

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	1월 5일	1월 5일	1월 5일	1월 6일
재	박준성	구명서	이은희	박훈

1. 출장개요

출장목적	AGU Fall Meeting 2025 참석 및 발표		
출장일정	2025. 12. 14. ~2025. 12. 21. (6박 8일)		
성명		소속	직급(직위)
안은지		역학물리팀	원급연구원
박준성		결합모델팀	선임급연구원
김수빈		결합모델팀	원급연구원
방문기관 (또는 회의장소)	미국, 뉴올리언스, 뉴얼리언스 모리얼 컨벤션센터(New Orleans Morial Convention Center)		
출발지	서울, 인천	도착지	미국, 뉴올리언스

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2025년 12월 15일~12월 19일에 미국 뉴얼리언스 모리얼 컨벤션센터(New Orleans Morial Convention Center)에서 개최되는 미국 지구물리학회(AGU) 참석을 통해 구름 및 강수과정, 열대 순환, 에어로졸-구름-복사 상호작용, 대기-해양-해빙 상호작용, 물리/역학과정 개발, 모델 불확실성, 계통오차 개선 방안 등 시공간 통합형 모델 개발 관련 최신 연구 동향을 파악하고, 각국의 전문가들과 교류함으로써 사업단의 연구성과 및 비전 등을 공유하고자 한다.
- 현재까지 사업단에서 수행한 연구 성과를 발표하고, 모델 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 한다.

나. 주요 업무 수행 사항

- 안은지
 - 본 학회에서 단순화된 에어로졸 모듈을 결합한 차세대모델을 활용한 에어로졸 간접효과 연구 결과를 발표하였다. 에어로졸 모듈로부터 에어로졸-구름 상호작용을 모의하고, 재분석자료와의 비교를 통해 에어로졸 질량 농도의 재현성을 평가하였다. 또한 구름응결핵을 기준으로 고·저

에어로졸 지역을 구분하여, 해당 지역에서의 구름 미세물리 변수, 강수 및 복사 반응을 분석함으로써 에어로졸 간접효과의 특성을 진단하였다. KIM 기반 에어로졸 간접효과 연구의 현황을 공유하고, 관련 연구자들과 분석 방법 및 해석 방향에 대한 논의를 진행하였다.

- Atmospheric Aerosols and Their Interactions with Clouds, Radiation, and Climate 관련 세션에 참석하여, 에어로졸-구름-복사 상호작용 및 에어로졸 간접효과를 주제로 한 다수의 구두 및 포스터 발표를 청취·검토하였다. 위성 기반 에어로졸 광학두께 산출 자료의 최신 동향과 수치 모델 내 에어로졸-구름 상호작용 표현 방식, 재분석자료 및 모델의 한계점, 그리고 관측 기반 제약 조건 제시 등 다양한 관점의 연구들이 발표되었으며, 최근 연구들은 에어로졸 간접효과를 단순한 평균 기후 영향 분석이 아닌 예측 시스템 관점에서의 물리적 구현과 성능 영향 평가로 확장하고 있음을 확인하였다.
- 위성 기반 에어로졸 광학두께 산출 자료의 최신 동향을 검토한 결과, MODIS Dark Target 산출과 전지구 에어로졸 광학두께 자료는 2000년 Terra 위성의 MODIS 관측 시작 이후 연구 및 응용 분야에서 핵심적인 역할을 해왔다. Terra 및 Aqua의 MODIS 운용이 곧 종료될 예정이므로 C7은 사실상 마지막 MODIS 자료가 될 가능성이 크다. Collection 6.1 대비 C7의 주요 개선 사항은 고위도 영역 확대, 고해상도 구름 마스킹 및 권운 판별 개선, 먼지·탐지 기능 강화 등이 이루어졌고, 또한 보조 입력 자료가 GDAS에서 GEOS-IT로 전환되고, 자료 포맷이 netCDF4 기반으로 개편됨에 따라 장기 자료 활용성과 접근성이 향상되었음을 확인하였다. MODIS C7과 VIIRS V2.2 간 일관된 격자화 산출물이 제공됨으로써 수십 년 규모의 연속 AOD 자료 구축이 가능하도록 설계되고 있고, 이는 장기 에어로졸 변화 분석 및 모델 검증을 위한 위성 자료 체계가 지속적으로 유지될 수 있음을 시사한다.
- MPAS-A 모델에서 Thompson aerosol-aware 미세물리 스킴을 적용하여 강수 사례를 시뮬레이션하였다. 가변 해상도(약 60-3km)의 복사 영향 및 지표 강수를 관측자료와 비교·평가 하였다. 해당 연구에서는 브라질 지역의 여러 강수 사례를 대상으로 실험을 수행하였으며, 에어로졸 농도 증가 시 구름 물방울 수농도 증가와 평균 물방울 크기 감소가 모의되어 구름 반사도가 증가하는 Twomey 효과가 재현됨을 제시하였다. 또한 물방울 크기 감소로 인해 충돌·병합 과정이 지연되면서 강수 발생이 지연되거나 약화되는 경향이 일부 사례에서 나타났다. 이를 통해 가변 해상도와 미세물리 스킴의 결합이 에어로졸 간접효과를 보다 명확히 재현할 수 있음을 보여주었다.
- 극지방을 대상으로 한 에어로졸-구름 상호작용 연구에서는, 황산염, 유기탄소, 블랙카본 등 에어로졸 종류와 미세물리 스킴 선택에 따라 모델 성능에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다. WRF-Chem 기반 다중 미세물리·화학 모듈 비교 연구에서는, 다중 모식 접근법을 적용하여 미세물리 스킴과 에어로졸 화학 모듈에 따라 구름 미세물리 변수 및 복사 반응의 민감도가 크게

달라짐을 보여주었으며, 이는 에어로졸 간접효과 모의에서 구조적 불확실성이 여전히 주요한 문제임을 시사한다. 이러한 연구들은 간접효과 해석 시 단일 스킵 결과에 대한 과도한 일반화를 경계해야 함을 강조하였다.

- NOAA의 전지구 화학·에어로졸 예측시스템(UFS-Aerosols, UFS-Chem) 개발 사례를 통해서 Unified Forecast System(UFS)와 완전 결합되어 예측을 수행한다. UFS-Aerosols는 기존 GEFS-Aerosols v12.3을 대체하는 GCAFS.v1으로 운영될 예정이며, JEDI 기반 에어로졸 자료 동화 기능을 포함한다. UFS-Chem은 NOAA와 NCAR의 협력으로 개발되며, CATCHem 화학 패키지를 포함한다. 두 시스템 모두 Thompson 에어로졸 인지 미세물리 모식을 통한 에어로졸 간접효과, 대규모 습윤 침적, 산불 배출, 복사 강제력의 계산이 구현되었다. 그 결과, 간접효과를 포함할 경우 고위도 지역을 중심으로 AOD 편향과 RMSE가 추가적으로 감소하였으며, 전지구 평균 구름 분을 편향 역시 직접·반직접 효과만 고려한 경우 대비 최대 약 13% 까지 감소함이 제시되었다. 또한 간접 피드백을 추가하면 특히 북대서양 지역에서 28% 감소한다. MERRA-2와 CAMS AOD는 크기가 다르고 결과적으로 CAMS와 비교했을 때 AOD 차이가 MERRA-2와 비교했을 때 보다 더 작게 나타난다.
- 한편, 재분석자료 및 화학수송모델 기반 에어로졸 질량 모의의 한계를 다룬 연구들에서는 PM2.5 성분 모의에서 황산염(SO₄)이 공통적으로 과소모의되는 경향이 보고되었으며, 이는 고습·안개 조건에서의 2차 생성 과정 표현 한계가 주요 원인으로 지적되었다. 또한 거대 해염 에어로졸(GSSA; dry radius > 1 μ m)의 경우 재분석자료가 현장 관측 대비 수직적으로 과대모의되는 경향이 보고되어, 재분석자료를 모델 평가에 활용할 때 해석상 주의가 필요함을 확인하였다.

o 박준성

- 학회에서 결합모델 내 해빙 모델의 모의 성능과 최근 개선 결과를 발표하였다. 먼저 해양-해빙 단독모델 장기 적분 실험을 통해 다른 대기 강제력(DFS5.2, JRA55-do)에 의해 유발되는 해양-해빙 계통오차의 특성을 진단하였고, 빙붕 및 빙산에서 기원하는 담수 유입 효과를 반영했을 때 남극 연안의 성층화가 강화되면서 남극순환심층수(CDW) 유입이 약화 되고, 그에 따른 표층 해수면 온도 감소가 해빙 면적 모의성능을 개선할 수 있음을 제시하였다. 또한 중기 및 계절 예측 실험에서는 결합 구성요소 간 일관성 확보를 위해 표층 교환계수, 반사도와 벌크식에서 사용되는 상수들을 일관하였고, 양극 겨울철 한랭오차를 완화하기 위해 해염입자에 의한 극지역 온난화 효과를 추가하기 위한 방안으로 하향 장파복사 관련 방출률을 5% 상향 적용이 한랭오차를 감소시키고, RMSE 차이에도 줄여주는 효과가 있음을 제시하였다. 추가적으로 북극 지상 기온 관측과 비교했을 때 공간적 패턴이 보다 유사해짐을 공유하였다. 타 결합모델에서도 북대서양의

한랭 편차와 염분 과소 모의가 대서양 자오선 역전순환(AMOC) 약화로 이어지는 경향이 공통적으로 보고되었고, 이는 해양모델 고유의 계통오차로 해상도 증가만으로는 한계가 있어 추가적인 모수화 개선이 필요하다는 점이 논의되었다. 마지막으로 겨울·여름철 해빙 표면 온도를 좌우하는 단파·장파복사 성분을 체계적으로 분석하고, 관측자료와의 정량 검증을 병행할 필요가 있다는 조언이 있었다.

- 중위도에서 내륙 및 고위도로 대량의 수증기를 가늘고 긴 띠 형태로 집중 수송하는 대기천 (Atmospheric Rivers, AR)은 1990년대 초 Zhu and Newell(1994)이 개념을 제시한 이후, 중위도 저기압의 따뜻한 영역(온난수송대)과 결합해 저위도→고위도로 이동하는 수증기 수송의 약 90%를 담당하는 핵심 수문·에너지 수송 메커니즘으로 정립되었으며(Moon et al., 2019), 미국·유럽·동아시아 등 특정 지역에 국한되지 않고 전 지구적으로 관측되는 보편적 현상으로 보고된다. 특히 북극·남극과 같은 고위도에서는 AR의 발생 빈도는 상대적으로 낮더라도, 단일 사건이 강한 강수(대설)와 적설 축적을 유발하거나, 열·구름 조건에 따라 장파복사 증가 및 강수상 변화와 결합해 빙상·빙붕·해빙의 융해 및 표면 상태 변화를 동반하는 등 극지역 환경에 비선형적으로 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 최근 연구 동향은 위성 고도계 기반 표면 고/질량수지 변화 신호와 AR 이벤트를 계절별로 연계해 극지역 영향(적설·융해·강수 특성)을 정량화하고, MERRA-2 및 ERA5 재분석 자료를 활용해 AR 검출(예: 수증기 수송 진단 기반) 방법을 고도화하는 동시에 기후변화 조건에서의 AR 변화와 극지역 영향 전망까지 확장하는 방향으로 전개되고 있으며, 관련 연구가 빠르게 증가하는 추세는 극지역에서 AR 분석의 중요성이 뚜렷하게 부각되고 있음을 시사한다.
- 해빙 감소에 대한 대기 반응이 대기모델 수평 해상도에 의해 얼마나 증폭되는지를 평가한 포스터 발표에서는, CAM6(Community Atmosphere Model v6) 기반 실험에서 전구 110 km 격자 (Global 110 km)와 북극 정밀 14 km 격자(Arctic-refined 14 km)를 비교하여 북극 강수 및 대기 순환의 민감도를 체계적으로 진단하였다. 실험은 PAMIP 맥락의 해빙 강제력(미래-과거 해빙 차이)을 대기모델에 경계조건으로 강제하는 방식으로 구성되어, 해빙 감소라는 동일한 외부 조건에서 해상도 차이가 순수하게 대기 과정(특히 연직운동과 소용돌이 수송)을 어떻게 바꾸는지에 초점을 맞추었다. 분석 결과, 고해상도(14 km) 설정에서는 해빙 감소에 따른 북극 평균 강수 증가가 저해상도(110 km)보다 더 크게 나타나며(추가로 약 8.5% 증폭), 일 강수 변동성(표준 편차) 반응도 2배 이상 확대되는 등 강수의 평균뿐 아니라 극값/변동성까지 민감하게 강화되는 특징이 제시되었다. 이러한 증폭은 단순한 수증기량 증가보다 수평 해상도 변화에 따른 연직운동(상승류) 민감도 증가와 더 강하게 연결되며, 고해상도에서 연직운동과 관련된 열·수분 수송이 강화되면서 강수 반응이 커진다는 해석을 제안하였다. 더불어 고해상도 실험에서는 해빙 감소에

대한 대규모 대기 순환 반응도 더 크게 나타나 제트/편서풍 약화가 약 50% 수준으로 증폭되고, 북극 기온 신호 역시 최대 약 1 K 정도 더 크게 모의되는 경향을 보여, 해상도 향상이 북극 수문-순환 반응의 크기와 구조를 동시에 바꿀 수 있음을 보여준다.

- 남극 해빙이 계절적·공간적으로 매우 이질적임에도 기후모델에서 이를 균질한 해빙으로 단순화하는 한계를 문제로 제기하고, 신생 해빙-일년빙 사이의 전이 단계인 유년빙(YI; 두께 10-30 cm, 높은 벌크 염분 >6 psu)이 갖는 높은 투과성/열역학적 특성이 해빙-해양-대기 교환을 좌우함에도 기존 모형에서 충분히 반영되지 않는 점에 주목하였다. 이를 개선하기 위해 해빙 벌크 염분 (S_i)을 열적 투과성의 대리변수로 사용하여, 모델이 계산한 해빙 농도(SIC)를 염분 함수로 조정한 유효 해빙 농도(SIC_{eff})를 산출하는 젊은 해빙 모수화(YIP)를 제안했으며, 염분이 높은 젊은 해빙 구간에서 유효 농도를 낮춰 단일 효과를 약화시키고 해양→대기 상향 열플럭스를 강화하도록 설계하였다. 해당 모수화는 NEMO v4.2-SI3 전구 해양-해빙 모의(2016-2020)에 구현되어, ERA5 강제력과 WOA13 초기장 조건에서 기준 실험(control)과 YIP 실험(임계 염분 $S \approx 10$ g/kg 적용)을 비교했으며, YIP의 효과가 5월(성장기) 고염 신생 해빙 대비 12월(용해기) 저염·노후 해빙으로 대표되는 계절적 염분 변동성에 의해 크게 좌우됨을 보였다. 결과적으로 YIP 적용은 남극 주변 규모에서 해빙 두께를 전반적으로 증가시켜 위성 기반 두께 추정과의 일치도를 개선하고 기준 실험의 편의를 완화하는 경향을 보였으나, 늦겨울-봄철 두께 과대가 동반될 수 있음을 함께 제시하였다. 또한 열역학적 해빙 성장에 따른 해빙-해양 질량 플럭스가 큰 남반구 가을에 두께 및 성장 플럭스 변화가 전역으로 확장되며, 연안 신생 해빙 생성과 북향 수송의 결합이 남극 해빙 질량수지/두께 분포를 결정하는 핵심 과정임을 제시하였다.
- 최근(2010년 이후) 여름철 북극 변화가 유럽 폭염의 지속성(persistence)을 어떻게 강화할 수 있는지를 2010-2024년 북반구 여름(JJA) 기간의 저층 기온(T850), 중층 지위고도(Z500) 추세와 함께, 종관 규모 소용돌이 활동 및 하층 열수송의 장기 변화를 결합해 유럽 폭염의 강화 메커니즘을 제시하였다. 분석에서 최근 북극 온난화는 그린란드(GRL) 냉각과 바렌츠-카라해(BKS) 온난화라는 대비적 패턴으로 특징지어지며, 이에 따라 북대서양에서는 온도 경도(temperature gradient)가 증가하는 반면 서유라시아에서는 감소하는 공간적 비대칭이 나타난다고 정리한다. 이러한 경도 변화는 대기 내부 변동성에 직접 반영되어, 북대서양에서는 소용돌이 활동의 쌍극자(dipole) 변화와 함께 제트의 극향 이동(북대서양 제트 시프트)이 강화되고, 반대로 서유라시아에서는 온도 분산 감소로 대표되는 날씨 변동성 약화가 동반되는 것으로 제시된다. 폭염 지표 측면에서는 유럽에서 폭염의 누적 강도 및 특히 지속기간이 2010년 이후 뚜렷하게 강화되는 경향을 제시하며, 핵심 연결고리로 소용돌이 활동 변화와 폭염 지속성의 유의한 상관/회귀 관계(남서·북서 유럽 영역 모두)를 보여준다. 결론적으로 본 연구는 (i) GRL 냉각 → 경도

증가 → 소용돌이 활동 강화 → 제트 변화 및 아열대 영향 증대, (ii) BKS 온난화 → 경도 감소 → 소용돌이 활동 약화 → 서유라시아 변동성 저하·정체(stagnant) 조건 강화라는 두 경로가 결합해 유럽 폭염의 장기화(지속성 증가)를 촉진할 수 있음을 제안하였다.

o 김수빈

- 학회에 참석하여 해양모델 초기자료에 따른 결합모델 모의 성능 변화에 대하여 발표하였다. Cold Run으로 수행되는 결합모델 테스트 실험에 대하여 유속 초기화 실험은 전반적인 해양의 유속 모의성능 향상과 저층 수온 모의성능 향상에 긍정적인 영향을 미치고, 해수면 고도 초기화 실험은 초기 연안지역의 해수면 안정화를 통한 유속 모의 개선을 확인 할 수 있음을 발표하였다. 순환모델 적용시 해양모델의 개선 내용 분석 및 대기모델의 반응에대한 추가 분석이 필요하다는 조언을 받았다.
- 태평양 10년 규모 변동성(TPDV)의 예측 가능성을 평가하고, 그 변동성을 지배하는 물리적 원인을 규명을 위한 연구에서 CESM1 기반 십년 예측 앙상블 실험을 활용하여 해양 초기화 유무, 화산 등의 외부 강제력 포함 여부를 비교 분석한 결과, TPDV의 예측 가능성은 주로 해양 내부 열내용 변화와 이를 전달하는 해양 로스비파에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 이러한 로스비파는 서태평양에서 동쪽으로 수년~10년 규모로 전파되며, 표층 수온 변동과 결합해 지속적인 저주파 예측 신호를 형성한다. 실험 비교 결과, 해양 초기화는 예측력을 유의하게 향상시키는 반면, 외부 강제력의 영향은 상대적으로 제한적이었다. 연구는 열대 태평양 10년 변동성의 핵심 예측 원천이 대기 요인보다 해양 내부 동역학에 있음을 강조하며, 장기 기후예측에서 해양 관측과 초기화의 중요성을 확인하였다.
- 대형 연안해역에서 10년 규모의 기후 변동성에 따라 회전 순환 체계가 어떻게 순환 체 regime을 전환하는지를 분석한 연구에서는 남중국해(SCS)를 대상으로, 1993-2022년 동안의 고해상도 수치모델 결과를 이용해 상층·중층·심층으로 분리된 3층 순환 구조와 와도 변화를 진단하였다. 분석 결과, 해당 해역의 순환은 주기적으로 anticyclonic 패턴과 cyclonic 패턴이 전환되는 두 개의 대표 시기를 보이며, 이 과정에서 각 층 간 수직 결합과 에너지 전달이 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 특히, 순환 체계 전환은 지형 효과, 저층 압력 변동, 와도 압축에 의해 내부적으로 조절되며, 외부 기후 신호가 저층에서 상층으로 전달되는 경로를 강화한다. 연구는 이러한 3층 순환 체계의 전환이 연안해-개방해 상호작용을 통해 기후 변동성이 연안 해순환으로 전달되는 핵심 메커니즘임을 제시하며, 주변 해역의 기후·환경 변화 이해와 예측에 중요한 시사점이 있다.
- 멕시코만에서 발생하는 Loop Current 주변 전선형 소용돌이(Loop Current Frontal Eddies,

LCFE)의 공간적·수직적 분포 특성과, 대기-해양 상호작용에 의해 어떻게 조절되는지를 분석한 연구 발표는 AVISO 위성 관측 자료와 수치모델 실험을 함께 활용하여, 루프 전류가 분리·확장되는 사건 동안의 수직 평균 바트로프 해류의 진화를 추적하고, 소용돌이의 위치·형태·발생 빈도를 체계적으로 진단하였다. 분석 결과, LCFE는 루프 전류 가장자리에서 반복적으로 형성되며, 분리·전개 과정에서 주로 서쪽 및 북서쪽 영역에 집중적으로 분포하는 경향을 보였다. 또한, 소용돌이의 발달 및 유지에는 해류-대기 간 열·모멘텀 교환이 중요한 역할을 하며, 이러한 피드백이 소용돌이의 에너지 구조와 수직 확장 깊이를 조절하는 것으로 나타났다. LCFE가 루프 전류의 분리 과정을 안정화·지연시키는 데 기여할 수 있으며, 이는 멕시코만의 해양 역학 및 지역 기후 변동 이해에 중요한 요소임을 확인하였다.

- 인공 지능 기반 에뮬레이터를 활용하여 해수면 온도(SST) 변화가 전지구 복사 수지에 미치는 영향을 효율적으로 분석하는 방법에 대한 연구 발표는 에뮬레이터는 계산 비용이 매우 큰 기존 복사·기후 물리모델의 결과를 학습해, 동일한 입력에 대해 빠르게 복사 응답을 예측하는 머신러닝 기반 대체 모델로서, 복잡한 단파·장파·구름 성분을 포함한 복사 반응을 저비용으로 반복 계산할 수 있도록 설계되었다. 논문은 재분석 자료와 물리모델 산출물을 비교하여 공간 패턴 재현도, 상관계수, 성분별 오차 등을 통해 성능을 평가하였으며, 열대 및 중위도 해양에서 높은 정확도와 일관된 복사 응답 재현을 확인하는 한편, 관측 불확실성이 큰 고위도 지역에서는 상대적으로 오차가 커짐을 보고한다. 전반적으로 에뮬레이터는 기존 수치 계산 대비 수십~수백 배의 연산 효율 향상을 제공하면서도 주요 물리 신호를 안정적으로 재현하여, SST-복사 피드백 연구와 기후 민감도 평가를 대규모·반복적으로 수행할 수 있는 실질적 연구 도구로서의 활용 가능성을 제시하였다.

3. 출장성과·시사점 및 향후 업무 활용 계획

- o 안은지: 본 출장 기간 중 포스터 발표를 통해 단순화된 에어로졸 모듈을 결합한 KIM에서의 에어로졸 간접효과 모의 결과를 공유하였다. 에어로졸 모듈로부터 계산된 CCN을 기준으로 고·저 에어로졸 지역(HAR/LAR)을 구분하고, 해당 지역에서의 구름 미세물리, 강수 및 복사 반응을 분석한 접근에 대한 관심을 확인할 수 있었다. HAR/LAR 구분 기준과 LAR 지역에서 강수 증가가 명확하게 나타나지 않은 이유에 대한 질문이 있었으며, 연직 프로파일 분석 결과 해당 지역이 배경적으로 구름수분(qc)이 풍부한 지역임을 설명하였다. 이에 대해, LAR 영역을 재설정하거나 분석 영역의 공간 규모를 축소하여 배경의 영향을 최소화한 추가 분석이 필요하다는 의견을 확보하였으며, 특정 지역에 국한하지 않고 전지구적인 관점에서도 동일한 분석을 수행해 볼 필요가 있다는 자문을 받았다. 한편, 본 학회에서 청취한 다수의 에어로졸-구름 상호작용 연구에서는 에어로졸 간접효과 검증

과정에서 위성 기반 에어로졸 광학두께를 함께 활용하는 사례들이 다수 제시되었다. 이러한 연구들은 AOD를 주로 에어로졸 분포 및 제거 과정의 전반적인 재현성을 점검하는 지표로 활용하고 있었으며, 이를 통해 에어로졸-구름 상호작용 해석의 검증 수단으로 AOD 평가가 유용할 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로, 본 연구에서도 에어로졸 간접효과 해석 시 CCN 기반 분석과 더불어 AOD를 함께 점검할 필요성이 있음을 인식하게 되었다.

향후 연구 동향과 논의 내용을 반영하여, 에어로졸 간접효과 모의 결과의 물리적 타당성과 해석 신뢰도를 보다 체계적으로 향상시킬 예정이다.

- 박준성: 중장기 예보의 예측성능을 개선을 위한 대기(KIM)-해양(NEMO)-해빙(SI3) 결합모델 개발 과정 및 모의 성능을 평가하고 개선 방안 적용 결과들을 발표하여 사업단의 결합모델 현황을 공유하였고 타 기관에서의 결합모델 개발 방향과 검증방안을 확인하여 사업단 대기-해빙 결합모델 개발 적절성을 진단하였다. 중위도에서 고위도로 열·수증기를 집중 수송하는 대기천(AR)이 극지역에서 강설·적설과 장파복사/강수상 변화 등을 통해 빙상·빙붕·해빙의 융해와 표면 상태 변화를 비선형적으로 증폭시킬 수 있다는 최신 연구동향과 AR 검출·정량화 기법(재분석·위성 기반)이 빠르게 고도화되는 흐름을 확인하였으며, 해빙 감소에 대한 대기 반응이 대기모델 수평 해상도 증가로 인해 북극 강수의 평균·변동성 및 대기 순환 반응까지 크게 증폭되고 그 원인이 수증기량 자체보다 연직운동·소용돌이 수송 민감도 변화에 더 가깝다는 결과를 통해 결합모델의 해상도 개선이 예측 성능에 직접적으로 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 남극 해빙의 계절·공간적 이질성을 반영하기 위해 유년빙의 염분 의존성을 모수화하여 해빙 두께 및 성장·수송 구조 개선을 통해 모의성능이 개선됨을 확인하였다. 더 나아가 2010년 이후 북극 변화(그린란드 냉각-바렌츠·카라해 온난화)가 온도 경도와 종관 소용돌이 활동을 재구성해 북대서양 제트 이동 및 서유라시아 변동성 약화(정체 강화)를 통해 유럽 폭염의 지속기간을 증가시킬 수 있다는 메커니즘을 확인함으로써, 향후 결합 모델 평가·개선에서 대기천이 해빙모의 성능에 미치는 영향 진단, 해상도에 따른 연직운동/소용돌이 수송 재현, 유년빙 모수화, 그리고 극지역 변화가 중위도 극한기상으로 연결되는 원격 상관 검증을 통합적으로 반영하여 연구에 활용할 계획이다.

- 김수빈: 대기(KIM)-해양(NEMO) 결합모델의 해양 초기장 개선에 따른 해양모델 모의 성능 분석 내용을 공유하였다. NEMO 해양모델의 예측 시스템 활용 시 장기 수행을 통한 안정화 과정 단계를 제외 할 수 있는 가능성과, 초기 자료 개선을 통한 해양 예측 자료의 개선을 공유 할 수 있었다. 해양 예측 자료의 표층 수온 변화와 대기-해양 상호작용에 의한 대기모델의 반응에 대한 추가적인 조언을 받았다. 대기-해양 상호작용 중 특히 해류와 대기의 상호작용에 관한 연구내용을 기반으로

사업단에서 개발중인 결합모델에서 해류장 개선을 통한 상호작용 개선이 나타나는지에 대한 분석 수행에 대해 자문을 받았다. 현재 해양모델 해상도에서 모의되는 해류장에 의한 에디 분포와 에디 분포에 의한 열·모멘텀 교환 작용 분석 및 고해상도 해양모델 개발에 따른 해류모의와 해류-대기 상호작용 개선 내용에 대한 추가적인 연구가 가능할 것으로 기대된다.