

인공지능(AI) 기반 기후변화 연구



함유근 서울대학교 환경대학원

최근 AI 기법을 활용한 날씨예측 모형이 글로벌 IT기업들에 의해 개발되면서 전 지구 기상 및 기후 예측 성능은 최근 크게 향상되고 있다. 다수의 AI 기반 예측 모형들은 관측된 범위 내의 날씨 및 기후 변동에 대해서 매우 성공적인 추론을 한다는 사실이 증명되었다. 아직까지 완벽하지는 않지만 AI 기법이 단중기 기상 및 기후 예측을 넘어 지금까지 관측되지 않은 새로운 기후 상태 하에서의 지구 시스템 특성 변화까지 예측하도록 진화하고 있다. AI를 기반으로 한 기후변화 연구는 기존 역학 모델에 기반한 기후변화 연구를 보완 및 대체할 수 있는 신기술이 될 것으로 기대된다. 아울러 AI 기반 연구는 과학기술을 토대로 제공받은 극한 기후 현상의 변화 패턴의 정량적 예측치를 통해 국가 정책 결정자가 기후변화 정책 수립의 우선순위를 결정하는 데 핵심적인 역할을 할 수 있는 기법으로 장기적인 관점에서 지속적인 지원이 필요하다.

최근 AI(인공지능) 기술 개발이 활발해지면서 그 활용 범위가 확대되고 있다. AI(Artificial Intelligence)란 인간의 지능을 모방하거나 능가할 수 있는 기계를 만들기 위한 과학 및 기술의 분야를 총칭한다. 또한 기계가 학습하고 추론하며 문제를 해결하고, 의사 결정을 내리고, 자연어를 이해하며, 시각적 인식을 수행하는 등의 작업을 할 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 이러한 AI 기술은 최근 기상/날씨 예측 분야에까지 활용되면서 향후 기후변화 예측 정확도가 향상될 것으로 기대된다. GraphCast, Pangu-Weather, FourCastNet과 같은 인공지능 기반 전 지구 날씨 예측 모형의 개발은 기상 예측 성능을 한 단계 끌어올리는 데 있어 획기적인 성과를 이루고 있다. Google Deepmind사에서 개발한 GraphCast는 그래프 신경망을 활용해 지역적 기상 패턴의 복잡한 상호작용을 정밀하게 모델링하며, Huawei사의 Pangu-Weather와 상하이 AI Lab에서 개발된 'FengWu'는 Vision Transformer(ViT) 기법에 기반하여 기존 역학 모델들보다 높은 예측 정확도를 달성하고 있다. NVIDIA의 FourCastNet은 최근 업데이트된 두 번째 버전을 공개하여, 푸리에 변환(Fourier Transform) 기반의 뉴럴넷 시스템이 전통적인 수치 예보 모델보다 더 신속하고 정확한 예보를 제공할 수 있음을 보였다. 이러한 AI 기반 모델들은 기상 예측의 공간적 해상도를 크게 향상시키면서 극한 기상 현상의 조기 경보 능력을 강화하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 가장 성능이 뛰어나다고 알려진 역학 모델 기반 예측 시스템을 보유하고 있는 유럽 중기 기상예보센터(ECMWF)조차도 이러한 흐름에 발맞추어 최근 '그래프 신경망'(Graph Neural Net)에 기반한 자체 AI 기반 기상 예측 모델인 Artificial Intelligence/Integrated Forecasting System(AIFS)을 발표하였다.

기상/기후 예측 연구에의 AI 기법 도입

기상 예측에 있어 성공적인 도입과 함께 기후 연구에도 AI 기법이 활발히 도입되고 있다. 합성곱 신경망 기법과 Vision Transformer 기반 예측 시스템은 엘니뇨 지수 예측 성능을

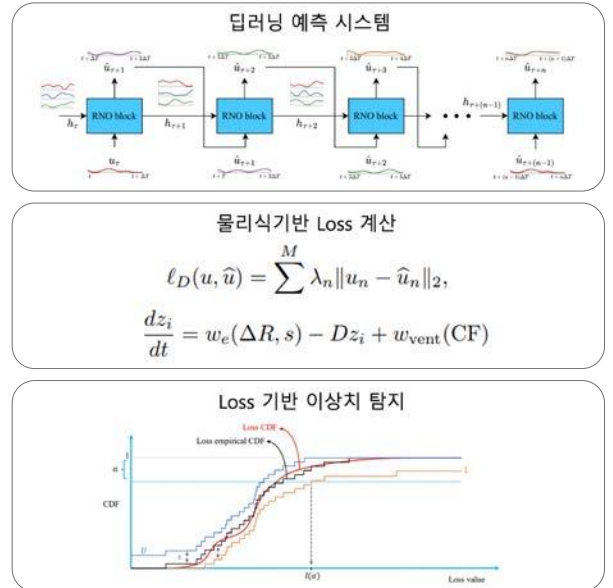
기존 1년 내외에서 18개월로 확장되었으며, multi-task 방식의 딥러닝 모형은 인도양 해수면 온도 예측 성능을 기존 3-4개월에서 7개월까지 확장됐다. 열대 해수면 온도 변동뿐 아니라 북극 해빙 예측 성능도 딥러닝 기반 통계 모형이 기존 역학 모형 기반 예측에 비해 유의하게 높은 성능을 보인다. 영국 Natural Environment Research Council(NERC)에서 개발한 U-Net 기반의 IceNet 예측 시스템은 25km 해상도의 해빙 면적 비율(Sea ice concentration) 데이터를 Openwater, Marginal ice, Full ice의 세 가지 카테고리로 나눈 카테고리 예측과 관련해 6개월 예측에서도 유의한 예측 성능을 보여 기존 역학 모형 예측이 2개월 예측에 대해서만 유의한 예측을 보이는 것에 비해 높은 성능을 보인다. 예측 성능의 향상은 선형 트렌드를 제거한 경우 해빙이 성장하는 시기인 10월~2월에 두드러지게 나타나지만 선형 트렌드를 포함한 경우에는 여름철에도 두드러지게 나타난다.

이처럼 기상 및 기후 예측에 AI 기반 예측 시스템이 큰 성공을 거두었지만 기후변화 연구에의 AI 기법 적용은 아직 걸음마 단계이다. 가장 큰 이유는 AI 기법들은 모두 기본적으로 통계 기법으로 학습 샘플이 존재하지 않아 학습하지 못한 상황에서는 일반화시키는 능력이 부족하기 때문이다. 즉, 기후변화 이후(약 2030~2050년 이후)의 기간에 대한 학습 샘플이 존재하지 않기 때문에 AI 기법들이 제대로 이를 학습할 수 없다는 것이다.

기후변화 연구에서 AI 기법 활용의 두 가지 개발 방향

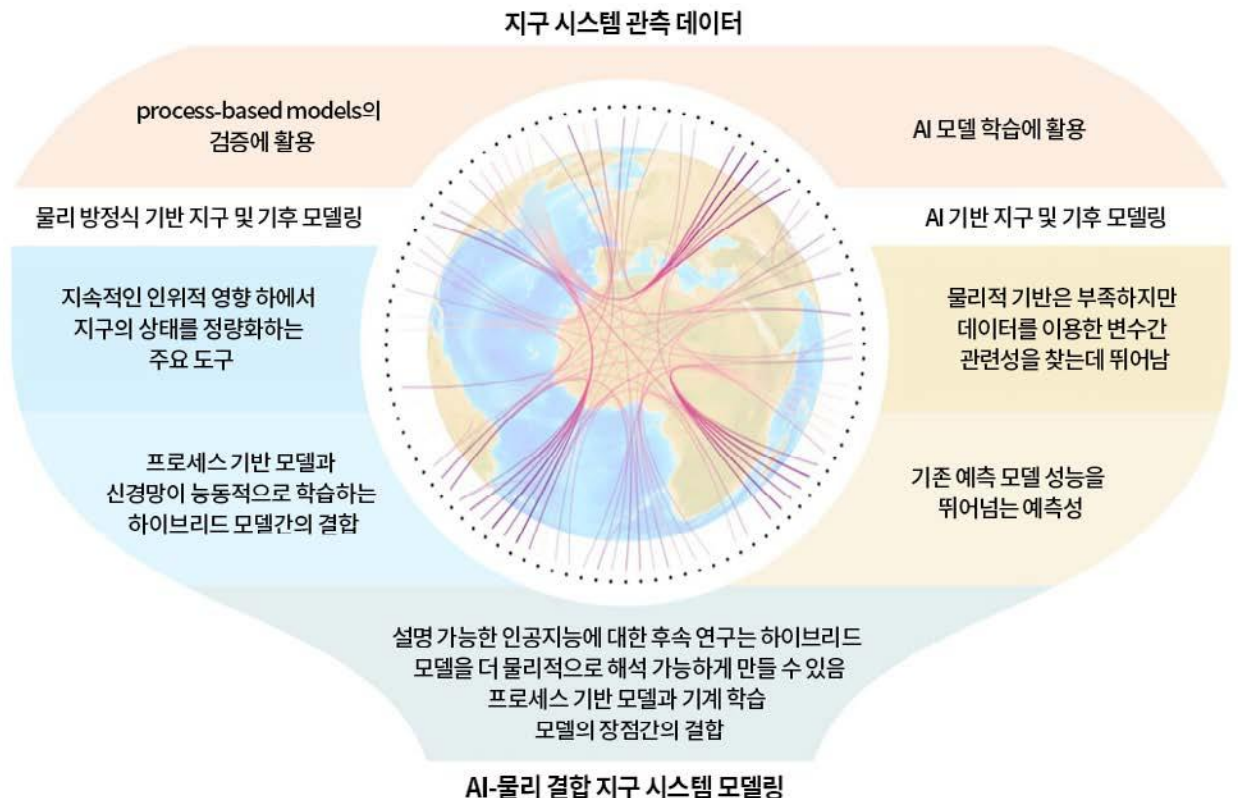
현재까지는 제한적이지만 두 가지 방향으로 연구가 이루어지고 있다. 첫째는 물리식에 기반하여 이상치를 탐지하는 것이다. AI 기반 모형들의 예측치가 기후변화 이전의 물리식에 만족하는 정도를 정량화하여 일정 수준 이하이면 기후변화로 인해 유의하게 영향을 받았다고 판단하는 식이다[1]. 이러한 방식으로 AI 기반 모형들이 비정상적이고 혼란스러운 동적 시스템의 진화에서 갑작스럽고 극적이며, 돌아올 수 없는 변화를 의미하는 기후 변화 변곡점(Tipping points) 예측에

활용되고 있다. 시스템의 변화를 함수 공간 간의 매핑을 학습하는 ‘순환 신경 연산자’(Recurrent Neural Operator: RNO)를 사용하여 학습한다. RNO를 변곡점 이전의 동적 과정만으로 훈련한 후 불확실성 기반 접근법을 사용하여 미래의 변곡점을 감지한다. 특히 보존된 양이나 편미분 방정식과 같은 물리적 제약에서 벗어나는 것을 모니터링하여 변곡점을 예측하는 대칭 예측(Conformal prediction) 프레임워크를 제안하여 이러한 급격한 변화를 예측할 때 엄격한 불확실성 측정을 가능하게 한다[그림1]. 이때 특정 물리식으로부터의 오차는 기후변화 변곡점으로 인해 시스템의 특성 자체가 바뀔 경우에도 발생할 수 있지만, 기후변화 이전의 데이터에 대해서도 AI 기반 모형의 단순 예측 오차로 발생할 수 있기 때문에 물리식의 충족 정도에 대한 불확실성을 정량화하여 이를 넘어서는 경우에만 기후변화 변곡점에 다다랐다고 판단한다. 두 번째는 기후변화 시나리오에 기반한 역학 모형 데이터를 학습 샘플로 활용하는 방법이다. 가장 대표적인 연구 결과로는 지구 온난화로 인한 일 강수량의 특성 변화를 탐지하기 위해 합성곱 신경망 기반의 시 기법을 활용한 것이다. 시 모델 학습을 위한 입력장으로 역학 모형의 과거 기간과 미래 기간, 총 1850년부터 2100년까지의 일 강수량의 전 지구 패턴을 사용하고, 출력값으로 연평균 전 지구 평균 지표 온도를 사용하였다. 이는 일 강수량과 지구 온난화 지표 간의 관련성을 갖는 딥러닝 모델을 구축한 것으로 이해할 수 있다. 딥러닝 모형 결과를



[그림 1] 기후변화 변곡점 예측 시스템의 예시. 딥러닝 예측 시스템의 예측값을 물리식 기반의 loss 함수에 적용하여 loss 값이 비이상적으로 커지는 경우 이상치를 탐지하는 방식으로, 본래의 시스템이라면 물리식 기반의 loss가 어느 정도의 범위 내 값을 가질 것으로 가정함

통해 전 지구 온도의 내부 변동성 상한을 초과하는 날은 1980년 이후 지속적으로 증가해 왔으며, 이는 지구 온난화가 일 강수량을 유의미하게 변화시켰음을 의미한다. 또한 설명 가능 인공지능 기법(explainable AI)을 통해 열대 동태평양과



[그림 2] ESM과 머신러닝을 결합하여 신경망 지구 시스템 모델링으로 나아가는 단계의 삽화. 왼쪽은 물리식이 결합된 하이브리드 AI 모델 개발을 의미하며, 오른쪽은 데이터 기반의 모델 개발 방향을 의미한다. Adapted from Irrgang et al.(2021)

미국 동부, 캐나다, 동아시아 지역에서 기상 시간 규모(10일 미만의 기간)의 강수 변동성 증가가 지구 온난화로 인해 가장 뚜렷하게 변화하는 강수장의 특징임을 규명하였다. 강수 변동성의 증가는 과거에 비해 비가 아예 오지 않는 날과 극한 강수가 발생하는 날 모두가 늘어나고 있음을 의미한다. 강수 변동성 증가는 입력장인 ‘강수’와 출력장인 ‘전 지구 평균 온도’ 간의 비선형 관련성이 있음을 의미하기 때문에 기존의 선형적인 기법으로는 탐지가 되지 않는다.

AI 기법으로 극한 강수 현상이 지구 온난화 때문임을 규명

최근 들어 극한 강수(혹은 폭우)의 발생 빈도는 전 세계적으로 늘어나고 그 강도 역시 증가하였으나 이러한 기상 재해의 증가가 기후변화로 인한 것인지는 명백히 밝혀진 바 없었다. 특히 지역적인 규모의 큰 자연적인 강수 변동으로 인해 상대적으로 짧은 기간의 강수 관측 데이터를 이용하여 기후변화가 극한 강수 발생 빈도 및 강도에 미치는 영향을 규명하는 것은 불가능하다고 여겨져 왔다. 그러나 이 연구를 통해 최근 증가하고 있는 극한 강수 현상이 지구 온난화로 인한 것임을 최초로 규명한 것이다. 본 연구에 제시된 결과와 방법론을 통해 전 세계적으로 기후변화 연구에도 AI 기법이 활발히 도입될 것으로 기대된다. AI 기법은 기존 기후변화 연구에 활용되던 기법으로 규명할 수 없었던 현상들을 새로이 규명할 수 있는 혁신적인 방법론이 될 것으로 기대하며, 이는 기후변화로 발생하는 복합적인 현상들의 변화를 이해하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

앞에서 설명한 기후변화 연구에의 AI 기법 적용을 위한 두 가지 개발 방향은 물리식을 제약 조건으로 추가하여 물리적 방정식에 기반한 AI 기반 모형과 데이터를 가능한 한 많이 확보하여 순수 데이터 기반 AI 모형을 개발하는 AI 기반 모델링 개발의 두 가지 주요 방향과 일맥상통하는 바가 있다[그림 2].

AI 기법은 단·중기 기상 및 기후 예측을 넘어 지금껏 경험해 보지 못한 수십 년 이후의 지구 시스템 특성 변화까지 예측하도록 진화해가고 있다. AI 기법을 이용한 기후변화 연구는 기존의 기법들이 하지 못했던 기후변화로 유발되는 비선형 지구 시스템 특성 변화를 성공적으로 탐지하여 과학기술에 근거한 각종 극한 기후 현상의 변화 패턴의 정량적 예측치를 제공할 수 있다. 예를 들어 폭염과 폭우, 태풍과 해일 등의 다양한 복합이상현상의 발생 빈도 변화가 기후변화로 인한 것인지를 탐지할 수 있을 것으로 기대되며, 이를 통한 국가 차원의 사회, 경제적 피해 규모 예측으로 정책 결정자가 기후변화 정책 수립의 우선순위를 결정하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 따라서 AI 기반 기후변화 연구에 대해 장기적인 관점의 지속적인 투자와 지원이 필요하다.

Reference

- [1] Liu-Schiaffini, M., Singer, C. E., Kovachki, N., Schneider, T., Azizzadenesheli, K., & Anandkumar, A.(2023). Tipping point forecasting in non-stationary dynamics on function spaces. arXiv preprint arXiv:2308.08794.
- [2] Irrgang, C., Boers, N., Sonnewald, M., Barnes, E. A., Kadow, C., Staneva, J., & Saynisch-Wagner, J.(2021). Towards neural Earth system modelling by integrating artificial intelligence in Earth system science. Nature Machine Intelligence, 3(8), 667-674.