

국외 출장 결과보고서

결 재	담당자	팀장	팀장	실장	사업단장
	1월 2일	1월 2일	1월 2일	1월 3일	1월 3일
	박준성	구명서	이은희	박래설	이우진

1. 출장개요

출장목적	AGU Fall Meeting 2022 참석 및 발표		
출장일정	2022. 12. 11.~2022. 12. 18. (6박 8일)		
성명	소속	직급(직위)	
남 현	모델역학팀	책임급연구원(팀장)	
김원홍	물리과정팀	선임급연구원	
박준성	결합모델팀	선임급연구원	
한용재	결합모델팀	원급연구원	
정지영	모델검증팀	원급연구원	
조건희	모델검증팀	원급연구원	
방문기관 (또는 회의장소)	미국, 시카고, McCormick Place		
출발지	서울, 인천	도착지	미국, 시카고

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2022년 12월 12일~12월 16일에 미국 시카고 McCormick Place에서 개최되는 미국 지구물리학회 (AGU) 참석을 통해 구름 및 강수과정, 열대 순환, 성층권-대류권 상호작용, 블로킹, 대기-해양-해빙-파랑 상호작용, 모델 불확실성, 계통오차 분석 시간 이산화기법 개선 방안 등 시공간 통합형 모델 개발 관련 최신 연구 동향을 파악하고, 각국의 전문가들과 교류함으로써 사업단의 연구 성과 및 비전 등을 공유하고자 한다.
- 사업단 1단계(2020~2022) 동안 개발한 KIM 모델 연구성과를 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

- High-Resolution Earth System Modeling on Large Supercomputers 섹션에서 시간 이산화기법 개선 방안으로 적응시간 간격 알고리즘 적용에 대한 주제로 포스터 발표

- 많은 연구자들이 KIM에 대해 궁금해했으며 KIM의 역학관하여 수평 및 연직에 대한 이산화 기법들 소개
- 고정시간 간격 및 적응시간 간격 알고리즘을 구체적으로 소개하고 KIM에 적응시간 간격 알고리즘을 적용하여 얻어진 수치적 결과에 대해 설명
- 대부분 KIM에서의 적응시간 간격 알고리즘 수치적 결과에 대해서 긍정적인 반응을 보이며 앞으로 고해상도에서의 효과를 기대한다고 함

o Idealized Modeling within the Community Earth System Model (CESM) Framework (by Scott Bachman)

- CESM에서 세팅되어진 이상실험들 소개. 예전보다 다양한 실험들이 포함
- 소개되어진 이상실험들: dry dynamical core/moist baroclinic wave with Kessler microphysics/moist Held-Suarez/gray radiation aquaplanet/radiative convective equilibrium world/aquaplanet/single column atmospheric model
- 이상실험 관련하여 예전에 비해 범위가 확장되었으며 추후 사업단에서 이상실험을 진행할 때 참고하면 좋을 것 같음

o Towards More Accurate Physics-Dynamics Coupling in NOAA's Unified Forecast System(UFS) (by Kevin Viner)

- UFS의 역학코어는 FV3, 연직 라그랑지안 구조이며 이 모델의 물리 및 역학과정에 대한 커플링 개선 방안을 제시함
- 현재 역학 및 물리 커플링은 각각 first-order time splitting을 사용하고 있으며 각각 역학 및 물리 과정이 순차적으로 서로에 대한 의존도 없이 수치해를 구하고 있음. 이 부분에 IFS의 splitting 기법으로써 second-order time splitting 기법을 적용하여 시간을 업데이트 하는 과정에 역학 및 물리 과정을 동시에 고려
- first-order splitting 및 second-order splitting 기법에 따른 온도(850hPa) 및 지위고도(500hPa) 수치해 비교. 대부분은 새로운 기법에서 오차가 개선됨을 확인
- 비록 연직으로 라그랑지안 기반 시간 이산화를 개선한 방법이라서 사업단의 KIM과는 구조적 차이가 있지만 시간 업데이트에 있어서 역학 및 물리 적용 단계를 고려해볼만함

o Resolving Away Stratocumulus Biases in Modern Global Climate Models (by Takanobu Yamaguchi)

- 연직 고해상도 측면에서 E3SM-FIVE(the Energy Exascale Earth System Model with Framework for Improvement by Vertical Enhancement) 모델을 설명함
- E3SM-FIVE에서 물리과정인 CLUBB(turbulence), MG2(microphysics), RRTMG(radiation), and vertical advection 등이 VEP(the vertically Enhanced Physics)에서 수치적으로 계산되어짐

- E3SM(100km) 모델은 연직으로 72층을 사용함. 반면 E3SM-FIVE 모델에서 VEP(연직 고해상도)는 212 층을 사용함 (8 times high resolution between 995 hPa and 700 hPa)
- 주된 수치결과로 수평 해상도를 100km에서 25km로 단순히 증가시킨다고해서 해양층적운(marine stratocumulus cloudiness) 관련 수치결과가 개선되지는 않음. 이를 개선하기 위해서는 연직 고해상도가 중요함을 강조하였음
- VEP 관점에서 연직 고해상도에 대해 연직 층수를 어떠한 방법으로 늘렸는지에 대해서 좀더 조사해볼 필요는 있을 것 같음

o Appliance of Eddy-Diffusivity/Mass-Flux (EDMF) approach in Shin-Hong (SH) scheme

- NUIST의 Chunsong은 WRF-solar를 이용하여 구름 모서리 부분에서의 균질/비균질 entrainment를 모수화하는 방법과 에어로솔 수농도의 차이로 인해 구름의 수농도의 차이는 잘 나타나지 않지만 에어로졸에 의한 구름의 광학적 특성은 현저한 차이를 보이며 이는 생성되는 구름 방울의 크기가 작아짐에 따른 것임을 보였다.
- NUIST의 Chongzhi yin는 구름 방울을 Lagrangian으로 추적하여 계산하는 super-droplet 방법과 이중 moment 방법의 차이와 수평/연직 해상도에 대한 민감도 실험을 수행하여 두 방법 모두 수평보다는 연직 해상도에 민감하게 반응하며 관측을 기반으로 분석하였을 때, 연직 해상도가 2.5m를 만족해야 구름 구멍 등의 구름의 entrainment를 직접적으로 구현할 수 있다고 하였다.
- Maryland College Park 대학의 Tianning SU는 경계층 상단의 에어로졸의 수농도에 따라 복사 흡수량이 달라지며 이를 통해 경계층 상단에서의 온도 분포가 변화하면서 경계층 상단의 안정도가 높아져 entrainment가 줄어드는 결과를 보였다.
- Maryland 대학교의 Dale Allen은 브라질에서 AOD와 CAPE가 증가할수록 낙뢰 빈도수가 증가하는 것을 분석하였다. 또한 에어로졸 성분에 따른 낙뢰 빈도수를 분석하였다.
- AOML의 Xuejin은 태풍이 발생한 지역의 모형의 수평 격자를 줄이며 예측하는 시스템을 선보였으며 이 시스템은 태풍의 경로를 기존의 모형보다 정확하게 예측하는 것을 확인하였다.
- TKE의 활용에 대한 문제점을 극복하고자 Columbia 대학의 Shamekh는 TKE를 이용한 난류 확산 모수화 과정에서 국지적/비국지적 효과로 구분하는 것이 아닌 TKE의 생성항에 따라 부력과 시어에 대해 난류 효과를 구분하고 이에 따른 확산을 모수화하는 방법을 제시하였다.
- Ateneo de manila 대학교의 Shane Marie Visaga는 대기 상층의 얼음 구름의 광학적 효과로 단파 복사 및 지면 온도, flux에 영향을 주어 결과적으로 경계층 고도의 변화에 관여한다는 연구 결과를 보였다.
- UCLA의 Mark A. Smalley는 경계층에서의 연직 확산이 신뢰할 수준으로 직접 계산되는 연직 해

상도를 각각의 연직 해상도에서 산출되는 값들의 비교를 통해 연직 해상도가 20 m에서 수렴하는 것을 보였으며, 20 m 이하의 조밀한 연직 해상도는 효율적이지 않다고 주장하였다.

o Atmospheric Rivers

- 중위도에서 내륙으로 많은 양의 수증기를 운반하는 대기천(Atmospheric Rivers, AR)은 가늘고 긴 수증기의 운반을 나타내는 현상을 의미한다. 1990년대 초 Zhu and Neewill (1994)에 의해 AR이라는 개념이 처음 제시되었고, 일반적으로 AR은 중위도 저기압의 따뜻한 지역에서 발생하여 저위도에서 고위도로 이동하는 수증기의 약 90%가 AR을 통해 이동된다(Moon et al., 2019).
- AR 현상은 특정 지역이 아닌 전 세계적으로 나타는 현상으로, 미국, 유럽 그리고 동아시아에서 관측되고 있다. 특히 북극, 남극과 같은 고위도 지역의 경우 AR의 수가 적긴 하지만 상당한 눈 을 쌓이게 하거나 열 특성에 따라 빙상, 빙봉 및 해빙에서 융해 현상을 동반하여 극지역에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.
- 현재 위성 고도 측정 자료를 활용하여 계절별 AR이 극지역에 미치는 영향 및 MERRA-2와 ERA5 재분석 자료를 활용한 AR 검출 방법개선과 미래 예측을 전망하는 연구가 진행 중이며 그 추세가 증가하고 있어 극지역에서 AR 분석의 중요성이 높아짐을 확인함

o Melt pond

- 북극의 융빙호(melt pond)는 해빙 면적 감소 및 북극 빙권 변화에 중요한 역할을 하기 때문에 융빙호의 정확한 관측이 필요하다. 미국 NASA의 차세대 고도계 위성인 Ice, Cloud, and Land elevation Satellite-2 (ICESat-2)는 532 nm의 녹색 레이저를 발사한 뒤 반사되는 광자의 이동 시간을 계산하여 전 지구적인 고해상도 고도 정보를 관측한다.
- ICESat-2는 현재 널리 쓰이고 있는 고도계인 CryoSat-2에 비해 세밀한 관측이 가능하기 때문에, CryoSat-2에서 관측할 수 없는 작은 규모의 융빙호를 탐지할 수 있을 것으로 기대함

o Iceberg

- 물에 떠 있는 얼음 조각으로 물 위에 나타난 높이가 최소 5m 이상 되는 것을 빙산(iceberg)라고 칭하고 그 미만의 높이면 유빙(drift ice)이라고 한다. 주로 빙봉이 무너져서 생기거나 빙하가 바다까지 흘러가서 자연스럽게 끊어져서 생기는 경우가 많다.
- 최근 실험들에서 빙산이 녹는 속도와 패턴 그리고 그에 따른 융빙수(meltwater) 분포가 해양 특성(수심에 따른 유속 변화)에 의해 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 우즈홀 해양학 연구소, 노이스턴 대학, 오리건 대학에서는 형상 관측과 실험실 측정을 통해 해빙 모델에서 빙산 용융 모수화를 개선 중이다. 프린스턴 대학교 Huth 박사는 해류나 지형에 따라 빙산이 움직임과 깨짐을 iKID bonded-particle 모델을 통해 모의가 가능함을 보임

o Weddell Gyre

- 남극순환해류와 남극대륙 사이에서 거대한 순환류를 이루는 웨델 환류(Weddell Gyre)가 존재하며 많은 양의 물을 순환하는데 빙하의 밑부분 즉 물속에 있는 부분의 녹는 속도에 영향을 준다. 분해능과 수심 정보에 따라 민감하게 변하며 0.25도 분해능에서 가장 많은 양의 물을 수송하며 수심을 고정한 민감도 실험에서는 분해능이 증가함에 따라 수송량도 증가함을 보임

o Wind-wave interaction

- 해수면 플럭스 모수화 방안인 COARE3.5에 유의파고와 파의 나이(Wave age)를 통한 모수화 방법을 적용하고, 기존의 COARE3.5와 비교함. 풍속과 해수면 스트레스와의 관계에서, 비교적 나이가 어린 파에서는 해수면에서 거칠기 길이와 스트레스가 증가하고, 나이가 많은 파에서는 거칠기 길이와 스트레스가 감소하는 경향을 보임. 이는 기존의 COARE3.5 방안의 결과와 비교해서, 조금 더 관측과 가까운 개선 효과를 보임. 현재 KIM이 사용하는 벌크식은 COARE3.0으로 버전은 다르지만, WAVEWATCH-III가 결합된 결과에 비추어보면 긍정적인 효과를 나타낼 수 있을 것으로 보임
- COARE 벌크 모수화 방안의 개발자인 J. Edson 박사는 현재 COARE3.5가 풍속과 파고의 관계를 모든 지역에 대해 대표성을 가질 수 없어서 새로운 파도 기반의 새로운 모수화 방안을 준비 중에 있음. 이는 COARE4.0으로 연안부터 먼바다까지, 특히 남극순환류의 파랑 정보까지 관측에 포함하여 모수화 개발을 진행하고 있음. 현재 풍속에 의존하는 Charnock 파라미터를 파고와 최대파주기를 활용할 예정이며, 열교환에 관한 함수들도 고려하여 개발하고 있음. 특히나 기존에 열 거칠기길이와 수분 거칠기길이는 같은 경향성을 가졌으나, 다음 개발에서는 서로 독립적인 결과를 나타내도록 개발
- 또한, 극한의 풍속이 발생할 경우, 실험실에서의 연구에서는 풍속이 강할 경우 마찰계수가 포화 상태에 이르러 증가하지 않지만, 파의 가파름을 통한 모수화 방안에서는 지속적으로 증가함. 이는 태풍과 같은 사례에서 풍속에 의존되는 마찰계수보다 파의 가파름을 통한 마찰계수가 좀 더 나은 예측성을 시사. 그러나 최근 ECMWF를 포함한 연구기관들에서 강한 풍속에 대한 마찰계수를 감소시키려고 노력하는 데 반해, 해당 연구는 오히려 증가시키도록 유도. 조금 더 보수적인 관점에서 결과들을 살펴보아야 할 것으로 판단.
- 대기모델에서 계산된 Wind-stress는 Ocean-stress와 같다고 가정하고 처방되지만, 실제로 파랑 모델이 결합되면 $\text{Ocean-stress} = (\text{Wind-stress}) - (\text{induced by waves})$ 형태로 결합해야 조금 더 정확한 에너지를 해양에 전달. 현재 우리는 Charnock 파라미터로 산출된 Wind-stress만 부과하지만, WW3에서 계산된 정보를 통해 Ocean-stress를 계산할 수 있을 것으로 보임.

o Model evaluation

- 모델을 평가하는 다양한 방법들이 있지만, 그중 다양한 규모에서 활용되는 방법은 대기의 천

(Atmosphere River)임. 기후학적 변동성에 대한 평가뿐만 아니라, 종관규모의 검증까지 다양하게 진행하고 있음. 대표적으로 그린란드 빙붕에 대한 대기의 천에 대한 영향과 이에 따른 성층권 극소용돌이에 대한 영향을 판단함. 또한 종관규모에서 대기의 천 패턴에 따른 적설 및 강수의 집중역을 분석하는 연구를 진행. CMIP자료 및 다양한 재분석자료의 연구산출물이 있어서, 우리 모형과 시공간적으로 제약 없이 비교평가가 가능함.

o Tropical Cyclone Frequency: The Role of Seeds and the Large-Scale Environment

- AEWs(African Easterly Waves)의 역제가 대서양에서 발생하는 TC 수에는 영향을 주지 않으나 TC 특성에 영향을 줌
- AEWs 수적 변화가 대서양에서 TC 수에 영향 주지 않음.
- Emanuel (2022): TC 발생의 비율은 “seeds”의 빈도와 대규모 환경에 영향을 받는 transition probability로 나타난다. TC의 climatology는 지역적 환경에 의해 통제되며, 복사 강제력에 대한 TC 활동도 마찬가지다.

o Structure of seed affect its ability to survive planetary Rossby waves

- 더 오래 지속되는 TC seeds가 TC를 더 많이 발생시킬 수 있는지에 대한 연구
- 최고 풍속과 Rhines speed의 비율에 기초한 vortex의 구조적 밀도(compactness)은 행성 로스비파(planetary Rossby wave)에 의해 얼마나 vortex의 강도가 이끌리는지를 설명한다.
- 2019년 태풍 Fung-Wong's의 seeds 는 뾰족한 구조를 가지며 barotropic한 β -plane을 지속시킨다. 이는 seed의 구조가 행성 로스비파의 끌림으로부터 살아남기에 충분히 뾰족하다는 것을 보여준다.
- seed가 확장될 때, 그것의 강도는 빠르게 감소한다. seed의 확장은 구조적 밀도를 낮추고 더 잘 행성로스비파에 의해 더 잘 끌리게 된다.

o Linking Seed Activity to Tropical Cyclone Frequency: A Hadley Circulation Perspective

- 헤들리 순환의 북쪽과 남쪽 cell의 확장 및 강화가 seed 발생과 TC 발생에 주는 영향.
- seed 발생에 오메가가 영향을 줌, TC로 변하는 transition 과정은 연직시어와 관련됨
- 헤들리 순환의 북쪽 cell의 확장과 강화는 ITCZ를 적도쪽으로 옮겨, seed의 위도를 적도쪽으로 이동시킴. 오메가의 강화는 더 많은 seed를 만들지만, 연직시어의 강화는 TC가 되길 방해함(trade off pattern)
- 헤들리 순환의 남쪽 cell의 확장과 강화는 ITCZ를 북쪽으로 옮겨, seed의 위도대를 북쪽으로 이동시킴. 오메가의 증가는 더 많은 seed를 만들고, 남쪽 cell의 연직시어 강화는 해당지역이 0-10N 부근이므로 TC 발생에 영향 없다.

o The Influence of ENSO on Future Atlantic Tropical Cyclone Activity

- ENSO의 미래 변화가 대서양 TC에 주는 영향 연구. ENSO와 대서양TC의 관계는 연직 바람시어에 의해 주로 설명되고, 두 번째 요소는 RH이다.
- ENSO와 TC의 teleconnection은 미래에서도 거의 유사, (정량적인 차이가 약간 있음)
- 모든 ENSO 조건에서 미래에 TC의 수는 감소하고 TC의 강도는 증가한다.
TC 수의 감소는 mean state의 변화와 관련이 있는데, tropical Pacific zonal SST gradient가 약해지고, 연직시어와 RH의 상태가 대서양 TC에 덜 적합하게 된다.

o Subseasonal Tropical Cyclone Prediction and Modulations by MJO and ENSO in CESM2

- CESM2의 subseasonal hindcasts를 가지고 2002년~2019년 TC 예측성을 평가
- 예측된 TC의 climatology 평가: 1주 예측은 관측과 일치함, TC의 수가 2주 예측 이상에서 빠르게 감소
- 예측성능 평가, Brier-skill score: GPI분석을 통해, TC 발생 예측성능은 1주 예측에서 좋으며, 그 이상에서 악화됨을 확인.
- 예측성능에 미치는 요소: mean-state condition이 호조건임에도 불구하고(GPI로 확인), 예측 시간이 길어질수록 TC seeds (convective disturbance)가 감소하고, 그로 인해 TC 수가 감소한다.
더 큰 규모의 조건이 장기 예측에서 TC 발생에 영향을 줄 것으로 사료됨
- MJO와의 관련성: 예측1~3주 정도에서 TC와 MJO간의 관련이 있다. MJO를 따라 TC 발생이 동쪽으로 확장됨.

o Effects of unique Marine Heat Wave ocean structure changed on Tropical cyclone intensity

- 1982~2019년의 관측 자료를 가지고 Marine heat wave (NHW)가 북서태평양 TC에 미치는 영향을 분석함
- NHW 동안 강화된 TC를 NHW TC로 분류(55개)하고, 그렇지 않은 기간에 대해 발생한 TC를 non-NHW TC로 분류(315개)
- 예측 5일 까지 두 가지 TC 모두 비슷한 TC 강도로 진화하지만, 그 뒤 NHW TC의 강도가 더 빠르게 강화함. 이는 NHW동안 해양과 대기의 적절한 상호작용에서, TC 중심 근처에서 증가한 강수가 대기로 막대한 잠열을 방출하면서 더 빠르고 강한 TC를 만듦.

o Contrasting Responses of Atlantic and Pacific Tropical Cyclone Activity to Atlantic Multidecadal Variability

- AMV (Atlantic Multidecadal Variability)가 TC에 미치는 영향을 앙상블 모델을 통해 분석
- AMV의 강제력의 방향에 따라 AMV-는 대서양 TC와 관련이 깊다. 북서태평양에서는 TC 감소
- AMV가 -에서 +가 될 때 북대서양의 TC는 증가하고(SST가 증가, 연직바람시어 감소 때문), 북서태평양 TC는 감소함(연직바람시어 증가 때문).

- Walker circulation의 변화: 두 해양간의 연직바람시어차이가 나타남.

대서양에서 AMV+이면, 상하층에 기압경도와 풍속이 감소하는데 이는 연직바람시어를 약화시키며, 깊은 대류를 가능하게 하고, outflow를 증가시킨다. 이는 태평양에서 상하층의 기압경도와 풍속을 증가시켜 연직바람시어를 강화하고 대기의 침강을 강화시키며 라니냐 때와 같은 SST 패턴이 나타난다.

o Impacts of a Weakened Atlantic Meridional Overturning Circulation on Tropical Cyclone Activity in a Warming Climate

- AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) 분석을 통해 미래 TC의 변화를 살펴봄
- 인위적인 강제력인 증가하면 TC GPI도 전반적으로 증가
- 북반구에서는 AMOC의 약화가 GPI의 증가를 강화시키고, 남반구에서는 감소시킴.
- 고정된 AMOC과 비교하여 약해진 AMOC은 북반구의 TC 발생을 감소시키고, TC 발생을 공간적으로 이동시킨다. 특히 US의 남동쪽 해안에서 증가함
- potential intensity의 변화는 TC 발생을 전반적으로 감소시키고, 바람시어의 변화는 GPI의 공간 분포를 바꿈

o Exploring the Relationship between Tropical Cyclone Precipitation and Sea Surface Temperature on Different Time Scales

- TC 강수와 SST의 관계 연구-단기간의 SST 변동성 vs 기후변화에 의한 장기간의 SST 변화 비교
- IMERG 위성의 강수 자료와 NOAA OISST의 SST 자료, 기후 모델의 모의 결과 등을 통해 분석
- 작은 시간 규모에서 SST 증가할 때 강수도 증가함.
- TC 강수의 apparent scaling이 climate scaling보다 큼.

o The Influence of Radiation on the Prediction of Tropical Cyclone Intensification

- TC와 주변 환경과의 radiative heating의 gradient는 TC 강화에 영향을 줄 수 있음
- CERES의 장파 복사 convergence 영역이 더 두드러질 때 TC 강도의 예측성이 더 좋음
- 습하거나 건조한 TC 환경은 복사적인 효과를 통해 TC 발생에 기여할 수 있음

o Study of the Blocking patterns over the Pacific in Winter and its impact on cold weather on the Korean Peninsula

- 한반도에 영향을 미치는 캄차카 블로킹 및 새로운 태평양 기압능 연구
- 기압능을 탐지하기 위한 새로운 방법 제안
- 대서양에서 이루어지고 있는 블로킹은 패턴 분류를 태평양에서 발생하는 캄차카 블로킹에 적용하여 한반도 한파에 미치는 영향 연구, 향후 KIM의 블로킹 검증에 활용할 기초 연구 자료로 활용
- 캄차카 블로킹과 달리 기압능에 의한 영향을 확인하고자 새롭게 기압능 탐지 방법을 제안하고 기압능을 탐지하여 한반도 한파에 미치는 영향을 연구, 향후 KIM의 블로킹 및 기압능 검증에 활용

할 기초 연구 자료로 활용

- 태평양에서 발생하는 캄차카 블로킹은 cyclonic Rossby wave breaking에 의해 형성되는 블로킹이 한반도 한파에 영향을 미침, 반대로 anticyclonic Rossby wave breaking에 의한 블로킹은 한반도에 온난화를 야기
- 새롭게 현상을 발견한 태평양 기압능은 보통 6일 이상 지속되는 캄차카 블로킹보다 짧은 3일 정도의 기간동안 한반도에 강한 한파를 야기
- 결론적으로 캄차카 블로킹은 길고 한파의 강도를 약하게 한반도에 영향을 미치고 태평양 기압능은 짧고 한파의 강도가 강하게 한반도에 영향을 미침
- 블로킹의 패턴과 기압능에 관한 토의 (University of Chicago, Emily Neal): 2022년 여름 미국의 폭염에 대한 메커니즘 분석이 블로킹과 연관이 있으며 서쪽 해안에서 큰 기압능이 블로킹으로 발전하는 메커니즘으로 Rossby wave breaking과의 연결성에 관한 의견을 교환함
- 블로킹 탐지 방법에 관한 토의 (Pukyong National University, Seon-Hwa Kim) (University of Washington, Jacob Cohen): 블로킹이 빈번하게 발생하는 지역인 대서양과 태평양은 탐지 방법에 따라 블로킹 탐지가 민감하며, 태평양 블로킹 탐지 및 모델 검증에는 본 연구에서 활용한 Reversal 방법이 유효하다는 의견을 교환함
- o Extreme Heat Waves: The Thermodynamic Response of the Atmosphere to Atmospheric Blocking
 - 2021년 북미의 폭염 현상이 저위도에서 발달한 블로킹과 깊은 연관
 - 태평양에서 강하게 발달하는 기압능이 미서부 산맥을 넘어 블로킹으로 발달
- o Contribution of Ural and Kamchatka Blockings to the Amplified Warm Arctic-Cold Eurasia Pattern under Arctic Sea Ice Loss and Eurasian Cooling
 - 우랄 블로킹과 같이 캄차카 블로킹도 유라시아 지역의 한파와 연관이 있음
 - 다양한 모델 시뮬레이션에서 CAM5 모델이 캄차카 블로킹의 효과를 반영
- o The Intrinsic Relation Between Cyclones, Anticyclones, and Rossby Wave Breaking
 - Rossby wave breaking에 의한 블로킹은 지상과 상층과의 상호작용이 중요
 - 일반적인 블로킹보다 Rossby wave breaking 블로킹이 악기상과 더 밀접한 관련이 있음
 - 악기상에 대한 예측성능은 Rossby wave breaking 모의 능력에 따라 달라짐
- o Impact of Arctic-Siberian warming on East Asian heatwaves
 - 여름철 우랄 지역에서 지상 고기압이 발달하고 남동쪽으로 지상 저기압이 발달하면 중층에 Anticyclonic wave breaking 블로킹이 발달(우랄 블로킹)
 - 이러한 블로킹은 우랄에서 한반도로 Rossby wave energy를 전파하고 폭염을 유발

- 극 지역의 해빙 모의와 연관이 깊으며 모델 실험을 통해 여름철 북극 해빙 모의가 한반도 폭염에 영향을 미침

3. 출장성과·시사점 및 향후 업무 활용 계획

- o 남현 : 시간 이산화기법 개선 방안으로 적응시간 간격 알고리즘 적용에 대한 주제로 포스터를 발표하였으며 적응시간 간격 알고리즘을 8km 고해상도 모델에 적용하는 부분에 대해서 많은 연구자들이 긍정적 반응을 보임으로써 해상도 8km에서의 적응시간 간격 알고리즘 적용 관련 연구를 신속히 진행할 계획이다. 많은 구두 및 포스터 발표 내용들이 전지구 모델의 역학부분은 이미 세팅이 되어져 있는 상태에서 그 밖의 다른과정(물리 과정 등)에 중점을 두고 있어서 관련 연구에 대한 직접적인 자문을 얻지는 못했지만 지역 및 기후 모델의 역학과전(전지구 모델의 역학부분과 동일)과 가변격자 관련 연구에 대해 최신 연구 동향을 파악하고 이를 기반으로 2023년 모델역학팀의 연직 고해상도 및 가변격자 업무 개선에 반영하고자 함
- o 김원홍: KIM모델에서 사용하는 경계층 모수화 방안에서 기존의 비국지 난류 확산과정에서 사용하는 국지 수정항을 이용하는 방법에서 질량속 방법을 사용하여 KIM 모델의 연직 확산 과정의 정밀화를 시도하였다. 이 정밀화로 KIM 모델에서 발생하는 지면 주변의 수증기 누적에 대한 문제가 부분적으로 해결되었으며 풍속에 대한 개선도 추가로 확인한 내용을 기반으로 발표하였다. Princeton 대학교의 Zhihong Tan은 질량속 방법에서 사용하는 질량속 항을 통합하여 사용하지 않고 건조 대류의 질량속과 구름층에서의 질량속을 나누어 계산하는 것을 추천하였으며, 이러한 질량속 계산과정의 세분화에 대한 민감도 실험이 필요할 것으로 보인다. 한편 국지적 난류 연직 확산에서 사용되는 에디 확산 계수(K)의 경우 기존에 사용하는 대류 속도 규모에 의한 모수화에서 TKE를 사용하여 계산하는 것에 대한 연구가 활발히 진행중으로 보였다. 특히 TKE를 활용하는 대표적인 방안인 MYNN과 sa-TKE-EDMF를 사용한 UFS의 검증에서 Fanglin Yang은 두 방안의 성능은 비슷하며 MYNN 방안은 지역 규모의 모의에서 sa-TKE-EDMF 방안은 전구 규모의 모의에서 좋은 성능을 보인다고 하였다. 또한 Shin and Hong 방안과 같은 TKE를 통해 K를 계산하지 않는 방안에서도 모형의 목표와 환경에 따라 충분한 성능을 기대할 수 있다는 의견을 말했다. 한편, Shin and Hong 개발자이자 NOAA/ERSL의 홍성유 박사는 TKE를 통한 국지적 난류의 연직수송 모수화에 대해 TKE를 국지와 비국지의 영역으로 구분하는 것에 어려움이 있어 TKE를 통한 난류 확산 모수화에 대한 문제점을 지적하였다. 이러한 의견을 미루어 볼 때, 현재 사업단에서 사용하는 경계층 방안의 모수화 방법에서 TKE의 무리한 사용보다는 모형의 환경에 따른 경계층 방안의 특성을 파악하고 고도화를 진행시켜 모형을 개선하는 방향으로 가는 것이 적절하다고 판단된다.

Shin and Hong 방안에서의 EDMF의 방법에 적용에 있어 Princeton 대학교의 Khaled Ghannam 은 얇은 대류와 경계층 방안의 통합을 위해 EDMF의 방법 적용이 필수적이라는 의견을 보였으며, Columbia 대학의 Shamekh 또한 기존의 국지수정항에 비해 물리적으로 합당한 EDMF 방법을 사용하는 것은 모형이 물리적인 당위성을 갖는데 필요하다는 의견을 보였다. 또한 NOAA/ERSL의 홍성유 박사는 기존에 직접적으로 계산되는 entrainment와 국지수정항의 한계를 EDMF 방법의 도입으로 혼합층에서의 기상 변수의 정확도가 높아지며 이로 인한 경계층 고도에 대한 예측성도 좋아졌을 것이라는 의견을 주었다. 이러한 의견들을 통해 현재 사업단에서 진행중인 EDMF 방법 활용은 적절하다고 판단되며 EDMF 방법의 고도화를 목표로 연구를 진행해야 할 것으로 판단된다.

수평 격자 간격의 감소에 대한 EDMF 방법에서의 격자적응 필요성의 경우 Hong Kong 대학교의 Xiaoming Shi는 고해상도(~1km) 기후 모델의 실험으로 1 km보다 큰 격자에서 난류에 대한 모수화는 필요하다는 것을 연구 결과로 보였다. 이 밖에 서울대 김정희 연구원은 안개의 연직층에 따른 TKE의 차이를 보임으로써 안개층에 따른 난류 연직 확산의 차이를 모수화하여야 한다는 의견을 주었으며, 국립 Taiwan 대학의 Kuan-Yun Wang은 열과 수증기 이류로 발생한 flux변화에 의해 순간적으로 높아지는 경계층 고도에 대해 현재 사용하고 있는 경계층 방안에서의 구현을 확인해야 하며, 이를 통한 이류, flux변화, 경계층 고도 진단 등의 과정에 대한 적절성을 판단에 활용할 것을 추천하였다. 또한 Arizona 대학교 Keming pan은 일몰 시간에 발생하는 불안정 경계층과 안정 경계층의 변환과정에 대한 경계층 방안의 문제를 지적하였다. 위와 같은 다양한 의견에 대한 검증 및 민감도 실험이 사업단의 경계층 방안 개선에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

- 박준성: 중장기 예보의 예측성능을 개선을 위한 대기(KIM)-해양(NEMO)-해빙(SI3) 결합모델 개발 과정 및 예측성능평가 결과를 발표하여 사업단의 결합모델 현황을 공유하였고 타 기관에서의 결합모델 개발 방향과 검증방안을 확인하여 사업단 대기-해빙 결합모델 개발 적절성을 진단하였다. 많은 연구들에서 극지역에서 대기천에 의한 열 및 수증기의 이동이 해빙에 미치는 영향이 미래기후에서 크게 작용할 것으로 보고 있어 현재 결합모델 결과와 관련되어 연구가 좀 더 필요해 보이며, 해빙 면적 감소 및 빙권 변화에 융빙호 및 빙상의 역할이 중요하며 적정한 모의 통해 여름철 해빙 표면 온도 예측성능을 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 해빙의 눈 두께를 검증하기 위한 위성자료로 ICESat-2가 널리 사용되고 있음을 파악하였고, 추후 자료를 확보하여 결합모델 검증에 적극 활용할 수 있도록 기대된다. 남극의 경우 위치에 따라 남극순환해류, 웨델 환류, 로스 환류가 존재하며 각각의 특징을 파악하고 분해능과 수심에 따라 어떤 특징을 가지고 있으며 남극 해빙에 어떠한 영향을 미치는지 추가적인 연구가 가능할 것으로 기대된다.

- 한용재: 대기-해양-파랑에 관한 최신 연구 동향 및 기술을 조사하였고, 우리 결합모델의 현황을

공유하면서 다른 연구자들의 연구 및 개발 현황들을 파악하였다. 특히, 해수면에서의 에너지교환 과정에 대한 모수화 및 결합방법에 대한 연구들을 확인하였다. 풍속에 의존하는 해수면에서의 플럭스 모수화 방안들이 파랑에너지를 활용하는 모수화 방안으로 교체되는 추세이다. 세부적으로, 풍속에 의존하는 거칠기길이 혹은 Charnock 파라미터를 유의파고 및 파의 나이 그리고 최대파주기와 같은 방법들로 모수화하여 개선된 효과들을 확인하였고, 이는 우리 사업단 모델에 적용하여 파랑 결합모델 결과에 긍정적인 효과를 줄 것으로 기대한다. 다만, 연구자들마다 사용되는 계수 혹은 알고리즘이 조금씩 다르므로 충분한 검토와 실험들이 진행돼야 할 것으로 생각된다. 또한, 결합모델을 평가하는 지표로서, 유의파고, 해양혼합층, ENSO의 경년변동 그리고 대기의 천에 대한 평가 방법들을 파악하였다. 이러한 방법들은 이미 여러 CMIP과 재분석자료를 활용한 연구 결과가 있어, 사업단 모델에 대한 평가 및 성능분석이 가능할 것으로 기대한다.

- 정지영: 열대저기압(TC)와 관련된 최신 연구 중 genesis 이전 단계인 TC seeds 연구들을 조사하고, 대규모 순환 및 기후 변동성 등과 관련하여 TC의 형성과 발달에 영향을 주는 메커니즘을 이해하였다(TC의 수, 강도, 분포 등과 연관지어 분석됨). TC 연구에 활용되는 data(재분석자료 뿐만 아니라 CERES, IMERG, OISST 등) 및 methodology에 대해 파악하였다. 최근 수행하고 있는 TC 발생 검증에 대하여 활용 가능한 자문을 얻을 수 있었고, 향후 KIM의 헤들리 순환 예측성을 평가하여 오메가의 강화 및 TCG 위도대의 변화의 영향성 평가와 TCG 수에 영향을 줄 수 있는 TC seeds 연구 추가 조사 및 활용 가능 여부를 파악할 계획이다.
- 조건희: 기존 대서양에서 발생하는 블로킹을 중점으로 Rossby wave breaking의 접목 및 기압능에 대한 현상을 태평양에 대해 연구가 이루어지고 있다. 또한, 기후적인 관점이 아닌 사례 및 모델 모의 성능 관점에서 연구가 이루어지고 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 기압능 탐지 방법 및 블로킹 분류 방법을 적용하여 KIM 모의 성능 검증에 활용하는 필요성이 있을 것으로 생각된다. 해빙 및 해양과의 작용이 블로킹과 매우 밀접하며 미래 기후 시나리오에서 블로킹은 감소하거나 증가하는 추세를 보이지 않고 있다. 그러나, 악기상에 미치는 영향은 증가할 것으로 예측되며 이를 위해 블로킹에 관한 관심과 연구는 지속적으로 필요하다. 모델에서 모의하는 블로킹에 관해 dynamics와 physics를 분류하여 분석이 이루어지고 블로킹 검증만을 위해 1-D ideal 모델을 개발하는 등 세세한 검증 방법이 제안되고 있다. KIM의 중기 및 계절 실험을 통해 블로킹 검증을 정량적으로 접근할 계획이 있다. 학회에서 제시된 역학과 물리를 분류하여 검증이 필요하며 결합 모델에서의 검증도 계획할 예정이다. 또한, 학회에서 긍정적인 반응을 얻은 기압능 탐지 방법을 모델 검증에 활용할 계획이다. 블로킹 검증을 위한 ideal 모델 개발은 KIM에서 블로킹 예측 성능을 파악하고 Rossby wave breaking 특성에 맞춰 개발을 착수할 예정이다.