

An Advanced Double-Moment Cloud Microphysics Parameterization Scheme : UDM Microphysics scheme

Songyou Hong

MMM, NCAR, Boulder, Colorado

An advanced double-moment parameterization for NOAA's unified forecast system (UFS) is developed for global forecasting. A main ingredient of the scheme utilizes a concept to represent the partial cloudiness effect on the microphysical processes, following the study of Kim and Hong (2018). The underlying assumption is that all the microphysical processes occur in a cloudy part of the grid box. Based on the long-term evaluation of the WRF Single-Moment (WSM) and WRF Double-Moment (WDM) schemes by WRF community, several revisions are made in microphysics terms, along with a newly introduced aerosol effect. A mass-conserving Semi-Lagrangian sedimentation is re-configured for double-moment physics. The new scheme reproduces the storm structure in an idealized 2D testbed, accompanying better organized front-to-rear jets, cold pools, and convective updrafts, as compared to the results in the case of conventional microphysics. The new scheme demonstrates a competitive or better skill in a statistical measure of the forecast skill in the global UFS as compared to that from the Thompson scheme

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 5-2

기후변화 적응형 수치예보를 위한 Transformer 기반 구름양 모수화 기법 개발

전현주, 박래설, 이길, 김은진

차세대수치예보모델개발사업단

본 연구는 수치예보(Numerical Weather Prediction, NWP) 및 기후모델에서 구름양(cloud fraction)을 보다 정밀하고 신뢰성 있게 산출하기 위해 기존의 진단적 접근법이 가진 한계를 극복하고, 머신러닝 기반의 진단 방안을 개발하는 데 그 목적을 둔다. 전통적인 진단식들은 주로 상대습도나 구름 수분자(cloud hydrometeor)의 단순 함수 관계에 의존하여 아격자(subgrid) 규모에서 발생하는 구름의 복잡한 변동성과 상호작용을 충분히 반영하지 못하는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 최근 인공지능 분야에서 널리 사용되는 Transformer 모델을 활용하여, 구름양 변화에 영향을 미치는 다양한 물리적 인자들과 구름양 간의 연관관계를 학습하는 딥러닝 모델을 구축하였다. 특히, 대기 상태를 수직 방향 여러 압력 층으로 세분화하여 고도별 특성을 반영하고, Transformer를 통해 층 간 상호작용과 비선형 상관관계를 정교하게 학습시켰다. 또한, 대기압의 로그 변환에 기반한 위치 임베딩(position embedding) 기법을 새롭게 제안하여, 단순 선형적 위치 임베딩 방식과 달리 대기역학적 특성을 효과적으로 반영함으로써 학습의 효율성과 일반화 성능을 높이고자 하였다. Transformer 기반 진단 방안은 급격히 변화하는 기후 조건과 기상 변동성을 실시간·효율적으로 반영할 수 있어 비정상(nonstationary)적인 기후 환경에서도 높은 적응력을 보일 것으로 기대한다. 본 연구에서 개발된 모델은 ERA5 재분석 자료와의 비교를 통해 기존 진단식에 비해 현저히 개선된 구름 분포 모의 성능을 보였다. 이와 같은 결과는 딥러닝이 기존 경험적·통계적 방법론을 보완 및 확장하는 강력한 도구임을 보여주며, 특히 미래 기후변화와 같은 복잡하고 빠르게 변화하는 대기 조건을 모델이 효과적으로 반영하는 데 매우 유용함을 시사한다. 따라서 이 연구는 딥러닝 기반 구름양 진단 매개변수화(parameterization)가 기후적응형 수치예보 모델의 발전 방향을 제시하고, 구름과 복사과정에 내재한 불확실성 저감 및 예측 신뢰도 제고에 크게 기여할 수 있음을 보여주었다. 아울러, 본 연구의 방법론은 다양한 대기·기후 모델에 적용 가능하며, 향후 고해상도 및 장기 예측 연구에 필수적인 기술로 자리잡을 것으로 기대한다.

Keywords: 딥러닝(Deep Learning), 구름양 모수화(Cloud Fraction Parameterization), 기후 적응형 모델(Climate-Adaptable Model), 수치예보(Numerical Weather Prediction), 트랜스포머 모델(Transformer Model)

※ 이 연구는 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 가변격자체계 기반 통합형수치예보모델 개발(KMA2020-02212)의 지원으로 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 5-3

적운과 층운에서 에어로졸 간접효과를 모의하기 위한 에어로졸-구름-강수-복사-난류 상호작용 물리모수화

박성수, 김시윤, 송찬우, 권의진

서울대학교 지구환경과학부

지구온난화에 의해 야기된 미래 기후 변화를 예측함에 있어서 가장 큰 불확실성은 에어로졸 간접효과에서 기인한다. 많은 양의 에어로졸은 물방울 입자의 크기를 작게 하여 물방울 입자의 총 단면적을 증가시키고 강수를 줄여 물방울의 총량을 증가시킨다. 이로 인해 많은 양의 태양에너지를 우주로 반사하여 지구를 냉각시킨다. 에어로졸 간접효과는 적운과 층운 모두에서 발생할 수 있는데, 현존하는 모든 기후모델은 적운 내에서의 에어로졸 간접효과를 모의하지 못한다. 적운이 기상과 기후에 미치는 중요한 역할을 고려할 때, 적운 내에서의 에어로졸 간접효과를 모의하는 것은 기상 및 기후 예측에 있어서 매우 중요하다. 지난 10년간 본 연구팀은 적운과 층운 모두에서 에어로졸 간접효과를 모의할 수 있는 새로운 기후모델인 IMPrES (Integrated Moist Physics Parameterization for the Earth System)를 개발하였다. IMPrES는 적운 및 층운 내에서 에어로졸의 핵화 현상, 수증기 응결, 연직 수송, 습성 침착 및 이와 관련된 구름, 강수, 복사 및 난류의 변동을 물리적으로 일관성 있게 다룰 수 있도록 정밀하게 설계되었다. IMPrES는 CMIP7에 참여할 예정이다. 본 발표는 IMPrES가 어떻게 적운과 층운 내에서 에어로졸 간접효과를 모의하는지, 기존의 모델과 비교하여 어떤 특성을 가지고 있는지 소개한다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 5-4

WSM5 내 얼음상 관련 과정의 조정을 통한 얼음상 혼합비 감소가 전구 모델 예측 성능에 미치는 영향

김기병^{1,2}, 임교선³

¹서울대학교 기초과학연구원

²서울대학교 기후예측연구센터

³경북대학교 대기과학과

구름미세물리 모수화 방안 내 얼음상의 생성·소멸과 관련된 다양한 미세물리과정이 존재하며, 일부 과정은 불확실성을 가지는 매개변수, 임계값, 또는 해당 과정의 효율을 의미하는 항을 포함한다. 선행연구에서는 기상청 현업 예보 모델인 한국형 수치예보모델(Korean Integrated Model)이 재분석 자료 대비 얼음상의 혼합비를 상대적으로 과대 모의함을 보였는데, 이것은 기온 및 복사 예측 성능에도 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 KIM의 구름미세물리 모수화 방안인 WSM5 (Weather Research and Forecasting Single-Moment 5-class) 내 얼음상의 생성·소멸과 관련된 미세물리과정 중 불확실성을 가지는 매개변수, 임계값, 그리고 효율성과 관련된 항을 내포하고 있는 과정을 선택하고 얼음상의 혼합비를 감소시키는 방향으로 조정하였다. 조정된 과정은 수증기의 핵화과정, 얼음에서 눈으로의 변환과정, 얼음의 부착과정, 그리고 수증기의 침적 및 승화과정, 총 4가지 과정이다. 먼저 이상화된 2-D 스콜라인 실험을 통해 기존 WSM5 방안을 사용한 기준 실험과 비교한 결과, 미세물리과정을 조정된 실험에서 얼음상의 혼합비가 감소하는 것을 확인하였다. 따라서, KIM을 활용해 2022년 여름철 중기예측실험을 기존 WSM5 방안을 활용한 실험과 앞서 조정된 실험 중 하나인 얼음상의 특성을 정의하는 매개변수를 단일총알에서 장미형태가 가지는 값으로 변환한 실험의 예측 성능을 비교하였다. 그 결과, 이상화된 2-D 스콜라인 실험과 마찬가지로 얼음상의 혼합비가 전반적으로 감소하면서 기존의 양의 오차가 감소하는 것으로 나타났다. 기온의 경우, 적도 상층과 극 하층에서 증가, 중위도 중층에서 감소하면서 일부 지역에서의 오차가 감소하였다. 복사의 경우, 대기 상단에서의 상향장파 복사가 전반적으로 감소, 지표로의 하향장파 복사는 증가하는 것으로 나타나면서 대부분 지역에서 평균 제곱근 오차가 개선되는 것으로 나타났다. 이를 통해 간단한 미세물리과정의 조정으로 얼음상의 혼합비를 감소시킬 수 있고, 전구 모델의 예측 성능도 일부 개선시킬 수 있음을 보였다.

Keywords: 구름미세물리, 얼음상 혼합비, 한국형 수치예보모델(KIM), WSM5

※ 이 연구는 기상청 「기후위기 대응 국가기후예측시스템 개발 사업」(RS-2025-02221669)의 지원으로 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 5-5

엑사 스케일 컴퓨팅 시대의 기상·기후 수치모델링

장지순

한국과학기술정보연구원 첨단과학컴퓨팅센터 이기종컴퓨팅팀

지구 온난화에 의한 기후 변화가 전례 없는 이상 기후와 악기상을 야기하고 있다는 위기 의식의 저변이 확대되고 있는 가운데, 이를 사전에 예측하여 인명과 재산의 막대한 피해를 막기 위한 수치모델링의 중요성 또한 강조되고 있다. 더 정확한 수치모델링 결과 생산을 위해 수치모델은 초고해상도의 설정으로 나아가고 있고, 다양한 지구 시스템 요소(예: 해양, 지면, 해빙, 식생, 화학 등)와의 결합 모델링 등을 시도하면서 나날이 복잡해지고 있으며, 그에 따른 계산 요구량 또한 기하급수적으로 증대되고 있다. 이러한 복잡한 지구 시스템 모델링 시스템을 전 지구에 대해 수 km 규모로 모델링을 하는 데에 필요한 계산을 감당할 수 있는 고성능컴퓨팅(High-Performance Computing, HPC) 시스템의 계산 성능 또한 엑사(10^{18}) Flops 수준 혹은 그 이상이 요구되고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 HPC 시스템은 운영 및 유지 관리에 막대한 에너지를 소모한다. 즉, 지구 온난화를 걱정하고 기후 변화에 의한 막대한 피해를 예방하기 위한 수치모델링의 계산 작업이 지구 온난화를 야기하는 온실 기체를 배출하는 거대 장비의 막대한 운용을 필요로 한다는 역설적 상황을 야기하는 것이다. HPC 분야에서는 10여 년 전부터 CPU 발열량과 계산 성능에 대한 회의적 데이터들을 공표해왔으며, 최근 대부분의 최고 성능 HPC 장비들은 CPU 대신 GPU를 주요 계산 단위로 사용하는 시스템으로 도입되고 있다. CPU 대비 GPU 에너지 효율이 높기 때문에 요구되는 계산 성능을 만족시키면서 장비 운용에 필요한 에너지를 최소화하기 위한 처방이라고 할 수 있다. 그러나, 지구 과학 분야의 수치모델은 이미 매우 복잡하고 거대한 형태로 개발되어 있어, GPU에서 효과적으로 작동할 수 있도록 옮겨심는 과정이 또 다른 도전적 과제로 남게 되었다. 한편, 인공지능 기반의 기상·기후 예측모델링의 진보가 GPU 계산 장비와 함께 더욱 가속되고 있는데, 대부분의 인공지능 기반 예측모델링 모델도 입력 데이터로 수치모델링의 결과 혹은 그 결과의 가공 자료(분석장)들을 활용하고 있으므로, 수치모델링의 GPU 활용은 여전히 중요한 과업으로 남는다. 본 발표에서는 엑사 스케일 컴퓨팅 시대를 맞이하여 국내 수치모델링 커뮤니티가 함께 고민해 볼 이슈들을 정리하여 발표하고자 한다.

Keywords: 엑사스케일 컴퓨팅, 수치모델링, 고성능컴퓨팅, 에너지 효율

※ 이 연구는 이기종 시스템 및 AI 기반 첨단 과학컴퓨팅 연구(K25L2M2C3)의 지원으로 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 5-6

KAF-WRF 모델의 지형 및 지면피복 입력자료 최신화 연구

이준홍¹, 임교선², 도유정^{3,4}, 이규원², 장은철⁵, 윤진호⁶, 박수훈⁷, 성재훈⁷, 고정수⁷

¹경북대학교 대기원격탐사연구소

²경북대학교 대기과학과

³서울대학교 기초과학연구원

⁴서울대학교 기후예측연구센터

⁵공주대학교 대기과학과

⁶광주과학기술원 환경에너지공학부

⁷공군기상단

본 연구는 공군에서 현업 예보모델로 사용 중인 Korean Air force-Weather Research and Forecasting (KAF-WRF)의 지형 및 지면피복 입력자료를 최신화하고, 그에 따른 효과를 검증하였다. 최근 공군 기상 수치예보 시스템 3호기 도입 이후 KAF-WRF 모델의 해상도 향상과 수치계산, 물리과정 등에 대한 개선 연구들이 활발히 수행되어왔다. 하지만 지형 및 지면피복자료는 여전히 1992-1993년 관측을 기반으로 United States Geological Survey에서 제공하는 30" 자료를 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 미국 National Aeronautics and Space Administration에서 제공하는 최신의 Shuttle Radar Topography Mission 3" 자료와 대한민국 환경부의 환경공간정보서비스에서 제공하는 3" 자료를 KAF-WRF에 적용하여 입력자료를 최신화 하였다. 이로써 지난 30여 년간 인간 활동과 생태계 변화가 반영된 최신 지면피복 분포를 현실적으로 구현하고, 복잡 지형의 세부 특성을 고려할 수 있게 되었다. 개선된 입력자료가 예보 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 집중호우 사례를 대상으로 강수 및 바람장을 다양한 관측자료와 비교 및 검증하였으며, 상세 결과는 발표 시 제시할 예정이다.

Keywords: KAF-WRF, 지형 및 지면피복 자료, 바람 모의, 강수 모의

※ 이 연구는 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」(RS-2023-00240346)의 지원과 공군기상단 수치예보 개발 용역사업 「KAF-WRF 강수 예측 성능 향상 연구」(2025UMM0447)의 지원으로 수행되었습니다.