

**지구기후모델의 현업예측 평가 및 강수모수화/결합초기화
진단**

**Evaluating operational forecast and diagnosing
precipitation parameterization/coupled
initialization of the Global Climate Model**

**이윤영, 김해정, 신선희, 전종안, 함수련, 김가영, 정여민
기후사업본부 예측기술과**

2021.12.

APEC기후센터

평문 초록

이 과제는 계절내 시간 규모에 대한 현업 예측 평가와 모형 특성 진단을 통해 동아시아 지역 맞춤형 기상청 기후예측시스템 개선 방향 제시를 목적으로 기획되었다.

보다 종합적인 현업 예측 평가를 위해, 2020년 과제에서 개발된 현업 주평균 예측 통합 평가 프레임(CREDYT: Comprehensive and Relative Evaluating weekly mean DYnamical forecasT)을 고도화하고, 이를 적용해 2020년 52주 주평균 예측의 상대적 성능과 역학 특성 분석을 완료하였다. CREDYT 고도화를 위해 첫째, 기존 S2S 5개 모형에 NMME/SubX 프로젝트 참여 모형 4개를 추가하여 다중 모형간 성능 비교의 안정성을 꾀하였고, 둘째, CREDYT 평가 정보 공유를 위한 온라인 시스템을 구축하였으며, 마지막으로 북극 해빙 관련 요소, 기후 지수 추가 등 콘텐츠 확장을 통한 CREDYT 평가프레임의 완성도를 높였다. 고도화된 CREDYT 프레임의 2020년 예측으로의 적용을 통해, 북극 해빙 계절 사이클의 시·공간적 오차, 해빙 감소 추세 과대모의 등을 확인하였다. 과거 재현 자료 검증에서 나타난 범열대 변동패턴, 빙권-성층권, 극-중위도 역학적 커플링 오차는 KMA-GloSea5의 동아시아 지역 기후 재현성 개선을 위해 수권/빙권 컴포넌트 모델 개선뿐만 아니라 지구 시스템간 결합 특성에 대한 면밀한 검토가 필요함을 제시한다.

UKMO-GloSea5와 GloSea6의 버전 비교를 통해 동아시아 여름 몬순 강수 모의 특성 및 개선 메커니즘이 분석되었다. GloSea6에서는 GloSea5에 비해 아시아 지역 여름 강수 및 하층 순환장 뿐만 아니라 열대 해양 변동성이 개선된다. 열대 해양 변동성 개선이 중앙 태평양 강제력에 의해 야기되는 북서 태평양고기압 (WNPSH) 변동성 개선에 영향을 주고, 이와 관련된 하층 순환장의 개선이 아시아 여름 몬순 강수 예측에 기여함을 제시하였다. 반면 GloSea6는 동아시아 제트의 공간 패턴 및 강도, 경년변동의 예측성을 오히려 감소시키며, ENSO와 관련된 인도-태평양 위커 순환의 상층 편차장의 오차를 여전히 만들어내었다. 동아시아 강수 예측력 향상에 있어 동아시아 제트를 포함한 상층 순환장 개선을 위한 노력이 필요한 것으로 판단된다. 한편, KMA-GloSea5의 강수 오차 개선을 위한 물리 모수화 방안을 제시하기 위해, 강수에 영향을 미치는 모수화 과정인 미세구름물리 모수화, 적운 모수화, 구름-복사 과정, 구름모수화의 주요 계수들을 조사하여 동아시아 여름철 강수의 계절내 예측성능의 개선 효과를 제시하였다. 이를 통해 기후예측모델의 동아시아 여름철 강수 예측에 유의한 계수는 적운모수화와 운량 모수화임을 밝혔으며, 실제로 GloSea6에 포함된 과정인 적운모수화의 계수 적용은 GloSea6 개선의 큰 원인으로 판단되었다. 구름모수화 과정의 계수도 동아시아 강수 개선에 크게 영향을 줄 수 있으며, 향후 GloSea6의 특성을 파악한 후 앙상블 추가 등으로 적절히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

대기와 해양 모형 각각의 초기 조건 간에 균형을 맞추는 결합초기화 기법을 기상청 현업 장기예보 운영에 적용한 뒤 과학적인 측면에서의 효과와 기술적인 측면에서의 능률성을 검토하였다. 기상청 현업 모델에서 나타나는 열대 강수의 기본적인 오차 특성과 열대-동아시아 대기 순환에 관한 예측성에 대해 진단함으로써 결합초기화 예측이 기상청 현업 장기예보의 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 결합초기화 기법이 주로 한랭 건조한 지역에서 토양온도의 오차를 개선시키는 결과를 확인하였고, 이로부터 장기예보의 예측성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 결합초기화 기법을 현업에 적용할 시 제기될 수 있는 기술적인 이슈들과 적절한 해결 방안들도 제시하였다.

Executive Summary

This report aims to evaluate the performance of KMA's operational subseasonal forecast as well as to diagnose model's characteristics and sensitivity of applying the modified cloud/precipitation parameterizations and the coupled initialization technique, thereby to give feasible guidelines for the enhancement of KMA's subseasonal prediction system tailored to the East Asia/Korea regional climate.

Firstly, the weekly mean dynamical forecast's evaluation frame, named CREDYT (Comprehensive and Relative Evaluating weekly mean DYnamical forecast), developed in 2020 for coherent and systematic tracking of KMA's subseasonal forecast performance, is highly advanced by a) increasing number of models participating in the inter-model comparison for the relative performance evaluation, b) expanding its evaluation contents such as those associated with Cryosphere, and c) establishing a web page for the online sharing of the CREDYT contents. When applying the advanced CREDYT to the 2020 KMA-GloSea5 forecasts/reforecasts, major discrepancies in individual earth systems and their interactions were identified: the reversed Pacific zonal asymmetry in the pan-tropical ocean variability, excessive Arctic sea ice melting trend, spatiotemporal biases in Arctic seasonal cycle, and disorganized Cryosphere-Stratosphere and Arctic-midlatitude dynamical couplings. These imply that there is room to improve KMA's operational subseasonal forecast system from the further research on the upgrade of ocean and sea ice models themselves and the modification of coupling processes between component models.

Secondly, the performance and characteristics of UKMO-GloSea6 in simulation of the Asian summer monsoon precipitation were analyzed by comparing UKMO-GloSea5 and GloSea6, and physical parameterization methods for improving Asian summer precipitation was suggested through the cloud/precipitation coefficient adjustment experiment. GloSea6 improved the mean biases and interannual variability of summer monsoon precipitation over the Asia monsoon domain as well as tropical ocean variability. We found that the spatial pattern of the central Pacific forcing mode of western North Pacific subtropical high (WNPSH) variability has improved, leading to an improved impact of WNPSH on Asian summer monsoon precipitation. These improvements may be attributed to the improvements of the spatial and temporal variability in tropical SST anomalies. On the other hand, the performance of GloSea6 in representing the spatial pattern, intensity, and interannual variability of East Asian Jets is slightly reduced, and there are still the biases remaining in the upper circulation anomalies of the Indo-Walker circulation related to ENSO. This study suggests that the efforts to improve the representation of upper circulation fields including the East Asian jet is necessary for better summer precipitation prediction in East Asia.

To improve the subseasonal prediction system, we also investigated the characteristics of cloud and precipitation schemes with relevant parameters in the KMA-GloSea5. Then, the sensitivity tests for parameters in microphysics, cloud-radiation interaction processes, convective precipitation scheme, and cloud fraction parameterization were conducted in order to increase precipitation over the East Asia monsoon domain. It is found that the sensitivity to parameters in microphysics and cloud-radiation interaction processes were negligible to all prediction variables. However, the summer precipitation biases in the East Asia monsoon domain were sensitive to fractional buoyancy compensation in the convective precipitation scheme and scaling factor for cloud fraction in the cloudiness parameterization.

The bias arising from the imbalance between model initial conditions can affect climate drift and predictions of various time scales, which is an important factor to be addressed to improve forecast skill. Lastly, the newly developed atmosphere-ocean coupled data assimilation (CDA) technique was applied to sub-seasonal prediction in GloSea5 to suggest the feasibility of the initialization technique in the operational forecast. A total of 192 forecast experiments with the coupled initial conditions were conducted in the same environment as the operation. The effect of the coupled initialization was examined in terms of ‘climate drift’ diagnosis and the forecast skill assessment on atmospheric circulation compared to the operational forecast. It was confirmed that the precipitation simulated by GloSea5 had systematic biases in tropical regions where sub-seasonal variability is active, and these systematic biases could be improved by applying coupled initialization. The coupled initialization improved the tropical-extratropical teleconnection patterns as well as tropical atmospheric forcing. As a result, it produced more realistic predictions than in the operational forecast for the cases of 2018 cold winter and 2020 wet summer in Korea.

In addition, we assessed impacts of the coupled initialization on climate drifts for water and energy components in a land-atmosphere coupled system. These results suggest that more accurate hydrologic assessment can contribute to the improvement of the land surface scheme. For the assessment of the energy components, the climate drifts were more reduced in cold and semi-arid climate zones. We concluded that the assessment approach for the energy components defined in this study has promise as a tool in evaluating the climate drifts for the energy components. Finally, several technical issues to be considered when applying the coupled initialization technique to the current operational forecast were listed step by step and ways to solve those issues were suggested.

국문 요약

이 과제에서는 기상청 기후예측시스템의 계절내 시간 규모 예측에 대한 현업 예측 평가와 함께 GloSea5 모형 특성 및 민감도 진단을 수행하였다. 세부적으로 첫째, 고도화된 현업 주평균 예측 통합 평가프레임을 2020년 기상청 연내 현업 예보에 적용해 종합적인 평가 정보를 생산하고, 둘째, GloSea 버전 비교 및 구름/강수 계수 조정 실험의 민감도 분석을 통해 동아시아 강수에의 개선 가능성을 타진하였으며, 마지막으로 결합 초기화 기법의 현업 환경 적용성을 테스트하고 이에 대한 열대/지면에의 기후표류 영향을 진단하였다. 세부 과제 결과들을 종합하여 동아시아 지역 맞춤 다각적 모형 오차 분석 프레임 제시하였고, 이를 바탕으로 기상청 예측 시스템 개선에 대한 실질적인 제언을 도출하고 모형 개발/수행 주체와 공유하였다.

기상청 계절내 현업 예보에 대한 상대적이고 일관되며 종합적인 평가 기틀 마련을 목적으로 2020년 과제에서 개발된 현업 주평균 예측 통합 평가프레임(CREDYT: Comprehensive and Relative Evaluating weekly mean DYnamical forecast)은 기후값, 실시간 예측, 기후 리짐, 역학 과정 네 부문에 대한 평가 요소를 포함하도록 설계되었다. 하지만, 평가프레임의 콘텐츠적 완성도 뿐만 아니라, 상대적 평가의 안정성, 생산된 정보에의 접근성 측면에서 보완이 필요해 CREDYT 고도화 전략을 수립하게 되었다. 이를 위해, 기존 S2S 5개 모형에 NMME/SubX 참여 모형 4개를 더해 다중 모형 비교를 수행하고, 빙권 관련 요소 등 평가 콘텐츠를 추가하였으며, 마지막으로 CREDYT 정보 온라인 공유시스템을 구축하였다. 2020년 52주 KMA-GloSea5 주평균 예측에 고도화된 CREDYT 프레임을 적용해 평가한 결과, 총 9개 모형간 비교에서 KMA-GloSea5는 대체적으로 중/상 정도 순위의 실시간 예측성능을 보였으나, 특정 변수/지역/선행시간에서는 1위에 근접하는 우수성을 나타내기도 하였다. 북극 해빙 농도 및 면적 검증에서 KMA-GloSea5의 겨울철 과대모의와 관측 대비 급격한 감소 추세가 뚜렷하며, inner Arctic에서 얼음이 녹는 지역적 순서에서도 오차가 발견된다. 하지만, 동아시아에의 영향이 잘 알려진 Kara-Barents 지역 해빙의 동아시아 기온 원격상관은 굉장히 우수하게 재현되는 특징을 보였다. 과거 재현 자료 분석에서는 범열대 변동성에서 태평양 동서 패턴이 뒤집히고, Kara-Barents 해빙 감소, 극지 기온 상승, 성층권 극소용돌이 강화 사이의 선후 관계 재현에 실패하는 등 KMA-GloSea5의 역학관계 재현 오차가 확인된다. 이러한 오차는 KMA-GloSea5의 수권/빙권 컴포넌트 모델 자체의 성능 뿐만 아니라 지구 시스템간 연결성 모의의 중요성을 제시하며, 향후 결합 모형 개선을 통한 동아시아 지역 기후 재현성 향상 가능성을 암시한다.

GloSea5와 GloSea6의 버전 비교를 통해 동아시아 여름 강수의 계절내 예측 특성을 비교 평가하고, 동아시아 여름 강수에 영향을 미치는 주요 원격 상관 인자들의 모의 특성을 평가하였다. GloSea6에서는 동아시아 여름 강수의 건조 오차 및 아시아 몬순 시스템에서의 하층 순환장의 평균 오차가 개선되는 결과를 보였다. 아시아 여름 몬순 강수의 경년변동에 결정적인 역할을 하는 북서태평양고기압 (WNPSH) 변동의 개선은 중앙 태평양 강제력에 의해 야기되는 WNPSH 변동 개선에 의해 야기되며, 이와 관련된 하층 순환장 개선이 아시아 여름 몬순 강수 강도의 경년변동을 개선시킴을 확인하였다. 또한 GloSea6에서 열대 SST 주성분 모드의 시·공간 재현성 및 NINO34 지수의 예측성 또한 향상된 결과를 제시하였다. ENSO 변동에 따른 인도

-태평양 워커 순환 편차가 관측에 비해 여전히 서쪽으로 이동하여 형성되긴 하지만, ENSO 변동에 따른 서태평양에서의 과도한 convection을 개선하며, 중앙 태평양 cooling에 따른 워커 순환의 하층 편차가 완화되는 결과를 보였다. 본 연구로부터 우리는 아열대 역학을 통한 ENSO-몬순의 관계의 개선 과정을 확인할 수 있었다. 반면 GloSea6에서 동아시아 제트의 공간 패턴 및 강도, 경년변동의 재현성은 오히려 감소하는 결과를 나타내며, ENSO와 관련된 인도-태평양 워커 순환의 상층 편차장의 오차가 여전히 개선되지 않음을 확인하였다. 이는 동아시아 강수 예측력 향상에 있어 동아시아 제트를 포함한 상층 순환장 개선을 위한 노력이 필요함을 제시한다.

기후예측모델의 오차를 개선하기 위한 한 방법으로 KMA-GloSea5의 강수와 관련된 모듈 및 계수들의 특성을 조사하고, 민감도 실험을 제시하여 동아시아 특히 한반도 강수의 오차를 줄이기 위해 개선되어야 할 점을 제안하고자 하였다. 기후예측모델내에서 강수에 영향이 있는 모수화 과정인 미세구름물리 모수화, 적운모수화, 구름-복사 과정, 구름모수화의 주요 계수들을 조사하여 동아시아 여름철 강수의 계절내 예측성능의 개선에 영향을 미칠 수 있는 과정들을 분석하였다. 조사된 계수들을 중심으로 각 과정별로 개선 가능한 파트를 선정하여 2020년 여름철 계절내 예측장을 생산하여 실제 현업과 비교하였다. 그 결과 미세구름물리과정과 구름-복사 상호작용과정에 포함된 계수 조정은 실제적으로 계절내 예측장 결과에 영향을 주지 못하는 것으로 확인되었다. 또한 적운모수화에 포함된 계수와 구름과정에 포함된 계수의 경우 실제 상승 운동에 크게 변화시키며, 그 결과 2차 순환을 변화시켜 동아시아 연직 운동 및 강수에 효과적으로 영향을 미친다. 실제로 적운모수화의 계수 변화는 GloSea6에 포함된 과정으로, GloSea5와 GloSea6의 결과 차이에 크게 영향을 주는 것으로 판단되며, GloSea6 개선의 큰 원인으로 분석된다. 개발 당시 제안되었던 값으로 진행했던 구름모수화 과정의 계수도 무시할 수 없는 영향을 줄 수 있는 계수로 판단되며, 추후 GloSea6의 특성을 파악한 후 적절하게 수정하여 앙상블 추가 등으로 적용시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 기후예측시스템의 지속적인 진단을 위해 준자동화가 가능한 오차 진단툴을 개발하였으며, 이는 추후 지속적이고 일관성 있는 기후예측모델 진단에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 새롭게 개발된 대기-해양 결합초기화 기법을 GloSea5 계절내 예측에 적용하여 결합초기화 기법의 현업 적용가능성에 대해 제안하고자 하였다. 현업과 동일한 환경에서 총 192개의 결합초기화 예측 실험을 수행한 뒤 기후표류 진단과 예측성 비교 측면에서 현업 대비 결합초기화 예보의 효과를 살펴보았다. GloSea5에서 생산되는 강수는 계절내 진동이 활발한 열대 지역에서 구조적 오차를 가지고 있음을 확인하였고 이러한 구조적 오차는 결합초기화 적용을 통해 개선이 가능하였다. 결합초기화를 통해서 열대 대기 강제력뿐만 아니라 열대-중위도 원격상관 패턴의 개선이 이루어졌고 그 결과 2018년 겨울철 한반도 한파와 2020년 여름철 장마에서 현업보다 더 현실성 있는 예측자료를 만들어 낼 수 있었다. 또한, 결합초기화 시스템에서 유출량의 오차가 기후표류 효과에 미치는 영향이 다른 수문성분에 비해 클 것으로 추정되고, 한랭 건조한 지역에서 결합초기화 적용이 기후표류에 대한 개선효과가 뚜렷하게 나타났다. 결합초기화 기법을 현재 현업에 적용할 시 고려해야 할 기술적인 이슈들을 단계별로 정리하고 해당 이슈들을 해소할 수 있는 방안에 대해서도 제안하였다.

목차

평문 초록	i
Executive Summary	ii
국문 요약	iv
목차	vi
표 차례	viii
그림 차례	ix
1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	3
가. 자료	3
(1) 계절내 모형 자료	3
(2) 관측 자료	6
나. 기후 지수들	7
다. 연구 전략 및 방법	9
(1) 주평균 예측 통합 평가프레임 고도화	9
(2) GloSea 버전 비교 및 물리 계수 조정 실험을 통한 강수 관련 오차 및 개선 요소 파악	10
(3) 결합초기화 실시간 예측 실험을 통한 열대/지면 과정에의 영향 진단 및 현업 적용 전략 도출	11
3. 결과	15
가. 계절내 예측 평가/모형 진단에 대해 축적된 기반 정보	15
(1) 2019년 과제 결과 요약	15
(2) 2020년 과제 결과 요약	20
나. 기상청 계절내 예측 시스템(GloSea5) 현업 예측성 및 역학 특성 평가	28
(1) 현업 주평균 예측 통합 평가프레임 고도화	28
(2) 2020년 KMA-GloSea5 예측 종합 평가	35
다. 동아시아 강수에 대한 모형 오차 특성 진단	43
(1) GloSea5 vs GloSea6 역학 특성 비교	43
(2) 구름/강수 관련 모듈 특성 조사 및 계수 조정 실험을 통한 개선점 파악	66
(3) 오차진단 툴 개발 완료	74
라. 결합 초기화 기법의 예측 개선 영향 및 현업 적용성 평가	76

(1) 열대 강수 기후 표류 및 중위도 원격 상관계의 영향	76
(2) 토양 수분 및 토양 에너지 기후 표류에의 영향	83
(3) 결합초기화 기법의 현업 적용 전략 도출	95
4. 요약 및 결론	97
사사	104
References	105
부록 A. CREDYT 관측 및 예측자료 수집	112
부록 B. 관측 및 예측자료 전처리	119
부록 C. CREDYT 결정론적 컨텐츠 생산	123
부록 D. CREDYT MJO 전처리 및 컨텐츠 생산	129
부록 E. 강수모수화 계수조정을 통한 동아시아 여름 강수 영향 평가 및 가이드라인	131
부록 F. 기상청 기후예측시스템 오차 특성 진단 틀	152

표 차례

Table	page
1. Description of subseasonal forecast models used in this study.	4
2. Summary of model sensitivity experiments for verifying the effect of coupled initialization.	5
3. Environment for coupled initialization experiment.	6
4. Datasets for analyzing systematic bias of precipitation in tropics.	6
5. Climate indices verified in this study. * indicates normalized value (anomalies).	9
6. Validation metrics for climate drift and forecast skill.	11
7. Validated target area for the climate drift.	11
8. Validated target area for the forecast skill.	12
9. (Left) standard deviation of Z500 in the boreal summer (Right) The definition of subseasonal periods within boreal summer in terms of WNPSH.	44
10. Classification of the 1997-2010 summers according to the phase of ENSO	48

그림 차례

Figure	page
1. Model configuration of KMA-GloSea5.	5
2. Structure and strategy of performing the project	9
3. Four categories and their components of CREDYT framework	10
4. Schematic representation of water balance in a grid. ΔS stands for a change in water storage.	13
5. Systematic representation of water and energy interactions between land and atmosphere. 14	
6. GloSea5 predictive skill and systematic biases diagnosis	16
7. Comparison of predictive skill before and after post-processing of (left) East Asia and (right) Korean peninsula subseasonal forecasts.	18
8. A guide to estimating lead week3 forecast skill of weekly mean East Asia temperature during boreal winter.	19
9. Schematic diagram and guidance for the BSISO impact field service	20
10. Evaluation components of CREDYT framework and an appearance of pdf documentation of CREDTY contents for the year 2019	22
11. (a) Annual and SON season averaged relative ACC difference of 2019 real-time forecast for 3-lead week of T2M, PREC, and Z500 over Globe, Tropics, and East Asia of EXP1(green line), EXP2(orange line), and EXP3(gray bar) with KMA.	24
12. (Left) Monthly averaged anomaly correlation coefficient of surface temperature over globe and East Asia at lead day 1 and lead weeks 1-8.	25
13. (Left) daily and (right) weekly bivariate correlation coefficient for velocity potential MJO indices in GloSea5 experiments (ERAiF, NWPiF).	26
14. (a) Comparison between ensemble sensitivity experiments (for changing ensemble size and initial time) for the forecast improvement of 2m temperature in week 3 and 4.	27
15. (a) (Left) daily ACC of 2020 real-time forecast for T2M, PREC, and Z500 over Globe, Tropics, and East Asia.	29
16. CREDYT webpage for the subseasonal model evaluation information online sharing (screenshot of main page)	30
17. Screenshots of CREDYT webpage displaying (a) model data resources information, (b)	

cryosphere evaluation contents	31
18. (left) 2020 weekly timeseries of northern hemispheric total sea ice extent for the observation and 1- to 4-lead weeks of KMA-GloSea5 and (right) their verification based on RMSE(Root Mean Squar Error) and TCC(Temporal Corrlation Coefficient) metrics. Upper (lower) panels are the evaluation for total (anomaly) field.	32
19. (center) Melting and freezing week isolated from 2000-2010 averaged sea ice extent(SIE) over 9 sub-regions and whole northern hemisphere.	33
20. (left) Long-term mean and (right) trend of weekly sea ice extent(SIE) derived from the period from 2000 to 2010 over 9 sub-regions and whole northern hemisphere.	34
21. (a) Lead-lag correlation between weekly ART1 index and stratospheric zonal wind at 50 hPa (U50) at each grid and (b) lead-lag correlation between weekly Kara/Barents sea ice extent(SIE) index and near surface temperatue (T2M) at each grid.	35
22. Annual and seasonal aggregation of weekly mean T2M biases at four different lead weeks for KMA, UKMO, and ECMWF during 2000-2010.	36
23. (a) (the leftest four columns) ranking of KMA-GloSea5 out of nine models at each grid for 1- to 4-lead week forecasts in 2020 and (5th column) regionally summarized ranking of KMA-GloSea5 for the Globe, Tropics and East Asia domain.	37
24. First and second loading vector from EOF(Empirical Orthogonal Function) analysis of weekly SST anomalies over the latitudinal band of 20° S-20° N.	38
25. Lead-lag correlation between East Asia averaged rainfall and SST at each grid during summer season (JJA).	39
26. Pie charts showing the relative contribution of ten climate regime strength in the 0-lead week (corresponding to -3 to +4 lead days) to weekly mean Z500 forecast ACC skill during SON season.	40
27. (a) Chord diagram showing the strength of links among (upper) 14 climate indices and (lower) four earth systems for (the leftest) the observation, (second and third columns) 1- and 3-lead weeks forecasts based on KMA-GloSea5 2020 hindcasts.	42
28. (Left) JJA mean (shading) and standard deviation (contour) of precipitation and 500hPa geopotential height for the period of 1997-2010.	43
29. Temporal correlation coefficients (TCC) between the predicted North East Asian Summer Rainfall (NEASR) index in P1 (blue bar) and P2 (green bar) from GloSea5 and those form ERA5.	44

30. Climatological precipitation (shading), 500hPa geopotential height (contour) and 850hPa horizontal winds (vector) from observations, and their biases from GloSea5 hindcasts.	45
31. (Right) Observed and (left) simulated latitude-time cross section of the precipitation averaged over the region of 110–140E from 1997 to 2010 for P1 and P2.	46
32. (Left) Temporal correlation coefficients (TCC) between the predicted WNPSH index in P1 (blue bar) and P2 (green bar) from GloSea5 and those from ERA5.	47
33. Composite anomaly maps of Z500 (contour), precipitation (shading) and 850 wind (vector) for the ENSO phase of El Niño developing, La Niña developing and La Niña persisting during P1.	48
34. Same as Figure 33, but for P2.	48
35. (Left) The observed and (Right) simulated time-longitude cross section of lag correlation between the WNPSH index and SST averaged over the tropics of 10S to 10N for the periods of P1 and P2.	49
36. Regressed fields of the SSTAs in previous winter (DJF, shading) and the 850hPa winds in P1 against WNPSHI index in P1 from the observation and GloSea5 hindcast at lead week 3.	50
37. Difference of the 850hPa zonal wind in P1 between reanalysis and hindcasts at lead W3.	51
38. (Left) Asian monsoon system including East Asia Monsoon, South Asia Monsoon and Western North Pacific Summer Monsoon.	52
39. Regressed fields of geopotential height at 500hPa (contour), precipitation (shading) and wind anomalies at 850hPa (vector) against WNPSH index.	53
40. Spatial correlations between the Pacific–Japan pattern in the reanalysis and the hindcast runs.	54
41. The regressed precipitation of latitude-time cross section averaged over the 110–140E region against the WNPSH index for the periods of P1 and P2.	55
42. 200hPa meridional wind (contours), wind vector and precipitation (shadings) anomalies regressed onto the SRP index in P1 and P2.	56
43. 200hPa meridional wind (contours), wind vector and precipitation (shadings) anomalies regressed onto the SRP index in P1 and P2.	56
44. Temporal correlations between the Silk–Road pattern in the reanalysis and the hindcast runs, and the fractional variance explained by SR.	57

45. Spatial correlations between the Silk-Road pattern in the reanalysis and the hindcast runs.	57
46. (Upper) The biases of JJA mean (Left) precipitation and (middle) geopotential height at 500hPa from GloSea5 and (Lower) the differences between GloSea6 and GloSea5 for 3-lead week.	58
47. Correlation of the JJA WNPSHI with the JJA precipitation (shading), 500hPa geopotential height (contours), and 850hPa horizontal winds (vectors) during 1997-2016.	59
48. EOF-1 mode and EOF-2 mode derived from JJA 500hPa geopotential height over [15S-45N, 45E-180E] during 1997-2016	60
49. (Top, Left) Scatter plots of PCC versus TCC skill of EOF1 and EOF2 modes and (Top, Middle)	61
50. Scatter plots of PCC versus TCC skill of EOF modes for tropical SST anomalies over [20S-20N, 120-270E] (O: EOF1, Δ : EOF2, +: EOF3)	62
51. (Top) The correlated SST (shading) and 500hPa geopotential height (contours) with the NINO34 index	62
52. (Left) Regression of JJA 850hPa velocity potential and divergent wind with respect to the Nino3.4 index for OBS and GloSea5	63
53. (Top) The first EOF mode of JJA zonal wind at 200hPa over [20-60N, 120-150E] and the TCC skill of the PC of EOF1 from GloSea5 and GloSea6 for 3-lead week	64
54. The correlation coefficient of the JJA EAJIS index with JJA WNPSHI, EARIS and Nino3.4 index	65
55. (Left) Time-latitude cross-section of weekly mean precipitation (shading) and 500hPa geopotential height (contour) from observation, GloSea5 and GloSea6 hindcasts (Right, Top)	66
56. Timestepping diagram for the PC2 scheme	68
57. Codes tree for the PC2 scheme in GloSea5	69
58. Distribution of updraft mass fluxes from no-adaptive detrainment and adaptive detrainment experiments. (Derbyshire et al. 2011)	70
59. Sensitivity experiments design for improving of precipitation prediction for East Asia	71
60. Difference distribution of total cloud amount between each experiment and operational results.	72
61. (Left) Averaged tropical vertical motion (shading) and zonal and vertical circulation	

(arrows) in the OPER, CLD, and CPS experiments.	73
62. Difference distribution of total precipitation between each experiment and operational results.	74
63. Anomaly correlation coefficient of total precipitation over Tropics and East Asia.	74
64. Main contents of diagnostic tool for KMA-GloSea5	76
65. Systematic bias of precipitation in GloSea5-GC2.	77
66. Types of climate drifts as proposed by Hermanson et al(2018).	78
67. Precipitation drifts as a function of lead time for OPER (red) and CDAR (blue) compared to the long-term biases of their free-running controls (black dashed line) and hindcasts (gray dashed line).	79
68. MJO-15 day lagged composites of the outgoing longwave radiation and sea level pressure in phase 3 for observations, operational forecast and coupled initialization experiment.	80
69. Improvement ratio of coupled initialization experiment compared to the operational forecast for the MJO-15 day lagged composites of the outgoing longwave radiation and sea level pressure in phase 3.	81
70. Correlation map between WNPSI and precipitation(shaded) and geopotential height at 500hPa (contour) in 2020 summer for observations, operational forecast and coupled initialization experiment.	82
71. Improvement ratio of coupled initialization experiment compared to the operational forecast for the relationship between WNPSI and precipitation and geopotential height at 500hPa in 2020 summer.	82
72. Selected 7 major basins for this study. Blue lines represent river networks.	83
73. Differences between simulated soil moisture and ERA-5 soil moisture.	85
74. Error time series of hydrologic components in the 7 major selected basins.	86
75. Anomaly correlation coefficients between CDA and ERA5, OPR and ERA5, and OPR and CDA.	86
76. Time series of systematic drifts for water balance in the 7 major selected basins.	87
77. Correlation coefficients between precipitation errors and systematic drifts.	88
78. Correlation coefficients between ET errors and systematic drifts.	89
79. Correlation coefficients between errors of precipitation-ET and systematic drifts.	90
80. Weekly differences between simulated and ERA-5 soil temperatures.	91

81. Average soil temperature differences between CDA and OPR.	92
82. Time series of systematic drifts for energy balance in the selected Koppen-Geiger classification.	93
83. Time series of systematic drift differences for energy balance in the selected Koppen-Geiger classification.	94
84. Correlation coefficients between errors of $R_{net} - \lambda E - H$ and systematic drifts. systematic drift differences for energy balance in the selected Koppen-Geiger classification.	94
85. Overview of coupled data assimilation process using incremental analysis updates (IAU).	96
86. A framework for diagnosing various aspects of model biases in terms of East Asia regional climate representation	103

1. 서론

올해 발행된 IPCC 보고서는 기후 위기 시대에 빈번해진 극한 기후 사상에 대해 11 챕터에서 중요하게 다루고 있다 (Arias et al., 2021). 최근 세계 각지에서 발생하는 집중 호우, 한파 등 극한 기후 사상은 석탄 가격 급등과 함께 에너지 가격 상승으로 이어졌고, COVID 상황 및 국제 역학관계 등과 맞물려 급격한 인플레이션을 초래하는 등 세계 경제에 큰 영향을 미치고 있다. 최근 파리 기후협약의 중간 점검 차 개최된 COP26에서는 유일하게 1.5 상승 수치만 살아남았을 뿐, 화석 연료 사용에 대한 개별국가 간의 입장차는 끝내 좁히지 못하였다.

이렇듯, 더이상 피할 수 없게 된 기후 위기와 극한 사상, 그로 인한 재난 상황에 잘 적응하기 위해서 계절내 예측의 개선은 필수 불가결한 과제가 되었다. 본 연구팀은 2019년 계절내 기본 예측성 진단을 통해 동아시아/한반도에서의 활용 가능성을 타진하였고, 2020년에는 본격적으로 KMA 글로씨 모형 내부를 자세히 해석하고, 현업 예측 평가는 물론 초기 자료 및 앙상블 처방 방식에 대한 민감도 평가를 수행하였다. 2년간 축적된 연구 결과를 바탕으로, 올해는 확장된 GloSea5 현업환경 모델 실험과 평가/진단 도구 고도화 등을 통해 기상청 예측 시스템 개선 방향을 제시하는 것으로 3년의 연구 단계를 마무리하고자 한다. 2021년 과제에서는 기상청 기후예측모형 GloSea5의 계절내 시간 규모 예측에 대한 현업 예측 및 역학 특성 평가와 함께 모델 버전, 모듈 개선에 따른 민감도 진단을 동시에 진행하였다. 특히, 주별 예측에 대한 통합 평가 프레임 고도화를 통해 2020년 현업 예측 특성을 파악하고, 새로 도입될 GloSea6 개선점과 강수/구름 관련 모듈/계수 조정 및 결합초기화 처방에 따른 예보 성능 개선 가능성을 진단함으로써 GloSea5 모형의 동아시아 지역 성능 저하 원인 및 지역에 최적화된 개선 방안에 대한 실질적인 제언을 도출하는 것을 목표로 하였다.

한편, 전지구 기후 모형(Global Climate Models; GCMs)은 계절내 예측에서 계절 예측에 이르기까지 기본적으로 사용되고 있는 필수적인 존재이다. 이에 전세계 현업 기관들내에서 기후 예측모형은 중장기 예측 성능 향상을 목표로 끊임없이 발전해 오고 있다. 한국 기상청에서도 1999년부터 대기대순환 모형에 근거한 장기예보 생산체계를 구축하고 역학적 방법에 의한 장기 예측자료를 생산하였다. 국립기상과학원에서도 2000년대에 들어서 기후예측모형을 구축, 역학적 방법에 의한 장기예측자료를 생산하였다. 최근에는 한국 기상청과 국립기상과학원은 계절 규모에서 한영 공동 기후예측시스템을 정착하고 현업으로 이용하기 위해 영국 기상청과 협력해왔고, 그 결과 2010년부터 영국 기상청의 전지구 대기-해양-해빙 결합모형 (HadGEM3)을 기반으로 한 계절예측 시스템 Global Seasonal Forecasting System version 4 (GloSea4)를 도입하고 구축하였다. 또한, 기상청은 향상된 계절 예보를 위해 2014년부터 GloSea4에서 모델 물리과정과 수평분해능을 개선한 고해상도 기후모형인 GloSea5 (GloSea version 5)를 현업에 도입하였다. 현재는 물리과정이 일부 개선된 GloSea6 버전 도입 및 현업화를 앞두고 있으며, GloSea6의 한반도/동아시아 기후에 대한 모형 최적화 및 국내 기후 예측 고도화의 중요성이 부각되고 있는 실정이다.

GloSea5 계통적 오차 특징으로는 적도 지역의 과도한 대류와 강수로 알려져 있다. 적도 태평양의 ITCZ의 강수대를 따라 양의 오차, 동태평양 강수대 위쪽 일부와 인도차이나 반도에서 한반도, 북서태평양 일부에서 약한 음의 오차가 나타난다. 선행시간에 따라 인도양을 비롯한

서태평양에 이르기까지 양의 강수 오차가 증가하며, 적도 중앙 태평양의 강수 오차는 대부분 선행시간 1주에서 가장 크게 나타난다. 주요 강수대의 양의 강수 오차와 반대로 한반도 주변으로는 강수의 음의 오차가 뚜렷하게 나타난다. 따라서 본 과제에서는 UKMO GloSea5와 GloSea6의 버전 비교를 통해 동아시아 여름철 강수의 계절내 예측 특성을 평가하고 동아시아 여름 강수에 영향을 미치는 주요 원격상관 인자들의 모의 특성을 진단하였다. 이를 통해 GloSea6의 동아시아 여름철 기후의 예측 특성을 선제시하고, 향후 제공될 GloSea6의 동아시아 강수 예측력 향상을 위한 개선 방향을 제시하고자 한다.

또한 한반도를 비롯한 동아시아 지역의 강수는 대류 활동에 의한 강수와 층운형 강수가 혼재되는 지역이다. 미세물리과정에 의한 강수와 적운 모수화 과정에 의한 강수의 비율을 조사해보면, 적도에서 중위도 대부분의 지역까지도 적게는 70%, 많게는 90% 이상의 비율로 적운 모수화 과정에 의한 강수로 이루어져 있다. 또한, 중위도에서 고위도로 갈수록 미세물리과정에 의한 강수가 늘어난다. 즉, 대부분의 오차를 설명하는 적도 태평양의 양의 오차는 대류과정에 의한 강수에 의해 발생하지만, 동아시아 지역은 층운형 강수의 오차도 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 강수의 오차를 줄이기 위해서는 미세구름물리 과정, 적운 모수화 과정, 구름 모수화 과정, 구름-복사 과정 등의 모듈을 이해할 필요가 있다. 따라서 본 과제에서는 동아시아 강수의 오차를 줄이기 위한 한 방법으로 강수와 관련된 모듈 및 계수의 특성을 조사하고, 민감도 실험을 통해 동아시아 강수를 개선할 방법에 대해 제안하고자 한다.

모델 초기장 간의 불균형에서 비롯된 오차는 기후 표류 현상을 만들어(Mullholland et al., 2015; Hermanson et al., 2018; Alves et al., 2004; Fernandez et al., 2009) 예보 초기 단계에서부터 계절 및 수십년 예측에 이르기까지 다양한 형태로 영향을 미칠 수 있다(Smith et al., 2013). 즉, 모델 초기 오차 개선은 예측 품질 개선을 위해서 다루어야 할 중요한 요소이다(Xie et al., 2015; Smith et al., 2012). 최근 R&D 연구를 통해 GloSea5의 장기예보 정확도 향상을 위해 대기과 해양 모형 각각의 초기장 간에 균형을 맞추는 결합초기화 기법이 개발되었고 이를 통해 MJO의 예측 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 개발된 결합초기화 기법을 현업 시스템에 접목함으로써 초기 오차의 개선과 이에 따르는 기후 표류 양상의 변화를 진단하고 좀 더 면밀히 계절내 변동 규모에서의 예측성 개선을 살펴보고자 한다. 따라서 본 과제에서는 GloSea5 계절내 예측에 대한 결합초기화 기법의 현업 적용가능성에 대해 제안하고자 한다.

이 보고서의 2장은 과제에서 사용된 자료 및 분석 방법론, 특히 각 세부 과제 목표를 달성하기 위한 추진 전략에 대해 서술하였다. 3장은 기상청 GloSea5 계절내 규모 예측과 관련하여 (가) 현업 주평균 예측 통합 평가프레임 고도화, (나) 강수 오차 관련 GloSea 버전 및 모듈/계수 처방 관련 민감도, (다) 결합 초기화 기법의 영향 및 현업 적용을 위한 기술적 제언 등에 대한 연구 결과를 포함한다. 4장은 연구 결과들을 요약하고, 동아시아 맞춤형 기상청 기후예측 시스템 개선 관련한 시사점을 제시한다.

2. 연구 자료 및 방법

가. 자료

(1) 계절내 모형 자료

(가) 주평균 현업 예측 자료

이 연구는 계절내 규모 KMA-GloSea5 현업 자료를 기본으로 하며, 타 기관 8개 현업 모형 자료를 상대적 성능 비교를 위해 사용하였다. 총 9개 기관은 구체적으로 S2S prediction project(Vitart et al. 2017)의 다섯 개 기관(ECCC, ECMWF, KMA, NCEP, UKMO)에 SubX project(Pegion et al, 2019)의 4개 기관(EMC-GEFS, ESRL-FIM, NRL-NESM, RSMAS-CCSM4)이다 (Table 1). S2S 모형 중 세 모형(ECCC, ECMWF, NCEP)은 모두 매주 목요일에 예측을 수행하고, 과거재현자료(reforecast) 역시 예측날짜와 동일한 날짜에 제공하고 있다. 반면 GloSea5를 기반으로 한 모형인 KMA와 UKMO의 예측 스케줄은 나머지 세 모델과는 다른데, 과거재현자료를 한 달에 4회 고정된 날짜(1일, 9일, 17일, 25일)에 제공하고 있으며 예측자료는 매일 생산, 제공한다. 그러나 실시간 예측을 위한 앙상블 멤버의 수가 4개로 적어서 확률예측 계산 등을 위해서는 일주일 정도의 예측 결과를 합쳐서 사용할 필요가 있다. 기상청에서도 실시간 예측을 위해 KMA 모델에서 생산된 최근 7일의 예측자료를 사용한다. 이 연구에서는 KMA와 UKMO에 대해서도 예측 시작 날짜를 다른 모델과 동일하게 맞추기 위해, 예측 시작 날짜로부터 6일 전인 전 주 금요일부터 예측 시작 날짜인 목요일까지 총 7일의 예측자료를 이용하여 시간 차이에 따른 앙상블을 구성하고 실시간 예측자료를 생산하였다. SubX 모형의 경우, S2S와는 다르게 모두 고정된 날짜에 대한 과거재현자료를 제공한다. 예를 들어, ECM은 1999-2016년 매주 목요일에 대한 과거재현자료가 존재한다.

각 모형의 수평 해상도 역시 저마다 다르므로, 모두 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 로 내삽하여 일관된 비교가 가능하도록 하였다. 또한, 계절내 예측성능을 살펴보기 위해 일주일 단위로 평균하여 선행 시간 1주부터 4주까지의 예측자료를 생산하였다. 예측 스케줄이 동일한 ECCC, ECMWF, NCEP의 기후값은 예측 시작 날짜와 동일한 날짜에 해당하는 과거재현자료와 일주일 전/후 과거재현자료의 총 3개의 평균으로 구하였다. 또한 KMA와 UKMO의 기후값은 기상청의 기후값 생산방법을 참고하여 계산하였고(Ham et al. 2017), 예측 시작 날짜와 가장 가까운 2개 과거예측자료에 날짜에 따른 거리가중치를 주어 평균했다. 과거재현자료의 날짜가 고정된 SubX 모형의 경우, SubX 기관에서 시행하는 기후값 생산 방식을 참고하여 예측 타겟 주의 해당 선행 주수에 대한 모든 샘플을 이용하여 만든 일별 기후값에서 4개 harmonics를 취하여 기후값을 만들었다.

Table 1. Description of subseasonal forecast models used in this study.

Source	Agency	Time Range	Resolution	Ens. Size	Fcst. Frequency	Refcst Period	Refcst Ens. Size	Refcst. Frequency
S2S	ECCC	32 days	0.45x0.45, L40	21	weekly	1998–2017	4	weekly
	ECMWF	46 days	Tco639/319 L91	51	2/week	past 20 years	11	2/week
	KMA	60 days	T216 L85	4	daily	1991–2010	3	4/month
	NCEP	44 days	T126 L64	16	daily	1999–2010	4	daily
	UKMO	60 days	T216 L85	4	daily	1993–2016	7	4/month
SubX	EMC	35 days	T574 L64(d0–8) T382(d8–35)	21	Weekly (Wed)	1999–2016	11	Weekly (Wed)
	ESRL	32 days	~60km L64	4	Weekly (Wed)	1999–2016	4	Weekly (Wed)
	NRL	45 days	T0359L50	1	4/week (Sat,Sun,Mon,Tue)	1999–2016	1	4/week (Sat,Sun,Mon,Tue)
	RSMAS	45 days	0.9x1.25deg L26	9	Weekly (Sun)	1999–2016	3	Weekly (Sun)

(나) KMA-GloSea5 구름/강수 관련 모듈/계수 조정 민감도 실험 자료

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 version 5 (GloSea5) (MacLachlan et al. 2015) 을 도입하였고, 2014년부터 현재까지 현업 계절예측에 활용 중이다. 영국 기상청 기후 모델인 HadGEM3 (Hadley Centre Global Environment Model version 3) 에 기초하여 구축된 GloSea5는 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 1). 이 연구에서는 GloSea5 현업 버전에서의 물리 모듈의 특성을 분석하고, 구름/강수와 관련된 각 모듈 내 조정 가능한 계수들을 선별하여 2020년 여름철 현업 자료와 비교하였다.

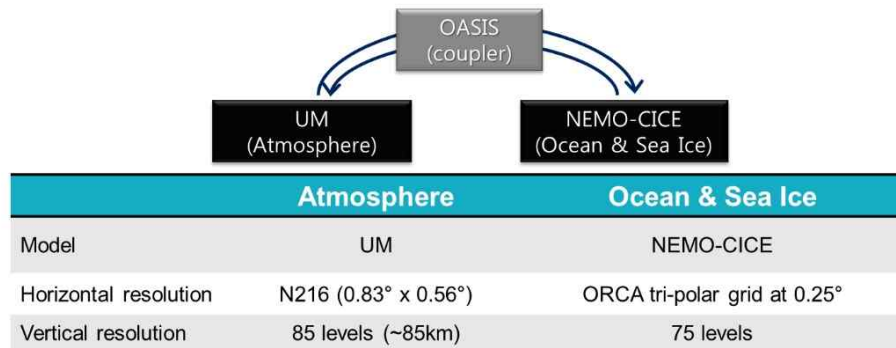


Figure 1. Model configuration of KMA-GloSea5.

(다) KMA-GloSea5 결합초기화 기법 처방 실험 자료

2018년부터 2020년까지 『기상지진See-At기술개발연구사업』의 일환인 「장기예보 지원을 위한 기후예측시스템의 결합초기화 기술 개발」 과제를 통해 대기-해양 결합초기화 기법이 개발되었다. 개발 주체였던 울산과학기술원 연구팀과 여러 차례에 걸쳐 기술을 교류함으로써 해당 기법의 현업화 적용 가능성을 평가하였다. 현업 대비 예측성 비교를 위해 동일한 시기와 조건에서의 결합초기화 예측 실험을 수행하였고 여름철과 겨울철에 대해 평가하였다.

Table 2. Summary of model sensitivity experiments for verifying the effect of coupled initialization.

Experiment	Initial Data	# of Ensemble	Frequency	Period	Cases	Version	Lead Time
OPER	OPER(UM)	4	4/month (1,9,17,25)	Oct.2018-Mar.2019	96	GC2.0	60d
CDA	Coupled Data Assimilation			Jan.2020-Dec.2020		GC2.1	
		Oct.2018-Mar.2019	GC2.0				
		Jan.2020-Dec.2020	GC2.1				

현업과 동일한 시스템 활용을 위해 기상청 슈퍼컴퓨터 본장비를 사용하였고, 겨울철 실험은 약 30회의 부산지방기상청 방문을 통해, 여름철 실험은 기상청-APCC 간 전용통신망 구축에 따라 APCC 슈퍼컴퓨터접속실에서 수행하였다.

Table 3. Environment for coupled initialization experiment.

System	Run Time	Location for experiment	etc.
KMA Nuri/ Miri	~ 1,920 hours	KMA Busan Office APCC	Technical exchange (w/ UNIST)

GloSea5 모델이 가지고 있는 열대 강수의 구조적 오차를 분석하기 위하여 장기 기후 실험과 후보실험을 활용하였다.

Table 4. Datasets for analyzing systematic bias of precipitation in tropics.

Experiment	Model Version	Period	Variable
Long-term climate run	GloSea5-GC2	1979-2018	Precipitation
Hindcast	GloSea5-GC2.0	1991-2010	Precipitation

(2) 관측 자료

이 연구에서 모형의 예측을 평가하기 위한 비교 대상으로 ECMWF의 재분석 자료인 ERA5를 사용하였다. 사용된 변수는 기온(T2M), 500hPa 지위고도(Z500), 200hPa 바람 자료(U200, V200)이다. 200hPa 바람 자료는 200hPa velocity potential(VP200)을 사용한 MJO 지수의 검증에 활용되었다. 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, 모형과의 비교를 위하여 모형과 동일한 격자인 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 로 내삽한

후 일별 자료를 주 평균하여 사용되었다. 관측자료의 기후값 역시 모델과 마찬가지로 예측 시작 날짜와 동일한 날짜에 해당하는 과거재현자료와 일주일 전/후 과거재현자료의 총 3개의 평균으로 구하였고, 실시간 예측 아노말리 또한 실시간 예측에서 기후값을 제거하여 계산하였다.

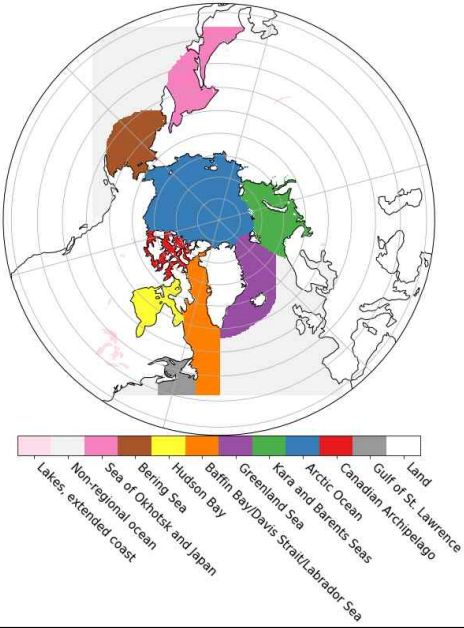
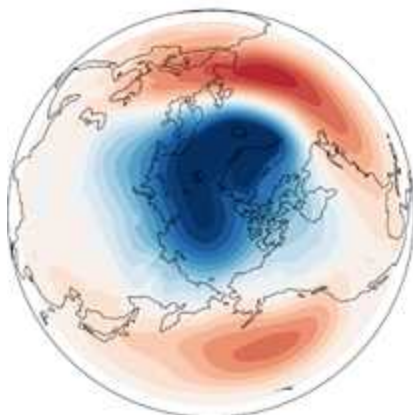
나. 기후 지수들

이 연구는 계절내 예측 모형이 구현하는 열대 대류 지수 등 수권/빙권/성층권/대류권에 해당하는 기후 변동 지수들을 기반으로 다양한 분석을 수행하였다.

작년 과제에서 적용한 기후 지수들에 더해 올해는 인도양의 Dipole Mode Index(DMI), 대서양의 North Atlantic Oscillation(NAO), 그리고 태평양에서는 Western North Pacific Subtropical High(WNPSH)에 대한 해양 및 대기지수가 추가되었다 (Table 5). 그리고 올해 CREDYT 고도화 미션 중 하나인 빙권 컨텐츠 확장 연구로 얻어진, 북극 9개 세부 지역 그리고 북반구 전체에 대한 해빙 면적 지수 역시 빙권 관련 기후 지수로 추가되었다.

Table 5. Climate indices verified in this study. * indicates normalized value (anomalies).

Index		Definition	Reference
Hydrosphere	NINO3.4	Sea Surface Temperature (SST*) average (5°S-5°N, 170°W-120°W)	
	Atlantic Equatorial Mode (AEM)	SST* average (3°S-3°N, 30°W-0°W)	
	Dipole Mode Index (DMI)	SST* average difference between western and eastern domains: [(10°S-10°N, 50°-70°E)] - [(10°S-0°, 90°-110°E)]	Saji et al. (1999)
Cryosphere	Arctic Temp. index 1 (ART1)	T2m* average (70°N-80°N, 30°E-70°E)	Kug et al. (2015)
	Arctic Temp. index 2 (ART2)	T2m* average (65°N-80°N, 160°E-160°W)	Kug et al. (2015)
	Sea Ice Extent timeseries for Arctic 10 regions	Area of grids with more than 15% Sea Ice Concentration for 9 Arctic Sub-regions and Whole Northern Hemisphere (based on polar stereographic map projection)	NSIDC (https://nsidc.org/data/polar-ster eo/tools_masks.html#region_masks)

		<p style="text-align: center;">Arctic Sub Regions</p> 		
Stratosphere	Polar Vortex (PV)	50hPa zonal wind (U50*) average within 60°N-80°N		
	Quasi-Biennial Oscillation (QBO)	50hPa zonal wind (U50*) average within 3°S-3°N	Naujokat (1986) Baldwin et al. (2001)	
Troposphere	East Asia Winter Monsoon (EAWM)	200hPa zonal wind (U200) gradient $\{[(30^{\circ}-35^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}-160^{\circ}\text{E})-(50^{\circ}-60^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}-170^{\circ}\text{E})]+[(30^{\circ}-35^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}-160^{\circ}\text{E})-(5^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}-160^{\circ}\text{E})]\}/2$	Li and Yang (2010)	
	Siberia High (SH)	1000hPa geopotential height (Z1000)* average (40°-65°N, 80°-120°E)	Panagiotopoulos et al. (2005)	
	Arctic Oscillation (AO)	PC1 of Z1000* poleward of 20°N, its loading pattern as below		Thompson and Wallace (1998)
	North Atlantic Oscillation (NAO)	leading mode (EOF1) of Z500* over the domain (20°-80°N, 90°W-40°E)	Hurrell et al. (2001)	
	Western North Pacific Subtropical High (WNPSH)	850hPa zonal wind (U850*) average difference between two domains: $[(25^{\circ}-35^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}-150^{\circ}\text{E})] - [(10^{\circ}-20^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}-150^{\circ}\text{E})]$	He and Zhou (2015)	

다. 연구 전략 및 방법

올해 연구 목표는 아래 추진 체계 다이어그램에서 확인할 수 있듯이, 기상청 현업 예측 평가 고도화에 더해, 강수 오차 결합초기화 관련 모형 특성 진단을 통해 과학원의 GloSea5 예측 고도화와 GloSea6 도입기반을 마련하고, 나아가 기상청 계절내 역학 예측 개선에 기여하는 것이다(Figure 2). 특히, 각자 수요 기반의 개별 연구 활동을 하더라도 공동의 목표를 가지고 연구역량을 집중시켜, 계절내 규모 예측원천인 토양 수분, 성층권, 로스비 웨이브, 해수면 온도, 해빙 등의 재현 특성이 어떤 식으로 한반도/동아시아 예측 성능 저하의 원인이 될 수 있는지에 대한 다각도의 분석 프레임워크를 제시하고자 한다. 세부 주제별 자세한 연구 전략은 아래와 같다.

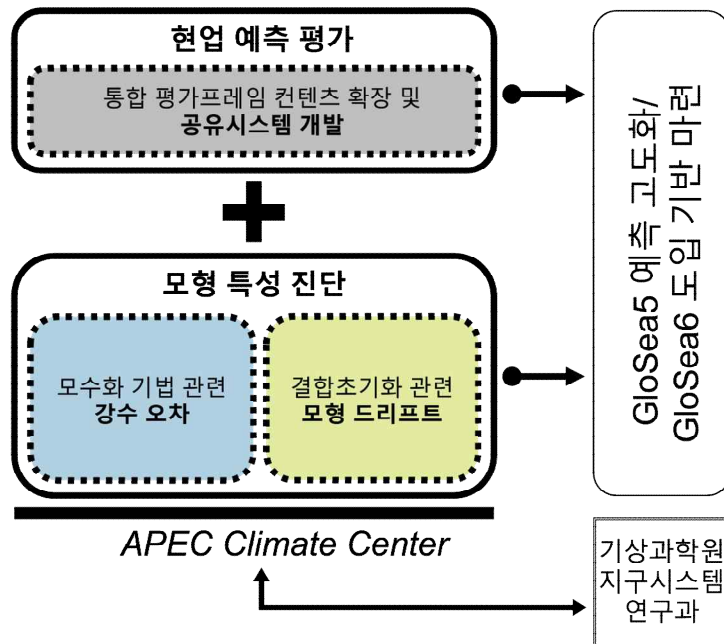


Figure 2. Structure and strategy of performing the project

(1) 주평균 예측 통합 평가프레임 고도화

2020년에 개발한 현업 주평균 예측 통합평가 프레임 CREDYT은 기후값, 예측, 기후 리짐, 역학과정 네 부문에 대한 다양한 평가 정보를 담게끔 설계되었습니다(Figure 3). 올해는 가) SubX 모형군 확장을 통한 안정적 성능 비교, 나) 평가 정보 온라인 공유 시스템 구축, 다) 빙권 평가 콘텐츠 추가라는 세 가지 CREDYT 고도화 계획을 세웠다. 2020년 개발 버전에서는 S2S 프로젝트 모형들 5개만으로 분석이 이루어졌기에 KMA-GloSea 예측 수준을 판별하기에 샘플수가 적다는 문제점이 있었다. 북미 지역 예측들로 이루어진 SubX 프로젝트 4개 모형을 추가함으로써 상대적 성능 추정의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단한다. 또한, 2019년 2020년 주평균 평가 정보에 대한 유관 기관 및 학계의 접근성을 높이고자 예측의 평가 콘텐츠를

공유하는 온라인 페이지 개발을 시도하였다. 마지막으로, 최근 온난화, 극한 사상, 나아가 동아시아/한반도 지역 기후에의 영향으로도 그 중요성이 증대된 빙권 콘텐츠 특히 북반구 해빙의 재현 특성 콘텐츠를 추가함으로써, 최신 기후 연구의 흐름에 뒤처지지 않고 통합 평가 프레임의 콘텐츠적 완성도를 높이고자 했다. 올해 개선/추가된 콘텐츠를 포함한 CREDYT 평가 콘텐츠 구조는 아래 Figure 3와 같다.

“relative, objective, consistent, multi-aspect and comprehensive...”

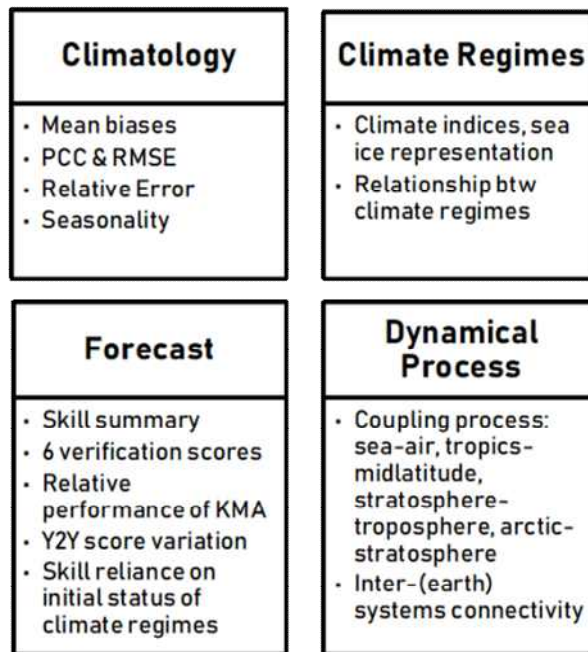


Figure 3. Four categories and their components of CREDYT framework

(2) GloSea 버전 비교 및 물리 계수 조정 실험을 통한 강수 관련 오차 및 개선 요소 파악

본 연구에서는 GloSea5와 GloSea6에서의 동아시아 여름철 강수 및 관련 열대-중위도 원격상관의 모의 특성뿐 만 아니라 계절내 변동 특성에 대해 살펴보고 관련 오차에 대해 제시하고자 하였다. 아시아 몬순 시스템에서 결정적인 요소인 북서태평양 고기압과 상층 아시아 제트의 변동 특성이 분석되었으며, 해양 강제력 모의 특성 및 관련된 위커 순환장의 모의 특성 분석을 통해 열대 해양 forcing이 중위도 강수 시스템 개선에 미치는 영향이 제시되었다. 이를 통해 GloSea6의 동아시아 여름철 기후의 예측 특성을 선제시하고, 동아시아 강수 예측력 향상에 있어 더욱 요구되는 개선 방향에 대해 제시할 것이다.

기상청 현업 모델로 사용되는 기후예측모델은 적도 지역의 과도한 대류와 강수의 오차가 잘 알려져 있다. 이러한 오차와 연관된 모듈로는 미세구름물리 모수화 과정, 적운 모수화 과정, 구름 모수화 과정, 구름-복사 과정 등을 들 수 있다. 모듈의 이해는 모델 강수 오차 특성 파악 및 예측성 향상을 위한 모델 개선에 필수적이다. 따라서, 이러한 오차를 개선시키기 위한 한

방법으로 강수와 관련된 모듈 및 계수들의 특성을 조사하고, 동아시아 강수에 영향을 줄 수 있는 계수들을 선정하여 민감도 실험을 수행하였다. 그 결과를 통해 동아시아 특히 한반도 강수에 영향이 큰 모듈을 알아보고, 계절내 예측 성능에는 어떠한 영향을 주는지 조사하고자 한다. 결과를 토대로 현재 모델의 오차를 줄일 수 있는 방법을 제안해 보고자 한다. 오차를 비교하기 위해 2020년 현업으로 사용된 자료를 레퍼런스로 구성하였으며, 현업의 오차는 ERA5 재분석자료와 GPCP 강수 자료를 사용하였다. 계절내 예측장은 선행시간 3-4주를 기준으로 분석한다.

(3) 결합초기화 실시간 예측 실험을 통한 열대/지면 과정에의 영향 진단 및 현업 적용 전략 도출

(가) 결합초기화 시스템 내 대기-해양 전구 순환장 진단

기상청 현업 장기예보의 정확도를 향상시키기 위해 대기와 해양 모형 각각의 초기장 간에 균형을 맞추는 결합초기화 기법을 현업에 적용하였다. 이 연구에서는 기후표류 진단과 예측성 비교 측면에서 현업 대비 결합초기화 예보의 효과를 살펴보았다. 기후표류 진단을 위해서 열대 강수의 바이어스를 계산하였고, 대기 순환장 예측 성능 비교를 위하여 제공근오차, 패턴 상관관계 그리고 시간 상관관계를 활용하였다.

Table 6. Validation metrics for climate drift and forecast skill.

Method	Metric
Climate Drift	Bias
Forecast Skill	Root mean square error
	Pattern correlation
	Temporal correlation

결합초기화로 인한 초기 예측 오차의 변화와 이 초기 오차에서 비롯되는 기후표류 양상의 변화를 살펴보기 위하여 열대 강수에 대해 8주까지의 바이어스를 진단하였다.

Table 7. Validated target area for the climate drift.

Variable	Region	Forecast Lead Time
Precipitation	Eastern Indian Ocean [12.5° S-0° N, 180° E-120° E]	1-8 weeks
	Western Pacific [15° S-5° N, 120° E-180° E]	
	Western North Pacific [5° N-20° N, 120° E-150° E]	

동아시아 계절내 예측에서의 결합초기화 효과를 살펴보기 위해 동아시아 예측 원천이 될 수 있는 열대 강제력과 열대-중위도 원격상관의 예측성을 진단하였다.

Table 8. Validated target area for the forecast skill.

Variable	Region	Lead
----------	--------	------

			Time
Temperature	East Asia	[25° N-55° N, 160° E-120° E]	3,4 Weeks
Precipitation	East Asia	[33° N-40° N, 100° E-140° E]	
	Indian Ocean	[5° N-18° N, 65° E-95° E]	
Outgoing Longwave Radiation	Indian Ocean	[5° S-10° N, 50° E-100° E]	
	Western North Pacific	[10° N-20° N, 110° E-140° E]	
Sea Level Pressure	North Pacific	[0° N-70° N, 90° E-260° E]	

(나) 지면-대기접합모형에서 기후표류 진단 프레임워크 구축 및 진단

지면-대기접합모형에서 기후표류현상을 정량화하고 결합초기화 시스템 내에서 물수지 및 에너지수지를 각각 유역별과 기후대별 평가하였다. 또한, 이를 활용하여 결합초기화의 물수지와 에너지수지에 대한 영향을 진단하였다.

① 결합초기화의 물수지에 대한 영향

Dirmeyer (2001)는 지면-대기접합모형에서 기후표류를 정량화할 수 있다고 판단하고, 토양수분의 계통오차(Systematic error)와 유사한 방법으로 정의하였다. Figure 4과 같이, 하나의 그리드내에서 물수지는 그리드로 들어오는 성분은 강수(P)이고, 그리드로부터 빠져나가는 성분은 증발산(ET)과 유출량(Q)으로 나타낼 수 있다. 이를 단위 시간당 물저장량(water storage)의 변화량을 수식화 하면 Eq. [1]과 같이 표현할 수 있다. 모형내에서 모의시간이 길어질수록 Eq. [1]의 우변의 오차는 좌변의 물저장에 대한 오차로 누적이 된다. 기후표류는 모형과 관측값의 차이의 누적값으로 통상 정의하므로(Dirmeyer, 2001), 물수지의 기후표류(D_s)는 Eq. [2]와 같이 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 물수지에서 중요한 증발산에 관여하는 근역층(root zone)내에서 물저장 변화량을 중심으로 토양수분의 기후표류를 정량화하였으며, 근역층은 1m 깊이까지의 토양층으로 가정하였다.

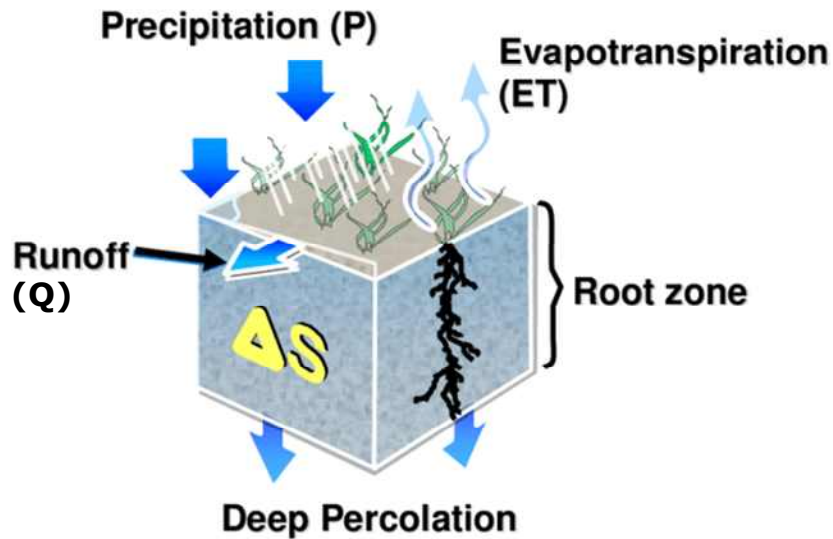


Figure 4. Schematic representation of water balance in a grid. ΔS stands for a change in water storage.

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = P_t - ET_t - Q_t \quad [1]$$

여기서, ΔS_t 는 물저장량의 변화량을 의미하고, Δt 는 단위시간을 의미한다. P_t 는 현재시간 t 에서 강수량을, ET_t 는 현재시간 t 에서 증발산량을, Q_t 는 현재시간 t 에서 유출량을 각각 의미한다.

$$D_s = \int (\Delta S_{MODEL} - \Delta S_{OBS}) dt \quad [2]$$

여기서, D_s 는 물수지의 기후표류를 의미하며, ΔS_{MODEL} 와 ΔS_{OBS} 는 각각 모형과 관측에서 단위시간당 물저장의 변화량을 의미한다.

② 결합초기화의 에너지수지에 대한 영향

이 연구에서 에너지수지의 기후표류(D_e)는 물수지의 기후표류식(Eq. [2])과 유사하게 정의하였다. Figure 5는 지면과 대기의 물과 에너지 상호작용을 표현한 그림이다. 이러한 상호작용 내에서 토양수분은 강수와 에너지를 각각의 성분으로 분배(partitioning)하는 역할을 담당하게 된다. 먼저 에너지저장(energy storage) 변화량이 결국 토양온도로 누적되어 나타난다고 가정한다면, Figure 5의 순복사량(R_{net}) 분배식으로부터 Eq. [1]과 유사하게 단위시간당 에너지저장 변화량을 Eq. [3]과 같이 표현할 수 있게 된다. 이로부터, 에너지수지의 기후표류는 Eq. [4]와

같이 나타낼 수 있다. 이와 같이, 이 연구에서 에너지수지의 기후표류는 근역층내의 토양온도 모형값과 관측 토양온도 값의 차이의 누적값으로 정의하였다.

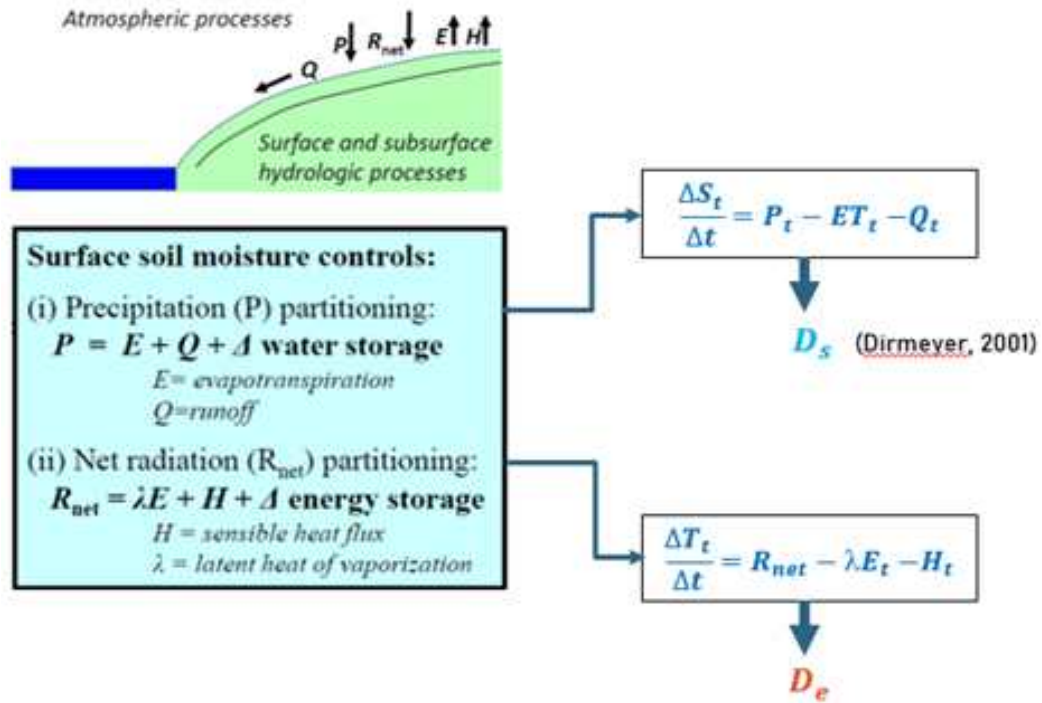


Figure 5. Systematic representation of water and energy interactions between land and atmosphere.

$$\frac{\Delta T_t}{\Delta t} = R_{net_t} - \lambda E_t - H_t \quad [3]$$

여기서, ΔT_t 는 에너지저장량의 변화량을 의미하고, Δt 는 단위시간을 의미한다. R_{net_t} 는 현재시간 t 에서 순복사량을, λE_t 는 현재시간 t 에서 잠열(latent heat)을, H_t 는 현재시간 t 에서 현열(sensible heat)을 각각 의미한다.

$$D_e = \int (\Delta T_{MODEL} - \Delta T_{OBS}) dt \quad [4]$$

여기서, D_e 는 에너지수지의 기후표류를 의미하며, ΔT_{MODEL} 와 ΔT_{OBS} 는 각각 모형과 관측에서 단위시간당 에너지저장(말하자면, 근역층의 토양온도)의 변화량을 의미한다.

3. 결과

가. 계절내 예측 평가/모형 진단에 대해 축적된 기반 정보

(1) 2019년 과제 결과 요약

2019년 과제에서는 계절내 시간 규모 역학 예측에 대한 평가/보정/활용 등 전방위로 연구를 진행했다. 다양한 세부 연구 주제들을 기본 목적에 따라 “모형 예측성 평가 및 오차 진단”, “모형 예측 보정 기술 개발”, “예측 정보 활용 가이드라인 개발”로 구분하여 개조식으로 서술하였다.

(가) 계절내 모형 예측성 평가 및 오차 진단

- ▶ GloSea5 예측성능 비교 및 평가 매트릭스 개발
 - GloSea5 기후값 재현능력 비교 및 평가 프레임 개발
 - GloSea5 기후값 구성방법(예측대상기간 기준과 예측선행시간 기준)에 따른 타 기관 모델(ECCC, ECMWF, NCEP) 대비 기후값 재현능력 비교 (Figure 6a) → GloSea5의 ‘18년 기후값의 재현능력은 ECCC와 NCEP에 비해 상대적으로 높은 것으로 파악됨
 - GloSea5 실시간 예측에 대한 결정론적 평가 프레임 개발
 - 변수별/지역별/계절별/예측선행시간별 실시간 주평균 예측성능 평가 프레임 개발
 - ‘18년 실시간 주평균 예측에 대한 GloSea5와 타기관 모델 예측과 비교 및 ’17년 대비 예측 특성 분석(Figure 6b)
 - GloSea5 예측성능 비교 및 평가 준자동화 시스템 구축
- ▶ GloSea5 구조적 오차 진단
 - GloSea5 S2S Hindcast v2017 자료 이상 파악
 - 500hPa 지위고도, 200hPa 동서/남북 바람장의 이상값 발견 및 결과 공유
 - GloSea5 동아시아 여름/겨울 몬순과 연관된 예측 특성 분석
 - 계절내 예측장의 동아시아 여름 몬순과 관련된 겨울철/봄철 적도 태평양/대서양 해수면 온도와와의 관련성 모의 성능 평가
 - 계절내 예측장의 동아시아 겨울 몬순 모의 성능이 1990년대와 비교하여 2000년대에 낮게 나타나며 이는 적도 태평양 해수면 온도와와의 상관성(특히, 상층 바람장)을 모의하지 못하기 때문임을 밝힘
 - 계절내 예측장의 동아시아 겨울 몬순과 관련된 북극진동/극변동과의 관련성 분석을 통해 해면기압의 오차가 동아시아 기온 모의 성능 저하를 가져옴을 밝힘

•GloSea5 적도 태평양 강수 오차 특성 분석

- GloSea5 예측장에서 서태평양 강수의 과대모의와 관련하여 지표 열속 오차 및 해들리 순환 오차 진단 (Figure 6c)
- GloSea5 예측장의 적도태평양 연직수온 및 해양혼합층 오차 특성 진단

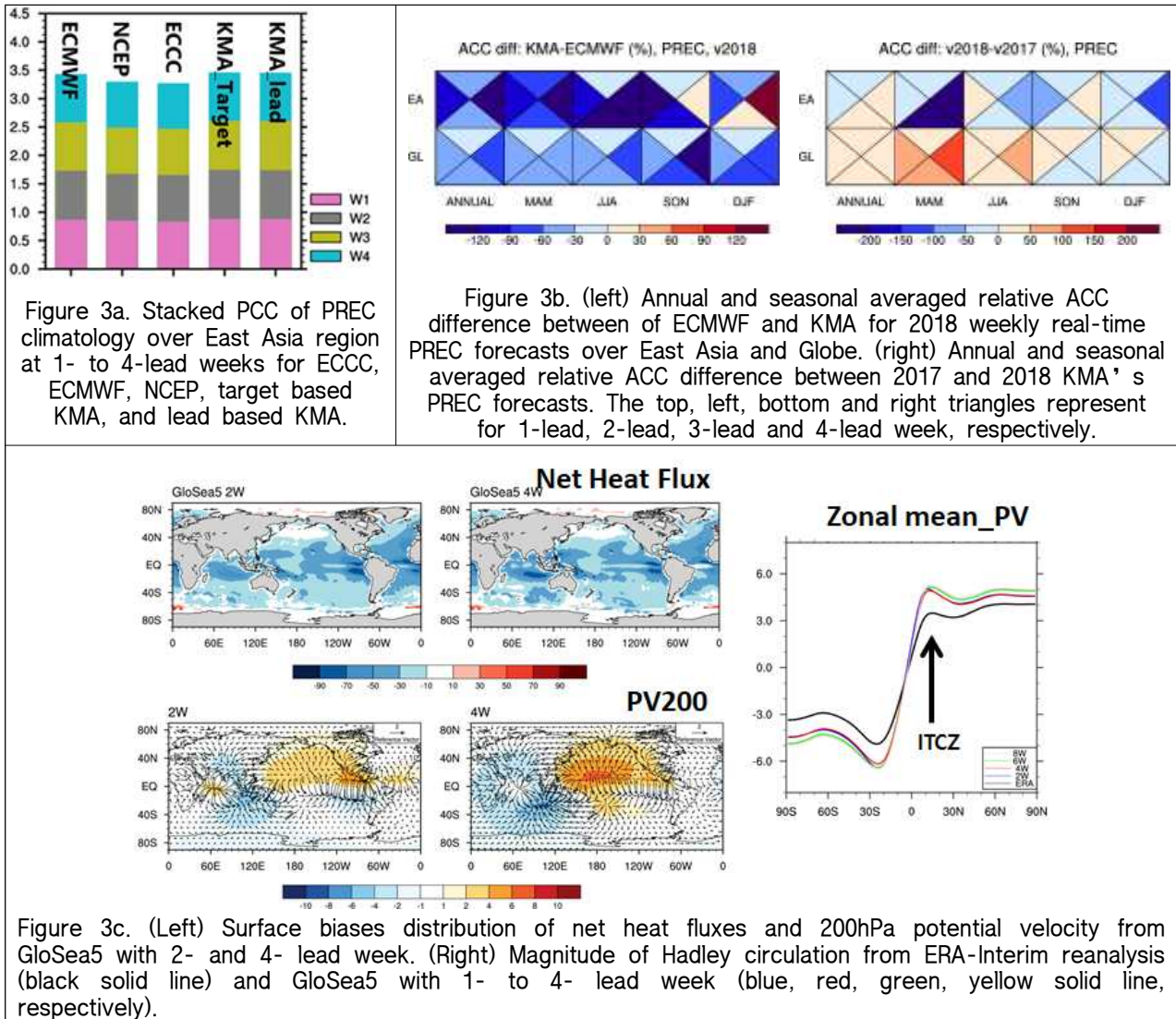


Figure 6. GloSea5 predictive skill and systematic biases diagnosis

(나) 계절내 모형 예측 보정 기술 개발

- ▶ 딥러닝을 활용한 한반도 최저·최고 기온 및 강수 예측 보정 기술 개발

•ECMWF(v2018) 및 GloSea5(v2018) 계절내 예측자료와 ERA-Interim 재분석 자료를 통해 한반도 영역에 대한 강수, 최고기온, 최저기온 예측성 평가 결과 낮은 예측력 (correlation 및 RMSE)를 확인함

- 다층퍼셉트론 및 장단기기억기술을 이용한 계절내 예측자료의 예측 성능 개선을 위한 파이프라인 구현
- 최적 학습 모델 구축을 위한 하이퍼파라미터 분석
- 한반도에 대한 딥러닝 적용성 평가 (Figure 7(좌))
 - 남한 내 4개 격자별, 예측자료 출시일별로 딥러닝을 통해 대부분의 경우에서 전체선행일에 대한 예측성이 개선됨을 확인
 - RMSE의 경우 전체선행일에 대한 예측성이 3개 예측변수 (강수, 최고기온, 최저기온) 모두에서 개선되었으나, correlation의 경우 최고기온, 최저기온에서만 개선되었음을 확인
 - 주평균 예측성 또한 전체선행시간과 유사하게 3개 예측변수 모두에게서 소폭 개선됨을 확인
- ▶ 겨울철 동아시아 기온 예측 보정 기술 개발
 - 동아시아 기온에 대한 EOF higher 모드 제거 방법, 모형내 EOF PC 및 기후 모드 지수에 대한 기온 회귀장을 관측에 상응하는 값으로 치환하는 방법 등 다양한 통계적 기법을 적용하고, 결과에 대한 예측성을 비교 분석 하였음.
 - 최적의 통계적 보정 기법 적용 시, 선행시간 3주에서 겨울철 주평균 동아시아 T2m 기온 예측에 대해 기존 단순 평균 MME 예측 대비 최대 19.4%의 ACC 스킬 개선 효과를 보임 (Figure 7(우))
 - hindcast 과거 11년의 겨울철 12주 예측 샘플, 총 132개에 대한 기존 단순 평균 MME 예측과 보정된 예측의 ACC 분포도 → 음의 ACC 영역에서 도수가 감소하고 양의 ACC 영역에서 도수가 증가하는 등 전반적인 개선을 확인할 수 있음

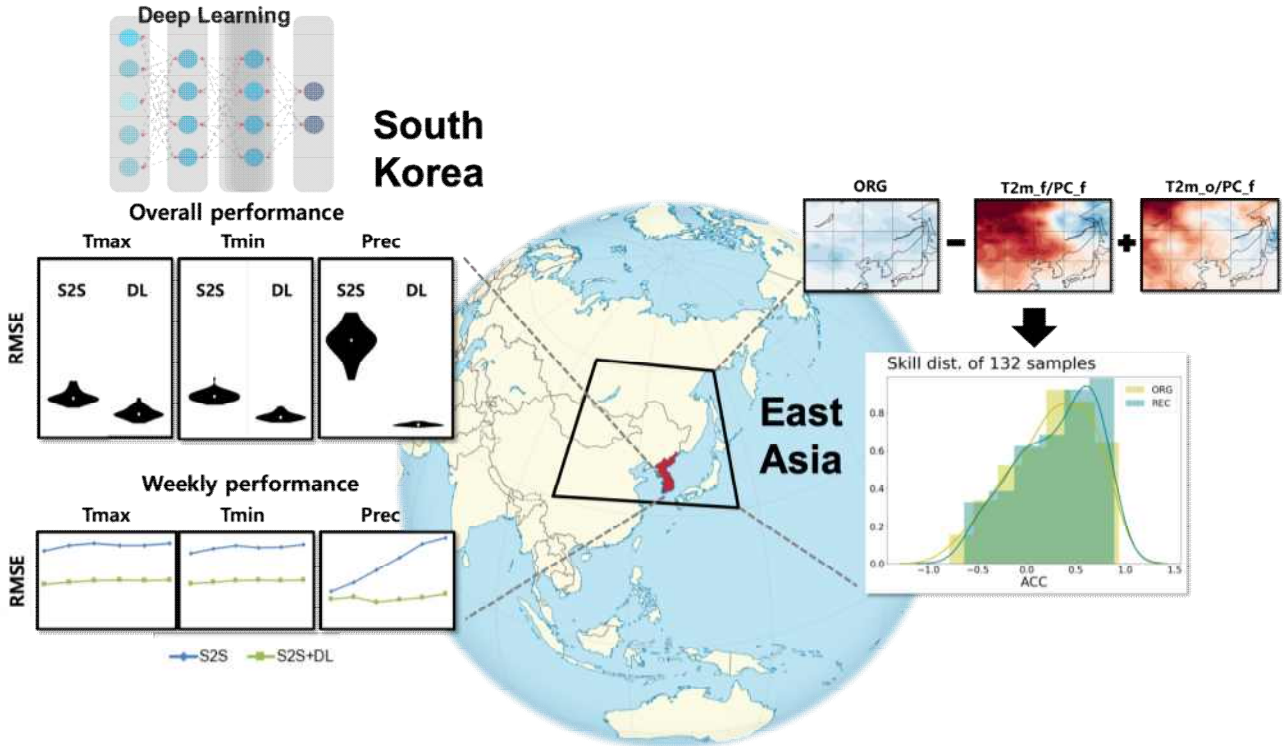


Figure 7. Comparison of predictive skill before and after post-processing of (left) East Asia and (right) Korean peninsula subseasonal forecasts. Regression/EOF approaches for East Asia and deep learning techniques for Korean Peninsula are applied.

(다) 계절내 예측 정보 활용 가이드라인 개발

▶ 겨울철 동아시아 주평균 기온 예측 성능 추정 가이드라인 개발

- 동아시아 주평균 겨울 기온 변동과 관련된 다양한 대기 모드들 (동아시아 겨울 몬순 지수, 시베리아 고기압 지수, 태평양 제트, AO 등)의 모형 예측성을 평가함
- ECCO, NCEP, ECMWF 세 모형의 Simple Composite Mean MME 과거 예측 정보 분석에 따르면, 대기 모드의 위상 및 강도에 따라 동아시아 겨울 기온 주평균 예측성능이 뚜렷이 구분되는 여러 조건들을 존재함. 또한, 선행 시간 진행에 따른 예측 안정도나 선행 1주 예측력도 선행 3-4주 예측력과 유의미한 관련성이 있음. 이러한 과거 예측에 대한 경험 정보를 활용하여 실시간으로 선행 3주에 대한 예측력을 high/moderate/low 세 카테고리도 미리 추정할 수 있게끔 가이드라인을 개발함 (Figure 8)
- 수주의 계절내 규모에서 역학 예측은 그 성능이 매우 낮고 불확실성이 큰 것이 잘 알려져 있음. 실시간으로 예측력 정도를 특정할 수 있다면, 역학 모형 신뢰 여부를 선 판단하여 기타 정보와의 상대적 가중치를 결정할 수 있고, 궁극적으로 객관적이고 최적화된 consolidated 예보 생산에 일조할 것으로 기대함.

① prepare categorized input

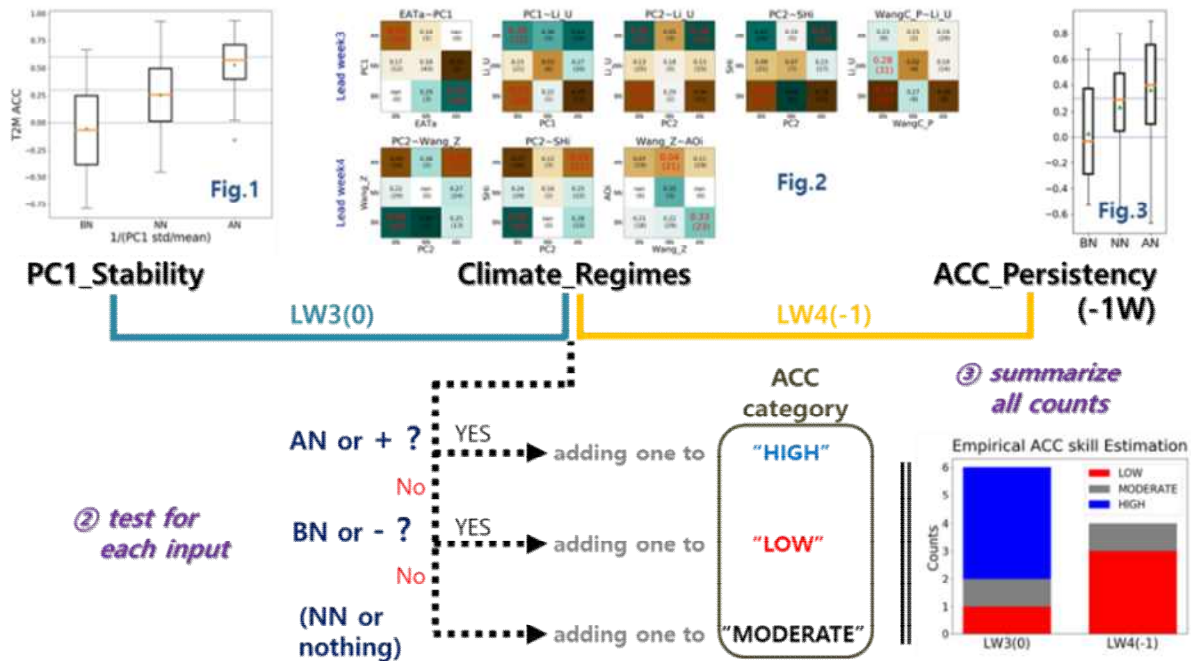


Figure 8. A guide to estimating lead week3 forecast skill of weekly mean East Asia temperature during boreal winter. step1: identifying predictor inputs (stability of PC1, phase and strength of climate regimes, degree of 1-lead week forecast skill of one week prior forecast). step2: for individual inputs, estimating degree of prediction skill as high/moderate/low. step3: counting the number of three categories. step4: synthesize all skill estimation and applying to the manual forecast.

▶ 다중모델 기반 BSISO 영향분석 기술 개발

- BSISO에 대한 대기 순환장의 반응을 추정할 수 있는 세 가지 통계적 선형 기법(EOF 분석, 회귀분석, 합성장 분석 기반)을 개발. 세 가지 기법 비교 평가 결과 합성장에 기반 한 기법을 활용하는 것이 가장 적절함을 확인함.
- 이 기법들은 지수를 공간장으로 변환하는 방법들로써 지금까지 위상도 형태로 지수 정보로 제공되던 BSISO의 상태와 사용자 개개인의 지식에 기반 하여 유추하여야했던 지역적인 영향을 좀 더 직관적으로 인지할 수 있게 아시아 몬순 지역에 대한 대기 순환장으로 만들어 줌 (Figure 9a).
- 합성장 기반 기법으로 만들어진 반응장은 여름철 6개월 중 인도, 중국, 북서태평양, 한반도 등 주요 몬순 지역마다 각각 몬순성 우기가 활발한 월에 대기 상황을 더 잘 설명하는 계절적 특성을 가지고 있어 건기에 비해 우기에 대한 활용도가 높음을 알 수 있음(Figure 9b).
- BSISO 반응장 분석 기법을 다중모델(BOM,ECMWF,GFS,GFS,CWB) BSISO 예측 지수에

적용, 주별 BSISO 반응장 예보를 생산/분석함. 그 중, ECMWF의 BSISO 반응장 예보는 다른 모델의 반응장에 비해 관측의 BSISO 반응장을 모의하는 능력이 더 뛰어나 아시아 몬순 지역에 있어서 적어도 2-3주까지는 신뢰할만한 BSISO 반응 정보를 제공할 수 있음.

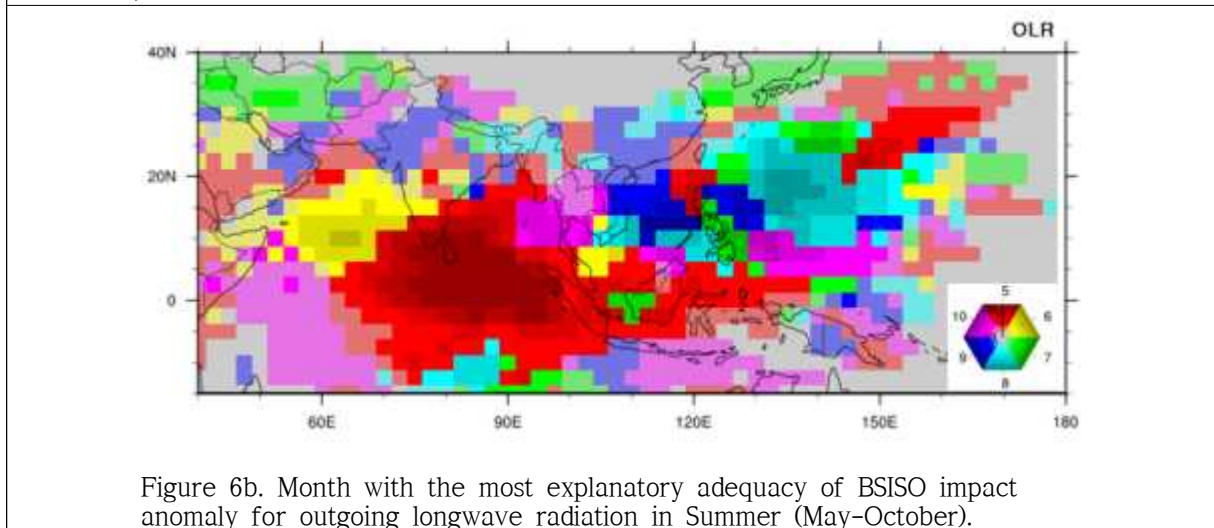
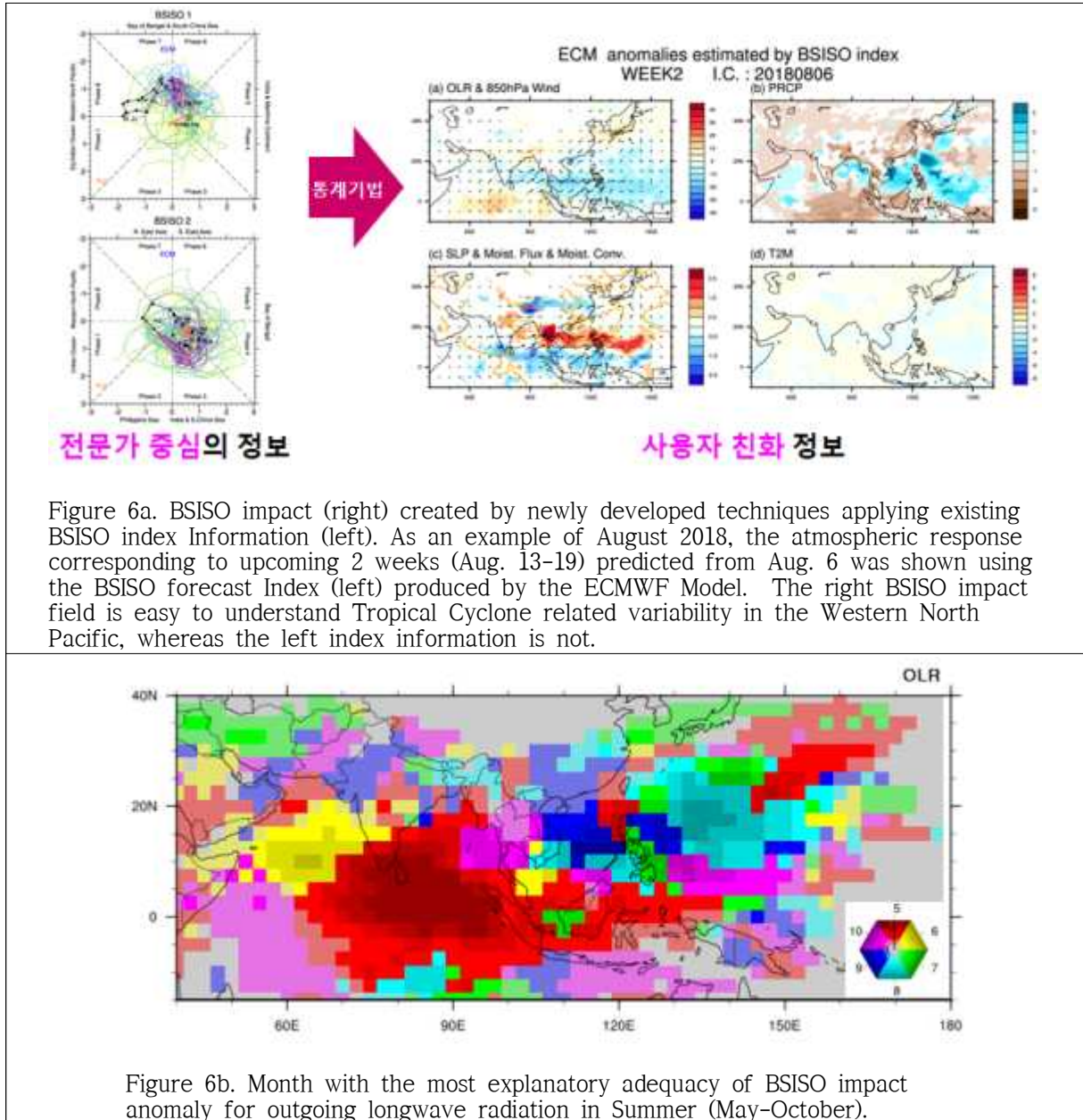


Figure 9. Schematic diagram and guidance for the BSISO impact field service

(2) 2020년 과제 결과 요약

2020년 과제에서는 기상청 기후예측모형 GloSea5의 계절내 시간 규모 예측에 대한 현업 예측성 평가와 모형 특성 평가를 동시에 진행하였다. 특히, 주별 예측에 대한 필수 평가 요소 정립 및 다중 모형 비교를 통한 상대적인 현업 성능 평가를 수행하고, 초기 자료 처방에 따른

오차 특성 및 **양상블 생산 방안**에 따른 예보 성능 개선 가능성을 진단함으로써 모형 개선 방향에 대한 실질적인 제언을 도출하였으며, 그 결과는 아래에 개조식으로 서술하였다.

(가) 기상청 계절내 예측 시스템 (GloSea5) 예측성 평가

▶ 현업 주평균 예측 평가 프레임 개발

- 필수 평가 콘텐츠 발굴 및 구조화

- 네 부분으로 나누어 현업 예측 평가 콘텐츠 발굴(Figure 10)

가. 기후값 관련: 평년값 오차장, 시·공간적 계절성, 여름 기간, ITCZ/SPCZ 등에 대한 5개 모형 비교 평가

나. 실시간 예측 검증 관련: 기온/강수/지위고도(500hPa)에 대한 단정/확률 실시간 예측 스킬에 대한 5개 모형 간 비교, KMA 성능 과거 연별 추이 분석

다. climate regime 관련: KMA-GloSea5 내에서 MJO 등 다양한 기후 지수의 연내(52주) 시계열 검증, 초기 기후 지수 삼분위 위상에 대한 기온/강수/지위고도(500hPa) 예측 성능 의존도 분석, 기후 지수간 연관 관계 진단 등

라. dynamical coupling 관련: KMA-GloSea5 내에서 열대-중위도, air-sea, 대류권-성층권 역학적 커플링에 대한 분석 및 관측과 비교

- 콘텐츠 구조화를 통한 평가 프레임(CREDYT: Comprehensive and Relative Evaluating weekly mean DYnamical Forecast) 개발

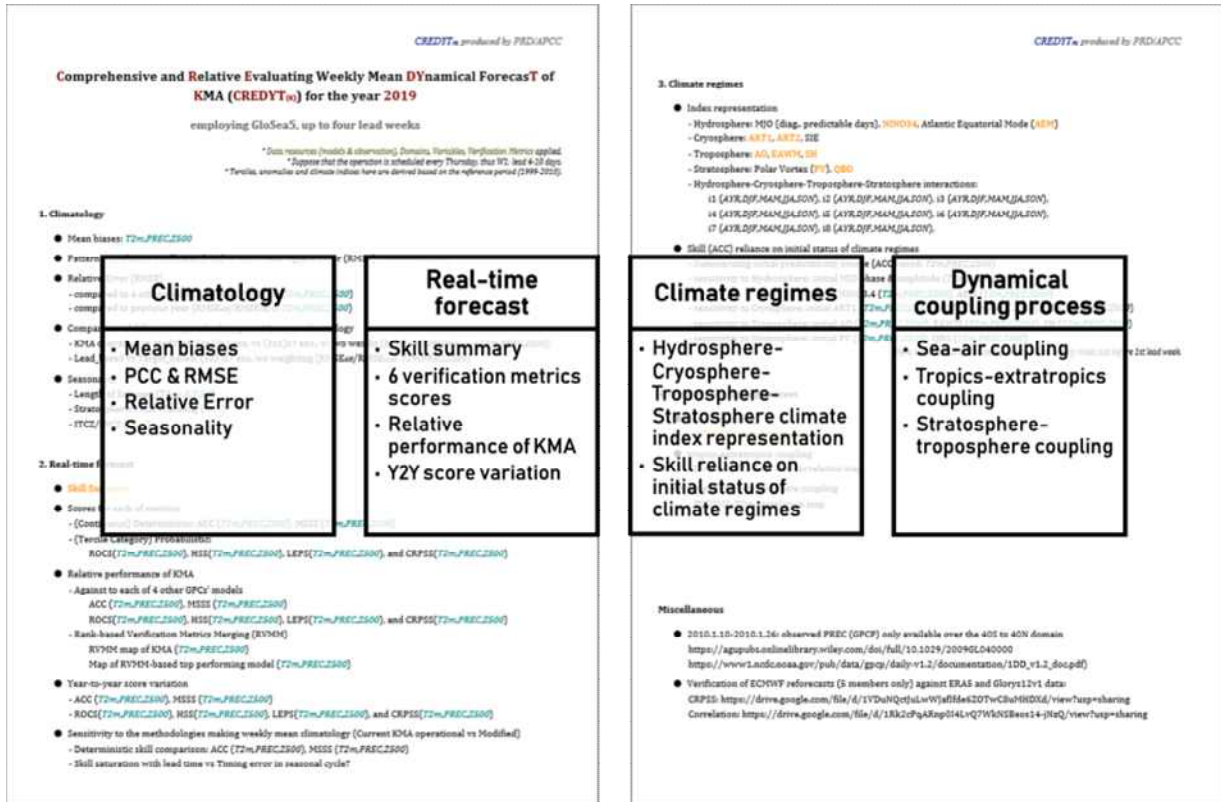


Figure 10. Evaluation components of CREDYT framework and an appearance of pdf documentation of CREDYT contents for the year 2019

- 새로운 실시간 예측 평가법 및 모형 성능 진단법 개발
 - 타 기관 예측시스템과 종합적인 비교·평가를 위한 순위기반 검증지수 병합법 (RVMM: Rank-based Verification Metrics Merging)개발
 - 모형내 지구 시스템 (빙권-수권-대류권-성층권) 상호작용 진단을 위한 climate regime간 연계성 진단 기술 개발
 - 다양한 기후모드들의 초기 상태가 기온/강수/지위고도(500hPa)의 주평균 예측 스킬에 미치는 기여도 분석법 개발
 - CREDYT 정보 자동 적용 및 PDF 형태 가시화를 위한 python 프로그램 개발
- ▶ 2019년 예측에 대한 CREDYT 적용
 - 2019년 평년값 및 실시간 52주 현업 예측 1-4주 평가 정보 생산 및 가시화
 - ‘19년 KMA-GloSea5 자료 및 비교를 위한 타 기관(ECCC, ECMWF, NCEP, UKMO) hindcast/forecast 자료 수집 완료
 - 5개 기관 2019년 버전 평년값(Bias, PCC, RMSE) 및 계절성 분석

- 지역별/변수별/계절별 결정론적(ACC, MSSS), 확률론적(ROCS, HSS, LEPS, CRPSS) 검
증값 생산, RVMM 적용을 통해 KMA의 타기관 대비 상대적 성능 도출
 - CREDYT 프레임에 2019년 평가 정보 적용 및 가시화
- ▶ GloSea5의 기후값 처방방안에 따른 재현/예측성능 분석
- 기상청 현업에서 사용 중인 기후값과 비교하기 위한 세 가지 기후값 처방방안(거리가
중치 제거(EXP1), 앙상블 수 증가(EXP2), 거리가중치 제거 및 앙상블 수 증가(EXP3))
을 개발하여 2019년 기후값 생산 완료(Figure 11a)
 - 세 가지 처방방안 모두 현 KMA 방안에 비해 나은 기후값 재현성능을 보여줌. 이에
따라 실시간 예측성능 역시 일정 정도 좋아지는 경향이 있으나, 변수별/계절적 차이
는 있음(Figure 11b).
 - 전반적으로 EXP3의 예측성능이 가장 크게 개선되었는데, GloSea5 기후값 생산 시 거
리가중치를 주는 대신 예측 시점으로부터 다소 멀더라도 주변 reforecast 앙상블 수
를 늘리는 쪽으로 리소스를 집중하는 것이 효과적일 것으로 판단됨.

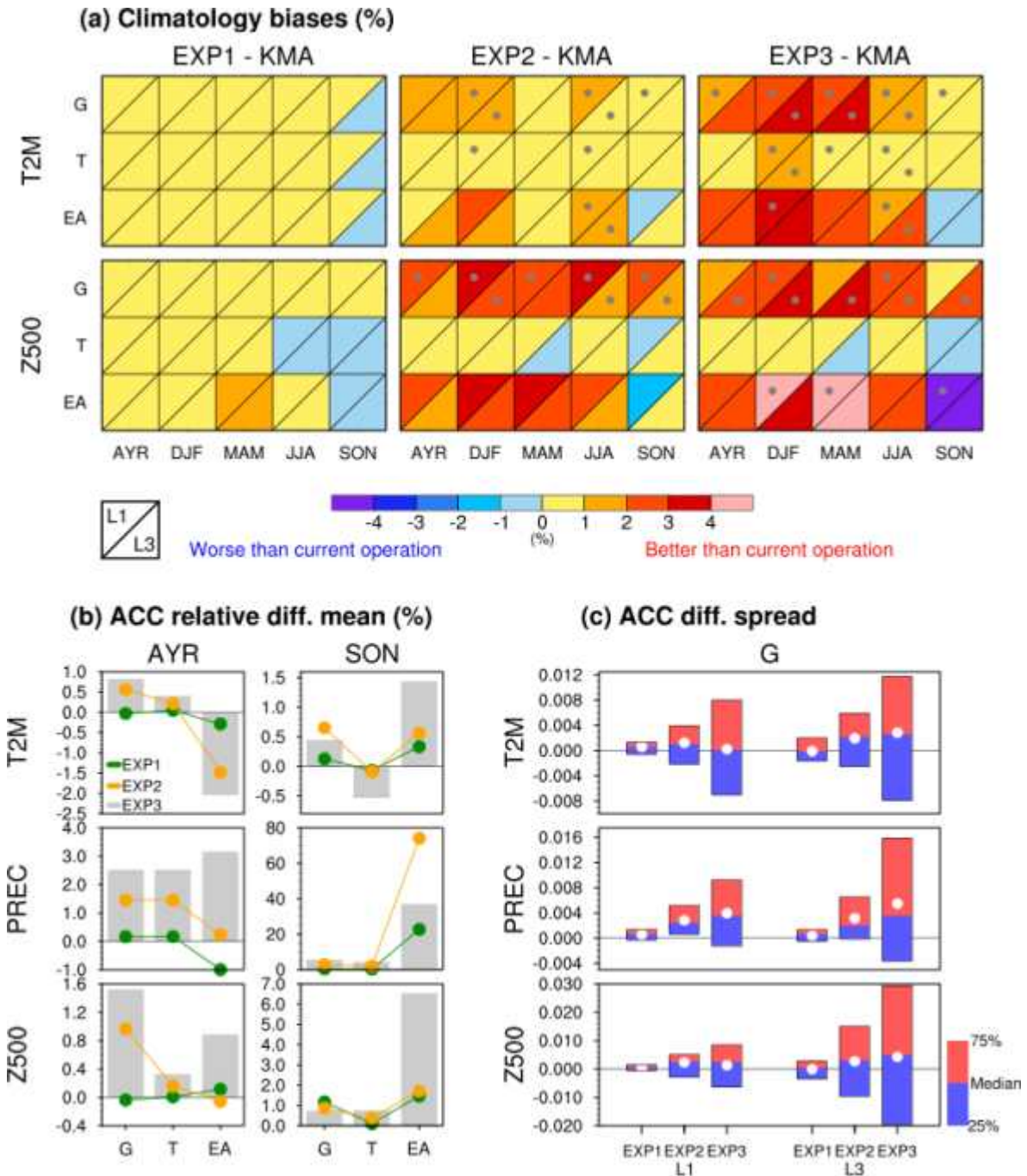


Figure 11. (a) Annual and SON season averaged relative ACC difference of 2019 real-time forecast for 3-lead week of T2M, PREC, and Z500 over Globe, Tropics, and East Asia of EXP1(green line), EXP2(orange line), and EXP3(gray bar) with KMA. The unit is %. (b) Annual ACC difference range between upper and lower 25% of 2019 real-time forecast for 1-, and 3-lead week of T2M, PREC, and Z500 over Globe of EXP1, EXP2, and EXP3 with KMA. White dot indicates the average value for each case.

(나) 초기장에 따른 오차 성장 특성 진단

- ▶ 초기장 차이(재분석, NWP)에 따른 계절내 예측 성능 평가
 - 초기장 민감도 실험 구성을 통한 201710-201812 예측장 생산 완료

- GloSea5 수행 방법 및 구조 파악을 통한 민감도 실험 수행 완료
 - 초기장 차이에 따른 동아시아 겨울철 계절내 예측 성능 비교 완료
 - NWP 예측장을 초기장으로 사용할 때 보다, 재분석자료를 초기장으로 사용할 때, 동아시아 겨울철 기온 및 순환장의 계절내 예측 성능이 개선됨(Figure 12(좌))
- ▶ 초기 오차 특성 진단 및 오차 성장 영향 평가
- 실시간 예측장과 과거재현기후 예측장의 계통적 오차 특징 파악
 - 과거재현기후에서는 동아시아 지역의 음의 오차가 뚜렷한 반면 실시간 예측장에서는 동아시아 지역의 양의 오차가 뚜렷하게 나타남
 - 선행시간 1일에서 계절내 규모까지의 오차 성장 특성 비교 완료
 - 선행시간 1일에서 운량 및 복사 값들의 오차가 매우 크게 나타나 초기 값 처방에서의 이슈가 있을 것으로 판단됨
 - NWP 초기장을 사용했을 때 나타나는 동아시아 기온의 양의 오차가 재분석자료를 초기장으로 사용했을 때 효과적으로 감소함(Figure 12(우))
 - 계절내 규모에서의 오차의 감소를 위해 지면오차 및 구름/복사와 연관된 초기조건들의 개선이 필요함

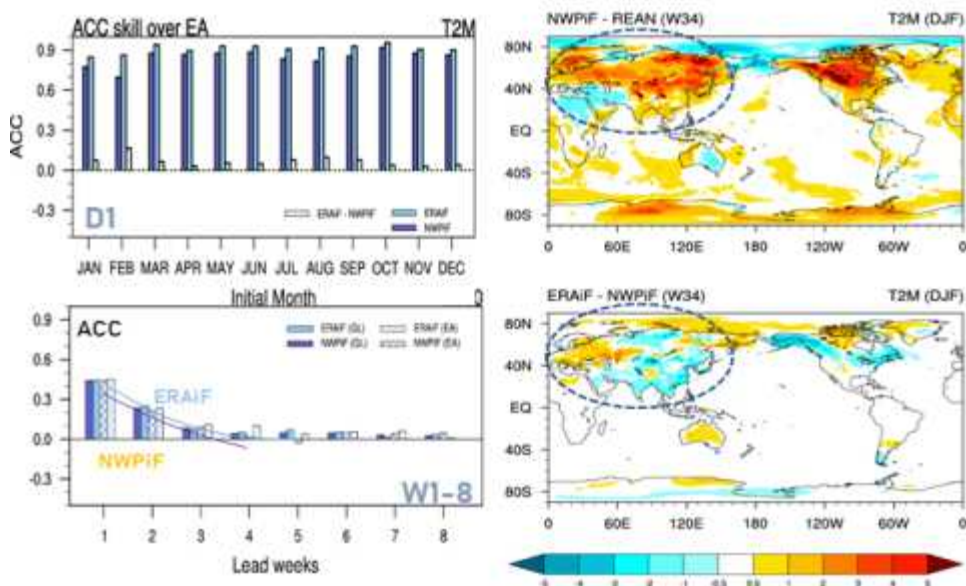


Figure 12. (Left) Monthly averaged anomaly correlation coefficient of surface temperature over globe and East Asia at lead day 1 and lead weeks 1-8. (Right) Difference distribution of surface temperature at lead weeks 3-4 between NWPiF and ERA5, ERAiF and NWPiF.

- 초기오차에 따른 MJO 예측 특성 파악
 - 재분석자료를 초기장을 사용한 실험의 경우 적도 지역의 대류 활동이 다소 증가하며, 선행시간 3-4주에서의 MJO 지수 모의 성능 및 전파 특성이 다소 개선됨(Figure 13)

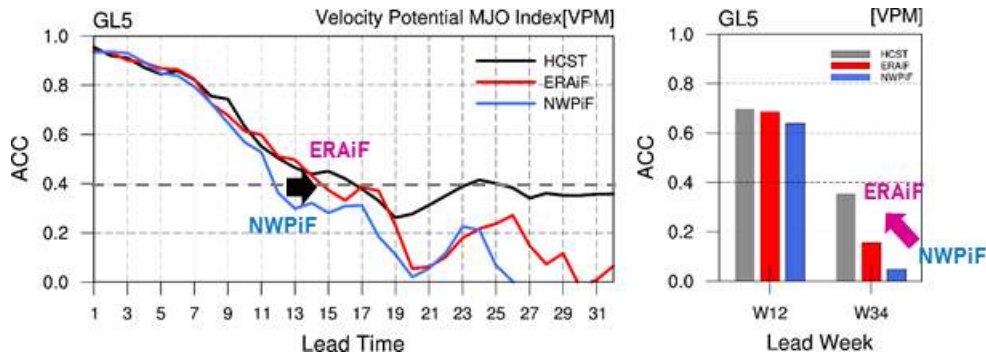


Figure 13. (Left) daily and (right) weekly bivariate correlation coefficient for velocity potential MJO indices in GloSea5 experiments (ERAiF, NWPiF).

(다) 앙상블 생산 방안에 따른 계절내 기온 예측 민감도 평가

▶ 계절내 규모에서의 실시간 예측장 앙상블 특성진단

- GloSea5 현업 hindcast의 1주~8주에 해당하는 동아시아 기온 예측에 대한 앙상블의 기본 특성을 진단하였음.
- GloSea5 앙상블에 대한 일관성과 신뢰도 진단 결과 10일 이하의 짧은 리드 타임에서는 주로 앙상블 유형은 overconfident (underdispersion)하고 신뢰도가 낮음. 반면 2주 후부터는 consistent 하고 신뢰도가 높은 앙상블을 생산하고 있다고 평가되어 활용하기 좋은 앙상블을 보유하고 있다고 보여짐.
- 또한 GloSea5 앙상블에 대한 불확실성 진단을 통해 유라시아 대륙 고위도에서의 저온 아노말리와 그에 수반되는 상층 고/저기압의 동서 배치가 8주 이내 동아시아 기온 예보의 오차가 커지게 하는 요인으로 작용할 수 있어 고위도 지면/해빙 처방에서의 개선이 요구됨.

▶ 앙상블 생산방안별 기온 예측 민감도 평가

- 앙상블 수/생산 일자/생성 방안에 따른 GloSea5의 3,4주 기온 확률 예보에 대한 민감도를 비교, 평가하였음.

- 예보 정확도와 유용성 비교(Figure 14a) 결과 현업 실험의 3,4주 기온 예보는 0.5 이상의 AUC를 나타내어 기본적으로 유용함. 대체로 앙상블 멤버수가 증가하면 리드 타임 전반에 걸쳐 스킬이 증가함. 기존 현업 예보 대비 민감도 실험 간 개선 정도를 상호 비교하면 개선율의 크기(RCP, AUC)에 있어서는 앙상블 멤버수 증가(3.2%, 1.5%)와 주말런(1.4%, 5.8%)이 주중런(-2.5%, -3.8%)보다는 효과를 가져다 줄 수 있고, 개선된 리드타임의 수 측면에서도 앙상블 크기 증가(93%)가 가장 개선 효과가 크고 그 다음은 주말런(50%) 순서임. 예보 카테고리 별로 살펴보면 대체로 below normal과 above normal에서 개선 효과가 있음.
- 종합 분석(Figure 14b) 결과 예측성이 현저히 떨어지는 3주 및 4주 기온 예보에 대해서 앙상블 크기를 증가시킬 경우 현업 예보 대비 최대 약 3%의 스킬 개선과 최대 13일, 평균 6일의 예보일 개선을 기대할 수 있음. 매일이 아닌 일주일에 한 번 예보를 생산하고 그것이 월요일이라면 -1~6%의 스킬 개선과 6~11일의 리드타임 개선을 가져올 수 있음.

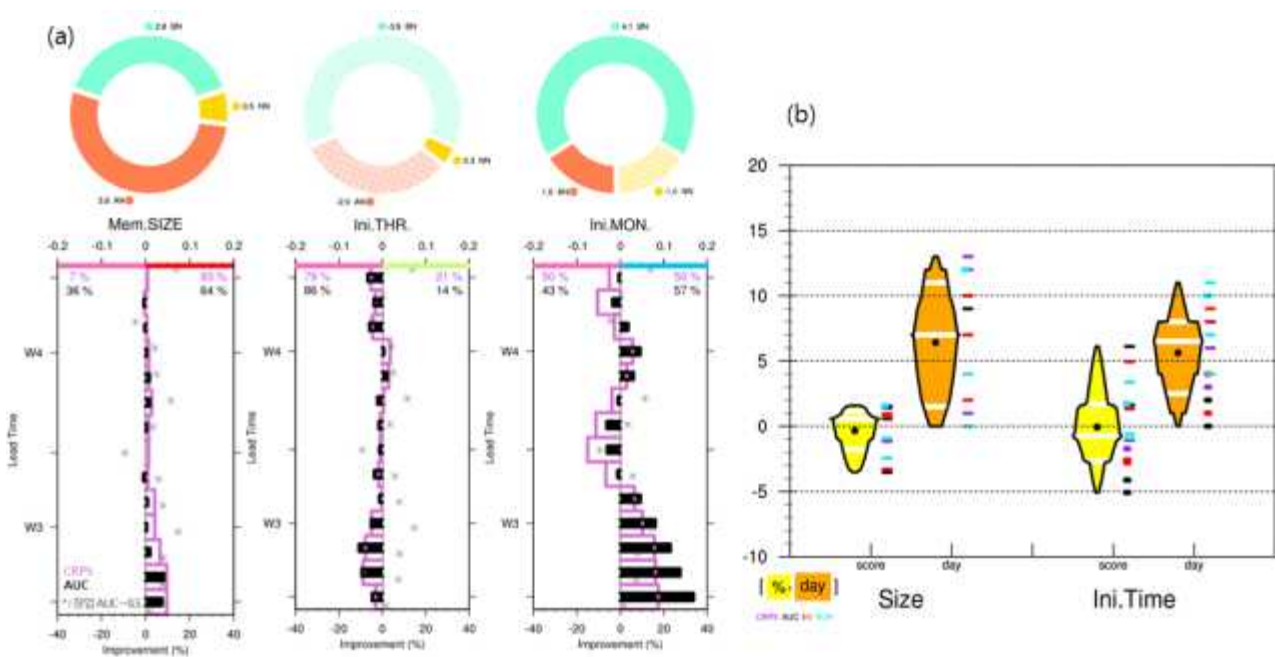


Figure 14. (a) Comparison between ensemble sensitivity experiments (for changing ensemble size and initial time) for the forecast improvement of 2m temperature in week 3 and 4. Purple and black bar indicates improvement of RPS and AUC comparing to the operational forecast, respectively. Gray asterisk is the value of AUC minus 0.5 and the value over 0 means the forecast is useful. The improvement of brier score for each forecast category (below normal, normal and above normal) is shown in the upper panel as a pie chart. (b) Comprehensive intercomparison for the various skill improvement on East Asia temperature forecast during 3 and 4 weeks lead time. The skill improvement is the improvement rate of forecast skill and the number of improved lead time (days) for each ensemble generation strategy (changing ensemble size and initial time) against operational forecast.

나. 기상청 계절내 예측 시스템(GloSea5) 현업 예측성 및 역학 특성 평가

(1) 현업 주평균 예측 통합 평가프레임 고도화

(가) 모형군 확장을 통한 상대적 평가의 안정성 확보

① SubX 프로젝트 모형 추가

앞서 언급했듯이, 2020년 과제에서는 S2S 프로젝트 5개로 제한된 모형군에 대한 스킬 비교와 평균장/기후값 평가를 수행했기에 모형간 비교, 특히 KMA-GloSea5의 모의 수준에 대한 객관성을 확보하기 어려웠다. 따라서, 추가적으로 모형을 추가하여 다중 모형 비교 및 상대적 성능 평가의 안정성을 확보할 필요가 있다. 이러한 배경 하에, 올해 과제에서는 S2S project 모형군들에 더해서 SubX project(Pegion et al, 2019)의 모형군까지 확장하여 상대적 성능 및 기후값 평가에 적용하였다. SubX가 제공하는 모형들 중에서 CREDYT 평가에 필요한 변수들이 대부분 가용하고, 2020년 검증을 위한 주평균 스케줄에 적절하도록 과거 재현 자료의 frequency가 충분한 4개 기관(EMC-GEFS, ESRL-FIM, NRL-NESM, RSMAS-CCSM4) 모형을(Table 1) 선정하였다. 실제 자료는 IRI 서버(<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Models/.SubX/>)를 통해 외부망의 서버에 일시로 다운로드 받았으며, 외부에 임시로 확보된 자료를 내부망으로 옮기는 반복 수업을 거쳐 두 달에 가까운 수작업을 통해 전체 4개 모형 자료를 HPC 서버로 내부 자원화할 수 있었다. S2S 모형들이 대부분 on the fly 형태로 매번 실시간 예측에 맞춰 과거 재현 자료를 재생산하는 방식을 갖는 데 반해서, SubX 모형의 과거 재현 자료는 fix된 날짜로 일정 기간 하나의 버전의 유지하는 방식을 취하고 있다. 따라서, 기후값을 생산하는 방식 역시 S2S와 일정 정도 차별화를 두어 SubX에서 제시하는 방법과 유사하게 처리했다.

② KMA-GloSea5의 상대적 성능

Global(G), Tropics(T), East Asia (EA) 세 평가 지역에서 T2M, PREC, Z500 세 변수에 대한 단정론적 평가 매트릭 Anomaly Correlation Coefficient (ACC)를 기반으로 9개 모형의 daily 예측성을 비교한 결과는 Figure 15a와 같다. 최고 성능수치의 1/2을 기준으로 각 모형의 예측 가능성을 계산한 결과(Figure 15a, bar graph), 예상할 수 있듯이 마젠타 색깔의 ECMWF가 G와 T 영역에서는 변수에 관계 없이 대부분 가장 긴 예측성을 보인다. 하지만, 동아시아 영역에서는 모형간의 차이도 거의 없고, 상층 변수 Z500 변수에서는 오히려 KMA가 가장 긴 예측일을 보여 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 주별 예측성 비교에서도 확률/단정 검증 매트릭에 관계 없이 ECMWF의 성능이 대체로 우수하다(Figure 15b). 그리고, HSS/CRPSS 등 확률/카테고리 검증 매트릭에서는 SubX 계열 모형들의 성능이 다소 저조하다는 것을 뚜렷이 알 수 있다. 자세히 살펴보면, 일부 변수/메트릭에서는 모델간 변별력이 그리 크지 않다는 특성이 있는데, 이는 일부 몇 개의 매트릭만으로 모형의 전반적인 성능을 단정하기에는 무리가 있고, 따라서 여러 종류의 매트릭을 통해 예측의 다양한 면모를 종합적으로 판단할 필요가 있음을 다시 한번 상기시키는 바다.

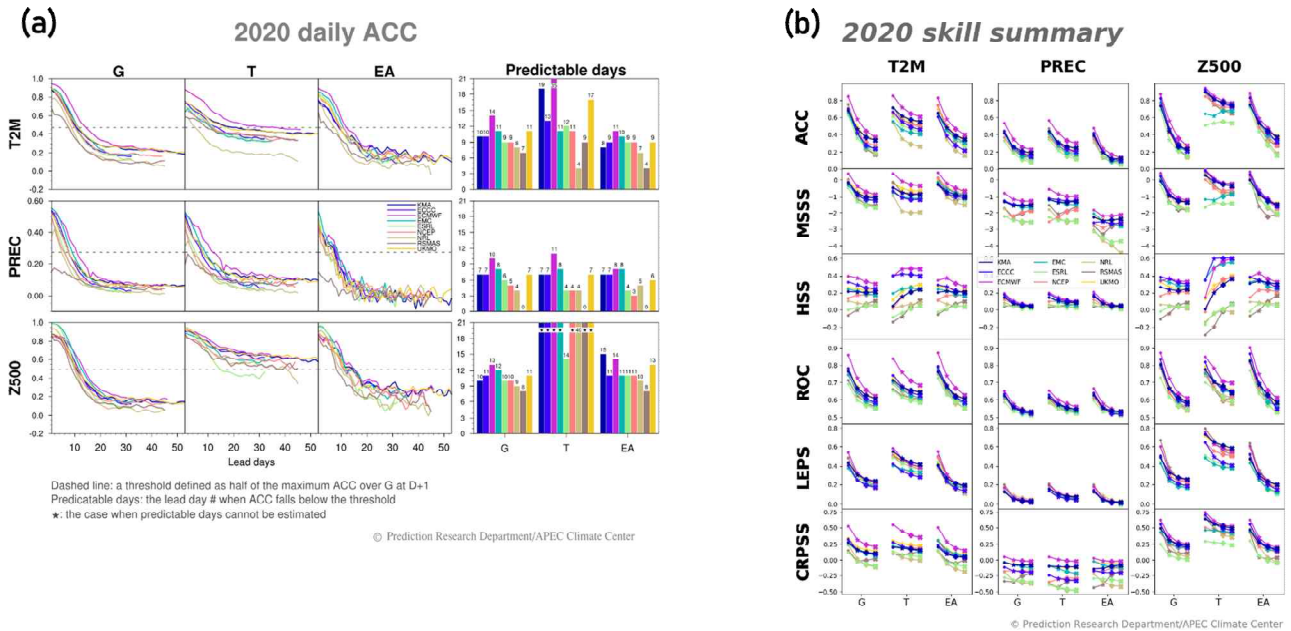


Figure 15. (a) (Left) daily ACC of 2020 real-time forecast for T2M, PREC, and Z500 over Globe, Tropics, and East Asia. (Right) ACC predictable day for each models that is the lead day number when ACC falls below the threshold. ★ indicates the case when predictable days cannot be estimated. (b) Six verification scores for 1- to 4-lead weeks 52 weekly mean real-time forecasts in 2020 over the Globe, Tropics and East Asia. Nine models including KMA-GloSea5(navy color) are displayed together with distinct colors.

(나) 평가 정보 온라인 공유 시스템 개발

① CREDYT 정보 공유를 위한 웹페이지 개발

2020년 과제에서 개발된 현업 주평균 예측 통합 평가프레임 (CREDYT)을 기반으로 매해 생산될 평가 정보가 유관 기관 및 학계에 유연하게 공유될 수 있도록, 총 180여 종의 평가 정보 그래픽을 포함하도록 설계한 온라인 기반의 웹페이지를 개발하였다(Figure 16). 기존에 모형 진단 평가 과제의 결과들이 보고서 상태로 대부분 사장되고, 비슷한 형태의 연구들이 반복적으로 수행되는 등 연구 자원 낭비가 일어나는 경우가 종종 있다. 하지만, CREDYT의 온라인 공유 페이지(Provisional domain: <https://credyt.link>)를 개발함으로써 이 연구 결과의 영속성을 담보할 수 있을 것으로 예상된다. 자세한 공유 시스템 개발 정보는 아래와 같다.

▶CREDYT 메인 페이지(Figure 16, 상단)와 Climatology, Forecasts, Climate Regimes, Dynamical Processes 네 평가요소별로 각 페이지를 할당하는 형태로 구조화하고, JavaScript/CSS/html 기반으로 웹페이지 프로그램을 완료함.

▶각 평가 요소 페이지의 좌측 패널 인덱스에 마우스를 위치시키는 것만으로 정보 그래픽이 호출되도록 작동방식을 구현하여 사용자의 정보 요청에 대한 웹페이지 반응성을 극대화 함.

▶심미성 강화를 위한 메인 화면 및 평가 페이지 상단에 최적화된 CREDYT 로고 디자인 개발을 완료 함.

▶각 평가 요소 페이지에 매해 생산된 CREDYT 정보가 Version 형태로 축적되고

drop-down 메뉴로 version year를 찾아 가게끔 설계 함.

▶추가적으로, 5 단계 과제에서 축적된 KMA-GloSea 개선 가이드라인 문서들이 pdf 형식으로 표출될 수 있도록 별도의 페이지를 마련함.

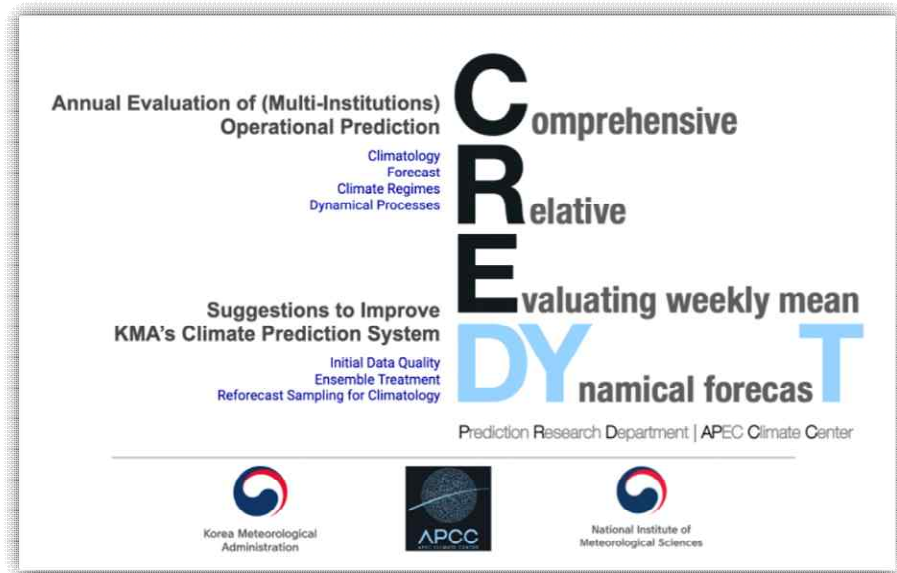


Figure 16. CREDYT webpage for the subseasonal model evaluation information online sharing (screenshot of main page)

② '21년 고도화된 CREDYT 콘텐츠의 웹페이지 적용

올해 CREDYT 고도화 계획 하에 추진된 SubX 모델 및 빙권 콘텐츠 추가 내용 역시 2020년 CREDYT 평가 결과와 함께 공유 웹페이지에 적용되도록 설계되었다. 상대적 평가를 위해 사용된 모델 설명, 원천 정보, 사사 문구 역시 웹페이지 하단 공간을 할당해 일목요연하게 정리하였다(Figure 17a). 북극 해빙 관련 평가 정보 역시 3개 평가 요소 페이지 적당한 위치에 인덱스를 추가하고 표출 적용 완료했다(Figure 17b). 다만, 이렇게 추가된 요소들은 2019년 현업 주평균 평가에는 소급 적용되지 않았음을 밝힌다.

(a)

DATA RESOURCES										
Source	Agency	GPC / Model	Time Range	Resolution	Forecast Ens. Size	Forecast Frequency	Hindcast	Hindcast Length	Hindcast Frequency	Hindcast Ens. Size
S2S	KMA	Secul	d 0-60	N216L85	4	Daily	On the fly	1991-2010	4/month (1, 8, 15, 22)	3
	ECCC	ECCC	d 0-32	0.45°x0.45°x40	21	Weekly (Thu)	On the fly	1995-2014	Weekly (Thu)	4
	ECMWF	ECMWF	d 0-48	T00839/319 L91	51	2/week (Mon, Thu)	On the fly	Past 20 years	2/week (Mon, Thu)	11
	NCEP	NCEP	d 0-44	T126L64	16	Daily	Fix	1999-2010	Daily	4
	UKMO	UKMO	d 0-60	N216L85	4	Daily	On the fly	1993-2016	4/month (1, 8, 15, 22)	7
SubX	EMC	GEFS	d 0-38	15°N (L64) 0.8° 795°E (0.8-35)	21	Weekly (Wed)	Fix	1999-2016	Weekly (Wed)	11
	ESR	FM	d 0-32	~50km L64	4	Weekly (Wed)	Fix	1999-2016	Weekly (Wed)	4
	NRL	NESM	d 0-45	T0358L50	1	4/week (Sat, Sun, Mon, Tue)	Fix	1999-2016	4/week (Sat, Sun, Mon, Tue)	1
	KOMOS	CCMA	d 0-45	0.9x1.25deg L26	9	Weekly (Sun)	Fix	1999-2016	Weekly (Sun)	5

• Variables: 2m temperature(T2M), Precipitation(PREC), Height at 900Pa(Z500)
 • Observations
 - ERA5 (<https://ods.climate.copernicus.eu/dsapp/#/search?text=ERA5%20back%20extension&type=dataset>)
 - GPCC (<https://www.noaa.gov/data/global-precipitation-climatology-project-gpcc-daily/access/>)

The S2S data (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/s2s/>)
 * We are grateful to KMA, ECCC, ECMWF, NCEP and UKMO as well as the S2S Prediction Project for their data and resources.

The SubX data (<http://red.ldeo.columbia.edu/SOURCES/Models/SubX/>)
 * We acknowledge the agencies that support the SubX system, and we thank the climate modeling groups (Environment Canada, NASA, NOAA/NCEP, NRL, and University of Miami) for producing and making available their model output. NOAA/NCEP, CNR, NASA, NOAA/NWS jointly provided coordinating support and led development of the SubX system.

(b)

The image shows three screenshots of the CREDYT 2020 website. The first screenshot (a) shows a table of data resources with columns for Source, Agency, GPC/Model, Time Range, Resolution, Forecast Ens. Size, Forecast Frequency, Hindcast, Hindcast Length, Hindcast Frequency, and Hindcast Ens. Size. The second screenshot (b) shows the 'Cryosphere' section of the website, which includes a list of cryosphere evaluation contents such as 'Mean Biases', 'Pattern Correlation Coefficient (PCC)', 'Relative Error (RMSE)', 'Seasonality', 'Arctic Sea Ice Temporal Variation within a Year', 'Index Representation', 'Dynamical Coupling', 'Sea-Air', 'Tropics-Midlatitude', 'Stratosphere-Troposphere', 'Oceanic Process', 'SST Variability', 'Earth System Interaction', and 'Summary'. The third screenshot (c) shows the 'Relationship between Climate Regimes' section, which includes a table of relationships between climate regimes and a list of cryosphere evaluation contents.

Figure 17. Screenshots of CREDYT webpage displaying (a) model data resources information, (b) cryosphere evaluation contents

(다) 빙권 콘텐츠 추가를 통한 평가 콘텐츠 확장

① 2020년 주평균 해빙 면적 검증

빙권 관련 콘텐츠는 북극 해빙 농도의 평년값, 트렌드 분석에 더해, 해빙 농도자료를 기반으로 추정된 해빙 면적에 대해 여러 분석을 수행하였다. 이를 위해서 모형의 latlon map projection을 25km 등격자 polar-streographic map projection으로 치환시키고, 15% 기준에 의해 얼음 격자를 카운트해서 해빙 면적을 계산하게 된다. 이때, NSIDC에서 제공하는 9개 북극 Sub regions에 대한 masking 자료를 적용하고, 북반구 전체 합산값까지 더해 총 10개 영역에 대한 2020년 KMA-GloSea5 해빙면적 주평균 시계열 예측성 평가를 수행했다. 아래 Figure 18는 북반구 전체 해빙 면적에 대한 2020년 평가 결과이다. 2020년 여름철 특히 7월 전후에 기후값 대비 급격한 해빙 면적 감소가 있었고 (Figure 18(좌하)), 이와 관련된 당시 북극 요란과 고위도에서의 웨이브 전파가 한반도/동아시아 몬순(장마/메이유/바이유)을 강하고 오래동안 지속시키는데 기여한다는 연구 결과들이 있다. 하지만 KMA-GloSea5의 경우 당시의 급격한 북극 해빙 면적 감소를 적절히 예측하지 못한다. 특히, 선행 주수가 길수록 훨씬 더 기후값에 가깝게 persistent한 예보를 내리는 경향이 강한 것을 알 수 있다. 2020년 북반구 전체 주평균 해빙 면적의 에러는 과거 11년 평균 에러에 비해 전반적으로 줄어들었고, persistent 기준 예보보다도 우수하고, 선행 주수 증가에 따른 에러 증가가 크지 않음을 알 수 있다(Figure 18(우상)). 하지만, 주평균 해빙 면적 아노말리 변동성에 대한 검증 결과는 세 경우 모두 유사한 결과를 보인다(Figure 18(우하)).

2020: Northern Hemisphere

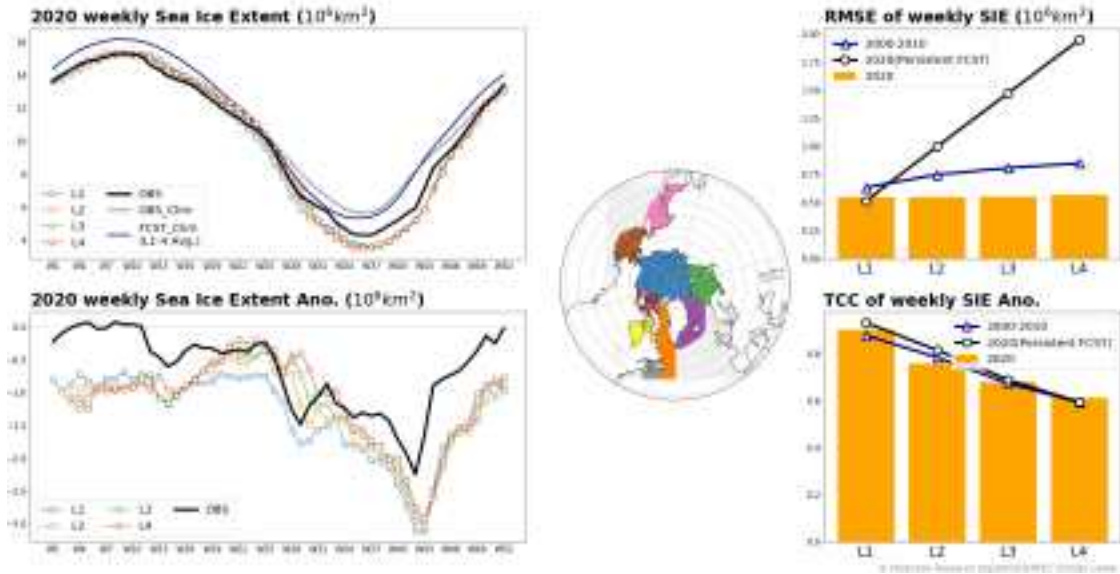


Figure 18. (left) 2020 weekly timeseries of northern hemispheric total sea ice extent for the observation and 1- to 4-lead weeks of KMA-GloSea5 and (right) their verification based on RMSE(Root Mean Squar Error) and TCC(Temporal Correlation Coefficient) metrics. Upper (lower) panels are the evaluation for total (anomaly) field.

② 북극 해빙의 spatiotemporal evolution 분석

지역별 melt-freeze timing에 근거한 해빙 면적의 시·공간 계절 사이클 분석 결과는 Figure 19와 같다. 여기서 melt와 freeze가 일어나는 시점은 각 지역 주평균 해빙 면적 기후값 시계열에서 1년간의 변화폭의 20%에 해당하는 값을 기준으로 설정했다. 기준 값 이하로 떨어지는 주를 그 지역 얼음이 녹는 시점, 기준 값 이상으로 올라가는 주를 그 지역 얼음이 어는 시점으로 정의하였다. 위도가 낮고 대야에 맞닿은 일부 지역은 해빙이 완전히 녹아 open sea 형태로 존재하는 구간도 존재하게 된다. melt-freeze의 시점을 지역별로 비교해 보면, 전반적으로 특히, 대서양 주변 바다에서 관측 대비 이른 melting이 KMA-GloSea5 모형에서 나타나고, 이는 북반구 전체 평균에서도 드러난다(Figure 19(중앙)). 하지만, freezing의 시기는 몇몇 지역에서 모형 오차가 들쭉날쭉하긴 하지만 전반적으로는 관측의 시점을 잘 따라가는 것을 알 수 있다. Melting의 regional sequence는 기본적으로 저위도에서 고위도 순서로 이루어지고 전반적인 경향은 모형이 관측을 잘 따르는 것으로 보인다(Figure 19(좌)). 하지만, inner arctic에서는 시계 방향으로의 녹는 순서가 KMA-GloSea5 모형에서는 반시계 방향으로 뒤집히는 오차를 확인할 수 있다. 관측에서 freezing의 순서는 melting의 순서를 반대로 뒤집어 놓는 형태이며, KMA-GloSea5 모형이 관측과 거의 유사하게 지역별 어는 순서를 재현하고 있음을 알 수 있다(Figure 19(우)).

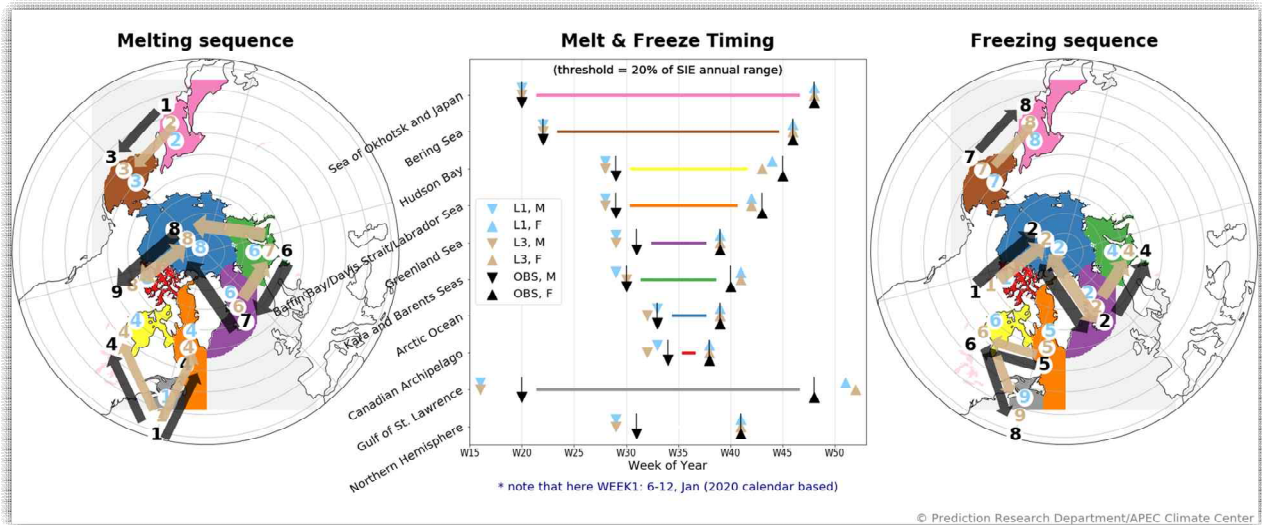


Figure 19. (center) Melting and freezing week isolated from 2000-2010 averaged sea ice extent(SIE) over 9 sub-regions and whole northern hemisphere. Regional sequence of SIE (left) melting and (right) freezing. Black, light blue, and sand colors denote the observation, KMA-GloSea 1-, and 3-lead week hindcasts, respectively.

③ 북극 해빙 면적 시계열 및 트렌드의 오차 분석

2000-2010 기간 11년에 대한 장기 평균값으로 추정된 KMA-GloSea5 해빙 면적의 계절 사이클은 대부분 지역에서 겨울철 과대 모의/여름철 과소 모의가 나타나 전반적인 annual range가 커지는 양상이고(Figure 20(좌)), 이는 선행 연구 결과와도 일치한다 (Park et al. 2018). Greenland Sea, Sea of Okhotsk, Bering Sea, Baffine Bay/Davis Strait/Labrador Sea 등 위도가 다소 낮고 대양과 맞닿은 지역에서 겨울철 과대 모의가 뚜렷하다. 반면에, Hudson Bay, Canadian Archipelago 지역처럼 대륙에 쌓인 내해의 경우는 여름철 과소 모의가 뚜렷하게 나타나는 특성이 있다. 2000-2010 기간은 지구 온난화 정체기 직전 기간으로, 이 기간 내 해빙은 예상할 수 있듯이 대부분 지역에서 해빙 감소 추세를 보인다 (Park et al. 2018). 여기서 모형이 관측에 비해 매우 급격한 해빙면적 감소 보인다는 점은 매우 인상적이다(Figure 20(우)). 북반구 전체뿐만 아니라, 각 지역에서도 선행 주수에 관계없이 KMA-GloSea5가 해빙 면적 감소를 과대하게 추정하고 있다.

KMA: Arctic Sea Ice Extent, 2000-2010

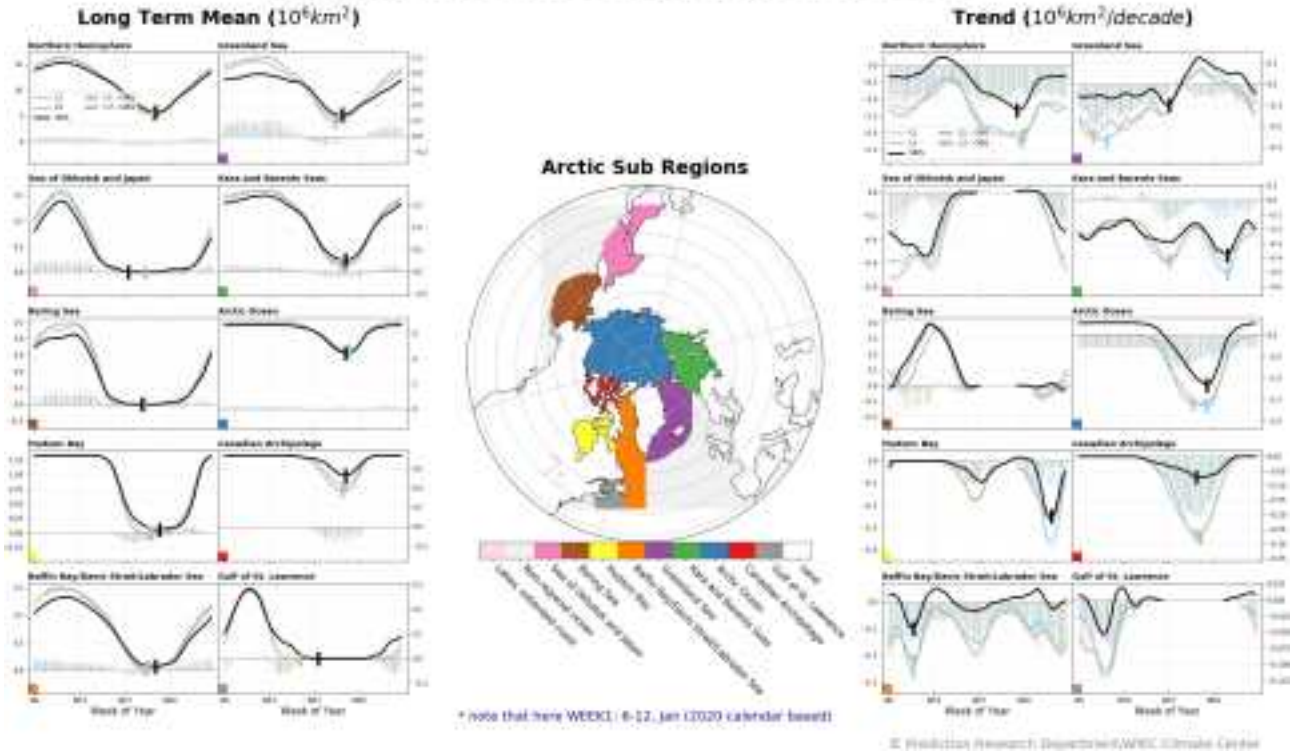


Figure 20. (left) Long-term mean and (right) trend of weekly sea ice extent(SIE) derived from the period from 2000 to 2010 over 9 sub-regions and whole northern hemisphere. The black line is for the observation. The light blue and sand colored lines are for 1- and 3-lead week reforecasts of the KMA-GloSea5. Colored bars represent the departure of KMA-GloSea5 from the observation. Short vertical lines denote weeks of (a) the minimum in SIE seasonal cycle and (b) the maximum in SIE reduction.

④ 북극 해빙이 주변 지구 시스템과 갖는 역학적 관련성 분석

지구는 점차 따뜻해지고 북극은 그보다 3배 더 따뜻해진다는 북극확장이 큰 이슈로 떠오르고 있다. Cohen et al. (2020) 에 따르면, 관측에서 warm arctic/cold continent 과정에서 일어나는 상층으로의 전파가 모형에서는 성층권 PV를 조절할 만큼 깊지 않다고 밝히고 있다. 계절 내 규모 예측에 있어 이러한 상-하층 커플링을 평가하고자 50hPa 바람 (성층권 Polar Vortex, PV)과 ART1 지수와와의 지연상관을 분석했다 (Figure 21(좌)). 동시상관에서는 PV와 ART1의 관계가 모형에서 적절히 재현되고, 2주 선행하는 PV가 지표의 ART1 지역을 데우는 과정도 잘 모의하는 것으로 보인다. 하지만, 반대로 ART1이 상층의 PV를 조절하는 과정은 잘 모의하지 못하고, KMA-GloSea5 선행 3주에서는 반대로 강하게 뒤집히는 것을 알 수 있다. ART1 지수가 정의되는 Kara-Barents (KB) 지역은 동아시아 특히 한반도 기후에 매우 중요하고 (Kug et al. 2015), 이 지역 해빙과도 밀접하게 관련되어 있다. 실제 KB 해빙의 계절내 변동 시그널이 지역 기후 및 원격 상관에 어떻게 기여하는지를 확인해 보았다 (Figure 21(우)). 관측에서는 KB 지역 warming이 해빙 감소에 2주 선행하지만, 이러한 해빙 감소가 2주 후에 이 지역 warming을 유도하지는 않는 것으로 나타난다. 하지만, 모형 선행 3주에서는 symmetric하게 해빙 감소가 그 지역 warming을 가져와 관측의 선행 관계 모의에 실패한 것으로 보인다. 하지만, 해빙 감소 2

주 후에 한반도 주변에 cooling이 나타나는 중위도 원격상관은 KMA-GloSea5 모형이 굉장히 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

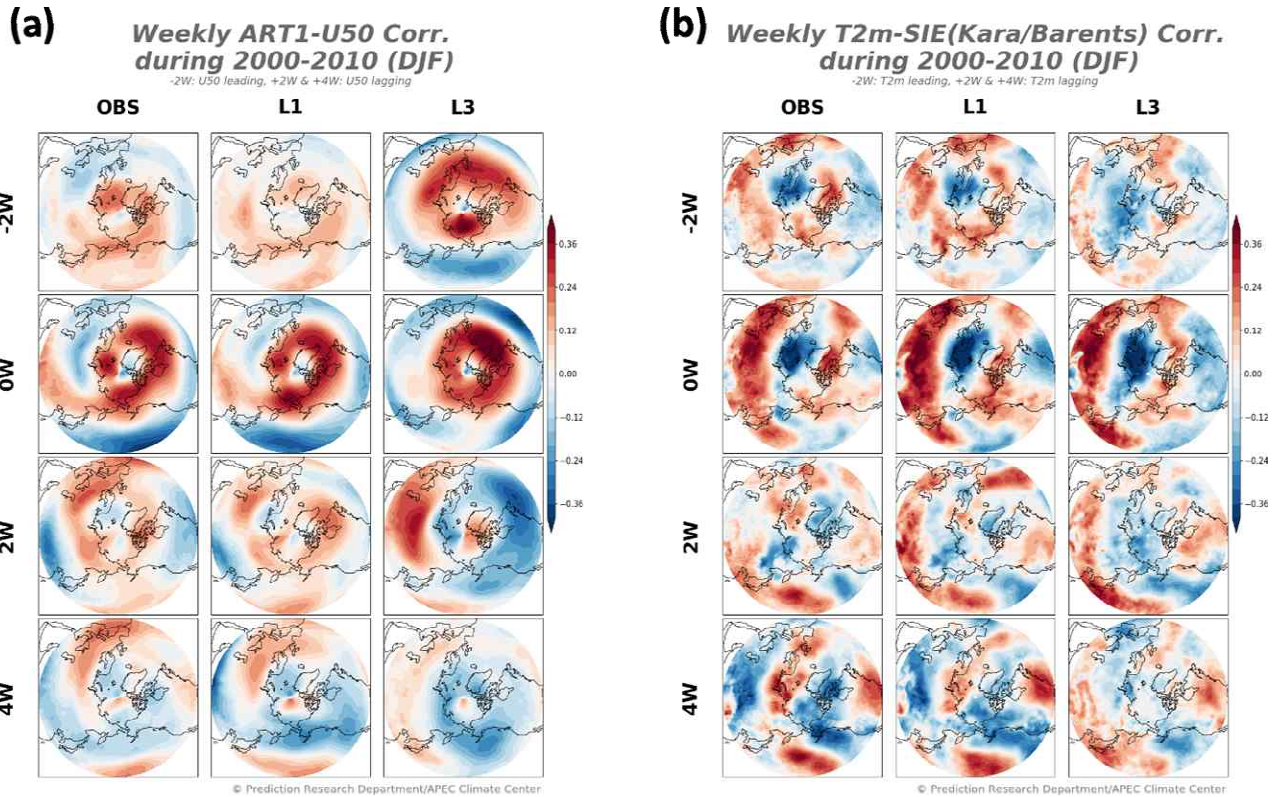


Figure 21. (a) Lead-lag correlation between weekly ART1 index and stratospheric zonal wind at 50 hPa (U50) at each grid and (b) lead-lag correlation between weekly Kara/Barents sea ice extent(SIE) index and near surface temperature (T2M) at each grid.

(2) 2020년 KMA-GloSea5 예측 종합 평가

(가) 2020년 주요 평가 정보 요약

① 평균 오차

KMA, UKMO, ECMWF 세 모형의 기온 장기 평균값에 대한 오차는 Figure 22와 같다. KMA/UKMO 두 GloSea 계열 모형은 남극 겨울철에서 뚜렷한 온난 오차가 있는데, 이것은 GloSea5의 오존 처방과 관련이 있고 GloSea6에서는 해결될 것이라고 한다. 북미 서부 지역의 온난 오차는 KMA가 지면 과정(실시간 토양 수분 초기화) 모듈을 국산화 하면서 UKMO와 달라진 것으로 파악된다. 마지막으로 검증에 위해 사용한 기준 자료에 대한 민감도 역시 이러한 오차에 기여할 수 있을 것이다. 실제 2020년 reforecast 초기장으로 ERA-Interim 자료가 사용되었지만 평년값 오차 검증에서는 ERA5 자료를 사용했다. 이는 ERA-Interim 자료가 더 이상 생

산되지 않기에 실시간 예측 검증과의 일관성을 위함이다. 두 재분석장간의 차이는 남극에서 매우 뚜렷하며(Gossart et al. 2019), 이 차이가 KMA/UKMO 겨울철 평균 기온 오차에 투영되는 듯한 모습을 보인다. 재분석 자료의 지속가능성과 검증의 일관성을 고려하면, 향후 KMA-GloSea reforecast의 초기장을 ERA5로 치환하는 문제에 대한 고민도 필요해 보인다. 앞서 언급한 2020년 평균 오차 패턴은 2019년 버전과 비교하면 우리 눈이 인식하지 못할 만큼 유사하다. 즉, 이는 GloSea 모형이 갖는 구조적 오차로서 향후 이를 개선하기 위한 노력 및 지속적인 평가가 필요함을 의미한다.

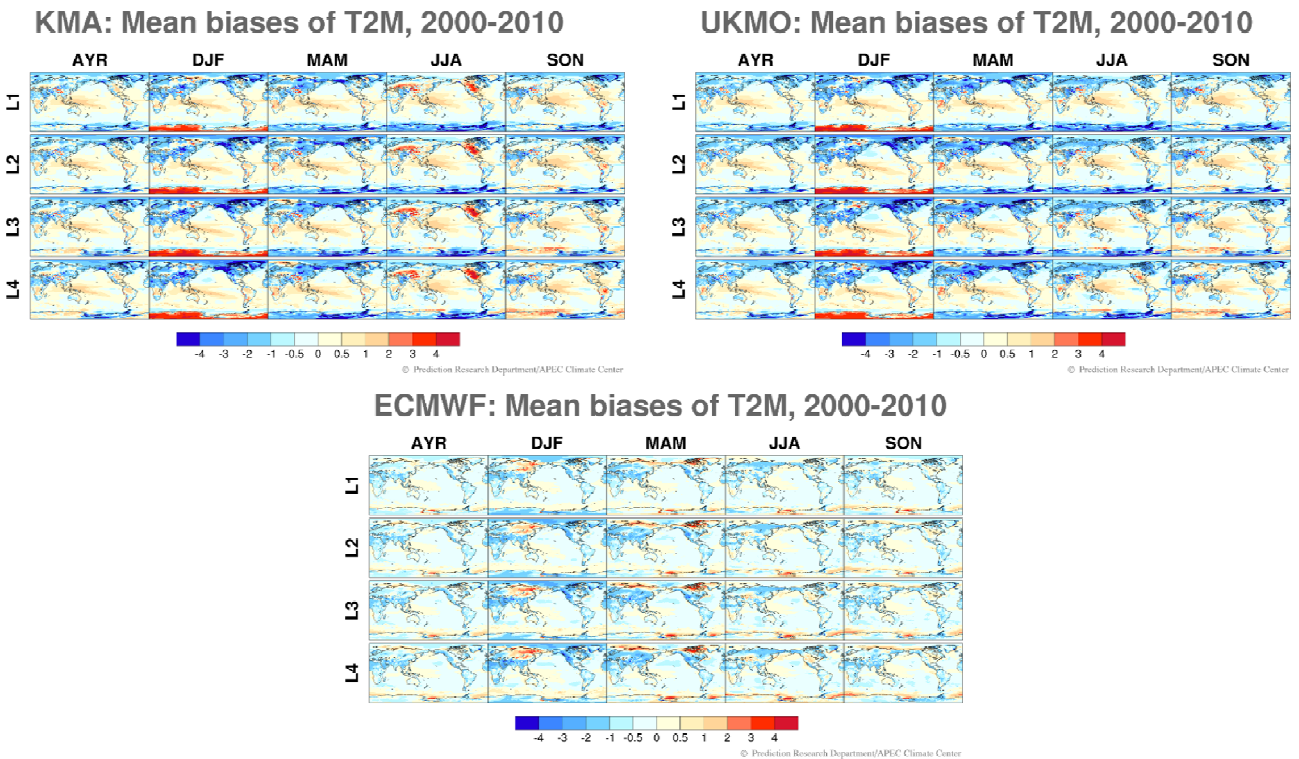


Figure 22. Annual and seasonal aggregation of weekly mean T2M biases at four different lead weeks for KMA, UKMO, and ECMWF during 2000-2010.

② 2020년 KMA-GloSea5 주평균 예측성 평가

SubX 4개 기관(EMC-GEFS, ESRL-FIM, NRL-NESM, RSMAS-CCSM4) 모형(Table 1)까지 추가한 총 9개에 모형 예측 비교에서 드러난 KMA-GloSea5의 상대적 성능은 아래와 같다. 전반적인 모형 성능 비교를 위해, 주평균 예측에 대한 2개의 결정론적 검증, 4개의 확률 카테고리 검증 스코어를 순위 기반으로 합산해서 모형 순위를 추출하는 RVMM(Rank-based Verification Metrics Merging) 기법을 작년에도 개발하였다. 지위고도에 대한 KMA 순위는 선행 3/4주에서 1위인 격자들이 많아지고, 우측의 line plot에서 표출하는 지역 평균된 순위도 선행시간에 따라 점차 증가하는 걸 알 수 있다(Figure 23a). 1등 모형은 대부분 격자에서 마젠타 컬러의 ECMWF지만, 3/4주에서 초록색 계열 EMC-GEFS이 1등을 차지하는 격자가 많아진 것을 알 수 있다(Figure 23b). 이 GEFS 모형은 중기 예측 모형을 시간 확장해서 계절내 규모를 예측하게 설계한 모형으로, MJO propagation 재현 성능이 우수하다는 기존 연구 결과가 있다 (Kim et al.

2019). 여기서, 계절내 예보의 모델 원천에 대해 비교해 보면, GEFS는 웨더 모델의 끝자락을 사용하는데 반해, 기상청 글로씨는 계절예측모델의 앞부분을 따서 쓰고, ECMWF는 웨더 모델과 예측모델을 붙여서 사용하고 있다는 특징이 있다. 향후 계절내 규모 예측 영역에서 어떠한 모델 원천을 가진 예측이 우수한지에 대한 경쟁도 주목할 포인트가 아닌가 생각된다.

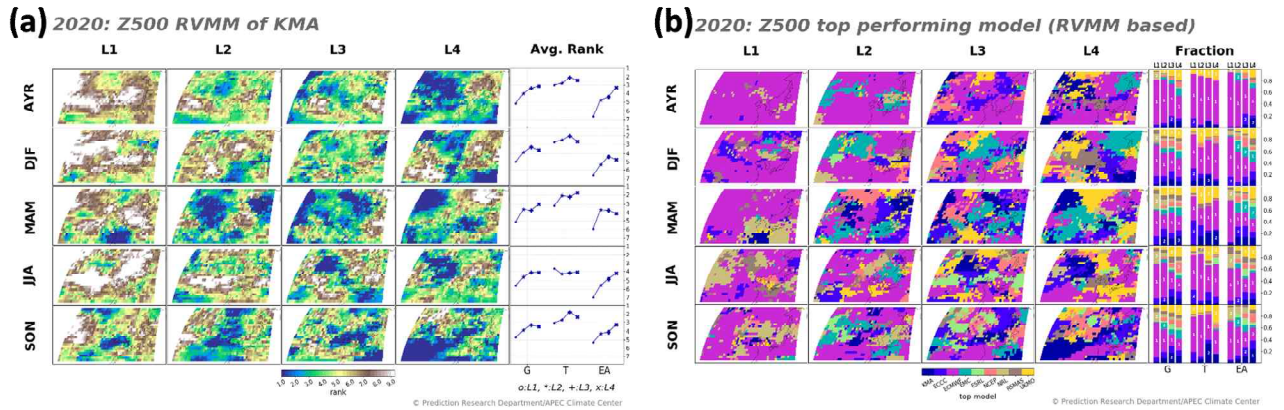


Figure 23. (a) (the leftest four columns) ranking of KMA-GloSea5 out of nine models at each grid for 1- to 4-lead week forecasts in 2020 and (5th column) regionally summarized ranking of KMA-GloSea5 for the Globe, Tropics and East Asia domain. (b) (the leftest four columns) top performing model at each grid and (the rightest column) the grid fraction of individual models getting the first place over three regional domains.

③ 계절내 역학 과정 재현성 평가

㉞ 범열대 해양 변동성 진단

SST는 해양과 대기 사이에서 에너지를 주고받는 영역이기 때문에, 결합 모형에서 SST 변동 및 역학을 현실적으로 재현하는 것은 매우 중요하다. 범열대 해양 변동성을 SST에 대한 EOF 분석을 통해 확인해 보았다 (Figure 24). 첫 번째 모드로는 97/98 시기와 유사하게 태평양에 엘니뇨, 인도양에 양의 IOD, 대서양 적도 cooling/아적도 warming 패턴이 나타나고, KMA-GloSea5도 매우 유사하게 첫 번째 모드를 재현하고 있다. 두 번째 모드는 동태평양 Cold Tongue 지역이 차갑고 나머지 해양은 모두 따뜻한 패턴으로 KMA-GloSea5가 이를 적절히 재현하지 못하는 것으로 보인다. 특히, 태평양에서 동서방향 asymmetry가 선행 3주차에 반대로 나타나, Subsurface ocean process에 대한 면밀한 검토가 필요해 보인다. 또한, 전체적인 해양 변동에서 주요 두 개의 모드가 차지하는 변동량이 관측에 비해 과대 추정된 것 역시 검토할 점이다.

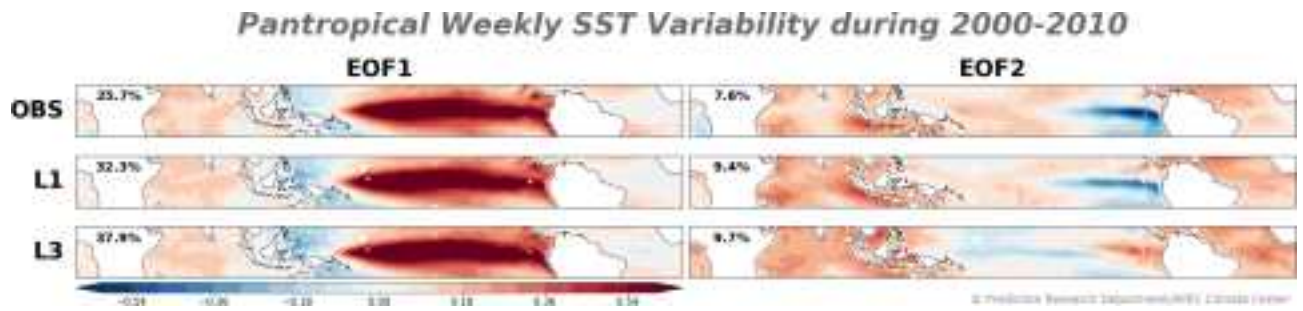


Figure 24. First and second loading vector from EOF(Empirical Orthogonal Function) analysis of weekly SST anomalies over the latitudinal band of 20° S-20° N.

㉔ 열대-중위도 역학적 커플링 진단

7월에 한반도 지역 낮은 기온/강한 강수 발생에 있어 1개월 선행하는 인도양에서의 강제력이 중요하고 (Kim and Kug, 2021), 중국 메이유 역시 인도양의 IOBM과 관련되어 일시적으로 북상하는 북서태평양 고기압의 역할의 중요성이 밝혀져 있다 (Ding et al., 2021). 선행 연구 결과와 유사하게, 계절내 규모에서도 동아시아 지역 강수가 4주 이전의 인도양 온난 시그널과 연관되어 있음을 확인할 수 있다 (Figure 25). 하지만, 안타깝게도 선행 3주에서 KMA-GloSea5는 이러한 인도양-동아시아 관련성을 적절히 재현하지 못한다. 이는 동아시아 강수 관련 좀 더 깊이 있는 dynamical/physical 과정에 대한 면밀한 평가의 필요성을 제기하며, 다음 파트에서 제시할 강수/구름 관련 모듈/계수 민감도 실험 연구의 타당성/정당성을 부여한다.

Weekly SST-EA(Prec) Corr. during 2000-2010 (JJA)

Box: East Asia, Line: 30S-20N avg., -4W & -2W: SST leading, +2W: SST lagging

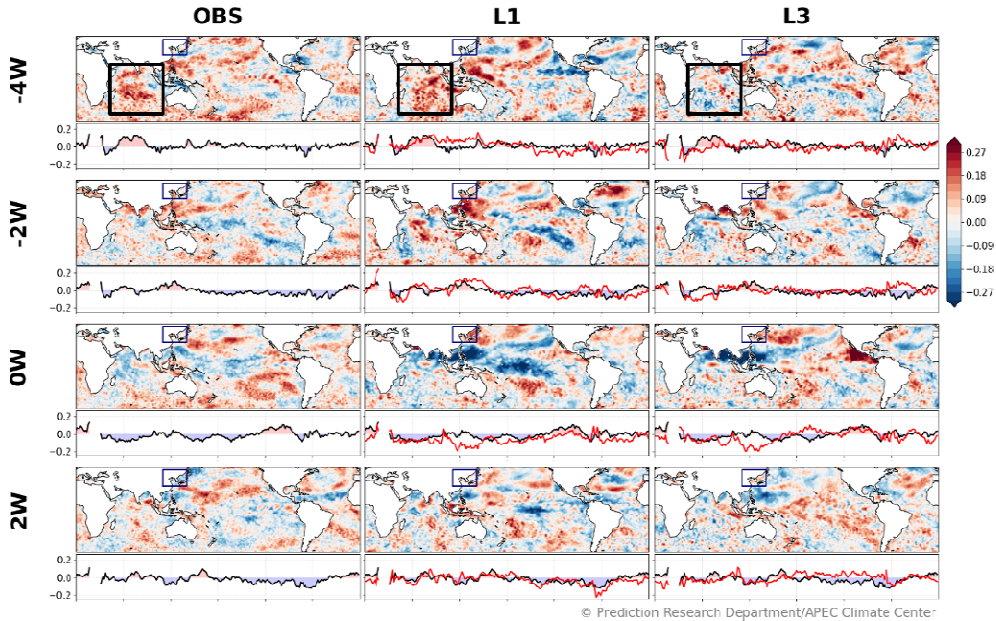


Figure 25. Lead-lag correlation between East Asia averaged rainfall and SST at each grid during summer season (JJA). Here, East Asia region is defined as a domain covering 75° -150° E, 15° -60° N. Black boxes at upper layer enclose the Indian Ocean area.

(나) KMA-GloSea5 모형 역학 특성 진단

① 계절내 예측 원천 평가

계절내 규모 예측 원천에 관한 메모리는 해양 강제력이 완전히 지배한다고 하기엔 짧고, 날씨 예보처럼 대기 초기장 자체에 의존하기에는 상대적으로 길다. 따라서, 다양한 인자들이 매우 복잡하게 경쟁하는 형태이고, 그렇기에 이 규모에 대한 예보 개선은 매우 도전적일 수 밖에 없다. 어떤 기후 리짐들의 초기 상태가 계절내 주평균 예측성을 좌지우지 하는지에, 각 기후 리짐들의 상대적 기여도는 어느 정도인지를 산출하고 가시화하였다(Figure 26). 2020년 과제에서 개발한 이 방법론은 각 지수에 대해서 예보 시작일 직전 1주일 관측 지수와 도메인별 ACC 시계열의 R제곱 값을 계산하고, 이 지수들의 상대적인 비율을 파이 그래프로 표출하는 방식이며, 이 때 파이의 면적은 R제곱 전체 총합에 비례하도록 설계되었다. 북반구 가을철 (SON) 결과를 확인하면(Figure 26), 선행 주수에 관계없이 전구, 열대 지역 계절내 예측성의 주요 원천은 ENSO, DMI, MJO 등 수권에 해당하는 기후 지수임을 알 수 있다. 하지만, 동아시아의 경우, QBO, PV, AO, ART2의 기여도가 주요한 것으로 나타나 수권 외에 성층권, 대류권, 빙권 지수가 크게 기여하는 것으로 나타났다. 하지만 열대와 달리 선행 주수에 따라 최대로 기여하는 기후 리짐이 들쭉날쭉 한데, 이는 계절내 역학의 복잡성에 기인한 것으로 보인다. 또한, 중위도의 경우 다양한 강제력이 한꺼번에 작용하고 각각을 분리하는 것이 쉽지 않다는 점 역시 계절내 예측 원천의 항상성을 저해하는 데 역할을 한 것으로 판단된다.

Initial predictability source of Z500 for SON

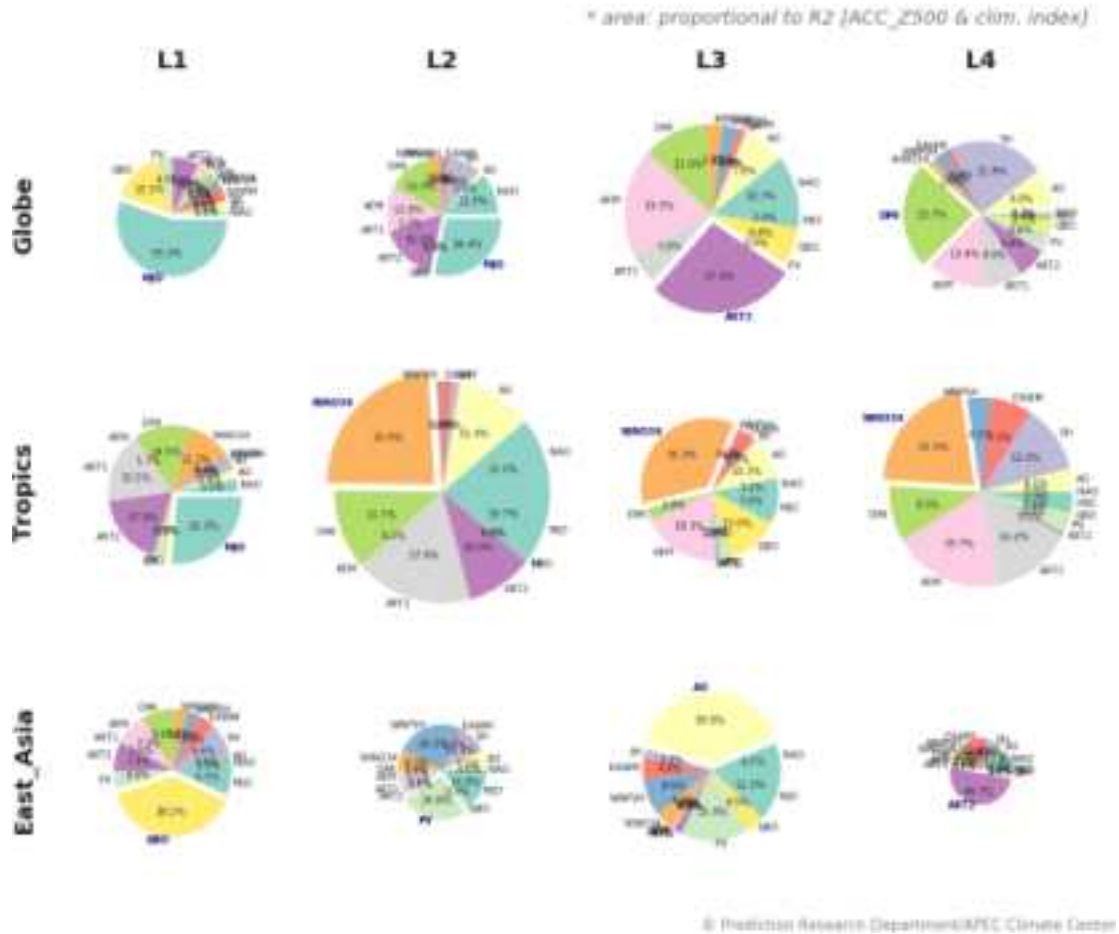


Figure 26. Pie charts showing the relative contribution of ten climate regime strength in the 0-lead week (corresponding to -3 to +4 lead days) to weekly mean Z500 forecast ACC skill during SON season. Top contributor is displayed with a spaced pie and navy color text.

② 지구시스템간 연결성 진단

실제 자연은 대기, 해양뿐만 아니라 이들과 상호 작용하는 지면 과정, 담수 순환, 식생 작용 등 다양한 시스템들이 연결되어 있고, 그들 간의 상호작용을 통해 자연 현상이 발현된다. 기후예측모형에서도 역시 이러한 지구 시스템간의 결합을 재현함으로써 예측에서의 개선을 타진하려는 여러 시도들이 이루어지고 있다. 2020년 CREDYT 개발 당시, Chord 다이어그램을 기반으로 가장 기본이 되는 대류권-성층권-수권-빙권간의 연결상태를 진단하는 메트릭을 고안하였고, 올해는 3개의 기후 리짐을 추가해 총 13개 기후 리짐의 14개 지수값을 활용하게끔 개선하였다. 기후 지수간의 상관 계수 절대값에 해당하는 Chord의 개수를 세팅하고, 이를 바탕으로 기후 지수간(Figure 27a, 상단) 연결성을 제시하게 된다. 이 때, Chord의 너비가 넓고 개수가 많을수록 연결성이 강함을 의미한다.

13개 기후 지수를 해당하는 대류권, 성층권, 대류권, 수권에 할당시키고, 각 시스템간의 연

결 조합에 따라 chord 컬러를 세팅하면 지구 시스템 간 연결성을 진단할 수 있다(Figure 27a, 하단). 예를 들어, 와인 컬러의 chord는 수권-빙권 조합에 해당하며, 이 색에 해당하는 chord만 확인하여 관측과 모형간의 양상 비교가 가능하다. 각 컬러에 해당하는 코드 개수를 합산하여 지구 시스템간의 연결 상태를 쉽게 비교할 수 있는데(Figure 27b, 누적 막대그래프), 와인 컬러의 수권-빙권 모형내 연결성이 북반구 가을철만을 제외하고 대부분 관측에 비해 강화된 것을 알 수 있다. 또한, 모형 선행 3주에서 지구 시스템 간 총 접합 강도가 북반구 가을철에만 유독 관측 대비 매우 약한 것을 확인할 수 있다. 이는 2019년 버전에서도 유사하게 나타나는 특징이다 (Figure 27c). 하지만, 다른 계절, 특히 북반구 봄/여름철 연결강도는 2019년 버전에 비교해 다소 과대 추정된 점을 확인할 수 있다. 2019/2020 버전 모두에서, 선행 3주차에서 수권 내부 연결 강도가 여름/가을철에 일관되게 과소 추정되는 것은 흥미롭다. 기후 예측 모형의 주요 예측 원천인 수권의 기후 지수들 간의 관련성 약화에 대한 향후 적극적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

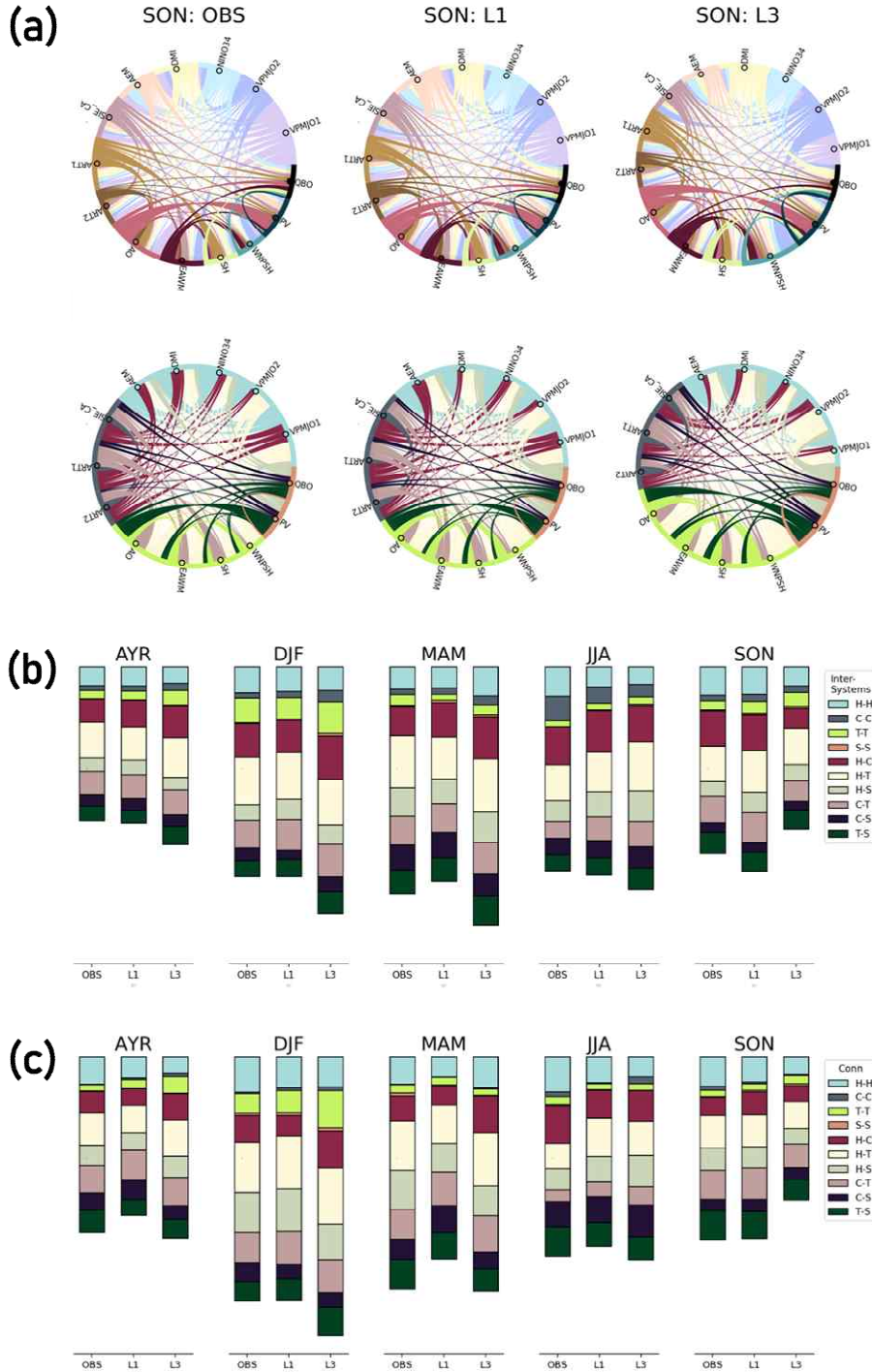


Figure 27. (a) Chord diagram showing the strength of links among (upper) 14 climate indices and (lower) four earth systems for (the leftest) the observation, (second and third columns) 1- and 3-lead weeks forecasts based on KMA-GloSea5 2020 hindcasts. Stacked bars showing the total number of chords connecting earth systems of 10 different combinations based on (b) 2020 and (c) 2019 hindcasts.

다. 동아시아 강수에 대한 모형 오차 특성 진단

(1) GloSea5 vs GloSea6 역학 특성 비교

(가) GloSea5 동아시아 여름 강수 계절내 예측 특성 분석

① 동아시아 여름 강수 계절내 변동 및 오차 분석

동아시아 여름철 강수는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 발달하며, 일본의 바이유와 중국의 메이유를 시작으로 점차 북상하면서 우리나라 장마에 영향을 준다. 우리나라에 영향을 주는 강수는 6월 중국 남동부, 한반도, 일본을 따라 남서-북동 방향으로 기울어진 모양의 강수 밴드가 위치하고 시간에 따라 점차 북상하면서 강수 최대 구역이 북쪽으로 이동하다가 8월에 다시 약화 되는 특징을 보인다 (Figure 28). 계절내 예측성 (리드 타임 3주)을 살펴보면, GloSea5는 6월부터 7월 중순까지 북동진하는 동아시아 여름 몬순 강수를 약하게 모의하는 반면 서태평양 여름 몬순 강수는 매우 강하게 모의하며, 이러한 특징은 리드 타임이 길어질수록 강해진다. Figure 28의 검은 박스는 본 연구에서 정의한 북동아시아 여름철 강수 (NEASR) 및 북서태평양고기압 (WNPSH)의 영역을 나타낸 것이다.

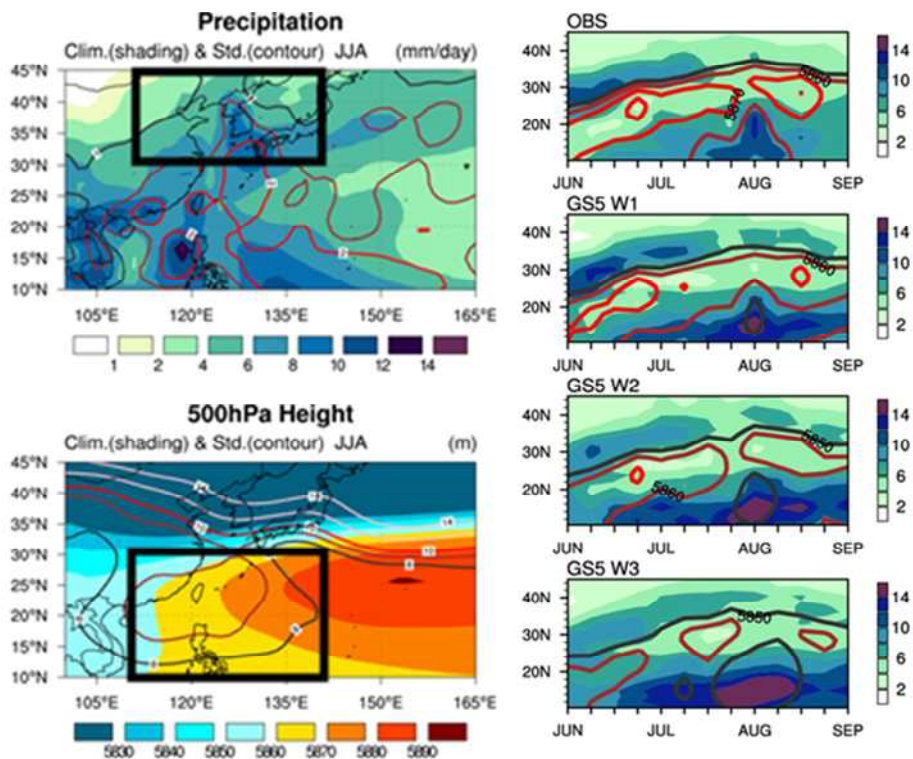


Figure 28. (Left) JJA mean (shading) and standard deviation (contour) of precipitation and 500hPa geopotential height for the period of 1997-2010. The black boxes indicate the area for calculation of NEASR and WNPSH index. (Right) Time-latitude cross-section of weekly mean precipitation (shading) and 500hPa geopotential height (contour) from observation and GloSea5 hindcasts.

본 연구에서는 6월 초부터 7월 중순 (21주에서 25주)의 기간은 P1, 7월 중순부터 8월 말 (26주에서 31주)까지의 기간은 P2로 여름철 계절내 기간을 2개로 구분하여 계절내 강수 특징을 살펴보았다. 여름철 계절내 기간의 정의는 북서태평양 고기압의 주평균 경년변동 특성의 유사성에 기반하였다 (Table 9). 여기서 정의된 여름철 계절내 기간은 Figure 28에서 제시한 여름철 강수의 위도별 특징이 뚜렷이 나타나는 7월 중순을 기점으로 동아시아 몬순 강수가 약해지고 서태평양 여름 몬순 강수가 강해지는 시기와 일치함을 알 수 있다.

Table 9. (Left) standard deviation of Z500 in the boreal summer (Right) The definition of subseasonal periods within boreal summer in terms of WNPSH. The numbers mean the temporal correlation coefficients of Z500 over WNPSH region between two consecutive weeks.

Weeks	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26	26-27	27-28	28-29	29-30	30-31
CC	0.31	0.52	0.73	0.67	0.52	0.08	0.55	0.72	0.33	0.7	0.41
period	P1 : 6/9-7/15 (W21-W25)					P2 : 7/17-8/31 (W26-W31)					

Figure 29는 우리나라를 포함하는 북동아시아의 여름철 계절내 강수의 예측성능을 나타낸 것으로, NEASR 강도의 경년변동에 대한 예측성은 리드 타임에 따라 감소하며, 특히 3주 이후 급속히 감소하여 예측성이 전무한 수준이 된다. 계절내 예측 (P1, P2) 성능은 여름철 계절 (JJA) 예측에 비해 낮고, 여름철 계절내 강수 강도의 위상을 전혀 모의하지 못한다.

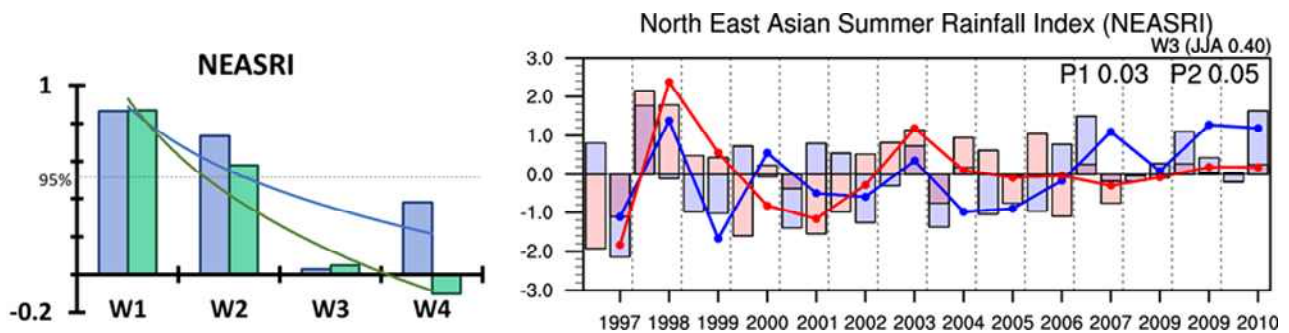


Figure 29. Temporal correlation coefficients (TCC) between the predicted North East Asian Summer Rainfall (NEASR) index in P1 (blue bar) and P2 (green bar) from GloSea5 and those from ERA5. (Right) Time series of the NEASR indices in P1 and P2 from the observation (red bar) and GloSea5 hindcasts (blue bar) with 3 week lead time. The lines denote JJA mean value. The numbers in the left upper corner in the figure indicate TCC skills between the predicted indices and those from observation.

여름철 계절내 강수 및 순환장의 평균 분포와 GloSea5의 모형 오차를 살펴보았다 (Figure 30). GloSea5는 P1의 동아시아 여름 몬순 강수를 매우 약하게 모의하는 반면, 서태평양 여름 몬순 강수는 매우 강하게 모의하며 이러한 오차는 리드 타임에 따라 강해지는 특징을 보인다. 동아시아 여름 강수 오차는 WNPSH 모의 특성 및 오차와 매우 높은 상관관을 가지는데, WNPSH를 매우 약하게 모의한다. GloSea5는 서태평양 지역 500hPa 지위고도의 강한 음의 편차는 저기압 순환을 약화하며 몬순 트라프를 강화시켜 그 남쪽의 몬순 흐름과 수분 수송을 강화함으로써 필리핀 동부에 양의 강수 편차에 기여한다. 또한 중국 동부로의 수분 이동을 약화시켜 강수량의 음의 편차를 초래하며, 강수대의 계절내 북쪽 이동에 따라 음의 강수 편차는 P2에서 다소 북쪽으로 이동하고 중국 남부와 남서부에서는 양의 강수 편차를 나타낸다.

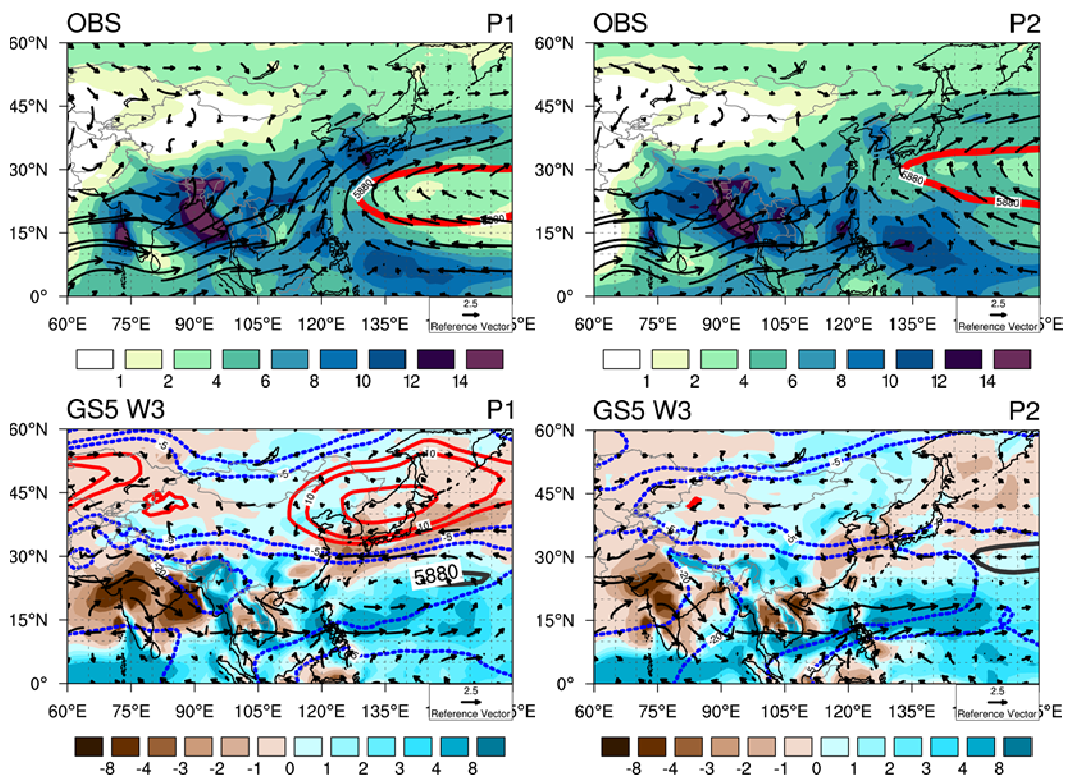


Figure 30. Climatological precipitation (shading), 500hPa geopotential height (contour) and 850hPa horizontal winds (vector) from observations, and their biases from GloSea5 hindcasts.

Figure 31은 여름철 계절내 기간에 대해 110-140E 지역 평균 강수량의 위도-시간 단면도를 나타낸 것이다. P1 기간에 서태평양에서의 강수는 위도적으로 크게 두 개의 주요 강수 구역으로 구분되며 뚜렷한 경년변동을 나타낸다. 적도에서 약 20N 사이에 발견되는 주요 강수대는 열대 대류 시스템과 관련되며, 30N-40N 사이에서 발달하는 주요 강수대는 동아시아 전선과 관련된다. 또한 두 주요 강수대 사이에 위치한 상대적인 건조 영역은 WNPSH의 경년변동이 뚜렷이 나타나는 지역으로 (10-30N) 강한 대류활동이 나타나는 지역이다. 이러한 강수의 공간 구조는 WNPSH 지역이 동아시아 전선대와 관련된 중위도 영향과 열대 대류 지역과 관련된 열대

영향 모두에 의해 제어될 수 있음은 의미한다. P2 기간의 서태평양 강수대의 위도별 분포는 P1과 비교해서 뚜렷한 계절내 특징을 나타낸다. P1에서 나타났던 중위도 동아시아 전선과 관련된 강수대가 확연히 약해지는 반면, 열대 대류와 관련된 강수대가 다소 북상하면서 북쪽으로 확장하고 강수 강도가 강해지는 특징을 보인다. 이러한 결과는 서태평양 지역의 계절내 강수 특징에 대한 이전 연구와 일치하는 것으로(Chou et al., 2009; Wang and LinHo, 2003), 6월 초에 강한 열대 대류가 발달하고 7월 말에 강수대가 북쪽 20N으로 점프하며 이는 WNPSM의 발달과 관련되는데 같은 시기에 동아시아 전선 강수대가 사라진다고 제시한 바 있다. 따라서 P2 기간의 WNPSH 지역은 열대 서태평양 대류대의 영향을 많이 받게 된다. 열대 서태평양의 대류 활동은 엘니뇨 활동과 밀접한 관련이 있으며 이는 P2 기간의 WNPSH가 엘니뇨 해에 북서태평양의 억압된 대류의 영향을 크게 받음을 의미한다. 엘니뇨 해에 열대 대류 강수 지역은 더 작은 지역으로 제한되며 강수 강도가 약한 것으로 알려져 있다. GloSea5 는 앞서 제시한 서태평양에서의 여름철 계절내 강수의 위도별 공간 분포를 잘 모의하지 못한다. 특히 P1에 중위도에 나타나는 동아시아 전선과 관련된 강수대를 과소 모의하는 반면 열대 대류 시스템과 관련된 강수대를 과대 모의하며, 두 강수대의 경년변동 특성을 거의 모의하지 못한다. P2의 주요 강수대인 서태평양 여름 몬순 강수의 북상은 다소 모의하는 편이나 여전히 과대 모의하는 특징을 보인다.

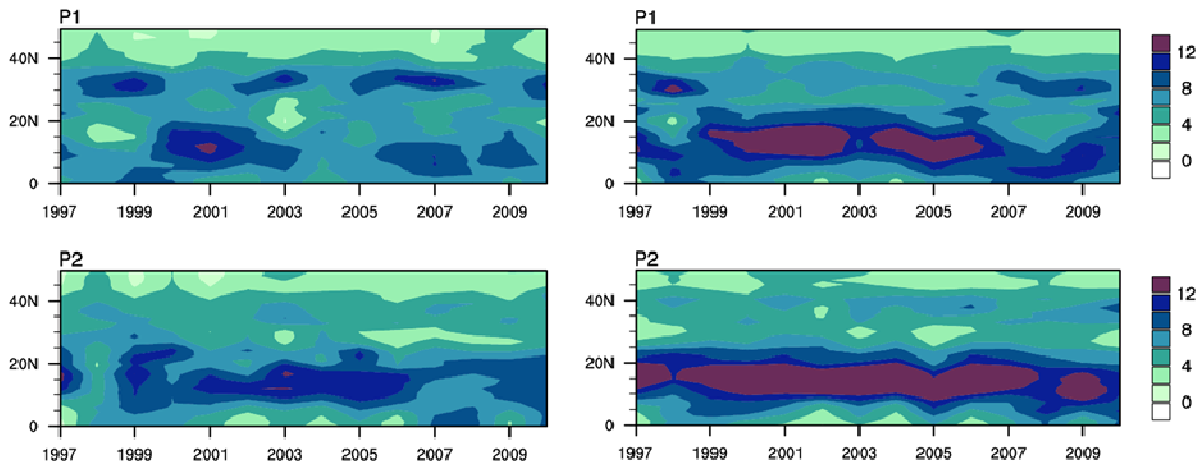


Figure 31. (Right) Observed and (left) simulated latitude-time cross section of the precipitation averaged over the region of 110-140E from 1997 to 2010 for P1 and P2.

② 북서태평양 고기압의 계절내 변동 모의 특성 및 관련 오차 분석

북서태평양 고기압(WNPSH)은 동아시아 여름 몬순 시스템의 결정적인 요소 중 하나로, 고기압의 북서쪽 측면의 북서풍을 통해 저위도의 많은 수증기를 동아시아의 중위도로 운반하는 역할을 한다 (Ninomiya and Kobayashi 1998; Lu and Dong, 2001). WNPSH은 강한 경년변동을 나타내며, WNPSH의 서쪽으로의 확장은 북서태평양 지역에서 고기압성 순환을 야기시킨다. 또한 WNPSH의 여름철 계절내 변동성은 동아시아 지역의 주요 강수대를 북쪽으로 점프시키는 역할을 한다. 따라서 북서태평양 고기압의 강도와 위치는 동아시아 여름 몬순 및 강수 변동에

직접적인 핵심 요소로 인식되고 있다 (Wang et al. 2000; Lee et al., 2005, Yuan et al., 2016). 이 장에서는 동아시아 기후의 계절내 예측에 있어 핵심 구성 요소인 WNPSH의 계절내 변동 특성을 살펴보고 GloSea5의 예측 특성 및 관련 오차를 분석하고자 하였다.

Figure 32는 WNPSH 강도의 시간적 위상에 대한 계절내 예측성능을 나타낸다. WNPSH 강도의 경년변동에 대한 예측성은 리드 타임에 따라 감소하지만, 4주까지 0.83 이상의 매우 높은 예측성능을 나타낸다. 계절내 예측 (P1, P2) 성능은 여름철 계절 (JJA) 예측에 비해 다소 낮게 나타지만 4주 이후까지 0.01 유의 수준을 넘는 높은 스킬을 나타낸다. 계절내 예측 특성을 살펴보면, P2에 비해 P1의 예측성능이 다소 높게 나타나며 계절내 기간에 일반적으로 동일한 위상을 가진다. 또한 1998년과 2010년은 WNPSH의 강도가 가장 크게 나타났던 해로써 다른 해에 비해 WNPSH를 예측하는데 있어 적은 불확실성을 가지고 (양상블 스프레드가 가장 작았음) 높은 예측성을 나타냈다. 이 두 해는 모두 엘니뇨 쇠퇴 단계인 해로, 북서태평양 지역의 대기 순환과 기후 편차는 엘니뇨가 쇠퇴하는 여름에 강화하는 경향을 보이며 (Huang et al., 2004; Tomita et al., 2004) 높은 예측 가능성을 나타내는 이전 연구(Wang et al., 2000; Xie et al., 2009)에 상응하는 결과라 하겠다.

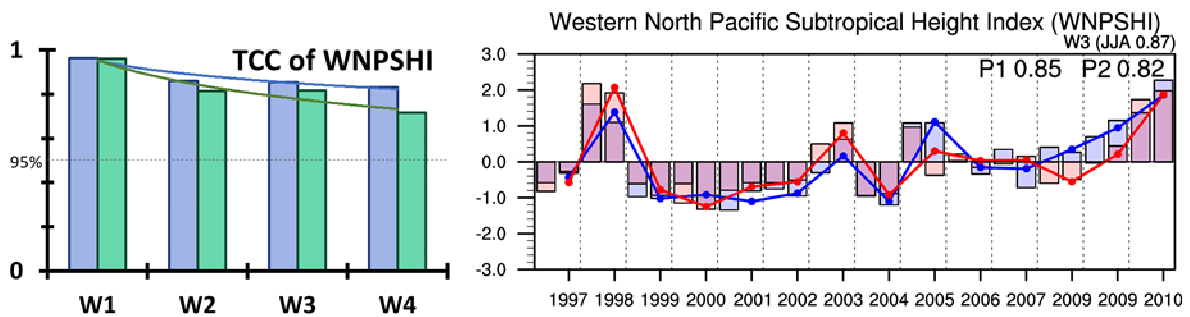


Figure 32. (Left) Temporal correlation coefficients (TCC) between the predicted WNPSH index in P1 (blue bar) and P2 (green bar) from GloSea5 and those from ERA5. (Right) Time series of the WNPSH indices in P1 and P2 from the observation (red bar) and GloSea5 hindcasts (blue bar) with 3 week lead time. The lines denote JJA mean value. The numbers in the left upper corner in the figure indicate TCC skills between the predicted indices and those from observation.

WNPSH의 경년변동은 특히 엘니뇨-남부진동과 관련된 열대 해양의 열 상태와 밀접한 관련이 있다 (ENSO, Wang et al., 2000; Wang and Zhang, 2002; Xue et al., 2018). ENSO는 WNPSH의 강도 및 위치와 그에 따른 하층 대기 순환장 편차의 진화를 통해 동아시아의 가뭄 및 홍수 재해와 관련된 강수 변동에 큰 영향을 미친다. 다른 외부 강제력을 가진 환경에서 모델의 계통 오차 특성을 평가하고 WNPSH 모의에 있어 모델 편차의 가능한 원인을 조사하기 위해, 우리는 ENSO phase에 따른 북서태평양 고기압 순환 및 강수 아노말리의 모의 특성을 분석하였다. 특정 여름해의 ENSO phase를 결정하기 위해 1997년부터 2010년 동안의 엘니뇨 발달 단계를 Table 10과 같이 3개의 범주로 (El Nino 발달, La Nina 발달, La Nina 유지)로 분류하였으며, ENSO 이벤트의 시작/종료, 지속성 및 강도는 겨울철 (DJF) 평균 ONI 지수로 결정하였다 (Ren et al., 2018). 전형적인 엘니뇨 현상은 한여름에 발생하고 초겨울에 최고조에 달하며 그 후 봄

에 쇠퇴하기 때문에 (Xie et al., 2009), 엘니뇨 발달 단계는 엘니뇨/라니냐 사건의 성숙기 전후의 여름으로 정의하였다.

Table 10. Classification of the 1997–2010 summers according to the phase of ENSO

ENSO phase	Number of years	Year
El Nino developing	5	1997, 2002, 2004, 2006, 2009
La Nina developing	4	1998, 2005, 2007, 2010
La Nina persisting	4	1999, 2000, 2001, 2008

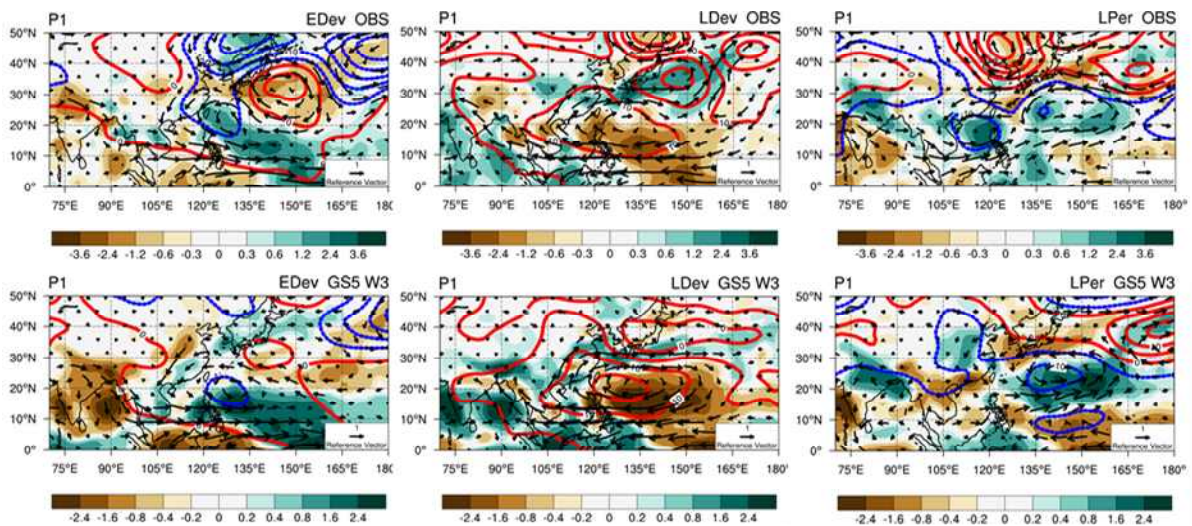


Figure 33. Composite anomaly maps of Z500 (contour), precipitation (shading) and 850 wind (vector) for the ENSO phase of El Niño developing, La Niña developing and La Niña persisting during P1.

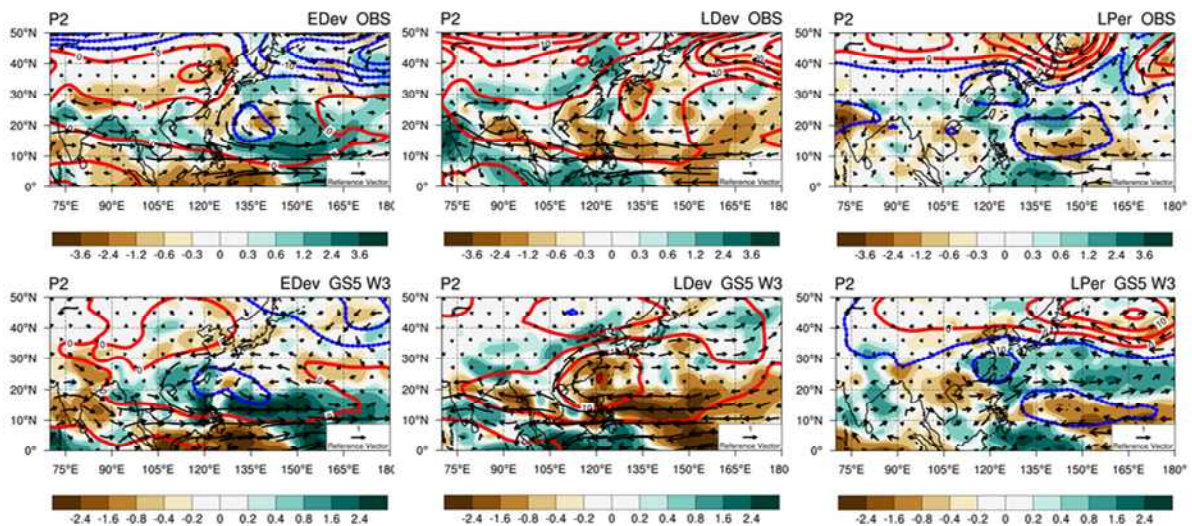


Figure 34. Same as Figure 33, but for P2.

Figure 33, 34은 ENSO 발달 단계에 대한 여름철 계절내 저층 대기 순환 및 강수 편차에 대한 관측과 3주전에 예측된 합성장을 나타낸 것이다. GloSea5는 ENSO 발달 단계에 따른 여름철 계절내 WNPSH 순환 및 강수 편차의 전반적인 분포는 잘 모의하나, WNPSH의 위치나 강도에 대해서는 모형 오차를 나타낸다. El Nino 발달 여름에 WNPSH는 약화되며 이에 따라 북서태평양에서는 저기압성 순환이 발달하고 북서태평양 강수의 양의 편차가 나타난다. GloSea5는 WNPSH의 약화와 양의 강수 편차는 잘 모의하지만, 중국 남동부와 동중국해서의 기압 및 강수 편차는 잘 모의하지 못한다. 특히 P1에서 일본 동부 해상에서의 고기압성 순환이 매우 약하게 모의하며, 동중국해에서의 양의 강수 편차 및 동중국에서 일본에 걸친 음의 강수 편차를 모의하지 못한다. La Nina 발달 여름에는 북서태평양 지역에서 고기압성 편차가 발달하며 WNPSH 흐름을 따라 남동부쪽에 강한 음의 강수 편차가 나타나며 북서쪽에 양의 강수 편차가 나타난다. GloSea5는 WNPSH에서의 양의 기압 편차를 다소 강하게 모의하며, WNPSH 편차의 남동부쪽 음의 강수 편차를 과도하게 모의하는 반면, 동중국과 우리나라를 걸쳐 발달하는 양의 강수 편차를 과소 모의하는 특징을 보인다. WNPSH의 계절내 북상에 따라 WNPSH의 양의 편차 또한 P1에 비해 P2에서 다소 북쪽으로 이동하며 이에 따라 동아시아 지역에서의 양의 강수 편차 또한 양쯔강의 북쪽으로 이동하여 나타난다. 이러한 WNPSH 순환 및 강수 편차의 계절내 변동을 GloSea5는 잘 모의하며, P1에 비해 P2에서 순환장의 예측성능이 다소 높게 나타난다. La Nina 유지 (또는 약화) 여름에 대기 순환과 강수 편차장에 대한 예측성능은 상대적으로 낮게 나타난다. 라니냐가 유지되는 여름의 경우, GloSea5는 남중국해와 필리핀에서의 WNPSH의 약화와 저기압성 순환의 발달을 모의하지 못하며 특히 P1시기에 강수 편차와 수증기 수송 모의에 상당한 모형 오차를 나타낸다. 라니냐 유지 (또는 약화)에서의 예측성능이 ENSO의 다른 Phase에 비해 다소 낮게 나타나는 것은 상대적으로 약한 순환 편차와 열대성 저기압 발생 빈도 증가 때문인 것으로 (Li et al., 2014) 짐작된다.

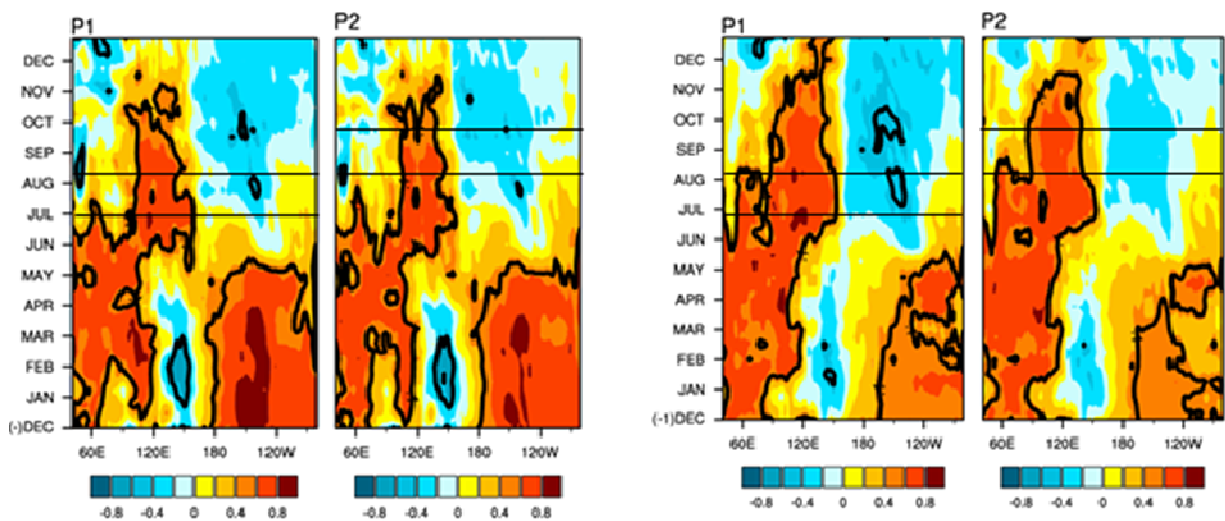


Figure 35. (Left) The observed and (Right) simulated time-longitude cross section of lag correlation between the WNPSH index and SST averaged over the tropics of 10S to 10N for the periods of P1 and P2.

WNPSH 모의에 대한 모형 오차는 대기-해양 상호작용에 의해 악화될 수 있다 (Zhang et al., 2020). 모형 오차 형성에 대한 해수면 온도의 영향을 조사하기 위해, 관측과 리드타임 3주에 예측된 GloSea5로부터 WNPSH의 계절내 변동에 대한 열대 해수면 온도의 영향을 분석하였다. 이전 연구에 따르면 WNPSH의 경년변동은 지역 대기-해양 상호 작용뿐만 아니라 원격 해수면 온도의 영향을 받는다 (He et al., 2015). 특히 열대 중앙 태평양 (CEP)와 열대 인도양 (TIO)은 여름철 WNPSH의 경년변동에 주요한 영향을 미친다 (Qian et al., 2018). Figure 35는 여름철 계절내 기간에 대한 WNPSH의 강도와 열대 해수면 온도 (10S-10N)의 지연 상관관계를 시간-경도 단면도로써 인도양에서 서태평양에 이르는 경도(40E-280E)를 포함한다. WNPSH의 강도는 전년 겨울 인도양에서와 동태평양에서 해수면 온도와 양의 상관을 서태평양에서 해수면 온도와 음의 상관을 뚜렷이 보여준다. 유의미한 양의 상관관계는 동태평양에서는 12월부터 4월까지 인도양에서는 2월부터 6월까지 계속되며, 서태평양에서의 음의 상관관은 1월부터 2월까지 유의하게 나타난다. 계절내 WNPSH 강도와 해수면 온도와 동시 상관을 살펴보면, 서태평양에서 양의 해수면온도 편차, 중앙 태평양에서 음의 해수면온도 편차와 상관을 나타낸다. 이러한 열대 해수면 온도가 WNPSH의 강도에 미치는 영향은 여름철 계절내 기간에 대해 매우 유사한 관계를 나타내며, GloSea5는 WNPSH와 열대 해수면온도와의 상관관계를 전반적으로 잘 모의하는 편이나, 겨울철 서태평양 해수면 온도와 음의 상관관과 동태평양 해수면온도와의 양의 상관관을 과소 모의하는 경향을 보인다.

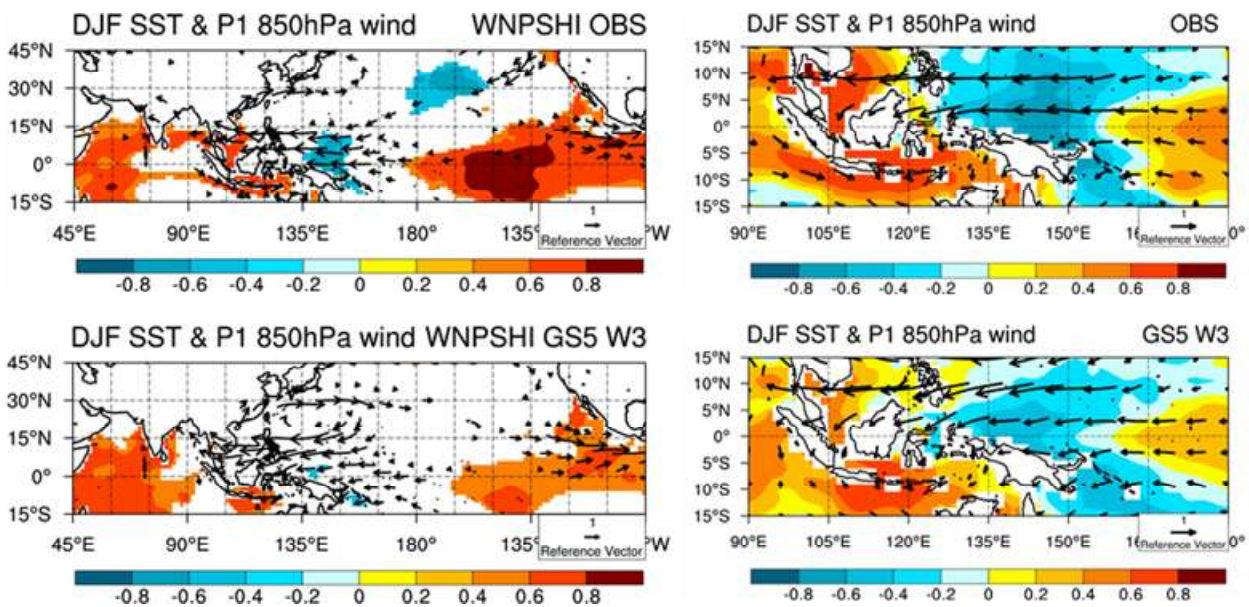


Figure 36. Regressed fields of the SSTAs in previous winter (DJF, shading) and the 850hPa winds in P1 against WNPSHI index in P1 from the observation and GloSea5 hindast at lead week 3.

일반적으로 El Nino는 한겨울에 최고조에 달하지만 북서태평양 고기압 순환을 통한

WNPSH에 대한 영향은 인도양 capacitor 메커니즘을 통해 다음 해 여름까지 지속된다 (Xie et al., 2016). Figure 36은 P1과 P2에 대한 여름철 계절내 WNPSH 강도 지수를 이전 겨울철(DJF) 해수면 온도에 회귀한 분포를 나타낸 것이다. WNPSH 강도 변화는 열대 인도양과 중앙 동태평양에서 양의 해수면 온도 편차와 서태평양에서의 음의 해수면 온도 편차와 강한 양의 상관을 나타낸다. GloSea5는 이전 겨울 열대 해수면 온도와 WNPSH 강도 변화의 관계를 대체적으로 약하게 모의하는 경향이 있다. 특히 서태평양에서의 음의 온도 편차를 매우 약하게 모의하며, 이는 열대 서태평양과 인도양에서의 온도 구배를 약화시켜 아열대 동풍 편차를 약화시키는 결과를 나타낸다. 이는 결국 서태평양에서의 고기압성 순환을 약화시키며 (Figure 37), WNPSH의 강도 약화에 기여할 것으로 생각된다. 겨울철 해수면 온도의 분포가 WNPSH에 미치는 영향은 리드타임과 함께 감소하며 P2에서도 유사한 결과가 나타남을 확인하였다. 이는 GloSea5가 북서태평양과 열대 인도양에서의 해수면 온도 dipolar 구조와 북서태평양고기압순환 사이의 양의 피드백 (Wang et al., 2013)을 약하게 모의함을 제시하는 결과라 하겠다.

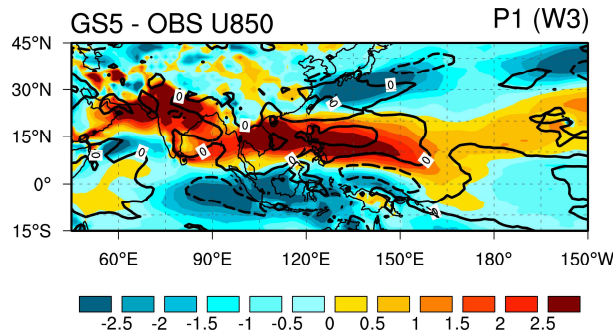


Figure 37. Difference of the 850hPa zonal wind in P1 between reanalysis and hindcasts at lead W3.

ENSO는 직접적으로 또는 다른 지역의 몬순시스템을 통해 간접적으로 동아시아 여름철 강수(EASMR)에 영향을 미치며, 아시아-태평양에서 발생하는 북서태평양여름몬순 (WNPSM) 강수 및 인도여름몬순 (ISM) 강수의 변동은 동아시아 여름 강수에 유의한 영향을 미친다. 엘니뇨가 소멸하는 여름철 북서태평양 몬순의 약화는 동아시아 몬순의 강화로 이어지게 되며 엘니뇨가 발달하는 여름철 인도몬순의 약화는 동아시아 몬순의 강화로 연결된다 (Wang et al., 2001).

북서태평양 고기압과 아시아 몬순과의 관계를 살펴보기 위해 여름철 강수 영역을 토대로 동아시아 여름 몬순, 남아시아 여름 (인도) 몬순 그리고 북서태평양 여름 몬순 강수 지수가 계산되었다 (Figure 38). 본 연구에서 각 강수 지수의 영역은 동아시아 몬순 강수 (30-45N, 110-140E), 인도 몬순 강수 (5-20N, 70-100E), 북서태평양 몬순 강수 (10-22.5N, 100-160E)로 정의되었다. Figure 38은 북서태평양 고기압과 각 몬순 강수 지수와의 상관을 나타낸 것으로 북서태평양 고기압 지수와 동아시아 몬순 강수와 인도 몬순 강수 지수와는 각각 0.62, 0.52로 양의 상관을 보이는 반면, 북서태평양 여름 몬순과는 -0.78로 높은 음의 상관을 보인다. 각 세부 몬순 지역에서의 강수는 북서태평양 고기압의 발달과 밀접한 관계가 있음을 제시하는 결과라

하겠다. 이러한 북서태평양 고기압의 변동에 따른 세부 몬순 지역에서의 강수 변화 관계를 GloSea5는 P1에서는 대체적으로 잘 모의하는 반면, P2에서는 잘 모의하지 못한다. 특히 GloSea5는 북서태평양 고기압과 인도 몬순 강수와의 양의 관계를 P1에서는 과대 모의하는 반면 P2에서는 오히려 반대 사인으로 모의하는 경향을 보인다.

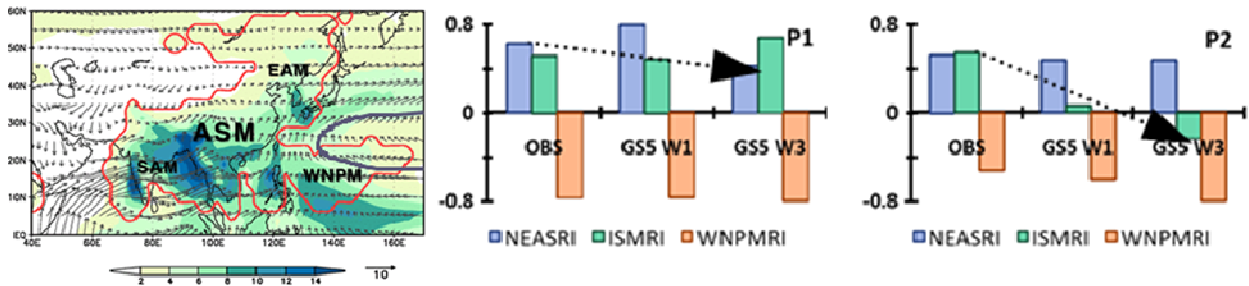


Figure 38. (Left) Asian monsoon system including East Asia Monsoon, South Asia Monsoon and Western North Pacific Summer Monsoon. (Right) the relationship between WNPSH intensity and the rainfall indices over three sub-monsoon regions.

③ 열대-중위도 원격상관 모의 특성 및 관련 오차 분석

동아시아 여름 강수에 영향을 미치는 주요 원격상관 패턴의 모의 특성을 살펴보았다. 본 연구에서는 동아시아에서 주요한 열대-중위도 원격상관 패턴으로 알려진 중층 대기에서의 열대 서태평양에서 중위도 남북 구조로 형성되는 East Asia/Pacific (EAP) 원격상관 패턴 (Huang and Li 1987; Nitta 1987, Huang 1990)과 상층 대기에서 유럽에서부터 아시아 태평양까지 중위도 제트를 따라 동서 구조로 형성되는 Silk-Road pattern (SRP)의 예측성 및 계절내 변동 모의 특성에 대해 살펴보고 관련 오차에 대해 제시하였다.

EAP 패턴은 PJ (Pacific-Japan) 원격상관으로도 불리며, 열대 서부 북태평양에서 대류 활동의 변화에 의해 유발된 로스비파의 북쪽 전파로 잘 알려져 있다 (Nitta 1987; Huang and Sun 1992). 이는 북서태평양 고기압과 장마전선 그리고 오호츠크 고기압 간의 긴밀한 관계를 통해 형성되며 동아시아 여름 몬순의 강도 (Huang and Sun 1992)와 동아시아 여름철 강수의 계절내 변동 (Chen and Zhou 2014; Wu et al. 2016; Chen et al., 2017; Guan et al., 2019)에 주요한 영향을 미친다. Figure 39는 WNPSH 지수로 회귀한 여름철 계절내 500hPa 지위고도, 850hPa 바람장 그리고 강수 아노말리 패턴을 나타낸 것이다. WNPSH 지수 정의를 위한 영역 (10-30N, 110-140E)에서 강한 고기압성 아노말리가 생성되며 이를 따라 남쪽으로 동풍 아노말리 북쪽으로 서풍 아노말리가 형성된다. 또한 고기압성 순환의 북서쪽 바운더리를 따라 양의 강수 아노말리가 나타나는 특징을 확인할 수 있다. 북서태평양에서부터 북동아시아까지 wave train의 여름철 계절내 패턴은 다소 다르게 나타난다. P1 시기에 북서태평양 고기압지수에 회귀된 대기 순환장은 서태평양에서 고기압성 순환, 일본에서 저기압성 순환을 나타내어 PJ 패턴(Nitta 1987) 또는 EAP 패턴 (Huang and Sun 1992)와 유사한 패턴을 형성하여 양쯔강에서 일본까지 확장된 강한 강수대가 나타난다. 반면 P2 시기에는 북서태평양 지역에서 우리나라 북부로 남

북방향으로의 wave train이 형성되며 기압대의 코어가 북쪽으로 이동하여 발생함으로써 북서태평양 고기압의 북서풍을 따라 발생하는 강한 강수대 또한 양쯔강 북부에서 한반도 북부에 걸쳐 생성된다. 이러한 원격상관 패턴의 계절내 특징을 GloSea5가 비교적 잘 모의하는 것으로 판단된다. 그러나 GloSea5는 북서태평양 고기압순환 및 열대 서태평양에서의 강수 아노말리를 매우 강하게 모의하며 관측에 비해 wave train의 구조가 동서방향으로 확장되어 더 강하게 모의하는 경향을 보인다. 특히 북서태평양 고기압 순환의 남동부쪽에 형성되는 강한 강수 아노말리는 GloSea5가 갖는 아열대 지역 wet bias와 직접 관련되며, 이러한 모형의 강수 오차는 동아시아 상층 서풍 제트와의 상호작용을 통해 북서태평양과 동아시아에서의 여름철 대기 순환에 두드러진 영향을 미칠 것으로 생각된다.

GloSea5가 EAP와 관련된 대기 순환 패턴을 얼마나 잘 모의하는지 정량적으로 제시하기 위해 북서태평양고기압 지수에 회귀된 지위고도와 강수 패턴의 PCC 스킬을 나타내었다 (Figure 40). 앞서 제시하였듯이 GloSea5는 북서태평양 고기압 강도의 경년변동을 4주 이후까지 0.8 이상의 높은 예측성능을 나타내며, 북서태평양 고기압 변동에 따른 대기 순환 및 강수 편차 패턴을 4주까지 90% 유의한 수준 (0.458) 이상으로 잘 모의함을 확인할 수 있다. 특히 P2 시기에 북서태평양 지역에서 우리나라 북부로 남북방향의 wave train 및 강수 패턴은 3주까지 0.6 이상의 PCC 스킬을 나타낸다. 이는 종관적으로 유용한 패턴을 구별하기 위한 0.6 하한 기준 (Hollingsworth et al., 1980)을 넘는 값이다.

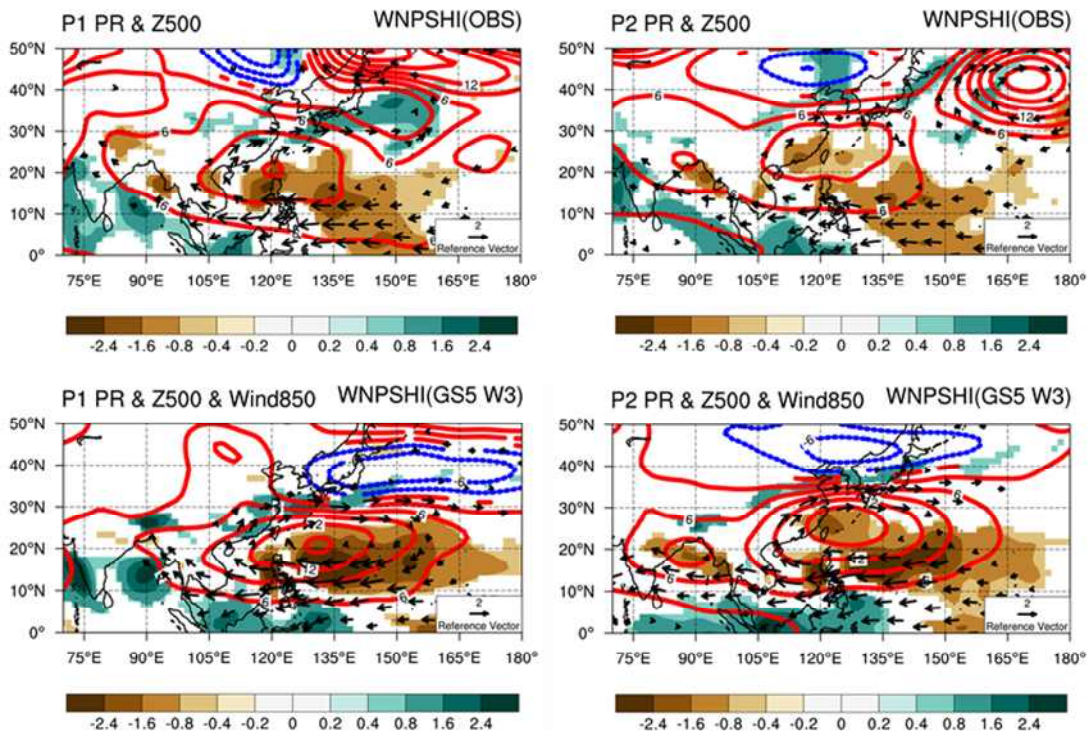


Figure 39. Regressed fields of geopotential height at 500hPa (contour), precipitation (shading) and wind anomalies at 850hPa (vector) against WNPSH index. The shadings and contours denote the values significant at 90% confidence level

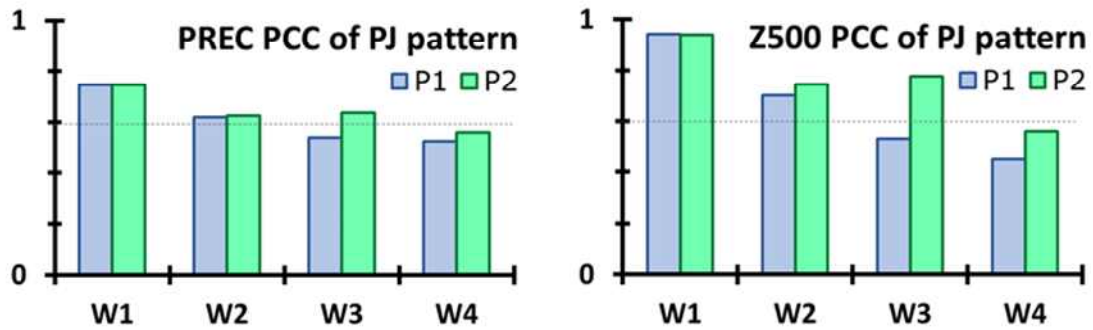


Figure 40. Spatial correlations between the Pacific-Japan pattern in the reanalysis and the hindcast runs. The dotted line in the figure shows the 0.6 lower-limit benchmark for differentiating between synoptically useful patterns (Hollingsworth et al., 1980).

북서태평양 지역에서의 WNPSH와 관련된 강수의 계절내 변동을 살펴보기 위해, 여름철 계절내 기간에 정의된 WNPSHI에 회귀된 경도 110-140E 지역 평균된 강수 편차의 위도-시간 분포를 나타내었다 (Figure 41). 여름철 계절내 기간인 P1과 P2에 대한 분포가 매우 비슷한 패턴을 보여 P1의 WNPSHI에 회귀한 분포를 제시하였다. WNPSH와 관련된 서태평양 여름철 강수는 점진적으로 북진하는 구조를 나타낸다. 6월에서 7월 첫주 동안 열대 서태평양에서 시작된 음의 강수 편차는 점진적으로 북상하며 비록 7월 중순에 약화되기는 하지만 이러한 강수 시그널은 8월부터 넷째주에 아열대 지역까지 도달한다. 서태평양 여름 강수의 음의 편차 북쪽에 발생하는 양의 강수 편차는 P1 시기 동안 점진적으로 북상하는 구조를 나타낸다. 이는 동아시아 몬순 강수가 6월 초에 시작되어 7월 중순까지 점진적으로 북진하는 현상과 일치하는 결과라 하겠다. GloSea5는 WNPSH와 관련된 여름철 계절내 강수대의 북진 구조를 거의 모의하지 못한다. WNPSH와 관련된 서태평양 여름철 강수의 과도한 음의 편차가 20N 이하 위도대에서 여름철 계절내 기간동안 지속적으로 나타나며 6월 초 서태평양 아열대 (20-30N) 부근에서 발생하는 동아시아 여름 몬순 강수대의 발달이 모의 되지 않음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 제시한 GloSea5 강수에서의 구조적 오차와 연관되며, 북서태평양 고기압 순환의 남동부쪽에서 형성되는 과도한 양의 강수 오차가 북서태평양과 동아시아에서의 여름철 대기 순환에 영향을 미칠 것이라 짐작할 수 있다 (Lu, 2004; Lu and Lin 2009).

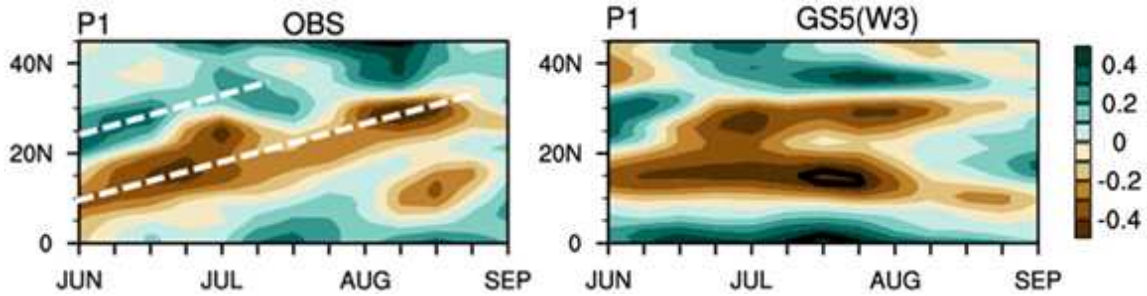


Figure 41. The regressed precipitation of latitude-time cross section averaged over the 110–140E region against the WNPSH index for the periods of P1 and P2.

SRP는 여름철 아시아 상층 대기의 서풍 제트를 따라 발생하는 원격 상관 패턴으로 잘 알려져 있다 (Lu et al 2002). SRP는 유라시아 서부에서부터 동아시아까지 중위도 아시아 서풍 제트 기류가 위치하는 대략 40N를 따라 남풍과 북풍 아노말리가 번갈아 나타나는 특징을 보이며, 이는 유라시아 대륙 중위도에서의 남북 바람 편차의 지배적 모드이다 (Chen and Huang 2012; Hong and Lu 2016; and many others). 또한 SRP는 대륙권 하층에까지 유의한 순환 편차를 가지는 상당 순압구조를 가지므로 북반구 중위도 넓은 지역의 여름철 기후뿐만 아니라 북서태평양 고기압 북서부와 동아시아 강수 편차에 유의미한 영향을 미친다 (Chen and Huang 2012; Saeed et al 2014; Hong et al 2018).

SRP의 중위도 파동 패턴은 일반적으로 상층 아시아 제트 기류에 의해 지리적으로 고정되는 경향이 있으며, 파동 경로와 파장은 이러한 기본 흐름에 의해 결정된다 (Hoskins and Karoly 1981; Hoskins and Ambrizzi 1993). 대륙권 상층 제트 기류는 7월경에 북쪽으로 이동하며 (Lin et al. 2017) 이러한 기본 흐름의 여름철 계절내 변화는 SRP 패턴 형성에 각각 다른 영향을 미치게 된다. SRP의 GloSea5 예측성 및 계절내 변동 모의 특성 분석에 앞서, 본 연구에서 정의된 여름철 계절내 기간 P1, P2에 대해 관측된 SRP의 분포 특성을 먼저 살펴보았다. Figure 42는 아시아 제트 지역 (20–60N, 0–150E) 200hPa 남북바람의 EOF 첫 번째 모드 패턴으로, SRP의 계절내 변화를 직관적으로 제시한다. SRP는 아시아 제트를 따라 형성되며 P2 시기에 상대적으로 북쪽으로 이동하는데 이는 아시아 제트의 북진과 상응하는 결과라 하겠다. 각 기간에 대한 SRP 선행 모드는 P1 (32%)에서 보다 P2 (35.2%)에서 더 많은 분산 비율로 설명되며, P1의 wave 패턴은 P2와 비교하여 유라시아 대륙에서 동쪽으로 이동하여 나타나는 특징을 보인다. 특히 P2의 경우 SRP를 트리거하는데 중요한 역할을 하는 카스피해 (Kosaka et al 2009; Hong and Lu 2016)를 중심으로 강한 편차가 나타나는 특징이 있으며, P1에 비해 SRP의 상부 영역에서 더 강한 시그널을 나타낸다. 또한 P2에 북대서양에서 두드러진 편차를 확인할 수 있는데, 이는 SRP의 wave 패턴이 P2에서는 북대서양에서 시작되지만, P1에서는 아시아 서부 제트 입구에서 시작됨을 의미한다. 이러한 SRP의 계절내 변동 특징은 Hong et al. (2018)의 결과와 상응하는 결과이다.

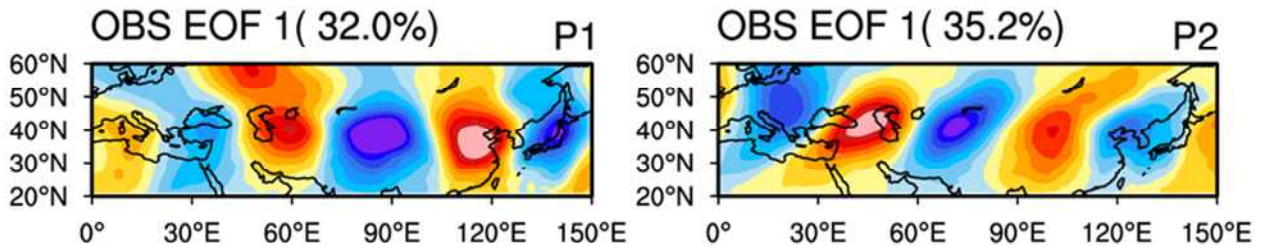


Figure 42. 200hPa meridional wind (contours), wind vector and precipitation (shadings) anomalies regressed onto the SRP index in P1 and P2. Shading indicates anomalies significant at the 0.1 level based on the Student's t test.

GloSea5의 SRP 예측성 및 계절내 변동 모의 특성을 살펴보기 위해, V200의 첫 번째 PC로 회귀한 관측 및 모델의 상층 바람 및 강수 패턴을 P1과 P2에 대해 나타내었다 (Figure 43). GloSea5는 SRP와 관련된 대기 순환장의 특징을 매우 약하게 모의하며, 계절내 예측성능이 다소 다르게 나타난다. P1의 경우 아시아 제트를 따라 형성되는 wave train 구조가 거의 나타나지 않지만, P2의 경우 관측에 비해 시그널은 약하지만, 유럽 서부에서부터 동아시아에 걸친 파동 구조가 어느 정도 모의하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 SRP의 동부에 해당하는 아시아와 동아시아에 걸친 wave 강도가 매우 약하게 모의함으로써 북서태평양 고기압의 북서부와 동아시아 강수 편차에 유의미한 영향을 제시하지 못한다.

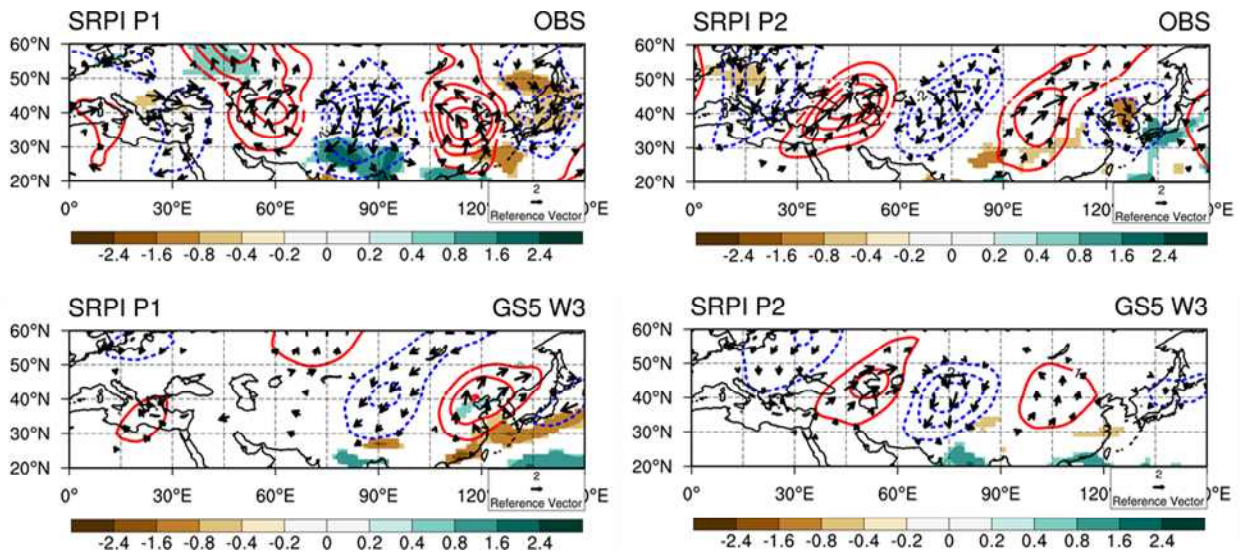


Figure 43. 200hPa meridional wind (contours), wind vector and precipitation (shadings) anomalies regressed onto the SRP index in P1 and P2. The SRP is defined as the standardized V200 PC1 (Chen and Huang, 2012). Shading indicates anomalies significant at the 0.1 level based on the Student's t test.

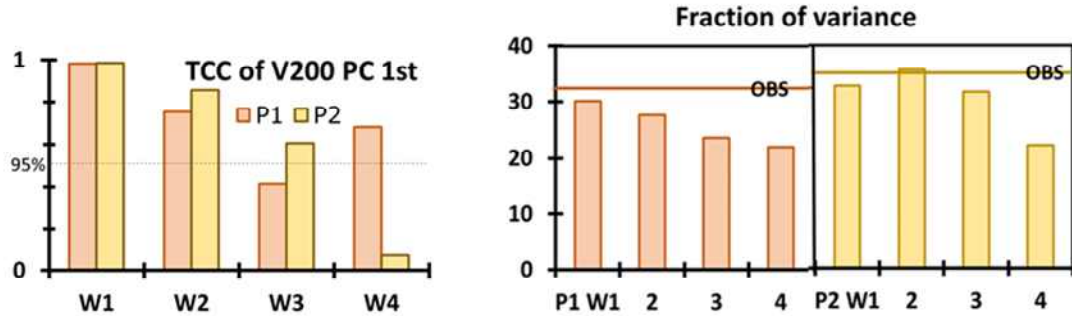


Figure 44. Temporal correlations between the Silk-Road pattern in the reanalysis and the hindcast runs, and the fractional variance explained by SR. The colored line in left panel show the fractional variance explained by the reanalysis SR.

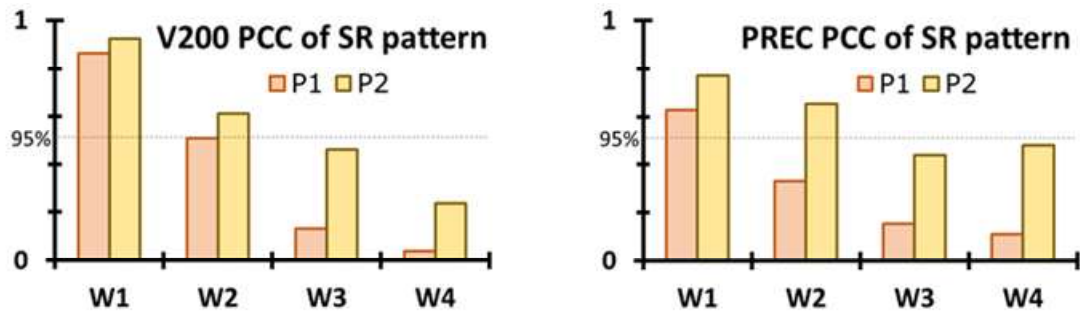


Figure 45. Spatial correlations between the Silk-Road pattern in the reanalysis and the hindcast runs.

GloSea5가 SRP와 관련된 대기 순환 패턴을 얼마나 잘 모의하는지 정량적으로 제시하기 위해 주별 예측장으로부터 계산된 SRP PC의 상관계수 및 분산 비율을 여름철 계절내 기간 P1, P2에 대해 나타내었다 (Figure 44). GloSea5는 SRP의 시간적 위상을 예측하는데 있어 2주까지 0.8 이상의 높은 스킬을 보이지만, 3주 이후부터 예측성이 급격히 감소한다. 앞서 제시하였듯이 GloSea5는 SRP의 계절내 예측성능 차이를 뚜렷이 나타내며, P2의 경우 3주에서도 95% 유의한 수준 이상의 TCC 스킬을 나타낸다. 또한 GloSea5는 비록 SRP의 분산 비율이 관측에 비해 다소 낮은 하지만, 관측에서 나타나는 SRP 선행 모드의 계절내 분산 비율의 상대적 크기 ($P1 < P2$)를 잘 모의한다. 특히 P2에 SRP 선행 모드의 분산 비율은 3주 (31.7%)까지 관측과 유사한 수준으로 나타낸다. SRP의 패턴 상관 계수의 주별 예측성능을 Figure 45에 제시하였다. 2주 이후부터 SRP에 의한 V200과 강수 아노말리의 PCC 스킬이 0.5 이하로 급격히 감소하지만 SRP의 계절내 예측 성능의 차이를 확인할 수 있다.

(나) GloSea5 vs GloSea6 동아시아 여름철 강수 및 관련 원격상관 모의 특성 비교

① 아시아 여름철 강수 및 하층 순환장 모의 특성 분석

UKMO GloSea5 와 GloSea6 버전간 비교를 통해 동아시아 여름철 몬순 강수 및 하층 순환장 재현성이 얼마나 개선되었는지 살펴보았다. Figure 46은 UKMO GloSea5의 리드타임 3주에 예측된 JJA 평균 강수와 500hPa 지위고도의 오차 분포와 GloSea6와 GloSea5의 차이를 나타낸 것이다. GloSea5는 서태평양 및 적도 인도양에서 양의 강수 오차를 보이며 동아시아 및 인도 내륙에서 음의 강수 오차를 나타낸다. 또한 500hPa 지위고도가 전반적으로 매우 낮게 모의되며, 특히 동아시아 여름 몬순에 큰 영향을 미치는 북서태평양고기압(WNPSH) 영역에서 음의 오차가 두드러지게 낮게 나타나 저기압성 순환 오차를 나타낸다. GloSea6는 GloSea5가 나타내는 강수 및 하층 순환장의 여름철 평균 오차를 개선하며, 특히 북태평양 고기압의 경년 변동성이 강하게 나타나는 WNPSH 영역에서의 경년 변동성이 상당히 개선됨을 확인할 수 있다. 아시아 여름 몬순 강수에 결정적인 영향을 주는 WNPSH 위치의 개선은 여름 몬순 강수의 예측성 개선에 기여하며 WNPSH 변동에 따른 아시아 지역 세부 몬순 (북서태평양여름 몬순, 인도 여름 몬순, 동아시아 여름 몬순) 강수의 예측성 개선에 기여함을 확인할 수 있다.

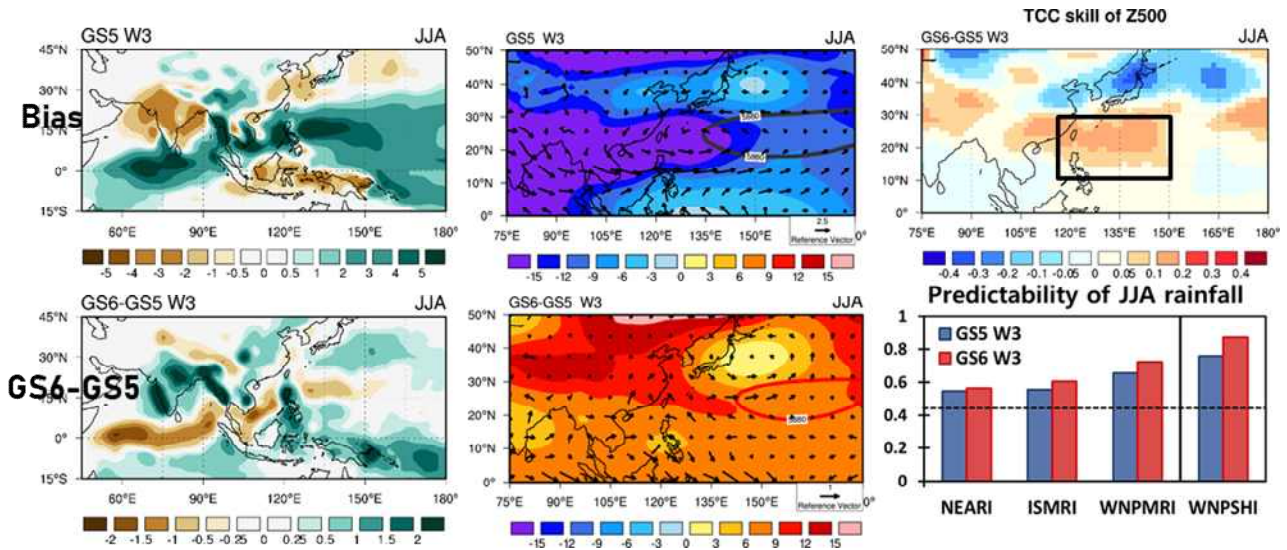


Figure 46. (Upper) The biases of JJA mean (Left) precipitation and (middle) geopotential height at 500hPa from GloSea5 and (Lower) the differences between GloSea6 and GloSea5 for 3-lead week. (Right) The difference between GloSea6 and GloSea5 of TCC skills for geopotential height at 500hPa and TCC skills of JJA mean precipitation averaged over three sub-Asian monsoon regions (NEAM, ISM, WNPSM) and WNPSH indices. The dotted line indicates significant at the 95% confidence level

Figure 47은 WNPSH의 경년변동성과 관련된 아시아 몬순 영역에서의 하층 순환장 및 강수의 편차장을 나타낸 것으로, WNPSH 지수와의 상관 패턴을 제시한 것이다. WNPSH의 서쪽 확장 하층 순환장의 남서풍을 따른 수증기 유입을 통해 주변 몬순 지역의 강수 변동에 영향을 주며 동아시아와 인도 몬순 강수와는 양의 상관을 서태평양 여름 몬순 강수와는 음의 상관을 나타낸다. GloSea5는 WNPSH 변동과 관련된 하층 순환장을 과대 모의할 뿐만 아니라 아시아 몬순 지역 강수와의 관계 또한 관측 대비 강하게 모의함을 알 수 있다. 반면, GloSea6는 관측과 유사하게 고기압성 순환을 완화하며, 과대 모의되었던 몬순 강수와의 관계를 개선함을 확인할 수 있다 (Figure 23).

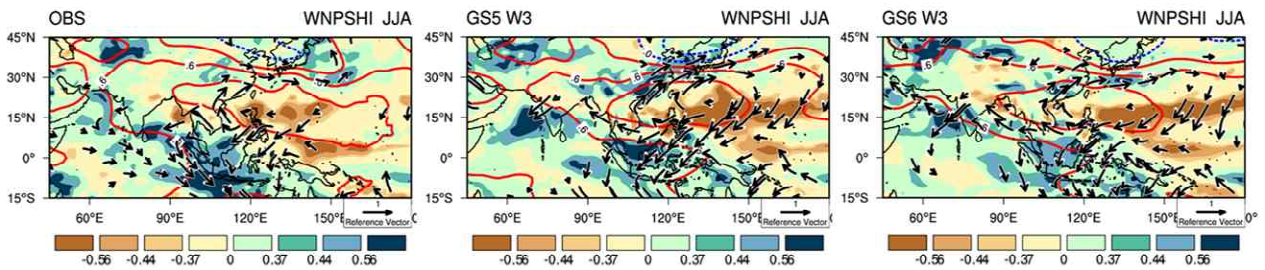


Figure 47. Correlation of the JJA WNPSHI with the JJA precipitation (shading), 500hPa geopotential height (contours), and 850hPa horizontal winds (vectors) during 1997–2016. The shading interval indicates the significant above 90, 95 and 99% confidence levels, respectively.

② 여름철 북서태평양 고기압 변동 모의 특성 분석

Figure 48은 아시아-서태평양 영역에서 하층 순환장 및 몬순 강수의 경년 변동성을 지배하는 두 개의 주요 EOF 모드를 나타낸 것으로, 북서태평양 고기압의 경년변동성의 특성을 설명한다 (Wang et al., 2013; Huang et al., 2018). 첫번째 EOF 모드는 PJ pattern (북서태평양 H : 우리나라-일본 L)으로 잘 알려진 대기-해양 상호작용 모드(AOI mode)이며, 두 번째 모드는 중앙 태평양 강제력에 의해 야기되는 동서 방향의 dipole pattern (북서태평양 H : 인도양 L)의 CP forcing 모드로, WNPSH의 경년변동성을 제어하는 두 가지 주요 SST 메커니즘을 제시한다. 아시아-서태평양 하층 순환장의 경년 변동성은 첫 두 모드에 의해 약 65.6%가 설명되며, WNPSH의 경년변동성은 첫번째 모드 (EOF1)에서 두드러지게 나타난다. 반면 GloSea5는 첫 번째 모드의 분산 비율을 관측에 비해 크게 나타내지만 WNPSH의 경년변동성은 오히려 두번째 모드 (EOF2)에서 과대 모의되는 특징을 나타낸다. 따라서 관측과 달리 WNPSH의 경년변동성이 중앙태평양 강제력에 의해 제어되며, PC2와의 상관성이 크게 나타난다. 다시 말해 GloSea5에서의 WNPSH의 변동성은 중앙 태평양 강제력, 즉 ENSO에 의한 영향이 비현실적으로 과도하게 반영되는 결과를 제시한다. GloSea6는 첫 두 개의 EOF 모드의 분산 비율을 관측과 유사하게 개선하며 EOF2에서의 과도한 WNPSH의 변동성을 완화시킬 수 있다.

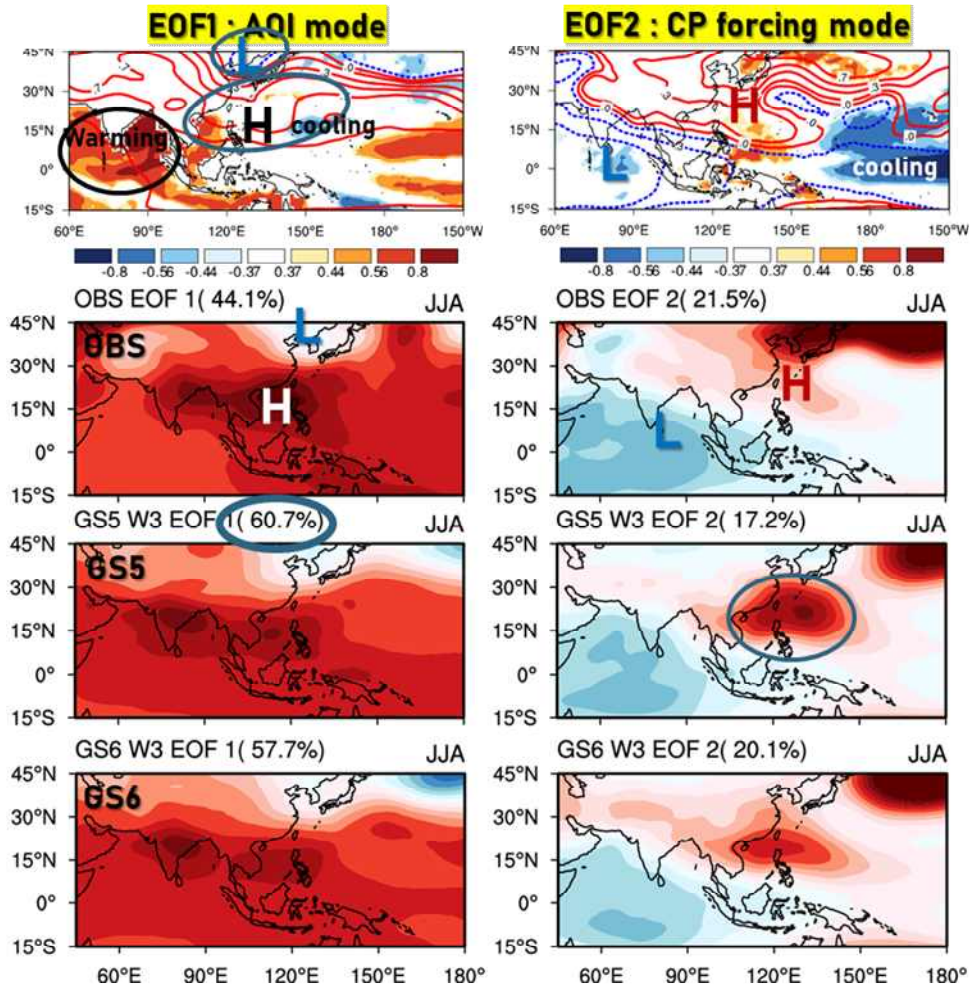


Figure 48. EOF-1 mode and EOF-2 mode derived from JJA 500hPa geopotential height over [15S-45N, 45E-180E] during 1997-2016

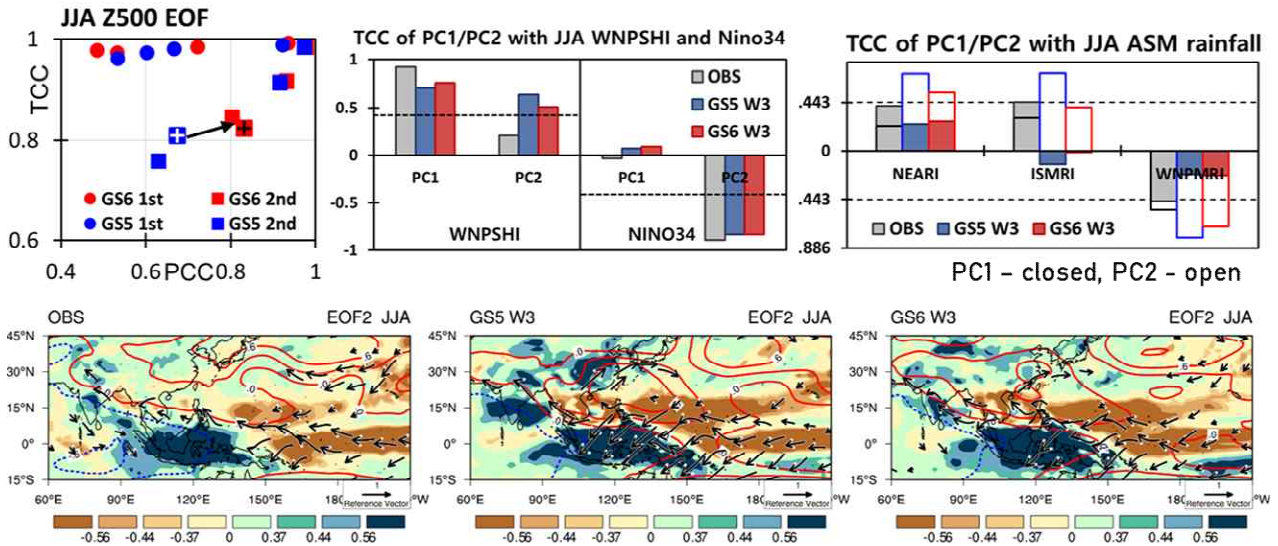


Figure 49. (Top, Left) Scatter plots of PCC versus TCC skill of EOF1 and EOF2 modes and (Top, Middle) The correlation coefficient of the PC1 and PC2 with JJA WNPSHI and JJA NINO3.4 inde during 1997–2016 (Top, Right) The correlation coefficients of the PC1 (filled bar) and PC2 (open bar) with JJA mean preicpitation averaged over three sub-Asian monsoon regions (Bottom) The correlated precipitation (shading), 500hPa geopotential height (contours), and 850hPa horizontal winds (vectors) with the PC of EOF2

GloSea6가 WNPSH 변동성과 관련된 대기 순환 패턴의 특성을 얼마나 잘 모의하는지 정량적으로 제시하기 위해, 두 EOF 모드의 시·공간 재현성 및 관련된 주요 지수들과의 관련성을 상관계수로 제시하였다 (Figure 49). GloSea6는 특히 계절내 예측기간 (리드타임 3, 4주) 동안 두 번째 EOF 모드의 시·공간 재현성을 개선시키며, EOF2에서의 과도한 WNPSH의 변동성을 완화시킴으로써 WNPSH 지수와 PC2와의 과도한 관계를 다소 완화시킨다. GloSea5는 EOF2와 관련된 북서태평양 고기압성 순환을 과도하게 모의하며 이로 인한 아시아 몬순 지역에서의 강수 반응을 과도하게 나타내는 특징이 있다. GloSea6는 과도하게 모의되었던 북서태평양 고기압성 순환을 완화하며, 아시아 몬순 지역에서의 과도한 강수 반응을 개선시킴을 확인할 수 있다.

③ 해양 강제력 모의 특성 분석

WNPSH의 경년변동성의 주요 강제력 중 하나인 해양 강제력 모의 특성을 분석하기 위해, 열대 [120-270E, 20S-20N] 해수면 온도 편차의 주요 변동성의 시·공간 재현성을 분석하였다 (Figure 50). EOF 모드의 공간 분포장을 그림으로 제시하진 않았지만 첫 번째 모드는 전형적인 엘니뇨 패턴을 보여주며, 두 번째 모드는 ENSO 전이모드 그리고 세 번째 모드는 CP 엘니뇨 패턴을 나타내었다. GloSea6는 SST 주요 EOF 모드의 시·공간 재현성을 개선시키는데 특히 2, 3번째 모드의 시·공간 재현성을 상당히 향상시킴을 확인할 수 있으며, NINO34 지수의 예측성 또한 GloSea6에서 개선되었다.

ENSO와 관련된 강수 및 하층 순환장 모의 특성을 살펴보았다. Figure 50은 Nino3.4 지수와 관련된 아시아-태평양 지역의 해수면 온도 및 500hPa 지위고도의 분포와 하층 대기의 순환장

및 강수의 분포를 나타낸 것이다. ENSO 변동에 따른 중앙 태평양 warming은 북서태평양 고기압성 순환의 약화와 유의한 상관을 나타내며, 서태평양 저기압성 순환 편차는 인도양과 Maritime continent에서의 강수와 음의 상관, 적도 서태평양에서의 강수와 양의 상관을 나타낸다. GloSea5는 관측에 비해 서태평양 warm pool 지역에서의 cooling을 과도하게 모의하며, 이는 동서 온도 편차를 강화시켜 적도 서풍 편차를 강화시키며 이는 과도한 강수 편차를 모의하는 원인이 될 수 있다. ENSO 변동에 따른 아시아 몬순 지역에서의 하층 순환장 및 강수와의 관계는 GloSea6에서도 GloSea5와 비슷한 패턴을 나타내지만, 과도한 상관의 크기가 다소 완화됨을 확인할 수 있다.

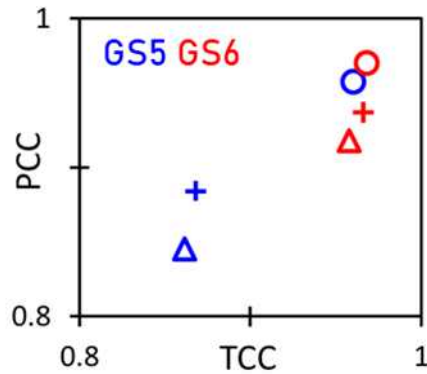


Figure 50. Scatter plots of PCC versus TCC skill of EOF modes for tropical SST anomalies over [20S-20N, 120-270E] (O: EOF1, Δ : EOF2, +: EOF3)

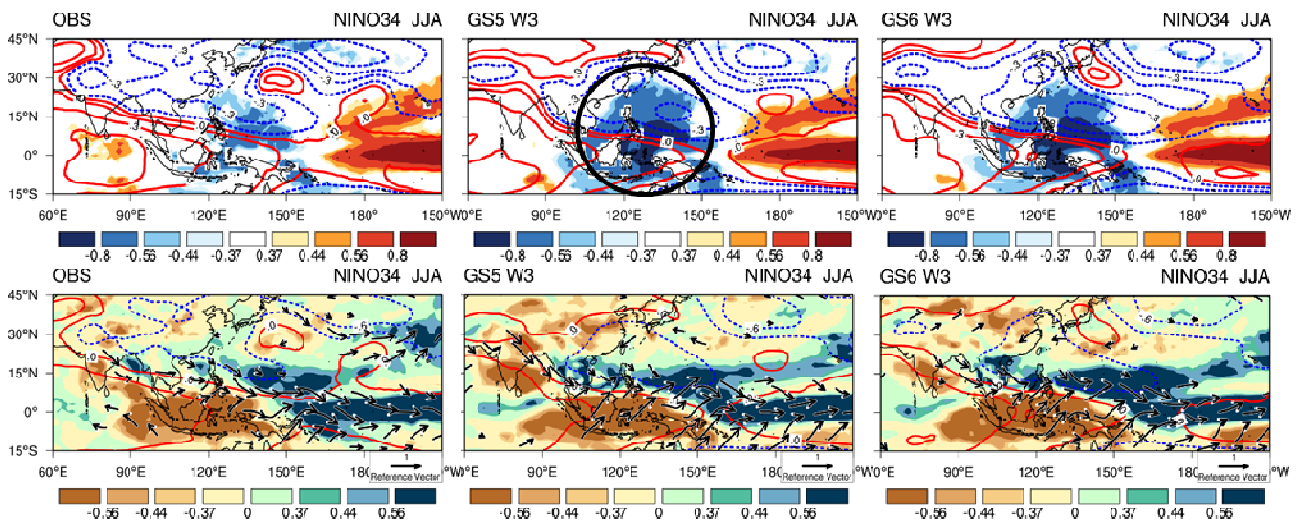


Figure 51. (Top) The correlated SST (shading) and 500hPa geopotential height (contours) with the NINO34 index (Bottom) The correlated precipitation (shading), 500hPa geopotential height (contours), and 850hPa horizontal winds (vectors) with the NINO34 index

Figure 52는 Nino3.4 지수 및 북서태평양 고기압 관련 지수에 회귀된 850hPa velocity potential과 발산장의 분포를 나타낸 것으로, ENSO 변동과 관련된 인도-태평양 워커 순환의 모의 특성을 제시한다. GloSea5는 ENSO 변동과 관련하여 하층 수렴 중심을 관측에 비해 중앙 태평양으로 shift 되어 더욱 강하게 모의하며, 하층 발산 중심은 인도양 쪽으로 이동하고 다소 약하게 모의하는 특징을 보인다. 인도-태평양 워커 순환 편차가 관측에 비해 서쪽으로 shift 되어 형성됨으로써 서태평양 convection이 과대모의 된다. 이는 과도한 ENSO-인도 몬순 강수 관계의 원인이 될 것으로 짐작된다. WNPSH 경년변동성에 대한 주요 강제력으로 작용하는 CP forcing 모드 (PC2)에 의한 중앙 태평양 cooling은 ENSO 변동에 따른 순환장과 다른 사인의 같은 패턴을 보이며, GloSea5는 서태평양에서 하층 발산이 과도하게 유도됨을 확인할 수 있다. GloSea6는 ENSO 변동에 따른 서태평양에서의 과도한 convection을 개선시키며, 중앙 태평양 cooling에 따른 인도-태평양 워커 순환 편차 또한 완화되는 결과를 제시한다. 따라서 본 연구에서는 열대 해양 변동성 개선이 중앙 태평양 강제력에 의해 야기되는 WNPSH 변동 개선에 영향을 주며, 이와 관련된 하층 순환장이 개선됨으로써 WNPSH와 아시아 여름 몬순 강수와의 관계가 개선되고 이는 결국 여름 몬순 지역 강수의 계절내 예측성능을 향상시킬 수 있다고 판단하였다.

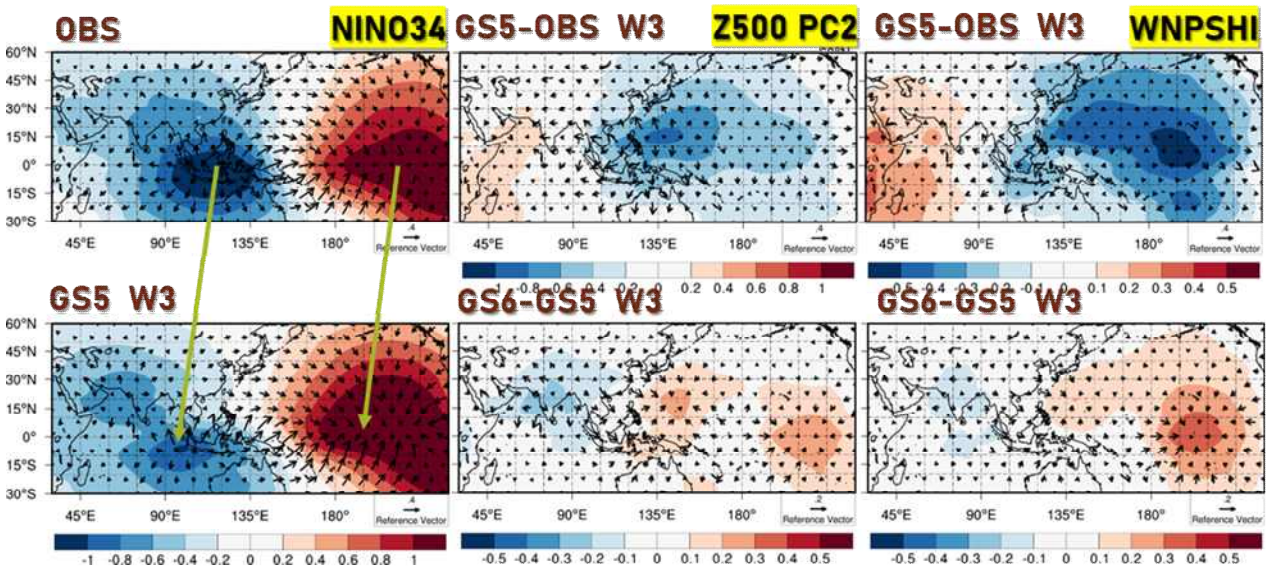


Figure 52. (Left) Regression of JJA 850hPa velocity potential and divergent wind with respect to the Nino3.4 index for OBS and GloSea5 (Middle, Right) Biases of GloSea5 and differences between GloSea6 and GloSea5 for the regression of JJA 850hPa velocity potential and divergent wind with respect to the PC2 of Z500 and WNPSH index

④ 동아시아 상층 순환장 모의 특성 분석

동아시아 여름 몬순에 영향을 주는 또 다른 주요 요소 중 하나인 동아시아 제트의 모의 특성을 분석하였다. Figure 53은 관측과 모형으로부터 모의된 동아시아 제트의 수평 분포를 나타낸 것으로, 동아시아 제트 지수는 동아시아 영역 [20-60N, 120-150E]에서의 200hPa 동서 바

람의 첫 번째 EOF PC로 정의하였다 (Lin et al., 2010). GloSea5에서 동아시아 제트는 관측에 비해 다소 남쪽에 형성되며 다소 약한 강도를 보인다. GloSea6는 동아시아 제트의 공간 패턴 및 강도, 그리고 경년변동의 재현성을 오히려 감소하는 결과를 나타내며, 이는 동아시아 제트를 포함한 상층 순환장 개선을 위한 노력이 요구됨을 제시하는 결과라 할 수 있다. WNPSH와 EAJS은 북서태평양과 동아시아에서의 남북구조의 원격상관의 두 가지 구성 요소로 간주되어왔지만 (Huang et al. 2003; Lu and Lin 2009), 1990 후반 이후 WNPSH와 EAJS의 관계가 상당히 약화되었으며 이는 하층 PJ pattern의 약화를 유도할 수 있다 (Huang et al. 2018). EAJS과 관련된 하층 순환장 및 강수 패턴을 살펴보면, 우리나라를 중심으로 저기압성 편차가 형성되지만 서태평양에서의 고기압 편차가 매우 약하며 이와 관련된 서태평양에서의 음의 강수 편차와 동아시아에서의 양의 강수 편차의 관계도 매우 약하게 나타남을 알 수 있다. GloSea5는 EAJS과 관련된 하층 순환장의 패턴을 우리나라를 중심으로 한정된 남북 범위를 모의하는 특징을 보이며 동아시아 강수 편차를 매우 강하게 모의하는 특징을 보인다. GloSea6 역시 GloSea5와 비슷한 패턴의 순환장을 나타낸다. 동아시아 강수 예측력 향상에 있어 상층 순환장의 개선이 필수적임을 제시하고자 한다.

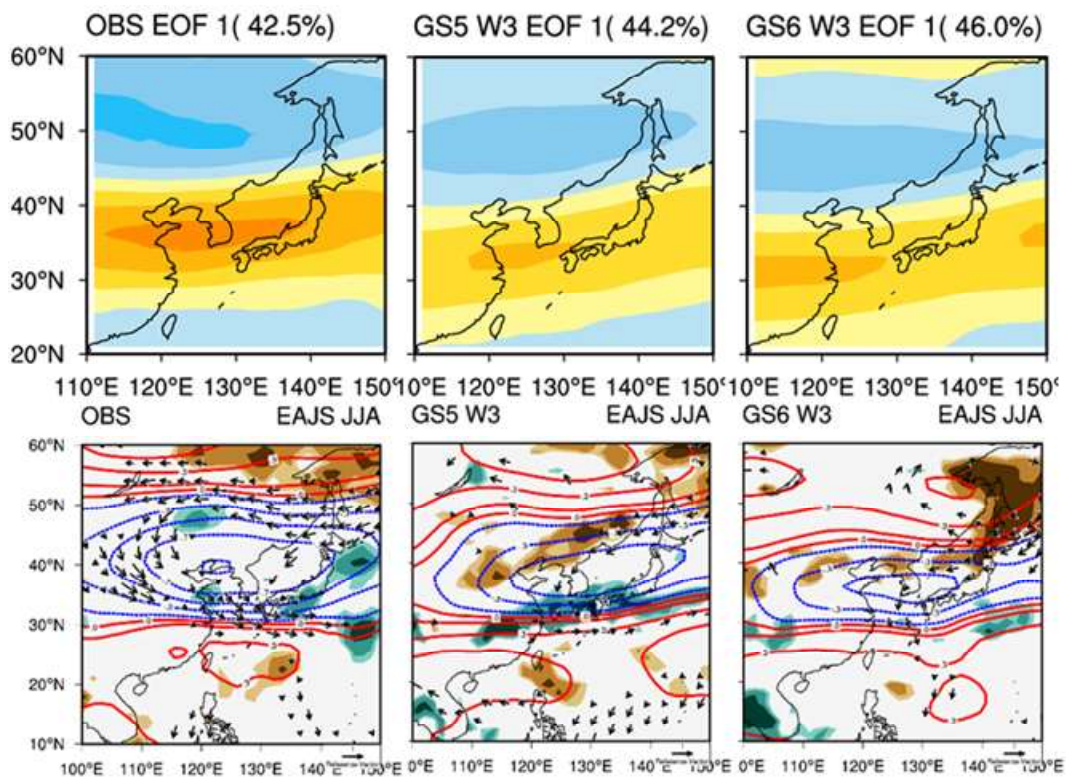


Figure 53. (Top) The first EOF mode of JJA zonal wind at 200hPa over [20-60N, 120-150E] and the TCC skill of the PC of EOF1 from GloSea5 and GloSea6 for 3-lead week (Bottom) The correlated precipitation (shading), 850hPa winds (vector) and 500hPa geopotential height (contour) with EAJS index during 1997-2016

Figure 54는 EAJS 지수와 주요 하층 대기 및 해양 지수들과의 상관관계를 나타낸 것이다. 앞서 제시하였듯이, 관측에서 EAJS과 하층 WNPSH 및 동아시아 여름 강수와의 관계는 매우 약화되어 유의하지 않은 관계를 제시한다. 그러나 GloSea5는 EAJS과 WNPSH와의 관계를 과대 모의하며, 과도한 barotropic response를 유도함으로써 동아시아 여름 강수와의 상관도 높게 나타냄을 볼 수 있다. 또한 아시아 제트와 ENSO와의 관계는 과소 모의하는 경향을 보인다. 이는 GloSea5가 대기 안에서의 결합은 과도하게 결합시키는 반면 해양과의 상호관계의 결합력은 약하게 모의함을 제시하는 결과라 할 수 있다. GloSea6는 아시아 제트와 관련된 북서태평양 고기압 및 동아시아 여름 몬순 강수, ENSO와의 관계를 관측과 유사하게 나타내는데, 이는 대기-해양간의 상호작용이 개선됨을 제시한다.

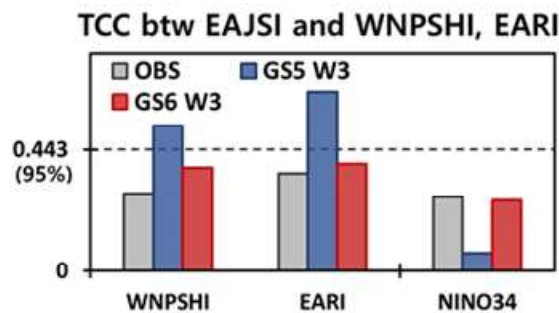


Figure 54. The correlation coefficient of the JJA EAJS index with JJA WNPSHI, EARI and Nino3.4 index

⑤ 동아시아 강수 계절내 변동 모의 특성 분석

마지막으로 동아시아 강수의 계절내 변동에 대한 모델 개선 정도를 살펴보았다. 동아시아 여름 강수의 계절내 변동 특성에서 제시하였듯이 동아시아 여름철 강수는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 발달하며, 일본의 바이유와 중국의 메이유를 시작으로 점차 북상하면서 우리나라 장마에 영향을 준다. GloSea5는 여름철 동아시아 지역에서 dry bias를 나타내는데, 이는 여름철 계절 내 기간 중 장마전선의 영향이 지배적인 P1에서 오는 dry bias로 특징된다. GloSea6는 P1 시기의 dry bias는 개선하지만 동아시아 여름 몬순 이후 P2 시기에는 오히려 강수를 과다하게 모의하는 특징을 나타낸다 (Figure 55). 동아시아 여름 몬순의 시종은 WNPSH의 계절내 북동진과 밀접한 관련이 있으며, WNPSH의 경년변동은 여름철 계절내 기간 동아시아 강수 강도에 각기 다른 영향을 미친다. 동아시아 여름철 강수 변동의 계절내 특성을 살펴보면, P1 시기의 동아시아 강수 변동은 WNPSH와 ENSO에 의한 하층 순환장 뿐만 아니라 아시아 제트에 의한 상층 순환장에 의해 영향을 받지만, P2에는 하층 순환장의 영향은 유의하지 않으며 동아시아 제트에 의한 상층 순환장의 관계만 유의하게 나타남을 알 수 있다. GloSea6는 동아시아 여름 몬순과 관련된 상·하층 순환장을 유도하는 주요 지수들 (WNPSH, NINO34, EAJS)과의 관계를 P1 시기에는 관측과 유사하게 개선하지만, P2 시기에는 하층 순환장과의 관계를 과

도하게 모의하는 특징을 보인다. 또한 동아시아 제트와 WNPSH와의 상관성이 강하게 연결되는 경향이 있으며, 이는 동아시아 상·하층 대기를 관측과 달리 너무 barotropic 하게 모의함을 의미하며, 그 결과 PJ pattern을 지속적으로 유도함으로써 wet bias를 나타내는 것으로 분석된다.

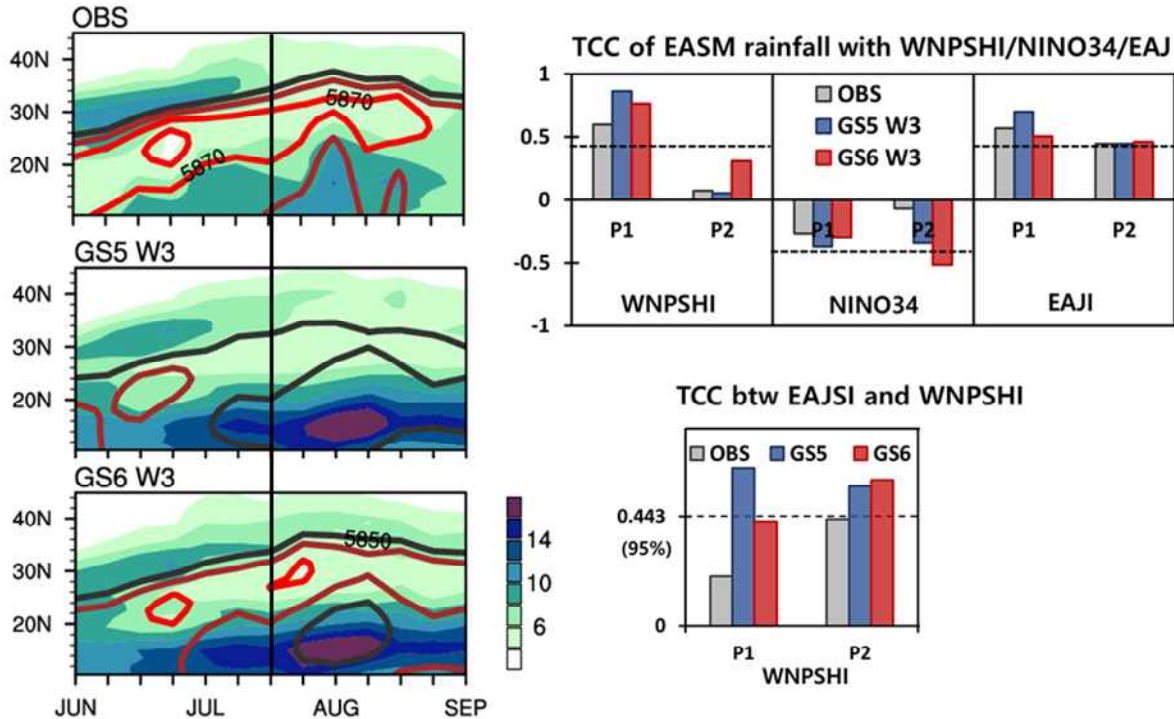


Figure 55. (Left) Time-latitude cross-section of weekly mean precipitation (shading) and 500hPa geopotential height (contour) from observation, GloSea5 and GloSea6 hindcasts (Right, Top) The correlation coefficient of P1 and P2 precipitation with WNPSHI, NINO3.4 index and EAJS index during 1997–2016 (Right, Bottom) The correlation coefficient of P1 and P2 EAJS index with JJA WNPSHI during 1997–2016

(2) 구름/강수 관련 모듈 특성 조사 및 계수 조정 실험을 통한 개선점 파악

GloSea 모델은 오차 개선을 위해 개발자 그룹내에서 이슈들 중심으로 ticket을 생성하여 이를 해결하는 방식으로 버전을 관리하고 있다. GloSea6의 구름/강수 모듈내에 적용된 ticket들을 중심으로 정리한 내용 및 강수 관련 모듈들의 해석을 부록 ‘강수모수화 계수조정을 통한 동아시아 여름 강수 영향 평가 및 가이드라인’ 내에서 확인할 수 있다.

(가) 구름/강수 관련 모듈 특성 조사

① GloSea5와 GloSea6에서 사용된 강수 모수화

GloSea5에서 사용하는 적은 모수화는 5A 옵션으로 설정되어 있으며, Gregory and Rowntree (1990)을 기반의 mass flux 방식으로 구성되어 있다. 다만, closure 방식은 Fritsch and Chappell(1980) 기반의 CAPE closure를 사용한다. 경계층에서 대류 활동이 발생할 수 있을지를 계산하고, 각각의 격자에서 얕은/깊은 대류 방안을 먼저 계산한 후, 모든 격자에서 중층

에서의 대류 활동을 계산하는 방식으로 구성되어 있다. 경계층 방안은 Lock et al. (2000)으로 계산되며, 얇은 대류는 Grant (2001), Grant and Brown (1999) 방안으로 계산된다. entrainment rate는 기압의 함수로 Eq. [5]와 같이 계산된다.

$$\epsilon = \alpha(P/P^*)^\gamma \quad [5]$$

여기에서 P 는 모델 레벨의 기압이며, P^* 는 지표기압, α 와 γ 는 사용자 설정 계수이다. 또한 이렇게 계산된 entrainment rate는 mixing detrainment rate에 다음과 같은 Eq. [6]으로 연관된다.

$$\delta = \alpha_{\text{det}}\epsilon(1 - RH)^2 \quad [6]$$

여기에서 RH 는 상대습도이며, α_{det} 는 GA4.0, 6.0 모두에서 3.0으로 설정된다. GA4.0 개발 단계에서 $[\alpha = 0.9, \gamma = 1]$ 에서 $[\alpha = 0.35, \gamma = 1]$ 로 변경함에 따라 모델 상층에서의 오차는 증가가 있었지만, 적도 지역의 오차 (tropical cyclone, 몬순 등)를 상당히 줄여주고 MJO 모의에서도 개선을 가져온다는 사실을 밝혔다 (Klingaman and Woolnough 2014; Bush et al. 2015). 이러한 사실을 바탕으로 Walters et al. (2017)에서는 convection scheme내의 entrainment rate와 연관된 계수 α 와 γ 를 레벨 (전체, 700hPa 이하, 400-700hPa)에 따라 여러 방법으로 처방하여 분석하였고, 최종적으로 $\alpha = 1.125$, $\gamma = 1$ 로 처방하여 기존에 비해 entrainment rate이 25% 정도 증가되게 설정되었다. 현재 현업 코드에서 α 와 γ 를 어떻게 처방하고 있는지, 또한 이 값이 동아시아에 적절한 값인지 생각해 볼 필요가 있다.

GloSea6에서 사용하는 적운 모수화는 6A 옵션으로 설정되어 있으며, GloSea5와 동일한 방안이다. 5A 방안과 비교하여 6A 방안에서 가장 크게 개선된 점은 다음과 같다.

1) detrained mass는 포화되고 환경에 따라 중립 부력을 가지게 될 수 있으며, 남은 대류 plume도 부력을 가지거나 포화될 수 있다. 이는 잠재 온위를 계산하는 방정식에 영향을 준다. 또한, 5A 방안에서는 한 번의 과정으로 forced detrain을 계산하지만, 6A 방안에서는 세 번의 과정을 반복한다.

2) 포화상태에서의 잠재 온위는 습도 및 건조 상태의 온위, 습도 등으로 반복 계산된다. 5A 방안에서는 1번의 반복이지만, 6A 방안에서는 3번의 반복 과정을 거치게 된다. 또한, entrainment 및 상승 운동 후의 준포화 상태에서의 parcel 증발이 포함된다.

3) 6A 방안에서는 mass flux가 구름 하부에서 5% 아래로 떨어지거나, forced detrainment가 mass의 95%이상으로 detrain되면 상승 운동이 멈춘다.

이러한 개선으로 6A 방안은 5A 방안보다 대류 운동이 더 깊어지고, 모델의 예단식에서 생기는 일시적인 noise를 제거하는 결과를 가져온다.

② 구름 모수화 모듈

구름 모수화는 timestep마다 각 격자내 condensation의 양을 계산하는 과정으로 주로 복사 과정 및 구름 물리 강수 과정에 사용되는 구름의 양을 계산하는 과정을 포함한다. GloSea5에 사용된 구름 모수화는 PC2 방안(Wilson et al. 2008)이다. PC2 방안은 cloud fraction과 condensation의 변화율을 연관된 모듈내에서 예단적으로 계산하는 방법을 사용하고 있다. 또한 구름을 ice와 liquid 두가지로 구분하여 고려하여 병합하는 방식을 사용한다. 모듈내 계산 순서도 및 코드 트리를 Figure 56과 57에 나타내었으며, 모듈내 수식 일부 및 간략한 설명을 부록내에서 찾아볼 수 있다.

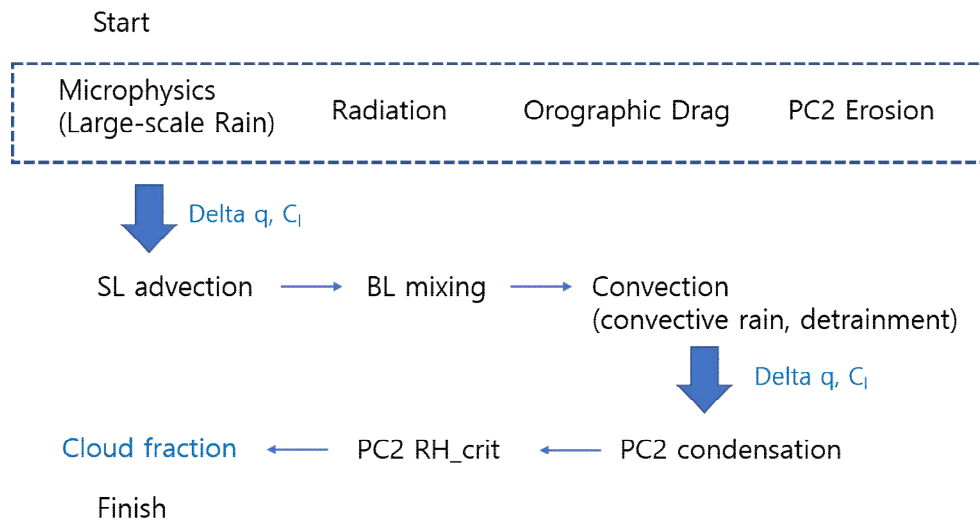


Figure 56. Timestepping diagram for the PC2 scheme

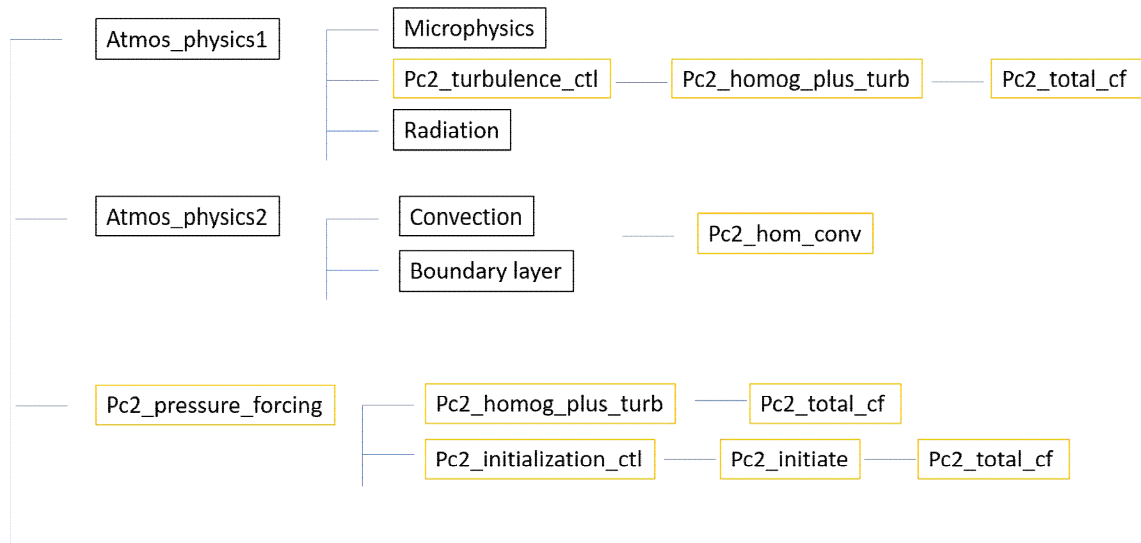


Figure 57. Codes tree for the PC2 scheme in GloSea5

③ 구름/강수 모수화 과정내 계수 특성 조사

기후예측모델내에서 적도 강수를 줄이기 위한 모듈 수정 및 계수 조정이 동아시아 여름 강수에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위해 관련 모듈 및 계수들을 조사하였다. 구름모수화를 중심으로 관련이 있는 적운모수화, 미세물리구름 과정, 구름-복사 과정 등에 포함되어 있는 계수들을 살펴보았다. 여러 가지 계수들을 조사한 결과를 부록내에서 확인할 수 있으며, 주요한 계수들만 아래에 소개한다.

- Exy: 미세물리과정내 계수로 눈송이와 얼음상이 충돌하여 병합될 효율. 이 병합 효율은 관측할 수 없는 매개변수로 다른 미세물리방안에서도 Exy는 임의로 처방되고 있으며 보통 0과 1사이의 값이 사용됨. GloSea5의 경우 온도에 의존하는 병합효율을 사용하고 있음. 이 병합 효율을 높여준다면, 눈상이 더 많이 생성되며, 눈상의 녹음과정을 통하여 비상이 많이 생성되고, 따라서 지표 강수를 늘여줄 수 있을 것으로 기대할 수 있음.

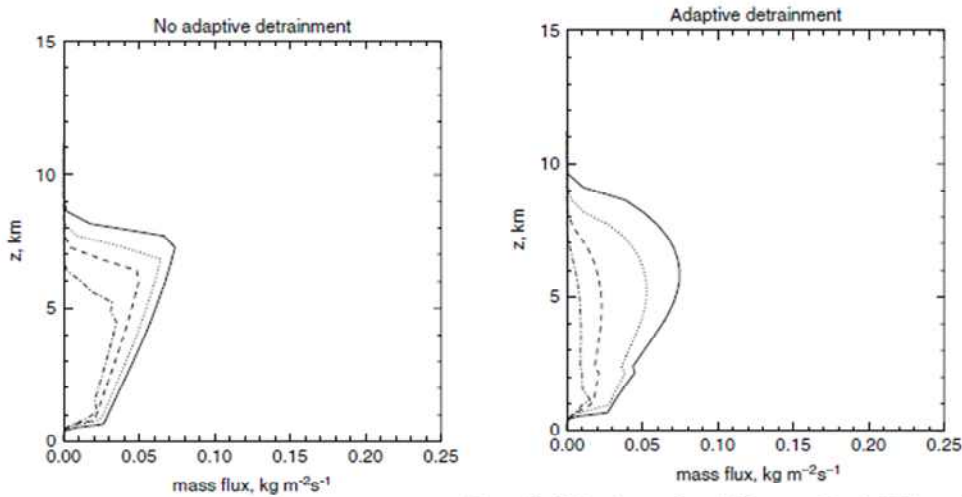
$$E_{xy} = 0.02\exp(0.08(T - 273.15)) \quad [7]$$

- ice_width: 격자내에 구름이 어떻게 분포하는지를 설정하는 PDF 분포에서 width를 결정하는 수식내 계수(i)를 수정하여 width를 조절하는 효과를 가지고 있음. 실제 qcl이 구름으로 변화하는데 직접적으로 영향을 미치는 계수로 모듈 개발 당시 0.04로 제안되었으나 실제 현업 적용에 0.02로 사용됨.

$$b_i = (1 - RH_{crit})q_{sat} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\overline{qc}f}{iq_{sat}T}\right) \quad [8]$$

- cca_dp_knob, cca_md_knob, cca_sh_knob: 복사 과정에서 사용되는 상/중/하층 운량의 비율을 설정하는 계수로 convective core의 복사 효과를 고려하는 부분임. 실제 운량에 영향을 미치지 않는지만, 단파 복사의 반사에 직접적인 영향을 미치는 계수. 개발 당시 0.2/0.1/0.1로 제안되었으나 실제 현업에는 0.5/0.5/0.5로 적용됨.

- r_det: Adaptive detrainment parameter로 mass flux/thermodynamic impact 비율을 결정하는 계수로 대류와 강수 과정에 직접적인 영향을 미침. Figure 58에서 볼 수 있듯이 adaptive detrainment를 고려하면 convective mass flux profile을 더 smooth하게 만드는 효과를 가져오며 이는 diabatic heating에 영향을 주어 적도 강수에 직접적인 영향을 줄 수 있음. 계절 규모에서는 walker circulation을 개선시키는 것으로도 알려져 있음. 현재 GloSea5는 r_det가 0.9로 적용되어 있지만, GloSea6에서 0.8로 조정될 계획에 있음. 사전 연구에 따르면 0.7로 수정할 경우에는 북태평양의 SST가 오히려 나빠지는 것으로 확인.



Derbyshire et al. 2011

Figure 12. Updraught mass fluxes (12 h averaged) for the SCM experiment under the EUROCS humidity case testbed (line styles as in Figure 1), with and without adaptive detrainment.

Figure 58. Distribution of updraught mass fluxes from no-adaptive detrainment and adaptive detrainment experiments. (Derbyshire et al. 2011)

(나) 구름/강수 관련 계수 민감도 실험을 통한 개선 가이드라인 제시

기후예측모델내에서 적도 강수를 줄이기 위한 모듈 수정 및 계수 조정이 동아시아 여름 강수에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위해 다음과 같은 민감도 실험을 구성하였다. 이러한

민감도 실험을 통해 동아시아 여름 강수에 영향을 크게 미치는 모듈이 무엇인지 알아보고, 또한 어떠한 계수가 예측성 향상에 기여할 수 있는지 살펴보고자 한다.

기후예측모델내에서 강수에 영향이 있는 모수화 과정인 미세구름물리 모수화, 적운모수화, 구름-복사 과정, 구름모수화의 주요 계수들을 조정하여 민감도 실험을 Figure 59와 같이 구성하였다. 모듈내 주요 계수들을 개발 당시 제안되었던 값, 혹은 많은 조사를 통해 검증되어 GloSea6에 적용하기로 한 값으로 변경하여 그 효과를 조사하였으며, 추가로 미세물리과정내에서 효과가 예상되는 계수를 선정하여 구성하였다. 미세구름물리 과정내에 병합효율 계수를 낮은 온도에서는 작게 높은 온도에서는 높게 설정되게 하는 실험을 MPS, 적운모수화내에서 adaptive detrainment 계수를 작게 설정하는 실험을 CPS, 구름-복사 과정내에서 복사과정내에 전달하는 운량의 비율을 낮게 설정하는 실험을 RAD, 운량모수화 실험에서 PDF 형태를 더 넓게 설정하는 실험을 CLD로 명명하였고, 2020년 여름철에 대해 각 4개의 앙상블로 구성하여 60일 적분을 수행한 후 그 결과를 현업 실험인 OPER와 비교하여 각 모듈의 영향이 어떻게 나타나는지 분석하였다.

EXP	OPER Physics	EXP Physics	Ens. Size	Frequency	Period
OPER	OPER		4	4/month (1, 9, 17, 25)	2020 MJJA (64cases)
MPS	Exy (0.02, 0.08)	Exy (0.03, 0.06)	4	4/month (1, 9, 17, 25)	2020 MJJA (64cases)
CPS	r_det (0.9)	r_det (0.8)	4	4/month (1, 9, 17, 25)	2020 MJJA (64cases)
RAD	cca_dp_knob (0.5) cca_md_knob (0.5) cca_sh_knob (0.5)	cca_dp_knob (0.2) cca_md_knob (0.1) cca_sh_knob (0.1)	4	4/month (1, 9, 17, 25)	2020 MJJA (64cases)
CLD	Ice_width (0.02)	Ice_width (0.04)	4	4/month (1, 9, 17, 25)	2020 MJJA (64cases)

Figure 59. Sensitivity experiments design for improving of precipitation prediction for East Asia

각 실험이 직접적으로 영향을 미치는 변수인 총 운량의 차이를 알아보기 위해 현업 결과와 각 실험과의 차이를 계산하여 Figure 60에 나타내었다. 병합 효율을 조정한 MPS 실험의 경우 지표 강수를 늘려줄 수 있을 것으로 예상하였으나, 효과가 매우 미미하게 나타났다. 또한 복사과정에 사용되는 운량의 비율을 설정하는 계수를 조정한 RAD 실험 역시 약간의 변화는 있었지만 큰 효과를 가져오지 않았다. 구름에 직접적으로 영향을 미치는 적운 모수화 과정 및 구름모수화 과정에 포함된 계수를 조정한 CLD, CPS 실험의 경우 전반적으로 서태평양 지역에서 운량의 감소를 보이고 있다. 따라서, 이 연구에서는 CLD, CPS 두 실험의 결과가 현업 결과

와 비교하여 어떠한 영향을 미치는지 조사하고자 한다.

CLD, CPS 두 실험의 적도지역 순환장의 변화를 살펴보기 위해 10S-10N 지역평균된 연직 바람장으로 나타낸 Walker circulation를 Figure 61에 나타내었다. 두 실험 모두 서태평양 지역에서 현업 결과인 OPER 대비 상승 운동이 감소한 것을 알 수 있다. 서태평양 지역의 상승기류의 변화는 2차 순환에 의해 동아시아에 영향을 줄 수 있다. 위도별 순환장 및 습도 변화를 살펴보기 위해 위도별 연직 순환장을 나타낸 그림을 살펴보면, 30N이상 지역에서 습도가 증가하고 상승기류 역시 강해진 것을 알 수 있다.

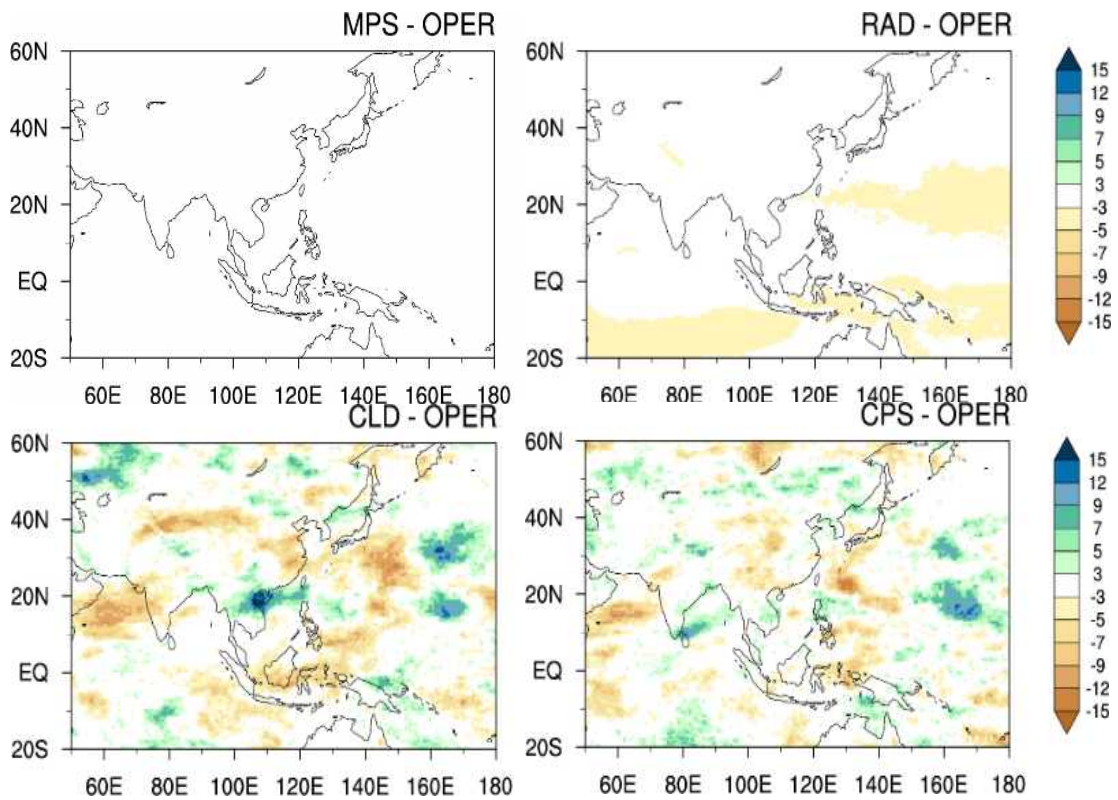


Figure 60. Difference distribution of total cloud amount between each experiment and operational results.

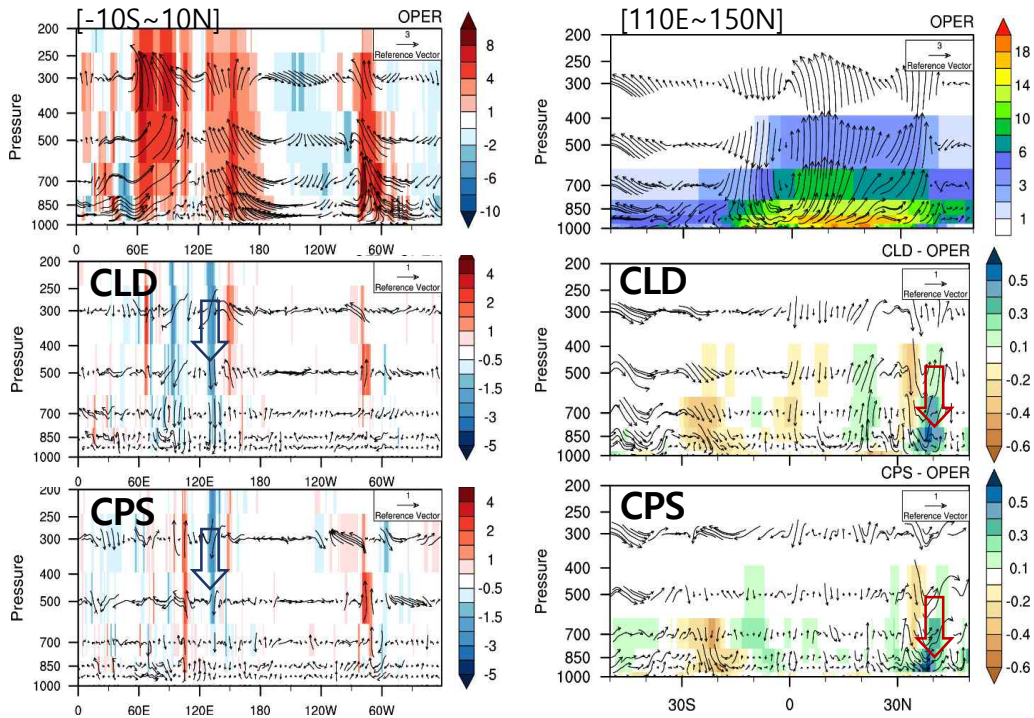


Figure 61. (Left) Averaged tropical vertical motion (shading) and zonal and vertical circulation (arrows) in the OPER, CLD, and CPS experiments. (Right) meridional mean specific humidity (shading) and meridional and vertical circulation (arrows) in the OPER, CLD, and CPS experiments.

두 실험 모두 동아시아 지역에서 상승기류가 강해졌으며, 하층 대기에서의 수증기가 증가한 것을 알 수 있다. 한반도 주변 지역으로 강수가 다소 증가하였으며(Figure 62), 특히 증가한 수증기로 인해 미세구름물리 과정으로 인한 stratiform precipitation이 증가하였다 (보이지 않음). 강수 패턴의 변화가 계절내 예측성에는 어떤 차이가 있는지 살펴보기 위해 각 실험과 현업 실험의 관측 강수 패턴 상관계수 (PCC)의 차이를 Figure 63에 나타내었다. 0 이상의 값은 실험이 현업에 비해 관측과 유사하게 나타나는 것을 의미한다. 적도 지역 강수대의 예측성은 거의 차이가 없는 반면, 동아시아에서의 예측성은 두 cases를 제외하고 모두 상관도가 높아진 것을 확인할 수 있다. 물론 적도 지역과는 달리 동아시아에서는 예측성능이 평균적으로 낮게 나타나기 때문에 그 차이가 크게 나타날 수 있지만, 대부분의 cases에서 예측성이 상승한다는 점은 매우 인상적인 결과라고 할 수 있다.

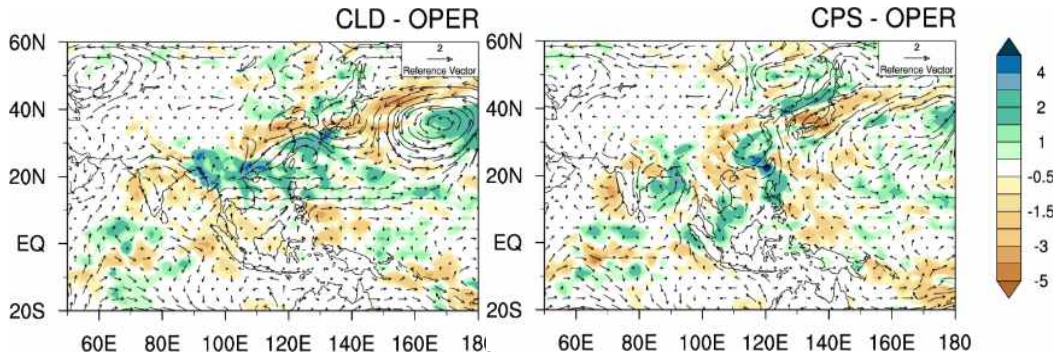


Figure 62. Difference distribution of total precipitation between each experiment and operational results.

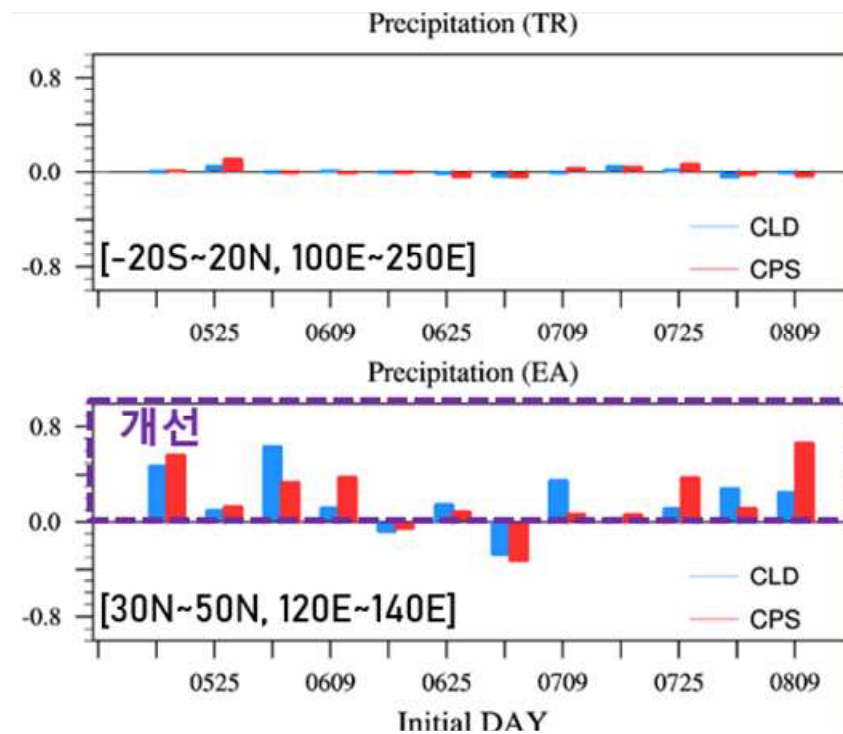


Figure 63. Anomaly correlation coefficient of total precipitation over Tropics and East Asia.

(3) 오차진단 틀 개발 완료

2019년부터 기상청 기후예측시스템 GloSea5 모델의 계절내 예측 결과의 예측 성능 평가 및 오차 분석을 통한 개선 지원 업무를 진행하면서 GloSea5의 개선을 위한 다양한 연구를 반영하기 위해 일관된 오차 진단 틀을 개발하였다. 기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 틀은 모델 결과 분석의 신속성과 정확성을 위해 자료처리 및 검증 과정을 포함한다. 또한 계절내 시간 규모의 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)과 동아시아 여름 몬순 주요 현상의 예측성능 및 오차 진단을 수행하도록 구성하여, 선행시간에 따른 계절내 변동성의 오차 분석이 용이하게 설계하였다.

오차 특성 진단 툴의 자료 처리 및 검증 과정은 기후예측모델의 원시 결과 파일의 형식 변환 및 재격자화 과정을 포함하고, 관측(ERA5, GPCP)과 모델의 S2S 제공 예측일 기준 격자 형태의 기후값 및 아노말리값을 산출한다. 또한 계절내 예측성능 및 오차 진단을 위해 예측일 기준 선행 주수 월 단위 자료와 선행 주수 기준 일단위 자료로 관측과 모델자료의 후처리 자료를 생산한다. 전/후처리 과정을 완료한 기후예측모델 자료의 검증은 주요 대기 변수의 월/계절별 평균 오차와 공간 상관 계수를 가시화하여 자료 검증을 수행한다. 기후예측모델 계절내 현상 기반 오차 특성 분석을 위해 적도 지역 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단과 동아시아 여름철 오차 진단 툴을 구성하였다. 해당 툴은 계절내 변동성 필터링을 적용하여 기후예측모델의 선행 주수 기준 겨울철 공간 변동성과 MJO 전파 구조 오차, 예측일 기준 MJO 지수의 예측성능 및 오차 특징을 분석한다. 또한, 동아시아 여름 몬순 특성을 반영하는 주요 지표들의 예측성능 및 오차를 선행 주수 기준으로 비교하고, 동아시아 지역 평균 시간-위도 강수 밴드 변동성 및 필터링 된 강수와 하층 바람성분의 지연 상관 분석을 통해 여름철 강수 오차 특성을 일관성 있는 방법으로 진단하고자 하였다.

자료처리 및 검증, 계절내 변동성 및 MJO 오차 분석, 그리고 동아시아 여름 몬순 오차 분석으로 구성된 기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 각 과정의 주요 작업과 분석 내용, 결과물을 Figure 64에 제시하였으며, 주요 예시와 구동 매뉴얼을 부록 “기상청 기후예측시스템 오차 특성 진단 툴”에 첨부하였다.

Diagnostic Tool of KMA-GloSea

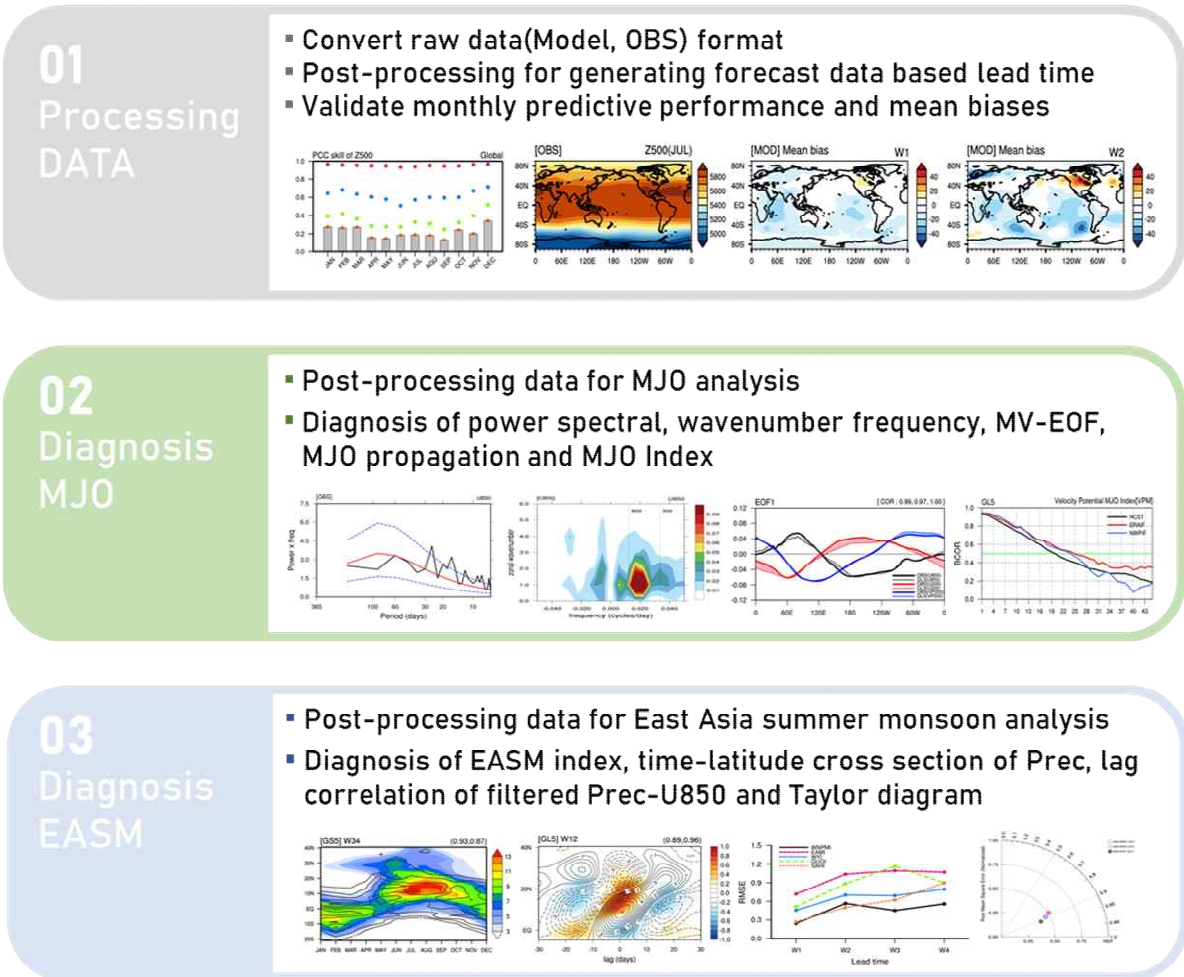


Figure 64. Main contents of diagnostic tool for KMA-GloSea5

라. 결합 초기화 기법의 예측 개선 영향 및 현업 적용성 평가

(1) 열대 강수 기후 표류 및 중위도 원격 상관계의 영향

(가) 기후표류 진단 프레임워크 구축 및 진단

① GloSea5 강수의 구조적 오차

GloSea5-GC2 강수 바이어스 분석(Figure 65)을 통해 열대 대류 지역에서 큰 바이어스가 두드러짐을 확인하였다. 특히 동인도양에서 건조 바이어스, ITCZ 강수대에서 습윤 바이어스를 확인할 수 있었고 이는 후보실험에서도 동일하게 나타나는 것(그림 미제시)을 보아 모델에서 구조적 오차가 존재함을 알 수 있었다. 이 연구에서는 열대 대류 활동이 활발하면서 구조적 오차가 나타나는 동인도양(A 지역)과 서태평양(C 지역) 그리고 여름철 한반도 기후에 영향을 줄 수 있는 북서태평양(B 지역)에서의 강수 오차 변화에 대해 중점적으로 살펴보았다. 겨울철과 여름

철 모두 동인도양에서는 건조 바이어스가, 서태평양에서는 습윤 바이어스가 나타났다. 북서태평양 지역은 겨울철에는 건조 바이어스가 나타나고 이 지역에서의 강수 활동이 활발한 여름철에는 습윤 바이어스가 나타났다.

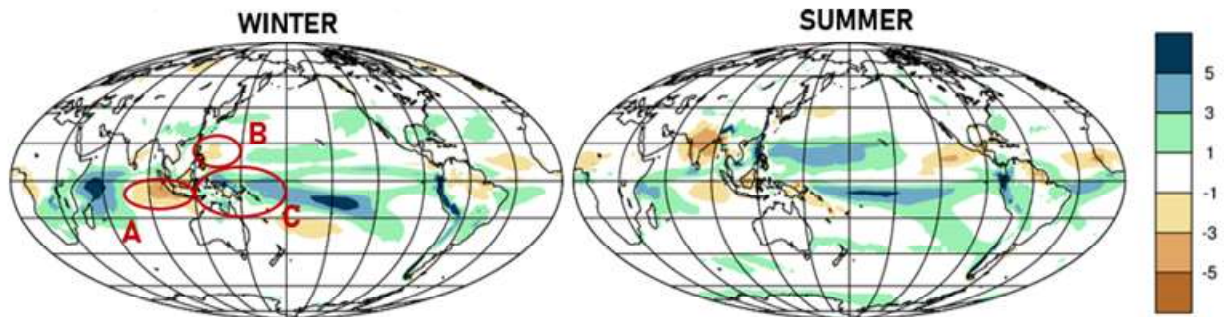


Figure 65. Systematic bias of precipitation in GloSea5-GC2.

② 기후표류 진단과 결합초기화 효과

Hermanson et al.(2018)에 의하면 기후표류 유형은 크게 세 가지로 나눌 수 있다(Figure 66). 모델의 예측 오차가 long-term bias에 수렴하는 형태인 asymptoting, 예측 오차가 long-term bias와 같은 부호이지만 크기는 long-term bias의 크기보다 더 크게 발달하는 overshooting, 그리고 예측 오차가 long-term bias와 반대 부호로 발달하는 inverse이다. 이 중 Inverse type의 기후표류는 모델의 구조적 오차보다는 예측의 초기치를 따라가는 유형으로 이해할 수 있다.

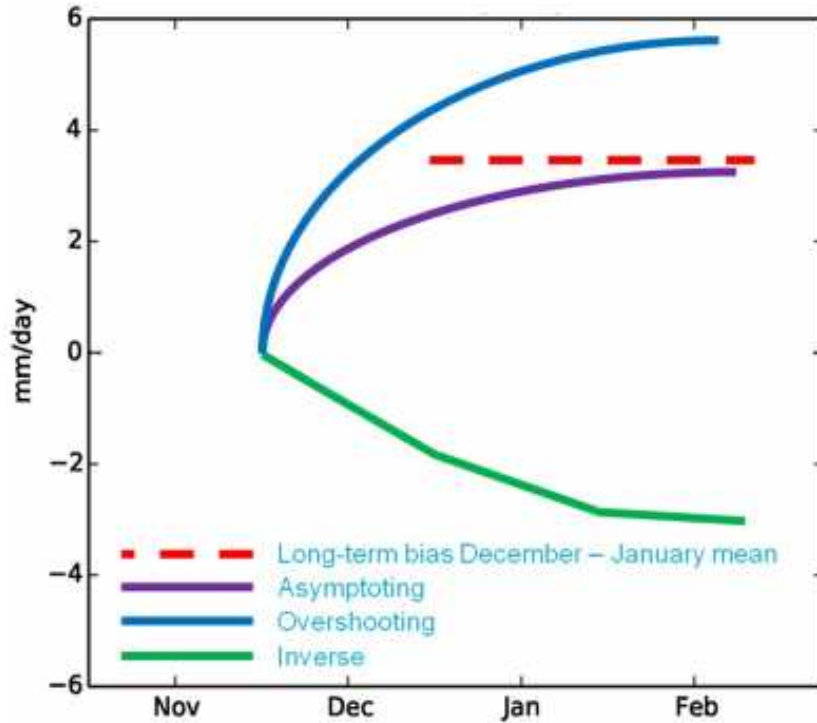


Figure 66. Types of climate drifts as proposed by Hermanson et al(2018).

Figure 67에서는 1주에서 8주까지의 리드타임에 따라 GloSea5 실험들의 강수 바이어스가 어떻게 발달하는지를 나타냄으로써 드리프트 양상을 진단하였다. Figure 65에서 본 것처럼 겨울철 동인도양과 북서태평양 강수는 건조한 long-term 바이어스가 나타난다. 여름철 동인도양 강수는 음의 long-term 바이어스가 나타나지만 북서태평양 강수는 양의 long-term 바이어스가 나타난다. 겨울철에는 결합초기화 실험(파란 실선)과 현업 예보(빨간 실선)의 강수 바이어스가 차이가 없거나(A지역, 동인도양) 리드타임에 따라 우열에 차이가 있지만(B지역, 북서태평양) 동인도양과 북서태평양 강수 모두 long-term bias의 반대 부호로 바이어스가 발달하는 inverse type이다. 초기화가 적용된 후보실험의 강수 드리프트 유형 역시 inverse type이다. 따라서 겨울철 강수 예측에 있어서 동인도양과 북서태평양 지역은 기본적으로 초기화 영향을 받는 지역으로 판단되고 이 연구에서 적용한 결합초기화 효과 역시 기대할 수 있는 영역이라 보여진다. R&D 개발 결과에 따르면 실제 결합초기화 실험은 현업 예보 대비 이 지역들에서 MJO 동진을 10일 이상 뚜렷하게 모의할 수 있었고 RMM 지수 측면에서는 7일 이상의 예측 기간이 개선되었다.

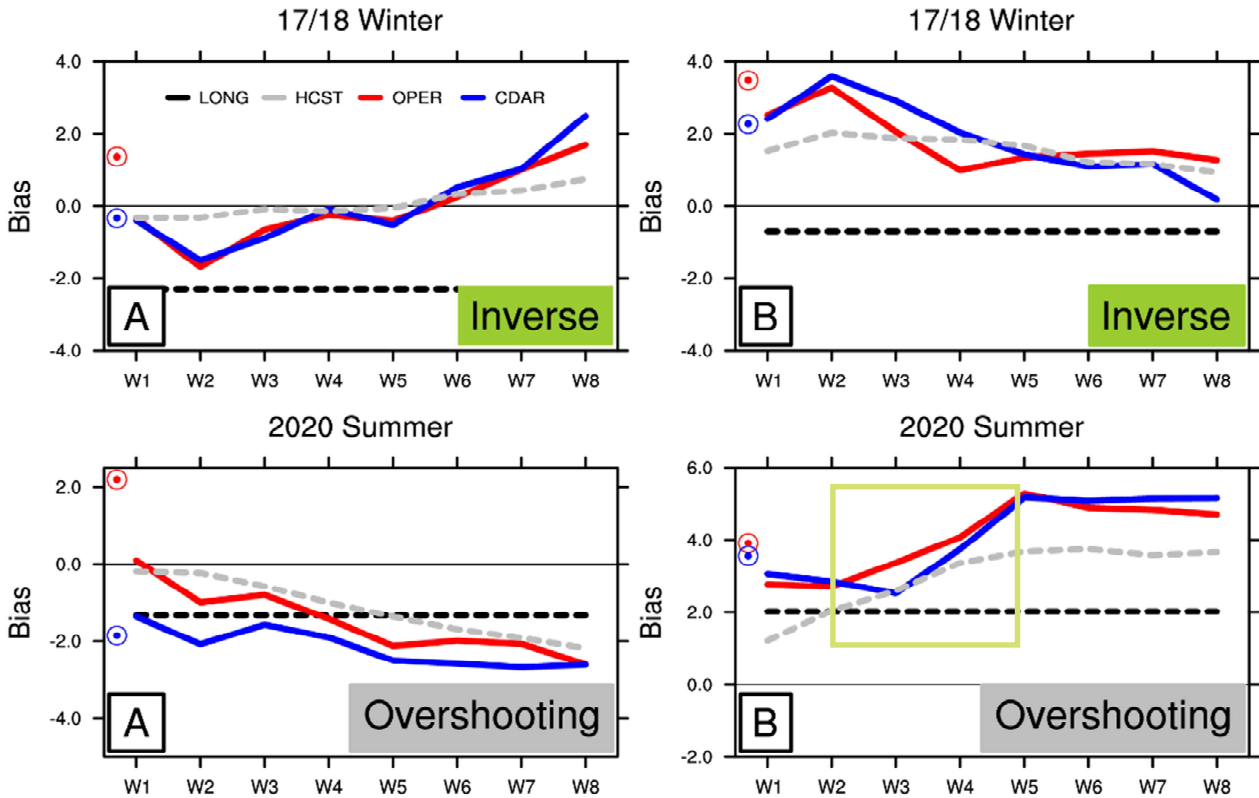


Figure 67. Precipitation drifts as a function of lead time for OPER (red) and CDAR (blue) compared to the long-term biases of their free-running controls (black dashed line) and hindcasts (gray dashed line).

여름철에는 동인도양과 북서태평양 강수 모두 long-term bias보다 더 크게 바이어스가 성장하는 overshooting type이다. 북서태평양의 경우 3,4주 리드타임에서 현업 예보(빨간 실선)보다 결합초기화 예보(파란 실선)에서 더 작은 바이어스가 확인되었다. 따라서 여름철 북서태평양 강수 및 대기순환장에 대한 3,4주차 예보에서 결합초기화 효과를 기대할 수 있으리라 기대되고 이는 (나)장에서 확인할 수 있다.

참고로 C지역인 적도 서태평양 지역은 계절 구분 없이 강수 드리프트가 long-term bias에 접근하는 asymptoting 유형이다.

(나) 대기-해양 순환장 예측에서의 결합초기화 효과 평가

기후표류 진단을 통해 겨울철 열대 대류 지역에서의 강수 오차가 초기 자료 개선을 통해서 개선될 가능성이 있음을 확인하였고 이는 실제 MJO 예측의 개선을 가져왔다. 이러한 MJO 예측의 개선을 통해서 중위도 원격상관 예측에 대한 개선 역시 기대할 수 있다.

이미 잘 알려져 있듯이 MJO 위상 3 발생 10-15일 이후에 로스피파 전파에 따라 동아시아 저온 현상이 발생할 수 있는 호조건이 형성된다(e.g. Kim et al., 2020).

2018년 겨울철을 사례로 MJO가 위상3인 날들을 선별하였고 이후 11일-15일에 해당하는 대기 순환장 아노말리의 평균을 Figure 68에 나타내었다. 열대 대류 패턴의 변화를 살펴보기 위해 상향장파복사 합성장을, 열대-중위도 원격상관 패턴을 살펴보기 위해 해면기압 합성장을 계산하였다. 현업에서는 동인도양에서의 대류 억제, 북서태평양에서의 대류 강제가 관측에 비해 약하게 모의되었다. 그러나 결합초기화 실험을 통해 동인도양에서의 음의 아노말리를 강화시킬 수 있었고 특히 북서태평양에서 대류를 강화시킬 수 있었다. 이러한 대류 쌍극자 구조는 중위도로의 로스비 파동을 유도하였고 한반도 인근에 고기압성 아노말 리가 위치함에 따라 동아시아에 북풍 아노말 리가 유입될 수 있는 호조건을 만들었고 이는 결과적으로 한랭한 동아시아를 야기했다. 한반도에서 캄차카반도, 북베링해로 이어지는 고기압-저기압-고기압 패턴이 현업에서는 두 개의 고기압-저기압 패턴으로 나타나지만 결합초기화 실험에서는 잘 나타나고 있다. 2018년 겨울철 분석을 통해서 MJO 위상 3 이후 11-15일 뒤 형성되는 인도양-북서태평양 대류 쌍극자 구조와 이에 따른 로스비 파동 패턴을 결합초기화 실험을 통해 개선할 수 있음을 확인하였다.

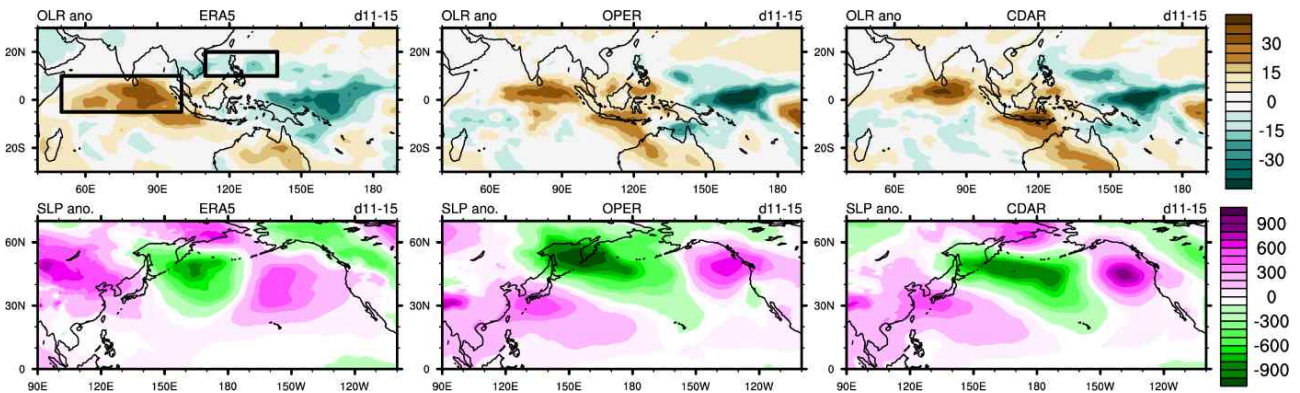


Figure 68. MJO-15 day lagged composites of the outgoing longwave radiation and sea level pressure in phase 3 for observations, operational forecast and coupled initialization experiment.

MJO 원격상관 패턴의 주요 지역들에 대해서 현업 대비 결합초기화 실험의 예측 개선율을 막대그래프로 정리하였다(Figure 69). 결합초기화 실험은 열대 대류 패턴에서 현업 대비 18.6%의 인도양 대류 오차 개선과 74%의 북서태평양 대류 오차를 개선시켰다. 또한 MJO-중위도 원격상관 패턴에서 현업 대비 24.6%의 패턴 개선을 가져와 결과적으로 동아시아에서 약 10% 기온 예측의 개선을 이루었다.

EA response (d11-15) on MJO P3&4

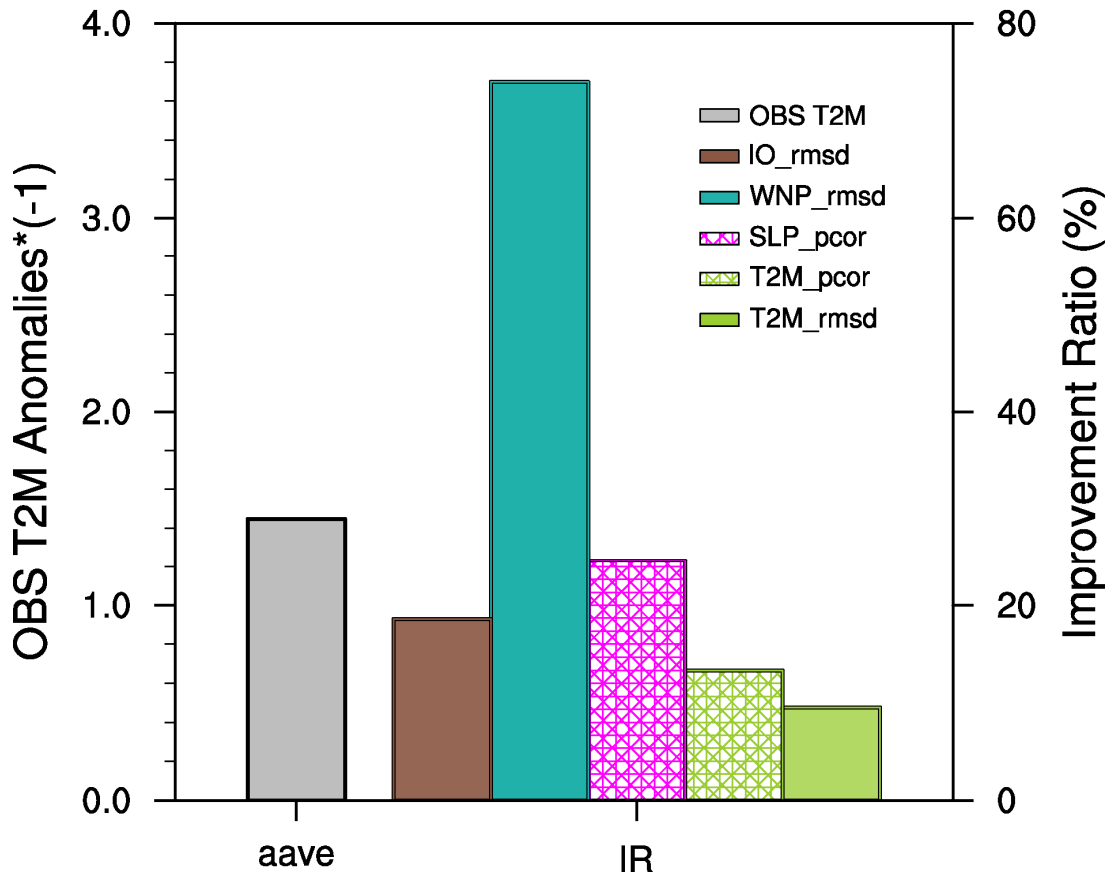


Figure 69. Improvement ratio of coupled initialization experiment compared to the operational forecast for the MJO-15 day lagged composites of the outgoing longwave radiation and sea level pressure in phase 3.

(가)장에서 보듯이 강수 드리프트를 통해 여름철 북서태평양 지역은 3,4주 리드타임에서 결합초기화로 인한 현업 예보의 개선을 기대할 수 있는 영역임을 확인하였다. 이러한 북서태평양에서의 대류 개선은 2020년 여름철 북서태평양 고기압 활동으로 인한 동아시아 강수 반응에도 개선을 가져왔다(Figure 70). 3,4주 리드타임에서 북태평양고기압 지수와 강수(갈색, 녹색 음영)와의 상관관계에서 살펴보면 북서태평양 고기압의 가장자리에 강수 밴드가 놓임으로써 우리나라 인근에 동서로 긴 양의 상관관계가 나타나는 것을 볼 수 있다. 현업에서는 이 강수 관련성이 우리나라 북쪽에 치우쳐서 나타나는데 결합초기화를 통해서 관측과 유사하게 한반도 중심으로 위치를 개선시킬 수 있었다. 패턴 측면에서 3주차에는 17%, 4주차에는 24%의 개선을 강수 오차 측면에서 3주차에는 2%, 4주차에 10% 개선을 가져올 수 있었다.

한반도 강수 개선은 패턴 측면에서 3주 17%, 4주 24%, 강수량 오차 측면에서 3주 2%, 4주 10% 개선을 가져올 수 있었다(Figure 71). 결합초기화 실험으로 인한 북서태평양 고기압 지수의 개선(2% 미만)은 그리 크지 않았음에도 불구하고 한반도 강수의 개선을 가져올 수 있었던 것은 우리나라로 들어오는 습윤한 공기 유입의 근원인 인도양 강수에서 개선(3주 19%, 4주 24%)이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

결합초기화를 통해서 열대 대기 강제력뿐만 아니라 열대-중위도 원격상관 패턴의 개선이 이루어졌고 그 결과 2018년 겨울철 한반도 한파와 2020년 여름철 장마에서 현업보다 더 현실성 있는 예측자료를 만들어 낼 수 있었다.

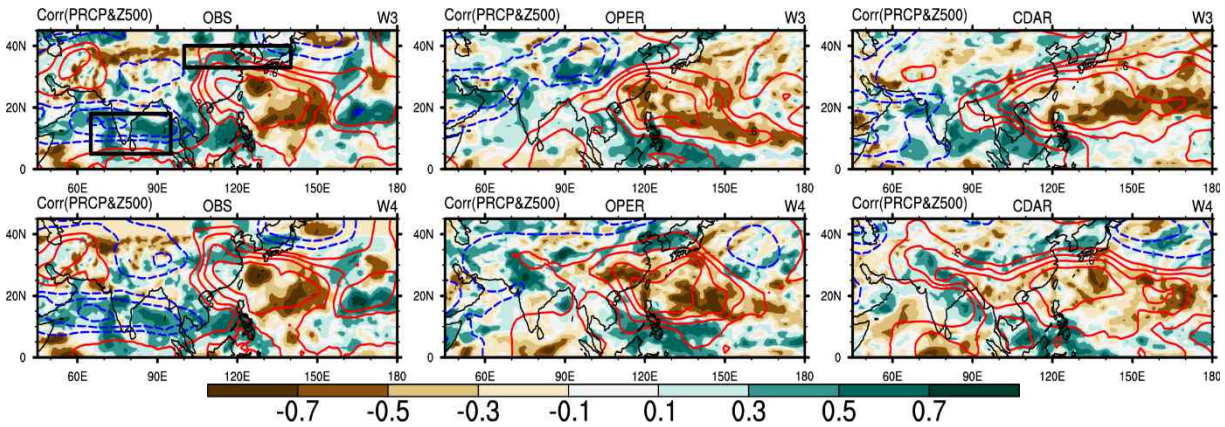


Figure 70. Correlation map between WNPSI and precipitation(shaded) and geopotential height at 500hPa (contour) in 2020 summer for observations, operational forecast and coupled initialization experiment.

EA response on WNPSHI

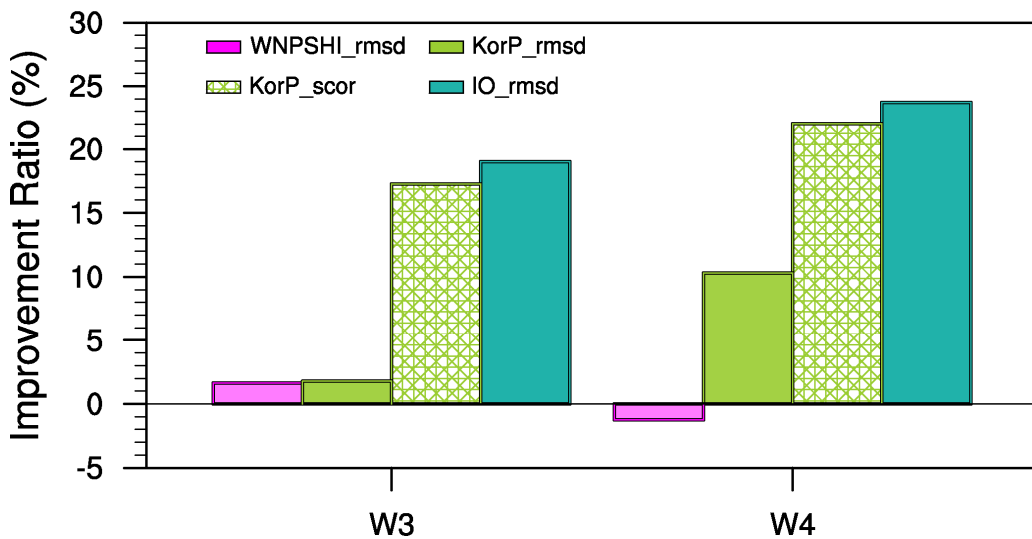


Figure 71. Improvement ratio of coupled initialization experiment compared to the operational forecast for the relationship between WNPSI and precipitation and geopotential height at 500hPa in 2020 summer.

(2) 토양 수분 및 토양 에너지 기후 표류에의 영향

(가) 물수지에 대한 기후표류

① 물수지 성분 평가

지면-대기 접합모형에서 결합초기화의 물수지에 대한 기후표류 효과를 평가하기 위해 먼저, 물수지에서 주요한 수문성분에 대한 평가를 하였다. 수문성분에 대한 평가를 위해 먼저, 전세계 대륙별 5개 주요 유역(양쯔강 유역, 메콩 유역, 미시시피 유역, 아마존 유역, 머리-달링 유역)과 한반도 기후와 밀접하게 관련이 있다고 알려진 고비 유역과 티벳 유역을 선정하였다 (Figure 72). 선택한 유역은 아마존 유역은 AMZ로, 고비 유역은 GOB로, 머리-달링 유역은 MDB로, 메콩 유역은 MEK로, 미시시피 유역은 MIS로, 티벳 유역은 TIB로, 양쯔강 유역은 YAN로 각각 표시하였다. GloSea5의 지면모델인 JULES 지면모형은 토양을 0.1 m, 0.25 m, 0.65 m, 2.0 m의 4개 층으로 나누어 총 3 m에 대해 토양의 수분 및 에너지 성분을 모의한다. 반면에, ERA-5의 토양층은 0.07 m, 0.21 m, 0.72 m, 1.89 m의 4개 층으로 총 2.89 m의 토양에 대한 수분 및 에너지 성분을 제공한다. 표층의 경우, JULES 지면모형의 0.1 m이고 ERA-5의 0.07 m로 다소 차이가 발생하나, 별도의 보정없이 비교 및 평가하였다. 근역층 토양수분의 경우는, 이 연구에서는 근역층을 1.0 m로 가정하고, 처음 3개층의 깊이 가중 평균값을 근역층 토양수분으로 하였다. 최종적으로 Coupled Data Assimilation (CDA; Choi, 2021)과 OPR (Korea Meteorological Administration Operational configuration)으로부터 모의된 표층과 근역층의 토양수분의 유역별 평균값을 산정하고 모형(CDA와 OPR)과 ERA-5의 값을 각각 비교하였다.

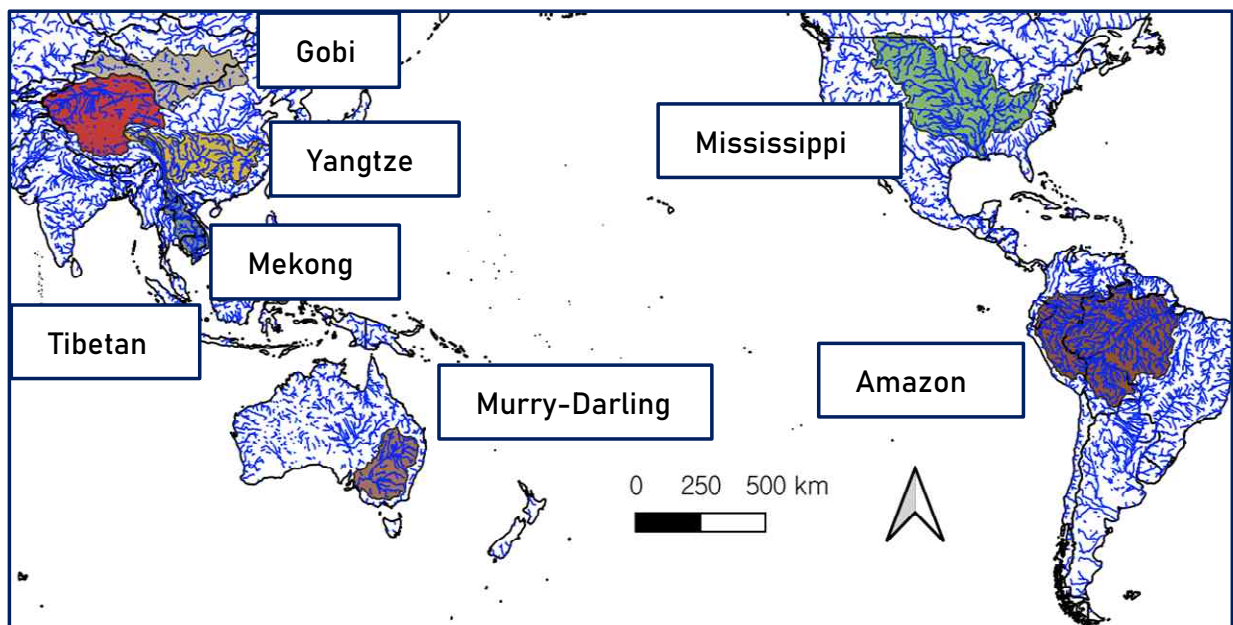


Figure 72. Selected 7 major basins for this study. Blue lines represent river networks. The shading polygons represent the selected river basins.

표층에서는 고비사막 유역과 미시시피 유역을 제외하고 CDA와 OPR 모두, 대부분 음의 편차를 보였다(Figure 73). 이 두 유역은 대부분의 유역에서 편차가 음의 방향으로 증가하는 경향과는 다르게, 고비사막 유역에서는 편차의 경향성이 분명하게 나타나지 않았고, 미시시피 유역은 음의 값에서 양의 값으로 양의 방향으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 CDA와 OPR의 차이는 대부분의 유역에서 매우 작은 값을 보였는데, 머리-달링 유역은 다른 유역과는 다르게 CDA와 OPR의 표층 토양수분의 차이가 최고 약 $0.05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 비교적 컸다. 표층의 편차 경향성과는 다르게 근역층에서는 모두 음의 편차를 보였으며, 고비사막 유역과 티벳 유역에서처럼 건조한 지역에서 편차는 다른 유역에 비해서 매우 작았다. 또한, CDA와 OPR의 차이도 이 두 유역에서 다른 유역과는 다르게 매우 작은 값을 보였다. 이와 같이, 유역의 특성에 따라서 CDA의 토양수분에 대한 영향이 다소 다르게 나타나나, 건조한 지역에서는 CDA의 토양수분에 대한 효과가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 다른 주요 수문성분(강수, 증발산량)에 대한 평가도 유사한 경향을 보였으며, Figure 74에 도시하였다.

Figure 75은 주요 7개 유역별 표층과 근역층의 CDA와 OPR과 ERA-5의 토양수분에 대한 ACC (Anomaly Correlation Coefficient)를 나타낸 것이다. 전반적으로 CDA와 OPR의 ACC는 대부분의 유역에서 초기 ACC 값이 낮았으며 모의시간으로 약 10일까지는 ACC가 증가하다가, 그 이후 떨어지는 경향을 보였다. 다만, 건조 지역은 고비 유역과 티벳 유역에서는 ACC값이 증가 이후 근소하게 떨어지거나, 거의 변화가 없었다. Figure 75에서 보여주는 것과 같이, 대부분의 유역에서 초기값의 편차가 매우 컸는데, 이는 해양과 대기의 결합초기화기법을 적용한 CDA에서도 여전히 initialization shock이 나타나고 있음을 보여준다. Mullholland et al. (2015)은 기후표류에 이러한 initialization shock이 포함된다고 하였다. 다만, 대부분의 유역에서 CDA에서 초기 편차가 다소 줄어드는 경향(Figure 73)을 보였는데, 이는 결합초기화의 효과로 추정된다.

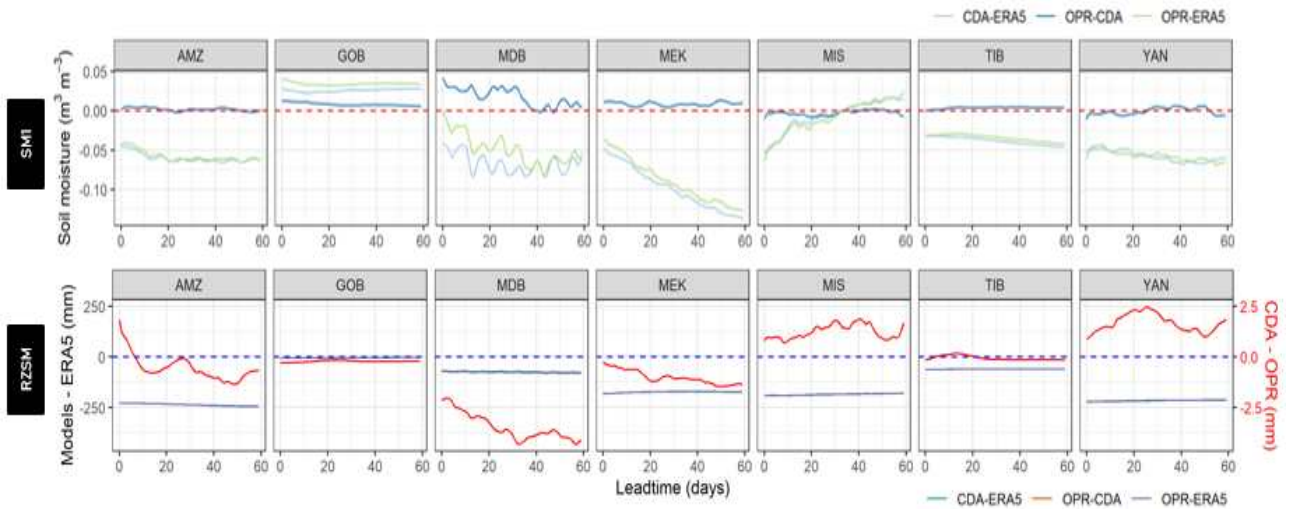


Figure 73. Differences between simulated soil moisture and ERA-5 soil moisture. SMI represents soil moisture in the first layer, and RZSM represents root zone soil moisture. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

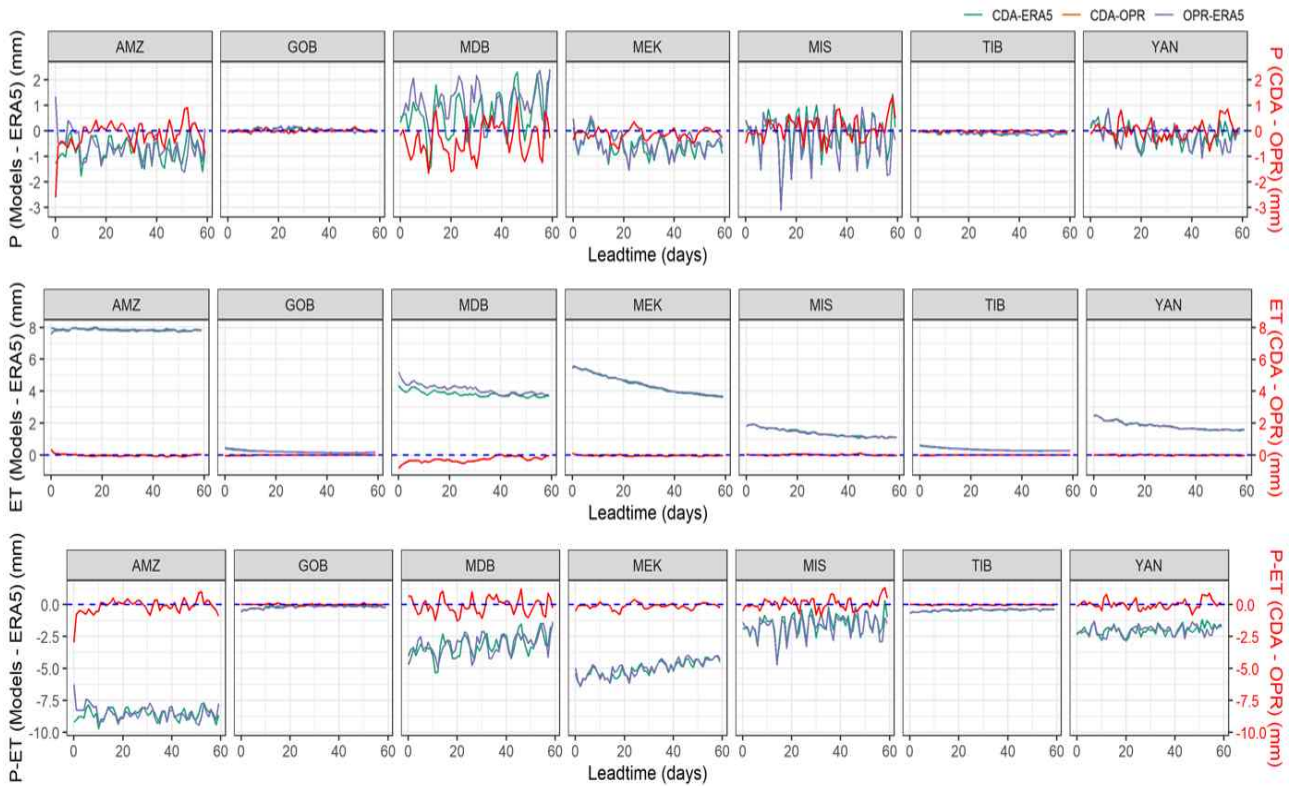


Figure 74. Error time series of hydrologic components in the 7 major selected basins. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

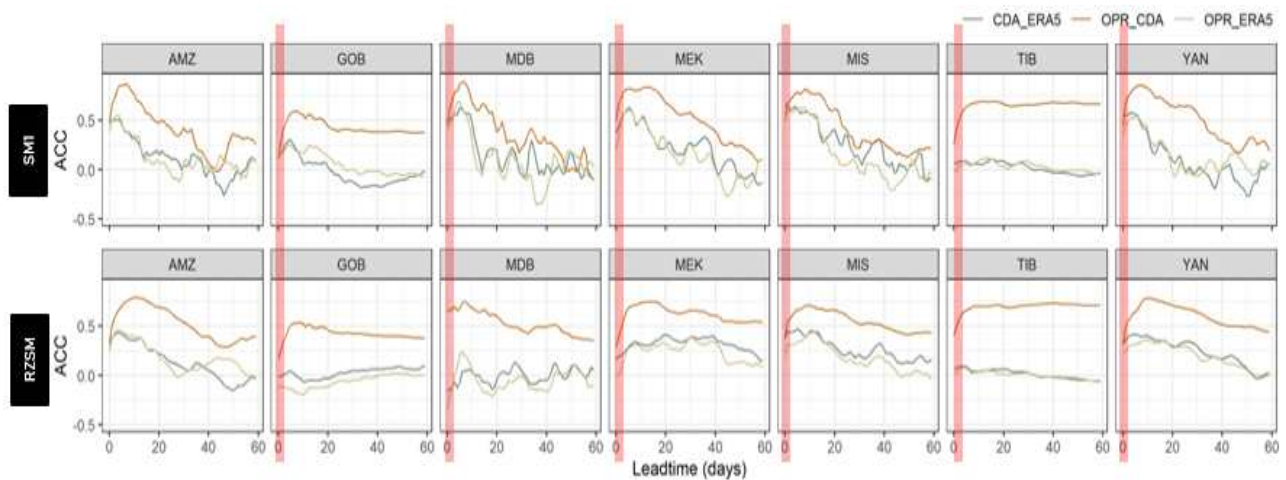


Figure 75. Anomaly correlation coefficients between CDA and ERA5, OPR and ERA5, and OPR and CDA. SM1 represents soil moisture in the first layer, and RZSM represents root zone soil moisture. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

② 물수지에 대한 기후표류 진단

물수지에 대한 기후표류를 각 3개월(10월, 11월, 12월) 앙상블 멤버와 유역별 시계열을 도시하였다(Figure 76). 기후표류 시계열에서도 건조한 두 유역(GOB, TIB)에서 매우 작은 값이 나타났고, 메콩강 유역, 미시시피 유역, 양쯔강 유역에서 기후표류값이 모의시간에 따라 전반적으로 양의 방향으로 증가하는 경향을 보였다. 반면에 아마존 유역에서는 대부분 음의 방향으로 증가하는 경향을 보였다.

주요 수문성분의 누적 오차 시계열과 기후표류의 시계열과 상관성을 각 앙상블 멤버별로 도시하였다. 기후표류 시계열과 강수 누적 오차 시계열과의 유역별 상관관계(Figure 77), 증발산 누적 오차 시계열과 유역별 상관관계(Figure 78), P-ET의 누적 오차 시계열과의 유역별 상관관계(Figure 79)를 각각 Figures 77-79에 나타내었으며, 90% 유의수준에서 유의한 경우 그 값을 표시하였다. 증발산의 경우는 모든 유역에서 양의 편차를 보였는데(Figure 74), 물수지 방정식(Eq. [1])에서 물수지에 대한 기후표류는 우변의 각 항의 오차의 누적으로 나타나게 되므로, 기후표류 시계열이 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 유역에서 강한 상관관계를 보였다. 아마존 유역과 메콩강 유역과 같이, P-ET의 누적오차 시계열과 기후표류 시계열의 상관성이 강수나 증발산 누적 오차 시계열과 기후표류와 상관성보다 다소 크게 나타났다. 그러나 다른 유역에서 전반적으로 P-ET에서 상관성이 변화가 크지 않는 것은 기후표류에 있어서 유출량의 영향이 강수와 증발산 보다 더 큰 것으로 판단된다. 이러한 결과는 LSS (Land Surface Scheme) 개선을 위해서는 강수, 증발산, 토양수분 등의 수문성분 뿐만 아니라, 유출량에 대한 정확한 평가가 필요하다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

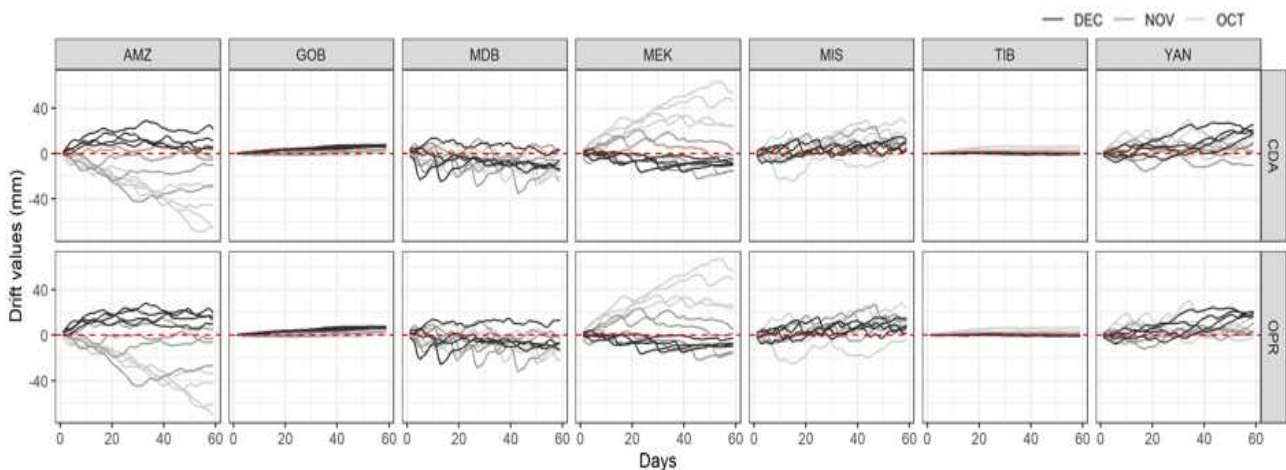


Figure 76. Time series of systematic drifts for water balance in the 7 major selected basins. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

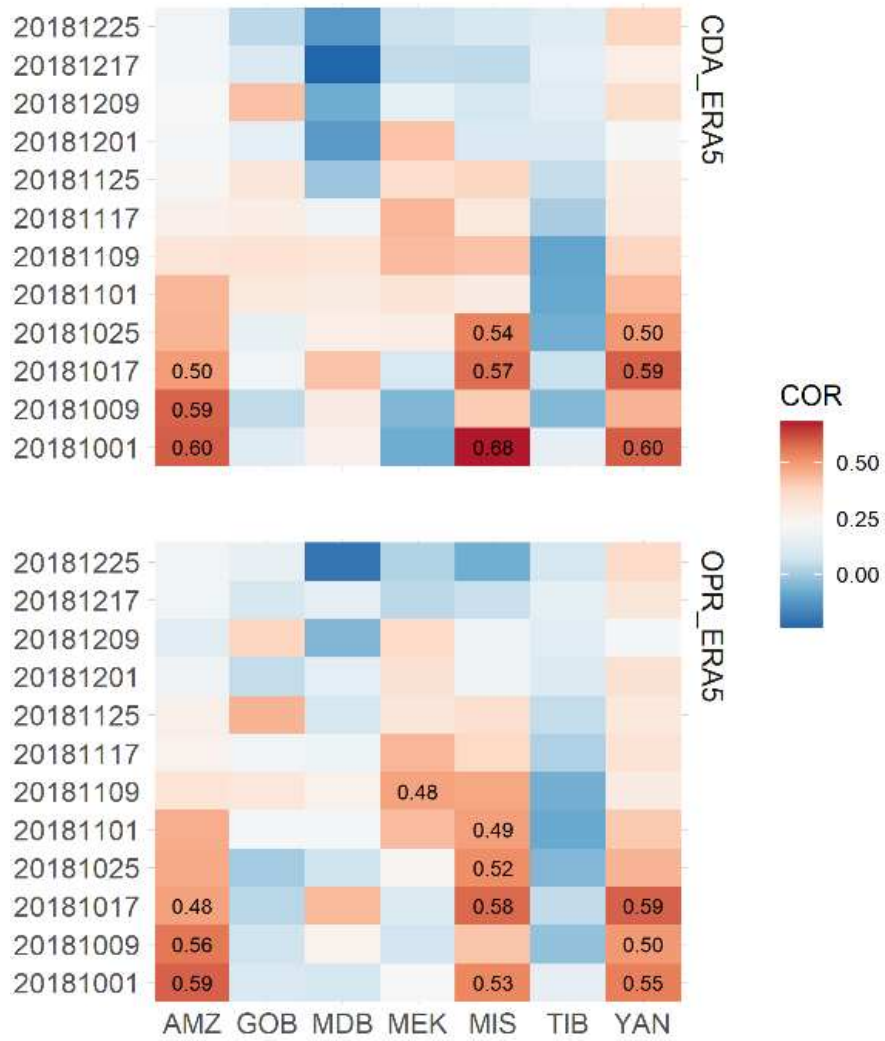


Figure 77. Correlation coefficients between precipitation errors and systematic drifts. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

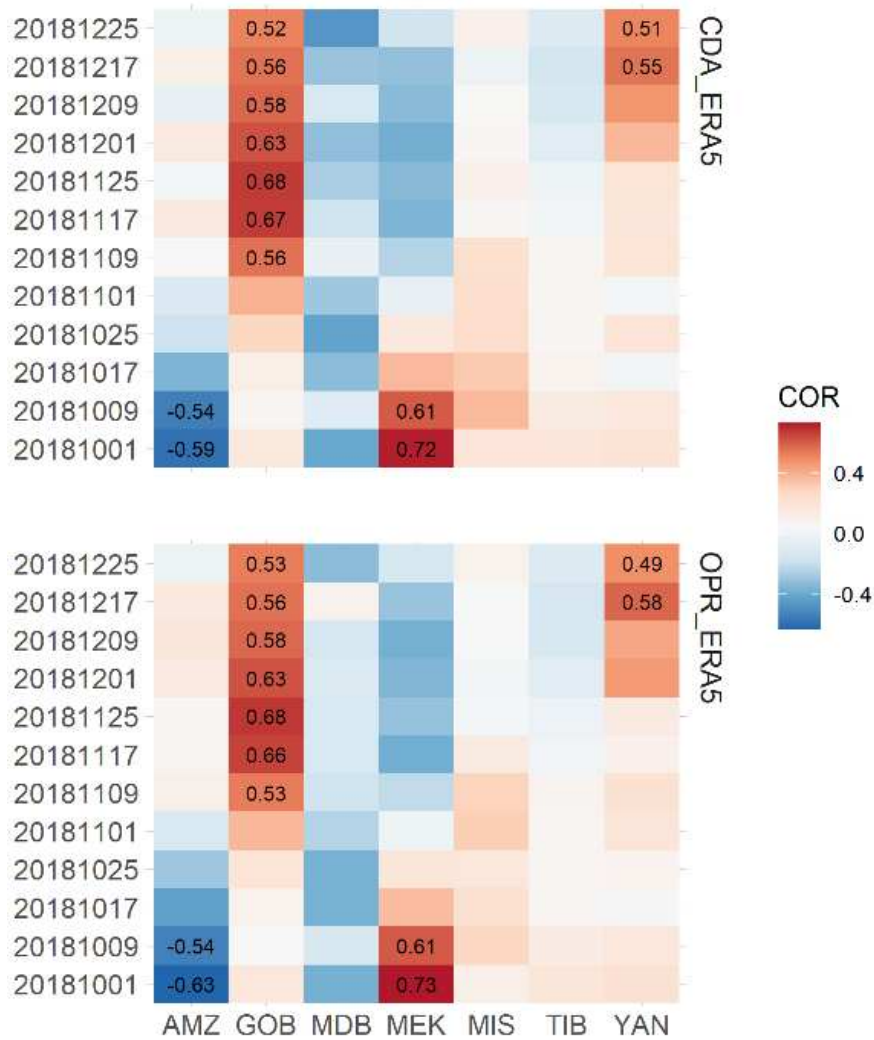


Figure 78. Correlation coefficients between ET errors and systematic drifts. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

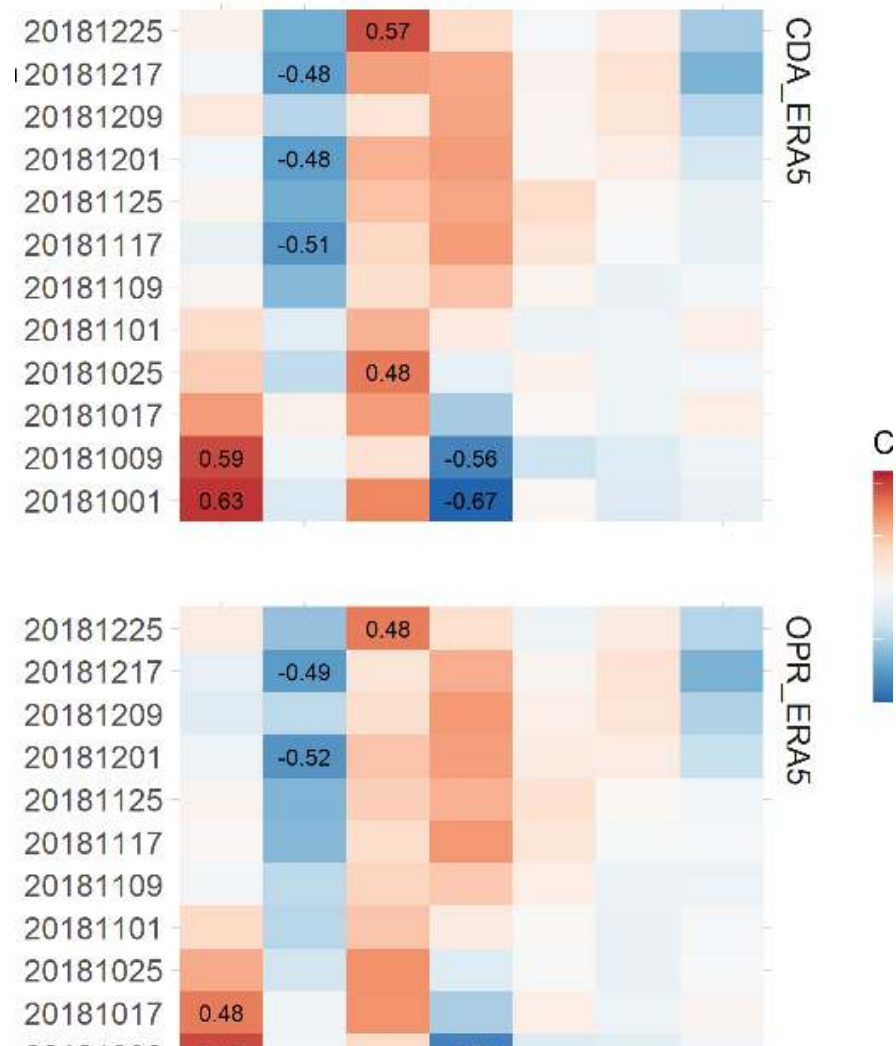


Figure 79. Correlation coefficients between errors of precipitation-ET and systematic drifts. AMZ: Amazon basin, GOB: Gobi basin, MDB: Murray-Darling basin, MEK: Mekong river basin, MIS: Mississippi river basin, TIB: Tibetan basin, and YAN: Yangtze river basin. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

(나) 에너지수지에 대한 기후표류

① 에너지수지 성분 평가

지면-대기 접합모형에서 결합초기화의 에너지수지에 대한 기후표류 효과를 평가하였다. 먼저 에너지저장의 변화량은 결국 근역층 토양온도의 누적 오차로 나타난다고 가정하였으며, 근역층 토양온도를 1.0 m 깊이(말하자면, 3개 토양층)의 깊이 가중 평균으로 산정하였다. 근역층 토양온도의 CDA-ERA5와 OPR-ERA5의 주별 차이를 살펴보면(Figure 80), CDA와 OPR 모두 대체로 양의 편차를 보였으나, 호주 서부와 미대륙 남서부와 서유럽 등에서 음의 편차를 보였다. 이러한 편차는 대체로 각 주별로 대부분의 지역에서 대체로 유사하게 유지되었으나, 호주와 유

라시아 중국 등지에서는 주별로 다른 양상을 보이기도 하였다. CDA와 OPR의 차이 또한 전체적으로 매우 작은 값을 보였으며, 남미나 중국 및 유라시아 대륙의 일부를 제외하고 대부분의 지역에서 CDA가 다소 큰 값을 보였다.

총 모의기간 CDA-OPR 평균값을 유역별(Figure 81a)과 Koppen-Geiger 기후대(Figure 81b)로 각각 중첩하여 도시하였다. Figure 81에서 보여주는 것과 같이 유역별 보다는 Koppen-Geiger 기후대에 더 유사하게 나타나는 지역이 많았다. 특히, 유라시아나, 중국의 남동부, 아프리카의 중부와 남부 등에서 더 뚜렷하게 나타났다. 따라서 물수지의 기후표류 진단은 7개 유역을 선정하여 실시하였으나, 에너지에 대한 기후표류는 Koppen-Geiger기후대별로 진단하였다. CDA-OPR 평균이 가장 큰 지역 중 음의 값으로 가장 큰 기후대(KG31)와 양의 값으로 가장 큰 기후대(KG41)을 선정하였고, 추가로 한반도 여름철 폭염과 관련이 높다고 알려진 티벳 지역을 포함하는 기후대(KG62) 등 3개 기후대를 선정하여 결합초기화에 대한 에너지의 기후표류 영향 진단하였다.

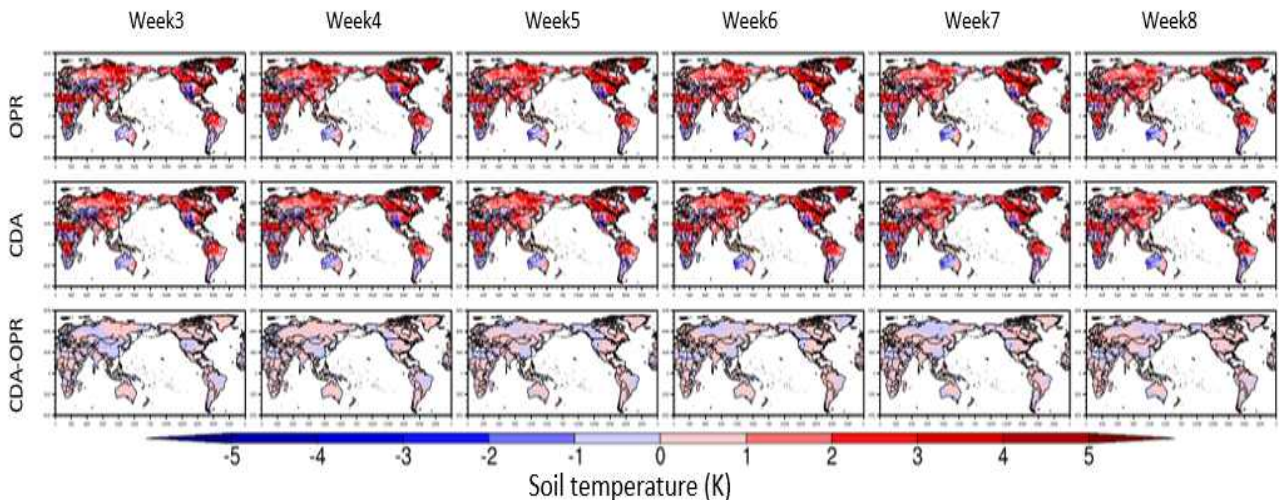


Figure 80. Weekly differences between simulated and ERA-5 soil temperatures. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration.

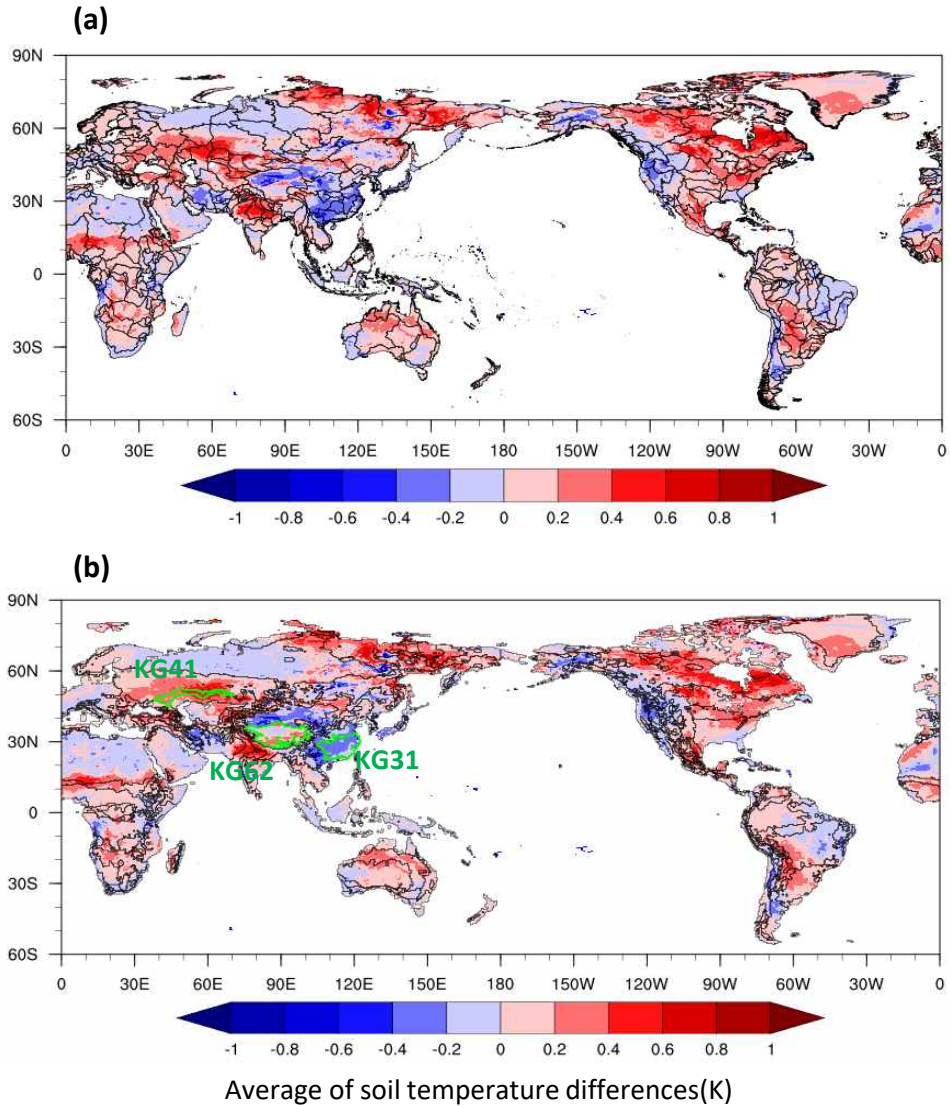


Figure 81. Average soil temperature differences between CDA and OPR. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration. KG31: Koppen-Geiger 31 classification, KG41: Koppen-Geiger 41 classification, and KG62: Koppen-Geiger 62 classification.

② 에너지수지에 대한 기후표류 진단

기후대(KG31, KG41, KG62)별 에너지에 대한 기후표류 값의 4월부터 9월까지 총 6개월의 평균 시계열은 CDA와 OPR 모두 유사하였다(Figure 82). 각 앙상블 멤버별 기후표류값의 분포는 KG41 기후대에서 가장 컸고, KG31, KG62 순이었다. KG31과 KG41 기후대에서는 기후표류값이 계속해서 증가하는 경향을 보였으나, KG62는 다른 두 기후대와는 다르게 초반 기후표류값이 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. CDA와 OPR의 기후표류값 차이는 KG31에서는 거의 비슷했고, KG41과 KG62 기후대에서는 CDA에서 기후표류값이 OPR 기후표류값 보다 줄어드는

경향을 보였다(Figure 83). 또한, 적분시간이 길어짐에 따라 그 차이도 더 커지는 형태를 보였는데, 결합초기화 기법이 에너지에 대한 기후표류를 줄여주는 효과가 있을 뿐 만 아니라, 적분시간이 길어짐에 따라 그 효과도 더 커지는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 KG31은 비교적 습한 기후대이고, KG41과 KG62는 춥고 건조한 기후대의 차이를 고려해 볼 때, 춥고 건조한 기후대에서 결합초기화의 기후표류 개선효과가 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 추정된다. Figure 84은 Eq. [3]의 우변의 예측값과 ERA-5값의 차이값과 에너지수지에 대한 기후표류 시계열과 상관관계를 나타낸 그림이다. CDA와 OPR의 차이가 큰 두 기후대(KG31, KG41)에서 거의 모든 앙상블 멤버에서 상관성이 매우 높게 나타난 것으로 미루어 봤을 때, 에너지에 대한 기후표류의 정의(Eq. [4])가 타당성이 높은 것으로 보여, 에너지에 대한 기후표류 진단에 활용성이 높을 것으로 기대된다.

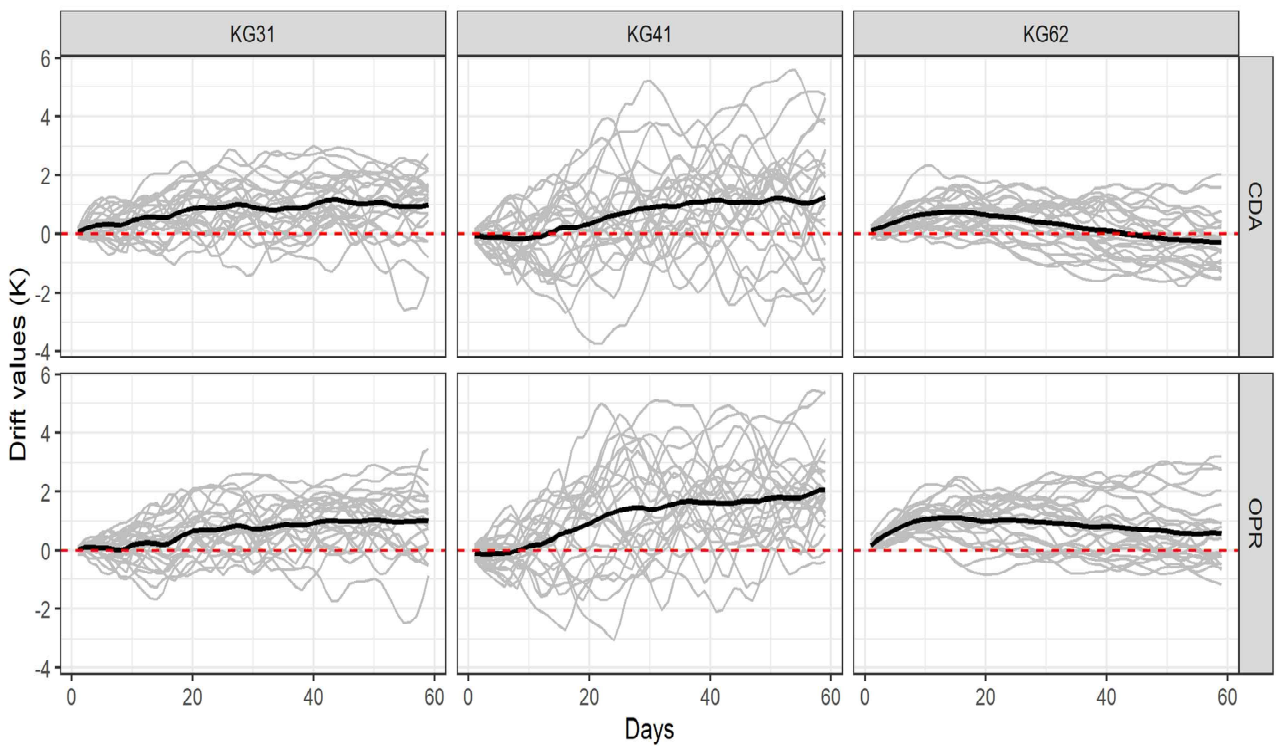


Figure 82. Time series of systematic drifts for energy balance in the selected Koppen-Geiger classification. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration. KG31: Koppen-Geiger 31 classification, KG41: Koppen-Geiger 41 classification, and KG62: Koppen-Geiger 62 classification.

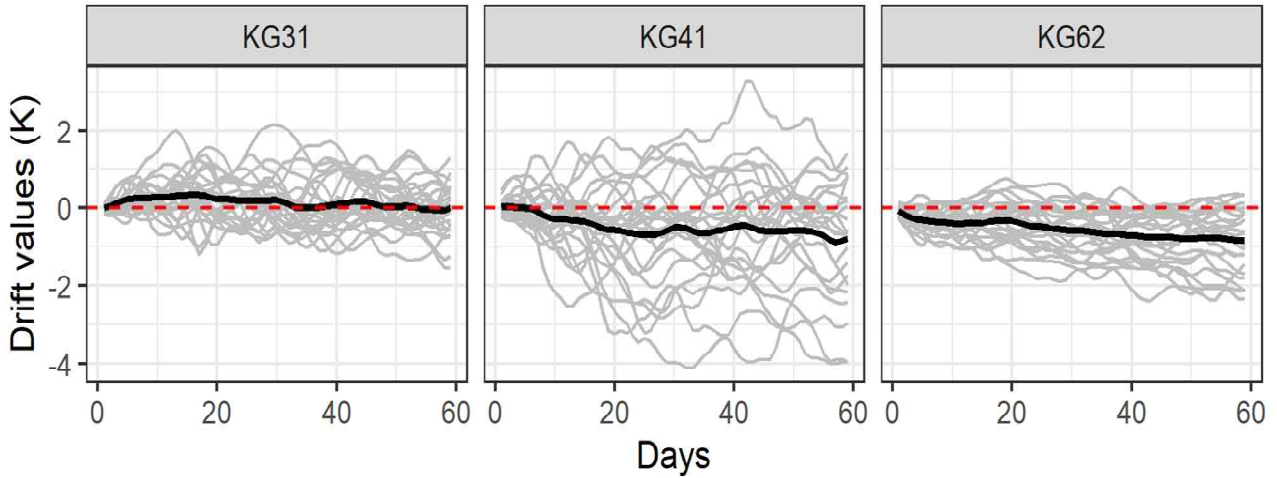


Figure 83. Time series of systematic drift differences for energy balance in the selected Koppen-Geiger classification. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration. KG31: Koppen-Geiger 31 classification, KG41: Koppen-Geiger 41 classification, and KG62: Koppen-Geiger 62 classification.

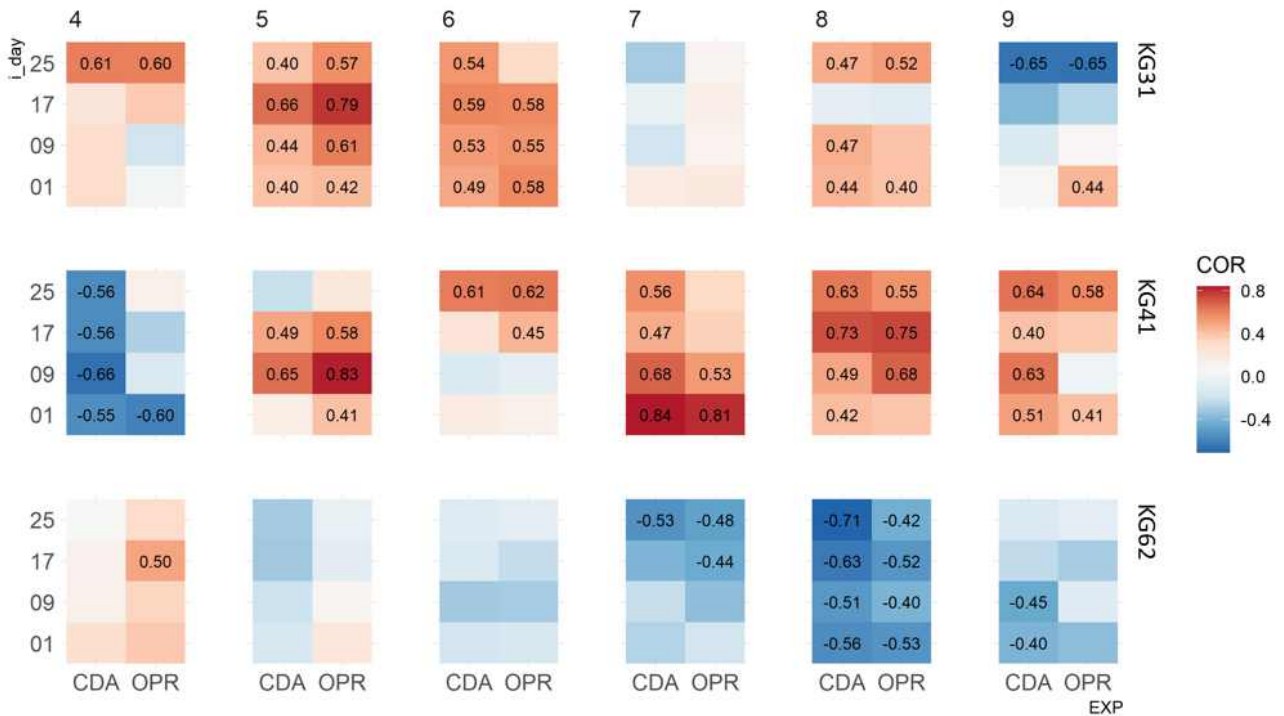


Figure 84. Correlation coefficients between errors of $R_{net}-\lambda E-H$ and systematic drift differences for energy balance in the selected Koppen-Geiger classification. CDA: Forecasts from the Coupled Data Assimilation method and OPR: Forecasts from the Korea Meteorological Administration Operational configuration. KG31: Koppen-Geiger 31 classification, KG41: Koppen-Geiger 41 classification, and KG62: Koppen-Geiger 62 classification.

(3) 결합초기화 기법의 현업 적용 전략 도출

결합초기화 기법을 현재 현업에 적용할 시 고려해야 할 기술적인 이슈들을 단계별로 정리 (Figure 85)하고 해당 이슈들을 해결할 수 있는 방안에 대해 제안하였다.

(가) 기술적 이슈

① 분석장 생산 단계

분석장을 생산할 때 이후 활용하지 않을 불필요한 데이터가 많이 저장되는데 이 자료들의 용량이 만만치 않아 저장공간 관리 차원에서 지속적으로 삭제를 할 필요가 있다. 매일 매일 수행해야 하는 현업의 특성상 분석장 또한 매일 생산이 될 것이므로 이 소모성 데이터를 삭제하는 번잡한 과정이 수반될 것이다.

② IAU 단계

IAU 과정에서의 해빙으로 인해 모델이 blow-up 하여 겨울철 실험에서는 15일까지도 적분이 가능하나 여름철 실험에서는 2일 이상 적분이 어려울 수 있다.

③ IAU 단계

IAU 과정을 얼마나 오래 수행해야 안정적인 결합초기장이 만들어지는가에 대한 연구가 불충분하다. 현업 스케줄이나 여름철 blow-up 현상을 감안하면 하루나 이틀 동안만 초기장 간의 균형을 맞출 수밖에 없다. 대기는 3시간 간격으로 업데이트되지만 해양은 24시간 간격으로 업데이트되므로 해양은 1번 혹은 2번 업데이트가 된다. 1일이라는 업데이트 기간이 대기과 해양 간 초기장의 불균형을 해소하기에 충분한 시간인가에 대한 해답을 찾는 과정이 필요하다.

④ 후처리 단계

IAU 과정이 끝난 뒤 생산되는 해양 산출물에서 해양초기장에 들어갈 특정 변수들을 뽑아내야하는데 해양 산출물들은 여러개의 노드로 쪼개어져 시스템에 저장이 된다. 이들을 모아서 원하는 변수를 뽑아낸 뒤 하나의 결합초기장으로 만들어내는데 현재는 NCL이 사용되고 있어 과도한 시간이 소요된다.

⑤ 총 소요 시간

현 현업 예보 시스템에 결합초기화 과정을 적용하게 될 시 10시간 이상의 추가 시간이 소요된다.

(나) 이슈에 대한 제안

① 분석장 생산 단계

분석장을 생산 시 발생하는 소모성 데이터 삭제에 대한 자동화 과정을 추가함으로써 불편함을 해소할 수 있다.

② IAU 단계

결합초기화 시 발생하는 남극 해빙과 관련된 모델 밸런스에 대한 추가 연구가 필요하다.

③ IAU 단계

대기 변수나 해수온 측면에서는 IAU 기간이 2일이면 충분히 안정되는 것을 확인했으나 균형이 맞춰진 해양 표층이 하층에서도 반영이 되고 있는지, 혹은 해양 상하층 간의 불균형이 있어서 다른 영향을 만들어내는 것은 아닌지 등 모델의 안정도 확인에 있어서 추가적인 연구가 수행되길 기대한다.

④ 후처리 단계

메모리 부담을 줄여주는 프로그래밍 언어를 사용함으로써 극복이 가능하다.

⑤ 총 소요 시간

고성능 슈퍼컴 5호기 활용으로 추가 시간의 부담을 줄일 수 있다.

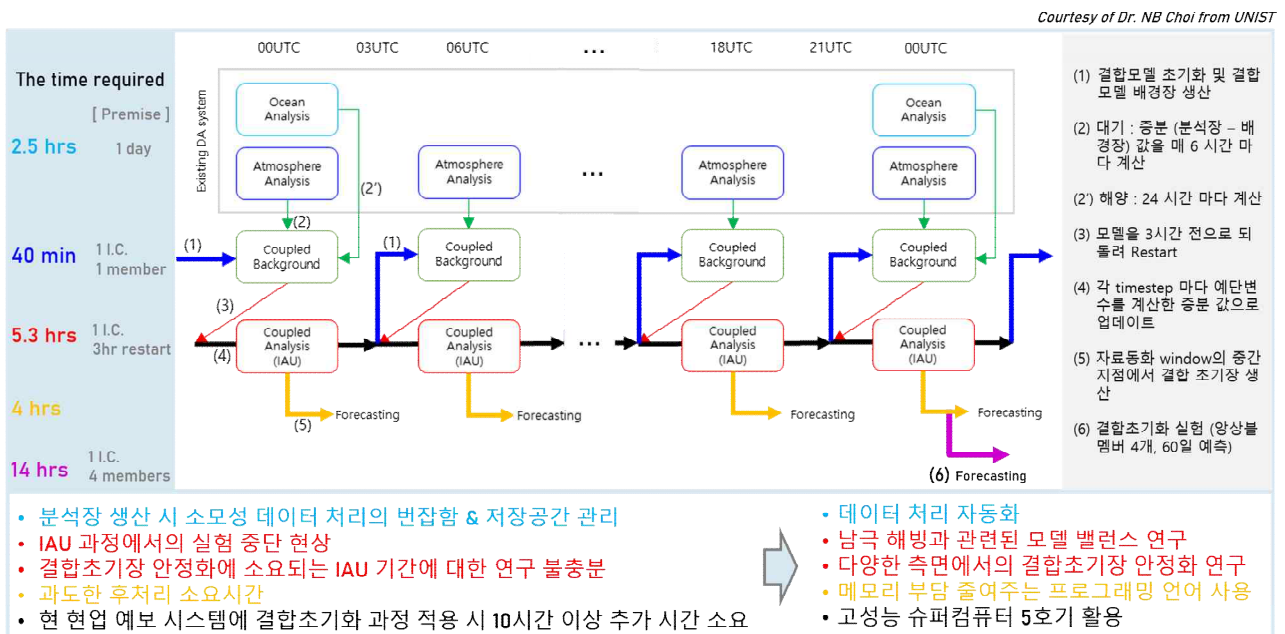


Figure 85. Overview of coupled data assimilation process using incremental analysis updates (IAU).

4. 요약 및 결론

A. 기상청 계절내 예측 시스템(GloSea5)의 현업 예측성 및 역학 특성 평가

첫째, 기상청 현업 시스템 평가 세부과제는 2020년 개발된 현업 주평균 예측 통합평가 프레임 CREDYT의 고도화에 역점을 두어 과제를 수행하였다. CREDYT의 개발 철학은 기후값, 예측, 기후 리짐, 역학과정에 대한 다양한 평가 정보를 포함하되, 지속적으로 일관되게 KMA 예측시스템의 타 기관 대비 상대적 평가를 가능케 하는 것이다. 기존 CREDYT은 S2S 총 5개 모형만을 비교에 참여 시켜 상대적 평가의 안정성이 낮고, CREDYT 평가 정보에 대한 외부로부터의 접근이 쉽지 않으며, 모형 진단에 필수적인 전방위의 평가 콘텐츠가 충분히 확보되지 않았다는 문제점이 지적되었다. 이에 대한 대응으로, 올해는 1) SubX 4개 모형을 더해 총 8개 모형에 대비 KMA의 상대적인 성능 검증을 가능케 하였고, 2) 온라인 공유 페이지를 개설해 CREDYT 정보에 대한 접근성과 사용성을 높였으며, 3) 마지막으로 빙권 관련 요소, DMI, WNPSH, NAO 등 기후 리짐 등 콘텐츠를 추가함으로써 평가 정보의 다양성을 확보하였다.

- 계절내 현업 모형간 상대적 검증 정보는 S2S 뮤지엄(<http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/S2S/>, 2주 엠바고를 거친 실시간 예측에 대한 간단한 검증 자료 제공), SubX(<http://cola.gmu.edu/subx/skill/skilld.html>, reforecast 검증까지 포함해서 좀 더 폭넓은 검증 정보 제시) 홈페이지에서 일부 제공되고 있음. 하지만, 모형간의 줄 세우기 같은 적극적인 비교/평가 정보는 찾아볼 수 없어, 전체 계절내 현업 모형들을 아우르는 비교/평가의 다양성 및 활용성에 있어, CREDYT 평가 정보가 비교우위에 있다고 판단함.
- 온라인 페이지 개설(<http://credyt.apcc21.org> 혹은 <https://credyt.link>) 및 평가 정보 공유는 과제 수행으로 파생된 연구 결과가 실제 손에 잡히는 살아 있는 정보로 전환됨을 의미함. 공유 시스템은 매해 주평균 예측에 대한 CREDYT 평가 정보뿐만 아니라, 기상청 계절내 기후 예측 시스템 개선 방향에 대해 제안한 pdf 문서들의 기록 보관소로서의 역할을 수행할 수 있음. 또한, 온라인을 통한 CREDYT 평가 정보 접근성 개선은 유관 기관 및 학계의 GloSea 연구 방향 설정 및 질적 향상에 기여할 것으로 기대됨.
- 북극 확장이라는 이슈와 함께 그 중요도가 높아진 북극 해빙 역학을 이해하고, 모형내 재현성을 높이기 위한 연구가 반드시 필요한 시점임. KMA-GloSea5 내에서 북극 해빙 농도/면적의 시·공간적 계절 사이클과 장기 변화 추세, 중위도 원격 상관 등의 재현성능에 대한 콘텐츠를 CREDYT에 추가함으로써 이러한 시류에 적극적으로 대응하였음.

둘째, 고도화된 CREDYT 적용함으로써, 2020년 KMA-GloSea5 현업 주별 예측 성능 및 역학적 특성, 특히 동아시아 지역 기후 예측에의 영향 등을 파악할 수 있었다.

- 평균장 오차의 공간 분포에서는 남극 대륙, 미국 서부 온난 오차가 뚜렷한 특징을 보이며, 이는 2019년 버전 결과와 크게 다르지 않음. 이와 관련해, 남극 오존 처방 및 지면 과정 토양 수분 실시간 초기화 모듈 검토, reforecast 생산시 초기장으로 사용된 재분석 자료의 ERA5로의 치환 등을 추가 연구 주제로 제안함.

- 9개 현업 모형 중 KMA-GloSea5의 상대적 performance는 대략 중·상위권에 랭크하는 것으로 판단되나, 동아시아 지역, 일부 변수/선행 주수에서는 1위에 육박하는 성능을 보이기도 함. 예상할 수 있듯이, 전반적으로 ECMWF의 성능이 가장 우수하나, 중기 예측 모형을 계절내 영역으로 확장한 형태인 EMC-GEFS 모형도 선행 3-4주에서 두각을 드러내는 것을 확인함. 이는 향후, 중기 예측 모형의 계절내 예보 영역으로의 확장 가능성을 시사함.
- KMA-GloSea5의 해빙 면적 계절 사이클은 관측에 비해 크고, 특히 겨울철 과대 모의가 뚜렷함. 밀레니엄 이후 해빙 면적 감소 경향이 관측에 비해 과대 추정된 것이 특징적임. 또한, inner Arctic 해빙 melting의 regional sequence가 관측과 상이한 구조적 오차 역시 확인할 수 있었음. 유난히 길고 강했던 2020년 동아시아 여름 몬순에 기여한 것으로 알려진 7월 북극 지역 해빙 면적의 급속한 감소의 경우, KMA-GloSea5는 실시간 예측에 실패함. 하지만, Kara-Barents 지역 해빙 면적 변동이 2주 후 한반도 주변 동아시아 순환장 및 기온 변화에 주는 원격상관은 매우 현실적으로 재현해 향후 가능성을 확인함.
- 계절내 주별 예측성의 원천 분석: 전구/열대 지역에서는 ENSO, IOD, MJO 등의 역할이 뚜렷하나, 동아시아의 경우는 QBO, PV, AO, ART2 등 성층권, 대류권, 빙권에서의 기후 리짐 역할 역시 중요함을 알 수 있음.
- KMA-GloSea5 모형내 지구 시스템간 연결성은 관측의 그것과 상이하며, 전반적인 강도 역시 모형만의 특성을 가짐을 확인할 수 있음. 또한, 계절 및 reforecast 버전 year에 다소 민감함. 지구 시스템간 연결 강도는 전반적으로 모형에서 과대 추정되지만, 북반구 가을철(SON)에는 오히려 과소 추정되는 경향을 보임. 구체적으로, 수권-빙권, 대류권 내부 연결 강도는 대부분 계절에서 과대 추정되고, 여름/가을철 수권 내부 연결 강도는 약화되는 특성을 보임.

B. 동아시아 강수에 대한 모형 오차 특성 진단

첫째, GloSea5와 GloSea6의 버전 비교를 통해 동아시아 여름철 몬순 강수 및 상·하층 순환장의 계절내 예측성을 평가하고, 동아시아 여름 강수에 영향을 미치는 주요 원격 상관 인자들의 모의 특성을 살펴보았다. 이를 통해 GloSea6의 동아시아 여름철 기후의 모의 특성을 선제시하고, 동아시아 강수 예측력 향상을 가능케 할 개선 방향에 대해 제시하고자 하였다.

- GloSea6는 GloSea5가 나타내는 동아시아 여름 강수의 dry bias를 개선하며, 하층 순환장의 평균 오차를 개선한다. 특히, 북태평양 고기압의 경년 변동성이 강하게 나타나는 WNPSH 영역에서의 변동성이 상당히 개선됨을 확인함. 아시아 여름 몬순 강수에 결정적인 영향을 주는 WNPSH 위치의 개선은 여름 몬순 강수 강도의 경년 변동성 개선에 기여하며 WNPSH 변동에 따른 아시아 지역 세부 몬순 (북서태평양여름 몬순, 인도 여름 몬순, 동아시아 여름 몬순) 강수의 예측성 개선에 기여함을 제시함.

- GloSea6에서 WNPSH 변동의 개선은 중앙 태평양 강제력 (Central Pacific forcing)에 의해 야기되는 하층 순환장 (CP cooling→북서태평양 고기압 강화) 개선에 의해 야기됨. GloSea5에서 WNPSH의 변동성은 중앙 태평양 강제력, 즉 ENSO의 영향을 비현실적으로 과도하게 반영하는 반면, GloSea6는 WNPSH의 주요 경년변동성 모드의 분산 비율 및 분포를 관측과 유사하게 모의하며 CP forcing에 의한 WNPSH의 변동성을 완화시킴을 알 수 있음.
- GloSea6는 열대 SST 주성분 모드의 시·공간 재현성을 개선시키는데, 특히 2, 3번째 모드의 시·공간 재현성을 상당히 개선시키며 NINO34 지수의 예측성 또한 향상된 결과를 제시함. ENSO 변동에 따른 인도-태평양 워커 순환 편차가 관측에 비해 여전히 서쪽으로 이동하여 형성되긴 하지만, ENSO 변동에 따른 서태평양에서의 과도한 convection을 개선하며, 중앙 태평양 cooling에 따른 워커 순환 편차 또한 완화되는 결과를 보임.
- 앞서 제시된 결과들은 열대 해양 변동성 개선이 중앙 태평양 강제력에 의해 야기되는 WNPSH 변동 개선에 영향을 주며, 이와 관련된 하층 순환장이 개선됨으로써 WNPSH과 아시아 여름 몬순 강수와의 관계가 개선되고 이는 결국 여름 몬순 지역 강수의 계절내 예측성능을 향상에 기여할 수 있음을 의미함.
- GloSea6에서 동아시아 제트 (EAJS)의 공간 패턴 및 강도, 그리고 경년변동의 재현성이 오히려 감소하고, ENSO와 관련된 인도-태평양 워커 순환의 상층 편차장의 오차가 여전히 개선되지 않음을 확인. 따라서, 동아시아 강수 예측력 향상을 위해서는 동아시아 제트를 포함한 상층 순환장 개선을 위한 노력이 필수적임.
- GloSea6에서 장마전선의 영향이 지배적인 여름철 전반 (P1)에는 dry bias가 개선되지만, 여름철 후반 (P2)에는 오히려 wet bias가 모의되는 특징을 보임. GloSea6에서 동아시아 여름 몬순과 관련된 상·하층 순환장을 유도하는 주요 지수들 (WNPSH, NINO34, EAJS)과의 관계가 P1 시기에는 관측과 유사하게 개선되지만, P2 시기에는 관측 대비 과도하게 모의되는 특징을 보임. 특히 동아시아 제트와 WNPSH와의 관계가 강하게 연결되어 동아시아 상·하층 대기의 barotropic response를 과도하게 유도하고, 그 결과 PJ pattern을 지속적으로 유도되기 때문으로 분석됨.

둘째, 기후예측모델의 오차를 개선하기 위한 한 방법으로 KMA-GloSea5의 강수와 관련된 모듈 및 계수들의 특성을 조사하고, 민감도 실험을 제시하여 동아시아 특히 한반도 강수의 오차를 줄이기 위해 개선되어야 할 점을 제언하고자 한다. 기후예측모델내에서 강수에 영향이 있는 모수화 과정인 미세구름물리 모수화, 적운모수화, 구름-복사 과정, 구름모수화의 주요 계수들을 조사하여 동아시아 여름철 강수의 계절내 예측성능의 개선에 영향을 미칠 수 있는 과정들을 조사하였다.

- 강수과정과 연계된 미세구름물리 과정, 적운모수화, 구름모수화 과정 등에 포함된 계수들을 조사하였으며, 특히 GloSea5와 GloSea6에서 논의가 된 ticket들을 조사함.

- 조사된 계수들을 중심으로 각 과정별로 개선 가능한 파트를 선정하여 2020년 여름철 계절내 예측장을 생산하여 실제 현업과 비교함.
- 미세구름물리과정과 구름-복사 상호작용과정에 포함된 계수 조정은 실제적으로 계절내 예측장 결과에 영향을 주지 못하는 것으로 확인됨.
- 적운모수화에 포함된 계수인 R_det와 구름과정에 포함된 계수인 ice_width의 경우 실제 상승 운동에 크게 변화시키며, 그 결과 2차 순환을 변화시켜 동아시아 연직 운동 및 강수에 효과적으로 영향을 미침.
- GloSea6에 포함된 과정인 적운모수화의 계수 변화는 GloSea5와 GloSea6의 결과 차이에 크게 영향을 주는 것으로 분석되며, GloSea6 개선의 큰 원인으로 판단됨.
- 개발 당시 제안되었던 값으로 진행했던 구름모수화 과정의 ice_width의 경우도 무시할 수 없는 영향을 줄 수 있는 계수로 분석되며, 추후 GloSea6의 특성을 파악한 후 적절하게 수정하여 앙상블 추가 등으로 적용시킬 수 있을 것으로 판단됨.

마지막으로, 기상청 현업 모델로 사용되는 기후예측모델의 개선을 위한 학계와 유관기관의 다양한 연구가 진행되고 있고, 이를 반영하여 일관된 진단 정보를 평가하고, 모델 개선을 위한 민감도 실험의 영향을 비교하는 시스템의 필요성에 따라, APCC에서는 기상청 기후예측모델 개선 연구 결과의 활용성을 높이기 위해 모델 개선/개발에 따른 계절내 예측성능 및 오차 특성 진단 시스템을 개발하였다.

- 기후예측모델 계절내 현상 기반 오차 특성 분석을 위해 적도 지역 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단과 동아시아 여름철 오차 진단 틀을 구성함.
- 해당 틀은 계절내 변동성 필터링을 적용하여 기후예측모델의 선행 주수 기준 겨울철 공간 변동성과 MJO 전파 구조 오차, 예측일 기준 MJO 지수의 예측 성능 및 오차 특징을 분석하게 설계됨.
- 또한, 동아시아 여름 몬순 특성을 반영하는 주요 지표들의 예측성능 및 오차를 선행 주수 기준으로 비교하고, 동아시아 지역 평균 시간-위도 강수 밴드 변동성 및 필터링 된 강수와 하층 바람성분의 지연 상관 분석을 통해 여름철 강수 오차 특성을 일관성 있는 방법으로 진단하게 됨.

C. 결합 초기화 기법의 예측 개선 영향 및 현업 적용성 평가

첫째, GloSea5에서 나타나는 기후표류의 양상과 대기와 해양 상호작용에서의 계절내 규모 예측성에 대해 진단함으로써 결합초기화 예측의 장점을 제시하였다.

- GloSea5에서 생산되는 강수는 계절내 진동이 활발한 열대 지역에서 구조적 오차를 가지고 있음을 확인하였고 이러한 구조적 오차는 결합초기화 적용을 통해 개선 가능하였음.
- 결합초기화를 통해서 열대 대기 강제력뿐만 아니라 열대-중위도 원격상관 패턴의 개선이 이루어졌고 그 결과 2018년 겨울철 한반도 한파와 2020년 여름철 장마에서 현업보다 더 현실성 있는 예측자료를 만들어 낼 수 있었음.

둘째, 지면-대기 접합모형에서 결합초기화의 물수지와 에너지수지에 대한 기후표류 효과를 주요 유역 및 Koppen-Geiger 기후대에 대하여 평가하였으며 요약하면 아래와 같음.

- 유역의 특성에 따라서 CDA의 토양수분에 대한 영향은 다르게 나타났는데, 특히, 건조한 지역에서는 CDA의 토양수분에 대한 효과가 다소 떨어지는 것으로 나타남. 강수나 증발산량과 같은 다른 주요 수문성분에서도 유사한 결과를 보였음.
- 기후표류에 있어서 유출량의 영향이 강수나 증발산보다 더 큰 것으로 나타났고, 이러한 결과는 LSS 개선을 위해서는 유출량을 포함한 수문성분에 대한 정확한 평가가 필요하다는 것을 의미한다고 할 수 있음.
- 총 모의기간 CDA-OPR 평균값의 지역적 분포는 유역 보다는 Koppen-Geiger 기후대에 더 유사하게 나타나는 지역이 많았음.
- CDA와 OPR의 차이가 큰 두 기후대에서 거의 모든 앙상블 멤버에서 상관성이 매우 높게 나타났는데, 이 연구에서 정의한 에너지에 대한 기후표류 정량화 기법이 타당성이 높아, 에너지에 대한 기후표류 진단에 활용성이 높을 것으로 기대됨.

마지막으로, 결합초기화 기법을 현재 현업에 적용할 시 고려해야 할 기술적인 이슈들을 단계별로 정리하고 해당 이슈들을 해결할 수 있는 방안에 대해 제안하였다.

- 결합초기화 기법을 현업에 적용할 시 제기될 수 있는 기술적인 문제점(기술의 안정성, 자료 처리 프로그래밍 언어, 소요 시간)이 파악되었고, 이를 해소할 수 있는 적절한 방안들을 제시하였음.
- 결합초기화 기법의 현업 적용에 있어 기술적인 문제점이 일부 노출되었으나, 앞서 과학적인 측면에서의 효과성과, 기술적인 측면에서의 능률성을 검토를 통해 GloSea5 현업 운영에 있어 결합초기화의 효율성이 있음을 확인하였기에 결합초기화 기법의 현업 적용을 적극 권장함.

D. 동아시아 지역 맞춤 다각적 모형 오차 분석 프레임 제시

앞서 제시한 3개의 개별 세부 과제 연구 결과를 종합하여 동아시아 지역 예측 성능 저하 원인 추정 및 성능 개선 방향 수립에 필요한 역학적 요소들을 선별하고, 이를 바탕으로 KMA 현업 예측 모형의 동아시아 지역 기후에 대한 다각도의 오차 분석 프레임의 실례를 제시하였다(Figure 86).

- ▶ **MJO & Rossby wave:** 결합초기화를 통해 열대 대기 강제력뿐만 아니라 열대-중위도 원격상관에 대한 계절내 예측을 향상시킬 수 있음을 확인하였고, KMA 현업 예측 모형의 동아시아 예측 성능을 위해 모델 초기장 간의 균형을 맞추는 것이 중요함을 제시함.
- ▶ **Indian Ocean & Moisture transport:** 결합초기화 적용시 WNPSH의 인도양과 한반도 주변의 수증기 반응장이 개선되며, 이는 북서태평양에서의 고압성 흐름이 인도양의 수증기를 적절히 한반도 쪽으로 수송시키기 때문으로 파악됨.
- ▶ **ENSO & WNPSH:** GloSea5와 GloSea6의 버전 비교를 통해 GloSea6 에서 아시아 여름 몬순 강수의 예측력이 향상됨을 확인함. 이는 중앙태평양 강제력에 의해 야기되는 북서태평양 고기압 변동 개선으로 인한 열대-중위도 원격상관 모의 특성 향상에 기인함. 반면 아시아 제트를 포함한 상층 순환장의 개선을 위한 노력이 요구됨.
- ▶ **Hadley & Walker 대규모 순환:** 구름/강수모수화의 모듈 분석을 통해 선정된 계수 조정을 통해 기존의 적도지역에서 과대모의되는 대류를 감소시켜 동아시아 여름 강수의 예측성을 향상시킬 수 있음을 확인.
- ▶ **북극 해빙:** 2020년 여름 길고 강한 장마에 영향을 주었다고 알려진 북극 해빙 감소 모의 실패와 겨울철 카라-바렌츠 해빙 변동과 동아시아 순환의 계절내 커플링 재현 오차 확인.
- ▶ **토양 수분/에너지:** 한반도 기후와 관련이 높은 기후대에서 결합초기화 기법을 적용했을 때 기후표류 현상을 다소 감소하는 결과를 확인. 향후 한반도 기후 예측성 개선 효과가 기대됨.

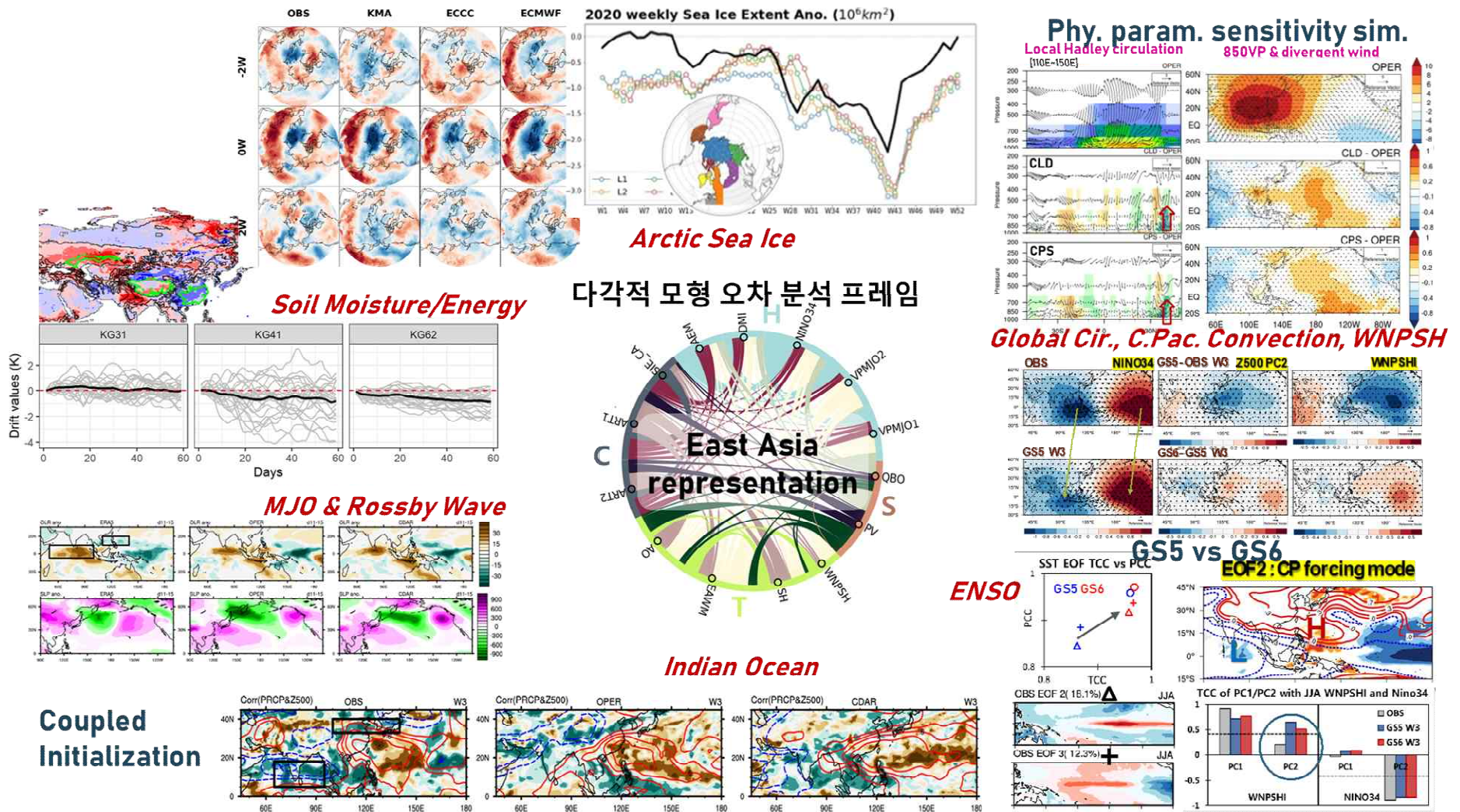


Figure 86. A framework for diagnosing various aspects of model biases in terms of East Asia regional climate representation

사사

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다. 강수모수화 민감도 실험은 국립기상과학원, 부산지방기상청, 국가기상슈퍼컴퓨팅센터의 협조를 통해 수행되었습니다. 결합초기화 연구는 국립기상과학원 현업운영개발부, 울산과학기술원 이명인 교수님, 최낙빈 박사님, APCC 최재원 연구원과 국가기상슈퍼컴퓨터센터의 도움을 통해 수행되었습니다.

References

- 김가영, 이윤영, 윤순조, 오지현, 2019: S2S 자료를 이용한 계절내 다중모델 앙상블 예측성능 평가. 2019년 한국기상학회 기후분과 봄학술대회 논문집, 62.
- 김가영, 김해정, 오지현, 유태우, 이윤영, 정여민, 정유란, 정유림, 함수련, 윤순조, 2019: 다중모델 기발 계절내 예측 활용 가이드라인 개발. APEC기후센터 연구보고서 2019, APEC기후센터.
- 김가영, 김해정, 이윤영, 정여민, 함수련, 2020: 기후예측모델 개선을 위한 예측성 평가 및 가이드라인 개발. APEC기후센터 연구보고서 2020, APEC기후센터.
- 이우섭, 윤순조, 김가영, 김미아, 신지현, 이현록, 2017: WMO 장기예보 선도센터 운영(7차년도), APEC기후센터 연구보고서 2017-20, APEC기후센터.
- Alves O., M.A. Balmaseda, D. Anderson, and T. Stockdale, 2004: Sensitivity of dynamical seasonal forecasts to ocean initial conditions. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 647-667. DOI:10.1256/qj.03.25.
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.K., Rogelj, J. and Rojas, M., 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary.
- Baldwin, M.P., L.J. Gray, T.J. Dunkerton, K. Hamilton, P.H. Haynes, W.J. Randel, J.R. Holton, M.J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D.B.A. Jones, J.S. Kinnnersley, C. Marquardt, K. Sato, and M. Takahashi, 2001: The Quasi-Biennial Oscillation. *Reviews of Geophys.*, **39**, 179-229, <https://doi.org/10.1029/1999RG000073>.
- Bush, S. J., G. T. Andrew, S. J. Woolnough, G. M. Martin, and N. P. Klingaman, 2015: The effect of increased convective entrainment on Asian monsoon biases in the MetUM general circulation model, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **141**, 311-326.
- Chen, G., and R. Huang, 2012: Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in northwest China. *J. Climate*, **25**, 7834-7851, doi:10.1175/JCLI-D-11-00684.1.
- Chen, X., and T. Zhou, 2014: Relative role of tropical SST forcing in the 1990s periodicity change of the Pacific-Japan pattern interannual variability. *J. Geophys. Res. Atmos.*, <https://doi.org/10.1002/2014JD022064>.
- Chen, X., et al., 2017: Relative contributions of external SST forcing and internal atmospheric

variability to July–August heat wave over the Yangtze River valley during 1979–2014. *Clim. Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3871-y>.

- Choi, N., 2021: *Development of a Coupled Data Assimilation System in the Fully Coupled Model and Its Implications for Seamless Prediction*. Ph.D. Dissertation, Dept. of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, 96 pp.
- Chou, C., L. F. Huang, J. Y. Tu, L. Tseng, and Y. C. Hsueh, 2009: El Nino impacts on precipitation in the western North Pacific–East Asian sector. *J. Climate*, **22**, 2039–2057.
- Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., Ballinger, T.J., Bhatt, U.S., Chen, H.W., Coumou, D. and Feldstein, S., 2020: Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, **10**(1), pp.20–29.
- Derbyshire, S. H., A. V. Maidens, S. F. Milton, R. A. Stratton and M. R. Willett, 2011: Adaptive detrainment in a convective parametrization, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **137**, 1856–1871.
- Ding, Y., Liu, Y. and Hu, Z.Z., 2021: The Record-breaking Meiyu in 2020 and Associated Atmospheric Circulation and Tropical SST Anomalies. *Advances in Atmospheric Sciences*, pp.1–14.
- Dirmeyer, P. A., 2001: Climate drift in a coupled land–atmosphere model, *J. Hydrometeorol.*, **2**, 89–100.
- Fernández, J., C. Primo, A. S. Cofiño, J. M. Gutiérrez, and M. A. Rodríguez, 2009: MVL spatiotemporal analysis for model intercomparison in EPS: Application to the DEMETER multi-model ensemble. *Clim. Dyn.*, **33**, 233–243. DOI:10.1007/s00382-008-0456-9.
- Fritsch, J. M. and Chappell, C. F., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: convective parameterization, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1722–1733.
- Gossart, A., Helsen, S., Lenaerts, J.T.M., Broucke, S.V., Van Lipzig, N.P.M. and Souverijns, N., 2019: An evaluation of surface climatology in state-of-the-art reanalyses over the Antarctic Ice Sheet. *Journal of Climate*, **32**(20), pp.6899–6915.
- Grant, A. L. M., 2001: Cloud-base fluxes in the cumulus-capped boundary layer, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **127**, 407–421.
- Grand, A. L. M. and Brown, A. R., 1999: A similarity hypothesis for shallow-cumulus transports, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **125**, 1913–1936.
- Gregory, D. and Rowntree, P. R., 1990: A massflux convective scheme with representation of

- cloud ensemble characteristics and stability dependent closure, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1483–1506.
- Guan, W. N., X. J., Ren, W. Shang et al., 2018: Subseasonal zonal oscillation of the western Pacific subtropical high during early summer. *J. Meteorol. Res.*, **32**(5), 768–780. <https://doi.org/10.1007/s13351-018-8061-2>.
- Ham, H., D. Won, and Y. Lee, 2017: Performance Assessment of Weekly Ensemble Prediction Data at Seasonal Forecast System with High Resolution. *Atmosphere (Basel)*, **27**, 261–276, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.3.261>.
- He, C., & Zhou, T., 2015: Responses of the western North Pacific subtropical high to global warming under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios projected by 33 CMIP5 models: The dominance of tropical Indian Ocean–tropical western Pacific SST gradient. *Journal of Climate*, **28**(1), 365–380.
- Hermanson L., H.-L. Ren, M. Vellinga, N. D. Dunstone, P. Hyder, S. Ineson, A. A. Scaife, D. M. Smith, V. Thompson, B. Tian, and K. D. Williams, 2018: Different types of drifts in two seasonal forecast systems and their dependence on ENSO. *Clim. Dyn.*, **51**, 1411–1426. DOI 10.1007/s00382-017-3962-9.
- Hollingsworth, A., K. Arpe, M. Tiedtke, M. Capaldo, and H. Savijärvi, 1980: The performance of a medium-range forecast model in winter—Impact of physical parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1736–1773.
- Hong, X., and R. Lu, 2016: The meridional displacement of the summer Asian jet, Silk Road pattern, and tropical SST anomalies. *J. Climate*, **29**, 3753–3766, doi:10.1175/JCLI-D-15-0541.1.
- Hoskins, B. J., and D. J. Karoly, 1981: The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179–1196.
- Hoskins, B. J., and T. Ambrizzi, 1993: Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1661–1671.
- Huang, R., F. Sun, 1992: Impacts of the tropical western Pacific on the East Asia summer monsoon. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **70**, 243–256.
- Huang, R., L. Zhou, W. Chen, 2003: The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian Monsoon and their causes. *Adv Atmos Sci* 20:55–69.
- Huang, Y., B. Wang, X. Li, H. Wang, 2018: Change in the influence of the western Pacific subtropical high on Asian summer monsoon rainfall in the late 1990s. *Clim. Dyn.*, **51**, 443–455.

- Hurrell, J.W., Kushnir, Y. and Visbeck, M., 2001: The north Atlantic oscillation. *Science*, **291**(5504), pp.603–605.
- Kim, H., Janiga, M.A. and Pegion, K., 2019: MJO propagation processes and mean biases in the SubX and S2S reforecasts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124**(16), pp.9314–9331.
- 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>.
- Kim S., J.-S. Kug, and K. H. Seo, 2020: Impacts of MJO on the Intraseasonal Temperature Variation in East Asia. *J. Clim.*, **33**, 8903–8916. DOI 10.1175/JCLI-D-20-0302.1.
- Kim, S. and Kug, J.S., 2021: Delayed impact of Indian Ocean warming on the East Asian surface temperature variation in boreal summer. *Journal of Climate*, **34**(8), pp.3255–3270.
- Klingaman N. P., and S. J. Woolnough, 2014: Using a case-study approach to improve the Madden-Julian oscillation in the Hadley Centre model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, doi:10.1002/qj.2314.
- Kosaka, Y., H. Nakamura, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2009: Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 561–580, doi:10.2151/jmsj.87.561.
- Kug, J.S., Jeong, J.H., Jang, Y.S., Kim, B.M., Folland, C.K., Min, S.K. and Son, S.W., 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geoscience*, **8**(10), pp.759–762.
- Lee, E. J., J. G. Jhun, C. K. Park, 2005: Remote connections of the Northeast Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index, *J. Climate*, **18**, 4381–4393.
- Li, Y., and S. Yang, 2010: A dynamical index for the East Asian winter monsoon. *J. Clim.*, **23**(15), 4255–4262, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3375.1>.
- Lin, Z., R. Lu, W. Zhou, 2010: Change in early-summer meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia around the late 1970s. *Int J Climatol* 30:2195–2204.
- Lock, A. P., 2001: The numerical representation of entrainment in parameterizations of boundary layer turbulent mixing, *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1148–1163.
- Lu, R., 2004: Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **82**, 155–165.

- Lu, R., and B. Dong, 2001: Westward extension of North Pacific subtropical high in summer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **79**, 1229–1241.
- Lu, R., and Z. Lin, 2009: Role of subtropical precipitation anomalies in maintaining the summertime meridional teleconnection over the Western North Pacific and East Asia. *J. Climate*, **22**, 2058–2072.
- 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>.
- Madec, G., 2008: NEMO ocean engine. *IPSL Tech. Rep.* **27**, 401 pp
- Mullholland D., P. Laloyaux, K. Haines, and M. Balmaseda, 2015: Origin and impact of initialization shocks in coupled atmosphere–ocean forecasts. *Mon. Weather Rev.*, **143**, 4631–4644. DOI:10.1175/MWR-D-15-0076.1.
- Naujokat, B., 1986: An update of the observed quasi-biennial oscillation of the stratospheric winds over the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1873–1877, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<1873:AUOTOQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<1873:AUOTOQ>2.0.CO;2).
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Japn.*, **65**, 373–390.
- Ninomiya, K., and C. Kobayashi, 1998: Precipitation and moisture balance of the Asian summer monsoon in 1991, Part I: Precipitation and major circulation systems. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 855–877.
- Panagiotopoulos, F., M. Shahgedanova, A. Hannachi, and D. B. Stephenson, 2005: Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action. *J. Clim.*, **18**, 1411–1422.
- Park, J., Kang, H.-S., Hyun, Y.-K., & Nakazawa, T., 2018: Predictability of the Arctic Sea Ice Extent from S2S Multi Model Ensemble. *Atmosphere*, **28**(1), 15–24. <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2018.28.1.015>.
- Pegion, K., and Coauthors, 2019: The Subseasonal Experiment (SubX): A Multimodel Subseasonal Prediction Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 2043–2060.
- Qian, D. L., Z. Y. Guan, and W. Y. Tang, 2018: Joint impacts of SSTA in tropical Pacific and Indian oceans on variations of the WPSH. *J. Meteor. Res.*, **32**, 548–559, doi: <https://doi.org/10.1007/s13351-018-7172-0>.
- Rae, J. G. L., H. T. Hewitt, A. B. Keen, J. K. Ridley, A. E. West, C. M. Harris, E. C. Hunke,

- and D. N. Walters, 2015: Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 2221–2230, <https://doi.org/10.5194/gmd8-2221-2015>.
- Saeed, S., N. Van Lipzig, W. A. Müller, F. Saeed, and D. Zanchettin, 2014: Influence of the circumglobal wave-train on European summer precipitation. *Climate Dyn.*, **43**, 503–515, doi:10.1007/s00382-013-1871-0.
- Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N. and Yamagata, T., 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**(6751), pp.360–363.
- Smith D., A. Scaife, G. Boer, M. Caian, F. Doblas-Reyes, V. Guemas, E. Hawkins, W. Hazeleger, L. Hermanson, C. Ho, M. Ishii, V. Kharin, M. Kimoto, B. Kirtman, J. Lean, D. Matei, W.J. Merryfield, W. Müller, H. Pohlmann, A. Rosati, B. Wouters, and K. Wyser, 2012: Real-time multi-model decadal climate predictions. *Clim. Dyn.*, **41**, 2875–2888. DOI:10.1007/s00382-012-1600-0.
- Smith D. M., Eade, R., and Pohlmann, H., 2013: A comparison of full-field and anomaly initialization for seasonal to decadal climate prediction. *Clim. Dyn.*, **41**, 3325–3338. DOI:10.1007/s00382-013-1683-2.
- Thompson, D.W. and Wallace, J.M., 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*, **25**(9), 1297–1300, <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.
- Vitart, F., C. et al. 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163–173, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>.
- Walters, D., I. Boutle, M. Brooks, T. Melvin, R.I. Stratton, S. Vosper, H. Wells, K. Williams, N. Wood, T. Allen, A. Bushell, D. Copesey, P. Earnshaw, J. Edwards, M. Gross, S. Hardiman, C. Harris, J. Heming, N. Klingaman, R. Levine, J. Manners, G. Martin, S. Milton, M. Mittermaier, C.I. Morcrette, T. Riddick, M. Roberts, C. Sanchez, P. Selwood, A. Stirling, C. Smith, D. Suri, W. Tennant, P. Li Vidale, J. Wilkinson, M. Willett, S. Woolnough, and P. Xavier, 2017: The Met Office Unified Model Global Atmosphere 6.0/6.1 and JULES Global Land 6.0/6.1 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 1487–1520, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1487-2017>.
- Wang, B., B. Xiang, J.Y. Lee, 2013: Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc Natl Acad Sci.*, **110**, 2718–2722.
- Wang, B., and LinHo, 2002: The time-space structure of the Asian-Pacific summer monsoon: A fast annual cycle view. *J. Climate*, **15**, 2001–2019.
- Wang, B., R. Wu, Z. Fu, 2000: Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO effect East

Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517–1536.

- Wang, B., R. Wu, K.M. Lau, 2001: Interannual variability of the Asian summer monsoon: contrasts between the Indian and the Western North Pacific-East Asian monsoons. *J. Climate*, **14**, 4073–4090.
- Wang, B., and Q. Zhang, 2002: Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development. *J. Climate*, **15**, 3252–3265.
- Wilson, D. R., A. C. Bushell, A. M. Kerr-Munslow, J. D. Price, C. J. Morcrette, and A. Bodas-Salcedo, 2008: PC2: A prognostic cloud fraction and condensation scheme. II: Climate model simulations. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **134**, 2109–2125.
- Xie, S., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, **22**, 730–747.
- Xie S.-P., C. Deser, G.A. Vecchi, M. Collins, T.L. Delworth, A. Hall, E. Hawkins, N.C. Johnson, C. Cassou, A. Giannini, and M. Watanabe, 2015: Towards predictive understanding of regional climate change. *Nat. Clim. Change.*, **5**, 921–930. DOI:10.1038/nclimate2689.
- Xie, S. P., Y. Kosaka, Y. Du, et al., 2016: Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv. Atmos. Sci.*, **33**, 411–432, doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-015-5192-6>.
- Xue, F., X. Dong, and F. X. Fan, 2018: Anomalous western Pacific subtropical high during El Niño developing summer in comparison with decaying summer. *Adv. Atmos. Sci.*, **35**, 360–367, doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-017-7046-x>.
- Zhang, D., G. M. Martin, J. M. Rodríguez, Z. Ke, and L. Chen, 2020: Predictability of the western North Pacific Subtropical High associated with different ENSO phases in GloSea5. *J. Meteor. Res.*, **34**, 926–940, <https://doi.org/10.1007/s13351-020-0055-1>.

부록 A. CREDYT 관측 및 예측자료 수집

A-1. 관측자료 수집

CREDYT에서는 APCC 기후정보통합위원회에서 수집, 관리 중인 일별 관측자료를 활용한다. 사용하는 관측자료에 대한 설명은 Table A1에 나타내었다.

Table A1. Observational reference datasets used in CREDYT.

Source	Variables	Location in HPC	Resolution
ERA5	T2M, Z500, U50, U850, MSLP, Z1000, U200, U850, V200	/ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/surface /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/pressure	0.25° × 0.25°
GPCP	PREC	/ifs/apccdb/Observation/Grid/GPCP/Daily	1° × 1°
OISST	SST	/ifs/apccdb/Observation/Grid/OISST/Daily/sst	0.125° × 0.125°

A-2. 예측자료 수집

CREDYT에서 사용되는 예측자료는 크게 S2S와 SubX 그룹에서 제공하는 모형들로 구분된다. S2S 자료의 대부분은 WMO 선도센터에서 수집하는 계절내 예측자료이다. S2S 예측자료에 대한 정보는 Table A2와 같다.

Table A2. S2S datasets used in CREDYT.

Source	Variables	Location in HPC	Resolution
Forecast	T2M, Z500, U50, U850, Z1000, U200,	/ifs/apccgb/APCC_S2S/RAW/FORECAST	1.5° × 1.5°
Hindcast	U850, V200, PREC, SST	/ifs/apccgb/APCC_S2S/PRE/HINDCAST	

두 번째로 SubX의 예측자료는 2021년에 추가로 수집하였다(Table A3). SubX project에서 제공하는 GitHub(<https://github.com/kpegon/SubX>)를 통해 자료수집부터 처리에 관한 프로그램들을 다양한 언어(GrADS, Matlab, NCL, Python)로 제공해주고 있다. 본 연구에서는 NCL 언어로 작성된 코드를 사용하여 자료를 다운로드 하였다. NCL 코드를 통한 SubX 자료 다운로드하는 OPeNDAP으로 읽어온 후 NetCDF 포맷으로 write 해주는 방식이므로, APCC의 HPC는 외부와 단절되어 있기 때문에 외부망을 통해 다운로드 한 후 내부망의 HPC로 옮겨야 한다.

Table A3. SubX datasets used in CREDYT.

Source	Variables	Location in HPC	Resolution
Forecast	T2M, Z500, U50, U850, MSLP, U200,	/ifs/apccgb/SubX/FORECAST	$1^\circ \times 1^\circ$
Hindcast	U850, V200, PREC, SST	/ifs/apccgb/SubX/HINDCAST	

■ SubX의 forecast 자료 다운로드 코드 (getSubXFieldsIRI_forecast.ncl)

- 원하는 모델(imodel) 및 변수(ivar) 선택 후 실행

```

;-----
; User Defined Variables
;-----
outPath="./forecast/"
varnames=(/"ua","ua","rlut","tas","ts","zg","va","va","pr","zg"/)
plevstrs=(/"850","200","toa","2m","sfc","500","200","850","sfc","200"/)
grps=(/"GMAO","RSMAS","ESRL","ECCC","NRL","EMC"/)
models=(/"GEOS_V2p1","CCSM4","FIMr1p1","GEM","NESM","GEFS"/)
dfv=-9.99e8
;-----
; Variables - DO NOT MODIY
;-----
url="http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Models/.SubX/"

nvars=dim sizes(varnames)
nmodels=dim sizes(models)
;-----
; Main Program
;-----

do imodel=5,5

model=models(imodel)
grp=grps(imodel)

do ivar=3,3

varname=varnames(ivar)
plevstr=plevstrs(ivar)

; Define input filename
fname=url+"."+grp+"/".$+model+"/.forecast/".$+varname+"/dods"

; Open the file
inFname=addfile(fname,"r")

;Get the dimensions
dims=getfilevardims(inFname,varname)
ndims=dim sizes(dims)

```

```

; Loop over the dimensions
do i=0, ndims-1
if (dims(i).eq."X") then
lon=inFname->X
nx=dimsizes(lon)
else if (dims(i).eq."Y") then
lat=inFname->Y
ny=dimsizes(lat)
else if (dims(i).eq."L") then
leads=inFname->L
nleads=dimsizes(leads)
else if (dims(i).eq."M") then
ens=inFname->M
nens=dimsizes(ens)
else if (dims(i).eq."S") then
ics=inFname->S
nics=dimsizes(ics)
else if (dims(i).eq."P") then
levs=inFname->P
plev=ind(levs.eq.stringtointeger(plevstr))
else
print("ERROR WITH DIMS: "+dims(i))
end if
end if
end if
end if
end if
end do ; ndims
; Create output directory
outDir=outPath+varname+plevstr+"/daily/full/"+grp+"-"+model+"/"

; Check to see if it exists
tmp=systemfunc("mkdir -p "+outDir)

; Loop over all ensemble members
do iens=0,nens-1

; Set ensemble string for output file name
ee=sprinti("%0.1i",iens+1)

; Loop over and read all start dates
do ic=0,nics-1

; Set date string to file name
cdate=cd_calendar(ics(ic),0)
year=tointeger(cdate(:,0))
month=tointeger(cdate(:,1))
day=tointeger(cdate(:,2))
yyyyymmdd=sprinti("%0.4i",year)+sprinti("%0.2i",month)+sprinti("%0.2i",day)

; Create output file name & remove if existing
ofile=outDir+varname+"_"+plevstr+"_"+grp+"-"+model+"_"+yyyyymmdd+".e"+ee+".daily.nc"
if (fileexists(ofile)) then
tmp=systemfunc("rm "+ofile)
end if

```

```

; Open file
oFname=addfile(ofile,"c")

; Get the data for dimensions lead,lat,lon
if (ndims.eq.6) then
data=inFname->$varname$(plev,ic,iens,,:,:)
else if (ndims.eq.5) then
data=inFname->$varname$(ic,iens,,:,:)
else
print("Problems with dimensions")
end if
end if

printVarSummary(data)

; Set the Global Attributes
gAtt          = True
gAtt@long_title = data@long_name
gAtt@title     = data@long_name
gAtt@comments  = "SubX project http://cola.gmu.edu/~kpegon/subx/"
gAtt@CreationDate = systemfunc ("date")
gAtt@CreatedBy  = systemfunc ("whoami")
gAtt@Source     = "getSubXFieldsIRI.ncf"
gAtt@Institution = "SubX IRI: "+url
fileattdef( oFname, gAtt )

; Change dimension names to time, lat, lon
data!0="time"
data!1="lat"
data!2="lon"

; Write the data to the file
oFname->$varname$ = data
oFname->$varname$@units=data@units

; Write the time units to the file
oFname->time@units = ics@units

; Delete data so it can be defined automatically on next iteration
delete(data)
end do ;nics

end do ;nens

delete(dims)
delete(ics)
delete(lon)
delete(lat)
delete(leads)
delete(ens)

if (isdefined(("levs"/))) then
delete(levs)
end if
end do ;nvars

```

```
end do ;nmodels
```

■ SubX의 hindcast 자료 다운로드 코드 (getSubXFieldsIRI_hindcast.ncl)

- 원하는 모델(imodel) 및 변수(ivar) 선택 후 실행

```
-----  
; User Defined Variables  
-----  
outPath="./HINDCAST"  
varnames=(/"tas","pr","ts","zg","ua","va","ua","va","sic"/)  
plevstrs=(/"2m","sfc","sfc","500","850","850","200","200","sfc"/)  
grps=(/"GMAO","RSMAS","ESRL","ECCC","NRL","EMC"/)  
models=(/"GEOS_V2p1","CCSM4","FIMr1p1","GEM","NESM","GEFS"/)  
dfv=-9.99e8  
-----  
; Variables - DO NOT MODIY  
-----  
url="http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Models/.SubX/"  
  
nvars=dimsizes(varnames)  
nmodels=dimsizes(models)  
-----  
; Main Program  
-----  
  
do imodel=1,1  
  
model=models(imodel)  
grp=grps(imodel)  
  
do ivar=1,1  
  
varname=varnames(ivar)  
plevstr=plevstrs(ivar)  
  
; Define input filename  
fname=url+"."+grp+"/."+model+"/.hindcast/."+varname+"/dods"  
  
; Open the file  
inFname=addfile(fname,"r")  
  
;Get the dimensions  
dims=getfilevardims(inFname,varname)  
ndims=dimsizes(dims)  
  
; Loop over the dimensions  
do i=0, ndims-1  
if (dims(i).eq."X") then  
lon=inFname->X  
nx=dimsizes(lon)  
else if (dims(i).eq."Y") then  
lat=inFname->Y  
ny=dimsizes(lat)  
else if (dims(i).eq."L") then
```

```

leads=inFname->L
nleads=dimsizes(leads)
else if (dims(i).eq."M") then
ens=inFname->M
nens=dimsizes(ens)
else if (dims(i).eq."S") then
ics=inFname->S
nics=dimsizes(ics)
else if (dims(i).eq."P") then
levs=inFname->P
plev=ind(levs.eq.stringtointeger(plevstr))
else
print("ERROR WITH DIMS: "+dims(i))
end if
end if
end if
end if
end if
end do ; ndims
; Create output directory
outDir=outPath+"/"+varname+plevstr+"/daily/full/"+grp+"-"+model+"/"

; Check to see if it exists
tmp=systemfunc("mkdir -p "+outDir)

; Loop over all ensemble members
do iens=0,nens-1

; Set ensemble string for output file name
ee=sprintfi("%0.1i",iens+1)

; Loop over and read all start dates
do ic=0,nics-1

; Set date string to file name
cdate=cd_calendar(ics(ic),0)
year=tointeger(cdate(:,0))
month=tointeger(cdate(:,1))
day=tointeger(cdate(:,2))
yyyymmdd=sprintfi("%0.4i",year)+sprintfi("%0.2i",month)+sprintfi("%0.2i",day)

; Create output file name & remove if existing
ofile=outDir+varname+"_"+plevstr+"_"+grp+"-"+model+"_"+yyyymmdd+".e"+ee+".daily.nc"
print("outFil="+ofile)
if (fileexists(ofile)) then
tmp=systemfunc("rm "+ofile)
end if

; Open file
oFname=addfile(ofile,"c")

; Get the data for dimensions lead,lat,lon
if (ndims.eq.6) then
data=inFname->${varname}${plev,ic,iens,,:,:)
else if (ndims.eq.5) then
data=inFname->${varname}${ic,iens,,:,:)

```

```

else
print("Problems with dimensions")

;          printVarSummary(data)

; Set the Global Attributes
gAtt          = True
gAtt@long_title  = data@long_name
gAtt@title      = data@long_name
gAtt@comments   = "SubX project http://cola.gmu.edu/~kpegon/subx/"
gAtt@CreationDate = systemfunc ("date")
gAtt@CreatedBy  = systemfunc ("whoami")
gAtt@Source     = "getSubXFieldsIRI.nc1"
gAtt@Institution = "SubX IRI: "+url
fileattdef( oFname, gAtt )

; Change dimension names to time, lat, lon
data!0="time"
data!1="lat"
data!2="lon"

; Write the data to the file
oFname->$varname$ = data
oFname->$varname$@units=data@units

; Write the time units to the file
oFname->time@units = ics@units

; Delete data so it can be defined automatically on next iteration
delete(data)

end if

end do ;nics

end do ;nens

delete(dims)
delete(ics)
delete(lon)
delete(lat)
delete(leads)
delete(ens)

if (isdefined(("levs"/))) then
delete(levs)
end if

system("tar -cvf "+outPath+"_"+varname+plevstr+".tar "+outPath)
system("rm -rf "+outPath)
system("mv "+outPath+"_"+varname+plevstr+".tar /mnt/c/Users/ZestPC/Desktop/SubX/")
end do ;nvars

end do ;nmodels

```

부록 B. 관측 및 예측자료 전처리

B-1. 관측자료 전처리

CREDYT에서 사용하는 일별 관측자료인 ERA5, GPCP, OISST는 모두 수평 해상도가 상이하기 때문에(Table A1) 가장 먼저 S2S 모형 해상도인 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 로 일치시킨다. 그 후 윤년일 경우 2월 29일을 없앤 후 일별 혹은 주별로 예측자료의 형식에 맞게 처리해준다.

■ 전처리 수행 순서

다음은 ERA5 전처리 수행 순서를 나타낸다. GPCP와 OISST의 경우에도 전처리 순서가 크게 다르지 않다.

- 기본 daily 자료 처리

01-1-1.ERA5_regrid_daily.ncl / 01-1-2.ERA5_hourly2daily.ncl
Daily 자료의 regrid (hourly인 경우(OLR) 일별 누적값을 계산하여 regrid)
01-2.ERA5_daily_no_leapyear.ncl
윤년에서 2/29일을 제외
01-3.ERA5_daily_VP200.ncl
MJO 계산에 필요한 200hPa velocity potential 계산

- Hindcast 포맷에 맞춘 daily/weekly 자료 처리

02-1.ERA5_daily_clim_total_inidate.ncl / 02-1-1.ERA5_daily_vp200_clim_total_inidate.ncl / 02-1-2.ERA5_subx_daily_clim_total_inidate.ncl
Daily 자료를 이용하여 모델 daily hindcast 형식에 맞춤
02-2.ERA5_weekly_total_inidate.ncl
관측자료를 모델 weekly hindcast 형식에 맞춤
02-4.ERA5_weekly_3weekmean_clim.ncl
weekly climatology

- Forecast 포맷에 맞춘 daily/weekly 자료 처리

03-1.ERA5_weekly_total_inidate_forecast.ncl / 03-1-1.ERA_weekly_total_vp200_inidate_forecast.ncl
Daily 자료를 이용하여 모델 weekly forecast 형식에 맞춤

03-2.ERA5_daily_total_inidate_forecast.ncl / 03-2-1.ERA5_daily_total_vp200_inidate_foercast.ncl
관측자료를 모델 daily hindcast 형식에 맞춤

B-2. S2S 자료 전처리

S2S 자료의 전처리과정은 모델의 특성에 따라 크게 GloSea 계열(KMA, UKMO)과 아닌 계열(ECCC, ECMWF, NCEP)의 전처리로 나뉜다.

■ GloSea 계열 모형(KMA, UKMO) 전처리 수행 순서

- Hindcast: \${HOME}/PREPROCESS/S2S/GloSea5/HINDCAST

01-1.daily_total.ncl / 01-2.daily_total_accumulated.ncl / 01-3.daily_total_vp200.ncl / 01-4.daily_total_SST.ncl
daily hindcasat total field 생산

02-1.weekly_total.ncl / 02-2.weekly_total_accumulated.ncl / 02-3.weekly_total_vp200.ncl / 02-4.weekly_total_SST.ncl
weekly hindcast total field 생산

- Forecast: \${HOME}/PREPROCESS/S2S/GloSea5/FORECAST

01-1.daily_total.ncl / 01-2.daily_total_accumulated.ncl / 01-3.daily_total_KMA_SST.ncl / 01-4.daily_total_vp200.ncl
daily forecast total field 생산

02-1.weekly_total.ncl / 02-2.weekly_total_accumulated.ncl / 02-3.weekly_total_KMA_SST.ncl / 02-4.weekly_total_vp200.ncl
weekly forecast total field 생산

- Climatology: \${HOME}/PREPROCESS/S2S/GloSea5/EXP1

01.Weekly_lead_clim_exp1.ncl
weekly climatology 생산

02.Daily_lead_clim_exp1.ncl
daily climatology 생산

11.Weekly_lead_RTF_ano_exp1.ncl
weekly forecast anomaly 생산

■ GloSea 계열이 아닌 모형(ECCC, ECMWF, NCEP) 전처리 수행 순서

- Hindcast: \${HOME}/PREPROCESS/S2S/3Models/HINDCAST

01-1.daily_total_accumulated.ncl / 01-2.daily_total.ncl / 01-3.daily_total_vp200.ncl
daily hindcasat total field 생산

02-1.weekly_total.ncl / 02-2.weekly_total_accumulated.ncl / 02-3.weekly_total_vp200.ncl
weekly hindcast total field 생산

03.weekly_3weekmean_clim.ncl
weekly climatology

04.daily_clim.ncl
daily climatology

- Forecast: \${HOME}/PREPROCESS/S2S/3Models/FORECAST

01-1.daily_total_accumulated.ncl / 01-2.daily_total.ncl / 01-3.daily_total_vp200.ncl
daily forecast total field 생산

02-1.weekly_total.ncl / 02-2.weekly_total_accumulated.ncl / 02-3.weekly_total_vp200.ncl
weekly forecast total field 생산

B-3. SubX 자료 전처리

SubX 모델은 S2S와 다르게 모델별 특성이 상이하기 때문에 모델별 전처리과정을 독립적으로 수행해야 한다. 그러나 전반적인 순서는 같기 때문에 EMC-GEFS에 대한 과정만을 서술하였다.

참고로 모델별 weekly 평균 날짜는 Figure B1과 같다.

Agency	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Mon	...	Sun	...	Mon	...	Sun
Day			0	1	2	3	4	5	...	11	...	26	...	32
EMC			→						Lead 1	...			Lead 4	
ESRL			→						Lead 1	...			Lead 4	
Day							0	1	...	7	...	22	...	28
NRL	Merging 4 days						→		Lead 1	...		Lead 4		
RSMAS							→		Lead 1	...		Lead 4		

Figure B1. Weekly periods for SubX models.

■ Hindcast: `/${HOME}/PREPROCESS/SubX/EMC-GEFS/HINDCAST`

01-1.daily_total.ncl / 01-2.daily_total_vp200.ncl
daily hindcasat total field 생산
02-1.weekly_total.ncl / 02-2.weekly_total_vp200.ncl
weekly hindcast total field 생산

■ Forecast: `/${HOME}/PREPROCESS/SubX/EMC-GEFS/FORECAST`

01-1.daily_total.ncl / 01-2.daily_total_vp200.ncl
daily forecast total field 생산
02.weekly_total.ncl
weekly forecast total field 생산
03.weekly_ano.ncl
weekly forecast anomaly 생산

부록 C. CREDYT 결정론적 콘텐츠 생산

C-1. CREDYT 결정론적 콘텐츠 생산을 위한 전처리

CREDYT에서 관측 및 예측자료를 사용하기 위해 부록 B의 과정을 통해 전처리한 자료를 재가공하는 과정이 필요하다. 재가공 과정은 크게 주별 기후값과 실시간 예측자료 처리로 나뉜다.

■ 주별 자료

- 기후값: $\${HOME}/CREDYT/UTIL/CLIM$

01-1.clim_GloSea.ncl / 01-2.clim_3models_s2s.ncl / 01-3.clim_4models_subx.ncl	S2S, SubX의 weekly 기후값 생산
02.clim_seasonal_models.ncl	S2S, SubX의 target season에 대한 계절별 자료 생산
03.clim_obs.ncl	관측의 weekly 기후값 생산
04.clim_obs_seasonal.ncl	관측 기후값의 target season에 대한 계절별 자료 생산
05.hind_total_obs_3week_mean.ncl	관측의 hindcast 기간에 대한 total field 생산 (MSSS 계산 시 필요)
06.hind_total_seasonal_3week_mean.ncl	관측의 hindcast 기간에 대한 total field의 계절별 자료 생산 (MSSS 계산 시 필요)

- 실시간 예측: $\${HOME}/CREDYT/UTIL/RTF$

01-1.rtf_anomaly_GloSea.ncl / 01-2.rtf_anomaly_3models_s2s.ncl / 01-3.rtf_anomaly_4models_subx.ncl	S2S, SubX의 weekly 실시간 예측 아노말리 생산
02.rtf_anomaly_seasonal_models.ncl	S2S, SubX의 weekly 실시간 예측 아노말리에 대한 계절별 자료 생산
03.rtf_anomaly_obs.ncl	관측의 weekly 실시간 예측 아노말리 생산

04.rtf_anomaly_obs_seasonal.ncl
관측의 weekly 실시간 예측 아노말리에 대한 계절별 자료 생산

04.clim_obs_seasonal.ncl
관측 기후값의 target season에 대한 계절별 자료 생산

■ 주별 자료

01-1.rtf_anomaly_GloSea.ncl / 01-2.rtf_anomaly_3models_s2s.ncl / 01-3.rtf_anomaly_4models_subx.ncl
S2S, SubX의 weekly 실시간 예측 아노말리 생산

02.rtf_anomaly_seasonal_models.ncl
S2S, SubX의 weekly 실시간 예측 아노말리에 대한 계절별 자료 생산

03.rtf_anomaly_obs.ncl
관측의 weekly 실시간 예측 아노말리 생산

04.rtf_anomaly_obs_seasonal.ncl
관측의 weekly 실시간 예측 아노말리에 대한 계절별 자료 생산

04.clim_obs_seasonal.ncl
관측 기후값의 target season에 대한 계절별 자료 생산

C-2. CREDYT 결정론적 평가 정보 생산 과정

■ 주별 평가 정보 계산: \${HOME}/CREDYT/UTIL/SKILL

- 실시간 예측 관련 평가 정보 계산

01-1.cal_rtf_ACC_all_inidate.ncl
실시간 예측에 대한 ACC 계산

01-2.cal_rtf_ACC_seasonal.ncl
실시간 예측에 대한 계절별 ACC 계산

02-1.cal_rtf_overall_MSSS_all_inidate.ncl
실시간 예측에 대한 MSSS 총점 계산

02-2.cal_rtf_overall_MSSS_seasonal.ncl
실시간 예측에 대한 계절별 MSSS 총점 계산

03-1.merge_ncfile_ACC_MSSS.ncl
실시간 예측에 대한 ACC와 MSSS 총점을 하나의 nc파일로 합치기
04-1.cal_rtf_ACC_grid_all_inidate.ncl
실시간 예측에 대한 격자별 ACC 계산
04-2.cal_rtf_ACC_grid_seasonal.ncl
실시간 예측에 대한 격자별 계절별 ACC 계산
05-1.cal_rtf_MSSS_grid_all_inidate.ncl
실시간 예측에 대한 격자별 MSSS 계산
05-2.cal_rtf_MSSS_grid_seasonal.ncl
실시간 예측에 대한 격자별 계절별 MSSS 계산
06-1.merge_grd_ncfile_ACC_MSSS_grd.ncl
실시간 예측에 대한 격자별 ACC와 MSSS를 하나의 nc파일로 합치기

※ 06-1에서 생산된 nc파일은 RVMM을 계산할 때 사용됨

- 기후값 관련 평가 정보 계산

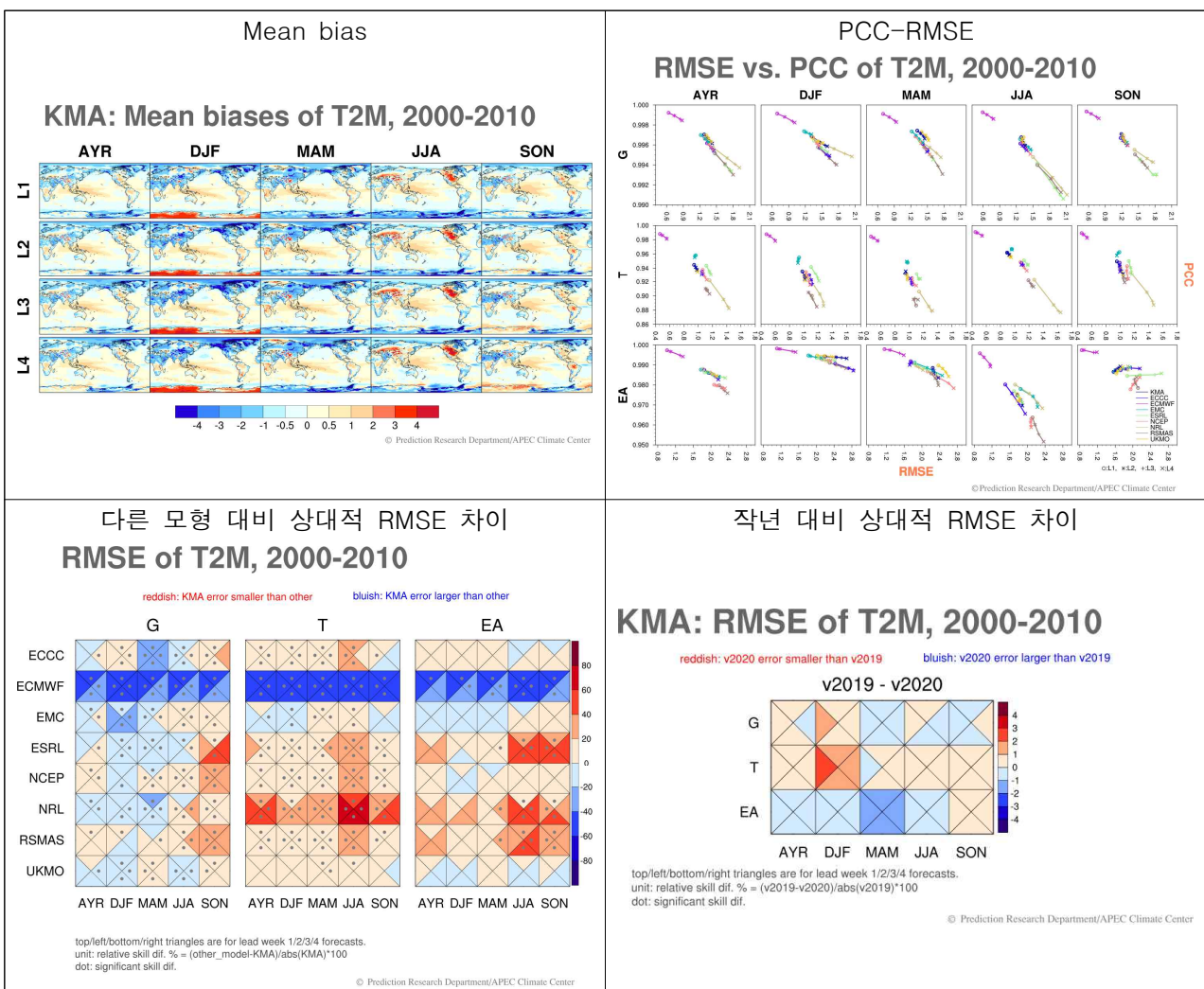
07-1.cal_clim_PCC_RMSE_all_inidate.ncl
기후값에 대한 PCC, RMSE 계산
07-2.cal_clim_PCC_RMSE_seasonal.ncl
기후값에 대한 계절별 PCC, RMSE 계산
08-1.merge_ncfile_PCC_RMSE.ncl
기후값에 대한 PCC와 RMSE를 하나의 nc파일로 합치기
09-1.cal_clim_MeanBias_all_inidate.ncl
Mean bias 계산
09-2.cal_clim_MeanBias_seasonal.ncl
계절별 Mean bias 계산
10-1.merge_grd_ncfile_MeanBias.ncl
Mean bias를 하나의 nc파일로 합치기

C-3. CREDYT 결정론적 콘텐츠 이미지 생산 과정

■ 주별 콘텐츠 계산

- 주별 기후값 관련 콘텐츠: $\${HOME}/CREDYT/UTIL/CONTENTS/CLIM$

- Mean bias: 01.clim_MeanBias.ncl
- PCC-RMSE: 02.clim_PCC-RMSE.ncl
- 다른 모형 대비 상대적 RMSE 차이: 03-1.clim_RelDiff_RMSE_others.ncl
- 작년 대비 상대적 RMSE 차이: 03-1.clim_RelDiff_RMSE_others.ncl



- 주별 실시간 예측 관련 콘텐츠: $\${HOME}/CREDYT/UTIL/CONTENTS/RTF$

- ACC: 01-1.score_ACC.ncl
- MSSS: 01-2.score_MSSS.ncl

HSS: 01-3.score_HSS.ncf

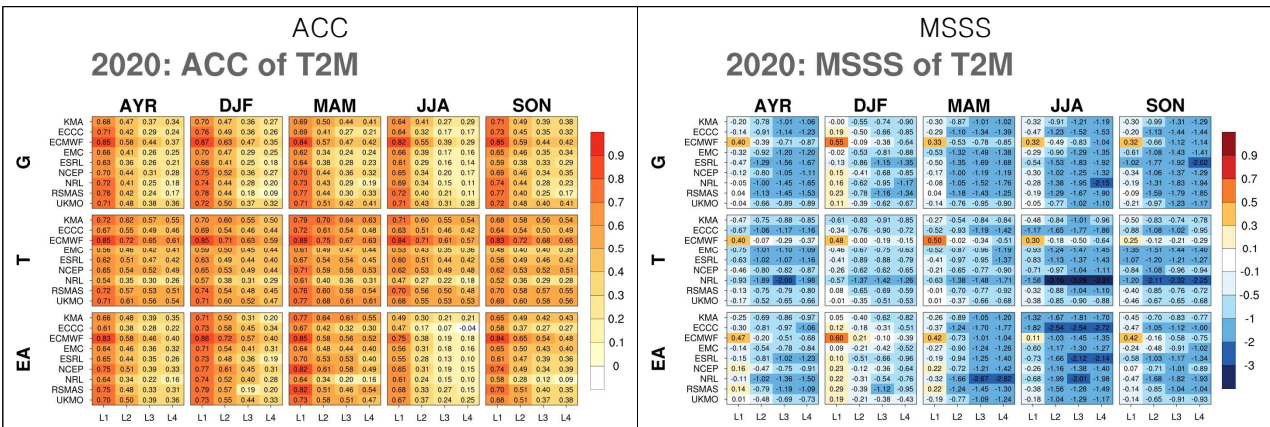
ROC: 01-4.score_ROC.ncf

LEPS: 01-5.score_LEPS.ncf

CRPSS: 01-6.score_CRPSS.ncf

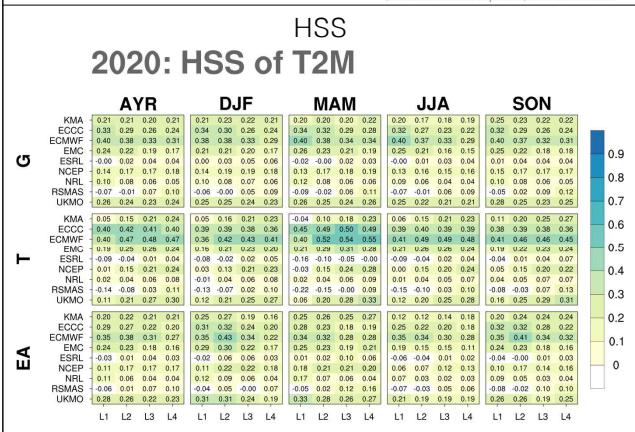
다른 모형 대비 상대적 ACC 차이: 02-1.RelDiff_ACC_others.ncf

다른 모형 대비 상대적 MSSS 차이: 02-2.RelDiff_MSSS_others.ncf

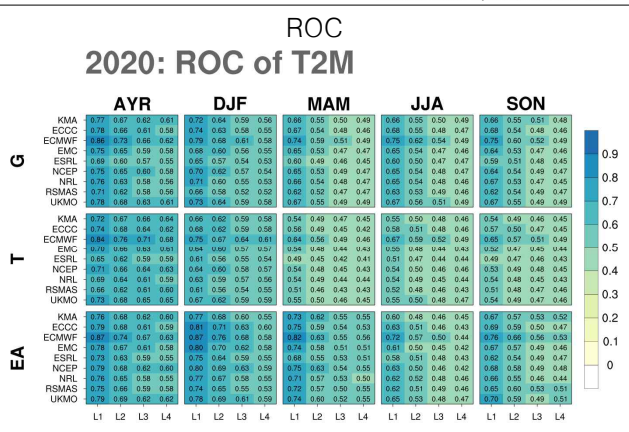


© Prediction Research Department/APEC Climate Center

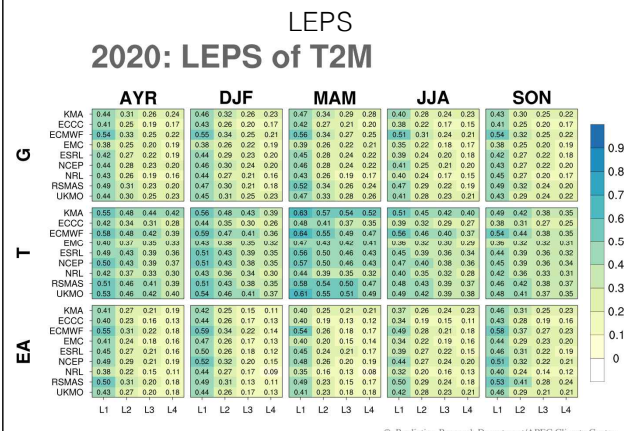
© Prediction Research Department/APEC Climate Center



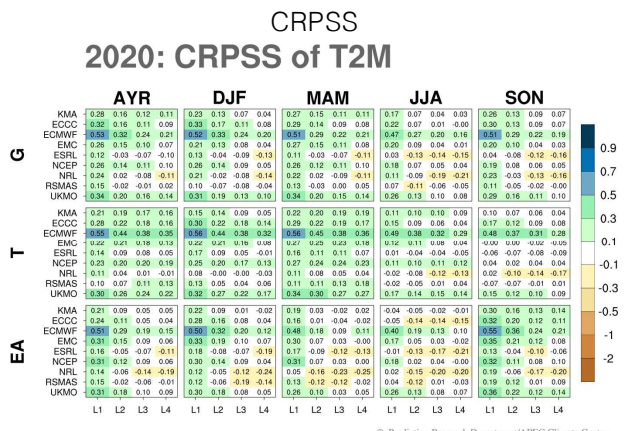
© Prediction Research Department/APEC Climate Center



© Prediction Research Department/APEC Climate Center



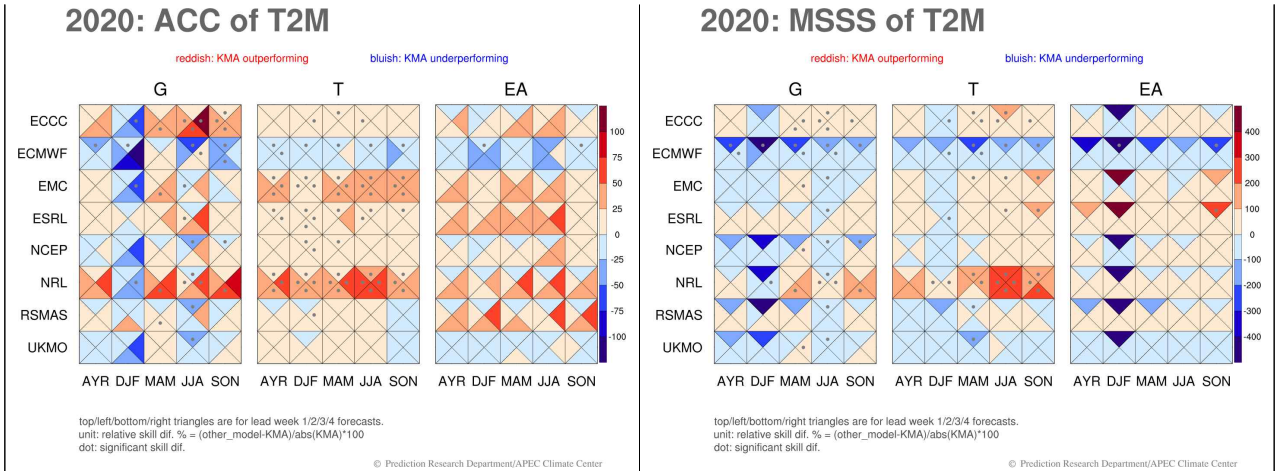
© Prediction Research Department/APEC Climate Center



© Prediction Research Department/APEC Climate Center

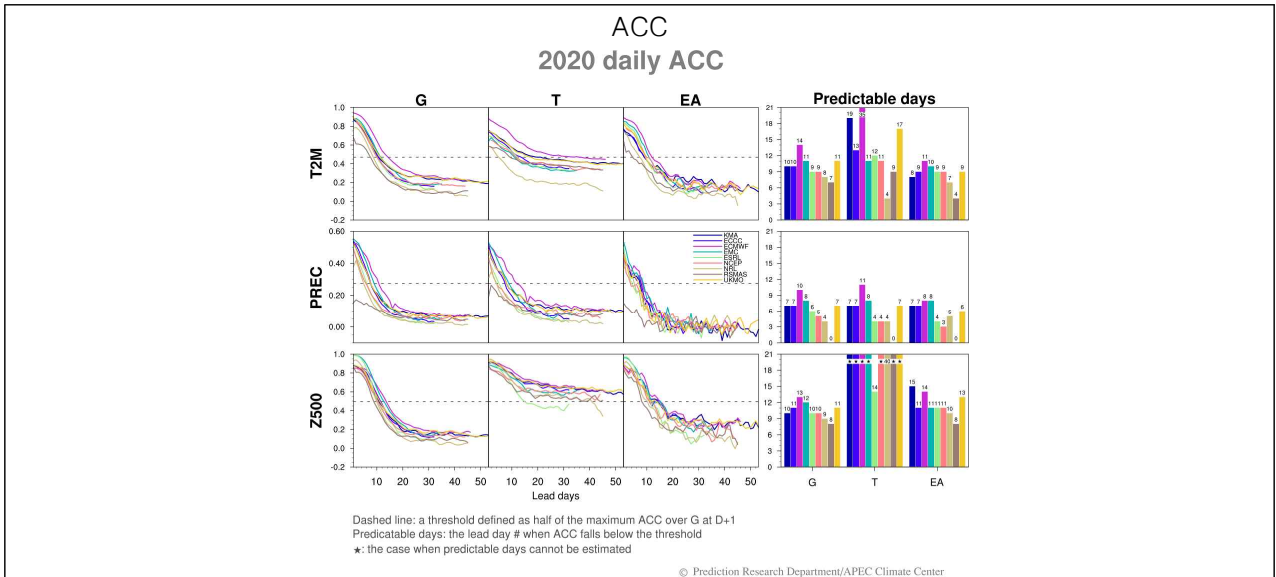
다른 모형 대비 상대적 ACC 차이

다른 모형 대비 상대적 MSSS 차이



- 일별 실시간 예측 관련 콘텐츠: `$(HOME)/CREDYT/UTIL/CONTENTS/RTF_daily`

· daily ACC: 01-1.daily_ACC.ncf



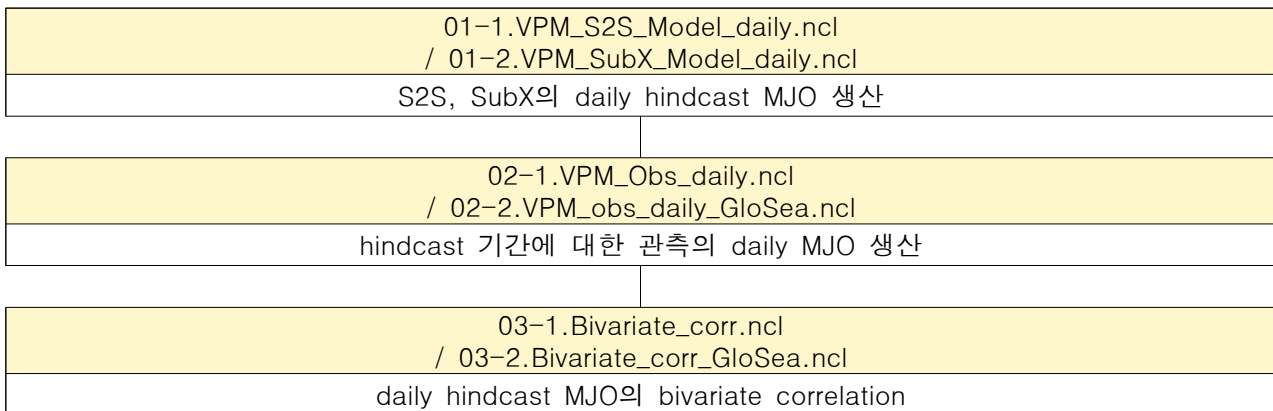
부록 D. CREDYT MJO 전처리 및 콘텐츠 생산

D-1. CREDYT MJO 콘텐츠 생산을 위한 전처리

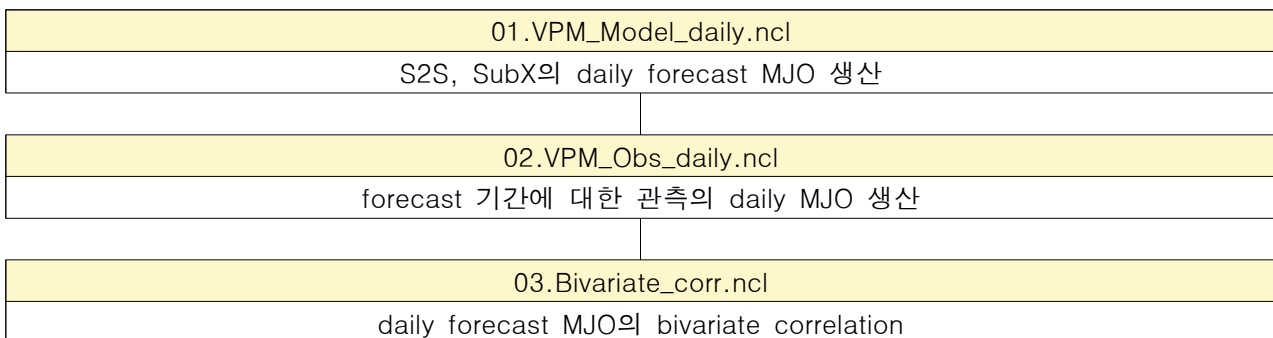
CREDYT에서는 KMA의 MJO 지수에 대한 정보를 제공한다. 이는 해당 연도의 선행시간 1주 및 3주에 대한 weekly VPM1, VPM2 지수와 일별 hindcast 및 forecast의 MJO bivariate correlation을 활용한 콘텐츠이다. MJO 콘텐츠 생산을 위해 daily hindcast, daily forecast, weekly forecast 처리로 나뉜다.

■ 일별 MJO

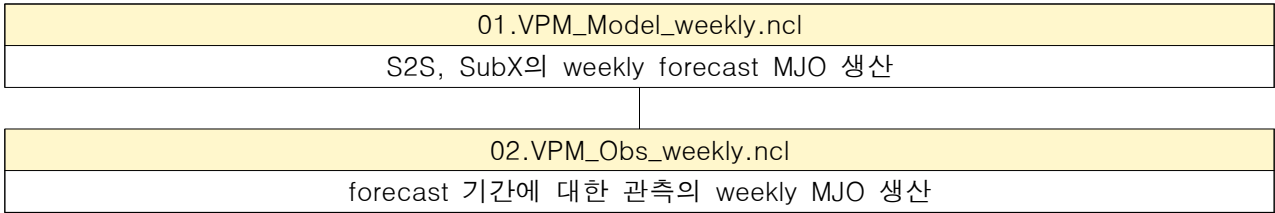
- Hindcast: \${HOME}/MJO/UTIL_HIND_Daily



- Forecast: \${HOME}/CREDYT/UTIL/RTF

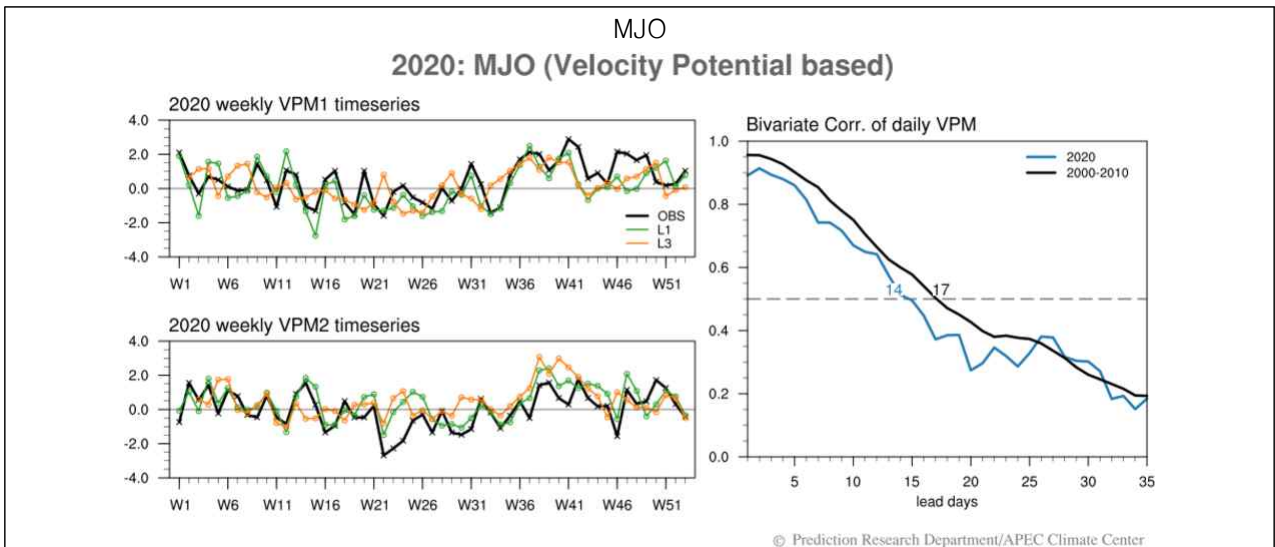


■ 주별 MJO



- MJO 예측 관련 컨텐츠: \${HOME}/MJO/ANAL

· MJO: 01.VPM_KMA.ncl



부록 E. 강수모수화 계수조정을 통한 동아시아 여름 강수 영향 평가 및 가이드라인

APEC CLIMATE CENTER

강수모수화 계수조정을 통한 동아시아 여름 강수 영향 평가 및 가이드라인

- [1] 강수/구름 모수화 특성 및 계수 분석
- [2] 동아시아 여름 강수 영향 평가

2021 년 11 월

APEC 기후센터 기후사업본부
예측기술과 함수련

증가가 있었지만, 적도 지역의 오차 (tropical cyclone, 몬순 등)를 상당히 줄여주고 MJO 모의에서도 개선을 가져온다는 사실을 밝혔다 (Klingaman and Woolnough 2014; Bush et al. 2015). 이러한 사실을 바탕으로 Walters et al. (2017)에서는 convection scheme내의 entrainment rate와 연관된 계수 α 와 γ 를 레벨 (전체, 700hPa 이하, 400-700hPa)에 따라 여러 방법으로 처방하여 분석하였고, 최종적으로 $\alpha = 1.125$, $\gamma=1$ 로 처방하여 기존에 비해 entrainment rate이 25% 정도 증가되게 설정되었다. 현재 현업 코드에서 α 와 γ 를 어떻게 처방하고 있는지 추후 namelist를 통해 확인해봐야 하며, 이 값이 동아시아에 적절한 값인지 생각해 볼 필요가 있다.

GloSea6에서 사용하는 적운 모수화는 6A옵션으로 설정되어 있으며, GloSea5와 동일한 방안이다. 5A 방안과 비교하여 6A 방안에서 가장 크게 개선된 점은 다음과 같다.

- 1) detrained mass는 포화되고 환경에 따라 중립 부력을 가지게 될 수 있으며, 남은 대류 plume도 부력을 가지거나 포화될 수 있다. 이는 잠재 온위를 계산하는 방정식에 영향을 준다. 또한, 5A 방안에서는 한 번의 과정으로 forced detrain을 계산하지만, 6A 방안에서는 세 번의 과정을 반복한다.
- 2) 포화상태에서의 잠재 온위는 습도 및 건조 상태의 온위, 습도 등으로 반복 계산된다. 5A 방안에서는 1번의 반복이지만, 6A 방안에서는 3번의 반복 과정을 거치게 된다. 또한, entrainment 및 상승 운동 후의 준포화 상태에서의 parcel 증발이 포함된다.
- 3) 6A 방안에서는 mass flux가 구름 하부에서 5% 아래로 떨어지거나, forced detrainment가 mass의 95%이상으로 detrain되면 상승 운동이 멈춘다.

이러한 개선으로 6A 방안은 5A 방안보다 대류 운동이 더 깊어지고, 모델의 예단식에서 생기는 일시적인 noise를 제거하는 결과를 가져온다.

1.2 GA6.0과 GA7.0의 차이 (Ticket lists 중심으로)

1) Microphysics scheme

- Wilson and Ballard (1999)
- New warm rain processes (Boutle et al. 2014a, b)

1. 강수/구름 모수화 특성 및 계수 분석

기상청 현업 모델로 사용되는 기후예측모델은 적도지역의 과도한 대류와 강수의 오차가 잘 알려져 있다. 이러한 오차와 연관된 모듈로는 미세구름물리 모수화 과정, 적운 모수화 과정, 구름 모수화 과정, 구름-복사 과정 등을 들 수 있다. 모듈의 이해는 모델 강수 오차 특성 파악 및 예측성 향상을 위한 모델 개선에 필수적이다. 따라서, 이러한 오차를 개선시키기 위한 한 방법으로 강수와 관련된 모듈 및 계수들의 특성을 조사하고, 민감도 실험을 제시하여 동아시아 특히 한반도 강수의 오차를 줄이기 위해 개선되어야 할 점을 제언하고자 한다.

1.1 GloSea5와 GloSea6의 비교

GloSea5에서 사용하는 적운 모수화는 5A옵션으로 설정되어 있으며, Gregory and Rowntree (1990)을 기반의 mass flux 방식으로 구성되어 있다. 다만, closure 방식은 Fritsch and Chappell(1980) 기반의 CAPE closure를 사용한다. 경계층에서 대류활동이 발생할 수 있을지를 계산하고, 각각의 격자에서 얇은/깊은 대류 방안을 먼저 계산한 후, 모든 격자에서 중층에서의 대류 활동을 계산하는 방식으로 구성되어 있다. 경계층 방안은 Lock et al. (2000)으로 계산되며, 얇은 대류는 Grant (2001), Grant and Brown (1999) 방안으로 계산된다. entrainment rate는 기압의 함수로 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = \alpha (P/P_s)^\gamma$$

여기에서 P 는 모델 레벨의 기압이며, P_s 는 지표기압, α 와 γ 는 사용자 설정 계수이다. 또한 이렇게 계산된 entrainment rate는 mixing detrainment rate에 다음과 같은 식으로 연관된다.

$$\delta = \alpha_{\text{det}} \epsilon (1 - RH)^\beta$$

여기에서 RH는 상대습도이며, α_{det} 는 GA4.0, 6.0 모두에서 3.0으로 설정된다. GA4.0 개발단계에서 $[\alpha = 0.9, \gamma = 1]$ 에서 $[\alpha = 0.35, \gamma = 1]$ 로 변경함에 따라 모델 상층에서의 오차는

증가가 있었지만, 적도 지역의 오차 (tropical cyclone, 몬순 등)를 상당히 줄여주고 MJO 모의에서도 개선을 가져온다는 사실을 밝혔다 (Klingaman and Woolnough 2014; Bush et al. 2015). 이러한 사실을 바탕으로 Walters et al. (2017)에서는 convection scheme내의 entrainment rate와 연관된 계수 α 와 γ 를 레벨 (전체, 700hPa 이하, 400-700hPa)에 따라 여러 방법으로 처방하여 분석하였고, 최종적으로 $\alpha = 1.125$, $\gamma=1$ 로 처방하여 기존에 비해 entrainment rate이 25% 정도 증가되게 설정되었다. 현재 현업 코드에서 α 와 γ 를 어떻게 처방하고 있는지 추후 namelist를 통해 확인해봐야 하며, 이 값이 동아시아에 적절한 값인지 생각해 볼 필요가 있다.

GloSea6에서 사용하는 적운 모수화는 6A옵션으로 설정되어 있으며, GloSea5와 동일한 방안이다. 5A 방안과 비교하여 6A 방안에서 가장 크게 개선된 점은 다음과 같다.

- 1) detrained mass는 포화되고 환경에 따라 중립 부력을 가지게 될 수 있으며, 남은 대류 plume도 부력을 가지거나 포화될 수 있다. 이는 잠재 온위를 계산하는 방정식에 영향을 준다. 또한, 5A 방안에서는 한 번의 과정으로 forced detrain을 계산하지만, 6A 방안에서는 세 번의 과정을 반복한다.
- 2) 포화상태에서의 잠재 온위는 습도 및 건조 상태의 온위, 습도 등으로 반복 계산된다. 5A 방안에서는 1번의 반복이지만, 6A 방안에서는 3번의 반복 과정을 거치게 된다. 또한, entrainment 및 상승 운동 후의 준포화 상태에서의 parcel 증발이 포함된다.
- 3) 6A 방안에서는 mass flux가 구름 하부에서 5% 아래로 떨어지거나, forced detrainment가 mass의 95%이상으로 detrain되면 상승 운동이 멈춘다.

이러한 개선으로 6A 방안은 5A 방안보다 대류 운동이 더 깊어지고, 모델의 예단식에서 생기는 일시적인 noise를 제거하는 결과를 가져온다.

1.2 GA6.0과 GA7.0의 차이 (Ticket lists 중심으로)

1) Microphysics scheme

- Wilson and Ballard (1999)
- New warm rain processes (Boutle et al. 2014a, b)

- New aerosol activation scheme (West et al. 2014)
- New ice cloud parameterization (Field et al. 2007)

<Ticket lists>

#11

- 개선된 ice crystal fall speed 적용
- ice cloud radiative properties 개선

#17

- Revised ice-microphysical properties
- Consistent ice optical and microphysical properties
- 기존 방식은 func(spectral band, ice water mass mixing ratio)
- 개선된 방식은 func(spectral band, ice water mass mixing ratio, temperature)
- 열대 상층에서의 온도 오차가 개선됨

#52

- New warm rain processes
- aerosol-cloud precipitation interaction 개선됨
- cloud cover 개선됨
- auto-conversion과 accretion 과정이 개선됨
- low cloud와 light rain에 영향
- 기존의 방식에서 lightest rain이 과도하게 많았던 것이 크게 개선됨

2) Large-scale cloud

- PC2 prognostic cloud scheme (Wilson et al. 2008a, b)

<Ticket lists>

#44

- cloud 과정에 의해 계산된 convective cloudiness는 복사과정내의 흡수/반사 등의 계산 과정에 직접적으로 사용됨
- 기존 방식에서는 convective plume에서 detrained되는 값이 복사과정으로 단 한 번으로

연결되고, 대류 상승 중심에서의 복사 효과는 무시됨

- convective cores에서의 radiative 효과를 고려하기 위해 convective cloud amount, convective cloud water를 개선하여 PC2내의 cloud와 합쳐줌, 이를 prognostic cloud fields에는 연결하지 않음
- $CCA = a + b \ln P$, $a=0.3$, $b=0.025$
- CCA는 PC2 cloud와 합쳐질 때, deep/mid-level/shallow convection에 따라 0.1/0.1/0.5의 비율로 조정되어 사용됨

#58

- 상변화와 관련하여, 0°C에서 liquid 100%에서 -20°C에서 ice 100%로 선형적으로 detrain되며 응결함
- convection scheme과 cloudiness parameterization에서의 상변화의 불일치를 줄이기 위해 -10°C에서 convection에 의해 ice가 형성될 수 있게 수정

#89

- Turbulence-based critical relative humidity
- PC2내에서 cloud-free 격자내에서 cloud가 생성되거나, cloud-full 격자내에서 cloud가 제거되기 시작하는 시점을 결정하게 되는 RH_{crit} 가 기존에는 constant값으로 결정되어 있었지만, 아격자 난류를 기반으로 PDF를 사용하여 계산되는 방식으로 수정

#98

- cirrus spreading rate, $r = 1.0 \times 10^{-3} c^{-1}$ 에서 $r = 1.0 \times 10^{-6} c^{-1}$ 으로 0에 가까운 값으로 설정 변경

#120

- cold cloud내의 liquid water의 부족, 많은 모델에서 나타나는 문제
- supercooled liquid의 부족은 SW 복사의 반사과정을 매우 작게 모의하고 지표에 도달하는 SW를 과대모의 하게 함, 이 역시 많은 결합 모델에서 빈번하게 나타나는 문제
- Field et al. (2014) 에서 소개된 방안을 접합함; Hill et al. 2014 (LES test), Furtado et al.

2016 (UM test)

- turbulent mixed phase cloud내에서 supersaturation 과정을 포함시킴
- 이 방안은 supercooled liquid와 mixed phase cloud의 양을 증가시키고 Arctic 지역에서의 개선을 가져옴, outgoing SW의 오차를 줄여주지만 tropics에서 warm cloud내의 liquid water를 과도하게 생산하는 단점이 있음

3) Convective parameterization

- CAPE closure based on Fritsch and Chappel (1980)

<Ticket lists>

#64

- detrainment 과정과 연계된 temperature 계산 과정을 기존 1번 반복에서 3번 반복으로 증가
- saturation과정 내의 potential temperature 계산 과정을 기존 2번 반복에서 3번 반복으로 증가
- cloud base에서 mass flux가 5%이하로 떨어지면 상승 운동을 중지시킴
- convection 상승 운동이 기존의 결과보다 깊어짐 (cloud 하층의 mass flux 줄어듦) (Walters et al, 2019, Fig. 4)

#84

- Fixed CAPE timescale에서 $\tau_{CAPE} = \kappa \omega_{L2}^{-1}$ 로 변경됨 (vertical velocity에 의해 계산됨)

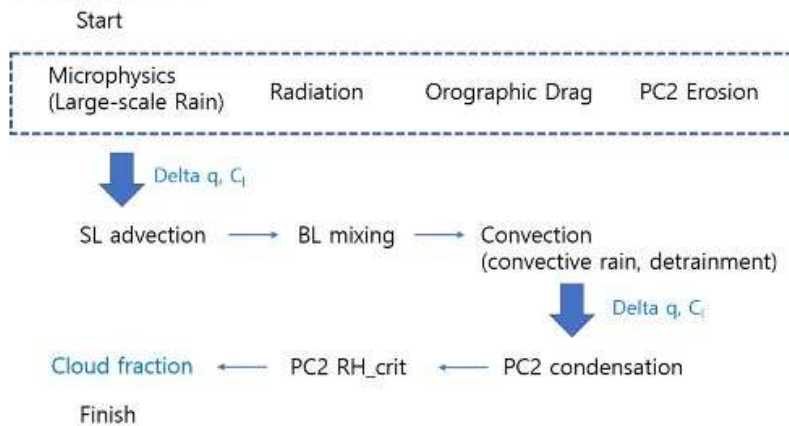
4) Radiation scheme

- New radiation scheme (SOCRATES)

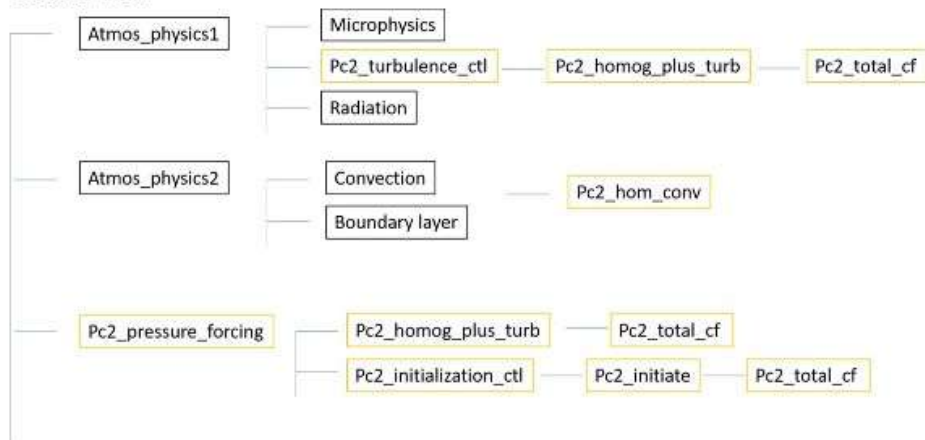
1.3 구름 모수화 과정 분석을 통한 특성 분석

1) 구름 모수화 과정 순서도

<계산과정 순서도>



<Codes tree>



2) 구름 모수화 과정 코드 분석 (PC2 Scheme), Reference: Wilson et al. 2008

<Microphysics>

- Mixing ratio 계산, cloud fraction 변화를 직접 계산하지는 않음

<Radiation>

- 태양복사에 의한 흡수로 인한 온도변화를 계산, 구름과 수증기에 따라 복사 값이 영향을 받고 다시 구름/수증기의 변화를 계산
- Cloud fraction, condensation에 의한 장파복사 및 지표 온도 변화 계산 후 다시 구름/수

증기 변화를 계산

- 복사 모듈 내에서 계산되는 수증기 및 구름의 increment는 다음과 같은 식에 의해 계산 됨

$$\frac{\partial q_{cl}}{\partial t} = -C_1 \alpha_{L\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \Big|_{Red.}$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -G(-Q_c) \alpha_{L\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \Big|_{Red.}$$

/um/src/atmosphere/radiation_control/rad_ctl.F90

```
!-----
! Homogeneous forcing. Note the temperature increment from the shortwave
! is added in this routine
!-----
! DEPENDS ON: pc2_homog_plus_turb
CALL pc2_homog_plus_turb(p_layer_centres(1,1,1),
  wet_model_levels,
  timestep, t_latest, cf_latest, cfl_latest,
  cff_latest, q_latest, qcl_latest, delta_t(1,1,1),
  zeros, zeros, zeros, 0.0, 0.0,
  l_mixing_ratio)
```

----> call /um/src/atmosphere/large_scale_cloud/pc2_homg_plus_turb.F90

```
! Calculate the rate of change of Qc due to the forcing
      dqcdt=al * ( dqdt(i,j,k) - alpha * dtdt(i,j,k)
                  - alpha_p * dpdt(i,j,k) ) + dldt(i,j,k)
! DQCDT is the homogeneous forcing part, (QC+DQCDT)*DBSDTBS is the
! width narrowing part
      deltacl_c(index_npt(i,j)) = g * ( dqcdt - (qc + dqcdt) * dbsdtbs)
```

<Orographic drag>

- Orographic drag는 moisture나 temperature에 영향을 주지 않으며, momentum에만 영향을 주기 때문에 cloud fraction 및 condensation에 적용되지 않음

<PC2 erosion>

- 건조공기의 entrainment의 효과를 계산하는 과정, C1은 증가 qcl은 감소하게 됨. moisture PDF의 width에 의해 서서히 감소시킴

$$\frac{\partial \bar{q}_{cl}}{\partial t} = (\bar{q}_{cl} - Q_c C_1) \frac{1}{b_z} \frac{\partial b_z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \bar{C}_1}{\partial t} = -G(-Q_c) Q_c \frac{1}{b_z} \frac{\partial b_z}{\partial t}$$

$$\frac{1}{b_z} \frac{\partial b_z}{\partial t} = -2.25 \times 10^{-5} (s^{-1}) \times \exp\left(-\frac{3.1 Q_c}{a_{LH,ref}(\bar{T}_L, \bar{p})}\right)$$

/um/src/atmosphere/large_scale_cloud/pc2_hom_conv.F90

```
! Original Wilson et al (2008) formulation: rate of
! narrowing related to RH via an ad-hoc exponential.
dbsdtbs = (pc2mixingrate * timestep + dqcdt + dbsdtbs1) *
EXP( -dbsdtbs_exp * qc / (al + qsl_tl(index_npt(i,j))))

! Calculate increment here, without checking it for
! potential removal of more QCL than there is.
! A check is carried out at end of routine.
deltal = (c_1 + dqcdt) +
! The homogeneous forcing part
( ( qcl(i,j,k) - (qc + c_1) ) * dbsdtbs)
! The PDF width-narrowing part.

! DQCDT is the homogeneous forcing part, (QC+DQCDT)*DBSDTBS is the
! width narrowing part
dcflpc2(i,j,k) = g_mqc * ( dqcdt - (qc + dqcdt)*dbsdtbs)
```

<Semi-Lagrangian(SL) advection>

- condensate contents가 이루어하는 것과 동일하게 cloud fraction은 SL 이류 방안을 통해 계산됨

$$\frac{\partial \bar{q}_{cl}}{\partial t} = -u \cdot \nabla \bar{q}_{cl}$$

$$\frac{\partial \bar{C}_1}{\partial t} = -u \cdot \nabla \bar{C}_1$$

/um/src/atmosphere/dynamics_advection/cal_q_star.F90

/um/src/atmosphere/tracer_advection/interpolation_qcon_multi.F90

(some codes relating q, cf in calculating advection)

```

Do k = 1, wet_levels
  Do j = 1, rows
    Do i = 1, row_length
      conv = 1. / ( moist(i,j,k) + moist_star(i,j,k) )
      q_star(i,j,k) = ( mix_v_star(i,j,k)*moist(i,j,k) - mix_v(i,j,k)*moist_star(i,j,k) ) * conv
      qcl_star(i,j,k) = ( mix_cl_star(i,j,k)*moist(i,j,k) - mix_cl(i,j,k)*moist_star(i,j,k) ) * conv
      qcf_star(i,j,k) = ( mix_cf_star(i,j,k)*moist(i,j,k) - mix_cf(i,j,k)*moist_star(i,j,k) ) * conv
    End Do
  End Do
End Do

! new method, advect the mixed phase cloud fraction
DO k = 1, model_levels
  DO j = 1, rows
    DO i = 1, row_length
      cf_star(i,j,k) = data_out_super(i,j,k,count-2)
      + data_out_super(i,j,k,count-3)
      + data_out_super(i,j,k,count-1)
      cfl_star(i,j,k) = data_out_super(i,j,k,count-2)
      cff_star(i,j,k) = data_out_super(i,j,k,count+3)
      exner_star(i,j,k) = data_out_super(i,j,k,count-4)
    END DO
  END DO
END DO

```

<Boundary layer (BL) mixing>

- 연직 q 와 T 의 혼합을 위한 과정
- qcl 과 Cl increment 를 계산하기 위해 homogeneous forcing method 가 사용됨

$$\frac{\partial q_{cl}}{\partial t} = C_1 a_L \left(\frac{\partial q_T}{\partial t} - a \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = G(-Q_c) a_L \left(\frac{\partial q_T}{\partial t} - a \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \right)$$

/um/src/atmosphere/large_scale_cloud/pc2_homg_plus_turb.F90

<Convection>

- Detrained mixing ratio 가 cloud 에 더해짐

<PC2 cloud initiation>

- Grid box 내에서 cloud 가 형성되기 시작하는 point 를 결정하기 위한 과정
- 상대습도가 임계점을 넘어가면 condensation 과 $C1$ 의 변화율을 계산함
- RH_{crit} 을 PDF 형태로 구성하여 적용

- PDF shape 에 따라 initiation 이 영향을 받음
- PDF width 는 다음과 같이 계산됨

$$b_z = a_L(1 - RH_{crit})q_{z,cr}(\overline{T_L})$$

<Cloud fraction>

- Diagnostic area cloud fraction from bulk cloud fraction (Brooks et al, 2005)

$$C_q = [1 + e^{(-f)}(C_b^{-1} - 1)]^{-1}$$

$$f = AV^\alpha H^{-\beta}$$

/um/src/atmosphere/large_scale_cloud/lc_acf_brooks.F90

```

! Calculate the symmetric adjustment (f).
! This parameter controls the extent to which the area cloud fraction
! is greater than the bulk cloud fraction. If f = 0, they are equal.

      symmetric_adjustment_liquid =
         power_law_gradient_liquid
         * ( vert_scale ** vert_fit_liquid )
         * ( horiz_scale ** horiz_fit_liquid )
      symmetric_adjustment_frozen =
         power_law_gradient_frozen
         * ( vert_scale ** vert_fit_frozen )
         * ( horiz_scale ** horiz_fit_frozen )

! Calculate the area cloud fractions for liquid and frozen cloud
! Calculate the liquid and frozen fractions separately to
! allow for greatest flexibility in future choice of decisions
! regarding mixed phase cloud.

      acf_liquid(i,j,k) = 1./
         ( 1. + ( EXP(-1.*symmetric_adjustment_liquid)
           * ( 1./bulk_cloud_fraction(i,j,k) - 1.) ) ) )
      acf_frozen(i,j,k) = 1./
         ( 1. + ( EXP(-1.*symmetric_adjustment_frozen)
           * ( 1./bulk_cloud_fraction(i,j,k) - 1.) ) ) )

```

3) 구름/강수 모수화 과정내 계수 특성 조사

<Cloud fraction scheme>

/um/src/atmosphere/large_scale_cloud/pc2_constants_mod.F90

```

! Tolerance of critical relative humidity for initiation of cloud
REAL,PARAMETER:: RHCRIT_TOL=0.01

! Power that is used to weight the two values of G when they are
! merged together
REAL,PARAMETER:: PDF_MERGE_POWER=0.5

! Power that describes the way G varies with s near the boundary
! of the cloud probability density function. For a "top-hat" it
! is equal to 0, for a "triangular" distribution it is equal to 1.
REAL,PARAMETER:: PDF_POWER=0.0

! Parameters that govern the turbulent decrease in width of the
! PDF. (dbs/dt)/bs = (DBSDTBS_TURB_0 + dQc/dt DBSDTBS_TURB_1)
! * exp(- dbsdtbs_exp Q_c / (a_L qsat(T_L)))
! dbsdtbs_turb_0 is set in the UMUI
REAL,PARAMETER:: DBSDTBS_TURB_1 = 0.0
REAL,PARAMETER:: DBSDTBS_CONV = 0.0
REAL,PARAMETER:: dbsdtbs_exp = 10.05

```

- PDF_MERGE_POWER, PDF_POWER: observation 사용해서 UM 결과 분석 및 안정성 test 후 결정된 값이지만, 더 분석이 필요한 상황

- RHCRIT_TOL = 0.01

/um/src/atmosphere/convection/calc_3d_cca_cal3dcca.F90

- Control: Anvil factor = 0, Tower factor = 0 / Operation: Anvil factor = 1.0, Tower factor = 1.0 ==> (anvil factor - tower_factor)*cca_2d 로 계산되기 때문에, 동일한 설정으로 계산됨

/namelists/run_cloud

```

&run_cloud
alllicetdegc=-20.00,
cff_spread_rate=1.00e-3,
cloud_fraction_method=2,
dbsdtbs_turb_0=1.50e-4,
forced_cu=0,
i_fixbug_pc2_checks=2,
i_pc2_conv_coupling=3,
i_pc2_erosion_method=3,
ice_width=0.020,
l_add_cca_to_mcica=.false.,
l_cld_area=.false.,
l_ensure_min_in_cloud_qcf=.true.,
l_filter_cloud=.true.,
l_fixbug_pc2_mixph=.true.,
l_fixbug_pc2_qcl_incr=.true.,
l_micro_eros=.false.,
l_pc2=.true.,
l_rhcpt=.false.,
pc2_falliceshear_method=2,
rhcrit=0.920,0.918,0.916,0.912,0.908,0.903,0.898,0.891,0.885,0.877,
0.869,0.859,0.850,0.839,0.828,0.815,0.803,68*0.800,
starticetkelvin=273.15,
tau_thresh=0.0100,

```

```

! Convective plume is either liq or ice with an abrupt change.
! Partition the condensate increments detrained from the
! convective plume onto the large-scale more smoothly over
! a range of temperature. Adjust for latent heating.

frac_icek = (thek(i)*exk(i)-starticeKelvin)/alliceTdegC
frac_icek = MAX(0.0,frac_icek)
frac_icek = MIN(frac_icek,1.0)
frac_liqk = 1.0 - frac_icek

```

- RH critical point: /large_scale_cloud/pc2_arclD.F90, pc2_initiation.F90

- ice scaling factor: /large_scale_precipitation/lsp_subgrid.F90

```

! -----
! Calculate width of vapour dist. in ice and clear region
! -----
! tempw is the mean vapour content in the ice only and clear
! sky partitions
tempw(i) = (q(i) - cfliq(i)*qsl(i)) / (1.0 - cfliq(i))
temp7(i) = ice_width * qsl(i)
! 0.001 is to avoid divide by zero problems
width(i) = 2.0 * (1.0 - rhcpt(i)) * qsl(i)
           * MAX( (1.0 - 0.5 * qcftot(i) / temp7(i)), 0.001 )
! The full width cannot be greater than 2q because otherwise
! part of the gridbox would have negative q. Also ensure that
! the full width is not zero (possible if rhcpt is 1).
width(i) = MIN(width(i), MAX(2.0*q(i), 0.001*qsl(i)))

! -----
! Calculate vapour contents in ice only and clear regions
! -----
IF (area_ice(i) > 0.0) THEN
  q_clear(i) = tempw(i) - 0.5*width(i) * area_ice(i)
  q_ice(i) = (q(i) - cfliq(i)*qsl(i) - area_clear(i)*q_clear(i))
            / area_ice(i)
ELSE
  q_clear(i) = tempw(i)
  q_ice(i) = 0.0 ! q_ice is a dummy value here
END IF ! area_ice gt 0.

```

- cirrus spreading rate: /large_scale_precipitation/lsp_fall.F90

```

! Augment the change in ice cloud fraction to account
! for the lateral spreading out of ice cloud (e.g. cirrus).
! This will increase CFF while keeping IWC the same.
!
! Cloud can only spread out from its edges, so work out the
! perimeter of the cloud edge as a function of cloud fraction.
cff_perimeter = (2.0*cff(i)-cff(i)) / (2.0*cff(i))
deltacff(i) = deltacff(i) + (cff_spread_rate*cff_perimeter*timestep)
deltacff(i) = min(deltacff(i), 1.0 - cff(i))

```

<Convection scheme>

/namelists/run_convection

- TICE: latent heat 의 차이를 통해 convection 의 강화에 영향을 줌, supercooled liquid water 의 양을 변화시킴
- RH_{crit} : Tunable value, initiating cloud와 ice cloud를 결정하기 때문에 중요한 계수
- ice_width: scaling factor for reduction in PDF width, qcl이 cloud가 되는데 직접적인 영향을 미침

$$b_i = (1 - RH_{crit})q_{zet} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\overline{qc\bar{f}}}{iq_{zet}T}\right)$$

- cff_spread_rate: Cirrus spreading rate(r)

	namelists (run_cloud)	GA6.0	GA7.0	current
ICE temperature	aliceTdegC	-20°C	-10°C	-20°C
RH critical point	rhcrit	0.092~0.8 (constant for each level)	calculating a variable based on sub-grid turbulence	0.092~0.8 (constant for each level)
ice scaling factor	ice_width	0.04	0.04	0.02
cirrus spreading rate	cff_spread_rate	0.001	0.00001	0.001

- TICE: /convection/environ_mod-6a.F90

```

! Convective plume is either liq or ice with an abrupt change.
! Partition the condensate increments detrained from the
! convective plume onto the large-scale more smoothly over
! a range of temperature. Adjust for latent heating.

frac_icek = (thek(i)*exk(i)-starticeKelvin)/alliceTdegC
frac_icek = MAX(0.0,frac_icek)
frac_icek = MIN(frac_icek,1.0)
frac_liqk = 1.0 - frac_icek

```

- RH critical point: /large_scale_cloud/pc2_arclD.F90, pc2_initiation.F90

- ice scaling factor: /large_scale_precipitation/lsp_subgrid.F90

```

! -----
! Calculate width of vapour dist. in ice and clear region
! -----
! tempw is the mean vapour content in the ice only and clear
! sky partitions
tempw(i) = (q(i) - cfliq(i)*qsl(i)) / (1.0 - cfliq(i))
temp7(i) = ice_width * qsl(i)
! 0.001 is to avoid divide by zero problems
width(i) = 2.0 * (1.0 - rhcpt(i)) * qsl(i)
           * MAX( (1.0 - 0.5 * qcftot(i) / temp7(i)), 0.001 )
! The full width cannot be greater than 2q because otherwise
! part of the gridbox would have negative q. Also ensure that
! the full width is not zero (possible if rhcpt is 1).
width(i) = MIN(width(i), MAX(2.0 * q(i), 0.001 * qs(i)))

! -----
! Calculate vapour contents in ice only and clear regions
! -----
IF (area_ice(i) > 0.0) THEN
  q_clear(i) = tempw(i) - 0.5 * width(i) * area_ice(i)
  q_ice(i) = (q(i) - cfliq(i) * qsl(i) - area_clear(i) * q_clear(i))
            / area_ice(i)
ELSE
  q_clear(i) = tempw(i)
  q_ice(i) = 0.0 ! q_ice is a dummy value here
END IF ! area_ice gt 0.

```

- cirrus spreading rate: /large_scale_precipitation/lsp_fall.F90

```

! Augment the change in ice cloud fraction to account
! for the lateral spreading out of ice cloud (e.g. cirrus).
! This will increase CFF while keeping IWC the same.
!
! Cloud can only spread out from its edges, so work out the
! perimeter of the cloud edge as a function of cloud fraction.
cff_perimeter = (2.0 * cff(i) - cff(i)) + (2.0 * cff(i))
deltacff(i) = deltacff(i) + (cff_spread_rate * cff_perimeter * timestep)
deltacff(i) = min(deltacff(i), 1.0 - cff(i))

```

<Convection scheme>

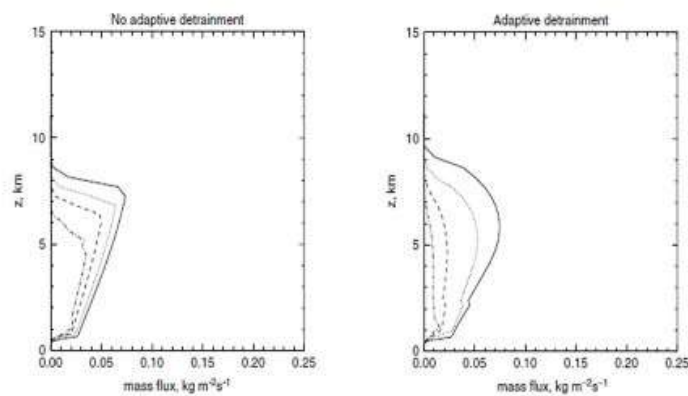
/namelists/run_convection

```

&run_convection
a_convect_seg_size=80,
a_convect_segments=-99,
adapt=7,
amdet_fac=3.00,
anv_opt=0,
anvil_factor=1.0000,
bl_cnv_mix=1,
cape_bottom=5,
cape_min=0.5,
cape_opt=3,
cape_timescale=3600,
cape_top=50,
cca2d_dp_opt=1,
cca2d_md_opt=1,
cca2d_sh_opt=1,
cca_dp_knob=0.50,
cca_md_knob=0.50,
cca_min=2.000e-2,
cca_sh_knob=0.50,
ccw_dp_knob=0.00,
ccw_for_precip_opt=4,
ccw_md_knob=0.00,
ccw_sh_knob=0.00,
cld_life_opt=0,
cnv_wat_load_opt=0,
cvdiag_inv=0,
cvdiag_sh_wtest=0.020,
dd_opt=1,
deep_cmt_opt=5,
dil_plume_water_load=0,
ent_dp_power=1.00,
ent_fac=1.0,
ent_fac_dp=1.13,
ent_fac_md=0.90,
ent_md_power=0,
ent_opt_dp=3,
ent_opt_md=0,
fac_qsat=0.500,
fixsd_cld_life=7200.00,
i_convection_vn=5,
iconv_congestus=0,
iconv_deep=1,
iconv_mid=1,
iconv_shallow=1,
icvdiag=1,
i4a_kterm=.false.,
l_3d_cca=.true.,
l_anvil=.true.,
l_ccrad=.true.,
l_cloud_deep=.true.,
l_conv_hist=.false.,
l_cv_conserve_check=.false.,
l_eman_dd=.false.,
l_fix_udfactor=.false.,
l_mom=.true.,
l_murk_conv=.false.,
l_param_conv=.true.,
l_rediagnosis=.false.,
l_safe_conv=.true.,
l_snow_rain=.false.,
limit_pert_opt=2,
mid_cmt_opt=0,
mid_cnv_pmin=10000.00,
mparvtr=1.5000e-3,
n_conv_calls=2,
plume_water_load=0,
qlmin=3.0000e-4,
qstice=3.5000e-3,
r_det=0.9000,
rad_cloud_decay_opt=2,
sh_pert_opt=1,
termconv=1,
tice=263.1500,
tower_factor=1.0000,
tv1_sd_opt=2,
ud_factor=1.0000,
w_cape_limit=0.4,

```

- CCA 는 PC2 cloud 와 합쳐질 때, deep/mid-level/shallow convection 에 따라 0.1/0.1/0.5 의 비율로 조정되어 사용됨 (cca_dp_knob/cca_md_knob/cca_sh_knob)
- Convective core 의 radiative 효과를 고려하는 부분 (only radiatively active): SW reflection 을 줄이기 위해 cca_sh_knob = 0.5 --> 0.2,
- Adaptive detrainment parameter: TTL temperature biases 의 개선을 위해 tuning, 0.7까지 내리면 atmospheric turbulent fluxes 에 영향으로 NP의 SST가 더 안 좋아지기 때문에 0.8 까지만 수정: r_det = 0.9 --> 0.8



Derbyshire et al. 2011

Figure 12. Updraught mass fluxes (12 h averaged) for the SCM experiment under the EUROCS humidity case (with and without adaptive detrainment).

<Adaptive detrainment 에 따른 mass flux 의 차이>

	namelists (run_convection)	GA6.0	GA7.0	current
fraction of diagnosed shallow cloud amount passed to radiation	cca_sh_knob	0.5	0.2	0.5
fraction of diagnosed mid-cloud amount passed to radiation	cca_md_knob	0.1	0.1	0.5
fraction of diagnosed deep cloud amount passed to radiation	cca_dp_knob	0.1	0.1	0.5
adaptive detrainment parameter	r_det	0.9	0.8	0.9

- CCA fraction: /convection/glue_conv-6a.F90

```
DO k=1, n_cca_lev
  DO i=1, n_dp
    cca0(dp1(i),k) = cca_dp(i,k) * cca_dp_knob
  END DO
END DO
```

- Detrainment parameter: /convection/parcel_mod-6a.F90

```
! Calculate XSBMIN_AD
! Use adaptive detrainment if ADAPTIVE_ON flag is set to 1
! making sure that adaptive min. buoyancy doesn't fall below 0.0
IF (ad_on == 1) THEN
  xsbmin_ad(i) = r_det * rbuoyk(i) + (1-r_det)*rbuoykp1(i)
  xsbmin_ad(i) = MAX(xsbmin_ad(i),0.0)
ELSE
  xsbmin_ad(i) = xsbmin(i)
END IF
```

<Microphysics scheme>

/namelists/run_precip

```

&run_precip
ai=1.8500e-2,
aic=1.8500e-2,
ar=1.00,
arc=1.00,
arcl_inhom_sc=1.00,
bi=1.9000,
bic=1.9000,
l_autoc_3b=.false.,
l_cry_agg_dep=.false.,
l_droplet_tpr=.false.,
l_hallett_mossop=.false.,
l_it_melting=.false.,
l_mcr_arcl=.true.,
l_mcr_iter=.true.,
l_mcr_qgraup=.false.,
l_mcr_grain=.true.,
l_psd=.false.,
l_rain=.true.,
l_rainfall_as=.true.,
l_taper_new=.false.,
l_warm_new=.false.,
lsiter=1,
lsp_eic=6.049000e-2,
lsp_fic=8.3100e-1,
niter_bs=7,
tnuc=-10.00,
x1r=2.2000e-1,
x2r=2.2000.

```

- 대기모델의 미세구름물리 모수화 과정 분석을 통한 특성 분석 및 개선점 제안 (임교선, 2020)에 수식 및 namelist 가 상세히 소개되어 있음
- ax = 0.0185, bx=0.9, ice crystal 연직 침강속도 및 수농도 분포와 관련된 계수 (aic, bic)
- ax=0.0185, bx=0.9, Aggregate 연직 침강속도 및 수농도 분포와 관련된 계수 (ai, bi)
- 빗방울 연직 침강 속도

$$V_x(D) = [c_{1R}D^{d_{1R}} \exp(-h_{1R}D) + c_{2R}D^{d_{2R}} \exp(-h_{2R}D)] \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{\zeta_R}$$

: 비상의 질량과 크기관계 및 연직 침강속도와 크기와 관계를 나타내는데 사용되는 매개변수

Parameter	c_{1R}	d_{1R}	h_{1R}	c_{2R}	d_{2R}	h_{2R}	ζ_R
Value	4854.1	1.00	195.0	-446.009	0.782127	4085.35	0.4

- 눈상의 연직 침강 속도

$$V_x(D) = c_x D^{a_x} \exp(-h_x D) \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{c_x} \quad c_x = e_x \mu_0^{(1-2f_x)} \rho_0^{(f_x-1)} (2g)^{f_x} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{f_x} \dots (1) \quad , d_x = f_x (b_x + 2 - s_x) - 1 \dots (2)$$

$$A_{ice} = r_x D^{s_x} \quad (\text{maximum cross-sectional area of an ice particle - diameter relationship})$$

$$R_e = e_x B_e^{f_x} \quad (\text{Best number-Reynolds number relationship})$$

: Ice crystal 의 질량과 크기관계 및 연직 침강속도와 크기와 관계를 나타내는데 사용되는 매개변수

a_x	b_x	c_x	d_x	s_x	h_x	e_x	f_x	r_x	s_x
0.0185	1.90	Eq (1)	Eq (2)	0.4	0.0	0.06049	0.831	0.131	1.88
aic	bic					lsp_eic	lsp_fic	ric	sic
<i>"namelist"</i>						<i>"namelist"</i>		<i>"mphys_psd_mold.F90"</i>	

: 타방안과 비교하여 빗방울의 연직침강속도는 느리며, 얼음상의 연직침강속도는 빠른 것으로 분석됨. 연직침강속도가 한반도 강수와 연관이 있음이 알려져 있음. 추후 고려할 필요가 있음

: GC4 버전에서 ice crystal fall speed 개선이 이루어졌음

- 비상의 수농도

$$n_R(D) = x1r \times \lambda_R^{x2r} \exp(-\lambda_R^D)$$

: x1r=0.22, x2r=2.2 (namelist)

: 다른 미세물리방안(WSM/WDM, Thompson, Morisson)과 비교하여 볼 때, 작은 크기 비상은 적게 큰 크기 비상은 많게 처방됨

: 최근 김기병과 임교선(2021, 봄기상학회)에 따르면, 얼음형 수농도의 오차를 감소시키는 개선을 통해 북태평양 기압 변화로 인한 한반도 여름 강수를 증가시킬 수 있음을 보임

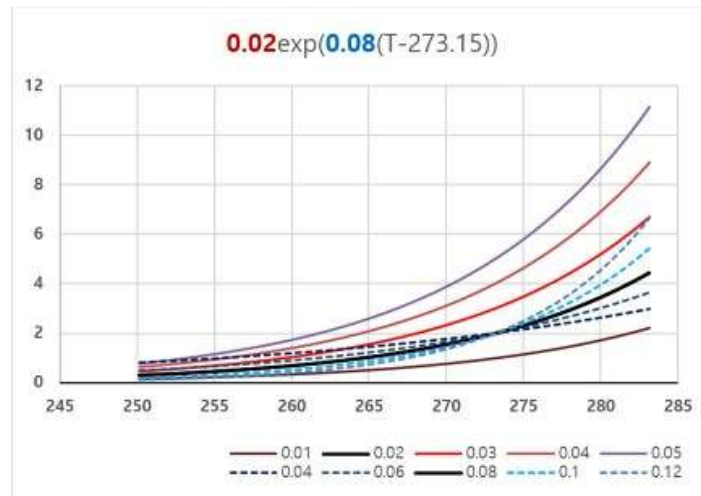
- 병합효율 (Exy)

: 눈송이와 얼음상이 충돌하여 병합될 효율인 Exy 가 온도에 의존하는 병합효율을 사용하고 있음. 이 병합 효율을 높여준다면, 눈상이 더 많이 생성되며, 눈상의 녹음과정을

통하여 비상이 많이 생성되고, 따라서 지표 강수를 늘여줄 수 있을 것으로 기대함
(임교선, 2020)

$$: E_{zv} = 0.02 \exp(0.08(T - 273.15)), \text{ lsp_collection.F90 (Grey et al. 2004)}$$

: 관측될 수 없는 매개변수이며 0과 1사이의 값이 사용됨, 다른 미세물리방안에서도
Exy는 임의로 처방됨, WRF/GRIMS/KIM 등에서 사용되는 WSM/WDM에서는 1로 처방
됨



<계수 조정에 따른 병합 효율 분포 변화>

부록 F. 기상청 기후예측시스템 오차 특성 진단 틀

APEC CLIMATE CENTER

기상청 기후예측시스템 오차 특성 진단 틀

- [1] 자료 처리 및 검증
- [2] 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단
- [3] 동아시아 여름 몬순 오차 진단

2021년 6월

APEC 기후센터 기후사업본부
예측기술과 정여민 함수련

목 차

1 소개	1
2 주요내용	3
2.1 자료처리 및 검증	4
2.2 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단	6
2.3 동아시아 여름 몬순 오차 진단	8
3 오차 특성 진단 툴 [자료처리 및 검증]	10
3.1 구조 및 코드	10
3.2 수행 방법	14
3.3 결과	19
4 오차 특성 진단 툴 [계절내 변동성 및 MJO 오차 진단]	21
4.1 구조 및 코드	21
4.2 수행 방법	25
4.3 결과	30
5 오차 특성 진단 툴 [동아시아 여름 몬순 오차 진단]	33
5.1 구조 및 코드	33
5.2 수행 방법	37
5.3 결과	42

1. 소개

APEC 기후센터 (APEC Climate Center, 이하 APCC) 기후사업본부에서는 기상청 기후예측시스템 (KMA-Met Office Joint Seasonal Forecasting System) 인 GloSea5 (Global Seasonal Forecast System version5) 모델의 계절내 (Subseasonal to seasonal, S2S) 예측 성능 평가를 수행하고 오차 특성 분석 및 해석을 통한 개선 가이드라인을 제공하는 업무를 수행 중이다. 기상청 현업 모델로 사용되는 기후예측모델의 개선을 위한 학계와 유관기관의 다양한 연구가 진행되고 있고, 이를 반영하여 일관된 진단 정보를 평가하고, 모델 개선을 위한 민감도 실험의 영향을 비교하는 시스템의 필요성에 따라, APCC 에서는 기상청 기후예측모델 개선 연구 결과의 활용성을 높이기 위해 모델 개선/개발에 따른 계절내 예측성능 및 오차 특성 진단 시스템을 개발하였다.

기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴은 모델 결과 분석의 신속성과 정확성을 위해 자료처리 및 검증 과정을 포함한다. 또한 계절내 시간 규모의 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)과 동아시아 여름 몬순 주요 현상의 예측성능 및 오차 진단을 수행하도록 구성하여, 선행시간에 따른 계절내 변동성의 오차 분석이 용이하게 설계하였다.

오차 특성 진단 툴의 자료 처리 및 검증 과정은 기후예측모델의 원시 결과 파일의 형식 변환 및 재격자화 과정을 포함하고, 관측(ERA5, GPCP)과 모델의 S2S 제공 예측일 기준 격자 형태의 기후값 및 아노말리값을 산출한다. 또한 계절내 예측성능 및 오차 진단을 위해 예측일 기준 선행 주수 월 단위 자료와 선행 주수 기준 일단위 자료로 관측과 모델자료의 후처리 자료를 생산한다. 전/후처리 과정을 완료한 기후예측모델 자료의 검증은 주요 대기 변수의 월/계절별 평균 오차와 공간 상관 계수를 가시화하여 자료 검증을 수행한다.

기후예측모델 계절내 현상 기반 오차 특성 분석을 위해 적도 지역 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단과 동아시아 여름철 오차 진단 툴을 구성하였다. 해당 툴은 계절내 변동성 필터링을 적용하여 기후예측모델의 선행 주수 기준 겨울철 공간 변동성과 MJO 전파 구조 오차, 예측일 기준 MJO 지수의 예측성능 및 오차 특징을 분석한다. 또한,

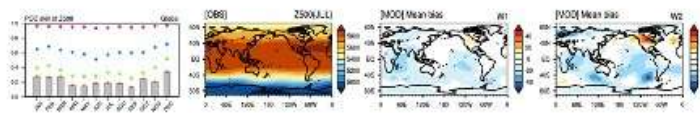
동아시아 여름 몬순 특성을 반영하는 주요 지수들의 예측성능 및 오차를 선형 주수 기준으로 비교하고, 동아시아 지역 평균 시간-위도 강수 밴드 변동성 및 필터링 된 강수와 하층 바람성분의 지연 상관 분석을 통해 여름철 강수 오차 특성을 일관성 있는 방법으로 진단하고자 하였다.

자료처리 및 검증, 계절내 변동성 및 MJO 오차 분석, 그리고 동아시아 여름 몬순 오차 분석으로 구성된 기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 각 과정의 주요 작업과 분석 내용, 결과물을 아래의 그림에 제시하였다.

Diagnostic Tool of KMA-GloSea

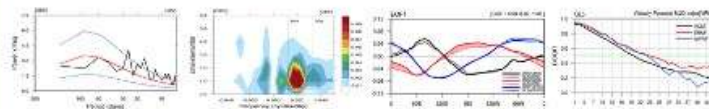
01 Processing DATA

- Convert raw data(Model, OBS) format
- Post-processing for generating forecast data based lead time
- Validate monthly predictive performance and mean biases



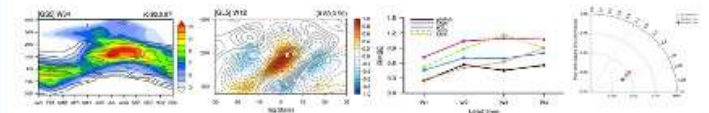
02 Diagnosis MJO

- Post-processing data for MJO analysis
- Diagnosis of power spectral, wavenumber frequency, MV-EOF, MJO propagation and MJO Index



03 Diagnosis EASM

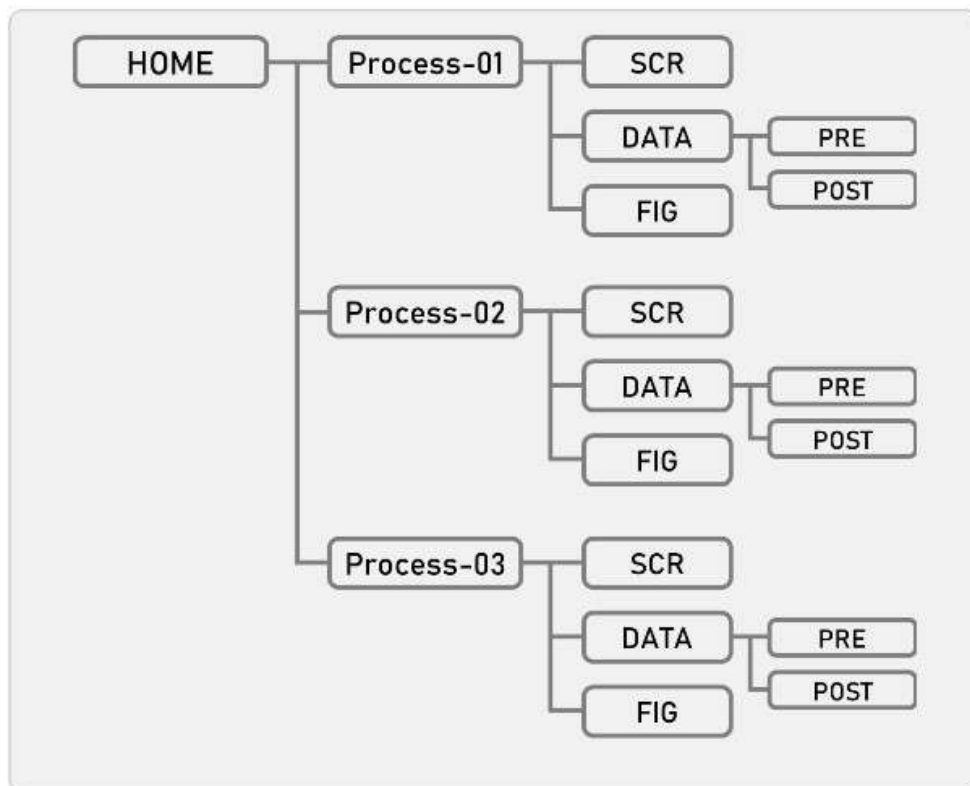
- Post-processing data for East Asia summer monsoon analysis
- Diagnosis of EASM index, time-latitude cross section of Prec, lag correlation of filtered Prec-U850 and Taylor diagram



<기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴 주요 내용 소개>

2. 주요내용

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 전체 구조를 아래의 그림과 같이 설계하였다. Process-01 에 원시 자료처리 및 검증 과정의 스크립트, 전/후처리 데이터, 그림이 저장되고 Process-02 에 계절내 변동성 및 MJO 오차 분석, 그리고 Process-03 에 동아시아 여름 몬순 오차 분석의 세부 과정이 포함된다. 2 장에서 각 과정의 주요 내용을 간략히 설명하였다.



<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 전체 구조>

2.1 기후예측모델 자료처리 및 검증

1) 기후예측모델 원시 결과파일 전처리

기상청 기후예측모델(KMA-GloSea)의 원시 결과는 영국 Met Office 에서 개발한 기상 자료의 파일 형식인 PP(Post Processing Format) 형태로 제공되며, 기후 연구에 활용성이 높은 NetCDF(Network Common Data Form) 형태로 변환 과정이 필요하다. 기후예측모델 오차 특성 진단 툴 [자료처리 및 검증] 과정에서는 기후예측모델 원시 결과의 형태 변환을 수행하고, NetCDF 형태의 모델 결과의 레벨 변수 추출 및 재격자화, 시간 단위 조정을 통해 S2S 제공 60 일 예측자료 형태로 전처리를 수행한다. 원시 결과파일 전처리 과정을 통해 해당 자료는 1.5°×1.5° 공간해상도의 60 일 시간자료로 변환된다.

「 결과 예시 」

Output file	Dimension information
GS5_U850_1991-2010_0101_CLM.nc	time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_RAW.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_ANO.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)

2) 기후예측모델 및 관측자료 전처리

기상청 기후예측모델(KMA-GloSea)의 S2S 제공 형식(time:60, lat:121, lon:240)을 입력자료로 사용하여 기후값(climatology) 및 아노말리값(anomaly)을 산출/저장하는 전처리 과정을 수행한다. 모델 검증을 위해 관측자료인 ERA5(대기변수)와 GPCP(강수)도 모델과 동일한 격자 및 시간 규모로 변환하여, 모델 형태로 기후값 및 아노말리값을 산출/저장하는 전처리 과정을 수행한다. 모델 및 관측자료의 전처리 과정을 통해 해당 자료는 연도별 예측일 자료로 변환된다.

「 결과 예시 」

Output file	Dimension information
GS5_U850_1991-2010_0101_CLM.nc	time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_RAW.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_ANO.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)

2.1 기후예측모델 자료처리 및 검증

3) 기후예측모델 및 관측자료 후처리

기후예측모델 및 관측자료의 전처리 과정을 통해 생산된 자료는 자료 검증 및 계절내 예측 성능 및 오차 분석을 위해 후처리 과정을 수행한다. 모델자료의 예측일 기준 선행 시간(LW1-4) 월 자료 및 계절내 필터링 적용을 위한 선행 시간(LW1-4) 기준 일 자료가 후처리 과정을 통해 생산된다.

「 결과 예시: 예측일 기준 선행 주 월 자료 」

Output file	Dimension information
LW_DATA_GS5_U850_start_0101_1991-2010_RAW.nc	year(20), week(4), lat(121), lon(240)
LW_DATA_GS5_U850_start_0101_1991-2010_ANO.nc	year(20), week(4), lat(121), lon(240)

「 결과 예시: 선행 주 기준 연속 일 자료 」

Output file	Dimension information
CONT_GS5_U850_1991-2010_LW(1~4)_RAW.nc	time(20*365), lat(121), lon(240)
CONT_GS5_U850_1991-2010_LW(1~4)_ANO.nc	time(20*365), lat(121), lon(240)

4) 기후예측모델 자료 검증

기상청 현업 시스템으로 활용되는 기후예측모델은 매년 과거재현실험(HINDCAST) 결과가 업데이트 되고, 모델 개선을 위한 다양한 방법론이 적용된 민감도 실험 결과도 지속적으로 생산된다. 해당 자료의 분석에 앞서, 신규 추가된 자료의 주요 변수(Z500, U850, PREC) 예측 성능 분석(Pattern Correlation Coefficients) 및 오차 진단(Mean bias)을 통해 자료 검증을 수행한다.

2.2 기후예측모델 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단

1) 기후예측모델 및 관측자료 전처리

기상청 기후예측모델(KMA-GloSea)의 S2S 제공 형식(time:60, lat:121, lon:240)을 입력자료로 사용하여 기후값(climatology) 및 아노말리값(anomaly)을 산출/저장하는 전처리 과정을 수행한다. 모델 검증에 위해 관측자료인 ERA5(대기변수)와 GPCP(강수)도 모델과 동일한 격자 및 시간 규모로 변환하여, 모델 형태로 기후값 및 아노말리값을 산출/저장하는 전처리 과정을 수행한다. 모델 및 관측자료의 전처리 과정을 통해 해당 자료는 연도별 예측일 자료로 변환된다.

「 결과 예시 」

Output file	Dimension information
GS5_U850_1991-2010_0101_CLM.nc	time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_RAW.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_ANO.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)

2) 기후예측모델 및 관측자료 후처리

기후예측모델 및 관측자료의 전처리 과정을 통해 생산된 자료는 자료 검증 및 계절내 예측 성능 및 오차 분석을 위해 후처리 과정을 수행한다. MJO 오차 진단을 위해 상층 발산장(200 hPa Velocity Potential) 아노말리 자료 및 계절내 필터링 적용을 위한 선행 시간(LW1-4) 기준 일 자료가 후처리 과정을 통해 생산된다.

「 결과 예시: 상층 발산장 자료 」

Output file	Dimension information
GS5_VP200_1991-2010_0101_ANO.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)
ERA5_VP200_1991-2010_0101_ANO.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)

「 결과 예시: 선행 주 기준 연속 일 자료 」

Output file	Dimension information
CONT_GS5_U850_1991-2010_LW(1~4)_RAW.nc	time(20*365), lat(121), lon(240)
CONT_GS5_U850_1991-2010_LW(1~4)_ANO.nc	time(20*365), lat(121), lon(240)

2.2 기후예측모델 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단

3) 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단

선행 1-2 주 평균(LW12)과 선행 3-4 주 평균(LW34)를 분석 대상으로 설정하여 기상청 기후예측모델의 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단을 수행한다. 주요 분석 변수(U850, U200, VP200)를 사용하여 적도 지역 파워 스펙트럼(power spectrum analysis)과 파수 진동수(wavenumber frequency) 분석을 수행, 모델의 계절내 변동성 예측성능을 평가한다. 계절내 필터링(band pass filter)을 적용하여 인도양 및 적도 지역의 수평 공간 분포와 MJO 전파(propagation) 위도 변화에 따른 구조적 오차를 진단한다. 예측일 기준 MJO 지수의 예측성능 과 오차를 제시한다.

2.3 기후예측모델 동아시아 여름 몬순 오차 진단

1) 기후예측모델 및 관측자료 전처리

기상청 기후예측모델(KMA-GloSea)의 S2S 제공 형식(time:60, lat:121, lon:240)을 입력자료로 사용하여 기후값(climatology) 및 아노말리값(anomaly)을 산출/저장하는 전처리 과정을 수행한다. 모델 검증에 위해 관측자료인 ERA5(대기변수)와 GPCP(강수)도 모델과 동일한 격자 및 시간 규모로 변환하여, 모델 형태로 기후값 및 아노말리값을 산출/저장하는 전처리 과정을 수행한다. 모델 및 관측자료의 전처리 과정을 통해 해당 자료는 연도별 예측일 자료로 변환된다.

「 결과 예시 」

Output file	Dimension information
GS5_U850_1991-2010_0101_CLM.nc	time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_RAW.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)
GS5_U850_1991-2010_0101_ANO.nc	year(20), time(60), lat(121), lon(240)

2) 기후예측모델 및 관측자료 후처리

기후예측모델 및 관측자료의 전처리 과정을 통해 생산된 자료는 자료 검증 및 계절내 예측 성능 및 오차 분석을 위해 후처리 과정을 수행한다. 모델자료의 예측일 기준 선행 시간(LW1-4) 월 자료 및 계절내 필터링 적용을 위한 선행 시간(LW1-4) 기준 일 자료가 후처리 과정을 통해 생산된다.

「 결과 예시: 예측일 기준 선행 주 월 자료 」

Output file	Dimension information
LW_DATA_GS5_U850_start_0101_1991-2010_RAW.nc	year(20), week(4), lat(121), lon(240)
LW_DATA_GS5_U850_start_0101_1991-2010_ANO.nc	year(20), week(4), lat(121), lon(240)

「 결과 예시: 선행 주 기준 연속 일 자료 」

Output file	Dimension information
CONT_GS5_U850_1991-2010_LW(1~4)_RAW.nc	time(20*365), lat(121), lon(240)
CONT_GS5_U850_1991-2010_LW(1~4)_ANO.nc	time(20*365), lat(121), lon(240)

2.3 기후예측모델 동아시아 여름 몬순 오차 진단

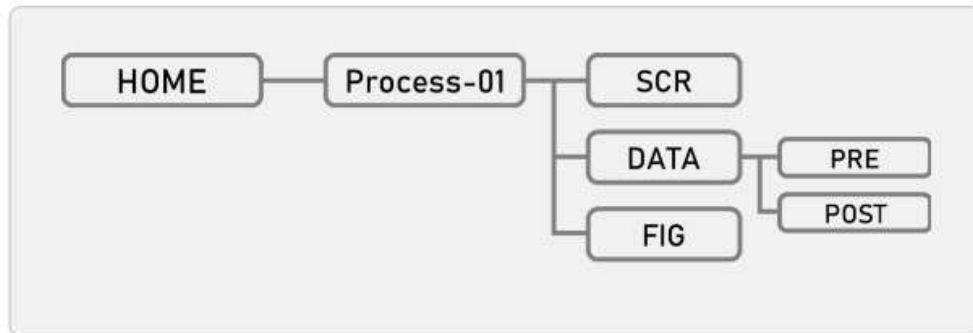
3) 동아시아 여름 몬순 오차 진단

선행 1-2 주 평균(LW12)과 선행 3-4 주 평균(LW34)를 분석 대상으로 설정하여 기상청 기후예측모델의 동아시아 여름 몬순 오차 진단을 수행한다. 동아시아 여름 몬순 주요 현상인 강수 밴드의 위도 변동성을 선행 주수(LW12/LW34) 기준으로 제시하고, 예측성능/오차를 테일러 다이어그램으로 진단한다. 동아시아 지역의 6-8월의 강수 및 하층 바람 성분의 오차를 선행 주수(LW12/LW34) 기준으로 평가한다. 계절내 필터링을 적용한 동아시아 몬순 지역 강수와 하층 동서 바람 성분의 위도 지연 상관을 선행 주수(LW12/LW34) 기준으로 분석하고 동아시아 여름 주요 몬순 주요 지수(Lee et al., 2020, Prediction Skill for East Asian Summer Monsoon Indices in a KMA Global Seasonal Forecasting System (GloSea5), Korean Meteorological Society, 30(3), 293-309)의 예측성능과 오차 진단을 수행한다.

3. 오차 특성 진단 툴 [자료처리 및 검증]

3.1 구조 및 코드

1) 자료처리 및 검증 툴 구조



기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 자료처리 및 검증 과정(Process-01)의 디렉토리 구조를 위 도표에 나타냈다. 자료처리 및 검증 툴은 기상청 기후예측모델(KMA-GloSea) 원시 결과파일(pp format)을 NetCDF 로 변환하고, S2S 모델 제공 형식과 동일한 시간규모 및 격자규모로 변환할 때 활용한다. 또한 모델 자료 검증을 위해 관측자료(ERA5, GPCP)의 시간규모와 격자규모를 S2S 제공 형식으로 변환한다. 분석을 위한 후처리 과정으로 예측일 기준 선행 주수(Lead Week 1-4) 파일과 계절내 필터링 적용 분석을 위한 선행 주수 기준 일자료 파일을 생산한다. 기후예측모델 전/후처리 수행 후 월별 예측성능 및 오차, 계절별 오차를 가시화하고 자료를 검증한다. [SCR] 경로에 원시자료 전처리 및 관측 자료 변환 코드가 위치하고 [DATA/PRE] 경로에 결과물이 저장된다. 기후예측모델과 관측자료의 후처리 결과는 [DATA/POST] 경로에 저장된다. 모델 검증 코드는 [SCR]에 위치하고 결과물은 [FIG] 경로에 저장된다. (기후예측모델 원시 결과파일 변환 소스 코드: <http://cms.ncas.ac.uk/documents/xconv/>)

3.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

`$(HOME)/Process-01/SCR/`

[기후예측모델 원시 결과파일 전처리]

Code01-0-1.RAW_MOD_conv2nc.csh

: 모델 원시자료의 형식을 NetCDF 로 변환 셸 코드

(xconvsh, tcl 파일 필요, 디렉토리 가용 사용량 확인, 단독 셸 수행 권고)

- 결과 `$(HOME)/Process-01/DATA/PRE`

Code01-0-2.RAW_MOD_Regrid.csh

: 모델 자료(NetCDF)를 S2S 제공 형태로 재격자화, 레벨 변수 추출 셸 코드

(코드 내 파라미터 설정, ref_Code01-0-2 디렉토리 세부 코드 수행 셸, 단독 수행 권고)

- 결과 `$(HOME)/Process-01/DATA/PRE`

Code01-0-3.RAW_MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_AN0.ncl

: 재격자화된 모델 자료를 S2S 제공 60 일 예측자료 형태로 생성

- 결과 `$(HOME)/Process-01/DATA/POST`

[기후예측모델 및 관측자료 전처리]

Code01-1-1.MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_AN0.ncl

: S2S 제공 예측자료의 기후값 및 아노말리 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-01/DATA/POST`

Code01-2-1.OBS_ERA5_Conv_RAW2DAILY.ncl

: 6 시간 관측자료(ERA5) 일평균 자료로 변환 및 재격자화

- 결과 `$(HOME)/Process-01/DATA/PRE`

Code01-2-2.OBS_ERA5_Format_RAW_CLM_AN0.ncl

: 관측자료(ERA5)를 모델자료 형태로 기후값 및 아노말리값 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-01/DATA/POST`

3.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

\$(HOME)/Process-01/SCR/

Code01-3-1.OBS_GPCP_Regrid.ncl

: 관측자료(GPCP) 재격자화 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-01/DATA/PRE

Code01-3-2.OBS_GPCP_Format_RAW_CLM_AN0.ncl

: 관측자료(GPCP)를 모델자료 형태로 기후값 및 아노말리값 산출 및 저장

- 결과 \$(HOME)/Process-01/DATA/POST

[기후예측모델 및 관측자료 후처리]

Code01-4-1.MOD_Make_LW_DATA.ncl

: 모델자료 예측일 기준 선행 주별(LW1-4) 자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-01/DATA/POST

Code01-4-2.OBS_Make_LW_DATA.ncl

: 관측자료 예측일 기준 선행 주별(LW1) 자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-01/DATA/POST

Code01-5-1.MOD_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

: 모델자료 선행 주별(LW1-4) 연속 일자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-01/DATA/POST

Code01-5-2.OBS_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

: 관측자료 선행 주별(LW1) 연속 일자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-01/DATA/POST

3.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

`$(HOME)/Process-01/SCR/`

[기후예측모델 자료 검증]

※ Code01-4 결과 입력자료로 활용, 자료 형태 불일치시 코드 수정 필요

`Code01-FIG-1.Monthly_PCC.ncl`

: 모델의 선행 주수(LW1-4) 기준 월별 공간상관계수(PCC) 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-01/FIG`

`Code01-FIG-2.Monthly_Mean_Bias.ncl`

: 모델의 선행 주수(LW1-4) 기준 월별 평균오차(Mean Bias) 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-01/FIG`

`Code01-FIG-3.Seasonal_Mean_Bias.ncl`

: 모델의 선행 주수(LW1-4) 기준 계절별 평균오차(Mean Bias) 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-01/FIG`

3.2 수행 방법

1) 기후예측모델 오차 특성 진단 툴 설치

```
> cp Diagnosis_KMA-GloSea.tar ${HOME}
> cd ${HOME}
> tar -xvf Diagnosis_KMA-GloSea.tar
> ls
Diagnosis_KMA-GloSea.tar Process-01 Process-02 Process-03
```

2) 자료처리 및 검증 툴 [01_Process_DATA.csh] 사용자 설정

```
> cd ${HOME}/Process-01/
> vi 01_Process_DATA.csh
```

```
#!/bin/csh -f
#=====
#This is a batch job script. [ command : qsub]
#=====
#PBS -N 01.pro_DATA
#PBS -q normal
#PBS -l select=1:ncpus=12
#PBS -l place=excl
#=====

### 1. User Option #####
set sYear = 1991
set eYear = 2010
set sYearp = 1997
set sMon = 1
set eMon = 12

set sHYear = 1991
set eHYear = 2010
set sHYearp = 1997

set DirTOOL = /home/user/WORK2021/0.Manual/
set DirS2S = /ifs/apccgb/APCC_S2S/PRE/HINDCAST/Seoul/v2020/
```

```

set DirGPCP      = /ifs/apccdb/Observation/Grid/GPCP/Daily/
set DirERA5_LEV = /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/pressure/
set DirERA5_SFC = /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/surface/

### 2. Set Directories #####
set DirSCR      = ./
set DirFIG      = ../FIG
set DirDATA     = ../DATA
set DirPRE      = ${DirDATA}/PRE/
set DirPOST     = ${DirDATA}/POST/

cat > 01.Parameter.User.ncl <<EOF

sYear  = ${sYear}
eYear  = ${eYear}
sYearp = ${sYearp}
sHYear = ${sHYear}
eHYear = ${eHYear}
sHYearp = ${sHYearp}
sMon   = ${sMon}
eMon   = ${eMon}
DirSCR  = "${DirSCR}"
DirFIG  = "${DirFIG}"
DirPRE  = "${DirPRE}"
DirPOST = "${DirPOST}"
DirS2S  = "${DirS2S}"
DirGPCP = "${DirGPCP}"
DirERA5_LEV = "${DirERA5_LEV}"
DirERA5_SFC = "${DirERA5_SFC}"

EOF

### 3. Run script #####
cd ${DirTOOL}process-01/SCR

echo ">>> STEP : 01_Process_DATA Pre-processing data for raw model data"
# csh (or qsub) Code01-0-1.RAW_MOD_conv2nc.csh    # Run this code alone #
# csh (or qsub) Code01-0-2.RAW_MOD_Regrid.csh    # Run this code alone #

```

```
ncl ${DirSCR}/Code01-0-3.RAW_MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_ANO.ncl

echo ">>> STEP : 01_Process_DATA Pre-processing model/obs data"
ncl Code01-1-1.MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_ANO.ncl
ncl Code01-2-1.OBS_ERA5_Conv_RAW2DAILY.ncl
ncl Code01-2-2.OBS_ERA5_Format_RAW_CLM_ANO.ncl
ncl Code01-3-1.OBS_GPCP_Regrid.ncl
ncl Code01-3-2.OBS_GPCP_Format_RAW_CLM_ANO.ncl

echo ">>> STEP : 01_Process_DATA Post-processing model/obs data"
ncl Code01-4-1.MOD_Make_LW_DATA.ncl
ncl Code01-4-2.OBS_Make_LW_DATA.ncl
ncl Code01-5-1.MOD_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl
ncl Code01-5-2.OBS_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

echo ">>> STEP : 01_Process_DATA validate data"
ncl Code01-FIG-1.Monthly_PCC.ncl
ncl Code01-FIG-2.Monthly_Mean_Bias.ncl
ncl Code01-FIG-3.Seasonal_Mean_Bias.ncl

echo ">>> END 01_Process_DATA <<<"
```

※ Process-01 [자료처리 및 검증] 총괄 스크립트01_Process_DATA.csh의 [1. User Option]의 진단 틀 설치 경로와 모델 및 관측 입력자료 경로를 사용자 환경에 따라 작성

3.2 수행 방법

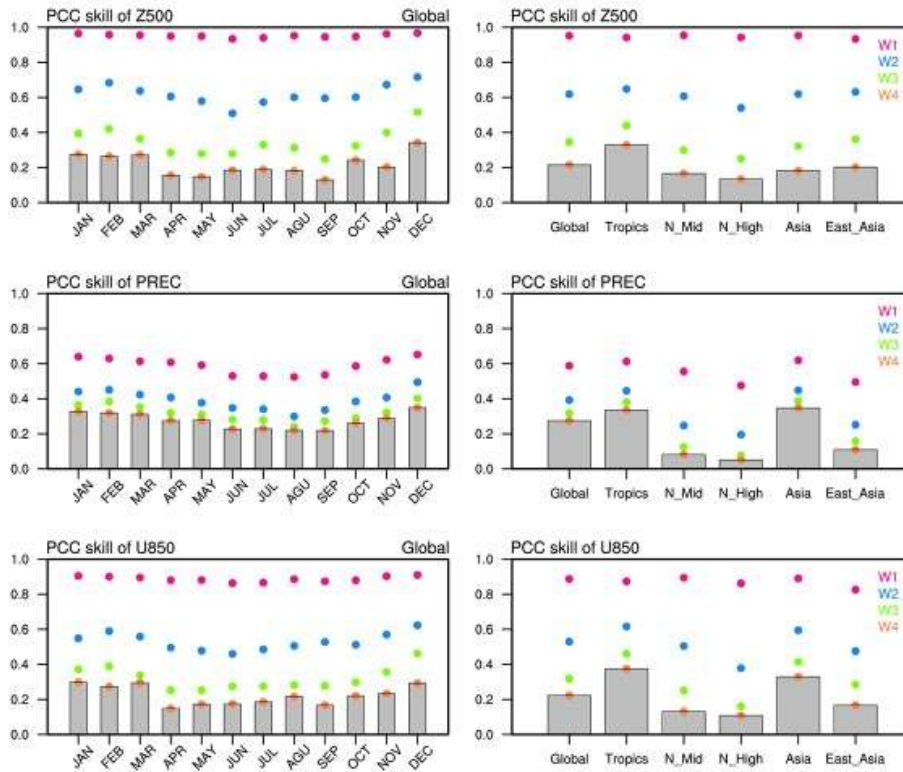
3) 자료처리 및 검증 툴 [01_Process_DATA.csh] 수행

```
> csh 01_Process_DATA.csh (or) qsub 01_Process_DATA.csh
```

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 적용 환경에 따라 자료처리 및 검증 과정(Process-01) 총괄 셸 스크립트(01_Process_Data.csh)는 C shell 명령어 (csh 01_Process_DATA.csh) 또는 PBS 명령어 (qsub 01_Process_DATA.csh)로 수행 가능하다. 기후예측모델 원시파일 형식 변환 전처리 코드(Code01-0-1.RAW_MOD_conv2nc.csh)는 사용자의 디렉토리 가용 사용량 확인이 필요하고 실험에 따른 추출 변수 정보가 상이하므로 주의하여야 한다. 추출 변수 정보에 따라 Code01-0-2.RAW_MOD_Regrid.nc의 변수 명과 레벨 정보 수정이 필요하다. 분석 자료 및 기간에 따라 총괄 스크립트 및 세부 코드의 수정이 요구된다.

3.3 결과

1) HINDCAST Monthly PCC

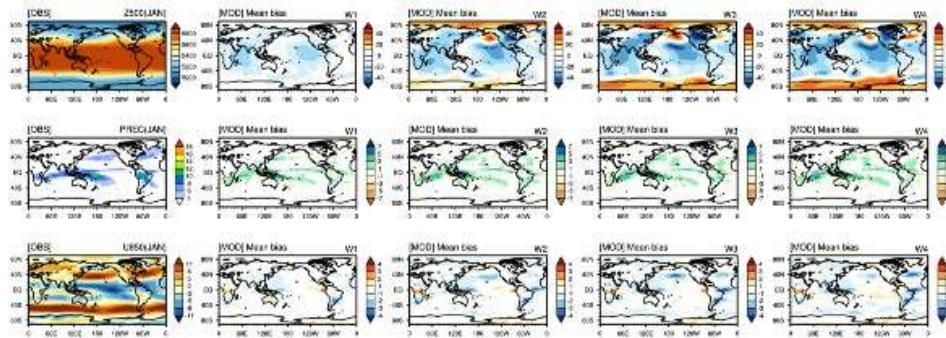


<기후예측모델 오차 특성 진단 틀 자료처리 및 검증 결과 예시 FIG01-1 Monthly PCC>

기후예측모델 오차 특성 진단 틀의 자료처리 및 검증 과정(Process-01)의 결과 예시 그림이다. 주요 대기 변수인 중층 대기 지위고도(Z500)와 강수(PREC), 하층 대기 동서바람(U850)에 대해 선행 주수(LW1-4) 기준 월별 공간상관계수(PCC)를 전구 및 주요 예측 영역으로 제시하였다.

3.3 결과

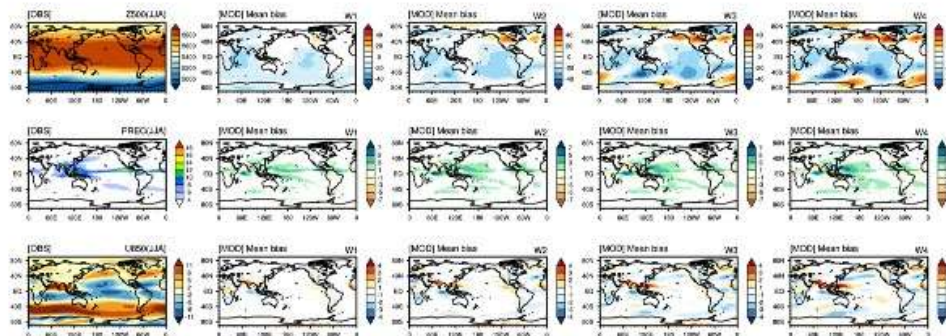
2) HINDCAST Monthly Mean Bias



<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 자료처리 및 검증 결과 예시 FIG01-2 Monthly Mean Bias>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 자료처리 및 검증 과정(Process-01)의 결과 예시 그림이다. 주요 대기 변수인 중층 대기 지위고도(Z500)와 강수(PREC), 하층 대기 동서바람(U850)에 대해 선행 주수(LW1-4) 기준 평균 오차분포를 월별로 제시하였다.

3) HINDCAST Seasonal Mean Bias



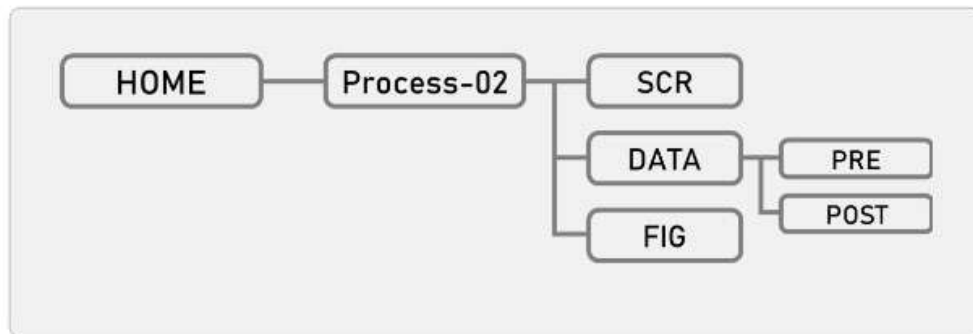
<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 자료처리 및 검증 결과 예시 FIG01-3 Seasonal Mean Bias>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 자료처리 및 검증 과정(Process-01)의 결과 예시 그림이다. 주요 대기 변수인 중층 대기 지위고도(Z500)와 강수(PREC), 하층 대기 동서바람(U850)에 대해 선행 주수(LW1-4) 기준 평균 오차분포를 계절별로 제시하였다.

4. 오차 특성 진단 툴 [MJO 오차 진단]

4.1 구조 및 코드

1) 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 툴 구조



기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 과정(Process-02)의 디렉토리 구조를 위 도표에 나타냈다. 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 툴은 기상청 기후예측모델(KMA-GloSea)의 S2S 모델 제공 형식을 입력자료로 분석을 위한 후처리 과정으로 예측일 기준 선행 주수(Lead Week 1-4) 파일과 계절내 필터링 적용 분석을 위한 선행 주수 기준 일자료 파일을 생산한다. 모델 오차 진단을 위해 관측자료(ERA5, GPCP)의 자료 처리도 진행한다. 기후예측모델의 계절내 변동성 오차 진단을 위해 계절내 필터링 적용(20-70 days band pass filter) 선행 주수(W12/W34) 기준 하층 동서 바람 성분의 평균 및 변동성 공간 분포를 관측과 비교하고, 상층 발산장의 적도 지역 파워 스펙트럼 및 파수 진동수 분석을 수행한다. MJO 오차 진단을 위해 계절내 필터링 적용(20-70 days band pass filter) 선행 주수(W12/W34) 기준 시간-경도 지면 상관 분석을 통해 MJO propagation 예측 성능을 비교하고, 예측일 기준 MJO 지수(Velocity Potential MJO Index, VPM)의 예측성능(Bivariate COR) 및 오차(Bivariate RMSE)를 제시한다. [SCR] 경로에 관측 및 모델 자료 처리 코드가 위치하고 결과는 [DATA/PRE] 또는 [DATA/POST] 경로에 저장된다. 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 가시화 코드는 [SCR]에 위치하고 결과물은 [FIG] 경로에 저장된다.

4.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

`$(HOME)/Process-02/SCR/`

[기후예측모델 및 관측자료 전처리]

`Code02-1-1.MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_ANO.ncl`

: S2S 제공 예측자료의 기후값 및 아노말리 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

`Code02-2-1.OBS_ERA5_Conv_RAW2DAILY.ncl`

: 6 시간 관측자료(ERA5) 일평균 자료로 변환 및 재격자화

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/PRE`

`Code02-2-2.OBS_ERA5_Format_RAW_CLM_ANO.ncl`

: 관측자료(ERA5)를 모델자료 형태로 기후값 및 아노말리값 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

`Code02-3-1.OBS_GPCP_Regrid.ncl`

: 관측자료(GPCP) 재격자화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/PRE`

`Code02-3-2.OBS_GPCP_Format_RAW_CLM_ANO.ncl`

: 관측자료(GPCP)를 모델자료 형태로 기후값 및 아노말리값 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

[기후예측모델 및 관측자료 후처리]

`Code02-4-1.MOD_Make_VP200_DATA.ncl`

: MJO 오차 진단을 위한 모델 상층 발산장(VP200) 생산 후처리 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

4.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

`$(HOME)/Process-02/SCR/`

`Code02-4-2.OBS_Make_VP200_DATA.ncl`

: MJO 오차 진단을 위한 관측 상층 발산장(VP200) 생산 후처리 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

`Code02-5-1.MOD_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl`

: 모델자료 선행 주별(LW1-4) 연속 일자료 생산 후처리 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

`Code02-5-2.OBS_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl`

: 관측자료 선행 주별(LW1) 연속 일자료 생산 후처리 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/DATA/POST`

[기후예측모델 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단]

`Code02-FIG-1.Mean_Variance.field.ncl`

: 관측과 모델(W12, W34)의 평균·변동 공간분포 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/FIG`

`Code02-FIG-2.Power_spectrum.ncl`

: 관측과 모델(W12, W34)의 적도 파워 스펙트럼 분석 결과 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/FIG`

`Code02-FIG-3.Wavenum_freq.ncl`

: 관측과 모델(W12, W34)의 적도 파수 진동수 분석 결과 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/FIG`

4.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

`$(HOME)/Process-02/SCR/`

Code02-FIG-4.MJO_propagation.ncl

: 관측과 모델(W12, W34)의 지연 시간-경도 교차 상관 분석 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/FIG`

Code02-FIG-5.MEOF.ncl

: 관측과 모델(W12, W34)의 다변량 경험직교함수 가시화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-02/FIG`

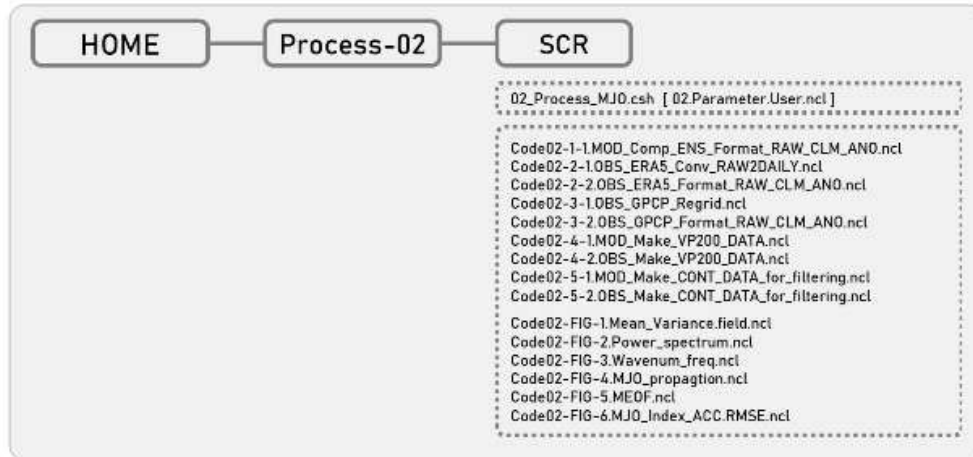
Code02-FIG-6.MJO_Index_ACC.RMSE.ncl

: 모델의 MJO 지수 예측성능 및 오차 분석 가시화 코드

※./DATA 디렉토리 내 지수 산출시 필수 입력 관측자료 및 생산 코드 포함

- 결과 `$(HOME)/Process-02/FIG`

4.2 수행 방법



기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 Process-02[MJO 오차 진단]의 자료 처리 및 가시화 코드(SCR 경로의 세부 코드)와 총괄 스크립트(Process-02 경로 셸 코드)를 위 도표에 나타냈다. 해당 과정의 총괄 스크립트인 Process-02-MJO.csh 수행을 통해 세부 코드가 진행되도록 구성하였다. 기본 설계는 과거재현실험(HINDCAST) 기준으로 설정하였고, 미래예측실험(FORECAST) 및 추가 민감도 실험결과의 자료 처리와 검증을 위해서는 02_Process_MJO.csh(02.Parameter.Users.ncl) 스크립트 수정이 필요하다.

※ 주의

- Code02-1~3 자료처리 코드는 [Process-01 자료처리 및 검증] 코드와 동일. [Process-01] 자료 처리 완료 후 동일한 분석기간을 [Process-02 MJO 오차 진단]에 적용할 경우 [Process-01] 자료를 입력자료로 설정, Code02-4~5 자료 후처리 코드 수행 후 FIG 코드 수행 가능
- Code02-2-1 코드 단독 사용시 HPC CPU 소모량이 크기 때문에 PBS 사용 권장
- Code02-FIG-6.MJO_Index_ACC_RMSE.ncl(모델의 MJO지수 산출, 예측성능 및 오차 분석 코드)
: /DATA 디렉토리 내 지수 산출시 필수 입력 관측자료(Harmonics, EOF, Daily anomaly data) 및 분석 기간 변경 시 Daily anomaly data 생산 코드(Code_to_make_daily_OBS_file.ncl) 포함

4.2 수행 방법

1) 기후예측모델 오차 특성 진단 툴 설치

```
> cp Diagnosis_KMA-GloSea.tar ${HOME}
> cd ${HOME}
> tar -xvf Diagnosis_KMA-GloSea.tar
> ls
Diagnosis_KMA-GloSea.tar Process-01 Process-02 Process-03
```

2) 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 툴 [02_Process_MJO.csh] 사용자 설정

```
> cd ${HOME}/Process-02/
> vi 02_Process_MJO.csh
```

```
#!/bin/csh -f
#=====
#This is a batch job script. [ command : qsub]
#=====
#PBS -N 02.pro_MJO
#PBS -q normal
#PBS -l select=1:ncpus=12
#PBS -l place=excl
#=====

### 1. User Option #####
set sYear = 1991
set eYear = 2010
set sYearp = 1997
set sMon = 1
set eMon = 12

set sHYear = 1991
set eHYear = 2010
set sHYearp = 1997

set DirTOOL = /home/user/WORK2021/0.Manual/
set DirS2S = /ifs/apccgb/APCC_S2S/PRE/HINDCAST/Seoul/v2020/
```

```

set DirGPCP      = /ifs/apccdb/Observation/Grid/GPCP/Daily/
set DirERA5_LEV = /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/pressure/
set DirERA5_SFC = /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/surface/

### 2. Set Directories #####
set DirSCR      = ./
set DirFIG      = ../FIG
set DirDATA     = ../DATA
set DirPRE      = ${DirDATA}/PRE/
set DirPOST     = ${DirDATA}/POST/

cat > 02.Parameter.User.ncl <<EOF

sYear  = ${sYear}
eYear  = ${eYear}
sYearp = ${sYearp}
sHYear = ${sHYear}
eHYear = ${eHYear}
sHYearp = ${sHYearp}
sMon   = ${sMon}
eMon   = ${eMon}
DirSCR = "${DirSCR}"
DirFIG = "${DirFIG}"
DirPRE = "${DirPRE}"
DirPOST = "${DirPOST}"
DirS2S = "${DirS2S}"
DirGPCP = "${DirGPCP}"
DirERA5_LEV = "${DirERA5_LEV}"
DirERA5_SFC = "${DirERA5_SFC}"

EOF

### 3. Run script #####
cd ${DirTOOL}process-02/SCR

echo ">>> STEP : 02_Process_MJO Pre-processing for model and obs"
ncl ${DirSCR}/Code02-1-1.MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_ANO.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-2-1.OBS_ERA5_Conv_RAW2DAILY.ncl

```

```

ncl ${DirSCR}/Code02-2-2.OBS_ERA5_Format_RAW_CLM_ANO.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-3-1.OBS_GPCP_Regrid.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-3-2.OBS_GPCP_Format_RAW_CLM_ANO.ncl

echo ">>> STEP : 02_Process_MJO Post-processing for model and obs"
ncl ${DirSCR}/Code02-4-1.MOD_Make_VP200_DATA.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-4-2.OBS_Make_VP200_DATA.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-5-1.MOD_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-5-2.OBS_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

echo ">>> STEP : 02_Process_MJO FIG"
ncl ${DirSCR}/Code02-FIG-1.Mean_Variance.field.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-FIG-2.Power_spectrum.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-FIG-3.Wavenum_freq.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-FIG-4.MJO_propagation.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-FIG-5.MEOF.ncl
ncl ${DirSCR}/Code02-FIG-6.MJO_Index_ACC.RMSE.ncl

echo ">>> END 02_Process_MJO <<<"

```

※ Process-02 [계절내 변동성 및 MJO 오차 진단] 총괄 스크립트02_Process_MJO.csh의 [1. User Option]의 진단 툴 설치 경로와 모델 및 관측 입력자료 경로를 사용자 환경에 따라 작성

4.2 수행 방법

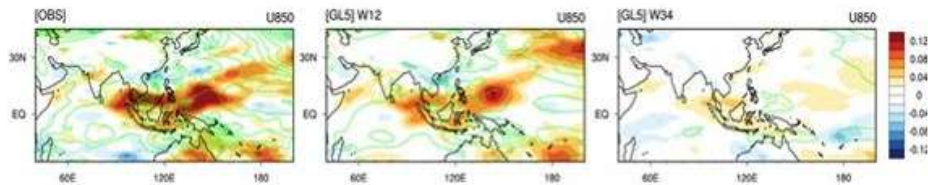
3) 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 틀 [02_Process_MJO.csh] 수행

```
> csh 02_Process_MJO.csh (or) qsub 02_Process_MJO.csh
```

기후예측모델 오차 특성 진단 틀의 적용 환경에 따라 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 과정 총괄 쉘 스크립트(02_Process_MJO.csh)는 C shell 명령어 (csh 02_Process_MJO.csh) 또는 PBS 명령어 (qsub 02_Process_MJO.csh)로 수행 가능하다. 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정 이전에 분석 변수에 대해 자료 처리 및 검증 과정의 Code01-1 ~ Code01-5 코드를 수행완료 한 상태에서는 Code02-1 ~ Code02-3 코드를 수행하지 않고 이전 단계에서 생산한 자료를 \${HOME}/Process-02/DATA/POST 경로로 복사하여 Code02-4 ~ Code02-5 후처리 코드 및 가시화 분석 단계만 수행 가능하다. 분석 자료 및 기간에 따라 총괄 스크립트 및 개별 코드의 수정이 요구된다.

4.3 결과

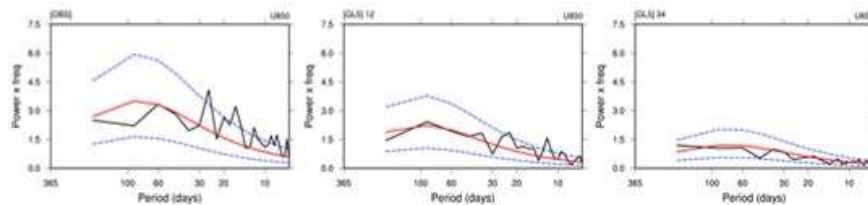
1) HINDCAST Mean Variance field



<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 MJO 오차 진단 결과 예시 FIG02-1 Mean Variance field>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 MJO 오차 진단(Process-02)의 결과 예시 그림이다. 적도 변동성의 공간 분포 특징을 분석하기 위해 관측 및 모델의 평균 공간분포(shading)와 변동성 공간분포(contour)를 제시하였다. 모델 분석 기준은 선행 1-2 주 평균(W12)과 선행 3-4 주 평균(W34)으로 설정하였다. 계절내 변동성 분석을 위해 20~70 일 band pass filter 를 적용하였다. 제시된 그림은 하층 동서 바람성분(U850)의 겨울철(11월 - 4월) 평균 및 변동성 공간분포이다.

2) HINDCAST Power spectrum

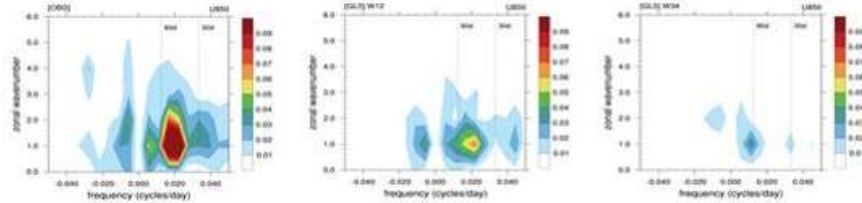


<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 MJO 오차 진단 결과 예시 FIG02-2 Power spectrum>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 MJO 오차 진단(Process-02)의 결과 예시 그림이다. 계절내 변동성이 크게 나타나는 적도 인도양 지역의 관측 및 모델의 파워 스펙트럼 분석 결과를 제시하였다. 모델 분석 기준은 선행 1-2 주 평균(W12)과 선행 3-4 주 평균(W34)으로 설정하였다. 제시된 그림은 하층 동서 바람성분(U850)의 겨울철(11월 - 4월) 파워 스펙트럼 결과이다.

4.3 결과

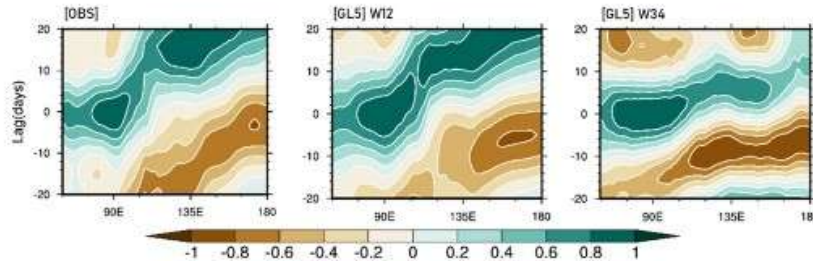
3) HINDCAST Wavenuber frequency



<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 MJO 오차 진단 결과 예시 FIG02-3 Wavenumber frequency>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 MJO 오차 진단(Process-02)의 결과 예시 그림이다. 관측 및 모델의 적도지역 파수 진동수 분석 결과를 제시하였다. 모델 분석 기준은 선행 1-2 주 평균(W12)과 선행 3-4 주 평균(W34)으로 설정하였다. 제시된 그림은 하층 동서 바람성분(U850)의 겨울철(11 월 - 4 월) 파수 진동수 결과이다.

4) HINDCAST MJO propagation

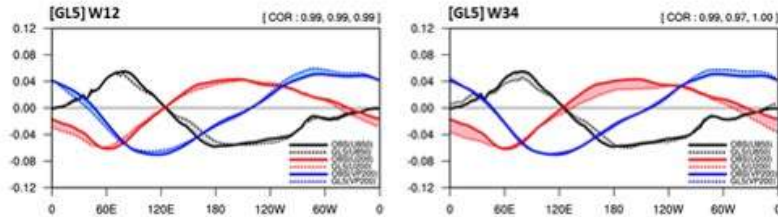


<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 MJO 오차 진단 결과 예시 FIG02-4 MJO propagation>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 MJO 오차 진단(Process-02)의 결과 예시 그림이다. 관측 및 모델의 지연 시간-경도 교차 상관 분석 결과를 제시하였다. 모델 분석 기준은 선행 1-2 주 평균(W12)과 선행 3-4 주 평균(W34)으로 설정하였다. 제시된 그림은 하층 동서 바람성분(U850)의 MJO 동진 형태를 선행 시간에 따라 비교한 결과이다.

4.3 결과

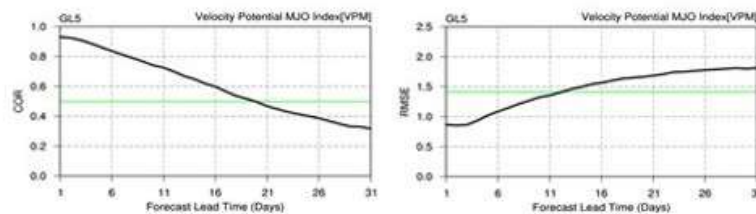
5) HINDCAST MEOF



<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 MJO 오차 진단 결과 예시 FIG02-5 MEOF>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 MJO 오차 진단(Process-02)의 결과 예시 그림이다. 분석기간의 적도 변동성을 살펴보기 위해 MJO 지수(Velocity Potential MJO Index, VPM) 분석에 사용되는 하층 동서 바람장(U850), 상층 동서 바람장(U200) 및 상층 발산장(VP200)의 다변량 직교함수 분석(Multivariate Empirical Orthogonal Function, MEOF) 첫 번째 모드 결과를 제시하였다. 관측 및 모델의 결과는 실선과 점선으로 각 분석 변수를 나타냈다. 모델은 선행 1-2 주 평균(W12)과 선행 3-4 주 평균(W34) 기준으로 제시하였고, 관측과의 차이를 면적(shading)으로 나타냈다.

6) HINDCAST MJO Index ACC RMSE



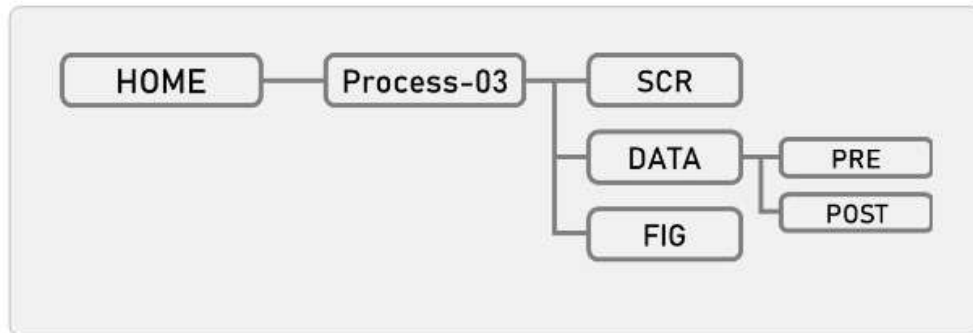
<기후예측모델 오차 특성 진단 툴 MJO 오차 진단 결과 예시 FIG02-6 MJO Index ACC RMSE>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 MJO 오차 진단(Process-02)의 결과 예시 그림이다. MJO 지수(Velocity Potential MJO Index, VPM) 예측성능(Bivariate Anomaly Correlation Coefficient, COR)과 오차(Bivariate Root Mean Square Error, RMSE)를 예측 일수에 따라 제시하였다.

5. 오차 특성 진단 툴 [동아시아 여름 몬순 진단]

5.1 구조 및 코드

1) 동아시아 여름 몬순 오차 진단 툴 구조



기상청 기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 디렉토리 구조를 위 도표에 나타냈다. 동아시아 여름 몬순 오차 진단 툴은 기상청 기후예측모델(KMA-GloSea)의 S2S 모델 제공 형식을 입력자료로 분석을 위한 후처리 과정으로 예측일 기준 선행 주수(Lead Week 1-4) 파일과 계절내 필터링 적용 분석을 위한 선행 주수 기준 일자료 파일을 생산한다. 모델 오차 진단을 위해 관측자료(ERA5, GPCP)의 자료 처리도 진행한다. 선행 주수(W12/W34) 기준 동아시아 여름 몬순 주요 현상인 강수 밴드의 변동성을 제시하고 예측성능/오차를 테일러 다이어그램으로 진단한다. 여름철 월별(6-8월) 강수와 하층 바람 성분의 공간 분포 및 평균 오차와, 계절내 필터링을 적용 동아시아 몬순 지역의 강수와 하층 동서 바람성분의 지연 상관을 선행 주수(W12/W34) 기준으로 진단한다. 또한 동아시아 여름 몬순 주요 지수(WNPMI, EAMI, WYI, GUOI, SAHI)에 대한 예측성능 및 오차 진단을 수행한다. [SCR] 경로에 관측 및 모델 자료 처리 코드가 위치하고 결과는 [DATA/PRE] 또는 [DATA/POST] 경로에 저장된다. 동아시아 몬순 오차 진단 가시화 코드는 [SCR]에 위치하고 결과물은 [FIG] 경로에 저장된다.

5.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

`$(HOME)/Process-03/SCR/`

[기후예측모델 및 관측자료 전처리]

`Code03-1-1.MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_ANO.ncl`

: S2S 제공 예측자료의 기후값 및 아노말리 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-03/DATA/POST`

`Code03-2-1.OBS_ERA5_Conv_RAW2DAILY.ncl`

: 6 시간 관측자료(ERA5) 일평균 자료로 변환 및 재격자화

- 결과 `$(HOME)/Process-03/DATA/PRE`

`Code03-2-2.OBS_ERA5_Format_RAW_CLM_ANO.ncl`

: 관측자료(ERA5)를 모델자료 형태로 기후값 및 아노말리값 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-03/DATA/POST`

`Code03-3-1.OBS_GPCP_Regrid.ncl`

: 관측자료(GPCP) 재격자화 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-03/DATA/PRE`

`Code03-3-2.OBS_GPCP_Format_RAW_CLM_ANO.ncl`

: 관측자료(GPCP)를 모델자료 형태로 기후값 및 아노말리값 산출 및 저장

- 결과 `$(HOME)/Process-03/DATA/POST`

[기후예측모델 및 관측자료 후처리]

`Code03-4-1.MOD_Make_LW_DATA.ncl`

: 모델자료 예측일 기준 선행 주별(LW1-4) 자료 생산 후처리 코드

- 결과 `$(HOME)/Process-03/DATA/POST`

5.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

\$(HOME)/Process-03/SCR/

Code03-4-2.OBS_Make_LW_DATA.ncl

: 관측자료 예측일 기준 선행 주별(LW1) 자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-03/DATA/POST

Code03-5-1.MOD_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

: 모델자료 선행 주별(LW1-4) 연속 일자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-03/DATA/POST

Code03-5-2.OBS_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

: 관측자료 선행 주별(LW1) 연속 일자료 생산 후처리 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-03/DATA/POST

[기후예측모델 동아시아 여름 몬순 오차 진단]

Code03-FIG-1.Prec_band.ncl

: 관측과 모델(W12, W34)의 동아시아 강수 시간-경도 분포 가시화 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-03/FIG

Code03-FIG-2.Prec_band_Taylor_diagram.ncl

: 모델(W12, W34)의 강수밴드 예측성능/오차(JJA) 테일러 다이어그램 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-03/FIG

Code03-FIG-3.Prec_UV850_Mean_Bias.ncl

: 관측과 모델(W12, W34)의 6-8 월 강수와 바람의 평균 오차 가시화 코드

- 결과 \$(HOME)/Process-03/FIG

5.1 구조 및 코드

2) 코드 설명

\$(HOME)/Process-03/SCR/

Code03-FIG-4.MJO_Prec_U850_Lag_Corr.ncl

: 관측과 모델(W12, W34) 필터링 적용 동아시아 강수와 하층 동서 바람의
지연 상관 가시화 코드

- 결과 **\$(HOME)/Process-03/FIG**

Code03-FIG-5.EASM_Index_TS.ncl

: 관측과 모델(W12, W34)의 동아시아 여름 몬순 지수 시계열 가시화 코드

- 결과 **\$(HOME)/Process-03/FIG**

Code03-FIG-6.EASM_Index_Skill.ncl

: 선행 시간(W1-4) 기준 모델의 동아시아 여름 몬순 지수 예측성능 및
오차 가시화 코드

- 결과 **\$(HOME)/Process-03/FIG**

5.2 수행 방법

1) 기후예측모델 오차 특성 진단 툴 설치

```
> cp Diagnosis_KMA-GloSea.tar ${HOME}
> cd ${HOME}
> tar -xvf Diagnosis_KMA-GloSea.tar
> ls
Diagnosis_KMA-GloSea.tar Process-01 Process-02 Process-03
```

2) 동아시아 여름 몬순 오차 진단 툴 [03_Process_EASM.csh] 사용자 설정

```
> cd ${HOME}/Process-03/
> vi 03_Process_EASM.csh
```

```
#!/bin/csh -f
#=====
#This is a batch job script. [ command : qsub]
#=====
#PBS -N 03.pro_EASM
#PBS -q normal
#PBS -l select=1:ncpus=12
#PBS -l place=excl
#=====

### 1. User Option #####
set sYear = 1991
set eYear = 2010
set sYearp = 1997
set sMon = 1
set eMon = 12

set sHYear = 1991
set eHYear = 2010
set sHYearp = 1997

set DirTOOL = /home/user/WORK2021/0.Manual/
set DirS2S = /ifs/apccgb/APCC_S2S/PRE/HINDCAST/Seoul/v2020/
```

```

set DirGPCP      = /ifs/apccdb/Observation/Grid/GPCP/Daily/
set DirERA5_LEV = /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/pressure/
set DirERA5_SFC = /ifs/apccdb/Observation/Reanalysis/ECMWF/ERA5/Daily/surface/

### 2. Set Directories #####
set DirSCR      = ./
set DirFIG      = ../FIG
set DirDATA     = ../DATA
set DirPRE     = ${DirDATA}/PRE/
set DirPOST    = ${DirDATA}/POST/

cat > 03.Parameter.User.ncl <<EOF

sYear  = ${sYear}
eYear  = ${eYear}
sYearp = ${sYearp}
sHYear = ${sHYear}
eHYear = ${eHYear}
sHYearp = ${sHYearp}
sMon   = ${sMon}
eMon   = ${eMon}
DirSCR = "${DirSCR}"
DirFIG = "${DirFIG}"
DirPRE = "${DirPRE}"
DirPOST = "${DirPOST}"
DirS2S = "${DirS2S}"
DirGPCP = "${DirGPCP}"
DirERA5_LEV = "${DirERA5_LEV}"
DirERA5_SFC = "${DirERA5_SFC}"

EOF

### 3. Run script #####
cd ${DirTOOL}process-03/SCR

echo ">>> STEP : 03_Process_EASM Pre-processing for model and obs"
ncl ${DirSCR}/Code03-1-1.MOD_Comp_ENS_Format_RAW_CLM_ANO.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-2-1.OBS_ERA5_Conv_RAW2DAILY.ncl

```

```

ncl ${DirSCR}/Code03-2-2.OBS_ERA5_Format_RAW_CLM_ANO.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-3-1.OBS_GPCP_Regrid.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-3-2.OBS_GPCP_Format_RAW_CLM_ANO.ncl

echo ">>> STEP : 03_Process_EASM Post-processing for model and obs"
ncl ${DirSCR}/Code03-4-1.MOD_Make_LW_DATA.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-4-2.OBS_Make_LW_DATA.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-5-1.MOD_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-5-2.OBS_Make_CONT_DATA_for_filtering.ncl

echo ">>> STEP : 03_Process_EASM FIG"
ncl ${DirSCR}/Code03-FIG-1.Prec_band.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-FIG-2.Prec_band_Taylor_diagram.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-FIG-3.Prec_UV850_Mean_Bias.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-FIG-4.Prec_U850_Lag_Corr.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-FIG-5.EASM_Index_TS.ncl
ncl ${DirSCR}/Code03-FIG-6.EASM_Index_Skill.ncl

echo ">>> END 03_Process_EASM <<<"

```

※ Process-03 [동아시아 여름 몬순 오차 진단] 총괄 스크립트03_Process_EASM.csh의 [1. User Option]의 진단 툴 설치 경로와 모델 및 관측 입력자료 경로를 사용자 환경에 따라 작성

5.2 수행 방법

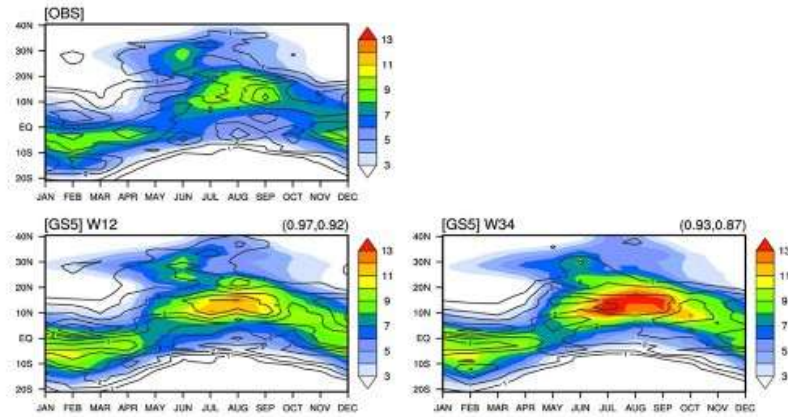
3) 동아시아 여름 몬순 오차 진단 툴 [03_Process_EASM.csh] 수행

```
> csh 03_Process_EASM.csh (or) qsub 03_Process_EASM.csh
```

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 적용 환경에 따라 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정 총괄 쉘 스크립트(03_Process_EASM.csh)는 C shell 명령어 (csh 03_Process_EASM.csh) 또는 PBS 명령어 (qsub 03_Process_EASM.csh)로 수행 가능하다. 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정 이전에 분석 변수에 대해 자료 처리 및 검증 과정의 Code01-1 ~ Code01-5 코드 또는 계절내 변동성 및 MJO 오차 진단 과정의 Code02-1 ~ Code02-5 코드를 수행완료 한 상태에서는 Code03-1 ~ Code03-5 코드를 수행하지 않고 이전 단계에서 생산한 자료를 \$(HOME)/Process-03/DATA/POST 경로로 복사하여 가시화 분석 단계만 수행 가능하다. 분석 자료 및 기간에 따라 총괄 스크립트 및 개별 코드의 수정이 요구된다.

5.3 결과

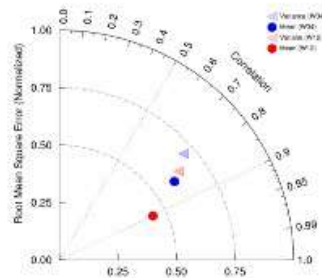
1) HINDCAST Precipitaion band



<동아시아 여름 몬순 오차 특성 진단 결과 예시 FIG03-1 Prec band>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 결과 예시 그림이다. 관측과 모델(W12/W34)의 동아시아 몬순 지역(100-140E) 월 강수 평균(Shading) 및 변동성(Contour)을 나타냈고, 모델 오른쪽 상단에 강수밴드의 연간/여름철 동아시아 지역의 공간상관계수(PCC)를 각각 제시하였다.

2) HINDCAST Precipitaion band taylor diagram

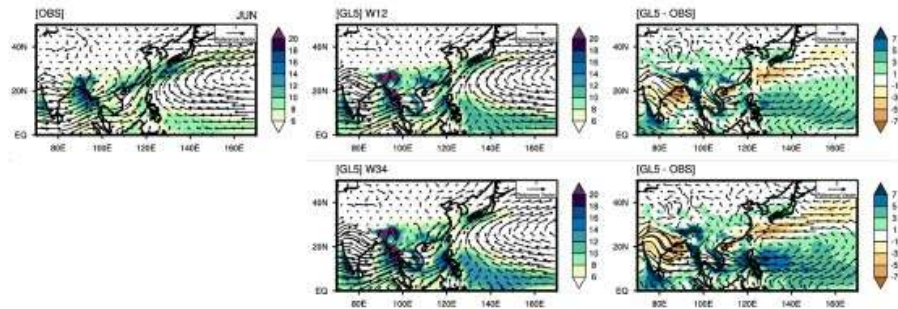


<동아시아 여름 몬순 오차 특성 진단 결과 예시 FIG03-2 Precipitation band taylor diagram>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 결과 예시 그림이다. FIG01-1 모델(W12/W34)의 동아시아 여름철 강수밴드의 예측성능(PCC)과 오차(RMSE)를 테일러 다이어그램으로 제시하였다.

5.3 결과

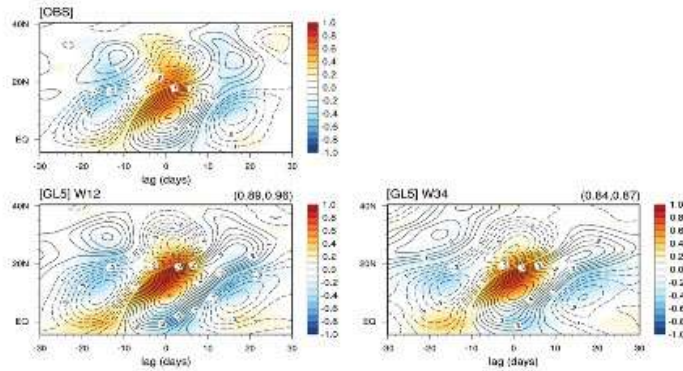
3) HINDCAST Precipitaion 850UV Mean bias



<동아시아 여름 몬순 오차 특성 진단 결과 예시 FIG03-3 Precipitation UV850 Mean bias>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 결과 예시 그림이다. 관측 및 모델(W12/W34) 동아시아 영역 여름철 월별 강수와 하층 바람의 분포와 평균 오차를 제시하였다.

4) HINDCAST Lag correlation Precipitaion & 850hPa U-wind

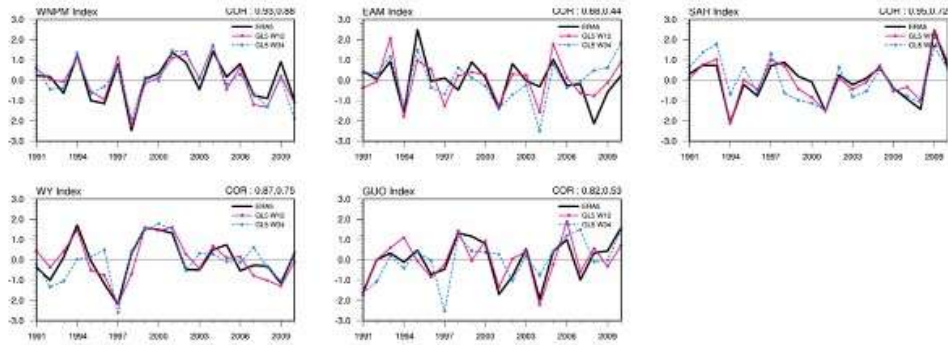


<동아시아 여름 몬순 오차 특성 진단 결과 예시 FIG03-4 Lag correlation Precipitation & U850>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 결과 예시 그림이다. 계절내 필터링 적용(20-70 days band pass filter) 관측 및 모델(W12/W34) 동아시아 영역(110-140E, 5-40N) 여름철 강수(Shading)와 하층 동서 바람 성분(Contour)의 지연 상관을 나타내고 각 변수의 공간상관계수(PCC)를 모델 오른쪽 상단에 제시하였다.

5.3 결과

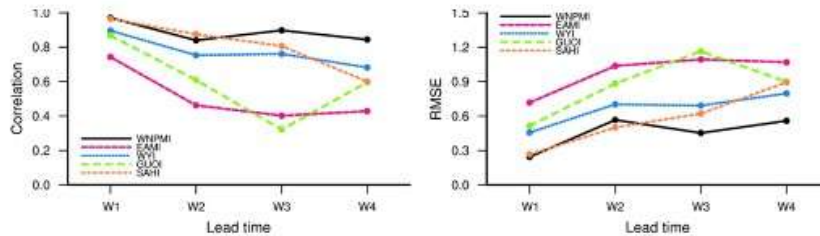
5) HINDCAST 동아시아 여름 몬순 지수 시계열



<동아시아 여름 몬순 오차 특성 진단 결과 예시 FIG03-5 EASM Index time series>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 결과 예시 그림이다. 관측 및 모델(W12/W34)의 동아시아 여름 몬순 주요 지수들의 시계열을 나타내고 선행 시간 기준 상관계수(CC)를 오른쪽 상단에 제시하였다.

6) HINDCAST 동아시아 여름 몬순 지수 예측성능 및 오차



<동아시아 여름 몬순 오차 특성 진단 결과 예시 FIG03-6 EASM Index skill>

기후예측모델 오차 특성 진단 툴의 동아시아 여름 몬순 오차 진단 과정(Process-03)의 결과 예시 그림이다. 선행시간 기준(W1-4) 모델의 동아시아 여름 몬순 주요 지수들의 예측성능(TCC) 및 오차(RMSE)를 제시하였다.