

## 국외 출장 결과보고서

| 결<br>재 | 담당자    | 실장     | 사업단장   |
|--------|--------|--------|--------|
|        | 1월 11일 | 1월 12일 | 1월 12일 |
|        | 심태현    | 김정한    | 이우진    |

### 1. 출장개요

|                   |                                                                 |            |                       |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|-----------------------|
| 출장목적              | AGU 2023 (American Geophysical Union Fall Meeting 2023) 참석 및 발표 |            |                       |
| 출장일정              | 2023. 12. 10.~2023. 12. 17. (5박 8일)                             |            |                       |
| 성명                | 소속                                                              | 직급(직위)     |                       |
| 심태현               | 모델체계팀                                                           | 선임급연구원(팀장) |                       |
| 김신우               | 모델체계팀                                                           | 선임급연구원     |                       |
| 오테진               | 자료응용팀                                                           | 책임급연구원(팀장) |                       |
| 박우연               | 자료응용팀                                                           | 원급연구원      |                       |
| 방문기관<br>(또는 회의장소) | 미국 샌프란시스코 모스콘센터(Moscone Center, San Francisco, USA)             |            |                       |
| 출발지               | 인천(Incheon)                                                     | 도착지        | 샌프란시스코(San Francisco) |

### 2. 업무수행내용

#### 가. 출장 배경 및 목적

- 개요 : AGU는 지구물리과학 분야에서 세계에서 가장 큰 학회로 2023년 기준 100개국 이상의 나라에서 지구, 대기, 해양, 수문학, 우주, 행성 과학 등 다양한 분야의 25,000명 이상의 참석자가 샌프란시스코로 모일 예정이다. 올해 학회 주제는 열린 과학으로 함께 모인 전 세계의 연구자들이 서로 교류와 협력, 참여하면서 열린 과학에 근거한 통합 공동체로 한 걸음 더 나아가자는 가치를 내세우고 있다. 2023년 12월 10일부터 일주일간 미국 샌프란시스코 Moscone 컨벤션센터에서 개최되며, 올해 운영체계실에서 참석하는 AGU2023 학회 출장 인원은 각각 모델체계팀 2명, 자료응용팀 2명이다.
- 심태현 : 사업단의 향후 목표인 연장중기 예측성 향상을 위해 진행 중인 KIM의 연장중기 예측 체계 및 과거재예측체계를 소개하고, 또한 이와 관련하여 이음새 없는 수치모델 예측기술 측면에서 필수 요소인 연장중기, 그리고 계절내-계절규모(sub-seasonal to seasonal, S2S) 예측기술의 발전 동향을 파악하고자 한다. 이번 발표를 통해 우리 모델의 연장중기의 성능을 과거재현실험에 의해 확인하고, 연장중기 이상의 예측에서의 KIM의 장단점을 파악하고자 한다. 발표와 전문가와의 토의를 통해 각 기관 모델과 KIM의 연장중기 및 S2S 예측성능을 비교·분석하고 이를 통해

앞으로 KIM의 연장중기 예측성 향상 연구의 근거로 활용할 계획이다.

- 김신우 : 수치모델을 이용한 예측기술의 개발에 있어 모델과 초기장의 불확실성을 표현해 내기 위한 앙상블 예측은 필수적인 요소이다. 현재 사업단에서는 이음새 없는 수치모델 예측기술의 개발에 있어 중기 및 연장 중기를 아우르는 앙상블 예측 시스템의 개발이 시작된 상황이다. 이에 KIM 모델을 기반으로 하는 앙상블 예측 시스템의 초기 버전을 소개하고 이를 활용한 극한 기상 현상 사례 연구 결과를 발표하여 국내외 전문가들과 함께 앙상블 예측 시스템의 개발 및 활용에 대해 다양한 논의를 진행하고자 한다. 특히 KIM 모델 내에서 큰 불확실성이 보이는 빙권 지역의 악기상 사례와 그 수치 모의 결과에 대한 토의를 수행하여 향후 KIM 모델을 이용한 극한 기상 연구에도 활용할 계획이다.
- 오태진 : 사업단에서 개발한 차세대수치예보모델 에뮬레이터 연구 결과를 발표하고 해외 전문가들로부터 피드백을 받고자 한다. 기존의 개별 물리모수화 과정 에뮬레이터 개발로 얻을 수 있는 모델 속도 개선에 한계가 있어 지면, 구름양, 경계층, 산악 및 비산악 중력과 항력, 얇은 및 깊은 대류, 미세물리, 그리고 단파 및 장파 복사과정을 포괄하는 전체물리과정 에뮬레이터 연구 개발 결과를 공유하고 해외 전문가들과 토의하여 최신 연구 동향을 파악하고 에뮬레이터 개발에 관련된 정보를 습득, 향후 개발 계획에 반영하고자 한다.
- 박우연 : 사업단의 인공지능 기반 연구 중 복사물리과정 에뮬레이터를 소개하고 다른 연구자들에게 개선할 점을 조언받고자 한다. 에뮬레이터의 계산 속도 개선과 정확도를 향상시킬 수 있는 방법에 대해 얇은 신경망과 순환신경망을 활용할 때의 차이점이 어떤지 소개하고 의논할 예정이다. 또한, 사업단의 강수 예측 정확도를 높이기 위한 방법을 찾기 위해 다른 연구들에서는 어떤 기술들을 적용했는지 참고하고자 한다. 특히 물리방정식을 활용하는 인공지능 연구들을 참고하여 추후 연구에 활용할 것이다.

#### 나. 주요 업무 수행 사항

- 심태현 : 겨울철 hindcast 수행을 통해 연장중기에서의 KIM 모델의 가능성을 알리고자 하였다. 11월의 사례를 활용하여 지상기온과 Z500에 대한 예측 시작일로부터 3~5주의 예측성 결과를 소개하였다. 저해상도 실험, 앙상블의 개수에 대한 한계가 있지만 hindcast 결과를 활용함으로써 bias를 줄이고, 이를 통해 KIM의 연장중기 예측에 있어 anomaly 예측에의 가능성을 확인하였다. 결과발표를 통해 예측의 시간규모에서 연장중기는 초기자료와 경계자료, 그리고 앙상블이 복합적으로 연관되어 있음을 인지하고, 대기뿐만 아니라 지면 앙상블 멤버의 적용 방안에 대한 조언을 제안받았다. 그리고 이번 연구에서는 KIM의 앙상블 멤버의 구성 방법과 멤버의 수에 따른 평균 스프레드의 변화를 연장중기까지 보여줌으로써 앙상블 구성 방법에 따라 다소 차이는 발생하지

만, 연장중기 입장에서는 스프레드가 충분함을 확인할 수 있었다. 물론 멤버 수가 증가할수록 더 좋은 스프레드를 나타내는 것으로 보였다. 전구 연장중기 예측성(ACC)은 지면의 역할이 클 것으로 추정되는데 이는 재예측 시의 지면초기화의 중요성을 반증한다고 할 수 있다. KIM의 potential predictability를 계산하고 북반구 평균값을 제시하였으며, 이를 통해 대기모델 기반의 KIM으로도 연장중기 예측성이 유의미한 결과를 도출할 수 있음을 보여주었다. 마지막으로 앙상블 멤버 구성 방안이 제한된 자원을 효율적으로 활용하는 측면에서 해상도의 증가보다 멤버 수 증가에 더 중점을 두는 연장중기 예측에서 중요한 사안임을 연구 토의를 통해 확인할 수 있었다.

- 김신우 : KIM 모델을 기반으로 하는 앙상블 예측 시스템 초기 버전의 구축과 이를 활용한 여름철 북극 저기압 사례에 대한 수치 모의 결과 연구를 발표하였다. 극지역은 KIM 모델 내에서 가장 큰 불확실성을 내포하고 있는 지역으로 해양-해빙 조건과 극지역 구름 모의 등에 있어서 많은 불확실성을 가지고 있다. 지구 온난화와 더불어 여름철 급격한 해빙 감소를 보이고 있는 극지역에서 강한 저기압이 발달하였던 2016년 8월 사례에 대해 해빙 조건 민감도 실험을 수행하였고 적은 해빙 농도 조건에서 저기압이 더 강하게 발달하는 경향을 확인하였다. 이에 대해 앙상블 예측을 추가 수행하였고 앞선 결과와 마찬가지로 해빙 조건과 저기압의 발달 사이의 연관성을 확인하였다. 해당 연구에 대해 세션의 좌장이었던 Xiangdong Zhang 교수와의 논의를 진행하였고 해양-해빙 조건에 의한 열속이 저기압 발달에 미치는 영향의 중요성을 확인하였다. 추후 해당 연구를 결합모델로 확장하여 해빙 조건이 저기압 발달에 미치는 영향뿐만 아니라 저기압이 해빙에 미치는 영향까지 연구를 확장할 필요성에 대해 여러 연구자와 논의를 수행하였다.

이외에 극한 기상 또는 기후 변동성과 관련된 앙상블 예측 연구들을 다양하게 접하고 해당 연구 내용들을 KIM을 활용한 연구로 연결할 수 있도록 다양한 논의를 나누었다. 특히 사업단의 목표 중 하나인 연장중기와 MJO 예측과 관련하여 주요 기관들의 연구 결과들을 볼 수 있었고 특히 결합모델 확장과 결합 자료동화의 효과 등에 대한 연구 결과도 접할 수 있었다. 재예측자료를 이용한 여러 기후 변동성 연구 결과들을 보고 KIM 재예측자료의 활용 방안도 모색하였다.

- 오태진 : 인공지능 활용 세션들을 위주로 참석하였다. Deep learning of ERA5 atmospheric dynamics improves climate model representation of European extratropical cyclone 발표를 통해서 현재의 기후모델들이 대기 블로킹 현상을 모의하지 못하는 등 현실적인 모의에 한계가 존재하는데 이를 머신러닝을 통한 ERA5 자료 학습을 통해 기존의 한계를 어느 정도 보완할 수 있다는 내용이 인상 깊었다. Coupling physical factors for precipitation forecast in China with GNN 발표에서 GNN 네트워크를 통한 강수 예측 보정 가능성을 확인하였다. 하지만 가장 인상적이었던 발표는 수요일 세션에 있었던 Neural General Circulation Models로 기존의 GraphCast와 같은 풀모델 에뮬레이션 (Full Model Emulation, FME)가 아닌 역확코어 전체를 역전파가 가능한

파이썬으로 코딩하여 (jax 사용) ERA5를 이용한 전체물리과정 학습에 관한 발표였다. 목요일에는 박우연 사업단에서 진행한 전체물리과정 에뮬레이터 연구에 대한 포스터 발표를 하였다. 개별적으로는 Sandia Laboratory의 Mark Taylor 박사를 만나서 DOE에서 진행하고 있는 GPU 기반 기후모델 개발 현황에 대한 이야기와 NCAR의 Bill Skamarock 박사를 만나 미국 현업 고해상도 지역모델에 MPAS가 사용될 것에 대한 이야기와 FV3의 MPAS의 역학적 특성의 차이에 대해서 대화를 나누었다.

- 박우연 : (발표 내용) 사업단의 복사물리과정 에뮬레이터 개발 결과에 대해 발표하였다. 전지구 수치 예보 모델 KIM의 안에 있는 복사물리과정을 학습하여 에뮬레이터를 만들고, 온라인 테스트를 통해 에뮬레이터를 넣은 KIM의 지위고도와 기온과 같은 물리 변수들 출력 결과가 기존 복사물리과정 방법의 KIM과 비슷하면서도 복사물리 부분의 속도 개선은 약 10배 빠름을 보였다. 한 연구자가 대기 상층의 얼음 구름에 대해 언급했고 이 부분을 포함하지 않으면 에뮬레이터 모사가 힘들 수도 있다고 주장하였다. 이에 반해 사업단의 에뮬레이터는 상층의 구름 정보를 빼고 학습했고, 온라인 테스트 시 극지역 최상층의 오차가 커지는 현상이 있었는데 이 부분이 상층의 얼음 구름 때문일지도 모른다는 생각이 들었다. AGU는 지구과학분야의 여러 연구자들이 모이는 학술대회이다. 대기과학뿐만 아니라 수문학, 환경과학, 해양학, 기후학, 우주과학, 행성과학 등 지구과학 연구자들의 인공지능 활용 방법에 대해 파악할 수 있었다. 최신의 인공지능 기술을 적용하기보다는 각각의 목적과 자료에 따라 적절한 기술을 적용하여 연구에 활용하고 있었다. 또한 자료의 전처리를 강조하는 연구자도 있었기에 인공지능을 활용하고자 하는 자료에 대한 지식도 필요함을 절감했다.

### 3. 출장성과 · 시사점 및 향후 업무 활용 계획

#### 가. 출장성과 · 시사점

- 심태현 : 연장중기 및 S2S의 시간규모에서의 전지구 모델 예측에 다양한 예측 성능을 살펴봄으로써 타 기관의 모델과 KIM의 연장중기 예측성을 비교해 보는 좋은 기회가 되었다. 특히 앙상블 생성을 대기 초기장에만 적용하던 KIM의 과거재예측 결과에 대해 지면모델의 초기섭동을 추가하여 앙상블 생성 및 적용함으로써 더 나은 연장중기 예측성 향상을 기대할 수 있다는 조언을 받았다. 사업단 과거재예측에 사용한 제한된 앙상블 멤버의 수에 대하여 멤버 확장의 필요성을 확인하고 추후 최적의 앙상블 멤버 확장 기술을 습득하는 연구를 진행할 예정이다. 지난 EMS2022에서와 동일하게 실제 연장중기 예측을 위해 결합모델 없이 경계자료를 어떻게 처리할지에 대한 다양한 방법을 접하고, 결합모델 사용 유무에 따른 성능 차이를 발표하는 세션에 참석하였다. 여기서 연장중기 예측성 향상에 분명 결합모델의 역할이 중요하지만, 반면 반드시 그렇지만은 않다는

사례를 접할 수 있었다(MJO 지수 예측). 이는 곧 대기모델 기반에서 결합모델 기반으로 중기-연장중기 예측을 수행하는 입장에 KIM에 적용해 볼 좋은 예시가 될 것이다. 그리고 연장중기 앙상블 예측에서 개별 멤버의 극한 기상현상 모의(weather scenario) 연구 결과를 벤치마킹하여 사업단 연장중기 확률예측 정보 산출에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

- 김신우 : KIM 대기 모델을 기반으로 하는 앙상블 예측 시스템의 초기 버전을 이용하여 여름철 극지역 저기압 사례 연구를 수행한 결과, Polar WRF 등을 이용하여 연구를 수행한 해외 연구자들과 논의를 수행하여서도 그 결과가 긍정적임을 확인할 수 있었다. 해당 연구를 결합 시스템으로 확장한다면 대기와 해양-해빙의 상호작용을 보다 심도 깊게 연구할 수 있을 것이며 극지역 저기압 사례 연구에 있어 지면 열속, 상층 잠재와도 등의 추가 분석 필요성을 알게 되었다.

주요 기관들의 재예측자료와 다양한 기후모델 예측 결과들을 이용한 여러 기후 변동성 연구들이 진행되고 있었고 관련 분야의 연구자들이 사업단의 과거 재예측자료에도 많은 관심을 보였다. 특히 국내 여러 연구자들의 경우 KIM 재예측자료의 활용에 대한 문의도 활발하였다. 사업단 내에서 재예측자료를 활용한 기후 변동성 연구 필요성을 느꼈으며 특히 연장중기 범위 내에서 MJO에 국한되지 않고 KIM의 진단에 있어 AO 등 추가적인 주제들을 다룰 필요성이 있다고 생각하였다. 그리고 빅데이터에 대한 규모축소, 기계학습 등의 연구가 활발하게 수행되고 있어 사업단에서도 학계와 협력하여 응용 연구를 수행할 수 있다면 KIM 연장중기 예측의 활용 폭을 더욱 넓힐 수 있을 것으로 판단하였다.

- 오테진 : FourCastNet, Pangu-Weather, GraphCast가 기상계에 준 충격이 고스란히 느껴지는 학회였다. 많은 연구자들과 기관들의 인공지능에 대한 관심을 실감할 수 있었다. NOAA의 한 연구원과의 대화를 통해서 본인들이 해낼 수 없었던 복사물리과정 에뮬레이터를 어떻게 그렇게 정확하게 구현해 낼 수 있었냐는 추궁과도 같은 질문을 받기도 했다. 대부분 기관이 에뮬레이터 개발에서 안정성 처리 문제 때문에 고민하고 있음을 알 수 있었으며 그 대안으로 google의 neural GCM 발표에서 보였듯이 온라인 훈련이 떠오르는 것을 알 수 있었다. 또한 자기지도학습도 활발하게 활용되는 것이 눈에 띄었다. Mark Taylor 박사와의 대화를 통해서 대규모 GPU 시스템이 CPU 시스템 만큼의 병렬 확장성을 보여줄 수 있는지 (CPU보다 약간 떨어지는 정도), 그리고 구축할 때 현실적인 구축 가성비를 보여줄 수 있는지 (CPU 시스템보다 비싸지만 가격대 성능비는 나은 수준) 궁금했는데 이에 대한 답변을 얻을 수 있었다. 기상/기후 모델의 GPU 포팅 최대 이슈는 1. GPU에 적합한 언어로의 포팅 (openACC, cuda, C++등), 2. Fortran 코드 업데이트에 따른 포팅된 언어와의 일관성 유지 방법으로 요약할 수 있다. 소스코드를 하나로 유지하는 openACC가 대안으로 자주 거론되지만 sandia에서는 이에 대한 한계를 느껴 역학과 물리과정 모든 코드를 C++로 포팅하는 작업을 거쳤다고 한다. 코드 업데이트에 대한 일관성 유지는 하지

않고 한가지 버전으로 고정하고 포팅하여 병렬 확장성을 테스트하는 것을 최우선 목표로 잡았다고 한다. 이렇게 개발된 모델이 SCREAM (Simple Cloud-Resolving E3SM Atmosphere Model)이며 이 모델로 세계 최초로 전지구 3km 수평해상도의 기후모델이 Frontier 시스템에서 1.26 simulated year / day의 성능으로 모의되어 Gordon Bell 상을 수상했다고 한다. 점차 세계적으로 슈퍼컴퓨팅 분야는 가전비가 유리한 GPU 시스템이 대세가 되어감에 따라 향후 우리나라도 이에 대한 본격적인 대비가 필요해질 것으로 생각된다. Bill Skamarock 박사와의 대화를 통해서 왜 FV3가 고해상도에서 강수 예측성능이 떨어지는지 정확하게 파악하지는 못했지만 동일한 물리 모수화과정을 사용해서 비교실험을 했던 만큼 MPAS와 FV3간의 역학적 특성 차이 때문일 것으로 사료된다. 두 모델 역학의 가장 큰 차이는 C (MPAS) / D (FV3) 그리드, 연직 이산화의 경우 FD (MPAS) / Vertically Lagrangian (FV3), 그리고 FV3의 경우 PPM을 이용한 이류 방식이다. 사업단의 경우 두 모델과 상이한 역학체계를 사용하므로 해상도를 늘려감에 따른 강수 예측성능은 예의주시해야 할 것으로 보인다.

- 박우연 : 복사물리과정 에뮬레이터의 개발 결과에 대해 공유하고 해외 연구자들에게 좋은 평가를 받았다. 또한 기상청 수치모델링센터 관계자들도 호의적인 의견을 제시했다. 현재는 100km와 25km의 저해상도에서 학습하고 테스트 했지만, 고해상도 모델에도 적용하는 연구를 거치면 현업에도 쓸 수 있을 것으로 생각한다. AGU에는 다양한 지구과학 연구분야에 인공지능을 적용한 다양한 아이디어의 연구들을 접할 수 있었다. 최근 인공지능에 물리 방정식 정보를 추가해 학습하는 연구들이 활발해지고 있는데 이런 연구들의 발표를 참고함으로써 강수예측 모델에 적용할 방법을 찾을 수 있을 것이다. 그리하여 강수예측 모델에 있어서도 물리방정식의 활용은 큰 역할을 할 것으로 기대할 수 있다. 1시간 이내의 초단기 예측은 단순 optical flow 모델로도 효과가 있지만, 사업단의 목표는 24시간까지 강수예측이기 때문에 구름이나 강수셀의 생성과 소멸을 예측하는 것 또한 중요한 요소일 것이다.

#### 나. 향후 업무 활용 계획

- 심태현 : 연장중기 예측에 필요한 KIM의 과거재예측실험의 결과 및 예측 성능을 공유하고, 학회에서 습득한 타 선진기관의 연장중기 예측 정보와 이를 향상시킬 기술을 활용하고자 한다. 특히 사업단의 현재 대기모델 기반 과거재예측 특히 연장중기 예측성 개선의 이슈에 초점을 두고 최적의 앙상블 멤버 수 선정 및 초기섭동 구성 방안 연구에 적용할 계획이다. 연장중기 예측-재예측의 초기조건 불일치에 따른 편차 발생 이슈를 해결하기 위해 타 기관의 지면초기조건의 생산 방안을 적용하여 민감도 실험을 수행할 예정이다. 이 문제는 중기-연장중기 앙상블 예측에서 각각 다르게 작용할 것으로 예상되는 만큼 두 시간규모의 예측에서 어떻게 반응하는지 사업단 준실시간 앙

상블 예측체계를 활용하여 비교해 보고자 한다. 이와 더불어 사업단 준실시간 예측체계의 이음새 없는 예측성을 유지하기 위해서 중기-연장중기 예측 성능의 연속성을 유지하기 위한 방법을 모색해야 한다. 참고로, 현재 두 예측체계는 DA의 적용 여부와 앙상블 구성 방법 등의 차이로 분리되어 운영될 계획이다. 연장중기의 예측 영역은 예측성 향상을 위해 앙상블 멤버에 대한 민감도와 초기자료에 의한 민감도가 공존하는 구간으로 seamless forecast를 지향하는 최근 모델링 연구 동향의 핵심 영역으로, 앞으로 사업단에서도 지속적인 개발이 필요하다. 연장중기 예측에서 결합모델은 핵심요소이며 결합모델 체계에서 연장중기 예측의 성능 변화를 분석할 예정이다. 또한 결합모델 체계에서 연장중기 예측은 필요한 별도의 초기화 방안 및 추가되는 앙상블 구성 방안, 확률예측체계 개발 등 새로운 기술 적용이 필수불가결한 도전적인 연구 영역이라 할 수 있다.

- 김신우 : 향후 KIM 앙상블 예측은 결합모델의 적용이 이루어질 예정으로 극지방 저기압 사례 연구는 대기와 해양-해빙 결합 효과를 분석할 수 있는 좋은 사례로 판단된다. 사례 연구뿐만 아니라 재예측자료의 평년 기간에 대한 장기 분석도 함께 수행하여 KIM 모델의 편차 분석과 그 보정, KIM 모델의 개선에도 기여할 수 있도록 연구를 수행하고자 한다. 더불어 연장중기 예측 검증을 위한 MJO 예측뿐만 아니라 기후 변동성 연구에도 활용할 수 있도록 관련 연구원들과 논의하여 재예측자료의 확장, 수정 등을 진행하고자 한다.
- 오탈진 : Pangu-Weather나 GraphCast와 같은 모델을 활용하여 강수 예측 시 한반도 영역 배경장 자료의 활용 가능성을 고려해 볼 수 있다. GNN을 이용하여 관측자료와 수치모델 자료를 모두 활용해 보는 것도 고려해 볼 수 있다. 여력이 된다면 전체 물리과정 에뮬레이터에서 구글 연구원으로부터 조언받은 내용을 바탕으로 훈련을 시도해 볼 수 있겠다.
- 박우연 : 복사물리과정 에뮬레이터 연구의 마무리를 위해 약간의 개선과 정리를 하고자 한다. 또한 차년도부터 수행할 강수예측 관련 연구방향을 정하는 데 큰 도움이 될 것이다. 인공지능 연구에 물리방정식을 접목하는 방법은 장시간 강수예측에 큰 역할을 할 것으로 생각한다. 사업단의 목표는 24시간까지 강수예측이기 때문에 구름이나 강수셀의 생성과 소멸을 예측하는 것 또한 중요한 요소일 것이다. 이러한 강수셀의 예측에 물리정보기반 인공지능 기술을 접목하여 장시간 강수나 국지적 집중호우의 모사에 정확도를 높일 수 있는 모델을 개발할 예정이다.