

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	1월 12일	1월 15일	1월 15일	1월 15일
재	김원흥	배수야	이은희	이우진

1. 출장개요

출장목적	AGU Fall Meeting 2023 참석 및 발표		
출장일정	2023. 12. 10.~2023. 12. 17. (5박 8일)		
성명	소속	직급(직위)	
이은희	모델검증팀	책임급연구원(팀장)	
박혜진	모델검증팀	선임급연구원	
여새림	모델검증팀	선임급연구원	
이은혜	모델검증팀	원급연구원	
정지영	모델검증팀	원급연구원	
김원흥	물리과정팀	선임급연구원	
정진윤	결합모델팀	원급연구원	
방문기관 (또는 회의장소)	미국, 샌프란시스코, Moscone Center		
출발지	서울, 인천	도착지	미국, 샌프란시스코

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2023년 12월 11일 ~ 12월 15일에 미국 샌프란시스코에서 개최되는 2023 AGU annual meeting 참석을 통해 수치모델개발, 기상-기후 예측성, 결합모델링, 물리과정 개발 등 시공간 통합형 모델 개발 관련 최신 연구 동향을 파악하고, 각국의 전문가들과 교류함으로써 사업단의 연구성과를 점검하고 향후 개선계획 수립에 활용할 것이다. 본 회의는 수치모델 각 요소와 관련된 개별 분야와 기상현상부터 기후 규모까지의 다양한 범위의 연구를 포함하여 전세계 연구진의 교류가 이루어지는 대규모 학회이므로 사업단 연구원들의 각 분야에 대한 최신 기술 뿐만 아니라 다양한 관점의 연구 동향에 대한 의미있는 정보를 습득할 수 있는 좋은 기회이다.
- 시험모델 예측성 향상을 위해서 다양한 현상에 모델 예측성 분석과 진단의 기술이 요구되므로, 관련 분야의 연구 결과들을 참고하여 접근 방법과 분석을 정교하게 할 수 있다. 본 학회에서는 전지구 규모의 악기상 뿐만 아니라 지역 규모의 현상에 대한 다양한 연구 분과가 있으며 각 분

과에 참석하여 정보를 수집할 예정이다. 이 중에서 악기상(extreme weather)과 집중호우(heavy precipitation) 관련 분과에서는 사업단 모델을 활용한 연구 결과를 발표하고자 하며, 그 외에도 태풍 및 기타 현상들에 대한 연구 정보를 습득하고자 한다.

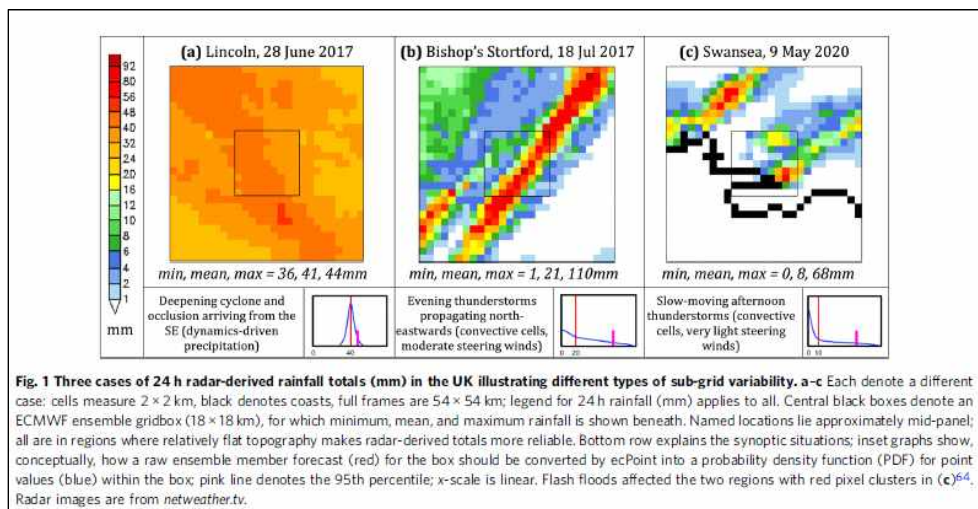
○ 사업단 모델은 현재 현업 중기예측에 활용되고 있으나 향후 연장중기 예측을 목표로 하고 있으므로 연장중기 예측성과 열대 계절내진동(MJO) 예측성 향상은 매우 중요한 과제이다. 이와 관련된 세션에서 사업단 모델의 개발 및 평가 현황에 대해 발표하고, 최신 연구 동향을 파악하고자 한다. 최근 추진한 과거재현실험(hindcast) 결과를 활용한 각종 분석결과를 몬순, MJO, 기후 관련 분과에서 논의하고자 하며, 연구 진행을 점검하고 향후 방향을 조정할 수 있는 각종 정보를 입수하고자 한다. 모델의 예측성 확대를 위해서 기후모델의 예측성에 대한 평가와 개선이 필요하다. 본 학회를 통해 연장중기 예측성, 앙상블 시스템 및 기후 변동성 등과 관련된 최신 연구 동향을 파악하여 사업단의 연장중기 시스템의 구축과 개선에 활용하고자 한다.

○ 사업단 결합모델의 개발 과정에 대해서 소개하고 검증 결과를 공유하고자 한다. 대기-지면-해양-해빙-파랑 각각의 결합 요소들에 대한 주요 이슈를 점검하고 향후 적용가능한 개선 방향을 수립하고자 한다.

나. 주요 업무 수행 사항

- “Extreme Precipitation in Past, Present, and Future Climates” session
 - 최근 22년과 23년에 있었던 집중호우 사례에 대한 사업단 모델의 결과를 제시하고 단기에측성능 개선을 위한 개선 방향을 제시함. 전선형 집중호우에서의 예측성능에 대한 주요 인자가 사례마다 상이하였으며, 아격자 대류과정의 강도와 북서태평양 고기압 확장의 모의가 각각 중요한 인자임을 제시. 북서태평양 고기압의 파소모의는 연장중기 및 장기모의 실험에서 공통적으로 나타는 계통오차임을 확인
 - 8월 8일 강수 사례의 강우 매커니즘을 조사한 공주대학교의 박민성 연구원과 토의. Sawyer-Eliassen equation의 성분을 비교 분석함으로써 강수의 주된 발생 요인이 무엇인지 분석하였음. 해당 사례의 경우 diabatic heating이 stretching deformation, shearing deformation 보다 상승의 유지에 크게 기여하고 있는 것으로 분석함
 - 7월 15일 강수 사례에 대해 수치모델링센터 김준수 연구원과 논의. 현업에서는 오히려 강수대가 북쪽으로 치우친다는 보고가 많았다는 의견과 함께 전선형 사례의 위치와 관련한 북서태평양 고기압과 고위도의 저기압의 모의 특성에 대해 확인할 필요가 있다는 공통 의견을 제시

- 수치모델링센터의 강수 후처리 기법 관련 연구에 대한 정보 수집. 기상청 예보관이 작성하는 최종 예보 지도의 생성을 위해 기존에는 KIM, UM, IFS의 예측장을 앙상블 평균하는 방법을 활용하고 있었으며, 최근에 유전알고리즘을 이용하여 각 자료의 예보장의 가중 평균하는 방법으로 수정하였음. 산출된 가중치(계절별)는 3년간의 현업자료를 통해 만들어짐. 개선된 방안의 가중치 값으로 봤을 때 KIM의 가중치는 10~20% 정도로 낮아 활용도가 낮음을 시사하며 향후 많은 개선이 필요할 것으로 보임.
- 강수예보에 있어서 post-processing을 활용하고자 하는 노력에 대해 공유하였고, ECMWF의 아격자 강수분포를 추정하는 저비용 방법(ecPoint)에 대해 소개 받음.



[아격자 강수 분포 추정 개념에 대한 이해, Hewson and Pillosu, 2021]

- 기후변화로 인해 최근 적도 대류지역의 상승지역(ascent branch)가 좁아지고 강수는 강화되는 현상에 대해 분석. Ascent area fraction의 정의를 $w500 < 0.0$ 으로 정의하여 접근하였고 적도의 TRMM radar와 ERA5 자료를 사용. 이러한 상승역의 감소와 강도 강화는 extreme rain의 증가이며 지역적인 순환을 변화시킴. 이때 강수의 반응을 volumetric RR, average RR, area, stratiform area 등으로 접근하여 다양하게 접근할 수 있음. 이러한 연구에서 극한 강수의 영역을 95th, 99th percentile와 같이 일반적으로 정의
- 대기의 강에 대한 높은 관심. Atmospheric River tracking Method Intercomparison Project (ARTMIP)에 대한 소개
 - o “The dynamics of the large-scale atmospheric circulation in present and future climates: jet streams, storm tracks, stationary waves, and monsoons” session
- 모델 실험을 통해 구름-복사 강제력에 의한 wave source 가 유럽-대서양 지역의 겨울 블로킹에

중요한 요인임을 증명. DOE의 E3SM 모델을 조절하여 구름을 복사에 투명하게 만들어서(cloud locking 방법이라고 칭함) 블로킹의 모의가 감소함을 확인하였고 그 과정을 wave activity flux를 이용하여 분석

- 폭염, 한파 등 extreme event와 관련있는 'barotropic atmospheric wave guide'를 측정할 수 있는 새로운 index를 소개하고 유라시아 지역에서 강화되고 있는 최근 경향에 대해 소개함
- Dynamical mode (ex. Southern Annual Mode)에 cloud feedback이 미치는 영향을 E3SM 대기 모델에서 cloud optical property 조절을 통해 cloud-radiative feedback을 차단한 'cloud-locking experiment'를 통해 살펴봄
- GCM에서 blocking 모의 성능 향상을 위해 개선해야 할 요소들 - cloud latent heating, oceanic front, mesoscale oceanic eddies, bias in near surface meridional temperature gradient, model mean state bias. 이 중, cloud feedback은 Euro-Atlantic 지역에서 blocking을 증가시키는 역할을 함

o "High-Resolution Earth System Modeling on Large Supercomputer" session

- High resolution 모델 개발의 필요성과 효과들에 대해서 발표들이 이루어짐. 결합모델의 해상도 증가로 해양 eddy-resolving system에서 Southern Ocean의 warming 문제가 감소할 수 있었으며 decadal prediction의 예측성 개선 효과를 본 연구가 있었음
- NOAA의 SPEAR(Seamless system for Prediction and Earth System Research)는 100~25km 범위의 계절내 예측 및 장기에측 모델임. 해상도 증가로 태풍 및 extreme 모의가 개선되므로 모의 성능이 향상될 수 있다는 관점. 전반적으로 extreme 예측가능성에 대한 일관된 기대를 하고 있음. cloud resolving model을 이용한 convection structure 모의는 주된 관심사임
- Convection-permitting model, SCREAM: US Department of Energy (DOE)의 E3SM 프로젝트의 Simple Cloud-Resolving E3SM Atmospheric Model (3.25km)에 대한 활용 소개

o "Explaining and Predicting Midlatitude Weather and Climate Variability Through Air-Sea Interactions and Teleconnections" session

- 겨울철 동해상에서 찬 공기가 수렴하면서 발생하는 폭설 현상(Japan Sea polar air mass convergence)에 대해, 선박의 존데 집중관측을 통해서 설명한 연구
- 재분석 자료에서 얻어진 ENSO와 동아시아 원격상관에 대한 MJO의 영향과 관련하여 KIM의 연장 중기 예측 성능을 제시하였음
- 예측 시간이 길어짐에 따라 나타나는 KIM의 오차 특성의 원인을 살펴보기 위해 AMIP 실험결과

를 살펴보고, 이를 통해 계절 평균 ENSO 반응에 대한 모의 성능이 연장 중기 예측 특성에 영향을 미침을 확인하였음

- 구두 발표를 통해 KIM에서 모의되는 열대-중위도 원격상관 특성을 연구자들과 공유하였으며 이를 통해 사업단의 연장 중기 예측 목표 및 개발 현황을 제시하였음

o “Identifying, Understanding, and Resolving Earth System Model Biases” session

- 수치모델에서의 minor treatment(발표자가 minor-looking treatment라 표현함)에 해당하는 parameter의 lower limit이나 임계값 설정 등이 모의 성능에 적지 않은 영향을 미칠 수 있음을 발표(Kawai et al. 2022)

o “The Madden-Julian Oscillation and Convectively Coupled Waves in the Tropics” session

- KIM의 겨울철 연장중기과거재현 실험과 AMIP 실험에서 MJO 모의 성능을 평가 및 진단하고 공통적으로 나타나는 MJO 모의 특성을 소개함
- George Mason University의 C. Tan 박사로부터 연장중기과거예측실험에서 자료동화된 초기장을 사용한 실험을 제안받음
- GFDL에서 최근 발표한 slab ocean model을 결합한 대기모델에서의 MJO 모의 성능 분석결과에 대한 논문도 공유받음
- MJO의 경년변동성에 영향을 미치는 ENSO와 QBO의 복합영향 분석. 중간 강도의 엘니뇨 조건에서는 MJO의 강도가 QBO와 관련없이 ENSO 강도에 비례하는 한편, 다른 ENSO phase에서는 QBO-easterly일 때 MJO 강도가 강해지는 관련성이 있음
- MJO가 미서부 지역의 compound extreme event (ex. wet-cold, dry-hot extremes)에 미치는 영향을 살펴봄. MJO convection이 서태평양에 위치했을 때 wet-cold extreme이 증가하는 한편, 인도양에 위치했을 때는 dry-hot condition이 감소함
- Cristiana Tan는 포스터 발표를 통해 모델의 연직해상도의 최상단 높이가 다른 NOAA UFS 모델의 두 버전(UFS5-54km / UFS6-80km)으로부터 MJO 모의 성능을 비교한 결과 RMM 지수의 ACC로 구한 성능은 UFS5가 UFS6보다 조금 더 나은 성능을 보였으나, MJO 동진 성능은 UFS6가 더 잘 예측되었음. MJO 원격상관은 대류권에서 Rossby wave를 통해서나 성층권-대류권을 통해서 중고위도 대기 순환패턴에 영향을 줄 수 있으나, 본 연구에서는 대류권에서의 성능만 확인함. 북반구 Z500 및 기온에 대한 MJO 원격상관 성능은 UFS6가 UFS5보다 조금 더 나은 성능을 보였으나 전반적으로 비슷하여, 결론적으로 최상단 높이의 차이가 MJO 원격상관 패턴에 크게 영향을 주지 않는다는 결론을 내림. 추후 성층권을 통한 MJO 원격상관에 대한 영

향을 확인할 계획이라고 하였음. 사업단 모델의 경우 연직상단 높이에는 변함이 없으나, 연직층수(dz)의 변화가 있기 때문에, 이 연구의 방법을 활용하여 연직 층수의 변화에 따른 MJO의 모의 성능을 확인해 볼 필요가 있음

- Wei-Ting Hsiao는 포스터 발표를 통해 관측자료를 이용하여 MJO 발달에 있어서 WTG 하에 장파 복사는 대류권 대기를 습하게 MJO 발달에 유리한 조건을 제공하는 반면에 단파 복사는 대류권 대기를 건조시킴. 이러한 복사 피드백은 열대 서태평양에서보다 열대 인도양에서 더 뚜렷하게 나타나고 이는 강수에 대한 높은 얼음 구름 덮음의 반응과 관련이 있음. 사업단 모델에서의 MJO 발달 모의에 대한 물리과정 진단을 적용할 때에 이러한 연구 결과를 고려하여 분석해 볼 수 있음

o “Atmosphere, Ocean, and Land Processes in the Maritime Continent and Indo-Pacific” session

- Chidong Zhang는 발표를 통해 해양대륙을 지나가는 MJO(MJO-C)와 그렇지 않은 MJO(MJO-B) 이벤트들로 나누어 현업 S2S 모델들에서의 MJO 모의 성능 비교한 결과 모든 모델들에서 MJO-C가 MJO-B보다 나은 예측성능을 보였고, 이러한 결과는 초기장에서의 MJO강도가 아닌 MC barrier effect(sfc heat flux 중요)로 인해서임을 발표하였음. MJO 예측 성능이 높았던 상위 4개의 모델들은 대기-해양 결합모델로, MJO 예측성능에 있어서 대기-해양 상호작용의 고려는 필수 요소 중 하나이나, MJO와 관련된 다른 요인들에 대한 고려도 필요성을 주장함. 이를 기반으로 사업단모델의 전체 MJO 모의 성능을 분석한 결과, 해양대륙부근에서의 대류가 악화되는 특성이 나타나서 MJO 종류에 따라 모의성능에 차이를 보일 것으로 예상되고, 이에 대한 추가 분석을 해 볼 수 있음
- MJO의 남쪽 방향 이동에 영향을 미치는 cross-equatorial cold surge(CES)의 역할을 살펴봄. CES를 통해 wind-evaporation feedback이 강해지며 surface latent heat flux의 강화로 MJO가 남쪽방향으로 이동할 수 있음
- MJO event 중 Maritime Continent를 넘어가는 event와 그렇지 못한 event를 나누어서 살펴보면 넘어가는 event에 대한 S2S 예측성이 높게 나타남. MJO의 강도에 따른 예측성의 차이는 크지 않음
- AMIP6 모델 평균과 관측을 비교하였을 때, ITCZ 및 몬순 지역에서 오차가 크고, 강수 오차는 모델간 스프레드가 나타남. AMIP6 강수 오차의 EOF 분석을 통해 남북 쌍극자 패턴이 첫번째 모드, 4극자 패턴이 두 번째 모드로 나타나는데 이는 관측에서 동일한 지역으로 EOF 분석을 수행한 결과와 유사한 순환 구조를 보임. 북서태평양에서의 고기압성 순환 아노말리는 평균적인 몬순 서풍과 태평양 무역풍의 영향으로 순압 불안정에 의해 유발됨. AMIP6 모델들의 강수 오차는 매

개변수화 부족과 북서태평양의 대기 순환에 의해 조절에 비롯됨.

o “Land–Ocean–Atmosphere interactions in the Earth System” session

- 해양지역 surface wind에 대한 S2S 예측 성능을 살펴봄. MJO phase 별 예측 성능의 차이는 크지 않음. ECMWF 예측에서는 아열대 지역에서는 2주 전 예측까지 0.5 상관계수, 중위도 지역에서는 그보다 낮은 예측성을 나타냄
- 아시아 여름 몬순 모의 성능에 영향을 미치는 aerosol–cloud–precipitation 상호작용 process의 역할을 살펴봄

o “North Atlantic climate variability and change: mechanisms, predictability, and influence on other basins” session

- SST 변동성에 영향을 미치는 ocean dynamics의 영향을 살펴보기 위해 slab ocean model을 개선하여 one–dimension과 three–dimension ocean dynamics의 영향을 분리하여 살펴봄
- 북대서양 multi–decadal variation을 강하게 모의하는 모델들의 북태평양 SST 반응과 decadal prediction에 대해 overestimate 하는 경향이 있음
- CESM2 모델을 사용하여 Atlantic warming hole (북대서양 warming signal이 나타나지 않는 지역)이 Ekman heat divergence와 관련되어 있음을 제시함
- 북대서양 storm track과 관련해서는 ocean heat transport change가 중요하게 작용하며 이를 제대로 모의하기 위해서는 dynamics와 thermodynamics가 모두 coupling된 모델을 사용하는 것이 중요함

o “Boundary layer clouds and climate change” session

- Catherine Naud는 발표를 통해 구름의 특성 및 환경 간의 상관관계를 통해서 전지구 해양에서 구름을 조절하는 주요 요소는 지역 및 구름의 종류에 따라 다름. 열대지역에서 층적운의 경우 cold air outbreak parameter가 주요 인자이고 적운의 경우 10m 바람이 주요 인자임. 중위도에서는 겨울철 서쪽 경계류 지역에서 현열유속이 지배적이고 고위도 지역에서는 역전 강도가 지배적임을 소개함 이러한 분석은 사업단 모델에서도 구름 모의를 진단하는데 적용가능함

o “Tropical Pacific Climate Variability: Dynamics, Teleconnections, Impacts, and Projections” session

- 2020~2023년의 Triple dip La Nina의 원인에 대한 다양한 연구 결과가 제시됨. Recharge Oscillator dynamics가 작동하지 않았음. Tropical Atlantic과 Indian Ocean에서의 Bjerkness feedback이 중요하게 작용함. Pacific Meridional Mode (북태평양 대기 변동성의 영향)의 중요

성도 함께 제시됨

o “Land-Atmosphere interactions over the Tibetan Plateau and their impact on weather and climate” session

- 티베트 고원 표면 잠재 와도의 dipole heating mode가 동아시아 지역의 순환 변화로 수증기를 공급하여 동아시아 여름 rainfall anomaly를 나타냄. 이러한 dipole heating mode는 북대서양 tripole SST로 인한 대륙 규모의 wave-train과 potential vorticity- θ 매커니즘으로 조절됨.
- 동아시아 여름 몬순의 경년 변동성은 7월 티베트 고원 표면 잠재 와도의 2번째 EOF 모드와 관련이 깊음.
- 티베트 고원의 표면 잠재 와도의 2번째 EOF 모드가 positive인 경우, 티베트 고원에서 강한 양의 잠재와도와 서풍 흐름이 발달하여 하강 지역에서 동서 잠재와도 이류가 높이에 따라 증가하여 전선 위쪽으로 이동함. 티베트 고원의 표면 잠재 와도 forcing은 실크로드 패턴이 동아시아 몬순에 미치는 영향에 연결하는 중요한 역할을 함.

o “The dynamics of the large-scale atmospheric circulation in present and future climates” session

- 몬순 주기는 대기 해양의 열용량 차이로 7월에 남아시아에서 보이는 몬순이 10월에 서태평양으로 이동함. 9월은 몬순 전환의 시기이며 동남아시아의 여분의 에너지로 인해 서풍으로 불고 열대 동태평양에서 용승으로 열대 서태평양에 강수가 머무르는데, 이는 표면 플렉스 매커니즘 관점으로 본 것.
- 몬순 모드로 서태평양이 가을에 따뜻해지면서 그 절정은 겨울에 나타나는데, 이는 land-sea contrast에서 비롯된 것임을 실험을 통해 증명됨.

o “Modeling of the cryosphere: Glaciers and ice sheets” session

- 빙붕은 빙상이 무너지는 것을 방지하고 해빙은 빙붕이 부서지는 것을 막는 역할을 함.
- 빙붕과 해빙이 녹아 지지대 역할이 약해지면 얼음의 이동속도가 빨라지고 얼음이 받는 항력이 커지면서 얼음덩어리들이 분리되고 부서지는 것을 가속화시킴.
- 빙붕에 생긴 균열을 아는 것이 빙붕의 구조적 불안정성을 판단하고 앞으로의 변화를 판단하는 중요한 지표가 될 수 있음.
- 남극 육지 위의 얼음인 빙상과 빙상에 연결되어 있지만 아래에 해양이 있는 빙붕을 정확하게 모의하기엔 아직 연구되지 않은 복잡한 과정들이 존재함.
- 해산(sea mount; pinning point)이 존재하는 지역 위의 빙붕은 지지대 역할이 강화되지만, 해산과 빙붕 사이의 상호작용이 불확실함.

- 빙붕이 빙상과 맞닿는 부분인 grounding zone의 얼음은 두껍지만, 현재 관측기기로는 아래에서 녹는 얼음의 양(basal melt)을 측정하지 못함.
 - CESat-2를 이용하여 용빙호(melt pond)의 표면과 바닥의 높이 차이를 측정해 표면에서 녹는 얼음의 양(surface melt)을 계산하는 방법을 개선하는 중임.
 - 북극은 바렌츠 해와 베링 해협을 통해 갑자기 들어오는 난류의 영향을 크게 받음. 음의 Interdecadal Pacific Oscillation (IPO) 또는 Pacific Decadal Oscillation (PDO) 상태이거나 양의 Pacific North American (PNA) 패턴일 때 북극 해빙을 감소시킴. 또한 열대 동태평양이 차가워지면 로스비파를 통해 해빙에 영향을 줌 (Pacific-Arctic teleconnection; PARC).
 - 남극의 해빙 감소는 양의 Southern Atmospheric Mode (SAM)의 특징이 강한 서풍일 때 강화되는 깊은 대류와 연관이 있음 (Wind drive salinity-deep convection feedback이 중요).
 - 빙상은 아래의 지형이 불확실하며 모델 해상도에 따른 모의 불확실성이 큼.
 - 대부분의 CMIP 모델들은 남극 빙상 및 빙붕의 변화를 모의하지 않고 얼음이 녹아 해양으로 흘러들어가는 양을 처방해줌. 빙붕은 아래의 해양과 상호작용을 통해 표면은 차갑고 표면 아래는 따뜻하게 만들지만, 모델들에 이러한 빙붕의 모의 효과가 제대로 들어가지 않음
- o “Understanding and modeling of mesoscale and severe local convective storm processes” session
- 지면 습도와 지면속에 의해 낮은 수렴이 발생하며 이러한 수렴대에서의 경계층 물리과정에 의한 대류 불안정 에너지의 영향으로 국지적 태풍이 발생하는 매커니즘을 소개함
 - 지구온난화로 인해 바람 최고 속도의 상승이 지속적으로 관측되며 이러한 결과는 국지적 태풍과 밀접한 관련성을 제시함
 - 국지적 태풍이 모델에서 모의되기 위해서는 수평해상도가 약 1 km 필수적이라고 주장하였으며, 정확한 기후적 특성을 분석하기 위해서는 고해상도에서 모델의 필요성을 강조함
- o “Understanding land-atmosphere interaction through the lens of surface fluxes and other drivers” session
- 지면에서의 눈 물리과정의 개선으로 극지방에서의 모델 정확도가 복사, 경계층, 미세물리 과정에서 나타남을 소개하였으며, 중위도 지방 겨울 사례들에서 눈 물리과정의 중요성에 대한 의견을 제시함
 - 지면속에 따른 경계층 고도에서 발달하는 구름의 변화에 대한 연구를 소개하였으며, 해당 연구에서 경계층 고도에서의 entrainment가 중요한 역할 보임
- o “Planetary boundary layer processes and turbulence” session

- 사업단의 경계층 물리과정에 대한 개선점을 구름 침강, 바람시어, 에디확산-질량속, 수증기 음수 제거로 구분하여 발표하였으며, 구름 침강 과정의 추가로 해무 예측성 개선에 대해 전문가들은 모델의 정밀화에 있어서의 필요하다는 의견과 에디확산-질량속 방법 적용에 있어 대류 비율에 대해 다중 대류 기동 방법과의 비교를 통해 모델 개선을 기대한다는 의견을 줌.
- 강수 발달 과정에서의 난류의 역할에 대해 큰 에디 모형(LES)에 정밀한 미세물리과정 (lagrangian super-parcle scheme)을 적용하여 구름방울 크기 분포 분석을 하였으며, 이를 통해 난류에 의해 충돌-병합과정의 증가와 강수 발달에서의 역할을 보임.
- 북중국해에서 발생하는 한파 사례에서 대부분의 수치 모형의 경계층 과정들이 한파의 메커니즘을 구현하고 있지 못하고 있으며 이를 큰 에디 모형(LES)와 비교 분석을 통해 보임.
- ACM2 경계층 방안에서 난류 운동 에너지를 기반으로 질량속 방법을 적용하여 모델의 성능을 분석을 하였으며, 난류 운동 에너지를 통한 난류 연직 확산량 계산 방법이 경계층 고도의 과대 모의 완화 시키며 이는 안정층에서의 지상 바람의 정확도 개선을 통해 이루어진것으로 판단함

o “Marine fog and multiphase turbulence” session

- FATIMA 라는 집중 관측을 한국 서해상 지역에서 선박, 비행기, 지점 관측으로 해무를 관측하였으며 관측된 자료들을 통해 해면온도와 해무와의 상관관계를 보임
- FATIMA의 관측 자료 공유에 대한 요청하였으며 이를 통해 사업단 모형의 해무 발생 매커니즘 분석을 통해 미세물리, 경계층 등의 물리과정의 검증과 서해상으로 단일 기동 모델 구동 범위 확대를 기대함

o 그 외

- 극한 현상의 정의에 따라 예보 양상이 상이할 수 있음을 폭염 예보의 heat index, wet bulb globe temp, heat risk 등 정의에 따라 설명
- 악기상, 극한기상 현상의 정의와 해석에서 pdf를 주로 사용
- 극한 현상의 연구에서 dry-warm, moist-cold와 같이 결합된 극한현상 (compound extreme)에 대한 접근이 활발함
- CHIRTS-daily 자료 활용: global 고해상도 (5km) 2-m maximum/minimum temperature 자료. Climate Hazards Center(US, Santa Barbara)에서 개발(1983-2016 기간). 극한 폭염 사례수 비교에서 관측에 가깝게 나타났으며 ERA5의 경우 냉각 오차가 있음

3. 출장성과 • 시사점 및 향후 업무 활용 계획

- 이은희 : 최근 있었던 극한 강수 현상에 대해 KIM 사례실험을 수행하고 전선형 강수의 주된 예측 인자들 중 KIM의 단기에측성에 영향을 주었던 요인을 분석하였다. 상하 열적 구조가 중요하게 작용했던 2022년 8월 8일 사례의 경우 아격자 강수과정에서의 과도한 안정화로 인해 한반도 육상의 상승이 억제되는 문제점이 있었다. 이는 CPS 방안의 수정이 필요함을 시사하고, 같은 연구에서 trigger 과정을 조절함으로써 개선 여지가 있음을 보였다. 2023년 7월 14일의 사례의 경우 전형적인 장마 패턴으로 종관 패턴의 모의가 매우 중요함을 시사하며, 북서태평양 고기압의 확장을 정확히 모의하는 것이 단기에측에서도 중요한 요인임을 확인하였고 향후 모델의 강수 예측성 개선을 위한 중요한 방향을 제시하였다. 이러한 극한 강수 사례와 모델 검증의 접근을 현재 일강수 측면에서 시도하였으나 극한 현상의 영향을 고려하여 sub-daily 규모에서 접근할 필요가 있다. 또한 타 연구들로부터 벤치마킹하여 강수 극한 현상에 대한 고해상도 모델의 이점에 강조할 필요가 있을 것으로 생각되며, 그 외 현상의 장기 경향성과 모델의 연장중기내 예측 가능성에 대해서도 향후 연구를 추진할 수 있을 것으로 생각된다.

AMIP 장기실험 등의 결과는 표준 프로토콜에 의한 것으로 많은 모델들의 결과를 상호 비교하기 위한 활용가능한 진단 메트릭이 상당히 많이 개발되어 있음을 확인하였다. 일부 도구들은 파이썬 기반의 오픈소스로 되어 있으며 모델의 산출물을 표준화함으로써 손쉽게 활용가능하고, 다양한 진단을 시도할 수 있을 것으로 보인다. 관련하여 Lawrence Livermore National Laboratory의 진단 도구와 관련하여 이지우 박사와 교류할 수 있을 것으로 생각된다.

- 박혜진: KIM의 겨울철 연장중기에측 실험 및 AMIP 실험으로부터 MJO의 모의 특성 결과를 발표하고 사업단의 연장중기에측을 위한 모델 개발 노력을 공유하였고 탁 기관의 전문가들로부터 실험 방법에 대한 제안을 받았다. 열대지역의 깊은 대류 및 MJO에 대한 이론, 모델링에 대한 섹션 발표를 들었으므로 그에 대한 이해도를 높였고 MJO 및 연장중기에서의 분석방법들을 습득하였다. 그 중에서 해양대류를 지나가는 MJO와 지나가지 못하는 MJO를 분리하여 모델 성능을 분석한 발표(Zhang et al)를 바탕으로 KIM에서도 MJO 이벤트의 특성에 따라 나누어 성능을 파악하여 KIM 모델의 추가적인 개선점을 진단할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 연직해상도의 변화에 따른 KIM에서의 MJO 모의 성능 비교 분석을 통해 KIM의 MJO 모의 특성을 파악하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 그리고 열대지역의 깊은 대류 및 MJO의 물리 과정 특성에 대한 발표들로부터 습득한 지식을 통해 KIM 모델에서 MJO의 발달과 관련된 물리적인 진단을 수행하고 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

- 여새림 : KIM의 연장 중기 예측 시스템 구축을 위해 연장 중기 time scale에서 주요하게 나타나는 열대-동아시아 원격상관 패턴의 예측 특성을 살펴보았다. KIM은 예측 시간이 길어질수록 엘

니뇨 시기에 인도양의 대류를 과도하게 모의하는 특성을 보였는데, 이는 겨울철 계절 평균 ENSO 반응에 대한 모의와 밀접하게 관련되어 있음을 AMIP 실험을 추가하여 살펴보았다. 연구 내용을 Mid-latitude teleconnection 관련 세션에서 구두 발표하였으며, 이를 통해 사업단의 연장중기 예측 목표 및 개발 현황을 제시하였다. 향후 업무에서는 폭염 및 한파 등의 extreme event의 예측 특성을 살펴볼 계획인데, 이를 위해서는 wave guide의 관점으로 접근하는 것이 역학적 이해를 높이기에는 적합할 것으로 보인다. 관련하여 extreme event에 대한 MJO의 영향을 분석하는 방안 역시 KIM에 적용 가능하다. 한편, 최근 기후 이슈로서, triple-dip 라니냐 현상에 대한 활발한 논의가 진행 중인데, 대양간 상호작용 및 북태평양 대기 변동성의 영향 등이 KIM에서도 모의가 되는지 살펴 볼 필요가 있다. AGU 학회 참석을 통해 KIM의 연장 중기 예측 검증 요소 및 검증 방안에 대한 다양한 아이디어를 접할 수 있었고, 이를 향후 연구 계획 수립에 반영할 계획이다.

- 이은혜: 연장중기 과거예측 여름 실험에서의 동아시아 여름 몬순 결과를 발표하면서 현 사업단에서 연장중기 예측을 목표로 하는 개발 현황을 공유하였다. 동아시아 몬순과 관련된 최신 연구 중에서 티베트 고원의 표면 잠재와도, ENSO 그리고 북서태평양 순환의 연구들을 조사하고 이와 관련된 매커니즘을 이해하였다. 몬순을 일으키는 기본 요소인 Land-sea contrast와 티베트 고원의 표면 잠재 와도가 동아시아 몬순 경년 변동성에 영향을 주는 점을 바탕으로 이후 사업단 모델에 추가적인 검증 및 연구에 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 현 사업단 모델의 티베트 고원 지형의 입력자료를 확인하고 티베트 고원 지형 상세화 민감도 실험을 수행하여 티베트 고원의 효과를 확인해볼 수 있을 것으로 보인다. 특히, 북서태평양 고기압 및 순환에 의해 아시아 몬순이 밀접하게 연관되어 있고 현 사업단 모델에서 북서태평양 순환 모의 성능의 개선이 필요하여 다양한 물리과정 민감도 실험들을 향후 업무 수행에 계획할 예정이다.
- 정진윤: 사업단의 대기(KIM)-지면(NoahMP)-해양(NEMO)-해빙(SI3)-파랑(WW3) 결합모델 업데이트 내용들과 연장중기예측 검증 결과를 발표하여 사업단의 결합모델 개발 현황을 공유하였다. AGU 학회 참석을 통해 최근 남극의 빙상 및 빙봉에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 관측자료의 한계로 인해서 많은 물리과정이 해결되지 않고 있음을 확인하였다. ICESat-2와 CryoSat-2 등 위성 자료의 한계를 극복하기 위하여 머신 러닝을 이용하여 자료의 공백을 메우려는 연구들이 활발하였으며 이를 통해 만든 데이터들을 공유하고 있기 때문에 해빙 및 빙봉 모의 검증에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 북극과 남극의 해빙에 영향을 줄 수 있는 다양한 대기 패턴의 특징들을 확인하였고, 관련 연구들을 바탕으로 결합모델에서 대기 패턴에 따른 해빙의 변화를 확인하고 대기와 해빙 사이의 상호작용이 제대로 작동하고 있는지 등의 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

○ 김원흥 : 사업단 모델의 경계층 물리과정에서는 기존의 국지경도 수정항에서 에디확산-질량속 방법을 적용하기 위해 여러연구를 진행하고 있다. 이러한 경향은 본 회의에서 만나 의견을 나눈 NASA, NCAR, ECMWF 등의 기관에서도 이미 진행중인 것으로 확인하였다. 특히 이번 회의에서 많은 전문가가 참여한 NASA는 최근 사업단 모델에 적용된 질량속 방법과 거의 비슷한 방법을 사용하고 있었지만, 대류 지역 비율의 지역적 특징을 지면속을 활용한 모수화를 통해 반영하려고 하는 사업단에 많은 관심과 의견을 주었다. 특히, 다른 기관들에서 사용하고 있는 다중 대류 기동 방법과 비교 분석의 필요성을 강조하였다. 한편, 에디확산계수의 모수화 방법에서도 사업단과 여러 기관들과의 차이가 보였다. 그 중 난류 운동 에너지를 사용하는 모수화 방법이 많이 소개되었지만, 해당 전문가들에게 문의한 결과 현업에서 사용하기에 난류 운동 에너지 방법은 모델의 안정성 확보가 힘들다는 의견을 들었다. 이러한 의견들을 종합해 볼 때, 비국지적 난류 확산 방법은 기존의 에디확산-질량속 방법과 다중 대류 기동 방법의 비교 분석이 필요하다고 판단되며, 국지적 난류 확산 방법은 기존의 방법에서의 개선점을 파악아하는 것이 합리적으로 보인다. 이 밖에 사업단 이상 실험에 사용되고 있는 큰 에디 모형(LES)보다 역학 재구축 모형(DRM)의 사용이 지형이 반영에 보다 합리적이라는 의견과 지면속의 변동성에 의한 경계층에서의 구름 변화에 관여하는 다양한 경계층 물리과정의 확인이 필요하다는 의견을 들었다. 이러한 의견을 기반으로 향후 경계층 물리과정의 개발 및 개선을 보다 효율적으로 진행될 것으로 기대된다.