

국외 출장 결과보고서

결	담당자	팀장	실장	사업단장
	8월 8일	8월 13일	8월 13일	8월 13일
재	김원흥	(대결) 남현	이은희	권인혁

1. 출장개요

출장목적	9 th GEWEX Open Science Conference 참석 및 발표		
출장일정	2024. 7. 7.~ 2024. 7. 13. (6박 7일)		
성명		소속	직급(직위)
배수아		역학물리팀	책임급연구원(팀장)
강정운		역학물리팀	책임급연구원
방문기관 (또는 회의장소)	일본, 삿포로, Keio Plaza Hotel		
출발지	서울, 인천	도착지	일본, 삿포로

2. 업무수행내용

가. 출장 배경 및 목적

- 2024년 7월 7일 ~ 12일에 일본 삿포로에서 개최되는 9th Global Energy and Water EXchanges (GEWEX) Open Science Conference 참석을 통해 관련 분야의 최신 연구동향을 파악하고, 각국의 전문가들과 교류함으로써 사업단의 연구성과 및 비전 등을 공유하고자 한다. 본 학회는 인간의 활동과 물, 에너지 간의 복잡한 상호 작용과 변화에 대한 이해를 높이기 위해 물, 기후, 인간활동 및 극한 기상, 물 순환의 주제를 중심으로 다양한 연구내용 교류가 이루어지는 학회이므로 사업단 연구원들이 다양한 관점의 연구 동향에 대한 의미있는 정보를 습득할 수 있는 좋은 기회이다. 사업단의 연구 성과를 발표하고 전문가들과 논의를 통해 사업단에 활용할 수 있는 유용한 정보 및 의견들을 수집하여 사업단에 환류함으로써, 사업단의 연구 개발에 활용하고자 한다.

나. 주요 업무 수행 사항

○ Planery session

- 일본 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)에서 Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer(EarthCARE) 위성에 관한 발표. EarthCARE는 일본과 유럽이 공동으로 개발한 지구 관측 위성으로, 전지구적으로 구름과 에어로졸을 관찰하고 특성을 파악하는 것뿐 아니라 반사된 태양 복사와 지구 복사를 측정하여 기후 변화 예측의 정확도를 높일

것으로 기대. 구름 입자와 에어로졸의 수직 방향 분포 관측뿐 아니라, 상승 및 하강하는 구름 입자에 대한 속도 측정까지 수행.

- 2021년 노벨 물리학상을 수상한 마나베 슈쿠로 박사를 헌정하는 발표. 대기 중 이산화탄소 농도 증가가 어떻게 지구 표면의 온도 상승으로 이어지는지 수증기의 긍정 피드백 효과가 있는 복사
- 대류 평형 상태의 대기 열 모델을 통해 설명. 또한, 대기 모델과 해양 순환 모델이 결합된 최초 기후 시뮬레이션 소개.

o “Organization of convection: from process understanding to high-impact weather and lightning warning” session

- 지표의 수분량의 변화도(gradient)가 클 때, 중규모 대류 시스템(Mesoscale Convective Systems, MCSs)이 크게 발달할 수 있는 조건이 됨을 관측 및 전지구 시뮬레이션을 통해 보임. 100 km 규모의 지표 수분량 변화도는 대기 온도 변화도 강화를 통해 시어(shear) 조건을 유발시켜 중규모 대류 시스템을 강화시킴. 유리한 수분량 변화도 상황에서는 강수 시스템의 크기 및 강수량이 10~50%까지 증가함을 보임.

o “Observing the Water Cycle from Space” session

- 새로운 위성관측에 추가된 강설자료에 대해 소개. 이를 이용한 강수관련 재분석장 검증 및 진단 연구들이 다양하게 이루어지고 있었음. 다양하게 사용되고 있는 위성관측과 재분석장 강수 자료에 대해 CloudSat 대비 검증이 수행됨. GPCP (Global Precipitation Climatology Project) v3.2에 대해서 소개되었고, 사업단에서 검증에 사용되고 있는 IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)은 과소모의되나 새로운 GPCP 자료는 CloudSat과 유사한 값을 보임.

o “The mountain and cold region (cryosphere) water cycle” session

- 현재 이산화탄소 등의 배출량 상태를 따라가면 전지구 1.5도 상승 목표를 초과할 가능성이 매우 크며, 여러 가지 전지구 온도 변화추이에 대해 Open Global Glacier Model을 이용해서 2500년까지 빙하 부피와 유출량에 대한 영향을 분석. 전지구 온도가 1.2도 상승했을 때, 2020년 전지구 빙하 부피의 30%가 사라짐. 전지구 온도가 3.0도 상승했다가 엄격한 배출 규제 및 탄소 제거 정책으로 인해 지구 온난화 온도를 1.5도로 다시 되돌리는 시나리오(overshoot)의 경우는 빙하의 느린 반응 때문에 불가역적 반응이 되어 지구 온난화 온도가 1.5도로 유지되는 시나리오에 비해 2500년이 되었을 때 빙하의 부피가 11% 감소.
- 30km, 10km, 2km 해상도에 대해서 티벳 고원지대의 모델 시뮬레이션 비교를 통해 2km 해상도

(대류 허용 시뮬레이션, convection-permitting simulation)에서 수증기의 이류 및 물 순환 모의가 현실적으로 이뤄지면서 강수 및 온도 모의가 타당하게 됨을 보임.

- 티벳 고원지대의 겨울-봄 변화시기에 지표면 식생 변화에 따른 기후학적 효과에 대한 발표. 티벳 고원지대의 겨울 적설량(Tibetan Plateau winter snow cover, TPWSC)과 동아시아 여름 강수량(East Asia summer precipitation, EASP)의 관계가 1990년대 초반에는 강화되었지만, 2000년대 이후 약화되었음을 보였고, TPWSC-EASP 관계의 약화는 티벳 고원지대의 겨울, 봄철의 눈 덮임에 대한 식생 증가 영향과 관련. 겨울에서 봄으로 계절이 변화하는 시기에 티벳 고원지대의 시든 풀 줄기로 인해 쌓인 눈이 금방 녹게 되고, 이로 인해 지표 단열 가열 현상을 약화시켜 여름철 하층 대기 순환에 대한 티벳 고원지대 열강제력의 영향이 변경되어 EASP 패턴이 달라짐. 눈-식생 피드백의 중요성과 기후 예측에서 눈 덮임 효과를 변경시킬 수 있는 잠재력을 강조.
- o “Understanding Energy and Water Cycles in the Troposphere and Stratosphere via Data and Modeling” session
 - 전구모델 상층부 모의성능 개선을 위해 성층권 내 수증기 및 CH₄ 산화과정 고려, 대류권-성층권 물 교환 등에 대한 내용 등 소개. 상층부 모의성능 관련해서 성층권에서 CH₄ 산화과정을 모의함으로써 열대지역 대류권 상층부에서 얼음입자들이 상승하게 되고 대류권-성층권 간 물 교환이 이루어져 모의성능이 개선됨을 보임.
 - 두 종류의 열역학(thermodynamic) 구성(consistent/simplified)을 사용해서 전지구 구름 분해 모델(Global Cloud Resolving Model)을 수행하여 그 결과를 비교, 열대 상층 대류권의 온도 차이가 약 2K 임을 확인. 이는 습윤단열 기온감율(moist adiabatic lapse rate)로 분석하였을 때, 현열은 감소하고, 잠열은 증가, 포화증기압도 증가하며 지표면의 온도가 증가하였을 때, 열대 상층 대류권의 온도 차이도 커짐. CMIP5/6(Coupled Model Intercomparison Project Physics 5/6)에 참가한 모델들은 관측과 비교했을 때 대류권 상층의 온도를 과대모의하는 경향을 보이는데, 이로 인해 상층운의 고도가 증가하고, 워커순환(Walker circulation)이 약화됨. 대류권 상층 온도의 과대모의 원인으로는 모델의 해상도와 오존의 연직 프로파일, 대류 모수화 등이 있을 수 있으며, 전지구 기후 모델(Global Climate Model, GCM)의 열역학 표현도 한 가지 가능성이 있는 원인 중의 하나임을 제시. 보다 정교한 습윤 열역학이 기후학 분야와 기후 예측과학을 잘 표현하는데 필요.
 - 적도수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)에서 떨어지는 얼음입자(snow)에 대한 복사 관점 효과를 제시. 실제 대기에서는 떨어지는 얼음입자가 존재할 경우, 단파를 대기 밖으로 많이 반사시켜서 지표면에 도달하는 단파의 양이 적지만, 대부분의 GCM에서는 떨어지는 얼음입자를 복사에서 고려하지 않으므로, 반사시키는 단파의 양은 적고 지표면에 도달하는 단파의 양이 커짐. 또한,

외향장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR)도 과하게 모의. 떨어지는 얼음입자가 대류 모수화에 미치는 효과도 제시. 모델에서 떨어지는 얼음입자를 복사에서 고려하지 않을 경우, 과도한 지표면 단파복사로 인해 변칙 하층 유출 흐름이 발생하고 대류 구름 내 updraft와 downdraft가 강화되는 것을 대류 모수화에서 처리해야 함. 떨어지는 얼음입자 고려 유무에 따라 CESM1-CAM5 민감도 테스트를 통해, 얼음입자를 고려하지 않았을 경우 지표면 바람 응력과 하층 무역풍이 약화되는 것을 확인. 이는 해수면 온도를 상승시키고, 따뜻한 비구름을 발생시켜 강수량이 과다모의되면서 double-ITCZ가 발생.

o “Cloud Processes: from cloud development to dynamic interactions“ session

- 에어로졸에 대한 기후, 구름 피드백, 강수효율 등에 대한 민감도를 확인하기 위해 에어로졸 및 구름 수송도를 변화시키면서 모델 수행을 하는 RCEMIP(GEWEX Aerosol Precipitation Initiative Radiative Convective Equilibrium Experiment) 프로토콜을 제휴함. 이상화된 에어로졸 섭동을 갖춘 전지구 km 규모 시뮬레이션을 제안하였고, 40일의 5km 규모 시뮬레이션 결과를 장기 추세 및 일별 반응으로 분해하면 대류 및 대규모 순환에 대한 명확한 효과가 나타남. 전지구 km 규모 시뮬레이션과 EarthCARE와의 상호 비교에 대한 논의도 있었으며, 앞으로 더 많은 내용이 추가될 예정.
- 수정된 WRF-Chem 모델을 이용해서 Gwanzhong Basin 영역에 대한 인위적 에어로졸의 강한 짧은 강수에 미치는 영향을 살펴봄. 0.2부터 5까지 범위의 인자를 곱해서 인위적 배출량의 강도를 조절하여 에어로졸의 농도를 변화시켰고, 에어로졸-구름 효과는 항상 포함하며, 에어로졸-복사 효과를 포함한 실험과 포함하지 않은 실험에 대한 결과를 제시. 인위적 배출량의 인자가 1.0 이상일 때, 두 실험의 강수량의 차이가 두드러지며 에어로졸-복사 효과를 포함한 실험에서 강수량이 줄어들었으며 이는 에어로졸-복사 효과 포함으로 대기의 안정도가 강화되었기 때문. 에어로졸-구름 효과는 일반적으로 인자가 임계값보다 작을 때 강수량을 강화시키지만 에어로졸-복사 효과와 에어로졸-구름 효과가 합해진 시너지 효과는 해당 영역의 총 강수량을 실질적으로 변화시키지 않음.
- 에어로졸의 간접효과 구현을 위해서 차세대모델에 접합한 간단화된 에어로졸 모듈에 대한 소개 및 에어로졸 모듈로부터 도출된 에어로졸 농도를 이용해서 구름응결핵 수송도를 계산해서 에어로졸 모듈-구름미세물리 과정을 연결한 내용 및 초기 결과에 대한 발표.
- CALIPSO와 EarthCARE 관측 자료를 통해 구름 입자 분류(Cloud Particle Category, CPC)에 대한 개발 내용 소개. 6년 관측자료를 바탕으로 얼음입자의 특성을 파악했을 때, 전지구적으로 고도 및 계절에 따라 다양한 모양의 얼음입자가 분포하고 있음을 제시. 물방울의 하강속도를 수정했을 때, 구름양 및 유효반경이 변하였고 따라서 복사 수지도 크게 변함. 구름미세물리 모수화의 개선 여지가 아직도 많으며, GCM의 적운모수화에 도플러 라이다 관측 결과를 연결시키는 것을 목적으로 업데이트가 이뤄져야 함.

○ 포스터 세션

- 차세대모델 내 아격자규모 구름에 대한 영향을 구름양 및 복사물리과정에 고려하여 복사속과 강수에 미치는 영향 분석 내용과, 적운대류가 주로 분포하는 열대지역에서는 아격자규모 수상을 고려하여야 실제적인 구름모의가 가능함을 보임을 발표
- 인위적, 자연적 강제력에 의한 미래 강수량 변화에 관한 모델링 연구 결과, 대기-지면 커플링 과정과 연관된 아시아 몬순의 강수 특징, 여러 미세물리과정 모수화와 해상도에 대한 비교 분석 결과, 티벳고원 경계층의 오후 대류 활동에 대한 지형 비균질성의 영향에 대한 모델 시뮬레이션 연구 등에 대한 포스터 세션 참여

3. 출장성과·시사점 및 향후 업무 활용 계획

- 배수야 : 최근 위성관측에서 강설값이 관측되어 대류강설이 추가된 사업단 강설값에 대해 검증 및 진단을 수행할 수 있을 것으로 보인다. 최신 GPCP 자료를 받아서 현재 사용하고 있는 IMERGE 자료와 비교를 통해 자료에 대해 파악하고 값에 대한 검증 정확도를 높일 수 있는지 확인해 보는 것이 필요해 보인다. 모델 계통적 오차는 구름 모의에 따른 것으로 보여지므로 수상에 대한 전반적인 진단이 필요해 보이고, 관련 연구원들과의 협업을 통해 수상 관련 물리과정 개선을 수행할 예정이다. 중간대기 모의성능 개선에 있어서 차세대모델 내 CH₄ 산화과정 고려가 도움이 될 지 살펴 볼 필요가 있다고 생각되었다. 대기 중력파가 중간대기 순환에 중요한 역할을 하는데 지구온난화로 인한 대류권계면 근처 구름 변동성으로 인해 상부 성층권 중력파 변동성이 증가하게 되고 변화된 중력파는 극지역 오존 농도를 회복시켜 극야제트기류(polar night jet stream)을 강화 시킴을 보여주었는데 대류중력파와 성층권 극 소용돌이(sudden stratospheric warming) 간의 관계성을 좀 더 면밀히 살펴볼 필요가 있어보인다.
- 강정운 : 차세대모델에 접합한 간단화된 에어로졸 모듈 개발 내용과 구름물리 연계과정 및 초기 결과에 대해서 소개하였다. 블랙 카본(Black carbon, BC)은 본 연구에서 포함시키지 않았는데, 블랙 카본이 복사효과에 미치는 영향뿐만 아니라 강수에도 영향을 많이 미치기 때문에, 이를 포함시키는 것이 좋을 것이라는 의견이 있었다. 현재 에어로졸 모듈을 통해 계산되는 구름응결핵은 Menon et al. (2002)를 바탕으로 하였으며, 블랙 카본의 농도를 이용하지는 않는다. 에어로졸 질량 농도를 구름응결핵 수농도로 변환하는 식 중에서 블랙 카본의 농도를 이용하고 있는 관계식이 있는지 조사해볼 필요가 있다. 또한, 빙정핵 효과를 고려하는지에 대한 질문이 있었는데, 빙정핵에 주요한 역할을 하는 황사입자는 간단화된 에어로졸 모듈에서 고려하고 있지 않을뿐더러 현재 WDM6 구름미세물리 과정에서 빙정핵의 수농도는 고려하고 있지 않다. 상층 구름에 대해서 황사 입자의 빙정핵 효과가 큰 것으로 알려져있는데 추후 이에 대한 선행연구를 조사해볼 필요가 있다.