



인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발

BSPE99611-11772-4

인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발

2018. 12.

인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발

2018. 12.

| 주의 |

이 보고서는

1. 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

2018 · 12

KIOST 한국해양과학기술원

BSPE99611-11772-4

인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발

2018. 12.

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발” 사업의 최종보고서로 제출합니다.

2018년 12월

연구책임자 : 최상화

참여연구원 : 강동진, 강성현, 강현우, 김경태, 김석현,
김성대, 김은수, 김종근, 나공태, 노재훈,
노태근, 박용주, 소재귀, 유주형, 이은경,
이재성, 정창수, 조성록, 최동한, 강나연,
구분화, 권영신, 김동국, 김범준, 김성한,
김연경, 김예슬, 김은영, 노주철, 문초룡,
민지은, 박소예나, 박지영, 박혁민, 백현민,
백 훈, 서성봉, 서옥희, 손푸르나, 신지선,
안성민, 양원석, 엄태양, 유장연, 이동관,
이민형, 이승용, 이승현, 이양재, 이정화,
이종현, 이호원, 정혜령, 조성태, 조소설,
최유리, 최유정, 현명진, 황초룡

보고서 초록

과제고유 번호	BSPE99611- 11772-4	해당단계 연구기간	2017.1.1. ~2018.12.31.	단계 구분	1단계
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	(바다 되살리기)해양환경 보전 기술 개발 및 해양오염 관리체제 강화			
	세부과제명	인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발			
연구책임자	최상화	해당단계 참여연구원수	총 : 72 명 내부: 32 명 외부: 40 명	해당단계 연구비	정부: 760,000천원 기업: 천원 계 : 760,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 72 명 내부: 32 명 외부: 40 명	총 연구비	정부: 760,000천원 기업: 천원 계 : 760,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양환경연구센터		참여기업명		
국제공동연구 위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	260
<p>○ 양식장 환경관리를 위한 모니터링 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 양식장 환경에 적용가능한 수층 모니터링 시스템 구축 - 형광 센서 값의 보정: 아세톤 추출법을 이용한 엽록소 a 농도와 비교를 통한 보정 - 광합성 변수 측정용 광학 장비: PhytoFlash (Turner Designs)와 FRRF (Chelsea) 이용 - 우점식물플랑크톤 장기모니터링 기술 시험: 원격 관측을 위한 FlowCAM의 연계 장치의 개발 - 대양에서 활용한 벤티랜더 기술을 기반으로 양식장 해역에 적합한 장비 제작 및 적용 <p>○ 고밀도 해양관측자료의 통합 DB 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> - 본 연구사업 생산 현장관측자료 및 연구해역 내 국내외 기존자료 수집, DB 설계 및 구축 - 자동관측기기 생산자료의 실시간 처리 및 정보서비스 개발 <p>○ 해양생태계 역학모형 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 저서생태역학모형 병행 개발 및 표영생태역학모형과 결합 - 환경모니터링 자료와의 준실시간 비교를 통한 예측시스템 평가 및 개선 체제 구축 <p>○ 인공지능경망 자료기반모형 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 자료기반모형 개발을 필요한 관측자료, 위성자료, 모델자료 수집 및 결측자료 보간 - Tensorflow의 LSTM 네트워크를 이용한 클로로필 머신러닝모형 구성 - 수집자료를 이용한 자료기반모형 테스트 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	양식장, 모니터링, 해양환경, 생태계모델링, 환경관리시스템			
	영 어	aquafarm, monitoring, marine environment, ecosystem modeling, marine environment management system			

요약문

I. 제 목

인공지능(AI) 기반 양식장 해역 환경관리시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

- 종래의 정선관측이나 비정기적인 연구 조사를 통해 얻어지던 관측자료가 각종 센서의 발달로 현장에서 실시간으로 획득되고, 자동으로 처리, 가공되어 수요자들에게 공급되는 상시 관측 시스템으로 변화 중임
- 여러 요인들의 작용으로 역동적으로 일어나는 해양 현상의 원인을 규명하고 미래의 변화를 예측하기 위해서는 상시적인 현장 관측으로 높은 빈도의 시공간적인 자료가 요구됨. 현재의 해양 상태와 변화 추세를 파악하지 못하면 미래의 변화도 예측할 수 없음.
- 해양 수층의 기본적인 물리적 요인과 해양화학인자에 대한 상시적이고 지속적인 관측을 수행할 수 있는 시스템을 갖추기 않고는 지속적으로 변화하는 해양환경을 온전히 파악할 수 없음
- 식물플랑크톤은 양식장 환경에 의한 부영양화 등에 의해 반응하는 가장 일차적인 변수로서 양식장의 환경 관리를 위해 실시간 모니터링이 필요한 중요한 파라미터임. 일부 센서가 개발되어 해양 환경에서 활용중이나, 양식장 환경에서 적용하여 장기간 모니터링한 사례는 거의 없으며, 관련 기술을 적용하기 위해서는 운영 기술의 개발 및 자료 검보정 등의 연구가 요구됨
- 양식산업 성장에 의한 양식활동 증가는 연안환경에 악영향으로 작용할 수 있으며, 가장 중요한 환경문제 중 하나는 저층으로의 유기물 집적임. 양식활동에 의한 퇴적물과 연안 생태계의 영향을 규명하기 위해서는 퇴적물 산소소모율 및 저층 영양염 용출율의 측정이 필요함

- 양식장 주변의 상시 환경관리시스템 구축을 위해서는 공간적, 시간적 해상도가 높은 자료 생산이 요구됨. 원격 모니터링 자료는 현장 실측 자료와의 매칭을 통해 상호 보완적으로 사용 가능하고, 추후 생태계 모델링의 기초 입력자료로 활용 될 수 있음
- 주로 천해에 있는 양식장 해역의 생태계 변동성을 진단하고 예측하기 위해서는 수층내의 물질순환 뿐만 아니라 저층과의 물질교환이 동시에 고려될 수 있는 표영-저서 결합 생태계 모형의 개발이 요구됨
- 양식장 해역을 대상으로 고밀도 상시관측자료가 생산되는 경우, 고밀도 관측자료를 활용하여 인공지능망-기계학습을 통한 자료기반 모형 구현이 가능함. 해양환경문제 예측을 위한 자료기반 모형 기술의 개발이 요구됨

2. 연구개발의 목적

- 양식장 해역의 환경관리를 위한 수층의 해양물리, 화학 및 생태요인별 변화를 파악할 수 있는 모니터링 시스템을 개발하고 이의 상시 운영 기술을 확보함
- 벤딕랜더를 이용하여 퇴적물 산소소모율과 저층영양염 용출율을 측정하여 양식활동에 의한 유기물 집적이 환경에 미치는 영향을 평가하고, 양식장에서의 저층 영양염 용출이 수층 일차생산자에게 미치는 영향을 밝힘
- 원격 모니터링 자료를 활용한 양식장 환경관리, 생태계예측 요소기술 개발에 필요한 입력자료 분석 및 제공 (클로로필, 부유물질 등)
- 통영 양식장 해역 변동 재현 및 예측을 위한 해양 생태계 역학모형 및 자료기반모형 개발

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 수층 모니터링 기술 개발
 - 표층계류장비 시험 및 현장적용
 - 표층상시관측 시범자료 생산
 - 표층시료채집기 시험 및 현장적용
 - 화학해양 인자 표층 시계열 시범자료 생산
 - 수층 프로파일러 운영 및 자료생산
- 생태계 모니터링 기술 개발
 - 생물량 (엽록소 a) 변동 모니터링 기술 개발
 - 실시간 식물플랑크톤 이미지 분석 기술 개발 (FlowCAM 활용)
 - 일차생산력 추정 기술 개발 (FRRf 이용)

- 퇴적물 모니터링 기술 개발
 - 소형(연안용) 벤딕랜더 프레임 설계 및 제작
 - 광센서 기반 프로파일러 제작
 - 벤딕랜더 시험 및 운영기술 확립
 - 양식장 유기탄소 수지 측정
 - 영양염 플럭스 측정
- 원격 모니터링 자료획득
 - 연구해역 해양환경자료 생산
 - 해양환경문제 (적조 등) 발생 시 집중관측
- 해양생태계 역학모형 개발
 - 표영 및 저서 생태계 모형 수립
 - 통영 양식장 해역에 적합한 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학모형 개발
- 양식장 생태계예측 요소기술 개발
 - 고밀도 해양관측자료의 통합 DB 구축
 - 인공지능망-기계학습 기술을 이용한 자료기반 모형 시범 개발

IV. 연구개발결과

- 수층 모니터링 기술 개발
 - 해양수산부 연구개발사업에서 제작·설치한 관측플랫폼의 연계운영을 통해 양식장 외해역 표층부이와 수층 프로파일러의 지속적인 시계열 관측자료 생산을 수행하였음. 표층부이 운영을 통해 10분 간격으로 해양대기와 표층해수의 기본적인 물리특성항목 관측자료를 획득하였음. 3시간 간격으로 해양대기와 표층해수의 이산화탄소 분압을 약 18개월간 측정하였으며, 이를 통해 한반도 연안해역에서 실측자료를 기반으로 한 연간 해양-대기 이산화탄소 교환량을 최초로 산정할 수 있었으며, 그 값은 $3.62 \pm 16.78 \text{ mol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 임
 - 전원이 공급되는 해상구조물에서 표층부이보다 적은 비용으로 표층의 기본 물리특성항목을 연속측정할 수 있는 열염분측정기(TSG, Thermosalinograph)를 기본 생태인자인 엽록소a로 환산가능한 형광량과 함께 측정할 수 있는 표층상시관측시스템을 구성해 시험하였으며, 형광센서의 생물오손을 방지하기위한 자동세척기능 추가 등 개선을 통해 시범자료 생산을 수행하였음
 - 양식장 시설물에 설치한 표층시료채집기 시험운영을 통해 2017년 7월 6일에서 8월 4일까지 한 조석주기 동안 다양한 시간간격(2시간, 3시간, 6시간)으로 230개의 자동시료채집 시험을 완료하였음.

- 수층 프로파일러 연계운동을 통해 수심 약 7~40 m 구간에서 수층의 수온과 염분 수직 구조 관측을 주기적(1시간 혹은 2시간 간격)으로 수행하였음. 이와는 별도로 양식장 시설물에 설치해 운영할 수 있는 수층 프로파일러를 제작·시험하였음. 자동원치를 이용하도록 설계한 수층 프로파일러로 통영해양과학기지에 설치해 표층~27 m 구간을 1시간 간격으로 시험운동을 수행하였음.
- 생태계 모니터링 기술 개발
 - 식물플랑크톤 생물량 측정 기술 확보
 - : CTD 부착형 엽록소 형광센서와 암 상태에서 *in-vivo* 형광(Turner 10-AU fluorometer)으로 측정된 값의 비교 결과 *in-situ* 형광 센서(FLRT)의 경우 낮 시간 동안 자연광에 의한 저해가 나타났음.
 - : 이는 *in-situ* 측정의 경우 PAR값의 증가에 따라 표층에서 형광 quenching 현상이 발생하기 때문으로 현장의 형광센서 측정시에 낮동안 생체량이 과소평가될 수 있음을 시사함
 - : 본 연구를 통해 개발된 보정식을 이용한 보정 결과 *in-situ* 측정치의 보정이 적절하게 이뤄짐
 - : Turner 10-AU fluorometer를 이용한 *in-vivo* 측정 실험에서 압적응을 통해 quenching 현상을 배제할 수 있음을 확인하였으며, 격막펌프를 이용한 pumping의 영향 또한 미비한 것으로 나타남
 - : 두 측정 방법의 결과는 엽록소 a 농도 분석 결과와 잘 일치하여 두 방법 모두 식물플랑크톤 생체량 모니터링에 적합한 것으로 판단됨
 - 우점 식물플랑크톤 실시간 분석 기술: FlowCAM 원격 운용을 위한 프로토타입의 펌핑 장치 및 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 식물플랑크톤 원격 측정 및 분석을 성공적으로 수행함
 - 일차생산력 모니터링 기술 개선: 방사선 동위원소법과 FRRf을 이용하여 추정된 일차생산력은 FRRf의 추정값이 1.5배 정도 높게 나타났으나, 선형적 관계를 보여 FRRf를 이용하여 일차생산의 변동을 파악할 수 있을 것으로 판단됨
- 퇴적물 모니터링 기술 개발
 - 저도 어류양식장(FF)에서 높은 유기탄소 함량과 퇴적물은 높은 퇴적물 산소소모와 저층 양양염 용출을 야기하였고, 이는 기존에 보고된 가두리 양식장 보다 더 높은 수치인 것으로 조사됨
 - 또한, 굴양식장(OF) 보다 유기물이 많이 배출된 저도 어류양식장(FF)에서 높은 퇴적물 산소소모율이 측정되었고 이는 유기탄소 농도뿐만 아니라 유기물의 질(quality)에도 영향을 받는 것으로 조사되었음
 - 결론적으로 양식활동에 의한 유기물의 배출이 양식장과 주변부의 퇴적물 산소소모율 및

저층 양양염 용출을 가속화 시켰고, 이는 양식활동이 연안 생태계의 생지화학적, 생태학적 과정을 변화시킬 수 있는 것을 의미함

○ 원격 모니터링 자료획득

- 총 5종 위성 자료로부터 해양산출물을 획득하였고, 해양환경문제인 적조 발생 시 현장 조사를 수행하고 위성자료를 분석하였음
- 그 결과, 다중위성 기반 클로로필, 부유물질, 용존유기물 공간자료를 획득하였고, 적조발생 해역에서 적조 패치를 추출하였음

○ 해양생태계 역학모형 개발

- 통영 양식장 해역에 대하여 영국 PML에서 개발 관리하고 있는 ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model)을 연직 1차원 난류확산 모형인 GOTM (Generalized Ocean Turbulence Model)과 결합하여 대기강제력에 의해 구동하는 표영 생태계 모형을 수립하였으며, 이를 이용해 계절변동성을 재현하였음
- 연직으로 30개의 수층으로 나눈 표영생태계와 시간에 따라서 두께가 변하는 3개의 층으로 구성된 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학모형 개발하였으며, 충분한 spin-up을 위해 1980년부터 2016년까지를 수치적분하고 후반 10년 결과를 이용해 계절평균장을 도출함
- 2006년에서 2016년까지 11년간 적분한 모형 결과를 통영 양식장 해역 인근의 국립수산과학원 관측자료와 비교분석하였으며, 이를 토대로 모형의 개선을 수행하여 과거 재현을 최적화하였음
- 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학 모형 적용을 통해 퇴적층의 유산소층과 탈질화층, 무산소층의 계절변동을 포함한 통영 양식장 해역의 하위생태계 계절변동성을 구현하였으며, 분석항목별 계절변동성의 관련성 등의 분석을 수행하였음

○ 양식장 생태계예측 요소기술 개발

- 인공지능 기술을 이용한 신경망 학습을 수행하기 위해 연구해역 인근의 기존 해양관측 자료를 최대한 수집하였으며, 본 사업에서 생산된 현장관측자료와 함께 활용가능한 통합 DB를 구축 하였음
- TensorFlow의 LSTM (Long short term memory) 네트워크를 이용한 클로로필 예측모형을 시범 개발하였음. 훈련자료셋을 달리해 5개 테스트를 수행하였으며, 학습을 통해 예측된 4개 테스트 결과의 최대 상관관계는 0.25~0.995 었음. 훈련에 사용한 데이터 수가 부족한 경우, 유의미한 결과가 도출되지 않았으며, 장기간 충분한 데이터 수가 확보된 경우 0.99 이상의 상관계수를 보이는 학습결과가 나와 신뢰성 있고 충분한 자료의 확보가 자료기반모형의 개발에 가장 중요한 요소임을 확인하였음

V. 연구개발결과의 활용계획

- 생지화학 센서 및 측정기기를 통한 화학해양요인과 해양생태요인의 연속측정기술은 다양한 대양 및 연안 해양연구를 위한 선상관측, 관측시스템 등에 활용될 수 있음
- 양식어장 별 퇴적물 산소소모와 저층 영양염 용출 특성을 규명함으로써 각 어장의 유기물 부하에 따른 환경개선 정책마련의 기초자료로 활용될 수 있음
- 유기탄소의 물질수지를 산정하는 등 해당 해역의 생지화학적 물질순환 규명에 대한 지식을 확보하였으므로 외부요인의 변화에 따른 통합적 생태계 관리체계를 만드는 데에 효과적으로 이용할 수 있음
- 원격 모니터링 자료는 현장관측 자료에 비해 공간적, 시간적으로 광범위한 자료 획득과 장기간의 해양환경자료 수집이 용이하여 고밀도 해양환경 자료로서 활용 가능함. 따라서, 원격 모니터링 자료는 양식장 해역의 환경관리를 위한 상시 모니터링이나 해양 생태계 역학모형 개발을 위한 기초 입력자료로 활용될 수 있음
- 표영-저서 생태계 결합 역학 모형기술은 타 해역에 대해 추가개발, 확장해 활용할 수 있으며, 이를 기반으로 환경-생태 예측시스템 개발에 활용될 수 있음
- 향후 자료생산량이 늘어날 실시간, 고밀도 해양관측자료를 이용한 연안역의 해양환경 예측용 자료기반모형 개발의 기반 기술로 활용이 가능함

S U M M A R Y

I. Title

Development of marine environment monitoring and management system in aquafarm based on artificial intelligence

II. Objectives and Necessity

1. Necessity

- Ocean observation data obtained through periodical or non-periodical on board observations by research vessels are acquired in real-time on the spot due to the development of various in-situ sensors, and are being changed into an operational observation system that is automatically processed and processed and supplied to the users.
- In order to identify the dynamics occurring marine phenomena due to various factors and to predict future changes, it is necessary to get high frequency of temporal and spatial data by observations. Without understanding the current marine condition and trends, future changes can not be predicted.
- We can not fully understand the ever-changing marine environment without having an observation system that can operate on-going and continuous observations of ocean physical and chemical parameters.
- Phytoplankton is primary organisms that respond to eutrophication by aquaculture. Thus, the phytoplankton parameters are important for real-time monitoring of aquaculture environments. Several sensors have been developed and used in the marine environment, but their long-time application to aquaculture are rare and development of operational techniques to assess changes of biomass, production and composition are additionally requested.
- One of the most important environmental impacts of aquaculture is organic matter (OM) enrichment in the benthic layer. The large-scale and long-term operation of aquaculture

farms brings massive discharge of OM, such as uneaten fish-feed, biodeposition, and fouling organisms. Furthermore, the aquaculture infrastructure, longlines, and net-cages can alter the hydrodynamics, which stimulate the OM trapping on the sediments around aquaculture farms. Consequently, the excess OM released from aquaculture is becoming more accumulated around aquaculture farms as a continuous operation, and thus is one of the important factors regulating the trophic state of coastal environment. For this reason, quantitative analysis SOD and BNF is important to relevantly evaluate the impact of aquaculture on sediments and coastal ecosystems.

- In order to establish environment management system around the farm, production of materials with high spatial and temporal resolution is required. Remote monitoring data can be used complementarily through matching with field survey data and as a basic input for future ecosystem modeling.
- In order to diagnose and predict the ecosystem variability of coastal aquaculture area, it is required to develop a pelagic-benthic coupled ecosystem dynamics model which can consider the material flux in the water column as well as the material flux with the benthic layer.
- If high-density time-series observations are produced in the aquaculture area, it is possible to implement a data-driven model through artificial intelligence-machine learning using high resolution observation data. Development of data-driven modeling techniques to predict marine environments is required.

2. Objectives

- Development of a monitoring system to identify changes in marine physics, chemistry and ecological factors in the aquatic environment for environmental management
- Estimation the SOD and BNFs of aquaculture sediment using in situ benthic chamber to assess the environmental impacts of OM enrichment by aquaculture. Evaluation the potential impact of benthic nutrient release resulting from the aquaculture on primary production in the water column.
- Analysis and provision of input data for the management of the farm environment using remote monitoring data, technology development of ecosystem prediction element
- Marine ecosystem model development for Tongyoung aquafarm based on NPZD (nutrients-phytoplankton- zooplankton-detritus) functional group

III. Content and Scope

- Development of water column monitoring technique
 - Test and site application of surface mooring buoy
 - Acquisition of operational observation data for surface seawater
 - Test and site application of autosampler for surface seawater
 - Acquisition of time-series operational observation data of chemical oceanographic parameter in surface seawater
 - Acquisition profile data by routine operation of profiler
- Development of ecosystem monitoring technique
 - Monitoring technique of phytoplankton biomass
 - Technique of real-time and remote monitoring of phytoplankton composition using the Flow CAM
 - Monitoring technique of primary production using the FRRf
- Design and manufacture of compact(coastal) benthic lander frame
 - Manufacture of profiler based on optic sensor
 - Equipment testing, modification and supplementation
 - Benthic lander testing and establishment of operational technology
 - Measurement of organic carbon cycle in the farm
 - Measurement of benthic nutrient fluxes
- Acquisition of acquire remote monitoring data
 - Processing and archiving marine environmental parameters form various spatial and temporal remote monitoring data
 - Implementation field observations on red tide patch
- Development of marine ecosystem model
 - Development of both pelagic and benthic marine ecosystem models
 - Development of one dimensional pelagic-benthic coupled marine ecosystem model suited for Tongyoung aquafarm
- Development of dynamic model and data driven model
 - Development of an integrated DB system of ocean data.
 - Pilot development of a data driven model using machine learning technique.

IV. Results

- Development of water column monitoring technique
 - We operated and archived successive time-series data from surface mooring buoy deployed by MOF R&D project. Meteorological data and physical data of surface seawater were obtained in every 10 mins. pCO₂ of marine air and surface seawater were measured in 3 hours during 18 months. For the first time, annual sea-air CO₂ flux was estimated by actual observations data around Korean peninsula, and it was 3.62±16.78 mol C m⁻² yr⁻¹.
 - Thermosalinograph system with fluorescence sensor, pump, and flowmeter was developed and tested for operational surface seawater observation system. Automatic cleaning system with brush was developed for prevent bio-fouling of glass tube in fluorescence sensor.
 - Autosampler was tested from July 6 to August 4, 2017. 230 samples were taken in various time interval (2, 3 and 6 hours).
 - Observation on vertical structure of seawater temperature and salinity were performed periodically (1 hour or 2 hours intervals) at depth of about 7~40 m by Aqualog profiler. Apart from this, another profiler that be installed and operated in an aquafarm facility was produced and tested. The new profiler designed to use automatic winch was installed in Tongyoung Ocean Science Station and operated in surface ~ 27 m at 1 hour intervals.
- Development of ecosystem monitoring technique
 - Technique to estimate phytoplankton biomass
 - : During day time, fluorescence obtained by the FLRT sensor attached on CTD showed lower values than *in-vivo* fluorescence obtained after dark adaptation by Turner 10-AU fluorometer, mainly due to inhibition by ambient light.
 - : the *in-situ* measures could be corrected well by applying a calibration equation with PAR as one of variables which was developed in this study
 - : The *in-vivo* measurement using the Turner 10-AU fluorometer confirmed that quenching could be excluded through dark adaptation, and the effect of pumping with a diaphragm pump was found to be insignificant.
 - Real-time image analysis of dominant phytoplankton
 - : A device and program for real-time and remote operation of FlowCAM was developed to monitor dominant phytoplankton and the remote acquisition of real time image and the real-time analysis of phytoplankton composition has been successfully conducted.
 - Improving primary productivity monitoring technique

- : Primary production estimated by using FRRf were ca. 1.5 times higher than those estimated by radioisotope method. However, they showed a positive relationship, suggesting that the FRRf technique could be used to monitor changes of primary production in aquaculture area.
- Development of sediment monitoring technique
 - This study suggested that the high TOC contents and sedimentation rates at FF and OF resulted in high rates of benthic respiration and BNFs, which have been shown to be more impacted from the net-cage than has been reported. In addition, SOD was higher in the FFs that discharge more OM than shellfish farms and was influenced by not only the contents of TOC, but also the quality of OM. Consequently, the massive discharge of OM at an aquaculture farm stimulates SOD and BNFs at the body and vicinity of aquaculture farms, which may change the biogeochemical and ecological processes in the coastal ecosystems.
 - Acquisition marine environmental data by satellite data
 - Oceanographic data were obtained from 5 types of satellite data, and field studies were carried out in case of red tide, which is a marine environmental problem, and satellite data were analyzed.
 - As a result, various satellite-based chlorophyll concentration, suspended particle matter and dissolved organic matter spatial data were obtained, and the red tide patch was extracted from the red tide area.
 - Development of pelagic-benthic coupled ecosystem dynamic model
 - We have established a pelagic ecosystem model by combining with ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model), which is developed and managed by UK PML, with GOTM (Generalized Ocean Turbulence Model). Using this model, we reproduced seasonal variability.
 - We have developed a vertically one dimensional (1-D) pelagic-benthic coupled ecosystem model with fixed vertical thicknesses of 30 layers in pelagic zone and time-varying 3 layers in benthic zone. We derive the seasonal average from the result of the last 10 years by numerical integration from 1980 to 2016 for sufficient spin-up.
 - We improved 1-D pelagic-benthic coupled ecosystem model by comparisons between the model results integrated for 11 years from 2006 to 2016 with observation data of the National Institute of Fishery Science near study area.
 - Seasonal variability of the aerobic, denitrifying and anaerobic layers of the sediments was simulated by the 1-D pelagic-benthic coupled marine ecosystem model in the Tongyoung

aquafarm area. We analyzed the seasonal variability of low trophic level of ecosystem and correlations between parameters.

○ Development of data driven model

- In order to carry out neural network learning using artificial intelligence technology, the existing ocean observation data near the study area were collected as much as possible and we developed the integrated database which includes observation data in this study.
- We carried out a pilot development of a data driven model to simulate chlorophyll using TensorFlow LSTM (Long short term memory) network. Five different tests were performed with different sets of training data. The maximum correlation of the four learning tests was 0.25 to 0.995. No significant results were obtained in the case of lack of data used for training. On the other hand, if there was enough data for a long time, the learning result showed a correlation coefficient of 0.99 or more. It was confirmed that reliable and sufficient data were the most important factor in the development of the data driven model.

V. Applications

- Technology for continuous measurement of chemical oceanographic parameters and marine ecological parameters through biogeochemical sensors and instruments can be used for on board observation and autonomous observation system in both open ocean and coastal area.
- These data can be used as a basic data for environmental policy according to the organic matter loading as investigation of sediment oxygen demand and benthic nutrient fluxes by type of aquaculture.
- The knowledge of the biogeochemical cycles estimated by material balance of organic carbon, which can be used to integrated ecosystem management by external factor change.
- Remote monitoring data can be utilized as a high-density marine environment data because it is easy to acquire a wide range of data in spatially and temporally as compared with field observation data and to collect long-term marine environment data.
- Therefore, remote monitoring data can be used as a basis for continuous monitoring for the environmental management of aquaculture waters or for developing marine ecosystem dynamics models.
- One dimensional pelagic-benthic coupled model can be further developed and extended to other areas, and it can be utilized in the development of marine environment and ecosystem prediction system.

- The pilot model in this study can be applicable to develop an advanced data driven model for marine ecosystem using real-time and high resolution ocean observations that will increase data production in the future.

< KEYWORDS >

양식장, 모니터링, 해양환경, 생태계모델링, 환경관리시스템
aquafarm, monitoring, marine environment, ecosystem modeling, marine environment management system

목 차

제1장 서론	1
제1절 개요	3
1. 연구개발 목적	3
2. 연구개발의 필요성	3
3. 연구개발 범위	5
제2장 국내외 기술개발 현황	7
제1절 국내 기술, 산업동향	9
제2절 국외 기술개발 현황	12
제3장 연구개발수행 내용 및 성과	17
제1절 수층 모니터링 기술 개발	19
1. 표층계류장비 시험 및 현장 적용	19
2. 표층시료채집기 시험 및 현장 적용	26
3. 표층상시관측 시범자료 생산	29
4. 화학해양 인자 표층 시계열 시범자료 생산	32
5. 수층 프로파일러 운영 및 자료 생산	35
제2절 생태계 모니터링 기술 개발	44
1. 식물플랑크톤 생물량 측정 기술 확보	44
2. 우점 식물플랑크톤 장기모니터링 기술 시험 운영	51
3. 일차생산력 모니터링 기술 개선	59
제3절 퇴적물 모니터링 기술 개발	64
1. 소형 프레임 설계 및 제작	64

목 차

2. 광센서 기반 프로파일러 제작	66
3. 장비(벤딕랜더) 시험, 수정 보완 및 운영기술 확립	68
4. 양식장 유기탄소 수지 추정	78
5. 양식장 퇴적물 영양염 플럭스 추정	91
제4절 원격 모니터링 자료 획득	101
1. 연구해역 해양환경자료 생산	101
2. 해양환경문제(적조 등) 발생시 집중관측	112
제5절 해양생태계 역학모형 개발	128
1. 표영 및 저서 생태계 모형 수립	128
2. 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학 모형 개발	133
제6절 통합 DB 및 자료기반모형 개발	144
1. 해양관측자료 통합 DB 구축	144
2. 하위생태계 자료기반모형 시범개발	162
제4장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	177
제5장 연구개발결과의 활용계획	211
제1절 연구결과의 활용방안	213
제2절 기대성과 및 파급효과	214
제6장 참고문헌	215

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Status of domestic and overseas technology development	7
Chapter 3. Research contents and achievement	17
Chapter 4. Achievement of goal and contribution for related field	177
Chapter 5. Plan to utilize R&D acheivement	211
Chapter 6. References	215

표 목 차

표 2.2.1 Western Channel Observatory의 생산자료 현황	13
표 3.1.1 pCO ₂ 관측부이 센서별 관측항목 및 관측기간	20
표 3.1.2 통영해양과학기지 인근해역 시계열 관측자료로 산정한 월평균 해양-대기 이산화탄소 교환량	35
표 3.1.3 수층 프로파일러 관측기간	36
표 3.3.1 산소프로파일러의 각 파트별 명칭	68
표 3.3.2 양식장 정보 및 퇴적환경 특성	69
표 3.3.3 다양한 양식장에서 환경인자 특성과 퇴적물 산소소모율	73
표 3.3.4 일차생산자가 필요한 영양염 농도 및 이에 대한 저층 영양염 용출의 비율	76
표 3.3.5 양식장 표, 저층에서의 수층 특성	82
표 3.3.6 2017-2018년 퇴적물 산소소모율(단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	88
표 3.3.7 2017-2018년 퇴적물 유기탄소 수지(단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	89
표 3.3.8 2017년 6월 저층 영양염 용출율(단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	95
표 3.3.9 2017년 10월 저층 영양염 용출율(단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	96
표 3.3.10 2018년 5월 저층 영양염 용출율(단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	97
표 3.3.11 2018년 11월 저층 영양염 용출율(단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	98
표 3.3.12 일차생산자가 필요로 하는 영양염 및 저층영양염 용출율의 영향 (단위: mmol m ⁻² d ⁻¹)	99
표 3.4.1 다중 위성 자료의 해양환경 산출물 목록	101
표 3.4.2 다중 센서 특성 비교	102
표 3.4.3 다중 센서 과장대역, 분광해상도, 신호 대 잡음비 비교	102
표 3.4.4 위성기반 클로로필 산출 알고리즘	105
표 3.4.5 위성기반 부유물질 산출 알고리즘	106
표 3.4.6 위성기반 용존유기물 산출 알고리즘	107
표 3.4.7 다중 플랫폼/다중 센서를 활용한 통영 해역 관측 계획	112

표 목 차

표 3.4.8 여수/통영 주변 해역 획득 가능한 위성 영상 목록	113
표 3.4.9 현장조사 정점별 측정 결과	126
표 3.6.1 통영 주변 기존자료 수집 목록	144
표 3.6.2 통합 DB 대상 자동관측 자료 항목	149
표 3.6.3 자동관측 자료의 포맷변환 프로그램	150
표 3.6.4 통합 DB 대상 현장관측 자료항목	151
표 3.6.5 수온, 염분자료의 QC 테스트 목록	152
표 3.6.6 수온, 염분자료의 QC 테스트 기준의 예	153
표 3.6.7 실시간 정보서비스에서 제공하는 자료항목	160
표 3.6.8 실시간 정보서비스용 폴더와 프로그램별 기능	161
표 3.6.9 자료기반모형 개발용 자료 목록	171
표 3.6.10 클로로필의 평균자료 계산 결과	171
표 3.6.11 LSTM network를 이용한 시범모형의 훈련 조건	173
표 3.6.12 클로로필 예측용 자료기반모형의 테스트 및 결과	173

그림 목 차

그림 2.1.1 새만금 해양환경조사 연구의 정보유통서비스	10
그림 2.1.2 운용해양시스템의 대용량자료 서비스	10
그림 2.1.3 새만금 해양관측자료를 이용한 자료기반 모델(Kim & Choi, 2016)	11
그림 2.2.1 WCO의 자료관리 개념도	13
그림 2.2.2 CalCOFI의 자료제공 화면	14
그림 2.2.3 HOT-DOGS 자료서비스	14
그림 2.2.4 홍콩 해양수질 예측을 위한 인공신경망 모델(Thoe et al., 2012)	15
그림 2.2.5 지하수 예측을 위한 수치모델과 자료기반 모델의 결과 비교 (Mohanty et al., 2013)	15
그림 3.1.1 표층계류 부이에서 연속관측한 기온 시계열 관측자료	21
그림 3.1.2 표층계류 부이에서 연속관측한 기압 시계열 관측자료	22
그림 3.1.3 표층계류 부이에서 연속관측한 풍속 시계열 관측자료	23
그림 3.1.4 표층계류 부이에서 연속관측한 표층염분 시계열 관측자료	24
그림 3.1.5 표층계류 부이에서 연속관측한 표층염분 시계열 관측자료	25
그림 3.1.6 현장에 설치된 자동시료채집기(좌), 시료채집구(중, 우)	26
그림 3.1.7 자동시료채집기를 활용한 시료 채집시기	27
그림 3.1.8 자동시료채집기를 통해 수집된 영양염 시계열 분석 결과(위로부터 아질산염, 질산염+아질산염, 암모늄염, 인산염, 규산염)	28
그림 3.1.9 자동시료채집기를 통해 수집된 영양염 분석 결과 해수중 N:P 비 (위: 질산염+아질산염 N:인산염 P, 아래: 질산염+아질산염+암모늄염 N:인산염 P)	29
그림 3.1.10 매 1분 간격으로 관측한 통영해양과학기지 표층 염분, 수온, 형광량 예	30
그림 3.1.11 현장설치 후 오염된 형광량 센서 내 튜브(좌)와 센서 내 튜브 세척을 위해 개발한 브러쉬(우)	31
그림 3.1.12 표층상시관측 수행을 위해 고안되고 개선된 시스템	31

그림 목 차

그림 3.1.13 시스템 개선 후 획득한 표층 TSG 실시간 모니터링 자료 예	31
그림 3.1.14 자동원치 시스템에 추가해 시험자료 생산에 활용한 SUNA V2	32
그림 3.1.15 통영해양과학기지 해역에서 관측한 표층과 저층 질산염 시계열 자료 ...	33
그림 3.1.16 통영해양과학기지 인근해역에서 관측한 해양대기와 표층해수의 이산화탄소 분압 시계열 자료	34
그림 3.1.17 통영해양과학기지 인근해역 시계열 관측자료로 산정한 해양-대기 이산화탄소 교환량 및 계산에 활용한 해양-대기 이산화탄소 분압차와 풍속 자료	34
그림 3.1.18 수층 프로파일러 관측해역	37
그림 3.1.19 프로파일러 계류모식도	38
그림 3.1.20 2016년 수온과 염분 관측 결과	39
그림 3.1.21 2016년도 유속 관측 결과	39
그림 3.1.22 2016년도 용존산소 관측결과	39
그림 3.1.23 2017년도 수온 염분 관측 결과	40
그림 3.1.24 2017년도 유속 관측결과	40
그림 3.1.25 2017년도 용존산소 관측결과	40
그림 3.1.26 2018년도 수온 염분 관측 결과	41
그림 3.1.27 2018년도 유속 관측결과	41
그림 3.1.28 2018년도 용존산소 관측결과	41
그림 3.1.29 양식장 해역 관측을 위한 수층 프로파일러용 원치	42
그림 3.1.30 양식장 해역 관측을 위한 수층 프로파일러 설치 부이	42
그림 3.1.31 수층 프로파일러에 장착된 센서와 설치 운용된 원치	43
그림 3.1.32 수층 프로파일러에서 관측된 각 항목의 수직 분포 예	43
그림 3.2.1 시험에 사용된 격막펌프의 사양	45
그림 3.2.2 식물플랑크톤 생물량 추정에 사용된 장비	46

그림 목 차

그림 3.2.3	현장의 CTD에 부착된 형광 센서(FRLT)를 이용하여 측정된 <i>in-situ</i> 형광량과 펌핑 후에 암소에서 10AU 형광기를 이용하여 측정된 <i>in-vivo</i> 형광량 자료의 비교. 맨위의 그래프는 형광이 측정된 수심에서의 광량을 나타냄	47
그림 3.2.4	광세기-보정 전 후에 <i>in-situ</i> FRLT센서의 형광량과 <i>in-vivo</i> 형광량의 비교	47
그림 3.2.5	광세기 보정 전후에 <i>in-situ</i> 형광량과 <i>in-vivo</i> 형광량의 선형회귀 계수의 변화를 보여주는 그림	48
그림 3.2.6	격막펌프 통과 전후의 엽록소 a 변화를 나타낸 그림. 붉은 실선은 1:1 라인을 의미함	49
그림 3.2.7	Turner-10AU의 <i>in-vivo</i> 형광량으로 추정된 엽록소 a와 현장여과-추출 후 측정된 엽록소 a의 시계열 변동을 나타낸 그림	50
그림 3.2.8	Flowcytometer 분석 시에 크기와 색소의 차이로 구별되는 분류군의 위치를 나타낸 그림	52
그림 3.2.9	2017년 7월에 FlowCAM 장비를 이용하여 고조와 저조에 측정된 식물플랑크톤 개체수의 변화와 우점하는 식물플랑크톤 이미지	54
그림 3.2.10	2017년 7월에 flowcytometer를 이용하여 측정된 광합성미소편모류, 광합성초미소식물플랑크톤 및 <i>Synechococcus</i> 개체수의 변화	55
그림 3.2.11	FlowCAM 원격 작동의 개념도	56
그림 3.2.12	실험실에서 원격작동중인 FlowCAM 사진	57
그림 3.2.13	2018년 11월 현장에서 설치된 FlowCAM을 원격조정을 통해 자료를 분석하고 있는 사진	57
그림 3.2.14	2018년 11월 FlowCAM 원격조정을 통해 획득한 식물플랑크톤 현존량 및 식물플랑크톤 이미지. 검정색 실선은 조석 주기를 나타냄	58
그림 3.2.15	2017년 10월에 FRRf와 ¹⁴ C-고정법으로 추정된 일차생산력 차이	61
그림 3.2.16	2018년 7월에 FRRf와 ¹⁴ C-고정법으로 추정된 일차생산력 차이	62

그림 목 차

그림 3.2.17 2018년 7월에 FRRf와 ¹⁴C-고정법으로 추정된 일차생산력의 선형적 관계를 보여주는 그래프. 오른쪽은 아침 9시~12시 사이의 자료를 뺀 경우 나타나는 선형 관계 62

그림 3.3.1 The Belcl benthic chamber instrument for benthic boundary layer studies in coastal sea. The drawing shows 1) frame with disk feet, 2) automatic water sampler, 3) stirring motor casing on lid, 4) stirring device, and 5) opaque PVC chamber 65

그림 3.3.2 연안 양식장용 벤틱랜더 사진 및 구성 66

그림 3.3.3 마이크로 프로파일러 구성도 67

그림 3.3.4 벤틱 랜더 시험운영 정점 70

그림 3.3.5 퇴적물 공극수 중 용존산소의 수직분포 71

그림 3.3.6 벤틱챔버를 이용해 측정한 시간에 따른 산소감소율 72

그림 3.3.7 어류양식장과 패류양식장에서 총 유기탄소 함량과 퇴적물 산소소모율 사이의 상관관계 74

그림 3.3.8 어류양식장과 패류양식장에서 총 유기탄소 함량, C/N, 퇴적물 산소소모율 사이의 삼차원 그림 75

그림 3.3.9 양식장에서 시간에 따른 영양염 용출율 77

그림 3.3.10 퇴적물 산소소모율 조사정점 79

그림 3.3.11 2017년 6월 퇴적물 산소소모율 84

그림 3.3.12 2017년 10월 퇴적물 산소소모율 85

그림 3.3.13 2018년 5월 퇴적물 산소소모율 86

그림 3.3.14 2018년 11월 퇴적물 산소소모율 87

그림 3.3.15 양식장 별 퇴적물 산소소모율의 평균 비교 88

그림 3.3.16 양식장에서 탄소순환 90

그림 3.3.17 퇴적물 영양염 용출율 조사정점 92

그림 3.3.18 2017년 6월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율 94

그림 목 차

그림 3.3.19 2017년 10월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율	95
그림 3.3.20 2018년 5월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율	96
그림 3.3.21 2018년 11월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율	97
그림 3.3.22 봄과 가을에 저층 영양염 용출에 대한 일차생산력 지지율 (단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	100
그림 3.4.1 2013년 8월 13일 12시경 GOCI 클로로필, 부유물질, 용존유기물 해양환경 자료	107
그림 3.4.2 2015년 8월 14일 11시경 Landsat OLI 관측 자료를 이용한 클로로필 및 부유물질 해양환경자료 분석 결과	108
그림 3.4.3 2018년 4월 20일(위), 7월 29일(아래) 11시경 Sentinel-2 MSI Top-of-atmosphere 반사도 영상, 클로로필, 부유물질 해양환경자료 ...	108
그림 3.4.4 2018년 5월 14일(위), 7월 19일(아래) 10시경 Sentinel-3 OLCI 레일라이 반사도 영상, 클로로필, 부유물질 해양환경자료	109
그림 3.4.5 통영주변 해역 및 통영해양생물자원기지 위치	110
그림 3.4.6 통영해양생물자원기지 주변 GOCI와 MODIS 영상 픽셀 분포	110
그림 3.4.7 2013년 6월 1일~2013년 9월 30일 GOCI와 MODIS 클로로필 평균 ...	111
그림 3.4.8 GOCI 클로로필 농도와 MODIS 클로로필 농도 분포	111
그림 3.4.9 2018년 7월 24일 국립수산과학원 적조속보(코클로디니움)과 Sentinel-2 레일라이 반사도 RGB 합성 영상	114
그림 3.4.10 2018년 7월 25일 국립수산과학원 적조속보(코클로디니움)	114
그림 3.4.11 2018년 7월 25일 GOCI RRS RGB 영상	115
그림 3.4.12 2018년 7월 27일 국립수산과학원 적조속보(코클로디니움)	115
그림 3.4.13 2018년 7월 27일 Sentinel-2 MSI TOA 반사도 RGB 영상	116
그림 3.4.14. 2018년 7월 29일 국립수산과학원 적조속보(코클로디니움)	116
그림 3.4.15 2018년 7월 29일 Sentinel-3, GOCI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상(Shin et al., 2019)	117

그림 목 차

그림 3.4.16	2018년 7월 30일 국립수산과학원 적조주의보	118
그림 3.4.17	2018년 7월 30일 고흥/여수 주변 해역 Sentinel-3, GOCI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상	118
그림 3.4.18	2018년 7월 30일 남해/통영 주변 해역 Sentinel-3, GOCI, Landsat OLI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상 (Shin et al., 2019)	119
그림 3.4.19	2018년 8월 1일 적조주의보, Sentinel-2 MSI 레일라이 보정 반사도 RGB 영상	120
그림 3.4.20	Sentinel-2와 GOCI 원격반사도 RGB 합성 영상, 적조의심영역 추출 결과	120
그림 3.4.21	2018년 8월 1일 적조 속보, 적조의심영역 추출 결과, GOCI, Sentinel-2 MSI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상 (Shin et al., 2019)	121
그림 3.4.22	2018년 8월 6일 국립수산과학원 적조속보	121
그림 3.4.23	2018년 8월 6일 Landsat OLI, Sentinel-2 MSI RGB 영상	122
그림 3.4.24	2018년 8월 7일 국립수산과학원 적조속보	122
그림 3.4.25	2018년 8월 8일 국립수산과학원 적조속보	123
그림 3.4.26	2018년 8월 8일 GOCI L1B, Rayleigh 보정 반사도 RGB 영상	123
그림 3.4.27	2018년 8월 8일 Sentinel-2 MSI 원격 반사도, Rayleigh 보정 RGB 영상 ..	124
그림 3.4.28	통영 및 거제도 주변 연안 해역에 대한 GOCI nLw 칼라 합성 영상 (a) 2017년 8월 10일 15:30 관측, (b) 2017년 8월 17일 12:30 관측	125
그림 3.4.29	2017년 8월 15일 통영 해역 적조 현장조사 클로로필, 부유물질, 용존유기물질 분석 결과	125
그림 3.4.30	2018년 8월 7일~8일 현장조사 정점 위치	126
그림 3.4.31	2018년 8월 7일~8월 8일 현장조사 정점 스펙트럼 (Shin et al., 2019)	127

그림 목 차

그림 3.4.32 (a) 코클로디니움 셀 농도와 클로로필 농도와의 상관관계 (b) 코클로디니움 셀 농도와 Spectral Shape 값과의 상관관계 (Shin et al., 2019)	127
그림 3.5.1 해양생태계 역학 모형 개발 대상 해역 - KIOST 통영 해상과학기지 양식장 해역	128
그림 3.5.2 연직 1차원 표영-저서 결합 생태계 모형(ERSEM-GOTM)의 체계도. 청색은 탄소 순환, 적색은 영양염 순환, 황색은 산소 순환, 녹색은 유기물 순환, 흑색은 피포식 관계를 나타냄 (Butenschon et al. 2016 변형)	129
그림 3.5.3 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영생태계 모형 결과(실선)와 국립수산과학원 관측 자료(도형)와의 비교(표층은 흑색, 저층은 적색) ...	130
그림 3.5.4 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영생태계 모형 결과 - 표층 변수들의 계절변동성(녹색구간은 엽록소a 농도가 최대인 시기)	131
그림 3.5.5 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영생태계 모형 결과 - 표층 식물 및 동물 플랑크톤의 기능군별 생체량 계절변동성 (녹색구간은 엽록소a의 농도가 최대인 시기)	132
그림 3.5.6 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영-저서 결합 생태계 모형 표층 결과(실선)와 통영 양식장 해역 인근 관측 자료 (정점 위치가 다른 해역은 색으로 구분)와의 비교	134
그림 3.5.7 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 수층 영양염 계절 변동성(왼쪽 위부터 시계방향으로 인산염, 질산염, 규산염, 암모니아, 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)	135
그림 3.5.8 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 식물플랑크톤 계절 변동성(왼쪽 위부터 시계방향으로 규조류, 미소조류, 소형조류, 초미세조류; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)	136

그림 목 차

그림 3.5.9 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 동물플랑크톤 계절 변동성(왼쪽 위부터 시계방향으로 중형 동물플랑크톤, 소형 동물플랑크톤, 박테리아, 이종섭식자; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)	137
그림 3.5.10 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 표영 생태계 계절 변동성(왼쪽 위부터 시계방향으로 수온, 엽록소a, 고형 유기물, 용존 유기물; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)	138
그림 3.5.11 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 표영 생태계 계절 변동성	138
그림 3.5.12 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서 생태계 경계층 두께의 계절 변동성(적색: 유산소층과 빈산소층(탈질화층)의 경계, 청색: 빈산소층(탈질화층)과 무산소층의 경계)	139
그림 3.5.13 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서 생태계 계절 변동성(위: 산소 플럭스 (음수는 표영 → 저서); 아래: 산소 농도(녹색))	140
그림 3.5.14 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서 생태계 영양염 플럭스 계절 변동성	140
그림 3.5.15 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 퇴적층내 영양염 농도의 계절 변동성	141
그림 3.5.16 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 퇴적층 공극수내 영양염 농도의 계절 변동성 (적색: 유산소층; 녹색: 탈질화층; 청색: 무산소층)	142
그림 3.5.17 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서생태계 생물생체량의 계절 변동성	142
그림 3.6.1 KOGAS 실시간 관측 자료의 예	145
그림 3.6.2 NIFS 정선해양관측자료의 예	146

그림 목 차

그림 3.6.3 KOEM 해양환경측정망 자료의 예	146
그림 3.6.4 OSTIA SST 자료수집용 프로그램	147
그림 3.6.5 World Ocean Database 자료의 예	148
그림 3.6.6 통영 주변 기존자료 수집 위치	148
그림 3.6.7 자동관측 자료의 변환 전(좌)과 후(우)	150
그림 3.6.8 수집한 현장관측자료의 예	151
그림 3.6.9 QC 테스트를 위한 상하한 값 산정 프로그램	153
그림 3.6.10 기존 관측자료 관리를 위한 DB 구성도	155
그림 3.6.11 현장관측자료 관리를 위한 DB 구성도	155
그림 3.6.12 DB 소프트웨어를 이용한 자료조회 화면	156
그림 3.6.13 Django를 이용한 정보서비스 흐름도	157
그림 3.6.14 부이 자료별 모델 클래스 정의	158
그림 3.6.15 자료검색 결과 표출용 프로그램	159
그림 3.6.16 실시간 정보서비스의 초기화면	159
그림 3.6.17 실시간 정보서비스의 자료검색 기능	160
그림 3.6.18 실시간 정보서비스의 그래프 생성 기능	160
그림 3.6.19 실시간 정보서비스용 프로그램 구성	161
그림 3.6.20 머신러닝 알고리즘(Mathworks, 2017a)	162
그림 3.6.21 머신러닝 워크플로우(Mathworks, 2017b)	162
그림 3.6.22 Matlab 머신러닝 Toolbox	164
그림 3.6.23 Matlab 머신러닝 Toolbox의 결과출력	164
그림 3.6.24 NARX 모형의 흐름도	165
그림 3.6.25 DO 예측을 위한 NARX 모형의 실행 테스트	165
그림 3.6.26 Python과 Jupyter Notebook을 이용한 딥러닝 실행	167
그림 3.6.27 RNN의 LSTM network의 작동방식	168
그림 3.6.28 DO 예측을 위한 LSTM Network 모형의 실행 테스트	168

그림 목 차

그림 3.6.29 Anaconda 배포판의 구성요소	169
그림 3.6.30 Anaconda Navigator 화면	170
그림 3.6.31 Jupyter Notebook 개발환경 및 딥러닝 프로그램의 예	170
그림 3.6.32 THREDDS에서 자료를 수집하는 Matlab 프로그램의 예	172
그림 3.6.33 자료기반모형 테스트 결과(테스트 1)	174
그림 3.6.34 자료기반모형 테스트 결과(테스트 2)	175
그림 3.6.35 자료기반모형 테스트 결과(테스트 3)	175
그림 3.6.36 자료기반모형 테스트 결과(테스트 4)	175
그림 3.6.37 자료기반모형 테스트 결과(테스트 5)	176

제1장 서론



제1장 서론

제1절 개요

1. 연구개발 목적

본 연구의 목적은 양식장 해역의 환경관리를 위한 해양물리, 화학 및 생태요인별 변화를 파악할 수 있는 모니터링 시스템을 개발하고 이의 상시 운영 기술을 확보하는 것이다. 또한 연안용 벤틱 랜더와 프로파일러를 개발/적용하여 퇴적물 산소소모와 퇴적물 영양염 용출을 정량화하여 양식활동에 의한 유기물 집적이 해양환경에 미치는 영향을 평가하고, 양식장에서 저층 영양염 용출이 수층 생태계에 미치는 영향을 밝히는 것이다. 그리고 위성자료를 활용한 원격 모니터링 자료 획득을 통해 양식장 환경관리, 생태계예측 요소기술 개발에 필요한 해양환경 입력자료 (클로로필, 부유물질 등) 분석하고 자료를 제공한다. 통영 양식장 주변 해역을 대표할 수 있는 연직 1차원 표영-저서 하위 생태계 결합 모형을 개발하고, 이를 통해 하위생태계의 계절 및 경년 변동성을 재현하고 예측한다. 이에 더해 고밀도 관측자료를 활용한 하위생태계 자료기반 모형을 시범 개발한다.

2. 연구개발의 필요성

오늘날의 해양조사는 종래의 정선관측이나, 비정기적인 연구 조사를 통해 얻어지던 관측자료가 각종 센서의 발달로 현장에서 직접 실시간으로 획득되고, 자동으로 처리되고 가공되어 수요자들에게 공급되는 상시 관측 시스템으로 변화하고 있다. 이는 여러 가지 요인들이 작용하여 역동적으로 일어나는 해양 현상들의 원인을 규명하고 미래의 변화 상태를 예측하기 위하여 상시적인 현장관측을 통해 시공간적인 자료를 매우 높은 빈도로 획득해야 한다는 수요의 증가에 따른 것이다. 현재의 해양 상태와 변화 추세를 파악하지 못하면, 미래에 어떤 상태로 변화할 것인지를 예측할 수 없다. 따라서 상시적이고 지속적인 관측을 수행 할 수 있는 시스템을 갖추지 않고는 계속적으로 변화하고 있는 해양의 상태를 파악할 수 없다.

식물플랑크톤은 양식장 환경에 의한 부영양화 등에 의해 반응하는 가장 일차적인 변수로서 양식장의 환경 관리를 위해 실시간 모니터링이 필요한 중요한 파라미터이다. 일부 센서가 개

발되어 해양 환경에서 활용중이나, 양식장 환경에서 적용하여 장기간 모니터링 한 사례는 거의 없으며, 관련 기술을 적용하기 위해서는 운영 기술의 개발과 자료의 검보정 등의 연구가 요구된다.

수층에서 생산된 유기물은 저층으로 유입된다. 특히, 연안은 수심이 얇고 생산력이 높기 때문에 수층에서 생성된 유기물의 약 50%는 퇴적물로 공급되게 된다. 유기물이 퇴적물로 공급되면 산소, 질산염, 산화망간, 산화철 및 황산염을 전자수용체로하는 호기, 혐기성 미생물에 의해서 빠르게 분해된다.(Canfield et al. 1993; Gribsholt and Kristensen 2002; Hyun et al. 2009). 퇴적물에서 산소는 수 mm이내에서 급격히 고갈되기 때문에 대부분의 유기물 분해는 혐기성 미생물에 의해 일어나서 되며, 혐기성 유기물 분해의 환원물(NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , HS^- 등)은 산소에 의해 빠르게 재산화된다(Holmer et al. 2005; Hyun et al. 2009). 남해와 같은 폐쇄성 내만의 경우 퇴적물 산소소모로 인한 저층 빈산소수괴 형성과 같은 환경문제가 대두되고 있다.

물질교환이 차단된 연안에서의 지속된 부영양화는 수층의 생산력 증가와 함께 유기물의 축적을 가져온다(Kemp and Boynton, 1984). 이렇게 축적된 유기물은 빠른 속도로 무기화되거나 퇴적물 속에 저장된다(Canfield et al 2005). 이때 퇴적물 속에서 유기물이 분해되면서 유리되는 무기 영양염은 수층으로 전달되어 일차생산에 상당부분을 기여(benthic-pelagic coupling)하게 되는데, 심한 경우 유독성 적조생물의 대증식을 유발하는 직접적인 원인으로 작용하기도 한다(Bulleid, 1984). 따라서 연안 환경에서의 주요물질(탄소, 질소, 인 등)의 거동을 이해하기 위해서는 퇴적물 산소소모율 및 저층 영양염 플럭스를 측정하고 이에 따른 생태계의 영향을 규명하는 것이 필수적이다.

양식장 해역의 해양환경은 주변해역과 비교하여 급격한 변화가 발생하므로, 상시 모니터링 시스템 구축을 통한 환경관리가 필수적이다. 양식장 상시 모니터링 시스템 구축을 위해서는 기존 관측자료 보다 고밀도로 획득된 모니터링 자료가 필요하며 위성자료를 활용한 원격 모니터링 자료는 공간적, 시간적 해상도가 높은 자료 생산이 가능하여 이를 위한 기초 입력자료로 활용이 가능하다. 원격탐사는 광역에 대한 표층 해양환경 자료 획득이 가능하고, GOCI 해색센서 자료는 1시간 간격의 일 8회 획득이 이루어지므로 기존 해색 원격탐사 자료보다 높은 시간해상도의 자료 획득이 가능하다. 해양에서의 고밀도 관측자료와 상호보완적으로 원격 모니터링 자료를 통합적으로 사용하면 보다 광범위하고 높은 시간해상도를 갖는 자료를 생성할 수 있으며, 이 자료는 양식장 해역에 적용가능한 해양생태계 역학모형 및 자료기반모형 개발수행에 필요한 고밀도 해양환경자료 DB로서 활용이 될 수 있다.

주로 천해에 있는 양식장 해역의 생태계 변동성을 진단하고 예측하기 위해서는 수층내의 물질순환 뿐만 아니라 저층과의 물질교환이 동시에 고려될 수 있는 표영-저서 결합 생태계 모형의 개발이 필요하다.

컴퓨팅 기술의 발달로 기계학습을 통한 자료기반 모형이 여러 분야에서 진행되고 있으나

해양에서는 고밀도 관측자료가 많지 않아 자료기반 모형의 개발이 많이 수행되지 않고 있다. 최근 들어 해양에서의 관측기술이 급속히 발달하여 활용 가능한 자료가 늘어나고 있음. 양식장 해역을 대상으로 고밀도 상시관측자료가 생산되는 경우, 고밀도 관측자료를 활용해 인공지능-기계학습을 통한 자료기반 모형구현이 가능함. 해양환경문제 예측을 위한 자료기반 모형 기술의 개발이 요구된다.

3. 연구개발 범위

양식장 해역의 환경관리를 위한 모니터링 시스템을 개발하고 이의 상시 운영 기술을 확보하기 위한 본 연구개발의 범위는 다음과 같다.

- 수층 모니터링 기술 개발
 - 표층계류장비 시험 및 현장적용
 - 표층상시관측 시범자료 생산
 - 표층시료채집기 시험 및 현장적용
 - 화학해양 인자 표층 시계열 시범자료 생산
 - 수층 프로파일러 운영 및 자료생산
- 생태계 모니터링 기술 개발
 - 생물량 (엽록소 a) 변동 모니터링 기술 개발
 - 실시간 식물플랑크톤 이미지 분석 기술 개발 (FlowCAM 활용)
 - 일차생산력 추정 기술 개발 (FRRf 이용)
- 퇴적물 모니터링 기술 개발
 - 소형(연안용) 벤딕랜더 프레임 설계 및 제작
 - 광센서 기반 프로파일러 제작
 - 벤딕랜더 시험 및 운영기술 확립
 - 양식장 유기탄소 수지 측정
 - 영양염 플럭스 측정
- 원격 모니터링 자료획득
 - 연구해역 해양환경자료 생산
 - 해양환경문제 (적조 등) 발생 시 집중관측
- 해양생태계 역학모형 개발
 - 표영 및 저서 생태계 모형 수립
 - 통영 양식장 해역에 적합한 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학모형 개발

- 양식장 생태계예측 요소기술 개발
 - 고밀도 해양관측자료의 통합 DB 구축
 - 인공지능경망-기계학습 기술을 이용한 자료기반 모형 시범 개발

제2장

국내외 기술개발 현황



제2장 국내외 기술개발 현황

제1절 국내 기술, 산업동향

국내 benthic lander 시스템에 대한 기술개발 및 보유기술은 매우 초보적 상태이다. 수심이 얇은 천해를 대상으로 다이버에 의해 기기 설치 및 시료 채집이 이루어진다. 특히, benthic lander의 핵심기술 중인 하나인 수중용 (연안 및 심해급) 임베이드 컴퓨터, pA 전류 증폭기의 개발은 전무한 상태이다. 따라서 benthic lander 운영 및 이와 연관된 연구는 전적으로 외국에서 개발된 기술에 의존한다.

국내에서는 양식장에서 퇴적물의 유기물 분해 규명과 같은 생지화학적 과정 연구가 거의 이루어지지 않고 있다. 최근 국내 연구팀에서 국립수산과학원과 공동으로 패류 및 어류양식장에서의 퇴적물 산소소모율과 혐기성 유기물 분해경로를 측정하고 있지만, 배양실험 시 현장배양이 아닌 실험실 배양을 수행하고 있기 때문에 정확한 자료 산출을 위해서는 현장측정 장비를 이용한 연구가 필요하다.

우리원에서는 해양과학조사 및 예보기술개발을 통해 국가해양영토 광역 감시망 구축 기반 연구를 수행하고 있으며, 다중 플랫폼 기반 원격 모니터링 자료를 활용하여 관심 해역의 해양환경 모니터링을 수행하고 통합분석시스템을 구축하고 있다. 표영 생태계 모형은 수중에서의 생물학적 요인과 무생물학적 요인간의 생태학적 상호관계를 정의하고, 이를 환경요인과 연동하여 전반적인 하위 생태계의 구조와 기능의 변화를 재현하고 예측하는 수치 모형으로서 전 세계적으로 다양한 모형이 개발되어 적용되고 있다.

한국해양과학기술원에서는 영국 PML의 ERSEM 모형을 도입하였으며 일차원 또는 삼차원 물리 모형과 결합하여 우리나라 주변 해역에 적용하는 연구를 수행하고 있다. 저서 생태계 모형은 표영 생태계 모형과 마찬가지로 해저면과 그 아래 퇴적층에서의 영양염과 생물상의 상호작용을 모의하는 모형으로서 단순한 영양염 환원 모형으로부터 복잡한 저서생물 모형까지를 포함하고 있다. 국내에서는 저서 생태계 모형을 적용한 사례는 거의 없으며 한국해양과학기술원에서는 단순한 영양염 환원 모형으로만 적용해 본 경험이 있다.

한국해양과학기술원에서 2002년부터 2011년까지 수행한 “새만금 해양환경 보전대책을 위한 조사연구” 사업에서는, 해양자료실 운영을 통해, 사업 내에서 생산한 현장관측자료와 실시간 관측자료를 체계적으로 수집, 관리하였다. 해양물리, 해양화학, 해양생물, 해양지질 전 분야 자료를 Oracle DB에 수록하여 관리하였으며, 정보제공을 목적으로 실시간서비스, DB 검색 및 GIS 정보서비스, 해양환경도 map 서비스를 수행하였다(그림 2.1.1).

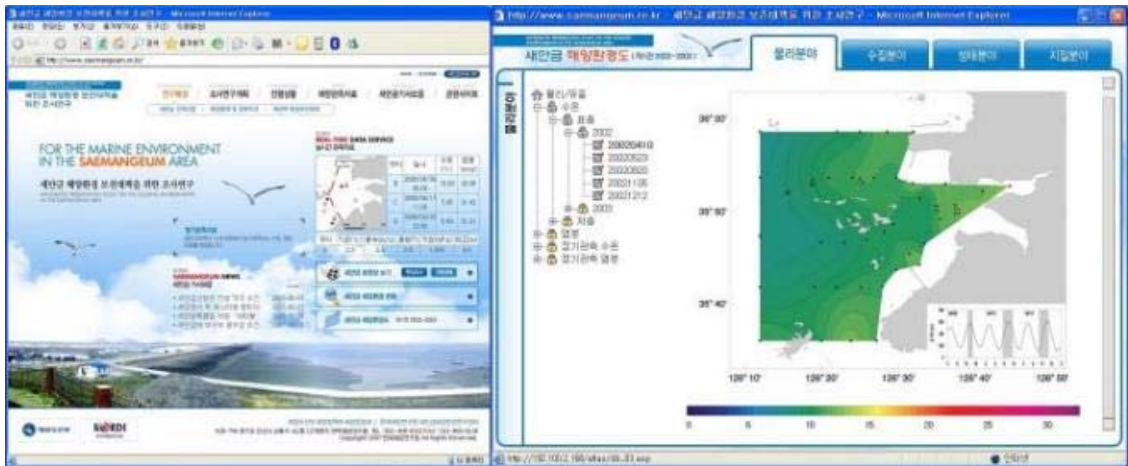


그림 2.1.1 새만금 해양환경조사 연구의 정보유통서비스

한국해양과학기술원에서는 2009년부터 “운용해양시스템 구축” 사업을 통해 해양모델과 연계한 해양자료 관리시스템을 구축, 운영하고 있으며, WOD 자료, ARGO 자료, 인공위성 자료 등을 주기적으로 수집하여 축적하고 있다. 수집한 자료는 해양수치모델 결과의 검증과 자료동화를 위해 사용하고 있다. 관측자료와 모델산출정보를 공유할 수 있는 FTP 사이트를 운영하고 있으며, 대용량 netCDF 파일의 원격접속과 subset 추출을 지원하는 OPeNDAP 서비스를 실시하고 있다. 또한, Live Access Server 운영을 통해 모델산출정보의 다양한 실시간 가시화 서비스를 제공하고 있다(그림 2.1.2).

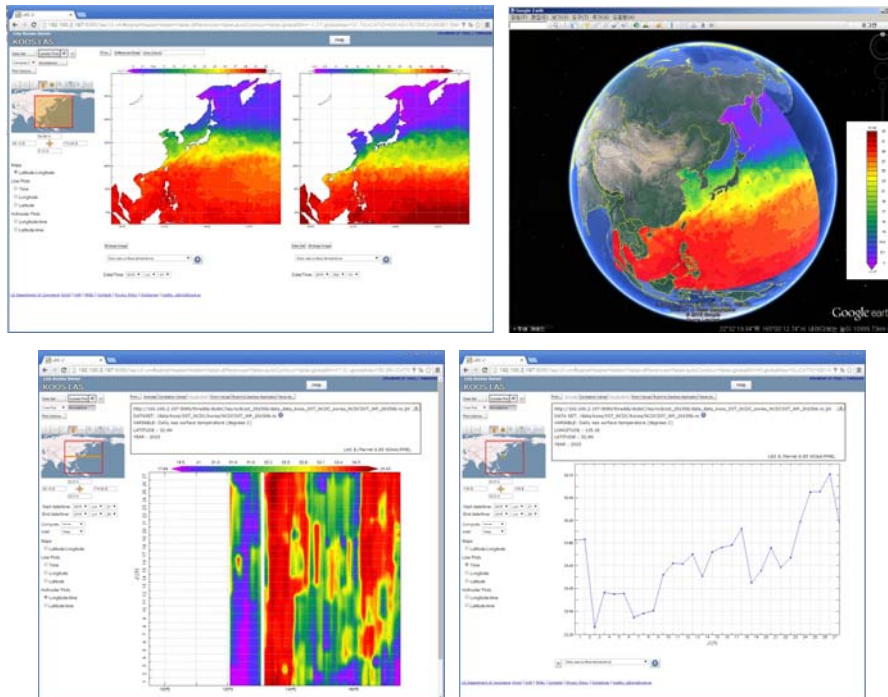


그림 2.1.2 운용해양시스템의 대용량자료 서비스

한국해양과학기술원에서는 해양생물에 대한 종합적인 DB 구축을 목적으로 한국해양생물지리정보시스템(KOBIS, Korea Ocean Biogeographic Information System)을 구축하여 운영하였다. 국제 해양생물지리정보시스템 (iOBIS)의 regional node로 한반도 해역의 해양생물 출현정보를 수집하여 국제 공동 네트워크에 연계하고 있다. KOBIS에서는 해양생물의 출현정보를 인터넷 GIS 서비스를 통해 제공하고 있다.

국립수산과학원에서는 1961년부터 매년 6회씩 정선해양관측을 실시하고 있으며, 총 25개 정선의 207개 정점에서 수온, 염분, 용존산소, 영양염류 등 17개 항목에 대한 정기조사를 실시하고 있다. 또한, 연안정지관측에서는 1993년부터 전국 연안의 34개 지점에서 매일 10시의 수온 및 기상자료를 수집하고 있으며, DB를 구축하여 자료를 관리하고 있다.

해양관측자료의 생산 특성을 고려한 DB 구축과 사용자에게 친숙한 GIS 개발 기술은 선진국 기술에 뒤지지 않고 있다.

Kim and Choi (2016)은 새만금 해역에서 관측한 10년간의 자료를 이용하여 연안역 해양수질을 예측할 수 있는 자료기반모형을 개발하였다. Bayesian structural equation model을 이용하면서 입력변수로 염분, Chl-a, DO, pH, TN, TP, COD, NH₄N, NO₂N, NO₃N, PO₄O, SiO₂Si를 사용하여 해양수질을 예측하는 연구를 수행하였다(그림 2.1.3).

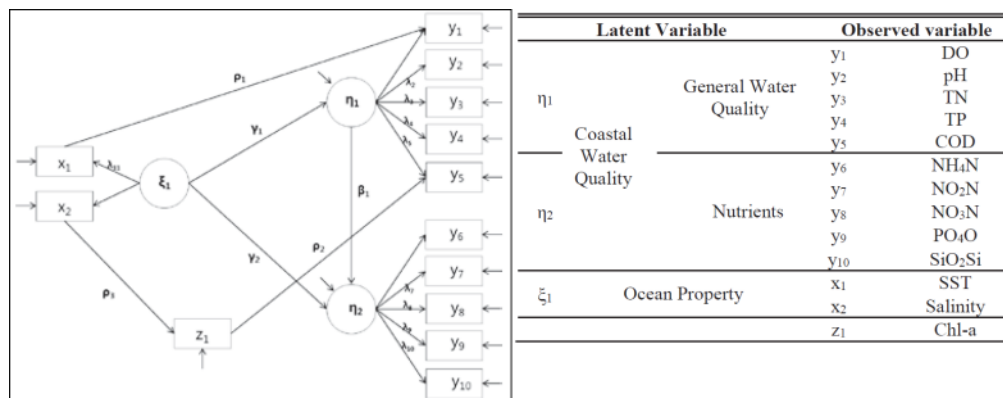


그림 2.1.3 새만금 해양관측자료를 이용한 자료기반 모델 (Kim & Choi, 2016)

해양수산부(2018)에서는 기계학습을 이용하여 이산화탄소 분압을 추정하는 연구를 수행하였다. 현장관측자료, GOCI 위성자료, MODIS 위성자료를 기반으로 Random forest, Cubist, Support vector regression 알고리즘을 이용하여 한반도 해역의 이산화탄소 분압을 추정하였다.

한국해양과학기술원(2014)은 북서태평양 해수온 상승 원인을 분석하기 위한 자료기반모형을 개발하였으며, 김(2016)은 인공위성 SST자료와 인공신경망의 심층기계학습 기법을 이용하여 한반도의 여름철 강수를 예측하는 연구를 수행하고 있다.

해양 분야의 자료기반모형은 국내외 연구자들의 관심이 많은 분야로, 장기 관측자료, 고밀도 관측자료, 위성자료 등 대용량 자료의 증가로 자료기반모형의 효용성도 점차 증가하고 있다.

제2절 국외 기술개발 현황

미국 및 유럽의 선진기술 보유 국가들은 연안 및 심해에서 자동으로 작동하는 benthic lander를 1980년대에 개발했다. 기후변화에 따른 탄소순환 연구등 다양한 연구 분야에서 활용되고 있다. 다양한 형태의 benthic chamber와 자동 채수기가 개발되고 있으며, 이에 관한 검증이 지속적으로 이루어지고 있다. 그리고 여러 환경 특성에 적합한 맞춤형 기기가 개발되어 연구에 이용되며, 고가의 장비로 판매되고 있다. 특히, 최근에는 심해에서 장기간 자동으로 이동하면서 분석하는 기기가 독일 및 캐나다를 중심으로 개발이 진행 중이다.

국제적으로는 IMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) 및 LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coastal Zones)와 같은 대규모 국제공동연구를 통해 기후변화-인간활동 등과 관련한 연안생태계의 생지화학 순환에 대한 연구가 광범위하고 체계적으로 수행되고 있다. 퇴적물내 미생물 생지화학 과정에 대한 연구는 독일의 막스 플랑크 해양미생물 연구소와 덴마크의 Aarhus 대학의 지구미생물 연구센터, Univ. of Southern Denmark의 Nordic Center for Earth Evolution 등이 세계적인 기술력을 보유한 과학자들을 보유한 기관으로 인정된다.

국외의 통합 해양관측 시스템으로는 미국의 US IOOS(Integrated Ocean Observing System), 국가해양데이터센터, NOAA의 ERDDAP(Environmental Research Division's Data Access Program), EU의 해양관측 예측 통합시스템 등이 있으며, 위성 자료, 무인항공기, HF 해양레이더, 수중무인기, 계류부이, 해양연구섭가 등의 첨단 장비를 활용하여 획득된 다종 플랫폼 자료를 활용하여 해양관측 및 감시활동을 수행하고 있다. 위성기반 해양감시로는 노르웨이 KSAT (Kongsberg Satellite Services)의 유류유출 모니터링, 캐나다의 OMW (Ocean Monitoring Workstation) 등이 있으며, 현재까지 위성자료를 활용하여 대규모 양식장 환경관리를 위한 모니터링 연구는 미미한 실정이다.

영국 PML 등 유럽의 몇몇 기관에서는 단순화한 저서 생태계 모형을 연직 1차원 표영 생태계 모형과 결합한 모형을 개발한 바 있으며, 최근에는 보다 복잡한 다층 저서 생태계 모형 개발과 이의 표영 생태계 모형과의 접합까지도 고려하고 있는 추세이다. 또한 상위생태계 모형이나 양식업종에 대한 개별 역학 모형이 개발되어 왔으며 최근에는 이들 개체군 모형을 하위 생태계 모형과 연계하여 그 변동성을 재현하고 예측하는 연구들이 수행 중이다.

영국의 Plymouth Marine Laboratory와 Marine Biological Association에서 운영하는 Western Channel Observatory에서는 다양한 해양자료의 시계열자료를 장기간 생산하고 있으며(표 2.2.1), 자체 데이터베이스(WCO database)를 구축하여 관리하고 있다(그림 2.2.1). 플랑크톤 자료는 디지털식별자를 부여하여 Pangaea 데이터베이스에 저장하고 있다.

표 2.2.1 Western Channel Observatory의 생산자료 현황

자료항목	자료관리 DB	시작년도	비고
Mooring	WCO database	L4, E1: 2009	
Zooplankton	BODC	L4: 1988	Pangaea
Phytoplankton	BODC	L4: 1992	Pangaea
Nutrients	NOWESP database & WCO database	L4: 2000	
CTD	WCO database	E1: 1903	
Pigment	WCO database	L4, E1: 1998	
Optics	WCO database		
CHN	WCO database	L4: 1992	
RV Quest Underway System	WCO database		Google Earth 기반 자료제공
Sunphotometer data	WCO database	2001	
Meteorological Data	WCO database & Rame Head NCI	2003	PML 지붕설치
모델산출자료	WCO database		L4 자료 추출

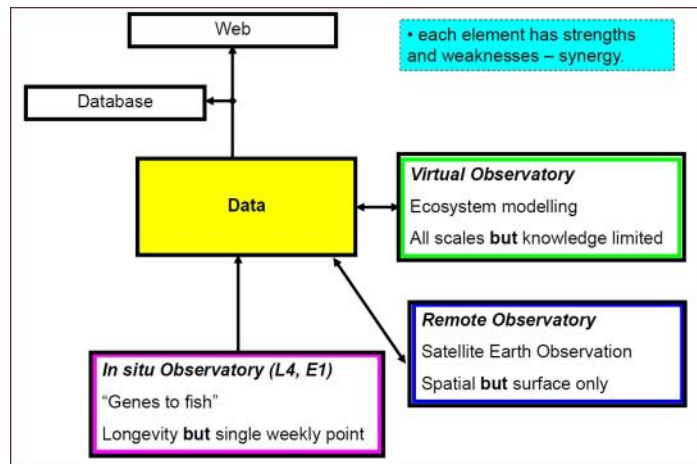


그림 2.2.1 WCO의 자료관리 개념도

일본 Hokkaido National Fisheries Research Institute에서는 A-Line 관측을 통해 입수한 CTD Data, Nutrient/Chlorophyll-a Data/Plankton Data를 파일형태로 관리하는 A-line Database를 운영하고 있다.

CalCOFI(California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation)에서는 Hydrographic Data, CTD Data, Net Sampling Data, Underway Sampling Data를 생산하고 있다. CalCOFI에서는 보유하고 있는 자료를 인터넷을 통해 제한 없이 제공하고 있으며, Data Reports 파일을 비롯하여, Access MDB 파일, CSV format data, XML data, IEA Archive 파일 등 다양한 형식으로 자료를 배포하고 있다. Net Sampling Data의 경우는 Online Database 접속을 통해 자료를 유통시키고 있다(그림 2.2.2).

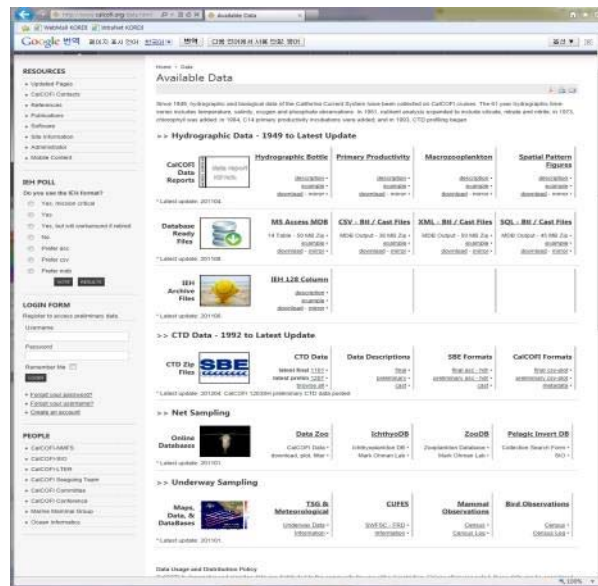


그림 2.2.2 CalCOFI의 자료제공 화면

미국의 Hawaii Ocean Time-series(HOT)에서는 1988년 10월부터 하와이 부근에서 관측되는 해양물리, 해양화학, 해양생물 자료를 관리, 제공하고 있으며, 자료관리에 데이터베이스를 활용하고 있다. 인터넷 정보서비스로 HOT-DOGS (HOT Data Organization & Graphic System)를 구축, 운영하고 있다. 자료별 특성에 따른 다양한 검색조건으로 검색이 가능하며, 검색결과는 수치형태, 그래프 형태로 제공한다(그림 2.2.3).

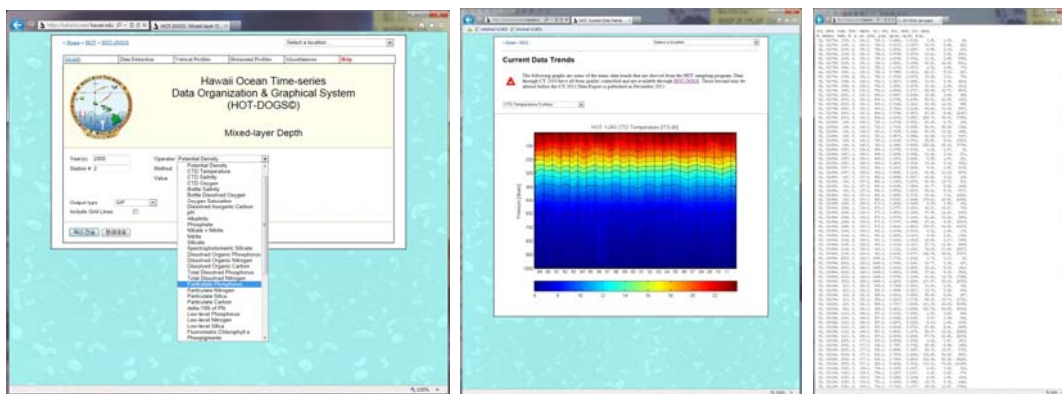


그림 2.2.3 HOT-DOGS 자료서비스

Fisheries and Oceans Canada에서는 북태평양의 시계열 자료 확보를 위해 Line P Program을 운영하고 있다. CTD 관측을 통해 수온, 염분, 투명도, 형광량, 용존산소 자료를 수집하고 있으며, Rosette/Bongo 관측을 통해 용존산소, 용존탄소, 알카리니티, pH, 영양염, 수온 자료를 수집하고 있다. 수집한 자료는 자체 과학데이터 관리정책에 따라 통합관리시스템에 축적하여 관

리하며 The Integrated Science Data Management Service(ISDM)를 통해 공유된다.

알파고의 등장으로 인공지능기술 중에서 심층기계학습(Deep Learning)이 많은 관심을 받고 있다. 심층기계학습은 여러 비선형 변환기법의 조합을 통해 높은 수준의 추상화를 시도하는 기계학습 알고리즘의 집합으로, 주로, 음성인식, 자연어처리, 음성/신호처리 분야에 적용된다(위키백과). 관련된 라이브러리들이 공개적으로 제공되고 있어서 해양 분야에서도 활용 가능하며, 해양포유류의 위치 추적, 고래소리 인식 등에 적용되고 있다.

Thoe et al. (2012)은 홍콩의 해안수질을 매일 예측하기 위한 Data-Driven 모델을 개발하였다. 다중선형회귀 분석과 인공신경망 모델을 수립하여 박테리아 농도와 해양수질의 관련성을 평가하였으며, 수질예측에 Data-Driven 모델의 사용이 가능함을 보였다(그림 2.2.4).

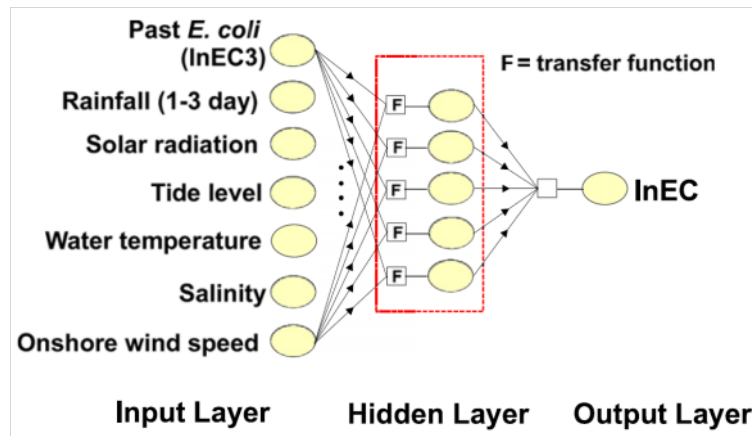


그림 2.2.4 홍콩 해양수질 예측을 위한 인공신경망 모델 (Thoe et al., 2012)

Mohanty et al. (2013)은 지하수 흐름을 예측하는 수치모델과 Data-Driven 모델의 결과를 비교하는 연구를 수행하였다. 단기간의 예측에서, 인공신경망 모델이 수치모델보다 좋은 결과를 얻을 수도 있음을 보여주었다(그림 2.2.5).

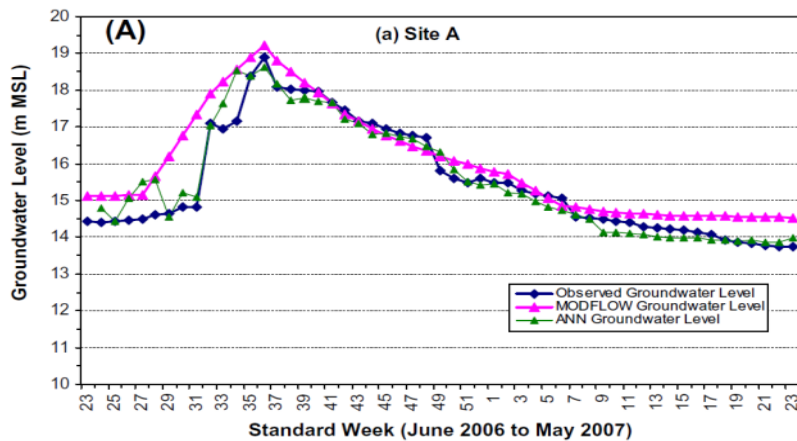


그림 2.2.5 지하수 예측을 위한 수치모델과 자료기반 모델의 결과 비교 (Mohanty et al., 2013)

Burchard-Levine et al. (2014)은 하천 수질의 조기경보를 위한 Data-Driven Model을 개발하면서 유전 알고리즘과 인공신경망을 같이 사용하였다. NH₃-N, COD, TCO, TP, Turbidity등을 입력자료로 사용하여 수질예측이 가능한 모델을 개발하였다.

Gal et al. (2013)은 민물 호수에서의 수위 변화와 동물플랑크톤의 관계를 규명하기 위해 Data-Driven 모델을 이용한 연구를 수행하였다. Feng과 Lu (2010)는 인공신경망을 이용한 홍수 예측 연구를 수행하였다. Lin et al. (2013)은 태풍에 의한 시간별 강수예측을 위한 Data-Driven 모델을 개발하였다. Karammad et al. (2013)은 태풍후 해수위를 예측하기 위한 하이브리드 모델을 이용하였다. Bhattacharya et al. (2015)은 퇴적물 이동에 대한 태풍 후 해수위를 예측하기 위한 모델을 개발하였다. Romano et al. (2009)은 쓰나미 예측에 인공신경망 기술을 이용하였다.

제3장

연구개발수행 내용 및 성과



제3장 연구개발수행 내용 및 성과

제1절 수층 모니터링 기술 개발

1. 표층계류장비 시험 및 현장 적용

해양수산부에서 지원한 “위성기반 한반도 주변해역 해양 탄소 추정모델 개발”과제에서 2017년 6월부터 통영 해상과학기지부근 해역에 pCO_2 관측부이를 설치하고 연속관측을 시작하였다. 관측항목과 시기는 표1에 정리하였는데, 2017년 12월 이 연구과제가 종료되면서 2018년에는 당 사업의 지원으로 관측을 진행하였다. 이 관측시스템의 자세한 사항은 “위성기반 한반도 주변해역 해양 탄소 추정모델 개발”과제 보고서에 설명되어 있다.

이 부이로 관측한 자료는 아래 그림들에 나타내었다. 앞서 언급한 것처럼 2018년도 이전 결과는 타 과제의 성과이나, 관측결과를 한 곳에 모아서 나타내기 위해 이 보고서에 포함시켰다.

장비를 최초 설치한 2017년 6월 초부터 현재까지 부이를 계속 운영하고 있지만 표 3.1.1에 정리한 것처럼 유지 보수 때문에 결측된 시기도 있다. 다양한 관측장비를 조합하여 구성된 부이를 안정화를 시키는데 1년 정도가 소요된 것이다.

대기온도는 계절변화와 일변화 모두를 보여 준다(그림 3.1.1). 여름에는 기온이 30도 이상이 되고 겨울철에는 0도 아래로 떨어졌다. 대기압도 여름철에 낮고 겨울철에 높아지는 특성을 잘 보여 준다(그림 3.1.2). 이런 전반적인 변화에 날씨 변화에 의한 수일~10일 정도 주기의 변화도 잘 관측되었다. 풍속은 계절변화보다는 날씨에 의해 더 많이 변하였다(그림 3.1.3).

부이에서 관측한 수온과 염분은 그림 3.1.4와 그림 3.1.5에 나타내었다. 수온 자료의 품질이 염분 자료 것보다 높음은 쉽게 알 수 있다. 약 1년 반 동안 전기전도도 센서가 오염되었을 것이기 때문에 검교정을 해야 할 것이다. 수온도 기온과 마찬가지로 당연히 여름에 높고 겨울에 낮다. 수온의 일변동폭이나 수일에서 10일 정도 시간 규모에서 나타나는 변화도 여름철에 크게 나타난다. 2017년 여름에 관측된 가장 두드러진 현상은 8월 초에 나타나는 고수온 현상이다. 약 10일 동안 수온이 10도 가량 상승한다. 수온 상승할 때 염분은 약 2 psu 정도 내려갔다. 이는 고수온이 양자강 저염수와 밀접하게 관련되어 있음을 의미한다. 프로파일러에서 얻은 자료와 비교하면 이런 변화가 어느 깊이 까지 나타나는지 확인할 수 있다.

10월부터 다음해 7월 정도까지는 계절변화에 의한 점진적인 변화가 가장 크게 나타난다. 고수온 현상에 의한 변화는 7월부터 10월 정도 까지만 나타나기 때문에, 이 현상이 목적이라면 이 기간만 집중 조사를 하면 될 것이다.

표 3.1.1 pCO₂관측부이 센서별 관측항목 및 관측기간

센서	관측 항목	관측 기간	관측 주기
기상관측장비	풍향	2017/06/30 ~ 계속	10분
	풍속		
	대기압		
	기온		
	습도		
pCO ₂	SW_XCO2	2017/05/24 ~ 2017/06/02	3시간
	AIR_XCO2	2017/07/14 ~ 2018/12/12	
SAMI PH	pH	2017/04/29 ~ 2018/12/20	3시간
CTD (SBE37SI)	수온	2017/06/30 ~ 계속	10분
	염분		
ADCP	유속	2017/06/30 ~ 2017/11/18 2018/09/07 ~ 계속	10분

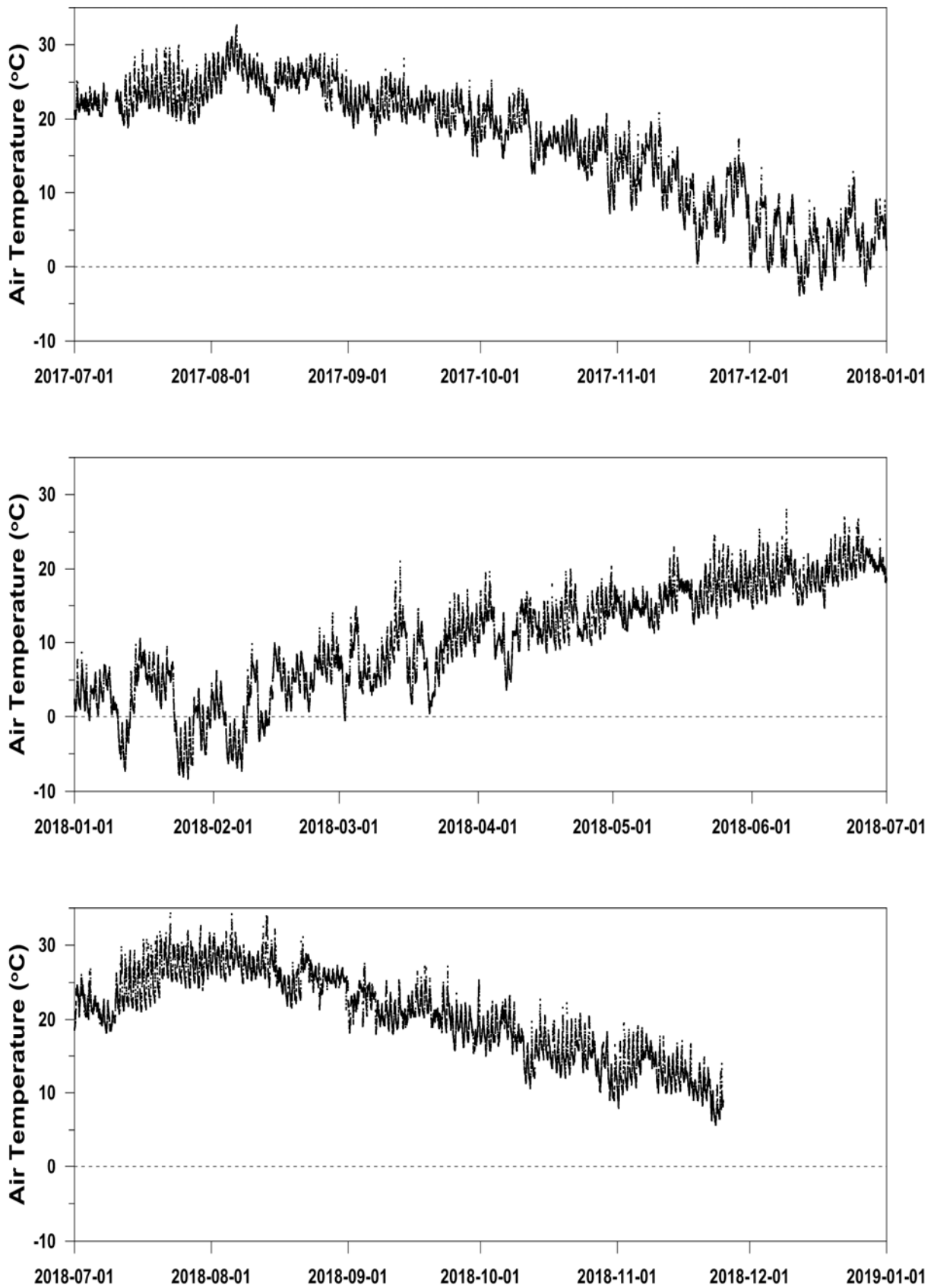


그림 3.1.1 표층계류 부이에서 연속관측한 기온 시계열 관측자료

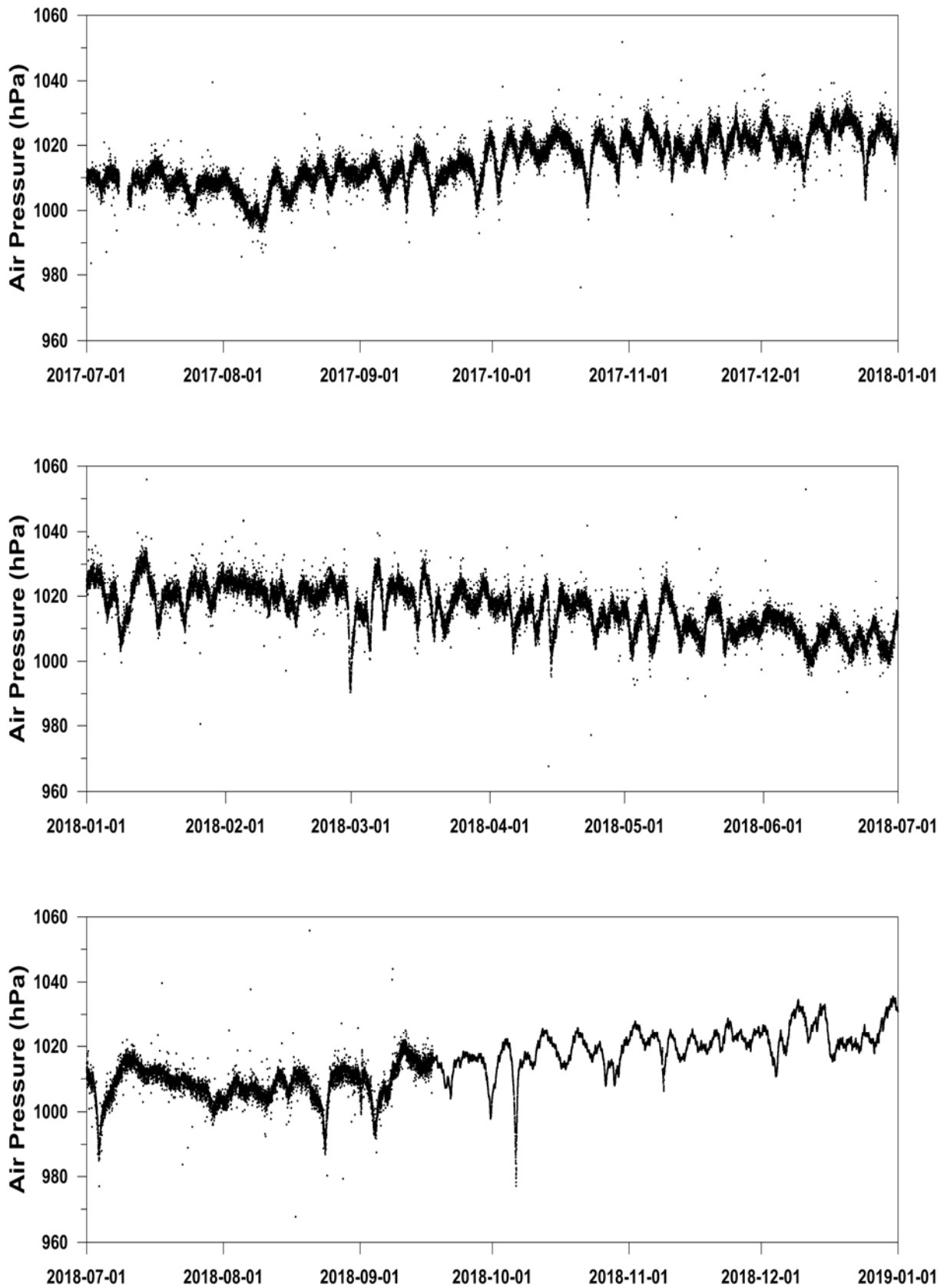


그림 3.1.2 표층계류 부이에서 연속관측한 기압 시계열 관측자료

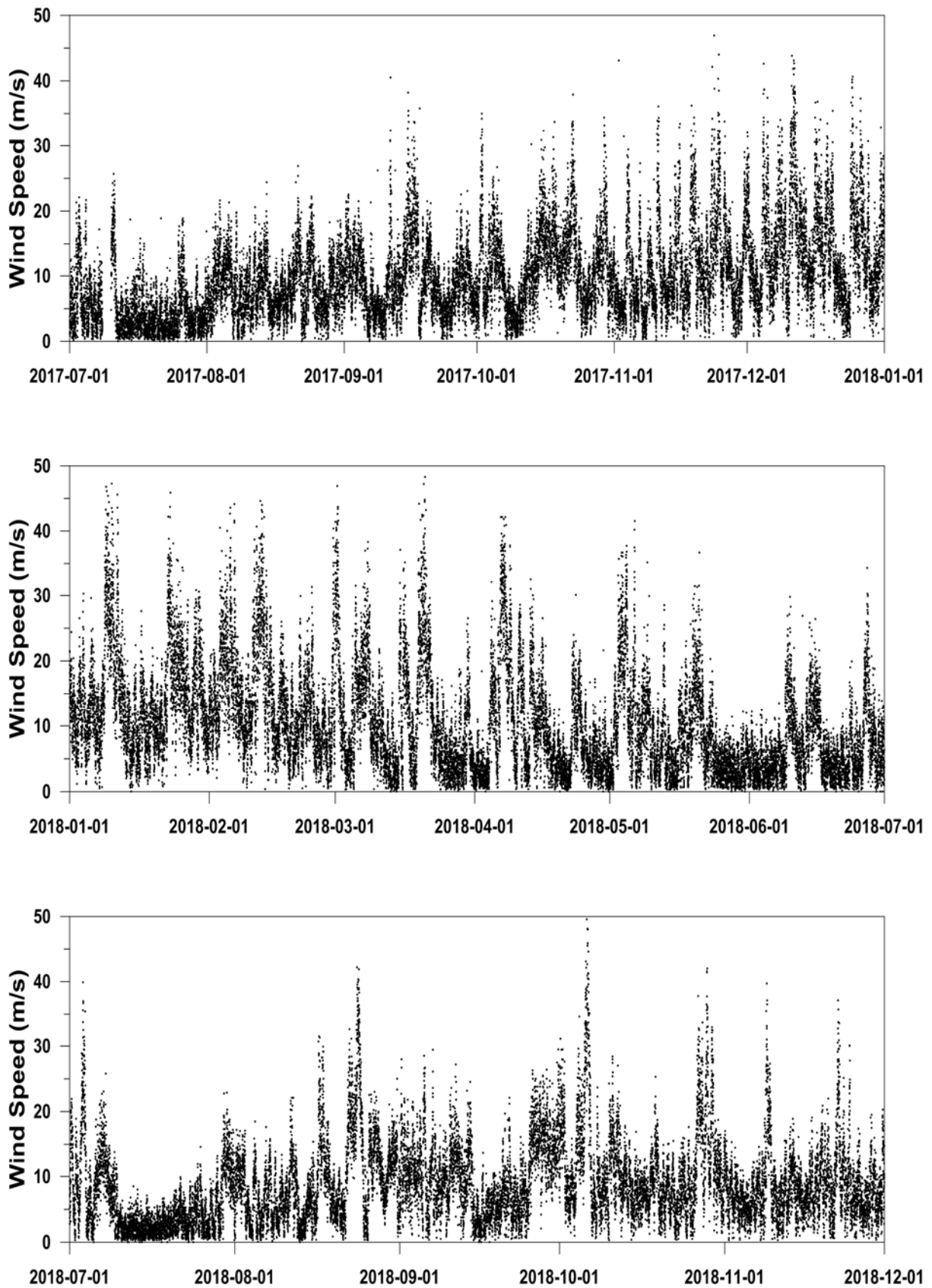


그림 3.13 표층계류 부이에서 연속관측한 풍속 시계열 관측자료

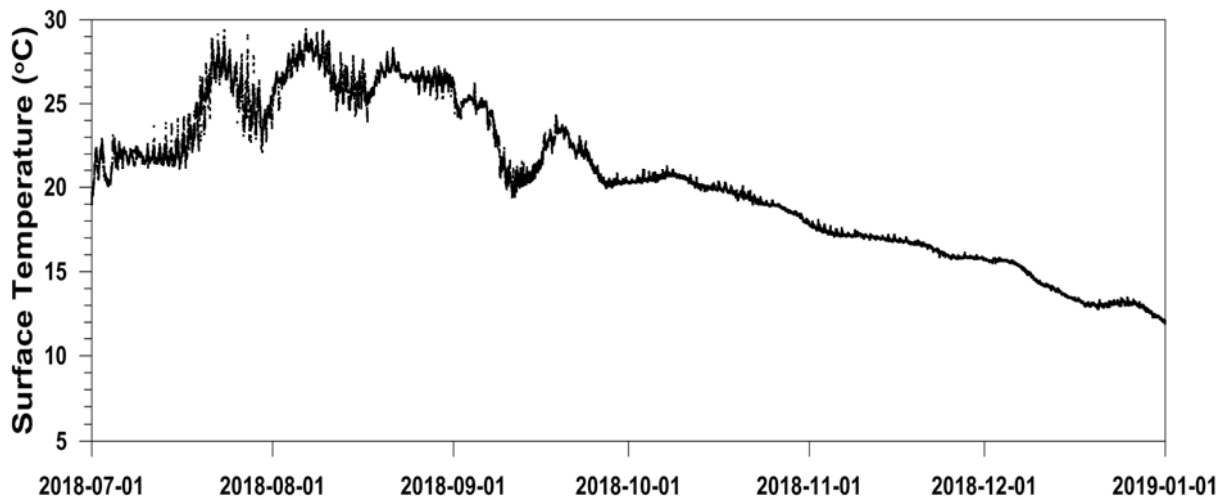
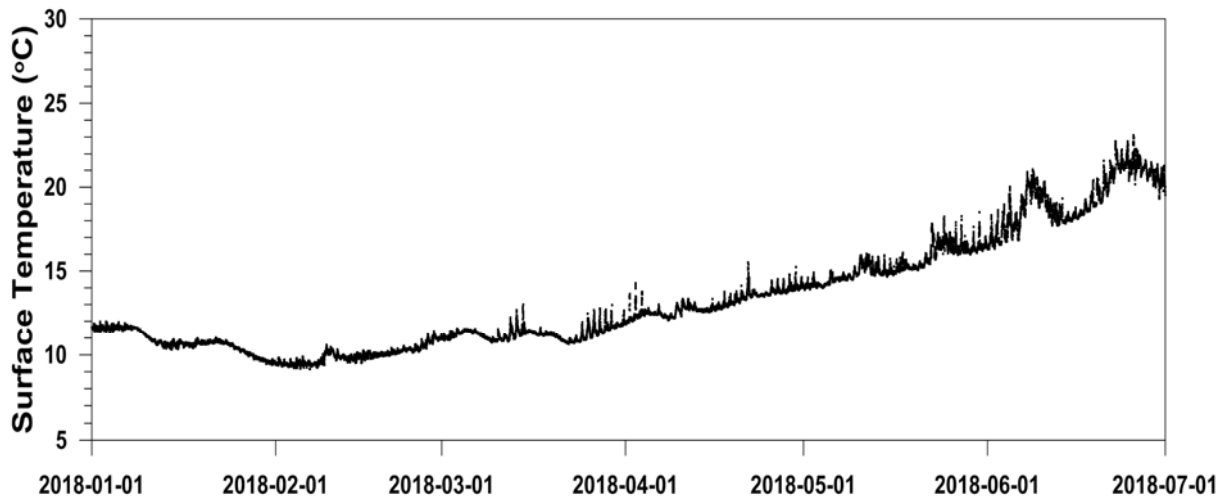
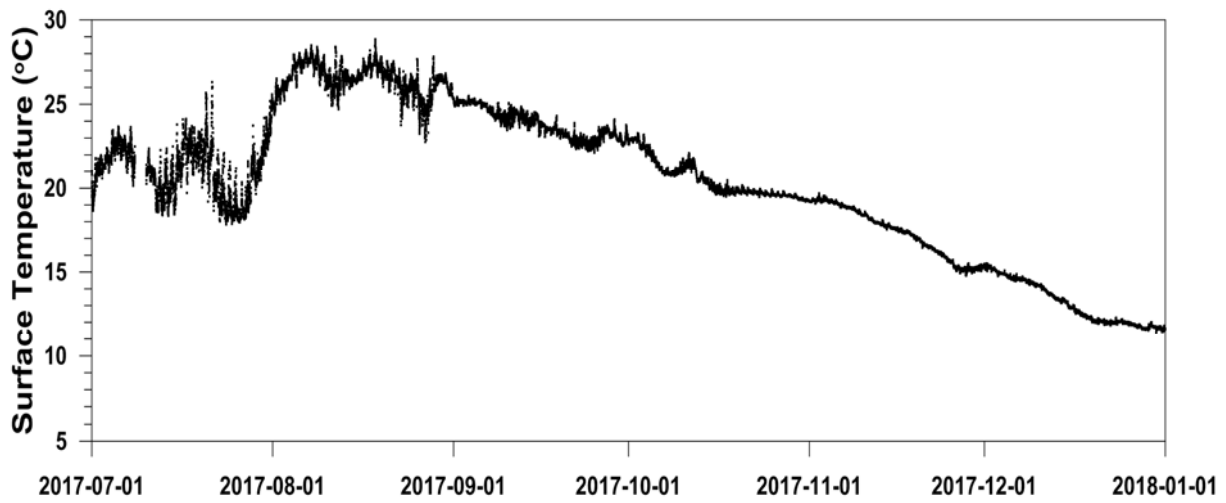


그림 3.1.4 표층계류 부이에서 연속관측한 표층수온 시계열 관측자료

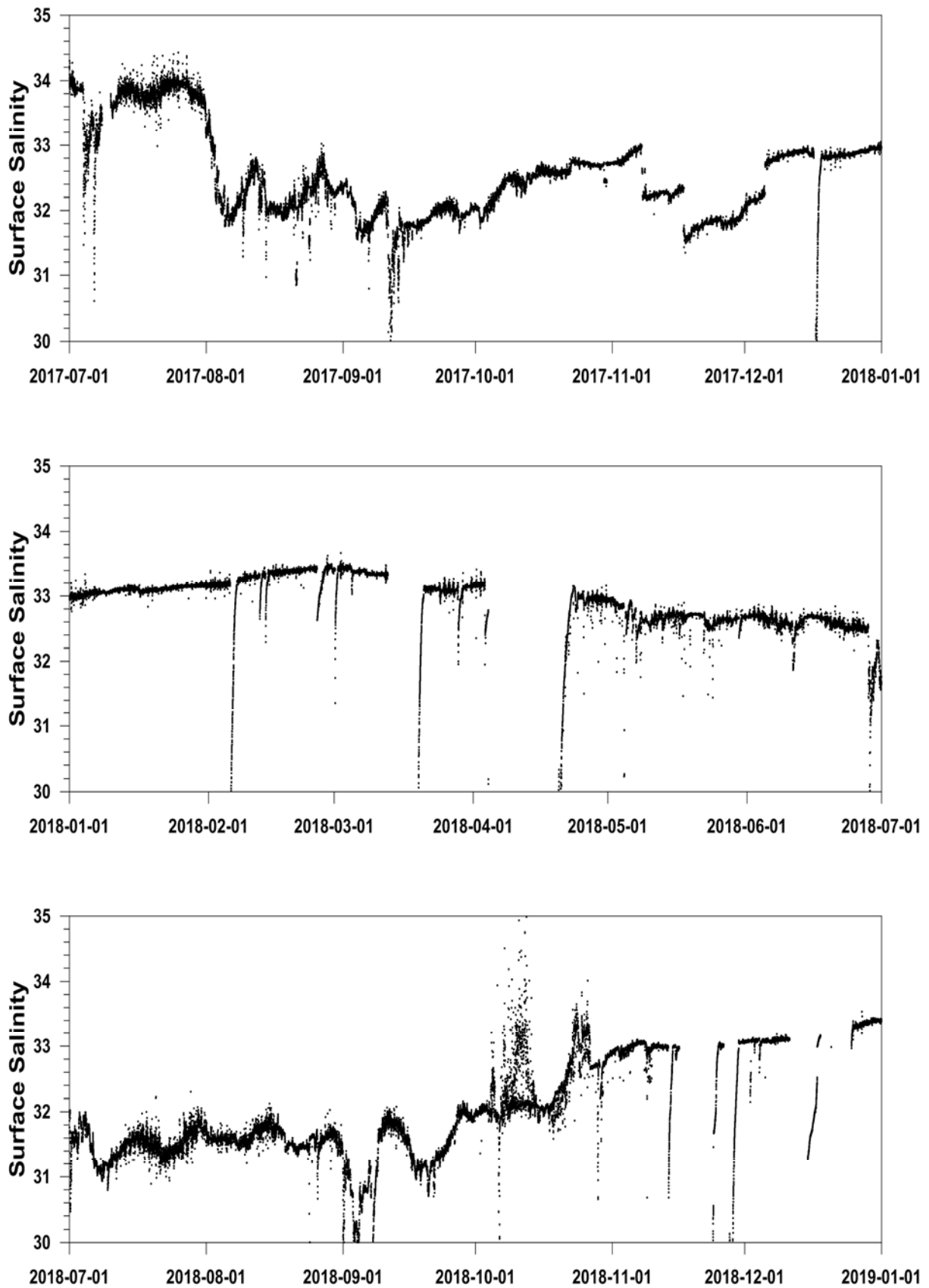


그림 3.15 표층계류 부이에서 연속관측한 표층염분 시계열 관측자료

2. 표층시료채집기 시험 및 현장 적용

해양환경 변화를 관측하기 위해서는 해수의 기본적인 물리특성 외에 해양환경과 관련된 화학적 인자에 대한 모니터링도 요구된다. 그러나 해수 화학 인자를 현장에서 기기를 통해 직접 측정할 수 있는 센서의 개발은 매우 제한적이다. 따라서 해석 가능한 해양환경 모니터링을 위해서는 해양환경 변화를 해석하기 위한 해수 화학 인자를 선택하고 이를 위한 시료를 현장에서 채집해야 한다. 본 연구에서는 실험실로 옮겨와 분석을 수행할 시료를 무인으로 자동 채집할 수 있는 표층시료채집기를 적용해 현장 인력 부담을 줄이고도 원활한 모니터링이 가능한 체계를 설계하고 이의 현장 적용을 수행하였다.

표층시료채집기는 연동펌프를 이용해 채수구로부터 표층 해수를 끌어들이며 24개의 시료병에 용도별로 분주해 담을 수 있는 구조로 이루어져 있으며, 시료보관함은 사용자 설정에 따라 냉장이나 냉동이 가능하다. 채수선으로는 약 10 m 거리의 시료채집이 가능하며, 시료채수구 입구는 생물오손을 방지하기 위해 타공된 구리판을 동그랗게 말아 덧씌워주었다(그림 3.1.6). 통영해양과학기술지에서 2017년 7월 6일부터 8월 4일까지 조석주기의 한 사이클에 해당하는 약 한달간 시험운동을 진행하며 표층시료 230개를 채집하였다. 시료는 초기 3일간 1시간 간격으로 72개를 채집하였으며, 이후 4일간 2시간 간격으로 51개, 12일간 3시간 간격으로 95개, 3일간 6시간 간격으로 12개를 채집하였다(그림 3.1.7). 시험기간 중 전원이 단절되거나 연동펌프 오류 등으로 일부 시료채집이 진행되지 않은 기간이 있었다. 정해진 시간계획에 따라 채집된 표층 해수시료는 생물활동에 의한 시료의 변질을 최소화 할 수 있도록 보관함 내에서 시료가 얼지 않을 가장 낮은 온도에서 냉장보관되었으며, 이후 주기적으로 시료채집기를 관리하는 연구원이 시료 200 mL를 여과한 여과지는 엽록소a 분석을 위해 냉동보관하였으며, 여과해수는 영양염 분석을 위해 냉동보관하였다. 식물플랑크톤 분석을 위해서는 일부시료는 냉동고정하였으며, 다른 일부는 루골고정액으로 고정한 뒤 냉장보관하였다.

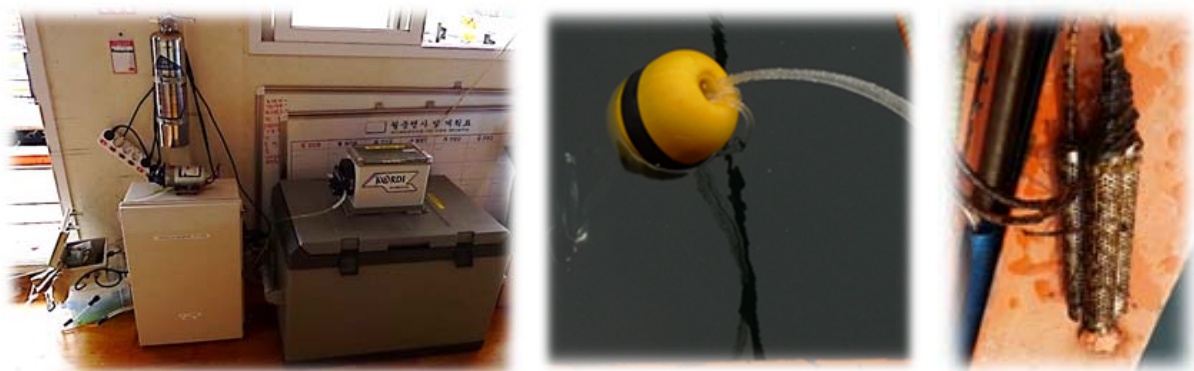


그림 3.1.6 현장에 설치된 자동시료채집기(좌), 시료채집구(중, 우)

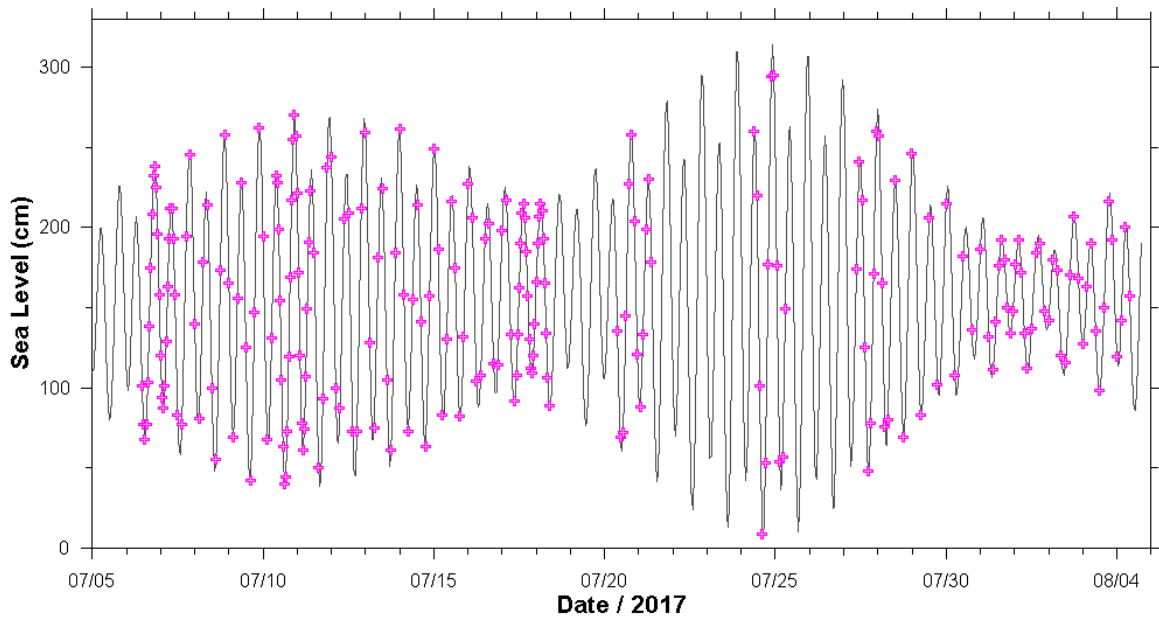


그림 3.1.7 자동시료채집기를 활용한 시료 채집시기

현장에서 채집한 시료는 실험실로 옮겨 영양염과 엽록소a, 식물플랑크톤 조성 분석을 수행하였으며, 엽록소a 및 식물플랑크톤 관련 분석내용은 제2절 2항에 정리하였다. 영양염 분석은 SEAL Co의 영양염자동분석기 QuAAtro를 이용해 암모늄염, 아질산염, 질산염의 질소 관련 3종과 인산염, 규산염의 영양염 5종을 분석하였다(그림 3.1.8). 각 영양염 분석 결과에서는 일변화가 크게 나타났으며 이에 더해 조석에 따른 대조기와 소조기의 농도 변화도 뚜렷하게 나타났다. 인산염과 질산염, 아질산염, 규산염은 대조기에 소조기보다 농도가 높게 나타났다. 암모늄염은 다른 영양염류와는 변화행태가 다르게 나타나는데 이는 암모늄염이 인위적 오염에 취약한 특성을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 통영해양과학기술지가 비교적 연안에 위치해 있고, 자동시료채집기가 양식시설과 관리시설 등 인위적 오염 가능성이 있는 시설물에 설치된 점을 감안하면 분석결과 보여지는 암모늄염의 변동이 아질산염과 질산염 등과는 완전히 일치하지 않는 것을 이해할 수 있다. 해수중 영양염 거동을 이해하기 위해 질소와 인의 비를 비교하였다(그림 3.1.9). 그 결과 아질산염과 질산염의 질소와 인산염 인의 비가 약 8.1로 이론적인 Redfield 비인 16에 많이 미치지 못하며 결정계수도 0.75로 높지 않은 반면 암모늄염을 포함한 용존무기질소의 질소와 인산염 인의 비는 약 11.2로 이론적인 값에 더 가까우며 결정계수도 0.88로 좋아짐을 확인하였다. 따라서 인위적인 영향이 큰 해역에서는 해수내 물질순환을 해석하기 위해 질소대 인의 비를 구할 때 암모늄을 고려해야함을 확인하였다.

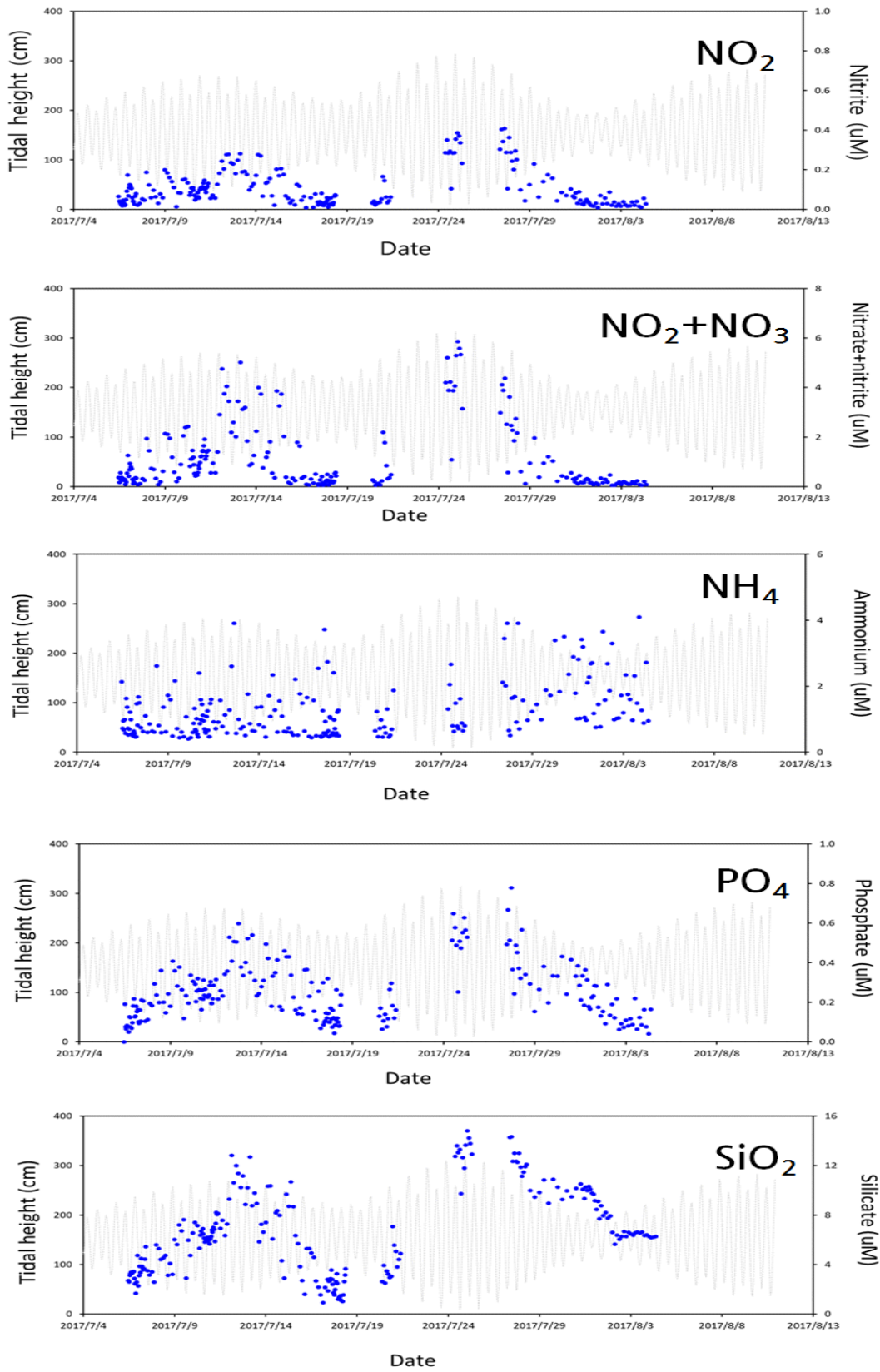


그림 3.18 자동시료채집기를 통해 수집된 영양염 시계열 분석 결과 (위로부터 아질산염, 질산염+아질산염, 암모늄염, 인산염, 규산염)

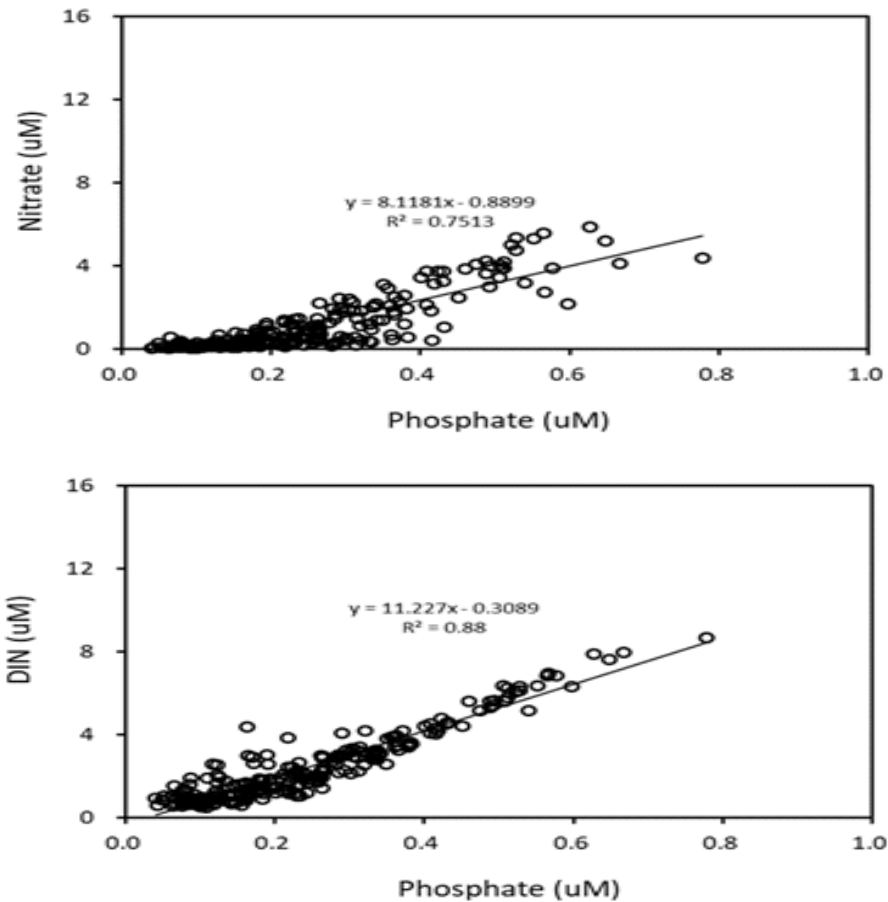


그림 3.19 자동시료채집기를 통해 수집된 영양염 분석 결과 해수중 N:P 비
(위: 질산염+아질산염 N:인산염 P, 아래: 질산염+아질산염+암모늄염 N:인산염 P)

3. 표층상시관측 시범자료 생산

해양의 표층해수 특성을 연속적으로 관측하기 위해서는 제3장 제1절 1에서 설명한 해양부이가 많이 활용된다. 관측을 원하는 위치에 설치해 연속적인 시계열 관측자료를 획득할 수 있으므로 해양환경을 모니터링하기 위해 매우 좋은 관측플랫폼이지만 부이자체의 비용 비싸고, 유지·관리비용이 많이 들어 쉽게 활용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 양식장과 같은 구조물을 활용할 수 있는 경우, 또한 통영해양과학기지나 에너지 복합양식시설 등에서와 같이 전기가 제공되는 환경에 적용가능한 저비용의 표층상시관측 장비를 고려하고 시험할 필요가 있다.

해수의 수온과 염분을 연속으로 측정할 수 있는 열염분계(Thermosalinograph, TSG)를 해수펌프와 연결해 측정시스템을 구성하고, 측정된 자료를 CDMA 모뎀을 통해 전송하는 표층상시관측 시스템을 구성하였다. 해수중 생태인자 중 활용도가 높은 엽록소로 환산가능한 형광량센서도 추가해 관측자료의 활용도를 높였다. 2017년 6월 1일 통영과학기지에 설치해 표층상시관측

시범자료 생산을 수행하였다. 펌프를 통해 시스템으로 유입된 표층 해수의 수온과 염분, 형광량을 1분간격으로 측정하였다(그림 3.1.10). 조석에 따라 약 반월 주기의 변화가 관측되었으며, 형광량 센서의 경우 생물오손으로 인해 약 3일 이후 자료사용이 불가하였다.

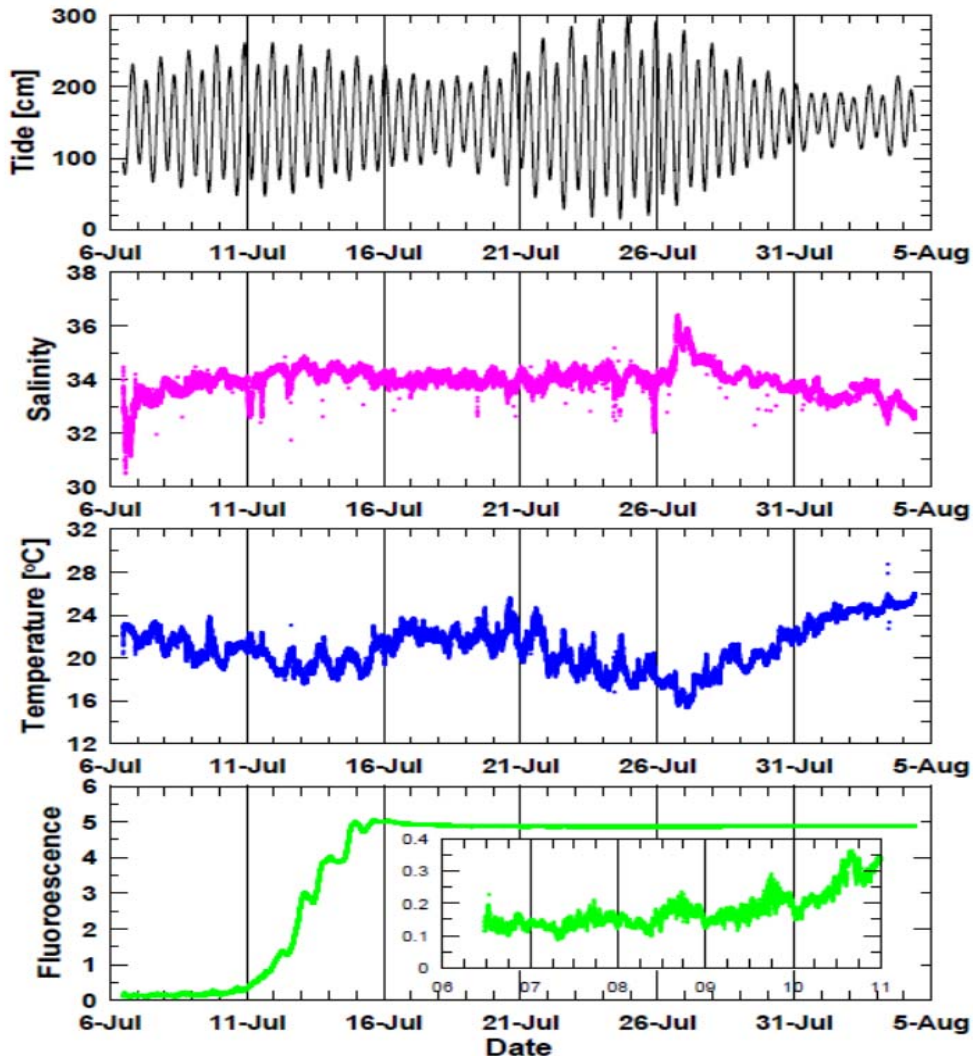


그림 3.1.10 매 1분 간격으로 관측한 통영해양과학기지 표층 염분, 수온, 형광량 예

형광량 센서의 생물오손 문제를 해결하기 위해 소형 펌프를 이용해 공기압으로 왕복 운동하는 브러시를 개발했으며, 정해진 시간에 센서 내의 튜브를 세척하도록 프로그래밍을 통해 운영하였다(그림 3.1.11). 또한 해수인입을 위한 펌프를 방수 케이스 내부로 옮겨 설치하였으며, 해수인입량을 확인할 수 있는 유량계를 부착하는 등 시스템 개선을 수행하였다(그림 3.1.12). 이러한 개선작업을 후 이전보다 훨씬 안정된 시계열 관측결과를 얻을 수 있었다(그림 3.1.13).

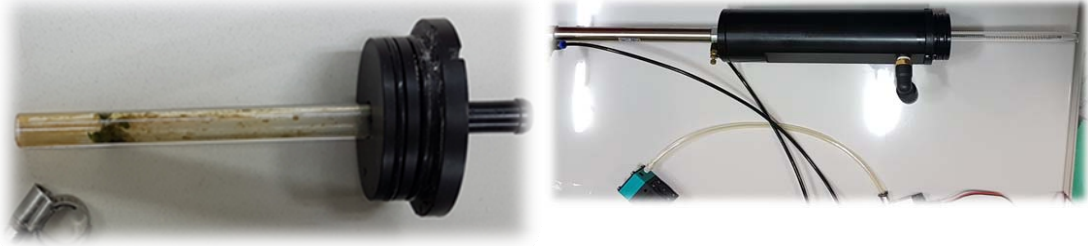


그림 3.1.11 현장설치 후 오염된 형광량 센서 내 튜브(좌)와 센서 내 튜브 세척을 위해 개발한 브러쉬(우)

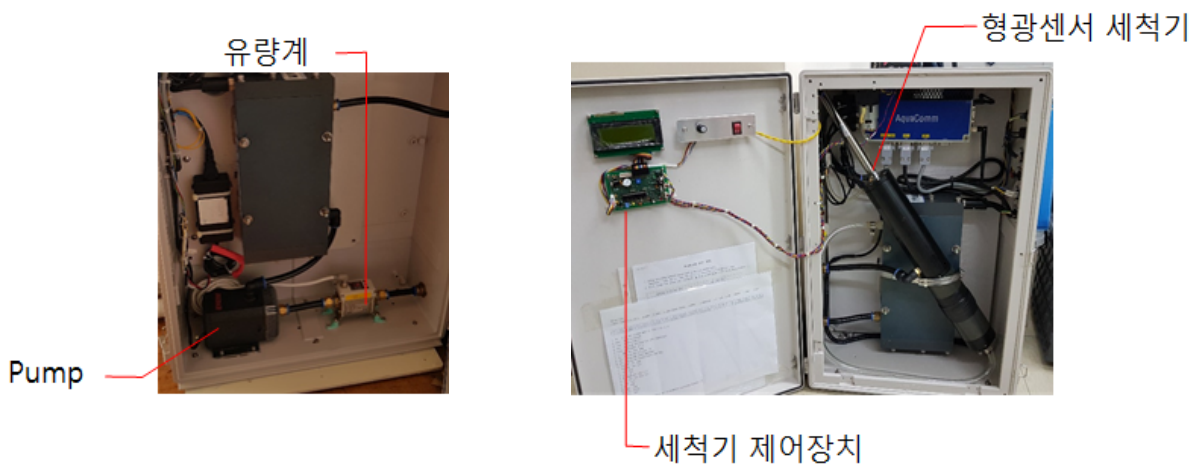


그림 3.1.12 표층상시관측 수행을 위해 고안되고 개선된 시스템

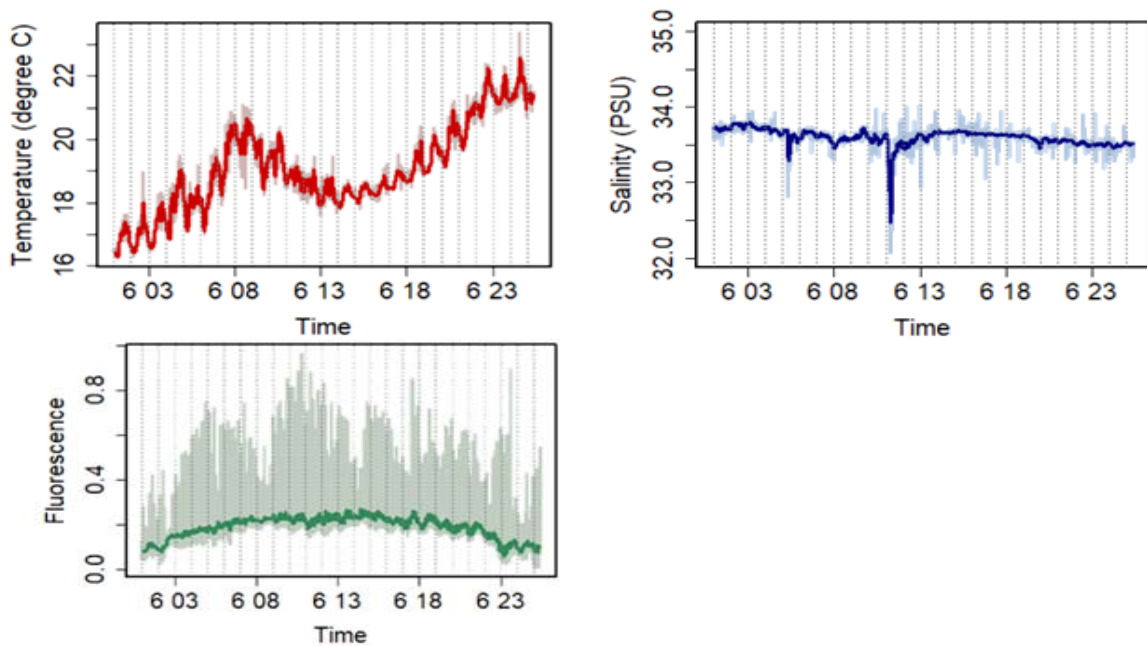


그림 3.1.13 시스템 개선 후 획득한 표층 TSG 실시간 모니터링 자료 예

4. 화학해양 인자 표층 시계열 시범자료 생산

해양환경, 특히 양식장이 설치된 해역의 해양환경을 모니터링 하기 위해서는 해수의 물리요인 뿐만 아니라 생지화학요인의 측정이 필수적이다. 현재 시계열 관측자료 생산이 가능한 해양내 생지화학요인은 엽록소a로 변환 가능한 형광량과 용존산소, pH, 질산염, 이산화탄소분압 등이다. 이중 형광량과 용존산소 측정을 위한 센서는 개발 이력이 길어 여러가지 방식을 적용한 다양한 제품이 상용화되었으며, 관측현장에서도 많이 이용되고 있다. 반면, 해양생태계를 포함한 해양 환경의 주요 요소인 해수중 탄소와 질소를 정량하기 위한 센서와 측정시스템의 개발은 상대적으로 최근에 이루어져 아직까지 그 적용이 대중화 되어 있지는 않다. 양식장 해역에 대한 환경 관리를 위해서는 생명체를 구성하는 핵심요소인 질소나 탄소의 해양내 변동에 대한 모니터링 이 필수적이므로 이의 모니터링 운영 기술을 확보하고 시계열 자료의 시범생산을 진행하였다.

가용한 질산염 센서는 자외선을 이용해 분광광도법으로 해수중 질산염의 양을 정량하는 ISUS(In Situ Ultraviolet Spectrophotometer)와 SUNA(Submersible Ultraviolet Nitrate Analyzer)가 있다. 두 모델은 분석원리가 동일하며 내장된 부품이 동일하나 ISUS는 대양관측용으로 SUNA는 연안역에 적용이 적합하도록 케이싱을 차별화한 제품들이다. 본 연구에서는 연안역에 적용이 적합하도록 센서부분에 브러쉬가 부착된 SUNA V2 질산염 센서를 선택했다(그림 3.1.14). SUNA V2 질산염 센서를 자동 원치 시스템에 장착해 매 1시간 간격으로 수층의 질산염 측정을 수행하였다(그림 3.1.15). 컨트롤 보드의 제어 프로그램에 의해 1시간 간격으로 관측시간이 되면 자동 원치 시스템에 전원이 공급되며, 원치 시스템에서 전원을 공급받은 CTD와 SUNA는 작동을 시작해 각각 측정과 내장메모리에 자료저장을 진행한다. 제어 프로그램에 따라 26 m를 왕복 회전한 자동원치는 표층 대기위치에 도착한 CTD와 SUNA가 CDMA 모뎀을 통해 관측자료를 전송하기 위한 시간만큼 기다렸다가 전원 공급이 끊어지면, 다음 관측시간까지 휴식 상태가 된다. 1시간 간격으로 관측한 표층 자료에서는 대조기와 소조기의 변동이 나타난다. 자동 원치 시스템 시험기간 중 원치 시스템의 오류로 수심 약 23 m에서 원치가 멈춰서는 경우가 발행하였다. 이때 원치가 되감기를 완료한 상태가 아니었으므로 원치 시스템에 전원 공급이 계속되며 수심 23 m에서 질산염 자료가 연속으로 측정되었다. 저층의 질산염 관측결과에서도 조석주기에 따른 뚜렷한 일변동이 나타났으며, 그 변동폭은 표층보다 크게 나타났다.



그림 3.1.14 자동원치 시스템에 추가해 시험자료 생산에 활용한 SUNA V2

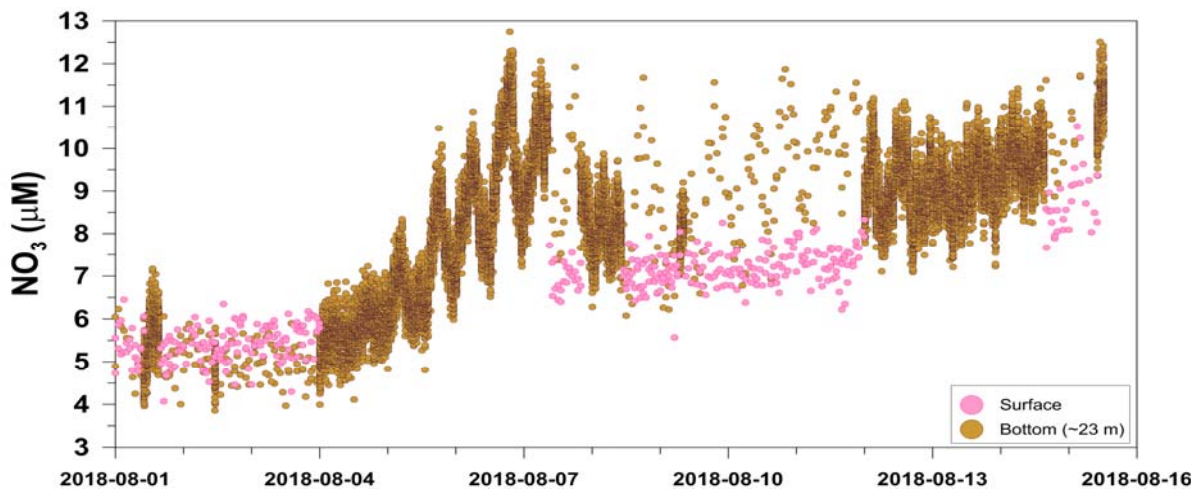


그림 3.1.15 통영해양과학기지 해역에서 관측한 표층과 저층 질산염 시계열 자료

해양 내 탄소는 탄소가 생물체를 구성하는 기본 요소이므로 해양생태계 연구를 위한 주요 측정요소가 될 뿐만 아니라 해수경계면에서 해양-대기 이산화탄소 교환을 통해 해양이 인간활동으로 추가방출된 대기 중 이산화탄소를 흡수하기 때문에 기후변화 연구를 위한 주요 측정요소이기도 하다. 제3장 제1절 1에 설명한 표층계류부이에는 해양대기와 표층해수의 물리적 특성을 측정하는 센서 이외에 해양대기와 표층해수의 이산화탄소분압을 측정하는 Battelle 사의 MAPCO2가 함께 구성되어 있어 3시간 간격으로 해양대기와 표층해수의 산화탄소 분압을 측정해 표층부이가 설치된 2017년 7월부터 약 18개월간 시계열 자료를 생산하였다(그림 3.1.16). 상용화 된 해수 CO₂ 측정장비가 대부분 수중계류방식으로 개발되어 기기의 검·보정이 까다로운데 반해 Battelle 사의 MAPCO2는 시스템 내부에 CO₂ 표준기체를 내장해 매번 측정시마다 분석기를 조정하는 장점을 가지고 있다. 측정된 해양대기의 평균 이산화탄소 분압은 약 406.9 μatm 이었으며, 표층해수의 이산화탄소 분압 범위는 220~588 μatm 이었다. 표층해수의 이산화탄소 분압은 수층의 성층이 강한 여름에는 반월주기의 변동이 나타났으며, 수층의 수직 혼합이 잘 이루어진 겨울에는 수온변화와 유사한 변동을 보였다.

해양대기와 표층해수의 이산화탄소 분압 측정 결과와 부이 상부에 설치한 기상장비로부터 획득한 풍속자료를 활용해 약 16개월간의 해양-대기 이산화탄소 교환량 시계열 자료를 산정하였다(그림 3.1.17). 해양-대기 이산화탄소 교환량의 방향은 표층해수와 해양대기간 이산화탄소 분압의 차이에 의해 결정된다. 폭풍이나 태풍 등의 계절적 특성으로 인해 최대 풍정은 여름철에 나타났지만 평균 풍속은 여름에 비해 겨울에 높았다. 월간 이산화탄소 교환량은 $-55.9 \sim 32.4 \text{ C m}^2 \text{ day}^{-1}$ 범위를 나타냈으며, 남해안 연안 해수는 여름철 대기로 이산화탄소를 방출하며 겨울에는 대기의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 나타났다(표 3.1.2). 외삽이나 내삽 등의 자료 보간 없이 관측한 실제 시계열 자료를 이용해 산정한 통영해역의 연평균 이산화탄소 흡수량은 $3.62 \pm 16.78 \text{ mol C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 였다.

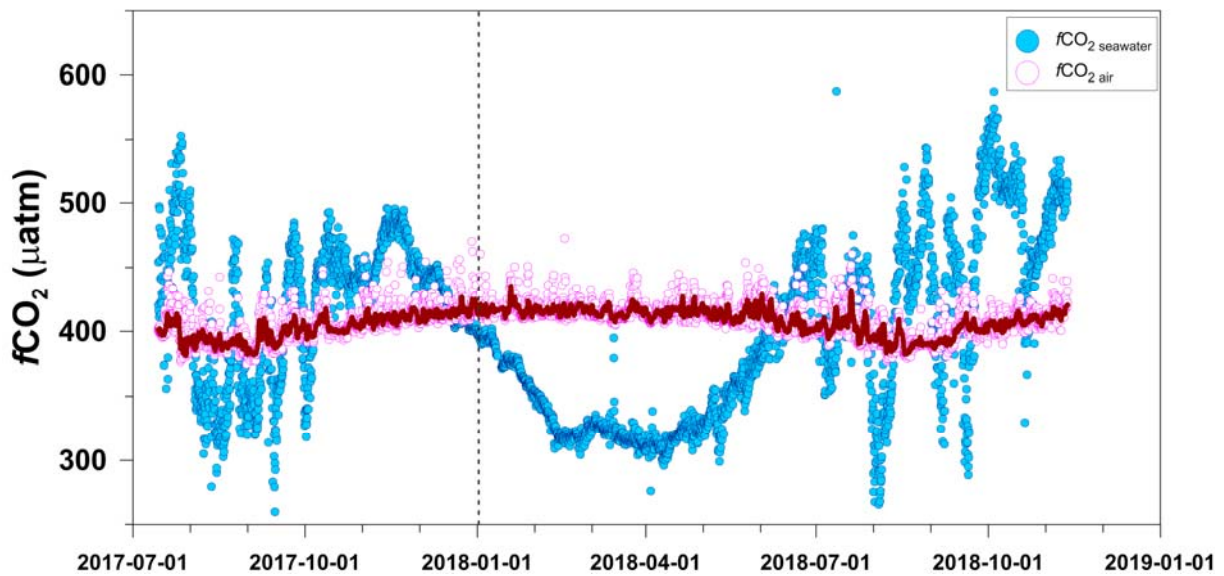


그림 3.1.16 통영해양과학기지 인근해역에서 관측한 해양대기와 표층해수의 이산화탄소 분압 시계열 자료

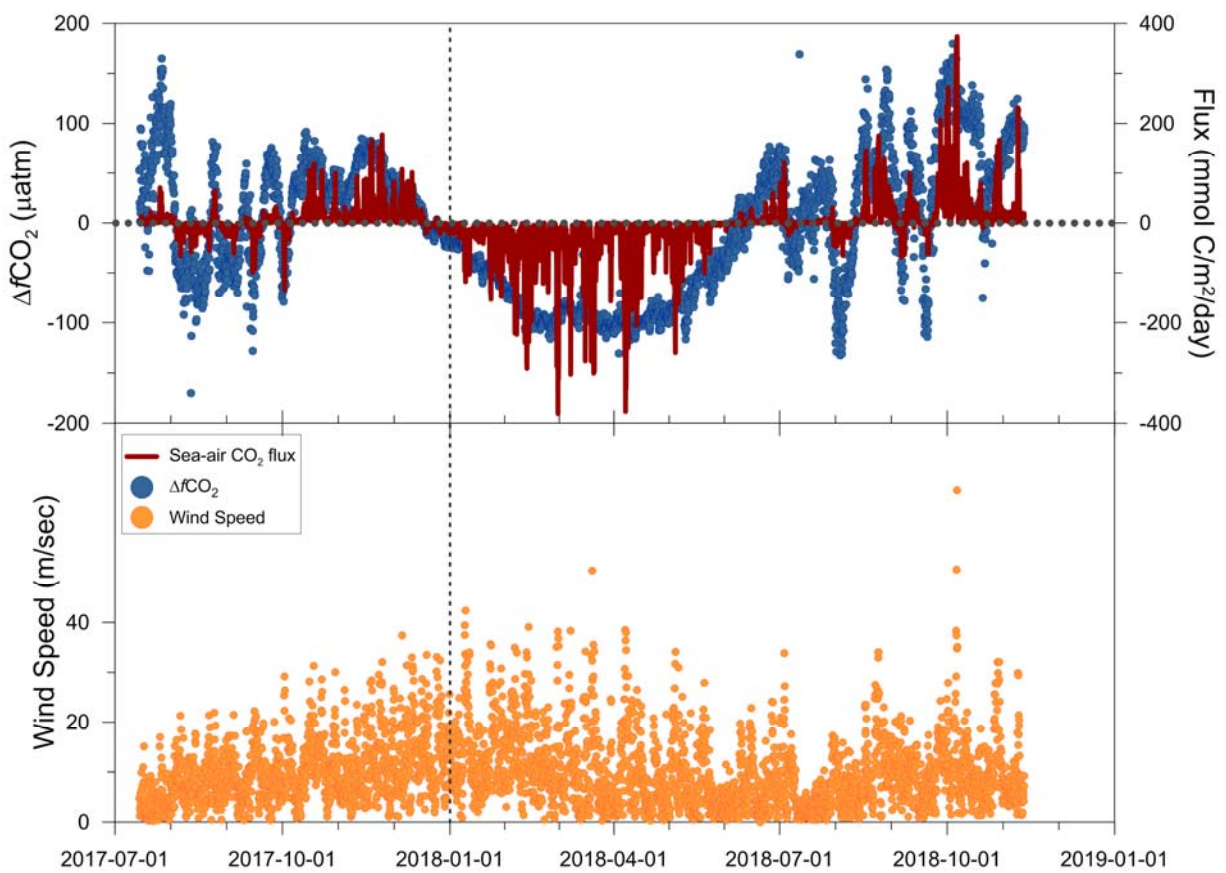


그림 3.1.17 통영해양과학기지 인근해역 시계열 관측자료로 산정한 해양-대기 이산화탄소 교환량 및 계산에 활용한 해양-대기 이산화탄소 분압차와 풍속 자료

표 3.1.2 통영해양과학기지 인근해역 시계열 관측자료로 산정한 월평균 해양-대기 이산화탄소 교환량

Period		CO ₂ flux (mmol C/m ² /day)
2017	July	5.45±10.87 (-3.64~70.51)
	August	-6.14±13.83 (-66.05~64.68)
	September	-4.96±16.96 (-98.94~32.37)
	October	13.56±26.91 (-134.23~118.84)
	November	23.98±32.67 (0.01~177.42)
	December	7.95±20.63 (-22.35~107.68)
2018	January	-18.74±24.15 (-117.99~-0.04)
	February	-55.92±60.09 (-400.89~-0.06)
	March	-50.57±77.59 (-611.99~-0.02)
	April	-39.87±67.22 (-415.69~-0.02)
	May	-20.36±34.50 (-259.89~-0.04)
	June	3.67±9.11 (-15.77~59.94)
	July	1.90±16.92 (-45.67~120.96)
	August	16.82±36.83 (-64.98~175.11)
	September	17.49±37.48 (-68.57~98.85)
	October	32.36±41.94 (-10.57~272.29)

5. 수층 프로파일러 운영 및 자료 생산

해양수산부에서 지원한 “위성기반 한반도 주변해역 해양 탄소 추정모델 개발”과제에서 2016년 8월부터 그림 3.1.18에 나타난 것처럼 통영 해상과학기지부근 해역에 계류선을 따라 왕복하는 프로파일러를 이용하여 수층의 특성을 관측하기 시작하였다. 전체 관측시기는 표 3.1.3에 정리하였는데, 2017년 12월, 이 연구과제가 종료되면서 2018년에는 당 사업의 지원으로 관측을 진행하였다. 이 관측시스템의 자세한 사항은 위 보고서에 설명되어 있어 여기에서는 간략하게 중요한 사항만 기술하였다. 해저면에 투하한 추와 면 아래 약 5 m에 아표층 부이를 이용하여 계류선을 유지하였다 (그림 3.1.19). 아표층부이에는 Nortek Aquadopp 400khz를 설치하여 수층의 유속을 10분 간격으로 연속관측하였다. 계류선을 따라 러시아 Aqualog사에서 제작한 Proflier가 정해진 시간간격으로 이동하였다. 이 프로파일러에 미국 SeaBird사에서 제작한 SBE52MP를 설치하여 수온 염분 용존산소의 수직 분포를 측정하였다.

표 3.1.3 수층 프로파일러 관측기간

2016	2017	2018
16.08.04~16.08.24	17.01.24~17.03.14	18.07.24~18.09.18
16.08.25~16.10.10	17.07.21~17.09.21	18.09.19~18.12.12
16.10.12~17.01.19	17.09.22~17.12.28	
"위성기반 한반도 주변해역 해양 탄소 추정모델 개발"과제에서 지원함		본 과제 제원

이 프로파일러로 2016년도부터 관측한 수온과 염분, 유속을 그림 3.1.20~25에 나타내었다. 앞서 언급한 것처럼 2018년도 이전 결과는 타 과제의 성과이나, 관측결과를 한 곳에 모아서 나타내기 위해 이 보고서에 포함시켰다.

장비를 최초 설치한 2016년 8월 초부터 2017년 3월 중순까지는 장비의 정비를 위하여 수거한 기간을 제외한다면 연속적으로 관측이 이루어졌다. 2016년 11월 초부터 11월 말까지는 프로파일러에 전기를 공급하는 건전지가 소진되어 작동을 멈추었다.

2016년도 하계에는 고온수가 나타나는 것이 매우 뚜렷하게 관측되었다. 고온수가 나타날 때 염분도 낮아져 고온수는 저염분수와 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다. 이런 현상은 2016년, 2017년, 2018년 여름철에 모두 나타났다. 이 장비로는 표층온도를 관측할 수 없어서 상층의 수온을 파악할 수는 없었다. 10월 말부터 다음해 3월 중순까지는 성층이 매우 약해져서 표층관측만으로도 수층의 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 비록 이 기간 동안에 수직적인 변화는 없으나, 남해 외해역의 해황이 계속 변하기 때문에 시간적인 변화는 계속 나타난다.

아표층 부이에 설치된 400 khz ADCP로 관측한 해류는 그림 3.1.21과 3.1.23에 나타내었다. 해류에서 가장 뚜렷한 신호는 일주조와 반일 주조이다. 여름철 고수온과 저염분 현상도 조석 주기를 따라 변화였다. 낙조때 북서쪽에서 조류에 의해 외해역의 물이 공급되면서 수온이 올라가고 염분이 내려간다. 낙조때는 반대 현상이 나타난다. 조석주기 동안에는 이런 형태로 변하고 수일 이상 규모에서는 외해역에 고온수 존재 여부에 따라 고온수가 나타났다 사라진다.

2017년도에는 고온수가 나타날 것으로 예상되는 7월 하순부터 관측을 시작하였다 (그림 3.1.22, 3.1.23). 여름철에는 강한 고온수가 저염수와 함께 나타났다. 가을이 되면서 고온 저염수가 사라지고 성층이 약해졌다. 12월 초순 건전지가 소진되면서 관측이 중지된 것으로 판단된다.

2018년도에도 7월부터 관측을 시작하였다 (그림 3.1.24). 여름철에 다른 해와 마찬가지로 고염 저염수가 나타났다. 2018년도에는 다른 해와 달리 1차 관측 끝 부분에서 관측이 제대로 이

루어지지 않았다. 장비를 수거 후 재계류한 후에도 정상적으로 관측이 이루어지지 않았다. 장비 수거시 프로파일러가 다른 줄과 엉켜 있었다. 즉 다른 줄과 엉켜서 이동을 하지 못한 것으로 판단된다. 10월 7일경 아표층 부이에 설치된 ADCP의 압력이 순간적으로 증가하였다. 이도 프로파일러가 외부의 영향으로 이동하였음을 보여준다. 9월 이후의 자료는 얻지 못하였으나 가을부터는 수직구조가 매우 단순해지기 때문에 다른 해에 얻은 자료에서 변화 경향 등은 추론할 수 있다.

3년간 자료에서 7월 부터 9월 까지 고온가 나타남을 확인할 수 있었다. 고온수가 나타날 때 염분이 낮아지는데 관측점 부근에는 강이 없기 때문에 저염분의 기원이 양자강이라고 추측할 수 있다. 저염분과 고온의 강도에 대한 정량적인 분석을 위해서는 추가 연구가 필요하다. 10월부터 다음해 3월정도 까지는 수직구조가 매우 단순해지기 때문에 프로파일러를 이용하여 연직구조를 측정할 필요가 없다. 3년 동안 봄철에는 장비를 설치하지 못하여 자료를 얻을 수 없었다. 추후에 계속 조사를 한다면 4월부터 시작하여 봄철의 구조와 봄에서 여름으로 넘어가는 시기에 어떻게 변하는지를 파악할 수 있어야 한다.

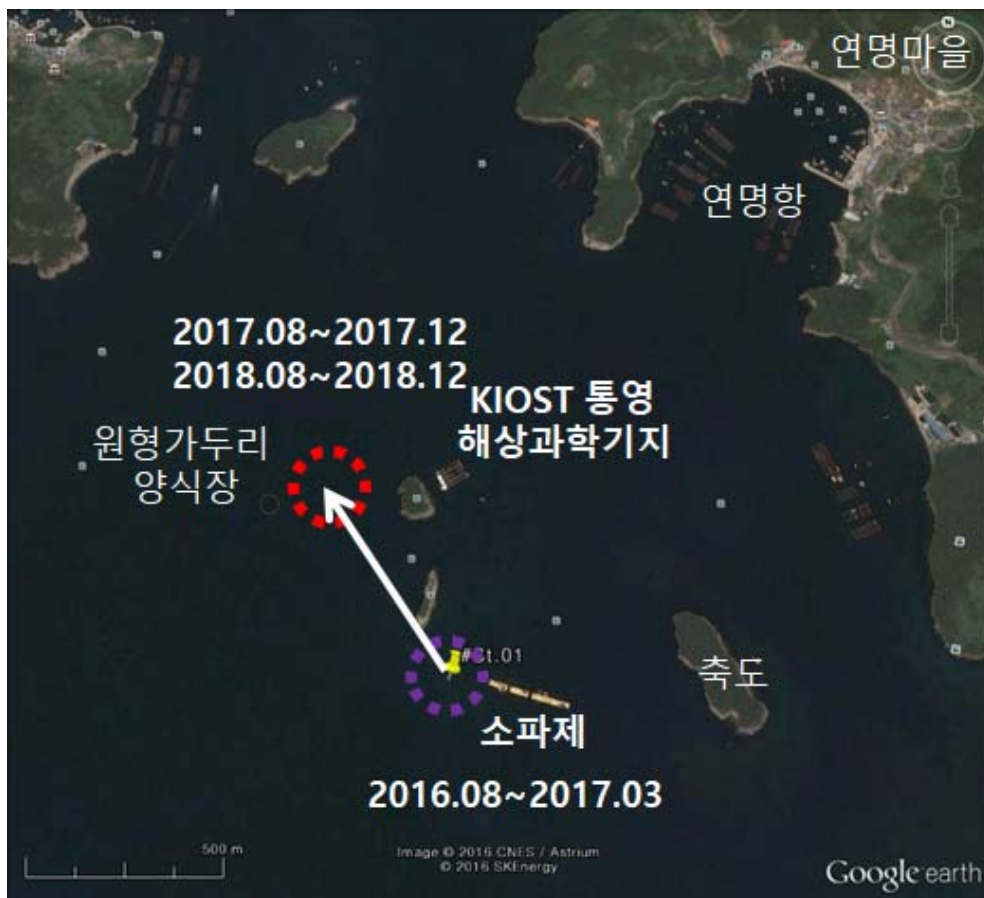


그림 3.1.18 수층 프로파일러 관측해역

- 관측 장비 계류도

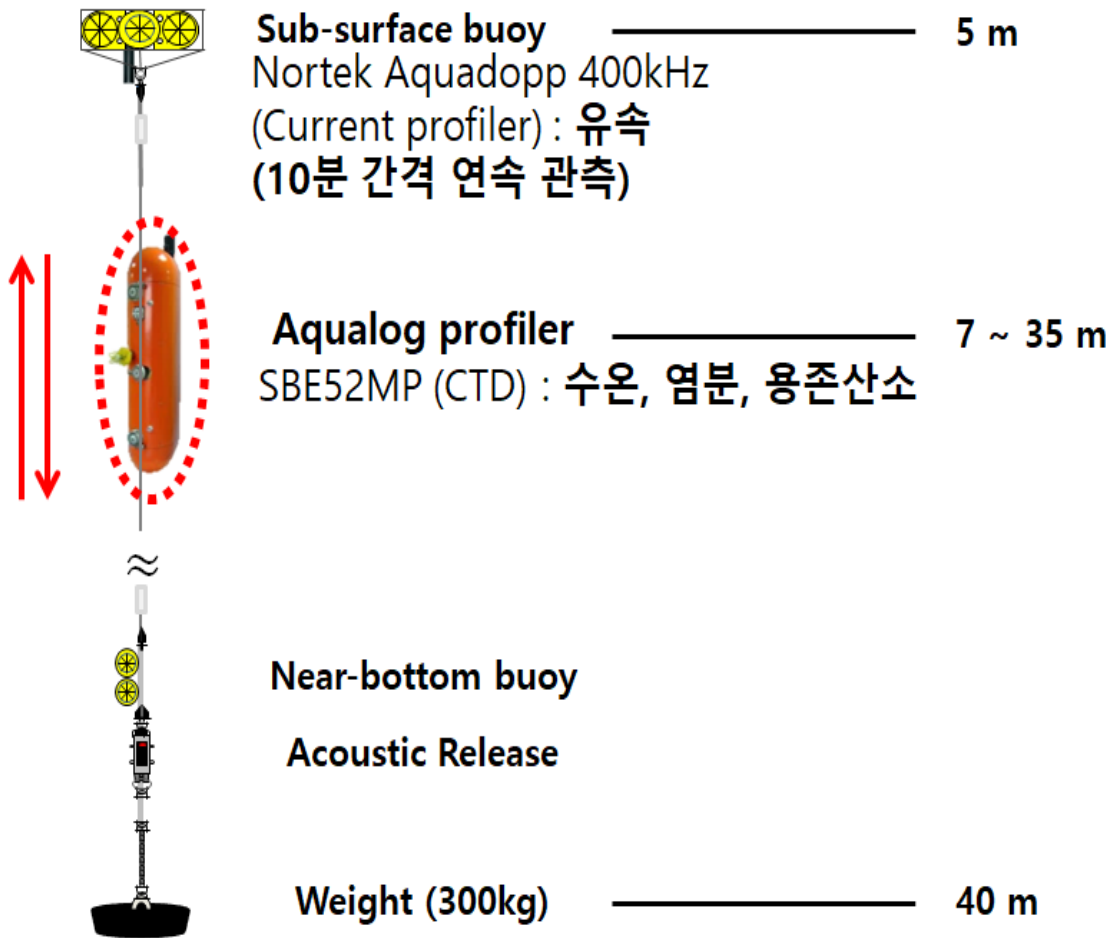


그림 3.1.19 프로파일러 계류모식도

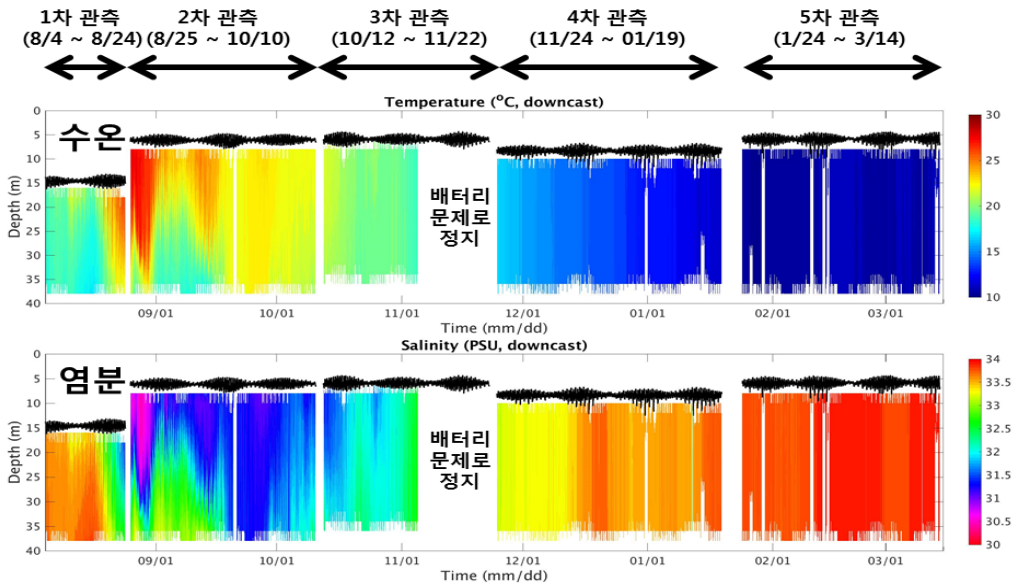


그림 3.1.20 2016년 수온과 염분 관측 결과

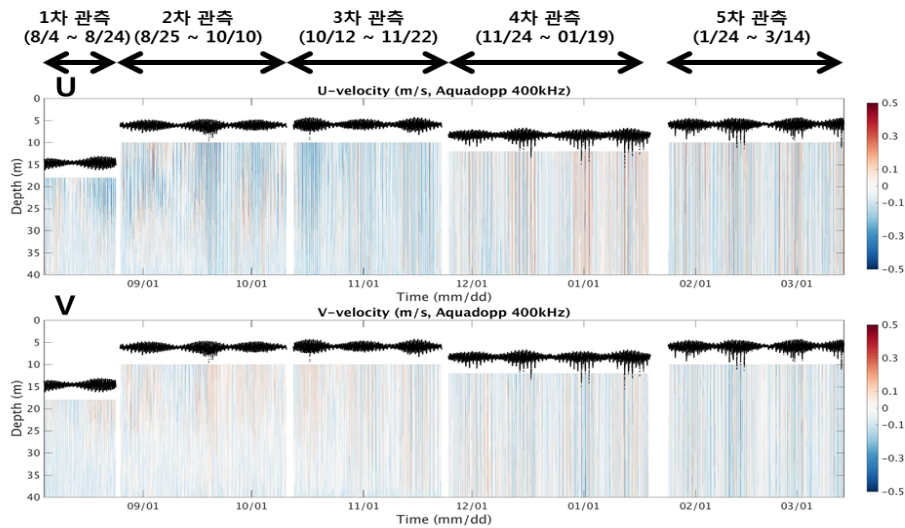


그림 3.1.21 2016년도 유속 관측 결과

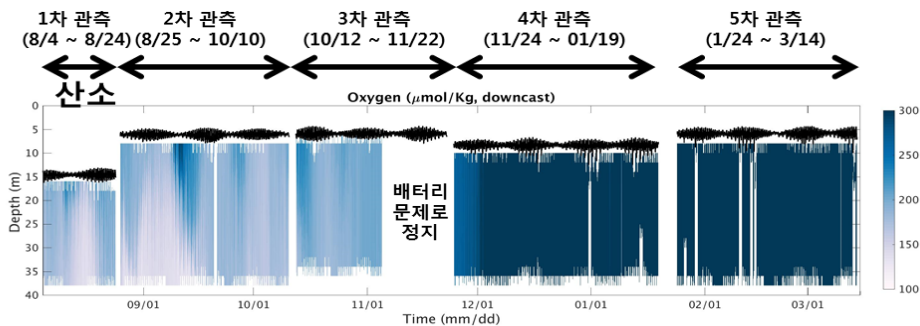


그림 3.1.22 2016년도 용존산소 관측결과

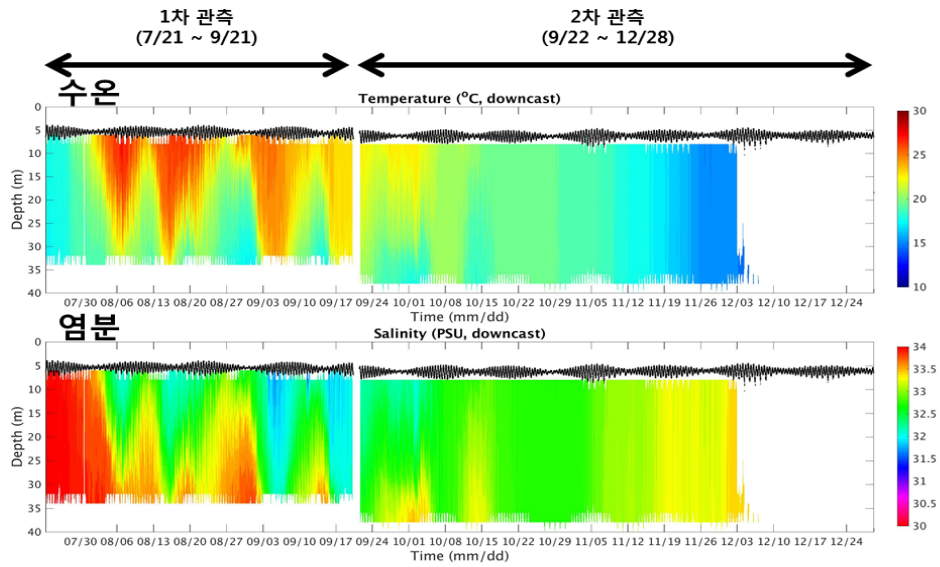


그림 3.1.23 2017년도 수온 염분 관측 결과

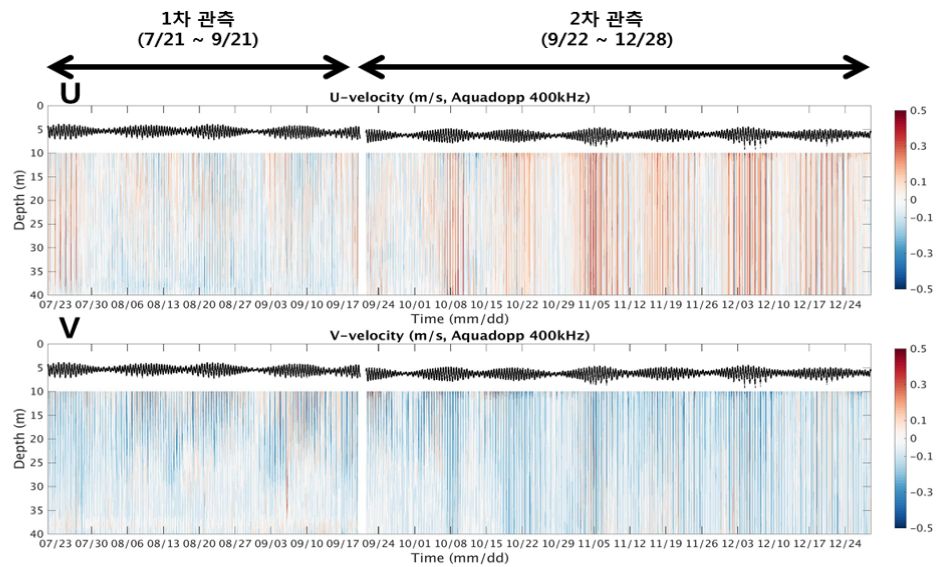


그림 3.1.24 2017년도 유속 관측결과

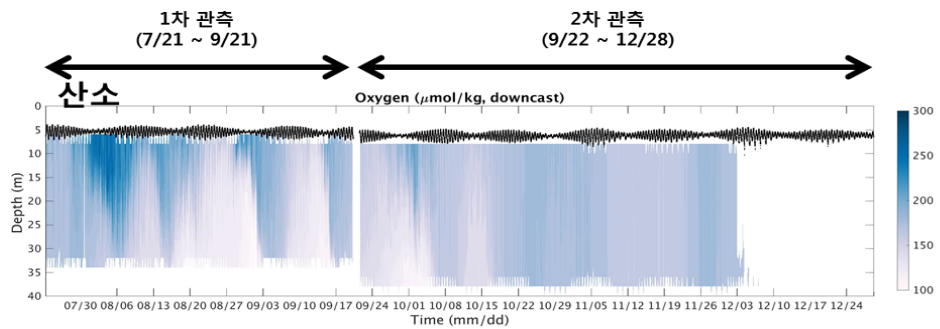


그림 3.1.25 2017년도 용존산소 관측결과

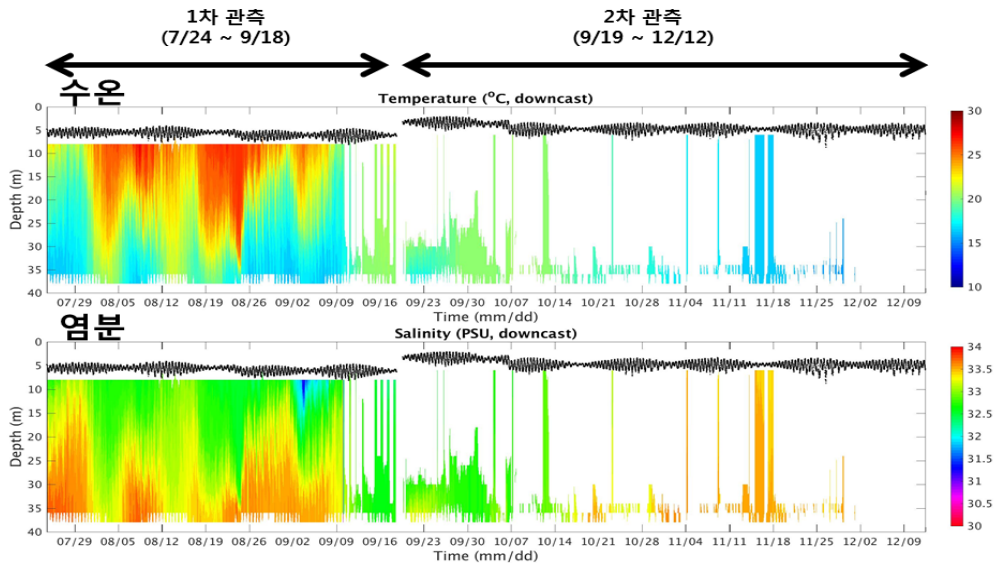


그림 3.1.26 2018년도 수온 염분 관측 결과

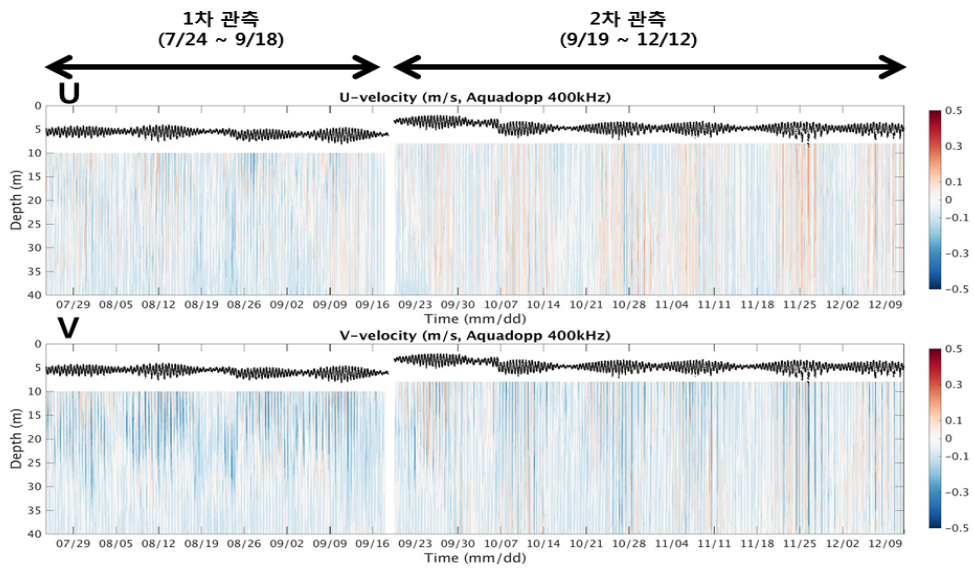


그림 3.1.27 2018년도 유속 관측결과

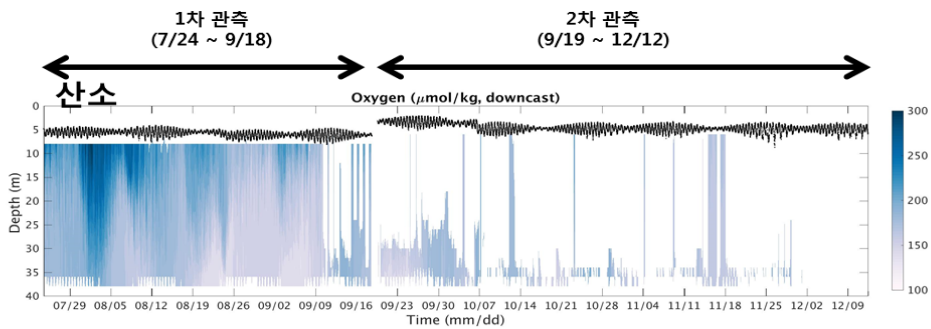


그림 3.1.28 2018년도 용존산소 관측결과

수중 바닥에서 대기하는 Aqualog 수층 프로파일러는 광투과율이 떨어지는 바닥에서 긴 대기 시간을 보내므로 센서의 생물오손을 줄일 수 있는 장점이 있으나 장비의 안전 등을 이유로 상층 5~10 m 가량은 관측하지 못하는 단점이 있다. 현재 개발되어 판매되고 있는 프로파일러들 중에는 Aqualog 프로파일러처럼 대기를 수중 바닥에서 하지만 수층관측을 진행하면서 해표면까지 상승해 관측한 자료를 데이터 통신으로 전송하고 다시 수중 바닥으로 내려가 대기하는 형태도 있다. 그러나 선박의 항행이 빈번한 해역에서는 이러한 형식의 운영은 안전사고로 이어질 위험이 있다. 양식장 해역은 양식물이나 해양환경 관리 차원에서 표층 관측자료가 매우 중요하다. 따라서 표층자료를 포함한 수층 프로파일 자료를 획득할 수 있는 프로파일러 개발을 진행하였다.

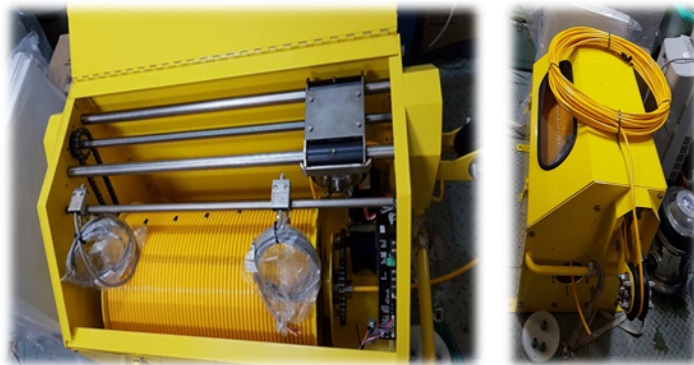


그림 3.1.29 양식장 해역 관측을 위한 수층 프로파일러용 원치



그림 3.1.30 양식장 해역 관측을 위한 수층 프로파일러 설치 부이

전기가 공급되는 양식장 구조물에서 활용할 수 있는 시스템으로 고전적인 CTD 운영을 자동으로 할 수 있는 시스템으로 고안하였다. 정해진 시간 간격으로 최대 50 m 수심까지 자동 운전하는 윈치를 제작하여 수층 프로파일러 운영에 활용할 수 있도록 하였으며, 윈치를 통한 관측기기 전원 공급과 CDMA 모뎀을 이용한 실시간 자료전송 기술을 적용하였다(그림 3.1.29). 자동 윈치가 운영될 수 있도록 양식장 가두리 제작용 파이프를 활용해 부이를 설계·제작하였다(그림 3.1.30).

완성된 자동 윈치는 현장 설치 시험을 통해 취약점을 보완·개선해 2018년 7월 31일부터 시험운행을 수행하였다(그림 3.1.31). 매시 정각 자동 운전으로 표층부터 수심 27 m까지 왕복 관측으로 수심에 따른 수온과 염분, 용존산소, 엽록소, 질산염을 측정하였으며(그림 3.1.32), 관측 중 CDMA 모뎀을 이용해 실시간으로 자료를 전송하였다.

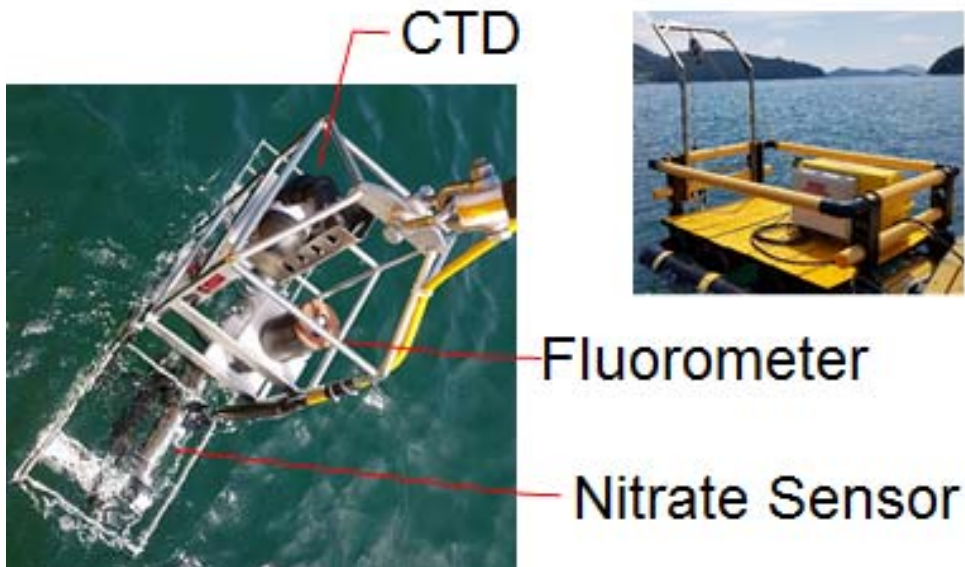


그림 3.1.31 수층 프로파일러에 장착된 센서와 설치 운용된 윈치

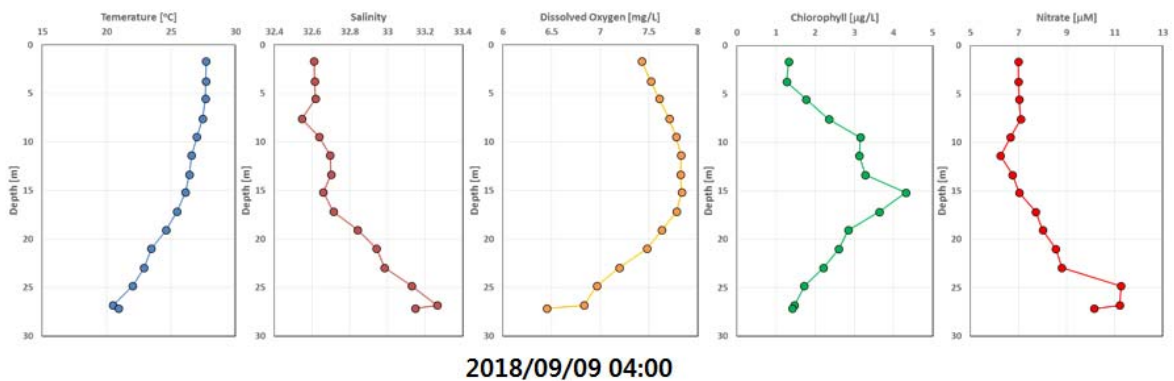


그림 3.1.32 수층 프로파일러에서 관측된 각 항목의 수직 분포 예

제2절 생태계 모니터링 기술 개발

1. 식물플랑크톤 생물량 측정 기술 확보

가. 서론

식물플랑크톤은 해양생태계 내에서 주요 일차생산자이다. 이들은 환경요인의 변동에 민감하며, 더욱이 이들 생물량의 증감에 따라 수괴의 특성이 변경될 수 있다. 따라서 양식장에서 양식생물을 보호하고 지속적이고 안정적인 생산을 위해서는 해양환경 및 식물플랑크톤을 대상으로 한 모니터링이 중요하다. 엽록소 a는 광합성을 수행하는 모든 일차생산자가 가지고 있으며, 세포내 엽록소 비율을 기초로 탄소함량을 추정할 수 있기 때문에 일차생산자의 생물량을 대변하는 지표로 이용되어 왔다. 엽록소 a를 정량화하기 위해 상대적으로 저렴하고 빠른 비침습적 방법이 널리 사용되어 왔다(Lorenzen, 1966; Lorenzen과 Jeffrey, 1980; Falkowski와 Kolber, 1995). 식물플랑크톤 세포 내 엽록소 색소는 형광물질로 빛 에너지의 2%를 다시 방사한다. 따라서 활성 형광은 460 nm의 파장을 전달하고 620~715nm 범위에서 방출된 형광을 측정하는 fluorometer를 이용하여 측정 할 수 있다. 측정된 수율이 식물플랑크톤 농도에 비례하기 때문에 이를 통해 생물량을 정량할 수 있다. 모니터링을 위해서는 신속한 탐지와 정량화 기법이 필요하다. 수중 형광센서를 이용한 측정법은 운용이 쉽고 빠르며 대량의 데이터를 수집할 수 있다. 더불어 특별한 시료 처리 과정이 필요하지 않기 때문에 실시간 데이터 수집에 이상적이다. 이렇듯 수중 형광 측정 기법은 대량의 데이터를 지속적으로 얻을 수 있는 가장 적합한 방법이지만 측정 결과는 광량을 포함한 몇 가지 요인에 의해 영향을 받는다(Behrenfeld and Boss, 2006). 따라서 본 연구에서는 수중 형광 센서를 활용하여 식물플랑크톤 생물량을 측정하고 환경요인에 따른 영향을 보정할 수 있는 기법을 개발하고자 하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 현장조사

2017년부터 2018년까지 2년간 통영해양과학기술지에 방문하여 채류조사를 실시하였다. 2017년과 2018년에 각각 1회와 4회 조사를 수행하였으며, 각 회별로 현장 조사는 2~3일 동안 수행되었다.

(2) 형광센서를 이용한 엽록소 a 형광 측정

조사 현장에서 CTD 19 plus (Seabird)를 수심 1~2 m에 계류하였으며, CTD에 장착된 FLRT 센서(WET Labs)를 이용하여 현장광 상태에서 수중 형광값 연속관측을 실시하였다. 더불어 현장광에 의한 영향을 배제하기 위해 격막펌프(Tapflo, T100)를 이용하여 현장 해수를 연구실로 펌핑하여 압조건에서 Turner fluorometer (Turner designs, 10-AU)를 이용하여 *in-vivo* 형광량을 측정하였다. 이 때 격막 펌프의 flow rate는 약 9 ℓ/min이 되게 조절하였으며, 펌프의 직경은 16 mm 호스를 이용하였다. 더불어 격막펌핑에 의한 생물량 감소의 가능성을 평가하기 위해 Turner fluorometer에서 측정되고 나오는 해수를 여과한 후 아세톤 추출하여 엽록소 a 농도를 측정하였다.



Tapflo T100 diaphragm pump

Technical info	Unit	Value
Max capacity	l/min (US gpm)	125 (33)
Volume per stroke	ml (cu in)	280 (17.1)
Max discharge pressure	bar (psi)	8 (116)
Max suction lift dry	m (Ft)	4 (13)
Max size of solids	mm (in)	6 (0.24)
Max temp in PE	°C (°F)	70 (158)
Max temp in PTFE	°C (°F)	100 (212)
Standard pump T in PE	kg (lb)	10 (22)
Standard pump T in PTFE	kg (lb)	17 (38)

PERFORMANCE CURVE

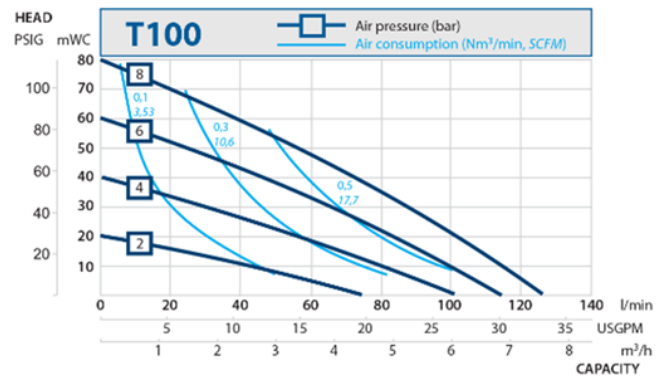


그림 3.2.1 시험에 사용된 격막펌프의 사양

(3) 엽록소 a 농도 측정

식물플랑크톤의 엽록소 a 측정을 위해 현장에서 채수한 해수 0.5 ℓ를 직경 25 mm의 GF/F 여과지로 거른 후 여과지를 분석 때까지 냉동보관 하였다. 여과지는 실험실로 옮긴 후 20 ml 유리 vial에 담고, 95% 아세톤 10 ml을 넣어 냉장 상태를 유지해주며 24시간 동안 색소를 추

출하였다. 추출한 시료는 0.2 μm syringe filter를 이용하여 입자를 제거한 뒤 Turner fluorometer (Turner designs, 10-AU)를 이용하여 Parsons et al. (1984)의 형광법으로 정량적인 엽록소 a 값을 구하였다. 더불어 식물플랑크톤에 대한 펌프의 영향을 검토하기 위해 Turner fluorometer 이용한 in-vivo 측정 후 나오는 해수 0.5 ℓ 를 취하여 동일한 방법으로 측정하였으며, 일반 해수를 통해 획득한 결과와 비교하였다.



그림 3.2.2 식물플랑크톤 생물량 추정에 사용된 장비

다. 결과

(1) 형광센서를 이용한 엽록소 a의 연속 모니터링

식물플랑크톤 생체량을 모니터링하기 위한 기법을 검토하기 위해 FLRT 센서와 Turner 10-AU fluorometer로 측정된 값의 비교하였다. 두 기법으로 획득한 엽록소 형광의 변동 양상은 유사한 것으로 나타났으나 in-situ 형광 센서(FLRT)의 경우 낮 시간 동안 형광 값이 낮게 나타났다(그림 3.2.3). in-situ 측정의 경우에는 PAR값의 증가에 따라 강한 자연광에 의한 형광 quenching 현상이 발생하여 생체량이 과소평가되는 것으로 판단된다.

높은 조도의 이러한 영향은 엽록소에 대한 형광을 정확하게 보정하기 위해 제거하거나 고려해야 하며 특히 표층에서 엽록소가 과소 추정되지 않도록 해야 한다. 따라서 이러한 quenching 현상에 의한 영향을 배제하기 위해 형광 값을 보정하는 방법과 측정 시료를 암적응시키는 방법을 모두 검토하였다. 우선 형광 값의 보정을 위해 현장광의 영향을 고려한 새로운 계산식은 아래와 같으며, F_0 는 형광 센서로부터 획득한 초기 형광 값, E_Z 는 측정 수심에서의 PAR를 의미한다.

$$F = F_0 \times (\log_{10} E_Z / 7.6 + 1)$$

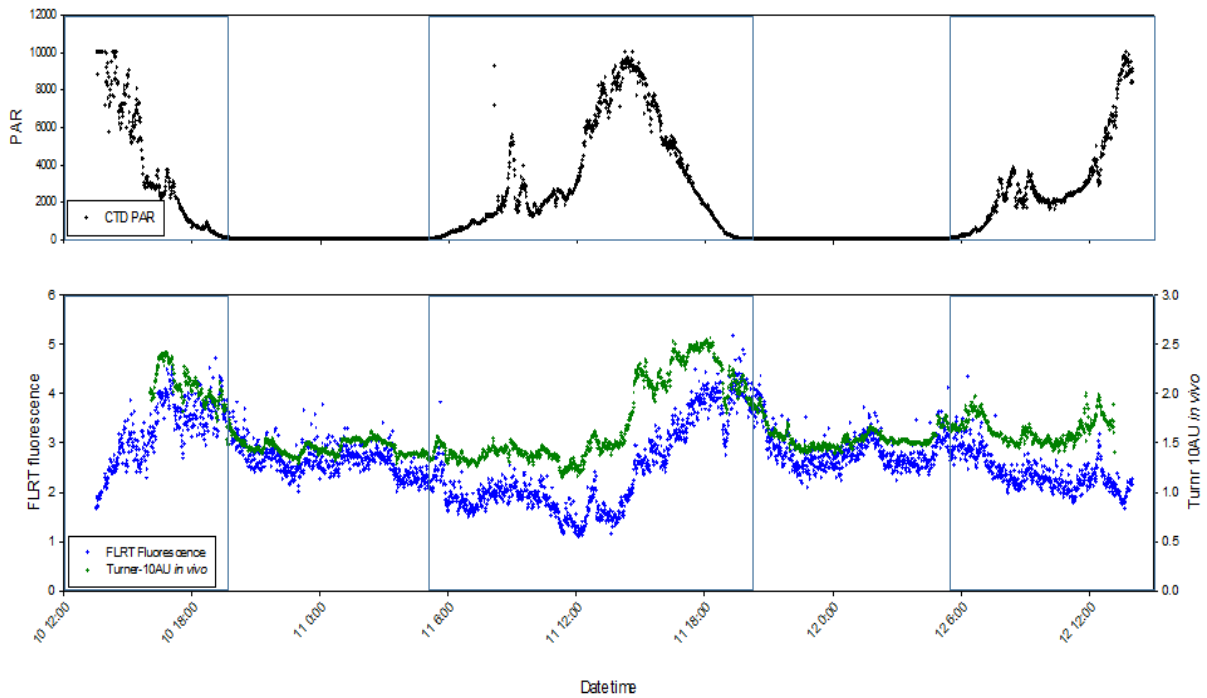


그림 3.2.3 현장의 CTD에 부착된 형광 센서(FRLT)를 이용하여 측정된 *in-situ* 형광량과 펌핑 후에 암소에서 10AU 형광기를 이용하여 측정된 *in-vivo*형광량 자료의 비교. 맨위의 그래프는 형광이 측정된 수심에서의 광량을 나타냄

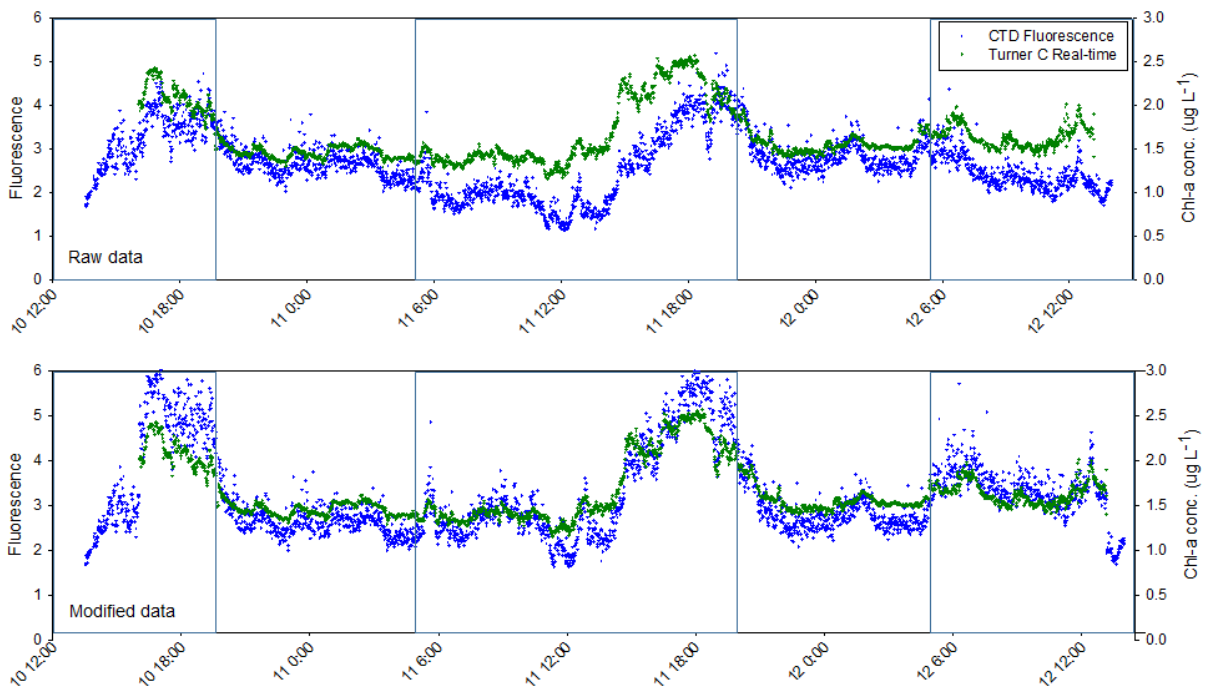


그림 3.2.4 광세기-보정 전 후에 *in-situ* FRLT센서의 형광량과 *in-vivo* 형광량의 비교

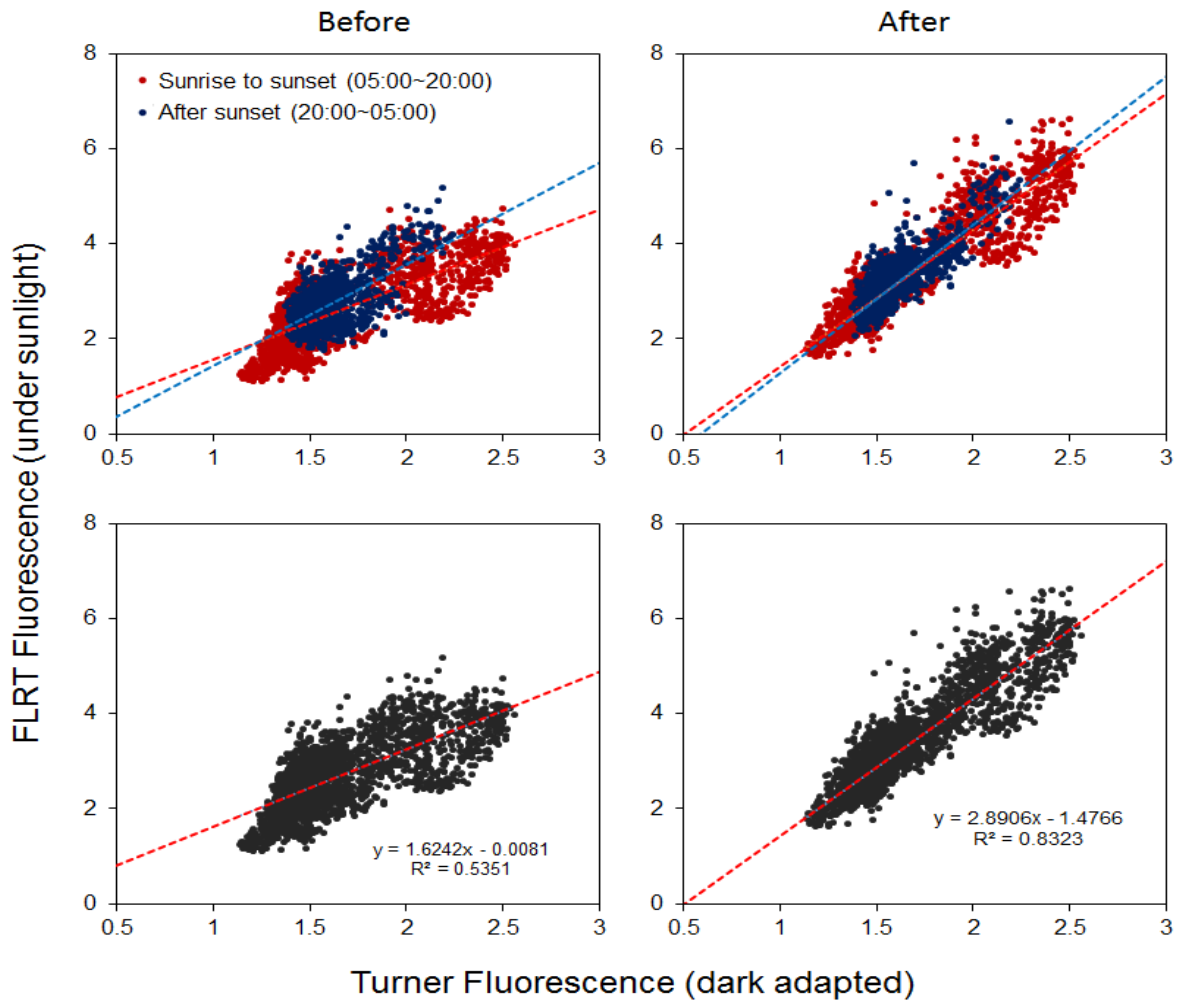


그림 3.2.5 광세기 보정 전후에 *in-situ* 형광량과 *in-vivo* 형광량의 선형회귀 계수의 변화를 보여주는 그림

개발된 보정식을 이용하여 *in-situ* 기법으로 측정된 형광 값을 보정하였으며, 형광 값의 보정 전후의 결과를 그림 3.2.4와 그림 3.2.5에 나타내었다. 붉은 색으로 표시된 *in-situ* 측정값은 일출 후 일몰까지의 측정값은 보정을 통해 두 측정치의 변동 양상이 잘 일치되는 것을 확인할 수 있다.

(2) 격막 펌프 통과 전후의 엽록소 a 농도 변화

대기광에 의한 식물플랑크톤 형광 값의 quenching 현상을 배제하기 위한 방법으로 측정 시료를 암적응시키는 방법을 검토하였다. 해수 시료를 센서 측정 부위로 끌어들이기 위해서는 해수를 pumping이 필연적으로 요구된다. 따라서 본 조사에서는 암적응 실험을 위해 격막펌프

를 사용하였으며, 사용된 격막펌프의 식물플랑크톤에 대한 영향을 파악하기 위해서 격막펌프 통과 전후의 결과를 비교하였다(그림 3.2.6). 2018년 3월과 8월 2회에 걸쳐 수행된 조사에서 얻은 결과를 보면, 3월 조사 결과에서 펌핑에 의한 엽록소 a 감소가 8월에 비해 상대적으로 영향이 큰 것으로 나타났으나, 대체로 1:1 선상의 위아래에 균등하게 분포하며 선형적 관계를 나타내어 격막 펌프의 영향은 크지 않다는 결론을 얻었다.

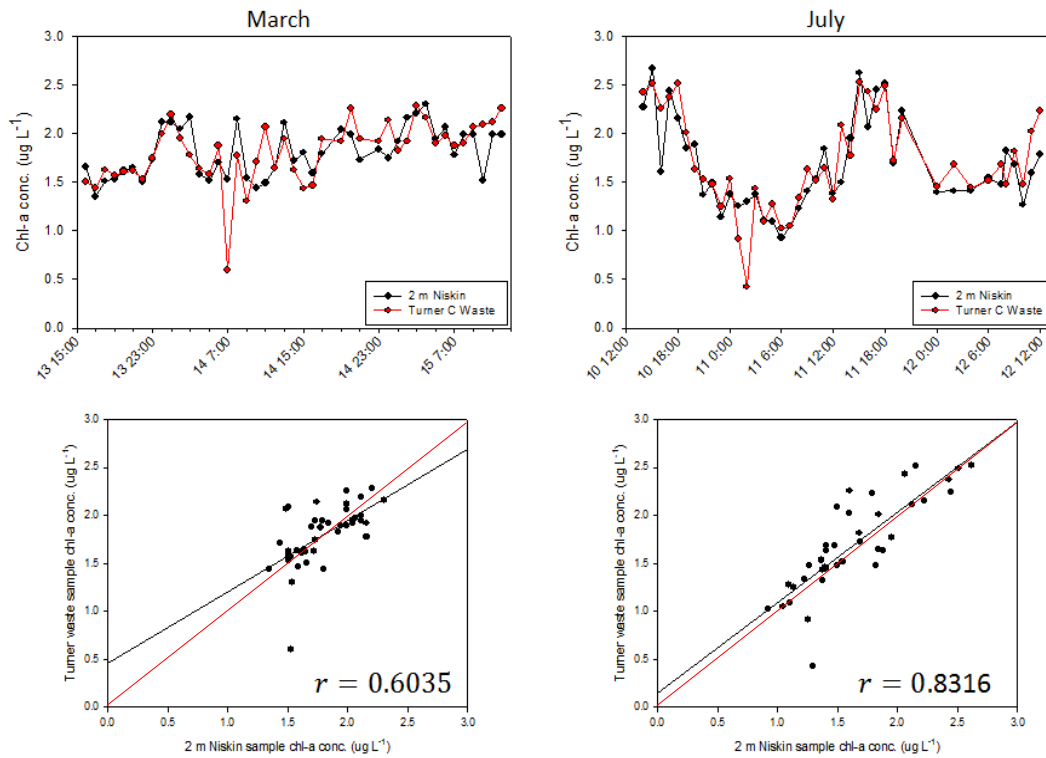


그림 3.2.6 격막펌프 통과 전후의 엽록소 a 변화를 나타낸 그림. 붉은 실선은 1:1 라인을 의미함

조사 기간 동안 30분~1시간 간격으로 채수 후 아세톤 추출 방법을 이용하여 측정된 엽록소 a와 Turner-10AU를 이용하여 *in-vivo*로 측정된 엽록소 형광값을 비교하였다(그림 3.2.7). 3월에 비하여 7월에 엽록소 a 농도의 일변화가 뚜렷하게 나타났고, 엽록소 a 농도는 주간에는 높아지고 야간에 낮아지는 양상을 보였으며, *in-vivo* 형광 값과 실제 추출하여 측정된 값 사이에 대체로 일치하는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 격막 펌프의 사용이 식물플랑크톤의 생물량, 생물활성 및 군집 변동에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 시사하며, Turner 10-AU fluorometer를 이용하여 *in-vivo* 형광을 측정하는 방법이 식물플랑크톤 생체량 모니터링에 적합하게 이용될 수 있음을 보였다.

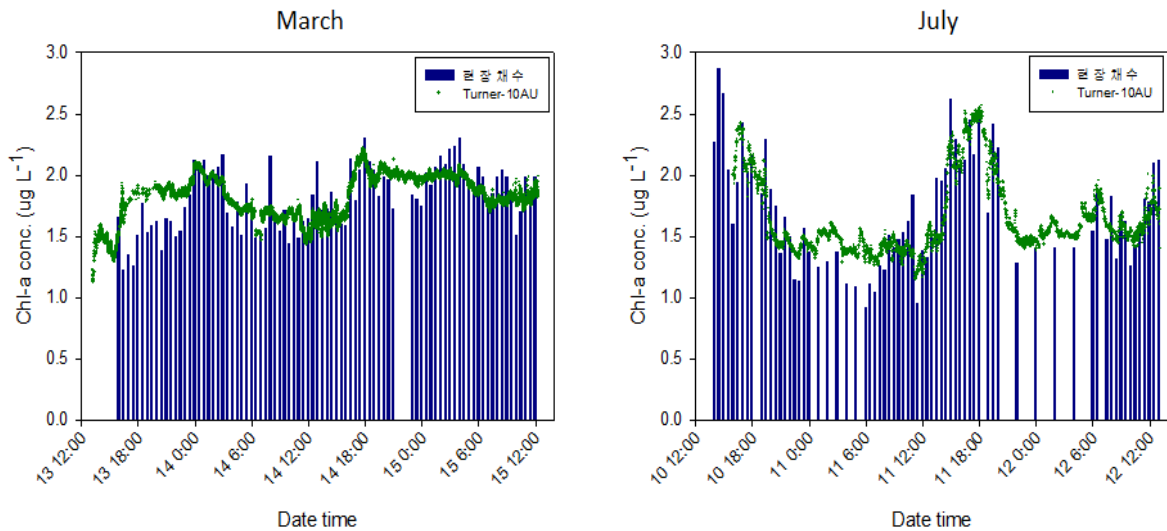


그림 3.2.7 Turner-10AU의 *in-vivo* 형광량으로 추정된 엽록소 a와 현장여과-추출 후 측정된 엽록소 a의 시계열 변동을 나타낸 그림

라. 토의

식물플랑크톤의 현존량은 수온, 염분, 광량, 광주기, 영양염류 등과 같은 이화학적 환경요인과 중간 경쟁, 상위 영양단계 생물에 의한 포식압 등 생물학적 요인들에 의해 조절된다(Mortazavi et al. 2000). 따라서 식물플랑크톤의 현존량 및 군집구조의 시공간적 분포를 밝히는 것은 해당 해역의 생산성 및 수산생물의 자원량을 가늠할 수 있는 중요한 척도가 될 수 있다.

식물플랑크톤 생체량의 측정 형광 quenching은 센서를 이용한 모니터링에서 정확성을 확보하는데 있어서 매우 중요하게 고려해야 할 사안이다. 실제 주간과 야간의 측정치의 차이에서 엽록소 a 농도의 변화와는 관련이 없다. 엽록소 당 형광에 영향을 미치는 단 하나의 가장 큰 요인은 광합성 유효 방사선(Photosynthetically Active Radiation, PAR)으로 측정되는 방사조도이다(Falkowski and Raven 1997). 높은 PAR 강도를 조절하기 위해 식물성 플랑크톤은 non-photochemical quenching 매커니즘을 사용한다. 이 프로세스는 빛 에너지 흡수량이 빛 이용 용량을 초과하는 환경에서 세포를 보호한다(Muller et al. 2001). 높은 광의 스트레스를 받는 기간 동안, 식물플랑크톤은 과잉 에너지를 형광이 아닌 열로 방출하여 광 시스템을 보호하는데. 이러한 광보호 상태에서 광합성은 억제되고 형광 수율은 감소한다(Muller et al. 2001; Milligan et al., 2012). 결과적으로 특정 임계값 이상 PAR의 증가는 양자 수율(quantum yield)이 감소하는 결과를 가져온다. 이러한 현상은 본 연구에서 나타난 바와 같이 PAR 값이 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 나타난다. Quenching을 보정하는 과정 없이 표층에서 형광을 측정하는 것은 식물플랑크톤 생체량을 추정하는데 있어 상당한 과소평가의 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 quenching을 보정하는 기법과 측정 전 시료를 암적응시키는 방

법을 검토하였다. 결과적으로 두 방법 모두 사용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 PAR 값을 고려한 계산식은 좋은 보정치를 보여주었다. 더불어 암적응을 통한 방법은 식물플랑크톤에 대한 펌핑의 영향은 미미하였으며, 암적응을 통한 quenching의 배제 또한 잘 이루어져 현장 측정치와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 다만 본 연구의 대상이 양식장임을 감안할 때 호스와 펌프, 측정 장비 등 상대적으로 복잡한 구조를 가지고 더욱이 상시적인 전기 공급이 필요한 암적응 방법에 비해 간편하게 설치가 가능한 수중 형광 센서 값을 보정하는 방법이 보다 적합한 것으로 판단된다.

2. 우점 식물플랑크톤 장기모니터링 기술 시험 운영

가. 서론

해양환경에서 주요 일차생산자들의 분포와 풍부함을 감시하는 것은 더 큰 생물학적, 물리적 과정을 이해하는 데 중요하다. 이들은 해양 생태계에 에너지를 전달하는 원천이다. 환경 조건이 이들의 성장을 허용하면, 그들은 활발하게 증식할 수 있으며, 이들의 집단적 영향은 주변 해역의 특성까지도 변경시킬 수 있다. 일차생산에는 광량, 식물플랑크톤 생체량, 탁도, 영양염 분포 등 다양한 요인들이 영향을 미친다. 이 중에서도 일차 생산에 직접적으로 관여하는 식물플랑크톤의 현존량 및 군집구조의 시공간적 분포를 밝히는 것은 매우 중요하며, 이는 해당 해역의 생산성 및 수산생물의 자원량을 파악할 수 있는 중요한 인자이다(임과 백 2017). 특히 온난해역에서 춘계와 추계의 식물플랑크톤의 대발생과 함께 하계에 국지적으로 빈번하게 발생하는 적조 현상으로 불리는 위해성 와편모조류의 대발생은 매년 막대한 경제적, 사회적 손실을 초래하고 있다. 반면 양식장으로부터 공급되는 많은 양의 영양염에 의해 양식장 주변 해역 영양염의 급격한 변화는 식물플랑크톤 군집에 영향을 미칠 수 있으며, 더욱이 유해한 적조 생물의 대발생을 야기할 수 있다(Wang et al. 2009). 따라서 식물플랑크톤 군집 모니터링은 양식생물의 보호와 위해 생물의 모니터링 측면에서도 필수적이라 할 수 있다. 그러나 수온, 염분, 영양염 등 이화학적 요인들과는 달리 식물플랑크톤 군집을 분석하는 것은 많은 노력이 요구되며, 특히 양식장이라는 제한적인 공간에서는 많은 제약이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 양식장 주변 해역에서 우점 식물플랑크톤의 원격 모니터링 기술 개발과 시험 운영을 통해 원격으로 식물플랑크톤 우점종 및 군집 구조를 분석할 수 있는 시스템을 개발하고자 하였으며, 이는 양식장에서의 안정적인 생산량 유지와 양식장 관리 및 양식생물 보호 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

나. 재료 및 방법

(1) 현장조사

양식장 주변의 식물플랑크톤 현존량 변동 양상을 분석하기 위해 통영해양과학기술지에서 2017년 7월초부터 약 한달 동안 연속시료채집기를 이용하여 저조와 고조시에 자동으로 시료를 획득하였으며, 획득한 시료는 분석시까지 루골 고정액을 이용하여 고정하여 보관하였다. 더불어 원격으로 제어 및 자료 처리의 수행 가능성을 적용 및 검토하기 위하여 2018년 11월 통영해양과학기술지에서 현장조사를 수행하였다.

(2) 식물플랑크톤 개체수

식물플랑크톤의 개체수는 FlowCAM (Fluid Imaging Technologies, Inc.)을 이용하여 분석하였다. 분석을 위해 획득한 시료를 망목이 100 μm 인 cell stainer를 이용하여 여과한 후 5 ml를 취하여 분석에 이용하였다.

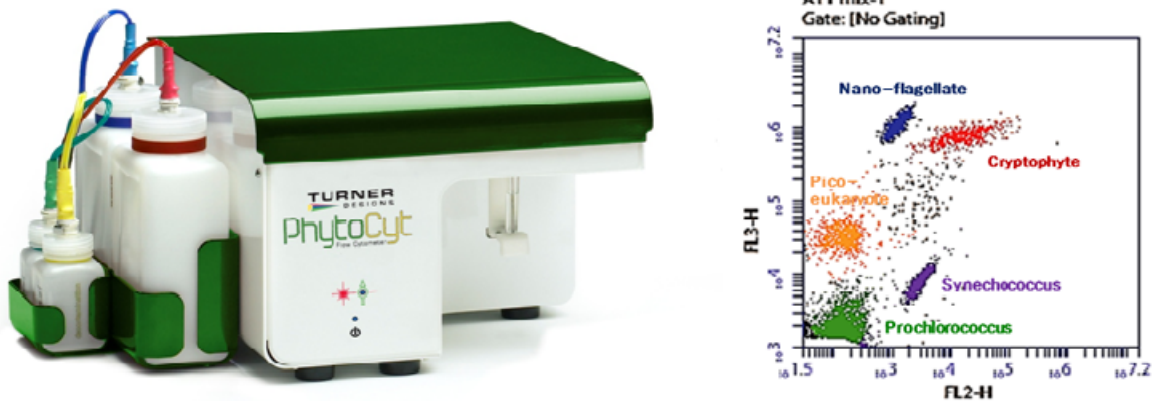


그림 3.2.8 Flowcytometer 분석 시에 크기와 색소의 차이로 구별되는 분류군의 위치를 나타낸 그림

초미소 플랑크톤의 개체수는 flow cytometry 방법을 이용하여 측정하였다(그림 3.2.8). Flow cytometer를 이용한 초미세플랑크톤 분석을 위해 증별 해수 3ml을 cryogenic tube에 넣고 10% paraformaldehyde 와 0.5% glutaraldehyde의 혼합액 0.3 ml 첨가한 후 냉동 보관하였다. 시료는 실험실로 옮겨 암소에서 녹인 후 산란과 형광을 표준화하기 위해 시료마다 내부표준물질 첨가하였다. 내부표준물질은 0.5 μm 직경의 yellow-green beads 그리고 1 μm 직경의 yellow-green beads를 혼합하여 사용하였다. Flow cytometer는 UV (225 mW)와 488 nm (1W)의 아르곤 이온

레이저가 장착된 BD Accuri C6 flow cytometer (BD Biosciences)를 이용하였다. *Synechococcus*와 picoeukaryotes와 같이 광합성을 하는 극미소 플랑크톤은 각분류군의 forward light scattering (FLS), 엽록소에 의한 적색형광, phycoerythrine에 의한 오렌지색 형광 특성 등 flow cytometer 상에서 이용되는 특징들을 이용 분리 계수 하였다(Olson et al., 1900a, 1900b). 미소 플랑크톤의 개체수는 현장에서 FlowCAM을 이용하여 분석하였으며, 식물플랑크톤 개체수는 단위부피당 세포수로 계산하였다.

(3) FlowCAM 원격 운용 시험

FlowCAM 원격 운용 시스템은 격막펌프, FlowCAM, 사전 여과 수조 및 밸브가 포함된 연계 장치로 구성되어 있다. 통영해상과학기지에서 현장조사 시 해수를 끌어드리기 위해 사용된 격막펌프는 식물플랑크톤 생체량 실험에서 사용된 펌프와 동일한 Tapflo T100 (Tapflo)이었으며, 상세 스펙은 그림 3.2.9에 나타내었다. 격막펌프와 FlowCAM을 제외한 연계 장치(멀티채널 밸브 및 제어 소프트웨어, 사전 여과 수조, 연결 라인)는 강동진 박사 연구팀의 협조를 통해 제작되었다.

다. 결과

(1) 식물플랑크톤의 개체수

2017년 7월초부터 약 한달 동안 연속시료채집기를 이용하여 저조와 고조시에 획득한 시료를 분석한 결과, 식물플랑크톤 개체수는 299~8,361 cells ml⁻¹의 범위를 보여 40배 이상의 큰 변이를 보였다(그림 3.2.9).

2017년 7월 조사에서 7~9일 사이에 높은 개체수를 보였으며, 24일~25일에 다시 일시적으로 증가하였다. 식물플랑크톤 개체수는 고조와 저조에서 각각 평균 3,201±2,885 cells ml⁻¹와 2,621±1,977 cells ml⁻¹로 나타나 고조시에 전반적으로 높은 개체수를 보이는 것으로 나타났다. 약 한달 동안 조사에서 주요 우점종은 규조류인 *Chaetoceros* spp.로 나타났으며, 16일 이후부터 *Nitzschia* spp.와 *Pseudo-nitzschia* spp.의 출현이 증가하였다. 25일에는 적조 생물종인 *Prorocentrum* spp.의 출현을 확인할 수 있었다. 우점종 및 주요 출현종은 조석에 관계없이 유사한 양상을 보였다.

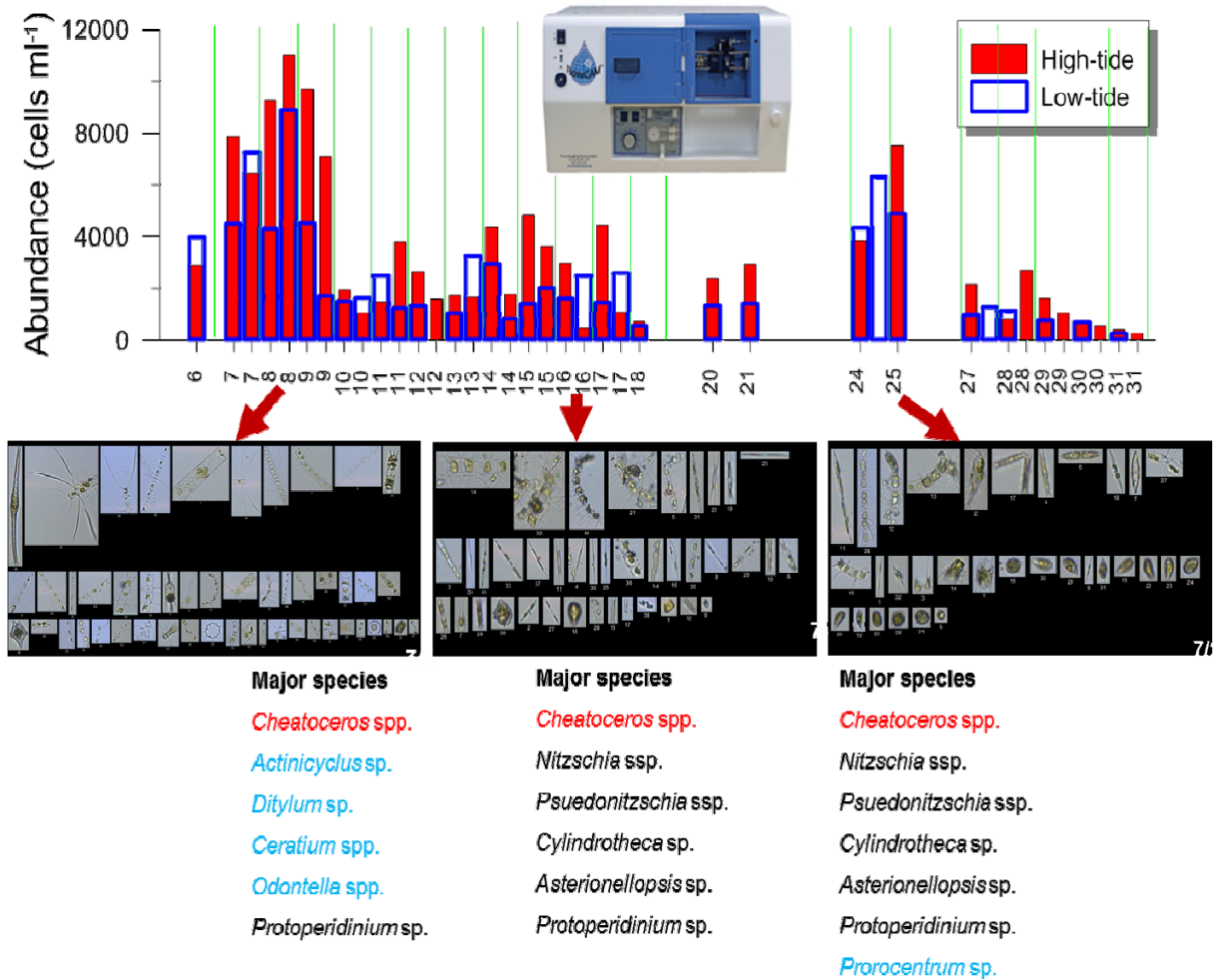


그림 3.2.9 2017년 7월에 FlowCAM 장비를 이용하여 고조와 저조에 측정된 식물플랑크톤 개체수의 변화와 우점하는 식물플랑크톤 이미지

(2) 초미소 식물플랑크톤 개체수

식물플랑크톤 분석과 동 기간 동안 flow cytometer를 이용하여 대표적인 초미소 남세균인 *Synechococcus*와 초미소 진핵식물플랑크톤(photosynthetic pico- eukaryotes), 그리고 광합성미소편모류(autotrophic nano-flagellates)의 개체수를 모니터링 하였다(그림 3.2.10).

초미소 진핵식물플랑크톤과 광합성미소편모류의 개체수는 각각 평균 10,070 ±5,025 cells ml⁻¹와 1,020±724 cells ml⁻¹로 나타났으며, micro 크기의 식물플랑크톤이 감소한 7월 중순에 약 2배 증가하였다. *Synechococcus*의 개체수는 평균 22,171±11,022 cells ml⁻¹로 나타났으며, 식물플랑크톤 및 초미소 진핵식물플랑크톤과 광합성미소편모류 모두 감소 양상을 보인 7월 말에 크게 증가하는 것으로 나타났다.

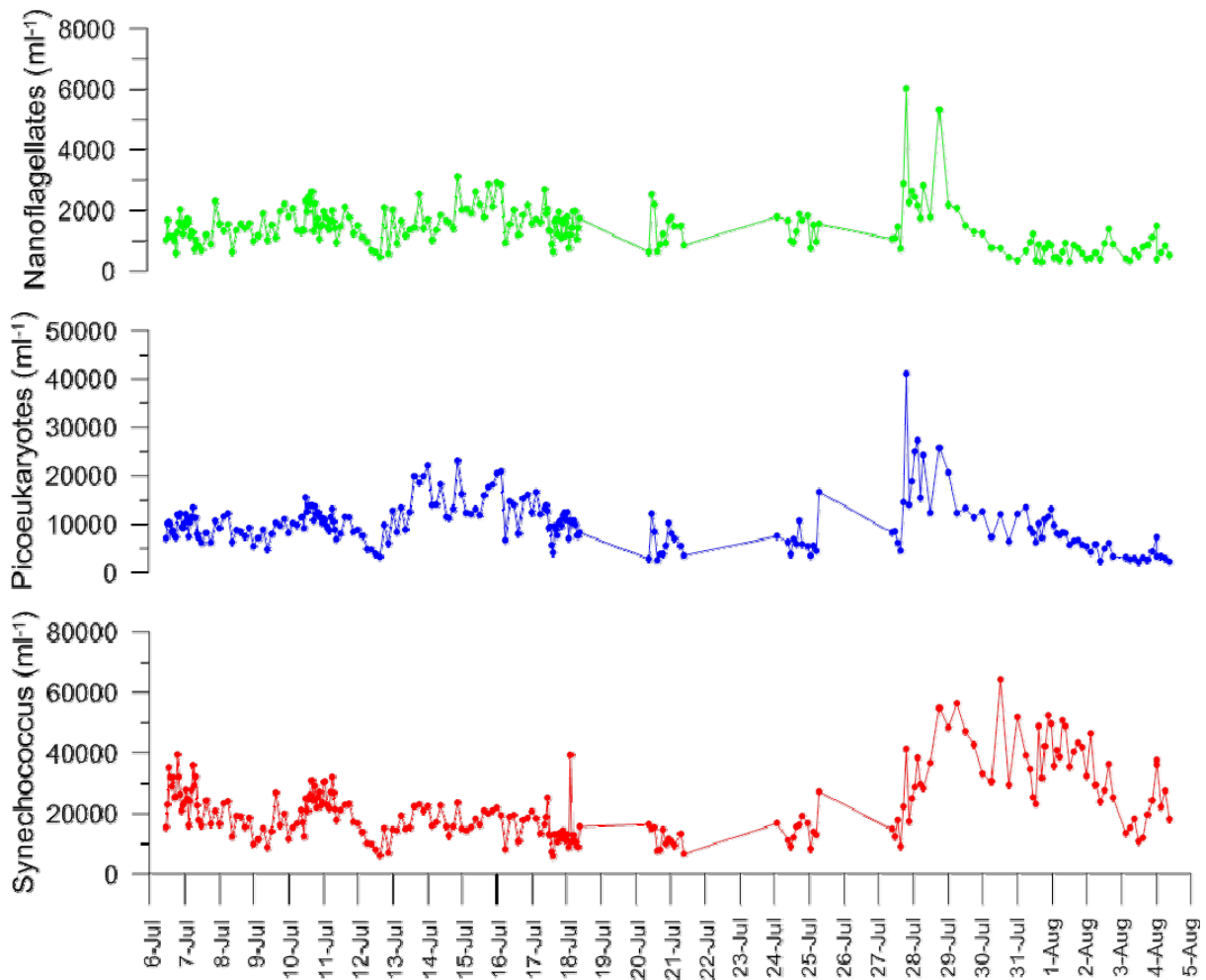


그림 3.2.10 2017년 7월에 flowcytometer를 이용하여 측정된 광합성미소편모류, 광합성초미소식물플랑크톤 및 *Synechococcus* 개체수의 변화

(3) FlowCAM과 자동채집기의 연계 장치 개발 및 운용

앞선 실험의 결과를 통해 식물플랑크톤의 개체수 및 우점종 파악이 가능했던 FlowCAM을 이용하여 원격으로 운용할 수 있는 연계 장치 개발을 실시하였다. FlowCAM의 원격 운용을 위해서는 시료의 투입과 측정 완료 후 라인 세척을 위한 증류수 및 산(acid)의 투입이 필요하였으며, 이를 토대로 연계 장치 개발을 위한 초기 설계를 구상하였다(그림 3.2.11).

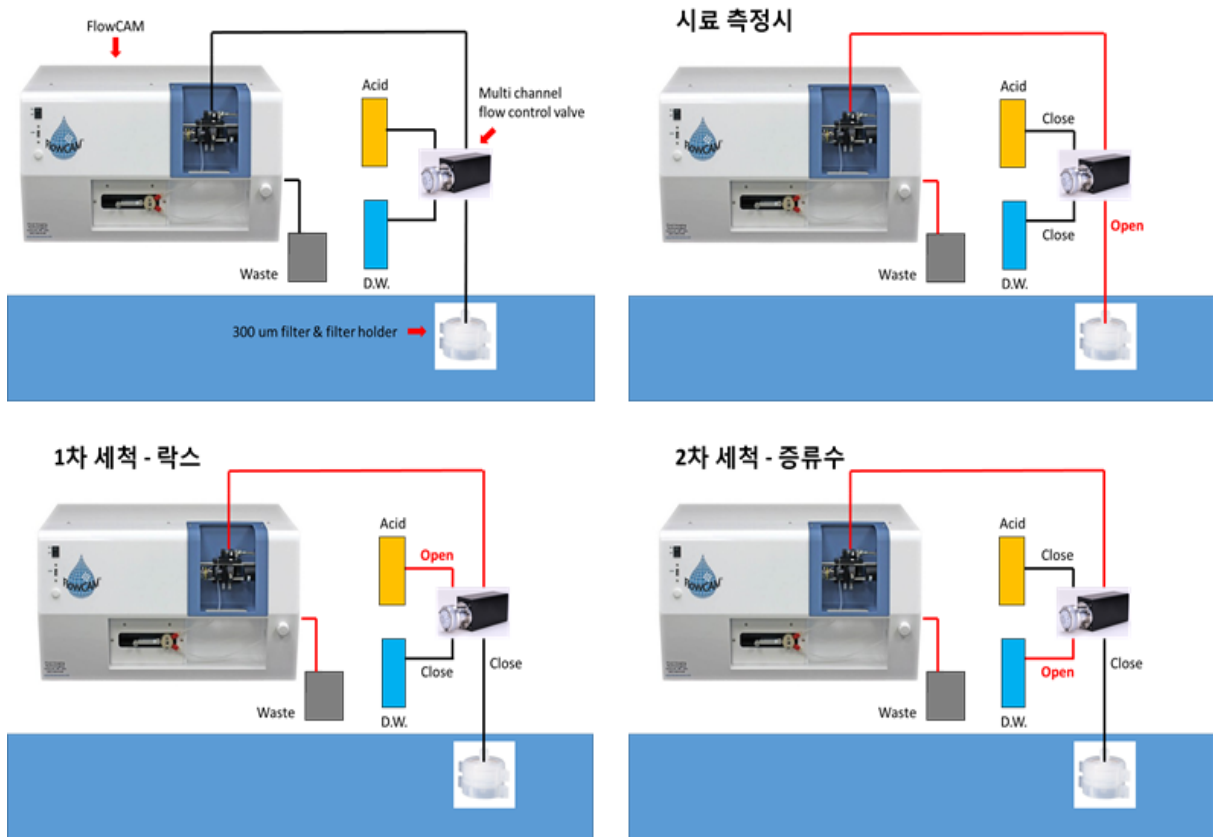


그림 3.2.11 FlowCAM 원격 작동의 개념도

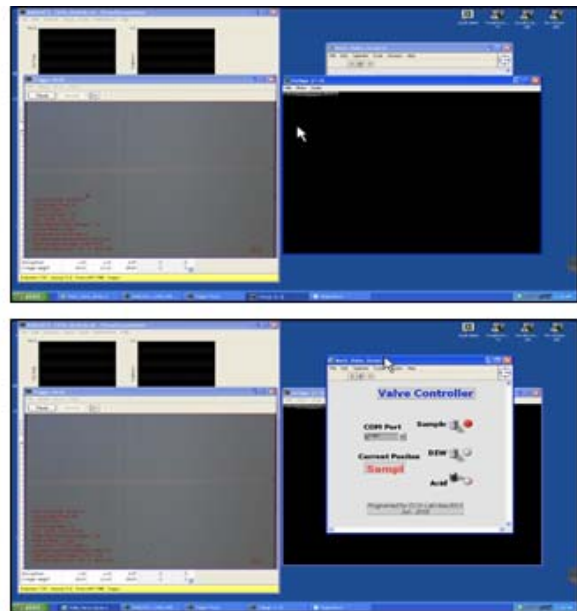
시료 및 세척액의 투입은 FlowCAM에 탑재되어 있는 syringe pump를 활용하였으며, FlowCAM의 경우 측정 cell의 너비가 정해져 있기 때문에 약 망목 80~100 μm 천을 이용한 사전 여과가 필요하며, 이를 위해 시료 채취를 위한 수조에 사전 여과 구조를 반영하였다. 또한 수조 내부 표면에 동테이프를 처리하여 bio-fouling에 의한 영향을 최소화 하고자 하였다. 초기 설계를 바탕으로 인터넷을 통해 원격 접속하여 조절이 가능한 장치를 강동진 박사 연구팀과의 협조를 통해 개발 및 제작하였고 여기에는 시료 및 세척액의 이동을 컨트롤하는 자동 멀티 밸브와 측정 시료의 획득을 위해 해수가 연속으로 통과하는 수조가 포함된다(그림 3.2.3.5). 개발된 시스템은 연구실에서 시험 운용을 실시하여 정상적 작동 여부와 관측을 위한 protocol을 마련하였으며, 1회의 현장 조사를 통해 원격 운용을 시험을 실시하였다(그림 3.2.12).



그림 3.2.12 실험실에서 원격작동중인 FlowCAM 사진



통영양식장 설치 환경
(실내): FlowCAM, Injector / (실외): 펌프 및 압축기



원격관측 위한 실제 구동화면 (스마트폰)

그림 3.2.13 2018년 11월 현장에서 설치된 FlowCAM을 원격조정을 통해 자료를 분석하고 있는 사진

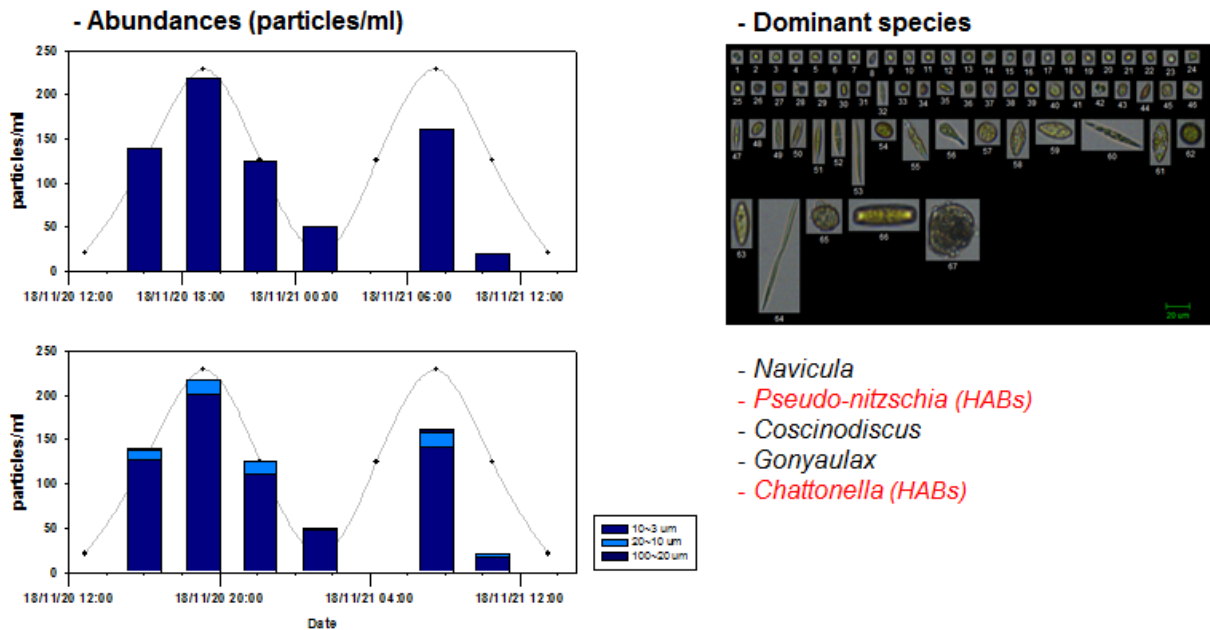


그림 3.2.14 2018년 11월 FlowCAM 원격조정을 통해 획득한 식물플랑크톤 현존량 및 식물플랑크톤 이미지. 검정색 실선은 조석 주기를 나타냄

2018년 11월 FlowCAM의 원격 운용 현장 시험을 위해 수행된 현장 조사를 통해 분석된 식물플랑크톤 개체수는 $20\sim 218 \text{ cells ml}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 주요 출현종은 규조류인 *Navicula* spp., *Coscinodiscus* spp.와 적조 유발종인 *Pseudo-nitzschia* spp., *Chattonella* spp. 등으로 나타났다(그림 3.2.14). 2017년 7월 조사와 동일하게 조석 주기에 따른 개체수의 차이를 보여 저조시에 낮은 개체수를 보였으나 출현종의 차이는 나타나지 않았다.

라. 토의

식물플랑크톤의 군집 변동은 그 해역의 환경에 따라 달라짐으로 그 해역의 특성을 나타내는 지시자로서 유용하게 이용될 수 있다. 또한 식물플랑크톤의 군집 조성을 모니터링 함으로써 이들을 포식하는 상위 영양단계 생물들의 먹이로서의 질을 가늠할 수 있을 뿐만 아니라, 유해종의 출현을 파악할 수 있다. FlowCAM은 자체적인 이미지 인식 알고리즘을 가지고 있어 다양한 식물플랑크톤을 식별하고 각각에 대한 개체수를 산출할 수 있다. 이를 통해 획득한 결과는 군집 구조 및 개체수 변동의 경향 분석, 유해 조류 발생 유무 등 양식장 주변 해역의 식물플랑크톤 모니터링에 사용될 수 있다. 결국 식물플랑크톤의 생체량과 더불어 군집 조성의 변동은 양식장 주변 환경 모니터링의 핵심 요소이나 현존량은 센서를 이용한 모니터링뿐만 아니라 생물량의 급격한 변동, 적조 발생 등의 이벤트 발생 시 원인 파악을 위해서는 FlowCAM과 같은 이미지 분석 시스템의 구축이 요구된다.

본 연구에서 FlowCAM을 이용하여 조사 지역의 주요 출현종을 확인할 수 있었다. 통영해상 과학기지 주변 해역에서는 *Chaetoceros* spp.가 연중 출현하며, 하계와 추계에는 주로 *Pseudo-nitzschia* spp.가 동계와 춘계에는 *Thalassiosira* spp. *Gymnodinium* spp. 등이 출현하는 것으로 보고되어 있어 본 연구 또한 기존 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다(임 등 2010). 더불어 조위에 따라 식물플랑크톤의 개체수가 증감하고 있음을 확인하였다. 조위의 변화는 수괴를 이동 및 혼합하고 표면 수렴을 생성하며, 수직 혼합을 야기하며, 이는 식물플랑크톤의 군집 구조와 생체량에 영향을 미칠 수 있다(Cloern et al. 1985). 결국 조석에 따라 조위가 올라가면 유광대 수심이 감소하고 저층에 분포하는 식물플랑크톤이 광합성을 위해 표면으로 이동하여 개체수가 증가한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 FlowCAM의 원격 운용을 위한 연개장치를 개발하고 운용 프로토콜을 작성하였으며, 현장 시험을 통해 성공적으로 운용할 수 있었다. 그러나 펌프 압력의 미세조정이 어려워 적절한 유량을 조절하는 것이 어렵고, 장기간 운용 시 bio-fouling에 대한 우려가 있는 등 몇 가지의 해결해야할 문제점을 확인할 수 있었다. 따라서 적절한 펌프의 용량과 bio-fouling에 대한 추가적인 고려가 필요한 것으로 판단된다.

3. 일차생산력 모니터링 기술 개선

가. 서론

모든 생명은 궁극적으로 광합성에 의해 햇빛에서 에너지를 포착하는 유기체인 일차생산자에 의존한다. 이들은 대기와 바다에서 흡수한 이산화탄소를 다양한 유기물질로 합성하며, 이는 상위영양 단계 생물로 전달된다(Duarte et al. 1999). 식물플랑크톤은 생물권에서 일차생산의 약 절반을 담당하는 것으로 알려져 있으며(Field et al. 1998), 해양에서 일차생산은 대부분 이들에 의해 이루어진다(Noriega-Curtis 1979). 일차생산을 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 궁극적으로는 광합성 강도를 측정함으로써 일차생산력을 추정하며, 이를 통해 수생생태계의 물질과 에너지의 변화를 파악할 수 있다(Regaudie-de-Gioux et al. 2014). 일차생산력은 해양 먹이사슬을 형성하는데 근본적인 역할을 하기 때문에 이것의 변화는 해양생물 다양성과 지속가능한 수산 관리의 보존에 중요한 영향을 미친다(Cury et al. 2008). 결국 생물학적 생산성에 대한 좋은 지표인 일차생산력을 모니터링 하는 것은 양식장의 생산 잠재력을 예측하고 어업 관리 정책을 수립하는 측면에서 매우 중요하다(Kumar et al. 2015). 따라서 본 연구에서는 양식장에서 일차생산 모니터링을 위한 기술을 개발하고자 하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 현장조사

본 연구를 위해 2017년 10월과 2018년 3월, 7월 통영해상과학기지에서 회당 2-3일간 채류조사를 수행하였으며, 일차생산력의 측정은 일출부터 일몰까지 1시간 간격으로 진행하였다.

(2) FRRf (Fast Repetition Rate fluorometry)를 이용한 일차생산력 추정

FRRf를 이용한 일차생산력 추정을 위해 본 연구에서는 FRRf를 통영해상과학기지에 계류하여 24시간 관측하였다. 2017년 10월 조사에서는 표층에 계류하였으며, 2018년 3월에는 수심 2 m에 계류하였다. FRRf로부터 얻은 자료로부터 일차생산력의 추정은 Kolber and Falkowski (1993)의 방법을 사용하였으며, 추정에 사용된 식은 아래와 같다.

$$P_{FRRf} = E \times q_p \times n_{PSII} \times \sigma_{PSII} \times [chl\ a] \times \phi_c \times 29.16 \times 10^{-2}$$

E = Irradiance [$\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

q_p = Photochemical quenching $[(F'_{m(ST)} - F)/(F'_{m(MT)} - F'_0)]$

n_{PSII} = Number of PSII units per mole of Chl [PSII units (mg chl a) $^{-1}$]

σ_{PSII} = functional cross section of PSII [$\text{m}^2\text{ PSII}^{-1}$]

c = Quantum efficiency of C-fixation [mol C (mol photon) $^{-1}$]

(3) 방사선 동위원소법을 이용한 일차생산력 추정

본 조사에서 일차생산력 추정을 위해 요구되는 동화계수는 Marcel et al. (1994)의 radial photosynthetron 방법을 채용하여 구하였다. FRRf가 설치된 수심에서 해수를 취한 뒤 50 mL Falcon culture flask 2개에 각각 58 mL씩 해수 시료를 넣고 1 mCi의 ^{14}C -sodium bicarbonate를 여과 해수를 이용하여 100분의 1로 희석한 stock을 제작하여 0.9 mL씩 접종하였다. 두 flask 중 1개는 호일로 감싸주고 양쪽으로 창이 달린 상자에 일렬로 배열하고 FRRf가 설치된 동일 수심에서 45-50분간 자연광 조건에서 배양하였다. 배양이 끝나면 즉시 25 mm filter funnel과 manifold를 이용하여 0.45 μm mixed cellulose ester membrane로 여과한 뒤 냉동 보관하였다. 냉

동 보관된 시료의 방사선량은 염산을 이용한 혼증이 끝나면 즉시 scintillation cocktail 10 mL를 첨가하여 냉암소에 24시간 보관한 뒤 liquid scintillation counter (Tri-Carb 2910TR, PerkinElmer)로 측정하였다.

다. 결과

(1) FRRf의 현장 적용성 개선

2017년 10월 조사에서는 자연광 조건에서 FRRf 운용시 표층에서는 강한 태양광에 의해 표층에서 역산란되는 적색 광자는 FRRf의 검출 대역과 겹치는 파장을 가질 수 있다. 1차년도에는 강한 태양광에 의한 적색 광자의 역산란에 의해 표층에서 광량이 높은 10시부터 16시까지 FRRf를 통해 자료 획득이 불가하였다(그림 3.2.15). 그러나 그 외의 시간대에서 획득한 자료를 검토해 보면 FRRf와 동위원소법으로 추정된 일차생산력이 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다.

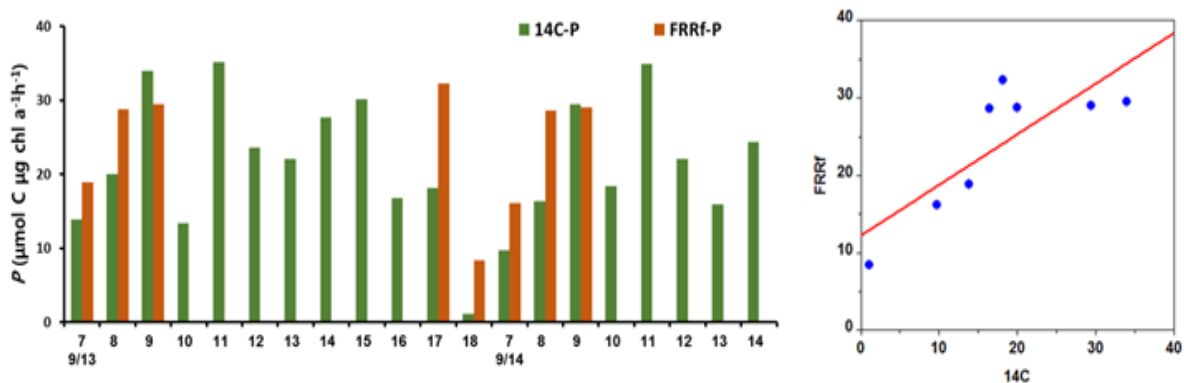


그림 3.2.15 2017년 10월에 FRRf와 ¹⁴C-고정법으로 추정된 일차생산력 차이

따라서 2018년 3월과 7월 연구에서는 설치 수심 조정 및 ND필터를 이용한 태양광에 의한 영향을 줄이는 조치 등을 통해 낮 시간 동안 FRRf 운용이 가능하였다. 동위원소법을 이용하여 추정된 통영해상과학기지주변 해역의 시간당 일차생산력은 실험 시간에 따라 0.14~5.90 $\mu\text{mol C m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 의 범위를 보였고 FRRf를 이용하여 추정된 값은 0.58~6.21 $\mu\text{mol C m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 의 범위를 보였다(그림 3.2.16). 2018년 7월 조사에서는 동위원소법과 FRRf로부터 추정된 시간당 일차생산력이 각각 0.10~21.76 $\mu\text{mol C m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 과 0.37~34.79 $\mu\text{mol C m}^{-3} \text{h}^{-1}$ 의 범위를 보여 3월 조사에 비해 높은 수치를 나타내었다. 또한 3월과 7월 조사 모두에서 FRRf가 동위원소법에 비해 1.5~1.6배 높은 수치를 보이는 것으로 나타났다.

7월 조사에서 오전 9시부터 11시까지 FRRf를 통해 추정된 일차생산이 낮은 양상을 보이는데, 이는 설치 장소가 통영해상과학기지에 있는 양식장 옆으로 장비 설치 시 구조물의 영향을 최소화하고자 하였으나 시간의 흐름에 따른 태양광 조사각이 변하면서 구조물에 의해 발생하는 그림자가 추정 결과에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이 시간대 값들을 제외하면 FRRf로 추정된 일차생산력이 ^{14}C 동위원소법을 이용한 측정치와 강한 양의 관계를 보여, FRRf를 이용하여 일차생산력의 변동을 모니터링할 수 있음을 보여준다(그림 3.2.17).

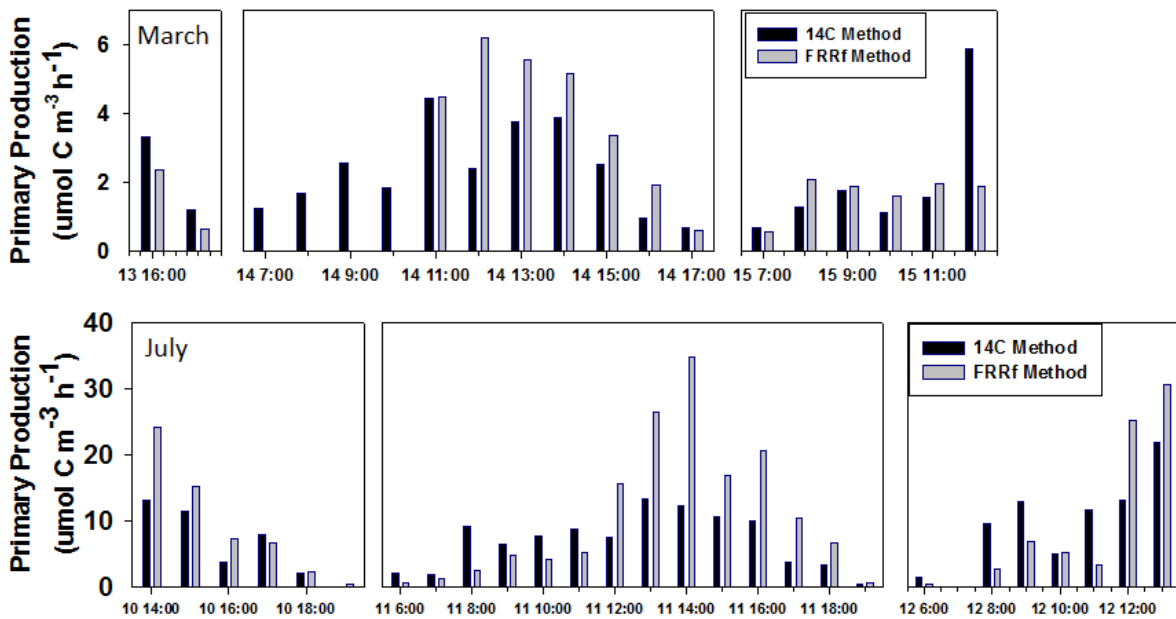


그림 3.2.16 2018년 7월에 FRRf와 ^{14}C -고정법으로 추정된 일차생산력 차이

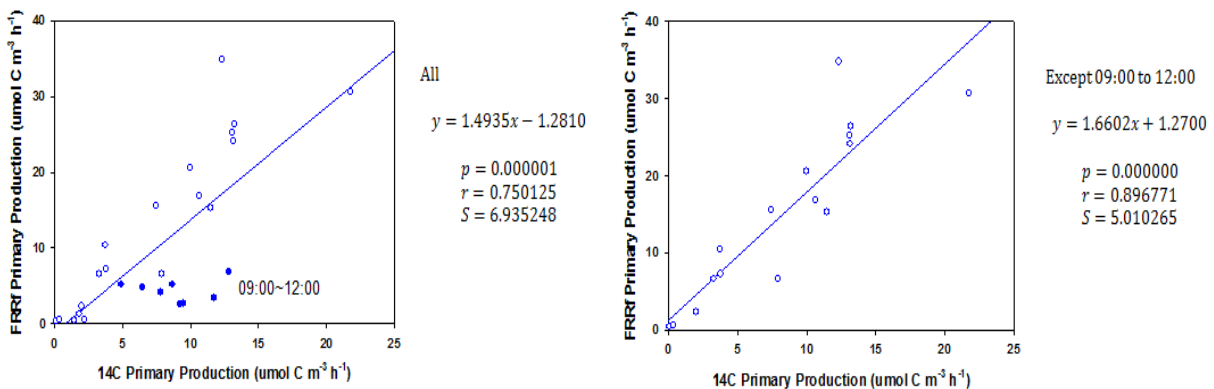


그림 3.2.17 2018년 7월에 FRRf와 ^{14}C -고정법으로 추정된 일차생산력의 선형적 관계를 보여주는 그래프. 오른쪽은 아침 9시~12시 사이의 자료를 뺀 경우 나타나는 선형 관계

라. 토의

일차생산을 측정하는 방법은 산소 발생 측정법(Gaarder 1927), ^{13}C 와 ^{14}C , ^{18}O 등을 이용하는 동위원소법(Steeman Nielsen 1952; Slawyk et al. 1977; Bender et al. 1987), 활성 형광 측정법(active fluorescence method) (Kolber and Falkowski 1993), 반침입적 생물 광학적 측정법(nonintrusive bio-optical method) (Claustre et al. 1999) 등 여러 가지 방법이 있다. 이 중 FRRf 방법은 수생태계 내 일차생산성 평가에 활용할 수 있는 기법으로 탄소고정율을 직접적으로 측정하지는 않으나, 전자전달율(electron transfer rate, ETR)과 궁극적으로 탄소고정율을 도출할 수 있는 광합성 양자 수율 추정치를 제공한다. 이 기법은 수중에서 측정할 수 있으면서도 체적 추정치를 도출할 수 있는 유일한 방법으로(Regaudie-de-Gioux et al. 2014), 양식장 주변해역의 일차산력 모니터링에 적합하다. 특히 일차생산력은 광량, 식물플랑크톤 생체량, 탁도, 영양염 분포 등 다양한 요인들에 의해 결정되며(Field et al. 1998), 각 요인들의 변동에 의해 일차생산이 시시각각으로 변화한다. 따라서 일차생산력의 모니터링에는 정확함과 더불어 신속성이 요구되는데, FRRf 기법은 긴 배양 시간과 복잡한 실험 설비를 요구하지 않기 때문에 시공간적으로 많은 제약이 따르는 양식장에서 사용이 적합한 방법으로 판단된다. 그러나 일반적으로 바이오광학기반의 접근법은 측정시 주변 자연광의 단기 변동에 의해 영향을 받을 수 있으며(Raatoja et al. 2004), 특히 자연광 조건에서 FRRf 운용시 표층에서 산란되는 적색 광자는 FRRf의 검출 대역과 겹치는 과장을 가질 수 있어 표층 인근에서는 문제가 야기된다(Laney, 2003). 이러한 문제는 유광대가 깊고 투명도가 높은 수역에서 더 깊은 수심에까지 영향을 미칠 수 있다. 따라서 선행연구에서는 연안 해역에서 물의 선명도에 따라 표면과 약 2~5 m 사이에서 수집된 데이터를 무시하였다(Moore et al. 2003). 본 연구에서도 동일한 문제가 있었으며, 2017년 10월 현장조사 시에는 낮 시간동안의 데이터를 확보할 수 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 2018년 3월과 7월 조사에서는 설치 수심의 조절 및 ND필터를 이용한 직사광선 및 역산란 영향 감소 조치로 주간 전 시간대의 자료를 획득할 수 있었다. 본 연구 결과 방사선 동위원소법과 FRRf을 이용하여 추정된 일차생산력은 양의 상관관계를 보였으나 FRRf를 통해 추정된 값이 1.5~1.6배 높은 것으로 나타났는데 이는 기존의 선행연구들과도 유사한 결과를 보인 것이다(Raatoja et al. 2004; Estevez-Blanco et al. 2006; Cheah et al. 2011). 이는 변수의 불확실성, 동위원소법의 용기 효과, 형광측정법의 과대측정 등 다양한 요인들에 의한 것으로 추정되며, 두 기법으로 추정된 값의 비교를 통해 실제 일차생산 값은 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 양식장 구조물에 의한 그림자로 인해 설치 위치에 따라서는 측정에 간섭을 미칠 수 있으므로 이에 따른 주의와 해결 방안이 필요할 것으로 판단된다.

제3절 퇴적물 모니터링 기술 개발

1. 소형 프레임 설계 및 제작

가. 서론

수층에서 일차생산력에 의해 생산된 해양환경에서 유기물 분해는 일차생산에 의해 생성된 유기물과 육지로부터 공급된 유기물이 무기탄소로 전환되는 중요한 생지화학적 과정이다 (Jahnke and Craven 1995; Mortimer et al. 1998; Weston et al. 2006). 연안 해양은 수심이 얇기 때문에, 수층에서 생산된 대부분의 유기물은 퇴적물로 가라앉은 후, 퇴적물 내 미생물에 의해 빠르게 분해된다. 유기물 유입량이 높은 연안 퇴적물에서 산소는 수층을 통해 공급되는 속도보다 퇴적물 내 미생물 호흡에 의해 소비되는 속도가 빠르기 때문에, 표층 퇴적물 수 mm이 내에서 급격히 고갈되며, 이로 인해 유기물 분해의 대부분은 혐기성 조건하에서 이루어진다 (Holmer et al. 2002; Canfield et al. 2005). 혐기성 환경에서의 유기물 분해는 산소 대신 질산염, 산화망간, 산화철 및 황산염 등을 전자수용체로 이용하는 다양한 미생물 군에 의해 주도된다 (Canfield et al. 1993; Kristensen and Holmer 2001; 현 2005).

유기물 분해과정에서 생성되는 여러 종류의 환원성 물질은 공극수와 입자 표면에서 복잡한 생지화학적 반응을 거치게 된다. 이러한 물질 반응과정의 결과인 순 생산(net production)은 해수와 공극수간의 농도차이를 유발하여 퇴적물-해수 경계면(sediment-water interface)에서 교환되는 물질 플럭스(benthic flux)를 결정한다. Benthic chamber는 해수-퇴적물 경계면을 지나는 저층 플럭스(benthic flux)를 추정할 수 있는 현장(in-situ) 배양·측정 장비이다. 장비의 기본 원리는 비교적 간단하다. 부피 및 면적을 알고 있는 용기를 퇴적물 표층에 설치한 하여 일정시간 동안 배양시킨다. 배양 시간동안 챔버내 물질의 농도 변화 기울기를 파악한 후 아래의 식에 적용하여 저층 플럭스를 추정한다.

$$F_{\text{chamber}} = dC/dt \times V/A \quad \text{--- (1)}$$

식1에서 F_{chamber} 는 퇴적물/해수 계면을 통과하는 물질의 플럭스($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dC/dt 는 시간 증가에 따른 물질 농도 변화 기울기($\text{mmol L}^{-1} \text{d}^{-1}$), V 는 용기부피(m^3), A 는 해저면에 설치한 용기의 면적(m^2)이다.

대형조사선에 경우 권양기(winch)를 이용하여 장비를 투하할 수 있으나, 연안 조사를 위한 조사선은 대부분 소형선박이기 때문에 이 연구의 목적은 소형 선박에서 운영이 용이한 연안용 벤틱 랜더의 소형프레임을 개발하는데 있다.

나. 재료 및 방법

개발한 벤틱 챔버의 구성 모식도 및 현장 사진을 그림 3.3.1~2에 각각 나타냈다. 프레임은 부식에 강한 스테인레스 강(SUS-304)으로 제작됐다. 프레임은 2단 구조로 설계 제작됐다. 상단은 각종 관측 장비(입자포집기, 수중 카메라 등), 부이 및 회수 시스템 등을 추가로 장착하도록 설계 제작했다. 다리는 챔버 높이를 5cm 간격으로 조절할 수 있게 하여 배양 수의 부피를 조절할 수 있게 했다. 그리고 해저면에 설치 시 안전성 증대와 chamber 자체 무게에 의해 퇴적물 속으로 매몰되는 것을 막기 위해 금속 원형 디스크(ID 15 cm)를 부착시켰다.

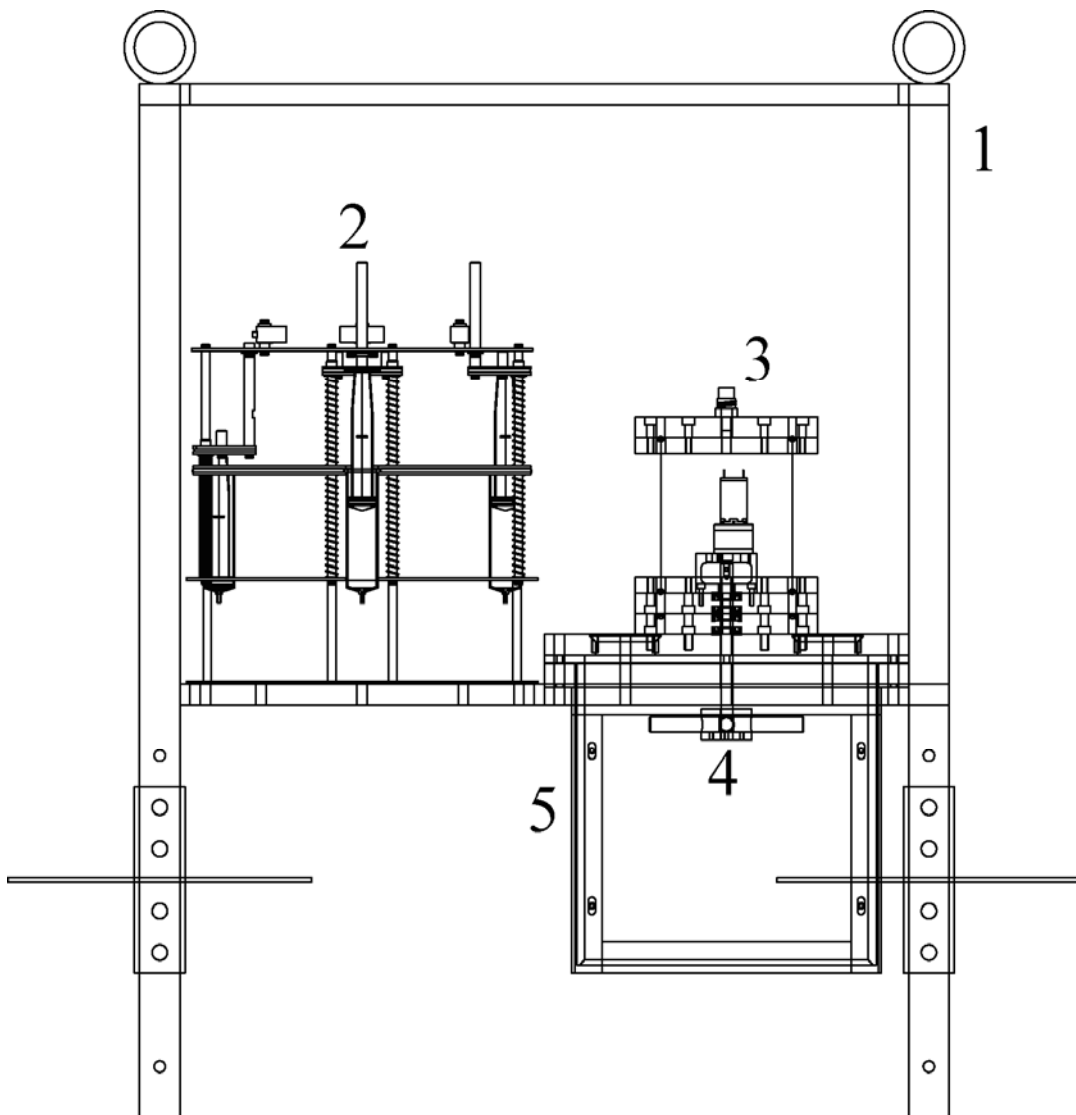


그림 3.3.1 The Belcl benthic chamber instrument for benthic boundary layer studies in coastal sea. The drawing shows 1) frame with disk feet, 2) automatic water sampler, 3) stirring motor casing on lid, 4) stirring device, and 5) opaque PVC chamber

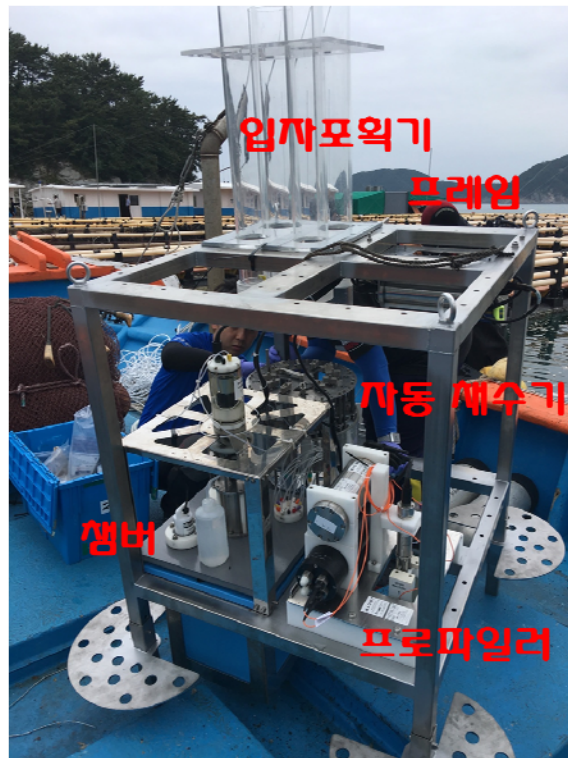


그림 3.3.2 연안 양식장용 벤틱랜더 사진 및 구성

2. 광센서 기반 프로파일러 제작

가. 서론

퇴적물에서 공극수를 추출하는 방법은 퇴적물을 자른 후 원심분리 과정을 거친 다음 공극수를 추출하거나 라이즌 샘플러(Rhizon sampler, Rhizosphere)를 이용하여 공극수를 추출하는 방식을 사용하고 있다. 특히, 환원된 상태인 유기물 분해산물(e.g. 암모니움, 철, 황화수소 등)의 분석을 위해서는 질소로 충전된 혐기성 박스를 이용하는 등의 어려움이 있다. 전통적인 공극수 추출 방식은 다음과 같은 제약이 있다. 추출할 수 있는 공극수 양이 적기 때문에(< 10 ml) 산소분석과 같이 많은 양의 시료를 필요로 분석은 불가능하다. 입경이 큰 퇴적물에서 공극수는 퇴적물 샘플링과 동시에 새어나가기(leak) 때문에 샘플링이 불가능하다. 마지막으로 퇴적물 깊이 별 분석시 약 1 cm이상의 간격이 필요하기 때문에 해상도가 높은 자료를 수집할 수 없다.

반면, 센서를 이용한 연구는 공극수를 직접 탐지하여 분석하기 때문에 공극수의 양 또는 입경에 영향을 받지 않는다. 센서를 이용한 공극수 농도 측정은 약 50~200 μm 간격으로 측정을 할 수 있기 때문에 기존 공극수 추출방법 보다 자료의 해상도(resolution)가 높다. 높은 해상도

를 이용하여 확산에 의한 플럭스를 계산할 수 있을뿐만 아니라 벤틱 챔버를 이용한 총 산소 소모율(TOU, total oxygen utilization)과 확산성 산소소모율(DOU, diffusive oxygen utilization)을 구분하여 측정/계산할 수 있으며, 두 값의 차이를 이용하여 저서동물에 의한 호흡(FOU, fauna-mediated oxygen utilization)을 계산할 수 있다. 또한, 산소광학센서를 이용한 공극수 산소 측정 시 빠른 반응시간(<2s)으로 인해 광구배에 따른 순생산력(net-production)을 측정할 수 있다. 본 연구의 목적은 광센서를 기반으로 공극수 내 산소농도를 측정할 수 있는 프로파일러 개발이며, 본 프로파일러는 연안용 벤틱랜더에 장착 할 수 있게 설계 하였다.

나. 재료 및 방법

휴대용 및 lander용 다기능 microprofiler는 4개의 탐침형 산소 광센서 장착이 가능하다. 전체 길이를 50cm 이하로 설계하여 기존에 시판되는 시스템에 비하여 소형화된 장비이다(그림 3.3.3, 표 3.3.1). 또한 휴대용 및 lander용 스텐드가 쉽게 기기를 장착하할 수 있도록 개발되어 연구목적 및 연구지역의 수심에 따라 다양한 운영이 가능하다. 한편, 전체 시스템을 경량화 함으로 심해저용 장비 회수 시스템 설계시 필요한 부이의 수량을 최소화할 수 있었다. 그리고 모든 시스템은 별도의 제어부에서 독립적으로 운영되며, 전체 환경설정은 동일 제어 프로그램 에서 설정이 가능하도록 개발되어 시스템간 연계성을 극대화 했다.

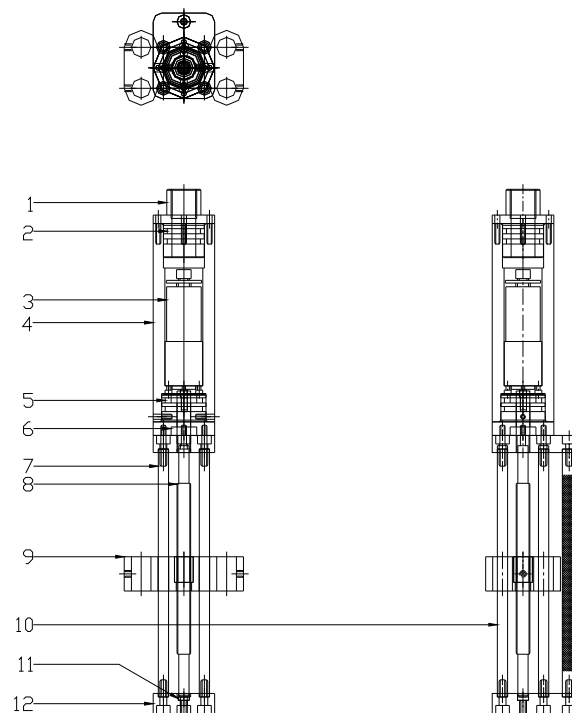


그림 3.3.3 마이크로 프로파일러 구성도

표 3.3.1 산소프로파일러의 각 파트별 명칭

NO	Designation	Q'ty	Specification
1	PF2-10.HousingTopCap	1 ea	Acetal / White
2	o-Ring	4 ea	AS NO.116, ID:18.72, T:2.62
3	Motor	1 ea	DC12V, Geared Motor
4	PF2-08.Housing	1 ea	Acetal / White
5	PF2-09.Housing Bottom Cap	1 ea	Acetal / White
6	Retainer	2 ea	ID:8, OD:15, T:8
7	PF2-03.Shaft	4 ea	φ6, 145mm, SUS
8	PF2-11.Screw	2 ea	M8-P1.0, SUS
9	PF2-07.Sensor Holder-4	1 ea	Acetal / White
10	PF2-04.Shaft-8	1 ea	φ8, 145mm, SUS
11	PF2-19.Support	1 ea	φ6.5, 2mm, SUS
12	PF2-02.Bottom Plate	1 ea	Acetal / White

3. 장비(벤틱랜더) 시험, 수정 보완 및 운영기술 확립

가. 서론

장비 시험 및 수정보완을 위한 현장 시험은 2017년 6월 26일~6월30일에 통영 및 고성-자란만의 어류양식장(FF), 통영과학기지(TMSS), 굴양식장(OF), 대조구(FF-C, OF-C)에서 실시하였다(그림 3.3.4). 총 산소소모율 현장 측정은 약 11시간 동안 챔버배양 실험을 통하여 수행하였고, 광섬유 산소마이크로 센서로 고해양도의 공극수 내 용존산소 수직분포를 측정하였다.

나. 연구 방법

표면에 테플론으로 코팅된 4각형 챔버 1기로 구성된다(가로×세로×높이=29×29×24cm). 챔버 뚜껑에는 뚜껑 개폐장치, 교반기, 용존산소 센서 장착부(2개소)로 개발되었다. 용존산소는 광 센서 타입으로 1기는 10초 간격으로, 다른 1기는 1분 간격으로 측정하여 자료의 안전성을 높이고자 별도의 자료 저장소에 기록하였다. 한편, 뚜껑 개폐장치는 초기 챔버 설치시 퇴적물의 교란에 따른 영향을 최소화 하기 위해 챔버 설치 후 2시간 이후 작동하도록 조건을 입력했으며, 이 시간은 임의로 조절할 수 있다. 챔버의 배양된 물을 자동으로 채집하는 채수기는 1시간 간격으로 채수하도록 하였으며, 이 채수시간 역시 사용자의 연구 목적에 따라 조절이 가능

하게 하였다. 챔버의 배양된 물을 자동으로 채집하는 채수기는 1시간 간격으로 채수하도록 하였으며, 이 채수시간 역시 사용자의 연구 목적에 따라 조절이 가능하게 하였다. 섬유 산소 마이크로 센서로 고해상도의 공극수내 용존산소 수직분포를 측정하였다. 양식장의 유기물 부하율을 측정하기 위해 별도로 고안된 입자포획기로 약 24시간 동안 입자물질을 채집하였다.

다. 연구 결과 및 토의

(1) 양식장 현황

연안용 랜더의 장비시험 및 수정보완을 위한 실험은 양식장에서 진행하였고, 양식장의 운영기간, 면적, 어류 밀도 및 퇴적물 특성에 대한 정보를 표 3.3.2에 나타내었다. 저도에 위치한 어류양식장(FF)은 30년 이상 운영해 왔으며, 굴 양식장(OF)는 40년 이상 장기간 동안 운영해 온 반면, 통영과학기지 양식장(TMSS)의 운영기간은 약 10년 이하였다. 굴양식장(OF)의 면적은 약 91,200 m²으로 가장 큰 면적을 차지했으며 어류양식장(FF)와 통영과학기지 양식장(TMSS)의 면적은 각각 15,000, 3,000 m²이었다. 상업양식장인 저도 어류양식장(FF)에서 양식 밀도는 42.7 kg m⁻²으로 과학적 목적으로 설립된 통영과학기지 양식장(TMSS, 5 kg m²) 보다 약 3배 높게 밀식하고 있었다. 굴양식장(OF)에서 양식밀도는 약 10.0 kg m²으로 조사되었다. 퇴적물 표층 0-2 cm에서 총유기탄소(TOC, total organic carbon) 함량은 어류양식장(FF)에서 1.81%로 가장 높게 나타났으며, 굴양식장(OF, 1.55%), 통영과학기지 양식장(TMSS, 1.35%) 순으로 조사되었다. 총유기탄소 함량과 마찬가지로 총질소 함량 또한 어류양식장(FF)에서 0.32%로 가장 높게 나타났으며, 굴양식장(OF, 0.25%), 통영과학기지 양식장(TMSS, 0.21%) 순으로 조사되었다. 양식장에서 C/N의 범위는 6.60~7.50으로 해양성기원에 가까운 유기물로 구성되어있었다. 퇴적률은 어류양식장(FF)에서 1.01 cm yr⁻¹로 통영과학기지 양식장(TMSS, 0.51 cm yr⁻¹) 보다 약 2배 높게 조사되었다.

표 3.3.2 양식장 정보 및 퇴적환경 특성

Site	Farm information			Sediment			
	Operation periods (years)	Area (m ²)	Stock density (kg m ⁻²)	TOC (% dry wt)	TN	C/N (mol/mol)	SR(a) (cm y ⁻¹)
FF	> 30	15,000	42.7	1.81	0.32	6.60	1.01
FF-C	-	-	-	1.16	0.19	7.12	0.35
OF	> 40	91,200	10.0	1.55	0.25	7.23	0.83
OF-C	-	-	-	1.18	0.17	8.10	0.55
TMSS	< 10	3,000	15.0	1.35	0.21	7.50	0.51

^(a)SR: sedimentation rates

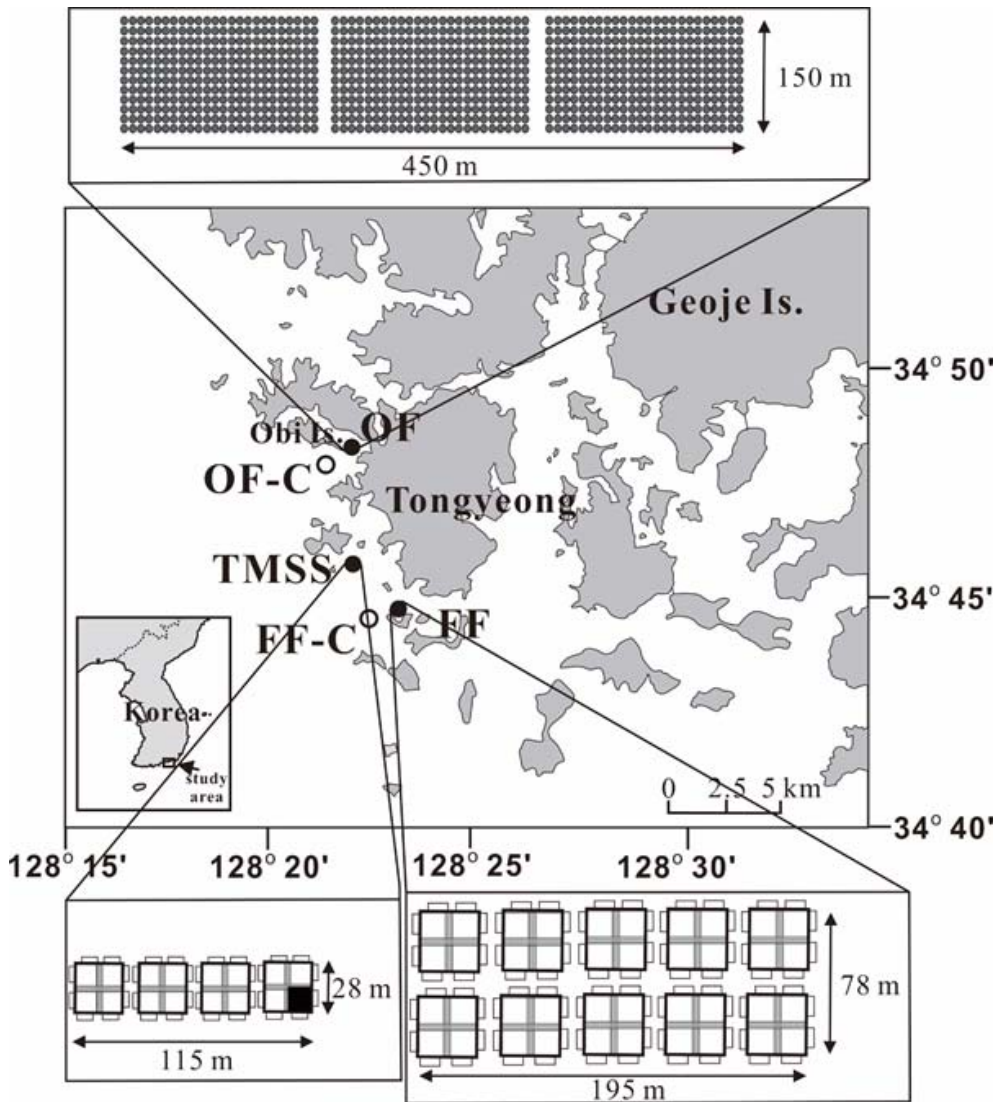


그림 3.3.4 벤틱 랜더 시험운영 정점

(2) 공극수 산소

그림 3.3.5에 광센서 산소마이크로센서로 측정된 퇴적물의 공극수 중 용존산소의 수직분포를 나타 내었다. 산소투과깊이는 약 1~5.2 mm였으며, 확산경계층(DBL, diffusive boundary layer)에서 산소농도가 급격히 감소하였다. 굴양식장 대조구(OFF-C) 퇴적물에서는 퇴적층 6~10 mm부근에서 생물 교란에 의한 burrow에 의해 산소농도가 증가한 것으로 나타났다.

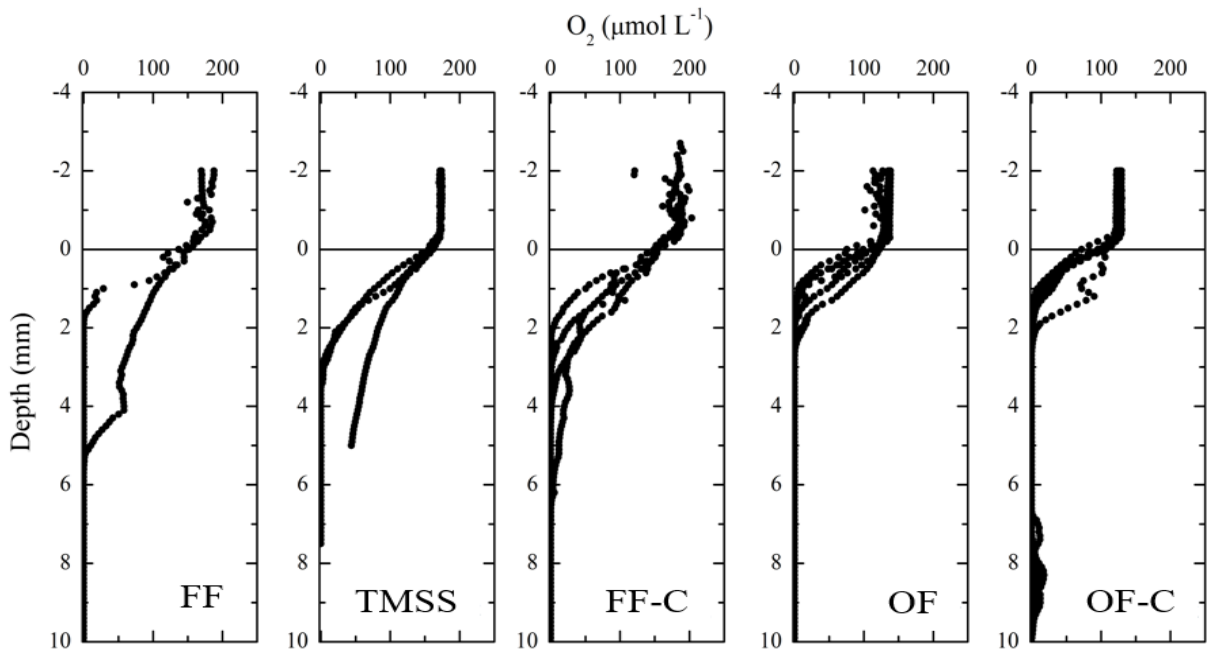


그림 3.3.5 퇴적물 공급수 중 용존산소의 수직분포

(3) 퇴적물 산소소모율

연안용 랜더에 부착된 벤틱 챔버 내에서 시간에 따른 산소소모율을 그림 3.3.6에 나타내었다. 시간에 따른 산소의 소모율은 어류양식장(FF)에서 $26.4 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 굴양식장(OF; $15.1 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$), 통영과학기지 양식장(TMSS, $8.2 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$) 순으로 조사되었다. 어류양식장과 굴양식장 대조구 정점(FF-C, OF-C)은 양식장 보다 각각 4, 3배 낮게 측정되었다.

일반적으로 연안 양식장에서의 가장 큰 환경문제는 퇴적물로의 유기물 축적이라고 알려져 왔다(Hatcher et al. 1994; Hayakama et al. 2001; Lauer et al. 2009). 어류양식장(FF)과 굴양식장(OF)에서의 과도한 유기물의 공급(예. uneaten food, biodeposition and dead organisms)은 퇴적물과 총유기탄소 농도를 증가시켰으며, 이에 따라 퇴적물 산소소모율이 높아졌다(표 3.3.3). 양식활동이 퇴적물 지화학 성분 분포와 퇴적물 산소소모율에 영향을 준다는 보고가 있었다(Lee et al. 2011; Hyun et al. 2013). 그러나 저도 어류양식장(FF)과 굴양식장(OF)는 대조적으로 통영과학기지 양식장(TMSS)에서 양식활동에 의한 퇴적물의 영향은 상대적으로 적었다. 통영과학기지 양식장(TMSS)의 퇴적물은 낮은 총유기탄소 농도(1.35%)와 퇴적률(0.51 cm yr^{-1})을 나타냈다. 통영과학기지 양식장(TMSS)은 어류양식장 임에도 불구하고 상업적 양식장인 저도 어류양식장(FF) 보다 양식밀도가 작을 뿐만아니라 운영기간도 상대적으로 짧았다. 따라서 통영과학기지 양식장(TMSS)은 다른 양식장 보다 퇴적물로의 유기물 가입이 적은 것을 의미하며 이에 따라

퇴적물 산소소모율이 낮게 나타났을 것으로 사료된다. 또한, 저도 어류양식장(FF)과 굴양식장(OF)는 내만에 위치한 반면, 통영과학기지 양식장(TMSS)은 상대적으로 조류에 영향을 많이 받는 외양에 위치하여 있다. 외양에 위치한 통영과학기지 양식장(TMSS)은 조류에 영향으로 수층에서의 유기물이 저층으로 퇴적되기 전에 외양으로 유출될 가능성 또한 있다.

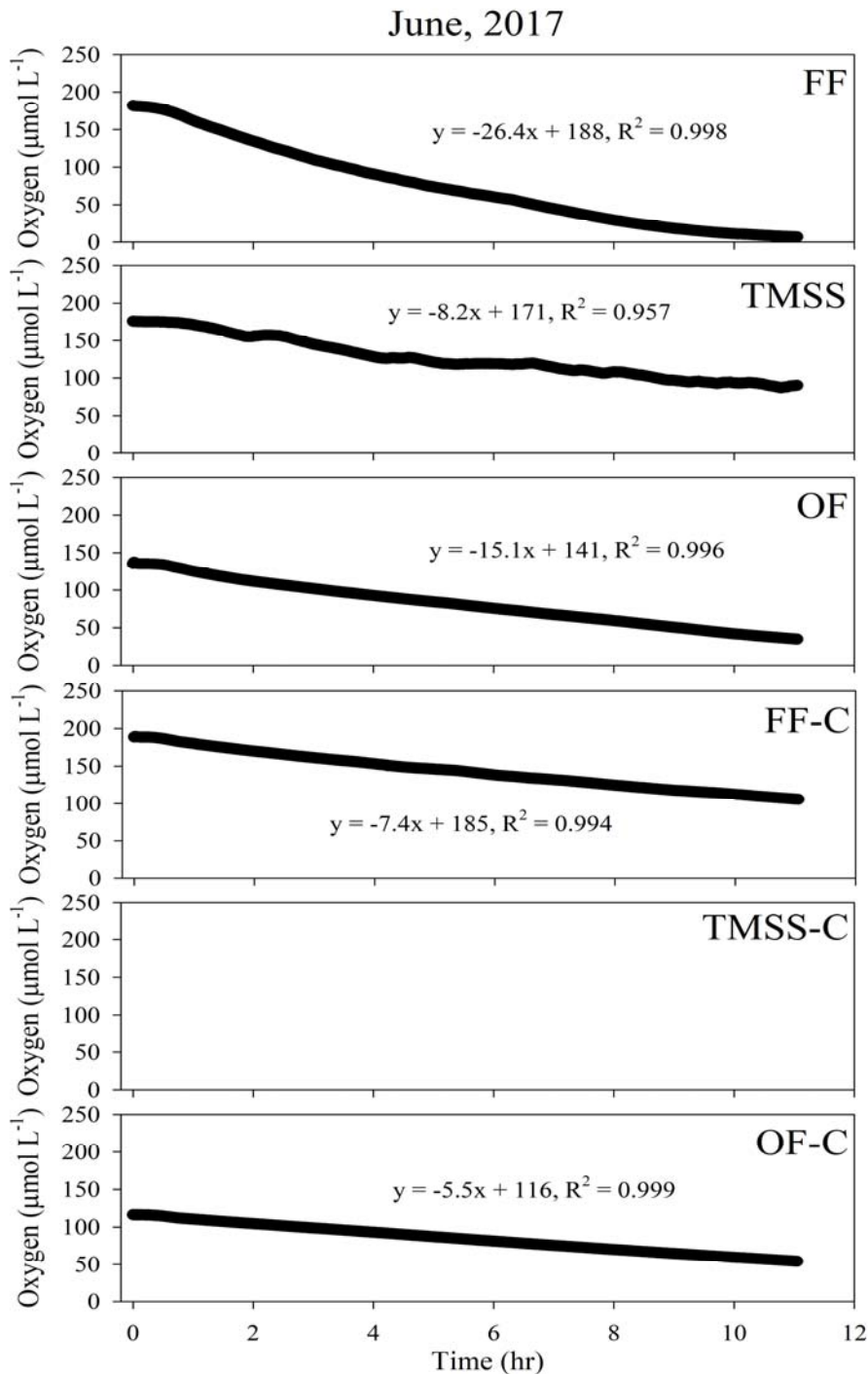


그림 3.3.6 벤틱챔버를 이용해 측정된 시간에 따른 산소감소율

표 3.3.3 다양한 양식장에서 환경인자 특성과 퇴적물 산소소모율

Location	Station ID	TOC	TN	C/N	SOD	Ref.
		(%)		(mol/mol)	(mmol m ⁻² d ⁻¹)	
Shell-fish farm:						
South Sea, Korea	OF	1.6	0.25	7.2	88.6	This study
	OF-C	1.2	0.17	8.1	34.4	
Jinhae-Tongyeong, Korea	SSF	3.9	0.65	7.0	173	(1)
Eastern Chesapeake Bay	Farm	0.4	0.06	8.8	51.8	(2)
Firth of Thames, New Zealand	Farm	2.6–4.4	0.30–0.48	9.5–15.2	21.8–74.0	(3)
Skagerrak Strait, Sweden	FS	2.1–4.0	0.20–0.39	9.9–12.9	6.4–39.1	(4)
Fin-fish farm:						
South Sea, Korea	FF	1.8	0.32	6.1	155	This study
	TMSS	1.4	0.21	7.5	47.7	
	FF-C	1.2	0.19	7.1	43.6	
Bolinao area, Philippines	FP	1.5–14.5	0.12–1.06	8.4–32.8	60.7–336	(5)
Hardanger fjorden, Norway	LF	5.0	0.40	14.6	224	(6)
Loch Creran, Scotland	S1	6.1	0.88	8.1	434	(7)
Horsens fjord, Denmark	C	1.4	0.17	9.6	57.0	(8)

(1) Lee et al. 2012a; (2) Testa et al. 2015; (3) Giles et al. 2006; (4) Carlsson et al. 2012; (5) Holmer et al. 2003; (6) Sweetman et al. 2014; (7) Nickell et al. 2003; (8) Heilskov and Holmer 2001

어류양식과 패류양식방법의 가장 큰 차이점은 사료사용의 유무이다. 예를들면, 어류양식장은 어류의 먹이원으로 사료를 사용하는 반면, 패류는 사료를 사용하지 않고 해양에 존재하는 플랑크톤을 먹이원으로 사용하여 양식한다. 따라서 어류양식장에서의 먹이공급은 퇴적물 산소소모율의 증가와 지역적인 부영양화를 야기하기도 한다(Christensen et al. 2003; Nedwell 2004; Holmer et al. 2005; Mirto et al. 2010). 어류양식장과 패류양식장의 총유기탄소 농도와 퇴적물 산소소모율을 비교하였을 때 어류양식장 퇴적물에서의 총유기탄소 농도와 퇴적물 산소소모율이 패류양식장 보다 높은 것으로 나타났다(표 3.3.3). 퇴적물 산소소모율을 포함한 퇴적물 대사작용은 유기물과 같은 전자공여체에 의해 조절된다(Jørgensen 2000; Canfield et al. 2005). 따라서 퇴적물 내 총유기탄소 농도가 증가할수록 퇴적물 산소소모율은 증가할 것이다. 이에따라 표 3.3.3을 이용하여 패류와 어류양식장에서 총 유기탄소 농도와 퇴적물 산소소모율의 농도사이의 관계를 나타내 보았다(그림 3.3.7). 그 결과, 어류양식장과 패류양식장 모두 두 변수사이의 상관관계가 낮은 것으로 나타났으며, 패류양식장의 경우 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 퇴적물 산소소모율이 총유기탄소 함량만으로 조절되지 않음을 의미한다. 최근 연구에 따르면 퇴적물 산소소모율은 퇴적물 내 총 유기탄소 함량만으로 조절되지 않는 것으로 보고되고 있다(Todd et al. 2010; Kim et al. 2017). 예를들어, Holmer et al. (2003)에 따르면 필리핀에 위치한 10개의 어류양식장에서 표층 퇴적물의 총 유기탄소와 퇴적물산소소모율 사이에 상관관계가 낮은 것으로 조사되었다. 이와 비슷하게 Edberg 와 Hofsten (1973)에서 퇴적물 총 유기탄소 함량만으로 퇴적물 산소소모율을 설명하는 것은 불가능하다고 보고하였다.

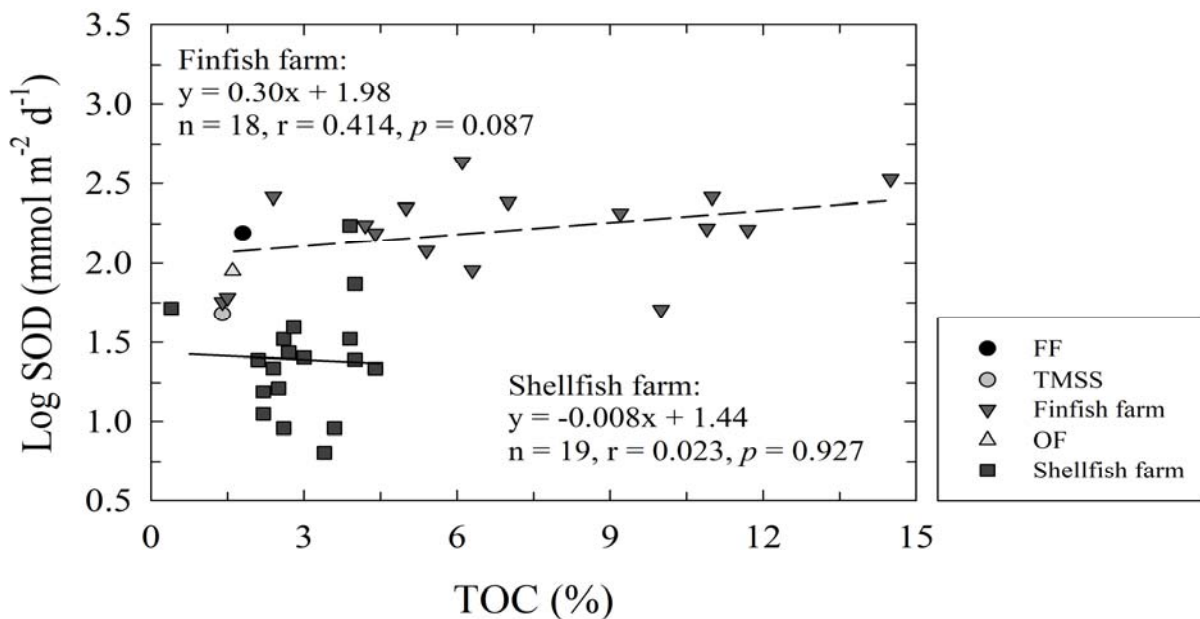


그림 3.3.7 어류양식장과 패류양식장에서 총 유기탄소 함량과 퇴적물 산소소모율 사이의 상관관계

퇴적물로의 유기탄소 가입이 퇴적물 산소소모율을 증가시키는 일반적인 자연현상과는 다른 것으로 나타났다(Grant and Hargrave 1987; Holmer 1999; Hyun et al. 2009). 양식장에서의 이러한 현상을 설명하기 위해 어류양식장과 패류양식장에서 총 유기탄소 함량과 퇴적물 산소소모율 뿐만 아니라 유기물의 질(quality)을 결정하는 요소인 C/N의 값을 을 비교하였다(표 3.3.3). 흥미롭게도 어류 양식장에서 C/N은 6.1~32.8의 범위로 넓게 분포한 반면, 패류양식장에서 C/N은 6~15의 범위로 분포하였다. 이는 패류양식장에서 상대적으로 미생물이 분해하기 용이한 유기물이 존재하는 것을 의미한다. 따라서 총 유기탄소 함량, C/N, 퇴적물 산소소모율 사이의 관계를 밝혀내기 위해 퇴적물 산소소모율은 종속변수, 총 유기탄소 함량과 C/N은 독립변수로 하여 삼차원 그림으로 표현하였다(그림 3.3.8). 그 결과, 퇴적물 산소소모율에 총 유기탄소 함량은 양의 상관관계를 나타냈으며 C/N는 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 퇴적물 산소소모율이 총 유기탄소 함량뿐만 아니라 유기물의 질(quality)에도 영향을 받는 것을 의미한다.

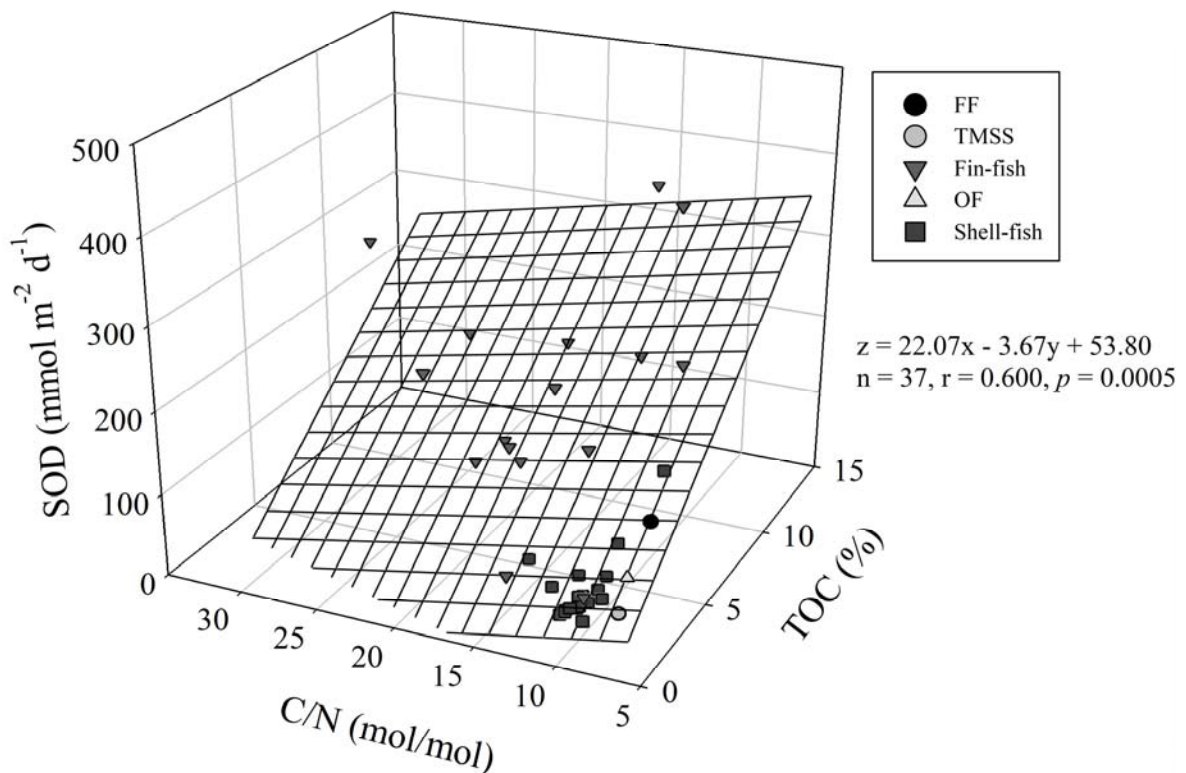


그림 3.3.8 어류양식장과 패류양식장에서 총 유기탄소 함량, C/N, 퇴적물 산소소모율 사이의 삼차원 그림

(4) 저층 영양염 용출율

저도 어류양식장(FF)과 굴양식장(OF)에서의 활발한 유기물 분해작용에 의해 암모니움($12.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ at FF, $8.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ at OF)과 인산염($3.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ at FF, $0.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ at OF)이 퇴적물로부터 다량으로 용출되는 것으로 조사되었다(그림 3.3.9). 저도 어류양식장(FF)에서 암모니움과 인산염의 용출율은 우렁챙이양식장($5.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for NH_4^+ and $1.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for PO_4^{3-} , Lee et al. 2012a)과 혼합양식장($10.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for NH_4^+ and $1.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for PO_4^{3-} , Richard et al. 2007) 보다 높았으며, 다른지역에서 연구된 어류양식장과 유사한 값($0.2 - 28.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for NH_4^+ and $0.2 - 5.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ for PO_4^{3-} , Hall et al. 1992; Holby and Hall 1991)을 보였다. 이와 유사하게 굴양식장(OF)에서 암모니움과 인산염의 용출율은 다른지역의 패류양식장과 유사한 값으로 조사되었다(Richard et al. 2007; Lee et al. 2012a). 퇴적물로부터 다량의 영양염이 용출은 수층의 부영양화를 야기한다(Dixon et al. 2014; Grenz et al. 2000; Richard et al. 2007; Lee et al. 2012b). Redfield ratio를 기반으로 계산한 연구지역의 수층 일차생산자가 필요로 영양염은 질소와 인이 각각 $10.44 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.65 \text{ mmol P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었다(Lee et al. 2011, 표 3.3.4). 양식장에서(FF, OF, TMSS) 저층 질소와 인의 용출은 일차생산자가 필요로하는 질소와 인의 각각 41-128%, 50-501%를 차지하는 반면, 대조구 정점(FF-C, OF-C)에서 저층 영양염 용출은 일차생산자가 필요로하는 질소와 인의 50%을 차지하는 것으로 나타났다(표 3.3.4). 이러한 결과는 양식장에서 유기물 분해에 의한 영양염 용출이 부영양화와 플랑크톤 대증식을 가속화 시키고 이에따라 양식장 부산물을 포함한 유기물은 퇴적물로의 유입이 증가될수 있음을 의미한다.

표 3.3.4 일차생산자가 필요한 영양염 농도 및 이에 대한 저층 영양염 용출의 비율

Site	Nutrient demand for PP ^(a) ($\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)		Benthic nutrient flux ^(b) ($\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)		Contribution of BNF to PP (%)	
	DIN	DIP	DIN	DIP	DIN	DIP
FF	10.44	0.65	13.36	3.25	128	501
FF-C			2.95	0.27	28	42
OF			9.30	0.46	89	70
OF-C			2.69	0.15	26	23
TMSS			4.32	0.32	41	50

^(a) Calculated from the PP data (Lee et al. 2011a) using Redfield's ratio of C:N:P = 106:16:1

^(b) DIN is calculated from the ammonium release rates plus nitrate release rate and DIP is calculated from phosphate release rates in Fig. 4.

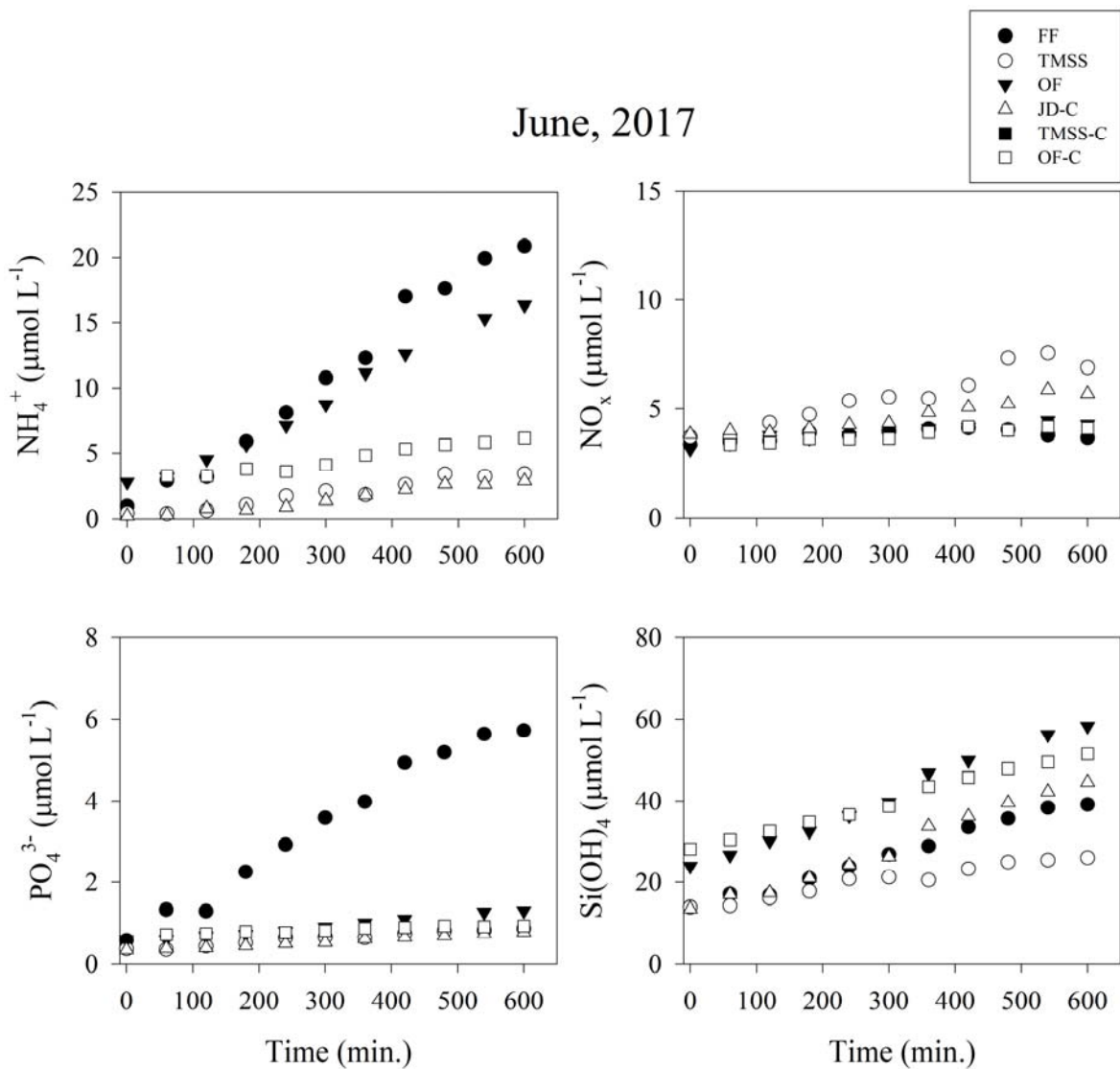


그림 3.3.9 양식장에서 시간에 따른 영양염 용출율

라. 결론

연안용 랜더의 장비시험 및 수정보완을 위한 실험으로 양식활동이 퇴적물 내 탄소, 질소 및 인의 순환에 미치는 영향을 수행하였다. 연안용 벤틱랜더를 위한 소형프레임 제작하여 양식장에 투여/실험한 결과, 양식장(FF, OF)에서 퇴적물로의 높은 유기물 유입으로 인해 퇴적물 산소 소모율과 저층 영양염 용출이 가속화 된다는 것을 정량적으로 밝혔을 뿐만 아니라 광센서 기반의 프로파일러 제작으로 공극수 산소 측정을 성공적으로 수행하였다. 현재 시스템에는 실험 시 문제가 없는 것으로 판단되며, 향후 양식장뿐만 아니라 다른 연안지역에서도 계속적으로 시험운영을 할 계획이다.

4. 양식장 유기탄소 수지 추정

가. 서론

양식산업은 가장 빨리 성장하고 있는 식품 생산산업이고 2012년도에는 전 세계 해산물 소비의 약 50%를 양식으로 공급하고 있다(Klinger and Naylor 2012; FAO 2014). 몇 십년후에는 전세계 인구가 약 70억 가까이 증가할 것이다(Delgado et al. 2003; Merino et al. 2012; Oyinlola et al. 2018). 미래의 식량공급 관점에서 양식산업은 더욱더 발전할 것으로 예상되지만(Duarte et al. 2009), 이러한 양식산업 발전에 의한 양식활동은 여러 환경문제를 야기하고 있다(Holmer et al. 2003).

양식활동이 해양환경에 미치는 여러 환경이슈 중 가장 큰 환경문제는 퇴적물로의 유기물 축적이다.(Holmer et al. 2005; Lee et al. 2011; Hyun et al. 2013). 대규모로 오랜기간 동안의 양식장 운영은 미접식 사료(Carroll et al. 2003; Kutti et al. 2007; Norði et al. 2011)와 생물에 의한 배설물(Hatcher et al. 1994; Giles et al. 2006; McKindsey et al. 2009; Zhou et al. 2014)과 같은 유기물의 축적을 야기한다. 더욱이 그물이나 연승과 같은 양식 시설물은 해수의 흐름을 방해하여 양식장 퇴적물 내에 유기물을 포함한 입자성 물질들의 퇴적물 가속화 시킨다(Duarte et al. 2008; Petersen et al. 2008). 결론적으로 양식활동에 의한 퇴적물로의 유기물 유입은 연안 환경의 영양단계를 조절하는 가장 중요한 요인이다(de Jong 1994; McKindsey et al. 2011)

유기물이 퇴적물로 유입되게 되면 산소, 질산염, 산화망간, 산화철 및 황산염을 전자수용체로 하는 호기, 혐기성 미생물에 의해서 빠르게 분해된다.(Canfield et al. 1993; Gribsholt and Kristensen 2002; Hyun et al. 2009). 퇴적물에서 호기성 호흡은 산소를 직접적으로 소모하고 혐기성 분해산물은 산소에 의해 산화되기 때문에(Glud 2008; Bayraktarov and Wild 2014) 퇴적물 산소소모율은 총 산소소모율로 표현할 수 있으며, 보통 양식장에서 유기물오염의 지표로 사용된다(Canfield et al. 1993; Glud 2008). 따라서 본 연구에서는 퇴적물 산소소모율을 정량화하여 양식활동이 연안 생태계에 미치는 영향을 평가 및 유기탄소 수지를 추정하였다.

나. 연구방법

(1) 연구정점

연구지역은 장비 시험 및 수정보완을 위한 현장 시험과 마찬가지로 통영 및 고성-자란만의 어류양식장(FF), 통영과학기지(TMSS), 굴양식장(OF), 대조구(FF-C, OF-C)에서 실시하였다(그림 3.3.10). 2017년 6월과 10월, 2018년 5월과 11월 총 4회에 걸쳐 조사를 진행하였다.

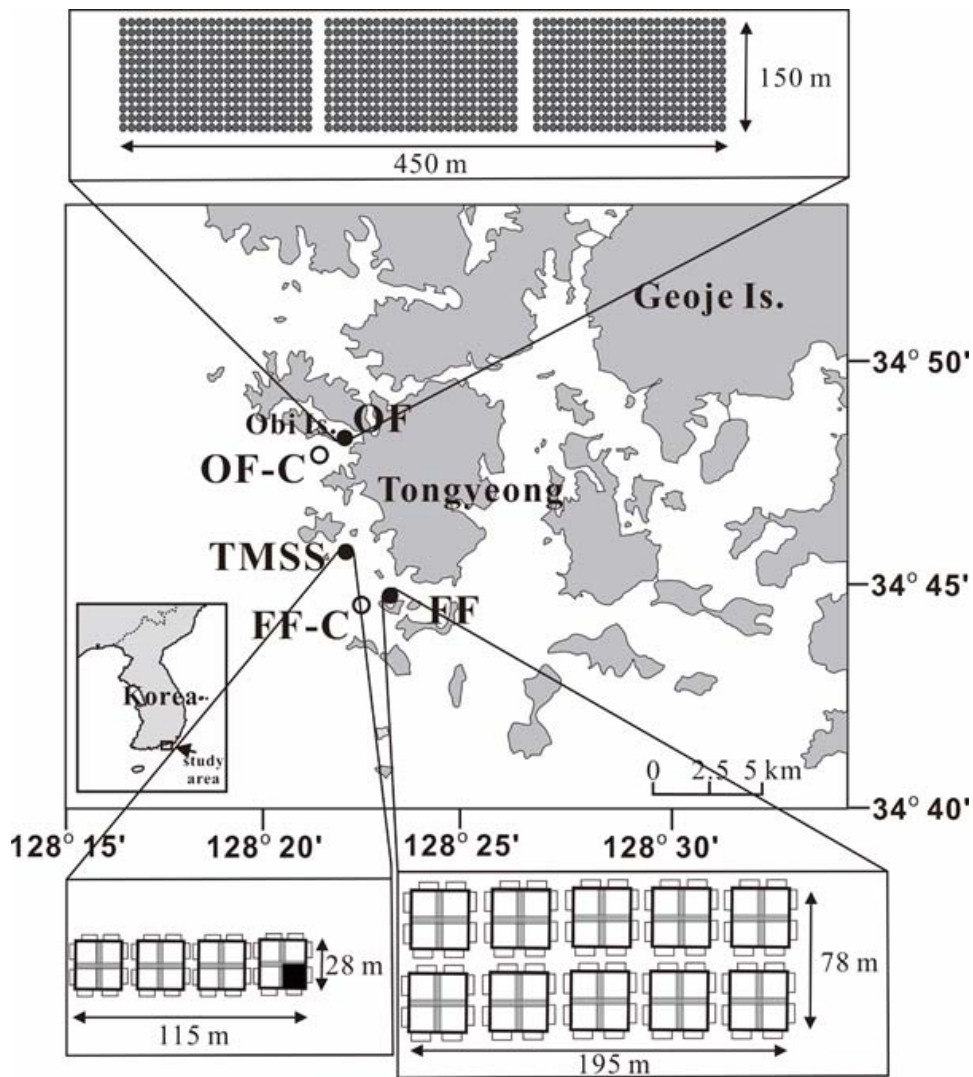


그림 3.3.10 퇴적물 산소소모율 조사정점

(2) 연구방법

(가) 현장조사

연안용으로 개발한 현장용 벤틱챔버를 이용하여 통영 부근 어류 및 굴양식장에서 퇴적물의 총산소소모율을 측정했다(Lee et al. 2010). 간략히 설명하면, 벤틱챔버는 사각형의 배양챔버 형태로 뚜껑에는 교반기가 장착되어 있다. 미리 설정된 시간에 채수할 수 있는 자동채수기가 장착되어 있으며, 퇴적물의 산소 소모율을 측정하기 위해 용존산소 센서 2개를 장착할 수 있다. Belcl는 소형선박의 크레인을 이용하여 해저면에 설치했으며, 전 설치과정은 다이버의 도움으로 진행되었다.

길이 60 cm, 직경 7 cm(Aspect ratio: 8,6)인 원통형 아크릴로 제작한 입자포획기를 벤틱침버 프레임에 설치하여 약 24시간 입자성 유기물을 채집했다. 입자포획기를 설치한 후 약 2시간 경과 후에 입자포획기의 시료병을 장착하여 기기 설치시 발생하는 재부유 영향을 최소화 했다. 시료병에는 고염의 용액(염분 > 50‰)을 넣어 시료의 인위적 영향을 최소화 했다. 회수된 시료는 일정시간 방치 한 후 분석시료별로 분리하여 전처리 되었다.

(나) 현장 수층 시료채취

수층의 표,저층에서 수온, 염분, 산소농도는 salinity-temperature probe(YSI model-85)를 이용하여 측정하였다. 표, 저층의 Chl.-a 분석을 위해 해수 약 500 ml을 여과지(Whatman, pore size 0.45 μm)로 여과하여 20 ml 유리바이알에 여과지를 넣은 후 분석전까지 냉동보관하였다. 영양염 분석을 위한 시료를 해수를 유리섬유 필터(Whatman, pore size 0.7 μm)로 여과한 후 여과수를 50 ml conical tube에 넣은 후 분석전까지 냉동보관 하였다.

(다) 실험실 분석

영양염 분석은 영양염 자동분석기(Proxima, Alliance, Inc.)로 분석하였다. Chl.-a 농도는 흡광법을 이용하여 분석하였다(Parsons et al. 1984). 유기탄소의 수직적 플럭스를 계산하기위해 입자포획기에 채집된 시료의 유기탄소 및 질소 함유량은 0.1 M HCl로 산처리하여 CaCO_3 를 제거한 후 원소분석기(Thermo Finnigan, FlashEA 1112)를 이용하여 측정했다.

(라) 저층 플럭스 계산

퇴적물-해수 경계면을 통과하는 용존산소의 저층플럭스는 아래의 식으로 계산되었다.

$$BF = (dC/dt) \times (V/A) \quad \text{--- (1)}$$

식1에서 BF는 물질의 저층 플럭스($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dC/dt 는 시간 증가에 따른 용존물질의 1차 선형 변화 기울기($\text{mmol L}^{-1} \text{d}^{-1}$), V는 챔버의 부피(m^3), 그리고 A는 챔버의 면적(m^2)이다.

다. 결과 및 토의

(1) 수층 특성

수층 특성은 2017년 6월, 2018년 5월과 11월 조사하였다(표 3.3.5). 2017년 6월 수온은 17.7~21.1℃의 범위로 나타났으며, 표·저층 사이의 수온차이는 최대 2.7℃로 조사되었다. 염분은 33.8~33.9 psu로 조사되었으며, 표·저층 사이의 염분차이는 거의 없었다. 용존산소 농도는 5.85~9.14 mg L⁻¹의 범위로 조사되었으며, 굴양식장(OF) 표층에서 9.14 μmol L⁻¹로 가장 높게 나타난 반면, 저층에서는 5.85 μmol L⁻¹로 가장 낮게 나타났다.

2018년 5월 수온은 15.8~20.5℃의 범위로 조사되었으며, 표·저층 사이의 수온차이는 최대 3.8℃로 2017년 6월 조사보다 큰 것으로 나타났다. 염분은 31.2~33.4 psu의 범위로 조사되었으며, 수온과 마찬가지로 표·저층 사이의 차이가 2017년 6월 보다 큰 것으로 나타났다. 수층 Chl.-a 농도는 0.80~3.39 μg L⁻¹의 범위로 조사되었으며, 굴양식장(OF)에서 3.05~3.39 μg L⁻¹로 가장 높게 조사되었다. 용존산소 농도는 5.71~7.55 mg L⁻¹로 조사되었으며, 굴양식장(OF)에서 6.55~5.71 mg L⁻¹의 범위로 가장 낮게 나타났다. 암모니움 농도는 0.8~2.7 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었으며, 어류양식장(FF)에서 2.3~2.7 μmol L⁻¹로 가장 높게 나타났다. 질산성질소+아질산성 질소의 농도는 0.4~1.3 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었다. 인산염 농도는 0.1~0.9 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었으며, 굴양식장(OF) 저층에서 가장 높은 값으로 측정되었다. 규산염 농도는 3.6~11.8 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었으며, 굴 양식장(OF)에서 6.0~11.9 μmol L⁻¹로 가장 높게 조사되었다.

2018년 11월 수온은 15.0~16.0℃의 범위로 조사되었으며, 표·저층 사이의 수온차이가 최대 약 0.7℃로 조사기간 중 그 차이가 가장 낮게 나타났다. 염분은 32.9~33.5 psu의 범위로 조사되었으며, Chl.-a 농도는 ND~1.71 μg L⁻¹의 범위로 조사되었다. 용존산소 농도는 7.00~7.98 mg L⁻¹의 범위를 보였으며, 2017년 6월과 2018년 5월에 비해 상대적으로 높은 값으로 나타났다. 암모니움 농도는 0.8~4.2 μmol L⁻¹의 범위로 나타났으며, 굴양식장(OF) 저층에서 가장 높게 나타났다. 질산성질소+아질산성질소의 농도는 0.8~1.1 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었다. 인산염 농도는 0.8~1.1 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었다. 규산염 농도는 19.5~22.9 μmol L⁻¹의 범위로 조사되었으며, 2018년 5월에 비해 최대 4배 높은 것으로 나타났다.

표 3.3.5 양식장 표, 저층에서의 수층 특성

시기	정점	수층	수온	염분	Chl.a	DO	NH ₄ ⁺	NO _x	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄	
			(°C)	(PSU)	(µg L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(µmol L ⁻¹)				
June, 2017	FF	표	19.4	33.9	-	7.58	-	-	-	-	
		저	18.1	33.9	-	6.79	-	-	-	-	
	TMSS	표	17.9	33.8	-	6.75	-	-	-	-	
		저	17.7	33.9	-	6.81	-	-	-	-	
	OF	표	21.1	33.8	-	9.14	-	-	-	-	
		저	18.3	33.9	-	5.85	-	-	-	-	
	FF-C	표	18.5	33.9	-	7.24	-	-	-	-	
		저	18.1	33.9	-	6.99	-	-	-	-	
	TMSS-C	표			-	-	-	-	-	-	
		저			-	-	-	-	-	-	
	OF-C	표	21.1	33.8	-	8.87	-	-	-	-	
		저	18.4	33.9	-	5.45	-	-	-	-	
	May, 2018	FF	표	16.2	32.9	1.36	7.55	2.7	0.8	0.3	8.2
			저	16.1	33.1	1.10	6.55	2.3	0.7	0.3	8.4
TMSS		표	20.5	31.2	0.80	7.01	0.7	0.3	0.1	7.0	
		저	17.7	32.1	1.65	7.09	0.8	0.4	0.1	8.0	
OF		표	18.8	33.2	3.05	6.55	1.9	1.0	0.3	6.0	
		저	15.8	33.4	3.39	5.71	2.0	0.7	0.9	11.9	
FF-C		표	-	-	-	-	-	-	-	-	
		저	-	-	-	-	-	-	-	-	
TMSS-C		표	17.7	32.9	1.35	7.21	0.7	0.4	0.1	5.6	
		저	15.9	33.0	1.31	6.78	0.8	0.4	0.3	8.1	
OF-C		표	19.6	32.1	2.80	7.11	1.9	1.3	0.2	3.6	
		저	15.8	33.2	2.20	6.20	1.9	0.8	0.6	11.8	
Nov., 2018		FF	표	15.8	32.8	0.81	7.31	1.76	10.1	0.8	19.5
			저	15.9	33.2	1.52	7.20	1.4	10.5	1.1	19.5
	TMSS	표	15.6	33.1	ND	7.59	1.1	10.2	0.8	20.1	
		저	15.4	33.3	0.01	7.63	1.0	10.1	0.8	20.3	
	OF	표	16.0	33.2	0.01	7.22	2.9	10.7	0.9	21.7	
		저	15.3	33.5	0.02	7.00	4.2	10.5	1.1	22.9	
	FF-C	표	15.8	33.2	ND	7.81	1.0	10.1	0.8	19.5	
		저	15.8	33.5	0.01	7.82	1.2	10.2	0.8	19.6	
	TMSS-C	표	15.4	33.1	0.81	7.99	1.0	10.2	0.8	20.4	
		저	15.1	33.5	0.92	7.98	0.8	10.4	0.8	20.6	
	OF-C	표	15.4	32.9	1.71	7.82	3.6	10.5	1.0	22.0	
		저	15.0	33.2	ND	7.73	3.9	10.6	1.1	22.5	

(2) 퇴적물 산소소모율

벤틱챔버에서 시간에 따른 산소소모율을 그림 3.3.11~14에 나타내었다. 2017년 6월 벤틱챔버에서 시간에 따른 산소감소율은 저도 양식장(FF)에서 $26.4 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 굴양식장(OF, $15.1 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$), 통영해양과학기지 양식장(TMSS, $8.2 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$) 순으로 높게 나타났다. 저도 어류양식장 대조구(FF-C)와 굴양식장 대조구(OF-C)에서 시간에 따른 산소감소율은 각각 $7.4, 5.5 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 조사되었다. 2017년 10월 벤틱챔버에서 시간에 따른 산소감소율은 6월과 마찬가지로 저도 어류양식장(FF)에서 $26.7 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 통영해양과학기지 양식장(TMSS, $14.0 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$), 굴 양식장($8.2 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$) 순으로 높게 나타났다. 저도 어류양식장, 통영과학기지 양식장 굴 양식장 대조구 지역에서 시간에 따른 산소감소율은 각각 $4.9, 7.0, 5.2 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 양식장 보다 최대 5배 낮게 조사되었다. 2018년 5월 벤틱챔버에서 시간에 따른 산소감소율은 저도 양식장(FF)에서 $17.3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 통영해양과학기지 양식장(TMSS, $11.0 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$), 굴양식장(OF, $10.2 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$) 순으로 높게 나타났다. 통영해양과학기지 대조구(TMSS-C)와 굴양식장 대조구(OF-C)에서 시간에 따른 산소감소율은 각각 $4.7, 7.5 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 조사되었다. 2018년 11월 벤틱챔버에서 시간에 따른 산소감소율은 저도 어류양식장(FF), 통영해양과학기지 양식장(TMSS), 굴양식장(OF)에서 각각 $13.0, 13.4, 14.3, 11.0 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 으로 양식장 사이의 차이가 나타나지 않았다. 저도 어류양식장, 통영해양과학기지 양식장, 굴양식장의 대조구(FF-C, TMSS-C, OF-C)에서 시간에 따른 산소감소율은 각각 $2.9, 4.4, 5.3, 11.0 \mu\text{mol L}^{-1} \text{h}^{-1}$ 으로 조사되었다.

벤틱챔버에서의 시간에 따른 산소감소율을 면적단위로 환산한 퇴적물 산소소모율을 표 3.3.6에 나타냈다. 2018년 11월을 제외하고는 퇴적물 산소소모율은 저도 어류양식장(FF)에서 $101.8 \sim 157.0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 가장 높게 측정되었으며, 대조구($17.1 \sim 43.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 보다 약 4-5배 높게 조사되었다. 통영과학기지 양식장(TMSS)에서 퇴적물 산소소모율은 $48.2 \sim 82.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 특정되었으며, 대조구 보다 약 2-3배 높은 것으로 조사되었다. 굴양식장(OF)에서 퇴적물 산소소모율은 $48.2 \sim 88.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 조사되었으며, 대조구 보다 약 2-3배 높게 조사되었다.

4번의 조사동안 양식장 별 평균 비료를 실시하였다(그림 3.3.15). 저도 어류양식장(FF), 통영해양과학기지 양식장(TMSS), 굴양식장(OF)에서 평균은 각각 $122.6, 68.6, 70.2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 계산되었으며, 양식장 대조구는 각각 $29.8, 31.6, 34.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 계산되었다. 저도 어류양식장(FF)은 다른 양식장(TMSS, OF)과 대조구 보다 통계적으로 높은 수치를 나타낸($p < 0.05$, one-way ANOVA) 반면, 통영해양과학기지 양식장과 굴양식장(OF)는 대조구와 통계적으로 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$, one-way ANOVA).

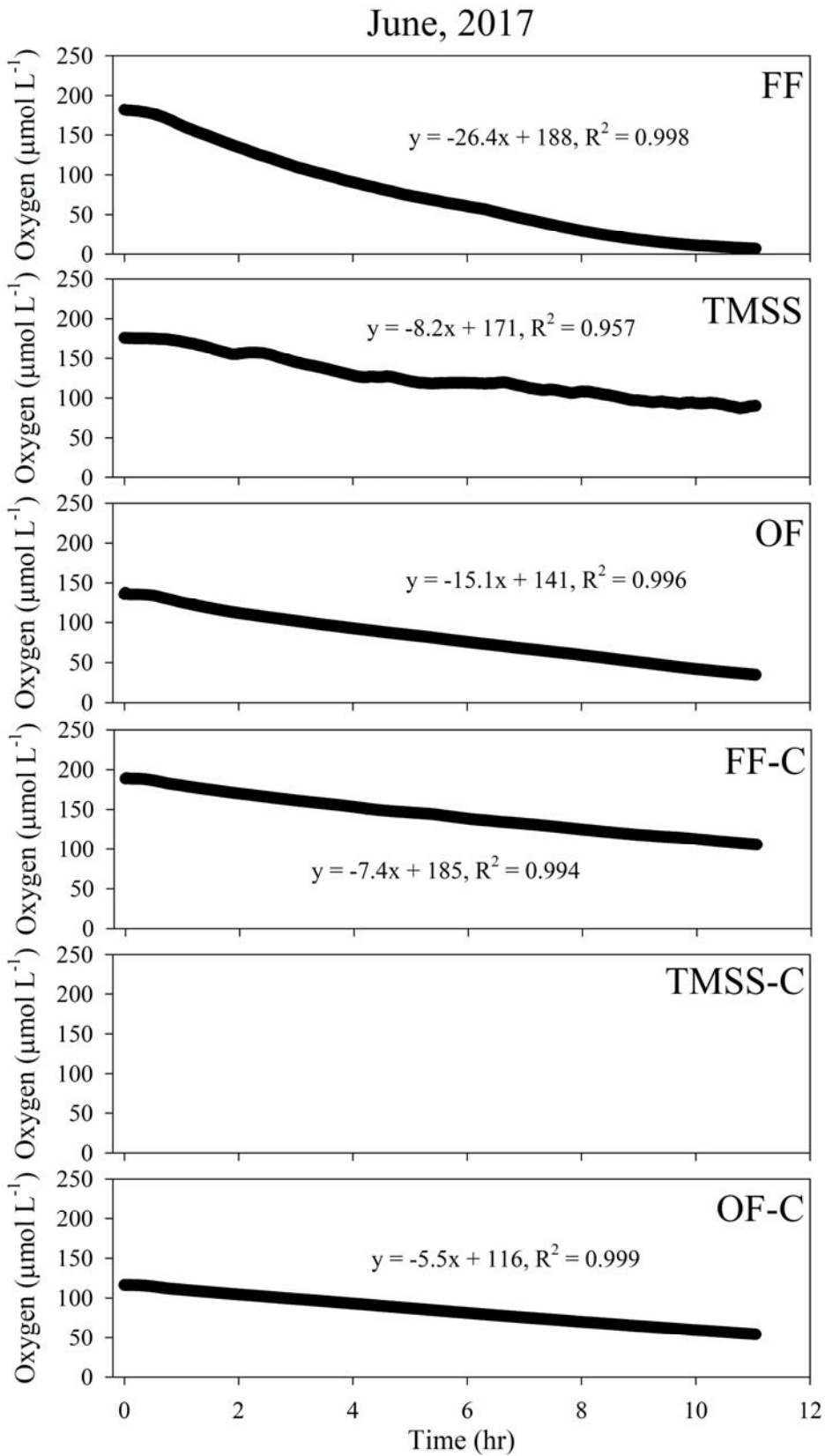


그림 3.3.11 2017년 6월 퇴적물 산소소모율

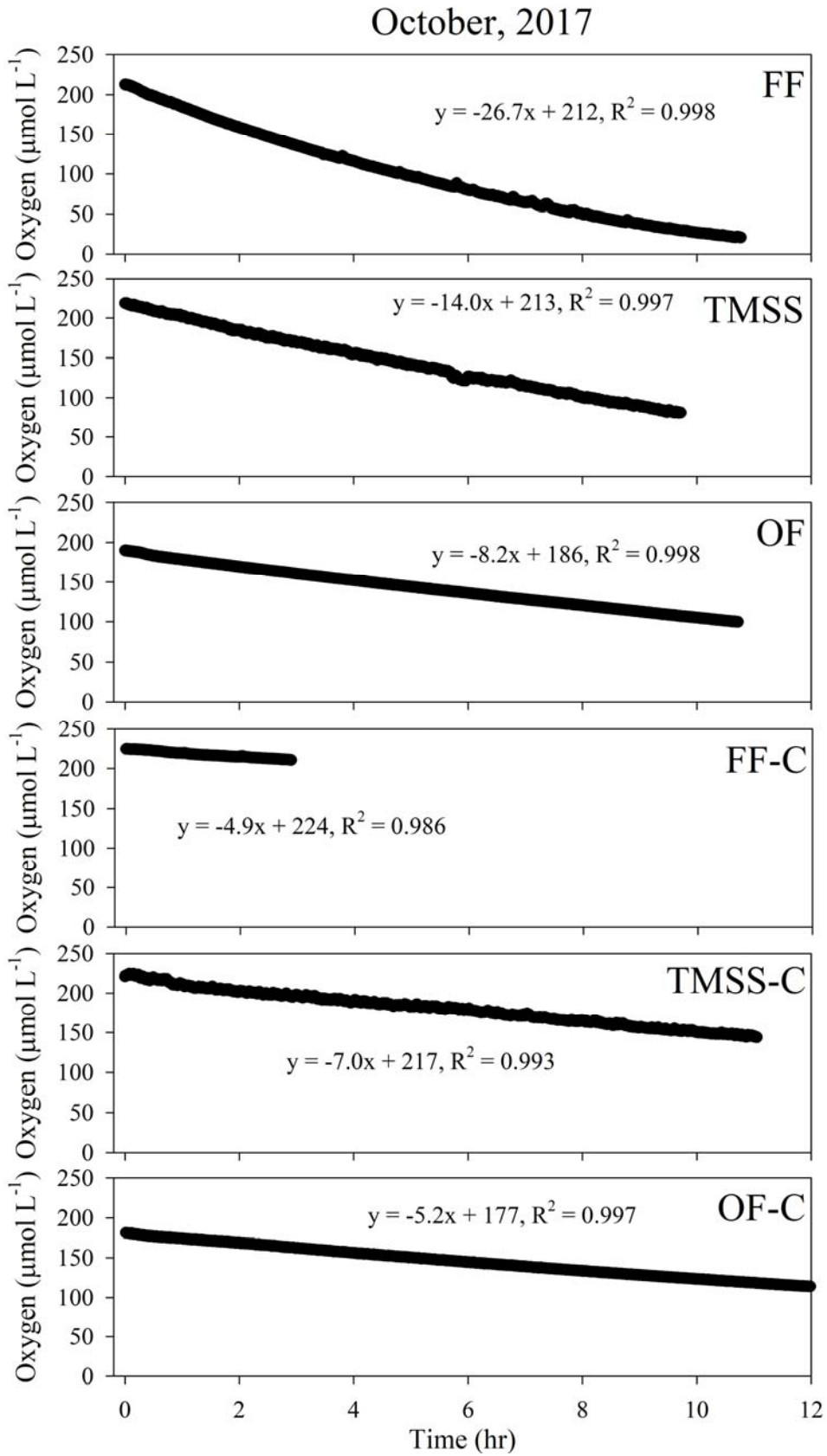


그림 3.3.12 2017년 10월 퇴적물 산소소모율

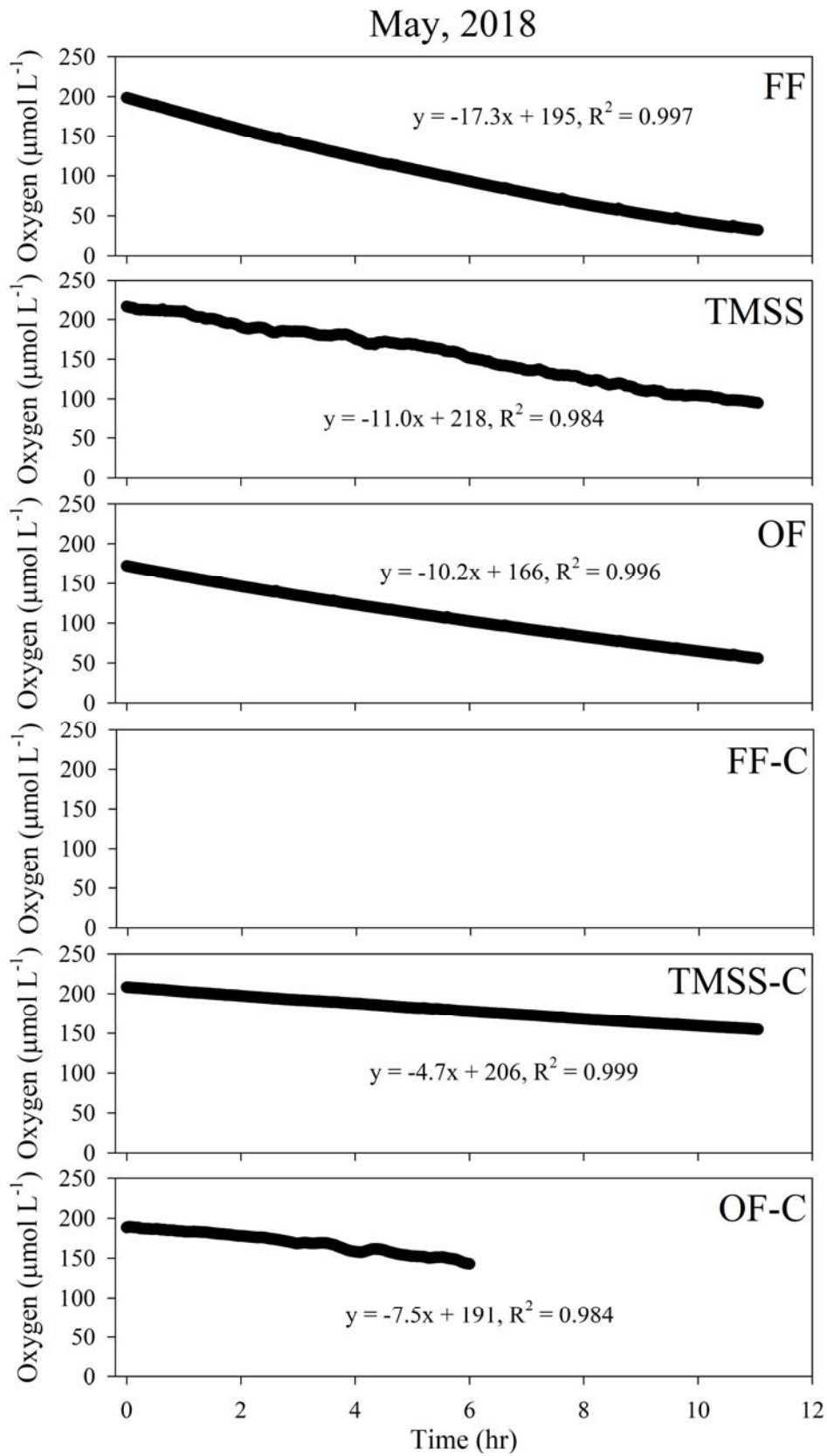


그림 3.3.13 2018년 5월 퇴적물 산소소모율

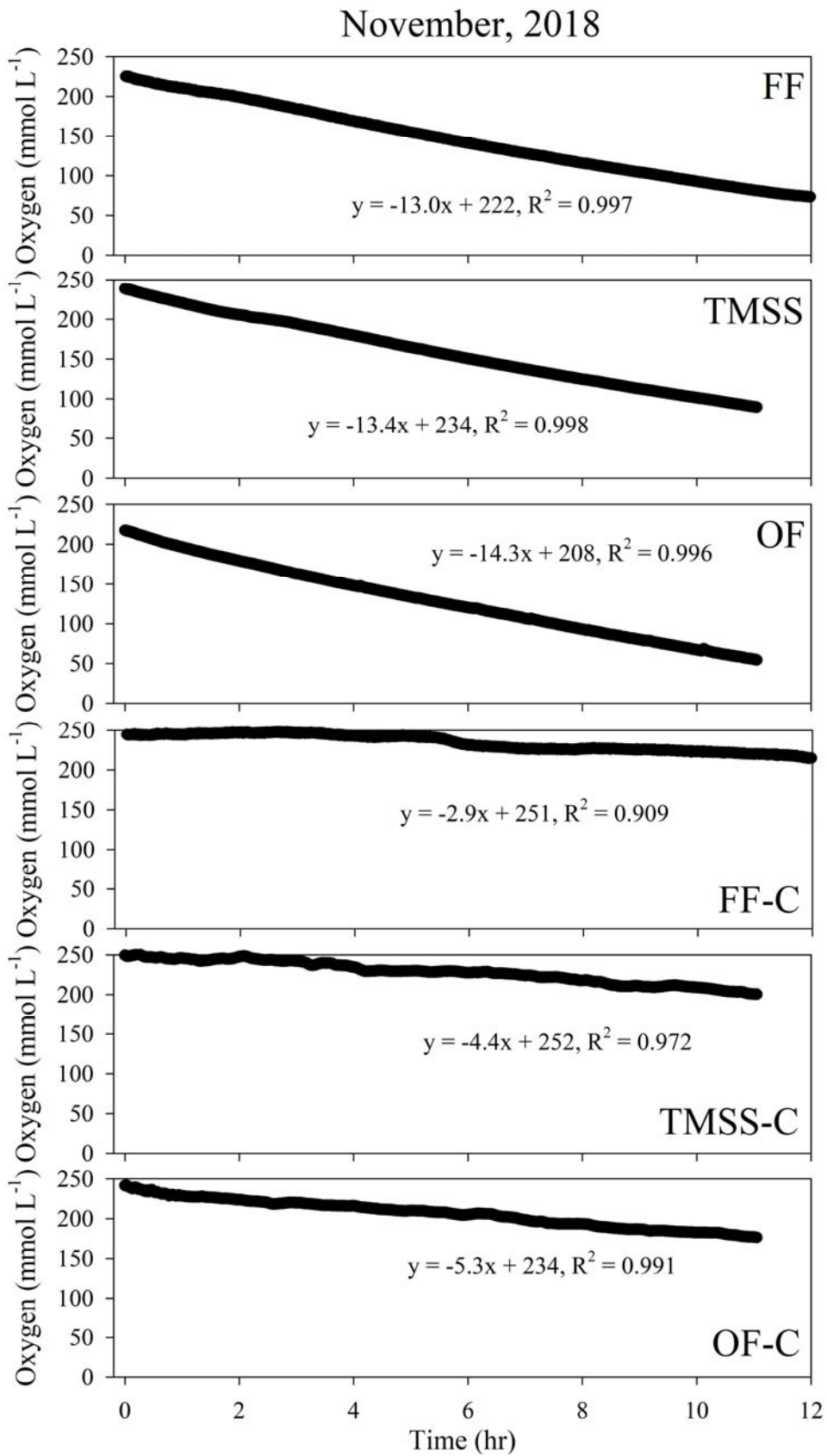


그림 3.3.14 2018년 11월 퇴적물 산소소모율

표 3.3.6 2017-2018년 퇴적물 산소소모율

(단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

	June, 2017	October, 2017	May, 2018	November, 2018
FF	155.2	157.0	101.8	76.4
TMSS	48.2	82.3	64.9	78.8
OF	88.8	48.2	59.7	84.1
FF-C	43.5	28.8	-	17.1
TMSS-C	-	41.2	27.8	25.9
OF-C	32.3	30.6	44.1	31.2

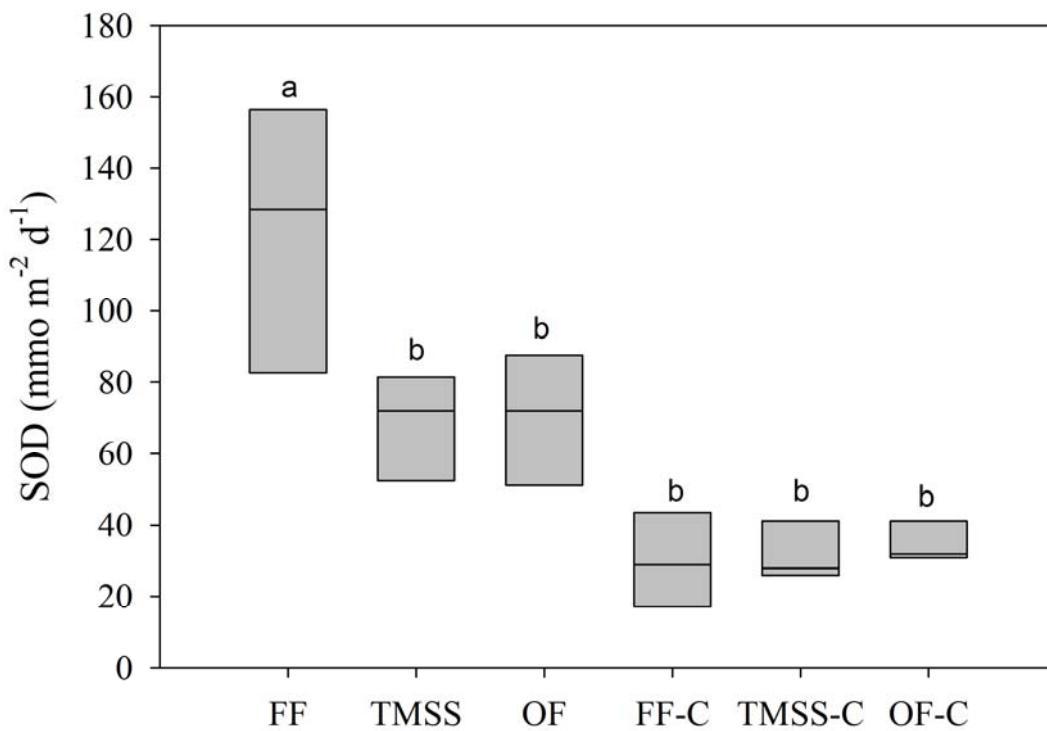


그림 3.3.15 양식장 별 퇴적물 산소소모율의 평균 비교

(3) 유기탄소 수지 추정

유기탄소 수지 추정을 위한 실험은 2018년도 5월과 11월에 진행하였다(그림3.3.16, 표 3.3.7). 2017년 5월 sediment trap을 이용하여 계산한 유기탄소의 수직적 플럭스는 저도어류양식장(FF)에서 $97 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 플럭스로 조사되었으며, 통영해양과학기지 양식장(TMSS, $72 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), 굴양식장(OF, $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 순으로 높게 나타났다. 퇴적물 산소소모율(SOD)을 Redfield ratio($\text{C}:\text{O}_2=106:138$)을 이용하여 탄소단위로 변환한 유기탄소 산화율(C-SOD)은 저도어류양식장(FF)에서 78.2로 가장 높게 조사되었으며, 통영해양과학기지 양식장(TMSS)와 굴양식장(OF)는 각각 $49.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $45.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 조사되었다. 수직적으로 유입된 탄소의 플럭스와 퇴적물에서 유기탄소산화율의 차이로 탄소 매몰량을 산정하였다. 퇴적물로 매몰되는 탄소는 통영해양과학기지 양식장(TMSS)에서 $22.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높게 조사되었으며, 저도어류양식장(FF, $22.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)와 굴양식장(OF, $4.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 순으로 높게 나타났으며, 수층으로 부터 유입된 탄소의 약 70% 이상이 분해되는 것으로 조사되었다. 반면, 2018년 11월 수층에서 퇴적물로 유입된 유기탄소의 수직적 플럭스는 굴양식장(OF, $129 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)에서 가장 높게 나타났으며, 통영해양과학기지 양식장(TMSS,), 저도어류양식장(FF,) 순으로 높게 나타났다. 양식장 퇴적물에서 유기탄소 분해율(C-SOD)은 58.7~64.6 $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 양식장 사이의 차이는 없었다. 퇴적물로 매몰되는 유기탄소는 굴양식장에서 $64.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 통영해양과학기지 양식장과 저도어류양식장은 각각 45.5, $40.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 조사되었고, 수층으로부터 유입된 탄소의 약 40% 이상이 매몰되는 것으로 조사되었다.

표 3.3.7 2017-2018년 퇴적물 유기탄소 수지

(단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

Date	Station	Vertical C flux	SOD	C-SOD	Burial C
May, 2017	FF	97±24	101.8	78.2	18.8
	TMSS	72±5	64.9	49.9	22.1
	OF	50±3	59.7	45.9	4.1
	FF-C	-	-	-	-
	TMSS-C	34±2	27.8	21.4	12.6
	OF-C	35±2	44.1	33.9	1.1
Nov., 2018	FF	99±11	76.4	58.7	40.3
	TMSS	106±8	78.8	60.5	45.5
	OF	129±8	84.1	64.6	64.4
	FF-C	27±1	17.1	13.1	13.9
	TMSS-C	35±3	25.9	19.9	15.1
	OF-C	46±14	31.2	24.0	22.0

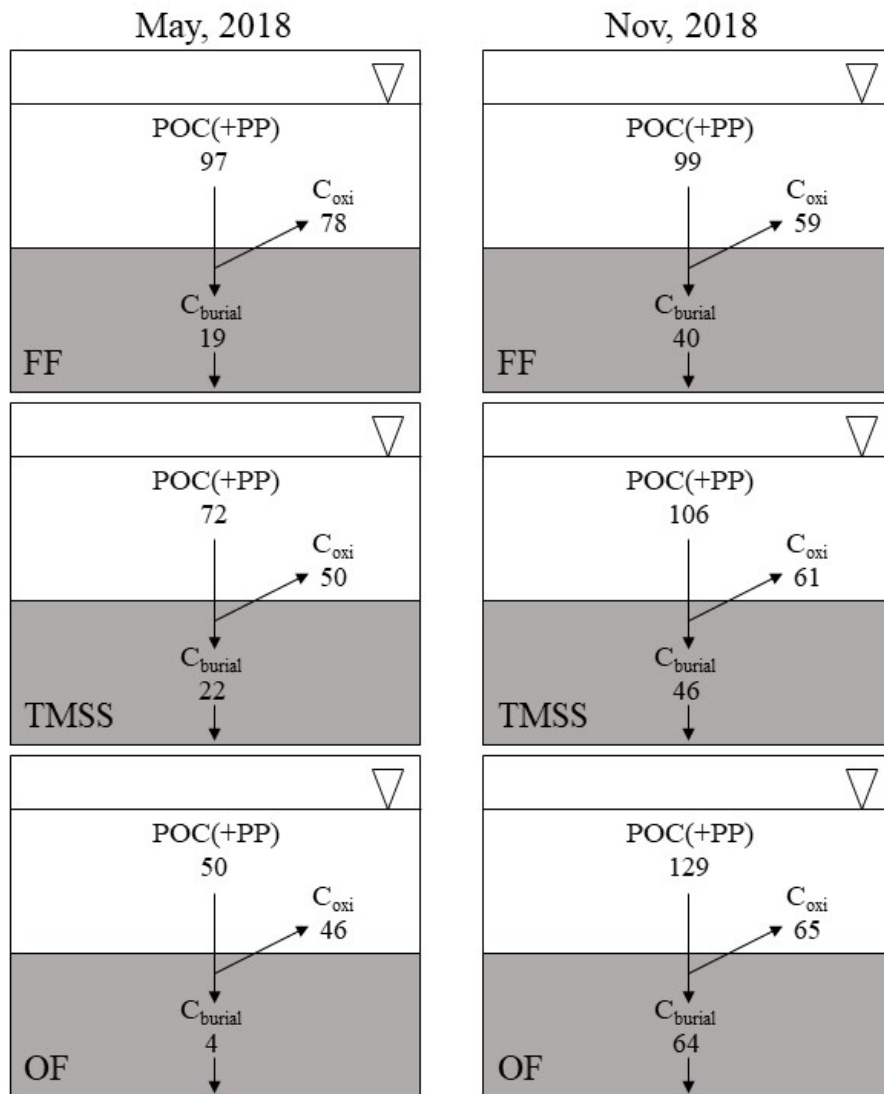


그림 3.3.16 양식장에서 탄소순환

라. 결론

퇴적물 산소소모율은 양식장 운영기간이 40년 이상이고 밀식양식을 하는 저도 양식장에서 가장 높게 나타난 반면, 통영해양과학기술지 양식장과 패류 양식장인 굴양식장에서는 통계적으로 대조구와 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 퇴적물 산소소모율이 양식장 운영기간, 양식 밀도 뿐만 아니라 품종에 따라 다르게 나타난다는 것을 의미한다. 퇴적물 내 탄소의 매몰량은 11월이 5월 보다 높은 것으로 나타났다. 두 계절 사이에 퇴적물 산소소모율은 차이가 나타나지 않은 반면, 탄소의 수직적 플럭스는 11월이 높은 것으로 나타났다. 이는 11월이 5월 보다 양식장 운영에 따른 유기물의 배출량이 많은 것을 의미하며, 양식장 내 퇴적물이 탄소의 저장고로서 역할을 하는 것으로 사료된다.

5. 양식장 퇴적물 영양염 플럭스 추정

가. 서론

퇴적물에서 유기물 분해 시 질소와 인은 공극수로 해리되며, 퇴적물-수층경계면에서 농도차이에 의해 수층으로 용출된다. 유기물 분해에 의해 퇴적물로부터 용출된 질소와 인은 저층-수층 생태연결고리(benthic-pelagic coupling)를 통하여 일차생산자가 필요로하는 질소와 인의 상당부분을(30~80%) 지지하는 등 연안생태계의 생산력을 조절하는 중요한 요인으로 작용한다. (Bullied 1984; Hopkins et al. 2001; Kemp and Boyton 1984; Lawrence et al. 2004). 그러나 폐쇄된 연안 해양환경에서 저층으로부터의 과도한 영양염(질소, 인) 용출은 부영양화 및 식물플랑크톤의 대증식 또는 적저와 같은 유해조류의 출현을 야기한다. 따라서 유기물 부하 및 분해가 활발한 양식장 퇴적물에서의 질소와 인의 생지화학적 순환을 이해하기 위해서는 퇴적물에서 영양염 용출을 측정이 필수적이다.

본 연구에서는 벤틱랜더를 이용하여 저층 영양염 용출율을 측정하여 퇴적물에서 영양염 용출이 일차생산자에게 미치는 영향에 대하여 토의하였다.

나. 연구방법

(1) 연구정점

연구지역은 장비 시험 및 수정보완을 위한 현장 시험과 마찬가지로 통영 및 고성-자란만의 어류양식장(FF), 통영과학기지(TMSS), 굴양식장(OF), 대조구(FF-C, OF-C)에서 실시하였다(그림 3.3.17). 2017년 6월과 10월, 2018년 5월과 11월 총 4회에 걸쳐 조사를 진행하였다.

(2) 연구방법

(가) 현장조사

연안용으로 개발한 현장용 벤틱챔버를 이용하여 통영 부근 어류 및 굴양식장에서 퇴적물의 저층 영양염 플럭스를 측정했다(Lee et al. 2010). 간략히 설명하면, 벤틱챔버는 사각형의 배양 챔버 형태로 뚜껑에는 교반기가 장착되어 있다. 미리 설정된 시간에 채수할 수 있는 자동채수기가 장착되어 있다. Belcl는 소형선박의 크레인을 이용하여 해저면에 설치했으며, 전 설치과정은 다이버의 도움으로 진행되었다. 배양시료는 자동채수기가 2시간 간격으로 약 50 mL씩

분취했다. 선상으로 회수된 시료는 즉시 0.45 μm 박막여과지를 이용하여 여과한 후 분석시까지 냉동보관했다.

(나) 실험실 분석

영양염 분석은 영양염 자동분석기(Proxima, Alliance, Inc.)로 분석하였다.

(다) 저층 플럭스 계산

퇴적물-해수 경계면을 통과하는 용존산소의 저층플럭스는 아래의 식으로 계산되었다.

$$BF = (dC/dt) \times (V/A) \text{ --- (1)}$$

식1에서 BF는 물질의 저층 플럭스($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dC/dt 는 시간 증가에 따른 용존물질의 1차 선형 변화 기울기($\text{mmol L}^{-1} \text{d}^{-1}$), V는 챔버의 부피(m^3), 그리고 A는 챔버의 면적(m^2)이다.

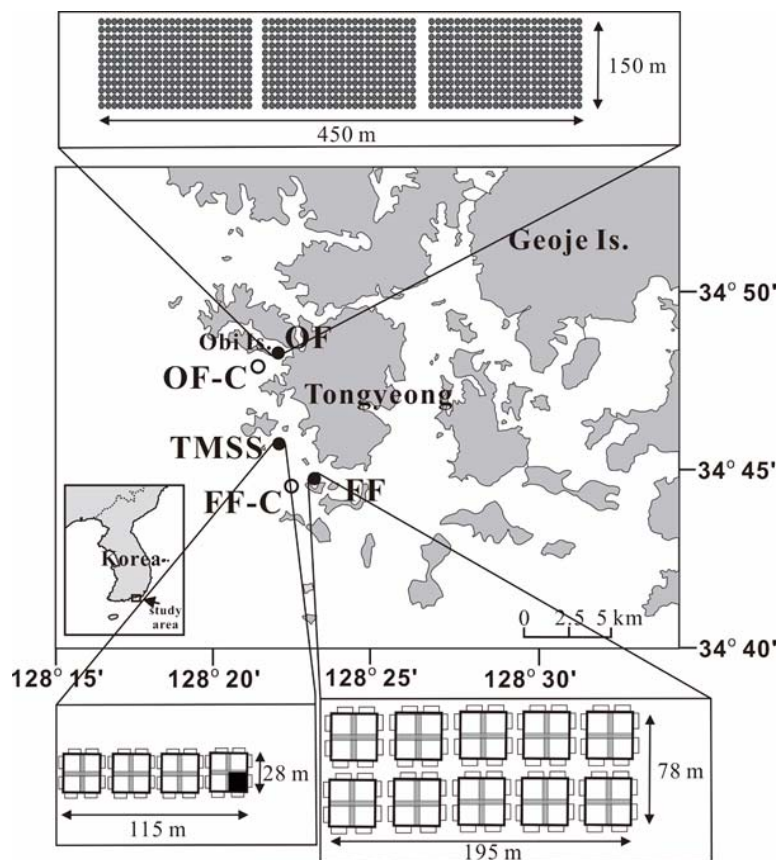


그림 3.3.17 퇴적물 영양염 용출을 조사정점

다. 결과 및 토의

(1) 저층 영양염 용출율

벤틱 챔버에서 시간에 따른 영양염의 증·감을 그림 3.3.18~21과 표 3.3.7~10에 나타내었다. 2017년 6월 벤틱챔버에서 시간에 따른 암모니움은 $0.57\sim 12.70 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 시간에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 저도 어류양식장(FF)에서 가장 높은 용출율을 보였으며, 굴양식장 대조구(OF-C)에서 가장 낮은 용출율을 보였다. 질산성질소+아질산성질소 역시 $0.66\sim 2.30 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 정점에서 용출되는 것으로 조사되었으며, 통영해양과학기술지양식장(TMSS)에서 가장 높은값으로 용출되었다. 인산염은 $0.15\sim 3.25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 조사정점에서 용출되는 것으로 조사되었으며, 저도 어류양식장에서 가장높은 값을 나타낸 반면, 굴양식장 대조구(TMSS-C)에서 가장 낮은 값으로 조사되었다. 규산염은 $7.59\sim 21.40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 조사정점에서 용출되는 것으로 나타났으며, 굴양식장(OF)에서 가장 높은 값으로 용출된 반면, 통영과학기술지 양식장(TMSS)에서 가장 낮게 용출되었다.

2017년 6월과는 다르게 10월 벤틱챔버에서 시간에 따른 암모니움은 감소하는 것으로 나타났으며, 통영과학기술지 양식장 대조구(TMSS-C)에서 유입률은 $0.46 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 가장 높은 값으로 나타났으며, 저도어류양식장(FF)과 통영과학기술지 양식장(TMSS)에서 유입률은 $0.07 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 낮은 값으로 조사되었다. 질산성질소+아질산성질소는 양식장 대조구 정점에서는 유입되는 것으로 나타났으나, 저도 어류양식장(FF), 통영과학기술지 양식장(TMSS), 굴양식장(OF)에서는 각각 $3.39, 5.08, 0.21 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 용출되는 것으로 조사되었다. 인산염은 저도 양식장 대조구(FF-C)에서는 유입되는 것으로 조사된 반면, 저도 어류양식장(FF), 통영과학기술지 양식장(TMSS), 굴 양식장(OF), 통영과학기술지 양식장 대조구(TMSS-C)에서는 각각 $0.95, 0.42, 0.07, 0.35 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 용출되는 것으로 조사되었다. 규산염은 $4.34\sim 15.73 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 조사정점에서 용출되는 것으로 나타났으며, 저도 어류양식장에서(FF) $15.73 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 값으로 용출된 반면, 저도 어류양식장 대조구(FF-C)에서는 $4.34 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 낮게 용출되었다.

2018년 5월 벤틱챔버에서 시간에 따른 암모니움은 굴양식장 대조구(OF-C)를 제외하고는 감소하는 것으로 나타났으며, 저도 어류양식장(FF)에서 용출율은 $3.83 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 가장 높은 값으로 나타났으며, 통영과학기술지 양식장(TMSS)에서 용출율은 $1.28 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 낮은 값으로 조사되었다. 질산성질소+아질산성질소는 $0.10\sim 0.59 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 정점에서 용출되는 것으로 조사되었으며, 굴양식장(OF)에서 가장 높은값으로 용출되었다. 인산염은 $\text{ND}\sim 1.15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 굴양식장 대조구(OF-C) 제외하고는 모든 조사정점에서 용출되는 것으로 조사되었으며, 저도 어류양식장에서 가장높은 값을 나타낸 반면, 통영과학기술지

지 양식장 대조구에서 가장 낮은 값으로 조사되었다. 규산염은 $3.54 \sim 10.56 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 조사정점에서 용출되는 것으로 나타났으며, 굴양식장(OF) $10.56 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 값으로 용출된 반면, 굴양식장 대조구(OF-C)에서는 $3.54 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 낮게 용출되었다.

2018년 11월 벤틱챔버에서 시간에 따른 암모니움은 $0.07 \sim 4.97 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 용출되는 것으로 나타났으며, 굴양식장에서 가장 높은값로 저도 어류양식장에서 가장 낮은 값으로 조사되었다. 질산성질소+아질산성질소는 통영과학기지 양식장(TMSS)와 굴양식장 대조구(OF-C)를 제외하고는 유입되는 것으로 나타났으며, 굴양식장(OF)에서 유입률은 $0.49 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타낸 반면, 통영과학기지 양식장(TMSS)과 굴양식장 대조구(OF)는 각각 $0.73, 0.07 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 용출되고 있었다. 인산염은 $0.001 \sim 0.83 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 조사 정점에서 용출되는 것으로 나타났으며, 저도 어류양식장에서 가장 높은 값으로 용출되고 있었다. 규산염은 $2.37 \sim 12.31 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 모든 조사정점에서 용출되는 것으로 나타났으며, 굴양식장에서(OF) 가장 높은 값으로 용출된 반면, 굴양식장 대조구(FF-C)에서는 가장 낮게 용출되었다.

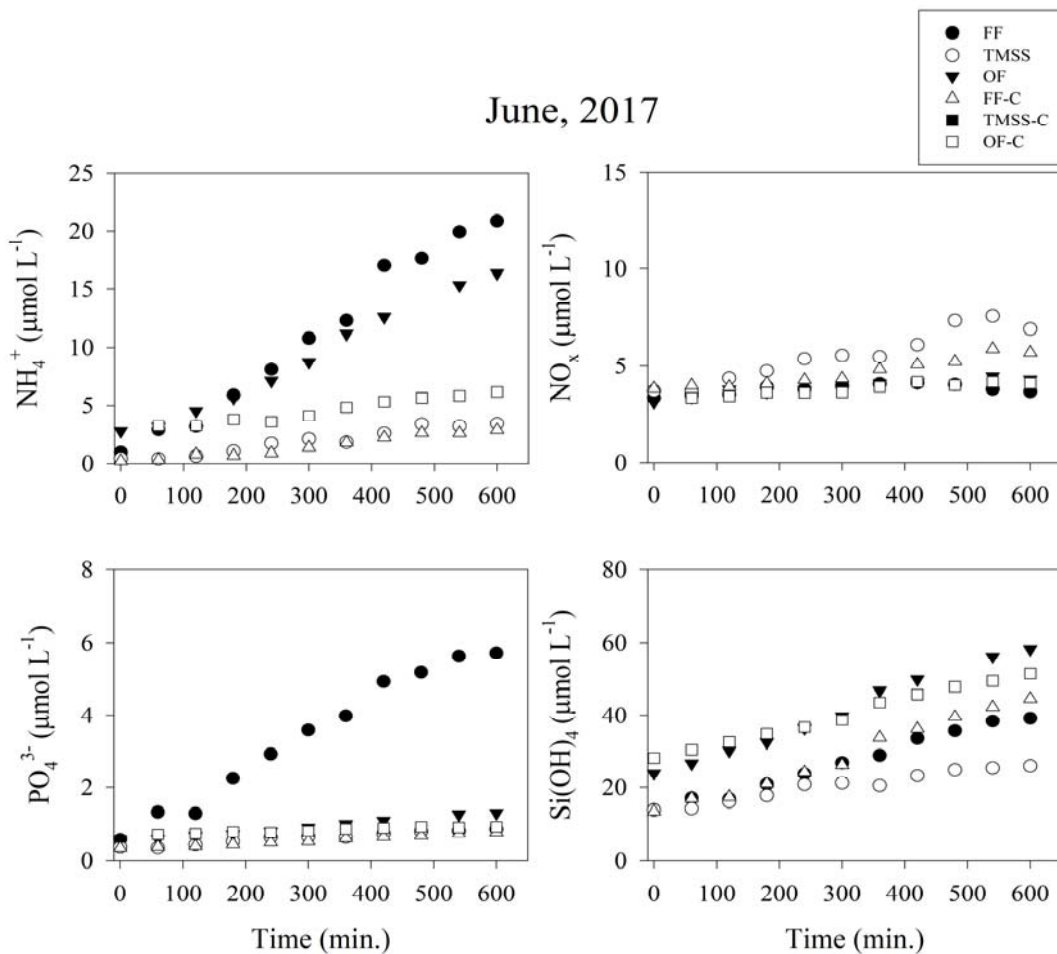


그림 3.3.18 2017년 6월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율

표 3.3.8 2017년 6월 저층 영양염 용출율

(단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Date	Station	NH_4^+	NO_x	PO_4^{3-}	Si(OH)_4
June, 2017	FF	12.70	0.66	3.25	15.92
	TMSS	2.01	2.30	0.32	7.59
	OF	8.64	0.67	0.46	21.40
	FF-C	1.70	1.26	0.27	19.38
	TMSS-C	-	-	-	-
	OF-C	0.57	2.13	0.15	14.40

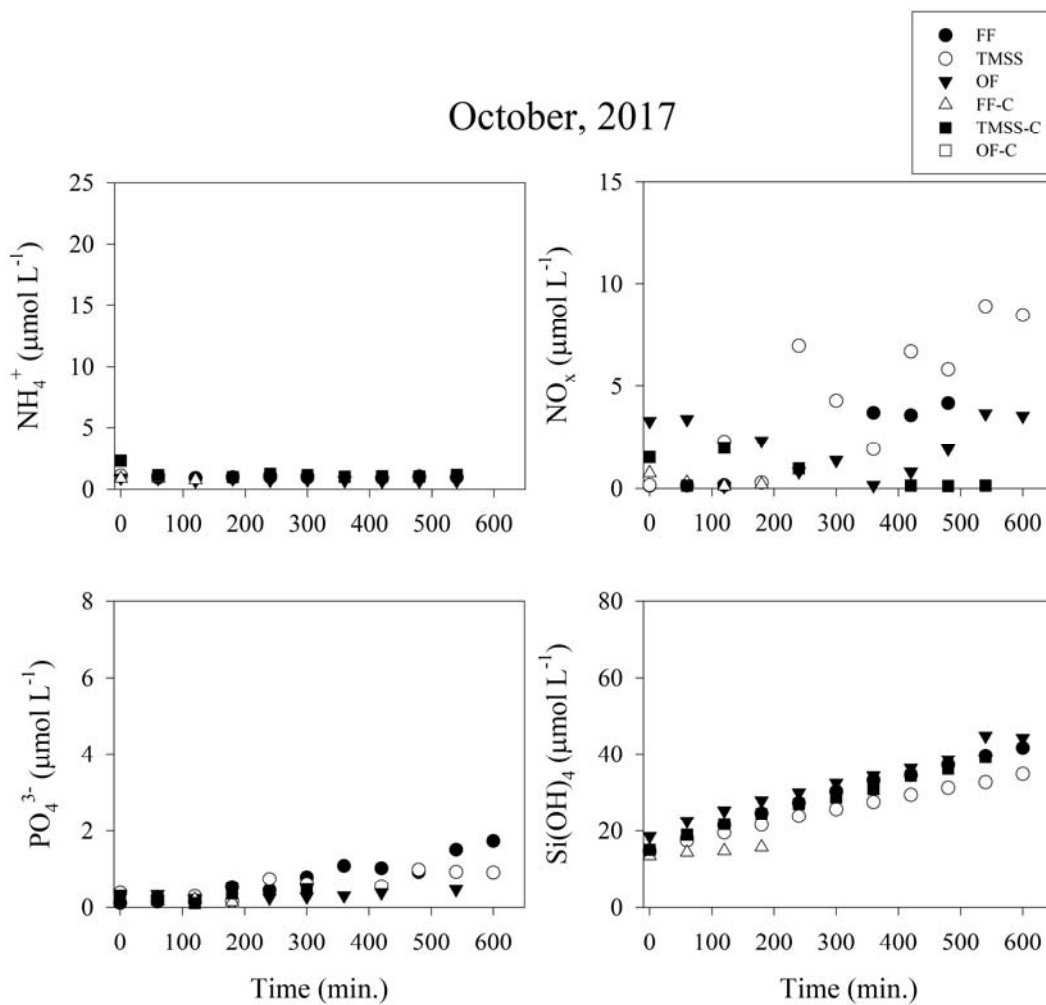


그림 3.3.19 2017년 10월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율

표 3.3.9 2017년 10월 저층 영양염 용출율

(단위: mmol m⁻² d⁻¹)

Date	Station	NH ₄ ⁺	NO _x	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
Oct., 2017	FF	-0.07	3.39	0.95	15.73
	TMSS	-0.07	5.08	0.42	11.50
	OF	-0.14	0.21	0.07	14.82
	FF-C	-0.35	-1.06	-0.07	4.34
	TMSS-C	-0.46	-0.81	0.35	14.99
	OF-C	-	-	-	-

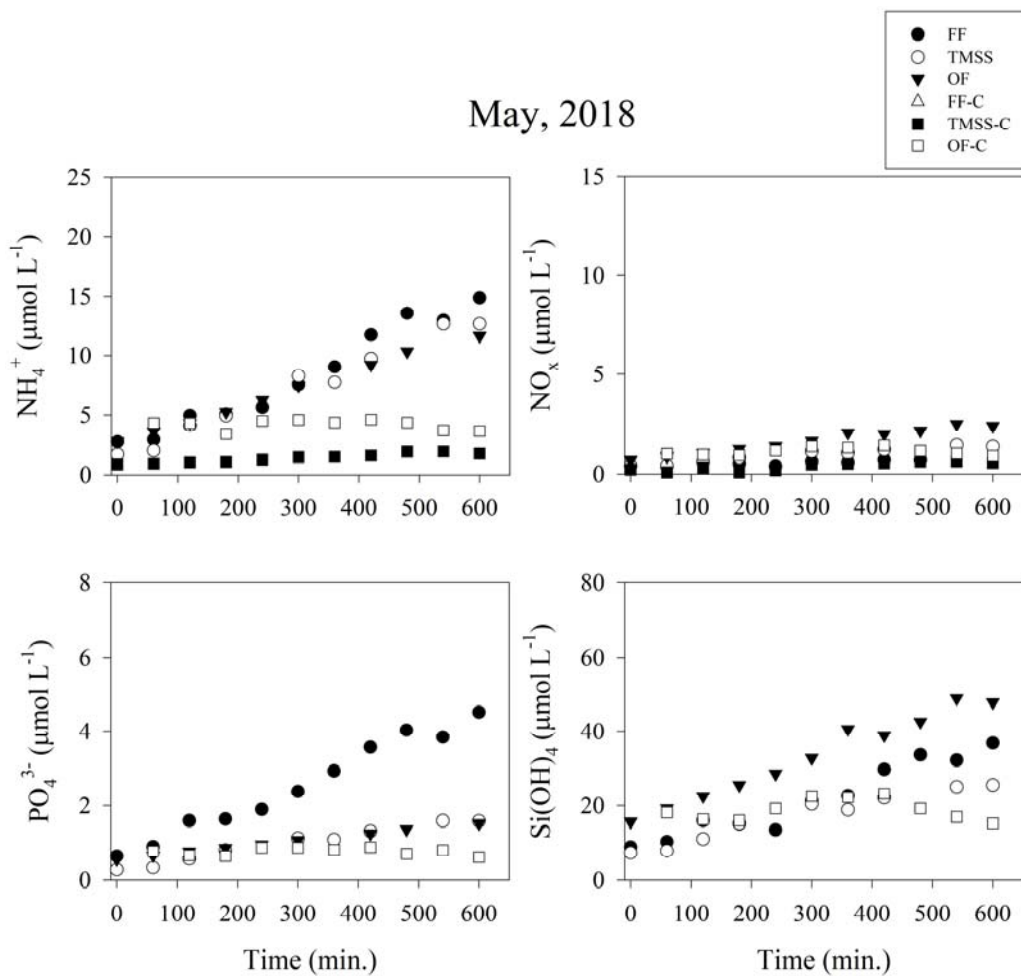


그림 3.3.20 2018년 5월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율

표 3.3.10 2018년 5월 저층 영양염 용출율

(단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Date	Station	NH_4^+	NO_x	PO_4^{3-}	Si(OH)_4
May, 2018	FF	3.83	0.10	1.15	8.47
	TMSS	3.58	0.36	0.44	6.10
	OF	2.71	0.59	0.29	10.56
	FF-C	-	-	-	-
	TMSS-C	1.28	0.37	0.18	7.41
	OF-C	-0.10	0.25	-	3.54

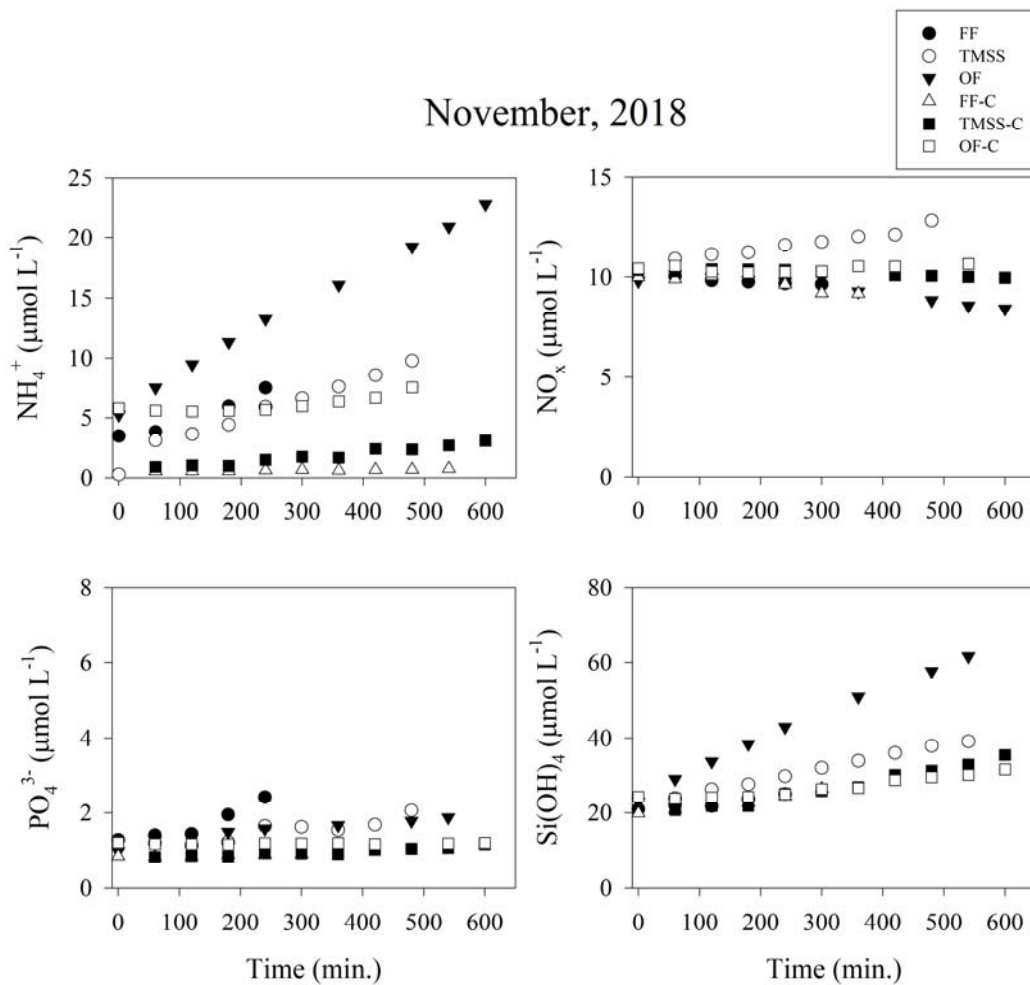


그림 3.3.21 2018년 11월 벤틱챔버에서 시간에 따른 영양염 증·감율

표 3.3.11 2018년 11월 저층 영양염 용출율

(단위: mmol m⁻² d⁻¹)

Date	Station	NH ₄ ⁺	NO _x	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
Nov., 2018	FF	3.00	-0.27	0.83	2.91
	TMSS	3.16	0.73	0.34	5.70
	OF	4.97	-0.49	0.25	12.31
	FF-C	0.07	-0.45	0.04	3.66
	TMSS-C	0.73	-0.13	0.10	4.87
	OF-C	0.59	0.07	0.001	2.37

(2) Benthic-pelagic coupling

저층 영양염 용출이 일차생산력에 미치는 영향에 대하여 표 3.3.12에 나타내었다. 2017년 6월 일차생산자가 필요로 하는 용존무기질소와 용존무기인은 각각 17.46 mmol m⁻² d⁻¹, 3.27 mmol m⁻² d⁻¹로 조사되었으며, 양식장에서 저층 용존무기질소와 용존무기인 용출율은 각각 4.31~13.36 mmol m⁻² d⁻¹, 0.32~3.25 mmol m⁻² d⁻¹로 조사되었다. 일차생산자가 필요로하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 25~77%, 10~99%인 것으로 나타났다. 양식장 대조구에서 일차생산자가 필요로하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 15~17%, 5~8%인 것으로 조사되었다.

2017년 10월 일차생산자가 필요로 하는 용존무기질소와 용존무기인은 각각 10.09 mmol m⁻² d⁻¹, 0.20 mmol m⁻² d⁻¹로 조사되었으며, 양식장에서 저층 용존무기질소와 용존무기인 용출율은 각각 0.07~5.01 mmol m⁻² d⁻¹, 0.07~0.95 mmol m⁻² d⁻¹로 조사되었다. 일차생산자가 필요로하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 6~460%, 35~475%인 것으로 나타났다. 양식장 대조구에서 일차생산자가 필요로하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 0%, 0~175%인 것으로 조사되었다.

2018년 5월 일차생산자가 필요로 하는 용존무기질소와 용존무기인은 각각 17.46 mmol m⁻² d⁻¹, 3.27 mmol m⁻² d⁻¹로 조사되었으며, 양식장에서 저층 용존무기질소와 용존무기인 용출율은 각각 3.30~3.94 mmol m⁻² d⁻¹, 0.29~1.15 mmol m⁻² d⁻¹로 조사되었다. 일차생산자가 필요로하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 19~23%, 9~35%인 것으로 나타났다. 양식장 대조구에서 일차생산자가 필요로하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 1~9%, 0~6%인 것으로 조사되었다.

2018년 11월 일차생산자가 필요로 하는 용존무기질소와 용존무기인은 각각 $10.09 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 조사되었으며, 양식장에서 저층 용존무기질소와 용존무기인 용출율은 각각 $2.73 \sim 4.48 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.25 \sim 0.83 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 조사되었다. 일차생산자가 필요로 하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 250~411%, 125~415%인 것으로 나타났다. 양식장 대조구에서 일차생산자가 필요로 하는 영양염 대비 저층 영양염 용출율은 용존무기질소와 용존무기인 각각 0~61%, 1~50%인 것으로 조사되었다.

표 3.3.12 일차생산자가 필요로 하는 영양염 및 저층영양염 용출율의 영향

(단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

Date	Station	Nutrient demand for pp^3		Benthic nutrient flux		Contribution of BNF to pp	
		DIN	DIP	DIN	DIP	DIN	DIP
		$(\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1})$		$(\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1})$		(%)	
June, 2017	FF	17.46	3.27	13.36	3.25	77	99
	TMSS			4.31	0.32	25	10
	OF			9.31	0.46	53	14
	FF-C			2.96	0.27	17	8
	TMSS-C			-	-	-	-
	OF-C			2.7	0.15	15	5
Oct., 2017	FF	10.09	0.20	3.32	0.95	305	475
	TMSS			5.01	0.42	460	210
	OF			0.07	0.07	6	35
	FF-C			-1.41	-0.07	-	-
	TMSS-C			-1.27	0.35	-	175
	OF-C			-	-	-	-
May, 2018	FF	17.46	3.27	3.93	1.15	23	35
	TMSS			3.94	0.44	23	13
	OF			3.30	0.29	19	9
	FF-C			-	-	-	-
	TMSS-C			1.65	0.18	9	6
	OF-C			0.15	-	1	-
Nov., 2018	FF	10.09	0.20	2.73	0.83	250	415
	TMSS			3.89	0.34	357	170
	OF			4.48	0.25	411	125
	FF-C			-0.38	0.04	-	20
	TMSS-C			0.60	0.1	55	50
	OF-C			0.66	0.001	61	1

^aData from Lee et al. (2011)

라. 결론

봄(2017년 6월, 2018년 5월)과 가을(2017년 10월, 2018년 11월)에 저층 영양염 용출이 일차생산력에 미치는 영향에 대하여 그림 3.3.22에 나타냈다. 봄시기 동안 양식장에서 일차생산력은 $116 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 조사되었으며, 일차생산력 중 $66 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 가 퇴적물에서 분해되었다. 이때 저층 용존무기질소와 용존무기인의 용출율은 각각 $6.36 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.99 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났으며, 일차생산자가 필요로하는 용존무기질소와 용존무기인이 각각 36%, 30%가 퇴적물에서 용출되는 것으로 나타났다. 대조구 정점에서는 저층에서의 일차생산자가 필요로 하는 용존무기질소와 용존무기인 각각 20, 15% 용출되는 것으로 조사되었다. 가을 조사시기 동안 일차생산력은 $22 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 인 것으로 나타났으며 퇴적물에서 유기물 분해는 $67 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 조사되었다. 퇴적물 유기물 분해가 일차생산력을 초과하는 경우는 일차생산력을 제외한 육상기원 유기물이 유입된 것을 의미한다. 퇴적물 용존무기질소와 용존무기인의 용출율은 각각 $3.25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.48 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 일차생산자가 필요로하는 용존무기질소와 용존무기인의 각각 298, 238%를 공급하는 것으로 나타났다. 결론적으로 봄시기 동안에는 저층 영양염 용출이 일차생산에 대한 영향이 미미한 반면, 가을 동안의 저층 영양염 용출은 수층의 부영양화를 유발할 수 있다는 것을 의미한다.

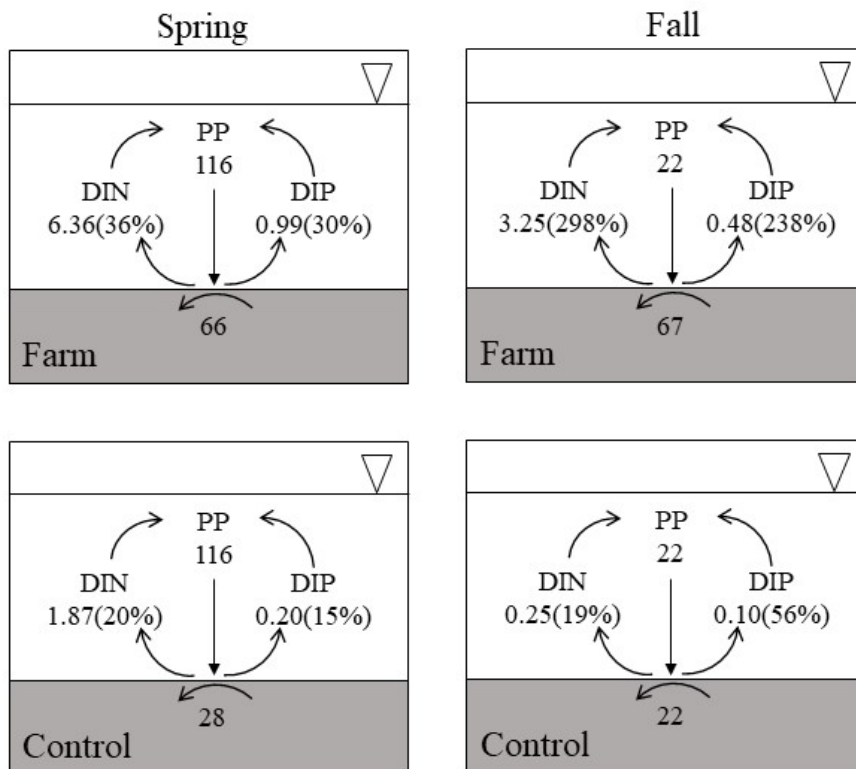


그림 3.3.22 봄과 가을에 저층 영양염 용출에 대한 일차생산력 지지율(단위: $\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

제4절 원격 모니터링 자료 획득

1. 연구해역 해양환경자료 생산

가. 다중 위성 자료 기반 해양환경 산출물

통영 주변 해역을 대상으로 확보 가능한 다중위성자료를 확인하고 산출 가능한 해양환경자료를 생산하였다(표 3.4.1). 사용한 위성자료 중 해색위성은 COMS와 Sentinel-3이며 육상위성은 Landsat과 Sentinel-2 이다. 다중위성으로부터 산출 가능한 해양환경 산출물에는 클로로필, 부유물질, 용존유기물이 있다. 적조 패치의 경우에는 각 위성영상의 원격반사도 영상에 적조 알고리즘을 적용하여 추출이 가능하다.

표 3.4.1 다중 위성 자료의 해양환경 산출물 목록

위성 (운영기관)	센서 타입 (이름)	공간자료 산출물	정확도	공간 해상도	생성 주기
Landsat (USGS)	Multispectral (ETM+)	클로로필, 부유물질	중/하	30 m	한 주 간격
		적조 패치 추출	상		
	Multispectral (OLI)	클로로필, 부유물질	중/하		
		적조 패치 추출	상		
Sentinel-2A/B (ESA)	Multispectral (MSI)	클로로필, 부유물질	중/하	10 ~ 60 m	3-5일 간격
		적조 패치 추출	상		
Sentinel-3 (ESA)	Multispectral (OLCI)	클로로필, 부유물질, 용존유기물질	상	300 m	1-3일 간격
		적조 패치 추출	중		
COMS (KIOST)	Multispectral (GOCI)	클로로필, 부유물질, 용존유기물질	상	500 m	한 시간 간격
		적조 패치 추출	중		

정지궤도 위성인 COMS에 탑재된 해색센서인 GOCI 센서 자료는 해양위성센터에서 자료의 수신하고 있으며 KOSC 웹사이트 (<http://kosc.kiost.ac.kr>)와 내부서버를 통해 자료 확보하였다. GOCI 영상은 오전 9시부터 오후 4시 경까지 한 시간 간격으로 획득이 가능하며, LIB 자료를 GOCI data processing software (GDPS, version 2.0) 소프트웨어를 통해 클로로필, 부유물질, 용존유기물질 자료로 변환하였다. 2011년 4월부터 자료 획득이 가능하며, 수신된 자료는 내부서버에 저장 중이며 현재 2018년 10월까지 획득 가능한 모든 자료를 확보하였다.

미국 USGS에서 운영 중인 중해상도 육상위성인 Landsat 위성의 ETM+/OLI 센서 관측 자료는 각각 16일 주기로 획득이 가능하며 USGS 웹사이트 (<http://glovis.usgs.gov>)에서 다운로드 받아 내부서버에 저장하였다. 유럽 연합에서 운영 중인 중해상도 위성인 Sentinel-2 위성의 MSI 센서 자료는 Copernicus open access hub (<https://scihub.copernicus.eu>), Sentinel-3 위성의 OLCI 센서 자료는 European organisation for meteorological satellites (EUMESAT) 웹사이트 (<http://coda.eumetsat.int>)에서 다운로드 받아 내부서버에 저장하였다.

Landsat ETM+/OLI, Sentinel-2 MSI, Sentinel-3 OLCI 센서 자료는 위성 영상 소프트웨어인 Sentinel Application Platform (SNAP, version 6.0)에서 제공하는 대기보정 도구인 Case 2 Regional CoastColour (C2RCC)을 사용하여 해양환경자료를 산출하였다.

표 3.4.2 다중 센서 특성 비교

Sensor	Spatial resolution	Swath	Revisit period	Spectral range
GOCI	500 m	2500 km	8 times/day	412-865 nm
Sentinel-3 OLCI	300 m	1270 km	1-3 days	400-1020 nm
Sentinel-2 MSI	10 m/20 m/60 m	290 km	3-5 days	443-2190 nm
Landsat ETM+	30 m	185 km	16 days	483-2350 nm
Landsat OLI	30 m	180 km	16 days	443-2290 nm

표 3.4.3 다중 센서 파장대역, 분광해상도, 신호 대 잡음비 비교

	GOCI/Sentinel-3 OLCI			Sentinel-2 MSI/Landsat OLI/ETM+		
	Wavelength (nm)	Spectral resolution (nm)	SNR	Wavelength (nm)	Spectral resolution (nm)	SNR
Blue1	443/443	20/10	1090/1811	443/443/-	20/15/-	129/237/-
Blue2	490/490	20/10	1170/1541	490/482/483	65/60/60	154/367/39
Green	555/560	20/10	1070/1280	560/561/561	35/57/80	168/304/37

표 3.4.2는 다중 센서 간 특성 중 공간해상도 (spatial resolution), 촬영 폭 (swath), 재방문 주기 (revisit period), 스펙트럼 범위 (spectral range)를 비교하고 있으며 스펙트럼 범위는 공통적으로 청색 파장 대역부터 근적외선 파장 대역까지 포함하고 있다. 해석센서는 공간해상도가 낮고 촬영 폭은 넓은 특징을 갖고 있는 반면 육상센서는 공간해상도가 높으나 촬영 폭이 좁다. GOCI는 하루에 8회 촬영하여 시간해상도가 가장 높으며, 육상센서인 Sentinel-2 MSI는 Landsat 시리즈에 비해 재방문 주기가 높은 특징을 갖고 있다.

표 3.4.3에는 다중 센서의 밴드 중 주로 적조 탐지 알고리즘에 사용되는 청색과 녹색 파장 대역의 분광해상도 (spectral resolution), 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 비교하였다. 해석센서의 분광해상도, 신호 대 잡음비가 육상센서보다 뛰어나며, 센서 중에서 Sentinel-3 OLCI가 가장 뛰어난 특징을 갖고 있다. Landsat OLI는 다른 육상센서보다 신호 대 잡음비가 높은 반면 Sentinel-2 MSI는 높은 공간해상도와 재방문 주기를 갖고 있다. Landsat ETM+은 가장 낮은 신호 대 잡음비의 특징을 보이며, 2003년 이후 scan-line corrector (SLC)의 문제로 인해 획득된 영상의 22 % 정도의 손실이 발생하고 있어 자료의 품질이 낮다(Chen et al., 2011).

나. 위성기반 해양산출물 알고리즘

해양광학적인 측면에서 해수는 Case-1과 Case-2 해역으로 구분된다. 위성자료로부터 획득 가능한 해양 산출물들을 위한 알고리즘들은 초반에 주로 Case-1 해역 위주로 개발되었다. Case-1 해역은 해수의 광 특성이 해수 수괴 또는 식물플랑크톤과 다양한 물질들 (유기성 쇄설물, 동물플랑크톤의 섭식에 의한 부산물, 조류세포들의 자연부패 등)에 의해서 결정되는 해수이며 맑은 해수인 대양이 대표적이다. Case-2 해역은 해수의 광 특성이 부유무기입자, 비색소 생물입자, 용존 유기물 등에 의해서 결정되는 해수로 탁한 해수이며 연안해역이 대표적이다.

한반도 주변 해수들의 경우 황해는 Case-2 해역, 동해는 Case-1 해역, 동중국해는 Case-1과 Case-2의 혼합해역, 제주해협은 Case-1 해역, 한반도 주변 연안은 Case-2 해역으로 구분된다. 따라서 한반도 주변은 복잡한 해역 특성을 갖고 있기 때문에 해수환경 분석 알고리즘은 이러한 특성을 고려하여 개발되어야 한다.

(1) 클로로필 알고리즘

표 3.4.4에는 위성기반 알고리즘들을 나타내었다. CZCS (Coastal Zone Color Scanner), OCTS (Ocean Color Temperature Scanner), SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 등의 초기 클로로필 농도 알고리즘들은 클로로필의 흡광과 관련된 490 nm 파장대와 부유물질의 산란과 관련된 555 nm 파장대의 원격반사도 기반 밴드비를 이용한다(O'Reilly et al., 1998). 이는 OCx

알고리즘이라고도 하며, OC4 알고리즘은 SeaWiFS 표준 알고리즘으로 활용되고 있고 Case-1 해역에 적합한 특성을 가진다. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) 등의 최근 클로로필 농도 알고리즘은 클로로필 흡광과 관련이 높은 2개 이상의 밴드를 이용한다(Darecki and Stramski, 2004). 반분석적 (Semi-analytical) 방법이나 인공신경망을 이용한 클로로필 농도 산출 알고리즘도 있다(Carder et al., 2004; Doerffer and Schiller, 2007). 하지만 이러한 알고리즘들은 복잡한 해수 광특성을 갖고 있는 Case-2 해역에서는 큰 오류가 발생하게 된다. 위성기반 클로로필 농도는 부유물질이나 용존유기물에 의해 큰 영향을 받기 때문에 대양에 적합한 OCx 알고리즘을 Case-2 해역에 적용할 경우 클로로필 농도가 상당히 과대추정 되는 결과를 보인다(Darecki and Stramski, 2004).

클로로필 농도의 최대흡광과장인 443 nm 부근에서는 부유물질의 흡광과 함께 용존유기물의 흡광도 강하게 발생되어 용존유기물의 농도가 높을수록 클로로필 농도 산출에 영향을 줄 수 있다. 파장 440 nm에서 용존유기물의 흡광계수 값이 증가할수록 원격반사도 밴드비 $Rrs(443)/Rrs(555)$ 값은 지수함수적으로 증가하며, 이러한 밴드비를 이용하여 산출된 클로로필 농도는 용존유기물의 흡광에 의해 과대추정된 값일 수 있다. Tassan (1994)은 blue-to-green 밴드비를 통해 부유물질과 용존유기물의 영향을 제거하고자 하였다.

CZCS, OCTS, SeaWiFS 해색센서들과 달리 MODIS, MERIS, GOCI와 같은 해색센서들은 클로로필의 형광신호를 탐지할 수 있는 밴드를 최소 한 개 이상 갖고 있어 형광밴드를 사용한 알고리즘들이 개발되기도 한다(Gower et al., 1999). 하지만 부유물질의 증가는 클로로필 형광신호를 감소시킬 수도 있다(McKee et al., 2007). YOC 클로로필 알고리즘은 한국-중국-일본 3개국 해색원격탐사 연구자들이 공동으로 동북아 해역에 맞도록 개발되었다(Siswanto et al., 2010). Moon et al. (2010)이 개발한 GOCI 클로로필 알고리즘은 1998년부터 2009년까지 한반도 주변 해역의 현장관측 자료들을 이용하여 개발되었다. 원격반사도 NIR-to-red 밴드비는 탁도가 높은 해역에서의 식물플랑크톤 개체량과 관련이 있다(Le et al., 2013). Kim et al. (2016)은 GOCI에 적용 가능한 4개의 클로로필 알고리즘을 적용하고 평가하였으며, 한반도 해역에 적합한 부유물질의 농도에 따른 개선된 알고리즘을 개발하였다. 현재 GDPS에서는 OC2, OC3, YOC 알고리즘을 활용하여 클로로필 자료를 산출할 수 있다.

표 3.4.4 위성기반 클로로필 산출 알고리즘

Name	Equation	Reference
Tassan	$\log_{10}[CHL] = c_0 + c_1 \log_{10} R + c_2 \log_{10}^2 R$ $R = \frac{R_{rs}443}{R_{rs}555} \left[\frac{R_{rs}412}{R_{rs}490} \right]^{c_3}$	Tassan (1994)
OC2v2	$10^{(0.2974 - 2.2429R + 0.8358R^2 - 0.0077R^3)} - 0.0929$ $R = \log_{10} \left(\frac{R_{rs}490}{R_{rs}555} \right)$	O'Reilly et al.(1998)
OC3	$\log_{10}[CHL] = c_0 + c_1 \log_{10} R + c_2 \log_{10}^2 R + c_3 \log_{10}^3 R + c_4 \log_{10}^4 R$ $R = \text{Max}(R_{rs}443, R_{rs}490) / R_{rs}555$	O'Reilly et al.(1998)
OC4v4 (SeaWiFS standard)	$10^{(0.366 - 3.067R + 1.930R^2 + 0.649R^3 - 1.532R^4)}$ $R = \log_{10} \left(\frac{\text{Max}(R_{rs}443, R_{rs}490, R_{rs}510)}{R_{rs}555} \right)$	O'Reilly et al.(1998)
FLH	<p style="text-align: center;">Fluorescence line height</p> $[CHL] = c_0 X^{c_1}$ $X = R_{rs}680 - \left[R_{rs}660 + (R_{rs}745 - R_{rs}660) \times \frac{(680 - 660)}{(745 - 660)} \right]$	Gower et al.(1999)
YOC Chl-a	$10^{(0.25484 - 3.12684R + 0.147215R^2)}$ $R = \log_{10} \left[\left(\frac{R_{rs}443}{R_{rs}555} \right) \left(\frac{R_{rs}412}{R_{rs}490} \right)^{-0.8} \right]$	Siswanto et al.(2010)
GOCI Chl-a	$1.8528R^{-3.263}$ $R = \frac{(R_{rs}443 + R_{rs}490) - R_{rs}412}{R_{rs}555}$	Moon et al.(2010)
NIR-to-red band ratio	$[CHL] = c_0 X^{c_1}$ $X = R_{rs}745 / R_{rs}660$	Le et al.(2013)

(2) 부유물질 알고리즘

위성기반 부유물질 알고리즘은 주로 원격반사도 밴드비를 이용하여 개발되어 왔다(표 3.4.5). 이러한 알고리즘들은 맑은 해수의 특징을 갖는 Case-1 해역에서는 잘 맞지만 다양한 부유물질들이 상당량 혼용되어 있는 연안해역 등의 Case-2 해역에서는 잘 맞지 않는다(Tassan, 1994). 특히 한반도 서해 및 남해 연안은 부유물질의 농도가 상당히 높기 때문에 기존의 밴드비를 활용하는데에 한계가 있다.

Ahn et al. (2001)은 원격반사도 밴드비보다 단일밴드를 이용하여 부유물질 농도 산출 알고리즘을 개발하는 것을 제안하였으며, 파장 555 nm의 원격반사도와 부유물질 농도의 상관관계를 이용하여 부유물 농도 산출 알고리즘을 개발하였다. Ahn et al. (2004)는 단일밴드 방식의 부유물질 농도 산출 알고리즘을 이용하여 동중국해 부유물질 분포의 발달과정을 4단계로 구분하였다. Zhang et al. (2010)은 황해와 동중국해에서의 현장관측을 통해 측정된 부유물질의 역산란계수, 흡광계수, 원격반사도 자료 등을 이용하여 MODIS 위성에 적용가능한 부유물 농도 산출 알고리즘을 개발하였다. 현재 GDPS에서는 YOC 알고리즘을 통해 부유물질 농도를 산출할 수 있다.

표 3.4.5 위성기반 부유물질 산출 알고리즘

Name	Equation	Reference
Clark TSM (SeaDAS)	$SS = 10^{0.51897 - 2.24106R + 1.20113R^2 - 4.35315R^3 + 9.07162R^4 - 5.10552R^5}$ $R = \log_{10} \left(\frac{nL_w 412 + nL_w 443}{nL_w 510} \right)$	MODIS ATBD (1997)
YOC TSM	$SS = 10^{0.649 + 25.623R1 - 0.646R2}$ $R1 = R_{rs} 555 + R_{rs} 670$ $R2 = \frac{R_{rs} 490}{R_{rs} 555}$	Siswanto et al. (2011)
GOCI SS	$SS = 945.07R^{1.137}$ $R = R_{rs} 555$	Moon et al. (2010)

(3) 용존유기물 알고리즘

위성기반 용존유기물의 흡광계수 분석 알고리즘들은 반분석적 방법을 이용한 Carder 모델 (Carder et al., 1999)과 분석적 방법을 이용한 QAA 모델 (Lee et al., 2005) 등의 알고리즘들을 이용한다. Moon et al. (2010)은 한반도 주변 해역의 현장관측자료를 이용하여 용존유기물의 흡광계수 값들과 원격반사도 밴드비들의 상관관계를 분석하였다. $a_{dom} 400$ 과 $a_{dom} 412$ 를 원격반사도 파장 412, 443, 490, 555 nm 밴드비와 조합하여 상관관계를 산출하여, 표 3.4.6과 같은 알고리즘을 개발하였다. 클로로필과 마찬가지로 용존유기물 산출을 위한 YOC 알고리즘도 사용되고 있다(Siswanto et al., 2011). 현재 GDPS로는 $a_{dom} 412$ 알고리즘과 YOC 알고리즘을 사용하여 용존유기물 산출이 가능하다.

표 3.4.6 위성기반 용존유기물 산출 알고리즘

Name	Equation	Reference
GOCI a_{dom400}	$a_{dom400} = 0.2355R^{-1.3423}$ $R = \frac{R_{rs412}}{R_{rs555}}$	Moon et al. (2010)
GOCI a_{dom412}	$a_{dom412} = 0.2047R^{-1.3351}$ $R = \frac{R_{rs412}}{R_{rs555}}$	Moon et al. (2010)
YOC a_{dom440}	$a_{dom440} = 10^{-1.11529 - 1.38942R + 0.51803R^2}$ $R = \log_{10} \left[\frac{R_{rs490}}{R_{rs555}} (R_{rs443})^{0.1} \right]$	Siswanto et al. (2011)

(4) 해양산출물 분석 예시

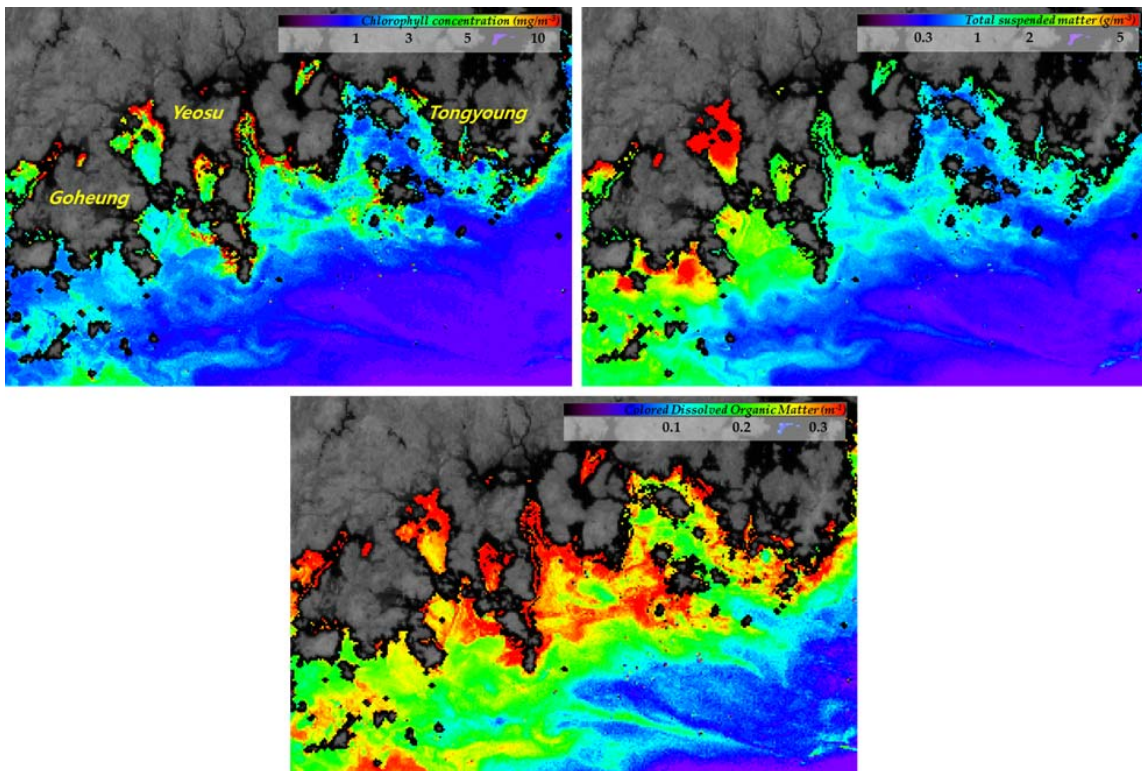


그림 3.4.1 2013년 8월 13일 12시경 GOCI 클로로필, 부유물질, 용존유기물 해양환경 자료

2013년 8월 13일은 남해안에 코클로디니움 적조가 발생했던 날로 남해안 해역의 클로로필, 부유물질, 용존유기물 농도가 모두 높은 값을 나타냈다(그림 3.4.1). 그림 3.4.2는 Landsat OLI 영상 중 2015년 8월 14일의 클로로필, 부유물질 영상으로 고흥, 여수 연안에 비해 통영 해역 부근에서는 낮은 값을 보였다.

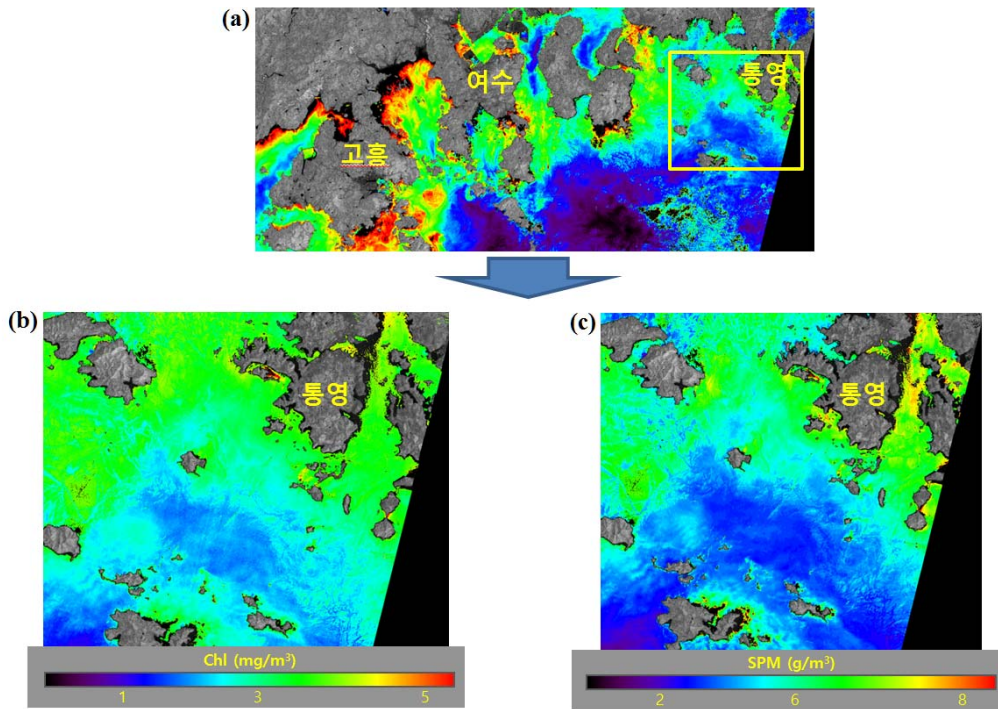


그림 3.4.2 2015년 8월 14일 11시경 Landsat OLI 관측 자료를 이용한 클로로필 및 부유물질 해양환경자료 분석 결과

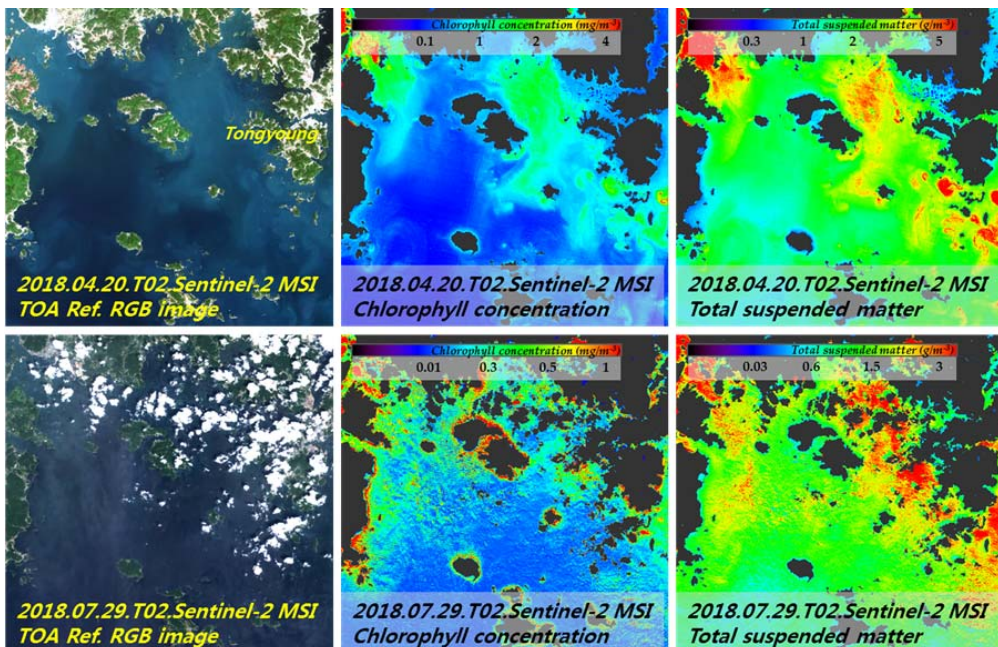


그림 3.4.3 2018년 4월 20일 (위), 7월 29일 (아래) 11시경 Sentinel-2 MSI Top-of-atmosphere 반사도 영상, 클로로필, 부유물질 해양환경자료

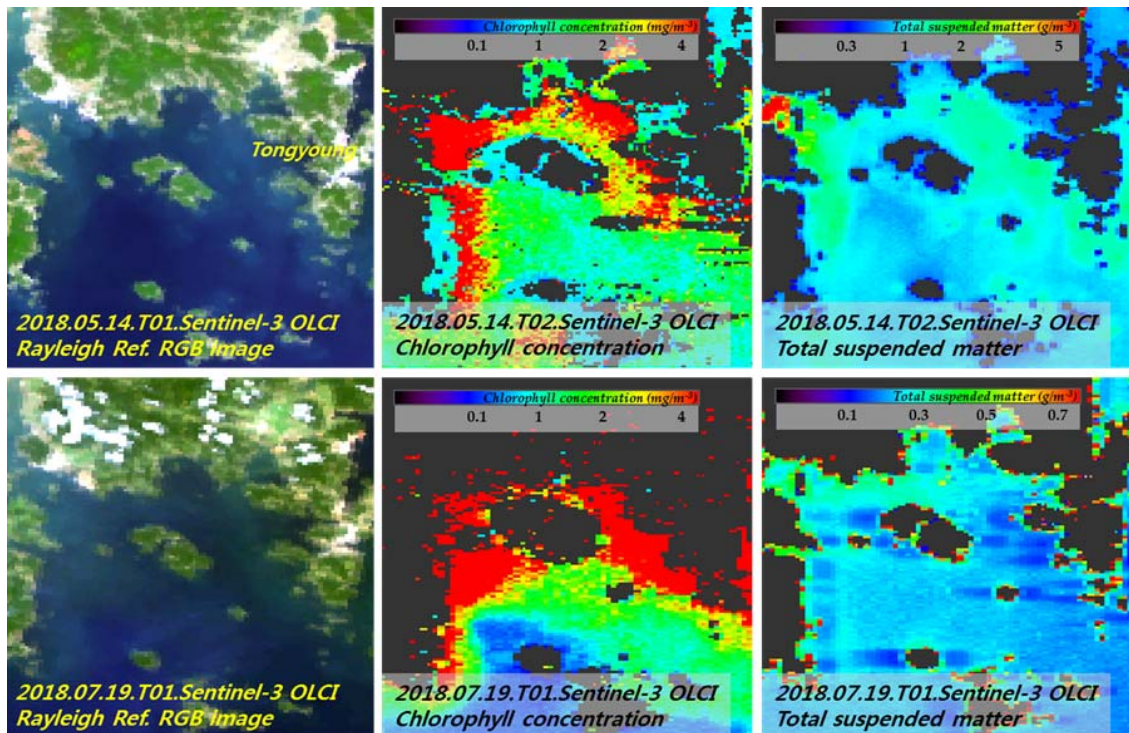


그림 3.4.4 2018년 5월 14일 (위), 7월 19일 (아래) 10시경 Sentinel-3 OLCI 레일리라이 반사도 영상, 클로로필, 부유물질 해양환경자료

Sentinel-2 MSI 영상 중 2018년 4월 20일, 7월 29일 영상을 분석하였으며, 60 m의 공간해상도로 통영 주변 해역의 클로로필, 부유물질의 분포를 잘 나타내주고 있다(그림 3.4.3). 그림 3.4.4는 Sentinel-3 OLCI 영상 중 2018년 5월 14일, 7월 19일 영상으로, 300 m의 공간해상도로 통영 주변 해역의 클로로필, 부유물질의 분포를 잘 나타내주고 있다.

다. 통영 주변 해역 대상 위성 클로로필 산출물 분석

통영 주변 해역은 크고 작은 섬들이 많은 해안선이 복잡한 리아스식 해안으로 적조 등의 클로로필 번성이 빈번히 일어나는 해역이다(그림 3.4.5). 해색센서인 GOCI나 MODIS는 낮은 공간해상도로 인해 통영해양생물자원기지 주변의 클로로필 산출물을 분석하기에 어려움이 있다. 따라서 위성 기반 클로로필 산출물 분석을 위하여 분석 지역을 통영 주변 해역으로 확대하여 클로로필 평균값을 분석하였다.

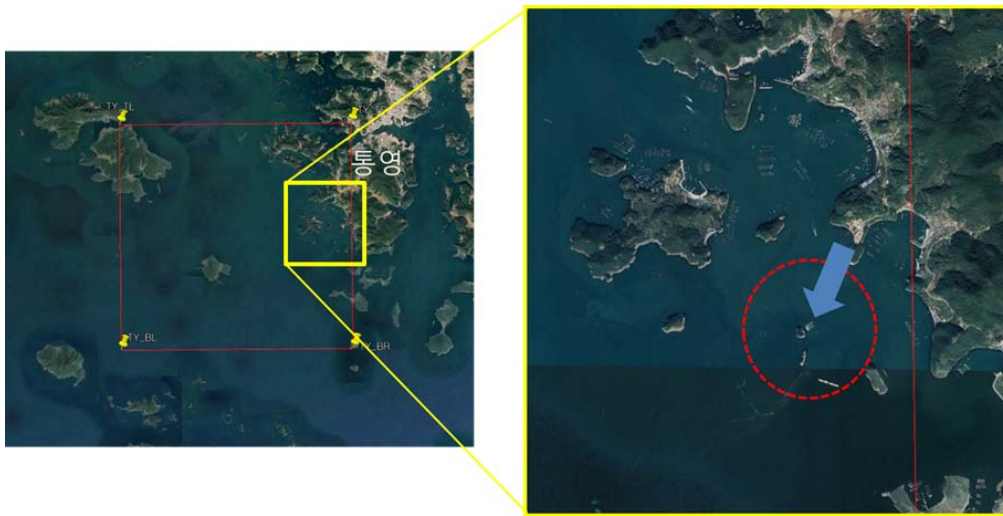


그림 3.4.5 통영주변 해역 및 통영해양생물자원기지 위치
(중심좌표: $34^{\circ} 46' 12.16''$, $128^{\circ} 22' 59.90''$)

적색 포인트는 통영해양생물자원기지의 위치로 맑은 날의 GOCI (공간해상도: 500 m)와 MODIS (공간해상도: 1km) 영상에서 낮은 공간해상도로 인한 연안 마스킹 때문에 기지 위치 주변의 3×3 window를 적용하기에는 자료가 부족하였다(그림 3.4.6). 따라서, 통영 주변 해역 중 그림에서 표시한 적색 박스 영역 ($15 \text{ km} \times 18 \text{ km}$)의 GOCI 클로로필 자료를 사용하여 2013년 6월 1일과 9월 30일 기간의 클로로필 평균 농도를 시계열로 분석하였다.

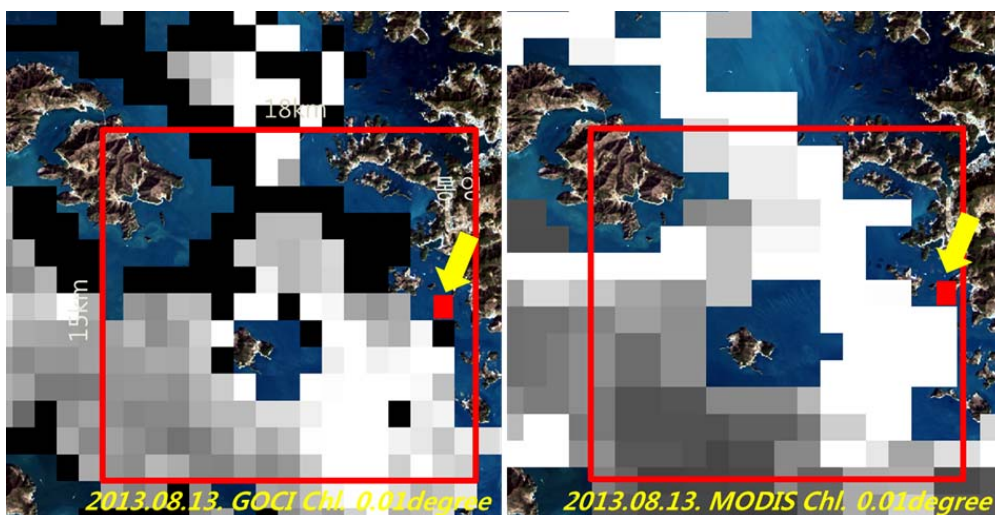


그림 3.4.6 통영해양생물자원기지 주변 GOCI와 MODIS 영상 픽셀 분포

따라서, 통영 주변 해역 중 그림에서 표시한 적색 박스 영역 (15 km × 18 km)의 GOCI와 MODIS 클로로필 자료를 사용하여 2013년 6월 1일과 9월 30일 기간의 클로로필 평균 농도를 시계열로 분석하였다. GOCI는 매일 오전 9시부터 오후 4시까지 총 8장의 영상 획득이 가능하여 하루 평균의 클로로필 자료를 사용하였고, MODIS는 하루 1장의 영상 (오후 3시경)으로 클로로필 자료를 사용하였다.

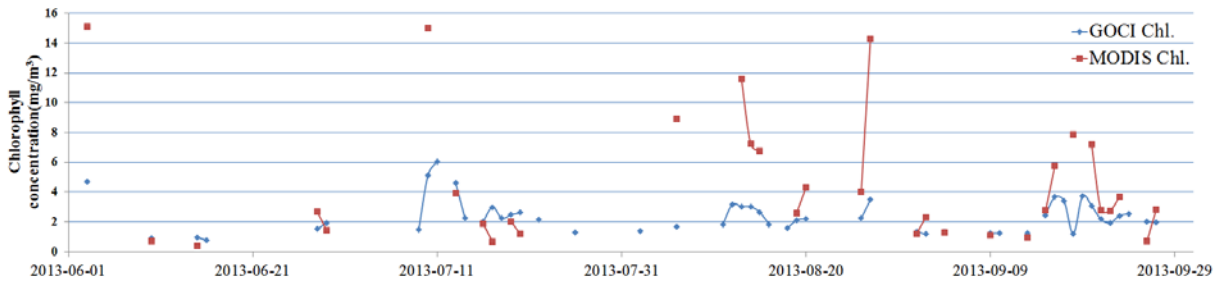


그림 3.4.7 2013년 6월 1일~2013년 9월 30일 GOCI와 MODIS 클로로필 평균

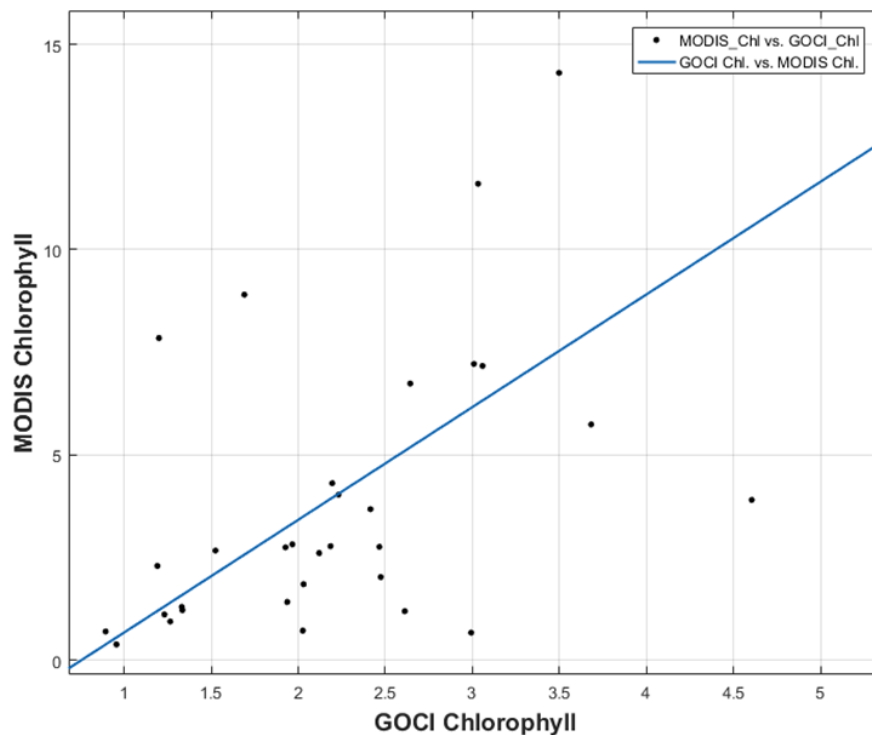


그림 3.4.8 GOCI 클로로필 농도와 MODIS 클로로필 농도 분포

GOCI에 비해 MODIS 자료는 구름에 의한 마스킹으로 인해 획득하기 어려웠으며, 총 매칭 자료는 33개였음. 분석 기간 동안의 MODIS 클로로필 농도는 GOCI 클로로필 농도보다 높은 값을 보였다(그림 3.4.7). 연구지역을 확대하여 장기간의 클로로필 평균값의 추가 분석이 필요

하다. GOCI 클로로필 농도와 MODIS 클로로필 농도 사이의 R-squre 값은 0.46으로 중간정도의 상관관계를 보인다(그림 3.4.8). MODIS 기반 클로로필 농도 정확도는 60 ~ 65 %이나 우리나라 주변 해역에서는 과대 추정되는 경향이 있다(Cui et al., 2010). GOCI 기반 클로로필 농도 정확도는 40-60 % 이며 (Kim et al., 2016), GDPS (GOCI 자료처리 소프트웨어)은 v2.0을 통해 우리나라 해역 특성을 고려한 OCx 클로로필 알고리즘의 계수 조정을 통해 클로로필 농도 추정의 정확도를 향상시켰다.

2. 해양환경문제(적조 등) 발생시 집중관측

가. 다중플랫폼 기반 적조 및 해양환경 관측 계획 수립

통영 연구 해역을 대상으로 무인항공기, 헬리카이트, 위성으로 나누어 관측 계획을 수립하였으며, 관측주기를 고려하여 플랫폼 운영 시기와 관측 해역을 조정하였다. 헬리카이트는 통영해양생물자원기지를 기점으로 운영하며, 무인항공기는 적조 발생 의심 지역을 대상으로 상시 운영하는 계획을 수립하였다(표 3.4.7).

표 3.4.7 다중 플랫폼/다중 센서를 활용한 통영 해역 관측 계획

플랫폼	운영기관/이름	센서	관측주기	관측 해역
무인항공기	KIOST	EO, TIR, Multispectral	수회 관측	관심 해역 내 적조 발생 지역을 대상으로 유동적으로 운영
헬리카이트 (Helikite)	KIOST	EO, TIR, Multispectral	일분 간격	
위성	Kompsat-3 (KARI)	Multispectral	7-8월 신청	관심해역을 대상으로 영상 촬영을 신청
	Kompsat-3A (KARI)	Multispectral, MWIR	7-8월 신청	
	Landsat (NASA)	Multispectral (ETM+, OLI)	한 주 간격	남해 전체 및 관측해역에 대해 유효 획득 영상을 분석 예정
	Sentinel-2A/B (ESA)	Multispectral (MSI)	1-2일 간격	
	Sentinel-3 (ESA)	Multispectral (OLCI)	1-2일 간격	
	COMS (KIOST)	Multispectral (GOCI)	한 시간 간격	

나. 코클로디니움 적조 발생시 위성자료 분석

(1) 적조발생기간 가용위성 영상 검색

2018년 7월 24일 여수 하화도, 함구미, 돌산 상동 부근 해역에 적조주의보가 발령되고 8월 9일에 적조주의보가 전면 해제되었다. 적조 발생 기간 동안의 여수, 통영 주변 해역의 획득 가능한 위성 영상 목록을 작성하여 모니터링을 수행하였다(표 3.4.8).

표 3.4.8 여수/통영 주변 해역 획득 가능한 위성 영상 목록

day	July 2018									August 2018									
	24	25	26	27	28	29	30	31		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
GOCI																			
S3A																			
S2-YS																			
S2-TY																			
L-YS																			
L-TY																			

S3A: Sentinel-3 OLCI, S2-YS: Sentinel-2 MSI at Yeosu, S2-TY: Sentinel-2 MSI at Tongyoung, L-YS: Landsat at Yeosu, L-TY: Landsat at Tongyoung

GOCI 영상은 하루 8회 획득 가능하므로, 적조 발생 기간 동안 모든 날의 자료 확보가 가능하였다. 하지만 구름의 영향과 낮은 공간해상도 (500 m)로 인해 통영 주변 해역이 마스킹 된 영상이 많았다. Sentinel-3 OLCI 영상은 300 m의 공간해상도로 연안 지역의 마스킹을 피할 수 있었지만, 촬영 주기가 1일에서 3일로 일정한 방문주기를 갖지 않아 연속적인 모니터링에 적합하지 않았다. 육상위성인 Sentinel-2와 Landsat 영상은 높은 공간해상도로 적조 패치의 관측에 적합하였으나, 해상위성보다 상대적으로 긴 재방문 주기로 인해 연속적인 모니터링에 어려움이 있었다.

(2) 적조발생 시 위성영상 분석

2018년 7월 24일 Sentinel-2 레일라이 반사도 RGB 합성 영상에서는 국립수산과학원 적조속보에 나타난 여수 하화도 부근 해역에서 적조 띠가 선명하게 나타남을 볼 수 있었다(그림 3.4.9). 2018년 7월 25일에는 전남 고흥군에서는 차토넬라와 코클로디니움이 혼합하여 출현하였으며, 전남 여수시 하화도, 개도, 월호수도에는 적조띠가 지속되었다(그림 3.4.10). 2018년 7월 25일 GOCI RGB 원격반사도 영상에서 보면 보들바다 부근에 붉은색의 적조띠가 나타났다(그림 3.4.11).

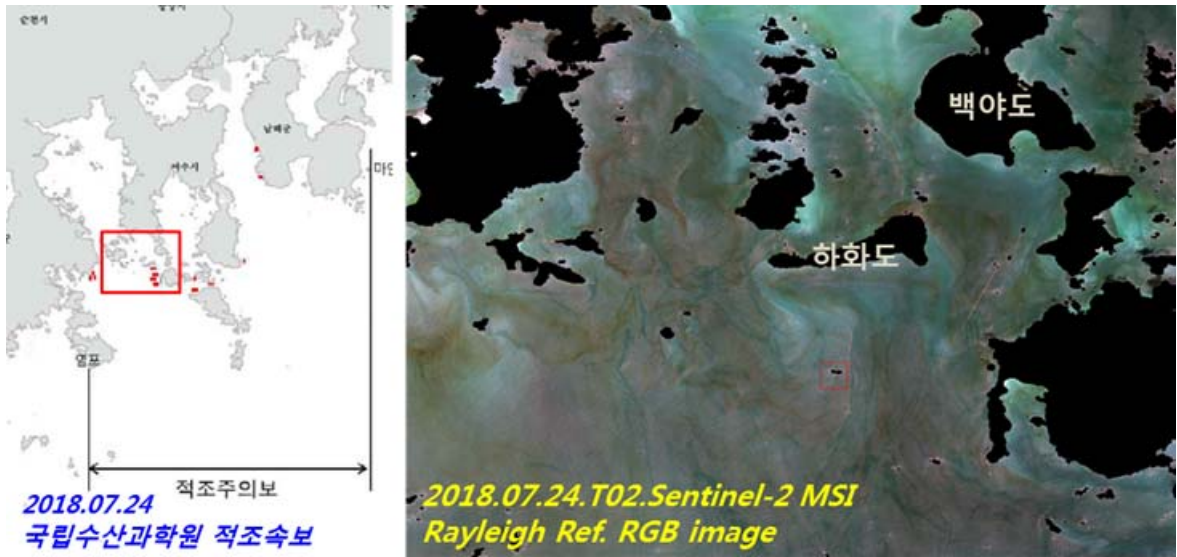


그림 3.4.9 2018년 7월 24일 국립수산과학원 적조속보 (코클로디니움)과 Sentinel-2 레일라이 반사도 RGB 합성 영상

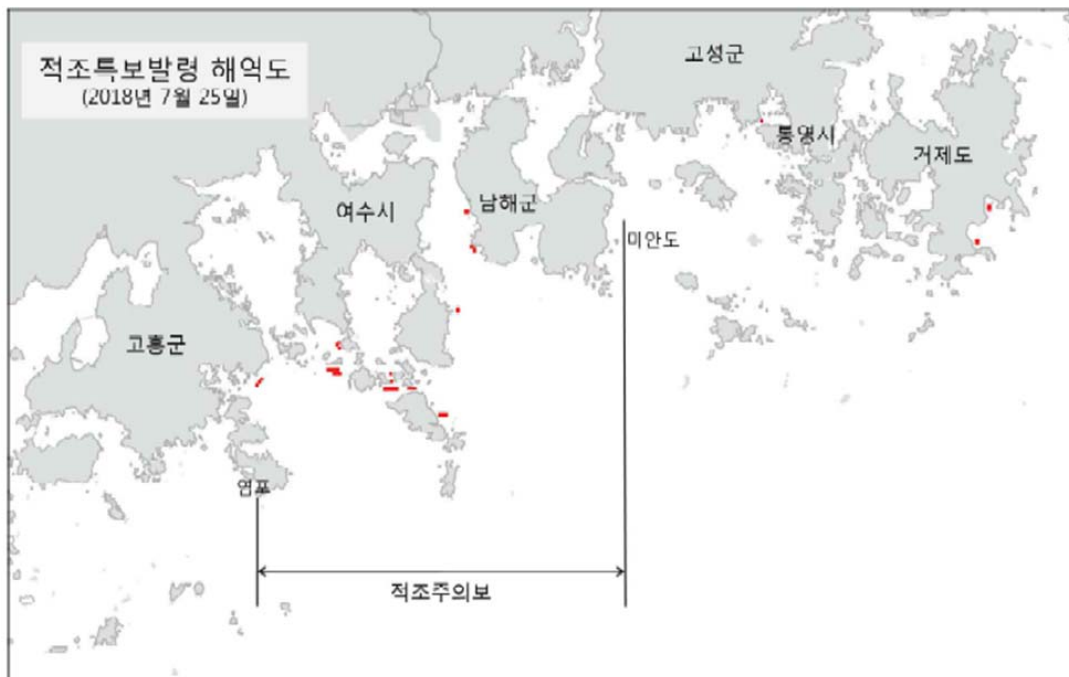


그림 3.4.10 2018년 7월 25일 국립수산과학원 적조속보 (코클로디니움)

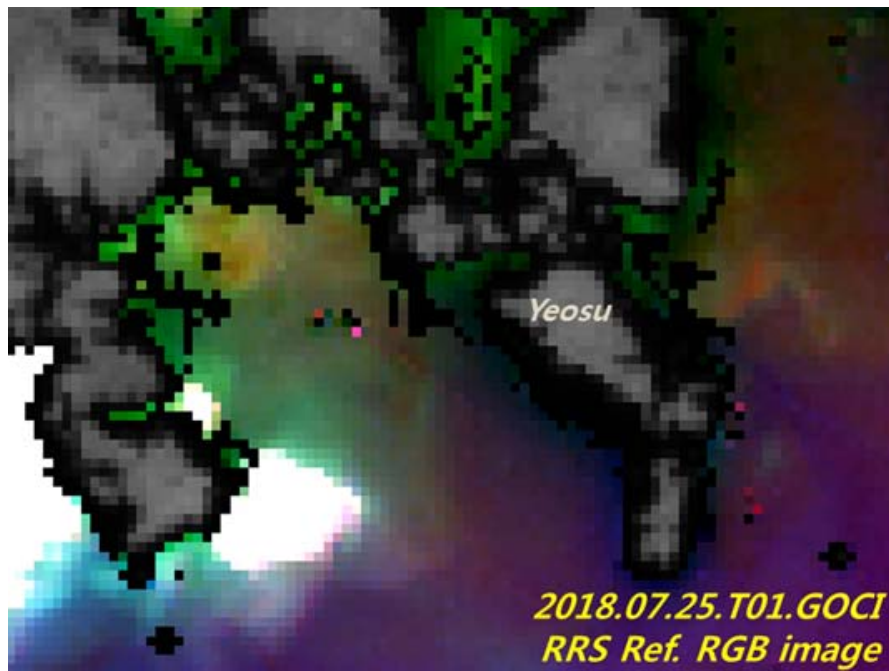


그림 3.4.11 2018년 7월 25일 GOCI RRS RGB 영상

2018년 7월 27일에는 전남 여수시 화정면과 보돌바다 남해군에 60에서 4500 개체수/mL의 코클로디니움 적조가 발생하였다(그림 3.4.12). 2018년 7월 27일 Sentinel-2 MSI TOA 반사도 RGB 영상에서는 적조가 갈색의 띠로 분포하였다(그림 3.4.13).

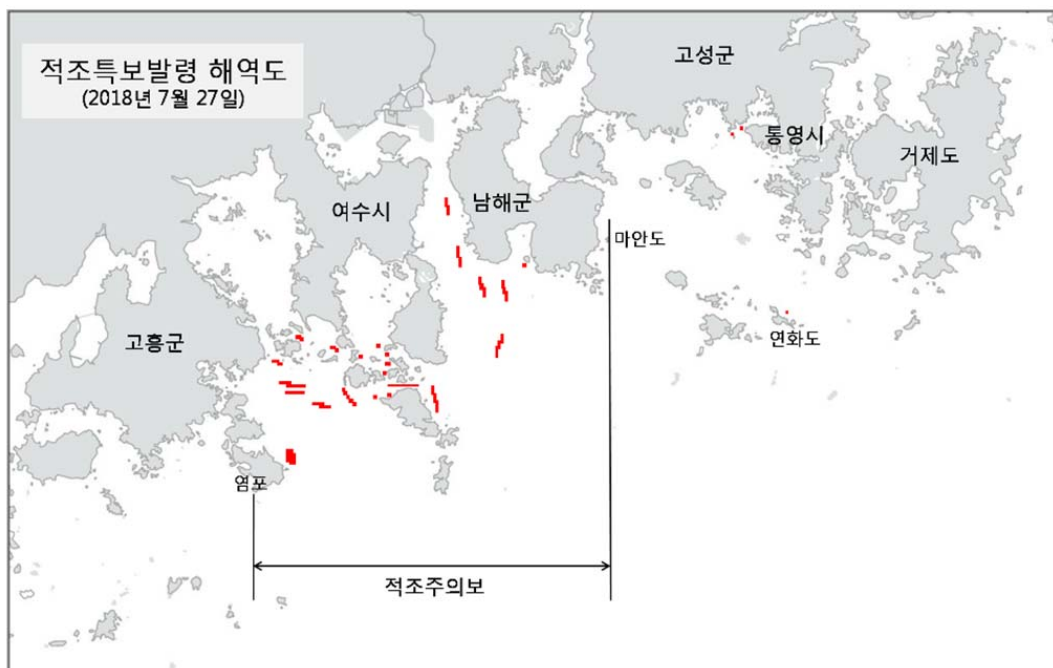


그림 3.4.12 2018년 7월 27일 국립수산과학원 적조속보 (코클로디니움)

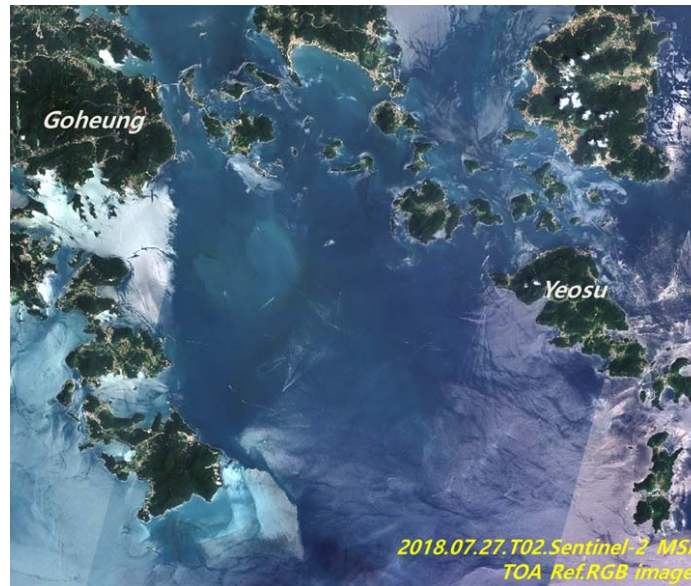


그림 3.4.13 2018년 7월 27일 Sentinel-2 MSI TOA 반사도 RGB 영상

적조속보에 의하면 2018년 7월 29일은 전남 여수시 화정면 및 남면 북부해역에 적조띠가 지속되었고, 보들바다 해역 및 내나로도, 외나로도 해역에 고밀도 적조띠가 출현하였다(그림 3.4.14). 2018년 7월 29일 Sentinel-3, GOCI 반사도 영상에서 적조 의심 영역이 붉은 계열로 나타났으며, Spectral Shape 알고리즘 (적조 알고리즘, 음수일수록 적조 의심 영역) 영상에서 적조 속보에 나타난 적조 패치와 유사한 영역이 적조 영역으로 나타났다(그림 3.4.15).



그림 3.4.14. 2018년 7월 29일 국립수산과학원 적조속보 (코클로디니움)

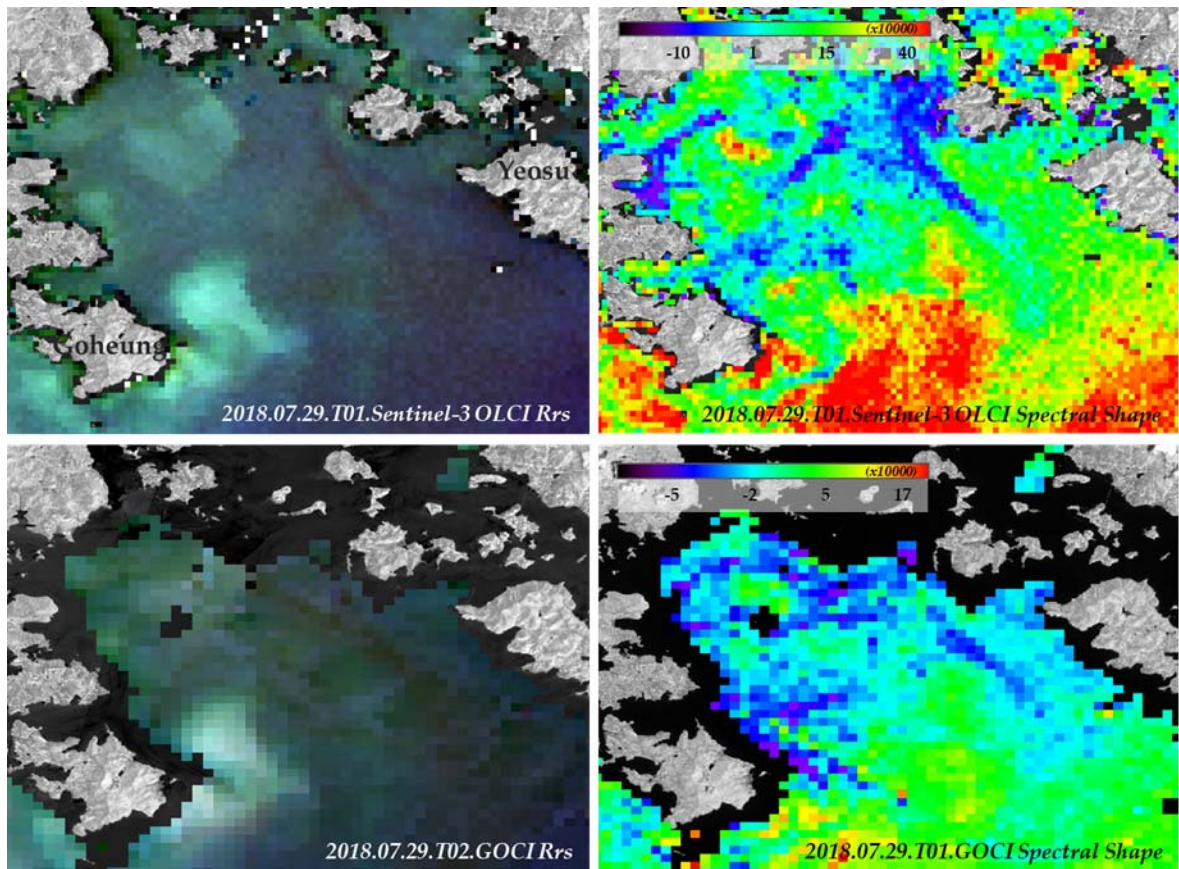


그림 3.4.15 2018년 7월 29일 Sentinel-3, GOCI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상 (Shin et al., 2019)

2018년 7월 30일은 전남 여수시 화정면~남면 북부해역 (10~500 개체수/mL), 보들바다, 금오도 북서측 (186~3480 개체수/mL), 경남 남해군 및 하동군 대도해역 (160~700 개체수/mL) 전역에 코클로디니움 적조가 발생하였다(그림 3.4.16). Sentinel-3와 GOCI 영상에서 보들바다 전역에 적조 의심 영역이 관측되었으며, Spectral Shape 영상에서도 적조속보와 유사한 패치들이 나타났다(그림 3.4.17). 여수의 좁은 해역에서 발생한 적조는 Sentinel-3에서는 탐지되었으나, GOCI에서는 낮은 공간해상도로 인해 연안이 마스킹 되었다. 남해, 통영 해역의 다중 센서 RGB 합성 영상과 Spectral Shape 영상으로 연안의 적조는 Sentinel-3 영상에서만 탐지되었다(그림 3.4.18).



그림 3.4.16 2018년 7월 30일 국립수산과학원 적조주의보

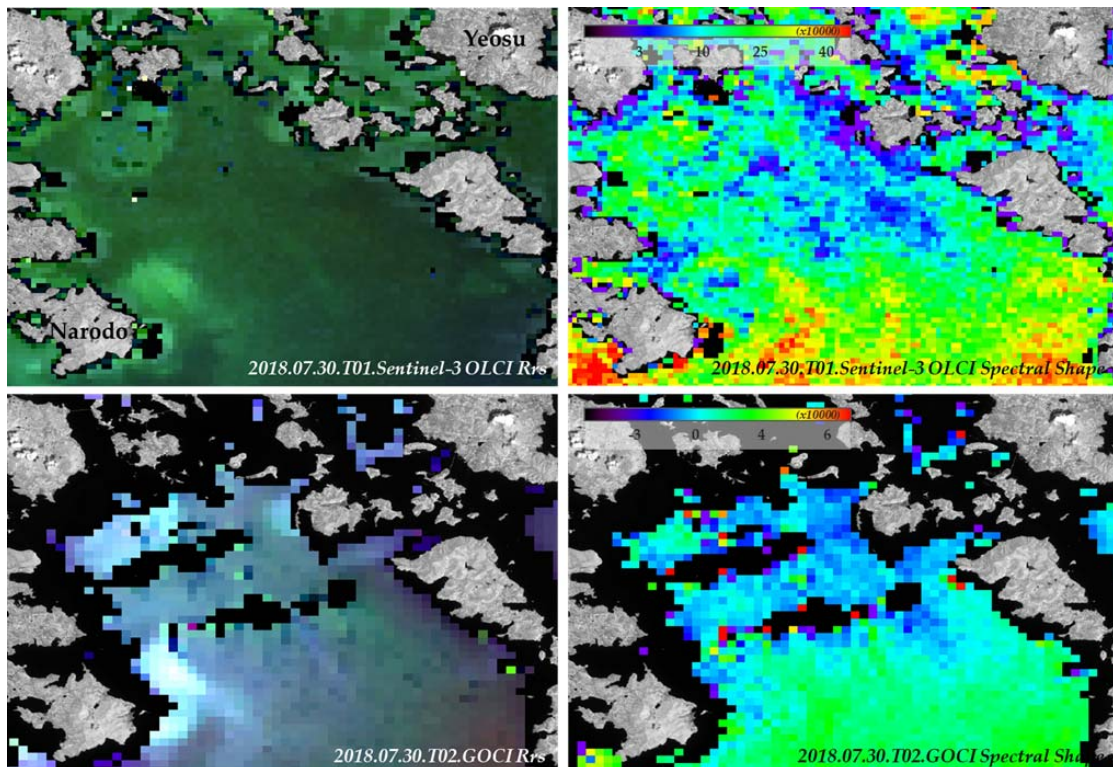


그림 3.4.17 2018년 7월 30일 고흥/여수 주변 해역 Sentinel-3, GOCI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상

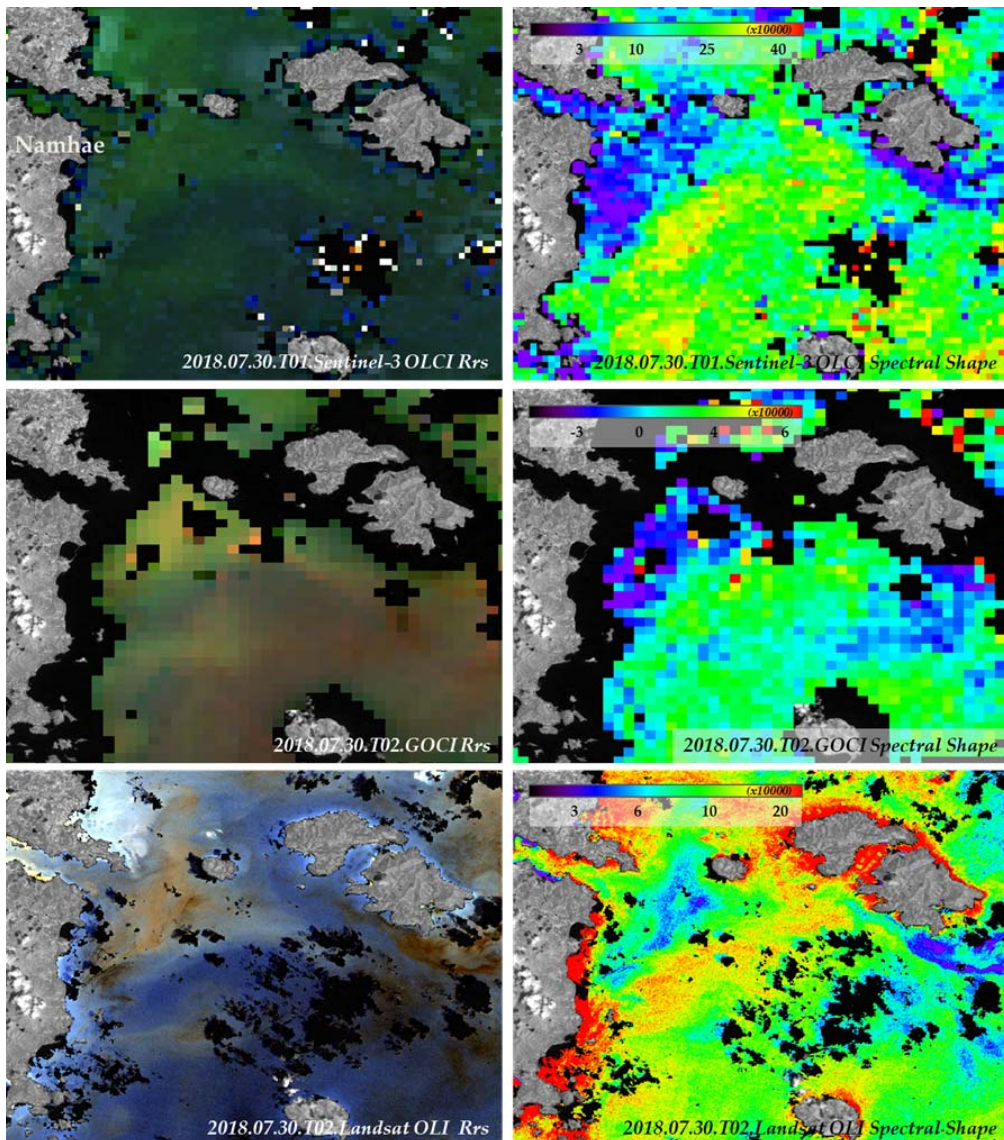


그림 3.4.18 2018년 7월 30일 남해/통영 주변 해역 Sentinel-3, GOCI, Landsat OLI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상 (Shin et al., 2019)

2018년 8월 1일 적조속보(코클로디니움)에 의하면 전남 고흥군 동일면 상부 (400~1850 개체수/mL), 여수시 화정면~남면~돌산읍 해역 (10~940 개체수/mL), 남해군 및 하동군 대도해역 (40~1200 개체수/mL)에 적조띠가 분포하였다(그림 3.4.19). Sentinel-2 MSI 레일라이 보정 반사도 RGB 영상에서 고흥과 여수 해역 부근 검붉은색의 적조띠가 관측되었다. 적조 속보에 따르면 남해 해역 부근에서는 연안에 인접하여 적조가 발생하였으며, 이러한 패치는 Sentinel-2 영상에서는 관측되었으나 GOCI 영상에서는 낮은 공간해상도로 인해 관측되지 않았다(그림 3.4.20). 하지만 Sentinel-2 영상은 패스 경계에서 발생하는 영상품질의 문제로 전체 적조 영역이 추출되지 않았고, 적조 탐지 알고리즘을 적용하여 적조 영역을 추출한 결과 연안

과 외측 해역에서 발생하는 적조의심영역을 모두 검출할 수 있었다. 그림 3.4.19의 2번 적색 박스 영역을 자세히 살펴보면, 여수 연안 사이에 적조가 발생하였으며 이러한 적조 패치는 GOCI 영상에서는 관측되지 않았고 Sentinel-2 MSI 영상에서는 붉은색의 패치로 관측되었다(그림 3.4.21). 두 영상의 Spectral Shape 영상에서는 적조 패치가 잘 관측되었으며 음수인 값을 적조의심영역으로 인식하여 적조 패치를 추출한 결과, 연안에서 발생한 적조도 잘 탐지됨을 확인할 수 있었다.

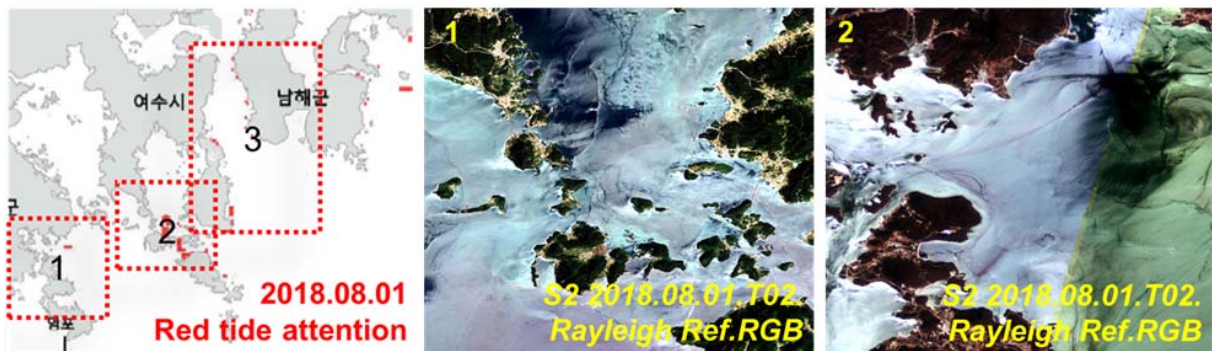


그림 3.4.19 2018년 8월 1일 적조주의보, Sentinel-2 MSI 레일라이 보정 반사도 RGB 영상

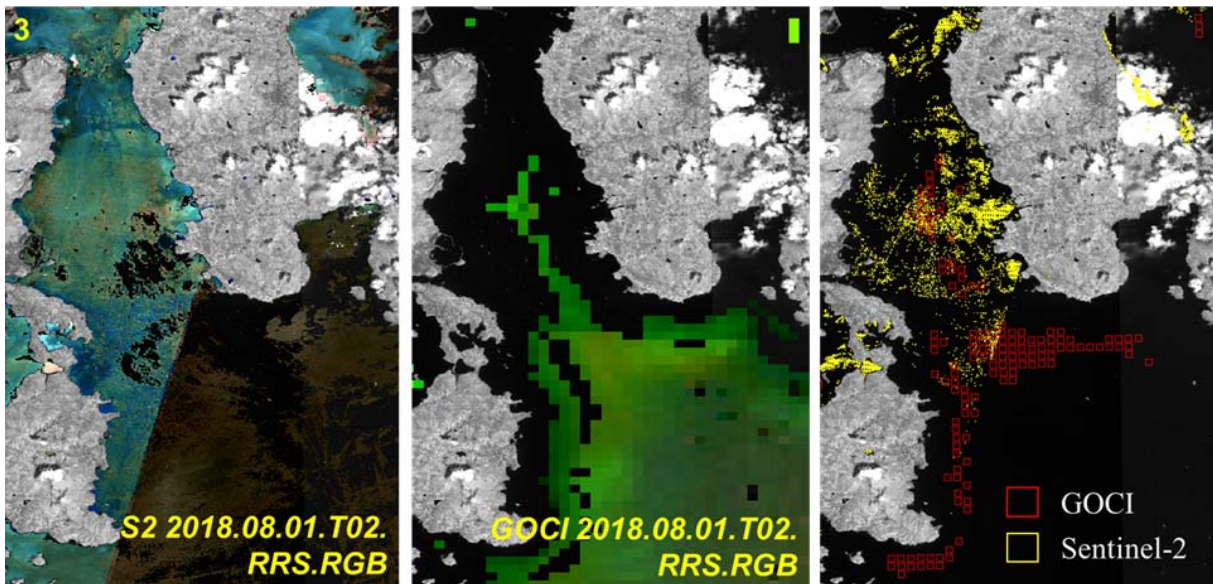


그림 3.4.20 Sentinel-2와 GOCI 원격반사도 RGB 합성 영상, 적조의심영역 추출 결과

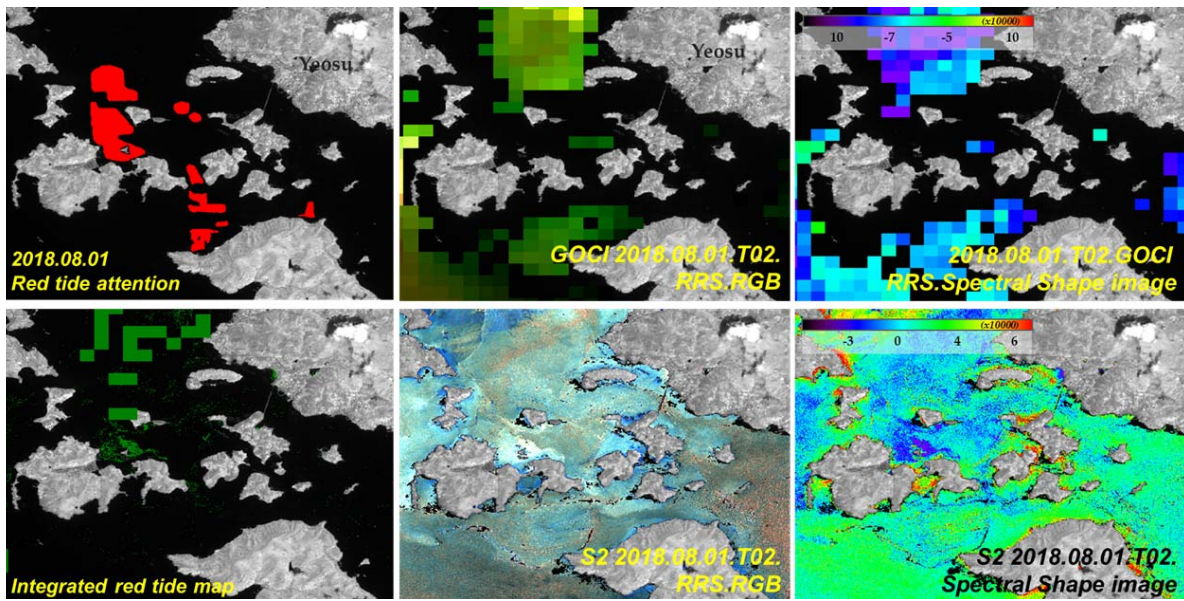


그림 3.4.21 2018년 8월 1일 적조 속보, 적조의심영역 추출 결과, GOCI, Sentinel-2 MSI 원격반사도 RGB 합성 영상, Spectral Shape 영상 (Shin et al., 2019)

2018년 8월 6일 적조 속보에 의하면 전남 장흥해역과 경남 사천, 하동해역에 소규모 적조띠가 발견되었으며, 전남 완도, 고흥, 여수 해역에서는 적조띠가 발견되지 않았다(그림 3.4.22). 전남해역 항공예찰 결과 경남 남해도 북측~하동~사천해역, 전남 여수 금오도, 고흥 동일면 상부 및 지죽도 해역 일부에 적조띠가 분포하였다. 2018년 8월 6일 Landsat OLI, Sentinel-2 MSI RGB 영상으로 금오도 해역 부근에서는 적조띠가 발견되지 않았다(그림 3.4.23).



그림 3.4.22 2018년 8월 6일 국립수산과학원 적조속보

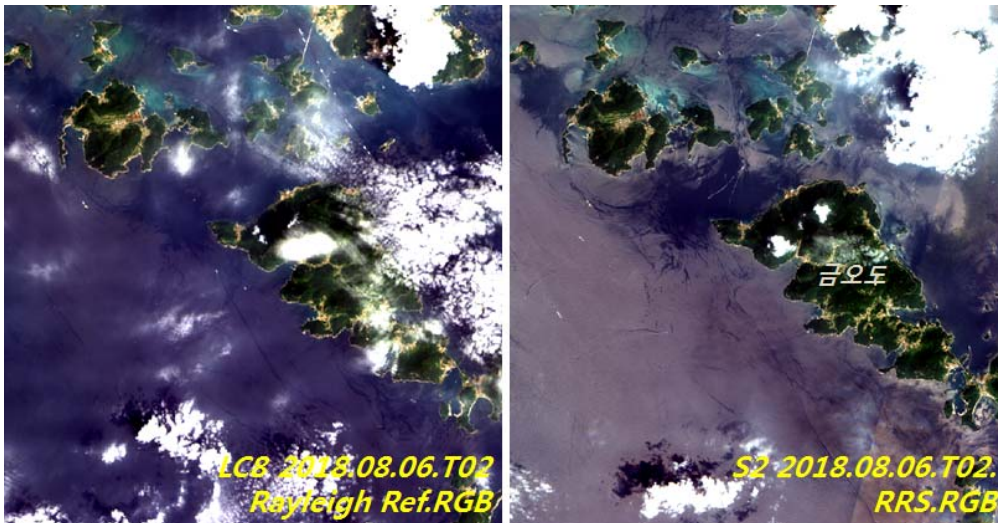


그림 3.4.23 2018년 8월 6일 Landsat OLI, Sentinel-2 MSI RGB 영상

8월 7일 적조속보에 의하면 전남 여수 돌산, 장흥, 경남 남해, 하동, 고성, 통영, 거제 동부면 해역에 소규모 적조띠가 출현하였다(그림 3.4.24). 경남해역 항공예찰 결과 고성~샤랑도~두미도~육지도~매물도~거제 동편 해역은 적조띠가 발견되지 않았다.

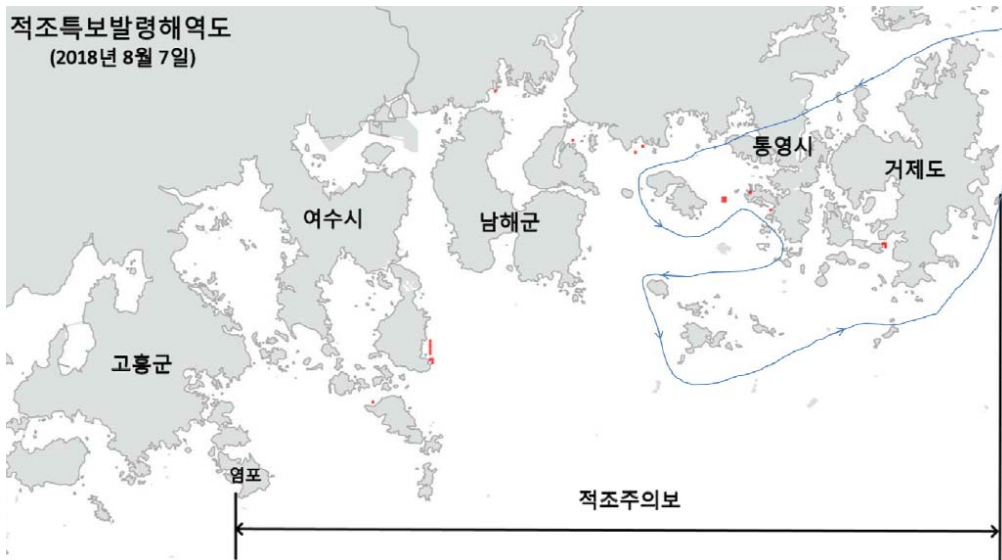


그림 3.4.24 2018년 8월 7일 국립수산과학원 적조속보

2018년 8월 8일에는 여수 돌산 해역에서 코클로디니움 적조가 발생하였으며, 다른 해역에서는 발견되지 않았다(그림 3.4.25). 동일 날짜의 GOCI 영상을 분석해 본 결과 여수 돌산 해역 부근에는 구름의 영향으로 관측이 어려웠으며, 특히 적조 발생 예상 지역인 방죽포 해수욕장은 GOCI의 낮은 공간해상도로 관측이 불가하였다(그림 3.4.26). 동일 날짜의 Sentinel-2 MSI 원격 반사도, Rayleigh 반사도 RGB 영상으로 방죽포 해수욕장 쪽의 구름으로 인해 원격 반사도 영상에서 유효한 값의 산출이 어려웠다(그림 3.4.27).



그림 3.4.25 2018년 8월 8일 국립수산과학원 적조속보

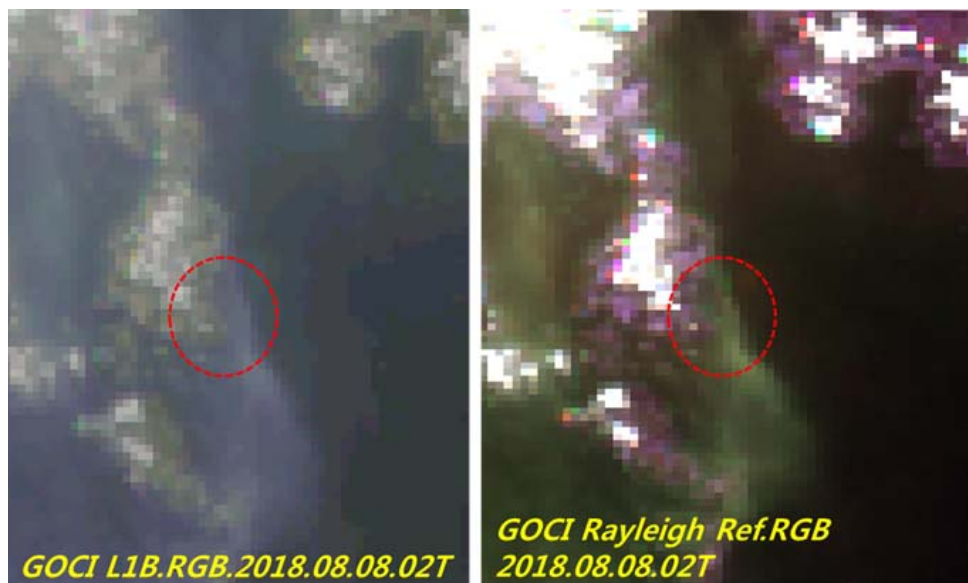


그림 3.4.26 2018년 8월 8일 GOCI L1B, Rayleigh 보정 반사도 RGB 영상

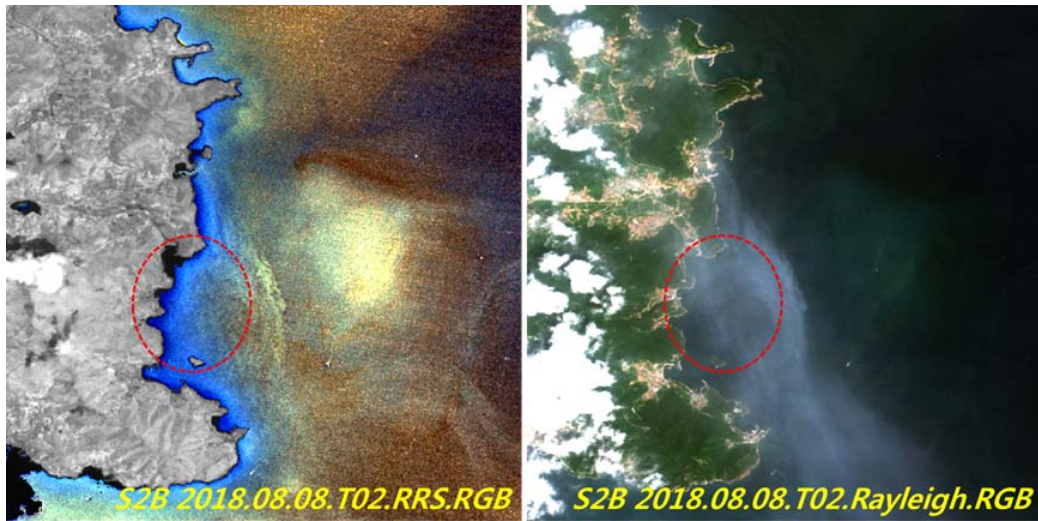


그림 3.4.27 2018년 8월 8일 Sentinel-2 MSI 원격 반사도, Rayleigh 보정 RGB 영상

다. 적조 현장조사 수행

(가) 통영 해역 현장조사 수행

2017년 8월 10일 GOCI 영상에서 통영 동쪽 연안 해역 및 거제도 남서 해역에서 적조로 예상되는 패치가 관측되었다(그림 3.4.28의 (a)). 국립수산과학원 적조 예보에 따르면 남해안 전체 (여수, 남해, 통영) 해역에서 *Alexandrium* sp.가 출현하였다. 2017년 8월 15일 통영 및 거제도 주변 연안 해역을 대상으로 적조 관측 현장조사 수행하였다. 흐린 날씨로 인하여 위성 관측 자료를 확보하지 못하였으며 다른 플랫폼 관측은 수행하지 않았다. 적조 패치는 발견하지 못하였는데, 8월 14일 내린 많은 비로 인해 (일 강수량 80 mm) 적조 패치들이 소멸된 것으로 판단되었다. 15일과 16일은 구름으로 인해 위성영상 확인이 불가하였으며 17일 GOCI 영상 확인 결과 적조로 의심되는 패치는 발견되지 않았다(그림 3.4.28의 (b)).

현장조사 자료 분석 결과 클로로필 농도 분포는 $0.61\text{-}2.10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 부유물질의 농도 분포는 $0.69\text{-}1.19\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 용존유기물질의 흡광은 $0.096\text{-}0.108\text{ (m}^{-1}\text{)}$ 의 좁은 폭의 낮은 값의 범위를 보였다(그림 3.4.29). 8월 15일의 경우 비가 오고 흐린 날씨로 인해 원격 플랫폼 관측을 시행하지 못하였으며, 그 이후 적조가 발생하는 시점에 관측을 하기 위한 준비를 하였지만 잦은 비 등의 환경적인 요인으로 인해 더 이상의 적조가 발생되지 않았기에 적조 이벤트에 대한 원격 플랫폼 관측을 수행하지 못하였다.

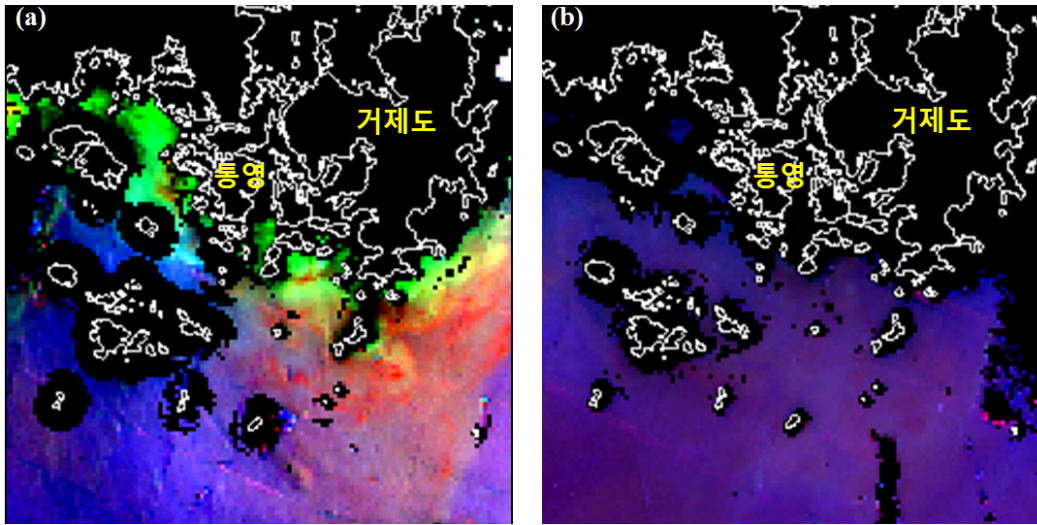


그림 3.4.28 통영 및 거제도 주변 연안 해역에 대한 GOCI nLw 칼라 합성 영상
(a) 2017년 8월 10일 15:30 관측, (b) 2017년 8월 17일 12:30 관측

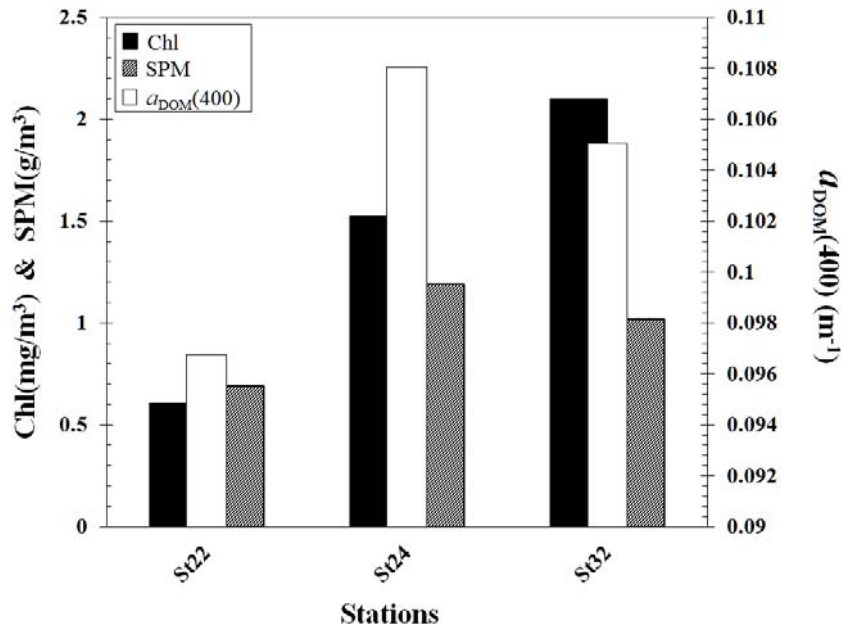


그림 3.4.29 2017년 8월 15일 통영 해역 적조 현장조사 클로로필, 부유물질, 용존유기물질 분석 결과

(나) 여수/남해 해역 현장조사 수행

2018년 8월 7일부터 8일까지 여수와 남해 주변 해역을 대상으로 적조 현장조사를 수행하였다(그림 3.4.30). 클로로필 농도와 적조 셀 농도 측정을 위해 해수샘플링을 수행하였고, 해수 광학 특성 분석을 위해 스펙트로미터를 이용하였다. 표 3.4.9는 현장조사를 통해 획득된 측정 값이며, Spectral Shape 값은 각 샘플링 위치에서 측정된 스펙트럼 값 중 443, 490, 570 nm 값

을 사용하여 계산하였다. 8월 7일에는 클로로필과 스펙트럼만 측정하였고, 8월 8일에는 클로로필, 스펙트럼, 코클로디니움 셀농도를 측정하였다.

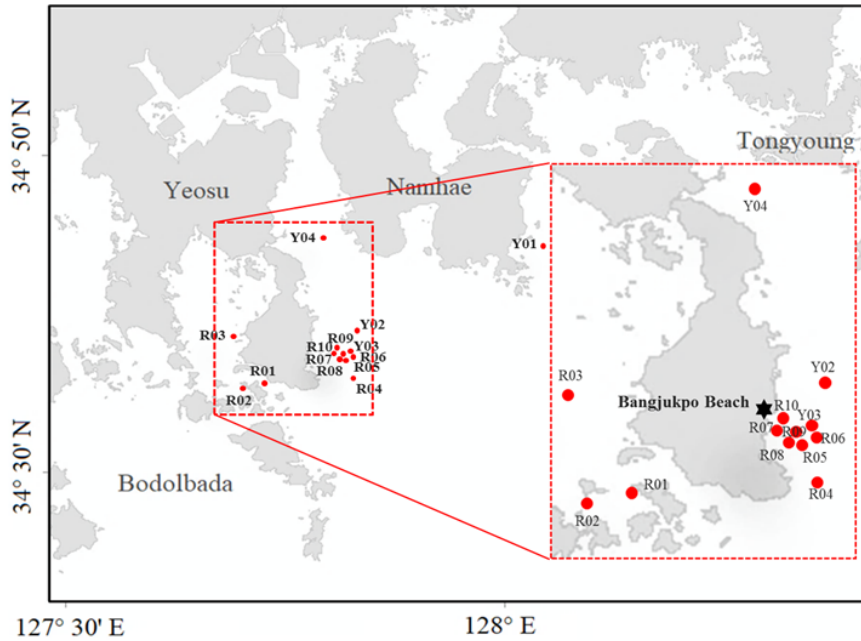


그림 3.4.30 2018년 8월 7일~8일 현장조사 정점 위치

표 3.4.9 현장조사 정점별 측정 결과

St. ID	Time	Chlorophyll (mg m ⁻³)	Cell Abundance (cells ml ⁻¹)	Spectral Shape Value
R01	2018.08.07 12:11	6.1	-	0.8
R02	2018.08.07 14:25	8.2	-	-1.7
R03	2018.08.07 15:15	4.1	-	4.2
R04	2018.08.08 11:37	1.5	526	3.6
R05	2018.08.08 12:54	16.9	1836	-11.1
R06	2018.08.08 12:59	15.9	4647	-13.5
R07	2018.08.08 13:12	4.58	678	-4.2
R08	2018.08.08 13:18	12.7	2152	-14.2
R09	2018.08.08 14:00	36.8	2115	-10.4
R10	2018.08.08 14:24	25.9	663	-7.7
Y01	2018.08.08 11:29	1.5	0.1	18.1
Y02	2018.08.08 13:35	7.4	237	-0.5
Y03	2018.08.08 14:20	9.1	2005	-15
Y04	2018.08.08 15:28	5.4	5	-0.8

각 정점별 원격반사도 스펙트럼 형태 분석 결과, 코클로디니움 셀농도로는 뚜렷한 패턴을 찾기가 어려웠음. 다만 클로로필 10 mg·m⁻³을 기준으로 녹색파장과 적색파장 대역에서 뚜렷한 역삼각형 형태를 보였다(그림 3.4.31). 코클로디니움 적조 셀 농도의 경우, 클로로필 농도와의 상관관계는 비교적 낮게 산출되었으며, 현장조사 원격반사도 값을 사용하여 Spectral Shape 적조 알고리즘을 적용한 값과는 높은 상관관계를 보였다(그림 3.4.32).

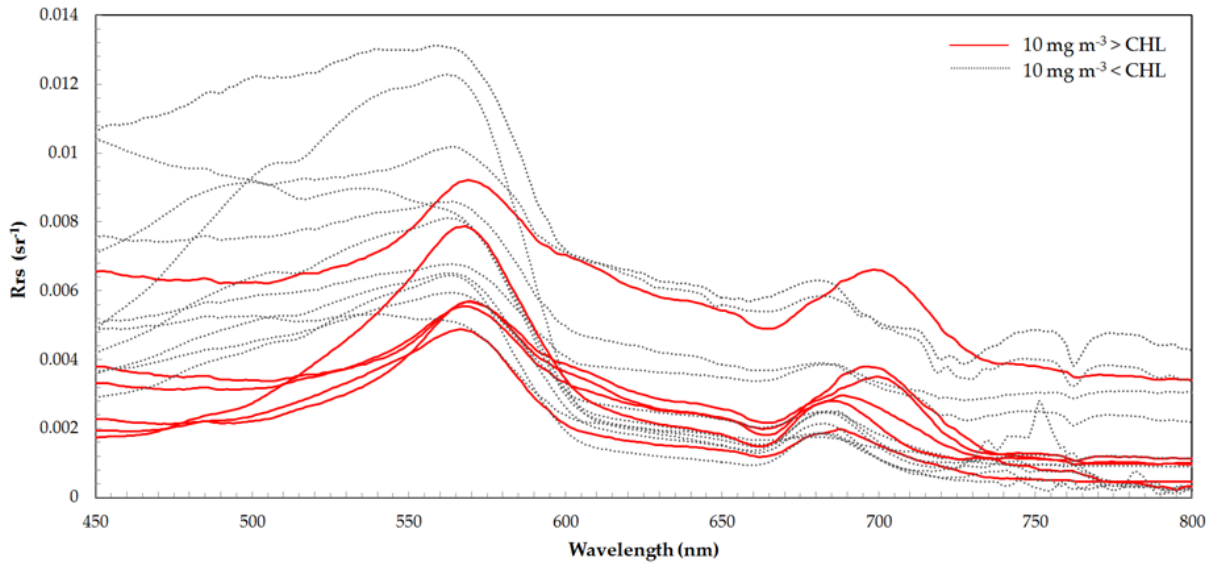


그림 3.4.31 2018년 8월 7일~8월 8일 현장조사 정점 스펙트럼 (Shin et al., 2019)

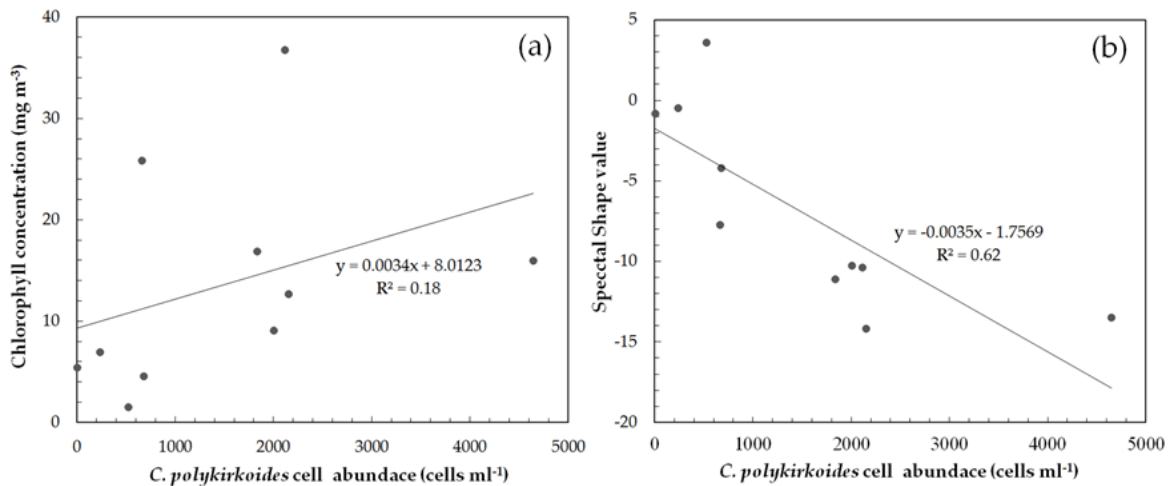


그림 3.4.32 (a) 코클로디니움 셀 농도와 클로로필 농도와의 상관관계
(b) 코클로디니움 셀 농도와 Spectral Shape 값과의 상관관계 (Shin et al., 2019)

제5절 해양생태계 역학모형 개발

1. 표영 및 저서 생태계 모형 수립

가. 연직 1차원 표영 생태계 모형 수립과 적용

우리원에서 관리 및 운영하고 있는 양식장해역인 통영 해상과학기지 (그림 3.5.1)를 대표할 수 있는 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학모형을 개발하기 위해서 일차적으로 표영 생태계 모형을 수립하고 그 재현성을 평가하였다.



그림 3.5.1 해양생태계 역학 모형 개발 대상 해역 - KIOST 통영 해상과학기지 양식장 해역

그림 3.5.2는 영국 PML에서 개발 관리하고 있는 ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model)을 연직 1차원 난류확산 모형인 GOTM (Generalized Ocean Turbulence Model)과 결합하여 대기강제력에 의해서 구동하는 체계를 모식화한 것이다.

ERSEM은 NPZD (Nutrients-Phytoplanktons-Zooplanktons-Detritus) 기반의 표영생태계와 3층 구조의 저서생태계를 포함하도록 개발되어 있으며, 탄산염 화학과정이 포함되어 있다 (Baretta et al., 1995; Blackford et al., 2004). 표영생태계만을 구현하기 위해서 해저면 경계조건을 단순화하여 가라앉은 유기물의 퇴적과 퇴적층으로부터의 영양염 용출을 모수화한 단순 영양염 환원 방식을 적용하였다. 표영생태계를 표현하는 ERSEM의 각 변수들은 연직으로 30개의 층으로 나눈 수심 30 m 수층내에서 각 박스에서 생지화학적 반응을 통해 변화가 일어나고, 물리적으로는 연직혼합과 확산에 의해 상하층의 이동확산이 재현된다.

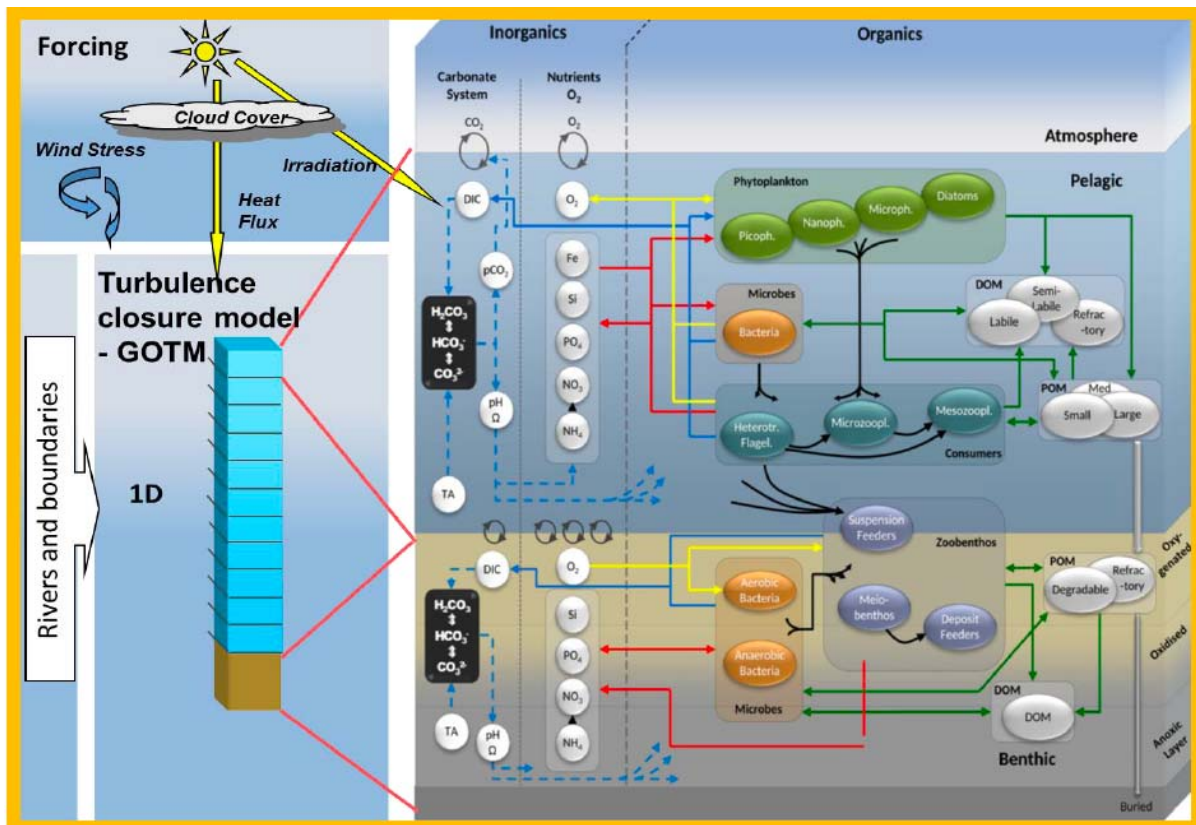


그림 3.5.2 연직 1차원 표영-저서 결합 생태계 모형 (ERSEM-GOTM)의 체계도. 청색은 탄소 순환, 적색은 영양염 순환, 황색은 산소 순환, 녹색은 유기물 순환, 흑색은 피포식 관계를 나타냄 (Butenschon et al. 2016 변형)

모형을 구동하기 위한 대기강제력은 유럽 중규모 기상 예보 센터 (European Center for Medium range Weather Forecast)에서 생산 배포하는 ERA-interim 재분석 자료 중 통영 양식장 해역에서 가장 가까운 격자를 선택해 2m 기온, 해면 기압, 10m 풍속과 풍향, 상대습도, 운량 등의 정보를 6시간 간격으로 추출하여 구성하였으며, 모형의 적분 기간은 2006년에서 2016년까지 11년 간이다.

그림 3.5.3은 ERSEM-GOTM 기반 표영 생태계 모형 결과와 국립수산과학원의 관측 자료가 있는 인근 해역의 자료를 표층과 저층에서 비교한 그림이다. 통영 해역의 경우 표층과 저층과의 수온차이는 여름철에만 한시적으로 나타나며 그 외의 계절에는 표층과 저층간의 수온차가 크게 나지 않는다. 염분은 일반적으로 표층에서 낮고 저층에서 높으나 모형에서는 이 차이를 재현하지 못했다. 다만 늦여름에 전반적으로 염분이 낮고 겨울철에 높게 나타나는 것은 비교적 잘 재현하였다. 인산염 관측 자료의 경우 겨울철에는 표층이 높거나 저층이 높거나 하지만 그 차이가 크지 않고 여름철에 저층이 높고 표층이 낮은 것이 비교적 뚜렷하게 나타나는 데, 모형 결과는 이런 현상이 훨씬 더 두드러지게 재현되었다. 고무적인 것은 인산염 농도의 범위가 관측자료와 모형자료에서 크게 다르지 않다는 것이다. 질산염도 비슷한 결과를 보이나 인

산염 보다는 재현성이 떨어지는 것으로 보인다. 한편 규산염의 경우 관측자료에 비해서 모형 값이 과대하게 모사하는 것으로 나타나 상당한 보완이 필요한 것으로 나타났다. 엽록소a의 경우 여름철에 표층이 살짝 높고 저층이 낮게 모형이 모사하였으며, 관측치에서 나타나는 후반부의 높은 엽록소a 농도는 모형에서는 나타나지 않았다. 용존산소의 경우 관측치는 봄에 높고 겨울에 낮았으나 모형은 여름에 높고 겨울에 낮아 높은 시기의 차이가 있었다. pH는 전반적으로 관측치에 비해 다소 낮게 모사되었다.

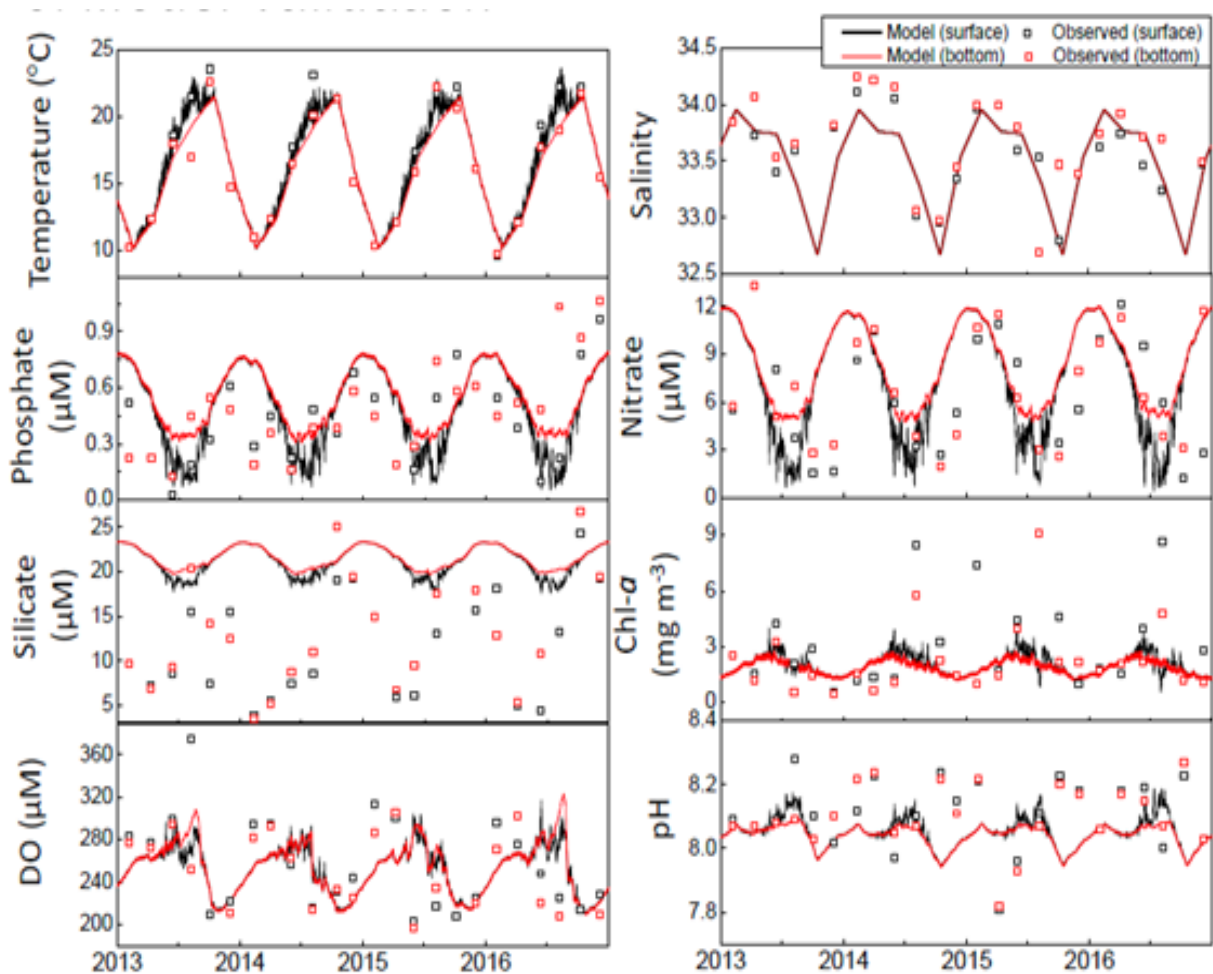


그림 3.5.3 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영생태계 모형 결과(실선)와 국립수산과학원 관측 자료(도형)와의 비교(표층은 흑색, 저층은 적색)

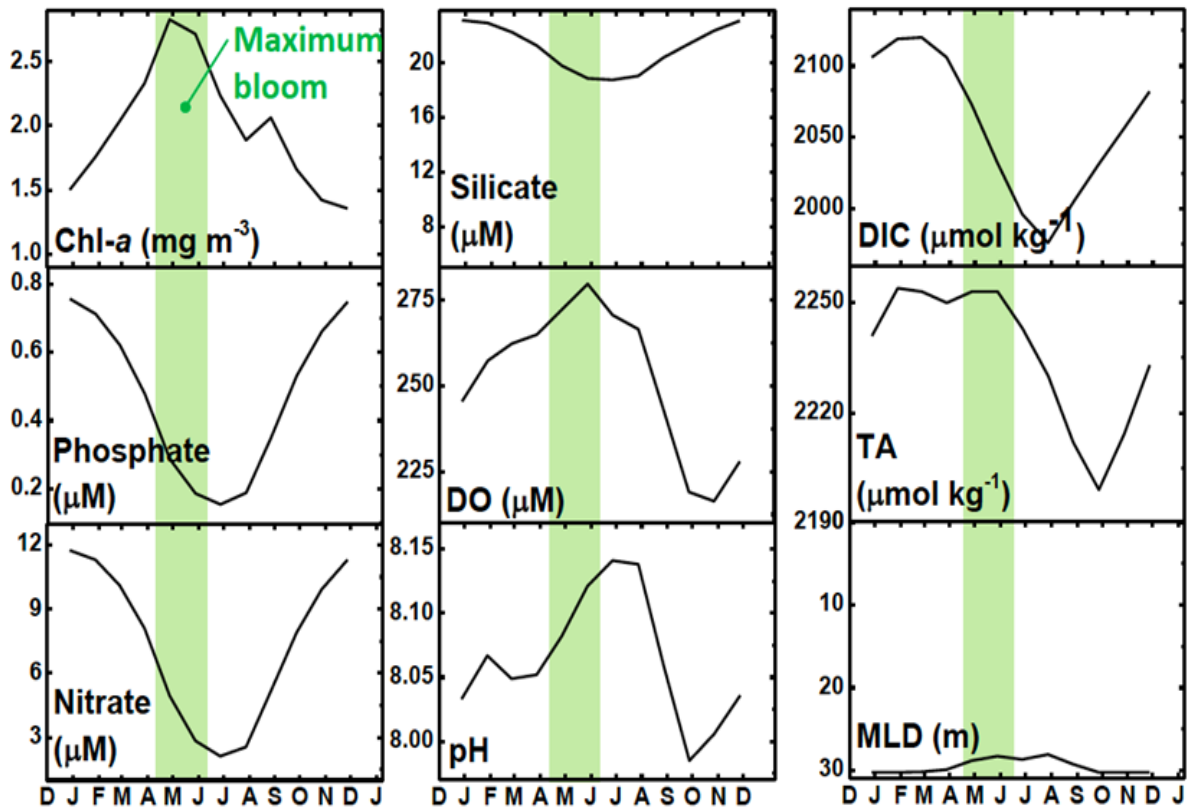


그림 3.5.4 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영생태계 모형 결과 -
표층 변수들의 계절변동성 (녹색구간은 엽록소a 농도가 최대인 시기)

그림 3.5.4는 ERSEM-GOTM 기반 표영생태계 모형 결과를 이용해서 표층변수들의 계절평균 값을 추출한 것이다. 엽록소a의 월별 분포를 보면 최대 번성시기가 5월에 나타나며 영양염은 이보다 2개월 늦은 7월에 최소가 되고 겨울철에 최대가 된다. 용존산소(DO)는 6월에 최대 11월에 최소를 나타내며 pH는 7월에 최대 10월에 최소값을 보였다. 용존유기탄소(DIC)는 겨울에 높고 여름에 낮게 나타났으며, 총알칼리도(TA)는 10월에 특별히 낮게 나타났다. 혼합층깊이(MLD)는 겨울철에 바닥까지 잘 혼합되며, 여름철에는 다소 얕아지지만 전층이 비교적 잘 섞이는 것으로 나타났고, 이와같이 모의된 이유는 조석의 영향이 크기 때문인 것으로 사료된다.

그림 3.5.5는 표층 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 기능군별 생체량의 계절변동성을 표현한 것으로서 5월에 최대 번성을 차지하는 것은 규조류이며 미세조류가 이보다 한 달 늦게 번성하고 초미세조류가 다시 한 달 늦게 번성하는 것으로 나타난다. 규조류가 아닌 소형조류는 최대번성은 5월로 규조류와 그 시기가 같으나 생체량은 1/3이 채 안될 정도로 작다. 동물플랑크톤의 경우 우점종은 중형으로 규조류 번성보다 약 한 달 늦게 번성하며 이중섭식자들과 소형크기의 것들이 그 다음으로 번성하나 생체량은 이중섭식자들이 소형보다 더 많다. 한편 박테리아는 2월에 생체량이 최대이고 10월에 최소이지만 연중 그 차이가 크지 않다.

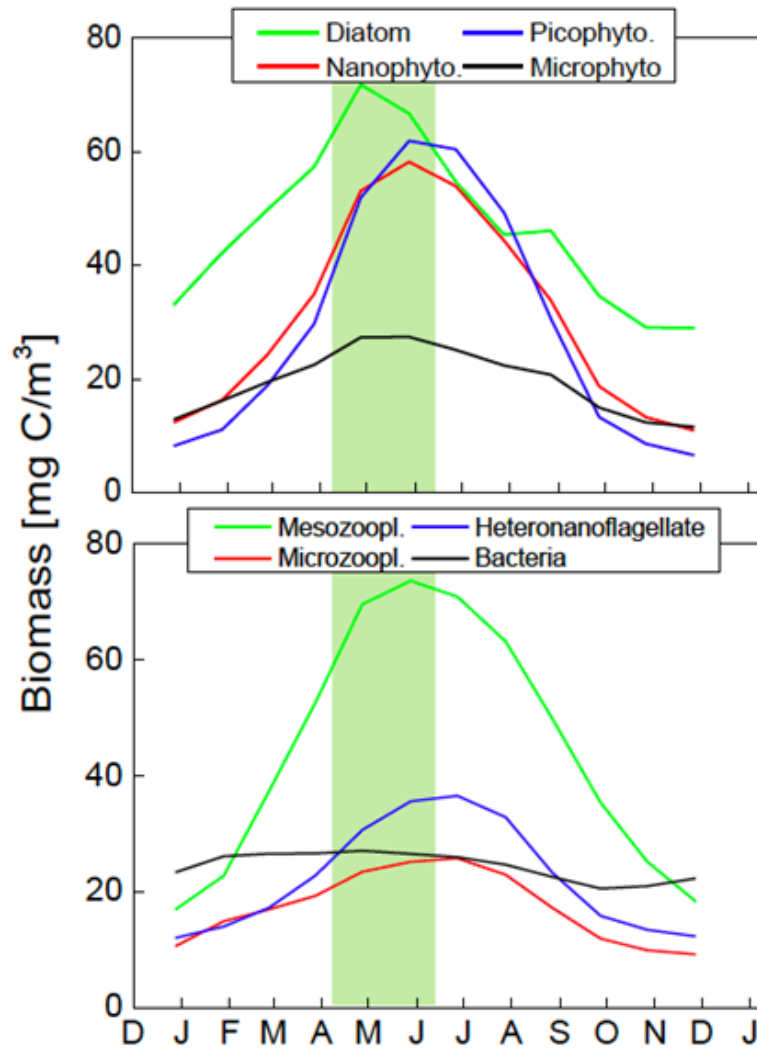


그림 3.5.5 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영생태계 모형 결과 - 표층 식물 및 동물 플랑크톤의 기능군별 생체량 계절변동성 (녹색구간은 엽록소a의 농도가 최대인 시기)

나. 저서 생태계 모형 수립 및 표영생태계 모형과의 결합

ERSEM의 저서생태계 모형은 그림 3.5.1에 나타난 바와 같이 3개의 층으로 표현된다. 첫 번째 층은 유산소층(oxic layer)으로 산소가 투과되는 깊이에 해당하며, 두 번째 층은 탈질화층(denitrification layer), 그리고 마지막 층은 무산소층(anoxic layer)으로 구성되어 있다. 저서동물군은 크게 세 가지로 부유섭식자(suspension feeder)와 퇴적섭식자(deposit feeder) 그리고 중형저서동물(meiofauna)로 구성되어 있다. 미생물은 유산소층에선 호기성 박테리아가 탈질화층에선 혐기성 박테리아로 구성되며 이 밖에 입자성 퇴적물과 용존유기물로 구성되어 있다. 이외에 영양염과 탄산염 화학과정도 포함되어 있다. 여기에는 퇴적층 내 공극수에서의 영양염, 산소 농도 등이 계산되고, 저서생물간 먹이망 구조도 포함된다.

표영생태계와의 결합을 위해서는 단순한 영양염환원 방식의 해저경계조건 대신 저서생태계 모형과의 연계를 통해 영양염과 탄소의 순환이 이루어지도록 하는 방식으로 모형을 구성하면 된다. 저서생태계 모형을 결합하는 경우 표영생태계 모형을 단독으로 수행하는 데 비해서 영양염 등의 평형을 이루는 데 걸리는 시간이 다소 오래 걸리기 때문에 충분한 spin-up 기간이 추가로 필요하다.

2. 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역학 모형 개발

앞서 기술한 ERSEM-GOTM 표영생태계 단독 모형과 단순한 3층 구조의 저서생태계 모형을 상호 연계한 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 모형을 통영 양식장 해역에 대해서 수립하였다. 표영생태계는 연직으로 30개의 수층으로 나누었으며 저서생태계는 시간에 따라서 두께가 변하는 3개의 층으로 구성하였다. 대기강제력은 ERA-interim 재분석 자료로부터 기온, 기압, 풍향, 풍속, 상대습도, 운량 등의 정보를 6시간 간격으로 추출하여 적용하되 충분한 spin-up을 위하여 1980년부터 2016년까지를 수치적분하고 후반 10년의 결과로부터 계절평균장을 도출하였다.

표영생태계 단독 모형과는 달리 본 사업에서 관측한 대상해역의 수온 연변동성을 기초로 하여 대마난류에 의한 열속 보정 방법을 고안하여 적용하였으며, 염분은 일정하게 가정하여 변동성을 배제한 방식으로 모형의 특성을 변형시켰다.

가. 모형자료와 양식장 환경 모니터링 자료와의 비교 분석

모형의 과거 재현성능을 향상시키고 최적화된 모수화 방안을 찾기 위해서 통영 인근해역의 기존 관측자료로 국립수산과학원, 해양환경관리공단, 한국해양과학기술원 등의 가용 자료를 수집하여 분석하였다. 이들 관측자료를 기반으로 모형결과의 비교 분석을 통한 모형 인자 개선 및 적용에 대한 반복 실험을 수행하였으며 특히 표층 수온, 영양염, 용존산소, 엽록소a를 대상으로 2006년부터 2016년까지의 자료를 비교하였다 (그림 3.5.6).

표층수온은 대마난류수의 영향을 고려하기 위한 방법으로 강제 부여한 열량에 의해서 비교적 잘 재현한 것으로 판단된다. 하지만 염분은 33.4로 일정하게 모형에서 부여하였으나 실제 관측 염분은 30~35 사이에서 계절변동성이 크기 때문에 염분 변동성을 고려할 수 있는 방법의 추가 개발이 필요하다.

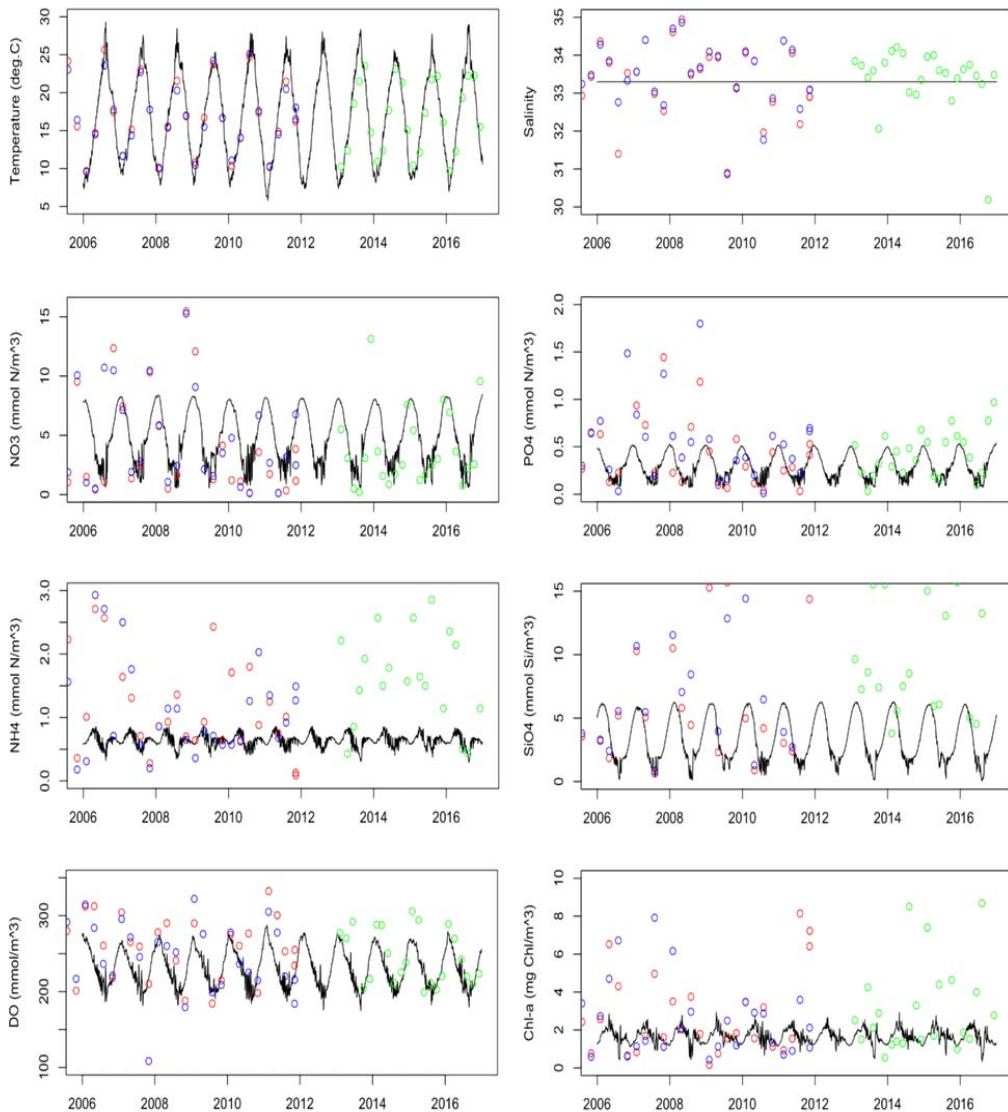


그림 3.5.6 ERSEM-GOTM 기반 연직 1차원 표영-저서 결합 생태계 모형 표층 결과(실선)와 통영 양식장 해역 인근 관측 자료 (정점 위치가 다른 해역은 색으로 구분)와의 비교

표층 질산염과 인산염의 경우 2010년 이전 겨울철 농도가 모형에 비해서 관측값이 높게 나타났으나 그 이후에는 그 변동폭이 모형과 유사하게 나타나, 모형에서 고려하지 못한 과정이 있는 것인지 관측값에 문제가 있는 것인지에 대한 추가 분석이 필요하다. 암모늄과 규산염의 경우 모형에 비해서 관측값이 전반적으로 높게 나타나 표영생태계 단독으로 돌린 결과와는 상충되는 양상을 보였으나 다소 개선된 효과도 있는 것으로 판단되나 여전히 개선의 여지가 많다. 표층 용존산소는 대체로 관측값의 변동을 잘 재현하고 있으나 겨울철에는 모형 결과가 작게 모의하는 것으로 나타났다. 표층 엽록소a의 경우 관측값에서 때때로 높게 나타나는 농도

를 모형이 제대로 모사하지 못하는 것으로 나타났으나, 이는 천해 양식장 해역의 지역적 편차와 영양염 농도 차이에서 기인한 것으로 사료되며, 향후 본 연구사업 관측결과를 활용한 모형 최적화를 통해 개선할 필요가 있다.

나. 표영생태계 계절변동성

모형의 한계에도 불구하고 연직 1차원 표영-저서 생태계 결합 역한 모형 적용을 통한 통영 양식장 해역의 하위생태계 계절변동성을 살펴보았다. 2007년부터 2016년까지 후반 10년의 결과로부터 월평균장을 추출하였으며 이로부터 계절변동성을 분석하였다.

영양염의 경우 겨울에는 인산염, 질산염, 규산염은 표저층간 균일하며 높은 농도를 유지하는 반면 여름에는 표저층간 구배가 10 ~ 20m에서 발달하며, 상층은 고갈되고 하층은 높게 나타나는 특성을 보였다. 암모니아는 표층은 4월에 최대, 8월에 최소 농도를 나타냈으며 저층에서는 5,6월에 최대 농도를 보였다. 전체 N:P 비율은 16.38, Si/N 비율은 0.7로 나타났다 (그림 3.5.7).

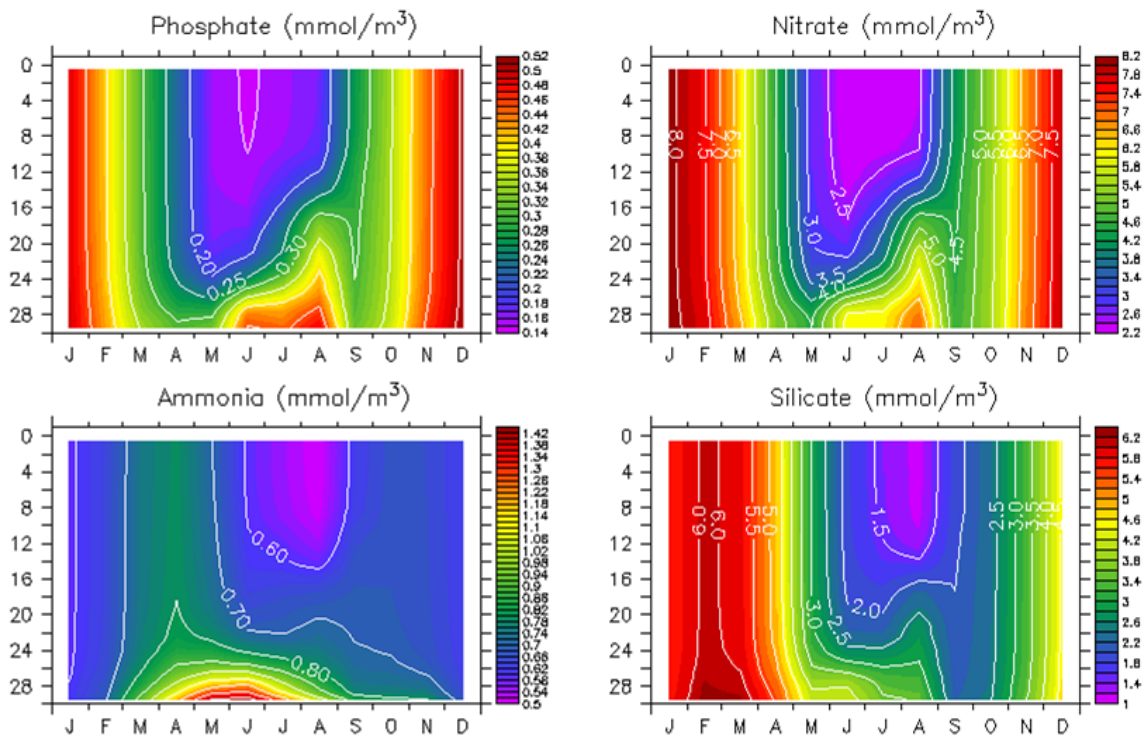


그림 3.5.7 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 수층 영양염 계절 변동성 (왼쪽 위부터 시계방향으로 인산염, 질산염, 규산염, 암모니아; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)

식물플랑크톤의 계절변동성은 그림 3.5.8에 나타낸 바와 같이 크기가 클수록 일반적으로 최대 번성시기가 빠르게 나타났으며, 소형조류는 3월에 규조류는 4월말에서 5월초에 미소조류는 5월 중순에 그리고 초미세조류는 5월 중하순에 각각 최대 번성하였다. 상대적으로 크기가 작은 미소조류와 초미세조류는 연중 한 번의 최대번성시기를 보였으나, 소형조류와 규조류는 8월에 그 생체량이 줄었다가 9월에 다시 약하게 성장하는 것으로 나타났다. 연평균 생체량 구성비를 보면 규조류가 32.2%로 가장 많았고, 그 다음으론 소형조류가 27.1%, 미소조류가 23.1%를 차지했다면 초미세조류는 17.6%를 차지하여 그 생체량이 가장 작았다.

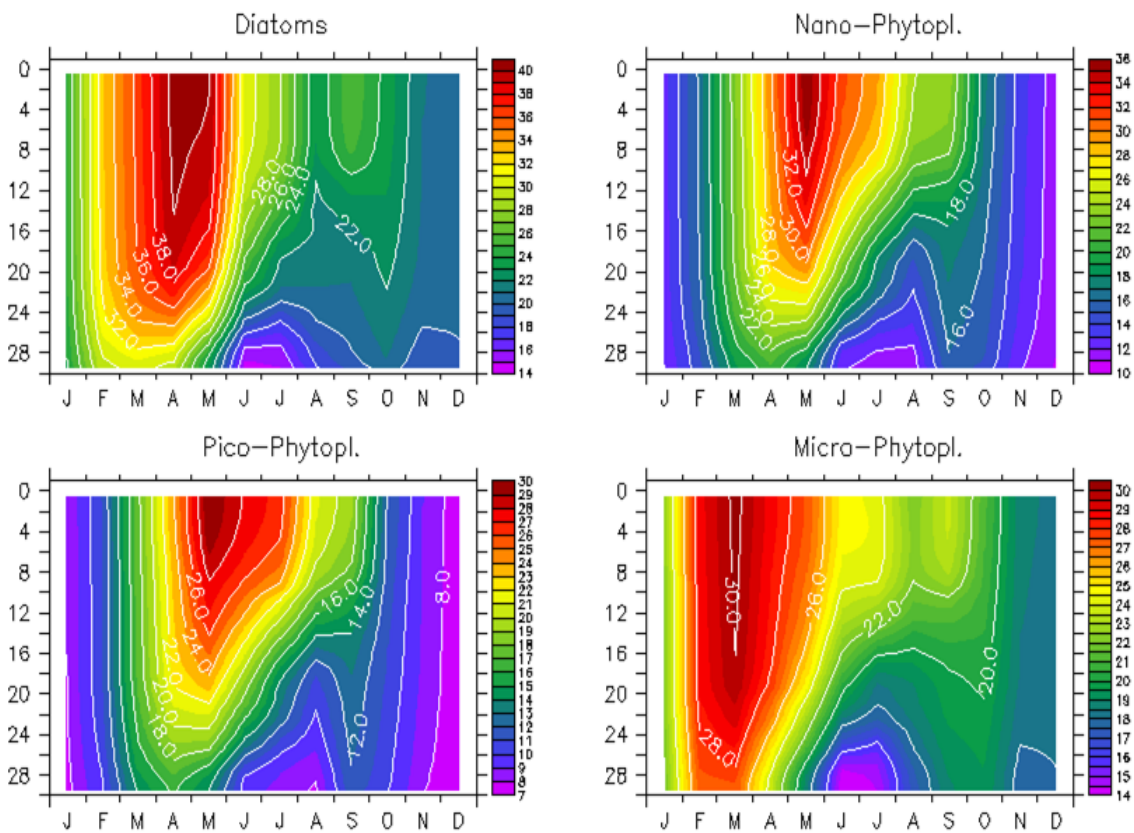


그림 3.5.8 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 식물플랑크톤 계절 변동성
(왼쪽 위부터 시계방향으로 규조류, 미소조류, 소형조류, 초미세조류;
세로축은 수심 (m), 가로축은 월)

동물플랑크톤의 계절변동성은 그림 3.5.9에 나타낸 바와 같다. 최대 번성시기는 중형과 소형이 모두 5월 중순에 나타났고, 이보다 작은 이종섭식자들은 다소 늦은 5월 말에서 6월 초에 나타났다. 박테리아는 1월부터 생체량이 증가하기 시작하여 3월에서 5월까지 최대 생체량이 유지되었다. 동물플랑크톤 생체량의 상대적 크기는 중형 동물플랑크톤이 가장 많아 51.9%를 차지하였고, 가장 작은 이종섭식자들이 26.8% 그리고 소형 동물플랑크톤이 21.3%를 차지하였다.

그림 3.5.10에는 수온과 엽록소a, 용존 유기물과 고형 유기물의 수층 내 계절변동성을 나타내었다. 수온은 8월에 최대가 되고 여름 한 철만 성층이 발달하며, 그 외 계절에는 비교적 연직으로 잘 혼합되어 나타난다. 엽록소a는 식물플랑크톤 기능군들의 생체량 변화로 본 바와 같이 4월 말에서 5월 초에 최댓값을 보이며, 깊은 수심까지 농도가 높게 나타나고, 9월에 상층부에서 가을 번성이 추가로 나타난다.

한편 용존 유기물은 8월에 표층에서, 고형 유기물은 7월에 바닥에서 최댓값을 보인다.

용존산소는 겨울에 높고 여름에 낮게 나타났으며 특히 여름철 저층에서 가장 낮게 나타났다. 탈질율은 겨울에 낮고 여름에 높게 나타났다. 이산화탄소 분압은 겨울에 낮고 여름에 높게 나타났으며, 여름철 저층에서 매우 높게 나타나 용존산소와는 반대 경향을 보였다. 한편 수소이온농도는 겨울에 높고 여름에 낮으며 여름철 저층에서 특히 낮게 나타났다 (그림 3.5.11).

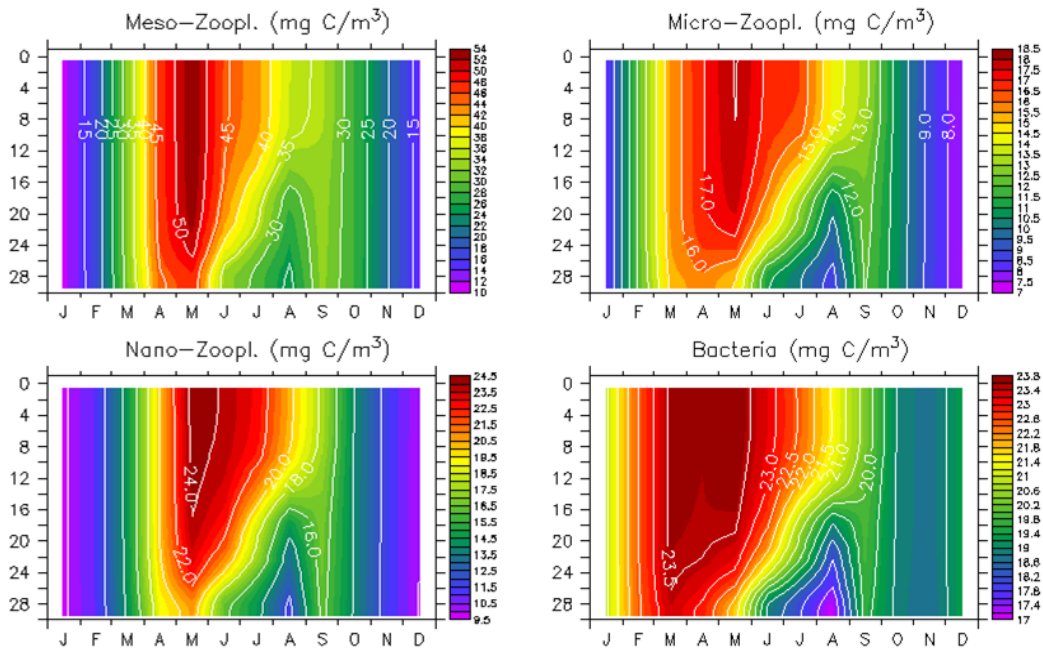


그림 3.5.9 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 동물플랑크톤 계절 변동성 (왼쪽 위부터 시계방향으로 중형 동물플랑크톤, 소형 동물플랑크톤, 박테리아, 이종섭식자; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)

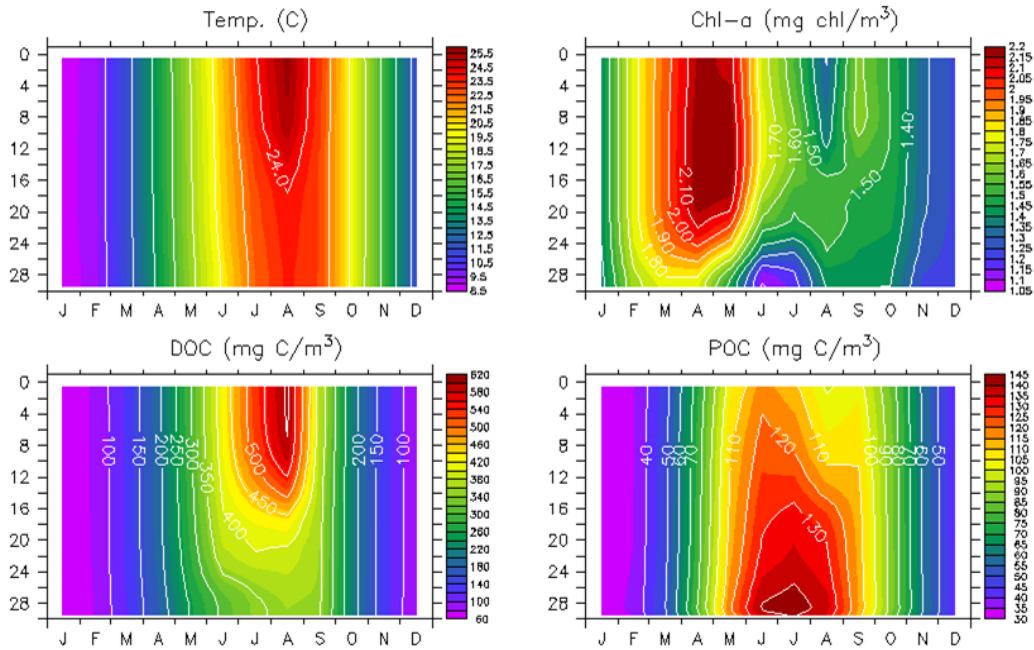


그림 3.5.10 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 표영 생태계 계절 변동성 (왼쪽 위부터 시계방향으로 수온, 엽록소a, 고형 유기물, 용존 유기물; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)

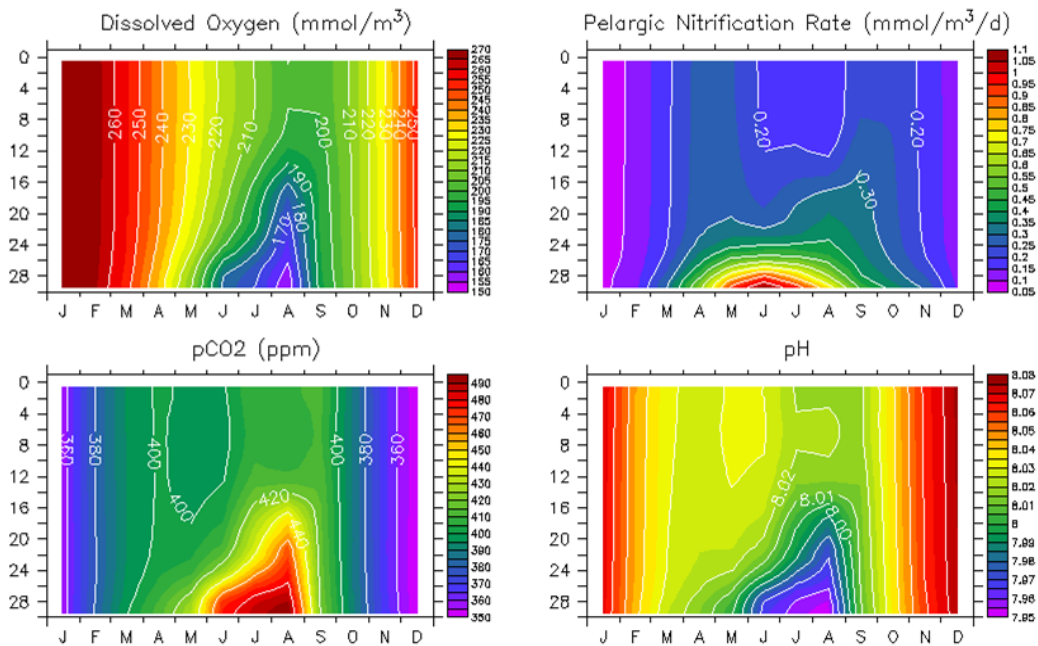


그림 3.5.11 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 표영 생태계 계절 변동성 (왼쪽 위부터 시계방향으로 용존산소, 탈질율, 수소이온농도, 이산화탄소분압; 세로축은 수심 (m), 가로축은 월)

다. 저서생태계 계절변동성

저서생태계를 구성하는 세 개의 층은 시간에 따라 그 두께가 변화하는 데, 그림 3.5.12는 각 층 경계면의 계절변화를 나타낸 것이다. 적색은 유산소층과 탈질화층의 경계를 나타낸 것으로서 겨울에 깊고 5월에서 11월까지는 매우 낮아 유산소층이 거의 존재하지 않는다. 탈질화층과 무산소층의 경계인 청색선도 겨울엔 훨씬 깊어 2월에 최대 6 cm 까지 깊어지고 여름엔 얕아져서 1 cm 이하를 유지하는 것으로 모의하였다.

수층내의 표영 생태계에서 저서 생태계를 구성하는 퇴적층으로의 산소 플럭스는 겨울에 작고 여름에 높게 나타난다 (그림 3.5.13). 한편 유산소층의 산소 농도는 매우 작으며 여름철에만 다소 높게 나타났다.

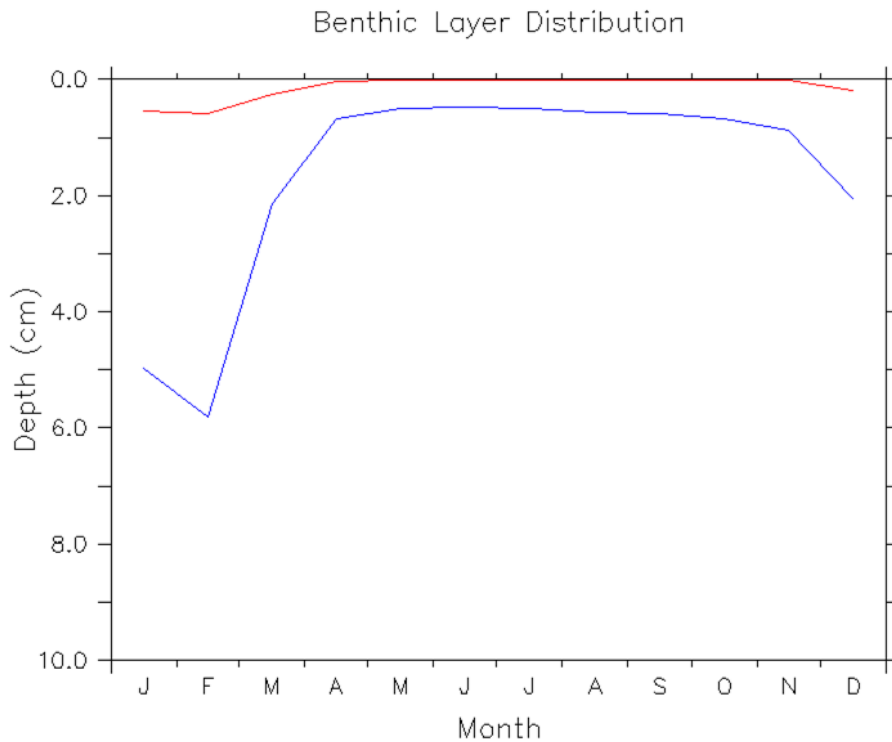


그림 3.5.12 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 -
저서 생태계 경계층 두께의 계절 변동성

(적색: 유산소층과 빈산소층(탈질화층)의 경계, 청색: 빈산소층(탈질화층)과 무산소층의 경계)

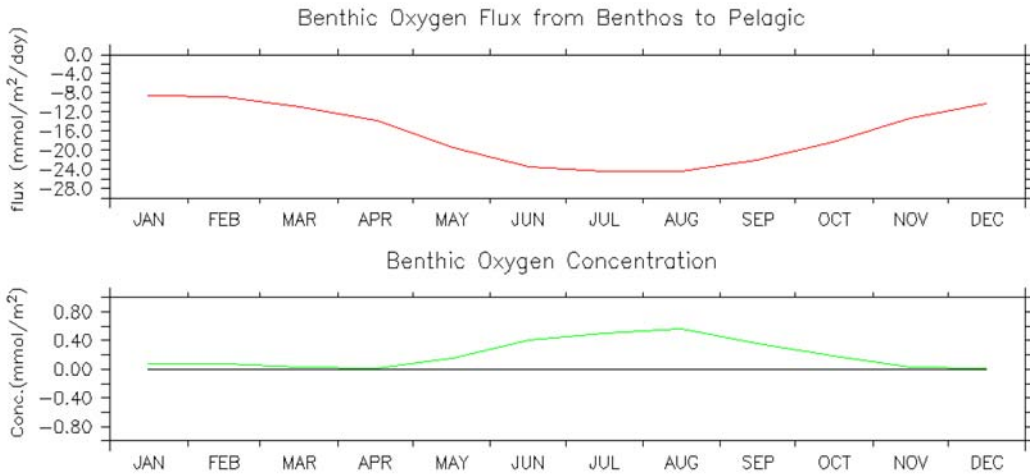


그림 3.5.13 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서 생태계 계절 변동성 (위: 산소 플럭스 (음수는 표영 → 저서); 아래: 산소 농도 (녹색))

그림 3.5.14는 표영 생태계와 저서생태계의 경계면에서 영양염 플럭스의 계절변동성을 나타낸 것이다. 인산인의 경우 전반적으로 퇴적층에서 수층으로의 영양염 플럭스가 나타나며 여름에 최대가 되고 겨울에 최소가 된다. 질산질소의 경우는 겨울에 퇴적층에서 수층으로의 플럭스가 최대가 되고 여름에는 최소가 되면서 오히려 수층에서 퇴적층으로의 플럭스가 나타난다. 암모늄질소와 규산규소는 인산인과 마찬가지로 퇴적층에서 수층으로의 플럭스가 여름에 최대가 되고 겨울에 최소가 된다.

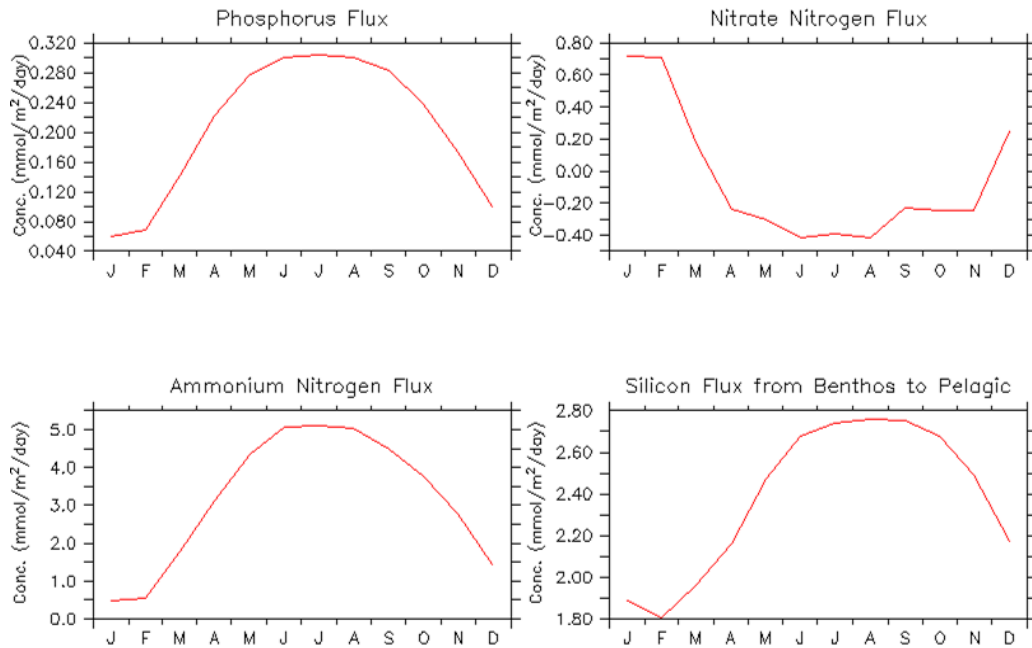


그림 3.5.14 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서 생태계 영양염 플럭스 계절 변동성

퇴적층내 영양염 농도를 보면 (그림 3.5.15) 인산인의 경우 3~5 mmol/m² 으로 7월~12월에 최소가 되고, 3월에 최대가 된다. 질산질소는 0~0.3 mmol/m² 으로 5월~10월에 최소가 되고 2월에 최대로 나타난다. 암모늄질소는 가장 농도가 높아 30~40 mmol/m² 으로 4월에 최소이며 9월에 최대가 된다. 규산규소는 8~16 mmol/m² 으로 6월에 최소를 나타내고 2월에 최댓값이 나타난다.

퇴적층내 공극수에 존재하는 영양염 농도는 그림 3.5.16과 같다. 인의 경우 0~12 mmol/m³ 의 범위내에 존재하며 유산소층인 상층에서 가장 작고 무산소층인 하층에서 가장 높다. 상층과 중층은 7월에 최대농도를 보이는 반면 무산소층에서는 4월에 최대를 나타낸다. 질소 농도는 15~120 mmol/m³ 의 범위를 보이며, 상층과 중층은 겨울에 낮고 여름에 높은 뚜렷한 계절 변화를 보이는 반면 하층은 4월에 최소가 되고 9월에 최대가 되지만 상대적으로 완만한 계절 변화를 보인다. 규소농도의 범위는 40~140 mmol/m³ 으로서 상층은 완만한 계절변화로 4월에 작고 6월에 높게 나타나고 중층과 하층은 2월에 가장 높고 다른 계절에는 상대적으로 완만한 변화를 나타낸다.

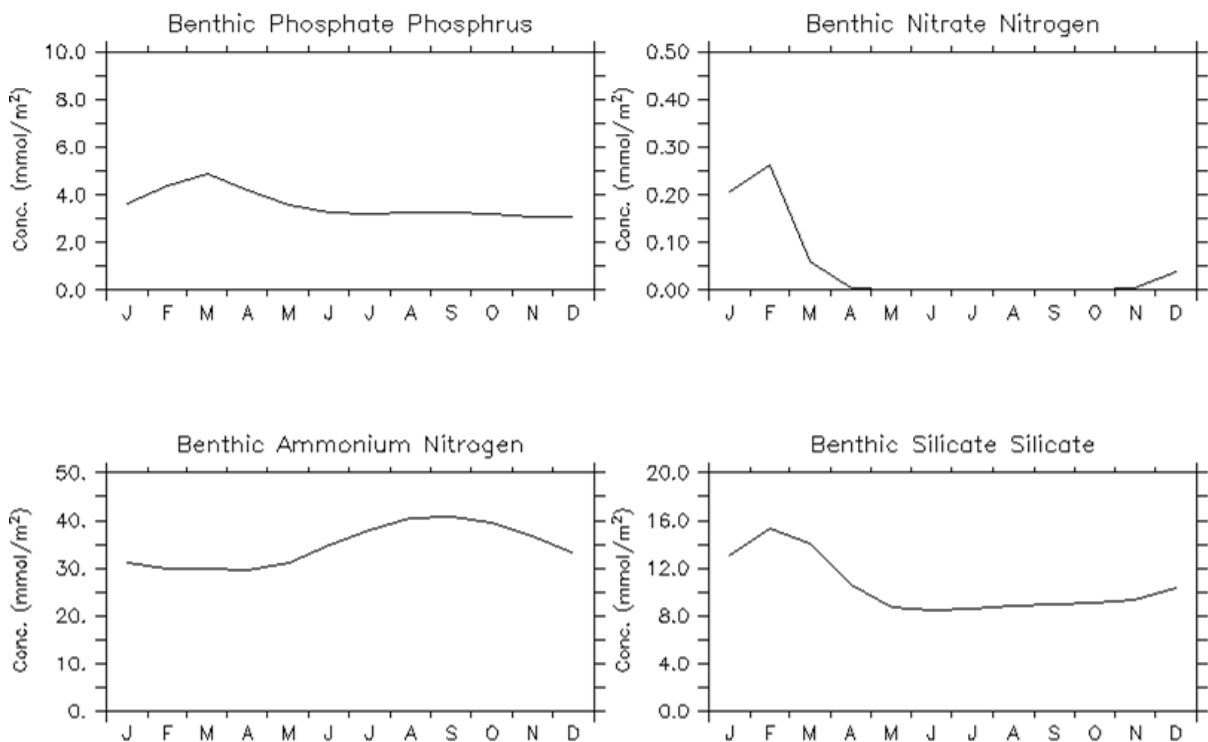


그림 3.5.15 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 퇴적층내 영양염 농도의 계절 변동성

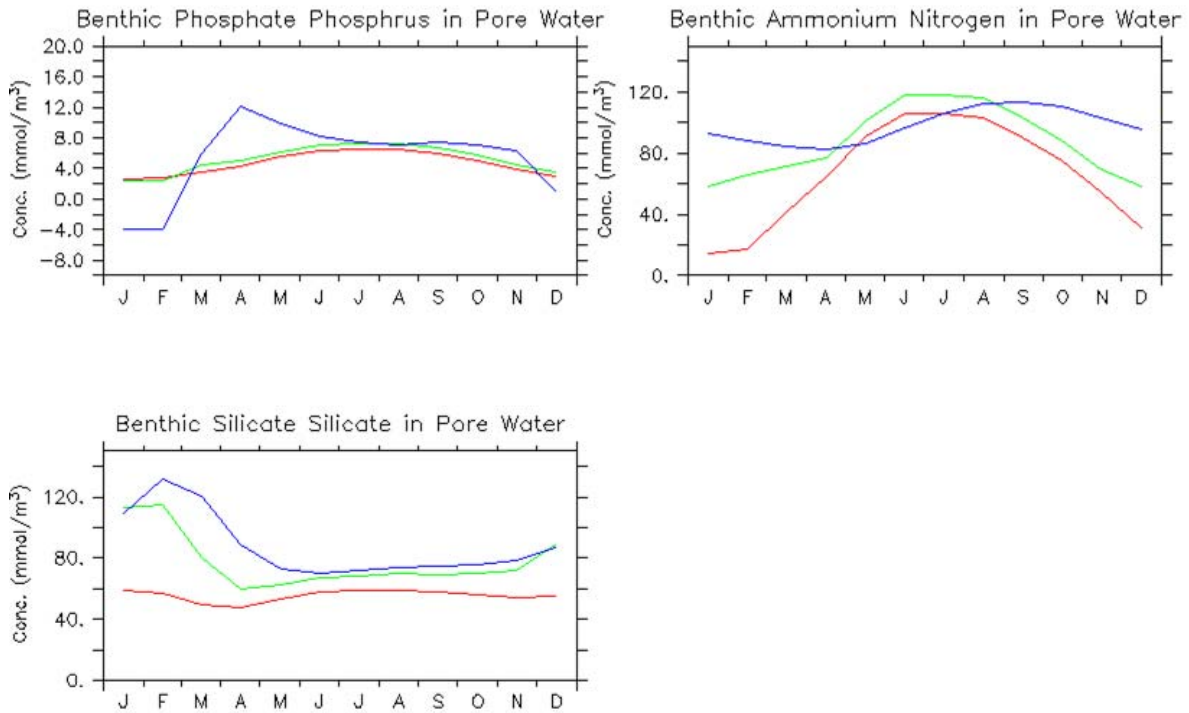


그림 3.5.16 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 퇴적층 공극수내 영양염 농도의 계절 변동성 (적색: 유산소층; 녹색: 탈질화층; 청색: 무산소층)

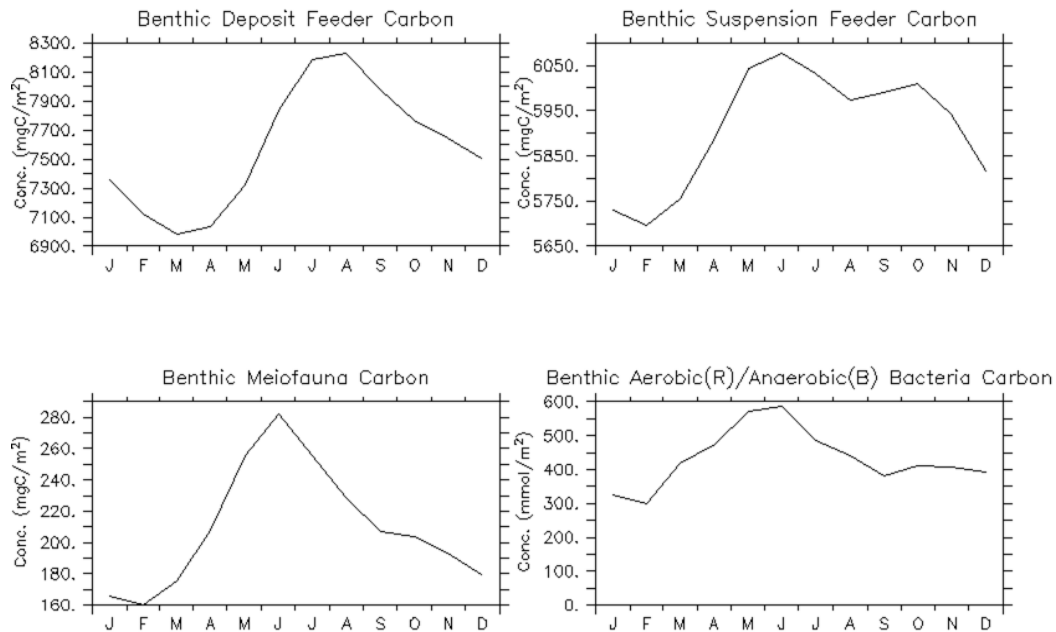


그림 3.5.17 연직 1차원 표영-저서 결합 하위생태계 모형 결과 - 저서생태계 생물생체량의 계절 변동성

저서생태계를 구성하는 생물들의 탄소기반 생체량 계절변화를 그림 3.5.17에 나타내었다. 퇴적물 섭식자가 가장 많은 생체량을 보였으며 3월에 최소가 되고 8월에 최대가 되는 계절변화를 보였다. 두 번째로 생체량이 많은 생물은 부유물섭식작로서 2월에 최소가 되고 6월에 최대가 되는 계절변화를 보였다. 생체량이 가장 작게 나타난 것은 중형저서동물로서 계절변동성은 다른 생물과 마찬가지로 2월에 최소 6월에 최대가 나타났다. 박테리아도 2월에 최소이고 6월에 최대로 나타나나 9월에 상대적으로 작은 값을 보였다.

참고로 본 연구에서 개발 모의한 모형 결과는 현장관측 자료와 구체적으로 비교 검증된 것이 아니며, 특히 저서생태계의 경우 처음 시도해본 결과일 뿐만 아니라 관측값과의 비교를 위한 도구조차 개발되지 않은 관계로 해석상에 주의가 필요하다.

제6절 통합 DB 및 자료기반모형 개발

1. 해양관측자료 통합 DB 구축

가. 통영해역 관측자료 수집

인공지능 기술을 이용한 양식장 해양환경관리시스템 구축을 위해서 연구해역 인근의 해양 관측자료를 최대한 수집하였다. 이를 위해 국내 해양관련 기관의 해양관측자료, 미국 NCEI (National Centers for Environmental Information)의 수집자료, 인공위성 자료를 수집하였으며, 자료 종류별 생산기관, 자료항목, 수집기간을 정리하면 표 3.6.1과 같다.

표 3.6.1 통영 주변 기존자료 수집 목록

자료종류	기관	자료항목	자료수집기간
실시간	KHOA	조위, 유의파고, 유의파주기, 최대파고, 최대파주기, 풍속, 풍향, 기온, 기압	2000.01.01. - 2018.10.31.
	KOGAS	수온, 염분, DO	2016.10.01. - 2018.10.31.
	NIFS	수온, 염분, DO	2005.01.19. - 2017.12.31.
연안관측	NIFS	수온, 기온, 운량, 천기	1967.04.22. - 2018.10.31.
정점관측	NIFS	수온, 염분, DO, 인산염인, 아질산질소, 질산질소, PH, 규산규소, 투명도, 기압	1964.03.14.- 2016.10.18.
환경모니터링	NIFS	수온, 염분, 이온농도, DO, 화학적 산소요구량, 암모니아질소, 질산질소, 아질산질소, 용존 무기질소, 총 질소, 용존 무기인, 총인, 규산규소, 클로로필-a, 부유 물질, 투명도	1998.02.13. - 2018.10.31.
	KOEM		1997.02. - 2018.10.
인공위성자료	NCDC	표층 수온	2012.01.01. - 2018.10.31.
	OSTIA	표층 수온	2007.01.01 - 2018.10.31.
World Ocean Database	NCEI	수온, 염분, DO, 인산염인, 아질산질소, 질산질소, PH, 규산규소, 기온, 기압	1932.09.02. - 2006.12.06

국립수산과학원 (NIFS, National Institute of Fisheries Science), 국립해양조사원 (KHOA, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency), 한국가스공사 (KOGAS, Korea Gas Corporation)에서 운영하는 실시간 관측소와 관측부이의 관측 자료를 수집하였다. 국립해양조사원에서는 실시간 해양관측정보시스템 (http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real.do)을 통해 조위, 파랑, 기상 요소들의 10분 간격 자료를 제공하며, 엑셀파일로 다운로드 받을 수 있다. 국립수산과학원과 한국가스공사의 수온, 염분, DO 자료는 국립수산과학원의 실시간 해양환경 어장정보시스템 (<http://www.nifs.go.kr/risa/main.risa>)에서 제공하는데, 30분 간격의 표층, 중층, 저층 자료를 엑셀형태로 제공하며, 자료형태는 그림 3.6.1과 같다.

관측소	관측일시	표층			중층			저층		
		수온(°C)	염분(psu)	DO(mg/L)	수온(°C)	염분(psu)	DO(mg/L)	수온(°C)	염분(psu)	DO(mg/L)
통영 안정(btaga)	2016-10-01 0:00	22.88	27.28	8.56	23.45	28.01	7.47	24.67	30.74	1.93
통영 안정(btaga)	2016-10-01 0:30	22.95	27.46	8.34	23.38	27.98	7.51	24.67	30.75	1.79
통영 안정(btaga)	2016-10-01 1:00	23	27.41	8.17	23.31	27.98	7.52	24.39	30.73	2.37
통영 안정(btaga)	2016-10-01 1:30	22.88	27.33	8.35	23.37	28.05	7.33	24.36	30.74	2.36
통영 안정(btaga)	2016-10-01 2:00	22.85	27.31	8.27	23.42	28.07	7.25	24.41	30.73	2.34
통영 안정(btaga)	2016-10-01 2:30	22.98	27.42	8.36	23.42	28.07	7.21	24.47	30.71	2.19
통영 안정(btaga)	2016-10-01 3:00	23.18	27.51	8.23	23.42	28.07	7.21	24.41	30.72	2.35
통영 안정(btaga)	2016-10-01 3:30	23.17	27.53	8.27	23.54	28.13	6.98	24.7	30.72	1.83
통영 안정(btaga)	2016-10-01 4:00	23.07	27.5	8.25	23.39	28.06	7.21	24.64	30.71	2
통영 안정(btaga)	2016-10-01 4:30	22.89	27.46	8.29	23.39	28.06	7.21	24.68	30.59	1.71
통영 안정(btaga)	2016-10-01 5:00	22.91	27.49	8.23	23.42	28.06	7.2	24.67	30.65	2.05
통영 안정(btaga)	2016-10-01 5:30	22.91	27.53	8.14	23.38	28.05	7.13	24.64	30.62	2.13
통영 안정(btaga)	2016-10-01 6:00	22.82	27.5	8.13	23.53	28.13	6.93	24.58	30.52	1.99
통영 안정(btaga)	2016-10-01 6:30	22.84	27.49	8.15	23.58	28.18	6.83	24.43	30.41	1.9
통영 안정(btaga)	2016-10-01 7:00	22.83	27.48	8.15	23.53	28.14	6.9	24.35	30.36	1.99
통영 안정(btaga)	2016-10-01 7:30	22.67	27.37	8.14	23.71	28.31	6.58	24.31	30.33	2.06
통영 안정(btaga)	2016-10-01 8:00	22.64	27.35	8.16	23.51	28.14	6.88	24.26	30.29	2.54
통영 안정(btaga)	2016-10-01 8:30	22.69	27.39	8.09	23.51	28.13	6.88	24.25	30.3	2.6
통영 안정(btaga)	2016-10-01 9:00	22.74	27.43	8.12	23.53	28.14	6.85	24.09	30.1	3.1
통영 안정(btaga)	2016-10-01 9:30	22.78	27.45	8.11	23.38	28.04	7.05	24.12	30.24	3.07
통영 안정(btaga)	2016-10-01 10:00	22.82	27.48	7.84	23.5	28.14	6.85	24.41	30.49	2.55
통영 안정(btaga)	2016-10-01 10:30	22.83	27.48	7.82	23.53	28.18	6.79	24.45	30.57	2.53
통영 안정(btaga)	2016-10-01 11:00	22.87	27.48	8	23.51	28.24	6.65	24.44	30.57	2.58

그림 3.6.1 KOGAS 실시간 관측 자료의 예

국립수산과학원에서는 전국 73개소에서 1933년부터 매일 오전 10시에 수온, 염분, 비중, 운량, 천기를 측정하고 연안정지관측자료로 공개하고 있다. 또한, 정선해양관측자료는 25개 정선, 207개 정점에서 2개월마다 주기적으로 수집하는 자료로, 수온, 염분, 용존산소, 영양염류, 동식물 플랑크톤 등 17개 항목에 대한 자료를 제공한다. 국립수산과학원에서 운영하는 한국해양자료센터 (KODC, Korea Oceanographic Data Center)의 웹사이트를 통해 원하는 기간 과 지역의 자료를 검색할 수 있으며, 검색결과는 텍스트 파일이나 엑셀 파일로 다운로드 할 수 있다 (그림 3.6.2).

날짜	정선	정점	정선-정점	위도(°E)	경도(°E)	관측시기(KST)	관측수심(m)	수온(°C)	수온 QC Flag	염분(psu)	염분 QC Flag
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-03-14 14:20	0	12.93	1	34.58	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-03-14 14:20	10	13.69	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-03-14 14:20	30	12.29	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-03-14 14:20	50	12.02	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-12-09 06:40	0	17.5	1	34.24	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-12-09 06:40	10	17.37	1	34.25	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-12-09 06:40	25	17.39	2	34.24	2
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-12-09 06:40	50	17.71	1	34.31	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.355	128.345	1961-12-09 06:40	65	16.59	2	34.25	2
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-02-01 21:35	0	12.8	1	34.65	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-02-01 21:35	10	12.46	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-02-01 21:35	25	12.36	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-02-01 21:35	50	12.08	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-02-01 21:35	60	12.04	1	34.6	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-03-06 08:50	0	11.2	1	34.52	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-03-06 08:50	10	11.13	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-03-06 08:50	25	11.08	1	34.47	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-03-06 08:50	50	11.07	1	34.4	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-04-09 07:10	0	12.8	1	34.56	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-04-09 07:10	10	12.16	1	34.6	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-04-09 07:10	25	12.01	1	34.63	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-04-09 07:10	50	13.33	1	34.6	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-04-09 07:10	60	11.94	1	34.72	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-05-20 17:38	0	15.5	1	34.38	1
2006-01-01	01	01	206-01	34.5917	128.575	1962-05-20 17:38	10	14.49	1	99.999	4

그림 3.6.2 NIFS 정선해양관측자료의 예

국립수산과학원과 해양환경관리공단 (KOEM, Korea Marine Environment Management Corporation)에서는 해양물리 자료와 함께 해양화학, 일부 해양생물 자료를 수집하는 해양환경 모니터링을 주기적으로 실시하고 있으며, 수집한 자료는 웹사이트를 통해 공개하고 있다. 국립수산과학원에서는 전국 연안 및 주요 양식어장 주변 해역에서 정기조사를 수행하고 자료는 어장환경모니터링 (<http://www.nifs.go.kr/femo/>)을 통해 제공한다. 해양환경관리공단에서 해양환경측정망 관측자료를 통합해양환경정보시스템(<http://www.meis.go.kr/rest/main>)을 통해 제공하고 있다 (그림 3.6.3).

Station	Type	Year	Month	Day	Longitude	Latitude	S	WTEMP	SALT	Slps	PH_5	PH_B	DO_Sing/L	DO_Bing/L	COD_Sing	Bing	NH4N_Sig	NH4N_Bing	NO2N_Sig	NO2N_Bing
2	통영 03	B	1997	2	128.4	34.83028	7.4	7.4	33.01	32.93	8.2	8.22	8.4	9.67	1.33	1.33	20.72	89.32	6.1	
3	통영 03	B	1997	5	128.4	34.83028	16.9	16.5	30.13	33.01	8.08	8.08	9.2	8.41	1.83	1.61	140		73	
4	통영 03	B	1997	8	128.4	34.83028	23.3	23.6	30.21	30.78	8.09	8.05	7.24	7.04	2.22	3.02	22		33	
5	통영 03	B	1997	11	128.4	34.83028	14.1	14	31.28	33.28	7.96	7.94	7.31	7.31	0.88	0.6	199		160	
6	통영 03	B	1998	2	128.4	34.83028	6.9	6.9	33.41	33.4	8.11	8.13	9.45	9.25	1.31	1.33	164		78	
7	통영 03	B	1998	5	128.4	34.83028	17	16.5	33.09	33.48	8.16	8.18	8.04	7.02	1.72	1.19	94.22		50.26	3.1
8	통영 03	B	1998	8	128.4	34.83028	26.72	25.76	29.94	30.1	8.03	8	7.94	5.65	3.99	2.09	115.78		49.42	7.1
9	통영 03	B	1998	11	128.4	34.83028	15.13	15.17	32.45	32.47	7.98	7.99	7.7	7.45	1.86	1.62	30.38		35.14	
10	통영 03	B	1999	2	128.4	34.83028	8.21	8.18	33.49	33.67	8.3	8.33	7.69	7.64	1.05	1.03	20.02		28	1.6
11	통영 03	B	1999	5	128.4	34.83028	15.9	15.5	32.95	32.98	7.8	7.73	6.52	6.2	1.66	1.76	67.06		129.36	5.6
12	통영 03	B	1999	8	128.4	34.83028	23.15	21.4	24.87	29.36	7.99	8.01	5.07	3.02	1.54	2.03	35.98		20.02	17.6
13	통영 03	B	1999	11	128.4	34.83028	17.3	17.3	32.66	32.67	7.99	8	5.53	5.7	1.41	1.7	18.34		20.72	3.6
14	통영 03	B	2000	2	128.4	34.83028	6.3	6.3	33.48	33.48	8.167	8.205	8.81	8.74	0.62	0.52	66.22		68.6	7.6
15	통영 03	B	2000	5	128.4	34.83028	15.3	14.5	33.96	34.13	8.32	8.27	10.37	8.85	2.73	2.06	47.88		23.94	2.2
16	통영 03	B	2000	8	128.4	34.83028	21.7	18.9	32.28	32.4	8.02	7.78	7.74	5.25	0.74	0.88	14.42		8.82	4.4
17	통영 03	B	2000	11	128.4	34.83028	16.76	16.9	33.66	33.18	8.046	8.039	5.28	5.17	1.76	1.57	7.98		23.94	1.8
18	통영 03	B	2001	2	128.4	34.83028	7.1	7.2	33.13	33.19	8.31	8.37	9.22	9.25	2.18	2.54	11.2		14.42	7.2
19	통영 03	B	2001	5	128.4	34.83028	15	14.3	33.314	33.611	8.11	8.12	5.45	5.75	2.144	1.52	21.89037		45.60019	8.98
20	통영 03	B	2001	8	128.4	34.83028	26.74	24.4	32.64	32.99	8.11	8.04	6.79	5.79	1.28	0.848	16.5816		29.4784	9.60
21	통영 03	B	2001	11	128.4	34.83028	16	16	32.09	32.17	7.9	7.89	7.18	7.28	0.83	0.56	99		81	
22	통영 03	B	2002	2	128.4	34.83028	8.6272	8.3852	33.2761	33.5107	8.03	8.04	7.58	7.76	0.552816	0.88	76.04737		81.58954	7.2
23	통영 03	B	2002	5	128.4	34.83028	14.79	14.49	33.14	33.12	7.77	7.85	6.63	6.85	0.552816	0.452304	58.21564		76.80605	6
24	통영 03	B	2002	8	128.4	34.83028	26.27	21.45	31.79	32.38	8.02	8.02	6.06	5.95	0.971616	0.854352	20.78961		37.23138	2.6
25	통영 03	B	2002	11	128.4	34.83028	12.04	12.09	31.81	31.86	7.7	7.7	8.14	9.48	2.848	1.152	105.4		108.5	22
26	통영 03	B	2003	2	128.4	34.83028	7.48	7.67	32.33	32.17	8.26	8.25	10.5	11.21	0.608	0.832	156.3		103.8	5.48511

그림 3.6.3 KOEM 해양환경측정망 자료의 예

인공위성자료 중에서는 해수면 온도 자료를 수집하였는데, NCDC (National Climate Data Center) SST와 OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) SST를 수집하였다. SST 자료는 전 지구 자료를 1개의 파일에 저장하여 1일 간격으로 배포하고 있으므로, 통영 주변 해역의 자료만을 추출하기 위해 Matlab 프로그램을 작성하였다. OSTIA 자료제공 FTP (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/ghrsst/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA) 에서 압축파일을 다운로드 받아, 압축을 해제한 후에 통영 주변의 자료만을 텍스트 파일로 저장하는 기능을 갖고 있다 (그림 3.6.4).

```

% Downloading OSTIA SST
% - make directory 'down'
% - copy 7z.exe to 'down'
%
% OSTIA SST URL
% ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/ghrsst/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA/2017/064
%
cyear = 2007;
sday = 1;
eday = 269;
tong_lat = 2496;
tong_lon = 6168;

ndays = eday - sday + 1;

ori_dir = 'E:\OSTIA_ori\';
des_dir = 'E:\OSTIA_down\';

% Download OSTIA SST
ftp_url='podaac.jpl.nasa.gov';
f=ftp(ftp_url);
binary(f);
cd(f, 'allData/ghrsst/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA/');

for i=1:ndays

    cday = sday + i - 1;
    s_year = num2str(cyear, '%03d');
    s_day = num2str(cday, '%03d');

    if(cday>59 && mod(cyear, 4) ~= 0)
        s_date = [s_year datestr(cday+1, 'mdd')];
    else
        s_date = [s_year datestr(cday, 'mdd')];
    end

    cd(f, [s_year '/' s_day '/']);
    ostia_fname = [s_date, '-UKMO-L4HRfnd-GLOB-v01-fv02-OSTIA.nc.bz2'];
    disp(['Downloading OSTIA SST data : ' ostia_fname]);
    mget(f, ostia_fname, des_dir);
    cd(f, '../..');

end
close(f);

% Uncompress data file

```

그림 3.6.4 OSTIA SST 자료수집용 프로그램

또한, 미국 NECI에서 전 세계 자료를 수집하여 배포하고 있는 WOD (World Ocean Database) 에 수록된 자료 중에서 통영 인근의 자료를 수집하였으며, 수온, 염분, 영양염, 기온 등의 자료가 포함되어 있다. WOD 자료는 매우 다양한 관측플랫폼에서 생산된 자료를 동시에 관리하므로 각 관측요소와 유효숫자 수와 품질관리 정보를 같이 제공하고 있다 (그림 3.6.5).

1	WOD_ID	DATETIME	LONGITUDE	LATITUDE	DEPTH	DSIGFIG	DQC	TEMPERATURE	TSIGFIG	TQC	SALINITY	SSGIFIG	SQC
305	6610013	19620520083	128.575	34.592	65	2.00	13.19	4.00	34.27	4.00	31.02	4.00	
306	6620975	19630824121	128.575	34.592	0	1.00	23.8	4.00	31.08	4.00	32.61	4.00	
307	6620975	19630824121	128.575	34.592	10	2.00	23.35	4.00	31.08	4.00	32.24	4.00	
308	6620975	19630824121	128.575	34.592	25	2.00	18.64	4.00	33.69	4.00	34.69	4.00	
309	6620975	19630824121	128.575	34.592	50	2.00	13.85	4.00	33.69	4.00	34.69	4.00	
310	6620975	19630824121	128.575	34.592	55	2.00	12.13	4.00	34.61	4.00	34.61	4.00	
311	6616505	19630410075	128.575	34.592	0	1.00	12.1	4.00	34.61	4.00	34.61	4.00	
312	6616505	19630410075	128.575	34.592	10	2.00	11.14	4.00	34.6	4.00	34.6	4.00	
313	6616505	19630410075	128.575	34.592	25	2.00	10.91	4.00	34.69	4.00	34.6	4.00	
314	6616505	19630410075	128.575	34.592	50	2.00	10.8	4.00	34.61	4.00	34.61	4.00	
315	6616505	19630410075	128.575	34.592	80	2.00	10.79	4.00	33.64	4.00	33.75	4.00	
316	6631277	19640625110	128.575	34.592	0	1.00	20.05	4.00	33.75	4.00	34.16	4.00	
317	6631277	19640625110	128.575	34.592	10	2.00	20.22	4.00	34.15	4.00	34.16	4.00	
318	6631277	19640625110	128.575	34.592	25	2.00	18.64	4.00	34.15	4.00	34.16	4.00	
319	6631277	19640625110	128.575	34.592	50	2.00	15.31	4.00	34.15	4.00	34.16	4.00	
320	6631277	19640625110	128.575	34.592	65	2.00	15.15	4.00	34.15	4.00	34.16	4.00	
321	6629973	19640527152	128.575	34.592	0	1.00	17.2	4.00	34.04	4.00	34.04	4.00	
322	6629973	19640527152	128.575	34.592	10	2.00	16.82	4.00	34.04	4.00	34.04	4.00	
323	6629973	19640527152	128.575	34.592	25	2.00	16.2	4.00	34.15	4.00	34.15	4.00	
324	6629973	19640527152	128.575	34.592	50	2.00	15.79	4.00	34.36	4.00	34.36	4.00	
325	6629973	19640527152	128.575	34.592	55	2.00	14.56	4.00	34.6	4.00	34.6	4.00	
326	6628302	19640415214	128.575	34.592	0	1.00	14	4.00	34.47	4.00	34.47	4.00	
327	6628302	19640415214	128.575	34.592	10	2.00	13.85	4.00	34.79	4.00	34.65	4.00	
328	6628302	19640415214	128.575	34.592	25	2.00	13.61	4.00	34.65	4.00	34.63	4.00	
329	6628302	19640415214	128.575	34.592	50	2.00	13.46	4.00	34.49	4.00	34.51	4.00	
330	6628302	19640415214	128.575	34.592	60	2.00	13.38	4.00	34.49	4.00	34.51	4.00	
331	6643848	19650504193	128.575	34.592	0	1.00	13.7	4.00	34.49	4.00	34.51	4.00	
332	6643848	19650504193	128.575	34.592	10	2.00	13.49	4.00	34.49	4.00	34.51	4.00	

그림 3.6.5 World Ocean Database 자료의 예

기존 해양관측 자료 수집을 위한 대상 해역을 설정하였으며 (128°-128.7° E, 34.5° - 35° N), 각 자료별 관측 위치는 그림 3.6.6과 같다.

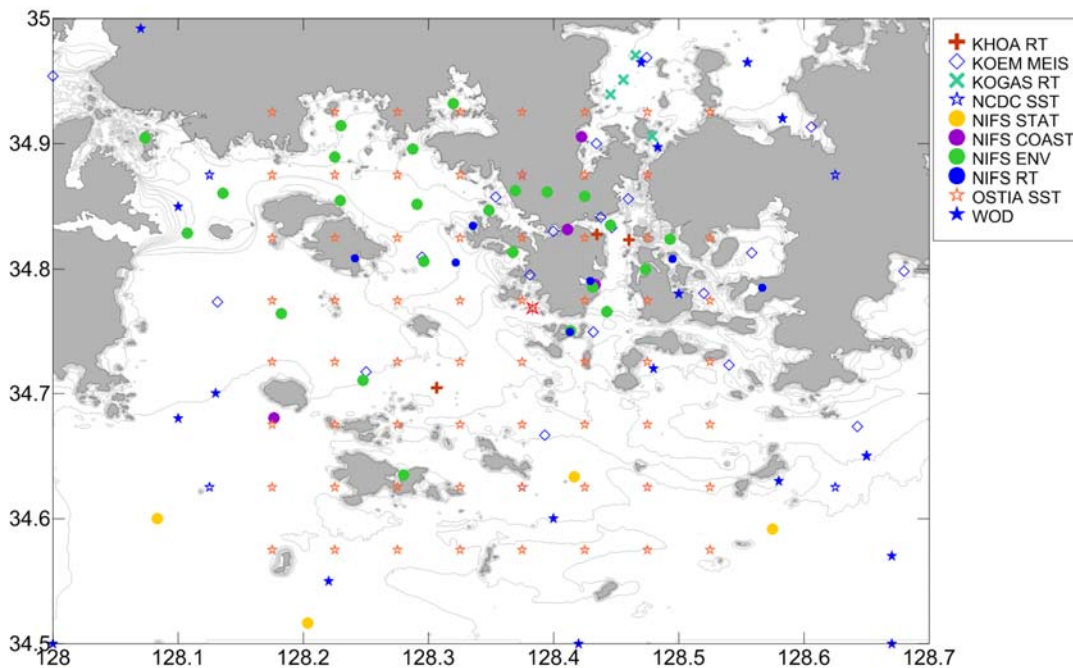


그림 3.6.6 통영 주변 기존자료 수집 위치

나. 연구사업 관측자료 수집

본 사업에서는 양식장 해역 해양환경관리를 위한 기본 자료 확보를 목표로 자동관측장비 및 현장관측을 통한 해양자료를 수집하고 있다. 기존 해양관측자료의 수집과 함께, 본 연구사업 내에서 획득한 해양자료도 같이 수집하였다. 장기간 자료 획득을 위해 설치한 자동관측 장비에서 측정된 자료는 데이터통신을 통해 전송되므로, 실시간으로 자료를 처리하고 활용하는 것이 가능하다. 선박을 이용하여 현장에서 관측하는 자료들은 대부분 실험실에서의 후처리가 필요하므로, 관측 이후 일정 기간이 지나야 활용이 가능하다.

통합 DB 구축을 위해 수집한 자동관측 자료는 통영해양과학기술지에 설치한 TSG와 인근 해역에 설치한 pCO₂ 부이에서 측정된 자료들이다. 자료항목에 따라 1분에서 3시간 사이의 간격으로 자료가 생산되고, 생산된 자료는 자료수신 서버에 일 단위 파일로 저장된다. 각 플랫폼 별 자료항목, 자료생산 주기, 자료파일명 등을 정리하면 표 3.6.2와 같다. 이 중에서 ADCP 자료는 자료의 양이 방대한 3차원 자료이므로 실시간 자료서비스에서 제외하였고, 나머지 자료는 자료수신 후 1시간 이내에 실시간으로 제공할 수 있도록 준비하였다. 통합 DB에 바로 입력할 수 있는 형태로 변환하는 프로그램을 Matlab으로 작성하였으며, 자동으로 자료처리가 가능하도록 예약작업을 설정하였다. 자료변환을 위해 작성한 Matlab 프로그램의 목록, 기능, 출력파일을 정리하면 표 3.6.3과 같고, 자료변환의 예는 그림 3.6.7과 같다.

표 3.6.2 통합 DB 대상 자동관측 자료 항목

부이	구분	자료항목	시간 간격	자료파일
pCO ₂ 부이	기상, CTD	풍향, 풍속, 대기압, 기온, 습도, 수심, 수온, 염분	10분	P_yymmdd.txt
	ADCP	수심별 u, v (4-44m, 2m 간격)	10분	P_yymmdd.txt
	pCO ₂	pCO ₂	3시간	P_yymmdd_pco2.txt
	sph	pH (Const Sal)	3시간	P_yymmdd_sph.txt
TSG 부이	TSG	수온, 염분	1분	I_yymmdd.txt

표 3.6.3 자동관측 자료의 포맷변환 프로그램

부이	프로그램	기능	출력
pCO ₂ 부이	conv_atm_ts_all.m	수집한 자료를 일괄적으로 변환	atm_ts_all.dat
	conv_atm_ts_day.m	지정한 날짜의 파일을 FTP에서 다운로드 받아서 변환	atm_ts_day.dat
	conv_pco2_all.m	수집한 자료를 일괄적으로 변환	pco2_all.dat
	conv_pco2_day.m	지정한 날짜의 파일을 FTP에서 다운로드 받아서 변환	pco2_day.dat
TSG 부이	conv_tsg_all.m	수집한 자료를 일괄적으로 변환	tsg_all.dat
	conv_tsg_day.m	지정한 날짜의 파일을 FTP에서 다운로드 받아서 변환	tsg_day.dat

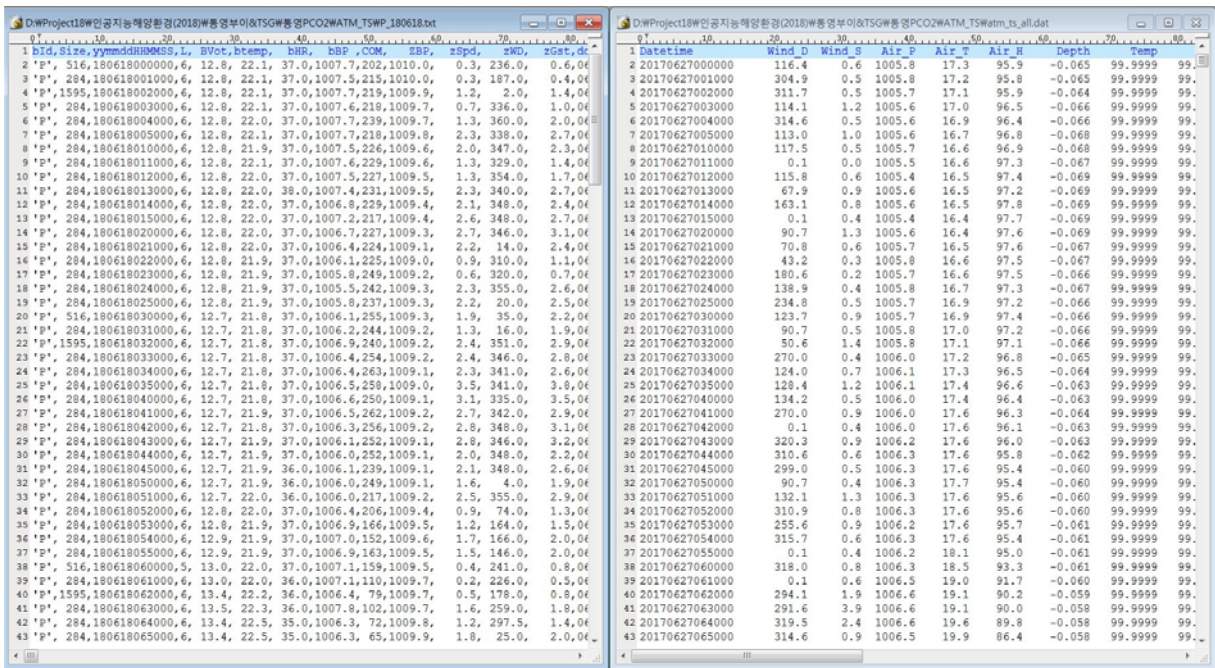


그림 3.6.7 자동관측 자료의 변환 전(좌)과 후(우)

현장관측자료는 생태계 모니터링 분야와 퇴적물 모니터링 분야에서 수집한 자료를 분야별 책임자로부터 수집하였다(표 3.6.4). 분야별 책임자가 제공한 자료는 모두 엑셀 파일이었으며, 각 관측정점에서 일정 기간 수집한 시계열 자료이거나 분석한 수치자료이다(그림 3.6.8). 엑셀 파일 형태로 수집한 자료는 텍스트 파일로 변환, 편집하여 DB 입력을 준비하였다.

표 3.6.4 통합 DB 대상 현장관측 자료항목

분야	자료항목	관측시기
생태계 모니터링	- CTD - 식물플랑크톤(microphytoplankton) - Chlorophylla - 대기광 (Photosynthetically active radiation)	2017.09 2018.03 2018.07
퇴적물 모니터링	- 영양염 저층플렉스 - 공극수중 용존산소 - 양식장 유기탄소 수치	2017.06 2018.05

QIQA 1803 Chl-a Measurements													
Equipment:		Turner B											
Final Calibration Date:		2018.01.23											
Sample Pretreatments:		Freezedry, Sonication											
N	추출날짜	측정날짜	Cruise_Date	St	Dep	Time	Acetone(m)	Fil.vol(m)	acidification	DILUTIO	acid conc.		
1	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T1	2	16:00	6	500	159	90.2	1	1.6543	1.6543
4	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T1.5	2	16:30	6	500	117	66.1	1	1.2239	1.2239
5	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T2	2	17:00	6	500	129	72.9	1	1.3489	1.3489
8	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T2.5	2	17:30	6	500	122	69.8	1	1.2552	1.2552
9	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T3	2	18:00	6	500	146	83.2	1	1.5101	1.5101
12	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T3.5	2	18:30	6	500	170	96.2	1	1.7746	1.7746
14	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T4	2	19:00	6	500	148	84.4	1	1.5293	1.5293
17	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T4.5	2	19:30	6	500	154	87.9	1	1.5894	1.5894
18	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T5	2	20:00	6	500	152	84.7	1	1.6183	1.6183
21	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T5.5	2	20:30	6	500	134	76.5	1	1.3876	1.3876
22	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T6	2	21:00	6	500	155	86.4	1	1.6495	1.6495
25	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T6.5	2	21:30	6	500	157	89.7	1	1.6183	1.6183
26	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T7	2	22:00	6	500	141	78.5	1	1.5028	1.5028
29	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T7.5	2	22:30	6	500	148	84	1	1.5389	1.5389
30	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T8	2	23:00	6	500	163	91	1	1.7313	1.7313
33	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T8.5	2	23:30	6	500	171	94.6	1	1.8371	1.8371
34	2018.03.19	2018.03.20	AIAQ1803	T9	2	0:00	6	500	196	108	1	2.1160	2.1160

그림 3.6.8 수집한 현장관측자료의 예

해양에서 관측한 자료를 사용하기 전에 적절한 방법으로 품질관리 (QC, Quality Control) 테스트를 적용하여야 한다. 여러 종류의 해양자료 항목 중에서 수온, 염분 자료에 대한 품질관리기술은 많이 개발되고 실제 활용되고 있다. 특히, GTSP (Global Temperature and Salinity Profile Programme), IOOS (Integrated Ocean Observing System), 국제 Argo 프로그램에서는 수온,

염분자료에 대한 품질관리 매뉴얼을 작성하여 배포하고 있다. 한국해양과학기술원 (2016)에서는 기존 품질관리기술들을 종합 검토하여 우리나라 연구사업에서 활용 가능한 품질관리기술을 제시한 바 있다. 본 사업에는 자동관측기기와 현장관측에서 생산한 자료 중에 TSG, CTD로 관측한 수온, 염분 자료가 포함되어 있다. 기존 품질관리 테스트 중에서 본 사업에 적용 가능한 테스트를 정리하면 표 3.6.5와 같다. 지역별, 계절별, 월별 자료범위 테스트는 미국 World Ocean Atlas에서 제공하는 통계 값을 이용하여 구하며, 이를 위한 프로그램이 개발되어 있다 (그림 3.6.9). 이 프로그램을 이용하면, 우리나라 주변해역(117°-142°E, 27°-52°N)과 표준수심(0-1550m)에서의 상하한 값을 구할 수 있다. 그 이외의 구체적인 품질관리 테스트 방법은 한국해양과학기술원(2016)에 제시되어 있으며, 그 예는 표 3.6.6과 같다.

표 3.6.5 수온, 염분자료의 QC 테스트 목록

번호	테스트	구분			적용대상		비고
		필수	권장	제안	시계열	수직 프로파일	
1	수집시간/시간간격 테스트	○			○		실시간
2	자료전송문장 테스트	○			○	○	
3	날짜/시간 테스트	○			○	○	
4	위치 테스트	○			○	○	
5	불가능 이동속도 테스트		○			○	연속관측
6	지역별 자료 범위 테스트		○		○	○	
7	지역·계절별 자료범위 테스트			○	○	○	
8	지역·월별 자료범위 테스트			○	○	○	
9	시간 연속성 테스트		○		○		
10	압력 증가 테스트		○			○	
11	수직 Spike 테스트		○			○	
12	수직 변화도(Gradient) 테스트		○			○	
13	고착값(Stuck value) 테스트		○		○	○	
14	밀도역전 테스트			○		○	


```

D:\Project15\해양정보유통\WOA13\Seasonal\get_season_range\Debug\get_seasonal_ran...
This program provides seasonal regional TS range for QC.
Input Latitude (27N-52N) : 36.5
Input Longitude (117E-142E) : 132.5
Input Season, Winter(1, Jan-Mar), Spring(2, Apr-Jun)
                Summer(3, Jul-Sep), Fall(4, Oct-Dec) : 3
Input Depth (0-1550m) : 350

Please wait while reading data. /.25d data/1d data/5d data

-----
Grid      Data      Mean      Standard No. of Mean-3sd Mean+3sd
          Data      Deviation Data
-----
[.25d] Temperature 0.518324 0.077400   10  0.286124 0.750524
          Salinity  34.072163 0.011103   9   34.038854 34.105472
-----
[1d]    Temperature 0.451350 0.113262  229 0.111564 0.791136
          Salinity  34.066850 0.019260  171 34.009070 34.124630
-----
[5d]    Temperature 0.521596 0.144939 3793 0.086779 0.956413
          Salinity  34.063347 0.018085 3135 34.009092 34.117602
-----
[Recommend Range] - It is possilbe to use different range.
-----
Temperature : 0.111564 - 0.791136
Salinity : 34.009070 - 34.124630
-----
Press any key to continue

```

그림 3.6.9 QC 테스트를 위한 상하한 값 산정 프로그램

표 3.6.6 수온, 염분자료의 QC 테스트 기준의 예

구분	내용		
개요	수직연속자료의 spike 테스트		
테스트 내용	수직프로파일의 수직연속자료에 spike가 있는지를 테스트 관측값(V2)과 바로 위와 아래의 관측값(V1, V3)관계를 평가 $VE = V2 - (V3 + V1)/2 - (V3 - V1)/2 $ 평가값(VE)를 허용범위(VR)와 비교		
적용대상	수직 프로파일 자료		
자료항목	수온, 염분		
적용법	Flag	조건	적용
	1 (Good)	spike 없음	$VE \leq VR$
	3 (Suspect)	spike 의심	$VE > VR$
	4 (Bad)	-	
	9 (Missing)	-	
비고	권장(Recommended) 테스트 기준은 지역별 특징을 고려하여 작업자가 결정 (참고) ARGO 자료의 기준 (약 10m 간격) -수압 500db 미만 : 수온 $VE > 6^{\circ}C$, 염분 $VE > 0.9$ psu -수압 500db 이상 : 수온 $VE > 2^{\circ}C$, 염분 $VE > 0.3$ psu		

다. 통합 DB 설계 및 구축

해양 관측에서는 매우 다양한 형태의 자료를 생산하고 있으며, 자료의 효과적인 관리를 위해 다양한 방법들이 개발, 활용되고 있다. 전통적으로 동일한 형태의 자료가 반복해서 생성되는 장기 시계열 자료의 경우는 텍스트 파일 형태로 관리되는 경우가 많다. 시공간적으로 불규칙한 현장관측 자료의 경우에는 전문 DB 소프트웨어를 이용하면 효율적인 관리가 가능하며, 필요한 자료만을 추출하는데 용이하다. 대신 자료에 접근하기 위해서는 DB 전용 프로그램과 SQL에 대한 지식이 필요하여 접근성이 떨어지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 별도의 검색용 프로그램이나 웹사이트를 개발하기도 하는데 지속적인 관리가 필요하다. 미국 NCEI에서는 netCDF를 자료관리 포맷으로 활용하고 있으며, 유럽연합에서는 ISO 19100 시리즈를 표준 포맷으로 사용하고 있다. 유럽연합의 표준을 따르는 경우에는 자료 자체 뿐 아니라, 메타데이터(자료 관련 정보)의 양이 많고 다양하므로, 자료관리에 DB를 활용하는 것이 유리하다.

본 사업에서는 타기관 해양관측자료, 자동관측기기 자료, 현장관측자료를 수집하였으며, 시공간적으로 불규칙한 자료와 시계열 자료가 혼재하고 있다. 사업이 장기간 계속되는 경우, DB를 잘 설계하여 일괄 저장, 관리하면, 추후에 필요한 자료의 추출 및 활용에 매우 유리하다. 여러 기관에서 다양한 방법으로 생산한 자료를 효과적으로 관리하기 위해 Oracle DBMS (Database Management System)를 이용한 DB 시스템을 구축하였다. 컴퓨터 하드웨어의 성능 향상으로, 양이 많은 시계열자료도 DB로 관리하는데 전혀 문제가 없다. 김 등(2015)은 연구사업에서 생산한 해양자료의 관리에 적용 가능한 자료항목별 표준을 제시하였다. 본 사업에서는 이를 기본으로 메타데이터와 관측 자료를 분리하여 관리하는 DB를 설계하였다. 관리대상 모든 자료와 메타데이터를 추출한 후 DB 설계절차에 따른 정규화를 거쳐 그림 3.6.10, 그림 3.6.11과 같은 DB 구성을 도출하였다.

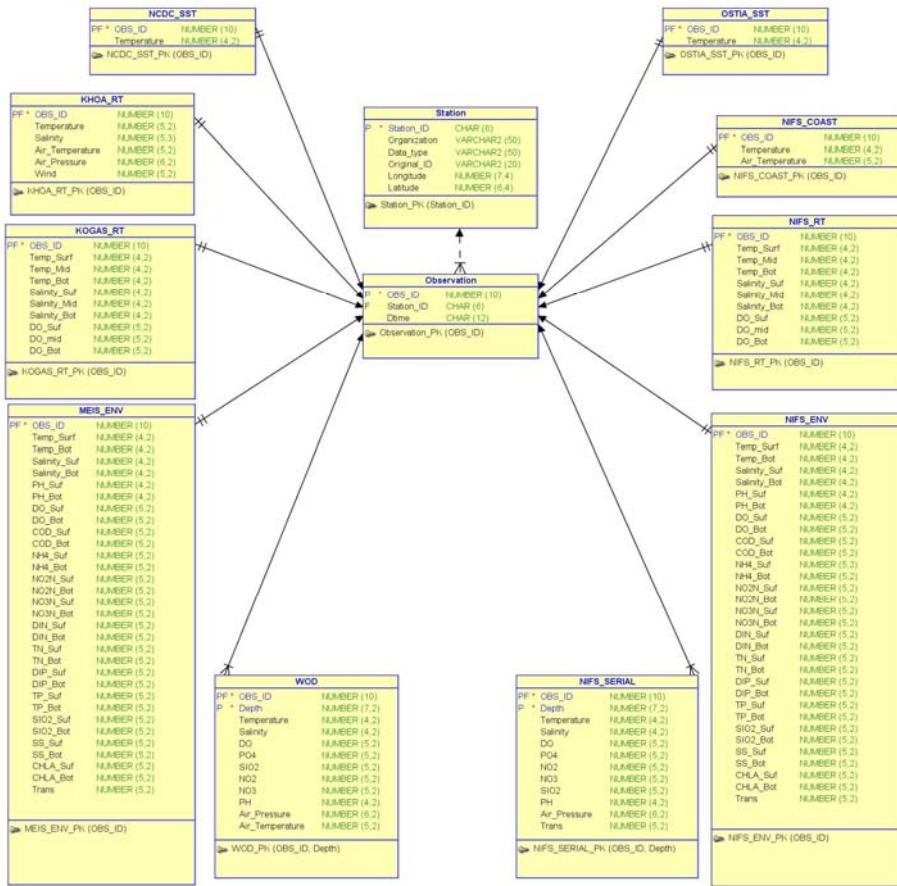


그림 3.6.10 기존 관측자료 관리를 위한 DB 구성도

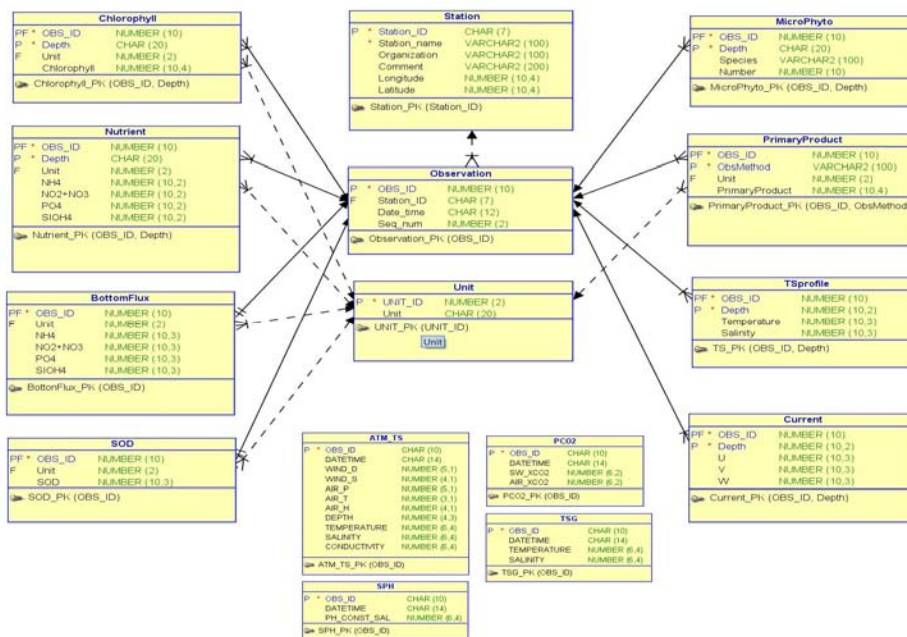


그림 3.6.11 현장관측자료 관리를 위한 DB 구성도

DB 설계 내용을 바탕으로 수집한 모든 자료를 재정리하였다. DB 테이블에 저장할 관측자료와 메타데이터를 분리하고, 테이블간의 연결을 위한 키 값을 생성하였다. 각 테이블에 입력한 자료별로 엑셀 파일을 작성한 후에, 자료 무결성을 유지할 수 있는 순서에 따라, 자료를 일괄 입력하였다. 이렇게 DB에 입력한 자료는 그림 3.6.12와 같은 전문소프트웨어를 이용하여 접속하면, 조회, 수정, 삭제가 가능하다.

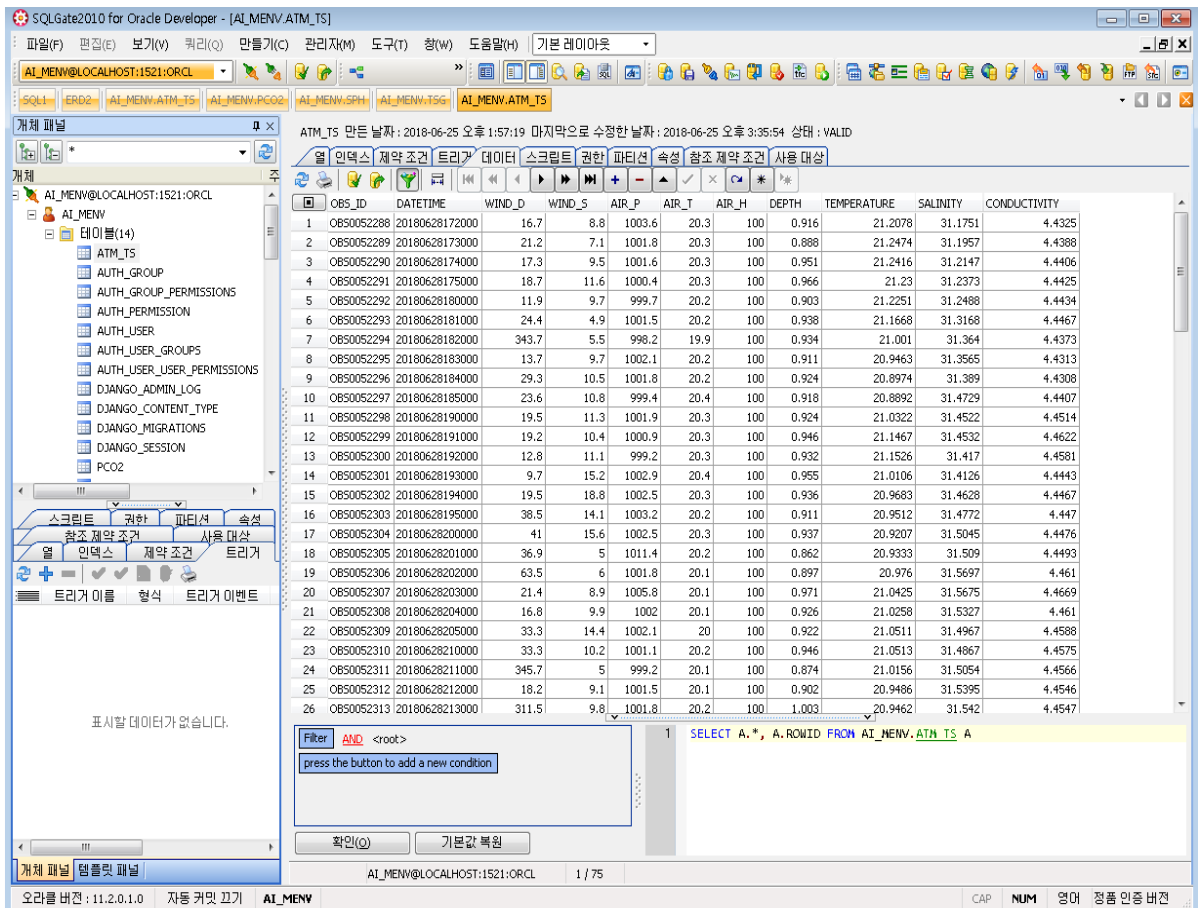


그림 3.6.12 DB 소프트웨어를 이용한 자료조회 화면

라. 자료공유를 위한 실시간 정보서비스 개발

자료관리용 DB에 수록된 자료 중에서 실시간으로 수신, 처리가 가능한 부이 자료를 실시간으로 조회, 다운로드할 수 있는 웹서비스를 구축하였다. 실시간 정보서비스 구축에는 Python 기반의 오픈소스 웹 프레임워크인 Django를 이용하였다. 개발언어인 Python은 64비트 3.5.2버전을 사용하였고, Django는 1.11버전을 사용하였다. Python 통합개발환경인 pycharm community를 설치하여 웹 개발환경 관리 및 Python 함수 작성에 활용하였다. 웹서비스 환경 설정을 위한 프로젝트를 만들고, 실시간 정보서비스 어플리케이션을 생성하였다.

Django를 이용한 웹 어플리케이션 개발은 MTV (Model - Template -View) 패턴을 따른다. 모델은 Django와 연동한 DB 데이터를 의미하고, 템플릿은 사용자 인터페이스를, 뷰는 사용자 요청에 맞게 데이터를 처리하고 반환하는 역할을 담당한다. 사용자의 데이터 처리 요청이 들어오면 뷰는 모델과 연결하여 데이터를 처리하고 템플릿을 이용해 HTML로 만든 응답데이터를 반환한다(그림 3.6.13).

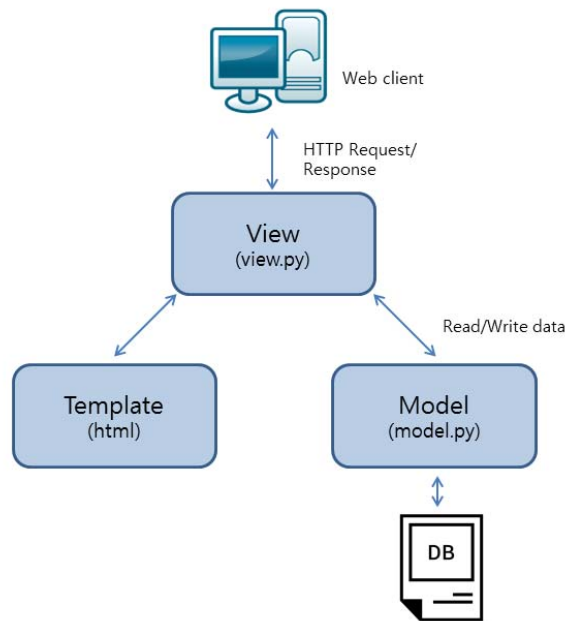


그림 3.6.13 Django를 이용한 정보서비스 흐름도

부이 자료가 오라클 DB에 수록되어 있으므로, python 확장모듈인 cx_oracle 5.2.1 버전을 설치하여, Django가 오라클에 접속하도록 하였다. 환경변수 저장용 스크립트에 호스트명, SID, 포트번호, 계정 정보를 입력하여 접속환경을 설정하였다. Django는 접속한 DB의 구조를 스캔해서 자동으로 모델 클래스를 만들어준다. 이를 사용하여 models.py에 부이 자료 DB 테이블 별로 데이터 타입, 속성 및 데이터 리턴 메서드를 정의한 4개의 클래스를 작성하였다(그림 3.6.14).

```

13 class AtmTs(models.Model):
14     obs_id = models.CharField(primary_key=True, max_length=10)
15     datetime = models.CharField(max_length=14)
16     wind_d = models.DecimalField(max_digits=5, decimal_places=1, blank=True, null=True)
17     wind_s = models.DecimalField(max_digits=4, decimal_places=1, blank=True, null=True)
18     air_p = models.DecimalField(max_digits=5, decimal_places=1, blank=True, null=True)
19     air_t = models.DecimalField(max_digits=3, decimal_places=1, blank=True, null=True)
20     air_h = models.DecimalField(max_digits=4, decimal_places=1, blank=True, null=True)
21     depth = models.DecimalField(max_digits=4, decimal_places=3, blank=True, null=True)
22     temperature = models.DecimalField(max_digits=6, decimal_places=4, blank=True, null=True)
23     salinity = models.DecimalField(max_digits=6, decimal_places=4, blank=True, null=True)
24     conductivity = models.DecimalField(max_digits=6, decimal_places=4, blank=True, null=True)
25
26     class Meta:
27         managed = False
28         db_table = 'atm_ts'
29
30     def __str__(self):
31         return '%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s' % (self.obs_id, self.datetime, self.wind_d, self.wind_s, self.air_p, self.air_t, self.air_h, s
32
33 class Pco2(models.Model):
34     obs_id = models.CharField(primary_key=True, max_length=10)
35     datetime = models.CharField(max_length=14)
36     sw_xco2 = models.DecimalField(max_digits=6, decimal_places=2, blank=True, null=True)
37     air_xco2 = models.DecimalField(max_digits=6, decimal_places=2, blank=True, null=True)
38
39     class Meta:
40         managed = False
41         db_table = 'pco2'
42
43     def __str__(self):
44         return '%s, %s, %s, %s' % (self.obs_id, self.datetime, self.sw_xco2, self.air_xco2)
45
46
47 class SpH(models.Model):
48     obs_id = models.CharField(primary_key=True, max_length=10)

```

그림 3.6.14 부이 자료별 모델 클래스 정의

템플릿은 자료의 종류 및 웹 기능을 고려해 총 24개의 HTML문서로 구성하였다. 모든 템플릿에 일관성 있는 디자인을 적용하기 위해 bootstrap을 사용하였으며, 검색 결과의 다운로드 및 그래프 생성용 프로그램은 Javascript로 작성하였다. 자료 검색을 위한 날짜 선택에 달력을 표출하기 위해 JQuery datepicker를 사용하였으며, Django의 템플릿 확장 기능을 사용하였다. 공통적으로 입력되는 코드들은 base.html에만 입력하고, 다른 html 문서에서는 이를 호출하여 사용하도록 하였다. 자료 검색, 다운로드, 그래프 생성 요청을 받아 작업을 수행하는 views.py는 46개의 Python 함수로 구현하였다(그림 3.6.15). 사용자가 웹 서비스를 통해 보내는 요청은 URL(Uniform Resource Locator) 방식으로 전달되고, Django는 이를 분석하여 Python 함수 중 URL에 부합하는 역할을 수행하는 함수를 호출한다. 검색 함수는 SQL(Structured Query Language)을 사용해 조건에 맞는 결과를 템플릿에 전달해 HTML문서로 응답한다. 다운로드 함수는 검색 결과를 Python의 csv모듈을 사용하여 ASCII파일로 만들어 제공한다. 그래프 생성 함수는 검색 결과를 JSON 포맷으로 변환하고, 이를 그래픽 라이브러리인 Fusioncharts에 전달하여 시계열 그래프를 생성한다.


```

71 def ata_ts_period(request):
72     if request.GET['startdate'] and request.GET['enddate']:
73         start = request.GET['startdate']
74         start_s = start.split('-')
75         start = start_s[0]+start_s[1]+start_s[2]
76         starttime = request.GET['starttime']
77         start = start+starttime
78         last = request.GET['enddate']
79         last_s = last.split('-')
80         last = last_s[0]+last_s[1]+last_s[2]
81         lasttime = request.GET['endtime']
82         last = last+lasttime
83         obs_ids = Atats.objects.filter(Q(datetime__gt=start), Q(datetime__lt=last)).order_by('-obs_id')
84     elif request.GET['startdate'] and request.GET['enddate'] == '':
85         start = request.GET['startdate']
86         start_s = start.split('-')
87         start = start_s[0]+start_s[1]+start_s[2]
88         starttime = request.GET['starttime']
89         start = start+starttime
90         obs_ids = Atats.objects.filter(datetime__gt=start).order_by('-obs_id')
91     elif request.GET['enddate'] and request.GET['startdate'] == '':
92         last = request.GET['enddate']
93         last_s = last.split('-')
94         last = last_s[0]+last_s[1]+last_s[2]
95         lasttime = request.GET['endtime']
96         last = last+lasttime
97         obs_ids = Atats.objects.filter(datetime__lt=last).order_by('-obs_id')
98     return render(request, 'ata_ts_period.html', {'obs_ids': obs_ids })
99
100
101
102 def pco2_period(request):
103     if request.GET['startdate'] and request.GET['enddate']:
104         start = request.GET['startdate']
105         start_s = start.split('-')
106         start = start_s[0]+start_s[1]+start_s[2]

```

그림 3.6.15 자료검색 결과 표출용 프로그램

이상의 설명한 방법을 이용하여 구축한 실시간 정보서비스의 초기화면은 그림 3.6.16과 같으며, 제공하는 자료항목은 표 3.6.7과 같다. 각 자료종류별 자료검색 및 결과 표출화면은 그림 3.6.17과 같다. 화면의 상단에서 검색기간을 선택하여 검색버튼을 클릭하면, 검색결과가 화면 하단에 표로 출력된다. 여기서 다운로드 버튼을 클릭하면 CSV 포맷의 자료파일을 다운로드 할 수 있다. 그래프 버튼을 클릭하면 새로운 창(그림 3.6.18)에 그래프가 표출된다. 마우스를 이용하면, 특정시점의 자료를 수치로 확인할 수 있으며, JPG, PDF 등의 파일로 저장하는 것도 가능하다.

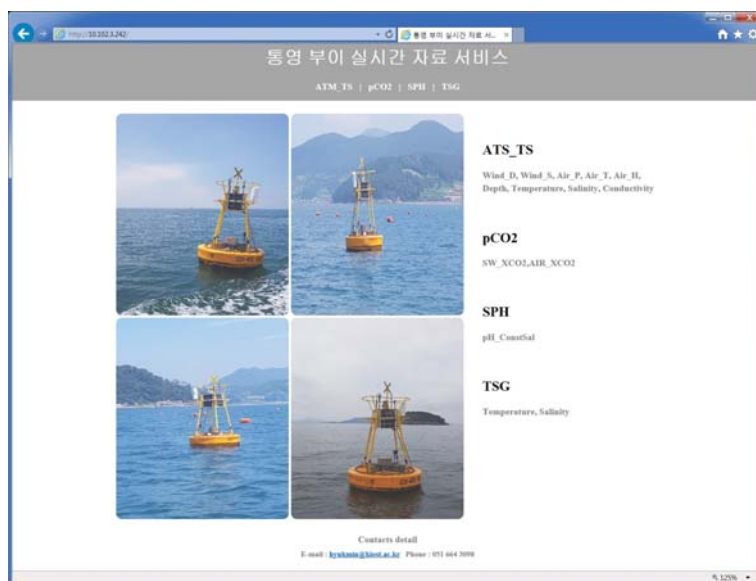


그림 3.6.16 실시간 정보서비스의 초기화면

표 3.6.7 실시간 정보서비스에서 제공하는 자료항목

자료종류	자료항목
ATS_TS	기상자료 : 풍향, 풍속, 기압, 기온, 습도 해양자료 : 수심별 수온, 염분, 전기전도도
pCO ₂	해양대기중 pCO ₂ , 표층수중 pCO ₂
SPH	표층 pH
TSG	수온, 염분

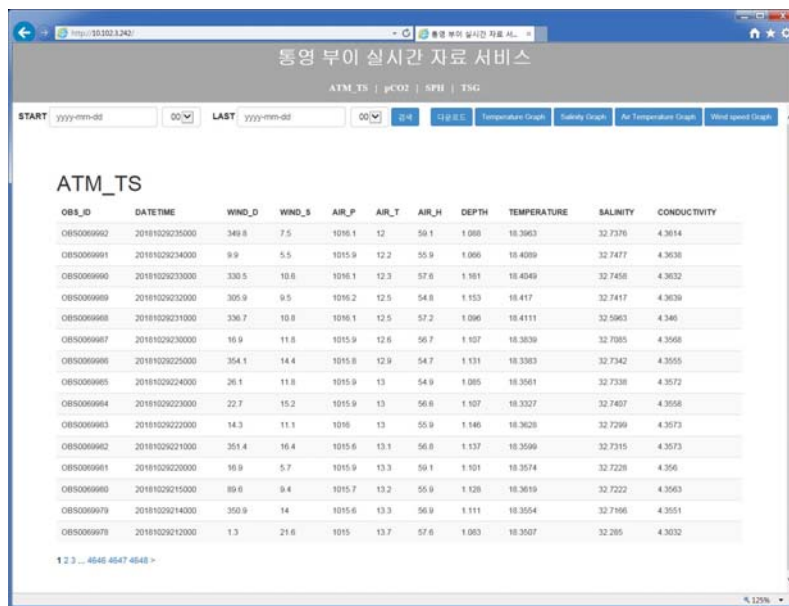


그림 3.6.17 실시간 정보서비스의 자료검색 기능

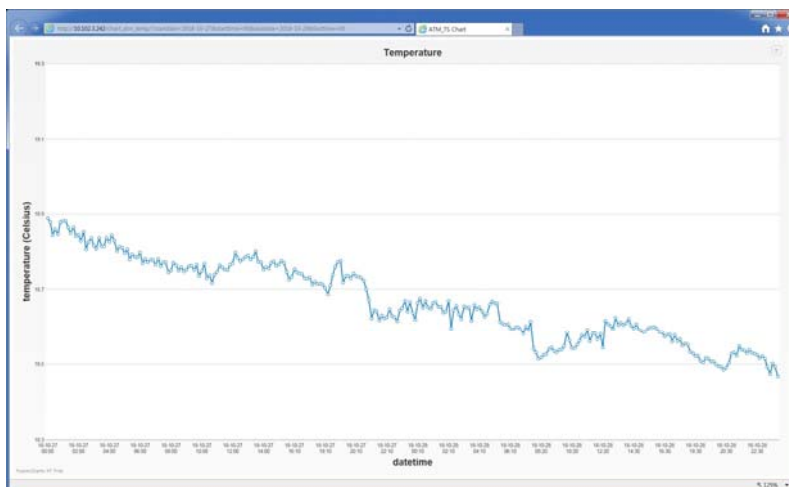


그림 3.6.18 실시간 정보서비스의 그래프 생성 기능

실시간 웹서비스를 위해 작성한 Python 모듈, HTML, CSS, Javascript 파일들의 구성을 정리하면 그림 3.6.19와 같으며, 각 폴더 및 파일의 용도는 표 3.6.8과 같다.

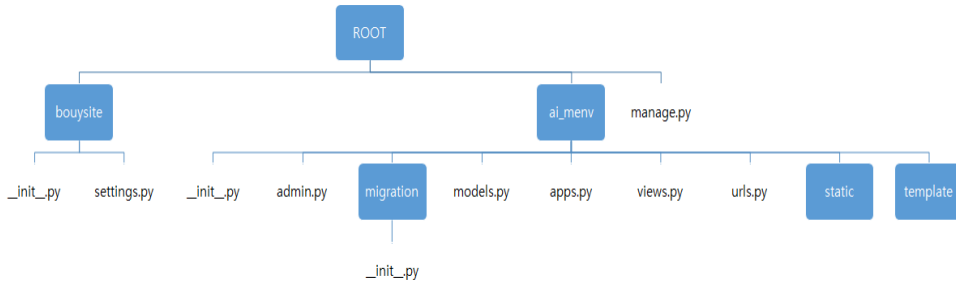


그림 3.6.19 실시간 정보서비스용 프로그램 구성

표 3.6.8 실시간 정보서비스용 폴더와 프로그램별 기능

항목명	설명
ROOT 폴더	- 프로젝트 최상위 폴더 - settings.py 파일의 BASE_DIR로 지정됨
manage.py	- Django 명령어 처리파일
bouysite 폴더	- 프로젝트 폴더 - 프로젝트 관련 파일 저장
init.py	- 파일이 보관된 폴더가 python 패키지로 작동하도록 함 - ai_menv와 migration폴더의 _init_.py와 같은 역할
settings.py	- 프로젝트 설정 파일
ai_menv 폴더	- 실시간 정보서비스 어플리케이션 폴더 - 어플리케이션 관련 파일 저장
admin.py	- 어플리케이션 관리자 화면 - Admin 사이트에 모델 클래스 등록
migration 폴더	- DB 변동사항 관리 폴더
models.py	- 부이관측자료 DB 모델 클래스를 정의한 파일
apps.py	- 어플리케이션 환경설정파일
views.py	- 실시간 정보서비스 python 함수 파일
urls.py	- 실시간 정보서비스 URL 파일
static 폴더	- CSS, Javascript, 이미지 등 정적파일 보관
template 폴더	- HTML 템플릿 보관

2. 하위생태계 자료기반모형 시범개발

가. 자료기반모형 개발용 프로그램 검토

기존 관측자료를 이용한 자료기반모형 개발을 위하여 머신러닝을 실행할 수 있는 개발 프로그램으로 Matlab nnTool (Neural Network Toolbox)과 Google Tensorflow를 검토하였다.

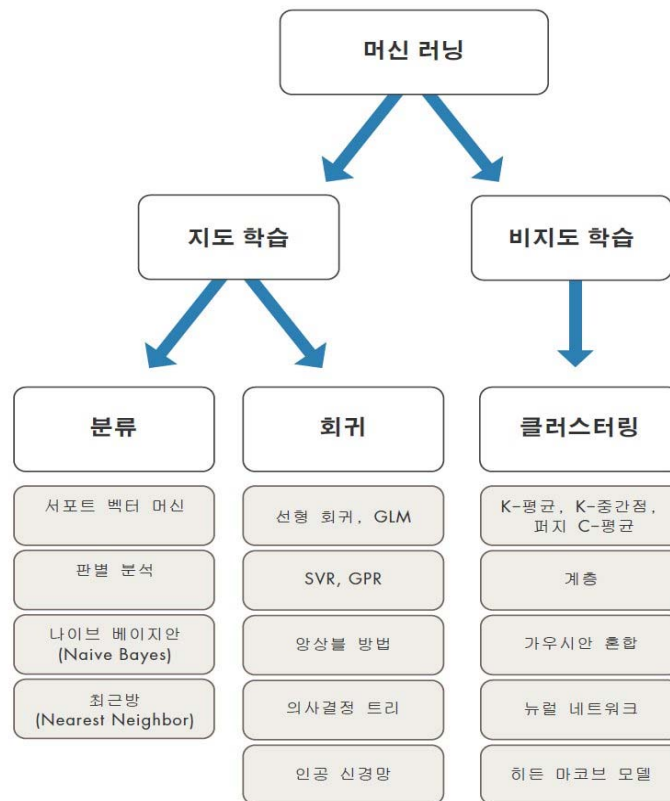


그림 3.6.20 머신러닝 알고리즘 (Mathworks, 2017a)

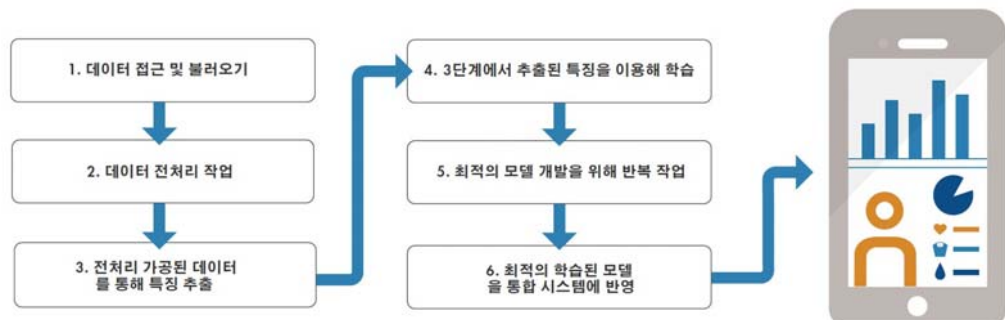


그림 3.6.21 머신러닝 워크플로우 (Mathworks, 2017b)

머신러닝은 사람과 동물이 경험을 통해 학습하는 것을 컴퓨터가 수행할 수 있도록 가르치는 것이다. 머신 러닝 알고리즘은 미리 결정된 방정식을 모델로 의존하지 않고, 계산 방법을 사용하여 데이터에서 직접 정보를 학습한다. 빅데이터가 부상하면서 이미지 프로세싱 (얼굴 인식, 동작 인식), DNA 염기서열 분석, 가격 및 부하 예측, 자연어 처리 등 매우 다양한 분야에서 머신러닝이 사용되고 있다(Mathworks, 2017a). 머신러닝은 크게 지도 학습과 비지도 학습으로 구분할 수 있다. 지도학습은 알려진 입력과 출력 데이터를 이용하여 미래 출력을 예측하는 방법으로, 분류 기법과 회귀 기법을 이용한다. 분류 기법은 입력 데이터를 세부적으로 계속 분류하면서 결과에 도달하는 방식이며, 회귀 기법은 연속적인 입출력 데이터를 이용하여 연속적인 출력을 예측하는 방식이다. 비지도 학습은 입력 데이터만을 이용하여 숨겨진 패턴이나 고유 구조를 찾는 방법으로 클러스터링 기법을 많이 사용한다. 지도 학습과 비지도 학습을 위한 수 십개의 알고리즘이 개발되어 있으며, 다양한 학습 접근법에서 사용자가 원하는 결과를 얻기 위한 알고리즘을 선택하는 것은 쉽지 않다. 현재 많이 사용되는 알고리즘을 정리하면 그림 3.6.20과 같다. 머신러닝의 성공적 수행에는 적절한 데이터 처리와 적합한 모델 찾기가 중요하다. 머신러닝에 사용되는 데이터는 형태와 크기가 매우 다양하므로, 자료에 대한 전문 지식과 도구를 이용하여 데이터를 다루어야 한다. 또한 원하는 최적 모델을 찾는 과정에서 모델이 출력을 잘 모의하면서도 오퍼피팅이 되지 않도록 주의하여야 한다. 머신러닝에서의 자료 처리 흐름을 정리하면 그림 3.6.21과 같다.

본 사업에서 수립하고자 하는 자료기반모형은 기존의 입력 자료와 출력 자료를 이용하여 미래를 예측할 수 있는 모델이므로 머신러닝 중에서 지도학습 기법을 이용하면 된다. 머신 러닝을 구현할 수 있는 프로그래밍 언어는 다양하며, 각 언어별 개발자들이 머신러닝 알고리즘들을 구현할 수 있는 다양한 라이브러리들을 개발, 공개하고 있으므로, 프로그래밍 언어에 익숙한 개발자는 적은 노력으로도 머신러닝 모형을 개발할 수 있다. 여기서는 Matlab과 Tensorflow를 이용한 머신러닝개발 방법을 테스트하였다.

Matlab은 자연과학 분야에서 많이 사용하는 소프트웨어로, 프로그래밍 기능을 통해 복잡한 자료처리, 다양한 가시화 등이 가능하다. 여러 종류의 Toolbox를 제공함으로써, 개별 연구자들이 기본적인 내용의 코딩에 소모하는 시간을 대폭 줄일 수 있다. Matlab은 유료 소프트웨어로 Toolbox 이용, 최신 버전 업그레이드에 별도의 비용을 지불해야 한다. Matlab에서 머신러닝을 지원하는 Toolbox는 nnTool이며, Parallel Computing Toolbox를 같이 설치하여야 한다. 명령 윈도우에서 nntool을 호출하면 Neural Network/Data Manager가 호출된다. 여기서 입력 데이터, 출력 데이터, 훈련 네트워크 등을 선택한 후 머신러닝을 실행할 수 있다 (그림 3.6.22). 머신러닝 훈련을 수행한 후에는 그림 5.6.23과 같은 윈도우를 통해 출력을 확인할 수 있다. Performance, Training State, Regression 등을 그래프로 표출하기도 한다. 또한, 머신러닝 모형의 프로그램 코드를 별도로 제공하기 때문에, 훈련을 위한 세부적인 내용이나 출력하고자 하는 데이터 등을 수정하여 개발자가 원하는 형태로 튜닝하는 것이 가능하다.

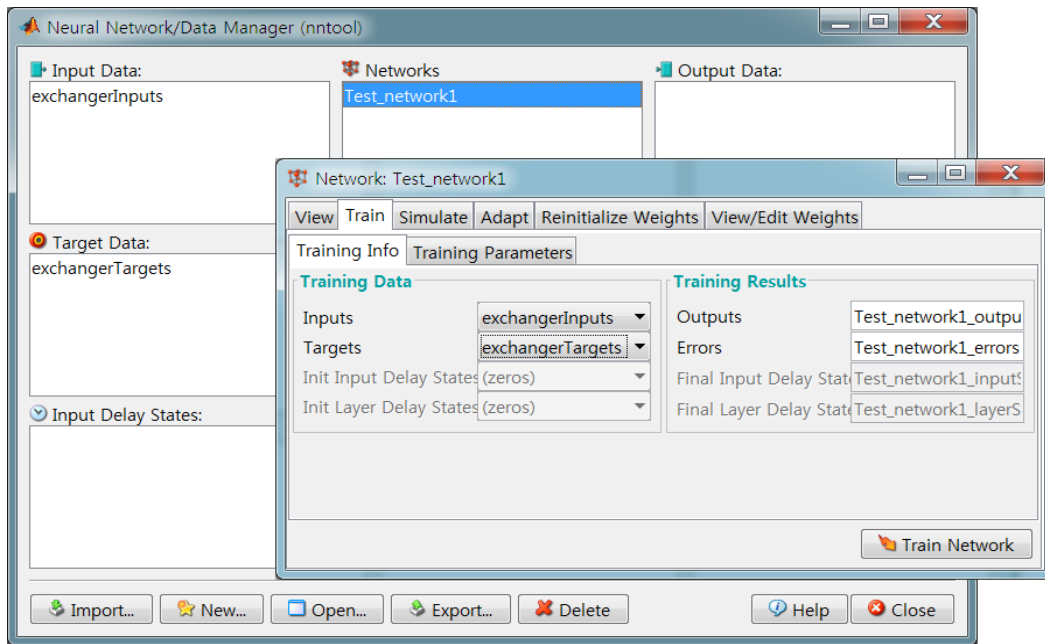


그림 3.6.22 Matlab 머신러닝 Toolbox

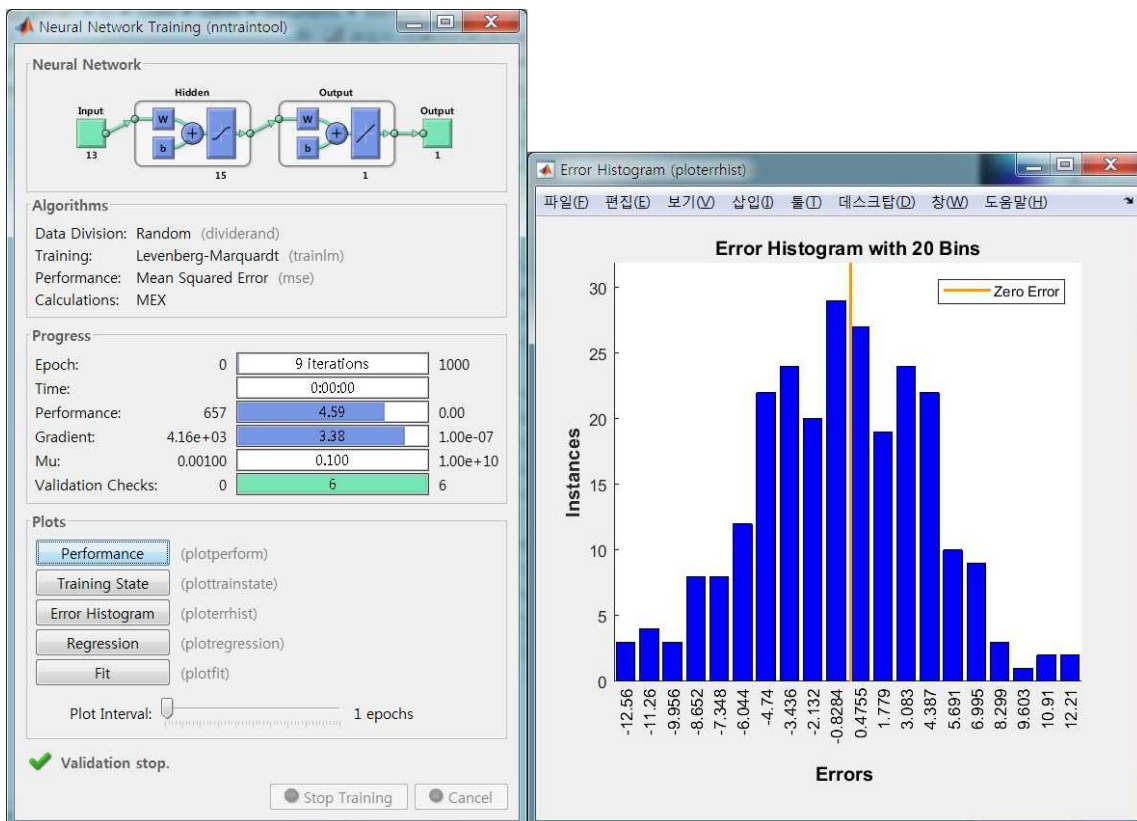


그림 3.6.23 Matlab 머신러닝 Toolbox의 결과출력

Matlab에서 제공하는 여러 머신러닝 알고리즘 중에서 NARX 모델 (Nonlinear Autoregressive Exogenous Model)의 적용 가능성을 테스트하였다. NARX 모델을 수식으로 표현하면 아래와 같으며, 그림으로 도시하면 그림 3.6.24와 같다. y 는 출력 데이터, x 는 입력 데이터, ϵ 는 에러를 뜻하며, F 는 비선형 함수이다.

$$y_t = F(y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, \dots, x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}, \dots) + \epsilon_t$$

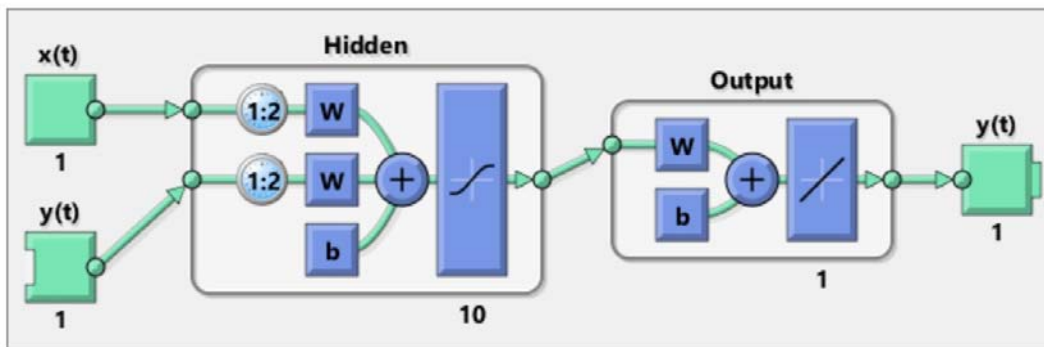


그림 3.6.24 NARX 모형의 흐름도

실제 관측자료를 이용한 테스트를 위해 수온과 용존산소의 시계열 자료를 준비하여, Matlab에서 머신러닝을 실행 후 결과를 비교하였다(그림 3.6.25). 예측 테스트 결과를 보면, 주기는 어느 정도 맞지만 크기는 전혀 예측하지 못하고 있다. 이는 훈련에 사용한 수온자료 만으로는 용존산소를 예측하는 것이 어려움을 뜻한다. 화학적 요소나 생물학적 요소들에 대한 예측모형을 만들기 위해서는 보다 다양한 종류의 자료를 입력 데이터로 활용하여야 한다.

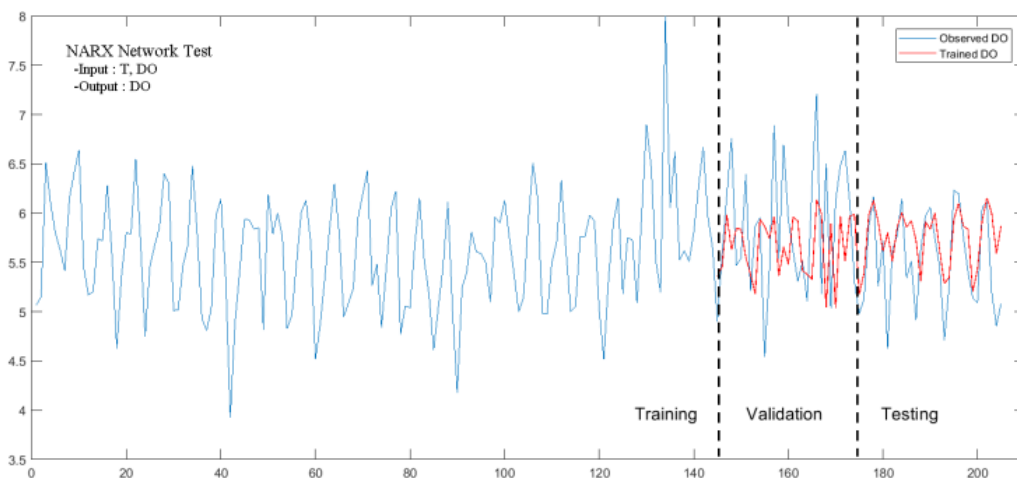


그림 3.6.25 DO 예측을 위한 NARX 모형의 실행 테스트

머신러닝에 대한 이론과 알고리즘에 대한 연구가 1980년대부터 이루어졌지만, 실제 생활에 활용되는 예는 많지 않았다. 신뢰할 수 있는 대용량 자료의 확보, 컴퓨터 성능의 비약적 발전 등에 힘입어, 딥러닝(Deep Learning)과 TensorFlow에 대한 관심이 폭발적으로 증가하였다. 딥러닝(심층학습)은 여러 비선형 변환기법의 조합을 통해 높은 수준의 추상화(abstractions, 다량의 데이터나 복잡한 자료들 속에서 핵심적인 내용 또는 기능을 요약하는 작업)를 시도하는 기계 학습(machine learning) 알고리즘의 집합으로 정의되며, 큰 틀에서 사람의 사고방식을 컴퓨터에게 가르치는 기계학습의 한 분야라고 이야기할 수 있다(위키백과). 딥러닝 구조는 인공신경망(ANN, artificial neural networks)에 기반하여 설계된 개념으로, 1989년에 얀 르쿤과 그의 동료들은 오류역전파 알고리즘(backpropagation algorithm)에 기반하여 우편물에 손으로 쓰여진 우편번호를 인식하는 deep neural networks를 소개했다. 그러나, 학습시간 너무 시간이 많이 걸려서 비현실적인 것으로 여겨졌다. 본격적으로 딥러닝이란 용어를 사용한 것은 2000년대 Geoffrey Hinton과 Ruslan Salakhutdinov이며, 2012년 스탠포드대학의 앤드류 응과 구글이 함께한 딥러닝 프로젝트의 성공으로 큰 관심을 받기 시작했다. 이렇게 딥러닝이 다시 부활하게 된 이유는 인공신경망 모델의 단점 극복, 컴퓨터 하드웨어의 발전, 빅데이터 덕분이다. 딥러닝에서 사용하는 알고리즘으로는 심층 신경망(Deep Neural Network, DNN), 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN), 순환 신경망(Recurrent Neural Network, RNN), 제한 볼츠만 머신(Restricted Boltzmann Machine, RBM), 심층 신뢰 신경망 (Deep Belief Network, DBN), 심층 Q-네트워크(Deep Q-Networks)가 있다. DNN은 입력층(input layer)과 출력층(output layer) 사이에 여러 개의 은닉층(hidden layer)들로 이뤄진 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)이다. 기존 인공신경망과 같이 과적합(Overfitting)과 높은 시간 복잡도(Time complexity)가 흔히 발생한다. CNN은 하나 또는 여러 개의 합성곱 계층과 일반 인공 신경망 계층들로 이루어져 있으며, 가중치와 통합 계층(pooling layer)들을 추가로 활용한다. CNN은 영상, 음성 분야 모두에서 좋은 성능을 보여준다. RNN은 인공신경망을 구성하는 유닛 사이의 연결이 Directed cycle을 구성하는 신경망을 말한다. 순환 신경망은 앞먹임 신경망과 달리, 임의의 입력을 처리하기 위해 신경망 내부의 메모리를 활용할 수 있다. 이러한 특성에 의해 순환 신경망은 필기체 인식(Handwriting recognition)과 같은 분야에 활용되고 있고, 높은 인식률을 나타낸다. 순환 신경망을 구성할 수 있는 구조에는 여러가지 방식이 사용되고 있다. 완전 순환망(Fully Recurrent Network), Hopfield Network, Elman Network, Echo state network(ESN), Long short term memory network(LSTM), Bi-directional RNN, Continuous-time RNN(CTRNN), Hierarchical RNN, Second Order RNN 등이 대표적인 예이다(위키백과).

TensorFlow는 다양한 작업에 대한 데이터 흐름 프로그래밍을 위한 오픈소스 소프트웨어 라이브러리이다. 심볼릭 수학 라이브러리아자, 뉴럴 네트워크 같은 기계학습 응용프로그램에도 사용된다. Google 내부의 연구와 제품개발을 위한 목적으로 구글 브레인팀이 만들었고, 2015년

11월 9일에 아파치 2.0 오픈소스 라이선스로 공개되었다(위키백과). TensorFlow 웹사이트에서는 TensorFlow를 다음과 같이 소개하고 있다. “TensorFlow™는 데이터 흐름 그래프를 사용하는 수치 연산용 오픈소스 소프트웨어 라이브러리이다. 그래프의 노드는 수학적 연산을 나타내며, 그래프의 변은 노드 간에 전달되는 다차원 데이터 배열(텐서)을 나타낸다. 유연한 아키텍처를 채택하여 단일 API를 통해 데스크톱, 서버 또는 휴대기기에 장착된 하나 이상의 CPU 또는 GPU에 연산을 배포할 수 있다. TensorFlow는 처음에는 Google의 기계지능 연구 조직의 Google Brain팀에 속한 연구자 및 엔지니어가 기계 학습 및 심층신경망 연구용으로 개발하였지만, 다른 분야에도 광범위하게 적용 가능한 범용 시스템이다.” TensorFlow는 DNN, CNN, RNN 등을 구현할 수 있는 다양한 라이브러리를 제공하며, 지원하는 컴퓨터 언어는 Python, Javascript, C++, Java 등이다. 보통 TensorFlow를 사용하는 경우에 Python 언어를 많이 사용하고 있다. Python에서 TensorFlow 라이브러리를 호출하기 위해서는 Jupyter Notebook을 설치하여야 하며, 다차원 배열 계산, 인공지능경망, 가시화용 라이브러리를 사용할 수 있다(그림 3.6.26). Jupyter Notebook은 오픈소스 웹 어플리케이션으로 live code, equations, visualizations, narrative text를 포함하는 문서의 생성과 공유를 가능하게 한다.

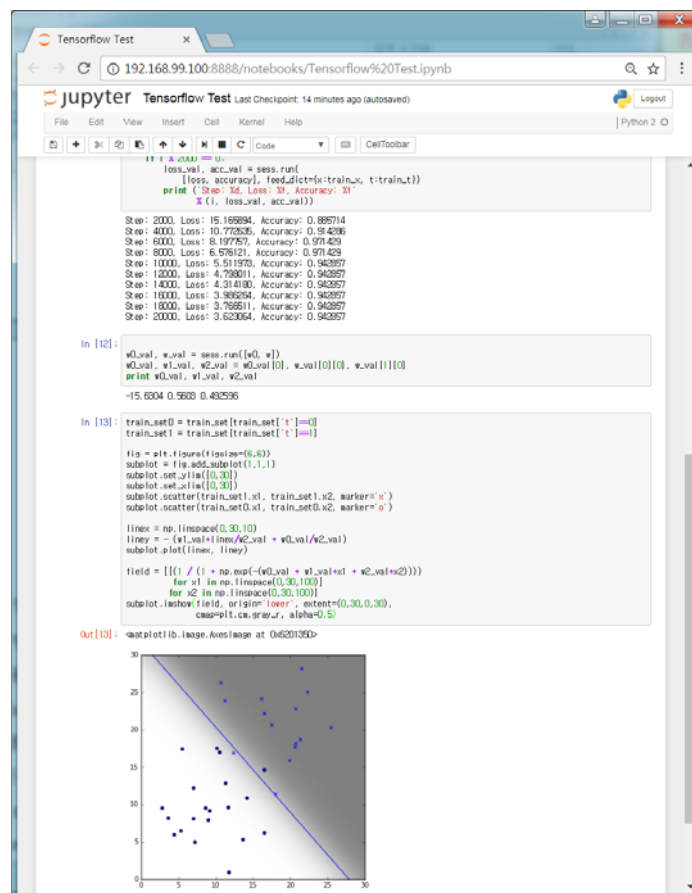


그림 3.6.26 Python과 Jupyter Notebook을 이용한 딥러닝 실행

RNN unit 중의 하나인 LSTM(Long short term memory) unit은 cell, input gate, output gate, forget gate로 구성되어 있다. Cell은 임의의 시간 간격동안 값들을 기억하며, 세 개의 gate들은 cell로 들어가고 나가는 정보의 흐름을 조절한다. 이런 LSTM unit 들로 구성된 네트워크를 LSTM network라 하며, 분류, 자료처리, 시계열 자료 기반의 예측에 적합하다. 시계열 자료에 대한 LSTM의 작동 방식은 그림 3.6.27과 같다.

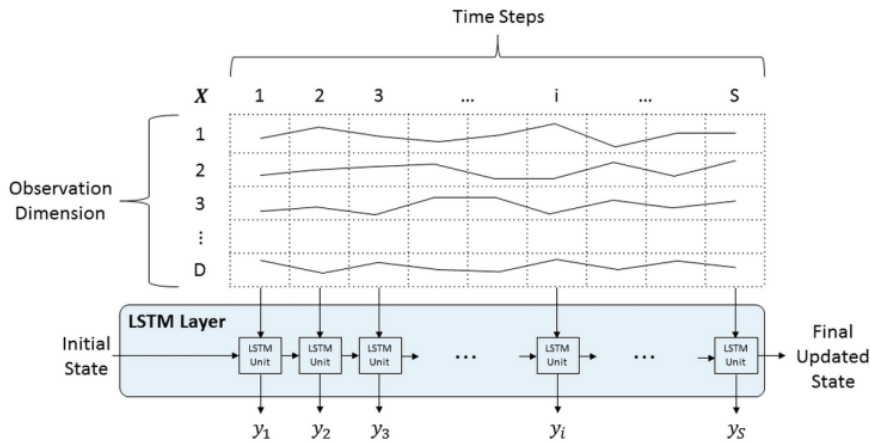


그림 3.6.27 RNN의 LSTM network의 작동방식

실제 관측자료를 이용한 테스트를 위해 수온, 염분, 기압, 용존산소의 시계열 자료를 준비하였다. Python 언어로 TensorFlow의 LSTM 라이브러리를 호출하고, 준비한 자료를 훈련시키는 프로그램을 작성하였다. Jupyter notebook에서 머신러닝을 실행 후 결과를 비교하였다(그림 3.6.28). 예측 테스트 결과를 보면, 주기는 비교적 잘 맞추고 있으며, 크기에는 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. Matlab에서 NARX 모형으로 예측한 결과보다는 양호한 것으로 보이나, 사용한 자료의 종류가 다르기 때문에 직접적인 비교는 불가능하다. 이번 테스트보다 다양한 종류의 입력자료를 사용한다면, 화학적 요소나 생물학적 요소들에 대한 예측모형을 만드는 것이 가능할 수도 있다.

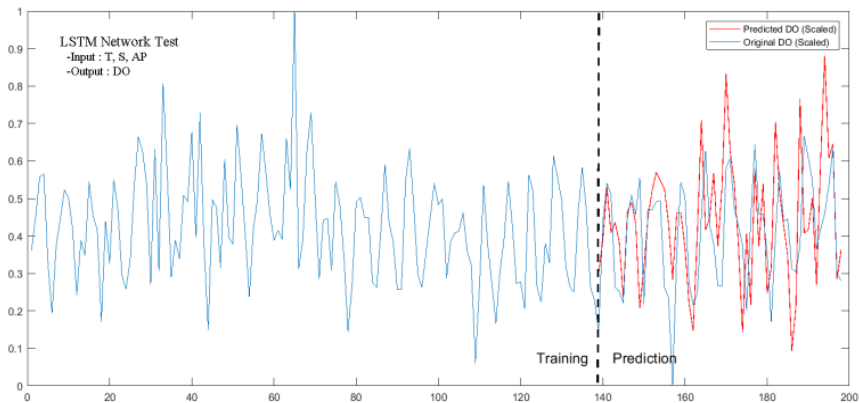


그림 3.6.28 DO 예측을 위한 LSTM Network 모형의 실행 테스트

나. 자료기반모형 시범개발

하위생태계 자료기반모형 개발을 위하여 최근 많이 사용하는 딥러닝 기술을 이용하기로 하였으며, TensorFlow에서 제공하는 LSTM network로 시범 모형을 개발하였다. TensorFlow 라이브러리 활용을 위한 컴퓨터 언어로는 Python을 이용하였다. 예전에는 Python을 우선 설치한 후 계산, 그래픽 처리를 담당하는 패키지들을 별도로 설치하고 Docker를 추가 설치하여야 Jupyter Notebook을 사용할 수 있었다. 최근에는 Anaconda만 설치하면, SciPy, Numpy, Matplotlib, Pandas 등의 많은 패키지가 한꺼번에 설치된다. Anaconda는 수학, 과학 분야에서 사용되는 여러 패키지를 묶어 놓은 Python 배포판으로, Data Scientist, IT Professionals, Business Leaders를 위한 Data Science Platform이다. 과학자들이 인공지능이나 머신러닝 개발을 위해 가장 많이 사용하고 있는 플랫폼으로, 그림 3.6.29와 같은 4개의 요소로 구성되어 있다. 이 중에서 Data Science 라이브러리는 Data Science IDE (통합개발환경, Integrated Development Environment) 개발도구, 분석 및 과학계산 라이브러리, 자료가시화 라이브러리, 머신 러닝 라이브러리를 포함하고 있다. Anaconda Navigator는 Data Science를 위한 데스크탑 포털로서 사용자 인터페이스 역할을 수행한다(그림 3.6.30). 본 사업에서도 Python과 TensorFlow를 활용하기 위하여 Anaconda를 설치하였으며, Anaconda Navigator에서 Jupyter를 호출하였다. 자료기반모형을 개발을 위한 여러 개의 Notebook을 생성하고, 프로그램을 개발, 수정하였다(그림 3.6.31)

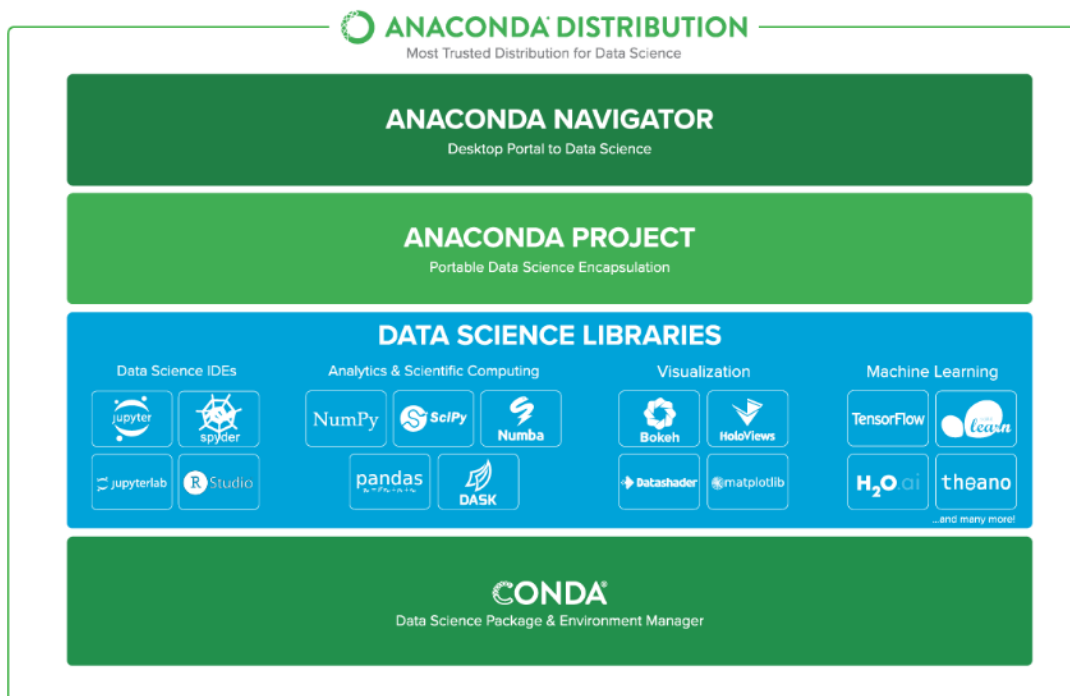


그림 3.6.29 Anaconda 배포판의 구성요소

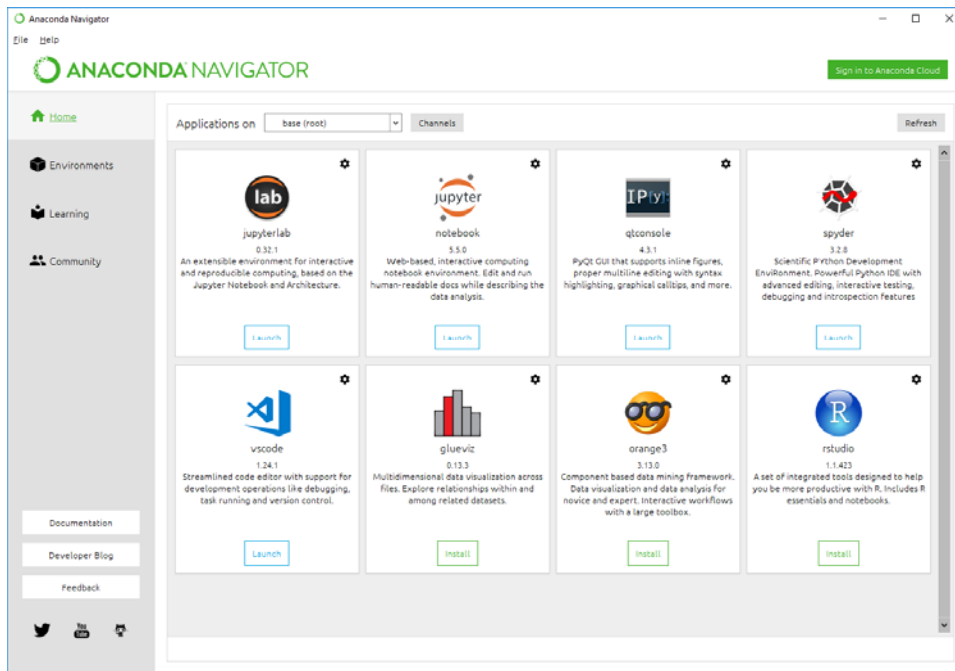


그림 3.6.30 Anaconda Navigator 화면

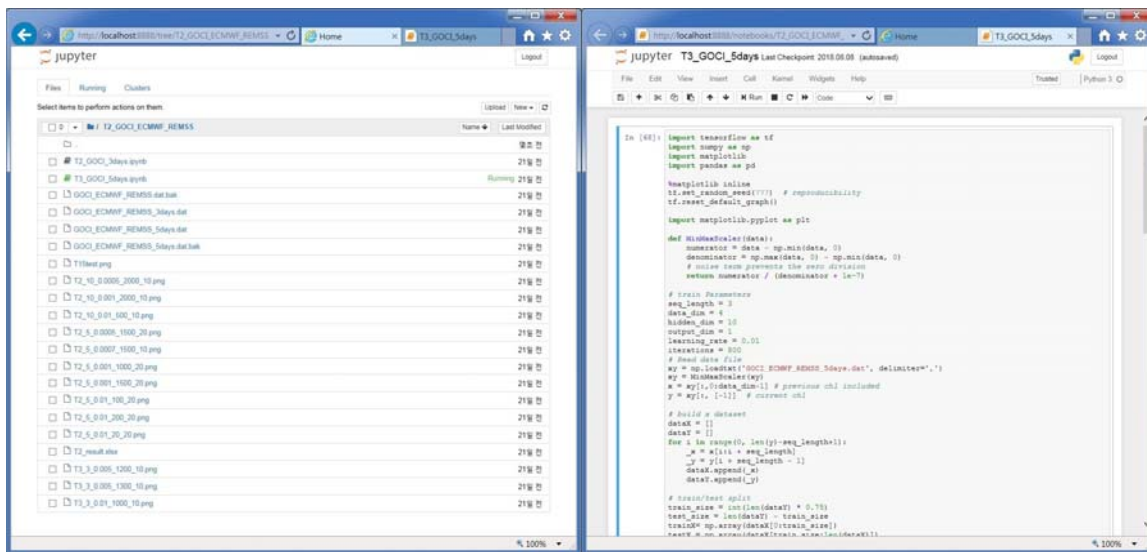


그림 3.6.31 Jupyter Notebook 개발환경 및 딥러닝 프로그램의 예

하위생태계 자료기반모형 개발에는 신뢰성 있는 대량의 자료가 필요하다. 생물 분야 자료 중에서는 인공위성 관측이 가능한 클로로필 자료는 장기간 생산되어 유통되고 있다. 이번에 시범 개발한 모형에서는 클로로필 자료의 예측을 목적으로 하였으며, 훈련용 자료로 활용 가능한 위성자료, 모델자료, 관측자료를 수집하였다. 자료기반모형 개발을 위해 수집한 자료의 목록, 기간, 자료수를 정리하면 표 3.6.9와 같다.

표 3.6.9 자료기반모형 개발용 자료 목록

수집자료	자료기간	자료간격	총 자료수	결손률
GOCI 클로로필	2011.04.01 - 2017.12.31	1일	1383	43.9%
MODIS 클로로필	2002.07.17 - 2017.12.31	1일	1459	74.2%
REMSS SST	2002.06.01 - 2017.12.31	1일	5693	0
ECMWF 일사량	2011.01.01 - 2017.12.31	1일	2557	0
기상청 일조시간, 습도	2011.04.01 - 2017.12.31	1일	5647	0
현장관측자료 (수온, 영영염, 클로로필)	2013.3.14 - 2016.04.21	15일	78	-

출력자료로 활용할 클로로필 자료는 GOCI와 MODIS로 생산한 자료를 수집하였다. GOCI 클로로필 자료는 원내 위성센터 연구팀이 제공하였는데, 총 6년 7개월간의 자료였다. 통영해역에서의 1일 평균자료로, 구름 등의 영향으로 자료를 생산하지 못한 기간이 전체 기간의 43.9%를 차지하고 있다. MODIS에서 산출한 클로로필 자료는 2002년부터 2017까지의 장기간 자료를 확보할 수 있었으나, 대상해역의 자료는 많지 않아 결손률이 74.2%에 이르렀다. 두 위성의 클로로필 자료는 머신러닝에서 훈련용 자료로 활용하기에는 결손률이 높아서, 1일 간격 자료를 그대로 사용할 수 없었다. 며칠간의 평균자료를 사용하기로 하고, 3일, 5일, 7일, 10일 평균을 계산하였으며, 그 결과는 표 3.6.9와 같다. MODIS 자료는 10일 평균을 한 경우에만 결손률이 12%대로 떨어지며, GOCI 자료는 3일 평균 자료의 결손률이 14%대이다.

표 3.6.10 클로로필의 평균자료 계산 결과

구분	GOCI 클로로필		MODIS 클로로필	
	자료수	결손률	자료수	결손률
3일 평균	822	14.72%	1882	44.00%
5일 평균	493	5.48%	1129	28.17%
7일 평균	352	1.99%	806	18.86%
10일 평균	246	0.00%	564	12.41%

머신러닝의 입력자료로는 클로로필과 관련이 있을 것으로 예측되는 자료항목 중에서 장기간 자료 확보가 가능한 자료들을 수집하였다. 인공위성 SST는 GHRSSST(Global High Resolution Sea Surface Temperature) 자료 중에서 자료기간이 가장 긴 REMSS SST를 수집하였다. MODIS 클로로필 자료와 REMSS SST는 자료제공 사이트에서 THREDDS(Thematic Real-time Environmental Distributed Data Services) Data Server를 통해 자료를 제공하므로, 원격으로 접속하여 통영해역의 자료만 추출하는 것이 가능하다. 각 Data Server에 접속하여 자료를 선별적으로 수집하는 Matlab 프로그램을 작성하여 활용하였다(그림 3.6.32). 기상자료 중에서는 ECMWF 재분석 일사량 자료와 기상청의 일조시간, 습도 자료를 다운로드하여 정리하였다. 또한, 통영 해양과학기지에서 2013년부터 2주 간격으로 계속 수집한 현장관측자료 중에서 수온, 영양염, 클로로필 자료를 해당 연구팀으로부터 수집하였다.

```

clear all;

% REMSS SST THREDDS url
remss_url='https://podaac-opendap.jpl.nasa.gov:443/opendap/allData/ghrsst/data/GDS2/L4/LOB/REMSS/mw_ir_01/v5.0/';
fname_tail='120000-REMSS-L4_GHRSSST-SSTfnd-MW_IR_01-LOB-v02.0-fv05.0.nc';

syear = 2003;
eyear = 2017;

sy = 5; % 1 means 2003, 15 means 2017
ey = 15; % nyear

nyear = eyear - syear + 1;
nd_mon(1:15) = 365;
for i=2:4:14
    nd_mon(i)=366;
end

slat = 1418;
elat = 1421;
slon = 3507;
elon = 3511;

nlat = elat - slat + 1;
nlon = elon - slon + 1;

for iy=sy:ey
    ndays = nd_mon(iy);
    iyear = syear + iy -1;
    clear itime;
    clear sst;
    clear sst_err;

    for i=1:ndays
        str_year = num2str(iyear, '%4d');
        str_day = num2str(i, '%03d');
        pnum = datenum(['1-jan-' str_year]);
        pdate = datevec(pnum + i - 1);
        str_mon = num2str(pdate(2), '%02d');
        str_mday = num2str(pdate(3), '%02d');

        remss_dfile = [remss_url str_year '/' str_day '/' str_year str_mon str_mday fname_tail];
    end
end
    
```

그림 3.6.32 THREDDS에서 자료를 수집하는 Matlab 프로그램의 예

TensorFlow의 LSTM network를 이용하는 클로로필 예측용 머신러닝 프로그램을 작성하였다. 딥러닝 수행에 필요한 Activation Function으로는 Tanh를, Optimizer로는 Adam Optimizer를 선택하였다. Sequence Length, Hidden Layer Depth, Learning Rate, Iteration 횟수는 표는 3.6.11와 같이 다양한 값을 이용하였다.

표 3.6.11 LSTM network를 이용한 시범모형의 훈련 조건

구분	머신러닝 조건
Activation Function	Tanh
Optimizer	Adam Optimizer
Sequence Length	3, 5, 7, 10
Hidden Depth	5, 10, 20
Learning Rate	0.0005 - 0.01
Iteration	100 - 2000

앞에서 설명한 입출력 자료와 역학모형 자료를 이용하여 총 5종류의 테스트를 수행하였으며, 각 테스트별로 수백 번의 반복 수행을 거쳐 가장 상관관계가 높은 경우를 도출하였다. GOCI 클로로필 자료는 3, 5일 평균한 자료를, MODIS 클로로필 자료는 10일 평균한 자료를 사용하였으며, 결손된 자료는 spline 보간으로 채웠다. 총 5가지 테스트별 입출력 자료, 자료간격, 훈련 결과 등을 정리하면 표 3.6.12와 같다.

표 3.6.12 클로로필 예측용 자료기반모형의 테스트 및 결과

테스트	훈련자료	기간	자료간격	자료수	결과 (Max. Cor.)
1	- MODIS Chla - REMSS SST - 기상청 일조시간 - 기상청 습도	2002.07.17. -2017.12.31	10일	564	0.25
2	- GOCI Chla - REMSS SST - ECMWF 일사량	2011.04.01. -2017.12.31	3일	822	0.54
3	- GOCI Chla - REMSS SST - ECMWF 일사량	2011.04.01. -2017.12.31	5일	493	0.53
4	현장관측자료 - 수온 - ECMWF 일사량 - 영양염(NO ₂ , NO ₂ +NO ₃ , NH ₄ , PO ₄ , SiO ₂) - 관측 Chla	2014.01. -2015.08.	15일	40	-
5	역학모델자료 - 일사량 - 수온 - PO ₄ - NO ₂ +NO ₃ - Chla	1980.1.1. -2016.12.31	1일	13,514	0.995

각 테스트를 위해 준비한 자료 중에서 75%는 훈련용으로 사용하였고, 훈련 결과를 바탕으로 나머지 25%에 대한 예측을 수행하였다. 각 테스트별로 예측결과를 도시하면 그림 3.6.33 - 그림 3.6.37과 같다. 테스트 1의 경우에는 상관관계가 0.2 내외로 주기와 크기에서 모두 자료 예측이 잘 되지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 사용한 MODIS 자료가 10일 평균자료로 클로로필의 변동성을 포함하기에는 간격이 너무 넓기 때문이다. 테스트 2와 테스트 3의 경우에는 상관관계가 0.5 이상으로 자료의 주기와 크기 변화를 어느 정도 예측하고 있지만, 모형을 운영할 수 있을 정도의 결과는 아니다. 이 역시 3일과 5일 평균자료를 이용하였기 때문인 것으로 판단된다. 테스트 4의 경우에는 유의미 있는 결과가 전혀 도출되지 않았는데, 훈련에 사용한 데이터가 40개로 머신러닝을 적용하기에는 턱없이 부족하다. 테스트 5는 역학모형의 결과를 이용한 경우로, 17년 동안의 13,000개 이상의 자료를 이용하였으므로, 머신러닝에 필요한 충분한 자료를 확보한 경우이다. 테스트 결과는 상관계수가 0.99 이상으로 역학모형을 대신하여 예측 값을 도출할 수 있는 수준에 이른다. 역학모형에서는 입력 값을 기반으로 정해진 방정식과 파라미터를 이용하여 출력 값을 계산하므로, 역학모형의 자료를 이용한 머신러닝에서도 이를 잘 구현하는 것으로 판단된다. 결과적으로 이번에 구현한 시범 모형이 클로로필 예측에 활용할 수 있음을 확인하였으나, 머신러닝에 사용할 자료의 확보에는 성공하지 못 하였다. 머신러닝을 필요한 신뢰성 있고 충분한 자료의 확보가 자료기반모형의 개발에 가장 중요한 요소임을 다시 한 번 확인한 결과이다.

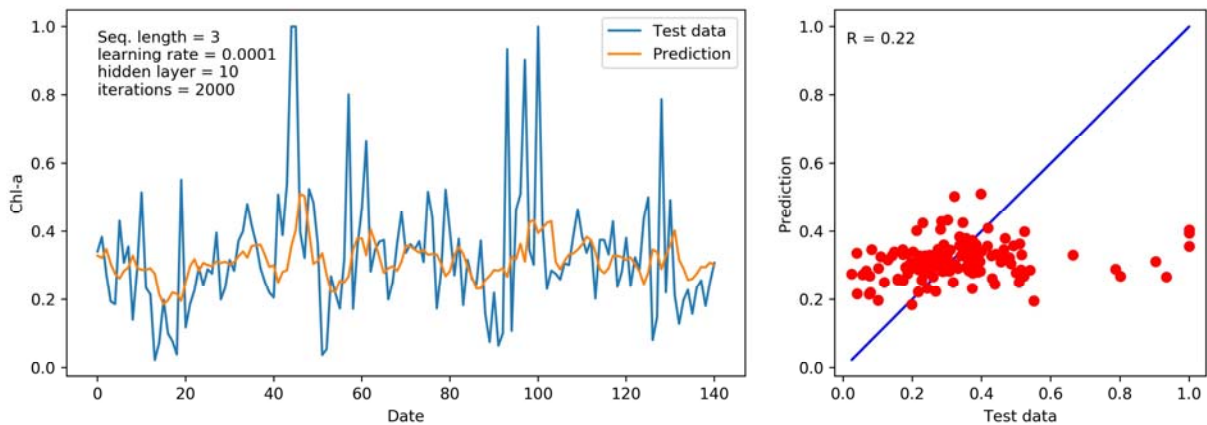


그림 3.6.33 자료기반모형 테스트 결과(테스트 1)

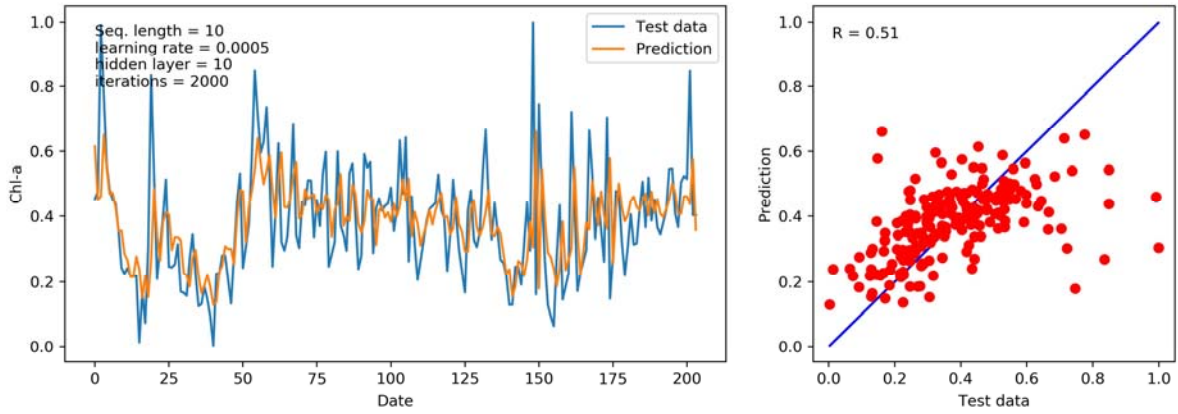


그림 3.6.34 자료기반모형 테스트 결과(테스트 2)

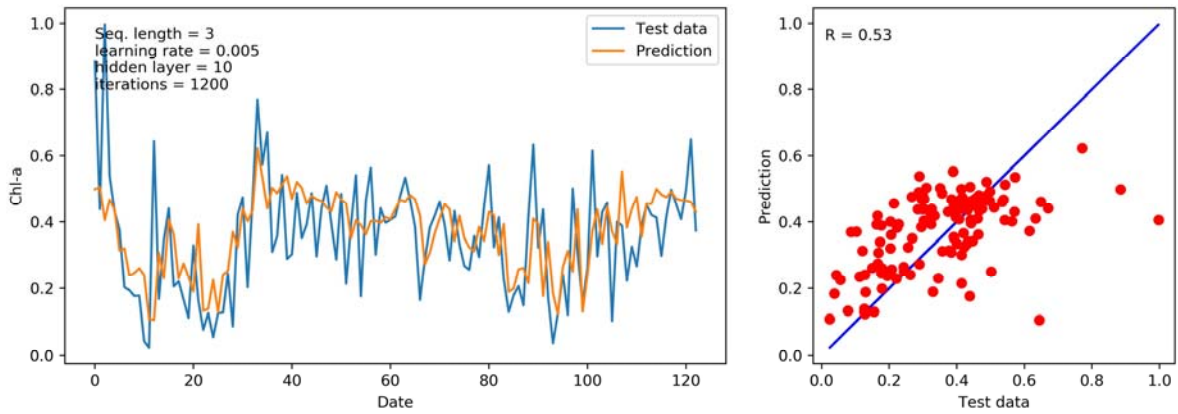


그림 3.6.35 자료기반모형 테스트 결과(테스트 3)

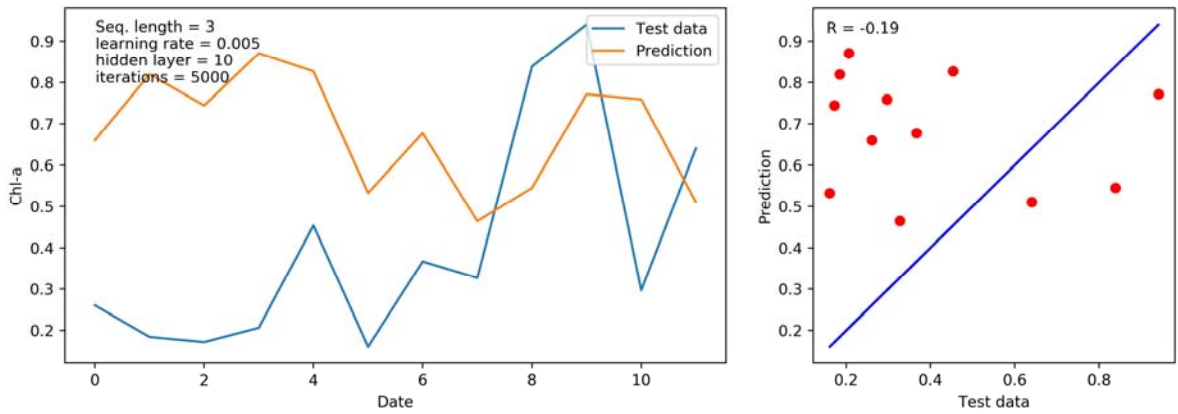


그림 3.6.36 자료기반모형 테스트 결과(테스트 4)

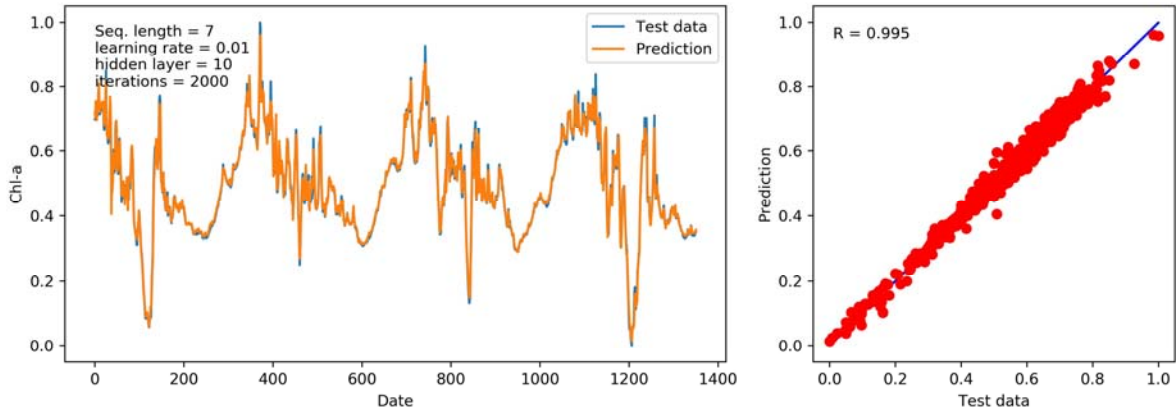


그림 3.6.37 자료기반모형 테스트 결과(테스트 5)

제4장

연구개발목표 달성도 및 대외 기여도



제4장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

■ 2017년도 정량적 연구성과 목표 대비 달성도

구분		가중치*	달성 목표(건)		세부 가중치	달성(건)	달성도(%)
과학적 성과	논문	40%	mrnIF 41~60	1	20%	0	0%
			mrnIF 40점 이하	1	20%	0	0%
			국내외 학술대회	3	60%	5	100%
			소계	5	100%	5	60%
기술적 성과	특허	10%	소프트웨어(SW)	1		1	100%
기타 성과	연구노트	10%		1		1	100%
	기타 성과	20%	수층 프로파일 자료	1000		2076	100%
	기타 성과	20%	표층 상시관측 자료	1000		62208	100%
계	-	100%			-		84%

■ 2018년도 정량적 연구성과 목표 대비 달성도

구분		가중치*	달성 목표(건)		세부 가중치	달성(건)	달성도(%)
과학적 성과	논문	30%	mrnIF 40점 이하	2	50%	1	50%
			국내외 학술대회	2	50%	9	100%
			소계	4	100%	3	75%
기술적 성과	특허	10%	국내특허 출원	1	50%	1	100%
			소프트웨어(SW)	1	50%	1	100%
			소계	2	100%	2	100%
사회적 인프라	홍보활동	5%	홍보	1		1	100%
	대외활동	5%	대외	1		1	100%
기타 성과	웹사이트	5%	신규 개설	1		1	100%
	연구노트	10%		1		1	100%
	기타 성과	15%	수층 프로파일 자료	4,000		6,168	100%
	기타 성과	15%	표층 상시관측 자료	10,000		272,880	100%
	기타 성과	5%	관측자료 DB 구축	1		1	100%
계	-	100%			-		92.5%

■ 과학적 연구성과

○ 연구논문

- 안성민 등, “Next-generation sequencing reveals the diversity of benthic diatoms”, ALGAE, SCI(E), 2018.06.15.

Research Article

Algae 2018, 33(2): 167-180
<https://doi.org/10.4490/algae.2018.33.4.3>

Open Access



Next-generation sequencing reveals the diversity of benthic diatoms in tidal flats

Sung Min An¹, Dong Han Choi^{1,2}, Howon Lee¹, Jung Ho Lee³ and Jae Hoon Noh^{1,2,*}

¹Marine Ecosystem and Biological Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

²Department of Marine Biology, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

³Department of Biology Education, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Benthic diatoms are ubiquitous in tidal flats and play major roles in maintaining coastal ecosystems. Spatio-temporal variations in diatom diversity have not been well-studied, mainly because of difficulties in morphological identification and the lack of appropriate genetic tools. To overcome these problems, we used the gene encoding the ribulose biphosphate carboxylase large-subunit (*rbcL*) as a molecular marker, and sequenced these genes with the aid of the MiSeq platform. In this manner, we explored the genetic diversity of benthic diatoms in tidal flats of Guenso Bay on the west coast of Korea; differences in the spatial distributions of benthic diatoms were evident. The diatom communities were dominated by *Nitzschia*, *Navicula*, and *Amphora*; their relative distributions were affected by the sand proportion, grain size, and air exposure time. Our results suggest that meta-barcoding of the *rbcL* gene and next-generation sequencing can be used to explore the diversity of benthic diatoms.

Key Words: benthic diatom; diversity; MiSeq; *rbcL* gene; tidal flat

INTRODUCTION

The intertidal zone is one of the most productive ecosystems in the world (Hughes and Sherr 1983, Watermann et al. 1999). Benthic microalgae are ubiquitous in tidal flats and play major roles in coastal ecosystems. Microalgae contribute significantly to primary production, biomass generation, nutrient exchange via seawater and sediment interfaces, and sediment stabilization (Admiraal 1984, Yallop et al. 1994, Underwood and Barnett 2006). Many taxa are found in tidal flats, including diatoms, cyanobacteria, and euglenophytes; and sometimes dinoflagellates and chlorophytes (Meadows and Anderson 1968, Rejil 2013). Of these, diatoms are the most abundant, being the principal contributors to pri-

mary production and algal biomass in the intertidal zone (Admiraal 1976, Sullivan and Moncreiff 1988). Their ubiquitous distribution renders diatoms one of the most important groups of organisms of ocean ecosystems (Yallop et al. 1994, Mann et al. 2010).

Despite the importance of these taxa, knowledge on the diversity of benthic diatoms is limited. As samples from tidal flats contain a variety of organic matter and sedimentary particles, acid treatment is required prior to traditional morphological analysis (Baldi et al. 2011). However, this removes all organic material; we cannot tell whether frustules are those of living diatoms or dead diatoms deposited from overlying water. Furthermore,



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received October 30, 2017, Accepted April 3, 2018

*Corresponding Author

E-mail: jhnoh@kiost.ac.kr

Tel: +82-51-664-3260, Fax: +82-51-955-3981

○ 국내외 학술대회 발표

- 권영신 등, “Simulation of seasonal variations of the lower trophic ecosystem near Tong-Yeong”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2017. 4. 19.~20.



2017 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
2017년 4월 19일(수)~20일(목) / 부산 BEXCO

1차원 연직 혼합 -생지화학 결합 모형을 이용한 통영 연안 하위생태계 계절 변동성 모의

권영신, 강현우, 소재귀, 서옥희
한국해양과학기술원 해양순환·기후연구센터

통영 연안은 쿠로시오 해류의 영향으로 겨울철에도 평균 수온이 10 °C 정도로 유지되며, 조석의 영향으로 연직 혼합이 잘 이루어지며, 풍부한 영양염으로 인해 일차생산이 비교적 높은 해역이다. 한편 굴, 우렁쉥이를 비롯하여 각종 어류 양식도 활발하게 이루어지고 있어, 해양 환경 변화가 양식장에 매우 큰 영향을 미칠 수 있는 중요한 해역이다. 본 연구에서는 통영해상 과학기지 근처 (34.77 N, 128. 38 E, 수심 30m) 를 대상으로 1차원 연직혼합-생지화학 결합 하위 생태계 모형인 ERSEM-GOTM을 수립하고 영양염 및 플랑크톤, 그리고 유기물과 화학 변수들의 계절 변동성을 모의하였다. 모형 결과는 2013년부터 2016년까지 국립수산과학원에서 관측한 자료와 2017년 3월 한국해양과학기술원에서 관측한 자료를 이용하여 비교 검증하였다.

표층에서의 질산염과 인산염은 변성이 일어나는 시기인 초여름(5~6월)에 각각 약 0.5 μM 과 0.05 μM 으로 최저값을 보였으며, 겨울철에는 각각 약 11 μM 과 0.8 μM 로 최고값을 보여, 관측값과 매우 유사한 범위를 나타내었다. 표층 규산염은 겨울철에는 약 25 μM 로 관측값과 비슷하나 초여름의 경우 관측값이 약 3 μM 이하로 떨어지는 것에 반해 모형에서는 수배 이상이 남아 여름철 재현에 문제가 있는 것으로 나타났다. 한편 엽록소 a 의 재현 결과는 초여름 변성시기에 관측값에 비해 절반 정도 (약 4 $\mu\text{g L}^{-1}$) 에 불과한 값을 보였다. 이는 질산염과 인산염의 고갈로 인해 이 지역 우점종인 규조류의 변성이 실제보다 작게 재현되었기 때문인 것으로 판단된다.

하위생태계 월별 평균값은 여름을 제외한 모든 시기에 규조류가 가장 우점하는 것으로 재현되었고, 하절기(6~7월경) 편모조류가 포함된 미소(Nano-)식물플랑크톤이 규조류의 생체량과 비슷한 수준으로 변성하였다. 동물플랑크톤은 식물플랑크톤의 변성 이후 약 한 달 정도 늦게 변성하였으며, 박테리아는 연중 내내 거의 일정한 생체량을 유지하였다. 용존 무기탄소와 pH는 여름에 최대, 겨울에 최소값을 보이고, 총 알칼리도는 이와 반대 경향을 보여 식물플랑크톤 변성에 따른 화학적 변화를 잘 나타낸다.

모형내에서의 규조류의 포식자인 동물플랑크톤의 섭식률을 조정하거나, 질소/인에 대한 경쟁 기능군의 영양염 흡수율을 조정하면서 규산염 농도 변화 및 이와 연관된 하위생태계 변수들의 반응을 분석하였다. 또한 해저면에서의 영양염 재생산율에 대한 모형 민감도 실험을 통해 통영 연안에서의 하위생태계 계절변동성을 재현하는 데 적합한 모형 인자 개선 방법을 제안하였다.

- 권영신 등, “Diurnal variation and vertical distribution of Carbon Monoxide in the North Pacific: A modeling study”, AMEMR (Advances in Marine Ecosystem Modelling Research), 2017. 7. 3.~6.

About AMEMR 2017

The AMEMR (Advances in Marine Ecosystem Modelling Research) Conference provides an opportunity to present, discuss and learn about a wide variety of marine modelling challenges, methods, applications and outcomes.

Marine ecosystem models are a fundamental tool for understanding marine ecosystems and providing projections of potential future states of the marine environment. Marine modelling is continuously evolving, in response to new scientific knowledge, societal needs and computational resource.

AMEMR has a strong focus on the state-of-the-art and articulating future challenges. It also promotes interdisciplinary discussion among stakeholders and modelling, observational and experimental scientists and students who want to contribute to the conceptualisation, design, development and application of improved and new marine ecosystem models.

AMEMR is the place to showcase your work, share ideas and develop new networks.

Conference venue

AMEMR 2017, 3-6 July, organised by [Plymouth Marine Laboratory](#), and will take place in Plymouth, Britain's Ocean City.

Plymouth is a global center of excellence for marine science and technology and has one of the largest clusters of expertise in Europe.

AMEMR 2017 will take place at the Roland Levinsky Building, University of Plymouth, UK.



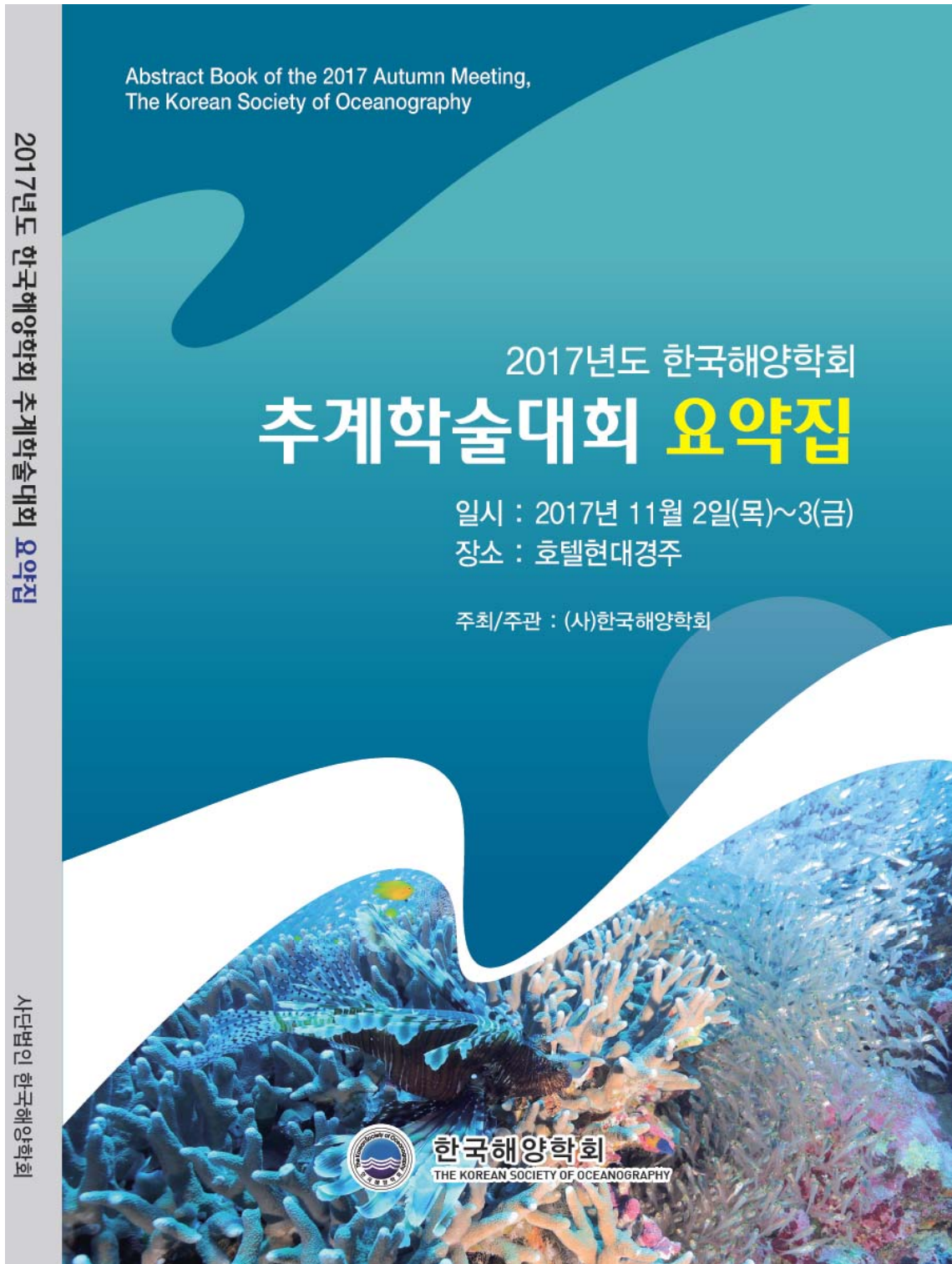
Diurnal variation and vertical distribution of Carbon Monoxide in the North Pacific:**A modeling study**Young Shin Kwon¹, Hyoun-Woo Kang², and Tae Siek Rhee¹

¹Division of Polar Ocean Environment, Korea Polar Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea

²Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

Carbon monoxide (CO) which is formed by photochemical reaction with dissolved organic matter, is one of the useful tracers for understanding the physical, chemical, and biological phenomena in the ocean. We developed a CO module and integrated it into ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model) in order to investigate the CO dynamics occurring in the complex marine ecosystem. The CO module consists main processes of CO dynamics in the upper ocean; photochemical production, microbial oxidation, and air-sea gas exchange. Physical mixing in the upper ocean is relied on GOTM (General Ocean Turbulence Model). Setting up a 1-D model by coupling ERSEM with GOTM we examined the CO module by simulating the observations conducted for 24 hours at two hydrocasting stations, NP06 (47.38°N, 160.69°E) and NP11 (62.50°N, 174.00°W) in 2012 as a SHIPPO (SHIpborne Pole-to-Pole Observations) project. Not only did the 1-D model effectively reproduce the typical sinusoidal variation of CO at the surface but also the vertical structure of exponential decrease of dissolved CO with depth which is shown in the observations. This implies that the photochemical production occurring within the euphotic zone during daytime and the microbial oxidation occurring in the entire water column at all the time were properly implemented in our module. Analysis of length scales relevant to the aforementioned processes based on the model simulations indicated that those two hydrographic stations were governed by the rates of photochemical production and microbial oxidation.

- 최상화 등, “양식장 인근해역의 해양환경 집중관측”, 한국해양학회 추계학술대회, 2017. 11. 2.~3.



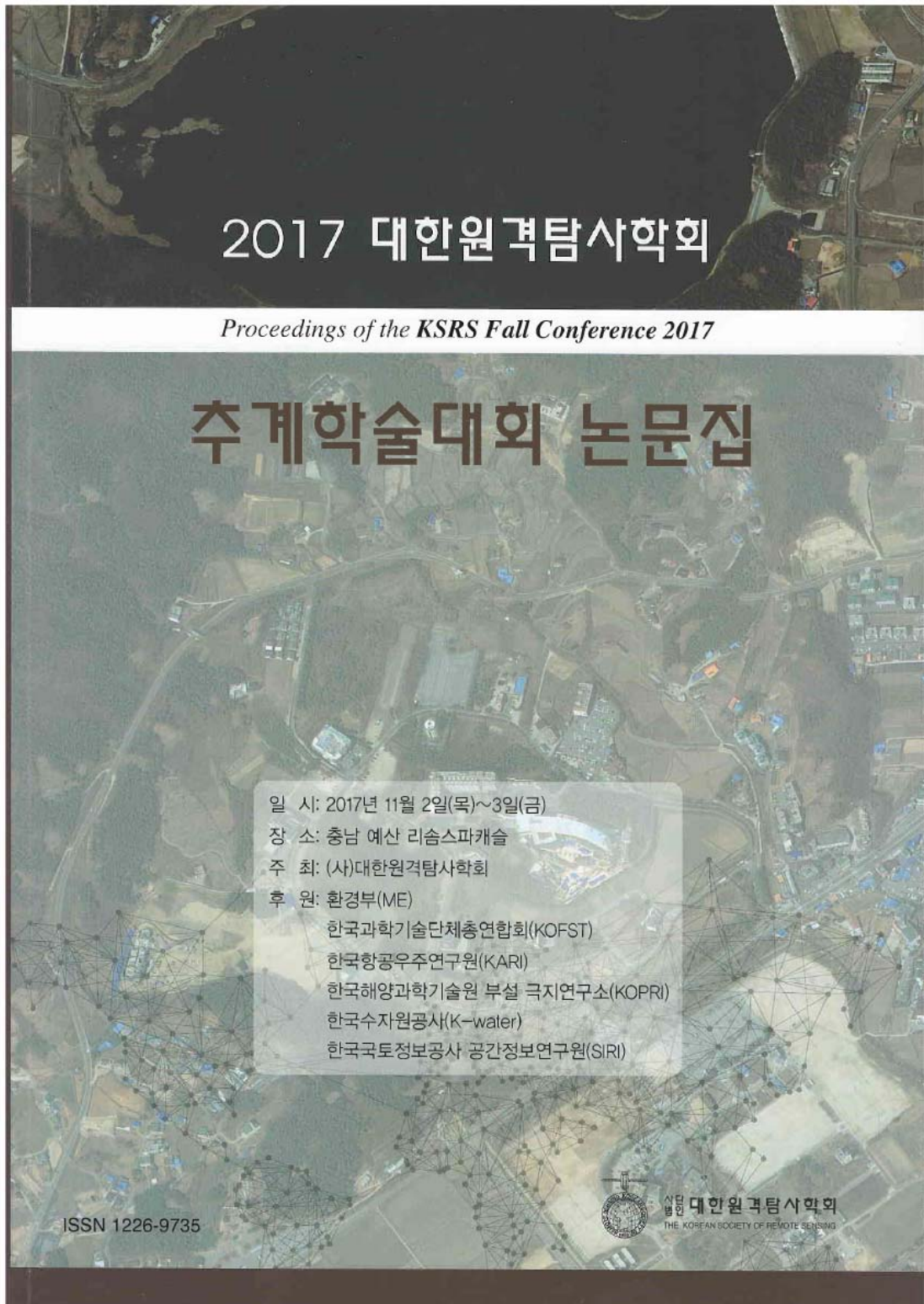
양식장 인근해역의 해양환경 집중관측

최상화¹, 조성록¹, 백훈¹, 강성현¹, 강동진¹, 문초룡¹, 노태근¹,
강나연¹, 손푸르나¹, 노재훈², 최동한², 박용주³

한국해양과학기술원 ¹환경기반연구센터, ²생태기반연구센터, ³통영해양과학기지

어류 및 패류의 시험양식장이 설치된 통영해양과학기지에서 2017년 7월 한달간 표층센서와 자동 시료채집기를 설치해 집중관측을 수행하였다. 표층센서는 수온과 염분, 형광을 측정하는 TSG (thermosalinograph)를 1분 간격으로 운영하였으며, 자동시료채집기를 통해 영양염과 엽록소 a, 식물플랑크톤 분석을 위한 표층 시료를 230회 채집하였다. 시료는 1시간 간격으로 3일간 72회 채집과 2시간 간격으로 4일간 51회 채집, 3시간 간격으로 12일간 95회 채집, 6시간 간격으로 3일간 12회 채집하였다. 엽록소 a 분석을 위해 표층 해수 200 mL를 여과하였으며, 여과한 해수는 영양염 분석을 위해 냉동보관하였다. 식물플랑크톤 분석을 위한 시료는 micro-식물플랑크톤 분석을 위해서는 루골 고정 후 냉장보관하였으며, pico- 및 nano-식물플랑크톤 분석을 위해서는 냉동 고정하여 실험실로 운반한 뒤 분석하였다. 수온과 염분은 뚜렷한 일변동을 보였으며, 한달간 수온은 약 10℃, 염분은 3 이상의 변화를 나타냈다. 식물플랑크톤의 현존량도 고조와 저조 시에 개체수 변동이 크게 나타났으며, 관측기간 중 우점종 종류의 변이도 flowcam 관찰을 통해 파악할 수 있었다.

- 민지은 & 유주형, “적조 및 연안 환경 분석을 위한 유인항공기 초다분광 영상 전처리 및 검증”, 대한원격탐사학회 추계학술대회, 2017. 11. 2~3.



적조 및 연안 환경 분석을 위한 유인항공기 초다분광 영상 전처리 및 검증

Pre-processing and verification of airborne hyperspectral image for red tide and coastal environment analysis

민지은, 유주형*

Jee-Eun Min, Joo-Hyung Ryu*

한국해양연구원 해양위성센터

jhyu@kiost.ac.kr

요약: 초다분광 영상은 적조나 연안 수질 변화 등의 미세하게 변화하는 연안의 다양한 환경 변화를 효과적으로 관측할 수 있다. 또한 초다분광 센서를 항공기에 탑재할 경우 관심 해역으로의 접근성과 공간 및 시간해상도를 원하는 대로 조정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 기존의 연안 해역에 대한 연구가 많지 않으며 연안 환경 분석에 활용되기 위해서는 많은 전처리 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 연안 해역에서 관측된 유인항공기 초다분광 영상을 대상으로 기존의 전처리 방법을 적용하여 연안 해역에서의 환경 분석 활용 가능성을 검토해 보고자 한다. 이를 위하여 우리나라 남해 연안 해역을 대상으로 유인항공기를 이용하여 관측된 초다분광 영상에 대하여 방사보정, 기하보정, 대기보정 등의 전처리를 실시하고 그 결과를 현장 관측 스펙트럼을 이용하여 검증하였다. 그 결과 현장관측 스펙트럼과 초다분광 영상 획득 스펙트럼이 비교적 잘 일치되는 결과를 얻었다. 추후 추가적으로 태양광 직접 반사 및 구름 보정 등의 추가 보정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1. 서론

적조는 가장 흔한 연안 재해 중 하나이며 연안 해양 환경에 심각한 피해를 준다. 이러한 적조 현상을 감지 할 수 있는 위성 센서들이 많이 있지만 공간 및 분광 해상도 측면에서 적조 패치의 정확한 모양 및 면적, 그리고 생물학적 농도(abundance) 등을 정확하게 분석하기에는 한계가 있다. 항공기에 탑재하는 초다분광 센서의 경우 높은 공간 해상도와 분광 해상도를 갖기 때문에 위성 센서들이 갖는

한계를 극복하고 연안의 적조를 보다 효과적으로 분석 할 수 있는 장점이 있다.

1980년대 초 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 제트 추진 연구소(Jet Propulsion Laboratory, JPL)에서 시작된 영상 분광법(imaging spectrometry) 또는 초다분광 영상법(hyperspectral imaging)은 연속된 스펙트럼 채널에서, 영상을 수집함으로써 각 픽셀에 대해 일정 구간의 파장 영역에서 완전한 반사도 스펙트럼 정보를 얻을 수 있다(Gao et al., 2009). 따라서 대상체에 대한 전체 분광 스펙트럼 정보를 제공하

는 초다분광 원격탐사는 지질, 광물, 농업, 산림 등의 다양한 육상 분야의 연구에 활용되어 왔으며 최근에는 다양한 연안 (coastal water) 및 내수 (inland water) 수질 연구에 활용되었다 (Thiemann and Kaufmann, 2002; Brando and Dekker, 2003; Karaska et al., 2004; Vahtmae et al., 2006; Giardino et al., 2007; Olmanson et al., 2013). 하지만 이렇게 연안 환경 분석에 활용하기 위해서는 다양한 전처리 분석이 필요하며 이에 대한 검증은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 연안 해역에서 관측된 유인항공기 초다분광 영상을 대상으로 기존의 전처리 방법을 적용하여 연안 해역에서의 환경 분석 활용 가능성을 검토해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2-1. 초다분광 영상획득 및 전처리

2016년 9월 24일 통영 해역을 대상으로 유인항공기에 초다분광 센서를 탑재하여 관측을 실시하였으며, 자료의 검증을 위한

표층 광관측 자료 및 환경 분석 자료 등의 현장 매칭 자료를 획득하였다. 400 ~ 1,000 nm 분광 영역을 약 130개 밴드로 나눠서 관측할 수 있는 Aisa EAGLE 모델의 초다분광 센서를 Cessna 208B 기종의 유인항공기에 탑재하였으며 약 3,000 m의 관측 고도에서 18 km x 18 km 영역의 해역을 관측하였다.

초다분광 센서로 관측된 원시 자료는 전처리로서 방사보정 (Radiometric correction), 기하보정 (Georeferencing), 대기보정 (ATCOR atmospheric correction algorithm)을 실시하였으며 14개의 라인으로 관측된 각각의 영상을 모자이크하여 하나의 정사 영상으로 분석하였다. 먼저 방사보정을 통하여 대기산란, 지표면과 감지기 간의 기하학적 관계, 감지기의 반응 특성 등에 의한 방사치의 왜곡을 보정하였으며, 다음으로 GPS/INS 데이터 및 검교정 데이터를 이용하여 기하보정을 실시하였다. 기하보정을 통해 영상 자료와 GPS/INS 운항 자료 정보를 동기화하여 정사 보정을 실시하고 각 픽셀의 좌표 정보

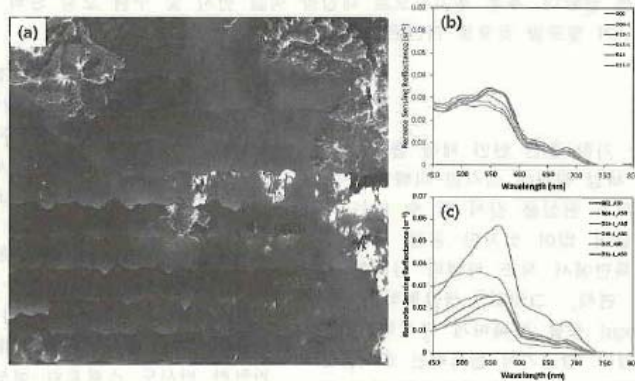


그림 1. (a) 획득된 초다분광 영상 및 (b) 초다분광 영상 추출 반사도 스펙트럼 자료, (c) 초다분광 영상 검증을 위한 현장 매칭 해양 표층 반사도 스펙트럼 자료

를 획득하였다. 마지막으로 항공기와 해수면 사이의 대기에 의한 효과를 제거하기 위한 대기보정 (Atmospheric correction)을 실시하였는데, MODTRAN-5 modeling 기반의 ATCOR-4 (Atmospheric Correction tool for Airborne Imagery) 프로그램을 이용하여 분석하였다.

2-2. 자료 검증을 위한 현장조사

초다분광 영상의 검보정을 위하여 2016년 9월 24일 9시 ~ 12시 사이에 비행 경로 관측 스케줄에 맞추어 2 개의 선박을 이용하여 해당 경로를 통과하는 시점과 동시에 매칭 자료 획득을 위한 정점 현장 조사를 수행하였다. 해양 광학자료 및 환경자료가 분석되었는데, 각 정점별로 해수 성분 자료를 얻기 위한 해수 샘플 채취와 광학관측이 동시에 이루어졌다. 채수된 물을 이용하여 식물성 플랑크톤의 농도 (Chl, chlorophyll concentration)와 총 부유물 농도 (SPM, concentration of suspended particulate matter)를 측정하였으며, 식물 플랑크톤의 흡광계수 (a_{ph}), 부유물의 흡광

계수 (a_{SPM}), 용존유기물의 흡광계수 (a_{DOM})를 측정하였다.

3. 결과 및 토론

전처리가 완료된 초다분광 관측 영상 (그림 1(a))은 9개의 매칭 자료를 이용하여 검증되었다. 방사 및 대기보정이 이루어진 초다분광 영상의 R_{rs} 스펙트럼 (그림 1(b))은 분광복사기 (ASD FieldSpec-3)를 이용하여 현장에서 측정된 R_{rs} 스펙트럼 (그림 1(c))과 모양이 잘 일치되는 결과를 보였다. 하지만 정점에 따라서 일부 파장 구간에서의 모양이 다르거나 전체적으로 과도 또는 과소 추정되는 경향이 나타났다. 이는 각 정점의 영상 상태에 따라 다르게 나타났는데, 확인 결과 9개의 정점 중 3개의 정점만 양호한 상태를 나타냈으며 2개 정점의 경우 구름 그림자에서 측정이 되었고, 4개 정점의 경우 태양광 직접 반사 (sun glint)의 영향을 받은 것으로 나타났다. 양호한 상태의 정점의 경우 전체 파장

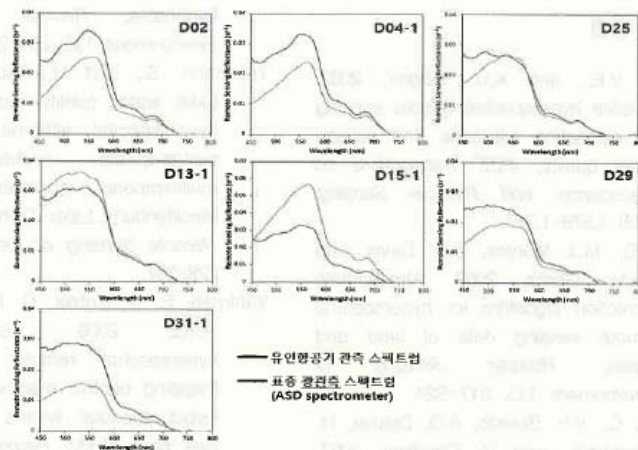


그림 2. 초다분광 영상과 표층 광원측 스펙트럼 상호 비교

구간에서의 모양과 같이 비교적 비슷한 패턴을 보였다 (그림 2의 D02, D04-1, D25 점점). 반면에 구름 그림자에 들어간 경우 영상의 스펙트럼이 전체 파장에서 매우 낮은 결과를 보였다.

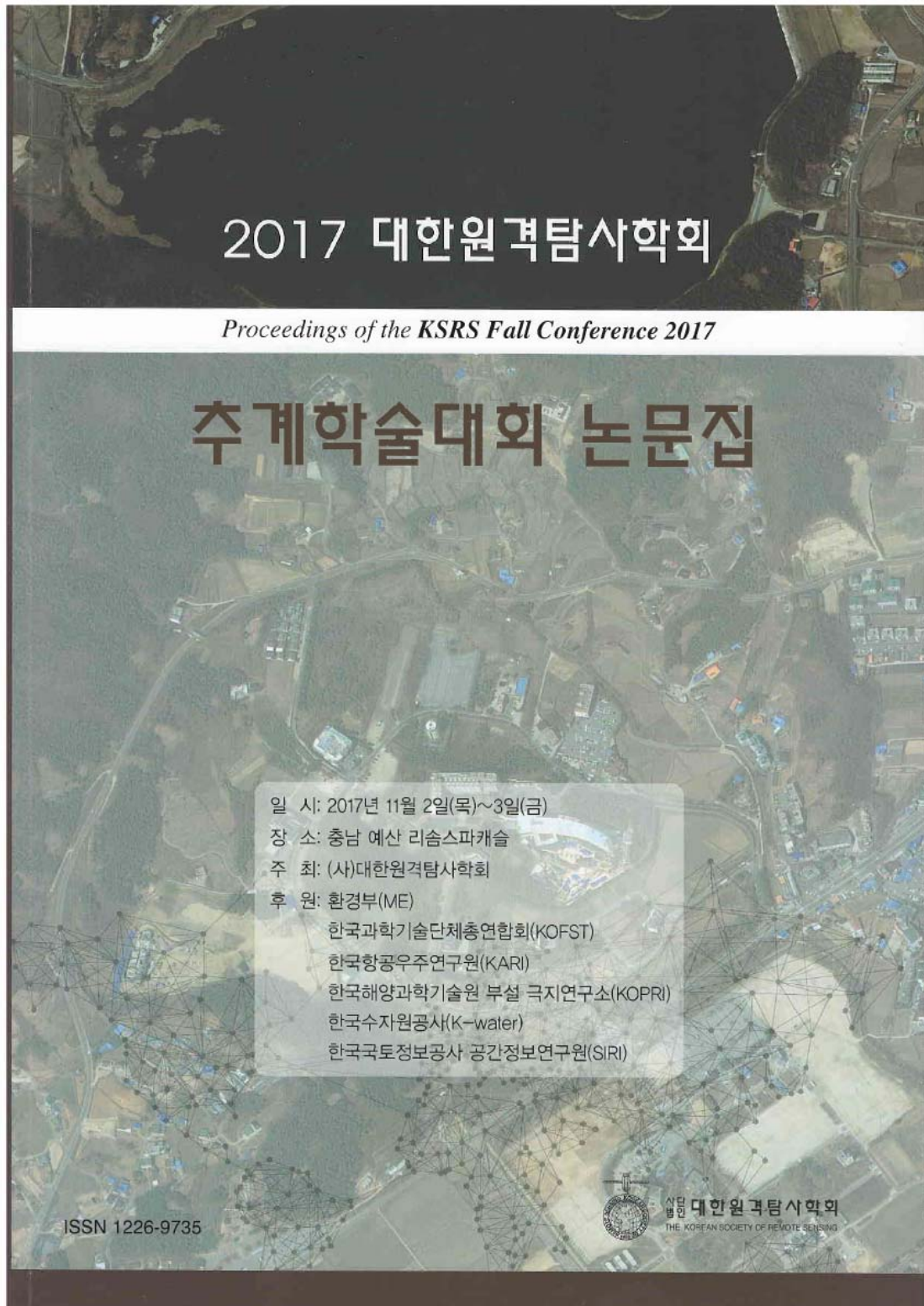
태양광 직접 반사의 영향을 받은 경우는 두 가지의 추가 패턴으로 분류될 수 있다. 파도의 모양에 따라 각도에 의해 태양광이 직접 반사된 밝은 부분과 그렇지 않은 어두운 부분으로 나뉘지고, 밝은 부분은 과대 추정되는 결과를 보였으며 (그림 2의 D29, D31-1 점점) 어두운 부분은 과소 추정되는 결과를 보였다 (그림 2의 D13-1, D15-1 점점).

유/무인항공기에 탑재된 초다분광 영상을 이용하여 적조를 비롯한 연안 환경의 효과적인 분석을 위해서는 기본적으로 시행되는 방사보정, 기하보정, 대기보정 이외에도 구름 그림자의 제거 및 태양광 직접 반사의 영향의 보정이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단되며 추후 이에 대한 연구를 진행할 계획이다.

4. 참고문헌

- Brando, V.E., and A.G. Dekker, 2003. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6) 1,378-1,387.
- Gao, B.C., M.J. Montes, C.O. Davis, and A.F.H. Goetz, 2009. Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing data of land and ocean, *Remote Sensing of Environment*, 113, S17-S24.
- Giardino, C., V.E. Brando, A.G. Dekker, N. Strombeck, and G. Candiani, 2007. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion, *Remote Sensing of Environment*, 109, 183-195.
- Karaska, M.A., R.L. Huguenin, J.L. Beacham, M.H. Wang, J.R. Jensen, and R.S. Kaufmann, 2004. AVIRIS measurements of chlorophyll, suspended minerals, dissolved organic carbon and turbidity in the Neuse River, North Carolina, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(1), 125-133.
- Lee, Z.P., K.L. Carder, R.F. Chen, and T.G. Peacock, 2001. Properties of the water column and bottom derived from Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data, *Journal of Geophysical Research*, 106(C6), 11,639-11,651.
- Olmanson, L.G., P.L. Brezonik, and M.E. Bauer, 2013. Airborne hyperspectral remote sensing to assess spatial distribution of water quality characteristics in large rivers: The Mississippi River and its tributaries in Minnesota, *Remote Sensing of Environment*, 130, 254-265.
- Thiemann, S., and H. Kaufmann, 2002. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data - a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany, *Remote Sensing of Environment*, 81, 228-237.
- Vahtmäe, E., T. Kutser, G. Martin, and J. Kotta, 2006. Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters - a Baltic Sea case study, *Remote Sensing of Environment*, 101, 342-351.

- 신지선 등, “적조 탐지를 위한 다중위성자료 융합 방법 연구”, 대한원격탐사학회 추계학술대회, 2017. 11. 2.~3.



적조 탐지를 위한 다중위성자료 융합 방법 연구 A study on fusion method of multi-sensor for red tide detection

신지선^{1, 2}, 유주형^{1, 2}, 민지은¹

한국해양과학기술원 해양위성센터¹

KIOST-KMOU 해양과학기술전문대학원² (sjs1008@kiost.ac.kr)

요약 : 현재까지 위성을 활용한 적조 탐지는 다양한 위성 자료와 알고리즘들에 의해 연구되어 왔다. 이에 의해 탐지된 적조 영역은 각각의 위성 자료와 알고리즘의 특징에 따라 각기 다른 특성을 나타내며 이에 따라 적조 감지 면적과 농도 추정에 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 다중위성자료로부터 탐지되는 적조 영역의 차이점과 원인을 인식하고 이들의 융합을 통한 최적의 적조 영역을 파악하는데에 목적이 있다. 이를 위하여 적조가 출현한 유사 시간대의 다중센서 영상들의 시각 판독을 수행하였다. 높은 공간해상도를 갖는 육상 센서 영상에서는 좁은 적조 띠가 선명하게 표현되는 반면 해수 유동, 선박 등의 영향에 의해 적조 영역 탐지에 한계가 있었다. 해상 센서는 낮은 공간해상도로 인해 좁은 패치들은 감지가 어려웠으나, 육상 센서보다 분광해상도와 signal-to-noise가 뛰어나 육상 센서 영상에서는 탐지가 어려운 낮은 농도의 적조 패치가 표현되었다. 다중위성 자료 간의 유사성을 알아보기 위해 각 영상에 Spectral Shape (SS) 알고리즘을 적용하여 영상간의 상관도를 분석하였다. 영상 간 상관도의 차이는 공간해상도, 분광해상도, signal-to-noise 등의 차이에 의한 것으로 볼 수 있었다. 한반도 주변 해역에서 발생한 적조를 대상으로 다중센서로부터 탐지되는 적조 픽셀을 각각 추출하고, 이에 대한 비교 분석을 수행하였다. 각 영상으로부터 추출된 적조 픽셀을 융합하여 분석된 결과는 다중센서 간의 시너지 효과를 보여주고 있었으며, 이를 통해 적조 잠재 영역의 더욱 효과적인 예측이 가능할 것으로 기대된다.

1. 서론

현재까지 위성을 활용한 적조 탐지 연구는 다양한 위성 자료와 알고리즘들에 의해 진행되어 왔다. 주로 해상 센서를 중심으로 연구되어 왔으며, 탐지 적조 종과 연구 해역 특징, 각 센서들의 파장대역이 고려되어 적조 탐지 알고리즘들이 개발되었다. 주요 탐지 적조 종으로는 *Karenia brevis*, *Cochlodinium polykirkoides*,

*Prorocentrum donghaiense*이며, 탐지에 사용된 센서는 주로 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor/OrbView-2(SeaWiFS), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS), Geostationary Ocean Color Imager(GOCI)였다(Carder et al., 1999; Tomlinson et al., 2009; Suh et al., 2004; Ahn and Shanmugam, 2006)(표 1).

적조 탐지 알고리즘은 일반적으로 센서로부터 산출되는 클로로필(Chlorophyll), 원격반사도(spectral remote sensing reflectance, R_{rs}), 정규화된 수출광량(normalized-water leaving radiance, nL_w)을 사용한 밴드비로 구성된다. 사용 파장대는 MODIS 기준으로 443, 490, 555 nm 이며, 적조 탐지 알고리즘을 다른 센서에 적용할 경우 이와 유사한 파장대역을 선택되어 적조 탐지가 수행되어 왔다(Son et al., 2012). 하지만 이 경우 각 센서가 갖는 특징이 다르기 때문에 동일한 적조 탐지 알고리즘을 적용할지라도 추출된 적조 영역은 각 센서 별로 상이하게 된다. 이는 센서의 공간해상도, 분광해상도, 신호 대 잡음비(signal-to-noise, SNR), 변조전달함수(modulation transfer function, MTF) 등의 다양한 특징에 따라 달라지며, 이에 의해 실제 각 센서로부터 추출되는 적조 감지 면적과 농도 추정 정도가 달라질 수 있다. 이러한 특징을 고려하여 각 센서들의 특징이 반영될 수 있는 다중 센서를 활용한 적조 영역 융합을 수행한다면 단일 센서를 사용하여 적조 영역을 탐지할 때와 비교하여 시너지 효과를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 다중 센서로부터 탐지되는 적조 영역의 차이점과 원인을 인식하고 이들의 융합을 통한 최적의 적조 영역을 파악하는데에 목적이 있다. 이를 위하여 각각의 다중 센서에서 탐지되는 적조 영역을 비교하여 장단점을 분석하였다. 또한 다중 센서에 적조 탐지 알고리즘을 적용하여 유사도를 검증한 후, 최종적으로 적조 영역의 융합을 수행하였다.

2. 연구지역 및 방법

연구지역인 한반도 해역 주변 및 중국 항저우 연안은 매년 적조 발생이 빈번히 발생하고 있으며, dinoflagellate인 *C.*

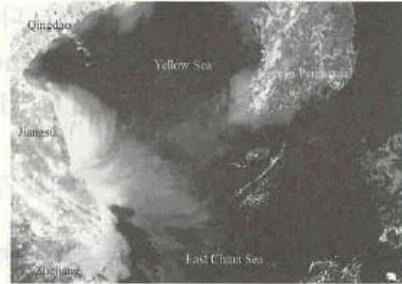


그림 1. 연구지역

*polykrikoides*와 *P. donghaiense*이 주요 발생 적조 종이다(그림 1). 이러한 유해 적조 종 이외에도 *Noctiluca scintillans*, *Prorocentrum dentatum* 등 무해 적조 종도 발생 빈도가 높으며, 이를 위한 탐지도 필요한 실정이다.

적조 분포 현황은 국립수산과학원 적조 속보 자료 및 현장 조사 결과를 이용하였다. 연구에 사용된 영상은 해상위성인 GOCI, VIIRS, MODIS와 육상위성인 Landsat이다(표 1). 각 영상의 원격반사도 값은 제공되는 산출물을 사용하였고, 제공되지 않는 경우에는 Chavez (1996)가 제안한 COST 모델을 사용하여 대기보정을 수행하였다.

다중 센서에서 탐지되는 적조 영역의 비교 분석을 위하여 원격반사도 RGB와 Enhanced-RGB(ERGB) 영상을 이용하였다. 다중 센서 영상 간 유사도 검증을 위하여 Unbiased Percent Difference (UPD), Mean Relative Difference (MRD),

표 1. 다중 센서 특성

센서	공간해상도	Signal-to-noise
MODIS	1000 m	516-1,087
VIIRS	750 m	360-723
GOCI	500 m	750-1,170
Landsat	30 m	201-367

Coefficient of determination (R^2)를 산출하였다. 적조 탐지 알고리즘에 따라 추출되는 적조 면적을 비교한 후, 최종적으로 각 영상에서 추출된 적조 영역을 활용하여 적조 융합 맵을 생성하였다.

3. 연구결과

3.1 다중 센서별 적조 탐지 비교

그림 2는 해색 센서인 GOCI, VIIRS, MODIS의 원격반사도 RGB, ERGB 영상이다. 모든 영상에서 뚜렷하게 적조 영역을 확인할 수 있었고, 해상도가 높아질수록 더 세밀한 표현이 가능했다. 그림 3은 GOCI와 육상 센서인 Landsat OLI의 비교를 보여준다. 높은 공간해상도를 갖는 육상 센서에서는 좁은 적조 띠가 선명하게 표현되는 반면 해수 유동, 선박 등의 영향에 의해 적조 영역 탐지에 한계가 있었다. 해색 센서는 낮은 공간해상도로 인해 좁은

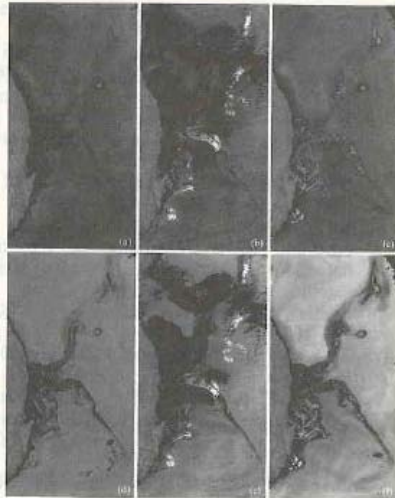


그림 2. (a) 2013년 8월 13일 GOCI R_{rs} RGB 영상 (b) VIIRS RGB (c) MODIS RGB (d) GOCI ERGB (e) VIIRS ERGB (f) MODIS ERGB

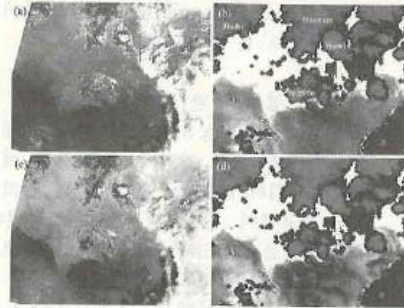


그림 3. (a) 2015년 9월 15일 Landsat OLI R_{rs} RGB (b) GOCI RGB (c) Landsat OLI ERGB (d) GOCI ERGB

패치들은 감지가 어려웠으나, 육상 센서보다 분광해상도와 signal-to-noise가 뛰어나 육상 센서 영상에서는 탐지가 어려운 낮은 농도의 적조 패치가 표현되었다.

3.2 다중 센서 간 유사도 검증

유사 시간대에 획득된 GOCI와 Landsat OLI 영상에 Spectral Shape 알고리즘을 적용한 후 영상 간 유사도를 산출하였다 (그림 4). 결정계수는 0.33, UPD는 109%, MRD는 79%로 상관성은 높지 않았다. 이는 육상센서와 해색센서 간의 공간해상도,

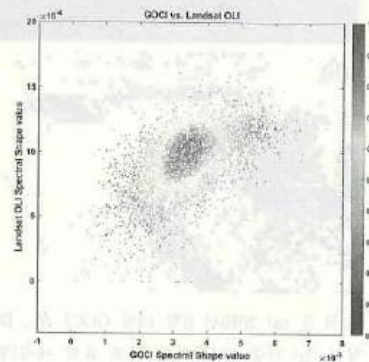


그림 4. GOCI와 Landsat 영상 유사도 검증

분광해상도, signal-to-noise 등의 차이에 의한 것으로 볼 수 있었다.

3.3 다중 센서 기반 적조 융합 맵

그림 5는 2015년 8월 14일 여수 외해역에서 발생한 적조 영역에 대한 융합 예시이다. GOCI와 Landsat 영상에 SS 알고리즘을 적용하여 적조 영역을 추출하였다. 빨강 픽셀은 GOCI와 Landsat 영상 모두에서 적조 영역으로 인식된 영역이고, 녹색은 Landsat 영상에서, 남색은 GOCI 영상에서만 추출된 영역이다. 원격반사도 영상에서 볼 수 있듯이 적조 농도가 높은 곳은 두 영상에서 모두 적조 영역으로 인식되었지만, 적조 패치가 좁은 경우는 Landsat 영상에서만 인식되었다. 그러나 적조 농도가 낮은 영역의 경우 signal-to-noise가 뛰어난 GOCI 영상에서만 인식되기도 했다.

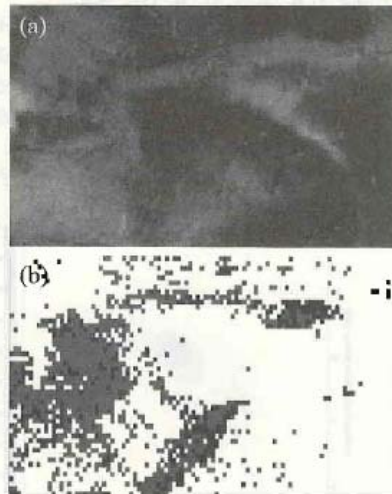


그림 5. (a) 2015년 8월 14일 GOCI R_{rs} RGB 영상 (b) 다중 센서 기반 적조 융합 예시(빨강: Landsat+GOCI, 녹색: Landsat, 남색: GOCI)

4. 결론

본 연구에서는 다중 센서로부터 탐지되는 적조 영역의 차이점과 원인을 인식하고 이들의 융합을 수행하였다. 센서 간의 공간해상도, 분광해상도, signal-to-noise 등으로 영상 간의 상관도는 차이가 발생했다. 각 영상으로부터 추출된 적조 픽셀을 융합하여 분석된 결과는 다중센서 간의 시너지 효과를 보여주고 있었으며, 추후 이를 고려한 연구를 통해 가장 효과적인 적조 영역 추출을 수행할 예정이다.

5. 참고문헌

- Ahn, Y.H. and P. Shanmugam, 2006. Detecting the red tide algal bloom from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 103: 419-437.
- Chavez, P. S., 1996. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 62(9): 1025-1035.
- Carder, K.L., F.R. Chen, Z.P. Lee, S.K. Hawes, and D. Kamykowski, 1999. Semianalytic Moderate Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll-a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures, *Journal of Geophysical Research*, 104: 5403-5421.
- Suh, Y.S., L.H. Jang, N.K. Lee, and J. Ishizaka, 2004. Feasibility of red tide detection around Korea waters using satellite remote sensing, *Journal of Fisher Science Technology*, 7(3): 148-162.
- Son, Y.B., Y.H. Kang, and J.H. Ryu, 2012. Monitoring Red Tide in South Sea of Korea (SSK) Using the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(5): 531-548.
- Tomlinson, M.C., T.T. Wynne, and R.P. Stumpf, 2009. An evaluation of remote sensing techniques for enhanced detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*, *Remote Sensing Environment*, 113: 589-609.

- 안성민 등, “Fast Repetition Rate fluorometry (FRRf)와 ^{14}C 동위원소법을 이용한 소청초 해양과학기지 주변 해역의 춘계 일차생산력 추정” 한국해양학회, 2018.05.24

2018년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
5월 24일(목)-25일(금) | 제주 국제컨벤션센터

Fast Repetition Rate fluorometry (FRRf)와 ^{14}C 동위원소법을 이용한 소청초 해양과학기지 주변 해역의 춘계 일차생산력 추정

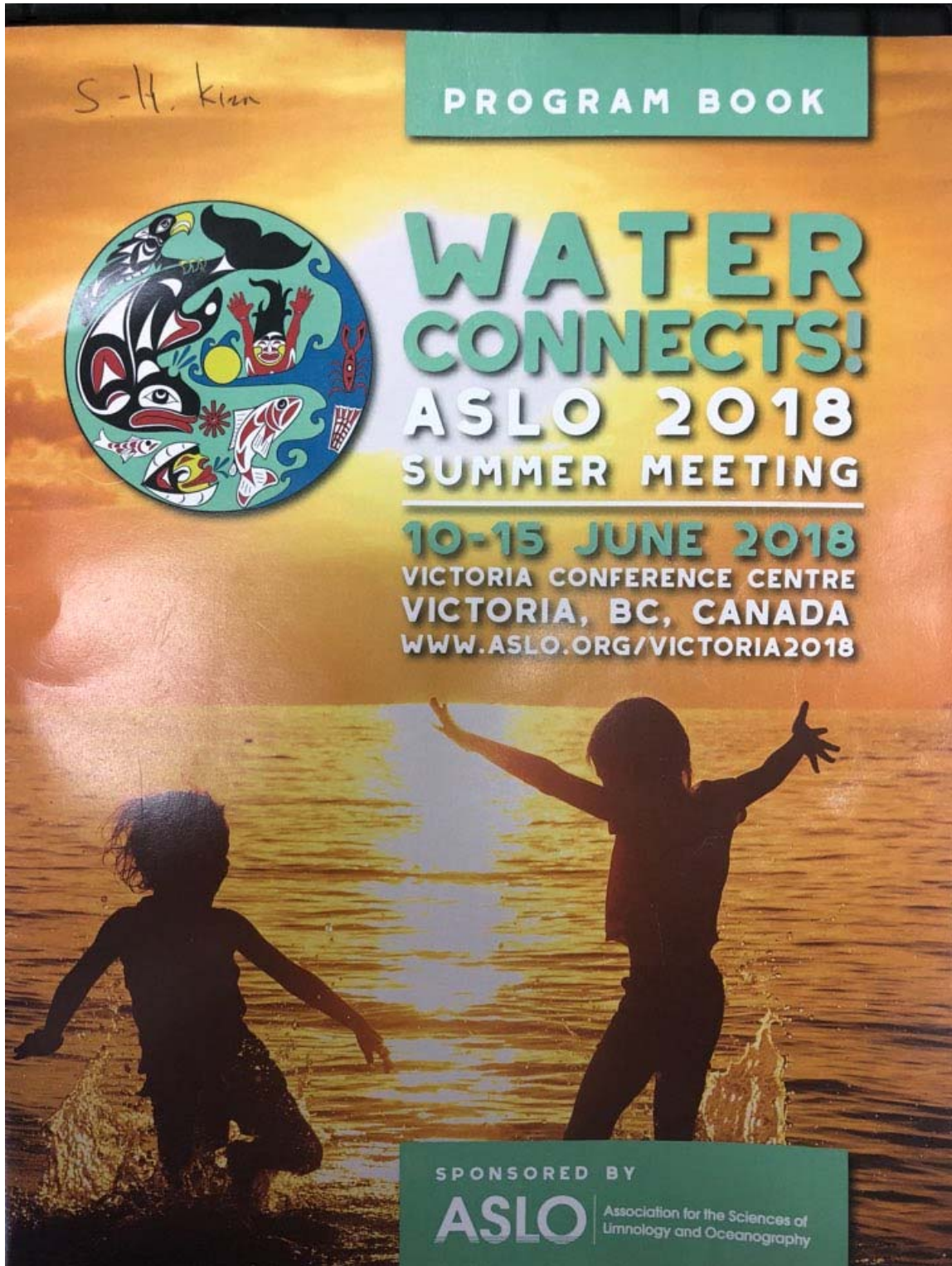
안성민¹, 최동한¹, 이호원¹, 양원석¹, 현명진¹, 정진용², 정종민², 노재훈¹

¹한국해양과학기술원 생태기반연구센터

²한국해양과학기술원 운용해양예보연구센터

해양 식물플랑크톤은 전 세계 일차생산의 약 50%를 담당하고 있다. 이들의 일차생산을 추정할 수 있는 방법은 여러 가지가 있으며, 그 중 엽록소 a의 형광추정을 기반으로 한 fast repetition rate fluorometry (FRRf)은 수생태계 내 일차생산성 평가에 활용할 수 있는 기법으로 잘 알려져 있다. FRRf는 탄소고정율을 직접적으로 측정하지 않으나, 대신 전자전달율 (electron transfer rate, ETR)과 궁극적으로 탄소고정율을 도출할 수 있는 광합성 양자수율 추정치를 제공한다. 우리는 서해 소청도 인근에 위치한 소청초 종합해양과학기지에서 FRRf와 ^{14}C 동위원소법을 이용하여 춘계 대충식기의 일차생산력을 추정하였다. 현장 조사는 2017년 4월 7일부터 2017년 5월 11일까지 격일로 진행되었으며, 조석을 고려하여 저조시 조사를 수행하였다. 해당 기간 동안 수온은 6.2°C에서 12.6°C까지 증가하였으며, 염분은 평균 32.1로 큰 변화를 보이지 않았다. 수층의 적분된 엽록소 a 농도는 45.9~135.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였다. FRRf 기법으로 추정된 일차생산력은 조사 기간 동안 7.4~93.2 $\text{mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ 이었으며, ^{14}C 동위원소법을 기반으로 추정된 일차생산력은 6.0~165.8 $\text{mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ 로 나타났다. 두 기법으로 추정된 일차생산력은 유의미한 상관관계를 보였으나 (slope=1.73, $r^2=0.62$, $P>0.001$), FRRf에 의해 추정된 값이 ^{14}C 를 이용하여 추정된 값에 비해 전반적으로 낮은 양상을 보였다. 이러한 차이는 FRRf 운용 시 표층에서 대기광의 역산란에 의한 간섭 때문으로 사료되며, 추후 해당 문제의 해결의 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

- 김성한 등, “Sediment oxygen demand and its controls in the affected by weir impoundments: A case study at major Korea river system”, Association for the Sciences of Limnology and Oceanography, 2018.06.14.



SSO20 LIVING IN A VARIABLE WORLD: STUDYING THE ROLE AND CONSEQUENCE OF VARIANCE, COVARIANCE, AND EXTREMES IN AQUATIC ECOSYSTEMS

- 61 Bricke, J.; Van Allen, B.; Jones, N.; Shurin, J.: INCREASED PRECIPITATION VARIABILITY CHALLENGES AND INTRODUCES LEGACY EFFECTS INTO THE POPULATION DYNAMICS OF TEMPORARY POOL INVERTEBRATES

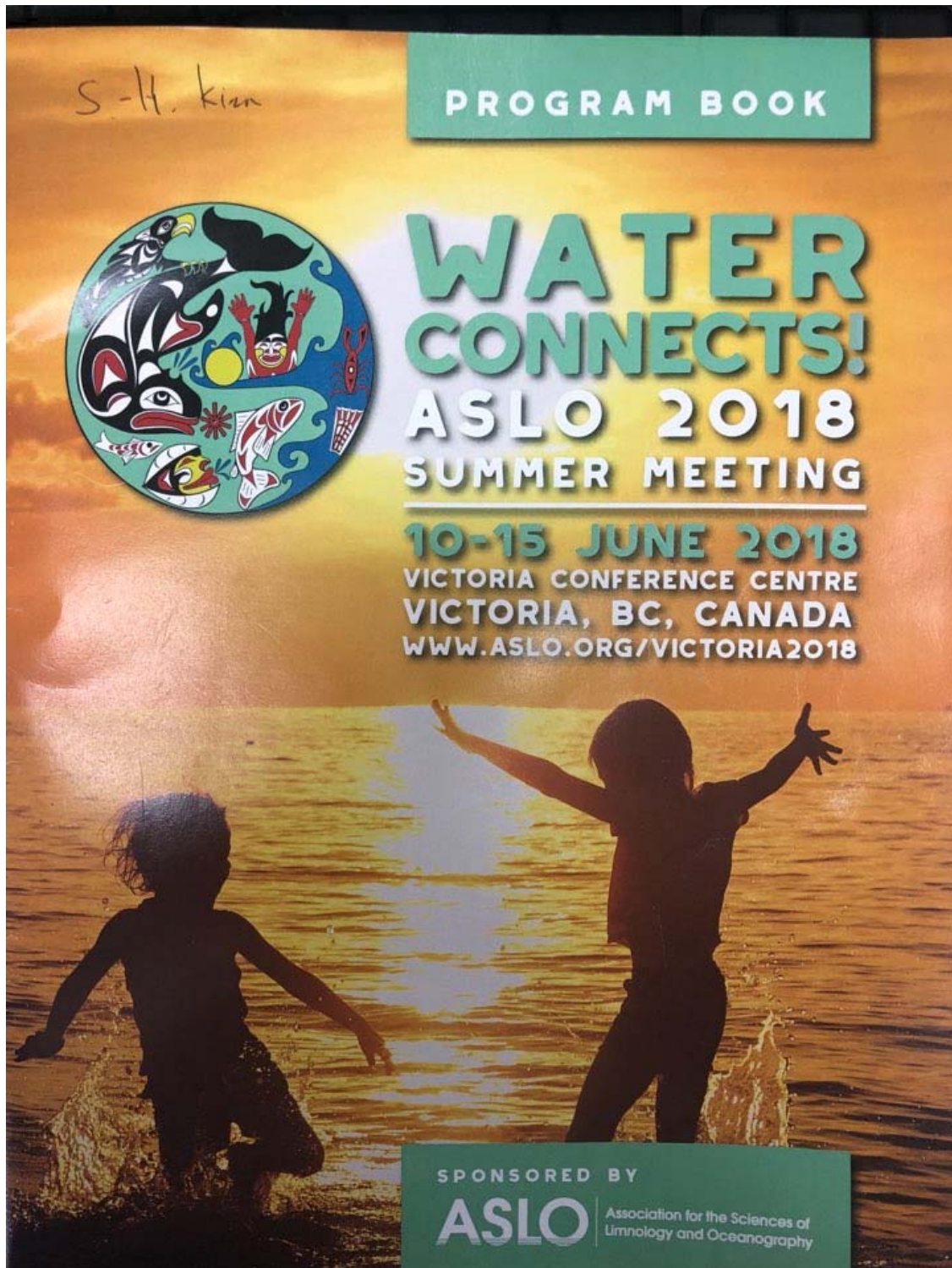
SSO21 THE DAMMING OF RIVERS AND LAKES AND ITS EFFECTS ON BIOGEOCHEMICAL CYCLES

- 62 Kim, D.; Kim, J.; Kim, M.; Ra, K.; Shin, K.: ASSESSING ENVIRONMENTAL CHANGES IN LAKE SHIHWA (SOUTH KOREA) BASED ON DISTRIBUTIONS AND STABLE CARBON ISOTOPIC COMPOSITIONS OF N-ALKANES
- 63 Kim, J.; Kim, D.; Ryu, J.; Ock, G.; Shin, K.: SEASONAL VARIATIONS OF ORGANIC CARBON FLUXES AND SOURCES IN GEUM AND SUMJIN RIVERS IN SOUTH KOREA
- 64 Kim, S.; Hyun, J.; Baek, J.; Baek, H.; Lee, H.; Kim, S.; Choi, S.; Lee, J.: SEDIMENT OXYGEN DEMAND AND ITS CONTROLS IN THE AFFECTED BY WEIR IMPOUNDMENTS: A CASE STUDY AT MAJOR KOREA RIVER SYSTEM

SSO22 MARINE MICROBIAL BIOCHEMISTRY, PRODUCTIVITY AND CLIMATE CHANGE

- 65 Jackson, C.; Labonté, J.: A MULTI-APPROACH TO LINK ENVIRONMENTAL VIRUSES TO THEIR ENVIRONMENTAL HOSTS
- 66 Cheung, S.; Suzuki, K.; Nakaoka, S.; Liu, H.: BASIN-SCALE AND SEASONAL DYNAMICS OF DIAZOTROPHIC POPULATIONS IN THE NORTH PACIFIC OCEAN
- 67 Fernandez-Carrera, A.; Patey, M.; Louropoulou, E.; Achterberg, E.; Montoya, J.; Dengler, M.; Brandt, P.; Subramaniam, A.: PRIMARY PRODUCTION IN TWO CONTRASTED TROPICAL

- 이재성 등, “Impact of Aquaculture farming on benthic respiration and nutrient fluxes in semi-closed coastal water of Korea”, Association for the Sciences of Limnology and Oceanography, 2018.06.15.



EVALUATED BY CARBON ISOTOPE ANALYSES ON
SEDIMENT DENSITY FRACTIONS

- 117 Sakamaki, T.; Fujibayashi, M.: TESTING CONNECTIONS
OF AN INNER-BAY FOOD WEB SYSTEM WITH
RIVERINE MATERIAL INPUTS

**SSO59 BIODIVERSITY - ECOSYSTEM FUNCTIONING
UNDER STOCHASTIC ENVIRONMENTAL FORCING**

- 118 Katz, A.; Marzetz, V.; Wacker, A.: LED LIGHTING SYSTEM
FOR RAPID TESTING OF ALGAL GROWTH

**SSO60 SUSTAINABLE AQUACULTURE: ISSUES,
TOOLS, AND TRENDS**

- 119 Lee, J.; Kim, H.; Sim, B.; Kim, S.; Park, J.; Choi, S.: IMPACT
OF AQUACULTURE FARMING ON BENTHIC
RESPIRATION AND NUTRIENT FLUXES IN SEMI-
CLOSED COASTAL WATER OF KOREA

- 120 Gilmore Solomon, L.; Chevarie, P.; Nadeau, M.; Genard,
B.; Tremblay, R.: IMPACT OF GLOBAL WARMING
ON THE MAGDALEN ISLANDS (QC, CANADA)
AQUACULTURE PRODUCTION: THE BLUE MUSSEL
(MYTILUS EDULIS) AND GIANT SCALLOP'S
(PLACOPECTEN MAGELLANICUS) CASES.

- 121 Sim, B.; Kim, H.; Hong, S.; Yoon, S.; Kim, J.; Jung, R.;
Kang, S.; Kim, S.; Kim, J.; Jung, W.; Kim, C.: ORGANIC
ENRICHMENT ON THE SEDIMENT UNDERNEATH
OF ABALONE CAGE FARMS IN WANDO OF KOREA

**SSO65 RELEVANCE OF HOST-MICROBE
INTERACTIONS IN AQUATIC ECOSYSTEM
FUNCTIONING**

- 129 Zilius, M.; Cardini, U.; Bonaglia, S.; Samuiloviene, A.; Zaiko,
A.; Petkuvienė, J.; Vybernaite-Lubiene, I.; Benelli, S.; Politi, T.;
Saulys, A.; Bartoli, M.: INVERTEBRATE-BACTERIAL
ASSOCIATIONS AS HOTSPOTS OF BENTHIC
NITROGEN CYCLING IN ESTUARINE ECOSYSTEMS
(INBALANCE)

- 안성민 등, “Temporal variation of benthic diatom assemblages in tidal flat of Geunso Bay, Korea”, 한국해양학회, 2018.10.25.

[BO-04]

Temporal variation of benthic diatom assemblages in tidal flat of Geunso Bay, Korea

안성민, 최동한, 이호원, 노재훈
한국해양과학기술원 해양생태연구센터

Benthic diatoms are ubiquitous in tidal flats and play major roles in maintaining coastal ecosystems. We investigated the temporal variation of benthic diatom composition by MiSeq sequencing of *rbcL* gene in a total of 80 samples collected from May 2009 to May 2015 at tidal flat in Geunso Bay, Korea. In result of meta-barcoding, *Navicula* was the most abundant genus, followed by *Nitzschia*, *Amphora*, *Sellaphora*, and *Entomoneis*. The concentration of chlorophyll a in the study area was high in winter and spring, and the relative frequency of *Navicula* and *Nitzschia* increased mainly during this period. On the other hand, the relative frequency of *Amphora* and *Sellaphora* was increased in summer with low chlorophyll a concentration. Major species in this study area were *Navicula salinarum*, *Nitzschia bergii*, *Amphora* sp., *Halamphora montana*. Of the 44 OTUs with a relative frequency of 5% or more, only 18 showed more than 98% similarity to the reference database. Based on the results of CCA analysis, it was confirmed that major factors affecting the change of community structure of benthic diatoms in tidal flat were the grain size and sand ratio. In addition, we observed changes in community structure of benthic diatoms due to artificial changes in sediment particle size. The results from the study will establish a basis of benthic diatom dynamics and give us a more advanced way to monitor benthic diatoms that are essential to maintain the function of the tidal flat. However, further researches are needed to increase the quantity and quality of the database and thus improve our understanding of the biodiversity of diatoms.

- 김은영 등, “서해 근소만 퇴적물 내 저서미세조류의 광합성 색소조성과 광생리적 특성의 시간적 변동”, 한국해양학회, 2018.10.25.

[BP-41]

서해 근소만 퇴적물 내 저서미세조류의 광합성 색소조성과 광생리적 특성의 시간적 변동

김은영¹, 안성민², 노재훈^{1,2}

¹한국해양대 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

²한국해양과학기술원 해양생태연구센터

저서미세조류(microphytobenthos)는 갯벌생태계의 중요한 일차생산자이다. 간조 시 퇴적물 표면이 대기 중에 노출되면서 저서미세조류는 극심한 환경변화를 겪게 되는데, 이러한 변화에 적응하기 위해 저서미세조류는 행동적·생리적 적응기작을 이용한다고 알려져 있다.

본 연구에서는 태안반도 근소만 갯벌에서 2016년 10월부터 2017년 10월까지 간조 시 퇴적물 코어 샘플을 채취하고 상부 1 cm 절단 후, HPLC를 이용하여 색소분석을 하였다. 퇴적물 내 저서미세조류의 생체량의 지표로 사용되는 Chl *a* 농도는 연중 40.4-218.9 mg m⁻²의 범위로 동계에 생물량이 가장 높았고, 하계에 가장 낮게 나타났다. Chl *a*에 대한 pheophorbide *a* 상대비를 이용해 상위포식자에 의한 섭식강도를 추정한 결과는 동계에 가장 낮았다. 지시색소로 추정된 저서미세조류 군집구성 분석 결과, fucoxanthin을 지시색소로 가지는 저서규조류(benthic diatom)가 연중 가장 우점 하였다. 동계 변성시 zeaxanthin을 지시색소로 가지는 녹조류, alloxanthin을 지시색소로 가지는 온편모조류도 함께 출현하는 것으로 보인다. 미세조류의 광적응의 지표로 사용되는 diadinoxanthin과 diatoxanthin로 얻은 상대적인 비(DT/(DD+DT))는 10월에서 3월로 갈수록 감소하며, 5월에는 증가하는 것으로 볼 때, 5월에는 증가된 PAR값에 따라 저서미세조류가 광적응 한 것으로 사료된다.

퇴적물 코어를 상부부터 14 mm까지 2 mm 단위로 잘라 10-AU 형광분석기로 분석한 결과, 퇴적물 내 Chl *a* 수직분포는 퇴적층 표면 2 mm 이내에서 집중적으로 나타났다. 2017년 5-7월은 퇴적물 표면부터 12 mm 층까지 Chl *a* 농도는 깊이에 따른 변화가 없었다. 한편, 산소미세전극(oxygen microoptode)을 이용해 얻은 산소농도는 퇴적물 내 상위 1 mm에서 가장 집중적인 분포를 보였다. 무광층에서 나타난 Chl *a*는 저서미세조류의 생활사 중 광합성을 하지 않고, 낮은 신진대사를 유지하는 단계에 해당되는 세포 혹은 상위포식자 위 속에서 분해되지 않은 색소에 의해서 축적된 것으로 추정된다. 또한 저서미세조류의 강 수준에서의 내생이동리듬(endogenous migratory rhythms)의 차이 혹은 저서규조류의 성장형(growth form)에 따른 수직적 이동 능력 차이에 의한 복합적인 원인의 결과로 추측된다.

낮 동안 간조 시 Diving PAM을 이용하여 방형구 내 형광 파라미터 F_v' , F_m' , $\Delta F/F_m'$, rETR)를 측정 한 결과, F_v' 분포는 시간이 시남에 바다 방형구 내 공간적인 차이가 크게 나타났다. $\Delta F/F_m'$ 과 rETR 값의 하루 중 시간적 변화는 상대적으로 적었다. 5월에 광량이 가장 높았으나 $\Delta F/F_m'$ 과 rETR 값의 뚜렷한 감소가 나타나지 않아 광저해현상이 없었던 것으로 생각된다. 따라서 근소만에 서식하는 MPB 군집은 여러 가지 적응기작을 이용해 주어진 광조건에 잘 적응하고 있는 것으로 추정된다. 또한 저서미세조류의 환경변화에 따른 적응기작은 다양하므로 여러 가지 환경조건에서 생리적인 특성 파악을 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2018년 한국해양학회 추계학술발표대회
10월 25일(목)~26일(금)

- 양원석 등, “용진 소청초 해양과학기지 수역 춘계 환경변화와 식물플랑크톤 생태계의 반응 특성”, 한국해양학회, 2018.10.25.

[SJP-15]

용진 소청초 해양과학기지 수역 춘계 환경변화와 식물플랑크톤 생태계의 반응 특성

양원석^{1,2}, 이호원¹, 안성민¹, 현병진^{1,3}, 최동한^{1,2,3}, 노재훈^{1,2,3}¹한국해양과학기술원 해양생태연구센터²한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과³과학기술연합대학원대학교

해양의 식물플랑크톤은 일차생산, 먹이망 및 생지화학적 순환에 중요한 역할을 담당하며, 발생 시기, 생체량, 군집구조 및 다양성 등을 통하여 환경과 기후변화에 대한 생태계 반응 지표로서 생태학적으로 중요한 위치를 지닌다. 또한 해양과학기지에서는 해황, 날씨 등 여러 요인들에 의해 제약받는 승선연구와 달리 고정점에서 안정적인 증장기 모니터링이 가능하며, 이를 통해 얻은 자료들은 향후 환경 및 기후변화 관련 연구에 활용할 수 있다. 이 중 우리나라 서해역에 위치한 용진 소청초 해양과학기지는 중국에서 발생한 황사의 영향을 우리나라에서 가장 먼저 받는 해역으로 이에 따른 생태계 변화를 파악하기에 유리한 이점을 가진다.

본 연구는 용진 소청초 해양과학기지에서 2017년 4월 5일부터 5월 24일 까지 52일간 연속적인 채취조사를 통해, 춘계 식물플랑크톤 대증식시기의 특성을 관찰하고자 하였다. 해수시료는 매일 저조마다 채수하였으며, 해수의 물리적 변동은 확인하기 위하여 CTD를 저조 및 고조에 일 2회 수행하였다. 이와 함께 관측기간 동안 표층에 형광센서가 부착된 표류부이를 계류하여 연속적으로 식물플랑크톤 형광을 확인하였다.

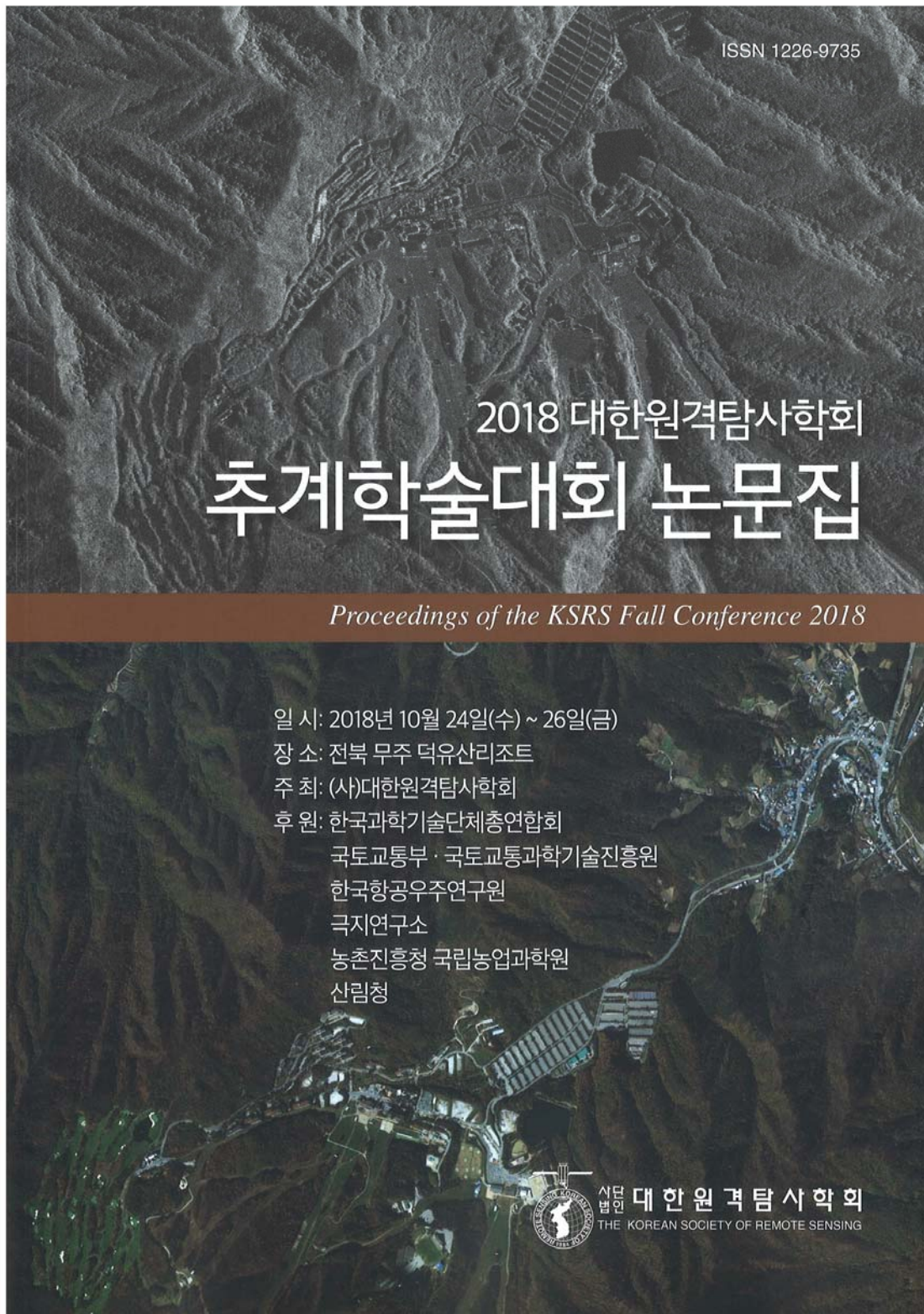
표층 수온은 관측기간 약 6.09°C에서 약 16.46°C로 10.37°C 상승하였다. 또한 형광값을 통해 4월 20일 이후 SCM층의 형성과 4월 24일을 시점으로 식물플랑크톤 대증식이 발생하는 것을 확인하였다. 주 영양염류인 질산염, 규산염 및 인산염은 관측 초기부터 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 엽록소 *a* 농도 측정을 통해 조사기간 중 3회의 식물플랑크톤 생체량 증가 현상을 확인하였으며, 이 중 첫 번째 증가는 환경 변화에 의한 계절적 개체수 증가이며, 2,3차 변성은 백령도에서 고농도 황사 발생이 관측되고 일정 기간 후에 확인되었다. 이는 춘계 엽록소 *a* 증가에 황사가 영향을 미칠 수 있음을 시사하며 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 춘계 대증식 기간 동안 엽록소 *a* 농도에 기여하는 식물플랑크톤의 크기별 비율을 확인해 본 결과, 전 기간에는 평균적으로 Nano-plankton (20-3 μm) 이 48.4%로 우점하였으나, 대증식시기에는 Micro-plankton (>20 μm) 이 48.5%로 우점하였다.

각각의 분류군을 대표하는 주요색소의 농도를 HPLC를 이용하여 측정한 결과, 1차 변성기에 fucoxanthin, 19'-hexanloxyfucoxanthin, chlorophyll *b*의 증가를 통해 규조류, 작편모조류 및 녹조류의 변성을 확인하였으며, 2,3차 변성에서는 19'-hexanloxyfucoxanthin, alloxanthin, zeaxanthin 및 chlorophyll *b*를 통해 작편모조류, 은편모조류 및 녹조류의 생체량의 증가를 확인하였다. 대증식 시기에 따른 주요 군집의 개체수를 Flow cytometry를 사용하여 분석한 결과, 1차와 2,3차 생물량 증가 시 각각 Nano-flagellates, Pico eukaryotes 및 Cryptomonads의 개체수가 증가하였다. ¹⁴C 동위원소법을 이용하여 측정된 식물플랑크톤의 일차생산력은 관측 전 기간 동안 973.9±757.1 mg C m⁻²d⁻¹ 이었으며, 대변성 기간 전에 395.7±219.2 mg C m⁻²d⁻¹에서 2,042.1±707.6 mg C m⁻²d⁻¹로 약 5.2배 증가하였다. 이러한 일차생산력의 증가는 엽록소 *a*, 일사량, 소광계수 및 동화계수 등이 복합적 요인으로 작용한 것으로 보인다.

이처럼 용진 소청초 해양과학기지 해역의 식물플랑크톤 대증식은 환경적 요인에 영향에 따른 변동을 보여준다. 또한 장기적인 기후변화와 더불어 단기적인 이벤트로 황사의 영향은 매년 발생하기 때문에 장기적인 모니터링이 필수적이다.

2018년 한국해양학회 추계학술발표대회
10월 25일(목)~26일(금)

- 신지선 등, “Synergistic effect of multi-sensor data on the detection of *Cochlodinium polykrikoides*”, 대한원격탐사 추계학술대회, 2018.10.25.



10월 25일 (목)

| 알츠 홀 |

■ 환경 1		좌장 : 엄 진 아 교수(강원대학교)
09:00 ~ 09:20	선포토메터 개발 및 미세먼지 크기분포 역산 기술 연구	99
	김덕현 한밭대학교 기초과학부	
09:20 ~ 09:40	카메라를 이용한 미세먼지의 소산 및 AOD 추출에 관한 제안 및 검증	100
	김덕현 한밭대학교 기초과학부	
09:40 ~ 10:00	토양 수분 능동 및 수동 마이크로웨이브 위성 자료에 대한 비국부적 평가	101
	이주형 고려대학교 건축 토목 환경공학과	
10:00 ~ 10:20	GeoEye-1 이미지 매칭 기반 점군데이터를 이용한 접경지역 임분구조 해석	103
	박진우, 김정민 국립산림과학원 국제산림연구과	
■ 해양		좌장 : 유 주 형 박사(한국해양과학기술원)
10:50 ~ 11:10	GOCI-II 파장을 이용한 해빙탐지 알고리즘	104
	반현주 ¹ , 홍성욱 ² ¹ 세종대학교 환경에너지융합학과, ² 세종대학교 환경에너지공간융합학과	
11:10 ~ 11:30	연안해역 적조탐지를 위한 고해상도 위성영상의 원격탐사반사도 및 레일리산란반사도 비교 분석	105
	김영준 ¹ , 임정호 ¹ , 김원국 ² ¹ 울산과학기술원 도시환경공학과, ² 한국해양과학기술원 해양위성센터	
11:30 ~ 11:50	GOCI를 이용한 적조농도 정량화 알고리즘 개발 및 검증	106
	김원국 ¹ , 노재훈 ² , 안재현 ¹ , 손승현 ³ , 박영계 ¹ ¹ 한국해양과학기술원 해양위성센터, ² 한국해양과학기술원 해양생태연구센터, ³ CIIRA, Colorado State University	
11:50 ~ 12:10	Cochlodinium polykrikoides 적조 탐지를 위한 다중위성자료의 Synergy 효과	107
	신지선 ^{1,2} , 김근용 ² , 유주형 ^{1,2} ¹ 한국해양과학기술원 해양위성센터, ² KIOST-KMOU 해양과학기술전문대학원	
■ 환경 2		좌장 : 이 원 진 박사(기상청)
13:30 ~ 13:50	합성곱신경망(CNNs)을 이용한 산림 탄소 축적량 추정	108
	차성은, 조현우, 김문일, 이우균 고려대학교 환경생태공학과	
13:50 ~ 14:10	위성영상을 활용한 화산재 퇴적 지역 탐지 방안 연구	109
	신종신, 이원진, 박순천, 이택기 기상청 지진화산국 지진화산연구과	
14:10 ~ 14:30	다중플랫폼 원격탐사를 활용한 곰소만 갯벌 지역의 지형 변화 분석	110
	황득계 ^{1,2} , 김법준 ² , 유주형 ^{1,2} ¹ 한국해양과학기술원 해양위성센터, ² 과학기술연합대학원대학교 해양융합학과	
14:30 ~ 14:50	Frequency Ratio (FR), Logistic Regression (LR), Naive Bayes(NB) 방법을 이용한 사천면의 산사태 민감도 작성을 위한 공간 예측	111
	Prima Riza Kadavil ¹ , Saro Lee ^{2,3} ¹ Division of Science Education, Kangwon National University, ² Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM), ³ Department of Geophysical Exploration, Korea University of Science and Technology	

Cochlodinium polykrikoides 적조 탐지를 위한
다중위성자료의 Synergy 효과
Synergistic effect of multi-sensor data
on the detection of *Cochlodinium polykrikoides*

신지선^{1, 2}, 김근용¹, 유주형^{1, 2*}

Jisun Shin^{1, 2}, Keunyong Kim¹, and Joo-Hyung Ryu^{1, 2*}

¹ 한국해양과학기술원 해양위성센터

² KIOST-KMOU 해양과학기술전문대학원 (sjs1008@kiost.ac.kr)

한반도 남해에서 주로 발생하여 경제적 피해와 해양 및 연안 생태계에 심각한 악영향을 끼치는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 외해뿐만 아니라 연안에서도 빈번하게 발생한다. 현재까지 위성기반 적조탐지는 주로 해색센서를 중심으로 알고리즘이 개발되어 왔다. 해색센서 자료는 낮은 공간해상도로 인해 연안이 마스킹 되기 때문에 연안에서 발생하는 적조 탐지에 있어 한계를 갖는다. 본 연구에서는 한반도 남해 연안의 *C. polykrikoides* 적조를 대상으로 해색센서와 육상센서를 활용한 적조 탐지의 synergy 효과를 알아보려고 한다. 2018년 여수 해역에서 발생한 *C. polykrikoides* 적조 탐지를 위해 현장조사 자료와 해색센서인 GOCI와 Sentinel-3 OLCI, 육상센서인 Landsat OLI/ETM+와 Sentinel-2 자료를 사용하였다. 현장조사 결과로 얻어진 클로로필 자료와 적조 셀농도는 낮은 상관관계($R^2=0.21$)를 보인 반면, 현장 적조 스펙트럼에 Spectral Shape(SS) 적조 알고리즘을 적용한 값과 적조 셀농도는 비교적 높은 상관관계($R^2=0.58$)가 산출되었다. 또한 각 센서 자료에서 나타나는 적조 스펙트럼 형태를 비교한 결과, 현장 적조 스펙트럼과 유사하게 녹색파장 영역에서 보다 청색파장 영역에서 상대적으로 낮은 원격반사도를 보였다. 이러한 결과를 기반으로 각 센서 자료에 SS 적조 알고리즘을 적용하여 적조 영역을 추출하고 공간 융합을 수행하였다. 해색센서 자료는 연안 해역의 적조 탐지에는 한계점이 있었지만 외해역의 광역적인 적조탐지에 유용하였다. 또한 높은 분광해상도와 signal-to-noise ratio (SNR)로 인해 육상센서에서 탐지되지 않은 적조 영역까지도 추출이 가능했다. 육상센서 자료의 경우 연안 해역의 적조 패치 탐지에 유용하였지만 고해상도 자료가 갖는 영상잡음, 낮은 분광해상도, SNR로 인해 적조가 아닌 영역까지 적조로 추출되는 한계점이 있었다. 따라서 각 센서들의 특징을 고려한 적조 탐지를 수행한다면 연안과 외해역에서 발생하는 *C. polykrikoides* 적조 탐지에 있어 synergy 효과를 기대할 수 있을 것이다.

사사: 해양수산부 연구개발사업인 “국가해양영토 광역 감시망 구축 기반연구” 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

- 김성대 등, “An integrated database for marine environment monitoring and management system at the Tongyoung bay in Korea”, IMDIS 2018, 2018.11.05.



Session 1- Data services and tools in ocean science Posters

An integrated database for marine environment monitoring and management system at the Tongyoung bay in Korea

Sung-Dae Kim, Korea Institute of Ocean Science and Technology (Republic of Korea), sdkim@kioos.ac.kr
 Sang-Hwan Choi, Korea Institute of Ocean Science and Technology (Republic of Korea), chsh@kioos.ac.kr
 Hyuk-Min Park, Korea Institute of Ocean Science and Technology (Republic of Korea), hmpark@kioos.ac.kr

A marine environmental monitoring and management system to support efficient operation of the aquafarm at Tongyoung bay in Korea, was started to be developed by the Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) in 2017. The system consists of an intensive observation system, a data management system, a hybrid environment prediction system, and a facility management system based on artificial intelligence technology. During the 1st phase of the project (2017-2018), we are setting up a database system to manage marine data of the intensive observation and to archive all available environmental data of Tongyoung bay area. Several physical parameters and chemical parameters measured at the surface buoy and automatic vertical profiler are transmitted to the server through wireless network, processed and stored into DB system, and provided to the researchers via intranet in real-time mode. Observed data of biological parameters and biogeochemical parameters are being submitted to the database system by the related researchers in delayed mode. We also collected all oceanographic data produced by several organizations and satellites (Fig. 1). We manipulated all collected data in accordance with the metadata standard and quality control procedures which had been prepared for research managed data of KIOST. An internet web site was established to support data retrieval and share collected data with researchers. To develop marine environment prediction system, a data driven model and a numerical dynamic model are under development. We are trying to build a data driven model based on LSTM (Long Short Term Memory) network of RNN (Recurrent Neural Network) to simulate biological parameters based on physical parameters and chemical parameters. Tensorflow library was used to set up machine learning programs.

An ensemble model will be set up to combine the results of the data driven model and the numerical model and provide prediction information to the aquafarm operation system.

Fig. 1 - Observation stations near Tongyoung bay

66

International Conference on Marine Data and Information Systems 5-7 November, 2018 - Barcelona (Spain)

TABLE OF CONTENTS

M. FIDALTI AND D. SOHAP SeaDataNet: What's up in the cloud?	15
Session 1 - Data services and tools in ocean science	
Oral presentations	
R. KOHN AND A. MACAIGÉ Bridging the gap between data and sensor information	21
J.G. FERNÁNDEZ, P. BOUTAN, C. MURGO, I. RUIZ, M. CHACCO, M.A. RUIZ, X. NESTOR, S. GOMARA, M. GOMARA AND J. TRINIDAD New SOCIB Data Catalog REST API	23
S. MANDEL, R. PROCTOR, P. BURR AND K. RICE Australian Ocean Data Network utilizes Amazon Web Service Batch processing for gridded data	25
M. WIKHROVICH, M. PIOTROWSKI, L. SEYDANAK, U. POCZYK, M. OSTROVSKA AND M. WLODK eCUDO.pl - towards the Polish Oceanographic Data Committee	27
A. LAZAREVA AND S. BELIN The integration platform of Roshydromet for data exchange within Russian and international projects	29
G. WINKLEY, D. MELI, T. PIERRE, C. BLANEY, G. ROBERTS AND C. JACO Data driven Blue Growth - meeting ocean renewable energy sector needs with iMarDis	31
S. MERICH AND R. SCHNEIDER webODV - a tool for the online analysis of marine data	34
G. MONCOURT AND A. KOSKINEN The BODC Parameter Usage Vocabulary (PUV) semantic model exposed	36
C. WOOD, A. KOKKINAKI, A. LEADRETTER AND R. THOMAS Exposing the SeaDataNet metadata catalogues via SPARQL endpoints	37
M. BISHMAN, P. THIRISH, S.H. VATHISAYAK, S. MERICH, G. LERLAN, G. SANTARELLI AND A. BARTH The SeaDataCloud Virtual Research Environment: researching the sea from the cloud	38
P. ODET, S. CLAU, F. HERNANDEZ, B. VANHOONEL, F. WILKINSON, J.-B. CALLEBERT, P. DEVEY, A. CHEVREUIL, H. LI, A. NOVILLON, A. PEREIRA, D. SOHAP, H. VALLIS AND T. SOMMET EMODnet Central Portal data services	40
A. NOVILLON, P. D'ANGELO, P. GORRINGE, D. SOHAP, P. TERRE AND S. POLVIZON EMODnet Physics: a horizontal platform serving blue growth	42
D. SOHAP, S. BONA AND F. STROBER EMODnet Data Ingestion: "Wake up your data"	44
C. BARRERANO AND M. MATABOS The Deep Sea Spy system: building a marine images annotation database from participative science	46
R. PROCTOR, T. LANGRISH, A. FREEMAN, S. MANDEL, X. HENNINGER AND B. DAVEY Cloud-based national on-line services to annotate and analyse underwater imagery	49

3

Table of contents

B. SCHNEIDER, N. JACOBSEN STOUT, L. KUANG, L. LUNDSTEN, K. SCHNEIDER AND S. VON THUN MBARI media management - tools for turning video into data	50
Posters	
G. CHEN, P. SORIANO AND P. PILLAYAR Enhancing ARGO floats data re-usability	53
C. FERRI, G. DIARIELLO, P. BOBBERY AND F. HOLON MEDTRIX: a mapping platform for monitoring data in the Mediterranean Sea	56
F. MARQUEL AND M. FIDALTI SEANDE, a publisher of scientific data in the field of marine sciences	58
C. BISHOP Sharing survey data from the offshore renewables sector	60
E. ZHUK, G. V. KUTYPAK, G. GALANI, G. ZHUKOVA, K. SHENKOVICH, N. KAMRANI AND D. SLOVINSKY On-line visualization of the calving indices for the Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre	61
S.D. JONES AND J. HENNINGSEN Quinc: An online tool for processing and quality control of surface ocean CO2 measurements	64
S.-D. KIM, S.-H. CHOI AND H.-M. PARK An integrated database for marine environment monitoring and management system at the Tongyoung bay in Korea	66
S. FIBRELL, U. KLEBERN, J. KORNELI, R. LEHLEITZ, L. SCHNEIDER AND S. TAMM Automatic assessment of metadata quality in ISO 15917	67
E. KALASHOV, V. VOLKOV AND D. DENICHEV Compact automated system for sea ice monitoring based on SAR data	69
L. BALDERNOLI, U. KLEBERN, M. LANGRISH AND D. SAUER The coastMap Approach for visualization and dissemination of marine geodata	71
T. KATSUMI, T. FUJIMARU AND H. FUJIKAWA Real-time Web-GIS as part of Japan's MDA	74
A. GONZALEZ Application of elements of Big Data technology for storage, access and retrieval of metadata and Roshydromet data	76
P. DEBACCO, S. MANDEL, A. BUSATO, X. HOENNER AND F.-O. NISPHO Tools to handle environmental concerns in marine seismic data exploration	77
S. MERICH AND P. TALAZAN On-board cloud system	80
M. OSTROVSKA AND M. DAVENET SatBytyk - the sense of the Baltic environment	81
V. GIVAS, M.A. MORENO, J. SORREDA, A. TORRALBA, A. BARRERANO, A. SANCHEZ-ANGILA On the design of e-services for DANIBUS RI	84

4

- 최상화 등, “Temporal variations of surface pCO₂ and sea-air CO₂ fluxes during a year in the southern coastal water of Korea”, American Geophysics Union, 2018.12.13.

2018. 11. 2.

AGU Fall Meeting 2018



OS41C-2038: Temporal variations of surface pCO₂ and sea-air CO₂ fluxes during a year in the southern coastal water of Korea

Thursday, 13 December 2018

08:00 - 12:20

📍 Convention Ctr - Hall A-C (Poster Hall)

Ocean is the largest mobile carbon inventory in the global carbon cycle and also absorbs about one third of anthropogenic carbon emitted to the atmosphere by human activities. Although continental margins and coastal areas cover only about 7% of the world's ocean surface area, they play a major role in oceanic carbon cycling. The complex and dynamic nature of these areas produce highly variable sea-air CO₂ fluxes. Therefore, large ranges of error are involved in estimating the role of coastal carbon uptake in the global carbon cycle due to the complexity of coastal ecosystems and hydrodynamics. This study aims to understand the temporal variations of surface pCO₂, its controlling processes and sea-air CO₂ fluxes in the coastal area through time-series surface pCO₂ data set from a pCO₂ monitoring buoy during a year in the southern coastal water of Korea. Temperature and salinity of surface seawater, current profiles of water column and meteorological parameters have been measured in every minute by moored CTD (SBE 37) and ADCP (Workhorse Sentinel) under the buoy and meteorological sensors (RM-Young 86106, Almar 200WX, and Vaisala PTB210), respectively. pCO₂ in surface seawater and overlying marine air have been measured by Battelle Seaology pCO₂ Monitoring System in every 3 hours from July 2017. The seasonal variations of surface pCO₂ were not significantly large, despite the large differences in SST. The damped seasonal variability of surface pCO₂ resulted from several processes, such as vertical and lateral mixing, biological activity, and sea-air CO₂ exchange.

Authors

Sang-Hwa Choi

Korea Institute of Ocean Science & Technology

Young-Gyu Park

Korea Institute of Ocean Science and Technology

Dong Guk Kim

Korean Institute of Ocean Science and Technology

Hong Sik Min

KIOST

[Find Similar](#)

View Related Events

Day: [Thursday, 13 December 2018](#)

제5장

연구개발결과의 활용계획



제5장 연구개발결과의 활용계획

제1절 연구결과의 활용방안

원격 모니터링 자료는 지속적이고 광범위한 자료 수집 및 모니터링이 가능하므로 양식장 해역 환경관리시스템 개발을 위한 유용한 해양환경자료로 활용이 가능하다.

본 연구사업을 통해 개발한 표영-저서 생태계 접합 모형은 연안역, 특히 양식장 해역에서의 표영-저서 생태계 역학 모형을 수립해 과거 변동성 재현을 통한 모형 개선과 대기 강제력 변화 등의 시나리오에 기반한 예측 시스템을 구축하거나 환경변화를 예측하는 데 활용할 예정이다.

통영해역 해양자료 통합 DB에는 본 사업의 현장 관측 자료와 함께 타 기관 등에서 수집한 해양자료들이 함께 수록되어 있다. 일정 해역에 대한 해양자료가 일괄적으로 수록, 관리되고 있으므로, 동일 해역의 다른 연구 수행에서 본 자료를 활용할 수 있다.

하위생태계 자료기반모형의 시범 개발을 통해, 입출력자료가 충분히 확보되면 생태계 예측에 자료기반모형을 사용할 수 있음을 확인했다. 통영해역에서 신뢰도 높은 고밀도 해양관측자료가 준비되면 본격적인 자료기반모형 개발을 시도할 수 있다.

자료기반모형의 테스트 중에서 생태계 역학모형의 결과를 이용한 경우에, 높은 상관관계가 도출되었으며, 생태계 예측 성능을 향상시키는 방법으로 두 모델을 연계하는 연구를 수행할 수 있다.

제2절 기대성과 및 파급효과

서남해역 해상풍력발전단지의 공간적 환경변화의 신속한 탐지와 예측을 위해 광범위한 원격모니터링 자료를 제공할 수 있다.

표영-저서 결합 하위생태계 모델링의 기술을 확보하고 현장 적용을 통해 양식장 또는 연안 환경에 대한 관리기술 등에 이를 활용하거나 3차원 해수 순환 모형과의 접합을 통해 연안환경 시공간에 대한 예측기술을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

본 사업에서 구축한 해양자료 통합 DB에 수록된 자료를 다른 연구에서 사용하면 자료 수집에 소요하는 비용과 노력을 절감할 수 있다.

머신러닝의 심층학습 기술 중에서 TensorFlow의 LSTM network를 이용하여 시계열 자료를 훈련하고 예측하는 모형을 시범 개발하였다. 머신러닝 알고리즘 중에서 한 종류의 알고리즘만 테스트하였는데, 다른 다양한 알고리즘을 이용하여 생태계를 예측하는 추가적인 연구가 가능하다.

생태계 역학모형의 결과를 이용한 자료기반모형 테스트에서 좋은 예측 성능을 보인 만큼, 역학모형과 자료기반모형을 결합한 하이브리드 모형으로 발전시키는 연구가 가능하다.

제6장 참고문헌



제6장 참고문헌

- 국립수산과학원 웹사이트, <http://www.nifs.go.kr/>
- 국립해양조사원 웹사이트, <http://www.khoa.go.kr/>
- 김동훈, 김정환, 함유근, 2016, 인공신경망 딥러닝을 이용한 한반도 여름철 강수에측 실험, 2016년도 한국해양학회 추계학술대회 요약집, 21.
- 김성대, 최상화, 박준용, 박수영, 2015, 연구사업 해양자료 관리를 위한 표준화와 해양물리자료 표준(안), *Ocean and Polar Research* Vol. 37(4), 249-263.
- 위키백과, <https://ko.wikipedia.org/wiki/>
- 임영균, & 백승호 (2017). 통영-사랑도 굴 양식장 주변 해역에서 일차 생산자 식물플랑크톤 군집의 계절적 변화. *환경생물*, 35(4), 492-500.
- 임월애, 이영식, 강영실, 김성수, 김성연, 최혜승, 허영백, 이태식, 이재영 (2010). 통영 양식장 해역의 식물플랑크톤 군집의 연간변동. *한국해양학회지 바다*, 15(4), 158-165.
- 한국해양과학기술원, 2014, 북서태평양 해수온 상승 원인분석을 위한 자료 지향적 모델 (data-driven model) 개발, 74pp.
- 한국해양과학기술원, 2016, 해양정보유통 기반기술 개발 및 정책 연구, 366pp.
- 해양수산부, 2018, 위성기반 한반도 주변해역 해양탄소 추정모델 개발 보고서, 690pp.
- 현정호, 2005. 혐기성 해양환경에서 철 환원세균에 의한 유기물 분해 및 생물정화. *바다*. 10, 145-153.
- Ahn, Y. H., Moon, J. E., and Gallegos, S., 2001. Development of suspended particulate matter algorithms for ocean color remote sensing. *Korean Journal of Remote Sensing*, 17(4), 285-295.
- Ahn, Y. H., Shanmugam, P., and Gallegos, S., 2004. Evolution of suspended sediment patterns in the East China and Yellow Seas. *Journal of Korean Society of Oceanography*, 39(1), 26-34.
- Baretta J.W., W. Ebenhoh and P. Ruardij, 1995, The European Regional Seas Ecosystem Model, a complex marine ecosystem model, *Netherlands Journal of Sea Research*, 33(3/4): 233-246.
- Bayraktarove, E., and C. Wild. 2014. Spatiotemporal variability of sedimentary organic matter supply and recycling processes in coral reefs of Tayrona National Natural Park, Colombian Caribbean. *Biogeosciences* 11, 2977 - 2990.
- Behrenfeld, M. J., & Boss, E. (2006). Beam attenuation and chlorophyll concentration as alternative optical indices of phytoplankton biomass. *Journal of Marine Research*, 64(3), 431-451.

- Bender, M., Grande, K., Johnson, K., Marra, J., Williams, P. J. L., Sieburth, J., Pilson, M., Langdon, C., Hitchcock, G., Orchard, J., Hunt, C., Donaghay, P., & Heinemann, M. (1987). A comparison of four methods for determining planktonic community production. *Limnology and Oceanography*, 32(5), 1085-1098.
- Bhattacharya, B., R.K. Price, D.P. Solomatine, 2005, Data-driven modelling in the context of sediment transport, *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 297-302.
- Blackford J.C., J.I. Allen, F.J. Gilbert, 2004, Ecosystem dynamics at six contrasting sites: a generic modelling study, *Journal of Marine Systems*, 52, 191-215.
- Bulleid, N.C. 1984. Deoxygenation and remineralization above the sediments - water interface; an in situ experimental study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 19, 15 - 25.
- Burchard-Levine, A., Shuming Liu b, Francois Vince, Mingming Li, Avi Ostfeld, 2014, A hybrid evolutionary data driven model for river water quality early warning, *Journal of Environmental Management*, 143, 8-16.
- Butenschön, M., Clark, J., Aldridge, J. N., Allen, J. I., Artioli, Y., Blackford, J., Bruggeman, J., Cazenave, P., Ciavatta, S., Kay, S., Lessin, G., van Leeuwen, S., van der Molen, J., de Mora, L., Polimene, L., Saille, S., Stephens, N., and Torres, R., 2016, ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1293-1339, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1293-2016>.
- Canfield, D.E., B. Thamdrup, and J.W. Hansen. 1993. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: Iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction. *Geochimica Cosmochimica Acta* 57, 3867-3883.
- Canfield, D.E., E. Kristensen, and B. Thamdrup. 2005. *Aquatic Geomicrobiology*. Elsevier, Amsterdam. pp. 65-166.
- Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K., and Kamykowski, D., 1999. Semianalytic Moderate Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio optical domains based on nitrate depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C3), 5403-5421.
- Carder, K. L., Chen, F. R., Cannizzaro, J. P., Campbell, J. W., and Mitchell, B. G., 2004. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research*, 33(7), 1152-1159.
- Carlsson, M.S., P. Enhström, O. Lindahl, L. Ljungqvist, J.K. Petersen, L. Svanberg, and M. Holmer. 2012. Effects of mussel farms on the benthic nitrogen cycle on the Swedish west coast. *Aquaculture Environmental Interactions* 2, 177 - 191.

- Carroll M. L., S. Cochrane, R. Fieler, R. Velvin, and P. White. 2003. Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture* 226, 165 - 180.
- Cheah, W., McMinn, A., Griffiths, F. B., Westwood, K. J., Wright, S. W., Molina, E., ... & Van den Enden, R. (2011). Assessing Sub-Antarctic Zone primary productivity from fast repetition rate fluorometry. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58(21-22), 2179-2188.
- Chen, J.; Zhu, X.; Vogelmann, J.E.; Gao, F.; Jin, S., 2011. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1053-1064.
- Christensen, P.B., R.N. Glud, T. Dalsgaard, and P. Gillespie. 2003. Impacts of longline mussel farming on oxygen and nitrogen dynamics and biological communities of coastal sediments. *Aquaculture* 218, 567 - 588.
- Cloern, J. E., Cole, B. E., Wong, R. L., & Alpine, A. E. (1985). Temporal dynamics of estuarine phytoplankton: a case study of San Francisco Bay. In *Temporal Dynamics of an Estuary: San Francisco Bay* (pp. 153-176). Springer, Dordrecht.
- Cui, T., Zhang, J., Groom, S., Sun, L., Smyth, T., and Sathyendranath, S., 2010. Validation of MERIS ocean-color products in the Bohai Sea: A case study for turbid coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2326-2336.
- Cury, P. M., Shin, Y. J., Planque, B., Durant, J. M., Fromentin, J. M., Kramer-Schadt, S., Stenseth, N. C., Travers, M., & Grimm, V. (2008). Ecosystem oceanography for global change in fisheries. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(6), 338-346.
- Darecki, M. and Stramski, D., 2004. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea. *Remote sensing of Environment*, 89(3), 326-350.
- De Jong, R.J. 1994. The effects of mussel farming on the benthic environment. MSc thesis, School of Biological Sciences, University of Auckland, Auckland.
- Delgado, C.L., N. Wada, M.W. Rosegrant, S. Meijer, and M. Ahmed. 2003. *Fish to 2020: Supply and demand in changing global market*. Penang, Malaysia: The World Fish Center.
- Dixon, L.K., P.J. Murphy, N.M. Becker, and C.M. Charniga. 2014. The potential role of benthic nutrient flux in support of *Karenia* blooms in west Florida (USA) estuaries and the nearshore Gulf of Mexico. *Harmful Algae* 38, 30 - 39.
- Doerffer, R. and Schiller, H., 2007. The MERIS Case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3-4), 517-535.

- Duarte, C. M., Agusti, S., Kennedy, H., & Vaque, D. (1999). The Mediterranean climate as a template for Mediterranean marine ecosystems: the example of the northeast Spanish littoral. *Progress in Oceanography*, 44(1-3), 245-270.
- Duarte, C.M., M. Holmer, Y. Olsen, D. Soto, N. Marbá, J. Guinu, K. Black, and I. Karakassis. 2009. Will the oceans help feed humanity? *Biosciences* 59, 967-976.
- Duarte, P., U. Labarta, and M.J. Fernández - Reiriz. 2008. Modelling local food depletion effects in mussel raft of Galician Rias. *Aquaculture* 274, 300-312.
- Estevez-Blanco, P., Cermeno, P., Espineira, M., & Fernandez, E. (2006). Phytoplankton photosynthetic efficiency and primary production rates estimated from fast repetition rate fluorometry at coastal embayments affected by upwelling (Rias Baixas, NW of Spain). *Journal of plankton research*, 28(12), 1153-1165.
- Falkowski, P. G., & Kolber, Z. (1995). Variations in chlorophyll fluorescence yields in phytoplankton in the world oceans. *Functional Plant Biology*, 22(2), 341-355.
- Falkowski, P. G., & Raven, J. A. (2013). *Aquatic photosynthesis*. Princeton University Press.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United States). 2014. *The state of the world fisheries and aquaculture*. Food and Agriculture Organization of the United States, Rome, Italy.
- Feng, L.H., Jia Lu, 2010, The practical research on flood forecasting based on artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, 37, 2974-2977.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *science*, 281(5374), 237-240.
- Gaarder, T. (1927). Investigations of the production of plankton in the Oslo Fjord . *Rapports et proces-verbaux des reunions. Conseil International pour l'Exploration de la Mer* , 42, 1-48.
- Gal, G., Mateja Skerjanec and Natasa Atanasova, 2013, Fluctuations in water level and the dynamics of zooplankton: a data-driven modelling approach, *Freshwater Biology*, 58, 800-816.
- Giles, H., C.A. Pilditch, and D.G. Bell. 2006. Sedimentation from mussel (*Perna canaliculus*) culture in the Firth of Thames, New Zealand: Impacts on sediment oxygen and nutrient fluxes. *Aquaculture* 261, 125-140.
- Glud, R.N. 2008. Oxygen dynamics of marine sediments. *Marine Biology Research* 4, 243 - 289.
- Gower, J. F. R., Doerffer, R. and Borstad, G. A., 1999. Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9), 1771-1786.

- Grant, J., and B.T. Hargrave. 1987. Benthic metabolism and the quality of sediment organic carbon. *Biological Oceanography* 4, 243-264.
- Grenz, C., J.E. Cloern, S.W. Hager, and B.E. Cole. 2000. Dynamics of nutrient cycling and related benthic nutrient and oxygen fluxes during a spring phytoplankton bloom in South San Francisco Bay (USA). *Marine Ecological Progress Series* 197, 67-80.
- Gribsholt, B., and E. Kristensen. 2002. Effects of bioturbation and plant roots on salt marsh biogeochemistry: a mesocosm study. *Marine Ecological Progress Series* 241, 71-87.
- Hall, P.J.O., O. Holby, S. Kollberg, and M.J. Samuelson. 1992. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. IV. Nitrogen. *Marine Ecological Progress Series* 89, 8191.
- Hatcher, A., J. Grant, and B. Schofield. 1994. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. *Marine Ecological Progress Series* 115, 219-235.
- Hayakama, Y., M. Kobayashi, and M. Izawa. 2011. Sedimentation flux from mariculture of oyster (*Crassostrea Gigas*) in Ofunato estuary, Japan. *ICES Journal of Marine Science* 58, 435-444.
- Heilskov, A., and M. Holmer. 2001. Effects of benthic fauna on organic matter mineralization in fish - farm sediments: importance of size and abundance. *ICES Journal of Marine Science* 58, 427-434.
- Holby, O., and P.O.J. Hall. 1991. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus. *Marine Ecological Progress Series* 70, 263-272.
- Holmer, M., C.M. Duarte, A. Heilskov, B. Olesen, and J. Terrados. 2003. Biogeochemical conditions in sediments enriched by organic matter from net - pen fish farms in the Bolinao area, Philippines. *Marine Pollution Bulletin* 46, 1470-1479.
- Holmer, M., D. Wildsh, and B. Hargrave. 2005. Organic enrichment from marine finfish aquaculture and effects on sediment biogeochemical processes. 5: 181 - 206. In: Hargrave, B.T. (eds) *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture*. Handbook of environmental chemistry, Springer, Berlin.
- Holmer, M., Marba, N., Terrados, J., Duarte, C.M., Fortes, M.D. 2002. Impacts of milkfish (*Chanos Chanos*) aquaculture on carbon and nutrient fluxes in the Bolinao area, Philippines. *Marine Pollution Bulletin* 44, 685-696.
- Hopkinson, C.S., Giblin, A.E., Tucker, J. 2001. Benthic metabolism and nutrient regeneration on the continental shelf of eastern Massachusetts, USA. *Marine Ecological Progress Series* 224, 1-19.
- Hyun, J. - H., J. - S. Mok, H. - Y. Cho, S. - H. Kim, K.S. Lee, and J.E. Kostka. 2009. Rapid organic matter mineralization coupled to iron cycling in intertidal mud flats of the Han River estuary, Yellow Sea. *Biogeochemistry* 92, 231-245.

- Hyun, J. - H., S. - H. Kim, J. - S. Mok, J.S. Lee, S. - U. An, and W. - C. Lee. 2013. Impacts of long - line aquaculture of Pacific oyster (*Crassostera gigas*) on sulfate reduction and diffusive nutrient flux in the coastal sediments of Jinhae - Tongyeong, Korea. *Marine Pollution Bulletin* 74, 187-198.
- Jahnke, R.A., Craven, D.B. 1995. Quantifying the role of heterotrophic bacteria in the carbon cycle: A need for respiration rate measurements. *Limnology and Oceanography* 40, 436-441.
- Jørgensen, B.B. 2000. Bacteria and marine biogeochemistry. In: Schulz, H.D., Zabel, M. eds, *Marine geochemistry*. Springer, Berlin, 173-207.
- Karamouz, M., Mehdi Kia, Sara Nazif, 2014, Prediction of Sea Level Using a Hybrid Data-Driven Model: New Challenges After Hurricane Sandy, *Water Qual Expo Health*, 6, 63-71.
- Kemp, W.M. and W.R. Boynton. 1984. Spatial and temporal coupling of nutrient inputs to estuarine primary production: the role of particulate transport and decomposition. *Bulletin of Marine Science* 35, 522-535.
- Kim et al., 2016. Evaluation of chlorophyll retrievals from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) for the North-East Asian region, *Remote Sensing of Environment*, 184: 482-495.
- Kim, J. and Jungwoon Choi, 2016, Data-driven Modeling of Coastal Water Quality using the Bayesian Method for Coastal Management, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 75, 647-651.
- Kim, S.-H., J.S. Lee, and J.-H. Hyun. 2017. Extremely high sulfate reduction, sediment oxygen demand and benthic nutrient flux associated with a large-scale artificial dyke and its implication to benthic-pelagic coupling in the Yeongsan River estuary, Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin* 120, 126-235.
- Klinger, D., and Naylor, R. 2012. Searching for solutions in aquaculture: Charting a sustainable course. *Annual Review Environment and Resources* 37, 247-276.
- Kristensen, E., Holmer, M. 2001. Decomposition of plant material in marine sediment exposed to different electron acceptor (O₂, NO₃⁻ and SO₄²⁻), with emphasis on substrate origin, degradation stage and the role of bioturbation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 419-433.
- Kumar, S., Sharma, B. K., Sharma, S. K., & Upadhyay, B. (2015). Primary productivity and phytoplankton diversity in relation to fisheries potential of the Lake Udai Sagar, Udaipur. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 2(5), 9-12.
- Kutti, T., A. Ervik, and P.K. Hansen. 2007. Effects of organic effluents from a salmon farm on a fjord system. I. Vertical export and dispersal processes. *Aquaculture* 262, 367-381.

- Laney, S. R. (2003). Assessing the error in photosynthetic properties determined by fast repetition rate fluorometry. *Limnology and Oceanography*, 48(6), 2234-2242.
- Lauer, P. R., M. Fernandes, P.G. Fairweather, J. Tanner, and A. Cheshire. 2009. Benthic fluxes of nitrogen and phosphorus at southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii* sea - cages. *Marine Ecological Progress Series* 390, 251-263.
- Lawrence, W., Dagg, M.J., Liu, H., Cummings, S.R., Ortner, P.B., Kelble, C. 2004. Wind events and benthic-pelagic coupling in a shallow subtropical bay in Florida. *Marine Ecological Progress Series* 266, 1-13.
- Le, C., Hu, C., Cannizzaro, J., English, D., Muller-Karger, F., and Lee, Z., 2013. Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary. *Remote Sensing of Environment*, 129, 75-89.
- Lee, J.S., S. - H. Kim, Y. - T. Kim, S.J. Hong, J.H. Han, J. - H. Hyun, and K. - H. Shin. 2012a. Influence of sea squirt (*Halocynthia roretzi*) aquaculture on benthic - pelagic coupling in coastal waters: A study of the South Sea in Korea. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 99, 10-20.
- Lee, J.S., Y. - T. Kim, K. - H. Shin, J. - H. Hyun, and S. - Y. Lim. 2011. Benthic nutrient fluxes at longline sea squirt and oyster aquaculture farms and their role in coastal ecosystems. *Aquaculture International* 19, 931-944.
- Lee, Z. P., Du, K. P., and Arnone, R., 2005. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C2).
- Lin, G.F., Bing-Chen Jhong, Chia-Chuan Chang, 2013, Development of an effective data-driven model for hourly typhoon rainfall forecasting, *Journal of Hydrology*, 495, 52-63.
- Lorenzen, C. J. (1966). A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* (Vol. 13, No. 2, pp. 223-227). Elsevier.
- Lorenzen, C. J., & Jeffrey, S. W. (1980). Determination of chlorophyll in seawater. *Unesco tech. pap. mar. sci*, 35(1), 1-20.
- Marcel, B., Morel, A., & Gagnon, R. (1994). An incubator designed for extensive and sensitive measurements of phytoplankton photosynthetic parameters. *Limnology and Oceanography*, 39(3), 694-702.
- Mathworks website, <https://www.mathworks.com/>
- MathWorks, 2017a, 머신 러닝 소개, 12pp.
- MathWorks, 2017b, 머신 러닝 시작하기, 16pp.

- McKee, D., Cunningham, A., Wright, D., and Hay, L., 2007. Potential impacts of nonalgal materials on water-leaving Sun induced chlorophyll fluorescence signals in coastal waters. *Applied optics*, 46(31), 7720-7729.
- McKindsey, C.W., M. Lecuona, M. Huot, and A.M. Weise. 2009. Biodeposition production and benthic loading by farmed mussels and associated tunicate epifauna in Prince Edward Island. *Aquaculture* 295, 44-51.
- McKindsey, C.W., P. Archambault, M. Callier, and F. Olivier. 2011. Influence of suspended and off - bottom mussel culture on the sea bottom and benthic habitats: a review. *Canadian Journal of Zoology* 89, 622-646.
- Merino, G., M. Barange, J.L. Blanchard, J. Harle, R. Holmes, I. Allen, E.H. Allison, M.C. Badjeck, N.K. Dulvy, J. Holt, S. Jennings, C. Mullon, and L.D. Rodwell. 2012. Can marine fisheries and aquaculture meet fish demand from a growing human population in a changing climate? *Global Environmental Change* 22, 795-806.
- Milligan, A. J., Aparicio, U. A., & Behrenfeld, M. J. (2012). Fluorescence and nonphotochemical quenching responses to simulated vertical mixing in the marine diatom *Thalassiosira weissflogii*. *Marine Ecology Progress Series*, 448, 67-78.
- Mirto, S., S. Bianchelli, C. Gambi, M. Krzelj, A. Pusceddu, M. Scopa, M. Holmer, and R. Danovaro. 2010. Fish - farm impact on metazoan meiofauna in the Mediterranean Sea: Analysis of regional vs. habitat effects. *Marine Environmental Research* 69, 38-47.
- MODIS ATBD Report, 1997. Bio-Optical Algorithms-Case 1 Waters. edited by Clark, D.K..
- Moon, J. E., Ahn, Y. H., Ryu, J. H., and Shanmugam, P., 2010. Development of ocean environmental algorithms for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(2), 189-207.
- Mohanty, M., Madan K. Jha, Ashwani Kumar, D.K. Panda, 2013. Comparative evaluation of numerical model and artificial neural network for simulating groundwater flow in Kathajodi - Surua Inter-basin of Odisha, India. *Journal of Hydrology*, 495, 38-51.
- Moore, C. M., Suggett, D., Holligan, P. M., Sharples, J., Abraham, E. R., Lucas, M. I., Ripperth, T. P. Fisher, N. R., Simpson, J. H., & Hydes, D. J. (2003). Physical controls on phytoplankton physiology and production at a shelf sea front: a fast repetition-rate fluorometer based field study. *Marine Ecology Progress Series*, 259, 29-45.
- Mortazavi, B., Iverson, R. L., Landing, W. M., Lewis, F. G., & Huang, W. (2000). Control of phytoplankton production and biomass in a river-dominated estuary: Apalachicola Bay, Florida, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 198, 19-31.

- Mortimer R. J. G., Krom M. D., Watson P. G., Frickers P. E., Davey J. T., Clifton R. J., 1998. Sediment-water exchange of nutrient in the intertidal zone of the Humber estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin* 37, 261-279.
- Muller, P., Li, X. P., & Niyogi, K. K. (2001). Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. *Plant physiology*, 125(4), 1558-1566.
- Naylor, R.L., R.J. Goldburg, J.H. Primavera, N. Kautsky, M.C.M. Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney, and M. Troell. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017-1024.
- Nedwell, R.I.E. 2004. Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension - feeding bivalve molluscs: a review. *Journal of Shellfish Research* 23, 51-61.
- Nickell, L.A., K.D. Black, D.J. Hughes, J. Overnell, T. Brand, T.D. Nickell, E. Breuer, and M. Harvey. 2003. Bioturbation, sediment fluxes and benthic community structure around a salmon cage farm in Loch Creran, Scotland. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 285 - 286, 221-233.
- Norði G., R.N. Glud, E. Gaard, and K. Simonsen. 2011. Environmental impacts of coastal fish farming: carbon and nitrogen budgets for trout farming in Kaldbaksfjørður (Faroe Islands). *Marine Ecological Progress Series* 431, 223-241.
- Noriega-Curtis, P. (1979). Primary productivity and related fish yield in intensely manured fishponds. *Aquaculture*, 17(4), 335-344.
- Olson, R. J., Chisholm, S. W., Zettler, E. R., Altabet, M. A., & Dusenberry, J. A. (1990a). Spatial and temporal distributions of prochlorophyte picoplankton in the North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I*, 37, 1033-1051.
- Olson, R. J., Chisholm, S. W., Zettler, E. R., & Amburst, E. V. (1990b). Pigment, size, and distribution of *Synechococcus* in the North Atlantic and Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 35, 45-58.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., Kahru, M., and McClain, C., 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24937-24953.
- Oyinlola, M.A., G. Reygondeau, C.C.C. Wabnitz, M. Troell, and W.W.L. Cheung. 2018. Global estimation of areas with suitable environmental conditions for mariculture species. *PLOS one* 13: e0191086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191086>.
- Parsons, T. R. (2013). *A manual of chemical & biological methods for seawater analysis*. Elsevier.
- Parsons, T.R., Maita, Y. and Lalli, C. M., 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon press, Oxford. p. 173.

- Petersen, J.K., T.G. Nielsen, L. van Duren, and M. Maar. 2008. Depletion of plankton in a raft culture of *Mytilus galloprovincialis* in Ría de Vigo, NW Spain. I. Phytoplankton. *Aquatic Biology* 4, 113-125.
- Platt, T., Gallegos, C. & Harrison, W. G. (1980). Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *Journal of Marine Research*, 38, 687-701.
- Raateoja, M., Seppala, J., & Kuosa, H. (2004). Bio-optical modelling of primary production in the SW Finnish coastal zone, Baltic Sea: fast repetition rate fluorometry in Case 2 waters. *Marine Ecology Progress Series*, 267, 9-26.
- Regaudie-de-Gioux, A., Lasternas, S., Agusti, S., & Duarte, C. M. (2014). Comparing marine primary production estimates through different methods and development of conversion equations. *Frontiers in Marine Science*, 1, 19.
- Richard M., P. Archambault, G. Thouzeau, and G. Desrosiers. 2007. Summer influence of 1 and 2 yr old mussel cultures on benthic fluxes in Grande - Entrée lagoon, Îles - de - la - Madeleine (Québec, Canada). *Marine Ecological Progress Series* 338, 131-143.
- Romano, M., Shie-Yui Liong, Minh Tue Vu, Pavlo Zemskyy, Chi Dung Doan, My Ha Dao, Pavel Tkalic, 2009, Artificial neural network for tsunami forecasting, *Journal of Asian Earth Sciences*, 36, 29-37
- Slawyk, G., Collos, Y., & Auclair, J. C. (1977). The use of the ^{13}C and ^{15}N isotopes for the simultaneous measurement of carbon and nitrogen turnover rates in marine phytoplankton 1. *Limnology and Oceanography*, 22(5), 925-932.
- Shin, J., Kim, K., Son, Y., and Ryu, J. H., 2019. Synergistic Effect of Multi-Sensor Data on the Detection of *Margalefidinium polykrikoides* in the South Sea of Korea. *Remote Sensing*, 11(1), 36.
- Siswanto, E., Tang, J., Yamaguchi, H., Ahn, Y. H., Ishizaka, J., Yoo, S., Kim, S. -W., Kiyomoto, Y., Yamada, K., Chiang, C., and Kawamura, H., 2011. Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas. *Journal of oceanography*, 67(5), 627.
- Steeman-Nielsen, E. (1952). The use of radioactive carbon (^{14}C) for measuring production in the sea. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 18, 117-140.
- Sweetman, A.K., K. Norling, C. Gunderstad, B.T. Haugland, and T. Dale. 2014. Benthic ecosystem functioning beneath fish farms in different hydrodynamic environments. *Limnology and Oceanography* 59, 1139-1151.
- TensorFlow 웹사이트, <https://www.tensorflow.org/>

- Testa, J.M., D.C. Brady, J.C. Cornwell, M.S. Owens, L.P. Sanford, C.R. Newell, S.E. Suttles, and R.I.E. Newell. 2015. Modeling the impact of floating oyster (*Crassostrea virginica*) aquaculture on sediment - water nutrient and oxygen fluxes. *Aquaculture Environment Interaction* 7, 205 - 222.
- Thoe, W., S.H.C. Wong, K.W. Choi, J.H.W. Lee, 2012, Daily prediction of marine beach water quality in Hong Kong, *Journal of Hydro-environment Research*, 6, 164-180.
- Todd, M.J., R.R. Lowrance, P. Goovaerts, G. Vellidis, and C.M. Pringle. 2010. Geostatistical modeling of the spatial distribution of sediment oxygen demand within a Coastal Plain blackwater watershed. *Geoderma* 159, 53-62.
- Wang, Z., Zhao, J., Zhang, Y., & Cao, Y. (2009). Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea. *Journal of Environmental Sciences*, 21(9), 1268-1275.
- Westrich, J.T. and Berner, R.A., 1984. The role of sedimentary organic matter in bacterial sulfate reduction: The G model tested. *Limnology and Oceanography* 29, 236-249.
- Zhang, M., Tang, J., Dong, Q., Song, Q., and Ding, J., 2010. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 392-403.
- Zhou, Y., S. Zhang, Y. Liu, and H. Yang. 2014. Biologically induced deposition of fine suspended particles by filter - feeding bivalves in land - based industrial marine aquaculture wastewater. *PLOS one* 9(9): e107798. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107798>.

