

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	7월 31일	8월 1일	8월 1일	8월 1일
재	이은정	구명서	(대결) 배수야	이우진

1. 출장개요

출장목적	WWRP/WCRP S2S Summit 2023 참석 및 발표		
출장일정	2023. 7. 2.~2023. 7. 9. (6박 8일)		
성명		소속	직급(직위)
박래설		수치모델실	책임급연구원(실장)
이은정		결합모델팀	책임급연구원
방문기관 (또는 회의장소)	영국, 레딩, University of Reading		
출발지	대한민국, 인천	도착지	영국, 레딩

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2023년 7월 2일 ~ 7일에 영국 레딩에서 개최되는 WWRP/WCRP S2S Summit 2023 참석을 통해 계절내-계절(Subseasonal to Seasonal, S2S)과 관련된 물리 메커니즘을 이해하고 모델 계통 오차 분석방법 등에 대한 최신 연구 동향을 파악하고, 각국의 전문가들과 교류함으로써 사업단의 연구성과 및 비전 등을 공유하고자 함.
- 현재까지 사업단에서 수행한 연구 성과를 발표하고, 수치예보모델 개발 및 예측오차 분석 전문가들과 논의를 통해 시공간 통합형 모델 개발에 성공적으로 활용할 수 있는 유용한 정보와 의견들을 수집하여 추후 사업단 연구 계획에 적극적으로 활용하고자 함.

나. 주요 업무 수행 사항

- Korean Integrated Model: expansion of prediction target to extended range forecasts (박래설 실장 구두 발표)
 - 사업단 및 사업단의 연구개발 전체를 간략히 소개하고, S2S 프로젝트와 연관된 연장중기 예측을 위한 연구 전반을 구체적인 내용과 함께 소개하였음.
 - JMA에서 적응시간간격 기법에 대한 관심을 보이고, 유사한 시도에 대한 자신들의 실패 사례를 보이며, 자문을 요청함. JMA 모델과 KIM의 역학코어는 사용 가능한 적분시간간격이 다르고,

이로 인해 KIM에서는 이러한 방법이 실효성을 보일 수 있음을 자문함. 한편, 오존 선형모델에 대한 영향성에 대한 질문에 중간대기 예측성 개선에 대한 설명을 추가로 진행함.

- ECMWF의 Magdalena Alonso Balmaseda 박사는 사업단의 연구 방향 및 성과에 관심을 보이고, 향후 진행될 WWRP(WMO Weather Research Program)에서 S2S 스케일에서 weather regime 에 대한 의견들을 지속적으로 나누고 공동 연구에 대한 가능성을 타진함.
 - 부산대 이준이 교수와 WMO에서의 연장중기 관련 활동에 사업단의 기여에 대한 얘기를 나누고, 향후 추가로 의견을 나누기로 함.
 - 기타, NCAR에서 진행한 경계모델의 대기모델 예측성에 미치는 영향성에 관한 연구 결과에 대한 토의 등을 진행함.
- o Impacts of an Atmosphere–Ocean Coupling in the Korean Integrated Model (이은정 연구원 포스터 발표)
- 사업단에서 개발하고 있는 KIM 결합모델의 개발 현황 및 계절예측성능 분석 결과 발표. KIM 결합모델의 계절예측에서 비결합모델 대비 강수 예측성의 개선을 확인하였고 이에 대한 원인으로 대기-해양 상호작용 관점에서 결합모델에서 대기강제력에 따라 상층 해양이 변화하여 해수면온도-구름-강수 피드백이 반영되어 있으며 대기대순환 관점에서 해들리순환과 워커순환의 여름철 상승기류의 위치와 세기 오차가 감소하여 해양대륙에서의 하층 수렴과 상층 발산이 모의되었기 때문으로 밝힘.
 - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF)의 Earth System Predictability 총괄자인 Magdalena Alonso Balmaseda 박사와의 논의를 통해 사업단 결합모델과 ECMWF 결합모델과의 비교를 논의함. ECMWF 결합모델은 KIM 결합모델과 동일한 해양모델인 NEMO를 사용하고 있으나 버전 차이가 존재함. 두 모델 간에 워커순환 모의 특성이 다르며 이는 초기자료와 대기모델 차이에 기인한 것으로 판단됨. 현재 ECMWF에서 새로운 해양 재분석자료를 구축하고 있으며 추후 사업단에 공유를 논의하였으며 이를 통해 해양모델 버전차이, 개선된 물리모수화, 대기모델 차이에 따른 영향을 비교할 수 있을 것으로 기대함.
 - 이화여자대학교/Stony Brook University 겸임교수인 김혜미 교수 및 National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center(NASA/GSFC) 임영권 박사와의 논의를 통해 대부분의 모델에 있는 drizzle bias가 KIM에서도 존재하는 것 같으며 이는 깊은대류와 미세물리과정의 모수화를 통해 해결할 수 있을 것이며 모델에서 Maritime continent (MC) barrier 영향을 모의하는 것이 Madden-Julian oscillation(MJO) 예측에 중요함을 논의함. 또한 KIM 결합모델의 동태평양 강수 오차는 해양 결합뿐만 아니라 경계층과 구름물리방안과 연계한 분석방향을 제시함.

- 결합모델에서 북태평양 강수 오차가 감소함은 storm track 모의성과 연결되어 있을 것이라는 조언을 받아 추후 결합모델의 태풍 모의 성과와 연계하여 분석할 예정임.

o 타기관 subseasonal to seasonal(S2S) 예측성

- ECMWF에서는 전구 경향성을 포함하는 재분석자료 CONSistent representation of temporal variations in boundary Forcings in reanalysES and Seasonal forecasts(CONFESS) 프로젝트를 수행하고 있으며 이는 지면/식생 상태, 대류권 에어로솔 등의 정보를 제공하며 이에 대한 고려로 토양수분과 해수면온도에 큰 영향이 존재함을 확인함. 또한 S2S 예측 성능에 초기자료, 앙상블 수, 수평/연직 해상도 순으로 영향이 큼을 확인하고 연장중기 예측을 위해 100개 멤버, 8km 해상도, 연직 137층을 모델을 하루에 한번 수행하는 것을 계획함.
- Japan Meteorological Agency(JMA) S2S ensemble sub-project를 통해서 Community Earth System Model 2(CESM2)는 기후모델이나 Stochastic Perturbation of Parameterisations Tendencies(SPPT)을 적용하면 3-4주 예측성능이 개선되어 ECMWF와 유사함. 또한 S2S 예측을 위해 깊은/얕은 대류 물리모수화를 수정하여 MJO 전파를 개선하나 평균장의 성능 저하를 보임을 확인함.
- JMA와 유사하게 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)에서도 CESM2에서 기후 변동성을 잘 모의하며 SPPT 적용하여 ECMWF보다 더 높은 유라시아 2m 온도의 ACC(anomaly correlation coefficient)를 확인함.
- 미국 Naval Research Laboratory(NRL)는 해양 모델 HYCOM에 tide를 추가, 연직으로 120km 까지 확장하고 143층 고해상도를 적용하여 열대지역의 10m 바람, 성층권에서의 오차를 개선하고 태풍 경로 오차를 개선함.
- NASA의 Global Modeling and Assimilation Office(GMAO)에서는 강한 지면-대기 결합 고려시 예측 성능이 향상되고 열대 해양 염분 예측이 MC 담수 이류를 잘 표현하여 MJO 예측에 도움이 되기에 GEOS-S2S-3나 Argo 자료를 통해 해양 편차 보정과 고해상도(대기 7km, 해양 2-4km)를 계획함.

o MJO와 Teleconnections

- MC에서의 깊은 대류에 의해 상승기류가 발생하고 저위도의 wave 형태에 따라서 수분의 경로가 유럽 또는 동아시아로 전달되며 이에 따라 subtropical jet에 영향을 주기에 인도 몬순은 유럽 기후예측에 매우 영향을 미치며 중고위도의 극한 기상현상을 발생시킴.
- S2S 예측시스템에서 대부분 모델들이 MJO-teleconnection을 1-2주 예측에서는 과대모의하나 3-4주 예측에서는 과소모의하는 경향이 존재함.
- 동쪽으로 전파되는 MJO는 인도-태평양 해양 대류(MC)를 만나면 약화되거나 완전히 사라지는

데 대부분의 S2S 모델에서 해양대륙에서 과도하게 차갑고 건조하여 이러한 MC 장벽 효과가 과대모의됨. S2S 예측시스템을 활용하여 오스트레일리아 여름 MJO를 분석한 결과, 지속적으로 전파되는 MJO(continuous MJO)은 전파력이 약한 MJO(blocked MJO)보다 예측성이 훨씬 높으며 blocked MJO 사례에서 중앙태평양에서의 차가운 해수면온도를 모의하여 강한 subsidence를 모의할 때 예측성이 높아짐을 확인함.

- S2S 예측 모델 대부분 MJO index skill이 대부분 20일에서 0.5 값을 갖으며 이와 관련한 성능 저하 원인은 인도양에서 발생한 대류가 MC를 지나서 전파하지 못하는 것이고 이는 강수오차로 연결됨. MC 장벽 효과를 적절히 고려하기 위해 깊은 대류를 약화시키면 예측성이 약 10일 정도 증가됨. 한편, 깊은 대류는 해수면온도와 연관되어 있기 때문에 일변동성을 고려하기 위한 대기-해양 결합 주기를 적어도 1시간으로 설정하면 MJO 예측성이 개선됨. 인도양에서의 냉각 오차 존재 시 육지-해양 온도 차이를 감소시켜 MJO 전파를 방해하는 요인이 됨을 밝힘.
- MJO 분석에 있어서 phase로 구분한다면 강수 공간분포만 분석하게 되므로 propagation speed 분석이 어려우므로 주간분석이 병행되어야 함.
- 상태-종속 예측 기술은 PNA, MJO, NAO를 상태를 나누어 예측성을 분석하는 방법으로 CEMS2와 ECMWF, NCEP 분석하였을 때 검증지수와 상태에 따라서 예측성이 다를 수 있음.
- Boreal summer interseasonal oscillation (BSISO)는 대순환을 통해 열파에 영향을 주고 이는 강수 사례와 연결되고 대순환 예측성을 높이면 악기상 사례의 예측성을 높일 수 있음.
- El-Nino 기간에 양의 NAO 발생을 증가시키며 MJO propagation이 뚜렷함. 한편, neutral 또는 La-nina 기간에는 MJO teleconnection이 뚜렷하지 않음.
- 북대서양-유럽 기상 체계는 cyclonic regime과 blocked regime이 존재하며 warm conveyor belts(WCBs)는 blocked regime을 유지시키는 역할을 함. S2S reforecast에서 5-10일 예측에서 WCB outflow를 예측하나 10일 이후 예측에서 과소모의하여 blocking 성능 저하를 유발함.
- 대기 수분 초기화를 통해 MJO 동쪽 지역의 수분을 유지함으로써 MJO 예측 성능이 15일에서 30일로 개선되고 연직 dipole을 모의함을 확인함.

o 관련 물리과정

- 봄철 티벳고원 온도와 여름철 록키산 강수에 대한 관계를 분석하였을 때, 티벳에서 cold anomaly가 존재하면 barotropic instability Rossby wave를 통한 wave train에 의해 록키산 지역에 영향을 줌. GEWEX/LS4P 대부분의 모델에서 티벳에 warm bias를 가지기 때문에 예측성 저하될 수 있음.
- 이전에는 현실적인 토양 수분 초기화에 주목했지만 토양 수분에 영향을 주는 식생의 영향을 분

적하였고 식생 광학깊이는 수분증가에 따른 증발산 증가로 이어져 지상온도가 낮아지는 음의 관계가 가지며 강우가 끝나는 기간에 이러한 관계를 갖는 기간이 길어짐을 밝힘. 또한 Meteo-France에서는 반사도, 토양증발, 식생 증산에 영향을 주는 Leaf area index(LAI)의 예측의 중요하며 지역에 따름을 강조함.

- 에어로솔 직접 및 간접 효과를 모두 고려하면 복사와 강수의 상관관계가 향상되어 서태평양 및 MC에서 예측성이 약 30일까지 확보됨.
- 대부분의 S2S 예측 모델에서 sudden stratosphere warming(SSW)의 과소모의하며 관측자료 넷징을 통해 SSW 세기 완화 가능함. 특히 ECMWF 2009/2018년에 SSW 예측성이 낮으며 이는 20일 전 initial vortex가 매우 강하여 동서바람이 강하게 유지됨을 확인. 파동 강제력과 극 소용돌이의 평균 흐름에 대한 더 나은 예측이 SSW 이벤트의 예측 가능성을 향상시킬 수 있다고 제안함.
- 음의 따뜻한 북극-차가운 유라시아(Warm Arctic-Cold Eurasia; WACE)는 Rossby wave 전파에 의해 2주 후 양의 따뜻한 북극-차가운 북미(Warm Arctic-Cold North America; WACNA)를 유도하며 대류권 역학을 고려해야 예측 가능.
- 이른 여름철 따뜻한 공기 이류에 의해 증가된 대기 수분과 하향 현열 및 장파복사 플럭스가 6일 후 해빙을 녹이는 지배적인 역할을 함. 30-60일 주기를 갖는 극지 시계 방향 전파 대기파(circumpolar clockwise-propagating atmospheric waves; CCPW)에 의해 대기 수분이 증가하며 이로 인해 북부 바렌츠해 해빙 계절간 변동이 30-60일 주기성을 가짐. wind-driven 과정은 해빙을 증가시키는 역할을 하며 해양 열 수송은 적은 역할을 함을 밝힘.

다. 기타

o 사업단 홍보

- (박래설 실장) 발표 서두에 사업단 및 사업단 연구개발내용을 대략적으로 소개하여 이후 이와 관련하여 JMA, ECMWF, NCAR 등에서 참석한 연구원들과 다양한 주제(계산 효율성, 중간대기 예측성, 결합모델링 시스템, 연장중기 예측성 등)로 소통함.

3. 출장성과 • 시사점 및 향후 업무 활용 계획

가. 출장성과 • 시사점

- o S2S Summit 2023에서는 타기관에서의 계절내 예측을 위한 개발성과 및 계획에 대한 발표를 통해 지면, 해양, 해빙과 같은 다양한 지구시스템 경계모델 결합을 통해 초단기에서 연장중기 예측을 아우르는 시공간 통합 예측을 시도하고 있으며 다양한 물리과정 모수화 영향 결과를 통해 사업단

에서의 연장중기 예측을 위한 개발 방향이 적합함을 확인함. 또한 해상도 및 초기자료, 앙상블 수에 대한 민감도를 확인하여 앙상블 예측 설계 기초를 이해할 수 있었음.

- 사업단의 연장중기 예측성 연구를 위한 검증 및 진단과정에서의 다양한 방법론 수용이 필요함을 확인하였고, 국제공동연구 및 대외 소통을 더욱 적극적으로 하는 것이 실효성있는 연구를 위한 필수조건임을 확신하였음.

나. 향후 업무 활용 계획

- 타 기관들의 연장중기 예측을 위한 결합모델 및 앙상블 예측 설계를 사업단에 공유함으로써 개발 방향을 진단하고 향후 개발 계획 설계와 운용에 활용 가능함.
- S2S 예측 관련 지면, 해양, 해빙, 중간 대기 등의 물리과정을 파악함으로써 연장중기 예측을 위한 각 경계모델 물리과정 모수화 개발에 활용 가능함.