

EOF 기반 UFS P8의 CONUS 지상기온 예측 오차 주요 모드와 원인

최낙빈

울산과학기술원 지구환경도시건설공학부

본 연구는 NOAA Unified Forecast System Prototype 8 (UFS P8) 모델에서 생산된 고해상도 연장 중기 예측 (35일)에서 나타나는 북미 본토 (CONUS) 지역 대규모 지상기온 예측 오차 패턴을 분석하였다.

대규모 지상기온 예측 오차 패턴은 모델과 재분석자료간의 편차를 경험적 직교 함수 (Intermodel Empirical Orthogonal Function, EOF)를 통해 주요 오차 패턴을 추출하였으며, 각각 북반구 여름철과 겨울철에 대해 수행하였다.

그 결과, 여름철에는 동서 쌍극자 형태의 대규모 패턴이 지배적으로 나타났고, 겨울철에는 북미 본토 지역에 전반적으로 영향을 주는 패턴과, 동서 쌍극자 형태 패턴의 두 가지 패턴이 주요하게 나타났다. 각 모드의 PC (Principal Component)를 오차 지수로 활용하여 각각의 대규모 오차 패턴의 원인을 찾고자 하였다.

먼저 여름철 오차 패턴은 적도 중태평양 지역의 대류 활동으로부터 발달하는 상층파동을 모델에서 잘 모의하지 못하는 경우에 나타나는 것으로 보이며, (1) 모델이 열대 대류를 잘 예측하지 못하는 경우와 (2) 모델이 상층 파동의 전파를 잘 모의하지 못하는 경우로 나누어 볼 수 있다. 그중 모델에서는 태평양 중위도 아열대 제트가 약하고 연직 시어가 강해 상층 파동의 전파가 잘 모의되지 않아 북미 본토 지상 기온 오차가 나타나는 것으로 보인다.

겨울철 첫 번째 모드는 북극 척치해의 기온이 북미로 전파되는 원격상관 패턴과 높은 관련성을 보이는데, 모델이 척치해 기온 예측에 실패하면서 원격상관이 잘 모의되지 않는 것으로 보인다. 두 번째 모드는 여름철과 유사한 쌍극자 형태의 패턴을 가지고 있으며, 모델에서는 열대 대류의 영향이 유의하게 나타나고 있으나 재분석 자료에서는 여름과는 다른 기작을 보이고 있어 모델이 계절에 따라 달라지는 상층 파동 기작을 잘 재현하지 못하는 것으로 판단된다. 또한 모델은 국지적인 관점에서도 북미 동부 지역의 지면-대기 상호작용의 계절적 변동을 재현하지 못하는 것으로 나타났다.

본 연구는 EOF 기반의 주요 오차 패턴 추출 기법으로 모델의 대규모 오차 패턴 원인을 규명하여 향후 예측성 향상과 모델 개선 방향을 제시한다.

Keywords: 지구시스템모델, 연장 중기 예측, 모델 오차 분석, UFS

신진과학자 / 신진과학자 2

북반구 정체파가 극한기후 발생에 미치는 영향과 기후모델에서의 모의 성능

박민규

울산과학기술원 지구환경도시건설공학부

정체파 (Stationary waves)는 계절 동안 거의 일정하게 유지되고 해마다 되풀이되는 대규모 대기 순환 패턴으로, 동서 방향으로 뚜렷한 기압 차이를 보이는 특징을 갖고 있다. 그로 인해 정체파는 온도와 강수량 등의 지역 기후에 큰 영향을 미치며, 정상파의 공간적 변화는 지역에 따라 극한기후 발생 빈도와 강도를 증감시킬 수 있다. 본 연구에서는 미국 해양대기청 산하 GFDL에서 개발한 SPEAR 모델의 대규모 앙상블 시뮬레이션을 활용하여, 북태평양 상층 대기에서 일어나는 정체파와 일시파(transient waves) 사이의 파동 간섭(interference)이 북미 겨울철 한파와 극한 강수 현상 발생의 빈도를 조절시키는 중요한 요인임을 보이고, 이러한 관계성이 미래 기후변화 시나리오에서 악화될 것임을 제시하였다. 북태평양에서 일별 대기 순환 이상이 기후 평균 상태와 위상이 일치할 때, 미국 서부 지역으로 향하는 열과 수증기 수송이 급격하게 줄어들어 미국 전역에서 한파 발생 빈도가 증가하고 서부 지역에서는 극한 강수 발생의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 미래기후 시나리오에서는 북태평양 동부 상층에서의 기후 평균 정체파가 약화되고 공간적으로는 북동쪽으로 확장하여, 파동 간섭과 북미 극한기후 발생 간의 관계가 변형되고 전반적으로는 약화된다. 위 결과는 CMIP6에 참여하는 최신 세대 기후모델들에서도 확인되었으며, 북태평양 정체파의 구조적 변형이 열대 태평양 해수면 온도의 추세 패턴에 따라서 좌우됨을 밝혔다. 본 연구는 지역적 파동 간섭의 변화 예측이 미래 지역 기후 변동성을 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다.

Keywords: 정체파, 기후모델, 극한기후, 기후변화 시나리오, 패턴 효과

신진과학자 / 신진과학자 3

수도권 지역의 깊은 대류 발달에 도시가 미치는 영향: 국지성 소나기 사례 모델링 연구

홍성호, 백종진

서울대학교 지구환경과학부

도시와 그 주변에서 나타나는 다양한 국지적 강제력들은 서로 상호작용하여 도시 강수를 야기하는 폭풍을 발달시킬 수 있다. 이 연구에서는, 우리나라 수도권 지역에서의 산발적인 대류성 폭풍 발달에 도시가 미치는 영향을 살펴보고 도시-지형 상호작용의 영향이 이에 어떻게 기여하는지 탐구하였다. 이를 위해, 수도권 지역의 토지 이용도와 지형을 고려한 도시 양상블 실험과, 수도권 지역에서 도시, 도시 열섬 효과, 도시 거칠기 효과, 지형을 제거한 추가적인 양상블 실험을 Weather Research and Forecasting 모형을 이용해 수행하였다. 서울의 강수량은 도시의 영향으로 크게 증가하였으며, 이는 도시 열섬이 찬공기 유출 전선면에서의 온도 경도를 증가시켜 상승기류를 강화함으로써 대류 세포들이 강한 폭풍으로 발달하도록 도왔기 때문이다. 도시 열섬에 의해 약한 도시풍이 발달하였지만, 이 강수 사례에서는 강수에 결정적인 역할을 수행하지 않았다. 한편, 도시 거칠기 효과의 경우 강수량에 미친 영향은 미미하였으나 강수 진행을 약 1시간 지연시켰다. 도시-지형 상호작용의 영향은 서울에서 강한 폭풍이 발달하는데 기여하여 서울 강수량을 증가시켰다. 이는 수도권 동쪽 산에서 발달하는 대류에 의해 유도되는 순환이 서해안 부근에서 해풍에 의한 아침 강수 발달을 억제하여 따뜻한 공기를 보존하였기 때문이다. 보존된 따뜻한 공기는 이후 해풍을 따라 서울로 이동하여 늦은 오후 폭풍 발달을 강화하였다.

Keywords: 도시 강수, 도시 효과, 도시 열섬, 도시 거칠기, 도시-지형 상호작용

기계학습을 이용한 이중편파 기반 대류계 강수 미세물리 특성 분석

신규희¹, 이규원^{1,2}

¹경북대학교 대기원격탐사연구소

²경북대학교 BK21 위험기상 교육연구팀, 대기과학과

우적크기분포(Drop Size Distribution, DSD)의 특성변수 산출은 강수 미세물리를 이해하는데 있어 필수적인 과정이다. 기존의 DSD 특성변수는 이중편파 변수를 이용한 다항식 또는 멱급수 회귀식을 기반으로 산출되어 왔으나, 이러한 접근법은 복잡한 비선형 관계에 취약하다는 한계를 가진다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 기계학습(Machine Learning, ML) 기반의 DSD 특성변수 산출 알고리즘을 개발하였다. 기계학습은 종속변수와 독립변수 간의 복잡한 비선형 관계를 효과적으로 처리할 수 있다는 장점을 지닌다.

본 연구에서 제안한 ML 알고리즘은 이중편파변수와 감쇠를 사용하여 이중 모멘트 스케일링 정규화 접근법 (보편특성수농도 (N_0)와 보편특성직경(D_m))에 기반한다. 기계학습 모델은 2차원 광학우적계를 통해 얻은 DSD 자료를 기반으로 산란모의 된 이중편파레이더 변수들로 학습되었으며, 앙상블 트리 기반의 랜덤포레스트(RF)와 XGBoost, 신경망 기반의 다층 퍼셉트로(MLP) 기법을 적용하였다.

검증 결과, 제안된 ML 기반 알고리즘은 기존의 경험적 방법보다 더 나은 성능을 보였으며, 특히 RF 모델이 가장 우수한 성능을 나타냈다. RF 모델을 X 밴드 이중편파레이더에 적용한 결과, 기존 방법보다 시공간적으로 더 연속성 있는 DSD 산출 결과를 나타냈다. 또한, 라그랑주 관점에서 대류셀의 이동을 추적하여 발달, 성숙, 소멸 단계에 따른 DSD의 시공간적 진화를 분석하였다. RF 기반으로 산출된 DSD는 시공간적 연속성을 보였으며, 강수 미세물리 과정의 진화 특성을 정량적으로 해석하는데 유용하게 활용될 수 있다.

Keywords: 기계학습, 우적크기분포, 이중편파레이더, 대류셀, 라그랑주

※ 본 연구성과는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2025-25434314)

자유 대기 난류 특성과 발생 원인, 항공 난류로의 적용

고한창

연세대학교 대기과학과

본 논문은 자유 대기에서의 난류 특성과 발생 원인에 대한 이해를 심화하고, 이를 항공 난류에 적용함으로써 궁극적으로 안전하고 효율적인 항공 운항에 기여하는 것을 목표로 한다. 대기 난류는 미량 기체의 혼합, 운동량과 열의 확산, 강수 입자의 성장에 중요한 역할을 하며, 항공 운항 시 승객의 안전과 편안함에도 영향을 미친다. 본 연구는 전지구적으로 운영되는 고해상도 라디오존데 관측자료(HVRRD)를 활용하여 Thorpe 방법을 기반으로 난류를 도출하였다. HVRRD는 연직 5-10 m 해상도를 가지며, 주기적으로 제공되는 현업 관측자료로서 추가적인 비용 없이 난류 특성을 신뢰성 있게 도출할 수 있다.

난류의 전 지구적 특성을 분석한 결과, 난류는 성층권보다 대류권에서 더 강하게 나타나며, 대류권계면 아래 약 6 km 부근에서 최대치를 보이고, 그 위로는 급격히 약화된다. 계절별로는 두 반구 모두 여름철 대류권 난류가 강하게 나타나며, 성층권에서는 봄철에 난류가 뚜렷하다. 지역적으로는 대류권에서 남태평양과 남아프리카, 성층권에서는 동아시아와 남아프리카 지역에서 강한 난류가 나타나는 것으로 분석되었다. 고해상도 재분석 자료 및 수치 실험을 통해 Thorpe 방법으로 도출된 난류의 주요 발생 메커니즘을 규명하였고, 6년(2012-2017) 기간의 재분석 자료 분석 결과 난류는 주로 약한 정적 안정도와 대류 환경에서 발생하였다. 수치 실험을 통한 사례 연구에서는, 발달하는 대류가 대류권계면을 상승시켜 대류권 상부의 정적 안정도를 낮추고, 그로 인해 흐름의 뒤집힘을 유발하기 쉬운 조건이 형성되었다. 이 과정에서 구름 상단 인근의 부력 경사가 소용돌이도를 강화하며, 이는 다시 부력 경사에 양의 되먹임으로 작용하여 파동의 증폭 및 난류 발생으로 이어졌다.

마지막으로, 도출된 난류 자료는 상업 항공기의 난류 관측 및 기상청 및 유럽중기예보센터(ECMWF)의 두 항공 난류 예측 시스템의 성능 평가에 활용되었다. 그 결과, 기상청과 유럽중기예보센터 시스템 모두 HVRRD 기반 난류보다는 항공기 관측 난류에 대해 더 높은 예측성을 보였으며, 기상청 예측 시스템이 ECMWF보다 높은 예측성을 보였다. 또한, 항공기 관측자료를 활용한 두 가지 개선 방안을 통해 ECMWF 시스템의 예측 성능이 향상됨을 확인하였다. 본 연구의 결과는 자유 대기 난류에 대한 이해 증진과 함께, 항공 안전 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 고해상도 라디오존데 관측자료, 대기 난류, 항공 난류, 항공 난류 예측시스템

※ 이 연구는 기상청 차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather, KMI2022-00410)의 지원으로 수행되었습니다.