

남극환류 남동인디안해령 해역에서
극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해

Understanding of physical processes governing
the cross-frontal heat flux in the Antarctic
Circumpolar Current near Southeastern Indian Ridge



인하대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구” 과제의 위탁연구 “남극환류 남동인디안해령 해역에서 극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	: 박 지 수
위탁연구기관명	: 인하대학교 산학협력단
위탁연구책임자	: 박 재 훈
위탁참여연구원	: 채 정 엽
“	: 구 아 영
“	: 송 하 진
“	: 이 강 녕
“	: 김 기 덕

보고서 초록

위탁연구과제명	남극환류 남동인디안해령 해역에서 극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해					
위탁연구책임자	박재훈	해당단계 참여연구원수	13	해당단계 연구비	130백만원	
연구기관명 및 소속부서명	인하대학교 산학협력단 /인하대학교 해양과학과		참여기업명			
국제공동연구	상대국명 : 미국		상대국연구기관명 : 로드아일랜드대학교			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수	68
- 2021년 아라온호 남극 항차 동안 남극해 남동인디안해령에 PDS-CPIES 16개 정점 설치를 통해 극전선 통과 EHF 변동성 현장관측시스템을 구축 - 원격자료획득시스템(PDS)를 이용해 관측장비 회수 이전에 계류관측자료 획득 성공 - 2024~2025년 아라온호 남극연구항차를 통해 계류된 16대 CPIES 회수에 성공하여 약 3~4년 길이의 장기관측자료 획득 성공 - 획득한 현장관측자료 분석 결과, 극전선을 통과하는 소용돌이 기원 열속(EHF) 발생과 밀접한 상층의 극전선 사행과 심층 해류의 변동이 관측되었음을 확인 - 남극환류 전체 영역에서의 극전선 통과 열속 연구를 목적으로 약 27년 길이의 자료동화된 재분석 수치모델 자료 확보 및 Drake Passage의 CPIES 관측자료와 비교를 통한 수치모델자료 검증 수행 - 장기간의 수치모델 출력자료 분석 결과, 남극해 전체에서 극전선을 통과하는 EHF의 시공간분포 확인 및 최근 27년에 걸친 극전선 통과 열속의 증가 추세 확인 - PDS 이동을 장기간 추적함으로써, 표층 근처에서 파랑에 의해 극전선 통과 해류와 열속이 발생하고 해당 경년변동성이 열대해역의 대기순환과 밀접하게 원격상관되어 있음을 규명 - 장기 현장관측자료, 재분석 수치모델, PDS 관측을 활용하여 SEIR과 남극환류 태평양 인접해역에서 극전선 통과 열속과 관련된 여러 물리적 과정을 조사했고, 해당 결과는 남극해 열수지 균형 및 해양 열용량 변화에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대						
색인어 (각 5개 이상)	한글	극전선 통과 열속, 소용돌이 열속, 남극 순환류, 극전선 해역, 열균형, PIES 관측, 파랑				
	영어	Cross-frontal heat flux, Eddy heat flux, Antarctic Circumpolar Current, Frontal zone, Heat balance, PIES observation, Wind waves				

요 약 문

I. 제 목

남극환류 남동인디안해령 해역에서 극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해

II. 연구개발의 목적 및 필요성

남극해는 전 지구 해양 열흡수의 약 40~70%를 담당하는 핵심 해역으로, 전 지구 기후 조절에 중요한 역할을 한다. 기후변화에 따라 남극해에서의 해양-대기 상호작용과 극전선 통과 소용돌이 열속(eddy heat flux; EHF)은 해양대기 열속 및 에크만 수송에 의한 열 손실을 보상하는 주요 과정으로 알려져 있다. 특히 남동인디안해령(SEIR) 해역은 복잡한 해저지형의 영향으로 환남극해류(ACC)의 사행이 빈번히 발생하여 강한 EHF가 집중되는 지역으로 주목받고 있으나, 혹독한 관측 환경으로 인해 현장관측 기반 연구는 매우 제한적이었다. 따라서 본 연구는 현장관측을 통해 남극해 열 균형 시스템에서 극전선 통과 EHF의 물리적 과정과 시공간적인 변동성에 대한 이해를 향상시키고자 수행되었다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

남동인디안해령 남부 극전선 해역에 국제공동연구를 통해 16개 PDS-CPIES 정점을 설치하여 극전선 통과 EHF 변동성을 관측할 수 있는 현장관측 시스템을 구축하였다. PDS를 활용하여 장비 회수 이전에 관측자료를 위성으로 전송·확보하였으며, 확보된 관측자료를 통해 극전선 통과 EHF와 관련된 해류 변동 특성을 분석하였다. 또한, 약 27년 길이의 자료동화 재분석 수치모델 자료를 확보하고, Drake Passage의 CPIES 관측자료와 비교·검증을 진행하여 남극해 ACC 전반에서의 극전선 통과 EHF의 공간분포와 장기 변동 특성을 분석하였다. 추가로, 자동자료전송부이(PDS)를 표층뜰개로 활용하여, 경로를 장기간에 걸쳐 추적함으로써 파랑에 의한 극전선 통과 열속 발생 기작을 조사했다.

IV. 연구개발결과

아라온호 남극연구항차에 참여하여 2021년 11월~2025년 2월/11월에 걸쳐 16개 정점에서 약 3~4년 길이의 PDS-CPIES 장기관측자료 획득에 성공했다. 장비계류기간 동안 세 번에 걸쳐 PDS 시스템을 활용해 장비가 회수되기 이전에 계류관측자료 획득에 성공하여, 장비 회수 이전에 극전선 통과 열속과 관련한 물리적 과정에 대한 조사를 수행했다. 관측자료 분석 결과, EHF 발생과 항상 동반되는 극전선 사행과 전선을 통과하는 방향의 해류 변동성이 관측되었다. 극전선을 통과하는 방향의 해류변동성 발생은 극전선 사행이 주로 발생하는 북동쪽 정점들에서 주로 발생하였다. 남극환류 전체에서 최근 수십년에 걸친 EHF 시공간변동을 조사하기 위해 전 지구 재분석 모델자료를 수집하여 분석에 활용했다. 계류관측자료와의 비교를 통해 검증된 수치모델 자료 분석을 통해 복잡한 해저지형과 남극환류가 만나는 해역에서 강한 극전선 통과 EHF가 발생함을 확인했다. 약 27년 길이의 수치모델 분석 결과, 최근 수십 년간 남극해로 유입되는 EHF의 증가 추세가 나타났다. PDS 부이를 장기간에 걸쳐 추적함으로써 남

극환류해역에서의 극전선 통과 해류의 관측에 성공했다. 표층에서 발생하는 극전선 통과 해류는 주로 파랑에 의해 발생하는 것이 확인되었고, 파랑이 극전선 통과 열속의 발생에 기여하고 있음을 확인했다. 파랑에서 기원하는 극전선 통과 열속은 열대해역의 남방진동과 밀접하게 원격상관되어 있음을 추가 장기자료분석을 통해 규명했다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 확보된 장기 현장관측자료는 남동인디안해령 해역에서 상층 및 심층 해류의 상호작용과 이에 따른 극전선 통과 EHF의 발생 기작과 시공간적 변동성을 규명하는 데 활용될 수 있다. 장기계류관측자료를 활용해 극전선 통과 열속의 정량적인 수치를 계산함으로써 남동인디안해령에서의 극전선 통과 열속이 남극해 열수지 균형에 기여하는 정도를 정량적으로 규명할 예정이다. 나아가 수치모델 자료와의 결합 분석을 통해 해저지형 및 대기 강제력이 극전선 통과 EHF에 미치는 역할을 보다 정량적으로 평가하고, 남극해 열균형 시스템에 대한 이해를 심화할 계획이다. 또한, 본 연구에서 규명한 파랑기원 극전선 통과 열속에 대한 이해를 바탕으로 남극환류 전체 및 최근 수십년에 걸친 장기간에 대한 연구를 수행함으로써, 그동안 알려지지 않은 열수지 균형에서의 파랑의 역할에 대해 보다 자세히 규명할 계획이다.



S U M M A R Y

I. Title

Understanding of physical processes governing the cross-frontal heat flux in the Antarctic Circumpolar Current near Southeastern Indian Ridge.

II. Purpose and Necessity of R&D

The Southern Ocean plays a critical role in regulating the global climate system by absorbing approximately 40–70% of the global oceanic heat uptake. Under climate change, ocean–atmosphere interactions and eddy heat flux (EHF) across the Polar Front are recognized as key processes that compensate for heat loss associated with air–sea heat exchange and Ekman transport. In particular, the Southeast Indian Ridge (SEIR) region has attracted attention as a hotspot of strong EHF due to frequent meandering of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) induced by complex bottom topography. However, harsh environmental conditions have severely limited field observation–based studies in this region. Therefore, this study aims to improve understanding of the physical processes and spatiotemporal variability of Polar Front–crossing EHF within the Southern Ocean heat balance system through direct field observations.

III. Contents and Extent of R&D

Through international collaboration, a field observation system was established by deploying 16 PDS-CPIES sites south of the SEIR to monitor variability in Polar Front–crossing EHF. Using the Pop-up Data Shuttle (PDS) system, observational data were transmitted via satellite and secured prior to instrument recovery, enabling analysis of current variability associated with Polar Front–crossing EHF. In addition, approximately 27 years of data-assimilative ocean reanalysis model output were collected and validated through comparison with CPIES observations in Drake Passage. Based on the validated model data, the spatial distribution and long-term variability of Polar Front–crossing EHF across the ACC were analyzed. Furthermore, the PDS units were utilized as surface drifters, allowing long-term trajectory tracking to investigate wave-induced mechanisms responsible for Polar Front–crossing heat flux.

IV. R&D Results

Participation in Antarctic research cruises aboard the R/V Araon enabled the successful acquisition of approximately 3–4 years of long-term PDS-CPIES observations at 1

6 sites between November 2021 and February/November 2025. During the mooring period, the PDS system was used on three occasions to transmit and secure observational data prior to instrument recovery, allowing investigation of the physical processes associated with Polar Front-crossing heat flux before full recovery.

Analysis of the observational data revealed pronounced Polar Front meandering and cross-front current variability that consistently accompanied EHF events. Cross-front current variability was most prominent at northeastern sites, where Polar Front meandering occurred most frequently.

To examine spatiotemporal variability of EHF across the entire ACC over recent decades, global ocean reanalysis model data were collected and analyzed. Based on validation against moored observations, model analysis confirmed that strong Polar Front-crossing EHF occurs preferentially in regions where complex bottom topography intersects the ACC. The 27-year model analysis further revealed an increasing trend in EHF entering the Southern Ocean over recent decades.

Long-term tracking of PDS units successfully captured cross-front currents in the ACC region. These surface cross-front currents were found to be primarily generated by surface waves, indicating that waves contribute significantly to the generation of Polar Front-crossing heat flux. Additional long-term analysis demonstrated that wave-driven cross-front heat flux is closely remotely correlated with tropical climate variability, particularly the Southern Oscillation.

V. Application Plans of R&D Results

The long-term field observations obtained in this study will be used to elucidate interactions between upper- and deep-ocean currents and the resulting mechanisms and spatiotemporal variability of Polar Front-crossing EHF in the SEIR region. By quantitatively estimating EHF using long-term moored observations, the contribution of Polar Front-crossing heat flux to the Southern Ocean heat budget in the SEIR region will be quantitatively assessed.

Furthermore, combined analyses with numerical model data will enable more quantitative evaluation of the roles of bottom topography and atmospheric forcing in controlling Polar Front-crossing EHF, thereby deepening understanding of the Southern Ocean heat balance system. Finally, building on the identified role of wave-driven cross-front heat flux, future studies will extend the analysis to the entire ACC and recent multi-decadal periods to more comprehensively quantify the previously underexplored role of surface waves in the ocean heat budget.

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1절 EHF에 대한 국외 선행연구
- 2절 표층 해류와 스톱스 표류에 대한 국외 선행연구
- 3절 IES 및 PDS-CPIES 장비 개요

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1절 재분석 수치모델을 활용한 남극해 EHF 분석
- 2절 남극해 SEIR 해역에서의 PDS-CPIES 계류/회수 및 현장 관측
- 3절 PDS 전송 관측자료 분석결과
- 4절 파랑 기원 극전선 통과 열속의 경년변동성

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 1절 연구개발목표 대비 달성도
- 2절 연구성과 및 의의

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서론

해양대기순환은 저위도로 과잉공급된 열을 추운 남극해로 수송하여 전 지구 열 균형에 중요한 역할을 하고 남극해 빙하 용해와 해양의 일차생산력 변화에 큰 영향을 준다. 열 균형 측면에서 볼 때 남극해 극전선 해역은 해양대기 상호작용과 편서풍에 의한 저위도 방향으로의 에크만 수송으로 열을 빼앗기고 있다. 하지만 남극해는 느린 변화를 포함하지만 온도가 급격하게 떨어지지 않는 열평형 상태에 있고, 이는 해양의 물리적 현상이 열을 공급하여 남극해 열균형 시스템에 기여하고 있음을 의미한다. 하지만 남극해는 Subantarctic Front (SAF), Polar Front (PF), Southern Antarctic Circumpolar Front (SACCF)로 대표되는 3개의 극전선을 따라 환남극해류(Antarctic Circumpolar Current; ACC)가 동쪽으로 흐르고 있어 해양의 평균적인 흐름에 의한 남극해로의 열 공급을 차단하고 있다. 따라서 남극해 열 균형 시스템을 정량적으로 이해하기 위해서는 남극해 극전선을 가로질러 열을 공급하는 해양의 물리적 현상에 대한 이해가 필요하다. 또한, 남극해는 전 지구 기후 조절에 중요한 역할을 하는 해역으로, 남극해 열 균형 시스템에서 해양의 역할에 밝혀내면 미래기후 예측의 불확실성을 줄이는 데에 상당히 기여할 수 있다.

남극해에서 평균적인 해류에 의한 열 수송은 ACC에 의해 가로막혀 있어 수심에서 수백 킬로미터 크기의 중규모 소용돌이가 중요한 역할을 하고 있는 것으로 알려져있다. de Szoeke and Levine (1981)은 ACC 중심축을 가로질러 극지방으로 향하는 열 수송을 중규모 소용돌이에 의한 열속(eddy heat flux; EHF)이 담당하고 있다고 제안하였다. EHF는 등온선이 급격히 기울어진 전선에서 경압불안정(baroclinic instability)에 의해 급격히 강화된 중규모 소용돌이가 만드는 열속을 의미한다. 경압불안정도가 높은 해역에서는 급격한 수심의 변화나 다른 해류와의 접촉 등에 의해 역학적 평형상태가 깨질 때 상층과 심층의 해류의 상호작용에 의해 중규모 소용돌이가 강하게 발생한다. 해양에서 baroclinic instability에 의해 중규모 소용돌이가 생성될 때, 가용위치에너지의 감소와 함께 등온선의 기울기가 줄어들고 등온선 경사를 따라 내려가는 방향(downgradient)으로 EHF가 발생한다. 남극해 극전선 해역은 수평방향으로의 수온변화가 급격한 경압불안정도가 높은 해역이이므로 과학자들은 남극해 극전선 통과 열 수송에 EHF가 상당한 역할을 할 것으로 주목하고 있다. 남극해에서 직접적인 EHF 관측을 위해 최소한 ACC 사행의 한 파장에 해당하는 수백 킬로미터 범위에서 3차원 공간의 수온과 유속의 관측이 요구되지만, 필요한 관측 규모가 넓고 남극해의 혹독한 환경으로 현재까지 남극해 극전선 통과 EHF에 대한 현장관측을 통한 연구가 부족한 상황이다.

남동인도양 해령(Southeast Indian Ridge; SEIR)은 남북방향으로 뻗어 있는 해저산맥의 영향으로 극전선 통과 EHF가 집중되어 있을 것으로 예상되는 해역이다. SEIR는 ACC 극전선이 수렴하는 해역으로 EHF와 관련한 복잡한 물리적 현상이 있을 것으로 예상되지만, 현재까지 현장관측을 활용한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 극전선 통과 EHF를 관측할 수 있는 Current- and Pressure-recording Inverted Echo Sounder (CPIES) 4대를 SEIR 해역에 계류하여 극전선을 통과하는 열속에 대해 연구해보고자 한다. CPIES는 SEIR 해역에서 ACC 남쪽에 계류되어, ACC 남부로 유입되는 열속과 최종적으로 남극대류 주변 환류로 빠져나가는 열속을 관측하려 한다. 또한, 12대의 CPIES를 계류한 미국 로드아일랜드 대학(University of Rhode Island; URI)와의 공동연구를 통해 총 16개의 CPIES로 구성된 물리관측시스템을 운용하여 SEIR 남부해역에서 넓은 공간 규모에서 극전선 통과 열속의 시공간적 변동성에 관한 연구가 가능할 것으로 기대한다[그림 1].

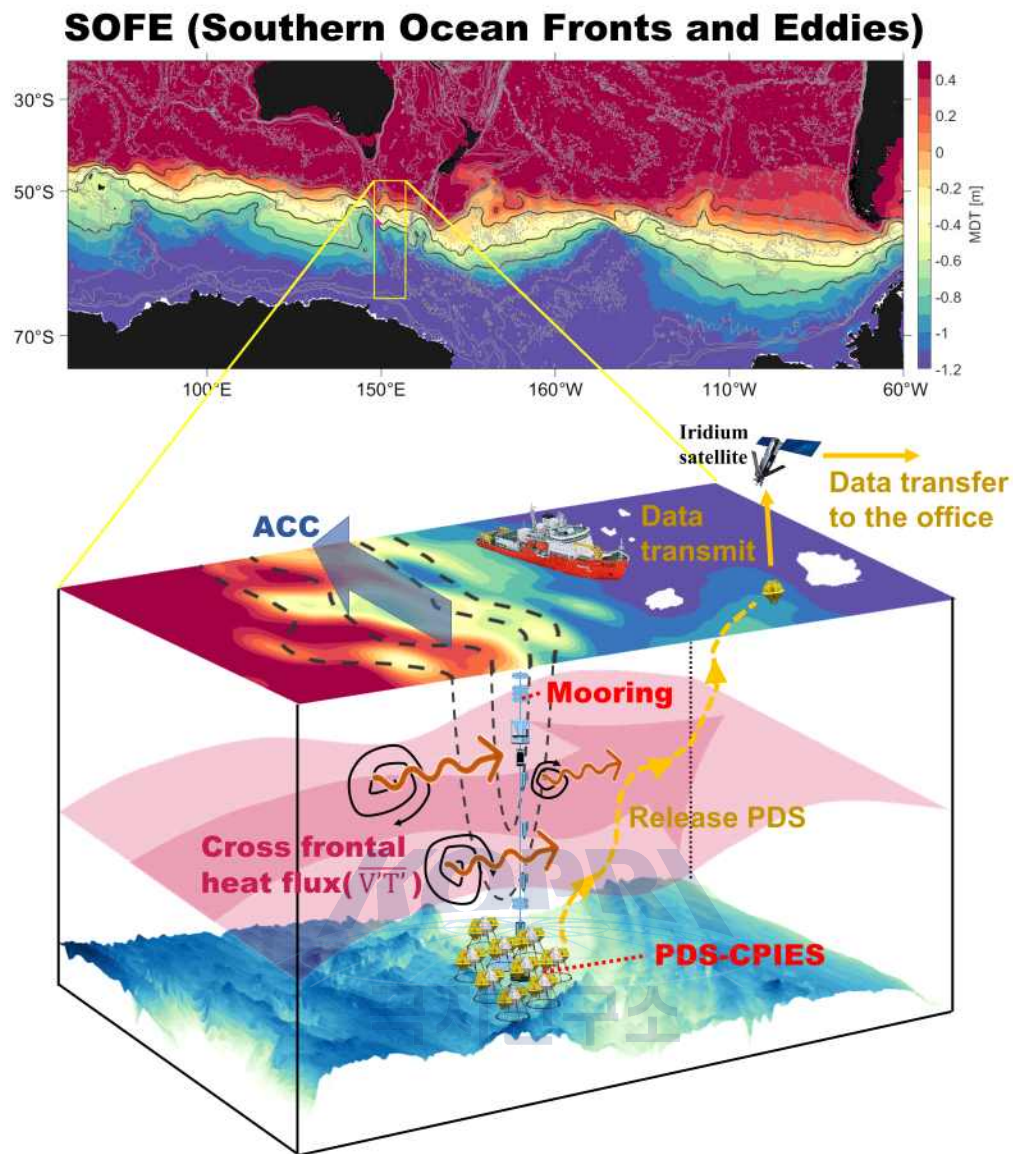
남극해에서는 전 층에 걸친 열용량뿐 아니라 해양 표층 근처의 열의 변화에 대한 이해

역시 매우 중요하다. 남극해의 표층열은 해양대기 상호작용에 영향을 주어 남극해 해빙농도, 구름 농도, 해양 순환, 열대 해역 표층수온 등에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Kang et al., 2023). 특히, 관측 이래로 남극해의 표층수온은 지속적인 지구 온난화에도 불구하고 상대적으로 느린 상승 혹은 하강을 보여주고 있어 수온 변화 기작에 대한 많은 관심이 집중되어 왔다(Fan et al., 2014).

미래 기후를 예측하는데 있어 표층 수온 변동의 예측은 모델의 불확실성을 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 중요도에도 불구하고 미래기후를 예측하는 최신의 기후 모델조차 남극해 표층 수온 변화를 재현하는 데 한계가 있다. 과거 관측과 비교했을 때, 많은 최신의 기후모델들은 표층수온의 느린 상승 혹은 하강을 재현하지 못하고 있다(Lee et al., 2022). 이는 남극해 표층수온의 변화를 결정 짓는 물리적 과정이 완벽히 밝혀지지 않았다는 것을 시사한다.

남극해 표층수온 변화 기작에 대한 이해를 높이하고자 본 연구에서는 바람에 의해 생성되는 파랑에 주목했다. 바람에 의해 생성되는 파랑은 스톡스 표류(Stokes drift)라는 표층 흐름을 야기해 극전선 통과 열속을 발생시켜 지형류에 비해 효율적으로 수온 변화를 야기할 수 있을 것으로 추측된다. 이러한 파랑의 영향을 조사하기 위해 본 연구에서는 CPIES와 함께 계류되는 PDS(Pop-up data shuttle) 부이를 활용했다. PDS 부이는 해저면에 계류된 CPIES가 회수되기 전에 관측자료를 획득하기 위한 목적으로 제작된 장비다. 자동으로 부상한 후 PDS는 자료전송 후 표층에서 자유롭게 표류한다. PDS의 이동경로를 장기간에 걸쳐 추적함으로써 파랑의 영향이 온전히 반영된 해류와 이와 관련된 극전선 통과 열속을 조사할 수 있을 것으로 기대한다.





[그림 1] 남극해 위성관측 수평 해수면고도(mean dynamic topography)와 SEIR CPIES 관측정점 위치(상)와 연구해역 내 PDS-CPIES를 이용한 EHF 관측모식도(하)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

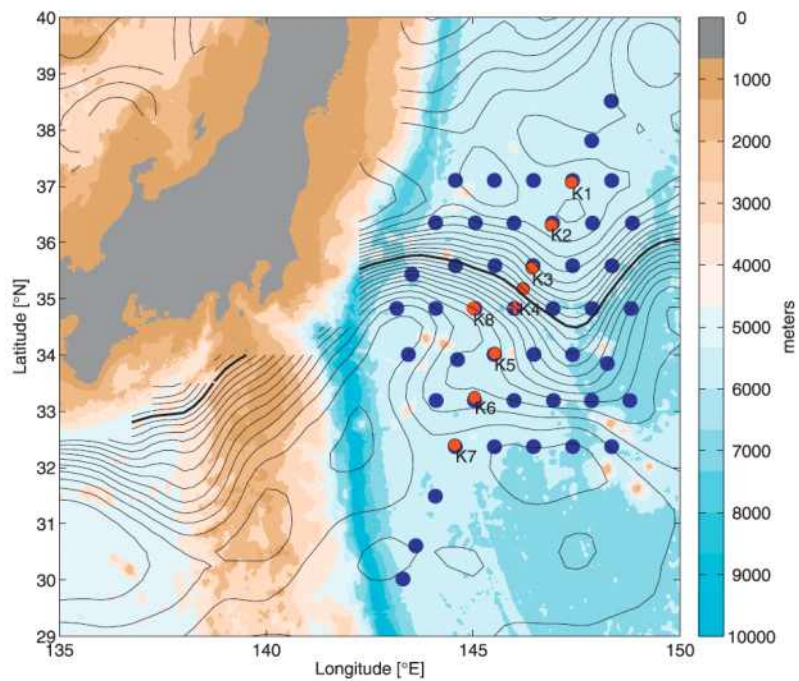
2.1 EHF에 대한 국외 선행연구

중위도와 고위도 사이의 열 수송에 중요한 역할을 담당하는 전선 통과 EHF에 관한 국외 연구들은 현장 관측, 위성 관측, 수치 모델을 활용하여 활발하게 수행되었다. 이 절에서 CPIES를 포함한 현장 관측을 활용한 역학적으로 중요한 전선 통과 EHF를 분석한 선행연구 결과와 남극해 및 전 지구 범위에서 EHF의 공간분포를 위성관측 자료와 수치모델 출력자료를 활용하여 분석한 선행연구들을 소개한다.

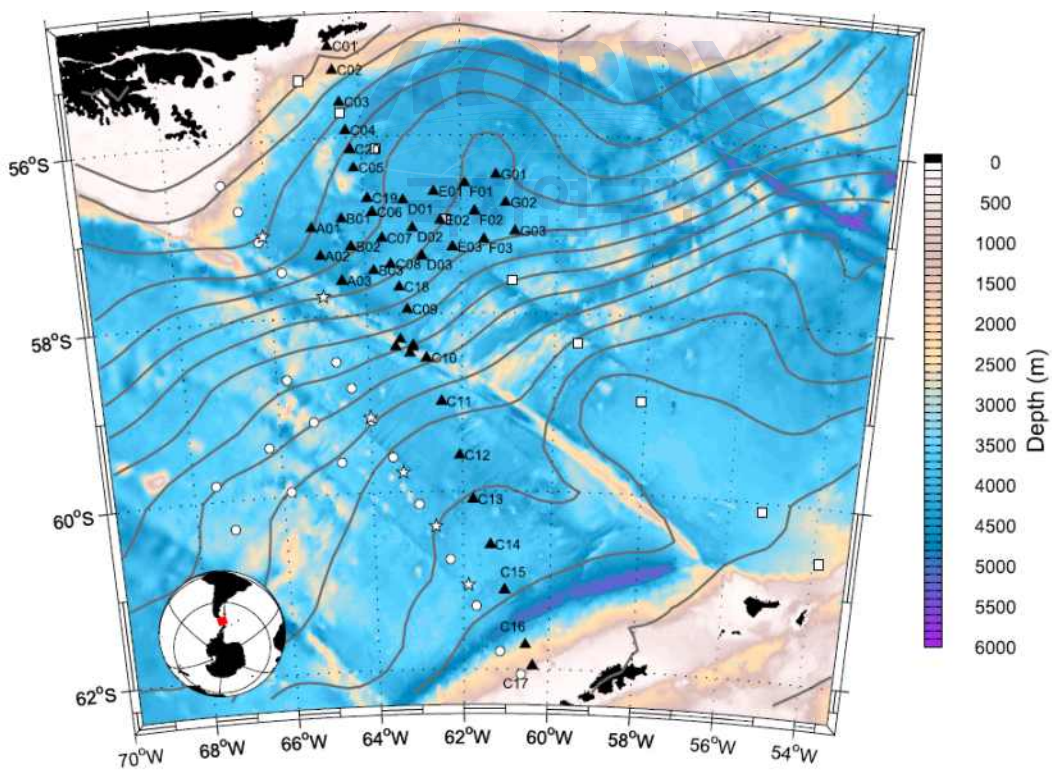
3차원 공간에서 EHF 벡터는 헬름홀츠 분해정리(Helmholtz decomposition)을 통해 회전성분(rotational component)과 발산성분(divergent component)로 분해할 수 있다. Marshall and Shutts (1981)는 EHF 발산성분이 전체에서 적은 비중을 차지함에도 특정 영역을 벗어나 열을 수송하는 역학적으로 중요한 성분임을 이론적으로 제시하였다. Cronin and Watts (1996)는 Marshall and Shutts (1981)의 이론적인 연구결과가 실제 해양에도 적용됨을 Gulf Stream 해역에서 현장관측 유속, 수온자료를 활용한 정량적인 열 수지(heat budget) 분석을 통해 밝혔고, 관측에서 역학적으로 중요한 EHF 발산성분만을 추출하여 분석할 필요성을 제시했다. Bishop et al. (2013)은 Kuroshio Extension 해역에서 수행된 CPIES array 관측[그림 2]을 통해 EHF의 회전성분과 발산성분을 산출하였다. CPIES로 관측한 해저면 근처 유속으로 계산한 EHF는 대부분 발산성분만으로 이루어졌고 경압성 유속으로 계산한 EHF는 주로 회전성분만을 포함하였다. 이러한 Bishop et al. (2013)의 결과는 적절한 경계 조건 설정이 필수적인 EHF의 성분 분해가 CPIES 관측을 통해 자연스럽게 가능함을 보여주었다.

극전선이 수렴하는 남극해 Drake Passage에서 CPIES array 관측[그림 3]을 활용한 극전선 통과 EHF 발산성분의 발생 과정에 관한 연구가 진행된 바 있다(Watts et al., 2016) CPIES 관측과 위성 관측을 통해 확인한 결과, 순압성 소용돌이의 위상이 상층 해류의 사행에 비해 약 90도 앞선 위상을 가질 때 순압성 소용돌이가 발달하는 baroclinic instability가 발생하였다. 이때 발달한 순압성 소용돌이의 남향류(북향류)는 상층의 상대적으로 따뜻한(차가운) 해수를 극전선을 가로지르는 방향으로 수송해 강한 남향의 EHF를 발생시켰다. 이 연구의 CPIES 관측 결과는 EHF가 Drake Passage에서 경압불안정도가 높은 SAF, PF의 해저산맥 주변에 집중적으로 분포함을 보였다. 또한, Watts et al. (2016)은 직접적인 수온, 유속 관측을 통해 산출한 EHF와의 비교를 통해 CPIES 관측 결과를 통해 상당히 정확한 EHF를 계산할 수 있음을 확인하였다.

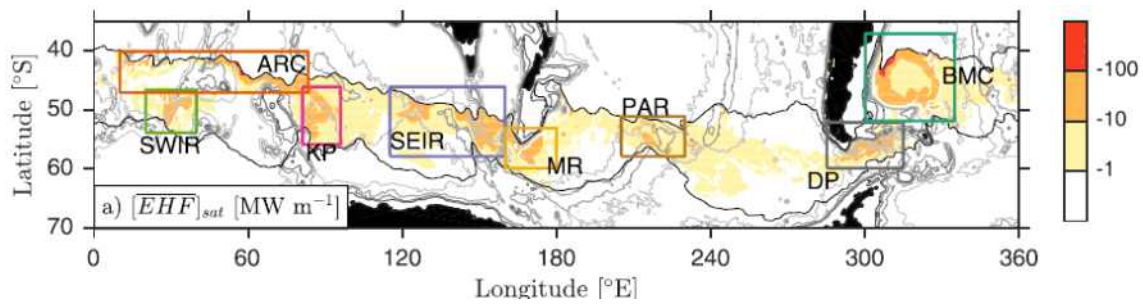
현장 관측만으로 힘든 남극해 전반 혹은 전 지구 범위에서의 EHF에 관한 연구도 진행되었다. Guo and Bishop (2022)는 위성 관측자료를 활용하여 혼합층 내 EHF 회전성분과 발산성분의 공간 분포를 전 지구 범위에서 계산하였고 이를 활용하여 EHF 모의성능이 높은 기후모델을 개발하였다. 여기서 위성 관측 결과와 기후모델에서 혼합층 내 EHF 발산성분은 강한 전선이 분포하는 중위도와 고위도 사이에 주로 분포하였다. Foppert et al. (2017)은 남극해 수치모델을 활용하여 전 수층에서 적분한 극전선 통과 EHF과 해수면높이(SSH)의 표준편차 사이의 선형관계를 도출하고 관계식을 23.5년 길이의 위성 관측 SSH에 적용하여 남극해 전체 범위의 EHF를 계산하였다. 계산된 극전선 통과 EHF는 남극해 전체에서 여러 hot spot을 형성하며 분포하고 있고, 각각의 hot spot은 subtropical gyre의 서안경계류 혹은 복잡한 해저지형과 만나는 곳에서 위치하였다. 또한, EHF hot spot들이 최근 약 23년에 걸쳐 서로 다른 경년변화 추세와 함께 수년 주기의 서로 다른 변동을 가질 가능성을 제시하였다.



[그림 2] Kuroshio Extension 해역에서 수행된 CRIES 관측정점도 [Bishop et al. (2013)].



[그림 3] Drake Passage에서 수행된 CRIES 관측정점도 [Watts et al. (2016)].



[그림 4] 위성 관측 해수면높이 표준편차를 프록시로 활용하여 계산한 남극해 극전선 통과 EHF 분포도 [Foppert et al. (2017)].



2.2 표층 해류와 스톱스 표류에 대한 국외 선행연구

표층해류는 대기 순환에 의해 주로 강제되어 발생하며, 해양에서 열과 질량 수송에서 관여하여 지구 기후시스템에서 중요한 역할을 하고 있다(Esselborn and Eden, 2001; Foltz et al., 2003). 또한 표층해류는 해빙 이동, 생지화학적 순환, 부유생물의 이동, 미세 플라스틱의 이동 등에도 크게 영향을 준다(Kwok et al., 2013; Siegel., 2003). 이로 인해 여러 관측을 이용해 표층해류를 조사하기 위한 노력이 꾸준히 이어져 왔다. 전통적으로 표층 해류는 선박, 부이, 유속계 등을 이용해 관측되어왔다. 특히 기술의 발전 덕분에 위성을 이용해 넓은 해역에서 장기간에 걸친 연속적인 해류관측이 가능해지기도 했다. 위성이 관측한 지형류에 풍속으로부터 산출 가능한 에크만 유속값이 합성된 표층유속자료가 표층 흐름의 특성에 대한 연구에 꾸준히 사용된다(Sudre, 2013; Rio, 2014).

스톱스 표류는 바람의 영향으로 발생하는 파랑의 진행방향으로 흐르는 라그랑지안 흐름을 말한다. 이러한 스톱스 표류는 지형류, 에크만 흐름과 함께 전 지구 해양의 표층 흐름을 발생시키는 주요 요소 중 하나로 전 지구 표층 순환에서 중요한 역할을 담당한다(McWilliams and Restrepo, 1999). 전 지구 파랑모델 결과로 산출된 장기간 기후치는 전 지구 스케일에서 스톱스 표류는 지형류와 비슷한 수준의 표층 유속을 가진다(Carraso, 2014). 특히, 태풍과 같이 바람이 강하게 발생하는 시기에는 에크만 해류와 비슷하거나 빠른 속력을 띄기도 한다(Perrie, 2003). 이렇게 스톱스 표류는 전 지구 스케일에서 표층 해류 발생에 상당히 크게 관여하기 때문에, 직접적인 관측을 기반으로 표층 흐름과 수평방향 열속에 대한 기여를 조사할 필요가 있다.

이러한 중요성에도 불구하고 직접적인 관측을 기반으로 한 광범위한 해역에서의 파랑에 의한 수평방향 열속에 대한 연구는 상당히 드물다. 그 이유는 파랑을 관측하기 위해서는 표층뜰개 관측이 필요한데, 일반적으로 underwater drogue가 부착된 표층뜰개가 주로 사용되기 때문이다. Underwater drogue는 뜰개의 하부에 부착되어, 표층부터 십 미터 이상 깊은 수심의 유속에 의해 주로 뜰개가 표류하도록 강제하는 장비이다. 이러한 underwater drogue가 부착된 뜰개는 파랑과 바람 응력(windage)에 영향을 거의 받지 않으며 표류한다(Niller, 1987). 이에 따라 표층 뜰개를 활용하는 관측 연구는 주로 파랑의 영향보다는 중규모 해류 변동성, 관성주기 변동 등에 주로 활용되었다(Lumpkin and Flament, 2013).

2.3 IES 및 PDS-CPIES 장비 개요

2.3.1 Inverted Echo Sounder (IES)

Inverted Echo Sounder (IES)는 해저면에 계류되어 해수면을 맞고 돌아오는 12kHz 음파의 연직방향 왕복시간(Acoustic echo time: τ)을 측정한다. 연직방향 음속은 수층의 수온에 따라 변하기 때문에, 측정된 τ 를 통해 내부파, 해류의 사행운동, 중규모 소용돌이 등의 신호를 포함하는 수온약층 두께 변화나 다른 수괴 출현에 의한 수온 변화 등을 알아낼 수 있다. 또한, GEM technique을 활용할 경우 수온의 연직 프로파일을 얻을 수 있어 array 관측 내 상대 지형류 유속 계산도 가능하다. τ 관측에 사용되는 트랜스듀서는 500~6700m의 수심 범위에서 사용 가능하며 중심에서부터 $\pm 45^\circ$ 의 원뿔 모양의 170~197dB 강도의 음파를 전파한다. IES는 원판 추를 부착한 거치대에 장착되어 계류되고 상대적으로 작고 간단한 구조를 가져 계류 및 회수가 용이하다. IES 관측은 자료 획득 시간간격 설정과 배터리 성능에 따라 최대 5년까지 유지될 수 있고, 장비 회수 시 릴리즈 명령 신호가 담긴 특정 주파수의 음파를 수신하면 IES는 스스로 추와 연결을 끊고 해수면으로 부상한다. IES는 넓은 영역 및 장기간에 걸친 해수 유동, 열속 등의 관측에 적합하여, Drake Passage와 Kuroshio Extension 해역과 동해에서의 관측에 성공적으로 활용된 바 있다.

2.3.2 Current- and Pressure-recording IES (CPIES)

PIES는 IES에 해저면 압력(Bottom pressure: P_b)을 측정하는 센서가 추가된 장비를 말한다. 압력센서로는 Parascientific Digiquartz 410K가 사용되고 10,000psi (6000dbar)까지의 해저면 압력을 $\pm 0.01\%$ 의 정확도와 0.001 dbar의 해상도를 가지고 측정할 수 있다. PIES에 0.1°C 해상도를 가진 수온센서가 부착되고 측정된 수온은 압력 센서의 수온에 따른 변화를 보정하는 목적으로 쓰인다. 압력센서의 특성상 장기간 관측 시 해저면 압력에 약 4ppm/month의 drift가 포함되어 자료처리 시 drift 제거가 요구된다.

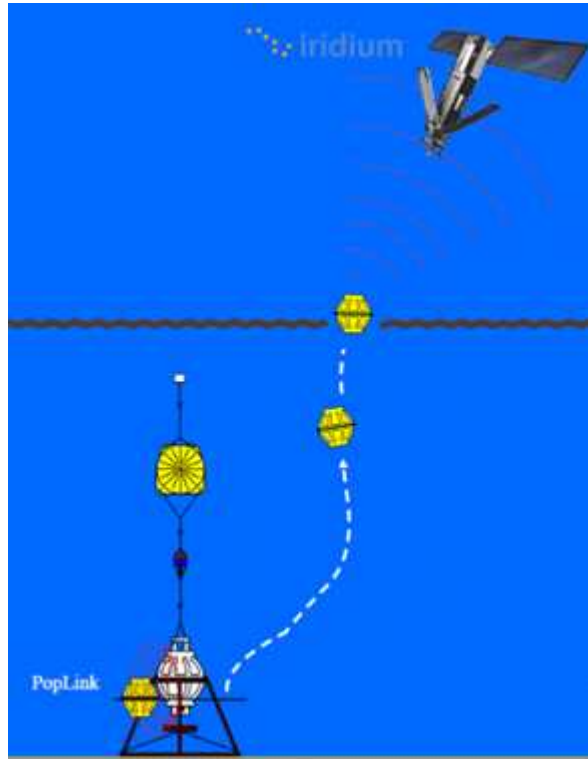
CPIES는 PIES에 해류계가 연결되어 해저면 위 50 m 수층의 유속을 측정하도록 설계된 장비이며 적정 수심에 위치하도록 해류계에 17인치 부이가 연결된다. 해류계로는 해류의 속력과 방향을 측정할 수 있는 견고한 true vector인 averaging sensor Aanderaa Data Instruments Doppler current sensor를 사용한다. 해류계는 0~300cm/s의 유속 측정범위를 가지고 0.1mm/s의 해상도와 0.15cm/s의 정확도를 가졌다. 센서 내 컴파스를 활용하여 유속의 정확한 방향을 측정할 수 있고 부착된 기울기 센서를 활용하여 방향의 보정도 가능하다. 관측된 해저면 근처 유속을 τ 관측으로 얻어진 상대 지형류의 기준 유속으로 활용하여 지형류의 절대속도를 얻을 수 있다. 해류계에 수온 센서가 부착되어 해저면 근처 수온을 0.01°C의 해상도로 측정할 수 있다. 본 연구에서 계류된 4대의 CPIES는 10분마다 4번의 ping을 전파하여 τ 를 관측하고 P_b , 수온, 유속을 30분 간격으로 측정하도록 설정하였다.

2.3.3 Pop-up Data Shuttle (PDS)-CPIES

PDS는 관측 중인 CPIES의 자료를 받아 위성으로 송신하는 장비로 CPIES 회수 전에 관측자료를 미리 획득할 목적으로 생산된 장비다. 1대의 CPIES에 최대 4대의 PDS가 장착될 수 있고 각각의 PDS는 30분 간격의 τ , P_b , 해저면 근처 유속자료를 매시간 CPIES로부터 수신한다. PDS는 사전에 설정된 시간에 자동으로 부상하여 수신한 관측자료를 이리듐 위성으로 전송하도록 설계되었다[그림 5]. 자료전송을 위해 CPIES는 최대 2m 범위의 자기장을 생성하고 PDS는 관측자료가 포함된 자기 신호를 디지털 신호로 수신 및 변환하여 저장한다. PDS를 CPIES와 함께 활용하면 일반적으로 수년이 소요되는 관측 도중

에 관측자료를 사전에 쉽게 획득할 수 있는 장점이 있게 된다. 본 연구에선 CPIES 한 대 당 세 대씩의 PDS가 총 12대가 장착되었고 자동 부상일은 2022년 9월 19일, 2023년 11월 13일, 2024년 9월 23일로 설정하였다.





[그림 5] PDS-CPIES 계류 시스템과 PDS-이리듐위성 자료전송 시스템을 나타낸 모식도.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 재분석 수치모델을 활용한 남극해 EHF 분석

남극해 극전선을 통과하는 EHF의 변동 특성, 공간분포, 대기 및 해저지형과의 상호작용 등을 분석하기 위해 GLORYS 재분석 수치모델 출력자료를 수집하였다. GLORYS는 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)에서 제공하는 자료동화된 수치모델이다. 분석에 사용된 모델은 $1/12^\circ$ 의 수평해상도를 가지는 GLORYS12V1과 최근에 공개된 Global Reanalysis Multi-Model Ensemble Product V2 (GREP-V2) 앙상블 수치모델에 포함된 $1/4^\circ$ 해상도의 GLORYS2V4로 두 버전의 GLORYS를 사용하였다. 두 수치모델의 1993~2019년까지 약 27년 길이의 수온, 염분, 유속, 해수면 높이(SSH) 자료를 수집하였고, 수집한 자료의 공간 도메인은 ACC 전체를 포함한다.

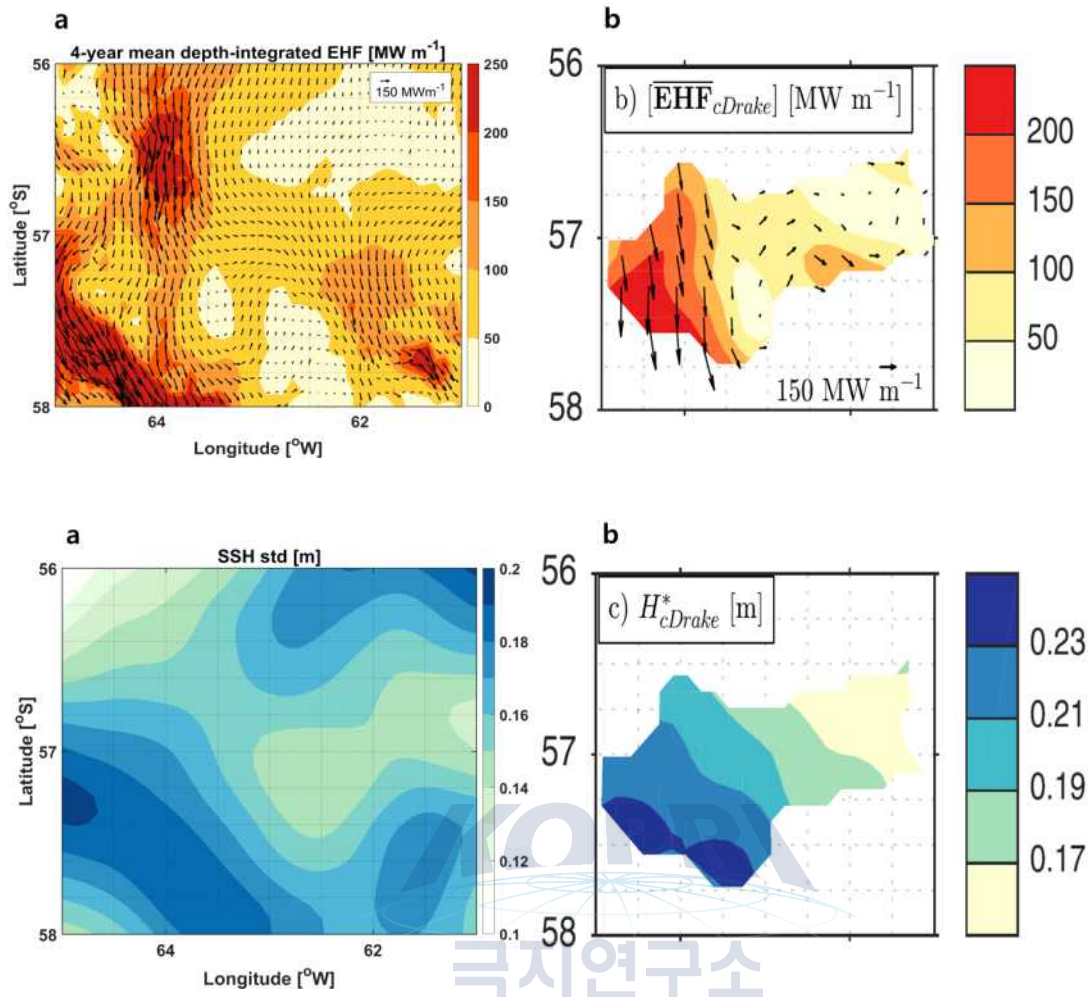
수치모델 출력자료를 활용하여 극전선 통과 EHF를 분석하기에 앞서, 수치모델의 EHF에 대한 모의성능을 확인하였다. GLORYS 검증에 위해 2007년부터 2011년에 수행된 cDrake project의 Drake Passage에서의 CPIES 관측자료를 수집하였고, EHF 발산성분과 SSH 표준편차, 해저면 근처 유속을 cDrake 관측결과와 비교하였다. EHF 발산성분을 비교하기 위해 수치모델 유속, 수온자료로 $\text{EHF}(\mathbf{u}'\mathbf{T}')$ 를 계산 후 연직방향 적분 후 관측 기간에 맞추어 4년 평균하였다[그림 6]. 여기서 EHF 발산성분은 관측 결과와 동일하게 GLORYS12V1의 가장 깊은 수심을 사용하여 계산하였다. 수치모델 산출 EHF 발산성분은 cDrake 관측결과와 마찬가지로 관측해역 전반에 걸쳐 남쪽으로 향하고 있었고 관측해역 남서쪽의 Shackleton Fracture Zone (SFZ)에 250 MW/m 이상 세기를 가지고 분포하고 있다. GLORYS12V1가 관측에서 나타난 ACC 사행과 연관된 EHF 발산성분의 시계방향 회전까지 포함하고 있어 수치모델이 남극해에서 현실적인 극전선 통과 EHF의 분포를 재현하고 있음을 확인하였다.

극전선 통과 EHF 발생은 baroclinic instability 발생과 함께 SSH의 변동을 동반하므로 수치모델에서 나타난 SSH 변동의 모의성능도 확인할 필요가 있다. 이를 위해 GLORYS12V1의 4년 길이 해수면 높이의 표준편차를 산출 후 공간분포를 cDrake 관측결과와 비교하였다[그림 6]. GLORYS12V1의 SSH 표준편차는 EHF 발산성분이 강하게 분포하는 SFZ에서 강하고 북동쪽으로 갈수록 약해지는 관측결과와 유사한 분포를 보였다. 계산된 GLORYS12V1의 SSH 표준편차의 범위는 약 $0.15\sim 0.2\text{m}$ 로 현장관측 결과와 상당히 유사하였다. 관측결과와의 SSH 표준편차 결과, GLORYS12V1를 EHF 발생과 관련된 역학 분석에 활용될 수 있음을 확인하였다.

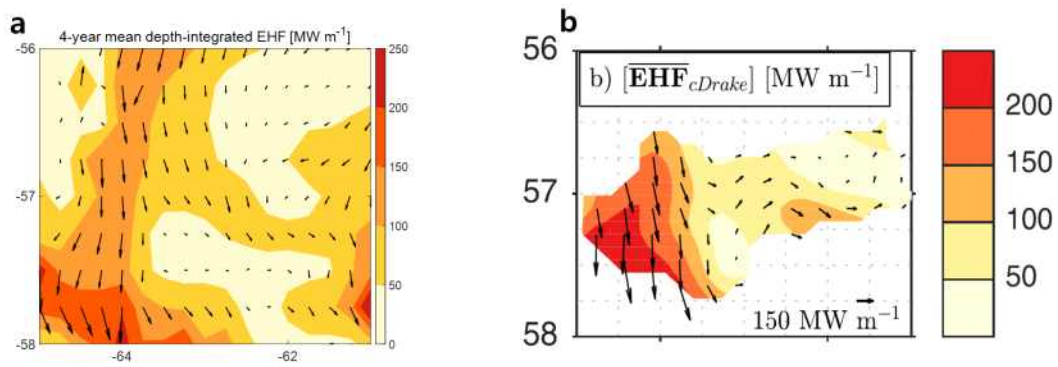
최근에 공개된 GREP-V2의 GLORYS2V4의 EHF 발산성분의 재현성능도 확인하였다. 특히, GLORYS2V4는 GLORYS12V1에 비해 낮은 수평해상도를 가지고 있고 EHF는 중규모 해수유동과 관련 있으므로 모의성능을 더욱더 확인할 필요가 있다. GLORYS12V1과 마찬가지로 GLORYS2V4의 수온, 해저면 근처 유속을 가지고 EHF의 발산성분을 계산 후 4년 평균 및 연직방향으로 적분해 cDrake EHF와 비교했다[그림 7]. Drake Passage에서 GLORYS2V4의 EHF 발산성분은 전 영역에서 전반적으로 남향하고 있고 SFZ에서의 강한 EHF의 분포까지 재현하였다. GLORYS12V1의 해저면 근처 유속이 cDrake 관측결과와 상당히 일치하는 것을 Artana et al. (2021)이 확인한 바 있다. 하지만, GLORYS2V4의 경우 EHF 발산성분과 관련성이 높은 해저면 근처 유속의 재현 정도를 확인된 바가 없어 CPIES 관측과의 비교를 진행하였다. 비교를 위해 GLORYS2V4의 수심 3,325m의 유속과

CPIES 해류계 관측자료를 이용하여 평균 해류와 principal ellipse를 도시하였다[그림 8]. 여기서 principal ellipse는 유속에 principal analysis를 적용하여 얻어진 유속의 주성분 및 부성분의 축 각도와 각 유속성분의 표준편차를 사용하여 그렸다. 현장관측과 GLORYS2V4의 심층 평균해류와 principal ellipse가 방향과 변동의 세기 측면에서 상당히 일치하고 있고 이는 SFZ의 영향으로 발생하는 순압성 소용돌이를 GLORYS2V4가 실제와 유사하게 재현하기 때문으로 해석된다. 수행된 두 비교를 통해 수평해상도가 비교적 낮음에도 남극해 EHF 연구에 GLORY2V4도 역시 활용될 수 있음을 확인하였다.

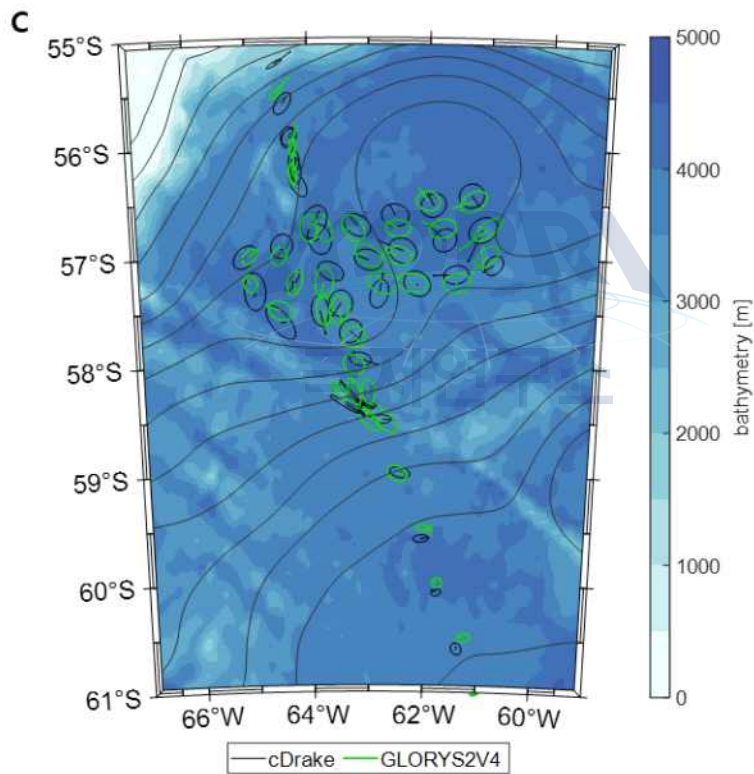




[그림 6] GLORYS12V1(좌상)과 cDrake(우상)의 연직방향 적분 및 4년 평균한 EHF 발산성분 공간분포도. GLORYS12V1(좌하)과 cDrake(우하)의 4년 길이 해수면 높이 자료의 표준편차 공간분포도. cDrake 결과는 Foppert et al. (2017)에서 발췌함.



[그림 7] GLORYS2V4(좌)와 cDrake(우)의 연직방향 적분 및 4년 평균한 EHF 발산성분 공간 분포도. cDrake 결과는 Foppert et al. (2017)에서 발췌함.



[그림 8] GLORYS2V4의 수심 3,325m 유속과 cDrake 관측 해저면 근처 유속의 principal ellipses 및 평균 해류

극전선 통과 EHF의 모의성능이 검증된 GLORYS12V1의 약 27년(1993~2019)의 출력자료를 이용해 ACC 전 해역에서의 극전선 통과 EHF의 공간분포를 분석했다. EHF 발산성분을 계산하기 위해 수치모델의 가장 깊은 수심의 유속을 순압성 유속으로 가정하여 계산에 활용하였고 ACC 전 해역에서 최소수심으로 알려진 수심 2,000m를 연직적분 한계수심으로 설정했다. [그림 9]는 계산된 약 27년의 EHF 발산성분 중 2007년과 2010년의 연평균 EHF 발산성분의 보여주고 있고, 극지방 유입 EHF만을 보기 위해 남향성분만을 도시하였다. 두 시기 모두 EHF는 ACC 전 해역에 걸쳐 남향 성분이 우세하였고 여러개의 EHF hot spot을 형성하여 분포하고 있다. 그중 Agulhas Current ($10^{\circ}\text{E}\sim 83.5^{\circ}\text{E}$), Southeast Indian Ridge (SEIR, $115^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$), Drake Passage ($75^{\circ}\text{W}\sim 45^{\circ}\text{W}$), Brazil-Malvinas Confluence ($60^{\circ}\text{W}\sim 25^{\circ}\text{W}$)에 강한 EHF 남향성분이 집중되어 있다. 두 시기의 연평균 EHF를 비교해보면 남향 EHF 발산성분의 변화가 있음을 볼 수 있다. Brazil-Malvinas Confluence 해역에선 2007년에 강한 EHF가 분포하는 반면 Agulhas Current 해역에선 2010년에 EHF 남향성분이 더 넓게 분포하고 있다. 서안경계류의 영향이 강한 두 해역에서 서로 다른 EHF 변화를 보이는 것은 EHF hot spot들이 서로 다른 EHF 변동 특성이 있기 때문으로 추정된다.

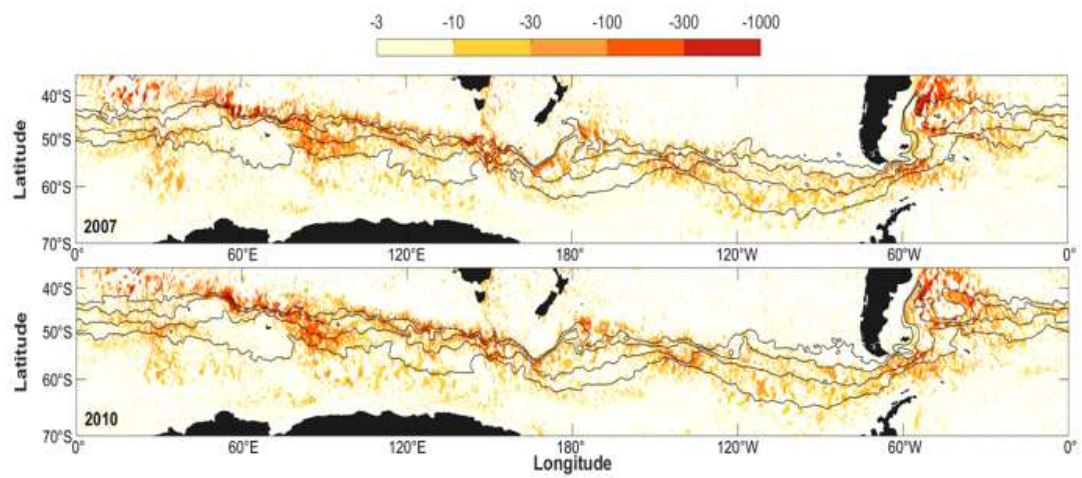
관측해역인 SEIR 역시 극전선 통과 EHF의 hot spot 중 하나이다. [그림 10]은 수치모델로 계산한 SEIR의 시간평균한 EHF 발산성분을 음의 값만을 보여준다. SEIR에 남향의 강한 EHF가 북쪽에서 남쪽의 모든 극전선에 걸쳐 분포하는 것을 볼 수 있다. SSH 평균으로 확인할 수 있는 극전선은 남북으로 뻗은 복잡한 해저지형을 통과하면서 큰 사행을 보여주고 전체적으로 복잡한 해저지형 통과 후에 강한 EHF가 분포하고 있다. 이는 SEIR에 통과하는 ACC가 복잡한 해저지형을 통과할 때 baroclinic instability에 의해 강화된 중규모 소용돌이가 강한 EHF를 만들어 낸 것으로 보인다. [그림 10]의 파란점은 2021년 11월에 수행된 PDS-CPIES 계류 정점으로 남향 EHF이 높은 영역에 관측 위치가 적절히 설정되었음을 확인할 수 있다. 또한, 계류 정점이 남쪽의 극전선 사행이 강한곳에 위치해 극전선 사행의 변화 혹은 대기 영향에 따른 ACC 축 위치 이동에 따른 EHF의 변동을 관측할 수 있을 것으로 보인다.

ACC 전 해역과 SEIR에서 계산된 EHF 발산성분의 약 27년간의 변화를 살펴보았다. [그림 11]은 ACC 전 해역과 SEIR 해역에서 수치모델의 EHF 발산성분의 공간평균값의 시계열과 -10 MW/m 이하의 값을 가지는 그리드 개수의 변화를 보여준다. ACC 전 해역에서 EHF는 반년 혹은 계절내 변동과 같은 일년 이하 주기의 변동과 함께 26년에 걸쳐 그 값이 감소하고 있고 이는 남극해로 유입되는 열이 평균적으로 증가하고 있음을 나타낸다. 공간평균 영역을 관측해역인 SEIR 해역으로 줄였을 때 EHF는 일년 이하 주기 변동과 함께 2004년 이후 남쪽으로 유입되는 EHF가 증가하는 것을 볼 수 있다. 남향 EHF의 증가는 -10 MW/m 그리드개수 변화에서 더욱 뚜렷하게 드러난다. [그림 11]의 그리드개수 시계열은 약 27년에 걸쳐 ACC 전 해역과 SEIR에서 모두 증가하고 있고 이는 구체적으로 남향 EHF의 분포 범위가 넓어지고 있음을 보여준다.

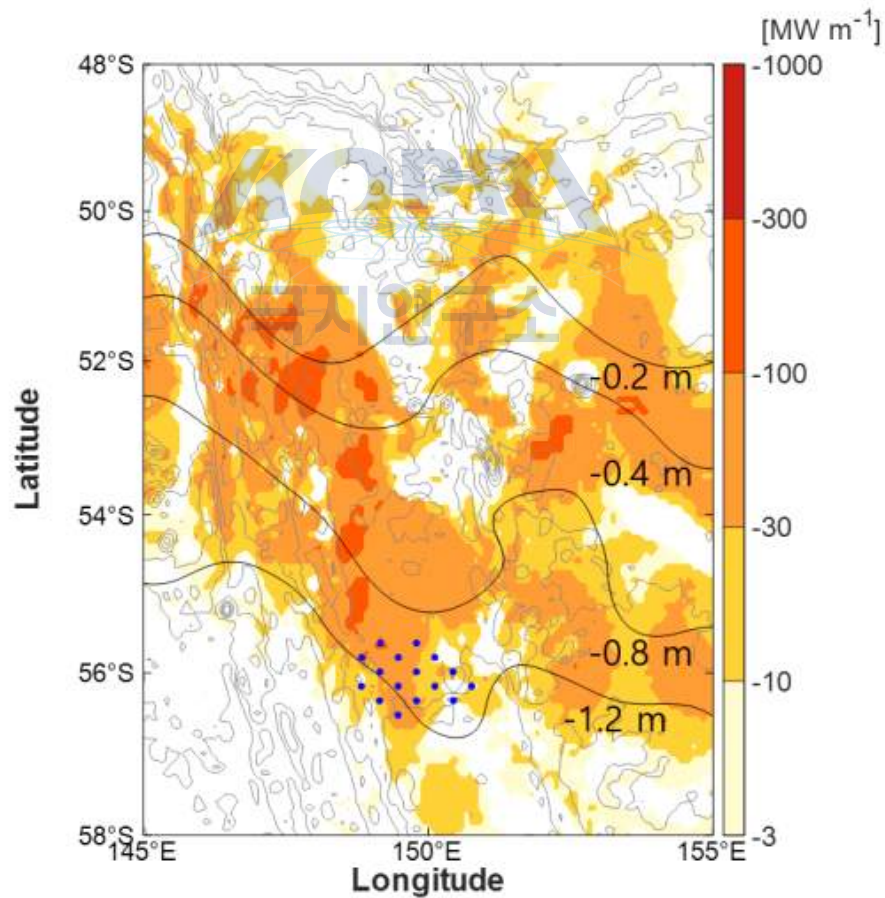
EHF와 함께 발생하는 baroclinic instability는 ACC 전선 강도에 따라 변할 수 있고 ACC 강도는 SAM index로 대표되는 편서풍의 변동에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. [그림 12]는 SEIR 해역이 남극해 주요 기후 인덱스인 SAM index에 따른 바람장의 변동이 잘 나타나는 곳임을 보여준다. 사용된 바람자료는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA5 해수면 위 10m 바람자료(u_{10} , v_{10})를 사용하였다. SAM index와 u_{10} 은 ACC 전 해역에 걸쳐 양의 상관계수를 가지고 있고 SEIR는 상관계수가 높은 해역에 위치한다. SEIR 해역은 SAM index와 v_{10} 사이 상관계수와 SAM index와 바람응력와의 두

값이 모두 음의 값을 강하게 띄는 곳에 있다. 검은 점은 표현된 PDS-CPIES 계류위치는 SAM index와 바람 사이의 높은 상관성이 나타난 해역에 위치하여, SAM index와 연관된 EHF 변동과 같은 물리 현상을 관측할 수 있을 것으로 기대한다.

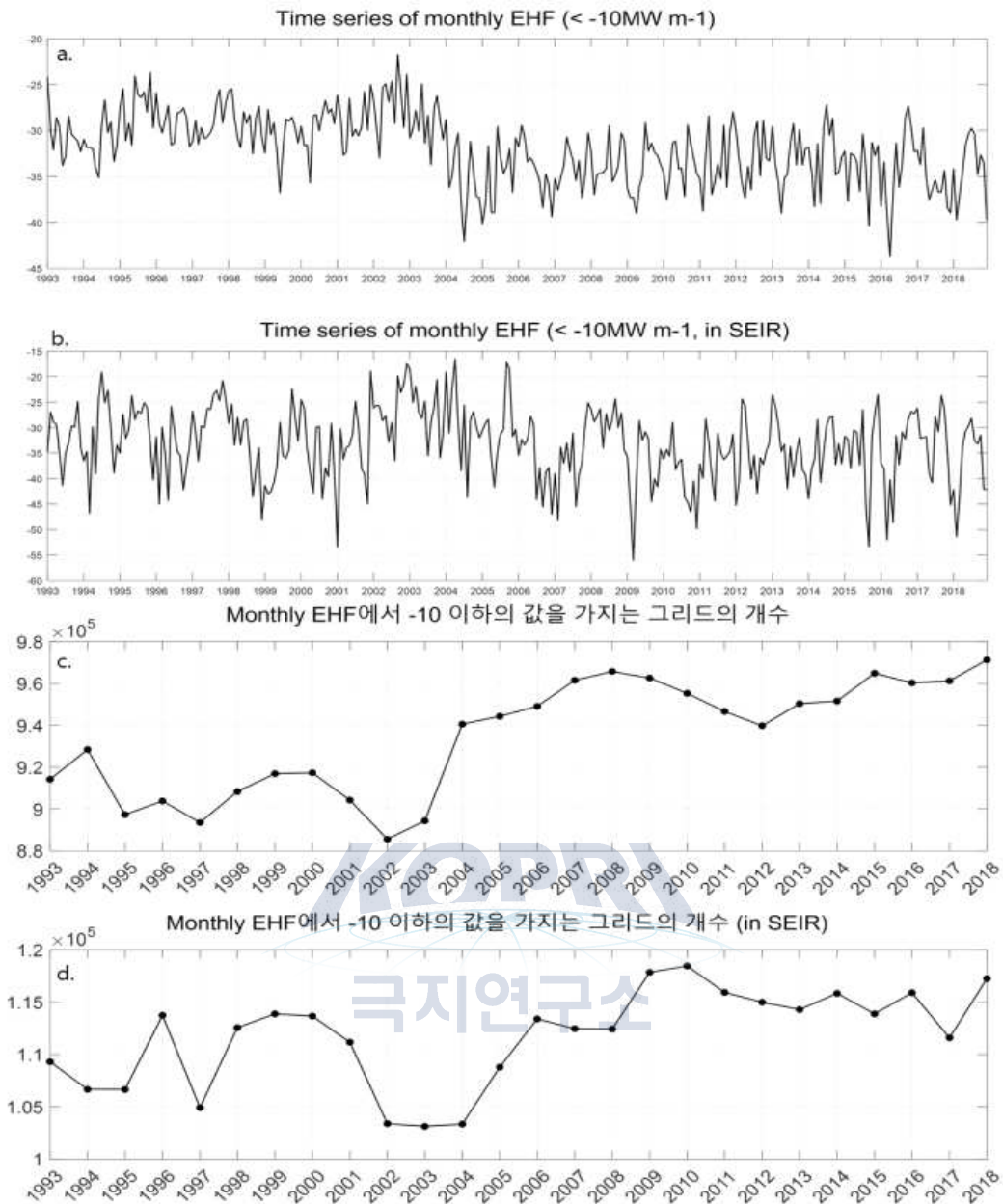




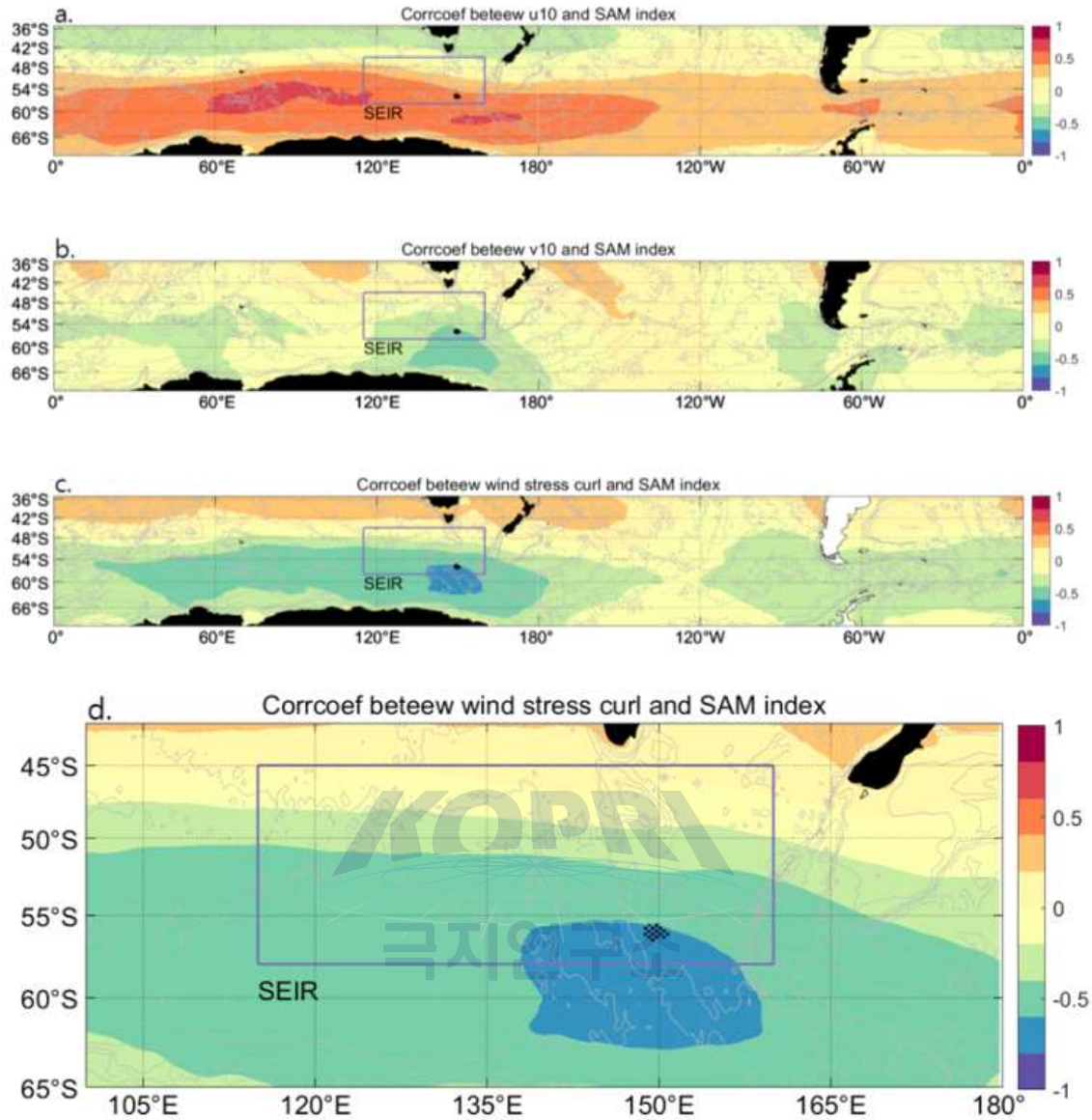
[그림 9] GLORYS12V1에서 계산한 2007년과 2010년의 연평균 및 연직방향 적분한 EHF. EHF 벡터의 남향 성분 중 음의 값만을 도시함.



[그림 10] GLORYS12V1에서 계산한 SEIR 해역의 26년간(1993~2018년) 평균 EHF 공간분포도. 파란점은 KOPRI와 URI의 PDS-CPIES 계류정점을 의미함.



[그림 11] GLORYS12V1 재분석 수치모델 EHF 분석 결과. ACC 전해역 EHF의 시계열 그래프(a), SEIR에서의 EHF 시계열 그래프(b), ACC 전해역에서의 EHF가 -10 MW/m 이하의 값을 가지는 그리드 개수 변화(c), SEIR에서 EHF가 -10 MW/m 이하의 값을 가지는 그리드 개수 변화(d).



[그림 12] ACC 전해역에서 ERA5 10-m zonal wind(u10)과 SAM index와의 시간 상관계수 공간분포도(a)와 10-m meridional wind(v10)과 SAM index와의 시간 상관계수 공간분포도(b). ACC 전해역에서 ERA5 바람응력과도 자료와 SAM index와의 시간상관계수 분포도(c), SEIR에서의 ERA5 바람응력과도와 SAM index 사이 공간상관계수 분포도(d).

3.2 남극해 SEIR 해역에서의 PDS-CPIES 계류/회수 및 현장 관측

남극해 SEIR 해역에서의 극전선 통과 EHF의 시공간변동 모니터링을 목적으로하는 관측시스템을 구축하기 위해 PDS-CPIES를 투입하였다. PDS-CPIES 계류는 극지연구소 아라온호 남극항차(2021년 10월 20일~12월 3일)때 수행되었다. PDS-CPIES 계류정점은 총 16개로 KOPRI 담당 4개 정점과 URI 담당 12개 정점으로 구성되었다[그림 13]. KOPRI 정점의 CPIES 한 대에 PDS 세 대가 함께 계류되어 장비 회수 전에 관측자료를 사전에 획득할 수 있도록 하였다. 세 대의 PDS 표층부상 날짜는 2022년 9월 19일, 2023년 11월 13일, 2024년 9월 23일로 설정하였다.

현장관측에 사용된 CPIES와 PDS는 2021년 8월과 9월 사이에 미국 URI로부터 도입 완료하였다. CPIES는 투입 이전에 트랜스듀서, 압력 센서, 해류계의 작동검사 및 배터리 체크 등을 수행하여 정상 작동함을 확인하였다. 아라온호 승선 이후 PDS의 GPS 정상작동 여부와 위성과의 통신상태 및 CPIES와의 데이터 송신상태 등을 점검하였다. 장비 정상작동 확인 후 PDS와 CPIES에 관측 주기 및 표층부상 시간 설정 등을 포함한 기기 설정을 진행하였고 관련 정보는 [표 1]과 [표 2]에서 볼 수 있다. CPIES는 약 3년 동안의 장기간 관측이 가능하도록 설정되었다. PDS와 CPIES는 30분 간격의 관측자료를 한 시간 간격으로 송수신하도록 설정하였다.

PDS-CPIES 계류작업은 계류 라인 준비, 해저지형 탐색, PDS-CPIES 계류, CTD full casting 순으로 진행되었다. 정점 도착 전 거치대에 CPIES를 설치 후 PDS를 적정 위치에 오도록 설치하였다[그림 14]. 거치된 CPIES에 유리구 부이와 하강을 위한 웨이트를 달아 주었다. 장비 투입 전 아라온호에 장비된 Multibeam Echo Sounder를 이용해 정점 주변 해저지형 탐색을 진행 후 PDS-CPIES가 투입이 적절치 않은 복잡한 해저지형 여부 등을 확인하여 투입 위치를 세밀히 조정하였다. 투입 결정된 정점에서 아라온호 선속을 1kn으로 유지하며 PDS-CPIES를 안정적으로 투입하였고[그림 14] 정확한 장비 투입 위치, 시간, 수심 등의 정보를 기록하였다. CPIES는 투입 이후 하강 여부, 해지면 도착, 관측 수행 여부를 음파 신호를 통해 연구선 위의 사용자가 확인할 수 있다. 음파 신호 송수신을 위해 아라온호에 부착된 트랜스듀서와 UTS-9500 장비를 연결하여 사용하였고 모든 정점에서 CPIES의 바닥 도착 후 16초와 18초 간격의 4 ping으로 이루어진 정상 관측 신호를 확인하였다. 관측 신호 확인 후 CTD full-casting을 통해 관측정점의 연직 물성 프로파일을 획득하였다.

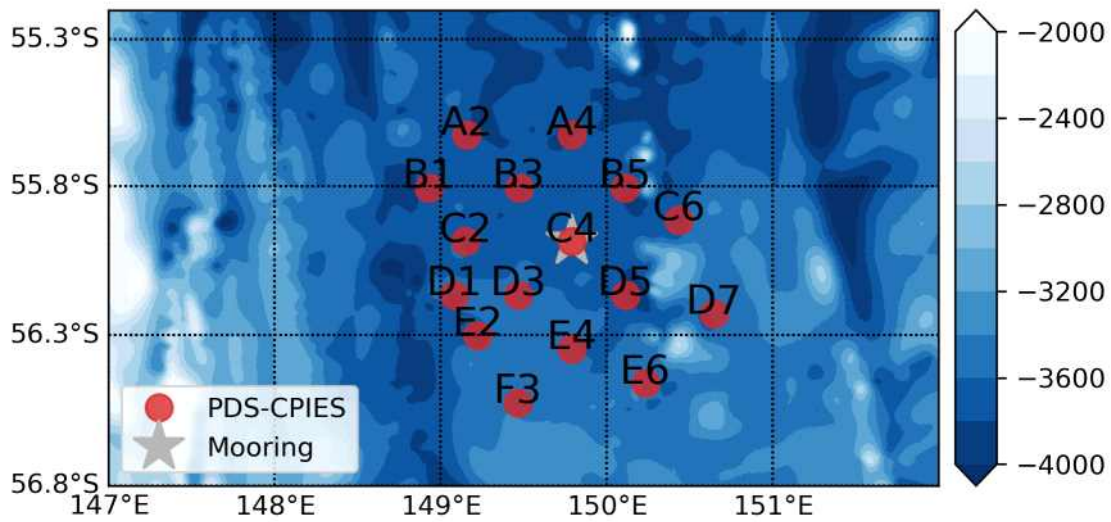
약 3년간의 CPIES 관측 이후 극지연구소 아라온호 남극항차 ANA15B (2024년 12월 27일~2025년 2월 23일)에서 1차적으로 회수를 진행하였다. 해당 항차를 통해 총 9기의 CPIES를 회수하였으며, 4기의 PDS-CPIES를 재계류하였고 해당 회수/계류 위치는 [그림 15]에 표시하였다. 회수된 9개 지점의 CPIES는 관측 신호를 10분당 4 ping으로, current meter는 저층 유속을 30분 간격으로 기록하도록 구성되었으며, 관련 정보는 [표 3]에서 확인할 수 있다. 나머지 7개의 정점에 대해서는 hull-mounted transducer를 이용하여 관측 신호를 확인하고, 통신 여부를 확인하기 위해 사용자가 clear command를 송신하여 CPIES의 응답 신호를 확인하였다. 회수한 정점 중 B3, B5, D3, D5의 정점에 대해서는 PDS-CPIES를 재계류하였으며, 음파 왕복 시간 (τ)는 10분당 4 ping으로 설정되었고, 저층 압력과 저층 유속은 30분 간격으로 측정하도록 설정하였다. 재계류된 4개 지점에서의 PDS-CPIES에 장착된 각 PDS 부이는 CPIES로부터 매시간 전송되는 저층 유속, 저층 압

력 그리고 음파 왕복 시간 (τ)을 수신하도록 구성되었으며, 2026년 12월 1일에 자동으로 분리 및 회수되도록 프로그램되었다.

극지연구소 아라온호 남극항차 ANA16A (2025년 11월 22일~2025년 12월 21일)에서 남은 CPIES에 대한 회수작업을 진행하였다. 회수한 CPIES의 개수는 총 11기이며, 2021년에 계류한 7기와 추가적으로 ANA15B에서 계류한 4기가 포함된다. 회수 작업 및 통신 테스트에는 아라온호의 선체에 장착된 hull-mounted transducer를 이용하였으며, 작업 대기 시에는 이를 이용하여 관측 신호를 확인하였다. 기상 변수에 대한 위험을 최소화하기 위해 해가 떠있는 시간에 최대한 회수 작업을 진행하였으며, 일몰 후에는 CTD casting 작업을 진행하여 관측 자료의 검증 및 비교에 사용하고자 하였다. 회수한 CPIES로부터 관측자료는 케이블 또는 메모리 칩을 통해 성공적으로 추출되었는데, 2021년부터 계류되었던 CPIES는 배터리 방전의 이슈로 인해 케이블로 통신이 되지 않는 부분을 확인하였다.

최종적으로 남극해 SEIR 해역에서의 CPIES 관측 정점은 16개이며, ANA16A 항차를 끝으로 전량 회수 완료하였다. 2021년 11월부터 시작된 관측을 통해 각 정점에서 최소 3년 이상 길이의 장기관측자료를 획득했다. 획득된 장기 관측자료는 심층 해류장을 보여주는 해저면 근처 유속과 수층 내 수온변화를 보여주는 음향전달시간으로 구성되어있어, 16개 정점으로 구성된 넓은 관측해역에서의 EHF의 시공간변동 특성 분석에 활용될 예정이다. 모든 정점에 대한 위치 및 ANA16A 항차에서 회수한 정점에 대한 정보는 [그림 16]과 [표 4]에서 확인할 수 있다.





[그림 13] PDS-CPIES 관측정점도 및 관측해역 주변 해저면 수심(m).



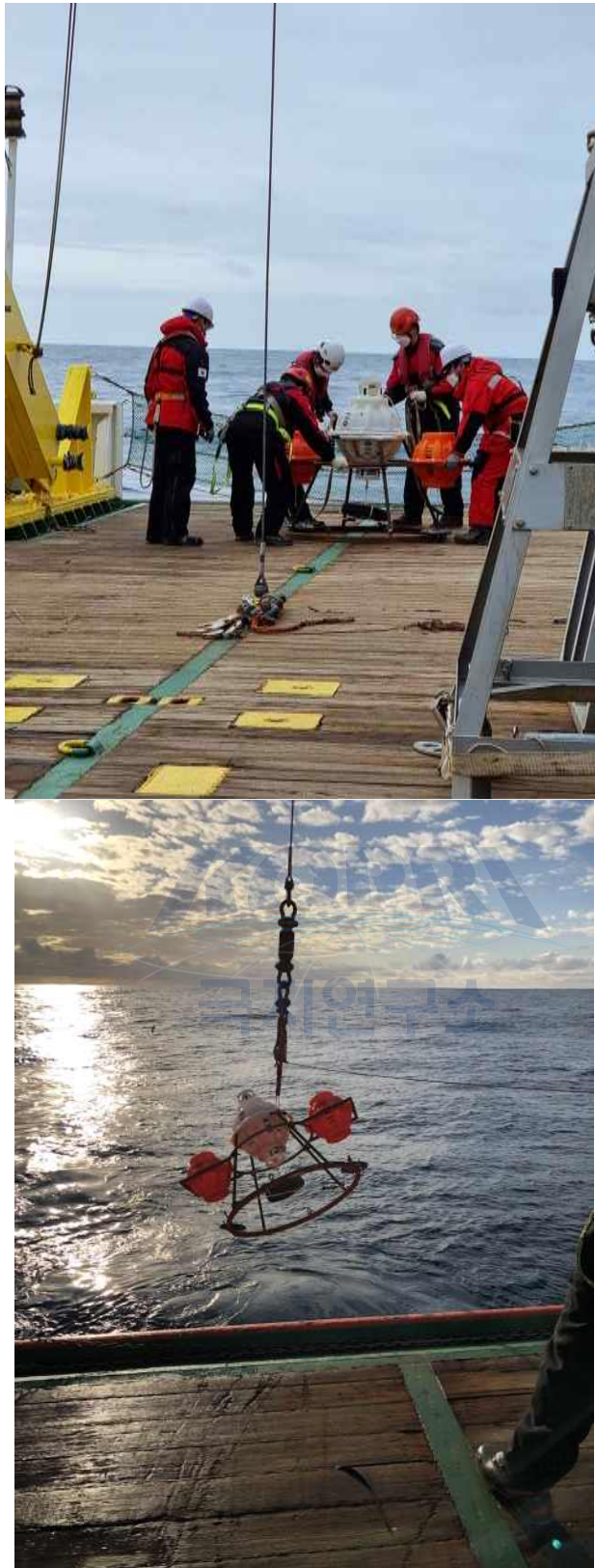
SEIR PDS_CPIES (ARAON 2021)

PIES (+CM)	105 (+339)	109 (+348)	118 (+504)	152 (+503)
PDS	103 104 105	106 107 108	109 110 111	112 113 114
Site name (CTD site name)	B3 (ANA12A009)	B5 (ANA12A015)	D3 (ANA12A008)	D5 (ANA12A011)
Location	149°28.356'E 55°48.378'S	150°06.708'E 55°48.378'S	149°28.176'E 56°09.978'S	150°06.888'E 56°09.978'S
Dep (mindep)	3795 (3685)	3721 (3684)	3576 (3576)	3655 (3627)
Clear	76	76	76	76
XPND	71	69	69	70
Beacon	75	73	73	74
Telemetry	67	65	65	66
Release	41	45	54	24
Auto release	2026/03/03 12:00	2026/03/04 00:00	2026/03/03 00:00	2026/03/04 12:00

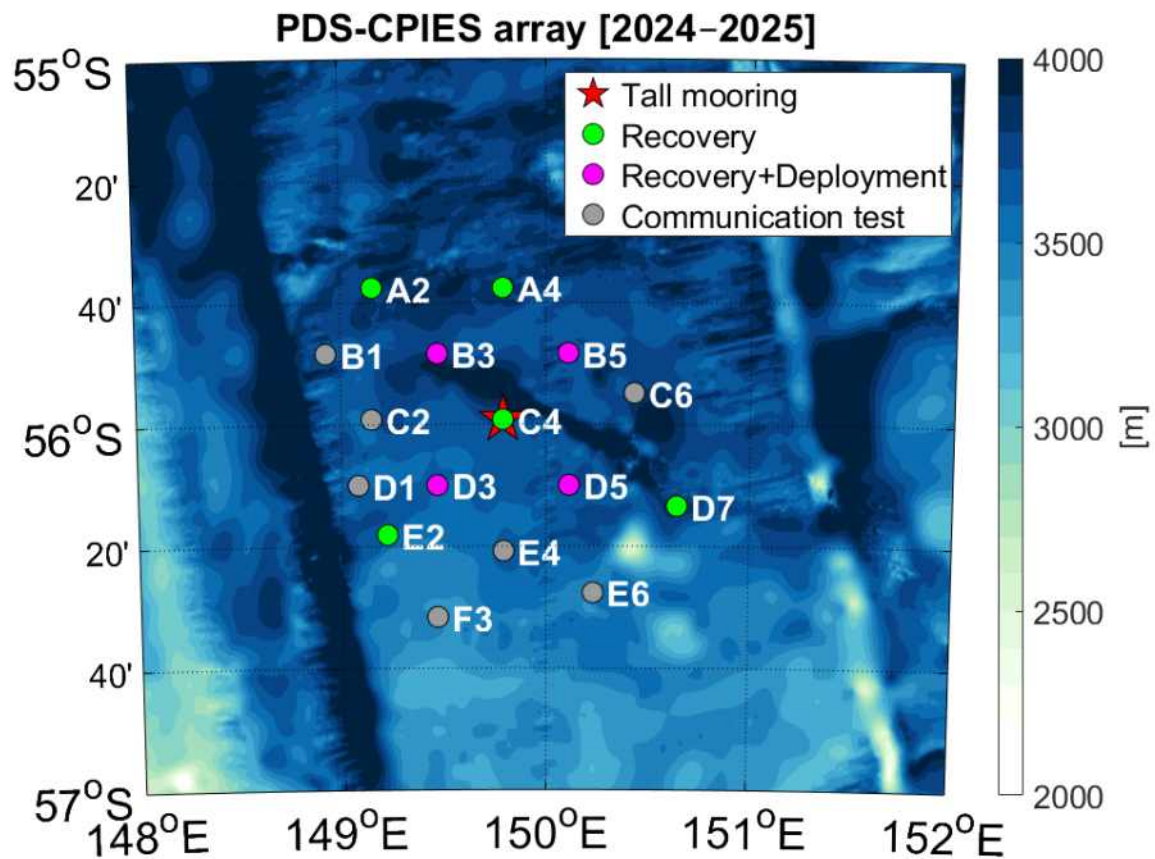
[표 1] PDS-CPIES 계류 정보 및 관측정점 정보.

PDS S/N	with CPIES	Planned release date (UTC)	IMEA (30053406+)
103	105	2022/09/19 00	0066440
104	105	2023/11/13 00	0162360
105	105	2024/09/23 00	0164480
106	109	2022/09/19 00	0265090
107	109	2023/11/13 00	0389540
108	109	2024/09/23 00	0952350
109	118	2022/09/19 00	0952870
110	118	2023/11/13 00	0953910
111	118	2024/09/23 00	0956750
112	152	2022/09/19 00	0956950
113	152	2023/11/13 00	0957720
114	152	2024/09/23 00	0959190

[표 2] 계류된 PDS 정보 및 설정된 표층 부상 시간.



[그림 14] PDS-CPIES 계류 전 준비작업(상) 및 계류(하) 사진.

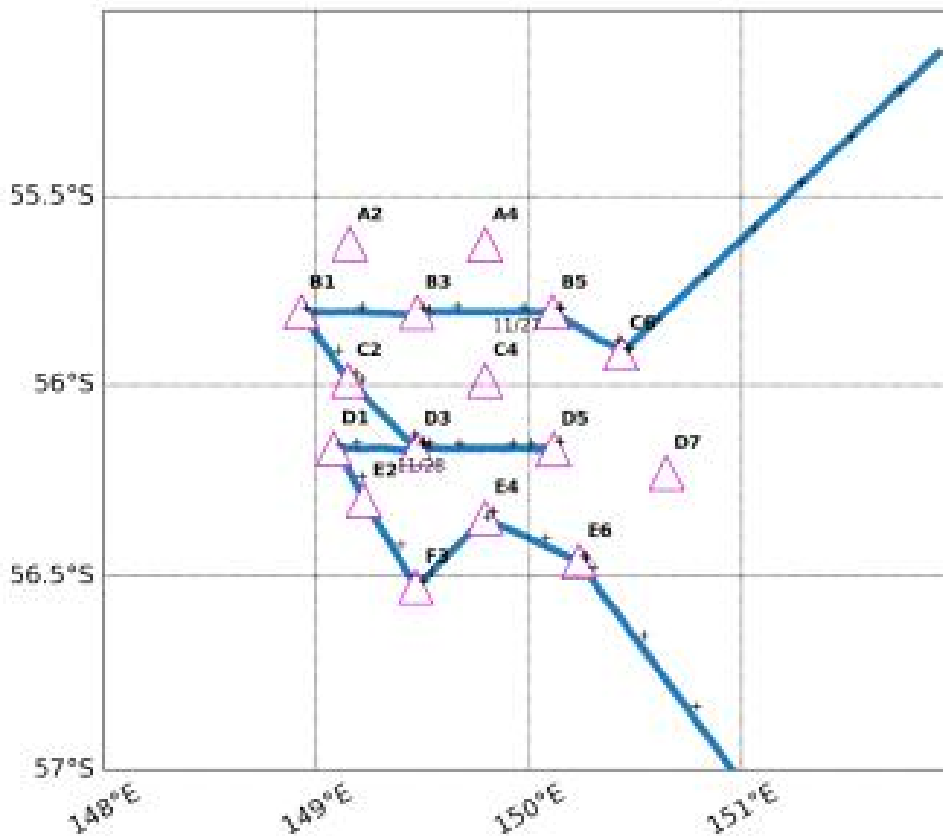


[그림 15] ANA15B 당시 CPIES 회수 및 재계류 위치에 대한 정점도 및 수심.

SEIR PDS_CPIES (ARAON 2024)

PIES (+CM)	053 (+11)	110 (+12)	105 (+339)	109 (+348)	118 (+504)	152 (+503)	151 (+311)	142 (+230)	156 (+337)
Site name	A2	A4	B3	B5	D3	D5	D7	C4	E2
Location	149°09.3397'E 55°37.5509'S	149°47.4948'E 55°37.5669'S	149°28.2990'E 55°48.3733'S	150°06.6666'E 55°48.3695'S	149°28.1496'E 56°09.9714'S	150°06.8587'E 56°09.9663'S	150°38.6887'E 56°13.7739'S	149°47.4915'E 55°59.1995'S	149°13.3864'E 56°18.0889'S
Dep (mindep)	3857 (3723)	3787 (3752)	3795 (3685)	3721 (3684)	3576 (3576)	3655 (3627)	3878 (3535)	3752 (3617)	3581 (3581)
Clear	76	76	76	76	76	76	76	76	76
XPND	70	70	71	69	69	70	69	69	71
Beacon	74	74	75	73	73	74	73	73	75
Telemetry	66	66	67	65	65	66	65	65	67
Release	53	46	41	45	54	24	23	14	28
Auto release	2026/03/01 00:00	2026/03/03 18:00	2026/03/03 12:00	2026/03/04 00:00	2026/03/03 00:00	2026/03/04 12:00	2026/03/05 00:00	2026/03/03 06:00	2026/03/02 06:00

[표 3] ANA15B 당시 회수된 CPIES의 정보 및 위치.



[그림 16] ANA16A 당시 CRIES 회수 위치에 대한 정점도 및 작업 진행 시 아라온호의 경로.

Station	Longitude	Latitude	Recovery Date (UTC)	Notes
C6	150° 26.020' E	55° 54.859' S	2025/11/26 20:44	
B5	150° 06.675' E	55° 48.340' S	2025/11/26 23:20	
B3	149° 28.244' E	55° 48.352' S	2025/11/27 02:57	
B1	148° 55.711' E	55° 48.357' S	2025/11/27 06:25	
C2	149° 08.959' E	55° 59.167' S	2025/11/27 09:03	
D5	150° 06.780' E	56° 09.934' S	2025/11/27 20:29	
D3	149° 28.121' E	56° 09.934' S	2025/11/27 23:57	
D1	149° 04.924' E	56° 09.938' S	2025/11/28 02:30	
F3	149° 28.045' E	56° 31.597' S	2025/11/28 05:50	
E4	149° 47.590' E	56° 20.782' S	2025/11/28 08:10	
E6	150° 13.960' E	56° 27.626' S	2025/11/28 10:40	

[표 4] ANA16A 당시 CRIES 회수에 대한 위치 정보 및 회수 시각.

3.3 PDS 전송 관측자료 분석결과

SEIR 해역의 네 개 KOPRI 정점에 2021년 11월에 투입된 PDS 중 5대가 2022년 중에 해수면으로 부상하여 CPIES 관측자료를 위성으로 전송하였다. 관측정점 B5, D3, D5에 투입된 PDS S/N 106, 109, 112은 사전에 계획된 2022년 9월 19일에 정확히 부상하였다. 정점 B3에 투입된 PDS S/N 103, 104는 기술적인 문제로 인해 계획된 시점보다 빠른 2022년 1월 17일과 4월 3일에 부상하였다. 네 정점의 CPIES 관측자료는 PDS로부터 이리듐 위성으로 전송되었고 자료전송시스템을 활용하여 모두 성공적으로 획득되었다. 획득된 관측자료는 SBD 형식으로 이루어졌고 하나의 SBD 파일은 9시간 길이의 CPIES 관측자료로 구성되어 있다. 모든 SBD 파일을 취합하여 분석 가능한 형태로 변환한 후 자료처리를 통해 비정상 관측값, spike, 해저면 압력(P_b)의 조석신호 및 drift를 제거했다. B3 정점의 두 PDS는 동일한 기간의 약 2달(2021년 11월 16일~1월 16일) 길이의 자료를 보내왔다[그림 17]. B3 외 세 정점에선 모두 약 10달(2021년 11월~9월 19일) 길이의 관측자료가 전송되었다[그림 18, 그림 19]. 정점 B5에선 해저면 근처 유속이 알 수 없는 이유로 정상 관측되지 않았다.

PDS가 송신한 관측자료 분석 결과, 관측정점 B3에서 ACC 사행과 관련된 신호들이 관측되었다[그림 17]. 연직 음파 왕복시간(τ)은 관측 기간에 걸쳐 증가하는 추세를 보였다. τ 는 수온의 변화에 민감하고 τ 의 증가추세는 수온의 감소 혹은 수온약층 두께 감소로 해석된다. 관측해역은 상층의 ACC가 남북방향으로 뻗은 해저산맥으로 통과하면서 큰 사행이 주로 발생하는 곳이다. 따라서, 관측된 τ 증가는 ACC 사행과 관련된 극전선 축의 위치 이동 혹은 ACC 사행의 결과로 만들어진 중규모 소용돌이 생성에 따른 수온약층 두께 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. B3의 P_b 는 τ 와 마찬가지로 관측기간에 걸쳐 증가하는 추세를 보이지만 주로 약 14일 주기의 변동이 우세하였다. 이는 순압 유속에 가까운 ACC의 사행의 신호 혹은 서향하는 순압성 로스비파가 관측된 것으로 보인다. 해저면 근처 유속은 순압성 소용돌이의 신호를 포함하고 있고 조석 및 준관성주기파와 관련된 단주기 성분도 포함하고 있다. 관측 초기(11월)과 후기(1월)에 강한 극전선 통과 EHF를 만들 수 있는 북향과 남향의 유속이 강하게 발생했다.

순압성 로스비파, ACC 사행, 준관성주기파의 신호가 약 10달간의 CPIES 관측으로 확인되었다[그림 18, 그림 19]. KOPRI 네 정점의 P_b 는 서로 상당히 일치하는 시계열을 보여주었다[그림 18]. 그중 14일 주기의 P_b 변동이 가장 공통적으로 뚜렷하였고 약 0.13dbar의 변동폭을 가지고 있다. 이 14일 주기 변동성은 모든 정점에서 거의 동시에 발생하고 있어 대기압, 바람에 의해 생성되어 서쪽으로 전파한 순압성 로스비파의 신호로 추측된다. P_b 는 약 7일 주기의 공통된 변동성도 포함하는데 이것 역시 동쪽에서 기원한 순압성 로스비파 혹은 관측해역의 대기압, 바람응력와도의 효과로 만들어진 신호로 보인다. 네 개 관

측정점에서 τ 는 서로 상당히 비슷한 시계열을 가지고 있고 약 15일과 약 30일 이상의 상대적으로 장주기 변동이 우세하였다[그림 18]. CPIES 관측해역을 SEIR를 통과하는 ACC의 남쪽 경계에 위치하므로, 약 30일 이상 주기의 변동은 ACC 사행과 사행에서 기원한 중규모 소용돌이가 관측된 것으로 추측된다. 15일 주기의 τ 변동은 30일 주기 변동에 비해 변동폭이 작아 약 14일 주기 P_b 와 연관이 있을 것으로 보인다. D3, D5 정점에서 관측된 해저면 근처 유속은 EHF와 관련된 peak와 반일주기 조석과 준관성주기 변동을 가졌다[그림 19]. 두 정점에서 2022년 1월, 3~4월, 6월에 남북향 유속의 peak가 관측되었고 이 유속 변화는 극전선을 통과하는 강한 EHF를 야기할 수 있다. 관측된 준관성주기 유속의 power spectrum은 넓은 진동수 범위를 가지고 있어, 시기에 따라 준관성주기파의 적도방향 전파 혹은 ACC에 의한 전파의 가로막힘이 관측된 것으로 보인다. 해저면 근처 유속과 P_b , τ 에 SEIR 극전선 사행과 순압성 소용돌이가 관측되어 이를 활용한 극전선 통과 EHF 발생 기작과 변동성이 연구될 수 있을 것으로 기대된다.

위성 전송된 CPIES 자료를 활용하여 SEIR 해역의 해류장 변동 특성을 이해하기 위해 분석을 진행하였다. 위성 자료의 ADT와 더불어 관측자료를 활용하여 SEIR 해역에서 극전선 통과와 관련된 해류장의 시공간적 변동을 분석하였다. 관측된 해저면 근처 유속 자료를 기반으로 principal ellipse 분석을 수행한 결과, 극전선 인근에서 유속의 주성분 방향과 크기가 뚜렷하게 변화하는 양상이 확인되었다. 특히 북쪽 해역에서는 극전선 통과 시 유속 분산이 상대적으로 크게 나타나, 극전선 위치 변화가 해저면 근처 유속 변동성을 증폭시키는 주요 요인임을 시사한다[그림 20].

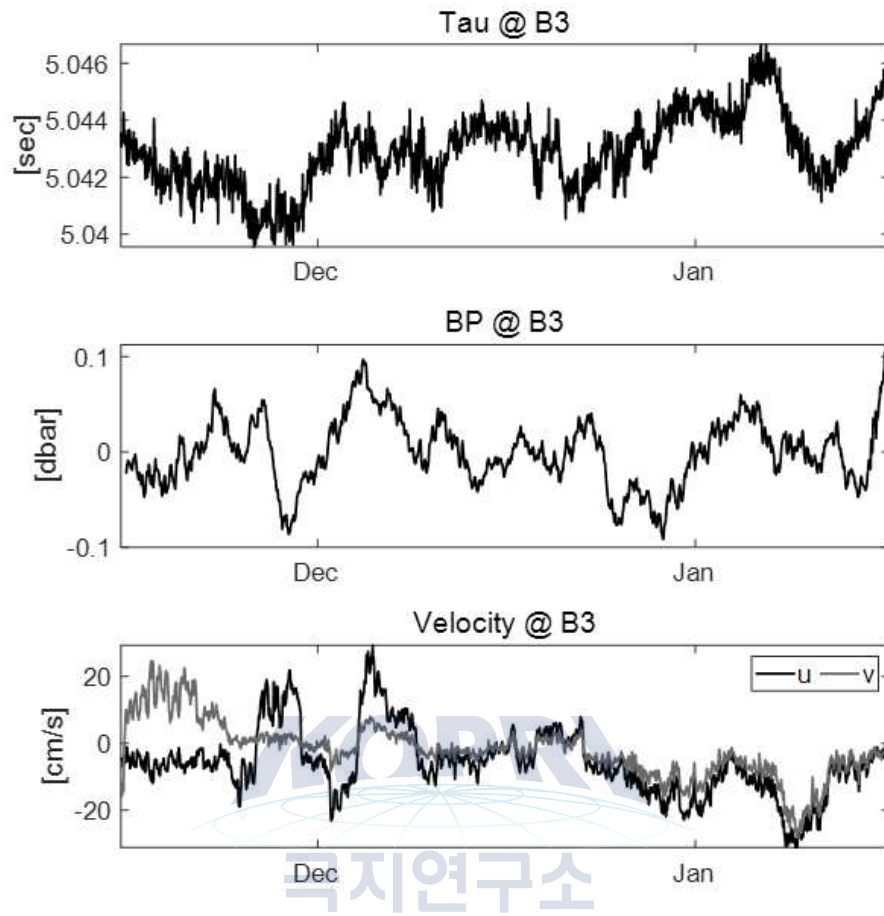
Principal ellipse의 장축 방향과 크기 분포를 살펴보면, 북동쪽에 위치한 관측 정점들에서는 유속 변동의 주된 방향이 해수면 높이 경사를 가로지르는 방향에 해당하는 것으로 나타났다. 북동쪽에 위치한 관측정점들은 주로 남극환류의 강한 극전선이 주로 분포하는 곳에 해당한다. 따라서, 관측 유속에서 나타난 해저면 근처 유속이 전선을 가로지르는 방향으로 주로 변동하는 것은 극전선에서 baroclinic instability가 발생과 동반되는 심층 소용돌이가 발생했음을 의미한다. 추가로 극전선 통과 유속의 분산 특성을 정량적으로 평가한 결과, 유속 분산 반경을 원으로 표현한 그림에서 북동쪽 해역(A2, A4, B3, C4 등)에서 상대적으로 큰 분산 반경이 나타났다[그림 21]. 이는 주로 북동쪽 해역에서 강한 극전선 통과 유속이 강하게 발생하고 있음을 시사한다.

극전선 변동과 관련된 해류장 변화를 보다 정량적으로 이해하기 위해, CPIES 관측으로부터 산출된 극전선 통과 유속과 위성 기반 해수면 높이 변동 간의 관계를 비교·분석하였다. 극전선 통과 유속의 시계열과 해수면 높이 변동을 함께 제시한 그림에서, 두 변수는 전반적으로 유사한 변동 패턴을 보이며 유의미한 상관관계를 나타냈다[그림 22]. 특히, 북동쪽 해역에 위치한 A4 정점에서는

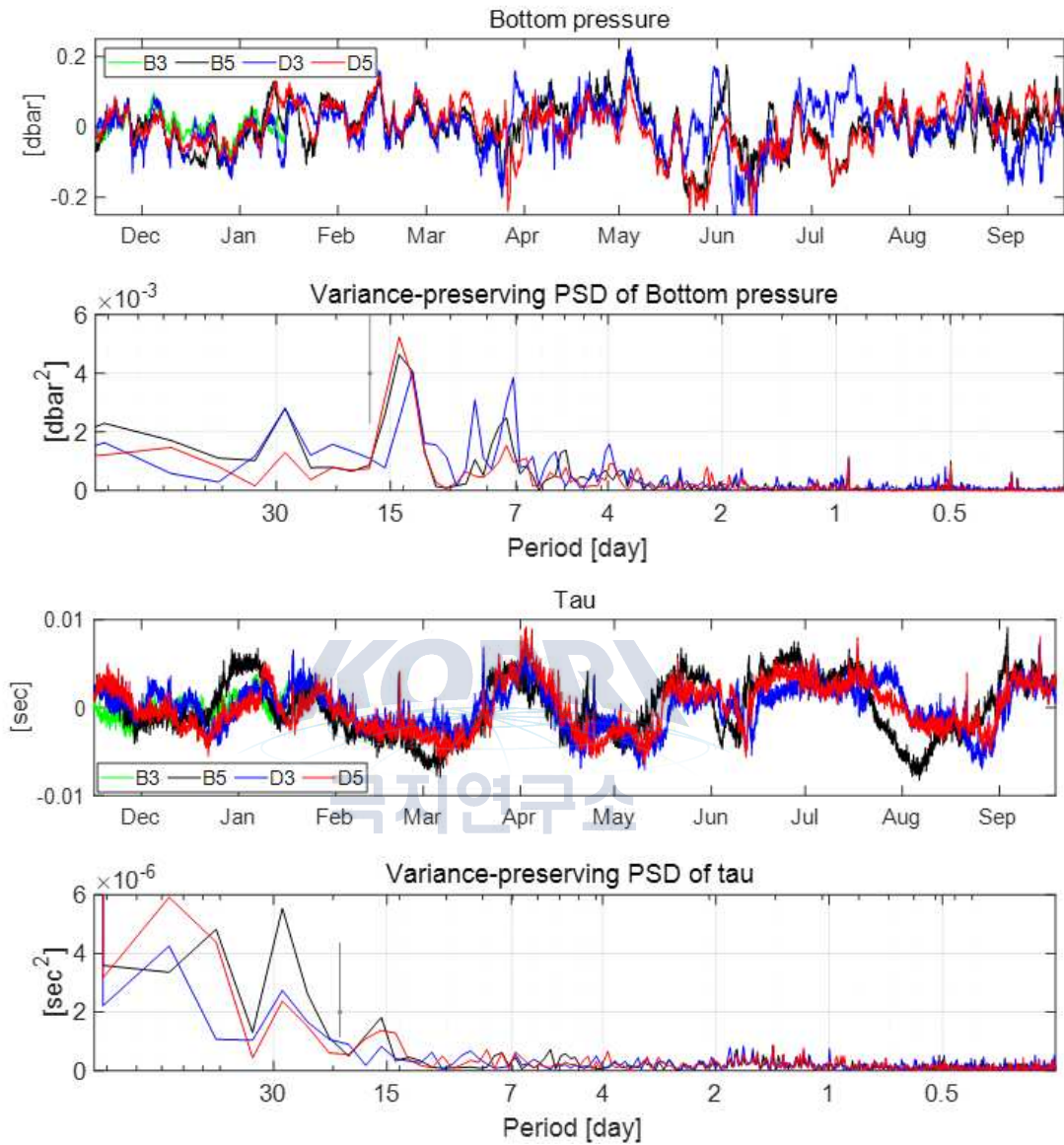
극전선의 남북 이동에 따라 해저면 유속의 방향이 일관되게 변화하는 특징이 뚜렷하게 나타났다. 극전선이 남쪽으로 이동한 시기에는 해저면 근처에서 해수면 경사를 따라 강하게 남하하는 유속이 발생하였으며, 반대로 극전선이 북쪽으로 이동한 경우에는 북상하는 유속이 우세하게 관측되었다. 이러한 변화는 해수면 높이 공간 분포와 연계된 극전선 위치 변화가 해저면 유속 방향을 직접적으로 제어하고 있음을 의미한다.

또한, 강한 극전선 통과 유속이 발생한 두 달짜에서 위성이 관측한 해수면 높이가 분포와 해저면 유속 벡터를 비교한 결과, 극전선 이동 시 해수면 높이가 구배가 강화되며 강한 극전선 통과 유속이 동반되는 양상이 확인되었다[그림 23]. 이러한 특징은 극전선 이동 과정에서 baroclinic instability가 발생했음을 시사하며, 이와 함께 관측해역에서 극전선 통과 열속이 관측기간에 걸쳐 지속적으로 발생해왔음을 시사한다.

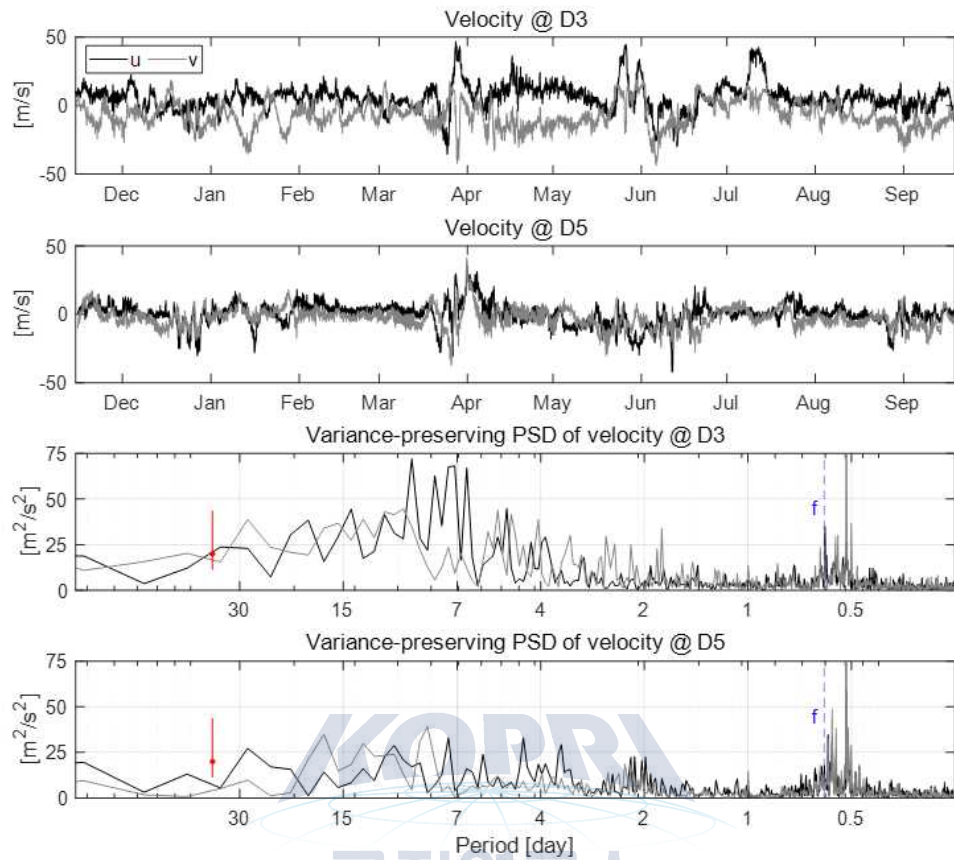
관측 자료에서 확인된 극전선 통과 유속과 해수면 변동 특성을 검증하기 위해, GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024(GLORYS) 수치모델 자료를 활용하여 해류장 변동을 분석하고 CPIES 관측 결과와 비교하였다. GLORYS 모델의 해수면 높이와 해저면 유속 분포를 CPIES 관측 결과와 비교한 그림에서 극전선 인근의 해수면 높이 구배와 해저면 근처 유속 구조가 전반적으로 유사하게 재현됨을 확인하였다[그림 24]. 특히 극전선 통과 해역에서는 해수면 높이가 구배가 크게 나타나며, 이에 따라 강한 해류가 형성되는 특징이 관측과 모델 결과 모두에서 공통적으로 나타났다. principal ellipse 분석 결과 또한 유속의 방향성과 크기 분포가 관측 결과와 정성적으로 잘 일치하였다. 더 나아가, 극전선 위치 변화에 따른 유속의 시공간적 변동성을 비교한 결과, 모델 자료 역시 극전선 이동에 따라 유속 변동성이 강화되는 경향을 재현하였다. 이는 GLORYS 수치모델이 극전선 - 해류 상호작용을 합리적으로 모사하고 있음을 의미하며, 관측이 제한적인 해역이나 장기간 변동 분석에 있어 유용한 보완 자료로 활용될 수 있음을 시사한다.



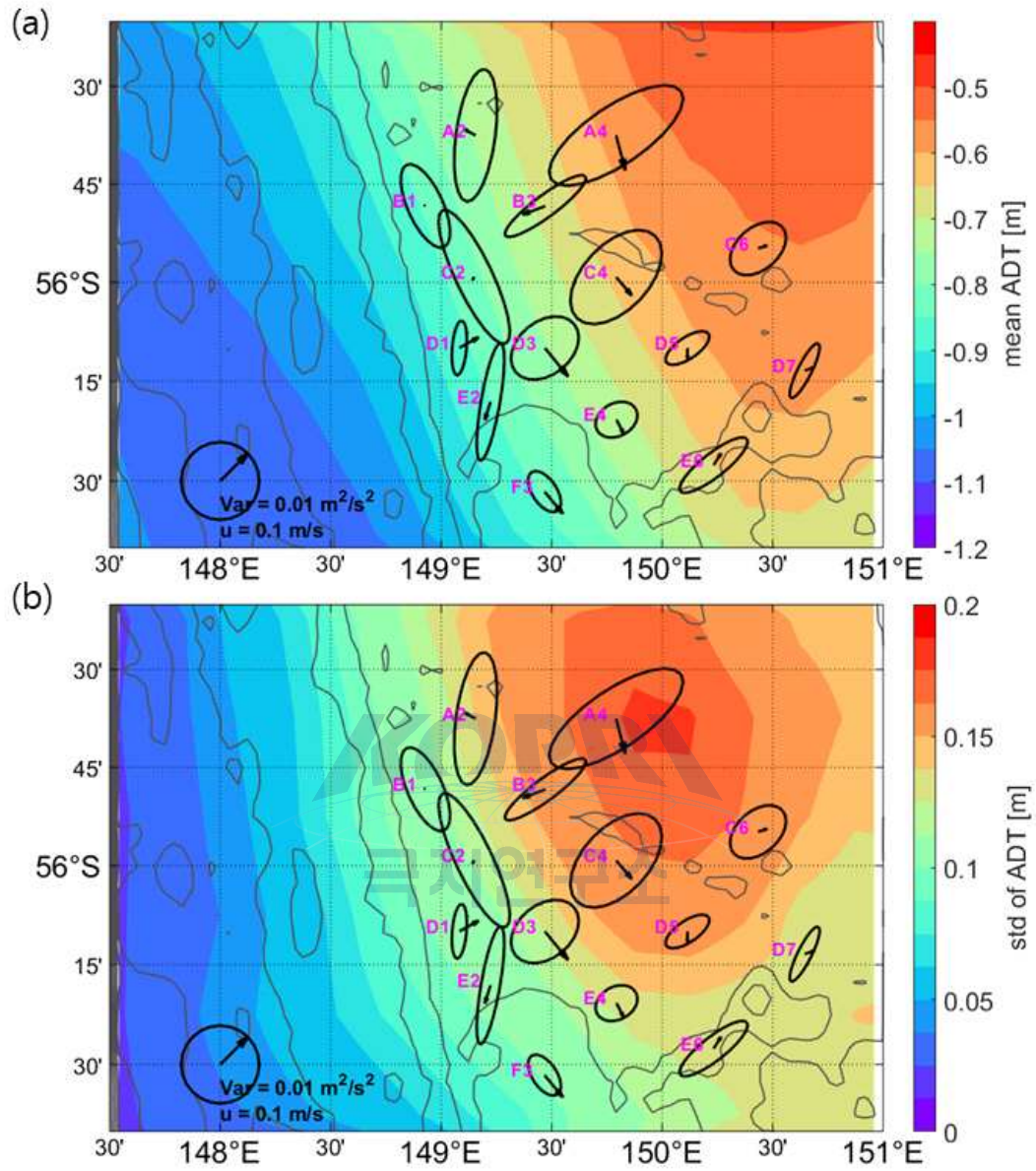
[그림 17] PDS가 전송한 B3 정점 음파 왕복시간(상), 해저면 압력(중), 해저면 근처 유속(하).



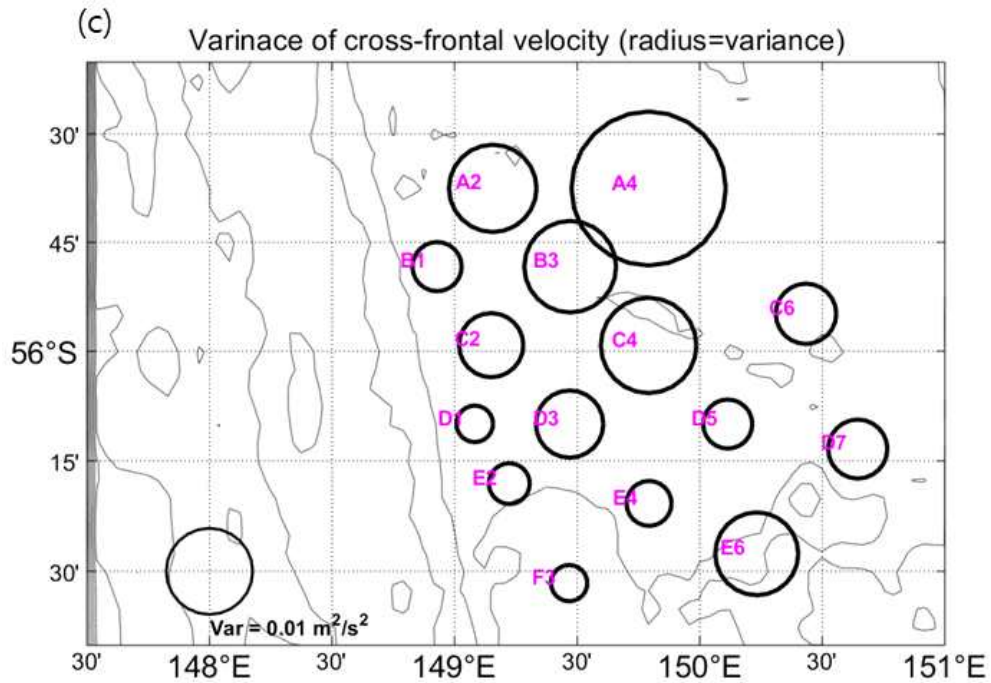
[그림 18] PDS가 전송한 네 관측정점에서의 해저면 압력(상)과 음파 왕복시간(하)의 시계열 및 Variance-preserving PSD.



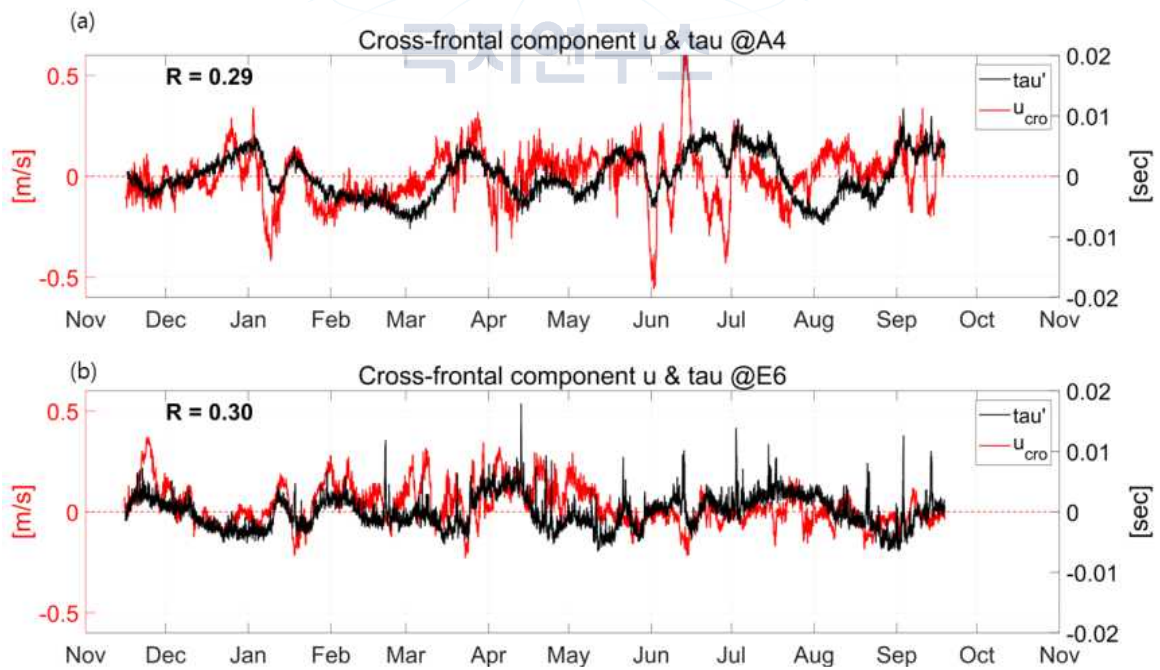
[그림 19] PDS가 전송한 D3, D5 정점에서의 해류계 관측 유속 시계열(상)과 Variance-preserving PSD(하).



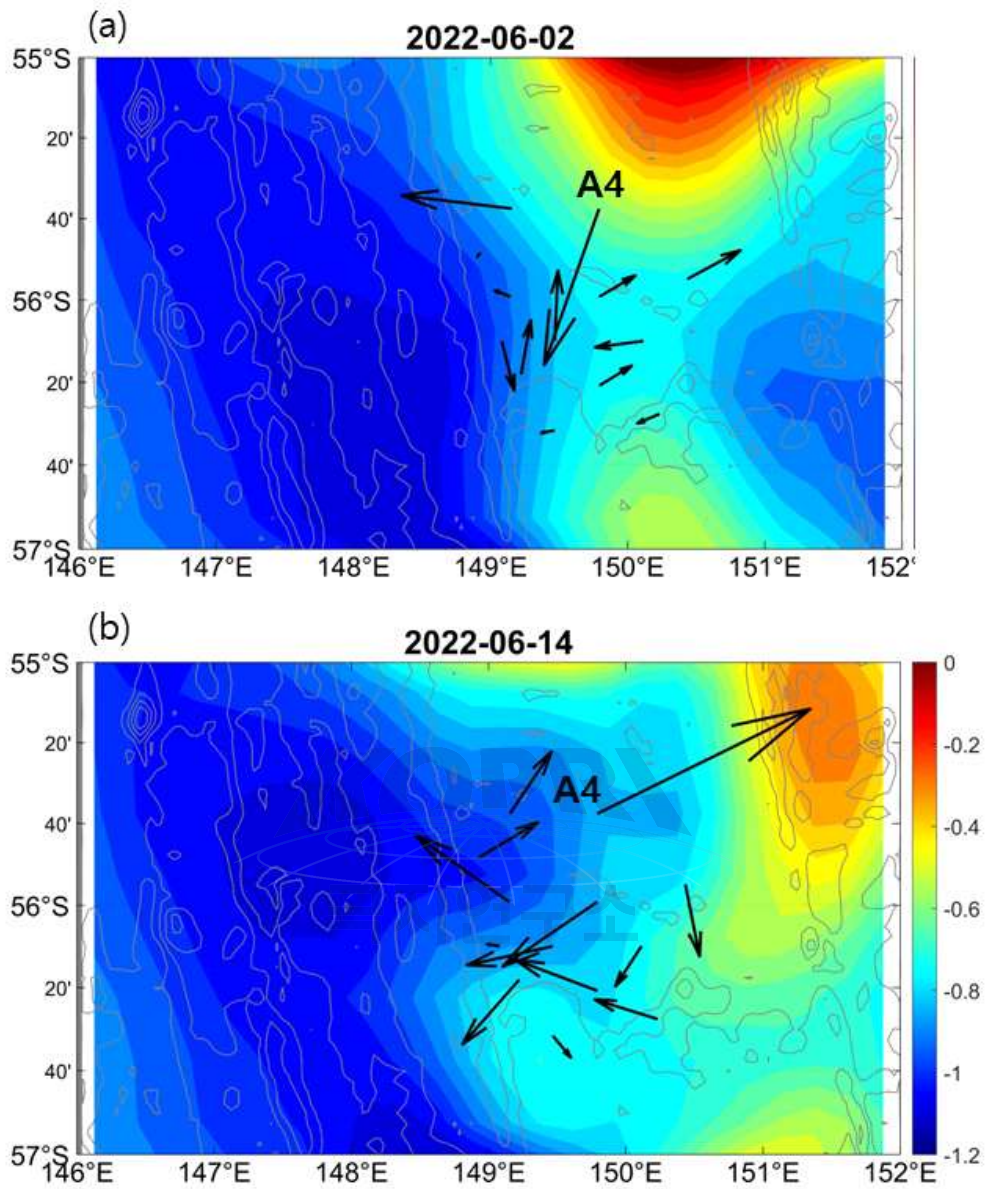
[그림 20] CPIES가 관측한 해저면 근처 유속의 principal ellipses와 위성관측 해수면 높이의 관측기간 내 평균(a)과 표준편차(b) 분포도.



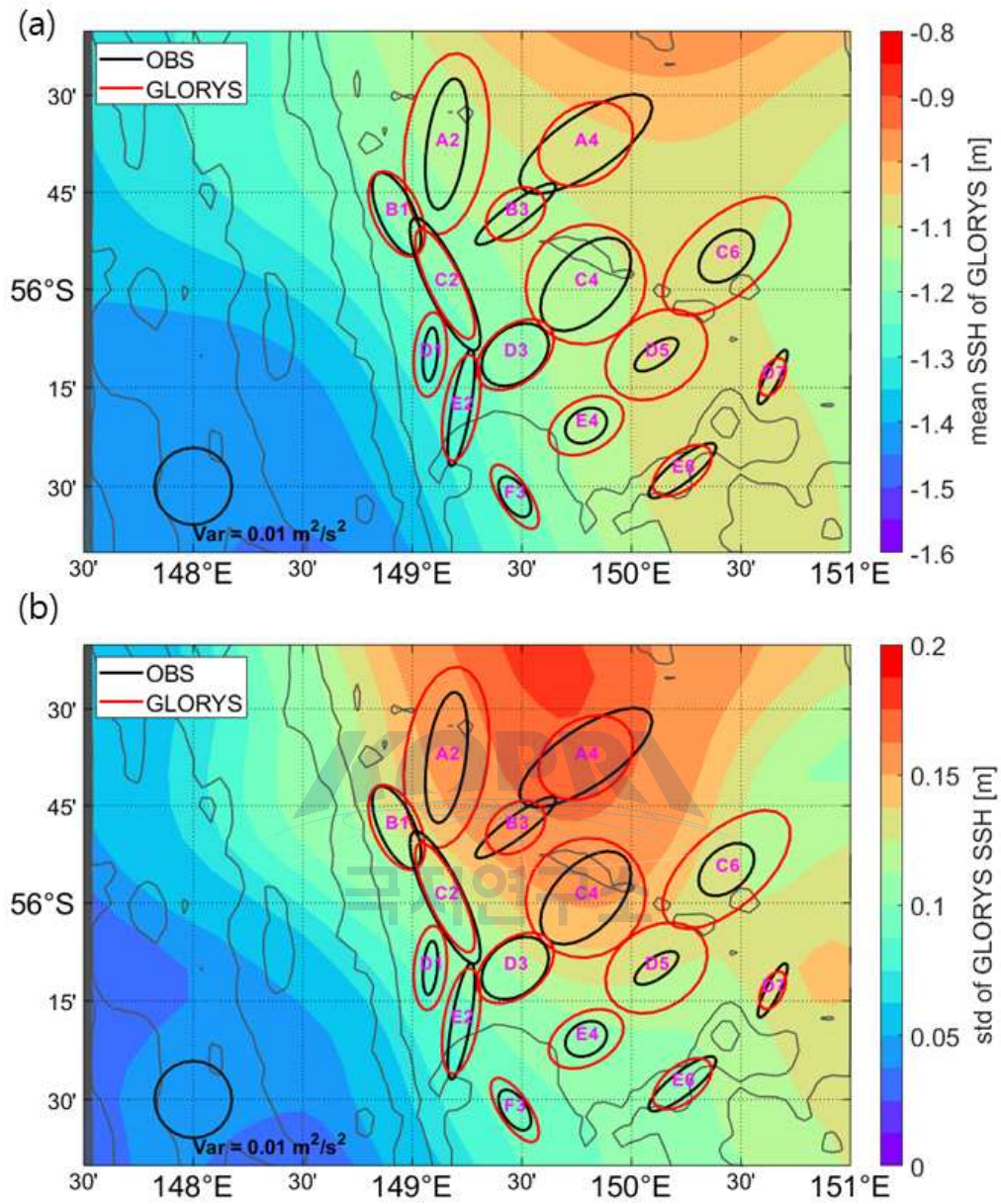
[그림 21] CPIES 관측자료로 분석한 극전선 통과 유속의 분산 분포.



[그림 22] A4(a)와 E6(b)에서 관측된 음향전달 시간 편차(τ')와 해저면 근처 유속의 극전선 통과 성분(u_{cro})의 시계열.



[그림 23] 2022년 6월 2일(a)과 14일(b)의 위성관측 해수면 높이 분포와 CPIES 관측 해저면 근처 유속.



[그림 24] CPIES 관측(흑색)과 GLORYS 분석장(적색)의 해저면 근처 유속으로 산출한 principal ellipses와 GLORYS 분석장의 해수면 높이 관측기간 내 평균(a)과 표준편차(b) 분포도.

3.4 파랑 기원 극전선 통과 열속의 경년변동성

본 과업에서는 위성으로 자료전송 이후 자유롭게 표류하는 자동자료전송 부이(PDS)의 위치정보를 장기간에 걸쳐 수집하여 남극해 극전선 해역 표층해류와 극전선 통과 열속의 특성을 조사했다. PDS는 underwater drogue가 장착되어 있지 않아 파랑의 영향을 온전히 받아 표류할 수 있다. 이러한 PDS 설계구조 덕분에 파랑에 의한 스톱스 표류가 포함되는 표층해류 관측에 활용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 자료전송이후 PDS 이동경로를 장기간에 걸쳐 추적함으로써 표층유속을 관측하고 파랑에서 기원하는 극전선 통과 열속의 발생 및 변동성에 대해 조사했다. 스톱스 표류의 변동을 조사하기 위해 첫 번째(2022년 9월 부상)와 두 번째 시기(2023년 11월)에 부상한 30대의 PDS 위치좌표를 장기간에 걸쳐 수집했다. 본 연구를 위해 PDS 이동좌표를 6시간 간격으로 최소 200일 이상의 기간에 걸쳐 수집하였다[그림 25].

남동인도양해령의 PDS-CPIES 정점에서 첫 번째와 두 번째 부상 시기에 표층으로 떠오른 총 30대(각 15대)의 PDS는 모두 동향 성분이 우세한 남극환류를 따라 동쪽으로 표류하는 경향을 보였다[그림 25]. 두 차례의 실험 결과, 동쪽으로 이동하는 과정에서 PDS의 남북 방향 이동의 정도는 서로 굉장히 달랐다. 첫 번째 해에 부상한 PDS는 남북방향 이동의 정도가 약하여 ACC 극전선을 따라 주로 이동한 반면, 두 번째 해에 부상한 PDS들은 모두 극전선을 가로질러 남하하는 이동경로를 보여주었다. 이는 ACC 해역에 걸쳐 극전선을 통과하는 해류가 분포하고 있고, 이러한 극전선 통과 해류는 뚜렷한 경년변동성을 가지는 것을 의미한다. 관측된 극전선 통과 해류는 주로 전선을 따라 동쪽으로 흐르는 지형류와 달리 전선을 통과해 열을 보다 효과적으로 전달할 수 있다. 이를 바탕으로 관측된 비지균 해류가 만드는 극전선 통과 열속에 주목하여 추후 분석을 진행했다.

가장 먼저, 극전선 통과 열속이 어떤 물리적 현상에서 기인하는지 파악하기 위해 관측유속 중 비지균류에서 기인한 열속과 재분석장이 재현하는 열속을 비교했다[그림 26]. 관측유속에서 비지균류를 뽑기 위해 위성관측 표층 지형류와 바람에 의한 직접적인 표류를 의미하는 windage를 PDS 이동속도에서 제거한 후 관측 열속을 산출하였다. 극전선 통과 열속을 만드는 것으로 널리 알려진 에크만 열속과 파랑에서 기인하는 스톱스 표류가 만드는 열속을 재분석장을 이용해 산출하여 관측해류가 만드는 열속과 비교해 극전선 통과 열속에 기여하는 정도를 정량적으로 비교하였다. 모든 열속 계산에 있어 수온 자료는 OSTIA 해수면자료를 사용했다. 에크만 유속은 ECMWF ERA5 재분석장의 바람 자료를 이용해 산출하여 열속 계산에 사용했다. 파랑에서 기원하는 스톱스 표류 자료는 ECMWF Wave model(ECWAM) 파랑모델 출력자료를 사용했다.

스톱스 표류와 에크만 유속이 만드는 열속과 상호 비교를 통해, 극전선을 통과하는 표층 해류는 주로 표층 파랑에서 기원하는 스톱스 표류가 지배적임을 확인

하였다[그림 26]. 관측된 극전선 통과 열속의 상당부분(79%)은 스톡스 표류와 에크만 유속에서 기인하는 열속으로 설명이 되었다. 특히, 스톡스 표류가 만드는 열속은 에크만 유속이 만드는 열속에 비해 약 2.5배 강한 값을 가져 표층의 극전선 통과 열속에 있어서는 스톡스 표류가 에크만 유속에 비해 더욱 중요한 물리적 현상임을 확인했다.

스톡스 표류가 극전선 통과 열속을 주로 지배하는 현상임을 바탕으로, PDS 관측된 극전선 통과 해류의 경년변동이 극전선 통과 열속의 경년변동에 미치는 영향을 추가로 조사하였다[그림 27]. 그림 27은 첫 번째와 두 번째 부상 시기에 표층 스톡스 표류가 만드는 극전선 통과 열속의 공간 분포를 보여준다. 두 시기에 모두 극전선 해역의 북부에서는 복잡한 전선 구조에 의해 극전선 통과 열속의 복잡한 분포를 보여준다. 반면, 극전선 해역의 남쪽에서는 두 시기 사이의 뚜렷한 열속의 경년변동을 확인할 수 있다. 극전선 통과 흐름이 약하게 나타났던 첫 번째 시기에 비해 남향하는 극전선 흐름이 뚜렷하게 나타난 두 번째 시기에 주로 남쪽으로 흐르는 극전선 통과 열속이 주로 분포하는 것을 볼 수 있다.

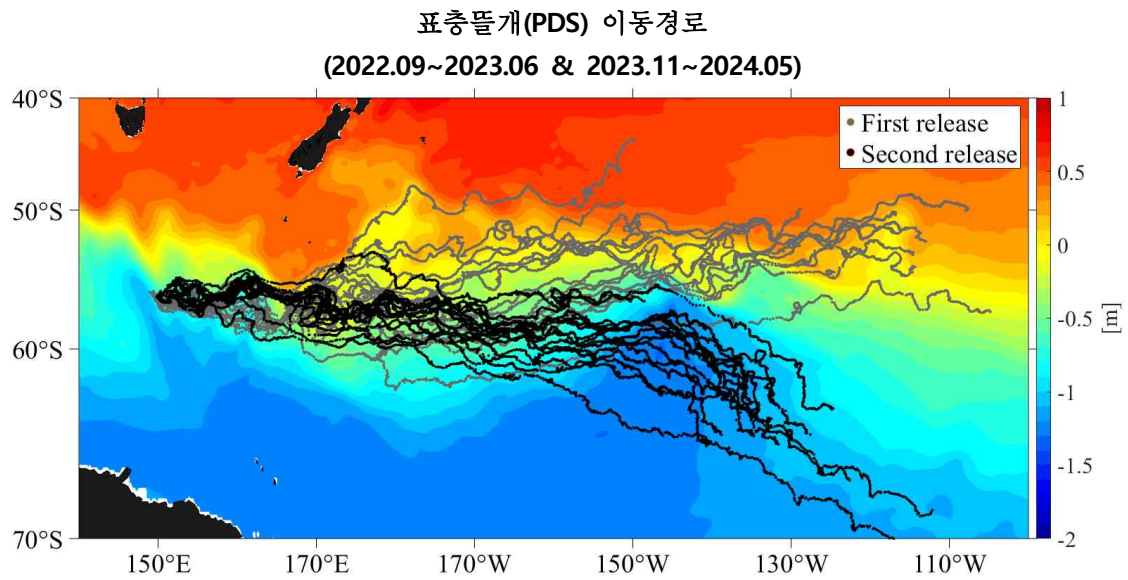
[그림 28]는 파랑이 만드는 해수 수송량을 이용해 극전선을 통과하는 열수송량을 보여준다. 그림 27과 달리 그림 28의 결과는 파랑에 의한 수면하에서 발생하는 모든 해수 수송량을 고려하여 산출된 열 수송량을 보여준다. 분석 결과, 첫 번째 부상 시기에는 파랑 기원 수송이 주로 북쪽으로 흐르는 경향이 두드러졌다. 이러한 북향하는 파랑에서 기원하는 해수 수송은 상대적으로 차가운 표층 해수를 북쪽으로 이동시켜 해양 상층 열의 감소를 유발하는 것으로 나타났다. 반면, 두 번째 부상 시기에는 남쪽으로 흐르는 파랑 기원 해수 수송량이 우세하게 나타났으며, 이는 상대적으로 따뜻한 해수를 남쪽으로 수송함으로써 해양 상층 열의 증가를 초래하였다. 이러한 결과는 바람에 의해 강제되어 생성된 표층 파랑이 표층 인근 해수를 극전선을 통과하는 방향으로 수송함으로써, 해양 상층 열 변화에 기여하고 있음을 명확히 보여준다.

관측에서 나타난 극전선 통과 열속의 경년변동의 원인을 조사하기 위해 ENSO의 영향을 주목하였다. 그림 29은 1993년부터 2024년까지 발생한 엘니뇨와 라니냐 시기를 기준으로 평균한 파랑기원 극전선 통과 열수송량을 보여준다. 장기간에 걸친 극전선 통과 열속의 경년변동을 조사하기 위해 1993년부터 2024년 3월까지의 약 32년 이상 길이의 OSTIA 자료와 ECMWF Wave model 한 달 평균 출력자료를 수집하였다. 파랑에서 기원하는 해수 수송량은 파랑모델의 유의 파고, 평균 파랑 진동수, 평균 파랑 전파방향을 Breivik et al. (2014)에서 제시된 계산식에 넣어 산출하였다. 이렇게 산출된 파랑기원 수송량에 OSTIA 해수면 온도 자료를 결합함으로써, 30년 이상에 걸친 장기간의 극전선 통과 열수송량 시계열을 구축하였다.

[그림 29]의 분포도에서 엘니뇨와 라니냐 발생에 따라 변동하는 파랑기원 열수

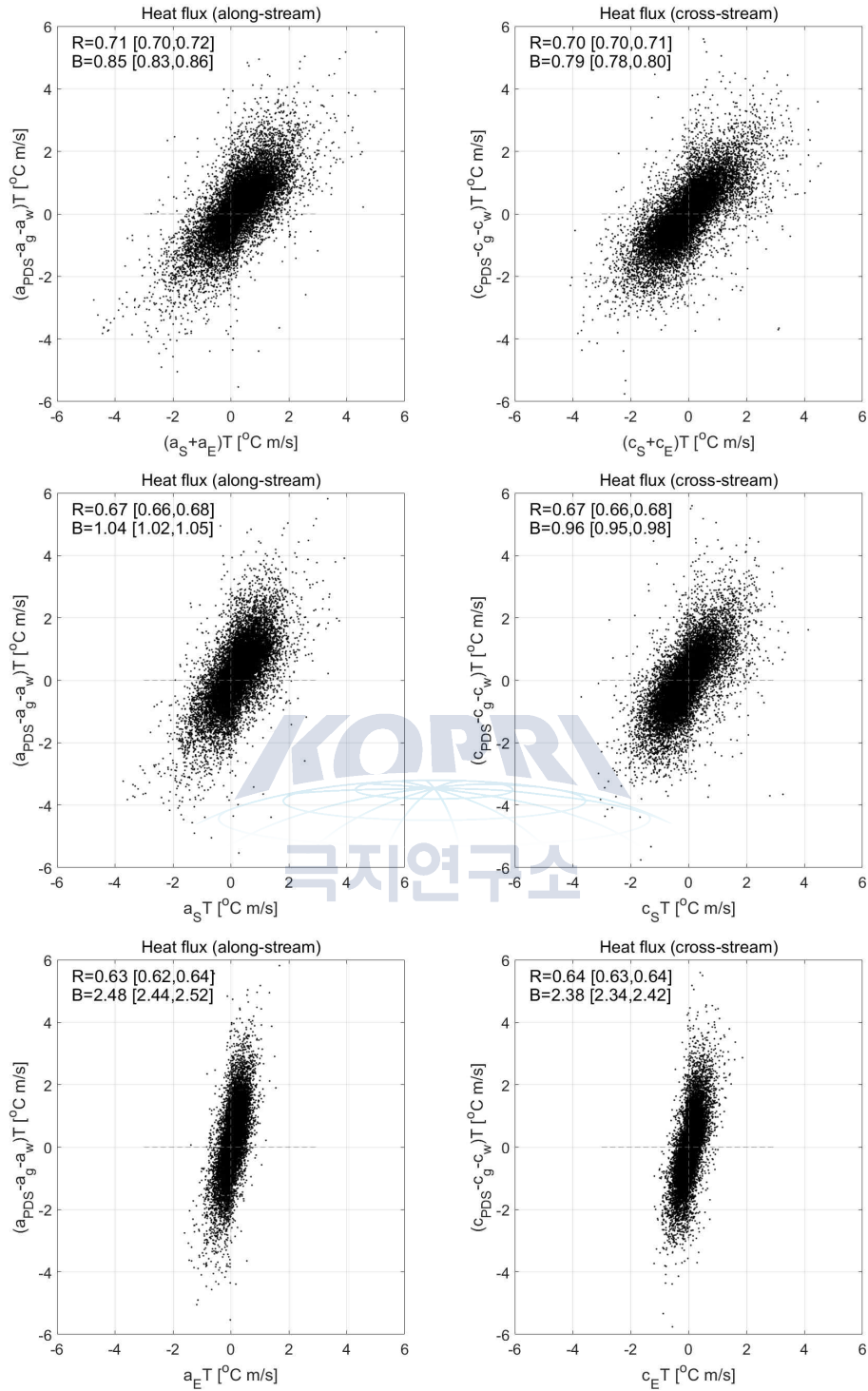
송의 대표적인 특성을 볼 수 있다. 그림에서 열수송량이 양의 값을 가질 경우 해양 상층열이 증가함을 의미한다. 그림에서 함께 나타난 화살표는 엘리뇨 및 라니냐 시기에 나타나는 파랑기원 수송량의 평균장을 나타내며, 각 기후 국면에 따라 극전선을 가로지르는 표층 해수 수송의 방향과 강도가 뚜렷하게 달라짐을 시각적으로 확인할 수 있다. 엘리뇨 발생 시기에는 주로 남쪽으로 흐르는 파랑기원 수송량이 우세하게 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 파랑기원 수송은 상대적으로 따뜻한 표층 해수를 극전선을 통과하여 남쪽으로 이동시키며, 그 결과 해양 상층열의 증가에 기여했다. 반면, 라니냐 발생 시기에는 북쪽으로 흐르는 파랑기원 수송이 상대적으로 강하게 나타났으며, 이로 인해 차가운 표층 해수가 북쪽으로 수송되어 해양 상층열의 감소를 유발하는 경향을 보였다. 이러한 결과들은 바람에 의해 생성되는 표층 파랑의 특성이 변화함에 따라 서남극 극전선 해역의 해양 상층열이 뚜렷한 경년 변동성을 보인다는 것을 시사한다. 연구 해역의 극전선 통과 열속과 ENSO 사이 밀접한 관계는 Nino3.4 지수와의 시계열 비교를 통해서도 확인할 수 있다[그림 30]. 표층 극전선 통과 열속과 Nino3.4 지수 사이의 음의 상관관계는 엘리뇨 시기에는 파랑은 연구해역의 해수면 근처 열용량의 증가에 기여하고 있음을 의미한다. 이러한 결과들로부터 표층 파랑의 전파 방향은 주로 적도 태평양에서 발생하는 엘리뇨 - 남방진동(ENSO)의 영향을 받아 변화하는 것으로 확인되었으며, 이는 극전선 해역에서 극전선을 통과하는 열수송과 표층 순환이 적도 지역의 대기 변동성과 원격상관을 통해 긴밀하게 연결되어 있음을 의미한다.

극지연구소

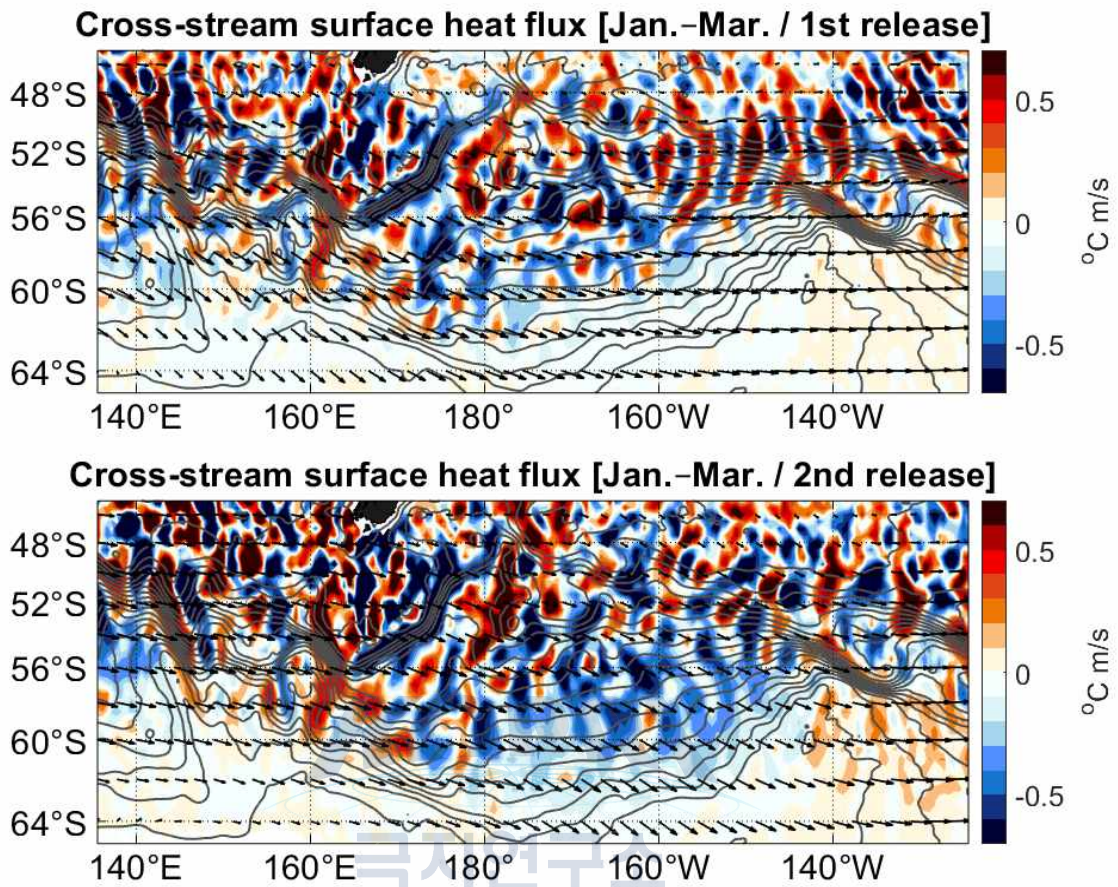


[그림 25] PDS가 전송한 이동경로좌표. 회색점과 흑색점은 각각 첫 번째와 두 번째 시기에 부상한 PDS의 이동경로를 의미.

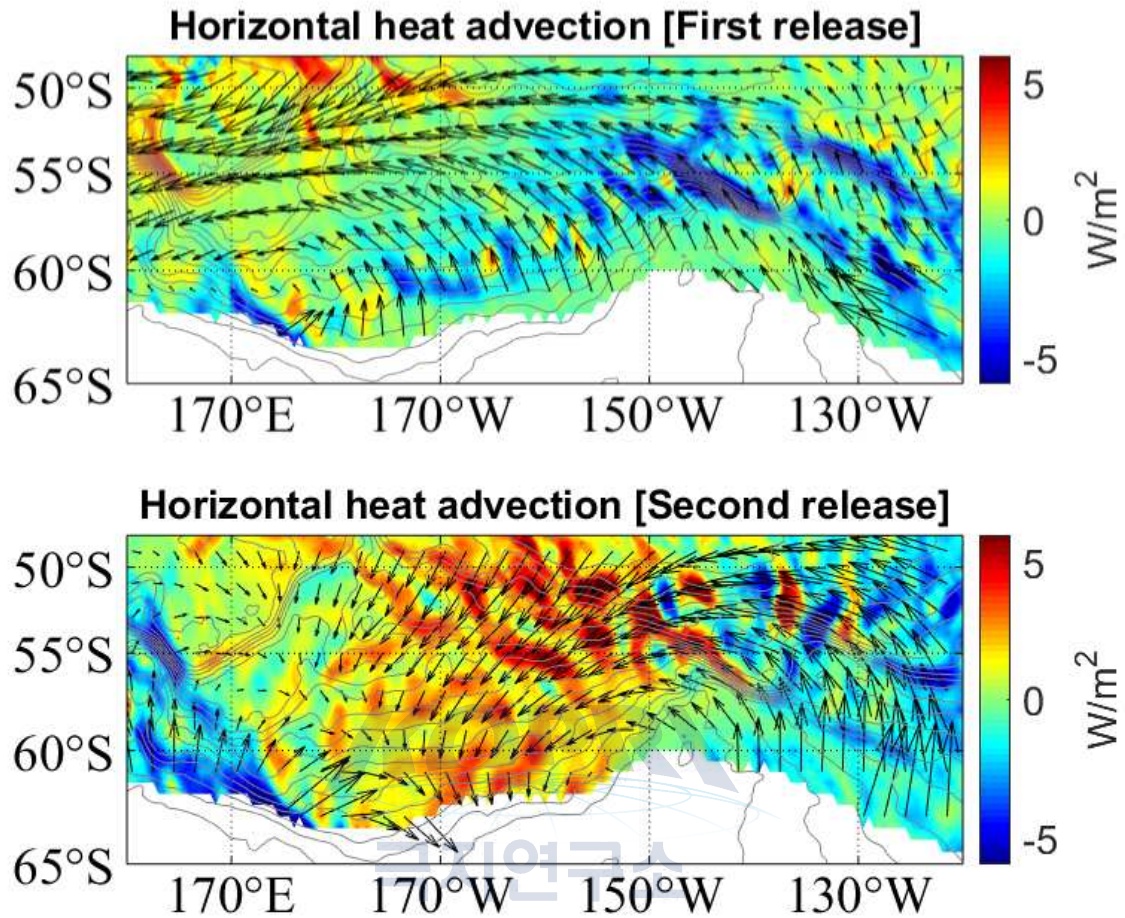




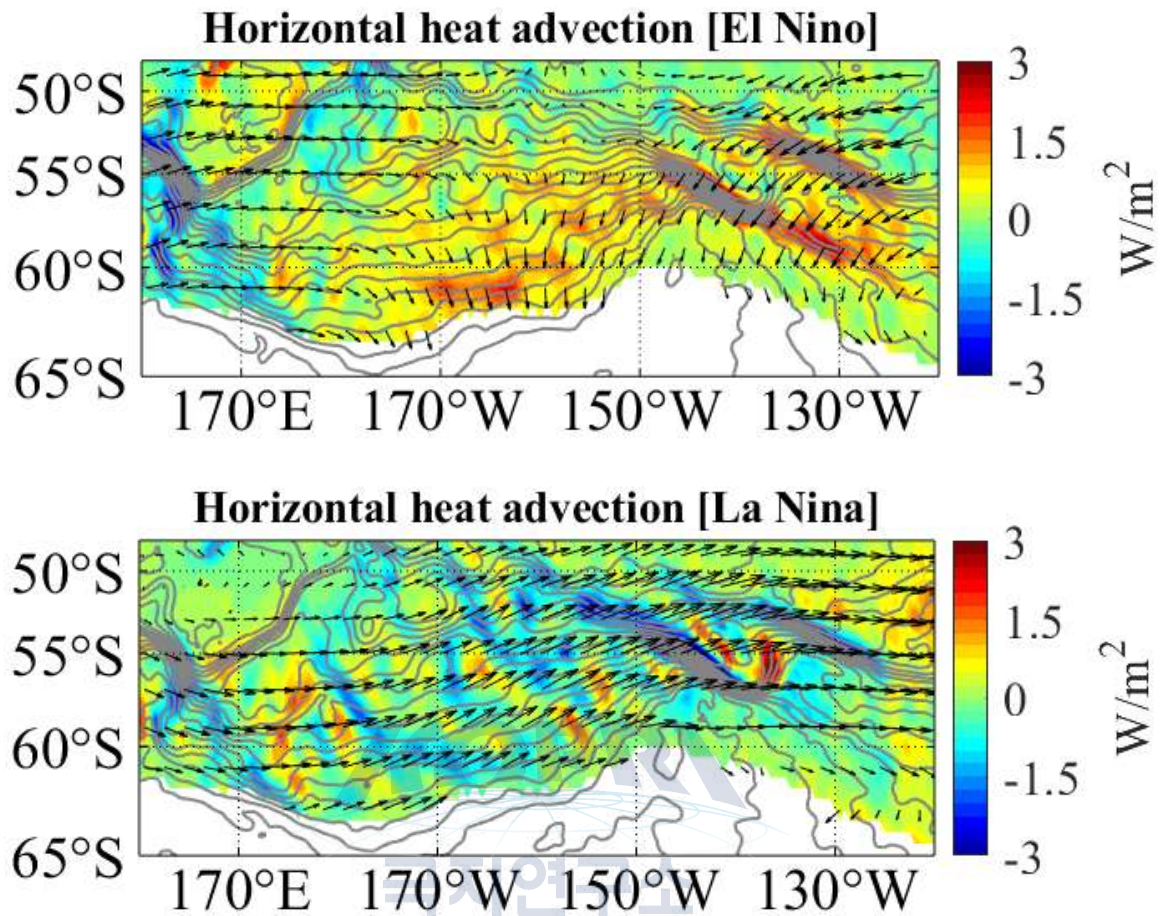
[그림 26] PDS가 관측한 표층 이동속도로 계산한 열속과 재분석장이 재현한 표층 이동속도로 계산한 열속 사이 비교산점도. 모든 그림의 y축은 관측된 비지균류로 계산한 열속을 의미. 두 번째와 세 번째 행의 x축은 각각 스톡스 표류와 에크만 속도가 만드는 열속을 의미하고 첫 번째 행은 x축은 두 성분의 합을 의미. 첫 번째 열과 두 번째 열은 각각 극전선에 평행한 열속과 극전선 통과 열속 성분을 나타냄.



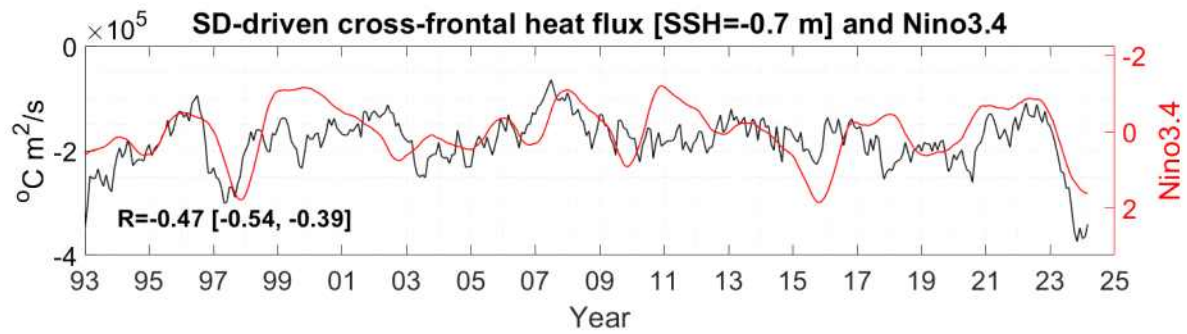
[그림 27] 첫 번째 부상시기(위)와 두 번째 부상시기(아래)의 스톡스 표류에서 기인한 극전선 통과 표층 열속의 분포도. 실선은 위성이 관측한 평균해수면고도(mean dynamic topography)를 의미하고 화살표는 평균 바람장을 의미.



[그림 28] 두 번의 PDS 표류 시기의 파랑에서 기인하는 열수송량 분포도. 열수송량이 양의 값을 가질 때, 열이 해수면 고도 경사를 따라 내려가는 방향으로 열이 수송됨을 의미. 각 그림의 화살표는 해당 시기의 파랑 기원 해수 수송량을 의미. 실선은 위성이 관측한 평균해수면고도(mean dynamic topography)를 의미.



[그림 29] 엘리뇨(위)와 라니냐(아래)시기에 맞추어 평균한 파랑기원 극전선 통과 열수송량. 열수송량이 양의 값을 가질 때 극전선 통과하여 열이 남쪽으로 전달되는 것을 의미. 화살표는 파랑기원 해수 수송량을 의미. 실선은



[그림 30] 스톡스 표류가 야기하는 표층 극전선 통과 열속과 Nino3.4 지수 비교 시계열. 하단의 R값은 두 시계열 사이 상관계수를 의미하고, 괄호 안의 값은 상관계수의 95% 신뢰구간을 의미.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4.1 연구개발목표 대비 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 기존자료 활용 극전선 통과 열속 변동성 분석	1-1	남극환류 극전선 통과 열속 분포 제시	- Drake passage 해역의 극전선 통과 열속 관측자료 확보 - 수치모델 결과로부터 극전선 통과 열속 관측자료 계산 및 현장관측 비교 결과 제시	100
	1-2	극전선 통과 열속 현장관측 계획 수립	- 수치모델 결과를 활용한 남극해 전해역 극전선 통과 열속 계산 결과 제시 - 계산 결과를 근거로한 현장관측 계획 확립	100
2. 극전선 통과 열속 변동성 현장관측 시스템 구축	2-1	현장관측 시스템 구축	- 현장관측장비(PDS-CPIES) 투입을 위한 사전 준비 완료 (스탠드, PDS 장착부속품 제작 및 점검) - 현장관측장비(PDS-CPIES) 투입 예정 해역의 EHF 및 SSH 분포 확인 및 지형 등을 고려한 장비 투입 정점 최종 선정 - 2021년 10월 20일 아라온 승선, PDS-CPIES 4대 투입 및 현장관측 수행	100
	2-2	극전선 통과 열속 변동성 파악	- NEMO_3.1 version GLORYS12V1 수치모델 결과로부터 ACC 전해역과 관측 해역인 Southeast Indian Ridge (SEIR, 115° E~160° E)의 수치모델 결과 수집 (1993~2018년, 1/12도, 1일 간격의 50개 전층 수온, 염분, 유속 및 해수면 높이 자료) - 수치모델 결과를 활용하여 eddy heat flux (EHF)를 계산하여 EHF의 시공간적 변동특성 분석 수행 - Antarctic Circumpolar Current 전해역에서 EHF와 ERA5 바람자료 및 SAM index와의 공간 상관관계 분석 수행을 통해 EHF변동 원인이해	100

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
3. 현장 관측자료 활용 극전선 통과 열속의 시간적 변동성 이해	3-1	현장자료 및 수치모델 자료 획득	- Drake passage 해역의 현장 관측자료(해저면 압력, 음파 왕복시간, 해저면 수온, 해저면 근처 유속) 확보 - 최근 공개된 수치모델 GREP-V2의 27년(1993~2019년) 길이의 하루 간격 출력자료(1/4도 해상도, 전체 수층에 대한 수온, 염분, 유속, 해수면 높이) 획득	100
	3-2	열속 장기 변동성 분석	- cDrake 관측자료를 활용한 수치모델 GREP-V2의 극전선 통과 열속 및 심층 유속에 대한 모의성능 비교 검증	100
	3-3	자동 전송 현장관측자료 취합 및 분석	- PDS 및 위성을 활용한 계류관측 중인 CPIES 현장 관측자료의 회수 이전 원격 확보 및 분석 가능한 자료로 변환 후 데이터 처리 - 현장 관측자료(해저면 압력, 음파 왕복시간, 해저면 근처 유속)을 활용한 SEIR 해역의 극전선 변동, 순압성 해저면 압력 변동, 심층 해수 유동 변동성 분석	100

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
4. 남극해 극전선 통과 열속 변화에 미치는 해류장의 시공간 변동 특성 이해	4-1	위성 전송된 CPIES 자료 활용 해류장 변동 특성 이해	- 남극해 남동인디안해령 해역에서 CPIES가 관측한 해저면 근처 유속의 공간분포 확인 - 극전선 통과 열속과 관련된 해저면 근처 유속의 극전선 통과 성분을 추출해 공간분포 특성 확인	100
	4-2	위성관측 해수면 변동 특성과 해류장 변동 비교 분석	- 극전선 변동과 관련된 CPIES가 관측 음과 전달시간과 해저면 근처 유속의 극전선 통과 성분 사이의 상관성 검토 - 위성관측 해수면 높이의 공간 분포를 확인해 강한 극전선 통과 유속의 방향과 극전선 분포 사이 관계 확인	100
	4-3	자료동화된 수치모델자료와 현장자료 비교 및 상관관계 분석	- CPIES 관측에서 나타난 극전선 통과 열속 및 유속의 발생원인 분석을 위한 수치모델(GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024, GLORYS 분석장) 확보 - 수치모델 분석장의 해저면 근처 유속과 CPIES 관측자료의 비교 분석 수행	100
5. 남극해 극전선 통과 열속의 시간적 변동특성 이해	5-1	현장관측 열속자료와 수치모델 결과 비교분석	- 자동자료전송 표층부이(Pop-up data shuttle)의 이동속도와 수치모델의 표층유속으로 계산한 표층열속 비교검증	100
	5-2	서남극해 극전선 통과 열속의 장단기 변동특성 분석	- 수치모델 자료로부터 산출한 표층열속의 장단기 시공간변동 특성 분석	100
	5-3	위성 전송 CPIES 추가 자료 처리	- 자동자료 전송시스템으로 획득한 해저면 계류관측자료 획득 및 해석	100

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
6. 남극해 극전선 통과 열속의 시공간적 변동 특성 파악	6-1	기존 투입 CPIES 장비 회수 및 재계류	- 서남극해 극전선 해역에 2021년도에 계류되었던 16대의 CPIES 회수 및 4개 정점에 CPIES 재계류 성공	100
	6-2	서남극해 극전선 통과 열속의 시공간적 변동 특성 분석	- 관측시스템을 통해 획득한 서남극 해역의 극전선 통과 해류자료를 이용해 극전선 통과 열속 산출 및 시공간변동성 확인	100
	6-3	현장관측 자료와 수치모델 결과 비교를 통한 남극해 열속 변동 특성 파악	- 현장관측자료로 비교하여 검증된 수치모델의 장기간 출력자료를 활용하여 극전선 통과 열속의 대기 변동성과의 연관성 파악	100



4.2 연구성과 및 의의

본 연구를 통해 남극해 ACC 해역에서 약 4년 길이의 장기 계류 관측자료를 성공적으로 확보하였다. 현장관측 해역인 SEIR는 잦은 폭풍 발생으로 연중 대부분 높은 파고가 유지되는 극한 환경임에도 불구하고, 본 과제에서는 PDS-CPIES를 활용한 현장 관측 시스템을 구축하여 최소 3년 이상 길이의 최신의 장기 관측자료를 획득하는데 성공하였다. 이는 관측 난이도가 매우 높은 남극해 환경에서 장기 계류 관측 성공의 사례로서 중요한 의미를 가진다.

특히 SEIR 해역은 극전선 통과에 따른 EHF가 집중될 것으로 예상되는 지역임에도 불구하고, 험난한 해양환경에 의해 그동안 직접적인 관측을 통한 연구가 진행된바가 없다. 본 연구에서 확보한 장기 관측자료는 아직 현장 관측을 통해 분석된 바가 많지 않은 SEIR 해역 극전선 통과 EHF의 시공간적 변동 특성을 규명하는데 핵심적인 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다. 더욱이 2011년에 종료된 cDrake project 이후 현장 관측에 기반한 극전선 통과 EHF 연구가 사실상 전무한 상황에서, 최근 급격한 기후변화가 진행 중인 남극해에서 최신 관측자료를 확보했다는 점은 학문적 측면에서 매우 중요한 성과라 할 수 있다.

본 과제에서는 2021년도 KOPRI 아라온호 남극항차를 통해 SEIR 해역 남부에 사전에 설정된 16개의 정점에 PDS-CPIES 16대를 성공적으로 계류하였다. 이 중 일부 정점에서는 KOPRI와 URI의 PDS를 함께 계류함으로써, CPIES 회수 이전에도 위성을 통한 원격 자료 전송이 가능하도록 관측 시스템을 설정하였다. CPIES는 τ 관측을 통해 수온 정보를 확보하고, 이를 해저면 근처 유속 관측자료와 결합하여 극전선 통과 EHF의 발산성분을 계산할 수 있다. 또한 τ 는 수온약층 두께 변화에 민감하게 반응하므로, ACC 사행과 중규모 소용돌이의 변동 및 이와 연계된 EHF 변동을 포착할 수 있는 관측자료를 제공할 것으로 기대된다.

또한, 본 연구에서는 GLORYS12V1 수치모델을 활용하여 약 27년 길이의 남극해 전 해역 EHF를 산출하였으며, 이를 통해 EHF의 공간 분포와 장기적인 시간 변화를 분석하였다. 분석 결과, 관측 해역을 포함한 극전선 인근에서 EHF가 증가하는 경향이 확인되었으며, 이는 현장 관측자료와 결합될 경우 극전선 통과 EHF 변동 메커니즘을 보다 종합적으로 이해하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가, ECMWF ERA5 대기 자료를 함께 활용한 분석을 통해 SEIR 해역이 남극해 기후변동 지수인 SAM index에 따른 대기 변동성이 뚜렷하게 나타나는 지역임을 확인하였으며, 향후 극전선 통과 EHF와 대기 변동 간의 연관성을 규명하는 연구로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

총 세 차례에 걸쳐 33대의 PDS를 이용한 원격 자료 전송을 통해, 관측장비 회수 이전에도 해저면 계류 관측자료를 성공적으로 확보하였다. 위성을 통해 획득된 자료를 분석한 결과, 관측 해역에서 극전선 통과 EHF와 밀접하게 연관된 ACC 사행 및 해저면 근처 유속의 뚜렷한 변화가 확인되었으며, 순압성 로스비파의 전파와 해양 연직혼합에 중요한 준관성주기파 등 다양한 물리적 현상 또한 관측되

었다. 이러한 성과는 PDS 시스템을 활용한 회수 전 원격 자료 획득이 극지 환경과 같이 접근이 제한된 해역에서도 안정적인 관측자료 확보를 가능하게 함을 보여주는 사례로, 향후 새로운 관측 패러다임을 제시하는 중요한 성과로 평가될 수 있다.

본 과업에서는 PDS를 활용해 계류관측데이터를 원격으로 수집함과 동시에 PDS를 표층뜯개로서 활용하여 남극해 극전선 해역의 표층해류를 관측하는데 성공했다. 이는 원격 데이터 전송 시스템이 계류관측자료를 획득뿐 아니라 표층해류 데이터를 획득할 수 있는 관측장비로써도 활용될 수 있음을 보여주는 최초의 사례이다.

두 차례에 걸친 PDS의 이동경로를 추적한 결과, 효율적인 해수면온도 변화에 기여할 수 있는 극전선 통과 해류가 넓게 분포하고 있는 것이 확인되었다. 관측 결과를 다양한 원격 관측데이터와 함께 활용하여 분석한 결과, 극전선 통과 해류를 야기하는 가장 주요한 해류 성분은 파랑에서 기원하는 스톱스 표류라는 것을 밝혔다. 특히 주목할만한 결과는 극전선 통과 해류가 유의미한 극전선 통과 열속을 야기하고 있고 이 현상은 적도해역의 ENSO 현상과 밀접하게 연관되어 있다는 것이다. 파랑 기원 극전선 통과 해류가 유의미한 수준의 극전선 통과 열속을 야기하는 것을 확인해, 극전선 통과 열속이 열대해역과 원격상관되어 있다는 것을 밝혔다.

PDS 경로를 분석하여 극전선 통과 열속을 조사한 결과는 해양의 표층근처 열함량을 조절하는 또 다른 물리적 과정을 제시하는데 그 의의가 있다. 분석 결과는 극전선 해역에서 표층 열함량을 조절하는 것으로 꾸준히 주목해오던 에크만 수송과 해양대기 상호작용 뿐 아니라 파랑 또한 무시할 수 없는 역할을 할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 최신의 기후모델들조차 해결하지 못하는 남극해 극전선 해역 SST 재현의 한계를 극복하기 위한 또 하나의 실마리를 제공한다. 특히, 미래에 남극해 파랑이 점차 강해질 것으로 예상되어, 본 과업에서 밝힌 파랑의 역할은 점차 강화되어 갈 것으로 예상된다. 따라서, 본 과업의 결과는 남극해 극전선 해역을 보다 정확하게 예측하기 위해서, 파랑의 역할을 명시적으로 포함하는 새로운 패러다임의 기후모델링이 활용될 필요가 있음을 강조한다,

본 과업에서는 관측자료 획득과 더불어 남극해 전역의 EHF 시공간변동 특성을 조사하기 위해 남극해 전역 극전선 통과 EHF 분석에 사용할 자료동화된 수치모델 재분석자료인 GLORYS12V1의 약 27년(1993~2019년) 길이의 출력자료를 확보했다. GLORYS12V1의 극전선 통과 EHF에 대한 재현성을 검토하기 위해 2007~2011년에 Drake Passage에서 수행된 cDrake project의 CPIES 관측자료도 추가적으로 확보하였다. GLORYS12V1가 Drake Passage에서 EHF의 공간분포, 방향, 세기를 재현하고 있음을 관측자료와의 비교를 통해 확인하였다. 검증된 GLORYS12V1 출력자료를 활용하여 2007년, 2010년의 남극해 전 해역에서 극전선 통과 EHF를 계산하였고, 계산결과를 바탕으로 SEIR 해역의 남부의 EHF hot

spot 남부 경계에 KOPRI와 URI의 16개 CPIES 관측 정점을 설정하였다. 3차년도에는 추가로 최근에 새롭게 공개된 27년(1993~2109년) 길이의 GREP-V2 수치모델 자료도 확보하였다. cDrake 관측자료와 비교를 통해 확보된 GREP-V2 GLORYS2V4가 현실적인 심층 유속과 남향 EHF를 재현함을 확인하였다. 대용량 자료처리가 필수적인 남극해 극전선 통과 EHF 분석에 상대적으로 수평해상도가 낮은 GLORYS2V4를 활용한 보다 빠른 극전선 통과 EHF 분석이 가능할 것으로 보인다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

PDS-CPIES를 활용한 현장관측 시스템이 구축된 SEIR 해역은 해저지형 영향에 의한 ACC 사행이 지속적으로 발생하여 극전선 통과 EHF가 집중되어 있을 것으로 예상되는 해역이다. PDS 자동전송을 통해 확보된 현장관측자료는 추후 추가로 확보될 관측자료와 함께 SEIR 해역의 극전선 통과 EHF 발생 및 변동성과 관련된 물리적 과정을 분석할 연구에 활용할 계획이다. CPIES 관측 자료를 활용하여 바람장의 변동과 해저지형과의 상호작용으로 발생하는 ACC 사행의 변동성과 SEIR 해역 극전선의 축이동을 분석이 가능할 것으로 예상된다. 또한, CPIES로 관측되는 심층의 해류장도 활용하여 SEIR 극전선 해역의 상층과 심층의 해류장 변동 특성과 두 층 해류장 간의 연관성을 분석할 계획이다.

수많은 연직 물성 프로파일을 활용하는 Gravest Empirical Mode (GEM) technique을 CPIES 관측 τ 에 적용함으로써 관측 해역의 수온, 염분 수직 프로파일을 산출할 수 있다. CPIES 계류와 함께 수행된 CTD full-casting으로 얻어진 물성 자료까지 활용한 GEM technique을 통해 현장관측 해역의 연직 수온 프로파일을 획득할 계획이다. 획득한 수온 프로파일과 CPIES 관측 심층 유속을 활용하여 물리적으로 중요한 EHF 발산성분을 계산하고 EHF의 장단기 변동 특성에 대한 분석을 진행할 계획이다. 또한, SEIR 해역은 ACC의 여러 극전선이 수렴하는 해역으로 관측자료 분석을 통해 극전선 사이 열전달에 관한 물리적 과정을 분석할 수 있을 것으로 기대한다. 이미 Drake Passage 관측과 상호비교를 통해 검증된 자료동화된 수치모델의 보다 신뢰성 높은 검증 결과를 위해 SEIR 해역 관측자료를 활용하려 한다.

확보된 약 27년 길이의 GREP-V2 자료를 활용하여 하루간격과 월간격 남극해 전해역 극전선 통과 EHF를 계산할 수 있다. 계산된 EHF는 이미 계산된 GLORYS12V1의 EHF와 함께 남극해 전 해역에서 EHF를 발생시키는 물리적 과정을 분석하는데 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한, ACC 전 해역의 각 EHF hot spot 들이 가지는 EHF 시공간적 변동 특성, 경년 변동 유무와 발생 원인을 분석해보고자 한다. 또한, 확보된 대기 자료(ECMWF ERA5)와 위성 관측자료를 함께 활용하여 남극해 기후 변화에 따른 극전선 통과 EHF의 시공간적 변화를 연구할 계획이다. 또한, 현장관측 자료와 확보된 수치모델, 대기자료, 위성자료를 분석하여 실질적으로 직접 관측하기 어려운 남극해 전 해역의 EHF를 계산하는데 활용될 수 있는 프로시를 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

이와 더불어, 본 과제를 통해 확보된 장기 계류 관측자료는 극전선 통과 EHF 분석에 국한되지 않고 다양한 해양 물리 과정 연구에 활용될 수 있다. CPIES로 관측되는 심층 유속 자료와 바람장 재분석 자료를 결합함으로써 바람으로부터 생성되는 near-inertial wave (NIW)의 분포 및 전파 특성 등을 분석할

수 있으며, 해저지형이 발달한 SEIR 해역의 특성을 고려하였을 때 lee wave 생성과의 연관성 또한 규명할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 관측 기반 분석은 수치모델 및 재분석장의 준관성주기 내부파 재현성을 검증하는데 활용될 수 있으며, 이를 통해 ACC 전 해역 및 장기간에 걸친 준관성주기 내부파의 시공간적 변동 특성을 이해하는데 기여할 수 있다. 또한, CPIES의 해저면 압력자료 시계열을 분석함으로써 순압성 로스비파의 전파 특성과 변동성을 분석하는 것도 가능하다. 또한, CPIES 관측자료를 통해 조밀한 시간간격의 정확한 해수면 고도 변화를 생산할 수 있어 위성 관측 해수면높이 자료를 검증하거나, 남극해 극전선 해역의 해수면 높이 변화에 대한 연구에도 활용될 수 있다.

또한, 본 연구에서 PDS 경로를 추적함으로써 규명된 파랑이 만드는 극전선 통과 열속 발생에 대한 이해를 바탕으로 파랑의 영향을 보다 심층적으로 분석할 계획이다. 본 연구과정에서는 파랑의 역할을 PDS가 표류한 남극환류(ACC) 태평양 주변부 해역에 국한하여 평가하였다. 그러나 남극해는 연중 강한 파랑이 지속적으로 분포하는 해역으로 알려져 있으므로, 향후 분석 범위를 남극환류 전 해역으로 확장하여 환남극 해역 전체의 관점에서 파랑의 역할을 체계적으로 규명할 계획이다. 아울러, 표층 인근에서 극전선 통과 열속을 형성하는 주요 메커니즘인 해양-대기 상호작용 및 에크만 수송과의 비교 분석을 통해, 극전선 통과 열속에 대한 파랑 기원의 기여도를 정량적으로 평가할 예정이다.

PDS 부이를 이용해 표층해류와 파랑의 영향을 조사할 수 있다는 성과를 바탕으로 다른 해역에서의 연구에 PDS 관측을 활용할 계획이다. 남극대륙 주변부는 해빙의 분포와 상대적으로 작은 물리적 현상의 규모에 의해 위성관측을 통한 표층해류를 관측에 한계가 있는 해역이다. 이러한 남극대륙 주변부에서 CPIES 관측과 함께 PDS 부이를 동시에 활용한다면 표층해류의 관측데이터를 수집할 수 있을 것으로 기대한다. 이렇게 표층해류에 대한 관측데이터를 수집하게 된다면 해빙 이동속도에 미치는 영향과 남극대륙 주변부의 중요한 물리적 현상인 Antarctic slope current의 표층 분포에 대해서도 조사할 수 있을 것으로 기대한다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서 남극해 극전선 통과 EHF의 물리적과정 및 변동성을 분석하기 위해 재분석 수치모델인 GLORYS12V1과 GREP-V2를 수집하였고 남극해 대기에 의한 영향 분석을 위해 ERA-5 대기자료를 수집하였다. 관측으로 나타나는 EHF 분석 및 재분석 수치모델의 비교검증을 위해 Drake Passage에서 획득한 CPIES 관측자료 역시 수집하였다.

남극해 극전선 통과 EHF 분석을 위해 수집한 GLORYS12V1은 CMEMS에서 제공하는 중규모 소용돌이를 모의 가능한 자료동화된 전 지구 재분석 수치모델이다. GLORYS12V1은 NEMO 3.1을 기반으로 하여 $1/12^\circ$ 간격 수평 격자와 Z-coordinate를 따르는 50개의 연직층으로 구성되었다[Lellouche (2018)]. 대기 강제력으로 강수, 장파 및 단파 복사를 포함하는 ECMWF ERA-interim의 3시간과 24시간 간격자료를 사용하였고 1993년 1월의 EN.4.2.0를 초기장으로 사용하였다. 위성관측 SSH, SST, 해빙농도(SIC) 자료와 ARGO 관측 수온, 염분 연직 프로파일을 reduced-order Kalman filter 기법을 사용해 자료동화하였고 장기간 수온, 염분 편차를 3D-VAR 기법을 사용하여 보정하였다. 해저지형 자료로는 심해에선 ETOPO1, 연안과 대륙붕 해역에선 GEBCO8 자료를 사용하였다. 본 연구를 위해 GLORYS12V1의 27년(1993~2019년) 길이의 하루 간격 수온, 염분, 유속, SSH 자료를 수집하였다.

극전선 통과 EHF 분석에 추가로 사용할 앙상블 모델 GREP-V2에 포함된 4개의 재분석 수치모델을 수집하였다. GREP-V2는 CMEMS 웹사이트(<http://marine.copernicus.eu>)에 공개되어있다. 수집된 4개의 수치모델은 Mercator Ocean의 GLORYS2V4, UK Met Office의 FOAM, CMCC의 C-GLORS, ECMWF의 ORAS5이다. 네 개의 모델은 모두 NEMO 모델을 기반으로 하고 있고 ORCA025 $1/4^\circ$ 수평 격자와 75개의 연직층으로 구성되었다. 네 수치모델 모두 ERA-interim을 대기 강제력으로 사용하고 위성관측 SST, SSH, SIC, 현장관측 수온, 염분자료를 활용한 자료동화가 적용되었다. 3차년도에 사용된 GLORYS2V4는 NEMO 3.1을 기반으로 하고 있고 표면 강제력에 빙붕, 빙산 용해를 포함하는 담수유입량 자료도 사용하였다. 자료동화 기법으로 singular extended evolutive Kalman (SEEK) filter를 사용하였고 3D-VAR 기법을 활용하여 장기간 수온, 염분 편차를 보정하였다. GLORYS2V4는 과거 버전과 비교했을 때 자료동화에 사용되는 MDT (Mean Dynamic Topography)와 현장관측자료, 초기장으로 사용되는 EN4, 표면강제력으로 사용하는 담수유입자료가 보다 향상된 최근 버전의 자료를 사용하였다. 네 개의 GREP-V2의 수치모델의 27년(1993~2019년) 길이의 하루 간격 수온, 염분, 유속, SSH 자료를 수집하였다.

극전선 통과 EHF와 대기 사이 관련성 분석에 사용된 대기 자료는 ECMWF

에서 제공하는 ERA-5 재분석자료이다[Hersbach et al. (2020)]. ERA-5 재분석 자료는 ECMWF Integrated Forecast System (IFS)의 CY41R2 대기에보모델을 기반으로 하고 있다. ERA-5 재분석장은 10개의 앙상블 멤버를 활용한 불확실성 분석을 거친후 생산된다. ERA-5 재분석자료는 대기에보모델에 4D-VAR ensemble 기법을 활용한 자료동화를 통해 생산된다. ERA-5는 해수면부터 1 Pa 고도까지 137개의 연직층으로 구성되었고 31 km 간격의 수평 격자로 이루어졌다. 본 연구를 위해 ERA-5의 1/4° 격자 간격의 1시간 간격 해수면 10 m위 풍속, 해수면 대기압 자료를 수집하였다.

Drake Passage에서 2007년 11월에서 2011년 12월 사이에 진행된 cDrake Experiment는 남극해 ACC의 수송량과 역학적 균형에 대한 이해를 목적으로 수행한 현장관측을 말한다[Tracey et al. (2013)]. cDrake Experiment의 관측자료는 CPIES 관측 해저면 근처 유속, P_b , τ 과 CTD casting 자료, LADCP 자료로 구성되었다. CPIES 관측정점은 총 46개로 Drake Passage를 가로지르며 800km 간격을 가지는 transport 라인(20개)와 120~240km 간격으로 놓인 local dynamic array (21개) 그리고 SFZ에 마지막 년도에 계류된 5개 CPIES로 구성된 array로 구성되었다. CPIES는 10분간격으로 6번의 ping을 발생시켜 τ 를 관측하였고 P_b 는 30분 간격으로 측정하였다. 해저면 근처 유속은 배터리 소모를 고려하여 유속 관측 간격을 관측초기 1시간 간격에서부터 10분 간격까지 늘렸다. 장비 회수 후 획득한 관측자료들은 MATLAB을 활용한 데이터 처리 과정을 거쳐 1시간 간격 자료로 생산되었다. 데이터 처리과정에서 P_b 에 포함된 drift와 조석 신호가 제거되었고 모든 데이터의 spike가 제거되었다. 본 연구에 선 전 기간에 해당하는 데이터 처리된 CPIES 관측자료를 수집하였다.

본 연구에서 파랑에서 기원하는 극전선 통과 열속을 분석하기 위해 파랑모델의 출력자료와, 해수면 온도자료, 위성관측 해수면 높이 및 절대 지형류 유속자료를 획득했다. 파랑에 대해 분석하기 위해 ECMWF의 파랑 모델인 ECWAM의 출력자료를 사용했다. ECWAM 파랑 모델은 대기 재분석장인 ERA5와 함께 동시에 구동되는 모델로 ERA5에서 생산되는 10m 바람 자료를 강제력으로 사용한다(Hersbach et al., 2020). ECWAM은 위성이 관측하는 유의파고를 자료동화하여 파랑과 관련한 변수와 스톱스 표류의 정확도를 향상시킨다. 본 연구에서는 PDS 표류기간에 대해서는 1시간간격의 출력자료를 사용했고, 장기간(1993~2024년)의 분석에서는 한달 간격의 출력자료를 사용했다. 사용한 변수는 스톱스 표류, 유의파고, 평균파랑주기, 파랑평균전파방향이다.

위성관측 해수면 높이와 절대 지형류는 CMEMS에서 제공하는 Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights And Derived Variables 자료를 사용했다. 해당 자료는 위성이 관측한 하루 간격의 해수면 고도와 절대 지형류를 0.25°의 해상도의 격자에 맞추어 제공한다. 해수면 고도 자료로부터 극전선 통과 방향 벡터를 산출하여 PDS 이동속도와 스톱스 속도에서

극전선 통과 유속을 추출하는데 활용되었다. 절대 지형류는 PDS의 이동 중 지형류에 의한 이동을 판단하는데 사용되었고, 결과적으로 PDS의 비지형류적 이동을 추출하는데 활용했다. 위성관측 해수면 높이와 절대 지형류는 1993년부터 2024년까지의 자료를 획득하여 분석에 활용했다.

파랑에 의한 극전선 통과 열속 산출에 필요한 SST 자료는 Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA) dataset을 사용했다. OSTIA는 위성관측 및 다양한 해양관측 플랫폼에서 획득되는 관측자료를 결합하여 SST 자료를 생산한다(Good et al., 2020). 본 연구에서는 OSTIA의 하루 간격의 데이터를 수집해 분석에 사용했다. 구체적으로 1993년 1월에서 2022년 5월까지의 재생산된(reprocessed) 버전의 데이터를 사용했고 2022년 5월 이후의 데이터는 near-real time 데이터를 사용했다.



제 7 장 참고문헌

- Artana, C., Ferrari, R., Bricaud, C., Lellouche, J.-M., Garric, G., Sennéchaël, N., Lee, J. H., Park, Y. H., & Provost, C. (2019). Twenty-five years of Mercator Ocean reanalysis GLORYS12 at Drake Passage: Velocity assessment and total volume transport. *Advances in Space Research*, 68(2), 447 - 466. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.11.033>
- Bishop, S. P., Watts, D. R., & Donohue, K. A. (2013). Divergent eddy heat fluxes in the Kuroshio Extension at 144° - 148°E. Part I: Mean structure. *Journal of Physical Oceanography*, 43, 1533 - 1550. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0221.1>
- Carrasco, A., Semedo, A., Isachsen, P. E., Christensen, K. H., & Sætra, Ø. (2014). Global surface wave drift climate from ERA-40: The contributions from wind-sea and swell. *Ocean Dynamics*, 64, 1815 - 1829. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0763-0>
- Cronin, M. F., & Watts, D. R. (1996). Eddy - mean flow interaction in the Gulf Stream at 68°W. Part I: Eddy energetics. *Journal of Physical Oceanography*, 26, 2107 - 2131. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<2107>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<2107>2.0.CO;2)
- de Szoeke, R. A., & Levine, M. D. (1981). The advective flux of heat by mean geostrophic motions in the Southern Ocean. *Deep-Sea Research Part A*, 28, 1057 - 1085. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(81\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90048-0)
- Esselborn, S., & Eden, C. (2001). Sea surface height changes in the North Atlantic Ocean related to the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 28, 3473 - 3476. <https://doi.org/10.1029/2001GL013491>
- Fan, T., Deser, C., & Schneider, D. P. (2014). Recent Antarctic sea ice trends in the context of Southern Ocean surface climate variations since 1950. *Geophysical Research Letters*, 41(7), 2419 - 2426. <https://doi.org/10.1002/2013GL058136>
- Foltz, G. R., Grodsky, S. A., Carton, J. A., & McPhaden, M. J. (2003). Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3146. <https://doi.org/10.1029/2002JC001584>

- Foppert, A., Donohue, K. A., Watts, D. R., & Tracey, K. L. (2017). Eddy heat flux across the Antarctic Circumpolar Current estimated from sea surface height standard deviation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 6947 - 6964. <https://doi.org/10.1002/2017JC012837>
- Good, S. A., et al. (2020). The current configuration of the OSTIA system for operational production of foundation sea surface temperature and ice concentration analyses. *Remote Sensing*, 12(4), 720. <https://doi.org/10.3390/rs12040720>
- Guo, Y., & Bishop, S. P. (2022). Surface divergent eddy heat fluxes and their impacts on mixed layer eddy - mean flow interactions. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14, e2021MS002863. <https://doi.org/10.1029/2021MS002863>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999 - 2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kang, S. M., et al. (2023). Global impacts of recent Southern Ocean cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(30), e2300881120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2300881120>
- Kwok, R., Spreen, G., & Pang, S. (2013). Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 2408 - 2425. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20191>
- Lee, S., et al. (2022). On the future zonal contrasts of equatorial Pacific climate: Perspectives from observations, simulations, and theories. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), 82. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00286-6>
- Lellouche, J.-M., Greiner, E., Le Galloudec, O., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., et al. (2018). Recent updates on the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system. *Ocean Science*, 14, 1093 - 1126. <https://doi.org/10.5194/os-14-1093-2018>
- Lumpkin, R., & Flament, P. (2013). On the extent and energetics of the Hawaiiia

- n Lee Countercurrent. *Oceanography*, 26(1), 58 - 65. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.12>
- Marshall, J. C., & Shutts, G. (1981). A note on rotational and divergent eddy fluxes. *Journal of Physical Oceanography*, 11, 1677 - 1680. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1677>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1677>2.0.CO;2)
- McWilliams, J. C., & Restrepo, J. M. (1999). The wave-driven ocean circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 29(10), 2523 - 2540. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<2523>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<2523>2.0.CO;2)
- Niiler, P. P., Davis, R., & White, H. (1987). Water-following characteristics of a mixed-layer drifter. *Deep-Sea Research Part A*, 34, 1867 - 1882. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90060-4)
- Perrie, W., Tang, C., Hu, Y., & DeTracy, B. (2003). The impact of waves on surface currents. *Journal of Physical Oceanography*, 33(10), 2126 - 2140. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<2126>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2126>2.0.CO;2)
- Rio, M.-H., Mulet, S., & Picot, N. (2014). Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents. *Geophysical Research Letters*, 41, 8918 - 8925. <https://doi.org/10.1002/2014GL061773>
- Siegel, D. A., Kinlan, B. P., Gaylord, B., & Gaines, S. D. (2003). Lagrangian descriptions of marine larval dispersion. *Marine Ecology Progress Series*, 260, 83 - 96. <https://doi.org/10.3354/meps260083>
- Sudre, J., Maes, C., & Garçon, V. (2013). On the global estimates of geostrophic and Ekman surface currents. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3, 1 - 20. <https://doi.org/10.4319/lom.2013.11.1>
- Tracey, K. L., Donohue, K. A., Watts, D. R., & Chereskin, T. K. (2013). cDrake CPIES data report: November 2007 to December 2011. University of Rhode Island, Graduate School of Oceanography Technical Report 2013 - 01, 80 pp.
- Watts, D. R., Tracey, K. L., Donohue, K. A., & Chereskin, T. K. (2016). Estimat

es of eddy heat flux crossing the Antarctic Circumpolar Current from observations in Drake Passage. Journal of Physical Oceanography, 46(7), 2103 - 2122.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0029.1>



뒷 면

주 의

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