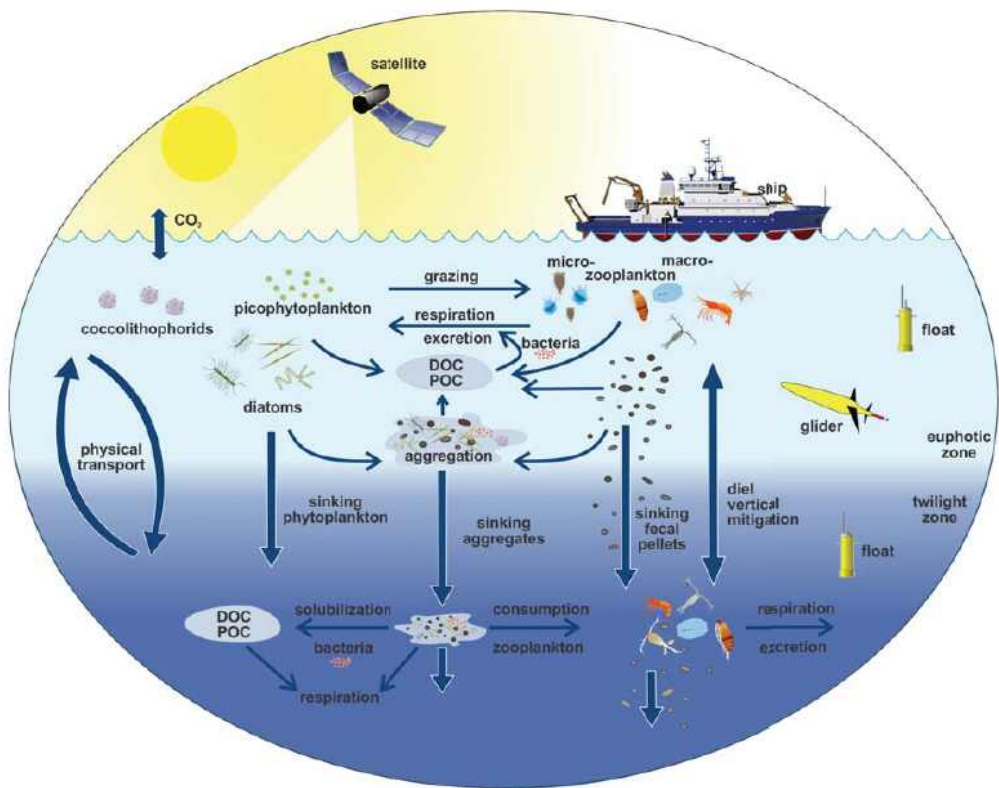


차세대 관측기법을 활용한 한반도 주변해의 생물학적 탄소순환 연구과제 기획보고서



요약문

- 산업혁명 이전 280 ppm 이었던 대기중 CO₂ 농도는 현재 약 400ppm으로 증가하였으며, CO₂의 증가에 따른 기후변화로 인해 지구에는 이전에 경험하지 못한 빠른 속도의 환경변화가 나타나고 있어 노벨상 수상자인 Paul Crutzen은 지구환경이 지난 46억년과 같이 자연적으로 변하기보다는 인간이 야기한 환경변화에 따라 변해가는 시대, 즉 인류가 만든 지질시대 (geology of mankind)에 들어섰다는 의미로 현재를 인류세(Anthropocene)란 신조어로 표현 하였다. 이러한 환경변화에 대응하기 위해 국제 사회는 기후변화 예측 시나리오에 근거 지구환경 보존을 위해 CO₂ 방출 저감 및 적응정책을 수립·이행하는데 동참하고 있다.
- 해양은 대기의 약 50배에 달하는 탄소의 저장고 이며 탄소의 이동, 변환 등을 통해 전 지구적 탄소 순환을 조절한다. 특히 해양의 표층 (유광대)에서 CO₂를 이용한 광합성 과정에서 생성된 유기물은 다양한 생물/물리/화학적 과정을 통해 심해로 침강하여 격리되는데 이를 생물 펌프 (biological pump)라 칭한다. 생물 펌프는 지구 탄소 순환 과정의 핵심적 요소로서, 산업혁명 이후 대기로 방출된 CO₂의 약 30%가 생물 펌프를 통해 해양이 흡수되어 격리됨으로서 대기 중 CO₂ 증가와 기후변화 진행 속도를 늦추는 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 탄소순환이 현재와 미래의 해양생태계에 미칠 영향의 정량화는 해양학 분야에 남겨져 있는 가장 큰 도전이라 할 수 있다.
- 현재의 지구환경 조절요인과 미래의 기후변화를 예측하기 위해 생물학적 펌프의 주요 구성 요소의 역할에 대한 이해가 필수적이나 아직 많은 부분이 불확실한 상태이다. 이러한 불확실성의 감소를 위해 순 생산력, 식물플랑크톤 탄소 농도, 입자 크기 분포, 식물플랑크톤 군집 조성을 관측할 수 있는 차세대 관측 위성의 활용에 대비한 연구가 필요하다. 또한 해양 생물 펌프의 구조와 효율에 미치는 요소들에 관한 연구 및 생화학 센서가 부착된 글라이더와 아고부이 등을 차세대 관측위성과 함께 활용할 계획의 수립이 필요하다.
- 이러한 관측 및 연구방법의 개발 및 실행을 통한 생물학적 탄소 순환의 정량화는 기후변화에 따른 대기 및 해양의 반응을 이해하는데 있어 필수적 요소이다. 이번 기획 보고서는 한반도 주변 해 (동해)의 생물학적 탄소 순환의 구성 요소, 펌프 효율에 영향을 주는 요인, 먹이망 구조와 탄소 순환 특성 등을 파악하기 위한 연구방법 검토, 활용할 기술의 조사 및 현재 와 미래의 기후변화에 따른 생물 탄소 펌프의 변화 예측 모델등 차세대 관측위성 활용기반을 구축하는 것과 이를 통해 탄소순환 경로 연구의 새로운 전환점이 될 수 있는 연구개발을 목표로 진행할 계획이다. 또한 탄소순환의 이해 및 예측능력의 제고와 함께 기후변화에 적응할 수 있는 법적·정책적 기반 마련에 기여하는 것도 목표로 하고 있다.

목 차

제1장. 요약

- 1. 사업개요 -----4
- 2. 사업추진 배경 및 기대효과 -----5

제2장. 기획내용

- 1. 연구개발 목표 및 필요성-----7
- 2. 상위목표와의 연계성 -----8
- 3. 국내외 연구동향 -----9
- 4. 연구개요 및 주요연구내용-----15
- 5. 추진체계 ----- 19
- 6. 주요기술 개발현황 ----- 21
- 7. 기대효과 및 활용방안 -----27
- 8. 연구원편성표 -----29

제 1장 요약

1. 사업 개요

□ 사업목적

- 차세대 관측기술을 활용 한반도 주변해 (동해)의 현재 및 미래의 탄소순환 특징을 이해하고 예측할 수 있는 기술의 개발 및 활용을 위한 기획 연구.

□ 사업내용

- 사업기간
 - 기획연구: 2016년 8월 1일 ~ 2016년 10월 31일
 - 본 사업: 2018년 1월 1일 ~ 2022년 12월 31일 (20억/년)
- 주요 연구 내용
 - 과거 10년간 측정된 한반도 주변해의 일차생산력 자료와 위성자료를 결합하여 한반도 주변해에 적합한 일차생산력 알고리즘 생산 검토.
 - 해양표층의 정밀한 시공간적 일차생산력 산정을 통한 대기-해양의 탄소플럭스 특성 이해
 - 생물/물리/화학적 요인들에 의한 유기탄소 침강 과정 파악을 위한 차세대 활용기술 검토.
 - 유광대와 박명대 (twilight zone)의 유기탄소 침강 및 분해 과정 경로 및 정량화 분석을 위한 연구방법 검토.
 - 유광대의 식물플랑크톤 군집 분석기술 활용 검토
 - 차세대 관측장비들의 활용 방법 수립 (글라이더를 이용한 탄소 측정)
 - 현재 및 미래 기후변화에 따른 생물학적 펌프의 효율 및 기능 변화에 대한 예측 모델 개발 방안모색.
 - 기후변화의 영향 및 취약성 파악과 국가대응정책 수립에 기여할 수 있는 연구과제 개발을 위한 방안 모색

2. 사업추진 배경 및 기대효과

□ 추진배경

- 기후변화의 위험성 증가: 산업혁명이후 인간 활동의 증가로 온실가스인 CO₂의 대기농도는 약 120ppm (280→400)이 증가하였으며 이로 인한 기후변화로 해양은 수온증가, 산성화, 탈산소화 등의 위해요소가 국제적인 환경문제로 부각됨.
- 유엔기후협약 당사국 총회는 2015년 파리 기후변화 협약을 채택 지구 평균온도를 산업혁명 이전 대비 2°C이하로 억제하도록 노력하고 참가국들은 국가별 온실가스 감축 목표를 만들어 UN에 제출하고 2023년부터 5년마다 목표를 상향조절 제출하기로 합의함.
- 해양은 탄소의 저장고로서 산업혁명이후 대기로 방출된 이산화탄소의 약 1/3은 해양이 흡수하여 격리되어 대기중 CO₂ 증가와 기후변화 진행 속도를 늦추는 역할을 하는 것으로 밝혀졌음.
- 현재의 지구환경 조절요인과 미래의 기후변화를 예측하기 위해 해양 생물 펌프의 주요 구성 요소와 역할에 대한 이해가 필수적이거나 아직 많은 부분이 불확실한 상태임. 따라서 탄소순환이 현재와 미래의 해양생태계와 지구환경에 미칠 영향력의 정량화는 해양학 분야에 남겨져 있는 가장 큰 도전이며 미래세대를 위해 지속되어야할 해양과학의 중요 분야임.
- 이 기획 연구는 우리원이 해양과학분야에서 지속적으로 진행해오던 생물학적 탄소순환 연구의 새로운 연구방법의 제시와 동시에 국가의 기후변화 대응 법적·정책적 기반 마련에 기여할 것으로 예측됨.

□ 기대효과

- 한반도 주변해에 적합한 일차생산력 모델 개발을 통해 탄소 순환과정의 정밀도 향상
 - MODIS 해색자료를 활용 2003-2015년 사이의 동해 일차생산력의 정밀한 시공간적 변화를 파악함으로써 기후변화에 따른 탄소순환 연구 기반 구축이 가능함.
 - 위성을 이용한 일차생산력의 시공간적 분포특성 및 연구선을 이용한 동해의 CO₂관측 자료를 활용하여 동해의 탄소지도 작성

- 이산화탄소의 해양-대기 교환과 심층이동을 조절하는 생물 탄소 펌프의 구조와 기능에 대한 장기변화 이해와 미래 예측 역량 확보
 - 해양 생물학적 탄소 펌프의 탄소 조절 기능과 해양 환경조절 역량의 이해를 통해 기후변화에 따른 미래 탄소순환 및 해양생태계 영향 예측능력 제고.
- 축적된 자료를 이용 기후변화가 한반도 주변 해양 생태계에 미치는 사회·경제적 영향 파악 및 대응을 위한 정책 개발에 기여 영향의 사회적동해의 의 이산화탄소의 해양-대기 교환과 심층이동을 조절
- 먹이망을 통한 탄소순환경로의 장기예측 능력 제고를 통해 수산자원 변화 예측 모델 개발 및 수산 정책 수립에 기여

제 2장 기획내용

1. 연구개발 목표 및 필요성

□ 최종목표

- 차세대 관측기술을 활용 한반도 주변해의 생물 탄소펌프 특성과 해양생태계내의 역할 규명을 통해 기후변화로 인한 탄소펌프의 변동 및 생태계 영향에 대한 예측능력 확보와 해양의 지속가능한 발전목표 달성에 기여

□ 연구개발의 필요성

○ 기술적 측면

- 해양은 지구 탄소 순환을 조절하는 핵심적 역할을 하고 있으며, 탄소 순환이 현재와 미래 환경에 미치는 영향의 정량화는 가장 시급한 해양학 연구 분야임.
- 한반도 해역의 지속가능한 이용을 위해 생물 펌프의 구조와 기능에 대한 장기변화 이해와 미래 예측 역량 확보가 필요함.
- 기후변화에 따른 북서태평양의 해양학적 변동 이해에 필요한 기초자료 및 해양환경/해양생태 예측모델 개발에 기초자료로 활용하여, 측정 자료의 가치를 향상시키고 모델 출력치의 신뢰성을 향상 시킴.
- 한반도 주변해에 적합한 일차생산력 모델의 개발 및 탄소순환 과정의 정밀도 향상을 통해 기후변화에 따른 탄소수지 및 수산자원에 미치는 영향을 파악할 수 있는 기술의 확보가 요구됨.

○ 경제·산업적 측면

- 이산화탄소 배출 증가에 따른 기후변화가 경제 및 산업에 미치는 영향은 막대하며 앞으로 영향은 심화될 것으로 예측되고 있어, 생물학적 탄소 순환의 이해를 통한 미래 변화 예측 기술 개발이 시급한 실정임.

○ 사회·문화적 측면

- 이산화탄소 증가에 따른 기후변화로부터 지속가능한 발전을 위한 해양의 환지구환경의 지속적 이용의 사회적 영향과 효율적인 적응은 지구환경의 으로 적응하기 위해선 이산화탄소의 주요저장소인 해양의 생물학적 펌프의 특징 및 미래변화 변화 예측 결과를 국가 대응 정책 수립에 반영함으로써 사회 전반의 영향을 최소화하고 지속 가능한 성장을 기대할 수 있음.

2. 상위목표와의 연계성

□ 해양과기원 임무 및 경영목표 등과의 연계성

- 본 기획연구는 해양과기원 발전 전략 (2012-2020)에 따른 주요 기능의 ‘해양관측·탐사, 해양환경 및 기후 변화에 관한 연구’ 및 12대 중점연구분야 중 ‘해양환경 및 생태계 보전기술’과 ‘기후변화 예측 및 대응기술’에 부합함.
- 생물학적 탄소 순환 기획 연구는 해양과기원의 전략목표 1-1 한반도 해역 해수순환 및 물질순환 연구에 부합하며, 전략목표 3-1의 환경변화에 따른 해양생태계 반응 이해 및 대응기술 연구와도 부합함.

□ 국가적 아젠다 (정부 140대 국정과제, 제3차 과학기술기본계획 등)와의 연계성

- 정부는 출범에 맞춰 창조경제에 중점을 둔 5대 국정목표, 21개 중점전략, 140개 국정과제를 선정해 발표하였음. 140개 국정과제 중 해양과 관련된 국정과제는 8개가 포함되어 있음. 해양관련 8개 과제 중 아래와 같은 4개 과제가 동중국해의 환경변화에 따른 생태계 기능변화 평가 및 예측 연구와 정책적 목표가 부합되며 연계되어 있다고 판단됨.
 - **국정과제 13** : “해양 신성장 동력 창출 및 체계적 해양관리”를 위해 주변해역에 대한 해양관측과 조사활동 강화 및 해양관리 추진을 목표로 하고 있으며 이러한 계획은 한반도 해역의 탄소순환 연구와 잘 부합됨.
 - **국정과제 98** : “온실가스 감축 등 기후변화 대응” 분야에서는 범지구적 기후변화 및 환경문제에 주도적 역할 수행을 실행 목표로 설정하였으며 이를 위해서는 해양과 대기의 이산화탄소 교환 및 생물학적 펌프를 통한 탄소격리의 지속적 모니터링이 필요함.
 - **국정과제 99** : “기상 이변등 기후변화적응”을 위해 기후변화의 해양 영향 및 연동되는

생태계 반응에 대한 이해와 예측 능력을 강화가 필요하며 이는 본 기획연구와 잘 부합됨.

3. 국내외 연구동향

□ 국외

※ 탄소순환과 관련된 국제기구 및 협의체 활동 현황

- 전 지구적 기후변화에 의한 해양의 생지화학적 순환 및 생태계 변동연구는 IGBP와 SCOR의 주도 또는 승인 하에 국제협력연구 프로그램들이 진행되고 있음. 현재 진행되고 있는 프로그램으로는 CLIVAR와 같은 해양 관측 프로그램이 있으며, 대양규모의 생지화학적 순환과 생태계에 초점을 맞춘 연구로는 IMBER, SOLAS, GEPTRACES, BIO-GEOTRACES 등이 있음.
- 기후변화에 관한 정부 간 패널 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)
 - 유엔환경계획 (UNEP)과 세계기상기구 (WMO)가 지구의 기후변동과 이에 따른 생태계 영향을 분석, 검토할 목적으로 1988년 설립 됨. 인간에 의해 야기되는 기후변화의 위험, 기후변화의 잠재적 영향 및 그 적응과 완화를 위한 과학적인 이해와 관련된 과학적, 기술적, 사회경제적 정보의 평가를 수행함. 새로운 기후관련 연구, 감시사업을 하는 것이 아니라 현존하는 검증되고, 출판된 과학기술 문헌에 의거한 평가를 수행함. 5차 평가보고서는 현재추세로 온실가스를 배출한다면 금세기말 (2081-2100)의 지구평균 기온은 3.7°C 상승할 것으로 예측함.
- 국제해양탄소공조프로젝트 (International Ocean Carbon Coordination Project, IOCCP)
 - 2005년 IOC와 SCOR의 합작 프로젝트로 이산화탄소 자문 패널을 대체할 IOCCP를 설립 하였으며 주요 설립 목적은:
 - 해양탄소와 관련된 활동에서 국제적 의사소통의 중심점 역할, 고품질의 관찰로 지구 탄소 순환에서 해양의 역할에 대한 이해를 높이기 위한 국제 포럼의 개최.
 - 전 세계 연구와 관찰 프로그램들과 협력해 해양탄소관찰시스템의 개발을 촉진하고 상태를 기록하도록 협력.

- IGCO, GCP등과 같은 통합 프로그램과 협력해 해양탄소분야를 지구시스템 연구 분야로 통합하도록 촉진.

- 국제 해색위성 전문가 그룹 (International Ocean-Colour Coordinating Group, IOCCG)
 - IOCCG는 지구관측위성위원회 (CEOS)의 결의에 의해 유네스코 산하에 1996년 결성되었으며 해색 위성분야에 대해 전 지구적인 규모에서의 통합과 합의를 이끌어 내는 것이 목적이며 주요 working group으로는 아래와 같음.
 - Calibration of Ocean-Colour Sensors
 - Phytoplankton Functional Types
 - Bio-optical Instrumentation on ARGO Floats
 - Ocean Colour from a Geostationary Orbit
 - Level 1 Requirements for Ocean Colour Remote Sensing
 - Ocean Colour Radiometry-Virtual Constellation (OCR-VC)

※최근의 탄소순환 관련 연구동향

- 통합적 해양 생지화학 및 생태계 연구 (Integrated Marine Biogeochemistry & Ecosystem Research, IMBER)
 - 2001년 IGBP/SCOR 해양미래계획위원회에서 프로젝트 착수가 결의된 프로그램으로 IMBER 연구는 어떠한 해양생물이 해양생지화학적 순환에 영향을 주고, 이러한 과정이 어떻게 해양생태계에 영향을 주는가를 밝히는 것임. 해양의 생지화학적 순환과 생태계에 연구 초점이 맞추어져 있으며, IMBER 프로젝트의 목표는 전 지구적 변화에 따른 해양의 생지화학적 순환과 생태계의 민감도를 연 단위 혹은 10년 단위로 조사하는 것임. 주요 연구 내용으로는:
 - 생지화학적 순환과 해양먹이망의 상호관계
 - 전 지구적 변화에 대한 민감도: 해양의 주요 생지화학적 순환, 생태계 그리고 이들의 상호관계가 전 지구적 변화에 미치는 반응
 - 지구시스템으로의 피드백: 해양 생지화학과 생태계가 기후 조절에서의 역할
 - 지난 20년간 해양학 분야에서 가장 중요한 프로그램이었던 JGOFS (Joint Global Ocean Flux Studies)와 GLOBE (Global Ocean Ecosystem Dynamics)의 주제 통합

○ SOLAS (Surface Ocean - Lower Atmosphere Study)

- 2000년 2월에 독일에서 개최된 International SOLAS Open Science Meeting에서 설립되어 2001년부터 진행 중인 공동-후원 프로젝트로서 목표는 해양과 대기간의 생지화학적-물리학적 (biogeochemical-physical) 상호작용과 피드백의 이해 증진과 더불어 국제프로그램으로서 기후환경 변화가 해양과 대기의 시스템에 어떤 영향을 주는가를 규명하며, 지구시스템과학 협력체의 일부로서 프로젝트들을 운영을 통해서 그리고 이것이 어떻게 결합계에 영향을 미치고 기후와 환경변화에 영향을 받는가에 대한 양적인 이해를 증진시키고자 함.

○ ARGO (The Global Array of Profiling Floats)

- 수온, 염분, 해류 등을 측정하는 무인해양관측부이를 이용하여 전 지구적 규모의 해양 상층부 자료를 인공위성을 통해 실시간으로 제공하는 프로그램으로 전 지구 기후/해양 관측시스템 (GCOS/GOOS), 기후변동 및 예측실험 (CLIVAR), 전지구해양자료 동화실험(GODAE) 사업과 연계하여 국제 공동 연구사업을 추진함.

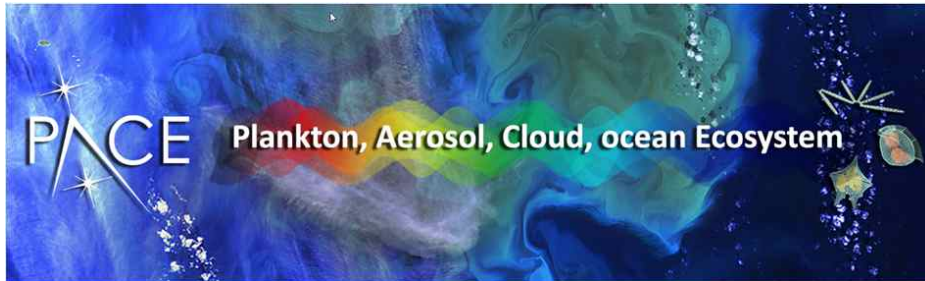
○ GEOTRACES

- GEOTRACES는 해양의 주요 미량원소와 이들의 동위원소의 분포를 결정하는 과정을 이해하고 플럭스를 정량화하여 환경변화에 따른 이들 분포의 변화정도를 밝혀 범지구적 해양생지화학적 순환을 연구하는 국제프로그램.
- 지역별 해수 특성과 미량원소 분포와의 상관성 파악, 지구환경 변화에 따른 미량원소 변화 평가, 고환경 복원의 추적자로서 미량원소의 역할을 규명함.
- 해수에 포함된 주요 미량원소의 분포 및 플럭스 연구를 통해 전 지구적 해양환경 변화에 따른 이들의 변동성을 규명함.

○ PACE (Plankton, Aerosol, Clods, Ocean Ecosystem) mission

- 미국은 NASA 주도로 지구의 기후변화에 대한 진보된 연구를 위해 2023 PACE (Plankton, Aerosol, Clods, Ocean Ecosystem) 위성발사를 목표로 mission을 진행 중임.
- PACE 임무는 복수의 과학적 목표를 가짐: (1)탄소순환 및 탄소순환과 기후변화의 상호간 영향 과정의 이해에 필수적인 전 지구적 해양의 해색 관측과 함께 구름과 에어로솔의 확장된 자료제공을 위한 편광측정. (2) 수계의 탄소저장 정량화나 인간의 활

동과 자연적 사건에 대응하는 생태계 기능의 이해를 위한 해양생태, 생물, 화학의 연속적이며 새로운 관측의 수행.



- PACE 는 미래 지구의 예측을 위해 현재의 해양과 대기 변화의 원인과 결과 분석 및 지구규모의 탄소역학연구에 초점을 두고 있으며, 중요한 목표중 하나는 생물펌프를 포함한 전 지구적 탄소순환의 정량화. 이러한 mission 수행을 통해 생물펌프의 현재 상태와 지구의 탄소순환과 기후변화를 조절하는 해양의 역할에 대한 예측기술의 발전을 위한 기회 제공을 목적으로 함.

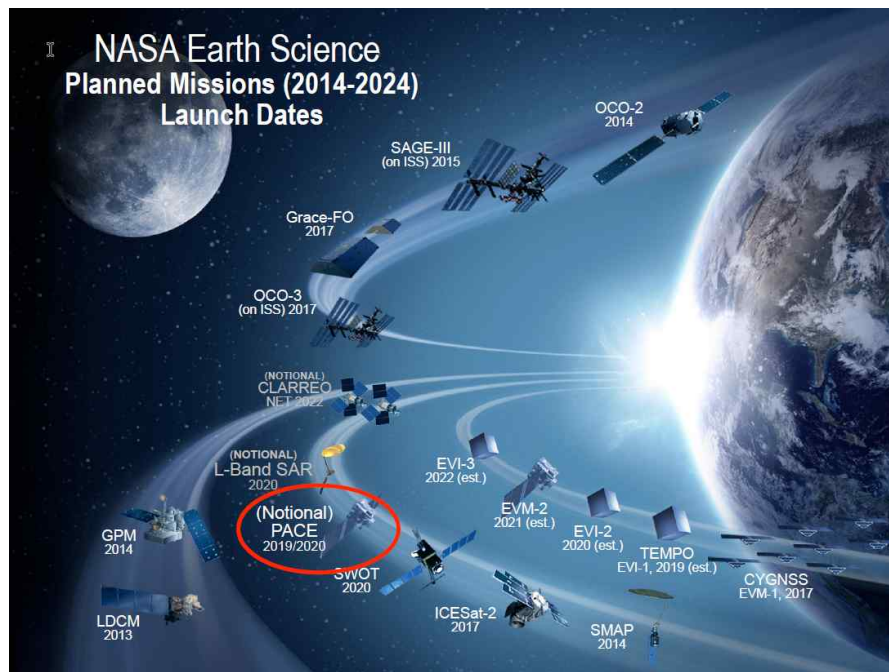


그림 1. NASA의 위성발사 계획도

○ EXport Processes in the Ocean from RemoTe Sensing (EXPORTS)

- NASA의 field campaign인 EXPORTS의 과학안은 위성을 이용하여 해양 생물펌프의

상태를 정량화하는 것임.

- 해양생태계는 지구탄소순환에 중대한 역할을 하고 있으며, 탄소순환이 현재와 미래의 해양생태계에 미칠 영향력의 정량화는 해양학 분야에 남겨져 있는 가장 큰 도전으로 EXPORTS는 2022년 발사될 PACE 위성의 임무 달성에 필요한 현장조사 및 기술 점검/개발을 2017-2020년 사이에 진행될 예정이며, 주요연구 테마는 아래와 같다:
 - 해양표층의 식물플랑크톤 군집 구성과 생태-물리적 상호작용이 유광대로 부터 저층으로 이동되는 유기물 수직이동에 미치는 영향 확인.
 - 표층 하 중층에서 진행되는 수직이동 효율에 영향을 미치는 요인 검증 및 확인.
 - 현재와 미래의 생물펌프 특성의 이해 및 예측.

□ 국내

- 한국해양과학기술원에서는 2003년부터 2008년까지 “기후변화에 따른 남해 (동중국해 북부)의 해양환경 및 생태계 변동연구”를 진행하며 동중국해의 해황 및 해수 특성분석, 화학적 특성, 하위영양단계 생태계특성, 기후변화 시나리오 예측 모델 경과 분석 등 환경과 생태계의 구조적 특성에 초점을 맞춰 연구를 진행하였음.
- 2005년 이후 포항공대 이기택 교수는 NRL과제로서 온실가스 (CO₂) 증가에 의한 미래 해양생태계 변화 모니터링 기술에 대해 연구를 수행하고 있음.
- 한국해양과학기술원은 2006-2011년 동안 “산사댐 건설로 인한 남해 (동중국해)의 해양환경연구”를 진행하며 산사댐 건설이 동중국해 북부 해역의 해양환경 및 생태계에 미치는 영향을 연구하였음.
- 한국해양과학기술원은 2008년 10월부터 “기후변화가 남해역 (남해 및 북부 동중국해) 해양생태계에 미치는 영향 평가 시범 연구”를 통해 기변화가 생태계에 미치는 영향을 진단할 수 있는 방법을 개발을 진행 중이며 2012년 7월에 과제가 종료되었음.
- 한국해양과학기술원은 2005년-2007년 동안 “동해의 탄소순환연구-1.울릉분지”를 진행하며 봄과 여름의 대기-해양 탄소플럭스분석, 표층의 생물과정 분석, 표층-심층 해양유기탄소 플럭스 분석 등을 수행하였음.
- 한국해양과학기술원은 2014-2017년 약 3년 동안 “위성기반 한반도주변해역 해양탄소 추정모델개발”을 진행 중에 있음.

4. 연구개요 및 주요 연구내용

□ 연구개요

- 해양의 탄소순환을 이해하고 과정별 탄소전달(이동) 효율을 파악하기 위한 기획연구의 개요는 그림2 에 잘 나타나 있으며, 기획 중인 해양의 생물학적 탄소순환 연구의 출발점은 위성을 이용하여 해양표층의 식물플랑크톤 생체량 및 일차생산력의 관측 뿐 아니라, 식물플랑크톤 군집구조 및 탄소량을 파악하는 기술을 개발하는 것.
- 해양표층의 유광대로부터 박명대로의 탄소 침강은 5가지 경로를 통하는데 침강효율은 식물플랑크톤 군집구조, 크기분포, 먹이망효율, 동물플랑크톤의 주야이동에 따라 다르게 나타남. 유광대에서 나타나는 생물학적 연결고리의 특징을 현장조사와 원격탐사, 생화학 적 센서가 부착된 글라이더와 아고등과 sediment trap을 이용하여 시공간적 특징을 파악하는 기술개발이 기획연구의 목표임.
- 기획연구의 목표는 차세대 관측기술을 활용 한반도 주변해의 생물 탄소펌프의 해양생태 계내의 역할 규명과 미래 기후변화로 인한 탄소펌프의 변동과 생태계 영향에 대한 예측 능력을 확보하는 것.

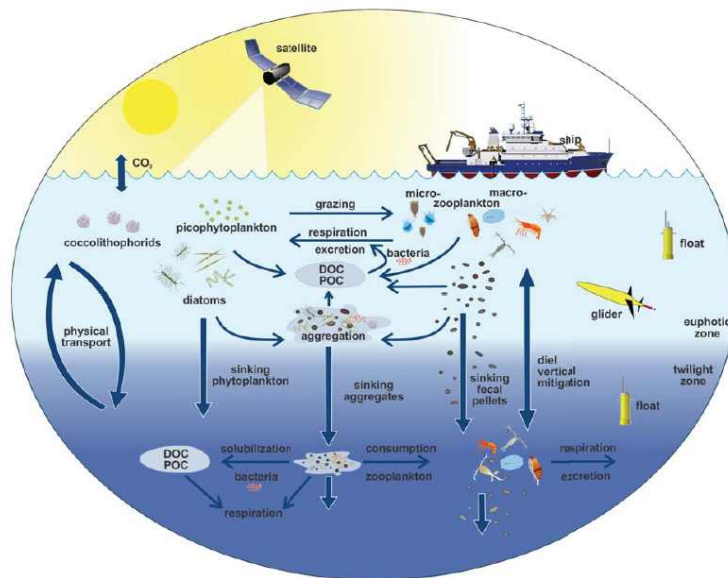


그림 2. 해양의 먹이망, 생물학적 펌프 및 차세대 관측기법의 도해 (EXPORTS, 2014 인용)

□ 주요 연구내용

※ 위성-현장조사 기반 동해의 일차생산력 평가

- 해양의 탄소펌프는 유광대의 식물플랑크톤이 광합성을 통해 유기 탄소를 만드는 과정 (일차생산)부터 시작됨. 식물플랑크톤은 유광대의 해수 중 CO₂를 이용 유기물을 합성 후 침강에 하며 대기 중 이산화탄소를 심해로 이동시키는데 이를 생물 탄소펌프 (biological carbon pump) 라 칭하며 대기 중 기후가스 증가를 늦추는 중요한 역할을 담당함. 따라서 탄소펌프에 의한 이산화탄소 순환을 이해하기 위해선 위성을 이용 해양 표층 일차생산력의 시·공간적인 변화의 파악이 필요함.
- 동해에서 위성을 이용한 일차생산력 연구는 2000년대 이후 증가함. MODIS 해색자료의 이용과 Behrenfeld & Falkowski (1997)와 Kameda & Ishizaka (2005)등이 개발한 P^Bopt 알고리즘을 적용 동해일차생산력의 월 변화와 연 변화를 연구하였다 (Joo et al. 2010; Joo et al. 2016). 그러나 VGPM (Behrenfeld & Falkowski, 1997) 알고리즘은 전 지구적 자료를 활용하여 개발된 알고리즘이며 KI (Kameda & Ishizaka, 2005) 알고리즘도 Behrenfeld 알고리즘에 일본주변해의 자료 일부를 추가하여 개발한 알고리즘으로 동해 울릉분지에 적합한지에 대한 검토가 필요함.
- 기획연구는 동해에 적용되는 일차생산력 알고리즘의 적합도 분석 및 개선방안에 대한 분석결과를 제시하며 향후 연구방향 설정을 제안할 예정임.

※ 위성을 이용한 동해의 식물플랑크톤 생태계 특성 분석

- 해양표층에서 식물플랑크톤 군집구조는 순일차생산과 고정된 탄소의 침강플럭스의 효율을 결정한다. 일반적으로 크기가 큰 식물플랑크톤이 우점한 군집구조는 높은 탄소침강 효율을 나타냄 (Siegel et al. 2014). 따라서 위성을 이용한 해양표층의 식물플랑크톤 군집구조의 분석 기술의 개발은 생물펌프의 시·공간적 변화를 파악하는데 있어 많은 수월성을 제공할 수 있음.
- 현재까지 위성을 이용한 표층의 식물플랑크톤 생태계 연구를 요약하면 아래와 같다:
 - 순일차생산 (Net primary production, NPP)을 (Behrenfeld and Falkowski, 1997;

Behrenfeld et al. 2005; 2006)

- 부유 입자성유기탄소 농도 (Stramski et al., 1999; 2008; Mishonov et al, 2003)
- 식물플랑크톤 탄소 생체량 (Behrenfeld and Boss, 2006; Brewin et al. 2012),
- 기능그룹별 식물플랑크톤 (phytoplankton functional type)의 구분 및 정량분석 (Nair et al. 2008; Bracher et al. 2009; Hirata et al. 2011)
- 입자크기 스택트럼과 상대적 식물플랑크톤 사이즈 (Ciotti and Bricaud, 2006; Roy et al. 2013),
- 식물플랑크톤 손실률 (Behrenfeld et al. 2013; Siegel et al. 2014)
- 식물플랑크톤 손실률 (Henson et al. 2011; Siegel et al. 2014)

- 이와 같은 위성의 활용영역 확대는 탄소침강의 시공간적 변화를 모델화 하는데 유익한 자료를 제공함. 또한 2022년 8월로 계획되어 있는 PACE 위성은 표층의 식물플랑크톤 생태계의 특성 분석능력을 강화하여 탄소펌프 연구의 발전에 기여를 할 것으로 판단됨. 따라서 PACE 위성의 분해능을 고려한 현장연구 수립을 기획보고서에 포함할 예정임.

※ 해양의 유광대에서 박명대로의 생물학적 탄소 침강 경로 및 효율

- 해양 표층 (유광대)로부터 박명대로의 생물 탄소의 이동은 그림 3과같이 5가지 경로를 나타냄.
- 이들 다섯 가지 경로는 3가지의 직접적인 입자 침강 경로가 있으며 DOC와 동물플랑크톤 수직이동에 의한 탄소 침강 경로가 있음.
 - I) 식물플랑크톤 세포의 중력에 의한 침강
 - II) 박테리오 플랑크톤, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 그들의 부산물의 집합체의 침강
 - III) 동물플랑크톤 부산물과 사체의 직접적인 침강
 - IV) DOC 와 부유입자들의 아래쪽으로 향하는 혼합
 - V) 동물플랑크톤의 수직이동 중 유광대에서 포식활동 후 박명대에서의 탄소 배출

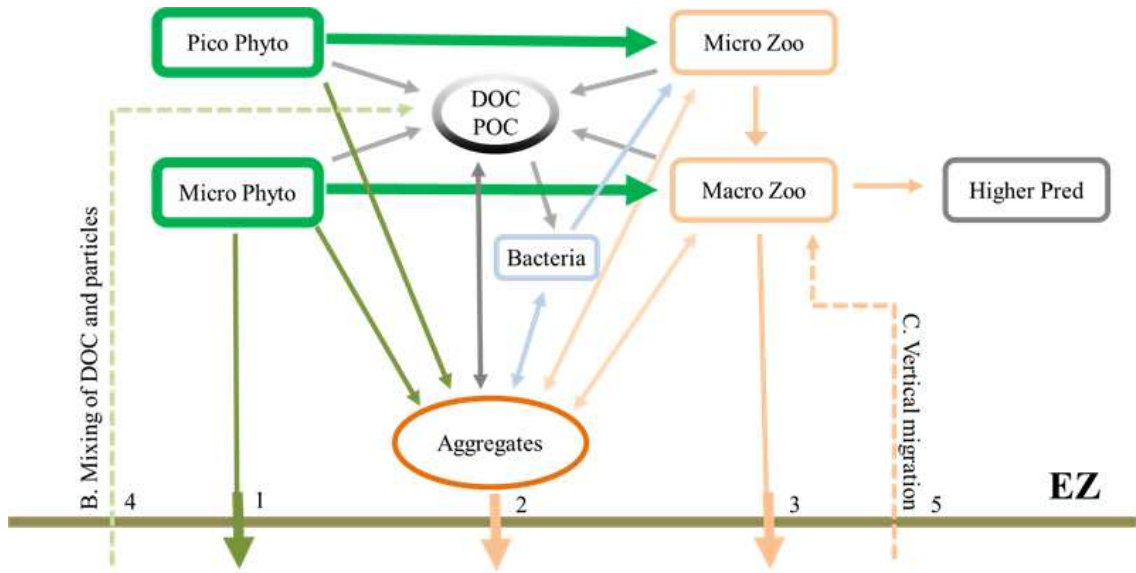


그림 3. 위성을 활용한 유광대 (euphotic zone)에서의 생물학적 탄소순환 경로 연구 개념도

※ 유광대와 박명대에서의 먹이망구조 탄소 침강 효율

- 유광대와 박명대에서의 먹이망구조는 탄소 펌프의 효율을 결정하는데 있어 중요한 요소임. 먹이망구조의 파악에는 입자 크기의 구조와 조성, 박테리오 플랑크톤, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 군집특성에 대한 자료가 필요함.
- 입자 크기와 구조 및 조성은 대용량의 해수 크기별로 분류 후 원소분석을 하는 방법이 있으며, 대용량의 시료를 여과 후 생물마커 분석이나 분자적 분석 방법을 적용할 수 있음.
- 또한 여러 분석 장비 및 기술 (flow cytometry, microscopy, flowCAM)을 이용한 직접 분석과, 엽록소 분류 측정, HPLC를 이용한 지시색소 분석, 분자생물학적 종 조성 분석 등 간접적 방법 활용이 필요함.

5. 추진체계

□ 추진전략

- NASA는 이산화탄소의 증가에 따른 전 지구적 기후변화의 급격한 진행을 조절하는 해양 탄소펌프의 현재 상황 및 미래의 변화를 예측하기 위해 PACE 위성을 발사를 예정하고 있으며, 탄소펌프의 효율을 위성으로 관측하기 위한 기술개발을 목표로 EXPORTS field campaign을 계획하고 있음 (그림 4).
- 산업혁명이후 대기 중 방출된 CO₂의 약 30%가 생물 펌프를 통해 해양이 흡수되어 격리됨으로서 대기 중 CO₂ 증가와 기후변화 진행 속도를 늦추는 역할을 하는 것으로 밝혀짐. 따라서 탄소순환이 현재와 미래의 해양생태계에 미칠 영향력의 정량화는 해양학 분야에 남겨져 있는 가장 큰 도전이라 할 수 있음.
- 이 보고서는 기후변화가 급격히 진행되고 있는 우리나라 주변해중 동해를 대상으로 생물학적 탄소순환 특성을 파악하기 위한 연구개발을 목표로 하고 있으며, EXPORTS 연구계획서를 기반으로 우리가 개발하였거나 개발 중인 해양과학기술과 구축 및 구축예정인 인프라를 결합하여 기획과제 보고서를 작성 중으로 주요 연구내용의 추진전략은 아래와 같음:
 - 해양의 생물학적 탄소순환의 시작은 유광대의 식물플랑크톤에 의한 일차생산으로부터 시작함. 표층의 식물플랑크톤 생체량, 생산력, 군집구조 등 탄소펌프의 효율에 영향을 주는 요인들의 시공간적 특성과 정량화는 GOCI 해색위성과, MOSDIS 및 발사예정인 PACE 위성의 활용계획에 맞춰 현장연구와 기술개발을 진행함.
 - 유광대로부터 박명대로의 탄소침강은 유기탄소의 크기, 조성 및 먹이망구조 등 다양한 요인에 영향을 받으며, 이러한 특성은 현장 조사와 위성자료의 비교를 통해 분석기술을 개발함. 현장조사는 연구선을 이용한 현장조사와 함께 글라이더와 아고 등에 부착된 생화학적 센서의 자료를 활용하여 연구선의 현장조사 제한성을 극복함.
 - 유광대와 박명대의 먹이망 구조는 탄소펌프의 효율에 영향을 주는 주요 요인으로 먹이망 구조를 결정하는 생물들의 크기별 탄소량, 조성, 지시색소분석을 통한 군집구조, 포식자인 동물플랑크톤의 조성과 생체량 등의 분석을 통하는 방법과 동위원소와 생화학 지표인 아미노산 분석방법을 채용함.
 - 유광대로부터 심해로의 유기탄소침강은 sediment trap을 이용하여 탄소침강의 주요원인생물과 깊이별 탄소침강의 감소율을 구하여 탄소펌프 효율을 파악함.
 - 이와 같은 추진전략에 맞게 주요 연구내용별 핵심 기술개발이 진행되어야 목표한 성과

를 달성 할 수 있을것 임.

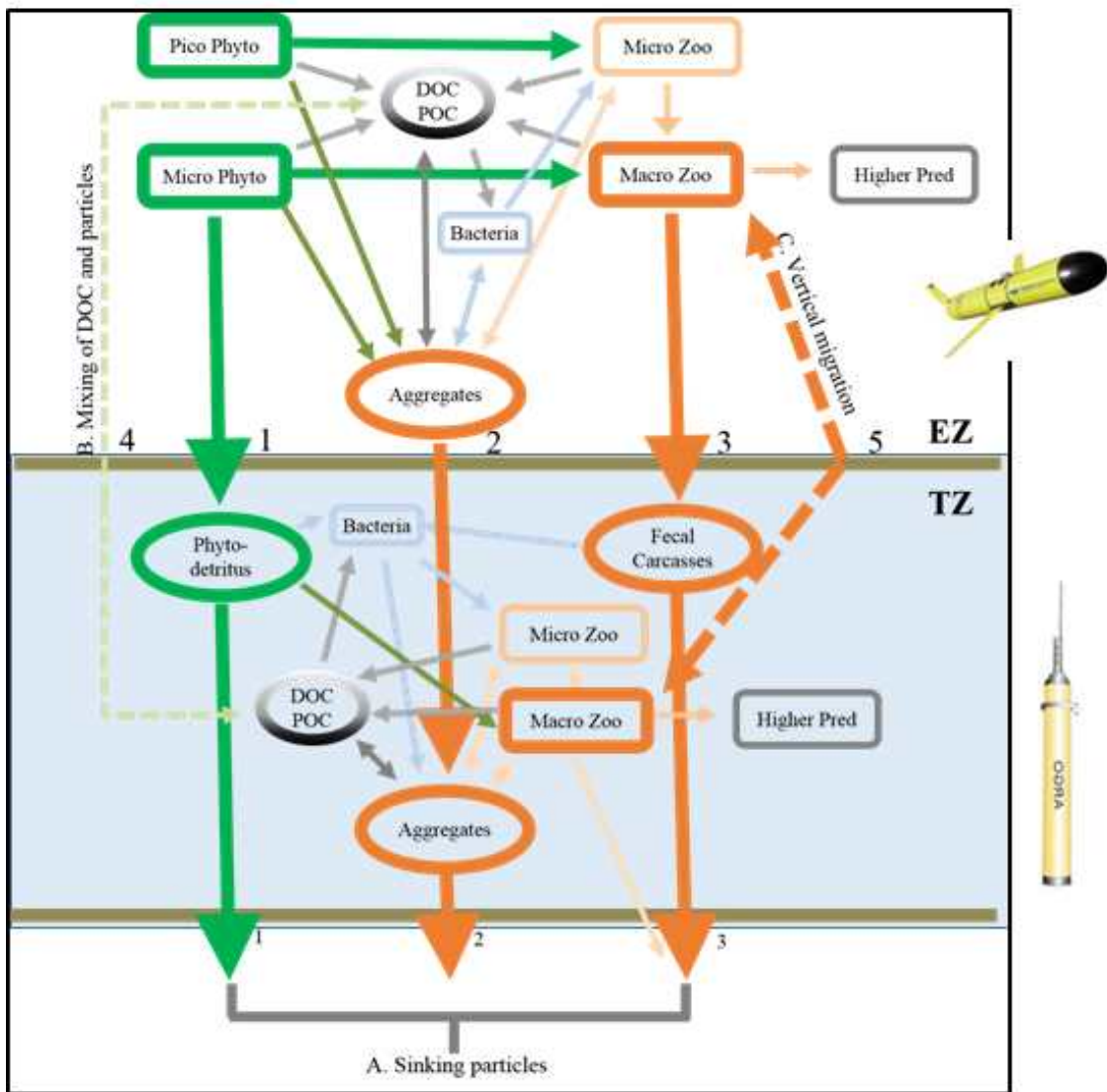


그림 4. EXPORTS field campaign 의 연구추진 계획 (EXPORTS연구계획서 참고)

□ 국제협력 추진계획

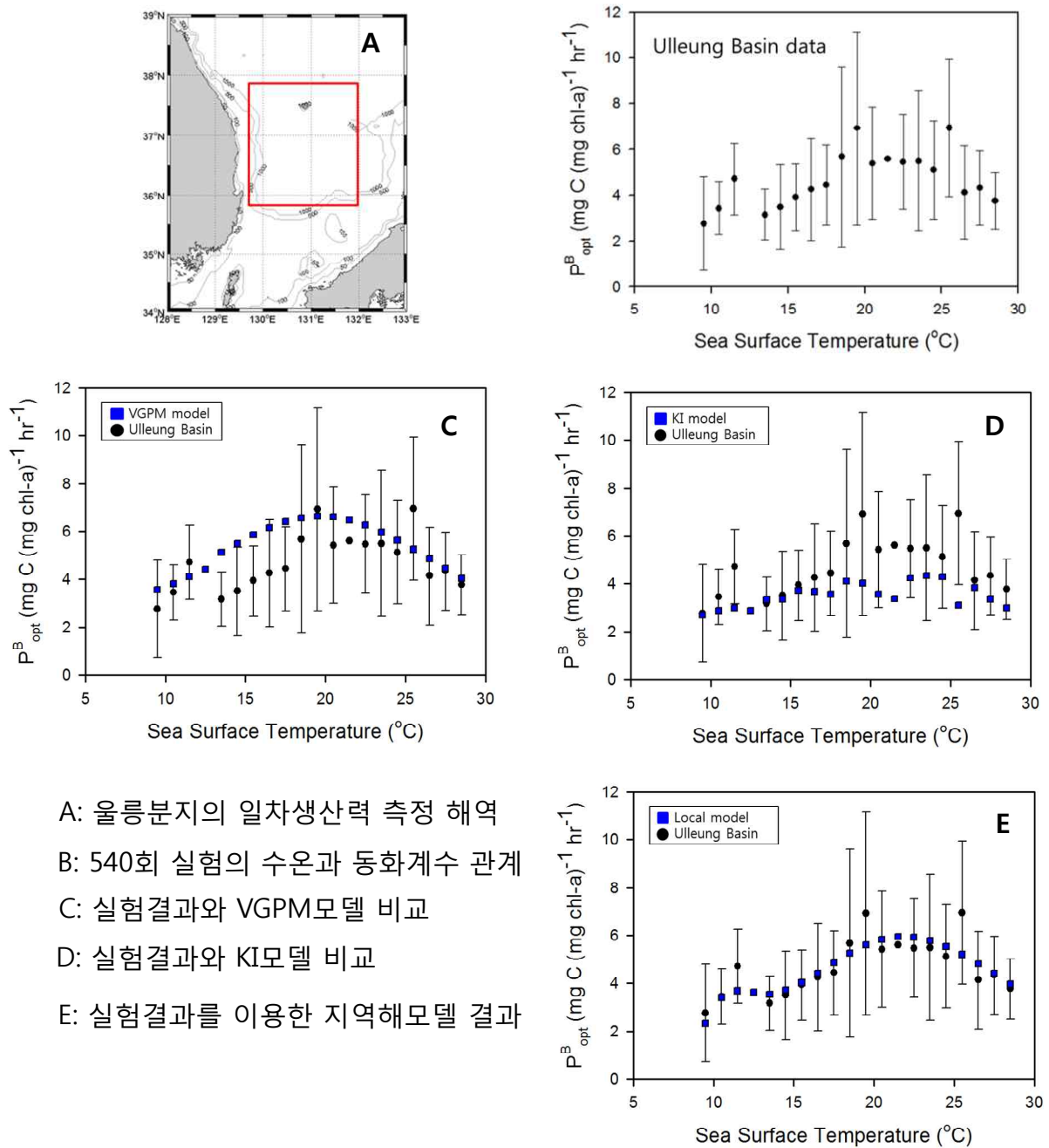
- 기획과제의 성공적인 진행을 위해서는 NASA의 EXPORTS 연구팀과의 정보교환이 필요. 2017년 4-5월에 예정되어 있는 KORUS campaign 워크숍에서 NASA의 EXPORTS 연구팀과 협력방안을 모색할 예정임.
- 대기-해양간 이산화탄소 플럭스는 연구선에 설치된 장비에 추가하여 Glider에 pCO₂ 측정 센서를 장착하여 주기적인 관측을 예정하고 있으며, 필요한 기술은 현재 축 센터의 산성화모니터링 시스템을 공동으로 운영하고 있는 NOAA PMEL 탄소그룹 연구자들과 협력 연구를 계획 중임.

6. 주요기술 개발현황

- 동해에서의 생물학적 탄소순환의 현재특성과 미래에 나타날 변화의 연구는 핵심기술의 개발 능력이 과제의 성공적 수행을 결정하는 주요 요소이다. 따라서 현재의 기술개발 현황과 향후에 개발이 필요한 기술에 대한 검토가 필요하다.

※ 동해의 일차생산력 시공간적 변화특성 파악을 위한 알고리즘 개발 현황

- 위성을 이용한 일차생산력 산정은 탄소펌프의 연구에 핵심적인 자료이나, 전술한 바와 같이 동해의 일차생산력은 MODIS 해색자료에 (Behrenfeld & Falkowski, 1997; Kameda & Ishizaka, 2005)등이 개발한 P^Bopt 알고리즘을 적용하여 월별 변화와 연 변화를 구함. 따라서 이들 알고리즘의 지역해의 적용타당성을 2005-2015년 동해에서 진행된 일차생산력 실험 자료를 통해 검토 함.
- 2005-2015년 사이 울릉분지의 표층수에서 측정된 일차생산력 자료를 이용 VGPM 모델과 KI 모델의 적용가능성을 검토한 결과 이들 모델은 동해 울릉분지에 적합하지 않은 결과를 보여 울릉분지에 적합화 된 새로운 모델을 개발함. (그림 5)



- A: 울릉분지의 일차생산력 측정 해역
- B: 540회 실험의 수온과 동화계수 관계
- C: 실험결과와 VGPM모델 비교
- D: 실험결과와 KI모델 비교
- E: 실험결과를 이용한 지역해모델 결과

그림 5. 2005-20015년 사이 동해 울릉분지에서 측정된 최적동화계수 자료를 활용한 지역해 모델 개발 결과

※ 동해의 적조생물 생체량 파악을 위한 알고리즘 개발

- 동해는 지형류와 관련된 용승현상으로 인해 적조현상이 나타남. 적조의 발생은 유광대에서 심층으로 침강하는 유기탄소의 증가를 증가시킬 수 있음. 이와 같은 이벤트성 탄소펌프의 양적변화를 파악하기 위해선 엽록소 농도를 정확히 측정할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요함.
- 2013년 8월 동해에서 발생한 적조의 현장조사 농도는 최대 약 1000 ug/L 의 농도를 나타냈으나, GOCI 표준 알고리즘으로 처리된 값은 10 ug/L 정도에서 더 이상 증가가 나타나지 않은 반면, 새로 개발된 알고리즘은 현장 농도를 잘 재현 함. 따라서 색소 농도 분포도 새로 개발된 알고리즘이 현장감에 가까운 분포도를 나타냄 (그림 6).

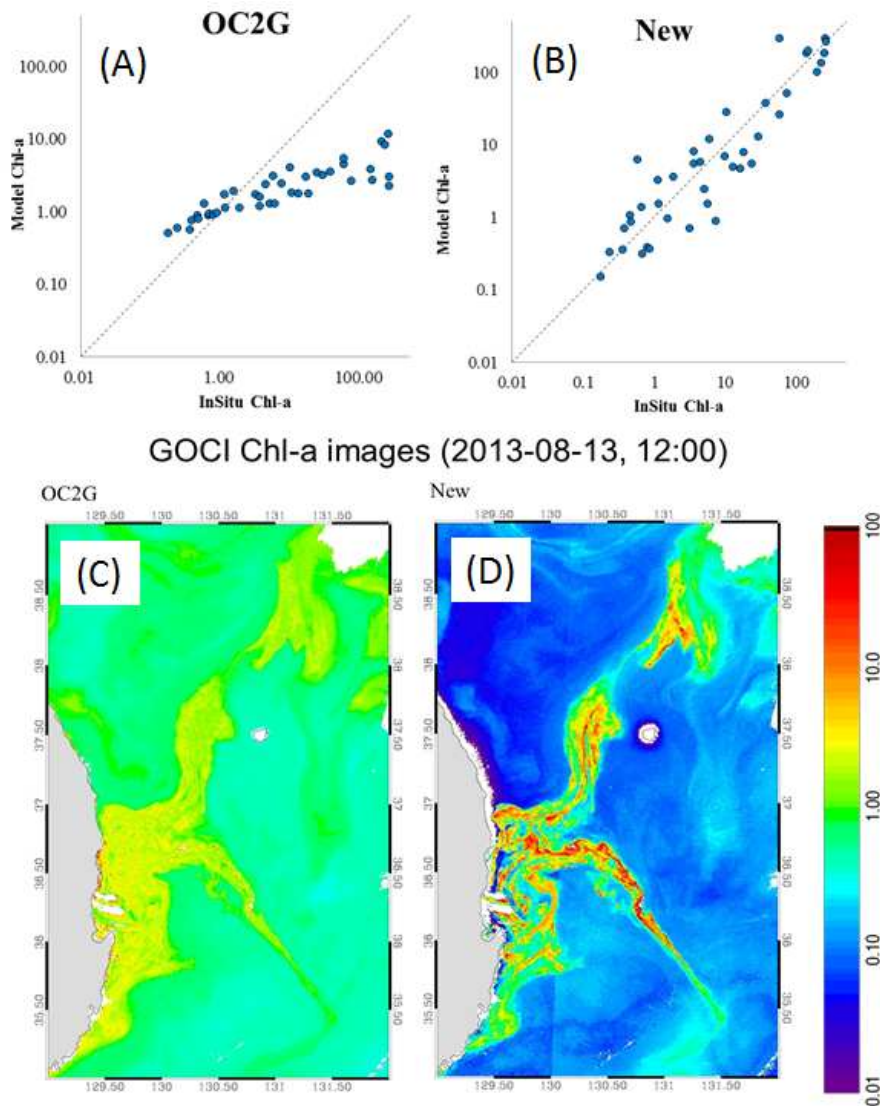


그림 6. 동해적조발생시 OC2G (A) 과 새로 개발된 알고리즘(B)으로 계산된 엽록소 농도 및 엽록소분포도 (C,D)

※ 유광대의 식물플랑크톤 다양성 및 군집구조 분석기술

- 탄소펌프의 효율은 식물플랑크톤의 군집구조와 밀접한 관계를 보이나, 식물플랑크톤의 생체량 중 분규군 파악이 어려운 부분이 약 30-80%를 나타냄. 따라서 탄소펌프의 효율을 파악하기 위해 식물플랑크톤 다양성 및 군집구조 분석 기술이 우선 요구됨.
- 연구팀은 2005-2015년 사이 약 1400개의 시료를 NGS 분석을 수행 약 1,100만개의 리드를 얻었으며, 계절별 다양성 및 우점분류군을 파악함 (그림 7과 8).

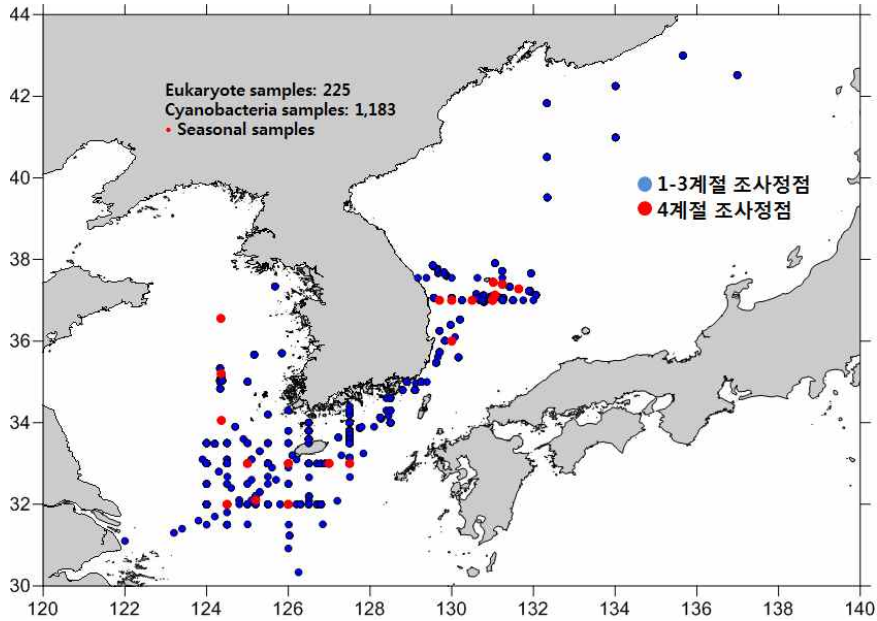


그림 7. 우리나라 주변해의 다양성 조사정점

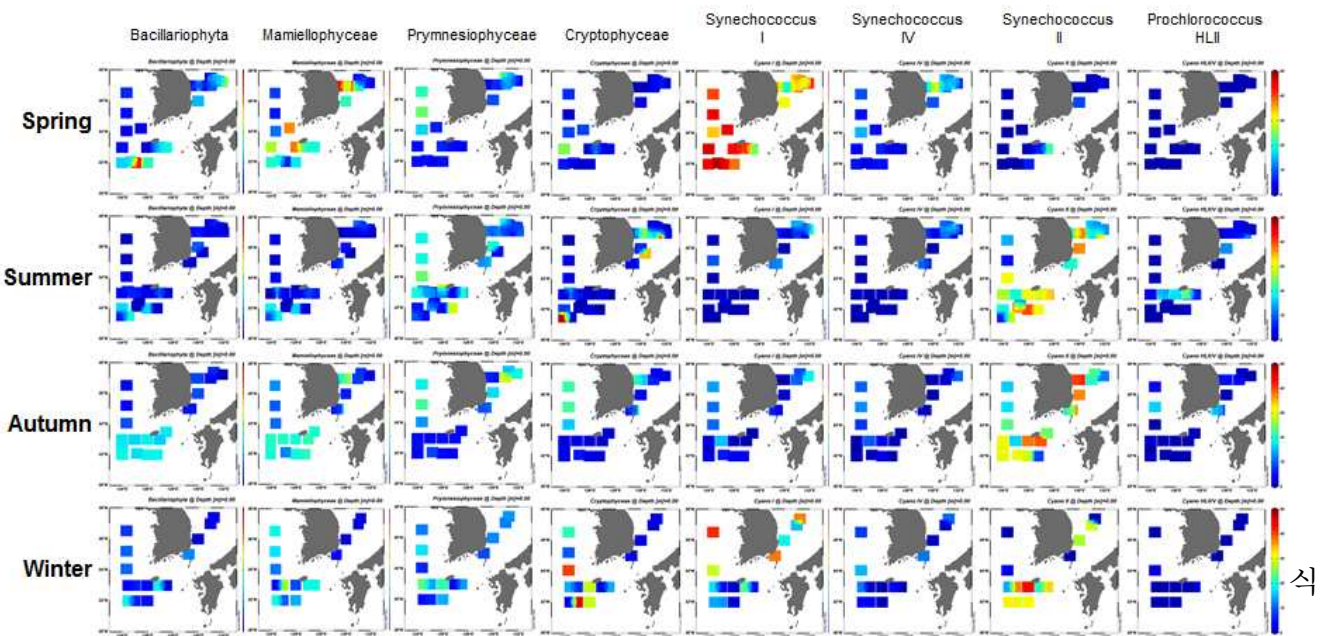


그림 8. 주요 분류군 시공간적 분포특성

물플랑크톤

※ 유광대의 식물플랑크톤 생체량 및 군집구조 분석기술

- 식물플랑크톤 분류군별 생체량은 Flow cytometer, FlowCAM, microscope 등 이미지 분석 장비와 분자생물학적 다양성분석기술, 지시색소분석 및 해석 측정 등을 병행하여 분류군별 생체량 및 군집구조를 연구할 예정임 (그림 9).

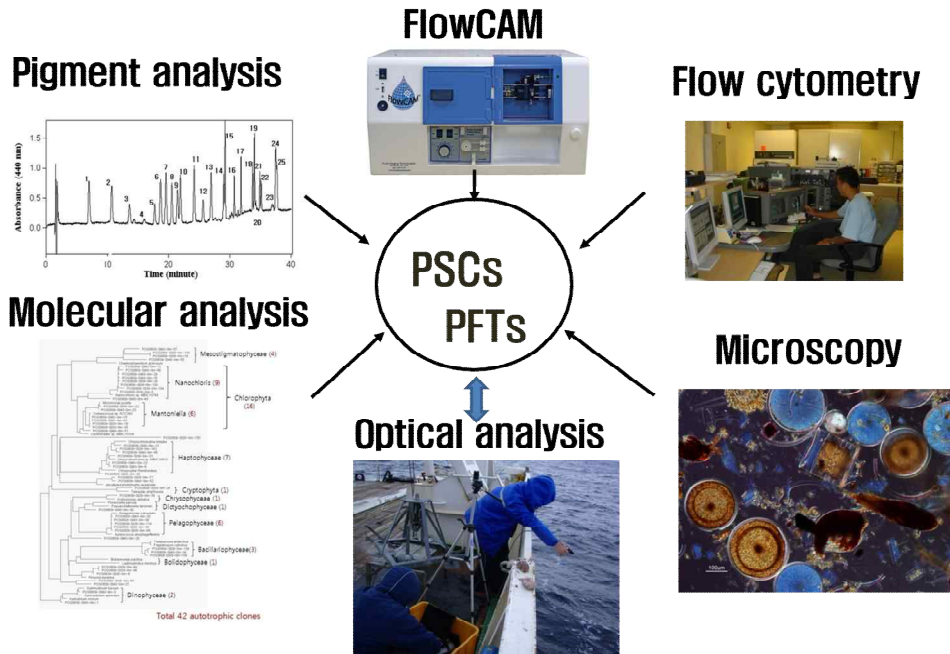


그림 9. 식물플랑크톤 다양성 및 생체량 분석을 위한 연구방법

※ 먹이망 분석기술

- 기후변화에 따른 식물플랑크톤 생물량 및 생산력과 관련 있는 다양한 환경요인 (강수량, 수온, 이산화탄소 분압, 해류 순환, 성층 강도 등)의 변화가 보고됨 (Sarmiento et al., 2004; Irwin and Finkel, 2008).
- 먹이망 구조에 직접적으로 영향을 주는 식물플랑크톤 크기나 군집 역시 기후변화에 의해 영향을 받고 있음이 보고된 바 있음 (Bopp et al., 2005; Finkel et al., 2010).
- 기후변화에 따른 환경변화는 한반도 해역의 생태계 구조에 영향을 미칠 것으로 예측되나, 이에 대한 충분한 이해는 부족한 실정임.
- 유광대로부터 침강하는 유기 탄소 flux는 차세대 시퀀싱 기법 및 관측 장비를 활용 식물플랑크톤 군집구조 및 먹이망 특성에 따른 변화 분석을 목표로 관측 방법을 선택할 예정임.

- 유광대의 먹이망구조는 Flow cytometry, FlowCAM등의 생물 이미지분석 장비와 안정 동위원소 및 아미노산 분석기법을 활용한 분석방법을 검토 후 선택할 예정임.

※ 기타 분석기술

- 해양 중층의 유기탄소 변화는 미생물에 의한 분해와 동물플랑크톤의 수직이동과 연결된 탄소 flux를 측정하기 위해 sediment trap 및 새로운 관측방법의 개발 가능성을 검토 후 채택할 예정임.
- Glider와 생화학센서를 부착한 아고의 활용계획은 12월 최종보고서 제출 전까지 참여연구진과 논의를 거쳐 결정할 예정임.
- 이상의 관측방법을 통해 한반도 주변해의 생물학적 펌프의 효율 분석과 영양요인의 파악을 목표로 연구방법을 기획할 예정임.
- 연구의 최종 목표인 현재와 미래의 기후변화가 생물학적 탄소순화에 미치는 영향을 예측할 수 있는 모델의 검토 및 장기적 발전방향을 고려하여 선택할 계획임.

7. 기대효과 및 활용방안

□ 기대효과

- 한반도 주변해에 적합한 일차생산력 모델 개발을 통해 탄소 순환과정의 정밀도 향상
 - MODIS 해석자료를 활용 2003-2015년 사이의 정밀한 일차생산력의 시공간적 변화를 파악함으로써 기후변화에 따른 탄소순환 연구 기반 구축이 가능함.
 - 먹이망을 통한 수산자원 변동성 파악에 활용함.
- 이산화탄소의 해양-대기 교환과 심층이동을 조절하는 생물학적 탄소 펌프의 구조와 기능에 대한 장기 변화 이해와 미래 예측 역량 확보
 - 해양 생물학적 탄소 펌프의 탄소 조절 기능과 해양 환경조절 능력의 이해를 통해 기후 변화에 따른 미래 변화 예측 능력 제고.

□ 연구개발결과의 활용방안

- 대기의 이산화탄소 증가에 따른 기후변화 대응 전략 수립에 활용
 - 생물학적 탄소 펌프의 이해와 기후변화에 따른 변동성 예측 능력 확보를 통해 국가적 대응전략 수립 및 실행에 기여함.
- 포스트 Kyoto 체제 대응을 위한 국가 정책 수립에 활용
 - 온실가스 국가통계와 정책이행, 기후변화 영향 및 적응 연구를 통해 기후변화 당사국 총회(COP)에 국가보고서를 제출해야 하는 국가적 의무의 이행 및 국가의 기후변화 대응 법적·정책적 기반 마련에 기여함.
- 차세대 관측기술의 운영 노하우를 신기술 개발에 활용
 - 차세대 관측기술의 운영 노하우를 한구 주변해에 적합한 신기술 개발에 활용 및 기술 개발단계에서 축적된 노하우는 해양생태계 연구의 효율성 제고에 활용될 수 있음.

8. 연구원 편성표

□ 연구책임자

성명	국문	노재훈 (한문) 盧在勳			과학기술인 등록번호	10175294
	영문	Noh Jae Hoon				
직장	전공	식물플랑크톤 및 일차생산력			전화/FAX	031-400-6218 031-408-5820 (F)
	부서	생태기반연구센터	직위	책임연구원	휴대전화	010-3223-9279
	주소	우편번호 15627 경기도 안산시 상록구 해안로 787			E-mail	jhnoh@kiost.ac.kr

□ 참여연구원

분야	성명	부서	직위	전공 및 학위				참여율 (%)
				학위	년도	전공	학교	
생물	노재훈	생태기반연구센터	책임연구원	박사	2000	생물해양학	인하대학교	
생물	최동한	생태기반연구센터	책임연구원	박사	2003	해양미생물학	서울대학교	
생물	이연정	생태기반연구센터	선임연구원	박사	2014	안정동위원소 생태학	한양대학교	
생물	강형구	생태기반연구센터	책임연구원	박사	1997	생물해양학	부경대학교	
생물	김동성	생태기반연구센터	책임연구원	박사	1996	생물해양학	동경대학교	
생물	김영옥	남해특성연구센터	책임연구원	박사	1995	생물해양학	도호쿠대학	
위성	김원국	해양위성센터	선임연구원	박사	2011	원격탐사	Perdue Univ.	
화학	김석현	화학연구본부	책임연구원	박사	1997	해양화학	서울대학교	
화학	김동선	화학연구본부	책임연구원	박사	1998	해양화학	캘리포니아 주립대	
화학	김형직	심해저광물자원센터	선임연구원	박사	2012	해양화학	부산대학교	
물리	김철호	물리연구본부	책임연구원	박사	1996	해양물리	서울대학교	
모델	강현우	물리연구본부	책임연구원	박사	2001	물리해양학	서울대	
모델	조홍연	연안방제연구센터	책임연구원	박사	1994	환경모델링	서울대	
생물	최유리	생태기반연구센터	사업인력	학사	2011	분자생물학	순천향대	

9. 참고문헌

- Barber, R. T. (2007) Picoplankton do some heavy lifting. *Science*, 315, 777-778.
- Behrenfeld, M.J.; Falkowski, P.G. (1997), Photosynthetic rates derived from satellite-based Chl-a concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1 - 20.
- Behrenfeld, M.J., E. Boss, D.A. Siegel, and D.M. Shea (2005), Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1006, doi:10.1029/2004JC002527
- Behrenfeld, M.J., S.C. Doney, I. Lima, E.S. Boss, D.A. Siegel (2013), Physicoecological interactions of the subarctic Atlantic annual plankton bloom. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 526 - 540.
- Bopp, L., Aumont, O., Cadule, P., Alvain, S., Gehlen, M. (2005) Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19606.
- Boyd (2014), Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models, *Global Biogeochemical Cycles*, 28, 181 - 196, doi:10.1002/2013GB004743
- Bracher, A., M. Vountas, T. Dinter, J.P. Burrows, R. Röttgers, and I. Peeken (2009), Quantitative observation of cyanobacteria and diatoms from space using PhytoDOAS on SCIAMACHY data. *Biogeosciences*, 6, 751-764.
- Ciotti, A. M., and A. Bricaud (2006), Retrievals of a size parameter for phytoplankton and spectral light absorption by colored detrital matter from water-leaving radiances at SeaWiFS channels in a continental shelf region off Brazil. *Limnology and Oceanography Methods*, 4, 237 - 253.

- Finkel, Z. V., Beardall, J., Flynn, K. J., Quigg, A., Rees, T. A. V., Raven, J. A. (2010) Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry. *J. Plankton Res.*, 32, 119-137.
- Henson, S.A., R. Sanders, E. Madsen, P. J. Morris, F. Le Moigne, and G. D. Quartly (2011), A reduced estimate of the strength of the ocean's biological carbon pump, *Geophysical Research Letters*, 38, L04606.
- Hirata, T., N.J. Hardman-Mountford, R.J.W. Brewin, J. Aiken, R. Barlow, K. Suzuki, T. Isada, E. Howell, T. Hashioka, M. Noguchi-Aita, and Y. Yamanaka (2011), Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types. *Biogeosciences*, 8, 311-327.
- Irwin, A. J. and Finkel, Z. V. (2008) Mining a sea of data: determining controls of ocean chlorophyll. *PLOS One*, 3, e3836, doi: 3810.1371/Journal.pone.0003836.
- Joo, H.; Park, J.W.; Son, S.; Noh, J.-H.; Jeong, J.-Y.; Kwak, J.H.; Saux-Picart, S.; Choi, J.H.; Kang, C.-K.; Lee, S.H. (2014), Long-term annual primary production in the Ulleung Basin as a biological hot spot in the East/Japan Sea. *J. Geophys. Res. Oceans* 2014, 119, 3002 - 3011.
- Joo et al. (2016). Long-Term Pattern of Primary Productivity in the East/Japan Sea Based on Ocean Color Data Derived from MODIS-Aqua. *Remote sensing* doi:10.3390/rs8010025.
- Kameda, T.; Ishizaka, J. Size-fractionated primary productivity estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *J. Oceanogr.* 2005, 61, 663 - 672.
- Mishonov, A.V., W.D. Gardner, and M.J. Richardson (2003), Remote sensing and surface POC concentration in the South Atlantic. *Deep-Sea Research Part II*, 50 (22 - 26), 2997 - 3015.

- Nair, A., S. Sathyendranath, T. Platt, J. Morales, V. Stuart, M.-H. Forget, E. Devred, and H. Bouman (2008), Remote sensing of phytoplankton functional types. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3366 - 3375.
- Richardson, T. L., Jackson, G. A. (2007) Small phytoplankton and carbon export from the surface ocean. *Science*, 315, 838-840.
- Roy, S., S. Sathyendranath, H. Bouman, and T. Platt (2013), The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 139, 185 - 197.
- Sarmiento, J., Slater, R. D., Barber, R., Bopp, L., Doney, S. C., Hirst, A. C., Kleypas, J., Matear, R., Mikolajewicz, U., Monfray, P., Soldatove, V., Spall, S. A., Stouffer, R. (2004) Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biochem. Cycles*, 18, 1 - 23.
- Siegel, D. A., K. O. Buesseler, S. C. Doney, S. F. Sailley, M. J. Behrenfeld, and P. W. Stramski, D., R. A. Reynolds, M. Kahru, and B. G. Mitchell (1999), Estimation of particulate organic carbon in the ocean from satellite remote sensing. *Science*, 285, 239 - 242.

과 제 요 약 서

연구목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 차세대 관측기술을 활용 한반도 주변해의 생물학적 탄소 펌프의 구조, 효율 및 역할 규명과 미래 기후변화로 인한 변동성 예측능력 확보를 통해 국가 기후변화 대응 전략에 기여할 수 있는 과제개발을 위한 기획수립 					
연구내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과거 10년간 측정된 한반도 주변해의 일차생산력 자료와 위성자료를 결합하여 한반도 주변해에 적합한 일차생산력 알고리즘 검토 <ul style="list-style-type: none"> - 해양표층의 정밀한 시공간적 일차생산력 산정을 통해 유광대의 생물학적 탄소 펌프 특성 이해 ○ 차세대 관측기술 및 현장연구를 통해 생물/물리/화학적 요인들에 의한 유기탄소 침강 과정 파악을 위한 기술 검토 <ul style="list-style-type: none"> - 유광대와 박명대(twilight zone)의 유기탄소 침강 및 분해 과정 정량화와 먹이망 효율 분석을 위한 연구방법 검토 ○ 현재 및 미래 기후변화에 따른 생물학적 펌프의 효율 및 기능 변화에 대한 예측 모델 개발 방안모색 ○ 기후변화의 영향 및 취약성 파악과 국가대응정책 수립에 기여할 수 있는 연구과제 개발을 위한 기획 					
예상 연구성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ Target 성과물 : 한반도 주변해의 생물학적 탄소 펌프 특징 이해 및 예측 모델 개발 전략 수립을 위한 기획보고서 ○ 한반도 주변해에 적합한 일차생산력 모델 개발을 통해 탄소순환 과정의 정밀도 향상 ○ 생물학적 펌프의 구조와 기능에 대한 장기변화 이해와 미래 예측 역량 확보 ○ 생물학적 탄소 펌프 예측 모델 개발 					
종료후 활용계획	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대기의 이산화탄소 증가에 따른 생태계 영향파악 및 대응전략 수립에 활용 ○ 포스트 Kyoto 체계 대응을 위한 국가 정책 수립에 활용 ○ 차세대 관측기술 운영 노하우를 신기술 개발에 활용 					
키워드	이산화탄소	생물학적 탄소펌프	일차생산력			
	먹이망	탄소순환 예측 모델	탄소 격리			
관련과제 국내 전문가 3명이상 제시	소속	직위	이름	전공	연락처	비고
	부산대학교	부교수	이상현	일차생산	010-3580-4519	
	한양대학교	교수	신경훈	먹이망	010-2276-6637	
	포항공과대학교	부교수	이기택	탄소순환	010-9355-3285	
	한양대학교	교수	현정호	미생물	010-2365-6431	