

남극해 중규모 소용돌이 분류의 세분화 및 탄소순환 특성 규명

Categorizing mesoscale eddies and identifying their
carbon-related characteristics in the Southern Ocean



연세대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소흡수의 변동 및 생태계 반응 관한 연구” 과제의 위탁연구 “남극해 중규모 소용돌이 분류의 세분화 및 탄소순환 특성 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 송 하 준

위탁참여연구원 : 곽 경 민

“ : 조 아 진

“ : 김 동 혁

“ : 선우효준

“ : 김 유 진

“ : 윤 정 희

보고서 초록

위탁연구과제명	남극해 중규모 소용돌이 분류의 세분화 및 탄소순환 특성 규명				
위탁연구책임자	송하준	해당단계 참여연구원수	15	해당단계 연구비	130백만원
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 산학협력단 /연세대학교 대기과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	44
- 남극해 중규모 소용돌이의 3차원 입체 구조 분석을 위해 위성 관측 자료와 고해상도 (1/20°) MITgcm 수치모델 자료를 확보하고, 상호 검증을 통해 관측의 시공간적 한계를 보완한 정밀 분석 기반을 구축함. - 기존 해수면 높이 기반 탐지로는 식별이 불가능한 비전형적 소용돌이를 규명하기 위해, 해수면 밀도 정보를 결합한 새로운 4가지 유형 (전형적 반시계/시계, Mode-water, Thinny) 분류 체계를 고안함. - 분석 결과, 비전형적 유형인 Mode-water 소용돌이는 상층 등밀도선 역전이라는 독특한 구조를 가지며, 겨울철 강력한 연직 혼합을 유발하여 심층의 철을 표층으로 공급함으로써 남극해 생물 생산성을 비약적으로 증대시키는 핵심 요인임을 입증함. - 반면, 드레이크 해협 통과 후 해역에서는 연직 혼합보다는 배경장의 철 농도 분포에 따른 포획 기작이 우세함을 밝힘. - 본 연구는 새로운 분류 체계를 도입하여 남극해의 물리-생지화학적 상호작용을 정밀하게 규명함으로써, 향후 기후 변화에 따른 탄소 순환 및 해양 생태계 반응 예측의 정확도를 제고하는 데 기여함.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	중규모 소용돌이, 소용돌이 분류법, 합성장 분석, 연직혼합, 철 제한 생물 생산성			
	영 어	Mesoscale eddy, Eddy classification method, Composite analysis, Vertical mixing, Iron-limited primary productivity			

요 약 문

I. 제 목

남극해 중규모 소용돌이 분류의 세분화 및 탄소순환 특성 규명

II. 연구개발의 목적 및 필요성

남극해는 전 지구적 탄소 순환과 생태계 역학에 중요한 역할을 하며, 중규모 소용돌이는 이러한 물질 수송과 혼합을 주도하는 핵심 물리 현상이다. 최근 서남극해 온난화 등 해양 환경이 급변함에 따라 소용돌이의 역할을 정확히 파악하는 것이 중요해지고 있으나, 기존의 해수면 높이 기반 분류법은 소용돌이의 복잡한 내부 연직 구조와 그에 따른 생지화학적 기작을 설명하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구는 남극해 중규모 소용돌이의 분류 체계를 세분화하고, 이를 통해 각 유형별 물리적 특성과 탄소 순환과 관련한 생지화학적 특성 (철 공급 및 생산성)을 정밀하게 규명하는 것을 최종 목표로 하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

가. 남극해 중규모 소용돌이의 탐지를 위한 관측 자료 확보

1. 남극해 중규모 소용돌이 자료 확보
2. 남극해 표층 수온 및 염분 인공위성 자료 확보
3. 남극해 연직 수온 및 염분 ARGO 자료 확보 및 수치모델 자료 활용

나. 남극해 중규모 소용돌이 탐지 및 분류

1. 남극해 중규모 소용돌이 분류법 개발
2. 기존의 분류법과 새로운 분류법의 비교 및 평가

다. 남극해 중규모 소용돌이 종류에 따른 탄소순환 특성 규명

1. 중규모 소용돌이 유형별 탄소 순환 관련 변수의 합성장 분석
2. 탄소 순환 관련 변수의 편차 분석 및 물리적 과정과 탄소 순환 연관성 이해

IV. 연구개발결과

가. 남극해 중규모 소용돌이의 탐지를 위한 관측 자료 확보

남극해 중규모 소용돌이의 정밀 탐지를 위해 위성 고도계 기반의 해수면 높이 자료를 활용하여 소용돌이의 위치, 진폭, 반경 등 물리적 특성을 추출하였으며, 고해상도 위성 수온 및 염분 자료를 추가로 확보하여 상호 정합성을 검증하였다. 그러나 표층 정보에 국한된 위성 관측과 시공간적 해상도가 부족한 현장 관측 자료만으로는 소용돌이의 복잡한 내부 구조를 파악하는 데 한계가 있었다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 남극해의 해양 순환과 소용돌이 활동을 정밀하게 모의할 수 있는 고해상도 ($1/20^\circ$) 해양 수치모델을 도입하였다. 산출된 고해상도 3차원 자료는 실제 관측된 남극순환류 및 서안경계류 지역의 소용돌이 발생 빈도와 물리적 특성을 성공적으로 재현하였으며, 이를 통해 관측 자료의 공백을 메우고 소용돌이 내부의 입체적 연직 구조와 생지화학적 변동성을 정밀하게 분석할 수 있는 신뢰도 높은 기초 자료를 구축하였다.

나. 남극해 중규모 소용돌이 탐지 및 분류

기존의 해수면 높이 편차만을 이용한 단순 2분류법은 소용돌이 내부의 밀도 역전 구조를 반영하지 못하는 한계가 있었다. 이를 개선하기 위해 해수면 높이와 해수면 밀도 편차 정보를 결합한 새로운 분류 알고리즘을 개발하여, 소용돌이를 전형적 반시계방향 (AE), Mode-Water (MWE), 전형적 시계방향 (CE), Thinny (CTE)의 네 가지 유형으로 세분화하였다. 특히 상층 등밀도선의 역전 구조를 가지는 MWE는 여름철 성층화가 강화됨에 따라 생성에 필요한 에너지 장벽이 낮아져 발생 빈도가 급증하는 특징을 보였으며, 이는 기존 분류법으로는 설명하기 어려웠던 소용돌이 내부의 역학적 구조와 영양염 공급 기작을 해석하는 중요한 토대가 되었다.

다. 남극해 중규모 소용돌이 종류에 따른 탄소순환 특성 규명

새로운 분류법을 적용하여 각 유형에 따른 물리적 구조와 생지화학적 반응의 상관관계를 분석한 결과, 해역에 따라 탄소 순환을 이끄는 핵심 기작이 상이함을 규명하였다. 드레이크 해협 통과 전 해역에서는 강력한 수직 혼합이 심층의 철을 표층으로 공급하여 생물 생산성을 주도하였으며, 이는 주로 MWE의 역학적 특성에 기인한 것으로 나타났다. 반면, 통과 후 해역에서는 수직 혼합보다는 주변 배경장의 철 농도 분포에 따라 영양염을 가두어 이동하는 포획 기작이 핵심 요인으로 작용하였다. 이는 소용돌이가 해역별 특성에 따라 연직 혼합과 수평 포획이라는 서로 다른 방식으로 남극해 탄소 순환에 기여함을 입체적으로 입증한 결과이다. 종합적으로, 본 연구는 남극해의 생지화학적 변동성이 소용돌이 자체의 유형과 배경장의 환경적 특성이 결합된 복합적인 과정임을 규명함으로써, 향후 기후 변화에 따른 해양 탄소 흡수 능력 평가의 정밀도를 높이는 데 기여하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 정립된 새로운 분류법은 위성 자료만으로도 해양 내부 구조를 추정할 수 있게 하여, 고비용과 시공간적 제약이 따르는 현장 관측의 한계를 효과적으로 보완하였다. 학술적으로는 소용돌이가 해양 내부 생지화학적 환경에 미치는 영향을 정밀하게 규명하였으며, 경제적으로는 남극해 해양 생태계 변화 예측을 통한 어업 효율성 증대와 탄소 흡수 능력 평가의 신뢰도 향상에 기여할 것으로 기대된다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Categorizing mesoscale eddies and identifying their carbon-related characteristics in the Southern Ocean

II. Purpose and Necessity of R&D

The Southern Ocean plays a pivotal role in the global carbon cycle and ecosystem dynamics, with mesoscale eddies acting as dominant physical drivers for material transport and mixing. As the marine environment undergoes rapid changes, such as the warming of the West Antarctic, understanding the precise role of these eddies has become increasingly critical. However, existing classification methods based solely on Sea Surface Height (SSH) have limitations in resolving the complex vertical structures of eddies and the resulting biogeochemical mechanisms. Therefore, the final objective of this study was to refine the classification system for Antarctic mesoscale eddies and precisely elucidate the physical characteristics and biogeochemical mechanisms (iron supply and productivity) associated with each eddy type.

III. Contents and Extent of R&D

A. Acquisition of Observational Data for Antarctic Eddy Detection

1. Acquisition of Antarctic mesoscale eddy datasets
2. Acquisition of satellite Sea Surface Temperature (SST) and Salinity (SSS) data
3. Acquisition of vertical temperature/salinity data (Argo) and utilization of numerical model data

B. Detection and Classification of Antarctic Mesoscale Eddies

1. Development of Antarctic mesoscale eddy classification methods
 2. Comparison and evaluation of existing and new classification methods
- C. Investigation of Biogeochemical Characteristics by Eddy Type
1. Composite analysis of biogeochemical variables (e.g., nutrients, Chl-a) by eddy type
 2. Analysis of biogeochemical anomalies and understanding the linkage between physical processes and biological productivity

IV. R&D Results

A. Acquisition of Observational Data for Antarctic Eddy Detection

To precisely characterize Antarctic mesoscale eddies, physical parameters including location, amplitude, and radius were extracted using satellite altimetry-based SSH data. High-resolution satellite SST and SSS data were also used to verify consistency. However, surface-confined satellite observations and spatiotemporally sparse field data limited the understanding of internal structures. To address this, a high-resolution ($1/20^\circ$) ocean numerical model (MITgcm) was employed. The model successfully reproduced eddy activities in the Antarctic Circumpolar Current and western boundary current regions, establishing a reliable foundation for analyzing 3D vertical structures and biogeochemical variability to complement observational gaps.

B. Detection and Classification of Antarctic Mesoscale Eddies

The conventional binary classification based on SSH anomalies fails to reflect density inversion structures. A new algorithm combining SSH and sea surface density anomalies was developed, classifying eddies into four types: Anticyclonic Eddy (AE), Mode-Water Eddy (MWE), Cyclonic Eddy (CE), and Thinny Eddy (CTE). Notably, MWEs, characterized by upper-layer isopycnal inversion, showed a sharp increase in frequency during summer due to enhanced stratification lowering the energy barrier for generation. This provides a crucial basis for interpreting internal dynamics and nutrient supply mechanisms previously unexplained by conventional methods.

C. Investigation of Biogeochemical Characteristics by Eddy Type

Analysis using the new classification revealed that core biogeochemical

mechanisms differ by region. In the region upstream of the Drake Passage, strong vertical mixing—driven primarily by MWEs—supplied deep iron to the surface, enhancing biological productivity. Conversely, in the region downstream of the Drake Passage, the trapping mechanism, which transports nutrients based on background iron distribution, was the dominant factor rather than vertical mixing. This study multidimensionally demonstrated that eddies contribute to the carbon cycle via different modes (vertical mixing vs. horizontal trapping) depending on regional characteristics. Consequently, by elucidating that biogeochemical variability is a complex process combining eddy type and background environmental conditions, this study contributes to enhancing the precision of evaluating ocean carbon uptake under climate change.

V. Application Plans of R&D Results

The new classification system established in this study allows for the estimation of internal ocean structures using only satellite data, effectively complementing the limitations of high-cost and spatiotemporally restricted field observations. Academically, it precisely elucidates the impact of eddies on the internal biogeochemical environment. Economically, it is expected to contribute to fishery efficiency through ecosystem prediction and improve the reliability of evaluating the Southern Ocean's carbon uptake capacity.

목 차

제 1 장 서론	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황	12
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	13
1절 남극해 중규모 소용돌이의 탐지를 위한 관측자료 확보	13
2절 남극해 중규모 소용돌이 탐지 및 분류	18
3절 남극해 중규모 소용돌이 종류에 따른 탄소순환 특성 규명	28
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	38
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	39
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	40
제 7 장 참고문헌	41

제 1 장 서론

중규모 소용돌이 (mesoscale eddy, 이하 에디)는 전 지구 해양에 걸쳐 광범위하게 나타나는 수십에서 수백 킬로미터 규모의 현상으로, 해양의 물리적 구조뿐 아니라 화학 및 생물학적 환경을 형성하는 핵심 요소로 작용한다 (Chelton et al., 2011a, b). 특히 대륙을 따라 동서 방향의 흐름이 우세한 남극해에서 에디는 열, 염분, 영양염 등 다양한 성분을 남북 방향으로 수송하는 데 크게 기여하며, 그 결과 대규모 해양 순환과 생태계 역학에 중요한 영향을 미친다 (Flagg et al., 1997; Dong et al., 2014; Frenger et al., 2015; Huang et al., 2010; Zhang et al., 2014; Patel et al., 2020). 남극순환류를 따라 풍부하게 분포하는 에디는 연직 혼합과 물질 재분배를 유발함으로써 해양 생산성과 생지화학 과정의 주요 조절 요인으로 작용한다 (Frenger et al., 2015; Kahru et al., 2007; Hausmann et al., 2017; Song et al., 2018; Frenger et al., 2018).

남극해에서 에디가 생지화학적 특성에 미치는 영향은 지역과 계절에 따라 상이하다. 에디의 회전에 의해 유도되는 수평 이류는 엽록소 편차 (anomaly)를 효과적으로 형성하며, 남극순환류 북쪽 해역에서 관찰되는 엽록소 변동성의 주요 원인으로 제시된 바 있다 (Frenger et al., 2018). 반면 남극순환류 인근 해역에서는 에디에 의해 강화되는 비정상적 연직 혼합이 생물 생산성을 조절하는 핵심 기작으로 작동한다 (Frenger et al., 2018; Song et al., 2018). 남반구 겨울철에는 일조량이 부족하여 생산성이 제한되는데, 이 시기에 고기압성 에디 내부에서 강화된 혼합은 영양염을 상층으로 공급할 수 있는 반면, 식물성 플랑크톤을 더 깊은 층으로 혼합시켜 광 제한을 강화함으로써 생산성을 오히려 억제할 수도 있다. 반대로 여름철에는 심층의 영양염이 상층으로 공급되어 생산성을 증진시키는 방향으로 작용할 수 있다 (Song et al., 2018). 이러한 상반된 반응은 에디가 남대양 생지화학 시스템에서 시공간적으로 복합적인 역할을 수행함을 시사한다.

전통적으로 에디는 회전 방향과 해수면 높이의 편차를 기반으로 전형적인 반시계방향 (고기압성) 에디와 전형적인 시계방향 (저기압성) 에디로 분류되어 왔다. 일반적으로 반시계방향 에디는 따뜻한 수괴를, 시계방향 에디는 차가운 수괴를 포획하는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 연구들은 반시계방향 에디 내부에서 오히려 해수면 수온 편차가, 시계방향 에디 내부에서 양의 해수면 수온 편차가 나타나는 등 전형적 기대와 다른 사례들을 보고하고 있다 (Yasuda et al., 2000; Everett et al., 2012; Ji et al., 2017; Liu et al., 2020, 2021; Ni et al., 2021; Dong et al., 2025). 또한 표층 밀도 편차가 전형적인 에디와 반대 부호를 갖는 사례도 관측되었다 (McGillicuddy et al., 2007; McGillicuddy Jr, 2015). 이러한 비전형적 에디는 연직 혼합과 영양염 재분배, 나아가 생물 생산성에 전형적인 에디와는 다른 방식으로 영향을 미칠 수 있다 (Nishino et al., 2018). 예를 들어, 북대서양 아열대 환류에서 관측된 비전형적 반시계방향 에디는 계절 수온약층이 상향 변위되는 동시에 영구 수온약층이 하강하는 구조를 보였고, 그 결과 표층에서 전형적 에디와 반대의 밀도 편차가 형성되었다 (McGillicuddy et al., 2007). 이 에디에서 관측된 강한 심층 엽록소 층은 하층 영양염이 연직 이류 및 난류 확산을 통해 공급된 결과로 해석되었다 (Ledwell et al., 2008).

그러나 남극해에서 이러한 비전형적 에디의 분포와 생지화학적 영향에 대한 종합적인 평가는 아직 미흡한 실정이다. 가장 큰 난관은 명확한 정의와 탐지 기법의 부재에 있다. 생지화학적 반응은 연직 밀도 구조 및 이에 수반되는 연직 물리과정과 밀접하게 연결되어

있으므로, 비전형적 에디를 식별하기 위해서는 신뢰할 수 있는 표층 밀도 편차의 추정이 필수적이다. 중위도 해역에서는 해수면 수온에 기반한 접근이 유용할 수 있으나, 표층 밀도에서 염분의 기여가 큰 남극해와 같은 고위도 해역에서는 그 적용에 한계가 있다.

이에 본 연구는 남극해에서 표층 밀도 편차를 기준으로 식별된 비전형적 중규모 에디와 그에 따른 생지화학적 반응을 체계적으로 분석하였다. 이를 위해 위성 관측 자료와 에디 분해능을 갖춘 물리·생지화학 결합 해양 수치모델을 이용하여 에디를 탐지하였다. 이후 회전 방향과 표층 밀도 편차의 조합에 따라 에디를 전형적인 유형과 비전형적인 유형으로 세분화하고, 에디 중심 좌표계에서의 합성장 분석을 수행하였다. 이를 통해 각 유형의 계절별 연직 구조, 영양염 분포, 생물 생산성 변화를 비교 분석하여, 비전형적 에디가 남극순환류 및 드레이크 해협 하류 지역의 생물 생산성에 미치는 영향을 규명하였다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

중규모 에디는 해양 내부의 물질 수송과 생지화학적 순환에 중요한 역할을 하며, 전 세계적으로 해수면 높이 편차, Okubo-Weiss 파라미터, 해류장 등을 활용한 탐지 및 분석 기법이 활발히 개발되어 왔다. 대다수의 기존 연구들은 위성 기반 해수면 높이 데이터를 활용하여 에디를 시계방향과 반시계방향의 두 가지 극성으로 분류하고, 이들이 영양분 분포 및 생물 생산성에 미치는 영향을 분석해 왔다. 그러나 최근 Yasuda et al. (2000)을 비롯한 여러 선행연구는 동일한 극성을 가지더라도 일부 소용돌이가 기존 이론과 다른 비전형적 연직 밀도 구조를 가질 수 있음을 보고하였다 (Everett et al., 2012; Ji et al., 2017; Liu et al., 2020, 2021; Ni et al., 2021).

이러한 물리적 특성은 남극해의 지역적 환경과 결합하여 더욱 복잡한 양상을 보인다. Frenger et al. (2015)과 Hausmann et al. (2017)은 남극해에서 혼합층 깊이와 소용돌이 활동이 지역적으로 큰 편차를 보이며, 드레이크 해협을 기점으로 물리·생지화학적 특성이 뚜렷하게 달라짐을 제시하였다. 생지화학적 측면에서는 Kahru et al. (2007)와 Huang et al. (2022)이 관측을 통해 남극해 생물 생산성이 철 (Fe)에 의해 제한됨을 밝혔으며, 이에 따라 소용돌이에 의한 철의 연직 수송 가능성이 주요 연구 주제로 다뤄지고 있다.

수치모델링 분야에서는 국외를 중심으로 MITgcm과 같은 고해상도 해양순환모델의 활용이 활발하며, 생지화학 모듈과 결합한 모델을 통해 소용돌이와 영양분·탄소 순환 간의 상호작용을 분석하는 연구가 확대되고 있다. 그러나 기존 연구 대부분은 소용돌이를 단순 극성 기준으로만 분류하여 분석함에 따라, 상층 밀도 구조의 차이에 따른 연직 혼합 및 영양분 수송 특성의 다양성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 지적되고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

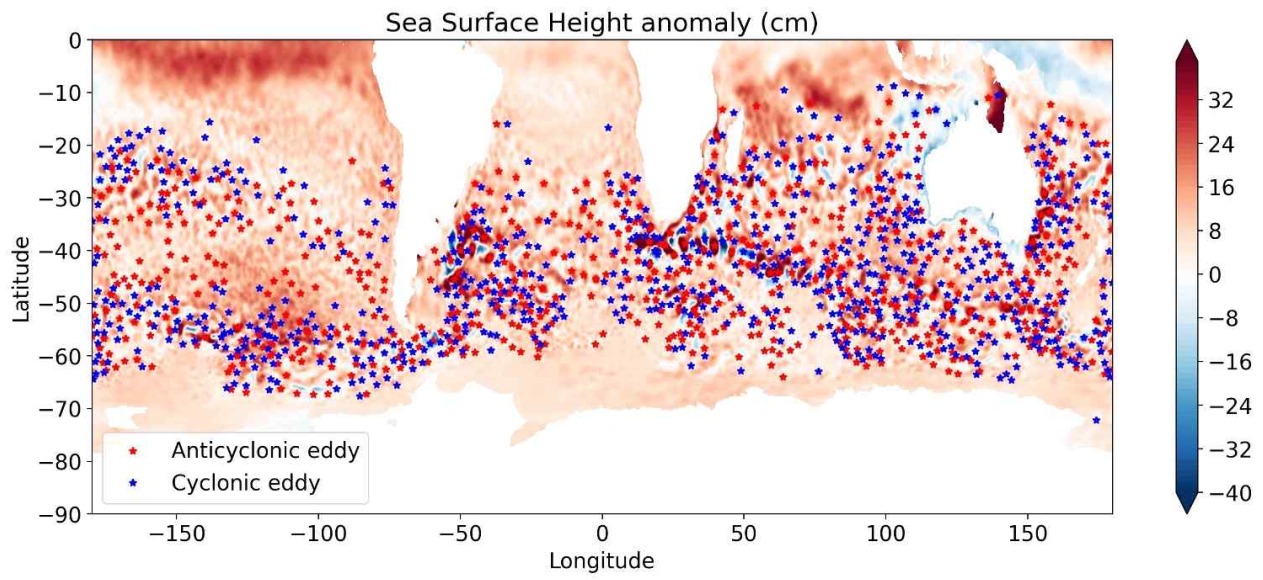
1절 남극해 중규모 소용돌이의 탐지를 위한 관측자료 확보

1. 남극해 중규모 소용돌이 자료 확보

남극해 전역에서 발생하는 중규모 에디를 탐지하고 그 지리적 분포 특성을 분석하기 위해 위성 관측 자료를 확보하였다. 본 연구에서는 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)에서 제공하는 중규모 소용돌이 위성 관측 자료인 META 3.2 DT (Mesoscale Eddy Trajectory Atlas)를 활용하여, 2015년부터 2019년까지의 에디 위치, 진폭, 반경 정보를 체계적으로 추출하였다. 추출된 데이터의 공간적 정합성을 검증하기 위해 위성 고도계 기반의 해수면 높이 편차(Sea Surface Height Anomaly, SSHA) 자료와 대조 분석을 수행하였다.

특히 그림 1은 2016년 1월 1일의 관측 자료를 대상으로 SSHA 분포와 탐지된 소용돌이 중심 위치를 중첩하여 검증한 결과이다. 분석 결과, SSHA가 양(+) 또는 음(-)의 극값을 보이는 지점이 탐지된 에디의 중심 좌표와 물리적으로 정확히 일치함을 확인하였다. 지리적 분포 측면에서는 남극순환류 (Antarctic Circumpolar Current, ACC) 유역과 브라질-말비나스 해류가 교차하는 서안경계류 등 역학적 불안정성이 높은 해역에서 소용돌이 발생 빈도가 집중되는 특성을 보였으며, 이는 기존 해양 순환 이론과 부합하는 결과이다.

극지연구소



[그림 1] 해수면 높이 편차와 중규모 소용돌이 위치

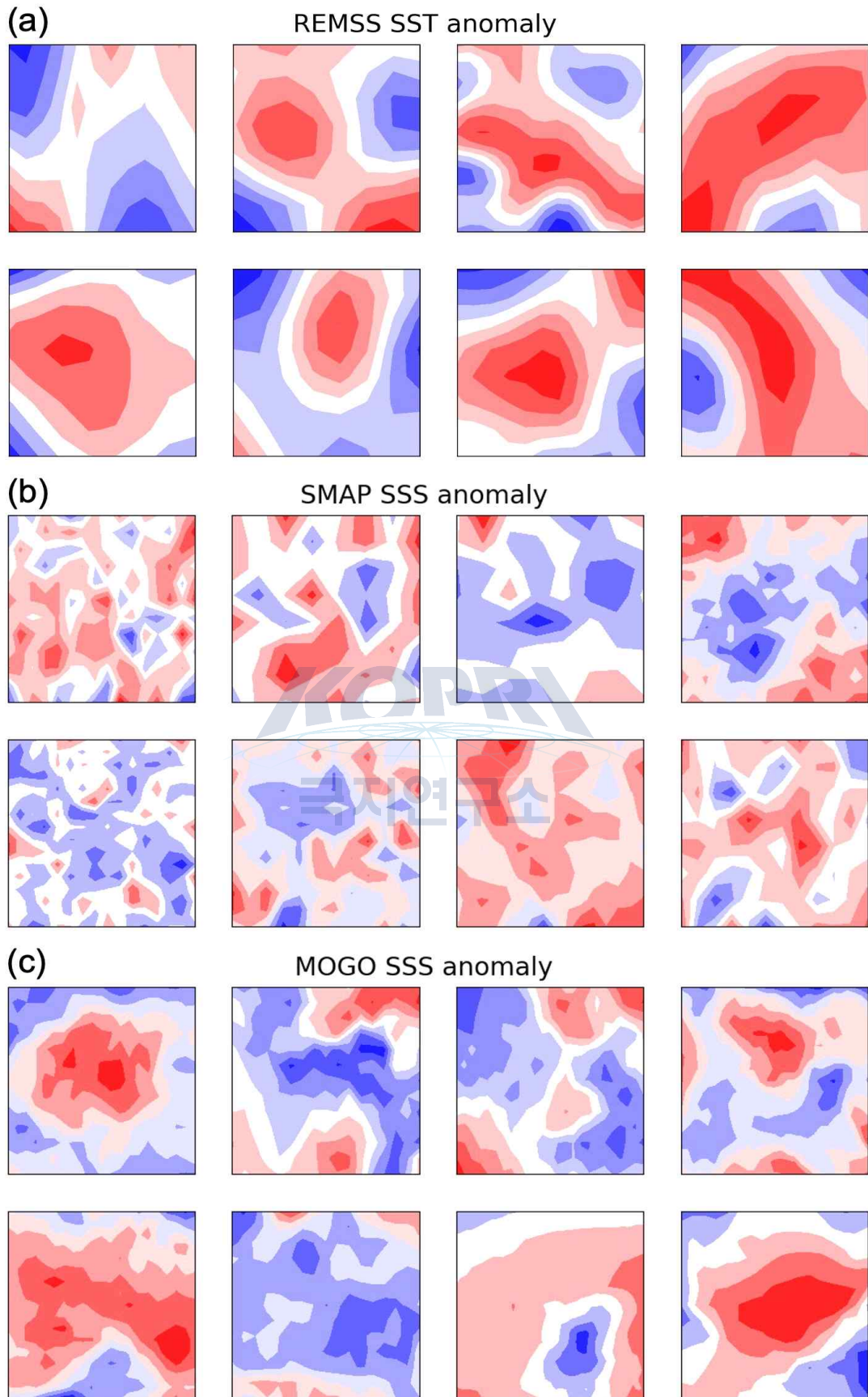


2. 남극해 표층 수온 및 염분 인공위성 자료 확보

소용돌이의 표층 열역학적 구조 분석을 위해 고해상도 위성 기반의 표층 수온 (Sea Surface Temperature, SST) 및 표층 염분 (Sea Surface Salinity, SSS) 자료를 수집하였다. 표층 수온은 Remote Sensing Systems (REMSS)의 0.25도 해상도 Multi-sensor L4 Foundation SST 자료를 활용하였으며, 이는 마이크로파와 적외선 센서 데이터를 합성하여 구름 피복에 의한 데이터 결측 문제를 보완한 것이다. 표층 염분은 초기 분석 단계에서 NASA의 Soil Moisture Active Passive (SMAP) 자료를 검토하였다.

확보된 자료의 신뢰성을 검증하기 위해, 에디 발생 해역에서 나타나는 물리량 편차 특성을 기반으로 에디 위치 정보와 위성 데이터 간의 공간적 정합성을 분석하였다 (그림 2). 그 결과, 위치에 따른 미세한 오차는 존재하나 대다수 에디 발생 지점에서 뚜렷한 수온 편차가 관측되어 SST 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 반면, 염분 데이터의 경우 SMAP 자료만으로는 에디 위치에서의 편차가 명확히 드러나지 않는 한계가 확인되었다. 이는 극지방 위성 관측이 갖는 고유한 불확실성에 기인한 것으로 판단된다. 이에 대한 보완책으로 CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)의 Multi Observation Global Ocean Sea Surface Salinity (MOGO) 자료를 대체 자료로 확보하였으며, 재검증 결과 에디 중심부의 염분 편차를 효과적으로 포착할 수 있음을 확인하였다.





[그림 2] 중규모 소용돌이 중심부의 위치에 해당하는 구역의 물리 변수 편차

3. 남극해 연직 수온 및 염분 ARGO 자료 확보 및 수치모델 자료 활용

중규모 에디의 역학적 구조에 의한 연직 혼합의 변화가 미치는 영향을 파악하고자 초기에 ARGO 플로트 등 직접 관측 자료의 활용을 검토하였다. 그러나 ARGO는 해류를 따라 이동하는 라그랑지안 (Lagrangian) 특성을 가지므로, 특정 에디의 내부와 외부를 연속적으로 비교하거나 독립적인 3차원 구조를 파악하는 데 시공간적 제약이 따름을 확인하였다. 이에 따라 관측 자료의 한계를 극복하고 에디의 상세한 연직 수온·염분 구조를 분석하기 위해, MITgcm (MIT General Circulation Model) 해양 수치모델을 이용한 고해상도 모델링을 수행하는 것으로 연구 방법론을 정립하였다.

중규모 해양 현상과 물리·생지화학적 특성을 동시에 모의하기 위해, 단순 생지화학 모듈이 결합된 MITgcm의 1/20°도 고해상도 버전을 사용하였다 (Dutkiewicz et al., 2005; Parekh et al., 2006; Verdy et al., 2007). 모델 영역은 남위 75도에서 35도, 경도 140도 구간을 포함하며, 이는 남동태평양에서 드레이크 해협을 거쳐 남서대서양에 이르는 남극순환류의 핵심 구간을 포괄한다. 연직 격자는 표층 부근에서 10m의 고해상도를 갖도록 설계된 50개 층으로 구성하였으며, 이는 Song et al. (2019) 및 Kwack et al. (2021)의 선행 연구와 동일한 설정이다. 모델의 대기 강제력으로는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF; Simmons et al., 2007) 재분석 자료의 6시간 간격 바람과 부력 플럭스를 적용하였다. 수직 혼합 과정은 Large et al. (1994)의 K-프로파일 매개화 (K-Profile Parameterization, KPP) 방식을 채택하였으며, 표면 강제력, 부력, 그리고 수직 속도 전단 (vertical shear)에 의해 결정되는 벌크 리처드슨 수를 기반으로 경계층 깊이를 산정하였다. 본 연구에서는 리처드슨 수가 임계값인 0.3583에 도달하는 수심을 혼합층 깊이 (Mixed Layer Depth, MLD)로 정의하였다. 생지화학 경계 조건은 Song et al. (2016)의 전 지구 모델의 월평균 결과를 활용하였다. 해당 설정을 바탕으로 모델의 초기 안정화를 위해 2분 간격의 시간 스텝으로 초기 3년 간 스핀업 (spin-up)을 선행하였으며, 이 과정에서 남극해의 해양 상태와 약 100km 규모의 중규모 에디 활동이 관측 수준으로 성공적으로 재현됨을 검증하였다. 이후 모델이 안정화된 상태에서 추가로 3년 간 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 연구의 분석에는 이 후반 3년 간의 자료만을 활용하였다.

2절 남극해 중규모 소용돌이 탐지 및 분류

1. 남극해 중규모 소용돌이 분류법 개발

본 연구에서는 중규모 에디 탐지를 위해 가장 보편적으로 사용되는 해수면 높이 편차 기반의 탐지 기법을 채택하였다. 구체적으로는 해수면 높이장이 폐곡선을 형성하고, 그 크기가 로스비 변형 반경에 상응하며 원형에 가까운 형태를 갖는 경우를 에디로 정의하여 MITgcm 모델 결과에 적용하였다. 탐지 결과, 드레이크 해협 서쪽의 남극순환류 해역과 동쪽의 서안경계류(브라질 해류 및 말비나스 해류 접점) 해역에서 에디 발생 빈도가 높게 나타났으며, 이는 Frenger et al. (2015)의 관측 결과와 일치한다.

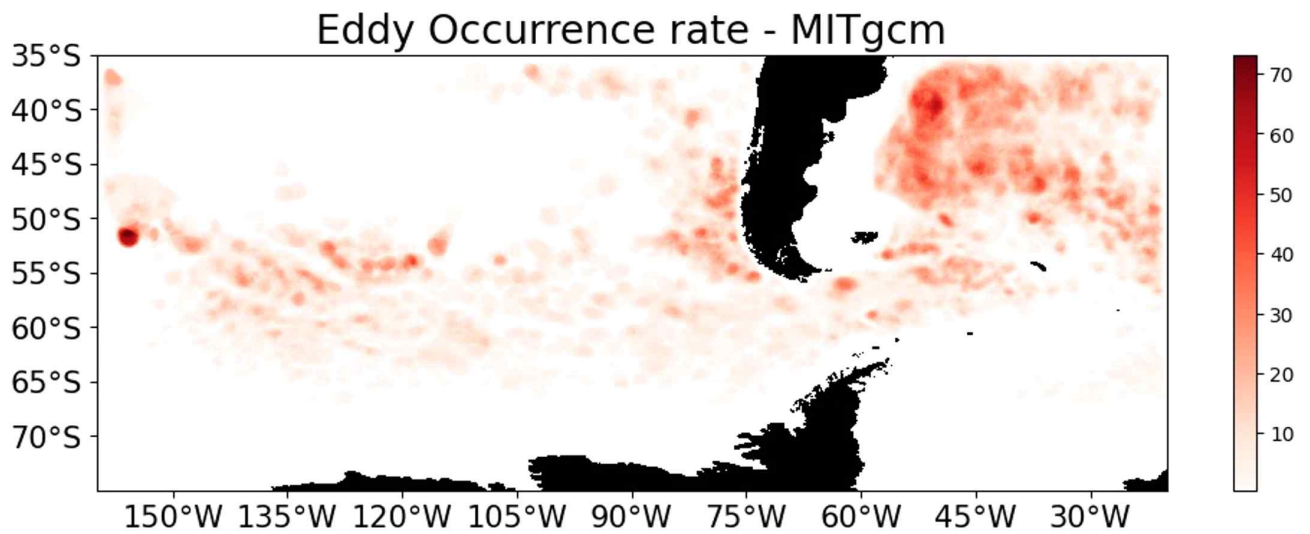
분석 영역의 설정은 남극해의 지역적 특성을 고려하여 수행되었다. Hausmann et al. (2017)에 따르면 남극해는 혼합층 깊이의 특성에 따라 드레이크 해협 서쪽, 동쪽, 그리고 남아메리카 대륙 연안으로 구분된다. 본 연구에서는 에디 발생 빈도는 높으나 얕은 수심으로 인해 혼합층이 깊게 발달하지 못하여 심층과의 상호작용이 미미한 남아메리카 대륙 동쪽 연안 지역을 분석에서 제외하였다. 대신 강한 해류와 깊은 혼합층이 특징인 남극순환류 주변 해역에 집중하였으며, 드레이크 해협을 기점으로 혼합층 및 에디 특성이 변화할 것이라는 가정하에 분석 영역을 ‘드레이크 해협 통과 전 (Before Drake Passage, BDP)’과 ‘통과 후 (After Drake Passage, ADP)’ 구역으로 세분화하였다.

기존 연구들은 동일한 극성의 에디 내에서도 연직 구조가 상이한 비전형적 사례가 존재함을 지적해 왔다 (Yasuda et al., 2000; Everett et al., 2012; Ji et al., 2017; Liu et al., 2020, 2021; Ni et al., 2021; Dong et al., 2025). 이러한 비전형적 에디는 상층 등밀도선의 역전 현상이 주요 특징으로 나타난다. 본 연구에서는 이를 식별하기 위해 기존의 단순 극성 분류를 넘어, 해수면 높이와 해수면 밀도 편차를 통합한 4분류 알고리즘을 개발하였다. 구체적으로는 해수면 높이 편차 (회전 방향)와 밀도 편차의 부호 조합에 따라 에디를 각각 전형적인 반시계방향 에디 (Anticyclonic Eddy; AE), Mode-Water 에디 (Mode-Water Eddy; MWE), 전형적인 시계방향 에디 (Cyclonic Eddy; CE), 그리고 Thinny 에디 (Cyclonic Thinny Eddy; CTE)로 명명하였다 (그림 4). 이들 4가지 유형에 대한 상세한 분류 기준과 물리적 특징은 표 1과 같다.

[표 1] 남극해 중규모 에디의 4가지 유형 분류 기준 및 특징

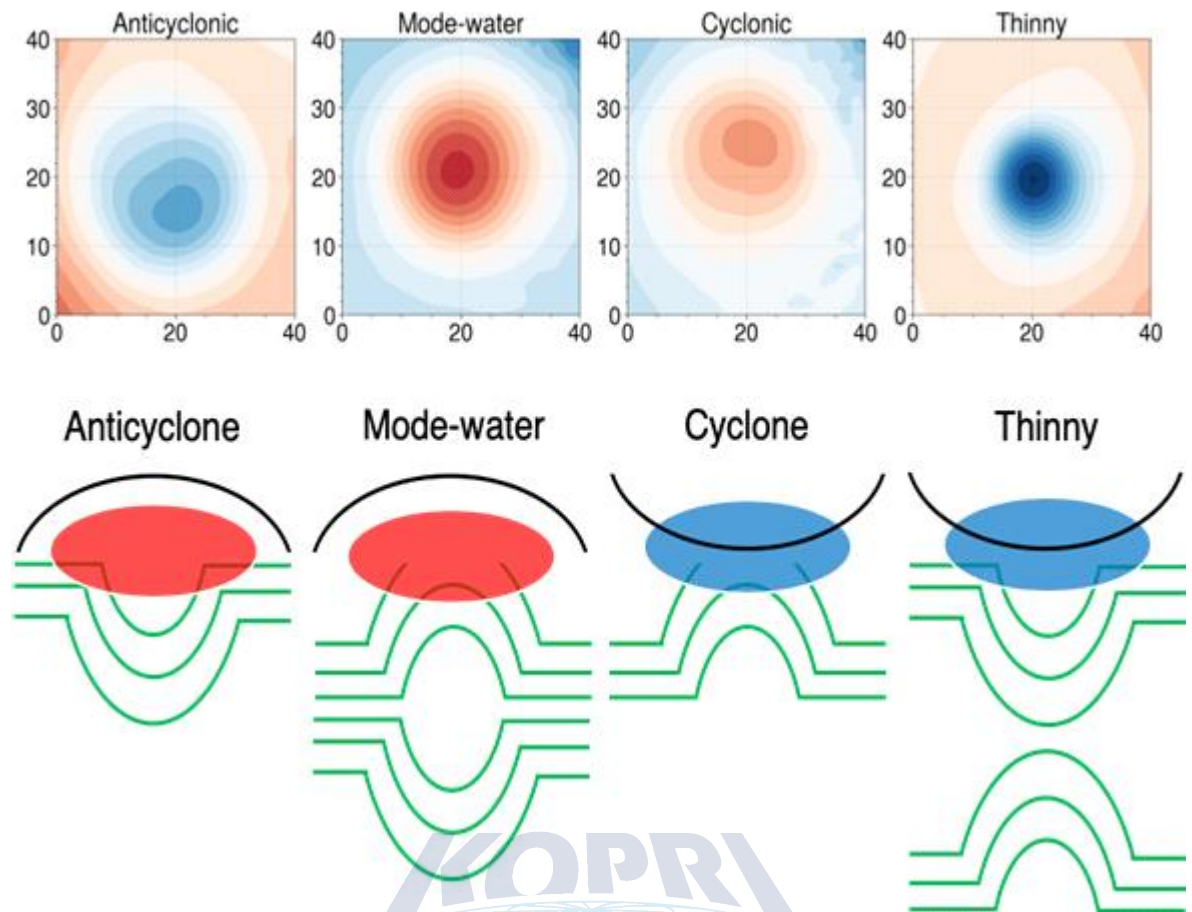
유형	해수면 높이 편차 (회전 방향)	해수면 밀도 편차
전형적인 반시계방향 에디 (Anticyclonic Eddy, AE)	양 (+) (반시계, 고기압성)	음 (-)
Mode-water 에디 (Mode-Water Eddy, MWE)	양 (+) (반시계, 고기압성)	양 (+)
전형적인 시계방향 에디 (Cyclonic Eddy, CE)	음 (-) (시계, 저기압성)	양 (+)
Thinny 에디 (Cyclonic Thinny Eddy, CTE)	음 (-) (시계, 저기압성)	음 (-)





[그림 3] MITgcm 해양수치모델에서 나타나는 중규모 에디의 발생 빈도 (%)





[그림 4] 에디의 극성과 해수면 밀도 편차를 기반으로 분류한 4가지 중규모 에디
해수면 밀도 편차 합성장 (상단)과 연직 등밀도선 구조 모식도 (하단)

2. 기존의 분류법과 새로운 분류법의 비교 및 평가

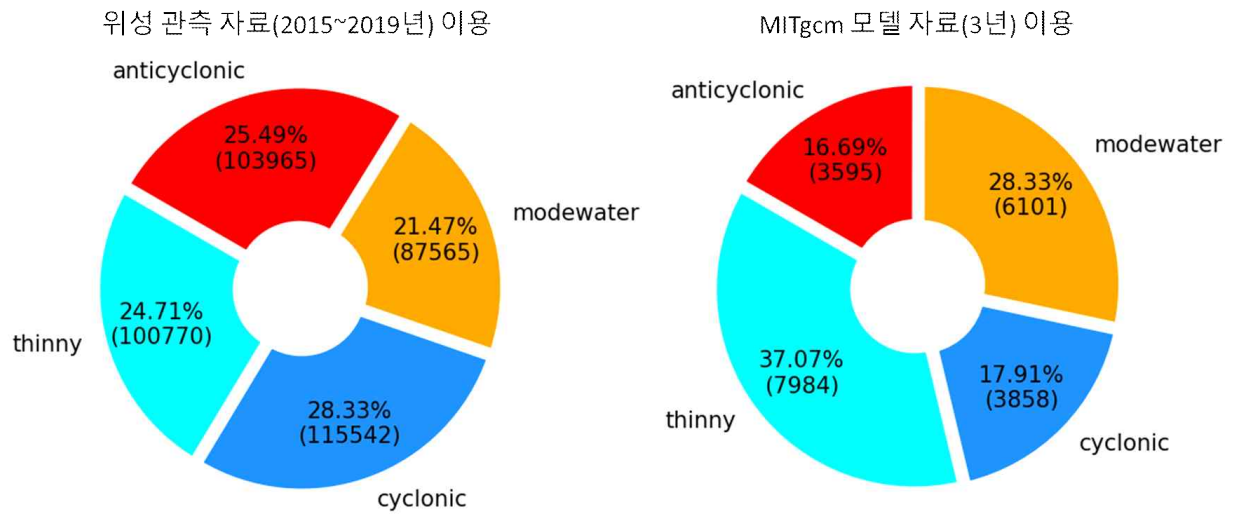
가. 에디 유형별 분포 특성

제안된 새로운 분류법을 관측 및 모델 자료에 적용하여 남극해 에디의 유형별 비율을 산출하였다. 분석 결과, 그림 5와 같이 기존의 해수면 높이 기반 2분류 체계로는 식별이 불가능했던 비전형적 유형인 MWE와 CTE가 전체 에디에서 상당한 비중을 차지함을 확인하였다.

구체적인 분포를 살펴보면, 2015년부터 2019년까지의 위성 관측 자료에서는 전형적 유형인 AE (25.49 %)와 CE (28.33 %)가 절반 이상을 차지하는 가운데, 비전형적 유형인 MWE (21.47 %)와 CTE (24.71 %) 역시 약 46 %라는 높은 비중으로 존재함이 나타났다. 이러한 분포 경향은 MITgcm 고해상도 수치모델 자료에서 더욱 두드러지게 나타나는데, 모델 결과 내 MWE와 CTE의 비중은 각각 28.33 %와 37.07 %에 달해 비전형 유형의 합계가 전체의 약 65 %를 차지하는 것으로 분석되었다.

특히 위성 관측 대비 수치모델에서 비전형적 유형의 비율이 현저히 높게 나타나는 것은, 위성 관측의 해상도 한계로 포착하기 어려운 해양 표층의 미세한 등밀도선 역전 구조와 밀도 편차를 $1/20^\circ$ 고해상도 수치모델이 상대적으로 더 정밀하게 모의하여 비전형적 에디의 물리적 특성을 성공적으로 재현해냈기 때문으로 해석된다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 4분류 체계는 남극해 소용돌이의 실질적인 물리적 다양성을 반영하는데 있어 기존 방식보다 탁월한 성능을 보임을 입증하였다.





[그림 5] 위성 관측 자료와 MITgcm 모델에서의 에디 유형별 비율 및 개수 비교



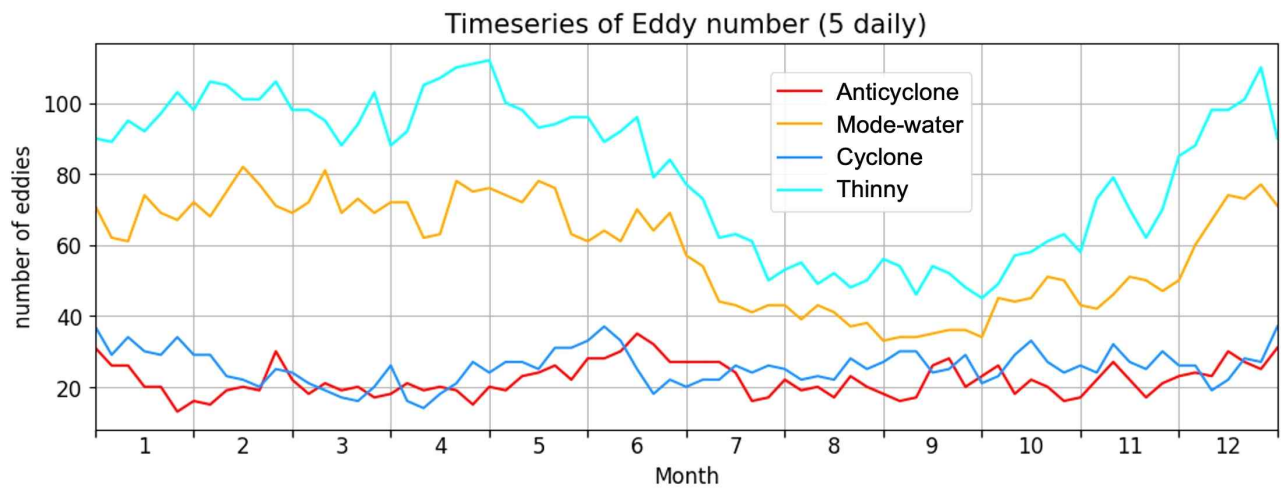
나. 에디 발생의 계절적 변동성

다음으로 에디의 계절적 특성을 이해하기 위해 각 유형별 발생 개수의 시계열 변동성을 분석하였다. 분석 결과, 남극해 중규모 소용돌이는 전반적으로 일사량이 풍부한 여름철 (12~2월)에 증가하고 겨울철 (6~8월)에 감소하는 공통적인 계절 주기를 보였다. 그러나 유형별로 세분화하여 살펴보면, 이러한 계절적 변동폭은 비전형적 유형인 MWE와 CTE에서 더욱 뚜렷하게 나타난다 (그림 6).

구체적으로 살펴보면, 전형적인 에디인 AE와 CE는 계절에 따른 개수 변화폭이 상대적으로 작고 완만한 변동을 보이는 특징이 있다. 반면, 비전형적 에디인 MWE와 CTE는 겨울철 대비 여름철에 발생 개수가 약 2배 가까이 급격히 증가하는 양상을 보인다. 이러한 비전형적 유형의 압도적인 변동성은 남극해 전체 소용돌이 개수의 계절적 패턴을 결정짓는 핵심적인 요소로 작용한다.

이러한 현상은 여름철 해수면 상층의 성층화(stratification) 강화와 밀접한 관련이 있다. 일사량 증가로 성층화가 강화되면 등밀도선이 평탄해지는데, 이는 기존의 전형적 구조를 유지하려는 성질보다 이를 역전시켜 비전형적 구조를 형성하는 데 필요한 물리적 에너지 장벽을 낮춰주는 역할을 하기 때문이다. 결과적으로 여름철의 물리적 환경은 비전형적 에디가 생성되기에 유리한 조건을 조성하며, 이에 따라 해당 시기에 비전형적 에디의 수가 폭발적으로 증가하게 된다.





[그림 6] 에디 유형별 발생 개수의 월별 변화 및 계절적 변동성



다. 에디 유형별 물리적 특성 비교

마지막으로 4가지 유형에 대한 평균 진폭과 반경을 산출하여 표층 물리적 특성을 정량적으로 비교하였다 (표 2). 분석 결과, 유형 간 표층 물리 변수에서는 통계적으로 유의미한 차이나 일관된 경향성이 발견되지 않았다.

표 2에 제시된 바와 같이, 각 유형의 평균 진폭은 AE (9.73 cm), MWE (10.04 cm), CE (9.66 cm), CTE (9.54 cm)로 모두 10 cm 내외의 매우 유사한 범위를 보였다. 평균 반경 또한 AE (56.42 km), MWE (62.47 km), CE (50.52 km), CTE (53.84 km) 사이로 나타나, 특정 유형에 따른 외형적 크기의 차별성은 관찰되지 않았다.

이러한 정량적 수치의 유사성은 비전형적 에디와 전형적 에디를 해수면 높이나 회전의 강도와 같은 표층 정보만으로는 명확히 구분할 수 없음을 시사한다. 즉, 소용돌이의 실질적인 역학적 차이는 해수면 상층에서 관측되는 외형적 특성이 아닌, 내부 등밀도선의 역전과 같은 연직 구조의 변화에 기인함을 본 분석 결과가 강력히 뒷받침하고 있다. 이는 남극해 에디의 역할을 정확히 이해하기 위해 표층 분석을 넘어선 본 연구의 4분류 체계가 필수적임을 입증하는 근거가 된다.



[표 2] 에디 유형별 평균 진폭 및 반경

구분	AE	MWE	CE	CTE
진폭 (cm)	9.73	10.04	9.66	9.54
반경 (km)	56.42	62.47	50.52	53.84



3절 남극해 중규모 소용돌이 종류에 따른 탄소순환 특성 규명

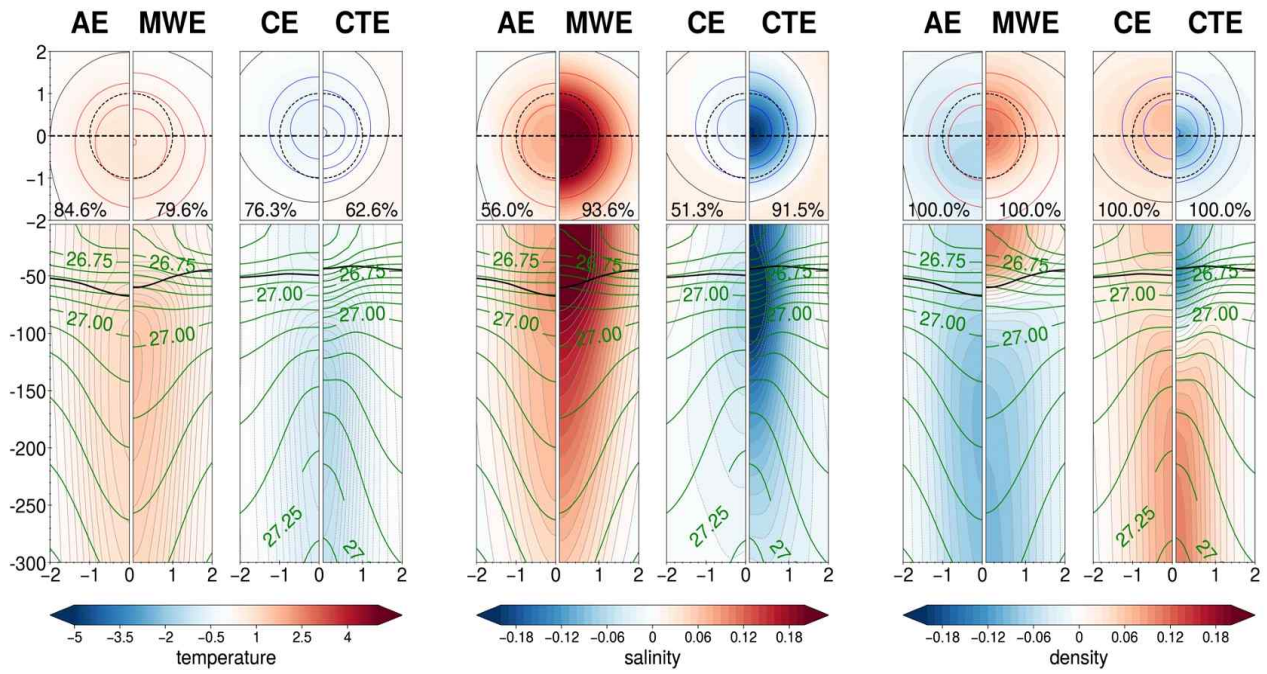
1. 중규모 소용돌이 유형별 탄소 순환 관련 변수의 합성장 분석

해수면에서 확인 가능한 물리 변수들뿐만 아니라, 새롭게 규명된 비전형적 소용돌이 (MWE, CTE)는 상층 혼합 양상의 변화에 따른 연직 구조의 변형이 핵심적인 특징이다. 따라서 본 연구에서는 에디 중심 합성장 분석 (Eddy-centric Composite Analysis)을 통해 각 유형별 물리·생지화학적 입체 구조를 분석하였다.

가. 물리적 변수 (온도, 염분, 밀도)의 연직 구조

그림 7은 에디의 원형 대칭성을 이용하여 전형적 유형 (AE, CE)과 비전형적 유형 (MWE, CTE)을 좌우로 배치해 비교한 결과이다. 각 그림의 상단은 해수면에서의 편차를, 하단은 연직 분포를 나타낸다. 여기서 하단에 표기된 퍼센트 (%)는 해당 유형의 에디 중 그림에 나타난 평균적인 편차 부호와 동일한 부호를 갖는 에디의 비율을 의미한다. 예를 들어 AE의 96.2 %는 전체 AE 중 중심부에서 양의 온도 편차를 갖는 비율이 96.2 %임을 뜻하며, 이는 분류의 신뢰도를 뒷받침한다. 분석 결과, 온도와 염분 편차의 경우 기존 유형과 새로운 유형 간에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으나, 해수면 밀도 편차에서는 기존 유형과 정반대의 부호가 관측되었다. 특히 연직 단면 분석을 통해 이러한 밀도 역전 현상이 상층에서만 유지되고 하층으로 갈수록 소멸하는 특징을 확인하였으며, 이는 비전형적 소용돌이가 표층 혼합 및 성층화 과정과 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다.

극지연구소



[그림 7] 에디 유형별 물리 변수 (온도, 염분, 밀도)에 대한 해수면 편차 합성장 (상단) 및 연직 단면도(하단).



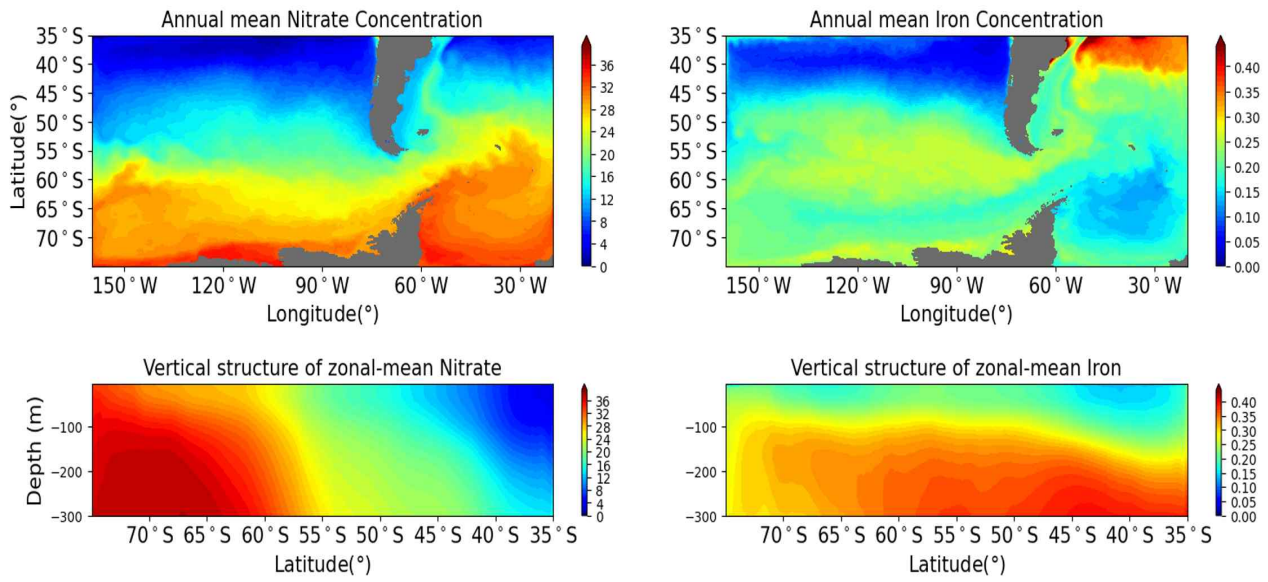
나. 생지화학적 변수 (질산염, 철)의 배경 농도 분포

남극해의 생물 생산성을 결정짓는 주요 영양염인 질산염과 철의 배경 농도 분포를 분석하였다 (그림 8). 일반적으로 전 지구 해양의 일차 생산력은 질산염 (Nitrate)에 의해 조절되지만, 남극해는 대량 영양염이 풍부함에도 불구하고 철의 결핍으로 인해 생산성이 억제되는 대표적인 고영양염-저엽록소 (High-Nutrient, Low-Chlorophyll, HNLC) 해역이다. 따라서 이 지역에서는 질산염보다 철이 생물 생산을 결정짓는 핵심적인 제한 영양염 (Limiting Nutrient)으로 작용한다.

본 연구에 사용된 MITgcm 모델은 질산염 농도를 직접 산출하지 않으므로, 질산염 농도는 Redfield ratio ($N:P = 16:1$)를 이용하여 인산염 농도로부터 환산하였다. 해수면 농도 분포를 보면, 질산염은 경도와 무관하게 북쪽으로 갈수록 농도가 감소하는 경향을 보인다. 이에 따라 에디 포획 (eddy-trapping) 발생 시 북쪽의 저농도 해수를 가두는 AE와 MWE는 내부에 음의 편차를, CE와 CTE는 양의 편차를 보인다.

반면, 철의 분포는 지역적 특성이 뚜렷하다. 드레이크 해협 통과 전 (BDP) 지역에서는 질산염과 유사하게 북쪽으로 갈수록 농도가 감소하며, 남극순환류 ($45\sim 60^{\circ}S$) 지역에서는 겨울철 강한 심층 혼합으로 인해 상대적으로 높은 농도를 보인다. 그러나 드레이크 해협 통과 후 (ADP) 지역에서는 철의 수평 농도 분포가 정반대 경향을 보인다. 즉, 철의 관점에서 BDP 지역의 AE는 음의 편차를 보이지만, ADP 지역의 AE는 양의 편차를 보이게 된다.

한편, 선행 연구에서는 남극반도를 따라 높은 생물 생산성을 가진 CE와 고농도의 철 분포를 보고한 바 있다 (Kahru et al., 2007; Huang et al., 2022). 그러나 본 연구의 모델 결과에서는 남극반도 연안의 국지적인 고농도 철 공급이 충분히 모의되지 않았으며, 이에 따라 관측과 달리 높은 생산성을 가진 CE나 CTE가 탐지되지 않았다. 이는 모델의 한계점으로 고려되나, 전체적인 남극해의 경향성을 분석하는 데에는 무리가 없는 것으로 판단된다. 이처럼 지역에 따라 상이하게 나타나는 영양염의 수평·연직 분포 특성은, 소용돌이에 의한 물질 수송과 생물 생산성 변화 기작이 해역별로 다르게 작용하는 원인이 되며, 이에 대한 상세한 분석은 다음 절에서 다루기로 한다.



[그림 8] 모델 영역 내 주요 영양염 (질산염, 철)의 해수면 농도 분포 (상단) 및 위도별 연직 평균 단면도(하단).



2. 탄소 순환 관련 변수의 편차 분석 및 물리적 과정과 탄소 순환 연관성 이해

탄소 순환의 핵심인 생물 생산성은 제한 영양염의 수직 공급에 크게 의존한다. 앞서 그림 8의 하단 연직 단면도를 보면, 질산염은 남북 방향의 수평 경도는 뚜렷하나 연직으로는 비교적 잘 혼합되어 있어 연직 기울기보다 수평 경도가 더 우세한 특징을 보인다. 반면, 철은 수평 경도보다 연직 경도가 훨씬 강하며, 표층에서는 고갈되고 심층에 풍부하게 층이 분리된 구조를 갖는다.

따라서 소용돌이에 의해 연직 운동이 발생할 때, 이미 잘 섞여 있는 질산염은 농도 변화가 크지 않으나, 철의 경우 하층의 고농도 철이 상층으로 얼마나 공급되는지가 생물 생산성을 결정짓는 핵심 기작이 된다. 또한, 남북 방향 연직 분포는 지역적 차이가 적으나, 철의 해수면 분포는 드레이크 해협을 기점으로 완전히 다른 양상을 보여 에디 포획 효과가 상이하게 나타난다. 이러한 배경장의 차이를 고려하여 본 연구에서는 분석 영역을 BDP와 ADP 지역으로 구분하였다.

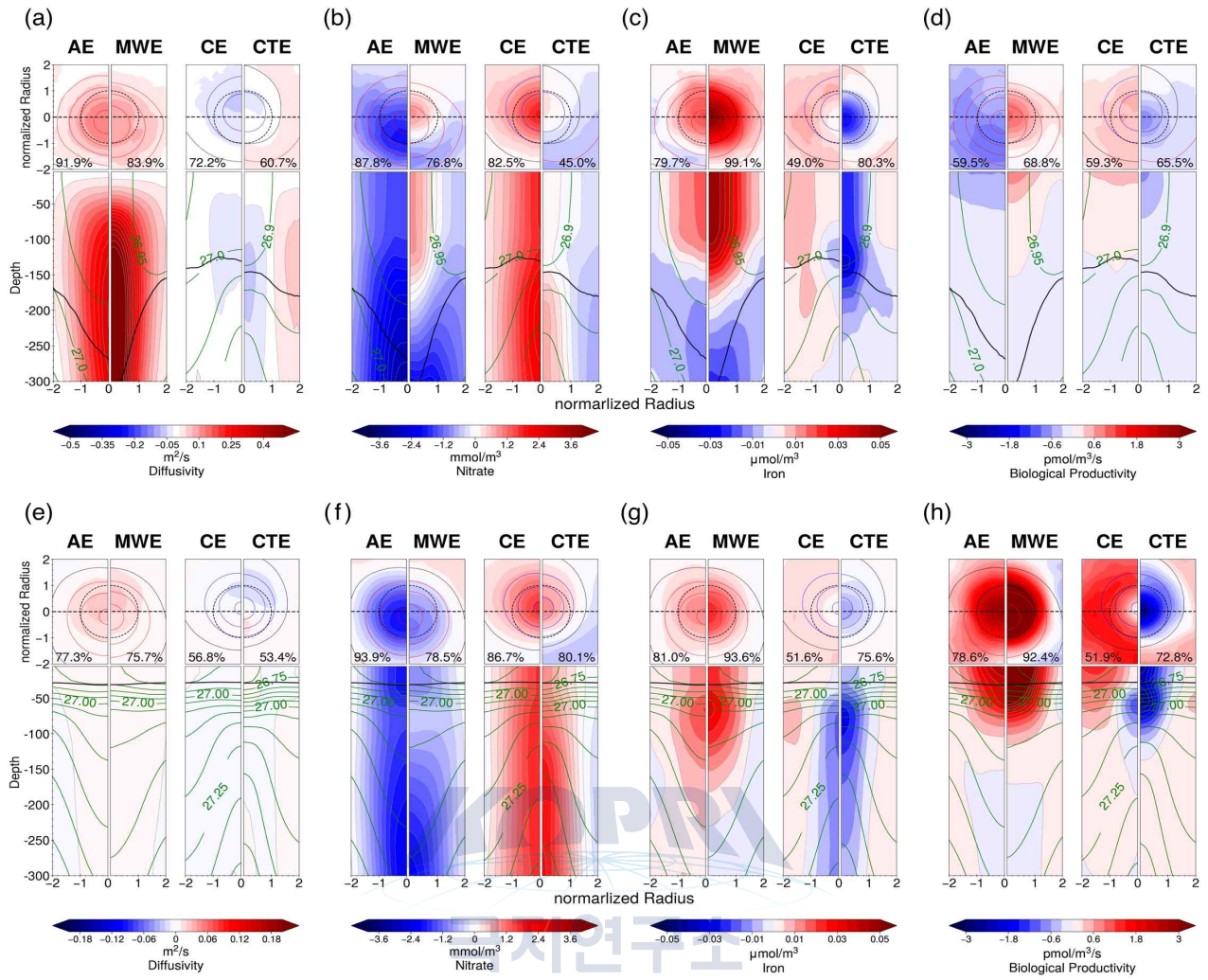
가. 드레이크 해협 통과 전 (BDP) 해역: 연직 혼합 (Vertical Mixing)의 역할

BDP 지역 분석의 핵심은 비전형적 유형인 MWE의 강력한 겨울철 연직 혼합이다. 그림 9에서 확인되듯이, 겨울철 MWE는 다른 유형보다 월등히 강한 혼합을 유발하여 심층(150m 이하)의 고농도 철을 상층으로 공급한다.

(1) 겨울철 기작 (질산염 제한): 겨울철에는 일사량 부족으로 전반적인 생산성이 낮으며, 강한 혼합으로 인해 철 공급이 충분해지면서 상대적으로 질산염이 중요 제한 요소로 작용한다.

- AE & MWE: 생성 시 북쪽의 빈영양 해수를 포획하여 질산염이 부족 (음의 편차)하지만, MWE는 강한 심층 혼합으로 하층의 질산염까지 상층으로 공급하여 양의 편차로 전환된다. 반면 AE는 혼합이 얕아 질산염 공급이 제한적이다.
- CE & CTE: CE는 질산염이 풍부한 남쪽 해수를 포획하여 양의 생산성을 보이거나, CTE는 질산염 편차도 약하고 혼합 억제로 철 공급도 불리하여 음의 생산성을 보인다.

(2) 여름철 기작 (철 제한): 성층화로 혼합이 약화되면 질산염 공급이 중단된 MWE는 다시 질산염 음의 편차를 갖는다. 그러나 철의 경우, 겨울철에 MWE에 의해 공급된 고농도의 철이 역전된 상층 밀도 구조에 갇혀 하층으로 내려가지 못하고 표층에 잔류하게 된다. 그 결과, 일사량이 충분한 여름철에 철이 풍부한 MWE는 높은 생물 생산성을 유지 (양의 편차)하는 반면, 철이 부족한 AE는 낮은 생산성 (음의 편차)을 보인다.



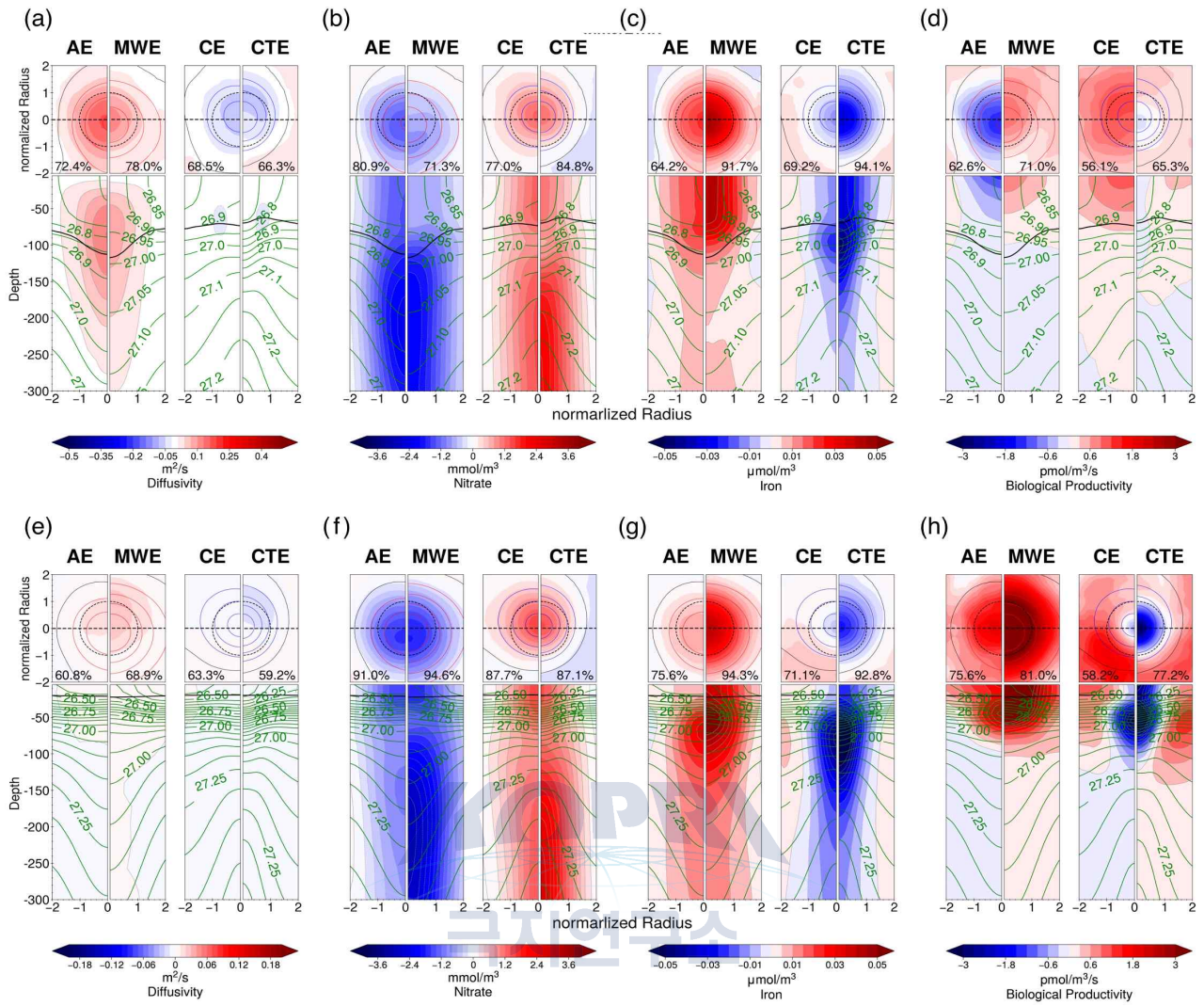
[그림 9] 드레이크 해협 통과 전 (BDP) 해역에서의 에디 유형별 겨울철(a-d) 및 여름철(e-h) 확산계수, 질산염, 철, 생물 생산성의 연직 분포 특성.

나. 드레이크 해협 통과 후 (ADP) 해역: 에디 포획 (Eddy-Trapping)의 역할

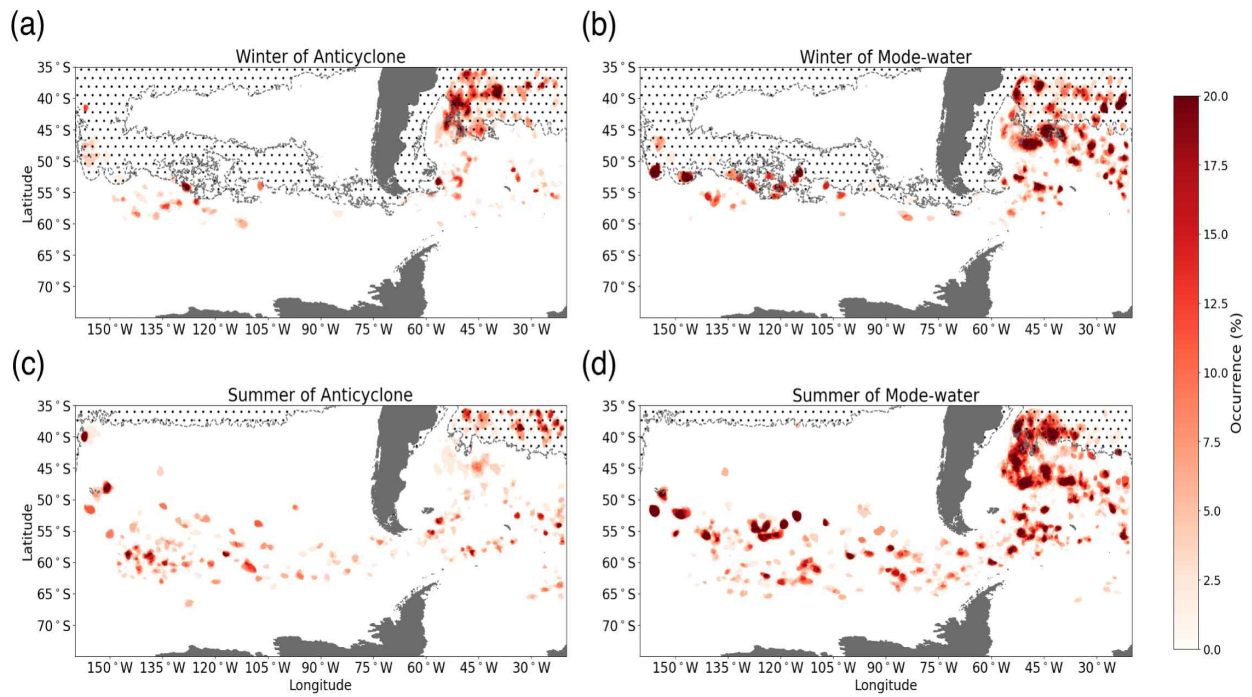
ADP 해역은 혼합층이 깊게 발달하지 않아, AE와 MWE 간의 연직 혼합 강도 차이가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 대신 이 해역은 배경 철 농도의 공간적 분포 (북쪽이 고농도)가 에디 내부 특성을 결정짓는 주된 요인으로 작용한다. 북쪽의 해수를 포획하여 고립시키는 AE와 MWE는 배경장의 특성에 따라 철이 풍부한 해수를 내부에 보유하게 된다. 그 결과, 계절적 변동과 무관하게 AE와 MWE는 상층에서 철의 양의 편차를, 반대로 CE와 CTE는 음의 편차를 보인다 (그림 10). 다만 겨울철 생물 생산성에서 AE (음의 편차)와 MWE (양의 편차)가 서로 반대 부호를 보이는데, 이는 그림 11과 같이 에디 발생 위치에 따른 제한 영양염의 종류가 다르기 때문이다.

- 겨울철: AE는 주로 질산염 제한 구역에서 생성되어 질산염 부족으로 인한 낮은 생산성을 보인다. 반면, MWE는 질산염 제한 경계 이남 (철 제한 구역)에 주로 분포하여, 질산염은 충분하고 철 공급의 이점을 받아 높은 생산성을 보인다.
- 여름철: 대부분의 소용돌이가 철 제한 구역에 위치하므로, 철 공급이 우세한 AE와 MWE가 일관되게 양의 생산성을 보인다.





[그림 10] 드레이크 해협 통과 후 (ADP) 해역에서의 에디 유형별 겨울철(a-d) 및 여름철(e-h) 확산계수, 질산염, 철, 생물 생산성의 연직 분포 특성.



[그림 11] 겨울철 (a,b)과 여름철(c,d) AE 및 MWE의 발생 위치 분포와 질산염 제한 구역의 관계.



다. 종합 고찰 및 시사점

본 연구를 통해 남극해 탄소 순환, 특히 생물 생산성 변동의 핵심 기작은 소용돌이에 의한 철의 연직 수송과 지역적 배경장의 분포에 있음이 확인되었다. 특히 BDP 지역에서 관측된 높은 생물 생산성은 기존 통념과 달리 전형적인 AE가 아닌, MWE의 강력한 연직 혼합에 기인한 것임이 밝혀졌다.

Kahru et al., 2007 등의 선행 연구들에서는 AE 내부의 높은 생산성을 보고하였으나, 이는 MWE를 독립적인 유형으로 분리하지 않고 AE 범주에 포함시켜 분석함으로써 발생한 해석의 오류로 판단된다. 본 연구 결과에 따르면, 상층 영양분 공급이 필수적인 환경에서 전형적인 AE는 오히려 혼합이 억제되어 낮은 생산성을 보이기도 하였다.

이는 소용돌이를 단순히 회전 방향 (극성)에 따라 2가지로만 분류할 경우, 해수면의 물리적 변수 해석에는 큰 무리가 없을지라도 연직 구조와 생지화학적 기작 (철 농도, 생산성 등)을 규명하는 데에는 치명적인 한계가 있음을 시사한다. MWE와 같이 독특한 연직 구조를 가진 에디의 효과가 AE의 평균적인 특성에 묻히거나 왜곡될 수 있기 때문이다. 따라서 남극해의 생지화학적 변동성을 정확히 이해하고 소용돌이의 실제 기후적 역할을 파악하기 위해서는, 본 연구에서 제시한 4가지 유형 분류법의 적용이 필수적이다.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 연구의 연차별 연구개발 목표와 이에 대한 세부 달성 내역은 아래 표 3과 같다. 당초 계획했던 연차별 목표를 모두 100 % 달성하였으며, 특히 관측 자료의 한계를 고해상도 수치모델로 보완하여 남극해 중규모 소용돌이의 새로운 4가지 분류법을 정립하고, 이에 따른 철 (Fe) 공급 및 탄소 순환 기작을 해역별로 규명하였다.

[표 3] 당해연도 연구개발 목표 대비 결과 및 달성도

연차	성과목표	세부 목표 및 달성 주요내용		달성도
1차년도 (2023)	남극해 중규모 소용돌이의 탐지를 위한 관측자료 확보	남극해 중규모 소용돌이 자료 확보	남극해 주변 소용돌이 위치 및 해수면 높이 편차 자료 구축	100 %
		남극해 표층 수온 및 염분 인공위성 자료 확보	위성 기반 표층 수온/염분 자료와 소용돌이 위치의 동일성 검증	
		남극해 연직 수온 및 염분 ARGO 자료 확보 및 수치모델 자료 활용	ARGO 관측 자료의 시공간적 공백을 보완하기 위해 MITgcm 고해상도 수치모델 자료 생성 및 활용 체계 구축	
2차년도 (2024)	새로운 소용돌이 분류법 개발 및 평가	남극해 중규모 소용돌이 분류법 개발	해수면 높이 및 밀도 편차를 결합한 새로운 4가지 유형 (AE, MWE, CE, CTE) 분류 알고리즘 개발	100 %
		기존의 분류법과 새로운 분류법의 비교 및 평가	기존 2분류법 (회전 방향) 대비 신규 분류법의 물리적 구조 (비전형적 에디의 연직 밀도 역전 등) 모의 성능 비교 및 우수성 입증	
3차년도 (2025)	남극해 중규모 소용돌이에 따른 탄소순환의 변화 파악	중규모 소용돌이 유형별 탄소 순환 관련 변수의 합성장 분석	에디 중심 합성장 분석을 통해 유형별 물리·생지화학 입체 구조 및 밀도 역전 현상 규명	100 %
		탄소 순환 관련 변수의 편차 분석 및 물리적 과정과 탄소 순환 연관성 이해	드레이크 해협 통과 전후(BDP/ADP) 해역별 제한 영양염(철, 질산염) 분포 차이와 MWE의 강한 수직 혼합 및 포획 기작이 생물 생산성에 미치는 영향 규명	

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

가. 학술적 활용

- 중규모 소용돌이 분류 체계 고도화 및 내부 구조 규명: 기존의 해수면 높이 기반 분류법은 내부 구조를 반영하지 못해 해양 심층에 미치는 영향 설명에 한계가 있었다. 그러나 본 연구를 통해 정립된 새로운 분류법은 해양의 물리·생지화학적 변화를 입체적으로 고려한 정밀 분류를 가능하게 하여, 소용돌이 역학 연구의 학술적 수준을 한 단계 높이는 데 활용될 것이다.
- 위성 관측 자료를 활용한 해양 내부 구조 예측 기술 확보: 남극해는 현장 관측 (in-situ) 자료가 절대적으로 부족한 해역이다. 본 연구 결과는 접근이 용이한 위성 해수면 자료 (SSH, SST 등)만으로도 보이지 않는 해양 내부 구조와 영양염 순환을 역추적하는 방법론을 제시함으로써, 극지 해양 연구의 시공간적 한계를 극복하는 데 핵심적으로 활용될 것이다.

나. 경제적 활용

- 저비용·고효율의 해양 환경 모니터링 체계 구축: 막대한 비용과 시간이 소요되는 채빙선 및 계류 관측 없이, 위성 자료를 기반으로 한 새로운 분류법을 적용하여 해양 생지화학적 변동성을 경제적이고 정확하게 예측하는 시스템 구축에 기여할 것이다.
- 수산 자원 관리 효율화 및 어업 생산성 증대: 소용돌이에 의한 영양염 (철) 공급과 식물플랑크톤 번성 간의 상관관계를 규명함으로써, 남극해 해양 생태계 변화와 어장 형성 시기를 보다 과학적으로 예측하여 어업 활동의 효율성을 높이는 데 활용될 것이다.
- 기후변화 대응을 위한 탄소 순환 예측 성능 향상: 전 지구적 이산화탄소 흡수의 핵심 해역인 남극해에서 소용돌이 유형별 탄소 흡수 능력을 정교하게 평가할 수 있게 된다. 이는 글로벌 탄소 순환 모델의 불확실성을 줄이고 미래 기후 변화 예측의 신뢰도를 제고하여, 국가적 기후 대응 전략 수립에 기여할 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서는 남극해 중규모 소용돌이의 물리적·생지화학적 특성을 다각도로 규명하기 위해, 위성 관측 자료를 포함한 최신 해외 과학기술 정보를 적극적으로 수집하여 분석에 활용하였다.

우선, 소용돌이의 정확한 위치와 이동 경로, 발생 빈도 등 거시적인 물리 특성을 파악하기 위해 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)에서 제공하는 Mesoscale Eddy Trajectory Atlas (META 3.2 DT, allsat) 자료를 확보하였다. 이 자료는 위성 고도계 기반의 해수면 높이 편차를 이용하여 전 지구의 중규모 소용돌이를 탐지하고 추적한 고품질 데이터셋이다. 본 연구에서는 2015년부터 2019년까지의 자료를 사용하여 드레이크 해협을 포함한 남극해 전역의 소용돌이 분포 특성을 분석하였으며, 이를 통해 수치모델이 모의한 소용돌이의 생성 위치와 이동 경로의 정합성을 검증하는 기준 자료로 활용하였다.

또한, 소용돌이 내부의 표층 열역학적 구조를 분석하고 본 연구의 핵심인 새로운 분류법을 적용하기 위해 고해상도 해수면 온도 (SST) 및 염분 (SSS) 자료를 도입하였다. 해수면 온도 자료는 Remote Sensing Systems (REMSS)의 Multi-sensor MW_IR OISST 자료를 활용하였는데, 이는 마이크로파와 적외선 센서를 결합함으로써 남극해의 잦은 구름에 의한 데이터 결측을 최소화하고 0.25도의 높은 해상도를 제공하여 소용돌이 표층 구조 분석에 최적화된 자료이다. 해수면 염분의 경우, Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)에서 제공하는 Multi-Observation Global Ocean (MOGO) SSS 자료를 수집하였다. 극지방은 일반적으로 위성 염분 관측의 기술적 난이도가 높고 불확실성이 존재하는 해역이나, 해당 자료는 다양한 위성 센서와 현장 관측 자료를 융합하여 이러한 오차를 저감시킨 것이 특징이다.

결과적으로 본 연구에서는 수집된 고해상도 해수면 온도와 염분 자료를 결합하여 해수면 밀도를 산출하였으며, 이를 통해 기존의 단순 극성 기반 분류법이 탐지하지 못했던 소용돌이 내부의 밀도 역전 구조를 규명하고 새로운 4가지 유형 분류법을 개발하는 데 핵심적인 기술 정보로 활용하였다.

제 7 장 참고문헌

- Chelton, D. B., Gaube, P., Schlax, M. G., Early, J. J., & Samelson, R. M. (2011). The Influence of Nonlinear Mesoscale Eddies on Near-Surface Oceanic Chlorophyll. *Science*, 334(6054), 328–332.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., & Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2), 167–216.
- Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). (2023). Multi-year reprocessed daily sea surface salinity (SSS) data. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00051>
- Dong, C., McWilliams, J. C., Liu, Y., & Chen, D. (2014). Global heat and salt transports by eddy movement. *Nature Communications*, 5(1), 3294.
- Dong, C., You, Z., Dong, J., Ji, J., Sun, W., Xu, G., Han, G. (2025). Oceanic mesoscale eddies. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, 4, 0081.
- Dutkiewicz, S., Sokolov, A., Scott, J., & Stone, P. (2005). A three-dimensional ocean-seaice-carbon cycle model and its coupling to a two-dimensional atmospheric model: uses in climate change studies. In Joint program on the sci. policy global change (chap. Rep. 122). MIT, Cambridge, Mass
- Everett, J. D., Baird, M. E., Oke, P. R., & Suthers, I. M. (2012). An avenue of eddies: Quantifying the biophysical properties of mesoscale eddies in the Tasman Sea. *Geophysical Research Letters*, 39(16).
- Flagg, C. N., Wallace, D., & Kolber, Z. (1997). Cold Anticyclonic eddies formed from cold pool water in the southern Middle Atlantic Bight. *Continental Shelf Research*, 17(15), 1839–1867.
- Frenger, I., Munnich, M., & Gruber, N. (2018). Imprint of Southern Ocean mesoscale eddies on chlorophyll. *Biogeosciences*, 15(15), 4781–4798.
- Frenger, I., Munnich, M., Gruber, N., & Knutti, R. (2015). Southern Ocean eddy phenomenology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(11), 7413–7449.
- Hausmann, U., McGillicuddy Jr., D. J., & Marshall, J. (2017). Observed mesoscale eddy signatures in Southern Ocean surface mixed-layer depth. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1), 617–635.
- Huang, R. X. (2010). Ocean circulation: wind-driven and thermohaline processes. Cambridge University Press.
- Huang, Y., Tagliabue, A., & Cassar, N. (2022). Data-driven modeling of dissolved iron in the global ocean. *Frontiers in Marine Science*, 9, 837183.
- Ji, J., Dong, C., Zhang, B., & Liu, Y. (2017). An oceanic eddy statistical comparison using

- multiple observational data in the Kuroshio Extension region. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(3), 1–7.
- Kahru, M., Mitchell, B., Gille, S., Hewes, C., & Holm-Hansen, O. (2007). Eddies enhance biological production in the Weddell Scotia Confluence of the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters*, 34(14).
- Kwak, K., Song, H., Marshall, J., Seo, H., & McGillicuddy Jr, D. J. (2021). Suppressed pCO₂ in the Southern Ocean Due to the Interaction Between Current and Wind. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(12), e2021JC017884.
- Large, W. G., McWilliams, J. C., & Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, 32(4), 363–403.
- Ledwell, J. R., McGillicuddy, D. J., & Anderson, L. A. (2008). Nutrient flux into an intense deep chlorophyll layer in a mode-water eddy. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(10–13), 1139–1160.
- Liu, Y., Yu, L., & Chen, G. (2020). Characterization of Sea Surface Temperature and Air-Sea Heat Flux Anomalies Associated With Mesoscale Eddies in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2019JC015470.
- Liu, Y., Zheng, Q., & Li, X. (2021). Characteristics of Global Ocean Abnormal Mesoscale Eddies Derived From the Fusion of Sea Surface Height and Temperature Data by Deep Learning. *Geophysical Research Letters*, 48(17), e2021GL094772.
- Marshall, J., Adcroft, A., Hill, C., Perelman, L., & Heisey, C. (1997). A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5753–5766.
- Marshall, J., Hill, C., Perelman, L., & Adcroft, A. (1997). Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5733–5752.
- Marshall, J., Jones, H., & Hill, C. (1998). Efficient ocean modeling using non-hydrostatic algorithms. *Journal of Marine Systems*, 18(1–3), 115–134.
- McGillicuddy, D. J., Anderson, L. A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K. O., Carlson, C. A., ... & Steinberg, D. K. (2007). Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science*, 316(5827), 1021–1026.
- McGillicuddy Jr, D. J. (2015). Formation of intrathermocline lenses by eddy wind interaction. *Journal of Physical Oceanography*, 45(2), 606–612.
- Ni, Q., Zhai, X., Jiang, X., & Chen, D. (2021). Abundant Cold Anticyclonic Eddies and Warm Cyclonic Eddies in the Global Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 51(9), 2793–2806.
- Nishino, S., Kawaguchi, Y., Fujiwara, A., Shiozaki, T., Aoyama, M., Harada, N., & Kikuchi, T. (2018). Biogeochemical Anatomy of a Cyclonic Warm-Core Eddy in the Arctic

Ocean. Geophysical Research Letters, 45(20), 11–284.

- Parekh, P., Follows, M. J., Dutkiewicz, S., & Ito, T. (2006). Physical and biological regulation of the soft tissue carbon pump. *Paleoceanography*, 21(3).
- Patel, R. S., Llorc, J., Strutton, P. G., Phillips, H. E., Moreau, S., Conde Pardo, P., & Lenton, A. (2020). The Biogeochemical Structure of Southern Ocean Mesoscale Eddies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8), e2020JC016115.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., & Kobayashi, S. (2007). ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. In *ECMWF Newsletter* (Vol. 110, pp. 25–35). ECMWF.
- Song, H., Long, M. C., Gaube, P., Frenger, I., Marshall, J., & McGillicuddy Jr, D. J. (2018). Seasonal Variation in the Correlation Between Anomalies of Sea Level and Chlorophyll in the Antarctic Circumpolar Current. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 5011–5019.
- Song, H., Marshall, J., Follows, M. J., Dutkiewicz, S., & Forget, G. (2016). Source waters for the highly productive Patagonian shelf in the southwestern Atlantic. *Journal of Marine Systems*, 158, 120–128.
- Song, H., Marshall, J., Campin, J.-M., & McGillicuddy Jr, D. J. (2019). Impact of Near-Inertial Waves on Vertical Mixing and Air-Sea CO₂ Fluxes in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7), 4605–4617.
- Verdy, A., Dutkiewicz, S., Follows, M. J., Marshall, J., & Czaja, A. (2007). Carbon dioxide and oxygen fluxes in the Southern Ocean: Mechanisms of interannual variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2).
- Yasuda, I., Ito, S.-I., Shimizu, Y., Ichikawa, K., Ueda, K.-I., Honma, T., Koizumi, K. (2000). Cold-core anticyclonic eddies south of the Bussol’ Strait in the northwestern subarctic Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 30(6), 1137–1157.
- Zhang, Z., Wang, W., & Qiu, B. (2014). Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science*, 345(6194), 322–324.

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.