

남극환류 남동인디안해령 해역에서
극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해

Understanding of physical processes governing
the cross-frontal heat flux in the Antarctic Circumpol
ar 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 단계보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 인하대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 박 재 훈

위탁참여연구원 : 채 정 엽

“ : 구 아 영

“ : 송 하 진

보고서 초록

위탁연구과제명	남극환류 남동인디안해령 해역에서 극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해				
위탁연구책임자	박재훈	해당단계 참여연구원수	12	해당단계 연구비	120백만원
연구기관명 및 소속부서명	인하대학교 산학협력단 /인하대학교 해양과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 미국		상대국연구기관명 : 로드아일랜드대학교		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	40
<ul style="list-style-type: none"> - 2021년 아라온호 남극 항차 동안 남극해 남동인디안해령에 PDS-CPIES 4 정점 계류를 통해 극전선 통과 EHF 변동성 현장관측 시스템 구축 - PDS 전송 현장관측자료 획득 후 분석 결과, 강한 EHF를 만들 수 있는 상층의 극전선 사행과 심층 해류의 변동성이 관측됨 - 극전선 통과 EHF의 물리적 과정 분석에 활용할 27년 길이의 자료동화된 수치모델 출력자료 확보 및 Drake Passage의 CPIES 관측자료와 비교를 통한 수치모델자료 검증 수행 - 수치모델로 계산한 EHF는 남극해 전체에서 극전선을 통과하여 극지방으로 유입되고 있고 평균적으로 최근 27년에 걸쳐 그 강도와 범위가 증가하는 추세 - 현장관측 시스템 구축을 통해 극전선 통과 EHF에 미치는 해저지형과 대기의 영향에 대한 역학적 과정과 남극해 열균형 시스템에서 극전선 통과 EHF가 가지는 역할 이해에 활용될 수 있는 현장관측 자료 확보를 기대 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	소용돌이 열속, 남극 순환류, 극전선, 열균형, PIES			
	영 어	Eddy heat flux, Antarctic Circumpolar Current, Frontal zone, Heat balance, PIES			

요 약 문

I. 제 목

남극환류 남동인디안해령 해역에서 극전선 통과 열속의 물리적 과정 이해

II. 연구개발의 목적 및 필요성

남극해에서 극전선 통과 소용돌이 열속(eddy heat flux; EHF)은 해양대기상호작용과 에크만 수송에 의한 열 손실을 보상하는 것으로 알려져 있다. 남동인디안해령은 해저지형의 영향으로 환남극해류(ACC)의 사행이 주로 발생하여 EHF가 집중된 해역으로 주목받고 있지만 현장 관측을 통한 연구는 부족한 상황이다. 현장관측을 활용한 남극해 열 균형 시스템에 기여하는 EHF의 물리적 과정과 시공간적 변동성 이해를 향상시키기 위한 연구가 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

남동인디안해령의 남부 극전선 해역에 4대의 PDS-CPIES를 계류하여 극전선 통과 EHF 변동성 관측 시스템을 구축했고 PDS를 활용하여 관측자료를 장비 회수 전 획득 및 분석하였다. 관측자료와 함께 EHF 분석에 함께 활용할 자료동화된 전 지구 수치모델 자료와 Drake Passage에서의 CPIES 관측자료를 확보했다. 확보된 수치모델 자료의 비교 검증을 진행하고 ACC 전 해역에서의 EHF 산출 후 공간분포와 시간에 따른 변화를 분석했다.

IV. 연구개발결과

확보한 수치모델은 Drake Passage에서 복잡한 해저지형이 만드는 극전선 사행과 강한 EHF의 공간분포를 잘 재현하고 있었다. 약 27년 길이의 수치모델에서 계산된 극전선 통과 EHF는 ACC 전 해역에 걸쳐 몇 개의 hot spot 형성하며 분포하고 있었고, 남극해로 유입되는 EHF의 증가 추세가 나타났다. 2022년 9월 19일에 표층으로 부상한 PDS가 전송한 남동인디안해령 CPIES 관측자료를 성공적으로 확보하였다. 관측자료 분석 결과, 해저지형에 의한 ACC 사행과 극전선 통과 EHF 발생에 중요한 심층 유속의 변화가 CPIES를 통해 관측되었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

확보된 관측자료는 남동인디안해령에서 상층 해류와 심층 해류 사이의 상호작용과 이와 관련된 EHF의 발생 및 시공간적 변동성을 연구에 활용될 수 있다. 수치모델자료를 함께 활용하여 EHF 발생과 시공간적 변동성에 대한 해저지형과 대기의 역할을 이해하여 극전선 통과 EHF에 대한 더욱 심화된 물리적 과정을 밝혀낼 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

Cross-frontal eddy heat flux (EHF) transports heat poleward and compensates heat loss by air-sea interaction and by northward Ekman transport in the Southern Ocean. In the Southeastern Indian Ridge (SEIR), although meander of upper mean current that can produce the poleward EHF occurs frequently, the physical process about the EHF is not well understood due to lack of observation. To understand role of the EHF on heat balance in the Southern Ocean, research using observation is needed.

III. Contents and Extent of R&D

Four PDS-CPIES were deployed to monitor spatiotemporal change of cross-frontal EHF in the SEIR region. About 27-year-long data-assimilated global reanalysis outputs and CPIES-measured data in the Drake Passage were obtained. Validation on the reanalysis was carried out to confirm its capacity for EHF simulation. The EHF in whole ACC region was calculated and then its spatial distribution and temporal evolution were checked.

IV. R&D Results

GLORYS12V1 and GLORYS2V4, which were data-assimilated reanalysis, reproduced the ACC meander and EHF distribution that relate to the bottom topography. In the reanalysis, the EHF were distributed in the whole ACC with several hot spots and poleward EHF increased for about 27 years. The CPIES-measured data in the SEIR, which were transmitted by the PDS, was successfully obtained. ACC meander and deep current change necessary to the cross-frontal EHF were observed by the CPIES in SEIR.

V. Application Plans of R&D Results

The obtained observational data can be used to investigate interaction between upper and deep current and to understand related EHF event and its spatiotemporal

variability. The plans are to research the physical processes in poleward EHF and to reveal the roles of atmosphere and bottom topography for better understanding in heat balance in the Southern Ocean.



목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절 EHF에 대한 국외 선행연구

2절 IES 및 PDS-CPIES 장비 개요

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 재분석 수치모델을 활용한 남극해 EHF 분석

2절 극전선 통과 EHF 변동성 현장관측 시스템 구축

3절 PDS 전송 관측자료 분석결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

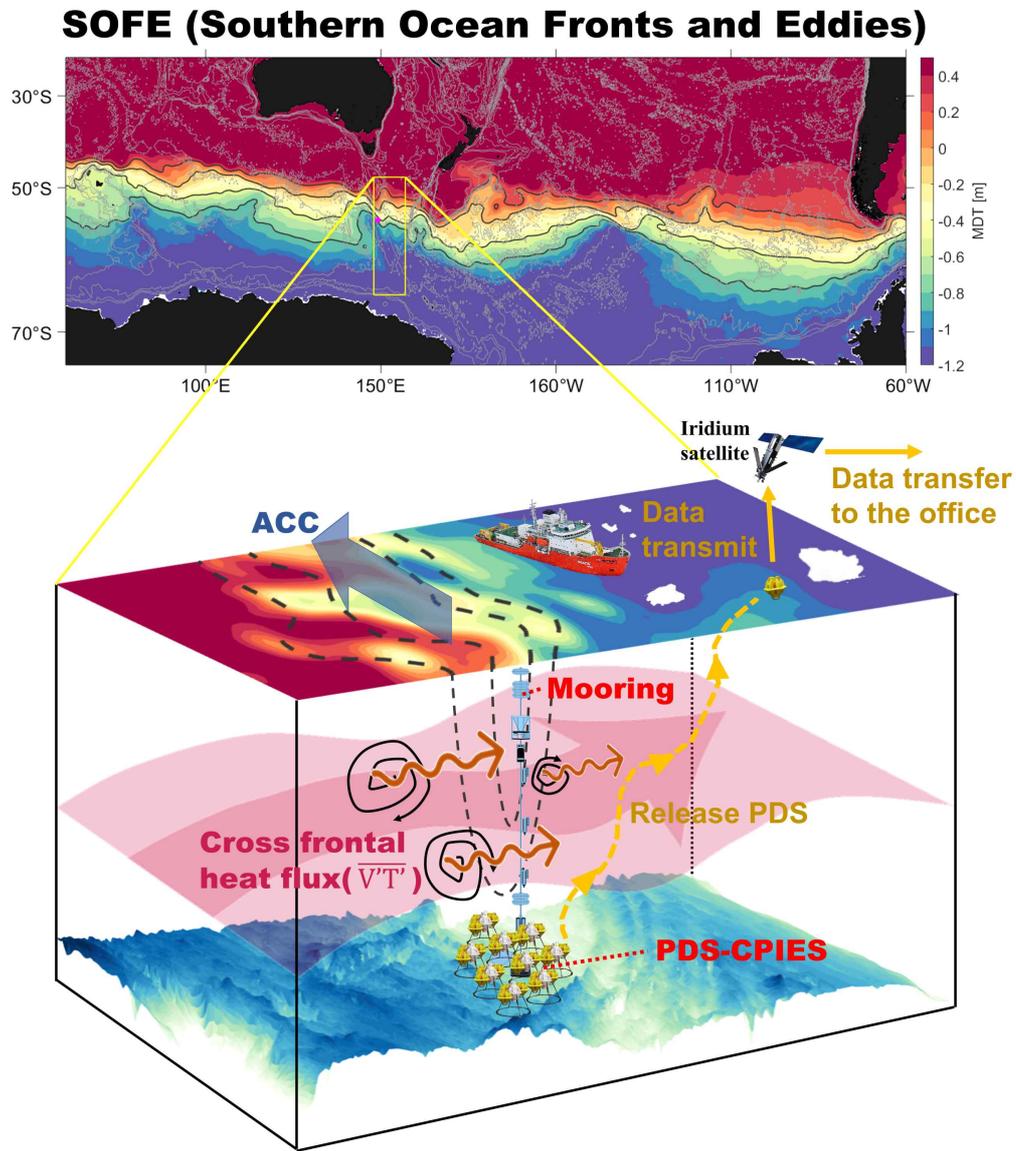


제 1 장 서론

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 남극해는 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 소용돌이 중요하다. 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 해역에서 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, 포텐셜 에너지의 감소와 함께 등온선의 기울기가 줄어들고 등온선 경사를 따라 내려가는 방향(downgradient)으로 EHF가 발생한다. 이때 EHF의 발산성분(divergent component)은 수온 전선을 가로지르는 방향으로 발생할 수 있다. 남극해 극전선 해역은 수평방향으로의 수온 변화가 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 SEIR 남부해역에서 넓은 공간 규모에서 열속의 시공간적 변동성에 관한 연구가 가능할 것으로 기대한다[그림 1].



[그림 1] SEIR 내 관측정점을 포함하는 남극해 위성 관측 Mean Dynamic Topography(상)과 연구해역 내 PDS-CPIES를 이용한 EHF 관측모식도(하)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

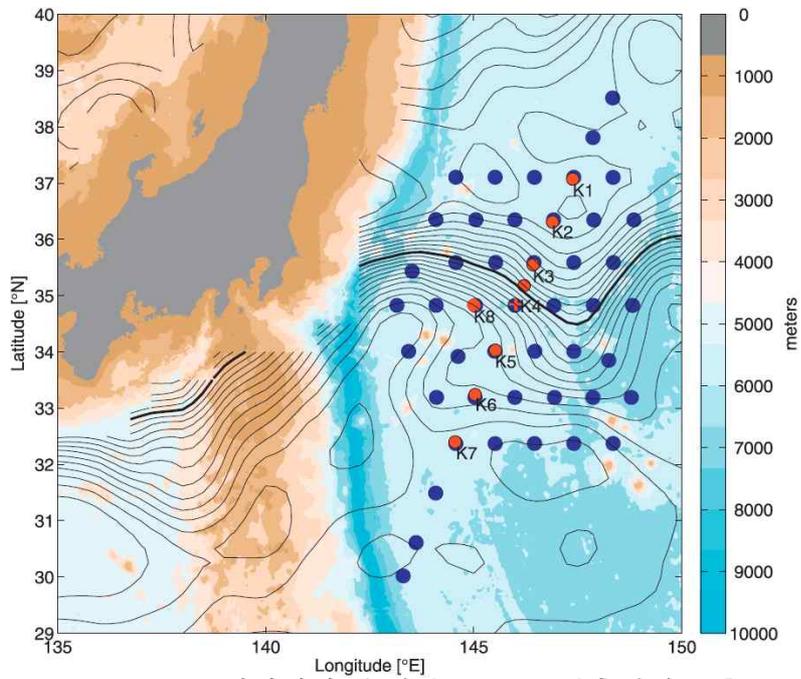
2.1 EHF에 대한 국외 선행연구

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 소개 한다.

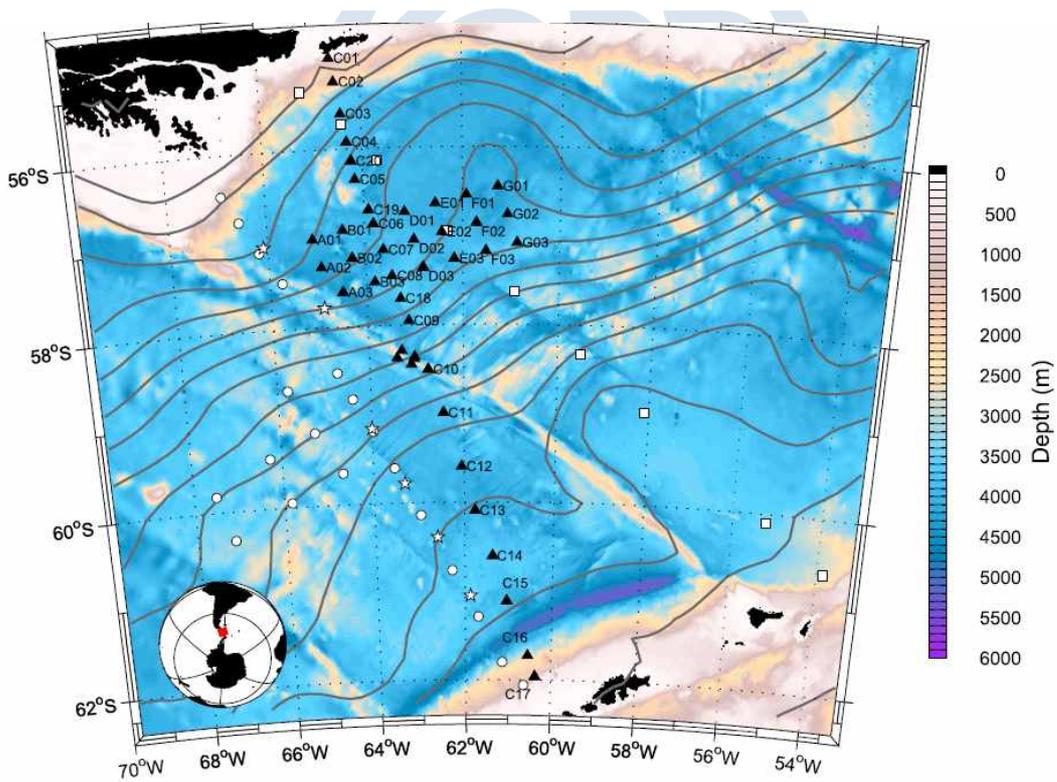
3차원 공간에서 EHF 벡터는 헬름홀츠 분해정리(Helmholtz decomposition)을 통해 회전성분(rotational component)과 발산성분(divergent component)로 분해할 수 있다. Marshall and Shutts (1981)는 EHF 발산성분이 전체에서 적은 비중을 차지함에도 특정 영역을 벗어나 열을 수송하는 역학적으로 중요한 성분임을 이론적으로 제시하였다. Cronin and Watts (1996)는 Marshall and Shutts (1981)의 이론적인 연구결과가 실제 해양에도 적용됨을 Gulf Stream 해역에서 현장관측 유속, 수온자료를 활용한 정량적인 열 수지(heat budget) 분석을 통해 밝혔고, 관측에서 상대적으로 적은 부분을 차지만 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 해지면 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.

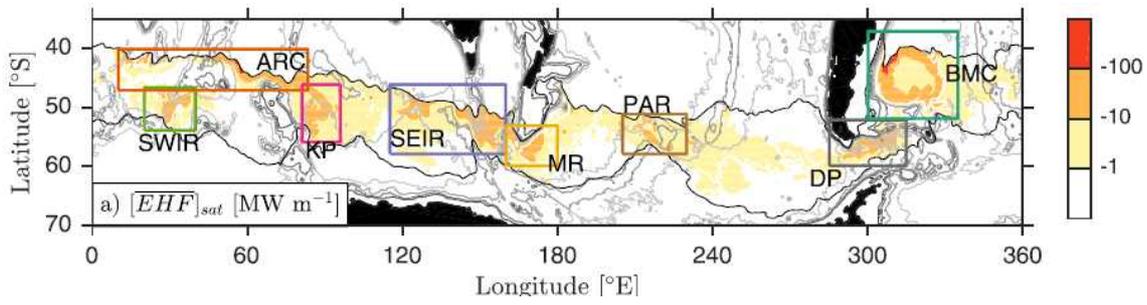
현장 관측만으로 힘든 남극해 전반 혹은 전 지구 범위에서의 EHF에 관한 연구도 진행되었다. Guo and Bishop (2022)는 위성 관측자료를 활용하여 혼합층 내 EHF 회전성분과 발산성분의 공간 분포를 전 지구 범위에서 계산하였고 이를 활용하여 EHF 모의성능이 높은 기후모델을 개발하였다. 여기서 위성 관측 결과와 기후모델에서 혼합층 내 EHF 발산성분은 강한 전선이 분포하는 중위도와 고위도 사이에 주로 분포하였다. Foppert et al. (2017)은 남극해 수치모델을 활용하여 전 수층에서 적분한 극전선 통과 EHF과 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 IES 및 PDS-CPIES 장비 개요

2.2.1 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 원관 추를 부착한 거치대에 장착되어 계류되고 상대적으로 작고 간단하기 때문에 A-프레임이나 크레인 등으로 쉽게 계류할 수 있다. 관측 설계와 배터리 성능에 따라 최대 5년까지 계류될 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.

2.2.2 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 10,000 psi (6000 dbar)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. 압력 센서의 특성상 장기간 관측 시 해저면 압력에 약 4ppm/month의 drift가 포함되어 자료처리 시 drift 제거가 요구된다.

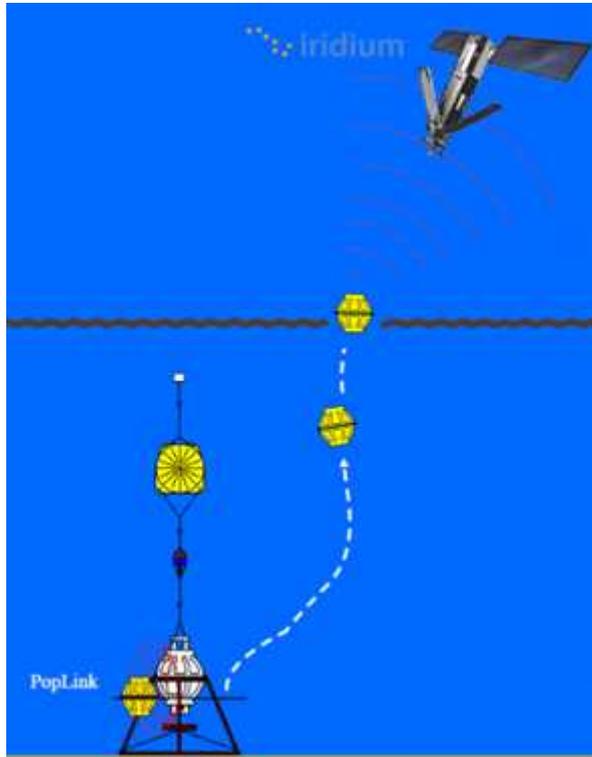
CPIES는 PIES에 해류계가 연결되어 해저면 위 50 m 수층의 유속을 측정하도록 설계된 장비이며 적정 수심에 위치하도록 해류계에 17인치 부이가 연결된다. 해류계로는 해류의 속력과 방향을 측정할 수 있는 견고한 true vector인 averaging sensor Aanderaa Data Instruments Doppler current sensor를 사용한다. 해류계는 0~300cm/s의 유속 측정범위를 가지고 0.1mm/s의 해상도와 0.15cm/s의 정확도를 가졌다. 센서 내 컴파스를 활용하여 유속의 정확한 방향을 측정할 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°C 의 해상도로 측정할 수 있다. 본 연구에서 계류된 4대의 CPIES는 10분마다 4번의 ping을 전파하여 τ 를 관측하고 P_b , 수온, 유속을 30분 간격으로 측정하도록 설정하였다.

2.2.3 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°의 수평해상도를 가지는 GLORYS12V1과 최근에 공개된 Global Reanalysis Multi-Model Ensemble Product V2 (GREP-V2) 앙상블 수치모델에 포함된 1/4° 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.

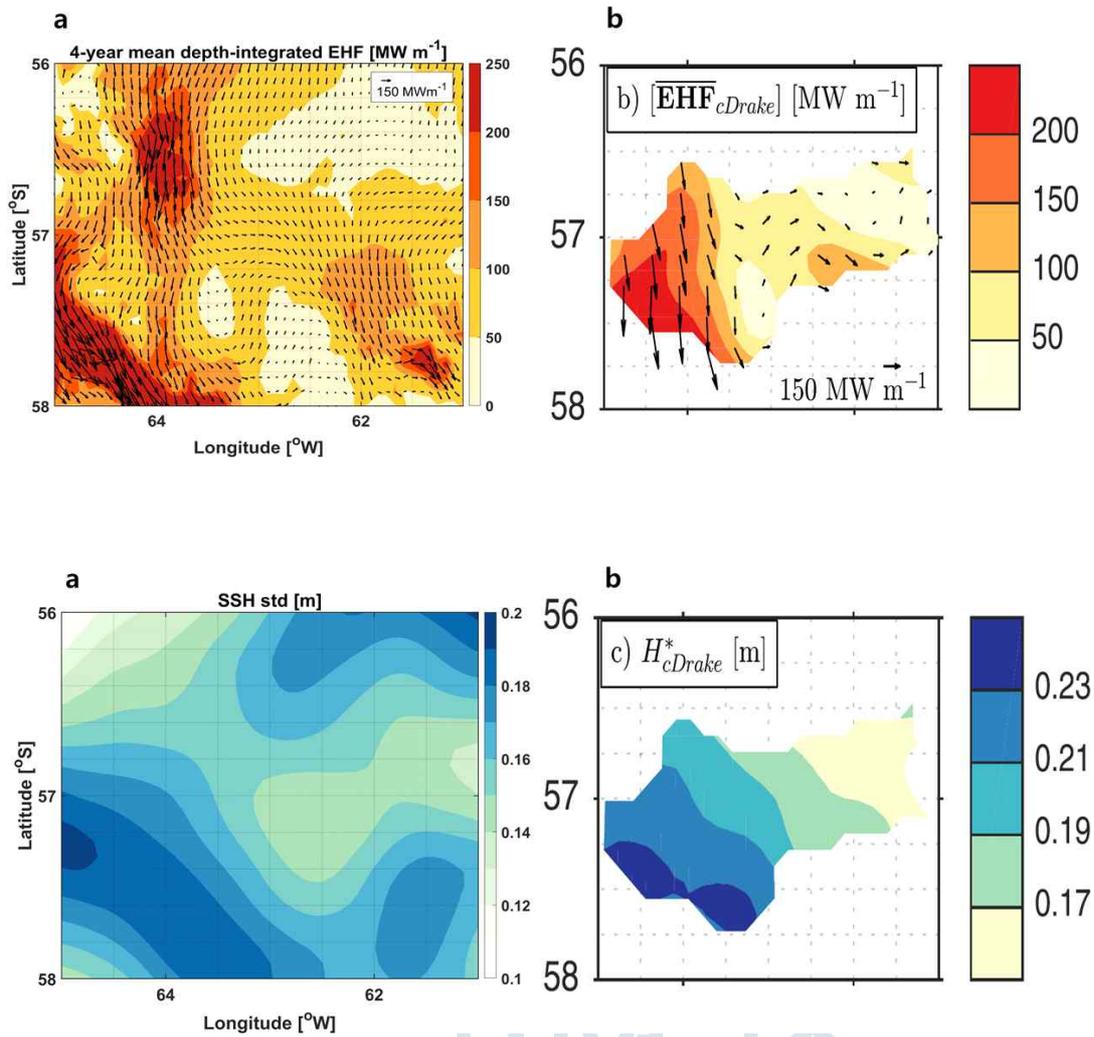
수치모델 출력자료를 활용하여 극전선 통과 EHF를 분석하기에 앞서, 수치모델의 EHF에 대한 모의성능을 확인하였다. GLORYS 검증을 위해 2007년부터 2011년에 수행된 cDrake project의 Drake Passage에서의 CPIES 관측자료를 수집하였고, EHF 발산성분과 SSH 표준편차, 해저면 근처 유속을 cDrake 관측결과와 비교하였다. EHF 발산성분을 비교하기 위해 수치모델 유속, 수온자료로 $\text{EHF}(\mathbf{u}'\mathbf{T}')$ 를 계산 후 연직방향 적분 후 관측 기간에 맞추어 4년 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 GLORSY12V1의 SSH 표준편차의 범위는 약 0.15~0.2m로 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

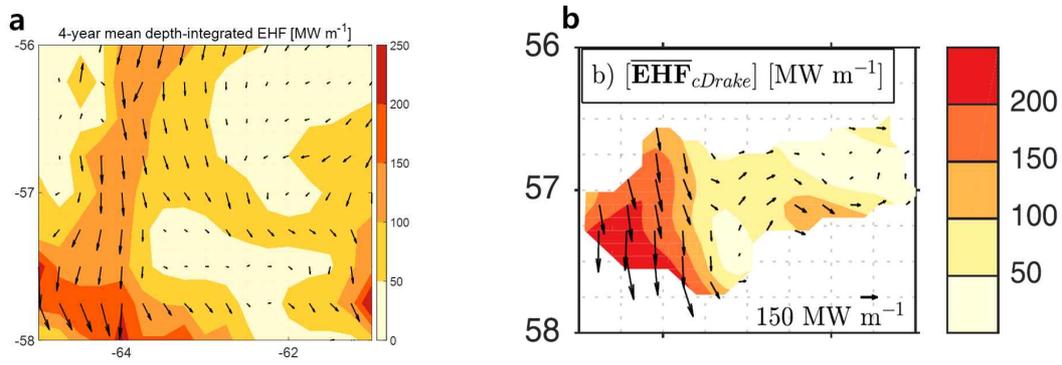
CPIES 관측과의 비교를 진행하였다. 비교를 위해 GLORYS2V4의 수심 3,325m의 유속과 CPIES 해류계 관측자료를 이용하여 평균 해류와 principal ellipse를 도시하였다[그림 8]. 여기서 principal ellipse는 유속에 principal analysis를 적용하여 얻어진 유속의 주성분 및 부성분의 축 각도와 각 유속성분의 표준편차를 사용하여 그렸다. 현장관측과 GLORYS2V4의 심층 평균해류와 principal ellipse가 방향과 변동의 세기 측면에서 상당히 일치하고 있고 이는 SFZ의 영향으로 발생하는 순압성 소용돌이를 GLORYS2V4가 실제와 유사하게 재현하기 때문으로 해석된다. 수행된 두 비교를 통해 수평해상도가 비교적 낮음에도 남극해 EHF 연구에 GLORYS2V4도 역시 활용될 수 있음을 확인하였다.



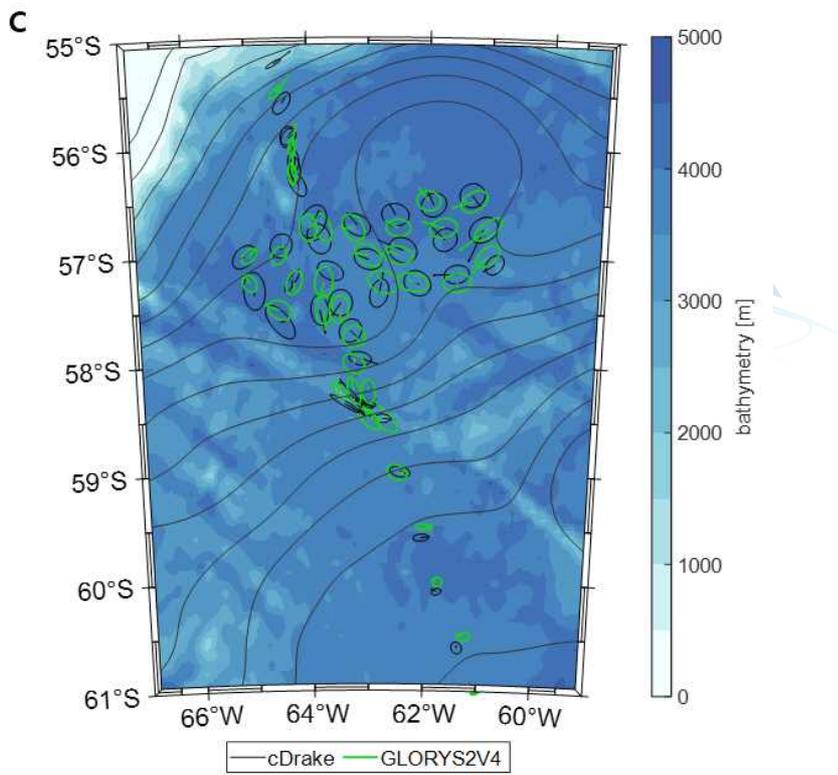


극지연구소

[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°E~83.5°E), Southeast Indian Ridge (SEIR, 115°E~160°E), Drake Passage (75°W~45°W), Brazil-Malvinas Confluence (60°W~25°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.

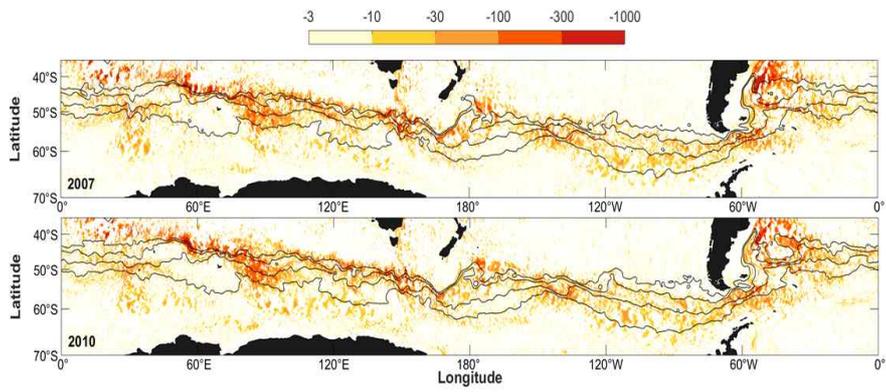
관측해역인 SEIR 역시 극전선 통과 EHF의 hot spot 중 하나이다. [그림 10]은 수치모델로 계산한 SEIR의 시간평균한 EHF 발산성분을 음의 값만을 보여준다. SEIR에 남향의 강한 EHF가 북쪽에서 남쪽의 모든 극전선에 걸쳐 분포하는 것을 볼 수 있다. SSH 평균으로 확인할 수 있는 극전선은 남북으로 뻗은 복잡한 해저지형을 통과하면서 큰 사행을 보여주고 전체적으로 복잡한 해저지형 통과 후에 강한 EHF가 분포하고 있다. 이는 SEIR에 통과하는 ACC가 복잡한 해저지형을 통과할 때 baroclinic instability에 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.

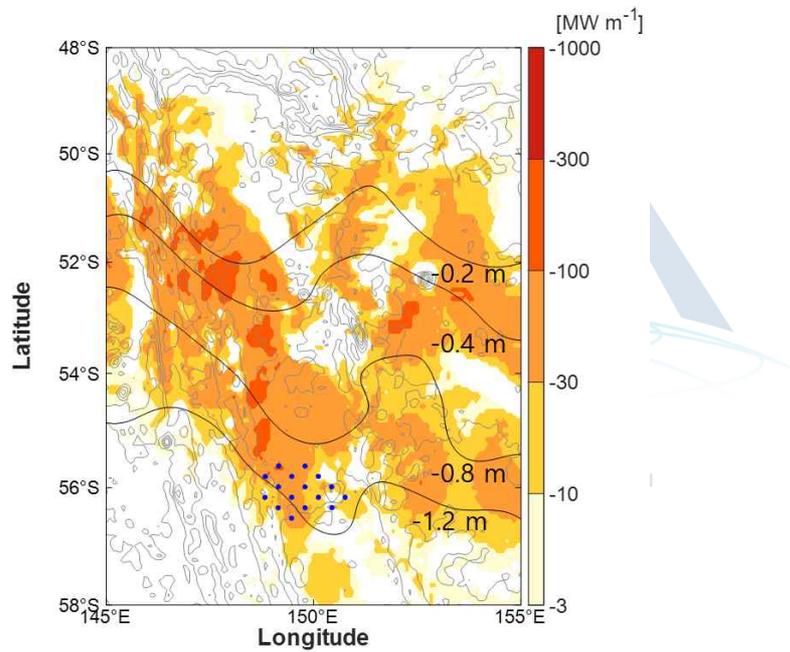
EHF와 함께 발생하는 baroclinic instability는 ACC 전선 강도에 따라 변할 수 있고 ACC 강도는 SAM index로 대표되는 편서풍의 변동에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. [그림 12]는 SEIR 해역이 남극해 주요 기후 인덱스인 SAM index에 따른 바람장의 변동이 잘 나타나는 곳임을 보여준다. 사용된 바람자료는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA5 해수면 위 10m 바람자료(u10, v10)를 사용하였다. SAM index와 u10은 ACC 전 해역에 걸쳐 양의 상관계수를 가지고 있고 SEIR는 상관계수가 높은 해역에 위치한다. SEIR 해역은 SAM index와 v10 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.

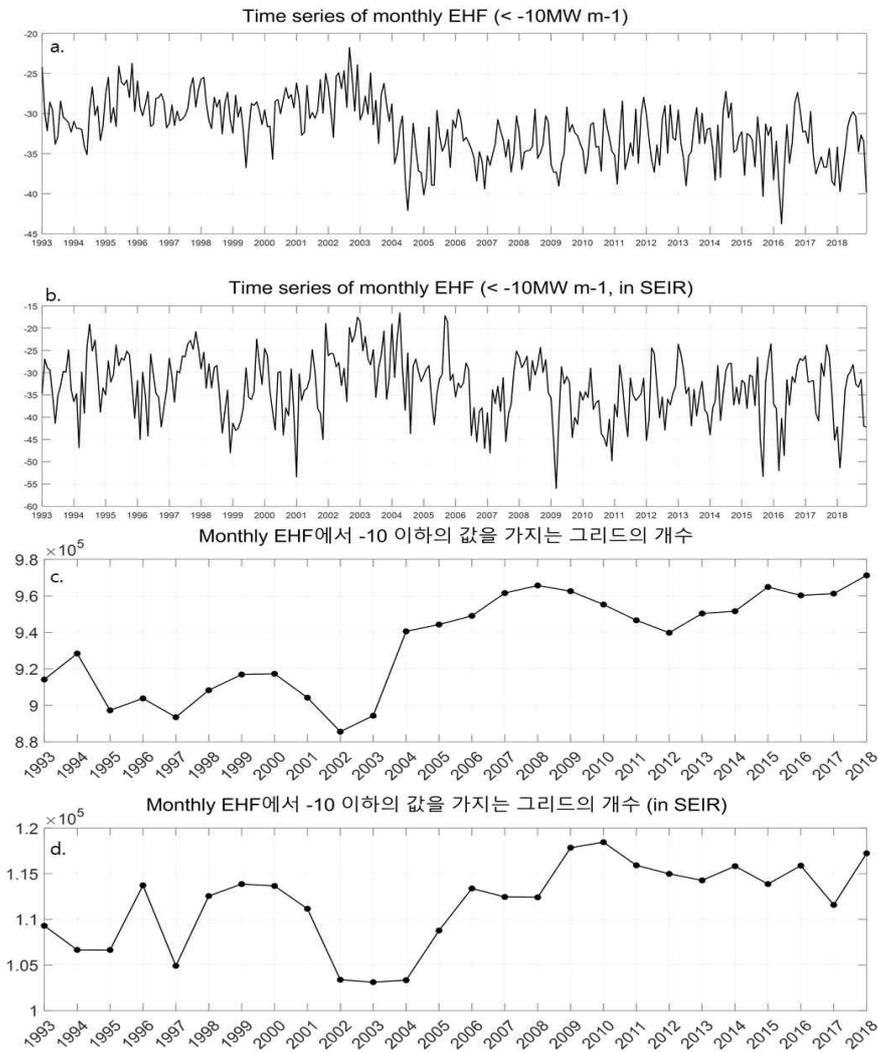




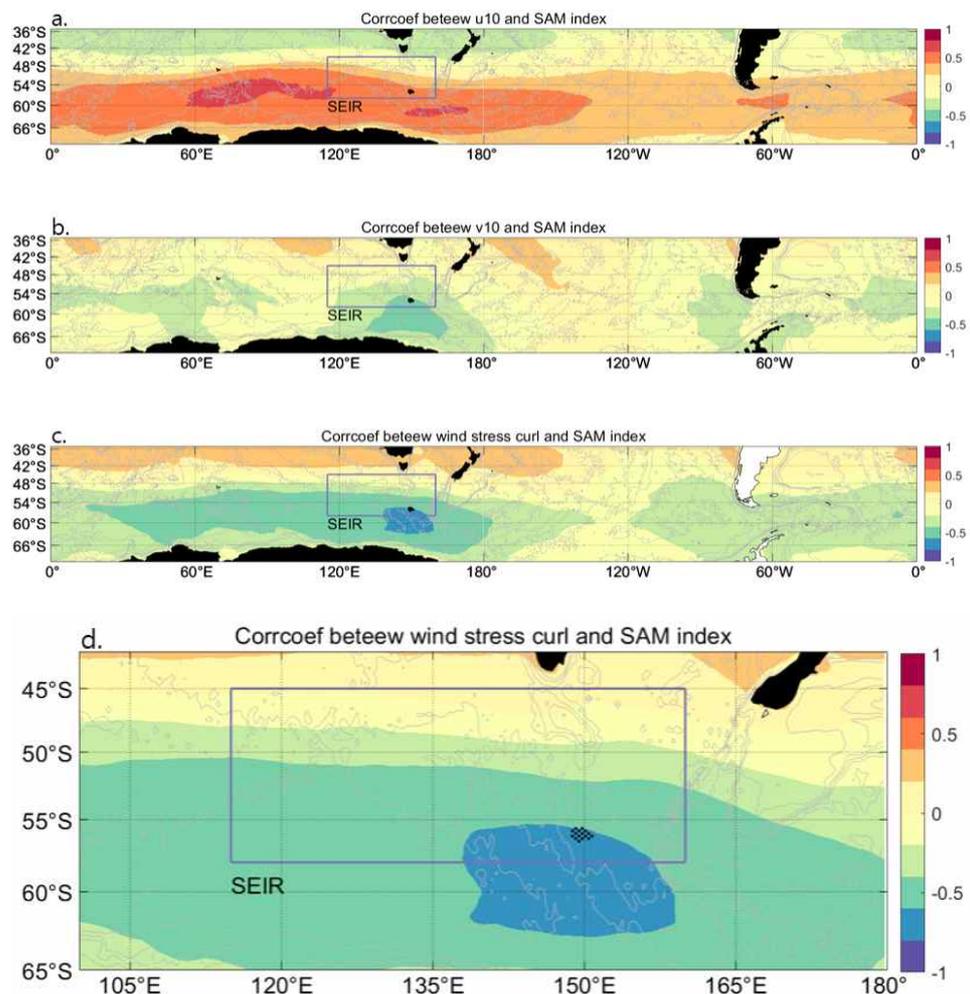
[그림 9] GLORYS12V1에서 계산한 2007년과 2010년의 연평균 및 연직방향 적분한 EHF. EHF 벡터의 남향 성분 중 음의 값만을 도시함.



[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).



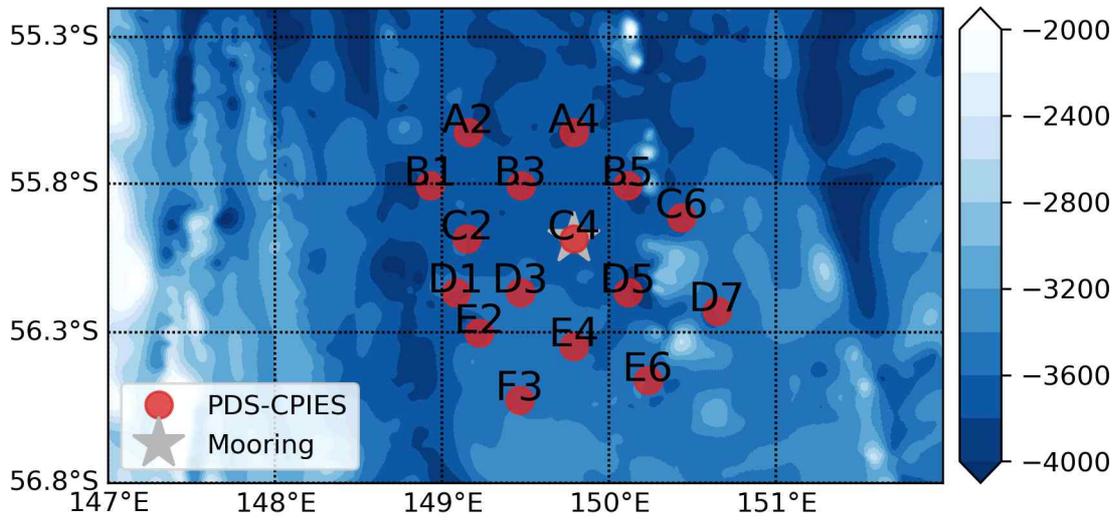
[그림 12] ACC 전해역에서 ERA5 10-m zonal wind(u10)과 SAM index와의 시간 상관계수 공간분포도(a)와 10-m meridional wind(v10)과 SAM index와의 시간 상관계수 공간분포도(b). ACC 전해역에서 ERA5 바람응력자료와 SAM index와의 시간상관계수 분포도(c), SEIR에서의 ERA5 바람응력자료와 SAM index 사이 공간상관계수 분포도(d).

3.2 극전선 통과 EHF 변동성 현장관측 시스템 구축

남극해 SEIR 해역에서의 극전선 통과 EHF 현장 관측 시스템을 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. 세대의 PDS 표층부상 날짜는 2022년 9월 19일, 2023년 11월 13일, 2024년 9월 23일로 설정하였다.

현장관측에 사용된 CPIES와 PDS는 2021년 8월과 9월 사이에 미국 URI으로부터 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 이후 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 탐사를 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.



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



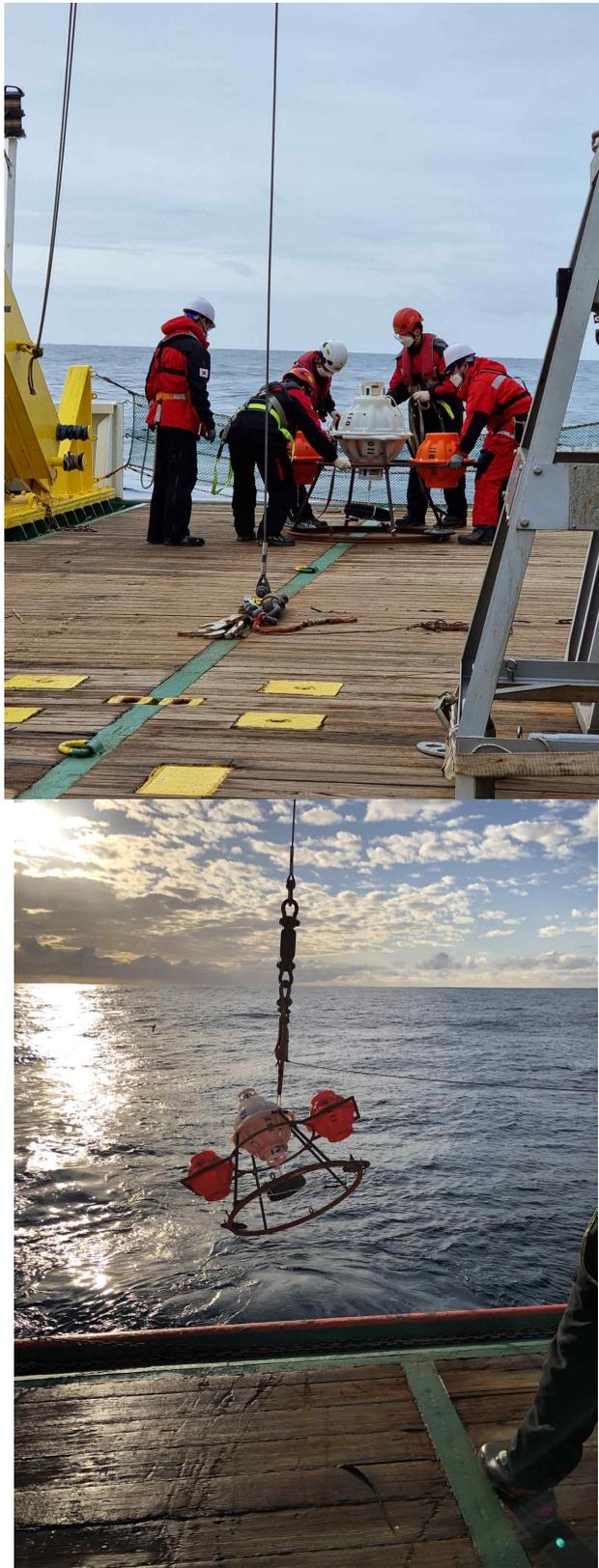
SEIR PDS_CPIES (ARAON 2021)

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.

3.3 PDS 전송 관측자료 분석결과

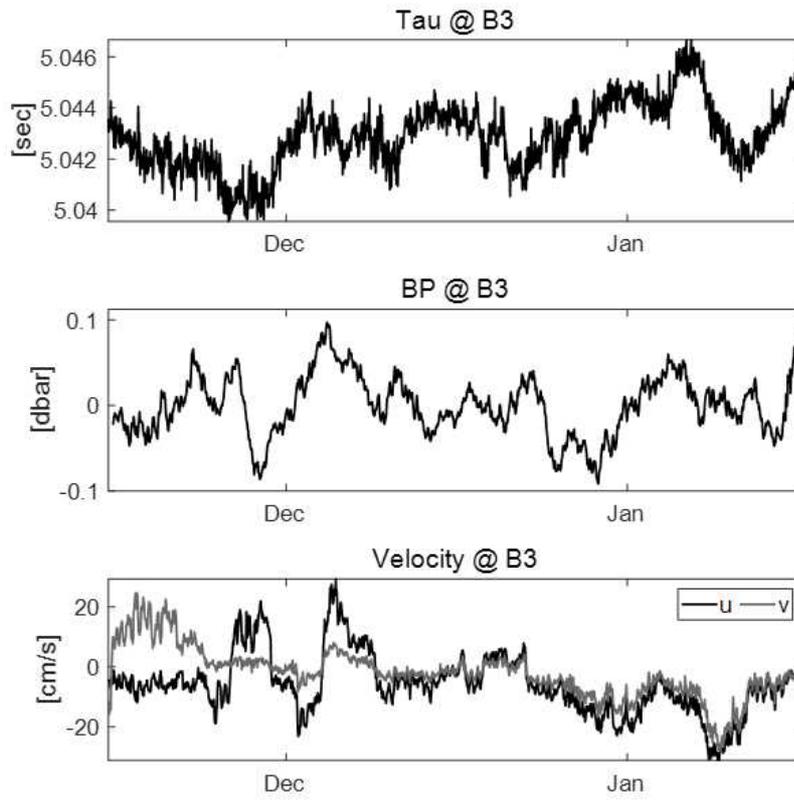
SEIR 해역에 네 개 정점에 2021년 11월에 투입된 PDS 5대가 해수면으로 부상하여 CPIES 관측자료를 위성으로 전송하였다. 관측정점 B5, D3, D5에 투입된 PDS S/N 106, 109, 112은 계획된 2022년 9월 19일에 정확히 부상하였다. 정점 B3에 투입된 PDS S/N 103, 104는 기술적인 문제로 인해 계획된 시점보다 빠른 2022년 1월 17일과 4월 3일에 부상하였다. 네 정점의 CPIES 관측자료는 PDS로부터 이리듐 위성으로 전송되었고 모두 성공적으로 획득되었다. 획득된 관측자료는 SBD 형식으로 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 16]. B3 외 세 정점에선 모두 약 10달(2021년 11월~9월 19일) 길이의 관측자료가 전송되었다[그림 17, 그림 18]. 정점 B5에선 해저면 근처 유속이 알 수 없는 이유로 정상 관측되지 않았다.

관측정점 B3에서 ACC 사행과 관련된 신호들이 관측되었다[그림 16]. 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 뺀 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.

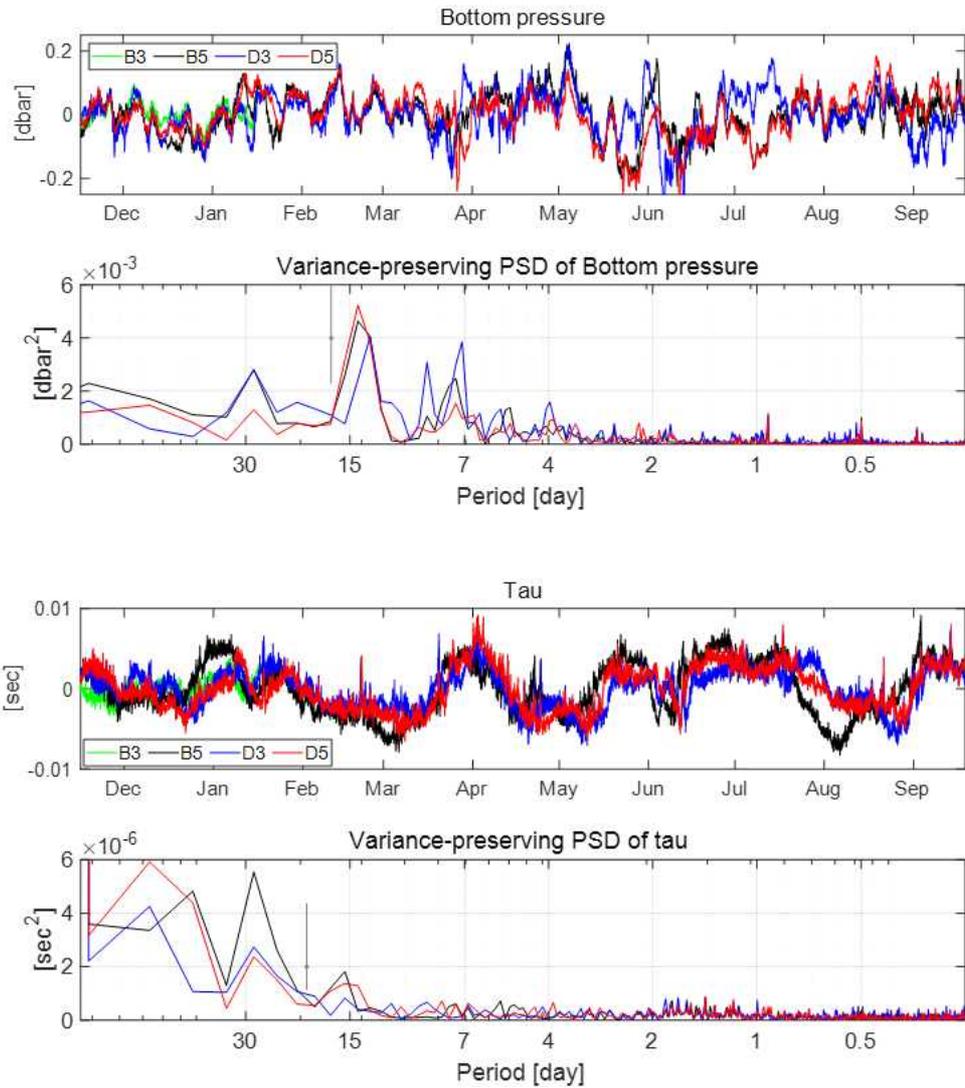
순압성 로스비파, ACC 사행, 준관성주기파의 신호가 약 10달간의 CPIES 관측으로 확인되었다[그림 17, 그림 18]. KOPRI 네 정점의 P_b 는 서로 상당히 일치하는 시계열을 보여주었다[그림 17]. 그중 14일 주기의 P_b 변동이 가장 공통적으로 뚜렷하였고 약 0.13dbar의 변동폭을 가지고 있다. 이 14일 주기 변동성은 모든 정점에서 거의 동시에 발생하고 있어 대기압, 바람에 의해 생성되어 서쪽으로 전파한 순압성 로스비파의 신호로 추측된다. P_b 는 약 7일 주기의 공통된 변동성도 포함하는데 이것 역시 동쪽에서 기원한 순압성 로스비파 혹은 관측해역의 대기압, 바람응력와의 효과로 만들어진 신호로 보인다. 네 개 관측정점에서 τ 는 서로 상당히 비슷한 시계열을 가지고 있고 약 15일과 약 30일

이상의 상대적으로 장주기 변동이 우세하였다[그림 17]. CPIES 관측해역이 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 18]. 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.

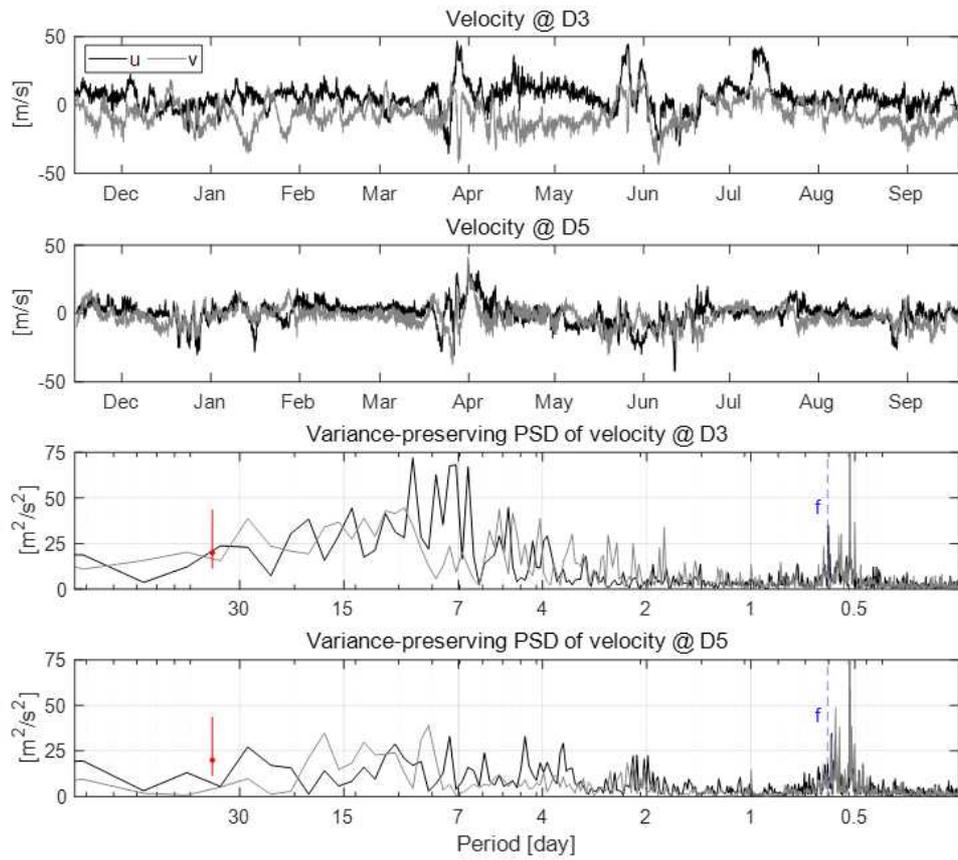




[그림 16] PDS가 전송한 B3 정점 음파 왕복시간(상), 해저면 압력(중), 해저면 근처 유속(하).



[그림 17] PDS가 전송한 네 관측정점에서의 해저면 압력(상)과 음파 왕복시간(하)의 시계열 및 Variance-preserving PSD.



[그림 18] PDS가 전송한 D3, D5 정점에서 해류계 관측 유속 시계열(상)과 Variance-preserving PSD(하).

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1차년도에 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.

2021년도 KOPRI 아라온호 남극항차에서 사전에 설정한 SEIR 해역 남부 16개 정점에 PDS-CPIES 16대를 성공적으로 계류하였다. KOPRI와 URI의 정점에 각각 2대와 3대의 PDS가 함께 계류되어 CPIES 장비 회수 이전에 관측자료 획득이 가능하도록 설정하였다. CPIES는 τ 관측을 통해 수온자료를 획득하여 해저면 관측 유속과 함께 극전선을 통과하는 EHF 발산성분을 계산할 수 있다. 또한, τ 는 수온약층의 두께 변화에 민감하여 ACC의 사행과 중규모 소용돌이의 변동을 관측할 수 있고 이와 관련된 EHF의 변동을 포함하는 관측자료를 획득할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 2차년도에 GLORYS12V1를 활용하여 약 27년 길이의 남극해 전 해역에서 EHF를 산출하였다. 계산된 EHF 분석을 통해 남극해 전 해역에서의 EHF의 공간분포와 시간에 따른 변화를 확인하였고 관측해역에 극전선 통과 EHF의 증가 추세가 있음을 확인하였다. 극전선 통과 EHF와 대기의 연관성을 분석하기 위해 ECMWF에서 제공하는 ERA5 대기 자료를 확보하였다. 분석 결과 현장관측 해역인 SEIR는 남극해 기후변동인덱스인 SAM index에 따른 대기 변동이 뚜렷하게 나타나는 곳임을 확인했고 확보된 수치모델 자료와 함께 활용되어 극전선 통과 EHF와 대기 변동과의 관련성을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

2022년 1월과 4월에 관측정점 B3에서 부상한 두 대의 PDS가 전송한 자료를 장비 회수 전에 성공적으로 획득하였고 관측해역의 극전선 사행과 순압성 소용돌이를 관측하고 있음을 확인하였다. 사전에 계획된 2022년 9월 19일에 KOPRI 정점 중 B5, D3, D5에서 부상한 세 대의 PDS가 전송한 약 10달의 관측자료를 성공적으로 획득하였고 분석가능한 형태로 변환하였다. 관측자료 분석을 통해 PDS가 전송한 관측자료에 극전선 통과 EHF와 밀접한 ACC 사행 및 해저면 근처 유속의 뚜렷한 변화가 관측해역에서 발생함을 확인하였다. 또한, 대기와 밀접한 순압성 로스비파의 전파 및 해양 연직혼합에 중요한 준관성

주기파를 포함하는 다양한 물리적 현상 역시 관측자료 분석을 통해 확인되었다. 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.

국제적 관심이 높은 남극해 ACC 해역에서 극전선 통과 EHF 변동성 연구에 활용될 현장 관측 시스템을 성공적으로 구축하였다. 현장관측 해역인 SEIR는 극전선 통과 EHF가 집중되어 있을 것으로 예상되지만 관측자료가 부족한 해역으로 남극해 기후 조절에 밀접한 EHF 분석에 필요한 주요 자료로 제시될 것이다. 또한, CPIES를 통한 심층 해류관측은 전 지구 순환에 중요한 ACC 심해 열교환 및 물질 순환 연구에 활용될 중요한 시계열 자료를 제공할 것이다. PDS를 활용한 장비회수 전 자료 획득은 자료 획득에 긴 시간이 걸리는 물리관측의 단점을 보완한 성공적인 사례가 될 것이다.



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.

과거 연직 물성 프로파일을 활용한 Gravest Empirical Mode (GEM) technique을 CPIES 관측 τ 에 적용하여 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 상호 비교를 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 프록시를 개발할 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 ECWFMF

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.

제 6 장 참고문헌

- Artana, C., Ferrari, R., Bricaud, C., Lellouche, J.-M., Garric, G., Sennéchaël, N., Lee, J. H., Park, Y. H., and 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, doi:10.1016/j.asr.2019.11.033.
- Bishop, S. P., D. R. Watts, and K. A. Donohue (2013), Divergent eddy heat fluxes in the Kuroshio Extension at 144° - 148°E. Part I: Mean structure, *Journal of Physical Oceanography*, 43, 1533 - 1550, doi:10.1175/JPO-D-12-0221.1.
- Cronin, M., and D. R. Watts (1996), Eddy - mean flow interaction in the Gulf Stream at 68°W. Part I: Eddy energetics, *Journal of Physical Oceanography*, 26, 2107 - 2131, doi:10.1175/1520-0485(1996)026<2107:EFIITG.2.0.CO;2.
- de Szoeke, R. A., and M. D. Levine (1981), The advective flux of heat by mean geostrophic motions in the Southern Ocean, *Deep-Sea Research*, 28A, 1057 - 1085, doi:10.1016/0198-0149(81)90048-0.
- D. R. Watts, K. L. Tracey, K. A. Donohue, and T. K. Chereskin (2016), Estimates of eddy heat flux crossing the Antarctic Circumpolar Current from observations in Drake Passage, *Journal of Physical Oceanography*, 46(7), 2103 - 2122, doi:10.1175/JPO-D-16-0029.1.
- Foppert, A., K. A. Donohue, D. R. Watts, and K. L. Tracey (2017), Eddy heat flux across the Antarctic Circumpolar Current estimated from sea surface height standard deviation, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 122, 6947 - 6964, doi:10.1002/2017JC012837.
- Guo, Y., and 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. doi: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*, 96, 1029 - 1063, doi:10.1002/qj.3803.

eteorological Society, 146(730), 1999 - 2049, doi:10.1002/qj.3803.

K. L. Tracey, K.A. Donohue, D. R. Watts, and T. Chereskin(2013), cDrakeCPIES data report November 2007 to December 2011, University of Rhode Island GSO Tech. Rep., 2013 - 01, 80 pp. [Available online at [http://digitalcommons.uri.edu/physical_oceanography_techrpts/4/.](http://digitalcommons.uri.edu/physical_oceanography_techrpts/4/)]

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 Discussions, 14, 1093 - 1126, doi:10.5194/os-2018-15.

Marshall, J. C., and G. Shutts (1981), A note on rotational and divergent eddy fluxes, Journal of Physical Oceanography, 11, 1677 - 1680, doi:10.1175/1520-0485(1981)011<1677:ANORAD.2.0.CO;2.



뒷 면

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.