남극해 탄소 저감 해역의 해양물리 순환

Ocean circulation associated with CO2 reduction in Southern Ocean



인하대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 "남극해 탄소저감 최적기능 환경특성 연구"과제의 위탁연구 "남극해 탄소 저 감 해역의 해양물리 순환"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 02.

大 총괄연구책임자 : 유 규 철

위탁연구기관명 : 인하대학교

위탁연구책임자 : 하 호 경

위탁참여연구원 : 박 재 훈

" : 서 준 영

" : 손 은 애

" : 하 헌 준

보고서 초록

위탁연구과제명		남극해	탄소 저감 해역의	해양물리 순환		
위탁연구책임자	하호경	해당단계 참여연구원수	5 명	해당단계 연구비	40,0	00,000 원
연구기관명 및 소속부서명	인하대학교 현	해양과학과	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내) 보고서 면수 31 페이기		31 페이지				

○ 연구개발의 배경 및 필요성

- 서남극 아문젠해, 로스해와 웨델해를 중심으로 해양순환과 물질순환을 모니터링하는 프로그램이 운영되고 있으나 온실기체의 형성과 해양 유입과 관련된 해양 순환 연구는 미진함
- 본 연구의 목적은 남극해 탄소 저감 해역의 장기 모니터링을 통한 해양순환 메커니즘 규명 및 해양물리 순환에 의한 이산화탄소 저감 메커니즘 규명임

○ 2016년 연구결과

- 대륙사면에서 발생하는 상대적으로 따뜻한 환남극심층수 유입 특성은 해빙/빙하의 융빙 속도를 가속화시키며, 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 해조류의 성장을 촉진시켜 대기-해양 간의 탄소순환에 영향을 끼침
- 브랜스필드 해협에 발달한 수괴의 특성은 남쪽에서 유입되는 웨델해 심층수 기원과 북쪽에서 유입되는 환남극심층수 기원에 의해 조절되므로 이들을 관측하기 적합한 두 지역(M1, M2) 을 장기계류 위치로 제시
- 극지연구소와의 공조를 통한 장기계류장비 구축 및 사전 설치 테스트 완료
- 서남극해 관측망 유지 선도그룹과의 국제협력

○ 연구결과 활용계획

- 대기-해빙-해양의 상호작용에 의한 남극해 주변 해양순환의 장기변동성을 규명
- 전 지구 규모의 탄소순환관점에서 남극해 주변 해양순환의 역할을 평가하고, 이산화탄소 해양 저장을 위한 주요 후보지 및 적합지 제안

색 인 어	한 글	이산화탄소 저감, 남극해, 해양물리 순환, 장기계류, 국제협력
(각 5개 이상)	영 어	${\rm CO_2}$ reduction, Southern Ocean, Ocean circulation, Long-term mooring, International cooperation

요 약 문

Ⅰ. 제 목

남극해 탄소 저감 해역의 해양물리 순환

- Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성
 - 남극해 탄소 저감 해역의 장기 모니터링을 통한 해양순환 메커니즘 규명
 - 해양물리 순환에 의한 이산화탄소 저감 메커니즘 규명
- Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위
 - 남극해 탄소 저감 예상 지역을 관측하기 위한 해양물리 관측장비 구축
 - 남극해 탄소 저감 예상 지역 해양물리 관련 논문 및 기초자료 조사
 - 장기관측시스템 계류 최적지 선정 및 계류 디자인

Ⅳ. 연구개발결과

- 대륙사면에서 발생하는 상대적으로 따뜻한 환남극심층수 유입 특성은 해빙/빙하의 융빙 속도를 가속화시키며, 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 해조류의 성장을 촉진시켜 대기-해양 간의 탄소순환에 영향을 끼침
- 브랜스필드 해협에 발달한 수괴의 특성은 남쪽에서 유입되는 웨델해 심층수 기원과 북쪽에서 유입되는 환남극심층수 기원에 의해 조절되므로 이들을 관측하기 적합한 두 지역(M1, M2) 을 장기계류 위치로 제시
- 극지연구소와의 공조를 통한 장기계류장비 구축 및 사전 설치 테스트 완료
- 서남극해 관측망 유지 선도그룹과의 국제협력 (스웨덴 고덴버그 대학, 미국 럿거스 대학)

V. 연구개발결과의 활용계획

- 대기-해빙-해양의 상호작용에 의한 남극해 주변 해양순환의 장기변동성(계절별, 연도별)을 규명함으로써 해양순환을 제어하는 주요 외부강제력 규명에 활용
- 전 지구 규모의 탄소순환관점에서 남극해 주변 해양순환의 역할을 평가하고, 이 산화탄소 해양저장을 위한 주요 후보지 및 적합지 제안

SUMMARY

I. Title

II. Purpose and Necessity of R&D

Ocean circulation associated with CO2 reduction in Southern Ocean

0	To investigate ocean circulation mechanism through long-term monitoring of the CO_2 reduction in the Southern Ocean.
0	To reveal CO ₂ reduction mechanism by ocean circulation.
III.	Contents and Extent of R&D
0	To construct of the ocean observing systems in order to monitor the CO ₂ reduction in the Southern Ocean.
0	To carry out fundamental investigation of ocean circulation on the CO ₂ reduction potential areas in the Southern Ocean.
0	To determine the design of long-term mooring systems and its optimal sites.
IV.	R&D Results
0	The inflow of warm Circulmpolar Deep Water (CDW) accelerates the melting of sea ice and production of algae, which absorbs atmospheric CO2, affecting the atmospheric-ocean carbon cycle.
0	We suggested suitable two long-term mooring stations (M1 and M2), enabling the observation of the northward-flowing Weddell Sea Deep Water and the southward-flowing CDW, because characteristics of water masses in the Bransfield Strait were controlled by them.
\bigcirc	We conducted construction of long-term mooring systems and its pre-installation testing with KOPRI.
0	To construct international cooperation with network of observation leading groups in the western Southern Ocean.

V. Application Plans of R&D Results

- O To reveal major factors controlling ocean circulation through long-term variability of ocean circulation about the atmosphere-sea ice-ocean interaction in the Southern Ocean.
- $_{\odot}$ In view of CO_2 circulation, we will evaluate the role in ocean circulation in Southern Sea and suggest the proposed sites for underground storage of CO_2



목 차

제 1	장 서론7
제]	L 절 연구개발 배경/필요성 ·······7
제 2	2 절 연구개발 목표7
제 2	장 국내외 기술개발 현황14
제]	l 절 국내 연구현황 ····································
제 2	2 절 국외 연구현황14
제 3 -	장 연구개발수행 내용 및 결과17
제]	l 절 남극해 탄소저감 예상 지역(웨델해 주변)의 해양물리 특성 ·······17
제 2	2 절 장기계류 위치 및 계류장비 디자인20
제 3	3 절 국내외 학술발표 및 국제협력23
제 4	장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도26
제]	L 절 연구개발목표 달성도 무지연구소 2 절 대외기역도 26
제 2	2 절 대외기여도26
제 5 -	장 연구개발결과의 활용계획27
제]	l 절 연구개발 성과의 활용방안 ····································
제 2	2 절 기대효과27
제 6 -	장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보28
제 7 :	장 참고무허 ····································

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 연구개발 배경

- 서남극 아문젠해, 로스해와 웨델해를 중심으로 해양순환과 물질순환을 모니터링하는 프로그램이 운영되고 있으나 온실기체의 형성과 해양 유입과 관련된 해양 순환 연구 는 미진함
- 전 지구 규모의 탄소순환관점에서 남극해주변 해양순환의 역할을 평가하고, 이산화 탄소 해양 저장을 위한 주요 후보지 및 적합지 가능성을 타진하는데 있어서 필요한 연구임

2. 기술적/경제산업적 측면에서의 기술개발 필요성

- 대기-해양-심층 경로를 따라 온실기체 플럭스 파악(퇴적물 트랩에서 생산되는 생지 화학 자료와의 융합필요): 연안 폴리냐에서 형성된 남극심층수의 유속구조 및 하강속 도 파악함으로써 저장된 온실기체의 순환시간(overturning time) 추정 및 퇴적물 트 랩을 이용한 입자성 부유입자의 침강속도 및 플럭스 계산
- 해류순환관측을 위한 계류 관측 거점 평가 및 결정에 도움이 되며, 기존 자료획득 방법의 문제점 해결을 위한 새로운 관측기술 접목
- 남극해 해양물리 순환 연구는 전 지구 규모의 이산화탄소 순환을 이해할 수 있으며, 차후 기후변화협약에서 제시되는 이산화탄소 배출의 청정개발시스템으로 인정될 수 있어 국내 경제적인 이익에도 커다란 도움을 줄 수 있는 중요한 자료로 활용할 수 있음

제 2 절 연구개발 목표

1. 최종목표

- 남극해 탄소 저감 해역의 장기 모니터링을 통한 해양순환 메커니즘 규명
- 해양물리 순환에 의한 이산화탄소 저감 메커니즘 규명

2. 최종목표 성격 및 설정근거

- 최근 전지구 온난화/기후변화에 따른 급격한 극지역 환경변화가 전세계적으로 큰 이슈 가 되고 있으며, 국제기후변화협약을 통해 현실화된 이산화탄소 감축에 따라 전지구적 인 대기 이산화탄소의 흡수 지역인 남극해에서 이산화탄소 저감 기작에 대한 남극권 특성화 연구를 실시
- 넓은 범위의 연구 지역을 포함하는 연구선 기반 승선 연구로 상당한 탐사 기간과 예 산을 고려하여 설정한 목표
- 국내 연구진 및 국제 협력 연구진의 기술수준을 고려할 때 실현 가능한 목표

3. 연차별 연구목표 및 내용

1) 1차년도

해당연도 연구개발 목표	남극해 탄소 저감 기작 규명을 위형	한 인프라 구축
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	연구범위
I과즈자비 구주	○ 해양 계류 및 관측 장비 구축 ○ 연구대상 지역 해양환경 기초조사	장비 구축 및 기초 조사

	연구개발내용 및 범위 상세기술
남극해 해역	 ○ 남극해 탄소 저감 예상 지역을 관측하기 위한 해양물리 관측
관측장비 구축	장비 구축 ○ 남극해 탄소 저감 예상 지역 해양물리 관련 논문 및 기초자료
및 기초조사	조사 ○ 장기관측시스템 계류 최적지 선정 및 계류 디자인

2) 2차년도



해당연도 연구개발 목표	아라온 기반 해양관측 연	구(1)
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	연구범위
	○ 해양 계류 및 관측 장비 구축 ○ 남극해 탄소 저감 예상 지역에 물리해양 관측장비 계류	장비 구축 및 해양 관측 장비 계류
남극해 해역의 정점 자료	○ 아라온 기반 승선 연구를 통한 남극해 탄소 저감 예상 지역의 정점 조사 ○ 해양물리 자료 분석	연구선 기반 승선 연구, 해양물리 자료 분석

	연구개발내용 및 범위 상세기술
남극해 해역	○ 남극해 탄소 저감 예상 지역을 관측하기 위한 해양물리
관측장비 구축	관측장비 구축 ○ 남극해 탄소 저감 예상 지역을 관측하기 위한 해양물리
및 장비 계류	관측장비 계류 (연구선 기반 승선 연구)
남극해 해역의	○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양물리 관측(연구선 기반 승선
정점 자료	연구) ○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양물리특성 자료 분석

3) 3차년도

해당연도 연구개발 목표	아라온 기반 해양관측 연구(2)		
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	연구범위	
남극해 해역의 정점 자료	○ 아라온 기반 해양관측 연구를 통한 남극해 탄소 저감 예상 지역의 정점 자료 분석	해양물리 자료 분석	

	연구개발내용 및 범위 상세기술
남극해 해역의 정점 자료	○ 남극해 탄소 저감 후보지에서 해류순환 및 수괴 분석

4) 4차년도

해당연도 연구개발 목표	남극해 해양순환 메커니즘 규명 및 아라온	기반 해양관측 연구(3)
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	연구범위
남극해 해역의 장기 모니터링 자료	 ○ 2차년도 계류된 남극해 탄소 저감 후보지의 해양 계류 장비에서 획득한 시계열 해양물리특성 자료 분석 ○ 남극해 탄소 저감 후보지의 추가 정점 설정하여 해양물리 관측(연구선 기반 승선 연구) ○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양물리특성 자료 분석 	연구선 기반 승선 연구, 해양물리 자료 분석
남극해 해역의 해양순환 메커니즘 규명	○ 남극해 탄소 저감 후보지의 장기 모니터 링 자료와 정점 자료의 비교 및 통합 분 석○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양순환 메 커니즘 규명	자료 해석

	연구개발내용 및 범위 상세기술
남극해 해역의 장기 모니터링 자료	 ○ 2차년도 계류된 남극해 탄소 저감 후보지의 해양 계류 장비에서 획득한 시계열 해양물리특성 자료 분석 ○ 남극해 탄소 저감 후보지의 추가 정점 설정하여 해양물리 관측 (연구선 기반 승선 연구) ○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양물리특성 자료 분석
해양순환	○ 남극해 탄소 저감 후보지의 장기 모니터링 자료와 정점 자료의 비교 및 통합 분석○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양순환 메커니즘 규명

5) 5차년도

해당연도 연구개발 목표	남극해 해양물리 순환에 의한 이산화탄소 저감 기작 규명						
세부 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	연구범위					
남극해 해역의 장기 모니터링 자료	○ 남극해 해역 계류 장비의 해양물리 자료 분석○ 남극해 해역의 해양물리 자료 최종 분석	해양물리 자료 종합 분석					
해양순환에 의한 탄소 저감 기작 규명	○ 남극해 해역의 해양순환에 의한 탄소 저감 기작 규명	자료 종합 해석					

연구개발내용 및 범위 상세기술								
남극해 해역의 장기 모니터링 자료	○ 2차년도 남극해 탄소 저감 후보지의 해양 계류 장비에서 획득된 시계열 해양물리특성 자료 분석○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양물리특성 자료 최종 분석							
해양순환에 의한 탄소 저감 기작 규명	○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해류순환 및 수괴 최종 분석 ○ 남극해 탄소 저감 후보지의 해양순환에 의한 탄소 저감 기작 규명							

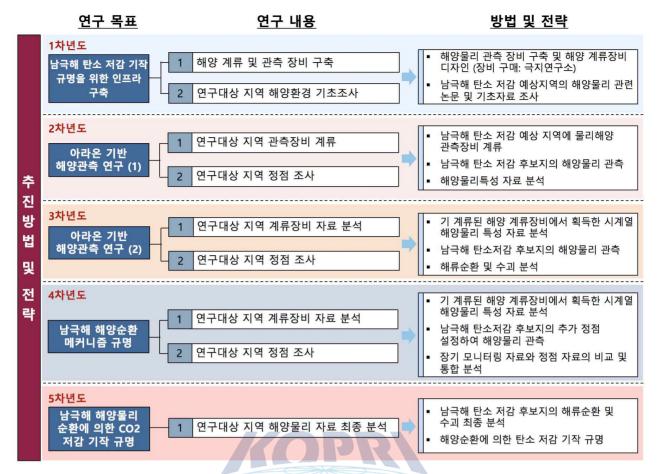


그림 1. 연차별 연구개발 로드맵

4. 정량적 성과목표 및 평가기준 기연구소

구분	년도	성과목표		세계최고 수준 (보유국/ 보유기관)	연구 전 국내 수준	목표치	가중 치 (%)	평가 기준	
		남극 해 해양	남극해 해역의 장기 모니터링 자료	미국/WHOI	60%	- 월별 시계열 자료	40	- 시계열 수온, 염분, 유속자료	
최종 목표	2020	물리 순환 연구	남극해 해역의 정점 자료	미국/WHOI	65%	- 정점 해양물리 관측 자료(탐사시즌)	40	- 수온,염분자료	
		탄소 저감 기작 규명	해양순환에 의한 탄소 저감 기작 규명	독일/AWI	30%	- 상위 30% 이내 SCI /SCIE 논문 2편	20	- 논문 건수	
1차	2016	남극 해 해양	해	계류 및 관측장비 구축	미국/WHOI	60%	계류 및 관측 장비 구축장기계류 최적지 선정 및 디자인	50	- 장비구축
년도		물리 순환 연구	남극해 해역 해양환경 기초조사	미국/WHOI	60%	- 연구지역 해양물리 관련 기초조사	50	- 연구지역 기초 조사 자료 제시	

2차 년도	2017	남극 해 해양 물리 순환	남극해 해역 관측장비 구축 및 장비 계류	미국/WHOI	60%	해양 계류 및 관측 장비 구축물리해양 관측장비 계류	50	- 장비구축 - 관측장비 계류
		연구	남극해 해역의 정점 자료	미국/WHOI	65%	- 정점 해양물리 관측 자료(탐사시즌)	50	- 수온, 염분자료
3차 년도	2018	남 해 양리 문한 연 선한 연	남극해 해역의 정점 자료	미국/WHOI	65%	- 정점 해양물리 관측 자료(2차년도탐사)	100	- 수온, 염분자료
		남극 해 해양	남극해 해역의 장기 모니터링 자료	미국/WHOI	60%	- 월별 시계열 자료	40	- 시계열 수온, 염분, 유속자료
4차	2212	물리 순환 연구	남극해 해역의 정점 자료	미국/WHOI	65%	- 정점 해양물리 관측 자료(탐사시즌)	40	- 수온, 염분자료
년도	2019	해양 순환 메커 니즘 규명	남극해 해역의 해양순환 메커니즘 규명	독일/AWI	30%	- 상위 30% 이내 SCI /SCIE 논문 1편	20	- 논문 건수
		남극 해 해양	남극해 해역의 장기 모니터링 자료	미국/WHOI	60%	- 월별 시계열 자료	40	- 시계열 수온, 염분, 유속자료
5차 년도	2020	물리 순환 연구	남극해 해역의 정점 자료	미국/WHOI	65%	- 전체 정점 해양물리 관측 자료 종합 분석	40	- 수온, 염분자료
		탄소 저감 기작 규명	해양순환에 의한 탄소 저감 기작 규명	독일/AWI	30%	- 상위 30% 이내 SCI/SCIE 논문 1편	20	- 논문 건수

5. 당해연도(1차년도) 연구개발 목표

- 남극해 탄소 저감 기작 규명을 위한 인프라 구축
- 6. 당해연도(1차년도) 연구개발내용 및 범위
 - 남극해 탄소 저감 예상 지역을 관측하기 위한 해양물리 관측장비 구축
 - 남극해 탄소 저감 예상 지역 해양물리 관련 논문 및 기초자료 조사
 - 장기관측시스템 계류 최적지 선정 및 계류 디자인

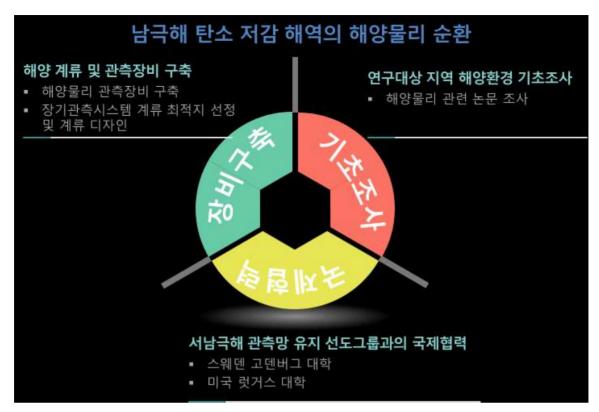


그림 2. 당해연도 연구개발 목표 및 내용 로드맵

극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구현황

- 2009년 쇄빙연구선 건조이후 본격적인 남극해 해양관측 연구가 시작되었으며, 최근 5년간은 신규 인프라 구축 및 국제협력 강화 시기로 평가할 수 있음
- 2010년부터 극지연구소의 K-Polar 프로젝트를 모태로 하여, 남극주변의 해양온난화 관련된 글로벌 이슈를 대응하기 위한 연구과제가 진행 중임

제 2 절 국외 연구현황

- 최근 서남극해 빙하 연구에 따르면, 빙하 내에 발생하는 열개작용(rifting)이 융빙 속도를 급격하게 상승시키는 요인으로 밝혀짐. 이에 따라 열개작용 형성과정 및 해양순환 영향에 대한 연구가 활발히 진행중임
- 남극해양관측시스템(Southern Ocean Observing System, SOOS, www.soos.aq)을 중심으로 각국에서 진행되고 있는 독립적인 남극해양 관측과제의 주요현장자료를 상호 공유하고자 하는 노력이 국제과학 커뮤니티에서 활발하게 진행되고 있음(그림 3)
- 현재, 미국 컬럼비아대학의 LDEO연구소(C. Zappa 박사)가 주축이 되어 로스해 주변해 역 관측 연구가 활발히 진행 중임

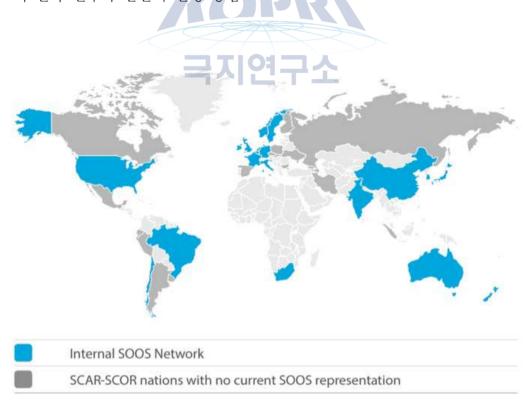


그림 3. 남극해양관측시스템의 참여국가 네트워크 현황

- 1990년부터 시작된 Palmer LTER(Long Term Ecological Research) 프로그램은 미국 럿거스 대학 연구진이 주축이 되어 서남극 해역에 지속적인 해양물리 관측을 진행하 고 있음(그림 4)
- LTER 연구지역은 브랜스필드 해협의 서쪽에 위치하므로 추후 획득된 장기계류 자료에 대한 국제협력과 공동연구를 추진하여 서남극의 해양순환 매커니즘을 명확히 밝혀내고자 함
- ISW(Ice Station Weddell)는 미국 컬럼비아대학의 A.L. Gordon 교수가 주축이 되어 1992년부터 남극 서쪽 웨델해에 해빙캠프를 설치하여 큰 소용돌이(Gyre)의 해양과 대기 물리학적 변화를 연구함
- 해빙캠프가 설치된 해빙은 평균 6.2 km/day의 속력으로 이동하였으며, 수괴의 열염 및 흔적원소, 유속, 난류 및 해빙의 물리적 정보에 대한 자료를 획득함
- ISW는 브랜스필드 해협의 남쪽에서 유입되는 웨델해 저층수에 대한 연구를 지속적 으로 진행하였음
- GO-SHIP(The Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program)은 2007 년부터 현재까지 전 남극해를 대상으로 고해상의 물리, 화학, 생물학적 자료를 획득 하기 위해 선상관측을 기반으로 하는 관측 프로그램임
- GO-SHIP의 연구 목표는 큰 규모에서의 해양의 열염 및 기타 성분의 변화 파악과 향후 해양에 의한 탄소순환 양상 변화 예측임

극지연구소

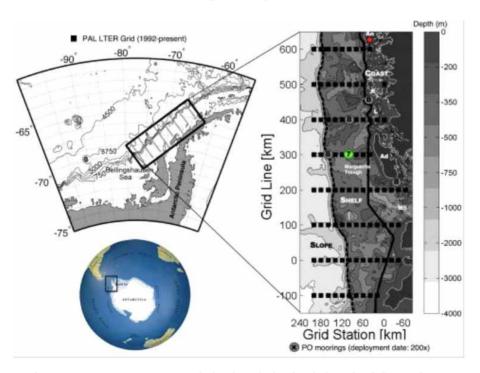


그림 4. Palmer LTER 프로그램의 연구지역 및 해양물리 관측 트랙

O SOCCOM(Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling)은 생화학 아르고를 이용한 남극해 최초의 관측을 실시한 프로그램으로써, 관측, 모델, 영향 평가의 총 세가지 분야로 나뉘어 연구가 진행되었음(그림 5)

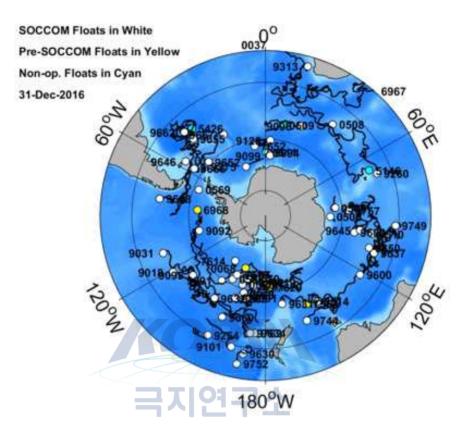


그림 5. SOCCOM 프로그램에서 생화학 아르고를 통해 관측된 남극해역

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 남극해 탄소저감 예상 지역(웨델해 주변)의 해양물리 특성

1. 해양순환 특성

- 남극대륙을 시계방향으로 돌고 있는 고리모양의 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current)는 지구전체 해양순환의 중요한 연결고리 역할을 하며, 계절별로 형성이 되는 전선(front)의 남-북 방향 움직임에 따라 중위도-고위도 간의 열-에너지 교환이 적극적으로 이루어짐(Cater et al., 2009; Oris et al., 1995)
- 전 지구적인 규모의 열염분순환의 대서양, 태평양, 인도양 등을 포함한 모든 해류는 남극대륙주변의 남극순환류와 연결되어 있으므로, 이는 전 지구적인 기후변화의 지시 자이자 반응자 역할을 함(그림 6)
- 남극대륙의 움푹 들어간 지역 특히, 웨델해와 로스해를 중심으로 큰 소용돌이가 형성되며, 그로 인해 대륙붕 주변부에 대륙사면과 평행한 방향의 강한 해류가 나타남 (Robertson et al., 2002; Ryan et al., 2016)
- 남극저층수(Antarctic Bottom Water)는 폴리냐(polyna) 혹은 빙붕지역에서 발생하는 염 분배출(brine ejection)과 수온감소 현상으로 인해 무거운 밀도를 가지는 표층수가 아 래로 가라앉게 되어 형성됨(Azaneu et al., 2014; Garabato et al., 2002; Gordon et al., 2001; van Caspel et al., 2015)

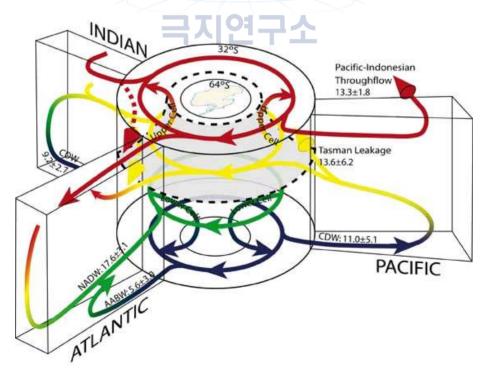


그림 6. 남극대륙을 중심으로 흐르는 남극순환류와 다른 대양의 해류와 연 결되어 있는 모식도(Lumpkin and Speer, 2007)

- 남극저층수의 수온은 약 -0.8~2° C, 염분은 약 34.6~34.7psu를 보이며, 특히 웨델해에서 형성되는 저층수는 전세계 저층수 가운데 가장 차가운 특징을 지님(Gordon et al., 2010; Marshall and Speer, 2012)
- 남극대륙 주변 특히, 서남극에 존재하는 해빙/빙하는 전 지구적인 규모의 기후변화로 인해 지난 20년 동안 융빙 속도가 점점 증가하고 있으며, 이러한 융빙 속도의 가속화 현상은 빙하붕괴, 해빙면적 감소의 원인이 되어 주변 해양 순환에 직·간접적으로 영 향을 끼침(Paolo et al., 2015; holemann et al., 2011; Schmidtko et al., 2014)
- 최근 연구에 따르면 대륙사면에서 발생하는 상대적으로 따뜻한 환남극심층수 (Circumpolar Deep Water) 유입량의 증가가 해빙/빙하의 융빙 속도를 가속화 시키는 요인으로 밝혀짐(Snow et al., 2016; Thompson et al., 2009; Martinson and McKee, 2012; Moffat et al., 2009)
- 이에 따라 환남극심층수의 유입 메커니즘 및 특성 변화에 대한 관심이 증폭됨
- 또한 환남극심층수는 남극 대륙붕 주변 수괴에 비해 상대적으로 많은 영양분을 함유 하고 있으므로 남극 대륙붕으로 유입 시 해양의 생물 생산량을 증가시킴(Hoppema et al., 2002; Loeb et al., 2010)
- 결국 이는 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 해조류의 성장을 촉진시켜 대기-해양 간 의 탄소순환에 영향을 끼침(Shadwick et al., 2015)
- 연구지역인 웨델해 북서쪽에 위치한 브랜스필드 해협은 반폐쇄성 특징을 보이며, 크게 환남극심층수, 브랜스필드 대륙붕 수괴(Bransfield Strait Shelf Water), 베링스하우 젠해 수괴(Bellingshausen Sea Water), 웨델해 저층수(Weddell Sea Deep Water)의 유입 으로 해양순환이 발달함(그림 7)

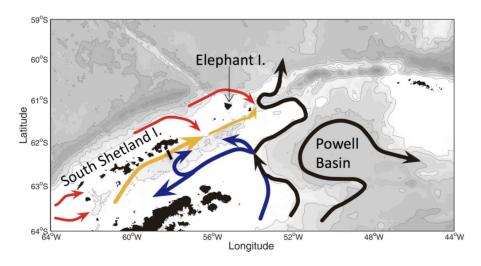


그림 7. 브랜스필드 해협에 발달한 해양순환 모식도, 붉은색 화살표는 환남극심층수, 파란색 화살표는 브랜스필드 대륙붕 수괴, 주황색 화살표는 베링스하우젠해 수괴, 검은색 화살표는 웨델해 저층수(Gordon et al., 2000; Thompson et al., 2009)

- 특히 브랜스필드 해협 북쪽에서 유입되는 환남극심층수의 계절별, 연년별 변화 및 이에 따른 일차생산량의 변화에 대한 많은 연구가 진행되어옴(Loeb et al., 2010; Dotto et al., 2016; Zhou et al., 2013)
- 따라서 위 연구지역은 최근 이슈인 환남극심층수의 특성과 탄소순환 관점에서의 해양 순환 메커니즘 규명에 적합한 지역으로 사료됨

2. 수괴분포

- 브랜스필드 해협의 수괴는 환남극심층수, 변형된 환남극심층수(modified Circumpolar Deep Water), 브랜스필드 대륙붕 수괴, 브랜스필드 저층수로 구성됨(그림 8)
- 환남극심층수는 약 1°C 이상의 수온을 보이며, 혼합된 환남극심층수는 상대적으로 차가운 약 0~1°C 의 수온을 보임
- 특징적으로 환남극심층수는 브랜스필드 해협 북쪽 대륙사면을 따라 유입되며 혀 모양 의(tongue-shaped) 수괴 형태가 잘 발달됨(그림 9)

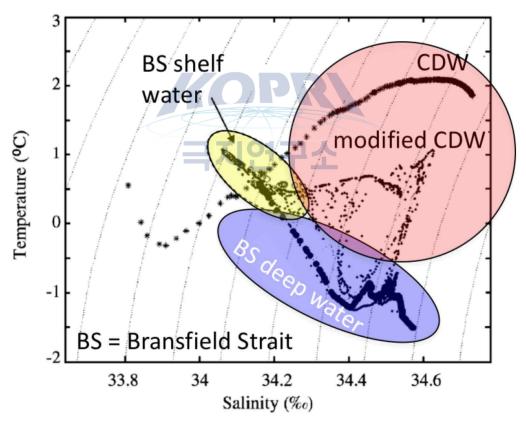


그림 8. 브랜스필드 해협에서 관측된 수온, 염분의 T-S 다이어그램(Zhou et al., 2006)

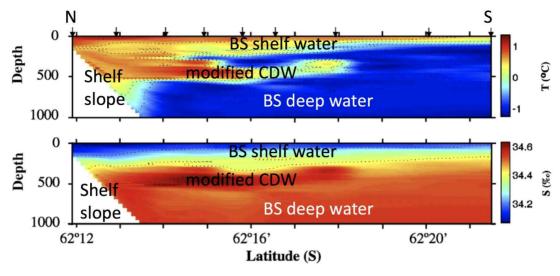


그림 9. 브랜스필드 해협의 수온, 염분 수직분포(Zhou et al., 2006)

제 2 절 장기계류 위치 및 계류장비 디자인

- 1. 장기계류 위치 및 계류장비 디자인
 - 브랜스필드 해협에 발달한 수괴의 특성은 남쪽에서 유입되는 웨델해 저층수 기원과 북쪽에서 유입되는 환남극심층수 기원에 의해 조절되므로 이들을 관측하기 적합한 두 지역(M1, M2)을 장기계류 위치로 제시(그림 10, 11)
 - 계류장비 디자인 또한 웨델해 심층수와 환남극심층수를 관측하기 적합한 위치에 각 각의 관측 장비를 배치(그림 12)

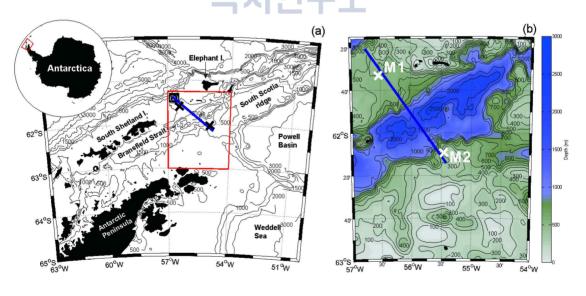


그림 10. (a) 연구대상 지역, (b) 장기계류 위치(M1, M2)

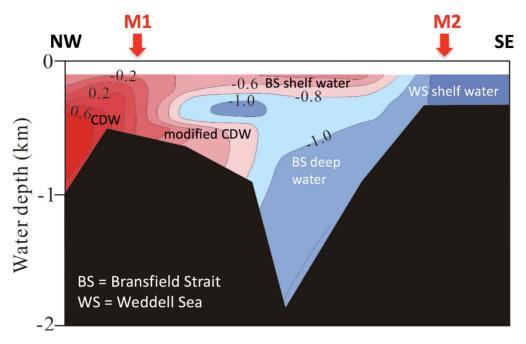


그림 11. 장기계류 위치의 수온 수직분포

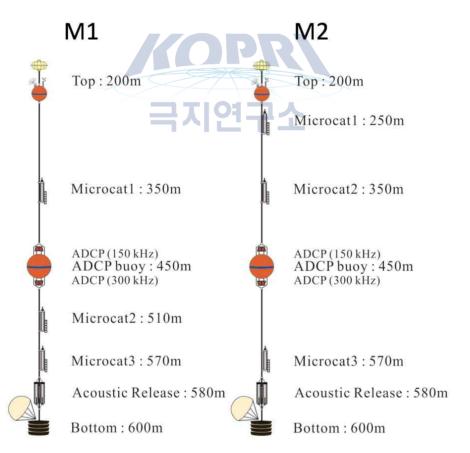


그림 12. 장기계류 디자인 모식도(M1, M2)

2. 계류장비 테스트 및 가설치

- 2017년 계류 예정인 계류장비에 대한 장비테스트 및 가설치 실시
- 가설치를 통해 확인한 내용은 아래와 같음
 - 고정 추(Anchor)-낙하산-AR(Acoustic Release): 바닥면에 고정되는 추는 AR과 샤 클・링크(샤클 사이 엉킴 방지)를 통해 사슬과 연결됨. 낙하산은 샤클과 링크 사이를 통과하여 장착되며 계류장비의 추락을 방지함. 사슬은 상단부 5 m 밧줄과 연결됨(그림 13a)
 - AR은 2개(예비용 1개 포함)를 연결하여, AR 오작동시 발생할 수 있는 문제를 해결함. 각각의 AR 하단부는 샤클로 연결되어 추와 고정되며, 상단부는 하나의 사슬로 연결되어 AR 작동시 링크를 통과하여 사슬이 빠져 나오도록 설계됨(그림 13b)
 - 부이(Buoy): 계류시 상단(5개), 중앙(3개), 하단(2개)에 수직으로 설치되며, 사슬에 샤클로 고정(그림 13c)



그림 13. 계류장비 가설치 사진

■ ADCP 부이: 부이에 150 kHz와 300 kHz가 위・아래 방향으로 수면으로부터 약 450 m에 각각 설치됨. 상대적으로 무게가 많이 나가는 150 kHz ADCP를 우선 설치하여 중심을 맞춘 후, 300 kHz ADCP를 설치. ADCP 설치 완료 후 상단면에 보호용캡을 장착(그림 13d)

■ 퇴적물 포집장치: 100 m와 400 m에 총 2개가 설치될 예정. 상단과 하단에 각각 4 개의 고리가 연결되며, 상단은 PVC, 하단은 스테인리스를 이용함. 스테인리스의 부식 방지를 위해 전기테이프로 감싼 후 연결(그림 13e)

제 3 절 국내외 학술발표 및 국제협력

1. 국내외 학술발표

○ 제목: Drake Passage 남부해역에서 관측된 내부파 에너지의 시공간적 변동에 대한 해빙의 영향

일시/장소: 2016년 10월 26일-27일(여수엑스포)

학회: 한국해양학회 추계학술대회

○ 제목: Observation of sea-ice effects on deep internal waves in the southern Drake Passage

일시/장소: 2016년 12월 12일-16일(미국 샌프란시스코)

학회: 미국 AGU 학회

2. 국제협력

- 1) 스웨덴 고덴버그 대학과의 국제협력
 - 고덴버그 대학 방문하여 SOOS 과학위원회 의장인 A. Wahlin 교수면담
 - 서남극해 급속 융빙의 주요 메커니즘은 고온, 고염의 환남극심층수 유입이며, 이를 관측하기 위해 웨델해 동쪽지역 장기계류 최적지에 대한 심층토의 진행
 - 본 연구의 장기계류 최적 후보지점 및 현장계류 디자인에 대하여 자문 받음
 - SOOS 커뮤니티 내에서 추후 획득된 장기계류 자료에 대한 공동연구 및 협력방안 토의
 - 사이드 미팅형식으로, 한국연구재단과 스웨덴 STINT재단의 지원을 받아 스웨덴 Borno 연구소에서 해양물리 관측 및 후속자료처리 워크샵 개최(CTD: Anna Wahlin, ADCP: 하호경 발표)
- 가) 해양물리 관측장비 실습
- 해양물리 관측 및 후속자료처리 워크샵을 통해 관측장비 파일럿 테스트 및 극지기 반 후속자료처리 실습을 실시
- 해양물리 관측장비 파일럿 테스트
 - 극지 해양물리 관측기술 기반 확보 및 사전 관측장비 계류 테스트를 통한 극지의 접근 제한성 및 현장조사의 어려움 극복
 - 선진 연구그룹(예, 스웨덴 고덴버그 대학)의 관측기술을 모태로 극지환경에 적합한 관측방법 적용
 - 해빙내부와 하부의 온도·염분·밀도 측정 위한 기술 테스트를 통해, 국내 극지연 구에 적합한 현장관측 기반 확보

- 정기적인 Mini-CTD 관측을 통한 수층의 수직적 프로파일(염분, 온도, 밀도) 측정 및 밀도약층 수직이동 모니터링 테스트
- Microcat(7개) 계류를 통한 수층의 물리적 거동의 시·공간적 변화 감지 테스트(그림 14)

○ 극지기반 후속자료처리

- 스웨덴 고덴버그 대학과의 공동자료처리를 통한 극지기반 후속자료처리법 구축
- 환남극심층수 유입 메커니즘 및 특성 규명 위한 고해상도 자료 처리법 구축
- 해빙하부 수괴 거동 메커니즘의 자료 처리 노하우 축적 및 통합적 이해
- 극지 관측 자료 기반한 Mini-CTD 및 Microcat 관측 자료 보정 및 검정(그림 15)
- 수심 약 15 m에서 발달하는 성층은 표층으로 유입되는 빙하의 융빙수에 의해 형 성됨(그림 15)

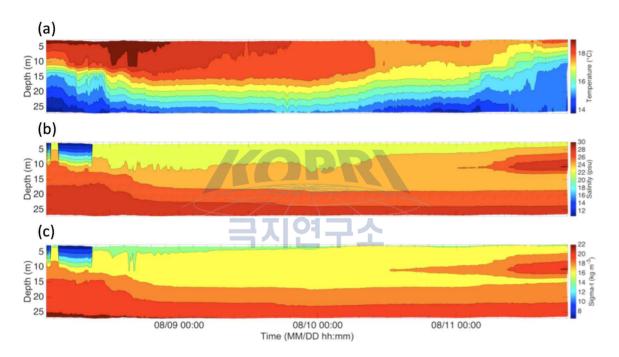


그림 14. Microcat(7개) 계류를 통한 시·공간적 수층구조 변화: (a) 온도, (b) 염분, (c) 밀도

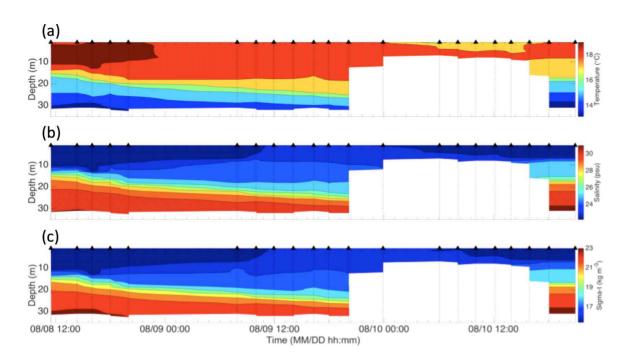


그림 15. Mini-CTD 캐스팅 통한 수직적 수층구조: (a) 온도, (b) 염분, (c) 밀도

- 2) 미국 럿거스 대학과의 국제협력
 - 한국을 방문한 럿거스 대학 연구진(O. Schofield, T. Miles 교수)과 웨델해에서 진행하고 있는 LTER 프로그램의 정점위치 정보교환(그림 16)
 - 향후 장기계류 관측자료 공동연구 등의 국제협력 방안 검토 예정

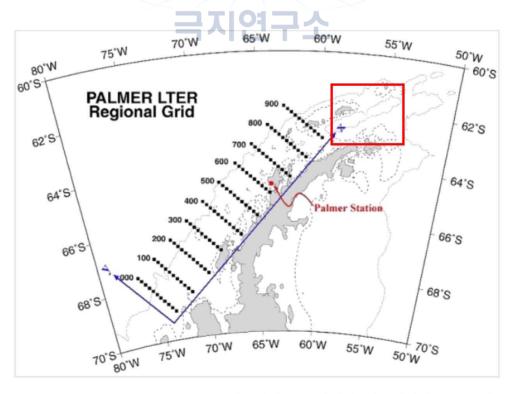


그림 16. Palmer LTER 프로그램 연구지역. 본 사업의 연구지역인 브랜스필드 해협(붉은 박스)과 가까운 곳에 위치

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위	목표치	평가기준	가중치 (%)	달성도(%)
남극해 해역 관측장비 구축	○ 남극해 탄소 저감 예상 지역을 관 측하기 위한 해양물리 관측장비 구축○ 장기계류 최적지 선정 및 디자인	○ 계류 및 관측 장비 구축 ○ 장기계류 최적지 선정 및 디자인	○ 장비구축	50	100
연구대상 지역 해양환경 기초조사	○ 남극해 탄소 저감 예상 지역의 해 양물리 관련 논문 및 기초자료 조 사	○ 연구지역 해양물리 관련 기초 조사	○ 연구지역 기초 조사 자료 제시	50	100

○ 연구개발목표별 추진 일정 (계획, 실적)

구분	세부연구개발목표	추진 및 계 획								
七	세구한기계절목표	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	
	관측장비 구축									
	270714	7	27							
1차년도 (2016년)	해양환경 기초조사									
	,, 0 2 0 1 == 1									
	장기 계류 최적지 선정 및									
	계류 디자인									

- 연구지역의 해양물리 특성 및 국내외 연구현황 조사 실시(제 2장, 제 3장 참조)
- 물리해양 관점에서 적합한 두 지역(M1, M2) 을 장기계류 위치로 제시(그림 10,11 참 조)
- 해양물리 관측장비는 극지연구소에서 구매하여 구축하였으며, 선정된 두 지역의 장 기계류에 적합한 디자인 제시(그림 12 참조)

제 2 절 대외기여도

- 기초자료 조사를 통해 연구해역 해양순환 특성 리뷰
- 탄소 저감 기작을 밝히기 위한 해양물리 관측장비 구축
- 현재 추진중인 국제협력을 통해 대한민국의 남극해 관측분야 역량을 강화

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1절 연구개발 성과의 활용방안

- 대기-해빙-해양의 상호작용에 의한 남극해 주변 해양순환의 장기변동성(계절별, 연도별)을 규명함으로써 해양순환을 제어하는 주요 외부강제력 규명에 활용
- 전 지구 규모의 탄소순환관점에서 남극해 주변 해양순환의 역할을 평가하고, 이산화탄 소 해양저장을 위한 주요 후보지 및 적합지 제안
- 이산화탄소 해양저장 기술의 환경영향 예측 및 사후 모니터링 시스템 구축을 위한 해양물리 기초 자료 확보

제 2절 기대효과

- 장기 관측된 자료는 국제과학커뮤니티인 남극해양관측시스템(SOOS)에서 공적자산으로 활용하여, 대한민국의 남극해 관측분야 역량을 강화
- 남극해 이외의 국내 영해에서 기술 적용 가능성을 검토할 수 있는 파일럿 스터디 활용



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- SOOS는 남극과학위원회(SCAR)와 국제해양과학기구(SCOR)가 협조하여 남극해와 관련 된 해양관측을 확대, 조율, 향상시키기 위하여 국제적으로 발의된 기구
- SOOS는 남극해를 5개의 지역으로 구분하여 각 지역의 선도그룹 간 자료공유 및 공 동연구를 위한 통합관리 시스템 구축을 위해 노력함(그림 17)
- 우리나라의 경우, 극지연구소가 주축이 되어 서남극에 위치한 아문젠해역의 연구 선 도그룹으로 활발한 해양물리 관측을 진행하고 있음
- LTER 프로그램은 본 과제의 연구지역인 웨델해역의 선도그룹으로써 활발한 해양물 리 관측을 진행하고 있음
- 따라서 SOOS, LTER과의 장기계류 자료공유 및 공동연구를 통해 본 연구지역의 해양순환 메커니즘을 보다 명확히 규명할 수 있음

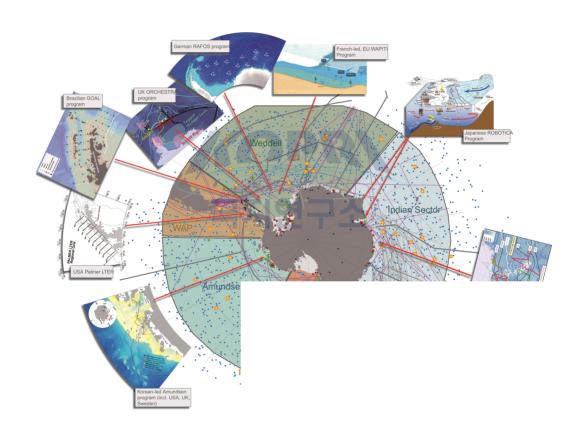


그림 17. 5개의 지역으로 구분된 남극해의 각 지역에서 진행 중인 연구 프로그램 및 참여국가 현황

제 7 장 참고문헌

- Azaneu, M., Kerr, R., Mata, M.M., 2014. Assessment of the representation of Antarctic Bottom Water properties in the ECCO2 reanalysis. Ocean Science 10, 923-946.
- Carter, L., McCave, I.N., Williams, M.J., 2008. Circulation and watermasses of the Southern Ocean: a review, In: Florindo, F., Siegert, M. (Eds.), Antarctic Climate Evolution, Developments in Earth & Environmental Sciences 8, Elsevier, Amsterdam, pp. 86-114.
- Dotto, T.S., Kerr, R., Mata, M.M., Garcia, C.A.E., 2016. Multidecadal freshening and lightening in the deep waters of the Bransfield Strait, Antarctica. Journal of Geophysical Research 121, doi:10.1002/2015JC 011228.
- Garabato, A.C.N., McDonagh, E.L., Stevens, D.P., Heywood, K.J., Sanders, R.J., 2002. On the export of Antarctic Bottom Water from the Weddell Sea. Deep-Sea Research II 49, 4715-4742.
- Gordon, A.L., Huber, B., McKee, D., Visbeck, M., 2010. A seasonal cycle in the export of bottom water from the Weddell Sea. Nature geoscience 3, 551-556.
- Gordon, A.L., Visbeck, M., Huber, B., 2001. Export of Weddell Sea deep and bottom water. Journal of Geophysical Research 106, 9005-9017.
- Hellmer, H.H., Huhn, O. Gomis, D., Timmermann, R., 2011. On the freshening of the northwestern Weddell Sea continental shelf. Ocean Science 7, 305-316.
- Hellmer, H.H., Kauker, F., Timmermann, R., Determann, J., Rae, J., 2012. Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. Nature 485, 225-228.
- Hoppema, M., de Baar, H.J.W., Bellerby, R.G.J., Fahrbach, E., Bakker, K., 2002. Annual export production in the interior Weddell Gyre estimated from a chemical mass balance of nutrients. Deep-Sea Research II 49, 1675-1689.
- Holemann, J.A., Kirillov, S., Kiagge, T., Novikhin, A., Kassens, H., Timokhov, L., 2011. Near-bottom water warming in the Laptev Sea in response to atmospheric and sea-ice conditions in 2007. Polar Research 30, doi:10.3402/polar.v30i0.6425.
- Jullionm, L., Garabato, A.C.N., Meredith, M.P., Hollandm P.R., Courtois, P., King, B.A., 2013. Decadal freshening of the Antarctic bottom water exported from the Weddell Sea. Journal of Climate 26, 8111–8125.
- Loeb, V., Hofmann, E.E., Klinck, J.M., Osmund, H.H., 2010. Hydrographic control of the marine ecosystem in the South Shetland-Elephant Island and Bransfield Strait region. Deep-Sea Research II 57, 519-542.
- Lumpkin, R., Speer, K., 2007. Global ocean meridional overturning. Journal of Physical

- Oceanography 37, 2550-2562.
- Marshall, J., Speer, K., 2012. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. Nature geoscience 5, 171–180.
- Martinson, D.G., McKee, D.C., 2012. Transport of warm Upper Circumpolar Deep Water onto the western Antarctic Peninsula continental shelf. Ocean Science 8, 433-442.
- Moffat, C., Owens, B., Beardsley, R.C., 2009. On the characteristics of Circumpolar Deep Water intrusions to the west Antarctic Peninsula Continental Shelf. Journal of Geophysical Research 114, doi:10.1029/2008JC004955.
- Oris, A.H., Whitworth, T., Nowlin Jr, W.D., 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. Deep-Sea Research I 42, 641-673.
- Paolo, F.S., Fricker, H.A., Padman, L., 2015. Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. Science 348, 327-331.
- Robertson, R., Visbeck, M., Gordon, A.L., Fahrbach, E., 2002. Long-term temperature trends in the deep waters of the Weddell Sea. Deep-Sea Research II 49, 4791-4806.
- Ryan, S., Schroder, M., Huhn, O., Timmermann, R., 2016. On the warm inflow at the eastern boundary of the Weddell Gyre. Deep-Sea Research I 107, 70-81.
- Schmidtko, S., Heywood, K.J., Thompson, A.F., Aoki, S., 2014. Multidecadal warming of Antarctic waters. Science 346, 1227–1231.
- Shadwick, E.H., Tilbrook, B., Cassar, N., Trull, T.W., Rintoul, S.R., 2015. Summertime physical and biological controls on O_2 and CO_2 in the Australian Sector of the Southern Ocean. Journal of Marine Systems 147, 21–28.
- Snow, K., Sloyan, B.M., Rintoul, S.R., Hogg, A.M.C., Downess, S.W., 2016. Controls on circulation, cross-shelf exchange and dense water formation in an Antarctic polynya. Geophysical Research Letters 43, 1–8.
- Thompson A.F., Heywood, K.J., 2009. Surface circulation at the tip of the Antarctic Peninsula from drifters. Journal of Physical Oceanography 39, 3–26.
- van Caspel, M., Schroder, M., Huhn, O., Hellmer, H.H., 2015. Precursors of Antarctic Bottom Water formed on the continental shelf off Larsen Ice Shelf. Deep-Sea Research I 190, 1-9.
- Zhang, X., Thompson, A.F., Flexas, M.M., Roquet, F., Bornemann, H., 2016. Circulation and meltwater distribution in the Bellingshausen Sea: From shelf break to coast. Geophysical Research Letters 43, 1–8.
- Zhou, M., Niiler, P.P., Zhu, Y., Dorland, R.D., 2006. The western boundary current in the Bransfield Strait, Antarctica. Deep Sea Research I 53,1244-1252.

- Zhou, M., Zhu, Y., Dorland, R.D., Measures, C.I., 2010. Dynamics of the current system in the southern Drake Passage. Deep-Sea Research I 157, 1039-1048.
- Zhou, M., Zhu, Y., Measures, C.I., Hatta, M., Charette, M.A., Gille, S.T., Freants, M., Jiang, M., Mitchell, B.G., 2013. Winter mesoscale circulation on the shelf slope region of the southern Drake Passage. Deep SeaResearch II 90, 4-14.



주 국지연구^일

- 1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보 고서 입니다.
- 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지 연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임 을 밝혀야 합니다.
- 3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대 외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.