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.
- 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, and S. Kang, 2018: Seamless Coupled Prediction System (SCoPS): Assessment of East Asia climate variability on the APCC model retrospective seasonal prediction (1982–2013). *Clim. dyn.*, in review.
- Huang, J., K. Pegion, 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.

- Jiang, X., D.E. Waliser, P.K. Xavier, and Coauthors, 2015: Vertical structure and physical processes of the Madden-Julian oscillation: exploring deep model physics in climate simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 4718–4748.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., M.J. Martin, and P.R. Oke, 2014: Demonstrating the complementarity of observations in an operational ocean forecasting system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 2037–2049.
- 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.
- 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.
- Lee, J.-Y., 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, M.-I., H. S. Kang, D. Dim, D. Kim, H. Kim, and D. Kang, 2014: Validation of the experimental hindcasts produced by the GloSea4 seasonal prediction system. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50** (3), 307–326.

- Lee, S.-S., J.-Y. Moon, B. Wang, 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.
- 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.
- 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.
- Viar, F., 2014: Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **140**, 1889–1899.

- Viar, 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.
- Wang, B., 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, B., P.J. Webster, and H. Teng, 2005: Antecedents and self-induction of the active-break Indian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L04704.
- 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.
- Wheeler, M.C., 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.
- Wheeler, M.C., 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.
- Yun, K.S., K.J. Ha, B. Ren., J.C.L. Chan, and J.G. Jhun, 2009: The 30–60 day oscillation in the East Asian summer monsoon and its time-dependent association with the ENSO. *Tellus A*, **61A**, 565–578.
- 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

김선태 선임연구원

임아영 연구원

정여민 연구원

정혜인 연구원

연구보고서 2017-01

계절 예측을 위한 APCC in-house 모형의 현업 운영 및 활용

I S B N 979-11-5698-191-6

발 행 2018년 3월

발 행 인 정 홍 상

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.