

특별세션 6 / 이상기상 대응 수치모델 1-1

대규모 수치실험을 통한 물리과정간 상호작용 분석

이용희¹, 원혜영¹, 최원¹, 이근희¹, 박선영², 임교선², 이규원²¹기상청 수치모델링센터²경북대학교

기상수치예측모델은 대기 현상 모의하여 미래 기상을 예측하는데 필수적인 도구이다. 수치예측모델의 정확도는 대기 물리과정을 표현하는 다양한 모수화 방안과 물리 모수들의 최적화에 크게 의존한다. 특히, 강수 예측은 대기 모델의 핵심적인 예측 요소 중 하나이며 대류, 경계층, 미세물리 등 복잡한 물리과정 간의 상호작용에 의해 결정된다. 기존의 물리모수에 대한 연구는 제한된 관측자료에 의존하여 단일 모수의 민감도 분석이나 전역 최적화에 집중해왔다. 그러나 실제 대기 시스템은 여러 물리 과정들이 복합적으로 비선형 상호작용을 하며 예측에 영향을 미치므로 물리모수 간의 상호작용을 고려한 다차원적인 분석이 필수적이다. 또한, 최적화 과정에서 모수들이 어떻게 진화하고 수렴하는지, 그리고 예측성능을 높이기 위한 물리모수 조합들이 어떤 유형으로 분류될 수 있는지에 대한 이해는 모델의 물리적 타당성을 높이고 예측 불확실성을 줄이는데 기여할 수 있다. 따라서 최근에 자주 발생하는 이상기상에 대한 예측성 향상을 위해서는 물리 모수들의 최적 조합을 장기간에 걸쳐 대규모로 탐색하고, 각 모수가 예측 성능에 미치는 중요도, 민감도, 영향도 등을 정량적으로 이해하고 개선하는 것이 중요하다.

이 연구는 이러한 노력의 하나로 집중호우 사례를 중심으로 미세물리, 적운물리, 경계층 물리과정의 다양한 물리모수를 마이크로 유전 알고리즘(Micro Genetic Algorithm, μ GA)을 활용하여 동시에 최적화하는 대규모 수치실험을 수행하였다. 그 과정에서 호우 사례에 대한 각 과정별 최적의 물리모수 값을 도출하고, 최적화된 모수 집합의 특성 및 예측 성능에 대한 각 모수의 기여도를 심층 분석하였다. 특히, 강수예측 성능에 미치는 각 모수별 민감도 분석, 특정 조건에서 나타나는 모수의 중요도 변화, 군집분석을 통해 물리모수 간의 상호작용 즉 물리과정 간의 상호작용을 분석하였다. 실제로 2025년 5월 16일 경기북부 집중호우 사례에 대해서 27개 물리모수를 대상으로 세대당 54개의 개체로 0~200세대까지 μ GA를 수행하여 개별 물리모수에 대한 최적값을 찾았다. 이 과정에서 수행된 총 10,854번의 수치모델 수행 결과를 바탕으로 적운과 미세물리 간의 상호작용, 미세물리와 경계층 물리과정의 상호작용 등에 대한 정량적 및 정성적으로 살펴보았다. 이를 바탕으로 핵심 물리 모수들을 식별하고, 이들의 상호작용이 물리적으로 타당한지를 검토하고 종합 분석하였다.

Keywords: 이상기상, 대규모 수치실험, 물리모수, 유전 알고리즘

※ 이 연구는 기상청 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술개발』 과제(KMA2018-00721)의 하나로 수행되었다.

특별세션 6 / 이상기상 대응 수치모델 1-2

기계학습 기반 여름철 낙뢰 발생 예측 연구

신규희¹, 류근수¹, 이청룡^{1,2}, 이규원^{1,2}

¹경북대학교 대기원격탐사연구소

²경북대학교 BK21 위험기상 교육연구팀, 대기과학과

2025년 여름 한반도는 이례적인 폭우와 함께 국지적 극한 대기 불안정으로 인한 집중호우와 잦은 낙뢰 발생이 관측되었다. 특히 경남 산청에서는 단 몇 시간 동안 200회가 넘는 낙뢰가 기록되었다. 낙뢰는 인명 피해뿐만 아니라 전기, 교통 시설 파손 등 간접적 피해를 유발하므로, 낙뢰 발생 직전에 이를 선제적으로 예측하고 대응할 수 있는 체계 구축이 필수적이다. 낙뢰는 좁은 영역에서 짧은 시간 안에 발달하는 대류운 속에서 발생하므로, 기존 수치모델만으로는 발생 위치 예측이 어렵다. 최근 대기과학 분야에서 기계학습 기법이 활발히 도입되고 있으며, 분포 가정을 필요로 하지 않고 방대한 자료를 다룰 수 있는 장점을 바탕으로 덕분에 다양한 인자를 동시에 고려하는 낙뢰 예측과 같은 복잡한 문제 해결에 효과적인 접근법으로 주목받고 있다.

본 연구에서는 초단기 예측모델(KLAPS)와 이중편파레이더, 위성(GK2A) 자료를 활용하여 랜덤 포레스트(Random forest) 기반의 낙뢰 발생 확률 예측 모형을 제시하였다. KLAPS에서 산출된 역학 및 열역학 관련 특성변수, 이중편파레이더 기반 특성변수(반사도, 차등반사도 등), 위성 기반 특성변수(GK2A 8개 채널 및 BTD 등) 총 94개 변수를 독립변수로 설정하였으며, 관측된 낙뢰 발생 유무를 종속변수로 설정하였다. 학습된 모델은 분석장과 예측장에 적용하여 기상청 낙뢰 예측 자료와 비교 검증하였다.

Keywords: 기계학습, 낙뢰 발생 예측, KLAPS, 이중편파레이더, GK2A

※ 이 연구는 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술 개발』 과제 (KMA2018-00721)의 일환으로 수행되었습니다. 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-02242970).

특별세션 6 / 이상기상 대응 수치모델 1-3

정지궤도 기상위성 영상기 자료를 이용한 수치모델의 구름미세물리 자료 특성 분석에 관하여

이다영¹, 염다빈¹, 이은희², 이용희², 안명환¹

¹이화여자대학교 기후·에너지시스템공학부

²기상청 수치모델링센터

위성자료는 수치모델의 중요한 입력자료로 활용되고 있으나, 일부 자료는 제한적으로 이용되는데, 그 대표적인 자료가 구름의 영향을 받는 가시 및 근적외 채널자료이다. 적절한 관측연산자의 부재가 큰 원인중의 하나였으나, 최근의 인공지능 기술의 발전으로 이와 같은 장애물이 점차 완화되고 있다. 최근 공개된 RTTOV-14에는 정지궤도 기상영상기의 대표적인 가시채널들에서의 구름산란 과정을 빠른 속도로 비교적 정확하게 모의하는 모듈이 추가되어, 가시 및 근적외 채널자료의 다양한 활용성을 촉진하고 있다. 본 연구에서는 우선 추가된 모듈인 MFASIS-NN(method for fast satellite image synthesis-neural network)의 성능을 DOM(discrete ordinate method) 모듈과의 비교분석을 통해 평가하고, 기상청 모델링 센터에서 생산되는 지역모델의 구름정보와 GK2A에서 관측된 구름정보의 상호비교를 통해 모델이 가지는 구름미세물리 특성을 분석하고자 하였다. 우선 MFASIS-NN의 특성을 평가하기 위해 ERA5를 입력자료로 한 반사도 모의자료 비교(MFASIS-NN vs DOM-16 stream)에서는 반사도 차이가 0.02%로 나타나 두 모듈 사이의 차이는 수치모델의 구름미세물리 특성을 분석하기에는 충분히 정확함을 보였다. 이를 바탕으로 2024년 7월 16일에서 17일까지 생산된 모의반사도와, KIM 지역모델과 ERA5에서 생산되는 구름정보를 RTTOV-14로 생산, GK2A 관측자료의 상호비교를 수행한 결과 두 모델 모두 전반적인 반사도 분포는 관측값과 유사하나, 최대빈도의 화소가 나타나는 화소값이 관측에 비해 다소 높게 나타나며, 반사도가 높은 화소들에서 관측값에 비해 더 높은 빈도의 분포를 보였다. 반면, 휘도온도는 모의자료가 더 낮은 온도에서 높은 분포를 보여, 모델 구름이 실제구름보다 높은 고도에 좀 더 큰 광학두께를 가지며 존재하는 것으로 해석되었다. 비교기간을 늘리고, 수증기 채널을 포함한 다른 채널에서의 모의자료와 관측자료의 비교결과를 보이고, 정지궤도 영상기의 지역모델 활용 가능성을 제시하고자 한다.

Keywords: 정지궤도 영상기 가시영상, RTTOV-14, 신경망모델, 국지모델

특별세션 6 / 이상기상 대응 수치모델 1-4

벌크형 구름 미세물리 방안에서 우박 혼합비와 싸락기 밀도의 예측의 상대적 중요성 평가

임교선^{1,2}, 박선영², 조중현¹

¹경북대학교 대기과학과 BK21 위험기상 교육연구팀

²경북대학교 대기원격탐사연구소

본 연구에서는 두 가지 버전의 WRF (Weather Research and Forecasting) Double-Moment 6-class (WDM6) 구름미세물리 모수화 방안의 성능을 비교하였다. 한 버전은 우박 혼합비를 예측 변수로 도입한 것이고, 다른 버전은 싸락기의 밀도를 예단한 것이다. 싸락기 밀도를 예단하는 WDM6 방안은 Park et al. (2024)의 연구에 기반한 방안이며, 우박의 혼합비를 포함한 WDM6 방안은 본 연구에서 새롭게 개발되었다. 레이더 반사도의 고도별 등Contoured Frequency by Altitude Diagrams (CFADs)를 통해 두 버전에서 모의된 구름 형태와 강수량을 평가하였다. 한반도에서 발생한 겨울 강설, 여름 강우, 그리고 우박을 포함한 총 13건의 강수 사례를 대상으로 한 CFADs 분석 결과, 대부분의 사례에서 예측된 싸락기 밀도를 포함한 방안이 관측 자료와 비교했을 때 반사도의 연직 패턴을 더 잘 모의하였다. 우박 범주를 포함한 WDM6방안은 우박 생성으로 인해 강한 반사도의 빈도를 과대 모의하는 경향을 보였고, 최대 60 dBZ에 이르는 비현실적으로 높은 반사도를 산출하였다. 예측된 싸락기 밀도를 포함한 방안에서 싸락기 혼합비의 감소가 모의된 레이더 반사도를 개선하는 핵심 요인으로 작용하였다. 우박 혼합비를 도입한 WDM6방안에서도 싸락기 혼합비가 감소하였으나, 우박 혼합비의 생성으로 인해 관측값에 비해 레이더 반사도를 과대 모의하는 결과를 초래하였다. 이러한 결과는 고체상의 특성을 예단 변수로 반영하는 것이 고체상 범주의 수를 늘리는 것보다 더 현실적인 연직 레이더 반사도 프로파일과 현실적인 미세물리 과정을 모의함에 있어 중요함을 시사한다.

Keywords: WDM6, 싸락기상의 밀도, 우박, CFAD

※ 본 연구는 한국연구재단 (RS-2023-00208394) 및 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술 개발』 과제 (KMA2018-00721)의 지원으로 수행되었음.

특별세션 6 / 이상기상 대응 수치모델 1-5

한국형 수치예보모델의 지역규모 버전 개발

조희제, 김정한, 노일석, 장지연, 이영수

(재)차세대수치예보모델개발사업단

차세대수치예보모델개발사업단은 한국형수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM)의 지역규모모델 버전을 개발하고 있다. 이는 KIM의 격자를 이루는 육면체구(cubed-sphere)의 한 면에서만 모델을 구동시키는 모델체계를 구축하는 방식으로 이루어졌으며, 슈미트 변환(Schmidt transformation)을 통한 육면체구의 이완-수축 기능과 동시에 활용하면 지역규모모델의 모의영역(domain)을 조정할 수 있다. 지난 한국기상학회 학술대회에서 지역규모모델의 개발 과정 및 고해상도 한반도 호우사례 모의를 소개하였고, 새롭게 개발된 분광요소법(spectral element method) 기반 측면경계조건 처방 과정의 안정적인 성능을 시사한 바 있다. 차세대수치예보모델개발사업단은 기상청의 현업 수치예보시스템에 상응하는 준실시간 예보시스템을 운영하여 개발에 활용하고 있는데, 최근 지역규모모델을 위한 예보시스템의 초기버전이 개발되어 이를 테스트하기 위한 준실시간 시험운동을 진행하고 있다. 시험운동을 위한 지역규모모델은 한반도 주변 약 1km 해상도의 1,537x1,537개 수평격자를 가진다. 초기조건과 측면경계조건은 8km 해상도로 수행 중인 준실시간 전구 예보시스템의 결과를 시공간 내삽하여 구성한다. 따라서 지역규모모델의 예보시스템은 별도의 자료동화 과정을 갖추고 있지 않더라도 초기조건과 측면경계조건을 통해 8km 전구 예보시스템 결과에 동화된 관측 정보의 영향을 받고 있을 것으로 판단된다. 시험운영 기간 동안 지역규모모델의 결과는 8km 전구 예보시스템 결과와의 일관성을 유지했으며 특히 강우 사례에서 고해상도 모델의 특징을 잘 보여주었다. 향후 지역규모모델을 위한 물리과정 개선과 대류규모 자료동화의 개발 및 적용을 통해 현업 예보모델로서의 활용성을 기대할 수 있을 것이다.

Keywords: 한국형 수치예보모델, 지역규모 모델, 고해상도 수치예보

※ 이 연구는 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 거대 수치예측자료의 효율적 처리와 수요 맞춤 활용기술 개발(KMA2020-02213)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 6 / 이상기상 대응 수치모델 1-6

기상청 현업 초단기 예측 시스템(KLAPS)의 여름철 집중호우 모의 성능 개선을 위한 방안 연구

장은철^{1,2}, 김윤아¹, 변의용²

¹국립공주대학교 대기과학과

²국립공주대학교 지구환경연구소

기상청은 빠르게 발달하는 위험 기상 현상의 예보 지원을 위하여 지역모델 기반의 초단기 예측 시스템인 Korea Local Analysis and Prediction System(KLAPS)를 운영하고 있다. KLAPS는 5 km 수평해상도로 종관 및 중규모 현상 모의를 목적으로 하고 있으며, 10분 간격으로 초기장을 갱신하여 급격히 생성되어 발달하는 현상을 탐지하고 예측할 수 있도록 한다. 하지만 KLAPS는 관측, 레이더, 위성 자료를 초기시간에만 적용하기 때문에 초기시간에 탐지되지 못한 현상을 모델 내부에 반영하지 못하는 한계를 가지고 있으며, 고해상도 모델들이 가지는 일반적인 한계와 같이 중규모 강수 현상의 위치 오차가 발생하는 경우 예측이 전반적으로 빗나갈 수 있다는 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 모델의 초기 관측 정보 반영의 한계를 극복하기 위하여 초기장에만 적용되는 관측 반영 대기장을 관측 정보가 확보되는 기간 전체에 적용하는 방안을 시도하였으며, 강수 위치와 강도의 불확실성을 줄이기 위하여 지역 모델의 시간 적분 과정에 난수 기반의 공간 정보를 추가하여 단일 경계장을 기반으로 한 지역 앙상블 예측 체계를 구성하고 강수의 확률 예측 정보를 생산하였다. 제안된 방안의 효과를 확인하기 위하여 2025년 여름철에 발생한 집중 호우 사례를 선정하고 현업 KLAPS와 비교 분석을 수행하였다. 2025년 7월 16-17일 호남지역 집중호우 사례, 8월 3일 호남지역 집중호우 사례, 8월 13-14일 중부지역 집중호우 사례를 대상으로 선정하였다. 이 사례들은 하층 제트 구조에서 중규모의 강수 밴드 폭을 가지며 강수 집중도가 높은 특징을 보였다. 관측 정보를 추가로 모델에 반영한 실험은 전반적으로 수증기 분포와 양을 관측에 가깝게 보정할 수 있었으며, 모델 적분이 진행되면서 시간에 따라 발생하는 오차를 줄여줄 수 있음을 확인하였다. 지역 앙상블 예측 체계는 앙상블 멤버들이 강수의 큰 형태는 유사하게 유지하면서 위치와 강도에서의 편차를 효과적으로 생산하여 작은 규모 현상의 불확실성을 감소시킨 결과를 생산함을 보였다.

Keywords: KLAPS, 지역 앙상블 예측 체계, 초단기 예측, 여름철 집중호우

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