

지구시스템모델 기반
해양-대기경계층-구름
상호작용에 의한 북극 온도
상승 및 제트기류 반응 연구

A Study on Arctic Temperature Rise
and Jet Stream Response by
Ocean-Atmosphere Boundary
Layer-Cloud Interaction Based on
EARTH System Model



국립부경대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “지구시스템모델 기반 북극-한반도 통합 재해기상 예측 시스템 (KPOPS-EARTH)의 개발 및 활용” 과제의 위탁연구 “지구시스템모델 기반 해양-대기경계층-구름 상호작용에 의한 북극 온도 상승 및 제트기류 반응 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 김 주 홍

위탁연구기관명 : 국립부경대학교

위탁연구책임자 : 김 백 민

위탁참여연구원 : 문 우 석

“ : 성 현 준

“ : 이 승 표



보고서 초록

위탁연구과제명	지구시스템모델 기반 해양-대기경계층-구름 상호작용에 의한 북극 온도 상승 및 제트기류 반응 연구				
위탁연구책임자	김 백 민	해당단계 참여연구원수	13명	해당단계 연구비	161,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	국립부경대학교 지구환경시스템과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서 면수	98
○ 모델 실험 체계 구축 및 극지역 국지적 변화가 전지구 대기에 미치는 영향 분석 - CESM2 모델을 36년간 적분하여 바렌츠해 해빙 감소 실험 구축 모의 - CESM1 모델, 재분석 자료와 비교, 분석을 통해 CESM2 모델의 해빙에 대한 대기 반응 차이 분석 ○ 북극 해양-대기경계층-구름의 연관성 분석 및 극지연구소 예측시스템 모의성능 평가 - 대서양 사이클론 사례에 대한 니알슨 지점 관측 자료와 CESM2 모의결과 비교 - 예측 기간별 수적 과대모의 경향 진단 및 매개변수화 개선 필요성 도출 ○ 모델 자료를 활용한 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명 - 빙정 형태 모수화 개선을 통한 과냉각 수적 및 빙정 침강 문제 개선 - 수적 감소에 따른 복사 및 지상기온 변화 분석 ○ 국지적 열속 변화가 전지구 규모 대기 순환에 미치는 영향에 대한 이론 연구 - 국지적 열속에 반응하는 전지구 대기운동의 역학적 패턴 이론 수립 - 재분석 자료 및 CMIP6 자료를 활용한 북극-중위도 원격상관 이론 검증					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극 온난화 증폭, 해양-대기-구름-상호작용, 지구시스템 모델, 혼합상구름, 제트기류			
	영 어	Arctic Amplification, Ocean-Atmosphere-Cloud Interaction, EARTH System Model, Mixed-phase Cloud, Arctic-Midlatitude Teleconnection			

요 약 문

I. 제 목

지구시스템모델 기반 해양-대기경계층-구름 상호작용에 의한 북극 온도 상승 및 제트기류 반응 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

극지역의 부족한 관측으로 인해 경계층 난류혼합, 구름 물리, 복사, 해빙 상의 플럭스 모수화 과정 등 물리과정에 있어 큰 불확실성이 존재하여 북극 기온의 중위도 예측성을 저하하고 있음. 모델 모의 성능 평가, 관측 기반, 혼합상 구름 모의 개선을 통해 모델에서의 북극 온도 상승 차이에 대한 분석을 진행하였으며, 북극의 해빙, 국지적 열속 변화가 전지구 스케일 대기에 미치는 영향에 대해서는 학계에서 의견이 분분한 상태로, 북극 지역의 해빙, 국지적 지표 열속의 변화가 전지구 규모의 대기에 미치는 영향에 대한 이론 연구 및 검증 연구를 수행하였음.

III. 연구개발의 내용 및 결과

모델 실험 체계 구축 및 극지역 국지적 변화가 전지구 대기에 미치는 영향 분석

극지연구소 예측시스템의 기반 모델인 CESM2와 이전 모델인 CESM1에서 모델을 활용하여, 초겨울 바렌츠해에서 해빙이 감소한 상태로, 36년간 적분하고 해빙 감소가 두 모델에 미치는 대기 반응을 분석함. 해빙 감소시 CESM2보다 CESM1에서 기온의 증가 폭이 컸으며, 이는 기존의 구름량 차이에 따라 증가할 수 있는 수적량이 많은 CESM1에서 기온이 증가한 것으로 분석됨. 이론 연구에서는 전지구 규모 대기 운동의 역학적 특성에 대한 선행 연구의 한계를 분석하고 전지구 규모의 대기운동의 지역적인 열속에 반응하는 역학적 패턴에 대한 이론 수립함.

북극 해양-대기경계층-구름의 연관성 분석 및 극지연구소 예측시스템 모의성능 평가

해양-대기경계층-구름의 연관성 분석을 위해, 북대서양 사이클론 사례에 대한 분석을 진행하였고, 니알슨 지점 자료와의 비교 분석을 진행함. 동일하게 사이클론이 관측 지점의 동쪽으로 유입되었으나, 상세 진입 경로에 따라 관측 결과는 상이하였으며, 모델에서는 예측 기간이 길어질수록 수적의 과대모의가 누적되는 경향이 나타났으며, 구름, 경계층, 복사 매개변수화 과정에 대한 개선의 필요성을 확인함. 이론 연구에서는 이론 검증을 위한 이상화 실험을 구축하고 국지적 열적 강제력에 따른 경압성 파동의 변화에 대한 분석을 진행함.

모델 자료를 활용한 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명

CESM2 모델에서는 사이클론 기간 동안 혼합상 구름보다는 과냉각 수적이 거의 지속되며, 빙정이 중, 상층에서 침강되지 못하는 특징이 나타났으며, 빙정 형태 모수화를 통해 이를 소폭 개선하였음. 결과적으로 수적이 감소하면서 하향 장파복사의 감소, 지상기온의 편차가 완화되었으며, 복사량이 과대함에도 적절한 지상 기온은 해양, 해빙에서의 물리과정에 대한 추가 개선 필요

요성을 제기함. 이론 연구에서는 이론에 대한 재분석 자료, CMIP6 자료와의 비교, 검증 분석을 하였음.

IV. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 개발한 빙정 형태 모수화 방안을 KPOPS-EARTH 계절예측시스템 내 이식, 검증 예정임.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

A Study on Arctic Temperature Rise and Jet Stream Response by Ocean-Atmosphere Boundary Layer-Cloud Interaction Based on EARTH System Model

II. Purpose and Necessity of R&D

Due to insufficient observations in polar regions, significant uncertainties exist in physical processes such as boundary layer turbulent mixing, cloud physics, radiation, and flux parameterization processes over sea ice, thereby reducing the predictability of mid-latitude phenomena originating in the Arctic. We analyzed differences in Arctic temperature rise within models through model performance evaluation, observation-based approaches, and improvements in mixed-phase cloud simulations. Regarding the impact of Arctic sea ice and local heat flux changes on the global-scale atmosphere, academic opinions remain divided. Therefore, we conducted theoretical and verification studies on the effects of Arctic sea ice and local surface heat flux changes on the global-scale atmosphere.

III. R&D Contents and Results

Establishment of a Model Experiment System and Analysis of the Impact of Localized Changes in Polar Regions on the Global Atmosphere

The Korea Polar Prediction System (KPOPS-EARTH) analyzed atmospheric responses to reduced sea ice in the Barents Sea during early winter, integrating for 36 years using both the base model CESM2 and its predecessor CESM1. When sea ice decreased, the temperature increase was greater in CESM1 than in CESM2. This was analyzed as a result of the temperature increase in CESM1, which has a larger potential for increase due to existing differences in cloud cover. Theoretical research analyzed the limitations of previous studies on the dynamical characteristics of global-scale atmospheric motion and established a theory on the dynamical patterns responding to regional heat fluxes in global-scale atmospheric

motion.

Analysis of Arctic Ocean-Atmosphere Boundary Layer-Cloud Interactions and Evaluation of the KPOPS-EARTH Simulation Performance

Using the CESM2 model, the foundation of the KPOPS-EARTH, and its predecessor CESM1, we analyzed atmospheric responses to reduced sea ice in the Barents Sea during early winter over a 36-year integration period. When sea ice decreased, the temperature increase was greater in CESM1 than in CESM2. This was analyzed as a result of the temperature increase in CESM1, which has a larger potential for increase due to differences in cloud cover. Theoretical research analyzed the limitations of previous studies on the dynamical characteristics of global-scale atmospheric motion and established a theory on the dynamical patterns responding to regional heat fluxes in global-scale atmospheric motion.

Identifying the Role of Ocean-Boundary Layer-Cloud Interactions Using Model Data

In the CESM2 model, supercooled water droplets persist almost continuously during the cyclone period rather than mixed-phase clouds, exhibiting a characteristic where ice crystals cannot sink in the middle and upper layers. This was slightly improved through ice crystal shape parameterization. Consequently, the decrease in water vapor led to reduced downward longwave radiation and mitigated surface temperature anomalies. Despite excessive radiative forcing, the appropriate surface temperatures suggest the need for further improvements in physical processes over the ocean and sea ice. Theoretical studies involved comparisons with reanalysis data and CMIP6 data, along with validation analyses.

V. Application Plans of R&D Results

The ice crystal parameterization scheme developed in this study is scheduled for implementation and verification within the KPOPS-EARTH.

제 1 장 서론

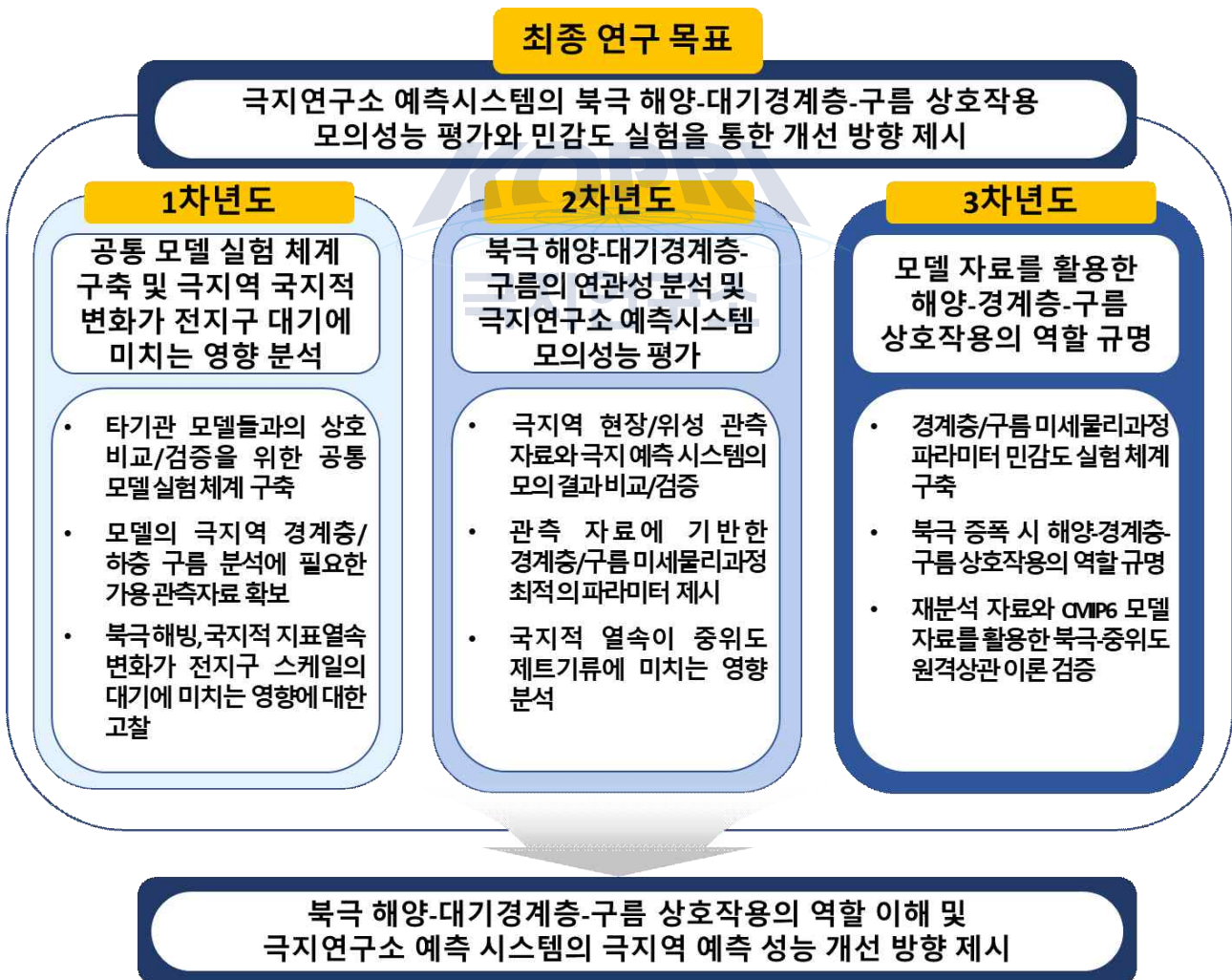
1절 연구개발의 목적

1. 최종목표

- 극지연구소 예측시스템의 북극 해양-대기경계층-구름 상호작용 모의성능 평가와 민감도 실험을 통한 개선 방향 제시

2. 연차별 세부목표

- 1차년도: 공통 모델 실험 체계 구축 및 극지역 국지적 변화가 전지구 대기에 미치는 영향 분석
- 2차년도: 북극 해양-대기경계층-구름의 연관성 분석 및 극지연구소 예측시스템 모의성능 평가
- 3차년도: 모델 자료를 활용한 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명



2절 연구개발의 필요성

- 북극은 2000년대 이후 타지역에 비해 기온이 빠르게 상승하는 북극증폭(Arctic Amplification) 현상이 심화(전지구 평균의 4배속)되고 있으며 이에 따른 극지역 빙권의 점진적 소멸은 중위도 이상기상 현상의 새로운 소스로 작용하고 있음 (Cohen et al. 2019; Rantanen et al. 2022)
- 극지역의 부족한 관측으로 인해 극지 경계층 난류혼합, 구름 물리, 복사, 해빙 상의 플럭스 모수화 과정 등 물리과정에 있어 큰 불확실성이 존재하여 중위도 예측성을 저하하고 있음
- 극지연구소 예측 시스템(KPOPS-EARTH; Korea Polar Prediction System-EARTH)이 3년간의 성공적인 연구수행을 통해 준현업 예측이 가능한 상태가 됨에 따라, 과거 발생했던 극한 기상 현상 분석에 활용하고, 관련 메커니즘 연구를 진행할 필요가 있음.
- 극지역 모델링 연구는 부족한 관측들로 아직까지 불확실성이 매우 커서 단일 모델 결과 분석으로 결론을 도출하기보다 다양한 모델들을 활용하여 상호 비교/검증하는 체계 구축이 필요함.
- 모델의 검증 이후 물리과정 개선에 있어서, 어떤 방향으로 모수화를 적용할 것인지가 중요함. 보편적으로 전지구 모델에서는 모델의 해상도 문제, 아격자 규모에 대한 정보 부족 등으로 중, 저위도 현장 관측 자료 기반으로 최적의 파라미터로 구성하고자 한 경우가 대부분이며, 극지역 현장 관측 자료를 통한 모델 파라미터 조절 연구는 필수적임.
- 최근, 구름 관측 자료들을 극지연구소를 포함한 다양한 기관들(CALIPSO, Cloud data portal 등)로 부터 제공되어 여러 연구에 활용되고 있으며, 해당 자료들을 기반으로 한 모수화는 모델에서 나타나는 극지역 오차를 개선할 가능성이 높음.
- 모델의 물리과정 개선뿐만 아니라, 현상 자체에 대한 이해도 중요함. 북극 지역의 표면 온도는 북극 증폭(Arctic Amplification)의 강도를 조절할 수 있어 극 제트 기류와 중위도 이상 기후 현상 예측성에 영향을 미칠 가능성이 큼. 그러나 북극의 해빙, 국지적 열속 변화가 전지구 스케일 대기에 미치는 영향에 대해서는 학계에서 의견이 분분한 상태로, 북극 지역의 해빙, 국지적 지표 열속의 변화가 전지구 규모의 대기에 미치는 영향에 대한 이론 연구 및 검증 연구도 필요함.

3절 연구개발의 범위

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 모델 실험 체계 구축 및 극지역 국지적 변화가 전지구 대기에 미치는 영향 분석	1-1	모델 실험 체계 구축 및 타기관 모델과의 경계층 및 하층 구름 모의 성능 비교/평가	- 북극 해양-대기경계층-구름-표층기온 상호작용 평가를 위한 모델 실험 체계 구축	100%
	1-2	모델의 극지역 경계층/하층 구름 분석에 필요한 가용 관측 자료 확보	- 가용 관측 자료 조사	100%
	1-3	북극 해빙, 국지적 지표열속 변화가 전지구 스케일의 대기에 미치는 영향에 대한 고찰	- 북극 온난화로 유도되는 전지구적 제트 기류 반응에 대한 이론적 고찰	100%
2. 북극 해양-대기 경계층-구름의 연관성 분석 및 극지역 연구소 예측시스템 모의성능 평가	2-1	극지역 현장/위성 관측 자료와 극지역 예측 시스템의 모의 결과 비교/검증	- 극지역 위성 관측 자료와 관측팀과 조율한 현장 관측 자료를 활용하여 극지역 예측 시스템의 모의 결과 비교/검증 수행	100%
	2-2	관측 자료에 기반한 경계층/구름 미세물리과정 최적의 파라미터 제시	- 가용한 관측 자료 내 구름의 기하학적(고도, 두께, 운량 등) 특성, 구름의 미세물리적 특성(형상, 입자 크기, 수농도 등) 분석을 통한 구름 미세물리과정 내 최적의 파라미터 제시	100%
	2-3	국지적 열속이 중위도 제트기류에 미치는 영향 분석	- Idealized GCM dynamic core를 이용하여 이론적으로 확인된 원격상관의 패턴을 수치적으로 구현 및 비교	100%

3. 모델 자료를 활용한 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명	3-1	경계층/구름 미세 물리과정 파라미터 민감도 실험 체계 구축	- 경계층/구름미세물리과정 빙정의 형태 민감도 실험 체계 구축	100%
	3-2	북극 증폭 시 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명	- Single Column model에서의 빙정 형태 고려 시 혼합상 구름 모의 결과 비교 - 사이클론 발생 기간 내 해양-대기경계층 상호작용 특성 분석	100%
	3-3	재분석 자료와 CMIP6 모델 자료를 활용한 북극-중위도 원격상관 이론 검증	재분석 자료를 기반으로 북극 온난화에 따른 중위도 역학 반응 확인 및 이론, 수치모델 결과와 비교·분석 예측 시스템 모의 자료를 통한 이론의 실용성 평가	100%



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절 국내 기술개발 현황

- 현업기관인 기상청 국립기상과학원은 계절예측과 장기예보 지원을 목적으로 전지구 기후예측시스템(GloSea6; Global Seasonal forecasting system version 6)를 도입하여 2021년부터 현업 운영하고 있으며 (그림 1). GloSea6 모델의 예측성능을 검증하고 개선하기 위한 다양한 학계의 노력이 있어왔음 (Kim et al., 2021; Hyun et al., 2022; Kim et al., 2024; Kim et al., 2026).

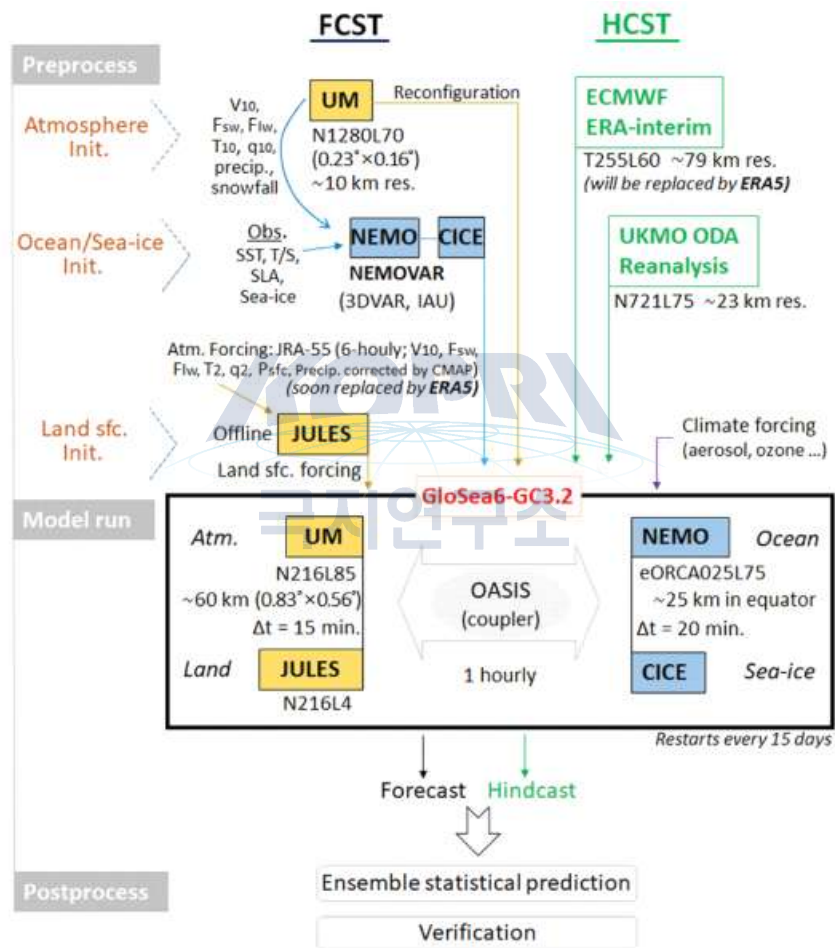


그림 1. GloSea6 모델의 현업 구조

- 현업기관 뿐만 아니라 아니라 계절예보를 위한 노력은 학계에서도 있었는데, 부산대학교에서는 CGCM(Coupled General Circulation Model)을 구축하여 모델의 예측성을 평가하고 예측결과를 APCC 기후센터에 제공하여 타기관의 예측결과와 비교 분석이 가능하도록 하였음 (Ahn et al., 2018).

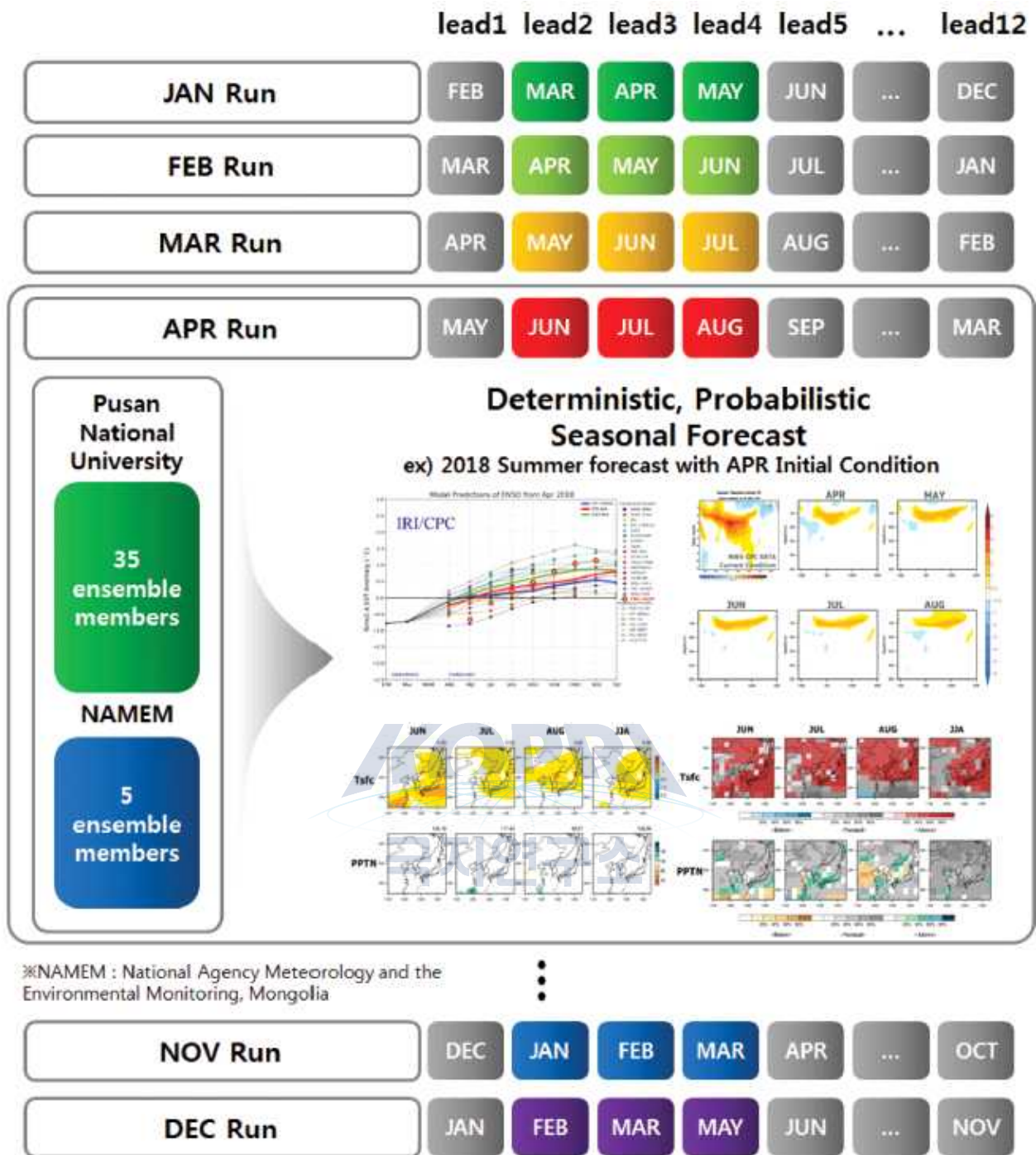


그림 2. 부산대학교 계절예측시스템 CGCM 모델 구성

- 이와 같이 계절 내 원격상관에 관한 국내 학계의 기술 수준은 비교적 높은 수준이고 다수의 논문게재 등을 통해 관련 분야의 발전에 기여하고 있음. 그러나, 주요 연구는 극지역 이외의 지역에서의 평가가 주로 이루어지며, 이는 계절 예측성에 있어 상방이 제한된 향상 효과가 나타남.

2절 국외 기술개발 현황

- 유럽중기예보센터(ECMWF; European Center of Medium-Range Weather Forecasts)에서는 1997년부터 계절예측시스템을 구축하여 운영하고 있으며 5년간격으로 계절예측시스템을 개선하고 있음. 현재 운영 중인 계절예측시스템은 SEAS5 모델로 ECMWF의 5번째 계절예측 시스템이며, SEAS6는 2025년 초 운영 전환 예정이었으나, 2025년 12월 기준, 계절예보시스템은 여전히 SEAS5이 운영되고 있음.

표 1. ECMWF SEAS4 모델과 SEAS5 모델 구성 비교.

	SEAS4	SEAS5
IFS cycle	36r4	43r1
IFS horizontal resolution (dynamics)	T255	T319
IFS horizontal grid	linear	cubic octahedral
IFS horizontal resolution (physics)	N128 (80 km)	O320 (36 km)
IFS vertical resolution (Top of atmosphere)	L91 (0.01 hPa)	L91 (0.01 hPa)
IFS model stochastic physics	3-scale SPPT and SKEB	3-scale SPPT and SKEB
Coupling	OASIS3	single executable
Ocean model	NEMO v3.0	NEMO v3.4.1
Ocean horizontal resolution	ORCA 1.0	ORCA 0.25
Ocean vertical resolution	L42	L75
Sea-ice model	sampled climatology	LIM2
Wave model resolution	1.0°	0.5°

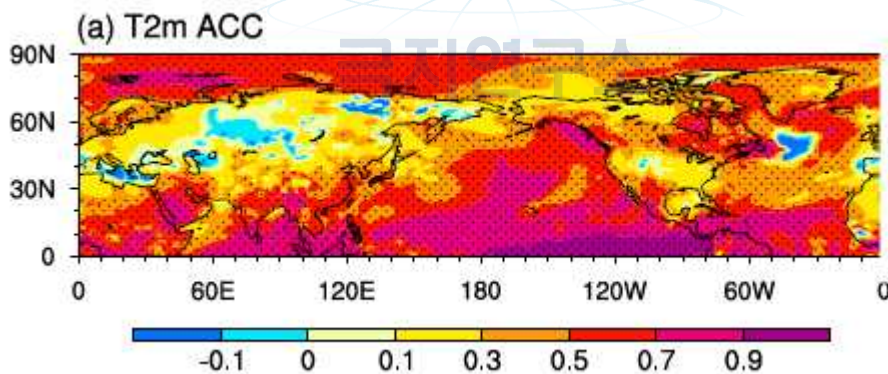


그림 3. ECMWF SEAS5의 1981-2016년 겨울철 평균의 북반구 지상 기온 예측성(Fan et al., 2020)

- SEAS5 모델은 SEAS4 대비 특히 열대 대류현상을 잘 모의하며(Bechtold et al. 2014), 수평 해상도의 유의미한 개선을 보였음. 또한, SEAS4 모델에 포함되지 않은 해빙 모델을 SEAS5에서 포함시켜 성능을 향상시킴 (Johnson et al., 2019).
- 이와 같이 국외 기관에서 또한 다방면으로, 계절예측시스템을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행중임. 다만, 고위도 지역에서는 상대적으로 낮은 예측성을 보이며 (그림 3), 이는 해빙, 해양, 대기의 복합적인 효과와 관측 불확실성에 의한 것으로, 중위도 원격상관 예측성 향상에 있어 시작점이 될 수 있는 고위도의 상호작용 이해 및 개선 연구가 필요함.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 모델 실험 체계 구축 및 극지역 국지적 변화가 전지구 대기에 미치는 영향 분석

1. 모델 실험 체계 구축 및 타기관 모델과의 경계층 및 하층 구름 모의 성능 비교/평가

가. 모델 간 상이한 북극 기후 특성을 분석하기 위한 공통 실험 설계

- 북극 해양-대기경계층-구름 상호작용 평가를 위한 실험 설계에 있어 주요 분석 계절은 해빙 감소로 대류권 반응이 확인되는 초겨울(ND)로 선정하였음
- 실험에 활용할 모델은 KPOPS-EARTH 대기 모델의 기반 모델인 CESM2(CAM6)와 비교 모델로는 CESM1(CAM5)를 선정하였음. 선행 연구에 따르면, CAM6는 CAM5와 비교하였을 때, 구름은 관측 자료와 유사하게 모의하지만, 구름 피드백에 매우 민감한 것으로 알려져 있음(Bacmeister et al., 2020). 한편, CAM5는 다른 여러 전지구 순환 모델에서 보이는 특징과 비슷하게 극지역 구름을 과소모의하는 특징이 있음(Cesana and Chepfer, 2012).
- 극지역 구름에 대하여 상이한 특징을 보이는 두 모델에 바렌츠/카라해(BK)의 해빙 농도가 1979-2020년 기간 평균보다 1σ 이하이며, 당시 유라시아 지역(EU)의 지상 기온 또한 1σ 이하로 하락한 해(BK_EU, 1984, 2000, 2009, 2016, 2018년)의(Kim et al., 2021), 해수면 온도(SST)와 해빙의 농도(SIC)의 평균 합성장을 65°N 이상의 북극 지역에 대해 경계 조건으로 처방하였고, 1979-2020 기간 평균 해수면 온도와 해빙의 농도를 경계 조건으로 처방한 실험과 차이를 비교 분석하였음. (그림 1.1, 표 1.1)
- 진행된 실험은 해빙의 감소, 해수면 온도가 증가하였을 때를 경계 조건으로 주어 해양과의 상호 피드백 효과가 나타나지 않음. 그러나 해빙의 감소, 해수면 온도가 증가하였을 때 대기 모델이 모의하는 북극 지역 대기의 특징을 파악하기 위해 실험을 구성 및 진행하였음.

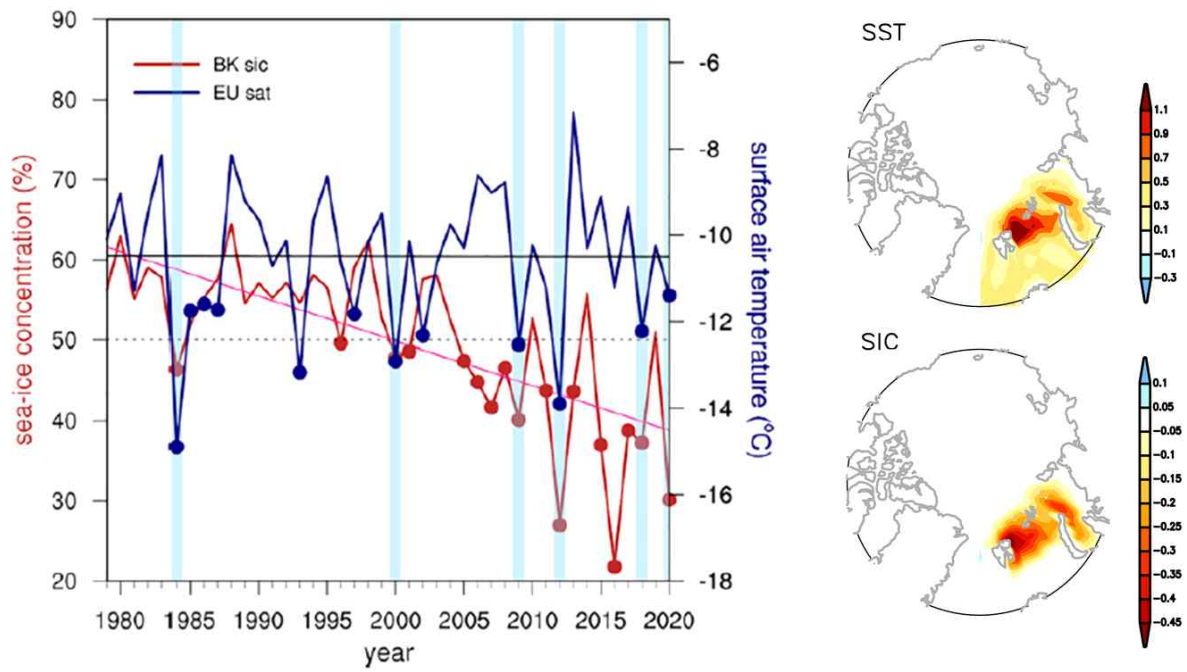


그림 1.1. 1979~2020년 초겨울 (ND) 기간 바렌츠 지역 해빙 농도와 유라시아 지역의 지상 기온 분포 및 BK_EU 기간(하늘색 실선)의 해수면 온도(SST), 해빙 농도(SIC) 합성장

표 1.1. 공통 실험 구성 정보

	CLIM (CTRL)	BK_EU
CESM1	CAM5	CAM5
CESM2	CAM6	CAM6
Boundary condition	1979-2020 기간 climatological SST, SIC 처방	65°N 이상, BK_EU 기간 composite SST, SIC 처방 65°N 이하 CLIM boundary condition 처방.
모델 수행 기간	100 years	

나. 각 모델이 모의하는 해양-대기경계층-구름 상호작용 특성

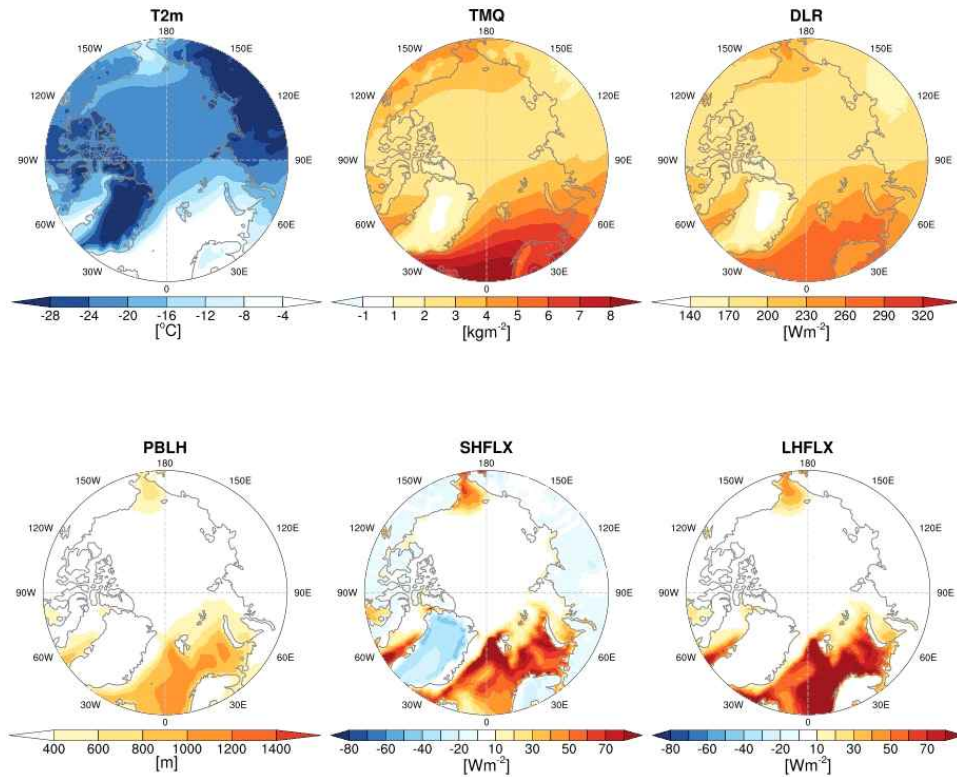


그림 1.2. 1979-2020년(Climatology)에 대한 재분석 자료 ERA5의 초겨울(ND) 지상 기온(T2m), 가강수량(TMQ), 하향 장파 복사량(DLR), 경계층 높이(PBLH), 현열(SHFLX), 잠열(LHFLX) 분포

- 두 실험 결과를 분석하기 이전에 구름의 형성에 영향을 줄 수 있는 변수들에 대해 재분석 자료 ERA5의 원값, 아노말리 특성을 비교하였음(그림 1.2-1.5).
- 북극 지역의 평년 지상 기온은 영하 20도 - 24도이며 북대서양에서 바렌츠해까지는 영하 4도 정도의 온도가 분포하였음. 가강수량은 북극 내로 진입할수록 작아지며, 하향 장파 복사량은 바렌츠해 부근에서는 약 250(W/m²), 북극 내에서는 200W/m² 하향 장파 복사량이 존재함. 경계층 고도는 현열 플럭스와 잠열 플럭스가 강한 북대서양에서 1000m, 해빙과 인접한 지역에서는 400~800m의 지역에서는 고도로 분포함.

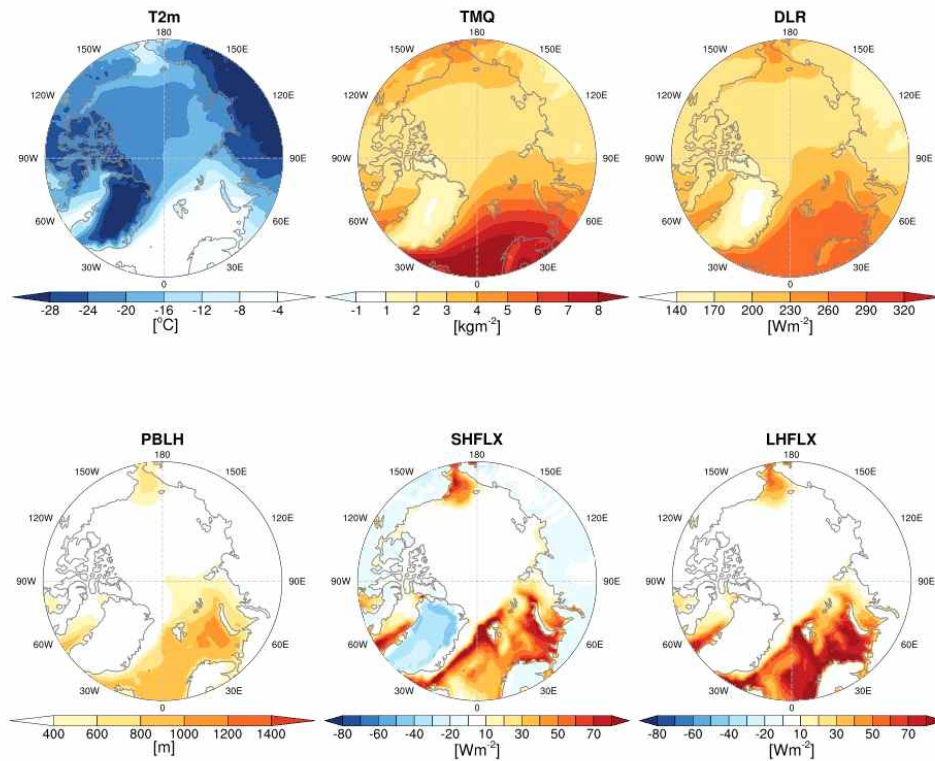


그림 1.3. BK_EU 기간에 대한 재분석 자료 ERA5의 지상 기온(T2m), 가강수량(TMQ), 하향 장파 복사량(DLR), 경계층 높이(PBLH), 현열(SHFLX), 잠열(LHFLX) 분포

- BK_EU 기간에는 동시베리아까지 기온이 상승하며 가강수량이 북극 내에 더 많이 증가함. 이는 BK_EU 기간 동안 북대서양에서 혹은 해빙이 감소한 지역에서 국지적으로든 수증기가 유입 되었음을 의미함. 하향 장파 복사는 카라해까지 증가하며, 카라 지역에 현열과 잠열 플럭스가 모두 증가함. 증가한 플럭스와 유사하게 경계층 고도도 상승하였고 바렌츠해에서 1200m 이상으로 가장 높게 상승하는 것으로 보아, 바렌츠 지역에서 대류가 가장 활발하게 일어나고 있음을 추정할 수 있음.

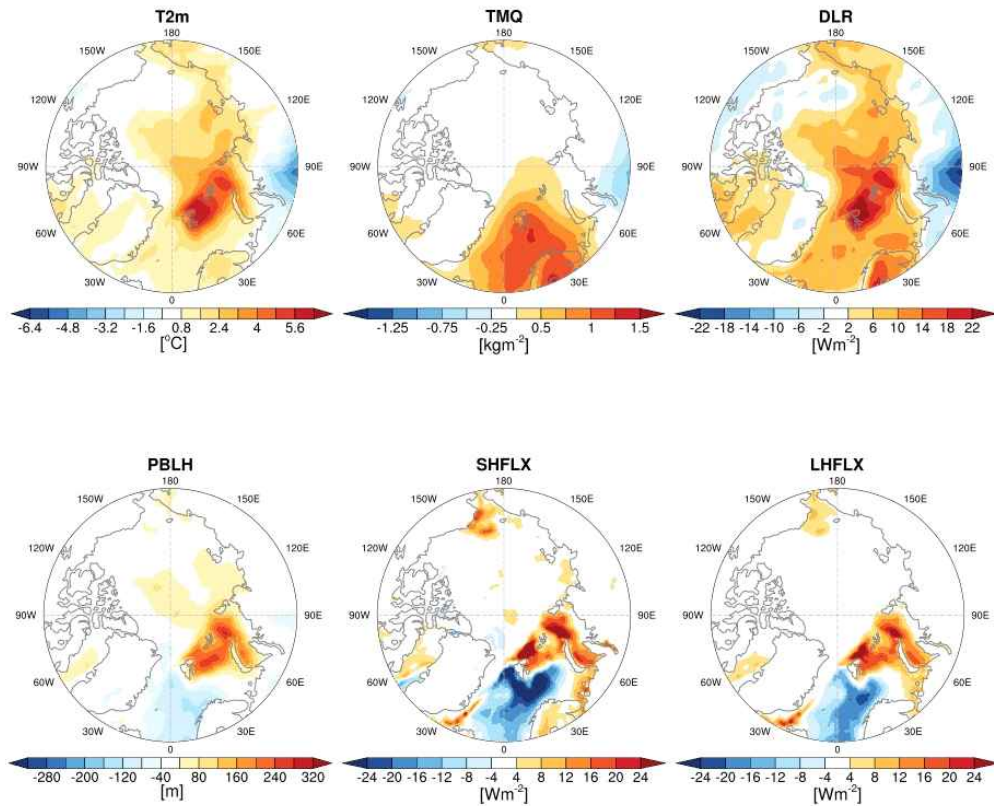


그림 1.4. Climatology 기간에 대한 BK_EU 기간의 아노말리 합성장 분포. 지상 기온 (T2m), 가강수량(TMQ), 하향 장파 복사량(DLR), 경계층 높이(PBLH), 현열(SHFLX), 잠열 (LHFLX) 분포

- 각 변수에 대해 BK_EU 기간의 아노말리를 살펴보면 스발바르 지역에서 5도 이상의 지상 기온 증가하며, 북대서양으로부터 유입되는 수증기량 또한 증가하며, 하향 장파 복사량은 스발바르 지역 주변에서 가장 크게 증가하였음. 현열, 잠열, 경계층 고도 모두 해빙이 감소한 바렌츠/카라 지역에서 증가하였으며, 경계층 고도는 평년보다 300m 이상 증가하였음. 이러한 지상 부근에서의 기온, 열 증가, 극지역 부근의 수증기량 증가는 극지역의 구름의 형성에 좋은 조건임.
- 북대서양의 현열 감소는 BK_EU 기간에 지상 기온의 증가로 대기와의 해양 간의 온도 차이는 오히려 감소하였고, 현열이 감소하였음. 따라서, 대기와 해양의 온도차 감소로 잠열 또한 감소한 것으로 추정함.

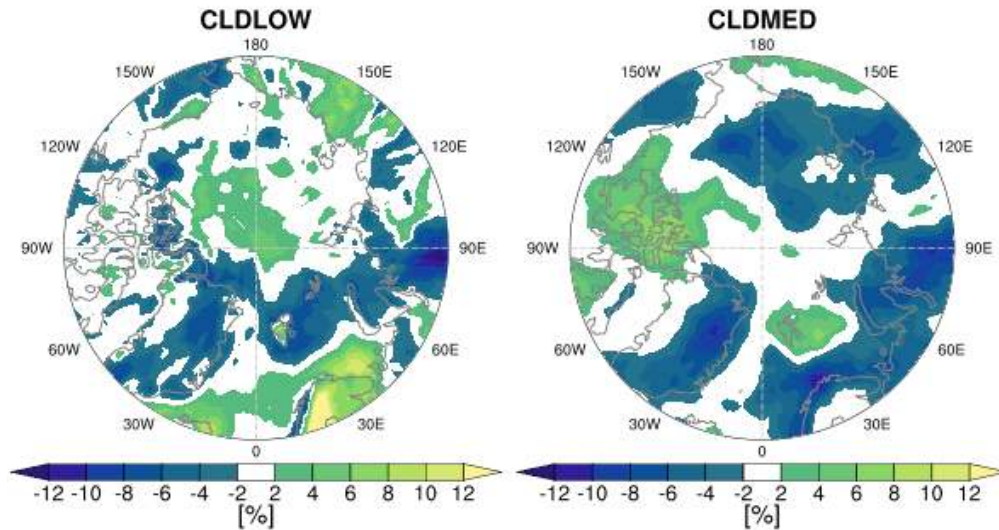


그림 1.5. Climatology 기간에 대한 BK_EU 기간의 아노말리 합성장 분포. 하층 구름 ($>800\text{hPa}$), 중층 구름 ($800\text{hPa} < 480 \text{ hPa}$) 분포

- 분석에 앞서 이후, 분석이 진행될 모델의 하층 구름과는 기준 고도가 다를 수 있음을 유의해야함. ERA5는 800hPa 약 2km , 모델 분석에 사용될 위성 자료인 CALIPSO-GOCCP는 약 3.2km 이하의 구름을 하층 구름으로 판별함.
- 하층 구름은 경계층 고도가 증가한 지역을 중심으로 감소하는 경향을 보였으며, 북극 초입인 북대서양에 하층 구름이 증가하였음. 기온과 하향 장파 복사가 가장 많이 상승한 지역에서 중층 구름이 증가하는 함을 확인함. 이는 경계층 고도의 상승으로 해당 지역의 구름이 base height가 중층까지 상승하게 된 것으로 판단됨.

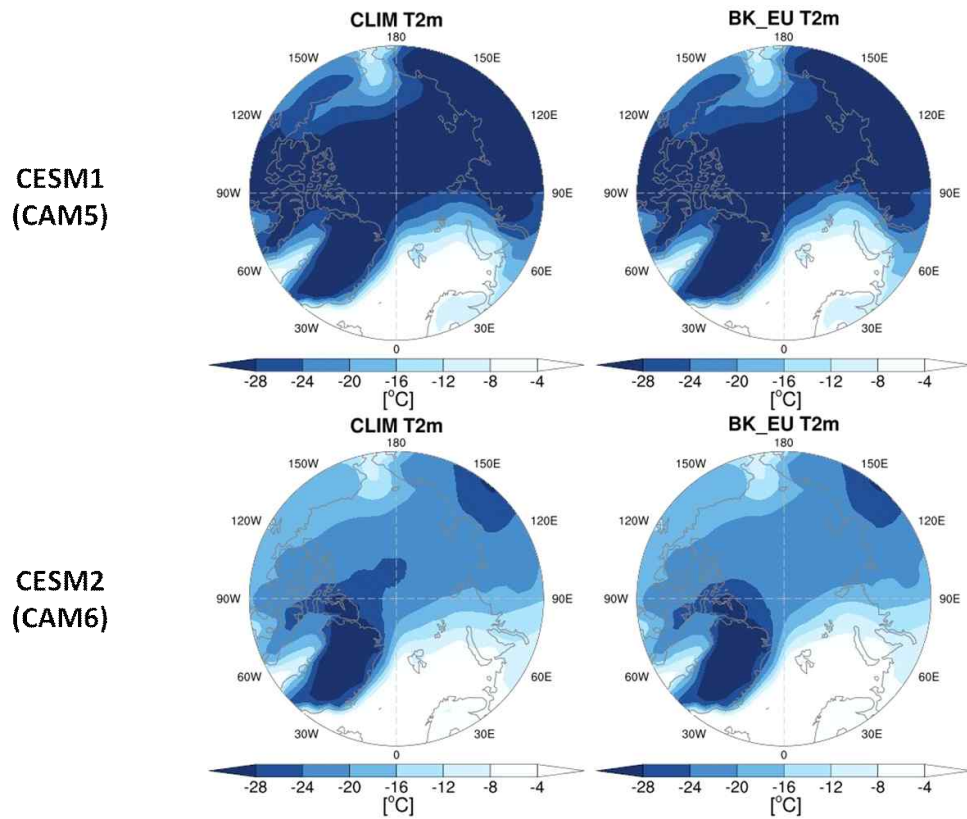
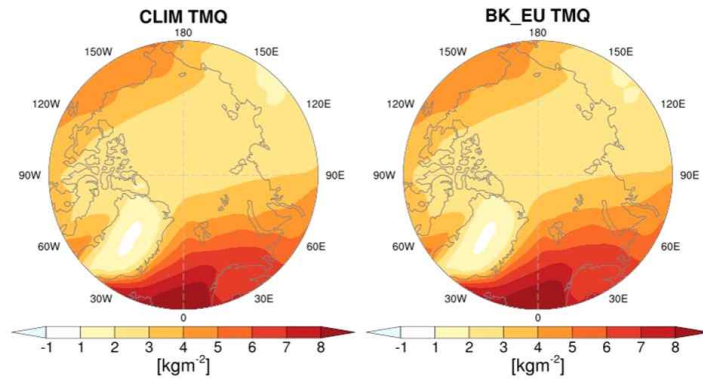


그림 1.6. 공통 실험 체계인 CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 지상 기온 분포

- CESM1은 초겨울 북극 내 지상 기온을 매우 한랭하게 모의하며, CESM2는 북극 일부가 한랭하지만, 지상 기온이 재분석 자료와 비슷하게 모의되는 특징을 보였음. BK_EU 기간에도 CESM1의 북극 내륙의 기온이 증가하긴 하지만, 동일하게 북극 내륙을 한랭하게 모의하고, CESM2 또한 재분석 자료보다는 한랭하게 모의함.

CESM1
(CAM5)



CESM2
(CAM6)

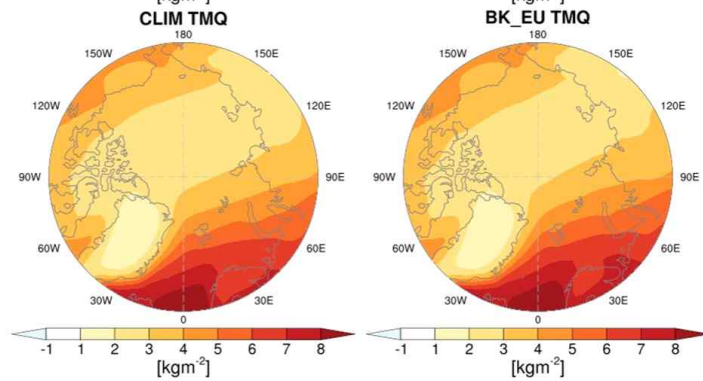
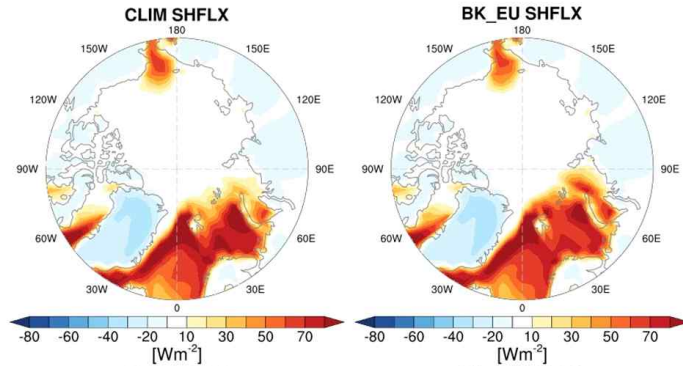


그림 1.7. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 가강수량 분포

- 두 모델 모두 두 실험(CLIM, BK_EU)에서 북대서양에서는 평균적으로 7~8kg/m²의 가강수량이 분포하고, 북극해에 근접한 지역에서는 2kg/m² 이하 가강수량이 존재하였음. 평균적으로 CESM2가 북대서양-랩테프 해 까지의 가강수량이 크게 나타남.
- 스발바르 제도를 기준으로 CESM1은 CLIM 실험에 대하여, 가강수량이 4kg/m² 이내로 분포하고, CESM2는 보다 더 북쪽까지 5kg/m² 이하의 가강수량이 존재함. BK_EU 실험에 대해서 두 실험 모두 카라해 쪽으로 가강수량이 증가함.

CESM1
(CAM5)



CESM2
(CAM6)

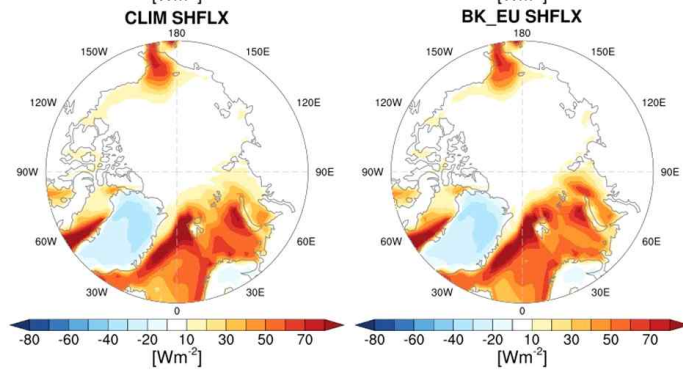
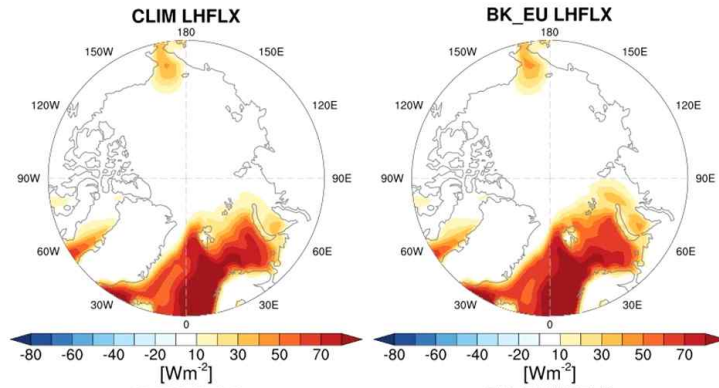


그림 1.8. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 현열 플럭스 분포

- CESM1의 CLIM은 현열 플럭스가 CESM2, 재분석 자료와 비교하면 상대적으로 많이 나오는 편임. BK_EU에서는 CLIM 보다 더 고위도인 카라해에서 현열 플럭스가 증가하였으며, BK_EU 기간에 북대서양의 현열 감소, 카라해 현열 증가 특징이 동일하게 나타남.

CESM1
(CAM5)



CESM2
(CAM6)

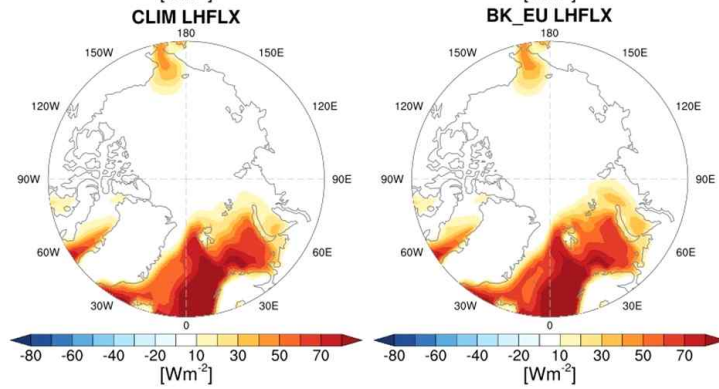


그림 1.9. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 잠열 플럭스 분포

- CESM1과 CESM2의 잠열 플럭스 분포는 거의 유사하며, 두 모델 모두 BK_EU 실험에서 카라해에 잠열이 증가함.

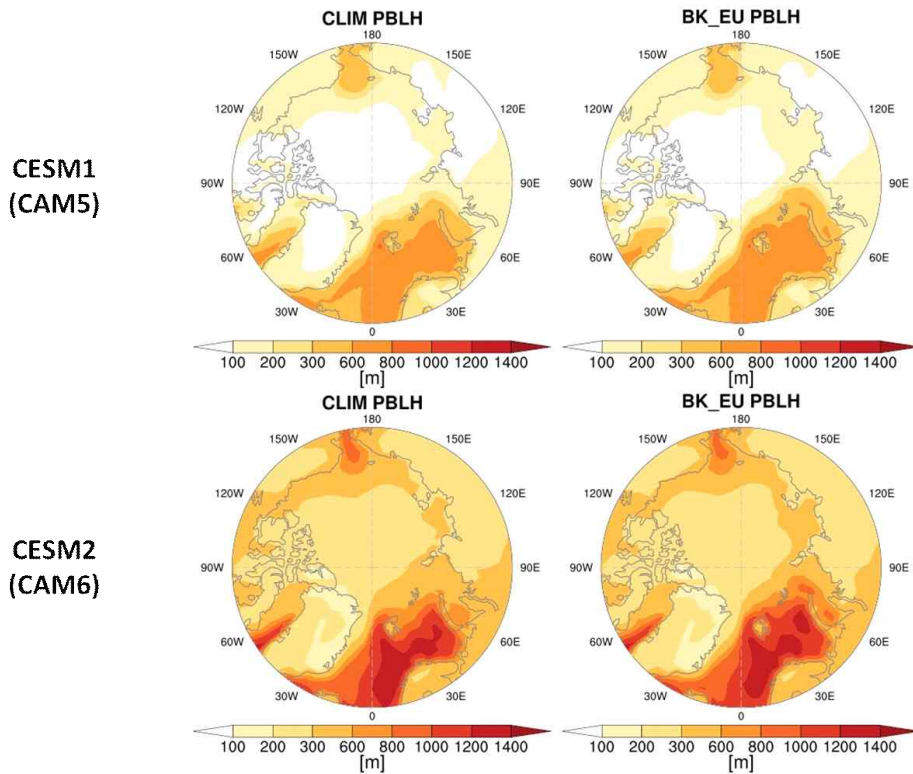


그림 1.10. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 경계층 고도 분포

- CESM1과 CESM2의 경계층 고도가 매우 상이함. CESM1은 CLIM 평균적으로 경계층 고도가 800m가 되지 않으며, 해빙이 감소하고, 해수면 온도가 증가하더라도 해당 지역의 경계층 고도가 상승하지만, 1000m가 채 되지 못함. 반면, CESM2의 경우 CLIM 평균적으로 북대서양 지역에 1000m가 넘음. 이는 앞서 분석한 ERA5보다 평균적으로 200m 높은 경계층 고도를 모의한 것으로, CESM2에서 기본적으로 북대서양에서 난류 발생이 잘 일어나고 있음을 추정할 수 있음. BK_EU 실험에서는 CESM1, CESM2 모두 스발바르 제도-바렌츠해에서 경계층 고도가 증가함.

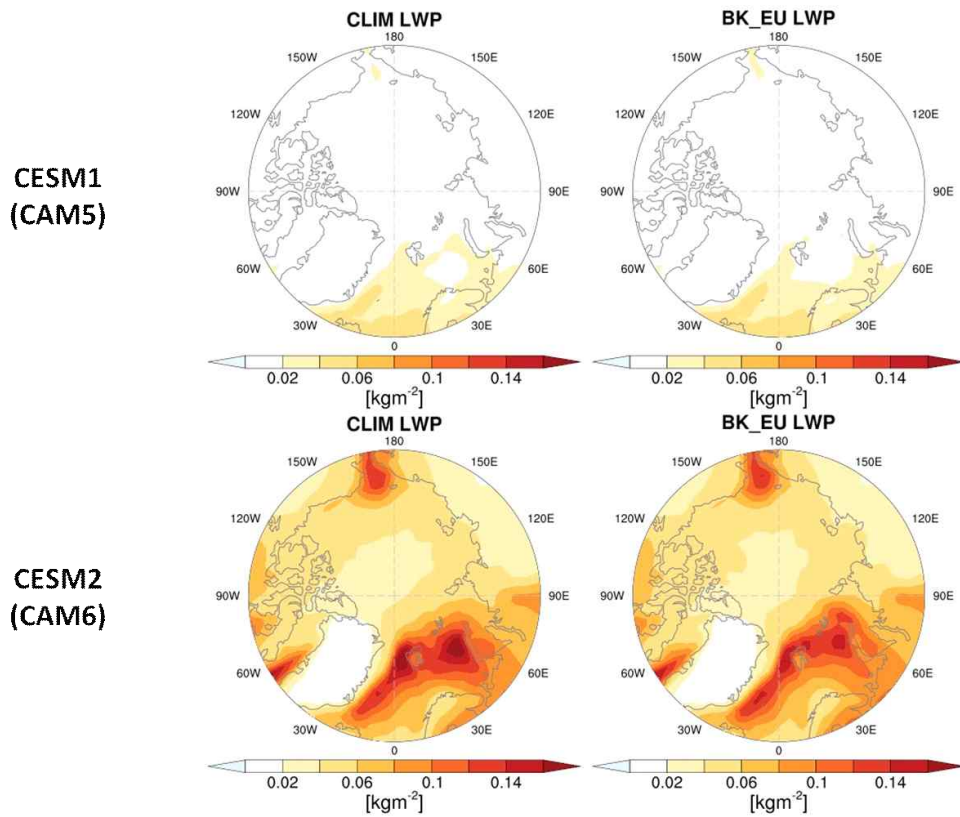
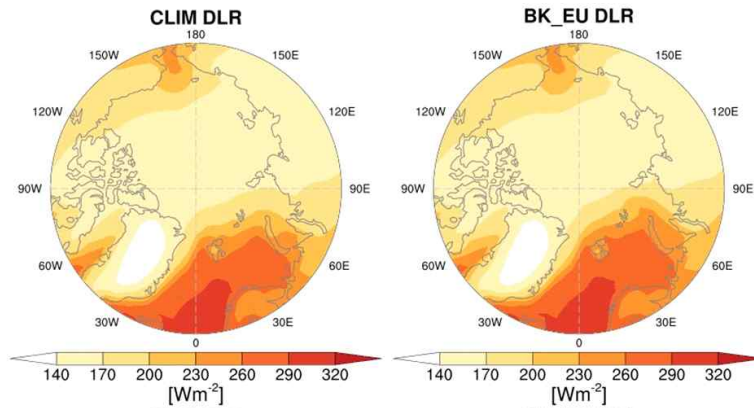


그림 1.11. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 액체 수 경로 분포

- 액체 수 경로는 그 양에 따라 복사량을 반사, 차단하는 효과로 복사량과 밀접한 변수로 알려져 있음. 이러한 액체 수 경로를 CESM1에서는 과소 모의하며, CESM2는 CESM1과 달리 해빙의 감소가 주로 나타난, 바렌츠 지역을 중심으로 액체 수 경로가 상당히 크며, 북극 내에서 액체 수 경로가 상당량 분포함.

CESM1
(CAM5)



CESM2
(CAM6)

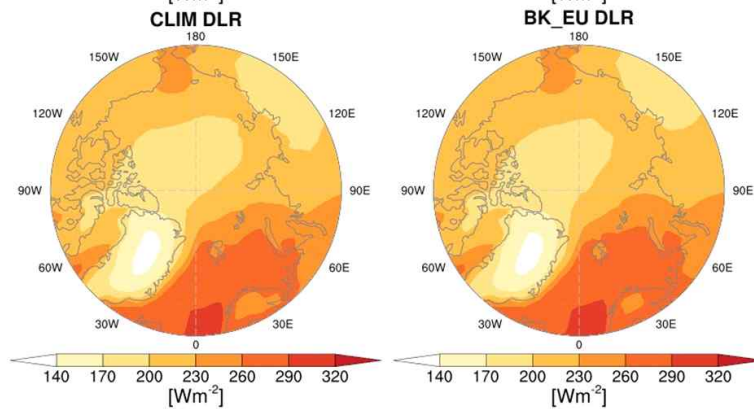
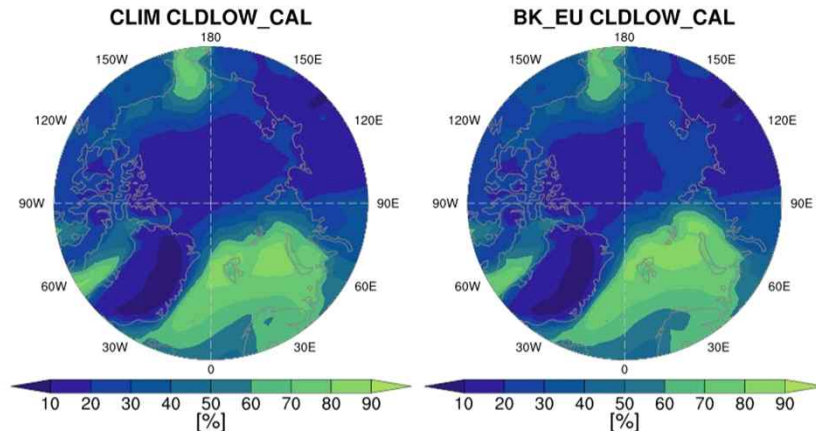


그림 1.12. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 하향 장파 복사량 분포

- CLIM 실험에 대해서 비교하면, 액체 수 경로가 작은 CESM1에서는 하향 장파 복사량이 작고, 액체 수 경로가 큰 CESM2는 지상에서 방출되는 복사량을 가두는 효과로 북극 전체적으로 CESM1에 비해, 하향 장파 복사량이 크게 나타남. 또한 재분석 자료와 비교해도 더 많은 하향 장파 복사량이 나타남. 북극 내에서는 액체 수 경로의 크기와 하향 장파 복사량이 유사하지만, 북대서양 지역에서는 액체 수 경로가 작은 CESM1에서도 320W/m^2 이상으로 크며, 해양, 해양과 밀접한 해빙 경계 지역 등에서는 액체 수 경로의 차단 효과 이외의 다른 영향이 큰 것으로 판단됨. 하향 장파 복사량 결정 과정에 대해 면밀히 살펴볼 필요가 있음. BK_EU 실험에서는 두 실험 모두 바렌츠/카라 지역의 장파 복사량이 증가하는 것을 모의함.

CESM1
(CAM5)



CESM2
(CAM6)

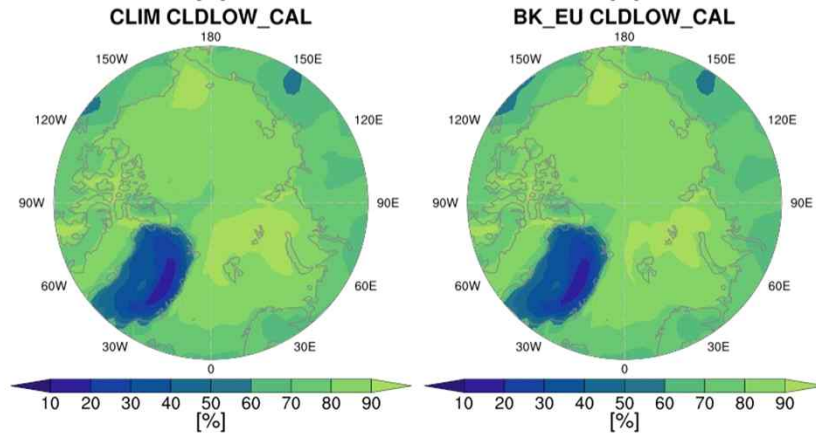


그림 1.13. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 하층 구름 양 (>680hPa) 분포

- 하층 구름 양 분포는 CESM1과 CESM2가 매우 상이함. CESM1은 CLIM 실험 결과에서 보이듯이, ERA5와 다르게 680hPa 이하임에도 북극 내 하층 구름을 과소 모의함. BK_EU 실험에서는 바렌츠/카라해에서 하층 구름이 증가하는 특징이 있음. CESM2는 평균적으로 하층 구름이 70% 이상으로 많이 나타나며, 해빙이 감소하더라도 하층 구름이 거의 증가하지 않음.

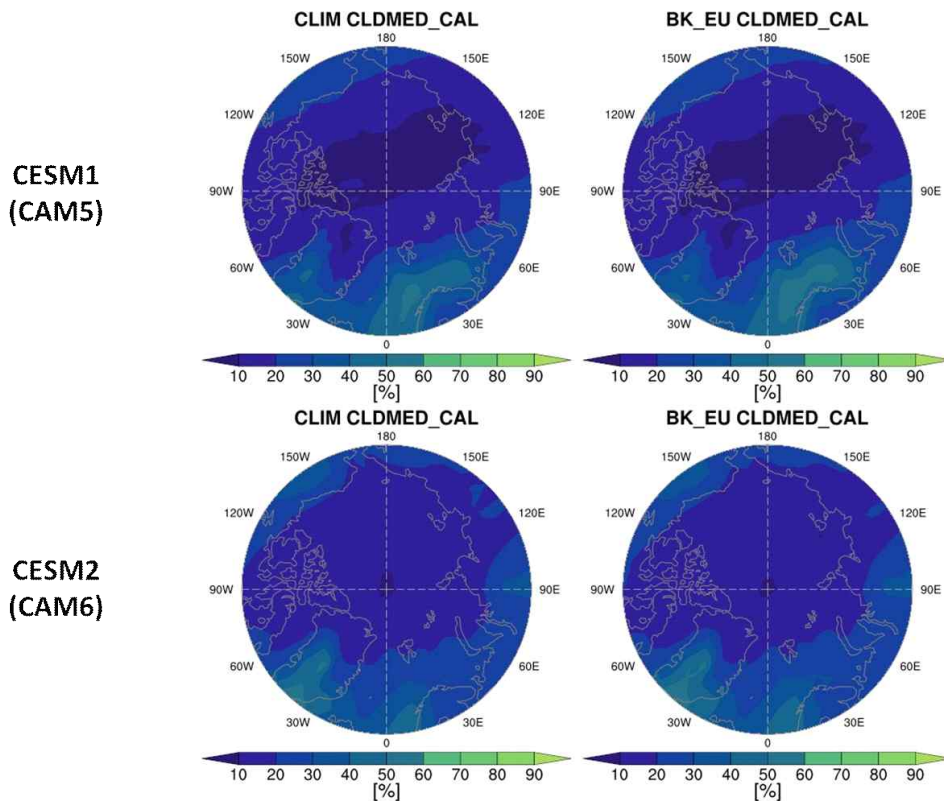


그림 1.14. CESM1, CESM2의 CLIM, BK_EU 실험의 초겨울 평균 중층 구름 양 (680hPa<P<440hPa) 분포

- 중층 구름 양은 두 모델 모두 50% 미만으로 작게 모의함. ERA5와 동등비교는 어렵지만, ERA5에서 BK_EU 기간의 아노말리 합성장에서 북대서양, 북극 내의 하층 구름 양은 증가하고 스발바르 지역의 하층 구름 양은 감소, 중층 구름 양은 증가하였음. CESM1에서 북극 내에는 10% 미만으로 중층 구름이 거의 존재하지 않지만, 바렌츠 카라해를 따라 중층운이 형성되어 있는 것을 확인함. 이러한 특징은 BK_EU에서 더 강화되며, 북대서양- 바렌츠해에서 중층운이 50%이상 나타남. 반면, CESM2는 북극 내에 중층운이 10-20% 가량 존재하기는 하지만 BK_EU 실험에서 중층 구름 양의 증가는 거의 나타나지 않음.

다. 특성 차이에 의한 상이한 북극 증폭 유도 과정 분석

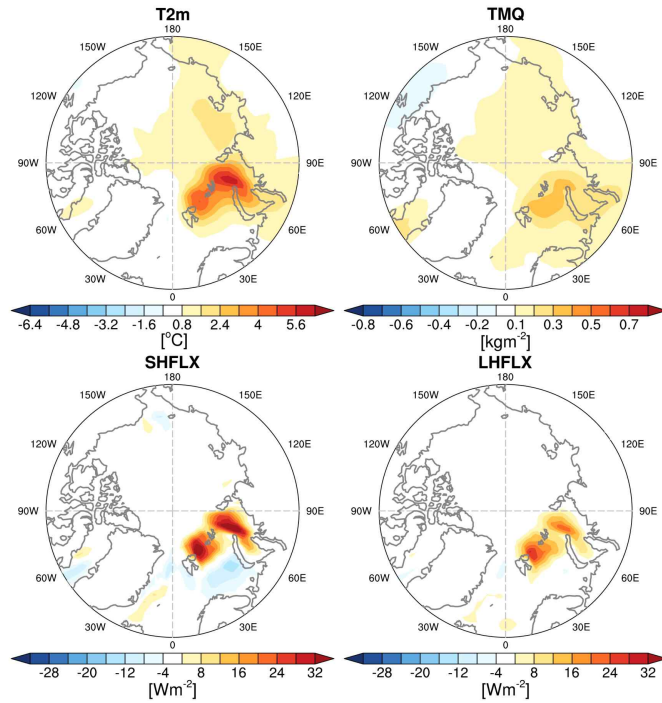


그림 1.15. CESM1(CAM5)의 CLIM, BK_EU 실험의 구름 관련 변수 (T2m, TMQ, SHFLX, LHFLX) 초겨울 평균 아노말리 분포

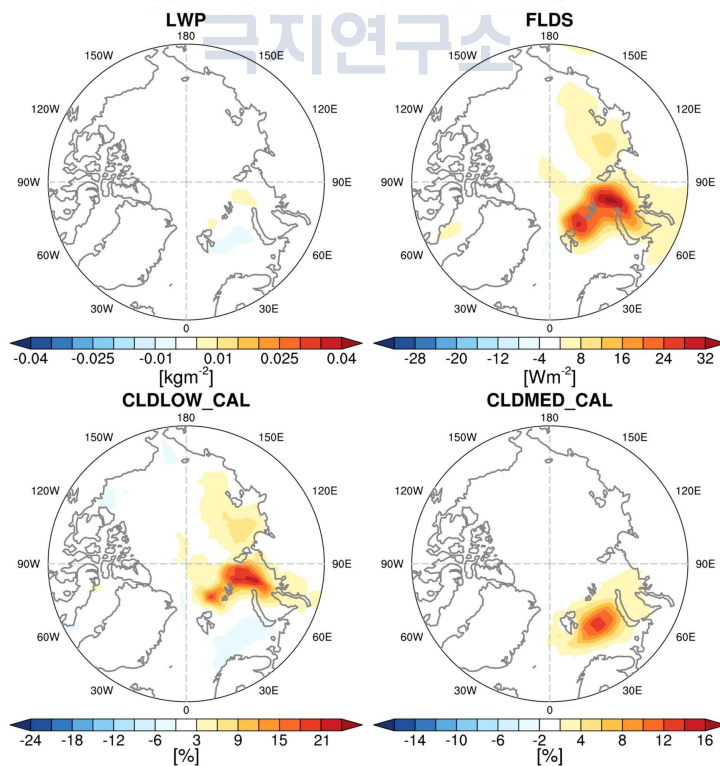


그림 1.16. CESM1(CAM5)의 CLIM, BK_EU 실험의 구름 관련 변수 (LWP, FLDS, CLDLOW_CAL, CLDMED_CAL) 초겨울 평균 아노말리 분포

- CESM1에서 바렌츠/카라 지역의 SST 증가, SIC 감소 효과로 지상 기온은 5도 이상 증가하였으며, 바렌츠해에서 가강수량이 증가하였음. 그러나 액체 수 경로의 변화는 미미하였음. T2m이 증가한 지역은 하향 장파 복사의 증가가 있었으며, 스발바르 제도/카라해에서 현열, 잠열 플럭스가 증가하였음. 카라해에서는 하층 구름이 20% 증가하였으며, 바렌츠해에는 하층운이 아닌 중층운이 증가하였음.

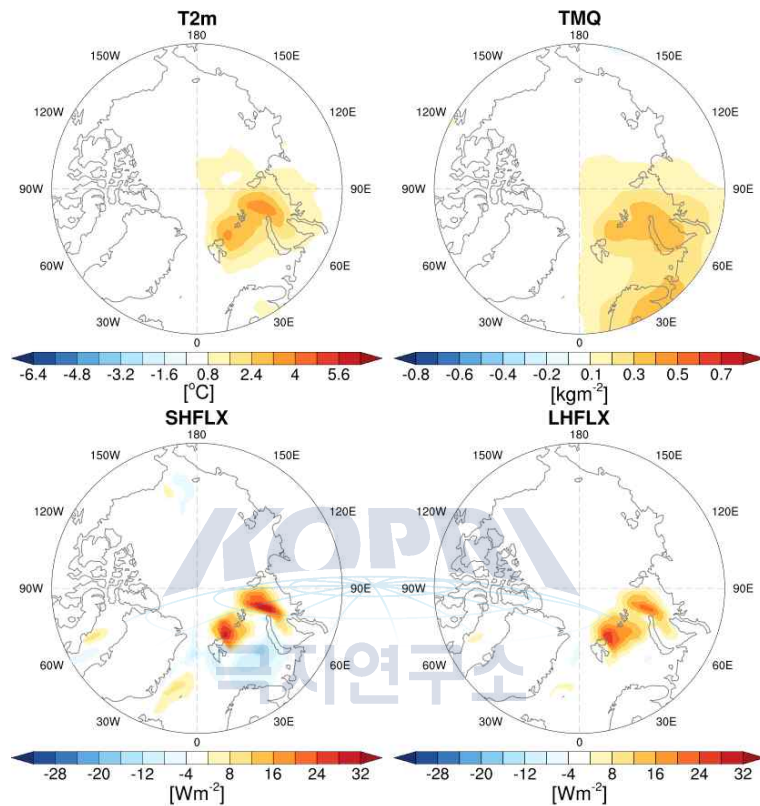


그림 1.17. CESM2(CAM6)의 CLIM, BK_EU 실험의 구름 관련 변수 (T2m, TMQ, SHFLX, LHFLX) 초겨울 평균 아노말리 분포

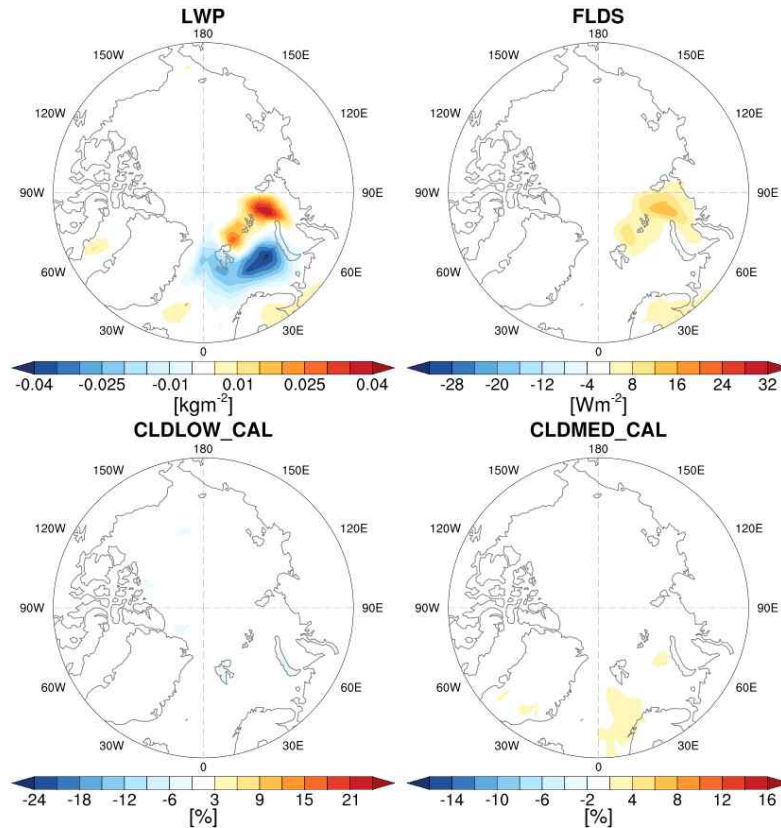


그림 1.18. CESM2(CAM6)의 CLIM, BK_EU 실험의 구름 관련 변수 (LWP, FLDS, CLDLOW_CAL, CLDMED_CAL) 초겨울 평균 아노말리 분포

- CESM2에서 바렌츠/카라 지역의 SST 증가, SIC 감소 효과로 지상 기온은 2.5도 이상 증가하였으며, 카라해에서 가강수량이 많이 증가하였음. 액체 수 경로는 바렌츠해에서는 감소, 카라해에서는 증가하였음, 현열, 잠열 플럭스가 증가하는 CESM1보다 작았으며, 그로 인해, 하향 장파 복사량이 다소 적게 상승한 것으로 유추됨. Liquid water path가 카라해에서 상당량 증가하였음에도 하향 장파 복사량은 작게 증가하였으며, 하층 구름과 중층 구름은 거의 차이가 없었음.
- 종합적으로, CESM1과 CESM2는 크게 지상 기온, 하향 장파 복사, 현열, 잠열 플럭스, 액체 수 경로, 경계층 고도, 하층 구름 양에서 큰 차이를 보였으며, CESM1에서는 해빙 감소, 해수면 온도 증가 시 하층 구름, 중층 구름 형성과 함께 지상 기온 상승의 효과를 보였지만, CESM2에서는 해빙 감소, 해수면 온도 증가 시 현열과 잠열 플럭스가 증가하는 만큼의 지상 기온 상승이 있었지만, 추가적인 구름의 생산 효과, 이후 장파 복사량 증가와 같은 효과가 나타나지 않았음.

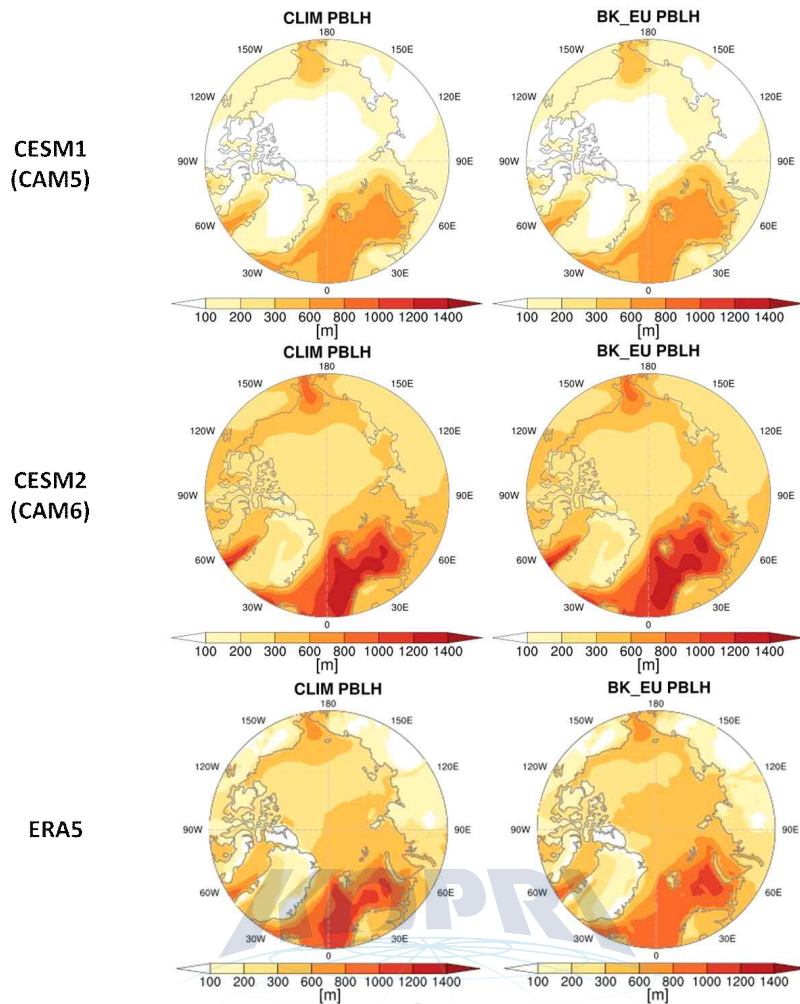


그림 1.19. CESM1, CESM2, ERA5의 CLIM, BK_EU 기간 평균 초겨울
경계층 고도 합성장

- 이러한 결과에 대해 다양한 원인이 있겠지만, 추정되는 것은 CLUBB 통합 방안 내 Boundary layer turbulence 계산 과정에 문제점이 있을 것으로 추정됨. CESM1에서 CESM2로 변경되면서 Boundary layer turbulence와 shallow convection, cloud macrophysics 과정이 통합된 CLUBB가 적용되었음. 여러 과정 중 북극에 수증기, 열 공급으로 구름 형성에 중요한 위치인 북대서양 지역에서 Boundary layer turbulence가 강하게 적용이 되어, 재분석 자료보다 200m 가량 더 높은 북대서양의 경계층 고도를 가지고, 난류 형성으로 구름 형성에 좋은 조건을 가지며, 북극으로 유입되는 수증기 양이 증가하여, CLIM 실험에서도 평균적으로 하층 구름을 많이 만들어냈을 것으로 추정됨.

2. 모델의 극지역 경계층/하층 구름 분석에 필요한 가용 관측 자료 확보

가. 모델 간 모의성능 평가에 필요한 극지역 관측 및 재분석 자료 확보

- 모델의 실험 구성, 기간에 따라 분석에 활용할 수 있는 관측 자료가 달라지며, 기후학 관점에서 사용할 수 있는 자료 및 2차년도 구름 관측 자료를 활용하기 위해 다양한 기관에서 제공하는 자료 조사를 진행함.
- 재분석 자료로는 ERA5, JRA-55 자료를 확보하였으며, 현장 관측 자료에 대해서는 크게 지점 관측 자료, 위성 관측 자료와 최근에 진행된 캠페인인 MOSAIC 이동 관측 자료 또한 확보하였음. 확보한 자료에 대하여 각 기관별 제공 변수에 대해 테이블화함.



표 1.2. BSRN 지점 관측 자료

기관	Baseline Surface Radiation Network (BSRN)	
자료 정보	https://bsrn.awi.de/	
자료 특성	위도 60°N 이상, 북극 지역 지점 관측 자료	
지점 (자료 기간)	Alert(82.49°N,62.42°W)	2004.08. - 2014.05.
	Barrow(71.32°N,156.61°W)	1993.02. - 2022.12.
	Cape Baranova(79.27°N,101.75°E)	2016.02. - 2016.11.
	Lerwick(60.14°N,1.18°W)	2001.01. - 2017.07.
	Ny-Ålesund(78.92°N, 11.93°E)	1992.01. - 2023.08.
	Tiksi(71.63°N,128°E)	2010.06. - 2018.03.
관측장비 (제공 변수)	Basic and others	표. 1.3
	Radiosonde	표. 1.4
	Meteorological synoptical observation	표. 1.5
비고	자료 기간 기준 : Basic and others 하향 장파 복사량(#9) 자료가 포함 여부 Barrow : 2018년 자료 부재 Lerwick : Radiosonde 2007.04 이후 자료 부재	

- 현장 관측 자료를 제공하는 기관 중 BSRN의 자료를 테이블화 하였으며, 위도 60°N 이상의 북극 지역은 Alert(82.51°N, 62°W), Barrow(71.32°N, 156.61°W), Cape Baranova(79.27°N, 101.75°E), Lerwick, Ny-Ålesund(78.93°N, 11.93°E), Tiksi(71.63°N, 128°E) 지역의 자료를 제공한다. 관측장비에 따라 크게 Basic and others, Radiosonde, Meteorological synoptical observation으로 분류됨 (Driemel et al., 2018).
- 지점별 자료 날짜 기준은 극지역의 복사 특성 분석에 용이한 Basic and others 자료의 하향 장파 복사량(#9) 자료가 포함되는 날짜로 분류함.
- Radiosonde 자료는 일부 지점(Barrow, Lerwick, Ny-Ålesund)에서 제공되며, Lerwick 지역은 2007.04. 이후 Radiosonde 자료가 없음.

표 1.3. Basic and others 제공 변수

#	Name	Short Name	Unit
1	DATE/TIME	Date/Time	
2	HEIGHT above ground	Height	m
3	Short-wave downward (GLOBAL) radiation	SWD	W/m2
4	Short-wave downward (GLOBAL) radiation, standard deviation	SWD std dev	W/m2
5	Direct radiation	DIR	W/m2
6	Direct radiation, standard deviation	DIR std dev	W/m2
7	Diffuse radiation	DIF	W/m2
8	Diffuse radiation, standard deviation	DIF std dev	W/m2
9	Long-wave downward radiation	LWD	W/m2
10	Long-wave downward radiation, standard deviation	LWD std dev	W/m2
11	Short-wave upward (REFLEX) radiation	SWU	W/m2
12	Short-wave upward (REFLEX) radiation, standard deviation	SWU std dev	W/m2
13	Long-wave upward radiation	LWU	W/m2
14	Long-wave upward radiation, standard deviation	LWU std dev	W/m2
15	Air temperature at 2 m height	T2	°C
16	Humidity, relative	RH	%
17	Station pressure	PoPoPoPo	hPa

표 1.4. Radiosonde 제공 변수

#	Name	Short Name	Unit
1	DATE/TIME	Date/Time	
2	ALTITUDE	Altitude	m
3	Pressure, at given altitude	PPPP	hPa
4	Temperature, air	TTT	°C
5	Dew/frost point	TdTdTd	°C
6	Wind direction	dd	deg
7	Wind speed	ff	m/s

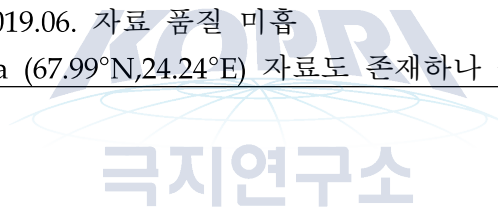
표 1.5. Meteorological synoptical observation 제공 변수

#	Name	Short Name	Unit	Method/Device
1	DATE/TIME	Date/Time		
2	Cloud base height	h	code	Ceilometer (CEIL)
3	Horizontal visibility	VV	code	Visibility sensor
4	Wind direction	dd	deg	Anemometer
5	Wind speed	ff	m/s	Anemometer
6	Temperature, air	TTT	°C	Thermometer
7	Dew/frost point	TdTdTd	°C	H y g r o m e t e r (HYGRO)
8	Pressure, atmospheric	PPPP	hPa	Barometer (BARO)
9	Characteristic of barometric tendency	a	code	Barometer (BARO)
10	Amount of barometric tendency	ppp	hPa	Barometer (BARO)
11	Present weather	ww	code	Visual observation
12	Past weather1	W1	code	Visual observation
13	Past weather2	W2	code	Visual observation
14	Low cloud	CL	code	Visual observation
15	Middle cloud	CM	code	Visual observation
16	High cloud	CH	code	Visual observation
17	Total cloud amount	N	code	Visual observation
18	Low/middle cloud amount	Nh	code	Visual observation
19	Temperature, air, maximum	TxTxTx	°C	Thermometer
20	Temperature, air, minimum	TnTnTn	°C	Thermometer
21	Whiteout yes/no	96111	y/n	Visual observation

극지연구소

표 1.6. ACTRIS 지점 관측 자료

기관	The Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure (ACTRIS)	
자료 정보	https://cloudnet.fmi.fi/	
자료 특성	자연 기간 2일의 준실시간 자료	
지점 (자료 기간)	Ny-Ålesund (78.92°N, 11.92°)	2017 ~ 현재
관측장비 (제공 변수)	Model	Cloud fraction, U(m/s), V(m/s), T(k), q(kg/kg), P(Pa)
	Disdrometer	Rainfall rate(mm/h), Number of Particle
	Lidar	Attenuated backscatter coefficient
	Rader	Radar reflectivity factor(dBZ), Doppler velocity(m/s), Spectral width(m/s)
	Microwave radiometer	Liquid water path (kg/m ²)
	Categorize	Model, Lidar, Radar, Microwave radiometer 통합 자료
비고	복사량에 직접적 연관이 있는 Liquid water path, Ice water content, Liquid water content 자료 존재 2018.10.-2019.06. 자료 품질 미흡 Kenttärova (67.99°N, 24.24°E) 자료도 존재하나 품질 미흡으로 제외	



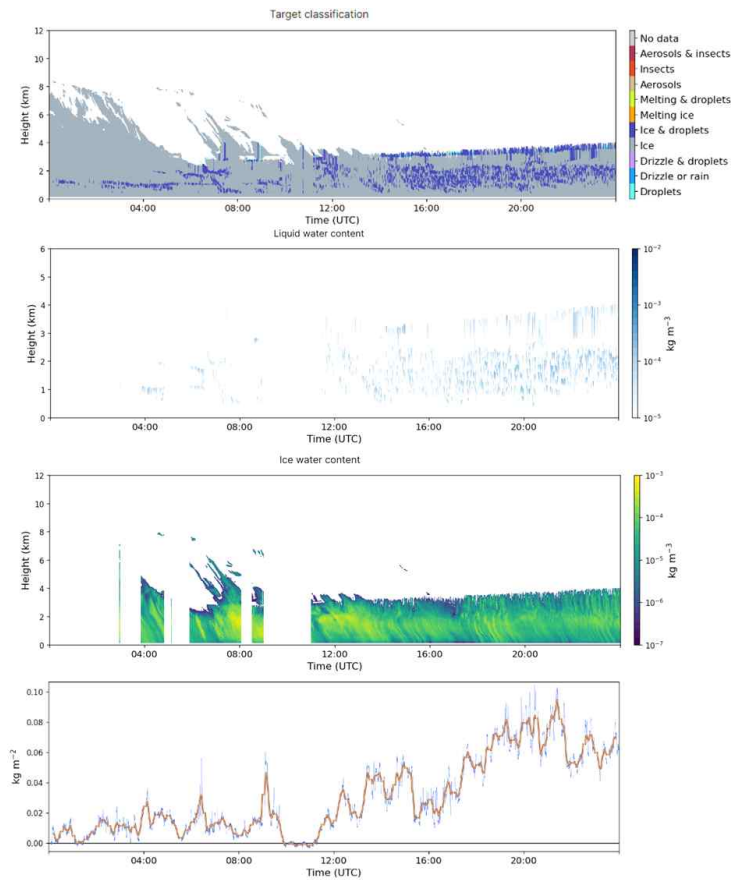


그림 1.20. 확보된 ACTRIS 지점 관측 자료 예시. 2023년 10월 27일의 수상체 종류별 연직 분포, Liquid water content (LWC), Ice water content (IWC)의 연직 분포와 Liquid water path (LWP) 시간별 분포.

표 1.8. CALIPSO-GOCCP 위성 관측 자료

기관	NASA (National Aeronautics and Space Administration)	
자료 정보	https://espo.nasa.gov/impacts/content/The_GCM-Oriented_CALIPSO_O_Cloud_Product_CALIPSO-GOCCP	
자료 특성	전지구 순환 모델 (GCM)의 특성을 비교하기 위해 사용되는 위성 관측 자료	
자료 기간	2006.06. - 2020.12.	
제공 변수	Cloud fraction	Total, High, Middle, low
	Cloud fraction_phase	각 레벨의 ice, liquid, unclassified cloud fraction
비고	2016.02. 자료 부재	

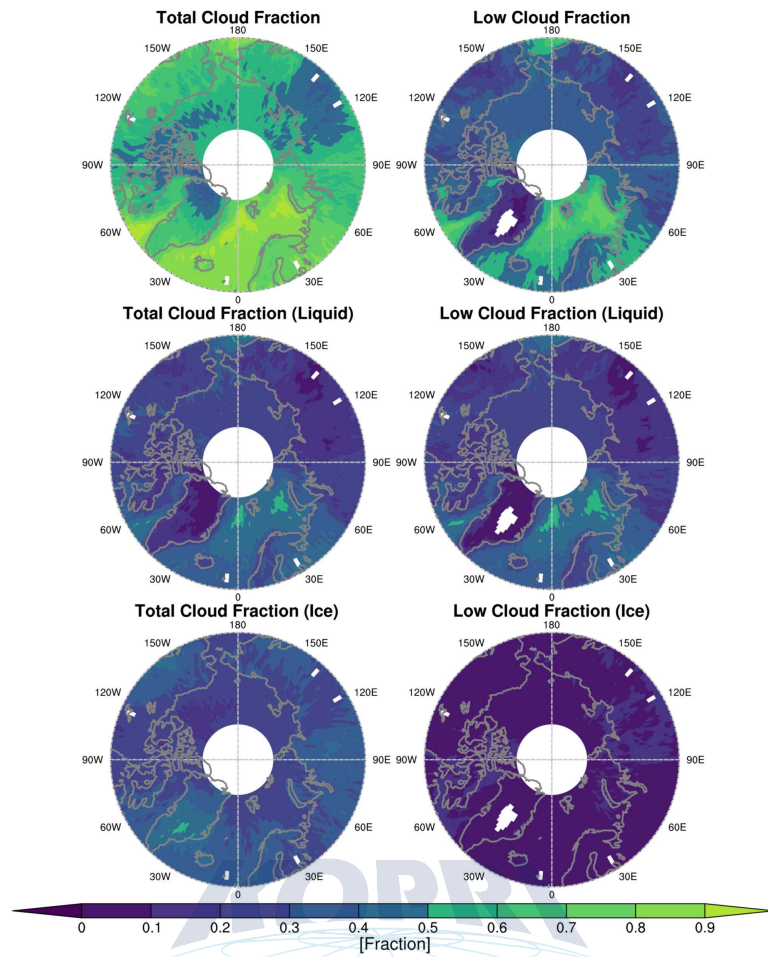


그림 1.21. CALIPSO-GOCCP의 2006년 - 2020년 기간 평균 겨울철 (DJF) 극지역 구름 양 분포

- 종합적으로, 지점 자료에서 모델과 분석에 용이한 지역은 Ny-Ålesund으로 판단함. BSRN에서 제공되는 관측 자료 중 기간이 가장 길며, 다양한 변수를 제공할 뿐만 아니라 ACTRIS에서 준 실시간으로 Ny-Ålesund 지역 자료를 확보할 수 있음.
- 수평 공간에 대한 분석을 위해 위성자료로 CALIPSO-GOCCP 자료를 확보하였으며, 극지역의 연직 분포뿐만 아니라, 수평 분포 분석에 CALIPSO-GOCCP 자료를 통한 비교 분석을 하고자 함.

3. 북극 해빙, 국지적 지표열속 변화가 전지구 스케일의 대기에 미치는 영향에 대한 고찰 가. 전지구 규모 대기 운동의 역학적 특성

(1) 기존 역학이론의 한계

- 대규모 대기 운동의 특성은 역사적으로 준지균 와도 보존식 (Quasi-Geostrophic potential vorticity equation)을 바탕으로 분석하였다. 준지균 와도 보존식은 Ageostrophic motion의 convergence 혹은 divergence가 대기 운동의 와도와 수직 운동으로 만들어지는 단열 warming 혹은 cooling과 연결되어 있음을 이용하여 만들어진 식이다. 즉, 대기 역학의 과정과 열역학 과정의 결합을 통해서 구현되었다고 볼 수 있다. 이러한 와도와 열역학적 단열과정의 결합은 Potential vorticity의 보존과정으로 귀결되는 데 이는 열역학적인 조건이 대기 역학적 움직임과 어떻게 결합하는지를 보여줌.
- QG potential vorticity equation은 남북간의 온도 경차가 만들어내는 제트기류의 vertical shear의 안정도를 분석할 수 있는 기반이 되며 불안정도가 만들어내는 저기압의 생성과 소멸의 과정을 포함하고 있다. 즉, 날씨 스케일의 저기압 역학의 핵심을 담고 있음.
- QG equation의 핵심은 Mean flow에서 에너지를 받은 에디의 움직임을 묘사하는데 목적을 두고 있다. 결과적으로 한 지역의 평균장이 불안정하면 저기압이 발생하고 저기압은 이동을 하고 다른 지역에서 소멸되면서 먼 지역과의 역학적 연결 고리를 만들어주고 있음.
- 저기압의 생성과 소멸의 과정이 3~4일 정도가 소요되므로 서로 다른 지역의 역학적 연결에 의해서 이루어지는 현상 중에 일주일을 넘지 않는 시간 스케일을 가지는 케이스들이 QG dynamics에 의해서 해석될 가능성이 많다고 볼 수 있음.
- 현재 보여지는 북극 지역의 국지적 온도 상승이 불려오는 대기 순환의 변화는 날씨보다는 공간적 그리고 시간적 스케일이 크다고 볼 수 있음. 즉, QG dynamics를 이용하여 북극 지역의 국지적 변화가 한반도 및 다른 아시아 지역에 미치는 역학적 영향을 파악하는 데는 한계가 있어 보임.
- 결정적으로 QG dynamics의 한계는 수직 안정도의 경직성에 있음. QG potential vorticity equation에서는 수직 안정도를 상수로 가정함. 그러나 실제 대기에서는 수직 안정도가 저기압의 생성과 소멸 과정 중에서 변함. 그리고 이러한 변화가 저기압의 발달 과정에 영향을 줌. 특히, 이러한 변화를 통해서 대기가 지나치게 불안정하지 않도록 조율해주고 있음. 수직 안정도가 고정 상수이면 중관 규모의 에너지가 전지구 규모로의 upscale cascade가 가능하지만, 실제 대기에서는 이러한 에너지 이동이 이루어지지 않음. 이는 난류적인 성격을 최소화 시키려는 대기의 성질을 QG dynamics가 표현하지 못한다는 것을 시사함. 결국, QG dynamics를 바탕으로 북반구 전체의 대기 움직임을 해석하는 데 한계가 있을 수 밖에 없음을 의미하기도 함.
- 결국, QG dynamics는 지역적인 적용만이 적절할 것으로 보이며 전 지구 규모의 대기 운동과 패턴은 다른 프레임이 적용되어야 함을 알 수 있음.

나. 전 지구 규모 대기 운동 방정식의 유도와 특징

- Primitive equation을 통해서 QG potential vorticity equation을 유도하는 과정에서 Geostrophy와 Hydrostatic balance를 기반으로 이루어진다. 그런데, 가장 중요한 요소는 Heat equation이 자동적으로 만족하면서 기본적인 Balance를 통해서 대기 운동을 결정하지 못하였다. 이를 Geostrophic degeneracy라 불린다. 이러한 연유로 지균풍을 예보하기 위해 Ageostrophic motion을 고려해야 함.
- 지균풍의 관계를 만족하더라도 기본적인 규모가 3000km를 넘어가는 운동의 경우에는 heat equation이 가장 중심적인 물리과정으로 자리잡음. 이러한 규모의 대기운동을 전 지구 규모로 규정하고 이를 묘사하는 식을 Planetary Geostrophic motion이라고 함.
- QG dynamics가 와도의 변화와 보존을 묘사하는 데 그 목적을 두고 있다면 Planetary Geostrophic Motion은 외부 열속에 반응하는 북반구 스케일의 대기 운동을 묘사하려 함. 즉, forced heat equation을 바탕으로 geostrophy와 hydrostatic balance를 만족하는 대기 운동을 결정함.
- 큰 규모의 대기 운동에서 가장 중요한 부분이 대륙과 해양의 존재이다. QG dynamics는 대륙과 해양의 열적 성질 차이에서 비롯되는 외부력에 대한 대기의 반응을 반영하는 데 구조적인 문제를 지니고 있음. 이와는 달리 Planetary geostrophic motion의 경우에는 기본적인 물리가 heat equation을 바탕으로 하기 때문에 대륙과 해양의 열적 성질 차이에서 비롯되는 외부열속을 반영하는 데 적절한 역학 구조를 가지고 있음. 즉, 대륙과 해양의 분포에서 발생하는 중위도 몬순의 역학 그리고 일반적으로 zonally asymmetric한 열속에 의한 큰 규모 대기 운동의 형성을 표현하기 위해서는 Planetary geostrophic motion이 가장 적절한 역학적 프레임으로 보임.

다. 전지구 규모의 대기운동의 지역적인 열속에 반응하는 역학적 패턴

(1) 전 지구 규모의 대기운동과 중관규모 운동의 상호작용

- Planetary Geostrophic motion을 zonally symmetric condition에 적용하면 Heat equation은 regional radiative-convective equilibrium의 과정으로 귀속됨. 이는 zonal 방향의 변화를 통해서 발생하는 meridional wind와 vertical wind는 발생할 수 없게 됨. 결국 이러한 대기에서는 지역적으로 radiative convective equilibrium을 만족하는 수직적 온도 분포를 가짐. 결국, 대기는 Thermal wind balance를 만족하는 서풍을 기본으로 가지게 됨.
- 이러한 상황에서는 대기는 남북 방향으로 서로 섞이지 않음. 실제 대기는 baroclinic instability를 통해서 남북의 서로 다른 온도를 지닌 대기가 섞임. 이러한 과정을 통해서 남쪽의 잉여 복사 에너지를 북쪽으로 이동시킴. Baroclinic instability가 QG dynamics로 묘사되는 것을 감안한다면 Planetary geostrophic motion은 남북 방향의 에너지 이동과정을 묘사하는 물리적 과정을 포함하고 있지 않음. 즉, 지균풍을 만족하는 대규모 대기운동의 묘사는 QG dynamics 나 Planetary geostrophic motion의 어느 하나로 묘사될 수 없음을 알 수 있음. 대규모의 대기운동은 두 스케일의 상호작용을 통해서 서술해야 함.

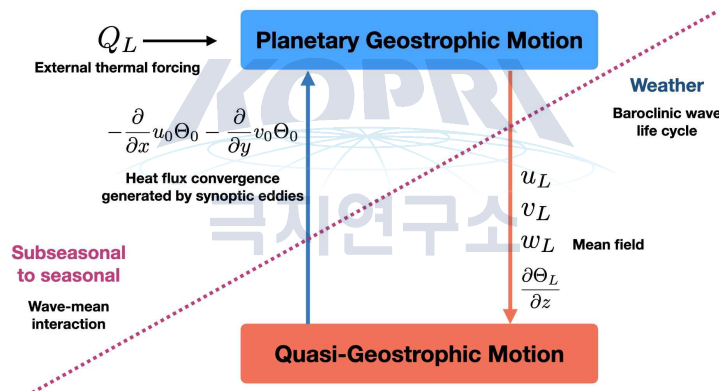


그림 1.22. Planetary geostrophic motion과 Quasi-Geostrophic motion의 상관관계 모식도

- Multi-scale formalism을 통해서 Planetary Geostrophic Motion과 Quasi-Geostrophic Motion의 상관관계를 표현할 수 있음. Planetary Geostrophic Motion은 지역적인 평균장을 구성하고 Quasi Geostrophic Motion은 불안정한 평균장에서 자라나는 에디를 묘사함. 그림 22에서 보여주는 모식도를 통해서 본다면 외부의 큰 열속을 받은 Planetary Geostrophic Motion이 지역적인 평균장을 구성하면 중관규모의 에디들이 평균장의 에너지를 받아서 자라남. 이러한 에디들은 Heat flux와 Momentum flux를 만들어내고 이는 다시 Planetary Geostrophic motion에 영향을 줌. 이러한 상호작용의 결과가 전지구 규모의 대기 운동이라고 볼 수 있음.

(2) linearized planetary geostrophic motion with a zonal mean wind

- 국지적인 열속에 반응하는 전지구 규모의 대기운동을 파악하기 위해서 가장 간단한 이론적

모델을 고려하였음. Planetary Geostrophic Motion에 지표면 열속을 가했을 때 선형적 반응을 조사하였음.

$$U \frac{\partial \eta}{\partial X} + Sw = Q(X, z)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{1}{H} \right) w = \beta \frac{\partial \psi}{\partial X}$$

- 이 두 식에서 U 는 중위도 평균 서풍을 나타내고 S 는 중위도 평균 수직 안정도를 나타냄. 그리고 $-\frac{1}{H} = \frac{1}{\rho_S} \frac{\partial \rho_S}{\partial z}$ 로서 공기밀도로 정의되는 수직 스케일을 나타냄. η 는 potential temperature이고 ψ 는 pressure로서 전지구 규모 대기에서는 $\eta = \frac{\partial \psi}{\partial z}$ 의 관계를 만족함. Q 는 지표면에 집중된 지역적인 열속으로서 전 지구 규모 대기 패턴을 형성하는 원인이 되고 있음. 위의 미분 방정식의 해가 지역적 열속에 반응하는 전 지구 규모 대기 운동의 패턴이 결정됨.
- Analytical solution은 전체 zonal wind U 의 크기에 따라서 대기 반응의 형태가 달라짐을 볼 수 있음. 그림 2에서는 중위도 제트 기류의 전반적인 세기를 나타내는 U 가 강할 때 대기의 반응을 보여주고 있음. 제트 기류가 강할 때는 대기의 반응은 지표면 근처에 국한되어서 나타남. 즉, 상층에서는 대기의 반응이 거의 미미하게 나타난다. 전반적으로 반응은 크지 않으며 대기의 반응이 지표면 근처에 국한되어있는 것이 특징으로 나타남.

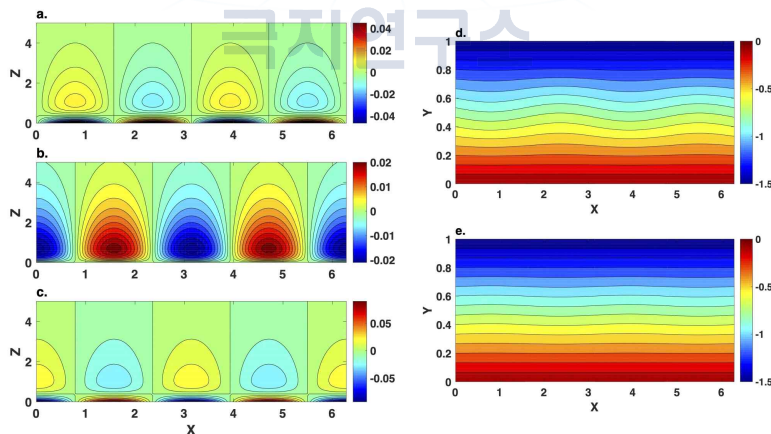


그림 1.23. 중위도 제트기류의 세기가 강할 때 전지구 규모 대기의 반응

- 반면에 U 가 약할 때 대기의 반응은 전혀 다른 패턴을 보여줌. 전반적으로 똑같은 지표면 열속에 대해서 대기의 반응은 더 크게 나타나며 상층에서도 반응을 살펴볼 수 있음.

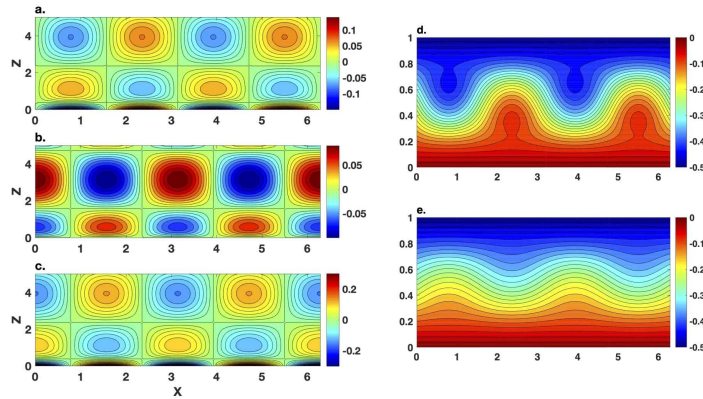


그림 1.24. 중위도 제트기류의 세기가 약할 때 전 지구 규모 대기의 반응

- 위의 간단한 모델의 결과는 primitive equation을 직접적으로 구현하는 수치모델의 결과와 재분석 자료의 비교를 통해서 결과의 신뢰성을 확인할 수 있음.

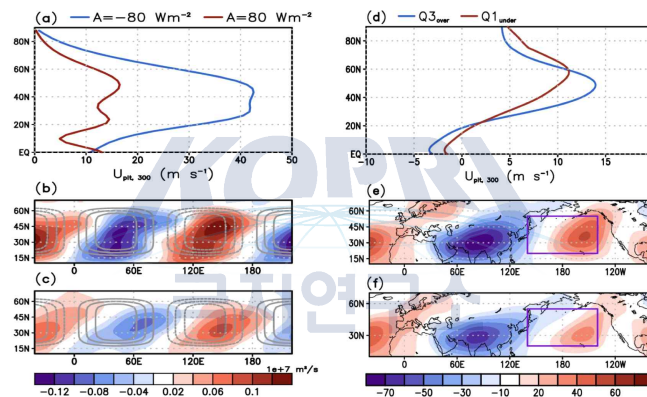


그림 1.25. 제트기류의 세기에 따른 지표면 열속에 대한 대기 반응, 수치모델링 결과 (a,b,c), Reanalysis data 분석 (d,e,f)

- 그림 1.25에서는 수치 모델과 재분석 자료에서 나타난 전지구 규모의 대기 반응을 제트기류의 세기에 따라서 비교해보았음. 수치 모델은 제트 기류의 세기가 강할 때와 약할 때 똑같은 지표면 열속에 대해서 반응하는 대기의 패턴을 나타냈음. 결과에 따르면 이론에서 보여진 것과 일치하게 제트기류가 약할수록 대기의 반응은 강하게 나타나는 것을 볼 수 있었음. 여름철 북태평양 고기압의 세기를 태평양 제트기류의 세기에 따라서 비교해보면 위의 그림에서처럼 제트기류가 약할 때 북태평양의 세기가 강하게 형성되는 것을 볼 수 있음.
- 위의 결과들을 종합적으로 판단해보면 전지구 규모의 대기 반응이 강하게 나타난다는 것은 중위도 제트 기류가 보다 더 남북으로 휘어진다는 것을 의미함. 즉, 중위도 서풍의 강도가 약해질수록 제트 기류의 사행의 정도는 커진다는 것을 의미함.
- 그러면 중위도 서풍의 강도를 결정하는 가장 중요한 요소는 무엇인지에 대한 고민을 해야 함. 지구 온난화의 가장 중요한 결과는 지표면 온도의 상승인데 이 상승의 정도가 균일하게

나타나지 않는다는 것임. 지구 온난화는 고위도의 온도를 보다 더 많이 올리고 있음. 특히, 이러한 현상의 원인을 북극과 남극의 해빙이 빨리 녹는 것이라고 보고 있음. 결국 극지방의 빠른 온도 상승은 적도와 극지역의 온도 차이를 줄이고 있음. Thermal wind balance를 고려한다면 중위도 서풍의 감소가 일어날 것으로 예상됨.

- 그렇다면 중위도에 존재하는 지역적인 열속에 반응하는 대기의 반응은 온난화가 진행함으로써 더욱 강해질 것으로 예상됨. 즉, 제트 기류의 사행이 심해질 것이라고 예상되는 데 이는 아마도 중위도 지역의 홍수나 가뭄과 같은 극한 기상의 발생을 증가시킬 수 있을 것으로 생각됨.

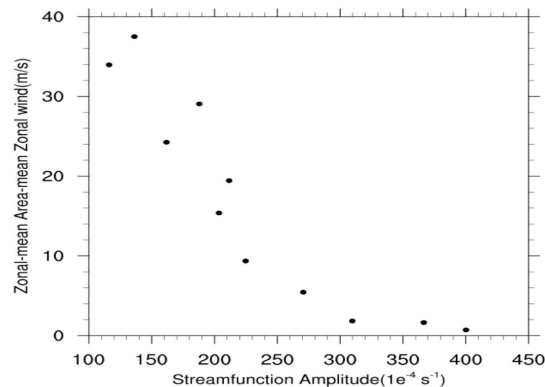


그림 1.26. 중위도 서풍의 강도에 따른 지표면 열속에 의해 만들어지는 전 지구 대기 운동의 강도

- 수치 모델링을 통해서 전 지구 대기의 반응이 중위도 서풍의 강도에 따라서 어떻게 변하는지를 살펴보았다 (그림 1.26). 결과에서 보면 중위도 서풍이 감소하여 10m/s보다 아래로 내려가면 대기의 반응의 세기가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있음. 즉, 서풍의 감소가 지속되어 10m/s 이하로 내려가면 대기의 반응이 폭발적으로 변할 가능성이 있음.

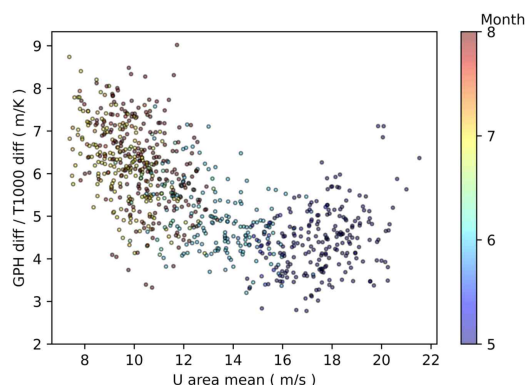


그림 1.27. 중위도 서풍의 세기에 따른 대기의 반응. 대기의 반응은 대륙과 해양의 Geopotential height의 차이로 나타냈으며 대륙과 해양의 온도차이로 정규화시킴

- 그렇다면 중위도 서풍이 전반적으로 작아서 수치 모델링의 결과에서 나온 대기의 반응의 증가를 보려면 여름철이 적당할 것으로 보임. 그림 1.27에서는 5월에서 8월까지의 40년간의 재분석 자료를 통해서 중위도 서풍과 대기의 반응의 상호관계를 살펴보았음. 일단, 일주일 평균 장을 바탕으로 위의 scatter plot으로 구성하였음. 전반적인 패턴은 그림 1.26에서 보았던 관계와 비슷하게 나타남. 특히 중위도 서풍이 10m/s보다 작아지면 대기의 반응이 보다 크게 증가함을 볼 수 있음. 주목할 부분은 이러한 증가가 7월과 8월에 집중적으로 나타난다는 것을 볼 수 있으며 이는 계절적 변화에 기인한 것으로 보여짐. 즉, 계절적 특성에서 비롯된 중위도 서풍의 감소는 지표면 열속에 대한 대기의 반응을 증폭시키고 있음.
- 최근 들어서 나타나는 현상이 북극의 고온과 여름철 이상 기상 현상의 전세계적인 증가라고 볼 수 있음. 이상 기상 현상은 여러 종류가 있는데 공통점은 적도의 습하고 따뜻한 공기와 극지역의 건조하고 차가운 공기가 중위도로 주입되면서 일어난다고 볼 수 있음. 즉, 중위도에서 고위도와 저위도의 경계라고 볼 수 있는 제트기류가 남북으로 심하게 사행하는 것이 위의 이상 기후와 밀접한 연관이 있음.

실험1

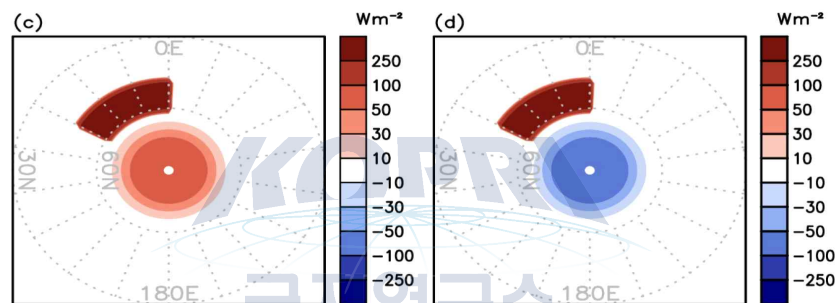


그림 1.28. 수치 모델에 이용된 지역적으로 국한된 지표면 열속

- 전 지구 규모의 대기의 반응은 제트기류의 사행과 밀접한 연관이 있으며 본 연구에서 테스트한 수치 모델 실험들과 재분석 자료의 분석은 앞으로 중위도 서풍의 감소를 예측하고 이는 중위도 대기의 지표면 열속에 대해서 보다 강하게 반응할 것으로 기대됨.
- 지역적으로 국한된 고위도의 지표면 열속이 만들어내는 전 지구 규모의 대기 운동의 패턴을 살펴보기 위하여 그림 1.28과 같은 지표면 열속을 수치모델에 도입하였음. 첫 번째는 극지의 온난화를 가정하여 고위도에 국지적인 열속을 가했고 두 번째는 극지의 온도가 내려간 상황에서 고위도에 국지적인 열속을 가한 경우임. 극지의 온도는 중위도 제트기류의 속도를 조율할 수 있음. 즉, 극지의 온도가 상승한 경우 중위도 서풍은 약화되고 극지의 온도가 내려간 경우 서풍이 강화됨.
- 이번 실험에서는 특정 웨이브 넘버를 설정하여 지표면 열속을 준 기존의 실험과는 차별을 보임. 국지적인 열속을 가하는 경우 대부분의 웨이브 넘버들이 포함되어 있다고 보면 됨. 그러면 각각의 웨이브 넘버 열속 패턴에 반응하는 전 지구 규모의 대기 운동을 볼 수 있음. 즉, 전 지구 규모 대기 운동의 반응 패턴을 볼 수 있음.
- 이론을 바탕으로 살펴보면 전 지구 규모의 대기의 반응은 zonal wavenumber k 에 따라 달라

지는 데 이론적인 계산에 따르면 $1/k$ 에 비례함. 즉, wavenumber가 예를 들어 5인 경우 반응은 $1/5$ 에 비례하게 됨. 지표면 열속의 공간적 스케일이 클수록 반응의 크기도 커지며 작을수록 급격하게 반응에서 감소하는 것으로 볼 수 있음.

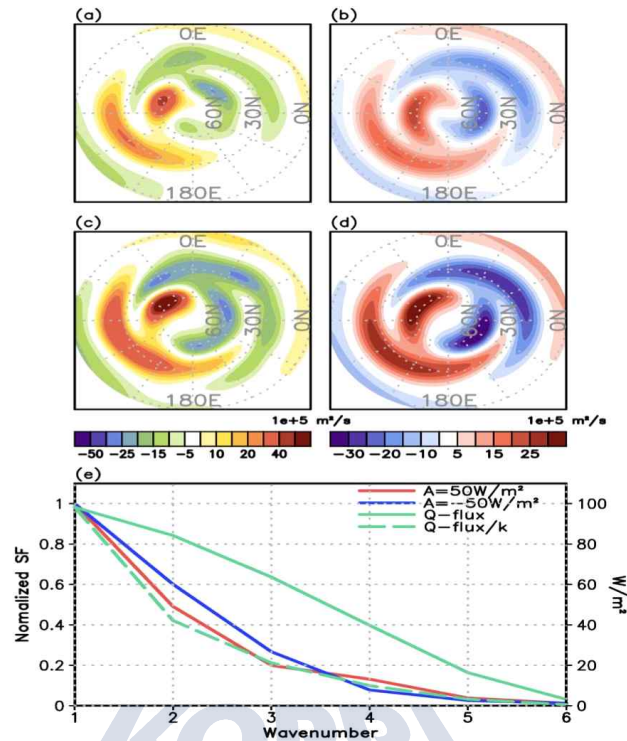


그림 1.29. 국지적인 지표면 열속에 반응하는 전 지구 규모 대기 운동의 공간적 패턴

- 수치모델의 결과를 보면 이론에서 예상하듯이 지표면 열속이 가지는 각각의 zonal wavenumber의 반응이 $1/k$ 배 비례해서 그 반응이 나타난다는 것을 볼 수 있음. Primitive equation을 바탕으로 하는 수치모델에서도 간단한 이론적 모형에서 나온 결과와 일치하는 반응이 나타난다고 볼 수 있음. 그림 1.28에서 보면 지표면의 열속이 공간적으로 국소적이었으나 반응은 전 북반구에 걸쳐서 wavenumber 1의 패턴을 강하게 보이는 것을 볼 수 있음.
- 위의 실험은 북극 지역의 국지적인 온도 상승이 어떻게 다른 지역에 영향을 줄 수 있는지를 보여주고 있음. 전 지구 규모의 대기의 반응은 low frequency를 선호한다고 볼 수 있는데 위의 결과에 따르면 극지역 국지적 열속이 북반구 전체의 제트 기류의 세기를 조정한다고 볼 수 있음.

(3) 종관 규모 에디의 역할

- 전 지구 규모의 대기 운동만으로는 남북 방향의 역학적 소통을 설명할 방법이 존재하지 않음. 실제로 전지구 규모의 에디들이 만들어내는 남북 방향의 열속이 종관 규모의 에디에 비해서 현저히 작게 나타남. 즉, 전체 대기의 반응에서 남북 방향의 반응은 종관 규모의 에디들이 가지는 역학적 역할에 대해서 고려해야 함.

- 그림 1.29에서 보면 북극 근처의 국지적 열속이 북반구 전체의 대기 반응을 만들어내는데 남북 방향으로의 대기의 형태로 파동적인 반응을 이끌어내고 있음. 제트 기류의 관점에서 보면 이러한 반응의 형태는 제트 기류의 중심을 북쪽 혹은 남쪽으로 이동시키는 결과를 초래하는데 현재 많은 재분석 자료의 분석에서 위와 같은 변화가 감지되고 있으며 이를 온난화와 연결시키고 있음.
- 전 지구 규모의 대기에서 보여지는 파동적인 반응은 국한적인 공간에서의 Heat equation에서 국소적인 forcing을 주었을 때의 해와 비슷한 패턴을 보이고 있음. 전 지구 규모의 대기 방정식이 Heat equation에 기반을 두고 있으므로 중관 규모 에디들의 역할이 diffusion과 비슷하다고 볼 수 있음.
- Heat equation에서 파동적인 반응이 나타나는 것은 경계 조건이 중요함. 만약 경계가 무한대로 주어져 있다면 국소적인 열속에 대한 반응은 국소적으로 한정될 것임. 물론 열속의 영향력 보다는 보다 넓게 반응할 수 있어도 파동적인 반응이 전 구간에 나타나지 않을 수 있음. 이러한 부분이 전 지구 규모 대기의 반응에서 나타나므로 이러한 공통점이 의미하는 바를 대기 역학적으로 해석해야 할 필요가 있음.



2절 북극 해양-대기경계층-구름의 연관성 분석 및 극지연구소 예측시스템 모의성능 평가

1. 극지역 현장/위성 관측 자료와 극지 예측 시스템의 모의 결과 비교/검증

가. 관측 자료의 사이클론 유입 시 대기 경계층-구름, 복사 특성 분석

- 1차년도 연구에서 본 연구진은 The Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure (ACTRIS)의 지점 자료, Baseline Surface Radiation Network (BSRN) 지점 자료를 확보하였으며, 당해연도에 두 자료의 공통 지점인 니알슨(Ny-Ålesund) 지점에 대해 관측 자료와 모델과의 비교를 진행하였음.
- 2019년 10월부터 2020년 10월까지 MOSAIC campaign에서 구름을 포함한 다양한 북극의 특성을 1년간 조사된 바가 있으며, 지점 자료와 함께 분석을 진행하기 위해, MOSAIC 캠페인 기간 내 사례를 분석 기간으로 선정하였음.

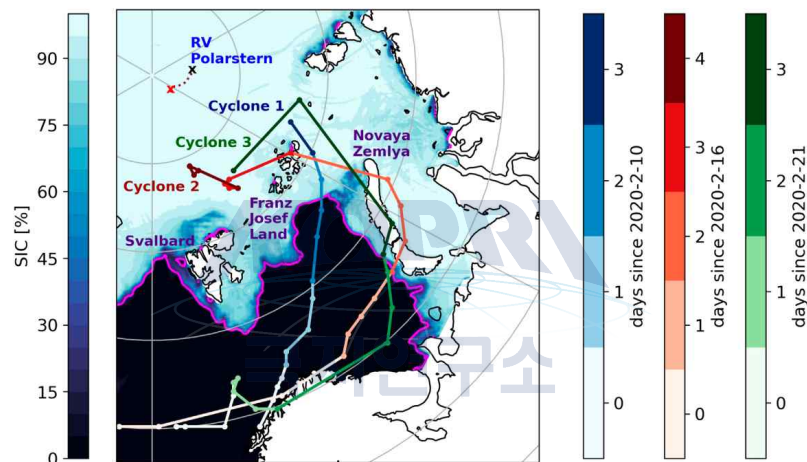


그림 2.1. 2020년 2월 Cyclone 유입 경로 (Aue et al., 2023)

- 사례는 2020년 2월 10일부터 2월 25일 사이 바렌츠해로 유입된 세 개의 사이클론으로 선정함. 각 사이클론은 해빙에 다음과 같은 영향을 미쳤으며, 이후 해양-대기경계층 구름 상호작용 특성을 분석하기에 적절한 사례로 판단됨.
- 첫 번째 사이클론(2020.02.10.~2020.02.12..)의 경로는 중앙 바렌츠해를 통과하여 Franz Josef Land 인근 북극 중앙에 진입하였으며, 두 번째 사이클론(2020.02.16.~2020.02.20.)은 바렌츠해 남부를 지나 노바야젬랴(Novaya Zemlya)를 넘어 카라해 서부로로 진입하여 북극 중앙까지 이동함. 특징으로는 최저 중심 기압이 960 hPa 이하로 기록되며, 세 사이클론 중 가장 강력한 사이클론으로 평가됨. 동쪽에서 따뜻하고 습한 공기가 유입되면서 기온이 급격히 상승하여 Franz Josef Land와 스발바르 북쪽 지역의 기온이 영하 30도에서 영하 10도까지 상승하였음. 세 번째 사이클론(2020.02.21.~2020.02.25.)은 두 번째 사이클론과 거의 동일한 경로를 따랐으나 빠르게 소멸되었음. 두 번째 사이클론으로 인해 해빙이 얇아지고 이동한 상태에서 세 번째 사이클론이 발생해 변화가 증폭됨(Aue et al., 2023).

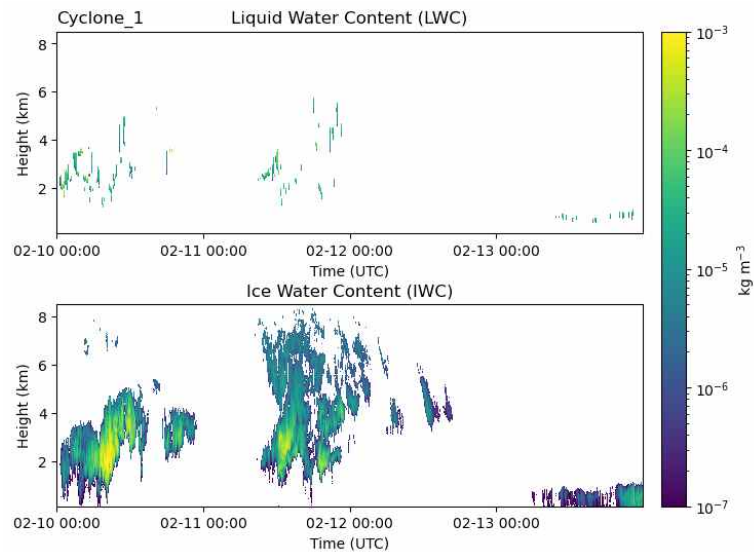


그림 2.2. 첫 번째 사이클론 발생 기간 내 니알슨 지역의 Liquid water content(LWC), Ice water content(IWC)의 시계열 분포

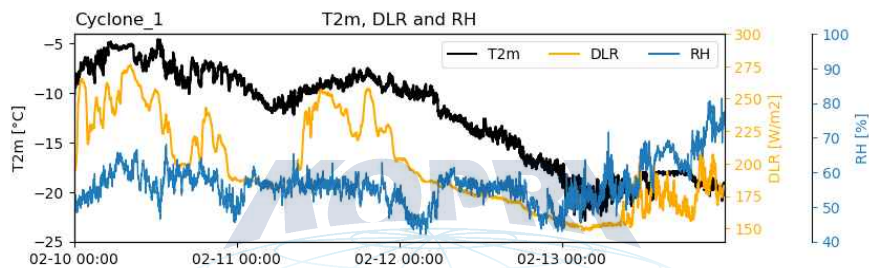


그림 2.3. 첫 번째 사이클론 발생 기간 내 니알슨 지역의 지상 기온 (T2m), 하향 장파 복사량(DLR), 상대습도(RH)의 시계열 분포

- 첫 번째 사이클론 발생 기간 중 2월 10일~11일, 니알슨 지역 주로 2~4km 사이 중층에서 liquid water content (LWC)와 Ice water content (IWC)가 동시에 존재함. 혼합상 구름 (mixed-phase cloud)의 형성되며 구름 내에서 수적과 빙정의 공존이 나타남. 사이클론이 인접하면서 구름이 가장 크게 발달한 시기인 2월 12일에는 LWC는 6km, IWC는 8km 고도의 상층까지 확장됨. 이는 강한 상승 기류와 대류성 활동이 있음을 보여주고, 중위도에서 유입된 따뜻하고 습한 공기가 구름의 수직 발달을 도왔을 가능성이 높음. 이 시점에서 구름이 최대 발달하며, 상층 구름에서는 빙정이 형성되고 하층에서는 과냉각 물방울이 유지됨. 2월 13일은 층운형 구름 발달 시기로 LWC와 IWC가 2~4km에 걸쳐 층운형 구름 형태로 나타남. 구름 상부에서는 복사 냉각이 발생하고, 하부에는 가열이 발생하여, 구름 내 빙정과 수적이 공존하며, 혼합상 구름이 장시간 유지됨.
- 2월 10일 ~ 11일 초기 지상 기온은 중위도에서 유입되는 공기의 영향으로 발달된 구름으로 하향 장파 복사가 증가하며, 기온이 상대적으로 -10°C에서 -5°C 사이로 높게 유지됨. 이후 사이클론이 접근하면서, 북극에서 밀려 내려온 차가운 공기가 니알슨 지역으로 유입되어 기온이 점차 하강함. 11일 12UTC 이후 강한 상승 기류와 함께 발달한 구름으로 하향 장파 복사가 다시 증가하면서 기온이 소폭 상승하였다가, 사이클론의 접근으로 차가운 북극 공기가

남하하여 기온이 -20°C 까지 내려감. 이후 층운형 구름의 형성으로 장파 복사가 증가하면서 지상 기온도 -16°C 까지 상승함. 상대습도의 경우 초기에는 50~60% 였으나, 시간이 지남에 따라 80~90%까지 상승하였고, 이는 수증기 공급이 증가하고 구름 발달에 유리한 조건이 형성되었음을 보여주고, 높은 상대습도는 혼합상 구름 형성과 유지에 중요한 역할을 했을 가능성이 큼.

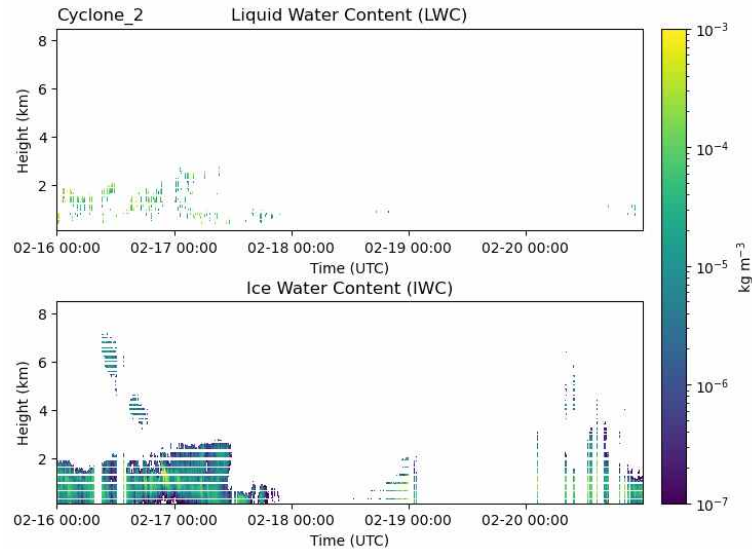


그림 2.4. 두 번째 사이클론 발생 기간 내 니알슨 지역의 Liquid water content(LWC), Ice water content(IWC)의 시계열 분포

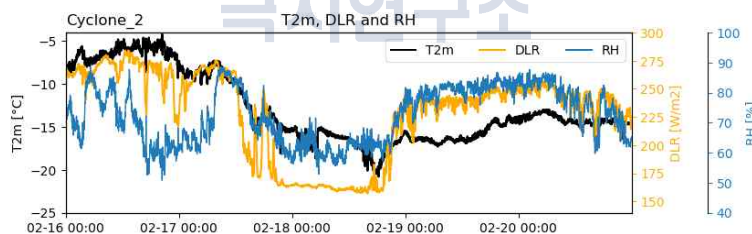


그림 2.5. 두 번째 사이클론 발생 기간 내 니알슨 지역의 지상 기온(T2m), 하향 장파 복사량(DLR), 상대습도(RH)의 시계열 분포

- 두 번째 사이클론의 초기 날짜인 2월 16일에 약 2~3km 고도에 약한 LWC가 나타남. 이 시점에서 구름은 비교적 낮은 고도에 형성되며, 강한 상승 기류가 없는 상태임. 2월 17일~18일에 LWC는 중간 고도(2~3km)에서 관측되며, 농도가 비교적 낮게 나타남. 이는 구름 내 수적의 양이 제한적임을 시사함. 상층의 LWC가 많지 않은 것은 차가운 북극 공기의 유입으로 대부분의 수분이 얼음 형태로 변환되었을 가능성을 암시함.
- IWC는 2월 16일~17일 사이 2~6km 고도까지 넓게 분포하며, 사이클론이 강한 얼음 구름을 동반했음을 보여줌. 2월 18일 이후 고도가 2~4km로 낮아지고, IWC의 농도도 약해짐. 이는 구름이 약화되고 해빙 영역에서의 공기 흐름이 바뀌었음을 시사함. 이 시기 동안 IWC의 감소는 구름이 얇아지면서 복사 냉각 효과가 나타날 가능성을 높임.

- 2월 16일 초기, 지상 기온이 -5°C 에서 -10°C 사이로 유지되며, 사이클론 전면부에서 온난한 공기의 영향을 받고 있음. 이 때, 하향 장파 복사량이 약 250 W/m^2 까지 증가하며, 지표의 냉각이 억제됨. 2월 17일 이후 IWC가 감소하고 구름이 얇아지면서 하향 장파 복사도 감소함. 구름 복사 효과가 약해지고 기온 하강이 촉진되어, 기온이 급격히 하강하며 -20°C 에 도달함. 이는 사이클론 후면에서 차가운 북극 공기가 남하했기 때문임. 2월 18~19일, 지상 기온이 점차 상승하며 $-10^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 사이로 유지됨. 이는 구름 복사 효과와 바람의 변화에 의한 것으로 보임. 2월 20일에는 기온이 다시 하강하며, 사이클론의 영향이 줄어들고 차가운 공기가 다시 유입됨. 상대습도는 초기에는 80~90%로 높게 유지되지만, 2월 18일 이후 구름이 얇아지며 습도가 점차 낮아졌고, 19일에 다시 증가하였으며, 습도의 변화는 구름 발달과 약화에 따라 복사 효과와 온도 변화에 영향을 줌. 이러한 특징은 두 번째 사이클론이 초기에는 강한 빙정형 구름을 형성했지만, 시간이 지남에 따라 구름이 약화되고 복사 냉각이 강화되면서 기온이 하강하는 과정을 잘 보여줌.

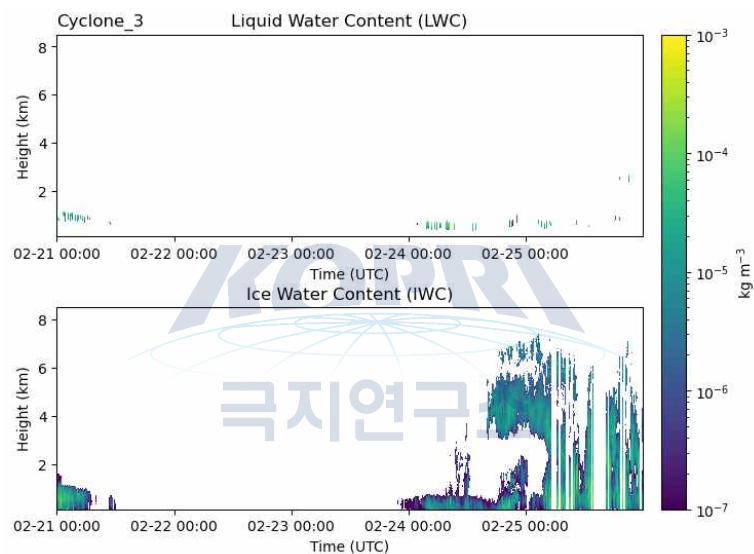


그림 2.6. 세 번째 사이클론 발생 기간 내 니알슨 지역의 Liquid water content(LWC), Ice water content(IWC)의 시계열 분포

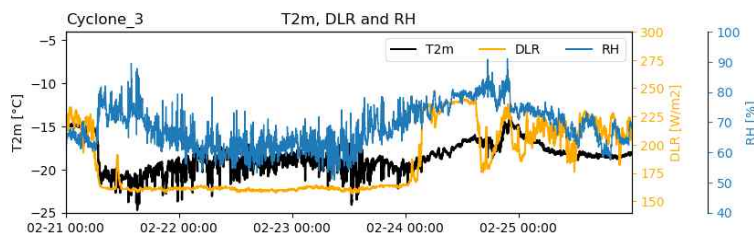


그림 2.7. 세 번째 사이클론 발생 기간 내 니알슨 지역의 지상 기온(T2m), 하향 장파 복사량(DLR), 상대습도(RH)의 시계열 분포

- 2월 21일~22일 초기에는 LWC와 IWC가 함께 존재하며, 혼합상 구름이 형성됨. 이후 LWC가 감소하고 IWC가 유지되면서 구름이 빙정형 구름으로 전환됨. 2월 24~25일 사이 IWC가 3~8km 고도까지 확장되며, 강한 빙정형 구름이 형성됨. IWC는 특히 2월 24일 이후에 가장

농도가 높아지고, 구름이 상층까지 발달하며 대기 중에서 얼음 입자가 활성화된 것을 보여줌. 이는 강한 북극 기단과 상승 기류가 영향을 미쳐 빙정 형성이 활발했음을 나타냄.

- 2월 21일 초기 지상 기온이 -20°C 부근까지 하락하며 매우 차가운 상태로 시작됨. 2월 23일 전후, 지상 기온이 점차 상승하며 -10°C 에 근접함. 이는 구름 복사 효과와 따뜻한 공기의 일시적인 유입으로 인한 현상일 수 있음. 2월 24~25일에는 지상 기온이 다시 약간 하강하지만, 이전만큼 극단적으로 떨어지지 않고 -15°C 근처에서 유지됨. 이는 구름의 지속적인 복사 효과로 설명됨. 상대습도는 전체적으로 70~90% 사이에서 높게 유지되며, 구름 발달과 유지에 기여함. 특히 2월 22~23일 사이클론이 강하게 발달한 시점에서 상대습도가 최고치에 도달하며, 이는 수분 공급이 충분했음을 나타냄.
- 종합적으로, 모든 사이클론은 니알스 관측 지점을 기준으로 동쪽으로 진행이 되었으나, 사이클론의 상세 진입 경로에 따라 이후 관측 결과가 상이하였으며, 공통적으로 지상 기온은 사이클론에 동반된 공기의 유입과 이동에 따라 급변하며, 이로 인한 온난 공기와 한랭 공기의 교차로 일간 기온 변동이 크게 나타났으며, 하향 장파 복사량은 구름층의 물리적 특성에 따라 크게 달라지며, 높은 LWC와 IWC는 복사 강도를 증가시켜 하향 장파 복사량을 증가시키는 경향이 있음. 상대습도는 구름 형성 및 유지의 핵심 요소로, 사이클론 통과 시 높은 습도가 유지되면서 혼합상 구름과 빙정형 구름의 전환이 일어나며 복사 과정에 중요한 영향을 미쳤음.



나. 사이클론 유입 시 KPOPS-EARTH 대기모델의 구름, 복사 특성 분석

- KPOPS-EARTH 대기 모델의 기반 모델인 CESM2(CAM6)는 극지역 하층 구름이 과대모의된다는 선행 연구가 많이 알려져 있음(Baek et al., 2022; Bae et al, 2022). CESM2(CAM6)에 Vavrus and Walizer 2008 scheme을 적용하여, 극지역 하층 운량을 제한하여, CTRL 실험과, 운량 제한 실험 (FD)으로 2020년 2월의 사이클론에 대한 예측 실험을 진행하였음. 모델 수행은 2월 9일 초기장을 활용하여 2월 28일까지, 앙상블 31개의 자료를 사용함 (표 2.1).

표 2.1. 2020년 2월 사이클론 사례 실험 구성 정보

	CTRL	FD
모델	CESM2.1.3	
수행 기간	2020.02.09. ~ 2020. 02.28.	
초기장	Initial time: 2020.02.09. ATM:ERA5 LAND: CLM5 spun up with ERA5 OCN & ICE : POP2/CICE5 forced with JRA 55-DO (Data Assimilation and Observation)	
앙상블	31개	
해상도	1.9° x 2.5°, 32 levels	
비고		Freeze_dry scheme 적용 (Vavrus and Waliser., 2008)

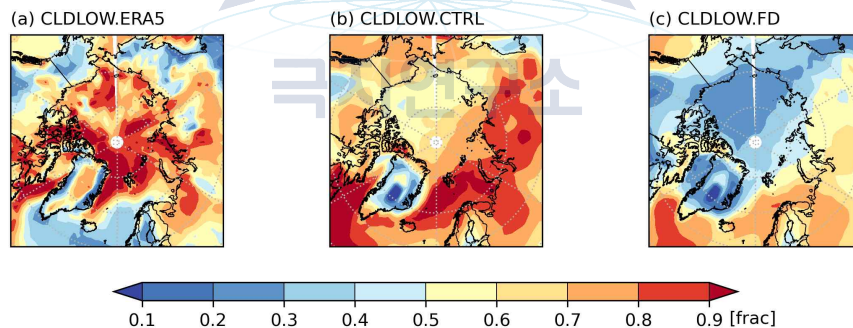


그림 2.8. 모델 수행 기간 전체(2020.02.09.~2020.02.28.) 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 하층 구름 운량 분포

- 재분석 자료에서는 북극 전역과 바렌츠해, 스발바르 군도 주변에서 하층 구름 양이 높게 나타나는 지역이 분명하게 보임. 적색 계열은 하층 구름이 많음을, 청색 계열은 구름이 적음을 나타내며, 구름량은 0.8~0.9 범위에서 크게 나타나는 지역이 있음. CTRL 실험은 초기장(2월 9일) 이후 수행된 기본 실험임. ERA5와 비교했을 때, 북극의 특정 해양 지역에서 하층 구름 양이 유사하게 분포하지만, 일부 육지 지역과 해양 경계에서 과대모의된 경향이 보임(빨간색 영역). FD 실험에서는 Vavrus and Waliser (2008)에서 제안한 freeze-dry scheme을 적용하여, 북극 내에서 하층 구름의 형성을 제한함. 이 실험 결과는 CTRL 실험과 비교해 하층 구름 양이 눈에 띄게 감소했으며, 구름이 적은 청색 영역이 넓게 분포함. 특히 육지와 해양 경계에서 구름 양이 현저히 줄어든 것이 특징임. FD 실험은 하층 구름의 형성을 제한하는 방안이 적

절히 적용되었음을 보여주며, 특히 극지방에서 과도한 구름 형성을 제어하는 데 효과적인 것을 확인할 수 있음.



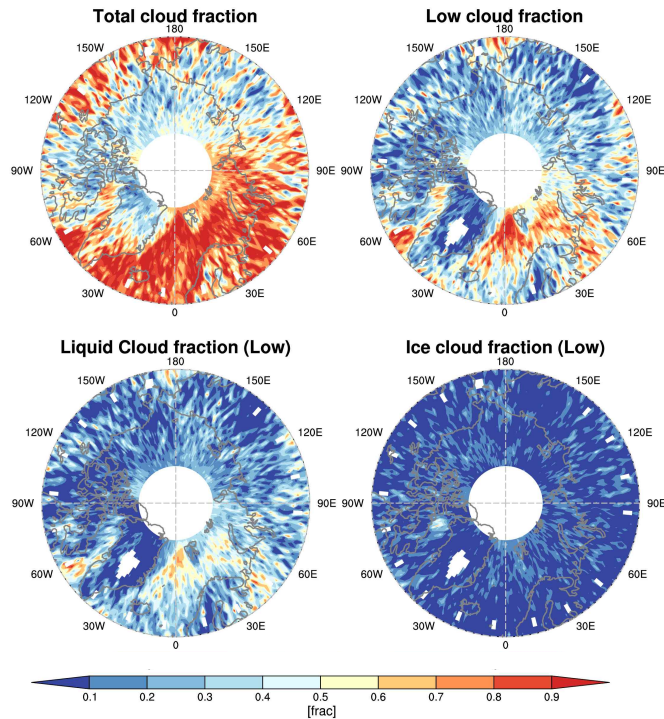


그림 2.9. CALIPSO-GOCCP 위성 자료의 2020년 2월 평균 총 운량(Total cloud fraction), 하층 운량(Low cloud fraction), 하층 수적형 구름 운량(liquid cloud fraction(low)), 하층 빙정형 구름 운량(ice cloud fraction at low level)) 분포

- 북극 지역 전반에서 구름 분포가 균일하지 않으며, 특히 대륙 주변 및 일부 해양 지역(북대서양, 바렌츠해)에서 높은 구름량(0.7~0.9)이 나타남. 이 패턴은 대기 순환과 습한 공기 유입에 의한 구름 형성을 반영하며, 사이클론의 경로에 따라 구름량이 집중되는 것을 보여줌. 하층 구름은 주로 북극 해양과 스발바르 군도 주변에서 많이 나타나며, 대륙 지역에서는 구름 양이 상대적으로 적음. 이 분포는 극지방의 해빙과 해수면에서 발생하는 수증기 공급이 하층 구름 형성에 중요한 역할을 한다는 것을 시사함. 하층 구름 중에서도 액체 상태의 구름은 주로 바렌츠해와 북대서양에서 나타나며, 이는 상대적으로 따뜻한 해양에서 혼합상 구름이 형성됨을 반영함.
- 육지와 고위도 해빙 지역에서는 액체 구름 양이 극히 낮거나 거의 나타나지 않음. 하층 얼음 구름은 주로 육지와 해빙 지역에서 집중되며, 특히 스발바르와 그린란드 근처에서 두드러짐. 이는 극지방의 낮은 온도가 물방울을 얼게 해 빙정형 구름을 형성하기 때문임. CALIPSO-GOCCP 자료와 비교하여, CTRL 실험은 바렌츠해와 북대서양 주변에서 관측된 구름 양에 비해 과대평가되었으며, FD 실험은 실제 구름 양이 많이 나타나는 해양 지역에서도 구름 양을 과도하게 억제한 경향이 있음.

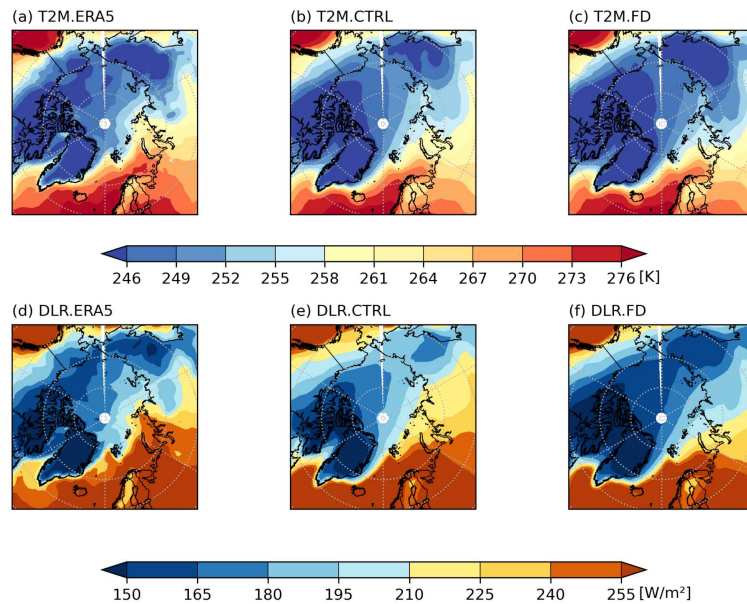


그림 2.10. 첫 번째 사이클론 발생 기간 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 지상 기온 (상단), 하향 장파 복사량 분포(하단)

- ERA5 재분석에 따르면, 북극 해양 지역에서는 대체로 250~260K의 기온 분포가 나타남. 스발바르 주변의 바렌츠해는 해양의 상대적으로 따뜻한 수온과 사이클론 활동으로 인해 기온이 273K 부근까지 상승하는 지역도 있음. CTRL 실험에서는 ERA5와 유사한 기온 패턴이 나타나지만, 전체적으로 기온이 약간 높게 나타나는 경향이 있음. FD 실험에서는 freeze-dry scheme이 적용된 결과로, CTRL에 비해 전체 기온이 낮아지는 경향을 보임. 특히 스발바르와 그린란드 동부 지역의 기온이 273K 이하로 나타나며, 구름 양 감소에 따른 복사 냉각 효과가 기온 하락에 영향을 미친 것으로 판단됨.

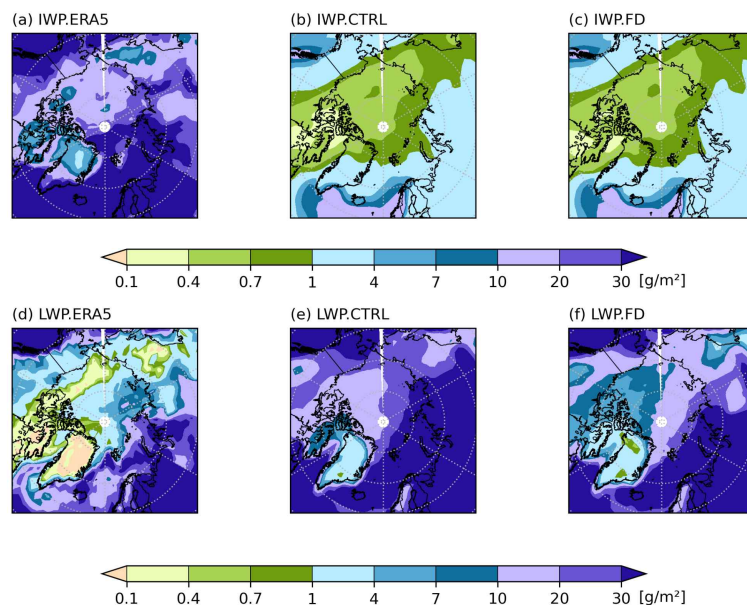


그림 2.11. 첫 번째 사이클론 발생 기간 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 IWP (상단), LWP 분포 (하단)

- ERA5에서는 빙정 수 경로(IWP; Ice Water Path)가 전반적으로 더 높고 넓게 분포하지만, CTRL과 FD 실험은 IWP가 다소 과소모의되는 경향을 보임. 이는 두 실험 모두 얼음 구름 형성 과정에서의 편차나 물리적 제약이 존재할 수 있음을 의미하며, 특히 모델이 사이클론 내의 얼음 구름을 충분히 재현하지 못한 것으로 해석할 수 있음.
- 두 실험의 IWP는 공간적 패턴과 값이 매우 비슷하게 나타남. 이는 FD 실험에서 적용된 freeze-dry scheme이 액체 수 경로(LWP; Liquid Water Path)에는 뚜렷한 영향을 미쳤지만, IWP에는 큰 영향을 미치지 않은 것을 의미함. 이 결과는 모델 내에서 FD 방안이 주로 액체 물 함량을 억제하고, 이미 형성된 얼음 결정에는 영향을 덜 미치는 방식으로 작동했음을 시사함. CTRL 실험에서는 스발바르와 바렌츠해 인근에서 여전히 20 g/m^2 이상의 LWP가 모의됨. 이 지역은 상대적으로 따뜻한 해수면과 사이클론에 의해 액체 구름이 발달하기 쉬운 환경임. 나머지 북극 지역, 특히 해빙이 확장된 지역에서도 $10\sim20 \text{ g/m}^2$ 수준의 LWP가 형성된 것을 볼 수 있습니다. 이는 CTRL 실험이 극지방에서 액체 구름을 과대모의하는 경향이 있음을 보여줌. FD 실험에서는 freeze-dry scheme이 적용됨에 따라 전체적으로 LWP가 감소했지만, 감소의 정도가 지역에 따라 상이하게 나타남. 특히 스발바르와 바렌츠해 인근에서는 CTRL 실험과 유사한 수준으로 LWP가 유지되었으며, 이는 상대적으로 따뜻한 해양 환경에서 액체 구름 형성이 여전히 가능했음을 시사함. 반면, 북극 해양의 다른 지역에서는 LWP가 크게 감소하며, 10 g/m^2 이하로 떨어진 곳이 많음. 이는 freeze-dry scheme이 해빙 위 지역에서 더 강하게 작동했음을 의미함.

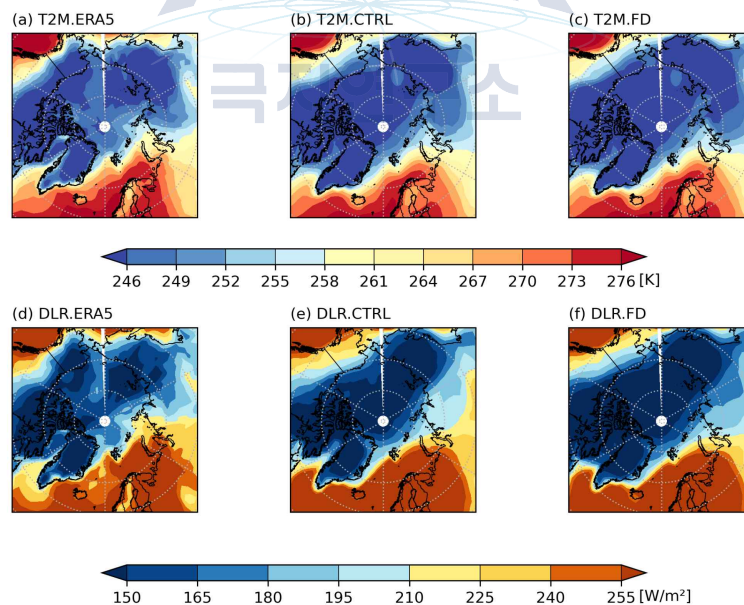


그림 2.12. 두 번째 사이클론 발생 기간 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 지상 기온 (상단), 하향 장파 복사량 분포(하단)

- ERA5에서는 북극 전역에서 기온이 $246\sim258\text{K}$ 사이에 분포하며, 바렌츠해와 북대서양에서 상대적으로 따뜻한 공기가 유입된 흔적이 보임. ERA5에서는 하향 장파 복사량이 해양과 대륙 경계에서 $200\sim230 \text{ W/m}^2$ 사이로 나타나며, 구름과 복사의 상호작용이 반영된 결과임. CTRL 실험은 ERA5와 비교해 전체적으로 기온이 약간 높게 모의되고 있음. 이로 인해 해양 경계

근처에서는 273K 부근까지 상승한 영역이 보이며, 이는 CTRL 실험이 따뜻한 공기 유입을 과대평가했을 가능성을 시사함. 하향 장파 복사량은 ERA5보다 과대 모의되는 경향이 보임. FD 실험에서는 구름 양이 감소하며 하향 장파 복사량이 전체적으로 낮아졌고, 특히 해빙 지역에서 200 W/m^2 이하로 크게 줄어듦.

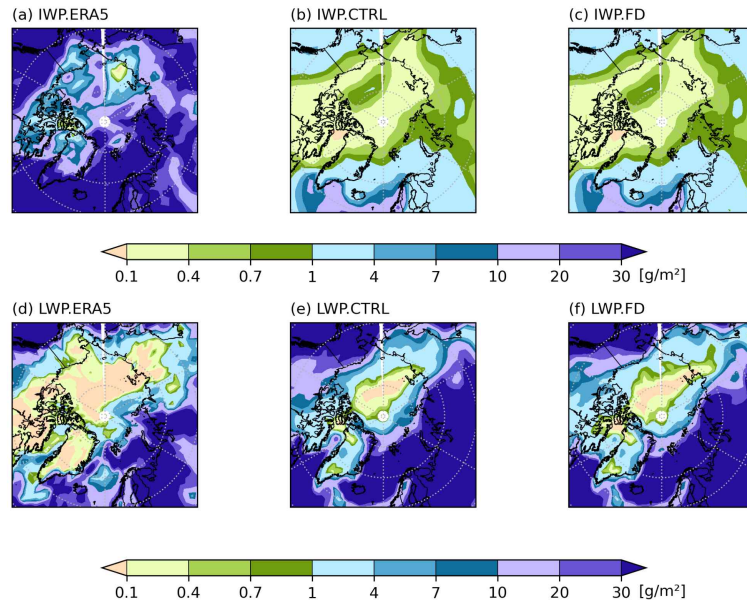


그림 2.13. 두 번째 사이클론 발생 기간 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 IWP (상단), LWP 분포 (하단)

- ERA5에서는 대부분의 북극 지역에서 10 g/m^2 이상의 IWP가 나타나며, 바렌츠해와 스발바르 인근에서 높은 값을 보임. CTRL과 FD 실험 모두 ERA5보다 IWP가 과소모의 되었으며, 두 실험 간 큰 차이가 없음. CTRL에서부터 얼음 구름이 생성되는 양이 작아서 freeze-dry scheme이 얼음 구름의 감소에 영향을 크게 미치지 않았음.

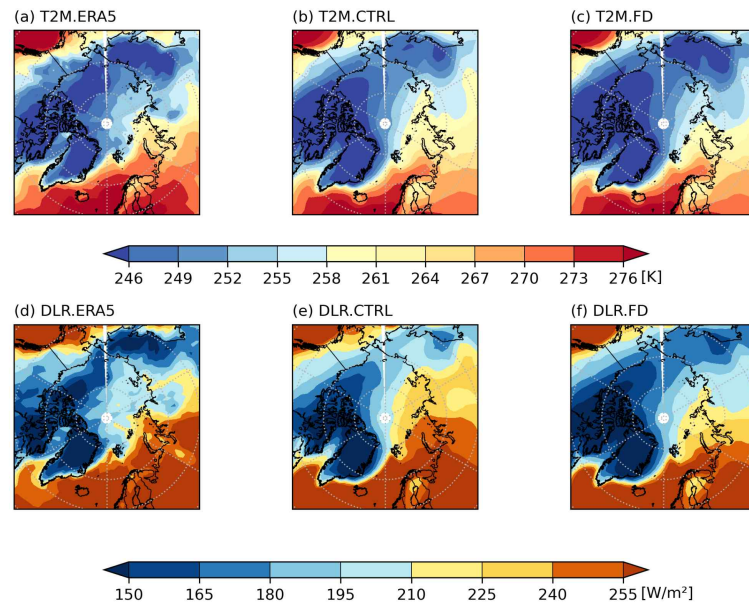


그림 2.14. 세 번째 사이클론 발생 기간 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 지상 기온 (상단), 하향 장파 복사량 분포(하단)

- ERA5에서는 북극 대부분 지역의 기온이 246~258K로 낮게 분포함. 바렌츠해와 북대서양 인근에서는 상대적으로 따뜻한 공기가 유입되어 273K에 근접한 지역이 있음. CTRL 실험에서는 ERA5와 비교해 전체적으로 기온이 높게 모의됨. 특히 해양 지역의 따뜻한 공기 유입이 과대 평가된 것으로 보이며, 바렌츠해와 북대서양 인근에서 273K에 가까운 기온이 넓게 분포함. FD 실험에서는 CTRL에 비해 기온이 다소 낮게 나타나며, 이는 구름 양 감소로 인한 복사 냉각 효과가 반영된 결과임. 그러나 여전히 스발바르 주변과 북대서양 인근에서는 상대적으로 따뜻한 영역이 유지됨. CTRL 실험에서는 하향 장파 복사량이 ERA5보다 과대 모의되며, 이는 구름 양이 많아 복사량이 증가한 결과임. 북대서양과 바렌츠해 인근에서는 240~255 W/m²에 이르는 강한 하향 장파 복사량이 나타나, 구름 형성 과대모의와 관련이 있음. FD 실험에서는 구름 양이 감소하면서 하향 장파 복사도 줄어들어 대부분의 해양 지역에서 200 W/m² 이하로 나타남. 이는 구름 감소에 따른 복사 효과 약화를 반영함.

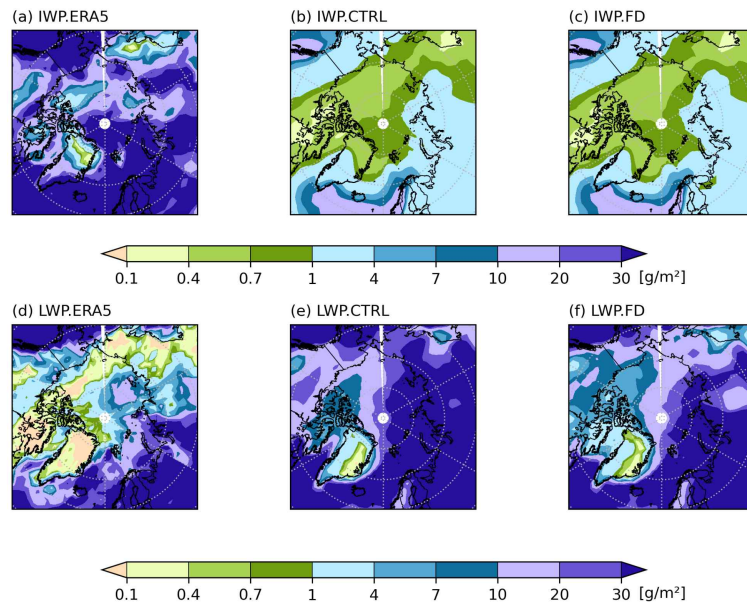


그림 2.15. 세 번째 사이클론 발생 기간 평균의 ERA5 재분석 자료, CTRL, FD 실험의 IWP (상단), LWP 분포 (하단)

- ERA5에서는 바렌츠해와 스발바르 주변에서 $10 \sim 20 \text{ g/m}^2$ 수준의 높은 IWP가 관측되며, 나머지 북극 지역도 $1 \sim 10 \text{ g/m}^2$ 의 빙정이 분포함. CTRL과 FD 실험 모두 IWP가 ERA5보다 낮게 모의되었으며, 예측기간 동안 두 실험 간의 큰 차이는 보이지 않음. CTRL 실험에서는 ERA5보다 더 넓은 지역에서 높은 LWP가 모의되며, 이는 액체 구름의 과대모의를 시사함. FD 실험에서는 LWP가 대폭 감소하였으며, 대부분의 북극 해양 지역에서 20 g/m^2 이하로 줄어들었음. 그러나 스발바르 주변과 바렌츠해 인근에서는 여전히 20 g/m^2 이상의 LWP가 남아 있어, 따뜻한 해양 환경에서는 구름 형성을 완전히 억제하지 못한 것을 보여줌.
- 종합적으로, ACTRIS 및 BSRN의 니알슨(Ny-Ålesund) 지점 자료를 사용해 2020년 2월 MOSAIC 캠페인 기간 중 발생한 세 개의 사이클론을 분석하였으며, 각 사이클론 동안 혼합상 구름(LWC와 IWC 공존)이 나타나고, 구름의 수직 발달과 복사 특성이 크게 달라졌음.
- 첫 번째 사이클론(2020.02.10.~2020.02.12.)은 니알슨 지역에서 강한 상승 기류와 함께 혼합상 구름이 형성되었으며, 상층에는 빙정, 하층에는 과냉각 물방울이 공존함. 이후 구름이 약화되면서 복사 냉각 효과가 증가하고 기온이 급격히 하강함.
- CESM2(CAM6) 모델 기반의 CTRL 실험은 북극 해양과 육지 경계에서 하층 구름 양을 과대 모의했으며, Vavrus and Walizer(2008)의 freeze-dry scheme을 적용한 FD 실험은 하층 구름을 효과적으로 억제하여 과대모의를 완화함.
- 관측 자료와 비교했을 때, CTRL 실험은 액체 구름과 복사량을 과대모의하였고, FD 실험은 일부 따뜻한 해양 지역에서는 여전히 한계가 있었지만, 전체적으로 하층 구름과 복사 특성을 개선함.
- 예측 기간이 길어질수록 CTRL 실험의 과대모의가 누적되는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 CESM2 모델의 구름 및 복사 매개변수화 과정에 대한 개선이 필요함을 시사함.

2. 관측 자료에 기반한 경계층/구름 미세물리과정 최적의 파라미터 고안

가. 아라온 관측 자료 분석

- 2024년 아라온 현장 관측 자료를 포함하여, 모델의 민감도 실험을 구성하기 위해, 빙정핵 계수기 (PINE; Portable Ice Nucleation Experiment)와 에어로졸 측정기 Sky-OPC의 자료를 활용하였음.



그림 2.16. (좌) Portable Ice Nucleation Experiment (PINE)과 (우) SKY-OPC

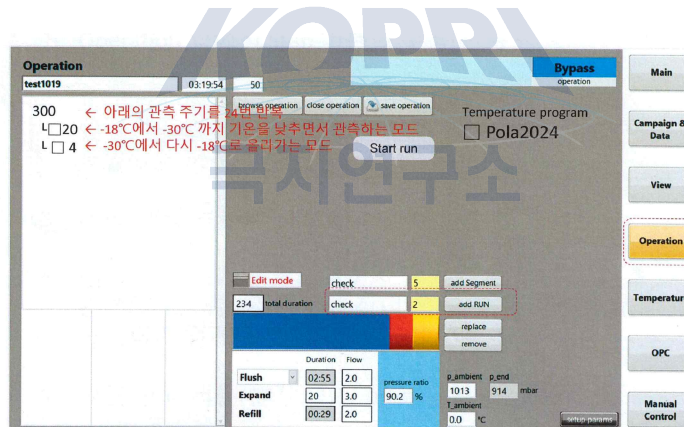


그림 2.17. PINE 장비 측정 방법

- PINE과 SKY-OPC는 국립기상과학원과의 협업을 통해 아라온 관측에 추가되었으며, 그림 16과 같이 아라온 호에 배치 및 측정이 진행되었음. PINE 장비는 장비 내 공기를 주입시켜, 해당 공기가 포함하고 있는 에어로졸이 빙정핵으로써 역할을 하는지, 한다면 어느 온도, 개수 분포를 보이는 지 파악할 수 있는 장비이며, SKY-OPC는 에어로졸의 크기를 측정하는 장비로, PINE 장비에서는 확인할 수 에어로졸의 특성을 보완할 수 있는 장비임. 아라온 항해 기간 동안에는 북극 내 공기를 포집하여 $-18^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각이 되면서, 흡입된 에어로졸이 빙정으로써 역할을 하는 온도 및 개수를 측정하였음 (그림 2.17).

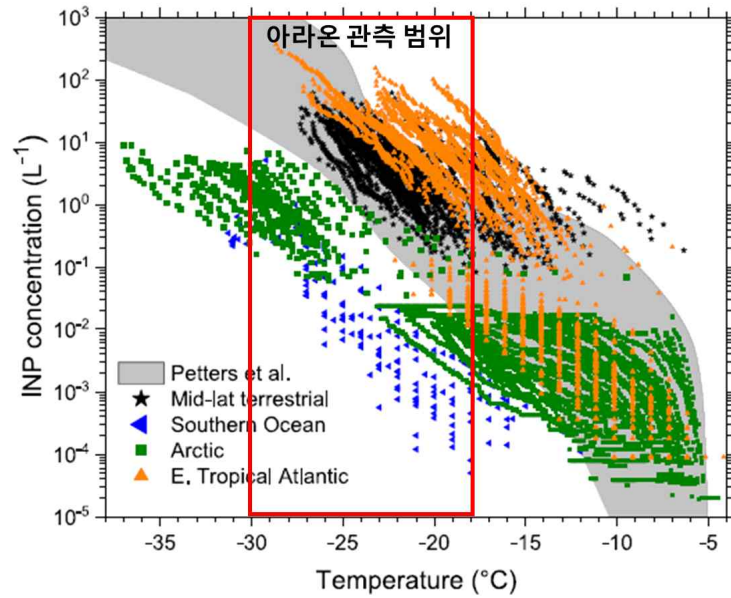


그림 2.18. 다양한 지역에서 측정된 온도에 따른 빙정핵의 분포 및 아래온 호에서 PINE 장비의 관측 범위

- 선행 연구에서 측정된 빙정핵의 농도 분포를 살펴보면, 지역에 따라 다양하게 빙정핵 가능 입자들이 존재함. 북극에서도 측정된 바가 있으나, 아래온 호와 다른 지역에서 측정되었으며, 아래온 호의 항해 경로에서 측정된 빙정핵 자료는 없었음. 본 연구에서 자료 활용에 앞서, 중위도와 북극의 에어로졸, 빙정핵의 절대량 차이를 확인하기 위해, 인천항과 북극의 초입 알래스카 nome 지역에서의 에어로졸, 빙정핵 분포를 비교하였음.

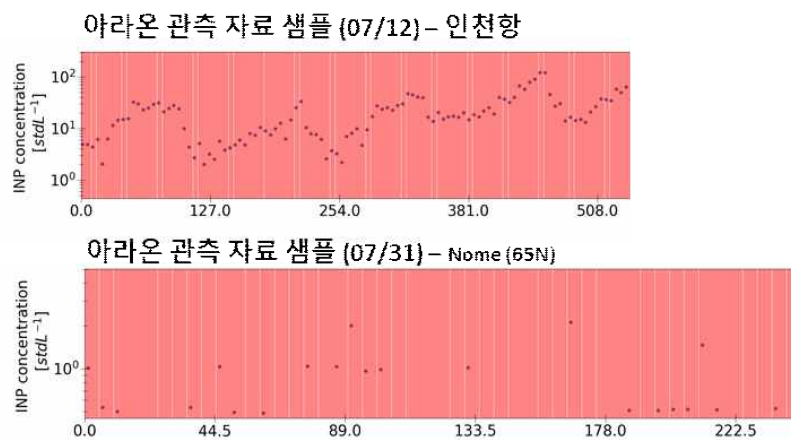


그림 2.19. 7월 12일, 7월 30일 PINE 장비에서 측정된 빙정핵 개수

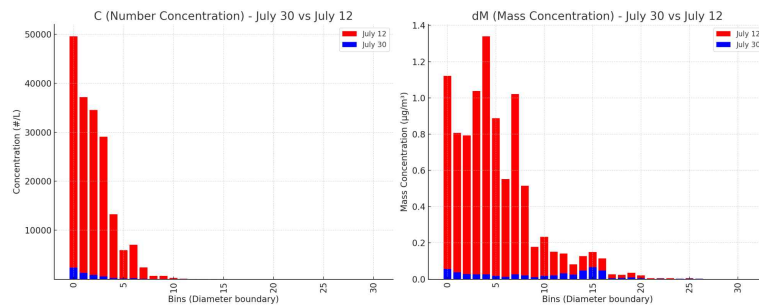


그림 2.20. 7월 12일, 7월 30일 SKY-OPC 장비의 에어로졸 수 농도, 질량의 크기별 분포

- 에어로졸의 수농도와 직경의 분포를 살펴보면, 인천항에서는 에어로졸 수농도 자체가 높았고, 직경 또한 nome에서 보다 더 큰 입자들이 분포하였음. 가장 작은 입자 단위인 250-280nm 크기의 입자는 nome에서도 에어로졸 수농도는 5000#/cm³ 이하로 매우 작고, 입자의 크기가 매우 작았으며, 빙정으로 형성되는 입자는 거의 나타나지 않았음(그림 2.19, 그림 2.20).
- PINE 장비는 북극에 분포하는 에어로졸을 냉각시켜 빙정핵의 역할을 하는 에어로졸의 크기, 빙정핵으로 전환되는 양을 측정하는 장비임. 그러나 자료 활용에 있어 다음과 부분에 대해 추가 논의가 필요함. 관측 고도에서의 에어로졸이 그대로 빙정핵이 된다고 볼 수 있는지, 해당 에어로졸이 하층 900~800hPa로 상승하였을 때, 빙정핵으로써 역할을 한다고 가정을 해야 하며, 구름이 형성되는 고도까지 얼마나 많은 양이 상승하는지 파악이 어려움. 두 번째로 이동 관측으로 진행됨에 따라 해상 분무가 주요 에어로졸로 측정되었을 가능성을 고려해야 함.

나. 대기 모델 내 구름 미세물리과정 적용 방안 고안

- Cyclone 사례는 지점 관측 자료를 활용한 것으로, 아라온 현장 관측 자료를 활용할 수 있는 방안을 모색하였음. KPOPS-EARTH의 대기모델로 활용되는 CAM6에 아라온 관측 자료의 적용 방안을 모색하였음. 아라온 관측 자료는 2024년 7월 11일 ~ 8월 28일 자료로, 북극에 대해서는 7월 30일부터 측정이 되었음. 여름철 관측 자료로 CAM6의 여름철 모의 특징과 에어로졸, 미세물리과정에 대해 조사함.

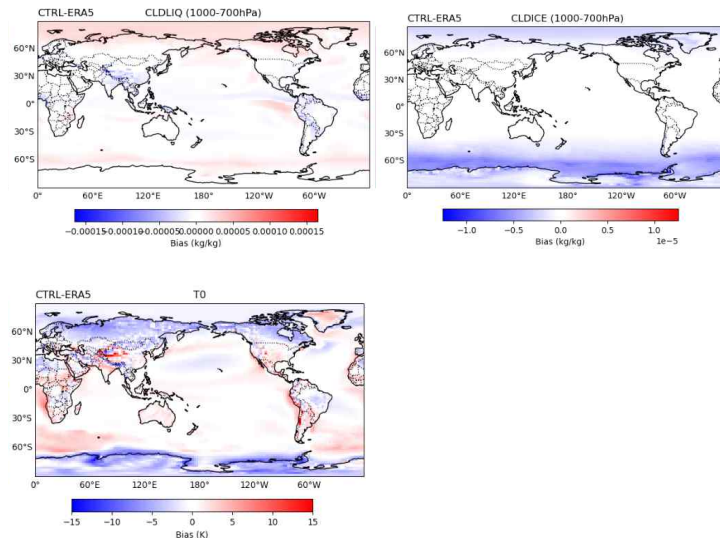


그림 2.21. KPOPS-EARTH 대기 모델의 (1979-2020) 여름철(JJA) 하층 구름 내 수적, 구름 내 빙정, 지상 기온의 전지구 공간 분포

- 앞서 분석한, 2020년 2월과 비슷하게, 북극 지역에서 여름철에도 하층의 구름 내 수적 (CLDLIQ)는 많이 나타나며, 구름 내 빙정은 과소 모의하는 특징을 보임. 과대한 구름 내 수적으로 하향 단파 복사를 차단하여, 지상 기온을 한랭하게 모의함. 모델 내 에어로졸에서 빙정이 형성되는 부분이 아라온 관측 자료 대비 과소하게 적용되어있으면, 관측 자료 적용을 통한 개선까지 이루어질 수 있겠으나, 아닌 경우, 개선의 효과는 기대하기 어려울 것으로 판단됨.

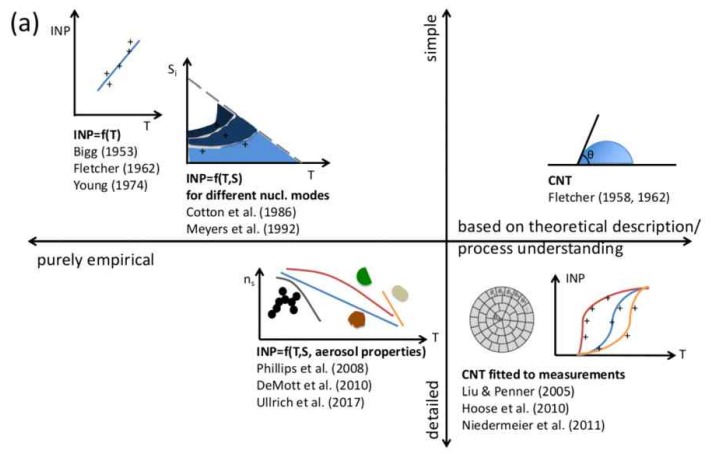


그림 2.22. 모델 내 빙정핵 모수화 방법 (Morrison et al., 2020)

- 빙정핵 모수화 방법은 최근까지, 다양한 방법으로 개발되어 왔음. 간단하게 온도에 따른 분포, 포화도에 따른 분포, 핵화 이론, 에어로졸 입자 종류에 따른 분포 등이 있으며, KPOPS-EARTH 대기 모델의 빙정핵은 핵화 이론과 에어로졸의 분포를 고려한 방안이 채택됨. MAM4 에어로졸 모드를 사용하며, 빙정핵은 크게 black carbon, dust의 freezing으로 빙

정핵이 형성됨. 그러나 현재 관측 자료에서는 크기 파악만 가능하고, 종류의 구분이 불가능함.

- 에어로졸은 모드에 따라 Aitken mode $0.01\sim0.1\ \mu\text{m}$, Accumulation mode : $0.1\sim1.0\ \mu\text{m}$, Coarse mode: above $1.0\mu\text{m}$ 로 분류됨. Black Carbon은 주로 Aitken mode 와 Accumulation mode에서 나타나고, Dust는 Coarse mode와 Accumulation 모드에서 나타남. 샘플 자료로 파악한 nome 지역에서 측정된 자료는 Black Carbon에 가까운 것으로 판단됨.
- 종합적으로, 2024년 아라온 호 현장 관측이 진행된 PINE(빙정핵 계수기)과 SKY-OPC(에어로졸 측정기)를 사용하여, 빙정핵과 에어로졸 특성을 분석함. 인천항과 Nome 지역에서 에어로졸과 빙정핵 분포를 비교하며, 북극과 중위도 간 에어로졸 특성 차이를 일부 확인하였으며, Nome 지역에서는 에어로졸 수농도와 빙정핵 개수가 매우 낮게 나타남.
- KPOPS-EARTH 대기 모델의 여름철(JJA) 북극 모의 결과에서는 하층 구름 내 수적이 과대모의되며, 빙정이 과소모의됨에 따라 지상 기온이 한랭하게 모의되는 경향이 나타남. 아라온 관측 자료가 현재 모델 내 적용되어있는 빙정보다 많은 양이 측정되는 경우, 빙정형 구름의 형성 개선 가능성이 확인됨.
- KPOPS-EARTH 대기 모델은 빙정핵 모수화에 MAM4 에어로졸 모드를 적용하여 black carbon과 dust의 freezing을 통해 빙정핵을 형성함. 그러나 관측 자료로는 에어로졸의 크기만 파악 가능하며, 종류 구분이 어려운 점이 한계로 남아, 에어로졸의 크기를 기준으로 모델 내 빙정핵 형성에 관한 파라미터를 조절하는 방안을 제시함.

극지연구소

3. 국지적 열속이 중위도 제트기류에 미치는 영향 분석

가. 국지적 열적 강제력 실험 세팅

- 국지적 열속에 따른 중위도 제트기류의 변화를 분석하기 위해, 러시아 북부 시베리아 지역의 산불을 참조하였음. 해당 지역은 매년 대규모 산불이 발생하는데, 특히 여름철인 6-8월 사이에 가장 빈번하게 일어남. 2019년과 2020년에는 평소보다 강한 산불이 발생하였음

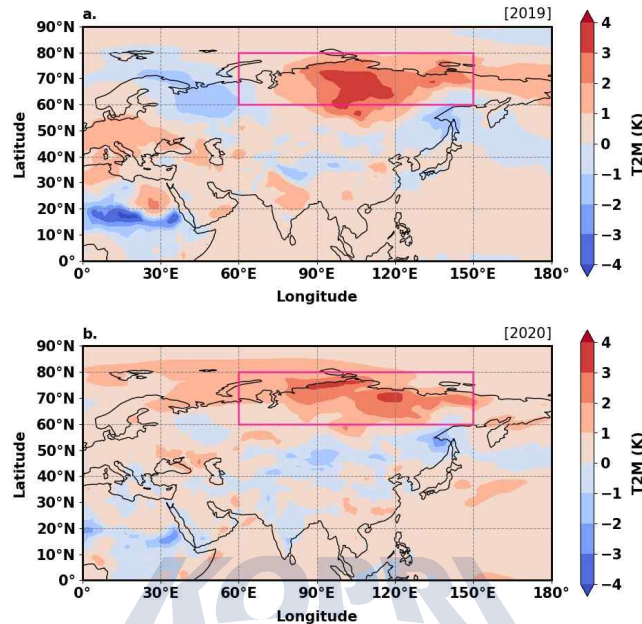


그림 2.23. 2019년, 2020년 JJA 시베리아 지표면 온도(T2M) 아노말리 분포

- JRA-55를 사용하여 산불에 따른 지표면 온도(T2M)의 변화를 조사하였음. 그림 1은 1989년 ~ 2019년 기후값 대비 2019년, 2020년 여름철(JJA) T2M 아노말리 분포임. 산불의 강도가 가장 강했던 2019년에는 최대 4K까지의 T2M 아노말리를 보였고 (그림 2.23a), 그 다음으로 강했던 2020년은 평균 3K의 T2M 아노말리를 보였음 (그림 2.23a). 따라서, 실험에 적용될 국지적 열속의 강도는 T2M 반응이 최소 1K, 최대 3K를 보이도록 설정함.
- 본 연구진은 Idealized GCM dynamic core를 사용하여, 보다 단순한 동서 대칭 상태 조건에서 국지적 열적 강제력을 그림 2.24와 같이 동서 대칭적으로 처방하였음.

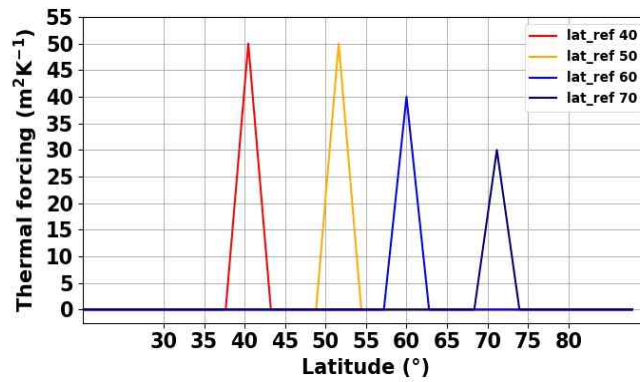


그림 2.24. Idealized GCM에 적용된 총 4개의 Thermal forcing 처방 방법

- 각 시뮬레이션마다 약 40, 50, 60, 그리고 70°N 기준에 10도 범위의 국지적 열적 강제력을 지표면에 해양 열속(ocean heat flux) 형태로 처방함. 40, 50°N에는 $50m^2/K$, 60°N에는 $40m^2/K$ 그리고 70°N에는 $30m^2/K$ 의 각기 다른 강도의 열적 강제력이 처방되었는데, 이는 같은 강도의 열적 강제력이라도 극 지역이 더 민감하게 반응하기 때문임. 이를 통해, 열적 강제력의 강도에 따른 반응을 배제하고, 위도에 따른 반응에 집중할 수 있음. 열적 강제력 강도의 설정 기준은 시베리아 산불로 인한 T2M의 아노말리 (그림 2.23)을 참고하여 최소 1K, 최대 3K의 변화량을 묘사하게끔 설정함.

$$A(1 + \tanh(\alpha(\theta - \theta_0)))(1 + \tanh(\alpha(\theta_0 - \theta)))$$

열적 강제력은 $\tanh$ 를 통해 지표면에 처방되었음. A 는 강도(m^2/K), θ_0 는 열적 강제력이 처방되는 위도(°N), α 는 $\tanh$ 의 형태를 결정하는 계수로 0.05로 설정되었음.

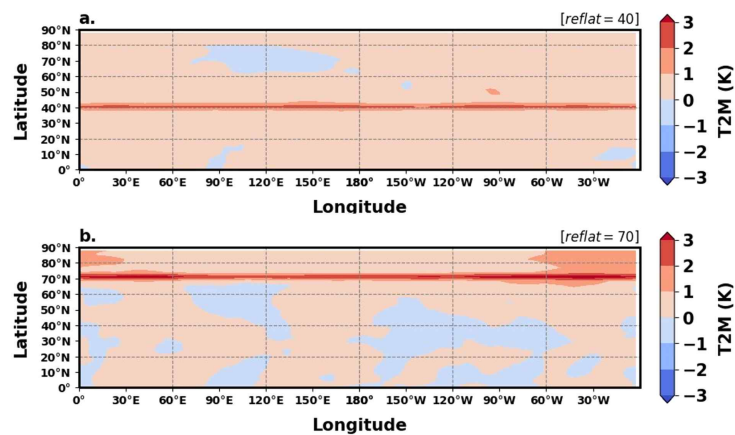


그림 2.25. 40°N, 70°N 열적 강제력 실험에서 Control run을 뺀 T2M 아노말리

- 그림 2.25는 40°N과 70°N에 열적 강제력을 적용한 실험에서 control run을 뺀 T2M 아노말리임. 전체 열적 강제력의 T2M 아노말리 그림은 생략했지만, 모델은 처방된 국지적 열적 강제력에 따라 처방 위도에서 T2M 변화가 최소 1K에서 최대 3K까지 동서 대칭적으로 반응하였음. 따라서, 총 4개의 처방 위도에 국지적 열적 강제력을 준 실험을 바탕으로 중위도 제트기

류의 변화를 분석함.

나. 국지적 열적 강제력에 따른 경압성 파동의 변화

- 남북 온도 경도는 온도풍 균형에 따라 연직 바람시어를 결정함. 남북 온도 경도가 크면 경압성이 증가하고, 경압성 파동의 발생을 야기함. 이러한 경압성 파동들은 남북 온도 경도를 해소하는 목적을 가짐.

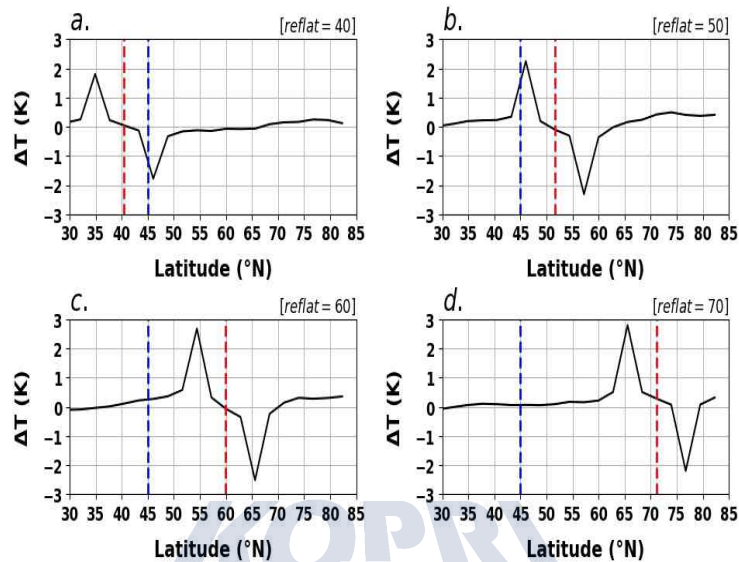


그림 2.26. 각 실험에서 Control run을 뺀 T2M gradient (ΔT)아노말리

- 그림 2.26은 40, 50, 60 그리고 70°N 실험에서 Control run을 뺀 지표면 온도 경도 (ΔT) 아노말리임. ΔT 는 5도 간격으로 계산되었는데, 이는 경압성 파동의 크기를 고려하기 위함임. 파란 점선은 control run에서의 중위도 제트기류 위치를 의미하며, 빨간 점선은 열적 강제력이 처방된 위도임. 온도는 극으로 갈수록 감소하기 때문에 북반구에서 계산된 ΔT 는 음수를 가짐. 따라서 그림 4의 각 실험에서 control run을 뺀 ΔT 아노말리는, 양수는 control run보다 남북 온도 경도가 약함을 의미하며, 음수는 control run보다 남북 온도 경도가 강함을 의미함. 모든 실험에서 공통적으로 열적 강제력이 처방된 위도를 중심으로 적도 방향은 남북 온도 경도가 약하고, 극 방향은 남북 온도 경도가 강화되었음.

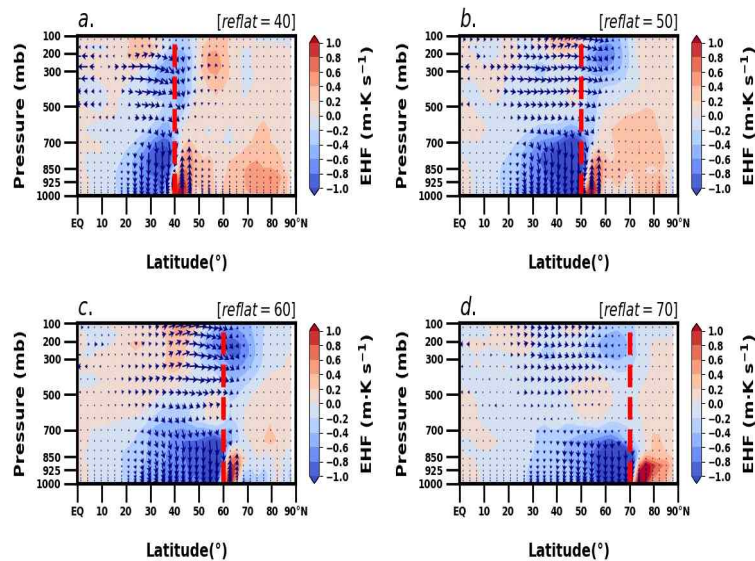


그림 2.27. 각 실험에서 control run을 뺀 Eddy Heat Flux(EHF), EPflux 아노말리

- 국지적 열적 강제력을 처방한 위도를 기점으로 남북 간 상이한 온도 경도가 초래되었음. (그림 2.26). 이는 결과적으로 지역 간 경압성의 변화를 초래할 것임.
- 그림 2.27의 빨간 점선은 열적 강제력이 처방된 위도를 나타냄. 이 처방 위도를 중심으로 남북 간 경압성의 반응이 뚜렷하게 구분되는 것이 관찰되었음. 처방 위도 중심에서 극 방향은 증가된 남북 온도 경도에 따라 경압성이 강화되었음. 반면, 적도 방향은 남북 온도 경도가 감소해 결과적으로 경압성이 약화되었음.
- 그림 2.27에서 화살표로 표시된 부분은 지역적 경압성 변화에 따른 경압성 파동의 활동 변화를 시각적으로 나타내는 EPflux 아노말리임. 각 실험 기준 위도 중심으로 극 방향의 상승하는 화살표는 control run에 비해 강화된 경압성 파동을, 적도 방향의 하강하는 화살표는 control run에 비해 약화된 경압성 파동을 의미함.
- 경압성 파동은 남북 온도 경도를 해소하며 이는 Eddy Heat Flux (EHF)로 정량화됨. 그림 27의 색은 각 실험이 반응한 지역적 경압성 변화에 따른 control run 대비 EHF의 변화를 나타냄. 처방 위도 극 방향에서 경압성 파동이 강화됨에 따라 EHF가 증가했고, 적도 방향은 EHF가 감소했음. 이는, 국지적 열속이 일어나면 극방향은 열 수송이 더욱 활발히 일어나고, 적도 방향은 열수송이 더욱 감소함을 의미함.

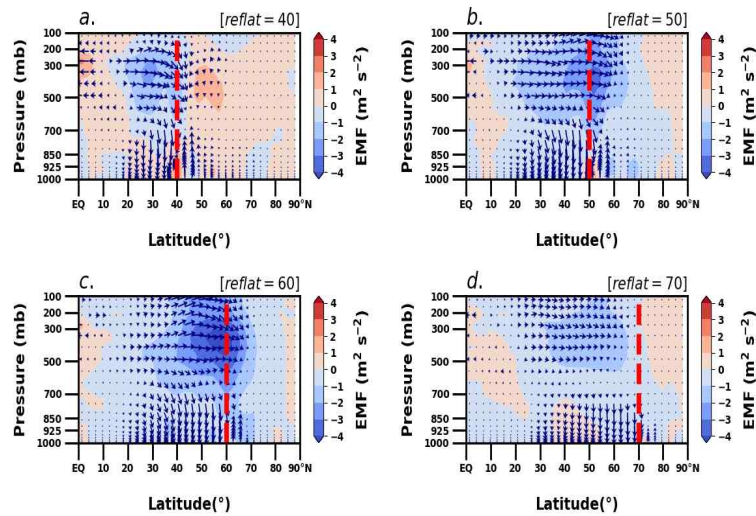


그림 2.28. 각 실험에서 control run을 뺀 Eddy Momentum Flux(EMF), EPflux 아노말리

- 중위도 경압성 파동은 지표면 남북 온도 경도차에 따라 생성되며, 그 후 상승하고 적도 방향으로 이동하다가 소멸하는 일생 주기를 가진다고 알려져 있음. 특히, 생성하는 동안 평균장으로부터 에너지를 흡수하고, 소멸하는 동안 평균장으로부터 에너지를 재분배함. 경압성 파동과 평균장과의 이러한 에너지 교환 과정은 각각 EHF와 Eddy Momentum Flux(EMF)로 정량화됨.
- 그림 2.28은 국지적 열적 강제력이 EMF에 미치는 영향을 보여줌. 주목할 점은 열적 강제력의 처방 위치에 따라 EMF의 변화가 다르다는 것임. 이러한 변화는 중위도 제트기류의 위치에 따라 구분됨.
- 제트기류보다 아래에 위치한 40°N 열적 강제력 실험에서는, 처방 위도 40°N를 중심으로 EMF의 남북 차이가 뚜렷하게 관찰되었음 (그림 2.28a). 극 방향에서는 경압성 파동의 약화로 인해 상층에서의 EMF가 감소하였고, 적도 방향에서는 경압성 파동이 활발함에 따라 상층에서 EMF가 증가했음.
- 그림 한편, 제트기류보다 위쪽에 열적 강제력을 적용한 실험에서는 경압성 파동이 처방한 위도를 기점으로 남북 간 상이한 반응을 보였음에도 불구하고, 중위도 상층에서 EMF가 일관되게 감소하는 경향이 관찰되었음 (그림 2.28b-d).
- 국지적 열적 강제력을 준 Idealized GCM 실험에서 공통적으로 관찰된 특징은 처방 위도의 적도 방향 지역으로 경압성 파동이 전반적으로 약화 되었다는 점임. 특히, 60°N과 70°N 실험에서는 중위도 전역에 걸쳐 경압성 파동이 약화되는 현상이 관찰되었음. 경압성 파동이 평균장과 에너지를 교환한다는 사실을 고려할 때, 이러한 결과는 고위도의 국지적 열속이 중위도 제트기류에 영향을 미칠 수 있음을 시사함.

다. 국지적 강제력에 따른 중위도 제트기류의 반응

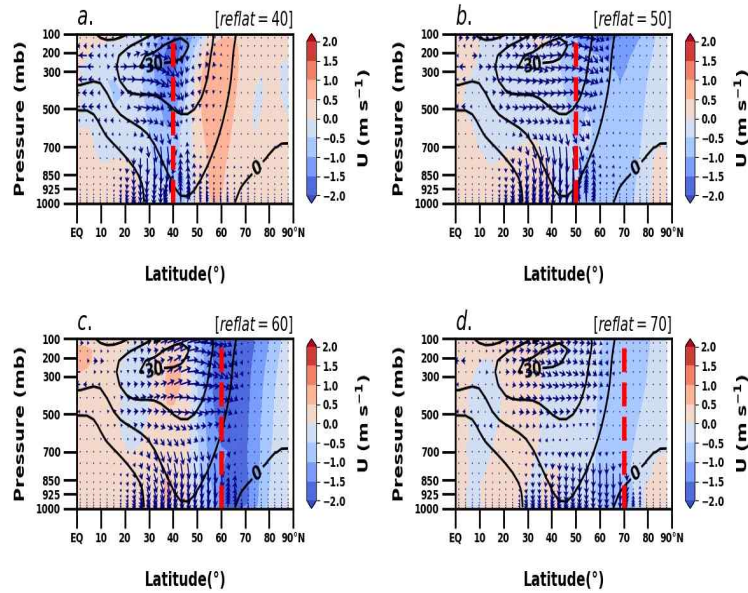


그림 2.29. 각 실험에서 control run을 뺀 zonal mean zonal wind, EPflux 아노말리

- 그림 2.29는 각 실험에서 국지적 열적 강제력이 동서 평균 동서 바람(zonal mean zonal wind)에 미치는 영향을 보여줌. 검정 실선은 control run에서의 zonal mean zonal wind를 나타내며, 색상은 control run 대비 아노말리를 나타냄.
- 제트기류보다 아래인 40°N에 열적 강제력을 준 실험에서는 EMF변화와 일치하는 패턴으로 zonal mean zonal wind가 변화했음. 구체적으로, 처방 위도를 기준으로 zonal mean zonal wind가 극 방향에서 증가하고 적도 방향에서 감소하는 뚜렷한 구분이 관찰되었음 (그림 2.29. a)
- 50°N와 70°N에 열적 강제력을 처방한 실험 (그림 2.28b,d)에서도 유사한 반응이 관찰되었음. 상층 EMF의 감소 (그림 2.28b,d)와 함께 전반적으로 중위도 제트기류의 약화가 관찰됨.
- 이는 국지적 열적 강제력이 중위도 전반적으로 경압성 파동의 활동을 약화시켜 상층 EMF의 감소, 즉 운동량 수송이 감소되어 결과적으로 제트기류의 약화로 이어진 것으로 해석됨.
- 반면, 60°N에 국지적으로 열적 강제력을 처방한 실험은 상층 EMF가 감소했음에도 불구하고, 제트기류가 약 30°N~50°N 구간에서 증가하고 50°N 이상에서는 약화되는 양상이 관찰됨.

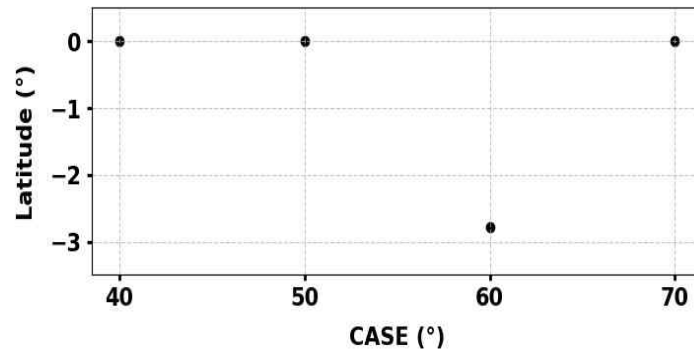


그림 2.30. 각 실험에서 control run을 뺀 제트기류 위치
아노말리. 제트기류의 위치는 850 hPa에서 zonal mean
zonal wind 의 최대값 위도로 선정되었음

- 주목할 점은 60°N 실험에서 제트기류가 다른 실험과 달리 control run 대비 적도 방향으로 약 2.5° 이동했다는 것임(그림 2.30). 그림 2.29c의 EMF와의 비선형적인 반응은 제트기류의 위치 이동과 함께 감소된 EMF이 복합적으로 작용한 결과로 해석됨.
- 결과적으로, 그림 2.29 국지적 열속이 제트기류의 강도와 위치를 변화시킬 수 있음을 시사함. 국지적 열속의 위도에 따라 제트기류의 반응이 상이하게 나타날 수 있으며, 특히 극 지역에 국한된 열속이라 할지라도 중위도 전반적으로 경압성 파동의 활동 변화를 야기하여 운동량 수송에 영향을 미치며, 중위도 제트기류가 변화할 수 있음을 보여줌.

라. Dry model에서의 결과 비교

- 동일한 실험이 GFDL Flexible Modeling System (FMS)의 dry dynamical core spectral model에서도 수행되었음. 이전 모델에서 잠열이 고려된 것과 달리, FMS는 건조 대기에서 대류 복사 평형의 온위 프로파일이 처방되어 적분됨.
- 국지적 열적 강제력은 Butler et al. (2010)을 참고하여 다음과 같이 각 처방 위도에 가우시안 형태로 처방되었음.

$$q_0 \exp\left[-\left(\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2} + \frac{(P - P_0)^2}{2\sigma_P^2}\right)\right]$$

q_0 는 강도 ($Kday^{-1}$), θ_0 는 열적 강제력이 처방되는 중심 위도, σ_θ 는 처방되는 위도 분산, P_0 는 열적 강제력이 처방되는 중심 고도, σ_P 는 처방되는 고도 분산임.

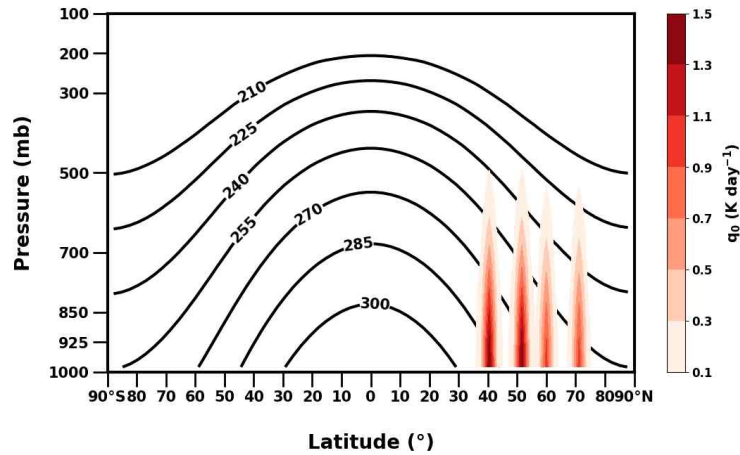


그림 2.31. FMS dry 실험에 처방된 국지적 열적 강제력

- 이전 실험과 동일한 위도 40, 50, 60, 70°N에 국지적 열적 강제력을 처방함 (그림 2.31). 위도 범위는 건조 대기가 습윤 대기에 비해 열적 강제력에 더 민감하게 반응하는 점을 고려하여, 약 2.5° 범위의 열적 강제력을 처방하였음 ($\sigma_\theta=1.2^\circ$). 열적 강제력 강도 q_0 는 40°N와 50°N에서는 1.5 ($K day^{-1}$)의 강도로, 60°N과 70°N에서는 1.0 ($K day^{-1}$)로 처방되었고, 고도는 약 500 hPa까지 처방됨 ($\sigma_P=250$ hPa).

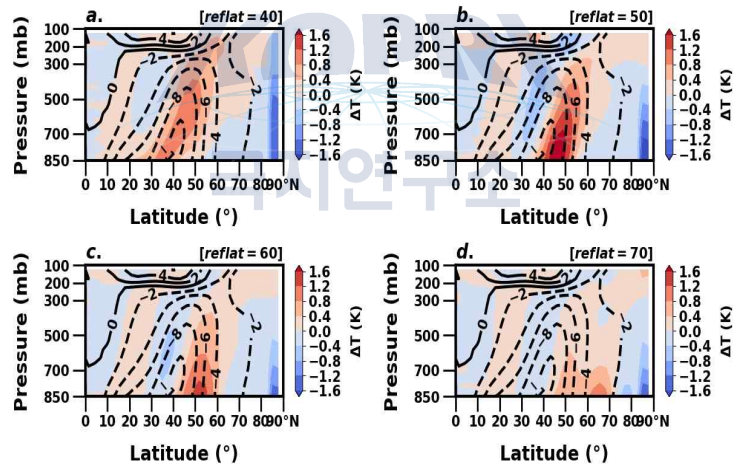


그림 2.32. FMS dry 각 실험에서 Control run을 뺀 T2M gradient (ΔT)아노말리. 검정 실선은 control run에서의 ΔT 를 나타냄

- 그림 2.32는 FMS dry 실험에서 각 열적 강제력에 따른 ΔT 아노말리의 연직 프로파일임. 열적 강제력이 처방된 위도에 대해 인접한 적도 방향에서는 양의 ΔT 아노말리가, 극 방향에서는 음의 ΔT 아노말리가 관찰되었음. 이러한 반응은 습윤 모델과 유사하지만, 건조 모델에서 적도 방향의 반응에 차이가 존재함
- 구체적으로, 습윤 모델에서는 열적 강제력에 대해 처방 위도 적도 방향에서 일관되게 양의 ΔT 아노말리가 나타났지만 (그림 2.24), 건조 모델에서는 ΔT 아노말리가 증가했다가 감소하는 패턴이 관찰됨. 이는 수증기가 열적 강제력의 효과를 혼합하여 완충하고 있다는 것을 보여줌.

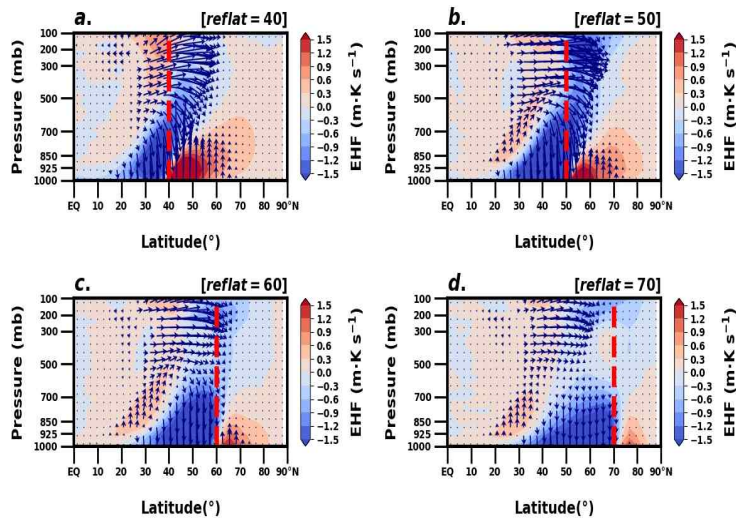


그림 2.33. FMS dry 각 실험에서 Control run을 뺀 Eddy Heat Flux(EHF), EPflux 아노말리

- 건조 모델에서 열적 강제력에 대한 파동적인 ΔT 아노말리 반응은 습윤 모델과의 서로 다른 경압성 파동의 변화를 초래함. 습윤 모델에서는 처방 위도 적도 방향의 양의 ΔT 에 따라 모든 실험에서 중위도 경압성 파동이 일관되게 약화되어 그에 따라 EHF가 감소했음 (그림 2.25). 반면 건조 모델은 파동적인 양의 ΔT , 음의 ΔT 반응에 따라 경압성 파동이 약화되고 강화되며, 이에 따라 EHF도 감소하고 증가하는 반응이 동반되었음 (그림 2.33).

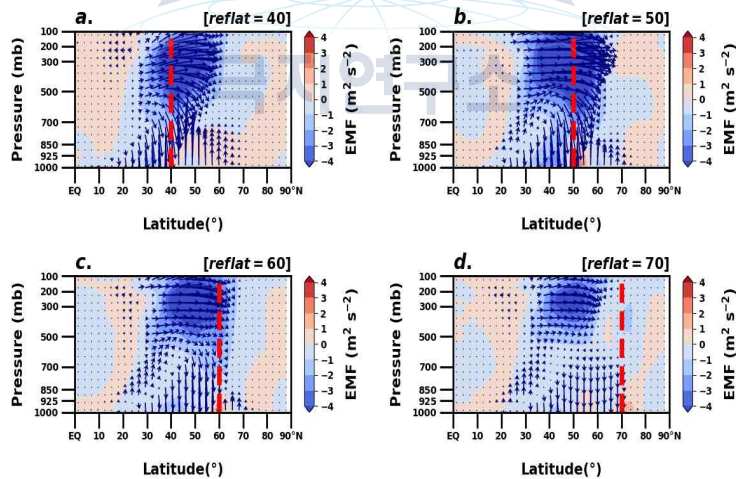


그림 2.34. FMS dry 각 실험에서 Control run을 뺀 Eddy Momentum Flux(EMF), EPflux 아노말리

- 습윤 모델과 건조 모델은 중위도 EMF반응에서도 차이를 보였음. 습윤 모델에서는 제트기류 보다 남쪽인 40°N에 열적 강제력을 가했을 때, 상층 EMF가 적도 방향은 감소, 극 방향은 증가하는 패턴을 보였음 (그림 2.29). 반면 건조 모델에선 열적 강제력의 위치와 관계없이 중위도 EMF의 반응이 모든 실험에서 감소하는 패턴이 나타났음 (그림 2.34).

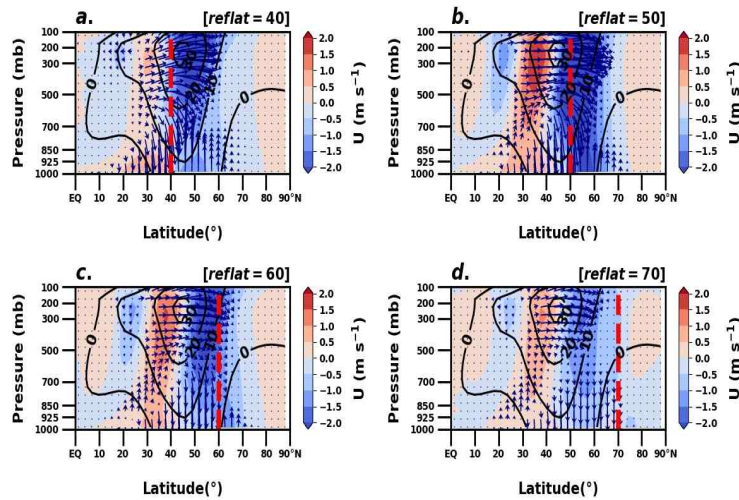


그림 2.35. FMS dry 각 실험에서 Control run을 뺀 zonal mean zonal wind, EPflux 아노말리

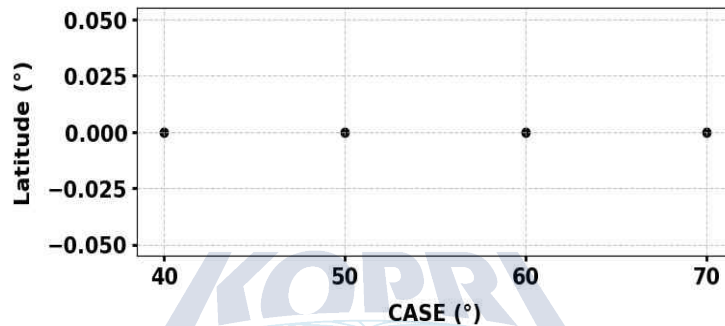


그림 2.36. FMS dry 각 실험에서 control run을 뺀 제트기류 위치 아노말리. 제트기류의 위치는 850hPa에서 zonal mean zonal wind 의 최대값 위도로 선정되었음

- 국지적 열적 강제력에 대한 중위도 제트기류의 반응은 습윤 모델과 건조 모델에서 뚜렷한 차이를 보였음. 건조 모델에서는 제트기류 반응이 모든 실험에서 파동적인 반응을 보였음 (그림 2.35). 구체적으로, 약 40도를 기준으로 극 방향은 감소하고, 적도 방향은 증가하며, 그 이후에도 파동적인 zonal mean zonal wind의 반응이 관찰되었음. Control run 대비 제트기류의 위치변화가 없었다는 점도 고려해야 함 (그림 2.36).
- 건조 모델에서 나타난 중위도 제트기류의 파동적인 반응은 주로 국지적 열적 강제력에 따른 ΔT 아노말리의 파동적인 반응에 기인했음. 예를 들어, 약 35도에서 강화된 제트기류는 음의 ΔT 아노말리, 즉 온도 경도가 증가된 35도 지역에서 일어났음.
- 습윤 모델과 건조 모델 모두에서 국지적 열적 강제력 실험은 공통적으로 중위도 제트기류의 변화를 야기했음 (그림 2.29, 2.35). 그러나 두 모델 간 반응의 차이가 뚜렷했는데, 건조 모델에서는 국지적 열적 강제력에 대해 경압성 파동이 파동적인 반응을 보인 반면, 습윤 모델에서는 중위도 경압성 파동이 일관되게 약화되는 경향이 관찰되었음. 이러한 차이는 수증기가 열적 강제력에 대한 대기의 반응을 조절한 것으로 해석됨. 결론적으로, 고위도에서의 국지적 열적 강제력은 중위도 제트기류 변화를 유발하며, 이 과정에서 대기의 습윤 상태에 따라 반응이 달라질 수 있음을 시사함.

3절 모델 자료를 활용한 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명

1. 경계층/구름 미세물리과정 파라미터 민감도 실험 체계 구축

가. 빙정 형태 고려 시 기대 효과 분석

- 북극 증폭에 기여하는 요소들은 규모에 따라 다양하게 존재함. 대규모 관점에서는 여름에 흡수된 열을 가을/겨울에 방출하여, 해빙 형성을 지연시키고, 해양-대기 열 플럭스가 증가 (Previdi et al., 2021; Serreze et al., 2016). 극 소용돌이 약화, 제트기류 패턴의 변화 (Cohen et al., 2020; Overland et al., 2016) 등이 있지만, 국지적인 규모에서 해양-경계층-구름 상호작용 요소를 살펴보면 해빙 역학과정, 대기 온도 역전 등이 있으며, 중간 규모에서 단기간 내 중위도의 열과 수분을 수송하는 사이클론의 유입 등으로 구분할 수 있음.
- 사이클론은 해빙 감소를 가속화 하며, 해양 혼합과 열 수송으로 인한 북극 증폭 강화(Zhang et al., 2023) 시킬 수 있으며, 사이클론이 해양-대기 열 교환을 증가시켜 혼합상 구름 형성에 영향(Rinke et al., 2017)을 끼침. 사이클론에 의해 유도된 강한 바람은 해양 혼합을 증가시켜 심층의 따뜻한 대서양수를 표층으로 올라오게 함.
- Morrison et al., 2012에 따르면, 겨울철 사이클론 통과 시 경계층이 일시적으로 불안정해지며, 수직 혼합을 증가시킴. 혼합층 깊이의 증가는 구름 상-하부 결합을 강화하여 구름의 지속성에 영향을 미칠 수 있음.
- 혼합상 구름의 지속성은 구름 미세물리과정과 관련이 있으며, 수상체(빙정/수적)의 비율 변화에 따라 복사 특성이 크게 변화함(Morrison et al 2012). 관측, 모델 기반으로 북극 증폭에 대한 해양-경계층-구름 상호작용 요소에 대해 연구되고, 매커니즘을 밝혀왔으나, 많은 기후 모델들이 북극의 해양-경계층-구름 상호작용을 정확히 표현하는데 어려움을 겪고 있으며, 특히 혼합상 구름에의 미세물리과정과 경계층 안정도의 정확한 모의가 주요 과제로 남아있음. 그러나 많은 기후모델에서 사이클론 유입과 해양-대기 상호작용에 대하여 적절한 모의가 되지 않고 있음.

나. 경계층/미세물리과정 민감도 실험 체계 구축

- 본 연구진은 1차년도에 KPOPS-EARTH 모델에 활용되는 대기모델 CAM6에서 기후 평균적으로 초겨울 북극 내 경계층 고도를 높게 모의하는 특징을 확인하였음. 이러한 특징은 모델이 단기적 불안정화 상태를 지나치게 오래 유지하거나, 근본적으로 안정한 상태로 돌아가는 과정을 정확히 모의하지 못한다고 분석할 수 있음. (그림 1.19)
- 이와 더불어 구름이 과대 모의되는 것은 다음과 같은 피드백으로 유지될 수 있음. 모델 내 과다한 구름 형성 → 하향 장파 복사 증가 → 경계층 안정도 감소 → PBL 고도 증가 → 더 많은 수직 혼합 → 추가적인 구름 형성이 될 수 있음.
- 이러한 피드백이 나타나는 원인 중 하나로 미세물리과정 내 빙정의 형태를 구형으로 가정하는 것이 원인이 될 수 있음. 빙정은 실제 대기에서 다양한 형태로 나타나고 있으나, 모델의 물리과정 표현에 있어 관측의 부재, 계산량의 문제로 단순화되어 표현되어왔으며,

KPOPS-EARTH 대기모델에 사용되고 있는 MG2 미세물리과정방안은 빙정을 구형으로 가정하고 있음. 그러나 이는 과도한 수적을 유발할 수 있음. Ong et al., 2024에서 빙정의 형태에 따라 모의되는 혼합상 구름 내 수상체의 비율이 달라짐을 보인 바 있음.

- 빙정은 Inherent growth ratio로 특정 온도대에서 특정 형태로 주로 나타나고자 하는 경향이 있으며, 빙정의 형태에 따라 수증기가 침적하는 비율이 달라짐(Chen and lamb 1994; ; Ong et al., 2024).

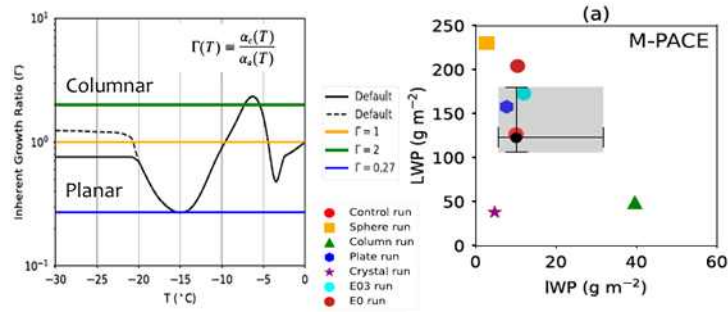


그림 3.1. 온도대별 빙정의 형태분포 및 빙정의 형태별 혼합상 구름 내 수상체 모의 분포 (Ong et al., 2024)

- 본 연구에서는 미세물리과정 내 빙정을 구형으로 가정한 것이 구름의 지속, 경계층 구조에 영향을 미쳤는지 파악하기 위해 온도별로 빙정의 형태를 고려하는 민감도 실험을 구축하였음.

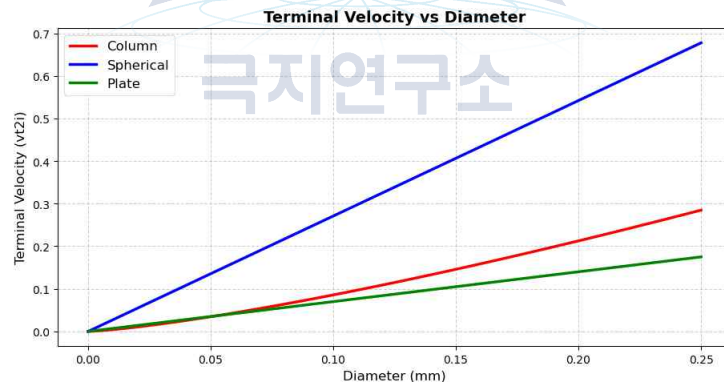


그림 3.2. 빙정의 형태별 직경과 종단 속도 관계

- 각 형태별 특징으로 구형인 빙정의 종단속도가 가장 빠르며, 기둥형 빙정은 중간 정도의 속도를 보이며, 판형 빙정은 가장 느린 종단속도를 가짐. 이는 넓은 표면적으로 인해 공기저항이 크기 때문임. 모든 형태에서 직경이 증가할수록 종단속도가 증가하는 경향을 보임.

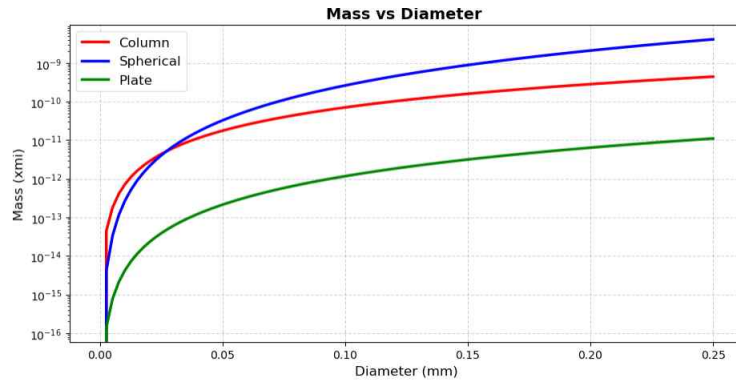


그림 3.3. 빙정의 형태별 직경과 질량 속도 관계

- 질량과의 관계에서는 구가 동일한 직경에서 부피가 가장 크기 때문에, 구형 빙정이 같은 직경에서 가장 큰 질량을 가짐. 기둥형은 중간 질량으로 나타나고, 판형은 가장 낮은 질량을 보이는데 같은 직경에서도 두께가 얇기 때문임. 모든 형태에서 직경이 증가할수록 질량이 증가하지만, 그 증가율은 형태에 따라 다름.
- 실제 대기에서는 빙정의 형태에 따라 낙하 속도가 다르므로, 다양한 빙정들이 구름 내에서 서로 다른 속도로 이동함. 구형에 가까운 빙정은 더 빠르게 떨어지므로, 다른 형태의 빙정보다 빠르게 지상에 도달할 수 있음. 판형 빙정은 천천히 떨어지므로 대기 중에 더 오래 머물며, 이는 혼합상 구름의 지속성에 영향을 줄 수 있음.
- 본 연구에서는 세 형태의 물리적 특성을 모두 고려하기 위하여, 온도에 따라 나타나는 Inherent growth ratio (IGR)을 형태별 가중치를 고려하여 적용하는 방식을 고안함.

$$IGR(T) = W_c(T) * IGR_c + W_s(T) * IGR_s + W_p(T) * IGR_p$$

$$W_c(T) + W_s(T) + W_p(T) = 1$$

$$IGR_c = 2.317 ; IGR_s = 1.0 ; IGR_p = 0.26$$

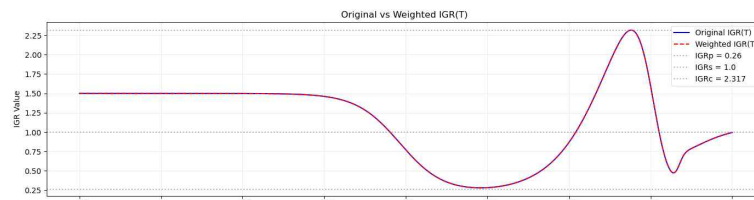


그림 3.4. 온도대별 빙정의 형태 가중치 적용 방식 구현

- 위 식을 적용하면 빙정의 형태별 특성을 고려한 IGR이 되며, 각 온도대별로 나타나는 가중치를 통해, 기존의 동일한 낙하속도, 질량과 다르게 낙하속도, 질량을 온도에 대한 함수로 표현할 수 있게 됨.

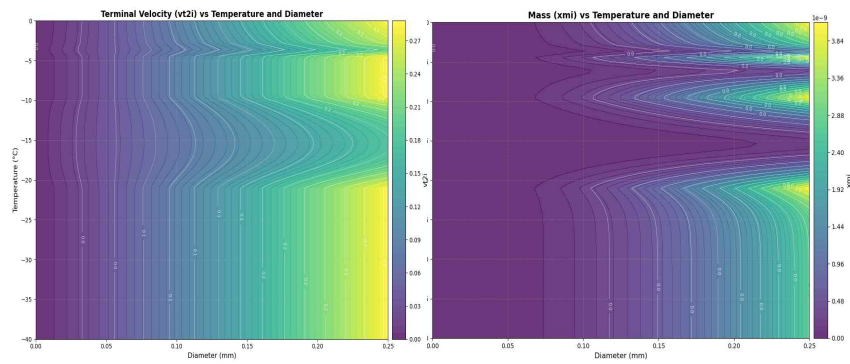


그림 3.5. 온도를 고려한 빙정의 크기별 종단속도, 질량 분포

- 결과적으로 온도에 따른 질량과 낙하속도를 다음과 같이 표현할 수 있음. 극지역의 혼합상 구름에서 빙정이 과냉각 물방울보다 빠르게 성장하는 베르제론-핀다이젠 과정은 빙정의 형태와 크기에 크게 영향 받음. 온도별 가중치를 적용하면 이 과정을 더 정확하게 모델링할 것으로 기대됨. 극지역에서 빙정의 침전은 구름의 수명과 수적 함량에 중요한 영향을 미침. 온도에 따른 다양한 빙정 형태의 낙하 속도를 고려함으로써 침전 과정을 더 현실적으로 모델링할 수 있음. 나아가 혼합상 구름에 대한 개선으로 복사 균형을 적절히 모의하여 북극 증폭에 대한 예측 정교화가 기대됨.



2. 북극 증폭 시 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명

가. 사이클론 발생과 북극 증폭 상호작용 연구 조사

- 빙정 민감도 실험은 전지구 모델에 고려하기 이전에 동일한 물리과정을 사용하는 Single Column CAM(SCAM)에서 Mixed-phase cloud (M-PACE) 캠페인 기간 동안 혼합상 구름의 모의 특성을 비교하였음.

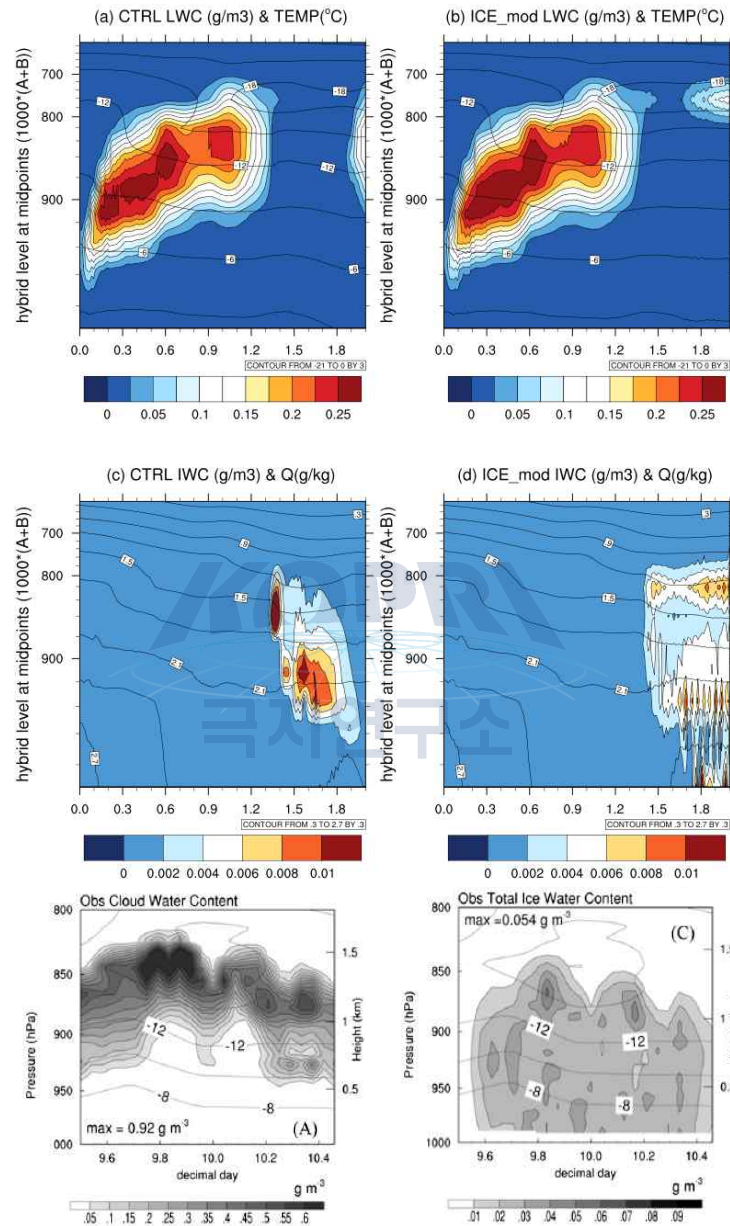


그림 3.6. M-PACE 기간 내 수적, 빙정 분포 (연구 결과) 및 관측 결과(Solomon et al., 2009)

- ICE_mod는 액체수함량의 공간적 분포를 CTRL보다 더 분산되게 모의하였음. 관측 자료의 최대 수함량(0.19 g/m^3)과 비교할 때, 두 모델 모두 약간 과대평가($0.2\text{-}0.25 \text{ g/m}^3$)하고 있음. 그러나 ICE_mod의 더 넓게 분산된 패턴이 관측 자료의 시간적 변동성과 더 유사하게 나타나는데, 이는 ICE_mod가 빙정의 침전과 수평 분포를 CTRL보다 더 현실적으로 모의했음을

보여줌. CTRL은 빙정을 매우 국지적으로 제한된 영역에만 모의하는 반면, ICE_mod는 시간에 따른 빙정의 하강을 더 잘 표현함. ICE_mod는 온도에 따른 빙정 형태별 가중치를 적용함으로써 빙정의 낙하속도와 성장 과정을 더 정확히 모의함. 이로 인해 빙정의 공간적 분포와 시간적 발달이 더 현실적으로 나타났음. 특히 빙정의 침전 과정이 ICE_mod에서 뚜렷하게 개선되었음.

나. 사이클론 발생 기간 내 해양-대기경계층 상호작용 특성 분석

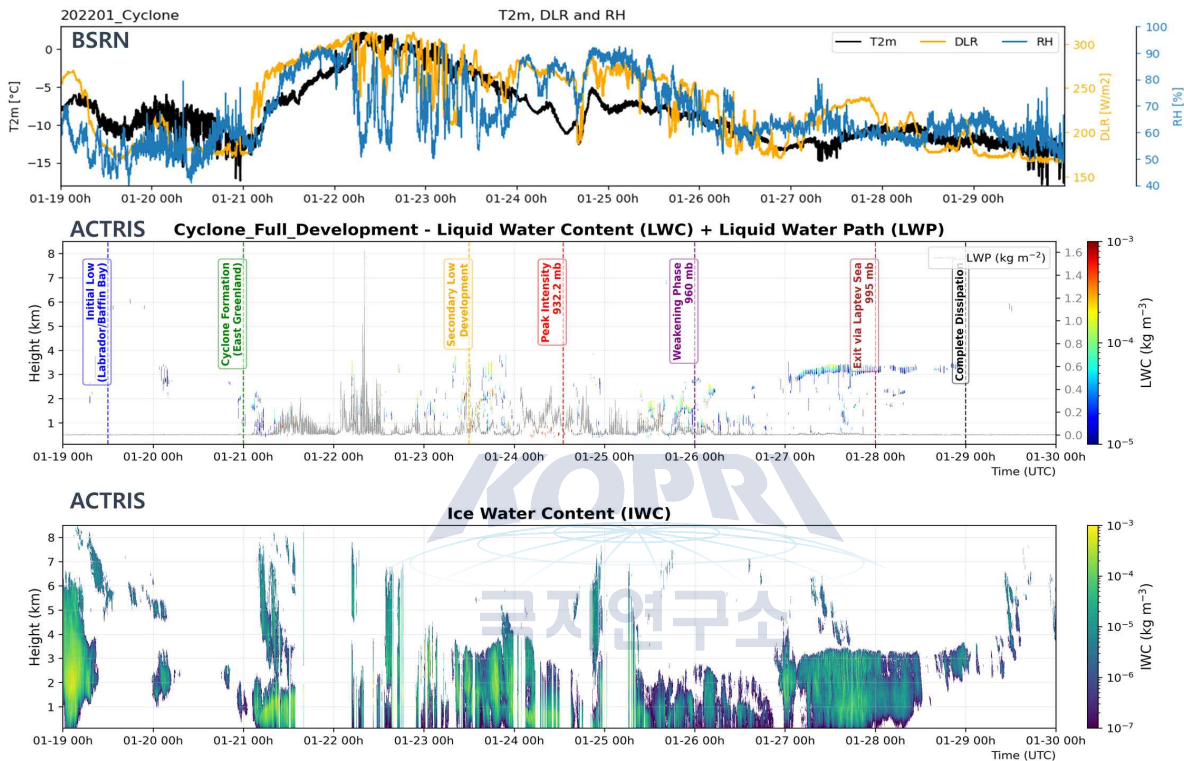


그림 3.7. 사이클론 사례 기간의 스발바르 지점 관측 자료 시계열 분포

- 본 사례에 대해서 상세한 구름 분석을 수행하였음. 2022년 1월 19일, 약한 저기압 유입 시에 Ny-Ålesund 지점은 북극에서 한랭 건조한 공기가 유입되며, 구름은 빙정형 구름만 일부 나타났으며, 기온은 영하 13도 - 영하 6도 내외, 상대습도는 70% 미만으로 분포하였음. 1월 21일, 사이클론이 형성된 이후 온난 습윤한 북대서양의 공기가 Ny-Ålesund 지역에 유입됨에 따라 Liquid Water Content (LWC), Liquid Water Path (LWP)가 증가함. Ice Water Content (IWC)는 사이클론 형성 시 8km 가까이 높은 고도까지 분포하였으며, 사이클론으로 인한 온난 습윤한 공기의 유입으로 기온과 상대습도는 점차 증가하여 22일에는 영상의 기온, 90% 이상의 높은 상대습도가 나타남. IWC는 23일 두 번째 저기압 형성 이전까지 점차 고도가 낮아지는 특징이 나타남. 1월 23일, 두 번째 저기압이 형성되고, 24일에 기온은 하락하지만 상대습도는 상승하는 특징을 보임. 이는 먼저 형성된 첫 번째 저기압이 스발바르의 북쪽에 위치하며, 북극의 한랭한 공기 스발바르로 내려오지만, 비슷한 수준의 습윤한 공기가 Ny-Ålesund로 유입되며, 낮은 기온으로 인해 상대습도가 증가한 것으로 분석됨. 상대습도의

증가는 구름 형성의 호조건으로 하향 장파 복사량이 지상 기온을 따라 감소하지 않고, 유지됨. 이후 첫 번째 저기압 소멸 및 두 번째 저기압이 스발바르 동쪽으로 빠져나가게 되면서 한랭 건조한 공기가 지속적으로 유입되며. 기온, 하향 장파 복사량, 상대습도 모두 감소하는 결과가 나타남. 사이클론 유입 시기에는 혼합상구름이 불분명하나, 사이클론이 빠져나가는 시기인 25일부터 혼합상 구름의 구조가 뚜렷하게 나타났음.

표 3.1. 2022년 1월 사이클론 사례 실험 구성

	CTRL	ICE_mod
모델	CESM2.1.3	
수행 기간	2022.01.19. ~ 2022. 01.19.	
초기장	Intial time: 2020.02.09. ATM:ERA5 LAND: CLM5 spun up with ERA5 OCN & ICE : POP2/CICE5 forced with JRA 55-DO (Data Assimilation and Observation)	
앙상블	31개	
해상도	1.9° x 2.5°, 32 levels	
비고		Ice Habit Weight 적용

- CAM6의 경우 겨울철 구름이 많고, 수적이 많으며, 하향 장파 복사가 많이 나타남. 사이클론 유입 시 예상 효과로는 장파 복사의 증가는 크게 없지만, 온난 공기의 유입으로 인한 기온 상승과 함께 경계층이 약화되어 사이클론의 소멸이 나타나지 않고, 지속되는 현상을 보일 것으로 예상됨. 그러나, 빙정의 형태에 대한 물리적 가중치를 온도별로 표현 가능한 경우 빙정의 낙하 속도가 전체적으로 감소하게 되어, 수증기 침적의 증가로 빙정의 증가와 함께 과냉각 수적의 감소 효과를 기대할 수 있음. 혼합상 구름을 현실적으로 더 잘 표현할 수 있게 되어, 사이클론의 소멸이 빨라질 것으로 예상되며, 그에 따라 단기간 내 복사 효과에 대한 개선이 기대됨.

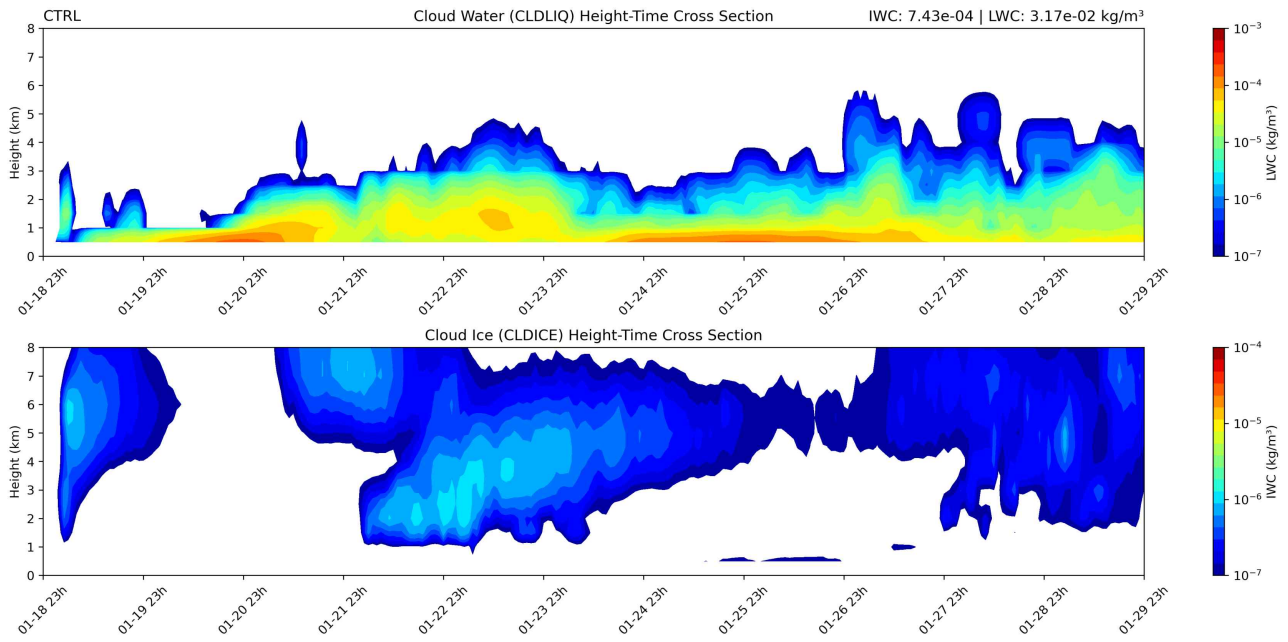


그림 3.8. CTRL 실험의 사이클론 기간 LWC, IWC 연직 시계열 분포

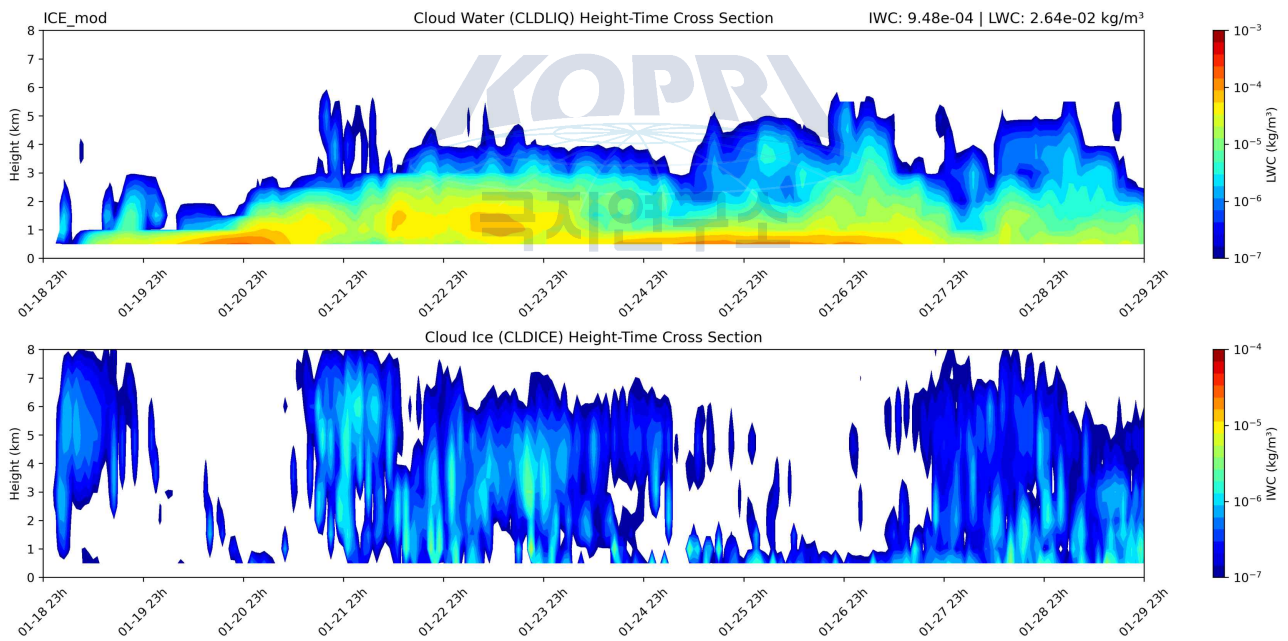
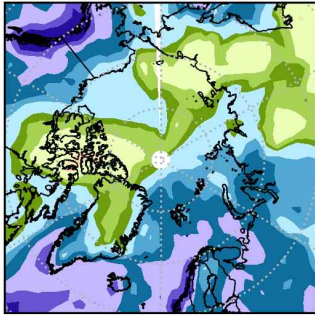


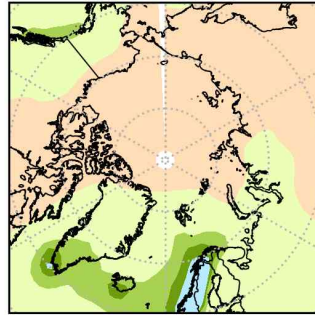
그림 3.9. ICE_mod 실험의 사이클론 기간 LWC, IWC 연직 시계열 분포

- CTRL 실험에서 LWC는 관측(그림 3.7)과 다르게 수적이 지속적으로 나타나는 특징이 있으며 사이클론 기간동안 평균 $3.17 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 빙정은 $7.43 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 정도로 나타남. ICE_mod 실험에서는 수적이 지속적으로 나타나는 특징은 그대로 나타나지만, CTRL 대비 17% 감소하였으며, 빙정은 상공에만 위치하는 것이 아니라 연직으로 다양한 분포를 나타내고, CTRL 대비 27% 증가함.

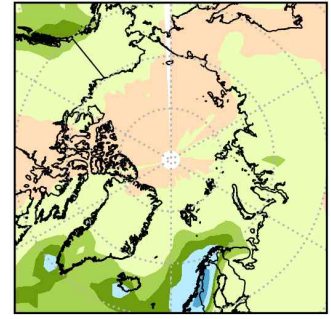
(a) IWP.JRA55



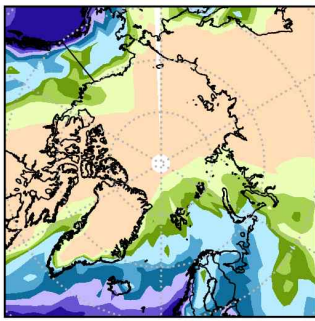
(b) IWP.CTRL



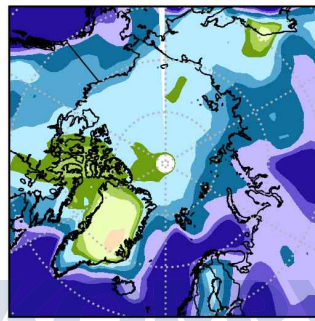
(c) IWP.ICE_mod



(d) LWP.JRA55



(e) LWP.CTRL



(f) LWP.ICE_mod

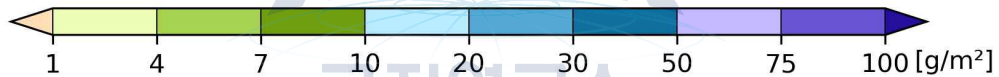
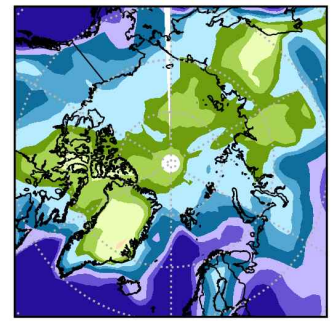


그림 3.10. 2022년 1월 19일 - 1월 29일 기간 평균의 JRA-55 재분석 자료, CTRL, ICE_mod 실험의 IWP (상단), LWP 분포 (하단)

- 결과적으로 극지역의 빙정은 JRA-55 대비 여전히 과소 모의되고 있지만, 사이클론이 위치한 북대서양-바렌츠해에서 빙정수경로가 증가하고, 액체수 경로는 감소하는 특징을 보였음. 그리고 국지적으로 수적이 감소하였으며, 이는 사이클론과 무관하게 해당 지역에서 빙정의 형태가 다양하게 고려됨에 따라 빙정에 침적되는 수적이 증가하여, 수적이 감소하였음.

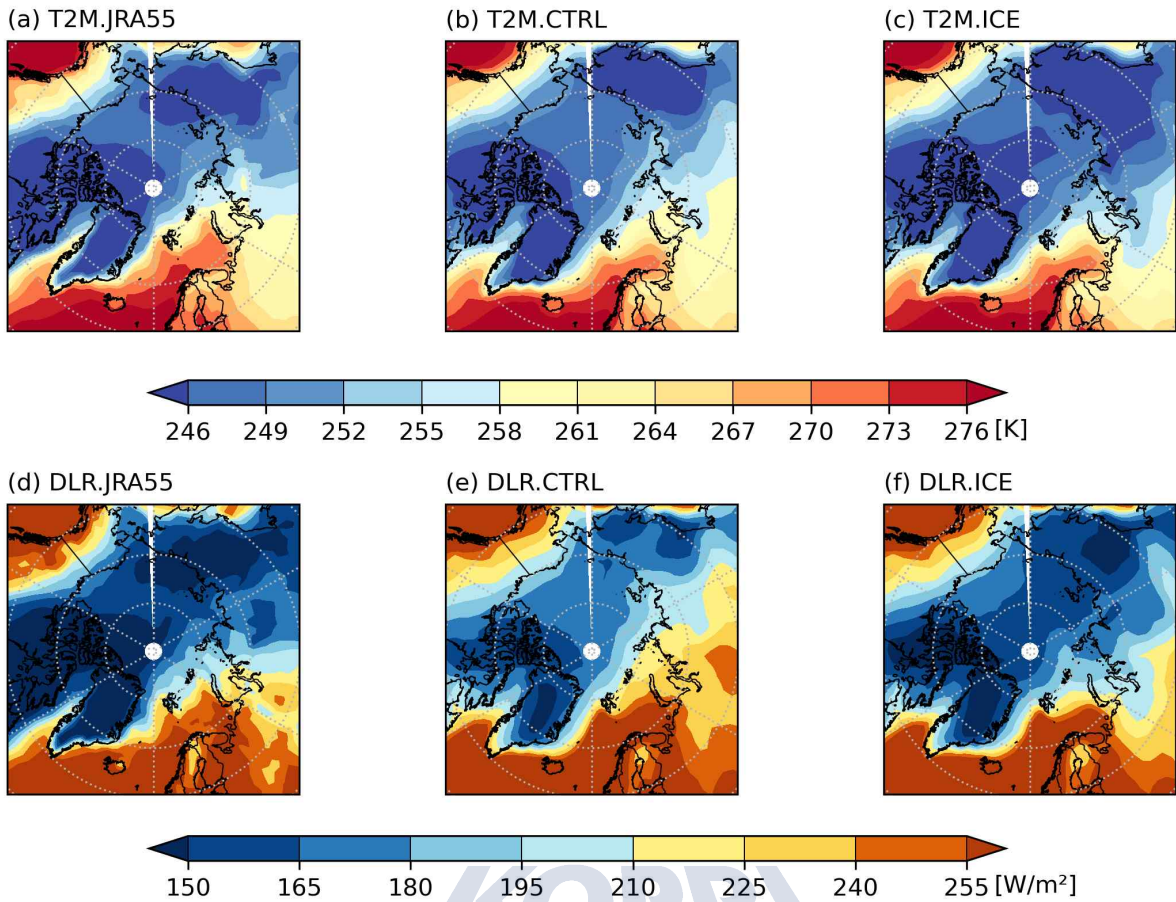


그림 3.11. 2022년 1월 19일 - 1월 29일 기간 평균의 JRA-55 재분석 자료, CTRL, ICE_mod 실험의 지상 기온 (상단) ,하향 장파 복사량 분포(하단)

- 지상 기온의 경우, 관측 지점에서는 거의 차이가 없지만, 북극, 시베리아 지역에서의 액체수 경로가 감소하면서 하향 장파 복사량이 감소하고, 지상 기온이 감소하는 특징이 나타났으며, 하향 장파 복사량이 JRA-55보다 높음에도 지상 기온은 JRA-55와 비슷하게 나타났음. 이는 구름 복사량이 일부 개선되었지만, 지면, 해양, 해빙 등 다른 부분에서 전달되는 플럭스에서 차이가 나타나며, 발생한 결과로 판단됨.

3. 재분석 자료와 CMIP6 모델 자료를 활용한 북극-중위도 원격상관 이론 검증
 가. 기후모델 역학 코어에서 모의한 대기 운동 특성의 재분석 자료와의 비교
 (1) 기후모델 역학 코어

- 2차년도 주요 연구 결과, 건조 역학 코어와 습윤 역학 코어 모두 북극 지표면 열속에 따라 제트기류가 반응하였음. 반면, 북극-중위도 원격상관 패턴은 건조 역학 코어와 습윤 역학 코어 간의 차이가 있었음. 구체적으로, 지표면 열속에 대한 에디의 반응이 건조 역학 코어에서는 과도적인 패턴을 보였으나, 습윤 역학 코어는 일관된 패턴으로 반응하였음.
- 이러한 현상은 수증기 혹은 해양이 국지적 열속에 대한 영향을 혼합해서 발생할 가능성이 있다고 판단됨. 3차년도 재분석 자료를 분석 하기 전에 습윤 역학 코어에서 수증기 함량을 조율함과 동시에 북극 지표면에 동일한 열속을 가하는 실험을 진행하였음. 이러한 실험의 목적은, 해양이 존재하는 습윤 역학 코어에서 수증기를 조율함으로써 외부 강제력에 대한 과도적 패턴의 유무가 해양인지, 수증기인지 판별하기 위함임. 습윤 역학 코어에서는 대기 중 수증기 함량을 포화수증기압 계수(ξ)를 조절함으로써 조율함.

$$e^*(T) = \xi e^*_0 e^{-(L_v/R_v)(1/T - 1/T_0)}$$

- 위 식은 모델이 포화수증기압을 계산하는 Clausius-Clapeyron relation 관계식으로 ξ (default = 1) 계수를 통해 대기 중 수증기 함량이 계산됨. 본 과제에서는 $\xi = 0.1$ 과 $\xi = 1.5$ 두 시뮬레이션을 진행하였고, 이는 전자에 비해 후자의 실험이 대기 중 수증기 함량이 많다는 것을 의미함.
- 위와 같은 실험 셋팅에 외부강제력 대한 반응 차이를 확인하기 위해 북극 지표면에 동일한 열속을 처방하였음.

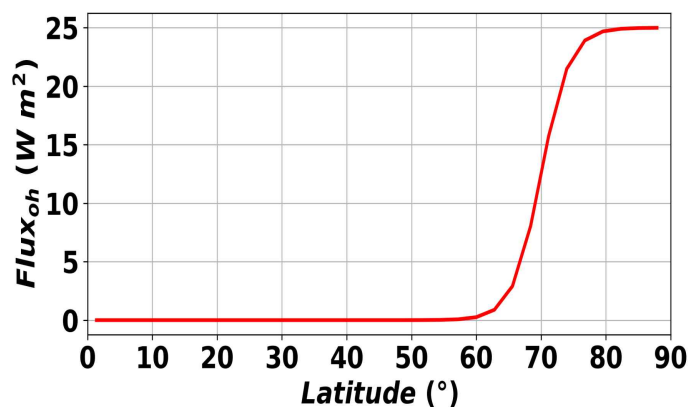


그림 3.12. 열적 강제력($Flux_{oh}$) 처방 방법

- 그림 3.12는 두 수증기 조율 실험에 처방된 열적 강제력으로, 약 60°N부터 버퍼형식으로 북

극 지표면에 동일한 열적 강제력을 처방하였음. 이러한 열적 강제력은 북극 온난화를 모의하기 위함임. 연구에서 $\xi = 0.1$ 과 $\xi = 1.5$ 만 조율한 실험을 각 실험의 control run으로 정의하고, 열적 강제력까지 처방한 실험을 $\xi_{ext} = 0.1$ 과 $\xi_{ext} = 1.5$ 이라고 정의하겠음.

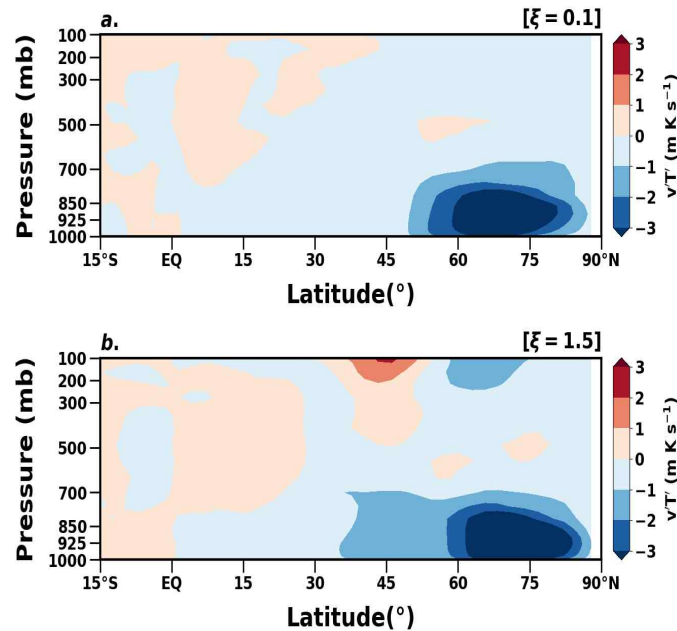


그림 3.13. 북극 지표면 열적 강제력에 따른 각 실험 별 Eddy heat flux ($v'T'$) 반응. 색은 각 실험에서 control run과의 제트기류 차이를 나타냄.

극지연구소

- 그림 3.13은 $\xi_{ext} = 0.1$ (a) 와 $\xi_{ext} = 1.5$ (b) 에서 각 control run을 뺀 eddy heat flux ($v'T'$)을 나타냄. 다시 말해, 주어진 수증기 함량 상태에서 북극 지표면 열속에 따른 에디 반응을 보여줌. 그림에서 확인된 것과 같이 수증기 함량이 다른 두 실험에서, 북극-중위도 간 에디의 원격상관 패턴이 일관된 모습을 확인할 수 있음. 이는, 2차년도 건조 및 습윤 모델에서 서로 상반된 결과를 보였던 에디 반응의 파동적인 패턴의 여부가 수증기보다는 해양의 영향일 가능성이 높다는 것으로 해석됨.

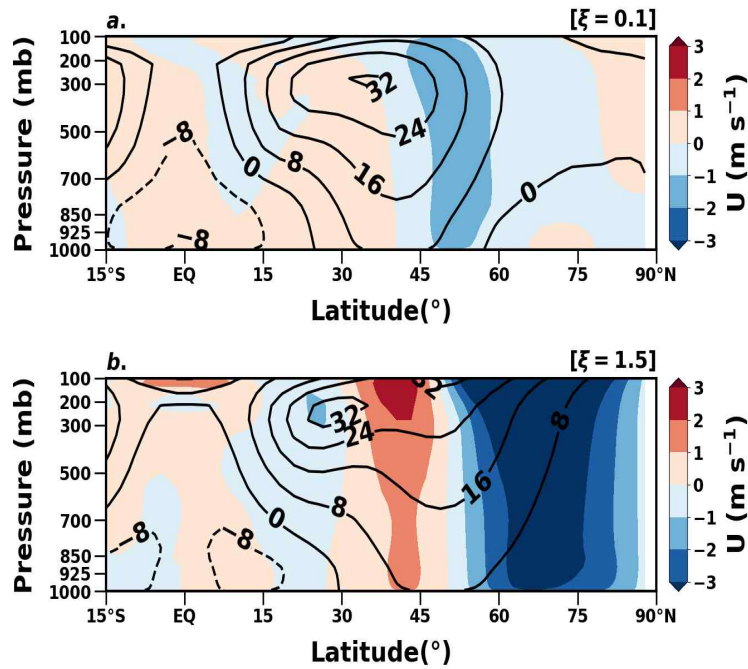


그림 3.14. 북극 지표면 열적 강제력에 따른 각 실험별 제트기류 반응. 색은 각 실험에서 control run과의 제트기류 차이를 나타내며, 검정 실선은 각 실험의 컨트롤런 제트기류를 나타냄

- 그림 3.14는 $\xi_{ext} = 0.1$ (a) 와 $\xi_{ext} = 1.5$ (b) 북극 지표면 열적 강제력에 대한 제트기류 반응을 나타냄. 실선은 각 실험의 control run 제트기류를 나타내며, 색은 control run 대비 제트기류 아노말리값을 나타냄.
- 습윤 역학 코어에서 높은 ξ 은 온실기후를, 낮은 ξ 은 냉각기후를 묘사함 (Frierson et al., 2006). 다시말해, $\xi = 1.5$ 실험은 지구온난화를 모의함. 주목할 만한 점은, $\xi_{ext} = 1.5$ 에서 북극 온난화에 대한 제트기류의 반응이 $\xi_{ext} = 0.1$ (a) 보다 강하다는 것임. 제트기류가 온실기후인 $\xi = 1.5$ 에서 $\xi = 0.1$ 보다 약하다는 것을 상기하면, 약한 제트기류는 외부 강제력에 대한 더 민감한 반응을 보인다는 1차년도 이론과 일치하는 것을 확인할 수 있음.

(2) 재분석 자료

- JRA-55 기반 1979년부터 2022년 북극을 대상으로 기후 평균 온도 대비 온도 아노말리 추세를 분석하였음.

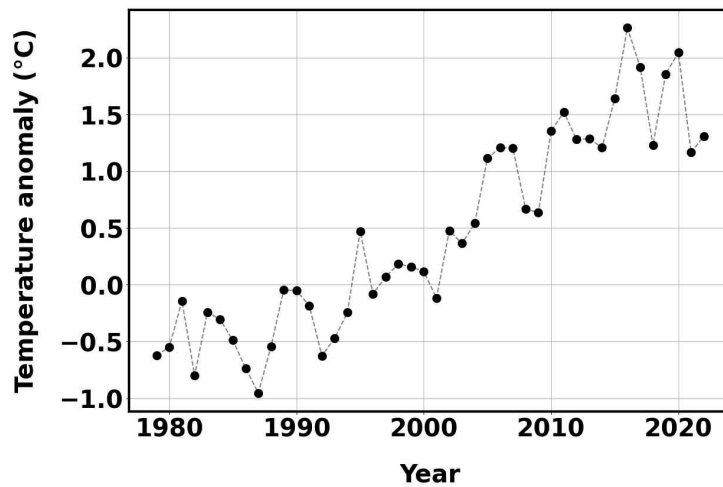


그림 3.15. 1979년부터 2022년 기후 평균 T2M 대비
북극(60°N ~ 90°N) 온도 아노말리

- 그림 3.15는 연 평균 온도 아노말리 값을 나타냄. 기후 평균 온도는 1979년부터 2022년도 까지 전체 연도의 평균으로 계산되었으며, 북극 온난화 지표는 60°N ~ 90°N 아노말리 값과 0° ~ 60°N의 비율로 계산되었음. 그림4에서 확인된 것과 같이, 지구온난화가 진행되는 최근래에 북극이 다른 지역보다 크게 온난화가 진행되는 북극 증폭 현상을 확인하였음.
- 이에 따라 제트기류의 강도 및 편위 정도는 분석을 진행하고자 하며, 수치모델과 이론과의 차이를 분석하고자 함.

나. 북극 온난화로 유도되는 표면 열속 변화를 통한 예측성 실험

- CMIP6 해빙 농도 시나리오를 이용하여, 근 미래 제트기류의 변화를 분석하고자 함. 시나리오는 The Polar Amplification Model Intercomparison Project(PAMIP)로, 북극 증폭에 따른 전 지구 기후 시스템의 반응을 분석하는데 유용한 실험틀을 제공해줌.

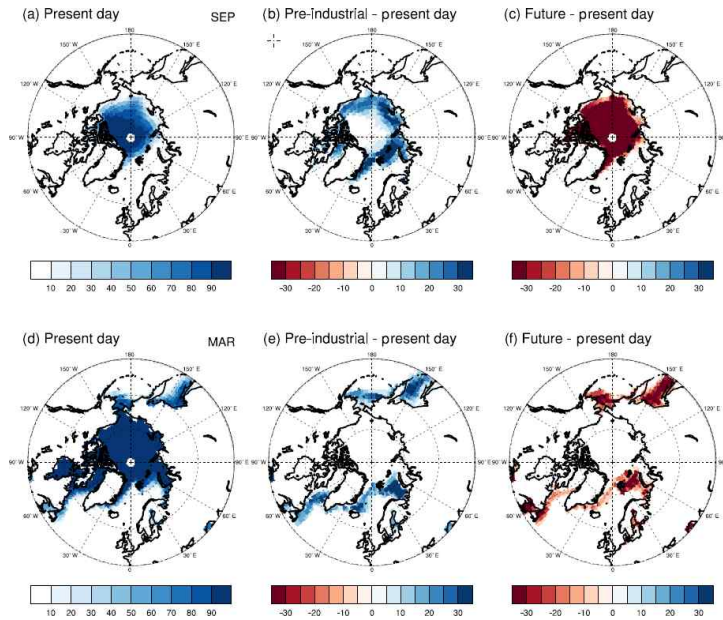


그림 3.11. 그림 3.11. PAMIP 해빙 농도 처방 방법 (Smith et al., 2019)

- 그림 3.16은 PAMIP에서 해빙 농도 처방 방법을 나타냄. 구체적으로, present-day 장은 1979-2008 기후값을 사용하며, Future 과 pre-industrial 장은 CMIP5에서 각 historical 과 RCP8.5 시뮬레이션으로 얻어진 결과로 처방됨 (Smith et al., 2019).
- 실험은 해양-대기 커플링 실험에서 pa-piArcSIC, pa-futArcSIC를 사용하고자 함. 이는 present-day 해수면온도 장에서 각각 pi SIC 장, future SIC 장이 처방된 실험임.
- 북극 해빙 농도를 변화시키는 PAMIP 시나리오를 통해 북극 증폭에 따른 제트기류의 반응과 북극-중위도 원격상관 패턴을 수치모델과 재분석 자료와 비교하여, 1차년도 이론 제시가 실용적 가치를 지니는지 분석하고자 함.

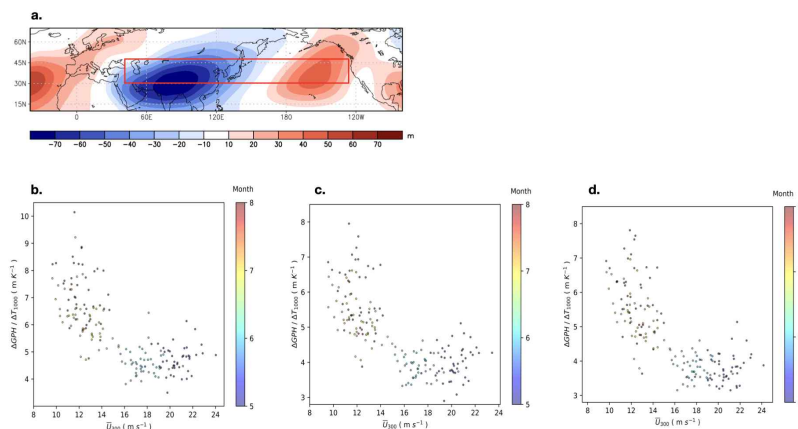


그림 3.17. Zonal mean zonal wind의 세기에 따라 여름철 태평양과 유라시아 대륙에 위치한 해양 고기압과 대륙 저기압 간의 기압차 분포

- 현재 기후 상태에서 zonal mean zonal wind의 세기에 따른 정규화된 대륙 저기압과 해양

고기압 간의 차이를 살펴보면, 제트의 강도가 약화될수록 그 차이가 커지는 경향을 확인할 수 있다(그림 3.17). 이러한 특징은 사용한 재분석 자료의 종류와 관계없이 일관되게 나타난다는 점에서 더욱 신뢰할 만한 결과로 볼 수 있음.

- 위의 결과는 북극의 해빙이 감소하여 중위도 제트 기류가 약화되면서 지역적으로 제트기류가 보다 남북방향으로 흔들리는 구조를 평균적으로 가짐을 나타냄.
- 근미래의 상황에서는 북극의 얼음의 양이 더욱 줄어들 것으로 기대되며 위와 같은 분포는 그대로 유지될 것으로 예상되고 있음.

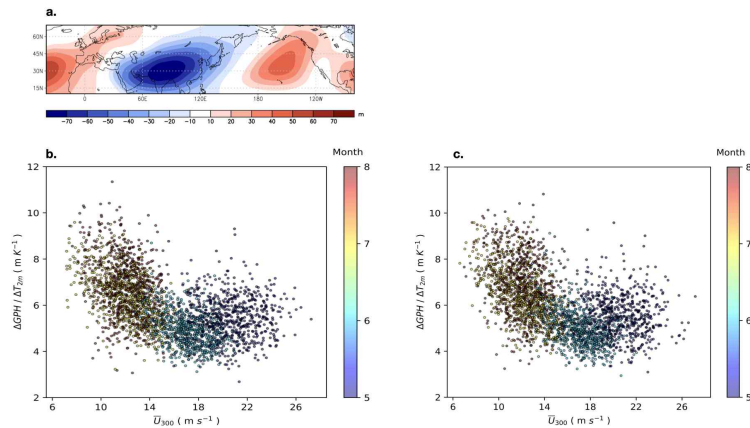


그림 3.18. CMIP6의 다양한 시나리오에 기반한 여러 GCM 시뮬레이션을 활용하여 여름철 대륙성 저기압과 북태평양 고기압 간의 기압차 분포 (패널 (b)는 2040-2059년 기간의 분포를, 패널 (c)는 2080-2099년 기간의 분포를 나타냄)

- CMIP6의 SSP1-2.6 시나리오에 포함된 34개 모델의 결과를 활용하여 근미래 여름철 대기 반응을 분석하였음. 그림 3.18은 동일한 지역에서의 기압차를 추정해낸 것으로, 패널 (b)는 2040-2059년의 근미래 20년 동안의 결과를, 패널 (c)는 보다 온난화가 진전된 2080-2099년의 결과를 각각 제시하여 두 시기의 변화를 비교할 수 있도록 하였음.
- 전체적인 결과는 현재 기후 상태와 유사한 분포를 보인다. 북극 온난화에 따른 중위도 제트 기류의 약화가 지속되면서, 대륙-해양 분포에 의해 유도되는 대기 반응의 강도는 오히려 강화되는 경향을 나타낸다. 근미래에도 이러한 패턴이 계속될 것으로 예상되며, 중위도 제트 기류는 현재와 마찬가지로 남북 방향으로 더 크게 사행할 가능성이 있음.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

년도	성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도(2023)	모델 실험 체계 구축 및 극지역 국지적 변화가 전지구 대기에 미치는 영향 분석	○ 모델 실험 체계 구축 및 타기관 모델과의 경계층 및 하층 구름 모의 성능 비교/평가	40	1. 해빙 감소 시 북극 반응에 대한 공통 실험안 제시 2. 공통 실험의 구름 관련 변수 모의 성능 비교/평가
		○ 모델의 극지역 경계층/하층 구름 분석에 필요한 가용 관측 자료 확보	30	1. 확보한 관측 자료 테이블화
		○ 북극 해빙, 국지적 지표 열속 변화가 전지구 스케일의 대기에 미치는 영향에 대한 고찰	30	1. 선행 연구의 한계 분석 2. 지역적 열속 변화에 따른 반응 분석 결과 제시
2차년도(2024)	북극 해양-대기경계층-구름의 연관성 분석 및 극지연구소 예측시스템 모의성능 평가	○ 극지역 현장/위성 관측 자료와 극지 예측 시스템의 모의 결과 비교/검증	40	1. 지점 관측 자료 활용 및 극지 예측시스템의 대기모델 비교/검증 수행
		○ 관측 자료에 기반한 경계층/구름 미세 물리 과정 최적의 파라미터 제시	30	1. 현장 관측 자료 활용 및 모델 내 에어로졸-빙정핵 모수화 방안 내 적용 방법 제시
		○ 국지적 열속이 중위도 제트 기류에 미치는 영향 분석	30	1. 습윤과 건조 이상 모델 활용 및 국지적 열속에 따른 중위도 원격상관 패턴 구현 / 비교 결과

3차년도(2025)	모델 자료를 활용한 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명	◦ 경계층 / 구름 미세물리 과정 파라미터 민감도 실험 체계 구축	40	1. 빙정의 형태 민감도 실험 체계 구축
		◦ 북극 증폭 시 해양-경계층-구름 상호작용의 역할 규명	30	1. 사이클론 사례로 북극 증폭에 대한 해양-대기경계층 구름 상호작용의 역할 분석
		◦ 재분석 자료와 CMIP6 모델을 활용한 북극-중위도 원격 상관 이론 검증	30	1. 재분석 자료 및 CMIP6를 통해 북극 온난화에 따른 중위도 역학 반응 분석 2. 이론과 수치모델과의 비교·분석 수행



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구에서 개발한 빙정 형태 모수화 방안을 KPOPS-EARTH 계절예측시스템 내 이식, 검증 예정
- 북극 해양-대기경계층-구름 상호작용 역할을 이해함으로써 예보 오차를 줄여줄 수 있는 주요 원인에 대해 파악 및 극지연구소 예측시스템 개선의 주안점과 방향성을 파악하는데 필요한 자료로 활용 가능



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. CESM2.1.3

- 출처: <https://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2>

2. JRA-55

- 출처: https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html
- 수집기간: 1981년 1월 ~ 2022년 2월
- 영역: 전지구

3. ERA5

- 출처: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels>
- 수집기간: 1981년 1월 ~ 2022년 2월
- 영역: 전지구

4. ACTRIS Cloudnet data

- 출처: <https://cloudnet.fmi.fi/>
- 수집기간: 2020년 1월 ~ 2022년 2월
- 영역: Ny-Ålesund



5. BSRN

- 출처: <https://bsrn.awi.de/>
- 수집기간: 2020년 1월 ~ 2022년 2월
- 영역: Ny-Ålesund

6. CALIPSO-GOCCP

- 출처: https://climserv.ipsl.polytechnique.fr/cfmip-obs/Calipso_goccp.html
- 수집기간: 2006년 6월 ~ 2020년 2월

7. CMIP6

- 출처: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6>
- 수집기간: 2006년 6월 ~ 2020년 2월

제 7 장 참고문헌

- Ahn, J. B., Lee, J., & Jo, S. (2018). Evaluation of PNU CGCM ensemble forecast system for boreal winter temperature over South Korea. *Atmosphere*, 28(4), 509-520.
- Aue, L., Röntgen, L., Dorn, W., Uotila, P., Vihma, T., Spreen, G., & Rinke, A. (2023). Impact of three intense winter cyclones on the sea ice cover in the Barents Sea: A case study with a coupled regional climate model. *Frontiers in EARTH Science*, 11, 1112467.
- Bacmeister, J. T., Hannay, C., Medeiros, B., Gettelman, A., Neale, R., Fredriksen, H. B., ... & Otto-Bliesner, B. (2020). CO₂ increase experiments using the CESM: relationship to climate sensitivity and comparison of CESM1 to CESM2. *Journal of Advances in Modeling EARTH Systems*, 12(11), e2020MS002120.
- Bae, J., Sung, H. J., Baek, E. H., Choi, J. H., Lee, H. J., & Kim, B. M. (2023). Reduction in the Arctic Surface Warm Bias in the NCAR CAM6 by Reducing Excessive Low-Level Clouds in the Arctic. *Atmosphere*, 14(3), 522.
- Baek, E. H., Bae, J., Sung, H. J., Jung, E., Kim, B. M., & Jeong, J. H. (2022). Characteristics of high-latitude climate and cloud simulation in Community Atmospheric Model Version 6 (CAM6). *Atmosphere*, 13(6), 936.
- Bechtold, P., Semane, N., Lopez, P., Chaboureaud, J. P., Beljaars, A., & Bormann, N. (2014). Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(2), 734-753.
- Cesana, G., & Chepfer, H. (2012). How well do climate models simulate cloud vertical structure? A comparison between CALIPSO-GOCCP satellite observations and CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 39(20).
- Chen, J. P., & Lamb, D. (1994). The theoretical basis for the parameterization of ice crystal habits: Growth by vapor deposition. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(9), 1206-1222.
- Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., ... & Yoon, J. (2020). Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, 10(1), 20-29.
- Driemel, A., Augustine, J., Behrens, K., Colle, S., Cox, C., Cuevas-Agulló, E., ... & König-Langlo, G. (2018). Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992-2017). *EARTH System Science Data*, 10(3), 1491-1501.
- Fan, H., Wang, L., Zhang, Y., Tang, Y., Duan, W., & Wang, L. (2020). Predictable patterns of wintertime surface air temperature in Northern Hemisphere and their predictability sources in the SEAS5. *Journal of Climate*, 33(24), 10743-10754.
- 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.
- 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.
- Kim, G., Shin, S. H., & Lee, K. J. (2026). Improved Maritime Continent MJO Simulation in the KMA GloSea6 through Enhanced Thermodynamic Processes. *Journal of Climate*, 39(2), 571-589.
- Johnson, S. J., Stockdale, T. N., Ferranti, L., Balmaseda, M. A., Molteni, F., Magnusson, L., ... & Monge-Sanz, B. M. (2019). SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*, 12(3), 1087-1117.
- Kim, S. H., Sung, H. J., Kim, S. J., Baek, E. H., Moon, J. Y., & Kim, B. M. (2022). Contribution of ural and kamchatka blockings to the amplified warm Arctic-Cold Eurasia pattern under Arctic Sea ice loss and Eurasian cooling. *Journal of Climate*, 35(13), 4071-4083.
- Laroche, S., & Poan, E. D. (2022). Impact of the Arctic observing systems on the ECCC global weather forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(742), 252-271.
- Lee, S. M., Hyun, Y. K., Shin, B., Ji, H., Lee, J., Hwang, S. O., & Boo, K. O. (2024). The seasonal forecast characteristics of tropical cyclones from the KMA's Global Seasonal Forecasting System (GloSea6-GC3. 2). *Atmosphere*, 34(2), 97-106.
- Morrison, H., De Boer, G., Feingold, G., Harrington, J., Shupe, M. D., & Sulia, K. (2012). Resilience of persistent Arctic mixed-phase clouds. *Nature Geoscience*, 5(1), 11-17.
- Ong, C. R., Koike, M., Hashino, T., & Miura, H. (2024). Responses of simulated Arctic mixed-phase clouds to parameterized ice particle shape. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 81(1), 125-152.
- Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvarinen, O., Ruosteenoja, K., ... & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications earth & environment*, 3(1), 168.
- Rinke, A., Maturilli, M., Graham, R. M., Matthes, H., Handorf, D., Cohen, L., ... & Moore, J. C. (2017). Extreme cyclone events in the Arctic: Wintertime variability and trends. *Environmental Research Letters*, 12(9), 094006.
- Serreze, M. C., Stroeve, J., Barrett, A. P., & Boisvert, L. N. (2016). Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19), 11-463.
- Smith, D. M., Screen, J. A., Deser, C., Cohen, J., Fyfe, J. C., García-Serrano, J., ... & Zhang, X. (2019). The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification. *Geoscientific*

Model Development, 12(3), 1139-1164.

Vavrus, S., & Waliser, D. (2008). An improved parameterization for simulating Arctic cloud amount in the CCSM3 climate model. *Journal of Climate*, 21(21), 5673-5687.

Previdi, M., Smith, K. L., & Polvani, L. M. (2021). Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms. *Environmental Research Letters*, 16(9), 093003.

Zhang, X., Tang, H., Zhang, J., Walsh, J. E., Roesler, E. L., Hillman, B., ... & Weijer, W. (2023). Arctic cyclones have become more intense and longer-lived over the past seven decades. *Communications EARTH & Environment*, 4(1), 348.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.