

**국가 기후예측모델 공동개발 성과 진단·평가 체계 구축 및
지면과정 개선 기술개발**

**Test-bed Construction for Jointly Developing
National Climate Prediction Model and Land
Surface Processes Improvement**

**김해정, 신선희, 양유빈, 전종안, 함수련
기후사업본부 예측기술과**

2022.12.

APEC기후센터

평문 초록

우리나라 장기예보 지원을 위해 국립기상과학원은 국가 기후예측시스템을 현업 운영하고 있으며, 예측모델의 예측성 향상을 위한 기후예측모델 개발은 연구개발허브(국립기상과학원, APCC, 학계 및 산업계)에 의해 공동으로 이루어지고 있다. 이 과제에서는 공동개발체계 하에서 개발된 연구 성과들이 현업으로 효과적으로 전환(R2O) 되기 위한 공동개발 기반체계를 구축하고, 기후예측모델 내 지면성분 모델의 물리과정 개선방안을 제시함으로써 국가 기후예측모델의 예측성 향상에 기여하고자 하였다.

공동개발 체계에서의 주요 개선점들을 도출하고 개선 방안들을 제안함으로써 궁극적으로 국가기후예측시스템 공동개발의 기능을 보다 공식화, 체계화, 문서화할 기반을 제공하고자 하였다. 주요 제안으로는 첫째, 구조적 측면에서 4단계, 3요소 공동개발의 체계를 제시하였고 각 단계별 역할 범위와 현행 대비 개선점, 요소별 기능을 제안하였다. 둘째, 연구 환경적 측면에서 다섯 가지 주요 개선점을 도출하고 각각에 상응하는 개선 방안들을 제안하였다. 이를 통해 국가 기후예측시스템 공동개발이 체계적으로 운영되고 활성화되어 우리나라 장기예보 개선을 위한 협력의 성장 동력이 되길 기대한다.

공동개발 체계에서 개발된 기술들이 현업으로 전환되기 위해서는 테스트베드에서의 준현업 실험을 통해 제안된 기술의 현업 적합성과 과학적 효과를 선제적으로 검증받아야 한다. 이에 모델 개발에 따른 기후예측모델의 예측성능을 일관된 평가 잣대로 통합적으로 평가하는 표준평가 프레임워크를 구축하고자 하였다. 표준 평가프레임은 예측유형에 따른 정량적인 성능검증 파트와 프로세스 기반의 기후변동성 진단평가 파트로 구성하였고, 이를 통해 기후예측모델의 구조적 오차, 예측품질의 개선 정보를 제공하고 모델의 개선방안을 제공하고자 하였다. 올해는 표준성능평가 프레임의 단정예보, 확률예보, 앙상블예보의 메트릭을 구축하고, ENSO 진단평가 메트릭을 구조화하였다. 각각의 평가 메트릭은 선택된 평가항목의 예측성을 정량화하여 객관화된 스코어카드의 형태로 표출하였고, 이는 모델개발에 따른 예측성능의 변수, 시간, 계절에 대한 통합적인 개선율을 한 눈에 볼 수 있도록 설계하였다. 제안한 스코어카드가 모델 개발 성과의 현업 전환을 고려하는 의사 결정시 유용한 판단 근거가 되길 기대한다.

공동개발 체계에서 개발된 기술들을 현업에 적용하기 위한 가교 역할을 하는 테스트베드에서는 2020년부터 개발되고 있는 「해빙 물리 과정에 의한 계절내 규모 기후 예측 기술 개발」을 적용/평가하였다. 국가 기후예측모델은 겨울 지표 기온을 낮게 모의하는 계통적 오차를 보이는 것으로 알려져 있는데 해빙 물리 과정의 눈 반사율을 조정함으로써 이 오차를 개선하고자 하였다. 현업 기후예측모델과 동일한 환경에서 준현업 실험을 수행하여 기후에 미치는 영향을 분석하였다. 눈 반사율을 감소시킴으로써 기후예측모델의 지표 온도 오차가 감소하였고 겨울철 극-중위도 원격상관 모의 성능이 개선되었다.

1개월에서 3개월 정도 기후를 예측하는 기후예측시스템에서 지면모형은 토양수분과 같은 지면의 상태를 재현한다. 지면모형은 지면과 대기의 상호작용을 통하여 강수, 유출량, 증발산량, 토양수분 등 강수와 순 복사량을 분할하는 역할을 한다. 이 연구에서는 Noah, Noah-MP,

JULES 등 주요 3개 지면모형의 물과 에너지 성분에 대한 예측성 비교 및 분석하여, JULES 지면모형의 개선방안을 제시하고자 하였다. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 관측 Total Water Storage (TWS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)의 표층 및 근역층 토양수분과 증발산량, FluxCom의 현열과 잠열자료를 수집하여 지면모형에 대한 기준자료로 사용하여 물과 에너지 성분에 대한 상호 비교를 하였다. 비교를 위해서 대표적인 7개 유역을 선정하였는데, 대륙별 주요 유역 5개 유역(미시시피유역, 아마존 유역, 양쯔강유역, 메콩강유역, 머레이-달링유역)과 한반도 폭염 등 기후와 밀접한 관련이 있는 2개 유역 (고비 및 티벳유역)이다. 주요 3개 지면모형은 2007년부터 2011년 까지 총 5년 기간 동안 모의했고, 그 결과를 분석하였다. 전반적으로 3개 지면모형은 에너지 성분보다는 수문성분의 예측성이 떨어지고, 건조지역에서 수문성분과 습윤 지역에서 에너지성분 예측성이 현저히 떨어지는 결과를 보였다. 이러한 연구결과와 기후예측시스템의 시간규모 등을 고려하여 단기적으로 한반도와 근접해 있고 한반도 기후와도 관련이 큰 양쯔강 유역의 표층과 근역층 토양수분 예측성 향상을 위해 지하수 모듈 개선을 제안하였으며, 지하수 모듈은 미계측 유역 적용이 용이하고, 필수자료가 매우 간단하며, 계산비용이 작아 기후예측성 향상 목적과 더불어 현업 적용이 용이하도록 개선해야 할 것이다.

또한, 국가 기후예측모델(GloSea6) 내 지면과정 중 하천유출모델의 특성을 파악하고 개선점을 제시하고자 하였다. GloSea6는 상대적으로 간단한 하천유출모델을 사용하고 있으며, 모델내에서 모의되는 하천유출량은 관측과 비교하였을 때 과대모의하고 있음을 알 수 있었다. 해양에 전달되는 과도한 담수는 해양 혼합층에 영향을 주어 결국 양의 해수면 온도 오차에 기여하게 된다. 정확한 하천 흐름을 모의하고 대기-지면-해양 상호작용의 개선을 가져오기 위해서는 정교하고 현실적인 하천유출모델을 접합하는 것이 가장 바람직하겠으나, 현재 현업에서 사용 중인 GloSea6에 개선을 위해서 간단하고 직접적인 효과를 줄 수 있는 방법으로 하천유출모델의 해상도를 높여 해양으로 유출되는 담수의 양을 줄이는 것을 제안할 수 있다.

Executive Summary

This study is planned to contribute to the advancement of the national climate forecast system by establishing an infrastructure that can efficiently convert research results developed in jointly developing system to operation and by suggesting ways to improve the surface processes in the climate prediction model.

KMA and NIMS has been produced operational subseasonal-to-seasonal forecasts using a global climate forecast system named GloSea6. In order to accelerate the transition of research to operations (R2O) for the forecast system development, industry, academia, and research institute experts as well as KMA and NIMS have been cooperated in jointly developing projects. This study assists the projects in formalizing, organizing and documenting by suggesting ways of improving for major matters in the joint development activity. On the main suggestion, first, the joint development system of 4 steps process(planning for R2O, research development, pre-operational testbed, implementation) and 3 requisites(evaluation, communication, developmental protocol) is proposed in terms of structure. Second, in a research environment aspect, five major improvements including the reorganization of governance, better computational environment, actualized technical exchange, capacity building for climate modeling experts and strengthening communication within the community are driven and corresponding ways to resolve are proposed. It is hoped that the suggestion will make the jointly developing project be systematically operated and activated to become a key driver for the improvement of KMA' s subseasonal-to-seasonal forecasts.

The standard evaluation frame is developed as a three-year plan to provide consistent and comprehensive evaluation of subseasonal-to-seasonal forecast performance and to provide an objective basis for selecting R2O candiadates. The standard evaluation frame is designed with a performance part and a diagnostic part. The performance part contains a series of evaluation information for three aspects of the predictions: deterministic forecast, probabilistic forecast and ensemble characteristics. These evaluation metrics consist of quantitative indices that measure the model' s ability for each prediction type, which will provide systematic errors, prediction quality, and ensemble characteristics of the climate model. The diagnostic part includes a series of evaluation information in terms of four aspects that affect mid-latitude climate predictions on subseasonal-to-seasonal time scales: ENSO, NJO, SIC, and monsoon. The ENSO metrics package is constructed to assess the predictability of ENSO variability, teleconnections in climate prediction models, and to suggest model weaknesses and needed improvements. The configured performance/diagnostic evaluation metrics results are displayed as a one-page scorecard that shows the improvements of the developed system at a glance. We hope that the proposed scorecards will be a useful basis for decision-making on R2O transition.

APCC serves as a bridge, called “test-bed”, to apply technologies developed in R&D to the operation. We performed semi-operational experiments under identical environment to operation. GloSea6 is known to have a cold bias in winter time. The sensitivity tests to snow albedo are designed to reduce this cold bias following a technique proposed in academy. The results are compared with observation and operational hindcast. The experiments with adjusted snow albedo simulate similar pattern to operation in surface temperature bias. When the lead time is short (ex. 1-month lead), all experiments show similar predictability. But as the lead time is longer, the difference in predictability becomes clearer. It is found that cold biases are mitigated by applying 10%-reduced snow albedo. Improvement is significant in 2- and 3-month lead. On the other hand, direct effect on sea ice is not clear, probably because of the winter time when solar radiation is not much. The linkage between Arctic and midlatitude climate are also analyzed. It is known that two distinct influences of Arctic warming which may lead to cold winters over East Asia or North America, based on observational analyses and extensive climate model results. The results revealed that the operational hindcast fails to simulate the overall pattern of Arctic-midlatitude teleconnection for both the eastern Eurasian and North American regions. Circulation patterns associated with these teleconnection are not represented in operation. The experiment with 10%-reduced albedo simulates the overall pattern of Arctic-midlatitude teleconnection for both the eastern Eurasian and North American regions. We suggest that these results may help improve seasonal prediction of winter climate.

It is widely known that soil moisture is one of the predictability sources of subseasonal climate forecasts. Surface soil moisture controls precipitation and net radiation partitioning by interactions between atmosphere and land. This study aimed to elicit an improvement scheme for the JULES land surface model (LSM) by assessing the water and energy budgets simulated by the Noah, Noah-MP, and JULES LSMs in the seven selected major basins (Mississippi, Amazon, Yangtze, Mekong, Murray-Darling, Gobi and Tibetan basins) over the world. These LSM-simulated water and energy budgets were compared against the corresponding reference datasets: Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)-observed Total Water Storage (TWS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) soil moistures and evapotranspiration, and FluxCom latent and sensible heat fluxes. The Noah and Noah-MP LSMs were simulated on the Land Information System (LIS) and the JULES LSM simulated on the Rose/Cylc environment similar to the operational seasonal climate forecast system in Korea. The study period was five years from 2007 to 2011 considering the period of the collected FluxCom datasets. Overall, the performances of the three LSMs were higher for the energy components than for the water components, and especially, the performances in the dry basins (Gobi and Tibetan) were apparently low. Unlike water budgets, the results showed lower performances of the energy budgets in wet basins including Amazon. We drew out the improvement scheme for the JULES LSM which is enhancing the predictability in soil moistures by replacing the groundwater module in the JULES LSM with GrUB. We believe

that this implementation contributes to the increase in the operational seasonal climate forecast system in Korea.

To improve the surface processes in the climate prediction model, the characteristics of the current river routing model were investigated and pointed out the weakness. It was found that GloSea6 uses a relatively simple river routing model, and the simulated river storage is overestimated compared to the observation. Excessive freshwater delivered to the ocean affects the ocean mixed layer, which in turn contributes to positive SST biases. To simulate accurate river flow and air-land-sea interaction, it is most desirable to couple a sophisticated and realistic river routing model. As a simple method, it can be proposed to reduce the amount of freshwater flowing into the ocean by increasing the resolution in same river routing model.

국문 요약

본 과제에서는 국가기후예측모델 예측력 강화를 목적으로 공동개발 성과의 신속한 현업화를 위한 기반체계 정립과 지면모델 물리과정 개선 기술 확보를 위한 과업을 수행하였다. 공동개발 기반체계 정립을 위해서 R2O 프로세스와 표준평가체계를 구축하고, 준현업 실험 수행을 위한 테스트베드 실험환경을 구축함으로써 현업화 효율성 강화에 기여하고자 하였다. 이와 더불어 GloSea 시스템 내 지면성분 모델 JULES의 특성을 진단하고, 하천유출 모델 TRIP의 특성을 진단함으로써 지면모델 물리과정 개선방안을 제시하고자 하였다.

장기예보 지원을 위해 국립기상과학원은 국가 기후예측시스템인 GloSea6를 현업 운영 중이고 기후예측시스템에 대한 연구개발 성과의 효과적 현업화를 위해 학,연,관이 공동개발에 상호 협력하고 있다. 이 연구는 국가 기후예측모델 공동개발 활성화를 위해 우리나라 실정에 맞는 단계와 요소로 체계를 구조화할 것을 제안하고, 공동개발 연구 환경에서의 주요 개선 방안을 제안한다. 첫째, 구조적 측면에서 4단계, 3요소 체계의 공동개발을 제안한다. 4단계는 공동개발의 순차적 흐름을 고려하여 현업화 기획, 연구개발, 현업화 테스트베드, 현업화 실행을 의미하고 공동개발 활성화에 필요한 3요소로는 연구개발허브소통, 현업화평가, 개발프로토콜을 의미한다. 각 단계별 역할 범위와 현행 대비 개선점, 요소별 기능도 함께 제시하였다. 둘째, 환경적 측면에서 5가지 주요 개선점을 도출하였고 각각에 대한 개선 방안을 제안한다. 연구개발 협의체와 관련된 제도를 제정하고 정비함으로써 연구개발협의체의 기능을 활성화 해야 한다. 연구개발 전산 환경 개선을 위해 기상청 슈퍼컴퓨터에 대한 접근성을 개선하고 현업화 시급성을 고려한 자원 할당을 고려해야하며 커뮤니티 모델 개선이 필요하다. 모델 개발 기술 전수에 있어 공식적인 절차나 과업 내용 마련을 통해 현실적이고 원만한 전수가 이루어져야한다. 국내 기후모델링 역량 강화를 위해 관련 세미나, 사용자 교육을 강화하고 지원과 투자 확대를 통해 기후모델 개발 관련 미래 인력을 양성해야 한다. 협력 커뮤니티 간 소통을 강화하려면 협업클라우드 사용을 활성화시켜야 한다. 또한 정기적인 워크숍이나 성과발표회를 개최를 통해 연구 성과의 공유 기회를 증대시켜야하며 이를 통해 자연스럽게 국가 기후예측모델 공동개발 협력 활동에 대한 홍보를 이끌어 낼 수 있다. 궁극적으로 이 연구는 공동개발 체계에서의 주요 개선점들을 도출하고 개선 방안들을 제안함으로써 국가기후예측시스템 공동개발의 기능을 보다 공식화, 체계화, 문서화할 기반을 제공한다.

모델 개발에 따른 기후예측모델의 예측성능을 일관된 평가자대로 통합적으로 평가하고, 현업화 후보군 선정을 위한 객관적인 근거자료를 제공하기 위해 표준 성능·진단 평가체계를 구축하였다. 표준 평가프레임은 예측유형에 따라 단정예보, 확률예보, 앙상블예보의 정량적인 성능을 제공하는 표준성능평가 파트와 중위도 기후예측에 영향을 주는 주요 기후 인자들 (ENSO, NJO, SIC, 몬순)의 진단평가 파트로 구조화하였다. 표준 성능평가에서는 단정예보, 확률예보, 앙상블예보의 정량적 평가 지표들로 구성된 메트릭을 구성하였고 기후예측모델의 구조적 오차와 예측품질, 앙상블 특성의 개선 정보를 제공하도록 하였다. 표준 진단평가 프레임에서는 계절내~계절 시간규모에서 중위도 기후예측에 영향을 주는 주요 기후 인자들 (ENSO, NJO, SIC, 몬순)의 진단 메트릭 구성하여 주요 기후 변동성의 재현 성능을 평가함으로써 모델의 취약점을

제시하고 개선방향을 제공하고자 하였다. 기후예측모델에서 ENSO 변동성의 예측성과 원격상관성을 평가하는 ENSO 메트릭을 구축하였으며, 현업 기후모델의 취약점과 개선안을 제시할 수 있도록 하였다. 구성된 표준 성능·진단평가 메트릭 결과는 예측시스템의 성능 개선을 한 눈에 살펴보고 신속한 현업화 의사결정을 도울수 있는 한 페이지짜리의 예측 성능 표준평가 스코어카드로 제작하였다. 선택된 평가항목의 예측성을 정량화하여 객관화된 스코어카드의 형태로 표출하였고, 이는 모델개발에 따른 예측성능의 변수, 시간, 계절에 대한 통합적인 개선안을 한 눈에 볼 수 있도록 설계하였다. 제안한 스코어카드가 모델 개발 성과의 현업 전환을 고려하는 의사결정시 유용한 판단 근거가 되길 기대한다.

학계에서 개발된 기술들을 현업에 적용하기 위한 가교 역할을 하는 테스트베드에서는 2020년부터 개발되고 있는 「해빙 물리 과정에 의한 계절내 규모 기후 예측 기술 개발」을 적용/평가하였다. 테스트베드 실험의 디자인은 해당 과제를 수행하고 있는 연구팀 및 현업을 수행하고 있는 과학원과의 논의를 통해 결정되었으며, 기술개발에 집중되어 있는 학계의 실험과 달리 다양한 기후조건에서 예측기술들의 효과를 검증하기 위해 준현업 환경에서 이루어졌다. 국가 기후예측모델은 겨울 지표 기온을 낮게 모의하는 계통적 오차를 보이는 것으로 알려져 있는데 해빙 물리 과정의 눈 반사율을 조정함으로써 이 오차를 개선하고자 하였다. R&D 연구 결과를 바탕으로 해빙 물리 과정 중 동아시아 기온 및 해빙 면적에 영향을 크게 주는 3가지 파라미터 중 visible snow albedo (이하 눈 반사도)를 선정하여 2 세트의 민감도 실험을 수행하였으며, 민감도 실험들은 현재 현업 모형에서 0.98로 설정되어 있는 눈 반사도를 각각 10%, 20% 감소시켜 동아시아 기후에 미치는 영향을 살펴보았다. 눈 반사율을 감소시킨 민감도 실험 결과들은 현업과 유사한 오차장을 보여 기후값 자체에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 이는 추후 해당 기술이 현업에 적용될 때 중요한 요소로 기후값 자체가 크게 변하면 과거의 현업과 불연속성이 커지므로 기후장 자체의 변화는 크지 않아야 한다. 눈 반사도를 조정함으로써 기후예측모델의 지표 온도 오차가 감소하였는데, 이와 같은 개선 효과는 선행 시간이 길어질수록 뚜렷하게 나타났다. 반면 해빙 농도 및 면적에서의 개선은 뚜렷하지 않았는데, 일사량이 많지 않아 눈 반사율 변화에 의한 직접적인 효과가 크지 않기 때문이라 생각된다. 극 지역의 해빙에 미치는 효과는 뚜렷하지 않았으나, 겨울철 중위도 기온에 영향을 주는 것으로 알려져 있는 극과 중위도의 원격상관의 모의 성능에는 개선이 나타났다. 관측에서 나타난 바렌츠-카라해와 유라시아 지역 기온과의 음의 상관관계가 나타나는데 반해 현업 기후값에서는 동아시아에서의 기온 상승 현상이 모의되지 않았다. 눈 반사도를 10% 감소시킨 실험은 관측에서 나타난 상관관계를 유사하게 재현했으며, 이와 관련된 순환장 또한 모의하였다. 동시베리아-척치해와 북미와의 원격 상관 또한 관측과 유사한 강도와 유지기간을 보이는 것으로 나타나 눈 반사도의 조정으로 인한 개선 효과를 확인할 수 있었다.

기후예측모델의 지면모형은 주로 S2S 시간규모에서 주요 예측인자(Predictability sources)로 알려져 있는 토양수분 모의를 담당하는 성분모델이다. 토양수분은 지면과 대기의 상호작용을 통하여 강수와 순복사량 분할을 조절한다. 이 연구에서는 Noah, Noah-MP, JULES 등 주요 3개 지면모델의 대륙별 주요 7개 유역에 대하여 물과 에너지 성분에 대한 예측성 비교·분석을 통해서, JULES 지면모형의 개선방안 도출하였다. 물과 에너지 성분에 대한 비교를 위해 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE 관측 Total Water Storage (TWS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)의 표층 및 근역층 토양수분과 증발산량, FluxCom의

현열과 잠열자료를 수집하여 지면모형에 대한 기준자료로 사용하였다. 대륙별 주요 유역 5개 유역(미시시피유역, 아마존 유역, 양쯔강유역, 메콩강유역, 머레이-달링유역)과 한반도 폭염 등 기후와 밀접한 관련이 있는 2개 유역(고비 및 티벳유역) 등 총 7개 유역을 선정하였다. Noah와 Noah-MP 지면모형은 Land Information System (LIS) 환경에서, JULES 지면모형은 Rose/Cylc 환경에서 각각 2007년부터 2011년 까지 총 5년간동안 모의하였다. 3개 지면모형은 에너지 성분보다는 수문성분의 예측성이 떨어지고, 건조지역에서 수문성분과 습윤지역에서 에너지성분 예측성이 현저히 떨어지는 결과를 보였다. 이러한 연구결과와 GloSea6의 시간규모 등을 고려하여 단기적으로 한반도와 근접해 있고 한반도 기후와도 관련이 큰 양쯔강유역의 표층과 근역층 토양수분 예측성 향상을 위해 지하수 모듈 개선을 제안하였다. 지하수 모듈은 미계측 유역 적용이 용이하고, 필수자료가 매우 간단하며, 계산비용이 작아 기후예측성 향상 목적과 더불어 현업 적용이 용이하도록 개선해야 할 것이다.

GloSea6는 상대적으로 간단한 하천유출모형을 사용하고 있으며, 모델내에서 모의되는 하천 유출량은 관측과 비교하였을 때 과대모의하고 있음을 알 수 있다. 하나의 이유로 지역별 주요 하천을 표현하기에 너무 큰 현재 하천유출모델의 해상도를 들 수 있다. 간단한 하천의 흐름만을 모의하고 있기 때문에 성긴 해상도는 실제에 비해 과도하게 담수의 유출을 가져오게 되고, 이는 해양 혼합층에 영향을 주어 결국 한반도 주변 지역에서 양의 해수면 온도 오차에 기여하게 된다. 정확한 하천 흐름을 모의하고 대기-지면-해양 상호작용의 개선을 가져오기 위해서는 정교하고 현실적인 하천유출모델을 접합하는 것이 가장 바람직하겠으나, 현재 현업에서 사용중인 GloSea6에 개선을 위해서 간단하고 직접적인 효과를 줄 수 있는 방법으로 하천유출모델의 해상도를 높여 해양으로 유출되는 담수의 양을 줄이는 것을 제안할 수 있다. 또한 해상도를 변경하면 하천의 흐름이 달라질 수 있어 유속 및 사행률 등의 변수들의 최적화 과정 역시 필요하다고 할 수 있다.

목차

| | |
|---|-----|
| 평문 초록 | i |
| Executive Summary | iii |
| 국문 요약 | vi |
| 목차 | ix |
| 표 차례 | xi |
| 그림 차례 | xii |
| 1. 서론 | 1 |
| 2. 연구 자료 및 방법 | 4 |
| 가. 자료 | 4 |
| (1) 표준평가체계 관련 자료 | 4 |
| (2) 해빙물리과정 개선 관련 자료 | 4 |
| (3) 지면모델 개선 관련 자료 | 6 |
| (4) 하천유출모델 개선 관련 자료 | 8 |
| 나. 연구 전략 및 방법 | 9 |
| (1) 국가 기후예측시스템 공동개발 체계 개선 방안 제안 | 9 |
| (2) 정확도, 유용성, 활용도 측면에서의 확률 예보 표준성능평가 제시 | 9 |
| (3) 지면모델 개선 | 10 |
| 3. 결과 | 14 |
| 가. 국가 기후예측모델 공동개발(K-R2O) 기반 체계 구축 | 14 |
| (1) 배경 및 목적 | 14 |
| (2) 공동개발 프로세스 구조화 | 14 |
| (3) 공동개발 체계 주요 개선점 | 21 |
| (4) 공동개발 체계 개선을 위한 제안 | 30 |
| 나. 표준 성능진단 평가체계 | 37 |
| (1) 표준 성능진단 평가체계 목적 및 구성 | 37 |
| (2) 표준 성능평가 프레임 구조화 | 38 |
| (3) 표준 진단평가 프레임 구조화 | 56 |
| (4) 향후 계획 | 72 |
| 다. 테스트베드 : 해빙물리과정 개선 기술 적용 | 74 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| (1) 연구 배경 및 목적 | 74 |
| (2) 1월 출발 2-4월 실험 결과 | 74 |
| (3) 5월 출발 6-8월 실험 결과 | 91 |
| 라. 지면모델 개선 | 98 |
| (1) GloSea6 JULES 특성 분석 및 개선 방안 | 98 |
| (2) GloSea6 하천유출 특성 분석 및 개선 방안 | 110 |
| 4. 요약 및 결론 | 116 |

표 차례

| Table | page |
|--|------|
| Table 1. Comparison of experiments performed for R&D and testbed | 5 |
| Table 2. Experimental design for sensitivity tests | 5 |
| Table 3. Specifications of the FluxCom datasets. | 7 |
| Table 4. Metrics for the diagnostic of ensemble characteristics and probabilistic forecast skill. | 10 |
| Table 5. Configurations for the selected LSMs in this study. | 12 |
| Table 6. Requisite details of R2O developmental protocol making | 20 |
| Table 7. (ex) Experimental protocol for the pre-operational testbed. | 35 |
| Table 8. The meaning and consistency according to ensemble types. | 52 |

그림 차례

| Figure | page |
|--|------|
| Figure 1. Surface soil moisture controls for water and energy budgets. | 2 |
| Figure 2. Impacts of irrigation on energy budgets (source from Yilmaz et al., (2014)). | 3 |
| Figure 3. Model configuration of KMA-GloSea6. | 8 |
| Figure 4. Experimental design for investigation of river routing effects. | 8 |
| Figure 5. Selected major basins. | 11 |
| Figure 6. Schematic of soil layers in the selected Land Surface Models. | 13 |
| Figure 7. Schematic of K-R2O structure showing 4-step process and 3-requisites | 15 |
| Figure 8. Suggestion of the K-R2O structure with 4-step process and 3-requisites. | 15 |
| Figure 9. Surveyee rate | 22 |
| Figure 10. Recognition on the jointly developing projects | 22 |
| Figure 11. Understanding on the jointly developing system | 23 |
| Figure 12. Understanding on the joint development community | 23 |
| Figure 13. Understanding on the governance of the jointly developing project | 24 |
| Figure 14. Recognition on the glair as a cooperative cloud | 24 |
| Figure 15. Fitness for purpose of the joint development activity. | 25 |
| Figure 16. Degree to which the jointly developing projects are smoothly operated. | 25 |
| Figure 17. Ratio of computational resource used. | 26 |
| Figure 18. User satisfaction on the computational resource. | 27 |
| Figure 19. Ranking of research environments in urgent need of improvement | 27 |
| Figure 20. Participant' s expectation by doing the jointly developing projects | 28 |
| Figure 21. Recognition for the pre-operational testbed. | 28 |
| Figure 22. Standarized evaluation framework including two categories and their components. | 38 |
| Figure 23. General idea and performance metrics of the MVIE. | 39 |
| Figure 24. Metrics table of GloSea6 in simulating climatological mean (1997-2016) Precipitation (PREC), 2m air temperature (T2M), 500hPa geopotential height (Z500), 850hPa winds (UV850), and 200hPa winds (UV200) in the northern hemisphere in summer (JJA). | 40 |
| Figure 25. Metrics scorecard for the climatology over globe(GL) and East Asia(EA) during 1997-2016. | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure. 26. Seasonal mean and standard deviation biases for T2M for 1 month lead during 1997-2016. | 42 |
| Figure. 27. Same as Figure 26, except for Precipitation. | 42 |
| Figure. 28. Same as Figure 26, except for 500hPa geopotential height. | 43 |
| Figure. 29. Same as Figure 26, except for 850hPa zonal wind. | 43 |
| Figure 30. Histogram of the mean bias for T2M for 1 month lead during 1997-2016. | 45 |
| Figure 31. Same as Figure 30, except for Precipitation. | 45 |
| Figure 32. Same as Figure 30, except for Z500. | 45 |
| Figure 33. Metrics scorecard for the anomaly fields over globe(GL) and East Asia(EA) during 1997-2016. | 46 |
| Figure 34. Time series of Anomaly pattern Correlation Coefficient (ACC) of T2M over Globe and East Asia from GloSea5 (black line) and GloSea6 (red line) with 1 month lead time. | 47 |
| Figure 35. (Left) Seasonal averaged relative ACC difference range between upper and lower 25% of GloSea6 with target based GloSea5 for the different lead of PREC, T2M, and Z500 over Globe. | 48 |
| Figure 36. (Left) Seasonal averaged relative TCC (Temporal correlation coefficient) difference range between upper and lower 25% of GloSea6 with target based GloSea5 for 1 month lead of PREC, T2M, and Z500 over Globe. | 49 |
| Figure 37. Proposed score card of standard evaluation for probabilistic forecast skill. | 51 |
| Figure 38. Schematic for calculating the degree of closeness from a diagonal line. | 53 |
| Figure 39. Proposed score card of standard evaluation for ensemble characteristics diagnosis. | 55 |
| Figure 40. ENSO evaluation framework including three categories and their components. | 56 |
| Figure 41. Spatial pattern of climatological precipitation in the equatorial Pacific, showing mainly the double intertropical convergence zone (ITCZ) bias. | 58 |
| Figure 42. (Left) Meridional mean structure of precipitation in the eastern Pacific (150-90W averaged), measuring mainly the double intertropical convergence zone (ITCA) bias. | 58 |
| Figure 43. Spatial pattern of the amplitude of the mean seasonal cycle of precipitation in the equatorial Pacific. | 59 |
| Figure 44. (Left) Meridional mean structure of the amplitude of the mean seasonal cycle of precipitation in the eastern Pacific (150-90W averaged). | 59 |
| Figure 45. (upper) Meridional structure of the mean seasonal cycle of precipitation in the | |

| | |
|---|----|
| eastern Pacific (150–90W averaged) (lower) zonal structure of the mean seasonal cycle of precipitation in the equatorial Pacific (5S–5N averaged). | 60 |
| Figure 46. Spatial pattern of climatological sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific, showing mainly the cold tongue bias. | 61 |
| Figure 47. Zonal mean structure of the sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific (5S–5N averaged), showing mainly the cold tongue bias. | 62 |
| Figure 48. Spatial pattern of the amplitude of the mean seasonal cycle of sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific. | 62 |
| Figure 49. (Left) Zonal structure of the amplitude of the mean seasonal cycle of sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific (150–90W averaged). | 63 |
| Figure 50. Sea surface temperature anomalies associated with ENSO in the equatorial Pacific. | 64 |
| Figure 51. Composite maps of sea surface temperature anomalies during La Nina and El Nino in the equatorial Pacific. | 64 |
| Figure 52. (Left) Zonal structure of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific(5S–5N), showing the zonal location of SSTA associated with ENSO. | 65 |
| Figure 53. Spatial pattern of the standard deviation of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific, showing usually a too strong maximum variability in the central equatorial Pacific. | 66 |
| Figure 54. (Left) Zonal structure of the standard deviation of the sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific (5S–5N averaged), showing usually the too strong maximum variability in the central equatorial Pacific. | 66 |
| Figure 55. Spatial structure of the standard deviation of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific, showing usually a too strong(weak) variability in the central equatorial Pacific during winter(spring). | 67 |
| Figure 56. (Left) Zonal structure of the standard deviation of the sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific(5S–5N) during winter and spring. | 68 |
| Figure 57. (Left) Ratio of winter over spring’ s standard deviation of sea surface temperature anomalies in the central equatorial Pacific (Nino3.4 averaged), showing the seasonal timing of SSTA. | 68 |
| Figure 58. Spatial structure of (left) surface temperature anomalies (TSA) and (right) the precipitation anomalies (PRA) over East Asia during boreal winter (DJF), showing the | |

| | |
|--|----|
| location of TSA and PRA associated with ENSO. | 70 |
| Figure 59. Same as Figure 58, except for boreal summer (JJA). | 70 |
| Figure 60. ENSO Metrics table of GloSea6 including ENSO performance and teleconnection. The lighter colors indicate better model performance. | 71 |
| Figure 61. ENSO Metrics scorecard. The green (red) colors indicate better (worse) model performance. | 71 |
| Figure 62. Schematic diagram exploring the key ENSO feedbacks; SST-Taux feedback, Taux-SSH feedback, SSH-SST feedback, and SST-NHF feedback (Planton et al., 2021). ... | 73 |
| Figure 63. Concept of test-bed for improvement of climate model. | 74 |
| Figure 64. Difference of 2-m temperature between observation and OPER (left), EXP1 (center), and EXP2 (right) during February–April. | 75 |
| Figure 65. RMSE (root mean square error) difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean 2-m temperature. | 76 |
| Figure 66. RMSE difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean 2-m temperature over East Asia. | 76 |
| Figure 67. Temporal correlation coefficient for monthly mean 2-m temperature. | 77 |
| Figure 68. Anomaly correlation coefficient for 2-m temperature of OPER (blue), EXP1 (red), and EXP2 (orange) over globe (top) and East Asia (bottom). | 78 |
| Figure 69. Scatter plot for skill of monthly mean 2-m temperature. | 78 |
| Figure 70. Difference between observation and OPER (left), EXP1 (center), and EXP2 (right) for monthly mean 500-hPa height. | 79 |
| Figure 71. RMSE difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean 500-hPa height. | 80 |
| Figure 72. Scatter plot for skill of monthly mean 500-hPa height over globe (left), northern Hemisphere (center), and East Asia (right). | 80 |
| Figure 73. Monthly mean sea ice concentration of observations, OPER, EXP1 and EXP2. ... | 81 |
| Figure 74. Monthly mean bias of sea ice concentration. | 82 |
| Figure 75. RMSE difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean sea ice concentration. | 83 |
| Figure 76. Monthly mean sea ice content over Arctic (60–90N) during February–April from 1993 to 2016. | 83 |
| Figure 77. Linear trend of monthly surface air temperature for observation, OPER, EXP1, and | |

| | |
|---|----|
| EXP2. | 84 |
| Figure 78. Timeseries of monthly mean ART1 and ART2 during February to April from 1993 to 2016. | 85 |
| Figure 79. Correlation coefficients of surface air temperature anomalies with respect to de-trended monthly ART1 during February–April from 1993 to 2016. | 85 |
| Figure 80. Linear regression of sea-level pressure with respect to de-trended monthly ART1 during February–April from 1993 to 2016. | 86 |
| Figure 81. Linear regression of 300-hPa height with respect to de-trended monthly ART1 during February–April from 1993 to 2016. | 87 |
| Figure 82. Correlation coefficients of surface air temperature anomalies with respect to de-trended monthly ART2 during February–April from 1993 to 2016. | 88 |
| Figure 83. Linear regression of sea-level pressure with respect to de-trended monthly ART2 during February–April from 1993 to 2016. | 89 |
| Figure 84. Linear regression of 300-hPa height with respect to de-trended monthly ART2 during February–April from 1993 to 2016. | 89 |
| Figure 85. Vertical difference of monthly mean temperature between observation and OPER, EXP1, and EXP2. | 90 |
| Figure 86. Vertical difference of monthly mean specific humidity between observation and OPER, EXP1, and EXP2. | 91 |
| Figure 87. Difference of 2-m temperature between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RSME difference (right) during June–August. | 92 |
| Figure 88. Difference of 2-m temperature between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) over East Asia during February–April. | 92 |
| Figure 89. Temporal correlation coefficient for monthly mean 2-m temperature over East Asia. | 93 |
| Figure 90. Anomaly correlation coefficient for 2-m temperature of OPER (blue), and EXP1 (red) over globe (top) and East Asia (bottom). | 93 |
| Figure 91. Scatter plot for skill of monthly mean 2-m temperature over globe (left), northern Hemisphere (center), and East Asia (right). | 94 |
| Figure 92. Difference of precipitation between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) over East Asia during June–August. | 95 |
| Figure 93. Temporal correlation coefficient for monthly mean precipitation over East Asia. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figure 94. Anomaly correlation coefficient for precipitation of OPER (blue), and EXP1 (red) over globe (top) and East Asia (bottom). | 96 |
| Figure 95. Scatter plot for skill of monthly mean precipitation over globe (left), and East Asia (right). | 96 |
| Figure 96. Difference of precipitation between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) during June–August. | 97 |
| Figure 97. Monthly mean sea ice content over Arctic (60–90N) during June–August from 1993 to 2016. | 97 |
| Figure 98. Characteristics of spinup behaviors from the three LSMs: Noah (left), Noah-MP (middle), and JULES (right). | 98 |
| Figure 99. Differences of soil moistures between LSMs and GLEAM: Noah (top), Noah-MP (middle), and JULES (bottom). | 99 |
| Figure 100. Comparisons of TWSA for the selected basins. | 101 |
| Figure 101. Comparisons of TWSC for the selected basins. | 102 |
| Figure 102. Comparisons of TWSA (top) and TWSC (bottom) for the Yangtze basin. | 103 |
| Figure 103. TCC of TWSA (Top) and TWSC (Bottom) for the selected basins. | 103 |
| Figure 104. Monthly mean soil moisture (mm) at the first soil layer. | 105 |
| Figure 105. Monthly mean soil moisture (mm) at the root-zone. | 105 |
| Figure 106. Monthly mean soil moisture at the first layer (top) and at the root-zone (middle) and evapotranspiration (bottom) in the Yangtze basin. | 106 |
| Figure 107. RMSE and correlation coefficients for Q _{le} : Latent heat flux (top) and Q _h : Sensible heat flux (bottom). | 108 |
| Figure 108. Monthly mean latent heat fluxes (left) and sensible heat fluxes (right). Amazon basin (top), Gobi basin (middle), and Tibetan basin (bottom). | 109 |
| Figure 109. Concept of TRIP for calculating of river storage from river sequence and direction. | 110 |
| Figure 110. Schematic diagram of GloSea6 model component. | 111 |
| Figure 111. Distribution of difference in the surface precipitation (left) and 850hPa specific humidity (right) between the GloSea6 and observation. | 112 |
| Figure 112. Distribution of the surface runoff from GRDC observation (top), GloSea6 (bottom-left) and its biases (bottom-right). | 113 |
| Figure 113. Distribution of the surface river storage and outflow from GloSea6. | 114 |

Figure 114. Region-averaged discharge over Han River in Korean peninsula from GloSea6 and observation. 114

Figure 115. Distribution of the depth of the 20C isotherm (left) and sea surface temperature (right) from GloSea6. 115

1. 서론

전지구 기후 모형(Global Climate Models; GCMs)은 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 모형에 근거한 장기에보 생산체계를 구축하고 역학적 방법에 의한 장기 예측 자료를 생산하였다. 국립기상과학원에서도 2000년대에 들어서 기후예측모형을 구축, 역학적 방법에 의한 장기에측자료를 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 도입하였으며, 2022년부터 물리과정 일부가 개선된 GloSea6가 현업으로 사용되고 있다.

국가 기후예측시스템인 GloSea6는 현재 국립기상과학원에서 현업운영 하고 있으며, 기후예측정보 정확도 향상을 위한 기후예측시스템 개발은 연구개발허브(국립기상과학원, APCC, 학계 및 산업계)에 의해 공동으로 진행하고 있다. 국내 모델링 인적 인프라가 부족함에 따라 기후모델 개발연구는 R&D 성과에 의존하여 진행하고 있으며, APCC 또한 수요과제를 통해 지면 모형 물리 과정 개선 연구를 진행 중이다. 이러한 연구들이 다양한 기관에서 개별적으로 진행됨에 따라 실제 현업 적용 사례가 부족하다는 문제점이 제기되었고 공동개발체계 구축의 필요성이 대두되기 시작하였다. 이에, 2019년 학,연,관 상호 협력 생태계를 구축하고 연구개발의 현업화 강화를 위한 “국가기후예측모델 공동개발 체계구축”을 제안하였으며, 2020년 다(多)기관 연구개발 조직화, 연구개발 협력시스템 체계화, 연구개발 활용성 평가 체계 구축 및 활성화의 기후예측시스템 공동개발 3대 추진전략이 수립되었다. 이 과정에서 공동 개발에 참여하는 학계와 산업계의 전문가 그룹(기후응용R&D 등 장기계속사업)을 포함하는 연구 개발 공동 협력 그룹인 연구개발허브, 공동개발협력을 체계화하고 신속한 현업화를 도모하기 위해 하드웨어적으로 마련된 협업클라우드, 소프트웨어 차원에서 마련된 표준화된 개발 플랫폼인 공동 개발플랫폼, 개발된 기술이 현업으로 전환될 수 있는지 여부를 평가하는 테스트베드¹⁾ 라는 개념들이 정립되었다. 이러한 배경에서 APCC는 R2O 활성화를 위한 징검다리 역할인 테스트베드의 역할을 수행하고자 하며, 원활한 테스트베드의 역할 수행을 위한 공동연구개발 기반 체계를 먼저 구축하고자 하였다.

테스트베드의 역할은 개발된 기술을 어떻게 최적화시켜서 실질적으로 예측성에 기여할 것인지에 대한 고민에서부터 시작된다. 연구자에 의해 개발된 기술들이 현업에 적용되기 위해서는 개발단에서 제시한 기술이 실제 현업 환경에서도 동일한 효과를 나타내는지 사전에 확인될 필요가 있다. 이를 위해 R&D 성과 기술을 현업 환경에 적용한 준현업실험이 수행되어야 하며, 일관된 평가체계를 통한 객관적 근거 자료를 토대로 현업 적용 여부가 결정되어야 한다. 공동개발체계 하에서 연구개발 성과들이 현업으로 효과적으로 전환되기 위해서는 테스트베드의 역

1) 신규로 개발·시험되는 기술의 성능 및 효과가 실제 현업 환경에서 원활히 작동하는지 테스트하는 시스템

할이 매우 중요하며, 테스트베드의 원활한 역할 수행을 위해서는 공동연구개발의 기반체계가 먼저 수립되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 공동연구개발 성과를 효과적으로 현업화하기 위한 K-R2O 과정을 체계화하고, 테스트베드의 준현업실험 수행을 위한 기반 환경을 마련하였으며, 현업화 후보군 선정에 위한 객관적 근거 자료를 제공하는 통합적인 평가프레임을 구축하고자 하였다.

국가기후예측모델 예측력 강화를 목적으로 지면모델 물리과정 개선기술 확보를 위한 연구 또한 진행되었다. 기후예측모델은 대기, 지면, 해양, 해빙의 성분 모델이 결합하여 이루어져 있다. 토양수분과 같은 지면상태는 지면과 대기 사이에서 물과 에너지 상호 교환작용을 통해 강수와 순복사량을 조절하는 역할을 수행하고, 지면모델은 이러한 조절 과정을 재현한다 (Figure 1). 토양수분은 계절내 시간 규모에서의 주요 예측인자로서 알려져 있다 (Merryfield et al., 2020). 국내의 많은 연구가 계절내 시간규모에서 예측성 향상을 위해 주로 자료동화기법에 기반한 지면초기장 개선에 집중하고 있는 실정이다. 그러나, 지면초기장을 개선하여 그 메모리의 효과로 어느정도 예측성 향상을 보여주고 있으나, 결국 기후모델에서 지면모델링은 이러한 조절과정의 적분 결과이므로 지면초기화 개선 뿐만 아니라, 이러한 물과 에너지 수지 조절 과정 모의 개선 필요하다 할 수 있다. 다만, 물과 에너지 수지 조절과정이 복잡하게 서로 얽혀 있으므로 어느 한 과정을 개선한다고 하더라도 두 과정 모두 개선효과를 면밀히 살피는게 필요하다. 실제로, Yilmaz et al., (2014)연구에서 Noah 지면모형에 농경지에 관개하는 모듈을 추가한 모형을 나일강유역에 적용한 결과 잠열과 현열 예측성이 크게 향상되어 에너지수지 개선의 효과를 보였다고 발표 한 바 있다(Figure 2). 본 연구에서는 Noah (Ek, 2003), Noah-MP (Niu et al., 2011; Yang et al., 2011), JULES (Best et al, 2011) 등 주요 3개 지면모델의 대륙별 주요 7개 유역에 대하여 물과 에너지 성분에 대한 예측성을 상호 비교하고, GloSea의 지면모형인 JULES 지면모형의 개선방안 도출하고자 하였다.

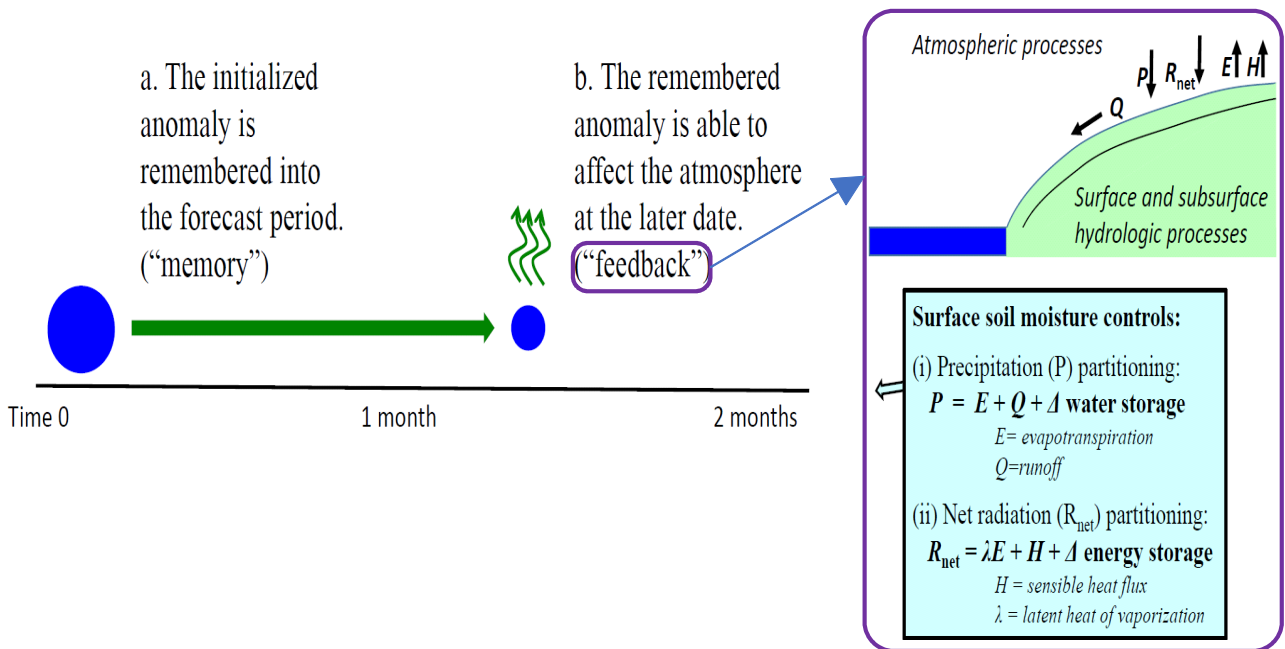


Figure 1. Surface soil moisture controls for water and energy budgets.

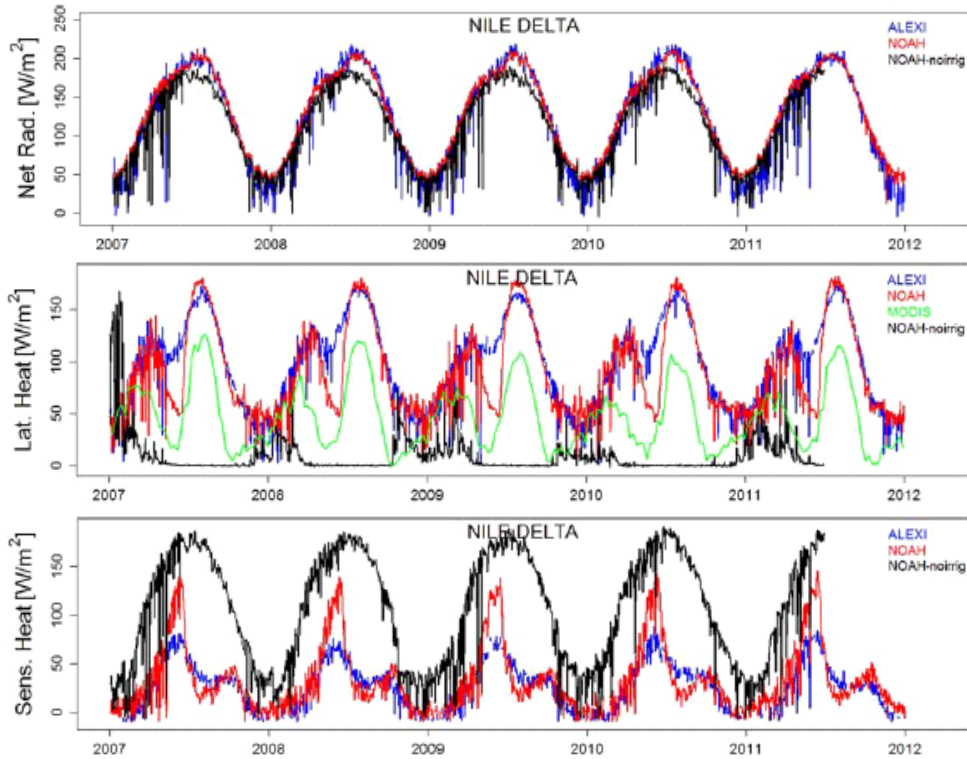


Figure 2. Impacts of irrigation on energy budgets (source from Yilmaz et al., (2014)).

지면에서 물의 이동은 증발산, 토양, 격자유출 및 하천유출 등의 과정으로 이루어지며, 이러한 물 순환 과정을 표현하기 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다 (Dirmeyer and Shukla 1993; Van den Hoof et al. 2003; Harding et al. 2014). 하천유출에 의한 담수는 해양의 염도를 직접적으로 변화시키며, 이는 물의 밀도, 혼합층을 바꾸어 해수면 온도를 변화시키는 것으로 잘 알려져 있다 (Zhang et al. 2011, Ham et al. 2012). 또한 해수면 온도 변화는 대기-해양 상호작용을 통해 대기 연직 구조 역시 영향을 주게 된다. 따라서 기후 예측 모델에서 하천 유출에 의한 담수의 흐름의 효과는 무시할 수 없을 만큼 중요하다고 할 수 있다. 현재 기상청에서 현업으로 사용되고 있는 기후 예측 모델인 GloSea6내에서 하천의 흐름은 Total Runoff Integrating Pathways (TRIP; Oki and Sud 1998)에 의해 계산된다. GloSea6내에서 TRIP은 지면모델로부터 계산된 runoff를 입력자료로 가져오며, 각 격자에서의 하천 유출량을 계산하여 최종적으로 해양모델로 방출량을 전달하고 있다. 최근에는 고해상도의 수문정보를 포함하는 다양한 하천유출 모델이 개발되었지만, GloSea6에 포함된 TRIP은 다소 간단한 저류방정식으로 구성되어 고해상도의 자연하천을 정확하게 묘사하기에는 한계가 있다. 좀 더 복잡하고 정교한 하천유출모델이 결합되는 것이 좋겠지만, 그 전에 TRIP으로 모의되는 GloSea6의 하천유출의 특성을 파악하고 현실적인 개선 방안에 대해 논의해보고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

가. 자료

(1) 표준평가체계 관련 자료

(가) 기후모델 예측자료

모델 개발에 따른 표준 성능·진단 평가체계 구축을 위해 사용된 기후예측 모델자료는 S2S prediction project database (Vitart et al. 2017)에서 수집한 UKMO GloSea5 와 GloSea6 자료를 사용하였다. 계절내 예측을 위한 UKMO GloSea의 과거재현기후 (Hindcast) 자료는 한 달에 4회 고정된 날짜(1일, 9일, 17일, 25일)에 7개 앙상블 멤버의 60일 적분 자료를 제공하고 있다. 기후 모델 평가를 위해 1997년부터 2016년까지 총 20년간의 자료가 사용되었으며 일주일 단위로 평균하여 선행시간 3주, 4주, 1달(5주~8주 평균)까지의 예측자료를 생산하여 사용하였다.

(나) 관측자료

본 연구에서는 모형의 예측성능 검증을 위해 사용된 reference 자료로 ECMWF의 재분석 자료인 ERA5를 사용하였다. 사용된 변수는 기온(T2M), 500hPa 지위고도(Z500), 850hPa 바람 자료 (U850, V850), 200hPa 바람 자료(U200, V200)이다. 강수(PREC)는 Global Precipitation Climatology Project(GPCP) v1.3(Huffman et al. 2001)을 사용하였고, 해수면 온도(SST)는 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature(OISST; Reynolds et al. 2007)를 사용하여 검증하였다. ERA5의 공간해상도는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 로 중위도 기준 약 30km 격자 간격을 가지고 있고 다른 자료들 역시 제각각의 해상도를 가지고 있으나, 모델과의 비교를 위하여 모델과 동일한 격자인 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 로 내삽한 후 일별 자료를 주 평균하여 사용되었다.

(2) 해빙물리과정 개선 관련 자료

(가) KMA-GloSea6 민감도 실험 자료

테스트베드에 적용된 기술의 예측성을 검증하기 위한 기준 실험으로 KMA-GloSea6의 현업 기후장(hindcast) 데이터를 이용하였다. 현재 현업에서는 1993년부터 2016년까지 총 24년의 기후기간을 적용하고 있으며, 매달 1, 9, 17, 25일을 초기날짜로 하여 각 날짜마다 3개의 앙상블 멤버로 252일 후까지 예측한다. 현업 데이터는 현재 슈퍼컴퓨터 5호기에 저장되어 있으며, PP 파일의 형태로 생산되므로 분석의 편의성을 위해 NC 형태로 변환하는 과정을 거친 후 내부자원화를 위해 APCC HPC로 전송하였다.

테스트베드 실험의 디자인은 해당 과제를 수행하고 있는 연구팀 및 현업을 수행하고 있는 과학원과의 논의를 통해 결정되었다. 월별 예측성과 해빙의 영향이 미치는 시기를 고려하여 1월 출발 144일 예측 실험을 수행하였고, 기후변화를 영향을 포함할 수 있는 1993년부터 2016년으로 현업 기후값과 동일하게 설정하였다. 앙상블 개수 또한 3개로 현업과 동일하게 적용하였

으며, 1월 1일, 9일, 17일, 25일 출발 실험들의 2-4월의 결과를 분석하였다. 1월 출발 실험의 결과를 중점적으로 분석하되, 타 계절에서의 과학적 효과와 기술적 효능을 살펴보기 위해 5월 출발 실험을 추가로 수행하였다.

Table 1은 학계에서 수행한 실험과 테스트베드 실험의 차이를 보여주는 것으로 기술개발에 집중되어 있는 학계의 실험과 달리 테스트베드 실험은 다양한 기후조건에서 예측기술들의 효과를 검증하기 위해 준현업 환경에서 실험이 이루어지는 것을 알 수 있다. R&D 연구결과를 바탕으로 해빙 물리 과정 중 동아시아 기온 및 해빙면적에 영향을 크게 주는 3가지 파라미터 중 visible snow albedo (이하 눈 반사도)를 선정하여 2 세트의 민감도 실험을 수행하였다(Table 2). 민감도 실험들은 현재 현업 모형에서 0.98로 설정되어 있는 눈 반사도를 각각 10%, 20% 감소시켜 동아시아 기후에 미치는 영향을 살펴보았다.

Table 1. Comparison of experiments performed for R&D and testbed

| | [학계] 기술개발실험 | [APCC] 테스트베드실험 |
|--------|------------------------------|---|
| 실험 종류 | Forecast | Hindcast |
| 실험기간 | 2019.1.1~2019.4.30 (120days) | 1월 출발(1,9,17,25일) 5월 출발(1,9,17,25일) 144days 1993-2016(24years) |
| 양상블 | 1개 | 3개 |
| 해상도 | N96: ~135km | N216: ~60km |
| 적용 사례수 | 1 case | 576 cases |
| 검증 데이터 | ERA5, NSIDC | |

Table 2. Experimental design for sensitivity tests

| 적용 변수 | visible snow albedo | | |
|-------|---------------------|---------------------|-----------------|
| 실험명 | OPER | EXP1 (10% ↓) | EXP2 (20% ↓) |
| 설정값 | 0.98 | 0.88 [JFMA,MJJA] | 0.784 [JFMA] |

(나) 관측 자료

이 연구에서 모형의 예측을 평가하기 위한 비교 대상으로 ECMWF의 재분석 자료인 ERA5를 사용하였다. 사용된 변수는 지표기온(Hersbach et al. 2018), 500hPa 지위고도(Z500), 기온과 비습(Hersbach et al. 2019)으로 검증에 활용되었으며, 강수 검증을 위해 Global Precipitation Climatology Project(GPCP) v1.3(Huffman et al. 2001)을 사용하였다. ERA5의 공간해상도는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 로 중위도 기준 약 30km 격자 간격을 가지고 있고 다른 자료들 역시 제각각의 해상도를 가지고 있으나, 모델과의 비교를 위하여 모델과 동일한 격자인 약 60km로 내삽된 월

평균 자료가 사용되었다. 또한, 민감도 실험에서 해빙농도 및 면적의 평가를 위해 National Snow and Ice Data Center (NSIDC)의 데이터를 사용하였고, 25km 격자의 데이터를 모델과 동일한 격자로 내삽하여 비교하였다.

(3) 지면모델 개선 관련 자료

(가) 물수지 기준자료

Total Water Storage (TWS)의 Anomaly (TWSA)와 Change (TWSC)는 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE, Landerer et al., 2012) 관측자료를 사용하여 각 3개 지면모형의 결과와 비교하였다. GRACE 관측 TWSA는 Center for Space Research (CSR), Jet Propulsion Laboratory (JPL), GeoForschungsZentrum (GFZ)의 3개 기관으로부터 수집한 자료를 산술 평균하여 사용하였다. 일반적으로 total column soil moisture, snow water equivalent, canopy water storage, groundwater, explicit reservoir storage의 총합으로 TWS를 산정해야 하나, 3개 지면모형은 지하수 유출을 고려하지 않는 모형(Noah 지면모형)과 저수지나 호수모형이 포함되지 않기 때문에, 각 모형별로 이러한 성분은 TWS 산정에 고려되지 않았다. 따라서 모형결과 TWS와 GRACE 관측 TWS를 비교시 오차를 발생시킬 수 있다는 점에 유의해야 한다.

GRACE 관측 TWSC는 noise가 비교적 적다고 알려진 중앙차분 방법(Eq. [1])을 사용하였으며, 지면모형으로부터 TWSC는 기본적인 물수지 방정식(Eq. [2])을 사용하였다. 한편, Noah와 Noah-MP는 표층으로부터 총 2m까지 토양수분량이 포함되었으며, JULES 지면모형의 경우 총 3m까지 수분량이 포함되고, 이 연구에서는 canopy water storage가 포함되지 않았다. 따라서, 이러한 제한사항을 고려하여 지면모형 결과를 분석하는데 주의를 기울여야 할 것이다. 표층토양수분과 근역층토양수분과 실제증발산은 Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM, Martens et al., 2017) 자료를 수집하여 사용하였다. 특히, GLEAM 자료를 선정한 이유는 기준자료로 많이 활용하는 ERA-5 자료와 ESA-CCI위성자료를 활용하여 생산한 자료이기 때문에 별도의 ERA-5와 위성자료와 각각 비교할 필요가 없는 장점이 있을 수 있기 때문이다. GLAM 자료는 025° × 0.25° 의 공간해상도와 일별 및 월별 자료를 각각 제공하는데, 본 연구에서는 월별자료를 수집하여 사용하였다.

$$GRACE\ TWSC = \frac{TWSA(t+1) - TWSA(t-1)}{2} \quad [1]$$

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - ET \quad [2]$$

여기서, S: Storage

t: Time

P: Precipitation (mm)

Q: Runoff (mm)

ET: Evapotranspiration (mm)

(나) 에너지수지 기준자료

현열(Qh)과 잠열(Qle) 등 에너지 수지 기준자료로는 FluxCom (Jung et al., 2019)자료를 Max Planck Institute로 부터 수집하여 사용하였다. FluxCom자료는 Fluxnet 자료로부터 위성자료나 기후자료 등과 함께 머신러닝 기법으로 재생산한 자료이다. 본 연구에서 사용한 현열과 잠열의 자료는 Fluxnet 기반의 자료, 기후자료, 식생 등 위성자료를 Random forest (RF), Artificial Neural Network (ANN), Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)의 3개 머신러닝기법으로 생산한 자료이다. 이와 관련한 보다 상세한 내용은 Table 3에 요약하여 제시하였다. 또한 Jung et al. (2019)에 FluxCom자료와 관련하여 보다 상세히 기술되어 있다.

Table 3. Specifications of the FluxCom datasets.

| Specifications | FluxCom |
|--|--|
| Spatial resolution | 0.5° |
| Temporal resolution | daily |
| Time period | 2001–2013 |
| Machine learning method | 3: RF, ANN, MARS |
| Climate input | CRUNCEPv8, WFDEI, GWSP3, CERES-GPCP |
| Number of flux observations for training | ~200,000 |
| Spatial features | PFT, Max of MSC(WAI _U), Mean of MSC(BAND 6), Max of MSC(fAPAR*R _g) |
| Spatial, seasonal features | R _{pot} , MSC(NDWI), MSC(LST _{Night}), MSC(EVI*R _g) |
| Spatial, seasonal, interannual features | R _g , Rain, Rh, R _g *IWA*MSC(NDVI) |

Enhanced Vegetation Index (EVI), fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR), night time Land Surface Temperature (LST_{Night}), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Plant Functional Type (PFT), incoming global Radiation (R_g), top of atmosphere otential Radiation (R_{pot}), Index of Water Availability (IWA), Relative humidity (Rh), upper Water Availability Index WAI (WAI_U), Mean Seasonal Cycle (MSC). Random forest (RF), Artificial Neural Network (ANN), Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)

(4) 하천유출모델 개선 관련 자료

(가) 기후모델 예측자료

우리나라 기상청은 2010년 영국 기상청(Met Office)과 대기-해양 결합 모델을 이용한 계절 예측시스템의 공동구축 및 운영에 관한 협정을 체결하여 단기간 날씨부터 계절내 및 계절 예측, 기후 예측을 포함하는 포괄적인 계절예측시스템인 Global Seasonal Forecasting System (MacLachlan et al. 2015) 을 도입하였고, 현재 GloSea6를 현업 계절예측에 활용 중이다. 영국 기상청 기후 모델인 HadGEM3 (Hadley Centre Global Environment Model version 3) 에 기초하여 구축된 GloSea6는 Met Office의 Unified Model (UM) 대기 모델 (Global Atmosphere model; Walters et al., 2017) 과 Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO) (Madec, 2008) 해양모델, Los Alamos sea ice model (CICE) (Rae et al., 2015) 해빙 모델, Joint UK Land Environment Simulator (JULES) (Walters et al., 2017) 지면 모델로 구성되며, 지면-대기-해양 플럭스 교환을 위해 OASIS 커플러로 결합되어 있다 (Kim et al., 2018). GloSea5의 대기모델 수평격자 해상도는 N216으로 위도 0.56° 와 경도 0.83° 이며 (약 ~60km), 연직으로 85개의 층을 가지고 있다. 해양모델의 수평 및 수직 해상도는 각각 0.25° × 0.25° 와 75층이며, 대기-해양 플럭스는 3시간 간격으로 교환 된다 (Figure 3).

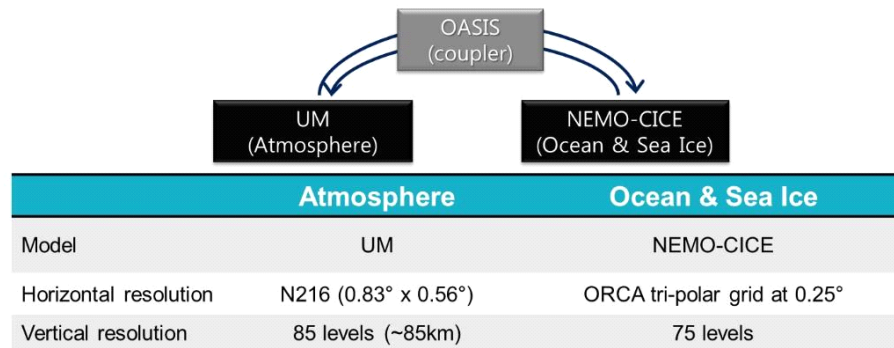


Figure 3. Model configuration of KMA-GloSea6.

이 연구는 KMA-GloSea6 현업 구성을 바탕으로 하천유출자료를 출력변수로 추가한 자료를 재생산하여 분석하였다. 현업에서 생산하는 과거재현자료는 한 달에 4회 고정된 날짜(1일, 9일, 17일, 25일)이므로, 이 연구에서는 5월에 해당하는 4개의 초기장으로 1995-2004 (10년)의 여름 예측장을 생산하였다 (Figure 4).

| EXP | Ens. Size | Initial date | HCST Period | Total member |
|------|-----------|-------------------|-----------------|--------------|
| OPER | 3 | (1, 9, 17, 25)May | 1995-2004(10yr) | 120 cases |

Figure 4. Experimental design for investigation of river routing effects.

(나) 관측 자료

이 연구에서 모형의 예측을 평가하기 위한 비교 대상으로 Global Runoff Data Center (GRDC)의 runoff 및 하천 유출값을 사용하였다. GRDC는 약 200년의 전구 데이터를 가지고 있으며, 159개국의 10,000 stations를 포함, 전구 runoff 자료뿐만 아니라 유역별 하천유출값을 ascii 데이터로 제공하고 있다. 또한, 해양 혼합층 깊이 분석을 위해 GODAS 해양 연직 온도 자료를 사용하였다.

나. 연구 전략 및 방법

(1) 국가 기후예측시스템 공동개발 체계 개선 방안 제안

이 연구에서는 국가 기후예측시스템 공동개발 체계 개선을 위해 우리나라 실정에 맞는 R2O 구조를 제안하고 연구개발허브 의견 수렴을 통해 R2O 과정에서의 개선 방안들을 제안하고자 하였다. 이 연구의 주요 범위는 다음과 같다.

- 국외 동향 파악을 통한 K-R2O 컨텐츠 발굴 및 구조화
- 연구개발허브 의견수렴
 - 인터뷰, 설문조사, 패널토의
- 국가 기후예측시스템 공동개발 체계 주요 개선점 도출
- 국가 기후예측시스템 공동개발 체계 개선을 위한 방안 제시

(2) 정확도, 유용성, 활용도 측면에서의 확률 예보 표준성능평가 제시

확률예보 표준성능을 평가할 수 있는 진단 기준으로 예보의 정확도, 유용성, 활용도를 제시하고 UKMO GloSea5와 GloSea6에서의 계절내 확률예보 표준성능평가를 수행, 비교하였다. 또한 모델 앙상블의 기본 특성을 살펴볼 수 있는 표준진단평가 기준으로 앙상블 유형, 신뢰도, 불확실성 추정을 제시하였다(Table 4). 앙상블 표준진단평가 역시 UKMO GloSea5와 GloSea6 과거재현실험에 적용하여 앙상블 기본 특성의 개선점을 살펴보았다.

Table 4. Metrics for the diagnostic of ensemble characteristics and probabilistic forecast skill.

| | | Metric | | |
|-------------|---------------------------------|---------------------------|--|--|
| Diagnostics | Ensemble Characteristics | Ensemble Type | | |
| | | Ensemble Reliability | | |
| | | Error-Spread Relationship | | |
| | Ensemble Uncertainty Estimation | | | |
| | Probabilistic Forecast Skill | Accuracy | Ranked Probability Score | |
| | | Usefulness | ROC(Relative operating characteristics) Area | |
| Value | | Extreme Forecast Index | | |
| Observation | ERA5 | | | |

(3) 지면모델 개선

(가) 주요 유역선정

물수지의 경우 연직흐름 뿐만 아니라 가로방향 흐름도 중요하기 때문에 개별 격자분석보다는 유역단위로 분석하는 게 일반적이다. 또한, 유역단위로 분석하면 각 모형결과나 기준자료의 해상도 차이로 인해 오차를 줄일 수 있다고 알려져 있다. 따라서 3개 지면모형의 물 수지과 에너지 수지를 비교 및 분석하기 위해 아프리카를 제외한 대륙별 주요 유역 5개 유역(북미대륙의 미시시피유역, 남미대륙의 아마존 유역, 동아시아지역의 양쯔강유역, 동남아시아 지역의 메콩강유역, 호주대륙의 머레이-달링유역)과 한반도 폭염 등 기후와 밀접한 관련이 있는 유역(고비 및 티벳유역) 등 총 7개 유역을 선정하였다(Figure 5).

Location of selected basins

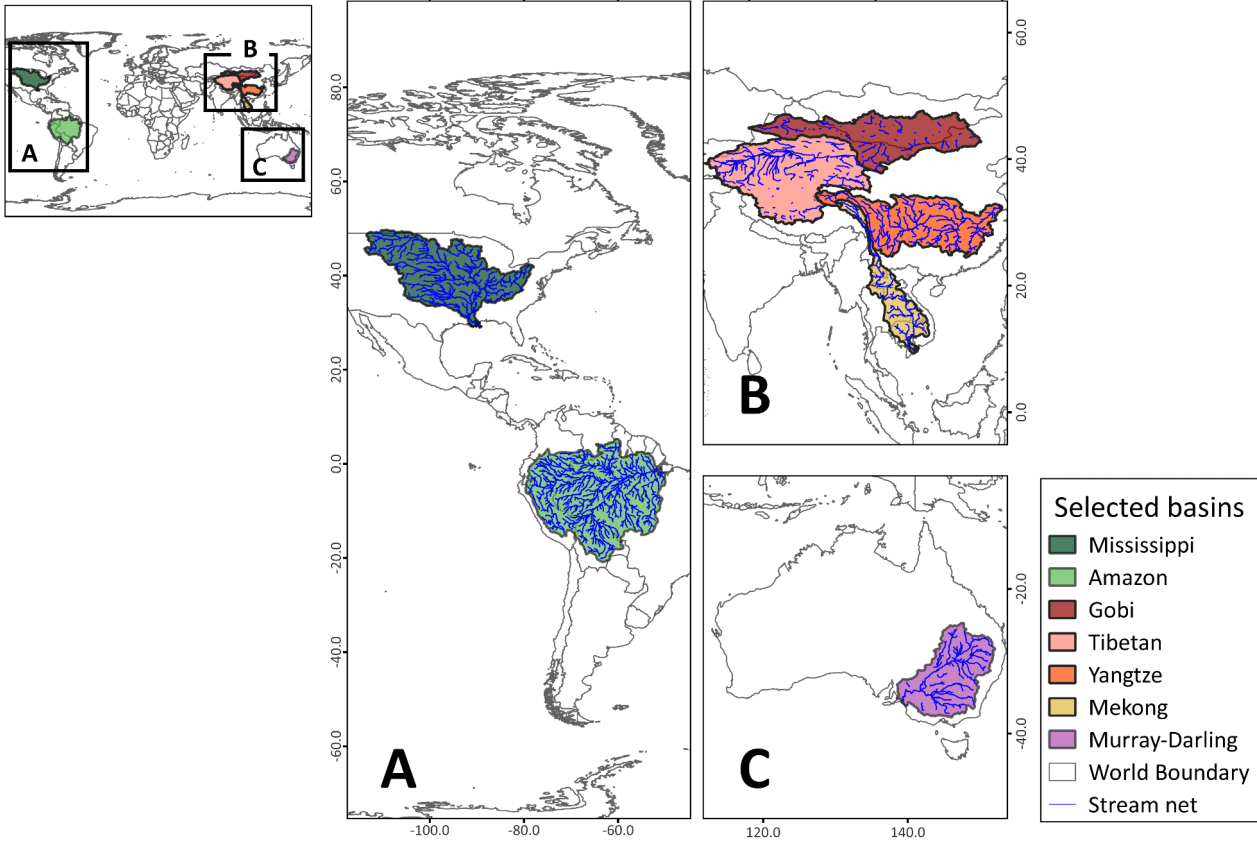


Figure 5. Selected major basins.

(나) 주요 지면모형 환경설정

Noah와 Noah-MP 지면모형은 Land Information System (LIS, Kumar et al., 2006)) 기반에서 구동하였고, JULES는 Rose/Cylc환경에서 실험을 수행하였으며, 각 모형 구동을 위한 환경설정은 Table 5에 요약하여 제시하였다. 지면모형별로 서로 다른 forcing자료를 사용할 경우, forcing자료 차이로 인한 오차가 발생할 수 있다. 따라서 forcing자료로부터 기인하는 오차를 줄이기 위해, Met forcing은 Global Data Assimilation System (GDAS)로 3개 지면 모형 모두 동일한 자료를 사용하였으나, Noah와 Noah-MP 지면모형에서는 9개 변수(Near surface air temperature, Near surface specific humidity, Incident shortwave radiation, Incident longwave radiation, Eastward wind, Northward wind, Surface pressure, Rainfall rate, Convective rainfall rate)를 사용하였고, JULES는 convective rainfall rate을 제외한 총 8개의 변수를 사용하였다. 총 실험 기간은 FluxCom 수집 자료와 겹치는 기간으로, 총 적분기간은 2007-2011의 5년이다. 스핀업 기간은 수문분야에서 지하수 등 심층 토양수분의 스핀업 기간은 70-80년 정도 소요되는 것으로 알려져 있어, 먼저 실험을 끝낸 Noah와 Noah-MP는 88년의 충분한 스핀업기간을 두었으나, 스핀업 결과 분석 후 모든 유역에서 30년 이내에 완료되는 것을 파악한 후, JULES는 30년으로 설정하였다. JULES 지면모형의 세부 설정환경은 국립기상과학원의 현업 환경을 참고하여 설정하였다.

Table 5. Configurations for the selected LSMs in this study.

| | Noah | Noah-MP | JULES |
|---|-------------------------------|---------|---------------|
| Environment | Land Information System (LIS) | | Rose/Cylc |
| Met forcing | GDAS | | |
| # of forcing variables | 9 | | 8 |
| Period | 2007-2011 | | |
| Resolution | 1° × 1° | | 0.56° × 0.83° |
| Timestep | 15 min | | 30 min |
| Spinup period | 88 years | | 30 years |
| Near surface air temperature, Near surface specific humidity, Incident shortwave radiation, Incident longwave radiation, Eastward wind, Northward wind, Surface pressure, Rainfall rate, Convective rainfall rate | | | |

(다) 지면모형 스핀업 특성분석

주요 지면모형의 결과를 분석하기 위해 충분한 스핀업을 수행하였다. 먼저 Noah, Noah-MP, JULES 지면모형 모두 4개 토양층(Figure 6)에 대해 토양수분 및 토양온도 등을 모의한다. Noah와 Noah-MP는 토양층이 각각 0.1, 0.3, 0.6, 1.0m로 총 2m의 토양깊이까지 모의하며, JULES의 경우에는 토양층이 각각 0.1, 0.25, 0.65, 2.0m로 총 3m의 토양깊이까지 모의한다. 3개 지면모형 모두 근역층의 토양수분을 별도로 모의하지 않아, Eq. [3]과 같이, 표층으로부터 총 3개층(말하자면, 1.0m 깊이)까지의 토양수분량을 근역층 토양수분량으로 가정하여 분석하였다. 또한, 스핀업이 완료되었는지 여부는 Eq. [4]와 같이 PC (percent in change)값으로부터 추정하는데, 엄밀히 말하면, PC값이 0이 될 때까지 스핀업을 수행해야 하나, 일반적으로는 PC값이 ±1% 이내로 들어오면 스핀업이 완료되는 것으로 간주한다. 이 연구에서도 PC 값의 임계값을 ±1%로 설정하여 스핀업을 수행하였고, 그 결과를 주요 유역별 스핀업 특성을 분석하였다.

$$RZ = \frac{\sum_{i=1}^3 (d_i \times sm_i)}{\sum_{i=1}^3 d_i} \quad [3]$$

여기서, d_i : Depths at the i^{th} soil layer

sm_i : Soil moisture at the i^{th} soil layer

RZ: Soil moisture at the root-zone

$$PC(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad [4]$$

여기서, PC: Percent in change (%)

M_1 : Monthly mean of soil moisture from the previous year

M_2 : Monthly mean of soil moisture from the current year

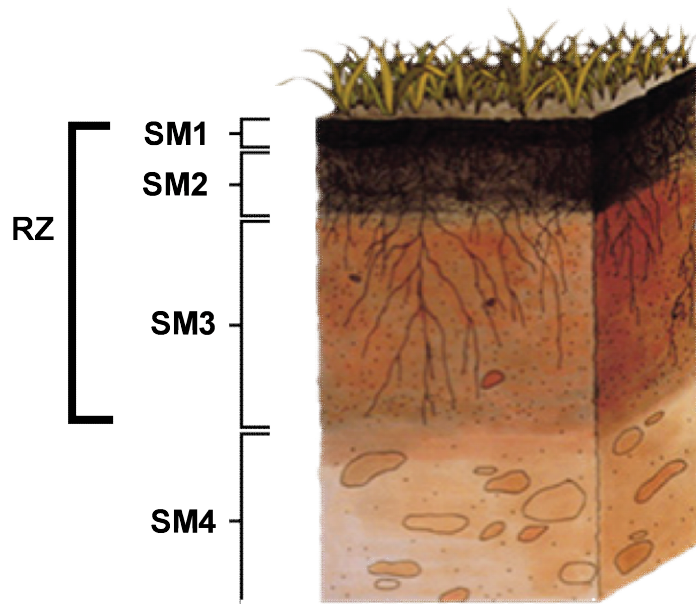


Figure 6. Schematic of soil layers in the selected Land Surface Models. SM1 stands for the first soil layer, SM2 for the second soil layer, SM3 for the third soil layer, and SM4 for the fourth soil layer, and RZ for the root-zone.

3. 결과

가. 국가 기후예측모델 공동개발(K-R2O) 기반 체계 구축

(1) 배경 및 목적

유럽중기예보센터(ECMWF), 세계기상기구(WMO), 미대기해양청(NOAA), 호주기상청 (BOM) 등 해외의 현업기관들 역시 최근 예측시스템의 R2O 효율성을 강화하는 추세이고 일부 기관들은 잘 짜여진 공동개발 체계를 보유하고 있다. ECMWF는 10년 장기 전략을 가지고 R2O 프로세스를 정립하기 시작하였다. 효율적인 R2O 전환을 위해 내부 프로젝트(IDEA)를 수행하고 공동개발체계를 구축, 운영하고 있다. NOAA 역시 우리나라와 유사하게 연구 커뮤니티에서의 현업 시스템 활용을 장려함으로써 현업 시스템의 지속적인 개선 도모하고 있다. 테스트베드 센터를 설립/운영하여 해당 커뮤니티에 R2O 전환 개선을 위한 기초를 제공하고 운영위원회의 활동 범위를 정의하는 등 공동개발체계 구축을 통해 R2O 전환을 조직화하고 있다. BOM은 이음새 없는 전지 구 결합 모델링을 위해 R2O 효율성 증대를 향후 3년 목표 중 하나로 선택하고 R&D 장기 계획을 수립할 뿐만 아니라 2020-2030 R&D 장기 계획에 따르면 R2O 전환 과정의 통합 파트너로서 테스트베드를 구축할 계획을 가지고 있다. WMO 역시 2020-2030 장기 전략에서 큰 틀의 기후 예측에 있어서 R2O 전환에 대한 가속화 필요성을 언급하였다. 세계적인 추세에 맞게 우리나라도 기후예측시스템 개발의 효율적인 R2O 전환을 위해 노력하고 있는 만큼 좀 더 체계적인 공동개발 틀과 그 체계를 담은 공식적인 문서가 마련될 필요가 있다.

연구개발 성과의 현업화 극대화라는 공동개발의 최종 목표를 달성하기 위해서는 공동개발에 참여하고 있는 구성원들이 유기적으로 상호 협력할 수 있는 환경 조성이 중요하다. 이를 위해서는 공동개발이 진행되는 일련의 과정과 연구 환경을 구성원들이 충분히 이해하게 하고 협력에 미진한 부분들에 대한 개선을 해나가는 것이 필요하다. 따라서 이 과제에서는 공동개발 체계에서의 주요 개선점들을 도출하고 개선 방안들을 제안함으로써 궁극적으로 국가기후예측시스템 공동개발 즉 R2O의 기능을 보다 공식화, 체계화, 문서화할 기반을 제공하려고 한다.

(2) 공동개발 프로세스 구조화

현재 우리의 공동개발 사이클은 주로 기획-연구개발-현업화의 단계를 거치는데 그 중간에 현업 실무진들을 통해서 현업 적용성을 테스트하거나 일부는 APCC를 통해 현업화 가능성이 테스트되고 있어 일련의 절차를 정립할 필요가 있다. 또한 참여하고 있는 주체들마다 기대 받고있는 역할이 완벽히 정의되어있지 않으며 그 역할의 범주가 모호하다.

ECMWF는 R2O의 프로세스를 계획-개발-테스트베드-소통-실행-평가 주요 6개 활동으로 갖추었고, NOAA의 R2O 프로세스는 기능에 초점을 맞추어 개발, 관리와 의사 결정, 테스트베드, 현업화 후보 기술, 평가, 실행, 소통으로 그 체계를 구성하였다. 현재 진행되고 있는 우리의 R2O의 프로세스와 관련 활동들을 기반으로 삼고 각 기관들이 가진 체계의 공통점과 장점들을 추가하여 국내 기후예측시스템 공동개발 체계를 4 단계, 3요소로 구조화하였다. 단계는

현업화 기획, 연구개발, 현업화 테스트베드, 현업화 실행으로 구성했고 요소는 연구개발허브소통, 현업화평가, 개발프로토콜로 구성하였다(Figure 7).

K-R2O 프로세스 구조화에 대한 제안뿐만 아니라 각 단계와 요소에 대한 기능 및 역할의 범위 또한 제안하고자 한다(Figure 8).



Figure 7. Schematic of K-R2O structure showing 4-step process and 3-requisites.



Figure 8. Suggestion of the K-R2O structure with 4-step process and 3-requisites.

(가) 현업화 기획

개발 결과들이 현업으로 결실을 맺기 위해서는 관위주로 공동개발이 선도되고 업무 지원이 이루어질 필요가 있어 현업화 기획의 주체는 기상청과 과학원으로 제안한다. 현업화 기획의 주요 역할은 국가 기후예측모델 공동개발에 관련된 정책을 기획하고 수립, 선도의 중심인 연구개발 협의체를 운영한다.

① 공동개발 정책, 기획

국가 기후예측시스템 공동개발과 관련된 정책 방향 설정과 추진 전략을 수립하고 중장기 로드맵 기획을 통해 중점 추진과제를 선정한다.

② 연구개발협의체 운영

국립기상과학원이 발간한 장기에측시스템 개발(2019)에 따르면 연구개발협의체는 기상청 현업 기후예측시스템의 예측성 향상을 위해 연구개발 사업 관련 기획, 추진, 평가, 관리에 관한 사항을 협의 조정하는 기구로 사업 성과물의 현업화가 원활하게 추진될 수 있도록 종합적으로 지원하고, 기후실무협력회의 및 현업화 심의위원회에 R&D 통합, 확대를 추진하는 역할을 한다. 또한 기술적 기준과 역할의 범위 등 공동개발 과정의 단계 단계마다 충족해야하는 표준을 정의할수 있어야 한다.

(나) 연구개발

우리나라는 다른 나라와 달리 기후모델링 커뮤니티의 주요 개발 인력이 관보다는 학계에 포진해 있어 연구와 기술개발에 관련된 과업의 주체는 학계를 중심으로 수행되길 제안한다. APCC는 지면 모델에 특화된 개발 연구 인력을 보유하고 있어 공동개발 분야 중 지면성분 개선에 대한 과업은 APCC에서 함께 수행하고 있다. 연구개발 단계에서의 주요 역할은 원천기술을 개발하여 예비실험을 수행한 뒤, 개발된 기술에 맞는 맞춤형 평가, 진단 결과를 도출하고 최종적으로 기술을 전달한다.

① 원천기술 개발

현업화 기획으로부터 수립된 정책에 따라 우선적으로 구현되어야하는 원천기술을 개발하는 단계이다. 이 단계의 연구는 과학적 의미 창출에 국한되지 않고 실행 가능한 예보 생산/개선에 중심을 두고 진행되어야 한다.

② 예비실험 수행

일반적으로 기후모델링 연구는 방대한 양의 전산 자원과 많은 인력이 필요한 연구라 학교 차원에서는 많은 실험을 수행하여 일반화 된 평가를 진행하기 힘들다. 따라서 개발된 기술은 예비실험을 수행함으로써 테스트될 수 있다. 이 예비실험은 추후 마련될 개발프로토콜에 기반하여 이루어진다면 현업화 실행에서의 편의를 기대할 수 있을 것이다.

③ 맞춤형 평가·진단

다양한 지구 시스템 요소와 다양한 지역의 변화를 광범위하게 살펴야하는 기후모델의 복잡성 때문에 공동개발 역시 분야별로 나누어 진행되고 있다. 따라서 개발된 기술의 결과 역시 일차적으로는 분야별/기술별 특징에 맞추어 평가·진단되어야 한다. 추후 개발될 표준성능·진단 평가체계의 활용을 통해 자신의 기술이 객관적 잣대에서 가지는 특성도 파악할 수 있을 것이다.

④ 기술전수

최종적으로 개발된 기술은 약속된 일정에 따라 현업실무진에게 전달되어야 한다. 대면을 통해 직접 전달하는 것과 더불어 개발된 기술을 한 데 집약할 수 있도록 협력 클라우드인 glair로의 통합 과정도 필요하다. 개발된 기술이 연구개발협의체의 의사결정 과정을 통해 현업화 후보 기술로 고려된다면 테스트베드 과정을 위해 APCC로 기술과 노하우가 전달되어야 한다.

(다) 현업화 테스트베드

NOAA의 공동개발 체계에 의하면 테스트베드는 준현업 프레임워크에서의 테스트를 위해 개발자와 현업 과학자/전문가들이 함께 일하는 관계이다. APCC는 2021년 공동개발체계를 통한 기후예측시스템 개발의 현업화 테스트베드 시범 역할을 수행하였고 2022년부터 본격적으로 그 역할을 발전시켜 나가고 있다. K-R2O에서 테스트베드의 역할은 “기술이식-준현업 실험-현업 적절성 평가-현업후보군 선정-연구결과 및 실험 자료 공유” 라는 일련의 과정을 통해 수행된다.

① 기술인계

테스트베드 전수 기술이 선정되면 연구개발협의체는 APCC로 그 결과를 전달한다. APCC는 해당 기술을 수행할 담당자를 선정하고 이후 기술 개발자와의 협력을 통해 소스코드 입수 및 시스템으로의 이식, 기술에 대한 노하우 및 상세한 개발 결과를 습득한다.

② 준현업 실험

APCC는 최근 기상청 슈퍼컴퓨터 원격접속실을 센터 내에 마련하여 전산 자원에 대한 접근성을 높일 수 있었다. 전산 자원에 있어 학계에 비해 상대적으로 좋은 환경을 가지고 있기에 예비 실험보다는 훨씬 방대한 양의 실험이 가능하다. 해서 테스트베드에서는 입수된 기술을 적용하여 현업과 동일한 조건에서 과거 20년간의 기후를 재현하는 준현업 실험을 수행한다. 이때 개별기술을 적용하는 실험 혹은 개발된 여러 기술이 동시에 적용되는 통합 예측 실험이 가능 한데 실험의 종류는 기술개발의 진행 상황에 따라 결정될 것이다.

③ 현업화 평가

테스트베드에서의 현업화 평가는 일차적으로 개발된 기술의 특성을 확인할 수 있게 기술 맞춤형 평가·진단을 수행한다. 현업환경과 동일한 조건에서 수행되는 만큼 과학적 효과와 더

불어 현업에서 안정적으로 운영될 수 있는지에 대한 기술적 능률도 확인될 수 있어야 한다. 또한 추후 마련될 표준성능·진단 평가 체계를 활용하여 현업화 의사 결정의 증거자료를 구비할 수 있어야 한다.

④ 현업후보군 선정

테스트베드는 현업화 평가 결과를 바탕으로 해당 기술이 현업후보군으로 선정되어야 하는지 그렇지 아니한지에 대한 정보를 줄 수 있어야 한다. 그러나 기후 모델의 복잡성으로 현업으로 전환되어야 할 명확한 기준(예를 들면 스코어의 커트라인)을 만들어내는 일부터가 쉽지 않다. 테스트베드에 대한 경험이 축적될수록 그 기준과 현업 후보군 선정 가이드에 대한 의견이 구체화될 수 있으리라 기대한다.

⑤ 연구 결과 및 실험 자료 공유

연구 결과는 약속된 일정에 따라 과학원으로 전달되어야 한다. 현재는 공문의 형태로 기술 노트나 가이드를 제출하고 있다. 추후 협업 클라우드가 좀 더 개선되면 glair를 통해 개발그룹과도 결과를 공유할 수 있도록 한다. 또한 테스트베드에서 생산된 준현업 과거기후 실험자료는 기술 전수에 대한 환류 차원에서 개발그룹과 공유될 수 있어야 한다. 이 과정을 통해 개발된 기술이 공동연구의 형태로 더욱 내실화 될 수 있길 기대한다.

(라) 현업화 실행

현업화 실행의 주체는 현업실무를 주관하는 곳인 국립기상과학원이다. 현업화 실행 단계에서는 현업화 의사결정, 현업 시스템으로의 기술 이식, 현업화 평가, 코드 검증의 역할이 이행되어야 한다.

① 현업화 의사결정

현업 운영 주체는 후보 기술이 현업에 적합한지 여부를 결정할 책임이 있다. 연구개발 단계와 테스트베드 단계로부터 공유 받은 결과들을 근거로 종합적으로 판단하여 현업으로 전환할 기술을 선택해야 한다. 이후 해당 기술에 대한 현업화 심의를 거쳐 공정성을 확보한다.

② 현업 환경으로의 전환, 현업화 평가, 코드 검증

현업으로 전환이 확정된 기술은 현업 시스템에서 구현된다. NOAA의 경우 선택된 기술이 현업으로 전환되는 과정은 수 개월에서 2년 정도 소요된다. 현업화 평가는 인력과 시간이 재투자되지 않도록 테스트베드에서의 과업을 고려하여 설계하고 현업 실무진의 관점에 맞는 평가가 이루어져야 한다. 동시에 소스 코드의 가독성, 안정성 등 소 소프트웨어 품질을 검증하여 현업 안정화를 도모할 수 있어야 한다.

(마) 현업화 평가

공동개발에 필요한 요소로 현업화 평가, 연구개발허브 소통, 개발프로토콜을 선정 하였다. 현업화 평가는 크게 표준성능평가, 표준진단평가, 과학적 효과, 기술적 능률 4가지로 구분하였다.

① 표준성능평가, 표준진단평가

표준성능평가와 표준진단평가는 다양한 기후인자, 지역, 계절 등에 있어서 개발 기술이 가지는 특성을 종합적으로 판단함으로써 판단의 객관성과 공정성을 도모하고 어떠한 기술에 대해서는 공통적으로 적용함으로써 기술 간 공평성을 확보하는 체계이다. 그 중 표준성능평가는 통계적 메트릭에 근간하여 예측 능력을 정량적으로 측정하려는 평가 방법인 반면 표준진단평가는 모델의 기후 시스템 내 물리적, 역학적 관계 등이 모의되는 정도를 살펴보는 평가 방법으로 정의하였다. 표준성능·진단 평가 틀에서는 현업실무진 및 전문가와의 논의를 통해 합의된 메트릭 및 대상을 평가한다. 커뮤니티 구성원간의 신뢰를 공고히 할 수 있는 잘 설계되고 활용이 용이한 표준 체계가 마련되길 기대한다.

② 과학적 효과, 기술적 효능

과학적 효과는 개발된 기술을 통해 현업 대비 개선된 과학적 성능, 품질, 신뢰성을 검증하는 것이다. 연구개발과 현업화테스트베드에서 언급된 것처럼 과학적 효과를 검증하는 방법은 기술의 특성에 의존적일 수 있다. 또한 과학적 효과와 함께 소프트웨어의 품질, 계산 성능 등 현업에서 안정적으로 운영될 수 있는지를 확인하는 기술적 능률도 도출될 수 있어야 한다.

(바) 연구개발허브 소통

커뮤니티의 소통은 R2O 프로세스의 활동을 지원하는 주된 요소이므로 ECMWF나 NOAA의 공동개발 체계에서도 공통적으로 중요하게 여기고 있다. 이를 위해 협업을 위한 클라우드인 glair를 구축하였고 정기적인 성과보고회나 비정기적 회의, 교육, 워크숍 등을 통해 연구개발허브 내 소통이 이루어지고 있다.

① 협업 클라우드(glair)

주요 선진기관 공동개발 체계들은 커뮤니티 구성원들의 소통을 위한 인터페이스나 공유 저장소 등을 제공한다. 우리 공동개발 체계에서도 그러한 역할을 위해 협력 클라우드인 glair와 공동연구개발플랫폼을 구축하였고 점진적으로 개선해나가고 있다. 개발된 기술의 구현 성공은 잘 관리되는 소프트웨어, 코드에 달려 있다. 따라서 커뮤니티 지원에 있어 코드, 소프트웨어 관리를 포함한 공유 저장소 관리는 중요하다. 저장소 관리 기능에는 코드의 히스토리를 추적하고 허브 구성원과 개발자에게 접근 권한을 제공하는 것이 포함된다. 저장소 관리에는 코드 관리를 위해 설계된 소프트웨어 뿐만 하드웨어의 관리도 수반된다. 해외 일부 공동개발 체계에서는 저장소의 유형, 위치 및 주요 기능과 활용 과정을 정리하는 저장소 관리 계획 보고서를 작성하고 지속적으로 발전시킬 것을 권고하고 있다. 추후 플랫폼의 활성화를 통해 최신 코드 배포, 사용자 가이드/과학적 문서/테스트를 위한 데이터 제공, 헬프데스크 운영 등 개발자와 사용자 지원도 강화될 수 있길 기대한다.

② R&D 보고회

주기적으로 개발 진도를 확인하고 성과에 대한 의견을 교류할 수 있어 성과보고회는 공동개발에 있어 중요한 기능을 가진다. 현재의 우리 공동개발 체계는 착수, 중간, 최종 보고회와 같은 정기적인 R&D 성과 보고회를 개최하고 있으며 이를 통해 세부 과제의 연구 결과를 공유

하고 진도를 점검, 필요한 협력 사안들에 대해 논의하며 연구자와 현업수요자 간에 상호 피드백하는 과정을 거친다.

③ 기타(워크숍 등)

공동개발 플랫폼을 통한 상시 소통과 세부과제별 R&D 성과보고회는 일대일 혹은 일대다 형태의 소통체계이다. 연구개발허브 구성원 전체가 서로 상호 교류할 수 있는 정기적 워크숍이나 교육, 혹은 허브 내 주요 이슈가 있을 때 함께 모여 이를 논의할 수 있는 비정기적 이벤트(예를 들어 패널토의나 학회)도 소통을 위한 좋은 수단이 될 수 있다.

(사) 개발프로토콜

공동개발 체계에서는 공통적으로 고려해야하는 개발표준을 정립함으로써 현업 요구사항들이 시스템에 통합되기 더 용이한 형태로 개발/테스트 될 수 있게 유도한다. 공동개발 프로토콜은 크게 실험, 자료, 평가, 코드로 구분할 수 있다. 각각의 개발프로토콜에서 다루어야 할 세부요소를 Table 6에 정리하였다. 현재의 국가 기후예측시스템 공동개발 체계는 연구 성과를 도출할 기반 환경이 각 연구자 별로 서로 상이하고, 표준화 된 개발 과정의 부재로 기술 통합과 연구성과 집약에 어려움이 있다. 이를 해소하고자 국립기상과학원은 표준화 된 개발 플랫폼을 구축하고 있고 이 과정을 통해 상기 제시된 개발프로토콜의 세부 요소들이 정립될 수 있으리라 기대한다.

Table 6. Requisite details of R2O developmental protocol making.

| Classification | Requisite details |
|----------------|--|
| Experiment | model composition, model version, spatial resolution, ensemble size, lead time, standard operation suite, system spec, forecast and hindcast period, |
| Data | the number of case, development language input or output format, file naming structure, directory and file structure |
| Evaluation | metric, variable, target lead time, target area, climatological standard normal, verification period, reference data(OBS or reanalysis), development language for evaluation tool, baseline for decision making on the transition to operation |
| Code | coding plan coding rule coding rule parallelism quality management, self-verification, peer-review verification |
| | readability, expandability, ease for the management, modularity, use of interface simplification, consistency, naming rule, writing comments, unit module development, optimization, code management |

(3) 공동개발 체계 주요 개선점

이 연구에서는 연구개발허브 구성원들의 국가기후예측모델 공동개발 관련 인식 현황 파악을 위해 의견수렴을 진행하였다. 의견수렴의 방법으로 인터뷰, 설문조사, 패널토의를 수행하였다. 제3장에서는 의견수렴의 주요 결과를 소개하고, 그 결과를 바탕으로 주요 개선점을 도출한다.

(가) 인터뷰를 통한 의견 수렴

공동개발을 위한 개선방안을 도출하기 위해서는 공동개발에 대한 인식에 대한 조사가 선행되어야 한다. 연구개발, 현업화 테스트베드, 현업 실행 등 R2O 과정 내에서 주요 역할별로 단계를 나누어 각 그룹에 참여하고 계신 분들 중 12인을 대상으로 인터뷰를 진행하였다. 3장에서 제안한 공동개발 체계 구조(안)에서의 현업화 단계별 역할 및 이행 범위와 해당 단계 주체로서의 개선 의견에 대해 논의하였다.

현업화 단계별 역할 및 이행 범위에 있어서는 주로 도출된 4단계·3요소 체계가 국가 기후예측모델 공동개발 성과의 현업 전환 과정에 맞게 잘 수립되었고 이 체계가 영속적일 수 있게 현실적인 문제들이 반영되어야 한다는 의견이었다. 연구개발협의체는 기상 학계 및 기후 모델링 산업의 확대를 위해 미래 지향적으로 공동 개발 과제를 설계하고 협력 커뮤니티가 활성화될 수 있도록 노력할 필요가 있으며 특히 현업화 기획 주체인 기상청과 과학원에서의 구체적인 추진 계획 및 R&D 로드맵이 있어야 기술 전수에 있어서 공동개발 협력 그룹 간의 예상 가능한 시스템이 만들어질 수 있다는 의견이 있었다.

주요 개선 의견으로는 기관 간 기술전수에 대한 정책의 부재로 학계로부터 테스트베드(APCC)로의 기술전수에 있어서 문제점이 대두되고 있어 R&D의 사업 특성을 고려하여 기술이전을 공식화하는 방안이 마련되어야 한다는 의견이 있었다. 그리고 슈퍼컴퓨터 활용에 있어서의 접근성 개선 및 모델 운영 체계 변화에 따른 교육 프로그램 운영 등을 통해 기후예측모델 개발자의 연구 환경에 대한 편의가 조성되어야 한다는 중지가 모아졌다. 공동개발 및 현업화의 수월성을 확보하기 위해서는 표준화 된 평가 지표와 체계가 필요하며 현업화 평가라는 용어를 현업 적합도 평가로 순화하길 제안하기도 하였다. 또한 국가 기후예측시스템 공동 개발에 참여하고 있는 다양한 R&D의 성과 보고가 사업 별 보고회 형태보다는 공동 개발 워크숍의 형태로 추진되길 제안하였다. 연구 용역 활용 등을 통해 데이터 표준화 및 자료 처리 자동화에 관한 틀이 마련되어 소비적인 중복 작업에 대한 개선을 기대하였다. 추가로 glair 활성화, 코드개발지침 요령의 필요성에 대한 의견도 있었다.

(나) 설문조사를 통한 의견 수렴

좀 더 다양한 구성원들의 인식을 파악하고 통계적으로 의미 있는 분석을 위해 설문조사를 수행함으로써 공동 개발에 대한 인식과 개선점을 파악하고자 하였다. 설문조사는 연구개발허브 내 주요 연구 책임자를 중심으로 한 37인을 대상으로 2022년 5월 23일부터 2022년 6월 3일까지 이루어졌다. 이 설문조사에서는 공동 개발 관련 인식과 함께 공동 개발 체계 내에서의 만족도 및 단계별/연구환경 개선점들을 조사하여 다음 (3)절에서 주요 개선 방안을 제시하는데 활용하였다.

설문조사의 응답자 수는 16명으로 학계에 소속된 응답자가 37.5%로 가장 높았으며, 정부부처 18.8%, 산업계 18.8%, 기타 공공기관에 25%가 소속되어 있었다. 응답자 들의 대다수(68.8%)는 국가기후예측시스템 개발/개선 분야에서 주로 1년~5년의 연구 경력을 보유하고 있었으며 응답자 들의 업무 분야 분포는 ‘현업화 연구개발’이 62.5%로 가장 많았고 그 뒤를 이어 ‘현업화 테스트베드’가 25%, ‘현업화 실행 및 구현’이 12.5%로 나타났다(Figure 9).

① 공동개발에 대한 인식

“국가 기후예측시스템 공동개발”이라는 용어에 대해 전체 응답자의 68.8%가 들어본 적이 있다고 답하였다(Figure 10). 연구개발 현업화(R2O) 강화 계획에 따라 국가 기후예측시스템 공동개발을 위해 학, 연, 관, 산이 함께 협력하는 기후분야 협력체계(생태계)가 형성되어 있다는 사실을 알고 있는지에 대한 질문에 ‘매우 잘 안다’와 ‘잘 안다’가 각각 18.8%, 31.3%, 보통이라고 응답한 비율은 37.5%였으며, ‘잘 모른다’가 12.5%로 나타났다(Figure 11).

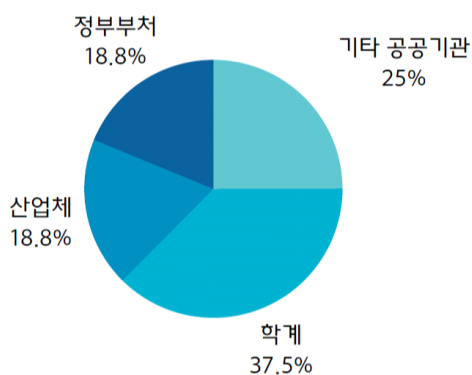


Figure 9. Surveyee rate.

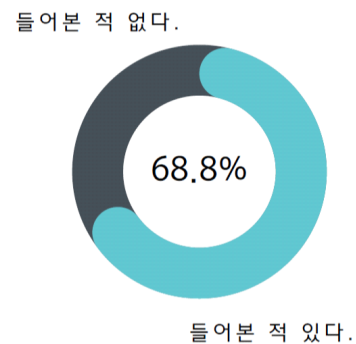


Figure 10. Recognition on the jointly developing projects.

“연구개발허브”가 공동 개발에 참여하는 학계와 산업계의 전문가 그룹을 포함 하는 연구 개발 공동 협력 그룹임을 응답자의 절반 이상인 56.3%가 잘 알고 있었으나 25%는 보통이거나 18.8%는 잘 이해하지 못하고 있었다(Figure 12).

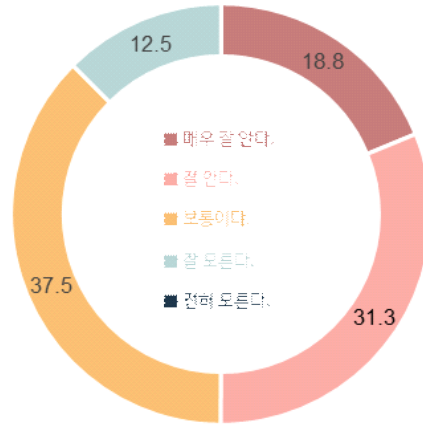


Figure 11. Understanding on the jointly developing system.

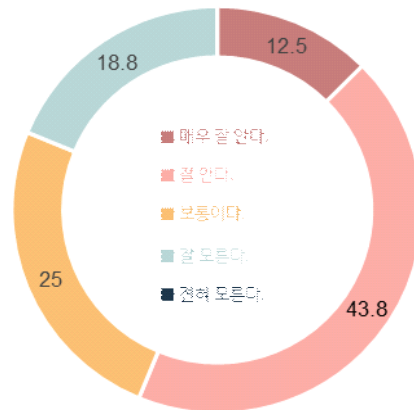


Figure 12. Understanding on the joint development community.

기상청 현업 기후예측시스템의 예측성 향상을 위해 연구개발 사업 관련 기획, 추진, 평가, 관리에 관한 사항을 협의 조정하는 기구인 “연구개발협의체”에 대한 이해도는 ‘보통이다’는 응답이 37.5%로 제일 많았다. ‘매우 잘 안다’와 ‘잘 안다’가 12.5%, 25%, ‘잘 모른다’가 18.8%, ‘전혀 모른다’라고 응답한 비율은 6.2%로 나타나 절반이 넘는 응답자가 연구개발협의체에 대해 잘 이해하지 못하는 것으로 나타났다(Figure 13).

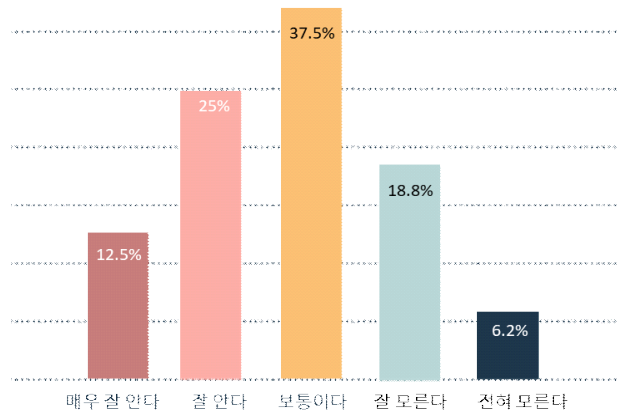


Figure 13. Understanding on the governance of the jointly developing project.

국가 기후예측모델 개선을 위해 개발된 기술을 인계 받아 현업과 동일한 환경에서 실험을 수행한 뒤 해당 기술이 현업으로 전환될 수 있는지 여부를 평가하는 “현업화 테스트베드”의 역할을 APCC가 수행한다는 것에 대해 ‘매우 잘 안다’와 ‘잘 안다’가 25%, 50%로 나타나 테스트베드에 대한 이해도가 비교적 높은 것으로 보여 진다.

“glair”가 공동개발 협력을 체계화하고 신속한 현업화를 도모하기 위해 마련된 협업 클라우드임을 응답자의 절반 이상(62.5%)이 잘 이해하고 있었으나, 잘 모르거나 전혀 모르는 응답자도 25%에 달했다(Figure 14).

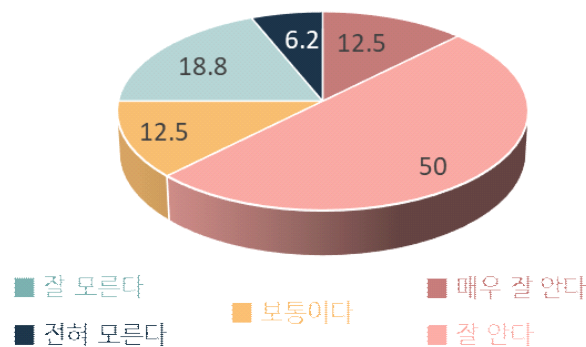


Figure 14. Recognition on the glair as a cooperative cloud.

② 만족도 조사

현업화, 실용화를 강화하기 위해 수행하고 있는 이 공동개발이 목적에 부합하게 운영되고 있는지 묻는 질문에 약 절반에 해당하는 응답자(43.8%)가 긍정적인 답변을 하였다(Figure 15). 그 근거로 현재 과제의 최종 목표가 현업화임을 주지하고 있어 목적 한 방향으로 정확히 가고 있을 뿐만 아니라 연구 결과의 활용이 실제로도 확대되었고 신속하게 현업화 되고 있기 때문 이라고 서술하였다.

그러나 현업 실험이 가능한 연구 용 슈퍼컴퓨터나 모델링 교육이 필요하다는 의견, R&D 로드맵이 필요하고 공동개발이 좀 더 조직화 될 필요가 있다, 체계적인 평가 틀이 필요하다 라는 의견도 있었다.

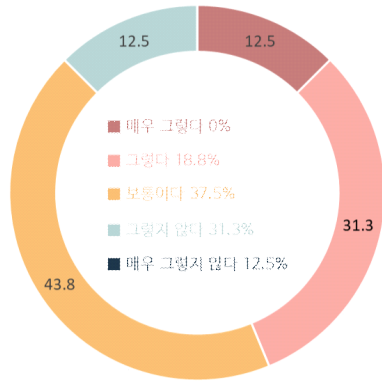


Figure 15. Fitness for purpose of the joint development activity.

국가 기후예측시스템 공동 개발이 원활하게 이루어지고 있다고 생각하는지에 대한 질문에 전체 응답자의 18.8%만이 긍정적인 대답을 하였다(Figure 16). 정부 조직이라는 한계를 극복하며 소수에 의해서나마 꾸준히 진행되고 있다는 점이나 공동 개발 체계에서의 뼈대에 해당하는 협업 클라우드(glair)가 안착되었다는 점만으로도 원활하다는 의견이었다. 그러나 응답자의 43.8%는 부정적인 대답을 하여 공동 개발 체계에 개선이 필요함을 시사하였다. 공동 개발 운영 자체에 대한 홍보 및 가시적인 활동이 부족하고, 기획 단계에서의 이해관계자참여가 제약적이거나 연구 개발 보고 과정은 있으나, 활발한 협의·협력이 부족하다는 등 제한적인 커뮤니케이션에 불편함을 느낀다는 의견이 있었다. 또한 연구 개발 실용화에 대한 성공 사례가 부족하다, 거버넌스가 잘 알려지지 않았다, 공동 개발 로드맵이 없다는 의견이 부정적인 대답의 근거였다. 그리고 기상청이나 과학원을 방문해서 실험하는 환경이 불편하고 모델 공유 및 시스템 활용에 제한이 따르는 현업 시스템의 접근성 문제도 제기되었다.

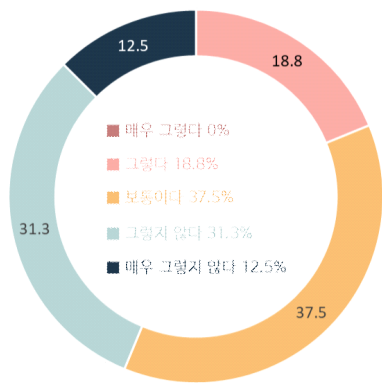


Figure 16. Degree to which the jointly developing projects are smoothly operated.

③ 공동개발 체계의 주요 개선점

공동개발에 대한 인식과 만족도 조사로부터 도출한 다섯 가지 주요 개선점에 대한 응답자들의 의견을 정리하였다.

1) 거버넌스

창출되는 많은 연구과제를 현업에서 효과적으로 소화해내기 위해서는 개발된 기술을 흡수하고 적절히 공유하며 운영할 수 있는 거버넌스를 가진 연구개발협의체가 필요하다. 연구개발협의체에 대해 얼마나 이해하고 있는가라는 질문에 25%는 잘 모르거나 전혀 모른다고 응답(Figure 13)하여 개선이 필요한 부분으로 나타났다. 구체적으로는 ‘구심점 역할을 할 수 있는 연구개발협의체가 잘 조직되어 안정적인 기반과 토대를 마련해야 한다.’, ‘정책 수립을 바탕으로 한 연구기획과 장기적인 로드맵이 필요하다.’, ‘수립된 기획, 정책에 대한 지속성 담보가 중요하다’, ‘단계별 연구 환경 개선이 필요하다.’, ‘R2O 체계의 실질 구동에 필요한 시급한 실험을 위한 자원이 필요하다.’, ‘공동개발에 대한 공유, 확산 증대’ 등의 의견이 있었다. 정리하면 거버넌스 측면에서는 연구개발협의체 기능 활성화, 공동개발 중장기 로드맵 공유, 연구 지원 강화가 필요하다는 것이 주된의견이었다.

2) 전산환경

응답자의 약 80%가 기상청 슈퍼컴퓨터를 사용(Figure 17)하고 있었고 또한 응답자의 약 80%가 그들이 이용하는 전산 자원 이용에 만족하지 못하고 있었다(Figure 18). 국가 기후예측 모델을 활용한 연구 및 현업을 수행할 때 개선이 시급한 연구 환경이 무엇이냐는 질문에 가장 많은 응답을 차지한 것과 상위 3위~5위가 전산 환경에 관한 것이었다(Figure 19).



Figure 17. Ratio of computational resource used.

자세히 살펴보면 ‘기상청 내부망에 대한 원격지 접속이 어려워 모델 개발, 모델 적분 과정의 실시간 모니터링 및 평가가 더디다.’, ‘계산속도나 처리 속도는 만족스러우나 보안상의 이유로 데이터 전송 단계가 많아 기상청 자료를 사용하기 위한 과정이 매우 힘들’, ‘모델 적분과 분석을 하는 위치가 달라 이동 간 불필요한 시간 소모’, ‘국가 자산을 무상 공유함에 감사드리지만, 국가 네트워크 보안 정책의 엄격함 으로 인해 원활한 사용에 제한이 있음’ 과 같이 슈퍼컴퓨터 활용 접근성과 자원 할당 및 보안 정책에 대한 의견이 있었다. 또한 ‘현업과 연구 플랫폼 사이의 갭을 줄일 수 있는 방법이 고려되어야 함’, ‘과학원의 노력에도 불구하고 가상화 기반 모델 활용 도가 낮음’, ‘개발 테스트가 수월했으면 함’ 등 커뮤니티 모델 개선에 대한 의견이 있었다.

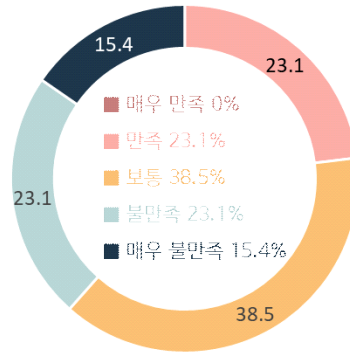


Figure 18. User satisfaction on the computational resource.

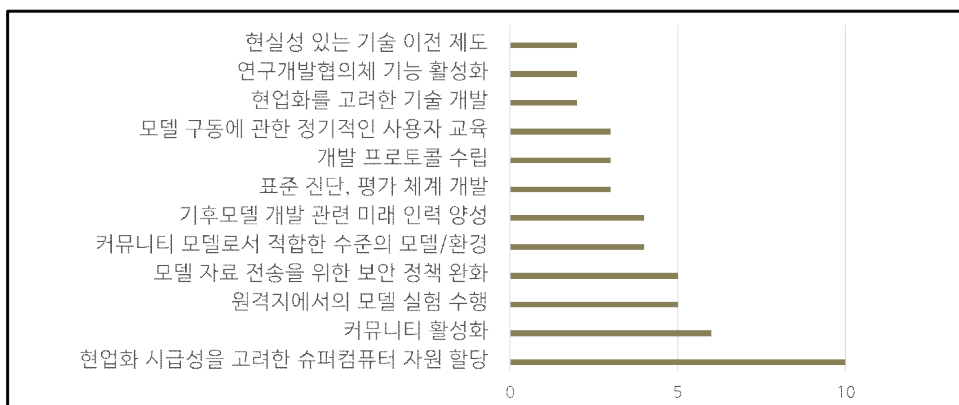


Figure 19. Ranking of research environments in urgent need of improvement.

3) 협력 커뮤니티 간 소통

응답자들은 공동개발을 통해 기대하는 바가 무엇인지 묻는 질문에 공동개발 협력 커뮤니티가 활성화되길 희망한다고 가장 많이 선택하였다(Figure 20). 이러한 소통과 협력을 위해 개발된 플랫폼이 glair이다. glair의 존재에 대한 인식은 높은 편(Figure 14) 이고 glair의 구축은 공동개발이 나아가야 할 길을 체계적으로 갖추는 고무적인 소식이라고 이해하고 있었다. 그러나 응답자들은 공통의 환경, 개발 관련 정보를 좀 더 원 활히 공유하길 원했고 ‘공동’ 개발인 만큼 subversion 관리를 위한 체계구축이 필요하 다고 응답했다. 또한 모델링 기술에 대한 교육이 강화되고 지속적으로 공유하는 것이 필요하다고 응답하였다.

4) 국내 기후모델링 역량 강화

공동개발을 통해 기대하는 바에 있어서 두 번째로 높은 응답이 국내 기후 모델링 역량 강화, 전문가 양성이었다(Figure 20). 단기 예보 모델링에 비해 기후 모델링 분야의 재정 지원이

약하므로 기후 모델링 역량 강화를 위해 좀 더 투자되어 체계적이고 안정적인 지원을 바탕으로 꾸준히 전문가를 양성해야 한다는 의견이 많았다.

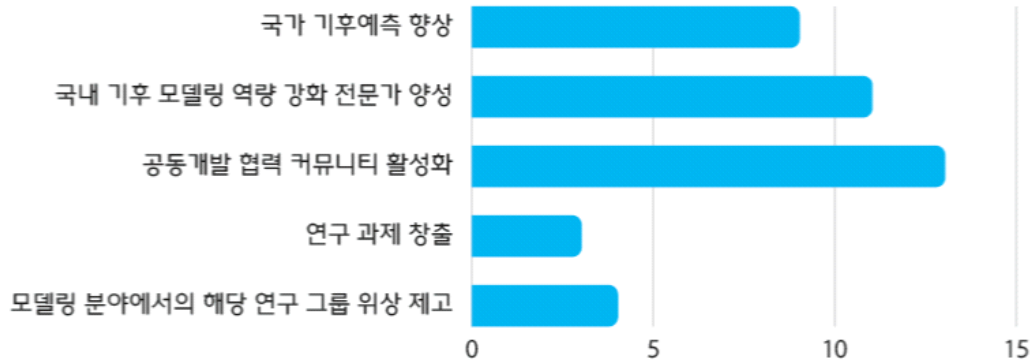


Figure 20. Participant's expectation by doing the jointly developing projects.

5) 기술전수

테스트베드는 R&D에서 나온 결과를 평가하고 어떤 연구들이 현업화로 이관되기 좋을 것인지 검증하는 역할로 기술통합 방향에 대한 코디네이터 기능을 수행하길 기대 받고 있다. 현업화 단계를 고려할 때 학계의 기술 전수가 R2O 프로세스의 핵심이나 그 과정이 공식적인 절차나 과업 내용에 따라 수행되고 있지 않아 개선이 필요하다는 의견이 있었다. 또한 정제된 연구 결과의 공유 뿐만 아니라 기술을 개발하거나 평가할 때의 경험과 노하우도 함께 전달되어야 한다는 의견이 있었다. 연구개발협의체 및 연구 개발 주체들과 잘 소통하여 기술 전수의 현실화가 필요한 실정이다. 설문조사 결과에 의하면 응답자들의 75%가 테스트베드에 대해 잘 이해하고 있어 기술 전수 현실화에 대한 방안이 수월하게 마련될 것이라 기대한다(Figure 21).

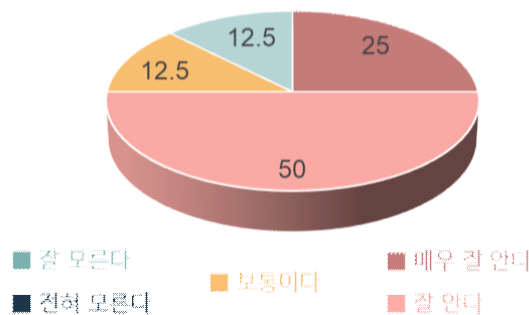


Figure 21. Recognition for the pre-operational testbed.

(다) 패널토의를 통한 의견수렴

APEC기후센터가 주최하는 ‘2022년도 제3차 기후예측워크숍’이 2022년 6월 30일 ~ 7월 1일 양일간 부산 벡스코에서 개최하였다. 이번 워크숍에서는 기후 예측 기술의 연구 및 개발에 서부터 현업으로서의 실질적인 전환을 위한 실용화(R2O) 체계 개발에 대한 방안을 공유하고 주요 사례를 소개하였다. 특히 효과적인 기후 예측 기술 환류 및 예보자 수요를 고려한 연구자(R&D)-이행자(Testbed)-사용자(Operation) 간 합의형 실용화 체계의 발전 방향을 다룬 패널토론에서 연구자, 이행자, 사용자를 대표할 수 있는 여섯 명의 패널을 모시고 국가 기후예측모델 공동개발을 위한 발전 방향에 대한 의견을 나누었다.

패널들은 “공동 개발에 관한 현실과 중요성을 인식하고 함께 해결해보자는 공감대로부터 공동개발은 3, 4년 전부터 시작되었는데 공동 개발 사이클의 기본 체계는 이미 만들어졌고 몸으로 익히고 있는 단계라고 보여진다.”며 “모델링 역량이 부족한 상황에서도 어렵게 이끌어 오고 있는 공동 개발이 테스트베드 및 glair 등 기술이 기반이 되어 체계적으로 발전되고 있어 고무적이다.”라고 감회를 밝혔다. 또한 패널들은 “기술의 실용화를 위한 행동력에 책임을 느끼며 최선을 다하고 있으며 추후에도 체계가 잘 정착하고 연구개발허브가 고민하는 부분들을 잘 고려하도록 노력하겠다.”, “현업 사용자로서 예산, 인력, 물리적, 재정적 정책들에 대한 노력을 기울이고있다.”, “기후 커뮤니티가 슈퍼컴퓨터를 잘 쓸 수 있는 부분을 한 단계 더 고민하겠으며 기후 커뮤니티와 슈퍼컴퓨터센터 상호 간의 이해를 기반으로 협력해나가자.”고 언급하여 국가 기후예측모델 공동 개발 발전에 대한 공감대와 각 계의 노력들을 확인할 수 있었다.

발전 방향에 대한 주요 내용은 설문조사에서 도출한 주요 개선점과 크게 다르지 않았다. 혼재되고 체계적으로 공유가 되지 않고 있는 현 공동개발의 개선점을 누군가가 컨트롤 할 수 있게 공동개발의 주체가 반드시 있어야 한다며 연구개발협의체의 기능 활성화를 강조하였다. 이를 위해 연구개발협의체의 구성 및 역할 등을 위한 관련 제도 제정 및 정비에도 힘을 기울여야 한다고 언급했다. 또한 기획-개발-성과공유-평가 등 전 주기에 대해 학·연·관·산이 긴밀하게 협의하여 수요맞춤형 R&D를 기획하고 어떠한 로드맵상에서 기후 모델 개발이 이루어져야 하는지 사전에 공유할 필요가 있음을 강조하며 테스트베드 적용 사업 및 기술에 대한 대상 기술 선정을 위해서라도 장기적 로드맵이 필요하다고 하였다. 거대한 R2O 체계가 잘 굴러가려면 테스트베드 역할이 필수적이고 이러한 테스트베드의 기능을 APCC가 수행하는 것은 공동개발 체계 발전의 팔목할만한 시작점이라고 언급하며 현업화 테스트베드에 대한 기대감을 드러냈다. 그와 동시에 기술 전수와 실험 환경 구축 등의 지원이 공식적인 절차나 과업내용에 따라 수행될 필요가 있고 R&D에서 나온 좋은 연구 결과를 APCC에서 모두 소화 하기 어려운 점을 우려하는 등 테스트베드에서의 개선점도 논의되었다. 그리고 연구자들이 처한 모델 개발 환경이 현업 친화적이지 않아 어려운 여건 속에서 연구 개발 중이므로 기상청과의 네트워크 및 개발 환경에서의 접근성 개선이 공동개발 발전에 필요한 부분임을 강조하였다. 기후 모델링 R&D 개발을 위한 재정 지원을 늘리는 등 국내 기후모델링 역량을 강화할 필요가 있다는 의견도 있었다. 그러나 신진 모델링 인력을 양성해도 기상청과 APCC에서 흡수가 안 되는 실정도 함께 고려하여 거시적인 고민이 필요함을 지적하였다. 공동개발 체계가 탄력을 받으려면 개발자부터 시행자까지 협력 커뮤니티 간의 긴밀한 소통이 필요하고 개별 과제가 아닌 연구개발허

브 전체를 대상으로 하는 성과발표회나 워크숍을 통해 연구 주제, 방법, 노하우가 더 잘 공유될 필요가 있다고 견해를 밝혔다. 또한 현업을 위한 연구(R2O)와 연구를 위한 현업(O2R)이 유기적으로 작동할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 중요함을 언급하였다.

인터뷰, 설문조사, 패널토의를 통해 수렴된 연구개발허브 구성원들의 의견을 종합하면 공동개발 발전에 대한 각 계의 공감대를 확인할 수 있었고 공동개발 활성화를 위해 주로 개선해야 할 점으로 연구개발협의체 기능 활성화, 연구개발 전산 환경 개선, 기술전수의 현실화, 국내 기후모델링 역량 강화, 협력 커뮤니티 간 소통 강화를 꼽았다. 의견수렴을 통해 정리된 결과들은 2022년 한국기상학회 가을학술대회의 특별 세션(GloSea6 개발과 현업)을 통해 환류되었다.

(4) 공동개발 체계 개선을 위한 제안

4장에서는 2장과 3장에서 논의된 바를 토대로 공동개발 체계 개선에 필요한 제안 사항들을 기술하고자 한다. 제안은 구조적 측면과 환경적 측면으로 나눌 수 있었다. 구조적 측면에서는 2장에서 제안된 R2O 구조 중 4단계에서 개선이 필요한 사항들을 제시하고, 환경적 측면에서는 의견수렴의 결과인 R2O 과정에서의 주요 개선점들에 대한 구체적인 제안 사항들을 기술하고자 한다.

(가) 환경적 측면에서의 제안

먼저 3장에서 도출된 주요 개선점을 기반으로 공동개발 활성화를 위한 제안을 하고자 한다.

① 연구개발협의체 기능 활성화

1) 연구개발협의체 정비

연구개발협의체 기능 활성화를 위해서 첫째, 협의체 설립과 운영에 관한 제도를 제정하거나 정비하길 제안한다. 협의체 운영 규정에서는 협의체의 목적과 조직 구성, 구성의 원리, 운영 방법, 주요 활동 내용 등을 담을 수 있다. 구성에 관한 일례로 “부산 기후변화 협의체”의 추진 현황을 참고한다면, 협의체는 공동 개발 체계 운영의 핵심 기관인 공동 주관 기관과 관련 협력 기관으로 구성할 수 있다. 공동 주관 기관은 정례 운영 실무를 담당할 상설 기구(사무국 혹은 협의회)을 두어 협의체 활동의 효과성을 제고하고 운영을 활성화할 수 있다. 상설 기구는 안건을 발굴하고 홍보와 소통을 담당하는 실무협의회와 협의체의 실효성 확보를 위해 공동 개발 각 단계를 대표하는 정책협의회로 이원화하여 효율적으로 업무를 추진하는 것도 하나의 방안일 수 있다. 운영에 있어서는 정기 회의와 임시 회의 및 필요에 따라서는 정기 포럼, 워크숍 개최에 관한 내용을 명시할 뿐만 아니라 운영 관련 예산의 분담 처리에 대해서도 다룰 수 있다.

② 연구개발 전산 환경 개선

연구개발을 위해 사용하는 전산 자원은 주로 기상청 슈퍼컴퓨터와 자체 보유 클러스터로 나타났다. 전산 환경 측면에서 슈퍼컴퓨터 사용자의 주된 고충은 계산 자원에 대한 접근과 보

안 정책의 제약이었고, 자체 보유 클러스터 사용자의 주된 고충은 커뮤니티 모델 운영이 수월하지 않다는 점이었다.

1) 기상청 슈퍼컴퓨터 접근성 개선

패널토론에서 의견을 나누었듯이 기상청 슈퍼컴퓨터는 국가 기상서비스를 위한 주요 시스템으로서 안정적으로 현업 시스템을 운영해야하는 자원이라는 특수성과 그로 인한 보안정책 때문에 접근에 제약이 있을 수밖에 없다. 그러나 기상청 슈퍼컴퓨터센터가 초고성능컴퓨팅 전문센터로 지정된 만큼 계산 자원 공동 활용의 목적도 함께 달성할 필요가 있어 거대한 기후 커뮤니티로부터 사용자를 확보하고 유지하는 것은 슈퍼컴퓨터의 활용률을 높이는 차원에서도 그리고 국가기후예측시스템 공동 개발을 위해서도 중요할 것이다. 이번 APCC 제 3차 기후예측 워크숍의 패널토론을 통해 기후 커뮤니티와 기상청 슈퍼컴퓨터센터가 서로의 입장에 대한 이해와 함께 협력해 나가야 한다는 공감대를 형성하였으므로 추후 소통과 협력을 통해 보안과 자원 공유의 균형에 대한 방향을 찾아가길 바란다.

2) 현업화 시급성을 고려한 자원 할당

슈퍼컴퓨터 활용 시 계산 및 저장 자원을 확보하는 것에서의 어려움은 잘 준비된 계획과 관련 이해당사자 간의 사전 협의를 통해 해결할 수 있을 것이다. 슈퍼컴 활용에 대한 정교한 계획을 세워 필요 시간과 자원에 대해서 사전에 협의/공유하는 과정을 통해 지원에 대한 정책이 마련될 수 있다. 이를 위해서는 연구 개발 R&D 단기/중장기 로드맵 수립이 선행되어야 할 것이고 이후 현업화가 시급한 실험들에 대해서 자원 할당에 우선권을 부여할 수 있어야 한다. 더불어 슈퍼컴퓨터의 자원은 공공 자원인만큼 다른 사용자와 전체 시스템에 영향을 주지 않도록 슈퍼컴퓨터 운영 정책을 잘 준수하고 효율적으로 활용하기 위해 노력하는 등 사용자의 배려와 존중의 자세가 요구되며 이는 공동 개발의 가치를 지속 가능케 할 양분이 될 것이다.

3) 커뮤니티 모델 개선

공동 개발의 수월성을 높이기 위해 슈퍼컴퓨터에 의존적인 기존 개발 방식을 탈피하고 학계의 중소형에서 활용이 가능한 저해상도의 커뮤니티 모델을 배포하였다. 그러나 연구자별로 상이한 자체 보유 클러스터의 기반 환경에 좀 더 쉽게 포팅이 가능하고 구동이 쉬운 툴로 개선이 될 필요가 있다. 또한 모델 구동을 위해 필요한 초기 자료 및 보조 자료의 입수가 원활하도록 하는 개선 방안이 필요하다. 현재 국립기상과학원 자체 용역을 통해 서버 환경에 적합한 모델 구성 최적화 수행, 표준 인터페이스를 통한 장기 적분 안정성 및 정합성 검증/배포, 통일된 운영체제를 갖추기 위해 표준 환경을 정의하고 배포하는 등 공동연구개발 플랫폼의 완벽성을 높이기 위해 노력하고 있다. 또한 기후 예측 모델을 구동하는데 필요한 초기 자료와 보조 자료를 배포하기 위해 자료공유 체계도 마련하고 있어 커뮤니티 모델의 활용성을 좀 더 높일 수 있는 환경이 마련되리라 생각한다.

③ 기술전수의 현실화

1) 공식적인 절차나 과업 내용 마련

테스트베드의 주요 기능은 현업과 연구 플랫폼 사이의 갭을 줄여 연구 성과의 현업화를 가속화시키는 것이다. NOAA의 공동 개발 체계에서는 성공적인 테스트베드는 실질적인 약속과 파트너십으로부터 기인한다고 서술하였다. 따라서 연구개발단으로부터 테스트베드로의 기술전수 과정에 있어서는 공식적인 절차를 마련하거나 연구 개발 과업 내용에 명시하는 등 현실적인 기술 전수 제도를 마련하여 실질적인 약속이 될 수 있길 제안한다. 전수 될 기술의 내용에 있어서는 과학적 성과에 대한 공유 뿐만 아니라 개발 과정에서 축적된 경험과 노하우도 함께 전달될 수 있도록 기술 전수 제도에 해당 사항들이 포함되어야 한다.

④ 국내 기후모델링 역량 강화

1) 모델링 관련 세미나, 사용자 교육 강화

국가 기후예측시스템의 구동 체계가 사용자들에게 익숙하지 않은 만큼 가상화 기반 수행 체계, 저해상도 모델 구축, 모델링 등에 대한 관련 교육이나 세미나가 강화되길 제안한다. 국립기상과학원은 기후예측모델 연구/개발자 기술 워크숍, 현장 교육, 세미나, 이메일 교환을 통한 수시 자문 등을 실시하고 있고 해마다 그 활동을 확대해 나가고 있어 점차 사용자들의 요구가 충족되리라 기대한다.

2) 기후모델 개발 관련 미래 인력 양성

국내 기후 모델링 기술력을 증진시키고 더 나아가 국내 기후 연구의 미래를 더 풍성하게 하기 위해서는 기후 모델링에 경험이 있는 인력을 많이 양성하는 것이 중요하다. 이를 위해서 점진적으로 개발 과제를 증대시키고 과제들이 꾸준히 유지될 수 있도록 안정적인 재정 지원이 필요하다. 또한 기후모델링에 경험이 있는 인적 자원이 늘어난다 하더라도 타분야 연구에 산재되어 기후 커뮤니티에서 역량을 발휘할 수 없다면 인력 양성의 실효성을 기대하기 어렵다. 이들을 국가 기후예측시스템 공동 개발 과제에 집약할 수 있는 정책과 체계, 환경들에 대한 전략적인 고민 또한 필요하다.

⑤ 협력 커뮤니티 간 소통 강화

1) glair 활성화

공동개발에 참여하는 연구자가 같이 협력하고 소통하기 위해 협업 클라우드인 glair가 마련되었지만 국내 기후예측 연구자들을 위해 처음으로 시도한 체계라 그 활용이 미진하고 협업 툴로서의 기능을 갖추어가는 과정에 있기에 활성화 되지 못하고 있다. 국립기상과학원은 용역 사업을 통해 웹 기반 형상 및 개발 이력 관리 시스템을 개선하고 자료 공유, 공동 분석을 위한 추가인 노력을 더하는 등 견고한 협업 연구개발 체계 구축을 위해 애쓰고 있다. 그러나 사용자들에게는 여전히 glair 시스템 내의 다양한 기능들이 익숙하지 않으므로 위키페이지, 마일스톤, 티켓을 적절히 사용할 수 있게 시스템적인 개선과 더불어 시스템 활용 교육 또한 glair 활성화를 위해 필요하다.

2) 정기적 워크숍, 성과발표회 개최

연구 성과와 결과를 공유하기 위한 세부과제 소규모 그룹의 발표회를 넘어 공동 개발에 참여하고 있는 연구자 누구나가 개발과정에서 축적된 노하우, 개발성과, 모델의 특성 등 정보를 자유롭게 나눌 수 있도록 연구개발허브 전체를 대상으로 하는 정기적인 워크숍이나 성과발표회가 개최되길 제안한다. 또한 허브 내 주요 이슈를 함께 논의할 수 있는 비정기적 이벤트도 자주 열리길 제안한다. 이를 위해 2022년 APCC는 패널토의와 기상학회 특별세션을 개최하여 국가 기후예측시스템 공동개발 체계의 개선점을 논의하고 GloSea6 개발 현황을 공유하는 자리를 만들어 협력 커뮤니티 내 소통을 강화하였다.

3) 연구 성과 공유·확산·홍보 강화

수년간 애쓰고 있는 이 공동개발 활동이 기후모델링 분야 발전에 국한된 것이 아니라 국가과학기술력 제고에 이바지 하고 더 나아가 세계 선도적 역할을 수행할 수 있도록 공유, 확산, 홍보를 위한 국내외 다양한 활동을 강화할 필요가 있다.

(나) 구조적 측면에서의 제안

국가 기후예측시스템 공동개발 체계를 우리나라 실정에 맞게 구조화하길 제안하였고 그 내용은 2장에서 정리하였다. 여기서는 그 중 각 단계에서 부가적인 개선이 필요한 사항들을 제시하였다.

① 현업화 기획

1) 연구개발협의체 정비

현업화 기획 단계에서의 첫 번째 제안 사항은 연구개발협의체 정비이다. 관련 내용은 4.1절에서 다루었으므로 생략하고자 한다.

2) 연구개발사업 운영 개선

두 번째, 연구개발사업 운영의 개선을 제안한다. 이를 위해 단기, 중장기 R&D 로드맵을 수립하여 정책 수립을 바탕으로 연구가 기획되어야 한다. 또한 수립된 로드맵은 연구개발허브로 공유되어 공동 개발에 참여하는 누구나 국가 기후예측시스템 개발의 전체적인 방향과 흐름, 순서를 인지하고 각각의 단계에서 각자의 계획과 일정을 세울 수 있어야 한다. 연구 개발을 통한 현업화 결과(성공/실패)에 대한 분석 및 관리 기능을 보강하는 것도 연구 개발 사업 운영의 개선을 위해 필요한 부분이다. 허브 구성 원들의 원활한 연구 수행을 위한 지원과 협조는 연구 개발 사업 운영의 기본 사항으로 지금도 소수의 인력으로 최대한 노력을 쏟고 있다. 추후 좀 더 전체 프로세스에 대한 관리가 강화되고 지원이 확대되며 협조 체계가 개선되길 기대한다. 그리고 무엇보다도 연구개발사업이 원활히 운영되기 위해서는 수립된 기획, 정책에 대한 지속성 담보가 중요할 것이다.

② 연구 개발

1) 현업시스템 기반의 개발

국가 기후예측시스템 한정된 자원 안에서 개발을 위한 노력을 집중하고 있다. 현업화가 목표인 공동개발인 만큼 기술을 개발하고 실험을 설계하는 단계에서부터 현업시스템을 고려한 연구가 이루어져 개발 성과의 현업 활용을 극대화 하고 현업으로 가속화 시킬 수 있어야 한다.

2) 실험과 검증에 대한 기준 활용

개별 기술들은 분야별로 특화되어 있어 연구 성과 또한 개별 기술의 특성에 맞게 평가, 진단되고 있다. 그러나 현업예측시스템으로의 그 기여도를 종합적으로 평가·진단하여 현업화 여부를 결정해야하므로 표준성능·진단 평가 틀이 현재 개발 중이다. 추후 이 틀이 배포되고 공동개발 프로토콜이 정립되면 개별 기술에 특화된 기여도 평가와 더불어 표준성능·표준진단 정보도 함께 제시함으로써 성과의 통일성과 객관성 도 갖출 수 있길 기대한다.

3) 정보 및 개발 결과 공유

추후 glair가 잘 갖추어지고 교육, 워크숍 등을 통한 소통 체계가 활성화되면 지금의 소규모 성과공유, 세부과제 내에서의 협소한 교류, 일대다(과학원-다수의 세부과제) 형태의 소통이 개선될 수 있도록 적극적으로 함께 애써나가길 기대한다.

③ 현업화 테스트베드

4.2절에서는 현업화 단계별로 개선점들을 제시하고 방안을 제안하지만 이 중 현업화 테스트베드 단계에서의 개선점들은 이미 상당 부분 진행이 되어 제안의 성격보다는 개선이 이루어진 것들을 중심으로 기술되었다.

1) 실험과 현업후보군 선정 과정 등에 대한 기준 마련

현업화 가능성에 대해 일관성 있고 종합적인 정보를 제공해야하는 테스트베드로서의 기능을 충실히하기 위해서는 개발된 기술 적용에 대한 실험 규모, 평가 기준, 현업 후보군 선정 기준 등이 필요하다. APCC는 올 한 해 국가 기후예측시스템 공동 개발 체계 기반 구축을 위한 여러 가지 과업 중 하나로 테스트베드의 기반을 구축하였다. 실험에 있어서는 현업 환경과 동일한 환경을 구축하고 동일한 조건에서 실험, 개발된 기술의 성격을 고려한 실험이 수행되어야겠으나 개발성과의 신뢰성을 확보하기 위해 기본적으로는 20년 치의 과거 재현 실험 수행, 3개 앙상블, 7 step (144일) 리드 타임 등이 프로토콜로 정해졌다(Table 7). 평가는 개발된 기술이 가지는 과학적인 가치뿐만 아니라 현업 적용이 가능한지 살펴보는 기술적 효능도 함께 분석된다. 더불어 추후 만들어질 표준성능·진단 평가 틀의 활용을 통해 개발된 기술의 현업 적용 가능성에 있어 객관적인 근거를 제시하고자 한다. 현업후보군 선정에 대한 명확한 기준을 갖추는 것이 가장 좋겠으나 기후와 모델의 특성상 하나의 기술 개선이 모델 전체의 성능을 개선시키기는 어려운 일이므로 다양한 근거 속에서 합리적으로 의사 결정을 할 수 있도록 과정에 대한 기준이라도 마련될 수 있게 계속 노력해나갈 필요가 있다. 추후 현업을 운영하는 주체와의 긴밀한 논의를 통해 그 기준들이 마련될 수 있길 기대한다.

2) 현실적인 문제 해소 노력

테스트를 위한 실험, 결과 검증 및 타당성 확인은 공동개발 단계 중 인적 자원과 계산 자원의 가장 큰 부분을 소비하여 항상 현실적인 문제가 수반된다. 기후 모델링 연구는 최근 APCC가 새롭게 집중하고 있는 사업인 만큼 인적 자원, 인프라 등에 대한 현실적 문제를 하나씩 해결해나가며 연구를 진행중이다. 현업과 동일한 환경에서 후보 실험을 한다는 것은 기상청 슈퍼컴퓨터 사용이 필연적으로 수반되는 일이라 접근성 및 계산/저장 자원 사용이 원활해야만 현업 적용성 테스트 결과를 신속히 전달해줄 수 있다. 이러한 환경적인 요소들을 해결하고자 여러 차례 회의를 통해 기후국과 관측국, 슈퍼컴퓨터센터의 협조를 이끌어내기 위해 노력하였다. 그 결과 테스트베드의 중기 실험 계획을 수립하였고 이에 맞게 예산/자원에 대한 투자 계획을 발전시켜 나가는 중이다.

Table 7. (ex) Experimental protocol for the pre-operational testbed.

| Computational Resource | Model version /Resolution | experiment | # of ensemble | Run frequency | Run period | Lead time |
|------------------------|-------------------------------|------------|---------------|---------------------|---------------------|-----------|
| KMA Supercomputer | Same as the operational suite | hindcast | 3 | 4/month (1,9,17,25) | 1993-2016 (24 year) | 144d |

④ 현업화 실행

현업화 실행 단계에서의 개선을 위한 제안이다.

1) 현업화 평가 범위 논의

테스트베드를 통해 추천 받은 현업 대상 기술을 실제 현업에 이식하고 실행하는 과정에서도 나름의 현업 적용성을 타진할 필요가 있다. 테스트베드 단계에서는 주로 과거 재현 실험을 통한 현업 적용 가능성을 확인하는 점을 고려하여 예측 실험에 대한 평가나 테스트베드에서 확인하지 않았던 계절이나 리드타임에 대한 평가, 현업 안정도 중심의 테스트만 수행 등 현업화 실행 단계에 맞는 테스트, 평가 범위를 결정하여 운영할 필요가 있다. 이는 현업 실무진들과 테스트베드와의 유기성을 강화시키고 인력과 시간 에 대한 소모를 줄일 수 있을 것이다.

2) 환류 과정 보완

개발된 기술이 현업화 실행까지 한 사이클을 다 거치고 나면 해당 기술의 유용함뿐만 아니라 추가적인 개선점도 도출 될 것이다. 이러한 개선 사항들이 다시 첫 단계인 현업화 기획 단계로 잘 전달되어 향후 연구 개발 계획 수립에 반영이 될 수 있도록 기술 개발의 환류 과정이 보완되어야 한다. 현업 후보군 선정에서 탈락한 기술에 대해서도 기획 단계로의 환류 과정을 거쳐 점진적 변화와 계속되는 테스트를 거치며 발전시킬지 혹은 재기획을 거부할지 결정되어야 한다.

3) 기록관리

공동개발이 진행된 기술들에 있어서 기획-개발-테스트-현업전환의 일련의 사이클과 현업화 이식 과정, 기술적 특성, 구동 절차 등을 기술 노트에 잘 정리하여 진행된 과업에 대한 이력을 관리하고 추후 새로운 실무진이 참여하여도 수월하게 재현할 수 있도록 기록 관리에도 힘쓰길 제안한다.

나. 표준 성능·진단 평가체계

(1) 표준 성능·진단 평가체계 목적 및 구성

표준평가체계는 모델개발에 따른 예측성 개선 효과를 평가하기 위한 기후예측모델의 통합적인 평가정보를 제공하고, 현업화 후보군 선정을 위한 객관적인 근거 자료를 생산하는 것을 목적으로 하였다. 또한 기후전문가뿐만 아니라 의사결정자들이 모델개발의 평가 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 가독성 높은 형태의 산출물을 표출하도록 기안하였다. 표준 평가프레임은 관리적 관점에서 예측 품질을 모니터링하고 개선된 모델의 성능을 제시하여야 하며, 과학적 관점에서 모델의 취약점을 식별하고 모델 물리 과정의 개선 방향을 제시할 수 있어야 한다. 따라서 표준 평가 프레임은 예측유형에 따른 정량적인 표준성능검증 파트와 주요 기후인자들의 표준진단평가 파트로 구성하였고, 전구뿐만 아니라 동아시아 예측성능을 함께 제공하며 계절내~계절 시간 규모의 예측성능 평가를 커버하도록 시간 확장성을 고려하여 구성하였다.

Figure 22은 표준 성능·진단 평가 프레임의 도식도를 나타낸 것으로, 통계분석 기반의 정량적 성능검증 정보를 제공하는 표준성능평가 프레임과 프로세스 기반의 기후 변동성을 진단하는 표준진단평가 프레임으로 구성하였다. 표준성능평가 프레임에서는 예측유형에 따라 단정예보와 확률예보의 예측 품질을 평가하도록 메트릭을 구성하였고, 단정예보의 기후값 분석에서 모델의 구조적 오차 정보를 제시하고, 편차장의 예측 품질과 삼분위 확률예보의 예측 품질 정보, 그리고 앙상블 예측의 특성 정보를 제공하도록 구성하였다. 표준진단 평가 프레임에서는 계절내~계절 시간 규모에서 중위도 기후 예측에 영향을 주는 주요 기후인자들에 대한 평가정보를 제공하고자 하였다. 기후인자의 배경 기후와 기본 특성에 대한 모의 성능(performance), 주요 지수의 변동에 따른 원격상관 모의 성능(teleconnection), 그리고 원격상관에 영향을 주는 내부 프로세스의 모의 성능(process)로 세분화하여 메트릭을 구성하였다. 이렇게 구성된 표준성능·진단평가 메트릭은 각 평가항목의 예측성을 정량화하여 객관화된 스코어카드의 형태로 표출되며, 현업화 의사결정의 객관적 근거 자료로 사용될 수 있도록 스코어카드의 가독성을 높이고자 노력하였다. 이 과업은 과학원 수요과제로 올해는 표준성능평가 프레임을 구축하였고, 표준진단평가에서 ENSO 진단평가 메트릭을 구조화하였다. 다음장에서 현재 구축된 세 파트, 단정예보, 확률예보, ENSO의 메트릭 구성 및 평가 결과를 소개하고 향후 계획에 대해 기술하고자 하였다.

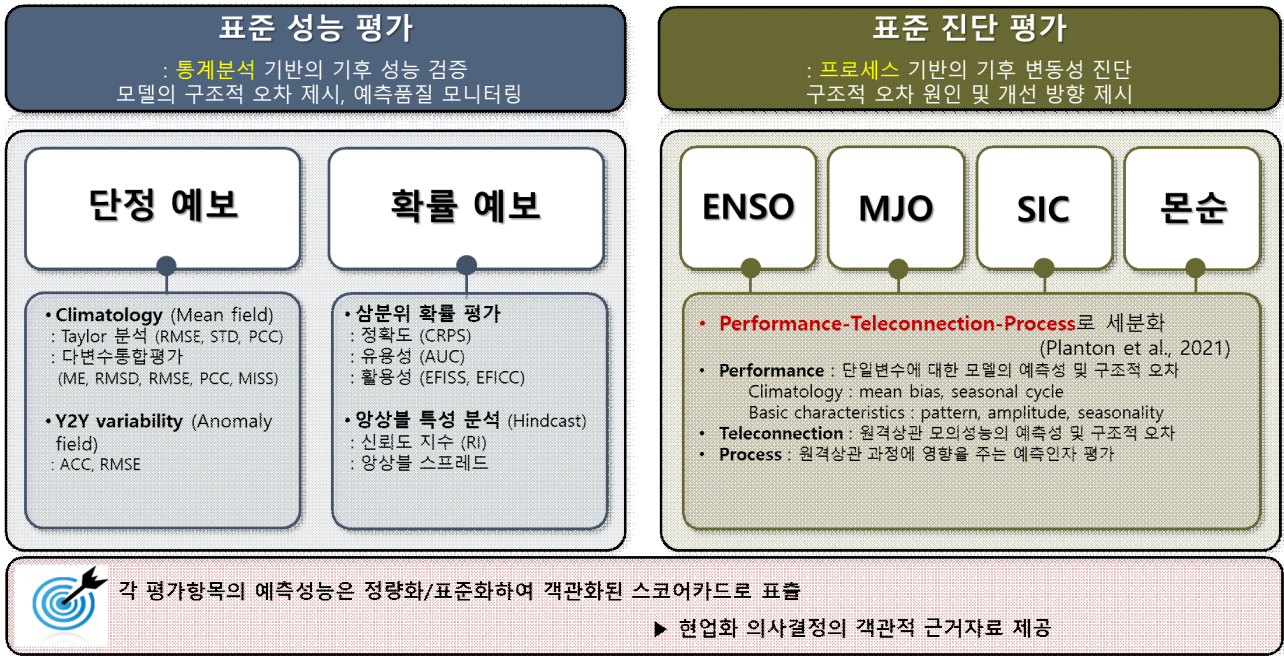


Figure 22. Standardized evaluation framework including two categories and their components.

(2) 표준 성능평가 프레임 구조화

(가) 단정예보 매트릭 구성 및 결과

① 단정예보 매트릭 구성

CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project 6)의 RFMIP(Radiative Forcing Model Intercomparison Project), GMMIP(Global Monsoon Model Intercomparison Project)과 같은 모델 상호 비교 프로젝트들이 많아지면서 기후모델의 정량적 평가를 위한 접근 방식의 필요성이 높아지고 있다 (Meehl et al., 2014; Eyring et al., 2019). 일반적으로 기후모델의 성능평가는 테일러 분석 방법(Taylor et al., 2001)을 사용하여 과거 기후를 모의하는 재현 능력을 평가하였다. 이는 모델의 스칼라 변수의 다면 특성을 요약하는 효율적인 방법이지만, 개별 변수에 대한 모델 성능을 제시함으로써 모델의 단편적인 성능만을 제시한다는 한계가 있다. 다양한 변수의 종합적인 성능평가를 위해 Xu et al. (2017)은 다양한 정규화된 스칼라 필드를 통합 벡터 필드로 그룹화하여 다중 필드 측면에서 모델 성능을 평가하는 다변수통합평가 (Multivariable Integrated Evaluation, MVIE) 방법을 개발하였다. 이후 Zhang et al.(2021)은 스칼라 필드와 벡터 필드를 혼합하여 평가할 수 있도록 MVIE 방법을 개선하고, 기후모델 전체 성능의 다양한 측면의 상대적 중요도를 조정할 수 있는 정규화된 지수인 다변수 통합기술 지수(Multivariable Integrated Skill Score)를 제시하였다.

다변수통합평가(MVIE)에서 다변수통합기술지수(MISS)는 Figure 23와 같은 순서로 계산된다. 모델에서 생산된 개별 스칼라/벡터필드를 각각의 관측의 RMS(Root Mean Square)로 정규화하고 통합벡터 필드로 그룹화하여 다변수통합필드를 생산한다(Figure 23 좌측). 다변수통합필드에 대한 개별 통계값(RMSL, VSC, RMSCD)을 계산한 후, 이를 종합하여 여러 필드를 시뮬레이션하는

모델의 전체 성능을 정량적인 지수(MISS)로 제공하게 된다.

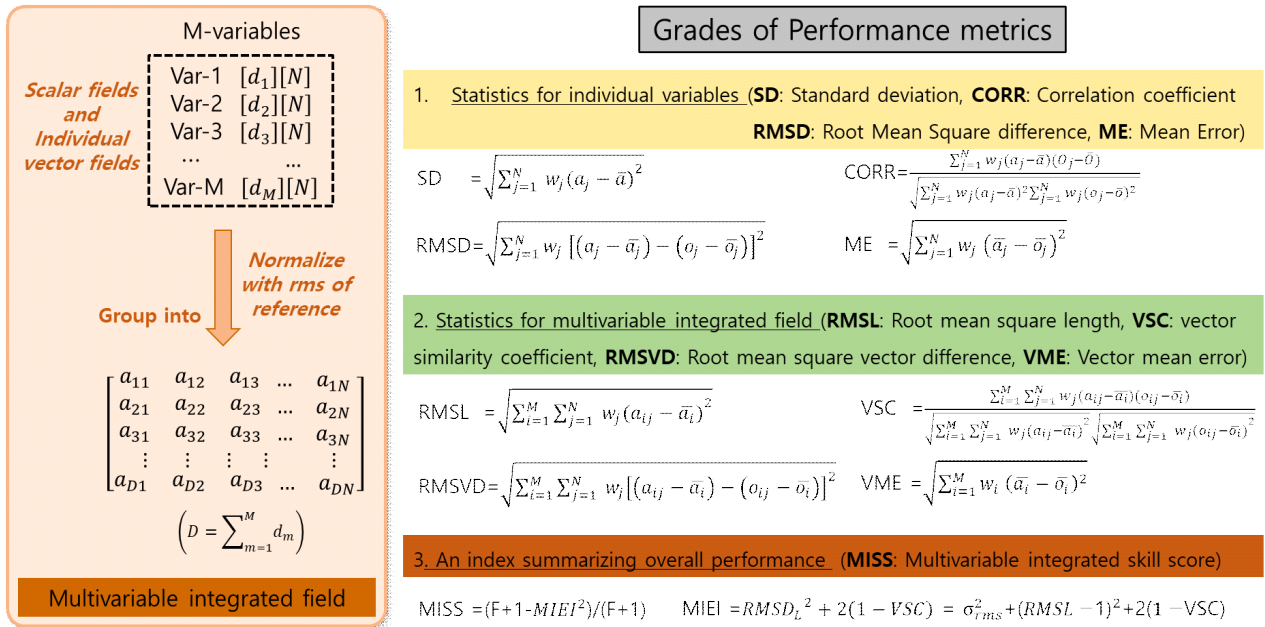


Figure 23. General idea and performance metrics of the MVIE. The left-hand column illustrates the general idea of MVIE. The statistics are sorted into three grades: statistics for individual variables, statistics for the multiple field, and a summary index (Zhang et al., 2021)

본 연구에서는 단정예보의 성능평가를 위해 기후예측모델에서 생산된 주요 7개 변수 (강수, 2m 기온, 500hPa 지위고도, 850hPa 동서/남북 바람, 200hPa 동서/남북 바람)들에 대한 4개의 skill scores(mean error(ME), 표준편차(STD), root mean square error(RMSE), 상관계수(CORR))를 사용하여 개별 스칼라 필드의 통계적 다면 특성 정보를 제시하고자 하였다. Mean error는 예측자료와 관측자료의 편차에 대한 오차 정보를 나타내며, 표준편차는 주요 변수들의 변동성의 크기를 나타내며 CORR은 예측된 공간 분포가 관측의 분포와 얼마나 유사한가를 나타낸다. 이는 -1에서 1의 값을 가지며 1에 가까울수록 두 패턴이 비슷함을 나타낸다. RMSD는 모델의 예측값과 관측값 사이의 오차를 나타내어 예보의 정확도를 제시한다. 또한 다변수통합평가 방법을 적용하여 기후예측모델의 전체 성능에 대한 포괄적이고 정량적인 정보를 제공하고자 하였다. 기후예측모델은 계절내에서 중장기 기후의 예측정보를 생산하므로, 이를 평가하기 위해서는 기후모델의 기후 재현성 뿐만 아니라 편차장 예측정보의 리드별 예측 정확도 또한 평가하여야 할 것이다.

② 단정예보 성능평가 결과

단정예보 성능평가 결과는 크게 두 가지로 제시되었다. 기후값 분석을 통해 모델의 구조적 오차를 정보를 제시하고, 예측정보의 편차장 분석을 통해 예측 품질을 모니터링하고 개선된 모

델의 성능 향상 여부를 제시하고자 하였다. Figure 24은 단정예보의 메트릭 테이블을 나타낸 것으로, 주요 변수와 통계적 다면 특성의 리드별 모의 성능을 보여주는 표이다. 지구(GL) 예측 성능뿐만 아니라 모델 성능개선의 관심 지역인 동아시아(EA) 예측성능도 함께 제시함으로써 모델의 정량적 성능을 한눈에 파악할 수 있도록 하였다. 여기서 개별 스코어는 밝은색일수록 좋은 성능값을 나타내도록 하였고 변수/리드에 따른 상대적 성능 비교가 용이하도록 가시화하였다. GloSea6의 여름철(JJA) 기후 재현성을 살펴본 결과, 다른 변수에 비해 강수의 재현성능이 상대적으로 낮게 나타나며 모든 변수에서 리드에 따라 모의 성능이 감소하는 특징을 확인할 수 있다.

| GS6 JJA | ME | | | | | VME | cRMSD | | | | | cRMSVD | SD | | | | | cRMSL | CORR | | | | | cVSC | cMISS |
|---------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | PREC | T2M | Z500 | uv850 | uv200 | | PREC | T2M | Z500 | uv850 | uv200 | | PREC | T2M | Z500 | uv850 | uv200 | | PREC | T2M | Z500 | uv850 | uv200 | | |
| GL W3 | 0.227 | 0.002 | -0.015 | 0.016 | 0.047 | 0.114 | 0.647 | 0.095 | 0.083 | 0.342 | 0.268 | 0.418 | 1.263 | 1.041 | 0.992 | 0.998 | 0.978 | 1.061 | 0.862 | 0.996 | 0.997 | 0.941 | 0.964 | 0.920 | 0.943 |
| GL W4 | 0.223 | 0.004 | -0.013 | 0.007 | 0.053 | 0.112 | 0.663 | 0.097 | 0.093 | 0.363 | 0.304 | 0.438 | 1.250 | 1.039 | 0.989 | 0.993 | 0.978 | 1.058 | 0.852 | 0.996 | 0.996 | 0.934 | 0.953 | 0.911 | 0.938 |
| GL M0 | 0.221 | 0.002 | -0.017 | 0.013 | 0.031 | 0.109 | 0.585 | 0.088 | 0.060 | 0.291 | 0.193 | 0.362 | 1.240 | 1.039 | 0.994 | 0.991 | 0.979 | 1.052 | 0.885 | 0.997 | 0.998 | 0.957 | 0.981 | 0.939 | 0.957 |
| GL M1 | 0.220 | 0.006 | -0.012 | 0.003 | 0.045 | 0.109 | 0.669 | 0.100 | 0.101 | 0.375 | 0.321 | 0.449 | 1.242 | 1.036 | 0.984 | 0.983 | 0.975 | 1.047 | 0.843 | 0.996 | 0.995 | 0.928 | 0.948 | 0.905 | 0.934 |
| EA W3 | 0.199 | 0.059 | -0.057 | 0.230 | 0.052 | 0.179 | 0.801 | 0.251 | 0.199 | 0.648 | 0.320 | 0.580 | 0.974 | 1.097 | 0.951 | 0.816 | 1.001 | 0.915 | 0.671 | 0.976 | 0.980 | 0.783 | 0.949 | 0.825 | 0.877 |
| EA W4 | 0.234 | 0.061 | -0.045 | 0.292 | 0.065 | 0.224 | 0.811 | 0.258 | 0.215 | 0.708 | 0.326 | 0.615 | 1.028 | 1.097 | 0.932 | 0.806 | 0.991 | 0.916 | 0.680 | 0.974 | 0.978 | 0.712 | 0.946 | 0.797 | 0.862 |
| EA M0 | 0.188 | 0.046 | -0.051 | 0.177 | 0.063 | 0.147 | 0.677 | 0.227 | 0.140 | 0.507 | 0.216 | 0.457 | 0.959 | 1.080 | 0.950 | 0.835 | 0.983 | 0.913 | 0.782 | 0.979 | 0.991 | 0.862 | 0.976 | 0.890 | 0.924 |
| EA M1 | 0.226 | 0.069 | -0.062 | 0.366 | 0.098 | 0.272 | 0.817 | 0.258 | 0.225 | 0.798 | 0.345 | 0.670 | 1.028 | 1.095 | 0.889 | 0.742 | 0.953 | 0.874 | 0.675 | 0.974 | 0.979 | 0.616 | 0.939 | 0.752 | 0.823 |

Figure 24. Metrics table of GloSea6 in simulating climatological mean (1997–2016) Precipitation (PREC), 2m air temperature (T2M), 500hPa geopotential height (Z500), 850hPa winds (UV850), and 200hPa winds (UV200) in the northern hemisphere in summer (JJA). ME (VME) is the error of the mean scalar or vector (multivariable) fields. cRMSD (cRMSVD) is the overall difference in scalar or vector (multivariable) anomaly fields between model and observation. CORR (cVSC) and SD (cRMSL) are the pattern similarity and amplitude of the anomaly fields for the individual variable (multivariable field). cMiss is the multivariable integrated skill score of the anomaly fields, which is calculated with SD (rms) values and cVSC. The colors represent the values of statistics metrics. The lighter colors indicate better model performance.

Figure 25는 기후모델이 기후값 재현성능을 제시함에 있어 모델이 가지는 구조적 오차의 개선 정보를 나타내는 메트릭 스코어카드를 나타낸 것이다. 메트릭 스코어카드는 모델 개발에 따른 현업모델 대비 예측성능의 개선 변화율($\% = \frac{\text{개발된 모델} - \text{기준모델}}{\text{현업모델}} \times 100$)로 표시하였으며, 4계절(봄, 여름, 가을, 겨울) 기후 재현성능의 변화율을 선행 시간별로 제시하였다. 각 통계값마다 상대적 예측성능이 개선되는 값의 부호가 다르게 나타나므로, 모델의 구조적 오차가 개선되는 것은 초록색 계열의 색으로 표시하였고 오차가 증가하는 것은 붉은색 계열의 색으로 표시함으로써 성능 비교가 용이하도록 가시화하였다. 지구 예측성능에 대해 GloSea6(개발된 모델)은 GloSea5(기준모델)에 비해 강수를 제외한 대부분의 변수들에서 모델이 가지는 구조적 오차

를 감소시키며, 대부분의 통계값에서 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 동아시아 영역에서의 모델의 구조적 오차 역시 강수를 제외한 대부분의 변수들에서 감소하며, 특히 여름철 기후 재현성능이 뚜렷이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 동아시아 기후의 경년변동성은 관측대비 다소 강하게 모의하함을 확인할 수 있으며 이것이 다변수 통합기술 지수의 감소에 영향을 미치는 것으로 평가된다.

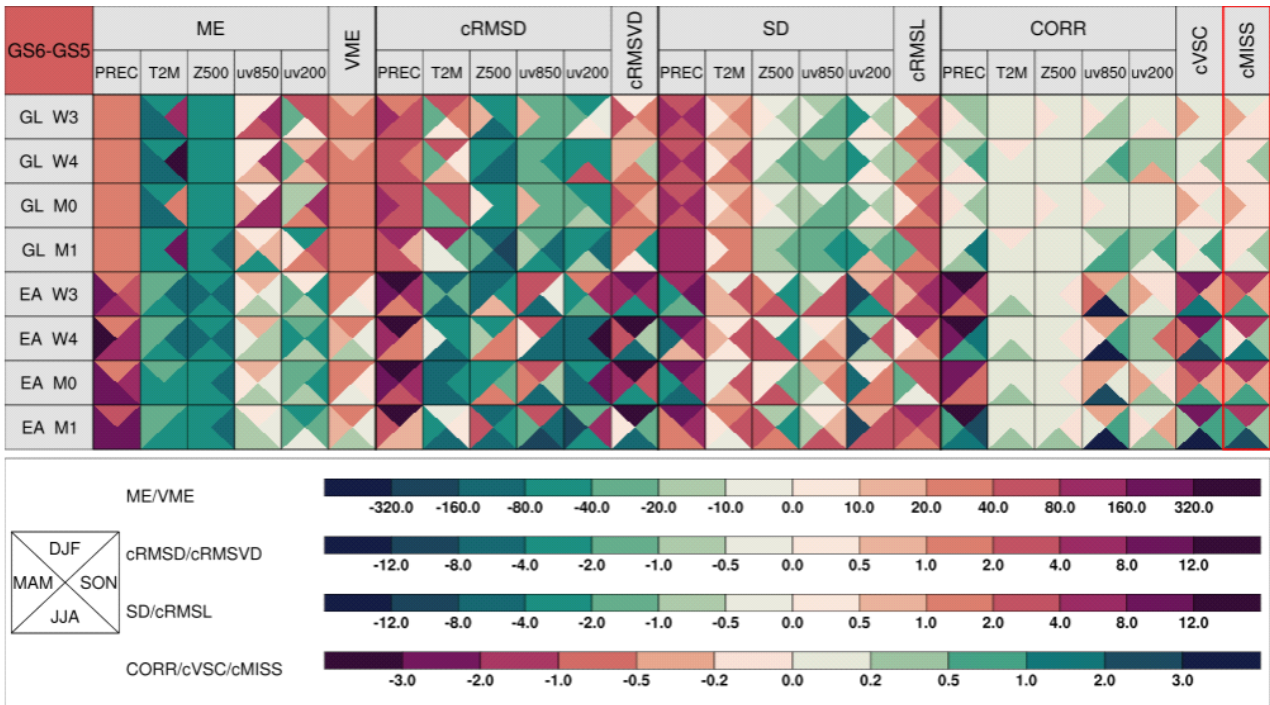


Figure 25. Metrics scorecard for the climatology over globe(GL) and East Asia(EA) during 1997-2016. Each square is divided into four triangles, representing model performance in different seasons, spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter (DJF) as shown in the bottom-left legend. The colored bars for different statistical metrics are shown below the table. The green (red) colors indicate better (worse) model performance.

표준 성능평가 프레임은 스코어카드의 지수화된 개별 성능값이 내포하고 있는 기후 재현 성능의 시-공간적 개선 정보 또한 제공하도록 구성하였다. Figure 26에서 Figure 29는 주요 변수들의 Mean bias 및 표준편차의 분포와 GloSea6의 개선 정도를 나타낸 것이다. GloSea5와 GloSea6는 계절에 따라 다소 차이는 있지만 대부분의 대륙에서 cold bias를 모의하는 반면, 열대 해양을 중심으로 warm bias를 모의하는 특징이 있다 (Figure 26). 또한 겨울철 남극에서의 warm bias를 과도하게 나타낸다. GloSea6에서 대륙에서의 cold bias는 상당히 완화되지만, 해양에서의 warm bias는 더 강해지는 특징을 보인다. 계절적으로 보았을 때 여름철 기온의 구조적 오차가 상당히 개선되지만, 겨울철 기온의 오차는 다소 증가하는 패턴을 보인다. 기온의 표준편차 분포에서 대륙에서의 변동성은 관측 대비 낮게 나타나는 반면 해양에서의 변동성은 관측 대비 크게 모의하는 특징을 확인할 수 있으며 GloSea6에서 기온의 변동성이 인도양과 적도 태평양에서 개선되는 것을 확인할 수 있다.

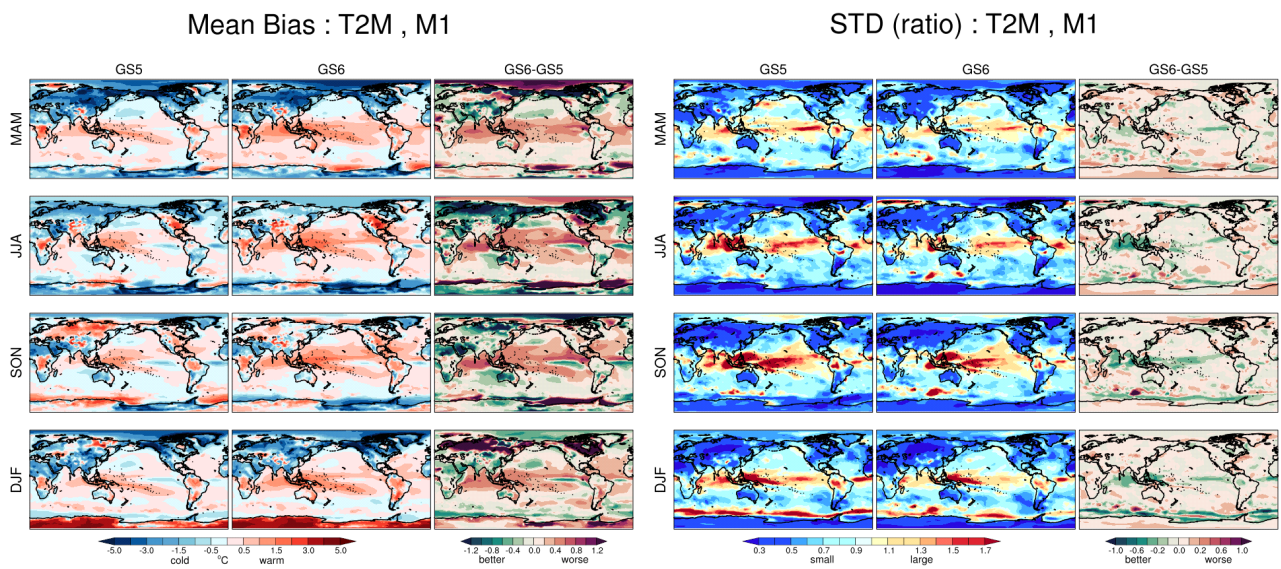


Figure. 26. Seasonal mean and standard deviation biases for T2M for 1 month lead during 1997-2016.

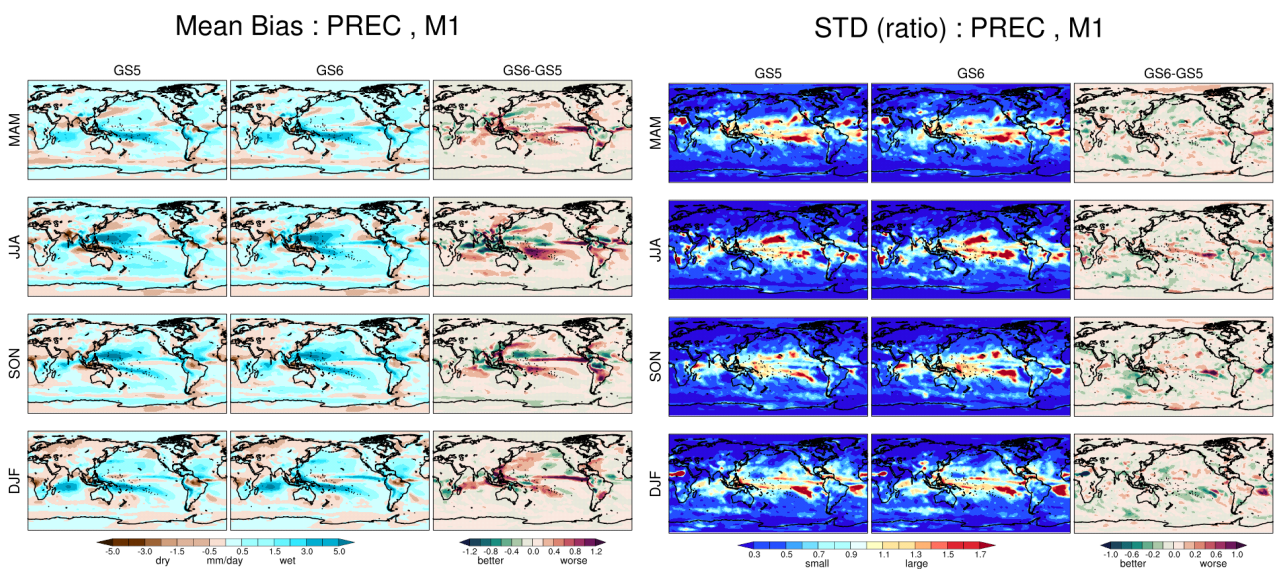


Figure. 27. Same as Figure 26, except for Precipitation.

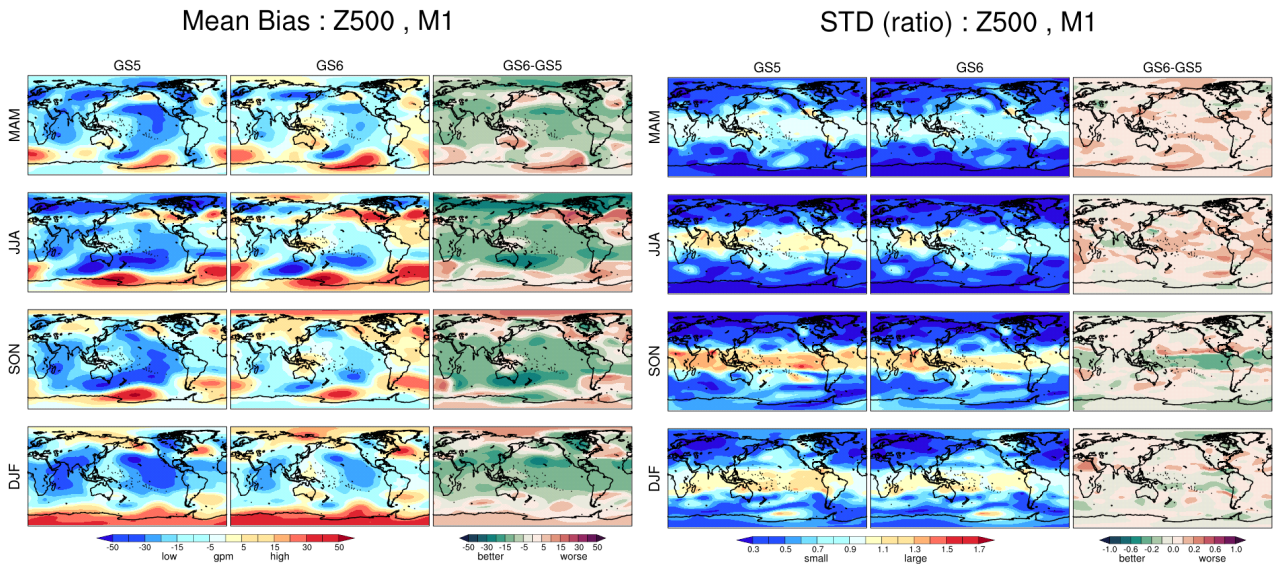


Figure. 28. Same as Figure 26, except for 500hPa geopotential height.

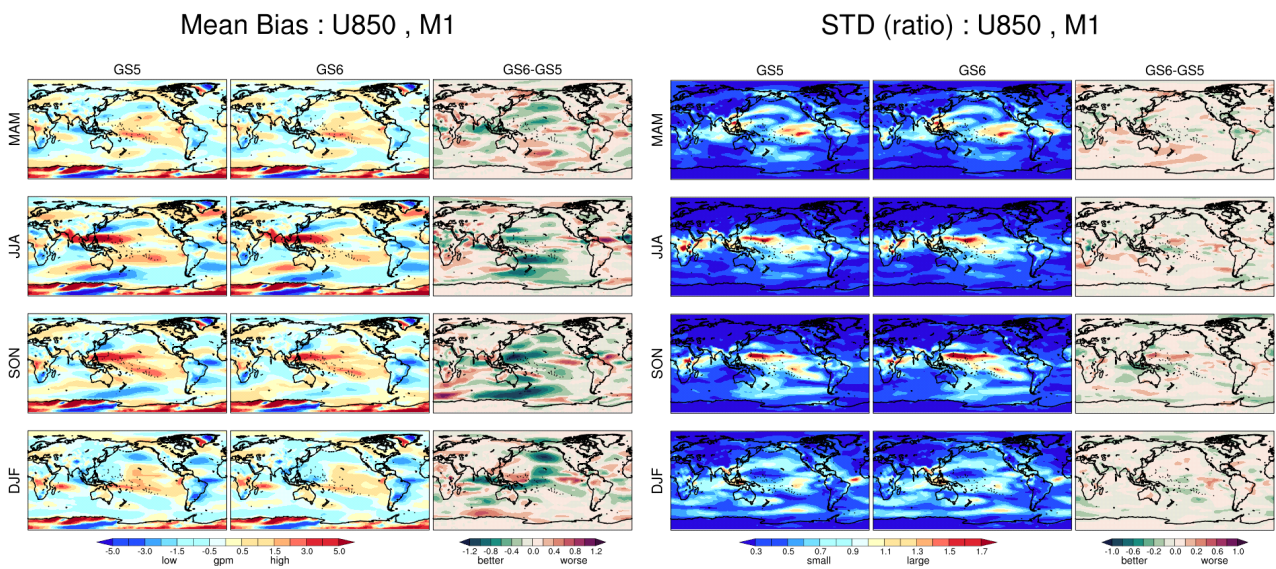


Figure. 29. Same as Figure 26, except for 850hPa zonal wind.

Figure 27은 강수의 Mean bias 및 표준편차의 공간 분포와 개선 정도를 나타낸 것이다. GloSea5는 열대 서태평양과 인도양에서의 평균 강수대를 전반적으로 과도하게 모의하며, 북태평양 여름 몬순 강수를 과도하게 모의하는 경향을 보인다. 북반구 봄과 여름철 동아시아 몬순 강수대와 인도 내륙 강수를 과소 모의하는 반면 적도 인도양에서의 강수를 과대 모의한다. GloSea6는 인도양에서의 평균 강수량을 개선하며 봄/여름철 동아시아 몬순 강수대를 다소 개선하지만 SPCZ 강수대를 더욱 과도하게 모의하며 적도 태평양에서의 강수를 전반적으로 과대 모의하는 특징을 보인다. 강수의 표준편차 또한 기온과 마찬가지로 대륙에서의 변동성은 관측 대비 적게 모의하는 반면 해양에서의 변동성은 관측 대비 크게 모의하며, GloSea6에서 강수의 변동성은 뚜렷한 개선 효과를 보이지 않는다.

GloSea5는 500hPa 지위고도를 전반적으로 매우 낮게 모의하는 특징을 보인다 (Figure 28). GloSea6에서 이러한 Z500의 평균 오차가 전구 전반에 걸쳐 상당히 완화되며, 전 계절에서 뚜렷한 개선 효과를 확인할 수 있다. 특히 우리나라 여름철 기후 변동에 많은 영향을 미치는 북서태평양 고기압 변동을 GloSea5는 매우 약하게 모의하며 이는 서태평양에서의 고기압성 순환을 약화시켜 850hPa에서의 동서 바람의 오차를 유도한다 (Figure 29). 이는 GloSea5가 북서태평양과 열대 인도양에서의 해수면 온도 dipolar 구조와 북서태평양 고기압순환 사이의 양의 피드백(Wang et al., 2013)을 약하게 모의하기 때문으로 분석된다 (김가영, 2021). GloSea6는 이러한 북서태평양 고기압순환의 강도를 강화시켜 구조적 오차를 상당히 개선함을 확인할 수 있다.

Figure 30에서 Figure 32는 주요 변수들이 가지는 구조적 오차를 histogram으로 나타낸 것으로, 모델이 가지는 오차가 어떠한 편향성을 나타내는지 가시적으로 표출하기 위해 제시하였다. GloSea5는 북반구 봄철과 여름철에 약 60% 이상의 지역에서 cold bias와 wet bias를 나타내며, 특히 여름철 이러한 바이어스 편향은 더 두드러지게 나타난다. 동아시아 지역에서는 더 뚜렷한 바이어스의 편향을 histogram에서 확인할 수 있으며, GloSea6에서 cold bias가 전구나 동아시아 영역에서 완화되는 것을 볼 수 있다. GloSea5에서의 wet bias의 개선 여지는 미비하게 나타났지만 500hPa 지위고도의 negative bias가 상당히 개선되는 것을 histogram에서 뚜렷하게 확인할 수 있다.

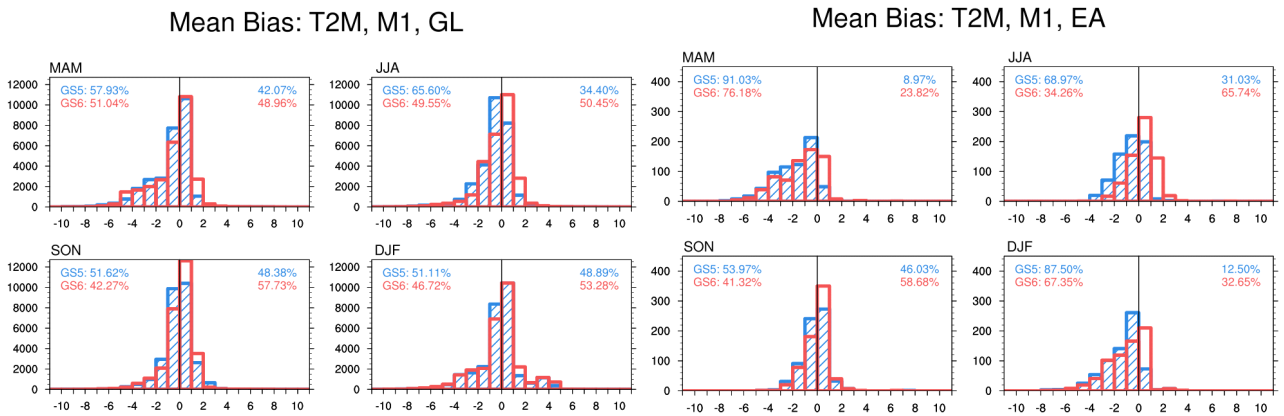


Figure 30. Histogram of the mean bias for T2M for 1 month lead during 1997–2016. Blue (Red) histograms represent the distribution of mean bias for GloSea5 (GloSea6).

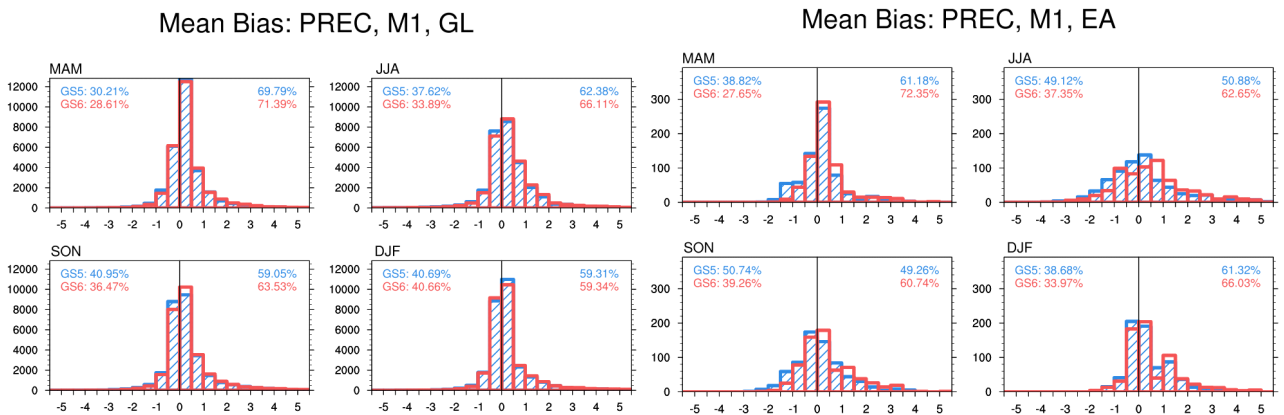


Figure 31. Same as Figure 30, except for Precipitation.

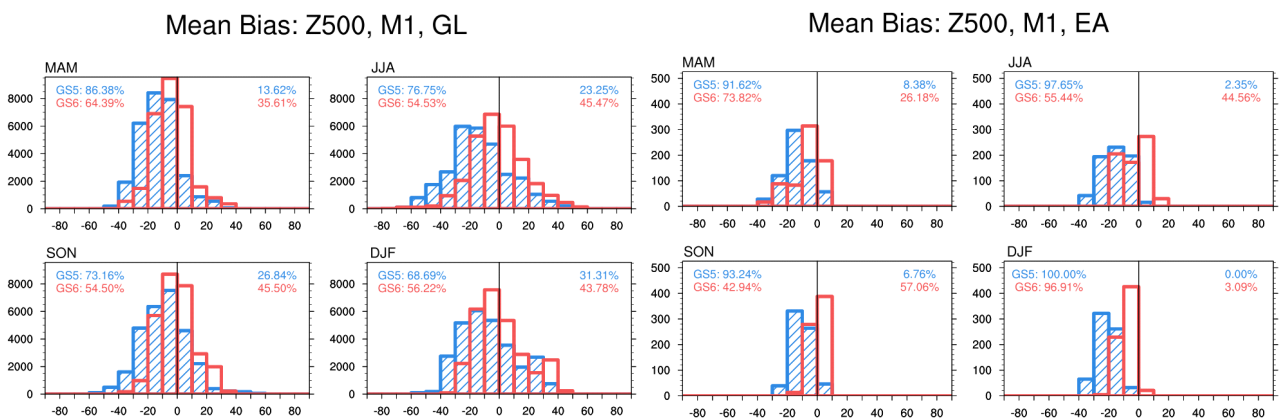


Figure 32. Same as Figure 30, except for Z500.

Figure 33는 기후모델의 단정예보 품질 개선 정보를 제공하는 메트릭 스코어카드를 나타낸 것이다. GloSea6의 전구 예측성능은 강수를 제외한 대부분의 변수들에서 4계절 예측성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 동아시아의 경우 3-week, 4-week 리드타임에서 GloSea5 대비 예측성능이 더 감소하는 경향을 보이지만 1-month 리드타임의 예측성능은 다소 향상되는 것을 확인할 수 있다. UKMO GloSea의 경우 모델 개발에 있어 영국을 포함한 유럽을 중심으로 예측성 향상을 위해 노력하고 있으며, 동아시아의 예측성 개선은 다소 관심 지역을 벗어나 있을 것이다. 따라서 우리나라를 포함하는 동아시아 예측성 향상을 위한 모델 개선·개발 연구들이 활발히 진행되어야 할 필요가 있으며, KMA GloSea6에서는 동아시아 예측성능 향상을 기대해 볼 수 있을것이라 생각한다.

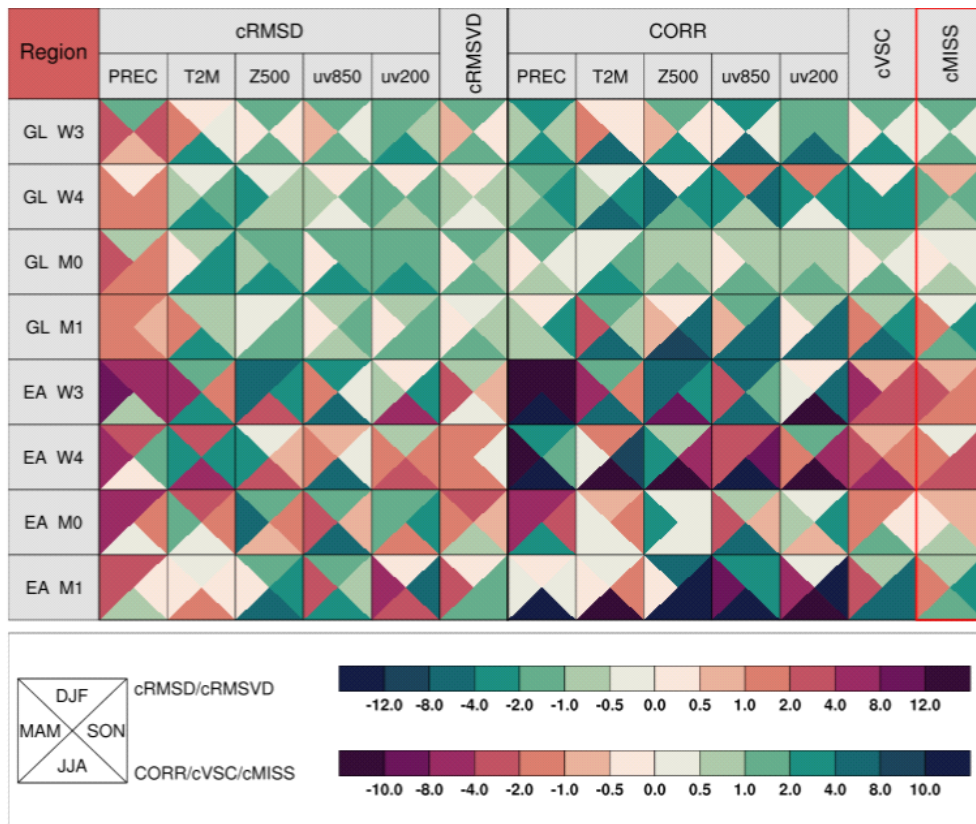


Figure 33. Metrics scorecard for the anomaly fields over globe (GL) and East Asia (EA) during 1997-2016. Each square is divided into four triangles, representing model performance in different seasons, spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter (DJF) as shown in the bottom-left legend. The colored bars for different statistical metrics are shown below the table. The green (red) colors indicate better (worse) model performance.

편차장 스코어카드의 지수화된 개별 성능값이 내포하는 예측 품질 개선의 시·공간적 분포 정보를 제시하기 위해 hindcast 기간 동안 예측성능 개선 여부의 시간 변화와 지역적 변화 비율을 제시하였다. Figure 34은 1-month 리드타임의 전구와 동아시아 기온의 여름철 예측성능의 연변화를 나타낸 것으로, GloSea5는 검은 실선, GloSea6는 빨간 실선으로 표시하고 예측성능의 개선 비율을 막대로 표시하였다. 전구 기온의 여름철 예측성능은 스코어카드에서도 뚜렷이 나타났듯이 많은 해에서 예측성능이 개선됨을 확인할 수 있지만, 동아시아 기온 예측성능의 개선 여부는 해마다 다른 특성을 나타내며 특히 2010년 이후 예측성능이 오히려 감소하는 결과를 보인다.

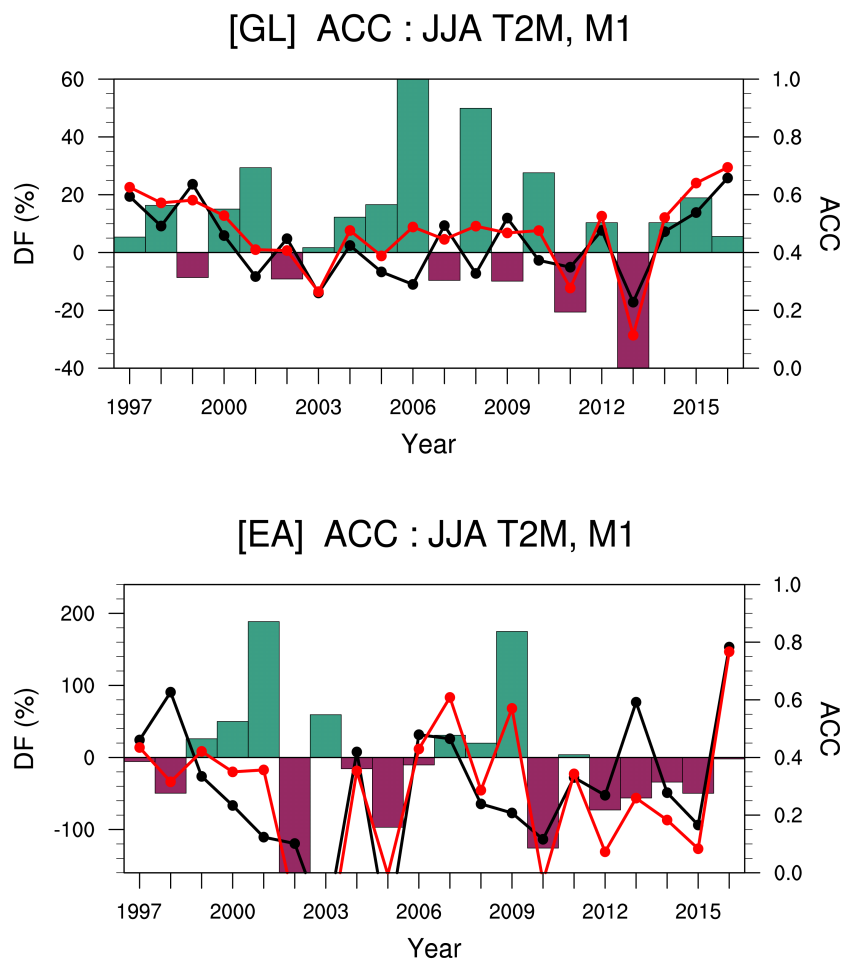


Figure 34. Time series of Anomaly pattern Correlation Coefficient (ACC) of T2M over Globe and East Asia from GloSea5 (black line) and GloSea6 (red line) with 1 month lead time. The bars denote relative ACC difference of GloSea6 over GloSea5. The green (red) colors indicate better (worse) model performance.

Figure 35와 Figure 36는 Hindcast 기간(1997~2016) 동안 GloSea5 대비 GloSea6의 예측성능 변화의 시·공간적 분포를 box plot으로 표시한 것으로, 검은 점은 예측성능 변화의 평균값을 나타낸다. Figure 35는 3개의 주요 변수의 ACC 예측성능 변화의 20년간 분포범위를 나타낸 것으로 대부분의 리드타임의 4계절 예측성능 분포를 한눈에 볼 수 있으며, 봄철을 제외한 예측성능 분포 박스가 양의 방향으로 치우쳐져 있으며 평균값 또한 양의 값을 나타내어 개선되는 결과를 확인할 수 있다. 좌측의 표는 3-week 리드타임에 대한 ACC 예측성능이 전체 20년 기간 대비 개선되는 해의 비율을 나타낸 것으로, 봄철을 제외한 계절에서 50% 이상의 해에서 성능이 개선됨을 보여준다.

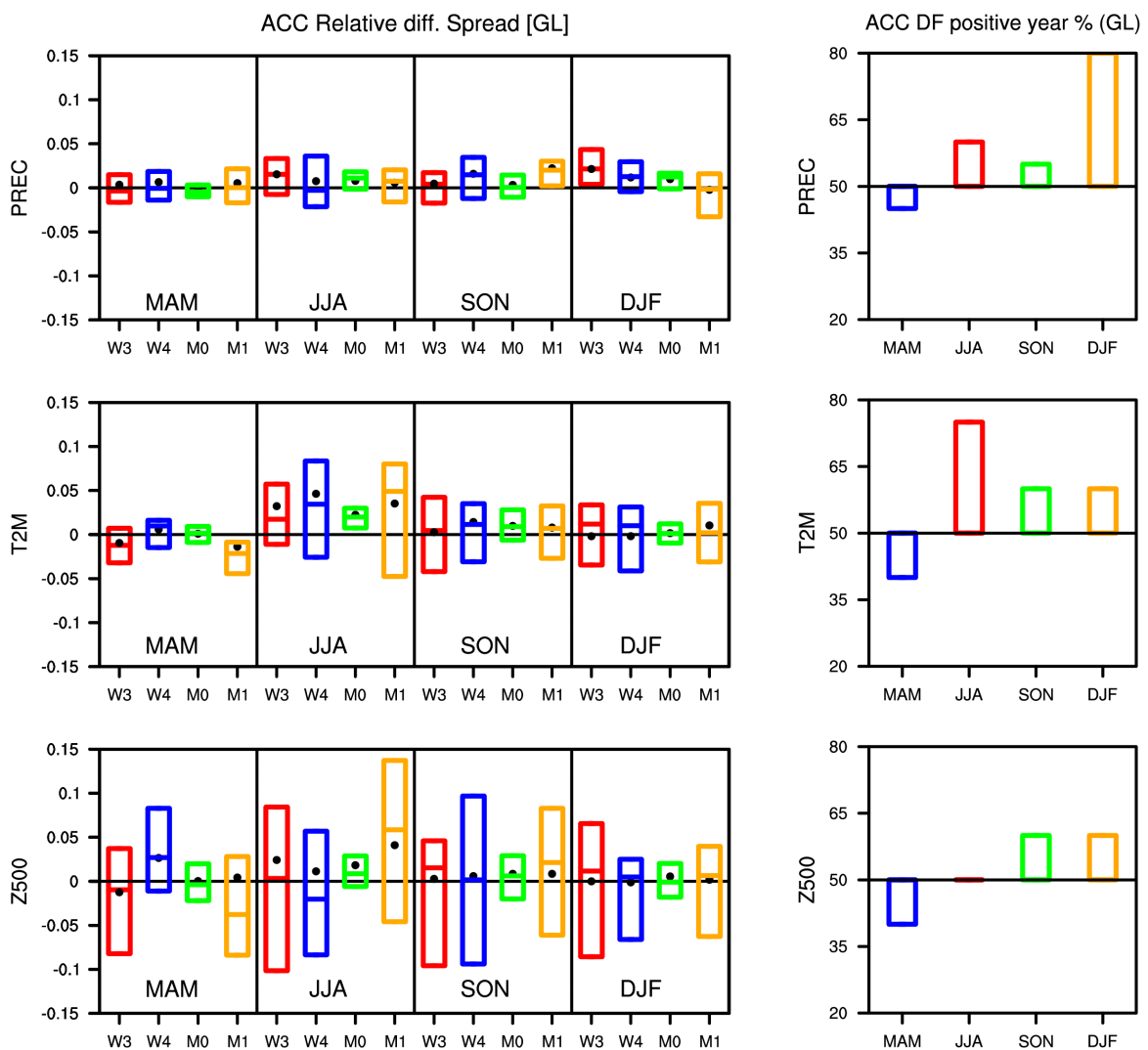


Figure 35. (Left) Seasonal averaged relative ACC difference range between upper and lower 25% of GloSea6 with target based GloSea5 for the different lead of PREC, T2M, and Z500 over Globe. Black dot and the colored line indicates the average value and the median value of each case. (Right) The ratio of years in which the relative ACC over Globe improves.

Figure 36는 TCC 변화의 공간 분포범위를 나타낸 것으로 지역적으로 예측성능이 개선되는 곳의 비율이 50% 이상인 것으로 확인되며, Hindcast 기간 동안 예측성능 개선 여부의 공간적 변화 비율을 한눈에 확인할 수 있다.

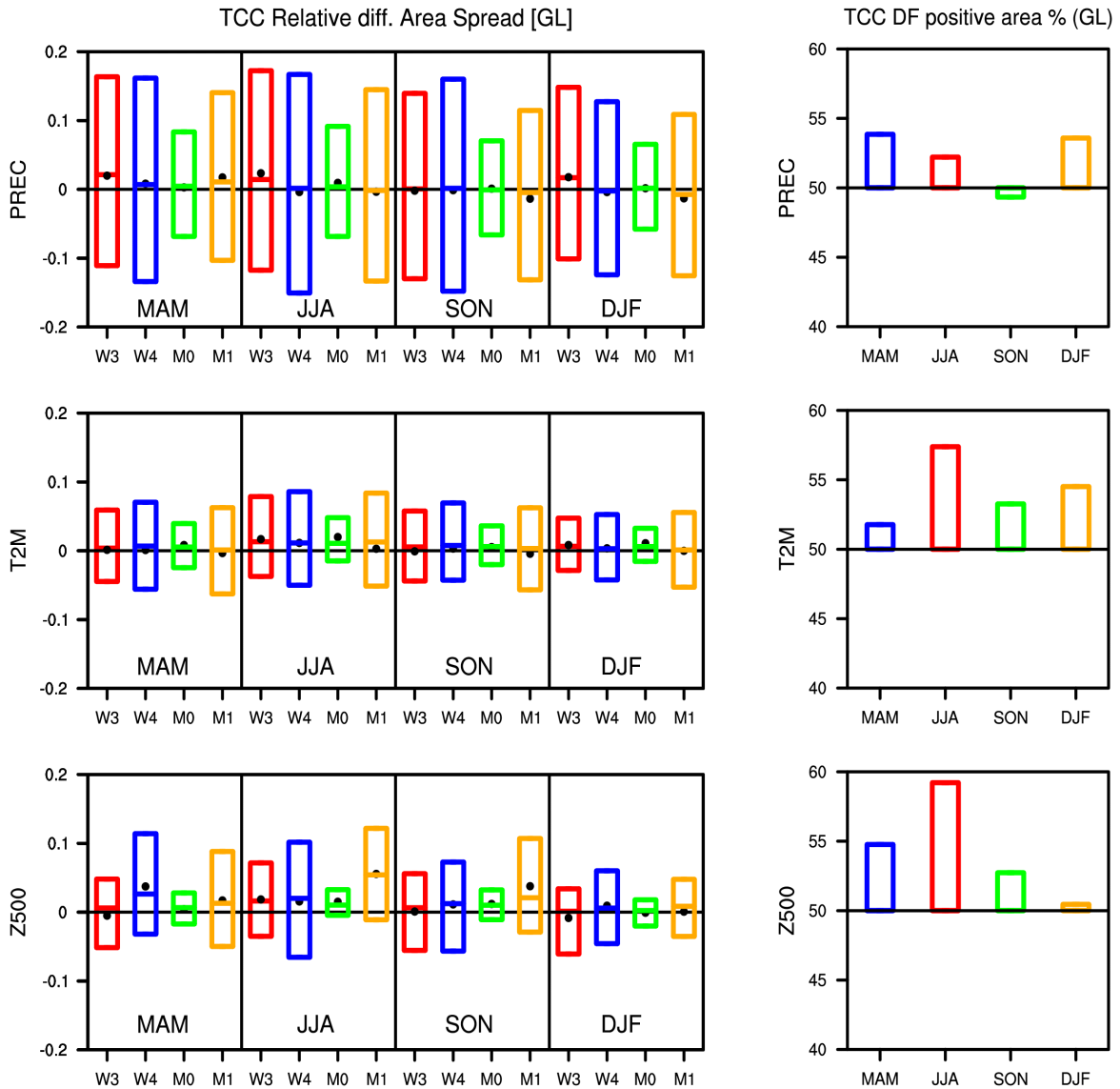


Figure 36. (Left) Seasonal averaged relative TCC (Temporal correlation coefficient) difference range between upper and lower 25% of GloSea6 with target based GloSea5 for 1 month lead of PREC, T2M, and Z500 over Globe. Black dot and the colored line indicates the average value and the median value of each case. (Right) The ratio of areas in which the TCC improves over Globe.

(나) 확률예보 및 앙상블 표준진단 구성 및 결과

① 확률예보 메트릭 구성

동아시아 기온 예보에 대한 GloSea5 현업 확률 예측의 품질을 평가하기 위한 표준 통계 검증 기법들을 제시하였다. 크게 확률 예보의 정확도, 유용성, 활용성으로 구성하였다.

① 정확도

확률 예보 정확도를 예보 카테고리 전체에 대해서 종합적으로 살펴보기 위해 ranked probability score (RPS)를 계산하였다. RPS는 brier score를 확장시킨 기법으로 예보 확률이 관측에서 나타나는 빈도와 얼마나 잘 상응하는지 평가하는 방법이다.

$$RPS = \sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 = \sum_{m=1}^J \left[\left(\sum_{j=1}^m y_j \right) - \left(\sum_{j=1}^m o_j \right) \right]^2$$

② 유용성

예보가 얼마나 유용한가라는 측면에서 예측성 진단을 위해 예보의 적중률(hit rate)과 오보율(false alarm rate)을 통해 예보의 분포가 사건과 무사건 사이에서 잘 분류되어 있는지를 평가하였다. 이 적중률과 오보율의 관계를 그림으로 도식화한 것이 Receiver Operating Characteristic Curve이고 만약 완벽한 예보라면 이 곡선 아래 면적(AUC, Area under ROC curve)이 1이 되며 예보가 기후학적 확률과 견주어 이득을 볼 수 없다면 즉 쓸모없는 예보라면 0.5의 값을 가진다.

③ 활용성

Extreme forecast index(EFI)는 모델의 기후 분포와 확률 예보 사이의 차이를 정량화함으로써 예보관에게 잠재적인 극한기상 사건에 대해 초기 가이드를 제공하는 도구이다. 과거재현실험의 동아시아 3,4주 예측에 있어서 기온 극한 사상 가능성에 대한 예보가 실제 극한 사상 발생 빈도와 공간적으로 얼마나 잘 부합하는지를 살펴보기 위해 관측의 극한 사상 빈도와 EFI 지수의 공간 상관값을 계산하였다.

$$EFI \text{ PCC} = \text{pcor}(\text{OBS percentile map}, \text{EFI map})$$

④ 개선율

예측 스킬의 개선율은 기준 예보 대비 개선된 비율로 해석하였다. 기준 예보는 GloSea5 예보로 설정하였다.

$$SS_{ref} = \frac{(A - A_{ref})}{A_{perf} - A_{ref}} \times 100$$

따라서 정확도의 개선율은 다음과 같다.

$$IR_{RPS} = \frac{(RPS_{GS6} - RPS_{GS5})}{0 - RPS_{GS5}} \times 100 = 1 - \frac{RPS_{GS6}}{RPS_{GS5}} \times 100$$

유용성의 개선율과 활용성의 개선율은 다음과 같다.

$$IR_{AUC} = \frac{(AUC_{GS6} - AUC_{GS5})}{1 - AUC_{GS5}} \times 100$$

$$IR_{EFI.PCC} = \frac{(EFI.PCC_{GS6} - EFI.PCC_{GS5})}{1 - EFI.PCC_{GS5}} \times 100$$

② 확률예보 성능평가 결과

이 연구에서 제안하는 확률예보 표준성능평가 스코어카드는 Figure 37과 같다. 스코어카드의 가로축을 구성하는 성능평가 메트릭은 RPS, AUC, EFI지수의 공간상관값으로 구성하였다. 세로축은 타겟 리드타임으로 3주, 4주, 3-4주, 1개월 예측으로 구성하였다. 스코어카드를 통해 확인할 수 있는 변수는 기온, 500hPa 지위고도, 850hPa의 동서, 남북류며, 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절 모두에 대한 확률예보 성능을 한 눈에 볼 수 있다. 모델의 구버전과 신버전 각각에 대한 성능뿐만 아니라 구버전 대비 신버전에서의 개선율도 변수, 리드, 계절을 종합적으로 확인할 수 있다. 녹색으로 진해질수록 좋은 성능을 나타내게끔 시각화함으로써 어떠한 메트릭이든 통일성 있는 잣대로 바라볼 수 있게 가독성을 높였다.

이 스코어카드를 실제 과거재현실험 자료에 적용을 한 결과 UKMO의 GloSea6는 GloSea5에 비해 가져올 수 있는 성능 개선의 정도가 일반적으로 약 10% 이하였다. 리드타임과 계절, 변수에 따라 10% 미만으로 감소하는 경우도 있다.

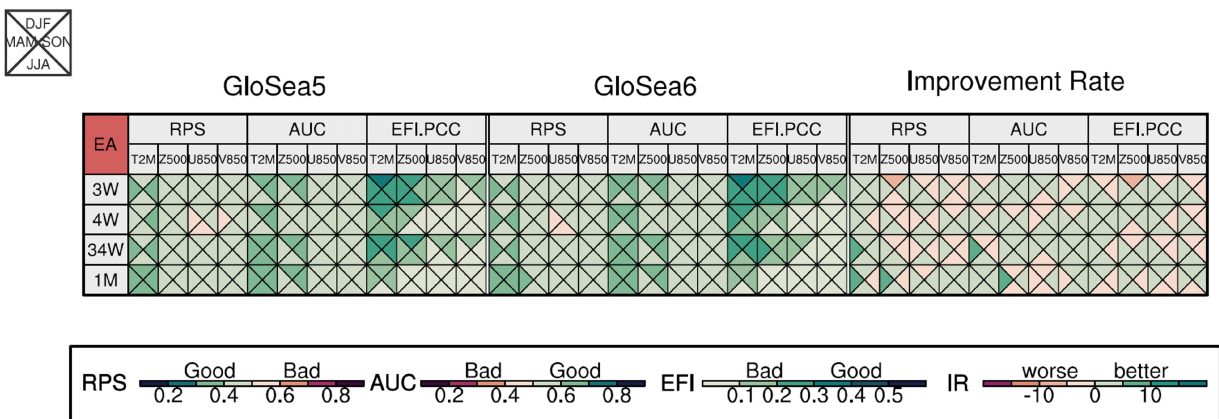


Figure 37. Proposed score card of standard evaluation for probabilistic forecast skill.

③ 앙상블진단 메트릭 구성

동아시아 기온 예측에 대한 앙상블 특징을 살펴보기 위하여 UKMO GloSea5, GloSea6 과거 재현실험 결과로부터 ranked histogram, 신뢰도 지수, 앙상블 스프레드 및 flow-dependent spread를 통한 불확실성 추정 분석을 수행하였다.

① Ranked histogram

ranked histogram을 통해 앙상블 유형을 진단할 수 있는데 관측값과 모델 앙상블 멤버 각각의 예측값들을 순서대로 나열함으로써 관측과 앙상블 멤버들 간의 순서가 어떤 통계적 일관성을 띄는지, 그리고 그 정도가 얼마인지를 측정할 수 있다. 즉, 모형에 대한 bias를 보여주는 진단 방식으로 앙상블 예측이 정확하면 ranked histogram이 평편해지고, 앙상블이 관측의 값보다 늘 낮은 값을 가질 때는 우상향하는 히스토그램이 만들어져 이때 우리는 앙상블 멤버들이 음의 바이어스를 가지는 특징이 있다고 말한다. GloSea5의 북반구 기온 계절내 예측은 주로 음의 바이어스를 가진다고 알려져 있다. 앙상블 유형은 크게 네 가지로 구분되고 유형별 특징이 Table 8에 정리되어 있다.

Table 8. The meaning and consistency according to ensemble types.

| Type | Meaning | Consistency |
|------------|---|---------------------------------|
| Flat | ensemble spread correctly represents forecast uncertainty | consistent |
| U-Shape | too small spread | underdispersion (overconfident) |
| Dome-Shape | too large spread | overdispersion (underconfident) |
| Asymmetric | ensemble contains bias | negative/positive bias |

② 신뢰도 지수

신뢰도 지수(Reliability Index)는 가장 이상적인 앙상블 형태인 평편한 모양의 ranked histogram으로부터 실제 ranked histogram이 얼마나 가까운지 그 정도를 나타낸 것이다 (Monache et al., 2006). 신뢰도 지수는 아래와 같이 정의한다.

$$RI = \frac{\frac{1}{N_{bin}} \sum_{i=1}^{N_{bin}} \left| \frac{count_i}{N_{point}} - \frac{1}{N_{bin}} \right|}{\frac{1}{N_{bin}}} \times 100 = \sum_{i=1}^{N_{bin}} \left| \frac{count_i}{N_{point}} - \frac{1}{N_{bin}} \right| \times 100$$

③ 앙상블 스프레드

앙상블 스프레드는 예측의 분산을 가리키고 평균으로부터 앙상블 예측의 편차를 측정하여 계산한다(Zhu, 2005; 김상욱 2019). 스프레드는 아래와 같이 정의한다.

$$spread = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\bar{f} - f(n))^2}$$

여기서, $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(n)$ 은 앙상블 평균이고, f 는 앙상블 예보이다.

④ 에러-스프레드 관계 지수

에러와 스프레드의 관계가 좋은 선형관계를 가지고 있으면 통계적으로 신뢰도가 높은 앙상블이라고 평가한다. 즉, 앙상블 스프레드와 에러에 대한 산포도를 그렸을 때 각 점들이 (0,0)에서 (1,1)에 이르는 대각선에 가까이 분포하면 신뢰도가 높다고 볼 수 있다. 이러한 관계를 이용하여 에러-스프레드 관계 지수를 다음과 같이 계산하였고 지수는 대각선으로부터 점들이 떨어진 거리의 합산을 의미한다(Figure 38).

$$\text{Relationship Index} = \sum_{i=1}^{N_{bin}} \frac{\sqrt{2(y_i - x_i)^2}}{2}$$

여기서, x_i 는 구간별 앙상블 스프레드 평균이고 y_i 는 구간별 앙상블 에러의 평균이다.

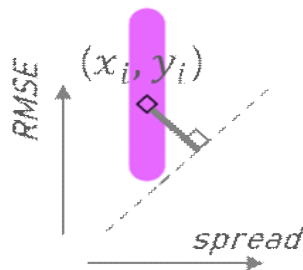


Figure 38. Schematic for calculating the degree of closeness from a diagonal line.

⑤ Flow-dependent spread (FDS)

대기 순환의 움직임은 보통 무질서하고 (Lorenz, 1963) 대기 순환의 발달은 초기 상태에 민감하기때문에 수치 예보의 예측성은 초기 상태가 어떠한지에 따라 달라진다. 어떤 특정 대기

패턴으로부터 예측이 시작될 때 더 정확한 예보를 생산하곤 한다. 다시 말하면, 예보는 초기 에러에 민감할 뿐만 아니라 초기 에러의 성장률은 초기 에러 자체에 비례하는데 특정 유형의 대기 구조가 상당히 안정적이면 그로 인해 예측 가능한 부분이 많아지고, 반면 안정적이지 않으면 예측하기 힘들다는 것이 밝혀졌다. 초기 오류와 마찬가지로, 모델에 있어서 불확실성은 대기 흐름에 의존적인 역학 불안정성과 연관된 불확실성이 반영되어 순환 패턴에 영향을 미친다. 이러한 예보 불확실성의 척도를 제공하기 위해 앙상블 방안을 사용하는데 앙상블 멤버 간의 스프레드가 예측에 대한 신뢰도의 추정치를 제공한다. 어떤 날에는, 스프레드가 작을 수 있고 이는 대기가 매우 예측 가능하다는 것을 암시한다. 또 어떤 날에는 예보 앙상블이 상당히 넓게 분포할 수 있는데 이는 대기가 덜 예측 가능하다는 것을 의미한다(Ferranti et al., 2015). 고로 앙상블 스프레드는 예보 에러를 예상할 수 있는 좋은 인자이다(MacLeod et al., 2017). 각각 스프레드 구간 안에서의 모든 앙상블 예보의 평균 에러를 계산함으로써 FDS를 평가할 수 있는데 FDS 분석은 대기 흐름의 어떤 구조가 더 예측 가능한 상태를 유도하는지 그래서 더 정확한 예보를 만들어내는지 미리 알 수 있는 방법이다(Ferranti et al., 2015).

④ 앙상블 표준진단평가 결과

이 연구에서 제안하는 앙상블 표준진단평가 스코어카드는 Figure 39과 같다. 스코어카드의 가로축을 구성하는 진단평가 매트릭은 신뢰도 지수, 에러-스프레드 관계지수, 동아시아 기온 예측 불확실성을 증가시키는 기온 패턴과 기압 패턴으로 구성하였다. 세로축은 타겟 리드타임으로 3주, 4주, 3~4주, 1개월 예측으로 구성하였다. 이 역시 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절 모두에 대한 앙상블 진단 결과를 한 눈에 볼 수 있다. 모델의 구버전과 신버전 각각에 대한 앙상블 특성을 확인하고 상호 비교 가능하며 리드, 계절을 종합적으로 확인할 수 있다. 신뢰도의 유형은 색깔로, 신뢰도 크기는 색의 농도로 구분할 수 있게 시각화하였고 색이 열수록 바이어스가 적은 정확도가 높은 앙상블로 구성된 예보라 볼 수 있다. 에러-스프레드 관계 지수 역시 색이 열수록 사용하기 좋은 분포를 가진 유용한 앙상블임을 나타낸다. 동아시아 기온 예측의 불확실성을 높이는 기온, 기압 패턴은 주로 북반구 주요 대기 모드인 AO, PNA, 우랄 블로킹으로 나타나 각 패턴들을 색으로 구분지음으로써 계절별, 리드별 해당 불확실성 증가 패턴이 스코어카드에 표현될 수 있도록 하였다.

GloSea5에서 동아시아 계절내 기온 예측은 대체로 모델이 관측에 비해 낮게 모의하는 경향이 있으며 신뢰도 또한 높지 않다. 4주 혹은 1개월로 리드타임이 길어지면 가을철 앙상블 예보는 믿을만한 것으로 나타났다. GloSea6에서는 이러한 음의 바이어스가 consistent 유형으로 개선되거나, 음의 바이어스가 유지될지라도 색이 열어져 신뢰도가 향상되었다. 에러-스프레드 관계를 통해 GloSea5는 봄, 겨울철보다는 여름, 가을 앙상블이 더 유용하게 쓰일 수 있는 앙상블 예보 분포를 가진다고 볼 수 있고, 이러한 봄, 겨울철 앙상블 분포는 GloSea6를 통해 개선이 된 것을 확인할 수 있었다. GloSea5에서의 동아시아 기온 예측은 주로 음의 AO 패턴과 우랄 블로킹 패턴으로 인해 예보 불확실성이 증가하고 GloSea5의 큰 특징인 동아시아 기온 음의 바이어스에 이 두 패턴이 주된 역할을 하는 것으로 이해할 수 있었다. GloSea6에서는 불확실성 요인 중 우랄 블로킹은 사라지고 주로 음의 AO에 의한 예보 불확실성이 남아있었다. 이는

GloSea5 대비 GloSea6의 주요 개선 요인 중 해빙에서의 큰 개선이 있었는데 이것이 그 역할을 한 것으로 보인다. 우랄 블로킹은 카라-바렌츠 해의 해빙 녹음으로 인해 유도되는 패턴으로 잘 알려져 있는데, 다중 대역 알베도와 다층 열역학 방정식 사용, 해양-해빙 항력 계수 및 bare ice 알베도 증가, 해수 어는점 개선, 준-암시적 결합 기법 적용 등 GloSea6에서 해빙 모델의 주요 개선(Kim et al., 2021; Hyun et al., 2022)이 있었기 때문으로 해석된다. GloSea 모델의 특징인 동아시아 기온 음의 바이어스는 GloSea6에서도 그 경향이 남아있고 이는 음의 AO와 관련된 WACE 패턴의 영향으로 볼 수 있다. 음의 AO는 유라시아 눈덮임에 크게 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있어 추후 GloSea 모델에서의 지면-대기 상호작용, 북극 구름 모수화에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보여진다.

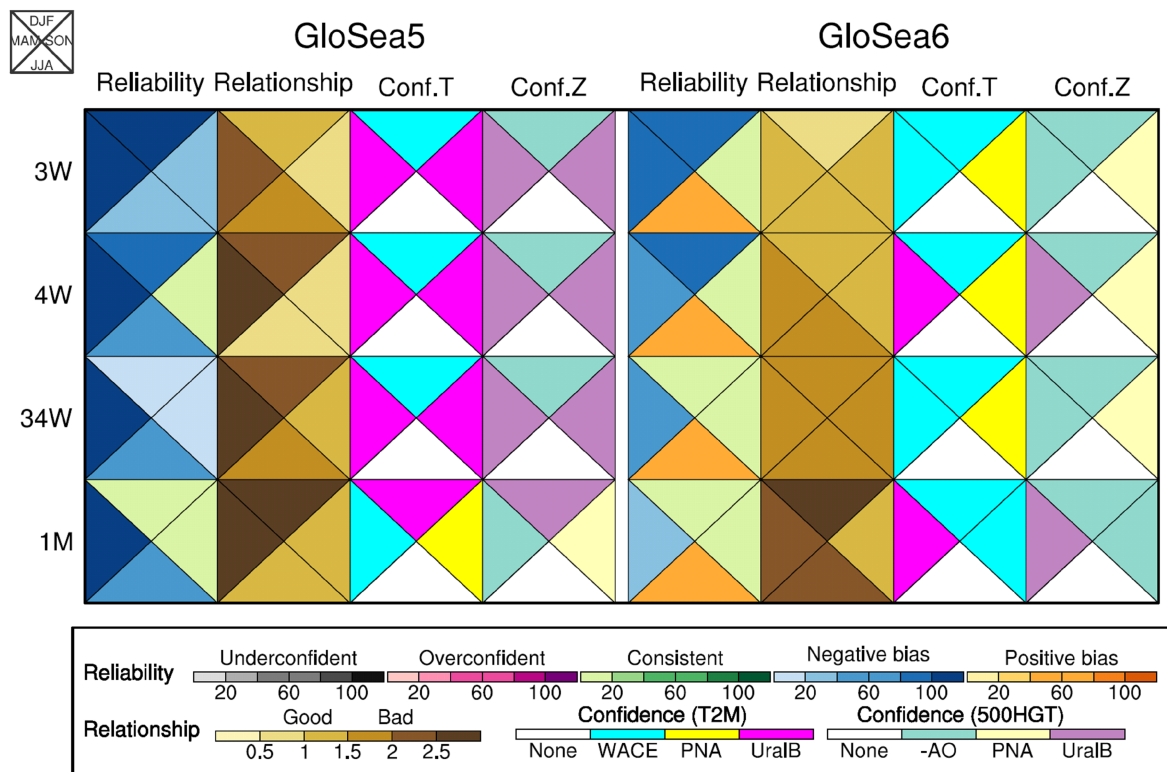


Figure 39. Proposed score card of standard evaluation for ensemble characteristics diagnosis.

(3) 표준 진단평가 프레임 구조화

(가) ENSO 진단 매트릭 구성 및 결과

① ENSO 진단 매트릭 구성

최근 Planton et al., (2021)은 CMIP 모델들의 ENSO 예측성을 정밀하고 정확하게 평가하기 위해 CLIVAR ENSO 매트릭을 소개하였다. ENSO 평가 매트릭을 ①Performance-②Teleconnection-③Process로 세분화하여 ENSO 발생 및 기작을 모의하는 모델 성능을 진단하고 평가하였으며 분석 결과를 하나의 진단 매트릭으로 구축하여 ENSO와 연관된 다양한 대기장 패턴 및 원격상관성의 재현성을 표출하였다. 본 연구에서는 이러한 CLIVAR ENSO 매트릭의 구성 방법을 토대로 기후예측모델의 ENSO 진단 평가에 적합한 평가 인자들을 선정하여 구성하였다. Figure 40은 표준진단평가 프레임에서의 ENSO 진단 매트릭 구성도를 나타낸 것으로 ENSO가 발생하는 배경 기후의 오차 정보와 ENSO의 기본적인 모의 성능, ENSO 변동에 따른 원격상관 모의 성능 및 내부 프로세스의 모의 성능을 제시하고자 하였다. 모델의 구조적 오차 파악을 위해 평균제곱근 오차(Root Mean Squared Error; RMSE)를 활용하였으며 예측성 평가를 위해 이상상관계수(ACC) 및 시간상관계수(TCC)를 활용하여 분석하였다.

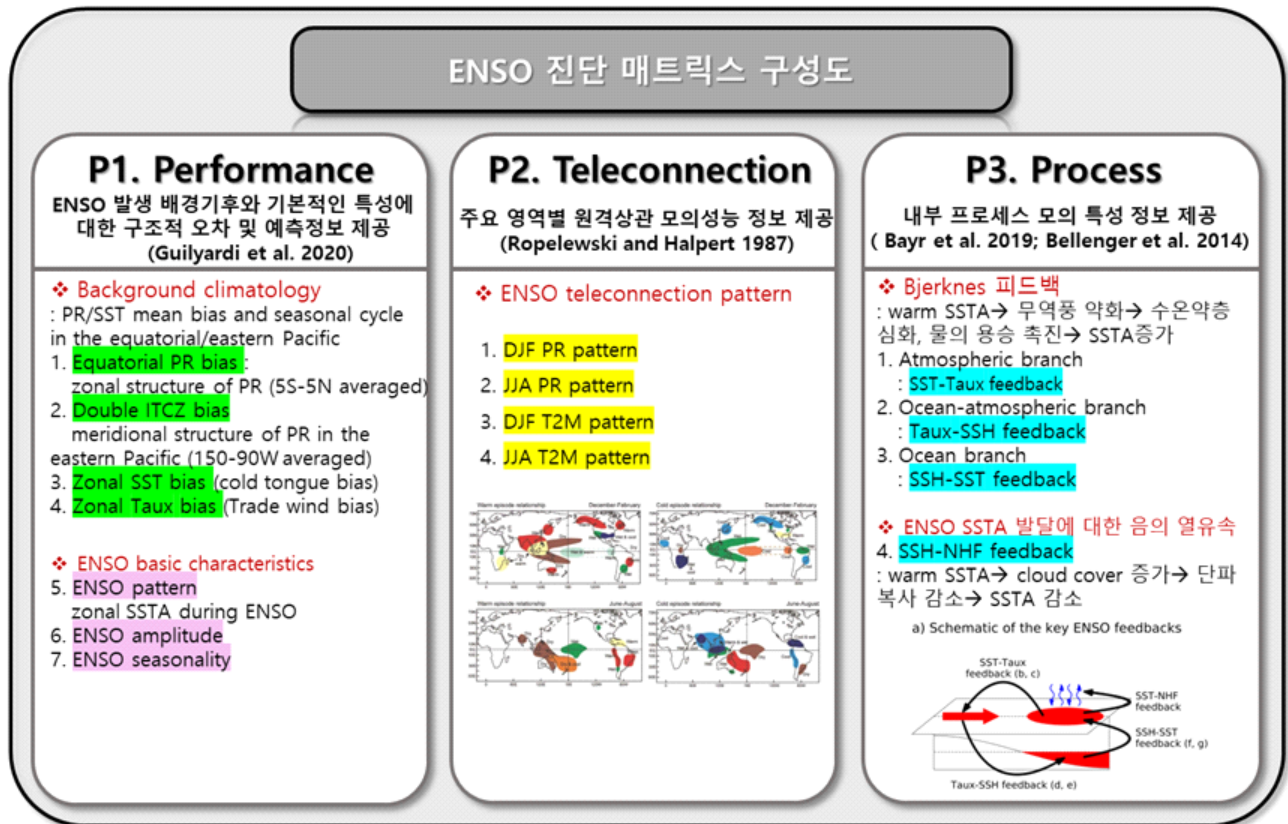


Figure 40. ENSO evaluation framework including three categories and their components.

② ENSO Performance 메트릭 구성

ENSO performance에서는 ENSO 발생 지역에서의 배경 기후의 구조적 오차와 ENSO의 기본 특성에 대한 모의 성능을 제시하며 (Guilyardi et al. 2020), 배경 기후의 구조적 오차 개선 정보 6개, ENSO의 기본적인 특성의 재현 성능 3개의 메트릭으로 구성하였다. 현재 한정적인 자료로 인해 일부 메트릭은 구성하지 못하였으나 더 많은 자료가 보충되면 메트릭 요소를 추가할 예정이다. 분석된 모든 자료는 detrend 하여 사용하였고, 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error; RMSE)를 활용하여 메트릭을 정의하였다.

ENSO 배경장 메트릭 구성 요소로 모델이 가지는 구조적 바이어스 4개 ① 동태평양 double ITCZ bias, ② 적도 태평양에서의 wet bias, ③ 적도 태평양 cold tongue bias, ④ 적도 Trade wind bias 중 첫 번째 3가지에 대한 메트릭이 구축되었고 UKMO GloSea 자료를 사용하여 모델 개선 정보를 제공하고자 하였다. 먼저 ENSO가 발생하는 동태평양과 적도 태평양 강수의 남북/동서 구조 모의 특성을 살펴보았다. Figure 41과 Figure 43는 적도 태평양에서의 연평균 강수와 연변동성의 공간 분포를 나타낸 것으로, GloSea5와 GloSea6는 전반적인 강수 패턴은 잘 모의하지만, 적도 태평양에서의 강수를 전반적으로 과도하게 모의하며 연변동성 또한 관측에 비해 강하게 모의하는 특징을 보인다. GloSea6는 전반적인 강수 패턴은 개선 시키지만, 적도 서태평양에서의 wet bias를 더욱 두드러지게 모의하며 동태평양에서의 wet bias 또한 더욱 강해짐을 확인할 수 있다. 이러한 적도 태평양에서의 과도한 wet bias는 결과적으로 전체 강수 예측성능 감소에 영향을 미친다. Figure 42과 Figure 44은 동태평양(150-90W, 15S-15N)에서의 연평균 강수의 남북구조와 적도 태평양(150E-90W, 5S-5N)에서의 연평균 강수의 동서구조를 나타낸 것으로, 일반적으로 기후 모델들이 가지고 있는 double ITCZ bias와 적도 서태평양 wet bias의 개선 여부를 확인하기 위해 제시하였다. GloSea5는 동태평양에서 wet bias를 모의하며 강한 변동성을 나타내는데 GloSea6는 이러한 구조적 오차를 더 강하게 나타내는 특징을 보인다. 여기서 제시한 동태평양(150-90W, 15S-15N) 영역 평균된 연평균 강수와 연변동성의 RMSE를 동태평양 double ITCZ bias 메트릭 값으로 정의하였다. 또한 GloSea5는 적도 태평양(150E-90W, 5S-5N)에서 전반적으로 wet bias를 모의하며 연변동성 또한 강하게 모의한다. GloSea6는 특히 적도 동태평양에서 강수를 더 과도하게 모의하며 변동성 또한 매우 강한 특징을 나타내어 더욱 과도한 적도 강수를 확인할 수 있다. ENSO 배경장 평가 메트릭의 하나로써 적도 태평양 (150E-90W, 5S-5N) 영역 평균된 연평균 강수와 연변동성의 RMSE 또한 적도 태평양 wet bias 메트릭 값으로 정의하였다. Figure 45은 동태평양 강수의 연변동의 남북구조와 적도태평양 강수의 연변동의 동서 구조를 나타낸 것으로 double ITCZ bias와 적도 wet bias의 강도가 과도하게 모의되는 것은 동태평양 ITCZ와 적도 서태평양에서 여름철 강수가 과도하게 모의되기 때문이다.

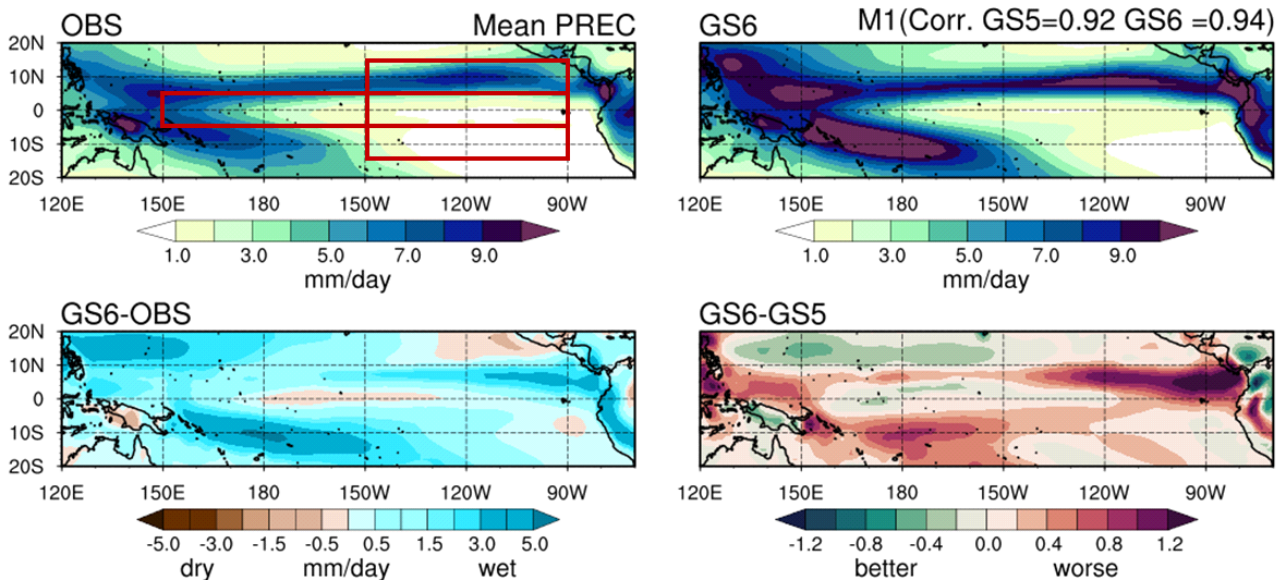


Figure 41. Spatial pattern of climatological precipitation in the equatorial Pacific, showing mainly the double intertropical convergence zone (ITCZ) bias. The upper left and right maps show respectively the reference and the model. And the lower left and right maps show the model bias from GloSea6 and the difference between GloSea5 and GloSea6.

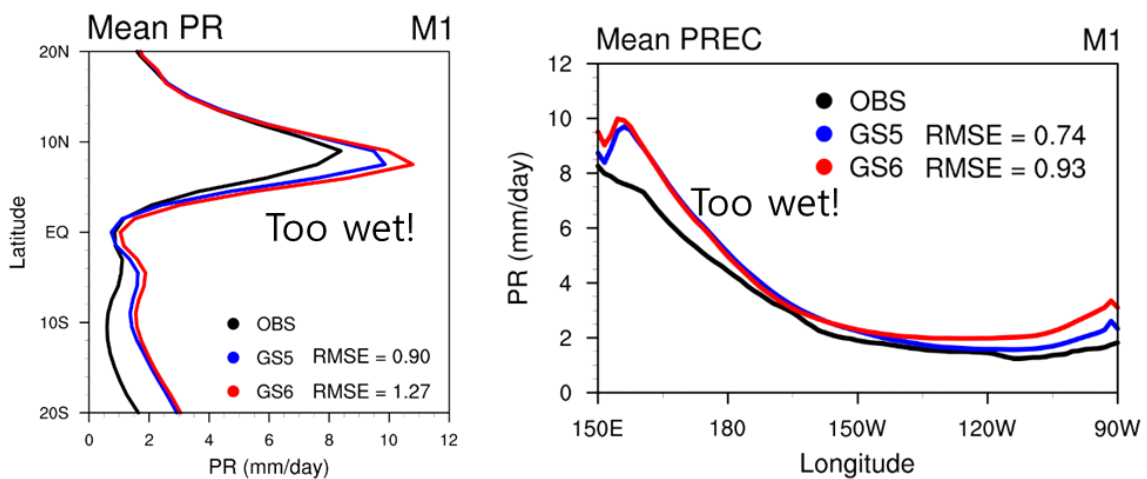


Figure 42. (Left) Meridional mean structure of precipitation in the eastern Pacific (150–90W averaged), measuring mainly the double intertropical convergence zone (ITCA) bias. (Right) Zonal mean structure of precipitation in the equatorial Pacific (5S–5N averaged), measuring mainly the equatorial wet bias. The black, blue and red lines denote respectively the reference, GloSea5 and GloSea6. The metric derived is the meridional and equatorial RMSE between the model and reference.

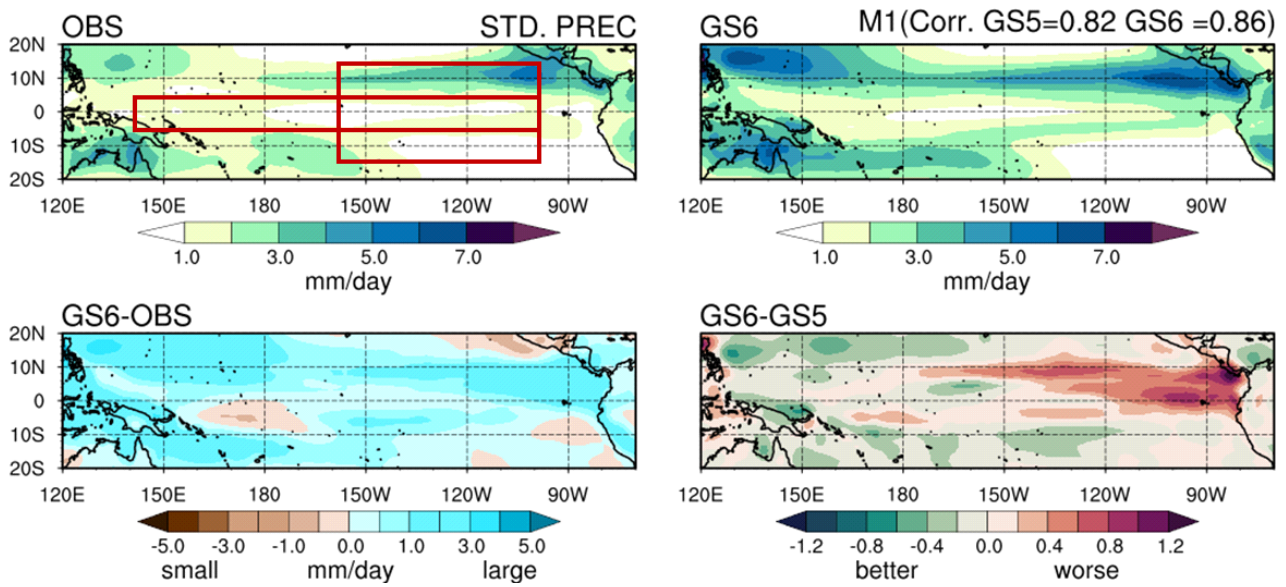


Figure 43. Spatial pattern of the amplitude of the mean seasonal cycle of precipitation in the equatorial Pacific. The upper left and right maps show respectively the reference and the model. And the lower left and right maps show the model bias from GloSea6 and the difference between GloSea5 and GloSea6.

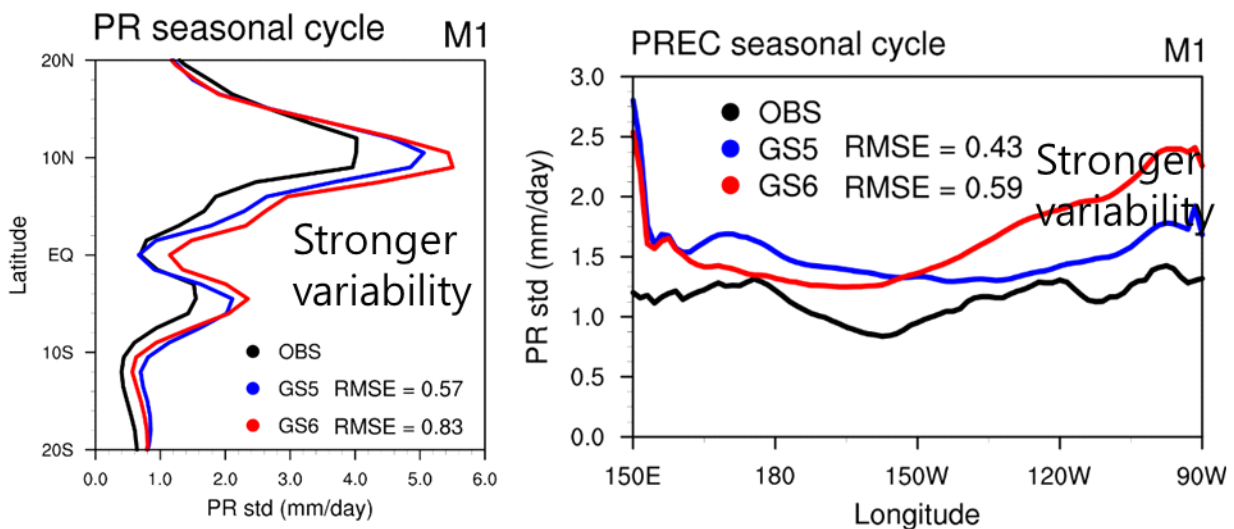


Figure 44. (Left) Meridional mean structure of the amplitude of the mean seasonal cycle of precipitation in the eastern Pacific (150–90W averaged). (Right) Zonal mean structure of the amplitude of the mean seasonal cycle of precipitation in the equatorial Pacific (5S–5N averaged).

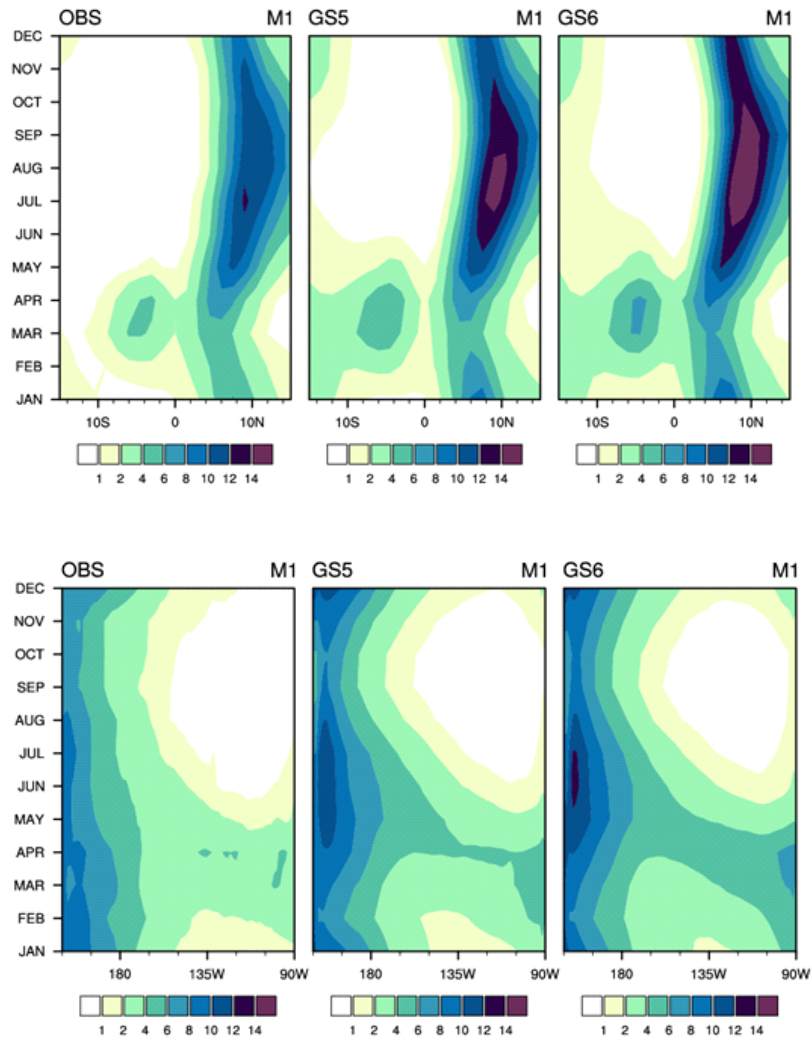


Figure 45. (upper) Meridional structure of the mean seasonal cycle of precipitation in the eastern Pacific (150-90W averaged) (lower) zonal structure of the mean seasonal cycle of precipitation in the equatorial Pacific (5S-5N averaged). The left and right maps show the reference and the models from GloSea5 and GloSea6.

일반적으로 기후모델은 태평양 위커순환의 상승 기류를 서쪽으로 편향 모의하는 특징이 있으며, 이는 ENSO 피드백 강도에 큰 영향을 미친다. 이와 관련된 ENSO 배경장의 구조적인 오차로 cold tongue bias와 Trade wind bias의 개선 정보를 메트릭 구성 요소로 제시하였다. Figure 46와 Figure 48는 적도 태평양 해수면온도의 연평균 및 연변동성의 공간 분포를 나타낸 것으로 적도 해수면온도의 동서구조를 평가하고자 하였다. GloSea5는 적도 태평양에서 두드러진 cold bias를 나타내는데 GloSea6는 이러한 cold bias를 상당히 완화시키지만 콜롬비아 앞바다에서 오히려 강한 warm bias를 모의한다. 또한 Nino 3 영역에서 강한 연변동성을 나타내는 특징을 보이는데 GloSea6에서 뚜렷한 개선점은 보이지 않았다. Figure 47과 Figure 49는 적도 태평양 해수면온도 연변동의 동서구조를 나타낸 것으로 cold tongue bias가 관측과 유사하게 개선되는 반면, maximum seasonality가 관측에 비해 서쪽으로 치우쳐 발생하는 특징을 확인할 수 있다.

태평양 위커순환의 상승기류를 서쪽으로 편향 모의하는 모델의 구조적 오차를 평가하기 위해 Trade wind bias 개선 정보를 제공하고자 하였으나 UKMO GloSea가 제공하는 변수의 제한으로 아직 메트릭을 완성하지 못하였다. 추후 변수가 추가되면 이를 구축하여 완성된 평가체계를 제시할 것이다.

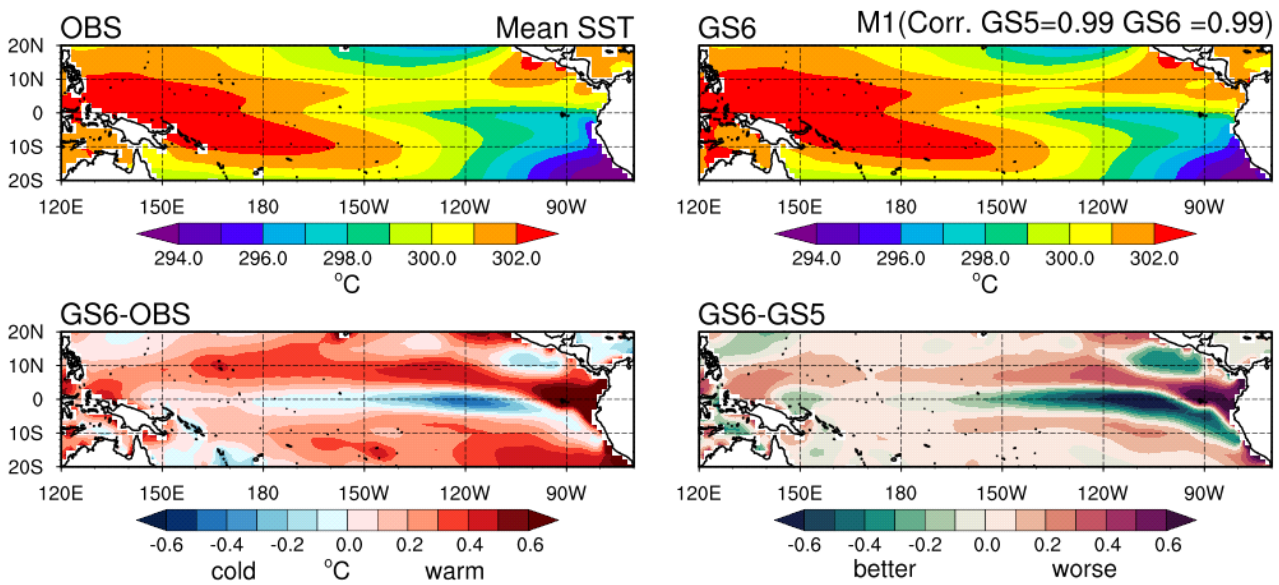


Figure 46. Spatial pattern of climatological sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific, showing mainly the cold tongue bias. The upper left and right maps show respectively the reference and the model. And the lower left and right maps show the model bias from GloSea6 and the difference between GloSea5 and GloSea6.

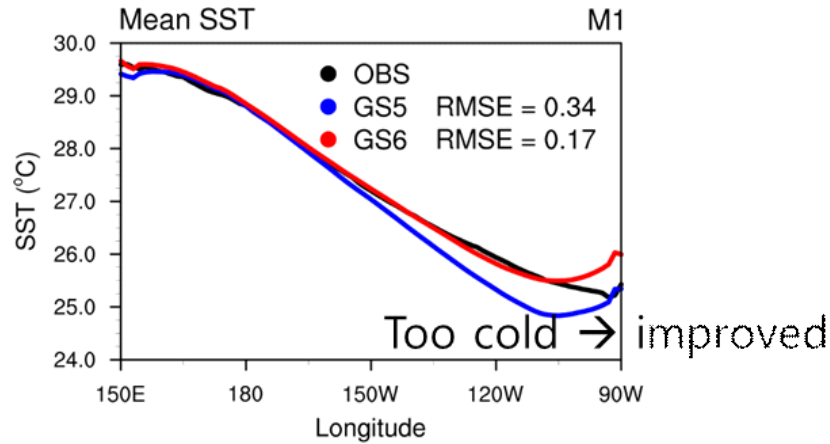


Figure 47. Zonal mean structure of the sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific (5S–5N averaged), showing mainly the cold tongue bias. The black, blue and red lines denote respectively the reference, GloSea5 and GloSea5. The metric derived is the meridional RMSE between the model and reference.

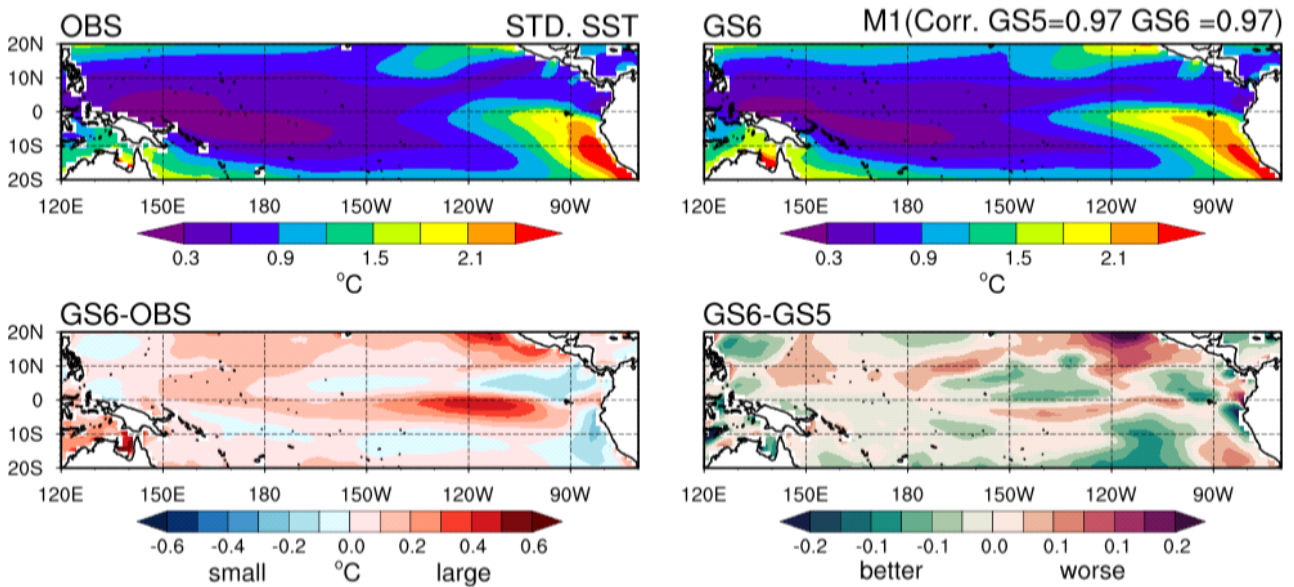


Figure 48. Spatial pattern of the amplitude of the mean seasonal cycle of sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific. The upper left and right maps show respectively the reference and the model. And the lower left and right maps show the model bias from GloSea6 and the difference between GloSea5 and GloSea6.

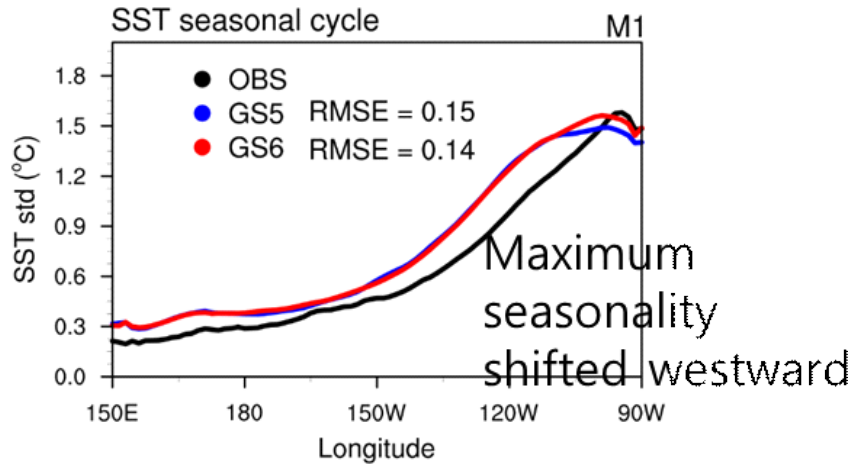


Figure 49. (Left) Zonal structure of the amplitude of the mean seasonal cycle of sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific (150-90W averaged). The black, blue and red lines denote respectively the reference, GloSea5 and GloSea5. The metric derived is the meridional RMSE between the model and reference.

ENSO performance에서는 ENSO 발생 지역에서의 배경 기후의 구조적 오차 외에도 ENSO의 기본 특성에 대한 모의 성능을 평가하고자 하였다. ENSO 기본 특성 메트릭 구성 요소로 3가지 ① ENSO pattern, ② ENSO amplitude, ③ ENSO seasonality에 대한 메트릭을 구축하여 ENSO 모의 성능을 제공하고자 하였다. ENSO 특성을 계산하기 위해 모든 변수의 seasonal cycle과 trend는 제거하였다. 먼저 ENSO pattern은 ENSO와 관련된 SST 변동의 동서 구조 재현 성능을 나타낸 것으로 12월 Nino3.4 지수로 회귀된 12월 해수면온도 편차의 [150E-90W, 5S-5N] 영역 평균값을 RMSE로 나타내었다. Figure 50와 Figure 51은 ENSO 변동에 따른 북반구 겨울철 해수면온도 변동의 공간 패턴을 나타낸 것으로, GloSea6는 Nino3.4영역에서 강한 온도 변동을 상당히 완화시킨다. El Nino와 La Nina 합성장에서도 적도 중앙태평양에서의 과도한 해수면 온도 편차가 GloSea6에서 완화되는 것을 확인할 수 있으며 La Nina의 경우 개선 정도가 더 크게 나타난다. Figure 52은 적도 태평양에서의 해수면 온도 편차의 동서 구조를 나타낸 것으로, ENSO와 관련된 해수면온도편차의 동서위치를 보여준다. GloSea5는 날짜변경선을 기준으로 서쪽에서 관측에 비해 약한 SSTA 변동을 나타내며 maximum SSTA를 관측에 비해 서쪽에 나타나지만 GloSea6는 전반적인 SSTA 동서구조를 관측과 유사하게 나타내며 maximum 위치 또한 관측과 유사하게 모의한다. 이러한 적도 태평양 SSTA의 동서 구조는 합성장에서도 뚜렷한 개선 효과를 확인할 수 있다.

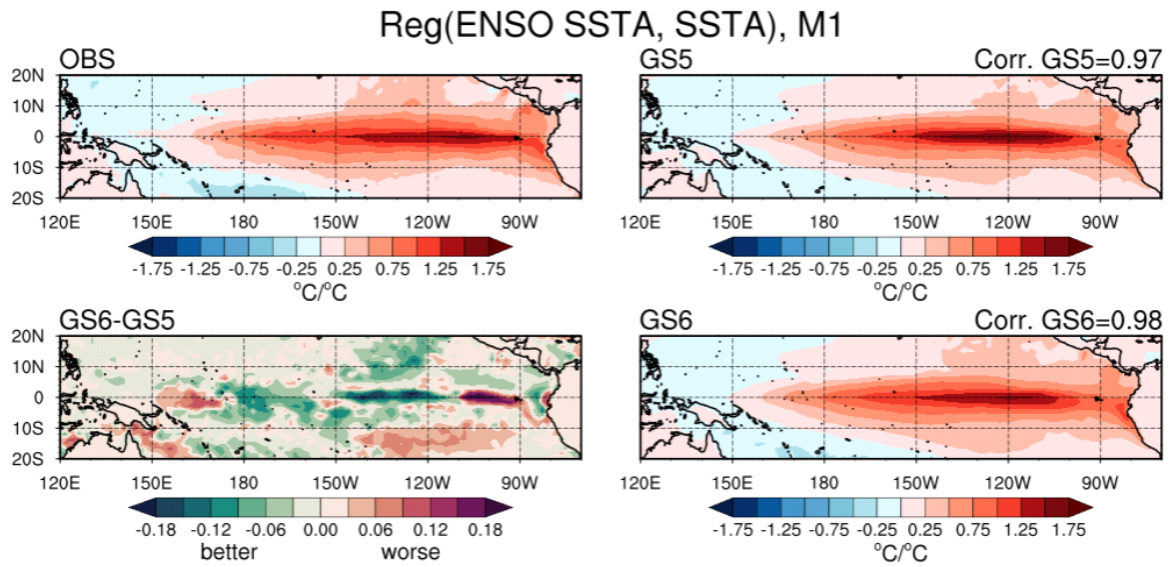


Figure 50. Sea surface temperature anomalies associated with ENSO in the equatorial Pacific.

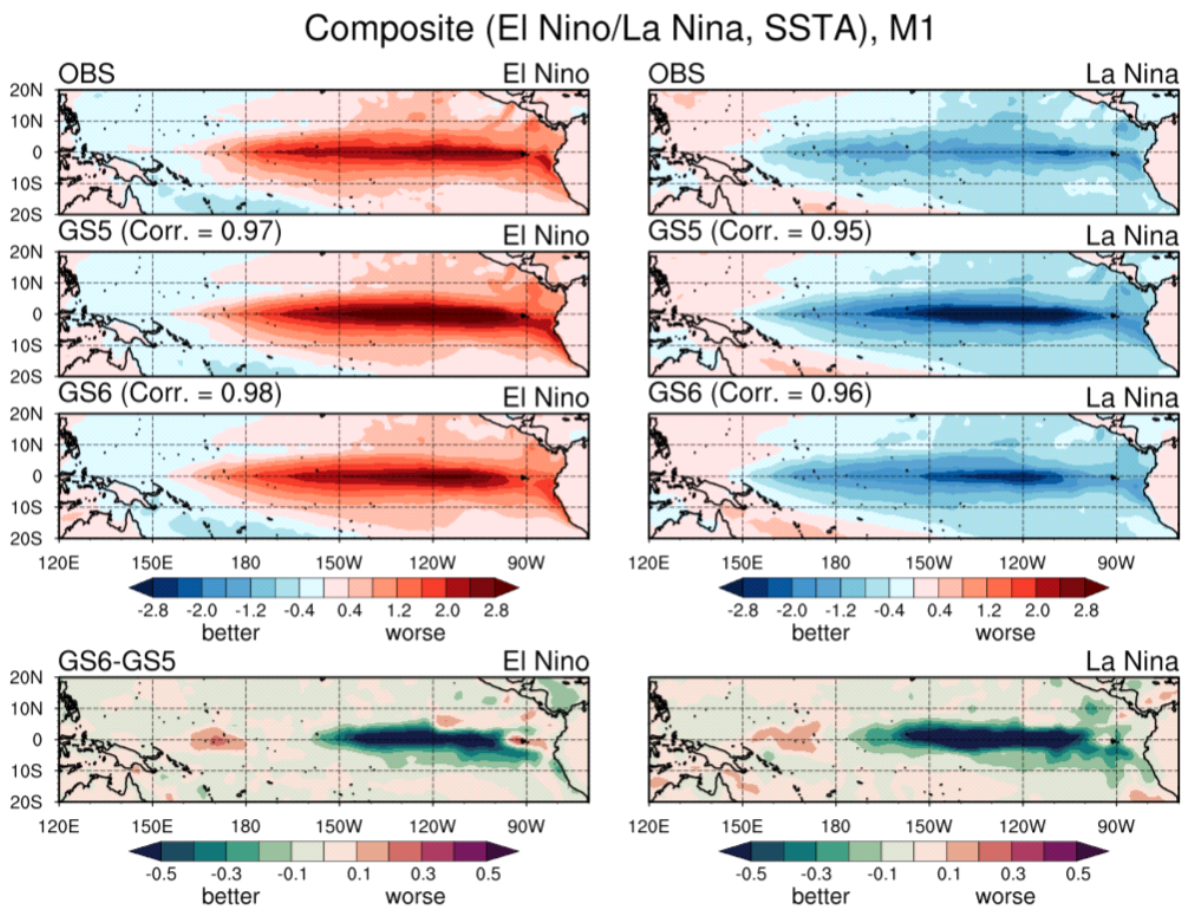


Figure 51. Composite maps of sea surface temperature anomalies during La Nina and El Nino in the equatorial Pacific.

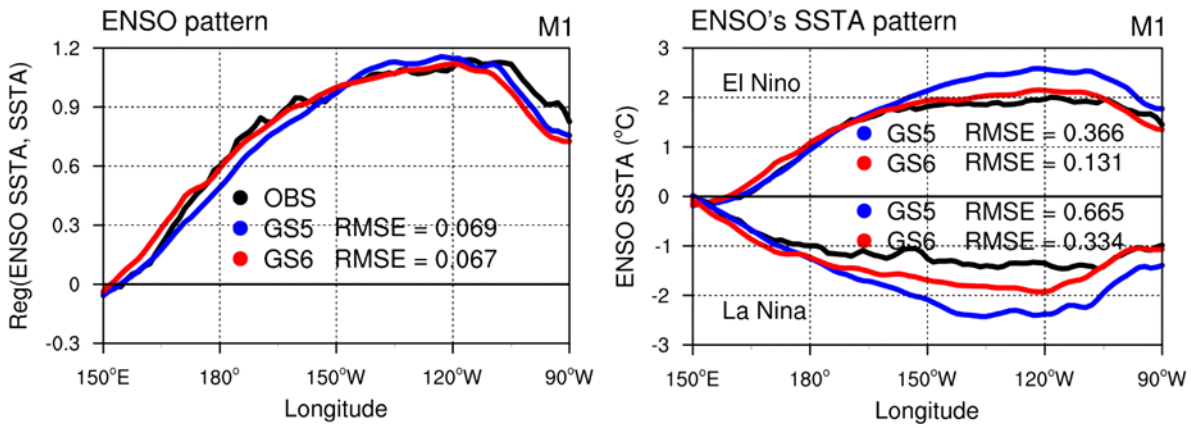


Figure 52. (Left) Zonal structure of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific(5S-5N), showing the zonal location of SSTA associated with ENSO. (Right) Zonal structure of sea surface temperature anomalies during La Nina and El Nino in the equatorial Pacific. The black, blue and red line denote the reference and model from GloSea5 and GloSea6, respectively.

ENSO 기본 특성 매트릭의 두 번째 구성 요소로 ENSO amplitude는 적도 중앙 태평양 (Nino3.4 영역) SSTA의 연변동성 크기로 정의하였다. Figure 53는 적도 태평양에서의 해수면 온도편차의 표준편차를 나타낸 것으로 ENSO amplitude의 공간 분포를 설명한다. GloSea6는 ENSO amplitude의 공간 패턴을 잘 모의하며, 적도 중앙 태평양에서 매우 강하게 모의되었던 maximum 변동을 상당히 완화시키는 결과를 보인다. 이러한 ENSO amplitude 개선 결과는 적도 태평양에서의 해수면 온도 연변동성의 동서 구조에서도 명확히 확인할 수 있는데 (Figure 54), 관측의 ENSO amplitude가 0.96인것에 비해 GloSea5와 GloSea6는 각각 1.171과 1.051로 과하게 모의하였던 ENSO amplitude가 상당히 완화되는 것을 수치로 확인할 수 있다. Figure 54 우측 그림은 ENSO amplitude의 관측대비 오차 비율을 나타낸 것으로, GloSea5는 ENSO amplitude를 관측대비 약 22% 강하게 모의하는 반면, GloSea6는 9.5% 강하게 모의함으로써 적도 태평양에서 과도하게 모의하였던 ENSO amplitude를 완화시켜 관측과 유사하게 모의함을 확인하였다.

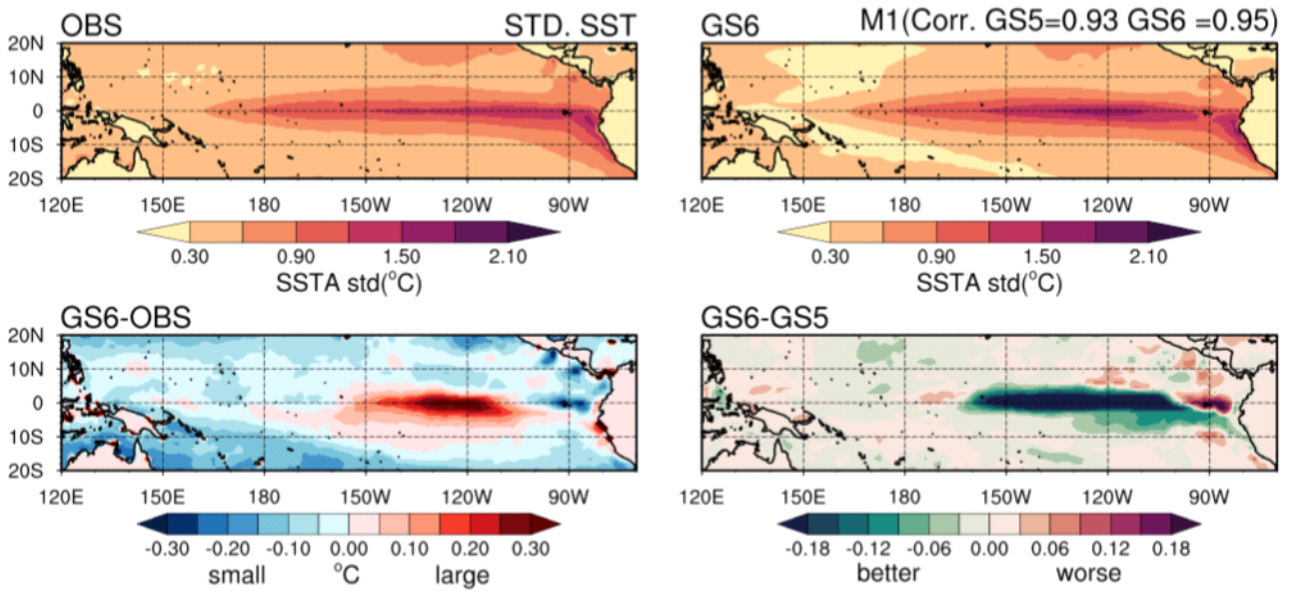


Figure 53. Spatial pattern of the standard deviation of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific, showing usually a too strong maximum variability in the central equatorial Pacific.

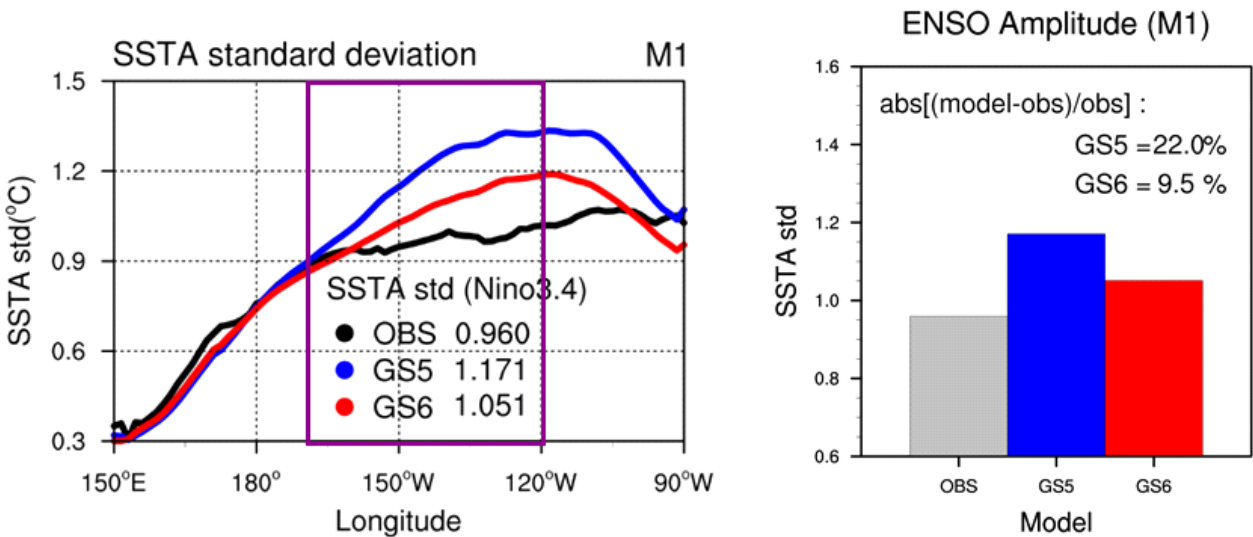


Figure 54. (Left) Zonal structure of the standard deviation of the sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific (5S–5N averaged), showing usually the too strong maximum variability in the central equatorial Pacific. The black, blue and red lines denote the reference and models from GloSea5 and GloSea6. (Right) Standard deviation of sea surface temperature anomalies in the central equatorial Pacific (Nino3.4 averaged), showing the amplitude of SSTA. The gray, blue and red bars denote the reference and the models from GloSea5 and GloSea6. The metric derived is the absolute value of the relative difference: $\text{abs}((\text{model}-\text{reference})/\text{reference}) \times 100$.

ENSO 기본 특성 메트릭의 마지막 구성 요소인 ENSO seasonality는 적도 중앙 태평양 (Nino3.4 영역) 해수면온도 연변동성의 계절 비율을 나타낸다. ENSO seasonality는 적도 중앙 태평양 (Nino3.4 영역) 해수면온도 연변동성이 가장 작게 나타나는 봄철(MAM) 표준편차 대비 연변동성이 가장 크게 나타나는 계절인 겨울철(NDJ) 비율로 정의하였다. Figure 55는 겨울철과 봄철 ENSO amplitude의 공간 패턴을 나타낸 것으로, GloSea6는 계절에 따른 ENSO amplitude의 전반적인 패턴을 잘 모의하며, 겨울철과 봄철 두 계절 모두에서 중앙 태평양에서의 Maximum amplitude의 강도를 완화시켜 개선된 결과를 보여준다. 이러한 개선 결과를 더 정량화하기 위해 ENSO amplitude의 동서구조와 annual cycle을 살펴보았다 (Figure 56). GloSea6는 겨울철 ENSO amplitude의 강도를 상당히 완화시키지만 남아메리카 앞바다에서의 변동성을 과소모의하는 특징을 나타내며, 봄철 ENSO amplitude의 수평구조를 관측대비 완만하게 모의하는 특징을 나타낸다. ENSO amplitude의 연변동성을 살펴본 결과, GloSea5는 관측대비 전 계절에서 강한 변동성을 나타내는데 반해 GloSea6는 이러한 강도를 상당히 완화시킴을 확인할 수 있다. Figure 57은 ENSO seasonality의 관측대비 오차 비율을 나타낸 것으로, 메트릭의 정량적 지수로 사용하였다. GloSea5는 ENSO seasonality를 관측대비 11.7%강하게 모의하는 반면 GloSea6는 4.0%로 강하게 모의함으로써 ENSO seasonality 또한 개선된 결과를 보여준다.

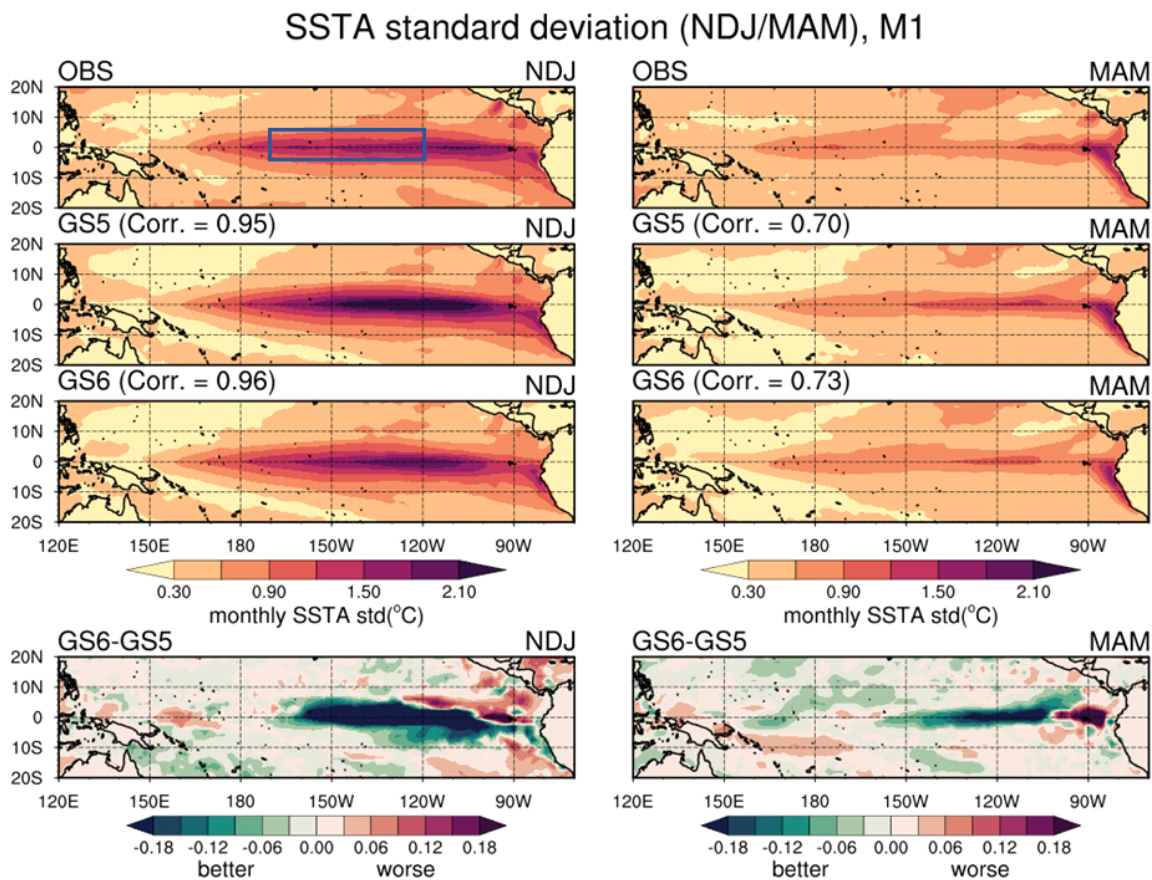


Figure 55. Spatial structure of the standard deviation of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific, showing usually a too strong(weak) variability in the central equatorial Pacific during winter(spring).

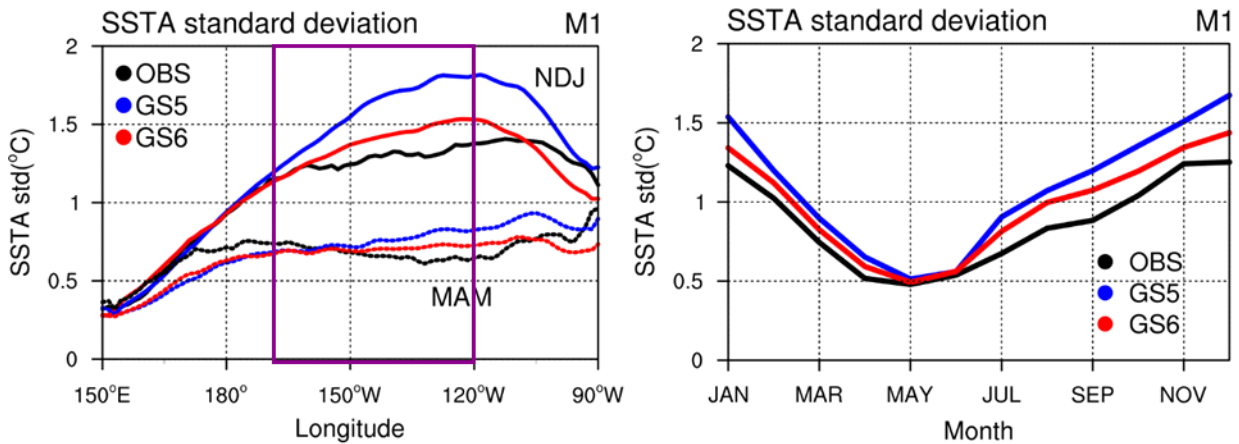


Figure 56. (Left) Zonal structure of the standard deviation of the sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific(5S-5N) during winter and spring. (Right) Zonal mean annual structure of the standard deviation of the sea surface temperature anomalies in the central equatorial Pacific (Nino3.4 averaged). The black, blue and red line denote the reference and model from GloSea5 and GloSea6, respectively.

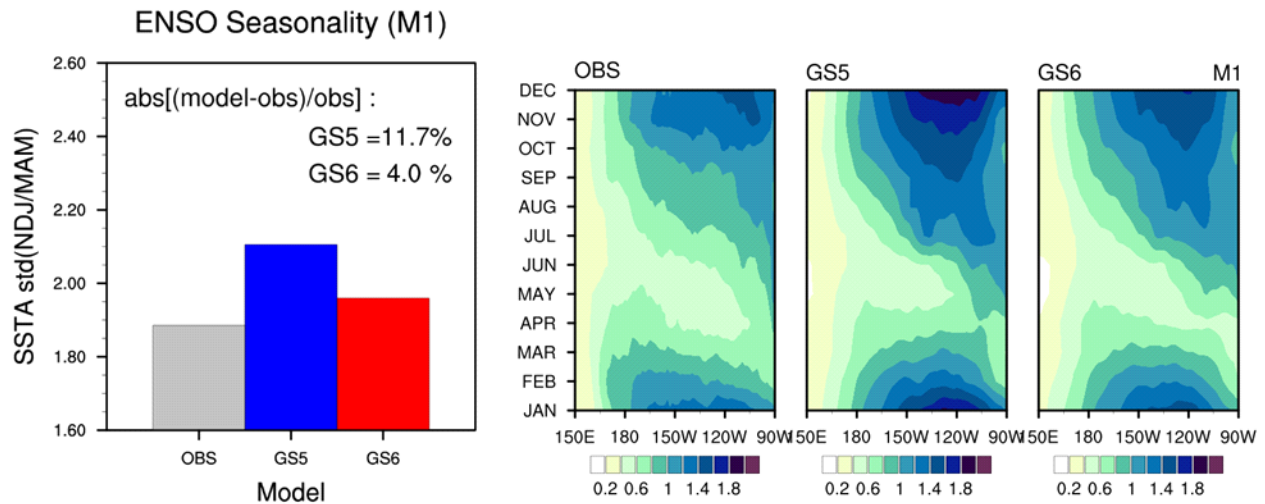


Figure 57. (Left) Ratio of winter over spring's standard deviation of sea surface temperature anomalies in the central equatorial Pacific (Nino3.4 averaged), showing the seasonal timing of SSTA. The gray, blue and red bars denote the reference and the models from GloSea5 and GloSea6. The metric derived is the absolute value of the relative difference: $\text{abs}((\text{model}-\text{reference})/\text{reference}) \times 100$. (Right) Spatio-mean annual structure of the standard deviation of sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific(5S-5N averaged).

③ ENSO Teleconnection 매트릭 구성

ENSO Teleconnection에서는 ENSO 변동에 따른 원격상관 모의 성능을 평가하기 위해 동아시아 기온/강수에 대한 원격상관 재현성능을 제시하였다 (Ropelewski and Halpert 1987). Figure 58와 Figure 59는 ENSO 변동과 관련된 북반구 겨울철 (DJF)과 여름철 (JJA) 동아시아 기온 및 강수 편차의 공간 패턴을 나타낸 것이다. 동아시아에서는 ENSO 변동에 따라 겨울철에는 평년 대비 고온 다습한 경향이 있으며 여름철에는 저온 건조한 특징을 보인다. GloSea5와 GloSea6는 이러한 ENSO 변동에 따른 동아시아 기온/강수의 원격상관 패턴을 전반적으로 잘 모의한다. 하지만 동아시아 북부 내륙에서의 겨울철 양의 온도 편차를 잘 모의하지 못하며 동아시아 강수 밴드와 관련된 강수 편차의 디테일을 잘 모의하지 못한다. 기후예측모델에서 ENSO 예측성능을 평가하기에 1-month 리드타임은 다소 짧은 경향이 있으나 제공되는 데이터의 제한으로 더 긴 리드타임의 예측성능을 평가하지 못하였다. 모델 개선에 따른 ENSO 모의 성능진단을 위해서는 추후 리드타임을 더 길게 확장하여 계절시간 규모에서의 ENSO 성능을 평가하여야 할 것이다. 원격상관 패턴 성능은 각 계절에 대한 공간 패턴의 RMSE로 정량화하여 다음과 같이 4개의 매트릭 요소 ① DJF T2M pattern, ② DJF PR pattern, ③ JJA T2M pattern, ④ JJA PR pattern로 제시하였다.

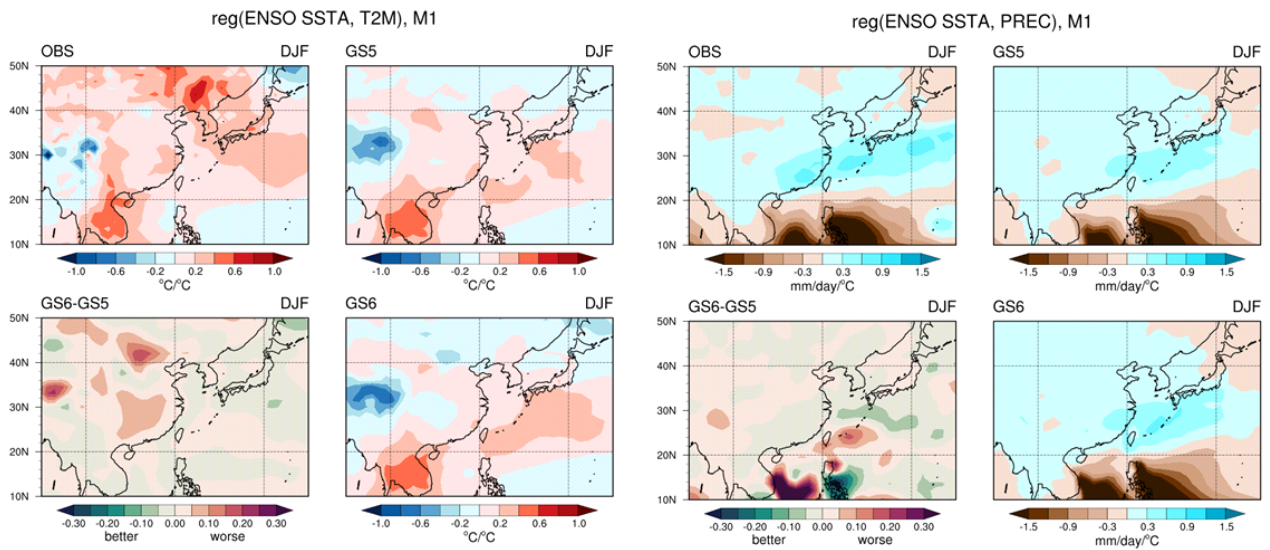


Figure 58. Spatial structure of (left) surface temperature anomalies (TSA) and (right) the precipitation anomalies (PRA) over East Asia during boreal winter (DJF), showing the location of TSA and PRA associated with ENSO. The main metric derived is the spatial RMSE between the model map and the observation map.

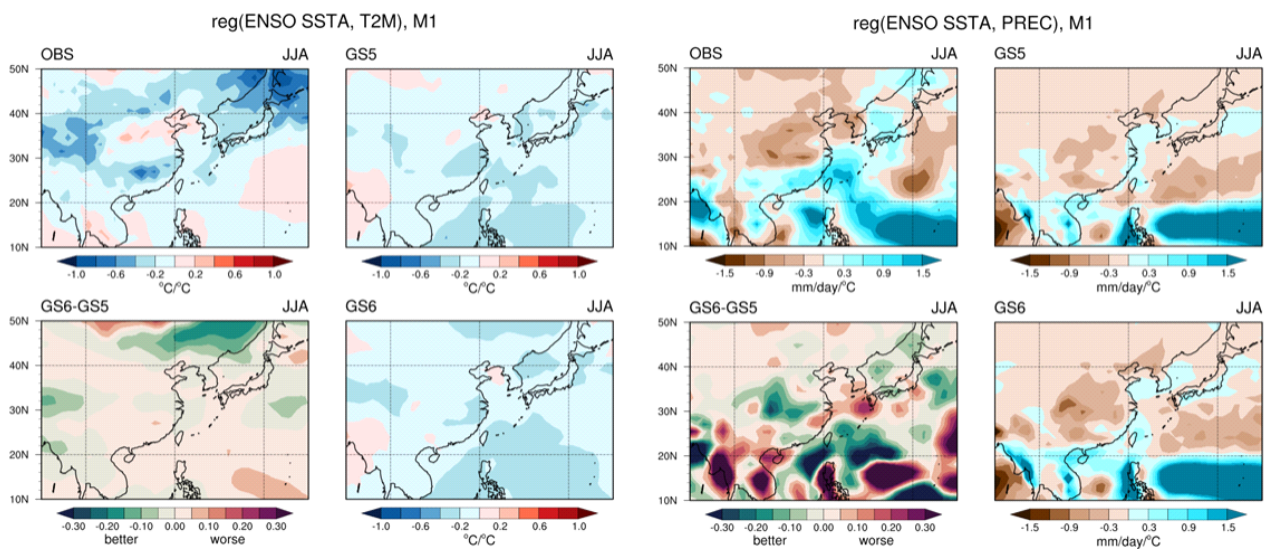


Figure 59. Same as Figure 58, except for boreal summer (JJA).

④ ENSO 진단 메트릭 결과

ENSO 진단평가 결과는 성능평가 결과와 마찬가지로 크게 두 가지 도표로 요약되었다. Figure 60은 ENSO 메트릭 구성 요소의 리드별 성능을 보여주는 ENSO 메트릭 테이블이며, Figure 61은 개선된 모델의 ENSO 모의 성능 향상 여부를 보여주는 ENSO 스코어 카드를 나타낸다. GloSea6의 경우 ENSO 발생의 배경 기후장의 오차는 오히려 증가하는 경향을 보이나, ENSO의 시-공간 모의성능은 개선되는 결과를 보여준다. 또한 동아시아 영역에서의 원격상관 모의 성능은 다소 감소함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 UKMO GloSea5/6 예측 데이터는 S2S 시간규모의 60일 예측정보를 제공한다. ENSO와 같은 계절 규모의 영향력을 가지는 기후 지수의 경우 더 긴 리드타임의 예측성능을 평가할 필요가 있으며, 추후 데이터가 확보 되는대로 리드타임을 수정할 예정이다.

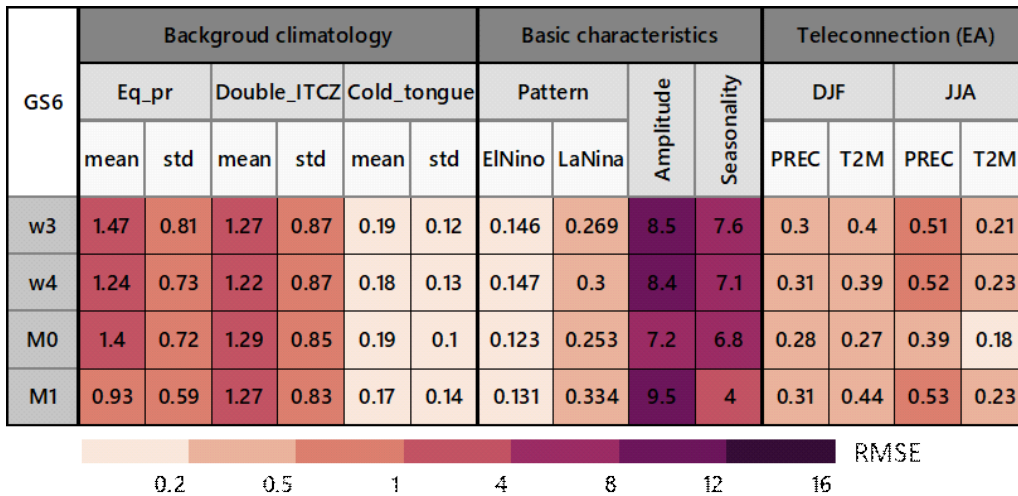


Figure 60. ENSO Metrics table of GloSea6 including ENSO performance and teleconnection. The lighter colors indicate better model performance.

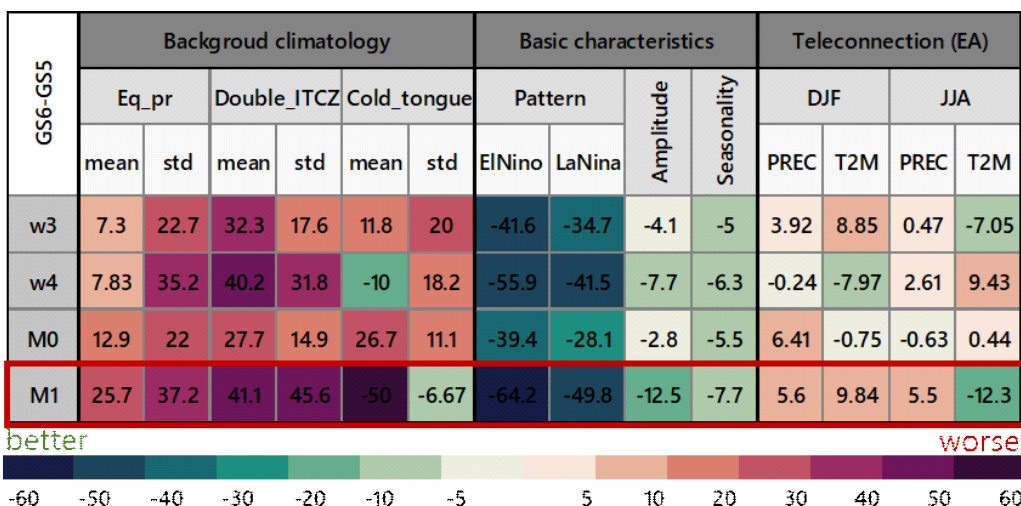


Figure 61. ENSO Metrics scorecard. The green (red) colors indicate better (worse) model performance.

(4) 향후 계획

(가) 표준 진단 메트릭 추가 구성

표준 성능·진단 평가체계의 구축은 총 3년의 과업으로 계획되었으며, 올해는 표준평가체계의 프레임 구조화하고 모델 개발에 따른 기후예측모델의 통합적인 평가체계의 방법론을 제시하였다. 또한 제시된 방법론에 따라 표준성능평가체계의 기본적인 틀을 구축하였으며 진단평가체계 중 ENSO 진단 메트릭의 일부를 구축하였다. 통합적인 진단평가체계를 온전히 구축하기 위해서는 앞서 ENSO 진단 메트릭을 완성하고 Figure 2.1에서 제시한 주요 기후 지수(ENSO, MJO, SIC, 몬순)의 진단 메트릭을 순차적으로 개발할 계획이다.

먼저 ENSO의 내부 변동성의 모의 성능 정보를 제공하기 위한 ENSO Process 메트릭의 필수요소를 선별하여 메트릭을 구조화하였다 (Bayr et al., 2019; Zebiak and Cane 1987; Bellenger et al., 2014). ENSO는 해양과 대기사이의 양의 Bjerknes 피드백 (Bjerknes 1969)을 통한 적도태평양 SSTA 증폭의 결과로 발생하며 해양과 대기사이의 음의 열유속 피드백에 의해 감소한다. 따라서 ENSO process 메트릭은 Bjerknes 피드백과 ENSO SSTA 발달에 대한 열유속 효과간 균형을 평가하는 과정으로 구성하고자 한다. Figure 62은 주요 ENSO 피드백의 모식도를 나타낸 것으로 4개의 메트릭 요소 ① SST-Taux 피드백, ② Taux-SSH 피드백, ③ SSH-SST 피드백, ④ SST-NHF 피드백을 설명한다. ENSO 내부 프로세스 평가는 먼저 ENSO의 발달 과정인 Bjerknes 피드백 평가로 구성하였다. ENSO 발달은 적도 동태평양에서의 따뜻한 SSTA가 무역풍을 약화시키며 수온약층이 심화되고 물의 용승이 촉진됨에 따라 SSTA가 더욱 증가하는 양의 피드백으로 설명된다. SST-Taux 피드백은 적도 동부 SSTA와 적도 중/서부 태평양 무역풍 편차의 관계가 잘 모의되는지를 평가하며, Taux-SSH 피드백은 원격 무역풍 편차에 따라 적도 동부 태평양의 sub-surface 온도 편차가 잘 나타나는지 해양-대기의 반응 성능을 제시하고자 하였다. 그리고 SSH-SST 피드백은 sub-surface 온도 편차와 적도 동태평양 SSTA의 관계를 평가하는 해양의 프로세스를 제시하였다. 이러한 Bjerknes 피드백은 음의 열유속 피드백 (Bayr et al., 2019)과 균형을 이루게 되는데, 적도 동태평양에서의 발달된 양의 SSTA는 운량을 증가시키고 이는 단파복사를 감소시켜 SSTA가 감소하는 음의 피드백으로 설명된다. ENSO를 제어하는 해양의 프로세스로서 음의 열유속 피드백 또한 Bjerknes 피드백과 함께 평가되어야 하지만, 기후예측 자료의 한계로 ENSO 진단평가에서는 Bjerknes 피드백의 4단계 평가 요소만을 ENSO Process 메트릭으로 구성하고자 한다. ENSO 진단 메트릭 구축에 이어 다른 주요 기후 지수 (MJO, SIC, 몬순)의 진단 메트릭 또한 모의 성능(performance), 원격상관 모의 성능 (teleconnection), 내부 프로세스의 모의 성능(process)로 세분화하여 메트릭을 구축함으로써 모델개발에 따른 기후변동성의 평가정보를 제공하는 표준진단평가체계를 제시할 것이다.

Schematic of the key ENSO feedbacks

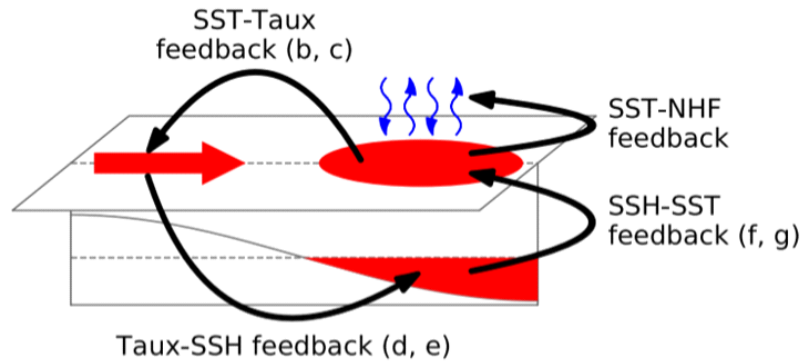


Figure 62. Schematic diagram exploring the key ENSO feedbacks; SST-Taux feedback, Taux-SSH feedback, SSH-SST feedback, and SST-NHF feedback (Planton et al., 2021).

(나) 현업화 후보군 선정을 위한 실무 협의

실질적으로 본 통합평가 프레임이 현업화 후보군 선정을 위해 활용되기 위해서는 표준 성능·진단 평가 메트릭의 필수 요소에 대한 전문가 자문 및 실무자 협의가 수반되어야 하며, 이를 바탕으로 현업화 의사결정에 사용될 스코어카드가 수정/개선될 필요가 있다. 실무자 협의를 통해 표준 성능·진단 평가체계를 최적화하고 현업화 후보군 선정 가이드를 마련함으로써 현업화 의사결정을 위한 객관적 근거 자료를 제공할 것이다. 이를 위해 현재 개발중에 있는 성능·진단 메트릭을 실제 현업모델(KMA GloSea6)의 과거예측자료(hindcast)에 적용하여 국가기후 예측모델의 통합적인 예측 성능을 제시하고 테스트베드에서 수행된 준현업실험을 사용하여 기준모델 대비 예측성능 향상의 척도를 제시함으로써 현업화 후보군 선정 가이드의 기초 자료로 활용할 것이다.

다. 테스트베드 : 해빙물리과정 개선 기술 적용

(1) 연구 배경 및 목적

최근 겨울철 북극 해빙면적의 급격한 감소로 인한 열, 수증기 방출로 온난화 현상과 북극 지역을 중심으로 거대한 고기압성 순환이 자주 형성되고 있으며, 이로 인한 북극진동 세기의 약화 및 유럽과 동아시아 지역에서의 강력한 한파 발생이 빈번하게 일어나고 있다. 북극 지역의 해빙과 시베리아 눈덮임 면적 등 빙권의 변화는 동아시아 기후에 직접적인 영향을 주고 있으며, 해빙의 감소와 같은 빙권의 변동은 태양 에너지 흡수율을 증가시킴으로써 주변 지역의 해빙이 녹는 현상이 가속화되는 기후 되먹임 현상을 가져올 수 있다(Jung et al., 2020). 그러나, 기후 역학 모델은 북극의 해빙, 눈덮임, 성층권 순환과 기후 시스템 사이의 관계가 정확하게 반영되어 있지 않기 때문에 해빙의 변화를 정확하게 구현하지 못하고 있는 실정이다.

현재 국가기후예측모델인 GloSea6은 겨울철 동아시아 지표기온을 과소모의 하는 특징을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(현유경 등, 2022). GloSea6의 한랭오차를 줄이고 겨울철 동아시아 기온의 예측성을 개선하기 위해 2020년 「해빙 물리 과정에 의한 계절내 규모 기후 예측 기술 개발」이 제안되었으며, 이 연구에서는 제안된 결과를 바탕으로 테스트베드에서의 준현업 실험을 수행하여 제안된 기술의 과학적 효과와 기술적 효능을 검증하고자 하였다 (Figure 63).

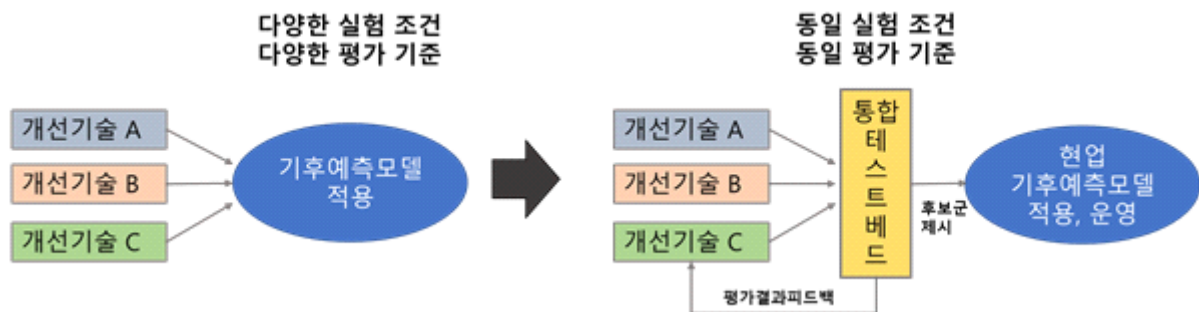


Figure 63. Concept of test-bed for improvement of climate model.

(2) 1월 출발 2-4월 실험 결과

(가) 지표 온도

Figure 64은 관측과 현업 및 두 민감도 실험들의 차이를 나타낸 것으로 월별 오차를 보여 준다. 2월부터 4월까지 세 실험 결과의 오차 분포는 크게 다르지 않으며, 북반구 대륙에서 한랭 오차가 확연하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 북위 40도 이상의 지역에서 한랭 오차가 더 뚜렷하게 나타난다. 오차의 분포 측면에서는 EXP1과 EXP2의 분포가 OPER와 크게 다르지 않은 것을 확인할 수 있다. 그러나, OPER와의 오차 크기를 비교했을 때 지역적으로 개선되는 측면이 있었다(Figure 65). 현업 hindcast와 EXP1의 오차 차이를 살펴보면, 2월에는 전반적으로 오차가 더 커지는 것으로 나타났으며, 3월에는 극지역에서의 오차가 줄어들고, 4월에는

유라시아에서 긍정적인 영향이 나타남을 확인할 수 있었다. EXP2에서는 2월에 유라시아에서 오차가 줄어들고, 북미에서는 오차가 더 커졌으며, 3월에는 극지역에서의 오차가 줄어들고, 4월에는 극지역과 유라시아에서 오차 개선 효과가 나타났다. 동아시아에서의 오차를 좀 더 면밀히 살펴보면 2월에는 한반도 북쪽에서는 개선 효과가 있었지만 중국과 한반도에서는 한랭 오차가 심해졌으며, 3월과 4월에는 오차 감소 효과가 더 넓은 영역에서 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 66). 눈 반사율의 조정 정도에 따라 오차 감소 효과가 나타나는 지역은 상이하게 나타났다.

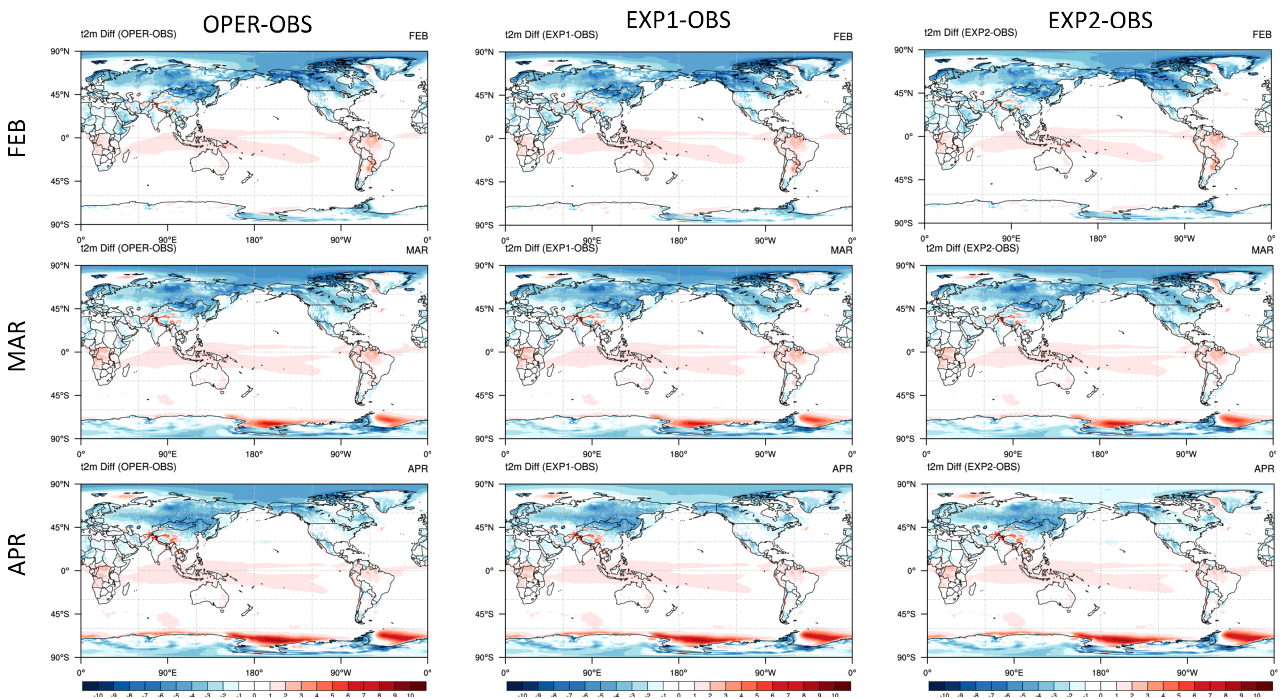


Figure 64. Difference of 2-m temperature between observation and OPER (left), EXP1 (center), and EXP2 (right) during February–April.

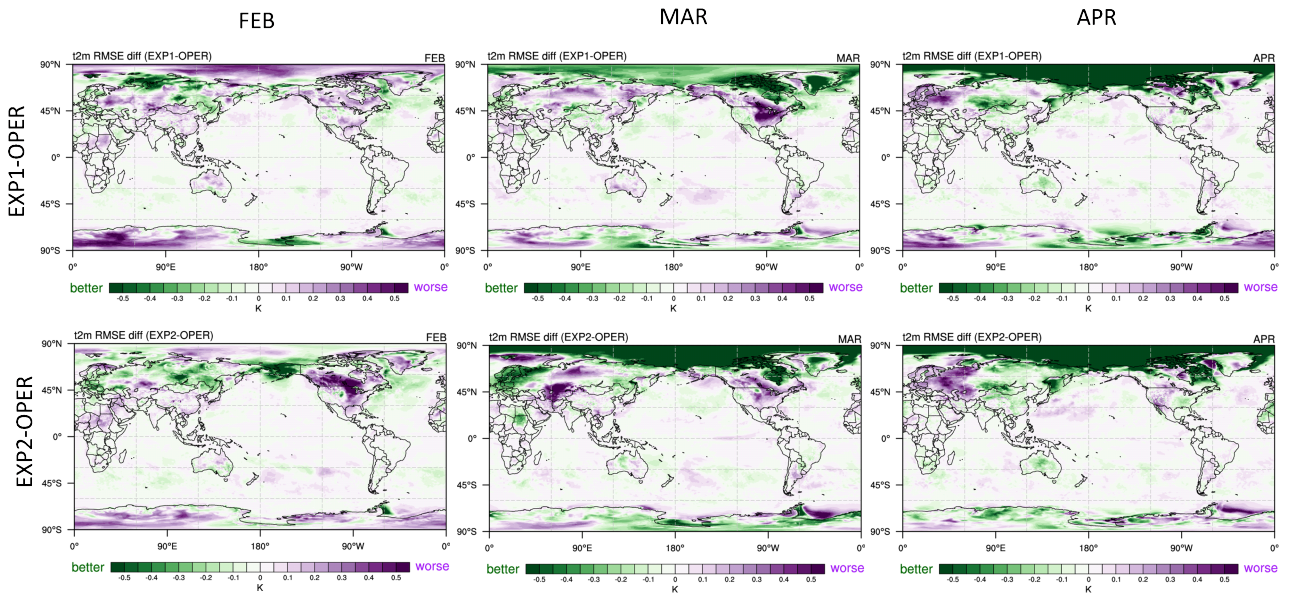


Figure 65. RMSE (root mean square error) difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean 2-m temperature.

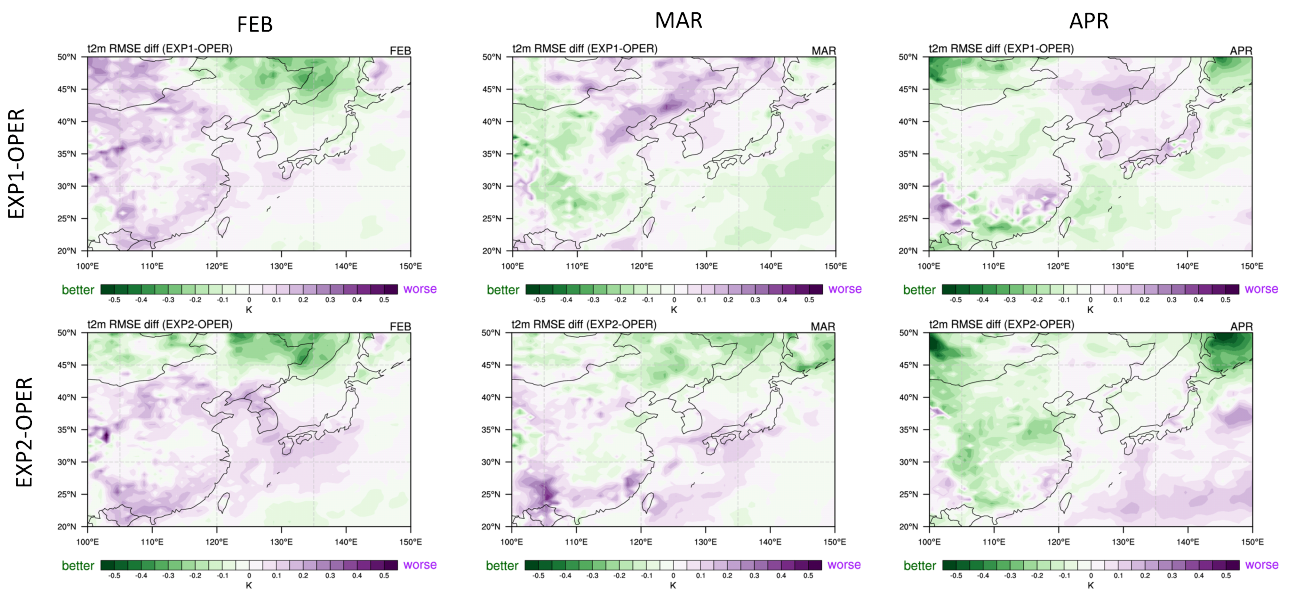


Figure 66. RMSE difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean 2-m temperature over East Asia.

Hindcast 기간 동안의 시간적, 공간적 상관관계(anomaly correlation coefficient; ACC)를 살펴보았다. 현업과 두 실험의 관측과의 시간상관계수(Temporal correlation coefficient; TCC) 차이를 동아시아에 대해 월별로 살펴보았을 때 2월을 제외하고 EXP1의 상관계수가 현업보다 높게 나타났다(Figure 67). 오차 분석에서 동아시아의 오차 감소가 크지 않았던 반면 TCC 측면에서는 3월에 개선 효과가 뚜렷하게 나타나는 반면 오차 감소가 EXP1에 비해 크게 나타났던 EXP2의 TCC는 현업 hindcast보다 높지 않았고 특히 3월에는 동아시아 전반적으로 상관계수가 낮아졌다.

Figure 68는 1993년부터 2016까지 지표 기온의 아노말리 상관계수 범위와 평균 및 중간값을 전구와 동아시아에 대해 분석한 것이다. 대체로 EXP1의 상관계수가 모든 월에서 OPER보다 높게 나타났으며, 동아시아에 대해서도 대체로 예측성이 개선되는 것을 알 수 있다. EXP2의 효과는 TCC에서와 마찬가지로 뚜렷하지 않았다. 3월과 4월 동아시아에 대한 EXP1의 ACC 범위가 현업에 비해 줄어드는 경향이 있으며, 이는 예측력의 변동폭이 줄어 기후 상태와 무관하게 안정적인 예측력을 가질 수 있음을 의미한다.

지표 기온의 아노말리 상관계수(ACC)와 시간 상관계수(TCC), RMSE를 종합하여 Figure 69에 나타내었다. 각 축은 상관계수를 표시한 것이고, 도형의 크기가 작을수록 오차가 작은 것을 의미한다. RMSE는 상대적인 비교를 위해 3개월 동안 모델들이 나타내는 RMSE 범위를 네 개로 나누어 다른 크기로 표시하였다. 상관계수의 경우 리드타임이 짧은 2월에 가장 높게 나타났으나, RMSE는 리드타임에 비례하지 않았으며, 동아시아에서는 4월에 가장 낮은 값을 보였다. 전구에 비해 동아시아에서 실험별 상관계수 차이가 크게 나타나고, 붉은색으로 표시된 EXP1의 예측력이 OPER에 비해 개선된다는 것을 알 수 있다.

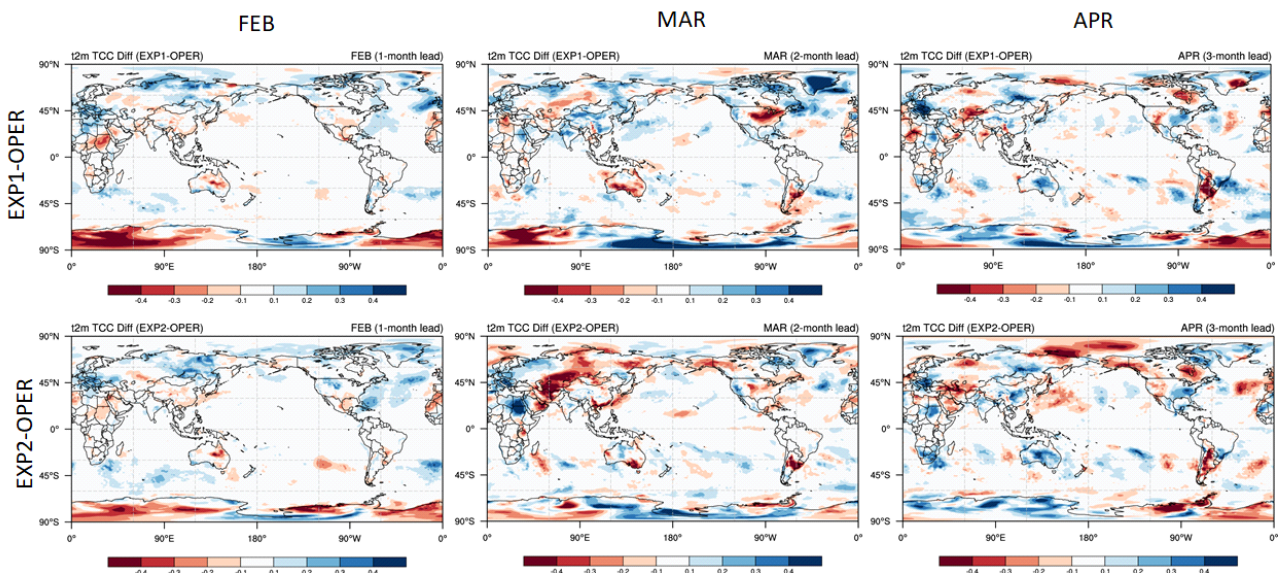


Figure 67. Temporal correlation coefficient for monthly mean 2-m temperature.

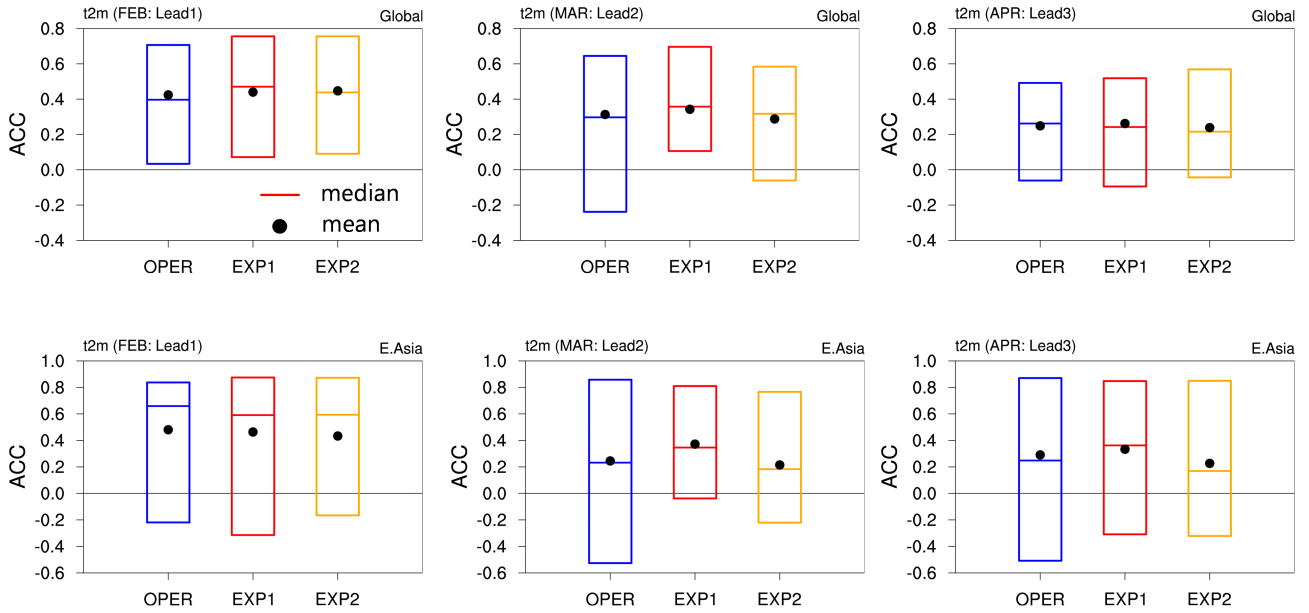


Figure 68. Anomaly correlation coefficient for 2-m temperature of OPER (blue), EXP1 (red), and EXP2 (orange) over globe (top) and East Asia (bottom).

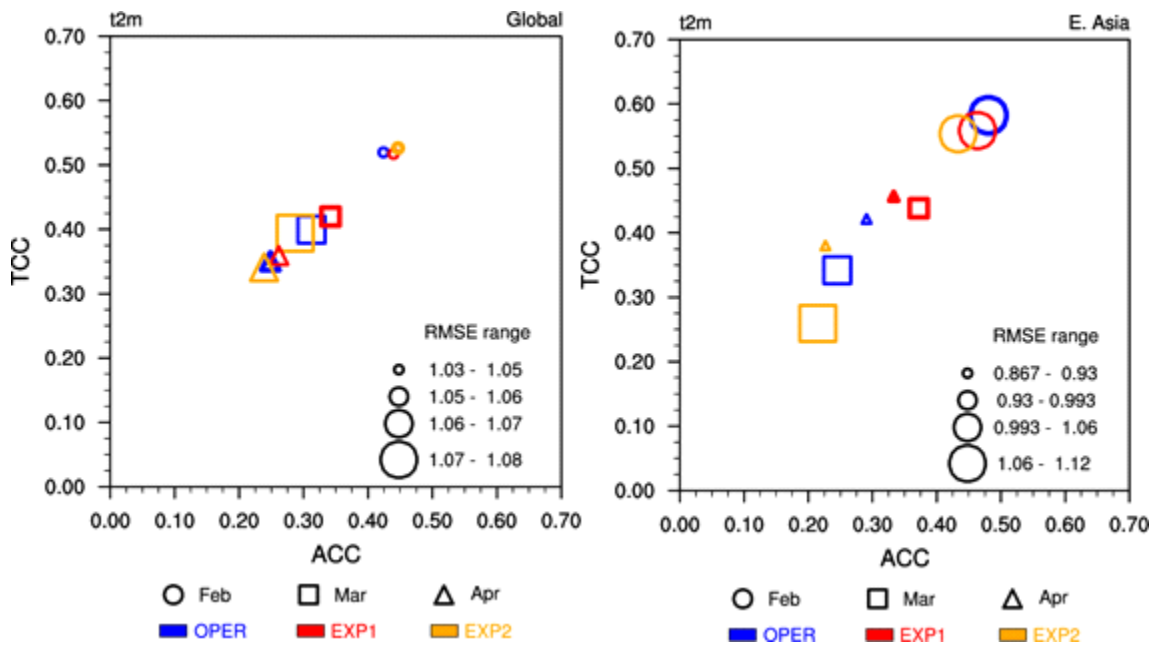


Figure 69. Scatter plot for skill of monthly mean 2-m temperature.

(나) 상층 기압

2월~4월 관측과 현업 hindcast의 500-hPa 기압 차이 및 민감도 실험들과 현업 hindcast의 오차 차이를 분석하였다. GloSea6는 2월에 러시아 북쪽에 양의 오차와 그 남쪽에는 음의 오차를 보이는 dipole 구조를 보이고 있으며, 3월에는 북극의 양의 오차가 약해지고 중위도 지역의 음의 오차가 나타나는 지역이 넓어지고, 4월에는 북반구 전역에서 음의 오차가 나타난다 (Figure 70). 이러한 오차의 형태는 OPER와 EXP1, EXP2에서 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

눈 반사율의 변동으로 인한 오차 개선 효과는 3월에 가장 뚜렷하게 나타난다(Figure 71). EXP1과 EXP2에서 공통적으로 그린란드 지역의 오차가 감소하였고, 3-4월에는 극지역에서의 오차 감소 효과가 뚜렷하게 나타났다.

지표기온의 아노말리 상관계수(ACC)와 시간 상관계수(TCC), RMSE를 종합적으로 살펴보면, 전구에서의 상관계수는 리드타임이 짧을수록 높았으나, RMSE는 4월에 가장 낮은 값을 보인다 (Figure 72). 북반구에서도 상관계수와 오차는 유사하게 나타났으며, OPER에 비해 EXP1의 예측력이 향상되었음을 알 수 있다. 전구에 비해 동아시아에서 실험별 상관계수 차이가 크게 나타나는데, 분석에서 설정한 동아시아 영역이 전구적인 순환을 봐야하는 Z500의 특징을 살펴보기에 좁은 지역이므로 평가에 참고하기는 어려운 것으로 생각된다.

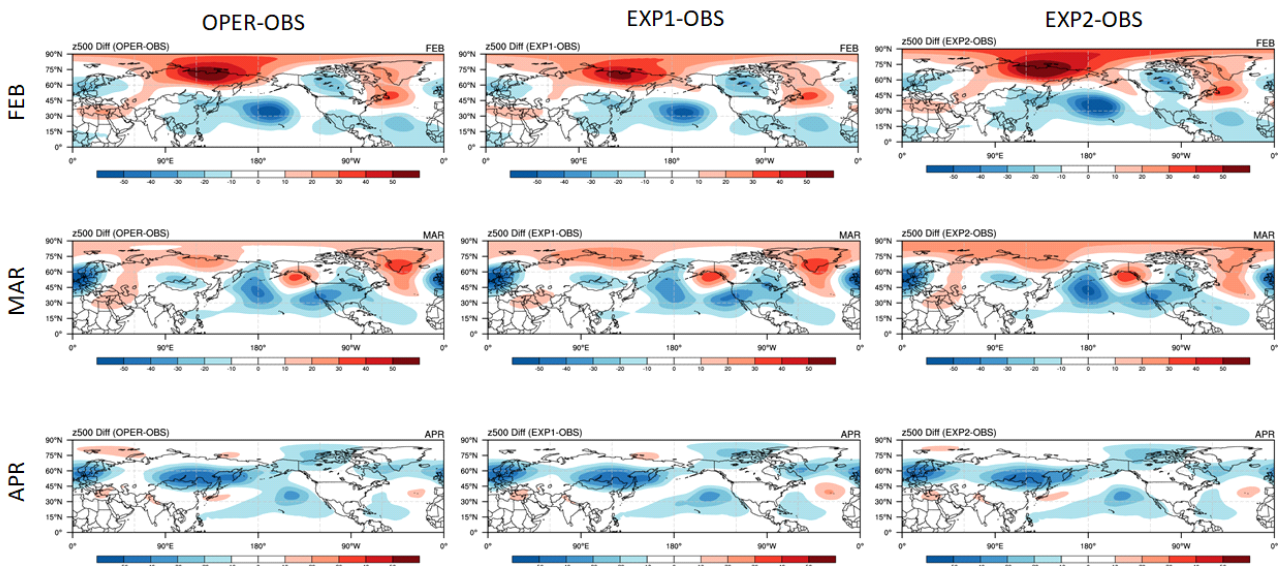


Figure 70. Difference between observation and OPER (left), EXP1 (center), and EXP2 (right) for monthly mean 500-hPa height.

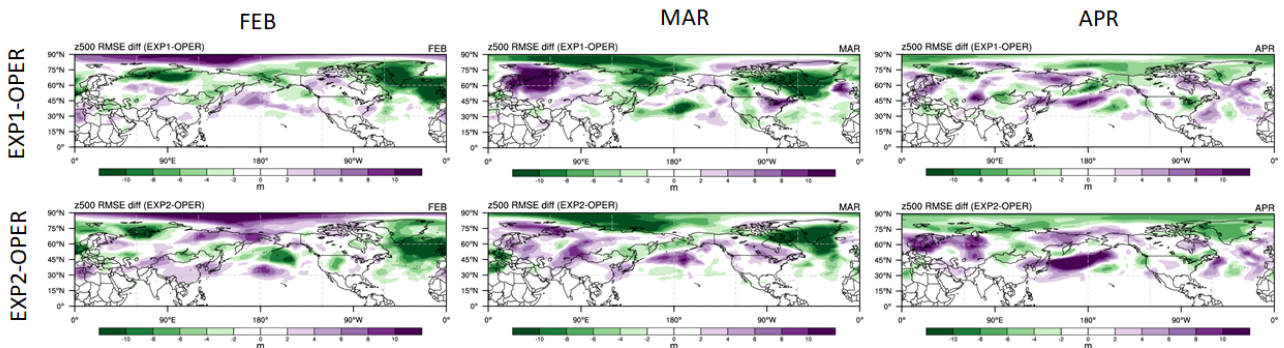


Figure 71. RMSE difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean 500-hPa height.

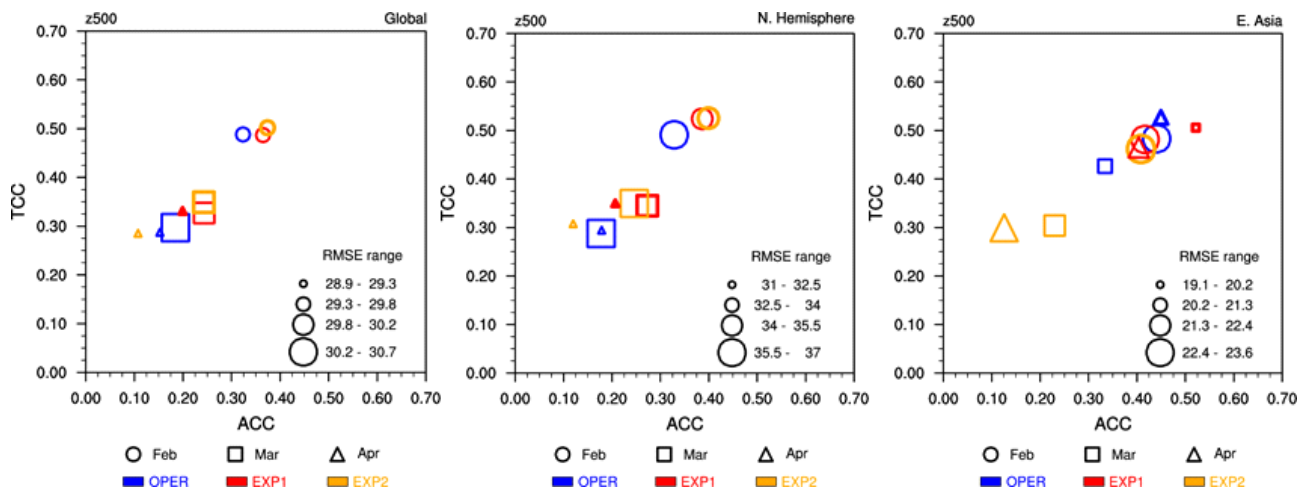


Figure 72. Scatter plot for skill of monthly mean 500-hPa height over globe (left), northern Hemisphere (center), and East Asia (right).

(다) 해빙

눈 반사율의 직접적인 영향을 살펴보기 위해 해빙의 농도와 면적을 분석하였다. Figure 73은 월별 해빙농도를 나타낸 것으로 현업을 포함한 민감도 실험들은 중앙 북극해의 해빙농도를 관측과 유사하게 100%에 가까운 높은 값을 보인다.

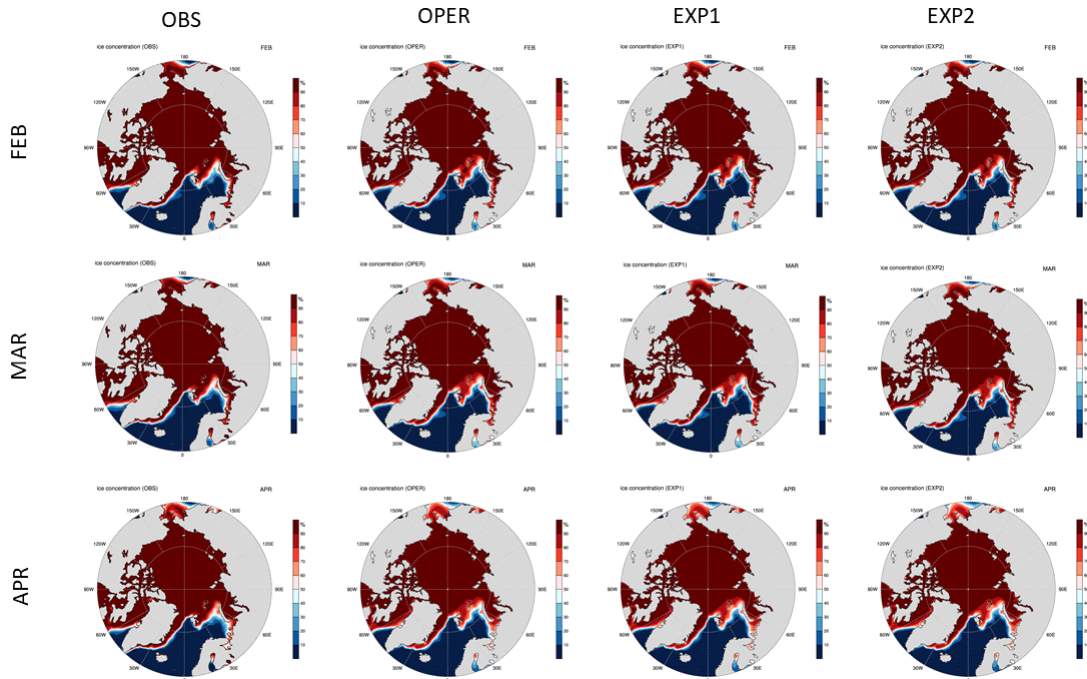


Figure 73. Monthly mean sea ice concentration of observations, OPER, EXP1 and EXP2.

관측과의 해빙 농도 차이를 살펴보면 현업의 경우 내륙에 인접한 바렌츠-카라해에서는 해빙 농도를 과대모의하며, 내해 쪽에서는 과소모의하는 특징을 보인다(Figure 74). 이러한 특징은 민감도 실험들에서도 크게 달라지지 않아 오차의 공간적 분포는 달라지지 않는 것을 확인하였다.

현업과 비교했을 때 오차의 분포에는 큰 차이가 없었으나, 오차의 개선도를 살펴보면 일부 지역에서 개선이 나타난다(Figure 75). EXP1과 EXP2 모두 2월에는 개선 효과가 두드러지지 않지만, 3월과 4월에는 개선의 여지가 보였으며, 특히 바렌츠-카라해에서의 오차가 줄어드는 효과가 있었다. 그러나, EXP2에서는 4월에 척치해와 바렌츠-카라해의 북쪽에서 오차가 오히려 커지는 현상이 나타났다.

월별 해빙 면적을 살펴보면 나타낸 것으로 모든 월에서 최근으로 갈수록 해빙 면적이 줄어드는 양상을 보인다(Figure 76). 2월의 경우 1999년을 기점으로 관측에 비해 해빙이 과소모의되다가 2000년대부터 과대모의되어 겨울철 climate shift가 나타난다. 현업과 민감도 실험 모두가 관측에서 나타난 트렌드를 잘 재현하는 것으로 보이나, 민감도 실험에서 해빙 면적의 오

차를 줄여주는 효과는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 일사량이 크지 않은 계절이므로 눈 반사율 변화에 의한 직접적인 효과가 크지 않기 때문이라 생각된다.

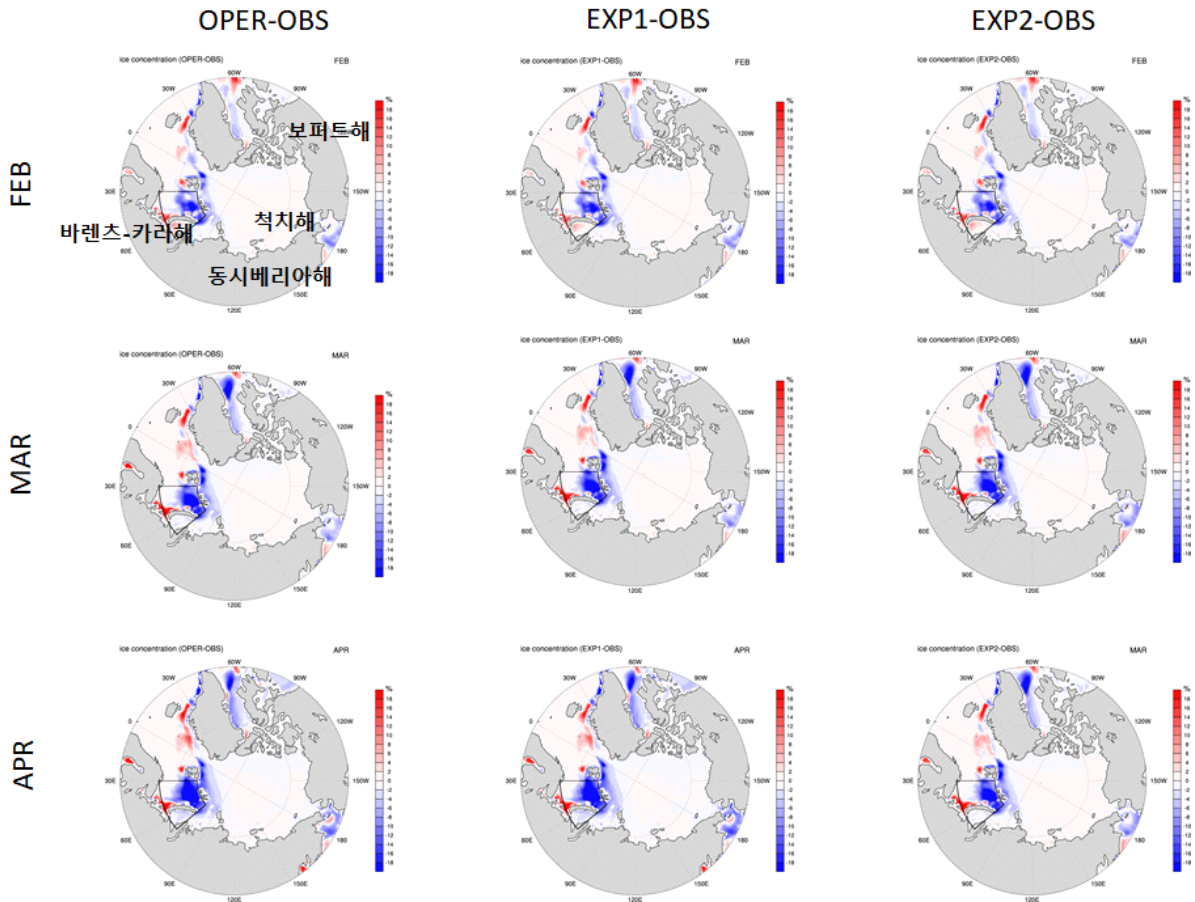


Figure 74. Monthly mean bias of sea ice concentration.

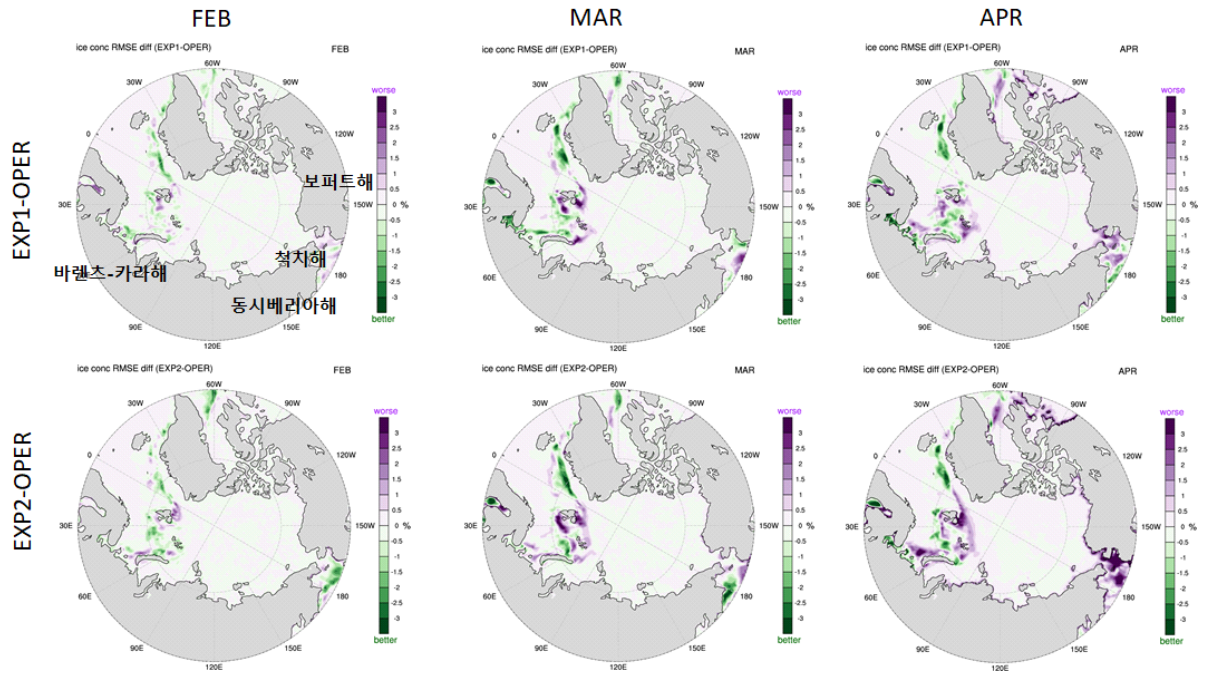


Figure 75. RMSE difference between OPER and EXP1 (top), and EXP2 (bottom) for monthly mean sea ice concentration.

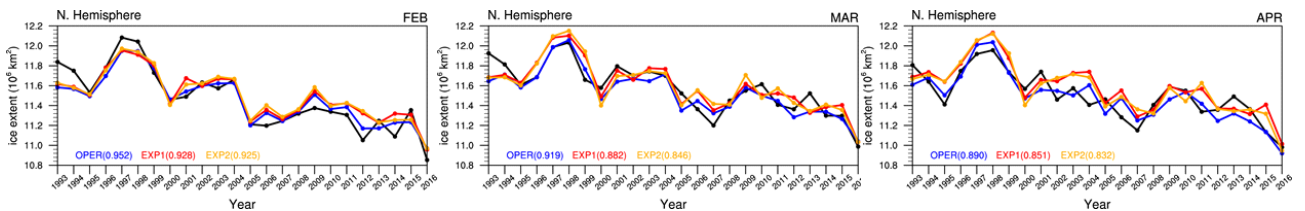


Figure 76. Monthly mean sea ice content over Arctic (60-90N) during February-April from 1993 to 2016.

(라) 극-중위도 원격상관

1993년부터 2016 사이 관측과 현업, 민감도 실험들에서의 지표기온 트렌드를 살펴보면 2월에서 4월까지 바렌츠-카라해의 온난화 경향이 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 77). 이러한 온난화 경향은 실험들에서 모두 잘 모의하고 있으나, 2월에 관측에서 나타나는 동러시아의 약한 한랭 트렌드는 현업과 민감도 실험들이 재현하지 못해 GloSea6가 계통적 오차를 가지고 있다는 것을 보여준다. 또한, 모델에서는 3월과 4월에 관측에서 나타나는 유라시아 대륙의 온난화 경향도 나타나지 않았다.

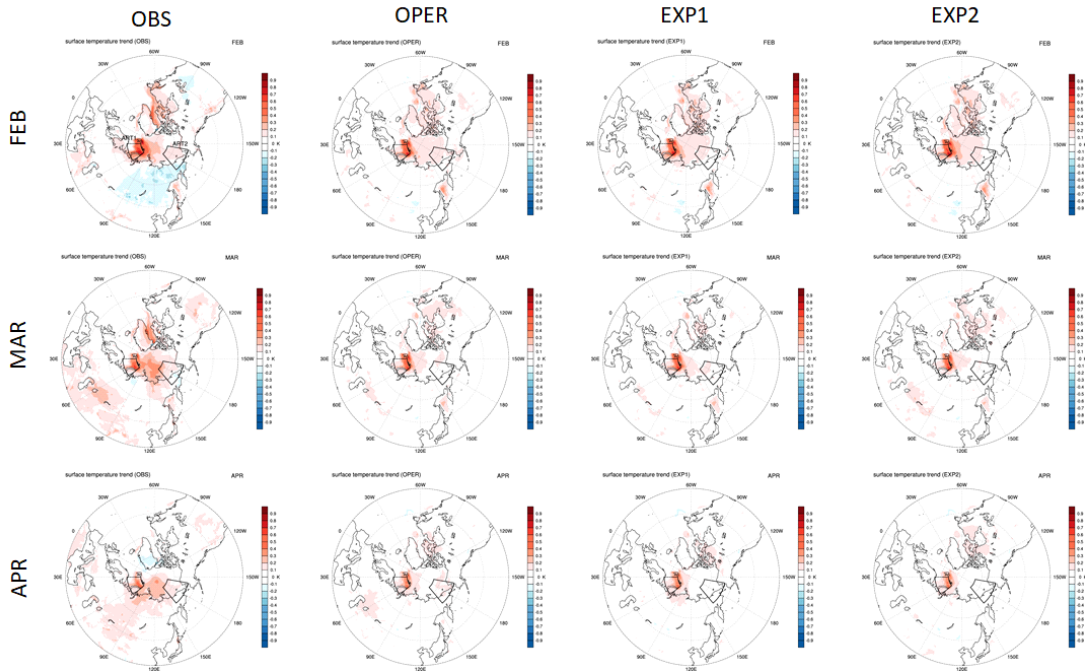


Figure 77. Linear trend of monthly surface air temperature for observation, OPER, EXP1, and EXP2.

북극과 중위도의 상관성을 알아보기 위해 두 지역에서의 지표기온 지수를 활용하였다. 동아시아 기온과의 원격 상관성이 높다고 알려져 있는 바렌츠-카라해(30-70E, 78-80N)의 지표기온 지수를 ART1이라 하고 동시베리아-척치해(160-200E, 65-80N)의 지표기온 지수를 ART2라 정의하였다(Kug et al). 트렌드를 제거하기 전 ART1과 ART2에서는 Figure 77에 나타난 것처럼 온난화 트렌드가 보였으며, Figure 78에서는 트렌드를 제거하여 분석하였다. ART1의 경우 관측과의 상관계수가 리드타임이 길어질수록 낮아지는 것을 알 수 있으며, 2월에는 현업과 민감도 실험들의 상관계수 차이가 거의 없지만 리드타임이 길어질수록 EXP1의 상관계수가 현업에 비해 높아져 바렌츠-카라해의 기온 변동성을 잘 모의하는 것으로 나타났다. ART2의 경우 2월의 상관계수가 매우 낮았으며, 3월에는 민감도 실험들에서 개선 효과가 나타나지만, 4월에는 현업이 더 높은 값을 보였다. 전반적으로 ART1의 기온 변화를 더 잘 모의하였으며, ART2 지역에서는 GloSea6가 기온의 큰 변동을 따라가지 못하는 모습이 나타났다.

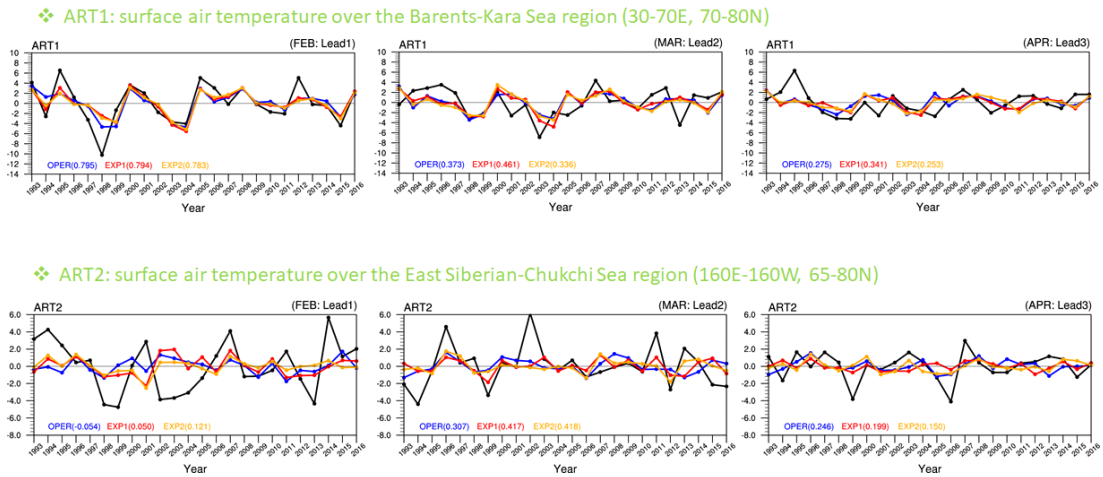


Figure 78. Timeseries of monthly mean ART1 and ART2 during February to April from 1993 to 2016.

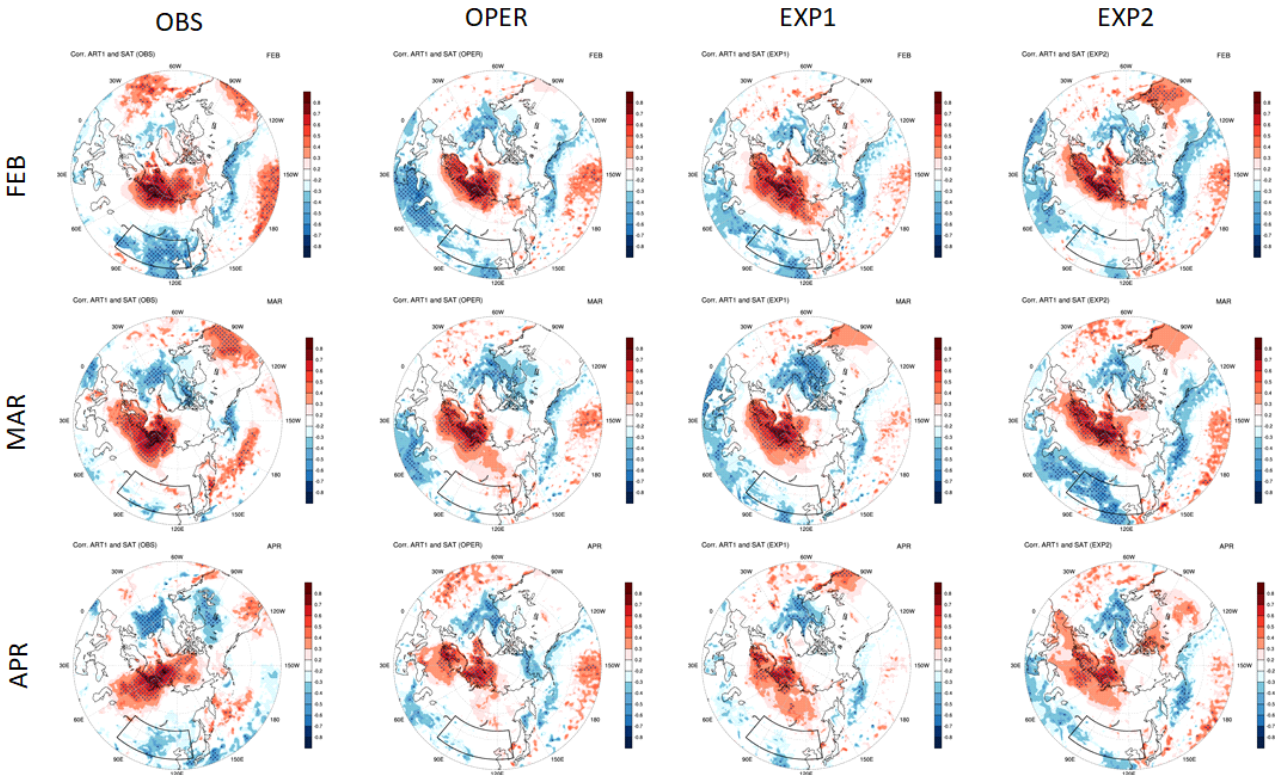


Figure 79. Correlation coefficients of surface air temperature anomalies with respect to de-trended monthly ART1 during February–April from 1993 to 2016. Dotted area denotes significant values at the 95% confidence levels based on a Student’s t-test. Black box represents East Asia.

Figure 79는 1993년부터 2016년까지 트렌드가 제거된 ART1과 지표기온의 상관성을 나타낸 것으로 ART1으로 정의된 지역에서의 강한 양의 상관성이 나타난다. 바렌츠-카라해의 기온과 유라시아 온도는 겨울철에 뚜렷한 음의 상관성이 있는 것으로 알려져 있는데(warm Arctic, cold Eurasia) 관측에서는 2월에 이러한 상관관계가 뚜렷하게 나타난다. 반면, 현업에서는 동아시아-극 원격상관이 뚜렷하지 않고 강한 음의 상관성이 나타나는 지역이 관측에 비해 서쪽으로 치우쳐 있다. EXP1은 동아시아에서 음의 상관성이 나타났으며, 현업에서 나타났던 중앙 아시아의 음의 상관성이 약하게 모의되어 관측과 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. EXP2는 2월 중앙 아시아의 음의 상관성은 현업에 비해 약하게 모의하였으나, 유라시아의 코어를 재현하지 못하였으며, 오히려 3월에 유라시아에 뚜렷한 음의 상관을 보인다.

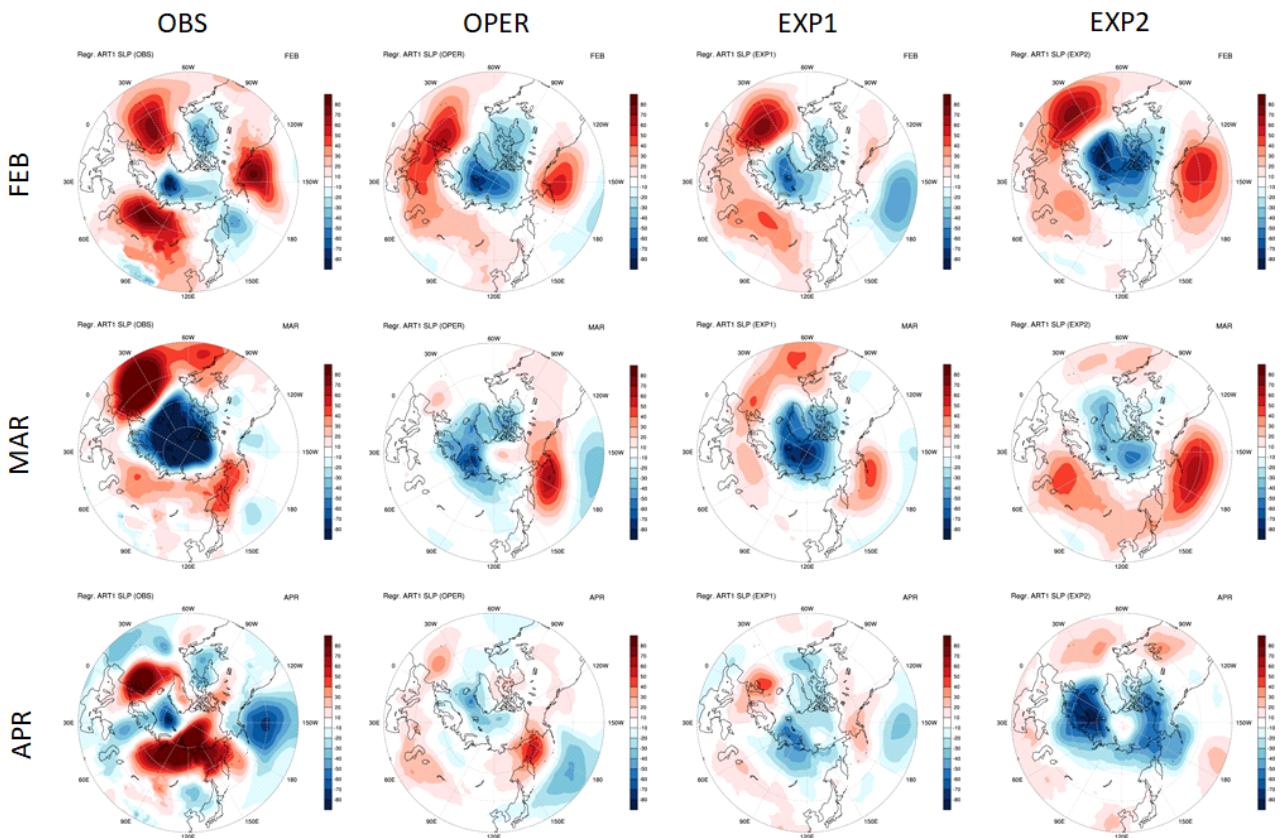


Figure 80. Linear regression of sea-level pressure with respect to de-trended monthly ART1 during February-April from 1993 to 2016.

관측과 현업 및 민감도 실험에서의 ART1 지수와 해면기압(sea level pressure)의 regression 을 살펴보았다(Figure 80). 극-중위도 원격상관이 뚜렷하게 나타났던 2월의 경우 관측에서는 ART1이 정의된 지역의 남쪽에서부터 유라시아 지역 전반에 걸쳐 해면기압이 강해져 시베리아 고기압이 강해지는 순환구조는 보이는 반면 현업에서는 영국과 북대서양 지역에서 코어가 나타나 북극 진동(Arctic Oscillation; AO)과 유사한 순환장이 나타난다. 이로 인해 바렌츠-카라해

의 해빙온도와 관련된 시베리아 고기압의 강화를 잘 모의하지 못하는 것으로 보인다. EXP1은 관측보다 강도는 약하지만 유사한 구조를 보이고 있어 2월에 관측에서 나타난 극-중위도 원격 상관 모의 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 눈 알베도를 20% 낮추었을 때는(EXP2) 이러한 구조가 다시 깨지면서 현업과 유사한 순환장을 보였다. 3월에는 관측에서도 ART1과 동아시아 기온 간의 상관관계가 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 이와 관련된 순환장의 모의에서 역시 EXP1이 관측과 가장 유사한 구조를 모의하였다. 선행시간이 길어지는 4월에는 어느 실험도 관측과 유사한 순환장을 나타내지 못하였다

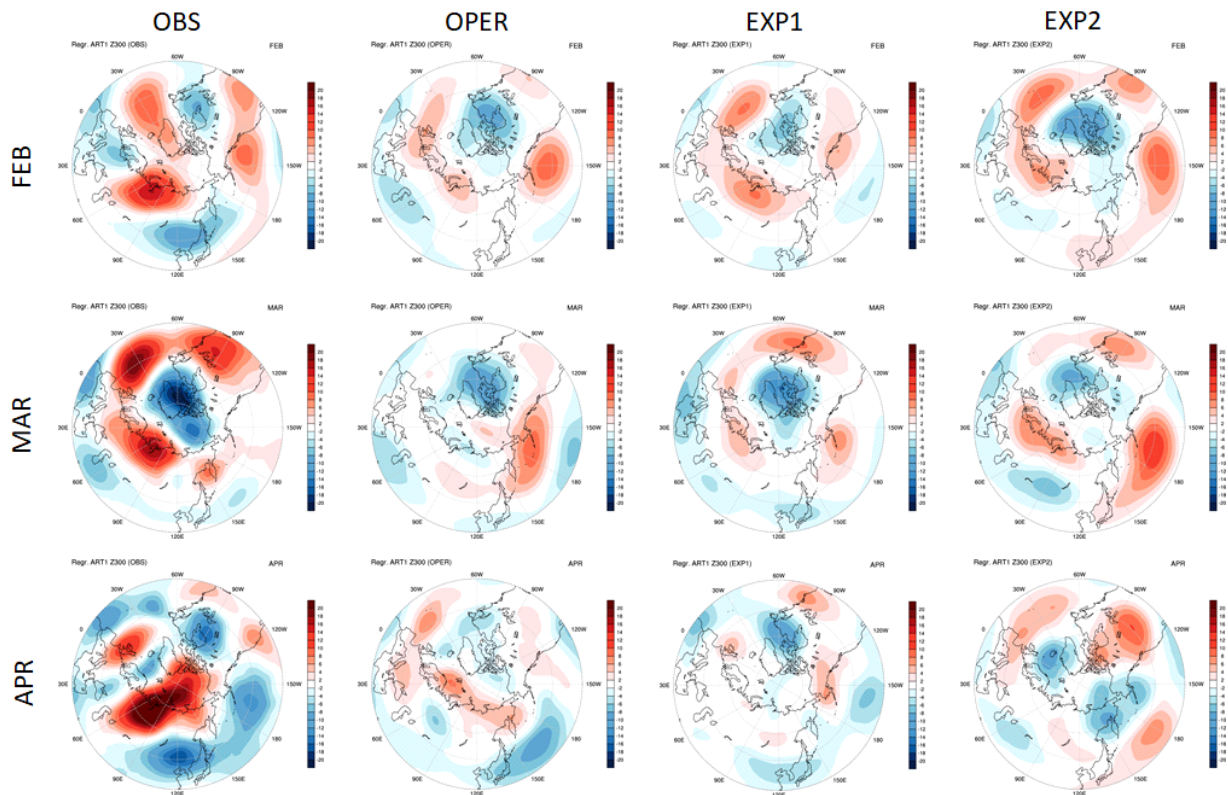


Figure 81. Linear regression of 300-hPa height with respect to de-trended monthly ART1 during February–April from 1993 to 2016.

상층 순환장을 살펴보기 위해 300hPa 지위고도의 regression도 분석하였다(Figure 81). 2월 관측에서는 전반적으로 로스비 웨이브 형태를 띄고 있으며, 러시아에 고기압, 중국에는 저기압이 위치하여 극지역의 차가운 공기가 동아시아 쪽으로 남하할 수 있는 구조를 보인다. 현업에서는 이러한 순환장이 나타나지 않으며, 민감도 실험에서도 로스비 웨이브 형태를 뚜렷하지 나타나지 않았다. 그러나, EXP1은 러시아에 위치한 고기압을 가장 명확하게 모의하는 것으로 보인다. EXP2는 해면 기압장에서와 마찬가지로 현업과 유사한 순환장을 보여 극-중위도 원격 상관에서의 개선점이 뚜렷하지 않았다. 3월에는 AO 패턴과 유사한 형태의 순환장을 보이며, EXP1이 강도는 약하지만 관측과 유사한 패턴을 모의하였다.

ART2에 대해서도 살펴보았다. Figure 82는 1993년부터 2016년까지 트렌드가 제거된 ART2 과 지표기온의 상관성을 나타낸 것으로 ART1에서와 마찬가지로 ART2로 정의된 지역에서의 강한 양의 상관성이 나타난다. ART2는 북아메리카 지역의 기온과 강한 음의 상관관계를 보이며, 이러한 상관성은 4월까지도 나타나는 것으로 보인다. 그러나, 현업에서는 음의 상관성을 재현하지 못하였고, 양의 상관성이 관측에 비해 약하게 나타나며, 3월과 4월에는 관측과 달리 동아시아 지역까지 양의 상관성이 나타난다. EXP1은 북아메리카 지역의 음의 상관성을 잘 모의하였으며, 2월에 관측에서 나타난 양의 상관성도 현업에 비해 뚜렷하게 나타낸다. 그러나, 3월과 4월에는 현업과 유사하게 넓은 지역에서 양의 상관성을 보인다. EXP2도 현업에 비해서는 동시베리아-척치해 기온과 북아메리카 지역의 음의 상관성을 잘 모의하였으나, 4월에는 상관성이 약해지는 특징을 보였다.

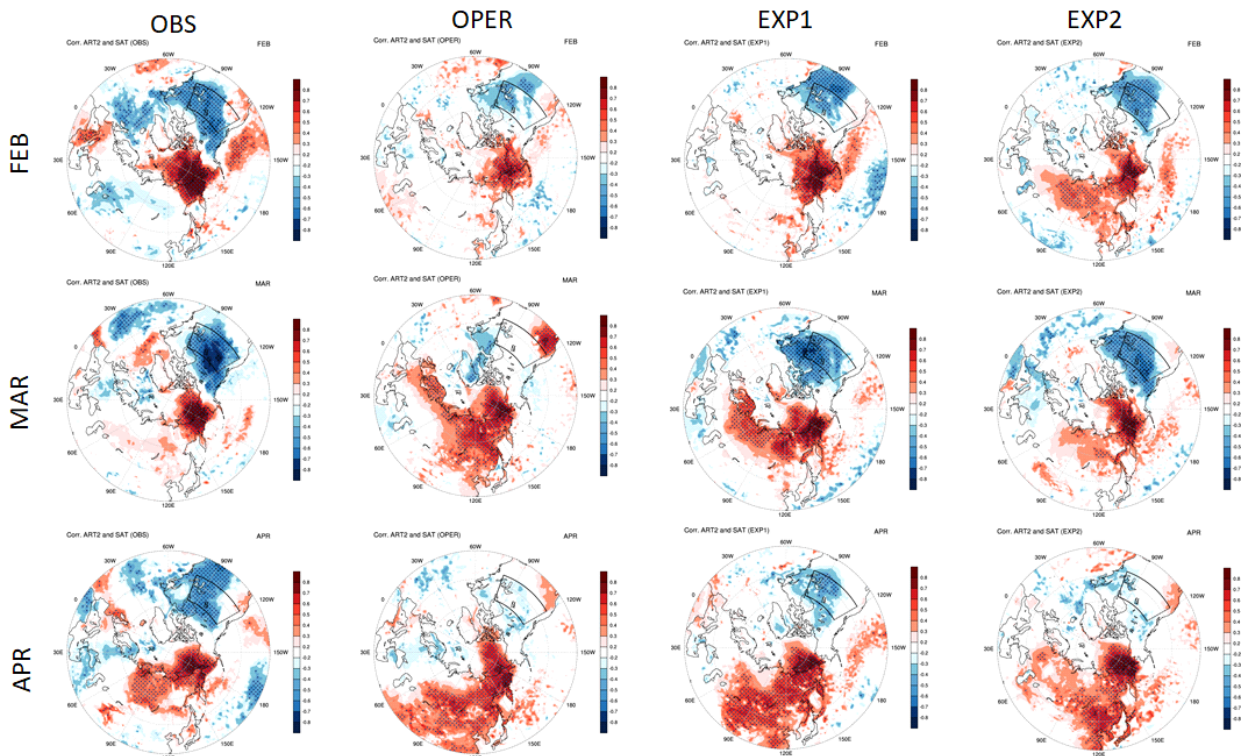


Figure 82. Correlation coefficients of surface air temperature anomalies with respect to de-trended monthly ART2 during February–April from 1993 to 2016. Dotted area denotes significant values at the 95% confidence levels based on a Student’s t-test. Black box represents north America.

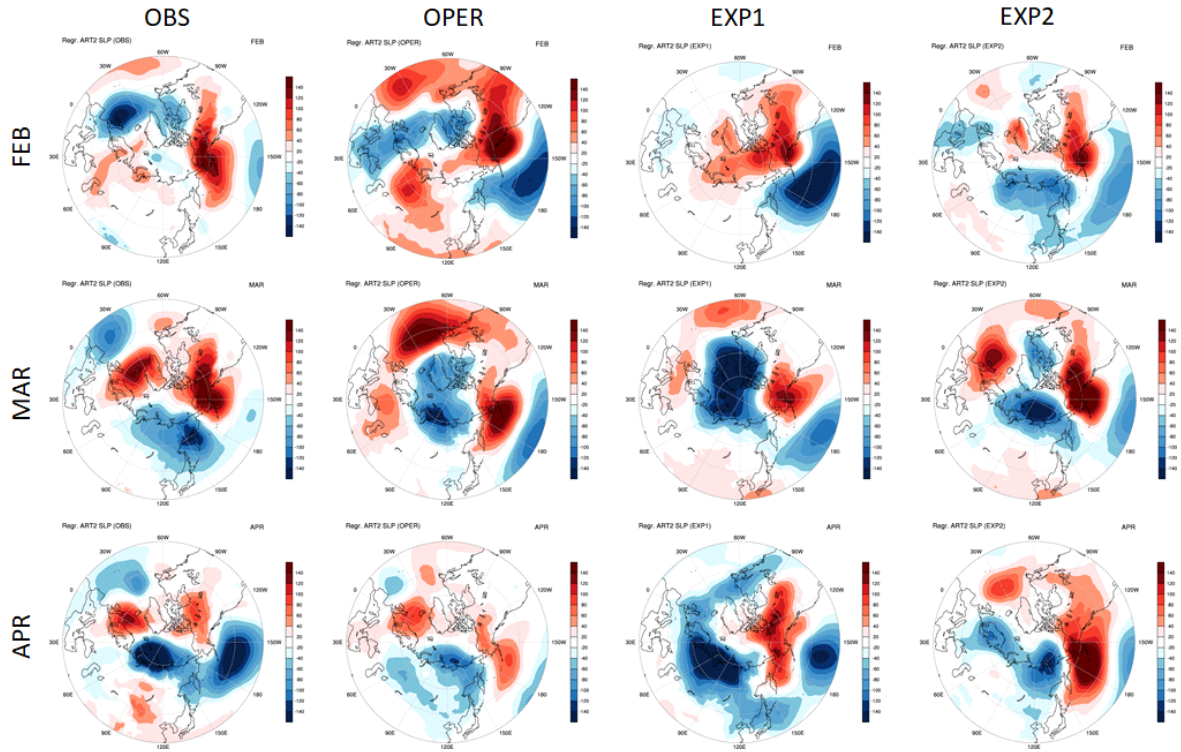


Figure 83. Linear regression of sea-level pressure with respect to de-trended monthly ART2 during February–April from 1993 to 2016.

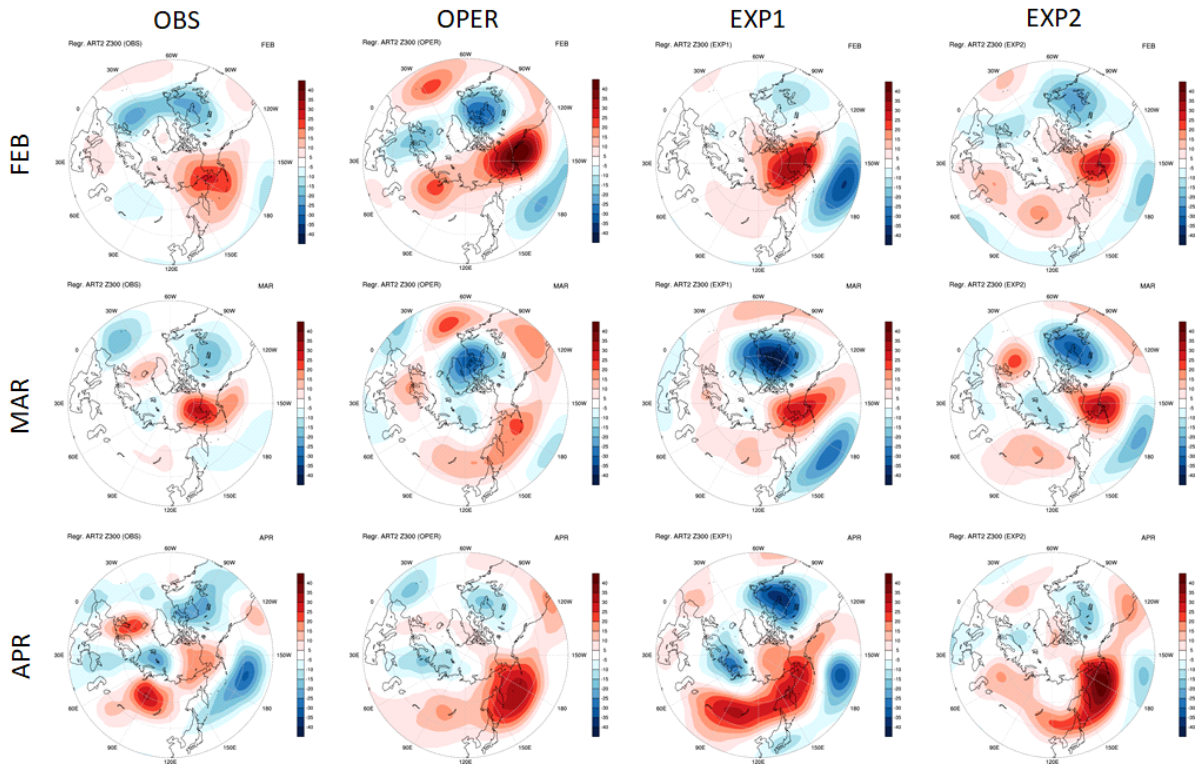


Figure 84. Linear regression of 300-hPa height with respect to de-trended monthly ART2 during February–April from 1993 to 2016.

ART2 지수와 관련된 대기순환장도 살펴보았다. ART2와 북아메리카의 극-중위도 원격상관은 3월까지 나타나는 것으로 분석되었는데, 이때의 해면기압 및 Z300의 회귀분석을 살펴보면 관측에서는 ART2 지역 부근에 순압성 고기압이 자리하고 있다(Figure 83, 84). 이 고기압성 순환은 3월까지 지속되어 알류시안 저기압을 약화시켜 북태평양에서의 블로킹을 야기하고, 극으로부터 불어오는 북풍을 강화시키는 역할을 하는 것으로 보인다. Z300 순환장을 보면 현업과 민감도 실험들은 2월의 고기압성 순환이 강화되는 특징은 모의하고 있으나 현업과 EXP2는 북아메리카와 북시베리아 지역에 걸쳐 쌍극자 구조를 보였으며, EXP1은 태평양에 강한 음의 회귀관계를 나타내었다. 현업은 3월에 상층에서의 고기압성 순환이 약해지는 양상을 보여 관측에서 나타나던 원격상관이 3월까지 지속되지 않는 것으로 보인다. 반면, EXP1과 EXP2에서는 고기압이 유지되어 ART2와 북아메리카 기온의 상관관계를 재현할 수 있었던 것으로 분석된다.

눈 알베도의 변화가 연직 구조에 미치는 영향을 알아보기 위해 온도와 비습의 오차를 분석하였다. Figure 85와 86은 현업 및 민감도 실험들의 관측과의 오차를 북극 지역에 대해 나타낸 것이다. GloSea6는 북극 하층 대기를 한랭하게 모의하여 기온역전층을 과도하게 모의하는 경향이 있으며, 이로 인해 관측보다 하층 대기를 안정하게 모의하여 구름 생성을 저해할 수 있다. 2월에는 눈 알베도의 영향이 하층에서는 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 보이나, 900hPa-700hPa 고도에서 EXP1의 오차가 감소하였다. 적분 기간이 길어질수록 현업과 민감도 실험의 차이가 뚜렷하게 나타나는데, 대기 하층에서는 EXP1의 오차가 줄어드는 효과가 있었다. 비습의 연직구조에서는 GloSea6가 대기 하층 수증기를 관측보다 과소모의 하여 구름 생성이 억제됨을 확인하였고, 알베도 변화에 의한 효과는 크지 않았다.

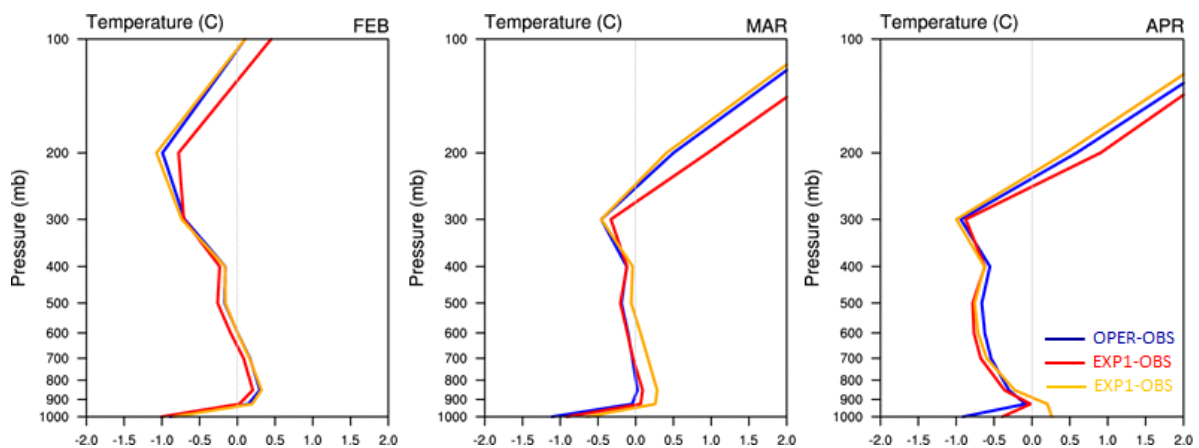


Figure 85. Vertical difference of monthly mean temperature between observation and OPER, EXP1, and EXP2.

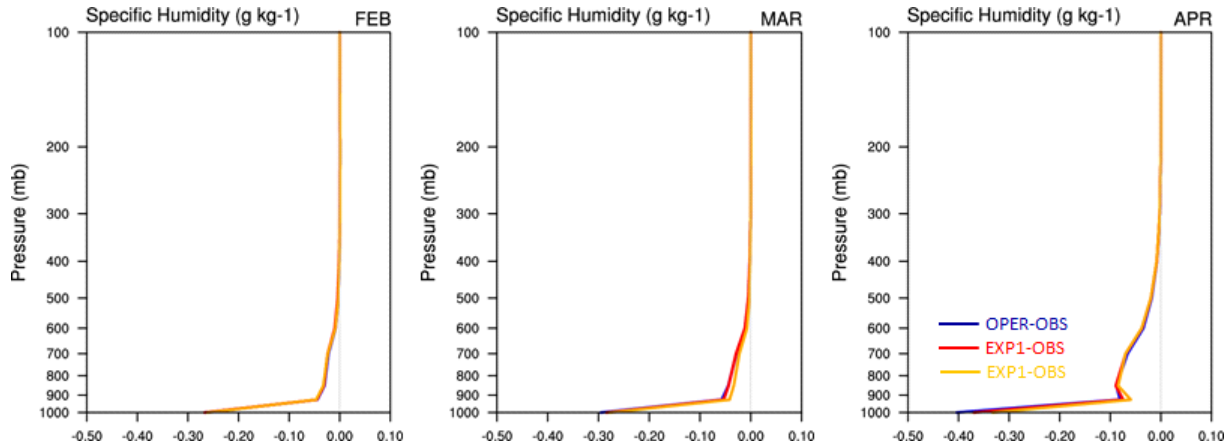


Figure 86. Vertical difference of monthly mean specific humidity between observation and OPER, EXP1, and EXP2.

(3) 5월 출발 6-8월 실험 결과

1월 출발 2-4월 실험 결과를 바탕으로 타 계절에 대해 눈 반사율의 효과와 현업적 효능을 살펴보기 위해 5월 출발 6-8월 실험 결과를 분석하였다. 5월 출발 실험은 1월 출발 실험에서 예측성 개선 효과가 보였던 EXP1(눈 반사율 10% 감소 실험)에 대해서만 수행하여 현업 및 관측과 비교하였다. 1월 출발 실험과 동일하게 1993년부터 2016년까지 hindcast 실험을 수행하여 현업 안정도를 살펴보았는데, 특정해의 특정 시점에서 반복적으로 실험이 멈추는 현상이 발생하였다. 그 원인은 추후 살펴볼 필요가 있으며 그 해를 제외하고 23년의 기후값을 이용하여 분석하였다.

(가) 지표 온도

Figure 87는 지표 기온의 오차와 오차 개선 정도를 월별로 살펴본 것으로 여름철 동안 북극과 남극에 한랭 오차가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 특히 겨울 반구인 남극의 한랭 오차가 뚜렷하게 나타났으며, 이는 EXP1에서도 지속적으로 나타났다. 반면 북극 지역에서의 오차는 EXP1에서 다소 개선되는 효과가 있었으며 6월에 가장 뚜렷하게 보였다.

지표 기온의 오차를 동아시아 지역에 대해 좀 더 면밀하게 살펴보면 2-4월과 달리 GloSea6의 오차 특성이 월별로 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 88). 6월의 경우 한반도와 중국 일부 지역에서는 한랭 오차가 나타나지만 7-8월의 경우에는 오호츠크해를 제외한 대부분의 지역에서 온난 오차를 보였다. 오차 개선 정도는 6월에 가장 뚜렷하게 나타났으며, 한랭 오차가 줄어드는 효과가 있었다. 반면 7월에는 온난 오차가 더 심해져 동아시아에서의 오차가 더 커졌으며, 8월에는 한반도 북쪽에서의 온난 오차가 줄어드는 효과를 보였다.

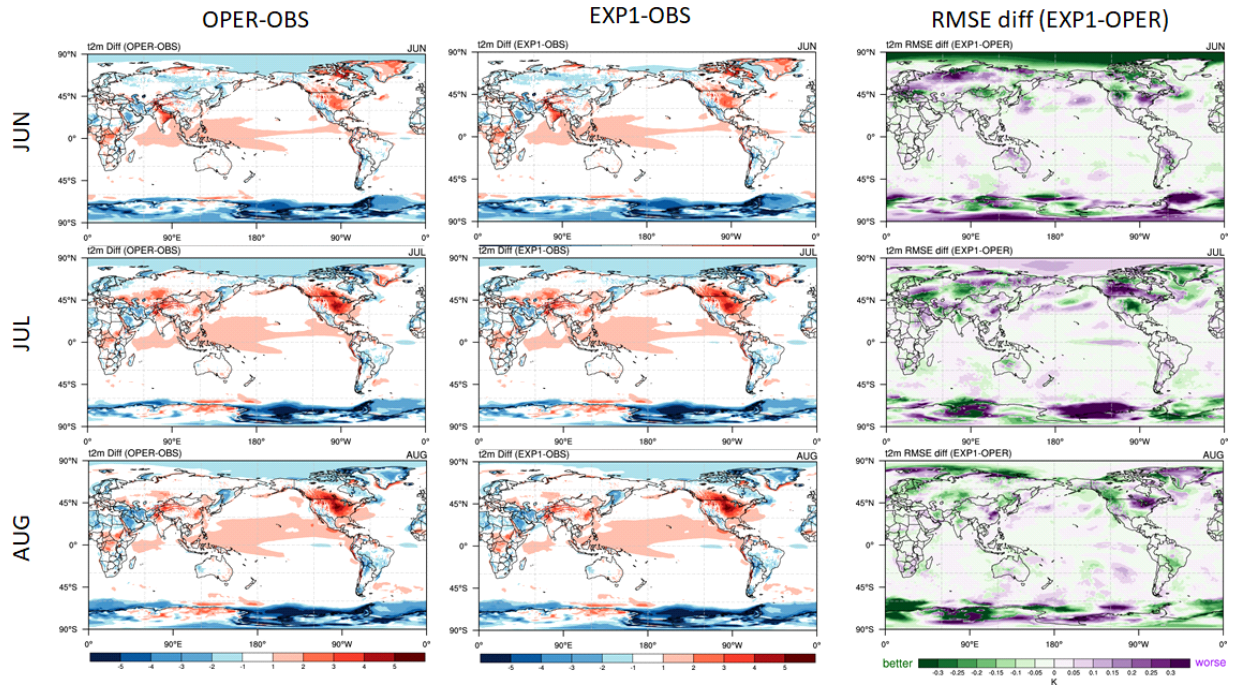


Figure 87. Difference of 2-m temperature between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) during June-August.

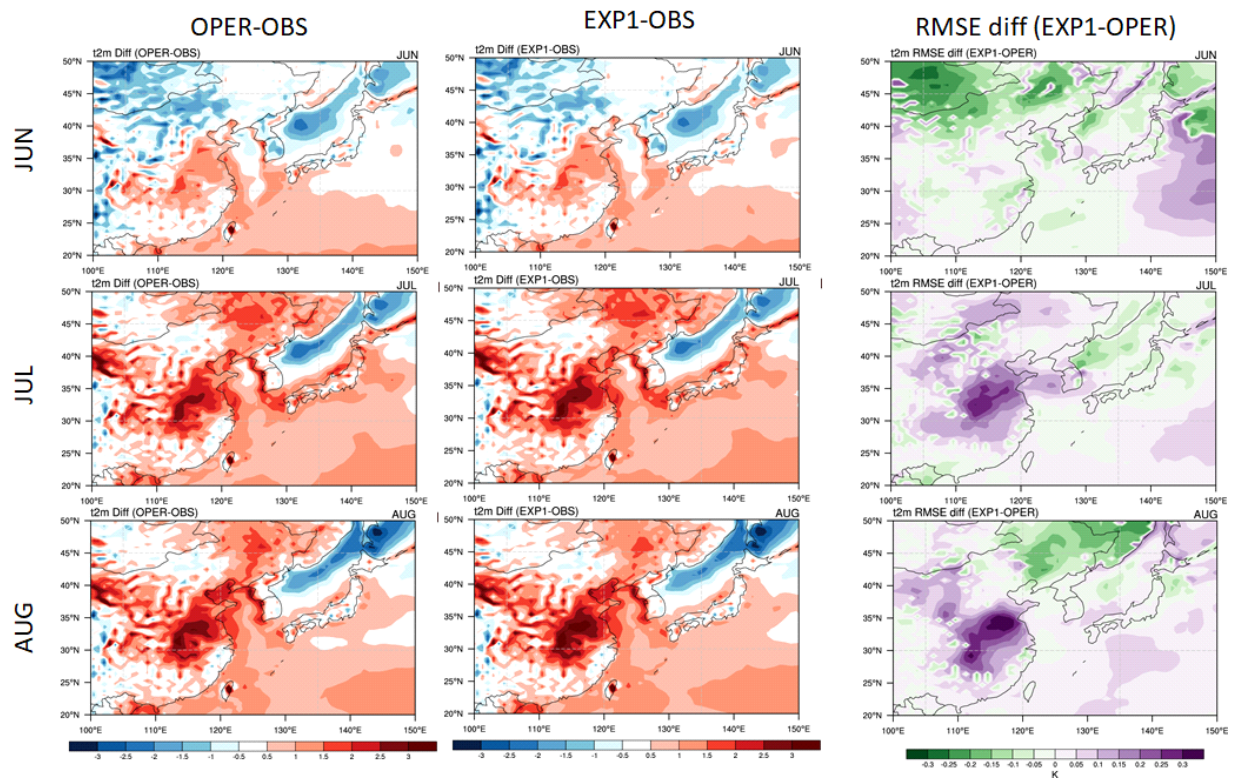


Figure 88. Difference of 2-m temperature between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) over East Asia during February-April.

동아시아 지역에서의 시간상관계수의 차이를 살펴보면 대륙에서의 상관계수 개선은 6월보다는 7월과 8월에 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 89). 6월의 경우 북위 30도 이상의 지역에서 상관계수가 낮아지는 반면 7월에는 해양을 제외한 대부분의 지역에서 상관계수가 높아졌으며, 8월에는 한반도 북쪽 지역을 제외한 대륙에서 상관계수가 개선되었다. 이는 오차 개선과는 반대되는 방향으로 기술 평가 시 다방면에서의 개선 효과 분석이 필요하다는 것을 의미한다.

Anomaly correlation에서는 1월 출발 실험 결과와 유사한 특징을 보였다(Figure 90). 6월(1-month lead)에는 예측력 개선이 나타나지 않지만 7-8월(2- & 3-month lead)에는 예측성이 다소 향상되고 예보안정도가 높아지는 효과가 있었다.

지표 온도의 전반적인 예측력 변화를 종합해보면 동아시아 6월을 제외하고 전구와 동아시아에서 EXP1의 RMSE가 줄었고, TCC와 ACC 또한 향상되는 것을 확인할 수 있었다(Figure 91).

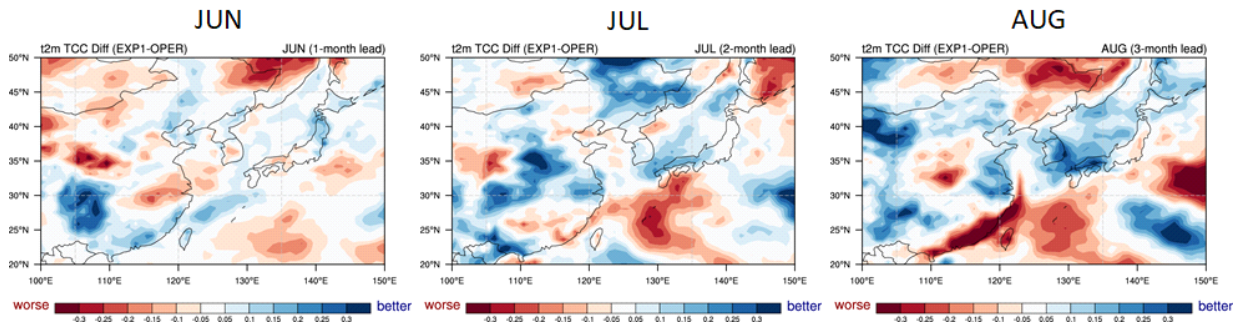


Figure 89. Temporal correlation coefficient for monthly mean 2-m temperature over East Asia.

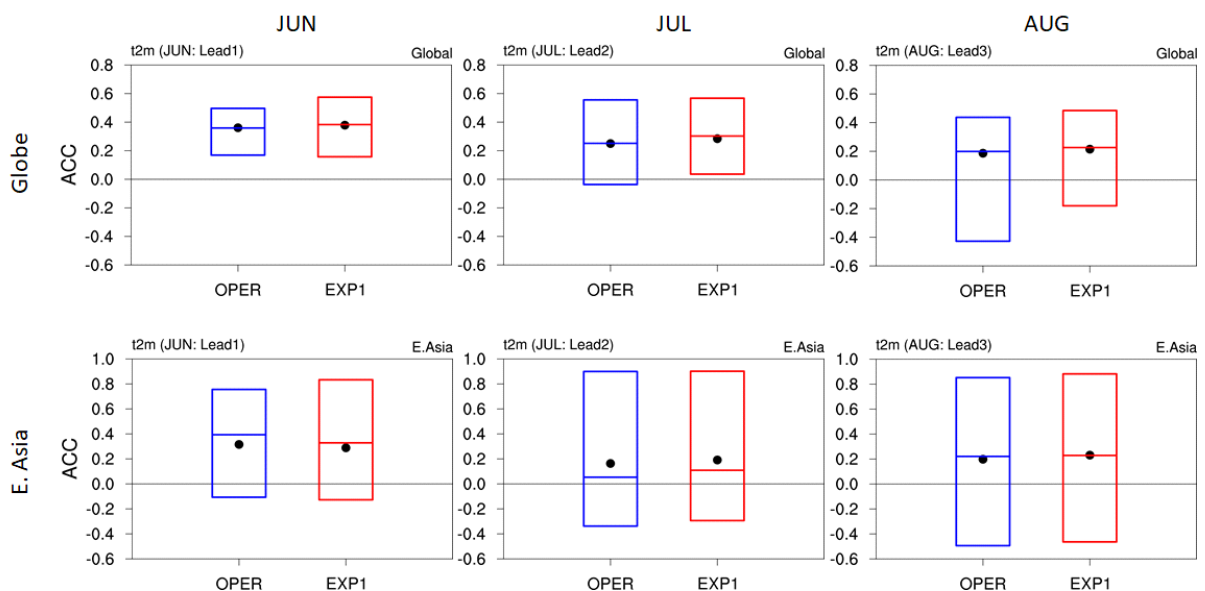


Figure 90. Anomaly correlation coefficient for 2-m temperature of OPER (blue), and EXP1 (red) over globe (top) and East Asia (bottom).

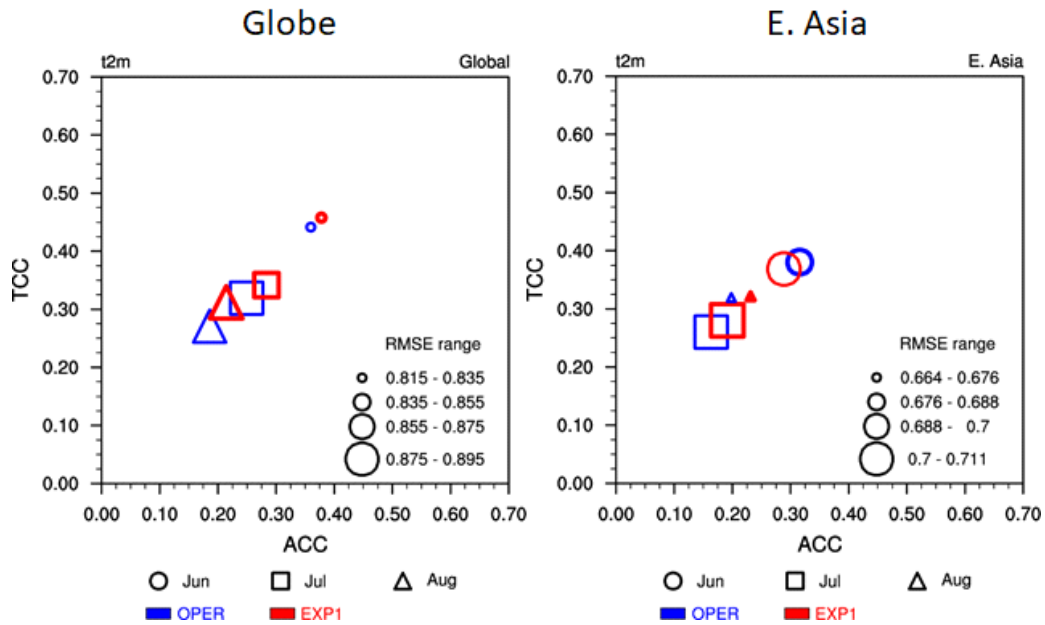


Figure 91. Scatter plot for skill of monthly mean 2-m temperature over globe (left), northern Hemisphere (center), and East Asia (right).

(나) 강수

여름철 중요한 예측 변수인 강수에 미치는 영향을 알아보기 위해 동아시아 지역에 대한 강수 예측력의 변화를 살펴보았다. 강수의 경우 관측 데이터인 GPCP가 1997년부터 가용하므로 다른 변수와 달리 1997년부터 2016년까지의 결과를 비교하였다. 동아시아에서의 월별 강수 오차를 살펴보면, GloSea6는 여름철 강수대를 전반적으로 약하게 모의하는 특징이 있는 것으로 나타났고, 이는 EXP1에서도 유사하게 나타났다(Figure 92). 그러나, RMSE의 차이를 살펴보면 건조 오차가 있는 지역에서 오차가 개선되는 효과를 보이는 것을 알 수 있다. 특히 6월에 개선 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 선행 시간이 길어질수록 이러한 효과는 약해지는 것으로 보인다.

TCC에서도 강수 예측력 개선 효과는 6월에 뚜렷하게 나타나며, RMSE의 차이에서와 유사하게 6월과 7월에는 강수대가 위치한 지역에서의 TCC 향상이 확인되었다(Figure 93).

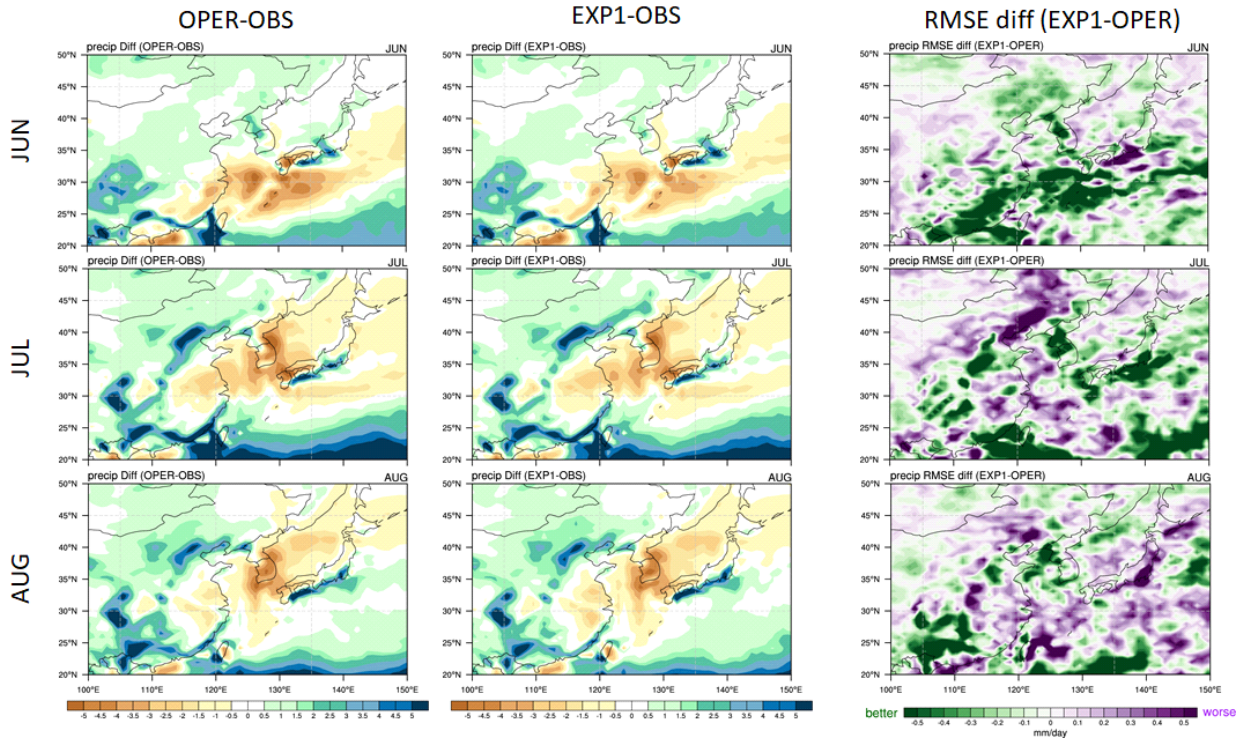


Figure 92. Difference of precipitation between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) over East Asia during June–August.

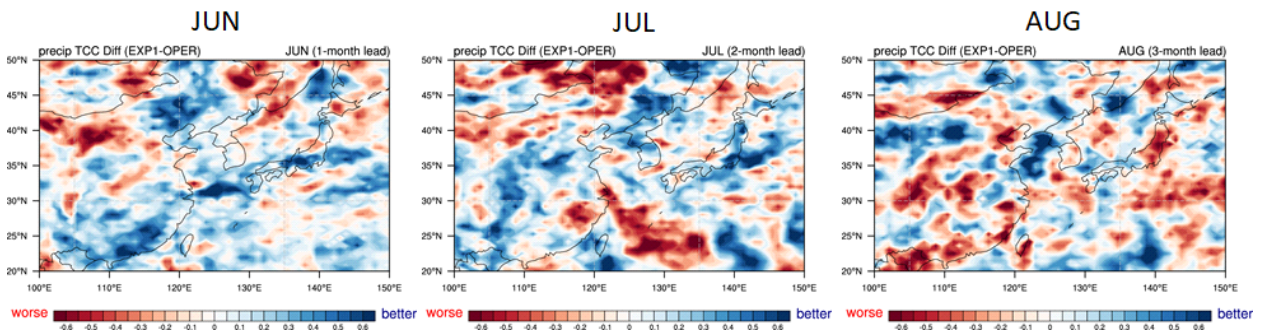


Figure 93. Temporal correlation coefficient for monthly mean precipitation over East Asia.

ACC 측면에서도 8월 동아시아를 제외하면 모든 월에서 관측과의 상관계수가 다소 향상되었으며, 동아시아에서는 6월과 7월에 예측안정도 또한 개선되었다(Figure 94). 그러나, 선행시간이 2달 이상이 되면 동아시아에 강수에 대한 예측력 자체가 매우 낮아 예측력이 다소 향상되었음에도 불구하고 여전히 낮은 값을 나타낸다.

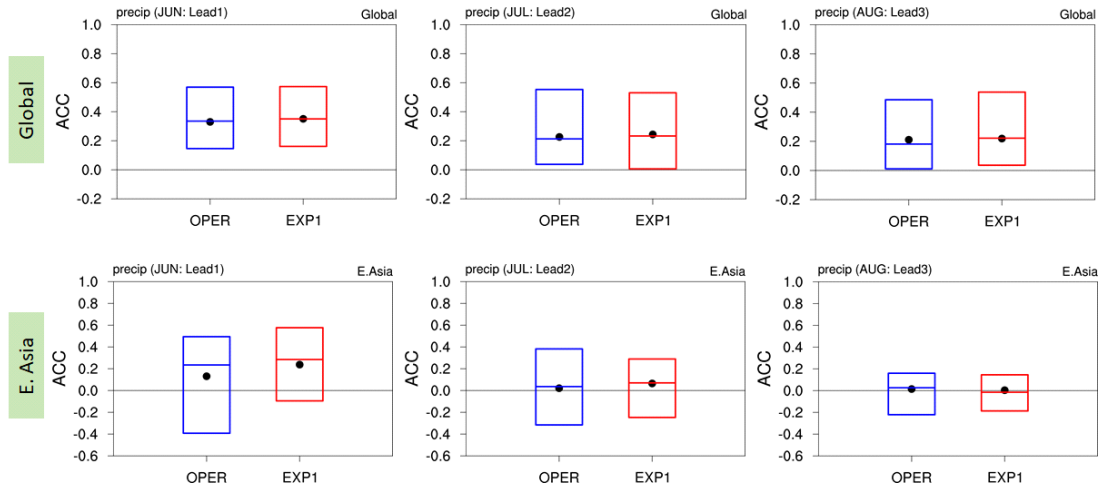


Figure 94. Anomaly correlation coefficient for precipitation of OPER (blue), and EXP1 (red) over globe (top) and East Asia (bottom).

강수에 대한 전반적인 예측력 개선 정도를 살펴보면, 다른 변수와 달리 선행시간이 짧을 때 개선 효과가 있는 것으로 나타났다(Figure 95). 이는 강수가 다른 변수에 비해 예측이 어려운 예단 변수이므로 선행시간이 길어질수록 예측력이 급격히 떨어지기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 강수대가 위치한 지역에서의 오차 개선 효과나 상관계수 향상이 있는 것으로 분석되었으므로 평가 지역을 강수대가 위치한 지역으로 정의하여 분석한다면 항상 정도가 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다.

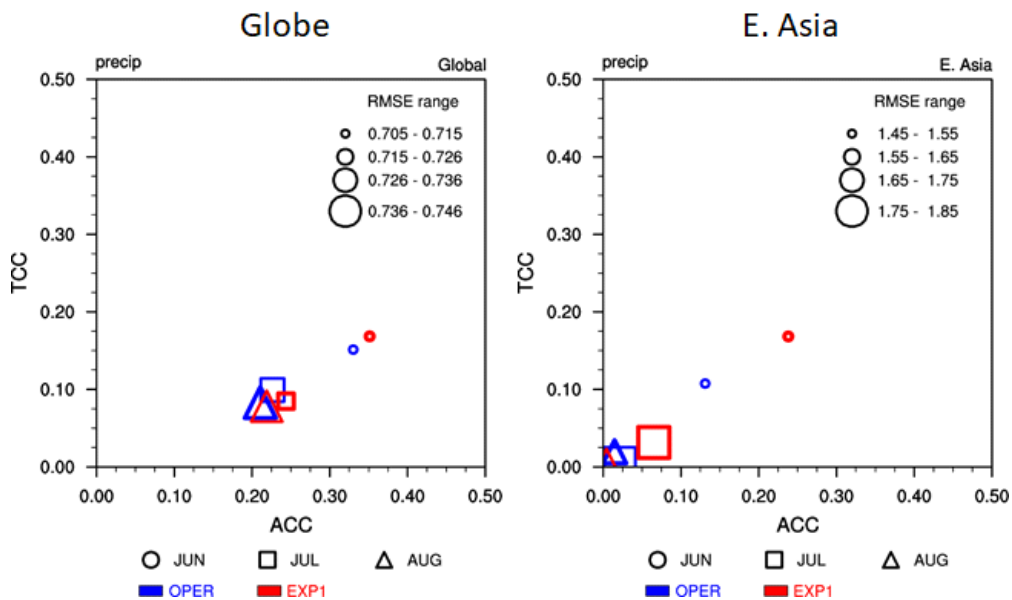


Figure 95. Scatter plot for skill of monthly mean precipitation over globe (left), and East Asia (right).

(다) 해빙

눈 알베도의 직접적인 영향을 받을 것으로 생각되는 해빙 농도와 면적의 변화를 살펴보았다. GloSea6는 여름철 해빙 농도를 과소모의하는 특징을 보이며, 예측시간이 길어질수록 이러한 특징은 뚜렷하게 나타난다(Figure 96). 눈 알베도를 낮추면 반사되는 일사량이 감소하므로 해빙 농도는 더 감소하게 되어 과소모의가 더 뚜렷하게 나타나고 오차가 커지는 결과를 보인다. 해빙 농도가 감소함에 따라 면적 또한 줄어들어 7월과 8월에는 관측 대비 과소모의 경향이 더욱 심해졌다(Figure 97). 1월 출발 실험에서 해빙에 직접적인 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았던 것과 달리 여름철에 대해서는 눈 반사율 감소의 효과가 해빙 농도와 면적 모의에 영향을 주는 것으로 보인다. 다만, GloSea6가 계통적으로 여름철 해빙을 과소모의하는 오차를 가지고 있어 눈 반사율을 감소시켰을 때 여름철 해빙 모의 예측력에 있어서는 긍정적인 영향은 주지 못하였다.

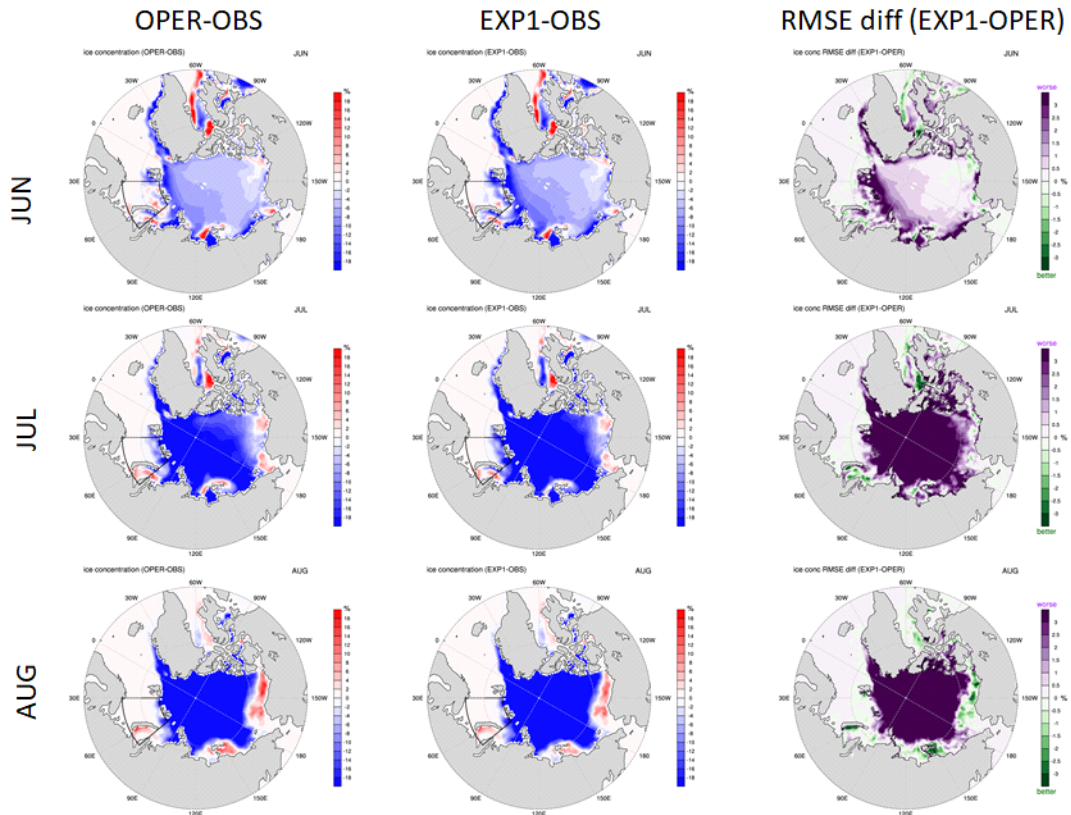


Figure 96. Difference of precipitation between observation and OPER (left), EXP1 (center), and RMSE difference (right) during June–August.

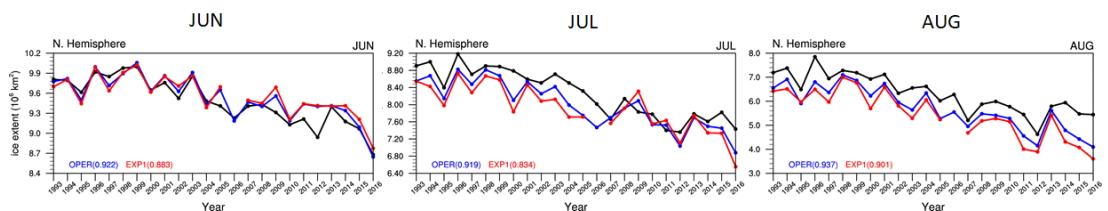


Figure 97. Monthly mean sea ice content over Arctic (60–90N) during June–August from 1993 to 2016.

라. 지면모델 개선

(1) GloSea6 JULES 특성 분석 및 개선 방안

(가) 지면모형 스핀업 특성분석

각 지면모형의 토양수분에 대한 스핀업 특성을 PC를 이용하여 수행하였으며, Figure 98에 결과를 제시하였다. 토양수분에 대한 스핀업 특성은 3개 지면모형 모두 건조한 지역에서 평형 상태에 도달하는 데 걸리는 시간(이하, 스핀업소요기간)이 더 길며, 토양하부층이 상부층보다 이 더 길게 나타나는 결과를 보였다. 유역별로 3개 모형의 스핀업 소요기간은 대체로 비슷한 경향을 보였고, Figure 98에서 보여주는 것과 같이 대략적으로 1~25년정도 소요되는 결과를 보였다. 토양온도에 대한 스핀업소요기간은 3개 지면모형과 7개 유역 모두에서 1년 이내로 매우 짧게 나타났으며, 각 지면모형별로는 대체로 유사한 결과를 보였다. 잠열에 대한 스핀업 특성 분석은 JULES가 대체로 짧게 나타나는 결과를 보였다.

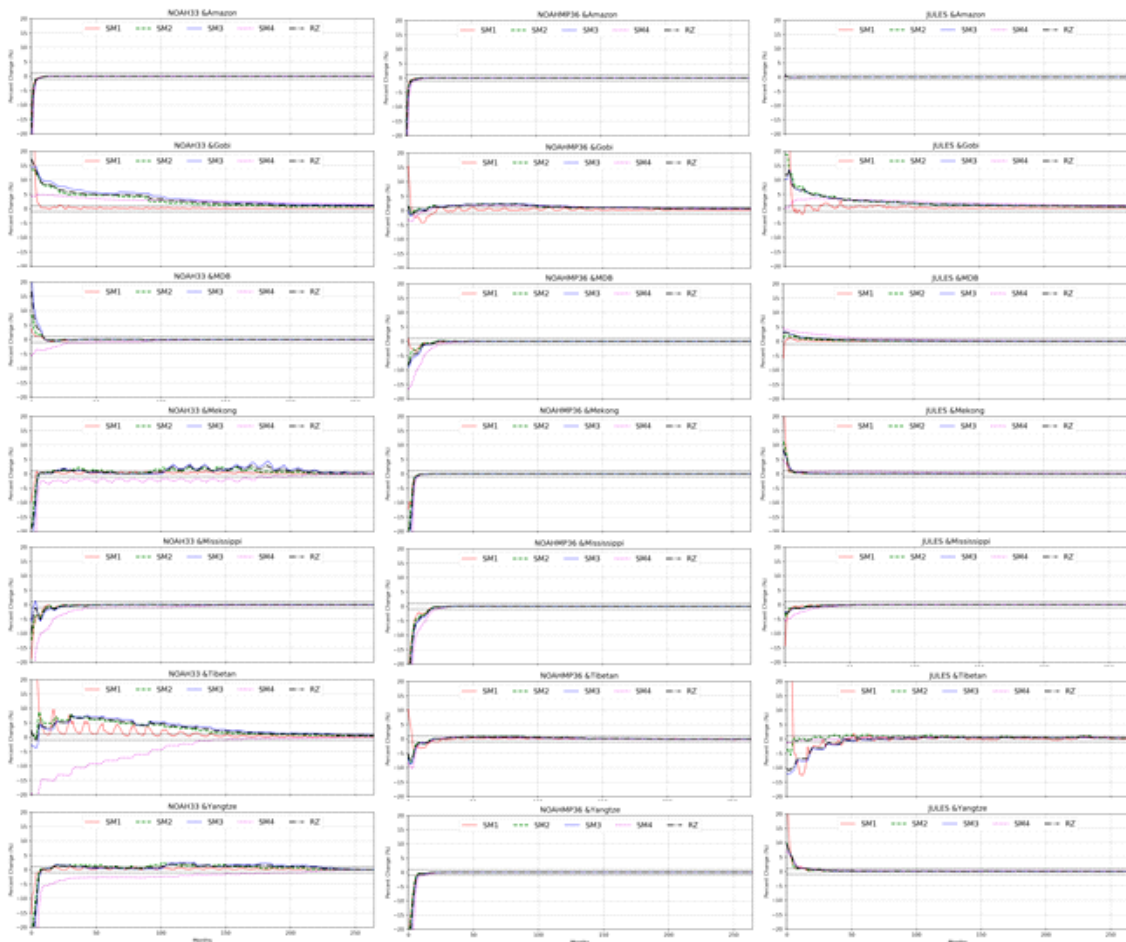


Figure 98. Characteristics of spinup behaviors from the three LSMs: Noah (left), Noah-MP (middle), and JULES (right).

(나) 유역별 토양수분 평가

GLEAM 표층과 근역층 토양수분자료를 활용하여 3개 지면모형의 표층과 근역층 토양수분 예측성을 비교하였다(Figure 99). Noah, Noam-MP, JULES 3개 지면모형 모두 4개 토양층의 토양수분을 모의하는데, 근역층 토양수분은 1.0m 깊이(말하자면 3개 토양층)의 평균 체적토양수분(Volumetric soil moisture content)으로 가정하여 GLEAM의 근역층 토양수분량과 비교하였다. 3개 지면모형과 GLEAM 토양수분과 비교한 결과는 어느 한 모형이 다른 모형에 대해 우세하다고 보기 어려운 결과를 보였으나, 대체로 Noah와 Noah-MP 지면모형에 비해 JULES 지면모형의 건조 편차가 더 크게 나타났다. 전체적인 경향은 3개 지면모형 모두 대부분의 지역에서 유사한 경향을 보이거나, 표층토양수분의 경우, 몽골 등 동북아시아에서는 JULES 지면모형이 Noah나 Noah-MP 지면모형에 비해 지역적으로 다소 과소모의(말하자면, 건조 편차가 큰)하는 경향이 나타났다. JULES 지면모형의 표층에서 건조 편차가 큰 경향은 호주와 북미, 남미의 칠레 부근에서도 분명하게 나타났다.

근역층의 경우, Noah와 Noah-MP 지면모형은 대체로 서로 유사한 결과를 보였는데, 호주 북동지역과 남부지역, 아프리카 북부, 서아시아, 몽골으로부터 남쪽지역에서 과대모의하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 대체로 JULES 지면모형의 결과와는 다소 차이가 커보이며, JULES 지면모형의 경우, 근역층에서도 표층과 유사하게 건조 편차가 비교적 크게 나타났다.

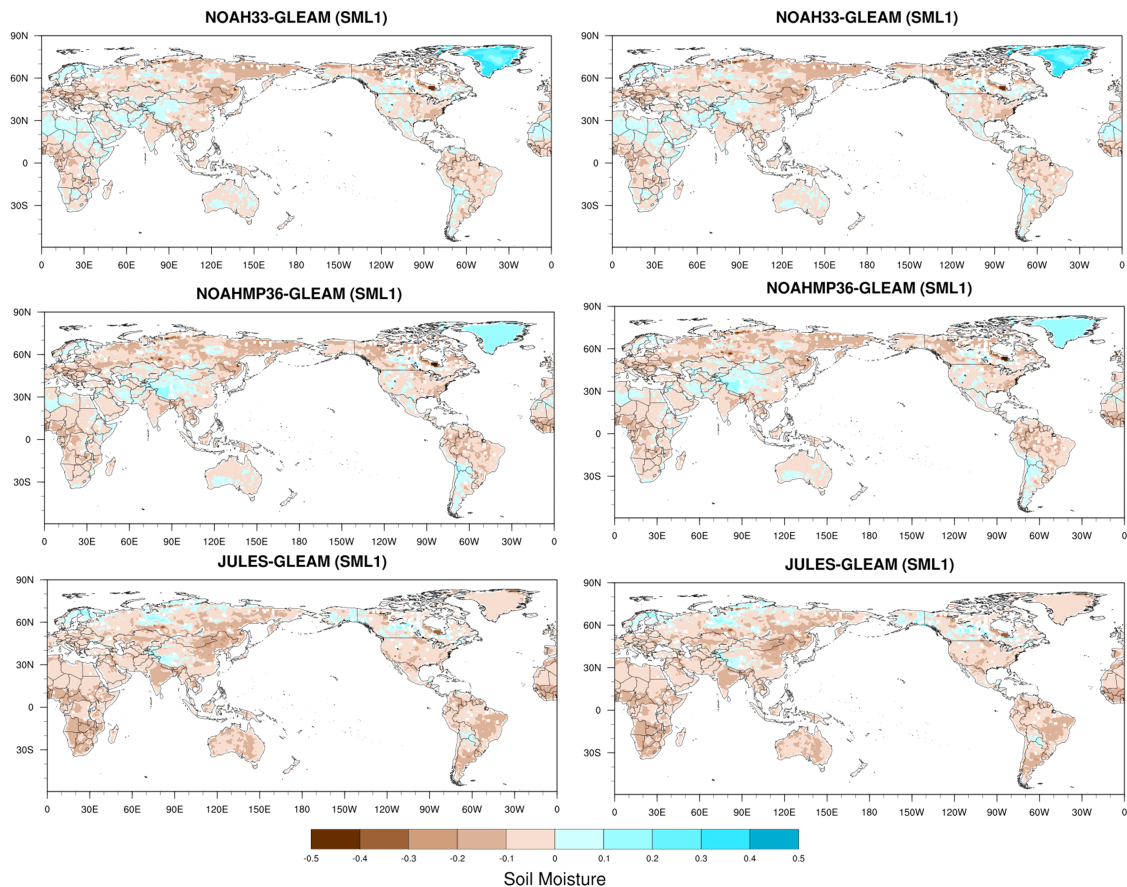


Figure 99. Differences of soil moistures between LSMs and GLEAM: Noah (top), Noah-MP (middle), and JULES (bottom). Soil moistures in the first layer (left) and those in root-zone (right).

(다) 유역별 TWSA 및 TWSC 평가

Noah, Noah-MP, JULES 지면모형의 유역별 TWSA와 TWSC를 GRACE 관측 TWS자료를 활용하여 평가하였으며, 그 결과를 Figures 100와 101에 나타냈다. TWSA와 TWSC 비교 결과는 전체적으로 TWSC 예측성이 TWSA에 비해 다소 떨어지는 결과를 보였으며, 고비와 티벳 유역 등 건조한 지역에서 3개 지면모형의 TWSA와 TWSC 예측성이 모두 떨어지는 결과를 보였다. 특히, 건조한 지역에서는 월별 변동성을 전혀 재현해 내지 못하는 것으로 나타나, 건조한 지역에 대한 수문성분 특히, 토양수분을 비롯한 유출량과 증발산량 등의 예측성 향상에 노력을 기울여야 할 것으로 판단된다. 또한 양쯔강유역이나 호주의 머레이-달링 유역의 경우에는 TWSC의 월별 변동성의 예측성이 건조한 지역을 제외하고 현저히 떨어지는 결과를 보였는데, 이는 관개를 하는 농경지가 많이 분포되어 있으나, 지면모형에서 관개량을 적절하게 반영하지 못하여 수문성분 분할에 오차를 발생시키는 것으로 추정된다. 향후, 관개 등 인간활동에 대한 물수지 영향에 대해서도 지면모형에 반영시키는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

한반도와 근접해 있고 한반도 기후와도 관련이 큰 양쯔강유역의 경우, TWSA는 모두 높은 상관관계를 보였으나, TWSC의 경우는 Noah와 Noah-MP 지면모형과는 다르게 JULES 지면모형의 예측성이 현저히 떨어지는 것으로 나타났다(Figure 102). 이는 토양수분의 기여율이 매우 큰 TWSA의 경우보다, 물수지방정식(Eq. [2])으로부터 지면모형의 TWSC를 산정하였으므로, TWSC에 대한 유출량과 증발산량의 기여도가 더 크게 나타나게 되는데, 유출량과 증발산량의 예측성이 떨어지기 때문인 것으로 추정된다. 실제로 Figure 106에서 보여주듯이 JULES 지면모형의 경우, 증발산의 경우 양쯔강유역에서 과대모의하고, 토양수분의 경우는 과소 모의하는 경향이 다른 두 지면모형에 비해 뚜렷이 나타나는 결과를 보여주고 있다.

전반적으로 Noah, Noah-MP, JULES 지면모형의 수문성분과 에너지성분에 대한 기준자료와 비교해 본 결과 (TCC), 수문 성분 예측성은 건조한 지역에서 예측성이 떨어지고, 에너지 성분의 경우는 수문 성분과는 다르게 습윤한 지역에서 예측성이 떨어지는 것으로 나타났다(Figure 103). 따라서, JULES 지면모형의 경우, 건조한 지역에서 수문성분 예측성 향상을 위한 후속 연구가 필요해 보이며, 아마존 유역과 같은 습윤하고 식생분포가 많은 지역에서는 에너지 성분에 대한 예측성을 향상시키는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

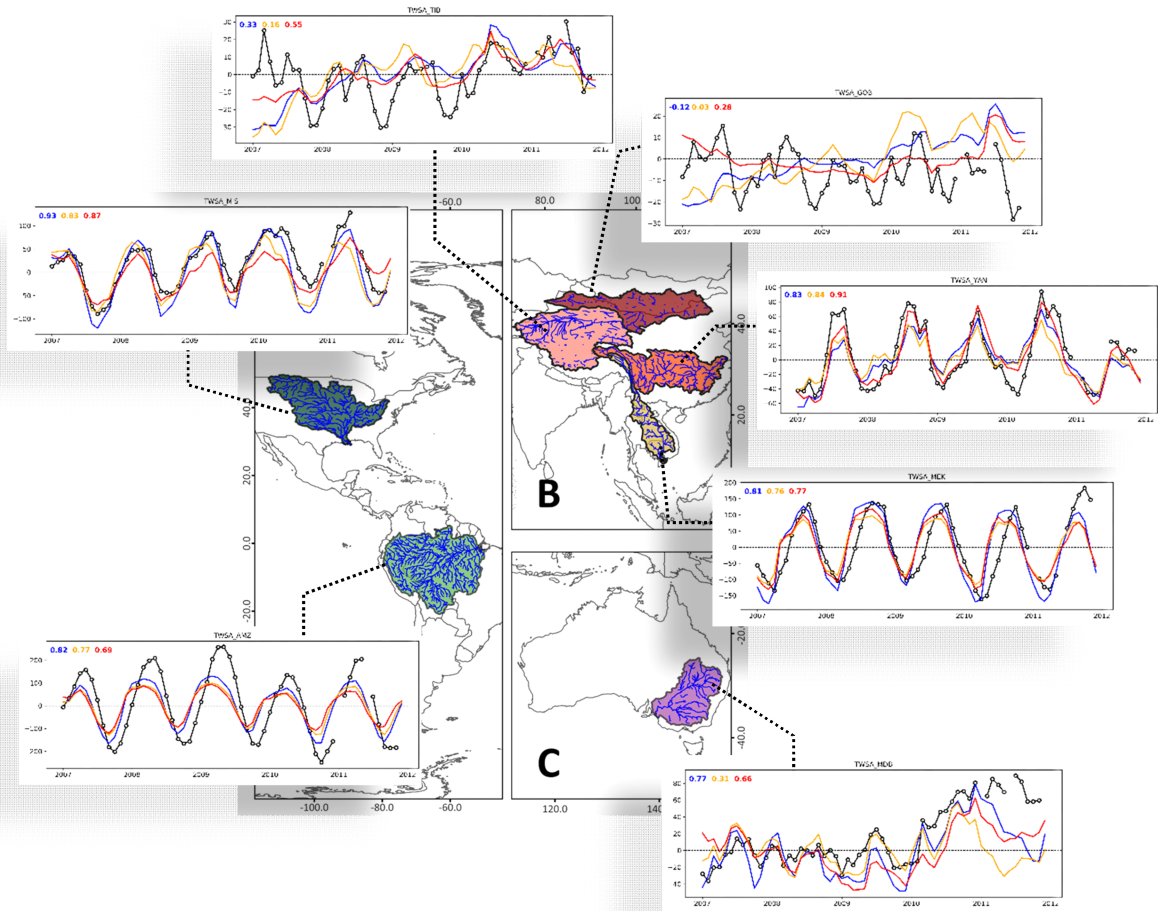


Figure 100. Comparisons of TWSA for the selected basins.

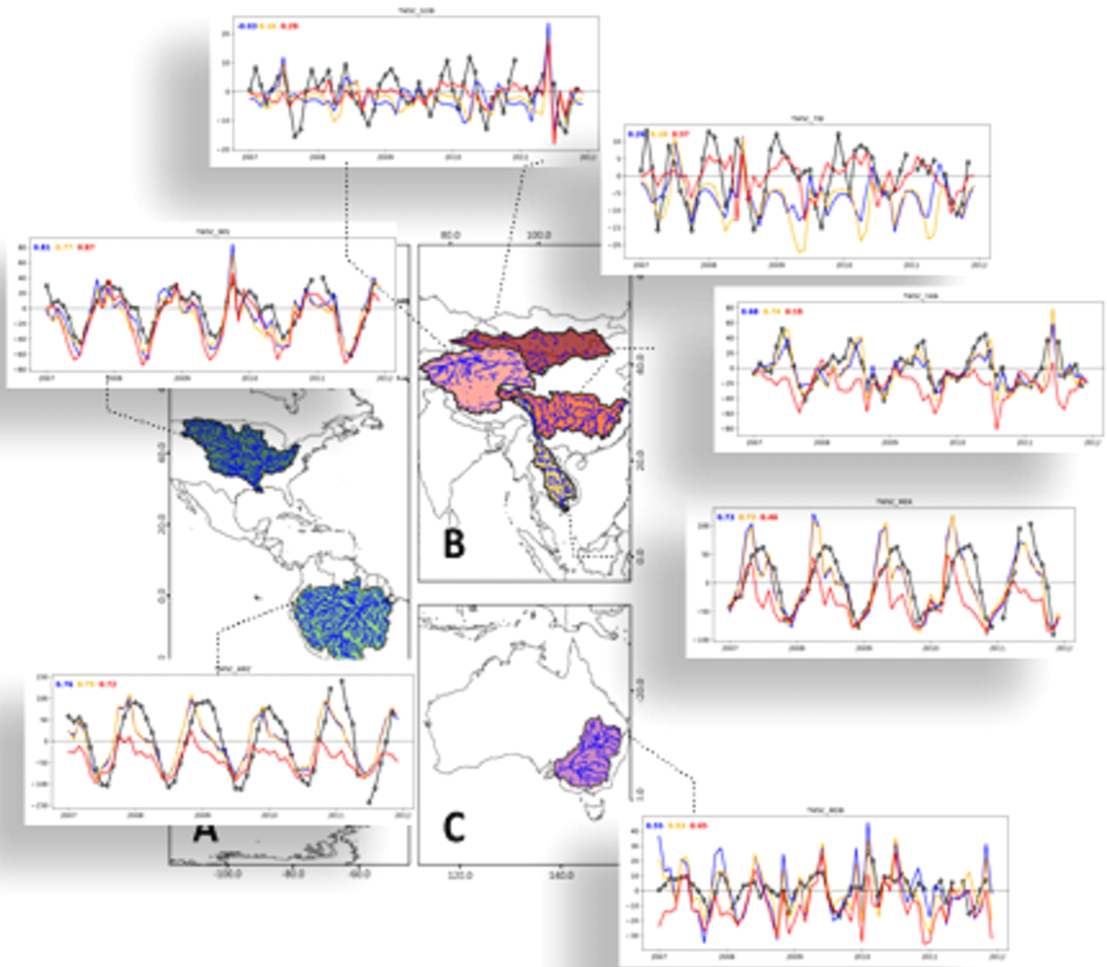


Figure 101. Comparisons of TWSC for the selected basins.

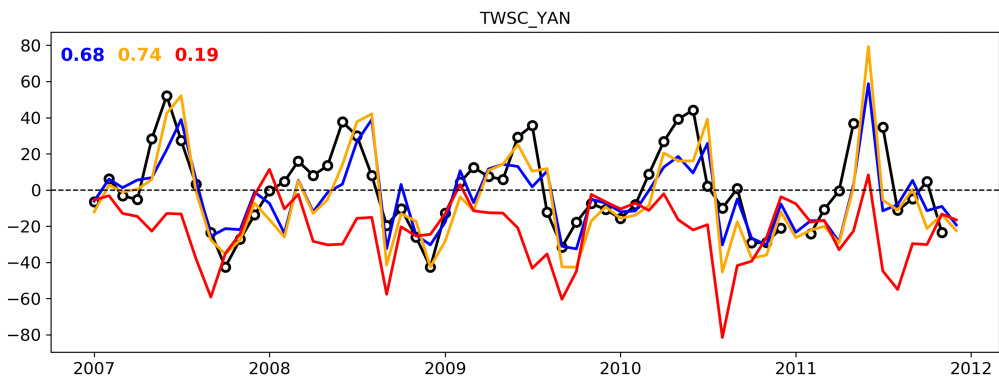
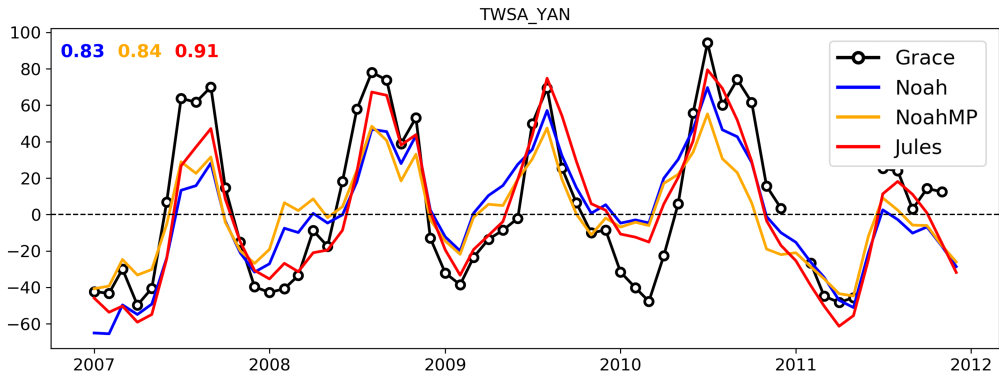


Figure 102. Comparisons of TWSA (top) and TWSC (bottom) for the Yangtze basin.

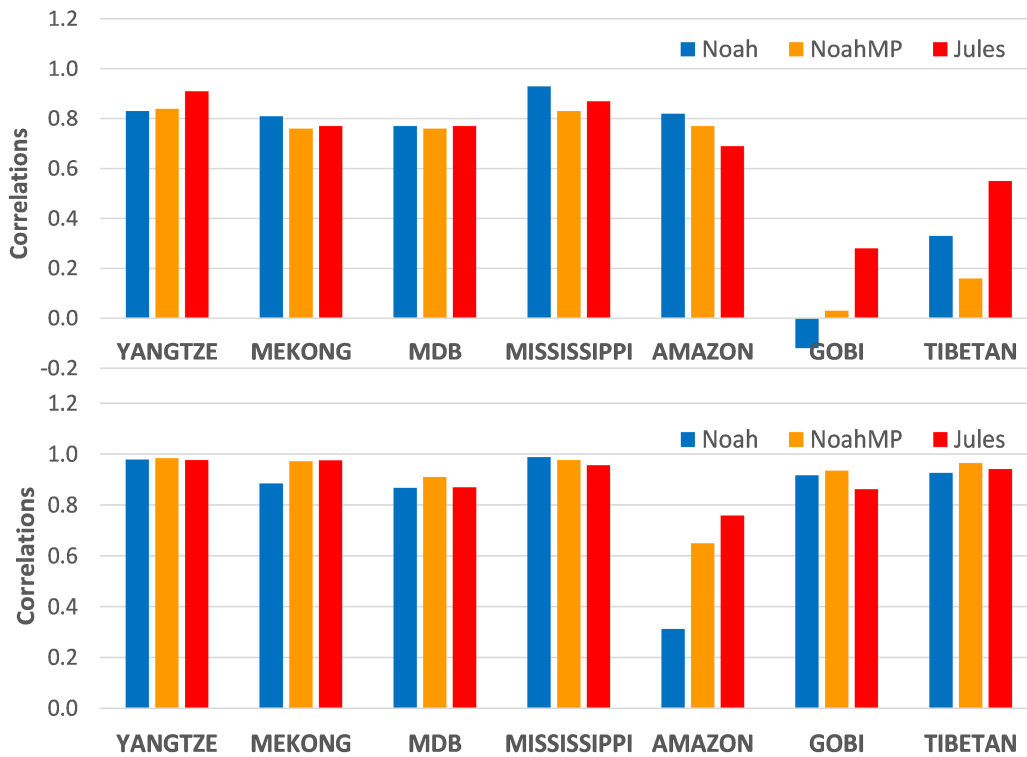


Figure 103. TCC of TWSA (Top) and TWSC (Bottom) for the selected basins.

(라) 유역별 물수지 변동성 평가

Noah, Noah-MP, JULES 지면모형의 유역별 물수지(표층과 근역층 토양수분, 증발산)의 월별 변동성을 GLEAM 자료를 활용하여 평가하였다(Figures 104-106). 표층토양수분의 경우 Noah 지면모형을 제외하고 0.6이상의 높은 상관관계를 보였으나, RMSE의 경우, JULES 지면모형의 고비사막 유역에서 가장 컸고, 티벳유역에서 가장 작은 분포를 보였다. 특히 JULES 지면모형은 다른 두 모형에 비해 비교적 높은 상관관계를 보였으나, Noah-MP 지면모형의 RMSE보다는 다소 크게 모의하는 경향을 나타냈다. 고비와 티벳 유역의 표층토양수분 월별 변동성은 GLEAM 이 보여주는 월별변동성을 Noah, Noah-MP, JULES 3개 지면모형 모두 제대로 재현하지 못하는 결과를 보였다(Figure 104).

Noah, Noah-MP, JULES 지면모형의 근역층 토양수분의 월별 변동성 결과(Figure 105)의 경우도, 표층 토양수분 월별 변동성 결과와 매우 유사한 결과를 보였는데, 티벳과 고비유역과 같은 건조한 유역에서 과소 모의하였으며, 다른 유역과는 다르게 월별 변동성을 제대로 모의하지 못하는 결과를 나타냈다. 특히 근역층의 경우 고비유역에서 JULES 지면 모형의 상관관계가 Noah 지면모형과 비슷한 수준으로 매우 낮았으며, 미시시피 유역에서 Noah와 Noah-MP 지면 모형의 GLEAM 근역층 토양수분자료와 상관관계가 가장 크게 나타났다. JULES 지면모형의 경우, 표층 결과와는 다르게 티벳유역에서 RMSE가 가장 크게 나타났으며, 고비유역에서는 상대적으로 작은 RMSE 값을 보였다. 특히 티벳유역에서 근역층 토양수분은 3개 지면모형 모두 과대모의하는 것으로 나타났다.

양쯔강 유역에서 표층의 토양수분 월별 변동성 평가결과는 JULES 지면모형이 가장 과소모의하고 Noah와 Noah-MP순이었으나, 근역층의 경우는 표층과는 다소 다른 결과를 보였는데, Noah가 가장 과소모의하는 결과를 보였다. JULES 지면 모형의 경우도 Noah 지면모형과 유사하게 과소모의하는 경향을 보였다. 특히 근역층의 경우, 3개 지면모형 모두 1월부터 5월까지 GLEAM 근역층 토양수분이 보여주듯 건조해지는 경향과는 반대로 근역층 토양수분의 값이 증가하는 결과를 보였다(Figure 106). 양쯔강 유역에서 증발산량의 경우 Noah와 Noah-MP의 경우 GLEAM 증발산량보다는 다소 과대모의하나 두 지면모형이 유사한 결과를 보인 반면, JULES 지면모형은 과대모의하는 경향이 가장 크게 나타났다(Figure 106). 특히, JJA 여름철 증발산량을 과대모의했는데, 이 지역의 농경지에서 관개하는 영농활동이 지면모형에 적절히 반영되지 못하는 것과 관련이 있을 것으로 추정된다. 향후, 관개와 같은 영농활동 등을 적절히 반영할 수 있도록 지면모형 개선이 필요할 것으로 판단된다. 이는 Yilmaz et al. (2014)의 결과에서와 같이 관개량을 고려하여 전체 수문성분 분할 뿐 만아니라 에너지 성분 분할도 개선이 이루어져, 물과 에너지 수지에 대한 지면모형의 예측성을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

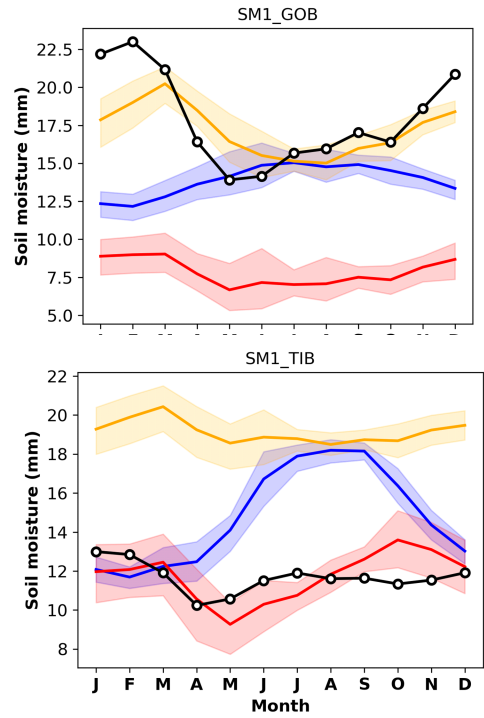
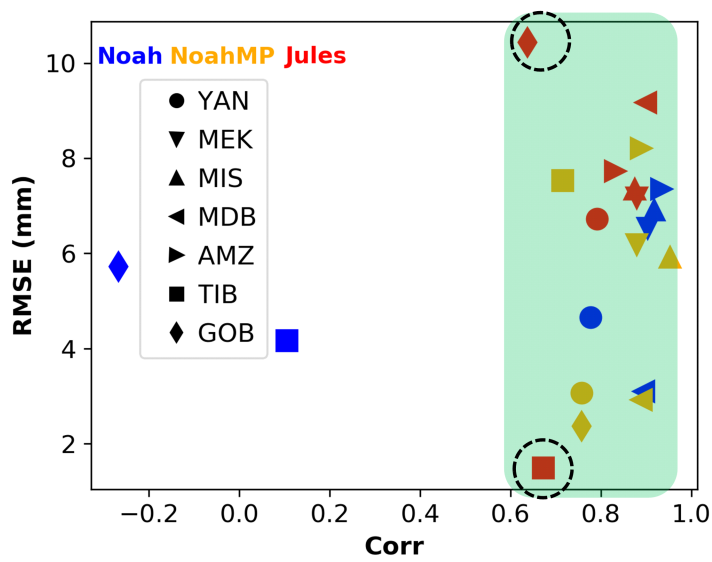


Figure 104. Monthly mean soil moisture (mm) at the first soil layer.

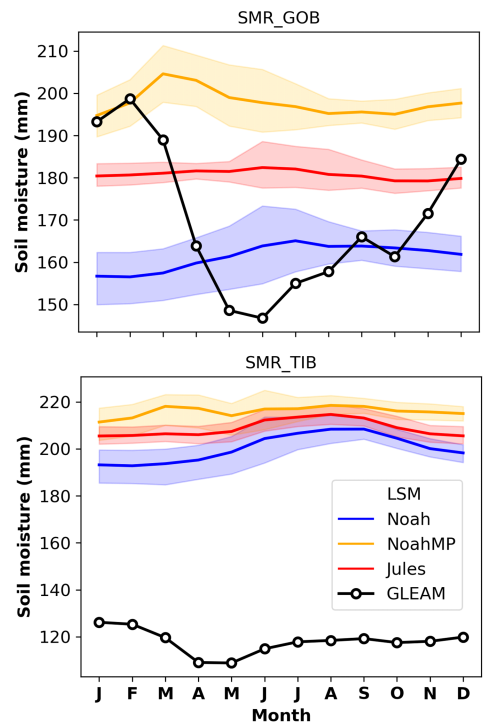
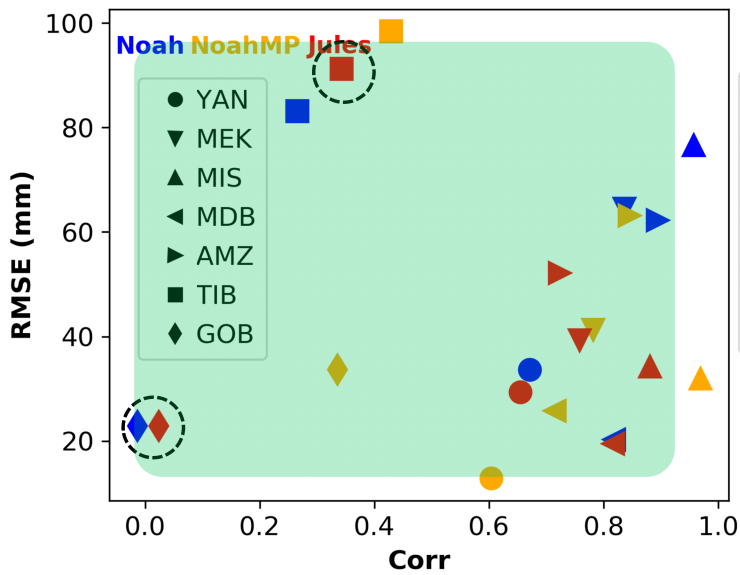


Figure 105. Monthly mean soil moisture (mm) at the root-zone.

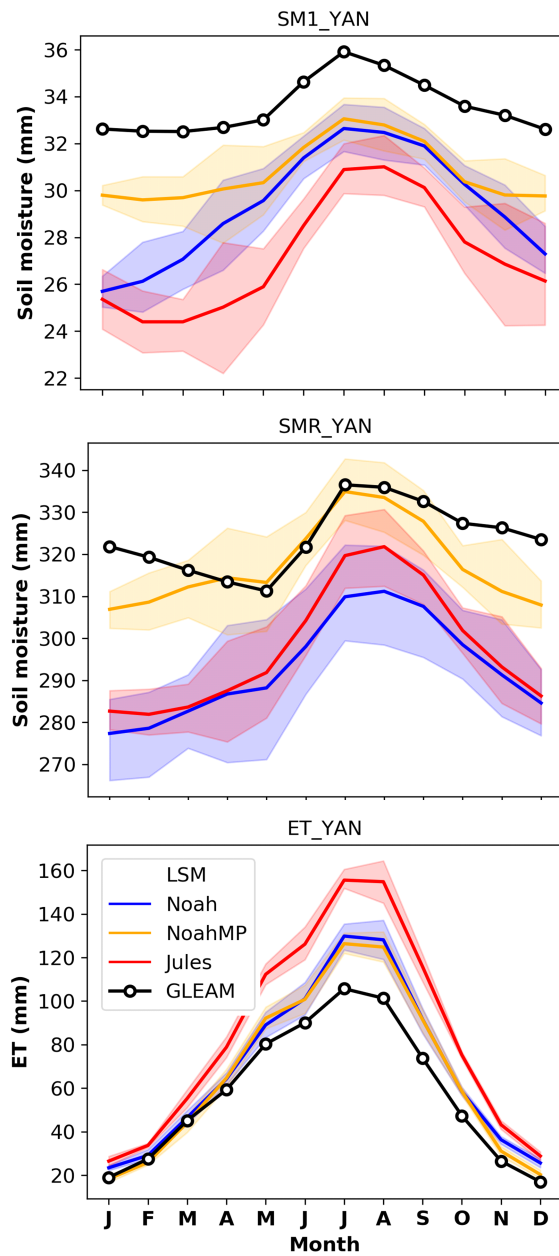


Figure 106. Monthly mean soil moisture at the first layer (top) and at the root-zone (middle) and evapotranspiration (bottom) in the Yangtze basin.

(마) 유역별 에너지수지 변동성 평가

Noah, Noah-MP, JULES 지면모형의 유역별 에너지수지(현열과 잠열) 변동성을 FluxCom 자료를 활용하여 평가하였으며, RMSE와 상관계수를 Figure 107에 도시하였다. 전체적으로 에너지 수지의 경우, 물수지 결과와는 다르게 건조한 지역에서는 상관성이 비교적 높았으나, 습윤 지역에서 예측성이 떨어지는 결과를 보였다. 잠열(Qle, Latent heat flux)의 예측성은 Noah 지면모형이 아마존 유역에서 가장 낮게 모의했으며, 양쯔강유역이나 미시시피유역에서는 3개 지면모형 모두 상관성이 매우 높게 나타났다. 현열의 경우, Noah-MP 지면모형의 양쯔강유역에서 상관성이 가장 낮았으며, 고비유역에서 3개 지면모형 모두 대체로 높은 상관성을 보였다. 전반적으로 각 유역의 RMSE 분포는 현열이 컸고, 상관성은 현열이 0.75이상으로 높은 상관성을 보였다.

잠열의 경우, 아마존유역을 제외한 모든 유역에서 3개 지면모형이 FluxCom자료와 비슷한 월별 변동성을 보였으나(Figure 108), 고비와 티벳과 같은 건조한 지역에서는 3개 지면모형이 모두 과소 모의하는 경향을 보였다. 아마존유역에서 JULES 지면모형이 다른 두 지면모형과는 다르게 과소모의 하는 결과를 보였다. 현열의 경우는 잠열과 다소 다른 월별 변동성을 보였는데, 아마존 유역에서는 JULES 지면모형이 다른 두 모형과는 다르게 과대모의하였고, 고비유역에서는 3개 지면모형 모두 과대모의 하는 경향이 나타났다. 특히, 고비유역에서는 늦은봄철과 여름철에서 과대모의하는 경향이 크게 나타났다. 티벳유역에서는 이와는 다르게 JULES 지면모형은 과소모의하는 경향을 보였고, Noah와 Noah-MP 두 지면모형의 경우 과대 모의하는 경향을 나타냈다.

에너지 성분에 대한 지면모형은 대체적으로 식생분포가 많은 아마존과 같은 습윤한 지역에서 예측성이 현저하게 떨어지는 경향을 보였는데, dynamic vegetation 모듈 등을 더욱 정교하게 개선하고 에너지 성분 분할 모듈 등도 면밀히 검토하여 개선해야 할 것으로 판단된다. 다만, 물수지와 에너지수지는 서로 영향을 주는 성분들이기 때문에, 상호작용 등을 종합적으로 살펴서 개선방안을 도출해야 할 것으로 판단된다. 또한, GloSea6 현업 기후예측시스템 예측성 향상이라는 단기적인 개선방안을 고려한다면, S2S 시간규모에서 예측성능을 향상시켜야 하므로 작물이나 식생의 성장시기와 같이 비교적 긴 시간규모와 연관성이 깊은 에너지 수지 개선은 장기적인 목표로 설정해서 그 개선방안을 도출해 나가는 게 적절할 것으로 판단된다.

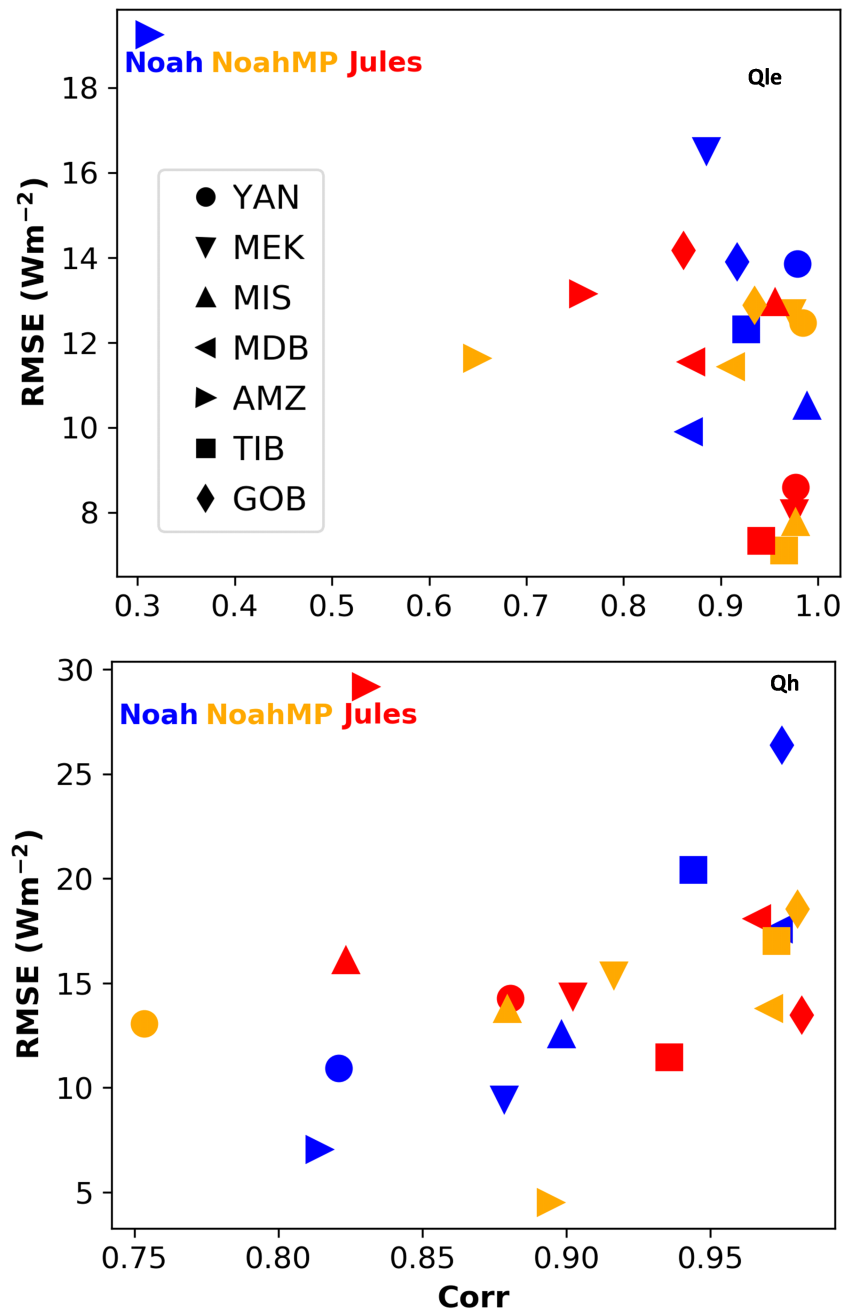


Figure 107. RMSE and correlation coefficients for Qle: Latent heat flux (top) and Qh: Sensible heat flux (bottom).

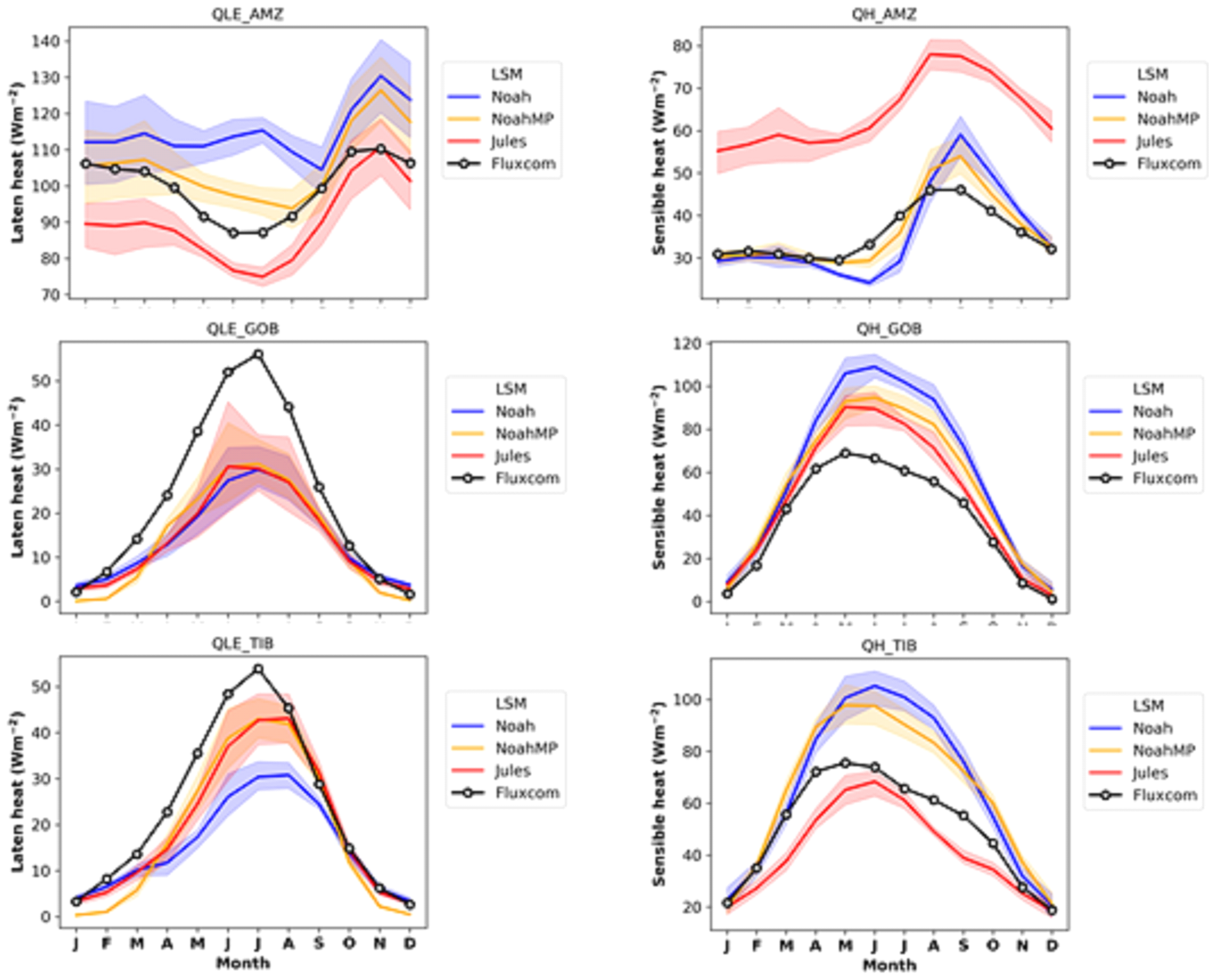


Figure 108. Monthly mean latent heat fluxes (left) and sensible heat fluxes (right). Amazon basin (top), Gobi basin (middle), and Tibetan basin (bottom).

(2) GloSea6 하천유출 특성 분석 및 개선 방안

(가) GloSea6의 하천유출모델 구조

GloSea6내에서 사용되는 하천유출모델은 TRIP으로 1°의 해상도로 구성되어 있다. 수평해상도의 하천의 흐름 정보를 고려하여 각 격자점에서의 유출량을 간단한 이류식으로 계산한다. 하천 채널은 물흐름의 방향과 연속성의 데이터로 구성되며, 주요 강의 하류에 위치하는 river mouth에서 해양으로의 방출량을 계산한다 (Figure 109).

Concept of TRIP

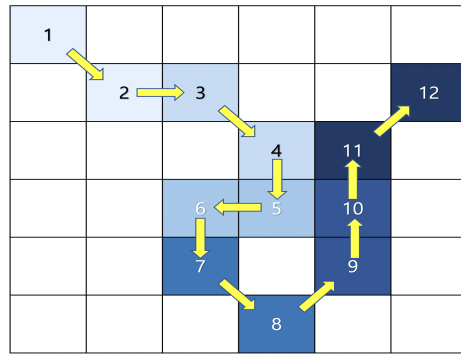


Figure 109. Concept of TRIP for calculating of river storage from river sequence and direction.

강이 존재하는 지역에서 물흐름은 다음과 같은 방정식으로 계산이 된다.

$$S^{n+1} = S^n e^{-dcdt} + (1 - e^{-dcdt}) \frac{I}{dc}$$

여기서, S 는 강흐름에 위치하는 격자내의 물용량을 말하며, 인접한 격자들로부터 흘러오는 유출량의 합으로 표현된다.

$$O = \frac{S^{n+1} - S^n}{dt} + I$$

격자내에서의 runoff를 발생시키는 항인 O 는 강에 의해 흘러가는 방출량을 선형식으로 모수화하여 계산한다. 여기서, $dc = \frac{V}{L}$ 로 효율속도 V 와 각격자 사이의 거리 L 에 의해 결정되며, 이 값에 실제 강 길이를 반영하기 위한 굽이침 정도 (사행률, meandering ratio)가 반영된다.

GloSea6내 하천유출과정은 지면과정에서 계산되는 지표 격자유량을 입력변수로 사용하여 하천 채널 자료를 ancillary로 제공 받아 하천 흐름을 계산하는 방식으로 구성되어 있다 (Figure 110). 대기 및 지면 모델의 수평해상도는 약 0.8도인 반면 하천유출모델은 1도로 구성

되어 있다. 또한 하천 방출값을 전달받는 해양모델의 해상도는 약 0.25도 정도이다. 전구적으로 주요 하천의 정보를 커버하기에는 부족하지 않지만, 지역적으로 세부적인 하천의 흐름을 모두 표현하기에는 한계가 있다. 특히 우리나라처럼 작은 지역에서는 이 해상도로 모의되는 수문정보로는 수자원 분야 및 재난·재해 등의 연구에 직접적으로 활용되기에는 어려운 측면이 있다. 따라서 여러 기관에서는 지면모델과 고해상도 하천유출모델의 결합으로 매우 고해상도의 수문정보를 산출하여 활용하고 있다. 하지만, 이러한 지역적 정보의 제공이외에도 하천유출은 해양모델로의 직접적인 영향으로 인해 대기-해양 상호작용에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져왔다. 따라서 이 연구에서는 GloSea6내에서 모의되는 하천의 유출량이 현실적으로 표현되는지를 검증하고, 현재 가지고 있는 오차의 특성이 어떠한지 알아보려고 한다.

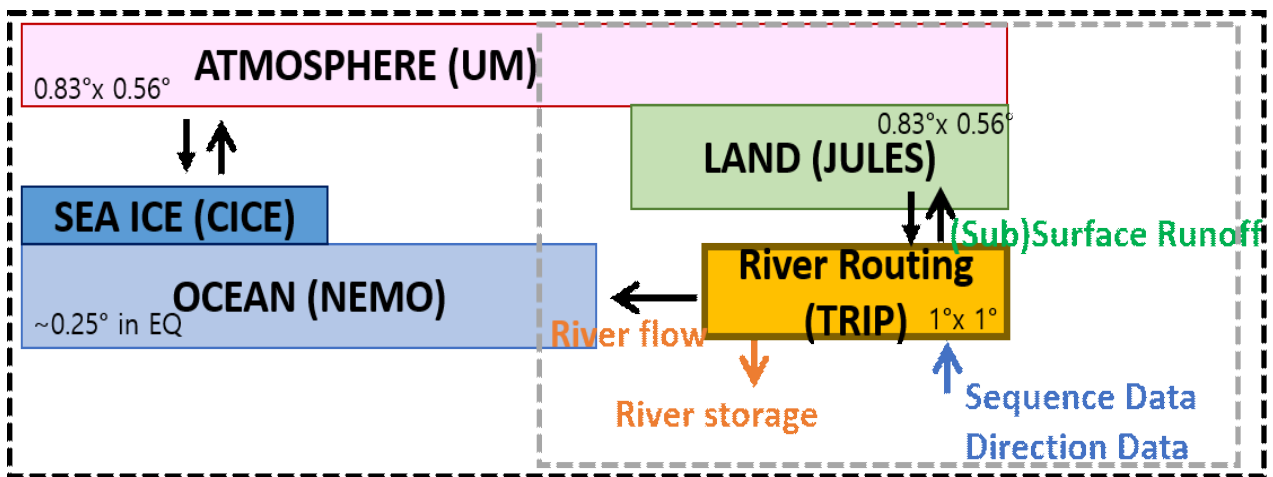


Figure 110. Schematic diagram of GloSea6 model component.

(나) GloSea6의 하천유출 특성 분석

GloSea6의 기본적인 성능을 살펴보기 위해 북반구 여름철 (JJA) 3개월 평균 강수 및 비습의 오차를 나타내었다 (Figure 111). GloSea6는 북서태평양에서 강수의 양의 오차가 두드러지게 나타나며 한반도 지역에서는 강수의 음의 오차가 나타나고 있다. 이는 GloSea5에서도 동일하게 나타난 계통적 오차이며, 적운모수화 및 미세물리 과정의 특징으로 설명될 수 있다. 또한 GloSea6는 하층 대기에서 전반적으로 매우 습윤한 대기를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 이유를 살펴보기 위해 지표의 수문량이 어떻게 모의되는지 분석하였다.

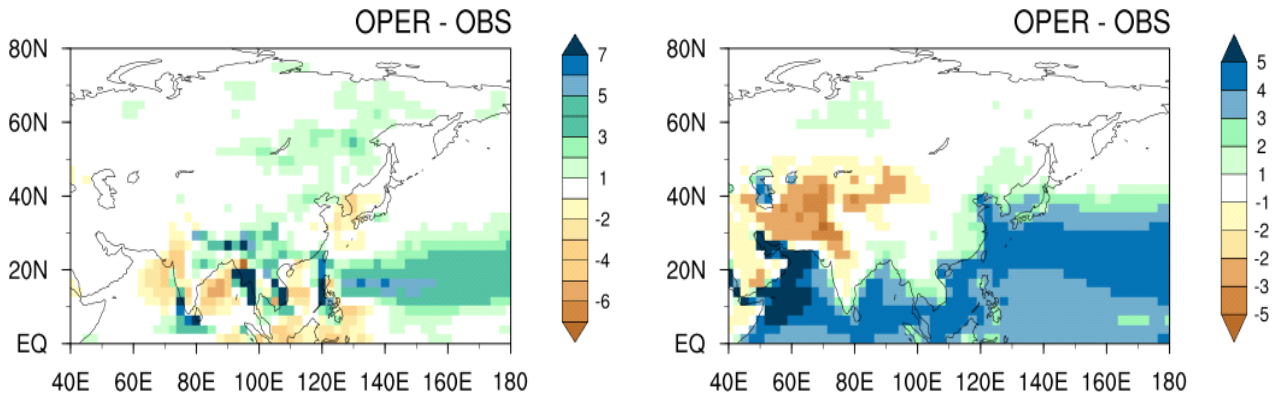


Figure 111. Distribution of difference in the surface precipitation (left) and 850hPa specific humidity (right) between the GloSea6 and observation.

Figure 112는 GloSea6로 모의된 지표 수문량의 분포와 관측과 비교한 오차의 분포를 나타내는 그림이다. 북반구 여름철 수문량은 몬순 기간임을 비추어 볼 때 강수가 많아지는 지역에서 수문양도 많이 분포하고 있음을 볼 수 있다. 관측과 비교하여 볼 때 GloSea6는 관측에서 나타내는 수문량의 패턴을 잘 모의하고 있지만, 전반적으로 건조한 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 다만 화남지역 일부 및 시베리아 일부 지역에서 습윤한 오차를 보이고 있다.

이러한 강수 및 수증기의 오차와 함께 지면에서의 수분 오차의 특징을 살펴보기 위해 GloSea6로부터 계산된 지표 수문량의 분포를 분석하였다. GloSea6에서 모의한 지표 수문량은 관측과 비교하였을 때, 관측이 나타내고 있는 기후값의 패턴을 잘 모의하고 있다. 다만, 관측은 100년 이상동안의 기후값을 나타내고 GloSea6의 기후값은 30년 남짓의 평균값이므로 절대적인 값의 비교는 어렵다고 할 수 있다. 지표 수문량의 기후값이 거의 동일하다고 가정하고 비교하였을 때, GloSea6의 결과는 비교적 건조하게 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 북반구 여름철 강수의 오차의 패턴과 연관하여 강수의 양의 오차를 가지고 있는 지역에서 유출량이 과대모의되는 것을 확인할 수 있다. 강수의 음의 오차가 나타나는 한반도 지역을 비롯하여 유라시아 대륙 전반 및 화남지역 일부에서의 과소 모의가 뚜렷함을 알 수 있다.

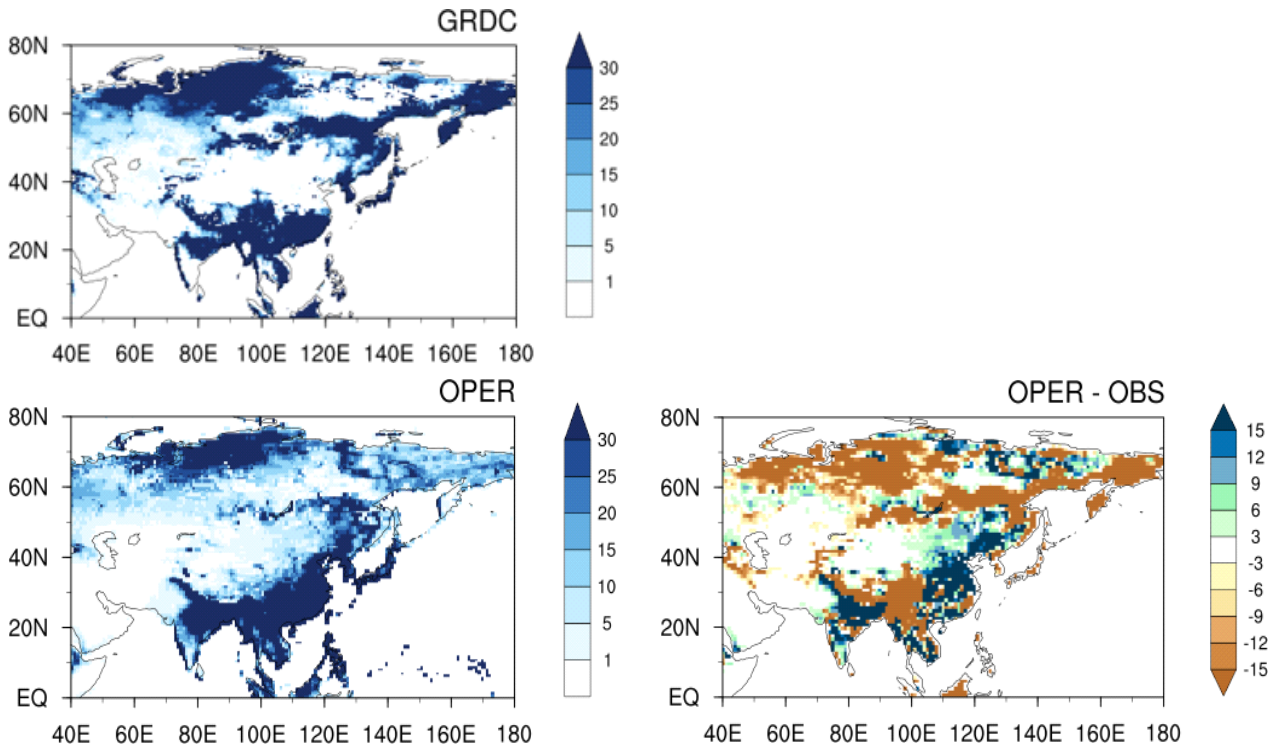


Figure 112. Distribution of the surface runoff from GRDC observation (top), GloSea6 (bottom-left) and its biases (bottom-right).

대기 모델의 격자 수문량과 더불어 강수의 오차를 살펴본 결과 한반도 지역은 건조하게 모의되고 있다. 이러한 기본적인 계통적 오차가 입력 변수로 고려되는 하천유출모델에서 모의하는 하천 유출량은 어떻게 표현되는지 살펴보고자 GloSea6내에서 모의되는 하천유출모델의 결과를 분석하였다. GloSea6에서 모의되는 하천유출량 및 해양으로 전달되는 방출량의 결과를 Figure 113에 나타내었다. 하천에 의한 수평적 흐름을 표현하는 모듈로 포함됨에 따라 주요 강의 흐름에 따라 하천 유출량이 크게 모의되며 내륙에서의 하천 유출량은 작게 모의되고 있다. 또한 주요 강에서의 흐름은 해상도에도 불구하고 전반적으로 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 해양으로 방출되는 하천방출량의 모의 결과를 살펴보면 해양과 인접한 부분에서 그 값을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 하천유출모델의 해상도로 인해 해양과 맞닿은 거의 모든 지점에서 그 값을 가지고 있다. 특히 한반도 지역에서는 한강, 낙동강 두 지역에서 큰 값을 가지고 있음이 예상되지만, 실제 모의된 결과를 살펴보면 거의 모든 지역에서 담수가 해양으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 특히 한반도에서 가장 큰 유출값을 가지고 있는 곳은 한강 유역으로 3개의 격자로 그 유출이 모의되고 있다.

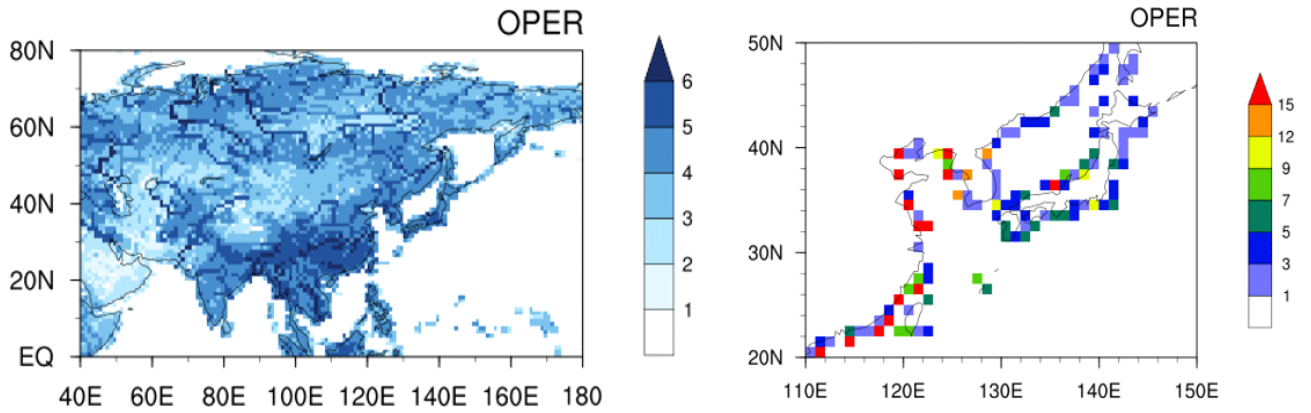


Figure 113. Distribution of the surface river storage and outflow from GloSea6.

한강 유역에서 방출되는 담수의 양이 실제로 관측과 어느정도 차이가 나는지 살펴보기 위해 유역별 관측값을 제공하는 GRDC의 하천 방출량과 GloSea6에서 모의되는 하천 방출 값을 지역 평균하여 연도별로 비교하여 제시하였다 (Figure 114). 실제 한강이 포함되는 유역의 면적 및 모델내 한강이 포함되는 격자를 산정하여 면적에 대한 효과를 평균하여 두 값을 비교해 본 결과, GloSea6는 대부분의 연도에서 방출되는 값을 과대 모의하고 있다. 이러한 결과의 원인 중 하나로 예상할 수 있는 것은 하천유출모델의 해상도라고 할 수 있다. 실제 GloSea6에서 포함되어있는 하천 유출 모델인 TRIP은 매우 간단한 하천의 흐름만을 계산하고 있어 세세한 지역에서의 하천 흐름을 모의하기에는 한계가 있다. 여기에 낮은 해상도는 실제 한반도의 대부분의 지역에서 한강의 흐름을 포함하게 되며, 그 격자내에 해당하는 하천의 유량을 해양까지 전달하게 된다. 따라서 격자내 하천이 흐르지 않는 곳이 존재하여도 모델내에서는 격자 전체에 하천이 흐르는 것으로 계산되어 실제 하천유역의 유역평균 유량을 계산할 경우 과도하게 모의될 수 밖에 없는 현실이다.

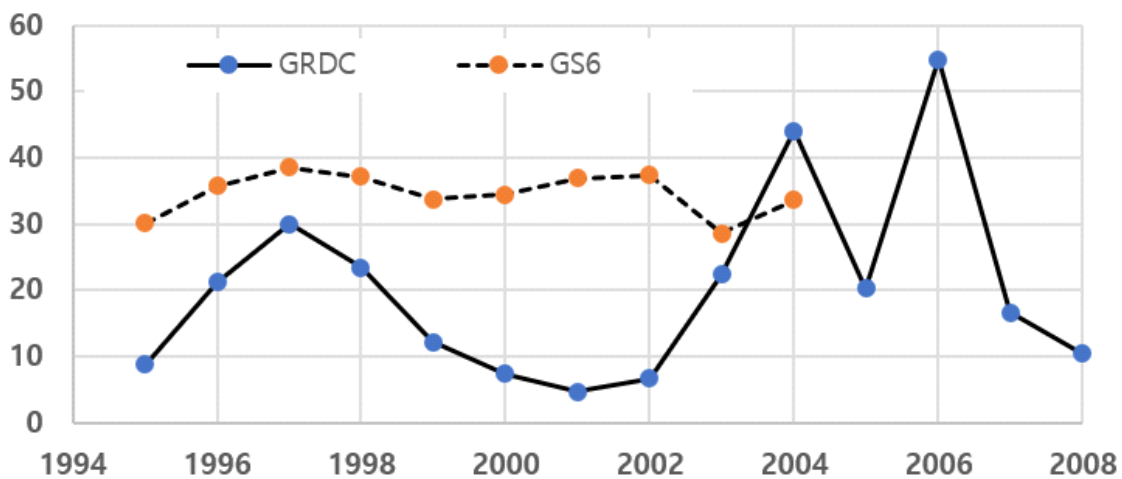


Figure 114. Region-averaged discharge over Han River in Korean peninsula from GloSea6 and observation.

담수는 염분의 함량이 낮은 물의 의미하며, 해수와 담수의 밀도 차이로 인하여 혼합비, 염분의 변화 등에 영향을 주게 된다. 또한 해수로 유입되는 담수는 해양의 연직 흐름을 직접적으로 변화시킬수 있고, 이는 결국 대기-해양 상호작용을 변화 시킬수 있기 때문에 대기-해양 모델이 포함된 기후예측모델에서는 매우 중요한 변수로 작용할 수 있다. 하천유출모델에서 방출되는 하천용량은 결국 해양모델내 담수로 직접적으로 전달되게 된다. GloSea6에서 과대모의되는 하천 방출량은 해양모델내에 과도하게 담수를 전달하고 이는 해수 표면에서 염분의 함량을 감소시킨다. 해양 염도의 연직 구조의 변화는 결국 해양 혼합층을 얇게 만들어 실제적으로 심층해수를 해양 표면으로 적게 가져와 결국 높은 해수면온도 오차에 기여하게 된다 (Figure 115).

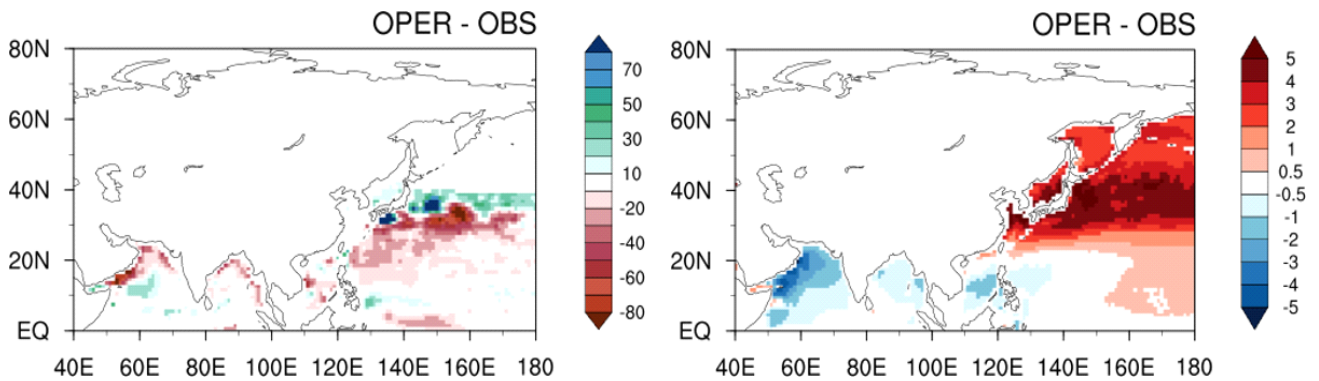


Figure 115. Distribution of the depth of the 20C isotherm (left) and sea surface temperature (right) from GloSea6.

(다) GloSea6의 하천유출 개선 방안

앞서 살펴본 결과에 따르면 GloSea6는 상대적으로 간단한 하천유출모델을 사용하고 있으며, 모델내에서 모의되는 하천유출량은 과대모의하고 있음을 알 수 있다. 다양한 이유가 있을 수 있지만, 하나의 이유로 다소 성긴 해상도를 들 수 있다. 특히 한반도 지역의 주요 하천을 표현하기에 현재 하천유출모델의 해상도는 너무 크다고 할 수 있다. 간단한 하천의 흐름만을 모의하고 있기 때문에 성긴 해상도는 실제에 비해 과도하게 담수의 유출을 가져오게 되고, 이는 해양 혼합층에 영향을 주어 결국 한반도 주변 지역에서 양의 해수면 온도 오차에 기여하게 된다. 보다 정확한 하천 흐름을 모의하고 대기-지면-해양 상호작용의 개선을 가져오기 위해서는 정교하고 현실적인 하천유출모델을 접합하는 것이 가장 바람직하겠으나, 현재 현업에서 사용중인 GloSea6에 간단하고 직접적인 개선을 위해서 우선적으로 하천유출모델의 해상도를 높여 해양으로 유출되는 담수의 양을 줄여줄 수 있을 것이다. 또한 해상도를 변경하면 하천의 흐름이 달라질 수 있기 때문에 유속 및 사행률 등의 변수들의 최적화 과정 역시 필요하다고 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

가. 국가 기후예측모델 공동개발(K-R20) 기반체계 구축

이 연구는 국가 기후예측모델 공동개발 프로세스에서 연구개발 성과의 효과적 현업화를 위해 우리나라 실정에 맞는 단계와 요소로 체계를 구조화하는 것을 제안하고, 공동개발 연구 환경에서의 주요 개선 방안을 제안한다. 주요 제안 내용은 다음과 같다.

☀️ 공동개발 환경 개선 방안 제안

1

연구개발협의체 기능 활성화

연구개발협의체 관련 제도 제정 및 정비

2

연구개발 전산 환경 개선

기상청 슈퍼컴퓨터 접근성 개선
현업화 시급성을 고려한 자원 할당
커뮤니티 모델 개선

3

기술전수의 현실화

공식적인 절차나 과업 내용 마련

4

국내 기후모델링 역량 강화

모델링 관련 세미나, 사용자 교육 강화
기후모델 개발 관련 미래 인력 양성

5

협력 커뮤니티 간 소통 강화

glair 활성화
정기적 워크숍, 성과발표회 개최
연구 성과 공유 · 확산 · 홍보 강화

환경 측면에서의 제안

구조 측면에서의 제안

공통개발 체계 구조화 제안



단계별 개선점 제안

1

현업화 기획

연구개발협의체 정비
연구개발사업 운영 개선

2

연구 개발

현업시스템 기반의 개발
실험과 검증에 대한 기준 활용
정보 및 개발 결과 공유

3

현업화 테스트베드

실험과 현업후보군 선정 과정 등에 대한
기준 마련
현실적인 문제 해소 노력

4

현업화 실행

현업화 평가 범위 논의
환류 과정 보완
기록 관리

나. 표준 평가체계 정립

모델 개발에 따른 기후예측모델의 예측성능을 통합적으로 평가하고, 현업화 후보군 선정을 위한 객관적인 근거자료를 제공하기 위한 표준 성능·진단 평가체계가 구축되었다. 표준 평가프레임은 예측유형에 따른 정량적인 성능검증 파트와 프로세스 기반의 기후변동성 진단평가 파트로 구성하였다. 표준 성능평가 프레임에서는 예측유형에 따라 단정예보와 확률예보의 정량적 평가 지표들로 구성된 메트릭을 각각 구성하였고, 다변수 통합평가라는 최신 평가 방법론을 적용하여 기후예측모델의 구조적 오차와 예측품질 개선 정보를 제공하도록 하였다. 확률예보 표준성능평가의 메트릭은 확률예보의 정확도, 유용성, 활용성을 평가할 수 있는 지수로 구성하였고, 앙상블 표준진단평가의 메트릭은 앙상블의 정확도, 유용성, 불확실성을 진단할 수 있게 신뢰도 지수, 에러-스프레드 관계지수, 불확실성 유도 패턴으로 구성하였다. 표준 진단평가 프레임에서는 계절내~계절 시간규모에서 중위도 기후예측에 영향을 주는 주요 기후 인자들 (ENSO, NJO, SIC, 몬순)의 진단 메트릭 구성하여 모델의 취약점을 제시하고 개선방향을 제공하고자 하였다. 이렇게 구성된 표준 성능·진단 평가 메트릭은 각 평가 항목의 예측성능을 정량화하여 객관화된 스코어카드의 형태로 표출하고자 하며, 이는 모델 개발에 따른 기준모델 대비 예측성능 개선율로 제시하고자 하였다. 실질적으로 본 통합평가 프레임이 현업화 후보군 선정을 위해 활용되기 위해서는 성능·진단 평가 메트릭의 필수요소에 대한 전문가 자문 및 실무자 동의가 수반되어야 하며, 현업화 의사결정에 사용될 스코어카드의 개선을 위해 실무자와의 협의가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

표준 성능·진단 평가체계의 구축은 총 3년의 과업으로 계획되었으며, 올해는 표준평가체계의 프레임을 구조화하고 모델 개발에 따른 기후예측모델의 통합적인 평가체계의 방법론을 제시하였다. 또한 제시된 방법론에 따라 표준성능평가체계의 기본적인 틀을 구축하였으며 진단평가체계 중 ENSO 진단 메트릭의 일부를 구축하였다. 표준 성능평가 프레임을 GloSea6에 적용해 본 결과, 개발된 모델(GloSea6)은 현업모델(GloSea5)에 비해 강수를 제외한 대부분의 변수들에서 모델이 가지는 구조적 오차를 감소시키며, 전구 예측성능 또한 개선하였다. 동아시아 영역에서의 모델의 구조적 오차 역시 강수를 제외한 대부분의 변수들에서 감소하는 결과를 보였으며, 특히 여름철 기후 성능이 뚜렷이 향상됨을 확인하였다. 그러나 동아시아 기후의 경년변동성은 관측대비 다소 강하게 모의하며 이것이 다변수 통합기술 지수의 감소에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 삼분위 확률예보의 평가 결과, UKMO의 GloSea6는 GloSea5에 비해 가져올 수 있는 성능 개선의 정도가 일반적으로 약 10% 이하로 나타났으며, 리드타임과 계절, 변수에 따라 10% 미만으로 감소하는 경우도 있었다. 앙상블 진단평가 결과, GloSea 모델의 특징인 동아시아 기온 음의 바이어스는 GloSea6에서도 그 경향이 남아 있었고, 이는 음의 AO와 관련된 WACE 패턴의 영향으로 볼 수 있다. 음의 AO는 유라시아 눈덮임에 크게 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있어 추후 GloSea 모델에서의 지면-대기 상호작용, 북극 구름 모수화에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보여진다. ENSO 진단평가 결과 GloSea6는 ENSO 발생의 배경 기후장의 구조적 오차는 오히려 증가하는 경향을 보이나, ENSO의 시·공간 모의 성능은 개선되는 결과를 보였고 원격상관 모의 성능의 개선점은 미비하게 나타났다.

기후예측모델의 통합적인 평가체계를 구축하기 위해서 Figure 2.1에서 제시한 표준 진단평가체계의 주요 기후 지수(ENSO, MJO, SIC, 몬순)의 진단 메트릭을 순차적으로 개발하여야 하

며, 실무자와의 협의를 통한 평가체계의 개선/고도화 작업이 수반되어야 할 것이다. 또한 동아시아 예측성능 개선 기술을 평가하기 위해서는 실제 현업 모델(KMA GloSea6)의 과거예측자료를 사용하여 국가기후예측모델의 통합적인 예측성능을 제시하고, 테스트베드에서 수행된 준현업실험 자료를 사용하여 현업모델 대비 예측성능 향상의 척도를 제시하여야 할 것이다. 이는 현업화 후보군 선정을 위한 가이드선의 기준 자료로 사용될 수 있을것이라 생각한다.

다. 테스트베드 : 해빙물리과정 개선 기술 적용

학계에서 개발된 기술들을 현업에 적용하기 위한 가교 역할을 하는 테스트베드에서는 2020년부터 개발되고 있는 「해빙 물리 과정에 의한 계절내 규모 기후 예측 기술 개발」을 적용/평가하였다. 테스트베드 실험의 디자인은 해당 과제를 수행하고 있는 연구팀 및 현업을 수행하고 있는 과학원과의 논의를 통해 결정되었으며, 기술개발에 집중되어 있는 학계의 실험과 달리 다양한 기후조건에서 예측기술들의 효과를 검증하기 위해 준현업 환경에서 이루어졌다. 국가 기후예측모델은 겨울 지표 기온을 낮게 모의하는 계통적 오차를 보이는 것으로 알려져 있는데 해빙 물리과정의 눈 반사율을 조정함으로써 이 오차를 개선하고자 하였다. R&D 연구결과를 바탕으로 해빙 물리 과정 중 동아시아 기온 및 해빙 면적에 영향을 크게 주는 3가지 파라미터 중 visible snow albedo (이하 눈 반사도)를 선정하여 2 세트의 민감도 실험을 수행하였으며, 민감도 실험들은 현재 현업 모형에서 0.98로 설정되어 있는 눈 반사도를 각각 10%, 20% 감소시켜 동아시아 기후에 미치는 영향을 살펴보았다. 눈 반사율을 감소시킨 민감도 실험 결과들은 현업과 유사한 오차장을 보여 기후값 자체에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 이는 추후 해당 기술이 현업에 적용될 때 중요한 요소로 기후값 자체가 크게 변하면 과거의 현업과 불연속성이 커지므로 기후장 자체의 변화는 크지 않아야 한다. 눈 반사도를 조정함으로써 기후예측모델의 지표 온도 오차가 감소하였는데, 이와 같은 개선 효과는 선행 시간이 길어질수록 뚜렷하게 나타났다. 반면 해빙 농도 및 면적에서의 개선은 뚜렷하지 않았는데, 일사량이 많지 않아 눈 반사율 변화에 의한 직접적인 효과가 크지 않기 때문이라 생각된다. 극 지역의 해빙에 미치는 효과는 뚜렷하지 않았으나, 겨울철 중위도 기온에 영향을 주는 것으로 알려져 있는 극과 중위도의 원격상관의 모의 성능에는 개선이 나타났다. 관측에서 나타난 바렌츠-카라해와 유라시아 지역 기온과의 음의 상관관계가 나타나는데 반해 현업 기후값에서는 동아시아에서의 기온 상승 현상이 모의되지 않았다. 눈 반사도를 10% 감소시킨 실험은 관측에서 나타난 상관관계를 유사하게 재현했으며, 이와 관련된 순환장 또한 모의하였다. 동시베리아-척치해와 북미와의 원격상관 또한 관측과 유사한 강도와 유지기간을 보이는 것으로 나타나 눈 반사도의 조정으로 인한 개선 효과를 확인할 수 있었다.

타 계절에서의 눈 반사도 조정에 의한 개선효과를 검증하기 위해 여름에 대한 눈 반사도를 10% 감소시킨 민감도 실험을 추가로 수행하였다. 1월 출발 실험과 달리 GloSea6는 매달 기온의 오차 분포와 성향이 다른 것으로 나타났으나, 2월-4월 결과와 유사한 개선 효과가 있는 것을 확인하였다. 선행시간이 2달 이상일 때 지표 온도 예측성이 향상되었으며, 해빙 면적 및 농도 등에 미치는 직접적인 개선 효과는 없었다. 오히려 해빙 측면에서는 과소모의 경향이 심해져 오차가 커지는 측면을 보였다. 그러나, 여름철 중요한 현상인 강수 모의에 있어서 강수대

가 위치하는 지역에서의 건조 오차가 개선되는 효과가 있어 눈 반사도 조정이 여름 기후 모의에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 보였다.

테스트베드의 수행을 통해 학계에서 개발된 기술의 현업 적용 가능성을 과학적인 측면과 기술적인 측면에서 평가하고자 하였으며, 준현업 실험에서 검증된 결과들은 현업 주체와 공유되어 추후 현업 예측성 개선에 기여할 수 있을 것이다.

라. 지면 모델 개선 방안 제시

지면 모델 개선 연구결과에서 전반적으로 3개 지면모형의 결과에서 에너지 성분 보다는 수문성분의 예측성이 떨어지고, 대체적으로 건조지역은 수문성분이 습윤지역은 에너지성분 예측성이 떨어지는 경향을 보였다. 또한, 건조한 지역은 스핀업기간이 매우 길며, 수문성분 예측성도 다른 유역에 비해 현저히 떨어지는 경향을 나타냈다. 이러한 연구결과와 GloSea6의 시간 규모 등을 고려하여 JULES 지면모형의 개선방안에 대해서는, 단기적으로 한반도와 근접해 있고 한반도 기후와도 관련이 큰 양쯔강유역의 표층과 근역층 토양수분 예측성 향상을 위해 지하수 모듈 개선을 제안하였다.

지하수는 전구규모에서 수문순환에 매우 중요한 성분으로 현재 JULES는 TOPMODEL 기반 기저유출과 지하수위 모의하는 지하수모듈을 사용하고 있다. 그러나 현재 JULES 지면모형이 채택하고 있는 지하수모듈은 매개변수 보정이 필요하기 때문에 미계측 지역 적용 한계가 있다. 또한 이러한 매개변수와 관련한 토양특성이 깊이와 매우 상관성이 크다는 가정하에 모듈이 개발되어, 비교적 복잡한 알고리즘에 비해 1~2개 토양특성이나 매개변수에 기반하여 모의하는 단점이 있다. 보정없이 이러한 의존성이 높은 매개변수를 사용할 경우, 예측성이 현저히 떨어질 위험성이 매우 크다. 따라서 보정 불필요하여 미계측 유역 적용이 용이하고, 필수자료가 매우 간단하며, 모듈화 되어 있고, 계산비용 또한 작은 장점이 있는 GrUB (Tashie et al., 2022)를 활용하여 JULES 지하수 모듈 개선을 제안하였다.

둘째, GloSea6내에서 TRIP은 지면모델로부터 계산된 격자유량을 입력자료로 가져오며, 각 격자에서의 하천 유출량을 계산하여 최종적으로 해양모델로 방출량을 전달하고 있다. 최근에는 고해상도의 수문정보를 포함하는 다양한 하천유출모델이 개발되었지만, GloSea6에 포함된 TRIP은 다소 간단한 저류방정식으로 구성되어 고해상도의 자연하천을 정확하게 묘사하기에는 한계가 있다. 좀 더 복잡하고 정교한 하천유출모델이 결합되는 것이 좋겠지만, 그 전에 TRIP으로 모의되는 GloSea6의 하천유출의 특성을 파악하고 현실적인 개선 방안에 대해 논의해보고자 하였다. 결과를 살펴보면, GloSea6는 상대적으로 간단한 하천유출모델을 사용하고 있으며, 모델 내에서 모의되는 하천유출량은 과대모의하고 있음을 알 수 있다. 다양한 이유가 있을 수 있지만, 하나의 이유로 다소 성긴 해상도를 들 수 있다. 특히 한반도 지역의 주요 하천을 표현하기에 현재 하천유출모델의 해상도는 너무 크다고 할 수 있다. 간단한 하천의 흐름만을 모의하고 있기 때문에 성긴 해상도는 실제에 비해 과도하게 담수의 유출을 가져오게 되고, 이는 해양 혼합층에 영향을 주어 결국 한반도 주변 지역에서 양의 해수면 온도 오차에 기여하게 된다. 보다 정확한 하천 흐름을 모의하고 대기-지면-해양 상호작용의 개선을 가져오기 위해서는 정교하고

현실적인 하천유출모델을 접합하는 것이 가장 바람직하겠으나, 현재 현업에서 사용중인 GloSea6에 개선을 위해서 간단하고 직접적인 효과를 줄 수 있는 방법으로 하천유출모델의 해상도를 높여 해양으로 유출되는 담수의 양을 줄이는 것을 제안할 수 있다. 또한 해상도를 변경하면 하천의 흐름이 달라질 수 있어 유속 및 사행률 등의 변수들의 최적화 과정 역시 필요하다고 할 수 있다.

사사

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다. 국가 기후예측모델 공동개발 체계 개선을 위해 함께 고민해주신 연구개발허브의 모든 구성원들에게 감사드립니다.

References

- 김가영, 김해정, 신선희, 이윤영, 전종안, 정여민, 함수련, 2021: 전구기후모델의 현업예측 평가 및 강수모수화/결합초기화 진단, *APEC 기후센터 연구보고서 2021-*, APEC 기후센터.
- 김상욱, 2019: *Optimal ensemble size for Sub-seasonal to Seasonal (S2S) prediction system*. 석사학위논문, 지구환경과학부, 서울대학교, 41 pp.
- 현유경, 이조한, 신범철, 최유나, 김지영, 이상민, 지희숙, 부경은, 임소민, 김혜리, 류영, 박연희, 박형식, 추성호, 현승환, 황승언, 2022: 기상청 기후예측시스템(GloSea6)-Part 2: 기후모의 평균 오차 특성 분석. *Atmosphere*, **32**, 87-101.
- Bayr, T., C. Wengel, M. Latif, D. Dommenges, J. Lübbecke, and W. Park, 2019: Error compensation of ENSO atmospheric feedbacks in climate models and its influence on simulated ENSO dynamics. *Climate Dyn.*, **53**, 155-172, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4575-7>.
- Bellenger, H., E. Guilyardi, J. Leloup, M. Lengaigne, and J. Vialard, 2014: ENSO representation in climate models: From CMIP3 to CMIP5. *Climate Dyn.*, **42**, 1999-2018, <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1783-z>.
- Best, M.J., Pryor, M., Clark, D.B., Roonery, G.G., Essery, R.L.H., Menard, C.B. et al., 2011: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description-Part 1: Energy and water fluxes, *Geoscientific Model Development*, **4**, 677-699.
- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 163-172, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2).
- Dirmeyer P. A., and J. Shukla, 1993: Observational and modeling studies of the influence of soil moisture anomalies on atmospheric circulation (Review). In J. Shukla, Ed., *Prediction of interannual climate variations, NATO ASI Series, vol 6, Springer*, 1-23, doi:10.1007/978-3-642-76960-3_1.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grummann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational Mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Eyring, V. et al., 2019: Taking climate model evaluation to the next level, *Nat. Clim. Change*, **9**, 102-110, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0355-y>.
- Ferranti, L., C. Susanna, and J. Martin, 2015: Flow-dependent verification of the ECMWF

- ensemble over the Euro-Atlantic sector. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **141**, 916–924, <https://doi.org/10.1002/qj.2411>.
- Guilyardi, E., A. Capotondi, M. Lengaigne, S. Thual, and A. T. Wittenberg, 2020: *ENSO modelling*: History, progress and challenges. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate, *Geophys. Monogr.*, Vol. 252, Amer. Geophys. Union, 199–226, <https://doi.org/10.1002/9781119548164.ch9>.
- Kim, H., J. Lee, Y.-K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021: The KMA Global Seasonal Forecasting System (GloSea6) – Part 1: Operational System and Improvements. *Atmosphere*, **31(3)**, 341–359, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.3.341>.
- Ham, S., S.-Y. Hong, Y. Noh, S.-I. An, Y.-H. Byun, H.-S. Kang, J. Lee, and W.-T. Kwon, 2012: Effects of freshwater runoff on a tropical pacific climate in the HadGEM2. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 457–463, doi:10.1007/s13143-012-0041-3.
- Harding, R. J., G. P. Weedon, H. A. J. van Lanen, and D. B. Clark, 2014: The future for global water assessment. *J. Hydrology*, **518**, 186–193, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.014.
- Hersbach, H., B. Bel, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee, J.-N. Thépaut, 2019: ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 10.24381/cds.6860a573.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee, J.-N. Thépaut, 2018: ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, 10.24381/cds.adbb2d47.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, J. Susskind, 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations. *J. Hydrometeor.*, **2(1)**, 36–50.
- Hyun, Y.-K., J. Lee, B. Shin, Y. Choi, J.-Y. Kim, S.-M. Lee, H.-S. Ji, K.-O. Boo, S. Lim, H. Kim, Y. Ryu, Y.-H. Park, H.-S. Park, S.-H. Choo, S.-H. Hyun, and S.-O. Hwang, 2022: The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6) – Part 2: Climatological Mean Bias Characteristics. *Atmosphere*, **32(2)**, 87–101, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2022.32.2.087>.
- Jung, M., S. Koirala, U. Weber, K. Ichii, F. Gans, G. Camps-Valls, D. Papale, C. Schwalm, G. Tramontana, and M. Reichstein, 2019: The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes, *Scientific Data*, **6**, **74**, <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0076-8>.
- Kim, S.-W., H. Kim, K. Song, S.-W. Son, Y. Lim, H.-S. Kang, and Y.-K. Hyun, 2018: Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Prediction Skills of GloSea5 Model: Part 1. Geopotential

- Height in the Northern Hemisphere Extratropics Atmosphere. *Korean Meteorological Society*, **28**(3), 233–245, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.3.233>.
- Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min, and S.-W. Son, 2015: Two distinct influence of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geoscience*, DOI: 10.1038/NGEO2517.
- Kumar, S. V., C. D. Peters-Lidard, Y. Tian, P. R. Houser, J. Geiger, S. Olden, L. Lighty, J. L. Eastman, B. Doty, P. Dirmeyer, J. Adams, K. Mitchell, E. F. Wood, J. Sheffield, 2006: Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling. *Environmental Modelling and Software*, **21**, 1402–1415.
- Landerer, F. W., and S. C. Swenson, 2012: Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, **48**, W04531, doi:10.1029/2011WR011453.
- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0).
- MacLachlan, C., A. Arribas K. A. Peterson A. Maidens D. Fereday A. A. Scaife M. Gordon M. Vellinga A. Williams R. E. Comer J. Camp P. Xavier and G. Madec, 2015: Global seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**(689), 1072–1084, <https://doi.org/10.1002/qj.2396>.
- MacLeod, D., C. O’ Reilly, T. Palmer, and A. Weisheimer, 2018: Flow dependent ensemble spread in seasonal forecasts of the boreal winter extratropics. *Atmos Sci Lett.*, **19**(5), <https://doi.org/10.1002/asl.815>.
- Martens, B., D. G. Miralles, H. Lievens, R. van der Schalie, R. A. M. de Jeu, D. Fernandez-Prieto, H. E. Beck, W. A. Dorigo, and N. E. C. Verhoest, 2017: GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, **10**, 1903–1925.
- Meehl, G. A., Moss, R., Taylor, K. E., Eyring, V., Stouffer, R. J., Bony, S., and Stevens, B. 2014: Climate Model Intercomparisons: Preparing for the Next Phase, *EOS T. Am. Geophys. Un.*, **95**, 77–84, <https://doi.org/10.1002/2014EO090001>.
- Meier, W. N., F. Fetterer, A. K. Windnagel, and S. Stewart. 2021. NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 4. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center <https://doi.org/10.7265/efmz-2t65>.
- Merryfield, W.J., Baehr, J., Batt?, L., Becker, E.J., Butler, A.H., Coelho, C.A., ... & Yeager, S. 2020: Current and emerging developments in subseasonal to decadal prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **101**(6), E869–E896.

- Monache, L. D., J. P. Hacker, Y. Zhou., and X. Deng., 2006: Probabilistic aspects of meteorological and ozone regional ensemble forecasts. *J. Geophys. Res.*, **111**, D24307, <https://doi.org/10.1029/2005JD006917>.
- Niu, G.-Y., et al. 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research*, **116**, D12109, doi: 10.1029/2010JD015139.
- Planton, Y., E. Guilyardi, A. T. Wittenberg, J. Lee, P. J. Gleckler, T. Bayr, S. McGregor, M. J. McPhaden, S. Power, R. Roehrig, A. Voldoire, 2021: Evaluating El Niño in climate models with the CLIVAR 2020 ENSO metrics package. *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi: 10.1175/BAMS-D-19-00337.1.
- Ropelewski, C. F., and M. S. Halpert, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1606–1626, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2).
- Tashie, A., Pavelsky, T., and Kumar, M., 2022: A calibration-free groundwater module for improving predictions of low flows. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030800.
- Taylor, K. E., 2001 : Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *J. Geophys. Res.*, **106**, 7183–7192.
- Van den Hoof, C., P. L. Vidale, A. Verhoef, and C. Vincke, 2013: Improved evaporative flux partitioning and carbon flux in the land surface model JULES: Impact on the simulation of land surface processes in temperate Europe. *Agric. Forest Meteorol.*, **181**, 108–124. doi:10.1016/j.agrformet.2013.07.011.
- Wang, B., B. Xiang, JY. Lee, 2013: Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc Natl Acad Sci.*, **110**, 2718–2722.
- Xu, Z., Han, Y., and Fu, C. 2017: Multivariable integrated evaluation of model performance with the vector field evaluation diagram, *Geosci. Model Dev.*, **10**, 3805–3820, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3805-2017>.
- Yang, Z.-L., G.-Y. Niu, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, K. Manning, D. Niyogi, M. Tewari, and Y. Xia, 2011: The Community Noah Land Surface Model with Multi-Parameterization Options (Noah-MP): 2. Evaluation over Global River Basins. *J. Geophysical Research*, doi:10.1029/2010JD015140.
- Yilmaz, T.M., Anderson, M.C., Zaitchik, B., Hain, C.R., Crow, W.T., Ozdogan, M., Chun, J.A., and Evands, J., 2014: Comparison of prognostic and diagnostic surface flux modeling approaches over the Nile River basin. *Water Resources Reserach*, **50**, 386–408.

- Zebiak, S. E., and M. A. Cane, 1987: A model El Niño–Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2262–2278, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<2262:AMENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<2262:AMENO>2.0.CO;2).
- Zhang, L., L. Wu, and J. Zhang, 2011: Coupled ocean–atmosphere responses to recent freshwater flux changes over the Kuroshio–Oyashio extension region. *J. Climate*, **24**, 1507–1524.
- Zhang, M.-Z., Z. Xu, Y. Han, and W. Guo, 2021: An improved multivariable integrated evaluation method and tool(MVIETool) v1.0 for multimodel intercomparison. *Geosci. Model Dev.*, **14**, 3079–3094, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3079-2021>.
- Zhu, Y., 2005: Ensemble Forecast: A new approach to uncertainty and predictability. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 781–788, <https://doi.org/10.1007/BF02918678>.

부록 A. 국가 기후예측모델 공동개발 용어 정리

| 용어 | 개념 |
|------------|--|
| 국가 기후예측시스템 | 기상청 장기예보서비스 지원을 목적으로 영국으로부터 도입하여 현업에 운영중인 전지구 기후예측시스템(GloSea6) |
| R2O | research to operations, 연구 성과의 현업으로의 전환 |
| K-R2O | 기후예측 기술의 실용화를 위한 국가 기후예측시스템 공동개발 |
| 연구개발허브 | 현업 모델 및 운영 시스템의 공동 개발에 참여하는 학계와 산업계의 전문가 그룹(기후응용R&D 등 장기계속사업)을 포함하는 연구 개발 공동 협력 그룹 |
| 협업 클라우드 | 공동개발 협력을 체계화하고 신속한 현업화를 도모하기 위해 마련된 웹기반 형상 및 이력관리 시스템과 공동 분석서버, 자료공유 스토리지와 같은 하드웨어적인 측면의 플랫폼 |
| 공동개발플랫폼 | 기후예측 분야 연구개발 현황, 문제점 해결을 위한 표준화된 개발 플랫폼. 연구개발을 위한 저장소 관리, 공통 OS 및 컴파일러, 라이브러리와 같은 소프트웨어적인 측면의 플랫폼 |
| 연구개발협의체 | 기상청 현업 기후예측시스템의 예측성향상을 위해 연구개발 사업 관련기획, 추진, 평가, 관리에 관한 사항을 협의 조정하는 기구로 사업 성과물의 현업화가 원활하게 추진될 수 있도록 종합적으로 지원하고, 기후실무협력회의 및 현업화 심의위원회에 R&D 통합, 확대를 추진함 |
| 현업화 테스트베드 | 국가 기후예측모델 개선을 위해 개발된 기술을 인계받아 현업과 동일한 환경에서 실험을 수행한 뒤 해당 기술이 현업으로 전환될 수 있는지 여부를 평가 |

부록 B. 연구개발허브 의견수렴을 위한 설문조사지



미래지역 기후혁신 정보서비스의 중심



10 중 1 섹션

국가 기후예측모델 공동개발 프로세스 개선을 위한 설문조사

안녕하십니까?

APEC기후센터에서는 “국가 기후예측모델 개선 및 공동개발 성과 진단, 평가 체계 구축” 과제를 수행중입니다. ‘국가 기후예측시스템 공동개발’에 참여하시는 ‘연구개발허브’ 구성원들 대상으로 진행하는 본 조사는 「국가 기후예측시스템 공동개발 프로세스 개선을 위한 설문 조사」이며, 공동 개발에 대한 허브 구성원들의 인식을 파악하고, 의견 수렴을 통해 개선 방안을 마련하고자 실시하고 있습니다.

응답하신 모든 내용은 「통계법」 제33조 및 제34조에 의거하여 통계 작성 목적으로만 사용되며, 철저하게 비밀이 보장됩니다. 다소 바쁘시더라도 국가 기후예측모델 공동개발 업무의 발전에 기여하신다는 마음으로 끝까지 응답하여 주시기를 부탁드립니다. 귀하의 성의 있고 진솔한 답변은 매우 귀중한 정보가 될 것입니다. 설문 시간은 약 10분 정도 소요될 것입니다. 감사합니다.

2022년 5월

- 조사기관 : APEC기후센터
- 설문기간 : 2022. 5. 23 ~ 2022. 6. 3
- 대 상 : 국가 기후예측모델 공동개발에 협력하는 연구개발허브
- 응답요령 : 설문 항목별로 해당되는 칸에 체크, 해당 내용 직접 기재
- 담당자(문의) : APEC기후센터 예측기술과 김해정 선임연구원(shout@apcc21.org)

10 중 2 섹션

1. 기초 정보 조사

귀하의 소속 및 연구 분야에 관한 설문입니다.

1. 귀하의 소속기관은 다음 중 어디에 해당하십니까?

1) 정부부처 2) 학계 3) 산업계 4) 기타 공공기관 기타

2. 귀하의 국가 기후예측시스템(현재 GloSea) 개발/개선 분야에서의 연구 연수는 어떻게 되십니까?

- 1) 1년 이하 2) 1년~5년 3) 6년~10년 4) 11년~20년 5) 20년 이상

3. 귀하께서 수행하시는 국가 기후예측모델 개발/개선 업무 분야는 다음 중 어디에 해당하십니까?

- 1) 현업화 기획 2) 현업화 연구개발 3) 현업화 테스트베드 4) 현업화 실행, 현업 운영 기타

10 중 3 섹션

2. 인식 조사

귀하의 우선 "국가 기후예측시스템 공동개발"과 "연구개발허브"에 대한 이해의 정도를 파악하기 위한 설문들입니다.

2019년 기상청은 기후 예측 연구 개발 결과의 현업 활용 극대화를 위해 학,연,관,산 상호 협력 체계가 필요함을 인지[1]하고 국가 기후예측 시스템의 공동 개발 체계를 제언[2] 하였습니다. 이후 예측성 향상의 목표 아래 다양한 전문 분야 연구 산업이 국립기상과학원, APEC기후센터, 기후R&D 간 역할 정립 하에 수행되고 있습니다[1].

- 출처 [1] 2020, 장기예측시스템개발, 국립기상과학원
 [2] 2019, 고해상도 기후예측모델 테스트베드 구축, 국립기상과학원

4. 귀하께서는 "국가 기후예측시스템 공동개발"이라는 용어를 들어보신 적이 있습니까?

- 1) 있다. 2) 없다. 기타

5. 귀하께서는 연구개발 현업화(R2O)강화 계획에 따라 국가 기후예측시스템 공동개발을 위해 기후 분야 협력체계(생태계)가 형성되어 있다(학,연,관,산이 함께 협력한다)는 사실을 알고 계십니까?

- 1) 매우 잘 안다. 2) 잘 안다. 3) 보통이다. 4) 잘 모른다. 5) 전혀 모른다.

6. 귀하께서는 "연구개발허브"가 현업 모델 및 운영 시스템의 공동 개발에 참여하는 학계와 산업계의 전문가 그룹(기후응용R&D 등 장기계속사업)을 포함하는 연구 개발 공동 협력 그룹임을 알고 계십니까?

- 1) 매우 잘 안다. 2) 잘 안다. 3) 보통이다. 4) 잘 모른다. 5) 전혀 모른다.

7. 귀하께서는 기상청 현업 기후예측시스템의 예측성향상을 위해 연구개발 사업 관련 기획, 추진, 평가, 관리에 관한 사항을 협의 조정하는 기구인 "연구개발협의체"에 관해 알고 계십니까?

- 1) 매우 잘 안다. 2) 잘 안다. 3) 보통이다. 4) 잘 모른다. 5) 전혀 모른다.

8. 귀하께서는 국가 기후예측모델 개선을 위해 개발된 기술을 인계받아현업과 동일한 환경에서 실험을 수행한 뒤 해당 기술이 현업으로 전환될 수 있는지 여부를 평가하는 "현업화 테스트베드"의 역할을 APCC가 수행한다는 것에 대해 알고 계십니까?

- 1) 매우 잘 안다. 2) 잘 안다. 3) 보통이다. 4) 잘 모른다. 5) 전혀 모른다.

9. 국가 기후예측모델 공동개발 협력을 체계화하고 신속한 현업화를 도모하기 위해 마련된 현업 클라우드(공동 기술개발 플랫폼)인 "glair"에 대해 알고 계십니까?

- 1) 매우 잘 안다. 2) 잘 안다. 3) 보통이다. 4) 잘 모른다. 5) 전혀 모른다.

10 중 4 섹션

3. 만족도 조사

다음은 국가 기후예측시스템 공동개발에 관한 만족도 파악을 위한 설문입니다.

10. 귀하께서는 국가 기후예측시스템 공동 개발이 원활하게 이루어지고 있다고 생각하십니까?

- 1) 매우 그렇다. 2) 그렇다. 3) 보통이다. 4) 그렇지 않다. 5) 매우 그렇지 않다.

11. 귀하께서는 위 문항에서 어떤 점에 있어서 원활하다/원활하지 않다고 생각하십니까?

12. 현재 귀하께서 협력하고 계신 "국가 기후예측시스템 공동개발" 이당초의 목적인 "연구개발 현업화(R2O) 강화"에 부합하여 운영된다고 생각하십니까?

- 1) 매우 그렇다. 2) 그렇다. 3) 보통이다. 4) 그렇지 않다. 5) 매우 그렇지 않다.

13. 위의 질문에서 그렇다고 답하셨으면, 그 이유를 간단히 설명해주시시오.

14. 위의 질문에서 그렇지 않다고 답하셨다면, 공동개발의 어떠한 부분의 개선이 필요하다고 생각하십니까?

15. 귀하께서 공동개발 협력을 통해 기대하는 바는 무엇입니까?(복수 응답 가능)

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> 국가 기후 예측 향상 | <input type="checkbox"/> 국내 기후 모델링 역량 강화 전문가 양성 |
| <input type="checkbox"/> 공동개발 협력 커뮤니티 활성화 | <input type="checkbox"/> 연구 과제 창출 |
| <input type="checkbox"/> 모델링 분야에서의 해당 연구그룹 위상 제고 | <input type="checkbox"/> 기타 |

10 중 5 선택

4. R2O 체계 개선점 조사

다음은 국가 기후예측시스템 공동개발에 참여한 경험에 대해 좀 더 구체적인 의견을 구하기 위한 조사입니다. 아래 그림은 R2O 체계 개선을 위해 APCC에서 제안하고자 하는 R2O 프로세스의 절차(단계)와 단계별 역할을 나타낸 것입니다. 이후 설문에 참고해 주시기 바랍니다.

[국가 기후예측시스템 공동개발 프로세스 및 역할]



16. 귀하께서는 "현업화 기획,정책" 단계에서의 역할이 충분히 잘 정리되어 있다고 생각하십니까?
 1) 충분하다. 2) 대체로 충분하다. 3) 보통이다. 4) 충분하지 못하다. 5) 전혀 아니다.
17. 상단에 제안된 "기획,정책"의 역할 뿐만 아니라 현재 수행 중인 "기획, 정책"의 기능을 고려하였을 때 어떤 점이 보완되었으면 좋겠습니까?

18. 귀하께서는 "현업화 연구개발" 단계에서의 역할이 충분히 잘 정리되어 있다고 생각하십니까?
 1) 충분하다. 2) 대체로 충분하다. 3) 보통이다. 4) 충분하지 못하다. 5) 전혀 아니다.
19. 상단에 제안된 "연구개발"의 역할 뿐만 아니라 현재 수행 중인 "연구개발"의 기능을 고려하였을 때 어떤 점이 보완되었으면 좋겠습니까?

20. 귀하께서는 "현업화 테스트베드" 단계에서의 역할이 충분히 잘 정리되어 있다고 생각하십니까?
 1) 충분하다. 2) 대체로 충분하다. 3) 보통이다. 4) 충분하지 못하다. 5) 전혀 아니다.
21. 상단에 제안된 "테스트베드"의 역할 뿐만 아니라 현재 수행 중인 "테스트베드"의 기능을 고려하였을 때 어떤 점이 보완되었으면 좋겠습니까?

22. 귀하께서는 "현업화 실행" 단계에서의 역할이 충분히 잘 정리되어 있다고 생각하십니까?
 1) 충분하다. 2) 대체로 충분하다. 3) 보통이다. 4) 충분하지 못하다. 5) 전혀 아니다.
23. 상단에 제안된 "현업화 실행"의 역할 뿐만 아니라 현재 수행 중인 "현업화 실행"의 기능을 고려하였을 때 어떤 점이 보완되었으면 좋겠습니까?

10 중 6 섹션

5. R2O 환경 개선점 조사

다음은 국가 기후예측시스템 공동개발을 위한 연구 환경에 관한 조사입니다.

24. 국가 기후예측모델(현재 GloSea)을 활용한 연구/현업을 수행하실 때 주로 이용하시는 전산 자원의 종류를 체크해주세요.

1) 기상청 슈퍼컴퓨터 2) 자체 보유 클러스터
 3) 기상청 외 타기관 슈퍼컴퓨터 4) 국외기관 슈퍼컴퓨터/클러스터 기타

10 중 7 섹션

5-24 기상청 슈퍼컴퓨터

26. 위의 문항에서 응답하신 부분의 개선이 시급하다고 생각하신 이유를 간단히 말씀해주세요.

.....

27. 국가 기후예측시스템 공동개발 체계 전반에 대한 개선 의견을 자유롭게 작성해주세요.

.....

부록 C. 국가 기후예측모델 공동개발 체계 개선 패널토의

| 패널 토의 개요 | |
|---|--|
| I | 개요 |
| <p>□ 배경 및 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 연구개발허브 의견수렴을 통한 국가기후예측시스템 공동개발 체계 개선 | |
| <p>□ 개요</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 일 시 : 2022. 7. 1.(금) 13시 - 15시 ○ 장 소 : 부산 벡스코 컨벤션홀 ○ 주 제 : 수요 맞춤형 기후예측 K-R2O 발전 방향 ○ 추진방법 : 공동개발 현황 발표 및 패널토론 | |
| 좌 장 | APEC기후센터 기후사업본부장 유진호 |
| 주요내용 | <p>연구자-이행자-사용자 간 합의형 실용화 체계의 발전 방향</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 공동개발을 위한 표준 개발 환경 <ul style="list-style-type: none"> - 발표자 : 국립기상과학원 현업운영개발부 이조한 연구관 ② 연구개발 허브에서의 APCC의 역할 <ul style="list-style-type: none"> - 발표자 : APEC기후센터 예측기술과 신신희 선임연구원 ③ 기상기후예측을위한 슈퍼컴퓨터운영 현황 <ul style="list-style-type: none"> - 발표자 : 기상청 국가기상슈퍼컴퓨터센터 장민수 |
| 토 론 자 | <ul style="list-style-type: none"> - UNIST 도시환경공학과 교수 이명인 - 부경대학교 환경대기과학과 교수 김백민 - APEC기후센터 예측기술과 선임연구원 전종안 - 국립기상과학원 기후연구부장 부경은 - 기상청 슈퍼컴퓨터센터장 장근일 - 기상청 기후예측과장 조경숙 |
| II | 주요내용 |

□ 공동개발 현황 발표

- 공동개발 필요성 및 체계, 협업 클라우드 구축을 통한 공동개발 활성화, 표준 개발 환경 소개
- 현업화 테스트베드로서의 APCC 역할 소개
- 기상·기후 예측을 위한 슈퍼컴퓨터 5호기 운영 현황 소개

□ 패널토의

- K-R2O 발전에 대한 공감대 확인
- 공동개발 프로세스 주요 개선점 도출
 - 연구개발협약제 기능 활성화 필요
 - 공동개발 중장기 로드맵 필요
 - 현업화 테스트베드 역할과 개선점
 - 모델 개발 전산 환경 개선 필요
 - 국내 기후모델링 역량 강화 필요
 - 공동개발 협력 커뮤니티 간 소통 강화 필요
- 현업의 개념에 대한 논의



<그림 S1> 공동개발 체계 개선 패널토의 사진