

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	팀장	실장	사업단장
	4월 21일	4월 23일	4월 23일	4월 23일	4월 24일
재	홍자영	심태현	배수야	이은희	박훈

1. 출장개요

출장목적	ECMWF Annual Seminar 2025 참석 및 발표		
출장일정	2025. 4. 6.~2025. 4. 13. (6박 8일)		
성명	소속	직급(직위)	
박래설	수치모델실	수석연구위원	
백성혜	역학물리팀	책임급연구원	
구명서	결합모델팀	책임급연구원	
홍자영	앙상블응용팀	선임급연구원	
방문기관 (또는 회의장소)	독일 연방 디지털 교통부 Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV)		
출발지	인천	도착지	본

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2025년 4월 7일부터 11일까지 독일 본에서 열리는 ECMWF 연례 세미나에 참석하고자 한다. 이번 세미나의 주제는 "변화하는 기후에서의 예보"로, 급변하는 기후 환경 속에서 효과적인 기상 예보 방법을 모색하는 것을 목표로 한다. 기후 변화로 인해 예측 가능성의 한계에 대한 논의는 더욱 중요해졌으며, 기존의 정적인 기후를 전제로 한 예보 방식은 더 이상 유효하지 않게 되었다. 이러한 변화 속에서 예보 정확성을 높이기 위한 새로운 기술과 방법론을 탐구하는 것은 필수적이다.
- 이번 세미나는 특히 기후 변화속에 예보모델이 대응하기 위한 방안에 중점을 두고 있다. 각국의 현업 기관 및 학계에서 예보 측면에서 제시하는 다양한 대응 전략과 해결책을 심도 있게 다룰 예정이다. 이를 통해 급변하는 기후 환경에 적응하고, 예보의 신뢰성을 높일 수 있는 방법을 모색한다. 또한, 다양한 전문가들과의 교류를 통해 최신 연구 동향을 파악하고, 한국형 모델에 적용할 수 있는 기후 위기 대응 방안을 탐색하는 기회를 가질 예정이다. 이를 활용하여 사업단의 기후변화 환경에서의 연구 개발의 중요성을 환기하고 앞으로 한국형 모델의 개발에 활용하고자 한다.

나. 주요 업무 수행 사항

○ 박래설

- 2025년도 ECMWF ANNUAL SEMINAR에서는 50주년을 기념하여 기후의 급속한 변화를 통한 수치예보모델의 직면한 문제와 이를 해결하기 위한 발전 방향에 대해 논의하였다. KIM을 기후 변화에 적응가능하도록 최적화 및 개선하기 위한 몇 가지 방안(AI 활용, 기후자료 상세화, 결합 모델링, 앙상블 예측 등)을 소개하였으며, 결과의 일부를 제시하였다. 본 학회에서는 기후변화가 수치예보모델의 예측성에 미치는 영향성의 정확한 분석 및 이해의 중요성을 언급하면서, 인공지능 및 기계학습을 활용한 수치예보와 결합모델링을 그 해결방안의 하나로 강조하였다. 이 외에도 km 규모의 고해상도 모델과 에어로졸을 포함하는 등 모델의 복잡성을 증가시키는 방향 역시 기후변화에 적응하는 방법으로 논의되었다. 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 머신러닝을 활용한 예보가 가장 앞서 있으며, 타 기관 역시 관련 연구를 진행 중이지만 그 격차는 매우 큰 것으로 보인다. 한편, ECMWF 주관으로 연장중기 예측을 위한 모델간의 비교 플랫폼이 구축된 상태이다. 이 경쟁에는 역학모델만이 아닌 인공지능 기반의 모델을 함께 포함하여, 가장 예측성이 좋은 모델을 발굴하고 이를 참고하여 각 기관의 연구 성과를 극대화하고자 하는 의도이다. 2026년도에 경쟁이 시작되기 때문에 사업단 역시 고려할 수 있을 것으로 보인다. ECMWF의 Magdalena 박사와 Hamburg 대학의 Detlef 교수와의 논의를 통해 기계학습과 관련해서는 사업단에서 진행하는 물리모수화 방안의 개발에 활용하는 부분은 적절한 시작점임을 인지할 수 있었다. 대만에서도 AI를 활용한 연구가 활발하게 진행 중인데, 그 방법론이 매우 흥미로웠으며 주로 계절예측을 위해 AI를 활용하지만, 충분히 중기예측에서의 활용이 가능함을 논의하였다.

○ 백성혜

- 유럽중기예보센터(ECMWF)의 2025년도 Annual Seminar에 참석하여 Land Surface Albedo Climatology Using MODIS Satellite Data and Its Changes with Climate라는 주제로 포스터 발표하였다. 이번 연례 세미나에서는 50주년을 맞은 유럽중기예보센터의 발자취를 돌아보고 기후변화 속에서 어떻게 수치예보모델을 발전시켜 나갈 것인가를 논의하는 자리였다. 학회에서 발표한 내용은 위성관측자료 MODIS를 활용한 지면 반사도의 소개와 기후변화에 따라 변화된 지면 반사도 기후값의 활용이 어떻게 계절예측에 영향을 미치는가에 대한 것이었다. 지면의 경우는 자연적인 변화와 더불어 인위적인 토지사용이나 산림, 도시계획에 영향을 받기 때문에 주기적으로 업데이트 되어야 할 필요성이 있고 계절실험 결과는 그 필요성을 뒷받침하고 있다. 북반구 여름과 겨울 중에서 특히 북반구 겨울의 지면 반사도 변화가 지난 10년간 가장 큰 변화율을 보였다. 이는 북반구 겨울에 기후변화로 심화된 혹한 기상과 관련 있는 사항으로 폭설의 빈도와 강도 증가로

중앙아시아와 몽골지역의 반사도 증가가 두드러졌다. 5개의 앙상블 실험에서 고위도 특히 성층권을 5K 이상 가열하는 결과를 나타내었다. 유럽중기예보센터의 Dr.Stockdale은 5개의 앙상블 실험에서 모두 성층권 고위도 지역에서 5K 이상 온도가 높은 결과는 signal로 보이기는 하지만 5개보다 훨씬 많은 100개의 앙상블로 실험하여 확률적으로 t-distribution을 활용하여 평가할 것을 권장하였다. 그리고 북반구 겨울 뿐만 아니라 여름의 경우 중부 아프리카에 나타난 2m 온도 증가도 삼림의 증가로 나타난 태양열 흡수의 증가 시그널로 해석할수 있다고 동의하였고 이 역시 보다 많은 앙상블 실험으로 확인해 볼 것을 건의하였다. ECMWF에서도 위성 관측에 기반한 지면 반사도를 사용하고 있으며 변화하는 기후와 데이터 처리 성능의 발전으로 지면반사도에 있어서도 자료동화를 사용하는 방법을 향후 고려 중이라고 설명하였다.

- 최근 들어 혹한 기상의 발생 빈도와 강도는 기후변화의 특징중 하나로 관측되는 것으로써 Lausanne 대학의 Dr. Domeisen의 The Role of the Stratosphere in Extended-Range Prediction: Mechanisms, Modeling and Impacts 발표는 혹한기상을 다루면서 현재 우리 사업단에서 추진 중인 연직 해상도와 관련이 있는 내용을 발표하여 사업단의 연구에 좋은 참고 자료가 될 것으로 보인다. 이 연구에서는 91층의 연직해상도를 198층으로 확장하였고 40km 고도에서 1.7km 연직 해상도를 800m로 증가시켰다. 그 결과 Gravitational Wave Breaking을 더 잘 모사할 수 있어서 10hPa에서 100hPa 사이에 나타난 냉각 오차를 2-4K 정도 높임으로써 이를 완화하고 그 결과로 장기적으로 8에서 14일 사이의 예보에서 지면의 혹한 현상에 대한 예보 성능을 높일 수 있었다고 발표하였다.

o 구명서

- ECMWF 50주년 기념 행사는 'Forecasting in a changing climate'을 주요 안건으로 상정하여 1개의 메인 워크숍(Annual seminar)과 3개의 작은 워크숍(data assimilation: initial conditions and beyond, surface process coupling and its interactions with the atmosphere, ancillary data for land surface and Earth system modelling)을 병행하여 진행하였다. Annual Seminar에서는 'New Coupled Modeling System based on the Korean Integrated Model (KIM)' 주제의 포스터를 발표하면서 사업단에서 개발중인 결합모델링시스템에 대한 전반적인 설명과 다양한 시공간 규모에서의 성능 검증 결과를 공유하였다. ECMWF, UM, DWD 등의 결합모델 개발자들과 개발 과정에 대한 질의응답을 진행하였고 사업단의 개발 전략과 성능이 유럽지역 모델과 상당히 유사점이 있음을 확인하였다. NEMO4-SI3 해양-해빙 결합모델 설정과 개발 방향은 큰 차이점이 없고 특히, UM 지역 결합모델은 WW3 파랑모델을 사용함으로써 KIM 결합모델과 거의 같은 성분 모델을 사용하고 있다. Annual seminar 발표의 주요 내용은 AI 모델과 km-scale 모델 개발,

그리고 기후 변화 예측성능 개선을 위한 모델링 측면에서의 노력 등이 필요함을 시사하였다.

- 자료 동화를 제외한 2개의 작은 워크숍에 참석하면서 결합모델 개발을 위한 보다 실제적이고 진보적인 연구들을 볼 수 있었다. 사업단에서 사용중인 eORCA025 (25-km)보다 고해상도 해양 모델링(전구 12-km; 지역 3-km), 빠른 주기의 결합 효과(지역모델 10분 간격 결합), 상호작용 개선(해상분무 효과, 해빙 지역 파랑 결합), 모델링 복잡도 증가(ice sheet, lake), 보조자료 개선(아격자산악, 지면피복) 등의 연구 결과를 확인하였고 그룹별/전체 논의 과정에 참석하여 각 연구기관의 개발 현황과 향후 전략을 습득하였다. 개별 논의를 통해 ECMWF의 보조자료 사용 현황, NEMO 고해상도 모델링 정보(GOSI9/eORCA12), ECCC 지면/호수모델 개발 현황, DWD Icon-seamless 모델의 개발 전략 등을 보다 상세히 확인하였다.

○ 홍자영

- ECMWF 50주년 기념 세미나에 참석하여 KIM에서의 모델 불확실성을 표현하는 추계 섭동의 현재 개발 상황과 향후 개발 계획에 관한 내용으로 포스터 발표하였다. 추계 물리모수 섭동(stochastically perturbed parameterizations, SPP)과 관련하여 Martin Leutbecher 박사(Team leader Model Uncertainty, ECMWF)에게 조언을 받았다. ECMWF에서는 2017년에 SPP를 개발한 이후 현업에 적용하기 위해 수년간 노력하여 2024년 11월에 Integrated Forecasting System(IFS) Cycle 49r1에 추계 물리모수 경향 섭동(Stochastically Perturbed Parametrization Tendency, SPPT)를 대신하여 교체하였다. 따라서 SPP를 개발하고 성능을 향상하는 것엔 무수한 조합과 실험이 필요하며 5일 예측 결과로 평가한 후 15일까지 확장하여 예측 결과를 분석하는 방향으로 잘 진행하고 있으며, 인내심이 많이 필요한 작업이라고 조언받았다. 또한, 물리모수에 임의의 섭동을 주었을 때 그 섭동으로 발생하는 오차(bias)를 분석하여 어떤 방향으로 조절하는 것이 옳은 방향인지를 판단하는 것이 좋을 것이라는 조언도 받았다. 그 외 Tobias Selz 박사(독일 항공우주 센터)는 ECMWF의 SPP와 차별성을 염두에 두면 좋을 것이라는 조언을 받았다.
- ECMWF, 독일 기상청(Deutscher Wetterdienst, DWD), 스위스 기상청(MeteoSwiss), 프랑스 기상청(Meteo-France) 등 유럽의 각 현업 기관의 수치모델 연구 계획 및 방향에 대해 발표하였다. 그리고 향후 공개될 ERA6 재분석자료와 ORAS6 재분석 자료의 장점과 특징, 중규모 예측에서 예측이 맞지 않는 이유, 열대와 중위도 원격상관에서 중위도 종관 시스템의 역할, 연장중기 예측에서 성층권의 역할, 예측 리드타임에 따라 달라지는 해양의 예측 가능성에 미치는 역할 등의 발표도 있었다. 또한, ECMWF의 앙상블 예측과 불확실성의 표현에 대한 포괄적인 내용을

다른 발표가 있었다. 이 발표에서는 지난 30년간 중기예보 검증 통계의 변화는 모든 측면에 걸쳐 이루어진 수많은 개선 덕분에 확률 예측 능력이 어떻게 향상되었는지를 잘 보여주며, 불확실성의 표현은 앙상블 예측 기법의 핵심 요소라고 설명하였다. 최근 주요 발전 사항으로는 SPP의 도입과 지역적 보존 특성을 통해 물리적으로 더 일관된 예측을 가능하게 하였고, 앙상블 자료동화와 고품질 결정론적 분석장을 활용하여 scale-dependent re-centering 방식으로 초기장을 새롭게 구성하였으며, 기계학습을 활용하여 낮은 해상도의 앙상블 예측 결과를 고해상도로 규모 축소함으로써 고해상도에서의 불확실성 정량화를 향상했다고 언급하였다. 향후 ECMWF에서는 SPP의 momentum transport 섭동을 조정하여 10m 바람의 스프레드를 줄이는 방향으로 개선할 예정이며, land-surface 등 결합 과정으로 SPP를 확장하고, 해양 및 해빙 모델 내의 불확실성 표현을 강화하는 등의 계획을 발표하였다.

3. 출장성과 · 시사점 및 향후 업무 활용 계획

가. 출장성과 · 시사점

○ 박래설

- 기후변화라는 수치모델 예측의 장애물을 극복하기 위한 각 기관의 방향은 사업단이 고려하는 방법들과 어느 정도 일맥상통함을 확인하였으며, 타 기관들과 지속적인 소통을 통해 전지구적인 관점에서 함께 해결하기 위한 노력이 필요함을 인식할 수 있었다. 또한, AI/ML 기반의 예측시스템 개발을 위한 노력은 비록 성과가 미비하더라도 지속하지 않으면 그 격차는 더욱 커질 것으로 판단되기에, 이 부분에 대해서 사업단의 개발 방향 수립 과정에서 심각하게 고려해야 할 것이다.

○ 백성혜

- 기후변화를 겪으며 수치예보에 있어서 지구의 온도나 에너지 순환을 비롯한 전반적인 시스템에서 평형상태의 가정을 사용하기 어려워짐에 따라 해양은 물론이고 다양한 시스템의 영향을 고려하여야 하는 문제에 직면하고 있다. 급격하게 증가된 데이터와 역학, 물리적인 과정에 대한 계산 요구를 AI/ML 기반으로 해결하려고 하는 노력은 이제 가장 적절한 해결책으로 받아들여지는 것으로 보인다. 아직 해결해야 할 문제들이 있지만 AI/ML의 다양한 기법들을 활용하여 기상 문제에 가장 알맞은 솔루션을 찾아나가는 노력은 모든 연구기관에서 필수적인 것으로 여겨진다.

○ 구명서

- 사업단에서 개발중인 결합모델은 유럽지역 결합모델과 유사한 개발 전략을 가지고 있으며 현재까지 분석된 결합모델의 예측성능은 그들과 비교해 적절한 것으로 분석된다. 관련 개발자들의 발표와

논의를 통해 드러난 향후 결합모델의 개발 전략은 해상도 개선, 상호작용 고도화, 보존성 강화, AI 하이브리드 기술 접목 등으로 귀결될 것으로 예상된다. 그리고 중기 및 연장중기 예측 성능을 동시에 개선하기 위해 시공간 규모별로 특화된 결합모델 개선안을 모색할 필요가 있고 계통오차를 완화하기 위해 다양한 검증체계를 마련하여 개발에 환류할 필요가 있다.

○ 홍자영

- KIM 연장중기 앙상블예측시스템을 활용한 모델 불확실성 및 추계 섭동 관련 초기 연구 결과를 소개하였고, 유럽의 여러 현업 기관의 중기 앙상블 예측성의 성능 및 평가 방법에 관한 내용을 수집하였다. 또한 SPP의 선두 기관인 ECMWF의 앙상블 예측에서 불확실성 표현 방법과 모델 추계 섭동 관련 개발 현황을 파악할 수 있었다. 그리고 대부분의 분야에서 AI/ML을 적용한 연구 발표가 두드러졌다. 현재 우리 기관은 ECMWF에 비해 추계 섭동 표현 방안은 개발 단계이지만, AI를 적용하는 경향을 반영하여 우리의 개발 계획에 고려해야 할 것으로 판단된다.

나. 향후 업무 활용 계획

○ 박래설

- 타 기관의 개발 방향을 고려하여, 현재 진행중인 ML 기반의 물리모수화 개발 및 에어로졸 등을 고려하는 복잡도 높은 모델 개발 등을 지속할 계획이다. 현재 검증체계에서 결합모델이나 연장중기 예측에 대한 검증은 포함되지 않았는데, 타 기관의 검증방안을 참고하여 결합모델 기반의 연장중기 예측에 대한 검증시스템을 구축하여야 할 것이다.

○ 백성혜

- 성층권 연직 해상도 증가와 관련하여 Dr. Domeisen의 연구결과를 현재 사업단 연구에 참고자료로 활용할 계획이다. 성층권 냉각 오차 완화와 관련하여 증력과 외에 어떤 물리과정이 주요하였는가를 질의하였고 특히 수증기에 의한 영향이 가장 컸다는 답변을 받았다. 이 연구에서 성층권의 해상도를 높임에 따라 수증기의 모의가 어떻게 변화하였고 또한 수증기 관련하여 검증할 수 있는 자료 여부등을 조사하여 활용하고자 한다.

○ 구명서

- 중기/계절예측 뿐만 아니라 CMIP과 같은 장기 기후 예측실험을 통해 결합모델의 성능을 보다 폭넓게 검증하고 안정성을 확인할 계획이다. 새롭게 습득한 GOSI9/eORCA12 정보를 활용하여 해양/해빙에 대한 해상도 개선 효과를 확인하고, 파랑모델의 해상도 및 상호작용을 동시에 개

선하여 결합모델의 완성도를 높여갈 것이다.

○ 홍자영

- ECMWF의 앙상블 예측에서 불확실성을 표현하는 방법 및 앙상블 예측을 진단하는 방법 등을 기반으로 현재 SPP 개발에 집중하고자 한다. 그리고 ECMWF의 Leutbecher 박사의 조언대로 각 물리모수를 섭동에 적용하였을 때 예측 변수들이 어떤 반응을 보이며, 모델 오차가 어떻게 바뀌는지 확인할 예정이다. 이 정보를 기반으로 KIM에 적용할 모델 불확실성 방안의 최적화 및 개선 방향을 세우고자 한다.