

기후 분과 [P-024]

강수 예측의 공간 선명도 개선을 위한 전역-국소 주파수 기반 복합 손실 함수

안수빈¹, 김영욱², 조동진³, 함유근⁴

¹한국외국어대학교 환경학과

²서울대학교 지구환경과학부

³서울대학교 환경계획연구소

⁴서울대학교 환경대학원 환경관리학과

강수는 기후 및 수문 예측에서 핵심 요소로, 강수의 정확한 예측은 홍수, 산사태와 같은 극한 재해 대응과 수자원 관리에 필수적이다. 이를 위해 수치예보모델 및 딥러닝 기반 예측 기법이 지속적으로 개발 및 적용되고 있으나, 여전히 블러(blur) 현상이 발생하여 강수장의 국소적·불연속적 특성을 충분히 재현하지 못하고, 이로 인해 공간적 선명도 및 극한 강수 강도의 예측력이 저하된다. 이러한 문제는 평균제곱오차(Mean Squared Error, MSE)와 같은 전통적 손실 함수가 주파수 영역에서 고주파 성분을 보존하지 못하여 결과를 과도하게 평활화하는 데에서 기인한다. 기존의 Fourier Transform 기반 Fourier Amplitude and Coherence Loss (FACL)은 위상 정합 및 진폭 재현을 분리하여 블러 완화에 일정한 효과를 보였으나, 전역 주파수 정보에 치중하여 국소 구조 보존에는 한계가 있었다.

따라서 본 연구는 이러한 한계를 극복하고 블러 문제를 완화하며, 강수 예측장의 공간적 선명도와 구조적 일관성을 동시에 개선할 수 있는 새로운 손실 함수를 제안하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 Dual Tree Complex Wavelet Transform (DTCWT)을 활용한 Wavelet Amplitude and Coherence Loss (WACL)을 도입하고, 이를 FACL과 결합한 FACL-WACL 복합 손실 함수를 제안하였다. 여기서 FACL은 전역적 주파수 정합을 담당하며, WACL은 국소 위상 및 진폭 특성을 반영하여 세부 구조 보존을 강화하도록 설계되었다. ERA5 재분석 자료 기반 U-Net 계열 모델을 학습한 결과, 제안한 FACL-WACL 손실은 기존 MSE 및 단일 FACL 대비 Fractions Skill Score (FSS) 및 Learned Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS) 등 주요 지표에서 향상된 성능을 보였다. 특히 국소 위상 정합의 개선이 전역 위상 정합으로 이어져 위상 안정성이 강화되었으며, 고주파 성분의 전역 진폭비 향상을 통해 세부 구조 보존 및 전역 주파수 충실도가 동시에 개선되었다. 이는 강수 예측에서 발생하는 블러 문제를 전역 및 국소 주파수 정보를 함께 고려한 손실 함수 설계로 효과적으로 완화할 수 있음을 보여주며, 강설이나 구름과 같이 국소적·불연속적 특성을 지닌 기상 및 기후 변수에도 확장 적용 가능할 것으로 기대된다.

Key words: 강수 예측, 딥러닝, 블러 완화, 손실함수, Fourier and Wavelet Loss(FACL-WACL)