

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 2-1

가까운미래기후 예측자료와 AI를 이용한 기후정보 활용기술

노준우^{1,2}, 정재희^{1,2}, 이정림³, 이조한³

¹(주)위즈아이

²어스앤어스

³국립기상과학원 기후연구부

급격한 기후변화로 인해 기상·기후 재해의 빈도와 강도가 증가하고 있으며, 이로 인해 위험기상 및 이상기상현상에 의한 사회적, 경제적 피해가 심화되고 있다. 기후위기 시대에 대응과 적응, 그리고 회복탄력성 확보를 위해 수년 규모의 가까운미래기후 예측 기반기술 개발이 시급하다. 위험기상 재난 대응, 에너지·물·식량 등 자원 관리, 사회 기반시설 및 안보와 같은 사회·경제적 정책 결정에 필수적으로 요구되는 분야로, 예측 정보의 가치가 매우 크다. 가까운미래기후 예측의 정확도를 높이기 위해 해양순환, 지면조건, 대기강제력 등 주요 기후 기작에 대한 이해와 처방이 필요하며, 이를 통해 가까운미래기후 예측 모형(DePreSys4) 개발 가능성이 제시된다. 본 연구에서는 가까운미래기후 예측 자료와 AI를 이용하여 가까운미래기후 시간규모의, 주요 도시 또는 목표 지역 공간규모의 기후예측 정보 산출을 위한 데이터 활용 기술과 모델 원형을 개발한다. 기후 데이터 활용 기술 기반으로 월 강수량, 월 폭염빈도, 월 한랭야일수, 월 해수면온도, 순별 일사량 예측 모델 원형이 개발된다. 일례로 월 폭염빈도 예측 모델의 경우, DePreSys4 예측 자료(양상블 10개), 22종의 기후지수, 남한지역 ASOS 44개소 지점 관측자료(38종 변수)와 AI를 이용한다. 학습(training) 기간은 1983년 1월부터 2015년 12월까지, 확인(validation) 기간은 2016년 1월부터 2017년 12월까지, 실험(test) 기간은 2018년부터 2021년 12월까지이다. 장단기 기억(LSTM; Long Short-Term Memory) 모델과 심층신경망(DNN; Deep Neural Network) 기반의 모델, 시간합성곱네트워크(TCN; Temporal Convolutional Network)와 심층신경망 기반의 모델을 각각 이용하고, 층과 각 뉴런 개수에 따라 깊은(Dense)/얕은(Shallow) 구조로 각각 설계하여 실험을 수행한다. 서울 지역, “Dense TCN+DNN”의 가까운미래기후 월 폭염 빈도와 관측 빈도 상관성은 0.92, 대구 지역, “Dense LSTM+DNN”의 그것은 0.87이다. 이외 각 기후 데이터 활용을 위한 AI 원형 모델을 소개한다.

Keywords: 가까운미래기후 예측 기반기술, AI, 데이터 활용기술

※ 이 연구는 기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용기술 개발(NRF-2012M1A2A2671851)의 지원으로 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 2-2

AI 기반 기법을 활용한 인천공항 시정 모의 비교 연구

변의용¹, 장은철¹, 전해영², 김정훈³

¹공주대학교 지구환경연구소

²연세대학교 대기과학과

³서울대학교 지구환경과학부

시정은 항공 교통 운영에 직접적인 영향을 미치는 중요한 기상 요소이며, 특히 해안에 위치한 인천국제공항은 해무와 안개로 인해 급격한 시정 악화가 빈번하게 발생한다. 이러한 저시정 현상은 항공기 이착륙 지연, 회항, 결항뿐 아니라 공항 접근 교통에도 심각한 차질을 초래하여 사회·경제적 영향이 크다. 따라서 공항 안전 확보와 운항 효율성 향상을 위해 정확한 시정 모의 및 예측 기법의 개발은 중요한 과제이다.

현재 국내외에서는 경험적 진단 방법에 기반한 시정 모의가 주로 활용되고 있으나, 저시정 사건을 충분히 재현하지 못하거나 절대값의 과대·과소 모의 문제가 발생하는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 인공지능(AI) 기법을 적용하여, 항공기상청(Aviation Meteorological Office, AMO) 방법, 미 공군(AFWA) 방법, Boudala 방법과 인공지능 기반 랜덤 포레스트(Random Forest, RF) 방법을 비교·평가하였다. RF 모형은 2001년부터 2024년까지 인천공항 자동기상관측시스템(AMOS) 자료를 학습에 활용하였으며, 풍향·풍속, 기온, 이슬점온도, 상대습도, 기압, 강수량, 이슬점차 등 다양한 기상 변수를 입력으로 사용하였다. 또한 환경부 산하 에어코리아(AIRKOREA)에서 관측한 에어로졸 자료를 추가 입력 자료로 포함하여, 시정 모의에 대한 잠재적 기여도를 평가하였다.

2025년 1월부터 12월까지의 관측자료를 대상으로 검증한 결과, AFWA 방법은 시정을 과대 모의하여 저시정 사건을 적절히 재현하지 못하는 경향을 보였으며, Boudala 방법은 AMO 방법과 유사한 특성을 나타냈다. 반면 RF 기반 방법은 특히 늦겨울에서 초여름에 해당하는 저시정 경보 집중 발생 기간 동안 기존 경험적 진단 방법보다 높은 모의 성능을 보였다. 본 연구는 다양한 진단 방법과 AI 기반 기법의 장단점을 비교하고, 향후 수치예보모델 출력 자료와 연계하여 공항 시정 예측을 고도화할 수 있는 기반을 제시한다.

Keywords: Visibility, Random Forest, Aerosol, Incheon Airport

※ 국문 : 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(KMI2022-00410)의 지원을 받아 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 2-3

FourCastNet을 활용한 인공지능 기반 고해상도 지역 바람 예측 모델 개발

김동훈¹, 문일주¹, 조민수²

¹제주대학교 태풍연구센터

²한국과학기술정보연구원

최근 전지구 대기대순환 AI 기상모델이 다수 개발되었으나, 지역-국지 순환모델은 여전히 개발 단계에 있다. 본 연구에서는 FourCastNet의 자원 최적화 버전인 FourCastNeXt를 활용하여 경계조건이 반영된 지역 바람 예측모델(rFCNx)을 개발하고, 1km 고해상도에서 10분 간격의 3시간 미래 예측을 구현하였다. 기존 FourCastNet은 ERA5 40년 자료로 전지구 순환을 학습했으나 지역 적용에 한계가 있어, 본 연구에서는 WRF 고해상도 지역모델 자료로 재학습을 수행했다. WRF outer(5km)/inner(1km) domain의 초기장 및 경계장을 입력으로, 1km inner domain의 예측장을 출력으로 사용하여 학습 데이터를 구성하고, 지역 모델의 경계조건을 효과적으로 반영했다. 연구 결과, rFCNx는 WRF의 예측 패턴을 매우 효과적으로 재현하며, 복잡한 지형 조건에서도 지역적 특색을 우수하게 포착했다. 경계조건을 반영하지 않는 기존 지역 예측모델 대비 경계 영역 정보 손실을 줄이고 일관성 있는 예측을 달성했다. 특히 기존 WRF 모델 대비 계산 시간을 90% 이상 단축하면서도 비교할만한 예측 정확도를 보이며, 3시간 예측에 단 1분 이내 시간만 소요된다. 본 모델은 산불 확산 예측 등 재해·재난 상황에서 준실시간 고해상도 바람장 정보를 제공하여 신속한 의사결정을 지원할 수 있으며, AI 기반 지역 기상 예측 모델의 실용화 가능성을 입증하는 중요한 기술적 토대를 마련했다.

Keywords: FourCastNet, FourCastNeXt, AI-based Regional Weather Prediction Model, AI-based Boundary Condition, Rapid nowcasting for wildfire operations

※ 이 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 위탁연구개발과제와 국가초고성능컴퓨팅센터로부터 초고성능 컴퓨팅자원과 기술지원(KSC-2025-CRE-0300)을 받아 수행된 연구성과임.

Tropical Cyclone Climatology in NeuralGCM

Muchan Kim, Daehyun Kim

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Deep learning–based atmospheric models are emerging as efficient alternatives to conventional numerical models, offering reduced computational cost while retaining skill in representing key atmospheric features. NeuralGCM is a hybrid model that combines a traditional dynamical core with neural network–based physical parameterizations. We assess NeuralGCM’s ability to reproduce tropical cyclone (TC) activity using a 36-member ensemble of 40-year (1981–2020) simulations. TC tracks are objectively detected with a tracking algorithm that identifies surface low-pressure systems collocated with warm-core structures. Despite NeuralGCM’s relatively coarse horizontal resolution ($\sim 2.8^\circ$), it captures the spatial distribution of TC genesis and track density. NeuralGCM also reproduces the basin-dependent seasonal cycle of TC frequency and simulates realistic interannual variability of TC frequency. We find regional biases in TC genesis in NeuralGCM, with genesis underestimated in the eastern North Pacific and North Atlantic, and overestimated in the South Pacific. NeuralGCM demonstrates substantial skill in simulating the climatology and variability of TCs across seasonal, interannual, and inter-basin scales. Our results suggest that this new hybrid deep learning–based atmospheric model is a powerful tool for TC research.

Keywords: Tropical cyclone, Deep-learning weather forecasting model, NeuralGCM, Seasonal cycle, Interannual variability

인공지능(AI)모델을 활용한 기상청 단·중기 예보지원 현황 및 전망

신현철, 박소라, 박세영, 국현훈, 최원준, 하종철, 김동준

기상청 수치모델링센터 수치모델개발과

AI 기술의 획기적인 발전과 함께 그동안 제한적으로 사용되어 왔던 AI 기술이 기상예보의 전 분야에 걸쳐 전방위적으로 활용되고 있다. 특히 ECMWF가 AI 모델 연구에 박차를 가하면서 전세계적으로 기존 수치예보모델보다 향상된 성능을 가진 AI모델들이 경쟁적으로 개발되고 있다. 기상청은 2024년부터 한국형모델(KIM), 영국 통합모델(UM), 유럽중기예보센터모델(ECMWF)을 초기장으로 하는 인공지능모델 3종(GraphCast, Pangu-Weather, FourCastNet)을 시험 운영하고 있다. GraphCast와 Pangu-Weather의 경우 수치예보모델들에 비해 전반적으로 우수한 성능을 보였으나 이러한 성능향상에도 불구하고 집중호우 등 극단적인 기상현상에 대해서는 수치예보모델 대비 다소 과소모의하는 경향을 보여주었다. 2025년 5월에는 KIM 전구모델의 해상도가 12km에서 8km로 개선됨에 따라 인공지능모델도 8km 전구모델의 초기장을 사용하도록 변경되었다.

KIM-전구양상블과 GraphCast를 연계한 AI-양상블도 예보에 활용되고 있다. 2024년에는 32km 해상도의 KIM-전구양상블의 26개 멤버의 초기장으로부터 GraphCast를 수행하는 방식으로 AI-양상블을 구축하였고 2025년에는 24km 해상도의 전구양상블 51개 멤버의 초기장으로부터 AI-양상블을 구성하였다. 멤버수와 초기장 해상도 증가를 통해 예측성능이 전반적으로 개선되는 효과가 나타났다.

AI 모델이 전반적인 검증스코어에서는 수치예보모델에 비해 우수한 성능을 보이기는 하지만, 구체적인 위험기상 사례에 있어서 강도 측면에서 과소모의 경향을 보이는 만큼 실제 예보활용에 있어서 어떤 하나의 기술을 배타적으로 사용하기보다는 각각의 장점을 융합하는 방향으로 다양한 연구가 진행될 필요가 있다.

Keywords: 한국형모델, KIM-전구양상블, GraphCast, Pangu-Weather, FourCastNet

※ 이 연구는 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술개발』 과제 (KMA2018-00721)의 일환으로 수행되었습니다.

Differentiable Discontinuous Galerkin Methods using Neural Ordinary Differential Equations based on Source Term Correction

Shinhoo Kang

Department of Computer Software, Korea University Sejong Campus

Computational advances have fundamentally transformed the landscape of numerical simulations, enabling unprecedented levels of complexity and precision in modeling physical phenomena. While these high-fidelity simulations offer invaluable insights for scientific discovery and problem solving, they impose substantial computational requirements. Consequently, low-fidelity models augmented with subgrid-scale parameterizations are employed to achieve computational feasibility. We introduce an end-to-end differentiable framework for solving the compressible Navier--Stokes equations. This integrated approach combines a differentiable discontinuous Galerkin (DG) solver with a neural network source term. Through the implementation of neural ordinary differential equations (NODEs) for network parameter optimization, our methodology ensures continuous interaction with the governing equations throughout the training process. We refer to this approach as NODE-DG. This hybrid approach combines the accuracy of numerical methods with the efficiency of machine learning, offering the following key advantages: (1) improved accuracy of low-order DG approximations by capturing subgrid-scale dynamics; (2) robustness against nonuniform or missing temporal data; (3) elimination of operator-splitting errors; (3) total mass conservation; and (4) a continuous-in-time operator that enables variable time step predictions, which accelerate projected high-order DG simulations. We demonstrate the performance of the proposed framework through numerical examples.

Keywords: neural ordinary differential equations, machine learning, Navier-Stokes equations, discontinuous Galerkin method, differentiable solver

※ This work was supported by Korea University Grants (No. K2411041, K2414071, K2425851).