

How Well Does the Climate Model Simulate the North Pacific Blocking Dynamics?

Jaeyoung Hwang^{1,2}, and Seok-Woo Son¹

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

²School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology

The dynamics of North Pacific (NP) winter blocking and its representation in climate models are investigated by calculating the quasi geostrophic geopotential tendency budget. The budget analysis reveals that NP blocking develops mainly through the quasi barotropic process, which reinforces the NP ridge from the lower troposphere to the upper troposphere by low frequency vorticity fluxes. Although relatively minor, high frequency eddies and their interactions with low frequency eddies also support the barotropic development of NP blocking. Additionally, the development of NP blocking is enhanced by both baroclinic and diabatic processes. While the former deepens the upstream trough in the lower troposphere, the latter induces the divergent outflows in the upper troposphere. These processes are well captured by the models, although the models overestimate NP blocking frequency and exaggerate low frequency vorticity fluxes. A multi model analysis further shows that the overestimation of NP blocking frequency is closely related to a weaker meridional wind shear in the model, due to a stronger wind in high latitudes and a weaker wind in midlatitudes. This result indicates that the model bias in NP blocking frequency is not likely caused by a misrepresentation of blocking dynamics but is likely caused by the biases in mean flow. This suggests that NP blocking can be better represented in the model by improving the model mean biases.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 7-2

대류허용모델을 이용한 2020년 동아시아 여름 몬순 중규모 대류계 모의: WSM6와 UDM 미세물리 방안 비교 연구

문태호, 차동현

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

동아시아 지역의 여름철 극한 강수는 대부분 중규모 대류계(Mesoscale Convective System; MCS)에 의해 발생하며, 이는 막대한 사회경제적 피해로 이어진다. 특히 동아시아는 장마전선, 태풍 등 다양한 종관 환경과 상호작용하며 복잡한 특성의 MCS가 발생하지만, 시공간적 규모가 작아 수치 모델에서의 예측 정확도는 여전히 낮은 실정이다. 이러한 배경에서, 기록적인 강수와 함께 지속시간이 길고 대류 발달 영역이 넓은 메조 알파 규모 MCS 및 상대적으로 국지적으로 발달하지만 강수 강도가 강해 짧은 시간에 많은 피해를 줄 수 있는 메조 베타 규모 MCS가 동시에 관측된 2020년 동아시아 여름 몬순(East Asian Summer Monsoon; EASM) 사례는 MCS 모의 성능 개선 연구를 위한 이상적인 기회를 제공한다. 본 연구에서는 Weather and Research Forecasting Model (WRF)을 이용해 대류 모수화 방안을 적용하지 않은 초고해상도 대류허용모델(Convection-Permitting Model; CPM)을 이용하여 2020년 여름 동아시아 MCS를 탐지하였다. 특히, Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), Unified Forecast System Double Moment Microphysics Scheme (UDM) 두 방안을 비교해 각 미세물리 모수화 방안의 MCS 유형별 모의 성능을 비교하였다. 결과, UDM 방안(In-cloud 미세물리 개념, 완화된 accretion rate)이 WSM6 방안에 비해 상층 구름 구조를 보다 현실적으로 모의해 MCS (특히 메조 베타 규모)의 개수를 더 정확하게 재현하였다.

Keywords: 대류허용모델, 동아시아, 중규모 대류계, 미세물리 모수화 방안

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 7-3

GRIMs-ESM의 성능 향상을 위한 머신러닝 기반 파라미터 튜닝

정지원¹, 윤세민¹, 이승연², 박록진², 문병권¹

¹전북대학교 과학교육학부/융합과학연구소

²서울대학교 지구환경과학부

GRIMs-ESM(Global/Regional Integrated Model System-Earth System Model)은 대기화학-식생-해양이 결합된 통합 지구 시스템 모델로, 지구 시스템 구성요소 간 상호작용에 따른 기후변화를 이해하기 위해 개발되었다. 지구 시스템 모델 개발에서 중요한 과정 중 하나는 파라미터 튜닝인데, 기존의 파라미터 튜닝 방법에는 파라미터를 수정할 때마다 시뮬레이션을 수행해야 하므로 막대한 계산 비용과 시간이 소요된다는 한계가 있다. 머신러닝 기반 파라미터 튜닝은 이러한 한계점을 극복하고자 고안된 방법이다. 이 연구에서는 GRIMs-ESM의 지구 복사 수지와 강수량, 해수면 온도, 구름양의 모의 성능 개선을 위해 파라미터 튜닝 과정에 머신러닝 기법을 적용하였다. 파라미터의 변화에 따른 GRIMs-ESM 모의 결과를 이용해 머신러닝 모델을 학습시킨 후, 관측값과 가장 유사한 결과가 예측되는 파라미터 조합을 도출하였다. 도출된 파라미터로 모의한 결과를 관측과 비교하여 모델의 성능을 평가하였다. 그 결과 적도 남쪽의 강수밴드가 기존에 비해 약화되어 double-ITCZ(Intertropical Convergence Zone) 문제가 완화된 모습을 보였다. 다만 구름양은 양 극과 적도에서 과대모의, 해수면온도는 태평양과 대서양에서 과소모의를 보였다. 이는 파라미터 종류를 재설계하며 개선할 예정이다. 이처럼 지구 시스템 모델 개발 과정에 머신러닝 기법을 활용한다면 미래 기후 예측 정교화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 지구 시스템 모델, GRIMs-ESM, 머신러닝, 파라미터 튜닝

※ 본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다. (2022003560001)

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 7-4

대기-해양-파랑 결합 모델을 이용한 해상 분무 매개변수화의 태풍 예측 개선: 링링(2019)와 마이삭(2020) 사례 연구

양신일¹, 배효준², Mark Bourassa^{3,4}, 남채현³, Steven Coker⁴, 신동욱⁴, Benjamin Barr⁵, 서효대^{5,6}, 차동현⁷, 권민호⁸, 김대현⁹, 박문수¹⁰, 정광영¹¹, 김백민²

¹아시아-태평양경제협력체 기후센터

²국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

³미국 플로리다주립대학교 환경해양대기과학부

⁴미국 플로리다주립대학교 해양대기예측연구센터

⁵미국 우즈홀해양연구소 물리해양부

⁶미국 하와이대학교 마노아캠퍼스 해양학과

⁷울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

⁸한국해양과학기술원 해양기후예측센터

⁹서울대학교 지구환경과학부

¹⁰세종대학교 기후환경융합학과

¹¹국립해양조사원 해양과학조사연구실

본 연구는 얇은 수심과 황해 저층 냉수대를 특징으로 갖는 황해(Yellow Sea)·동중국해(East China Sea) 연안해에서 대기-해양-파랑 결합 모델링 시스템 내 해상 분무(sea spray) 매개변수화를 통합한 최초의 시도 중 하나이다. 태풍 링링(2019년)과 마이삭(2020년) 사례를 모의한 결과를 요약하면, 해상 분무 과정의 도입으로 최저 중심기압과 최대풍속뿐만 아니라 구조예측 오차도 감소하였다. 해상 분무 실험에서 해상 난류 열속(heat flux)이 증가하여 급강화(rapid intensification) 과정의 예측이 개선되었다. 열역학적 분석 결과, 해상 분무 효과는 태풍의 연직 구조를 크게 변화시켰다. 마이삭의 경우, 경계층 및 대류권과 상층 중심부에서 최대 5K 가량의 온위가 상승하였다. 이러한 변화는 대류권 전체에 걸친 상당온위와 비습의 증가를 동반하며, 온난화의 연직 재분배(vertical redistribution)와 지속적인 수분 공급 증가가 심층 대류(deep convection)를 촉진하여 향상된 대기-해양 상호작용(air-sea interaction)을 통해 이차순환(secondary circulation)을 강화하는 결과를 보였다. 이러한 효과는 해양 경계조건에 따라 다르게 나타나며, 쿠로시오 및 대마 난류를 따라 이동한 마이삭이 황해 저층 냉수대를 통과한 링링보다 더 크게 나타났다. 본 연구는 황해·동중국해의 독특한 해양학적 특성(얇은 수심, 강한 조석 혼합, 저층 냉수대 등)에서 대기-해양 상호작용과 함께 해상 분무 효과의 중요성을 강조하며, 현업 예측 시스템으로의 확장 가능성을 위한 현 시스템의 한계점 및 향후 개선 방안을 제안한다.

Keywords: 해상 분무, 태풍 급강화, 대기-해양-파랑 결합모델, 저층냉수

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 7-5

황사사례에 대한 대기-화학-지면 삼중 결합 자료동화 시스템의 단일 관측 실험

임수정^{1,2}, 박선기^{1,2,3}, Milija Zupanski⁴, 이예본^{1,2,3,*}

¹이화여자대학교 국지재해기상예측기술센터

²이화여자대학교 기후·환경변화예측연구센터

³이화여자대학교 기후·에너지시스템공학

⁴Colorado State University, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere(CIRA)

*광주과학기술원 환경에너지공학과

황사는 중국 내륙 건조지대 및 고비사막 등에서 강한 바람에 의해 발생한 먼지가 장거리 수송을 통해 한반도에까지 영향을 미치는 현상으로, 정확한 예보를 위해서는 토양의 건조 상태, 기상 변수, 그리고 대기 중 먼지 농도에 대한 종합적인 이해가 필요하다. 그러나 수치 모델을 이용한 황사 예측은 발원지의 토양 수분 상태 및 먼지 배출량, 기상 조건과 결합된 이동 및 침적 과정, 에어로졸 모수화 등 다양한 불확실성을 포함하고 있어, 초기장을 지속적으로 갱신할 수 있는 자료동화 기법이 필수적이다. 본 연구에서는 2021년 3월에 발생한 황사 사례를 대상으로 지역 규모 대기-화학 결합 모델인 Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry(WRF-Chem)과 지면 과정을 위한 Noah with multiparameterization(Noah-MP), 그리고 앙상블 기반 동화 기법인 Maximum Likelihood Ensemble Filter(MLEF)를 이용하여 대기-화학-지면 삼중 결합 자료동화 시스템을 구축하였다. 실제 관측자료 동화에 앞서, 기상 변수, 토양수분, 먼지 예측변수에 대해 합성 단일 관측 실험을 수행하였으며, 각 관측이 배경오차 공분산의 교차 항을 통해 시스템 내에서 어떤 변화를 유도하는지를 분석하였다. 본 결과는 삼중 결합 자료동화가 관측 간 상호 영향을 이해하고 황사 예측의 초기장 개선에 유용함을 시사한다.

Keywords: 황사, 앙상블, 결합 자료동화 시스템, 단일 관측 실험, WRF-Chem

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2021R1A2C1095535)이며, 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A08025520)이며, 기상청의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화 대학원 사업의 지원을 받았습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 7-6

폭염 단기에측시스템 기반 구축을 위한 연구

장아현¹, 민기홍¹, 차동현², 이명인², Cheol-Hong Min³

¹경북대학교 대학원 대기과학과, BK21 위험기상 교육연구팀

²울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

³Department of Electrical and Computer Engineering, University of St. Thomas

여름철 고온으로 인한 온열질환자 발생, 가뭄과 산불을 유발하는 폭염은 대표적인 재해기상으로, 기후변화와 도시화의 심화로 그 강도와 빈도는 해가 지날수록 증가하고 있다. 폭염으로 인한 국민의 재산과 인명 피해가 심화되자 기상청은 2017년에 울산과학기술원(UNIST)에 폭염연구센터를 설립하였고, 이를 기반으로 폭염의 특징 및 발달 메커니즘을 전지구 규모에서 국지규모까지 분석하고, 예측성 향상을 위한 연구 및 현업운동을 위한 기반 구축에 이르기까지 광범위한 분야에 걸쳐 연구를 수행하고 있다. 본 연구는 폭염의 단기에측시스템 기반 구축을 위해 수행한 연구를 소개한다. ERA5 재분석 자료(ECMWF ReAnalysis v5)와 WRF 수치예보모델을 바탕으로 분석한 폭염의 종관 및 국지적 특징과 그 발달 메커니즘이 포함된 폭염 예보 가이던스, 기상청의 지역앙상블예측시스템(Local Ensemble Predictino System; LENS) 모델과 지상관측 자료를 바탕으로 구축한 딥러닝 모형과 베이지안 통계분석기반의 확률 예측모형을 구성하여 현업에서 활용할 수 있는 폭염 단기에측시스템을 구성하였다. 여름철 폭염의 발달 메커니즘 분석을 위해 체감온도를 기반으로 주요 도시의 30년(1991-2020) 평균값과 편차를 통해 폭염의 전조기(7월 9-13일), 최성기(8월 1-5일), 쇠퇴기(8월 30일-9월 3일)를 선정하였다. 이를 토대로 ERA5 재분석 자료를 이용하여 종관 분석을 수행하였다. 분석 결과 폭염의 전조기에는 중국 남부 지역을 통과하는 남서풍에 의한 온난 이류로 지상 기온이 상승하고, 최성기에는 대기 상층부터 지상까지 내려오는 키 큰 고기압으로 발생하는 하강기류의 단열압축이 주요 메커니즘으로 파악되었다. 폭염 예측성 향상을 위해 Convolution Neural Network (CNN)을 기반으로, U-Net과 Long-Short Memory Term (LSTM)과 CNN이 결합한 Conv-LSTM 및 SimVP 딥러닝 기법을 사용하여 AI 예측모형을 구축하였다. 2022년 여름철 기간을 평가 자료로 검증하였을 때 LENS 모델보다 딥러닝 모형이 더 정확한 기온 및 폭염 예측을 할 수 있었다. 또한, LENS 모델 자료와 선형 회귀모형을 토대로 베이지안 통계 기반 통합분포모형을 구축하여 확률 기반의 예측을 수행할 수 있도록 하였다. 베이지안 통합분포모형은 관측에 더 근접한 체감온도 평균값을 제시하였고, LENS와 비교할 때 더 정밀한 온도 분포와 폭염 발생 확률을 제시하였다. 이와 더불어 종관 및 국지적 특징 분석을 토대로 예보 가이던스를 작성하여 폭염에 대한 입체적인 분석 및 예측이 이루어질 수 있도록 시스템을 고도화할 계획이다.

Keywords: 폭염, 수치예보모델, 종관분석, 딥러닝, 통계 모형

※ 본 연구는 기상청 『기상·지진 See-At 기술개발연구』 KMI2017-02410의 지원으로 수행되었습니다. 또한 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21 FOUR 사업의 지원을 받아 연구되었습니다.