

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 4-1

## Pseudo Global Warming 실험을 이용한 미래 기후의 열대저기압 모의에 대한 고찰

조우진, 차동현

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

기후온난화로 극한기상 발생이 잦아지며 열대저기압(TC) 활동의 변화가 보고되고 있다. 전구모델의 낮은 수평 해상도 때문에 TC 강도가 과소 모의되고, 직접 변화를 해석하기 어려워 기존 연구는 잠재생성지수(GPI)나 최대잠재강도(MPI) 등 간접 지표에 의존해 왔다. 이를 보완하기 위해 전구 시나리오 기반 미래 증분을 고해상도 지역모델에 주입하는 Pseudo Global Warming (PGW) 접근이 널리 사용되지만, 증분 변수를 해수면 온도(SST)로 한정하는 경우가 많다. 그러나 시나리오에 따른 기온(T)과 수증기(비습, q) 변화는 대기 기둥의 부력 및 불안정도에 직접 영향을 미친다. 본 연구는 북서태평양 TC 사례들에 대해 (1) SST만 반영한 PGW와 (2) SST와 대기 열역학 변수(T·q)를 함께 반영한 PGW를 수행하여 비교하였다. 그 결과, SST만 반영한 실험에서는 지표 잠열·현열 플럭스를 과도하게 증대하여 하층 부력 및 불안정성을 크게 키워 TC 강도를 과대 모의하였다. 반면 대기 열역학 변수와 SST 모두 고려한 실험에서는 시나리오별 해수면 기인 플럭스 증가는 상대적으로 완만했고, 하층 비습 증가와 대기 전체의 온난화에 따른 대기 불안정도 증대가 TC 강도 증가의 주된 요인으로 나타났다. 따라서 SST만을 증분으로 사용할 경우 미래 TC 강도 해석이 과장될 수 있으며, PGW 실험 설계 시 SST와 함께 대기 열역학(T·q) 증분을 적용하는 것이 바람직하다.

**Keywords:** Pseudo Global Warming, 열대저기압, 증분

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 4-2

# 대기-해양 결합자료동화 및 딥러닝을 활용한 이례적 태풍 진로 예측 향상: 2022년 태풍 힌남노 사례 연구

이성빈<sup>1</sup>, 송상근<sup>1,2</sup>, 문수환<sup>1</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공

<sup>2</sup>제주대학교 지구해양학과

전 세계적으로 가장 파괴적인 자연재해 중 하나인 태풍은 우리나라에 막대한 경제적·사회적 피해를 초래하며, 기후변화로 인해 그 강도와 발생 양상은 점차 심화되는 추세를 보이고 있다. 특히 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고 해안선이 복잡한 지리·지형적 특성으로 인해 태풍에 취약하다. 따라서 재해를 줄이고 효과적으로 대응하기 위해서는 태풍의 진로와 강도를 정확하게 예측하는 것이 필수적이다. 이러한 배경 속에서 수치모델을 이용한 태풍 예측 연구가 과거부터 지속적으로 수행되어 왔으나, 고해상도의 대기-해양 상호작용을 충분히 반영하지 못하거나 수치모델 초기장의 불확실성 등으로 인해 예측 성능에 한계가 존재한다. 최근에는 태풍 예측 향상을 위해 인공지능 기법을 활용한 연구도 활발히 진행되고 있으나, 높은 계산 비용과 태풍 생성 및 발달에 영향을 미치는 다양한 환경 조건 간의 복잡한 상호작용을 충분히 반영하지 못하는 과제가 여전히 남아있다. 본 연구에서는 일반적인 태풍과 달리 이례적인 경로를 보이며 우리나라에 큰 인명 및 재산 피해를 초래한 2022년 태풍 힌남노 사례를 대상으로, 대기-해양 결합모델에 결합자료동화를 적용한 실험(DA)과 적용하지 않은 실험(BASE)의 수치모의 결과를 비교·분석하였다. 결합모델에 자료동화 적용 시, 결합모델의 배경장을 이용하여 자료동화하는 약결합자료동화(Weakly coupled data assimilation) 기법을 적용하여 초기장 불균형 현상을 최소화하고자 하였으며, 이에 따른 태풍 진로, 강도와 기상예측의 개선효과를 분석하였다. 또한 다양한 딥러닝 기반 모델(CNN, U-Net+LSTM)을 수행하여 이를 수치모델 결과와 함께 비교함으로써, 수치모델 결과와 딥러닝 모델에 따른 태풍 예측정확도를 평가하였다. 전반적으로, 결합자료동화를 적용한 DA 실험의 태풍 진로 및 강도 결과가 BASE 실험에 비해 관측값에 더 가깝게 모의되었으며, 주요 기상요소(SST, 풍속, 기압 등) 또한 DA 실험에서 더 낮은 오차를 보였다. 이 외에도 DA 실험결과와 딥러닝 기반 모델 실험 결과들을 비교하였을 때, DA 실험결과에 비해 딥러닝 기반 모델들이 태풍 힌남노의 발달 과정에서의 진로 및 강도를 더 정확하게 예측하였으며, 그 중 U-Net+LSTM 딥러닝 모델에서 가장 뚜렷하게 향상된 결과가 나타났다.

**Keywords:** 대기-해양 결합자료동화, 딥러닝, 태풍 힌남노, 태풍 진로 및 강도, 기상요소

※ 이 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02217872, 한국형 연안재해 정밀예측 기술개발)

## 열대저기압의 급강화 모의에 기여하는 구름미세물리 방안 속 요인

조하은<sup>1</sup>, 차동현<sup>1</sup>, 박진영<sup>3</sup>, 이민규<sup>2</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

<sup>2</sup>한국에너지기술연구원

<sup>3</sup>한국과학기술연구원

열대저기압의 주요 에너지원은 구름 내에서 발생하는 잠열 방출이며, 이는 구름미세물리 과정과 그에 따른 구름 역학에 크게 좌우된다. 예컨대, 구름미세물리 과정에서 사용되는 수적에 따라 모의되는 열대저기압의 강도가 달라진다. 특히, 급격하게 발달하는 열대저기압의 예측 정확도는 구름미세물리 과정에 크게 의존하며, 이로 인해 구름미세물리 과정은 수치예보 모델에서 불확실성을 야기하는 요인 중 하나로 손꼽힌다. 본 연구는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 이용하여 급강화 열대저기압 모의에 있어 구름미세물리모수화 방안에서 불확실성을 야기하는 요인을 규명하고, 강화 과정에서 나타나는 물리적 메커니즘을 이해하고자 하였다. 이를 위해 WSM6 class graupel과 P3 1-category 구름미세물리 방안을 적용하여, 예단하는 대기 수적의 종류와 수적 변화 방식에 따른 열대저기압 강화 예측 성능을 비교하였다. 실험 결과, 보다 많은 얼음상의 수적을 만들어내었던 P3 방안에서 상층의 잠열 방출을 활발히 이끌어 급강화하는 열대저기압의 강화 속도 및 최대 강도를 현실적으로 모의한 것으로 나타났다. 이는, 잠열 방출이라는 미시적 과정이 대류로 이어지는 연쇄적 과정을 적절히 모사할 때, 급격히 강화하는 열대저기압의 모의 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

**Keywords:** 급강화, 열대저기압, 구름미세물리모수화, 잠열

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 4-4

## 인공지능 기반 전 지구 기상모델을 활용한 열대저기압 앙상블 예측 및 후처리 보정

정혜윤, 임서현, 문일주, 김동훈

제주대학교 해양기상학협동과정/태풍연구센터

인공지능 기반 전 지구 기상모델의 도입은 열대저기압과 같은 극심한 피해를 유발하는 기상 현상의 예보 정확도를 크게 향상시켰다. 방대한 기상 자료로 학습된 인공지능 기반 모델은 전통적 수치예보 모델보다 높은 정확도를 보이면서도 계산 속도가 훨씬 빨라, 실시간 또는 준실시간 응용에서의 잠재력을 보여준다. 그러나 각 인공지능 기반 모델은 모델 구조와 학습 방법의 차이로 인해 지역과 시기에 따라 고유한 편향과 오차 특성을 나타낸다. 이러한 문제를 해결하기 위해 앙상블 모형화 접근과 정교한 후처리 기법의 필요성이 점차 커지고 있다. 본 연구에서는 FourCastNet v2, Pangu-Weather, GraphCast, FuXi, FengWu, Aurora 등 주요 인공지능 기반 전 지구 기상모델의 열대저기압 경로 및 강도 예측 결과를 평가하였다. 각 모델의 예측을 체계적으로 분석하여 지역적·시간적 오차 패턴을 규명하였고, 그 결과를 바탕으로 가중 앙상블 평균, 신뢰도 기반 선택적 앙상블, 기계학습 기반 후처리 보정 등 최적화된 앙상블 방법을 개발하였다. 과거 열대저기압 사례에 대한 검증 결과, 제안한 앙상블 및 후처리 보정 기법은 개별 모델의 예측에 비해 예보 정확도를 일관되게 향상시키는 것으로 나타났다.

**Keywords:** 인공지능 전 지구 기상모델, 태풍 경로 예측, 앙상블 기법, 후처리 보정

※ This study was conducted with the support of the '2025 Coastal Inundation Map Production' project by the Korea Hydrographic and Oceanographic Agency of the Ministry of Oceans and Fisheries.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 4-5

## GloSea6 모델의 북서태평양 태풍 동반 강수 모의 평가

김은지<sup>1</sup>, 차동현<sup>1</sup>, 현유경<sup>2</sup>, 이조한<sup>2</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

<sup>2</sup>국립기상과학원 기후연구부

북서태평양 연안 지역은 전 세계적으로 태풍 상륙이 빈번한 지역 중 하나이며, 태풍에 대한 피해에 취약하다. 태풍은 강풍, 집중호우, 폭풍 해일을 동반하며, 과거 대비 태풍 영향에 의한 피해가 점점 심각해지고 있다. 특히 도시 지역으로 상륙 시 동반되는 집중호우는 심각한 홍수를 유발하여 인명 및 경제적 피해를 심하게 증가시킨다. 따라서 태풍의 강수 특성을 정확히 파악하는 것은 재해 대비와 피해 저감에 필수적이다. 아울러 2주에서 2개월까지의 계절내-계절(Subseasonal-to-Seasonal, S2S) 예측은 태풍 강수 대비를 위한 효과적인 대응에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 1993-2016년 기간 동안 수행된 Global Seasonal Forecast System version 6 (GloSea6) 모델의 21개 앙상블 hindcast 자료를 활용하여, 6-9월 북서태평양 지역에서 태풍 동반 강수의 계절 예측성을 평가하였다. 우선 GloSea6가 모의한 태풍 강수와 비태풍 강수의 비율을 Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) 자료와 비교, 분석하여 태풍 관련 강수 재현성을 검증하였다. 또한 태풍의 강도와 구조가 강수에 미치는 영향을 살펴보고, 태풍 진로와 강도, 환경장, 내부 구조 모의의 한계 등 다양한 요인을 고려하여 태풍 강수 오차 원인을 분석하였다.

**Keywords:** 태풍 강수, 계절내-계절 (Subseasonal-to-Seasonal: S2S), GloSea6

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 4-6

## 태풍 초기 조건 개선을 위한 4차원 자료동화 적용 역학적초기화 기법 개발

김경민, 차동현

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

수치모델을 통한 태풍 모의 오차는 물리 모수화, 모델 해상도, 해양-대기 상호작용 등 다양한 요인에 의해 발생할 수 있다. 또한, 초기 조건의 불확실성으로 인해 태풍 강도와 진로 모의에 큰 오차가 발생한다. 태풍 모의의 정확성을 높이기 위해 초기 조건 보정이 필수적이며, 이에 따라 기존 볼텍스 초기화 기법을 개선하였다. 본 연구는 기존에 제안된 역학적 초기화(Dynamical Initialization, DI) 기법을 4차원 자료동화(Four-dimensional Data Assimilation, FDDA)를 통해 개선하여 초기 조건을 보정하고, 북서태평양 태풍 모의 성능을 향상시키는 것을 목표로 한다. 새롭게 개발된 DI와 FDDA 결합 기법(DI with Data Assimilation, DIDA)은 기존 DI 기법의 절차를 기반으로 하며, 세 번째 사이클 실행 과정에서 볼텍스 크기와 강도를 보정하고 Weather Research and Forecasting (WRF) FDDA를 추가 적용하는 점이 특징적이다. 크기 보정은 Joint Typhoon Warning Center (JTWC) Best Track 자료를 활용하여 최대풍속반경과 강풍반경(약 17 m/s 이상)을 기준으로 수행하였다. 강도 보정 또한 JTWC Best Track 강도를 반영하며, 최대풍속반경에서 강풍반경까지 차등적으로 적용되도록 설계되었다. 크기 및 강도 보정 이후, 보정된 볼텍스가 안정적으로 반영되도록 세 번째 사이클에서 WRF FDDA를 적용하였다. 초기화 수행 결과, DI 기법은 관측과 유사한 강도 초기화를 위해 여러 차례 사이클 실행이 필요한 반면, DIDA 기법은 세 번의 사이클만으로 강도를 효과적으로 초기화할 수 있었다. 또한, 72시간 모의에서 DIDA 기법이 적용된 태풍 모의의 진로 및 강도 오차는 DI 기법 기반 태풍 모의와 유사한 수준을 보였다. 따라서, 본 연구에서 제안한 DIDA 기법은 DI 기법 대비 더 적은 사이클 횟수로 초기 태풍 강도를 효율적으로 초기화할 수 있으며, 태풍 모의 성능 역시 기존 DI 기법과 유사한 수준을 보였다.

**Keywords:** 열대저기압, 태풍 모의, 지역모델, 역학적초기화 기법, 4차원 자료동화