

남극해 이산화탄소 해양 저장 기작

(부제: 남극해 탄소 저감 최적 기능 환경 특성 연구)

CCS (CO₂ Capture & Storage) mechanism
in the Antarctic ocean



2015. 03. 31

한국해양과학기술원

부설 극지연구소

보고서 초록

과제관리번호	PE14100	해당단계 연구기간	2014.01.01 - 2015.3.31	단계 구분	(총단계)
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	남극해 이산화탄소 저장 기작(부제: 남극해 탄소 저감 최적 기능 환경 특성 연구)			
연구책임자	윤호일	해당단계 참여연구원수	총 : 13 명 내부 : 6 명 외부 : 7 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 19,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 선임연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	150
<p>○국내 이산화탄소 해양 저장 기술에 대한 소개 및 이론적 배경</p> <p>○이산화탄소 해양저장기술 개발을 위한 남극심층수 순환 연구</p> <p>- 남극해 해양순환을 장기 모니터링함으로써 남극대륙 주변에서 표층-심층의 교환 메커니즘 규명</p> <p>- 해양-대기 상호작용에 의한 이산화탄소의 흡수원으로서 남극해의 기능 규명</p> <p>○남극해 식물플랑크톤의 탄소섭취율 평가</p> <p>- 남극해 식물플랑크톤의 탄소섭취율을 정량적으로 평가하고, 이들의 변동을 조절하는 요인을 이해함으로써, 대기 이산화탄소 흡수원으로서의 생물생산의 역할 규명</p> <p>○남극해 침강입자 특성을 통한 대기-해수 이산화탄소 이동 기작 이해</p> <p>- 인간활동에 의한 지구온난화와 관련된 대기중의 이산화탄소 농도 저감 방안으로 남극해 표층해수의 급격한 일차생산성과 관계된 생물 펌프의 이산화탄소 제거 기작을 규명</p> <p>○저층 유기물 분해 및 분해경로가 남극해 탄소저장 기능에 미치는 영향</p> <p>○남극해의 fossil-fuel CO₂ 흡수 능력</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	이산화탄소, 해양 저장, 대기-해양 이산화탄소 이동, 생물 펌프			
	영어	Carbon dioxide, Ocean storage, Atmosphere-ocean CO ₂ import/export, Biological pump			

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극해 이산화탄소 해양 저장 기작(부제: 남극해 탄소 저감 최적
기능 환경 특성 연구)”의 최종보고서로 제출합니다.



극지연구소 참여연구원:

유규철 이재일 김기태 이민경 문홍수

외부기관 참여연구원(자문위원):

부산대 김부근

부산대 이상현

서울대 이용일

인하대 하호경

포항공대 이기택

한양대 신경훈

한양대 현정호

(가나다순)

요 약 문

I. 제목: 남극해 이산화탄소 해양 저장 기작

부제: 남극해 탄소 저감 최적 기능 환경 특성 연구

II. 사업의 필요성

- 18세기 산업혁명 이후 화석연료의 사용으로 지구 대기 내에 급속도로 축적되고 있는 온실가스들 중 현재 지구온난화의 대표적인 것으로 이산화탄소를 들 수 있다. 현재와 가까운 미래에도 세계 에너지 부문 이산화탄소 배출량이 증가하고 있고 화석연료가 1차 에너지원으로 계속하여 우세한 역할을 하고 있어 지구적인 이산화탄소 배출은 심각한 수준에 이르고 있다. 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon dioxide Capture & Storage; CCS) 기술은 이를 해결하기 위한 정부간 또는 산업간 노력들 중 하나이다. 결국 국제 사회의 저탄소 녹색성장이란 미래 비전 아래 CCS 기술은 미래 환경을 위한 대표적인 기술 중에 하나이다.
- CCS 기술의 원리는 이산화탄소의 포집, 수송 및 저장 기술을 포함하는 복합적인 기술이다. 대량 산업 재료 제조 과정의 배출 공정에서 생성되는 이산화탄소는 포집 기술을 통해 다른 산업재로 재사용되거나 이산화탄소를 포집 현장에서 저장소로 안전하게 수송시키고 지질학적인 안정성이 인정된 저장소에 이산화탄소를 저장하는 기술을 포함한다.
- CCS 기술 중 이산화탄소의 해저 저장 방법은 세계적으로 가장 적용 가능성이 높은 기술로 알려져 있다. 포집된 이산화탄소가 해저 특정한 매질 속에 영구적으로 보관되어야 하는데, 염대수층, 폐쇄된 유정 및 가스 정, 석탄층이 유력한 저장 장소이다.

- 현재 이런 기술이 안정적인가에 대한 논의가 계속 진행 중이고, 경제적인 면에서 상당한 비용이 요구된다. 이런 문제의 대안으로 해양의 생태계를 이용한 지구공학적이고 친환경적인 방법이 대두되고 있다.
- 남극해는 지구에서 해양의 이산화탄소를 흡수하는 장소로 가장 잘 알려져 있으며, 남극해의 해양학적인 이산화탄소 저장 기작은 아직도 정확하게 밝혀지지 않고 있다.
- 남극해의 친환경적인 이산화탄소 저장 기작을 지구공학적으로 이해하고, 남극해 지구공학 CCS 기술을 찾기 위한 노력이 필요하다.

III. 사업의 목적과 내용

- 최종 목적: 대기 중 온실가스 흡수 지역인 남극해의 탄소 저감 능력의 잠재성 평가 및 저감 기능의 최적화 시기 및 적합한 장소 선정
- 사업 내용
 - 가) 남극해 이산화탄소 해양 포집 및 저장 기작 규명
 - 나) 남극해 이산화탄소 순환 모델링 개발
 - 다) 남극해 철 비옥화 실험에 따른 해양생태계 안정화 연구

IV. 사업의 기대성과

- 환경 친화적인 녹색 기술 개발
 - 가) 지구공학적으로 환경오염을 최소화할 수 있는 이산화탄소 해양 저장 기술 도모
 - 나) 남극해 CCS 적용 지역의 종합적인 관측 시스템과 구체적이고 정량적인 포집 및 저장 결과 도출
- 국제 사회에서 우리나라가 의무적인 온실 가스 감축국으로 편입될 경우

감축 목표 초과한 탄소배출에 대한 탄소배출권 구입 비용 감소

- 남극해 CCS 사업의 상업화 및 탄소상쇄사업 등으로 100조 규모의 경제적 효과와 10만개 이상의 일자리 창출

V. 사업의 활용 방안

- 친환경적 이산화탄소 해양저장기술 개발에 최적 시기 및 적합한 지역을 선정하는데 핵심 DB 구축 및 자료 제공
- 남극해 이외의 자국의 영해상에 기술적용 가능성을 검토할 수 있는 파일럿 스터디 활용 가능
- 기후 변화 대응 노력으로 글로벌 환경 리더로서의 국가 이미지 제고
- 기후 변화 대응 분야 국제 협력으로 우리나라의 국제적 그린 리더십 제고



목 차

제 1 장 서론

1. 사업의 목적
2. 사업의 목표
3. 사업의 필요성
4. 사업의 연구 내용

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국내 연구현황
2. 국외 연구현황

제 3 장 사업 내용

1. 남극해 탄소 저감 기작 관측 및 측정을 위한 인프라 구축
2. 남극해 이산화탄소 포집 및 저장 기작 규명
3. 남극해 이산화탄소 순환 모델링 확립
4. 남극해 통합 탄소 리스크 관리

제 4 장 사업 추진체계 및 전략

1. 사업운영 기본방향
2. 사업추진 체계 및 전략

제 5 장 기대 성과 및 활용 방안

부록

1. 대한민국 확보지역(남극 브랜스필드 해협) 탄소 매장량 및 경제적 가치 추정
2. 국내 이산화탄소 해양 저장기술
3. 이산화탄소 해양 저장기술 개발을 위한 남극심층수 순환 연구
4. 남극해의 이산화탄소 대기/해양 순환
5. 남극해 식물플랑크톤의 탄소섭취율 평가
6. 남극해 침강입자 특성을 통한 대기-해수 이산화탄소 이동 기작 이해
7. 저층 유기물 분해 및 분해경로가 남극해 탄소저장 기능에 미치는 영향
8. 남극 고생산력 복원 및 고수온 복원
9. 남극해 탄소 리스크 관리



제 1 장 서론

1. 사업의 목적

- 대기 중에 방출되는 이산화탄소의 절반은 이산화탄소 흡수지인 해양과 대륙 생물권으로 크게 나누어 볼 수 있으며, 각각 동일한 양의 이산화탄소를 흡수한다. 이 중 남극해는 전체 이산화탄소 흡수지가 흡수하는 양의 약 15%이다. 이는 산업적인 CCS 공학기술이 전체 이산화탄소의 약 17%를 흡수할 수 있는 것과 비교할 만한 수준이다.
- 대기 중 온실가스 흡수 지역인 남극해의 탄소 저감 능력의 잠재성을 평가하고 저감 기능의 최적 시기 및 적합한 장소를 선정하는 것이 최종 목적이다.

2. 사업의 목표

- 남극해 지구공학 CCS 기술의 정의 확립
- 남극해 지구공학 CCS 기술로 기존에 제기된 문제점 극복
- 남극해 지구공학 CCS 기술로 기존의 산업적인 CCS 기술에 대응할 수 있는 실질적인 이산화탄소 제거의 실용화 연구

3. 사업의 필요성

지구온난화에 대한 화두는 과학계만의 문제가 아닌 세계적인 문제로 이미 알려져 있어 굳이 서론에 내용을 구구절절 담지 않아도 될 듯 쉽다. 물론 과학적으로 지구온난화를 바라보는 시각은 차이가 있을 수 있지만, 최근 지구과학계에서 뜨거운 논란의 중심에 서있는 것은 확실하다. 지구의 온도를 좌우하는 중요한 요인들에서 일차적으로 온실가스가 차지하는 비중은 너무나도 크다. 온실가스들 중에 당연히 이산화탄소는 가장 앞자리를 차지하며, 또한 역학적으로 가장 활발하게 연구된 요인이다. 과거 빙하 기록에서 이산화탄소의 대기 농도는 수만년 동안 280 ppm 안팎의 균형을 유지한 것으로 알려져 있다. 최근에도 이산화탄소 대기 농도는 1800년 280 ppm에서 현재

380 ppm으로 상승했는데, 실로 인류 역사에서 산업화가 가장 빠르게 진행된 시기와 너무나도 잘 일치한다. 세계 에너지 부문 이산화탄소 배출량이 증가하고 화석연소가 1차 에너지원으로 우세한 역할을 계속하여 담당하고 있다는 점에서 이러한 설명은 매우 타당하게 보인다. 물론, 지구의 기온 상승이 인위적인 산업화의 결과이며, 온실가스 배출이 지구의 기온을 지속적으로 상승시킬 것이라는 과학적 근거에 대해 반론도 있는 것은 사실이다. 가장 사실적인 사건은 근래 십년 동안을 보더라도 세계적인 기상 및 해양 재난들이 빈번하고 그 피해도 만만치 않다는 것이다. 모두 설왕설래 시간을 두고 어떤 것이 맞냐 안맞냐를 지켜보는 것은 자칫 돌이킬 수 없는 결과를 가져올 수 있다. 산업적인 친환경 정책과 더불어 온실가스 사용 자제, 이산화탄소 저감 방안이 정부간 논의되고 이에 대한 국제적인 노력이 동반되는 것은 어찌보면 당연하다.

이산화탄소 포집 및 저장 기술(CO₂ Capture & Storage; CCS)은 극히 산업적인 기술로 많이 일컬어진다. CCS 기술은 위에 설명한 것처럼 화석연료 사용하는 발전소, 철강, 시멘트 공장 등 대단위 산업 시설에서 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 공학적으로 격리시키는 기술이다. 포집된 이산화탄소의 운명이 결정되는 것은 격리되는 장소가 어디인가에 따라 달라진다. 그것은 지표, 지중, 그리고 해양이다. 이들 중 이산화탄소 지중 저장 기술은 1996년부터 미국과 캐나다, 유럽 연합을 비롯해 선진국에서 석유 및 천연가스 개발 사업과 연계하여 활발히 개발, 적용되고 있다. 이는 석유 및 천연가스, 석탄층, 메탄가스 회수를 증진시키는 부가가치 효과 때문에, 사실상 국제 공동 프로젝트를 통해 사업이 진행되고 있다. 지표 저장법은 과도한 화학적 공정 처리 및 낮은 저장 용량으로 대부분 연구가 미비한 것으로 알려져 있다. 또한, 이산화탄소 해양 저장 기술은 해저 3,000 m 아래에 이산화탄소, 하이드레이트 형태로 분사하여 저장시키는 방법인데, 생태계 파괴와 해양의 산성화 같은 안정성 문제가 대두되고 있다.

지금까지 위 내용에서 밝힌 CCS 기술의 논제는 산업적인 이익을 추구하기 위한 기술보다는 지구적인 기후변화 문제를 해결하는 하나의 방안에서 출발한다는 사실이다. 우리나라도 기후변화대응 R & D 중장기 마스터플랜, 녹색 기술 연구 개발 종합 대책, 기후변화 대응 종합 기본 계획 등을

통해 CCS 기술을 국가 중점 기술로 선정하고 있다. 과학기술 주도 행정 부서에서 이러한 기술에 투자를 확대하고 있는 실정이다. 문제는 산업적 기반에 중점을 둔 CCS 기술에 너무나도 편중되어 있다는 사실이다. 현재의 화석연료의 안정적 사용을 위한 CCS 기술은 궁극적 기후변화 대응 기술인 신재생 에너지 기술의 상용화 전까지 현실적인 정책 대안임을 부인할 수는 없다. 하지만 실질적인 기후변화 대응을 위한 CCS 기술은 산업적인 개발 이외에도 다른 방법들이 존재한다. 그것은 바로 산업적인 CCS 기술의 목적을 지구공학적인 CCS 원리를 적용하여 해결해 보자는 것이다.

지구는 이미 그 자체로 자체 기후 조절 능력을 지니고 있다. 특히 이 기획 보고서는 해양의 지구적인 조절 작용에 의미를 두고 있다. 즉 해양은 이산화탄소의 제거, 고정의 잠재적인 능력자이다. 대기 중에 탄소 환산으로 약 7,000 억톤의 이산화탄소가 존재하는데, 해양은 이보다 약 50 배 되는 이산화탄소가 화학적으로 용해되어 있다. 특히, 식물 플랑크톤에 의해 고정된 이산화탄소는 해양 깊이 운반되어 평균 수심 3,800 m의 해양으로 막대한 양이 흡수, 고정된다. 실제로 18세기 산업혁명 이후 대기로 배출된 이산화탄소의 상당한 양이 해양의 흡수되었다는 사실이 최근 저명 과학저널 사이언스에 발표된 적이 있다. 저자들은 18세기 산업혁명 이후 이산화탄소 발생량이 현재 대기 중에 남아있는 양(약 43%)과 차이가 있음에 주목하였다. 결국 나머지는 식물이나 해양으로 흡수되었을 것이다. 현재 산림이 흡수한 이산화탄소는 산림 파괴로 생긴 이산화탄소 양과 거의 같아서 산림이 이산화탄소 초과 발생량을 제거하는데 미미한 것으로 나타났다. 실질적으로 해양이 이산화탄소 초과 발생량의 거대한 처분장이 되었고 약 48%에 이른다는 수치를 제시하였다. 결국 해양은 막대한 육상의 이산화탄소를 처리할 수 있는 능력을 보여준다. 이러한 자연적인 해양의 이산화탄소 제거 능력이 지금까지 인위적인 이산화탄소 발생을 해결해 줄 수 있다는 것은 아니다. 지난 200년 동안 흡수한 이산화탄소는 해양이 흡수할 수 있는 최대량의 15%에 불과해 시간이 흐르면 기존의 이산화탄소 90%가 해양에 의해 제거될 수도 있지만, 현재 이산화탄소의 방출 속도가 제거 속도보다 훨씬 빠르다고 보고하고 있다. 이는 기후변화에 대응하기 위해 현재 산업적으로 발생하는 이산화탄소 제거 노력이 필요하다는 것을 말해준다.

이 보고서에서 소개하는 대안은 해양의 생태계를 이용한 지구공학적인 방법이다. 굳이 산업적인 CCS 기술을 접어두고 대안을 찾는 이유는 분명히 존재한다. 산업적인 CCS 기술은 대개 고농도의 이산화탄소를 분리할 수 있는 화석연료를 이용하는 발전소나 공장에 유용하다. 하지만, 이러한 기술이 대기 중에 흩어져 있는 저농도의 이산화탄소를 포집하기 어렵고 무엇보다도 효율대비 고비용이 든다는 것이 문제점이다. 또한 현재 이산화탄소 저장의 가장 실현적인 방법으로 지중이나 오래된 유정에 이산화탄소를 가두는 것인데, 이도 유출 문제를 해결하는 것도 과제가 되고 있다. 지구표면적의 70% 이상인 해양에는 해양 생태계 먹이 사슬의 기본인 식물 플랑크톤이 존재한다. 이 작은 플랑크톤들은 다른 동물 플랑크톤이나 여러 해양 생명체의 먹이가 되기도 하지만, 죽은 플랑크톤들은 바다 밑으로 가라앉아 퇴적된다. 이들이 이산화탄소 순환의 중요한 역할을 하는 것은 이들이 죽기 전 광합성 과정을 통해 이산화탄소에서 탄소를 추출하여 신체 일부분을 만들어낸다. 주로 칼슘 카보네이트와 실리카 카보네이트 형태로 몸의 골격이 구성되는데, 이들이 사체로 죽어 퇴적될 때 탄소도 바다 밑으로 가라앉는 것이다. 한 마디로 대기 중의 이산화탄소가 해양에 용존되고 식물 플랑크톤의 이용과 더불어 죽어 퇴적되면서 자연스럽게 이산화탄소가 흡수되어 저장되는 것이다. 지구공학적인 CCS 기술에서 이산화탄소 포집의 핵심은 이러한 식물 플랑크톤을 대량으로 증식시키는 과정을 가속화시켜 이산화탄소를 흡수하는 것이다.

이 포집 연구의 핵심은 식물 플랑크톤들이 대번식하는데 중요한 미량 원소 중 하나인 철분을 이용하는 것이다. 남극해를 비롯한 특정해양에는 이 미량 원소가 다소 부족하기 때문에 이 철분을 해양에 뿌려 식물 플랑크톤의 광합성을 촉진시켜 대번식을 일으키는 아주 간단하고 쉬운 방법이다. 대개 황산철(iron sulfate) 등의 미세한 입자가 이용되는 것으로 알려져 있으며, 철분 1 kg (0.5~1.0 마이크로미터 정도의 작은 입자 형태)이면 식물 플랑크톤 10만 kg을 증식시킬 수 있다고 보고하였다. 실제로 2009년에 LOHAFEX 프로젝트를 통해 남부 대서양에서 약 20톤의 황화철을 뿌려 거대한 플랑크톤 증식을 이끌어내었다. 지구공학적인 CCS 기술의 정점은 바로 저장이다. 심해로 침전되는 유용한 식물 플랑크톤은 규조류(Diatom), 인편모조류

(Coccolithophorids), 유공충(Foraminifera)이다. 사실상 이 프로젝트의 적용 장소는 규조류가 많은 해양이다. 불행히도 규조류 성장에 중요한 다른 영양소인 Silicic acid가 부족한 영역에서 시행되어 규조류의 성장은 미미했고, 결과적으로 해저 밑에 퇴적시키는 저장 효과는 미미했다.

이 지구공학적인 CCS 기술에 대한 생태계 교란 및 안정성 논란은 분명히 존재하며, 이 기획 보고서는 기존 이 기술의 논란을 해결하기 위한 연구의 첫걸음이다. 우선 철분을 뿌리는 행위 자체는 독소 성분을 지닌 플랑크톤의 이상 증식을 초래하여 해양 생태계에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다는 것이다. 이러한 영향은 대부분 연안에서 일어나기 때문에 기술 적용 범위를 외양으로 한정하면 해결되는 문제이다. 다음으로 증식된 해설의 형태로 심해로 내려가는 침전물이 많아질 때 이를 분해하는 박테리아에 의해 분해될 때 산소를 소모하기 때문에 심해 산소 부족으로 심해 생태계에 미칠 악영향도 존재할 수 있다. 과연 이렇게 침전되는 이산화탄소가 얼마나 안정적으로 심해에 존재할 지도 논란거리이다. 심해의 냉수는 이러한 침전물을 어느 정도 녹이기 때문에 일부 또는 다수가 다시 해양 내로 용존된다.

이 보고서는 남극해 지구공학 CCS 기술을 위한 연구 진행을 위해 기획되었고 산업적인 CCS 기술과 동등한 위치에서 바라볼 수 있다. 남극해는 거의 대부분 규조류가 우점하는 해양이다. 즉, 남극해는 이산화탄소 포집에 매우 유리한 위치를 점하고 있다. 해양 생태계의 안정성을 고려하여 철분 이외의 다양한 영양분 공급이 식물 플랑크톤의 대번식과 이상 번식에 미치는 연구도 동반된다. 사실상 산업적인 CCS 기술의 핵심은 이산화탄소 저장 기술이기 때문에 일반적인 지구공학적인 저장 기작이 일반 해역에 적용된다면 남극해 지구공학 CCS 기술은 특별한 가치를 갖지 못할 것이다. 이 보고서는 산업적인 CCS 기술에서 이산화탄소를 저장하기 위한 적합한 저장소를 찾는 것처럼 모든 남극해가 아닌 특정 해역의 저장소를 이용하는 것이다. 기본적으로 남극해 CCS 기술의 이산화탄소 저장 장소는 심해 생태계 악영향이 최소화되고, 침전물이 안정적으로 저장되어 산업적인 CCS 기술이 요구하는 것처럼 해양으로 다시 유출되지 않아야 되고, 실제로 상당량의 이산화탄소 제거를 보여주어야 한다.

4. 사업의 연구 내용

남극해 지구공학 CCS 기술은 특정 남극해에서 해양 생태계의 안정성을 고려한 영양 공급원을 통해 식물 플랑크톤의 대번식을 유도하는 이산화탄소 포집 기술과 이러한 식물 플랑크톤들의 해저 밑으로 가라앉아 안정적으로 해저에 저장되어 이산화탄소가 제거되는 이산화탄소 저장 기술을 말한다. 사실상 이 보고서는 산업적인 CCS 기술과 지구공학적인 CCS 기술의 차이점을 아는 것부터 출발한다. 기후변화에 대응하기 위한 산업적인 이산화탄소 포집 기술은 화학공학적이고 기계적이며 기반 시설이 포함되어 있는 반면에, 지구공학적인 이산화탄소 포집 기술은 지구 자체의 자연적인 이산화탄소 조절 기능을 이해하여 해양 생태계의 교란없이 식물 플랑크톤의 대번식을 가속화시키는 것이다. 산업적인 이산화탄소 저장 기술은 적합한 저장소를 찾아 포집된 이산화탄소를 유출되지 않도록 안정적으로 저장하는 기술을 말하며, 지구공학적인 이산화탄소 저장 기술 또한 자연적으로 식물 플랑크톤들(대부분 규조류)에 포집된 이산화탄소가 시공간적으로 해저에 침전되어 안정적으로 저장되도록 하는 기술이다.

이를 실현시키기 위한 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 인위적으로 다양하게 만들어진 영양 공급원과 규조류의 번식 과정을 이해하기 위한 생물학적 실험실 연구
- 영양 공급원에 따른 규조류 대번식의 정도, 양적 산출을 위한 남극해 현장 실험 및 표층/심해 해양 생태학적인 안정성 연구
- 남극해 이산화탄소 침전에 적합한 해저 저장 장소를 찾기 위한 지구물리 및 지질학적 연구
- 남극해 이산화탄소 저장소에서 일어나는 기상/해양물리 모니터링
- 남극해 이산화탄소 저장소에서 대기 및 해양 사이에서 발생하는 이산화탄소 플럭스 연구
- 남극해 이산화탄소 저장소 해저의 생지화적인 변화 연구
- 남극해 이산화탄소 저장소의 과거 이산화탄소 저장 규모를 이해하기 위한 해양지질학적 시추 연구

인류의 산업화로 야기되는 이산화탄소의 발생은 산업적으로 모든 것

을 해결하기가 힘들다. 기본적으로 이산화탄소의 기체 분자는 농도가 높은 대기에서 농도가 낮은 바다로 자연스럽게 스며든다. 이러한 원칙은 바다의 수온에 따라 달라진다. 생태계를 이용한 지구공학적인 CCS 기술은 적도보다는 극지가 훨씬 유리하며 효율적인 것은 분명하다. 우선 남극해에서 지구공학적인 CCS 접근은 지구의 기후변화 대응을 보다 섬세하게 이해하고 지구 온난화 문제의 원인을 찾기 위해 절대적으로 필요하다. 이와 더불어 인위적으로 이산화탄소를 조절할 수 있는 대안은 텅일 것이다.



제 2 장 국내외 연구개발 현황

1. 국내 연구 현황

가. 정부 정책

- 정부는 부처 합동 『국가 CCS 종합추진계획』 (제8차 녹색성장위원회, '10.7.13)을 수립하여 우리나라 중장기 CCS 기술개발 비전과 목표, 그리고 부처간 역할 분담 등 범부처 CCS 기술개발 전략을 제시
- 국가 온실가스감축목표가 2020년 30% 감축에서 포스트 2020으로 더욱 강화될 전망

나. 연구 사업

- 2000년
 - 연구사업: 북극환경 특성 및 자원 확보 방안 연
 - 연구기간: 2000년1월1일-12월31일
 - 연구책임자: 정경호, 강성호
 - 연구목표: 북극권 환경 변화 감시 시스템 구축 및 예측 기술 개발
 - 본 과제와 관련된 연구내용: 북극해 미세조류가 전 지구 이산화탄소 순환에 미치는 영향
- 2005년: 본격적인 이산화탄소 해양지중저장 기술 개발 시작
- 2011년
 - 연구사업: CCS 연구개발 사업
 - 연구기관: 한국해양과학기술원, 한국석유공사
 - 본 과제와 관련된 연구내용: 이산화탄소 50억톤 정도를 영구적으로 격리 저장할 수 있는 해저 지중 저장소 국내 최초 확인

다. 국내 지구공학적인 CCS 기술 연구의 한계

- 현재 지구공학적인 이산화탄소 해양 저장 기술은 대부분 철 비옥화 (iron fertilization) 연구에 집중되어 있음.

- 대기 중 먼지 입자에 포함된 철 입자가 식물플랑크톤의 번성을 일으킬 수 있으며, 이 식물플랑크톤이 이산화탄소를 흡수하여 성장하는 생물학적 촉진 기작이 기후 변화를 일으킬 수 있다는 연구 결과가 입증됨.
- 인위적으로 해양에 철 성분을 투여하는 실험이 이산화탄소 흡수원으로서 가치가 있는지에 대한 연구가 진행 중임.
- 하지만, 대부분의 자국 내 연안에서 지구공학적인 철 비옥화 연구는 연안 적조로 인한 피해 때문에 실험 단계를 진행할 수 없음.
- 이산화탄소 저장 장소는 차가운 표층수가 침강하는 해역이 적합하는데, 우리나라 어떤 해역도 이러한 해양학적 조건이 맞지 않음.

라. 국내 연구의 시급성

- 현재 산업적인 CCS 관련 기술들은 국가 온실가스 감축 목표치에 역부족(23%)이므로 대체 방안 수립이 시급(바다숲, 조림, 바이오숯, OIF).
- 국내 CCS 기술이 해중지중 저장 장소의 제약으로 인하여 기술 개발의 한계에 봉착하면서, 지구공학적인 CCS 기술을 검증하기에 적합한 남극해에 관심을 갖는 것이 절대적으로 필요함.
- 극지연구소 남극 연구 프로그램을 통해 2002년 남극해 탐사에서 서남극 웨델해 북서부의 브랜스필드 해협 수심 2,300 미터 해저에서 이산화탄소 덩어리 발견하였으며, 어떤 나라도 갖지 못한 남극해 탄소저장에 대한 지질학적 핵심 자료를 보유하며 선도적인 남극해 CCS 연구 가능

2. 국외 연구 현황

IPCC 제5차 보고서(2013)에 의하면, 온실가스 저감 차원의 지구공학 기술 개발이 시급하며, 그 중 하나로 Ocean Iron Fertilization(OIF)를 제시하고, 이를 위한 글로벌 협업이 요구된다.

가. CCS 기술

- 노르웨이
 - 슬레이프너 이산화탄소 주입: 세계 CCS 설비의 시초 중 하나는 노르

웨이 슬레이프터의 포집 및 저장 관련 가스 공정 설비임. 해양 지중 약 1,000 m 깊이의 지질층에 이산화탄소를 저장하는 최초의 프로젝트로 유명함.

- 스노허빗 이산화탄소 주입: 육상 LNG 플랜트의 배출 가스에서 분리된 이산화탄소를 해양 가스전 해저 염대수층에 주입

- 독일

- 북해 폐유정, 가스정, 염대수층이 존재하며 이를 이산화탄소 저장소로 이용

나. Iron Fertilization 실험을 통한 CCS : 이산화탄소 50톤/철500g 감소

- 캐나다

- 2008년 미국 보스턴에서 개최된 AAAS (Annual Conference of the America Association for the Advancement of the Science)에서 캐나다 David Keith 박사가 해양 철 투기와 탄소 격리: 해양이 지구를 구할 수 있는가?란 주제로 관련 기술 발표

- 유럽(독일, 프랑스, 이태리, 인도, 칠레)

- 2009년 남극해에 황산제일철 5톤을 뿌린 EIFEX (European Iron Fertilization Experiment) 프로젝트 실시
- 2004년 남빙양의 소용돌이성 해류 중심부에서 167 km²이 넘는 면적에 황산철을 뿌려 37일간 해양 생태계 관측하여 철분을 뿌려 생긴 식물플랑크톤의 생물량의 절반 이상이 해저 1,000 m에 가라앉는다고 발표(Smetacek et al., 2012, Nature). 그러나 탄소의 해중 저장에 대한 지질학적 증거 불투명

- 독일, 프랑스, 이태리, 인도, 칠레

- 2009년 남극해 철분 투여 실험인 로하팩스 프로젝트 수행
- 300 km² 바다에 6톤의 철분 투여. 식물플랑크톤 폭발적 성장 확인

- 미국

- 1993년/1995년 두 차례 남아메리카 갈라파고스 군도에서 황산철 투여. 일주일 만에 식물플랑크톤 3배 번성. 이산화탄소 농도 감소 확인

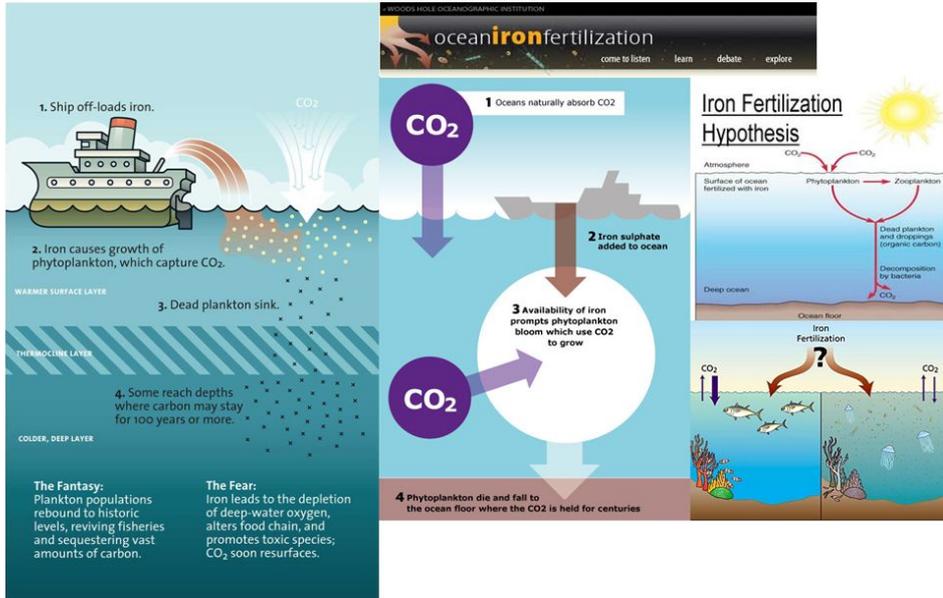
제 3 장 사업 내용

여러 선진국들을 포함해 잘 발달된 산업 구조를 이끈 대부분의 나라들은 현재의 지구온난화를 방지하기 위해서 수십 년 이래로 산업화로 인해 발생하는 이산화탄소 감축안을 내놓고 있다. 탄소 배출에 대한 감축 규제안으로 인해 파생되는 경제적인 손실이 상당할 것으로 알려져 이산화탄소 저감을 위해 산업적인 기술 이외에 다양한 시도를 통해 이산화탄소 저감을 통한 지구온난화가 해결되도록 노력하고 있다. 전체적인 사업 내용은 남극해 지구공학적인 CCS 기작을 규명하여 산업적인 CCS 기술과 동등한 잠재력을 가질 수 있도록 구성되어있다.

이 사업의 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 인위적으로 다양하게 만들어진 영양 공급원과 규조류의 번식 과정을 이해하기 위한 생물학적 실험실 연구
- 영양 공급원에 따른 규조류 대번식의 정도, 양적 산출을 위한 남극해 현장 실험 및 표층/심해 해양 생태학적인 안정성 연구
- 남극해 이산화탄소 침전에 적합한 해저 저장 장소를 찾기 위한 지구물리 및 지질학적 연구
- 남극해 이산화탄소 저장소에서 일어나는 기상/해양물리 모니터링
- 남극해 이산화탄소 저장소에서 대기 및 해양 사이에서 발생하는 이산화탄소 플럭스 연구
- 남극해 이산화탄소 저장소 해저의 생지화적인 변화 연구
- 남극해 이산화탄소 저장소의 과거 이산화탄소 저장 규모를 이해하기 위한 해양지질학적 시추 연구

남극해에서 지구공학적인 방법으로 이산화탄소 문제를 해결하기 위한 CCS 접근은 지구의 기후변화 대응을 보다 섬세하게 이해하고 지구온난화 문제의 원인을 찾기 위해 절대적으로 필요하다. 이와 더불어 인위적으로 이산화탄소를 조절할 수 있는 대안은 덩실 것이다.



< 지구공학적인 CCS 접근의 일반적인 모식도 >

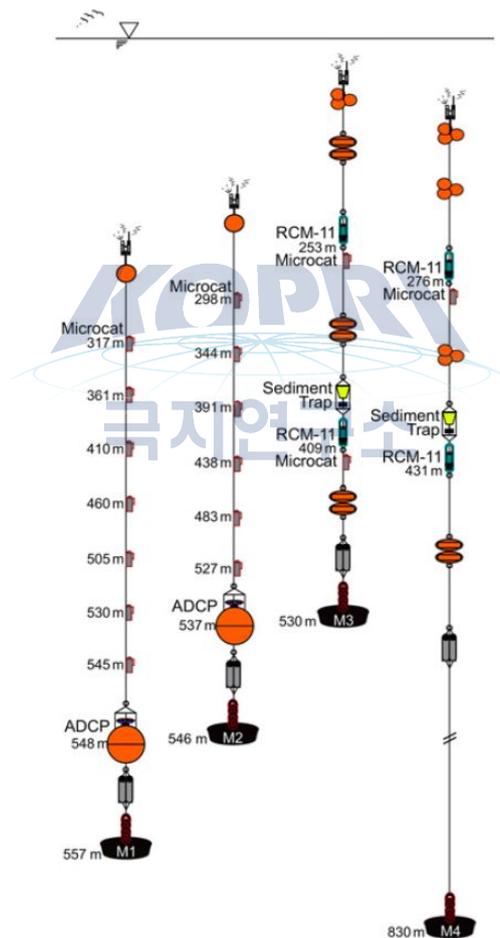


1. 남극해 탄소 저감 기작 관측 및 측정을 위한 인프라 구축

1-1. 남극해 수층 해양 특성 및 플럭스 관측 인프라

가. 해양 수층의 유속 구조 및 하강속도를 추정하기 위한 유속계 및 수온/염분 측정 기기 계류

나. 입자성 부유입자의 침강속도 및 플럭스 계산하기 위한 퇴적물 트랩 수중 설치



< 퇴적물 트랩 및 유속계, 수온/염분 측정 시스템 >

1-2. 남극해 고생산력 및 고수온 복원 인프라

가. 남극해 이산화탄소 저감 적정 장소에 쌓인 고생산력 및 고수온을 측

정하기 위해 퇴적물의 기본적인 물리 특성을 파악할 수 있는 다중 코어 검층기 구축. 해양 시추 퇴적물의 지질공학적 특성인 P와 속도, 감마선 감쇄 밀도, 전기비저항, 대자율, 고해상도 이미지를 촬영함.



< 다중 코어 검층기 >

나. 퇴적물 내 고생산력 측정과 밀접한 총무기탄소함량을 측정하는 분석 장비 구축. 이 장비를 통해 퇴적물 및 해수 중의 무기탄소함량이 측정되며, 이는 해양의 표층 생산성, 기후 및 해류 특성을 지시하는데 이용될 수 있음.



< 총무기탄소량 측정기 >

다. 퇴적물 특성 분석 장비 구축. 퇴적물의 입도 분석으로 표층 침강입자의 퇴적 환경 해석 가능.

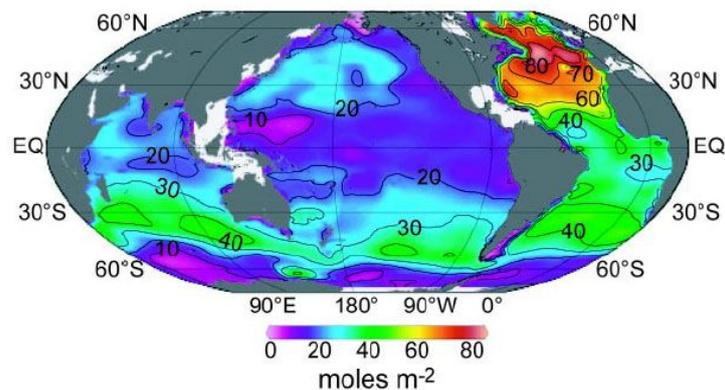


< 이산화탄소 분석기 >

2. 남극해 이산화탄소 포집 및 저장 기작 규명

2-1. 남극해의 fossil-fuel CO₂ 흡수 능력

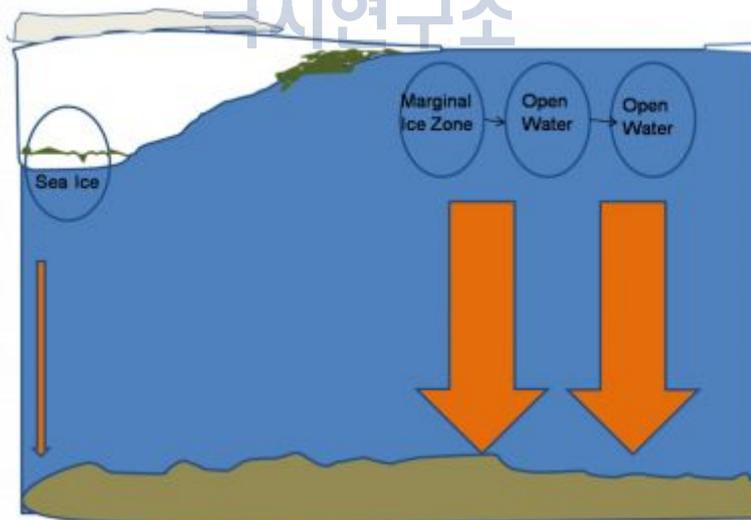
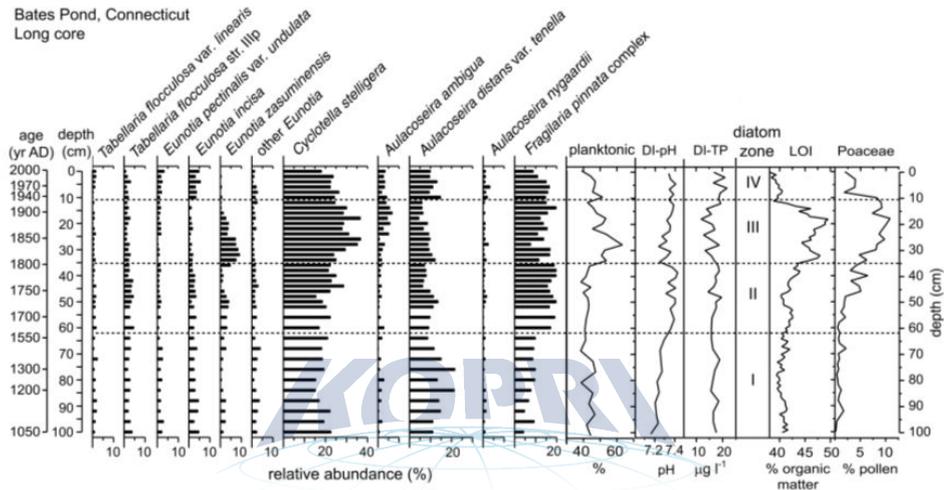
- 남극해는 심층수의 형성이 일어나는 대표적인 지역으로서 대기로부터 방출된 이산화탄소의 40% 이상을 흡수함.
- 남극해의 이산화탄소 흡수능력이 감소하고 있어 기후변화에 따른 이산화탄소 흡수능력 변동에 대한 관심이 증가.
- 이산화탄소의 물리적인 메커니즘에 의한 이동과 기후변화에 따라 기인하는 이산화탄소 흡수의 정량적인 변화에 대한 연구



< 대기 중으로 방출된 이산화탄소 중 해양으로 녹아 들어간 양 >

2-2. 남극해 식물플랑크톤 군집 분석 연구

- 남극해 표층 해수의 식물플랑크톤 군집 분석으로 종조성 파악: 미국 Colgate University (Prof. Amy Leventer)와 국제 공동 연구 수행
- 남극해 퇴적물의 규조류 군집 분석으로 환경지시종의 수직분포 변화와 퇴적학적, 지화학적 자료의 비교를 통한 환경 변화 추적



< 규조류 군집 분석 결과를 보여주는 도표 >

2-3. Ocean fertilization 실험 연구

- 실험실 내 규조류 배양과 다양한 비옥화 실험을 통한 변화 양상 파악

- 남극해 표층 해수 내 철 비옥화 현장 실험 연구
- 미국 SCRIPPS, University of South Florida의 전문가와 국제 공동 연구 수행 및 인프라 이용



< EIFEX (European Iron Fertilization Experiment) 모식도 >

2-4. 해저 유기물 분해 및 분해 경로에 따른 남극해 탄소 저장 기능 규명

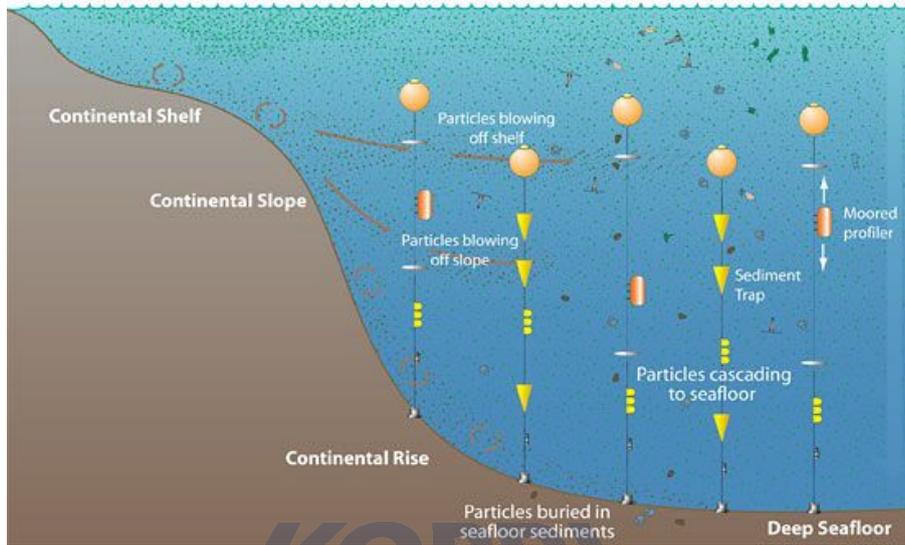
- 심층수 형성에 따른 유기물 공급이 많은 남극 웨델해 부근 대륙주변부 퇴적물을 대상으로 (1)유기물 분해에 따른 무기탄소 재순환 정도와 (2) 주요 유기물 분해경로(황산염 환원 및 금속환원 등)를 파악하여, 탄소의 생성과 제거와 관련한 생지화학적 순환 이해
- 해저 미생물의 생지화학적 기능 연구를 통해 퇴적물 내 유기물 분해율 정량 분석 및 주요 유기물 분해 경로의 상대적 중요성 규명(호기성 분해, 금속 환원, 황산염 환원)

2-5. 남극해 침강입자 특성을 통한 대기-해수 이산화탄소 이동 기작 연구

- 표층 해수의 일차생산성에 의한 입자성 유기탄소 형성 특성 규명 연구: 표층 해수의 특성을 측정하고 중층에 설치된 퇴적물 포집장치의 연구 결과와 비교하여 표층 해수의 export production의 특징을 연구
- 침강입자와 입자성 유기탄소의 관계 규명 연구: 저층에 설치된 퇴적물 포집장치의 연구결과와 입자성 유기탄소의 함량을 비교하여 표층 해수에서 이동

되는 총탄소량을 예측하는 연구

- 대기-해양 이산화탄소 이동의 정량적 접근: 표층해수에서 발생한 일차생산력에 의한 생물펌프 효과로 남극해 심해로 이동될 수 있는 대기중의 이산화탄소 제거량을 정량적으로 예측하는 연구



< 해저 Sediment Trap 디자인 >

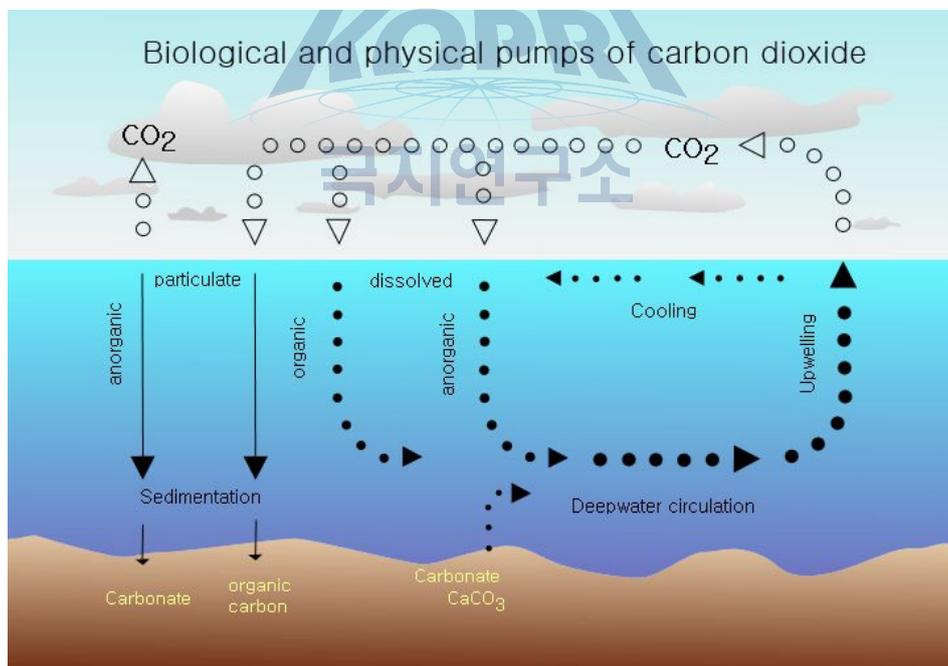
2-6. 남극해 고생산력 및 고수온 복원

- 남극해 이산화탄소 거동 모니터링에 적합한 해역을 선정하고 정기적 관측 시스템 구축
 - (1) 수층 내 지질생체지표의 거동 확인을 통한 남극해 탄소순환 기작 규명
 - (2) 침강입자와 표층 퇴적물 내의 생체지표를 이용한 퇴적 기작 이해
- 남극 해역 퇴적물의 연대 결정
 - (1) 퇴적물에서 추출된 생체지표의 분자별 포집기술 개발
 - (2) 결정된 연대와 지질학적 연대 분석 기법과의 비교 해석
- 남극해 퇴적물 내의 지질생체지표를 이용한 고기후 기록 복원
 - (1) 고생산성 지표 분석 및 연대에 따른 이산화탄소 흡수 능력 평가
 - (2) 퇴적물에서 아미노산의 질소 안정동위원소 변동과 고생산성 변동과의 상호관계 이해
 - (3) 고수온 복원 결과와 생산성 복원 결과를 이용한 고환경 복원
- 국제 협력 파트너

- (1) Dr. Xavier Crosta & Dr. Jérôme Bonnin (EPOC, France): 미고생물학적 연구와 남극해에서 홀로세 고수온 기록들의 편집
- (2) 뉴질랜드 NIWA: 남극해 해저퇴적물의 연대 측정
- (2) 미국 USF: 남극해 고환경 해석

3. 남극해 이산화탄소 순환 모델링 확립

- 남극해 해양순환을 장기 모니터링함으로써 남극대륙 주변에서 표층-심층의 교환 메커니즘을 규명
- 해양-대기 상호작용에 의한 이산화탄소의 흡수원으로서 남극해의 기능 규명
- 남극해 이산화탄소 해양저장 후보지로서 가치평가



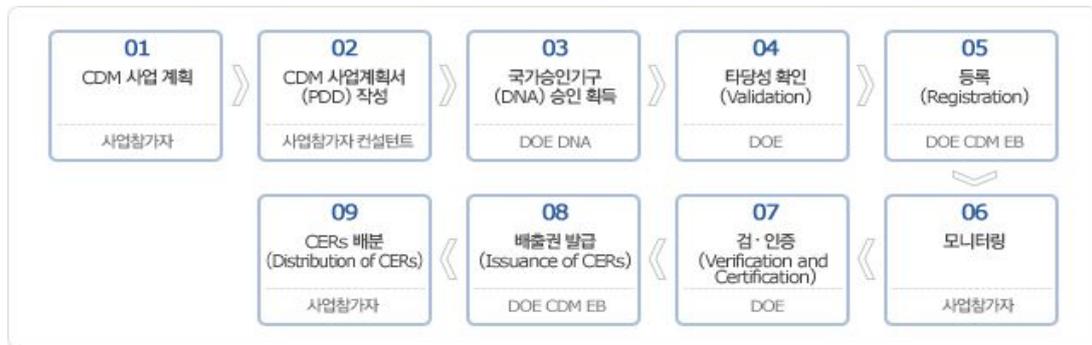
< 이산화탄소의 생물학적/물리학적 펌프 모식도 >

4. 남극해 통합 탄소 리스크 관리

- 현재의 수준을 진단하는 통계구축에서 탄소 포집과 저장기능에 대한 실

중 분석을 통한 예측연구 수반으로 탄소저감에 대한 가치평가

- 남극해와 같이 특정 해역에서 탄소포집과 저장으로 산출되는 감축 실적에 대해 CDM 이사회 인정 가능성 타진
- 남극해 탄소 크레딧 사업 추진 체계 마련



< 탄소 크레딧 사업 추진 체계도 >



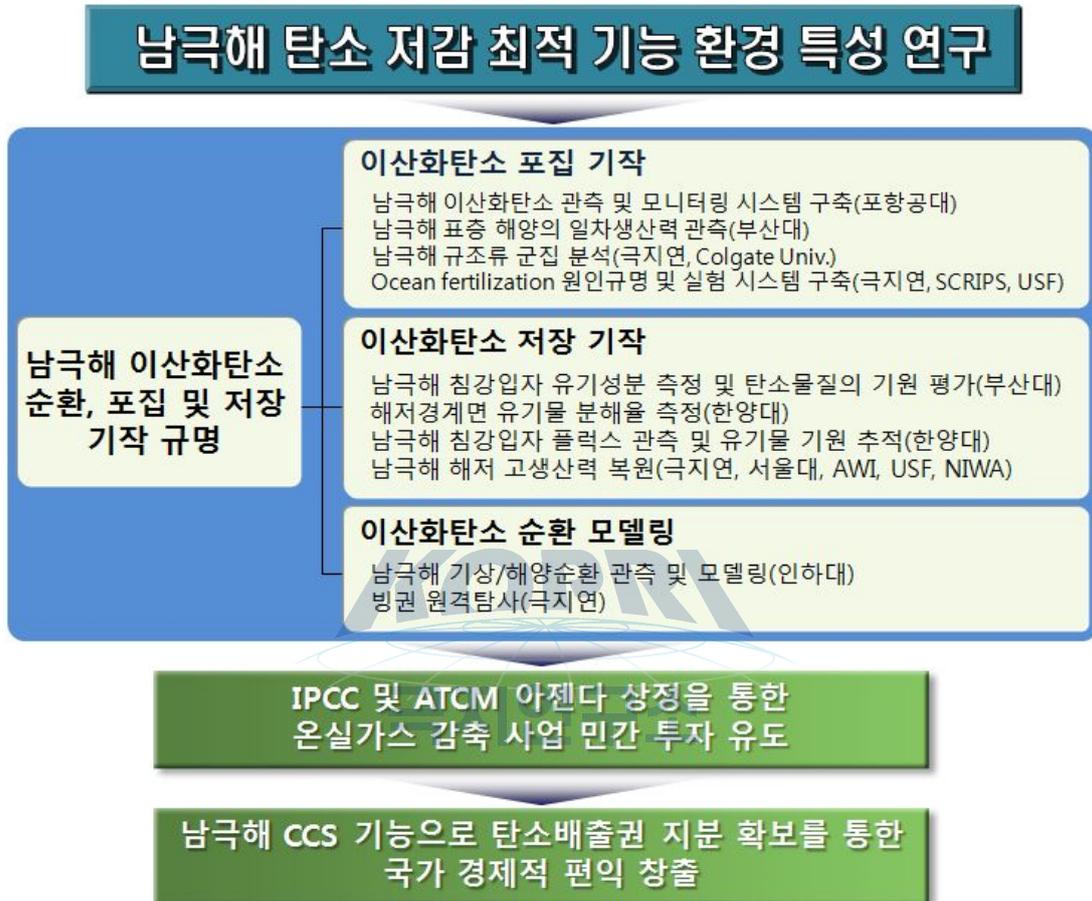
제 4 장 사업 추진체계 및 전략

1. 사업운영 기본방향

- 국내 전문가 중심의 산학연 협력 및 국제 공동 연구를 통해 남극해 탄소 저감 기작에 대한 극지연구소 주도형 연구 개발
 - 가) 빙하학/지구물리, 원격탐사, 해양학 및 해양생물 분야가 모인 다학제 연구 프로젝트 지향 및 유기적인 연관 관계를 규명할 수 있는 연구 방향 도모
 - 나) 국제 공동 워크숍 및 다양한 국내외 전문가 그룹의 참여로 실질적인 연구 내용 마련
 - 다) 연구선 기반 첨단 장비 운영에 적합한 해양/대기/지질 관측 인프라 구축 방안 마련
- 친환경 극지 지구공학적인 탄소 저감 기능 규명
 - 가) 남극해 이산화탄소 해양 포집 및 저장 기작 규명
 - 나) 남극해 이산화탄소 순환 모델링 개발
 - 다) 남극해 철 비옥화 실험에 따른 해양생태계 안정화 연구

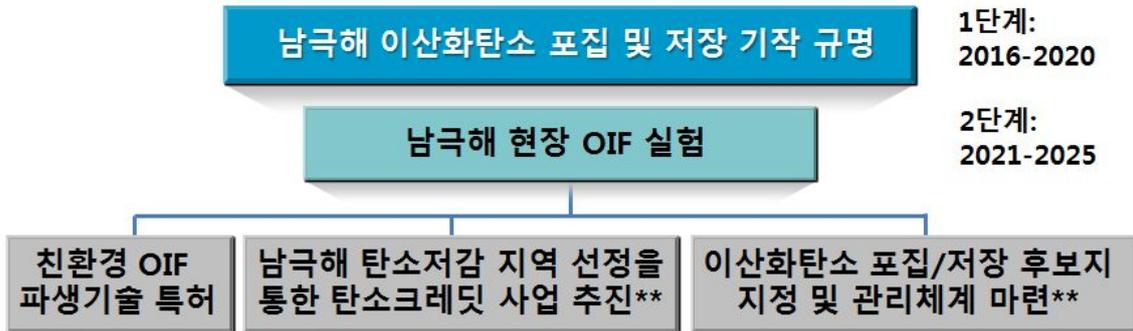
2. 사업 추진 체계 및 전략

- 남극해 이산화탄소 저감 기작 환경 특성 연구의 추진 방향



- 가) 남극해 이산화탄소 순환, 포집 및 저장 기작 규명을 위한 관측 모니터링 및 측정 시스템 구축
- 나) 국내외 학·연·산 공동연구체계 수립을 통해 연구선 기반 공동 승선 연구 수행
- 다) 국내외 전문가 분야별로 특화된 연구의 유기적인 통합으로 연구 목표 규명

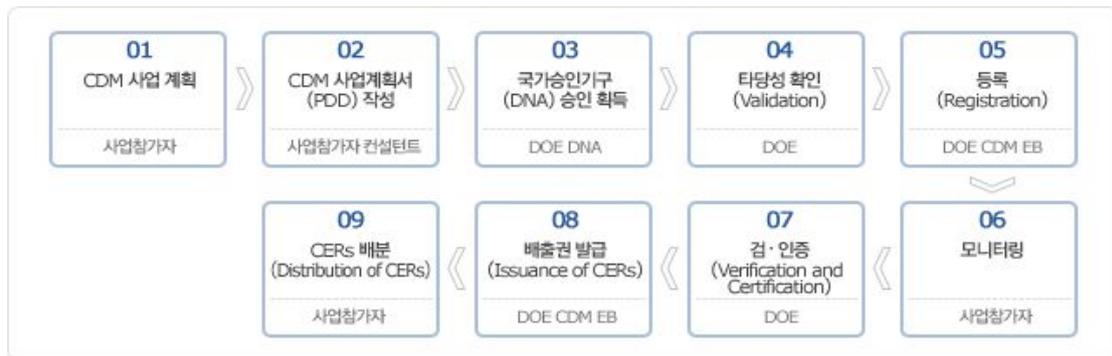
- 남극해 이산화탄소 순환, 포집 및 저장 기작 규명에 따른 사후 통합 탄소 리스크 관리



가) 산-학-연 컨소시엄 구성

- 에너지 다소비업종(5개 발전사 + 철강업체)을 겨냥한 산-학-연 컨소시엄 구성
- 민간 부분의 온실가스 감축사업 및 탄소배출권 확보에 대한 투자정보를 공유
- 민간 기업의 남극해 CCS 사업 참여시 후보지 위치 및 적정시기 등의 정보를 제공함으로써 탄소배출권 지분 확보

나) 탄소크레딧 사업추진



다) 이산화탄소 포집/저장 후보지 지정 및 관리체계 마련



제 5 장 기대 성과 및 활용 방안

- 환경 친화적인 녹색 기술 개발
 - 가) 지구공학적으로 환경오염을 최소화할 수 있는 이산화탄소 해양 저장 기술 도모
 - 나) 남극해 CCS 적용 지역의 종합적인 관측 시스템과 구체적이고 양적인 포집 및 저장 결과 도출
- 국제 사회에서 우리나라가 의무적인 온실 가스 감축국으로 편입될 경우 감축 목표 초과한 탄소배출에 대한 탄소배출권 구입 비용 감소
- 남극해 CCS 사업의 상업화 및 탄소상쇄사업 등으로 100조 규모의 경제적 효과와 10만개 이상의 일자리 창출
- 친환경적 이산화탄소 해양저장기술 개발에 최적 시기 및 적합한 지역을 선정하는데 핵심 DB 구축 및 자료 제공
- 남극해 이외의 자국의 영해상에 기술적용 가능성을 검토할 수 있는 파일럿 스터디 활용 가능
- 기후 변화 대응 노력으로 글로벌 환경 리더로서의 국가 이미지 제고
- 기후 변화 대응 분야 국제 협력으로 우리나라의 국제적 그린 리더십 제고

부록 1. 대한민국 확보지역(남극 브랜스필드 해협) 탄소 매장량 및 경제적 가치 추정

□ 연구지역

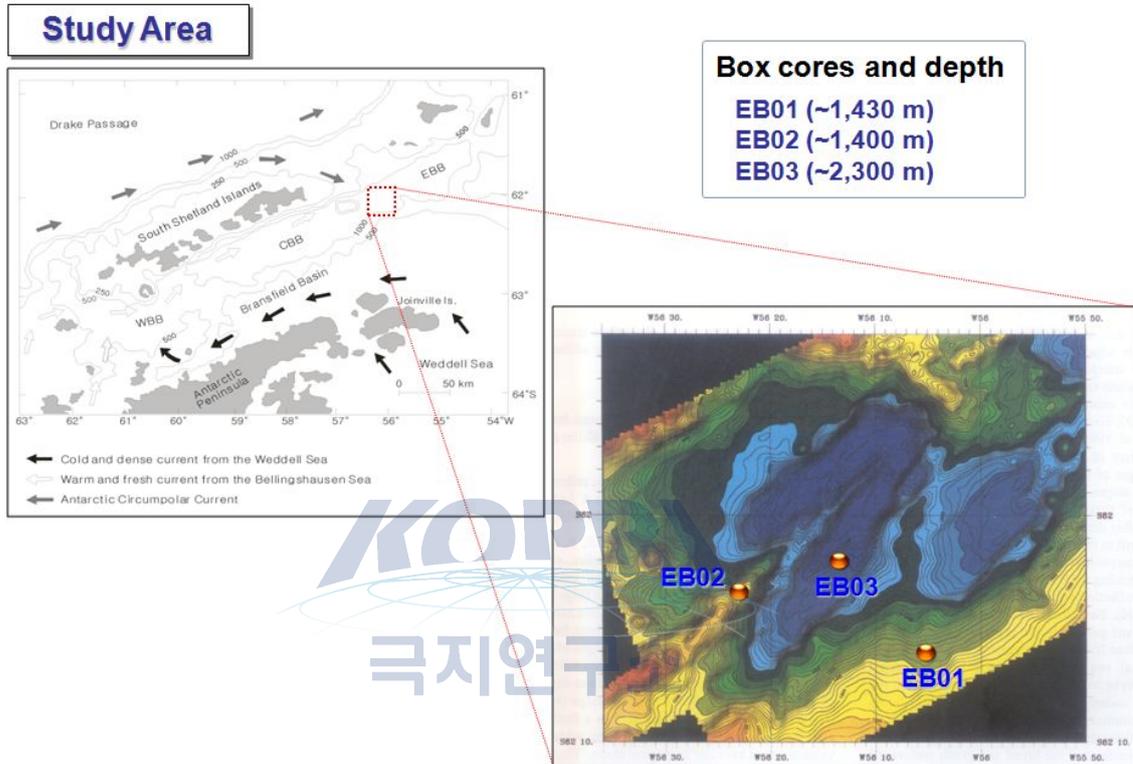


그림 1. 연구지역

□ 코어 위치 및 수심

- 코어 EB01, EB02: 동부 브랜스필드 분지의 사면으로 수심 약 1,400 m
- 코어 E03: 동부 브랜스필드 분지 중심으로 수심 약 2,300 m

□ 매장된 유기탄소 플럭스 계산식

- Burial flux of OC = OC (%wt) × MAR (mass accumulation rate)
- 매장된 OC = 평균 1.3%wt
- 공극률(porosity) 계산

$$\text{공극률} = \frac{\text{퇴적물의 평균밀도} \times \text{함수율}}{[\text{공극수 평균밀도} \times (1 - \text{함수율}) + \text{퇴적물의 평균밀도} \times \text{함수율}]}$$

IF 퇴적물의 평균밀도 = 2.64 g cm^{-3} , 공극수의 평균밀도 = 1.02 g cm^{-3} ,
 각 코어의 평균 함수율 = 65%,
 공극률 = $2.64 \times 0.65 / [1.02 \times (1 - 0.65) + 2.64 \times 0.65] = 0.828$

○ MAR 계산

$MAR (\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}) = (1 - \text{공극률}) \times GD (\text{g cm}^{-3}) \times ASR (\text{cm yr}^{-1}) \times 10^4$
 IF grain density (GD) = 2.62 g cm^{-3} , apparent sedimentation rate (ASR)
 = 0.3 cm yr^{-1} (각 코어 EB01 = 0.14 cm yr^{-1} , EB02 = 0.5 cm yr^{-1} , EB03 =
 0.4 cm yr^{-1} 의 평균),

$MAR = (1 - 0.828) \times 2.62 \times 0.3 \times 10^4 = 1351.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$

Burial flux of OC = OC (%wt) \times MAR (mass accumulation rate) =
 $0.013 \times 1351.9 = 17.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (동해 울릉분지의 약 6 to 9배)

□ 동부 브랜스필드 분지의 연간 유기탄소 매장량

○ Bransfield Strait 전체 면적으로 계산 $100,000 \text{ m} \times 500,000 \text{ m}$

연간 유기탄소 저장량 = $17.57 \times (100,000 \times 500,000) = 878,500,000,000$
 $\text{gC/yr} = 878,500 \text{ 톤/년} (3,221,167 \text{ CO}_2\text{톤/년})$

○ Bransfield Basin 면적중 대한민국확보지역(동부분지) $60,000 \text{ m} \times$
 $133,333 \text{ m}$

연간 유기탄소 저장량 = $17.57 \times (60,000 \times 133,000) = 140,560,000,000$
 $\text{gC/yr} = 140,560 \text{ tons/yr} (515,385 \text{ CO}_2\text{톤/년})$

	탄소 매장량 (이산화탄소 매장량)	최저가격* (16,500원/톤)	중간가격* (22,000원/톤)	최대가격* (27,500원/톤)
브랜스필드 해협	878,500톤/년 (3,221,167톤/년)	531.5억	708.7억	885.8억
브랜스필드 동부 분지	140,560톤/년 (515,385톤/년)	85억	113.4억	141.7억

* 2015 Carbon Dioxide Price Forecast 2020년 가격기준.

1 US Dollar = 1100원

□ 정부의 2020 감축 목표

- 2013년 우리나라 이산화탄소 배출량: 6억 1,600만톤
- 2020년 배출전망치: 7억 7,610만톤, 30%: 2억 3,280만톤
- 그러나 정부의 최대감축치는 23% 전망
- 나머지 7%인 5,433만톤의 이산화탄소는 대체 감축수단으로 감축 필요
: 남극해(브랜스필드 동부분지) 대한민국 확보지역 105개 규모에 해당



부록 2. 국내 이산화탄소 해양 저장기술

이산화탄소의 해양 저장기술은 해양에서의 이산화탄소의 거동에 대한 이론적 배경을 바탕으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 국내에서의 해양에 이산화탄소를 저장하는 기술을 개발하는 것도 이러한 이론적 배경을 바탕으로 두고 있으므로 이에 대하여 이 보고서에 제시하고자 한다.

1. 배경

해양은 이산화탄소의 저감처리 방안 중 규모의 측면에서 잠재력이 가장 큰 저장 대상이다. 산업혁명 이후 해양은 매년 인류가 배출해낸 이산화탄소의 약 50%를 흡수하고 있으며, 향후 배출될 이산화탄소의 약 85-90% 역시 궁극적으로 모두 해양에 저장될 것으로 예상된다(Kheshgi, 2004). 해양에서 이산화탄소의 흡수 현상은 대기-해양 표층수 간 물질 교환을 통해 이루어지는데, 흡수된 이산화탄소는 물리적 또는 생물학적인 순환을 거쳐 해양 전반에 분산 저장되어 표층수의 흡수능력이 유지된다.

해양에서의 탄소 순환은 해수 표층에서의 이산화탄소 흡수와 이 흡수된 이산화탄소를 심층수로 이동시키는 과정에서 시작된다. 해양의 표면에서 수심 약 100 m 내외까지는 바람의 혼합작용으로 수온이 거의 균일한 층으로 이를 혼합층이라고 하는데, 대기와 평형관계로 인하여 대기의 이산화탄소가 유입이 일어나고 식물성 플랑크톤의 광합성작용에 의해 무기 탄소가 유기물로 생성이 된다. 이렇게 해양 표층에 흡수·축적된 이산화탄소는 물리적 또는 생물학적 순환을 통해 해양 심층부로 이송이 되면서 수온약층을 통과한다. 이 수온약층은 층리화를 이루고 있기 때문에 해양 표층과 심층 간의 해수 순환을 방해하기 때문에 심층수에 저장된 이산화탄소가 대기 중으로 다시 재 방출되는 것을 막아주는 역할을 한다. 약 1000 m의 수온약층 이하 심해층은 태양 복사에너지의 영향을 받지 않아 수온이 2~4°C 정도로 거의 일정하다. 심해역은 전체 해양 면적의 약 88%를 차지하며 저온·고압의 환경 하에 놓여있으므로 이산화탄소의 높은 용해력으로 막대한 양의 탄소를 저장할

수 있는 역할을 할 수 있다.

해양-대기 간 이산화탄소의 흐름은 주로 양측의 이산화탄소 분압 차이에 의해 영향을 받는다. 즉, 해수 표면 바로 위에서의 분압이 해수 표면 바로 아래에서의 분압보다 크면 이산화탄소는 대기로부터 해양으로 흡수가 일어난다. 해양이 대기의 이산화탄소를 많은 양으로 흡수할 수 있는 또 다른 중요한 이유는 이산화탄소가 약 산성의 기체인데 비하여, 해수는 다양한 성분의 용존 광물의 영향으로 약알칼리성을 띠기 때문이다. 따라서 대기-해양 간 이산화탄소의 교환은 해수 속 이산화탄소와 탄산 간의 화학적 평형, 대기 중 이산화탄소의 분압, 대기-해양 간의 물지 교환에 따라 결정된다. 해양이 대기로부터 다량의 이산화탄소를 흡수하면 해양의 표층수에서는 해수 속 이산화탄소의 농도가 증가를 하게되고 이에 따라 탄산 $[H_2CO_3(aq)]$ 이 생성되고, 차례로 중탄산이온 (HCO_3^-), 탄산이온 (CO_3^{2-}), 수소이온 (H^+)으로 해리되어 탄산이온의 농도는 감소하며 수소이온의 농도는 증가한다. 이 과정을 화학반응식으로 표시하면 다음과 같다.



대기로부터 해양 표층수로 유입된 이산화탄소는 물리적 용해 펌프와 생물학적 펌프라는 두 가지 기작을 통하여 이루어진다. 물리적 용해 펌프는 해수의 순환에 의하여 일어난다. 북대서양이나 남극해와 같은 극지역으로 흐르는 해양 표층수는 수온이 낮아지면서 이산화탄소의 분압도 함께 낮아지며 대기로부터 이산화탄소를 흡수한다. 수온이 낮고 극지역으로 이동하는 동안 일어난 해수의 증발로 표층수는 점차 밀도가 높아지면서 다량의 이산화탄소를 함유한 채 밀도 차에 의해 해저 심부로 가라앉게 되는데, 이렇게 생성된 심층수는 해수의 순환에 의해 다시 적도 부근으로 이동하여 남하하다 대서양 남부를 거쳐 일부는 상승을 하고 인도양과 태평양을 한바퀴 돌아 다시 해수 표층으로 상승하여 수온과 이산화탄소 분압이 상승하며 이산화탄소는 다시 대기 중으로 방출된다(그림 1). 심해에 저장된 이산화탄소가 이러한 해수의 순환을 통하여 다시 재방출되기까지는 약 300~1000년이라는 오랜 시간이 걸린다. 저온·고압의 심해 조건에서는 이산화탄소의 용해도가 클 뿐 아니라 해수의 흐름에 의해 광범위하게 분산 저장이 되기 때문이다. 그런데 자연 상태에서는 심해에 저장된 이산화탄소가 다시 대기 중으로 재방출되는

속도 뿐 아니라 이산화탄소가 대기로부터 해양으로 흡수되는 속도 역시 매우 느리게 일어난다.

생물학적 펌프는 자연의 먹이 사슬을 통해서 일어나는 탄소의 하향 이송 현상이다. 해양 표층수에 서식하는 다양한 식물성 플랑크톤은 태양에너지를 이용하는 광합성을 통하여 해수에 용존된 무기탄소와 영양염류를 유기물로 변환시킨다. 식물성 플랑크톤은 동물성 플랑크톤에 먹히고, 동물성

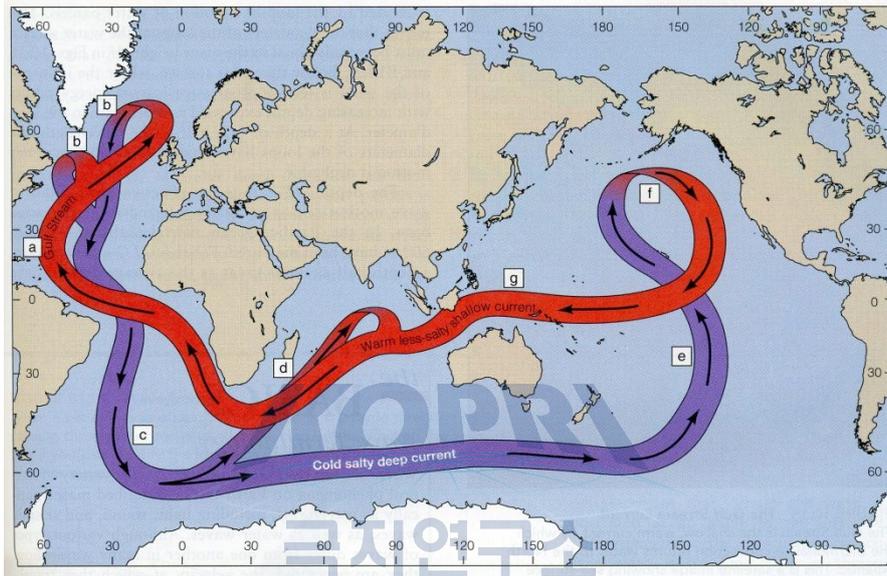


그림 1. 전지구적인 해수의 순환 (Skinner and Murck, 2011).

플랑크톤은 다시 고등 수생 생물의 먹이가 된다. 이들 모든 생물체의 유해는 중력에 의해 해저 심부로 가라앉게 되는데, 1000 m 정도 하강하는 동안 대부분의 유기물은 산화 분해되어 다시 무기탄소로 변환되고 극히 일부 약 10% 정도의 유기물 만이 해저면에 도달한다. 이렇게 해저면에 도달한 유기물은 지속적인 퇴적작용이 일어나 퇴적물 속에 매몰이 된다(그림 2). 태양에너지를 이용한 광합성의 특성상 수심 100 m 이하의 효율은 표층수의 10~20%로 감소하고, 수심 1000 m 이하에서는 거의 일어나지 않는다. 전세계 해양에서 생물학적 펌프에 의하여 해양 표층에서 심층으로 운반되는 탄소의 양은 연간 약 10 GtC에 달하는 것으로 추정되고 있다(Benson et al., 2000).

2. 해양 저장 유형

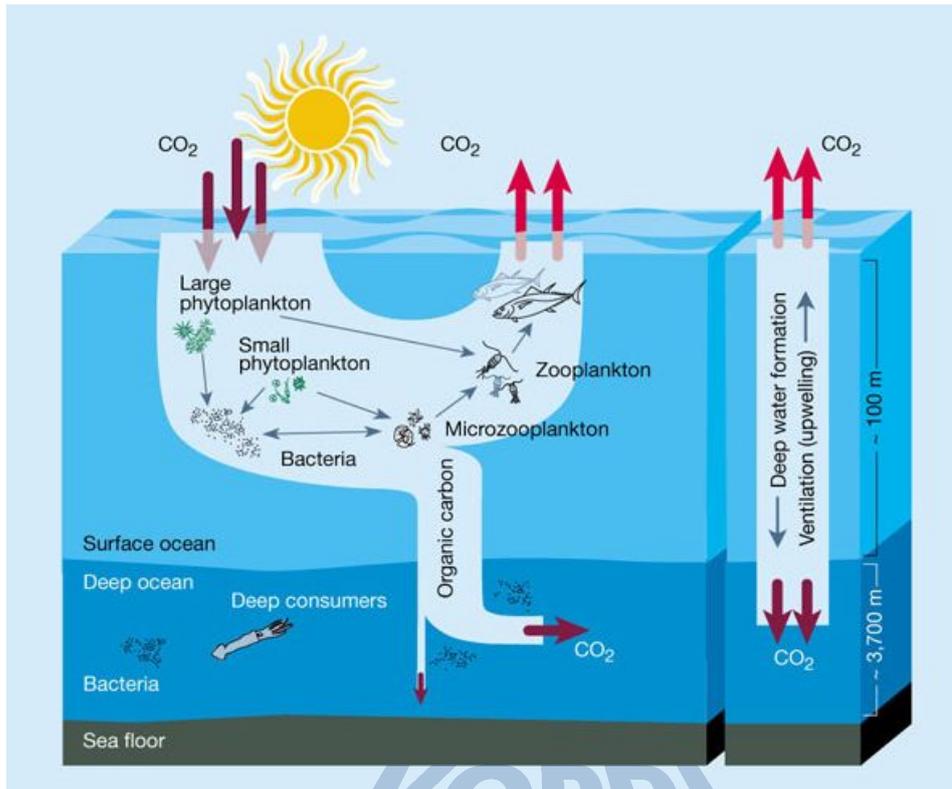


그림 2. 식물성 플랑크톤으로 시작한 복잡한 먹이 사슬에 의한 생물학적 펌프 개념도 (Chisholm, 2000).

극지연구소

이산화탄소 해양 저장을 위하여 현재까지 제안된 기술들을 살펴보면 육상에서 분리·포집된 이산화탄소를 다양한 형태로 바다 속 또는 해저면에 저장하는 직접 주입법 (injecting CO₂ into the ocean)과 대기-해양간 이산화탄소 교환 반응을 촉진하기 위하여 해양 표층수에 첨가하는 해양 시비법 (ocean fertilization), 그리고 해양 퇴적물 내 지중 저장법 (geological sequestration)으로 나누어 볼 수 있다. 이러한 방법들을 통하여 얼마나 오랜 기간 동안 이산화탄소를 대기로부터 격리시킬 수 있는가에 따라 이산화탄소의 저장 성공 여부가 판가름 날 수 있다. 이 보고서에는 이 세 가지의 해양 저장 방법 중에서 지중 저장 방법을 빼고 소개하기로 한다. 해양의 퇴적층에 이산화탄소를 지중 저장하는 방법은 일반적인 육상에서의 지중 저장 방법에 따르기 때문에 이에 대하여는 다음 기회에 소개하기로 한다.

2-1. 직접 주입

이 방법은 기본적으로 대기 중의 이산화탄소가 해양으로 흡수되는 자연적인 과정을 인위적인 방법을 통하여 가속화시키는 방법이다. 앞에서 소개한 바와 같이 자연적인 과정은 수백 년의 오랜 시간에 걸쳐서 일어나기 때문에 인위적으로 이산화탄소를 해양에 직접 주입하여 해양생물이 주로 서식하며 용존 이산화탄소의 대기 중 재 방출이 이루어지는 해양 표층의 혼합층을 우회하여 수직적 순환이 제한적으로 일어나는 수온약층이나 해양 심층에 이산화탄소를 주입하는 것이다. 이렇게 함으로써 환경적인 영향을 최소화하면서 이산화탄소의 체류 시간을 늘리고자 하는 것이 이 방법의 기본 개념이다(그림 3). 이때 이산화탄소의 주입 수심이 깊어질수록 해수 속에 체류하는 시간은 더 길어지며, 주입된 이산화탄소의 상과 거동은 주입 방법과 주입 수심에 의해 결정된다.

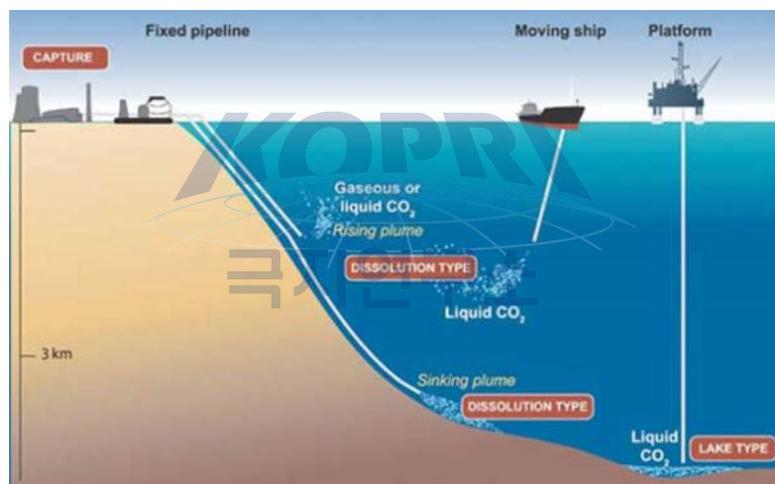


그림 3. 이산화탄소의 직접 주입에 의한 해양 저장의 방법 (www.powerplantccs.com).

이산화탄소는 기체, 액체, 고체, 또는 하이드레이트의 형태로 주입될 수 있으며, 주변의 압력과 수온 조건에 따라 이산화탄소의 상이 결정된다(그림 4). 해양의 일반적인 압력과 수온에서는 순수한 이산화탄소 가스는 대략 수심 500 m 이하에서는 가스로 존재하지만 이보다 깊은 수심에서는 액체로 존재한다. 수심이 약 3000 m 이하에서는 이 액체로 존재하는 이산화탄소는 상승을 하지만 이보다 깊은 수심에서는 음의 부력이 작용하여 가라앉는다. 약 3700 m에서는 이산화탄소에 포화된 해수에 비해 음의 부력이 작용한다. 해

수-이산화탄소 계에서 해수의 조성에 따라 다르지만 수심이 약 500 m 이하에서는 이산화탄소 하이드레이트 ($\text{CO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}, 6 < n < 8$)가 생성된다. 이산화탄소 하이드레이트는 고체로서 밀도는 해수의 밀도보다 약 10% 더 높다.

다양한 형태로 해양에 주입된 이산화탄소는 일정 시간이 지나면 모두 해수에 용해되는데, 이들의 용해 속도는 주입 형태와 수심, 주변 해수의 수온과 유속에 따라 크게 변화한다. 지금까지 제안된 직접 주입의 방법들은 아직 개념의 정립 단계이거나 제한된 수준의 실험만이 이루어진 단계로 실제 현장 실험에 의한 자료가 제공된 사례가 거의 없기 때문에 판단하기는 어렵지만 실제 실행에 있어서 뚜렷한 기술적 어려움은 없을 것으로 여겨지고 있다.

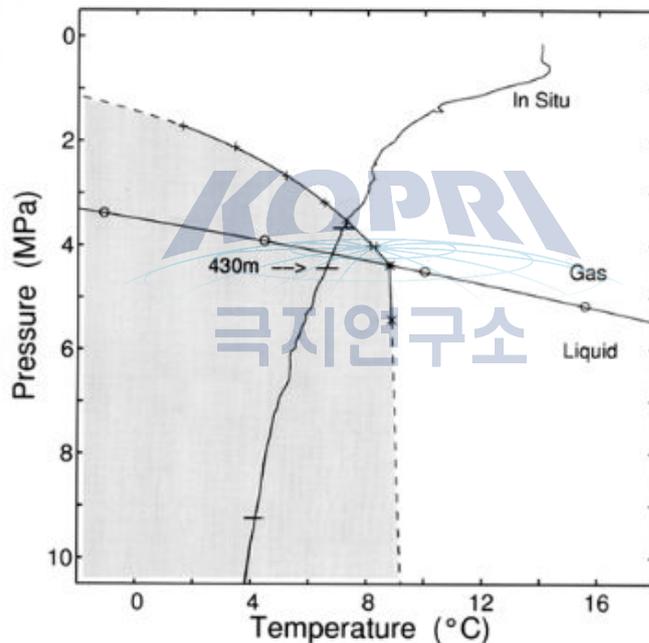


그림 4. 해수에서 이산화탄소의 상 변화(www.mbari.org).

2-2. 해양 철분 시비

연간 50 GtC 규모로 일어나는 식물성 플랑크톤에 의한 탄소 고정화는 생물학적 펌프를 통하여 심해로 탄소를 운송한다. 식물성 플랑크톤은 동물성 플랑크톤에게, 다시 고등 어류에게 섭취되며 식물성 플랑크톤에 의해 고정된 탄소의 70~80%는 해양 표층 내에서 재순환되지만, 그 나머지는 미립자 형태의 유기탄소로 중력에 의해 침강하여 심해로 이송된 후 오랜 시간에

결쳐 해저 미생물에 의해 무기탄소로 분해되어 해저면에 퇴적되거나 생물학적으로 재활용되어 생물생산성에 기여를 한다(그림 2). 해양 표층에 식물성 플랑크톤의 광합성을 촉진할 수 있는 영양소를 주입하는 해양 철분 시비법은 표층수 내의 탄소 농도를 낮추어 대기로부터 이산화탄소 흡수를 증대시키고 생물학적 펌프를 가속시키려는 인위적인 방법이다. 이 방법은 이산화탄소 저감과 함께 부수적으로 해양생물의 생산활동을 촉진시켜 어업 생산량을 늘릴 수 있는 방안으로도 연구되고 있다. 현재까지 제안된 다양한 가설과 실증 연구 중 가장 주목받는 것은 질소나 인 등 식물성 플랑크톤의 성장에 많은 양이 요구되는 다량영양소(macronutrients)는 풍부하지만 식물성 플랑크톤이 부족한 고영양 저클로로필(high nutrient low chlorophyll, HNLC) 지역에서는 미량영양소(micronutrients)인 철분의 부족이 식물성 플랑크톤의 성장을 제한하는 요소로 나타나므로, 이러한 지역에 철분을 공급함으로써 단시간 내에 식물성 플랑크톤의 성장과 탄소의 흡수를 증대시킬 수 있다는 철분 시비법(iron fertilization)이다(Boyd et al., 2007). 최근 태평양 적도 해역에서 수행된 제한된 규모의 현장 실험에서 철분의 투입 직후 다량영양소가 소비되고 해양 표층수 내 이산화탄소 분압이 감소하는 결과가 관측되기도 하였다. 최근에 또 실시된 현장 실험은 2009년에 남 대서양에서 실시한 인도와 독일의 Lohafex 프로젝트, 2012년에 캐나다 브리티쉬 콜롬비아 해안의 외해에서 실시된 Haida Salmon Restoration Corporation (HSRC) 프로젝트가 있다. 또 다른 방법으로는 다량영양소와 식물성 플랑크톤이 모두 부족한 저영양 저클로로필(low nutrient low chlorophyll, LNLC) 지역에 질소를 공급하는 방안이 연구되고 있다. 그러나 제한적으로 실시된 실증실험을 통해 해양 철분 시비의 효과가 관측되었다고는 하지만, 영양소의 주입으로 생물학적 펌프를 어느 정도 증대시킬 수 있는지 등 장기적인 효율성이나 해양 표층 내 부영양화나 산소 부족 등 잠재적인 생물학적 부작용에 관해서는 연구된 바가 거의 없는 실정이다.

이 해양 철분 시비법의 또 다른 긍정적인 영향은 플랑크톤의 몇 종은 dimethyl sulfide (DMS)를 생산하는 것을 알려져 있다. 이 DMS는 해양에서 대기로 방출이 되며 대기에서 OH 라디칼, 염소, 일산화브롬(BrO)에 의해 산화되어 황산염 입자를 생성시킨다. 이 황산염 입자는 구름을 생성하는데 작

용하여 구름이 널리 생성되는데 기여를 한다(그림 5). 이 가설은 이를 처음 제안한 과학자인 Robert Charlson, James Lovelock, Meinrat Andrea와 Stephen Warren의 이름 첫 자를 따서 CLAW 가설이라고 한다. 이렇게 구름이 많이 생성되면 태양 복사에너지의 반사율을 높이며 이로 인하여 지구가 냉각되는 효과를 나타낸다. 실제로 2002년에 남빙양에서 실시된 철 실험(SOFeX)에서 DMS의 농도가 시비가 이루어진 지역에서 약 4배 정도 증가를 하였다. 만약 이 가설이 작동을 한다면 남빙양의 넓은 지역에 철분 시비를 하면 철분으로 인한 생물생산성의 증가로 이산화탄소의 소모가 증가할 뿐 아니라 구름의 생성으로 해양의 알비도가 증가할 것으로 예상할 수 있지만 이로 인하여 얼마만큼의 냉각 효과가 일어날지에 대하여는 매우 불확실한 실정이다. 이보다는 철분 시비로 인한 인위적인 해양 환경의 변화가 해양 생태계의 구조와 균형에 어떠한 영향을 끼칠 것인가에 대한 분석이 이루어질 때까지는 신중한 접근이 요구된다.

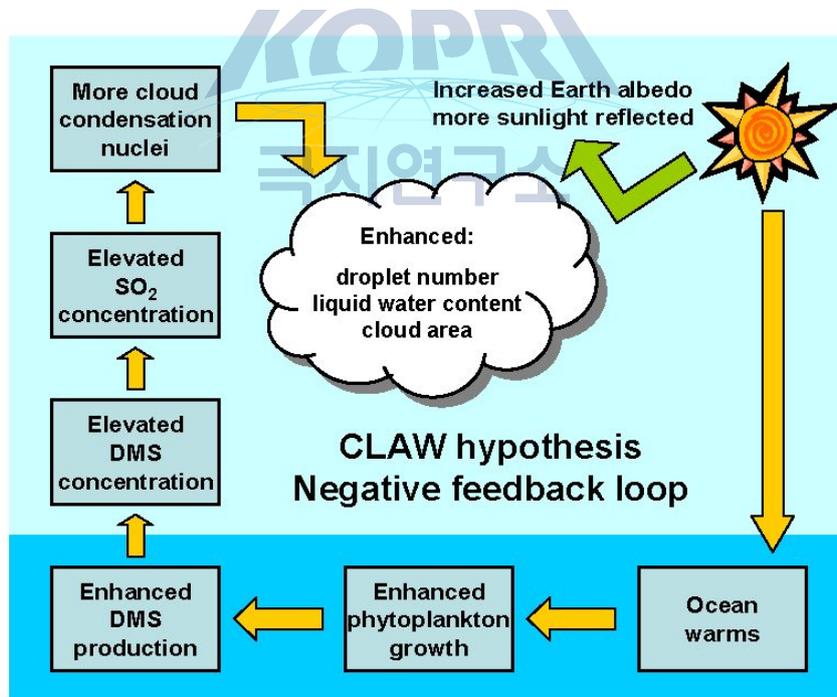


그림 5. CLAW 가설의 모식도 (Charlson et al., 1987).

3. 해양 저장과 관련된 고려 사항

우선적으로 해양 환경의 변화 상황을 고려하여야 한다. 잠재적 영향으로는 현재까지 예상되는 환경 변화는 해수의 pH 감소, 해양생물의 사망률 증가 등 단기적 영향과 해양 생태계 변화, 예측 불가능한 만성적 부작용 등 장기적인 영향들이다. 그러나 현재의 문제는 이러한 장·단기적 환경 영향들을 평가할 수 있는 과학적 근거나 정보가 극히 제한적이라는 점이다.

다음으로는 해양 저장의 경제적 비용이다. 해양 저장의 효율성과 경제성은 이산화탄소 주입 수심과 위치에 직접적인 영향을 받는다. 일반적으로 주입 수심이 깊을수록 저장의 효율성은 증가를 하지만, 주입에는 보다 고도의 기술이 필요해지므로 소요 비용 역시 증가하게 된다. 경제성이 있어서 직접 주입의 단점 중 하나는 저장 이전의 전처리 과정과 연관된 비용이다. 가장 용이한 주입 방법은 액체상 이산화탄소를 처리하는 것으로 알려져 있다. 주입된 이산화탄소는 직접적으로 해양 환경 및 생태계에 노출되기 때문에 주입되는 이산화탄소의 상태와는 무관하게 비교적 순수한 상태로 주입되어야지만, 순수한 이산화탄소의 포집을 위해서는 많은 비용이 소요될 수 있다. 또한 대규모 이산화탄소의 발생지가 해안가에서의 거리에 따라 이산화탄소의 운송에 많은 비용이 소요된다.

이 밖에도, 선박이나 해상 고정 플랫폼을 이용한 주입 과정에서도 선박을 통한 운송 거리에 따라, 또 취급 과정에서 증발 등으로 인한 손실과 운송에 소요되는 연료의 사용으로 인한 이산화탄소의 배출을 고려하여야 한다. 반면 해안으로부터 해저로 연결된 파이프라인을 통하여 이산화탄소를 직접 주입하는 경우 소요되는 비용은 파이프라인의 길이에 비례하게 된다.

탄산염 중화를 통한 이산화탄소 저장에는 기본적으로 해수와 탄산염 광물이 필요하다. 따라서 많은 양의 해수를 양수하는 비용뿐만 아니라 상당량의 탄산염 광물을 채굴, 수송, 분쇄, 용해시키는 비용이 소요되므로, 이 기술은 해안에 위치하면서 근거리에서 탄산염 광물의 생산지가 있는 발전소 등에 유리하게 적용될 수 있다.

해양 저장의 안정성과 효율성에 대한 모니터링과 검증을 위해서는 주변 해안에 많은 양의 센서를 설치하고 운용하여야 한다. 모니터링에 기술적

어려움은 비교적 해결할 수 있지만 현재까지 대규모의 모니터링이 실시된 예가 없으므로 그 비용을 추산하기 어렵다. 다만 해양 저장에 소요되는 전체 비용에 비하면 주입 지점 부근 모니터링에 소요되는 비용은 그리 크지 않을 것으로 예상은 된다. 다만 인근 해역에 대한 광범위한 모니터링에는 기존 연구에 활용이 되고 있는 국제적 연구 프로그램의 모니터링 체계를 활용하면 그 비용을 줄일 수가 있을 것이다.

4. 참고문헌

- Boyd, P. W., Kickells, T., Law, C. S., Blain, S., Boyle, E. A., Buesseler, K. O., Coale, K. H., Cullen, J. J., De Baar, H. J., Follows, M., Harvey, M., Lancelot, C., Levasseur, M., Owens, N. P. J., Pollard, R., Rivkin, R. B., Samiento, J., Schoemann, V., Smetacek, V., Takeda, S., Tsuda, A., Turner, S. and Watson, A. J., 2007, Mesoscale iron enrichment experiment 1993-2005: Synthesis and future directions. *Science*, v. 315, p. 612-617.
- Chalson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O. and Warren, S. G., 1987, Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, v. 326, p. 655-661.
- Chisholm, S. W., 2000, Oceanography: Stirring times in the Southern Ocean. *Nature*, v. 407, p. 685-687.
- Kheshgi, H. S., 2004, Ocean carbon sink duration under stabilization of atmospheric CO₂: A 1,000 year time scale. *Geophysical Research Letters*, v.31, L20204, doi:10.1029/2004GL020612.
- Skinner, B. J. and Murck, B. W, 2011, *The Blue Planet* (3rdEd.), John Wiley & Sons. 656p.

부록 3. 이산화탄소 해양 저장기술 개발을 위한 남극심층수 순환 연구

1. 연구 목적

- 남극해 해양순환을 장기 모니터링함으로써 남극대륙 주변에서 표층-심층의 교환 메커니즘을 규명
- 해양-대기 상호작용에 의한 이산화탄소의 흡수원으로서 남극해의 기능 규명
- 남극심층수(Antarctic Bottom Water, AABW)의 형성지역인 로스해 및 웨델해 주변지역을 이산화탄소 해양저장 후보지로서 가치평가

2. 연구 필요성



가. 남극대륙 주변에 존재하는 해빙/빙하는 전 지구적인 규모의 기후 변화로 인해 용빙 속도가 점점 증가하고 있다. 이러한 용빙 속도의 가속화 현상은 빙하붕괴, 해빙면적 감소의 원인이 되어 주변 해양순환에 직·간접적으로 영향을 끼친다.

나. 남극대륙을 시계방향으로 돌고 있는 고리모양의 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current, ACC)가 지구전체 해양순환의 중요한 연결고리 역할을 한다. 계절별로 형성이 되는 전선(front)의 남-북 방향 움직임에 따라 중위도-고위도 간의 열-에너지교환이 적극적으로 이루어진다.

다. 남극대륙이 움푹 들어간 지역을 중심으로 큰 소용돌이(Gyre)가 형성된다. 웨델해와 로스해에서 이런 현상이 관측되며(Ross Gyre, Weddell Gyre), 그로 인해 대륙사면 인근에서 오히려 서쪽으로 흐르는 강한 해류가 나타나기도 한다(그림 1).

라. 폴리나 혹은 빙붕지역에서 발생하는 염분배출(brine ejection)과 수온감소(cooling)현상으로 인해 무거운 밀도를 지니는 표층수가 아래로 가라앉게 된다(그림 1). 이것이 남극심층수(Antarctic Bottom Water, AABW)가 형

성되는 시발점이 된다. 심층수의 수온은 약 -0.8 에서 2°C 이며, 염분은 34.6-34.7 psu이다. 특히 웨델해에서 형성되는 심층수는 전세계 심층수 가운데서 가장 차가운 특징을 지닌다.

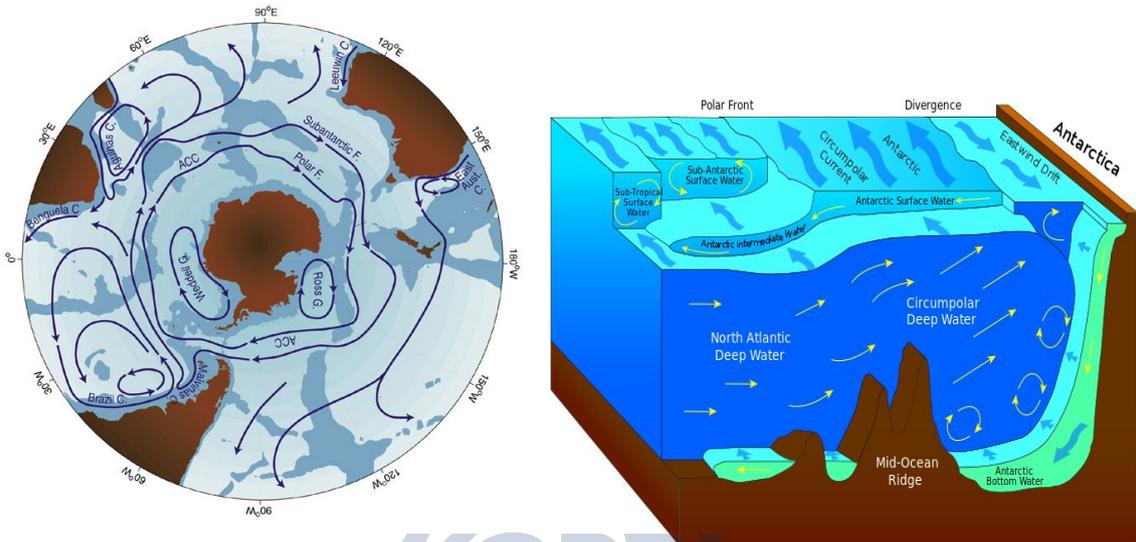


그림 1. (왼쪽) 남극대륙주변을 흐르고 있는 해류. 남극대륙이 움푹 들어간 로스해와 웨델해 내부에서 큰 소용돌이가 발견된다. (오른쪽) 강한 바람에 의해 형성된 폴리냐지역에는 남극겨울철에 높은 염분을 지니는 수괴가 형성되게 무거운 밀도로 인해서 심층으로 하강하면서 남극심층수(AABW)가 형성되어 전 지구 해양순환과 연결이 된다.

마. 온실기체 상당부분을 해양에서 흡수하고 있기 때문에 남극주변 해역에서 발생하는 해양-대기 상호작용을 이해함으로써 표층과 심층간의 연결고리를 이해할 수 있다. 특히 남극심층수(AABW) 형성지역을 온실기체 저감을 위한 해양저장 장소로 모색할 필요가 있다.

바. 전 지구적인 규모의 열염분순환의 대서양, 태평양, 인도양을 포함한 모든 해류는 남극대륙주변의 남극순환류(ACC)와 연결되어 있다(그림 2). 따라서 남극순환류는 전 지구적인 기후변화의 지시자이자 반응자 역할을 한다. 북대서양에서 가라앉으며 시작되는 심층수의 순환은 대서양을 따라 남반구로 내려오고, 서남극지역 아문젠, 벨링스하우젠해 주변에서 대륙붕을 따라 얕은 수심으로 용승을 하기도 한다.

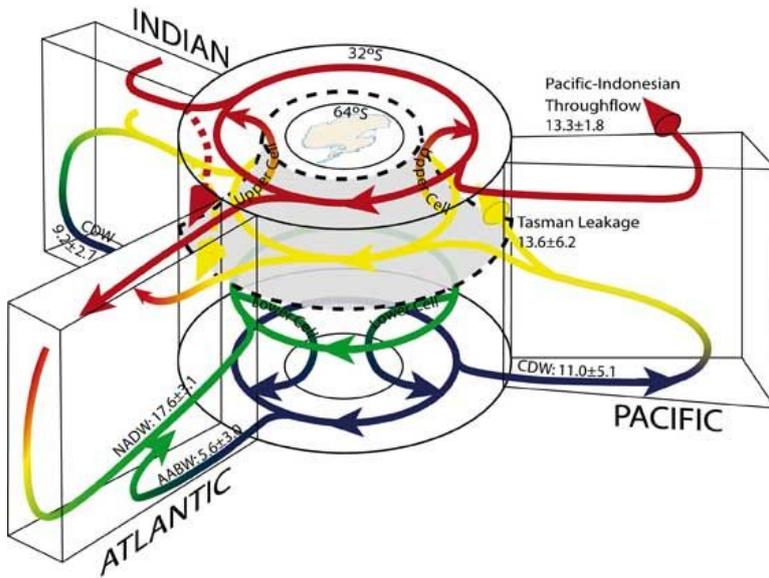


그림 2. 남극대륙을 중심으로 흐르는 남극순환류가 다른 대양의 해류와 연결되어 있는 모식도. 남극순환류는 태평양, 대서양, 인도양과 연결이 되어 있고 표층-심층사이의 물질이동에 중요한 역할을 한다. 또한 저위도-고위도 간의 열적 불균형을 해소시켜주는 역할을 담당하기에 전지구 규모의 기후변화의 지시자이자 반응자이다 (Lumpkin and Speer, 2007).

사. 서남극해를 중심으로 염분이 점차 감소하고 있다(그림 3). 이러한 현상으로 인해 표층 수괴의 밀도가 감소하게 되고, 아래에 존재하는 따뜻한 수괴 혹은 심층수와 혼합이 현저하게 감소한다. 성층화된 조건으로 인하여 표층-심층간의 열, 물질 교환이 줄어들게 되는 현상이 유발된다.

아. 이상과 같은 대규모 해양순환패턴과 남극해 주변에서 발생하는 변동성은 탄소순환에서 해양의 역할을 이해하는데 주요 배경지식이 될 수 있다. 특히, 해양의 변동성은 이산화탄소 해양저장을 위한 후보지 선정 시, 반드시 고려되어야 할 항목이다.

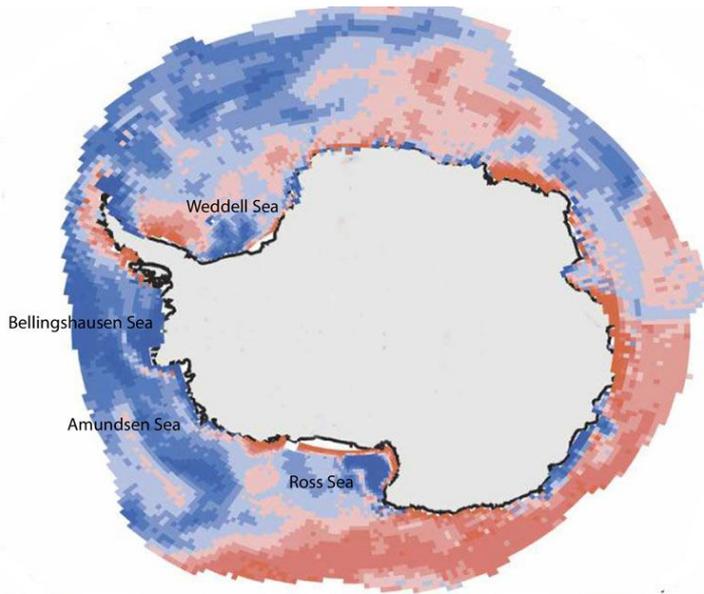


그림 3. 남극대륙주변의 1979년 이후 염분 변화. 파란색은 염분이 감소한 지역이며, 빨간색은 염분이 증가한 지역이다. 서남극해 중심으로 염분감소가 뚜렷하게 나타나고 있다 (자료: Jinlun Zhang, University of Washington).



3. 국내외 기술개발 현황 **극지연구소**

3-1. 국내 연구현황

가. 2009년 쇄빙연구선 건조이후 본격적인 남극해 해양관측 연구가 시작되었으며, 최근 5년간은 신규 인프라 구축 및 국제협력 강화 시기로 평가할 수 있다.

나. 2010년부터 극지연구소의 K-Polar 프로젝트를 모태로 하여, 남극 주변의 해양온난화 관련된 기후변화 이슈를 이해하기 위한 연구과제가 진행 중이다.

다. 서남극 아문젠해, 로스해와 웨델해를 중심으로 해양순환과 물질순환을 모니터링하는 프로그램이 운영되고 있으나 온실기체의 형성과 해양유입 관련된 연구는 미진한 실정이다.

라. 기후변화의 지시자이자 반응자로서 남극해양을 환경모니터링 입장에서 주로 다루었다. 실용적인 면에서 해양의 활용가치를 이해하는 데는 기초적인 이해수준에 머물고 있다. 특히, 온실기체 저감을 위한 해양저장 후

보지로서의 국내 남극해양 연구는 거의 전무한 실정이다.

3-2. 국외 연구현황

가. 남극해양관측시스템(Southern Ocean Observing System, SOOS, www.soos.aq)를 중심으로 각국에서 진행되고 있는 독립적인 남극해양 관측 과제의 주요현장자료를 상호 공유하고자 하는 노력이 국제과학커뮤니티에서 활발하게 진행되고 있다.

나. 현재, 미국 컬럼비아대학의 LDEO연구소가 주축이 되어 로스해 주변 해역관측 연구를 진행하고 있다. 극지연구소와의 국제협력을 통해 2015/16년도 남극하계시즌에 장기계류시스템을 구축하는 협의가 진행중 (LDEO 책임자: Dr. Chris Zappa)

4. 해양관측 기반한 해양순환 연구

4-1. 해양순환과 그에 동반된 물질순환의 주요 경로파악

이 장은 남극심층수(Antarctic Bottom Water)의 형성메커니즘 규명 및 순환패턴의 장기 변동성을 이해하기 위해서이다. 남극의 겨울철에 강력한 바람에 의해 형성되는 연안 폴리냐는 지역은 심층수 형성이 활발하게 이루어지는 곳이다(그림 4). 형성된 남극심층수의 순환패턴과 이동경로를 파악함으로써 온실기체 저감을 위한 해양저장 후보지를 평가할 수 있다.

남극심층수 형성 gateway를 중심(예, 로스해, 웨델해)으로 계류시험테스트 및 장기계류를 실시한다. 연안폴리냐에서 형성된 무거운 밀도의 수괴는 대륙사면을 따라 심층으로 흘러가면서 저위도로 이동한다(그림 5). 연안폴리냐에 장기계류시스템을 구축하여 1-2년 단위로 계류를 실시한다. 계류시스템에는 해양물리 관측장비(ADCP, CTD 등)는 물론 생지화학 관측장비(퇴적물 트랩 등)를 설치하여 해류순환과 물질순환을 동시에 관측한다.

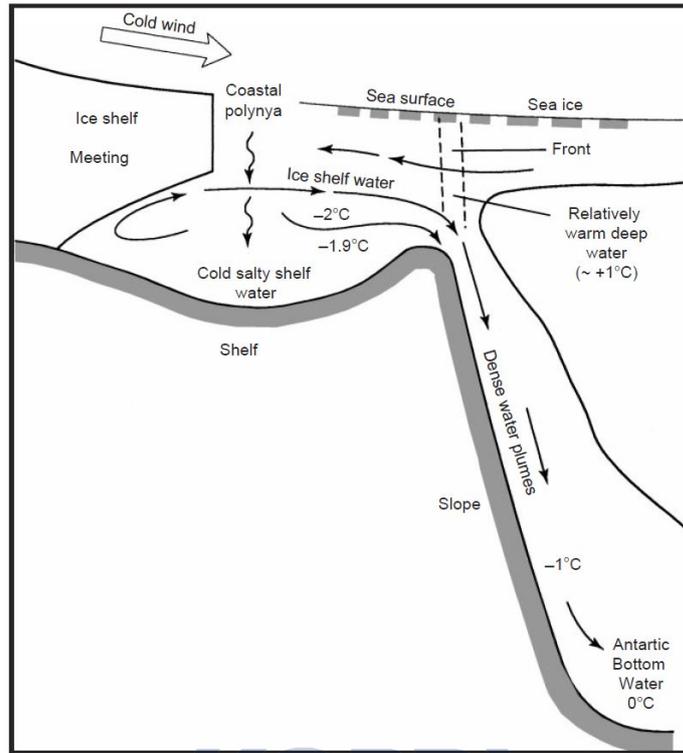
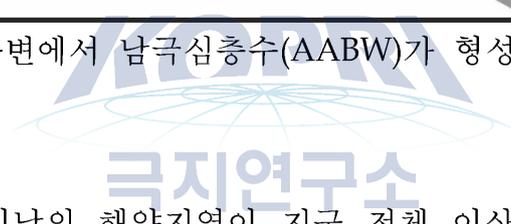


그림 4. 남극대륙 주변에서 남극심층수(AABW)가 형성되는 과정을 설명하는 모식도.



남위 30도 이남의 해양지역이 지구 전체 이산화탄소 저장의 40%를 차지한다(Sabine et al., 2004). 남극은 이산화탄소의 대표적인 흡수지역(sink)으로서 해양저장의 최적 후보지 중 하나로 평가된다(그림 6).

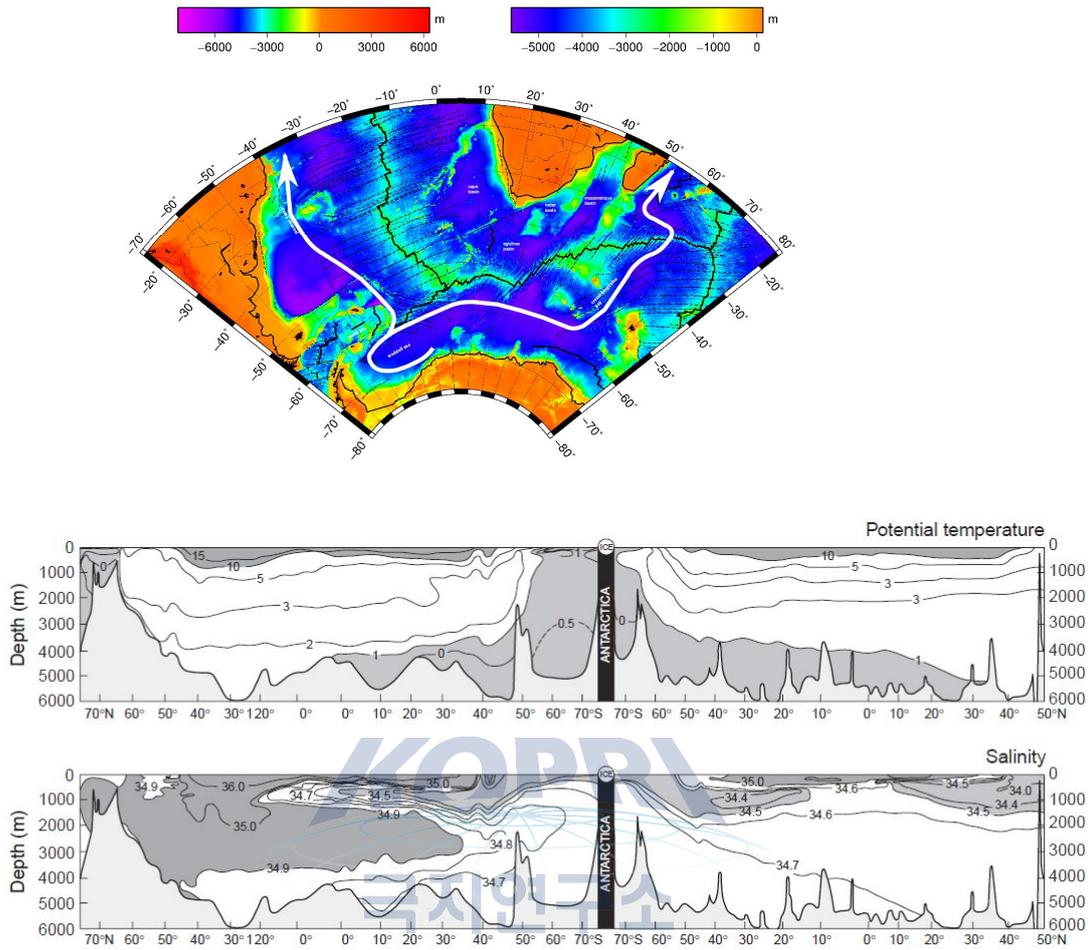
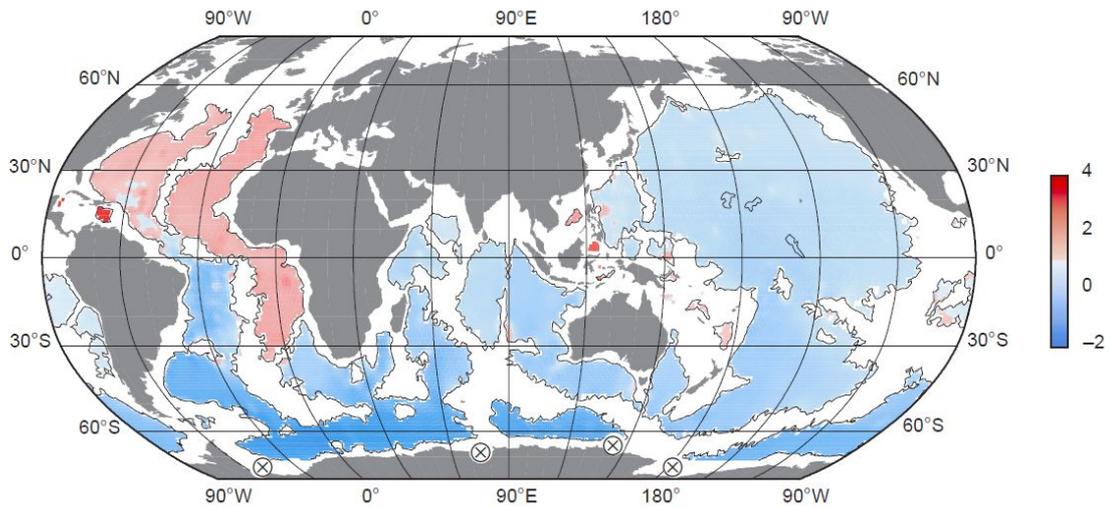


그림 5. (위) 남극심층수(AABW)의 예상 이동경로. (아래) 남극대륙을 중심으로 발달하는 수괴의 분포. 남극심층수(AABW)는 연안 폴리냐주변에서 주로 형성되어 저위도 지방으로 이동을 한다(Gordon, 2001).



Anthropogenic CO₂ Column Inventory (mol m⁻²)

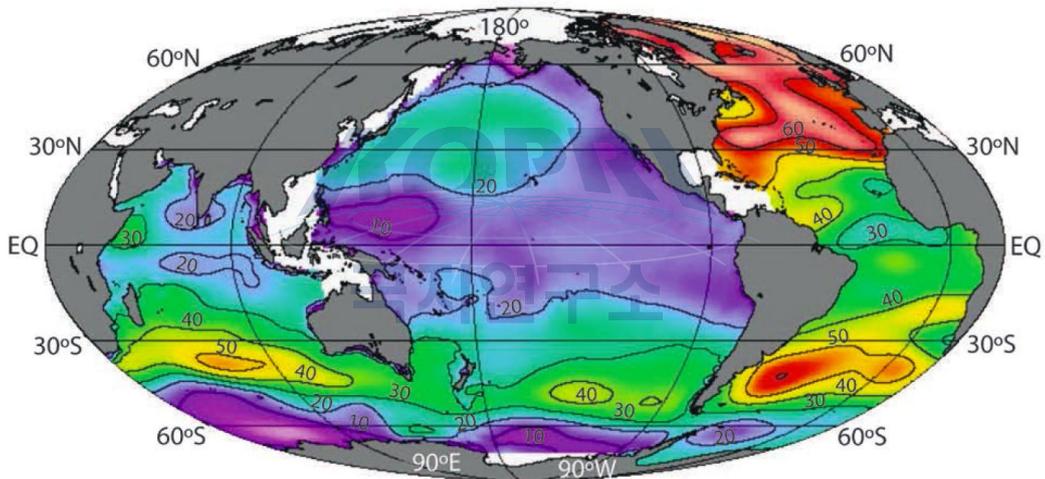


그림 6. (위)수심 4000 m 이상에서 관측되는 해저면 수온분포. 남극대륙주변에 4군데 표시된 곳은 남극심층수(AABW)가 형성되는 장소이다(Gordon, 2001). (아래) 전 해양의 이산화탄소 저장능력.

대기-해양-심층 경로를 따라 온실기체 Flux 파악(트랩에서 생산되는 생지화학 자료와의 융합필요)한다. 연안폴리냐에서 형성된 남극심층수의 유속구조 및 하강속도 파악함으로써 저장된 온실기체의 순환시간(overturning time)추정하고, 퇴적물트랩을 이용한 입자성 부유입자의 침강속도 및 Flux 계산한다.

5. 기대 효과

- 대기-해빙-해양의 상호작용에 의한 남극해 주변 해양순환의 장기변동성(계절별, 연도별)을 규명함으로써 해양순환을 제어하는 주요 외부강제력을 규명
- 전 지구 규모의 탄소순환관점에서 남극해주변 해양순환의 역할을 평가하고, 이산화탄소 해양저장을 위한 주요 후보지 및 적합지 제안 가능
- 장기관측된 자료는 국제과학커뮤니티인 남극해양관측시스템(SOOS)에서 공적자산으로 활용이 가능하며, 대한민국의 관측분야의 이니셔티브를 강화하는데 도움이 됨



부록 4. 남극해의 이산화탄소 대기/해양 순환

1. 남극해의 fossil-fuel CO₂ 흡수 능력

1-1. 연구의 중요성

해양은 대기로부터 방출된 이산화탄소의 가장 큰 흡수원으로써 미래 대기 이산화탄소 농도의 정확한 예측에 있어 그 변화가 주목되고 있다. 1990년대에 전지구적으로 이루어진 해양 탐사를 통해 심층수의 형성이 가장 중요한 해양의 이산화탄소 흡수 메커니즘으로 밝혀졌다. 남극해는 심층수의 형성이 일어나는 대표적인 지역으로서 대기로부터 방출된 이산화탄소의 40% 이상을 흡수한다(Sabine 외, 2004; Khatiwala 외, 2009) (그림 1). 따라서 이 지역의 흡수량의 시간적 변화는 해양 전체의 이산화탄소 흡수량에 큰 영향을 미칠 수 있다. 남극해의 이산화탄소 흡수능력 변동과 관련하여 Le Quere 외, 2007 이 남극해의 이산화탄소 흡수능력이 감소하고 있다는 결과가 발표된 이후로 기후변화에 따른 이산화탄소 흡수능력 변동에 대한 관심이 증가하고 있다. 위의 모델링 결과뿐만 아니라 실제 측정치를 바탕으로 남극해의 이산화탄소 흡수가 감소할 것이라는 연구 결과도 제기되었다(Takahashi 외, 2012; Ko 외 2014). 남극해의 이산화탄소 변화량은 해양 표층에서의 이산화탄소 흡수와 흡수된 이산화탄소의 물리적인 메커니즘에 의한 저위도로의 이동에 따라 결정된다. 하지만 기후변화에 따라 이 두 가지 요인으로 기인하는 이산화탄소 흡수의 정량적인 변화에 대해서는 명확히 밝혀진 바가 없다. 이것이 많은 이산화탄소 관련 해양학자들이 남극해에 관심을 두는 가장 큰 이유이다.

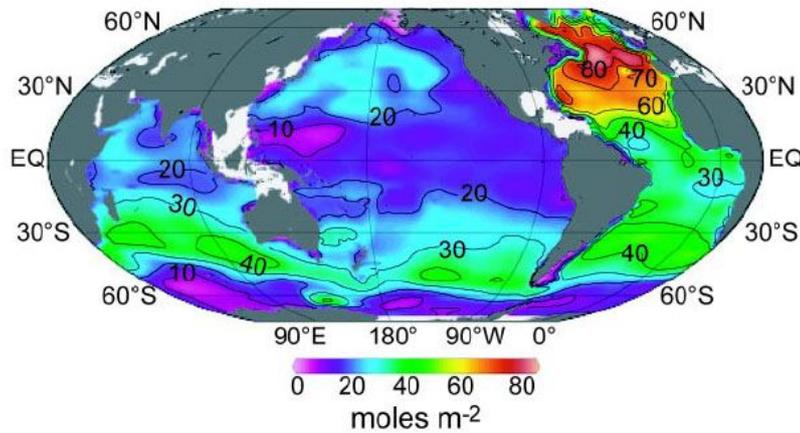


그림 1. 대기 중으로 방출된 이산화탄소 중 해양으로 녹아 들어간 양 (Sabine 외, 2004)



1-2. 연구 내용

남극해에서의 이산화탄소 흡수 연구는 크게 두 가지로 나누어 생각해 볼 수 있다. 첫째, 해양 표층 이산화탄소 흡수량과 둘째, 해양 내부 이산화탄소 흡수량의 시간적 변화 연구이다. 해양 표층에 흡수되는 이산화탄소의 양이 시간에 따라 어떻게 변화하며, 이렇게 흡수된 이산화탄소가 심층수 형성과 같은 물리적 작용에 의해 해양 내부로 이동되는 양이 시간에 따라 어떻게 변화하는 지에 관한 연구이다.

1-2-1. 해양 표층 이산화탄소 흡수량의 시간적 변화 연구

대기의 이산화탄소는 대기-해양간의 이산화탄소 분압 차이에 의해 해양 표층으로 녹아 들어 간다. 대기로부터 흡수되는 이산화탄소량은 아래 식과 같이 가스 교환 계수와 대기-해양 경계면에서의 이산화탄소 분압차의 곱으로부터 계산이 가능하다.

$$F = k (p\text{CO}_{2\text{AIR}} - p\text{CO}_{2\text{SEA}})$$

F: 대기-해양간의 이산화탄소 플럭스 (흡수량)

k: 가스 교환 계수 (풍속의 함수)

$p\text{CO}_{2\text{AIR}}$: 대기 이산화탄소 분압

$p\text{CO}_{2\text{SEA}}$: 해양 표층 이산화탄소 분압

그러므로 정확한 가스 교환 계수를 알고, 대기와 해양 표층의 이산화탄소 분압 변화를 측정하면, 흡수되는 이산화탄소량의 변화를 알 수 있다. 이 중 특히 정확한 가스 교환 계수를 아는 것이 이산화탄소 흡수량 계산에 필수적이다. 많은 해양학자들이 가스 교환 계수를 측정하고 풍속의 함수로 이를 예측하는 관계식을 개발하였지만(Liss와 Merlivat, 1986; Wanninkhof, 1992; Wanninkhof와 McGillis, 1999) 아직 풍속에 따른 가스 교환 계수의 관계식이 정확히 확립되지 않았다. 그러므로 풍속이 세고 변화가 심한 남극해에서 풍속에 따른 정확한 가스 교환 계수의 측정은 이산화탄소 흡수량 계산 뿐만 아니라 다른 여러 가지 기체의 유출입과 그 자체의 측면에서도 중요한 과학적 의미를 가진다. 정확한 가스 교환 계수의 측정은 SOLAS (Surface Ocean and Lower Atmosphere Study) 등과 같은 국제 공동 연구 프로그램들의 주요 목표 중 하나이다. 가스 교환 계수는 서로 다른 확산을 가진 두 가지 기체(SF₆, Sulfurhexafluoride와 ³He, Helium)의 시간에 따른 농도비 감소를 모니터링 함으로써 측정이 가능하다. ³He 농도는 해수 샘플링 후 질량 분석기로 측정이 가능하며, SF₆ 농도는 가스 크로마토그래피와 가스 추출 시스템을 이용 바다에서 실시간 측정이 가능하다(예, Koo 외, 2006).

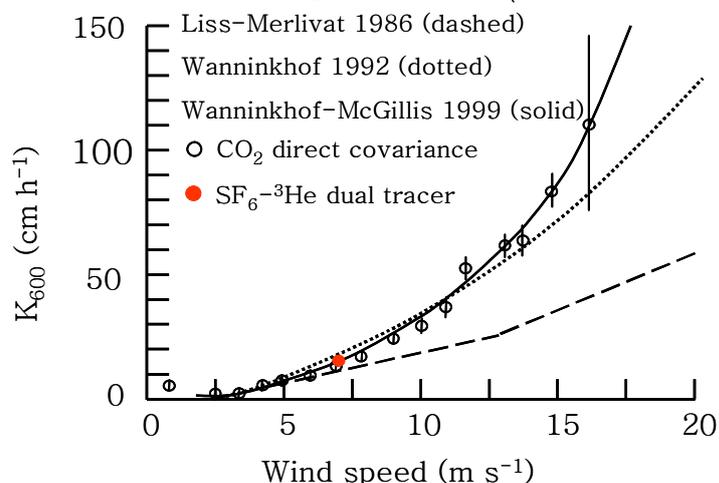


그림 2. 현재까지 알려진 풍속에 따른 가스 교환 계수

해양에서의 측정 결과, 1986년에서 2010년까지 남극해에서의 이산화탄소 분압 증가량이 대기에 비해 높은 것으로 나타났다(Takahashi 외, 2012) (그림 3). 해양의 이산화탄소의 빠른 증가속도는 이산화탄소 흡수를 감소시키므로 이에 대한 정확한 분석이 필요하다. 정기적인 대기와 해양의 이산화탄소 분압 측정과 함께 남극해에서 정확한 풍속에 따른 가스 교환 계수 관계식을 확립하면 표층에 흡수되는 이산화탄소 량의 시간적 변화를 정확히 알 수 있다. 그리고 이는 미래 기후 변화 예측과 해양 이산화탄소 흡수 연구에 있어 매우 중요한 자료로 이용될 것이다.

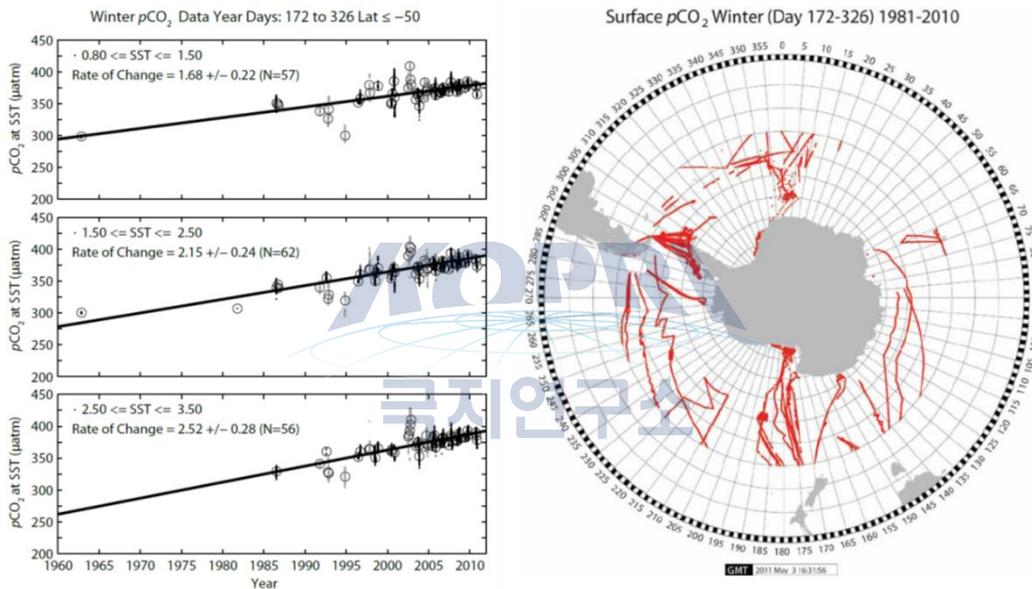


그림 3. 남극해의 이산화탄소 분압 측정위치 및 증가량(Takahashi 외, 2012)

1-2-2. 해양 내부 fossil-fuel CO₂ inventory 시간적 변화 연구

대기-해양간의 이산화탄소 분압차에 의해 해양 표층으로 흡수된 이산화탄소는 심층수나 중층수의 형성 메커니즘(겨울철 온도 감소에 의한 밀도 증가)에 의해 해양 내부로 이동된다. 남극지역은 해수 표층에서 흡수된 이산화탄소가 저위도 지역으로 빠르게 이동하는 대표적인 지역으로 이산화탄소 흡수량이 저장량에 비해 훨씬 높게 나타나는 지역이다(Caldeira 외, 2009) (그림 4). 해양 내부로 흡수된 이산화탄소 농도의 변화는 해양 표층에 녹은 이산화탄소량의 변화와 해양 내부로 이산화탄소를 이동시키는 물리적 메커니즘의 변화를 모두 반영한다.

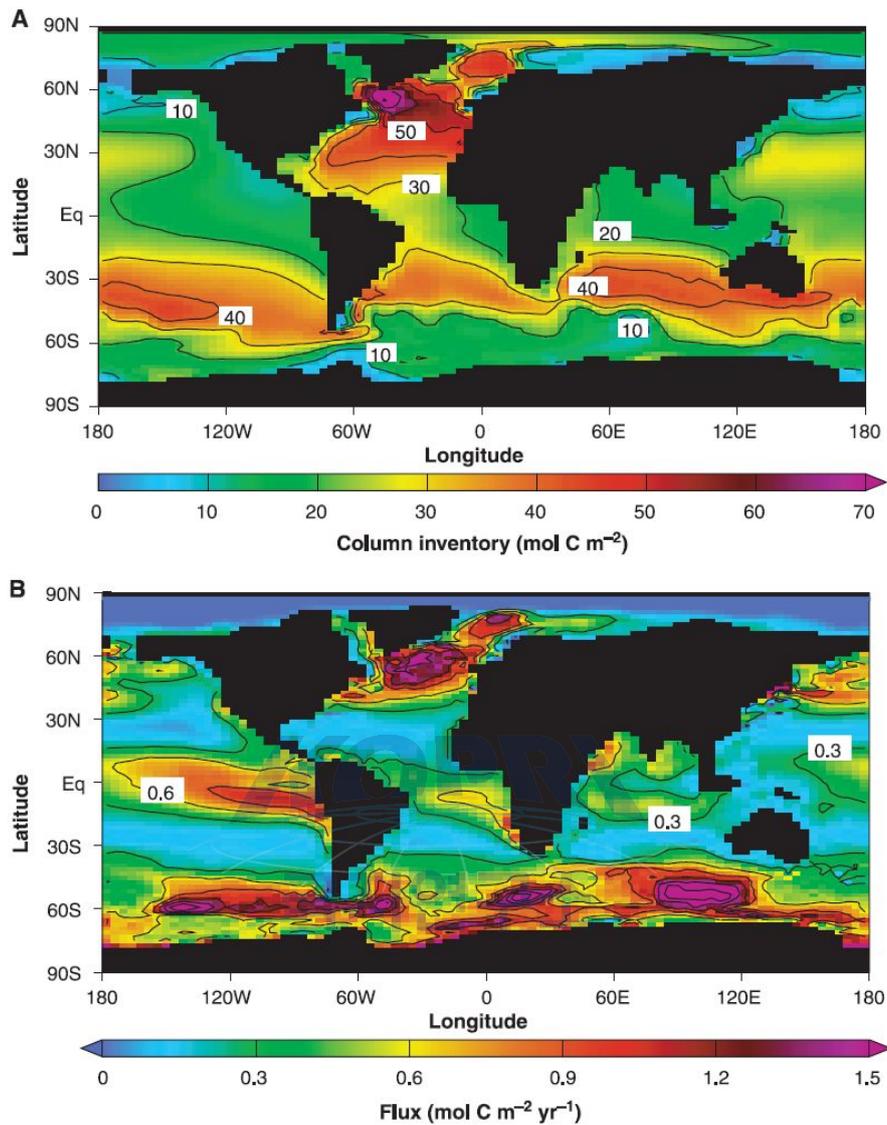


그림 4. 해양 내부의 fossil-fuel CO₂inventory(A)와 해수 표면에서의 CO₂ 기체 교환 (B) (Caldeira 외, 2009)

남극해가 흡수한 이산화탄소 총량(inventory)의 시간적 변화는 총 용존 무기 탄소(total dissolved inorganic carbon) 농도 또는 탄소 동위원소의 측정을 통해 알 수 있다. 이산화탄소 총량 변화를 계산하는 방법에는 isopycnal method, multi-parameter linear regression method 등이 있다 (Peng 외, 1998, 2003; Wallace, 1995). 그 중 등밀도선법(isopycnal method)은 거의 같은 지리적 위치에서, 같은 등밀도선상에서 측정된 두 용존 무기 탄소

농도를 유기물 산화, 탄산칼륨의 용해, 염분 변화 등을 보정한 후 직접 비교하는 방법이다. 인도양, 태평양의 이산화탄소 흡수량 변화 연구에 주로 사용되었다. 그러므로 아래 그림과 같이 하나의 경도선을 따른 남북 이산화탄소 해양 탐사(meridional carbon survey)를 정기적으로 수행함으로써 남극해의 이산화탄소 총량의 시간적 변화를 연구할 수 있다(Ko 외, 2014). 남북 이산화탄소 해양 탐사가 필요한 것은 겨울에 표층에서 형성된 심층수나 중층수가 남북 방향으로 흐르기 때문에 이산화탄소 총량의 시간적 변화를 관찰하기에 더 용이하기 때문이다.

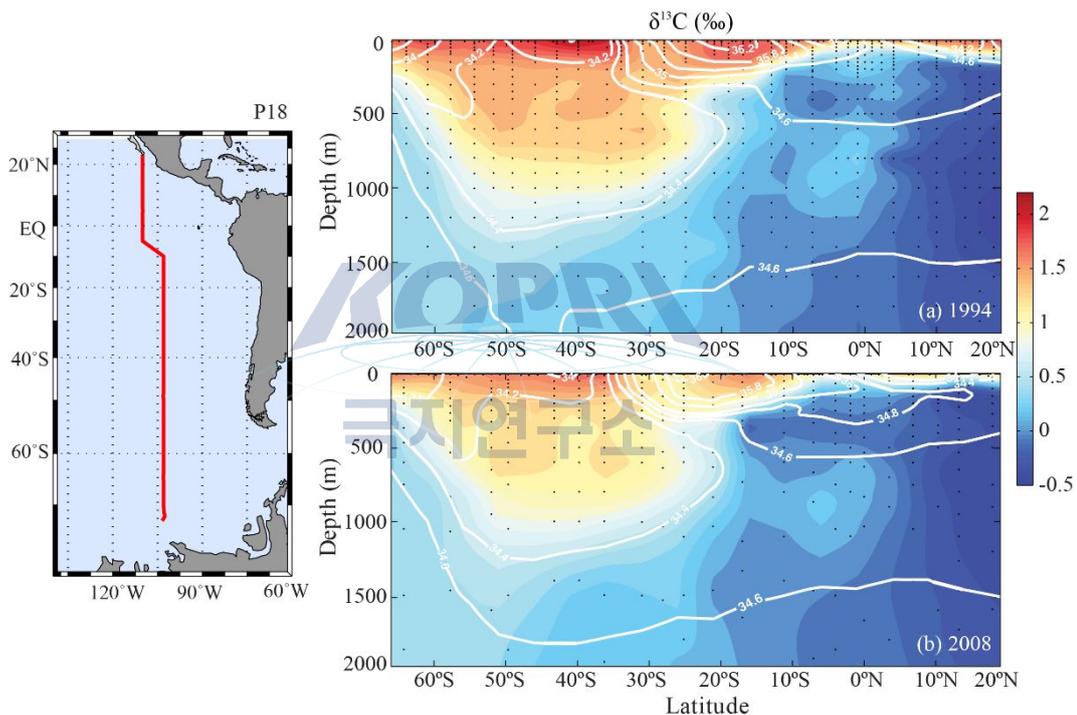


그림 5. 이산화탄소의 탄소 동위원소 측정 위치 및 1994년과 2008년의 측정 값(Ko 외, 2014)

기후변화로 인한 물리적인 변화도 남극해의 이산화탄소 흡수량 변화에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나이다. 기후변화에 따라 남극 지역의 풍속이 증가하였고 그에 따라 혼합층의 깊이가 증가할 것으로 예측되고 있다(Sallée 외, 2010)(그림 6). 혼합층의 깊이가 증가하면 이산화탄소의 분압이 높은 심층수가 표층으로 용승함에 따라 해수의 이산화탄소의 분압이 증가하고 그에

따라 이산화탄소의 흡수가 감소한다. 혼합층에서의 심층수의 기여도 증가는 남극해 표층에서의 이산화탄소 분압의 빠른 증가(Takahashi 외, 2012)와 태평양에서의 프레온 가스 감소를 통해서도 나타난다(Ko 외, 2014).

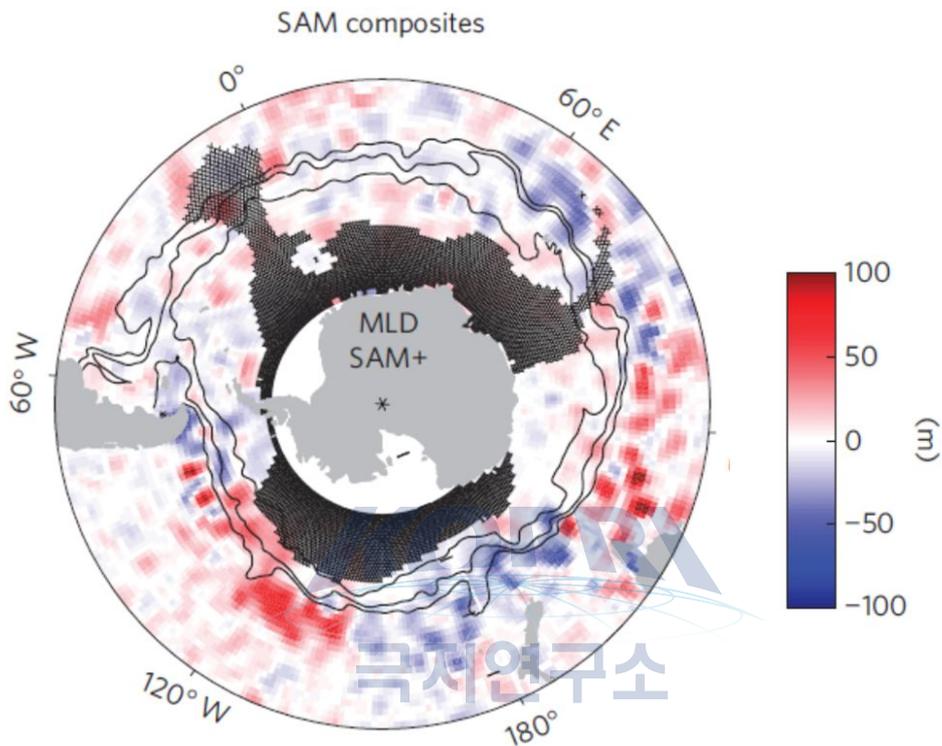


그림 6. 기후변화에 따른 혼합층 깊이 증가 (Sallée 외, 2010)

총 용존 무기 탄소 농도 측정과 함께 대기-해양 표층의 이산화탄소 분압 측정이 정기적인 해양 탐사를 통해 이루어지고 정확한 가스 교환 계수를 측정할 수 있다면, 남극해의 이산화탄소 흡수의 시간적 변화를 총체적으로 알 수 있고, 흡수 메커니즘과 변화의 원인 또한 밝힐 수 있을 것이다. 본 연구들은 미래 대기 이산화탄소 농도나 기후 변화 예측에 중요한 자료로 사용될 것이고 해양의 이산화탄소 흡수 연구에 매우 중요한 기여를 할 것이다.

1-2-3. 남극 식물플랑크톤에 의한 CO₂ 제거

플랑크톤에 의한 해양표층으로부터의 탄소 제거량을 측정하기 위해서는 표층에서 감소된 탄소총량(NCT)을 대기 해양 경계면에서의 탄소 이동량

(FAIR-SEA)_{M+1}과 심해로부터 유입된 탄소량(WDCT, KVDCT)으로 보정하면 된다.

$$\text{Carbon export}_{M+1} = (\text{AHM}_{M+1}[\text{NCTM} - \text{NCTM}_{M+1}]) + (\text{FAIR-SEA})_{M+1} + \text{WDCT} + \text{KVDCT} \quad (2)$$

여기에서 M은 계절을 의미하고, A는 해양 면적을 나타낸다. H는 혼합 층의 깊이 이다 (meter). W와 KV는 advection과 diffusion 속도를 나타낸다. 해양 표층에서 총탄소의 감소를 정량화 하기 위하여 1990년도에 전 세계 바다에서(표층부터 해저 바닥까지) 측정된 수십만 개의 탄소 농도 자료중 해양 표층에서 수집된 자료를 이용할 예정이다(그림 7).

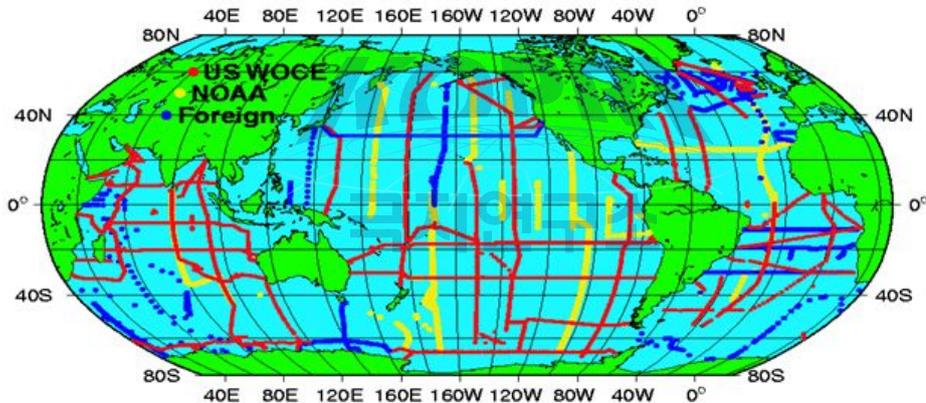


그림 7. 이 연구에 사용될 탄소 자료 위치. 이 자료는 전세계 the Ocean Atmosphere Carbon Exchange Study (OACES) (1990-1998), World Ocean Circulation Experiment (WOCE) (1990-1996) cruises 그리고 Climate Variability and Predictability (CLIVAR) (2000-2014)를 포함하고 있다.

기존 연구에서 많은 이산화탄소 측정인자들이 사용되었지만 지역적으로 자료 개수의 차이도 심하고 특히 남극이나 북극, 남반구의 자료가 부족하여 정확한 예측에는 한계가 있었다. 따라서 좀 더 정확한 이산화탄소 흡수량 계산을 위해서는 기존의 온도·이산화탄소 분압 알고리즘의 향상이 필수적이다. 1957년부터 2012년까지 측정된 약 650만개 이상의 해양 표층 이산화탄소 분압자료를 2005년에 표준화한 새로운 해양 표층 이산화탄소 분압도가 개발되

었다(Takahashi 외, 2014). 이는 기존의 1995년에 표준화한 해양 표층 이산화탄소 분압도에 비해 약 5배 이상의 많은 자료를 사용한 것으로 정확도 면에서 많이 향상된 분압도라 할 수 있다(그림 8). 해양 표층의 이산화탄소 분압과 해수 표면 온도의 관계는 위·경도에 따라 다양한 형태를 가진다. 그림 각각 3개의 같은 4°(위도)×5°(경도) 픽셀들에서의 1995년에 표준화한 해양 표층 이산화탄소 분압과 2005년에 표준화한 해양 표층 이산화탄소 분압의 해수 표면 온도와의 관계와 월별 변화를 보여준다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 새로운 이산화탄소 분압도는 지역에 따라 해양 표층 이산화탄소 분압의 월별 패턴과 해수 표면 온도와의 관계가 이전 분압도에 비해 많이 변화되었음을 알 수 있다. 이러한 향상된 자료를 바탕으로 남극지역의 탄소 제거량의 정확도를 향상시킬 예정이다

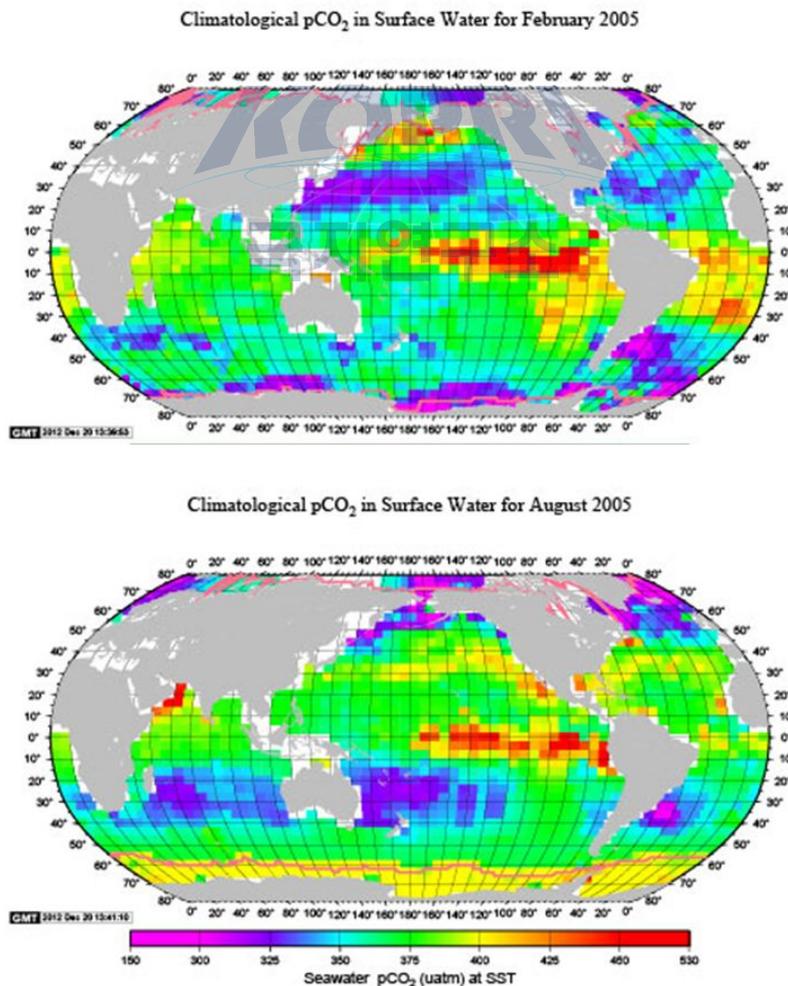


그림 8. 2005년에 표준화한 해양표층의 이산화탄소 분압(2월과 8월)

2. 온실가스 증가에 따른 환경 변화가 남극 해양 생태계에 미치는 영향 연구

2-1. 연구의 중요성

산업혁명 이후 대기 중 방출된 이산화탄소의 농도가 급격히 증가했고, 이에 맞추어 해양 표층의 이산화탄소 농도 또한 계속 증가해 왔다(Sabine 외, 2004). 해양 표층에서 이산화탄소 분압을 조절하는 것은 식물 플랑크톤이다. 식물 플랑크톤의 광합성을 통해 해양 표층의 이산화탄소 분압이 떨어지면, 더 많은 이산화탄소가 분압차에 의해 해양으로 녹아 들어간다. 따라서 식물 플랑크톤의 성장이 달라지면, 해양의 이산화탄소 흡수가 달라질 수 있다. 해양 표층의 이산화탄소 농도가 산업혁명 이후 지속적으로 증가해 왔는데, 과연 식물 플랑크톤의 성장률에는 변화가 없는 것일까? 만약 성장률이 이산화탄소 농도 증가에 따라 증가할 경우, 해양은 긍정적인 방향으로 이산화탄소 흡수가 증가하겠지만, 반대의 경우 해양의 이산화탄소 흡수 능력은 시간이 갈수록 떨어질 것이다. 실험실에서 단기적으로 이루어진 연구에서는 이산화탄소 농도의 증가에 따라 식물 플랑크톤의 광합성률이 증가하는 것으로 나타났고, 탄산칼슘 껍데기를 만드는 생물의 경우 이산화탄소 농도가 증가할수록 탄산칼슘 껍데기를 잘 만들지 못하는 것으로 나타났다(Riebesell 외, 1993, 2000). 하지만 실제 해양에서 장기적으로 이러한 변화가 일어나는지는 아직 밝혀진 바 없다. 그래서 유럽과 한국에서는 폐쇄성 생태계 시스템(mesocosm)을 이용, 이산화탄소 농도 변화에 따른 식물 플랑크톤의 광합성을 변화 연구를 하고 있다(예, Sommer 외, 2007; Kim 외, 2006). 유럽은 고위도 지역을 한국의 폐쇄성 생태계 연구는 중위도 지역을 대표한다.



그림 9. 한국의 폐쇄성 생태계 시스템 (거제 장목, 포항공대)

남극은 극지방으로 특히, 지구 온난화와 같은 환경 변화에 매우 민감한 곳이다. 현재 남극은 온도 증가에 따른 ice coverage의 변화, ice melting에 의한 염분 변화, UV radiation 증가 등과 같은 많은 변화를 겪고 있다. 남극에서의 폐쇄성 생태계를 이용한 연구는 중위도나 고위도에서의 연구들과는 달리 큰 변화를 보이는 극단적인 환경에서의 성장률 변화를 알 수 있고, 이는 남극의 환경 변화가 남극 해양 생태계에 미치는 영향을 직·간접적으로 보여줄 것이다.

2-2. 연구내용

남극에서의 폐쇄성 생태계 연구는 크게 3가지로 나누어 수행될 수 있다. 첫째, UV radiation의 증가에 따른, 둘째, 이산화탄소 농도 변화에 따른, 셋째, 온도 변화에 따른 대상 플랑크톤의 성장률 연구이다.



그림 10. 남극 세종기지 앞 폐쇄성 생태계 설치 예상 지역

남극의 해양 생태계 시스템은 남극 성층권의 오존층 파괴 현상과 함께 지속적인 변화를 겪어왔다. 이러한 오존의 파괴는 온도 상승뿐만 아니라 UV radiation을 증가시킨다. UV radiation의 증가는 플랑크톤의 광합성을 방해하며, DNA에 손상을 일으키고, 먹이사슬에 중요한 역할을 하는 polyunsaturated fatty acids (PUFAs)에 부정적 영향(산화 또는 합성 방해)을 미치는 것으로 알려져 있다 (Leu 외, 2006). 그러므로 UV radiation 변화에 따른, UV radiation의 영향이 없는, 현재의, 그리고 강화된 UV radiation의, 3가지 상태 재현을 통한 폐쇄성 생태계 시스템에서의 식물 플랑크톤의 광합성을 변화 관찰은 남극 생태계의 변화를 알아보고 예측하는데 좋은 연구가 될 수 있다.

해양에는 매우 다양한 종류의 플랑크톤들이 서식하며, 지리적 위치에 따라 종 조성이 다르고, 이산화탄소 농도에 따른 광합성률의 변화 또한 종에 따라 다를 것으로 예상되고 있다. 극지방에는 특히 규조류 (diatom)의 번성이 많이 관찰되는데 규조류는 다른 플랑크톤에 비해 무거워 이산화탄소를 해양 내부로 빠르게 제거하는 이점을 가지고 있다. 그러므로 극지방에서 규조류 등의 성장률 변화 연구는 해양의 이산화탄소 제거 측면에서 중요한 의미를 가진다. 남극해에 분포하는 식물 플랑크톤 종들을 대상으로 과거, 현재, 미래 이산화탄소 농도 재현을 통한 폐쇄성 생태계 연구는 이들 플랑크톤들이 앞으로 이산화탄소 제거에 있어서 어떤 영향을 미칠지 알 수 있는 좋은 연구가 될 것이다.

극지방은 다른 위도의 지역들에 비해 지구 온난화와 같은 환경 변화에 매우 민감하게 반응하는 곳으로, 아주 미세한 온도 상승만으로도 많은 양의 얼음이 녹아 바다로 흘러 들어가며, 온도 상승률 또한 높은 편이다. 그러므로 남극해에 서식하는 식물 플랑크톤 또한 온도 변화에 매우 민감하게 반응할 것으로 생각된다. 폐쇄성 생태계에 net heating system 을 적용하여 온도 변화에 따른 플랑크톤의 광합성률 변화를 측정하는 것 또한 하나의 중요한 연구가 될 것이다.

그리고 위의 세 가지 변화, UV radiation, 이산화탄소 농도 그리고 온도 변화의 식물 플랑크톤 광합성률에 대한 종합적, 복합적 영향 또한 폐쇄성 생태계를 통해 재현, 관찰이 가능하다.

폐쇄성 생태계 시스템은 실험실에서의 실험과는 달리 비교적 실제 해양 환경과 가장 비슷한 상태를 구현하기 위해서 개발되었다. 특히, 과거와 미래 이산화탄소 농도 환경의 구축을 위한 시스템이 필수적인데 포항공대에 서 세계 두 번째로 개발한 이 시스템은 기존 유럽의 시스템보다 미래 이산화탄소 농도 재현에 있어 더 우수하며, 해수 균일화 고성능 혼합 시스템 또한 구축하였다. 이 시스템을 이용한 폐쇄성 생태계 실험의 결과는 더욱 신뢰성을 띤다(Kim 외, 2008)



그림 11. 개발된 해수 혼합 시스템

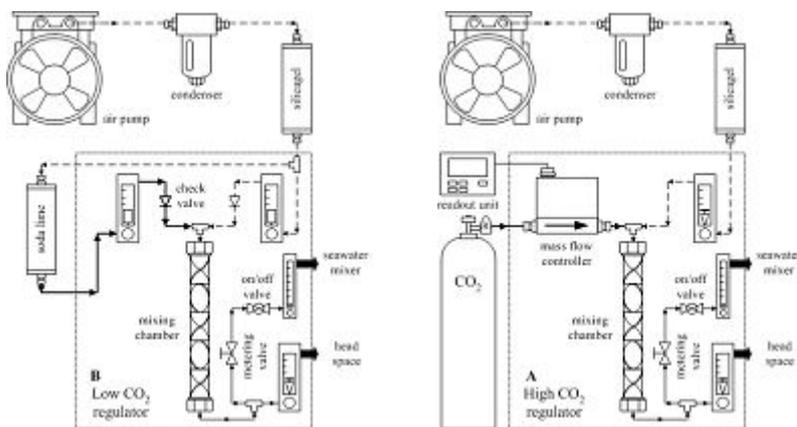


그림 12. 개발된 이산화탄소 농도 정밀 제어 시스템

3. 남극의 ice coverage (volume) 변화가 DMS(P) 발생에 미치는 영향 연구

3-1. 연구의 중요성

인간 활동이나 산업 활동 등의 영향이 상대적으로 적은 대양에서 발생하는 에어로졸의 기원은 현재 대부분 Dimethylsulfide (CH_3SCH_3 , 이하 DMS)로 추정하고 있다. 이른바 CLAW 가설(Charlson 외, 1987)은 DMS와 기후와의 관계에 대한 것으로 대기 중으로 방출된 DMS가 에어로졸이나 혹은 더 나아가 구름핵(cloud condensation nuclei)을 생성하는 원인물질이 되고, 생성된 에어로졸이나 구름핵은 알베도를 증가시켜 결과적으로 냉각효과를 가져올 수 있다는 것이다. 따라서 DMS는 지구 온난화와 같은 전 지구적인 규모의 기후 변화를 약화시킬 수 있는 역할을 할 수 있다는 면에서 매우 중요한 연구 가치를 지닌다. 특히 기후 변화와 관련된 연구 중 중요한 항목은 실제 기후 변화에 따라 DMS가 정성적 혹은 정량적으로 어떻게 변화할 것인가에 대한 예측이다. 이것은 실제 미래 기후 예측 분야에 필수적인 단서를 제공해 줄 수 있기 때문에 매우 중요하다.

현재 지구 온난화에 가장 빠르게 반응하는 지역 중 하나는 극지방으로 인공위성 등을 통해 측정된 ice coverage가 해마다 변화하고 있다는 사실이 발표되고 있기 때문이다. 이와 같은 사실 때문에 극지방의 DMS 연구 또한 매우 중요한 가치를 지니고 있으며, 만약 DMS가 실질적인 지구 냉각 효과를 가지고 있다면 그 효과가 가장 먼저 나타날 지역 또한 극지방이 될 수 있기 때문이다. 남극해에서 DMS의 생산은 sea-ice zone에서 많이 이루어지기 때문에 계절에 따른 ice coverage의 변화는 DMS 생산에 많은 영향을 준다(Curran and Jones, 2000). 따라서 이와 같은 지역에서 대기 중 DMS 농도를 지속적으로 모니터링하여 ice coverage와의 상관 관계를 연구해 봄으로써 빠르게 변화하고 있는 남극의 기후 변화에 DMS의 역할을 찾아보는 것은 매우 중요한 연구 분야이다.

3-2. 연구내용

3-2-1. 계절별(seasonal) 빙하의 변화에 따른 해수 중 DMS(P) 농도 변화 및 대기 중 DMS 농도 변화 연구

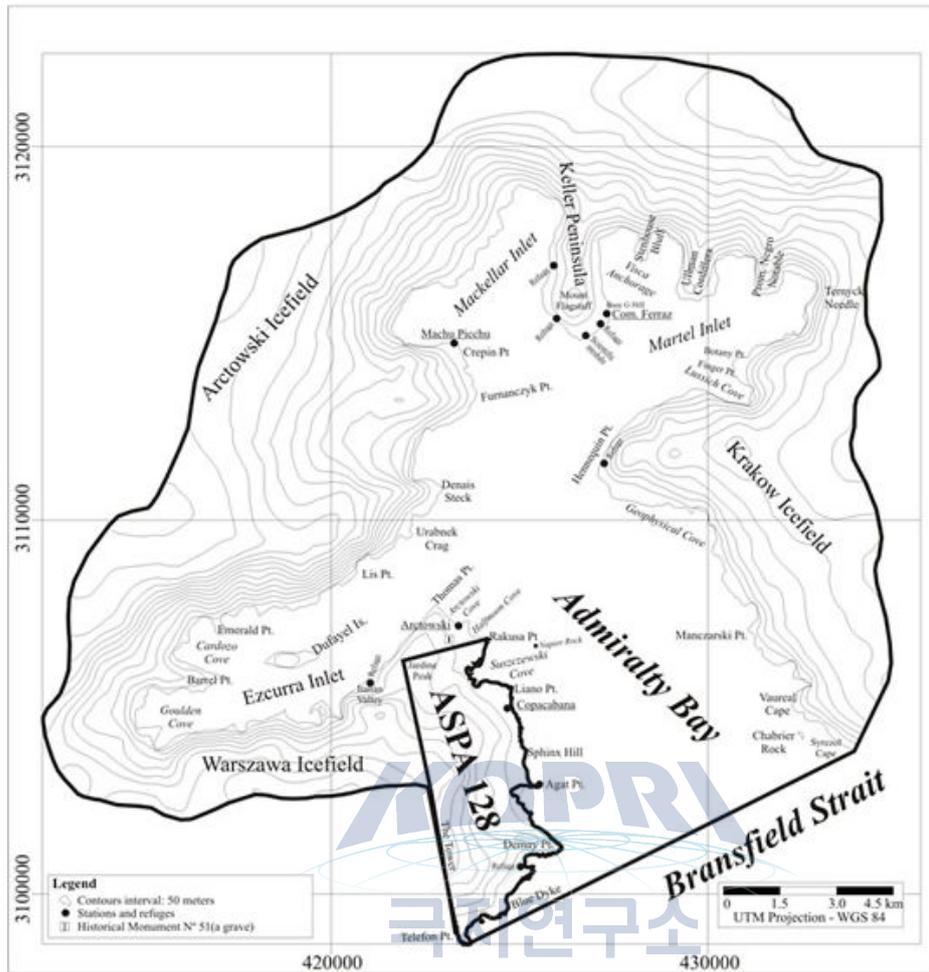


그림 13. Admiralty만

본 세부 연구 주제는 land fast ice를 대상으로 하는 연구로써 1년 동안 해빙이 생기고 녹음에 따라 표층 해수의 DMS 뿐만 아니라 DMSP 농도의 계절적 변화 그리고 이에 따른 대기 중 DMS 농도의 계절적 변화를 연구하는 것이다. DMSP는 해수 중에서 DMS의 전구 물질로 일종의 식물플랑크톤의 대사 물질 중 하나로 알려져 있다. 빙하와 관련하여 DMSP의 중요한 역할 중 하나는 DMSP가 얼음이 얼고 녹을 때 생기는 염분의 변화를 견디게 해 주는 osmolyte로서의 역할이고 또한 추위를 견디게 해 주는 cryoprotectant의 역할도 한다고 알려져 있다. 따라서 해양 생물의 계절적 변화에 따라 연중 DMSP의 계절적 변화가 클 것으로 예측된다. 이와 더불어 fast ice 내에 DMS 뿐만 아니라 DMSP가 고농도로 존재한다는 것이 밝혀졌다(예, Trevena 외 2006). 따라서 봄철 얼음이 녹을 경우 얼음 속에 존재하던

고농도의 DMS 혹은 DMSP가 계절적으로 상당히 큰 영향을 줄 수 있다. 하지만 아직 정량적인 연구는 매우 미흡한 실정인데 한 예로 이러한 고농도가 연간 대기 중 방출되는 flux에 몇 % 정도를 차지하는 지는 모르는 실정이다. 따라서 이와 같은 계절적 변화에 대한 연구는 ice coverage와 DMS(P)간의 상관관계를 밝히는 중요한 연구 분야 중에 하나가 될 수 있다. 또 다른 ice cover의 역할은 ice cover가 해양과 마찬가지로 대기 중 가스 성분을 흡수 또는 방출할 수 있다는 것이다(예, Delille 외, 2007). 예를 들어 이산화탄소의 경우 ice cover가 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 일종의 sink로써의 역할을 할 수 있다는 것이다. DMS의 경우에는 해빙의 brine 내에 존재하는 ice-algae등이 높은 농도의 DMSP를 가지고 있는 것이 밝혀진 바 있어 (Levessar 외, 1994) 잠재적으로는 해빙의 유무에 관계없이 일반 대양과 마찬가지로 지속적으로 DMS가 대기 중 방출이 될 수 있다는 가설을 충분히 생각해 볼 수 있다. 이상과 같은 연구는 킹조지섬의 Admiralty 만 내에 접근 가능한 시료 채취 지점을 몇 곳 선정하여 계절별로 지속적인 변화를 관찰하는 실험이 필요하다.

한편 이와 같은 해빙의 변화 속에서 대기 중 DMS 농도를 연속 관측하여 계절별로 어떠한 상관관계가 있는지 살펴보는 것 또한 매우 중요하다. 이를 위해 우선 대기 중 DMS농도에 영향을 줄 수 있는 해양 생물의 변화(예, 클로로필-a농도의 변화) 혹은 기상학적 요소 등을 먼저 분석하여 측정된 DMS의 농도에 영향을 준 지역에 선행 연구가 필수적으로 수행되어야 하며 이를 바탕으로 계절적인 ice coverage의 변화와 대기 중 DMS의 농도 변화 간의 관계를 연구할 수 있을 것이다.

3-2-2. 연도별(interannual) 빙하의 변화에 따른 해수 중 DMS(P) 농도 변화 및 대기 중 DMS 농도 변화 연구

위와 같은 연구를 통해 계절별 상관관계를 밝힌 후 이를 더 확장하여 연도별로 해수 중의 DMS(P) 농도와 대기 중 DMS 농도를 장기적으로 관측하는 연구가 필요하다. 이유는 이와 같은 DMS 농도 변화와 장기적인 변화가 관찰되는 ice coverage와의 상관관계를 연구하기 위해서이다. 이와 같은 연구는 특히 미래 기후 변화 예측 모델에 매우 귀중한 자료를 제공해 줄 수

있을 뿐만 아니라 앞서 밝힌 바와 같이 남극 지역에서 지구 온난화로 인해 ice coverage가 변화하는 상황 안에서 DMS가 어떠한 역할을 할 수 있을 지를 밝히는 귀중한 연구 주제가 될 수 있다.

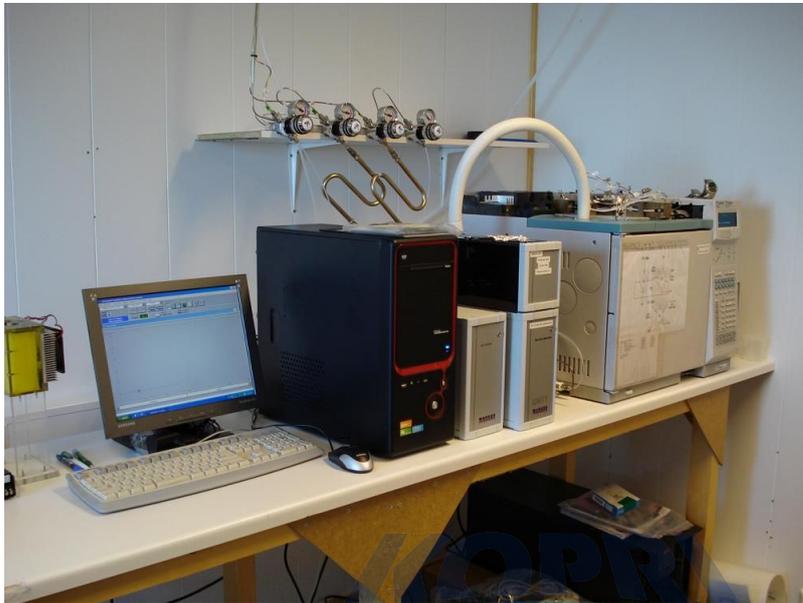


그림 14. 북극 Zeppelin 기지 내 DMS 측정 시스템 (남극에서도 동일한 시스템으로 DMS 모니터링 예정)

4. 참고문헌

- Sabine, C. L., et al. (2004), The oceanic sink for anthropogenic CO₂, Science, 305, 367-371.
- Khatiwala, S., F. Primeau, and T. Hall (2009), Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean, Nature, 462(7271), 346-349.
- Le Quéré, C., C. Rödenbeck, E. T. Buitenhuis, T. J. Conway, R. Langenfelds, A. Gomez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, and N. Metzl (2007), Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change, Science, 316,

1735-1738.

- Takahashi, T., C. Sweeney, B. Hales, D. W. Chipman, T. Newberger, J. G. Goddard, R. A. Iannuzzi, and S. C. Sutherland (2012), The Changing Carbon Cycle in the Southern Ocean, *Oceanography*, 25(3), 26-37.
- Ko, Y. H., K. Lee, P. D. Quay, and R. A. Feely (2014), Decadal (1994 - 2008) change in the carbon isotope ratio in the eastern South Pacific Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 28(8), 775-785.
- Liss, P. S., and L. Merlivat (1986), Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis. In *The role of air-sea exchange in geochemical cycling*, edited by P. Buat-Ménard, pp.113-129, D. Reidel, Norwell, Mass.
- Wanninkhof, R. (1992), Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *J. Geophys. Res.*, 97, 7373-7382.
- Wanninkhof, R., and W. R. McGillis (1999), A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1889-1892.
- Koo, C.-M., K. Lee, M. Kim, and D.-O. Kim (2006), Automated system for fast and accurate analysis of SF₆ injected in the surface ocean, *Environ. Sci. Technol.*, 39, 8427-8433.
- Caldeira, K., and P. B. Duffy (2000), The role of the Southern Ocean in uptake and storage of anthropogenic carbon dioxide, *Science*, 287(5453), 620-622.
- Peng, T.-H., R. Wanninkhof, J. L. Bullister, R. A. Feely, and T. Takahashi (1998), Quantification of decadal anthropogenic CO₂ uptake in the ocean based on dissolved inorganic carbon measurements, *Nature*, 396, 560-563.
- Peng, T.-H., R. Wanninkhof, and R. A. Feely (2003), Increase of anthropogenic CO₂ in the Pacific Ocean over the last two decades, *Deep Sea Res. Part II*, 50, 3065-3082.

- Wallace, D. W. R. (1995), Monitoring global ocean carbon inventories, OOSDP Backgroun drep. 5, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Sallée, J., K. Speer, and S. Rintoul (2010), Zonally asymmetric response of the Southern Ocean mixed-layer depth to the Southern Annular Mode, *Nature Geoscience*, 3(4), 273-279.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, D. W. Chipman, J. G. Goddard, T. Newberger and C. Sweeney. 2014. Climatological Distributions of pH, pCO₂, Total CO₂, Alkalinity, and CaCO₃ Saturation in the Global Surface Ocean. ORNL/CDIAC-160,NDP-094. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. doi:10.3334/CDIAC/OTG. NDP094
- Riebesell, U., D. A. Wolf-Gladrow, and V. Smetacek (1993), Carbon dioxide limitation of marine phytoplankton growth rates, *Nature*, 361, 249-251.
- Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, P. D. Tortell, R. E. Zeebe, and F. M. M. Morel (2000), Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂, *Nature*, 407, 364-366.
- Sommer, U., N. Aberle, A. Engel, T. Hansen, K. Lengfellner, M. Sandow, J. Wohlers, E. Zöllner, and U. Riebesell (2007), An indoor mesocosm system to study the effect of climate change on the late winter and spring succession of Baltic Sea phyto- and zooplankton, *Oecologia*, 150, 655-667.
- Kim, J.-M., K. Lee, K. Shin, J.-H. Kang, H.-W. Lee, M. Kim, P.-G. Jang, and M.-C. Jang (2006), The effect of seawater CO₂ concentration on growth of a natural phytoplankton assemblage in a controlled mesocosm experiment, *Limnol. Oceanogr.*, 51(4), 1629-1636.
- Leu, E., S.-Å. Wängberg, A. Wulff, S. Falk-Petersen, J. B. Ørbæk, and D.

- O. Hessen (2006), Effects of changes in ambient PAR and UV radiation on the nutritional quality of an Arctic diatom (*Thalassiosira antarctica* var. *borealis*), *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 337, 65-81.
- Kim, J. M., K. Shin, K. Lee, and B. K. Park (2008), In situ ecosystem based carbon dioxide perturbation experiments: Design and performance evaluation of a mesocosm facility, *Limnol. Oceanogr. Methods*, 6(6), 208-217.
- Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O. and Warren, S. G. (1987), Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, 326, 655-661.
- Curran, M. A., and G. B. Jones (2000), Dimethyl sulfide in the Southern Ocean: seasonality and flux, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 105(D16), 20451-20459.
- Vallina, S. M., R. Simó, and M. Manizza (2007), Weak response of oceanic dimethylsulfide to upper mixing shoaling induced by global warming, *PNAS*, 104(41), 16004-16009.
- Trevena, A. J., and G. B. Jones (2006), Dimethylsulphide and dimethylsulphoniopropionate in Antarctic sea ice and their release during sea ice melting, *Mar. Chem.*, 98, 210-222.
- Delille, B., B. Jourdain, A. V. Borges, J.-L. Tison, D. Delille (2007), Biogas (CO₂, O₂, dimethyl sulfide) dynamics in spring Antarctic fast ice, *Limnol. Oceanogr.*, 52(4), 1367-1379.
- Levasseur, M., M. Gosselin, and S. Michaud (1994), A new source of dimethylsulfide (DMS) for the arctic atmosphere-ice diatoms, *Mar. Biol.*, 121, 381-387.

부록 5. 남극해 식물플랑크톤의 탄소섭취율 평가

1. 서론

1-1. 연구 목적

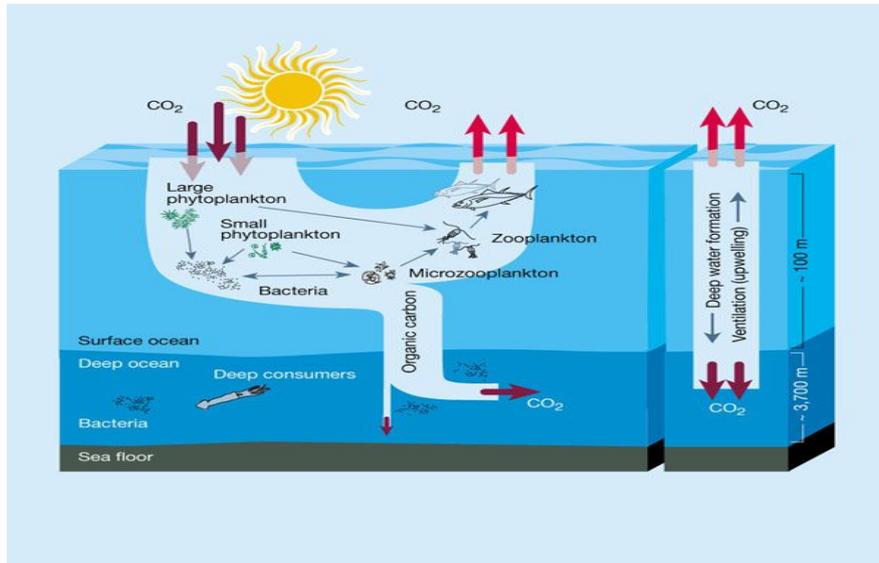
이산화탄소 저장소로서의 남극해의 기능 및 저장 기작을 이해하기 위해서는 생물생산에 의해 흡수되는 이산화탄소량과 이들이 심해로 유출되는 양의 정량적인 평가가 반드시 필요하다. 이에 해양 기초생산자인 식물플랑크톤에 의해 이용되는 탄소섭취율을 측정 및 심해로 유출되는 내보내기 생산을 추정함으로써, 대기 이산화탄소 흡수, 저장원으로서 남극해 생물생산의 역할을 규명해 보고자 한다.

1-2. 연구 필요성

전 지구적인 기후변화에 따라 해양이 이산화탄소로 대표되는 온실기체의 거동이나 지구변화에 있어서 어떠한 역할을 하는지에 대한 관심이 최근 고조되고 있다. 남극해는 대기와 해양 사이의 열 교환, 심층수 생성, 생물학적 펌프로써 해양에서 아주 중요한 역할을 하는 지역으로 (Siegenthaler and Sarmiento, 1993), 전 대양 이산화탄소 흡수량의 약 20%를 차지할 정도로, 전 지구 탄소 순환에 있어서 중요한 역할을 하고 있다 (Takahashi et al., 2009). 따라서, 이산화탄소 거동 및 저장 기작을 이해하기에 남극해는 매우 적합한 연구 해역이라고 할 수 있다.

해양으로 흡수되는 많은 양의 대기 이산화탄소는 해양생물의 일차생산에 이용되고 있으며, 생물활동이 정지된 후 해저면에 퇴적되어 저장됨으로써, 대기 이산화탄소 흡수 역할을 하게 되는 생물학적 펌프 역할을 하게 된다. 따라서, 해양 기초생산자인 식물플랑크톤의 일차생산 (탄소섭취율) 변동은 남극해의 이산화탄소 제거능 및 저장소로서의 기능에 영향을 줄 수밖에 없다. 이에 식물플랑크톤에 의해 흡수되는 정량적인 탄소섭취율을 도출하고 심해로 유출되는 양의 파악과 이들의 변동을 조절하는 요인을 이해하는 것이 필요

하다.



<해양의 Biological Pump>

식물플랑크톤의 탄소섭취율의 변동과 이를 조절하는 요인을 이해하기 위해서는 다양한 해양 환경요인들에 대한 이해가 우선적으로 필요하다. 일반적으로 식물플랑크톤의 생산은 빛, 온도뿐만 아니라 질소와 인 같은 주요 영양염의 농도, 그리고 철과 같은 미량 원소의 영향을 받게 되지만 (Harrison and Cota, 1991; Reay et al., 2001), 복잡한 해양환경요인들에 의해 결정되는 특성상 다양한 해양환경요인들을 이해하여 생물생산과의 관련성을 파악해 보는 접근이 필요할 것이다. 특히, 해빙 변동과 관련하여, 남극해의 해빙은 북극해와는 달리 평균 해빙 면적에서 주목할 만한 트렌드가 보이지는 않지만, 해빙의 양과 분포는 최근 들어 큰 연간 변동성을 보이고 있다 (Cavalieri and Parkinson 2008). 특히 동남극해와 달리 서남극해의 빙상 (West Antarctic Ice Sheet: WAIS) 의 크기와 얼음의 두께는 계속 감소하는 추세이다 (Rignot et al., 2008). 이러한 해빙 변동은 해양생물들의 성장 및 분포, 생산성에도 변화를 가져오게 된다. 최근 연구에 따르면, 서남극 반도 (western Antarctic Peninsula: WAP)의 기후가 cold-dry polar-type에서 warm-humid sub-Antarctic-type의 기후로 바뀌고 있고, 이것이 서남극 반도 대륙붕 주변에서 해양 생물 생산에서의 변화와도 관련이 깊다고 보고되었다 (Montes-Hugo et al., 2009).

Table 3. Yearly Trends of Sea Ice Extent and Sea Ice Area for Both the 20-Year Period Previously Studied [Zwally *et al.*, 2002] and the 28-Year Period Reported Here^a

Sector	Sea Ice Extent 20-Year Trend		Sea Ice Extent 28-Year Trend		Sea Ice Area 20-Year Trend		Sea Ice Area 28-Year Trend	
	10 ³ km ² a ⁻¹ (R)	Percent Decade ⁻¹	10 ³ km ² a ⁻¹ (R)	Percent Decade ⁻¹	10 ³ km ² a ⁻¹ (R)	Percent Decade ⁻¹	10 ³ km ² a ⁻¹ (R)	Percent Decade ⁻¹
SH	10.95 ± 6.95 (1.58)	0.96 ± 0.61	11.5 ± 4.6 (2.50)	1.0 ± 0.4	10.4 ± 6.4 (1.63)	1.2 ± 0.7	10.0 ± 4.0 (2.50)	1.2 ± 0.5
Weddell	3.9 ± 9.20 (0.42)	0.92 ± 2.19	3.3 ± 5.6 (0.59)	0.8 ± 1.4	1.6 ± 7.4 (0.22)	1.0 ± 2.2	2.1 ± 4.5 (0.47)	0.6 ± 1.4
Indian	-0.52 ± 4.51 (0.12)	-0.28 ± 2.45	3.5 ± 2.6 (1.35)	1.9 ± 1.4	-1.3 ± 3.9 (0.33)	-9.4 ± 2.9	2.2 ± 2.3 (0.96)	1.7 ± 1.7
W. Pacific	3.30 ± 3.68 (0.90)	3.13 ± 3.14	1.6 ± 2.2 (0.73)	1.4 ± 1.9	4.7 ± 2.7 (1.74)	5.9 ± 3.3	2.4 ± 1.7 (1.41)	3.1 ± 2.1
Ross	17.60 ± 7.56 (2.33)	6.45 ± 2.77	11.4 ± 4.6 (2.48)	4.4 ± 1.7	14.4 ± 6.1 (2.36)	6.9 ± 2.9	8.9 ± 3.6 (2.47)	4.4 ± 1.8
Bellingshausen/ Amundsen	-13.29 ± 5.26 (2.53)	-9.18 ± 3.63	-8.3 ± 2.9 (2.86)	-5.4 ± 1.9	-9.0 ± 4.1 (2.20)	-8.8 ± 4.0	-5.6 ± 2.2 (2.55)	-5.2 ± 2.1

^aBoth are given as 10³ km² a⁻¹ and as % decade⁻¹. R is the ratio of the absolute value of the trend to its standard deviation. Assuming a null hypothesis of zero trend and 26 degrees of freedom, R values in bold indicate a statistical significance of 95%; values in italicized bold indicate a significance level of 99%.

Cavalieri and Parkinson (2008)

<남극해 각 지역에서의 해빙 면적의 연간 변화 트렌드>

식물플랑크톤은 크기와 종에 따라 탄소섭취율의 차이가 있기 때문에, 남극해 식물플랑크톤 탄소섭취율에 주로 기여하는 주요종의 파악은 반드시 필요하다. 이는 향후 남극해 환경변화로 인하여 군집구조의 변화 (크기 및 우점종 변화)가 나타난다면, 탄소섭취율의 변동을 가져올 수 있고, 남극해의 전반적인 탄소 제거기능에도 영향을 끼칠 수밖에 없다.

남극해는 해양환경의 변화가 최근 급변하는 지역으로, 식물플랑크톤의 탄소섭취율 역시 계절적 및 연간 변동성이 매우 크고 그로 인하여 장기간의 자료 축적을 통해 변동성을 이해하는 것이 필요할 것이다. 장기간의 관측 자료와 위성자료를 상호 보완하게 되면 식물플랑크톤 생체량 및 탄소섭취율의 계절적, 연간 변동성 파악에 용이하고 이를 통하여 이산화탄소 저장고로서의 남극해의 기능 및 생물생산의 역할에 대한 이해 능력 증대가 기대된다.

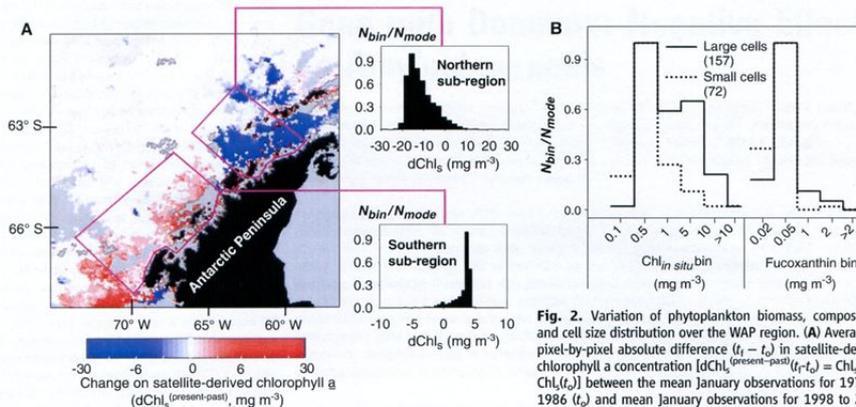


Fig. 2. Variation of phytoplankton biomass, composition, and cell size distribution over the WAP region. **(A)** Average of pixel-by-pixel absolute difference ($t_t - t_p$) in satellite-derived chlorophyll a concentration [$dChl_a^{(present-past)}(t_t - t_p) = Chl_a(t_t) - Chl_a(t_p)$] between the mean January observations for 1978 to 1986 (t_p) and mean January observations for 1998 to 2006 (t_t). Positive (negative) $dChl_a$ corresponds to an increase (decrease) of Chl_a with respect to the 1970s. Negative (by a factor of ~ 2 , northern subregion, upper histogram) and positive (by a factor of ~ 1.5 , southern subregion, lower histogram) trends in Chl_a are evident in the satellite data. N_{bin}/N_{mode} is the relative frequency of observations per bin, normalized by the mode. Gray pixels indicate areas without data or without valid geophysical retrieval due to cloud and sea ice contamination; black pixels indicate land. **(B)** Histograms of contribution of diatoms (fucoxanthin marker) and phytoplankton communities dominated by large ($>20 \mu m$) versus small ($<20 \mu m$) cell diameter to total in situ chlorophyll a concentration ($Chl_{in situ}$). Phytoplankton cell size spectra were computed from satellite imagery (1998 to 2006) (t_t), and phytoplankton pigments were measured over the northern and southern WAP subregions and during 1993 to 2006 Palmer-LTER cruises. Number of samples used to construct each histogram shown in parentheses.

Montes-Hugo *et al.* (2009)

<서남극 반도 지역에서 식물플랑크톤 생체량과 종조성 크기의 변화>

2. 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 연구현황

- 가. 전 지구 기후변화와 관련된 해양조사로 우리나라 주변해역인 동해에서 EAST-1, EAST-2 프로젝트를 통해 해양-대기 이산화탄소 교환 연구를 진행하고 있으며, 이를 통하여 기후변동에 따른 동해의 속성 변화를 장기적으로 관측하고 있음
- 나. 쇄빙연구선 아라온호의 도입으로 2010년부터 다학제 해양관측연구가 남극에서 진행되고 있음
- 다. 남북극 해역에서 중장기 환경변화에 대한 플랑크톤 지표종 발굴 연구나 해빙 변동에 따른 일차 생산 연구가 진행된 바 있음
- 라. 남극 세종기지 주변 모니터링의 일환으로 표층수 미세조류의 계절적 변동이 연구된 바 있음
- 마. 해양기초생산자인 식물플랑크톤의 일차생산 연구는, 주로 1차 소비자의 주요 먹이원으로서의 연구나, 생리/생태 연구로 기후변화와 관련한 생태계 변동에 초점이 맞춰져 있음
- 바. 해양으로 흡수되는 많은 양의 이산화탄소는 해양생물의 일차생산에 이용되고 있지만, 대기중의 이산화탄소 흡수원으로서의 생물생산의 역할 규명에 대한 연구는 아직 부족한 실정임
- 사. 남극해의 이산화탄소 흡수 및 저장 기작을 연구하기 위하여 생물펌프의 주요생물인 플랑크톤 연구가 반드시 필요함

2-2. 국외 연구현황

- 가. 전세계 주요 해역을 대상으로 하는 국제 프로그램인 GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics)에서도 남극해역은 주 목표 해역의 하나임
- 나. 독일의 Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research는 남극 순환해류를 통과하는 해역에서 쇄빙연구선 Polarstern을 이용하여 표층 해양 생태계 기능 연구를 거의 매해 수행하고 있음
- 다. 일본은 극지연구소가 남극해 소화기지 앞에서 연구를 수행하며, 북극

권에서는 일본해양과학기구(JAMSTEC)와 미라이호 등의 대형 연구선을 동원한 캐나다, 미국과의 공동연구로 북극해빙의 변화에 따른 전 세계적인 기후 반응 연구를 수행하고 있음

라. 중국의 극지연구소는 2년 주기로 장성기지와 중산 기지 사이의 환남극 해역에서 종합 해양생태계 조사를 수행하고 있으며, 북극해에서는 북극권 기후변화에 따른 아시아 지역의 기후 변화 연관성 연구를 수행하고 있음

마. 미국은 쇄빙연구선 Palmer호를 통해 남극생태계 연구가 진행중임

바. 영국은 남극연구소 (BAS), 쇄빙연구선 James Clark Ross 호를 이용한 남극해 결빙해역에서 연구를 수행하고 있음

3. 연구 내용

3-1. 입자태 유기탄소 (Particulate Organic Carbon) 분포 파악

생물생산에 의해 만들어진 생물기원 유기물들은 입자성 부유물의 형태로 서서히 가라앉아 해저로 이동하기 때문에, 대기 이산화탄소 흡수원으로서 해양 생물생산의 역할을 이해하기 위해서는 수층에 존재하는 입자성 유기탄소의 양과 분포를 이해하는 것이 필요하다.

가. 남극해 입자태 유기탄소량 측정 및 지역별 차이 이해

나. 수심별 입자태 유기탄소의 분포 패턴 파악

3-2. 탄소동위원소 tracer를 이용한 남극해 식물플랑크톤의 탄소섭취율 파악

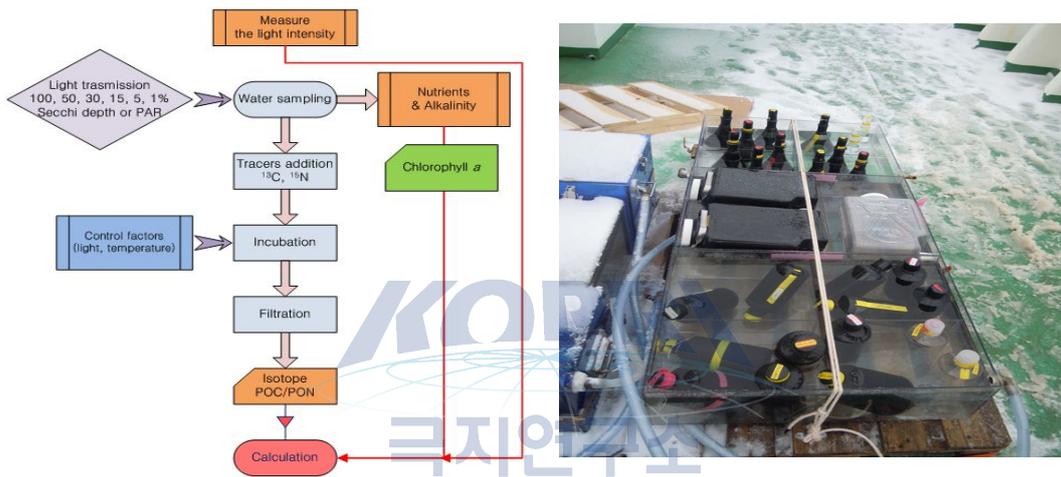
해양 표층에서 기체교환을 통해 녹아든 이산화탄소는 유광층내에서 식물플랑크톤들이 광합성을 하면서 흡수되고, 전 수층에서 동물들의 호흡이나 박테리아의 분해를 거쳐 재방출하는 과정을 거치게 된다. 식물플랑크톤의 일차생산 가운데 유광층에서 해양 내부로 전송되는 탄소 플럭스 (biological pump)를 정량화하기 위해서는 식물플랑크톤의 탄소섭취율에 대한 시공간적 분포 및 변동에 대한 이해가 필요하다.

가. 선상배양을 통한 식물플랑크톤 탄소섭취율 측정

- Secchi Disk 혹은 PAR sensor를 통한 표층 빛 광도의 100%, 50%,

30%, 12%, 5%, 1%의 수심을 결정

- 해수채취기를 통해 각 광랑별 수심의 해수를 채취하여 안정동위원소 Carbon 13을 Polycarbonate incubation bottle에 주입
- 배양기에서 자연광아래 3-5시간을 배양
- GF/F 여과지를 이용하여 여과한 후 냉동고 (-80°C)에 보관
- 실험실에서 전처리 (HCl fume)후 질량분석기를 이용하여 탄소안정동위원소 조성 분석



<탄소섭취율 측정 방법>

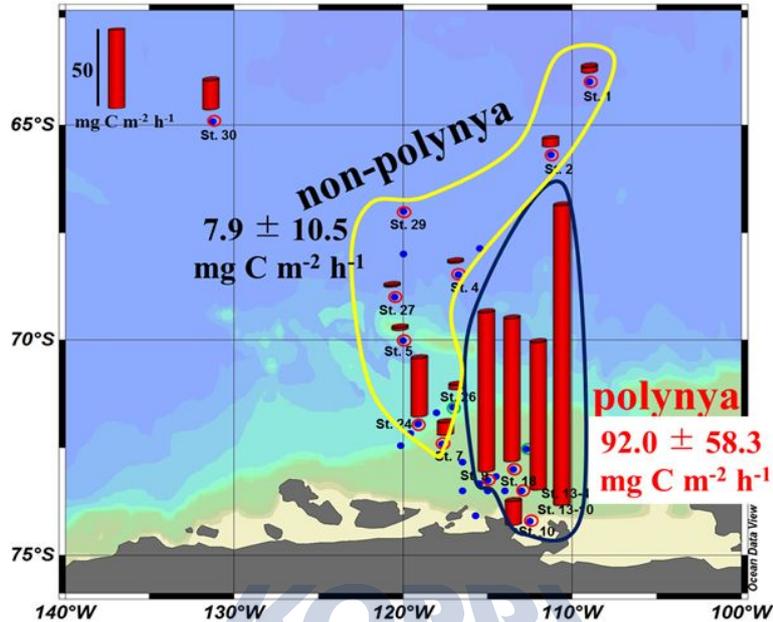


<질량 분석기: ThermoFinnigan Delta+XL mass spectrometer>

나. 수심별 탄소섭취율 비교 분석

유광층 (Euphotic Zone)내 깊이별 탄소섭취율 차이 비교

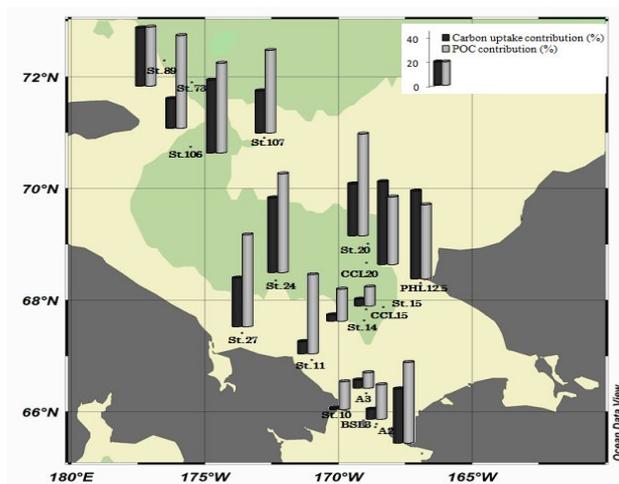
다. 지역별 탄소섭취율 특성 파악



<남극 아문젠해 polynya 와 non-polynya 에서의 탄소섭취율 비교>

라. 식물플랑크톤 크기별 탄소섭취율 비교 분석

- 식물플랑크톤 사이즈별 (large: >5 μ m, small: <5 μ m) 탄소섭취율 비교를 통하여 전체 탄소섭취율에 대한 식물플랑크톤 크기별 기여도 파악
- 향후 군집구조 변동에 의한 탄소섭취율 변동 가능성 예측



<북극 척치해에서 크기가 작은 식물플랑크톤 (<5 μ m)의 탄소섭취율과 입자태 유기탄소에 대한 기여도>

3-3. 탄소섭취율 변동 조절 요인 이해

생물생산 변동성의 원인이 될 수 있는 해양 환경요인들 (물리적, 화학적 조절인자)을 이해함으로써 궁극적으로 남극해에서 식물플랑크톤의 탄소섭취율 변동을 조절하는 주요 조절 인자를 도출하고자 한다.

가. 물리, 화학적 조절인자 이해

(1) 물리적인 조절인자 파악

수온, 염분, 밀도 분포 파악

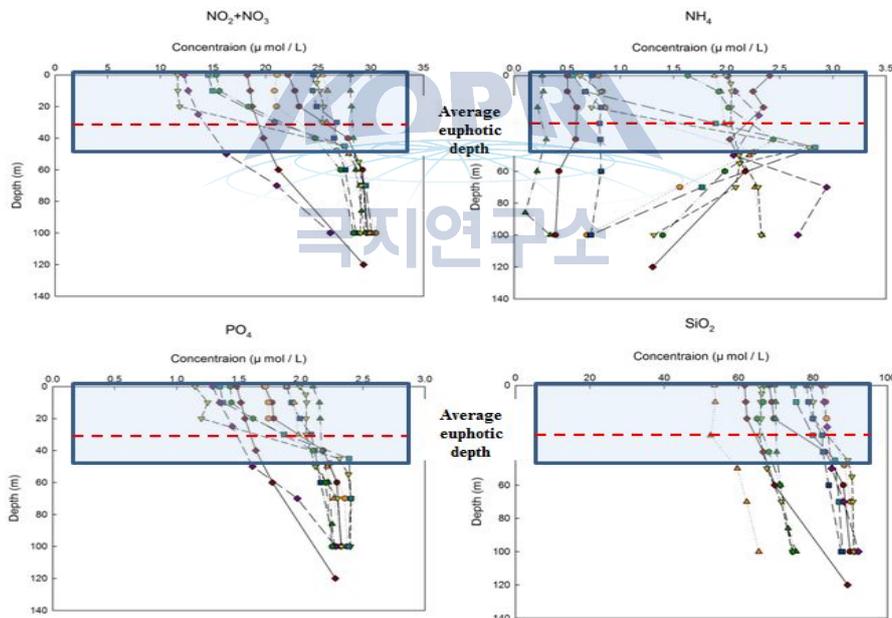
- 혼합층과 유평층 깊이 파악

- PAR sensor를 이용한 표층 빛 세기 연속 측정

(2) 화학적인 조절인자 파악

- 수층내 영양염류 (질산염, 암모늄, 규산염, 인산염) 농도 파악

- 질산염 농도구배로부터 질산염약층 깊이 (nitracline) 계산



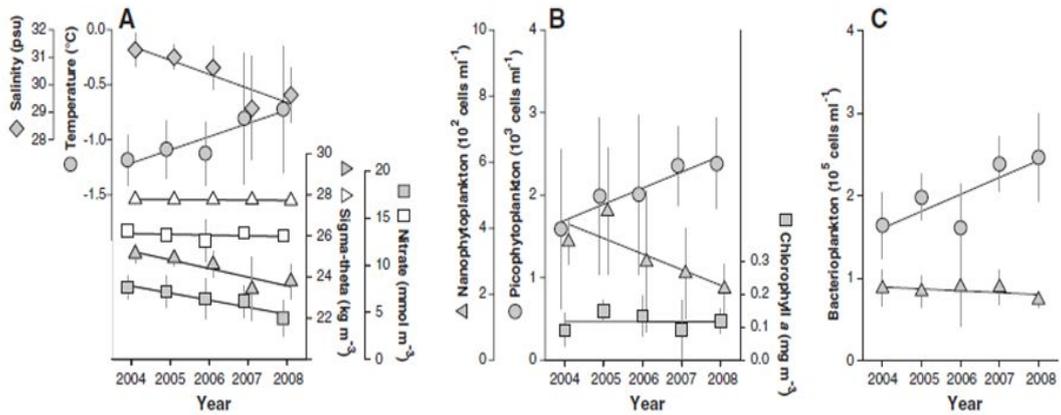
<남극 아문젠해에서의 수층 내 높은 영양염 농도>

나. 탄소섭취율 변동 주요 조절 요인 도출

- 물리, 화학적 조절인자와 탄소섭취율간의 관련성을 파악함으로써, 남극해 식물플랑크톤의 탄소섭취율 변동을 조절하는 주요 인자를 도출

3-4. 15N을 이용한 남극해 내보내기생산 추정

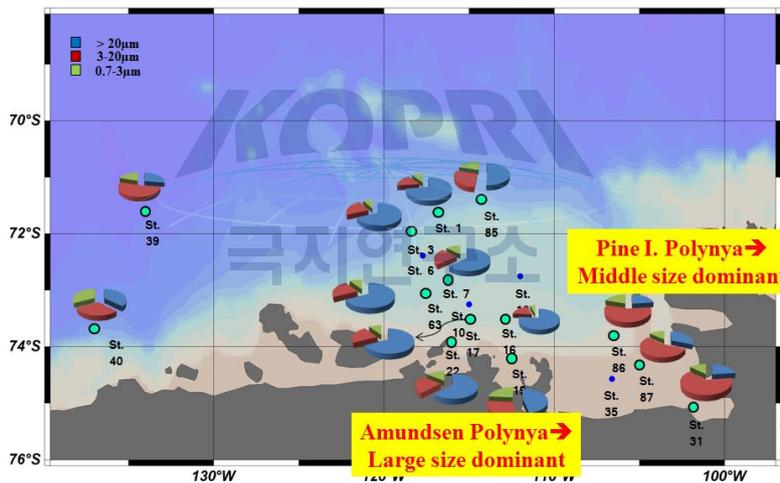
생물펌프를 대변하는 내보내기생산은 표층에서 만들어져 표층아래로 제거된 유기물을 의미하며 주로 sediment trap 을 이용하여 직접 표층으로부터



<북극 캐나다베이진에서 해양환경변화로 인한 플랑크톤 군집구조의 변화>

가. 총 엽록소 농도 측정을 통한 식물플랑크톤 생물량 파악

나. 크기별 엽록소 농도 측정을 통하여 식물플랑크톤 크기별 군집 분포 특성 파악



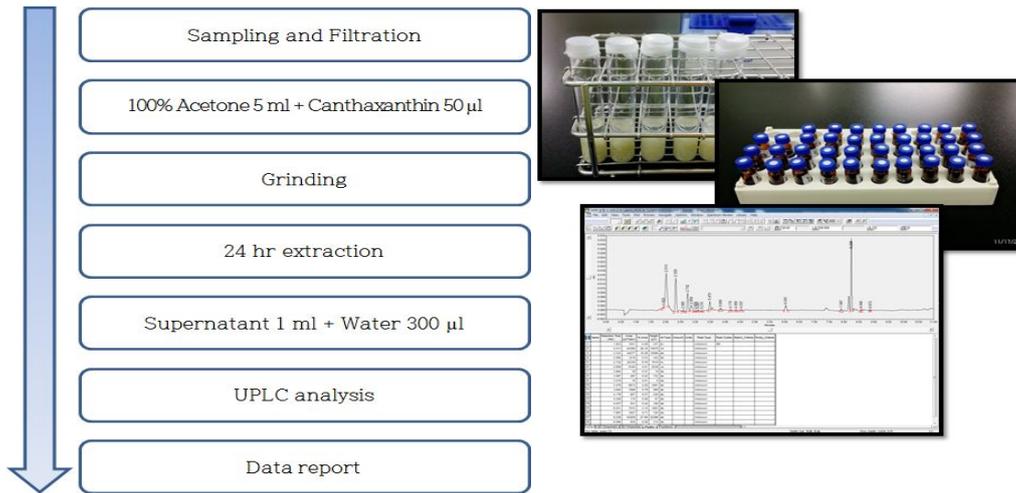
<남극 아문젠해 폴리냐 지역과 파인아일랜드 폴리냐 지역에서의 식물플랑크톤 크기별 군집 조성 비교>

다. 탄소섭취율에 기여하는 주요종 파악을 위해 고성능 액체크로마토그래피 (High Performance Liquid Chromatography)를 활용한 식물플랑크톤 종조성 파악

혼합색소를 단일색소로 분리후 식물플랑크톤 정량 정성 분석

CHEMTEX program 활용 식물플랑크톤 군집별 기여율 추정

식물플랑크톤 군집이 가지고 있는 마커색소의 상대적인 비 값을 산정하여 총 엽록소 농도값에 대한 군집별 기여율 추정

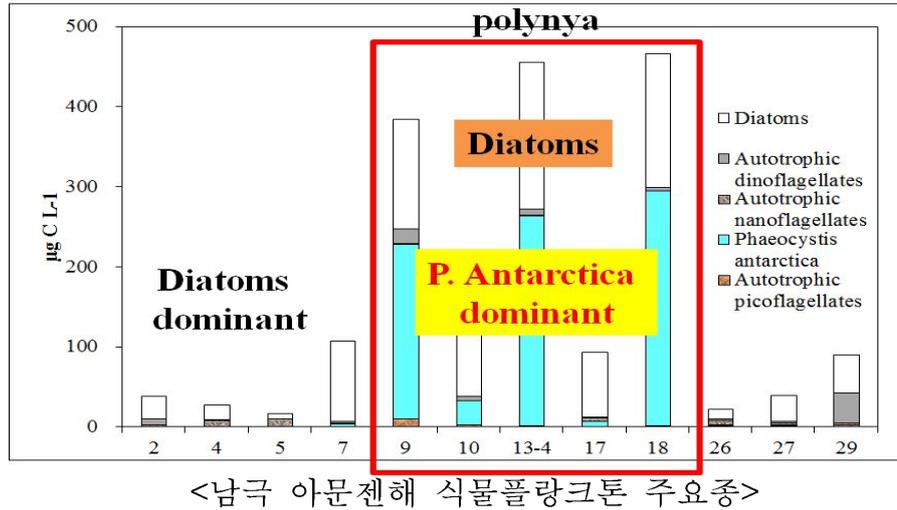


<HPLC를 이용한 식물플랑크톤 색소 분석 모식도>

Peak no	Pigment	Retention Time	Wavelength	E(Lg ⁻¹ cm ⁻¹)
1	Chlorophyllide a	2.07		127.0
2	Chlorophyll c2	2.14	630.9	40.4
3	Peridinin	2.53	472	132.5
4	19-but-fucoxanthin	2.87	446	160
5	Fucoxanthin	2.97	449	160
6	Neoxanthin		439	224.3
7	Prasinophytesinoxanthin	3.23	454	160
8	Violaxanthin	3.32	443	255
9	19-Hex-fucoxanthin	3.40	447	160
10	DiaDinoflagellatesxanthin	3.74	446	262
11	Alloxanthin	4.18	453	262
12	Diatoxanthin	4.43	449	262
13	Lutein	4.69	445	255
14	Zeaxanthin	4.76	450	254
15	Chlorophyll b	8.05	646.8	51.36
16	Chlorophyll a	8.36	663	88.15
17	Pheophytin a	8.74	667	51.2
18	Beta-carotene	8.99	453	262

Class	Perid	19but-fuco	Fuco	19hex-fuco	Neox	Prasino	Violax	Allox	Lutein	Zeax	Chl-b	Chl-a
Prasino	0	0	0	0	0.3768	0.1413	0.2165	0	0.0843	0	0.2807	1
Dino	0.7471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Crypto	0	0	0	0	0	0	0	0.1927	0	0	0	1
Hapto_N	0	0	0	1.7139	0	0	0	0	0	0	0	1
Hapto_S	0	0.5076	0.8354	0.2225	0	0	0	0	0	0	0	1
Chloro	0	0	0	0	0.0495	0	0.1185	0	0.1294	0.3262	0.0168	1
Cyano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6795	0	1
Diat	0	0	1.0198	0	0	0	0	0	0	0	0	1

<CHEMTEX program 이용 식물플랑크톤 군집별 기여율 추정>



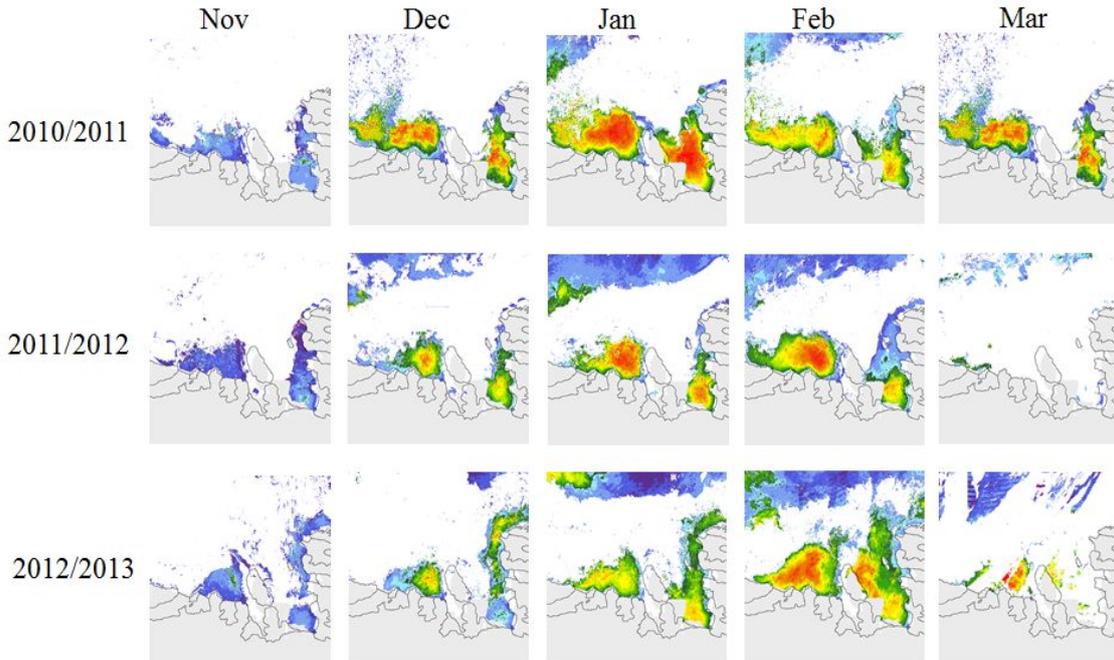
3-6. 남극해 식물플랑크톤 탄소섭취율의 계절적, 연간 변동성 이해

남극해는 해양환경의 변화가 최근 급변하는 지역으로, 식물플랑크톤의 생산 역시 계절적 및 연간 변동성이 매우 클 수밖에 없다. 연간 1회 관측 연구의 한계를 보완하기 위하여 인공위성 자료를 활용하게 되면, 식물플랑크톤 생체량 및 탄소섭취율의 계절적, 연간 변동성 파악에 용이하다. 그러나, 위성자료의 검, 보정 및 알고리즘 개발에 실측자료가 필수적으로 요구되는 바, 현장관측 연구로부터 얻어진 자료를 이에 활용하고 상호 보완함으로써, 이산화탄소 저장고로서의 남극해의 기능 및 생물생산의 역할에 대한 이해 능력 증대가 기대된다.

가. 인공위성 자료를 활용한 식물플랑크톤 생체량의 계절적/연간 변동성 파악

(협력 연구)

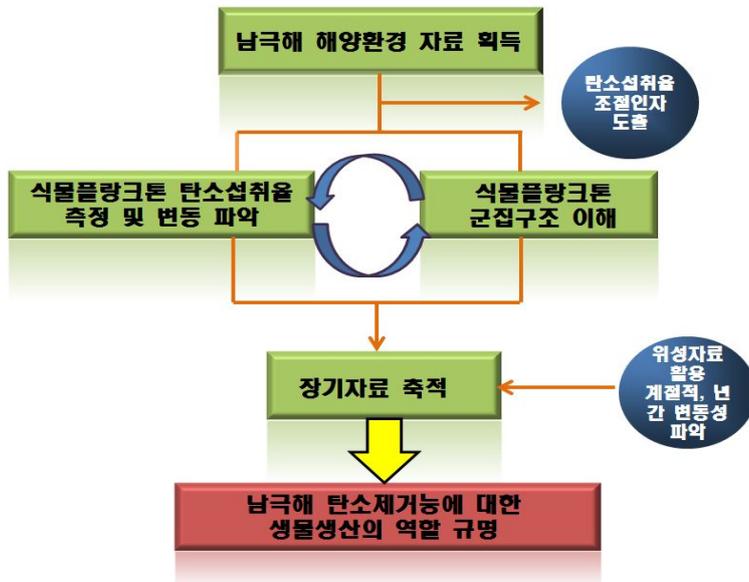
나. 인공위성 자료를 활용한 식물플랑크톤 탄소섭취율의 계절적/연간 변동성 파악 (협력 연구)



<인공위성 자료로부터 얻어진 남극 아문젠해 chlorophyll-a의 계절적, 연간 변동>

4. 연구 추진체계 및 전략

4-1. 연구 추진체계 및 전략



<연구 추진체계 모식도>

- 남극해 해양환경 자료 획득
 - 국내 대학, 출연연구기관 전문 인력과 공동협력
 - 국제적으로 표준화된 방법을 이용한 시공간적 반복 관측
 - 주요 항목의 동시 관측 탄소섭취율 변동 조절 요인 도출

- 식물플랑크톤 탄소섭취율 측정 및 변동 파악
 - 고성능 측정 장비 (ThermoFinnigan Delta + XL mass spectrometer) 활용 측정값 정밀도 향상

- 식물플랑크톤 군집구조 이해
 - 탄소섭취율에 기여하는 주요종 파악 및 향후 군집구조 변화 (종조성 변화 및 개체군 크기 변동) 에 따른 탄소섭취율 변동 가능성 예측

- 장기 관측자료 축적
 - 위성자료의 검/보정 및 알고리즘 개발에 활용
 - 위성자료를 활용한 생물생산의 계절적, 연간 변동성 이해 (해외 전문 기관 인력 활용한 협력연구 수행)

- 남극해 탄소제거능에 대한 생물생산의 역할 규명
 - 입자태 유기탄소 분포 파악
 - 식물플랑크톤 탄소섭취율 파악
 - 탄소제거율 추정

4-2. 세부 추진계획

연구목표	세부 연구목표	세부 추진계획
남극해 식물플랑크톤 탄소섭취율 평가	<ul style="list-style-type: none"> ■ 입자태 유기탄소 분포 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 남극해 입자태 유기탄소량 측정 및 지역별 차이 이해 - 수심별 입자태 유기탄소의 분포 패턴 파악
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 탄소동위원소 tracer를 이용한 남극해 식물플랑크톤 탄소섭취율 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 안정동위원소를 이용한 식물플랑크톤 탄소섭취율 측정 및 변동 이해 - 수심별 탄소섭취율 비교 분석 - 지역별 탄소섭취율 특성 파악 - 식물플랑크톤 크기별 탄소섭취율 비교 분석
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 탄소섭취율 변동 조절 요인 이해 	<ul style="list-style-type: none"> - 물리, 화학적 조절인자 이해 - 탄소섭취율 변동 주요 조절 요인 도출
	<ul style="list-style-type: none"> ■ ¹⁵N을 이용한 탄소제거율 추정 	<ul style="list-style-type: none"> - ¹⁵N을 이용한 신생산 계산을 통해 탄소제거율 추정 - Sediment trap 자료에서 얻어지는 organic carbon의 sinking rate과 비교 분석 (가능하다면)
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 남극해 식물플랑크톤 군집 구조 이해 	<ul style="list-style-type: none"> - 총 엽록소 농도 측정을 통한 식물플랑크톤 생물량 파악 - 크기별 엽록소 농도 측정을 통하여 식물플랑크톤 크기별 군집 분포 특성 파악 - 탄소섭취율에 기여하는 주요종 파악을 위해 고성능 액체크로마토그래피 (High Performance Liquid Chromatography)를 활용한 식물플랑크톤 종조성 파악
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 탄소섭취율의 계절적, 연간 변동성 이해 	<ul style="list-style-type: none"> - 인공위성 자료를 활용한 식물플랑크톤 생체량의 계절적, 연간 변동성 파악 - 인공위성 자료를 활용한 식물플랑크톤 탄소섭취율의 계절적, 연간 변동성 파악

5. 기대 효과

- 가. 식물플랑크톤 군집구조 자료를 데이터베이스화 하여 기후 변동에 따른 군집구조 변화가 탄소섭취율 변동에 미칠 영향을 예측 가능
- 나. 물리/화학적 환경요인 자료를 바탕으로 해양환경변화에 따른 식물플랑크톤의 탄소섭취율 변동 가능성 예측 가능
- 다. 남극해에서의 식물플랑크톤 탄소섭취율의 장기 변동 자료로부터 향후 남극해의 이산화탄소 제거능 예측 가능
- 라. 남극해에서 조사된 생물군집크기, 생물량, 탄소섭취율 등의 변화와 환경요소변화 사이의 원인 기작과 경로에 대한 이해로 향후 남극해에서 기후변화와 관련된 해양생태계 변동을 이해하는데 기초자료로 제공
- 마. 탄소섭취율이 뛰어난 식물플랑크톤의 광합성 기작을 연구하여 관련분야에 적용 가능
- 바. 남극해 영양염류 및 미량금속 분포 변동 자료를 이용하여 일차생산자의 생산 활동 예측 가능
- 사. 남극해에서 “Biological Pump”에 의해 대기에서 해양으로 유입되는 이산화탄소 양 추정
- 아. 남극해 생물펌프의 크기와 거동을 이해해하는 데 기초 자료로 제공
- 자. 남극해 이산화탄소 흡수량 추정 산출로 남극해의 이산화탄소 조정 능력 평가
- 차. Global ocean의 탄소순환에서의 남극해 역할 평가 가능: 전 세계 대양의 탄소순환 수지에 있어 남극해가 차지하는 역할을 (얼마나 많은 양의 탄소를 흡수하는지, 장단기 변동성은 어떠한지) 평가
- 카. 전 지구적인 기후변화 방향 예측과 변화 양상 이해를 위한 학술적인 근거 제공

부록 6. 남극해 침강입자 특성을 통한 대기-해수 이산화탄소 이동 기작 이해

1. 사업 필요성

1-1. 인간활동에 의한 지구온난화와 관련된 대기중의 이산화탄소 농도 저감 방안으로 남극해 표층해수의 급격한 일차생산성과 관계된 생물펌프의 이산화탄소 제거 기작을 규명

2. 국내·외 연구개발 현황

2-1. 국내 연구현황

가. 극지연구소에서는 지난 1990년대말-2000년초에 남극해 브랜스필드 협 주변에서 퇴적물 포집장치를 이용한 연구를 수행하였음

나. 극지연구소의 남극해 퇴적물 포집장치 연구는 물질순환과 관계된 해양학적 특성을 파악하는 것이 주요한 목적이었음

2-2. 국외 연구현황

가. 선진국에서는 수 년에 걸쳐 계류된 시간에 따른 퇴적물 포집기는 해양시스템의 생지화학적 과정에 관한 지속적인 정보를 제공하고 있음. 특히 남빙양에서의 몇 년간 또는 다년간의 퇴적물 포집기 조사는 생물기원 입자 플러스의 계절적인 사건과 격년(inter-annual) 변동 그리고 이런 특징들의 생지화학적 중요성에 대하여 확실한 정보를 제공함.

3. 사업 내용

3-1. 남극해 브랜스필드 동부분지 침강입자 특성

부유 입자들의 수직적인 수송은 기본적으로 군집(aggregate)과 분립(fecal pellets)의 생성에 의해 조절된다. 동물플랑크톤 그리고 작은 물고기들은 해양 표면의 작은 입자들을 밀도의 큰 군집(aggregate)으로 효과적으로 포장한다(Boungen et al., 1987). 이러한 군집들은 무거운 무게로 인해 해저로 빠르게 수송된다. Wefer and Fisher (1991)는 12월과 1월 동안 가끔씩 발생하는 여름철 퇴적이 중앙 브랜스필드 분지(Bransfield Basin)의 격년(inter-annual) 입자 플럭스의 95% 이상을 만들어 낸다고 보고하였다. 또한 Ducklow et al. (2008)은 Palmer 지역의 14년간의 퇴적물 플럭스 자료를 기반으로 하였을 때, 입자 플럭스는 초여름 시기에 연간(annual) 플럭스 배출의 75% 까지 강하게 주기적(strongly periodic)으로 나타난다고 보고하였다. 수괴의 전단과 연관되어 큰 입자 생성에 기여하며 빠르게 입자들을 침강시키는 물리적 집적 과정의 정도는 알려져 있지 않지만 아마도 남극 대류주변부에서는 중요한 과정일 것이다.

비록 남빙양의 입자 플럭스가 표층의 1차 생산에 강하게 의존하고 있지만, 몇몇 퇴적물 포집기 연구에서는 계절적 변동에 따른 생산에 의해 결정되는 주요 플럭스 신호를 변동시키는 수괴내의 과정에 대한 중요성에 대해 조명하였다(Wefer and Fisher, 1991; Dunbar et al., 1998; Langone et al., 2000; Pallanques et al., 2002). 1차 생산자와 상위 소비자)의 서식지이며, 대양에서 생물학적 과정에 영향을 미치는 중요한 물리적 요소인 해빙은 비록 여전히 연구가 부족하고 잘 이해하지 못한 부분이 많지만 매우 중요하다(Ducklow et al., 2008; Stammerjohn et al., 2008). 계절적으로 해빙으로 덮히는 지역에서 상부 그리고 중간 깊이에 계류된 퇴적물 포집기에서는 연간(annual) 변동과는 관계없이 남반구의 여름의 해빙이 없는 짧은 시기동안 거의 매 년간 입자 플럭스가 높게 침전되어 나타나는 것을 보여준다. 그러나, 해저 근처에 계류된 퇴적물 포집기에서는 때때로 변하지 않는 수직 플럭스가 기록되고, 몇몇의 경우에는 상부와 중간 깊이의 수층보다 높은 연간

(annual) 플럭스가 나타난다(e.g., Palanques et al., 2002). 따라서, 입자의 퇴적이 수로학적인 조건에 매우 민감한 남극 대륙주변부 해양에서 수평적으로 침전되는 입자의 기여도와 재부유된 입자들을 무시하여서는 안된다(Jaeger et al., 1996).

- 대기-해양 이산화탄소 이동 기작 연구

- (1) 표층 해수의 일차생산성에 의한 입자성 유기탄소 형성 특성 규명 연구

- 표층 해수의 특성을 측정하고 중층에 설치된 퇴적물 포집장치의 연구 결과와 비교하여 표층 해수의 export production의 특징을 연구

- (2) 침강입자와 입자성 유기탄소의 관계 규명 연구

- 저층에 설치된 퇴적물 포집 장치의 연구결과와 입자성 유기탄소의 함량을 비교하여 표층 해수에서 이동되는 총탄소량을 예측하는 연구

- (3) 대기-해양 이산화탄소 이동의 정량적 접근

- 표층해수에서 발생한 이차생산성에 의한 생물펌프 효과로 남극해 심해로 이동될 수 있는 대기중의 이산화탄소 제거량을 정량적으로 예측하는 연구

4. 사업 추진체계 및 전략

4-1. 사업운영 기본방향

남극해 일차생산이 매우 큰 연구해역에 퇴적물 포집장치를 다년간 설치하여 안정적인 관측인프라를 구축하고 남극해를 연구하는 다양한 국가들과 함께 상시모니터링 시스템을 구축할 수 있는 안정적인 운영 방안 마련

4-2. 사업추진 체계 및 전략

- 극지연구소 남극해 퇴적물 포집장치 관측인프라 확대 구축

- (1) 현재 남극해에 설치된 다른 국가들의 퇴적물 포집장치의 상황을

과약하고 향후 새로운 퇴적물 포집장치를 설치할 수 있는 해역을 파악하여 확보

(2) 과거 극지연구소가 수행한 퇴적물 포집장치의 연구 결과들을 다시 확인-검토하여 대기-해양 이산화탄소 이동 기작을 규명할 수 있는 기본적인 자료 확보

(3) 남극해에서 확보한 시추코아 퇴적물의 구성중에 규조층리가 발달한 퇴적물이 나타나는 연구지역을 추가 확보

5. 기대 효과

- 지구온난화의 주범인 대기 이산화탄소 저감 방안으로 남극해 퇴적물 포집장치 연구를 주도할 수 있는 기반 마련



부록 7. 저층 유기물 분해 및 분해경로가 남극해 탄소저장 기능에 미치는 영향

1. 서론

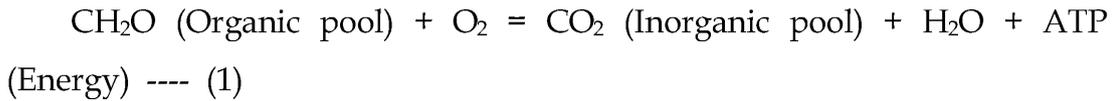
1-1. 연구 목적

해양의 탄소순환을 이해하기 위한 3대 요소는: (1) 표층에서 일차생산에 의한 유기물 생성 및 먹이망 내 순환; (2) 침강 플럭스를 통한 표층에서의 유기물 제거 및 중층에서의 CO₂ 재순환; (3) 퇴적물내에서 미생물 호흡에 의한 유기물 분해 및 CO₂ 재순환 정도를 규명하는 것이다. 극지해양은 높은 침강플럭스로 인해 퇴적물 내에 유기물의 공급이 높은 환경이다. 심층수 형성에 따른 유기물 공급이 많은 남극 웨델해 부근 대륙주변부 퇴적물을 대상으로; (1) 유기물 분해에 따른 무기탄소 재순환 정도와 (2) 주요 유기물 분해 경로(황산염 환원 및 금속환원 등)를 파악하여, 탄소의 생성과 제거와 관련한 생지화학적 순환을 이해하기 위한 것이다.

1-2. 연구의 필요성

가. 미생물 생지화학적 물질순환 연구의 필요성

- 미생물에 의한 호흡(microbial respiration)은 생화학적 관점에서는 유기물 분해로부터 에너지를 생산하는 대사과정(metabolic process)으로 정의되는 반면, 생지화학적인 관점에서는 환경 내에 존재하는 유기탄소가 무기탄소로 광물화(mineralization)되는 과정으로 정의될 수 있다(식 1) (Jahnke and Craven 1995). 따라서, 해양 퇴적물 내의 미생물 생지화학 연구는 퇴적물 내에서 발생하는 미생물에 의한 유기물 분해 및 분해경로에 대한 연구와 그 과정에서 발생하는 미생물과 원소들 간의 상호작용에 대한 연구로 정의된다(Fenchel et al. 1998; Canfield et al. 2005).



- 해양에서 일차생산에 의해 형성된 유기물의 일부는 수층 생태계 내 먹이망 경로를 거치면서 CO₂로 재순환되며, 일정 부분은 입자성 유기물의 형태로 저층에 축적되어 일부는 퇴적물 내에 저장되거나(burial), 상당량은 미생물에 의한 분해과정을 거치면서 무기탄소와 영양염류로 재순환(mineralized)되는 경로를 거치게 된다(그림 1). 이때 대기 중의 이산화탄소가 식물플랑크톤을 거쳐 입자성 유기물 형태로 퇴적토에 침강(sedimentation)된 후 생태계 내에서 제거되는 경로는 생물펌프(biological pump)로 정의되며, 생물에 의한 대기 중 이산화탄소의 중요한 제거 기작으로 인식된다. 반면에, 퇴적물에서 유기물이 미생물 호흡에 의해 이산화탄소로 재순환(mineralization)되는 과정은 생물펌프의 기능을 약화시켜 해양의 이산화탄소 저장기능을 약화시키는 역할을 한다. 따라서, 퇴적물 내 미생물 호흡에 의한 유기물 분해(CO₂ 재순환) 정도를 밝히는 일은 지구적 규모의 탄소순환을 이해하고, 생태/기후변화에 대한 해양의 역할을 이해하기 위해 반드시 연구되어야 할 중요한 분야이다.

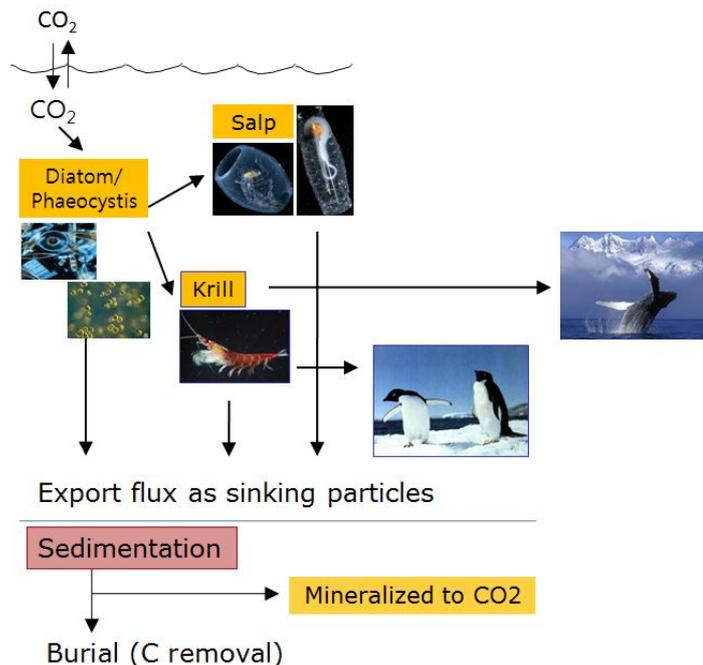
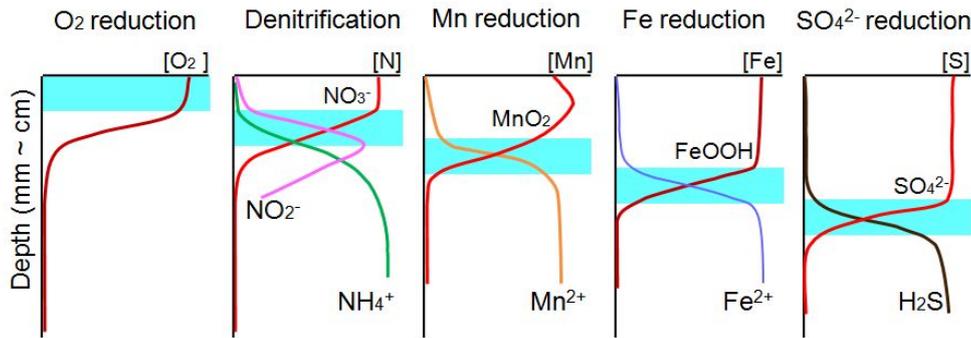


그림 1. 남극해 식물플랑크톤에 의해 유기물로 전환된 이산화탄소의 수층과 저층환경에서의 이동경로.

- 해양 퇴적물 내의 유기물 분해는 서로 다른 생지화학적 기능을 보유한 미생물들의 호흡에 의해 진행된다. 일반적으로 유기물의 공급이 많고, 점토광물들로 이루어진 해양의 퇴적환경에서는 퇴적물 내로 산소가 공급되는(diffusion) 속도보다 표층에서의 산소소비가 더 빠르게 일어나므로 표층 수 mm~수 cm 이내에서 산소의 농도가 급격히 감소된다. 따라서 이러한 환경에서 유기탄소 분해의 상당부분은 혐기조건에서 이루어진다. 해양 퇴적토 내에서의 혐기성 분해는 퇴적물 내에 서식하면서 서로 다른 전자수용체(electron acceptor)를 사용하는 다양한 미생물(탈질산화, 망간 및 철 환원, 황산염 환원)들에 의해 일어난다(그림 2).
- 해양환경에서는 황산염의 농도(~ 28 mM)가 가장 높은 관계로 해양퇴적토에서 일어나는 최종적인 유기물 분해는 SO₄²⁻를 전자수용체로 사용하는 황산염 환원(sulfate reduction) 세균에 의해 주도되는 것으로 여겨져 왔으며, 이로 인해 해양환경에서의 유기물 분해경로를 이해하기 위한 연구는 일차적으로 황산염 환원을 중심으로 진행되어 왔다 (Capone and Kiene 1988; Hyun et al. 2003, 2010). 그러나 망간과 철과 같은 금속산화물이 풍부한 환경에서는 망간 및 철 환원에 의한 유기물 분해의 중요성 및 이들 각 유기물 분해경로에 관여하는 미생물들의 다양성과 생지화학적 기능의 중요성에 대한 연구 결과들이 보고되고 있다(Canfield et al. 1993a, 1993b; Thamdrup 2000; Hyun et al. 2008, 2009, 2010).



- (1) O₂ reduction ($\Delta G^0 = -518\text{kJ/mol}$): $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- (2) Denitrification ($\Delta G^0 = -354\text{kJ/mol}$): $5\text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ = 5\text{CO}_2 + 2\text{N}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$
- (3) Fe reduction ($\Delta G^0 = -392\text{kJ/mol}$): $\text{CH}_2\text{O} + 4\text{FeOOH} + 8\text{H}^+ = \text{CO}_2 + 4\text{Fe}^{2+} + 7\text{H}_2\text{O}$
- (4) Mn reduction ($\Delta G^0 = -502\text{kJ/mol}$): $\text{CH}_2\text{O} + 2\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ = \text{CO}_2 + 2\text{Mn}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$
- (5) SO₄²⁻ reduction ($\Delta G^0 = -247\text{kJ/mol}$): $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$

그림 2. 해양퇴적물에서 산소가 고갈되면서 나타나는 다양한 유기물 분해 경로와 각 분해경로 상에서 소비되고 생성되는 다양한 원소들의 수직적 분포 양상 및 각각의 분해경로를 표시한 화학양론식. 그림의 하늘색 부분은 각각의 유기물 분해경로가 에너지 생성효율에 따라 순차적으로 일어남을 의미함. 관계식의 푸른색은 미생물들에 의해 사용되는 전자수용체를 나타내며, 붉은 색은 미생물 호흡의 최종산물을 나타냄.

- 퇴적물 내에서의 유기물 분해에 의해 일차생산이 CO₂로 재순환되는 양과 주요 분해경로들(호기성 분해, 탈질산화, 망간 및 철환원, 황산염 환원 등)의 상대적 중요도에 따라 최종 생성 산물이 바뀌며, 그로인해 주변의 환경변화 및 지구적 규모의 기후변화를 조절하는 지화학적 원소들의 분포가 크게 영향을 받게 된다(그림 1, 2). 따라서 해양 퇴적물 내 주요 유기물 분해경로에 대한 상대적 중요도를 밝히고, 이러한 물질순환 과정에 관여하는 미생물 그룹들의 군집구조 및 다양성에 대한 정보를 확보하는 일은 저층생태계 내 물질(탄소 및 영양염류)들의 생지화학적 순환 및 기후변화에 따른 해양생태계 반응을 이해하고, 유용미생물 자원의 확보 및 활용기반 구축을 위해 필수적으로 연구되어야 할 중요한 분야이다.

나. 극지의 대륙주변부 퇴적물에서의 미생물 생지화학 연구 필요성

- 연안을 포함한 대륙 주변부(shelf and slope)의 해양(marginal sea)은 전체 해양면적의 10%정도에 불과하나, 유기물 생성의 30% 이상을 차지하는 매우 높은 생산력을 보유한 지역이다(Wollast, 1991). 따라서, 대륙 주변부의 해양의 퇴적토는 수층의 일차생산에 의해 형성된 입자성 유기물이 침강 후 다양한 미생물에 의한 분해가 일어나는 장소로서 해양의 탄소 및 영양염 순환에서 중요한 역할을 담당하는 장소이다.
- 해양에는 대기중 탄소의 약 50 배에 해당하는 높은 이산화탄소가 존재한다. 따라서 해양에서의 적은 탄소농도 변화만으로도 대기 중 탄소농도 변화에 큰 영향을 미치게 된다. 남극해는 지구적 규모의 생지화학적 탄소순환을 조절하는 중요한 해양환경으로 인식되는데, 특히 최근의 온난화로 인한 생태계 반응 및 탄소저장고(Sink)로서의 기능에 대한 관심이 집중되는 지역이다(Turner et al. 2005; SCAR 2009; Ducklow et al. 2007). 남극해의 탄소저장기능은 저층으로의 입자성 유기물 침강 정도에 의해 강하게 영향을 받는데, 남극반도 부근의 대륙주변부 해양(Branfiled strait)에서 하계 일차생산력 평균 약 25% 정도가 침강하는 것으로 보고되며(Karl et al. 1991), 남극 Ross Sea에서의 유기탄소 침강플럭스($1.7 - 2.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)는 전 대양 평균(약 $1 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)의 약 2배에 이르는 높은 것으로 보고된 바 있다(Honjo et al. 2000). 이때 저층으로 퇴적된 유기물의 어느 정도가 미생물 호흡에 의해 이산화탄소로 재순환되는지에 대한 연구는 남극해내 탄소순환경로를 이해하는데 중요한 부분임에도 불구하고 연구 실적이 거의 없는 실정이다.
- 최근까지 보고된 극지방에서의 유기물 분해에 대한 연구결과들의 공통점은 극지방의 수온이 낮은($< 2 \text{ oC}$)데도 불구하고 미생물에 의한 유기물 분해는 온대연안해양의 퇴적토에 견줄 만큼 높은 것으로 보고되고 있으며(Hyun et al. 2003; Vandieken et al. 2006; Glud et al. 1998; Kostka et al. 1999; Rysgaard et al. 1996, 1998), 수층생산력과 저층의 분해가 비교적 균형을 이루어 나타나는 것으로 보고된바 있다(Nedwell et al. 1993). 이러한 결과들은 수층 생산력의 상당부분이 퇴적토에 퇴

적되어 영구매장되기 전에 대부분 미생물 호흡에 의해 이산화탄소 및 무기 영양염으로 재순환됨을 의미한다. 이러한 경향은 온난화에 따른 미생물 대사가 증가할 경우, 퇴적토내의 유기물 분해 증가 및 이산화탄소 재순환이 더욱 가중되어 극지해양의 이산화 탄소 저장능력을 감소시키는 요인으로 작용하는 것을 의미한다. 따라서, 기후변화에 따른 극지방의 얼음 층 후퇴와 식물플랑크톤 조성 변화 및 일차생산력의 변화(Arrigo et al. 2008; Montes-Hugo et al. 2009)는 극지의 연안 및 대륙주변부 해양퇴적토의 유기물 분해에 따른 탄소 및 영양염 순환과 이에 관여하는 미생물들의 활성 및 군집구조에 큰 영향을 미칠 것으로 여겨지며, 이에 대한 모니터링은 극지의 탄소순환을 이해하기 위한 필수연구항목이다.

- 국내에서는 극지연구소를 중심으로 극지에서 지구기후변화에 따른 온실기체 처리능력 평가 및 극지연안 생태계 연구 그리고 극지고유 유전자원 확보 및 이용기술 개발과 극지생물재현 및 활용기반구축 연구가 활발히 진행되고 있으나, 극지의 대륙주변부 퇴적물에서 진행되는 미생물에 의한 유기물 분해에 따른 CO₂ 재순환에 대한 연구와 유기물 분해경로에 대한 연구는 극지 저조한 실정이다.

2. 국내 · 외 연구개발 현황

2-1. 국내 연구현황

국내에서 해양 퇴적물 내 유기물 분해경로 및 그와 관련한 미생물의 생지화학적 기능 연구와 관련하여 2003년 이래 국내의 연안 갯벌(Hyun et al. 2009)과 유기물 함량이 높은 동해 울릉분지(Lee et al. 2008; Hyun et al. 2010)에서 황산염 환원, 철 환원 등에 의한 혐기성 유기물 분해경로에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나, 지구적 규모의 탄소순환에서 중요한 역할을 차지하는 극지의 퇴적물 내에서 유기물의 최종분해정도와 주요한 유기물 분해경로 및 각각의 유기물 분해에 관여하는 미생물들의 생태 및 생지화학적 특성에 대한 연구는 전무한 상황이다.

- 국내의 극지 생태 및 생지화학 연구와 지구환경 변화에 대한 극지해양의 역할 및 탄소순환 연구 등은 다학제적 연구의 필요성에도 불구하고, 각 연구 팀간(생물-지질(화)학-해양학 팀)의 사전디자인 및 획득된 연구결과에 대한 종합적인 고찰이 상대적으로 저조한 실정이다. 이로 인해 지구온난화와 관련하여 극지퇴적물 내 무기물-미생물-유기물 간의 상호작용에 따른 탄소 및 기타 원소들의 생지화학적 물질 순환에 관한 연구 성과는 대단히 미흡한 실정이다.
- 제한적이기는 하지만, 극지연구소에서 주관한 남극 아문젠해에서 퇴적물 공극수 및 퇴적물의 지화학적 특성과 유기물 분해에 대한 연구들 (Kim et al. 2015; Choi et al. 2015)을 통해, 남극해 수층의 높은 기초생산력에도 불구하고, 퇴적물내 유기물의 분해율은 상당히 낮은 것으로 관측되었다.

2-2. 국외 연구현황

○ 외국에서는 유기물 함량이 높은 연안해양 및 전 세계의 대륙 사면과 주변분지의 해양퇴적토 내 생지화학적 원소순환 및 미생물 기능다양성에 대한 연구가 다학제적으로 진행되고 있다. 예로서,

- 독일의 막스플랑크해양미생물 연구소(<http://www.mpi-bremen.de>)는 극지방을 포함한 전 세계의 다양한 대륙주변부 퇴적토에서 호기성 호흡, 황산염 환원, 금속환원 등에 의한 유기물 분해와 이에 관여하는 다양한 미생물 들의 기능 다양성에 대한 다학제 적 연구를 실시해 오고 있음.

- 덴마크의 Univ of Southern Denmark (<http://www.biology.sdu.dk/>)의 Nordic Center for Earth Evolution에서는 현장측정센서 기술 (In situ technology and sensor development)을 보유하고 있으며, Benthic lander 운영 등, 저층 유기물 분해경로 및 미생물의 생지화학적 거동 연구에서 세계최고 수준의 연구력을 보유하고 있음.

- 미국은 극지방에서의 장기생태연구(LTER; Long-term ecological research)연구 의 일환으로 남극반도(<http://pal.lternet.edu/>)와 남극대륙에서 기후변화에 따른 해빙의 발전과 감소, 그에 따른 수층일차생산력 및 저층으로의 침강플럭스 및 유기물 분해에 대한 연구를 수행해 오고 있음.

3. 연구 내용

제안된 과제는 남극 심층수가 형성되면서 유기물의 축적이 높을 것으로 인식되는 남극 웨델해 부근(동부 브랜스필드 분지) 대륙주변부 퇴적물을 대상으로;

- (1) 공극수와 퇴적물의 지화학적 환경특성을 해석하고,
 - (2) 심층수 형성과 함께 이동 된 유기물들이 퇴적물 내에서 미생물에 의해 분해되는 정도와,
 - (3) 극지 생태계 내 일차생산의 경로와 연관 된 저층의 탄소 재순환을 정량적으로 이해하여,
- 남극해의 탄소저장 기능을 평가하고, 조절요인들을 이해하기 위한 것이다

4. 사업 추진체계 및 전략

4-1. 사업운영 기본방향

남극해의 탄소의 생성과 제거와 연관 된 여러 경로들은; (1) 해양-대기 상호작용에 의한 CO₂ 흡수 (2) 해수중 일차생산에 의한 CO₂ 제거, (3) 생성된 유기물 침강과 (4) 침강 중 호흡에 의한 재순환 (5) 퇴적물내에서 유기물 분해에 의한 CO₂ 재순환 (6) 매장에 의한 퇴적물 내 CO₂ 최종 저장등의 연구분야로 이루어짐(그림 3).

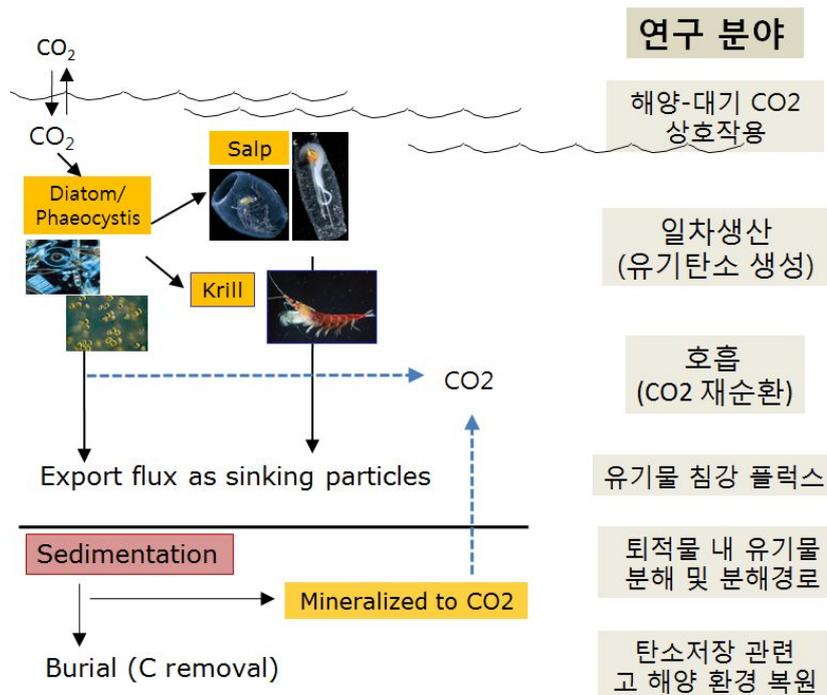


그림 3. 극지해양과 퇴적물내 탄소공급 및 제거경로와 연관된 주요 연구추진체계

4-2. 사업추진 체계 및 전략

제안된 연구는, 연구추진체계(그림 3)에 제시된 항목 4의 남극반도 대륙 주변부 퇴적물에 축적된 유기물이 미생물에 의해 분해되는 정도와 주요 분해 경로 규명 및 미생물 생지화학적 다양성에 대한 연구를 수행하기 위한 것으로, 다른 연구 분야 과학자들과의 공동승선연구 및 자료공유를 통해, 남극 심층수 형성에 의한 탄소저장기능을 평가가 가능함.

5. 기대 효과

- 극지 퇴적물 내 유기물 분해에 따른 무기탄소의 재순환 정도 정량화를 통해 극지해양의 종합적인 탄소순환 및 탄소저장기능에 대한 연구결과로 활용
- 다양한 유/무기 오염원들의 저온 분해 능력을 보유한 극지 저온/혐기성

미생물들은 특허 및 배양기술 교류 등을 통해 극지고유 유전자원 확보 및 극지생물재현 사업에 활용 가능.

- 획득된 연구결과는 국제학술 대회 및 학술지 게재를 통해 우리나라 극지 연구에 대한 국제적 인지도 제고
- 과제에 참여하는 대학원생들은 극지연구팀과의 공조 하에 극지연구소의 연구영역을 확장시킬 수 있는 극지전문 연구인력으로서 교육받을 것이며, 향후 한국의 극지 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대 됨.

6. 참고문헌

- Arrigo KR, Van Dijken G, Pabi S (2008) Impact of a shrinking Artic ice cover on marine primary production. *Geophysical Reserch Letter* 35:L19603
- Canfield DE, Jørgensen BB, Fossing H, Glud R and 6 others (1993a) Pathways of organic carbon oxidation in three continental margin sediments. *Mar Geol* 113:27-40
- Canfield DE, Thamdrup B, Hansen JW (1993b) The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction. *Geochim Cosmochim Acta* 57:3867-3883
- Canfield DE, Thamdrup B, Kristensen E (2005) *Aquatic Geomicrobiology, Advances in Marine Biology* Vol. 48. Elsevier Academic Press, Amsterdam
- Choi A, Cho H, Kim S-H, Thamdrup B, Lee SH, Hyun J-H (2015) N₂ production, diversity and abundance of functional genes associated with denitirfication and anaerobic ammonium oxidation in the sediment of the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Deep-Sea Res II*, Submitted
- Ducklow HW, Baker K, Martinson DG, Quetic LB, Ross RM, Smith RC, Stammerjohn SE, Vernet M, Fraser W (2007) Marine pelagic

- ecosystems: the West Antarctic Peninsula. *Phil. Trans. R. Soc.* 362:67-94
- Fenchel T, King GM, Blackburn TH (1998) *Bacterial Biogeochemistry: The ecophysiology of mineral cycling*, 2nd edn. Academic Press
- Glud RN, Holby O, Hoffmann F, Canfield DE (1998) Benthic mineralization and exchange in Arctic sediments (Svalbard, Norway). *Mar Ecol Prog Ser* 173:237-251
- Honjo S, Francois R, Manganini S, Dymond J, Collier R (2000) Particle fluxes to the interior of the Southern Ocean in the Western Pacific sector along 170°W. *Deep-Sea Res II* 47:3521-3548
- Hyun J-H, Mok JS, Cho HY, Kim SH, Kostka JE (2009) Rapid organic matter mineralization coupled to iron cycling in intertidal mud flats of the Han River estuary, Yellow Sea. *Biogeochem* 92:231-245
- Hyun J-H, Smith A, Kostka JE (2007) Relative contributions of sulfate- and iron(III) reduction to organic matter mineralization and process controls in contrasting habitats of the Georgia saltmarsh. *Applied Geochemistry* 22:2637-2651
- Hyun, J-H, Mok J-S, You O-R, Kim DS, and Choi D-L (2010) Variations and Controls of Sulfate Reduction in the Continental Slope and Rise of the Ulleung Basin off the Southeast Korean Upwelling System in the East Sea. *Geomicrobiology J* 27: 212-222
- Jahnke RA, Craven DB (1995) Quantifying the role of heterotrophic bacteria in the carbon cycle: a need for respiration rate measurements. *Limnol. Oceanogr.* 40: 436-441
- Karl DM, Tillbrook BD, Tien G (1991) Seasonal coupling of organic matter production and particle flux in the western Bransfield Strait, Antarctica. *Deep-Sea Res* 38:1097-1126
- Kim S-H, Hyun J-H, Choi A, Yang EJ, Lee SH (2015) Low benthic respiration and nutrient flux at highly productive Amundsen Sea

- polynya in Antarctica. *Deep-Sea Res II*, submitted.
- Kostka JE, Thamdrup B, Glud RN, Canfield DE (1999) Rates and pathways of carbon oxidation in permanently cold Arctic sediments. *Mar Ecol Prog Ser* 180:7-17
- Lee T, Hyun J-H, Mok JS, Kim D (2008) Organic carbon accumulation and sulfate reduction rates in slope and basin sediments of the Ulleung Basin, East/JapanSea. *Geo-Marine Letters* 28:153-159
- Montes-Hugo M, Doney SC, Ducklow HW, Fraser W, Martinson D, Stammerjohn SE, Schofield O (2009) Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the Western Antarctic Peninsula. *Science* 323:1470-1473
- Rysgaard S, Finster K, Dahlggaard H (1996) Primary production, nutrient dynamics and mineralization in a northeastern Greenland fjord during the summer thaw. *Polar Biol* 16:497-506
- Rysgaard S, Thamdrup B, Risgaard-Petersen N, Fossing H, Berg P, Christensen PB, Dahlggaard T (1998) Seasonal carbon and nutrient mineralization in a high-Arctic coastal marine sediment, Young Sound, Northeast Greenland. *Mar Ecol Prog Ser* 175:261-276
- SCAR (2009) *Antarctic Climate Change and the Environment*. Turner J, Bindschadler R, Convey P, di Prisco G, Fahrbach E, Gutt J, Hodgson D, Mayewski P, Summerhayes C (eds) Victoire Press, Cambridge
- Thamdrup B (2000) Bacterial manganese and iron reduction in aquatic sediments. *Adv Microb Ecol* 16:41 - 84
- Turner J, Colwell SR, Marshall GJ, Lachlan-Cope TA, Carleton AM, Jones PD, Lagun V, Reid PA, Iagovkina S (2005) Antarctic climate change during the last 50 years. *Int J Climatol* 25:279 - 294
- Vandieken V, Finke N, Jorgensen BB (2006) Rates and pathways of carbon mineralization for an Arctic fjord sediment (Svalbard) and

isolation of psychrophilic and psychrotolerant iron reducing bacteria. Mar Ecol Prog Ser 322:29-41

Wollast R (1991) The coastal organic carbon cycle: Fluxes, sources and sinks. In: Mantoura RFC, Martin JM, Wollast R (eds) Ocean margin processes in Global Change. Dahlem Workshop Report, J Wiley & Sons, Chichester pp 365-381



부록 8. 남극 고생산력 복원 및 고수온 복원

1. 서론

1-1. 사업 목적

지금까지 TEX^L_{86} 는 서남극 반도의 연안 (Shevenell et al., 2011; Etourneau et al., 2013) 및 동남극 연안 (Kim et al., 2012) 지역에서 고수온 복원에 성공적으로 적용되었다. 하지만 TEX^L_{86} 의 사용을 통한 이전의 고기후 연구의 성공적인 사례에도 불구하고, 고수온 복원을 위해 TEX^L_{86} 가 남극해에서 정기적인 방법으로 사용가능한지에 관한 판단을 내리기전에 아직 더 자세한 연구가 필요한 것은 명백하다. 이 관점에서 이 프로젝트의 궁극적인 목표는 고분자 화합물 isoGDGTs에 기초한 TEX^L_{86} 가 남극해 연안에서 정량적인 고수온 변화 복원에 정기적인 방법으로 사용이 가능한지 규명하는 것이다. 그리고 더불어 고분자 화합물 LCD가 남극해 연안에서 온도, 용승 (upwelling), 영양 가용성 (nutrient availability) 및 다른 기후의 지표로써 적용 가능한지 규명하는데 있다. 이것은 우리가 남극해에서 고기후 복원에 고분자 화합물을 이용하는데 대한 더 많은 자신감과 신뢰성을 갖는데 기여할 것이다.

가. 침강입자 포집기를 이용한 유기생체지표의 거동 확인

나. 남극 해역 퇴적물의 정확한 연대 결정

다. 남극 해역의 고생산성 및 고수온 복원

- 고분자 화합물 isoGDGTs에 기초한 정량적인 고수온 변화 복원성 판별

- 고분자 화합물 LCD가 남극해 연안에서 온도, 용승 (upwelling), 영양 가용성 (nutrient availability) 및 다른 기후의 지표로써 적용 가능성 규명

라. 남극의 탄소 저장고로서의 능력 확인 및 가치 평가

1-2. 사업 필요성

현재 전 지구적 해양은 연간 2 Pg C의 이산화탄소(CO₂)를 대기로 부터 흡수함으로써, 대기로 방출된 화석연료기원 이산화탄소 흡수 및 장기 저장에 중요한 역할을 하고 있다 (예: Takahashi et al., 2012). 남위 30도 이남 지역의 남극해는 그 중 연간 1 Pg C의 이산화탄소를 흡수함으로써, 대기 중에 이산화탄소의 급속한 축적을 둔화하는데 중요한 역할을 하고 있음이 밝혀졌다 (예: Takahashi et al., 2012). 여기서 한 가지 주요 질문은 남극해의 이산화탄소 제거능력이 미래 기후변화에 어떻게 반응할 것 인지이다. 만약 자연적 탄소 펌프(natural carbon pumps)의 강도가 일정 시간 내에 변화하지 않는다면, 증가된 화석연료기원 이산화탄소의 대기 방출은 해양의 흡수력을 더욱 증가시킬 것이다. 그러나 자연적 탄소 펌프(natural carbon pumps)의 강도는 변화한다. 특히, 생물학적 펌프(biological pump)가 온난화 현상에 어떻게 반응할지는 아직도 뜨겁게 논란이 되고 있다.

미래에 대한 단서를 얻기 위하여, 생물학적 펌프(biological pump)에 관한 대부분의 고해양학 연구들은 과거의 생물 생산성 변화와 유기입자탄소(particulate organic carbon)의 심해로의 침강입자 플럭스(flux), 또는 수출 생산(export production)을 재구성함에 초점을 맞추고 있다. 다양한 생물학적, 화학적 프록시(proxy)들이 과거 생물 생산성 변화를 재구성하는데 이용되어 오고 있다 (예: Lochte et al., 2003). 하지만 이들 프록시(proxy)들이 분명 과거 생물 생산성 변화를 측정하기 위해 해양 퇴적물에 사용될 수 있음에도 불구하고, 각각의 프록시(proxy)는 온도, 산소 농도, 및 해양 순환과 같은 다른 요인들에 의해서도 영향을 받는다 (예: Anderson et al., 2002).

그러므로 과거 생물 생산성의 변화 그리고 생물학적 펌프(biological pump)의 이산화탄소 제거능력에 고수온 변화가 어떻게 영향을 미쳤는지에 대한 동반연구가 필요하다. 이러한 연구는 과거 대기 이산화탄소 농도 변화와 그것들의 기후 변동에 대한 민감도와 연관된 natural process를 이지하는데 도움이 될 것이고, 더 나아가서는 미래의 기후 변화에 남극해가 어떠한 역할을 할 것이지에 대한 우리의 이해도를 향상 시킬 것이다.

정량적 및 질적 홀로세 (약 10,000년전) 고기후 복원들이 남극대륙 (Stenni et al., 2010), 남반구 중위도 (예: Crosta and Shemesh, 2002; Bianchi and Gersonde, 2004; Nielsen et al., 2004), 서남극 반도의 연안 (예: Taylor et al., 2002) 그리고 동남극 연안 (예: Crosta et al., 2007) 지역들로 부터 최근 크게 증가추세를 보이고 있다 (그림 1). 그러나 남극해 연안에서는 홀로세 (약 10,000년전) 동안의 정량적인 고수온 고해상도 기록들이 여전히 부족한 상황이다. 그 이유는 남극해에서 가장 널리 사용되는 정량적 바다 표면 온도 (SST) 재건 기술 중의 하나인 규조류(diatom)에 기반 한 복원 방법이 남극해 연안에서는 자주 사용할 수 없기 때문이다 (Crosta et al., 2008). 그러나 이러한 장애물은 archaeal membrane lipid에 기초한 방법, 즉 (Kim et al., 2010) 그리고 근래 새롭게 개발된 long chain diol index (LDI) (Rampen et al., 2012)를 적용함으로써 해결할 수 있는 가능성 크다.

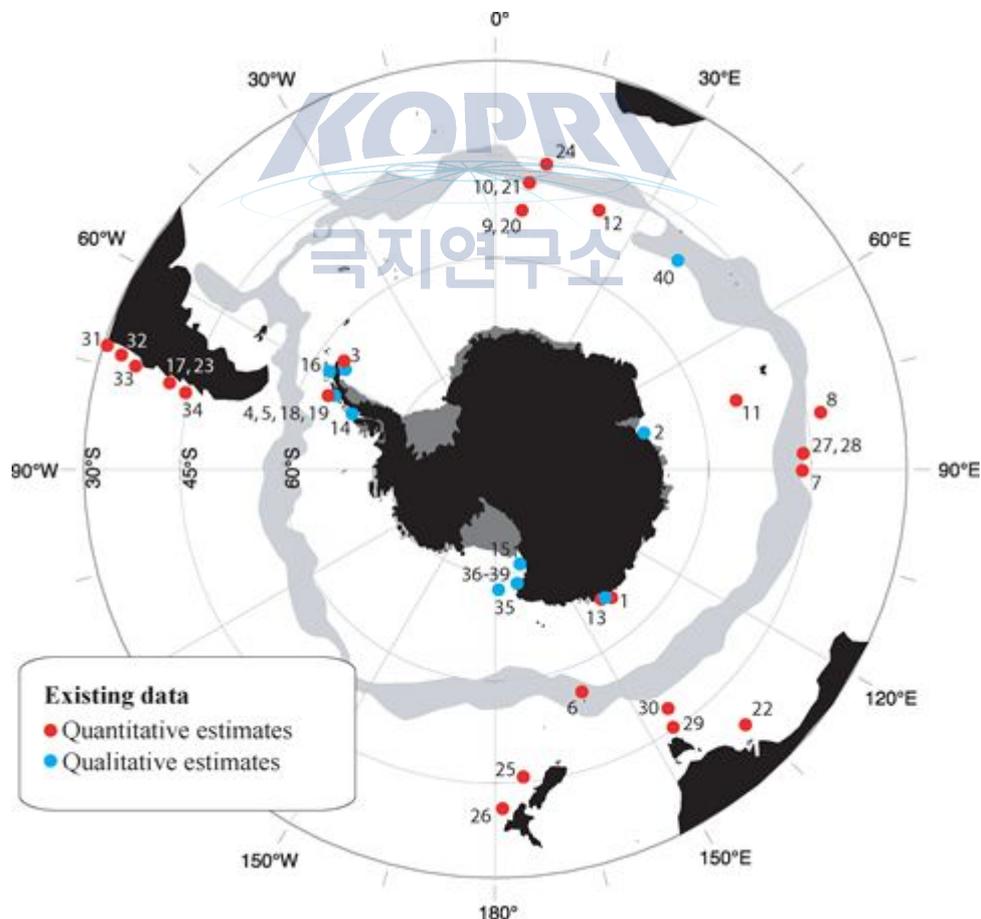


그림 1. 유럽 ESF PolarClimate HOLOCLIP 프로젝트의 프레임 워크 내에서 수집한 발표된 혹은 발표되지 않은 정량적 및 질적 홀로세 고수온 기록들의 코어 위치들 (작성자: Dr. X. Crosta, EPOC, France).

- 고세균 지질 (Archaeal lipids)

Group I Crenarchaeota (예. Brochier-Armanet et al., 2008; Spang et al., 2010)로 알려진 해양 Thaumarchaeota는 여러개의 cyclopentane moiety를 가지고 있는 membrane-spanning isoprenoid glycerol dialkyl glycerol tetraethers (isoGDGTs)를 생산한다 (Schouten et al., 2000). 침강입자 샘플 및 표층 퇴적물 조사로 isoGDGTs는 오늘날 바다에서 아주 흔하게 존재하는 것으로 알려졌다. 그리고 이러한 분자 화석은 퇴적물에도 잘 보존 되고 있는 것으로 나타났다 (Schouten et al., 2002; Kim et al., 2008, 2010). 최근에 화석화된 isoGDGTs에 대한 다양한 해양 지역으로 부터 채집된 표층 퇴적물의 연구에 따르면 해양 Thaumarchaeota는 그들의 열성 친척 (hyperthermophilic relatives)과 유사하게 isoGDGTs에 cyclopentane moiety의 상대적인 수를 변경함으로써 그들의 막 지질(membrane lipid) 구성을 온도에 따라 변경함을 보여 주었다 (Schouten et al., 2002). 이러한 발견에 기초하여, TEX₈₆(Tetra Ether index of tetraethers consisting of 86 carbon atoms) 프록시(proxy)는 새롭게 개발한 HPLC-APCI-MS 방법을 이용하여 isoGDGTs의 상대적 농도를 정량화함으로써 고수온을 재구성하기 위해 개발되었다 (Schouten et al., 2002). 후속 연구로, Kim et al. (2008, 2010)은 global core-top dataset를 확장하고 isoGDGTs와 SST의 관계를 재조명함으로써, 좀 더 극지바다에 적합한 약간 수정된 TEX₈₆, 즉 crenarchaeol regio-isomer를 포함하지 않는 로그 함수를 이용한 TEX₈₆^L를 발표하였다. 좀 더 최근에는 0에서 200 미터 수심의 연평균 온도를 이용한 새로운 calibration이 소개되었고 그것의 오차범위는 ±2.8도 이다 (그림 2; Kim et al., 2012).

남극해 연안을 포함한 다양한 지역으로 부터의 해양 퇴적물에서의 isoGDGTs에 기반한 프록시(proxy)들의 사용은, 특히 다른 프록시(proxy)들의 적용에 제한이 있는 지역에서, 그들의 가능성 보여주었다 (예: Schouten et al., 2003; Kim et al., 2012; Bijl et al., 2013; Etourneau et al., 2013). 그러나 isoGDGTs를 바탕으로 한 고수온 추정을 구체화하기 위해서는 더 자세한 연구를 요구하는 최근 몇 가지 문제들이 강조되고 있다 (Schouten et al., 2013). 예를 들어, 깊은 바다물에 서식하는 nitrifying Thaumarchaeota가

isoGDGTs의 퇴적 조성에 영향을 미침으로서 isoGDGTs에 기반한 paleothermometry에도 영향을 미치고 있다는 증거들이 증가하고 있는 추세다 (예: Taylor et al., 2013; Kim et al., 2015a). 사실, Villanueva et al. (2015)은 글로벌 데이터 세트에서 thaumarchaeotal ammonia monooxygenase (amoA)와 효소, 특히 isoGDGT의 생합성 경로에 관여하는 geranylgeranylglycerol phosphate (GGGP) 합성 효소 차이에 기반하여, 다음과 같은 사실을 관찰하였다: 증가하는 수심에 따른 isoGDGTs의 분포 변화는 'shallow water' (즉, 수심 <200 m)와 'deep water' (즉, 수심 >200 m) Thaumarchaeota 의 niches 변화와 일치한다. 그러므로 그것은 'shallow water'와 'deep water' Thaumarchaeota 사이의 GGGP 합성 효소의 촉매 사이트의 차이가 합성 isoGDGTs 의 상대적 비율의 차이로 이어질 수 있다고 제안 했다 (Villanueva et al., 2014). 최근에, 우리가 아는 한, 처음으로, 우리는 남부 포르투갈 연안에서 지질(lipid) 및 핵산 (nucleic acid) 모두를 분석 통합하여, 따뜻하고 염도가 높으며 산소농도가 낮은 Mediterranean Outflow Water (MOW)에 사는 'deep water' Thaumarchaeota가 isoGDGTs 분포와 그에 기반한 paleothermometer에 실제로 영향을 미치고 있음을 증명하였다 (Kim et al., 2015b). 이 연구는 이러한 연구방식이 isoGDGTs의 생물학적 출처와 분포를 연구하는 데 얼마나 유용한가를 보여준 좋은 사례이며, 동시에 우리의 미래 연구방향을 제시한다.

지금까지 남극해에서의 isoGDGTs와 관련된 모든 프록시(proxy) 검증 연구는 표층 퇴적물을 기반으로 하였다. 그러나 이러한 방법으로는 침전물의 isoGDGTs의 생물학적 출처와 분포에 관한 문제를 제대로 해결할 수 없음이 밝혀졌다. 따라서 남극해 침강입자에 대한 연구가 침전물의 isoGDGTs의 생물학적 출처와 분포를 밝히는데 꼭 필요하다. 특히 다른 계통의 Thaumarchaeota 클러스터가 다른 분포의 isoGDGTs를 생산하는지 아니면 다른 온도 반응을 보이는지를 연구해야 할 필요가 있다. 이러한 연구들은 남극해에서 isoGDGTs에 기반한 프록시(proxy)들의 고수온 복원을 위한 더 정확한 사용을 도모하는 데 필수 조건이다.

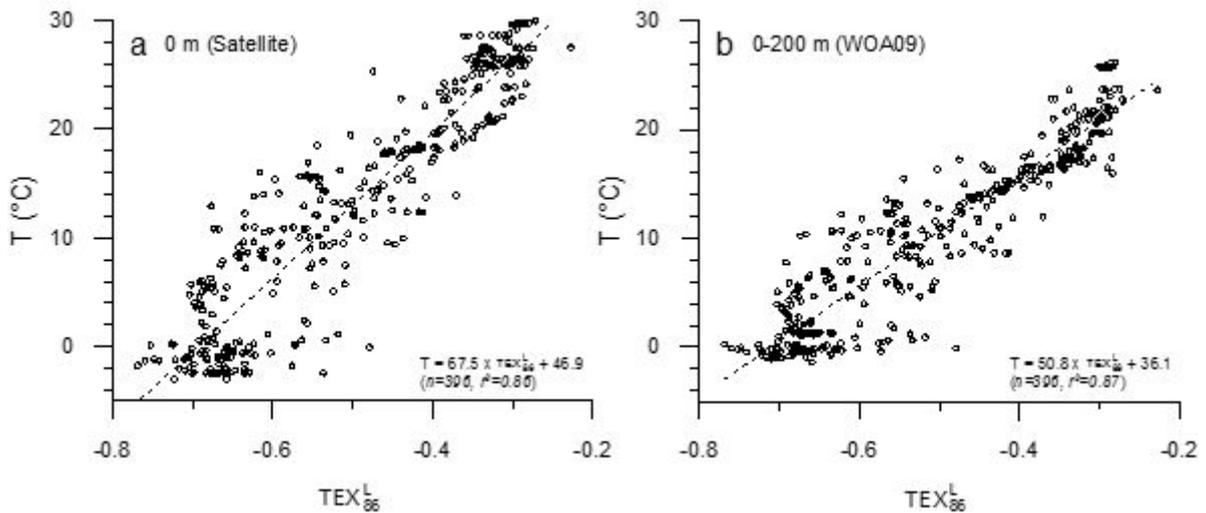


그림 2. a) 위성 SSTs (Kim et al., 2010) 그리고 b) 0 - 200 m 연 평균 수심 온도 (Kim et al., 2012)를 이용한 표층 퇴적물 calibrations.

- 장쇄 알킬 디올 (long chain alkyl diols)

장쇄 알킬 디올(long chain alkyl diols, LCD)은 다양한 환경에서 보고 된 지질 화합물이다 (예: de Leeuw et al., 1981; Versteegh et al., 1997). LCD는 C1과 중쇄(mid chain) 위치에 알콜기를 함유하는 alkyl chain으로 구성된다. C24에서 C36의 사슬 길이를 가진 많은 종류의 이들 지질(lipid)이 보고 되었으며, 중쇄(mid chain) 알콜 위치는 C11그리고 C19사이에서 변화한다 (예: Versteegh et al., 1997). 해양 환경에서의 주요 LCD는 C28및 C30_{1,13} diols, C28및 C30_{1,14} diols 그리고C30및 C32_{1,15} diols들이 일반적이다. C28및 C30_{1,14}-diols은 규조류 Proboscia (Sinninghe Damsté et al., 2003; Rampen et al., 2007) 그리고 해조류 Apedinella radians (Rampen et al., 2011)에서 확인 되었다. Proboscia 규조류는 남극 해역에서 풍부하며, 서부 브랜필드 분지(Western Bransfield Basin)에서 채취한 퇴적물 코어 분석에서도 C28및 C30_{1,14}-diols의 존재가 확인되었다 (Willmott et al., 2010). 따라서, Willmott et al. (2010)은 서부 브랜필드 분지(Western Bransfield Basin)에서 영양이 풍부한 Upper Circumpolar Deep Water의 용승(upwelling)을 재구성하는데 이용할 수 있는 diol index를 소개했다.

그러나 얼마나 널리 이 LCD를 용승(upwelling) 강도와 영양영 가용

성 (nutrient availability) 재구성하는 데 사용할 수 있는 지는 여전히 알 수 없는 상황이다. C28 및 C301,13 diols 그리고 C30 및 C321,15-diols은 양식된 해양 Eustigmatophyte 조류에서 보고 되었다 (예: Volkman et al., 1992). 그러나 Eustigmatophyte 조류는 해양환경에서 거의 보고 되지 않았기 때문에, 해양 환경에서 LCD의 출처로서의 그들의 역할은 아직 미지수이다. 또한, 양식된 해양 Eustigmatophytes 조류에서의 LCD 분포는 해양 퇴적물에서의 분포와 일치하지 않는다 (Versteegh et al., 1997). 흥미롭게도, 표층 퇴적물에서 C28 및 C301,13 diols의 농도는 SST와 강한 음의 상관 관계를 보이는 반면 C301,15-diol은 SST와 강한 양의 상관 관계를 보였다 (Rampen et al., 2012). 한편, C321,15-diol의 농도는 전체 SST 범위에서 변함없이 일정하였다 (Rampen et al., 2012).

이는 이들 성분의 농도를 조종하는 주요 환경요인이 온도임을 시사한다. 그러므로, long chain diol index (LDI)는 C281,13 , C301,13 그리고 C301,15 diols을 합한 농도에 C301,15 diol의 상대적인 비율로 소개되었다 (그림 3; Rampen et al., 2012). 콩고 (서아프리카) 강 하구에 가까운 남대서양에서 채취한 퇴적물 코어에서의 LDI 분포는 처음으로 43 kyr LDI SST 기록을 제공하였다 (Rampen et al., 2012). 이 기록은 몇 가지 알려진 기후 변동을 잘 반영 하였고, 트렌드와 절대 복원 온도 모든 측면에서 같은 퇴적물에서 U_{37}^k 를 사용하여 얻은 SST 기록과 유사성을 보였다. 이는 LDI가 고수온 복원을 위한 프록시(proxy)로서의 가능성이 있음을 보여주었다. 그 후, LDI는 다중 프록시(proxy) 접근의 한 일부로 점차 널리 적용되고 있다 (예: Lopes dos Santos, 2013). 그러나, 우리가 아는 한, LDI는 아직 남극해에서 그 가능성이 검증된 바가 없다.

LCD의 분포와 농도는 기원생물의 생태(예: 계절, niche)와 관련이 있어 보인다. LDI를 개선하고 그것의 잠재적인 문제점(biases)을 평가하기 위해서는 LCD의 분포와 농도에 영향을 미치는 특정 영양소 및 물리 화학적 요인들을 평가함으로써 LDI의 남극해에서의 적용 가능성 여부를 검증할 수 있다.

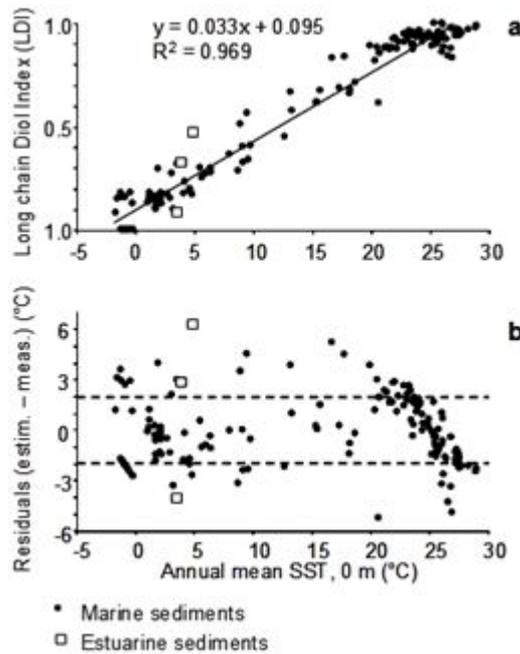


그림 3. a) 연 평균 SSTs를 이용한 표층 퇴적물 LDI calibrations 그리고 (b) 연 평균 SST 대 잔여 SST (예상한 SST - 측정된 SST) (Rampen et al., 2012).

극지연구소

- 특정 화합물 (compound-specific) AMS ^{14}C 분석

가속기 질량 분석법(accelerator mass spectrometry, AMS)의 출현은 25년 전에 방사성 탄소(^{14}C)분석의 혁신 및 기타 다른 연구 분야에 새로운 지평을 열었다. 1945년 핵융합 장치의 광범위한 대기 폭발이 대기 중 CO_2 의 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 를 증가시킴으로써, ^{14}C 농도는 육상과 해양 유기물 기원의 추가 지표로 쓰이게 되었다. 현대 해양의 용존 무기 탄소(DIC, $\Delta^{14}\text{C}=+100\%$)와 대기 중 CO_2 ($\Delta^{14}\text{C}=+300\%$)의 $\Delta^{14}\text{C}$ signature차이는 직접 광합성에 의해 통합되기 때문에 현대 육상 유기물은 증가된 ^{14}C signature에 의해 해양 환경에서 그 기원 추적이 가능하다 (예: Druffel et al., 1986). Preparative capillary gas chromatography를 이용한 기원이 알려진 특정 유기 화합물 (biomarkers)의 compound-specific AMS ^{14}C 분석 (Eglinton et al., 1996) 결과는 탄소원과 관련된 문제를 해결하기 위해 사용되고 있다 (예: Drenzek et al., 2007). 이

AMS 분석 방법은 preparative high-performance liquid chromatography를 이용해 농축된 isoGDGTs (예: Smittenberg et al., 2004) 그리고 branched GDGTs (Birkholz et al., 2013)를 측정 할 수 있을 정도까지 확장 되었다

생체 탄산 칼슘 (biogenic calcium carbonate)의 부재로, 남극해에서의 AMS 분석은 보통 대량 유기 탄소 (bulk organic carbon) 함량을 사용하여 이루어진다. 따라서, 고해양학자들은 남극해의 퇴적물 코어를 가지로 강력하고 명확한 연대측정을 하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 이 오랜 장애물을 극복하기 위해, 우리는 특정 화합물 (compound-specific) AMS ^{14}C 기술을 고수온 복원에 사용하는 isoGDGTs 및 LCD에 적용하려 한다. 우리의 이 접근 방식이 성공하면, 남극해에서의 고기후학 및 고해양학 연구에 새로운 지평을 열 것이다.

- 남극해의 이산화탄소 제거능력이 미래 기후변화에 어떻게 변화할 것인지에 국제적인 관심이 집중된 가운데 그와 연관된 자연적 탄소 펌프 (natural carbon pumps) 중 한 분기인 생물학적 펌프(biological pump)가 온난화 현상에 어떻게 반응할 것인지에 대한 논란이 뜨겁다.
- 생물학적 펌프(biological pump)에 관련된 대부분의 고해양학 연구들은 과거의 생물 생산성 변화와 유기입자탄소의 심해로의 침강입자 플럭스(flux)를 재구성함에 초점을 맞추고 있다.
- 과거 생물학적 생산성 변화를 재구성하는데 사용되고 있는 다양한 생물학적, 화학적 프록시(proxy)들은 다른 요인들 즉, 온도, 산소 농도, 및 해양 순환 등에 의해서도 깊은 영향을 받고 있음이 널리 알려져 있다.
- 과거 남극해에서의 생물 생산성 변화, 따라서 생물학적 펌프 (biological pump)의 이산화탄소 제거능력에 고수온 변화가 어떻게 영향을 미쳤는지에 대한 연구가 동반되어야 한다.
- 현재 남극해에서의 정량적인 고수온 변화 복원에 필요한 방법들이 제한되어 있다.

○ 현재 남극해 연안에서는 홀로세 (약 10,000년전) 동안의 정량적인 고수온 고해상도 기록들이 부족한 상황이다.

가. 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 감축을 위한 대책 마련이 촉구 되고 있음. 이를 위해 대기 중 이산화탄소의 포집 및 저장 기술(SSC: Carbon Capture & Storage) 및 철 비옥화 등의 기술이 주목 되고 있으며 이들 기술의 경제적성과 안정성을 고려하면 친환경적인 접근이 시도되어야 함. 친환경적인 이산화탄소 저장 기술을 찾기 위해서는 남극 해역에서 현재의 이산화탄소 저장 능력을 확인하고 향후 기후 변화에 따른 이산화탄소 거동에 대한 예측 및 대처가 필요함.

나. 해양에서 탄소의 제거 기작은 이산화탄소를 이용하여 수층에서 생산된 유기탄소가 먹이망을 통해 순환되고 이 중 일부는 심층 및 해저로 이동하여 해양에 저장되는 과정으로 이루어져 있음. 남극해역은 높은 일차생산력으로 인해 대기 중 이산화탄소의 흡수기작이 매우 높은 것으로 알려져 있음. 따라서 남극해역에서 이산화탄소가 해양으로 흡수되고 해양 퇴적물로 저장되는 기작을 이해하는 것은 이산화탄소 저감을 위해 선행되어야 하는 매우 중요한 단계임.

다. 남극 해양에서 자연적인 이산화탄소 흡수 기작을 이해하기 위해서는 기후 변화 및 해양 환경의 변동, 그리고 해양 생물의 상호 관계를 파악해야 함. 또한 해양 환경 변동과 해양 생물의 적응 기작의 순서를 이해하는 것은 미래 기후 변동으로 인한 남극 해양에서 탄소의 거동을 예측할 수 있는 중요한 부분임. 환경 및 생물의 변화의 인과관계를 설명하기 위해 과거의 환경과 일차생산자의 생산력의 변화의 기록이 중요한 증거로 활용될 수 있음. 따라서 과거 남극 해역의 생산력 및 해양 환경의 복원은 이산화탄소 저장 기작 이해의 필수 요소임.

라. 해양 퇴적물에 기록된 고생산력 및 고수온 정보를 획득하기 위한 기존의 지질학적 접근 방법은 극저온의 해양 환경과 수층에서 해양 생물의 기록(유공충 등)이 잘 보존되지 않는 특성으로 인해 남극 해역에서 고환경 복원 연구의 어려움으로 작용하며 특히 지질연대를 결정하는데 어려움이 따름. 따라서 남극의 퇴적물에서 지질연대를 결정하기

위한 새로운 기법의 도입이 필수적임.

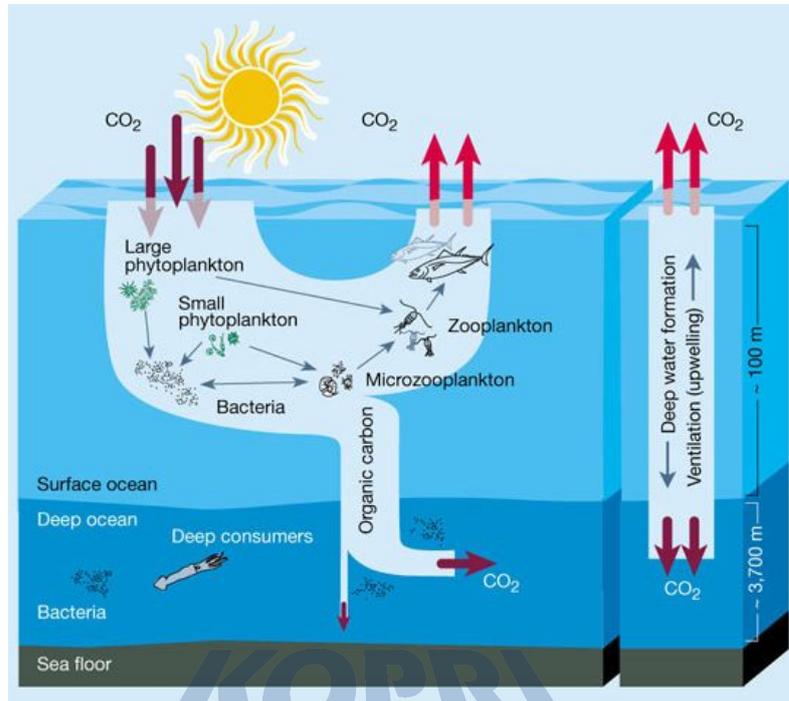


그림 4. 생물학적 기작(Biological pump)을 통한 탄소 저장고로서의 해양의 역할 (Chisholm, 2000. Nature)

2. 국내 · 외 연구개발 현황

2-1. 국내 연구현황

가. 국내에서 해양 생물 및 퇴적물에서 안정동위원소를 활용한 연구는 활발히 진행되고 있으나 분자단위의 안정동위원소 분석은 초기 연구 단계에 불과함. 또한 관련 연구를 수행할 전문 연구원이 부족한 실정임.

나. 남극 해역에서 다양한 연구기법을 활용하여 고환경 연구가 시도되고 있으나 해양 퇴적물에서 연대 결정에 어려움이 있음. 특히 심층수에 의해 오래된 용존무기탄소가 수층에 존재하고, 일반적으로 퇴적물에서 유공충이 적게 관측되는 남극 해역의 특성으로 인해 방사성탄소를 활용한 연대 결정에 어려움이 따름.

다. 남극 해역에서 높은 일차생산력을 보임에도 불구하고 극저온의 해양환

경 특성과 탄산염 골격을 가진 유공충 등의 기록의 보존상태가 좋지 않아 해양퇴적물에서 고해양 환경의 기록을 복원하는 데에 있어 기존의 연구 방법의 한계를 보임.

2-2. 국외 연구현황

가. 미국, 영국, 독일, 유럽 등 선진국에서는 Bransfield Strait, King George Island, McMurdo, Marguerite Bay 등의 남극 해역에서 장기간에 걸친 침강입자 채집기 계류 연구가 시행되고 있음

나. 미국과 네덜란드, 독일, 일본의 연구자들은 퇴적물 내의 지방산을 포집하고 이의 방사성 탄소동위원소 분석 기법을 개발하여 남극 해역과 같이 연대 결정이 어려운 해역에서도 성공적으로 지질연대를 확인하였음.

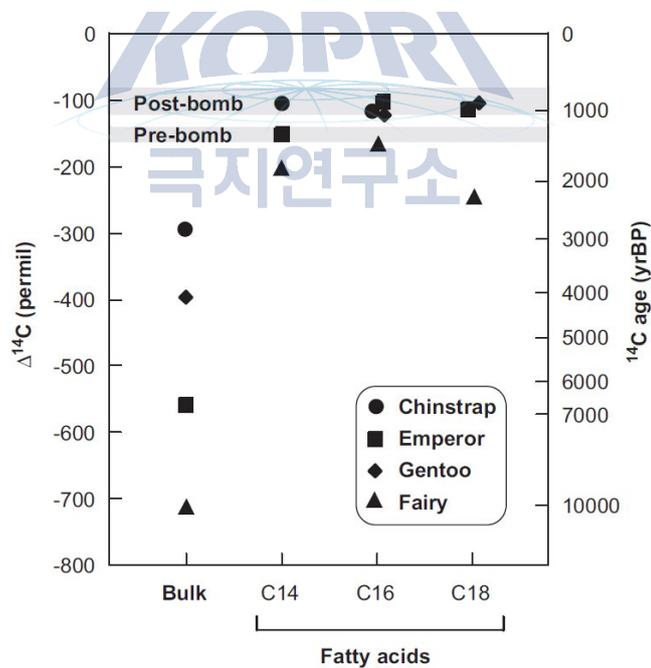


그림 5. 남극 로스 해역에서 시도된 퇴적물과 지방산의 방사성 탄소동위원소를 이용한 연대 결정 결과의 차이

다. 해양의 질소 순환을 이해하기 위해 해양 퇴적물에서 아미노산의 질소 안정동위원소 비 분석 기법을 활용되고 있음. 퇴적물에서 분석된 질소

안정동위원소비는 다양한 질소원이 혼재되어 있으므로 고환경에서 생지화학적 순환을 이해하는데 어려움으로 작용. 선진국에서는 분자별 질소 안정동위원소비 분석 기법을 이용하여 해양 질소 순환을 규명하는데 중요한 증거로 활용하고 있음.

라. 해양 퇴적물에서 추출된 지질 생체 지표를 이용한 생지화학적 연구 기법을 활용하여 과거 수층의 일차생산자의 생산력 기록을 복원하고 고수온을 복원하는 연구가 활발히 수행되고 있음.

3. 사업 내용

남극해는 높은 일차생산력을 보이는 해역으로 대기 중 이산화탄소를 고정하여 해양저로 이동시키는 기작이 활발히 일어나고 있음. 생물학적 기작을 통해 해양으로 유입된 이산화탄소는 일차생산자들을 통해 유기 합성되며 이는 먹이망을 통하여 상위 섭식자로 이동되고 섭식자들의 대사과정을 통해 이산화탄소로 배출되는 순환과정을 거침. 이 중 심해로 침강된 유기탄소는 심해의 박테리아에 의해 분해되며 이는 해양의 표층에서 보다 오랜 기간 심층에 머무르게 됨. 해양저까지 침강한 유기탄소는 궁극적으로 대기 중 이산화탄소를 저장하는 종착지가 되며, 따라서 수층에서 심해를 거쳐 해양퇴적물까지의 탄소의 거동 및 기작을 파악하고 이산화탄소 저장고로서의 가치 확인이 중요함. 또한 과거 기후 변화에 의한 해양 환경 변화와 남극해에서 이산화탄소 순환의 기작의 변화를 확인함으로써 미래 환경 변화에 의한 이산화탄소의 거동을 예측하고 대비하기 위한 중요한 정보를 제공.

이 프로젝트는 고분자 화합물(isoGDGTs와 LCD)의 사용에 특별한 중점을 두며 그와 관련된 프록시(proxy) 검증 연구에 multi- 및 inter-disciplinary 접근 방식을 추구하고 있다. 특히, 이 프로젝트는 생물유기지구화학을 분자생물학과 연결하는 연구를 수행하려한다.

- Core lipid (CL) isoGDGTs와 intact polar lipid (IPL)-derived isoGDGTs를 비교 연구함으로써, 남극해 침강입자 및 표층 퇴적물에서 고분자 화합물 isoGDGTs의 생물학적 출처와 분포를 결정하는 환

경 요인들 규명.

- 남극해 침강입자 및 표층 퇴적물에서 고분자 화합물 isoGDGTs의 생물학적 출처와 분포를 결정하는 환경 요인들 규명.
- 남극해 침강입자 및 표층 퇴적물에서 LCD의 생물학적 출처와 분포를 결정하는 환경 요인들 규명.
- 특정 화합물AMS 14C측정을 통해 목표 고분자 화합물(isoGDGTs와 LCD)을 퇴적시추 코어의 연대측정에 가능한지 규명.
- 목표 고분자 화합물(isoGDGTs와 LCD)을 이용해 서남극 반도 웨델해와 서남극 로스해 지역에서 홀로세 (약 10,000년전) 동안의 정량적인 고해상도 고수온 변화 복원.

3-1. 남극해 이산화탄소 거동 모니터링

- 가. 시계열 침강입자 포집 시스템을 활용한 부유 입자내의 유기생체지표 연구
- 나. 유기생체지표의 수층 내 거동 확인
- 다. 이산화탄소 저장고로서 남극해 역할 규명

3-2. 해양 퇴적물의 연대 결정을 위한 최신 기술 수립

- 가. 해양 퇴적물에서 추출된 지질생체지표 포집
- 나. 포집된 지질생체지표의 방사성탄소 분석
- 다. 남극 해역 퇴적물의 연대 결정

3-3. 남극해 고해양 생산성 및 고수온 복원

- 가. 남극해 퇴적물에서 일차생산자의 지질생체지표를 이용한 고해양 생산성 복원
- 나. 퇴적물 내 아미노산의 질소안정동위원소비 분석을 통한 고해양 환경에서 질소 순환 이해
- 나. 고수온 지표로 활용되고 있는 생체지표를 이용한 고수온 복원
- 다. 퇴적 유기탄소의 기원 규명 및 고환경 복원



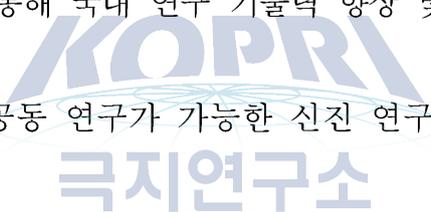
그림 6. 고성능액체크로마토그래피와 포집 시스템



그림 7. 가스크로마토그래피에 장착된 분자 포집기

3-4. 국제 공동 연구 기반 구축

- 가. 국제 공동 연구를 통해 국내 연구 기술력 향상 및 최신 연구 기법 확립의 기반을 다짐
- 나. 선진 연구진들과 공동 연구가 가능한 선진 연구자 양성



4. 사업 추진체계 및 전략

4-1. 사업운영 기본방향

- 가. 남극해 이산화탄소 거동 모니터링에 적합한 해역을 선정하고 선정된 해역에 시계열 침강입자 포집 시스템 구축. 정기적 관측 시스템을 이용한 남극 해역에서 해양 생물에 의한 이산화탄소 제거 능력의 정량적 산출
- 나. 남극 해역 퇴적물에서 유기지화학적 분석 기법을 활용하여 고해양 생산력 복원 및 고기후 복원. 유기분자 단위의 동위원소 분석 기법을 적용하여 과거 질소 순환기작 이해
- 다. 남극 해역 퇴적물 연대 결정을 위한 지질생체지표의 방사성 탄소 동위원소 분석. 결정된 연대와 지질학적 기법으로 확인된 연대와의 비교 검증. 새로운 연대 결정 기법의 활용화를 위한 기반 구축

4-2. 사업추진 체계 및 전략

● 연구 추진 체계

연구 지역에서의 수괴(water mass)의 물리적 매개변수(parameter)에 대한 정보를 얻기 위해 CTD (conductivity - temperature - depth) 시스템을 사용할 것이다. 해수의 영양 분석을 위한 물 시료는 로세트 샘플러(Rosette sampler)의 Niskin 병에서 수집한다. 부유 입자상 물질 (SPM)은 넓은 지리적 영역을 커버하는 긴 횡단면을 따라 배에 장치된 지속적인 펌프 시스템을 이용해 표층수(surface waters, 수심 0-5 m)에서 수집한다. 또한 심층수(subsurface waters)에서의 부유 입자상 물질(SPM)은 로세트 샘플러(Rosette sampler)의 Niskin 병 또는 in situ 펌프 시스템을 이용하여 수집한다. 심층수(subsurface waters) 수집은 긴 시간이 소요되므로 선택한 2-3 스테이션에서 여러 물 깊이에서 한다. 샘플링 수심은 각기 다른 수괴(water mass)의 물을 수집할 수 있도록 선택한다: i) 0-5 m, ii) 약 50-100 m, 엽록소 최대(chlorophyll maximum) 깊이 (CTD에 부착한 형광 검출기를 사용하여 측정), iii) 약 200 m, iv) 약 1,000 m, v) 약 2,000 m, 그리고 VI) 바다 바닥 위. 남극해의 태평양 부분에서 진행된 이전 크루즈들은 최소 100 L 해수가 지질 바이오마커 (lipid biomarker) 분석에 필요하다고 보고하였다. 수집한 물을 사전에 연소 처리한 두 종류의 공경(0.2 mm 그리고 0.7 mm)을 가진 유리섬유 필터(GF/F)를 이용해 여과한다. 여과 시스템이 선박의 환경에서 오염의 영향을 받지 않도록 주의한다. 모든 필터는 분석 전까지 -20°C에 저장 한다. 또한, 가능하다면, 연속적인 장기 관찰을 위해 퇴적물 트랩(sediment trap)을 사용하여 수집한 침강입자도 분석할 것이다. 표층 퇴적물은 box-corer 또는 multi-corer를 사용하여 열린바다(open ocean)에서 해안에 이르는 횡단면을 따라 수집할 것이다. 지질(lipid) 분석 및 특정화합물 AMS ^{14}C 측정을 위해 충분한 퇴적물의 양을 확보할 것이다. Gravity corer 또는 piston corer를 사용하여 얻은 홀로세 퇴적물 시추 코어들은 isoGDGTs와 LCD를 바탕으로 고수온 복원에 사용할 것이다.

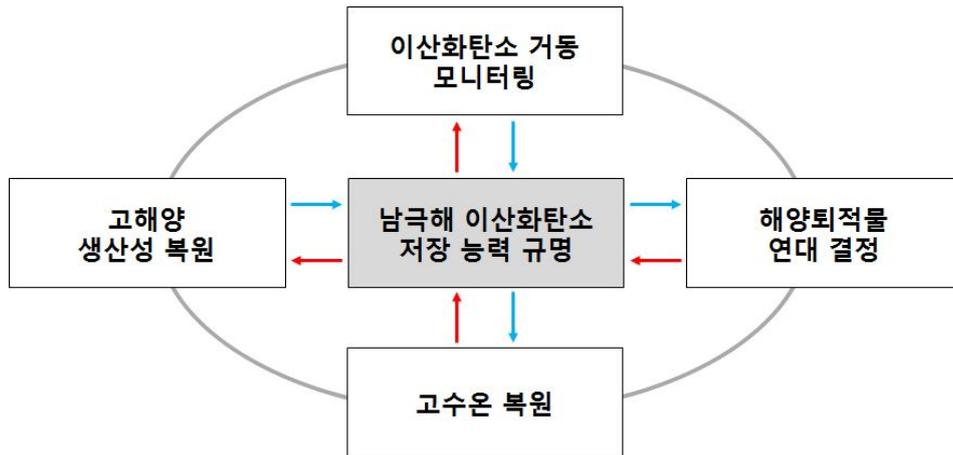


그림 8. 연구 추진 체계

● 분석 방법 및 계측

이 프로젝트를 위해 계획된 주요 분석 워크 플로우는 그림 9에 도시되어있다. 기본적인 벌크 (bulk) 및 분자 유기 지구 화학 장비(GC, GC-MS, HPLC-APCI-MS, EA-IRMS, GC-IRMS 및 LC 플렉스시스템)들은 이미 한양대학교가 갖추고 있다. 벌크 (bulk) 퇴적물 분석 (예: TOC 및 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)은 EA-IRMS를 이용하여 수행할 것이다. 지질 (lipid) 추출은 가속 용매 추출기 (ASE) 또는 수정된 Bligh & Dyer (BD) 기술을 사용하여 수행 될 것이다. 총 추출물은 비극성, 케톤, 그리고 극성 분획으로 분리 될 것이다. 극성 분획은 isoGDGTs 및 LCD 분석에 사용 된다. 그 동안 HPLC-APCI-MS 기기를 이용해 통상적으로 사용되어 오던 CL isoGDGTs의 분석기법 (Holman's et al., 2000)이 NIOZ 팀에 의해 아주 최근에 수정 되었다. 우리는 NIOZ 그룹과 협력하여 이 새로운 방법을 한양대 실험실에 이미 설정 중에 있다. 우리는 또한 HPLC-APCI-MS 기기를 이용해 Pitcher 등(2009)에 의해 고안된 intact polar lipid에서 유래된 isoGDGTs, 즉 IPL-derived isoGDGTs를 분석하는 방법을 한양대 실험실에 적용할 것이다. 이 분석방법은 우리가 좀 더 오래된 isoGDGTs로 부터 좀 더 신선한 isoGDGTs를 침강입자 및 표층 퇴적물에서 분리 할 수 있도록 할 것이다. 우리는 또한 심층수(subsurface waters)에서의 in-situ production을 관측하기 위하여 IPL isoGDGTs을 직접 측정하는 연구를 진행하고자 한다. 직접적인 IPL isoGDGTs 측정은 네덜란드 국립해양연구소(NIOZ)에서 확립한 프로토콜에 따라 Jaap S. Sinninghe Damsté (NIOZ, 네덜란드) 교수와의 긴밀한 협력하에서 진행할 것이다. LCD 측정은 Rampen

et al. (2008)의 방법을 따르며 GC/MS를 사용하여 분석한다. IsoGDGTs AMS ^{14}C 측정(예: Smittenberg et al., 2004)을 위해서는 Smittenberg 등(2002)이 high-performance liquid chromatography와 flow injection analysis-atmospheric pressure chemical ionisation mass spectrometry를 사용하여 crenarchaeol를 위해 개발한 농축 방법을 따를 것이다. LCD의 AMS ^{14}C 측정을 위한 프로토콜은 새롭게 우리의 실험실에서 개발할 것이다. IsoGDGTs와 LCD의 AMS ^{14}C 분석은 Dr. Irka Hajdas (ETH, 스위스)와의 긴밀한 협력하에 수행될 것이다.

가. 남극해 이산화탄소 거동 모니터링에 적합한 해역을 선정하고 정기적 관측 시스템 구축

- (1) 수층 내 지질생체지표의 거동 확인을 통한 남극해 탄소순환 기작 규명
- (2) 침강입자와 표층 퇴적물 내의 생체지표를 이용한 퇴적 기작 이해

나. 남극 해역 퇴적물의 연대 결정

- (1) 퇴적물에서 추출된 생체지표의 분자별 포집기술 개발
- (2) 결정된 연대와 지질학적 연대 분석 기법과의 비교 해석

다. 남극해 퇴적물 내의 지질생체지표를 이용한 고기후 기록 복원

- (1) 고생산성 지표 분석 및 연대에 따른 이산화탄소 흡수 능력 평가
- (2) 퇴적물에서 아미노산의 질소 안정동위원소 변동과 고생산성 변동과의 상호관계 이해
- (3) 고수온 복원 결과와 생산성 복원 결과를 이용한 고환경 복원

라. 국제 협력 파트너

- (1) Dr. Xavier Crosta & Dr. Jérôme Bonnin (EPOC, France): 미고생물학적 연구와 남극해에서 홀로세 고수온 기록들의 편집.
- (2) Prof. Jaap S. Sinninghe Damsté (NIOZ, Netherlands): Intact GDGT 분석
- (3) Dr. Irka Hajdas (ETH, Swiss): 특정 화합물 (compound-specific) AMS ^{14}C 분석.

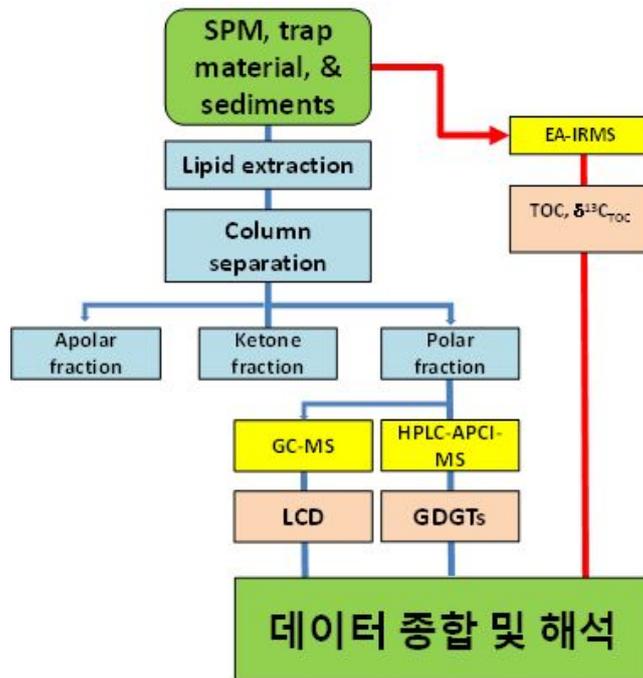


그림 9. 유기지화학적 분석 워크플로우 (workflow) 모식도.

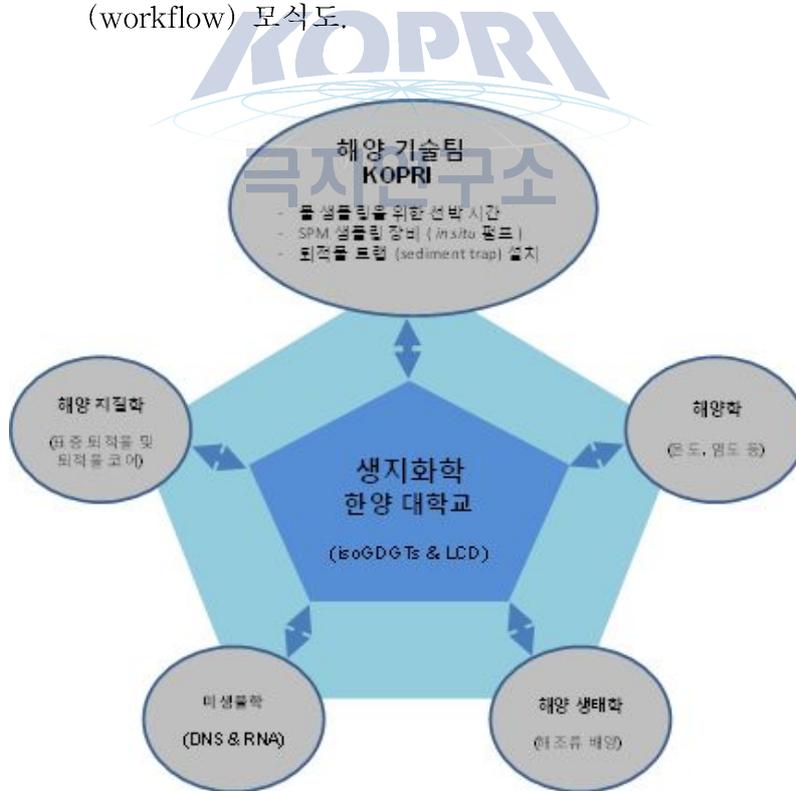


그림 10. 멀티 (multidisciplinary) 및 학제 간 (interdisciplinary) 협력 체계.

5. 기대 효과

위에서 언급 한 바와 같이, 심층수에서의 isoGDGTs와 관계된 앞으로의 연구는 생물학적 출처와 분포를 결정하는 환경 요인들을 규명하는 데 그 초점이 맞춰질 것이다. 이러한 연구는 아직 남극해에서 이루어진 적이 없으며, 따라서 앞으로 남극해에서의 프록시(proxy) 데이터를 좀 더 정확하게 해석하는데 꼭 필요한 연구분야이다. LDI 프록시(proxy)는 아직 한번도 남극해에서 그 사용 가능성 여부가 철저하게 검증되지 않은 상태이다. 그러므로 우리 연구는 TEX_{86}^L 와 함께 LDI 프록시(proxy)의 남극해에서의 정량적 paleothermometry로서의 잠재력을 평가하는 데 중요한 역할을 할 꼭 필요한 연구 분야이다. 이 프로젝트의 가장 혁신적이고 유망한 측면 중 하나는 고수온 복원에 사용하는 고분자 화합물, 즉 isoGDGTs와 LCD를 AMS ^{14}C 측정에 사용함으로써 연대측정을 도모함에 있다. 우리연구가 성공하면, 이는 남극해에서 고기후 변화 연구에 새로운 지평을 열 것이다.

- 가. 남극 해역의 이산화탄소의 거동 확인 및 제거 능력 확인을 통한 대기중 이산화탄소 농도 조절을 위한 기본 자료 제공
- 나. 과거 남극해의 대기중 이산화탄소 제거 능력의 변화기록을 통해 미래의 대기의 이산화탄소 농도 변화의 예측이 가능.
- 다. 분자단위의 동위원소 분석 기법은 고환경 연구에서 연대 복원을 비롯한 다양한 분야에 적용 가능
- 라. 국제 공동연구의 기반 마련 및 관련 연구 분야의 전문가 양성

● 세부 기대 효과

- 남극해 연안에서 정량적인 고수온 변화 복원에 사용 가능한 유기지화학적 방법 (& LCD) 제시.
- 검증한 고수온 복원 방법 (TEX_{86}^L & LCD)을 이용한 홀로세 (약 10,000년전) 동안의 정량적인 고해상도 고기후 변화 복원 가능.
- 복원된 남극해 고해상도 기후변화 기록들은 미래 남극해 기후/환경

변화 예측에 필요한 기후 모델링 기초자료로 활용 가능.

- 국제적 남극권 기후/환경변화 연구에 관한 국가 경쟁력 제고에 도움 가능.

5-1. 결과의 보급과 인력양성

다수의 학술 논문이 이 프로젝트에서 나올 것이라고 예상된다. 이 논문들은 모두 상위권에 속하는 국제 저널에 기고할 수 있을 것으로 기대 된다. 작은 주제의 연구는 학/석사 학생 교육의 바탕으로 쓰일 것이며, 박사과정 학생들은 주 저자로 혹은 공동 저자로 공동 연구에 참여 하게 될 것이다. 석사 및 박사 학위과정 학생들은 초기 단계에는 국내 학회에 후기 단계에는 국제학회 및 워크샵에 참석 할 계획이다. PI 또는 주연구원(Post-doc 이상)은 매년 적어도 하나의 주요 국제학회에 참석 국제적 수준의 연구 결과를 보급 함에 힘 쓸 것이다. 이 프로젝트는 또한 한국과 유럽 학생들 그리고 젊은 연구 과학자 및 수석 연구 과학자들 사이의 국제 교류를 추진할 것이다.

5-2. 기타 필요 자원 / 인프라

프록시 (proxy) 개발 및 검증 연구는 성격상 멀티 (multidisciplinary) 및 학제 간 (interdisciplinary) 협력 접근 방식을 필요로 한다 (그림. 10). 따라서, 한양대학교에서 진행될 생지화학 연구 외에, 다른 연구 분야의 도움자 료가 꼭 필요하며 이러한 자료들은 국내 및 국제 협력을 통해 얻을 필요가 있다. 예를 들어 다음과 같은 인프라가 이 프로젝트를 보다 효율적이고 효과 적으로 진행하기 위해서 필요하다.

연구 지역 내에서의 수괴(water masse)의 물리적 매개 변수 (parameter)에 대한 정보를 얻기위해 전도도-온도-깊이 (conductivity - temperature - depth, CTD) 시스템을 이용해야 한다. CTD 수직 프로파일은 온도 (T), 염분 (S), 용존 산소, 형광 (엽록소), 및 탁도(turbidity)에 대한 정보를 제공 할 것입니다.

다른 깊이의 수심에서 입자상 부유물 (SPM) 수집에는 충분한 배 시

간이 고려 되어야 한다. 또한, 적어도 두 개의 McLane in situ pump system (McLane Laboratories Inc., Falmouth, MA)을 이용하면 샘플링 시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 화학분석에 충분한 시료채집에도 많은 도움이 된다. 현재, 우리가 아는 한, 국내에는 이러한 시스템이 없으므로 장기적인 관점에서 볼 때 이 시스템 구입은 필수 요건이다. 또한 더 긴 시간 주기 동안에 침강 입자를 주기적으로 수집하기 위해서는 침전물 트랩 (sediment trap)도 배치 되어야 한다.

생지화학, 조류의 생리 및 유전적 도구를 조합한 공동연구는 고수온 복원에 사용될 수 있는 프록시(proxy) 개발과 검증에 꼭 필요하다. 따라서, 높은 핵산 (RNA 및 DNA) 분석을 수행 할 수 미생물학자와 협력하는 것이 바람직하다.

Thaumarchaeota의 culture 또는 enrichment 실험은 isoGDGT 분포에 배양 조건이 미치는 영향을 조사하는데 매우 바람직한 방법이다.

생리적 요인이 LCD 분포에 미치는 영향을 연구하기 위해서는, 배치 (batch)와 연속 배양(continuous culture)에서 조류를 배양하는 것이 무엇보다 요구된다. 연속 배양(continuous culture) 조건은 미디어(질소, 인산 제 2 철 등)에서의 제한 요소에 기초하여 성장 속도를 설정하고, 따라서, 환경 설정에 가까운 성장 조건을 평가할 수 있게 할 것이다. 이러한 방법을 통하여, 넓은 염도 및 온도 범위에서 LCD 농도 및 분포 변화 양상도 평가 할 수 있다. LCD 생합성에 관여하는 유전자를 찾아 내기 위해서는, LCD를 생산하는 조류에 대한 배양 실험 (culture experiment)과, 배양조건이 LCD 농도 및 분포 변화 그리고 그들의 transcriptome (표현 유전자 expressed genes)에 미치는 영향을 조사하는 것이 바람직하다.

이와 같은 배양 실험들은 전 세계적으로 아직 초기단계에 있으며, 우리가 아는 한, 현재 NIOZ팀 만이 배양 실험에 큰 중점을 두고 있다. 그러므로 우리가 LCD를 함유한 해조류 배양에 성공한다면, 단기간 내에 이 연구분야에서 큰 파급효과를 얻을 수 있으며, 그로 인하여 우리의 국제적 입지를 확고히 할 수 있으리라 전망된다.

6. 참고 문헌

- Anderson, R.F., Z. Chase, M. Q. Fleisher, and J. Sachs (2002), The Southern Ocean's biological pump during the Last Glacial Maximum. *Deep-Sea Res. II* 49, 1909 - 1938.
- Bianchi, C., and R. Gersonde (2004), Climate evolution at the last deglaciation: the role of the Southern Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 228, 407 - 424.
- Bijl, P.K., J.A. Bendle, S.M. Bohaty, J. Pross, S. Schouten, L. Tauxe, C.E. Stickley, R.M. McKay, U. Röhl, M. Olney, A. Sluijs, C. Escutia, H. Brinkhuis, and Expedition 318 Scientists (2013), Eocene cooling linked to early flow across the Tasmanian Gateway. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 9645 - 9650.
- Birkholz, A., R.H. Smittenberg, I. Hajdas, L. Wacker, S.M. Bernasconi (2013), Isolation and compound-specific radiocarbon dating of terrigenous branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers (brGDGTs). *Org. Geochem.* 60, 9 - 19.
- Brochier-Armanet, C., B. Boussau, S. Gribaldo, and P. Forterre (2008), Mesophilic crenarchaeota: proposal for a third archaeal phylum, the Thaumarchaeota. *Nat. Rev. Microbiol.* 6, 245 - 252.
- Crosta, X., and A. Shemesh (2002), Reconciling down core anticorrelation of diatom carbon and nitrogen isotopic ratios from the Southern Ocean. *Paleoceanography* 17, 1010, doi:10.1029/2000PA000565.
- Crosta, X., D. Maxime, D. Delphine, M.A. Courty, and O. Ther (2007), Holocene long- and short-term climate changes off Adélie Land, East Antarctica. *Geochem. Geophys. Geosy.*, doi:10.1029/2007GC001718.
- Crosta, X., D. Denis, and O. Ther (2008), Sea ice seasonality during the Holocene, Adélie Land, East Antarctica. *Mar. Micropaleontol.* 66, 222 - 232.

- de Leeuw, J.W., W.I.C. Rijpstra, and P.A. Schenck (1981), The occurrence and identification of C₃₀, C₃₁ and C₃₂ alkan-1,15-diols and alkan-15-one-1-ols in Unit I and Unit II Black Sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 2281 - 2285.
- Drenzek, N.J., D.B. Montluçon, M.B. Yunker, R.W. Macdonald, and T.I. Eglinton (2007), Constraints on the origin of sedimentary organic carbon in the Beaufort Sea from coupled molecular ¹³C and ¹⁴C measurements. *Mar. Chem.* 103, 146 - 162.
- Druffel, E.R.M., S. Honjo, and S. Griffin (1986), Radiocarbon in particulate matter from the eastern sub-arctic Pacific Ocean: Evidence of a source of terrestrial carbon to the deep sea. *Radiocarbon* 28, 397 - 407.
- Eglinton, T.I., L.I. Aluwihare, J.E. Bauer, E.R.M. Druffel, and A.P. McNichol (1996), Gas chromatographic isolation of individual compounds from complex matrices for radiocarbon dating. *Anal. Chem.* 68, 904 - 912.
- Etourneau, J., L. G. Collins, V. Willmott, J.-H. Kim, L. Barbara, A. Leventer, E. W. Domack, S. Schouten, J. S. Sinninghe Damsté, A. Bianchini, V. Klein, X. Crosta, and G. Massé (2013), Holocene climate variations in the western Antarctic Peninsula: evidence for sea-ice extent controlled by insolation and ENSO variability changes. *Clim. Past* 9, 1 - 41.
- Hopmans, E.C., S. Schouten, R.D. Pancost, M.J.T. van Der Meer, and J.S. Sinninghe Damsté (2000), Analysis of intact tetraether lipids in archaeal cell material and sediments using high performance liquid chromatography/atmospheric pressure ionization mass spectrometry. *Rap. Comm. Mass. Spectrum* 14, 585-589.
- Kim, J.-H., S. Schouten, E.C. Hopmans, B. Donner, and J.S. Sinninghe Damsté (2008), Global sediment core-top calibration of the TEX₈₆ paleothermometer in the ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72,

1154 - 1173.

- Kim, J.-H., J. van der Meer, S. Schouten, P. Helmke, V. Willmott, F. Sangiorgi, N. Koç, E. C. Hopmans, and J. S. Sinninghe Damsté (2010), New indices and calibrations derived from the distribution of crenarchaeal isoprenoid tetraether lipids: Implications for past sea surface temperature reconstructions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4639 - 4654.
- Kim, J.-H., X. Crosta, V. Willmott, H. Renssen, G. Massé, J. Bonnin, P. Helmke, S. Schouten, and J. S. Sinninghe Damsté (2012), Holocene subsurface temperature variability in the eastern Antarctic continental margin. *Geophys. Res. Lett.* 39, doi:10.1029/2012GL051157, 2012.
- Kim, J.-H., S. Schouten, M. Rodrigo-Gámiz, S. Rampen, G. Marino, C. Huguet, P. Helmke, R. Buscail, E.C. Hopmans, J. Pross, F. Sangiorgi, J.B.M. Middelburg, and J.S. Sinninghe Damsté (2015a) Influence of deep-water derived isoprenoid tetraether lipids on the $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$ paleothermometer in the Mediterranean Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 150, 125 - 141.
- Kim, J.-H., L. Villanueva, C. Zell, and J.S. Sinninghe Damsté (2015b), Biological source and provenance of deep-water derived isoprenoid tetraether lipids along the Portuguese continental margin. Submitted to *Geochim. Cosmochim. Acta*.
- Lochte, K., R.F. Anderson, R. Francois, R.A. Jahnke, G. Shimmiel, and A. Vetrov (2003), Benthic processes and the burial of carbon, in *Ocean Biogeochemistry: The Role of the Ocean Carbon Cycle in Global Change*, edited by M. J. R. Fasham, pp. 196 - 216, Springer, New York.
- Lopes dos Santos, R.A., M.I. Spooner, T.T. Barrows, P. de Deckker, J.S. Sinninghe Damsté, and S. Schouten (2013), Comparison of organic (UK'_{37} , $\text{TEX}_{86}^{\text{H}}$, LDI) and faunal proxies (foraminiferal assemblages)

- for reconstruction of late Quaternary sea surface temperature variability from offshore southeastern Australia. *Paleoceanography* 28, doi:10.1002/palo.20035.
- Nielsen, S. H. H., N. Koç, and X. Crosta (2004), Holocene climate in the Atlantic sector of the Southern Ocean: controlled by insolation or oceanic circulation? *Geology* 32, 317 - 320.
- Pitcher, A., E.C. Hopmans, S. Schouten, J.S. Sinninghe Damsté (2009), Separation of core and intact polar archaeal tetraether lipids using silica columns: Insights into living and fossil biomass contributions. *Org. Geochem.* 40, 12 - 19.
- Rampen, S.W., S. Schouten, S.G. Wakeham, and J.S. Sinninghe Damsté (2007), Seasonal and spatial variation in the sources and fluxes of long chain diols and mid-chain hydroxy methyl alkananoates in the Arabian Sea. *Org. Geochem.* 38, 165 - 179.
- Rampen, S.W., S. Schouten, and J.S. Sinninghe Damsté (2011), Occurrence of long chain 1,14 diols in *Apedinella* radiolarians. *Org. Geochem.* 42, 572 - 574.
- Rampen, S., V. Willmott, J.-H. Kim, E. Uliana, G. Mollenhauer, E. Schefuß, J. S. Sinninghe Damsté, and S. Schouten (2012), A reappraisal of the palaeoceanographic application of long chain diols in marine sediments: II. Long chain 1,13- and 1,15-diols as potential proxies for palaeotemperature reconstruction. *Geochim. Cosmochim. Acta* 84, 204 - 216.
- Sallie W. Chisholm, 2000. Oceanography: Stirring times in the Southern Ocean. *Nature*. 407, 685-687.
- Schouten, S., E.C. Hopmans, R.D. Pancost, and J.S. Sinninghe Damsté (2000), Widespread occurrence of structurally diverse tetraether membrane lipids: Evidence for the ubiquitous presence of low-temperature relatives of hyperthermophiles. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97, 14421 - 14426.

- Schouten, S., E.C. Hopmans, E. Schefuß, and J.S. Sinninghe Damsté (2002), Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth. Planet. Sci. Lett.* 204, 265 - 274.
- Schouten, S., E.C. Hopmans, A. Forster, Y. van Breugel, M.M.M. Kuypers, and J.S. Sinninghe Damsté (2003), Extremely high sea-surface temperatures at low latitudes during the middle Cretaceous as revealed by archaeal membrane lipids. *Geology* 31, 1069 - 1072.
- Schouten, S., E.C. Hopmans, and J.S. Sinninghe Damsté (2013), The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: a review. *Org. Geochem.* 54, 19 - 61.
- Shevenell, A. E., A. E. Ingalls, E. W. Domack, and C. Kelly (2011), Holocene Southern Ocean surface temperature variability west of the Antarctic Peninsula, *Nature* 470, 250 - 254.
- Sinninghe Damsté, J.S., S. Rampen, W.I.C. Rijpstra, B. Abbas, G. Muyzer, and S. Schouten (2003), A diatomaceous origin for long-chain diols and mid-chain hydroxy methyl alkanoates widely occurring in Quaternary marine sediments: Indicators for high nutrient conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 67, 1339 - 1348.
- Smittenberg, R.H., E.C. Hopmans, S. Schouten, and J.S. Sinninghe Damsté (2002), Rapid isolation of biomarkers for compound specific radiocarbon dating using high-performance liquid chromatography and flow injection analysis-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *J. Chromatogr. A* 978, 129 - 140.
- Smittenberg, R.H., E.C. Hopmans, S. Schouten, J.M. Hayes, T.I. Eglinton, and J.S. Sinninghe Damsté (2004), Compound-specific radiocarbon dating of the varved Holocene sedimentary record of Saanich Inlet, Canada. *Paleoceanography* 19, doi:10.1029/2003PA000927.
- Spang, A, R. Hatzepichler, C. Brochier-Armanet, T. Rattei, P. Tischler, E. Spieck, W. Streit, D.A. Stahl, M. Wagner, and C. Schleper (2010),

- Distinct gene set in two different lineages of ammoniaoxidizing archaea supports the phylum Thaumarchaeota. *Trends Microbiol.* 18, 331 - 340.
- Stenni, B., V. Masson-Delmotte, E. Selmo, H. Oerter, H. Meyer, R. Röthlisberger, J. Jouzel, O. Cattani, S. Falourd, H. Fischer, G. Hoffmann, P. Iacumin, S. J. Johnsen, B. Minster, and R. Udisti (2010), The deuterium excess records of EPICA Dome C and Dronning Maud Land ice cores (East Antarctica). *Quat. Sci. Rev.* 29, 146 - 159.
- Takahashi, T., C. Sweeney, B. Hales, D.W. Chipman, T. Newberger, J.G. Goddard, R.A. Iannuzzi, and S.C. Sutherland (2012), The changing carbon cycle in the Southern Ocean. *Oceanography* 25, 26 - 37.
- Taylor, F. and C. Sjunneskog (2002), Postglacial marine diatom record of the Palmer Deep, Antarctic Peninsula (ODP Leg 178, Site 1098): 2. Diatom assemblages. *Paleoceanography* 17, doi:10.1029/2000PA000564.
- Taylor, K.W.R., M. Huber, C.J. Hollis, M.T. Hernandez-Sanchez, and R.D. Pancost (2013), Re-evaluating modern and Palaeogene GDGT distributions: Implications for SST reconstructions. *Global Planet. Change* 108, 158 - 174.
- Versteegh, G.J.M., H.J. Bosch, and J.W. de Leeuw (1997) Potential palaeoenvironmental information of C24 to C36 mid-chain diols, keto-ols and mid-chain hydroxy fatty acids; a critical review. *Org. Geochem.* 27, 1 - 13.
- Villanueva, L., S. Schouten, and J.S. Sinninghe Damsté (2014), A Re-evaluation of the Archaeal Membrane Lipid Biosynthetic Pathway. *Nature Rev. Microbiol.* 12, 438 - 448.
- Villanueva, L., S. Schouten, and J.S. Sinninghe Damsté (2015), Depth-related distribution of a key gene of the tetraether lipid biosynthetic pathway in marine Thaumarchaeota. *Environ. Microbiol.*,

doi:10.1111/1462-2920.12508.

Volkman, J.K., S.M. Barrett, G.A. Dunstan, and S.W. Jeffrey (1992), C30-C32alkyl diols and unsaturated alcohols in microalgae of the class Eustigmatophyceae. *Org. Geochem.* 18, 131 - 138.

Willmott, V., S.W. Rampen, E. Domack, M. Canals, J.S. Sinninghe Damsté, and S. Schouten (2010) Holocene changes in Proboscidiatom productivity in shelf waters of the north-western Antarctic Peninsula. *Antarctic Sci.* 22, 3 - 10.



부록 9. 남극해 탄소 리스크 관리

1. 남극해 통합탄소관리체계 구축의 필요성

본 장은 남극해가 기후변화의 영향에 민감하고 그 파급효과가 범지구적인 관계로 전문가의 관심이 모아져야 한다는 시각에서 마련되었다. 남극해는 영해로서 어느 나라의 국경(boundary)안에도 포함되지 않는다. 즉, 기후변화협약상에서 국가(당사국)별로 취합되는 National Communication의 온실가스 인벤토리에 포함되지 않는다. 이는 남극해에서 탄소배출/흡수량이 급증하거나 급감할 경우, 이에 대한 모니터링과 사후관리의 책임이 모호하다는 얘기가 된다. 즉, 남극해에 대한 통합적인 탄소 DB가 시급히 마련되어야 하며, 대륙에서는 나타나지 않는 탄소포집 및 저장 기능이 남극해에 존재할 경우, 이에 대한 리스크 관리가 추가되어야 할 것이다. 남극해의 통합 탄소관리체계는 현재의 수준을 진단하는 통계구축에서 탄소 포집과 저장기능에 대한 실증분석을 통한 예측연구가 수반되어야 하며, 탄소저감에 대한 가치평가가 병행되어야 한다. 따라서, 본 장에서는 탄소저감에 대한 명분을 제공한 기후변화협약에 대한 이해와 시장메커니즘에 대한 이해를 돕기 위해 협약의 의의와 감축행위에 대한 경제적 의미에 대하여 설명하고자 한다.

1-1. 기후변화협약 동향 및 시장메커니즘의 변화

가. 기후변화협약 및 교토의정서

1992년에 리우에서 결의된 기후변화협약은 전인류의 공통된 그러나, 차별화된 온실가스감축 노력을 약속한 국제 환경협약으로, 국가/기업의 경쟁력의 근간인 에너지/환경정책에 새로운 패러다임을 제공하고 있다. 기후변화협약의 구성원은 크게 선진국과 개도국으로 나뉘며, 협약상의 선진국이라 함은 부속서에 명시된 OECD회원국(한국과 멕시코 제외)과 동구유럽 및 모나

코 등을 명명하며, 이 외의 국가는 개도국으로 분류된다. 협약에 의하면, 선진국은 역사적 책임에 따라 의무감축 목표를 할당받아 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 질소산화물(N₂O), HFCs, PFCs, SF₆의 6개 온실가스를 감축하기로 명시되어 있다. 이들 선진국의 의무감축 목표는 1차 감축기간(2008년-2012년) 내에 1990년 대비 최소한 5% 이상으로 설정하였다. 그러나, 기후변화협약은 미국의 교토의정서 탈퇴선언으로 인하여 기본 구조가 흔들리는 위기를 맞이하게 되었지만, 독일 본회의와 모로코 마라케쉬 선언을 통하여 정치적 합의를 도출하는 등 유럽을 중심으로 교토의정서 발효를 이끌어냈다. 그럼에도 불구하고, 교토 메커니즘을 포함한 국제온실가스 시장에 대한 불확실성은 1차 감축기간(2008-2012)가 지난 현재에도 여전한 상황이다. 그 이유는 기후변화체제의 연속성에 있다. 이러한 연속성 문제는 포스트교토(Post Kyoto)가 올해 기후정상회의에서 합의를 도출할 것이라는 기대감으로 불식될 수 있을지는 모른다. 그러나, 기후변화협약은 교토체제가 선진국에만 감축의무가 주어져 있기 때문에 배출권시장은 여전히 불확실성이 제거되지 않은 상태이다. 따라서, 올해 합의를 도출할 기후변화협약의 논의초점은 바로 온실가스감축에 대한 개도국의 역할에 맞추어질 것이다. 그 배경에는 개도국의 참여 없이는 정책효과를 극대화하기 힘들고, 선진국과 개도국간의 이원화된 교토체제로는 형평성 문제를 해결할 수 없기 때문이다. 즉, 포스트교토는 교토체제와는 달리 의욕을 앞세우기 보다는 실리와 합리성에 기반을 두고 포괄적인 감축이 실현되는 방향으로 전개될 전망이다.

나. 교토 메커니즘과 탄소시장의 기본적인 특성

교토의정서의 가장 큰 성과는 교토 메커니즘이라는 시장메커니즘을 마련한 것이다. 이로 인하여 탄소배출권을 사고 파는 탄소시장이라는 옵션을 경제주체들에게 제공하게 된다. 교토 메커니즘에는 선진국간의 공동이행(Joint Implementation), 배출권거래(International Emissions Trading)와 선진국-개도국간의 청정개발체제(Clean Development Mechanism)이 있다. 이들 메커니즘으로 인하여 생성된 크레딧은 예치가 가능하고 시장에서 상호 호환이 가능토록 하여 금융상품으로서이 기능을 확대시켜, 전체적인 탄소시장의 유동성을 증대시키는데 일익을 할 것으로 기대된다. 이밖에, 선진국이 산림

프로젝트를 통하여 생성한 크레딧은 제거단위(Removal Unit: RMU)라 명명하고, 그 예치한도를 각국의 할당량의 각각2.5%로 한정하였다.

교토 메커니즘의 기본적인 특성은 그 기능면에서 세 메커니즘간에 상호 보완적 성격을 갖고 있으나, 리스크와 비용 factor로 인하여 크레딧을 보유하려는 수요자 입장에서는 상호 경쟁관계에 놓이게 된다. 즉, 수요자의 포트폴리오는 서수적 효용함수로 나타낼 수 있는 반면, 공급자는 기술이전 가능성, 역량형성 프로그램의 質, 수익성 등에 따라 사업 파트너를 결정한다. 따라서, 서로의 정보창구가 다름에 따라 수요자와 공급자간의 정보의 비대칭이 발생하며, 수요시장과 공급시장이 경쟁력 높은 국가에 편중될 소지도 높다.

현재, 이상의 교토 메커니즘 형태의 감축 크레딧 외의 offset credit을 거래하는 시장이 필요하게 됨에 따라 2차 시장(secondary market)의 역할이 증대되었으며, 포괄적 의미의 탄소시장이 전개되었다. 이는 탄소배출권이 의무당사국인 선진국에만 국한되는 상품이 아니라 개도국도 관심을 가져야 하는 상품으로 발전하게 된 것이다. 게다가 현재 진행되는 기후변화협약과 관련한 협상이 개도국을 포함하는 형태로 발전되면서 그동안 감축실적으로 인정받은 배출권은 조기행동에 대한 보상형태로 경제적 이익을 실현하게 되었다.

다. 탄소배출권시장의 종류

본 장에서 언급하는 배출권거래란 광의의 온실가스 감축크레딧을 사고 파는 시장을 의미함으로써, 선진국간의 국제배출권거래(IET)와 구별됨을 우선적으로 명시하고자 한다. 즉, 시장참여자가 탄소시장에서 취할 수 있는 옵션은 교토메커니즘, 즉, 선진국간의 국제배출권거래제(IET), 공동이행(JI)와 선진국-개도국간의 청정개발체제, 이외에도 2차 시장 및 지역별로 행해지는 배출권거래시장이 있다. 따라서, 탄소시장의 규모와 가격을 결정하는 인자는 비단 교토의정서 상의 수요와 공급 이외에도 기후변화협약의 전개방향을 비롯한 이들 수요와 공급의 변동요인을 포함하게 된다. 우선, 배출권, 즉, 온실가스 감축크레딧의 종류를 나열한 뒤, 시장의 결정인자에 대하여 설명하

기로 하겠다.

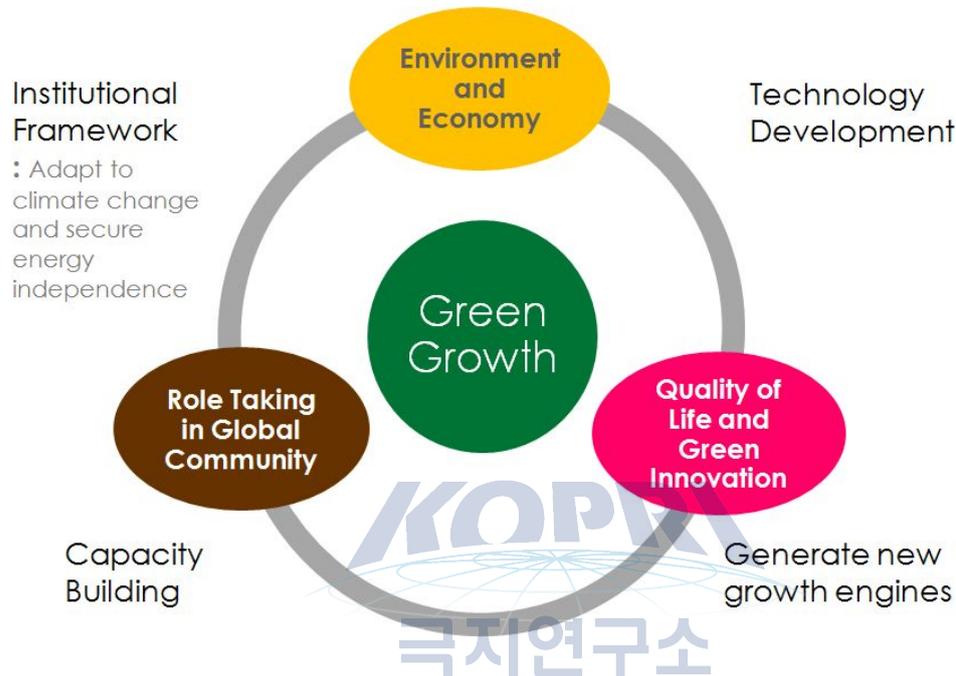
배출권은 교토 메커니즘에서 허용하는 범위 내에서는 선진국에게 할당된 AAU(Assigned Amount Unit), CDM 크레딧(Certified Emission Reduction: CER), JI 크레딧(Emission Reduction Unit: ERU)와 흡수배출권(Removal Unit: RMU)이 있다. 이밖에 교토 메커니즘으로 등록되지 않았지만, 제 3의 인증기관을 통하여 거래자격요건을 갖춘 감축 크레딧인 VER(Verified Emission Reductions)이 있다. 즉, 할당 크레딧(AAU)이란, 교토의정서 부속서 B국가들에 할당된 온실가스배출권으로서, 1차 감축기간 내 온실가스 배출한도를 의미한다. CDM 크레딧(CER)은 부속서 B국가와 개도국간의 온실가스저감사업에 따른 크레딧으로써, 개도국의 역량형성 및 기술이전을 향상시키고, 투자국의 AAU에 영향을 미치지 않는 추가 보너스란 점에서 메리트가 있다. JI 크레딧(ERU)은 부속서 B국가간의 온실가스 저감사업에 따른 저감실적으로서 의무감축을 이행한 실적으로도 활용되고, 시장에서도 거래가 가능한 크레딧이다. 그러나, 이 크레딧은 해당국가의 AAU와 RMU에 영향을 미친다. 다음, 흡수배출권(RMU)은 교토의정서에서 명시한 토지이용, 토지이용변화 및 산림 활동에 대한 온실가스 흡수실적이다. 따라서, 이에 상응한 크레딧을 흡수배출권으로 인정함으로써, 배출권 거래가 가능하다.

탄소시장은 기후변화협약의 구속성의 정도에 따라 배출권, 즉, 온실가스 감축 크레딧을 필요로 하는 수요에 의하여 리드될 것으로 전망된다. 즉, 수요는 자국의 실질적인 감축 목표와 시장에서 구매가능한 배출권의 가격과 자국의 감축비용 차에 의하여 결정되며, 협약 상 허용된 메커니즘의 형식과 자격요건을 충족시키는 배출권 물량이 시장에 노출될 때 비로서 공급시장이 형성된다. 여기서 시장에서 구매가능한 배출권의 가격은 평균 감축비용과 총 감축목표에 의하여 결정된다. 그러므로, 탄소시장의 주요인자는 부속서 B(이하 선진국)의 배출추이, 감축량, 개도국의 참여여부, 배출권 거래 가격 등으로 요약된다.

1-2. 국내 배출권거래 관련 정책 동향

국내 배출권거래는 아래와 같이 녹색성장기본법에 의거하여 마련되었다.

<그림 1> 녹색성장기본법에 의거한 전략 및 목표



자료: 녹색성장위원회(2010)

즉, 정부가 명시한 녹색성장이란 환경을 고려한 경제성장, 삶의 질 향상 및 녹색혁신, 국제사회에서의 역할 및 위상 제고의 세 가지 목표를 추구한다. 이때 녹색성장을 정책적으로 추진하기 위한 전략으로 기후변화에 적응하고 에너지자립도를 공고히 한다는 목표를 표면에 걸고 있다. 여기서 에너지자립도에 대한 문제는 에너지안보를 공급안정성에 초점을 맞춰온 정부의 고전적인 정책 방향에 변화가 없어 보인다는 점을 지적하게 된다. 즉, 법제상으로 녹색성장 기본법이 에너지정책과 온실가스정책은 규제와 시장이 공존하는 체제를 마련하는데 성공했다는 점에서는 고무적이거나, 실제로 이 두 시스템이 정착하고 두 개의 목표를 달성하기까지는 아직 남은 숙제가 많다.

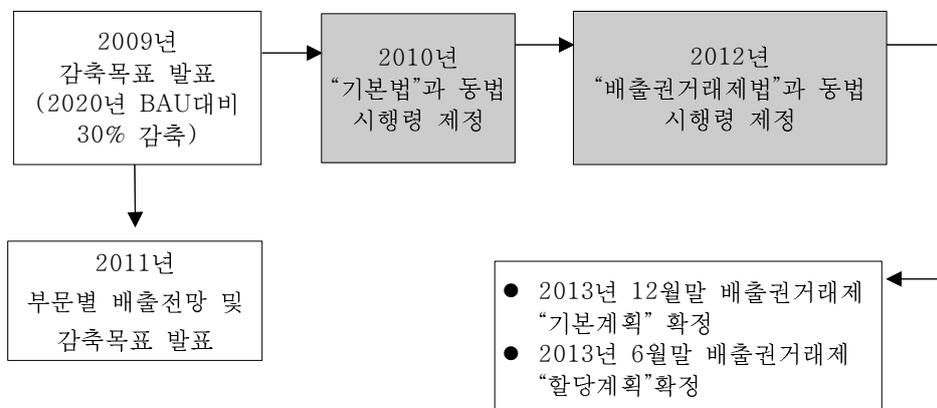
지난 2014년 9월 11일 온실가스 배출권거래제의 1차 계획기간(2015년부터 2017년까지)을 위한 ‘국가 배출권 할당계획’이 최종적으로 국무회의를 통과하였다. 이로써 2015년 1월 1일부터 배출권거래제가 사실상 시행되었다.

이로써 2008년 한국 정부가 코펜하겐에서 감축목표를 선언한 뒤 뚜렷한 정책수단을 제시하지 않아 한국정부의 감축의지를 의심받아온데 대한 국제사회의 불신을 불식시키게 되었다. 특히, 온실가스 감축목표 자체를 '2020년까지 BAU대비 30%'로 설정했다는 점은 EU를 비롯한 선진국의 감축목표와 뚜렷하게 선을 긋겠다는 것으로 비쳐질 수 있다. 더구나 구체적인 정책수단이 제시되지 않을 경우 감축목표 이행에 대한 국제적인 신뢰도에 부정적인 영향을 미칠 위기에 놓여 있었다.

사실상 국가목표가 선진국과 달리 경제성장의 여지를 남겨놓은 것은 소득에 따른 배출추이가 선진국과 개도국이 다른 데에서 출발한다. 따라서 감축목표가 GDP의 증가속도에 의거하여 BAU대비 30%라 할지라도 뚜렷한 정책수단이 제시될 경우 감축이행에 대한 약속은 크게 힘을 받게 된다. 이러한 의미에서 배출권거래제 시행은 매우 큰 의미를 갖는다.

국내 배출권거래 관련 정책은 2013년 마련된 배출권거래제 '기본계획'과 '할당계획'이 확정되기까지 법제상에서 "배출권거래제법"과 동법 시행령에 구속된다. 그런데, 배출권거래에서 가장 중요하고 기본적인 할당은 법제상에서 이중적인 구조를 가지고 있다. 즉, 10년에 걸친 장기에 대한 할당계획은 기재부가 결정하고, 이에 근거하여 환경부가 각 감축기간(3년-5년)에 해당하는 할당계획을 마련하도록 되어 있다.

<그림 2> 배출권거래제법의 법제상 위치



이밖에 배출권거래제를 보조하는 정책수단은 다음 <표 1>과 같이 다양하다. 결국 배출권거래제는 감축목표를 이행하는 정책수단 중 하나에 불과

하다. 그럼에도 불구하고 그동안 배출권거래제에 대한 논쟁이 계속된 이유는 배출권거래제 만큼 강력한 총량규제를 위한 정책수단이 없기 때문에 환경부로서는 배출권거래제를 포기할 수 없기 때문이다. 또한, 녹색성장기본법 자체가 <각계 부처의 활동범위 내에서 각기 정책수단을 이행하도록 되어 있는 구조이기 때문에 배출권거래제의 stance에 따라 각기 정책수단의 영향력이 달라진다.

<표 1> 녹색성장기본법에 명시된 온실가스 배출 및 감축과 관련된 정책

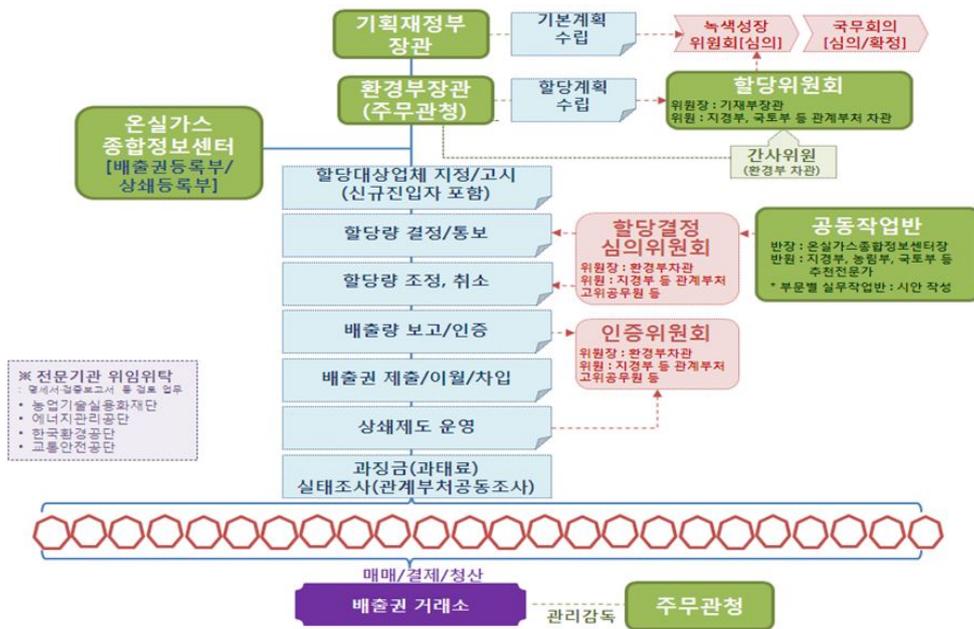
		정책수단	관련조항	
기 본 법		목표관리제	제42조	
		배출권거래제	제46조	
		에너지 기본계획	제39조,41조	
		환경친화적 조세제도 (탄소세 포함)	제30조	
기 타 정 책 · 지 원 정 책	기	농림수산의 축진 및 탄소 흡수원 확충	제55조	
	타	교통부문 교통부문 온실가스 관리 저탄소 교통체계의 구축	제47조 제53조	
		건물	제54조	
		물관리	제52조	
	지 원 정 책		온실가스 보고 및 종합정보관리체계 구축	제44조,45조
			지원정책	
			- 기술지원	
			- 녹색기술	제31,32조
			녹색기술·녹색산업 집적지 및 단지 조성	제35조
			- 중소기업 녹색기술·녹색경영에 대한 지원	제33조
		- 녹색기술 및 일자리 창출	제34조	
	- 금융지원	제28조		
		규제의 선진화 및 국제규범 대응	제36,37,61조	
		녹색생활	제49, 56~59조	
		녹색국토의 관리	제51조	

출처: 저탄소 녹색성장 기본법 (2011)

가. 배출권거래 기본계획

배출권거래제법 제4조와 동법 시행령(이하 “배출권거래제법 시행령”) 제2조는 계획기간 시작 1년전 까지 5년마다 10년 단위로 정부가 배출권거래의 현황 및 전망, 운영의 기본방향, 온실가스 배출전망, 제도시행에 따른 경제적 영향 등에 관한 사항을 고려하여 배출권거래의 중·장기 정책목표와 기본방향을 정하는 ‘배출권거래제 기본계획(이하 “기본계획”)'을 녹색성장위원회와 국무회의의 심의를 거쳐 기획재정부장관이 수립하도록 하고 있다.

<그림 3> 배출권거래 관련 제도운영 체계



자료: 기획재정부, “배출권거래제 기본계획(2013.11)”

배출권거래제의 기본계획에 따르면, 기별 중점사항은 다음과 같다. 즉, 1기에는 거래제 안착에 주력하고, 2기 이후부터 본격적인 온실가스의 효과적 감축에 중점을 두고자 한다. 계획기간은 기본적으로 5년으로 운영하되, 시행초기 문제점의 조기해결을 위해 1-2차 3년으로 운영하도록 규정하였다. (배출권거래제법 부칙 제 2조)

<그림 4> 배출권거래제 기별 운영방향



배출권거래제의 기본계획 상에 나타난 5대 원칙은 다음 <그림 4>와 같이, 국제협약을 준수하고, 경제적 영향을 고려하며, 시장기능을 활성화하고, 공정한 거래가 되도록 유도하며, 국제기준에 부합하도록 하는 것에 초점

을 맞추었다. 실제로 국내 배출권거래를 운영하는 주체인 주무관청은 배출권 거래제법 시행령 제6조제1항에 따라 환경부장관이다. 그럼에도 불구하고 동 제도의 기본계획을 기획재정부장관이 수립하도록 한 이유는 배출권거래제 시행으로 인하여 발생할 수 있는 경제적 부담(특히 산업계의 경제적 부담)을 최소화하기 위하여 제도운영에 관한 기본적인 방향을 경제분야 총괄부처인 기획재정부가 정하도록 한 것으로 해석된다.

<그림 5> 배출권거래제 기본계획상의 5대 원칙



극지연구소

기본계획은 해외의 거래제운영 현황 및 전망, 거래제 운영의 기본 원칙, 계획기간별 운영방향, 거래제 준비상황 점검, 경제적 파급효과와 지원정책, 거래제관련 재정 및 인력정책 등을 정하는 것이다. 배출권거래의 기본계획에 해당하는 해외사례를 찾기는 쉽지 않은데 독일의 거래제관련 Macro Plan이 유사하다. 2015년~24년의 10년을 대상으로 한 1차 기본계획은 1기~3기 4년차까지를 포괄한다. 기본계획은 계획기간별 목표로, 1기는 거래제 안착, 2기 이후부터 본격적인 온실가스감축을 시도한다고 명시했다. 2013년 기획재정부가 발표한 기본계획은 공청회(public hearing), 녹색성장위원회, 국무회의를 거쳐 2014년 1월 확정되었다. 이처럼 기본계획은 거래제의 구체적인 제도운영과 관련된 사항, 특히 할당을 다루지 않고 있다. 또한 1차 기본계획을 수립하여야 하는 법정시한인 2013년 12월말까지 환경부가 주도하고 관련 부처가 참여하는 ‘국가온실가스 감축 로드맵’이 결정되지 않음으로써 국내 배출권거래제의 배출상한(cap)에 관한 내용은 기본계획에서 다루지 않았다.

기본계획의 추진방향은 <표 2>와 같이 제1기에 거래제 안착, 제2기에 상당수준의 온실가스 감축 실현, 제3기에 적극적인 온실가스 감축이 배출권거래제로 인하여 유도되도록 목표를 설정하고 있다. 배출권거래제가 시장메커니즘으로써 제 역할과 기능을 하기에는 충분한 시간이 필요하다. 또한 제도에 대한 신뢰 및 시장에 대한 확신이 담보되어야 한다. 그러기 위해서는 MRV의 객관성과 보고 및 검증체계의 합리성이 확보되어 시장참여자들의 불신이 제거되어야 한다. 사실상 기본계획 상에서 볼 때 제 1기는 파일롯의 시범사업에 해당한다 할 수 있다. 선형적인 거래를 통하여 제도상의 미비한 점과 운영상의 불합리한 점을 발견할 수 있는 기회로 활용되어야 할 것으로 사료된다. 특히, 2기와 3기에 들어서면서 유상할당을 개시하고 확대하는 등 제도적인 변화가 예상되므로, 배출권거래 참여자들은 제1기에서 이러한 제도 변화를 사전에 리스크 헷징하는 틀을 모색할 필요가 있다.

<표 2> 배출권거래 제1차 기본계획의 추진방향

	제1기('15~'17년)	제2기('18~'20년)	제3기('21~'25년)
주요 목표	<ul style="list-style-type: none"> 경험축적 및 거래제 안착 	<ul style="list-style-type: none"> 상당수준의 온실가스 감축 	<ul style="list-style-type: none"> 적극적인 온실가스 감축
제도 운영	<ul style="list-style-type: none"> 상쇄인정범위 등 제도의 유연성 제고 정확한 MRV 집행을 위한 인프라 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 거래제 범위확대 및 목표 상향 조정 배출량 보고·검증 등 각종 기준 고도화 	<ul style="list-style-type: none"> 신기후체제 대비 자발적 감축유도 제3자 거래제 참여 등 유동성 공급 확대
할당	<ul style="list-style-type: none"> 전량 무상할당 목표관리제 경험 활용 	<ul style="list-style-type: none"> 유상할당 개시 벤치마크 할당 등 할당방식 선진화 	<ul style="list-style-type: none"> 유상할당 비율 확대 선진적 할당방식 정착

출처: 기획재정부, 기본계획(2014.1)

배출권거래의 기본계획과 할당계획은 <표 3>과 같이 정하는 내용이 상이하다. 기본계획이 보다 포괄적이고 장기적인 운영체계를 결정하는데 비해 할당계획은 배출권의 할당 및 할당된 배출권의 성격을 보다 구체화하는 작업이 된다. 즉, 실질적인 배출권거래의 rule은 기본계획을 따르게 되어 있다. 특히, 배출권거래의 flexibility를 충분히 살려 효율성을 극대화하기 위해서는 기간별 이월 및 차입에 대한 명쾌한 운영방안이 마련되어야 하기 때문에 기본계획이 갖는 의미는 할당계획 보다 근본적인 내용을 결정한다는 차원에서 볼 때 더 큰 그림을 제시한다 할 수 있다.

<표 3> 배출권거래 기본계획과 할당계획으로 정하는 내용

< 기본계획으로 정하는 주요 사항 >	< 할당계획으로 정하는 주요사항 >
1. 배출권거래제에 관한 국내의 현황 및 전망 2. 배출권거래제 운영의 기본방향 3. 국가온실가스감축목표를 고려한 배출권거래제 계획기간의 운영 4. 경제성장과 부문별·업종별 신규 투자 및 시설(온실가스를 배출하는 사업장 또는 그 일부를 말한다) 확장 등에 따른 온실가스 배출 전망 5. 배출권거래제 운영에 따른 에너지 가격 및 물가 변동 등 경제적 영향 6. 무역집약도 또는 탄소집약도 등을 고려한 국내 산업의 지원대책 7. 국제 탄소시장과의 연계 방안 및 국제협력 8. 그 밖에 자원조달, 전문인력 양성, 교육·홍보 등 배출권거래제의 효과적 운영	1. 국가온실가스감축목표를 고려하여 설정한 온실가스 배출허용총량 2. 배출허용총량에 따른 해당 계획기간 및 이행연도별 배출권의 총수량 3. 배출권의 할당 대상이 되는 부문 및 업종 4. 부문별·업종별 배출권의 할당기준 및 할당량 5. 이행연도별 배출권의 할당기준 및 할당량 6. 할당대상업체에 대한 배출권의 할당기준 및 할당방식 7. 배출권을 유상으로 할당하는 경우 그 방법 8. 조기감축실적의 인정 기준 9. 배출권 예비분의 수량 및 배분기준 10. 배출권의 이월·차입 및 상쇄의 기준 및 운영 11. 배출권의 할당 대상이 되는 부문 및 업종의 분류 12. 조기감축실적의 인정량 13. 배출권의 추가 할당 및 할당량의 조정 14. 배출권 할당·조정 취소 15. 3차 계획기간 이후 무상으로 할당하는 배출권의 비율 16. 상쇄배출권의 제출한도 17. 그 밖에 해당 계획기간의 배출권 할당 및 거래를 위하여 필요한 사항으로서 할당위원회에서 의결한 사항

이에 의거하여 국가 BAU 대비 연도별 감축률을 계산하면 <표 4>와 같다.

<표 4> 국가 온실가스 배출 BAU 대비 연도별 감축률

구분 (단위)	2014	2015	2016	2017	2020
국가 BAU_t (단위: 백만톤 CO ₂ e)	694.5	709.0	720.8	733.4	776.1
국가 감축률 (BAU대비) (%)	5.1	10.0	13.8	16.2	30.0
국가 목표배출량 (단위: 백만톤 CO ₂ e)	659.1	637.8	621.2	614.3	569.0
전년대비 감축률 (%)	-	3.2	2.6	1.1	
국내 배출권거래 목표배출량 (Cap)* (단위: 백만톤 CO ₂ e)	-	573.5	562.2	550.9	-

주: *국내 배출권거래 목표배출량에는 대상업체의 간접배출량이 포함되어 있음. 자료: 할당계획을 근거로 작성

다. 배출권 감축사업 및 인증 프로세스

앞에서 서술한 바와 같이, 배출권에는 여러 종류가 있다. 할당에 의한

할당배출권을 거래하는 시장이 있는가 하면, 교토의정서상의 CDM과 같이 감축사업에 대한 검인증 절차를 통하여 상쇄 배출권이 감축실적으로 인정되는 시장이 존재한다.

본 장에서는 남극해와 같이 특정 해역에서 탄소포집과 저장이 가능하여 감축실적에 대해 CDM 이사회의 인정을 받을 경우 가능한 인증 프로세스에 대하여 설명하고자 한다. 즉, <그림 6>에서와 같이, ①단계에서 CDM 사업을 계획하고, ②단계에서 CDM 사업계획서 작성하는데, 이때 사업의 타당성(validation), 등록(registration), 검증(verification)을 위해 필수적인 기술적 조직적 사항을 기술해야 한다. 다음, ③ 관련 당사국의 승인이 필요한데, 사업 참가자는 유치국을 포함한 각 당사국의 국가승인기구(DNA)로부터 자발적 참여에 대한 승인을 획득해야 한다. ④ 타당성을 확인하는 단계로서, CDM운영기구(DOE)가 CDM-PDD를 바탕으로 CDM 사업 요건 충족에 대한 독립적 평가를 수행하여 해당 사업의 타당성을 확인한다. ⑤ 등록단계로서, 타당성이 확인된 프로젝트는 CDM운영기구(DOE)가 절차에 따라 CDM 집행위원회(EB)에 사업 등록 신청서를 제출 후, 공식 승인 받는다. ⑥ 모니터링 단계는 사업 참가자가 CDM-PDD의 모니터링 계획에 준해 사업의 GHG 배출 감축 계산에 필요한 모든 데이터를 수집하고 작성하여, ⑦ 검·인증에 필요한 확인서를 발급받는다. 이렇게 해서 발급된 배출권은 ⑧ 단계를 통하여 검인증된 GHG 배출 감축 양에 대해 EB가 발급한 CERs을 의미한다. 배출권의 배분은 ⑨와 같이, 사업 참가자들이 합의한 분배 비율에 따라 배출권이 배분되는 것이 일반적이다.

<그림 6> 탄소 크레딧 사업 추진체계: CDM 사업의 경우

