

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	5월 26일	5월 26일	5월 26일	5월 26일
재	조미현	구명서	이은희	박훈

1. 출장개요

출장목적	EGU General Assembly 2025 참석 및 발표		
출장일정	2025. 4. 27.~2025. 5. 4. (6박 8일)		
성명		소속	직급(직위)
조미현		결합모델팀	선임급연구원
정진운		결합모델팀	원급연구원
방문기관 (또는 회의장소)	오스트리아 센터 비엔나 (Austria Center Vienna)		
출발지	서울, 인천	도착지	오스트리아, 비엔나

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2025년 4월 28일~5월 3일에 오스트리아 비엔나 Austria Center Vienna에서 개최되는 유럽 지구 물리학회(EGU) 참석을 통해 지면-대기 상호작용, 대기-해양-해빙 상호작용, 지구시스템모델 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

- 조미현
 - 본 학회에서 차세대수치예보모델개발사업단에서 구축한 결합모델시스템에 대해 간략하게 소개하고 하천결합모델을 이용한 연구 결과를 발표하였다. 2주 이상의 연장 중기 예측의 정확도 향상을 위해서 대기, 해양, 해빙, 파랑, 하천을 통합한 새로운 결합모델시스템을 구축하여 하천에서 해양으로 방출된 담수가 해수면 온도, 염분, 해빙 등에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 북극의 카라-바렌츠해

지역에서 하천의 담수가 해양의 열염분순환을 변화시켜 해빙이 변화하고 다시 대기에 미치는 영향의 순환 기작을 분석한 연구를 발표하여 국외 전문가들이 매우 긍정적인 반응을 보였다. 해양모델의 결과 분석에 있어서 AMOC 순환 진단의 중요성에 대한 조언도 들을 수 있었다.

- 지면대기상호작용 : 폭염 사례를 분석하여 고온이 증발산을 증가시켜 토양수분이 급격히 감소하는 사례와 토양 수분의 감소가 증발산을 억제시켜 지표면 온도가 상승하는 사례를 나누어 분석하였다. 이 연구를 참고하여 폭염 사례 연구를 진행하여 KIM에서 지면 대기 상호작용을 평가하는 데 이용할 예정이다.
- 지면모델 : Land-use, Land-use change, and Forestry (LULUCF)의 생지물리적인 영향과 생지화화학적 영향을 나누어 평가하였다. 생지화화적으로는 연간 인위적인 이산화탄소 배출의 10~15%에 기여하였다. 유럽 연합은 2022년 LULUCF를 통해 236MtCO₂e의 순제거를 달성하였다. 생지물리적으로는 알베도를 변경시켜 표면 거칠기 조절을 통해 지역 기온을 1~3°C 조절할 수 있다. 관개 농지를 확장시키면 증발산의 증가로 열파를 완화시킬 수 있다. 전세계에 경작지 확장으로 인해 생지물리적으로 중위도 지역 0.5~1.2°C 냉각을 가져왔으며, 아마존 탄소 저장량은 7GtC이 감소하였다. 한편으로 관개 농지의 확장은 heat stress를 30% 감소시키지만 지하수 고갈 리스크는 증가한다. 산림을 조성하면 생지물리적으로 탄소 흡수량이 2~4 tCO₂/ha/yr 증가한다. 반면 북극 지역에 산림 조성은 알베도 감소로 순 온난화 효과가 있다. 연구에서 제시된 정량적인 수치를 이용하면 KIM 지면-대기 상호작용에서 영향의 정도를 평가하는데 참고할 예정이다.
- 해빙대기상호작용 : 해빙 감소로 인해 북극 지역의 열린 바다(open sea) 면적이 증가하고 있다. 이에 따라 해수에서 기인하는 해염 에어로졸(SSA, sea salt aerosol)의 발생량 또한 증가하는 경향을 보이고 있다. 해염 에어로졸은 단순한 염분(salt) 성분 외에도, 해양 미생물(조류, 박테리아 등)이 생성하는 유기물질, 당, 아미노산, 지방산 등이 표면에 함께 포함되어 있는 것으로 확인되고 있다. 이러한 해염 에어로졸의 증가는 구름 응결핵의 수를 증가시켜, 구름의 양 및 반사도에 영향을 미쳐 기후 냉각 효과를 유발할 수 있다. 또한, 이는 북극 생태계 전반에도 다양한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 북극 기후 변화를 정확히 예측하기 위해서는 해빙, 해수, 해양 미생물, 에어로졸 간의 상호작용에 대한 과학적 이해가 필수적임을 보고한다. 온난화의 가속화와 함께 미래에 펼쳐질 해빙 감소에 따른 영향이 복합적으로 나타날 수 있음을 알 수 있다.
- 남극의 해빙 : 2015년 전까지 남반구 해빙 면적(SH SIA)은 약한 증가세를 보였으나, 2015년 이후 급격한 감소세로 전환되어 2017년, 2022년, 2023년에는 연속적으로 역대 최소 면적 기록이 갱신된 것으로 나타난다. 주요 원인으로는 첫째, 대기 순환 변화가 있다. 특히 남극 순환 모드와 남극진동 지수(SAM) 영향이 두드러지게 나타난다. 겨울철(해빙 최대기, 9월)에는 SAM이 강한 서풍 상태를 보이면서 해빙의 분산이 가속화되고, 이에 따라 해빙 면적이 감소하는 경향이 확인된다. 이러한

영향은 1년 동안 지속되어 연간 평균 해빙 면적의 하락을 주도하는 것으로 분석된다. 반면, 여름철 (해빙 최소기, 2월)에는 SAM이 해빙의 재형성 촉진에 기여하여 일시적으로 해빙 면적이 증가하는 현상도 나타난다. 둘째, 해양 온난화의 영향이 있다. 심해 온수 유입이 남극 저면 200~700m 깊이에서 0.2~0.4℃ 상승하는 경향을 보이며, 아문센해 등 서남극 지역으로의 온난 해류 유입이 증가하고 있다. 셋째, 열대 태평양 기후변동의 영향이 확인된다. 엘니뇨 현상 강화로 인해 남극 주변 기압계가 변화하고, SAM 패턴이 강화되면서 극소용돌이가 약화되고 중위도에서 따뜻한 공기가 남극으로 유입되는 빈도가 증가하는 것으로 나타난다. 이러한 변화는 해빙 감소 → 태양열 흡수 증가 → 해양 온난화 가속 → 추가 해빙 감소로 이어지는 악순환 구조를 형성하고 있다.

- 복사강제력과 담수의 중요성 : CESM2 모델은 온실가스(GHG)와 에어로졸의 복합적 영향으로 1990년대 이후 그린란드 표면질량균형(SMB) 감소를 재현하고 있다. 에어로졸 효과를 반영할 경우, 2090년까지 성층권 에어로졸 주입(G4 시나리오) 시 GHG만을 고려한 경우에 비해 빙상 질량이 31~38% 덜 감소하는 것으로 나타난다. 그러나 모델에는 한계가 있다. 대기 순환 변화가 충분히 반영되지 않아, 북극 상층 대기 순환(반시계방향 소용돌이) 변화가 관측된 표면 온난화의 50%를 설명함에도 불구하고 CESM2는 이를 충분히 모사하지 못한다. 또한, CESM2-SFLE에서는 에어로졸 단독 강제력 기여도가 관측 대비 40% 낮게 추정되어, 에어로졸 영향이 과소평가 된 것으로 나타난다. 유출량(Runoff) 측면에서는, 1991~2014년 SMB 감소의 60%가 용융수 유출 증가에 기인하는 것으로 분석된다. 해당 모델은 대기 순환에 의한 용융 촉진 메커니즘을 완전히 반영하지 못해, GHG 및 에어로졸에 의한 기여도 역시 과소평가하는 한계가 있다. 하천결합모델을 통한 담수의 해양으로의 유출이 그린란드 지역의 해수면고도에도 중요한 역할을 할 수 있음을 알 수 있었다.

o 정진윤

- 학회에 참석하여 결합모델의 대기와 해빙 사이의 상호교환과 관련된 계수 민감도 실험 결과를 발표하였다. 대기모델과 해빙모델의 교환계수의 일관성을 맞추고 해빙 지역에 맞는 거칠기 길이 방정식으로 대기-해빙 운동량, 열 및 습도 교환계수를 고도화하는 실험을 진행하였다. 그 결과 겨울 반구에서 큰 민감도를 보이며 특히 바렌츠-카라 해가 중요한 지역임을 확인하여 국외 전문가들과 공유하였다.
- 극지역의 구름 오차를 줄이기 위하여 다양한 관측 프로젝트들이 이루어지고 있었다. 특히 북반구에서는 북극의 찬 기운이 중위도로 내려오는 경우(cold-air outbreak)나 중위도의 따뜻한 기운이 북극으로 이동하여(warm-air intrusion; WAI) 급격한 기온 변화가 발생하는 기간에 대한 연구들이 많았다. 평상시에는 구름의 꼭대기만 습하고(과포화) 구름의 바닥은 건조하지만(과포화X),

WAI가 발생하여 덥고 습한 공기가 북상하면 얼음핵을 만들 수 있는 기준인 상대습도가 구름 꼭대기와 바닥 모두에서 높아져 과포화된다. 그로 인해 권운은 더 두껍고 밀도가 높아져 장파 복사를 더 많이 가두어 북극 온난화를 가속시킨다. WAI는 단순히 열과 수증기만 옮기는 것이 아니라 북극에 생기는 권운 특성을 바꾼다는 것을 알 수 있었다.

- 대부분의 CMIP6 모델들은 해수면온도가 차갑거나 지표 바람이 약한 조건에서 남반구 해양의 구름 반사율을 과소모의한다. 남반구는 관측자료의 부족으로 북반구 조건을 적용하기 때문에 실제 메커니즘을 잘 나타내지 못하고 있다. 실제로는 과냉각 액체구름이 자주 나타나지만 많은 기후모델에서는 이를 빙정 구름으로 잘못 표현함으로써 오차가 크게 생기며, 특히 4°C 미만의 해수면 온도에서 구름상의 변화가 자주 발생하기 때문에 이 온도를 구름 표현의 판단 기준(proxy)으로 사용할 수 있음을 제시하였다. 또한 기후모델과 재분석 자료 모두 남극 및 남대양의 단파복사를 과대모의하는 경향이 있다. 이는 주로 저층 혼합상 구름(low-level mixed-phase cloud)을 제대로 재현하지 못하기 때문에 발생한다고 알려져있다. UM의 고해상도 지역 기후모델은 구름의 연직 구조, 위상, 발생 시점 등은 잘 모의하지만 액체물경로(liquid water path)나 복사 플럭스는 잘 모의하지 못한다. 그 원인 중 하나는 에어로졸 농도를 심각하게 과소모의하는 것으로, 관측값의 최대로 구름 응결핵 자체를 증가시키는 것은 큰 효과를 보지 못하였고 그보다는 선박 관측을 토대로 얼음핵 입자를 현실적으로 모수화하는 것이 도움이 된다고 판단하여 Cloud AeroSol Interacting Microphysics (CASIM) 또는 GLObal Model of Aerosol Processes (GLOMAP)등의 모듈을 확보하고 있다.
- 기후모델들은 북극 해빙의 겨울철 표층 기온 또한 모의를 잘 못하고 있다. ERA5 재분석 자료가 검증에 널리 쓰이지만 극지에서는 온난편차를 보이기 때문에 관측자료들과의 비교를 통해 보정을 하여 사용할 필요가 있다. IPSL-CM6A-LR 모델을 활용하여 분석한 결과, ERA5에 비해서 한랭 오차가 존재하지만 linear regression을 통한 보정결과와 비교하면 온난오차로 바뀐다. 대기모델에서는 에너지 수지 분석을 통해 극지역으로의 대기 열 수송이 과대모의함을 확인하였고, 이는 하층 대류권을 통해 확장됨을 알 수 있었다. 결합모델에서는 해빙 과소모의가 온난오차를 증폭시키는데, 해빙 과소모의로 북극 대기가 따뜻해져 극지역으로의 대기 열 수송은 대기모델보다 줄어들지만 해양 열 수송 또한 과소모의되어 표층 에너지 수지 불균형이 초래된다.
- 대서양의 따뜻하고 염분이 높은 해수와 생물 군집이 북극해로 침투하는 현상을 Atlantification이라고 부르는데, 예상보다 훨씬 빠르게 나타나고 있다. Atlantification이 발생하면 해양 성층화가 약해지고 해수 열수송이 늘어나면서 시베리아 부근 북극해의 해빙이 급감한다. 또한 해빙이 녹으면 해양 표면은 더 많은 대기의 열을 흡수하여 해빙 감소 속도를 더욱 빨라지고 해양 성층화는 더욱 약해지는 등의 양의 피드백 효과를 통해 그 영향이 증폭된다. 주요 기후모델(CMIP5/CMIP6)들은 북극 해양

내 열 수송 메커니즘 (특히 하층 대서양 해수의 열수송)을 잘 나타내지 못하여 북극 해빙의 급격한 감소를 과소모의한다. 해빙 감소는 단순한 표층 온도의 문제가 아니며, 하층의 대서양 해수 열이 북극 표층으로 전달되는 동역학 변화가 핵심 문제임을 알 수 있었다. 그러나 기존 기후 모델들은 대서양 해수 열 플럭스와 해양 혼합 메커니즘을 잘 재현하지 못한다.

- 북극해의 성층과 순환은 주로 염분에 의해서 결정된다. 담수 유입은 염분을 희석시켜 상층을 안정화시키기 때문에 해빙 형성, 혼합 억제, 연직 열전달 차단 등 다양한 효과를 유발한다. 보퍼트 해(Beaufort Sea)는 여름철 해빙 용해와 하천 담수 유입이 모두 활발한 지역으로 가장 염분이 낮은(fresh) 지역 중 한 곳이다. 머신러닝 기반으로 해빙 예측에 대한 변수 중요도를 분석한 결과에서는 냉각에 직접적인 영향을 주는 해수면 온도(SST), 대기-해양간 에너지 교환을 의미하는 열속(heat flux), 해빙의 상태를 나타내는 해빙 농도, 그리고 성층 형성에 결정적인 역할을 하는 해수면 염도(SSS) 순으로 높게 나왔다. 이를 바탕으로 실험한 결과, SMOS+SMAP 위성 기반 OISST v3의 염도 데이터를 포함할 경우 해빙 예측 정확도가 향상됨을 보였다.
- 지난 60년간 북극 전역의 근지표 바람 속도(near-surface wind speed)가 점진적으로 증가하고 있다. 가장 증가한 지역은 카라해와 보퍼트 해로 특히 겨울철에 증가하였다. 평소 북극은 해빙 위의 지면이 차갑고 상층이 따뜻한 역전층을 형성하고 있는데, 온난화로 지표 온도가 따뜻해지면서 역전층이 약화되어 하층 대기가 불안정해지고 있다. 경계층 높이가 높아지면 난류 혼합이 증가하여 상층 고속풍이 지표면까지 수직 전달되므로 근지표 바람 속도가 증가할 수 있다. 더 강한 바람은 해빙 이동 및 파쇄를 가속화시키고, 해양 혼합을 증가시켜 표층을 냉각시킬 수 있기 때문에 바람의 트렌드를 잘 모의하는 것이 중요함을 시사한다.

3. 출장성과 · 시사점 및 향후 업무 활용 계획

- o 조미현 : 이번 학회에서 CaMa-Flood 하천모델과 KIM의 결합모델 연구 결과를 발표하고, 다양한 해외 연구자들과 모델 연계 및 검증 방법에 대해 심도 있게 논의할 수 있었다. 특히, 하천 유출량이 해양 및 대기 과정에 미치는 영향의 중요성을 각국 전문가들과의 의견 교류를 통해 확인할 수 있었다. 실제 관측자료 및 재분석 자료를 활용한 모델 검증 사례를 공유하여 모델의 공간적·계절적 재현성 평가 방안에 대해 조언을 얻을 수 있었다. 이번 교류를 통해, 북극 등 특정 지역에서 해양-해빙-대기 상호작용 연구의 최신 동향과 주요 쟁점도 파악할 수 있었다. 또한, 여러 연구자들과의 정보 교환을 통해 KIM 결합모델 적용 시 고려해야 할 검증 방법을 모색할 수 있었다. 향후에는 학회에서 논의된 검증 방법과 관측자료 활용 방안을 바탕으로, KIM과 하천결합모델의 성능 평가를 강화할 계획이다. 아울러, 해외 연구자들과의 네트워크를 유지하여 추가적인 자료 교환과 기술 자문을 받을 수 있도록 협력할 예정이다.

- 정진윤 : 결합모델의 해빙 지역 오차를 줄이기 위한 방안 중 하나로 대기-해빙 교환계수를 고도화하는 민감도 실험 결과를 발표하고 결합모델의 현재 극지역 해빙 모의 성능을 공유하였다. 극지역은 관측이 쉽지 않기 때문에 메커니즘에 대한 이해가 여전히 부족하지만, 이를 보완하기 위해서 다양한 프로젝트들이 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 극지역에서는 재분석 자료들도 정확도가 떨어지기 때문에 연구들을 참고해 다양한 관측자료들을 확보하거나 재분석자료들을 보정하여 검증에 활용할 예정이다. 또한, CMIP6 등 여러 기후모델들에서도 복사 플러스, 구름, 해빙 등에서 결합모델과 유사한 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있었으며, 관련 연구들을 바탕으로 오차가 발생한 원인이 유사한지 진단하여 교환계수 등 앞으로의 해빙지역 모델 개발 및 검증에 활용할 예정이다.