

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	11월 28일	11월 28일	12월 5일	12월 5일
재	구명서	이은희	박래설	(대결) 박래설

1. 출장개요

출장목적	6th WGNE workshop on systematic errors in weather and climate models 참석 및 발표		
출장일정	2022. 10. 30. ~ 2022. 11. 6. (7박 8일)		
성명		소속	직급(직위)
이은희		모델검증팀	책임급연구원(팀장)
구명서		결합모델팀	책임급연구원(팀장)
송재영		결합모델팀	선임급연구원
이은정		결합모델팀	선임급연구원
방문기관 (또는 회의장소)	영국, 레딩, ECMWF		
출발지	서울, 인천	도착지	영국, 레딩

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2022년 10월 31일~11월 4일에 영국 레딩 European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)에서 개최되는 6th Working Group on Numerical Experimentation (WGNE) workshop on systematic errors in weather and climate models 참석을 통해 구름 및 강수과정, 열대 순환, 성층권-대류권 상호작용, 대기-해양-지면-빙권 상호작용, 모델 불확실성, 계통오차 분석 등 시공간 통합형 모델 개발 관련 최신 연구 동향을 파악하고, 각국의 전문가들과 교류함으로써 사업단의 연구성과 및 비전 등을 공유하고자 한다.
- 사업단 1단계(2020~2022) 동안 개발한 대기-지면-해양 결합모델과 구름 모의성능 검증 연구 성과를 발표하고, 모델 개발 및 예측오차 분석 전문가들과 논의를 통해 시공간 통합형 모델 개발에 성공적으로 활용할 수 있는 유용한 정보와 의견들을 수집하여 사업단 2단계(2023~) 연구 계획에 적극적으로 활용하고자 한다.

나. 주요 업무 수행 사항

- Clouds and precipitation

- 고해상도 전구 결합모델은 CMIP 모델보다 구름과 강수의 일변화와 수평 전파를 잘 표현할 수 있음. 독일 ICON-SAPPHIRE (ICON-S) 전구 결합모델은 약 5km 해상도로 1년 장기 실험 수행이 가능하였고 구름과 강수의 계통적 예측 오차가 적절히 개선됨을 보임
- UM 모델에서 구름 물(liquid)은 진단하고 구름 얼음상(ice)에 대해서는 예단을 적용하는 혼합 구름양 모수화 방안을 개발하여 강수와 복사 모의에 긍정적인 효과가 있음을 제시. 도시 규모 (25~300m)에서 대류가 보다 적절히 표현되지만 계통적 오차가 단순히 해상도 증가만으로 해결되지 않음을 확인
- ECMWF 전구 모형에서 구름과 복사 모의에 대한 계통적 오차를 진단한 결과, 구름양 과소모의로 인한 TOA의 복사 모의 오차는 남반구 겨울철 극지역에서 나타나고 계절과 상관없이 대륙 서안에서 발생하는데, 이는 KIM을 포함한 CMIP 모델의 일반적 현상임. 과냉각 구름물과 얼음상 구름에 대한 개선, 구름양 방안 개선, 수상량 영향 반경(effective radius)와 구름 비균질성 등에 대한 종합적 개선을 통해 복사에 대한 계통적 오차가 최근 적절히 완화되었음

o (Sub-) tropical circulation

- 미국 Naval Research Laboratory (NRL) 지역모델(COAMPS-TC)을 개선하여 4 km 해상도에서 열대 저기압 예측을 수행한 결과, HWRF와 유사하거나 보다 개선된 태풍 강도와 진로 예측 성능을 보여줌. 모델 개선사항 중 하나로 강한 바람에서 항력 계수가 오히려 감소하도록 설정하였는데 이는 ECMWF IFS에서도 유사한 연구를 진행하고 있으며 대체로 긍정적 효과가 있음을 확인. 경계층, 미세물리과정, 대류 모수화, 그리고 수평 해상도 등에 따른 민감도 실험을 수행하여 모델 개선에 활용하고 있음
- 계절예측모델은 해수면 온도(sea surface temperature; SST) 아노말리를 보다 서쪽에서 많이 표현하는 계통적 오차를 지니고 있는데(ENSO-related SST) 이는 적도 강수 오차의 주요한 원인으로 작용. 이러한 현상은 예측기간이 길어져서 생기는 것보다 특정 계절에 대한 예측도가 감소함으로써 발생하는 문제로 분석됨
- 남아시아 여름 몬순(South Asian Summer Monsoon; SASM) 예측 오차는 구름에 의한 단파복사 오차와 큰 관계가 있는 것으로 분석되었고 3시간 간격 라디오존데 자료동화기법을 적용하면 maritime continent 서쪽에서 강수 일변화 모의 성능이 개선됨
- NRL의 계절내 및 계절(sub-seasonal to seasonal; S2S) 예측 모델은 HYCOM 해양모델과 CICE 해빙모델을 결합하였고 S2S 예측을 위한 실험은 매주 45일 예측을 수행하면서 7년 기간동안 5-11월에 대한 분석을 수행. Madden-Julian Oscillation (MJO)는 대체로 강하고 빠르게 모의되었으나 Analysis Correction-based Additive Inflation (ACAI) 기법을 적용하여 앙상블 예측 성능을 개선함

- CESM1 (CMIP5) 대비 CESM2 (CMIP6)의 MJO 예측성능이 크게 개선됨. 주된 원인은 해양모델 결합 교환주기가 daily에서 hourly로 변경된 것으로 예상되고 대기와 해양모델의 자체 업데이트는 MJO 모의 성능 개선에 큰 영향이 없는 것으로 파악됨

o Stratosphere-Troposphere interactions

- ECMWF 모델에서 수평해상도 증가는 성층권과 중간권 온도 모의성능 개선이 유도됨. 오존 기후값, 복사 및 에어러솔 물리과정 개선으로 상부 온도 오차가 크게 완화됨. 그리고 중력파는 4 km에서도 완전히 분해되지 않음을 확인하였고 3-5 km에서 grey-zone이 나타남
- S2S 예측 시스템은 대체로 성층권에서 큰 오차를 나타내는데 특히 모델 최상층이 낮은 모델에서 오차가 증가함
- 해양모델에서 kinetic energy backscatter 방안을 사용하면 어느 정도 난류현상을 재현하면서 모델 성능 개선에 도움이 될 수 있음. 한편, 벌크형 모수화 방안은 대체로 난류속을 과대모의하는 경향이 있는데 지면 난류속은 MJO와 ENSO 예측에 큰 영향을 미치므로 개선이 요구됨
- 민감도 실험에 근거하여 지면 열교환계수 모수화 방안을 개선하였을 때, 극지역 해빙 온도 모의성능을 향상시키면서 대기의 진동모드가 개선될 수 있음을 확인. 따라서 해빙 모의 성능이 예측도 개선에 크게 중요함
- 해빙 모델에서 다층 적설 방안을 적용하면 대기 강제력에 대한 민감도를 증가시켜 예측도 개선에 도움이 될 수 있고 극지역 예측도 향상을 위해서는 구름양 진단과 현열 모수화 방안에 대한 깊은 고찰과 수정이 필요함

o Quantifying uncertainty

- 1도 해상도에서 CESM2 모델을 20년(1999-2018) 동안 매주 수행하여 S2S 예측성능을 검증하였을 때 stochastically perturbed physical tendency (SPPT) 난수 섭동 방안은 앙상블 스프레드 개선과 Ranked Probability Score (RPS) 개선에 도움을 줄 수 있음. NAO, NAM, PNA, NPO, PSA등이 진동모드에서도 긍정적 효과를 확인하였으나 강수 일변화 등의 빠른 진동모드는 개선되지 않음

o Challenges and surprises in simulating the climate system

- 일본 NICAM 모델은 전구 5 km 해상도에서 S2S 예측성능을 검증하였고 저해상도 대비 여러 방면에서 예측 성능이 개선되나 강수 일변화나 MJO 예측성 등 여전히 해결해야 할 물리적 현상이 있음을 시사함
- 해양모델 해상도 증가는 North Atlantic의 해수면 온도 오차를 크게 감소시킬 수 있고 유럽지역 블로킹 모의에도 큰 도움이 될 수 있음
- radiative-convective equilibrium (RCE) 모의실험에서 해상도 증가에 따라 anvil 구름은 증가하

는데 주된 요인은 detraining 증가로 분석됨. 단일 모멘트와 이중 모멘트 미세물리과정은 다른 기작을 가지므로 구분하여 분석하는 것이 요구됨

- km 해상도에서 대류 모수화 과정을 제거하면 대부분의 모델은 유사한 계통 오차(열대 강수 과대모의, 과도한 셀형태 강수, 짧은 지속시간 등)를 보임. ECMWF IFS 모델은 미세물리과정과 난류 혼합 방안을 개선하고 대류 모수화를 약하게 사용하면서 계통 오차의 크기를 완화할 수 있었음

- 기후모델에서 해상도 증가가 어려울 때 large scale에 대한 eddy feedback을 강화하면 signal-to-noise 에러 감소에 도움을 줄 수 있음

o Novel approaches to diagnose, measure or reduce systematic errors

- Initial tendency approach는 아주 초기 시간에 모델 변동상태를 파악함으로써 모델 오차의 원인을 쉽게 분석할 수 있고 자료동화에 도움을 줄 수 있음.

- MetUM 모델은 Western Pacific Subtropical High (WPSH)을 대체로 약하고 오른쪽으로 편중되도록 모의하는 특성을 지니는데 이것은 아시아 지역 몬순 예측성능 약화의 원인으로 분석됨. 대류과정을 적절히 조절했을 때 WPSH 모의성능이 개선됨을 확인하였는데 대류가 발생할 때 지면 난류속이 좀더 지속될 필요가 있음을 분석함

- DIMOSIC 프로젝트는 동일한 대기 초기조건을 사용하여 다수의 전구 모델 성능을 비교 분석하는 것이 목표임(KMA/KIM은 이미 참여하고 있음). 대체로 중위도에서 유사한 RMSE 성능이 나타남을 확인하였으나 많이 태풍 예측 등에서는 상이한 오차 패턴을 확인

o 포스터 세션 및 전문가 토의

- ECMWF 소속 Richard Forbes 박사로부터 KIM의 구름 및 복사 오차 현황에 대한 내용을 논의함. 구름과 관련된 복사 진단에서 위성자료들의 지표면 값에 대한 오차를 내포하므로 TOA의 오차를 확인할 필요가 있고, 여름철 극지역 주변의 지표면 하향단파 복사모의 문제(예, DJF 남극 주변)는 우선 구름양 모의 문제를 검토한 후, ECMWF에서 최근 개선한 것과 같이 과냉각 수적에 대한 모의로 접근할 수 있다는 의견을 받음.

- ECMWF 소속 Linus Magnusson 박사와 DIMOSIC 작업에 대한 의견을 교환함. 현재 모델들의 오차를 비교한 상태이며 원인 분석을 위해 구름, 복사 등 향후 분석이 계획되어 있음. 수치모델링 센터에서 참여한 KIM 결과는 최종에 참여하지 못하였으나, 향후 비교연구를 재개할 예정.

- KIM 결합모델 개발 현황과 향후 계획을 소개하면서 ECMWF 소속 Kristian Mogensen 박사로부터 개발 과정이 적절해 보인다는 의견을 받음. ECMWF 결합모델은 KIM 결합모델과 같이 대기 모델의 해상도와 상관없이 동일한 해양/해빙모델 해상도(25 km)를 사용하고 있으며 2023년에 NEMO 버전을 3.4에서 4.0으로 업그레이드할 계획임. 주된 변화는 계산 효율성 개선으로 KIM

에 결합된 NEMO는 이미 4.0 버전이 적용되어 있음. 해양/해빙모델 해상도 개선은 조금 미루고 있으며 2024년 이후로 예상됨.

- NCEP 소속 Fanglin Yang 박사 포스터 발표를 통해 UFS 모델의 개발 현황과 방향을 확인함. KIM 결합모델에 포함된 NoahMP 지면모델을 동일하게 사용할 계획이나 겨울철 냉각오차가 심각하여 관련 이슈 해결을 위해 노력하고 있으며 이는 KIM에서 유사한 현상임. 기존 계획과 달리 2024년에 NoahMP 지면모델을 현업으로 사용할 것으로 예상함. 그리고 모델 오차의 12시간 진동에 대한 논의에서 관측자료의 차이와 대기 일변화로 인해 불가피한 문제이나 이러한 차이가 적은 것이 바람직하다는 의견을 교환함.
- 포르투갈 리스본 대학의 Francisco Lopes 박사는 지면 보조자료 Land-Use와 LAI의 업데이트를 통해서 IFS 지면 변수들에 큰 변화를 주는 것을 확인함. 북반구 쪽은 지면온도 개선이 약간 되었으나, 열대지역은 에러가 증가하여 최신 자료적용이 항상 긍정적인 결과만을 초래하지 않는다는 것을 보여줌. 또한, 우리 모델도 최신 지면자료 도입을 시도하고 있어 모델 개발 방향이 유사함을 확인할 수 있었음.
- JMA 소속 Takakura Toshinari 연구원의 GSM2103와 MRI.COM을 활용하여 대기-해양 결합과 해수면온도 오차, 강수 상관성, 대기 및 MJO 예측성과 같은 분석 결과를 통해 JMA 결합모델의 개발 현황과 방향을 확인하고 사업단과 유사한 방향으로 개발이 진행되고 있음을 파악하였음. 추후 초기 충격을 줄이기 위해 해빙모델의 초기화와 중위도에서의 단기 해수면온도 결합 시 tendency 활용이 도움이 될 수 있다는 의견을 교환함.
- 영국 임페리얼 대학의 Rui Chen 연구원으로부터 표층 난류 속 검증을 통해 사업단 결합모델 내 열 거칠기 길이 모수화 선정에 도움을 줄 수 있다는 의견을 받음.

3. 출장성과 • 시사점 및 향후 업무 활용 계획

- o 이은희: 본 워크샵에서는 여러 규모 현상에 대한 모델 계통 오차의 원인을 이해하기 위한 다양한 방법들이 소개되었고 대부분의 연구내용이 사업단 차세대 모델 개발과 성능 향상을 위해 직접적으로 활용될 수 있는 기술이다. 대기, 해양, 파고, 지면 등 지구시스템 모의의 전문가 집단들이 각 영역 혹은 이들의 상호 작용에 있어서 모델의 계통 오차와 그 원인을 규명하기 위한 것에 초점을 두고 있으므로 본 워크샵에서 소개된 다양한 방법론들은 사업단 모델을 진단하고 개선하는데 적용해 볼 수 있다. 또한 모델의 개선을 위한 물리과정 개선 뿐만 아니라 편향 오차의 제거 방법, 기계학습을 이용한 최신 방법들로의 확장 가능성을 확인할 수 있었다. 구름 과정은 가장 많은 불확실성을 가지는 반면, 강수 성능 뿐만 아니라 복사 영향에 따른 대기 예측 성능 전반 그리고 장기 예측까지 영향을 미칠 수 있는 매우 중요한 과정이다. 구름의 불확실성은 지표 및 대

기 조건, 일변화, 미세물리, 하층운의 모의 특성, 고위도 예측성, 격자/아격자 대류 등의 다양한 이슈들과도 밀접하게 연관되어 있는데 이러한 최신 연구의 동향들이 본 워크샵에서 다루어졌다. 선진 기술들을 공유함으로써 사업단 개발자들의 모델과정과 계통오차에 대한 이해를 증진시키고 모델의 문제점에 빠르게 접근할 수 있는 기술적인 도약을 제공할 수 있을 것이다.

- 구명서: 사업단에서 개발 중인 대기-지면-하천유수-해양순환-해빙-파랑 결합모델의 개발 현황과 향후 계획을 소개함으로써 사업단을 홍보하고 1단계(2020~2022) 기간 동안 개발된 KIM 결합모델 진단과 개선을 위해 관련 전문가의 자문을 받을 수 있었다. 향후 연장중기 시간규모에서 예측도 향상을 위한 결합모델 개발 방향과 검증방안을 구체적으로 수립하고자 전세계 현업 및 연구용 결합모델 개발 내용을 살펴보고 선진 개발그룹 전문가와의 의견 교류 및 토의를 통해 협업 가능성을 타진해 보았다. 결합모델에서 필요한 대기 물리과정과의 상호작용 및 일관성, 효율적 앙상블 예측체계 설계와 진단 방법 등에 관한 연구 주제는 향후 개발에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대한다.
- 송재영: 대기-지면 관한 최신 연구 동향 및 기술을 조사하였고 현재 우리 모델 결합 현황 그리고 몇 가지 지면 모델 연구 결과를 공유하였다. 특히, 결합 세션에서 대기-해양 및 대기-지면 등 모델 결합 후 발생할 수 있는 모델 오차의 원인을 조사할 수 있었고 KIM 결합모델 개발 중 초래할 수 있는 문제점을 최소화 할 수 있는 방법을 탐색하였다. 또한, 우리 모델의 결합 특성과 개발 계획을 해당 전문가와 논의하여 의견을 활용해 개선점 및 앞으로의 지면 모델 고도화 방향을 수립하는데 도움이 되었다.
- 이은정: KIM 대기-해양 결합모델 개발 과정 및 예측성능평가 결과를 발표하여 사업단의 결합모델 현황을 공유하였고 타 기관에서의 경계모델 결합모델 개발 방향과 검증방안을 확인하여 사업단 대기-해양 결합모델 개발 적절성을 진단하였다. 특히, 세부적으로 대기-해양 상호작용과 관련한 벌크공식의 모델 내 특성, 바람에 따른 다양한 교환계수 함수에 대한 민감도, 해양 중규모 에디에 의한 난류 모수화와 연장중기 예측에서의 결합모델 강수 및 ENSO 모의 특성을 파악하고 해당 전문가와 논의함으로써 대기-해양 결합모델 개발 및 검증에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대한다.