

기후 분과 [P-025]

GP-PCA 기반 기후 에뮬레이터를 활용한 과거 100만 년 장기 기후 재현

이채연, 김주홍, 전상윤

극지연구소 해양대기연구본부

기후 변화 연구에서 장기간의 기후 변동성을 규명하기 위해서는 전 지구 기후모델 (Global Climate Model, GCM)을 활용한 기후 모의가 필수적으로 요구된다. 그러나 높은 시공간적 해상도와 복잡한 물리적 구조를 가진 상위수준 기후모델의 장기 기후 모의는 큰 계산 비용이 필요하여, 계산 자원에 맞게 기간을 한정해 모의하거나 복잡도를 낮춰 계산 비용을 줄인 기후모델로 모의하여 해결하기도 한다. 이러한 한계를 보완하기 위한 또 다른 접근법으로, 기후모델의 모의 결과를 확률적으로 근사해 신속하게 생산할 수 있는 통계 기반 기후 에뮬레이터(emulator)가 제안되었다. 제한된 수의 기후모델 앙상블 모의 결과로부터 도출된 모든 입력 강제력과 출력 결과를 기반으로 그 모의 특성을 확률적으로 근사한 에뮬레이터는 기후모델로 직접 모의하지 않은 입력 강제력 조건에서도 기후 상태를 신속하게 근사해 낼 수 있어 장기간의 기후변화 연구 시 기후모델 모의의 대안으로 채택 가능하다.

본 연구에서는 GP (Gaussian Process)를 기반으로 중간 복잡도 기후모델인 LOVECLIM의 전 지구 지표 기온 (surface air temperature, SAT)모의 특성을 근사하는 에뮬레이터를 구축하여, 과거 100만 년 동안의 전 지구 SAT 변화를 산출하였다. Lord et al. (2017)에서 제시한 다양한 외부 강제력 조건(이심률, 지구 자전축 기울기, 근일점 경도, CO₂ 농도)을 적용하여 LOVECLIM으로 평형 기후 실험을 수행하고, 이를 통해 에뮬레이터 학습에 활용할 전 지구 SAT 앙상블 자료를 준비하였다. 이러한 SAT 앙상블 자료에 PCA (Principal Component Analysis)를 적용하여 상위 주성분의 특성을 산출하고 GP로 에뮬레이션 한 후 주성분을 재구성하여 전 지구 SAT를 재현하는 GP-PCA 기반 에뮬레이터를 구축하였다. 구축 과정에서 에뮬레이터 성능에 영향을 주는 scale이나 nugget과 같은 하이퍼파라미터의 최적화 과정을 수행하여 성능을 개선하였다. 학습된 에뮬레이터는 LOOCV (Leave One Out Cross Validation)을 통해 성능을 검증하였고, 검증된 에뮬레이터에 과거 100만 년의 궤도 및 CO₂ 자료를 입력하여 SAT를 재구성하였다.

LOOCV 결과, 기존 LOVECLIM 모의 값과 비교했을 때 RMSE는 약 0.35로 나타나 안정적인 예측 성능을 확인할 수 있었으며, 산점도 분석에서도 유사한 경향을 보였다. 에뮬레이터를 이용하여 재구성한 과거 100만 년의 SAT 시계열은 기존 연구에서 보고된 SAT 변동성과 전반적으로 일관된 양상을 나타냈다. 본 연구에서 제시한 에뮬레이터는 SAT뿐만 아니라 다른 기후 변수 (해수면 온도, 강수량 등)의 재현/예측에도 적용 가능하며, 전 지구적 모의뿐만 아니라 특정 지역 단위의 기후 변동성 분석에도 활용할 수 있다.

Keywords: 기후모델(GCM), 에뮬레이터(emulator), 가우시안 프로세스(GP), 주성분 분석(PCA), LOVECLIM

※ 본 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.