

기후예측시스템(GloSea6) 기반모델 개선연구

Research on improving the base model of climate
forecasting system GloSea6

2025. 4.

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “기후예측시스템(GloSea6) 기반모델 개선연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2025. 04. 30

연구책임자 : 전 상 윤

참여연구원 : 김 주 흥, 최 용 한,
정 의 석, 이 민 희,
최 혜 선, 이 술 지,
김 해 찬, 이 채 연

보고서 초록

과제관리번호	PG24030	해당단계 연구기간	2024.3.20.- 2024.11.30	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사 업 명	용역사업			
	세부사업명	용역사업			
연구과제명	중 과 제 명	용역사업			
	세부(단위)과제명	기후예측시스템(GloSea6) 기반모델 개선 연구			
연구책임자	전상운	해당단계 참여연구원수	총 : 7 명 내부 : 5 명 외부 : 2 명	해당단계 연구비	정부: 50,000 천원 기업: 0 천원 계: 50,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		참여기업명		
국제공동연구	상대국명:		상대국연구기관명:		
위탁연구	연구기관명:		연구책임자:		
요약				보고서면수	pp
○ 연구목표 - 현업 계절예측 모형에서 역학코어의 성능을 분석하여 효율성을 개선하기 위한 제언을 수행하고자 함. - 기상청의 현업 수치예보 모형과 연관된 기후예측 모형의 활용 가능성을 제시하고자 함. - 기후모델의 확산과정 활용 방안을 분석하고 효율성 향상을 위한 적용 방안을 도출하고자 함. - 기후예측모형을 위한 역학코어의 적분 알고리즘 등에 따른 계산 효율성, 병렬 확장성 등과 수평 및 연직 해상도에 따른 기초 모의 성능 자료를 확보하여 기후예측 모형에의 활용을 위한 기초 자료로 활용하고자 함. ○ 연구내용 기후 모의 예측성 향상을 위한 역학코어 선진기술 조사 - 최신 기후모델 역학코어의 수평 및 연직격자 활용방법 비교 - 장기적분을 위한 선진 역학코어 효율성 비교 분석 - 고해상도 기후모델 적용 위한 최신 지형 처리 및 모델링 기술 조사 현업 기후모델의 역학코어 성능 분석 - 장기적분을 위한 현업 기후모델의 역학코어 계산 효율성 분석 - 기후모델의 안정화를 위한 확산과정 활용 방안 분석 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출 - 역학코어의 적분 알고리즘 및 모델 요소별 계산 효율성 분석 - 수평 및 연직해상도에 따른 수치 안정도 분석 ○ 활용계획 - 분석된 현업기후예측시스템의 역학코어의 특성은 신규 기후예측시스템 개발을 위한 기초자료로 활용 - 해외 기후예측모델의 최신 역학코어의 모의 특성 분석 결과는 역학코어에 대한 학문적 이해도 심화와 이를 통한 현업 기후예측시스템의 성능 개선에 활용					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	기후예측, 기후모델링, 역학코어, GloSea, 기후예측시스템			
	영 어	climate forecast, climate modeling, dynamical core, GloSea, Climate forecast system			

요 약 문

I. 제목

- 기후예측시스템(GloSea6) 기반모델 개선연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 목적

- 현업 계절예측 모형에서 역학코어의 성능을 분석하여 효율성을 개선하기 위한 제안을 수행하고자 함.
- 기상청의 현업 수치예보 모형과 연관된 기후예측 모형의 활용 가능성을 제시하고자 함.
- 기후모델의 확산과정 활용 방안을 분석하고 효율성 향상을 위한 적용 방안을 도출하고자 함.
- 기후예측모형을 위한 역학코어의 적분 알고리즘 등에 따른 계산 효율성, 병렬 확장성 등과 수평 및 연직 해상도에 따른 기초 모의 성능 자료를 확보하여 기후예측 모형에의 활용을 위한 기초 자료로 활용하고자 함.

○ 필요성

- 이상기후 대응 장기예보 정확도 향상을 위해 동아시아 기후환경 반영 현업 기후모델의 역학코어 개선에 관한 연구 필요.
- 기상예보의 고도화에 대한 사회적 요구가 증가하고, 정확한 정보가 필요해지고 있으며, 정확한 기후정보에 대한 필요성이 국민 안전, 재난, 경제, 생활에 중요한 요소로 자리잡고 있음.
- 급속히 발달하는 컴퓨터 기술 및 관측자료의 확대, 예보기술의 발달과 더불어 계절예측 등의 중기 기후전망의 정확도를 향상하고자 하는 수요가 증가하고 있으며, 미국, 일본, 영국, 독일 등의 기상선진국에서는 선진화된 수치예보 기술을 이용하여 중기 기후전망을 수행하고자 하는 노력이 진행 중임.

- 현재 기상청은 기후 예측 시스템을 운영, 계절 내-계절 규모 예측에 활용하고 있으며, 예측 시스템의 지속적인 개발 및 개선을 통해 한반도 및 동아시아 기후에 대한 현업 예측성능을 향상하고자 함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 기후 모의 예측성 향상을 위한 역학코어 선진기술 조사
 - 최신 기후모델 역학코어의 수평 및 연직격자 활용방법 비교
 - 장기적분을 위한 선진 역학코어 효율성 비교 분석
 - 고해상도 기후모델 적용 위한 최신 지형 처리 및 모델링 기술 조사
- 현업 기후모델의 역학코어 성능 분석
 - 장기적분을 위한 현업 기후모델의 역학코어 계산 효율성 분석
 - 기후모델의 안정화를 위한 확산과정 활용 방안 분석
- 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출
 - 역학코어의 적분 알고리즘 및 모델 요소별 계산 효율성 분석
 - 수평 및 연직해상도에 따른 수치 안정도 분석

Ⅳ. 연구개발결과

- 기후 모의 예측성 향상을 위한 역학코어 선진기술 조사
 - NGGPS 프로젝트 보고서에 의하면 ECMWF의 IFS, FV3 순으로 좋은 계산 효율성을 보이는 것으로 나타났고, NEPTUNE과 MPAS는 현업에서 사용하기에는 많은 계산 자원이 필요한 것으로 나타남. 이 프로젝트에 의해 NOAA는 FV3모형을 현업 활용에 적합한 모형으로 선택함.
 - 역학 코어에 따라 성층권에 대한 기후 현상을 다르게 모의한 것을 확인했으며, 특히 유한체적법 기반 모델이 분광요소법 기반 모델보다 열대 지역에서 더 큰 age of air 값을 모의해 결과적으로 물질 수송을 다르게 모의할 가능성이 있음을 밝힘.
 - 유한체적법과 분광요소법 기반 모델이 북극 기후 모의를 다르게 모의하는 것을 확인함. 각 역학코어가 가지고 있는 수치적 특성이 물리적 과정을 다르게 계산하게 되고, 결과적으로 북극의 온도를 다르게 모의하게 되며 중위도 기후에도 유의미한 변화를 줄 수 있음을 밝힘.

○ 현업 기후모델의 역학코어 성능 분석

- 장기 적분을 안정적이고 계산 시간을 단축하여 수행하기 위해 기후 모델의 개선이 필요함. 역학코어 계산 효율성 분석을 위해 시뮬레이션 세부 프로파일을 분석하고, 계산 시간을 단축할 수 있는 방안을 제시함. 이를 통해 계산 시간 감소 효과를 확인함.
- 기존 역학코어 대신 정역학코어를 사용하여 계산 시간을 감소시킬 수 있음을 확인함. 정역학코어 사용 시, 비정역학 지배방정식의 일부 항을 제거할 수 있음. 이를 통해 이상 실험 (Held-Suarez with real orography)에서 20.5%, 실사례 실험 (Real Forecast)에서 5.6%의 계산 시간 감소가 나타났음.
- 확산과정에서 라플라시안 연산자의 구조를 분석함. 라플라시안 연산자는 행렬 연산자로서, 행렬 희소성이 0인 연산자임. 영향을 미치지 않는 포인트를 0으로 근사하는 방법을 적용하여, 이상 실험에서 1.8%, 실사례 실험에서 0.1%의 계산 부하 경감 효과를 확인함.
- 또한, 실사례 실험에서 기존 추적물질 (Tracer)의 확산과정이 과도하게 시간이 많이 소모되는 문제를 발견하고, 시분할 확산방안을 도입함. 이 방법은 34.2%의 추가 계산 시간 감소를 달성함.
- 향후 기후모델을 ESM으로 확장할 경우, 추적물질의 증가로 이류 계산 부담이 예상됨. 이에 대한 개선책을 준비할 필요가 있음

○ 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출

- CESM의 분광요소법 역학코어와 유한체적법 역학코어의 건조대기 이상화조건 프로토콜하의 실험을 수행한 결과, 적은 CPU 개수의 활용시의 계산 효율은 유한체적법 역학코어에서 높게 나타났으나, CPU 사용 증가시 분광요소법 역학코어에서 계산효율의 증가가 더 높게 나타남.
- 분광요소법 역학코어와 유한체적법 역학코어를 활용한 동일 전체물리과정 조건하의 기후실험 결과에서도 동일한 병렬확장 특성이 관찰되며, 물리 및 역학과정의 계산효율 분석 결과 역학코어의 선택이 전체물리과정을 활용한 기후실험에도 큰 영향을 미치는 것으로 확인됨.
- 전지구 규모의 건조대기 이상화조건 실험, 기후규모 실험에서 나타나는 평균 분포를 살펴본 결과 북극 지역 하부대류권에서 나타나는 분광요소법 역학코어의 온난 특성이 동일하게 관찰됨.
- 이러한 이상화조건 및 기후규모 실험에서 나타나는 북극 지역의 기후 모의 특성은 계절예측실험에서도 동일하게 관찰되나 평균 모의 편차는 이상상관계수로 평가한 경년변동의 예측성능에는 큰 영향이 없는 것으로 판단됨.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 분석된 현업기후예측시스템의 역학코어의 특성은 신규 기후예측시스템 개발을 위한 기초자료로 활용
- 해외 기후예측모델의 최신 역학코어의 모의 특성 분석 결과는 역학코어에 대한 학문적 이해도 심화와 이를 통한 현업 기후예측시스템의 성능 개선에 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Research on improving the base model of climate forecasting system GloSea6

II. Purpose and Necessity of R&D

○ Purpose

- To propose improvements to enhance the efficiency of the dynamical core used in operational seasonal forecast model.
- To explore the potential applicability of the Korea Meteorological Administration's (KMA) operational numerical prediction models to climate prediction
- To analyze the diffusion processes within climate models and suggest strategies to improve their efficiency.
- To provide fundamental data for the application of climate prediction models by evaluating the computational efficiency, parallel scalability, and baseline simulation performance under varying horizontal and vertical resolutions based on the integration algorithm of the dynamical core.

○ Necessity

- Research is needed to improve the dynamical core of operational climate models to better reflect East Asian climate conditions, thereby enhancing long-range forecasts for extreme climate events.
- The growing societal demand for high-precision weather forecasts and the need for accurate climate information are becoming critical for public safety, disaster preparedness, and economic activities
- With rapid advances in computational technology, expansion of observational data, and forecast techniques, the need for improving the accuracy of seasonal and

subseasonal climate forecasts is increasing. Leading meteorological institutions in the U.S., Japan, the U.K., and Germany are actively pursuing advancements in numerical prediction technologies for these purposes.

- The KMA currently operates a climate prediction system for seasonal to subseasonal forecasting and seeks to enhance operational forecast performance over the Korean Peninsula and East Asia through continued development and improvement of the prediction system.

III. Contents and Scope of R&D

- Investigation of Advanced Dynamical Core Technologies for Improved Climate Predictability
 - Comparison of horizontal and vertical grid structures in recent climate model dynamical cores.
 - Efficiency comparison of advanced dynamical cores for long-term integration.
 - Survey of high-resolution modeling and topography representation techniques.
- Performance Analysis of the Operational Climate Model's Dynamical Core
 - Evaluation of computational efficiency for long-term integration using the operational model's dynamical core.
 - Analysis of diffusion processes for stabilizing climate model
- Development of Improvement Strategies for the Dynamical Core
 - Evaluation of the integration algorithms and component-wise computational efficiency.
 - Analysis of numerical stability based on horizontal and vertical resolutions.

IV. R&D Results

- Investigation of Advanced Dynamical Core Technologies
 - According to the NGGPS project, ECMWF's IFS and FV3 demonstrated superior computational efficiency. NEPTUNE and MPAS were found to require excessive computational resources for operational use. NOAA selected FV3 as its operational model based on these findings.

- Simulations revealed that different dynamical cores produce varying climate representations in the stratosphere. Finite-volume models simulated larger tropical "age of air" values than spectral element models, implying differences in material transport.
- Finite-volume and spectral element-based models showed different climate responses in the Arctic. Numerical characteristics of each core affect the computation of physical processes, resulting in divergent temperature simulations that could significantly impact mid-latitude climate.

○ Performance Analysis of the Operational Climate Model

- Enhancements are needed to conduct long-term integrations stably and efficiently. Simulation profiling identified potential methods to reduce computation time, which were successfully validated.
- Replacing the non-hydrostatic core with a hydrostatic core led to reduced computation time. This modification eliminates certain terms in the governing equations, resulting in a 20.5% reduction in synthetic experiments and a 5.6% reduction in real-case forecasts.
- Laplacian operator structure in diffusion processes was analyzed. By approximating non-impactful points as zero (due to matrix sparsity), computational loads were reduced by 1.8% (synthetic) and 0.1% (real-case).
- Time-split diffusion was introduced to mitigate excessive time consumption in tracer diffusion during real-case experiments, yielding a 34.2% reduction in computation time.
- As the climate model expands into an Earth system model (ESM), the increased burden from additional tracers in advection processes must be addressed.

○ Development of Improvement Strategies for the Dynamical Core

- Experiments comparing spectral element and finite-volume dynamical cores under idealized dry atmospheric conditions showed that the finite-volume core was more efficient with fewer CPUs, but spectral element cores scaled better with increased CPU counts.
- Parallel scalability was consistently observed under identical physical process configurations. The choice of dynamical core significantly affected climate simulation outcomes, including when using full physics packages.
- Simulations under global idealized and realistic climate conditions revealed that the spectral element core consistently produced warmer conditions in the lower Arctic

troposphere.

- These Arctic simulation characteristics were also observed in seasonal prediction experiments. However, mean simulation biases had minimal impact on the interannual predictability as assessed by anomaly correlation coefficients.

V. Application Plans of R&D Results

- Characteristics of the dynamical core in the current operational climate prediction system will serve as a foundation for developing new systems.
- Results from the analysis of advanced dynamical cores in overseas climate models will deepen academic understanding and contribute to improving operational performance.

목 차

1. 개요	1
가. 연구 배경 및 필요성	1
나. 사업배경	2
다. 사업목적	5
2. 기후 모의 예측성 향상을 위한 역학코어 선진기술 조사	6
가. 최신 기후모델 역학코어의 수평 및 연직격자 활용방법 비교	6
나. 장기적분을 위한 선진 역학코어 효율성 비교 분석	12
다. 고해상도 기후모델 적용 위한 최신 지형 처리 및 모델링 기술 조사	21
3. 현업 기후모델의 역학코어 성능 분석	26
가. 장기적분을 위한 현업 기후모델의 역학코어 계산 효율성 분석	26
나. 기후모델의 안정화를 위한 확산과정 활용 방안 분석	38
4. 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출	48
가. 역학코어의 적분 알고리즘 및 모델 요소별 계산 효율성 분석	48
나. 수평 및 연직해상도에 따른 수치 안정도 분석	79
5. 결론	86
기타. 참고문헌	88

1. 개요

가. 연구 배경 및 필요성

- 지구 시스템의 급격한 변화 및 극단적 이상기후 발생 위험성의 증가로 예측 정확도 향상에 대한 요구는 증가하고 있음. 이상기후 대응 장기예보 정확도 향상을 위해 동아시아 기후환경 반영 현업 기후모델의 역학코어 개선에 관한 연구 필요.
- 기후변화로 인한 이상기후의 발생 위험성이 증가하여 기록적인 극한 기상현상이 전세계에서 동시다발적으로 발생하고 있음.
- 우리나라도 자연재해로 인하여 예상하지 못한 피해가 꾸준히 발생하고 있으며, 최근에는 이른바 “극한 기상현상”과 “기후재난”이라는 일반적 용어가 통용될 정도로 안전을 중요로 하는 사회에서 기후정보는 중요한 문제로 지적되고 있음.
- 기상예보의 고도화에 대한 사회적 요구가 증가하고, 정확한 정보가 필요해지고 있으며, 정확한 기후정보에 대한 필요성이 국민 안전, 재난, 경제, 생활에 중요한 요소로 자리잡고 있음.
- 급속히 발달하는 컴퓨터 기술 및 관측자료의 확대, 예보기술의 발달과 더불어 계절 예측 등의 중기 기후전망의 정확도를 향상하고자 하는 수요가 증가하고 있으며, 미국, 일본, 영국, 독일 등의 기상선진국에서는 선진화된 수치예보 기술을 이용하여 중기 기후전망을 수행하고자 하는 노력이 진행 중임.
- 현재 기상청은 기후 예측 시스템을 운영, 계절 내-계절 규모 예측에 활용하고 있으며, 예측 시스템의 지속적인 개발 및 개선을 통해 한반도 및 동아시아 기후에 대한 현업 예측성능을 향상하고자 함.
- 한반도 및 동아시아의 계절 내-계절 규모 기후 변동성은 지면 및 해양/해빙, 성층권 순환 등과 밀접한 관련이 있으므로, 수치적인 예측의 정확도 재고를 위해서는 대기뿐 아니라 다른 결합 요소에 대한 정확도 향상이 필요함.
- 최근 결합모델 및 중장기 기후모형은 고도화된 정보를 생산하기 위한 다방면의 노력이 수행되고 있음. 또한, 단일 요소 모델 대비 결합모델의 계산량이 훨씬 많이 요구되므로, 각 요소별 고도화된 모델의 효율성 제고를 위한 연구들이 중요한 부분으로 자리 잡고 있음.

- 영국의 경우, MetOffice에서 개발된 GloSea 모형도 위/경도 격자 체계에 기반한 대기모형(UM)의 효율성 제고와 고도화를 위하여, 역학코어의 개선을 위한 LFRiC 프로젝트를 수행하고, Mixed Element 방법 기반의 차세대 역학코어를 활용할 것을 제안함.
- 미국의 경우, 에너지부가 주관하는 고도화된 기후모형(E3SM)을 개발하며, 대기모형의 효율성 개선을 위하여, GPU를 활용한 계산속도의 개선을 중요한 차세대 연구주제로 내세우고 있음.
- 우리나라의 경우, MetOffice에서 개발한 기후예측 시스템(GloSea) 기반의 모형이 계절 및 중기 기후예측 모형으로 사용되고 있으나, 원래 GloSea를 개발한 MetOffice의 최근 연구 동향을 잘 주시하여야 하며, 우리나라 실정에 맞는 차세대 계절 및 계절내 기후모형의 계획을 잘 수립하여야 할 것으로 판단됨.
- 이를 통하여, 전구 예보모형으로 활용되고 있는 KIM과의 연계방안도 고려되어야 하며, 국내외 연구진들의 개발 노력이 잘 활용될 수 있는 다각도의 연구주제들이 고민되어야 할 것으로 판단됨.
- 따라서, 본 과제의 제안서는 현업 기후예측 시스템(GloSea6)을 바탕으로, 향후 현업 및 기반연구를 포용할 수 있는 다음과 같이 3개의 세부 내용에 대한 주제별 상세 사업내용을 제안하고자 함.

나. 사업 배경

- 국민 안전과 기후재난에 대비한 기후정보의 정확성 요구 증대
 - 기후변화 심화에 따른 극한기상 발생 빈도의 증가 및 도시화·인구 집적화로 인한 자연재해 규모 대형화 추세.
 - 기상재해로 인한 재산 피해액: 2020년 유례없는 장마 기간으로 인한 피해액 → 3.4조원 (2021 재해연보, 행정안전부)
 - 우리나라의 자연재해 피해는 태풍, 집중호우, 돌발홍수 등 강수로 인한 피해가 최근 증가하고 있어, 기후재난 발생 가능성에 대한 대비책 필요.
 - 10년간(2012~21년) 기상재해 중 태풍, 호우에 의한 피해율: 인명피해(사망,실종) 100%, 재산피해 93.1% (2021 재해연보, 행정안전부)
 - 기후변화와 연관된 극한기상 사례의 빈번한 발생으로 인한 사회적 대비 시간 마련을 위한 선행적 기후 예측 정보 수요 증가

- 기후예보모델 기반의 계절예측 및 계절내 예측 성능등 주요 지표 산출능력의 지속적 개선을 통해 정량적 예측기술 고도화 필요
- 계절내 혹은 계절 예측능력향상을 위한 고도화된 기후예측기술 개발
 - 급속도로 발전하는 컴퓨터의 계산능력을 활용하여 고도화/상세화된 기후예측 모델 개선을 위한 최근 연구 사례 증가
 - 시공간 규모에 관계없이 일원화/체계화된 수치모형 시스템을 현업으로 활용하려는 해외사례의 증가
 - 계절 예보 및 중장기 기후예측 정보 생산을 위한 결합 모형의 활용사례 증가
 - 결합 모형에서 각 요소 모형의 효율성 확대와 예측 정확도 개선을 위한 국가적 정책 마련
- 기후규모 예측에서의 역학코어의 역할과 효율적인 계산의 중요성
 - 장기예보 성능 개선과 예보 품질 향상은 기후모델 개선을 통하여 이루어질 수 있으며, 이를 위해서 기후모델 역학코어의 정확성과 장기적분 안정성을 보장하는 최신 기술의 도입 및 개선이 적극적으로 필요
 - 기후모델은 다양한 하위모델로 구성되며, 대기 모델은 이러한 하위모델 중에서도 기본적인 날씨/기후 프로세스들을 다루는 핵심 부분이며, 그 근본에는 역학코어라는 수치적으로 해석되는 방정식 집합을 풀어내는 컴퓨터 알고리즘이 그 근원 기술이기 때문임.
 - 역학코어에 관한 표준화된 정의는 존재하지 않으나 통상적으로 Williamson (2007)의 모델상에서의 분해가능한 유체 흐름"성분으로 받아들여지며, 격자 분해가 되는 역학코어 성분과 아격자상에서 이루어지는 물리과정을 다루는 모수화 성분으로 구분할 수 있음.
 - 일반적으로 역학코어는 과정별로 분리하여 계산하며 다음과 같은 과정의 알고리즘을 포함함.
 - 분해 가능한 수평/연직 운동량 및 스칼라장의 이류 과정
 - 압력경도력 이산화
 - 전향력 이산화
 - 지형 이산화
 - 시간 적분 이산화
 - 각종 확산과정과 물리량의 보정

- 한편, 기후모델의 예보 품질 향상은 지구의 지형, 대기 상태, 해양 순환, 구름 형성 등의 과정들을 더 상세하게 묘사할 수 있는 모의 해상도를 높임으로써 달성될 수 있음.
- 그러나 이러한 높은 해상도는 계산 비용이 증가하고, 슈퍼컴퓨터 자원을 많이 소모하게 되므로 기후 모델링은 정확도, 해상도, 계산 비용 등을 균형 있게 고려해야 하는 복잡한 과제임.
- 특히 장기예보는 계절 규모 이상의 예측을 위해 매우 긴 모의 기간이 필요하여 계산 비용 증가를 더욱 심화시킴.
- 그러므로 역학코어의 개선은 장기 예측 기후모델에서 효율성을 강화하는 핵심적인 방법의 하나로 강조됨.
- 효율성의 향상은 고성능 기상 예측에 핵심적이며, 역학코어의 최적화는 계산 리소스를 효과적으로 활용하여 고해상도 모의를 가능하게 하며 빠르고 정확한 기상 예측을 가능케 함.
- 따라서 역학코어의 효율적인 개선은 신속하고 효과적인 예측 및 기후모델링에 필수적임.

○ 기후규모 예측에서의 대기모델 역학코어의 중요성

- 최근 5차 접합모델간 상호 비교 연구 (Climate Model Intercomparison Project phase 5)에 참여한 기후모델들의 동일한 해수면온도/해빙조건을 활용하는 실험 결과에서 역학코어의 적분 알고리즘 및 격자체계에 따른 겨울철 북극 지역의 표층온도의 모의 차이가 있음이 밝혀짐. (Jun et al., 2018)
- 해빙 감소에 따른 대기 반응을 살펴보는 민감도 실험에서 동일한 물리과정과 지형조건을 활용하는 경우 역학코어의 선택에 따라 해빙감소에 따른 북극 지역의 반응과 중위도 지역의 온도 반응이 다르게 나타나는 것이 동일 연구에서 제시됨 (Jun et al., 2018).
- 이러한 결과는 겨울철 주요 이상기상 현상인 한파의 예측에서 역학코어의 영향이 있을 수 있음을 시사함.

다. 사업 목적

- 본 과업은 다음과 같은 사업목적을 가짐.
 - 최근 급속도로 변화하고 있는 해외 기후예측 모형의 발전 상황을 탐지하고, 이를 바탕으로 현업 기후 예측 모형의 개선 방향을 모색하고자 함.
 - 현업 계절 내 혹은 계절예측 모형에서 역학코어의 성능을 분석하여, 효율성을 개선하기 위한 제언을 수행하고자 함.
 - 기상청의 현업 수치예보 모형과 연관된 기후예측 모형의 활용 가능성을 제시하고자 함.
 - 기후모델의 확산과정 활용 방안을 분석하고, 효율성 향상을 위한 적용 방안을 도출하고자 함.
 - 기후예측모형을 위한 역학코어의 적분 알고리즘 등에 따른 계산 효율성, 병렬 확장성 등과 수평 및 연직 해상도에 따른 기초 모의 성능 자료를 확보하여 기후예측 모형에의 활용을 위한 기초 자료로 활용하고자 함.

2. 기후 모의 예측성 향상을 위한 역학코어 선진기술 조사

가. 최신 기후모델 역학코어의 수평 및 연직격자 활용방법 비교

1) 현업 기후예측 모형 현황

○ 국내 현황

- 기상청은 영국 MetOffice로부터 도입된 GloSea (Global Seasonal forecasting system)를 현업 기후예측 모형으로 사용해왔고, 관련 정보는 <표 2-1>로 요약할 수 있음 (Ham et al., 2019; Kim et al., 2021; Hyun et al., 2022).
- 기상청 초기 기후예측 시스템은 2012년 대기-해양 결합모델 기반의 N96 해상도 (~135km)를 가지는 GloSea4의 도입이며, 시험운행을 진행한 뒤 2013년 준현업으로 운영하였음.
- 2014년에는 해상도를 135km에서 60km로 개선한 GloSea5 (MacLachlan et al., 2015; Scaife et al., 2014)를 현업 운영하였음. 2016년 과학적 구성을 업그레이드한 GloSea5GC2를 사용함.
- 2021년부터 현재까지 GloSea6를 도입하여 지속 운영. GloSea6는 GloSea5 대비 대기, 해양, 지면, 해빙 모델의 개선이 있었음. 75일의 예보를 기본으로 하며, 최대 240일 예측까지 수행됨. 또한 기후장 (historical run)의 경우 24년간 적분을 수행하도록 운영되고 있음.

<표 2-1> 기상청 현업 계절 내 혹은 계절예측 모형 (GloSea) 현황

		GloSea5GA3 (Until 2015)	GloSea5GC2 (Since 2016)	GloSea6
Model configuration	Atmosphere	GA3.0	GA6.0	GA7.2
	Ocean	GO3.0	GO5.0	GO6.0
	Sea-ice	GSI3.0	GSI6.0	GSI8.1
	Land	GL3.0	GL6.0	GL8.0
	Coupler	OASIS3		
Resolution	Atmosphere	N216L85, $0.83^{\circ} \times 0.56^{\circ}$, Top: ~85 km		
	Ocean	ORCA025L75, 0.25° on tri-polar grid		
Initial Data	Forecast	Atmos.: KMA	Atmos.: KMA	Atmos.: KMA

		N512	N768	N1280
		Ocean: NEMO VAR(UKMO)	Ocean: NEMO VAR(UKMO)	Ocean: NEMO VAR(UKMO)
	Hindcast	Atmos.: ECMWF ERA-interim	Atmos.: ECMWF ERA-interim	Atmos.: ECMWF ERA-interim
		Ocean: Seasonal ODA reanalysis (UKMO)	Ocean: NEMO VAR(UKMO)	Ocean: NEMO VAR(UKMO)
Prediction time & Ensemble member	Forecast	63 days, 2 mem./day	75 days, 2 mem./day	75 days, 2 mem./day
		235 days, 2 mem./day	240 days, 2 mem./day	240 days, 2 mem./day
	Hindcast	245 days, 2 mem./day	255 days, 2 mem./day	255 days, 2 mem./day
		Hindcast period		14 years (1996~2009)
Operation date		2014 ~ May. 2016	2016 ~ Nov. 2021	2021 ~ Now

○ 국외 현황

- 국외 기후예측 시스템은 국가별·기관별로 다양하게 수행되고 있음 (<표 2-2>).
- 대부분의 기관이 1°~0.5° 사이의 수평해상도를 운영하고 있으며, 연직 격자의 경우 해상도와 모델 최상층은 기관별로 상이함.
- 국외 기후예측 시스템은 대부분 결합모델의 고도화를 초점으로 하여 개발을 진행 중임. 또한 현업 기관 이외에도 연구소 개별 단위로 연구를 목적으로 하는 커뮤니티 모델 형태로 개발되기도 함 (기상청, 2023).

<표 2-2> 국외 기후예측 시스템 현황. (APCC 자료)

기관	국가	모델명	해상도 (대기모형)
BCC (Beijing Climate Center)	중국	BCC_CSM1.1m	T106 (~110km) / L26
BOM (Bureau of Meteorology)	호주	ACCESS-S2	N216 (~ 0.5° x 0.5°) / L85

CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici)	이탈리아	CMCC-SPS3.5	$\sim 0.5^\circ \times 0.5^\circ / L46$
CWA (Central Weather Administration)	대만	TCWA1Tv1.1	T119 ($\sim 1^\circ \times 1^\circ$) / L40 (1mb)
ECCC (Environment and Climate Change Canada)	캐나다	CanSIPsv3.0	$\sim 1^\circ \times 1^\circ / L85$ (0.1hPa)
HMC (Hydrometeorological Research Center of Russia)	러시아	SL-AV-072L9 6	$\sim 0.72^\circ \times 0.9^\circ / L94$ (0.04mb)
JMA (Japan Meteorological Agency)	일본	JMA/MRI-CPS3	TL319 ($\sim 55\text{km}$) / L100 (0.01hPa)
METFR (METEO France)	프랑스	MF Sys 8	TL359 ($\sim 50\text{km}$) / L127 (0.01hPa)
MGO (The Voeikov Main Geophysical Observatory)	러시아	MGOAM2.4	T63 ($\sim 1.875^\circ \times 1.875^\circ$) / L25
NASA (National Aeronautics and Space Administration)	미국	GEOS-S2S-2.1	$\sim 0.5^\circ \times 0.5^\circ / L72$
NCEP (National Centers for Environmental Prediction)	미국	CFSv2	T126 ($\sim 1^\circ \times 1^\circ$) / L64 (0.26hPa)
UKMO (UK Meteorological Office)	영국	GloSea6	N216 ($\sim 0.5^\circ \times 0.5^\circ$) / L85

2) 기후예측 모형 수평 및 연직격자 활용방법 비교

○ 수평해상도

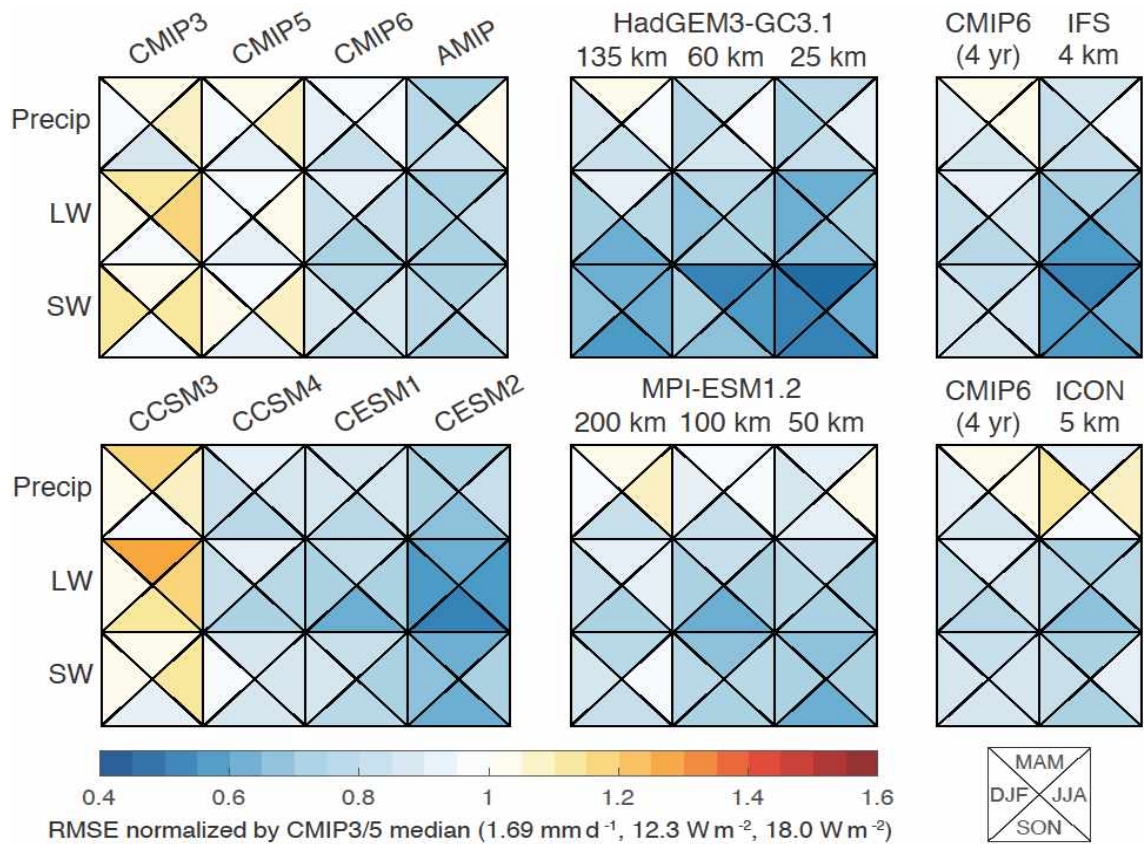
- 대부분의 기후예측 시스템에서 약 $1^\circ \sim 0.5^\circ$ 의 수평해상도가 많이 활용되고 있으나 (<표 2-2>), 거대 전산 자원을 바탕으로 상세한 기후정보를 생산하기 위해 고해상도의 활용방안을 검토할 필요가 있음. 현재 GloSea6는 GloSea5와 동일하게

약 0.5° 의 수평해상도를 사용함.

- 상대적으로 저해상도 (약 1°)의 기후모형들은 최근 고해상도화가 진행되고 있음. 유럽의 EC-Earth 기후모형은 기존 80km에서 40km 해상도로 고해상도화하여 ENSO (El Nino-Southern Oscillation)의 공간 구조 (spatial structure) 개선이 이루어짐을 밝힘 (Haarsma et al., 2020). 중국 BCC의 경우 현업에서 T106 (~ 110 km) 해상도를 사용하나 T266 (~ 40 km) 고해상도화를 통해 TC (Tropical Cyclone), ENSO, MJO (Madden-Julian Oscillation), QBO (Quasi-biennial Oscillation) 등에서 개선이 이루어짐을 확인함 (Wu et al., 2020).
- 최근 기후모형의 개발 과정에서 아격자 규모 (subgrid-scale)의 모수화 과정을 덜기 위해 수평해상도를 km 규모까지 높이는 게 화두가 되고 있으나, 수평해상도만 높이는 것은 문제가 있음. <그림2-1>에서 5km 해상도의 ICON (Icosahedral nonhydrostatic atmospheric general circulation model) 모형은 저해상도 모형인 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)보다 강수 오차가 큼 (Schneider et al., 2024). 따라서 km 규모의 급격한 수평해상도 증가 이전에 다른 요인들을 순차적으로 개발할 필요가 있음.

○ 수평격자 체계

- 기후예측 모형 개선에 있어 수평해상도뿐 아니라 수평격자 체계도 고려해야 함.
- CESM FV (Finite Volume)와 UM은 위·경도 격자를 사용하는 반면, CESM SE (Spectral Element)와 KIM (Korean Integrated Model)은 육면체구 격자 (Cubed Sphere Grid)를 사용함 (<표 2-3>). 육면체구 격자는 위·경도 격자가 가지는 극 왜곡 문제 (Pole distortion) 및 병렬화 문제 (Parallel efficiency)를 해결하는 데 유용함.
- 최근 전산 기술의 활용 극대화를 위하여 일반적인 위·경도 격자를 대신하여 비정규격자 (unstructured grid)를 많이 활용하는 추세임. 비정규격자 기반 모형 중 하나인 NCAR (National Center for Atmospheric Research)의 MPAS (Model for Prediction Across Scales) 모형은 기상모형 (weather model)과 기후모형의 연결다리가 될 것이라고 기대하고 있으며, 실제 기후모형 적용 연구 (Michaelis et al., 2019) 및 프로젝트 (SIMA, EarthWorks)들을 진행하고 있음. 과학적으로는 이러한 비정규격자를 활용하는 것이 무리가 없어 보이나, 다른 결합모델과의 결합 시 발생할 수 있는 문제점 혹은 사회적으로 기후정보 모형을 활용하기 위한 조사와 지속적인 연구가 필요함.



<그림 2-1> 여러 기후모형의 해상도에 따른 RMSE 지표. (Schneider et al., 2024)

<표 2-3> 역학코어 수평 및 연직격자 체계 현황

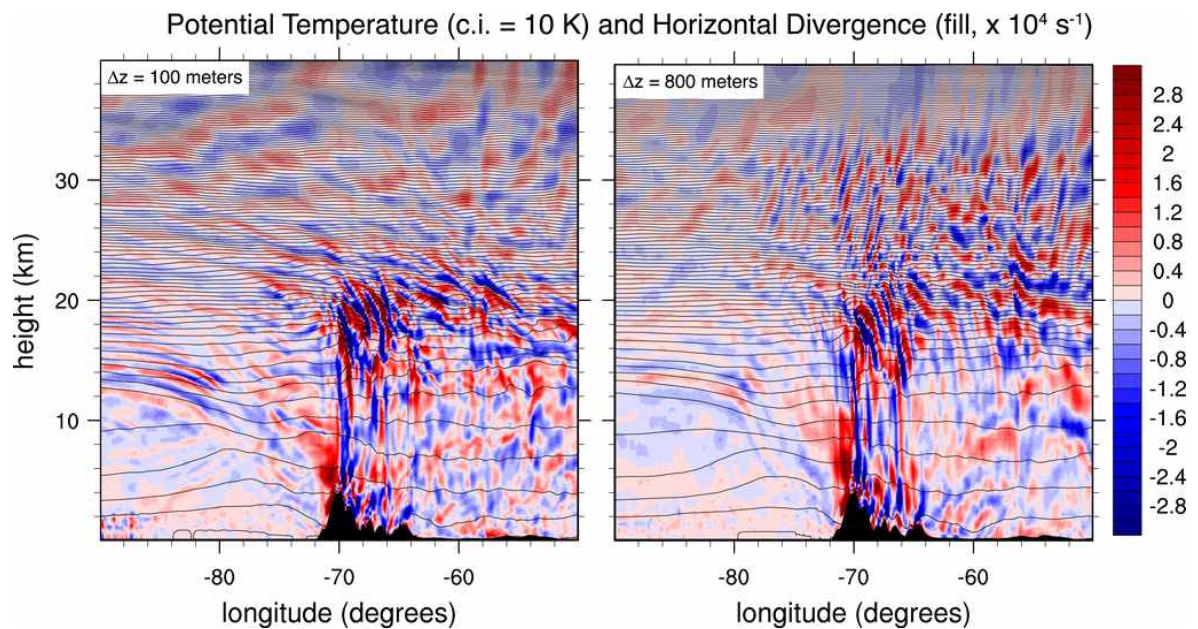
	MPAS	CESM FV	CESM SE	UM	KIM
Horizontal Grid	SCVTs	Lat-Lon	Cubed Sphere	Lat-Lon	Cubed Sphere
Vertical Grid	Terrain-Following (height)	Vertical Floating	Vertical Floating	Terrain-Following (height)	Terrain-Following (mass)

○ 연직해상도

- 기후모형의 수평해상도가 증가함에 따라 연직해상도도 같이 고려되어야 함. <그림 2-1>에서 MPI-ESM1.2 모형이 수평해상도 100km에서 50km로 고해상도화되

고 연직해상도는 변하지 않을 때, 강수 및 복사변수의 RMSE가 도리어 증가함 (Schneider et al., 2024).

- <그림 2-2>와 같이 연직해상도를 높임에 따라 상층의 수치 잡음이 제거되어, 모의 성능뿐 아니라 모형의 수치적 안정성을 확보할 수 있음 (Skamarock et al., 2019).
- GloSea6는 85km의 모형 최상층을 이용하여 총 85층의 연직해상도를 가짐. 반면, NCAR의 경우 10년 혹은 30년 이상의 장기적분을 하더라도, 모형의 최상층은 1 hPa 부근으로 설정되어 있으며, 연직 해상도는 33층을 기본으로 활용하도록 설정되어 있음.
- 3개월 이상의 계절 예측 모형에서 성층권의 역할은 중요한 것으로 알려져 있음 (Domeisen et al., 2020). 비교적 낮은 모형 최상단의 설정이 현업모형의 대류권 중/고위도 순환장 예측성능에 영향을 미치지 않는지 추가적인 연구가 필요함.

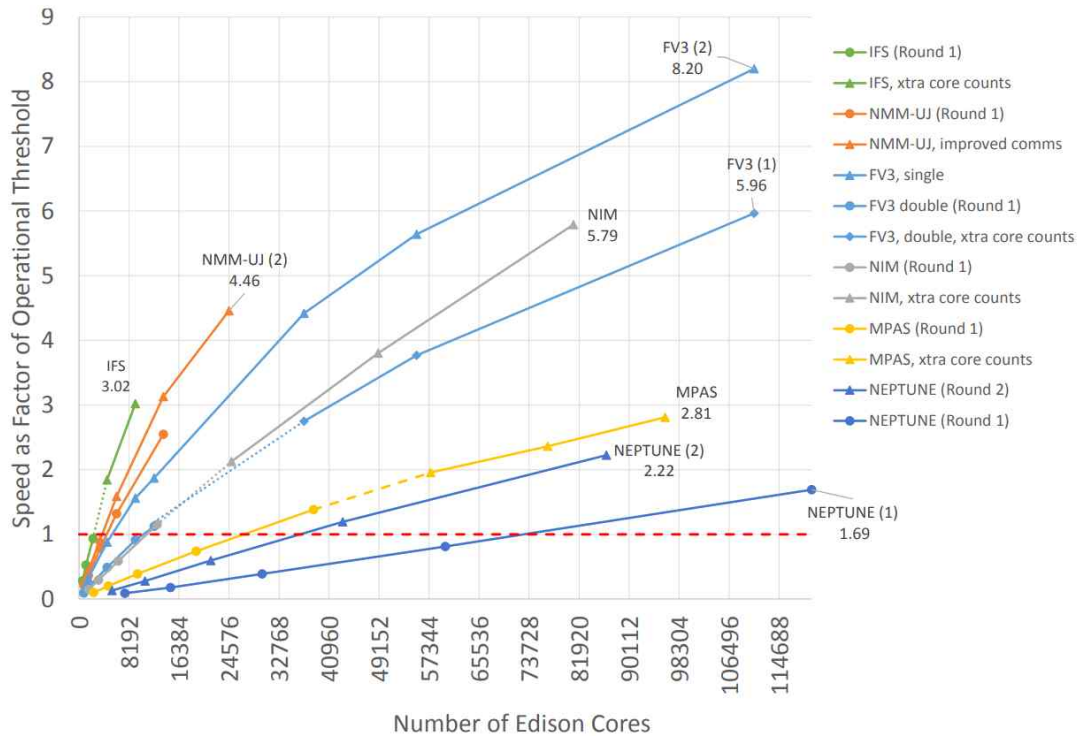


<그림 2-2> 연직해상도에 따른 온도 및 수평 발산 구조. (Skamarock et al., 2019)

나. 장기적분을 위한 선진 역학코어 효율성 비교 분석

1) 차세대 활용 선진 역학코어 현황

- 계절 내 혹은 계절예측 모형의 경우 예측 목표가 6~8개월 내로 정해져 있으나, 분석을 위하여 20년 이상의 기후장에 대한 장기적분이 필요한 상황임. 이러한 장기적분이 매일 수행되지는 않으나, 예측 편차장을 이용하여 모델의 계통적 오차를 제거하는 방법이 현업에서 활용하는 일반적인 상황이므로, 비교적 오랜 기간의 모형 수행이 필요함.
- GloSea6에서 활용하는 UM모형은 수치예보 모형으로도 활용되는 요소로, 기후모형보다 비교적 시간적 제약이 많은 기상모형 현업 운영 배경 바탕으로 개발되었음. 그러나, 비정수계 모형의 특징과 깊은 대류계 (deep atmosphere) 의 수치적 특징을 모두 포함하고 있음에도 불구하고, 다른 현업모형에 대비하여 상당히 빠른 계산 효율성을 가지고 있는 것으로 알려져 있음.
- 역학코어별 필요 전산 자원 비교
 - <그림 2-3>은 NOAA에서 2013년 수행된 차세대 전구 수치예보 모형 비교 프로젝트 (NGGPS-Next Generation Global Prediction System, Ming ji, 2016)에서 보고된 내용으로, 전구 13km의 해상도를 수행하는 데 필요한 전산 자원을 요약한 것임. ECMWF의 IFS가 가장 빠른 성능을 보이고 있으며, NOAA에서 개발된 NMM-UJ 와 FV3가 그다음으로 좋은 계산 효율성을 보이는 것으로 나타남. 미국의 NRL에서 개발된 NEPTUNE과 NCAR의 MPAS는 당시 기준으로, 현업에서 활용하기에 상당히 계산 자원이 많이 필요한 것으로 나타남.
 - NGGPS 프로젝트를 통해 NOAA는 FV3모형을 현업 활용에 가장 적합한 모형으로 선택하였으며, 그 근거가 되는 가장 중요한 이유는 계산 효율성인 것으로 보고되었음.

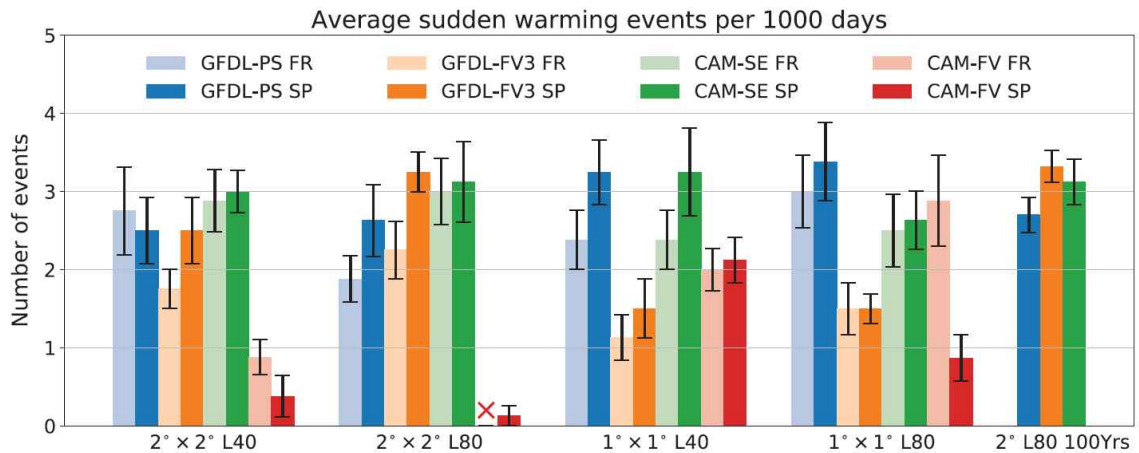


<그림 2-3> 각 전구 수치예보 모형별 전구 13km 해상도 실험 수행을 위한 필요 전산 자원 현황

2) 선진 역학코어 모의 능력 비교

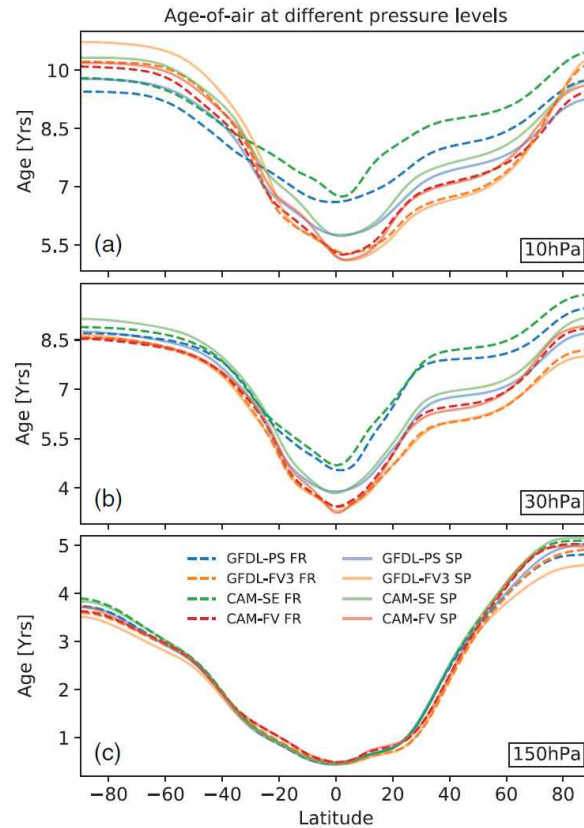
○ 역학코어별 모의 특성

- 역학코어 종류에 따라 기후모형이 모의하는 특정 기후현상에 대한 모의 능력이 달라질 수 있음. Gupta et al. (2021)은 기존에 이상 실험을 통해 역학코어를 비교했던 Held and Suarez (1994)를 확장하여 대류권-성층권 순환, 대기 흐름에 따른 air parcel 수송에 대한 대기 화학 관점을 추가하여 새로운 benchmark test를 제안 하였고 그 결과는 아래와 같음.
- <그림 2-4>는 각 역학코어 별 모의된 SSW (Sudden Stratospheric Warming) 빈도수를 비교한 결과임. SSW 발생 빈도수는 역학코어 종류에 따라 다른 해상도에 대한 민감도를 보이는데, 특히 FV의 경우 수평해상도가 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 일 때, $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 보다 다른 역학코어 만큼의 빈도수를 모의했고, FV3의 경우는 해상도가 높아지면 빈도수를 적게 모의하는 특징을 보임.



<그림 2-4> 각 역학코어 별 해상도에 따른 SSW 발생 평균 빈도수

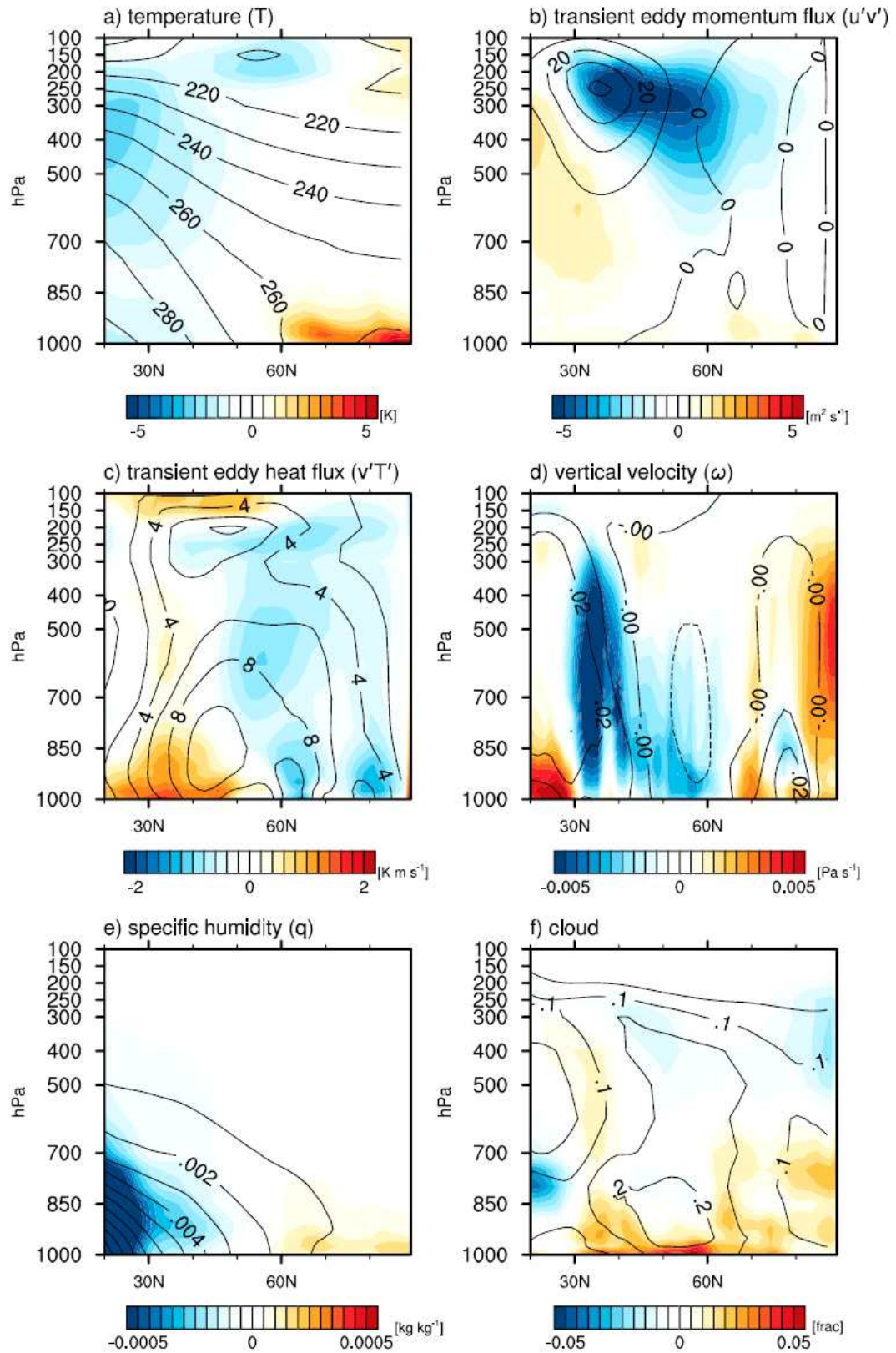
- <그림 2-5>는 역학코어별 성층권에서 age of air 모의 결과를 비교한 것임. age of air는 대기에서 물질이 이동하는 시간규모이며 tracer 수송에 대한 평가지표임. 성층권 하층에서 상층으로 올라갈수록 역학코어에 따른 차이가 보였으며, 특히 분광요소법 기반 모델들이(GFDL-PS, CAM-SE) 유한체적법 기반 모델(CAM-FV, GFDL-FV3) 보다 여름반구의 열대 지역에서 더 큰 age of air 값을 모의함. 이는 역학코어별로 다른 수치적 특성이 열대 지역의 수송에 영향을 미칠 수 있음을 의미함.



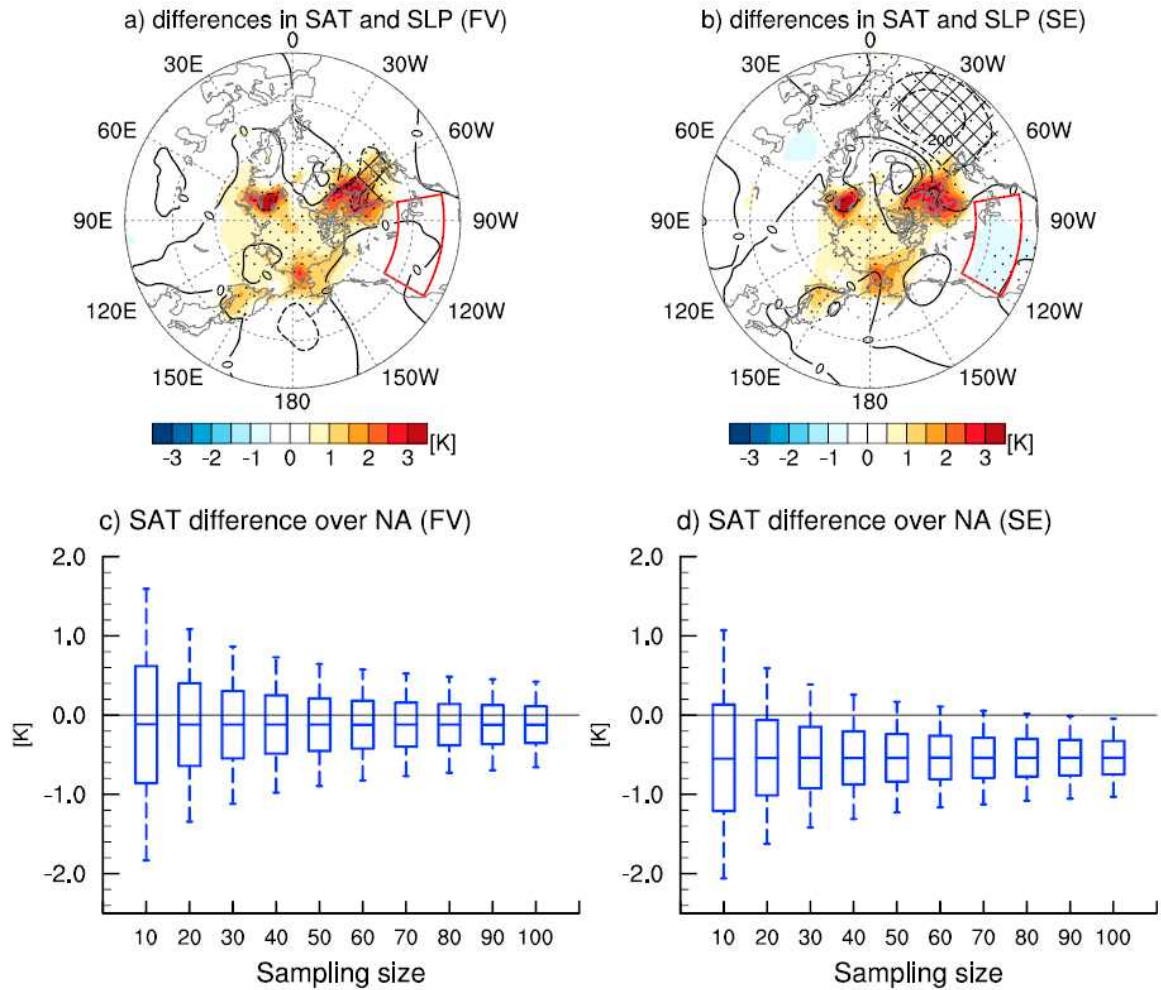
<그림 2-5> 각 역학코어별 성층권의 세 가지 등압면에서 위도에 따른 age of air 모의 결과

- Jun et al. (2018)에서는 북극 기후 불확실성에 분광요소법 기반 역학코어 (SE)와 유한체적법 기반 역학코어 (FV) 의 서로 다른 수치적 특성이 미치는 영향을 연구하였고 그 결과는 아래와 같음.
- <그림 2-6>은 SE 코어가 FV 코어에 비해 물리적 과정들을 얼마나 다르게 모의하는지 Shading으로 표시한 그림임. SE 코어는 북극 지역에서 에디 열 플러스 수송이 약해지고 하강 운동을 강화해 북극 전체에 FV 코어보다 따뜻한 하층 온도를 모의하는 경향을 보임. 또한, 수증기와 구름 수송차이도 북극 온도 상승에 기여하고 있음. 이 결과는 역학코어 마다 물리적 과정을 다르게 모의해 결과적으로 북극 지역의 기온에 영향을 미칠 수 있음을 의미함.
- <그림 2-7>은 역학코어별로 북극해빙 감소가 북반구 중위도에 미치는 영향을 분석한 것임. FV 코어 결과와 다르게 SE 코어는 북미 지역 SAT (sea of temperature)와 북대서양 지역의 SLP (sea level pressure)에서 유의미한 감소를 모의하였고, 이는 통계적으로도 유의미함. 이 결과에 따라 역학코어에 따른 북극 지역의 모의 결과가 중위도 지역의 기후변화 패턴에도 영향을 줄 수 있음을 의미함.

- Gupta et al. (2021)과 Jun et al. (2018)의 결과는 서로 다른 역학코어가 가지는 수치적 특성에 따라 다르게 모의 되는 기후 현상에 대해서 분석함. 그 결과, 역학코어의 종류에 따라 기후현상 뿐만 아니라 대기 수송 관점에서도 다른 결과를 나타내어 장기적분을 통한 기후장 분석에서도 또한 유의미한 차이를 보일 수 있음을 의미함.



<그림 2-6> 북반구에서 동서방향을 평균된 각 기후 매개변수의 FV 코어의 결과 (contour) 와 SE 코어 결과와의 차이(shading)



<그림 2-7> 각 역학코어별 북극 해빙 감소에 따른 SAT (shading) 와 SLP 변화 (color).

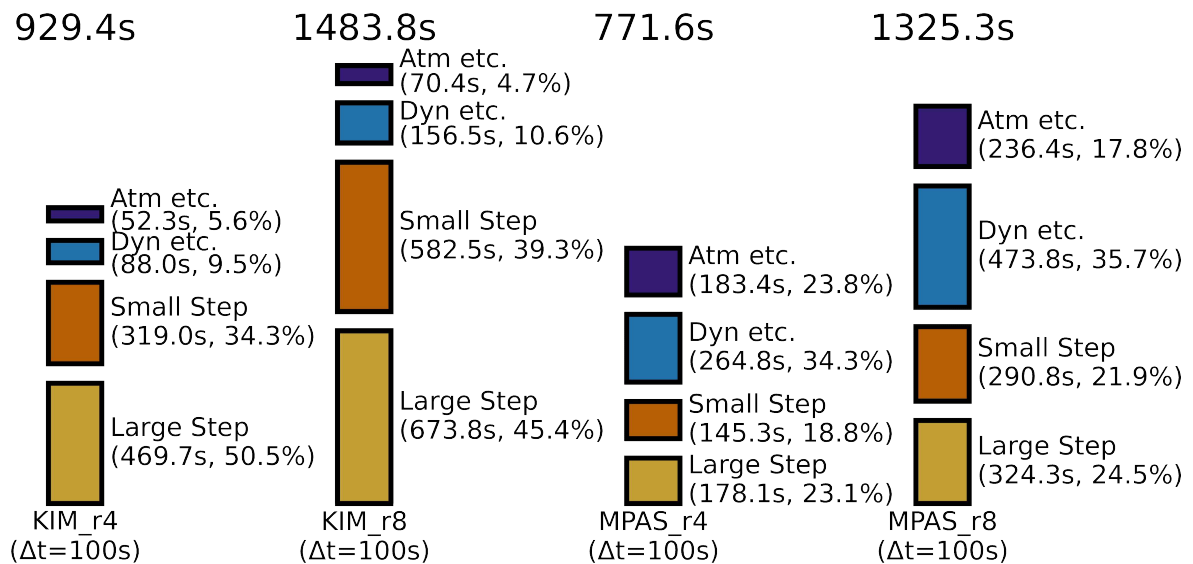
아래는 무작위 bootstrap 샘플링을 통한 box plot

3) 장기적분 활용 가능한 선진 연학코어 효율성 비교

○ 역학코어별 소요 시간 분석

- 앞서 NGGPS 프로젝트에서 살펴보았듯 역학코어 효율성은 기후 예측 시스템 운용에 있어 주요한 요소로 향후 적합한 역학코어를 찾는 데 중요한 평가 지표이자 모델의 개선 방향성을 제시해주는 이정표임.
- 반면 실질적인 역학코어의 개선을 위해서는 모델의 전체의 확장성 뿐만 아니라 각 세부 과정의 소요 시간을 조사하여 단계별 시간 단축 요인을 발견할 수 있음. 본 과제에서는 선제적으로 최신 역학코어인 KIM과 MPAS의 계산 소요 시간에 대한 비교 분석을 진행하였음.

- <그림 2-8>은 건조 역학코어 비교 실험인 Held & Suarez (1994) 모의에 KIM과 MPAS에서 단계별로 소요된 시간을 나타냄. 본 실험은 $\Delta t = 100s$, 약 0.5° 수평해상도에서 수행되었음. MPAS에서 총 적분에 보다 적은 시간이 소요되었음. 특히 KIM의 IO, 진단 변수 계산과 같은 부가적인 소요 시간이 MPAS의 1/3 수준인 반면 순수한 역학코어의 적분 과정은 2배 가량 소요됨. 위 경향성은 단정밀도, 배정밀도 모두에서 동일하게 나타남.



<그림 2-8> $\Delta t = 100s$, 약 0.5° 의 Held & Suarez (1994) 실험에서 KIM, MPAS 계산 소요 시간. r4, r8은 각각 단정밀도, 배정밀도를 의미

- <표 2-4>, <표 2-5>는 각각 단정밀도, 배정밀도 KIM에서 $\Delta t = 100s$ 와 $\Delta t = 200$ 실험의 소요시간 비율. Large step과 Etc.에서는 이론적인 수치인 50 % 부근의 비율을 가지는 반면 Small step에서 명확하게 높은 비율을 가짐. KIM이 Etc.를 제외한 비율에서 모두 높은 값을 가짐.
- 이는 KIM의 단정밀도 모델 수행에 있어 계산적 비효율성이 포함되어 있음을 시사함.

<표 2-4> 단정밀도 모델에서 $\Delta t = 100$ 그리고 실험 간의 각 단계별 소요 시간 비율.
Total은 전체 소요시간, Etc.는 <그림 2-3>의 Atm etc.와 Dyn etc.를 합한 결과

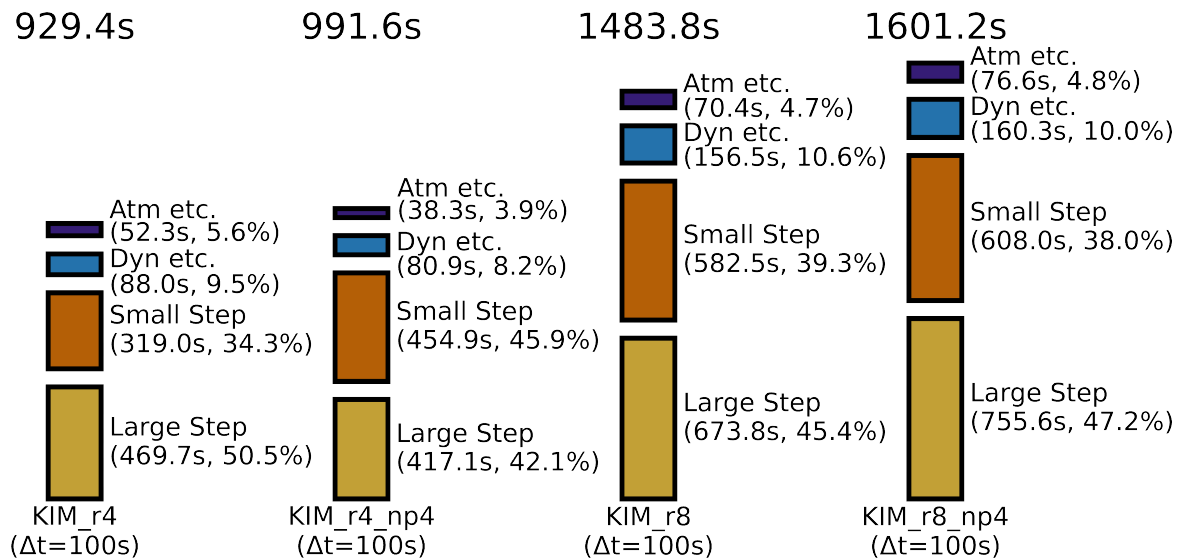
Single	KIM	MPAS
Total	62.05%	58.36%
Large	55.06%	49.92%
Small	77.68%	67.74%
Etc.	49.89%	58.66%

<표 2-5> <표 2-4>와 동일. 단 배정밀도 실험 결과

Double	KIM	MPAS
Total	62.37%	59.96%
Large	55.79%	50.20%
Small	74.63%	70.25%
Etc.	50.37%	60.21%

○ 수평격자 구성에 따른 소요시간 분석

- <그림 2-9>는 동정밀도, 동해상도의 KIM 모델에서 요소 및 가우스 구적점 개수에 따른 계산 소요 시간 결과. 동해상도인데도 불구하고 계산 소요 시간에 차이가 존재. 부가 과정들에서의 소요 시간은 일관된 경향성이 없으나 Small step에서 일관적인 증가 경향성을 보임. 이는 단정밀도에서 더욱 뚜렷한데 세부 서브루틴들의 계산 시간을 평가해본 결과 Small step의 대부분의 과정에서 더 많은 계산 시간을 소요함.
- 위 결과들은 KIM의 계산 효율성을 정밀도, 적분 시간 간격의 확장성, 육면체구 구성 측면에서 분석한 내용으로 향후 현업 기후 모형 생성 시 선행 연구 자료로 활용 가능.



<그림 2-9> $\Delta t = 100s$, 약 0.5° 의 Held & Suarez (1994) 실험에서 KIM의 요소 및 가우스 구적점 개수에 따른 소요 시간. np4는 ne60np4 실험을 의미하며 그 외는 ne90np3 실험을 의미

다. 고해상도 기후모델 적용 위한 최신 지형 처리 및 모델링 기술 조사

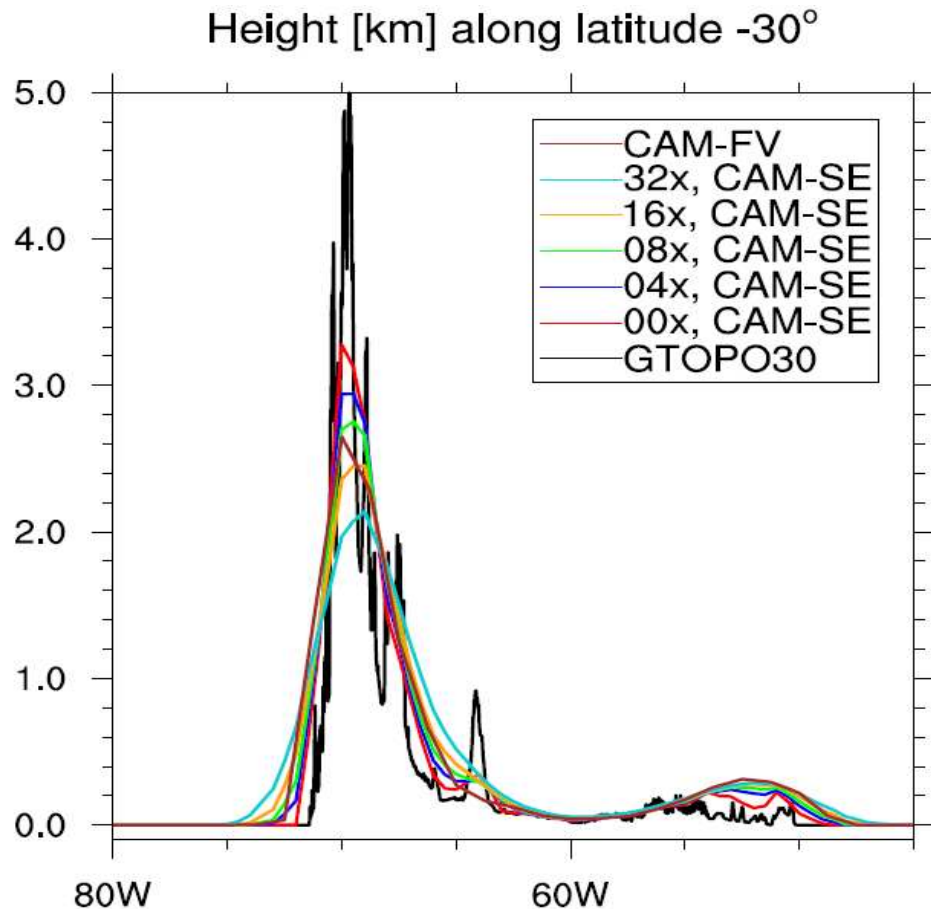
1) 국내외 기상, 기후예측모형의 지형 처리 방법

○ 고해상도화에 따른 지형처리의 필요성

- 현재의 기후예측 시스템은 수평해상도 약 0.5° 에 기반한 예측 정보를 생산하고 있고, 이를 기반으로 향후 고도화된 기후예측 시스템으로 활용될 가능성이 큼. 하지만 일반적으로 고해상도의 수치 실험을 수행할 경우, 대기의 지형성 강제력이 커지며 대기 불안정성이 강해져서 모형의 안정도가 감소하는 것으로 알려져 장기적분을 하는 기후모형의 안정도를 유지하는 데에 불리할 수 있음.
- 기후모형의 역학코어는 직접적으로 하층의 지형에 의한 불균질성을 처리하는 부분임. 즉, 복잡한 지형에 의한 강제력의 정확한 계산 및 모형의 안정성 보장과 밀접한 관련이 있음.
- 적절한 지형의 평활화 강도는 역학코어에서 사용하는 소산과 연관되어 있으므로, 표준적으로 사용되는 방법이나 강도가 없음. 하지만, 과도하게 적용할 경우 해안의 경계를 바꾸거나 해안 주변의 해면고도를 지나치게 상승시킬 우려가 있어 (<그림 2-10> 참조) 평활화의 사용에 유의해야 함 (Lauritzen et al., 2015).

○ 기후모형의 지형 처리 방법 조사

- 본 연구에서는 작은 규모의 지형에서 생겨나는 수치적인 오차를 줄이면서도 지형 강제력의 효과를 유지하는 방안을 찾기 위해 세계 각국의 다양한 기상, 기후 모형의 지형 처리 방법을 조사하였음.
- NCAR의 CESM의 CAM-SE, MPAS와 미국 에너지부의 E3SM과 같이 비정형 격자를 사용하는 경우 미국 지질조사국에서 제공하는 고해상도의 지형 자료 (약 1km 해상도)를 3km의 육면체구 격자로 사상한 후, 각 모형에서 사용하는 격자로 다시 사상하는 방법을 사용하고 있음 (Lauritzen et al., 2015; Taylor, 2024).
- NCAR의 CESM 모형의 경우, 역학코어에 따라서 지형 평활화가 다르게 적용되는데, 분광요소 기법을 활용하는 CAM-SE 코어를 사용할 경우 라플라스 연산자와 리미터를 사용해 평활화하고, 유한체적법을 사용하는 CAM-FV 코어는 위-경도 격자를 사용하므로 앞서 언급한 사상은 사용하지 않으나, 모델 해상도의 절반보다 높은 파수에 대한 정보를 사상 과정에서 제거함 (Lauritzen et al., 2015).
- E3SM은 CAM-SE와 유사하게 텐서 라플라스 연산자를 활용하고 있음. 특기할만한 점은 버전이 V2에서 V3로 올라감에 따라 라플라스 연산자의 반복 횟수를 줄였고, 덜 평활화된 지형을 사용하는 것을 권고하고 있음 (Taylor, 2024).
- UM의 경우 Raymond (1988)이 제안한 6차 레이몬드 탄젠트 필터를 변형한 형태를 사용하여 지형의 평활화를 적용하여 수치적 잡음을 억제하고 있음 (Webster et al., 2002).



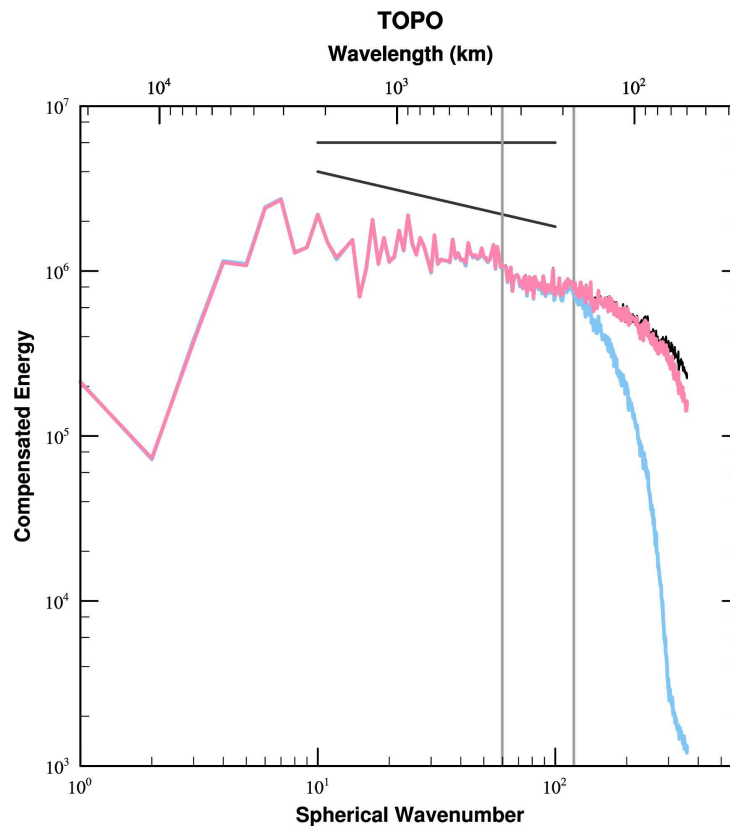
<그림 2-10> CESM의 역학코어와 평활화 강도에 따른 안데스 산맥의 지형 묘사
(Lauritzen et al., 2015)

2) 지형을 따르는 연직격자 체계의 개선을 통한 안정도 확보

○ 지형의 평활화 적용

- 지형을 따르는 연직격자 체계 (terrain-following vertical coordinate)의 경우, 혼합 연직격자 체계를 사용하더라도 연직 격자가 완전히 평활화 되기 전인 대기 하층에서는 격자의 형태 그 자체가 불안정성에 영향을 줄 수 있음. 이러한 불안정성을 해결하고자 지형을 따르는 연직격자 체계를 사용하는 모형은 일반적으로 지형의 평활화를 적용하여 지형에 의한 수치적 잡음을 줄이고 안정도를 확보하고 있음.
- <그림2-11>은 기후예측 시스템으로 활용되고 있는 영국 MetOffice의 UM 모형, 수치예보 시스템으로 활용되고 있는 KIM 모형, 미국 NCAR의 MPAS 모형에서 사용하고 있는 하층 지형 자료의 분산을 파수에 따라 표현한 것임. UM과 MPAS는

고주파의 지형 표현능력이 높은 것으로 판단되나, KIM의 경우 비교적 지형의 평활화를 많이 진행해 안정도를 높이는 방향으로 작동하는 것으로 판단됨.



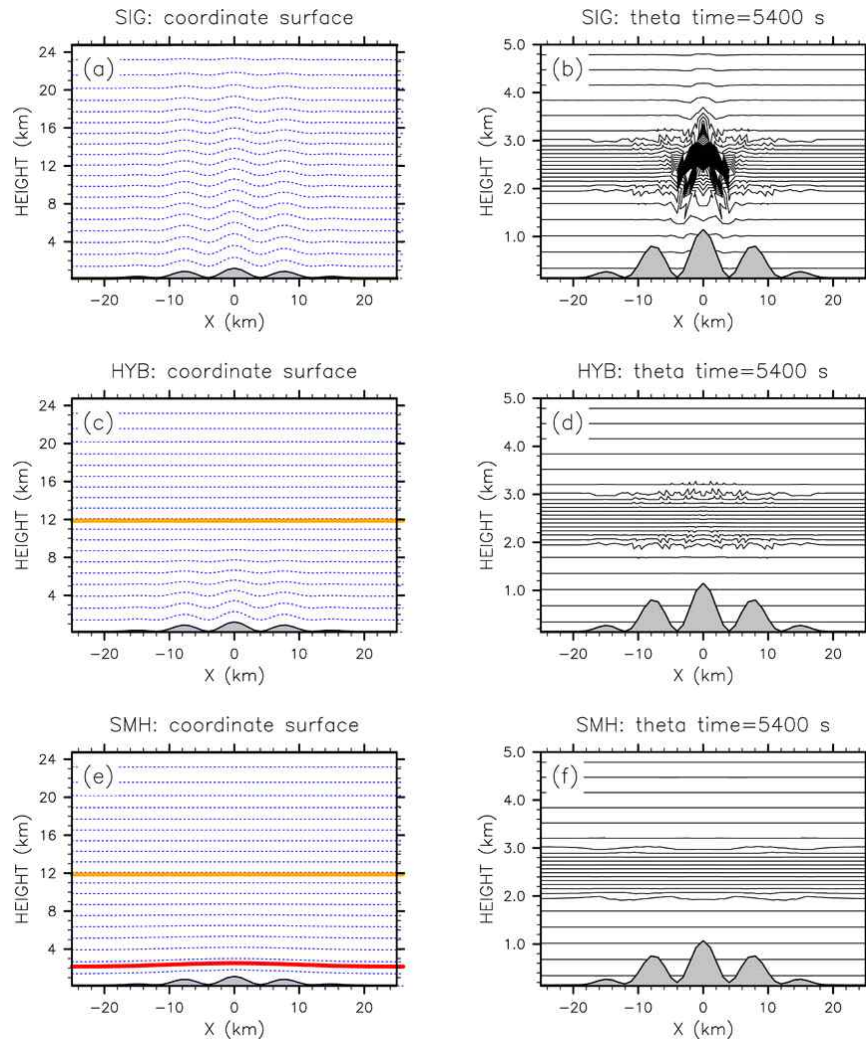
<그림 2-11> 지형자료의 variance의 파수-에너지 스펙트럼.

각 선은 MPAS (검은색), UM (분홍색), KIM (파란색) 모형 결과를 나타냄

○ 연직격자 체계 개선

- 지형의 해상도는 복잡 지형 주변에서의 지형성 강수뿐 아니라 대기 순환 및 수증기 수송에도 영향을 주고, 이로 인한 예보의 편향은 매우 복잡적임 (Gao et al., 2006; Cannon et al., 2017). 하지만, 지형의 높은 해상도는 모형을 더 불안정하게 만들고 이로 인해 역학코어에서 강한 소산 필터를 사용하게 될 경우 오히려 에너지 보존 측면에서는 오차를 키우는 요인이 될 수 있음 (Lauritzen and Williamson, 2019).
- 따라서, 지형의 해상도를 높게 유지하면서 모형의 안정도를 개선하고자, 기존에 KIM에서 사용하고 있는 혼합 연직격자 체계를 개선한 평활화된 혼합 연직격자

체계 (Choi and Klemp, 2021)를 KIM에 적용하여 안정도를 확보하고자 함. 해당 방법은 지형의 규모에 따른 차등적인 평활화 과정을 추가해 연직격자에서 발생하는 작은 규모의 수치적 잡음을 막을 수 있음 (<그림2-12>).



<그림 2-12> 세 가지 연직 격자 체계. 위에서부터 지형을 따르는 시그마 격자 체계, 혼합 연직 격자 체계, 평활화된 혼합 연직 격자 체계. (Choi and Klemp, 2021)

3. 현업 기후모델의 역학코어 성능 분석

가. 장기적분을 위한 현업 기후모델의 역학코어 계산 효율성 분석

1) 수치 예측모델 역학코어의 장기적분 활용 방안

○ 기후모델 및 수치 예측 모델의 역학코어

- 장기에보 성능 개선과 예보 품질 향상은 기후모델 개선을 통해 이루어짐. 이를 위해서는 역학코어의 정확성과 장기적분 안정성을 보장하는 최신 기술의 도입이 필요함.
- 기후모델은 다양한 하위모델로 구성되며, 대기 모델은 날씨와 기후 프로세스를 다루는 핵심 부분임. 대기 모델의 근본 기술은 역학코어를 풀어내는 수치적 알고리즘임.
- 두 모델은 유한 차분법, 유한 요소법, 스펙트럴 방법과 같은 수치적 기법을 사용하여 시간과 공간에 따른 대기의 상태를 예측함.
- 또한, 두 모델은 이산화된 격자에서 계산을 수행하며, 대규모 연산을 필요로 하므로 병렬 처리 기술을 사용하여 효율적으로 연산을 수행함. 이 점에서 기후모델과 수치 예측 모델은 공통된 기술적 기반을 가짐.
- 따라서 기후모델의 역학코어는 기술적으로 수치 예측 모델의 역학코어와 유사함.
- 그러나 기후모델과 수치 예측 모델은 목적과 시간 척도에서 차이가 있음. 기후모델은 장기적인 평균 상태와 추세 예측에 중점을 두고, 수치 예측 모델은 대기 중 빠른 변화를 정밀하게 예측함.
- 이러한 목적의 차이는 기후모델의 역학코어에서 시간적·공간적 해상도가 낮을 수 있음을 의미함. 기후모델은 장기적인 평균 상태와 추세를 반영하는 것이 중요하므로, 일부 과정에서는 해상도를 조정하거나 단순화된 접근을 사용함.
- 향후 기후모델의 안정하고 효율적인 장기적분을 위해 수치 예측 모델 KIM 역학코어를 분석하고자 함.

2) KIM 역학코어 코드 분석

○ 방정식계

- 전지구를 모의 대상으로 함에 따라 벡터불변 운동량 방정식이 사용됨.

- 압축성 비정역학 지배방정식은 Laprise (1992)가 정리한 지형추적 질량 기반 연속좌표계에서의 것을 기본으로 하되, 전지구 대기 날씨예측모델의 기후모델로의 확장을 고려하여 성층권-중간권의 모의에 지형의 영향을 받지않는 평활화된 지형 추적 hybrid sigma-pressure with smoothed coordinate surfaces (Choi and Klemp, 2021) 연속 좌표계가 고안됨.
 - 고분해능 압축성 비정역학 모델을 개발하기 위해서는 연속 전파하는 부력 진동과 음파를 효율적으로 제어할 수 있는 시간 적분법을 고려하여 이를 효율적이고도 정확하게 계산할 수 있도록 방정식이 설계됨. 이 방안은 Time-Splitting RK3 order time integration으로 알려져 있으며 WRF, MPAS등의 모델에서도 사용하고 있는 방안임.
- 수평이산화 기법
- 미래의 초병렬 컴퓨팅환경에서의 병렬확장성이 뛰어난 이산화방안인 분광요소법을 사용하며 개발.
 - 분광요소법은 고차 정확도의 미분 계산이 쉬우며, 대부분의 구면격자에 이식할 수 있는 유연성이 뛰어나.
 - 분광요소법은 halo 영역이라 부르는 병렬통신 영역이 고차 정확도의 미분 방안에 무관하게 인접 요소 영역 1 point로 제한됨.
- 구면격자
- 선택한 수평이산화 기법인 분광요소법은 사각형 요소 영역 내에서 문제를 풀어내는 것이 자연스러움.
 - 등거리성, 등방성, 극특이성의 제거를 고려하며, 사각형 모양을 가지는 구면격자를 고려함.
 - 위의 조건을 만족하며, 구면을 가장 간단히 사각형 모양의 요소로 분할 가능한 육면체 구면 격자를 사용함.
 - 한반도를 육면체면 중 하나의 면 중심에 두어 국지적 계산을 정확하게 함.
- 연직이산화 기법
- 연직이산화는 물리과정 패키지와의 자연스럽고도 정확한 커플링을 지원할 수 있는 방안이 선호되어 유한차분으로 연직이산화를 수행함.
 - 물리과정은 형태적으로 연직 기동 모델로 작동하며, 연직이산화로써 유한차분(유한체적)의 개념으로 작성되어있음.

- 모델 내재적인 안정성을 강화하기 위해 3차 정확도의 풍상 차분법을 사용함.

○ 시간이산화 기법

- 시간이산화는 수평이산화 기법인 분광요소법의 장점을 극대화 할 수 있는 방향으로의 설계가 필수적 고려 요소임.
- 분광요소법은 통신영역을 최소화한 병렬확장성에 그 장점이 있으므로 시간이산화 기법에서도 통신이 필요 없는 명시적 시간 적분법을 선택.
- 명시적 시간이산화 기법을 장착함에 따라 모델의 역학코어는 요소단위에서 독자적으로 문제를 풀 수 있는 소재 단위로 코드가 구현됨 (주어진 격자에 매우 자유로움).
- 연직으로 빠르게 전파하는 파동의 효율적 시간 적분을 위해 Klemp et al. (2007)이 고안한 time-split explicit third-order Runge-Kutta (RK3) integration을 사용함.
- Time-split RK3 integration은 이류에 의한 느린 파동의 모드는 RK3 방안의 시간 간격으로 적분하지만, 빠르게 전파하는 수평 음파 및 중력파와 연직 음파 및 부력진동은 RK3 방안의 시간 간격 안에서 보다 작은 시간 간격으로 적분된다. 이 중 빠른 수평전파 모드는 명시적인 forward-backward 시간 적분 방안이 도입되고, 빠른 연직 전파 모드는 전암 시 시간 적분 방안이 도입됨 (Klemp et al. 2007).

○ 모델안정화 방안

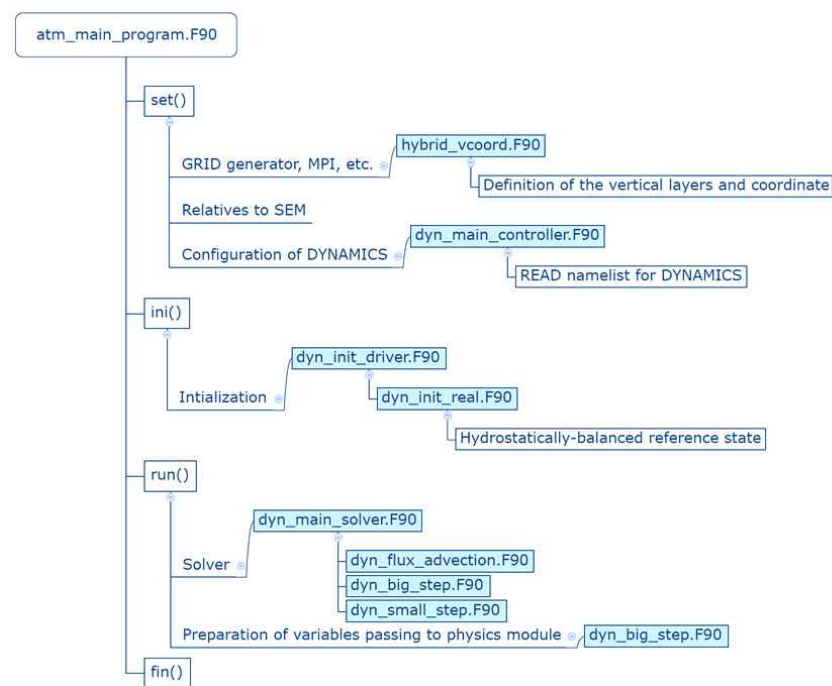
- 모든 수치 모형은 수치계 자체가 가져오는 계산잡음을 효과적으로 제거하기 위한 모델안정화 방안을 가지고 있음.
- 계산격자 규모와 물리현상 규모 간의 일관된 필터 방안이 요구됨.
- Laplacian 연산자를 기반으로 한 고차 필터 방안을 선택함.
- 분광요소법 육면체 구면에서의 Laplacian 연산자의 특성을 연구하였으며 이를 바탕으로 Laplacian 연산자 기반 고차 필터 방안은 시간 적분 간격이 매우 작아져야 함을 밝혀냄.
- 이를 극복하고자 시간분할 고차 명시적 필터 방안을 고안함.
- 현업모델의 운용은 엄격한 수행시간을 정해야 함으로 시간분할 고차 명시적 필터 방안을 사용하지 않고 4차 명시적 필터를 사용함.

○ 코드 구조

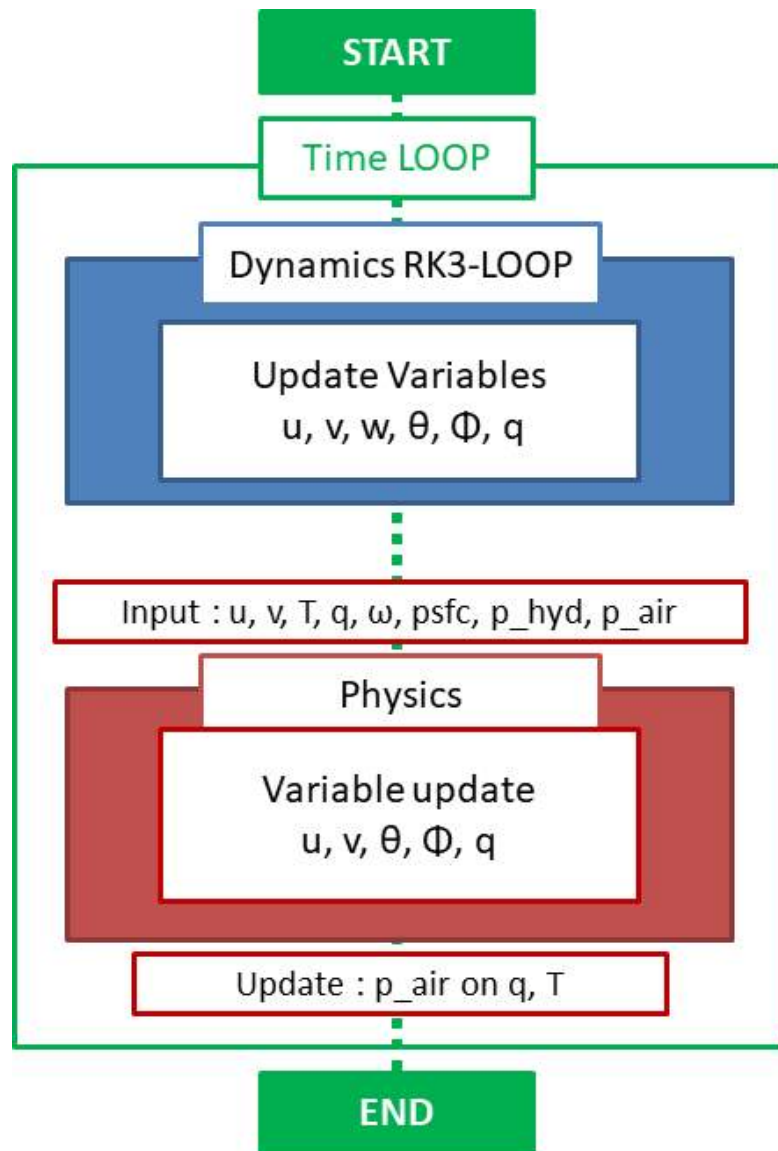
- atm_main_program.F90는 모형 전체 흐름을 관장함. 이 프로그램은 파라미터를 외

부 파일에서 읽어 할당하는 set 부분, 시간적분을 반복 수행하는 run 부분, 마지막으로 모델을 종료하고 메모리를 시스템에 반납하는 fin 부분으로 나누어짐 (<그림 3-1>).

- 시간 간격에 대해 반복 수행되는 역학코어 솔버는 dyn_main_solver.F90이며, 이 모듈에서 다음 항들을 계산하는 서브루틴들이 호출됨.
- 시간 예보는 현재 상태에서 변화량을 더해가는 시간적분 과정으로 이해할 수 있으며, 각 서브루틴을 반복 수행하여 예보를 진행함.
- <그림 3-1>에서 나타낸 슈도코드를 시간적분 관점에서 모식화한 <그림 3-2>는 KIM의 시간적분 순서를 나타냄. KIM은 시간 분할 방법을 적용하여 역학코어의 시간 전진과 물리 패키지에 의한 시간 전진 증분을 결합하여 하나의 시간적분 과정을 완성함. KIM에서 역학코어는 물리 패키지와 독립적이므로, 역학코어의 계산 효율성은 물리 모수화의 효율성과는 별개로 다를 수 있음.



<그림 3-1> KIM 메인 코드의 개념 구조

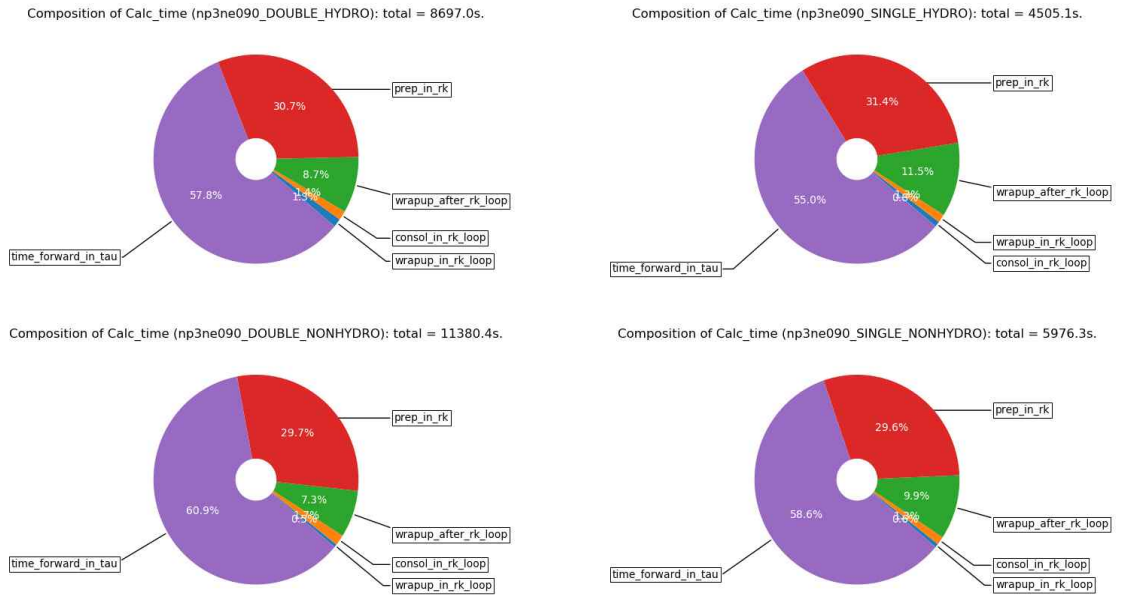


<그림 3-2> KIM 시간 적분 순서 모식도

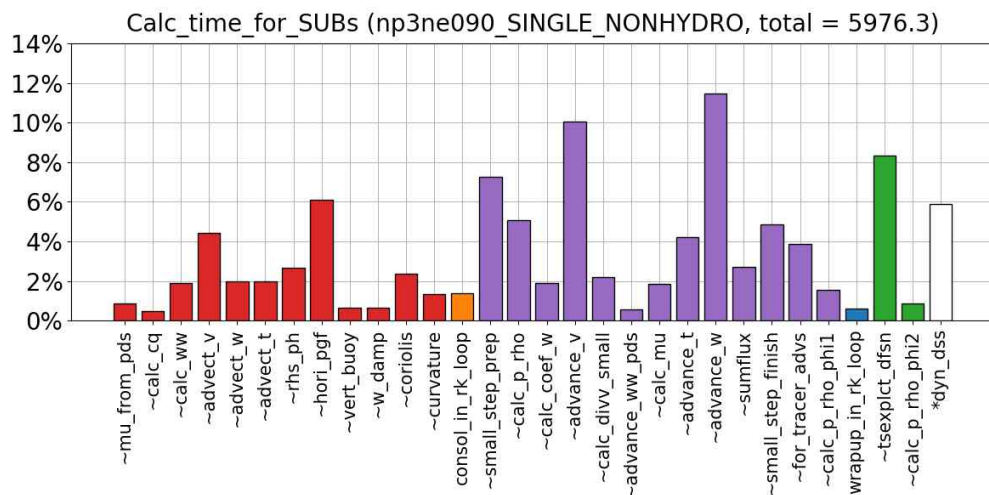
3) 계산 시간 프로파일링과 계산 효율성 강화 방안

○ 정역학 역학코어

- 장기 적분을 위한 계산 효율성 분석을 위해 모델 시뮬레이션에 대한 소요 시간에 대한 세부 프로파일 분석을 진행함 (<그림 3-3>).



<그림 3-3> 정도 (Precision)에 따른 모델의 계산 시간 프로파일



<그림 3-4> 비정역학 모델의 Jablonowski-Williamson Baroclinic Instability test 세부 프로파일

- <그림 3-4>에서 advance_w가 가장 큰 비중을 차지하여 이를 개선하고자 정역학 역학코어를 개발해 적용함.
- 정역학 지배방정식은 비정역학 지배방정식에서 관련 항을 제거하여 계산 부하를 줄임(<그림 3-5>). 단, 비정역학계를 정역학계로 변환할 때 시분할 시간 이산화

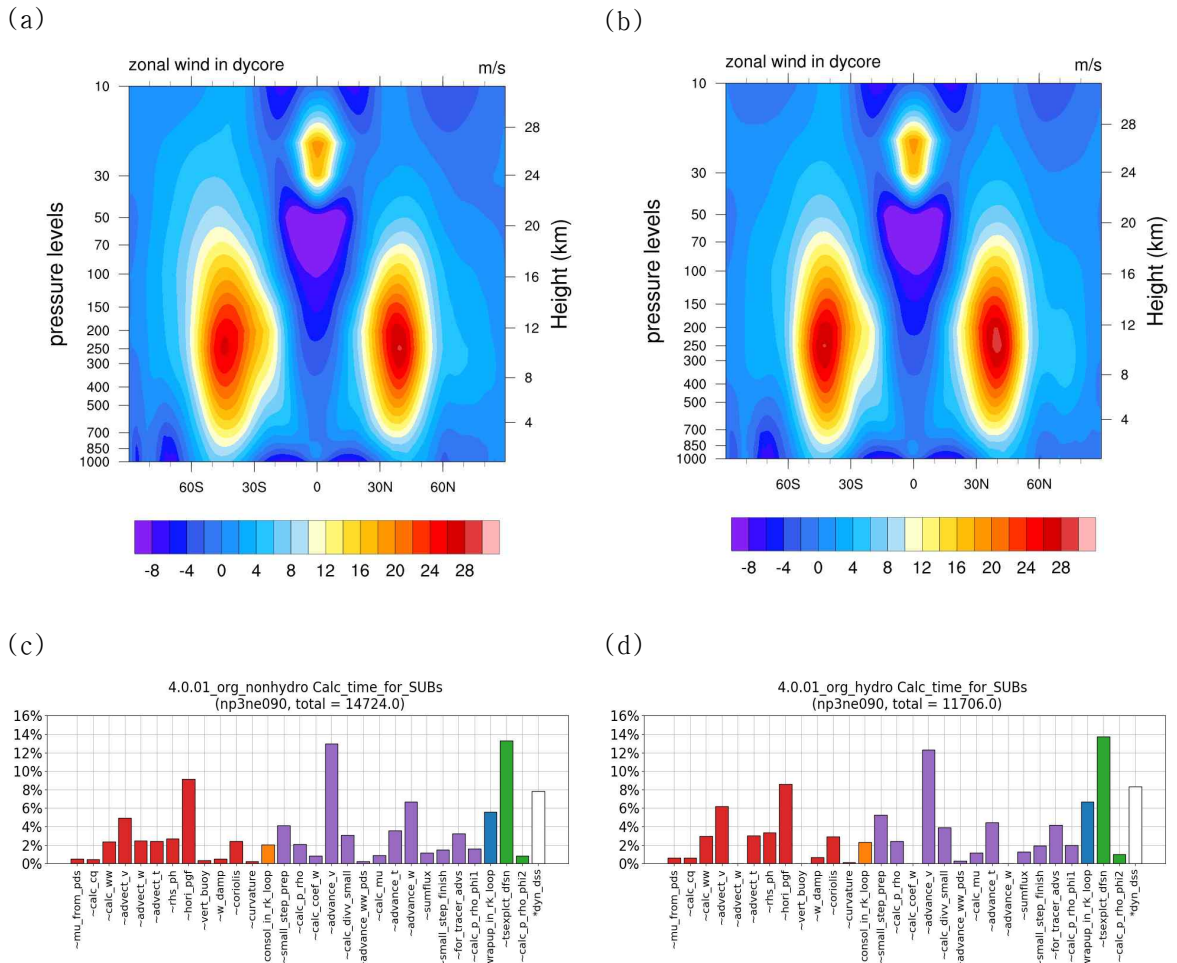
는 유지해야 함.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \vec{V}_\mu}{\partial t} + \mu_\sigma \nabla_\eta K + \frac{\partial(\Omega \vec{V}_\mu)}{\partial \eta} + \vec{V}_\mu \nabla_\eta \cdot \vec{V}_\mu + \zeta \hat{k} \times \vec{V}_\mu + \frac{\alpha}{\alpha_\sigma} \left[\mu_\sigma (\nabla_\eta \phi' + \alpha_\sigma \nabla_\eta p' + \alpha'_\sigma \nabla_\eta \bar{p}) - \nabla_\eta \phi \left(\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \mu'_\sigma \right) \right] = \vec{F}_{V_\mu} \\
 & \frac{\partial W}{\partial t} + \nabla_\eta \cdot (\vec{V}_\mu W) + \frac{\partial(\Omega W)}{\partial \eta} + g \left(\frac{\alpha}{\alpha_\sigma} \right) \left[\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_\sigma (q_v + q_c + q_r) \right] + g \mu'_\sigma = F_W \\
 & \frac{\partial \phi'}{\partial t} + \frac{1}{\mu_\sigma} \left[\vec{V}_\mu \cdot \nabla_\eta \phi + \Omega \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - g W \right] = 0 \\
 & \frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla_\eta \cdot (\vec{V}_\mu \theta) + \frac{\partial(\Omega \theta)}{\partial \eta} = F_\theta \\
 & \frac{\partial \mu'_\sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial p'_\sigma}{\partial \eta} \right) = \frac{\partial B(\eta)}{\partial \eta} \frac{\partial p'_{\sigma\sigma}}{\partial t} = -\nabla_\eta \cdot \vec{V}_\mu - \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} \\
 & \rho = \rho_\sigma \left(\frac{R_\sigma \theta_\sigma}{\rho_\sigma \alpha_\sigma} \right)^{c_\sigma/c} \quad \boxed{\hspace{10em}} \quad \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \equiv \frac{\alpha_\sigma}{\alpha} \mu_\sigma
 \end{aligned}$$

*정역학평형 정의

*연직좌표계 정의

<그림 3-5> 정역학계로 변환 시 지배방정식에서 제거되는 항

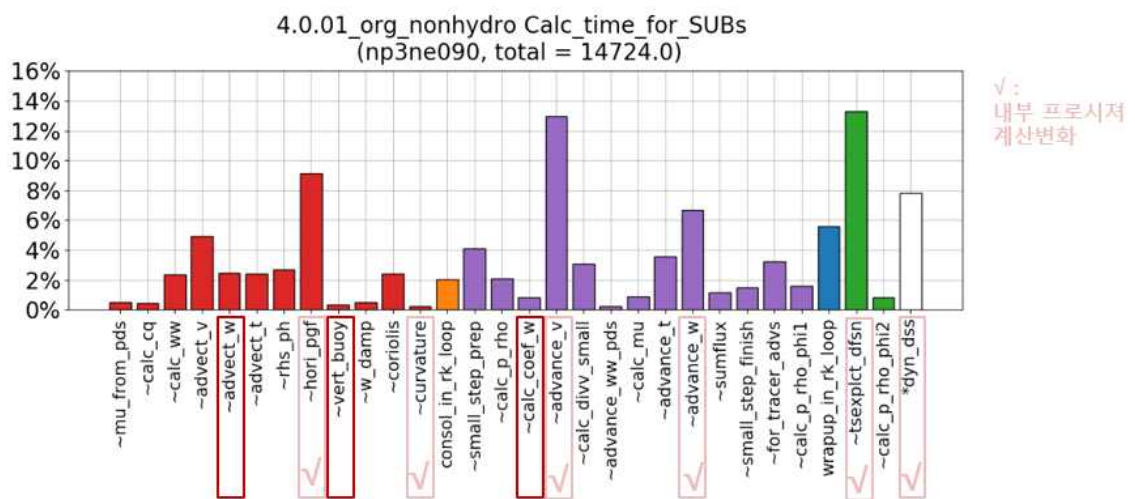


<그림 3-6> 비정역학 모델과 정역학 모델의 시간 평균 경도평균-연직 단면도와 소요 시간의 세부 프로파일

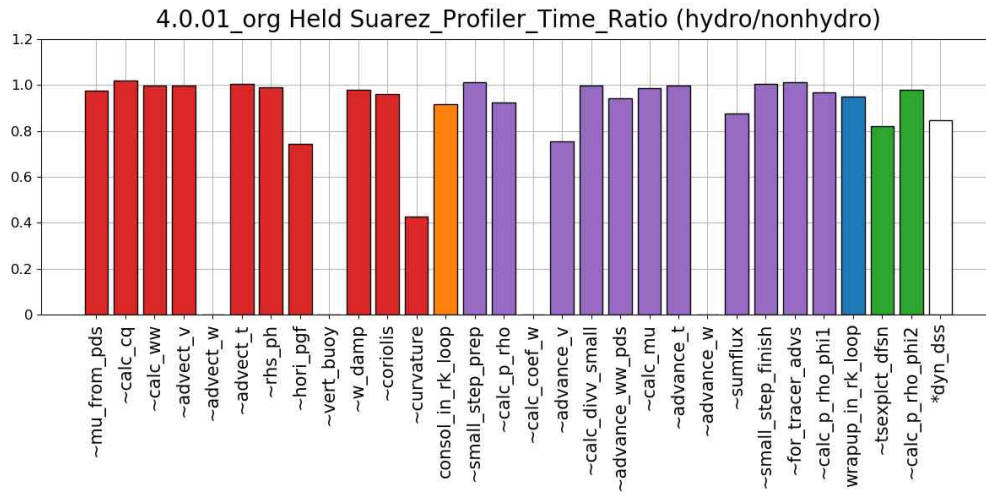
- 역학코어 모델 검증을 위해 지면 고도 자료를 사용한 Held-Suarez 테스트를 365 일 시뮬레이션으로 수행함 (<그림 3-6>).
- 정역학코어 적용 후 총 계산 시간이 14,724초에서 11,170초로 20.5% 감소함.
- 정역학코어 사용 시 비정역학 실험 (<그림 3-6c>)에서 나타났던 `advect_w`, `vert_buoy`, `calc_coef_w` 및 `advance_w`가 정역학 실험 (<그림 3-6d>)에서는 나타나지 않음.
- 정역학코어는 비정역학코어의 제트와 그 풍속을 잘 모의함 (<그림 3-6a, b>).
- 정역학코어를 적용하면서 일부 서브루틴에서 내부 프로시저 계산이 변함 (<그림 3-7>).
- 정역학코어 사용으로 계산 시간이 감소한 서브루틴 (`hori_pgf`, `curvature`,

advance_v, sumflux, tsexplct_dfsn, dyn_dss)과 제거된 항목으로 인해 계산 부하가 감소함을 확인함 (<그림 3-8>).

- 추가로 2022년 8월 8일 집중호우 사례에 대해 real forecast를 수행하여 예보 성능 변화를 확인함 (<그림 3-9>).
- 정역학 모델과 비정역학 모델 모두 IMERG 강수에 비해 강수를 과소 모의하는 경향이 있음 (<그림 3-9>).
- 두 모델을 비교한 결과, 정역학 모델의 모의 성능이 비정역학 모델과 유사함을 확인함.



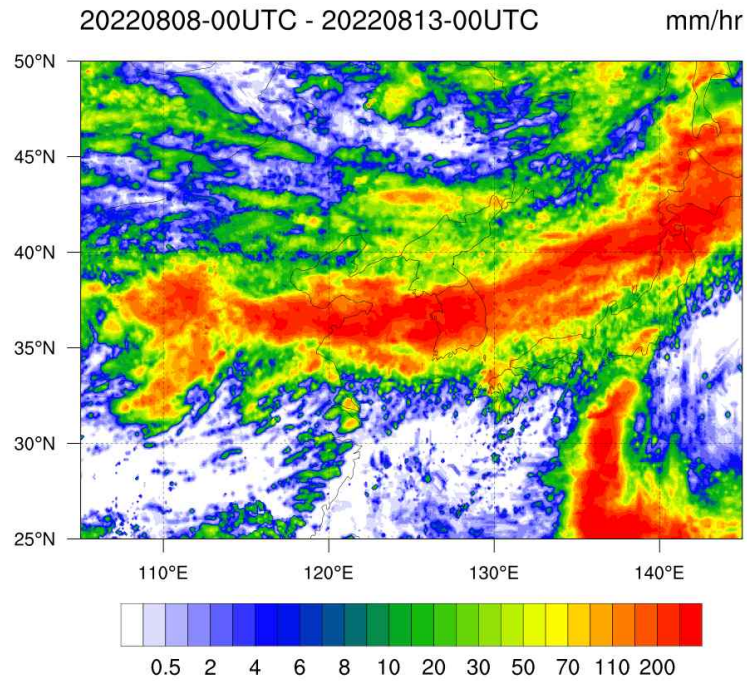
<그림 3-7> 세부 서브루틴 분석 결과



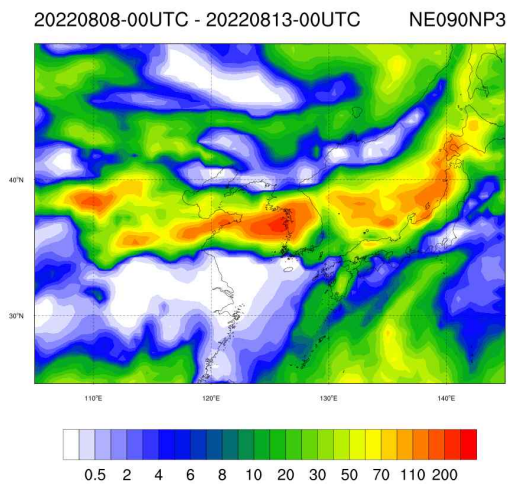
<그림 3-8> 비정역학 모델과 정역학 모델의 세부 서브루틴 비율

(a)

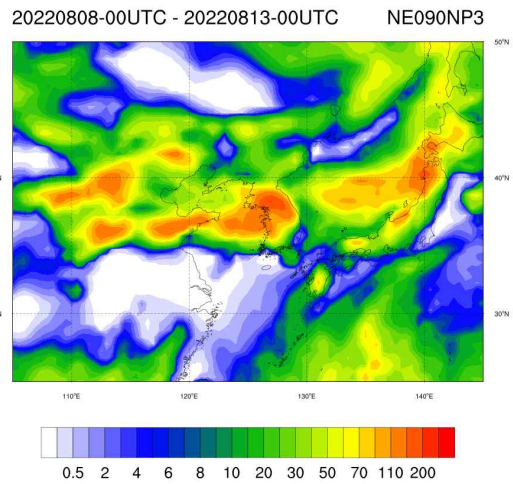
IMERG Observation precipitation



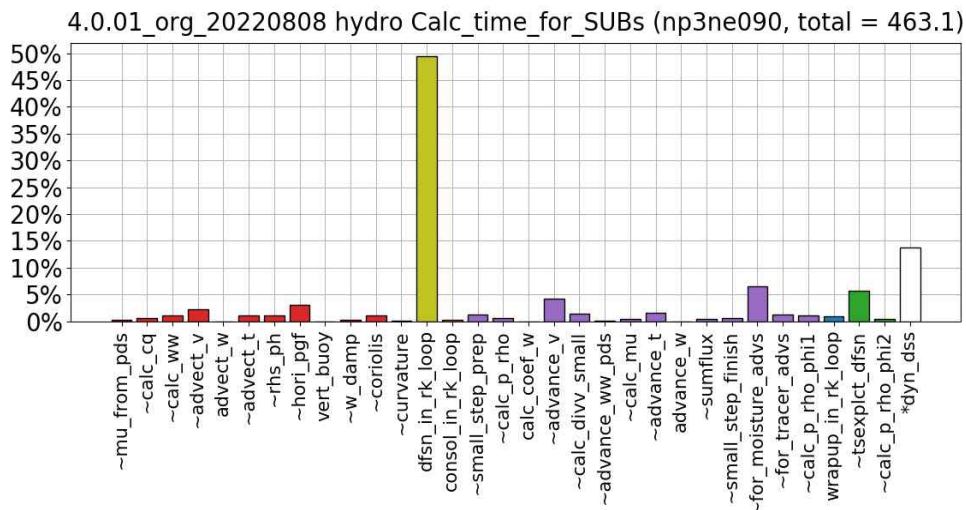
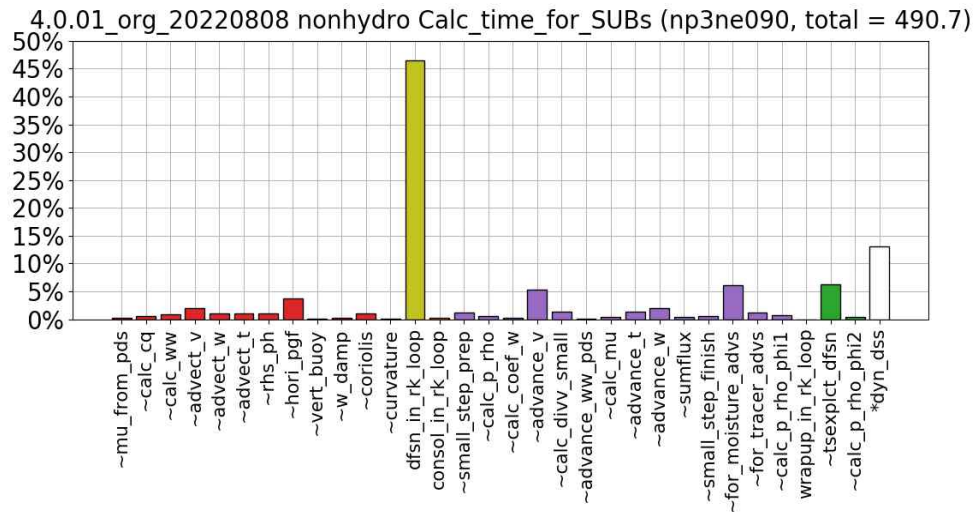
(b)



(c)



<그림 3-9> (a) IMERG 강수. (b) 비정역학 및 (c) 정역학 모델의 5일 (2022년 8월 8일 ~ 8월 13일) 누적 강수



<그림 3-10> 비정역학 모델과 정역학 모델의 real forecast 세부 프로파일

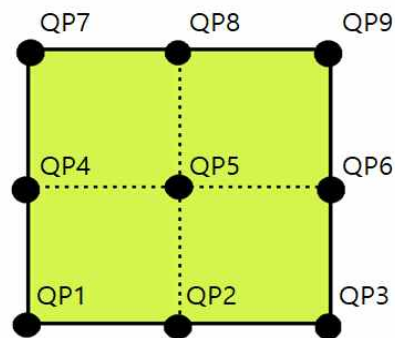
- 총 계산 시간이 490.7초에서 463.1초로 5.6% 감소함 (<그림 3-10>).
- Real forecast에는 에어로졸, 오존, 구름물 등 6종의 추적 물질 (tracer)이 필요함.
- 두 모델의 세부 프로파일링에서 dfsn_in_rk_loop가 가장 크게 나타남.
- 이는 역학코어만 테스트하는 이상 실험에서는 나타나지 않았으며, real 예보에서만 확인된 결과로, 확산 (diffusion) 과정을 시분할 방안 (mp, cld)으로 교체해야 함을 시사함.
- 역학코어 계산 효율성 분석 결과, 정역학 역학코어 사용 시 총 계산 시간이 의미 있게 감소하고 비정역학 모델과의 성능 차이가 크지 않음을 확인하여 정역학코어 모델의 가치를 입증함.

나. 기후모델의 안정화를 위한 확산과정 활용 방안 분석

1) 계산 시간 프로파일링과 계산 효율성 강화 방안

○ 라플라시안 회소행렬

- 분광 요소법의 모든 수평 미분 연산자는 매트릭스 형태를 가짐 (<그림 3-11, 3-12>).
- 라플라시안 연산자 또한 LGL 격자점 내부에서 매트릭스 형태로 나타남.



<그림 3-11> LGL 격자점 공간

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = 0 \quad \Rightarrow \quad M_{ij}^{(e)} \frac{dq_j^{(e)}}{dt} + \mathbf{D}_{ij}^{(e)} \mathbf{F}_j^{(e)} = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \nabla^4 q = \nabla^2 (\nabla^2 q) \quad \Rightarrow \quad M_{ij}^{(e)} \frac{dq_j^{(e)}}{dt} = \mathbf{L}_{ij}^{(e)} \mathbf{L}_{ij}^{(e)} q_j^{(e)}$$

<그림 3-12> 수평 미분연산자의 매트릭스 형태로의 변환

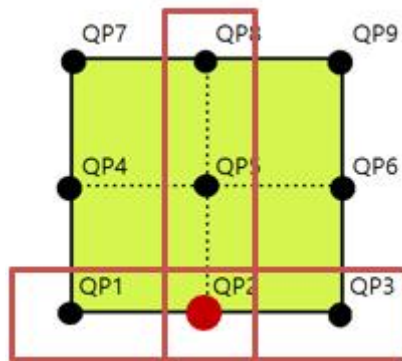
- 라플라시안 매트릭스는 행렬 회소성이 0이며 행렬 요소 값은 <표 3-1>과 같음.

<표 3-1> 임의의 요소에서 L_{ij} 의 행렬 구조

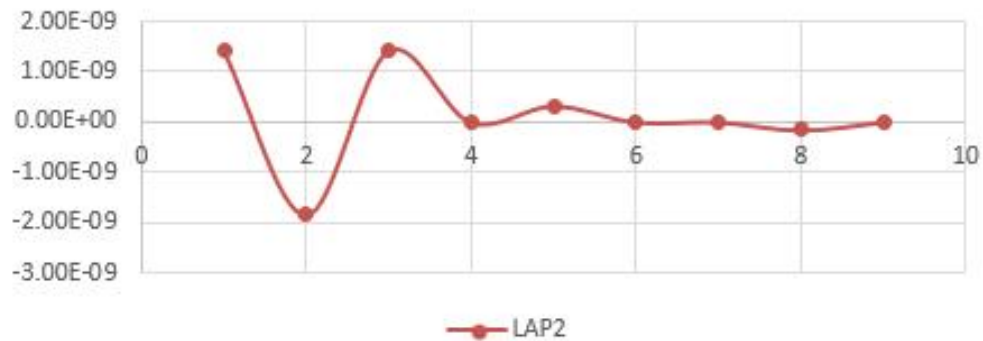
	QP1	QP2	QP3	QP4	QP5	QP6	QP7	QP8	QP9
LAP1	-2.38E	1.42E-0	-1.78E	1.30E-0	1.02E-1	-1.68E	-1.62E	-2.49E	4.07E-1

	-09	9	-10	9	1	-12	-10	-12	3
LAP2	3.54E-1 0	-1.84E -09	3.54E-1 0	-2.56E -12	1.30E-0 9	8.38E-1 3	6.35E-1 3	-1.62E -10	-2.03E -13
LAP3	-1.78E -10	1.42E-0 9	-2.37E -09	1.73E-1 2	-3.45E -12	1.30E-0 9	-4.32E -13	8.63E-1 3	-1.62E -10
LAP4	3.23E-1 0	-2.56E -12	4.30E-1 3	-1.88E -09	1.41E-0 9	-1.76E -10	3.24E-1 0	2.46E-1 2	-4.06E -13
LAP5	6.33E-1 3	3.23E-1 0	-2.15E -13	3.52E-1 0	-1.35E -09	3.52E-1 0	-6.21E -13	3.24E-1 0	2.03E-1 3
LAP6	-4.18E -13	8.36E-1 3	3.23E-1 0	-1.76E -10	1.41E-0 9	-1.88E -09	4.18E-1 3	-8.36E -13	3.24E-1 0
LAP7	-1.61E -10	2.53E-1 2	-4.29E -13	1.29E-0 9	-9.91E -12	1.67E-1 2	-2.35E -09	1.40E-0 9	-1.74E -10
LAP8	-6.19E -13	-1.61E -10	2.15E-1 3	2.45E-1 2	1.29E-0 9	-8.34E -13	3.49E-1 0	-1.83E -09	3.49E-1 0
LAP9	4.05E-1 3	-8.09E -13	-1.61E -10	-1.62E -12	3.24E-1 2	1.29E-0 9	-1.74E -10	1.40E-0 9	-2.36E -09

- 요소 내 격자점 QP2에서 라플라시안 연산을 수행한 결과, 가로와 세로의 근접 포인트에서만 큰 영향을 미침 (<그림 3-13, 3-14>).



<그림 3-13> QP2의 영향을 끼치는 point 구조



<그림 3-14> QP2 point에서 라플라시안 계산에 참여하는 행렬 요소 값

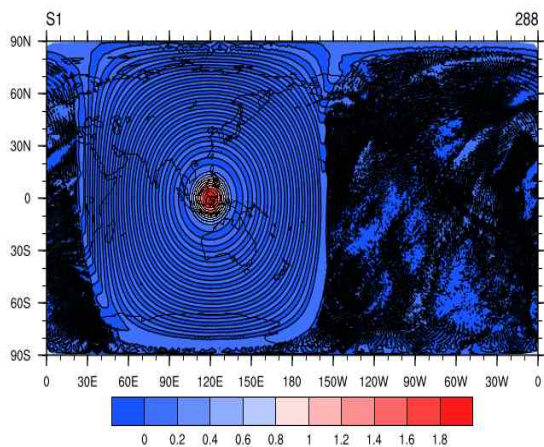
- 영향을 끼치지 않는 포인트를 0으로 근사하여 계산하면 정확도는 감소하지만 계산 시간에서는 이득을 볼 수 있음.
- 여기서 영향을 끼치지 않는 포인트를 0으로 근사한 매트릭스를 성긴 행렬 (sparse matrix)이라 하며, 행렬 희소성 (sparsity)은 0.44로, 기존 계산의 56%만 수행하게 됨 (<표 3-2>).

<표 3-2> 성긴 행렬 (sparse matrix) 구조

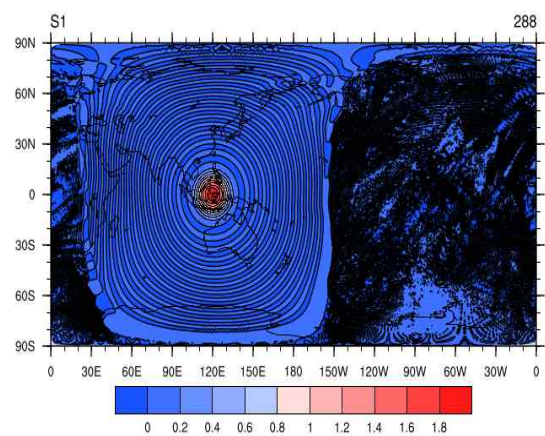
	QP1	QP2	QP3	QP4	QP5	QP6	QP7	QP8	QP9
LAP1	-2.38E-09	1.42E-09	-1.78E-10	1.30E-09			-1.62E-10		
LAP2	3.54E-10	-1.84E-09	3.54E-10		1.30E-09			-1.62E-10	-
LAP3	-1.78E-10	1.42E-09	-2.37E-09			1.30E-09			-1.62E-10
LAP4	3.23E-10			-1.88E-09	1.41E-09	-1.76E-10	3.24E-10		
LAP5		3.23E-10		3.52E-10	-1.35E-09	3.52E-10	-	3.24E-10	
LAP6			3.23E-10	-1.76E-10	1.41E-09	-1.88E-09			3.24E-10
LAP7	-1.61E-10			1.29E-09			-2.35E-09	1.40E-09	-1.74E-10
LAP8		-1.61E-10			1.29E-09		3.49E-10	-1.83E-09	3.49E-10
LAP9			-1.61E-10			1.29E-09	-1.74E-10	1.40E-09	-2.36E-09

- 0으로 근사하여 생성된 성긴 행렬 (sparse matrix)이 유효한지 확인할 필요가 있음.
- 성긴 행렬 (sparse matrix)을 적용은 라플라시안 연산자의 계산량이 줄어들어, 프로파일 분석에서 확산 (diffusion) 계산 시간의 비율 감소를 기대할 수 있음.
- 이를 확인하기 위해 COS BELL advection 1-cycle evolution 테스트를 수행함 (<그림 3-15>).

(a) CTL



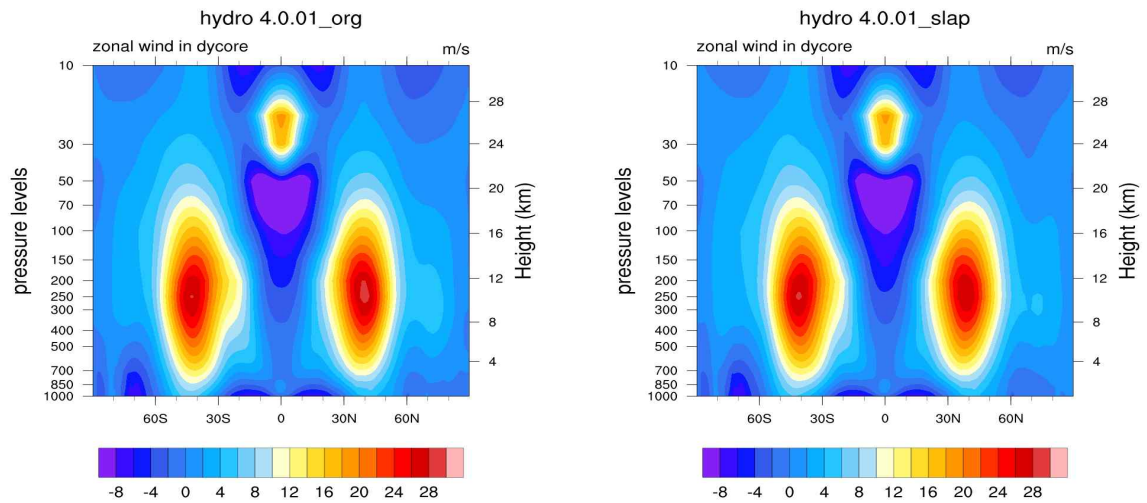
(b) SLAP



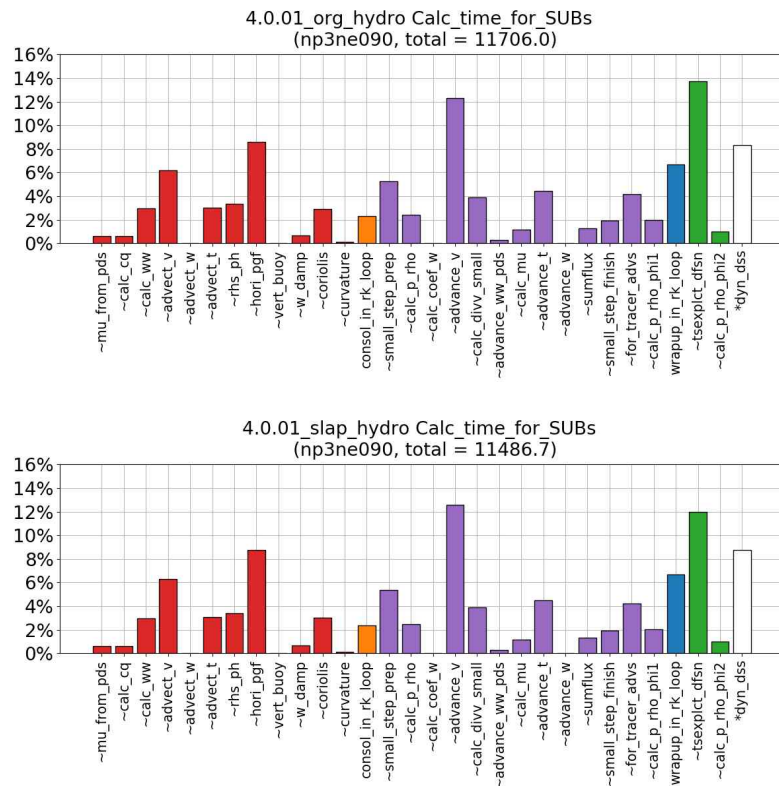
<그림 3-15> COS BELL advection 1-cycle evolution test 수행 결과

- <그림 3-15b>는 일부 영역에서 <그림 3-15a>와 차이가 나타나지만, 주요 부분에서 성긴 행렬 (sparse matrix)이 정상적으로 작동함을 확인함.
- 하지만 성긴 행렬 (sparse matrix)을 적용한 후 계산 시간 감소는 1%에 불과함.
- 추가적인 검증을 위해 정역학코어와 동일한 방식으로 Held-Suarez 테스트와 Real Forecast를 수행함.
- 앞서 역학코어 실험에서 정역학코어의 필요성을 입증했으므로, 이후 모든 시뮬레이션과 비교는 정역학코어를 사용하여 진행함.
- <그림 3-16>에서 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)은 정역학 모델 (HYD)의 제트와 풍속을 잘 모의함.
- <그림 3-17>에서 총 계산 시간이 11,706초에서 11,486.7초로 1.8% 감소했으며, tsexplct_dfsn 서브루틴의 전체 비율이 약 2% 감소함.
- 두 모델의 결과를 비율로 나타낸 결과, tsexplct_dfsn은 1,603초에서 1,373.7초로 14.3% 감소함 (<그림 3-18>).

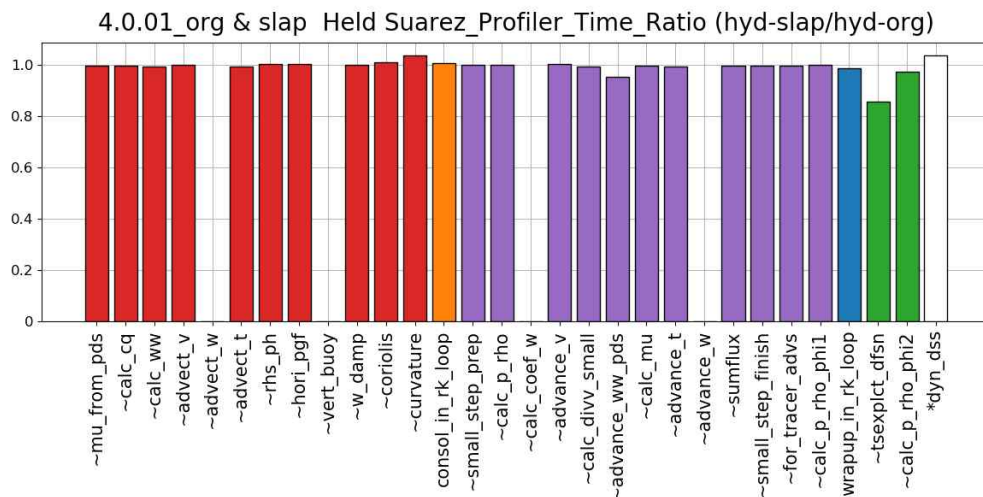
- 정역학 성긴 행렬 사용 모델에서 diffusion 항의 계산 시간이 14.3% 감소했음에도 불구하고, 총 계산 시간에서 1.8%의 감소만 나타난 이유는 모델 계산에서 tsexplct_dfsn이 차지하는 비중이 작기 때문임.
- 다른 프로파일보다 tsexplct_dfsn의 감소가 가장 커서, 성긴 행렬(sparse matrix)이 모델에 잘 적용되었음을 알 수 있음.



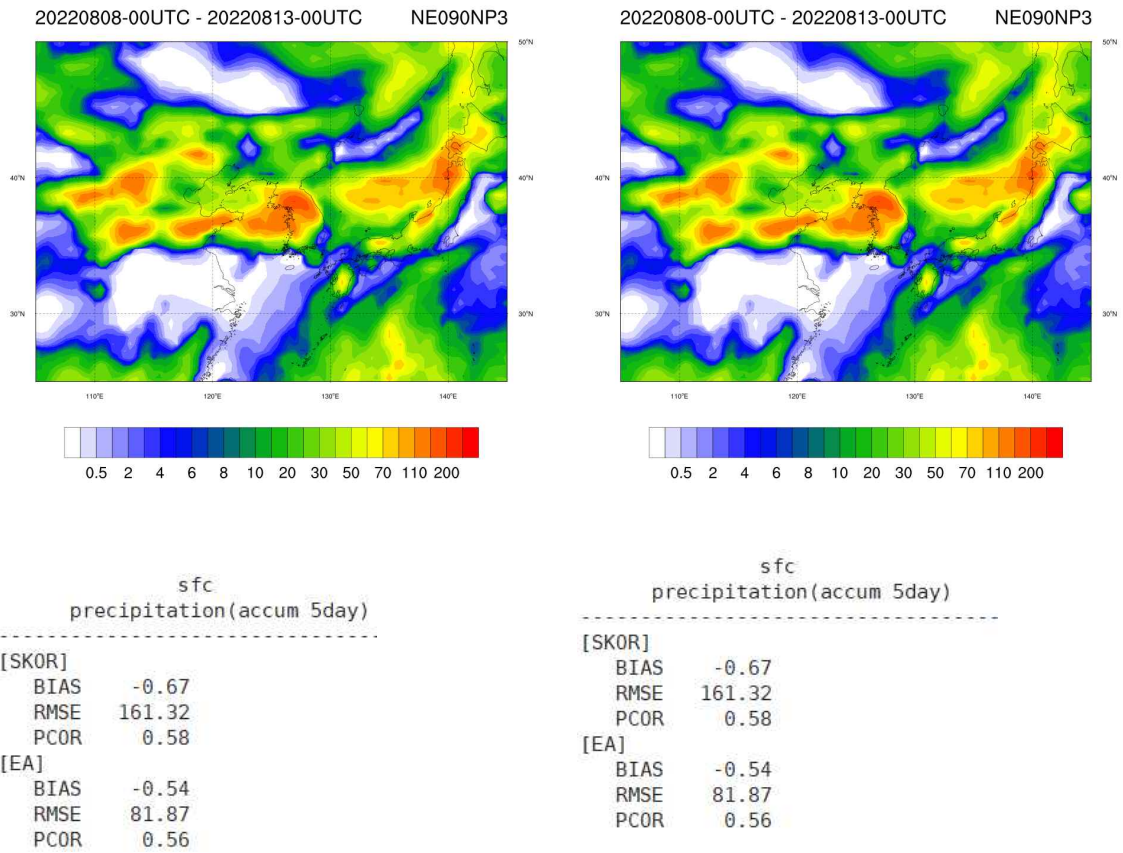
<그림 3-16> 정역학 모델 (HYD)과 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)의 평균 연직 단면도



<그림 3-17> 정역학 모델 (HYD)과 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)의 세부 프로파일링 결과

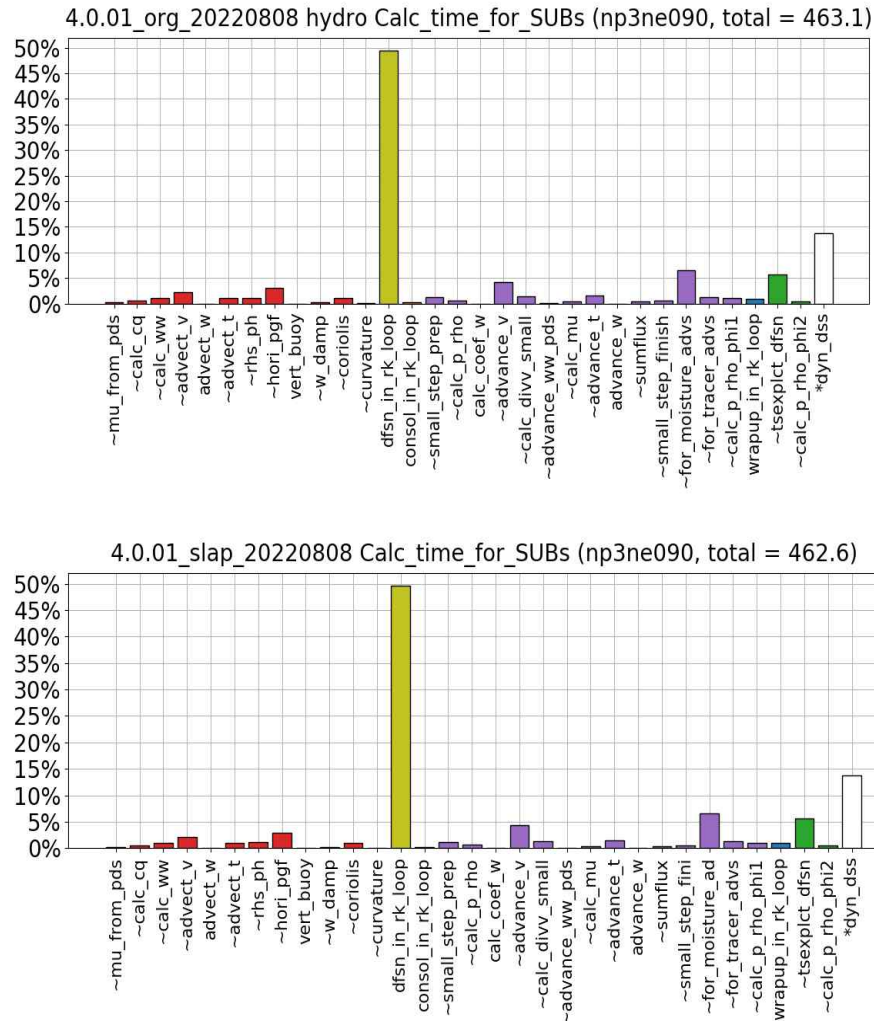


<그림 3-18> 정역학 모델 (HYD)과 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)의 세부 서브루틴 비율



<그림 3-19> 정역학 모델 (HYD)과 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)의 20220808 00 UTC ~ 20220813 00 UTC의 5일 누적 강수와 검증통계량 (BIAS, RMSE, PCOR).

- 성긴 행렬 (sparse matrix)을 적용한 모델은 정역학코어 결과와 일치하는 결과를 보임. IMERG 강수량을 기준으로 구해진 검증 통계량도 정역학 모델 (HYD)과 완전히 일치함 (<그림 3-19>).

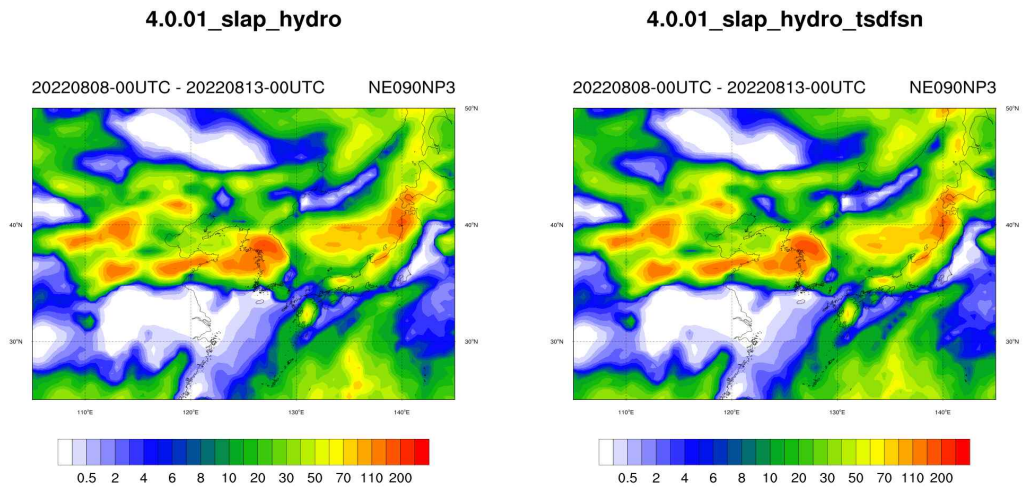


<그림 3-20> 정역학 모델 (HYD)과 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)의 real forecast 세부 프로파일.

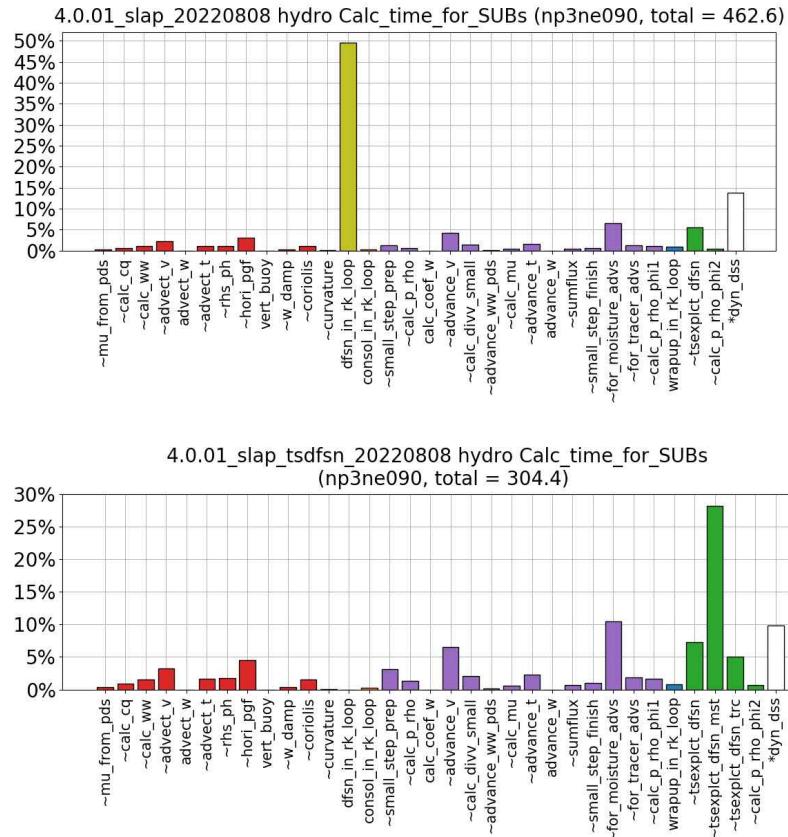
- 시뮬레이션에 대한 세부 프로파일 분석을 진행함 (<그림 3-20>).
- <그림 3-20>에서도 <그림 3-10>과 마찬가지로 dfsn_in_rk_loop의 비율이 가장 크게 나타나, 이 역시 시분할 방안으로의 교체 필요성을 시사함.
- 확산과정 활용 방안 분석 결과, 성긴 행렬 (sparse matrix)을 적용하면 모델의 확산 (diffusion) 계산 시간이 의미 있게 감소하지만, 모델에 미치는 영향이 크지 않아 정역학 성긴 행렬 사용 모델을 사용하기에는 어려움이 있을 것으로 판단됨.

○ 모든 이류량의 시분할 확산과정 적용

- 확산 (diffusion) 방안을 RK3 시간 루프마다 수행하는 것이 아니라 루프 바깥에서 한 번만 수행하는 시분할 방안은 계산 시간을 단축시킬 수 있음.
- 시분할 방안 모델 (HYD SLAP_tsdfs)을 real forecast로 수행하여 HYD SLAP과 비교함 (<그림 3-21>).



<그림 3-21> 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)과 정역학 성긴 행렬 사용 시분할 방안 모델 (HYD SLAP_tsdfs)의 20220808 00 UTC ~ 20220813 00 UTC의 5일 누적 강수



<그림 3-22> 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)과 정역학 성긴 행렬 사용
시분할 방안 모델 (HYD SLAP_tsdfsn)의 real forecast 세부 프로파일

- <그림 3-22>에서 총 계산 시간은 462.6초에서 304.4초로 34.2% 감소함.
- dfs_in_rk_loop는 시분할 방안이 적용되면서 0이 되었으며, 확산과정은 3개의 초록색 프로파일로 나타남.
- 모든 이류량 시분할 확산과정 적용 분석에서 시분할 방안의 확산과정을 사용했으며, 그 결과 계산 시간은 34.2% 감소했음. 강수 모의 결과는 정역학 성긴 행렬 사용 모델 (HYD SLAP)과 유사함.

4. 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출

가. 역학코어의 적분 알고리즘 및 모델 요소별 계산 효율성 분석

1) CESM 역학코어 현황

- NCAR CESM의 대기모델인 Community Atmospheric Model (CAM)은 역학코어, 물리과정 등 모델 구성요소의 모듈화를 통해 다양한 역학코어, 물리과정 등을 선택적으로 활용할 수 있도록 개발됨.
- 이 NCAR CESM version1과 version 2에는 Finite Volume (FV), Spectral Element (SE), Global Spectral Model (EUL) 역학코어가 탑재되어 있으며 역학코어를 활용한 다양한 실험이 가능함.
- 특히 현재 KIM 역학코어의 분광요소법 (Spectral Element) 기반의 역학코어의 특성을 기존 전지구대기모델에서 널리 활용되고 있는 Finite Difference, Finite Volume 등의 차분법 기반 역학코어의 특성과 동일한 물리과정 조건에서 비교할 수 있으며, 이러한 CESM의 특성을 활용한 다양한 역학코어 관련 연구가 수행되고 있음 (Jun et al., 2018, Kim et al., 2023, Park et al., 2024).
- 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출을 위하여 KIM 역학코어와 유사한 역학코어인 CESM의 SE 역학코어와 전통적으로 널리 사용되고 있는 유한체적법 코어인 FV 역학코어를 활용한 이상화조건 실험, full physics 실험, 기후예측 실험을 수행하고 역학코어에 따른 병렬확장성, 모의 특성 등을 살펴봄.

2) CESM을 활용한 역학코어 모의 성능 비교 분석

- 역학코어의 이상화조건 실험을 이용한 수평해상도에 따른 병렬확장성 분석
 - Held and Suarez (1994; HS94)에서 제안한 건조대기 실험은 표층의 Rayleigh friction과 복사평형온도로의 Newtonian cooling을 이용한 대기중의 복사강제력만을 강제시켜 전지구 순환을 재현하는 것으로 이후 다양한 연구에서 전지구 대기 순환의 이해와 수치모형의 특성 평가에 활용되어 왔음 (<그림 4-1>).
 - HS94 실험은 대기 순환을 만들어내는 주요 과정인 대기복사, 경계층 과정을 간단한 수식으로 표현하였기 때문에 여러 실험에서 동일한 물리과정을 활용할 수 있는 장점으로 인하여 역학코어의 성능평가에서도 널리 활용됨.

- NCAR CESM2.2.0의 SE 코어와 FV 코어를 활용하여 적도 기준 1°, 2° 해상도의 HS94 실험을 다른 CPU를 사용한 병렬확장성 실험을 수행함.

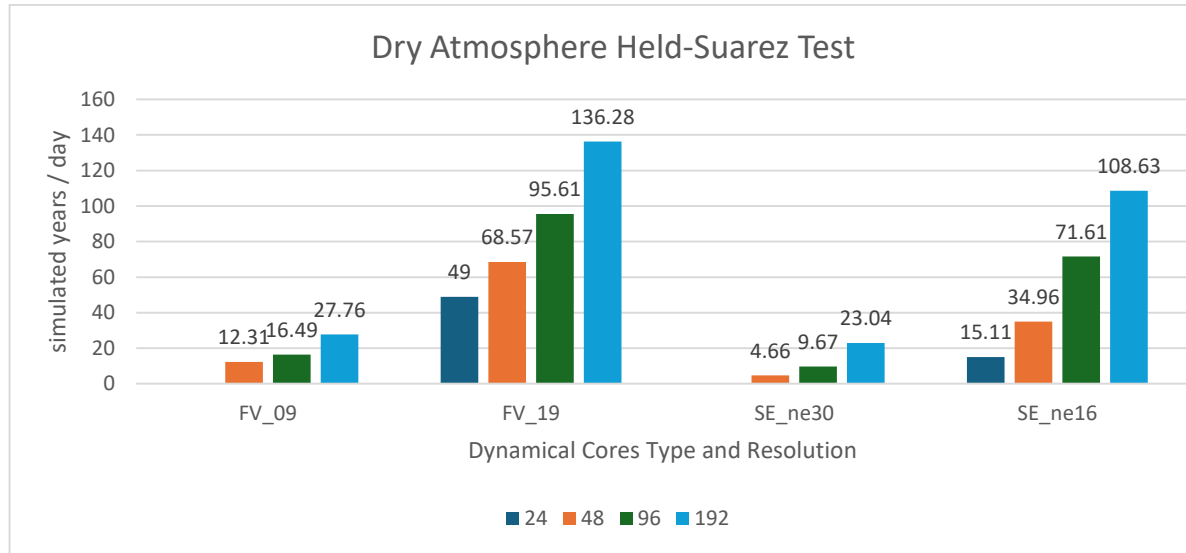
$$\frac{\partial v}{\partial t} = \dots - k_v(\sigma)v$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dots - k_T(\phi, \sigma)[T - T_{eq}(\phi, p)]$$

$$T_{eq} = \max \left\{ 200K, \left[315K - (\Delta T)_y \sin^2 \phi - (\Delta \theta)_z \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \cos^2 \phi \right] \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\kappa} \right\}$$

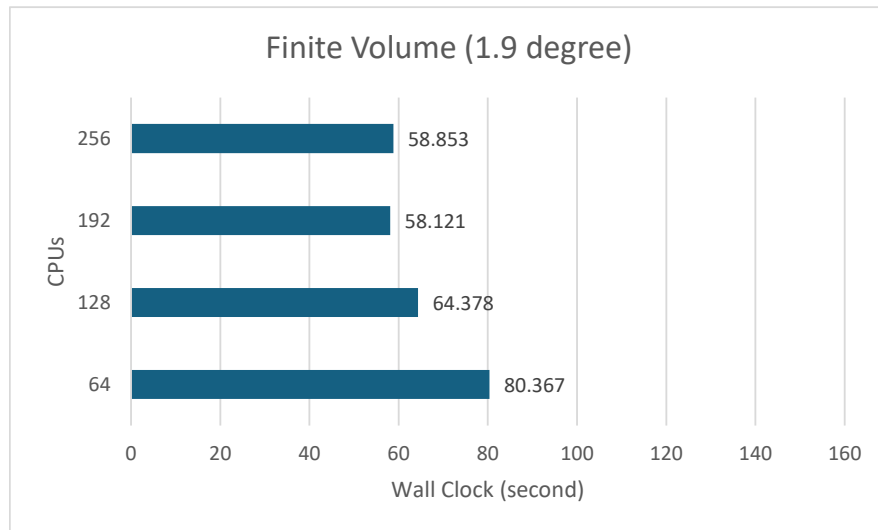
<그림 4-1> Held and Suarez (1994) 실험의 강제력 설정

- <그림 4-2>에서 실험 결과를 확인해보면 24개 코어를 활용한 약 2° 해상도 실험 (FV_19, SE_ne16)에서는 FV코어의 적분 성능 (49.00 syearday)이 SE 코어에 비하여 (15.11 syearday)이 우수하게 나타남.
- 활용 CPU가 증가할수록 SE 코어의 성능 향상이 더 뚜렷하게 나타났으며, 192 코어를 활용한 실험에서는 각각 136.28, 108.63 syearday로 24 cpu 활용시 두 코어의 성능이 약 3배 정도 차이가 발생했던 것에 비교하였을 때 차이가 급격하게 감소함.
- 기존 연구에서 알려진 것과 같이 분광요소법 기반 코어의 우수한 병렬확장성이 건조대기 이상화조건 실험에서도 확인됨.
- 두 역학코어의 해상도를 적도 동서방향 기준 1°로 약 2배로 증가시킨 FV_09, SE_ne30 실험에서 48, 96, 192개의 CPU를 활용하였을 때 FV 코어의 경우 12.31 syearday로 2° 해상도의 68.57 syearday에 비하여 약 5배 이상, SE 코어의 경우 4.66 syearday로 2° 해상도의 34.96 syearday 기준 약 7배 이상 적분시간이 저하됨.
- SE 코어의 적은 CPU 개수에서의 낮은 성능은 해상도가 높아질수록 크게 개선됨.
- 1° 해상도에서 192 코어로 활용 CPU를 늘리는 경우 성능 향상은 SE 코어에서 더욱 뚜렷하게 나타나며 (FV 27.76 syearday, SE 23.04 syearday) SE 코어의 우수한 병렬확장성이 2° 해상도 실험에서와 동일하게 관찰됨.



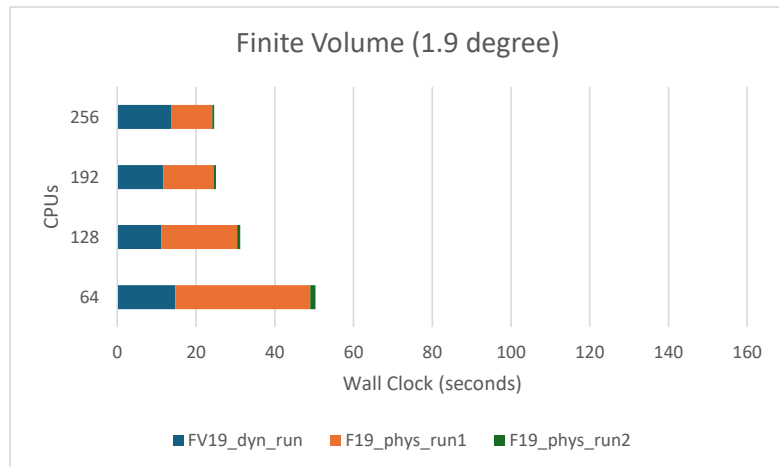
<그림 4-2> FV 1° (FV_09), 2° (FV_19), SE 1° (SE_ne30), SE 2° (SE_ne16) 해상도 조건의 24, 48, 96, 192개의 CPU를 사용한 HS94 10일 적분 실험의 1일당 적분년도 결과

- 역학코어의 full physics 실험을 이용한 과정별 병렬확장성 분석
 - NCAR CESM1.2.1의 FV 역학코어와 SE 역학코어의 2° 해상도에서 모든 물리과정 이 적용된 CAM4 physics package를 활용한 10일간의 기후실험을 64개부터 256개 까지의 CPU를 활용하여 수행하고 평균 Wall Clock Time의 변화를 살펴봄.
 - FV 코어의 경우 64개 CPU 활용시 해상 적분의 수행에 평균 80.367초가 걸리며 128, 192개의 CPU를 활용하는 경우 64.378초, 58.121초로 약간의 성능 향상이 발생하나 256개 CPU의 경우 오히려 58.853초으로 모의 시간이 더 증가함 (<그림 4-3>).
 - 이러한 결과는 기존 분산메모리 방식의 병렬확장성 연구에서 보고된 바 있는 연산시간보다 데이터 분배에 걸리는 시간이 증가하면서 나타나는 결과로 추정.



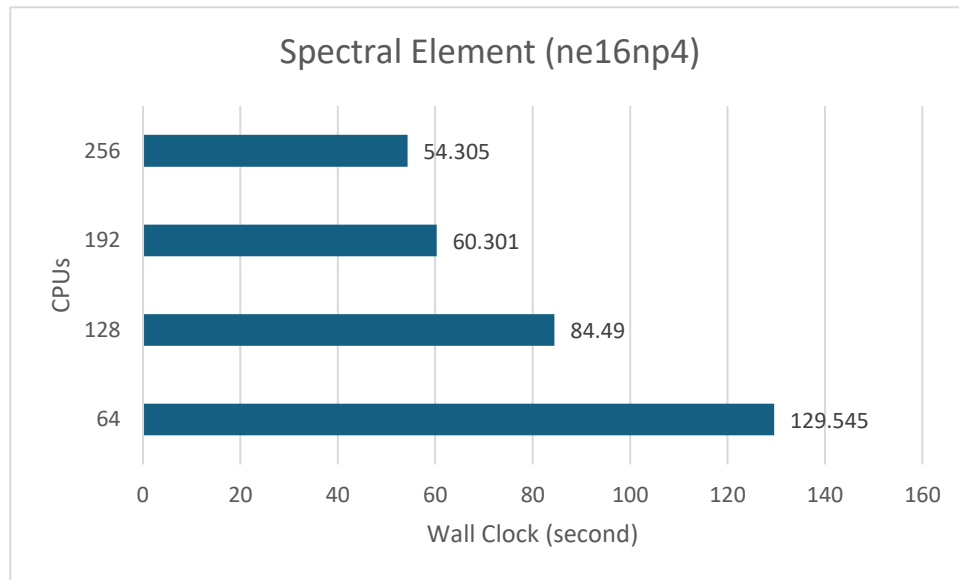
<그림 4-3> 64, 128, 192, 256개 CPU를 활용한 FV 2° (FV_19) 해상도의 모든 물리과정 활용
10일 적분 실험의 Wall Clock Time

- FV 실험 결과에서 역학과정과 물리과정에서 각각 소요되는 시간을 살펴보면 역학과정의 경우 CPU의 개수가 192개까지 증가시 Wall Clock Time의 감소가 나타나나 256개의 경우 오히려 평균 적분시간이 증가함.
- 이에 반해 물리과정은 CPU 개수의 증가에 따라 안정적인 연산시간 감소 경향을 보임.
- 즉 전체 물리과정을 활용한 실험에서도 역학코어의 병렬확장성은 전체 적분시간에 영향을 미치며 이에 따라 전체 적분시간에 역학과정과 물리과정이 차지하는 비율에도 뚜렷한 차이가 발생 (<그림 4-4>).



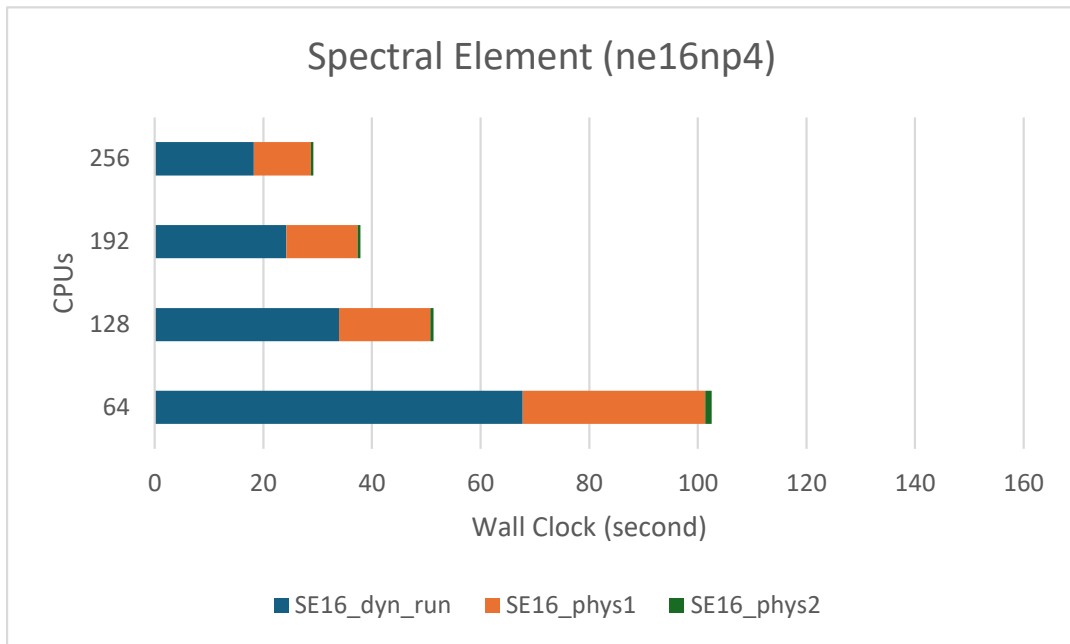
<그림 4-4> 64, 128, 192, 256개 CPU를 활용한 FV 2° (FV_19) 해상도의 모든 물리과정 활용
10일 적분 실험의 역학과정/물리과정별 Wall Clock Time

- SE 코어의 경우 64개 CPU 활용시 해상 적분의 수행에 평균 129.545초가 걸리며, FV 코어의 약 80초에 비하여 긴 연산시간을 보임.
- 128, 192, 256개의 CPU에서의 병렬확장성을 살펴보면, 84.49초, 60.301초, 54.305초로 CPU 증가에 따른 안정적인 Wall Clock Time의 감소가 나타남.
- 기존 이상화조건 실험에서 나타났던 FV 코어에 비교하여 상대적으로 높은 병렬 확장성이 전체물리과정 활용 실험에서도 동일하게 관찰됨 (<그림 4-5>).
- 특히 256개 CPU를 사용한 경우 wall clock time이 54.305초로 FV 코어의 약 58초에 비하여 더 높은 성능이 나타남.



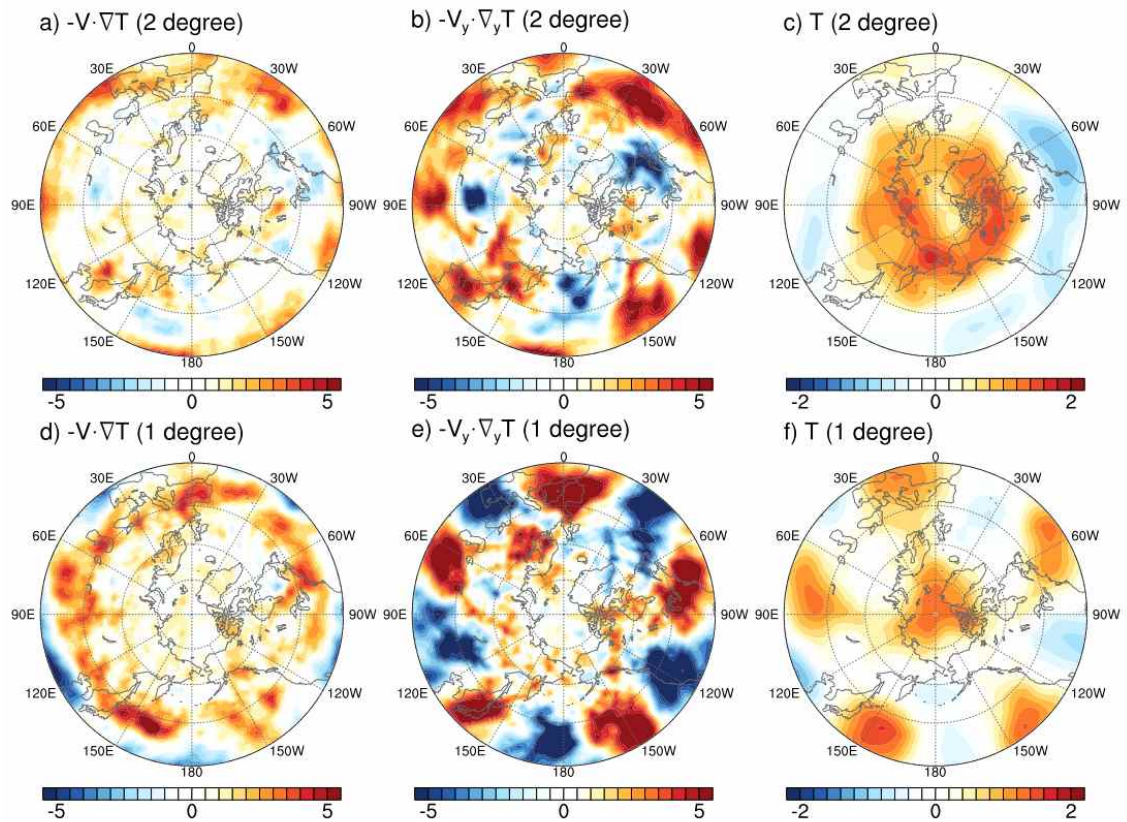
<그림 4-5> 64, 128, 192, 256개 CPU를 활용한 SE 2° (ne16np4) 해상도의 모든 물리과정 활용 10일 적분 실험의 Wall Clock Time

- SE 코어의 각 물리과정/역학과정의 Wall Clock Time을 살펴보면 기존 HS94 실험에서 나타났던 역학코어의 사용 CPU 증가에 따른 병렬확장성이 Wall Clock Time의 감소로 동일하게 관찰되며 물리과정에서도 활용 CPU의 증가에 따른 Wall Clock Time의 감소가 마찬가지로 관찰됨 (<그림 4-6>).
- 즉 SE 코어의 경우 전체물리과정을 활용한 기후실험에서도 이상화조건 실험과 마찬가지로 사용 CPU의 증가시에 지속적인 계산시간의 감소가 나타나는 안정적인 병렬확장성능을 보임.



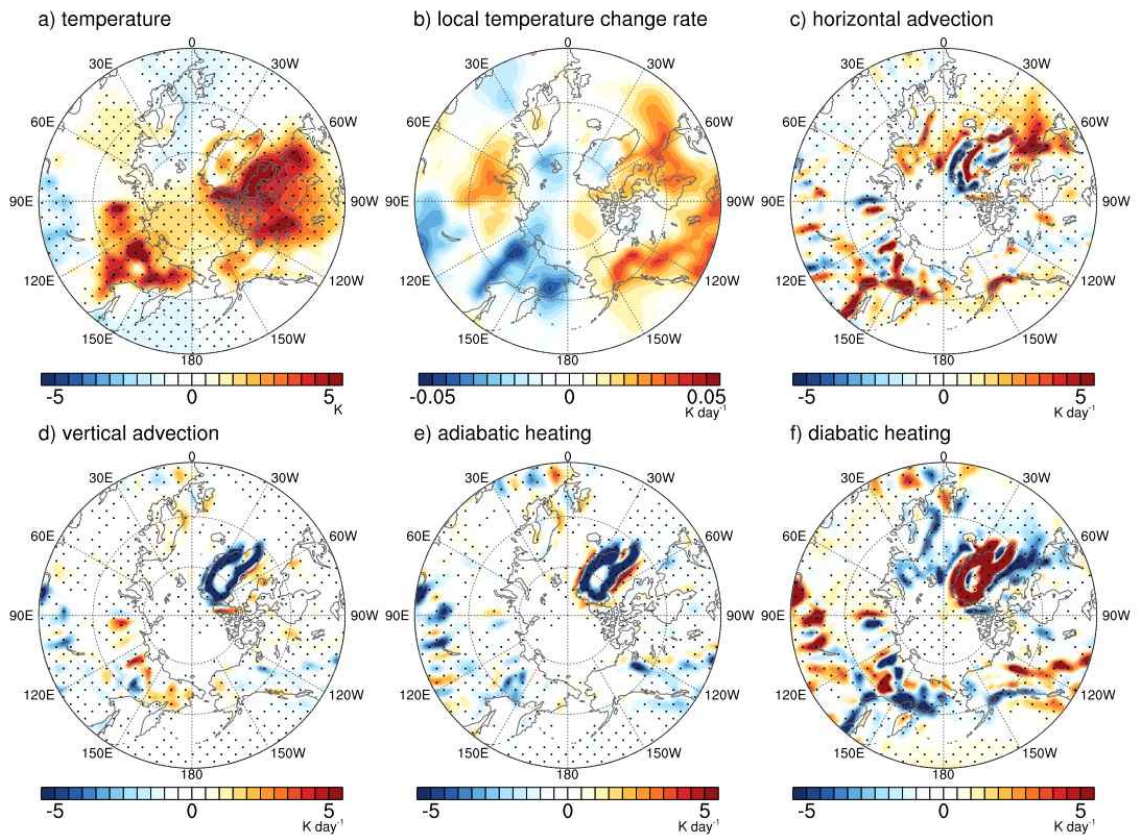
<그림 4-6> 64, 128, 192, 256개 CPU를 활용한 SE 2° (ne16np4) 해상도의 모든 물리과정 활용 10일 적분 실험의 역학과정/물리과정별 Wall Clock Time

- 역학코어별 이상화조건실험, 기후실험, 기후예측실험에서 나타는 모의 특성 분석
 - SE 코어와 FV 코어의 이상화조건실험 및 기후실험에서 나타나는 CESM의 역학 코어별 대기순환장 모의 특성의 차이를 조사함 (<그림 4-7>).
 - 기존에 보고된바 있는 겨울철의 북극 하부대류권의 SE 코어의 온난화 경향이 HS94 1°, 2° 실험의 925 hPa에서도 동일하게 관찰됨.
 - 2° 실험의 경우 북극 지역의 온난화 경향이 더 크게 나타나며 1° 실험에서는 북극 온난화의 지역이 감소함.
 - SE 코어에서의 북극 온난화 지역 경계에서 경도방향의 온난이류의 약한 강화가 2° 실험과 1° 실험 모두 동일하게 관찰됨.



<그림 4-7> FV 코어와 SE 코어를 활용한 HS94 실험에서 나타나는 북반구 925 hPa의 온도 이류, 남북방향 온도 이류, 온도 분포의 차이 (SE - FV)

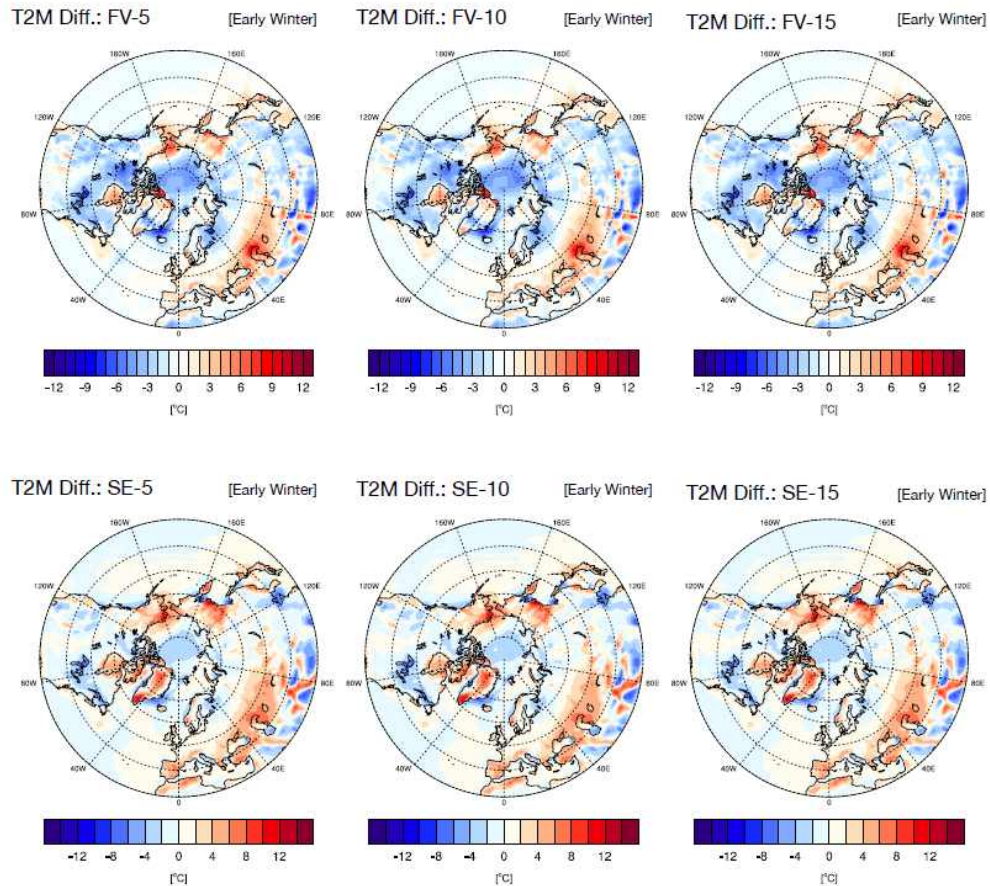
- 전체물리과정을 접합한 50년간의 기후실험에서 이러한 SE 코어의 온난화 경향이 동일하게 관찰됨 (<그림 4-8>).
- SE 코어에서 더 온난하게 모의되는 북극 circle 지역 주변으로 북태평양, 북대서양 지역에서 온난화 남북방향 온난 이류의 증가가 관찰됨. 이러한 경향은 HS94 실험에서 나타난 경향과 일관됨.
- 역학코어와 물리과정의 전체물리과정 접합실험을 조사한 기존 연구 (Jun et al. 2018)에서는 하강 기류에 의한 단열가열의 온난화 기여가 있음을 언급한 바 있음.



<그림 4-8> FV 코어와 SE 코어를 활용한 전체물리과정 기후 실험에서 나타나는 북반구 925 hPa의 온도 이류, 남북방향 온도 이류, 온도 분포의 차이 (SE - FV)

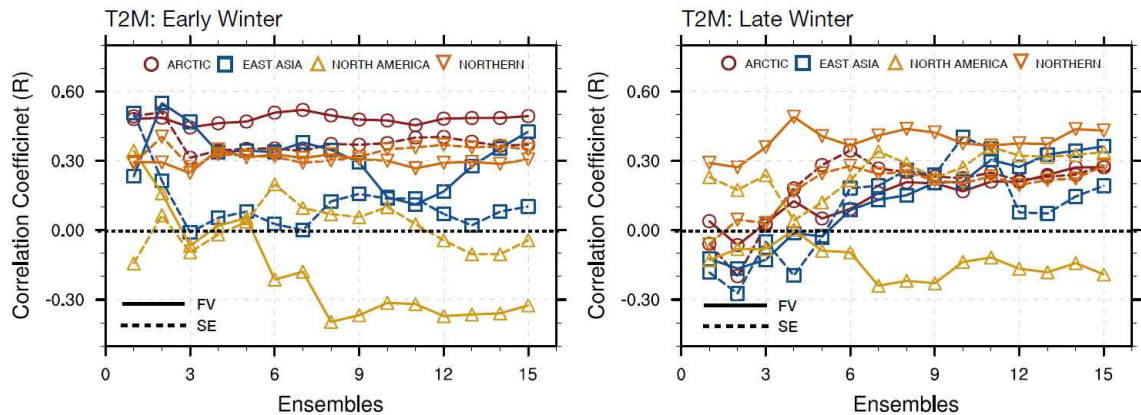
- 기후실험에서 활용된 SE 코어와 FV 코어와 CAM4 전체물리과정 설정을 이용하여 3개월간의 계절예측실험을 수행하고 예측 특성을 조사함.
- NCEP CFS 재예측자료의 해수면온도, 해빙면적 자료를 이용하여 2001년부터 2015년까지의 10월 1일부터 시작하는 15개 앙상블의 겨울계절예측실험을 수행하고 두 역학코어의 모의 특성을 조사함 (<그림 4-9>).
- 기후실험에서 나타났던 겨울철 하부대류권의 온난화 특성의 영향이 ERA-Interim 재분석자료와의 비교에서도 관찰됨.
- FV 코어의 계절예측실험에서 표층대기온도에서 ERA-Interim 재분석자료에 비하여 북극 지역의 강한 한랭 편차가 관찰됨.
- SE 코어의 계절예측실험에서는 북극 지역의 한랭편차가 나타나나, FV 코어에 비하여 감소되어 나타남.
- 이러한 기후장의 편차는 앙상블 개수와 상관없이 모든 실험에서 관찰되며 두 역

학코어를 채택한 기후모델의 계통오차로 판단됨.



<그림 4-9> FV 코어와 SE 코어를 활용한 전체물리과정 기후 예측 실험에서 나타나는 표층대기온도의 양상블 멤버 (5, 10, 15개)에 따른 차이 (SE - FV)

- 두 계절예측실험의 이상상관계수 (Anomaly Correlation Coefficient) 기준 예측성을 북극, 동아시아, 북미, 북반구 전지역 평균으로 살펴봄 (<그림 4-10>).
- 초겨울의 경우 북극, 동아시아 지역의 경우 FV 코어에서 높은 예측성이 나타나며 북미 지역의 경우 SE 코어에서 높은 예측성이 나타남. 특히 북미, 동아시아 지역의 15개 양상블에서의 예측성의 차이는 0.3 이상으로 높게 나타남.
- 늦겨울 예측의 경우 두 코어의 북극 지역의 예측성의 차이는 거의 발생하지 않으나, 북미와 동아시아의 경우 약 0.2 이상의 예측성의 차이가 관찰되며 특히 북미 지역의 경우 SE 코어에서 0.5 이상의 높은 예측성의 차이가 관찰됨.



<그림 4-10> FFV 코어와 SE 코어를 활용한 전체물리과정 초겨울, 늦겨울 기후 예측 실험에서 나타나는 표층대기온도의 앙상블 멤버 (5, 10, 15개)에 따른 차이 (SE - FV)

2) 현업기후모델의 역학코어 성능 평가방안 조사 및 도출

- 기후모델 및 기후예측을 위한 역학코어의 개선방안의 도출을 위하여, 역학코어의 적절한 성능 평가를 위한 방안도출이 필요.
- 이에 역학코어의 성능평가를 위한 기존 방안들을 조사하고 기후모델 성능평가를 위한 실험방안 및 평가방안을 조사함.
- 역학코어 비교를 위한 성능평가 방안 조사
 - 역학코어간 상호비교 연구 (Dynamical Core Intercomparison Project; DCMIP)에서는 역학코어간의 성능 비교를 위하여 다양한 실험 프로토콜을 해당 프로토콜하의 실험 결과를 통해 역학코어의 성능을 평가한바 있음.
 - 2008년, 2012년, 2016년에 수행되었던 DCMIP에서 다양한 실험군이 존재하는 2012년의 실험 설계를 조사함 (<표 4-1>).
 - DCMIP2012의 실험군은 크게 6개 정도로 구분될 수 있음.
 - 이류실험 (Pure Advection; 3차원 전지구 흐름 모의 평가)
 - 다양한 규모에서의 지형 효과 평가 (Impact of Orography on a non-rotating steady-state at rest: Hydrostatic scale)
 - 지형과 관련된 정역학계 흐름 평가, Orographic and non-orographic gravity waves on a non-rotating small-planet: Non-hydrostatic scales)
 - 회전행성에서의 불안정 실험 (Rotating planet: from hydrostatic to non-hydrostatic scales)

- 수증기 상호작용 평가 (simple moist interaction, complex moist interaction)
- DCMIP 실험들은 역학코어의 성능평가를 위해 제안되었으나, 기후규모의 모의 성능 평가를 위해서는 한계점들이 존재함.
- 전지구 규모에서 나타나는 기후규모의 변동성 모의 평가를 위해서는 전지구규모의 실험이 진행되어야 하며, 이 실험에서 북반구 지역 및 동아시아 지역에 영향을 미치는 주요 대기현상의 영향 평가가 가능해야 함.
- 한편 역학코어의 성능평가를 위해서는 이류, 지형효과, 수증기 모의 등의 영향 평가가 고려되어야 함.

<표 4-1> DCMIP 2012의 실험표.

Pure advection	
1-1	3D deformational flow
1-2	3D Hadley-like meridional circulation
1-3	2D solid-body rotation of thin cloud-like tracer in the presence of orography
Impact of orography on a non-rotating steady-state at rest: Hydrostatic scales	
2-0-x	optional: Accuracy of the pressure-gradient calculation in presence of a mountain
Orographic and non-orographic gravity waves on a non-rotating small-planet: Non-hydrostatic scales	
2-1	Mountain waves over a Schär-type mountain on a small planet
2-2	Mountain waves over a Schär-type mountain on a small planet with wind shear
3-1	Non-orographic gravity waves on a small planet
Rotating planet: From hydrostatic to non-hydrostatic scales	
4-1-x	Dry baroclinic instability on a shrinking planet with dynamic tracers EPV and Θ reduction factors 1, 10, 100, 1000 to enable extreme grid spacings down to $\Delta x \approx 110$ m
Simple moist interactions	
4-2	Moist baroclinic instability with large-scale condensation
4-3	optional: Moist baroclinic instability with simplified physics forcings
5-1	Idealized tropical cyclone with simplified physics forcings
Complex moist interactions	
5-2	optional: Idealized tropical cyclone with full physics package

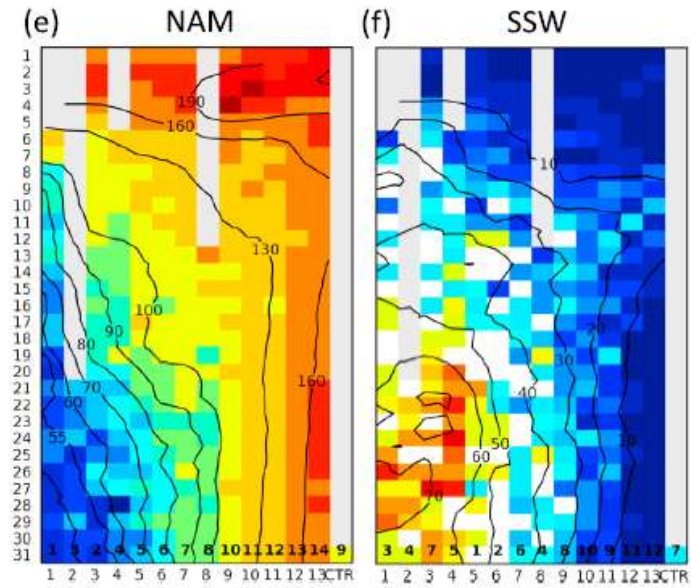
DCMIP 2012 Test cases

Table I. A list of test cases described in this document.

Test Case	Description	
Pure advection		Dry atmosphere experiment with orography and real equilibrium temperature
1-1	3D deformational flow	
1-2	3D Hadley-like meridional circulation	
1-3	2D solid-body rotation of thin cloud-like tracer in the presence of orography	
Impact of orography on a non-rotating steady-state at rest: Hydrostatic scales		
2-0-x	optional: Accuracy of the pressure-gradient calculation in presence of a mountain	
Orographic and non-orographic gravity waves on a non-rotating small-planet: Non-hydrostatic scales		
2-1	Mountain waves over a Schär-type mountain on a small planet	
2-2	Mountain waves over a Schär-type mountain on a small planet with wind shear	
3-1	Non-orographic gravity waves on a small planet	
Rotating planet: From hydrostatic to non-hydrostatic scales		Aqua-planet experiment with full/simple physics
4-1-x	Dry baroclinic instability on a shrinking planet with dynamic tracers EPV and Θ reduction factors 1, 10, 100, 1000 to enable extreme grid spacings down to $\Delta x \approx 110$ m	
Simple moist interactions		
4-2	Moist baroclinic instability with large-scale condensation	
4-3	optional: Moist baroclinic instability with simplified physics forcings	
5-1	Idealized tropical cyclone with simplified physics forcings	
Complex moist interactions		
5-2	optional: Idealized tropical cyclone with full physics package	

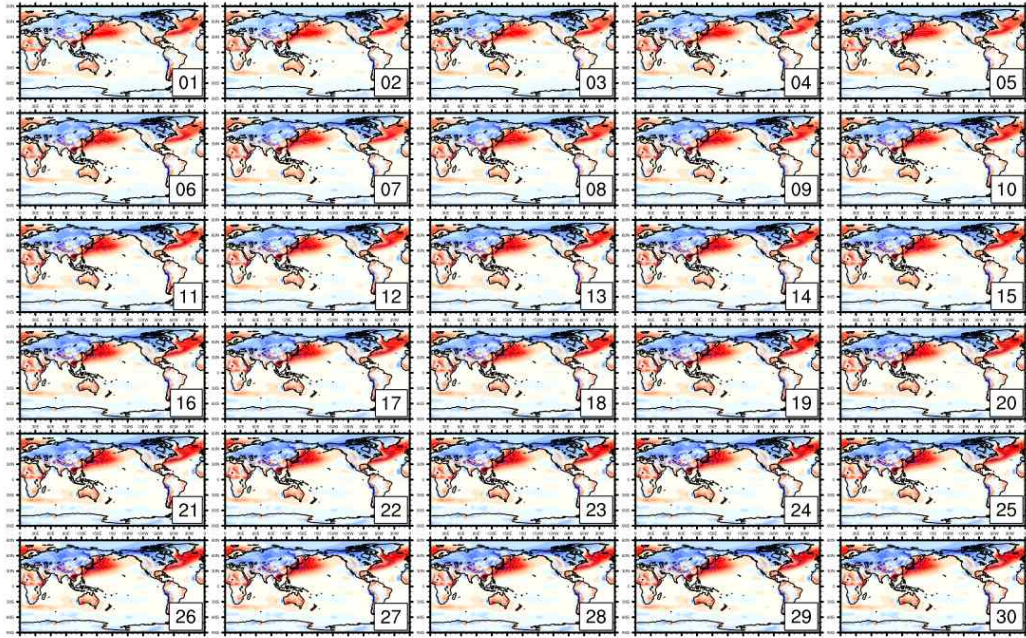
<그림 4-11> DCMIP2012 실험에 기반한 기후모의 실험 제안 모식도

- 따라서 전지구 규모의 건조대기 실험인 HS94 계열의 실험에서 지형효과를 고려한 실험과, 습윤과정을 포함하는 전지구규모의 Aqua-planet 실험의 수행이 역학 코어의 기후규모의 모의성능 평가에 적합할 것으로 판단됨 (<그림 4-11>).
- Wu and Reichler (2018)에서는 HS94 건조대기 실험을 실제 지형과 관측에서 추출된 3차원 복사평형온도를 활용하는 방식으로 개선하고 해당 실험에서 북극진동 (Arctic Oscillation)과 성층권 돌연승온 (Stratospheric Sudden Warming) 현상의 모의 성능을 평가한 바 있음 (<그림 4-12>).



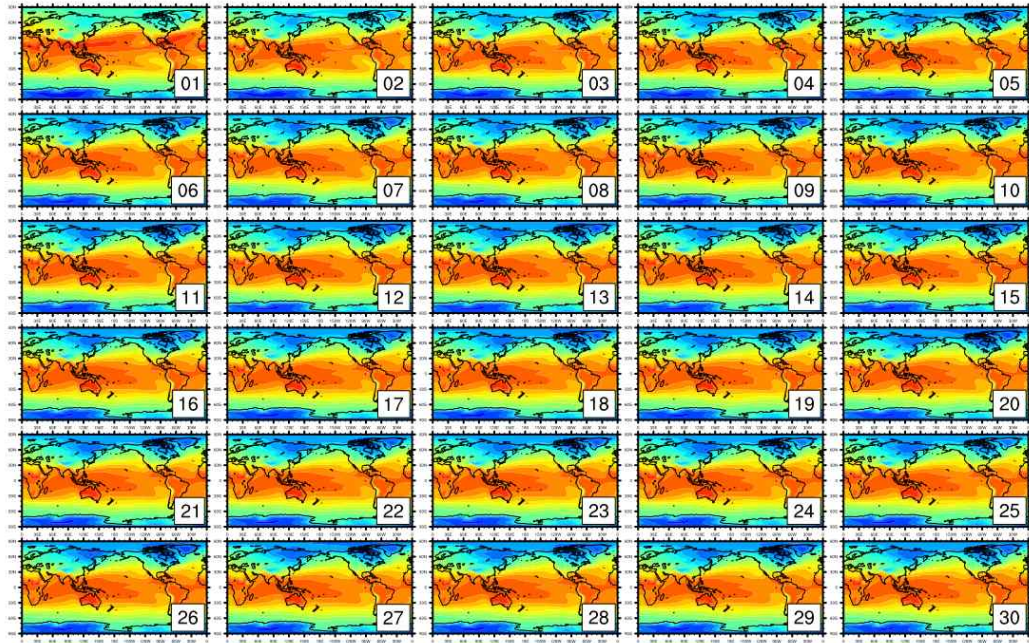
<그림 4-12> 건조대기 이상화조건에서 수행한 북극진동과 성층권돌연승원의 모의 성능 평가
(Wu and Reichler (2018))

- Wu and Reichler (2018) 실험은 재분석자료에서 추출된 3차원 온도프로파일과 Jucker et al. (2014)에서 제안한 전지구 평형시간 규모 (τ)에 따른 Newtonian cooling으로 복사강제력을 모의하는 방식으로, 이전 회차의 실험결과의 온도프로파일과 관측 온도 프로파일을 1:2 비율로 섞는 총 31회 순환 실험을 수행을 제안함.
- Wu and Reichler (2018) 실험 프로토콜에 따라 CESM2의 약 2° 해상도의 FV 역학 코어를 활용하여 총 31회차의 순환실험을 시험 수행함.
- 먼저 각 회차에 따른 heating rate의 분포를 살펴보면 재분석자료에서 나타나는 북서태평양, 북서대서양 지역의 heating과 대륙지역의 cooling 강제력이 강제실험에서도 모의되는 것이 관찰됨 (<그림 4-13>).



<그림 4-13> Wu and Reichler (2018)의 건조대기 이상화조건 실험 프로토콜로 수행한 30회 순환실험에서의 925 hPa heating rate

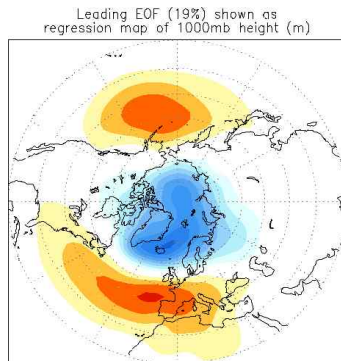
- 이러한 실제관측에 따른 가열율은 다음 차수 순환 실험이 실제 관측과 유사한 분포를 재현하는데에 영향을 미침.
- 925 hPa의 대기온도의 분포 변화를 살펴보면 초기 실험에서 나타나는 북반구 고위도 대륙 및 북극지역에서의 한랭 분포지역이 반복실험이 지속될수록 점차 뚜렷해지는 것이 나타남.
- 태평양 지역의 온도 분포 역시, 아열대 지역의 온난 지역의 회차가 반복될수록 약화되며, 수회차 순환 실험 이후부터는 일정한 형태로 수렴한 것이 확인됨 (<그림 4-14>).



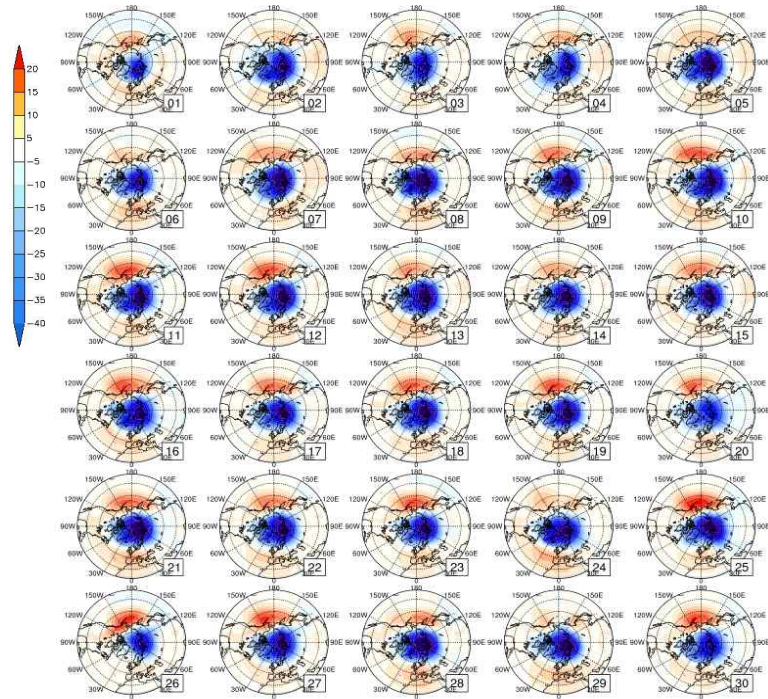
<그림 4-14> Wu and Reichler (2018)의 건조대기 이상화조건 실험 프로토콜로 수행한 30회 순환실험에서의 925 hPa 대기온도

- Wu and Reichler (2018)의 건조대기 이상화조건 실험에서 북반구 주요 변동성인 북극진동 (Arctic Oscillation; AO)의 모의 특성을 살펴본 결과, 관측에서 나타나는 북극 지역의 저기압성 순환과 북태평양, 북동대서양과 유럽에 걸쳐 나타나는 고기압성 순환 패턴이 동일하게 관찰됨 (<그림 4-15>).
- 특히 AO의 대표적인 특성인 북극과 중위도 지역의 반대 위상의 순환장 특성이 반복 실험에서 더욱 뚜렷해지는 것이 나타나며, 북극 지역의 저기압성 순환이 북극해 지역에서 더욱 강하게 나타나는 특성 역시 Wu and Reichler (2018) 프로토콜 실험에서 잘 재현됨 (<그림 4-15>).

(a)



(b)

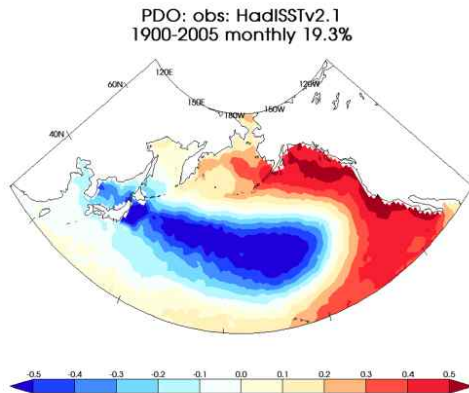


<그림 4-15> (a) 관측에서 나타나는 1000 hPa 지위고도의 첫 번째 EOF.

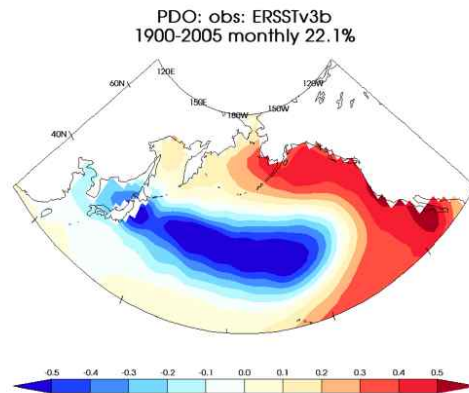
(b) Wu and Reichler (2018)의 건조대기 이상화조건 실험 프로토콜로 수행한 30회 순환실험에서의 해면기압의 첫 번째 EOF 모드

- 실제 관측과 유사한 역학코어 실험의 AO의 정량적인 모의 성능 평가는 관측 자료의 경험적 직교함수로 얻어진 성분들을 모델 실험에서 얻어진 어노말리에 투영하여 주성분을 얻는 방식인 Common Basis Function Analysis (CBF)로 평가할 수 있음.
- 이러한 CBF 방법론은 모델의 변동성 평가에서 전통적 EOF 분석으로 추출되는 모드들이 관측과 다르게 분리되는 경우 등의 문제점을 해결할 수 있으며, 패턴 비교 정확도에 대하여 모델들간 모의 정확도에 대하여 패턴 상관계수나 제공근 평균 오차 등을 통하여 정량적인 결과를 제시할 수 있는 장점이 있음.
- Lee et al. (2019)의 결과에 따르면, 북태평양 해수면온도의 주요 모드인 Pacific Decadal Oscillation의 경우 HadISST 와 ERSST 자료에서는 동일한 변동성을 보이나, 동일한 기간을 재현한 GISS 모델 등에서는 공간분포 특성이 다르게 나타나며, EOF 모드들을 살펴봤을 때 EOF에서 모드가 명확하게 분리되지 않은 것으로 나타남 (<그림 4-16>).

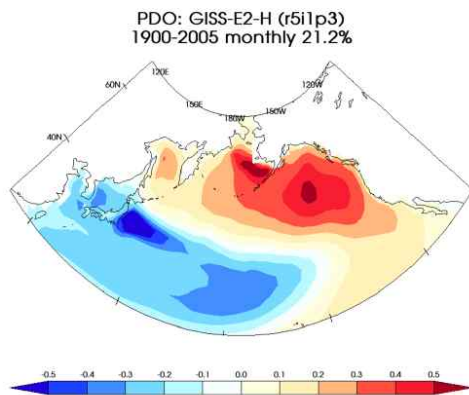
(a) OBS (HadISSTv2.1)



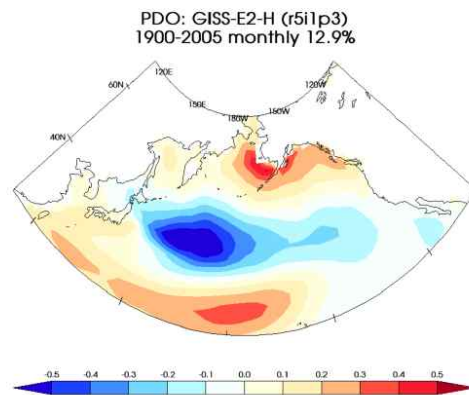
(b) OBS (ERSSTv3b)



(c) EOF1



(d) EOF2



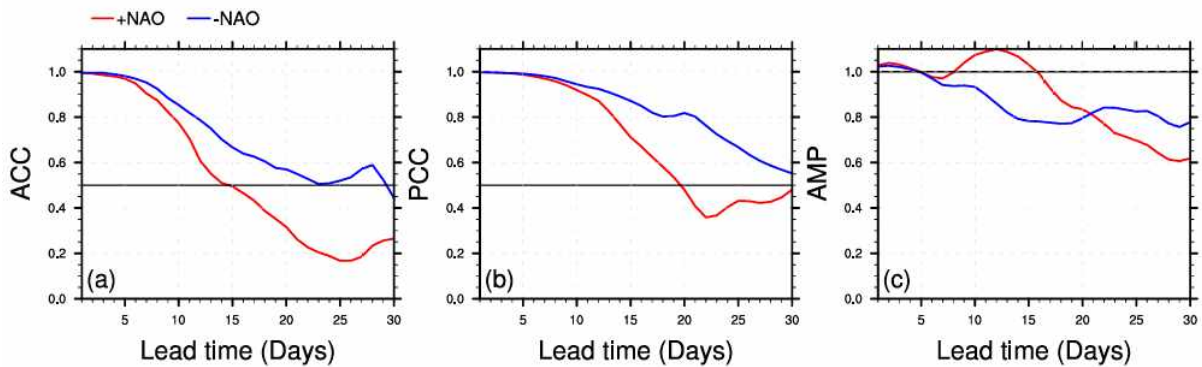
<그림 4-16> 관측자료와 모델자료의 북태평양 지역의 EOF 분석 결과.

Lee et al. (2019)에서 가져옴

- 따라서 EOF 모드를 모델 어노말리에 투영하여 CBF를 얻는 경우, 아래와 같은 장점을 가질 수 있음.
- CBF 접근법은 관측값과 모델 시뮬레이션 간의 패턴 상관계수와 제공된 평균 오차를 계산하여, 모델의 성능을 정량적으로 평가할 수 있으며, 높은 패턴 상관계수와 낮은 RMSE는 모델이 관측된 현상을 잘 재현하고 있음을 시사하며 낮은 패턴 상관계수와 높은 RMSE는 모델이 관측값과 크게 다르며 개선이 필요한 영역을 시사함.
- 한편 CBF로 얻어지는 CBF 주성분 시계열을 분석하여 변동성을 정량적으로 평가할 수 있으며, 이러한 CBF와 CBF 주성분 시계열의 진폭은 아래와 같은 정보를 제공함.
- 패턴 에리: 모델이 관측값의 공간적 분포(예: 기압이나 해수면 온도의 공간 패턴)

를 잘못 재현하는 경우

- 진폭 에러: 모델이 특정 변동성의 강도(예: 진폭)를 잘못 재현하는 경우.
- Lee et al. (2019)의 결과에서는 CBF 분석결과 많은 모델이 패턴 재현에는 성공했지만, 진폭 재현에서 큰 오류를 보이는 경우가 자주 관찰되었으며, 이는 해당 변동성의 모의 개선을 위한 모델의 개선방향을 제시해줄 수 있음.
- 또한 주요 변동성의 패턴과 진폭에러의 시간 변화 분석을 통해 주요 변동성을 정량적으로 평가할 수 있음.
- 이러한 패턴과 진폭을 이용한 분석에서 유사한 방식으로 Kim et al. (2024)의 연구에서는 북대서양 지역의 주요 변동성인 North Atlantic Oscillation (NAO)의 재현 특성에 대하여, 지수의 시계열에 대한 상관계수, 패턴 상관계수를 통한 공간 분포 정확도, 패턴의 진폭의 비율을 통해 예측성을 평가한바 있음.

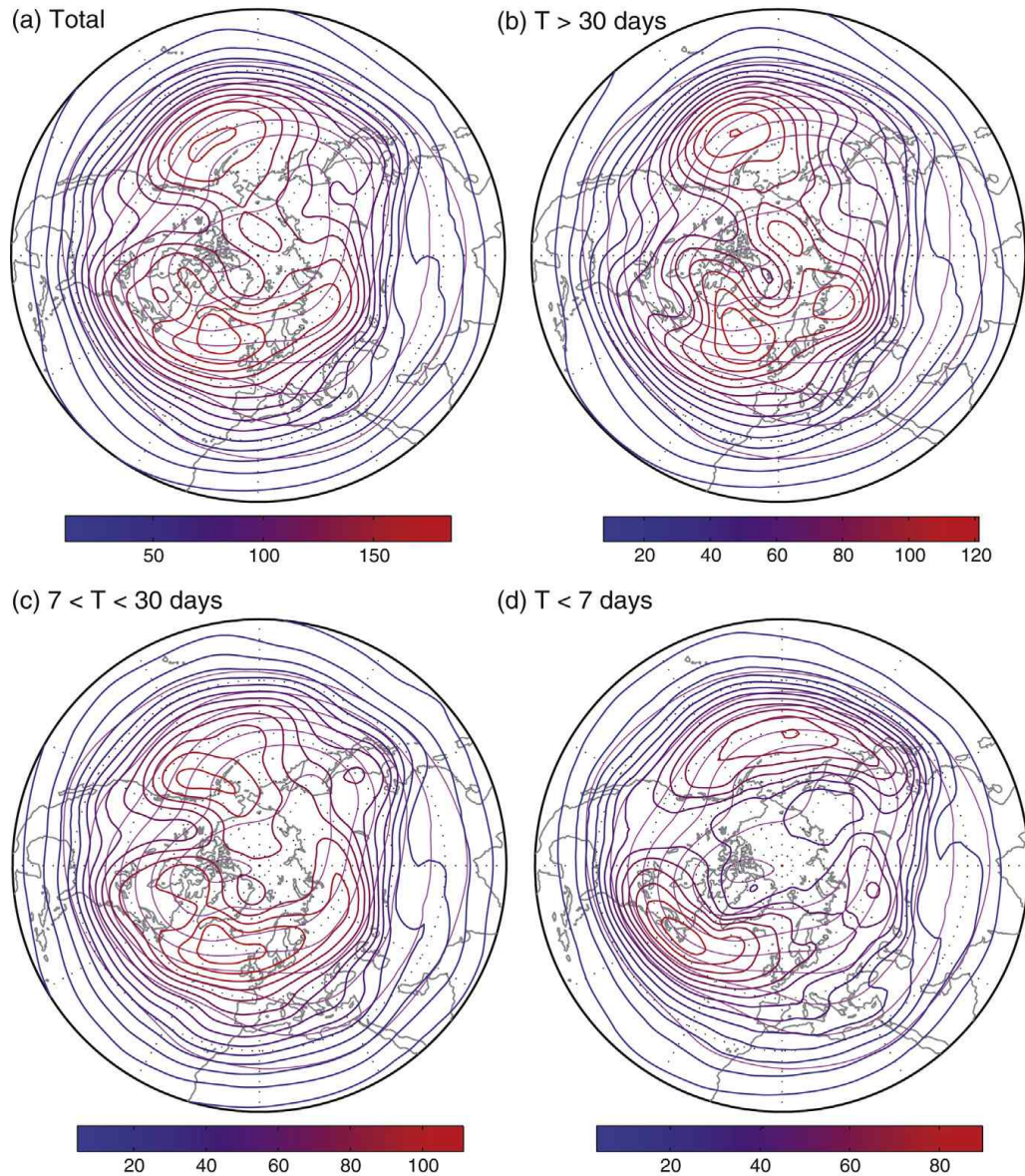


<그림 4-17> ECMWF S2S 재예측 실험과 관측의 NAO의 시계열 상관계수 (ACC), 공간상관계수 (PCC), 진폭 상관계수 (AMP). Kim et al. (2024)에서 가져옴

- 한편 중위도 변동성의 경우 AO와 같은 장주기 모드에 대한 성능 평가 이외에, 경압파동, 행성파동 등에 따른 대기변동 모의성능 평가의 수행이 도움이 될 수 있음.
- 이러한 파동에 따른 대기변동 모의 성능 평가는 지위고도장의 변동성을 시간규모에 따라 분리하고 이러한 변동성의 표준편차 등에 대한 분석을 수행하는 것임.
- 북반구 겨울철의 500 hPa 고도의 변동성을 살펴보면 바다에서 가장 높고 산악 지역에서 가장 낮게 나타남 (<그림 4-18>). 주기별 분석 바다에서의 변동성은 주로 30일보다 긴 주기의 현상에 의해 기여함.
- 7일에서 30일 사이의 중간 주기에서의 변동성은 바다의 풍하층에서 주로 발생함. 한편 7일보다 짧은 주기의 고주파 변동성은 태평양과 대서양의 서쪽 가장자

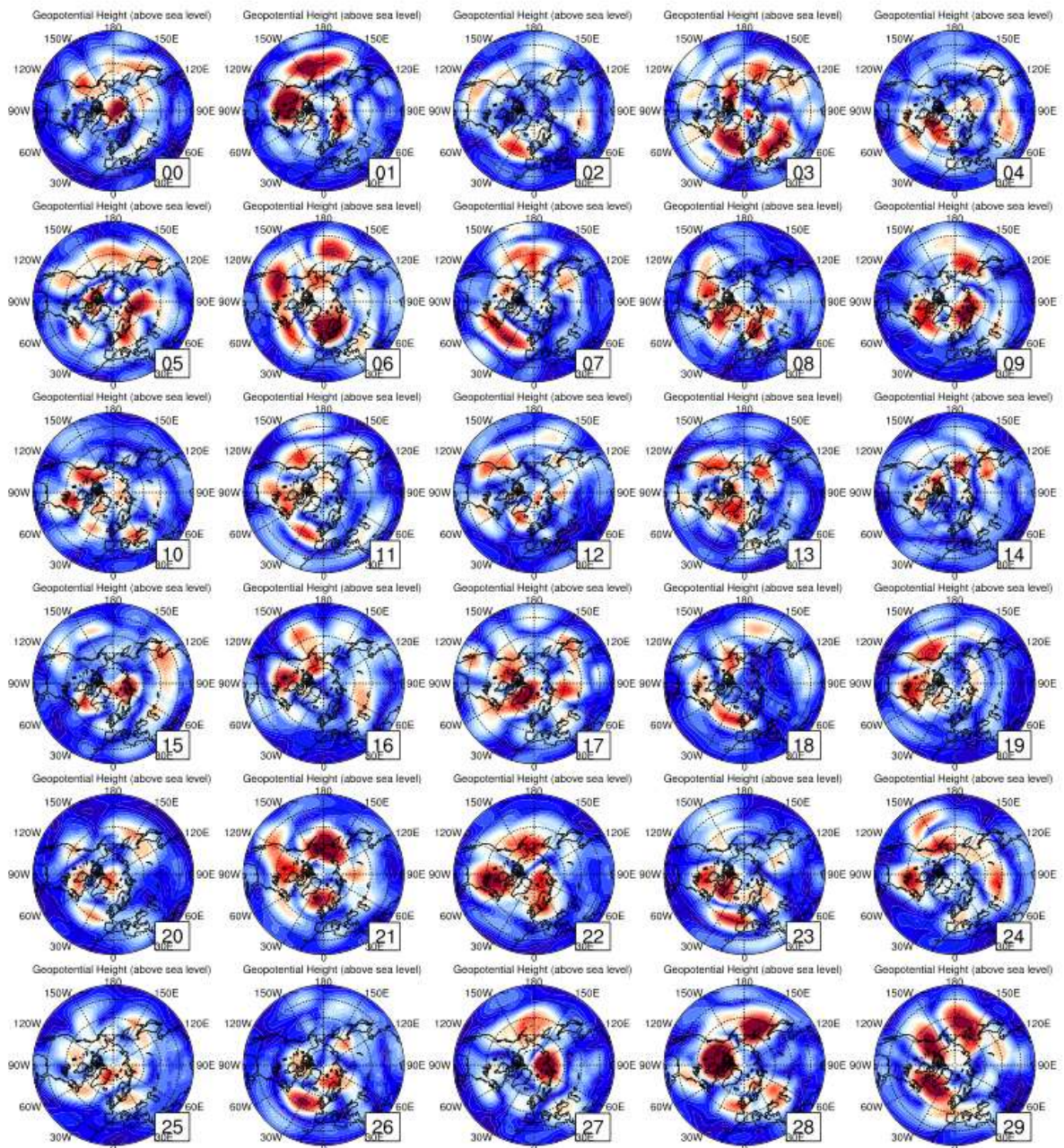
리에서 주로 나타남. 이러한 고주파 에디는 동쪽으로 전파되면서 중간 규모의 에디로 발전하며, 고주파 분산 최대값은 제트기류와 관련이 있음.

- 이와 같은 중위도 대기 변동성의 모습이 실제 지형을 고려한 이상조건 실험에서 어떻게 나타나는 가를 분석하여 중위도 변동성 모의 성능의 관측과의 비교 평가를 수행할 수 있음.



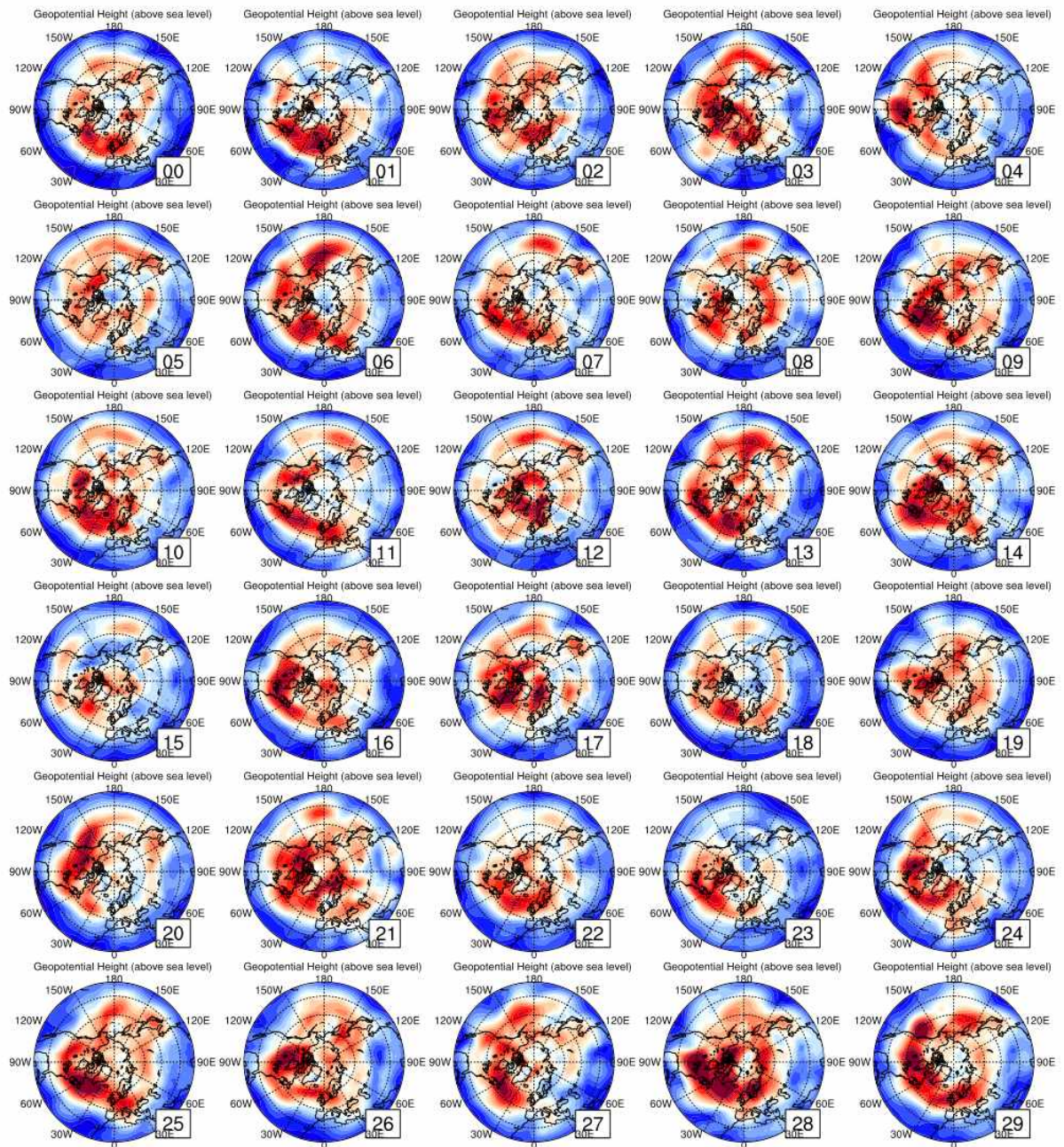
<그림 4-18> 북반구 겨울 반기(10월부터 3월까지) 동안 500 hPa 고도(파란색-빨간색 등고선 및 색상 바)의 표준편차(STD, 미터)의 시간 규모별 변동 특성. 기후값은 얇은 자홍색 등고선 표시. (a) 일일 12Z 데이터의 전체 표준편차, (b) 30일보다 긴 주기의 변동성 표준편차, (c) 7일에서 30일 사이의 주기에 대한 표준편차, (d) 7일보다 짧은 주기의 표준편차. Hartman (2015)에서 가져옴.

- WR18 실험의 북반구 지역 변동성을 마찬가지로 7일 이하 주기, 3일-30일 이하 주기, 30일 이상 주기에 대한 변화를 살펴봄.
- 30일 이상 주기의 경우 여러 실험에서 북태평양 지역과 북대서양, 북유럽 지역에서 강한 변동성이 나타나며 이는 Hartmann (2015)에서 분석된 겨울철 장주기의 변동과 유사함.



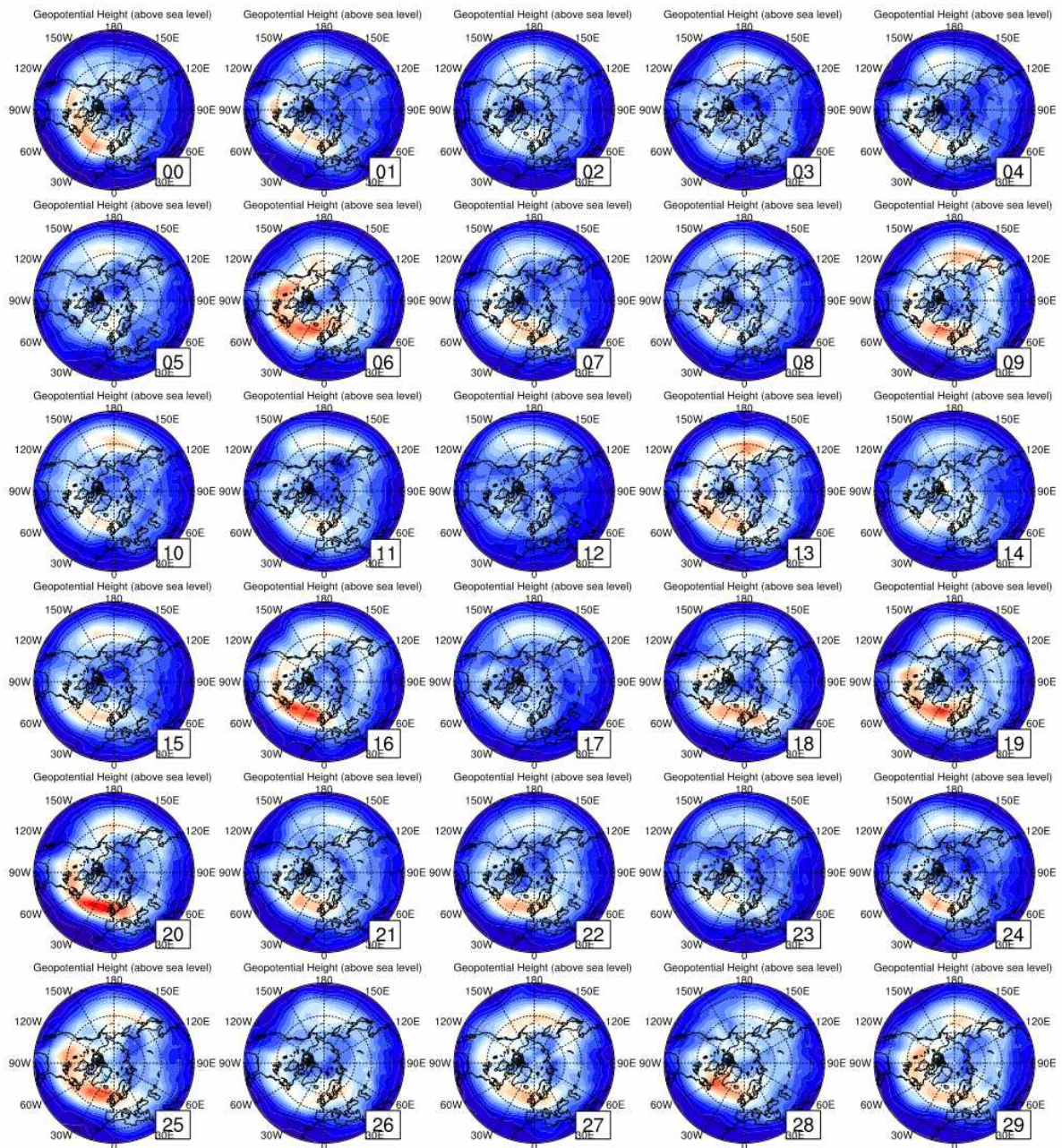
<그림 4-19> WR18 실험의 500 hPa 지위고도의 30일보다 긴 주기의 변동성 표준편차

- 7일-30일 주기의 변동성의 경우 대륙의 서안의 해안 지역에 강한 변동성이 나타나는 관측의 특성이 모델 실험에서도 유사하게 재현됨. 특히 북대서양 지역에 중 고위도 지역에 강하게 나타나는 관측 특성이 모델에서도 유사하게 재현되고 있음.



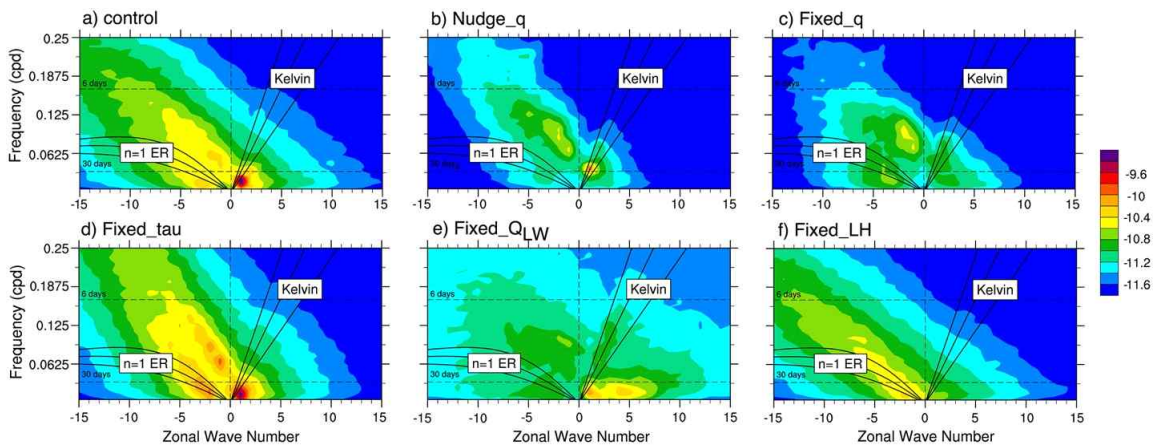
<그림 4-20> WR18 실험의 500 hPa 지위고도의 7일-30일 주기의 변동성 표준편차

- 7일 이하 주기의 경우 관측에서도 가장 약하게 나타나며 주로 대륙의 동안 해안 지역에 큰 변동성이 관찰되는데, WR18 실험에서도 상대적으로 다른 주기의 변동성보다 약한 특성이 모의되며, 여러 실험에서 북미 지역 동안 해안 지역에 상대적으로 변동성이 나타남.



<그림 4-21> WR18 실험의 500 hPa 지위고도의 7일이하 주기의 변동성 표준편차

- Aqua-planet 실험은 역핵코어 및 물리과정의 성능을 종합적으로 평가할 수 있는 이상화조건 실험의 하나로, 다양한 시공간 규모의 성능평가 연구에 활용된 바 있음.
- 특히 열대지역의 주요 변동성의 하나인 매든 줄리안 진동 (Madden-Julian Oscillation; MJO) 현상은 Aqua-planet 실험을 통해 평가할 수 있으며, 이에 따라 다양한 연구에서 Aqua-Planet 실험을 통해 연구가 수행되어 왔음.
- 전지구모형을 이용한 MJO 모의 연구가 시작되었던 1980년대 중반부터 아래의 다양한 연구에서 aquaplanet 실험들이 MJO 연구에 활용되었음 (Tokioka et al. (1988), Shi et al. (2018), Khairoutdinov and Emanuel (2018), Peatman et al. (2018), Huang et al. (2024))
- 특히 Shi et al. (2018)은 다양한 mechanism-denial 실험을 수행하여 MJO의 발달에 중요하다고 제안되어 온 기작들을 테스트함 (<그림 4-22>).

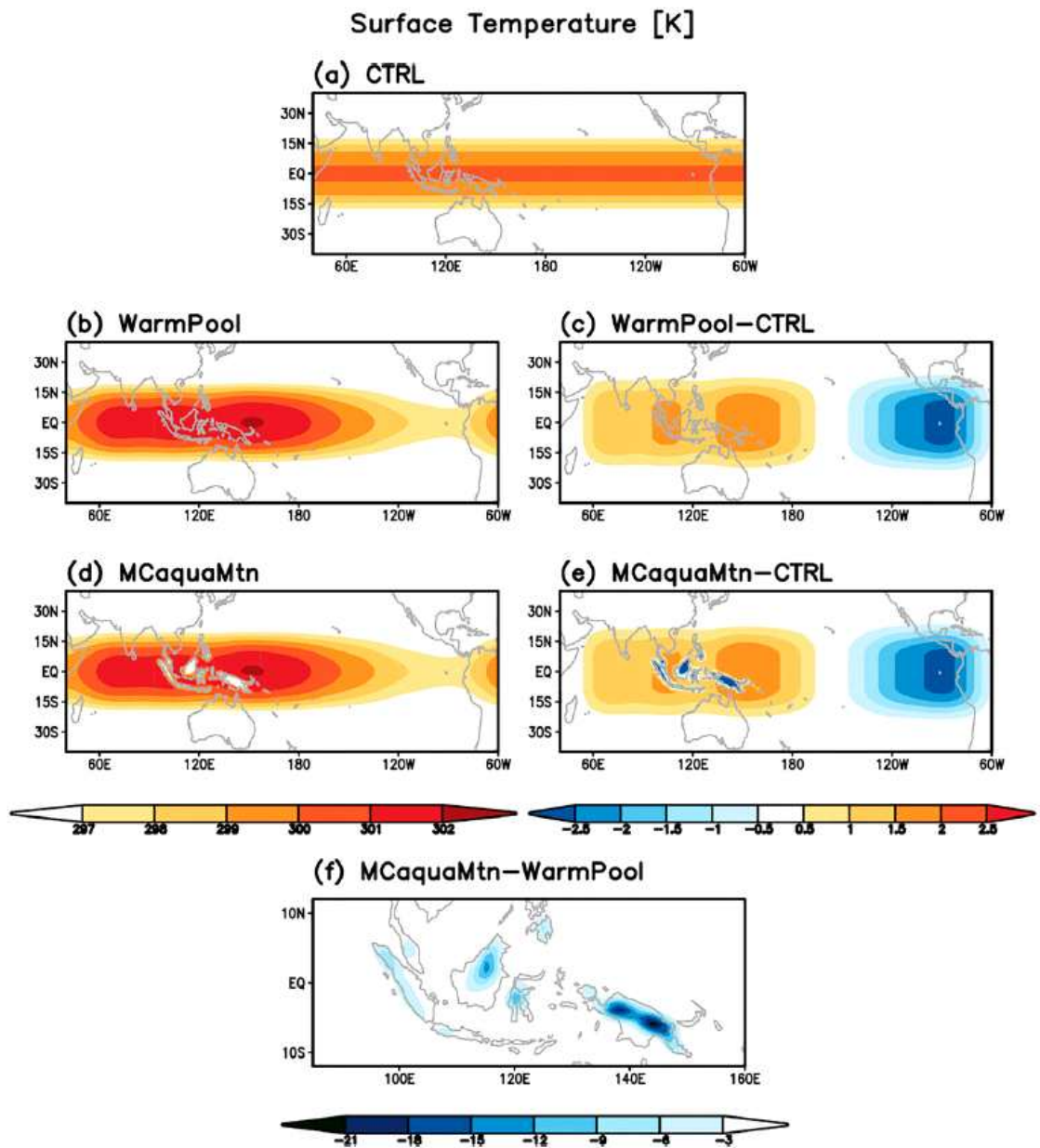


<그림 4-22> 기준실험과 Mechanism-denial 실험에서 얻어진 wavenumber-frequency power spectrum. Shi et al. (2018)에서 가져옴

- 계절내규모부터 기후규모까지 다양한 영향을 미치는 MJO 현상은 기후모델 및 역핵코어의 모의 성능평가를 위해 주요한 성능 평가 지표의 하나로 활용될 수 있음.
- MJO는 인도양과 태평양을 걸쳐 강화와 억제를 반복하는 열대지역의 대류성 구름대가 약 30-60일 주기를 가지며 인도양, 서태평양 및 중앙 태평양의 해안을 따라 시속 15-20km로 동진(eastward propagation)하는 현상임. 그러나, 세계 현업 예측 시스템은 아직까지 이 현상을 이론적 예측성만큼 예측하지 못하며, 이들의 공통적인 MJO모의 오차는 다음과 같음: (i) 예측된 MJO의 강도가 관측에 비해 약하게 모의되는 특성, (ii) 예측된 MJO의 동진 속도가 관측에 비해 느린 특성, (iii)

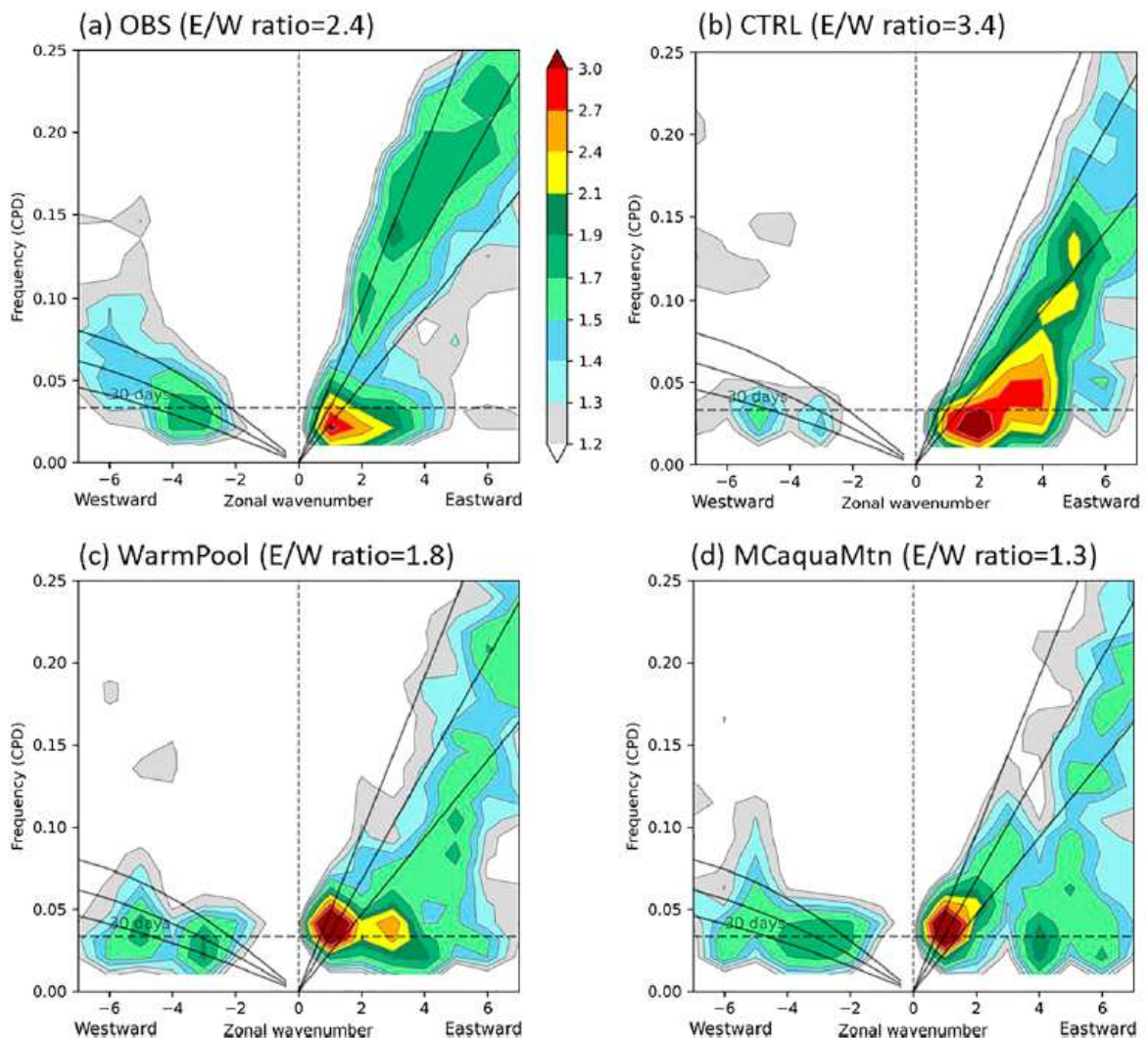
해양성대륙(Maritime Continent, MC) 예측 장벽의 존재

- Aqua-planet 실험을 통해 이러한 오차의 원인을 이해하고 예측모델을 개선, 예측성을 향상시키는 연구가 수행되어 왔으며, 특히 최근 MC 예측장벽이 MJO 예측에 미치는 영향에 대한 연구가 수행된 바 있음 (Kim and Benedict 2023)
- 특히 Kim and Benedict (2023)의 연구는 NCAR CAM6를 이용한 Aqua-Planet 실험을 수행하고 해양성 대륙 장벽과 워풀 확장을 처방한 실험을 수행하여 MJO의 역학 및 변화 메커니즘을 살펴본 바 있음.



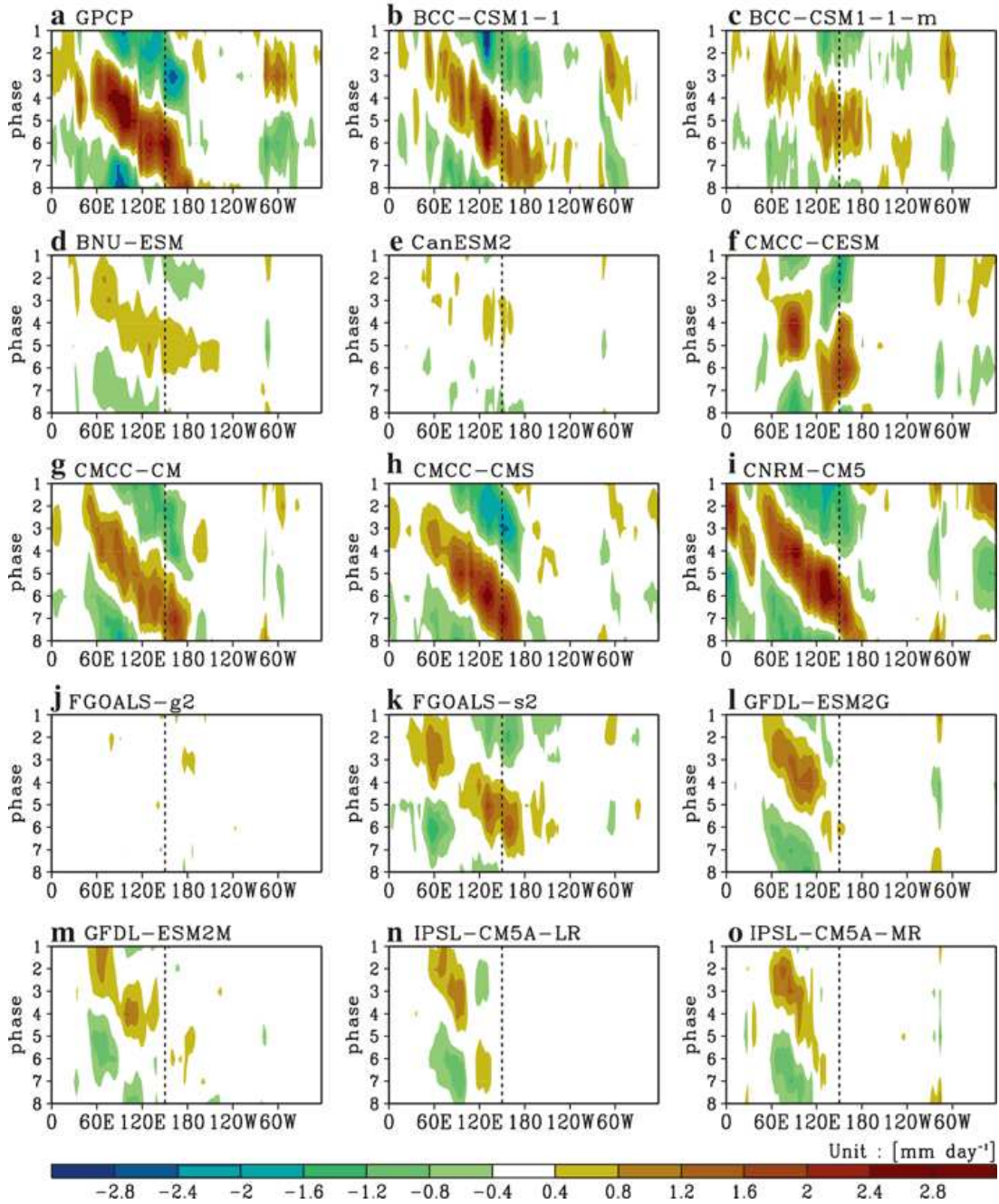
<그림 4-23> MJO 예측성 평가를 위한 Aqua-planet 실험에 사용된 해수면온도 분포.
Kim and Benedict (2023)에서 가져옴

- 실험별 해수면조건 처방 방식은 다음과 같음
- CTRL(Control): 대칭적 SST를 한 기준실험.
- WarmPool: 열대 인도-서태평양 지역의 SST를 따르는 비대칭적 온도 분포를 적용하여 대기 상태와 MJO 변동성 간의 상관성을 실험
- MCaquaMtn: 해양-육지 경계면 효과를 탐구하기 위해 MC(해양대륙) 산악 지형을 모사한 Aqua-Mountain 구성
- MC(해양대륙) 지형 효과 실험: MCaquaMtn에서는 해수면 온도를 지형의 고도에 따라 감소시키는 랩스율(6.5K/km)을 적용하여 MC 지형이 MJO 예측 및 전파에 미치는 영향을 분석



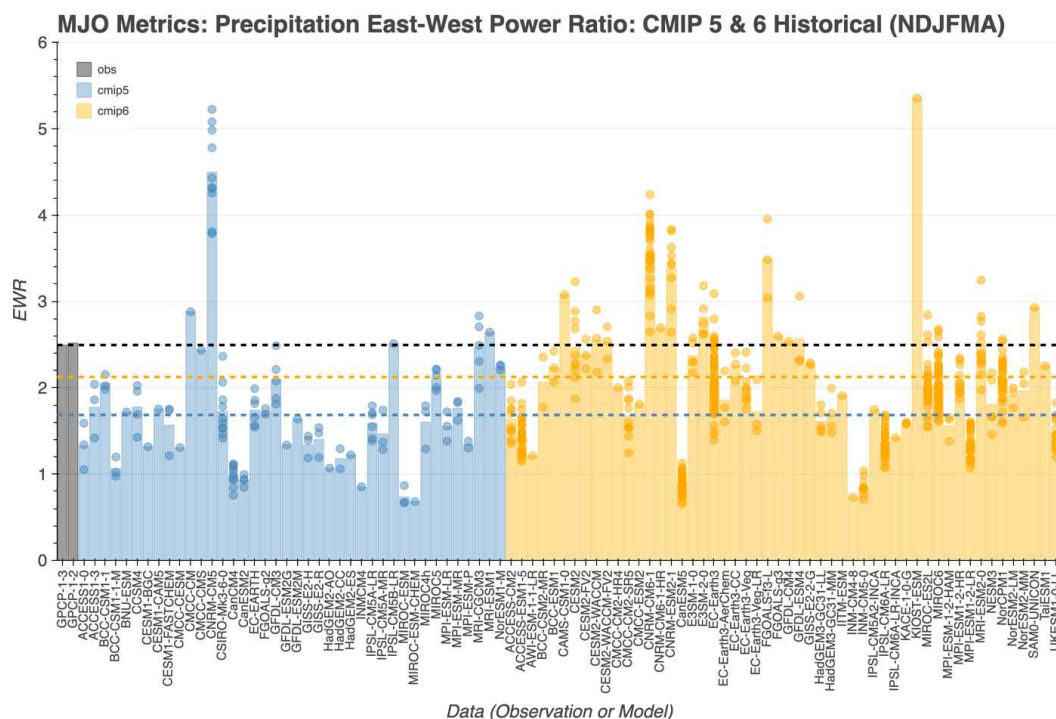
<그림 4-24> 다양한 해수면온도 조건에 따른 Aqua-Planet 실험에서 나타난 MJO 모의 성능.
Kim and Benedict (2023)에서 가져옴

- 실험 결과 Aqua-planet에서도 관측과 유사한 wavenumber-frequency 관계를 확인할 수 있으며, 해수면온도 처방에 따른 특성 변화를 확인할 수 있음.
- 한편 기후모델의 MJO의 모의 성능은 다양한 방식으로 평가될 수 있으며 이를 위한 다양한 도구가 개발된 바 있음.



<그림 4-25> MJO Simulation Diagnostics의 lag-correlation diagnostic을 (a) 관측과 (b-o) CMIP5 모형에 적용한 결과. Ahn et al. (2017)에서 가져옴.

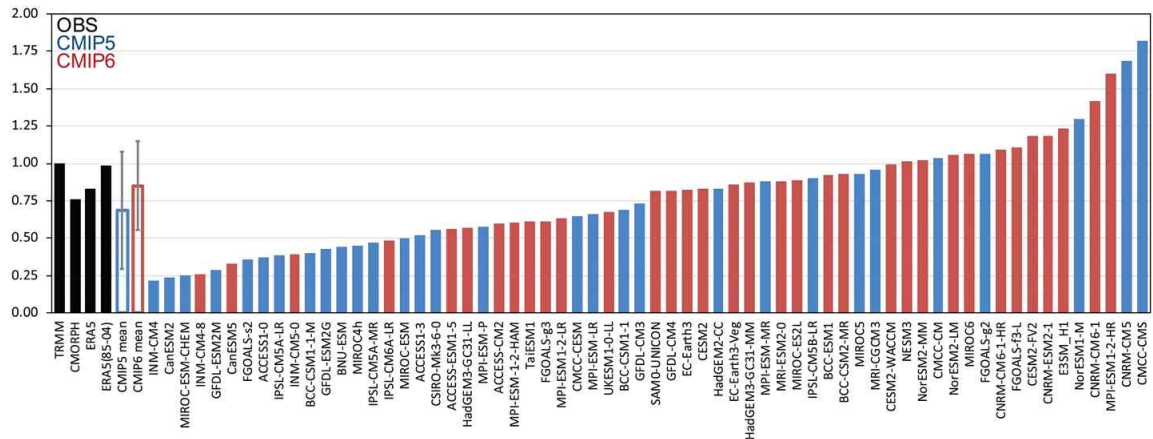
- Waliser et al. (2009)에서 기후모형의 MJO 모의성능을 체계적으로 평가하기 위한 진단기법 - CLIVAR MJO Simulation Diagnostics - 을 개발하여 제안함. Kim et al. (2009)에서 처음으로 그 기법들을 8개의 모형 자료에 적용. MJO Simulation Diagnostics는 lag-correlation 분석 (<그림 4-25>), wavenumber-frequency power spectrum 분석, combined EOF분석 등의 통계적 기법을 적용하여 모형자료에서 관측의 MJO와 유사한 특징을 가진 계절내 변동성이 존재하는지 알아내는 것을 목표로 함. MJO Simulation Diagnostics의 최초 버전은 Fortran과 GrADS로 개발이 되었고 NCAR에서 NCL로 같은 분석을 할 수 있는 코드를 개발하였음 (<https://www.ncl.ucar.edu/Applications/mjoclivar.shtml>).



<그림 4-26> 관측자료(회색)와 CMIP5(파란색), CMIP6(주황색) 모형자료에 PCMDI MJO Metric (East-West Power Ratio)을 적용한 결과. 각 막대그래프는 각 모형을 나타냄.

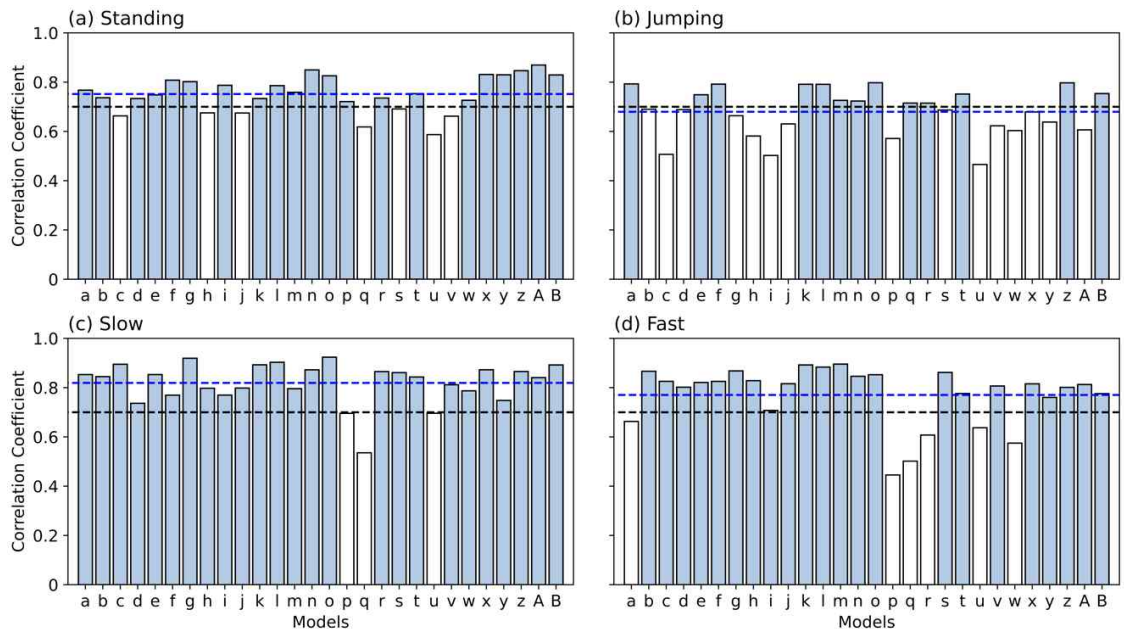
- 또한 MJO Simulation Diagnostics 에 포함된 wavenumber-frequency power spectrum 분석 결과에서 파수 1-3, 주기 30-60일을 가지고 동진하는 성분의 power를 같은 파수와 주기를 가지고 서진하는 성분의 power로 나눈 East-West Power Ratio를 분석하는 코드가 Lawrence Livermore National Laboratory의 PCMDI 에서 개발한 모형 성능 검증 package에 포함되었음

(<https://pcmdi.llnl.gov/metrics/mjo/>, <그림 4-23>).



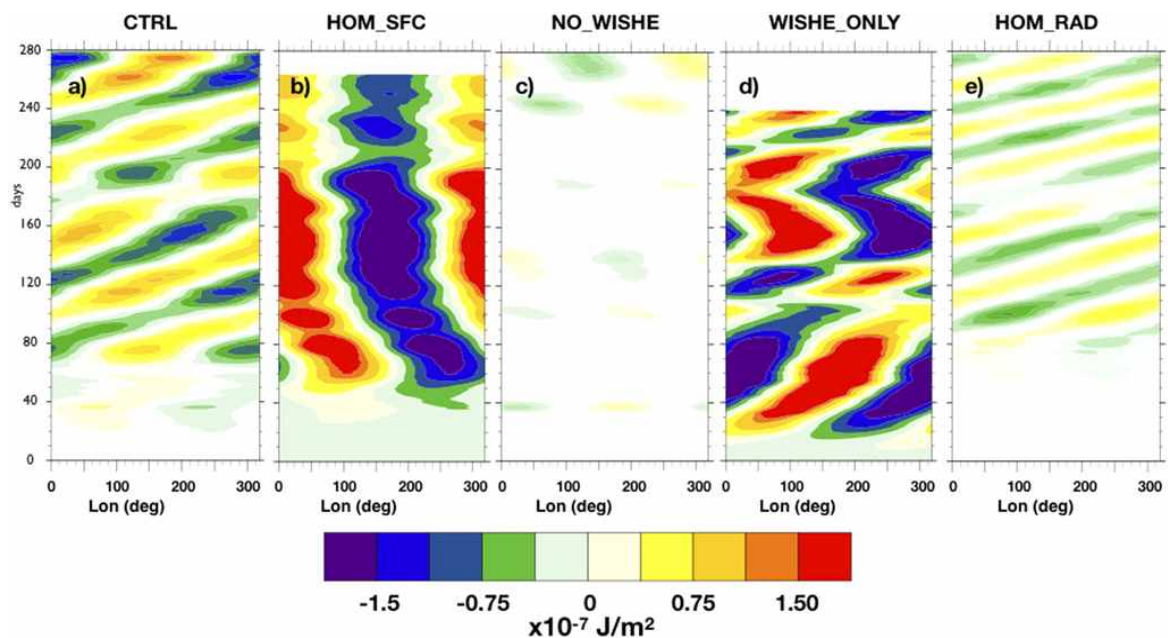
<그림 4-27> Ahn et al. (2020)의 MC propagation metric을 관측(검정색)와 CMIP5(파란색), CMIP6(빨간색) 모형자료에 적용한 결과

- Ahn et al. (2020)은 모형에서 MJO를 모의하는데 있어 MJO가 Maritime Continent 지역을 지나갈 때 과도하게 약해지는 경향을 가짐에 착안해 특별히 Maritime Continent 지역에서의 MJO 동진을 분석하는 기법을 개발하여 CMIP5 와 CMIP6 모형 자료에 적용함.



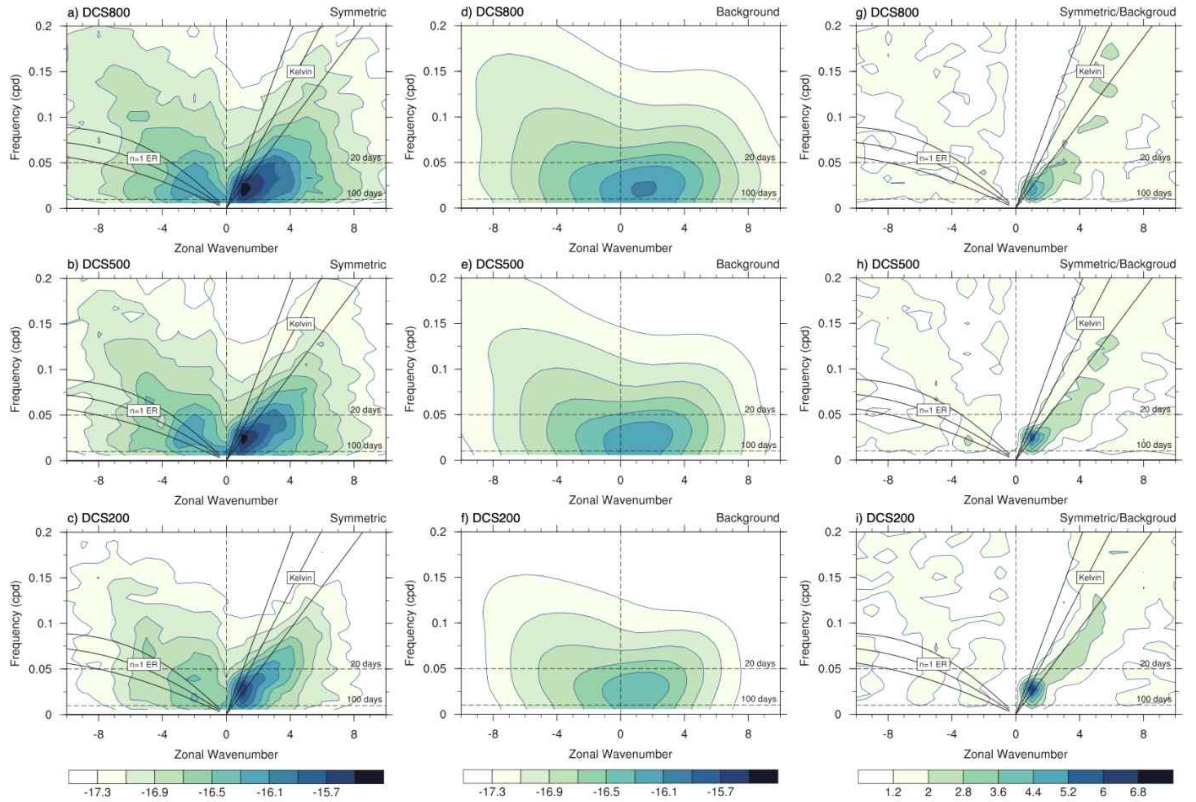
<그림 4-28> CMIP6 모형에서 4개의 MJO 타입(Standing, Jumping, Slow, Fast)의 모의성능. 강수자료를 사용하여 각 MJO타입에 대한 Hovmoeller diagram을 만들고 관측결과와의 pattern correlation을 구해 막대그래프로 나타냄. Back et al. (2024)에서 가져옴.

- 최근 관측에서 MJO의 전파 특징의 다양성을 반영하여 MJO를 4개의 타입으로 나누는 연구가 발표되었고 (Wang et al. 2019), Back et al. (2024)는 모형들이 관측에서처럼 4개의 MJO 타입을 잘 구분하여 나타내는지를 평가할 수 있는 진단 기법을 개발하여 CMIP6 모형 자료에 적용된 바 있음 (<그림 4-28>).
- Khairoutdinov and Emanuel(2018)는 전구에 동일한 해수면온도를 처방한 복사-대류평형실험을 수행하여 구름-복사상호작용이 MJO의 주요한 유지기작임을 확인함.



<그림 4-29> (a) 기준실험과(b-e) mechanism-denial 실험결과에서 얻어진 OLR anomaly의Hovmoeller diagram. Khairoutdinov and Emanuel (2018)에서 가져옴.

- Huang et al. (2024)는 구름미세물리과정 파라미터를 변화시키는 실험을 aquaplanet에서 수행하여 구름-복사상호작용이 MJO에 직접 영향을 미치는 것이 아니라 평균장을 먼저바꾸고, 바뀐 평균장이 MJO의 유지기작에 영향을 미침을 보임.

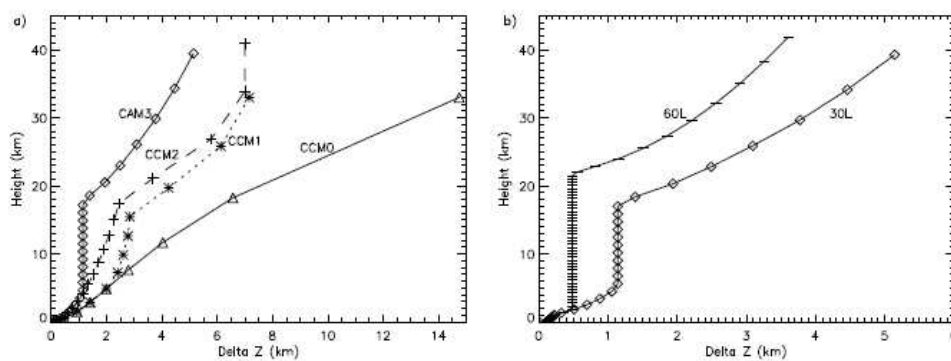


<그림 4-30> 구름미세물리과정 파라미터를 조정하여 수행한 aquaplanet 실험들의 강수장을 분석 결과.(왼쪽) wavenumber-frequency power spectrum, (가운데) background power spectrum, (오른쪽) normalized power spectrum. Huang et al. (2024)에서 가져옴.

나. 수평 및 연직해상도에 따른 수치 안정도 분석

- 최근 기후모형들은 성층권 과정의 계절내-계절 규모의 예측에서의 중요성이 강조됨에 따라 연직 격자의 확장과 적정해상도의 선정에 관한 다양한 연구가 수행되고 있으며 (<그림 4-31>), 또한 가용 연산자원의 증가에 따른 활용 가능한 수평해상도의 성능 및 특성 평가 역시 진행되고 있음.

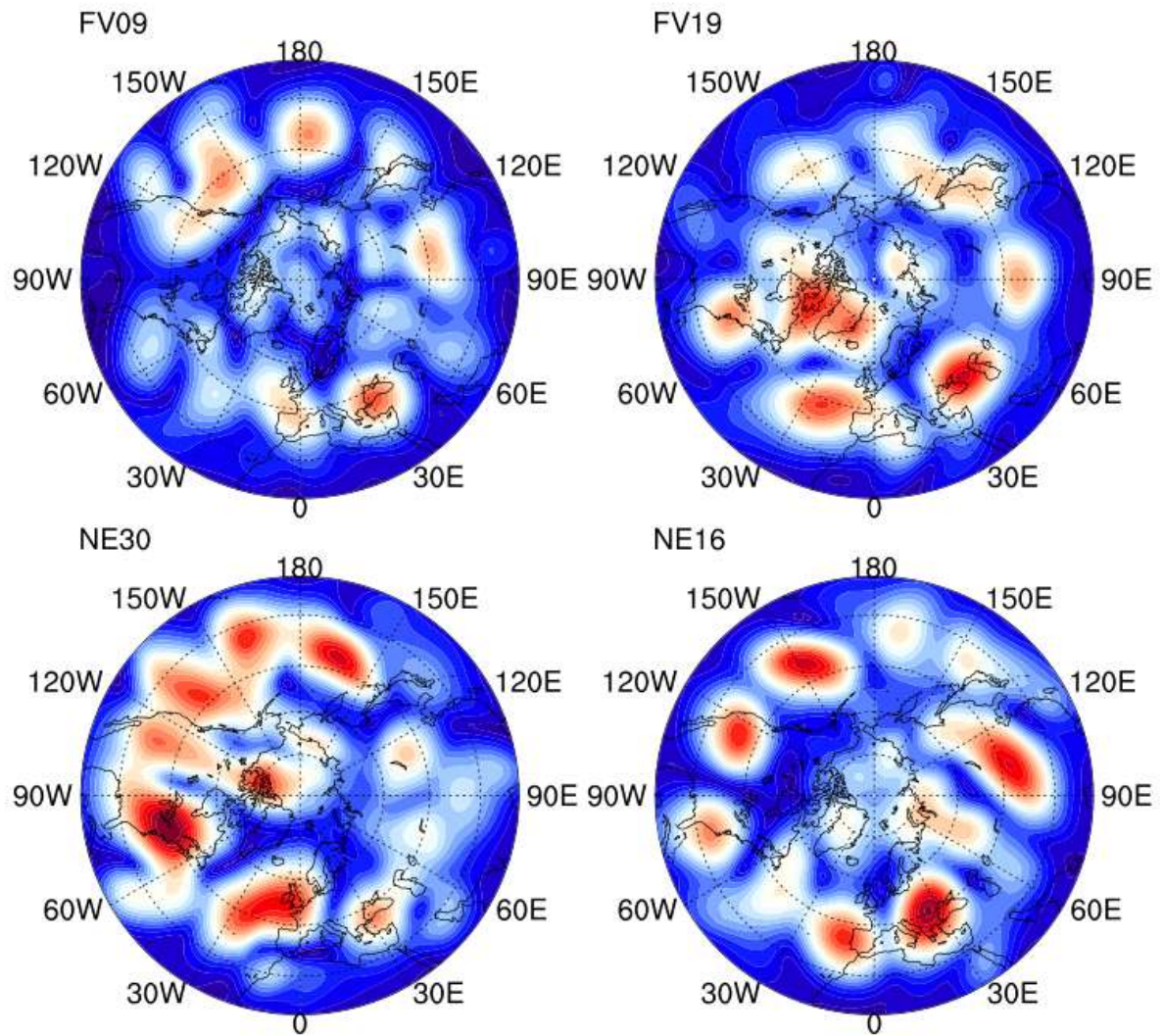
○



<그림 4-31> NCAR GCM의 연직 격자 체계의 변화와 CAM5에서의 두 주요 격자 체계 (Richter et al. (2014)).

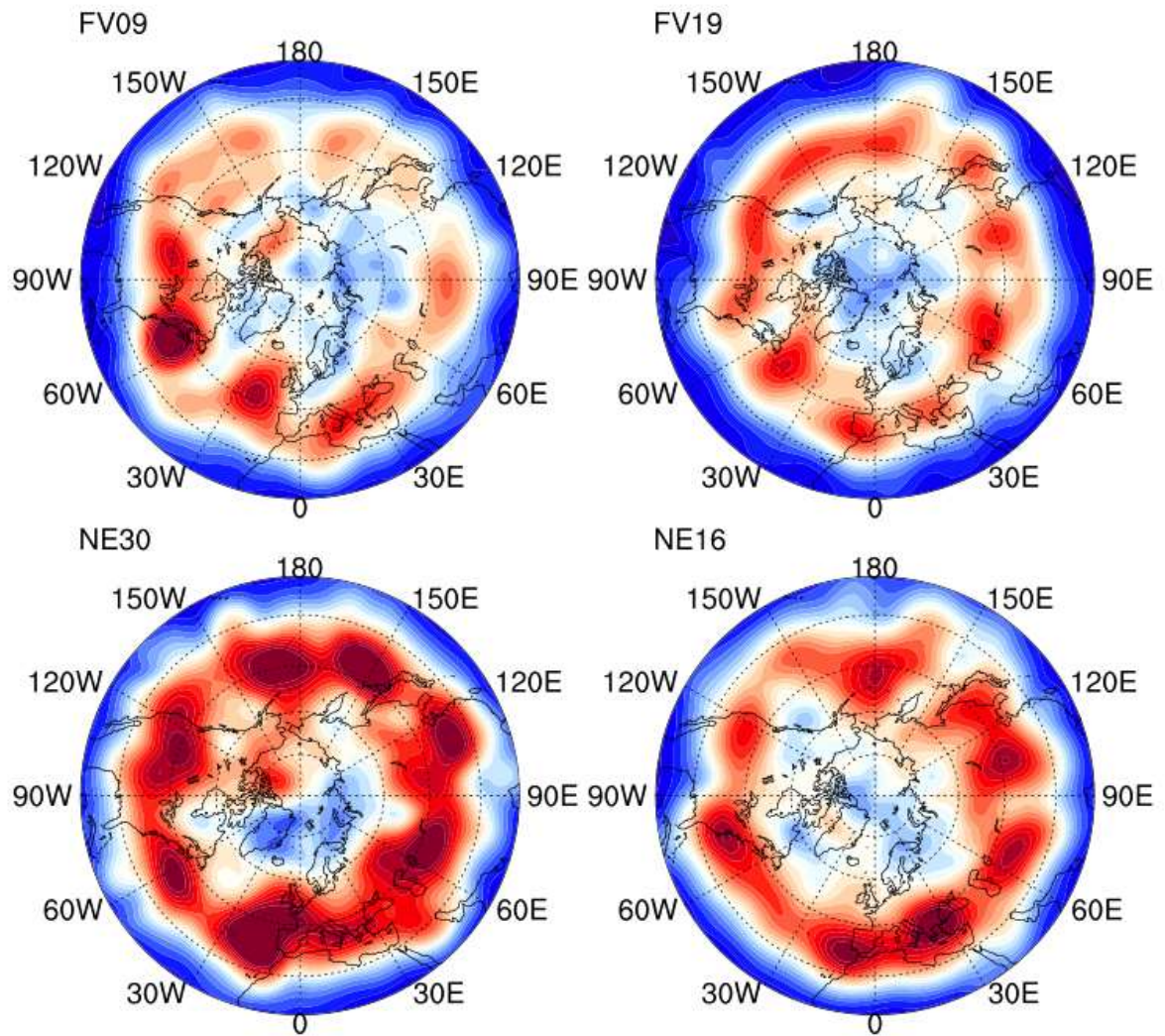
- 다양한 수평 및 연직해상도에 따른 여러 역학코어별 성능 평가에는 실제 예측에 영향을 미치는 AO, ENSO 등 다양한 변동성의 모의 성능에 기반한 Common Basis Function Analysis 등의 평가방안들이 활용될 수 있으나 (Lee et al., 2019; <그림 4-32>), 이러한 실제 변동성에 기반한 평가 방법은 각 과정의 모의에 물리과정이 크게 기여하기 때문에 역학코어만의 비교에 적합하지 않음.

- CESM1을 이용한 FV코어, SE 코어의 2도, 1도 해상도의 Held and Suarez (HS94) 실험을 수행하고 500 hPa 지위고도 일평균 변동의 주기별 분석을 수행하여 역학코어별 해상도에 따른 특성을 살펴봄
- 앞서 북극진동에서 살펴본 변동 주기별 분석 방안을 HS94 방식의 실험의 1000일-1100일 실험결과에 적용하여 역학코어별 주기별 특성을 비교 분석하였음.
- 30일 이상의 장주기 변동의 경우 SE 코어가 FV 코어에 비하여 상대적으로 강한 변동성을 보임. 이러한 변동성의 강도는 앞서 WR18 실험과 관측에서 살펴본 동일 주기의 변동성에 비교하여 살펴보면 SE 코어가 모의하는 강도가 실제 지형조건에 따른 실험결과와 더 유사한 것으로 판단됨.



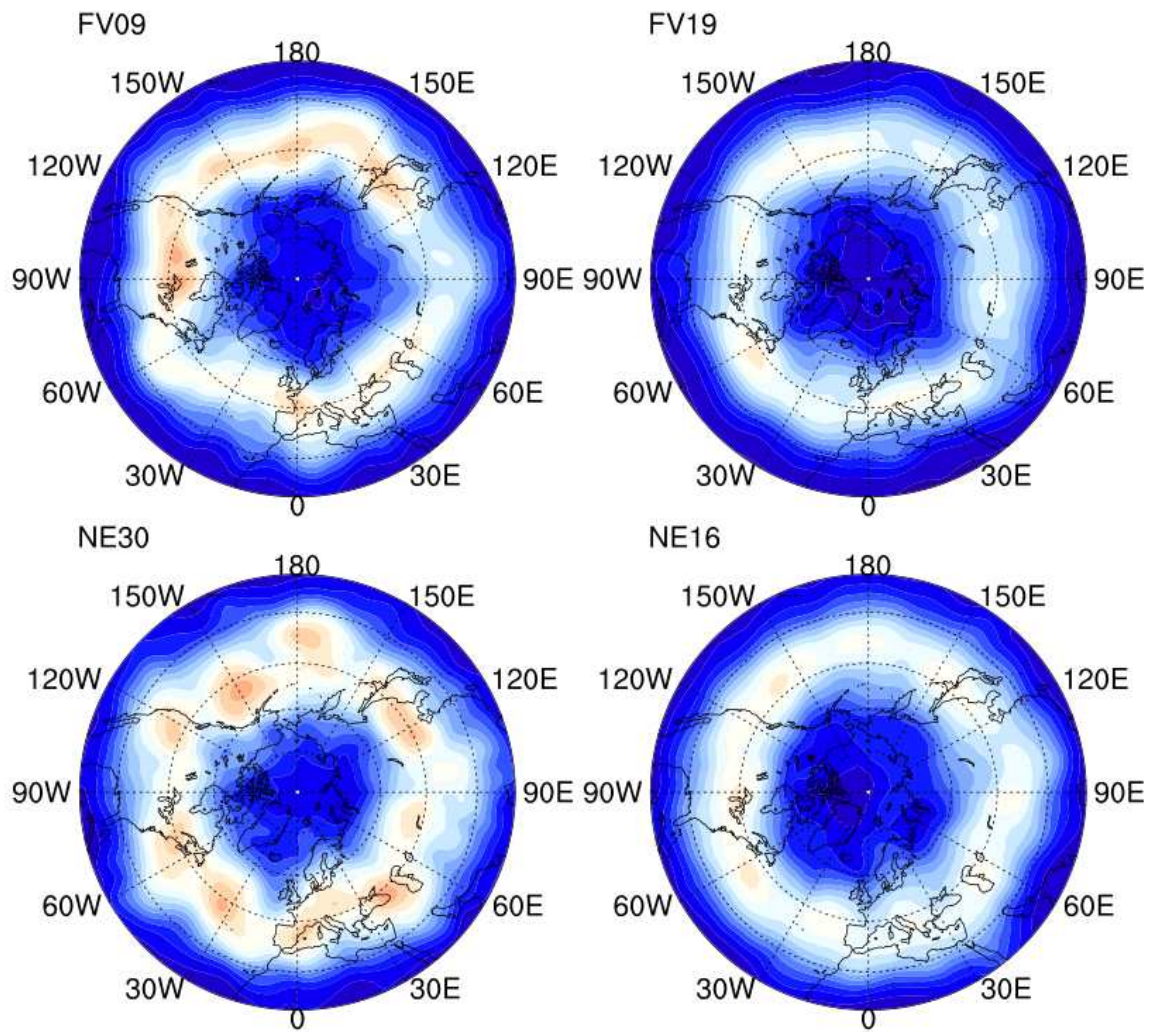
<그림 4-33> FV 1도 (FV09), FV 2도 (FV19), SE 1도 (NE30), SE 2도 (NE16)의 역학코어 및 해상도로 수행된 HS94 실험의 500 hPa 지위고도의 일평균 변동의 30일 이상 주기의 표준편차 분포

- 7일-30일의 주기 변동의 경우 30일 이상 주기와 마찬가지로 SE 코어가 FV 코어에 비하여 상대적으로 강한 변동성을 보임. 또한 이러한 변동성의 강도는 앞서 WR18 실험과 관측에서 살펴본 동일 주기의 변동성에 비교하였을 때 가장 강하게 나타나는 변동성을 보이는 특성은 일관적으로 나타남.
- FV 코어의 경우 낮은 해상도의 실험에서 조금 더 강한 중위도의 변동성이 나타나 전체적으로는 큰 차이를 보이지 않는데 반하여 SE 코어의 경우 고해상도에서 조금 더 강한 변동성이 관찰됨.



<그림 4-34> FV 1도 (FV09), FV 2도 (FV19), SE 1도 (NE30), SE 2도 (NE16)의 역학코어 및 해상도로 수행된 HS94 실험의 500 hPa 지위고도의 일평균 변동의 7일-30일 주기의 표준편차 분포

- 7일 이하의 단주기 변동의 경우 두 코어가 유사한 변동성을 보이며, 또한 이러한 변동성의 강도는 앞서 WR18 실험과 관측에서 살펴본 동일 주기의 변동성에 비교하였을 때 가장 약하게 나타나는 변동성을 보이는 특성은 일관적으로 관찰됨.
- 두 코어 모두 고해상도 실험인 FV09와 NE30에서 상대적으로 강한 변동성을 보이며, 저해상도도 실험인 FV19, NE16에서는 상대적으로 변동성이 약해짐. WR18 실험과 비교하였을 때 모든 실험에서 상대적으로 낮은 변동성이 나타남.
- 이러한 결과는 중위도 지역의 극한 기상현상 등의 모의에서는 고해상도 실험이 발생빈도 및 강도가 더 강하게 나타날 수 있음을 시사함.



<그림 4-35> FV 1도 (FV09), FV 2도 (FV19), SE 1도 (NE30), SE 2도 (NE16)의 역학코어 및 해상도로 수행된 HS94 실험의 500 hPa 지위고도의 일평균 변동의 7일-30일 주기의 표준편차 분포

5. 결론

◆ 기후 모의 예측성 향상을 위한 역학코어 선진기술 조사

- NGGPS 프로젝트 보고서에 의하면 ECMWF의 IFS, FV3 순으로 좋은 계산 효율성을 보이는 것으로 나타났고, NEPTUNE과 MPAS는 현업에서 사용하기에는 많은 계산 자원이 필요한 것으로 나타남. 이 프로젝트에 의해 NOAA는 FV3모형을 현업 활용에 적합한 모형으로 선택함.
- 역학 코어에 따라 성층권에 대한 기후 현상을 다르게 모의한 것을 확인했으며, 특히 유한체적법 기반 모델이 분광요소법 기반 모델보다 열대 지역에서 더 큰 age of air 값을 모의해 결과적으로 물질 수송을 다르게 모의할 가능성이 있음을 밝힘.
- 유한체적법과 분광요소법 기반 모델이 북극 기후 모의를 다르게 모의하는 것을 확인함. 각 역학코어가 가지고 있는 수치적 특성이 물리적 과정을 다르게 계산하게 되고, 결과적으로 북극의 온도를 다르게 모의하게 되며 중위도 기후에도 유의미한 변화를 줄 수 있음을 밝힘.

◆ 현업 기후모델의 역학코어 성능 분석

- 장기 적분을 안정적이고 계산 시간을 단축하여 수행하기 위해 기후 모델의 개선이 필요함. 역학코어 계산 효율성 분석을 위해 시뮬레이션 세부 프로파일을 분석하고, 계산 시간을 단축할 수 있는 방안을 제시함. 이를 통해 계산 시간 감소 효과를 확인함.
- 기존 역학코어 대신 정역학코어를 사용하여 계산 시간을 감소시킬 수 있음을 확인함. 정역학코어 사용 시, 비정역학 지배방정식의 일부 항을 제거할 수 있음. 이를 통해 이상 실험 (Held-Suarez with real orography)에서 20.5%, 실 사례 실험 (Real Forecast)에서 5.6%의 계산 시간 감소가 나타났음.

- 확산과정에서 라플라시안 연산자의 구조를 분석함. 라플라시안 연산자는 행렬 연산자로서, 행렬 희소성이 0인 연산자임. 영향을 미치지 않는 포인트를 0으로 근사하는 방법을 적용하여, 이상 실험에서 1.8%, 실사례 실험에서 0.1%의 계산 부하 경감 효과를 확인함.
- 또한, 실사례 실험에서 기존 추적물질 (Tracer)의 확산과정이 과도하게 시간이 많이 소모되는 문제를 발견하고, 시분할 확산방안을 도입함. 이 방법은 34.2%의 추가 계산 시간 감소를 달성함.
- 향후 기후모델을 ESM으로 확장할 경우, 추적물질의 증가로 이류 계산 부담이 예상됨. 이에 대한 개선책을 준비할 필요가 있음.

◆ 현업 기후모델의 역학코어 개선 방안 도출

- CESM의 분광요소법 역학코어와 유한체적법 역학코어의 건조대기 이상화조건 프로토콜하의 실험을 수행한 결과, 적은 CPU 개수의 활용시의 계산 효율은 유한체적법 역학코어에서 높게 나타났으나, CPU 사용 증가시 분광요소법 역학코어에서 계산효율의 증가가 더 높게 나타남.
- 분광요소법 역학코어와 유한체적법 역학코어를 활용한 동일 전체물리과정 조건하의 기후실험 결과에서도 동일한 병렬확장 특성이 관찰되며, 물리 및 역학과정의 계산효율 분석 결과 역학코어의 선택이 전체물리과정을 활용한 기후실험에도 큰 영향을 미치는 것으로 확인됨.
- 전지구 규모의 건조대기 이상화조건 실험, 기후규모 실험에서 나타나는 평균 분포를 살펴본 결과 북극 지역 하부대류권에서 나타나는 분광요소법 역학코어의 온난특성이 동일하게 관찰됨.
- 이러한 이상화조건 및 기후규모 실험에서 나타는 북극 지역의 기후 모의 특성은 계절예측실험에서도 동일하게 관찰되나 평균 모의 편차는 이상상관계수로 평가한 경년변동의 예측성능에는 큰 영향이 없는 것으로 판단됨.

참 고 문 헌

- Ahn, M.-S., D. Kim, K. R. Sperber, I.-S. Kang, E. Maloney, D. Waliser, H. Hendon, 2017: MJO simulation in CMIP5 climate models: MJO skill metrics and process-oriented diagnosis. *Climate Dynamics*, 49, 4023-4045.
- Ahn, M.-S., D. Kim, D. Kang, J. Lee, K. R. Sperber, P. J. Glecker, X. Jiang, Y.-G. Ham, and H. Kim, 2020: MJO Propagation across the Maritime Continent: Are CMIP6 Models Better than CMIP5 Models? *Geophysical Research Letters*. 47, e2020GL087250.
- Back, S.-Y., D. Kim, and S.-W. Son, 2024: MJO diversity in CMIP6 models, *Journal of Climate*, 37, 4835-4850.
- Cannon, F., Carvalho, L. M., Jones, C., Norris, J., Bookhagen, B., & Kiladis, G. N. (2017). Effects of topographic smoothing on the simulation of winter precipitation in High Mountain Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 1456-1474.
- Choi, S. J., & Klemp, J. B. (2021). A new hybrid sigma-pressure vertical coordinate with smoothed coordinate surfaces. *Monthly Weather Review*, 149(12), 4077-4089.
- CLIVAR Madden-Julian Oscillation Working Group (Waliser, D., K. Sperber, H. Hendon, D. Kim, E. Maloney, M. Wheeler, K. Weickmann., C. Zhang, L. Donner, J. Gottschalk, W. Higgins, I.-S. Kang, D. Legler, M. Moncrieff, S. Schubert, W. Stern, F. Vitart, B. Wang, W. Wang, and S. Woolnough), 2009: MJO simulation diagnostics. *Journal of Climate*, 22, 3006-3029.
- Domeisen, D. I., Butler, A. H., & Charlton-Perez, A. J. (2020). The role of the stratosphere in sub-seasonal to seasonal prediction. *Newsletter n 54 January 2020*, 14.
- Gao, X., Xu, Y., Zhao, Z., Pal, J. S., & Giorgi, F. (2006). On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 86, 173-185.
- Gupta, A., Gerber, E. P., & Lauritzen, P. H. (2020). Numerical impacts on tracer transport: A proposed intercomparison test of atmospheric general circulation models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(733), 3937-3964.
- Haarsma, R., Acosta, M., Bakhshi, R., Bretonnière, P. A., Caron, L. P., Castrillo, M., ... & Wyser, K. (2020). HighResMIP versions of EC-Earth: EC-Earth3P and EC-Earth3P-HR-description, model computational performance and basic validation, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3507-3527.
- Ham, H., Lee, S.-M., Hyun, Y.-K., & Kim, Y. (2019). Performance Assessment of Monthly Ensemble Prediction Data Based on Improvement of Climate Prediction System at KMA. *Atmosphere*, 29(2), 149-164. <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2019.29.2.149>
- Hartmann, D. L., 2015: *Global physical climatology*. 2nd ed. Elsevier Science, 498 pp.
- Held, I. M., & Suarez, M. J. (1994). A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bulletin of the American*

Meteorological society, 75(10), 1825–1830.

- Huang, Y., X. Shi, and D. Kim, 2024: The Role of Cloud–Radiative Interaction in Tropical Circulation and the Madden–Julian Oscillation, *Journal of Climate*, 37, 4559–4576.
- Hyun, Y.-K., Lee, J., Shin, B., Choi, Y., Kim, J.-Y., Lee, S.-M., ... Hwang, S.-O. (2022). The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6) – Part 2: Climatological Mean Bias Characteristics. *Atmosphere*, 32(2), 87–101. <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2022.32.2.087>
- Jucker, M., Fueglistaler, S., & Vallis, G. K. (2014). Stratospheric sudden warmings in an idealized GCM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(19), 11–054.
- Jun, S. Y., Choi, S. J., & Kim, B. M. (2018). Dynamical core in atmospheric model does matter in the simulation of Arctic climate. *Geophysical Research Letters*, 45(6), 2805–2814.
- Kim, D., K. R. Sperber, W. S. Stern, D. Waliser, I.-S. Kang, E. Maloney, W. Wang, K. Weickmann, J. Benedict, M. Khairoutdinov, M.-I. Lee, R. Neale, M. Suarez, K. Thayer–Calder, and G. Zhang, 2009: Application of MJO simulation diagnostics to climate models. *Journal of Climate*, 22, 6413–6436.
- Kim, H., Lee, J., Hyun, Y.-K., & Hwang, S.-O. (2021). The KMA Global Seasonal Forecasting System (GloSea6) – Part 1: Operational System and Improvements. *Atmosphere*, 31(3), 341–359. <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2021.31.3.341>
- Kim, H. 2024: Decrease in MJO predictability following Indo-Pacific Warm Pool expansion, *Geophysical Research Letters*, e2024GL108849, <http://dx.doi.org/10.1029/2024GL108849>
- H. Kim and J. J. Benedict, 2023: The idealized aqua-planet maritime continent barrier effect on the MJO predictability, *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0155.1>
- Kim, H. R., Kim, B. M., Choi, Y. S., Jun, S. Y., & Son, S. W. (2023). Difference in boreal winter predictability between two dynamical cores of Community Atmosphere Model 5. *Environmental Research Letters*, 19(1), 014019.
- Kim, M., C. Yoo, and H. Kim: A process-based evaluation of subseasonal prediction skill of the North Atlantic Oscillation in ECMWF S2S ensemble forecasting system. *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2024GL111291>
- Klemp, J. B., Skamarock, W. C., & Dudhia, J. (2007). Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. *Monthly Weather Review*, 135(8), 2897–2913.
- Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, 120(1), 197–207.
- Lauritzen, P. H., Bacmeister, J. T., Callaghan, P. F., & Taylor, M. A. (2015). NCAR_Topo (v1. 0): NCAR global model topography generation software for unstructured grids. *Geoscientific Model Development*, 8(12), 3975–3986.
- Lauritzen, P. H., & Williamson, D. L. (2019). A total energy error analysis of dynamical cores and physics-dynamics coupling in the community atmosphere model (CAM). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(5), 1309–1328.
- Lee, J., Sperber, K. R., Gleckler, P. J., Bonfils, C. J., & Taylor, K. E. (2019). Quantifying the agreement between observed and simulated extratropical modes of interannual variability. *Climate Dynamics*, 52, 4057–4089.

- MacLachlan, C., Arribas, A., Peterson, K. A., Maidens, A., Fereday, D., Scaife, A. A., ... & Madec, G. (2015). Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system, *QJ Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1072–1084.
- Michaelis, A. C., Lackmann, G. M., & Robinson, W. A. (2019). Evaluation of a unique approach to high-resolution climate modeling using the Model for Prediction Across Scales–Atmosphere (MPAS–A) version 5.1. *Geoscientific Model Development*, 12(8), 3725–3743.
- Michalakes, J., Govett, M., Benson, R., Black, T., Juang, H. M. H., Reinecke, A., ... & Vasic, R. (2015). AVEC report: NGGPS level-1 benchmarks and software evaluation.
- Park, S. H., Klemp, J. B., & Kim, J. H. (2019). Hybrid mass coordinate in WRF–ARW and its impact on upper-level turbulence forecasting. *Monthly Weather Review*, 147(3), 971–985.
- Park, J. S., Park, S. H., Chun, H. Y., Yoo, J. H., & Shin, U. (2024). Analysis of planetary scale waves using Idealized sudden stratospheric warming simulations in different dynamical cores. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(6), e2023JD039703.
- Raymond, W. H., & Garder, A. (1988). A spatial filter for use in finite area calculations. *Monthly weather review*, 116(1), 209–222.
- Scaife, A. A., Arribas, A., Blockley, E., Brookshaw, A., Clark, R. T., Dunstone, N., ... & Williams, A. (2014). Skillful long-range prediction of European and North American winters. *Geophysical Research Letters*, 41(7), 2514–2519.
- Schneider, T., Leung, L. R., & Wills, R. C. (2024). Opinion: Optimizing climate models with process knowledge, resolution, and artificial intelligence. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(12), 7041–7062.
- Shi, X., D. Kim, Á. F. Adames, and J. Sukhatme, 2018: WISHE–Moisture Mode in an Aquaplanet Simulation. *Journal of Advanced Modeling Earth System*, 10, 2393–2407.
- Skamarock, W. C., Snyder, C., Klemp, J. B., & Park, S. H. (2019). Vertical resolution requirements in atmospheric simulation. *Monthly Weather Review*, 147(7), 2641–2656.
- Taylor, M. (2024). Atmospheric topography generation. Retrieved from [https://acme-climate.atlassian.net/wiki/spaces/DOC/pages/2720202817/Atmospheric + Topography+ Generation](https://acme-climate.atlassian.net/wiki/spaces/DOC/pages/2720202817/Atmospheric+Topography+Generation)
- Webster, S., Brown, A. R., Cameron, D. R., & Jones, C. P. (2003). Improvements to the representation of orography in the Met Office Unified Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 129(591), 1989–2010.
- Williamson, D. L. (2007). The evolution of dynamical cores for global atmospheric models. *気象集誌. 第 2 輯*, 85, 241–269.
- Wu, Z., & Reichler, T. (2018). Towards a more Earth-like circulation in idealized models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7), 1458–1469.
- Wu, T., Yu, R., Lu, Y., Jie, W., Fang, Y., Zhang, J., ... & Shu, Q. (2020). BCC–CSM2–HR: a high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2020, 1–64.
- 기상청, 차세대 기후예측시스템 개발을 위한 상세 기획 연구, 2023
- 행정안전부, 2021 재해연보.

주 의

1. 이 보고서는 국립기상과학원에서 지원을 받아 시행한 「기후예측시스템 (GloSea6) 기반모델 개선 연구」 과제의 지원을 받아 수행된 최종보고서입니다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 해당 사업의 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.