

Improving land–atmosphere interactions in GloSea6 seasonal forecast system by implementing a multi–layer snow scheme

Eunkyo Seo^{1,2}, and Paul A. Dirmeyer²

¹Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University

²Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies, George Mason University

Traditional land surface models typically employ a zero– or single–layer snow scheme, which inadequately represents the insulating properties of thicker snowpacks, resulting in seasonal temperature cold and warm biases in winter and snow snowmelt seasons, respectively. This study assesses the impact of implementing a multi–layer snow scheme on reducing these biases within the Global Seasonal Forecast System (GloSea). We compare the latest version, GloSea6, which uses the multi–layer scheme, with its predecessor, GloSea5, which retains the zero–layer approach, over 24 years of retrospective forecasts (1993–2016). GloSea6 shows a significant improvement in simulating surface temperature and permafrost extent by delaying the snowmelt season by about a month. This delay reduces soil moisture depletion in spring, enhancing the partitioning of incoming energy into latent heat flux, which promotes evaporative cooling and reduces excessive land–atmosphere coupling. These advancements mitigate the near–surface warming bias during the summer season. Additionally, the accuracy of precipitation forecasts is enhanced, particularly in snowmelt regions, reducing errors in areas such as the Great Plains, Europe, and South and East Asia. This study demonstrates the worth of integrating the multi–layer snow scheme for more accurate seasonal forecasts of temperature and precipitation.

Key words: Multi–Layer Snow Scheme; Seasonal Forecast System; Land–Atmosphere Coupling

기상기후데이터를 이용한 남한 지역의 기후변화 추이 분석

하성철¹, 이두호², 강우협³, 추경수⁴, 김병식²

¹강원대학교 방재전문대학원 도시환경재난관리전공

²강원대학교 AI소프트웨어학과/방재전문대학원

³강원대학교 AI소프트웨어학과

⁴강원대학교 AI기후재난기술융합연구소

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 2022년 제6차 평가보고서(The Sixth Assessment Report, AR6)에 따르면 산업화 이전에 비하여 지구의 평균 온도가 약 1.1℃ 상승하였다고 밝혔다. 이러한 전 지구적인 온도의 변화는 기후변화라는 결과로 나타나고 있다. 1970년대 대한민국에는 극한호우(1시간 누적 50mm, 3시간 누적 90mm)가 연평균 9.7차례 정도였으나 2000년대에 들어 연 20차례를 넘어섰으며 이는 50년 전과 비교하였을 때 약 2.2배 증가한 수치이다. Hwang et al.(2024) 또한 지난 수십 년 동안 동아시아 대부분 지역에서는 지구온난화에 따라 극한 현상의 발생 빈도가 증가하였으며, 이와 같은 극치 값들은 많은 피해를 동반하였다. Choi et al.(2009) 이러한 상황 속에서 기후위기에 대한 효과적인 대응 및 완화를 위하여 기상기후데이터를 활용하여 기후변화의 정도를 정량적으로 표현하는 과정이 필수적이다. 기후변화의 정도를 정량화하기 위하여 세계기상기구(World Meteorological Organization)의 제안으로 구축된 기후변화 감지 및 지수 전문가 집단(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)은 총 27개로 구성된 극한기후지수를 제안하였으며, 이는 16개의 기온 관련 지수와 11개의 강수 관련 지수로 구성되어 있다. 본 연구에서는 기상기후데이터를 활용하여 남한 지역의 ASOS 95개 지점을 대상으로 2100년까지의 기후변화 추이 분석을 목적으로 한다. 분석을 위하여 기상청에서 국가 표준시나리오로 인정받은 SSP-RCP 기후변화 시나리오 중 화석연료에 대한 의존도가 높고, 도시 위주의 무분별한 개발을 가정한 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5 시나리오를 활용하였다. 과거 기후와 미래 기후를 구분하기 위하여 1990~2021년까지의 과거 관측 자료를 수집하였으며, 2021~2100년까지는 단기(2021~2050), 중기(2051~2080), 장기(2081~2100)와 같이 세 가지 구간으로 분류하여 각 구간의 추이를 분석하였다.

Key words: 극한기후지수, 남한, 기후변화, 기상기후데이터

※ 이 논문은 정부(기상청)의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

딥러닝 기반 한반도 지역의 1개월 기온확률 예측 모델 개발

이성균¹, 윤순조², 전종안¹

¹APEC기후센터 기후사업본부 예측기술과

²APEC기후센터 기후사업본부 기후분석과

계절 내 시간규모(Subseasonal timescale) 예측 분야는 약 15일에서 60일 이내의 기간을 예측하는 분야로, 수치모델 등 기존 예측 모델의 한계로 인해 인공지능과 같은 새로운 방법의 도입 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 한반도 지역의 1개월 기온확률 예측성을 개선하기 위해 딥러닝 기반의 일 단위 기온 예측 모델을 개발하고 1개월 기온확률 예측 모델 구축을 통해 계절 내 예측 분야에서 딥러닝 기술의 활용 가능성을 평가하였다. 딥러닝 기반 기온 예측 모델은 U-NET 아키텍처를 기반으로 양방향 ConvLSTM, 채널 어텐션 메커니즘 등 CNN (Convolutional Neural Network) 기반의 기법을 이용하여 설계하였다. 딥러닝 모델 학습자료는 1986~2015년 총 30년의 일 단위 ERA-5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5) 재분석자료의 T2M (2m temperature) 변수를 이용하여 학습 및 검증 데이터 세트를 구축하였으며 평가 데이터 세트는 2018~2021년 기간의 자료를 이용하여 구축하였다. 1개월 기온확률 예측 모델은 딥러닝 기반 일 단위 기온 예측 모델을 기반으로 순환예측 방법을 이용하여 한반도 지역의 3~4주 기온확률 예측이 가능하게 하였다. 예측 모델의 평가는 남한지역을 대상으로 기상청 지상기상관측소 자료, ECMWF S2S 모델 자료, 딥러닝 기반 1개월 기온 예측자료를 이용하여 3분위(평년보다 높음(Above Normal, AN), 평년과 비슷(Near Normal, NN), 평년보다 낮음(Below Normal, BN)) 확률자료를 생산하고, Heidke 기술 점수(Heidke Skill Score, HSS) 방법을 이용하여 1개월 기온확률 예측성을 비교 분석하였다. HSS 분석 결과, 딥러닝 모델의 예측성이 2018~2021년 전체 기간에서 ECMWF S2S 모델보다 3주와 4주 모두 다소 높게 나타났다. 본 연구에서 제안한 딥러닝 기반 1개월 기온확률 예측 모델은 한반도 지역의 1개월 기온확률 예측성을 개선하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

Key words: 딥러닝, 기후 예측, 한반도 기온확률 예측, 계절 내 예측, 순환예측 모델

※ 이 연구는 기상청 아태 기후정보서비스 및 연구개발(KMA2013-07510)의 지원으로 수행되었습니다.

딥러닝 전이학습을 이용한 전지구 해양 이산화탄소 분압 재분석장 생산

조동진¹, 함유근¹, 조현수¹, 김강민²

¹서울대학교 환경계획연구소

²주식회사 씨니항공 기상사업부

해양 이산화탄소 분압(Sea surface partial pressure of carbon dioxide; $p\text{CO}_2$)은 해양 내 이산화탄소 농도를 나타내는 지표로서, 전 지구 해양 탄소 흡수량 변화분석을 위해 필수적인 자료이다. $p\text{CO}_2$ 실측자료는 선박과 부표, 고정 관측소 등으로부터 다양하게 취득되지만, 그 수가 전 지구 해양 탄소순환 모니터링에 부족한 실정이다. 이러한 한계점을 극복하기 위해, 최근 물리적, 생물학적, 화학적으로 연관된 해양자료들과 인공신경망 기법을 활용하여 전 지구 해양 이산화탄소 분압 재분석장 자료를 생성하는 연구들이 활발히 수행되고 있다. 하지만, 제안된 신경망 기법들은 해양의 주변 공간 정보를 반영하지 못하는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 주변 공간 정보를 학습하는 이미지 기반 딥러닝 기법을 활용하여 전 지구 해양 이산화탄소 분압 재분석장을 생성하고자 하였다. 이때, $p\text{CO}_2$ 실측자료는 공간적으로 드물기 때문에 딥러닝 모델 학습에 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해, 기후모델 모의자료로부터 입력변수와 $p\text{CO}_2$ 간 물리 관계를 사전학습하고, 이를 재분석장과 $p\text{CO}_2$ 실측자료를 이용하여 미세조정하는 전이학습을 수행하였다. 딥러닝 기법으로 이미지 분야에서 많이 활용되는 U-Net을 사용하였으며, 기후모델로는 Community Earth System Model Version 2 Large Ensemble (CESM2 LE) 자료를 이용하였다. 입력변수로는 해수면 온도, 염분, 높이, 혼합층, 클로로필 자료와 대기 중 이산화탄소 몰분율 자료를 사용하였다. CESM2 LE 자료를 바탕으로 U-Net 모델의 사전학습 정확도를 평가한 결과, 기존 선행연구에서 제안된 인공신경망 기법보다 본 연구에서 제안한 U-Net 모델이 해양 $p\text{CO}_2$ 의 시공간적 패턴 모의 능력이 더 우수함을 확인하였다. 또한, 미세조정을 통한 실측 $p\text{CO}_2$ 자료의 10-fold 교차검증 결과, 기존 데이터 기반 $p\text{CO}_2$ 재분석장들보다 높은 정확도를 보여주었다. 특히, 본 연구에서 구축한 $p\text{CO}_2$ 재분석장이 주변 공간정보를 활용하여 안정적인 공간 패턴을 보여주었다. 이러한 결과들은 본 연구에서 제안한 U-Net 모델 및 전이학습을 통해 해양 $p\text{CO}_2$ 재분석장 산출 정확도 개선에 기여할 수 있음을 시사한다.

Key words: 해양 이산화탄소 분압, 딥러닝, 전이학습, CESM2 LE

베이지안 신경망 기반 한반도 겨울철 온도 앙상블 예측 시스템 개발

오설희¹, 함유근^{2,3}

¹서울대학교 AI 연구원

²서울대학교 환경계획연구소

³서울대학교 환경대학원 환경계획학과

앙상블 예측을 통해 예측의 불확실성을 정량화하는 것은 예보에 기반한 대책 마련에 필수적이다. 최근 딥러닝 기반의 다양한 기상/기후 예측 시스템이 제안되었지만, 대부분은 결정론적 예측에 머물러 있다. 따라서, 본 연구에는 베이지안 신경망을 활용하여 한반도 겨울철 온도 앙상블 예측 시스템을 개발하고, 기후 예측의 불확실성을 정량화하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 본 연구는 앙상블 학습을 위해 베이지안 앙상블 학습 알고리즘인 Bayes by Backpropagation (BBB)과 Monte Carlo Dropout (MC Dropout)을 적용하고, 제한된 관측 데이터를 효율적으로 활용하기 위해 Model-Agnostic Meta-Learning (MAML)을 활용하여 두 가지의 앙상블 예측 시스템 (MAML-BBB, MAML-MC Dropout)을 구축하였다. MAML-BBB 모델은 변분 추론을 통해 각 가중치가 사후 분포를 따르도록 학습하여 불확실성을 효과적으로 반영하고, MAML-MCdropout 모델은 학습 및 예측 과정에서 드롭아웃(dropout)을 사용해 뉴런을 무작위로 비활성화하여 불확실성을 추정한다. 두 모델을 비교한 결과, 에러-스프레드 (error-spread) 신뢰도 측면에서 MAML-BBB 모델이 MAML-MCdropout 모델보다 모든 예측 타겟 월에 대해 더 신뢰할 수 있는 앙상블 예측을 수행하는 것으로 나타났다. 반면, MAML-MCdropout 모델은 모든 예측 타겟 월에서 과신(overconfidence)하는 예측을 하는 경향이 있다. 이러한 결과는 BBB 기법이 MC dropout 기법보다 기후 앙상블 예측에 더 적합하며, 보다 신뢰할 수 있는 불확실성 평가를 제공할 수 있음을 시사한다.

Key words: 딥러닝 모델, 기후 예측, 앙상블 예측, 베이지안 신경망

Generation of state-dependent ensemble perturbations based on time-varying seawater density for GloSea5 initialization

Jeong-Gil Lee¹, Yoo-Geun Ham¹, Ji-Gwang Kim², and Pil-Hun Chang³

¹Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

²Department of Oceanography, Chonnam National University

³Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

In this study, we developed a state-dependent oceanic initialization system for initializing the ocean temperature and salinity in the Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5). Our algorithm addresses the limitation of stationary perturbations for Ensemble Optimal Interpolation (EnOI) by spreading observed information along isopycnal lines to create three-dimensional density snapshot states. The proposed algorithm, referred to as state-dependent ensemble-based EnOI (SD-EnOI), accounts for temporal changes in the background error covariance without relying on ensemble model simulations. To evaluate the quality of the oceanic initial conditions (ICs) produced by SD-EnOI, we compared them to those generated by the Global Ocean Data Assimilation and Prediction System version 1 (GODAPS1) operated by the Korea Meteorological Agency (KMA), over the period from January to December 2017. Our findings indicate that the thermal structure of SD-EnOI ICs is more realistic than that of GODAPS1, particularly in the tropical Pacific region. The strong warm bias in sea surface temperature (SST) and the shallow mixed-layer depth bias observed in the GODAPS1 ICs are absent in SD-EnOI. Due to the more realistic oceanic thermal structure present in the SD-EnOI ICs, retrospective forecast experiments showed a systematic reduction in climatological SST drift in the central-eastern Pacific for forecasts up to four lead months compared to using GODAPS1 ICs. This demonstrates the significant impact of the initialization process on the quality of dynamical seasonal forecasts.

Key words: Ocean, Data assimilation, EnOI, state-dependent, GloSea5