

남극 성층권 오존 감소와 열대 태평양 해수면 온도
변화의 관련성 분석

Analysis on the Impact of Antarctic Ozone Hole on Tropical
Pacific Warming Pattern



2024. 02. 28

한국해양과학기술원
부설 극지연구소



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 성층권 오존 감소와 열대 태평양 해수면 온도 변화의 관련성 분석”과제의 (최종)보고서로 제출합니다.

2024. 02. 28





보고서 초록

과제관리번호	PE23340	해당단계 연구기간	2023.02.01 ~ 2023.12.31	단계 구분	1단계 / 1단계
연구사업명	중 사업 명	연구·정책 지원사업			
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	남극 성층권 오존 감소와 열대 태평양 해수면 온도 변화의 관련성 분석			
연구책임자	정의석	해당단계 참여연구원수	총 : 1 명 내부 : 1 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해양대기연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	51pp
<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구목표 <ul style="list-style-type: none"> - 목표: 남극 성층권 오존 감소와 열대 동태평양 해수면 온도 감소 경향 사이의 관련성 분석을 통한 열대 태평양 해수면 온도 변화의 원인 규명 ○ 연구내용 <ul style="list-style-type: none"> - 태평양 지역 해수면 온도 장기 변동성 특성 파악 - 열대 태평양 해수면 온도 변화와 관련된 대기순환 변화의 특성 파악 - 자연변동성의 영향 분석 - 외부 복사강제 인자의 영향 분석 - 관측과 기후모델 모의결과 사이의 차이 분석 ○ 주요 연구 성과 <ul style="list-style-type: none"> - 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향의 원인 규명 - 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향과 관련된 대기순환 변화의 특성 제시 - 수십 년 주기의 자연변동성의 역할 제시 - 외부 복사강제 인자의 영향 평가 - 남극 성층권 오존 농도 감소의 영향 평가 - 자연변동성과 관련된 관측과 기후모델 사이의 차이 평가 ○ 연구개발결과의 활용 계획 <ul style="list-style-type: none"> - 남극 성층권 오존층 회복 추세에 따른 미래 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향 예측에 활용 - 기후모델 모의성능 평가를 위한 기초자료로 활용 - 열대 지역과 남반구 고위도 지역 사이의 상호작용에 대한 이해 향상에 활용 - 극지 현장 관측자료와의 연계 및 탐사 분야와의 연동을 통해 남반구 고위도 지역 기후변화 특성 이해 제고에 활용 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	열대 태평양, 해수면 온도, 남극 성층권 오존홀, 자연변동성, 기후변화 탐지 및 원인 규명			
	영 어	Tropical Pacific, Sea Surface Temperature, Antarctic Ozone Hole, Internal Variability, Detection and Attribution of Climate Change			



요 약 문

I. 제 목

- 남극 성층권 오존 감소와 열대 태평양 해수면 온도 변화의 관련성 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 기후피드백 과정과 원격상관 기작에 대한 이해 부족으로 여러 물리과정들이 기후모델에 부정확하게 표현되어 있을 수 있고 그로 인해 미래 기후변화 예측 불확실성이 초래될 수 있음
- 열대 태평양 해수면 온도 변화의 공간 분포에 따라 원격상관의 양상이 크게 달라질 수 있는 것으로 알려져 있음
- 열대 태평양 지역의 기후변화를 결정하는 물리과정에 대한 이해 향상을 통해 열대 지역 뿐만 아니라 극지역 기후예측 정확성 향상에 기여할 수 있음
- 열대 태평양 해수면 온도 변화의 공간 분포에 따라 지역별 물수지 특성과 가뭄·홍수 등의 극한 기상 현상의 특성이 변화하여 경제 및 산업에 큰 영향을 미칠 수 있음
- 관측 기간 및 관측 정확성과 관련된 현장 관측 자료의 제약 그리고 기후모델에 표현되어 있는 물리 과정들의 잠재적인 오류 등으로 인해 관측된 변화가 온실기체 증가 등과 같은 외부 요인에 기인하는 강제된 변화인지 아니면 관측된 변화의 상당 부분이 기후시스템 내의 자연변동성과 관련되어 있는지에 대한 원인 규명에 있어서 불확실성이 존재함
- 대기 중의 온실기체 농도 증가 이외의 다른 인위적인 요인에 기인하는 강제된 변화에 대한 이해가 불충분한 실정임
- 이러한 제약들로 인해 미래 기후예측에 상당한 불확실성이 발생할 수 있다는 점을 고려할 때 기후변화에 미치는 여러 인위적인 요인들의 영향과 자연변동성의 역할에 대한 이해 향상이 필요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 관측자료, 재분석자료 및 위성관측 자료 수집 및 분석
- 위성관측 기반 재분석자료의 정확성 평가
- 기후모델 실험자료 수집
- 성층권 오존 변화, 온실기체 증가, 에어로솔 농도 변화에 기인하는 남반구 고위도 지역 및 열대 태평양 지역 기후변화 분석
- 열대 태평양 지역 해수면 온도 변화에 미치는 자연변동성의 영향 분석
- 관측과 기후모델 모의결과 간 차이의 원인 분석

IV. 연구개발결과

- 열대 태평양 지역 해수면 온도 변동성 특성 파악
 - 태평양 지역 해수면 온도의 장기 변동성 및 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향의 특성 파악
 - 해수면 온도의 변화와 관련된 대기순환 변화의 특성 파악
- 위성관측 기반 재분석자료의 정확성 평가
 - 마이크로파 산소 흡수 밴드 밝기온도 자료 기반 재분석자료의 대류권 온도 변화 정확성 평가
- 자연변동성의 영향 파악
 - 관측 및 기후모델 실험 자료 분석에 기반하여 자연변동성과 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향 사이의 관련성 파악
- 외부 복사강제 인자의 영향 파악
 - 대기 중의 온실기체 농도 증가, 에어로솔 농도 변화, 성층권 오존 감소 등의 외부요인에 의한 강제된 변화와 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향 사이의 관련성 파악

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 성층권 오존층 회복 추세에 따른 미래 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향 예측에 활용
- 기후모델 모의성능 평가를 위한 기초자료로 활용
- 열대 지역과 남반구 고위도 지역 사이의 상호작용에 대한 이해 향상에 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

- Analysis on the impact of Antarctic ozone hole on tropical Pacific warming pattern

II. Purpose and Necessity of R&D

- Due to the insufficient understanding of climate feedback processes and tropics-extratropics teleconnections, a variety of physical processes might be inaccurately represented in coupled climate models, which may in turn cause uncertainties in future climate predictions
- The characteristics of teleconnections depend on the spatial pattern of sea surface temperature change and variability over the tropical Pacific
- Enhanced understanding of the physical processes governing the climate change over the tropical Pacific is essential for improving future climate predictions not only over the tropics but also over the polar regions
- The spatial pattern of sea surface temperature trend affects the characteristics of regional water budget and extreme weather events, such as severe droughts and flooding, which may exert a detrimental impact on economy and industry
- Due to both the limitation of in-situ observing system and the potential errors of physical processes depicted in climate models, it is challenging to unambiguously attribute the causes of observed climate changes
- There is an imperfect understanding of the forced response to non-greenhouse gas forcing agents
- Considering that these limitations may cause substantial uncertainties in predicted future climate change, it is crucial to improve the current understanding of both externally-forced and internal variability-related climate changes

III. Contents and Extent of R&D

- Acquisition and analysis of in-situ observations, reanalysis dataset, and satellite observations

- Assessing the accuracy of reanalysis dataset based on satellite observations
- Acquisition of climate model simulation output
- Analysis on the characteristics of climate change over the Southern Hemisphere high latitudes and over the tropical Pacific resulting from decreases in stratospheric ozone concentrations, increases in greenhouse gas concentrations, time-varying anthropogenic aerosols
- Analysis on the role of internal variability in shaping the observed La Niña-like sea surface temperature change
- Analysis on the potential causes responsible for the model-observation discrepancy

IV. R&D Results

- Characteristics of tropical Pacific sea surface temperature variability
 - The Pacific has experienced a substantial long-term variability of sea surface temperature, partly due to internal variability
 - The observed La Niña-like sea surface temperature trend pattern since the late 1970s is accompanied by a strengthening of the Pacific trade winds related to the intensification of the Hadley and Pacific Walker cells
- Assessment of the accuracy of reanalysis data set
 - It is found that the tropical tropospheric temperature trends from the ERA5 reanalysis data set is largely consistent with microwave satellite observations
- Contribution of internal variability to the observed La Niña-like sea surface temperature trend pattern
 - Comprehensive analyses indicate that the observed La Niña-like sea-surface temperature trend pattern since the late 1970s is closely linked to internal variability, more specifically, the Inter-decadal Pacific Oscillation
- Role of external forcing agents
 - Climate model simulations integrated with individual external forcing agents show that the observed La Niña-like sea surface temperature trend pattern is likely to have driven, partly, from changes in non-greenhouse gas forcing agents, particularly, decreases in stratospheric ozone concentrations and time-varying anthropogenic aerosols

V. Application Plans of R&D Results

- The linkage between stratospheric ozone decrease and La Niña-like sea surface temperature trend pattern can be used to roughly predict the response of tropical Pacific sea surface temperature to the projected recovery of Antarctic

ozone hole

- The results obtained from this study will be used as a benchmark for assessing the model performance
- The results obtained from this study will be used to better understand the two-way interaction between the tropics and the Southern Hemisphere high latitudes



C O N T E N T S

(영 문 목 차)

Chapter 1 Introduction	1
Section 1.1 Objective of the study	1
Section 1.2 Necessity of the study	1
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	4
Section 2.1 Domestic	4
Section 2.2 Abroad	5
Section 2.3 Weaknesses of previous studies	8
Section 2.4 Future directions	8
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	10
Section 3.1 Characteristics of observed change and variability	10
Section 3.2 Role of internal variability	24
Section 3.3 Contributions of external forcing agents	35
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute	45
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	47
Chapter 6 References	48

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구개발의 목적	1
1.2 연구개발의 필요성	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	4
2.1 국내 기술개발 현황	4
2.2 국외 기술개발 현황	5
2.3 현 기술상태의 취약성	8
2.4 앞으로의 전망	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
3.1 열대 태평양 및 남반구 고위도 지역 기후변화 특성	10
3.2 자연변동성의 영향	24
3.3 외부 복사강제 인자의 역할	35
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	45
4.1 연구개발목표 달성도	45
4.2 대외기여도	46
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	47
제 6 장 참고문헌	48
부 록 최종 결과보고서 평가의견 반영사항	50

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

- 본 연구개발의 목적은 남극 성층권 오존 감소와 열대 동태평양 해수면 온도 감소 경향 사이의 관련성 분석을 통해 열대 태평양 해수면 온도 변화의 원인을 규명하고 이를 바탕으로 온실기체 농도의 증가를 포함한 외부 복사강제 인자의 변화에 따른 미래 기후변화의 양상을 추정하는데 있음

제 2 절 연구개발의 필요성

- 대기 중의 온실기체 농도 증가에 따른 지구온도 상승과 함께 지구 도처에서 극한 기상현상의 발생 빈도수가 증가하고 있어 이로 인해 초래되는 경제·사회적 손실 및 인명 피해를 줄이기 위해 지구온난화에 따른 미래 기후변화의 특성에 대한 이해 향상이 필요함
- 온실기체 농도 증가 등의 외부 요인들로 인한 지구의 온도 상승이 기후시스템 내의 피드백 과정을 통해 증폭되거나 감쇄될 수 있는 것으로 알려져 있는데 지구 평균 온도 변화에 따른 구름의 변화에 대한 이해 부족으로 기후피드백의 크기 및 특성에 있어 불확성이 존재함
- 입사하는 태양 단파 복사에너지의 반사에 큰 영향을 미치는 아열대 지역 하층운의 변화가 열대 태평양 해수면 온도 변화의 공간 분포 및 수반된 대기순환의 변화에 크게 좌우되기 때문에 구름과 관련된 피드백 과정의 불확실성을 줄이기 위해 열대 태평양 해수면 온도 변화에 영향을 미치는 물리과정들에 대한 다양한 연구가 필요함 (예, Kim et al., 2022; Kang et al., 2023)
- 열대 지역에서의 기후변화가 열대 지역뿐만 아니라 대기를 통한 원격상관을 통해 북극과 남극을 포함한 중·고위도 지역에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있음 (예, Li et al., 2016, 2021; Schneider et al., 2015; Meehl et al., 2016, Purich et al., 2016; Chung et al., 2022)
- 지구온난화에 따른 열대 서태평양 지역과 열대 동태평양 지역 사이의 해수면 온도 경도 변화 양상이 미래 기후변화의 특성을 결정하는 주요한 인자로 작용함 (예, Dong et al., 2022; Lee et al., 2022; Latif et al., 2023; Seager et al., 2019,2022)
- 기후모델들의 경우 지구온난화에 따라 열대 서태평양 지역과 열대 동태평양 지역 사이의 해수면 온도 경도가 줄어드는 양상을 보이는데 반해 관측의 경우 특히 연속적인 위성관측이 시작된 1970년대 말 이후로 온도 경도 증가와 더불어 태평양 워커순환이 강화되는 양상을 나타내고 있음
- 이러한 해수면 온도 경도 증가 경향이 대기 중의 온실기체 증가에 기인하는 강제된 반응인 경우 기후모델에 심각한 문제가 있으며, 따라서 IPCC 보고서에 기술된 미래 기후변화에 상

당한 불확실성이 있음을 나타냄 (예, Dong et al., 2022; Lee et al., 2022; Latif et al., 2023; Seager et al., 2019,2022)

- 관측에 나타난 열대 태평양 동서 방향 해수면 온도 경도의 증가 경향을 설명하기 위해 여러 가지 가설들이 제시되었지만 온도 경도 증가 현상이 실제로 지구온난화에 기인하는 강제된 변화인지에 대해서는 의견이 분분함 (예, Dong et al., 2022; Lee et al., 2022; Latif et al., 2023; Seager et al., 2019,2022; Olonscheck et al., 2020; Watanabe et al., 2021)
- 성층권 오존 감소, 특히 남극 성층권 오존층의 파괴로 인한 남반구 고위도 대기순환의 변화가 열대 동태평양 해수면 온도의 감소를 유발할 수 있다는 가설이 제시되어 (예, Hartmann, 2022) 온실기체 증가와 에어로솔 농도 변화에 기인하는 해수면 온도 변화와의 비교를 통해 가설의 타당성에 대한 검증이 요구됨
- 대기 원격상관을 통해 열대 지역의 기후변화가 전지구적인 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려할 때 남극 성층권 오존 감소와 열대 태평양 해수면 온도변화 공간분포 양상 사이의 관련성에 대한 다양한 연구가 필요함
- 기후변화에 의한 극지 환경변화 감시와 원인 규명 그리고 극지역 환경변화가 초래하는 국가사회 문제 해결과 관련된 연구소의 역할 및 발전전략에 연계되어 있음

1. 기술적 측면

- 기후 피드백 그리고 열대 지역과 고위도 지역 사이의 원격상관 기작에 대한 이해 부족으로 기후모델에 표현되어 있는 여러 물리과정에 오류가 있을 수 있고 그로 인해 미래 기후변화 예측의 불확실성이 초래될 수 있음
- 열대 태평양 지역의 기후변화를 결정하는 물리과정에 대한 이해 향상을 통해 열대 지역 뿐만 아니라 극지역 기후예측 정확성 향상에 기여할 수 있음

2. 경제·산업적 측면

- 열대 태평양 지역 해수면 온도 변화의 공간 분포에 따라 연직 대류활동의 공간 분포와 대규모 대기순환의 특성이 변화하게 되고 이러한 변화로 인해 대기 원격상관의 특성에도 변화가 발생하게 되는 것으로 알려져 있음
- 동태평양 지역의 해수면 온도가 하강하는 경향을 보이거나 서태평양 지역에 비해 온도 상승의 정도가 작은 경우 대기-해양 결합과정으로 인해 대기 하층 무역풍 및 용승이 강화되어 동태평양 지역 해수면 온도의 감소 경향이 증폭될 수 있고 그로 인해 동-서 간의 온도차가 더욱 심화될 수 있음
- 열대 태평양 지역에서 동-서 간의 해수면 온도차가 증가함에 따라 라니냐 현상의 강도 및 발생 빈도수가 증가할 수 있고 그로 인해 미국 남서부 지역에서 가뭄의 발생 빈도수가 증가할 수 있음
- 반대로 동-서간의 온도 경도가 감소하는 방향으로 변화할 경우 엘니뇨 현상이 보다 빈번하게 일어나 미국 북서부 지역에서 물부족 현상이 발생할 수 있음
- 이와 같이 열대 태평양 해수면 온도 변화의 공간 분포에 따라 지역별 물수지 특성과 가뭄·

홍수 등의 극한 기상현상의 특성이 변화하여 경제 및 산업에 큰 영향을 미칠 수 있음

- 열대 태평양 지역 해수면 온도 변화를 일으키는 물리과정들에 대한 이해 향상을 통해 기후 모델 예측 정확성을 향상시킬 수 있고 나아가 미래 기후변화가 초래하는 경제적 피해를 줄일 수 있음

3. 과학적 측면

- 관측 기간 및 관측 정확성과 관련된 현장 관측의 제약 그리고 기후모델에 표현되어 있는 여러 물리과정들의 잠재적인 오류 등으로 인해 관측된 변화가 온실기체 증가 등과 같은 외부 요인에 기인하는 강제된 변화인지 아니면 관측된 변화의 상당 부분이 기후시스템의 내부 변동성과 관련되어 있는지에 대한 불확실성이 존재함
- 또한 온실기체 농도 증가 이외의 다른 인위적인 요인에 기인하는 강제된 변화에 대한 이해가 불충분한 실정임
- 이러한 제약들로 인해 미래 기후예측에 상당한 불확실성이 발생할 수 있다는 점을 고려할 때 기후변화에 미치는 여러 인위적인 요인들의 영향과 내부 변동성의 역할에 대한 이해 향상이 필요함

4. 사회·문화적 측면

- 미래 기후변화 예측의 불확실성을 감소시킴으로써 기후변화 대응 방안을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 사료됨
- 여러 인위적 요인에 기인하는 기후변화에 대한 이해 향상을 통해 일반 국민들의 탄소중립 정책의 필요성에 대한 인식 제고에 기여할 수 있을 것으로 사료됨

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 태평양 워커순환 강화 경향의 원인 규명

- 기후모델들은 지구의 온도가 상승함에 따라 태평양 워커순환이 약화될 것으로 모의하고 있는데 반해 지상 관측자료로부터 워커순환의 강화 경향이 도출되고 있음
- 이와 같은 상반된 경향으로 인해 기후모델로부터 모의되는 미래 기후변화의 신뢰성에 대한 의구심이 제기되어 왔음
- 그러나 기존에 워커순환 변화 연구에 사용된 현장 관측의 경우 관측 오차 등으로 인해서 실제와 다른 변동성이 도출될 수 있고 이로 인해 기후모델 모의결과와 차이가 발생할 수 있음을 제시함
- Chung et al. (2019)은 위성 관측 및 현장 관측자료를 기후모델 모의실험 결과와 함께 분석하여 강화 경향의 주요 원인으로 기후시스템 내의 자연변동성을 제시함

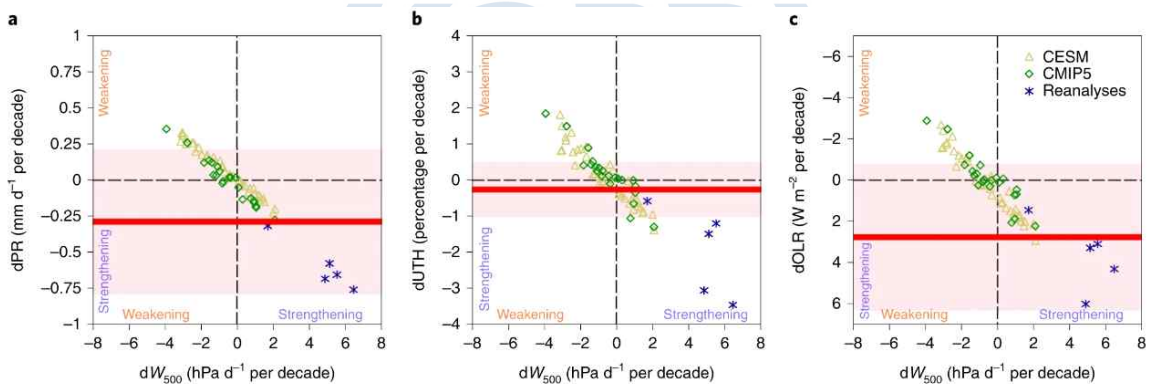


Fig. 1. Model-simulated versus observed Pacific Walker circulation intensity changes over the period 1979-2014 (Chung et al., Nature Climate Change, 2019).

2. 남극 해빙 면적 증가 경향의 원인 규명

- 연속적인 위성관측이 시작된 1979년 이래로 남극 해빙면적의 증가 경향이 관측된 것에 반해 기후모델들은 해빙면적의 감소 경향을 모의하고 있음
- 약 40년 간의 위성 관측으로는 수십년 이상의 시간 규모로 나타나는 자연변동성을 판별하는데 제약이 있기 때문에 관측된 남극 해빙의 증가경향의 원인은 미제로 남아 있음
- 이와 관련하여 Chung et al. (2022)은 남극 해빙과 밀접히 관련되어 있고 관측 기간이 상대적으로 긴 해수면 온도 자료와 여러 기후모델 실험결과 자료를 이용하여 남극 해빙 변화의 원인을 분석함
- 관측된 해빙 증가 경향은 상당부분 열대지역의 기후변동성과 관련이 있는 것으로 분석됨
- 반면 기후모델들은 열대지역과 남극해 사이의 원격상관과 관련된 자연변동성을 과소 모의

하는 동시에 온실기체 농도의 증가로 인한 해빙 감소를 과대 모의하고 있어서 남극 해빙의 증가 경향을 재현하지 못하는 것으로 분석됨

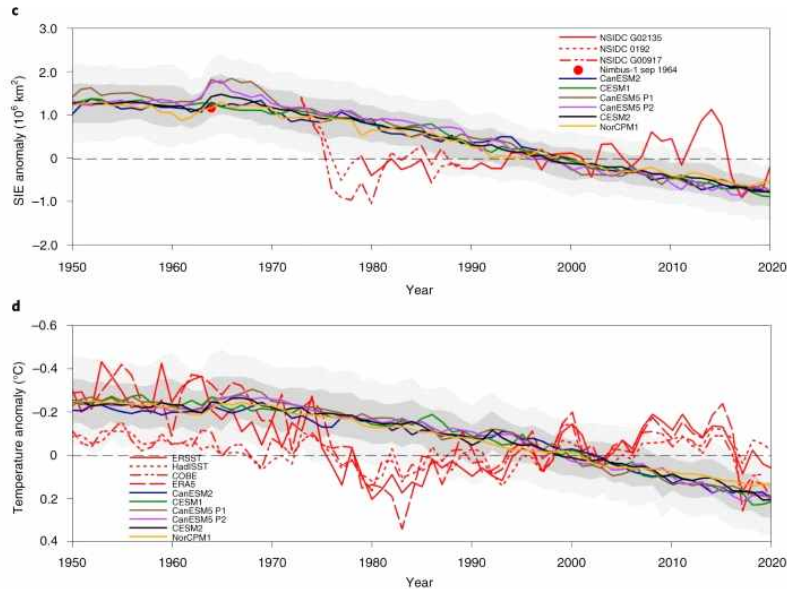


Fig. 2. Observed and model-simulated changes in sea ice extent and sea surface temperature over the Southern Ocean (Chung et al., Nature Climate Change, 2022).

3. 남극해 해수면 온도 하강 경향과 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화의 관련성

- Kim et al. (2022)과 Kang et al. (2023)은 남극해 해수면 온도 하강 경향의 영향이 기후평균적인 대기와 표층해양 순환, 구름 피드백 과정, 바람-증발-해수면 온도 피드백 과정, 그리고 Bjerknes 피드백에 의해 열대 태평양으로 전달되어 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 유발될 수 있음을 주장함

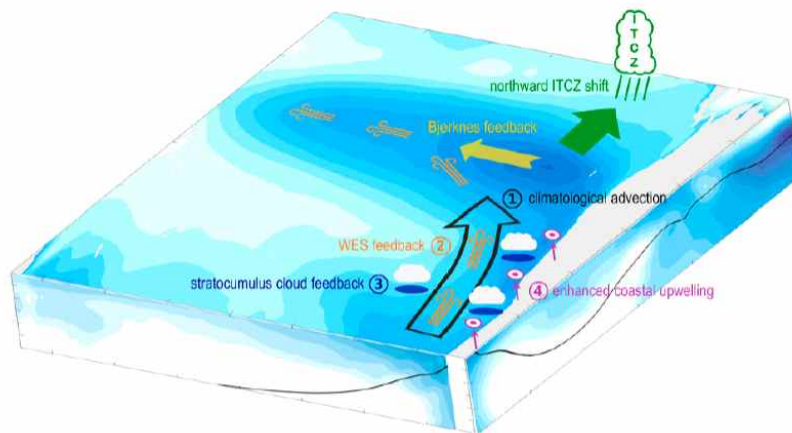


Fig. 3. Schematic of Southern Ocean-tropics teleconnection mechanism (Kim et al., PNAS, 2022).

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 남극 성층권 오존 감소와 남극 해빙 변화의 관련성

- Doddridge and Marshall (2017)은 남극 성층권 오존 감소와 남극 해빙 변화 사이의 관련성을 분석함
- 남극 성층권 오존 감소에 기인하는 남반구 여름철 남극 진동 (Southern Annular Mode, SAM)의 변화와 남극 해빙 면적의 경년 변동성 사이의 관련성을 분석함
- 남반구 여름철 SAM이 큰 양의 값을 보이는 경우 편서풍 강화와 관련된 남극해 해수면 온도 감소로 인해 남반구 가을철의 해빙 면적이 큰 증가를 보임
- 반면 남반구 여름철 SAM이 큰 음의 값을 보이는 경우에는 남반구 가을철 해빙 면적이 감소하는 경년 변동성을 나타냄
- 남반구 여름철 SAM의 변화가 남극 해빙 면적의 변화에 미치는 영향이 4월에 가장 큰 것으로 분석됨
- 2017년 3월에 남극 해빙의 면적이 최소값을 보였는데 이는 2016/2017 남반구 여름철에 SAM이 현저하게 큰 음의 편차를 보인 것과 관련되어 있음
- 남반구 여름철 SAM과 남반구 가을철 남극 해빙 면적 경년 변동성 사이의 관련성에 기반하여 남극 성층권 오존 감소가 1970년대 말 이후의 남극 해빙 면적 증가 경향의 주된 원인일 가능성이 있음을 주장함

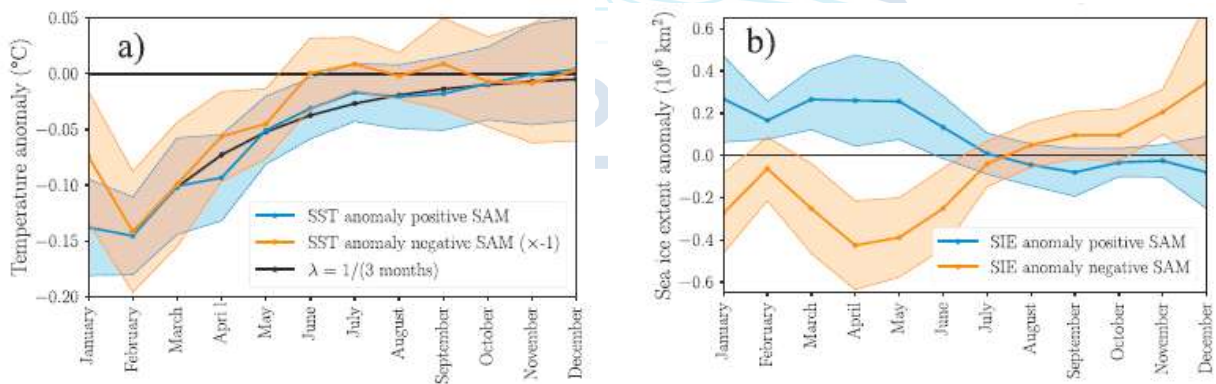


Fig. 4. Integrated response of sea surface temperature and sea ice to DJF Southern Annular Mode (SAM) anomalies (Doddridge and Marshall, Geophysical Research Letters, 2017).

- Polvani et al. (2021)은 남반구 여름철 남극 진동 모드 (SAM)와 남극 해빙면적 변화 사이의 관련성을 분석함
- Doddridge and Marshall (2017) 논문에서 보고된 남반구 여름철 SAM과 남반구 가을철 남극 해빙면적 경년 변동성 사이의 관련성을 상당수의 기후모델들이 비교적 유사하게 재현하고 있음을 입증함
- 그러나 기후모델뿐만 아니라 관측에서도 SAM이 남반구 가을철 남극 해빙의 경년 변동성의 15% 정도만을 설명할 수 있음을 제시함
- 또한 남극 성층권 오존 감소로 1970년대 말 이후의 남극 해빙면적의 증가 경향을 설명하기

에는 무리가 있음을 주장함

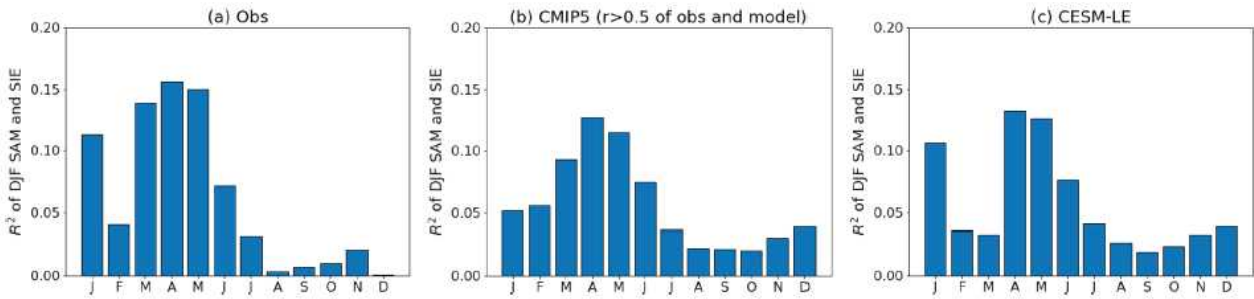


Fig. 5. Monthly variance in sea ice extent explained by the SAM in the previous DJF months for the observations and model simulations (Polvani et al., Geophysical Research Letters, 2021).

2. 남극 성층권 오존 감소와 열대 동태평양 해수면 온도 변화 사이의 관련성

- Hartmann (2022)은 1970년대 말 이후로 관측되고 있는 열대 동태평양 해수면 온도의 하강 경향이 남극 성층권 오존 감소와 관련되어 있다는 가설을 제시함
- 남극 성층권 오존 감소와 관련된 대기순환의 변화, 특히 지표 부근 편서풍의 강화로 인해 남극해의 해수면 온도가 하강하는 경년 변동성을 보인다는 결과를 제시함
- 대기순환, 하층운의 변화와 관련된 구름피드백, 그리고 해양순환의 변화와 관련된 상호작용을 통해 남극 성층권 오존이 남극해 해수면 온도의 경년 변동성에 미치는 영향이 열대 동태평양에까지 이를 수 있음을 주장함
- 이러한 경년 변동성 사이의 관련성을 토대로 남극 성층권 오존 감소가 라니냐 형태의 공간 분포를 보이는 해수면 온도 변화 경향의 주된 요인으로 작용했을 가능성이 크다는 결론을 내림

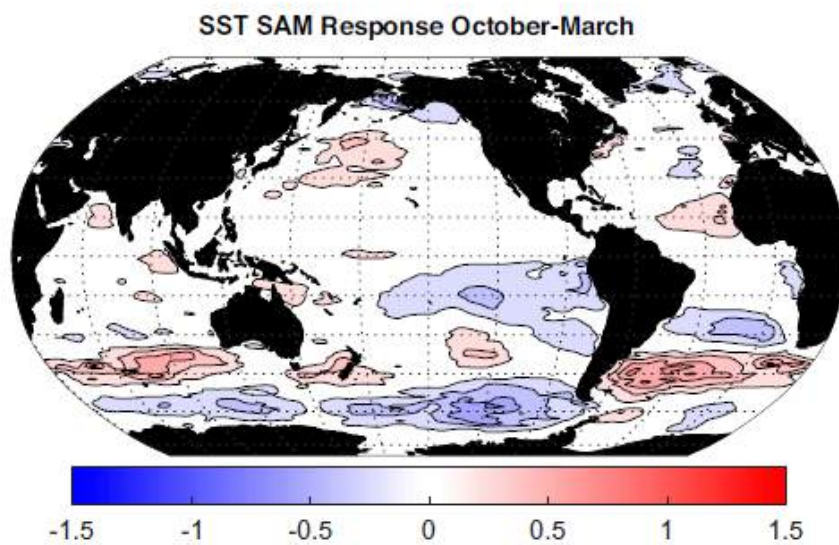


Fig. 6. Response of October-March monthly sea surface temperature to the monthly SAM index based on ERA-5 data (Hartmann, PNAS, 2022).

제 3 절 현 기술상태의 취약성

1. 관측자료 및 기후모델의 불완전성에 따른 불확실성

- 관측된 기후변화는 인위적인 요인에 기인하는 강제된 변화뿐만 아니라 기후시스템의 내부 변동성과 관련된 변화도 포함하고 있어 관측된 변화를 이 두 요소와 관련된 성분으로 분리 하는데 어려움이 있음
- 짧은 시간규모일수록 내부 변동성이 미치는 영향이 크기 때문에 내부 변동성의 영향을 최소화하여 외부 요인에 기인하는 강제된 변화를 보다 정확하게 결정하기 위해서는 반세기 이상의 관측자료가 필요하지만 현장관측의 경우 관측 회수, 관측에 사용된 관측기기의 변경, 관측기기 정확성의 시간에 따른 변화 등으로 인해 오차가 발생할 수 있음
- 현장관측에 비해 위성관측이 장기 기후변화 탐지에 적합하지만 1970년대 말 이후로 연속적인 관측이 시작되어 기후변화 분석에 제약이 있음
- 여러 물리과정에 대한 불충분한 이해와 연산자원 등의 제약으로 인해 기후모델에 오차가 존재하여 관측된 변화를 재현하는데 제약이 있음

제 4 절 앞으로의 전망

1. 다중모델 비교 실험

- 열대 태평양 해수면 온도 변화의 공간분포 양상이 미래 기후변화의 특성을 결정짓는 주요한 요소이기 때문에 현재 관측되고 있는 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 양상을 일으키는 주된 원인과 기후모델들 간의 차이를 일으키는 원인들을 규명하기 위해 CMIP7 등을 통해 다양한 다중모델 비교 실험이 수행될 것으로 전망됨
- 남극 성층권 오존 감소와 더불어 남극대륙 빙상의 용빙으로 인한 담수의 증가가 남극해뿐만 아니라 대기순환, 해양순환 그리고 구름피드백 사이의 상호작용을 통해 열대 동태평양 해수면 온도의 하강을 일으킬 수 있다는 연구결과들이 제시되어 이와 관련된 다양한 모델 실험들이 수행될 것으로 전망됨
- 기후모델 실험을 통해 외부 요인에 기인하는 강제된 변화를 결정하기 위해서는 CESM2 Large Ensemble 실험과 같은 다중 앙상블 실험이 필요한데 연산자원에 대한 제약이 줄어들어 따라 보다 많은 모델링 센터에서 100개 이상의 앙상블 멤버로 구성된 다중 앙상블 실험을 수행할 것으로 예상됨

2. 고해상도 모델 실험

- 현재 IPCC 보고서에 활용되고 있는 기후모델들의 경우 수평 및 연직 해상도가 높지 않아 구름 피드백 과정과 에디와 관련된 대기 및 해양에서의 열수송 등에 있어서 관측과 차이가

있을 수 있고 그로 인해 관측된 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 재현하지 못할 가능성이 있다는 점을 고려할 때 고해상도 모델을 이용한 다양한 실험이 수행될 것으로 예상함

3. 고기후 프록시 자료 활용 연구

- 관측기간의 제약으로 인해 관측된 변화를 외부 요인에 기인하는 강제된 변화와 내부 변동성과 관련된 성분으로 나누는데 어려움이 있기 때문에 빙하코어 등을 이용한 고기후 자료를 이용한 연구가 수행될 것으로 사료됨



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 열대 태평양 및 남반구 고위도 지역 기후변화 특성

1. 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향

- ERSST5 자료를 이용하여 연속적인 위성관측이 시작된 1979년부터 2022년 기간 사이의 해수면 온도 변화 경향을 살펴보면 대기 중의 온실기체 농도 증가 경향에 부합하게 대부분의 지역에서 해수면 온도의 상승 경향을 보이는데 반해 열대 동태평양과 남극해에서는 해수면 온도의 하강 경향이 관측되고 있음
- 북서태평양과 남서태평양 지역에서는 전지구 평균 또는 열대지역 평균보다 큰 해수면 온도의 상승 경향을 보여 동태평양 지역에서의 해수면 온도 하강 경향과 대조적인 변화 양상을 나타내고 있음
- 북서태평양과 남서태평양 지역과는 달리 열대 동태평양 지역에서는 전반적으로 통계적으로 유의하지 않은 해수면 온도 변화 경향이 관측됨
- 다른 분석 기간에서도 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 나타내고 있지만 북태평양 지역에서는 기간이 증가함에 따라 온도 하강 경향의 크기가 줄어드는 양상을 보임

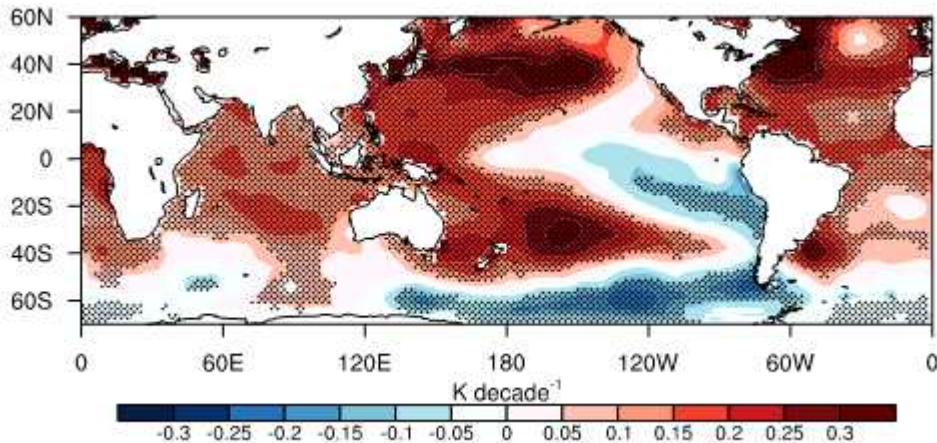


Fig. 7. SST trends over the period 1979-2022 from ERSST5, with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level.

- 남극해 특히, 태평양 섹터 지역에서는 분석기간의 변화에 상관없이 해수면 온도의 하강 경향이 관측되고 있고 이러한 경향이 전반적으로 통계적으로 유의한 것으로 분석됨
- 남극해 해수면 온도의 하강 경향은 부분적으로 열대 해양 지역의 기후변동성과 관련되어 있지만 (예, Li et al., 2016; Meehl et al., 2016; Chung et al., 2022) 온실기체의 증가 또는 성층권 오존 농도의 감소로 인한 남반구 중위도 제트의 강화와 남극 대륙의 빙하 용빙으로 인한 담수 유입 증가의 영향을 간과할 수 없는 것으로 알려져 있음 (예, Dong et al., 2022)

- 대기 중의 온실기체 농도의 증가가 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향을 일으키는 주된 원인일 가능성을 배제할 수 없음 (예, Seager et al., 2019, 2022; Lee et al., 2022; Latif et al., 2023)

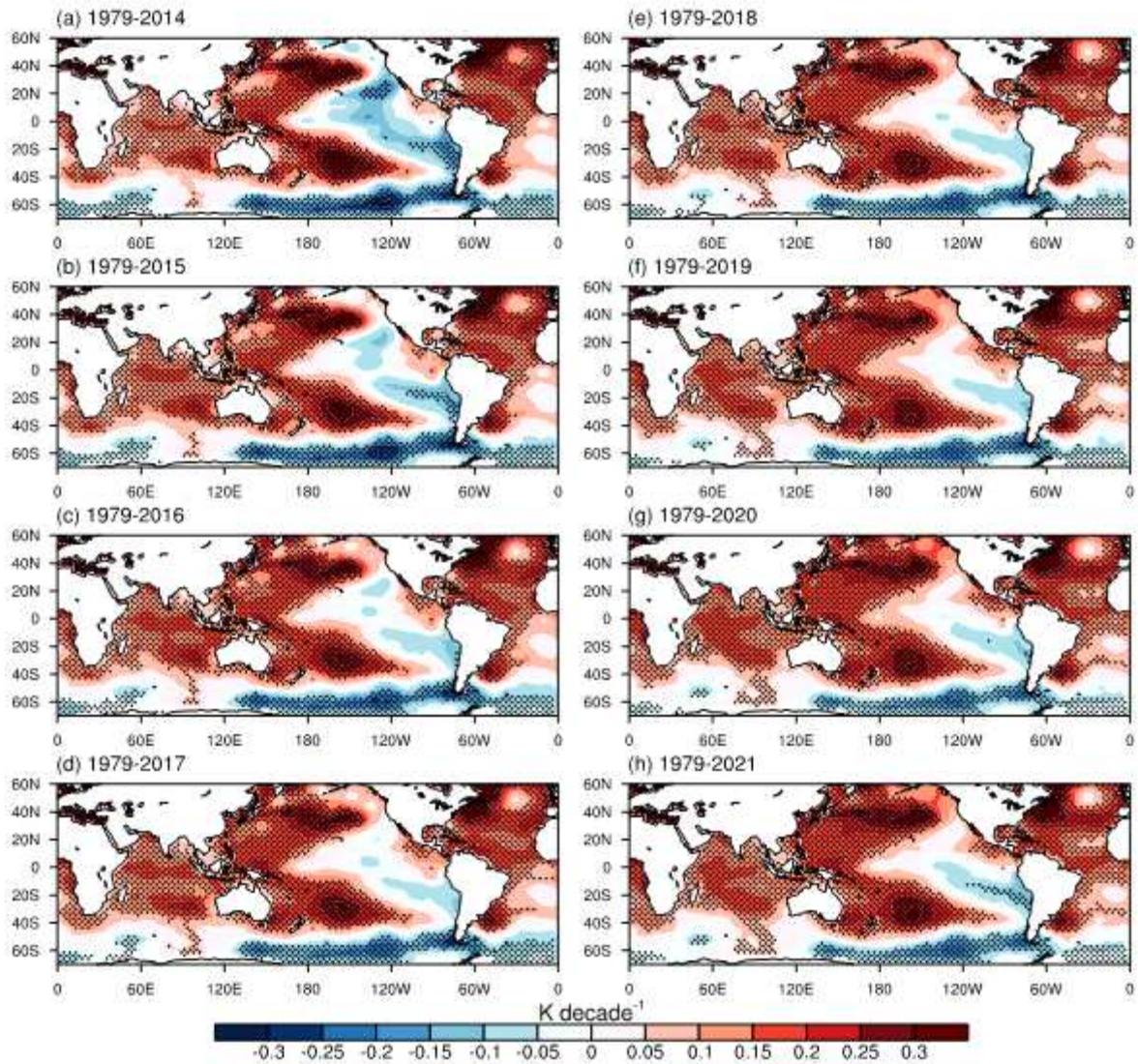


Fig. 8. SST trends from ERSST5, with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level: (a) 1979-2014, (b) 1979-2015, (c) 1979-2016, (d) 1979-2017, (e) 1979-2018, (f) 1979-2019, (g) 1979-2020, (h) 1979-2021.

- 대기 중의 온실기체 농도의 증가 등을 비롯한 인간활동과 관련된 외부 복사강제 인자들의 변화와 화산분출 및 태양활동의 변화를 고려하여 수행한 기후모델 모의실험 결과로부터 산출된 해수면 온도 변화의 경우 변화의 공간 분포 및 크기에 있어서 기후모델 간에 상당한 차이가 있음
- 앙상블 평균을 통해 자연변동성을 영향을 상당부분 배제한 경우 남극해 지역의 해수면 온도 상승의 크기가 전지구 평균에 비해 매우 작지만 기후모델들이 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향은 재현하지 못하는 것으로 분석됨

- 전지구 평균 지표면 부근 대기온도의 증가 경향에 있어서도 관측과 기후모델 모의결과 사이에 큰 차이가 있음

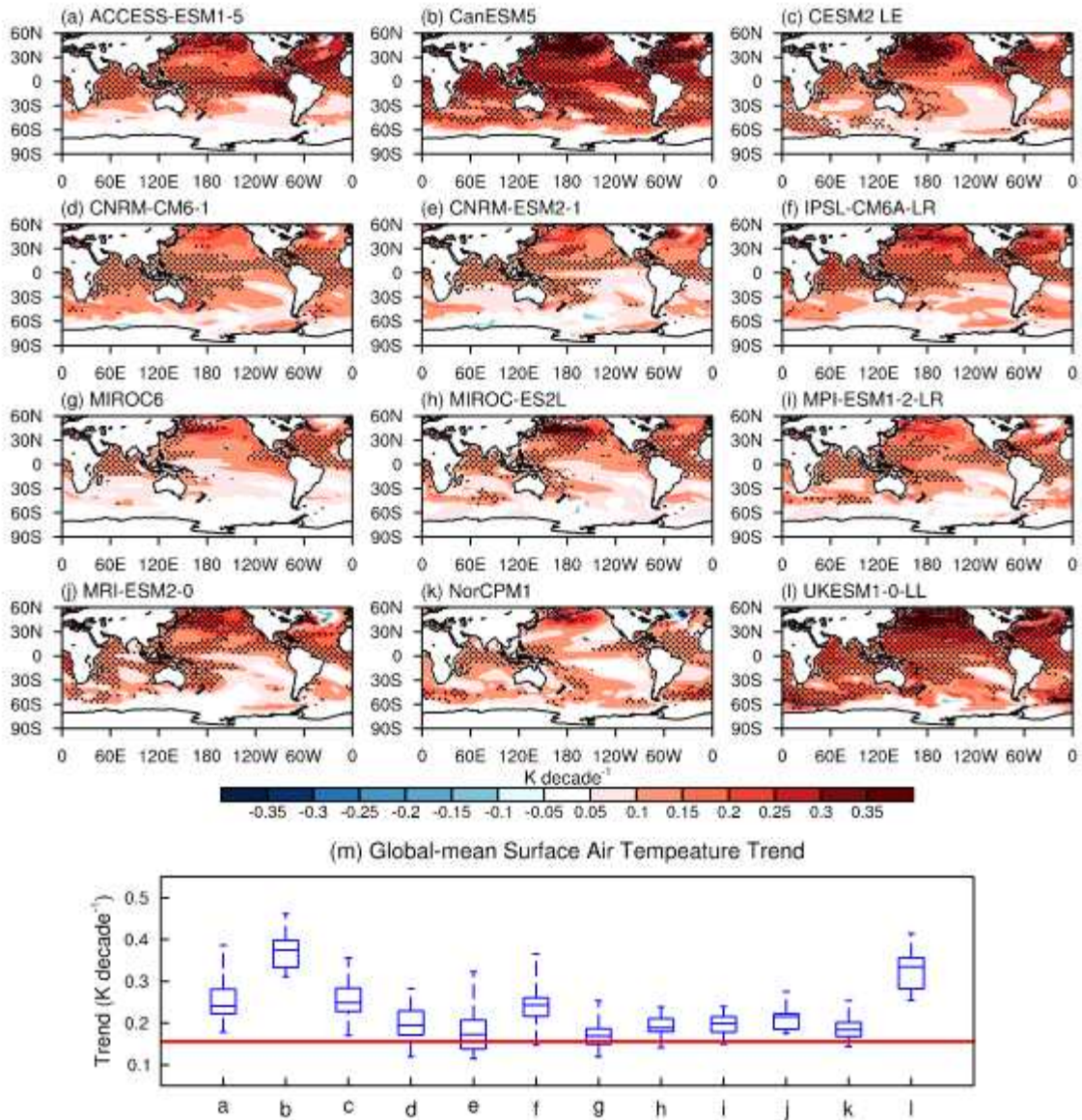


Fig. 9. Inter-model comparison of simulated warming over the period 1979-2014. (a)-(l) Ensemble-mean trends in annual-mean SST for a given model with stippling denoting regions where the ensemble-mean trend exceeds two standard deviations of the trend across the ensemble members. (m) Box plot of the corresponding global-mean surface air temperature trend for the individual models (a) to (l) with the red line representing the trend for ERA5. For each model, the box covers the inter-quartile range across the ensemble members with the line inside the box denoting the median value and whiskers representing the maximum and minimum values.

2. 태평양 해수면 온도의 변동성 특성

- 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 대기 중의 온실기체 농도 증가로 인한 강제된 변화인지 알아보기 위해 1953-2019년 기간의

해수면 온도 변화 경향을 분석함

- 북태평양과 적도 중앙 태평양 지역에서는 해수면 온도 변화가 미미하거나 하강 경향을 보이고 있지만 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 공간 분포를 나타내고 있지 않은 것으로 확인됨
- 대기 중의 온실기체 농도의 증가가 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향의 주된 원인일 경우 라니냐 형태의 공간 분포가 1953-2019년 기간에 더 뚜렷하게 관측되어야 함
- 그러나 1970년대 말 이후의 해수면 온도 변화 경향과 1953-2019년 기간의 해수면 온도 변화 경향 사이의 뚜렷한 차이는 대기 중의 온실기체 농도 증가가 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향의 주된 원인이 아닐 가능성이 있음을 시사함

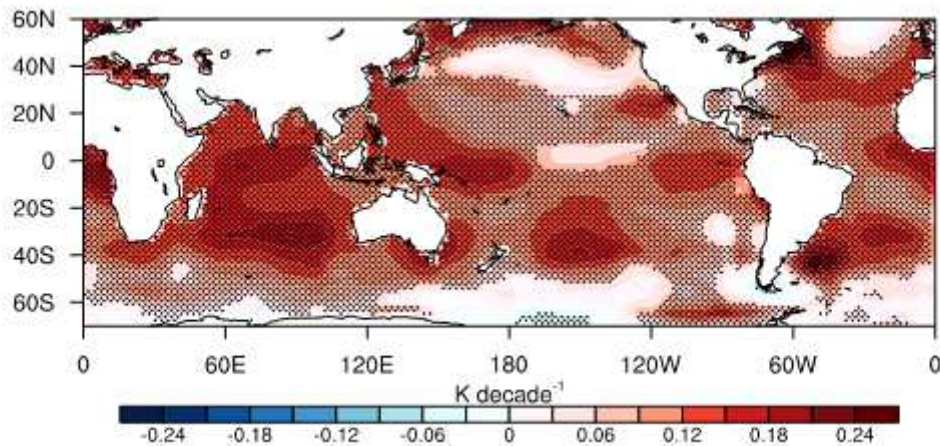


Fig. 10. SST trends over the period 1953-2019 from ERSST5, with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level.

- 수십 년 주기의 자연변동성과 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향 사이의 관련성을 살펴보기 위해 경험직교함수 (empirical orthogonal function, EOF) 분석을 수행함
- 엘니뇨-라니냐와 관련된 변동성의 영향을 줄이기 위해 해수면 온도 편차 시계열을 7년 평균한 후 태평양 지역 (70°S-60°N, 120°E-60°W) 영역을 대상으로 1953-2019년 기간에 대해 경험직교함수 분석을 수행함
- 첫 번째 EOF 모드는 해수면 온도 변동성의 약 55%를 설명하며, 1953-2019년 기간의 해수면 온도 변화 경향에 유사한 공간 분포를 보여 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향과는 거리가 있는 것으로 사료됨
- 첫 번째 EOF 모드와 관련된 주성분 (principal component) 시계열은 전반적으로 시간에 따라 증가하는 양상을 보이는 것으로 분석됨
- 두 번째 EOF 모드는 해수면 온도 변동성의 약 20%를 설명하며 라니냐와 유사한 공간 분포를 나타냄

- 해당 주성분 시계열을 살펴보면 시간에 따라 계속 증가한 것이 아니라 수십 년 주기의 장기 변동성을 나타내고 있음
- 이러한 양상은 1970년 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 적어도 부분적으로는 기후시스템 내의 자연변동성과 관련되어 있을 가능성이 있음을 시사함

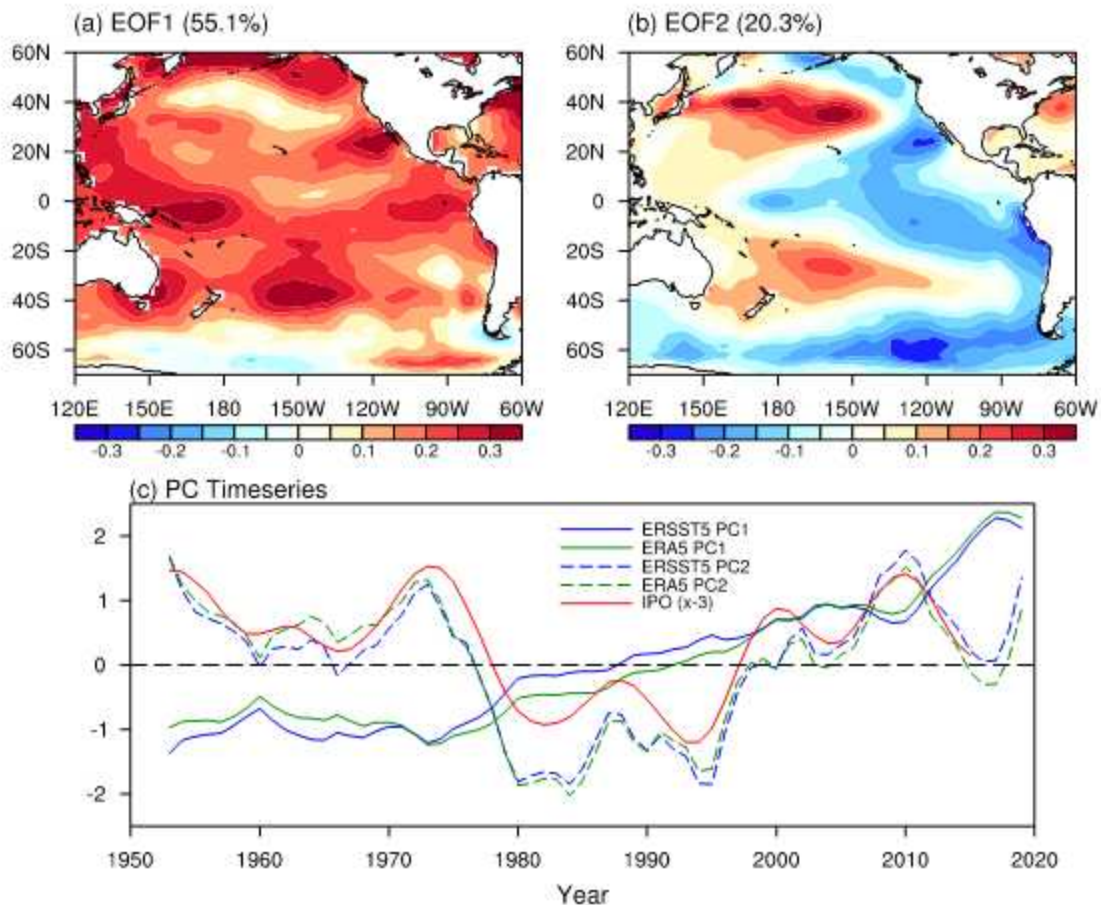


Fig. 11. Characteristics of the observed SST change and variability over the Pacific. (a) Spatial pattern of the first EOF mode analyzed in the Pacific (70°S-60°N, 120°E-60°W) over the period 1953-2019 for 7-yr running-mean, annual-mean SST anomaly. (b) Same as in (a), but for the second EOF mode. (c) Time series of the standardized PC values corresponding to the first two leading EOF modes shown in (a) and (b). Also shown are the PC time series computed with ERA5 SST (lines in green) and the observed time series of low-pass filtered IPO index multiplied by -3 (red line).

- 실제로 두 번째 EOF 모드와 관련된 주성분 시계열이 Inter-decadal Pacific Oscillation (IPO)가 매우 밀접히 관련되어 있는 것으로 분석됨
- Inter-decadal Pacific Oscillation 등의 자연변동성의 영향을 살펴보기 위해 다수의 기간에 대해 해수면 온도 변화 경향을 계산한 후 산출된 공간 분포와 두 번째 EOF 모드의 공간 분포 사이의 상관계수를 계산함
- 1970년 말 이후 기간의 경우 전반적으로 큰 양의 상관계수를 나타내며 이러한 결과는 라니

- 나 형태의 해수면 온도 변화 경향이 계속적으로 관측되었다는 것을 의미함
- 특히, 1982-2014년 기간의 해수면 온도 변화 경향이 가장 큰 양의 상관계수를 나타내는 것으로 분석됨
- 1970년 말 이전 기간의 경우에는 음의 상관계수를 나타내어 라니냐 형태가 아니라 엘니뇨 형태에 가까운 해수면 온도 변화 경향이 관측되었다는 것을 의미함
- 특히, 1950-1994년 기간의 해수면 온도 변화 경향이 가장 큰 양의 상관계수를 나타내는 것으로 분석됨

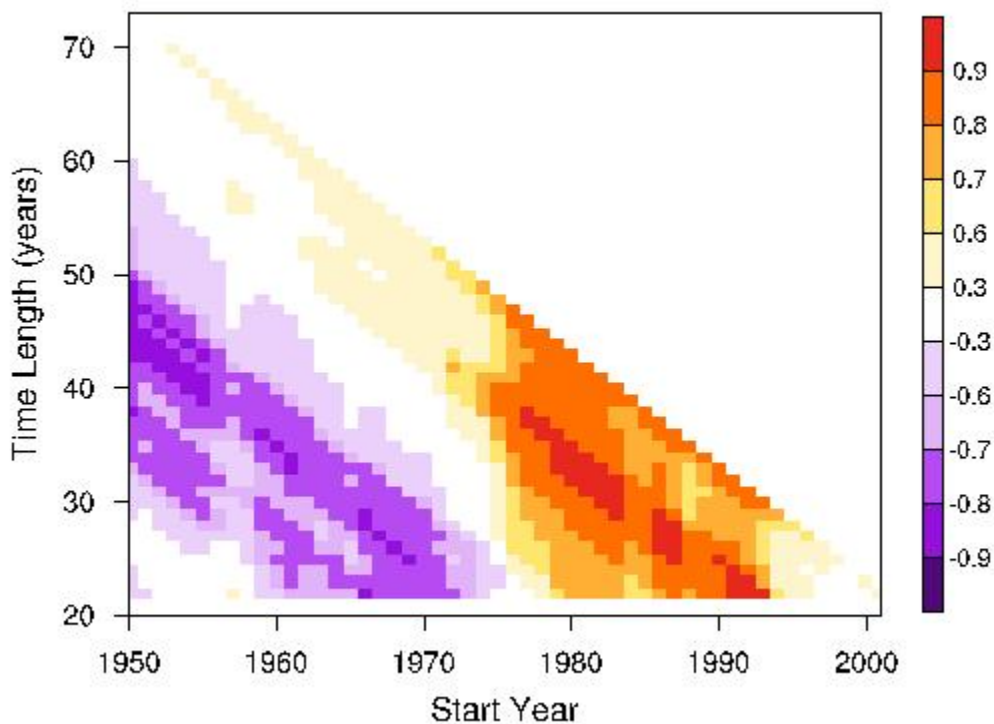


Fig. 12. Spatial pattern correlation over the Pacific between the second EOF mode and observed SST trends over multiple periods. In the plot, x-axis denotes the start year of a given period with y-axis representing the time span.

- 1982-2014년 기간과 1950-1994년 기간 사이의 상반된 결과를 고려하여 해수면 온도 변화 경향 및 대기순환의 변화 경향을 비교함
- 1982-2014년 기간의 경우 남반구 지역에서 페렐 순환과 헤들리 순환의 강화 경향이 관측되었고 태평양 워커 순환이 강화 경향을 나타내었음
- 대기순환의 강화 경향과 관련하여 열대 태평양 지역의 무역풍이 강화되고 그로 인해 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향을 보인 것으로 분석됨
- 반면, 1950-1994년 기간의 경우에는 페렐 순환과 태평양 워커 순환의 약화 그리고 그에 따른 태평양 지역 무역풍의 약화로 엘니뇨 형태의 해수면 온도 변화 경향이 관측된 것으로 분석됨
- 한편, 남극해 해수면 온도 변화 경향에 있어서도 두 기간 사이에 상반된 변화 경향이 관측

된 것으로 분석됨

- 이러한 결과는 자연변동성의 영향을 배제할 수 없음을 의미함

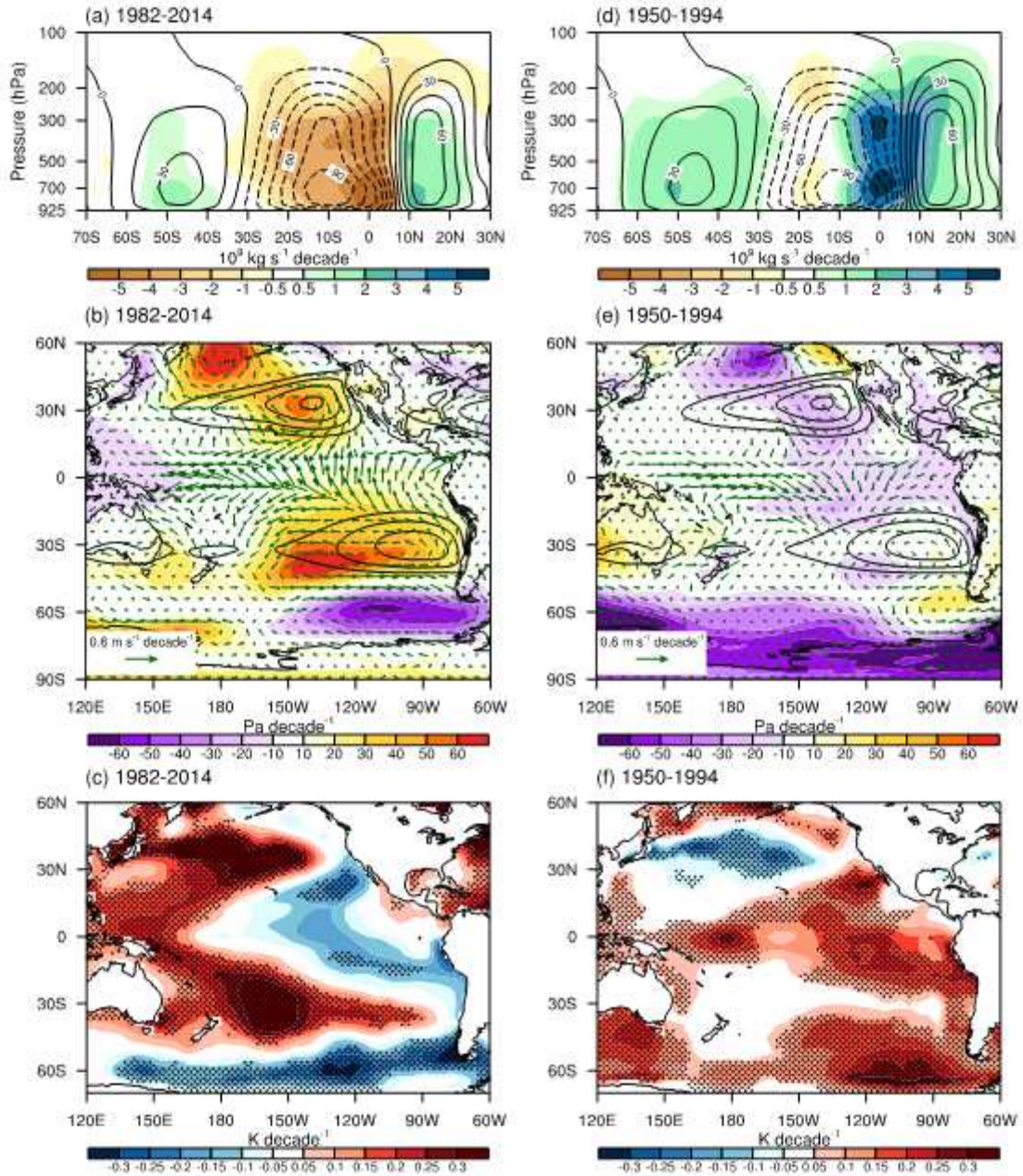


Fig. 13. Sensitivity of the observed trends to analysis period. (a) Annual-mean mass streamfunction trends over the period 1982-2014 from ERA5. Black contours represent the climatology over the period 1950-1978 (unit: 10^9 kg s^{-1}) with positive and negative values denoting clockwise and counter-clockwise circulation, respectively. (b) Same as in (a), but for trends in sea level pressure (shading) and surface winds (vectors). (c) Same as in (a), but for ERSST5 SST trends with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level. (d-f) Same as in (a)-(c), but over the period 1950-1994. In (b) and (e), contours in black represent the climatological high-pressure regions.

3. 관측과 기후모델 모의결과의 비교

- 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화의 원인을 규명하기에 앞서 1970년대 말 이후 기간에 대해 관측된 변화 경향과 기후모델 모의실험으로부터 산출된 변화 경향을 분석함
- 1979-2014년 기간의 경도 평균 대기온도 변화 경향을 살펴보면 남반구 고위도 지역의 성층권 온도가 크게 하강하여 열대 지역과의 온도 경도가 증가되었고 그로 인해 남반구 중위도 상공의 편서풍이 강화된 양상을 나타내었음
- 기후모델 실험에서도 남반구 고위도 성층권의 온도 하강 경향과 그에 따른 편서풍의 강화 경향이 모의되고 있지만 남반구 고위도 지역의 앙상블 평균 온도 변화 경향과 재분석자료 사이에 차이가 있는 것으로 분석됨

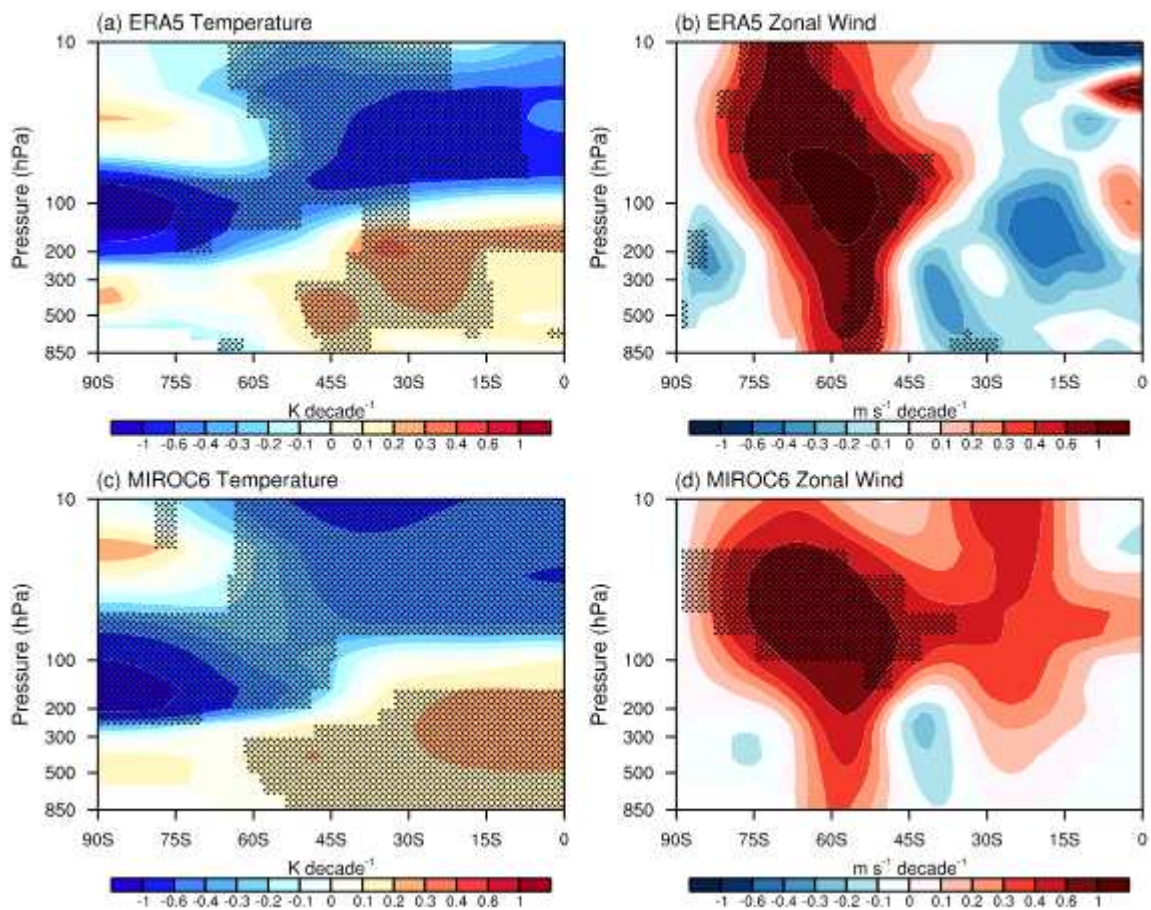


Fig. 14. Observed and model-simulated zonal-mean trends in DJF-mean temperature and zonal wind over the period 1979-2014. (a) Latitude-height distribution of temperature trends from ERA5. (b) Same as in (a), but for zonal wind trends. (c) Same as in (a), but for the ensemble-mean trends for MIROC6. (d) Same as in (c), but for zonal wind trends. Stippling indicates statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level for observations and regions where the ensemble-mean trend exceeds two standard deviations of the trend across the ensemble members for model simulations. Note non-linear color scales in (a)-(d).

- 재분석 자료를 분석한 결과 남반구 중위도 지역 상공의 편서풍 강화 경향에 부합하게 남반구 페렐 순환과 해들리 순환이 강화되었고 이와 더불어 태평양 워커 순환의 강화 경향으로

태평양 지역의 무역풍이 강화되어 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 발생한 것으로 추정됨

- 기후모델이 남반구 페렐 순환과 해들리 순환의 강화를 재현하고 있지만 열대 태평양 지역에서 워커 순환의 약화 경향을 모의하고 있어서 재분석 자료에 나타난 변화 양상과 차이가 있고 이로 인해 라니냐 형태의 해수면 온도 변화를 재현하지 못하는 것으로 추정됨

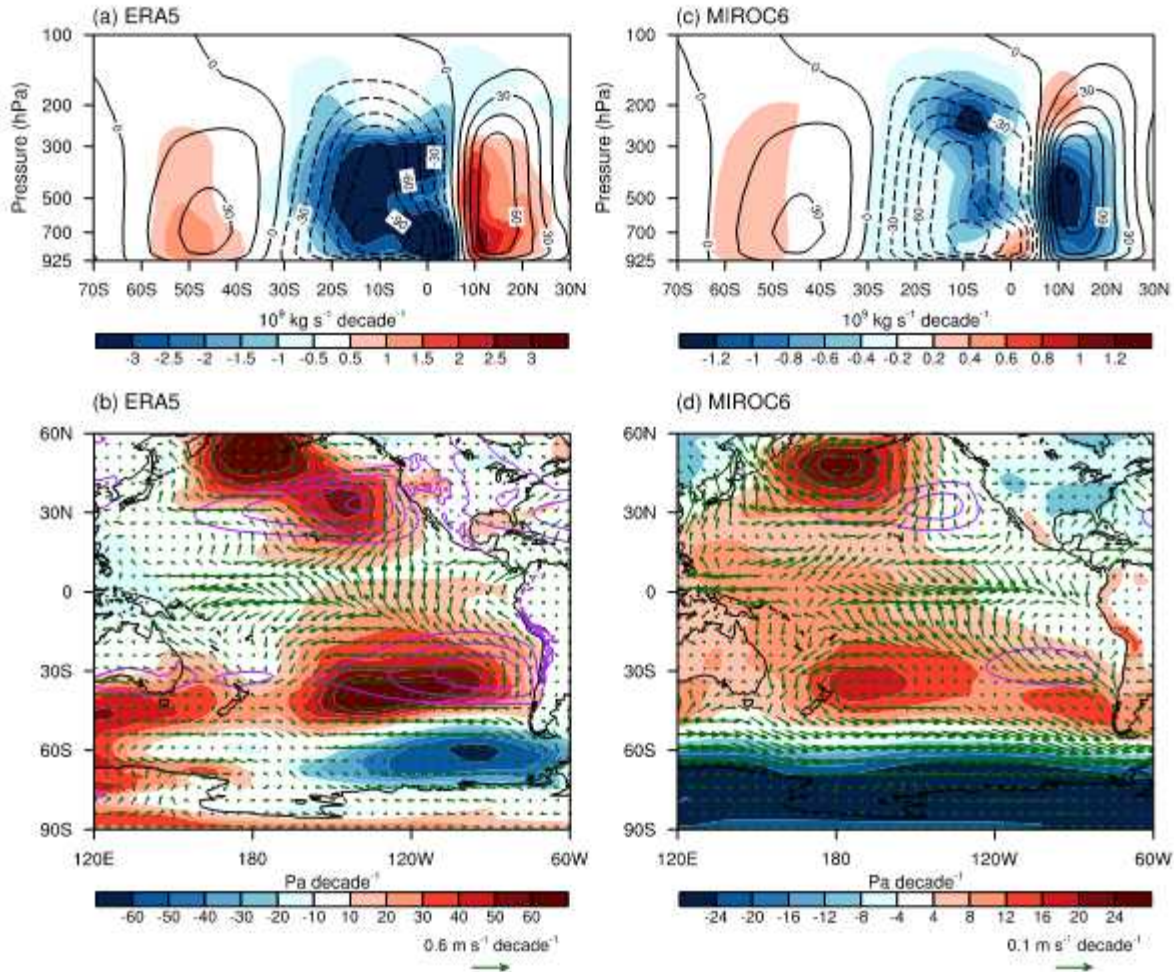


Fig. 15. Model-observation contrast in atmospheric circulation changes over the satellite era. (a) Annual-mean mass streamfunction trends over the period 1979-2014 from ERA5. Black contours represent the climatology over the period 1950-1978 (unit: 10^9 kg s^{-1}) with positive and negative values denoting, respectively, clockwise and counter-clockwise circulation. (b) Same as in (a), but for trends in sea level pressure (shading) and surface winds (vectors). (c and d) Same as in (a) and (b), but for MIROC6 ensemble-mean trends. In (b) and (d), contours in purple represent the climatological high-pressure regions. Note the different color scales between ERA5 and MIROC6 ensemble-mean trends.

- 1979-2000년 사이의 기간에서도 남반구 페렐 순환과 해들리 순환이 강화된 양상을 보였고 그에 따라 태평양 지역 무역풍도 전반적으로 강화된 양상을 나타내고 있지만 1979-2014년 기간의 변화 경향과는 다소 차이가 있음

- 1979-2014년 기간의 경우 기후모델들이 태평양 지역 무역풍의 강화 경향을 재현하지 못하는 데 반해 1979-2000년 기간의 경우에는 재분석 자료에 부합하게 남반구에서 무역풍의 강화 경향이 모의됨
- 기후모델 실험결과의 경우 앙상블 평균을 통해 자연변동성의 영향이 상당 부분 제거되었다는 점을 고려할 때 재분석 자료와 기후모델 실험 결과 사이의 정성적인 유사성은 태평양 지역 무역풍의 강화 경향 그리고 그에 따른 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 부분적으로 외부 복사강제 인자와 관련되어 있음을 시사함

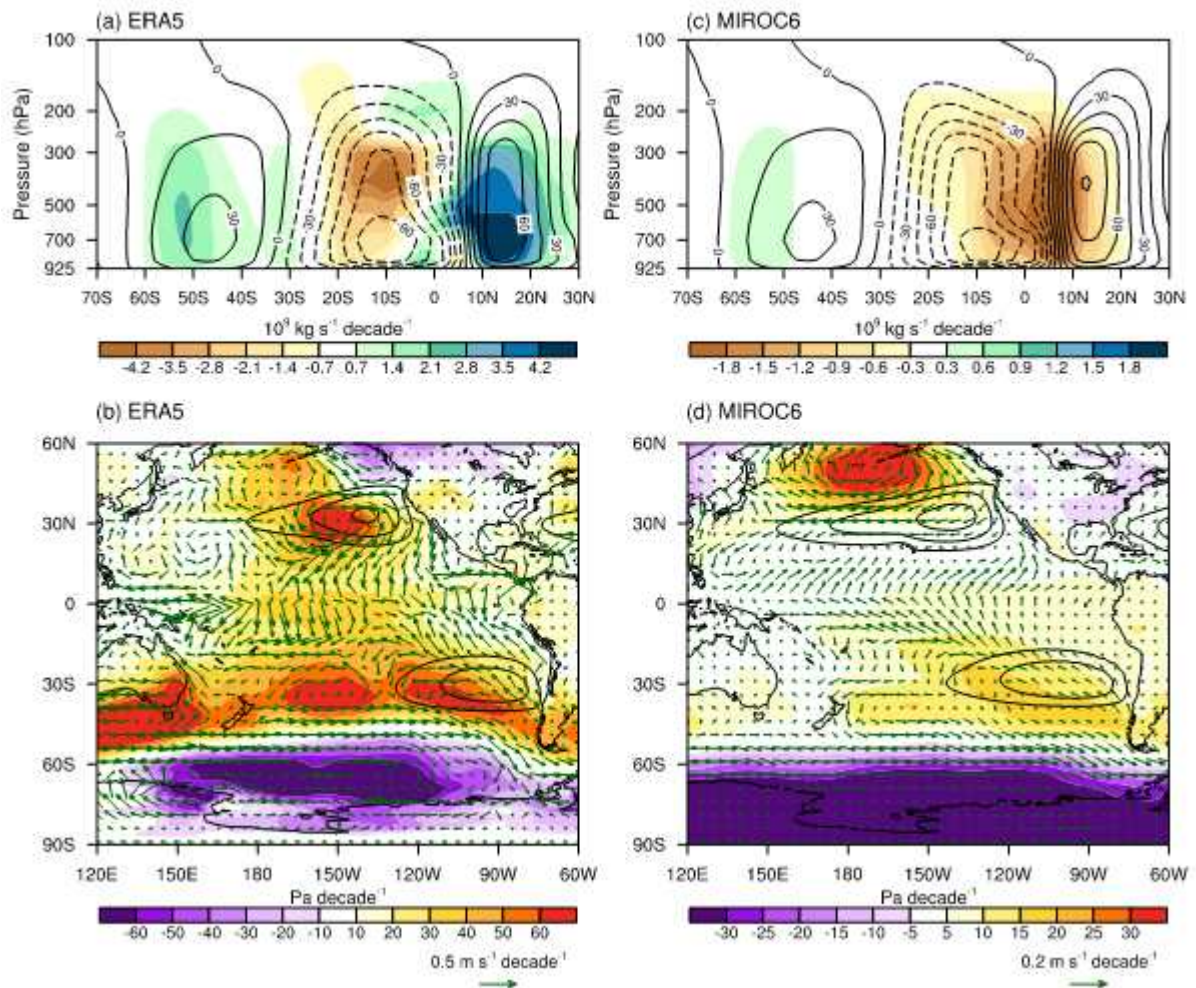


Fig. 16. Atmospheric circulation trends over the period of pronounced stratospheric ozone depletion. (a) Annual-mean mass streamfunction trends over the period 1979-2000 from ERA5. Black contours represent the climatology over the period 1950-1978 (unit: 10^9 kg s^{-1}) with positive and negative values denoting clockwise and counter-clockwise circulation, respectively. (b) Same as in (a), but for trends in sea level pressure (shading) and surface winds (vectors). (c and d) Same as in (a) and (b), but for MIROC6 ensemble-mean trends. In (b) and (d), contours in black represent the climatological high-pressure regions. Note the different color scales between ERA5 and MIROC6 ensemble-mean trends.

4. 남극진동 모드의 영향

- Southern Annular Mode와 관련된 지표 동서방향 바람장의 경년 변동성이 엘니뇨-라니냐 조건에 따라 달라지는지 여부에 대해 산업혁명 이전 기간의 통제실험 자료를 이용하여 분석함

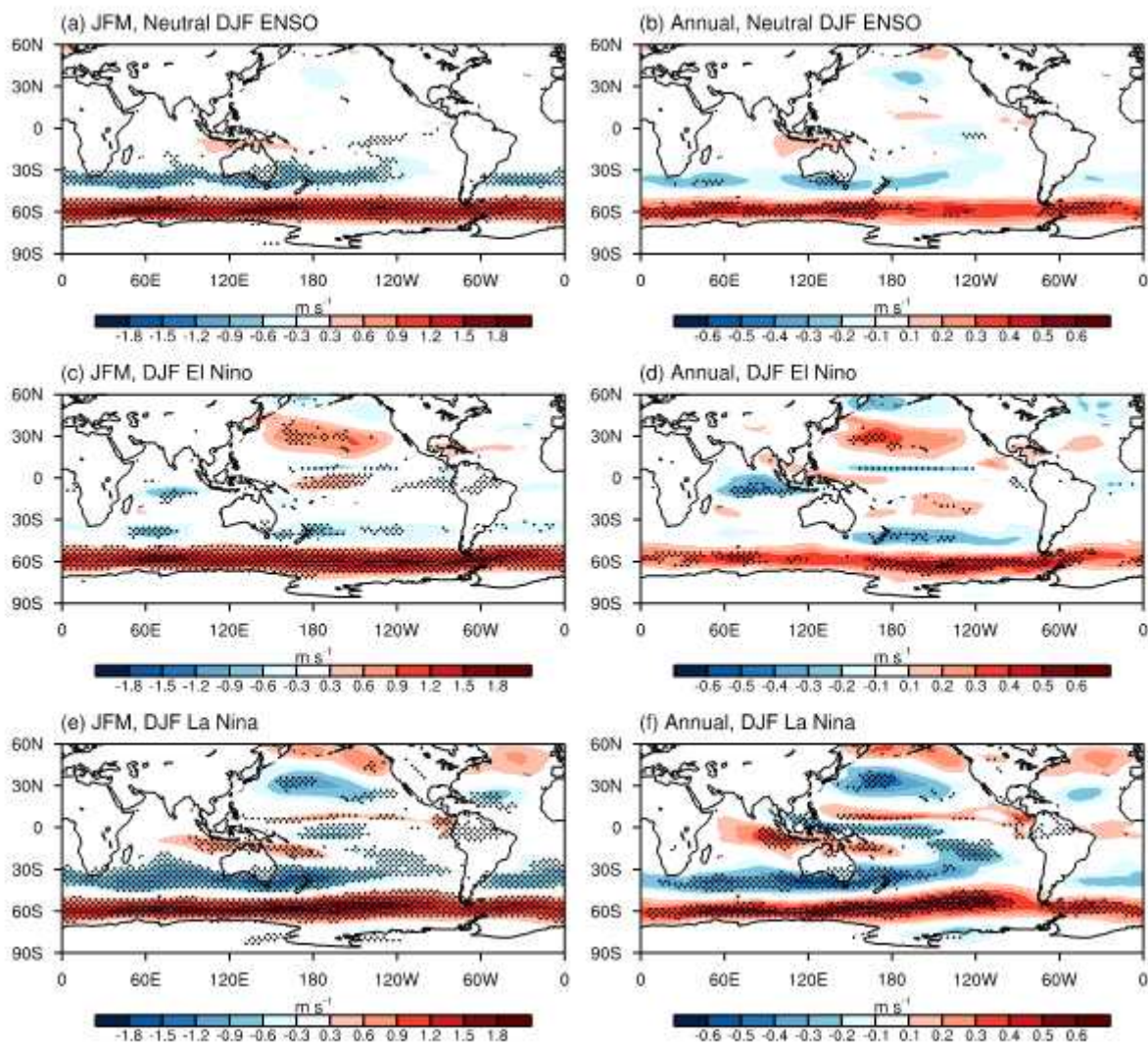


Fig. 17. Dependence of SAM-linked inter-annual surface zonal wind variability on the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in pre-industrial control simulations with IPSL-CM6A-LR. (a) JFM-mean surface zonal wind anomaly averaged over the years when preceding DJF SAM anomalies are greater than one standard deviation (SD) and the magnitude of the corresponding NINO3.4 index is smaller than 0.5 SD (i.e., neutral ENSO year). (b) Same as in (a), but for annual-mean surface zonal wind anomaly. (c) Same as in (a), but in an El Niño condition (preceding DJF NINO3.4 index $\geq +0.5$ SD). (d) Same as in (c), but for annual-mean surface zonal wind anomaly. (e) Same as in (a), but in a La Niña condition (preceding DJF NINO3.4 index ≤ -0.5 SD). (f) Same as in (e), but for annual-mean surface zonal wind anomaly. In (a)-(e), stippling denotes regions where more than 70% of the cases exhibit the same sign.

- 남반구 여름철 (12월-2월) Southern Annular Mode가 큰 양의 편차를 보일 경우 남위 60도

위도대 부근에서 서풍이 큰 양의 편차를 나타냄

- 이러한 관계가 El Niño-Southern Oscillation 조건에 따라 큰 변화를 보이지 않는 것으로 분석됨

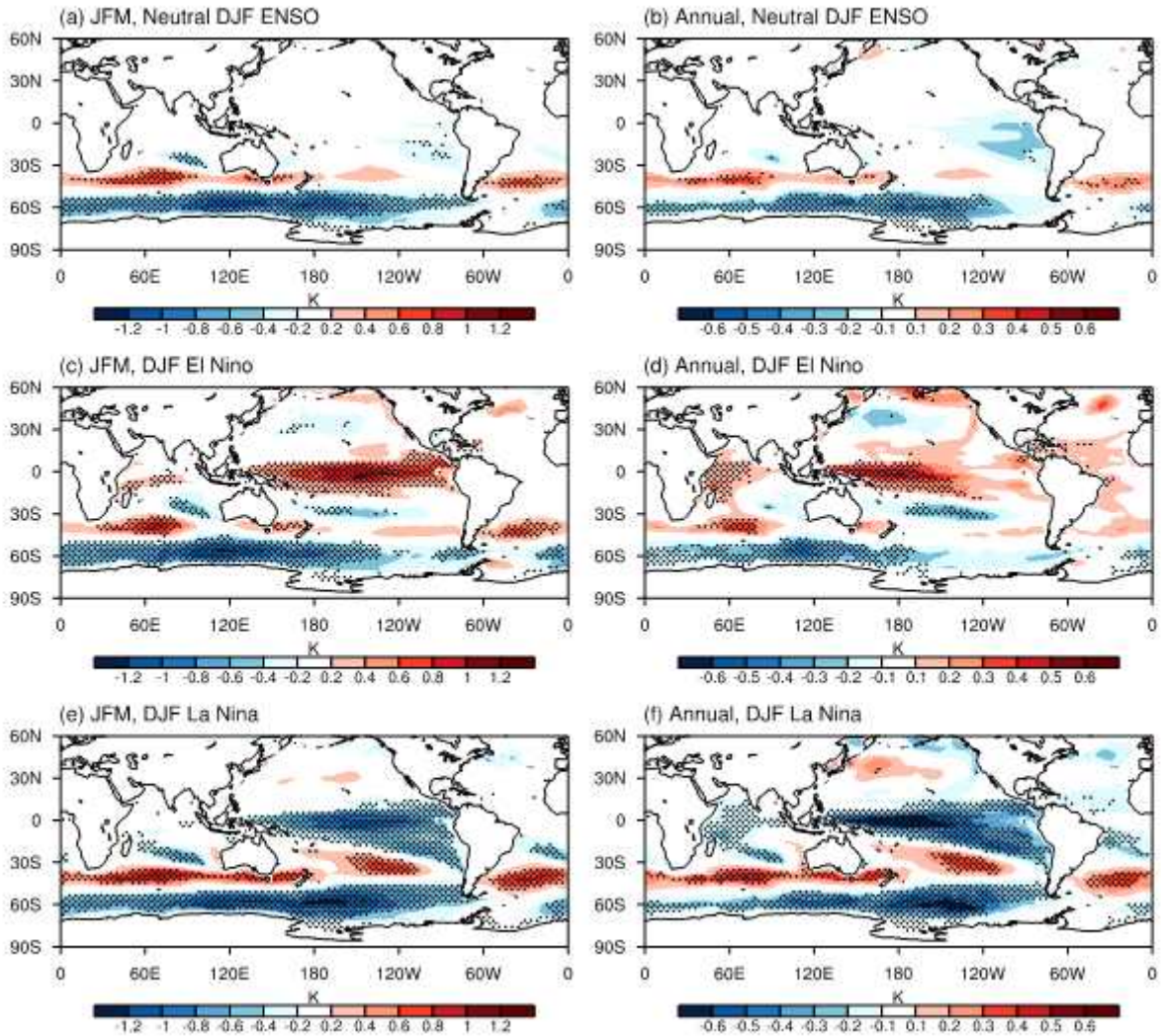


Fig. 18. Dependence of SAM-linked inter-annual SST variability on the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in pre-industrial control simulations with IPSL-CM6A-LR. (a) JFM-mean SST anomaly averaged over the years when preceding DJF SAM anomalies are greater than one standard deviation (SD) and the magnitude of the corresponding NINO3.4 index is smaller than 0.5 SD (i.e., neutral ENSO year). (b) Same as in (a), but for annual-mean SST anomaly. (c) Same as in (a), but in an El Niño condition (preceding DJF NINO3.4 index $\geq +0.5$ SD). (d) Same as in (c), but for annual-mean SST anomaly. (e) Same as in (a), but in a La Niña condition (preceding DJF NINO3.4 index ≤ -0.5 SD). (f) Same as in (e), but for annual-mean SST anomaly. In (a)-(e), stippling denotes regions where more than 70% of the cases exhibit the same sign.

- Southern Annular Mode의 경년 변동성과 관련된 해수면 온도의 경년 변동성이 El Niño-Southern Oscillation 조건에 따라 달라지는지 여부에 대해 분석함

- 남반구 여름철 Southern Annular Mode가 큰 양의 편차를 보일 경우 남극해 뿐만 아니라 열대 동태평양 지역 해수면 온도가 음의 편차를 나타냄
- 그러나 엘니뇨가 발생한 해의 경우에는 열대 동태평양 지역 해수면 온도가 양의 편차를 보여 El Niño-Southern Oscillation 조건의 영향을 받는 것으로 분석됨

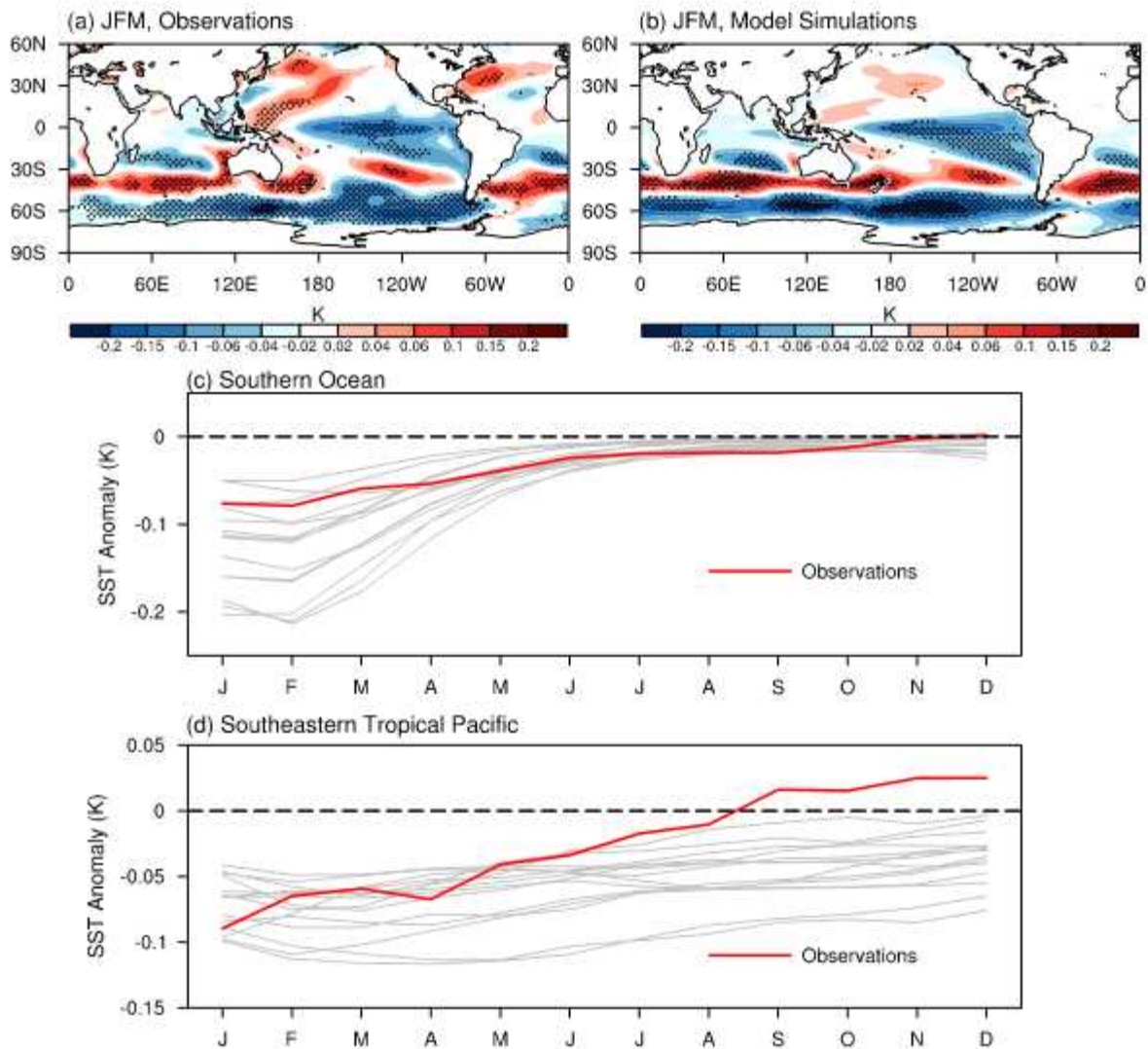


Fig. 19. SAM-linked inter-annual SST variability in observations and model simulations. (a) Detrended January-to-March (JFM)-mean SST response to a unit change in preceding detrended DJF SAM anomaly estimated from a regression analysis using the British Antarctic Survey SAM index and ERSST5. (b) Multi-model-mean (in total, 14 models) of the JFM-mean SST response to a unit change in preceding DJF SAM anomaly in pre-industrial control simulations. Stippling indicates statistical significance of the regression slopes at the 95% confidence level in (a) and regions where the multi-model mean exceeds two standard deviations of the regression slope across the models in (b). (c) Monthly mean SST anomalies averaged over the Southern Ocean (70°S-50°S) with the red and grey lines denoting, respectively, observations and individual models. (d) Same as in (c), but for SST anomalies averaged over the southeastern tropical Pacific (20°S-10°S, 120°W-80°W). Note non-linear color scales in (a) and (b).

- 관측 자료와 기후모델 실험자료를 이용하여 남반구 여름철 Southern Annular Mode의 경년 변동성과 관련된 해수면 온도의 변화를 추정함
- Southern Annular Mode가 큰 양의 편차를 보이는 경우 남극해 지역의 서풍이 강화되고 에크만 수송을 통해 남극해 해수면 온도가 하강하며 그 영향이 열대 태평양 지역까지 전파되는 것으로 분석됨
- 이러한 결과는 남반구 중위도 편서풍의 강화 경향을 일으키는 요인들로 인해 열대 동태평양 지역 해수면 온도의 하강 경향이 유발될 수 있음을 의미함

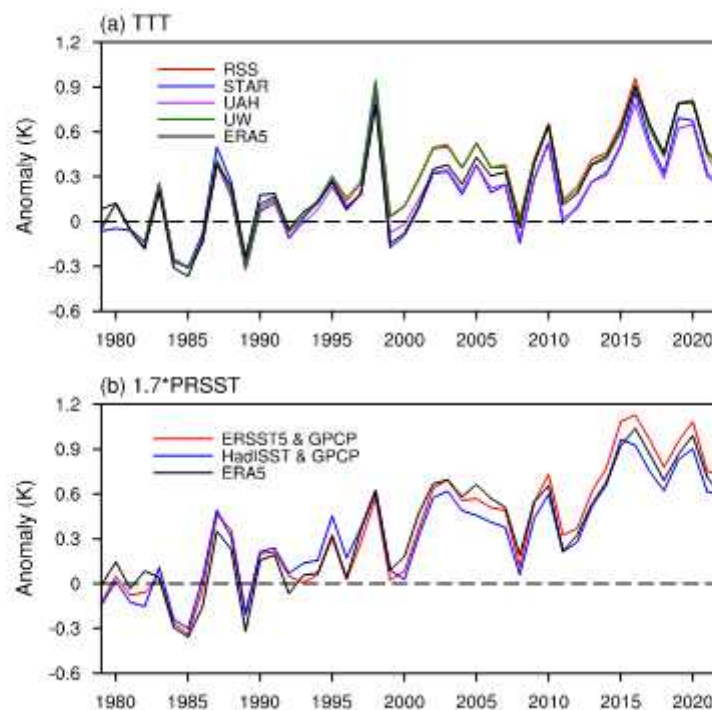


Fig. 20. (a) Temporal evolution of the tropical-mean, annual-mean tropospheric temperature (TTT) anomaly with respect to the 1979-1988 climatology for RSS, STAR, UAH, UW, and ERA5. (b) Same as in (a), but for precipitation-weighted SST (PR SST) anomaly multiplied by 1.7 for ERSST5, HadISST, and ERA5 in conjunction with GPCP precipitation field for ERSST5 and HadISST.

5. 위성관측에 기반한 재분석 자료의 정확성 평가

- 60 GHz 산소 흡수 밴드 밝기온도가 대류권 온도와 밀접히 관련되어 있는 특성에 근거하여 극궤도 위성에 탑재된 Microwave Sounding Unit (MSU) 및 Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) 관측자료를 이용하여 재분석 자료로부터 도출된 열대 대류권 온도 변화의 정확성을 평가함
- 위성의 경우 밝기온도 정보가 관측되는 데 반해 재분석 자료의 경우에는 대기 온도 정보가 제공되어 직접적인 비교를 위해 재분석 자료로부터 산출된 대기 및 지표 정보를 복사전달 모델에 입력하여 위성으로부터 관측될 것으로 예상되는 밝기온도를 모의한 후 비교 분석을

수행함

- 대기 중의 온실기체 농도 증가에 부합하게 위성관측과 재분석 자료 모두 밝기온도가 시간에 따라 전반적으로 증가하는 양상을 보이는 것으로 확인됨
- 대류활동과 관련된 열대지역 해수면 온도의 변화에 있어서도 관측과 재분석 자료 사이에 큰 차이가 없는 것으로 분석됨

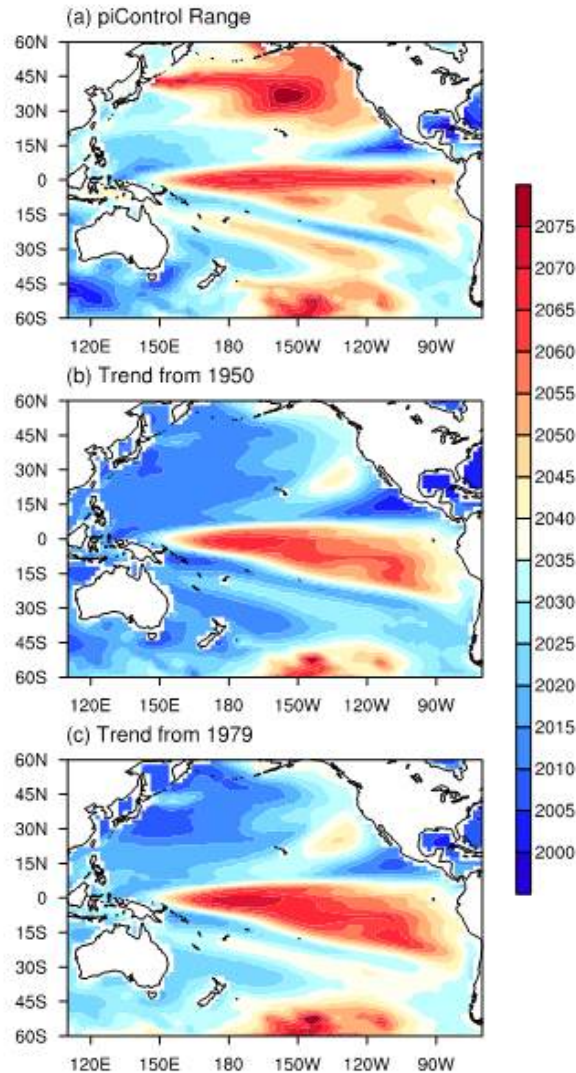


Fig. 21. Spatial inhomogeneity in the time of emergence over the tropical Pacific in the CESM2 LE. (a) The median value of the year, at each grid point, in which the corresponding annual-mean SST lies, for the first time, outside the 90% annual-mean SST range simulated under the pre-industrial control condition. (b) The median value of the end year of a given period starting in 1950 over which the magnitude of the corresponding trend is at least twice large as its uncertainty for the first time. (c) Same as in (b), but for periods starting in 1979.

제 2 절 자연변동성의 영향

1. 외부 복사강제 인자 영향의 지역적 차이

- 기후모델로부터 모의된 해수면 온도 변화의 정확성은 논외로 하고 외부 복사강제 인자의 영향이 자연변동성의 범위를 벗어났는지의 여부를 두 가지 방법을 사용하여 분석함
- 첫 번째 방법에서는 온실기체 증가 등을 포함한 외부 복사강제 인자의 영향을 고려하여 수행한 모델 실험으로부터 산출된 해수면 온도가 산업혁명 이전 기간의 통제실험으로부터 산출된 해수면 온도의 90% 범위를 벗어나는 해를 time of emergence로 결정함
- 두 번째 방법에서는 1950년 혹은 1979년을 시작점으로 하는 기간에 대해 해수면 온도의 변화 경향을 계산했을 때 계산된 변화 경향이 통계적으로 유의한 값을 보이는 기간의 마지막 해를 time of emergence로 결정함
- CESM2 Large Ensemble의 100개 앙상블 멤버에 대해 각각 time of emergence를 계산한 후 중간값의 공간 분포를 분석함
- 열대 서태평양의 경우 대부분의 지역에서 외부 요인의 영향이 이미 자연변동성의 범위를 벗어났을 확률이 높은 것으로 분석됨
- 반면, 열대 중앙 태평양과 열대 동태평양 지역에서는 time of emergence가 대부분 2050년 이후의 값을 나타내고 있음
- 이러한 양상은 열대 중앙 태평양과 열대 동태평양 지역에서는 외부 강제복사 인자의 영향이 자연변동성의 범위를 벗어나지 못했을 가능성이 있음을 의미함
- 따라서 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향의 주된 요인이 대기 중의 온실기체 농도 증가가 아닐 수 있고 자연변동성의 영향을 배제할 수 없음을 나타냄

2. 자연변동성으로 인한 불확실성

- 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 부분적으로 자연변동성과 관련되어 있는지 알아보기 위해 외부 복사강제력 조건은 동일하지만 초기 조건을 달리하여 수행한 모델실험으로부터 산출된 해수면 온도 변화 경향을 분석함
- 대기 중의 온실기체 농도의 증가 등을 포함한 외부 복사강제력 조건이 동일함에도 불구하고 앙상블 멤버들 간에 현저한 차이가 있는 것으로 분석됨
- 특히, 관측과 유사하게 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 산출하는 앙상블 멤버들이 있다는 점을 고려할 때 기후모델에 많은 문제점이 있지만 기후시스템 내의 자연변동성과 현재 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향 사이의 관련성을 배제할 수 없는 것으로 사료됨
- 열대 서태평양 지역의 경우 대부분의 앙상블 멤버들이 해수면 온도의 상승 경향을 보이는 데 반해 열대 동태평양 지역에서는 해수면 온도 변화 경향의 부호에 있어서 앙상블 멤버들 사이에 상당한 차이를 보이고 있음
- 이러한 결과는 time of emergence 분석에서 도출된 바와 같이 열대 서태평양 지역에서는 외부 복사강제 인자의 영향이 자연변동성의 범위를 벗어났을 확률이 큰데 반해 열대 동태

평양에서는 자연변동성의 영향을 벗어나지 못했을 가능성이 크다는 것을 의미함

- 남극해 지역에서도 해수면 온도 변화 경향의 부호에 있어서 앙상블 멤버들 사이에 상당한 차이를 보이고 있는 것으로 분석됨

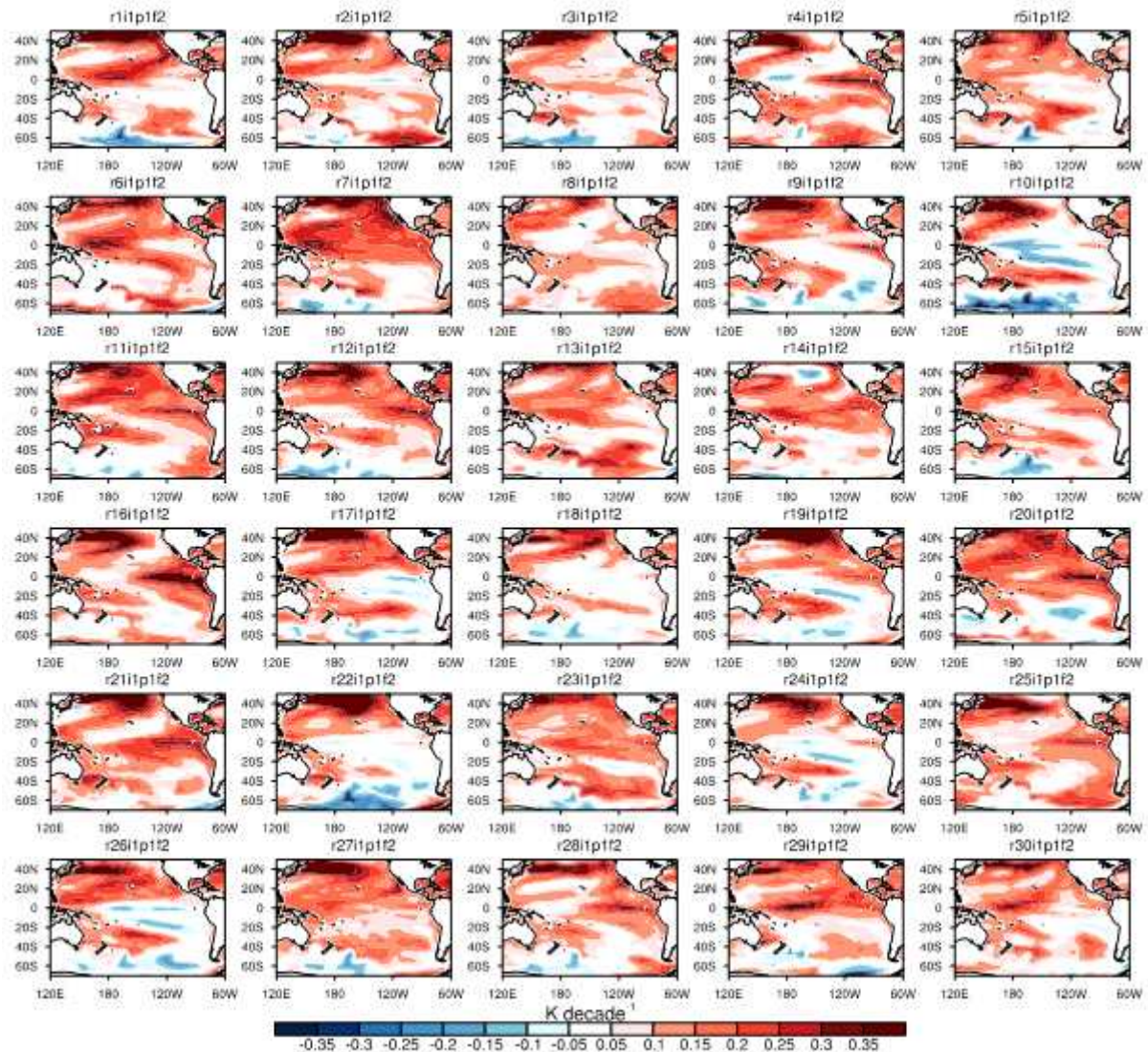


Fig. 22. Inter-ensemble variability in model-simulated SST trends. Each panel denotes annual-mean SST trends over the period 1979-2014 for an ensemble member of MIROC-ES2L with the accompanying title denoting the ensemble member.

- 앙상블 멤버들 사이의 차이를 보다 정량적으로 살펴보기 위해 해수면 온도 변화 경향에 대한 경험적고함수 분석을 수행함
- 첫 번째 EOF 모드는 라니냐 또는 Inter-decadal Pacific Oscillation의 음의 위상과 유사한 공간 분포를 보이고 있는 것으로 분석됨
- 첫 번째 EOF 모드에 해당하는 주성분 값을 기준으로 상위 10%인 앙상블 멤버들에 대해 해수면 온도 변화 경향, 해면 기압 변화 경향 그리고 850-hPa 바람장의 변화 경향의 평균 분포를 계산함
- 하위 10%인 앙상블 멤버들에 대해서도 평균적인 변화 경향을 계산하고 상위 10% 앙상블

멤버 평균 분포와 비교함

- 상위 10% 평균의 경우 관측에 유사하게 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 보이는 반해 하위 10% 평균은 엘니뇨 형태의 공간 분포를 나타내고 있음

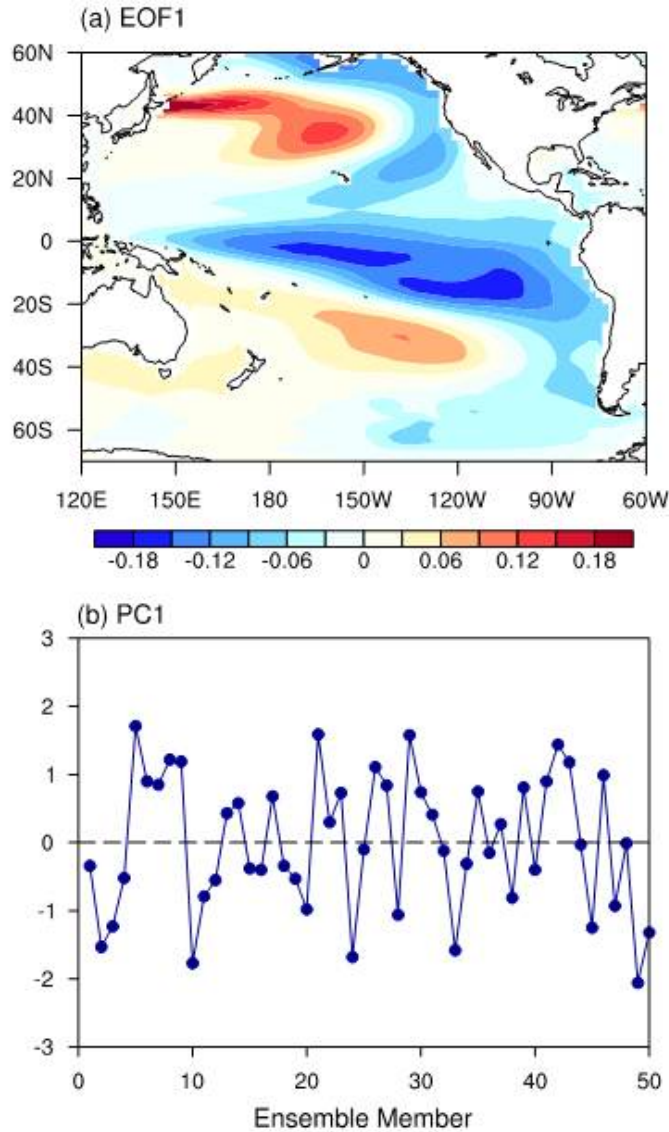


Fig. 23. Inter-ensemble variability of simulated SST trends due to internal climate variability in the CESM2 LE. (a) Spatial pattern of the first EOF mode for the 1979-2010 SST trends across the ensemble members. (b) Corresponding standardized PC.

- 상위 10% 평균과 하위 10% 평균 사이의 해수면 온도 변화 경향의 차이를 계산하면 Inter-decadal Pacific Oscillation과 매우 유사한 공간 분포가 산출되는 것으로 분석됨
- 상위 10% 평균의 경우 북태평양과 남태평양 고기압의 강화 경향과 더불어 태평양 워커 순환의 강화 경향이 수반되고 있고 그로 인해 태평양 지역의 무역풍이 강화된 양상을 나타내고 있음
- 반면, 하위 10% 평균의 경우 대체로 정반대의 변화 양상을 나타내고 있음

- 이러한 차이를 고려할 때 Inter-decadal Pacific Oscillation과 관련된 자연변동성이 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향에 영향을 미치고 있는 것으로 사료됨

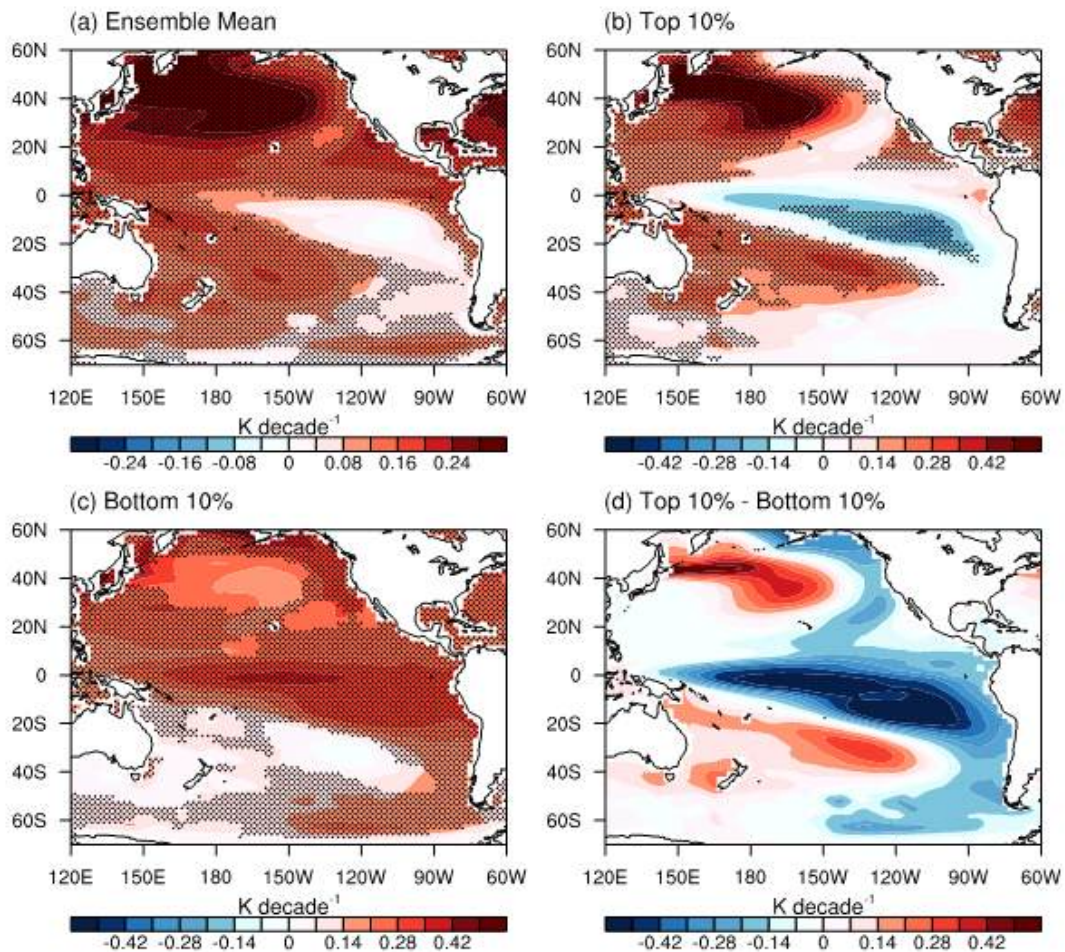


Fig. 24. (a) Ensemble-mean of annual-mean SST trends over the period 1979-2010 for the CESM2 LE with stippling denoting regions where more than 70% of the ensemble members exhibit the same sign. (b) Spatial pattern of SST trends averaged over the ensemble members with their PC values at the top 10%. Stippling indicates regions where the corresponding ensemble members exhibit the same sign. (c) Same as in (b), but for the ensemble members with their PC values at the bottom 10%. (d) Difference in the mean SST trends between the top 10% and bottom 10% subsets.

- 분석기간이 다른 경우에도 외부 강제력 조건이 동일함에도 불구하고 해수면 온도 변화 경향과 대기순환 변화 경향에 있어서 앙상블 멤버들 사이에 적지 않은 차이를 나타내고 있는 것으로 확인됨
- 또한, 앙상블 멤버의 수가 충분히 큰 다른 기후모델 실험에서도 자연변동성의 영향으로 모의된 해수면 온도 변화 경향과 대기순환 변화 경향에 있어서 앙상블 멤버들 사이에 상당한 차이가 있는 것으로 분석됨
- 그러나 분석 기간이 길어짐에 따라 자연변동성의 영향이 줄어들고 외부 강제인자의 영향이

커지기 때문에 앙상블 멤버들 사이의 차이가 줄어드는 경향이 있음

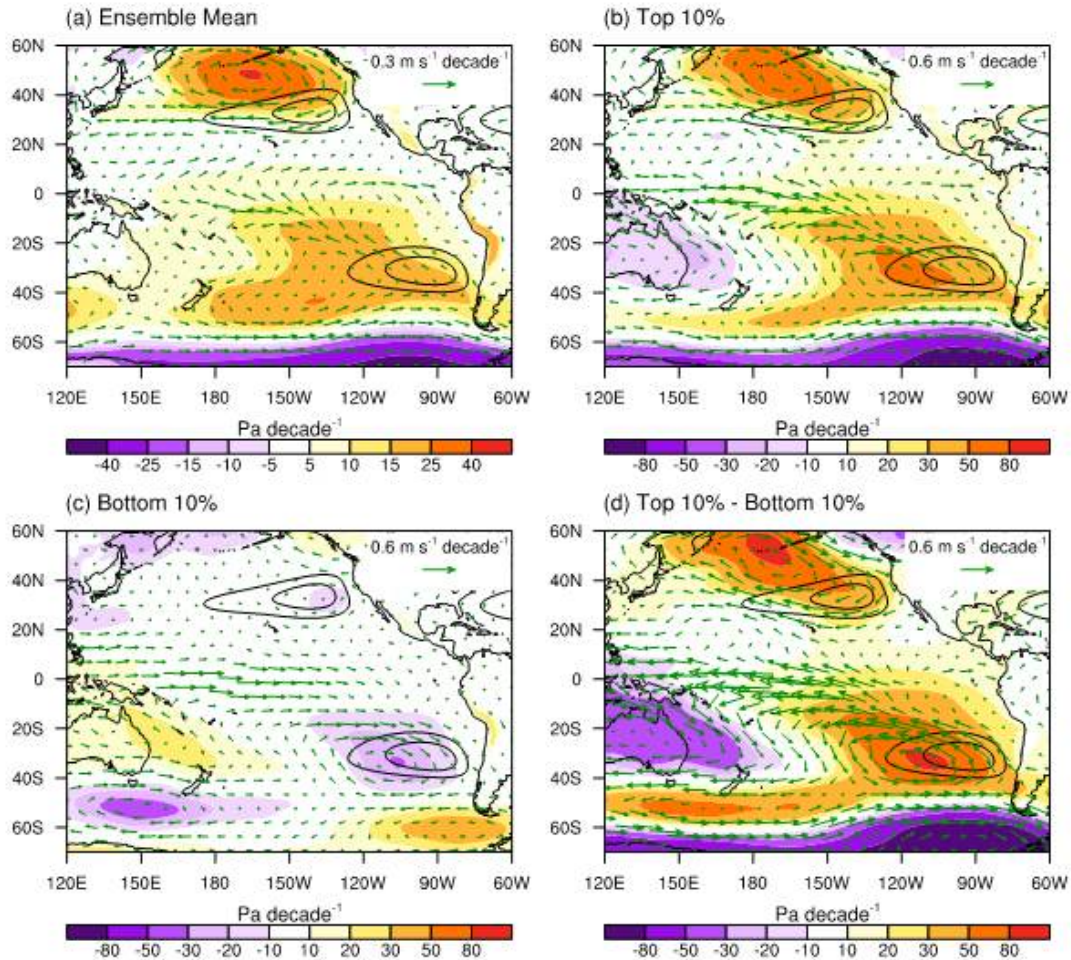


Fig. 25. (a) Ensemble-mean trends in sea level pressure (shading) and 850-hPa winds (vectors) over the period 1979-2010 for the CESM2 LE. Contours in black denote the climatological high-pressure regions with stippling denoting regions where more than 70% of the ensemble members exhibit the same sign. (b) Same as in (a), but for the ensemble members with their PC values at the top 10%. (c) Same as in (a), but for the ensemble members with their PC values at the bottom 10%. (d) Difference in the mean sea level pressure and 850-hPa winds trends between the top 10% and bottom 10% subsets.

3. 자연변동성으로 인한 관측과 기후모델 사이의 차이

- 관측된 해수면 온도 변화 경향의 경우 대기 중의 온실기체 농도 증가 등을 포함한 외부 복사강제 인자의 영향과 더불어 자연변동성의 영향이 포함되어 있음
- 기후모델 실험으로부터 산출된 변화의 경우 앙상블 평균을 통해 자연변동성의 영향을 상당 부분 제거할 수 있다는 점으로 미루어 관측된 변화와 앙상블 평균 변화 사이의 차이가 자연변동성의 영향을 나타낸다고 가정할 수 있음
- 기후모델 실험의 앙상블 평균 변화는 외부 요인에 기인하는 강제된 변화를 나타낸다고 할 수 있는데 기후모델에 표현되어 있는 물리과정에 오류가 있는 경우 관측과 앙상블 평균 사이의 차이가 자연변동성과 관련된 시간 변화를 보이지 않고 시간에 따라 그 차이가 증가하

거나 감소하는 양상을 보이게 됨

- 엘니뇨-라니냐 등과 관련된 변동성의 영향을 줄이기 위해 7년 평균을 한 후 경험직교함수 분석을 수행함

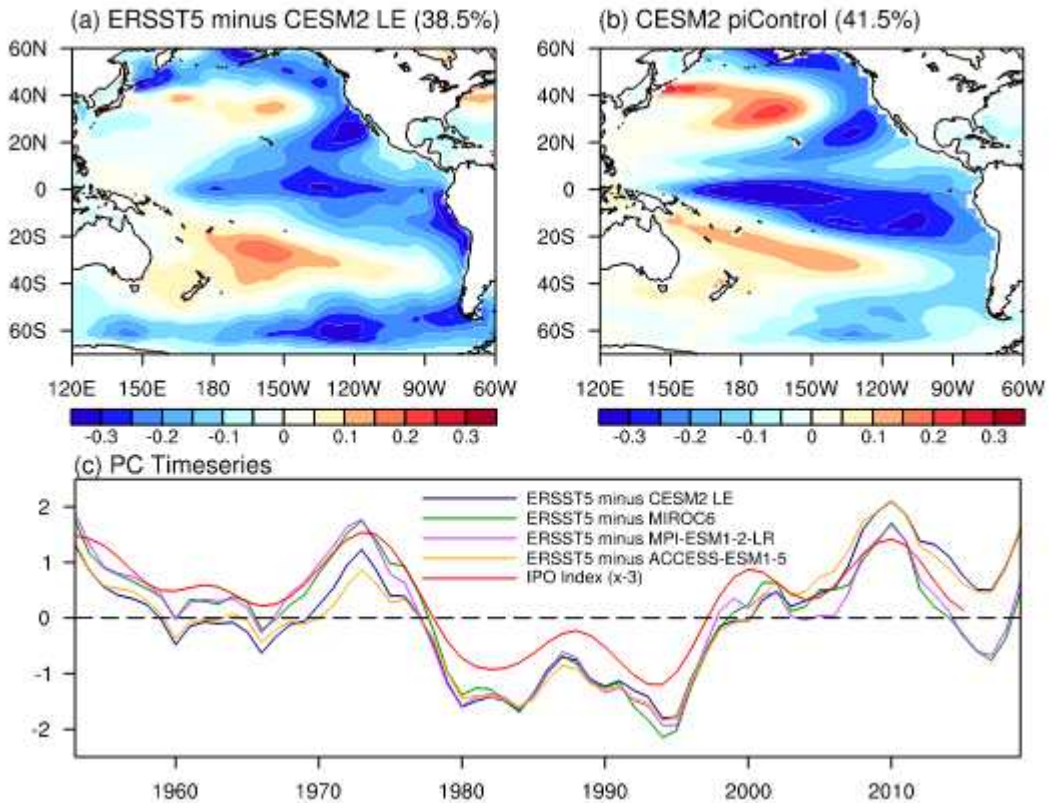


Fig. 26. (a) Spatial pattern of the first EOF mode analyzed in the Pacific (70°S-60°N, 120°E-60°W) for the 7-yr running-mean difference between ERSST5 and the CSM2 LE ensemble mean in annual-mean SST anomaly relative to the 1950-2022 means. (b) Same as in (a), but for an EOF analysis with 7-yr running-mean, annual-mean SST anomaly from CSM2 pre-industrial control simulations. (c) Time series of the standardized PC values corresponding to the first EOF mode shown in (a). Also presented are PC time series computed with the ensemble-mean SST anomaly of MIROC6, MPI-ESM1-2-LR, and ACCESS-ESM1-5 along with ERSST5. The red line denotes the observed time series of low-pass filtered IPO index multiplied by -3.

- 첫 번째 EOF 모드가 라니냐 또는 Inter-decadal Pacific Oscillation의 음의 위상과 관련된 공간 분포를 보이고 있음
- 관련된 주성분의 시계열이 시간에 따라 증가하거나 감소하는 것이 아니라 관측된 Inter-decadal Pacific Oscillation과 매우 유사한 변동성 양상을 나타내고 있음
- 다른 기후모델의 앙상블 평균을 이용하여 경험직교함수 분석을 수행한 경우에도 Inter-decadal Pacific Oscillation과 관련된 공간 분포와 변동성 양상을 나타내고 있는 것으로 확인됨
- 외부 강제인자의 영향이 없는 산업혁명 이전 기간의 통제실험 결과를 이용하여 경험직교함

수 분석을 수행한 경우에도 첫 번째 EOF 모드가 Inter-decadal Pacific Oscillation과 관련된 공간 분포를 나타냄

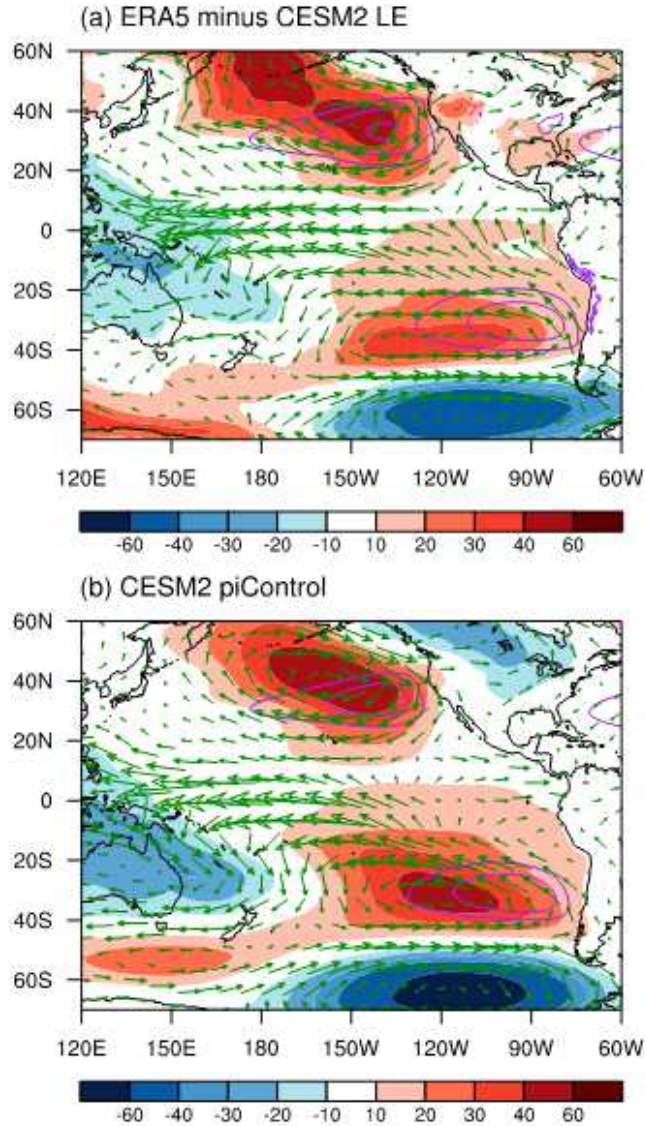


Fig. 27. (a) 7-yr running-mean differences between ERA5 and the CESM2 LE ensemble mean in annual-mean sea level pressure (shading) and 850-hPa wind (vectors) anomalies regressed onto the standardized PC1 for the ERSST5 minus the CESM2 LE ensemble mean SST. (b) 7-yr running-mean annual-mean sea level pressure (shading) and 850-hPa wind (vectors) anomalies regressed onto the standardized PC1 for CESM2 pre-industrial control simulation. Contours in purple represent the climatological high-pressure regions in observation (a) and in the CESM2 pre-industrial control simulation (b).

- 첫 번째 EOF 모드와 관련된 해면 기압과 850-hPa 바람장의 변화를 살펴 보면 Inter-decadal Pacific Oscillation의 위상이 양에서 음으로 변화함에 따라 북태평양과 남태평양의 고기압이 강화되고, 태평양 워커 순환이 강화되며 그 결과 태평양 지역 무역풍이 강화되는 것으로 분석됨
- 관측과 앙상블 평균 사이의 차이 뿐만 아니라 산업혁명 이전의 통제실험에서도 첫 번째

EOF 모드와 유사한 공간 분포를 보인다는 점을 고려할 때 기후모델의 문제점을 배제할 수 없지만 자연변동성으로 인해 관측과 기후모델 실험 앙상블 평균 사이에 차이가 발생할 수 있음을 시사함

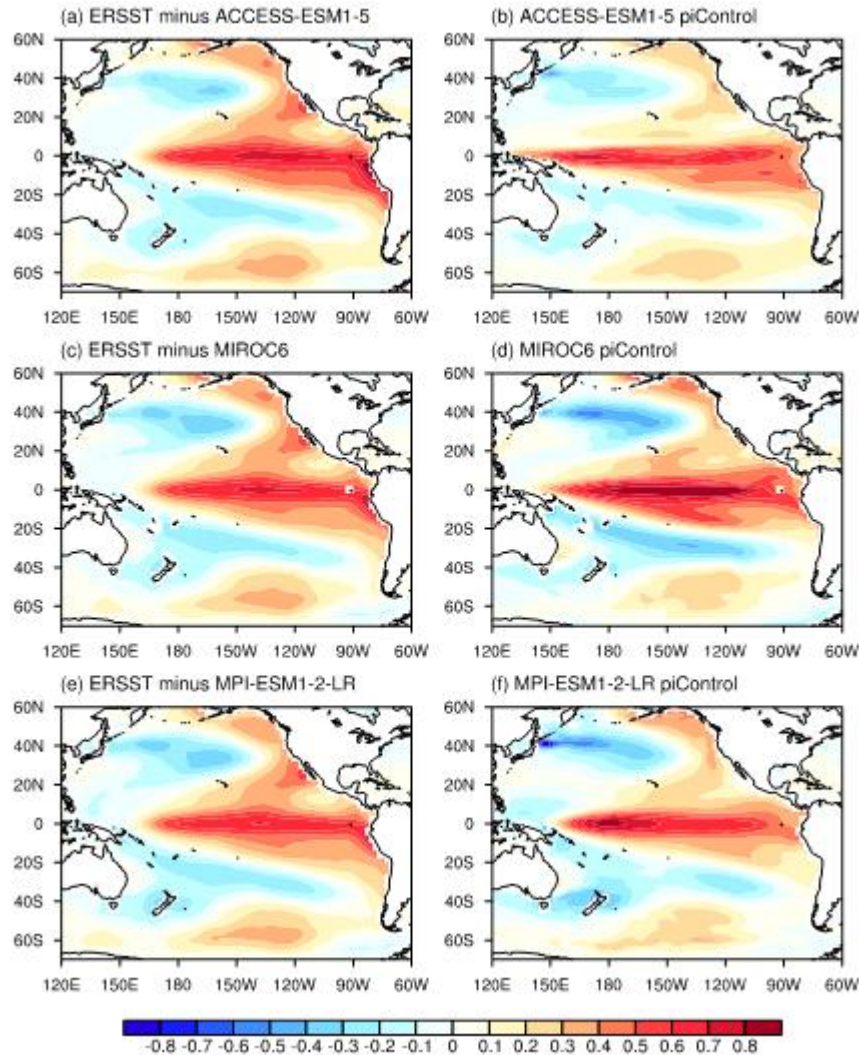


Fig. 28. Potential role of internal climate variability in the model-observation discrepancy in SST trends over the Pacific. (a) Spatial pattern of the first EOF mode analyzed over the Pacific (70°S-60°N, 120°E-60°W) for the difference between ERSST5 and ACCESS-ESM1-5 ensemble mean in annual-mean SST anomaly relative to the 1950-2021 means. (b) Same as in (a), but for an EOF analysis with SST from ACCESS-ESM1-5 pre-industrial control simulations. (c) Same as in (a), but with the MIROC6 ensemble mean SST anomaly. (d) Same as in (b), but for MIROC6. (e) Same as in (a), but with the MPI-ESM1-2-LR ensemble mean SST anomaly. (f) Same as in (b), but for MPI-ESM1-2-LR.

4. Inter-decadal Pacific Oscillation과 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향의 관련성

- Fig. 26에 제시된 두 번째 EOF 모드의 주성분이 1979-2010년 사이의 기간에 증가 경향을 나타내고 있는 것과 관련하여 Inter-decadal Pacific Oscillation이 관측된 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향에 미치는 영향을 분석함

- 전술한 바와 같이 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향은 북태평양과 남태평양 고기압의 강화 경향, 태평양 워커 순환의 강화 경향, 그리고 그에 따른 태평양 무역풍의 강화 경향을 수반하고 있음

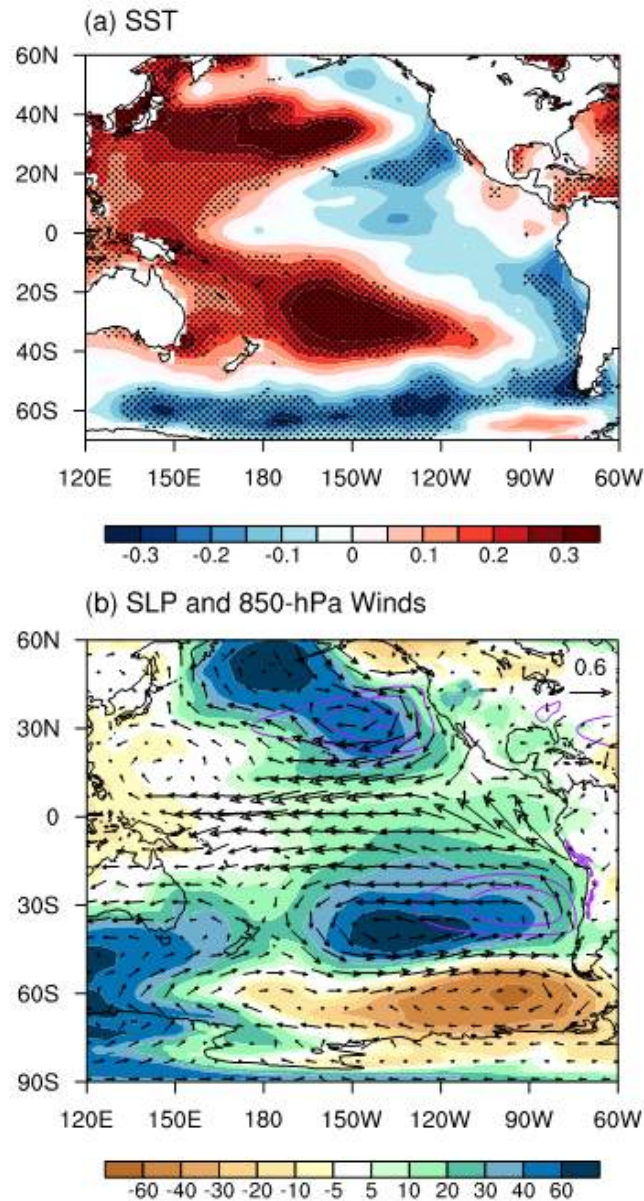


Fig. 29. (a) SST trends over the period 1979-2010 from ERSST5, with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level. (b) Sea level pressure (shading) and 850-hPa wind (vectors) trends over the period 1979-2010 from ERA5. Contours in purple represent the climatological high-pressure regions.

- 1953-2019년 기간에 대해 이산화탄소 농도 증가의 영향이 제거된 해수면 온도 편차 시계열을 이용하여 관측된 Inter-decadal Pacific Oscillation 지수를 독립변수로 하여 회귀계수를 산출한 후 Inter-decadal Pacific Oscillation과 관련된 1979-2010년 기간의 해수면 온도 변화 경향을 추정하고 관측된 변화와 비교함

- 1979-2010년 기간 동안 Inter-decadal Pacific Oscillation의 위상이 양에서 음으로 바뀌었고 그에 따라 열대 태평양 해수면 온도가 라니냐 형태의 변화 양상을 보이는 것으로 분석됨
- Inter-decadal Pacific Oscillation과 관련된 해면 기압 및 850-hPa 바람장도 관측과 유사한 변화 양상을 보여 Inter-decadal Pacific Oscillation이 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 양상과 밀접하게 관련되어 있음을 나타냄

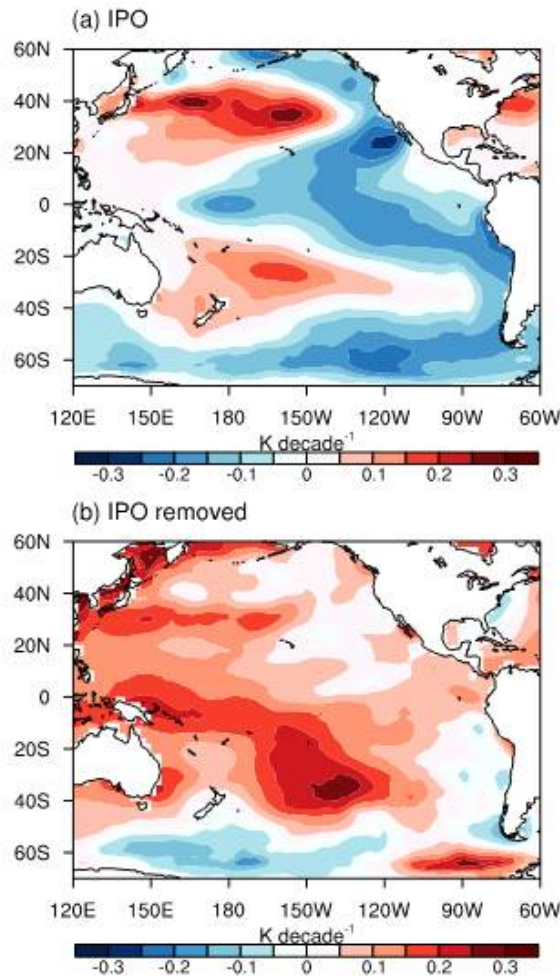


Fig. 30. (a) IPO-related SST trends over the period 1979-2010. The SST regression slope against the IPO, which is used to construct the IPO-related component, was computed at each grid point after removing the impact of time-varying CO₂ concentration. (b) Difference between the observed SST trends and the IPO-related SST trends.

- 그러나 Inter-decadal Pacific Oscillation의 영향을 제거했을 때 서태평양 지역에 비해 동태평양 지역의 해수면 온도 상승 경향이 작거나 하강하는 경향을 보이고 있고 남극해 지역에서는 해수면 온도가 하강하는 경향을 나타내고 있음
- 이러한 양상은 Inter-decadal Pacific Oscillation 이외에 외부 복사강제 인자들이 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향과 관련되어 있음을 시사함
- Inter-decadal Pacific Oscillation의 영향이 제거된 해면 기압의 경우 북태평양과 남태평양

고기압이 강화 경향을 나타내고, 850-hPa 바람장도 무역풍의 강화 경향을 나타내고 있다는 점을 고려할 때 이와 같은 대기순환의 변화를 일으키는 외부 요인들로 인해 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 유발되는 것으로 사료됨

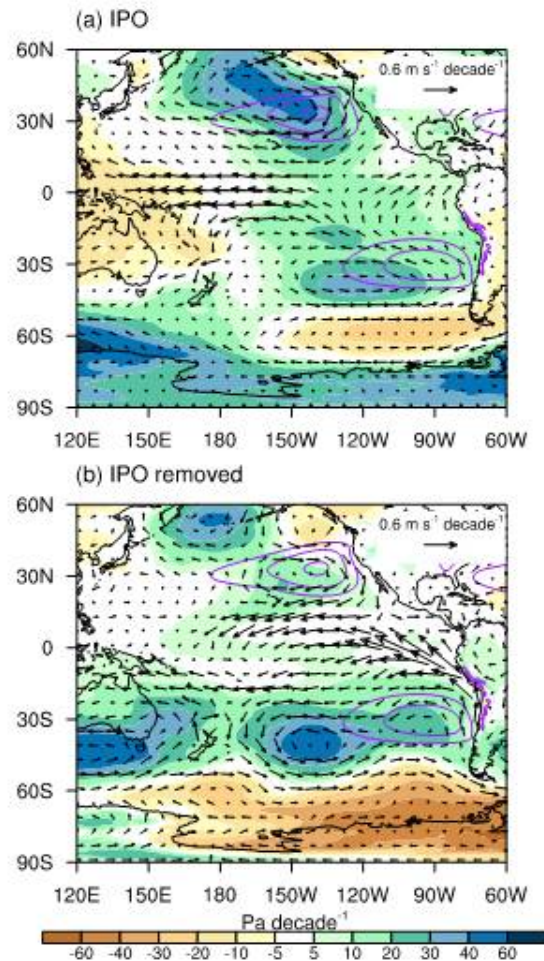


Fig. 31. (a) IPO-related sea level pressure (shading) and 850-hPa wind (vectors) trends over the period 1979-2010. The corresponding regression slopes against the IPO, which are used to construct the IPO-related component, were computed at each grid point after removing the impact of time-varying CO₂ concentration. Contours in purple represent the climatological high-pressure regions. (b) Differences between the observed trends and the IPO-related trends.

제 3 절 외부 복사강제 인자의 역할

- 대기 중의 온실기체 농도의 증가, 인간활동과 관련된 에어로솔의 변화, biomass burning과 관련된 에어로솔의 변화, 지표 사용의 변화 그리고 성층권 오존 파괴 물질의 변화만을 각각 고려하여 수행한 기후모델 모의실험 자료를 이용하여 외부 복사강제력에 기인하는 변화의 특성을 분석함
- 대기 중의 온실기체 농도의 증가만을 고려한 모델실험은 1979-2010년 기간에 대해 전반적으

로 엘니뇨 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 나타내고 있음

- 온실기체 증가의 결과로 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 나타나야 한다면 1979년 이전 기간에서도 뚜렷한 라니냐 형태의 해수면 변화 경향이 관측되어야 하지만 엘니뇨에 가까운 형태를 보인다는 점을 고려할 때 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 온실기체 농도의 증가와는 관련성이 크지 않은 것으로 사료됨

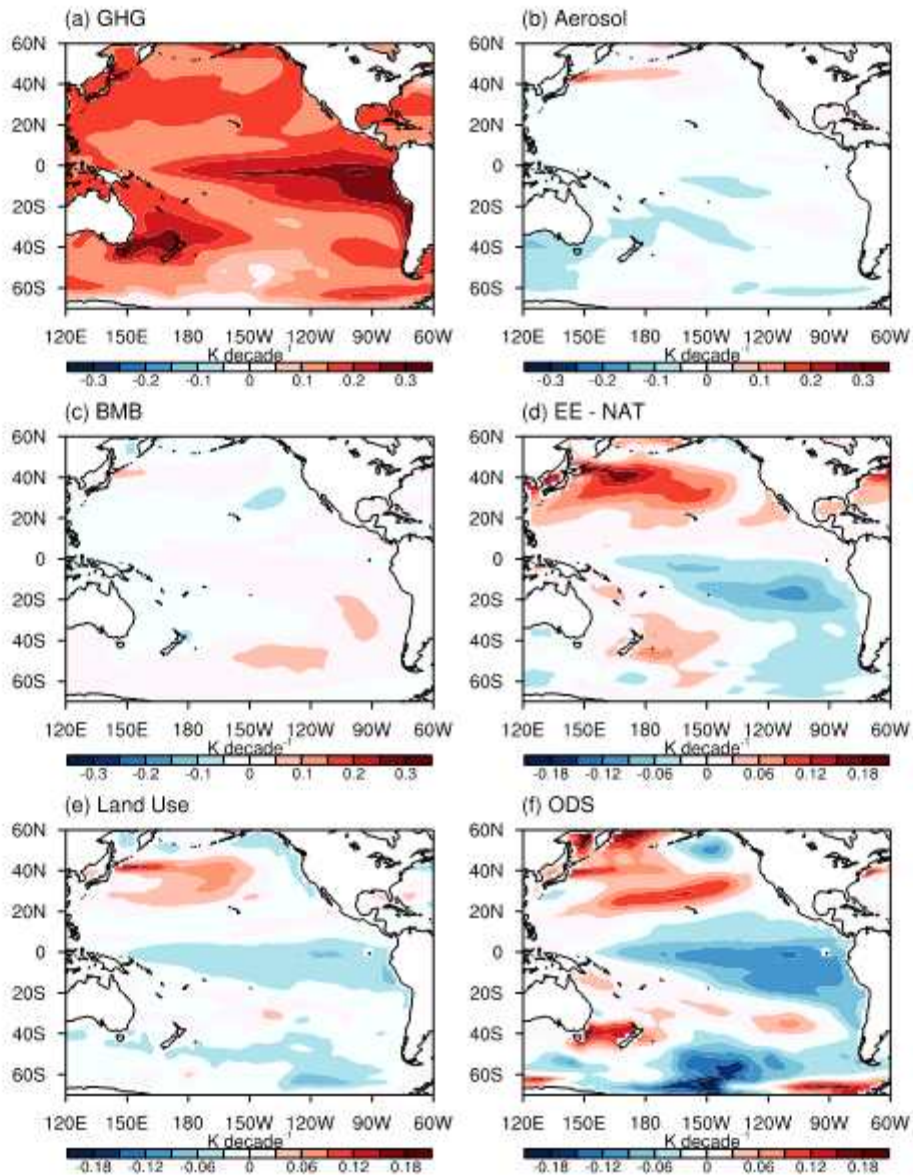


Fig. 32. (a) Model-simulated SST trends resulting from time-varying greenhouse gas concentrations over the period 1979-2010. (b) Same as in (a), but for anthropogenic aerosols. (c) Same as in (a), but for biomass burning emissions. (d) Same as in (a), but for changes in land use and ozone concentrations. (e) Same as in (a), but for land use changes and their interactions with other forcing agents. (f) Same as in (a), but for time-varying ozone depleting substances and resultant stratospheric ozone concentration changes along with their interactions with other forcing agents.

- 인간활동으로 인한 에어로솔 농도의 변화를 적용하여 수행한 모델실험으로부터 산출된 해수면 온도 변화 경향은 라니냐 형태의 공간 분포를 나타내고 있지는 않지만 태평양 지역에서 전반적으로 해수면 온도의 감소 경향이 모의되고 있음
- Biomass burning과 관련된 에어로솔 농도 변화 실험의 경우 엘니뇨에 가까운 해수면 온도 변화 경향을 나타내고 있어서 1970년대 말 이래로 관측되고 있는 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향과는 관련성이 적은 것으로 추정됨

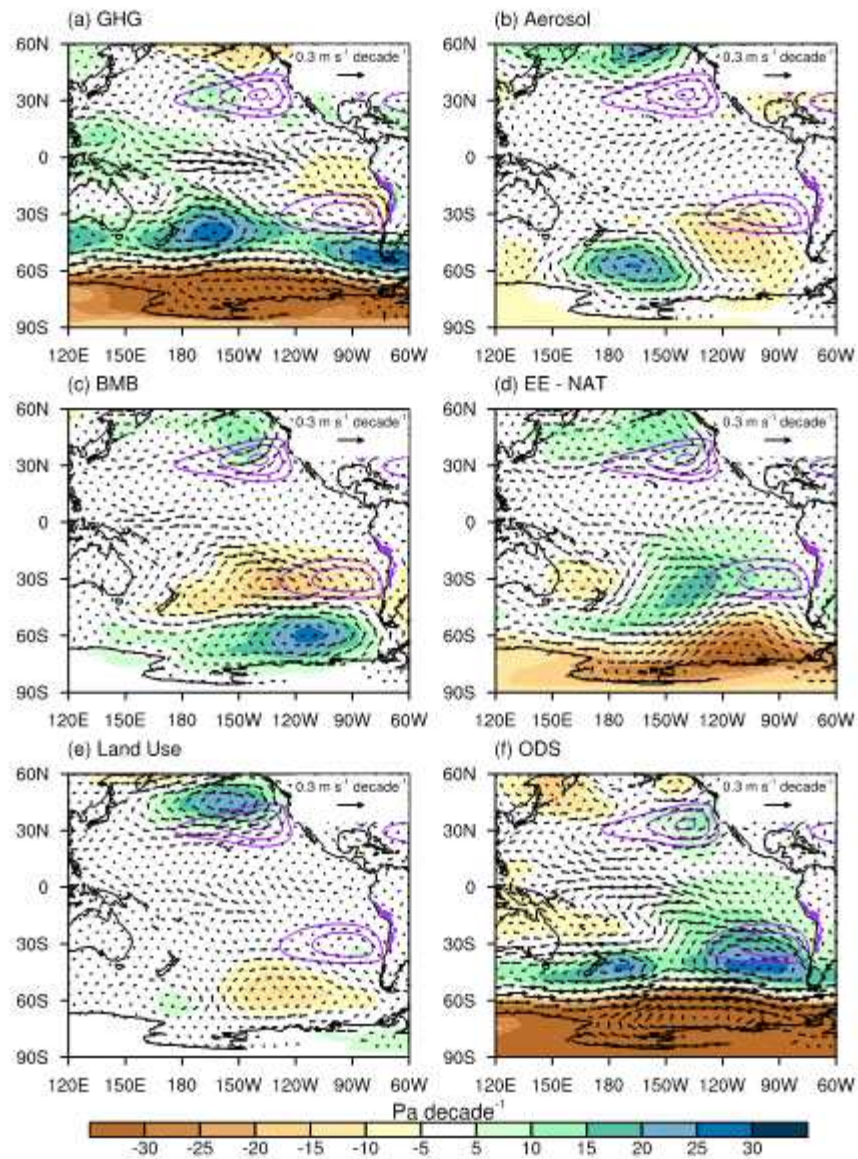


Fig. 33. (a) Model-simulated sea level pressure and 850-hPa wind trends resulting from time-varying greenhouse gas concentrations over the period 1979-2010. (b) Same as in (a), but for anthropogenic aerosols. (c) Same as in (a), but for biomass burning emissions. (d) Same as in (a), but for changes in land use and ozone concentrations. (e) Same as in (a), but for land use changes and their interactions with other forcing agents. (f) Same as in (a), but for time-varying ozone depleting substances and resultant stratospheric ozone concentration changes along with their interactions with other forcing agents.

- 온실기체 농도의 증가, 인간활동과 관련된 에어로솔 농도의 변화, biomass burning 에어로솔의 변화 그리고 화산분출과 태양활동 변화 이외의 외부 요인들로 오존 농도의 변화와 지표 사용의 변화를 들 수 있는데 이들에 기인하여 크기는 크지 않지만 라니냐 형태의 열대태평양 해수면 온도 변화 경향이 모의되고 있음
- 지표 사용의 변화와 성층권 오존 파괴 물질의 변화만이 각각 고려된 모델실험 결과를 분석하면 지표 사용 변화의 영향을 무시할 수 없지만 성층권 오존 감소가 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향에 보다 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석됨



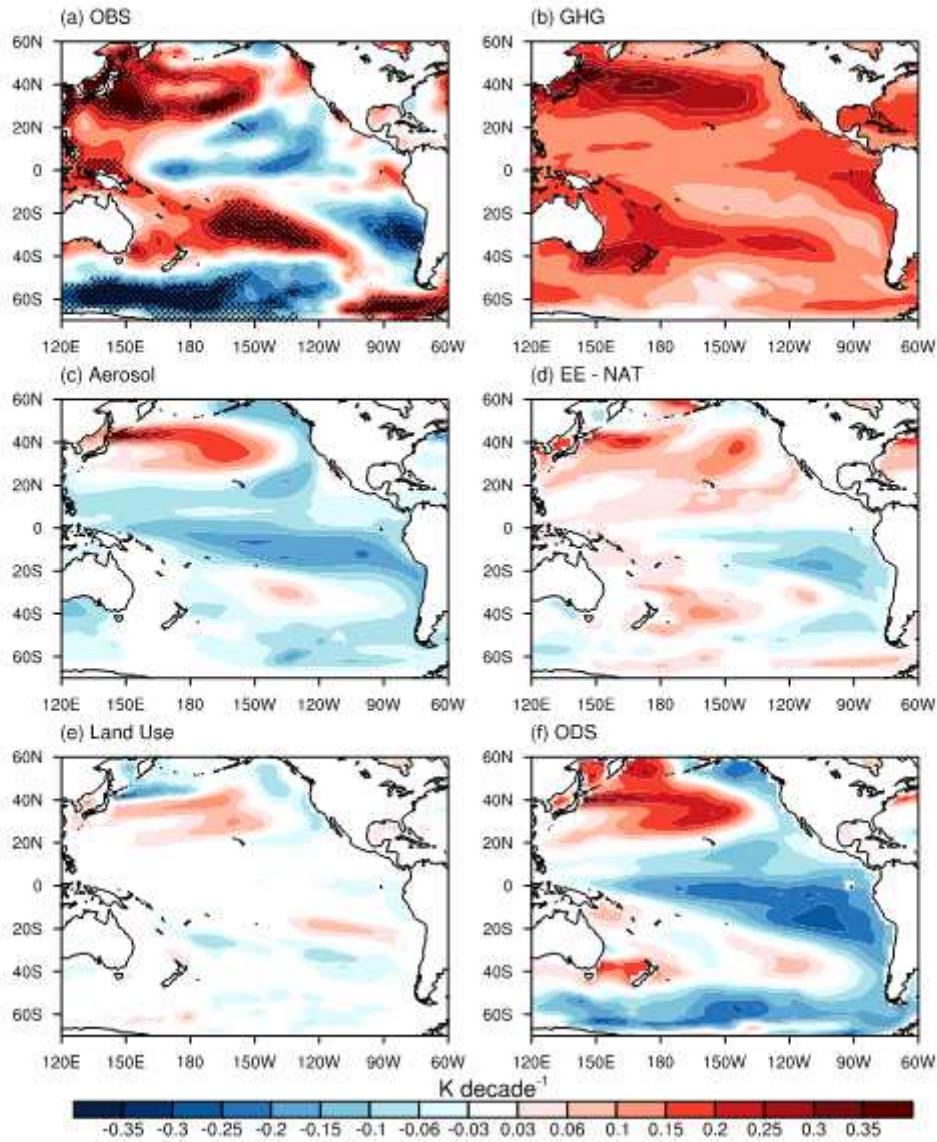


Fig. 34. (a) SST trends over the period 1979-2000 from ERSST5, with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level. (b) Same as in (a), but for model-simulated SST trends resulting from time-varying greenhouse gas concentrations. (c) Same as in (b), but for anthropogenic aerosols. (d) Same as in (b), but for changes in land use and ozone concentrations. (e) Same as in (b), but for land use changes and their interactions with other forcing agents. (f) Same as in (e), but for time-varying ozone depleting substances and resulting stratospheric ozone concentration changes along with their interactions with other forcing agents.

- 대기 중의 온실기체 농도 증가만을 고려한 모델실험의 경우 태평양 워커 순환의 약화 경향과 함께 무역풍의 약화 경향이 모의되어 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향과는 상반된 양상을 보이고 있음
- 인간활동과 관련된 에어로솔 농도 변화만을 고려한 모델실험의 경우 북태평양 지역에서 해면 기압이 상승하는 경향을 보여 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향을 일으킬 수 있는 것으로 분석됨

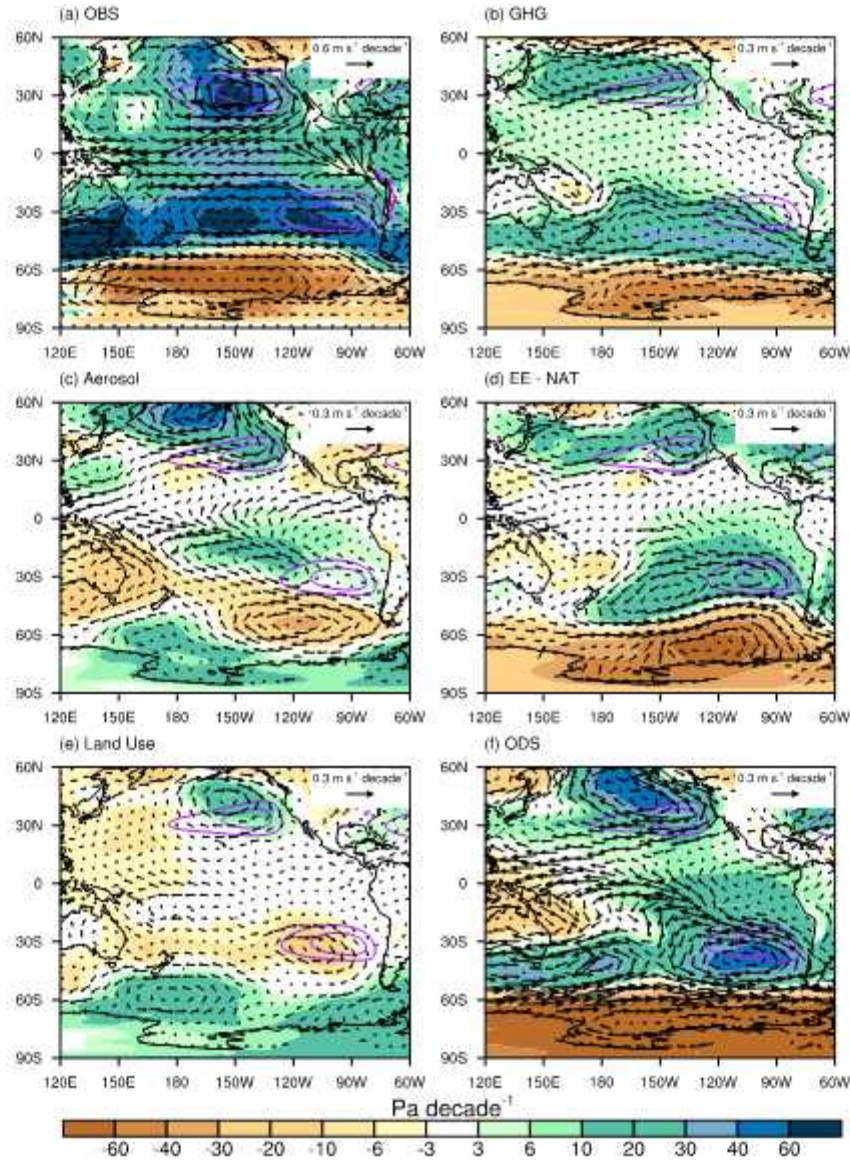


Fig. 35. (a) Sea level pressure (shading) and 850-hPa wind (vectors) trends over the period 1979-2000 from ERA5. Contours in purple represent the climatological high-pressure regions. (b) Same as in (a), but for model-simulated trends resulting from time-varying greenhouse gas concentrations. (c) Same as in (b), but for anthropogenic aerosols. (d) Same as in (b), but for changes in land use and ozone concentrations. (e) Same as in (b), but for land use changes and their interactions with other forcing agents. (f) Same as in (b), but for time-varying ozone depleting substances and resulting stratospheric ozone concentration changes along with their interactions with other forcing agents.

- Biomass burning 에어로솔의 변화만을 고려한 실험에서는 태평양 지역에서 무역풍의 약화 경향이 모의되고 있음
- 그 이외의 외부 요인들 특히 성층권 오존 감소와 관련하여 태평양 지역의 무역풍이 강화 경향을 나타내고 있고 그에 따라 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 유발될 수 있는 것으로 분석됨

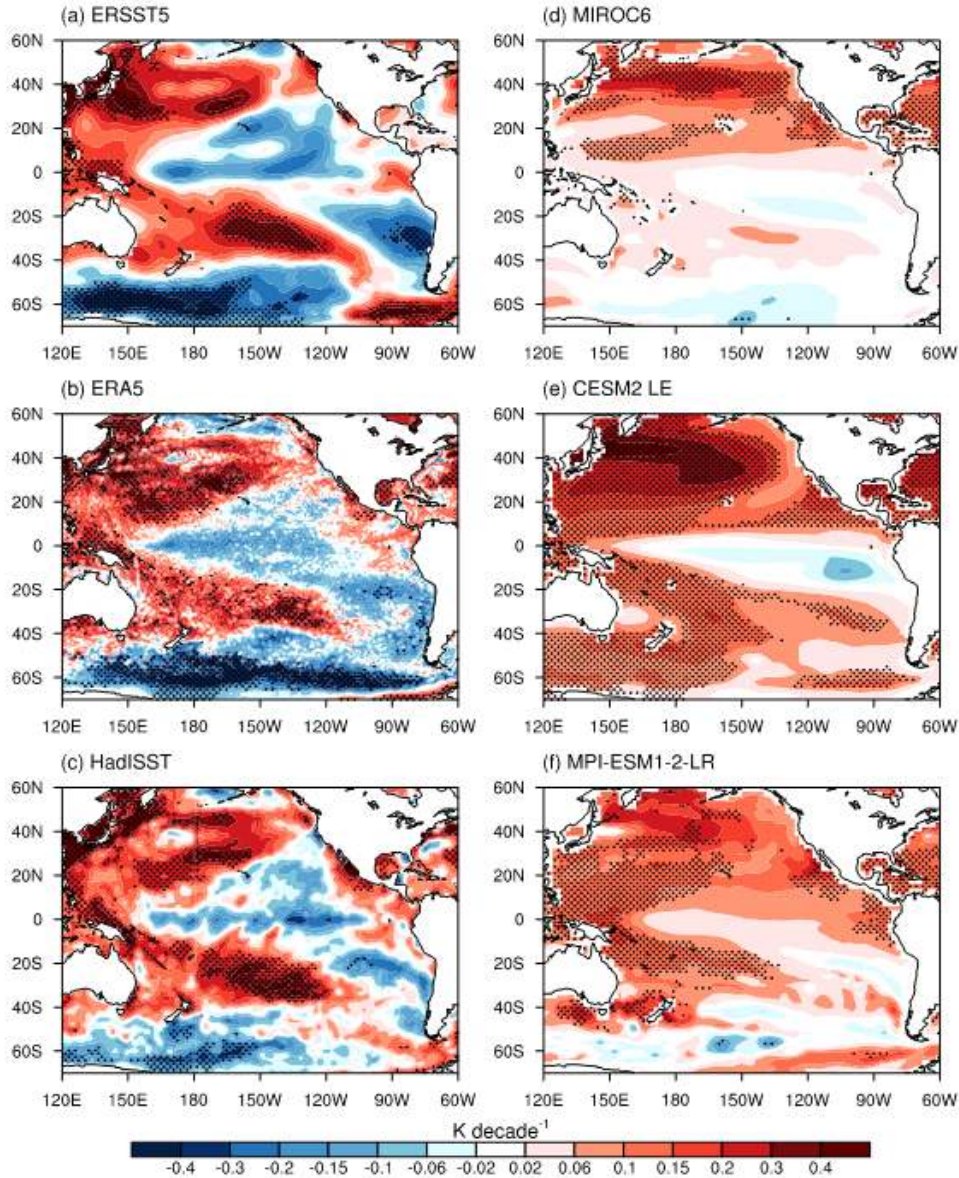


Fig. 36. Observed and model-simulated SST trends over the period of pronounced stratospheric ozone depletion. (a-c) Observed SST trends over the period 1979-2000 from (a) ERSST5, (b) ERA5, and (c) HadISST, with stippling indicating statistical significance of the computed trends at the 95% confidence level. (d-f) Ensemble-mean SST trends over the same period for (d) MIROC6, (e) CESM2 LE, and (f) MPI-ESM1-2-LR, with stippling denoting regions where more than 70% of the ensemble members exhibit the same sign.

- 남극 성층권 오존 농도가 현저하게 감소한 1979-2000년 기간에 (예, Banerjee et al., 2020) 한정하여 유사한 분석을 수행함
- 모의된 해수면 온도 변화 경향이 전반적으로 관측에 유사한 양상을 보이는 것으로 나타남
- 인간활동으로 인한 에어로솔 농도 변화와 관련하여 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 모의되고 있다는 점으로 미루어 에어로솔의 변화도 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향에 관여하고 있는 것으로 사료됨

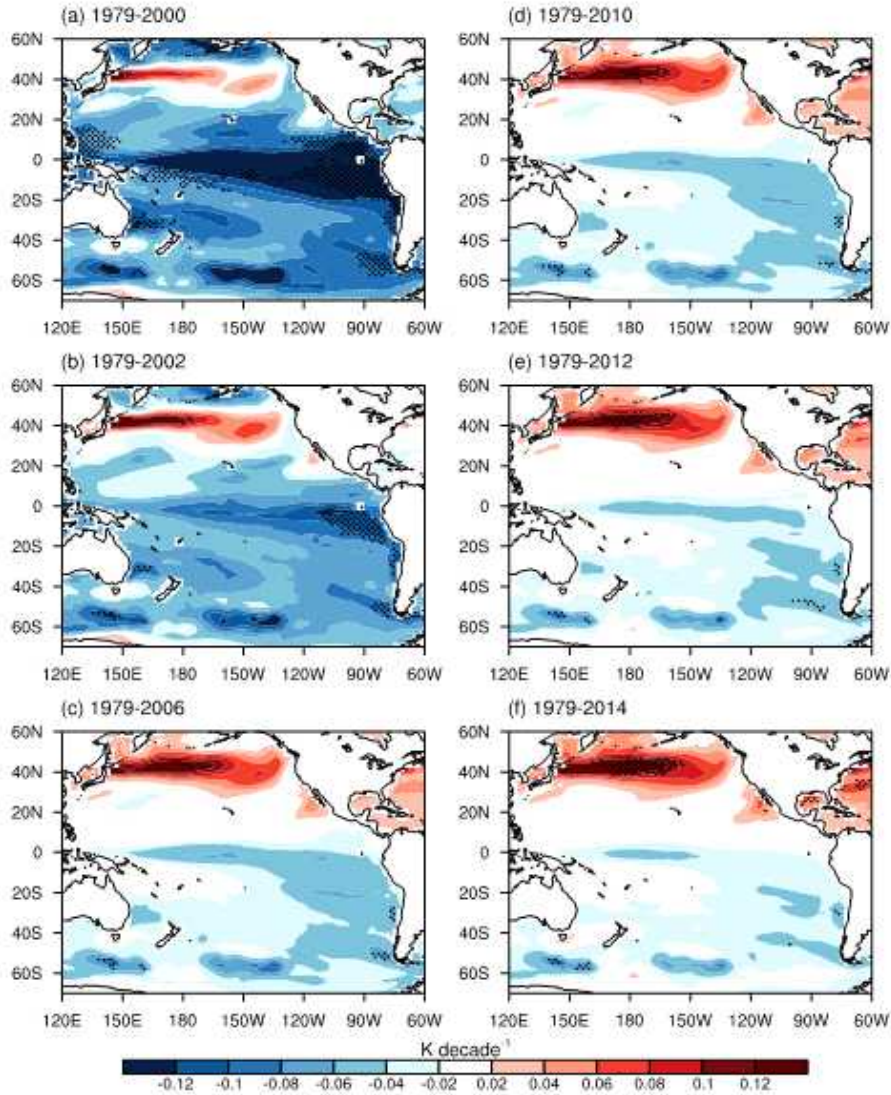


Fig. 37. SST response to non-greenhouse gas forcing. (a) SST trend difference between the historical and hist-GHG experiments over the period 1979-2000, with stippling indicating regions where more than 70% of the corresponding model simulations exhibit the same sign. (b) Same as in (a), but over 1979-2002. (c) Same as in (a), but over 1979-2006. (d) Same as in (a), but over 1979-2010. (e) Same as in (a), but over 1979-2012. (f) Same as in (a), but over 1979-2014.

- 인간활동과 관련된 에어로솔 농도의 변화로 인해 북태평양 지역의 해면 기압이 상승하고 태평양 워커 순환도 강화 경향을 보임
- 성층권 오존 농도의 감소로 인해 남태평양 고기압과 태평양 무역풍이 강화되어 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 일으키고 있는 것으로 분석됨
- 1979-2000년 기간 동안에 성층권 오존 농도가 크게 감소했다는 점을 고려하여 외부 복사강제 인자들의 영향이 모두 포함된 모델실험의 앙상블 평균 해수면 온도 변화 경향을 분석함
- 관측과 비교할 때 열대 동태평양 지역의 해수면 온도 하강 경향이 매우 약하지만 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 모의되고 있음

- 앙상블 평균을 통해 자연변동성의 영향이 상당 부분 제거되었다는 점을 고려할 때 성층권 오존 농도 감소와 더불어 에어로솔 농도의 변화로 인해 라니냐 형태의 해수면 온도 변화 경향이 모의되고 있는 것으로 사료됨
- 온실기체 이외의 요인들의 시간에 따른 변화로 인한 해수면 온도 변화 경향의 차이를 알아보기 위해 모든 외부 요인들의 영향이 포함된 모델실험과 온실기체 농도의 증가만을 고려한 모델실험 사이의 차이를 1979-2000, 1979-2002, 1979-2006, 1979-2010, 1979-2012, 그리고 1979-2014년 기간에 대해 계산함
- 분석기간이 증가함에 따라 해수면 온도 감소 경향의 크기가 줄어드는 분포를 보이고 있는데 이러한 양상은 2000년 이후로 남극 성층권 오존의 감소 경향이 둔화되거나 회복세를 보이고 있는 추세와 관련이 있는 것으로 생각됨
- 성층권 오존 농도의 변화만이 고려된 모델실험으로부터 산출된 해수면 온도 자료를 이용하여 경험직교함수 분석을 수행함
- 첫 번째 EOF 모드가 라니냐 또는 Inter-decadal Pacific Oscillation의 음의 위상과 관련된 공간 분포를 보이는 것으로 분석됨
- 해당 주성분은 관측된 Southern Annular Mode 지수와 유사한 변화를 나타내는 것으로 분석됨
- 온실기체의 증가만을 고려한 모델실험으로부터 산출된 해수면 온도는 1979-2000년 기간에 엘니뇨 형태의 변화 경향을 보이는데 반해 성층권 오존 감소와 에어로솔의 변화 등 온실기체 이외의 외부요인들이 모두 고려된 모델실험에서는 강도는 약하지만 라니냐와 관련된 해수면 온도 변화 경향을 나타내는 것으로 분석됨

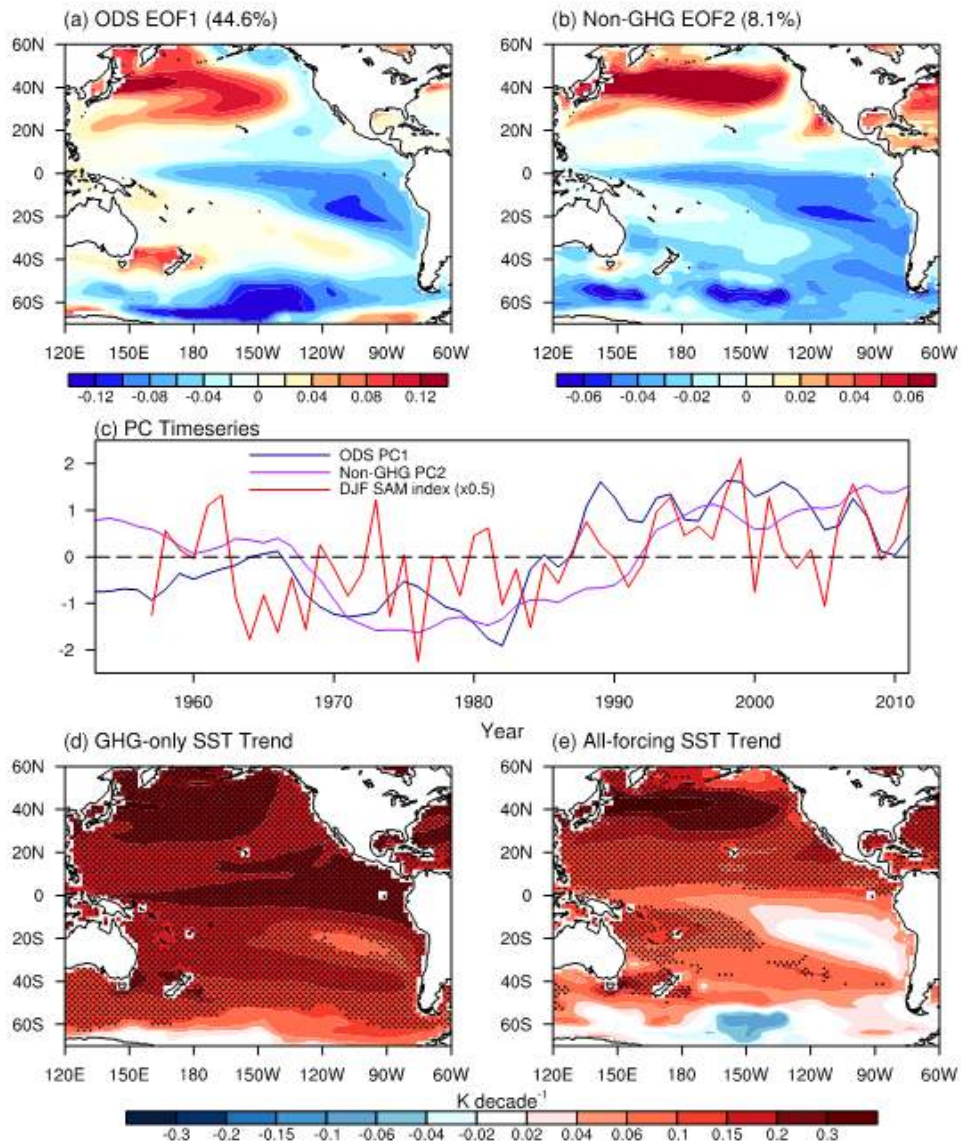


Fig. 38. (a) Spatial pattern of the first EOF mode analyzed in the Pacific over the period 1953-2011 for multi-model multi-ensemble mean, 7-yr running-mean, and annual-mean SST anomaly difference between the historical and hist-1950HC scenarios, which represents the response to ozone depleting substances. (b) Same as in (a), but for the second EOF mode for multi-model multi-ensemble mean, 7-yr running-mean, and annual-mean SST anomaly difference between the historical and hist-GHG scenarios. (c) Time series of the standardized PC values corresponding to the EOF modes shown in (a) and (b), with the red line denoting the observed DJF-mean SAM index (multiplied by 0.5) estimated from station-based sea level pressure measurements from British Antarctic Survey. (d) Model-simulated SST trends over the period 1979-2000 under the hist-GHG scenario, with stippling indicating regions where more than 70% of the corresponding model simulations exhibit the same sign. (e) Same as in (d), but under the historical scenario.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

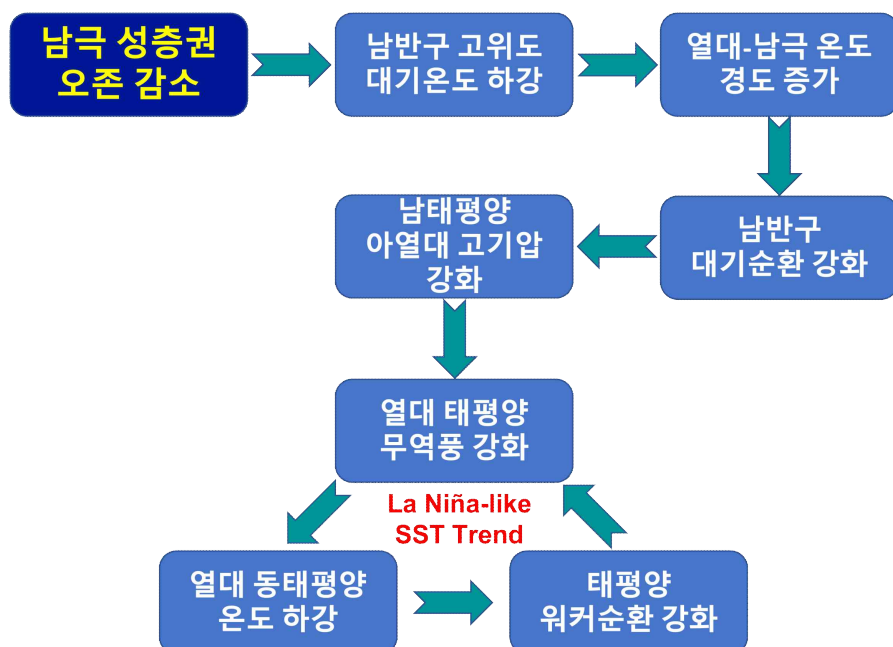
구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위	연구 비중 (%)	달성도 (%)
1차년도 (2023)	남반구 고위도 지역 및 열대 태평양 지역 기후변화 특성 파악	관측자료, 재분석자료 및 위성관측 수집 및 분석	10	100
		위성관측 기반 재분석 자료의 정확성 평가	10	100
	열대 태평양 해수면 온도 변화 경향의 원인 규명	기후모델 자료 수집	10	100
		열대 태평양 해수면 온도 변화에 미치는 자연변동성의 영향 분석	30	100
		외부 요인에 기인하는 남반구 고위도 지역 및 열대 태평양 지역 기후 변화 분석	40	100

○ 정량적 성과

- mrnIF 50 이상의 SCI(E) 논문 3편 투고

- 1) La Niña-like sea surface temperature trend pattern reinforced by human activity
- 2) El Niño-like sea surface temperature change under global warming
- 3) Overstated model-observation discrepancy in tropical tropospheric warming trends over the satellite era

- 남극 성층권 오존 감소가 열대 태평양 해수면 온도 변화에 미치는 역할 모식도



제 2 절 대외기여도

- 대기 중의 온실기체 농도의 증가에 반하는 열대 동태평양 해수면 온도의 하강 경향이 기후 시스템 내의 자연변동성과 밀접히 관련되어 있음을 입증함으로써 열대 태평양 지역 기후변화에 대한 이해 향상에 기여함
- 기후모델에 많은 문제점이 있지만 대기 중의 온실기체 농도의 증가는 전반적으로 엘니뇨 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향을 일으키는데 반해 인간활동으로 인한 남극 성층권 오존 농도의 감소 그리고 에어로솔 농도 변화의 지역간 차이로 인해 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향이 유발될 수 있음을 제시함으로써 인위적인 요인에 기인하는 기후변화의 특성 이해 향상에 기여함
- 남극 성층권 오존 감소 및 에어로솔 변화와 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향 사이의 관련성을 입증함으로써 향후 남극 성층권 오존 농도 회복과 동아시아 지역 에어로솔 배출량 감소로 인해 발생할 수 있는 기후변화의 특성 이해 제고에 기여함



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 향후 연구 방향

- 남반구 고위도 지역과 열대 지역의 기후변화 및 장기 기후변동성 특성 분석
- 남반구 고위도 지역 및 열대 지역 기후변화에 대한 원인 규명을 통해 해당 요인들이 기후 민감도 불확성에 미치는 영향 분석
- 관측과 기후모델 사이의 차이를 일으키는 원인들과 관련하여 기후모델에 표현되어 있는 물리과정 정확성 평가
- 라니냐 형태의 해수면 온도 변화와 관련된 변동성 모드가 뚜렷한 증가 경향을 나타낸 1979-2010년 기간과 남극 성층권 오존 농도가 뚜렷한 감소 경향을 보인 1979-2000년 기간에 중점을 두어 해수면 온도와 대기순환의 변화 양상을 분석했는데 향후 분석기간을 확장하여 연구 결과를 보완할 계획임
- 남극 성층권 오존 감소와 온실기체 증가 등 다른 외부 복사 강제인자들과의 상호작용 분석
- 모델링 및 관측자료에 기반하여 해양물리 및 생지화학 등 다양한 분야와의 융합 연구 가능성 모색

제 2 절 성과 활용 계획

- 남반구 고위도 지역 기후변화의 전지구적 영향 평가를 주요 연구목표로 하는 모델 실험 설계시 기초자료로 활용
- 남반구 고위도 지역과 열대 지역의 기후변화 및 기후변동성에 대한 이해 향상에 활용
- 관측과 기후모델 사이의 차이를 일으키는 원인에 대한 이해 향상을 통해 기후모델 예측 정확성 향상에 활용
- 열대 태평양 해수면 온도 변화에 대한 원인 규명을 통해 미래 기후변화 예측 정확성 향상에 활용
- 인위적인 요인에 기인하는 강제된 변화와 기후시스템 내의 자연변동성과 관련된 변화에 대한 이해 향상을 통해 기후변화 대응책 수립을 위한 기초자료로 활용
- 극지 현장 관측자료와의 연계 및 탐사 분야와의 연동을 통해 남반구 고위도 지역 기후변화 특성 이해 제고에 활용

제 6 장 참고문헌

- Banerjee, A., Fyfe, J. C., Polvani, L. M., Waugh, D. & Chang, K.-L. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol. *Nature* 579, 544-548 (2020).
- Chung, E.-S., Timmermann, A., Soden, B. J., Ha, K.-J., Shi, L. & John, V. O. Reconciling opposing Walker circulation trends in observations and model projections. *Nat. Clim. Change* 9, 405-412 (2019).
- Chung, E.-S. et al. Antarctic sea-ice expansion and Southern Ocean cooling linked to tropical variability. *Nat. Clim. Change* 12, 461-468 (2022).
- Doddridge, E. W. & Marshall, J. Modulation of the seasonal cycle of Antarctic sea ice extent related to the Southern Annular Mode. *Geophys. Res. Lett.* 44, 9761-9768 (2017).
- Dong, Y., Pauling, A. G., Sadai, S. & Armour, K. C. Antarctic ice-sheet meltwater reduces transient warming and climate sensitivity through the sea-surface temperature pattern effect. *Geophys. Res. Lett.* 49, e2022GL101249 (2022).
- Hartmann, D. L. The Antarctic ozone hole and the pattern effect on climate sensitivity. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 119, e2207889119 (2022).
- Kang, S. M., Shin, Y., Kim, H., Xie, S.-P. & Hu, S. Disentangling the mechanisms of equatorial Pacific climate change. *Sci. Adv.* 9, eadf5059 (2023).
- Kim, H., Kang, S. M., Kay, J. E. & Xie, S.-P. Subtropical clouds key to Southern Ocean teleconnections to the tropical Pacific. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 119, e2200514119 (2022).
- Latif, M. et al. Strengthening atmospheric circulation and trade winds slowed tropical Pacific surface warming. *Commun. Earth Environ.* 4, 249 (2023).
- Lee, S. et al. On the future zonal contrasts of equatorial Pacific climate: Perspectives from observations, simulations, and theories. *npj Clim. Atmos. Sci.* 5, 82 (2022).
- Li, X., Xie, S.-P., Gille, S. T. & Yoo, C. Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades. *Nat. Clim. Change* 6, 275-279 (2016).
- Li, X. et al. Tropical teleconnection impacts on Antarctic climate changes. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 680-698 (2021).
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Bitz, C. M., Chung, C. T. Y. & Teng, H. Antarctic sea-ice expansion between 2000 and 2014 driven by tropical Pacific decadal climate variability. *Nat. Geosci.* 9, 590-595 (2016).

- Olonscheck, D., Rugenstein, M. & Marotzke, J. Broad consistency between observed and simulated trends in sea surface temperature patterns. *Geophys. Res. Lett.* 47, e2019GL086773 (2020).
- Polvani, L. M. et al. Interannual SAM modulation of Antarctic sea ice extent does not account for its long-term trends, pointing to a limited role for ozone depletion. *Geophys. Res. Lett.* 48, e2021GL094871 (2021).
- Purich, A. et al. Tropical Pacific SST drivers of recent Antarctic sea ice trends. *J. Clim.* 29, 8931-8948 (2016).
- Schneider, D. P., Deser, C. & Fan, T. Comparing the impacts of tropical SST variability and polar stratospheric ozone loss on the Southern Ocean westerly winds. *J. Clim.* 28, 9350-9372 (2015).
- Seager, R., Cane, M., Henderson, N., Lee, D.-E., Abernathy, R. & Zhang, H. Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. *Nat. Clim. Change* 9, 517-522 (2019).
- Seager, R., Henderson, N. & Cane, M. Persistent discrepancies between observed and modeled trends in the tropical Pacific Ocean. *J. Clim.* 35, 4571-4584 (2022).
- Watanabe, M., Dufresne, J.-L., Kosaka, Y., Mauritsen, T. & Tatebe, H. Enhanced warming constrained by past trends in equatorial Pacific sea surface temperature gradient. *Nat. Clim. Change* 11, 33-37 (2021).

연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	신진연구원 지원과제		
과제명	남극 성층권 오존 감소와 열대 태평양 해수면 온도 변화의 관련성 분석 (계정번호: PE23340)	연구기간	2023.02.01. ~ 2023.12.31.
연구책임자	해양대기연구본부 정의석	연구비(직접비)	30,000천원

과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항

(1) 과제목적

- 남극 성층권 오존 감소와 열대 동태평양 해수면 온도 감소 경향 사이의 관련성 분석을 통한 열대 태평양 해수면 온도 변화의 원인 규명

(2) 최종성과

- 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향의 원인 규명
- 라니냐 형태의 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향과 관련된 대기순환 변화의 특성 제시
- 수십 년 주기의 자연변동성의 역할 제시
- 외부 복사강제 인자의 영향 평가
- 남극 성층권 오존 농도 감소의 영향 평가
- 자연변동성과 관련된 관측과 기후모델 사이의 차이 평가

(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과

- 남극 성층권 오존층 회복 추세에 따른 미래 열대 태평양 해수면 온도 변화 경향 예측에 활용
- 기후모델 모의성능 평가를 위한 기초자료로 활용
- 열대 지역과 남반구 고위도 지역 사이의 상호작용에 대한 이해 향상에 활용
- 극지 현장 관측자료와의 연계 및 탐사 분야와의 연동을 통해 남반구 고위도 지역 기후변화 특성 이해 제고에 활용

(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항

평가의견	반영사항	비고
<ul style="list-style-type: none"> ○ 2000년 또는 2010년까지 데이터를 반영하여 해수온도 변화경향이나 대기 순환 변화경향을 측정할 그래프를 활용하였는데, 그 자체로도 의미있지만, 최근의 2020년까지의 데이터를 가지고 분석하는 게 정부 정책적인 측면에서는 더 실용적이고 유용한 것으로 판단됨. 따라서 그 부분에 추가 의견이나 설명을 조금 더 보강하여 실용적인 성과로 이어지도록 하는 노력을 기울였다는 점을 부각할 필요가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 과제에서는 라니아 형태의 해수면 온도 변화와 관련된 변동성 모드가 뚜렷한 증가 경향을 나타낸 1979-2010년 기간과 남극 성층권 오존 농도가 뚜렷한 감소 경향을 보인 1979-2000년 기간에 중점을 두어 해수면 온도와 대기 순환의 변화 양상을 분석했습니다. 그러나 실용적인 성과를 도출할 수 있도록 향후 분석 기간을 확장하여 연구 결과를 보완하겠습니다. 	<p>연구보고서 p.47 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구성과물(논문투고 또는 게재확정)에 대한 언급 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구 내용과 직·간접적으로 관련되어 있는 논문 3편을 투고한 것을 보고서에 명시했습니다. 	<p>연구보고서 p.45 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지 현장 관측자료와의 연계 및 탐사 분야와의 연동 노력이 보이지 않는다는 부분이 아쉬움 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 향후 극지 현장 관측자료와의 연계 및 탐사 분야와의 연동을 통해 남반구 고위도 지역 기후변화의 특성 이해 제고에 활용할 수 있도록 연구를 계획하겠습니다. 	<p>연구보고서 p.47 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 모델링 및 관측자료 기반 해양물리, 생지화학 등 다양한 분야와 융합 가능성이 고려되면 좋을 듯함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 향후 연구 방향으로 해양물리 및 생지화학 등 다양한 분야와의 융합 연구 가능성을 고려하겠습니다. 	<p>연구보고서 p.47 참조</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○ 보고서에 향후 동일 주제의 연구의 확정성에 대한 계획 포함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 향후 연구 방향에 기술하였습니다. 	<p>연구보고서 p.47 참조</p>

※본 양식은 필요시 작성하여 최종결과보고서에 포함하여 제출

주 의

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

