

기후 분과 / 기후 5-1

## ENSO-동아시아 원격상관의 계절내 변동 이해와 이를 통한 역학예측모델의 S2S 예측 성능 개선

박창현, 손석우

서울대학교 지구환경과학부

엘니뇨-남방진동(ENSO)은 겨울철 동아시아 지상 기온에 큰 영향을 미치므로 이를 이해하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 그러나 ENSO 자체의 예측성은 6개월까지 향상된 반면, ENSO-동아시아 원격상관의 예측성은 그에 미치지 못한다. 더욱이 이 원격상관은 겨울철 동안 12월에 강화되고, 1월에 약화되며, 2월에 다시 강화되는 뚜렷한 계절내 변동을 보인다. 본 연구는 이러한 ENSO-동아시아 원격상관이 인도양, 해양성대륙, 중태평양의 세 주요 열대 대류 인자로 설명될 수 있음을 주장한다. 세 인자를 이용한 다중선형회귀모델은 관측된 원격상관의 계절내 변동을 효과적으로 재현하며, 이를 통해 역학예측모델의 주요 오차원인이 열대 인자에 의한 원격상관 패턴임을 파악하였다. 나아가 복잡한 물리과정을 수정하지 않고도 예측 성능을 개선하기 위해, 역학예측모델의 열대 인자에 통계적 보정을 결합한역학-통계 하이브리드 예측모델을 개발하였다. 이를 기상청 현업 예측시스템인 GloSea6에 적용한 결과, ENSO 원격상관뿐만 아니라 동아시아 지상기온 실시간 예보에서도 성능 향상이 확인되었다.

**Keywords:** ENSO-동아시아 원격상관, 계절내 계절(S2S) 예측성, 세 주요 열대 대류 인자, GloSea6

## K-R2O in Action: Bridging Research and Operation through the APCC Testbed for Seasonal Climate Prediction

Soo-Jin Sohn<sup>1</sup>, Yoo-Bin Yhang<sup>1</sup>, Hae-Jeong Kim<sup>1</sup>, Jin Ho Yoo<sup>1</sup>, Johan Lee<sup>2</sup>,  
Yu-Kyung Hyun<sup>2</sup>, Beomcheol Shin<sup>2</sup>, Kyungsuk Cho<sup>3</sup>, Myongin Lee<sup>4</sup>,  
Kyong-Hwan Seo<sup>5</sup>, Sungsu Park<sup>6</sup>

<sup>1</sup>APEC Climate Center (APCC)

<sup>2</sup>National Institute of Meteorological Sciences (NIMS)

<sup>3</sup>Korea Meteorological Administration (KMA)

<sup>4</sup>Ulsan National Institute of Science & Technology (UNIST)

<sup>5</sup>Pusan National University (PNU)

<sup>6</sup>Seoul National University (SNU)

Given the importance of operation and development of seasonal climate prediction system, a customized research-to-operation process tailored for circumstances in South Korea (K-R2O) has been proposed to increase our capacity for resource-sharing and collaborative efforts for the improvement of a climate prediction model. It follows a stepwise process from planning and R&D to operation, through testbed, with different parties, such as Korea Meteorological Administration (KMA), National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), academies and APEC Climate Center (APCC), responsible for its components. The new aspect of K-R2O, testbed by APCC evaluates the techniques developed by the R&D parties in the near operational environment, and consequently leads the proper techniques to operationalization.

As practical application of this framework, the coupled data assimilation initialization, adjustment of sea-ice albedo, and application of new convection scheme developed by academies are tested and evaluated in APCC testbed to improve the current operational climate prediction system, the Global Seasonal Forecast System version6 (GloSea6), of KMA and NIMS. The case study of coupled initialization for 2022 shows that warm and wet biases over the tropical western Pacific for boreal summer in the current operation could be decreased, and better Madden-Julian Oscillation (MJO) and Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO) could be represented, based data assimilation. The appropriate adjustment of sea-ice albedo could in general lead the improvement in predicting Warm Arctic-Cold Eurasia (WACE) pattern and the variability of boreal winter temperature over the East Asia. The implementation of new convection scheme shows the limited reproducibility of convective precipitation and associated underestimation of water vapor dissipation, suggesting the further development. Some technical and scientific issues on these techniques for the operationalization are discussed. Finally, the plan for testbed and operationalization of the current operational prediction system, and the potential of the testbed for the new and next-generational climate predictions system will be addressed.

**Keywords:** Research-to-Operation (R2O), Testbed, GloSea6, Seasonal climate prediction

※ This work was funded by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program “APEC Climate Center for Climate Information Services” under Grant (KMA2013-07510). It was also supported by the supercomputing resources of KMA

기후 분과 / 기후 5-3

## 기후 모델에서의 비대칭 열대 수렴대 오차 원인 분석

최낙빈<sup>1,2</sup>, Xiao-Wei Quan<sup>3</sup>, Cristiana Stan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술원 지구환경도시건설공학부

<sup>2</sup>George Mason University, Department of Atmospheric, Oceanic and Earth Sciences

<sup>3</sup>University of Colorado, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences

본 연구는 High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP)와 NOAA Unified Forecast System (UFS) 모델에서 생산된 고해상도 기후 모의 결과를 활용하여 열대 수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 오차를 분석하였다. 분석은 ITCZ 오차가 극대화되는 겨울-봄 계절 기간을 대상으로 수행하였다.

고해상도 모델은 저해상도 모델(CMIP5, CMIP6)에 비해 ITCZ 모의 성능이 다소 개선되었으나, 여전히 대부분의 모델에서 ITCZ 오차가 뚜렷하게 나타나며 모델 간 차이도 크게 나타났다. 모델 간 ITCZ 오차는 경험적 직교 함수(Intermodel Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석을 통해 북반구와 남반구 간 비대칭적인 강수 오차로 분리하였고, 이에 대응하는 비대칭 ITCZ 지수를 정의하였다. 전반적으로 기후모델에서 나타나는 이중 ITCZ(Double ITCZ)는 북반구의 강수 과소 모의와 남반구의 강수 과다 모의로 인해 발달하는 경향을 보였으며, 이중 ITCZ가 나타나지 않는 모델은 반대로 북반구에서 강수가 과다 모의되는 경향을 보였다.

기존 연구에서는 해수면 온도(SST) 오차를 ITCZ 오차의 주요 원인으로 지목했으나, SST를 비교적 현실적으로 모의하는 일부 모델에서도 ITCZ 오차가 나타나 SST 외의 다른 요인의 존재를 시사한다. 또, 동태평양의 음의 SST 오차가 이중 ITCZ를 줄이는 것으로 나타나, 오히려 SST 모의의 개선이 ITCZ 오차를 강화하는 경향도 보였다.

본 연구는 가상 온도(Virtual Temperature)의 연직 구조와 남북 방향 구배가 ITCZ 오차와 더 밀접한 상관관계를 가짐을 제시하였으며, 특히 기온보다 수증기 분포가 ITCZ 오차에 더 크게 기여함을 확인하였다. 이러한 결과는 기후모델에서 나타나는 ITCZ 오차를 줄이기 위해 수증기의 연직 구조 모의를 개선할 필요가 있음을 시사한다.

**Keywords:** 지구시스템모델, 열대수렴대, 모델 오차 분석, HighResMIP, UFS

기후 분과 / 기후 5-4

# 개념모형을 이용한 미래 1백만년 전지구 해수면 변화 예측

전상윤<sup>1</sup>, 박태욱<sup>1</sup>, 박원선<sup>2</sup>, 김주홍<sup>1</sup>, 한영철<sup>1</sup>, 박기홍<sup>1</sup>

<sup>1</sup>극지연구소

<sup>2</sup>부산대학교 기후물리연구단

개념모형 (conceptual model)은 대서양 자오면 순환의 이력 현상 등의 기후변동성의 이해를 위한 유용한 도구로 활용되어 왔다. 이 연구에서는 Paillard (1998)에서 제안된 북반구 여름철 최대 일사량 변화에 따른 전지구 빙상량 변화를 모의하는 개념모형을 활용하여 과거 및 미래 100만년의 전지구 빙상량 변화와 그에 따른 전지구 해수면 변화를 모의하였다. 전지구 빙상량 변화 개념모형은 과거 빙하기-간빙기 주기 전환을 성공적으로 재현하며 과거 80만년간의 해수면고도 변화 복원자료와 0.78의 상관계수를 보인다. 5종의 SSP 시나리오와 Lord et al. (2016)의 대기중 온실기체 감소함수에 따른 미래 1백만년 대기중 이산화탄소 농도 시나리오를 활용한 미래 예측 결과 최초 빙하기 도래 시점은 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 시나리오에서는 약 5만 년 후, SSP3-7.0 시나리오에서는 약 12.5만 년 후, SSP5-8.5 시나리오에서는 약 16.9만 년 후로 예측된다. 약 35-40만년에는 SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에서는 다른 시나리오와는 달리 간빙기가 수만 년 이상 지속되며, 모든 SSP 시나리오에서 대기중 이산화탄소가 290 ppm 이하로 낮아지는 약 60만 년 이후에는 모든 시나리오에서 빙상량 및 해수면고도 변화가 수렴하는 경향을 보인다.

**Keywords:** 개념모델, 빙하기-간빙기 기후체제 전환, 미래 해수면고도 변화

※ 이 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) ‘고준위방폐물 처분을 위한 부지환경 장기변화 예측기술 개발(RS-2024-00419276)’사업의 일환으로 ‘부지구모 장기 안정성 평가를 위한 한반도 해수면 변동 개념모델 개발(RS-2024-00431368)’의 지원을 통해 수행되었습니다.

기후 분과 / 기후 5-5

## Seasonally evolving SST modes and predictability in the East Asian marginal seas

Junghee Yun<sup>1</sup>, Hajoon Song<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

<sup>2</sup>Division of Environmental Science & Engineering, Pohang University of Science and Technology

---

The East Asian marginal seas (EAMS) are among the most rapidly warming regions of the global ocean, exerting strong impacts on seasonal climate and regional extremes. This study investigates the predictability of sea surface temperature (SST) in the EAMS using a mode-based statistical framework. A season-reliant empirical orthogonal function (SEOF) analysis is applied to SST anomalies, identifying leading modes connected to large-scale teleconnection patterns and higher-order modes that mainly represent regional subseasonal variability. The leading modes reveal robust links to remote climate processes and provide generally high prediction skill across both short- and long-lead times in different seasons. By comparison, current dynamical forecast systems capture aspects of the SEOF-derived structures at short leads but show limited ability to reproduce these teleconnection-linked patterns at longer leads. These findings highlight the importance of teleconnection-resolving modes for regional SST predictability and suggest opportunities for improving seasonal prediction in the EAMS.

**Keywords:** East Asian marginal seas, sea surface temperature (SST), predictability, teleconnection, season-reliant empirical orthogonal function (SEOF)

기후 분과 / 기후 5-6

## Strong Supply - Demand Imbalances in Global Renewable Energy under Negative CO<sub>2</sub> Emissions

Young-Min Yang<sup>1\*</sup>, Jae-Heung Park<sup>2</sup>, June-Yi Lee<sup>3,4</sup>, Soon-Il An<sup>5</sup>, and Sang-Wook Yeh<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Environmental Engineering, Jeonbuk National University

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

<sup>3</sup>Research Center for Climate Sciences, Pusan National University

<sup>4</sup>Center for Climate Physics, Institute for Basic Science

<sup>5</sup>Department of Atmospheric Sciences and Irreversible Climate Change Research Center, Yonsei University

<sup>6</sup>Department Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, ERICA

\*Corresponding Author: Dr. Young-Min Yang, email address: ymyang@jbnu.ac.kr

---

Wind energy is central to global decarbonization strategies, yet its long-term reliability under climate change remains poorly understood. Using a large ensemble of Community Earth System Model 1.2 simulations with symmetric CO<sub>2</sub> positive and negative emission scenarios, we assess the asymmetry and hysteresis in global wind energy resource (WER). Our findings reveal that approximately 59% of global land areas exhibit irreversible changes in WER, where wind resources fail to return to baseline levels despite full CO<sub>2</sub> recovery. Strong hysteresis is identified in the Central United States, Argentina, South Australia, and Central Africa, driven by altered mainly surface warming and vegetation feedbacks. In contrast, regions such as Western Europe and South Asia show weak or reversed hysteresis. These results highlight a critical knowledge gap in energy-climate planning: wind energy potential may not rebound with CO<sub>2</sub> drawdown, challenging the assumption of resource reversibility and requiring adaptive energy policy and infrastructure strategies.

**Keywords:** Negative CO<sub>2</sub> emission, wind energy, supply-demand, wind speed.