

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	10월 2일	10월 13일	10월 13일	10월 13일
재	남현	배수야	이은희	박훈

1. 출장개요

출장목적	EMS 2025 Annual Meeting 참석 및 발표		
출장일정	2025. 9. 6.~2025. 9. 14. (6박 9일)		
성명		소속	직급(직위)
이은희		수치모델실	책임급연구원(수치모델실장)
남현		역학물리팀	책임급연구원
김소영		역학물리팀	책임급연구원
한지영		역학물리팀	책임급연구원
방문기관 (또는 회의장소)	슬로베니아 류블리아나, Cankarjev dom		
출발지	인천	도착지	슬로베니아 류블리아나

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2025년 9월 8일~12일에 슬로베니아 류블리아나에서 개최되는 EMS 2025 Annual Meeting에 참석하여 관련 분야의 최신 연구 동향을 파악하고, 기상 예측 분야 전문가들과 교류하여 사업단 연구 활동 및 최신 연구 성과 등을 공유하고자 한다. 또한 사업단의 역학 및 물리과정 개발 결과와 연장중기 예측결과 등을 발표하고 개선 성과에 대한 논의를 수행하고자 한다.

나. 주요 업무 수행 사항

- KIM 최신 업그레이드 성과 및 차세대 모델 개발 현황 발표 및 토의 (이은희 연구원)
 - Forecasting, nowcasting and warning systems 세션을 통해 사업단 모델의 최근 업그레이드 성과를 발표함. 우선 한국형수치예보모델개발사업 및 차세대수치예보모델개발사업의 십여년간의 일련의 노력으로 개발된 한국형 모델 KIM의 주요 특징을 소개하였고, 최근현업에 적용된 8 km 전지구모델의 개발 성과를 강조함. 특히 수평 12 km로부터 8 km 해상도 회색지대(grayzone)의 수치모델 향상을 위해 대류물리과정의 격자적응 과정 불확실성이 존재하고, 이에 대한 검토와 개선이 필요함을 강조하였고, 사업단 연구에서 달성한 현업모델 예측성능 향상에 대해 발표.

또한 차세대사업(~2026년)에서 진행하고 있는 이음새없는 예측체계 개발에 대해 소개하고, 이를 달성하기 위한 가변격자 및 제한지역 모델 개발 성과, 결합모델 사양 및 개발성과, 앙상블 체계 구축 및 예측성능 결과 등에 대해 소개하였다.

- KIM에 대한 질문은 모두 KIM 예측자료 자료의 활용 가능 여부에 대한 것이었다. 국내 연구진인 한국전자통신연구원(ETRI)의 오승희 박사 외 유럽 및 홍콩 소재 연구자들 포함, 공통의 관심사는 추진중인 AI 모델링 연구에 KIM의 예측자료를 활용할 수 있느냐는 것이었으며, 이는 한국기상청의 현업 KIM 예측 자료 외에 사업단의 개발 중인 실험 자료까지도 확보하여 활용이 가능한지 여부에 대한 문의였다. AI 예측에 집중된 개발 동향을 체감할 수 있었으며, 모델의 성능 여부를 떠나 가능한 많은 예측자료를 확보하는 것이 현재 가장 중요한 관심사임을 확인하였다.

o KIM 가변격자 모델의 계산효율성 향상 방안에 대한 발표 및 토의(남현 연구원)

- 육면체구 격자에서 이완/수축 비율에 기반한 가변격자 모델에 대한 전반적인 설명 및 적응시간 간격 알고리즘을 적용한 결과를 발표하였다(제목: The Improvement of Computational Efficiency in KIM with a Variable-Resolution Grid). 전구모델 가변격자체계의 가장 큰 단점은 작아진 격자(고해상도 영역)에 맞게 작은 시간간격을 사용하는 것이다. 시간 간격이 작아지면 계산 시간이 증가하기 때문에, 이를 개선하고자 균일격자체계에서 적용했던 적응 시간간격 알고리즘을 가변체계에 적합하도록 설정을 재구성하여 25 km 해상도의 고해상도 영역 8 km 가변격자 모델에 적용하였다. 중기검증을 통해 고정 시간간격의 가변격자체계대비 적분횟수가 약 40% 감소함을 보였으며 균일격자 및 가변격자의 예측 성능 면에서 고정 시간간격의 결과와 유사함을 보였다. 또한, 모든 NWP 모델에서의 고해상도 운용을 위해서는 계산 효율성 개선을 고려해야만 하기 때문에 고정 시간간격 대비 적응 시간간격 알고리즘이 효율적인 방법임을 소개하였다.

o KIM 앙상블 실험에서 성층권 돌연승온 모의 성능 검증 연구에 발표 및 토의(김소영 연구원)

- 연장중기 시간규모의 KIM 앙상블 실험에서 성층권 돌연승온의 모의 성능을 검증하고 돌연승온 예측성에 중요한 요소를 분석한 연구 결과를 Atmospheric and climate dynamics and predictability, and extremes 세션에서 발표하였다(제목: Evaluation of Sudden Stratospheric Warming Event in the Korean Integrated Model Ensemble Simulations). KIM의 특성 및 연장중기 시간규모에서 성층권 성능 검증에 대한 필요성을 소개하고, 연장중기 모의 성능 검증의 일환으로 이루어진 성층권 돌연승온 예측 성능 검증 결과를 발표하였다. 50개 앙상블 멤버 중 7개 멤버에서 돌연승온과 관련한 동서바람의 역전 모의를 성공하였고, 12개 멤버에서는 역전을

전혀 모의하지 못하였음을 보여주고, 이 두 그룹의 특성 비교를 통해 대류권에서 동서파수 1과 2의 큰 규모 행성과 분포를 잘 모의하는 것이 성층권 돌연승온 예측성에 중요하다는 것을 보여주는 주요 결과를 소개하였다.

o 한반도와 미국지역의 강우 특성 차이를 고려한 대류물리과정 개발 연구에 대한 발표 및 토의 (한지영 연구원)

- Understanding and modelling of atmospheric hazards and severe weather phenomena 세션에서 강수 기작이나 유형 등의 지역 간 차이를 반영하는 적운대류 물리과정 모수화 기법 개발 연구 결과를 발표하였다(제목: Cumulus Parameterization Accounting for Differences in Heavy rainfall mechanisms over Korea and the central US). 미중부 지역과 차이를 보이는 한반도 지역 고유의 집중호우 발생 기작을 고려하여 강한 수분속 수렴 조건에서 발생하는 적운대류의 강도를 감소시키는 모수화 기법을 적용했을 때 열대 등 다른 지역의 강수와 대기 모의 성능에 미치는 영향 없이 한반도 지역의 강한 강수 예측 성능 개선 효과가 나타나는 것을 보인 연구 결과를 발표하였다. 이 방법에서 사용하는 수분속 수렴에 대한 조건 완화로 WRF와 같은 제한 지역 모델에서는 한반도 강수 모의 성능이 더 개선될 수 있지만, 전구 모델인 KIM에서는 그 영향이 열대 지역까지 확장되면서 열대 지역의 강수와 대기 모의 성능 저하로 이어지기 때문에 강한 수분속 수렴 조건에 한정해서 기법을 적용하는 것이 더 적절하다는 의견을 개진하였다.

o Operational Systems and Applications 세션 기조 발표(Keynote): 제목 ‘Data-driven weather models: A new era in meteorology’ by Mariana Clare

- ECMWF에서의 지난 몇 년간의 머신러닝 연구의 성과를 발표하였으며, 현재 ML 모델의 수준이 기존 수치모델의 수준을 이미 넘어서 더 높은 수준을 예상할 수 있음을 강조하였다. 특히 데이터 기반 모델이 기존 모델 대비 빠르다는 점(더 적은 에너지를 소비함) 또한 강조되었다. ECMWF의 AIFS가 속도 뿐만 아니라 예측 정확도에서 개선되어 극한 기상 현상의 예측 능력 또한 가능성이 있고, 특히 앙상블 시스템으로의 확장을 통해 기존의 지구 시스템 예측 개발 방향의 큰 전환점이 분명함을 제시하였다

o Understanding Weather and Climate Processes 세션 기조 발표(Keynote): 제목 ‘Flood warnings everywhere – data-driven rainfall-runoff modeling at global scale’ by Frederic Kratzert.

- 전세계 가장 빈번하고 피해가 큰 자연재해인 홍수의 조기 경보 시스템을 개발하기 위한 Google의 홍수 예측 연구에 대한 발표가 있었다. 상당 부분 딥러닝 기반 강수-유출 모델링의

결과로 몇 년 동안 수행된 네트워크 아이디어를 종합한 하천 유량 예측 모델 개발의 결과에 대한 종합 발표였다. 다양한 정부 기관 및 비정부 기구가 긴밀하게 협력하여 얻은 결과로 많은 이들의 관심이 있음을 알 수 있었으며, 활용 자료의 확대나 및 활용에 대한 창의적인 다양한 의견을 교환하였다.

o Forecasting, nowcasting and warning systems 세션 주요 연구 결과 및 토의

- DWD의 이음새 없는 예측 시스템(SINFONY) 대한 소개 발표가 여러 건 있었다. 이는 강렬한 대류성 강수와 같은 극한 현상의 초단기 예측을 개선하기 위한 프로젝트로 기상레이더와 같은 관측자료를 활용한 AI 예측과 초단기 수치모델의 개선을 종합하여 최적 조합을 통해 연속 예측을 구성하고자 하는 연구 프로젝트이다. 각 연구에서의 자료 활용과 방법론 소개 그리고 예측 결과의 검증 및 가시화 등에 대하여 단계적으로 발표 및 논의하였다. 그 외 MeteoSwiss의 예측 연구, 사업단 차세대모델 개발 연구, ECMWF의 Extremes Digital Twin (DT)에 대한 발표가 있었다.
- WRF 모델을 활용한 예측 연구에 대한 발표도 여전히 활발하였다. 비교적 활용이 용이하기 때문에 일부 지역에서는 현업 예측에 활용되고, 특히 산업계 등에서 응용함에 있어 접근이 쉬울 것으로 생각된다.
- 검증 분야에서는 새로운 관측을 검증에 활용하는 연구나 MetOffice의 후처리 시스템에 대한 소개 등이 있었다. 이 중 IMPROVER는 MetOffice에서 개발한 통합 모델 후처리 및 검증으로 그 핵심 기술은 시간별 순환 앙상블을 최대한 활용하는 것이다. 고해상도 결정모델 예측과 저해상도 앙상블을 결합하여 확률예측을 생산하는데 타겟 도메인에서의 초고해상도의 앙상블 예측이 가능하도록 고안되었다. 이 때 통계 및 머신 러닝 방법을 이용하고 주요 변수에 대해서는 앙상블 모델 출력 통계(Ensemble MOS)에서 더욱 개선된 이상 모델 출력 통계(Statistically Anomaly MOS)의 방법으로 개선하는 등 다양한 각도로 활발히 개선하고 있음을 알 수 있었다.

o Understanding and modelling of atmospheric hazards and severe weather phenomena 세션
주요 연구 결과 및 토의

- 악기상의 이해와 모델링에 대한 세션에서는 홍수, 극한 강수, 열파, 가뭄 등 위험기상에 대한 이해와 모델링 개선 연구에 대한 다양한 연구발표가 있었다. 이러한 연구에서는 지역(유럽) 기후 조건의 영향이나 지역 특이기상에 대한 관심을 읽을 수 있다. 항공기상이나 난류에 대한 연구 발표가 여러 건이 있었으며, 중위도 저기압의 발달과 관련된 건조역 침투(Dry Intrusion, DI)에 연구에 높은 관심이 있었다. 이러한 현상의 이해를 위해 모델링 연구가 많이 이용되며 특히 고해상도 모델을 이용한 상세모델링 연구가 활발했다. 예를 들면 한 연구에서는 DI의 PBL 구조에

미치는 영향에 대해 고해상도 ICON을 이용한 사례 시뮬레이션을 통해 PBL 속성 변화를 분석하였다.

- 악기상 이해를 위해 관측과 모델자료를 분석하기 위해서는 다양한 악기상 현상에 대한 정량적 정의와 매커니즘 파악을 위한 다양한 추적 및 분석 방법론(혹은 도구)이 필요함을 알 수 있었다. 예를 들어 DI 연구나 중위도 저기압 연구 등에서와 같이 기단의 궤적을 추적하거나 저기압의 트랙을 추적하는 것들이 수반되어야 함을 알 수 있다. 극한 기상에 대한 연구에서는 단일 극한 기상 현상 뿐만 아니라 복합 극한 기상 현상에 대한 연구가 주목받고 있다. 이는 연속된 두 현상에 따라서 피해가 가중되기 때문이다.

o Climate change detection, assessment of trends, variability and extremes 세션 주요 연구 결과 및 토의

- ECMWF의 ‘Opportunities and Challenges in Weather and Climate Modelling: Experiences from the Destination Earth Initiative’ 발표에서는 날씨 및 기후 모델링에서의 머신러닝(ML) 및 인공지능(AI)의 발전과 초대규모 슈퍼컴퓨팅 활용에서의 초고해상도 지구시스템 모델 개발의 변혁을 강조하며, 유럽연합의 Destination Earth (DestinE) 프로젝트의 현황과 거대 파트너쉽 그리고 복합 기술의 성과에 대해서 강조하였다. 이 과제에서의 핵심으로 ML/AI의 NWP 연계를 통한 달성 목표의 도약을 강조하는 일면이 있으며 한편, 이러한 개발에서 극한(extreme)에 대응하기 위해 극한 현상(기상)과 기후모델링의 통합적 접근이 필수적임을 알 수 있다.

o Atmospheric boundary-layer processes, turbulence and land-atmosphere interactions 세션 주요 연구 결과 및 토의

- 대기 경계층 과정, 난류, 그리고 육지-대기 상호작용 세션에서는 대기 경계층 내의 난류, 지표-대기 상호작용, 경계층-자유대기 상호작용 등을 다룬 이론/관측/모델링 연구 결과들이 발표되었다. Sergej Zilitinkevich 기념상을 수상한 오스트리아 인스브루크 대학 Mathias W. Rotach 교수의 수상 강연 ‘The Mountain Boundary Layer (MoBL) – do we need yet another variety?’에서는 산악 지형 위의 경계층을 단순히 전통적인 경계층 유형(CBL, SBL 등)으로 다루기에는 한계가 있음을 주장하고, 경계층 모수화 방안이 보통 평탄한 지형 가정에 기반하므로 복잡 지형 위의 경계층을 더 정교하게 다룰 필요가 있음을 제안하였다. ECMWF Ivan Bastak Duran 박사의 발표 ‘A prognostic TKE scheme in the IFS model’에서는 현재 IFS 모델에서 사용하고 있는 1차 종결 방식의 경계층 모수화 방안을 보완하기 위해 난류운동에너지(TKE)를 예측하는 TKE 방안을 도입하여 난류 세기 변화에 대한 메모리 효과를 포함하고 TKE 이류항과 안정도 함수 등을 수정한 연구 결과를 발표하였다. TKE 방안 사용으로 고해상도 모델에서의 난류 표현은 개선될

수 있으나 전지구 모델에서의 안정성 확보가 요구된다.

o Machine Learning in Weather and Climate 세션 주요 연구 결과 및 토의

- 인공지능(AI)의 날씨 예측 활용 연구는 개발 동향의 주축이 되는 흐름임에 분명하며, EMS2025에서 가장 많은 발표가 이루어졌다. 이는 해당 세션 뿐만 아니라 타 세션의 많은 발표에서도 활용되었다. 해당 세션은 총 4개의 구두 세션과 포스터 세션으로 구성되어 이 주제에 대한 집중 발표와 토의를 시도하였다. 세션의 초청 발표는 유럽 협력에서 개발된 ML 기상 예측 통합 프레임워크인 Anemoi에 대한 것이었으며 이는 EMS 기술상 2025를 수상하였다. 이는 ECMWF의 AIFS와 노르웨이 기상연구소 및 독일 기상청 등의 ML 기반 날씨 모델 개발에 활용된 것으로 발표하였다. 이 프레임워크는 협업을 위한 오픈 소스 프레임워크로 주요 특성은 기상예측에 ML 활용의 진입장벽을 낮추어 다양한 운영센터와 연구자들이 데이터 기반 접근 방식을 구현하도록 하는 것, 모듈 유연성, ML 수명 주기의 고려(데이터 준비~모니터링), 커뮤니티 주도, ML와 NWP의 하이브리드 접근 방식 지원 등의 주요 특성을 강조하였다.

o Atmospheric and Climate dynamics, predictability, and extremes 세션 주요 연구 결과 및 토의

- 대기 및 기후역학, 예측성, 그리고 극한 현상에 대한 세션에서는 다양한 규모에서 역학적 분석을 수행한 연구 결과들이 발표되었다. 가뭄에 대한 예측성 평가 연구 발표와 가뭄이 대기 대순환에 미치는 영향에 대한 연구 발표가 있었으며, 기후 변화로 나타나는 항공난류 특성 변화에 대한 연구 결과들이 발표되었다. 또한 해수면 온도가 행성과 특성이나 블로킹에 미치는 영향을 연구한 결과들이 발표되었다. 폭염에 대한 발표도 여러 건 있었으며, 그 내용은 더블 제트 현상과 관련한 알고리즘 설명, 대기대순환 변화와의 관련성 분석, 연직 온도 구조 특성 설명 등이었는데, 주로 전지구 모델이나 지역모델을 사용한 모델링 연구가 많았으며, ERA5 등 재분석 자료를 이용한 연구도 발표되었다. 열대 및 열대 밖 저기압에 대한 연구 결과도 여러 건 발표되었는데, 수천 개의 앙상블 실험 결과나 장기간 재분석자료를 기반으로 기계학습 방법을 이용하여 저기압 강도를 결정하는 요소를 분석하는 연구 결과들이 발표되어, 인공지능이 다양한 분야의 연구에 활용되고 있음을 알 수 있었다.

o Challenges in Weather and Climate Modeling: from model development via verification to operational perspectives 세션 주요 연구 결과 및 토의

- 해당 세션에서 사업단 운영체계실의 조희제 연구원이 KIM 제한지역모델에 관해 발표하였다. 특히 육면체구 격자의 SEM 역학코어에서 개발된 최초의 제한지역모델임을 강조되었다. 전지구 모델로

부터 경계조건을 제공받아 수행된 LAM의 안정성과 성능에 대해서 발표되었고, 이후 진행될 지상 레이더 활용 자료동화 체계 개발 계획을 공유하였다.

- ECCC의 McTaggart-Cowan 박사의 발표에서는 캐나다 예측 시스템이 다른 모델들에 비해 열대성 저기압에 대한 약한 강도의 편향을 보이는 문제점을 진단하고 개선하기 위한 노력에 대해 소개하였다. 이 편향의 존재는 복잡한 시스템으로부터 점진적으로 단순화된 실험에서 확인할 수 있었으며, 약한 강도 바이어스는 지배 방정식을 푸는데 사용되는 시간적분 방법에서 오프 센터링(off-centering)으로 인한 과도한 수치소산이 발생하고, 이를 사용하는 모든 (반)암시적 반라그랑지안 모델에 이러한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이를 해결하고자 모델의 시간 이산화에서의 필터에 대한 임의의 값을 제한적으로 조정함으로써 그 효과를 완화할 수 있었음을 보였다. 열대성 저기압의 약한 강도 편향을 크게 줄이므로써 전 세계 열대성 저기압 예보를 위한 캐나다 예측모델의 품질을 향상 되었음을 설명하였다.
- 위경도 격자에서 극점에 대한 문제는 지구 대기 모델의 수평 해상도를 높이는데 방해가 되는 사실은 이미 널리 알려져있다. 극지방 근처에서 U에 대한 소용돌이 계산을 재정의함으로써 이 문제를 물리적으로 일관성 있게 해결하고자 위경도 격자에 적합한 가우시안 필터 개발을 진행하는 연구가 발표가 있었다. 현재는 연구의 초기 단계로써 간단한 이상실험 등을 통해 이 방법이 극 문제를 효과적으로 완화할 수 있음을 보였다. 하지만 물리과정 등 복잡한 구조의 모델에서의 그 결과를 분석하기 위해서는 추후 많은 연구가 진행 되어야 함을 설명하였다.

3. 출장성과·시사점 및 향후 업무 활용 계획

가. 출장성과·시사점

- o 이은희: 사업단에서 개발 중인 차세대 수치예보시스템 및 개발 현황을 소개함으로써 사업단의 연구 결과를 홍보할 수 있었다. 현업 예측 모델의 개발 동향에 있어서 자료기반 AI/ML 개발은 이미 주류가 되었으며, 특히 ECMWF를 주축으로 한 유럽지역의 협력 연구에서 사업단의 향후 R&D 연구 계획을 수립하는데 많은 참고를 할 수 있을 것으로 생각된다.
- o 남현: 육면체구 격자에 이완/수축 배열 기반 가변격자 모델에서 좀더 큰 시간 간격을 사용하기 위해 적응시간간격 알고리즘을 적용하여 예측성능 및 계산 효율성 측면에서 그 결과를 소개하였다. 특히, 고해상도 모델에서의 계산 효율성을 위해서 적응시간 간격 알고리즘의 활용에 대해 논의하였다. 또한, 사업단의 가변격자 모델은 이완/수축 배열에 의해서 자유롭게 고해상도 영역을 선택할 수 있기 때문에 한반도 외의 지역에서도 고해상도 가변격자 모델 수행이 가능하다. 따라서 향후 국제 학회 등에서 유럽 등 다른 지역을 대상으로 한 고해상도 예측 결과를 소개한다면, 더 많은 연구자들이

관심을 유도할 수 있을 것이다.

- 김소영: 연장중기 예측이 가능한 모델 개발을 위해 수행하고 있는 KIM 앙상블 실험에서의 성층권 돌연승온 예측성 평가 및 예측성에 영향을 미치는 파동 특성 분석 연구 결과를 소개하였다. 같은 세션에서 발표된 열대 저기압, 난류, 폭염, 블로킹, 행성과 변화 등의 현상을 역학적으로 분석한 연구 결과들로부터, 앙상블 실험 및 다양한 재분석 자료, 인공지능 기법 등의 활용과 여러 파동 분석 방법을 참고할 수 있을 것이다.
- 한지영: 강수 유형, 기작 등의 지역 간 차이를 반영할 수 있는 적운대류 물리과정 모수화 기법 개발을 통해 한반도 지역의 극한 강수 예측 성능을 개선한 연구 결과를 소개하였다. 날씨 및 기후 예측, 환경 모니터링, 기상 연구 및 응용 분야에 인공지능(AI)과 기계 학습(ML) 기술을 활용한 연구가 다수 발표되었는데, 이를 향후 연구 개발에 참고할 수 있을 것이다.

나. 향후 업무 활용 계획

- 이은희: DWD의 SINFONY 프로젝트와 ECMWF의 DestinE와 같은 통합 과제의 목표들은 사업단이 당면한 현안에 대한 방향과 일치하는 것으로 보이고, 이니셔티브의 구성과 방법론, 당위성 등 사업 기획과 구체적 해결 방안 수립에 이러한 정보를 활용할 계획이다.
- 남현: 가변격자모델의 고해상도 영역으로써 한반도 외의 다른 지역으로의 영역 설정을 확대하는 등의 다양한 실험적 접근을 역학 개선에 활용할 계획이다.
- 김소영: 최신 연구발표로부터 얻은 앙상블 실험 방법 및 파동 분석 방법 등에 대한 정보를 참고하여, 성층권 돌연승온 모의 특성에 중요한 행성과 및 블로킹 등의 추가 분석 및 계획 수립에 활용할 계획이다.
- 한지영: AI와 ML 기술 활용 연구발표로부터 얻은 정보를 기존 물리과정 모수화 방안이 예측한 값을 기계 학습 모델로 후처리하거나 오차 보정하는 형태 등의 AI/ML 융합 기술 개발 계획 수립에 활용할 계획이다.

(재) 차 세 대 수 치 예 보 모 델 개 발 사 업 단