

BSPE xxxxx-xxxx-1

보고서
발간
번호

BSPE
xxxx
-
xxx-
1

모형을
이용한
동해하위생태계
중장기
변동성
연구

모형을 이용한 동해하위생태계 중장기 변동성 연구

Modeling studies for long-term
variability in the lower trophic
ecosystem in the East sea

2013. 12

한 국 해 양 과 학 기 술 원

한국해양과학기술원

주 의
(편집순서8)

(16 포인트 고딕체)

↑
7cm
↓

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “모형을 이용한 동해하위생태계 중장기 변동성 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2013년 12월

총괄연구책임자 : 유 신 재

참 여 연 구 원 : 강 현 우, 고 은 호
고 철 민, 권 경 만
김 민 우, 김 보 연
김 사 라, 김 수 인
박 재 훈, 박 지 수
박 태 욱, 소 지 현
손 영 백, 안 혜 림
오 유 리, 윤 주 은
이 동 원, 이 순 미
이 진 영, 장 정 미
장 찬 주, 조 영 지
최 원 근

위탁연구기관명 : 경북대학교

위탁연구책임자 : 박 중 진

보고서 초록

과제고유 번호		해당단계 연구기간	2011.01.01 - 2013.12.31	단계 구분	3 단계
연구사업명	중사업명	주요연구사업			
	세부사업명	기관목적사업			
연구과제명	대과제명	해양환경 보전 및 해양생태계 관리			
	세부과제명	모형을 이용한 동해하위생태계 증장기 변동성 연구			
연구책임자	유 신 재	해당단계 참여연구원수	총 : 24명 내부: 4명 외부: 20명	해당단계 연구비	정부: 580,000 천원 기업: 천원 계 : 580,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 24명 내부: 4명 외부: 20명	총 연구비	정부: 580,000 천원 기업: 천원 계 : 580,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양생태계연구부		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구	연구기관명	경북대학교		연구책임자	박종진
요약				보고서 면수	150
<p>기후변화가 진행됨에 따라 해양 탄소 순환뿐만 아니라 해양생태계의 생산력, 군집구조, 다양성 등이 변할 것으로 예상되며 부수적으로 어업 생산도 변하게 될 것으로 예상되고 있다. 이러한 생태계 변화에 대처하기 위해서는 장래에 생태계가 어떻게 변할 것인가를 예측하는 것이 필수적이다. 동해생태계가 미래에 어떻게 변할지 예측하기 위해서는 과거 수십 년간 어떻게 변해 왔는지를 이해하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 단기에서 장기에 이르는 생태계 변화를 분석하여 변동의 주요인을 밝히고 이를 토대로 미래변화를 예측할 수 있도록 정량적 모델을 구축하였다. 특히 울릉분지의 엽록소 장기변동에 있어 1980년대 말에 체제 전환(regime shift)이 있었음을 처음 밝혀내어 생태계 장기변동의 전체 그림을 완성하였고 전환의 기작으로 용승과 대마난류 변동을 가설로 제시하였다. 엽록소의 경년변동성을 분석하고 기후지수 및 기후요소에 대한 관계를 밝혔으며 동해의 각 지역 별로 각기 다른 기후인자와 물리요인에 의해 변동함을 밝혔다. 또한 단기적으로는 겨울 혼합층 변동에 의해 춘계변성이 크게 달라짐을 밝혀냈다. HYCOM 재분석자료를 활용하여 직전 겨울의 기상에 의해 이례적인 용승이 나타날 수 있음을 제시하였다. 특히 순환-생태 모델(0D, 1D, 3D)을 구축하여 동해 생태계의 계절적 변동을 재현하고 모델 적합화하여 미래의 생태계 변화를 예측할 연구토대를 구축하였다. 순환-생태모델을 개선하기 위하여 동해의 생물종을 배양하여 여러 조건하의 성장률을 측정하였으며 ERSEM 모델의 경우 동화자료에 따라 계절적 패턴이 영향을 받을 수 있음을 보여주었다. 순환-생태 모델을 이용하여 대마난류가 생태계에 미치는 효과를 정량적으로 분석하였다. 또한 용승이 생태계에 미치는 영향을 모의실험하여 바람의 세기에 따라 동해 연안의 생태계의 생산력이나 수직구조가 달라질 수 있음을 제시하였다. 이 연구에서 얻은 새로운 과학적 결과는 국제해양학 사회의 주목을 받을 수 있으며 동해 명칭 문제와 관련하여 국제적 홍보효과도 얻을 수 있다. 또한 PICES (북태평양 해양과학기구)에서 주기적으로 발간하는 북태평양 생태계 보고서에 기초자료로 수록될 수 있다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	동해 생태계, 생태계 변화, 기후변화, 모델링, 예측			
	영 어	East Sea ecosystem, Ecosystem change, Climate change, Modeling, Prediction			

요 약 문

I. 제 목

모형을 이용한 동해하위생태계 중장기 변동성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

장기 생태자료, 재분석 해양자료, 물리-생태계 접합모형을 이용한 동해 생태계 변동기작 규명

2. 연구개발의 필요성

○ 기술적 측면

- 기후변화가 진행됨에 따라 해양 탄소 순환뿐만 아니라 생산력, 군집구조, 다양성 등이 변할 것으로 예측되며 부수적으로 어업 생산도 변하게 될 것으로 예측되고 있다. 이러한 생태계 변화에 대처하기 위해서는 장래에 생태계가 어떻게 변할 것인가를 예측하는 것이 필수적이다.
- 기후변화와 관련된 생태계 예측 기술은 다양한 분야를 아우르는 복합적 기술의 성격을 지니고 있다. 생태모형, 기후-해양물리 분야와의 연계 기술과 자료 재해석, 동화, 생리 실험 등이 종합되어야 하므로 장기적인 투자와 능력 제고가 필요하다.

○ 경제·산업적 측면

- 전 세계적으로 기후변화에 대한 국제적인 규약과 규제가 강화되고 있다. 예상되는 기후협약의 강화에 대비하여 우리나라 해양생태계의 장기적 경향과 변동 예측에 대한 자료를 생산 보유하는 것이 필요하다.
- 최근 수 십 년 사이에 동해의 생태 환경의 다양한 변화에 대한 기작을 정확하게

진단하고 향후 변동에 대한 예측 능력을 확보하는 것은 동해의 수산업과 환경 보전 등 해양생태계 부가가치를 지속적으로 개발, 관리하기 위하여 국가가 보유하여야 할 핵심적 과학 기술 중 하나이다.

○ 사회·문화적 측면

- 근래 빈번히 발생하고 있는 가뭄, 홍수 등 기후와 관련된 환경재해와 이와 관련된 재정적 부담에 대해 국민적 관심이 커지고 있어 과학적인 근거에 의한 전망을 제공하는 것이 국가적 요구라고 할 수 있다. 체계적인 연구를 통해 기후변화에 따른 생태계의 장기 변동에 대한 예측을 제시할 필요가 있다.

○ 기술원 고유기능 발전과의 연관성

- 본 사업은 한국해양과학기술원의 기능 및 역할의 일환으로 한반도 주변해역에 대한 다학제적 과학기술 능력을 향상시키며 해양관련 공공부분의 기초, 응용, 개발 연구를 담당하는데 부응하는 사업이다.
- 특히 해양기후변화에 대비하고 우리나라 근해 생태계와 관련하여 국가정책 수립에 필요한 자료를 제공한다는 의미에서 기술원의 고유기능에 해당한다. 따라서 기후변화에 대한 해양생태계 변화를 분석하고 예측하는 연구는 국가적인 연구 방향뿐만 아니라 기술원의 연구 방향과 잘 부합된다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간

2011년 1월 1일-2013년 12월 31일

2. 연구개발의 내용 및 범위

가. 재분석 해양자료 분석

- 해양재분석 자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가
- 동해 및 혼합층 과거 변화 통계분석 및 혼합층 변화와 대기강제력/순환변화 연관성 파악
- 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성

나. 장기 생태자료 생산 및 분석

- 생태 장기 시계열 자료 생산

- 생태 장기 시계열 자료 분석
- 동해 남동부 생태계의 변동기작에 대한 가설 수립 및 테스트
- 기후 지수와 생태계 변동 간의 상관성 분석

다. 물리-생태계 접합모형을 이용한 생태계 변동기작 규명

- 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 추적
- 생태모형 개선
- 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태계 모형 시범 결합
- 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명

IV. 연구개발결과

1. 재분석 해양자료 분석

가. 해양재분석 자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가

- 자료동화모형 결과 분석: 위성에서 관측된 해수면 수온 및 해면 고도자료, 아고 뜰개 자료에 의해 관측된 연직 수온, 염분 자료, 그리고 정선 해양 관측 자료로 동화된 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 결과를 이용하여 동해 용승 현상을 분석하였다. 2011년 6-7월에 부산 및 울산 앞바다에서 이례적으로 용승 현상이 발생하였는데, 이는 직전 겨울에 형성된 동해 북부와 북한 연안 찬해수와 관련이 있을 것으로 판단된다.

나. 동해 및 혼합층 과거 변화 통계분석 및 혼합층 변화와 대기강제력/순환변화 연관성 파악

- 1999년 3월부터 2011년 4월까지, 13년 동안의 아고 뜰개 자료를 이용하여 동해 계절별 해양 혼합층을 산출한 뒤, 혼합층 깊이와 대기장 및 해양순환장과의 상관성 분석하였다. 그 결과, 여름과 가을철 동해 남부해역이 북부해역보다 혼합층 깊이가 깊은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 여름철 동해 남부해역의 바람세기가 더 강한 것에 의한 것으로 보인다.

다. 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성

- 2004년부터 2011년 까지 1/12° HYCOM의 수온과 염분 자료를 이용하여 해양 혼합층 깊이 자료를 생산하였고, 위성자료 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)와 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

diometer) Aqua를 이용하여 동해 엽록소의 경년 변동을 분석하였다. 2008년 동해 남부역에서 봄철 엽록소 농도가 평년에 비해 9배 큰 것으로 나타났으며 이는 재분석 자료를 통해 겨울 혼합층 깊이가 깊어 영양염이 상층으로 많이 공급된 것에 의한 것임이 밝혀졌다.

2. 장기 생태자료 생산 및 분석

가. 동해 남동부 지역의 생태 장기 시계열 생산 및 분석

○ 생태 장기 시계열 자료 생산

본 연구팀의 동해 현장조사 자료를 토대로 투명도(Secchi depth)와 엽록소 간의 유의한 상관성을 이용하여 관계식을 유도하였다. 이 관계식을 1961-2010년 기간 동안의 국립수산과학원 정선 해양 관측 자료 중 투명도 자료에 적용하여 엽록소 장기 시계열 자료를 생산하였다.

○ 생태 장기 시계열 자료 분석

동해 엽록소 장기 시계열 자료를 분석한 결과 1980년대 후반의 기후 체제 전환(regime shift)이 일어났던 유사한 시기에 엽록소 변동에 있어 체제 전환이 있었음을 최초로 밝혀냈다. 엽록소 장기 시계열 자료의 체제 전환이 발생한 정확한 시점을 테스트하기 위해 T-test를 적용하여 1990년이 유의한 체제 전환 발생년도를 확인하였다($p < 0.05$). 동해 남동부 지역을 공간적으로 나누어 살펴보면 1990년을 기점으로 외해와 연안에서 모두 엽록소 농도의 평균값이 증가했고 특히 외해보다 연안에서 엽록소 농도의 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

나. 동해 남동부 지역의 생태계 변동기작 규명

○ 동해 남동부 생태계의 변동기작에 대한 가설 수립

엽록소 장기 시계열 자료를 월별 및 공간적으로 살펴보면 체제 전환 이후 4-10월에 엽록소 농도가 증가하였으며 외해보다 연안에서 그 증가폭이 크게 나타났다. 특히 체제 전환 이후 연안에서는 용승 현상이 나타나는 4-10월 내내 엽록소 농도의 증가폭이 컸으나 외해에서는 용승이 강해지는 여름이 되어야 엽록소 농도의 증가폭이 커지는 현상 등은 연안용승의 증가와 어느 정도 상관관계가 있음을 보여준다. 동해 생태계 변동에 영향을 미친 기작에 대하여 연안 용승 외에도 대마난류의 수송량을 복합적으로 고려하여 분석하였다.

○ 기후 지수와 생태계 변동 간의 상관성 분석

기후 지수와 생태계 변동 간의 상관관계를 살펴보기 위해 10년 동안(1998-2007년)의 SeaWiFS 위성 자료를 활용하여 일차생산력의 변화와 기후인자와의 상관성을 분석하였다. 통계적으로 분류된 동해의 각 해역별로 일차생산

력에 영향을 주는 기후인자 및 물리적 요인이 달랐다.

3. 물리-생태계 접합모형을 이용한 생태계 변동기작 규명

가. 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 측정

- 자체 제작한 culture apparatuses를 이용하여 동해 출현종을 대상으로 광도, 온도, 영양염에 대한 최대성장률 측정 실험하였다.
- 동일한 조건에서 일반적으로 규조류의 성장률이 와편모조류와 석회조류보다 높게 나타났다.

나. 생태모형 개선

- GOTM-ERSEM 모형 개선

1D GOTM-ERSEM (General Ocean Turbulence Model-European Regional Seas Ecosystem Model) 모형을 동해 3개 정점에 적용한 결과, 3개 정점 모두 표층 영양염 공급이 미약하고 이에 따라 표층 엽록소의 계절적 변동이 재현되지 않는 문제점이 나타났다. 이를 개선하기 위하여 모형의 수온, 염분 동화 자료에 전구모형결과를 사용하는 것에서 한국해양자료센터(Korea Ocean Data Center)의 격월 관측 자료를 사용하는 것으로 대체하였다. 수온, 염분 동화 자료가 향상됨에 따라 연직 혼합의 모사성능이 향상된 결과를 보였으며, 이로 인해 모델링에 정확한 수온, 염분 동화 자료가 필요함을 명시하였다.

- GOTM-ERSEM 모형 개선

동해 울릉분지 정점에서 1D 모형의 문제점과 다양한 장기 관측 자료의 불충분함을 보완하기 위해 수정된 ERSEM 박스모형을 이용하여 식물플랑크톤의 장기 계절변동 테스트를 실시하였다. 겨울철 혼합층의 깊이가 얕아질수록 영양염 공급이 제한되어 봄철 식물플랑크톤의 번성 강도는 점차 감소하지만 충분한 빛 공급으로 번성 시기는 점차 앞당겨 지는 것으로 나타났다. 또한 혼합층 깊이의 변화에 따라 빛과 영양염에 의한 성장변화, 동물플랑크톤의 섭식변화로 식물플랑크톤 기능성 그룹은 서로 다른 변동특성을 보였다.

다. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명

- 해양순환모형 ROMS (Regional Ocean Modeling System)을 이용하여 세 가지 바람세기(0.02, 0.05, 0.10 Pa)를 적용하여 바람세기에 따른 용승 효과를 재현하였다.
- 3차원 동해 해양순환모형과 4개의 생태변수로 구성된 하위영양단계 생태모형을 이용하여 물리-생태계 접합모형을 구축하여 동해 생태계 모사를 시도했다. 동해

질산염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기 쇄설물 계절 변화가 비교적 잘 재현되었으며, 연안에서 외해로 갈수록 깊어지는 SCM (Subsurface Chlorophyll Maximum)층이 어느 정도 재현되었다.

- 대한해협 영양염 수송량이 동해 하위생태계(일차생산량)에 미치는 영향을 파악하기 위하여 대한해협 영양염 수송량 조건을 달리한 세 가지 3차원 물리-생태계 모형 수치실험 실시하였다. 대한해협 영양염 공급이 표층 엽록소 농도에 미치는 양의 영향(positive effect)이 봄철에는 동해 북부해역으로 갈수록 줄어들고 가을철에는 아극전선(subpolar front) 이남의 동해 남부해역에 전역에 강하게 나타났다. 대한해협 영양염 수송량의 경년 변동성과 대마난류의 지류가 흐르는 해역의 표층 엽록소 농도의 경년 변동성의 상관관계가 높게 나타났다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 동해 환경 장기 변화 예측에 대한 표준적 연구사례를 제시
 - 본 연구에서는 모형 연구를 통하여 향후 동해 환경 변화 연구에 대한 표준 연구 사례를 제시하고자 한다.
- 물리-생태계 접합모형 시스템으로 동해의 부각
 - 동해는 축소대양(miniature ocean)의 특성을 가지고 있어 대양 연구에서는 어려운 시스템 전체의 연구가 비교적 용이하여 접합모형을 통한 동해 생태계 장기 변화 예측이 가능하다. 이러한 연구결과는 국제해양학 사회의 주목을 받을 수 있으며 동해 명칭 문제와 관련하여 국제적 홍보효과도 얻을 수 있다.
- 북태평양 생태계 상태보고서(North Pacific Ecosystem Status Report, PICES) 수록
 - PICES는 2004년을 시작으로 동해를 포함한 북태평양 해양생태계의 상태 변화를 평가하는 보고서를 발간할 예정이다. 이 보고서는 주기적으로 지속적으로 증보될 예정이며 동해 생태계 장기 변동 분석에 대한 연구결과는 개정판에 포함되어 국제적으로 널리 홍보될 수 있다.

SUMMARY

I. Title

Modeling studies for long-term variability in the lower trophic ecosystem in the East sea

II. Necessities and objectives of the study

1. Objectives of the study

To elucidate the mechanisms of ecosystem change in the East Sea using long-term ecological data, reanalysis ocean data and coupled physics-ecosystems model

2. Necessities of the study

○ Technical aspects

- As climate change progresses, the ecosystem productivity, community structure and diversity as well as carbon cycle will change. To cope with such change it is necessary to predict how marine ecosystem will change in the future.
- Predicting the ecosystem change requires complex research skills covering a wide range of scientific areas. Comprehensive studies of ecosystem modeling, climate-physical oceanographic linkage, data assimilation, reanalysis, and physiological experimentation are needed. Therefore long-term investment and capacity building are required.

○ Economic/industrial aspects

- International agreements and regulations are being re-enforced regarding climate change. It is desirable to produce and maintain scientific grounds for long-term trend and future prediction of the ecosystem change in Korean waters.

- Diagnosis of the mechanisms of the East Sea ecosystem change in the past decades and predicting capacity of ecosystem change are among the core scientific and technical assets that the government should establish.
- Societal/cultural aspects
 - Public interests have been growing on environmental changes and related financial burdens. It is government's duty to provide an outlook of the changes based on scientific grounds. Long-term prediction on the ecosystem changes in response to climate change using systematic studies is necessary.
- Relation to proper functionality of KIOST
 - This study fits with the functionality of KIOST as conducting multidisciplinary research of Korean waters and conducting basic, application, and development research in the public domain.
 - It fits with the functionality of KIOST providing the scientific grounds for policy making for the marine ecosystems of Korean waters. Understanding and predicting the ecosystem change in response to climate change are relevant to KIOST directions as well as national research directions.

III. Contents and scopes of the study

1. Research period

January 1, 2011–December 31, 2013

2. Contents and scopes of the study

Understanding how the East Sea ecosystem has changed in the past decades is crucial to predict how it will change in the future. This study analyzed the past patterns from short to long-term scale and identified the regime shift in

the primary trophic level to complete the whole picture of ecosystem change and this study of assessed the influence of Tsushima Warm Current on the ecosystem using circulation–ecosystem models. The study proposed major mechanisms for ecosystem change and revealed relationship between ecosystem change and climate indices. Using circulation–ecosystem models (0D, 1D, 3D) seasonal patterns of the East Sea ecosystem was studied and parameterization was performed, which prepared a basis for prediction of the future changes. The study contents can be summarized as follows.

A. Analysis of ocean reanalysis data

- Collection, and basic/feature assessment of ocean reanalysis data
- Statistical analysis of mixed layer depth and its relationship with atmospheric forcing/circulation
- Relationship between the interannual variation of chlorophyll and mixed layer depth

B. Production and analysis of long–term ecological time series

- Production of long–term ecological time series
- Analysis of long–term ecological time series
- Hypothesis on the mechanisms of ecosystem change in the southwestern East Sea
- Testing the hypothesis on the ecosystem change in the southwestern East Sea
- Relationship between climate indices and ecosystem change

C. Elucidation of ecosystem change mechanisms using physics–ecosystem coupled models

- Accumulation of physiological parameters for physics–ecosystem coupled models
- Amelioration of ecosystem models
- Establishment of North Pacific circulation models and demonstration of coupling of physics–ecosystem models
- Analysis of the mechanisms of seasonal change in the pelagic ecosystem using physics–ecosystem coupled models

IV. Results

1. Analysis of ocean reanalysis data

A. Collection, and basic/feature assessment of ocean reanalysis data

Analysis of data assimilation models: Upwelling patterns were analyzed using satellite SST, altimetry, profiles of sea temperature and salinity by ARGO floats, and HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) results. The unusual upwelling events in the coast off Busan and Ulsan in JUN–JUL 2011 were attributed to the cold water formation in the northern East Sea and North Korean coastal waters.

B. Statistical analysis of mixed layer depth and its relationship with atmospheric forcing/circulation

Using 13–year ARGO float data from March 1999 through April 2011, ocean mixed layer depth was estimated and its relationship with atmospheric and ocean circulation field was analyzed. In contrast to the prior understanding, the results showed that the mixed layer depth in the southern East Sea was deeper than that in the northern East Sea in the summer and autumn. This may be due to stronger wind stress in the southern East Sea.

C. Relationship between the interannual variation of chlorophyll-*a* and that of mixed layer depth

Ocean mixed layer depth was estimated from $1/12^\circ$ HYCOM sea temperature for 2004–2011. The interannual variation of sea surface chlorophyll-*a* was analysed using SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) and MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua for the same period. The chlorophyll-*a* concentration in the spring of 2008 was about 9 times higher than in other years. Reanalysis ocean data showed that this anomaly was related to the enhanced nutrient supply to the upper layer by deeper winter mixing in

the previous winter.

2. Production and analysis of long-term ecological time series

A. Production of long-term ecological time series

A regression equation was derived for converting Secchi depth to chlorophyll-*a* from the oceanographic data accumulated for the past 11 years. Using this equation, chlorophyll-*a* time series was reconstructed for 1961–2010 period from the bimonthly ship observation data of the National Fisheries Research and Development Institute.

B. Analysis of long-term ecological time series

Analysis of the long-term chlorophyll-*a* time series revealed that a shift occurred in chlorophyll-*a* concentration in the similar time as the climate/ecosystem regime shift in late 1980s. A T-test on the time series showed that the shift of chlorophyll-*a* occurred in 1990 ($p < 0.05$). Spatially, the chlorophyll-*a* concentration increased after the shift in both the nearshore and open waters. The increase was greater in the nearshore waters than in the open waters.

C. Hypothesis on the mechanisms of ecosystem change of the southwestern East Sea

Temporal and spatial analysis of the chlorophyll-*a* time series revealed that the chlorophyll-*a* concentration increased after the regime shift for April–October period and the increase was greater in the nearshore waters. The increase in the nearshore waters was significant for April–October. However, the increase in the open ocean was significant only in the summer indicating that it might be related to coastal upwelling. Analysis of interannual variation of chlorophyll-*a* also indicated that spring chlorophyll-*a* concentration in nearshore waters was related to the volume transport of Tsushima Warm Current (TWC).

D. Relationship between climate indices and ecosystem change

The relationship between the primary productivity and climate indices

was analyzed to understand causes of the interannual ecosystem variation using SeaWiFS data for 1998–2007. The East Sea was statistically classified into several regions based on the chlorophyll-*a* variability. The primary productivity of each region showed different relations with various climate indices and physical forcing.

3. Elucidation of ecosystem change mechanisms using physics–ecosystem coupled models

A. Accumulation of physiological parameters for physics–ecosystem coupled models

Culture apparatuses were designed and built and used to measure the growth rates of phytoplankton species collected in the East Sea under various conditions of light intensity, temperature and nutrient concentrations.

Under similar conditions, the growth rate of diatoms was higher than that of dinoflagellates and coccolithophorids in general.

B. Amelioration of ecosystem models

GOTM–ERSEM (General Ocean Turbulence Model–European Regional Seas Ecosystem Model): When 1D GOTM–ERSEM model was applied to 3 stations in the East Sea, seasonal cycles of surface chlorophyll-*a* could not be reproduced because of insufficient vertical mixing in winter. To remedy the problem, global model data for sea temperature and salinity assimilation were replaced by bimonthly data from Korea Ocean Data Center. This improved vertical mixing in the model indicating the importance of better assimilated data of temperature and salinity.

To cope with uncertainty and insufficient data for 1D model, an ERSEM box model was used to simulate seasonal changes in the southwestern East Sea. As winter mixing depth decreases, nutrient supply was reduced and the magnitude of spring blooms decreased. However, the timing of spring bloom moved forward by improved light condition. In addition, zooplankton grazing changed and as a results, the functional groups of phytoplankton showed different responses.

C. Establishment of North Pacific circulation models and demonstration of coupling of physics–ecosystem models

A 3D circulation model and lower trophic ecosystem model with 4 compartments were coupled to simulate the ecosystem dynamics in the East Sea. Seasonal patterns of nitrate, phytoplankton, zooplankton, and detritus were well reproduced. Deepening of SCM (Subsurface Chlorophyll Maximum) was also well reproduced.

D. Analysis of the mechanisms of seasonal change in the pelagic ecosystem using physics–ecosystem coupled models

ROMS (Regional Ocean Modeling System) was used to reproduce the upwelling events under varying wind stress (0.02, 0.05, 0.1 Pa).

To understand the influence of the TWC volume transport variation on the lower trophic ecosystem in the East Sea, 3 numerical experiments were conducted with different conditions of nutrient supply. The positive effects on the surface chlorophyll-*a* were decreasing towards north in the spring. However, the effects in the autumn were strong all over the southern East Sea (south to the subpolar front). There was a significant correlation between the interannual variation of TWC volume transport and that of surface chlorophyll-*a*.

V. Application plans of the results of the study

1. Demonstration of a case study for predicting ecosystem change in the East Sea

This study could be used as a test case of a comprehensive study using long-term data analysis and various modeling techniques.

2. A test bed for physics–biology coupled modeling

The East Sea has many characteristic of a miniature ocean and enables modelers to study the behavior of the whole system, which could be more difficult with large-scale oceans. Such results can attract attention from

international community. A positive side effect could be the publicity on the naming campaign of the East Sea.

3. Input to North Pacific Ecosystem Status Report (PICES)

PICES has continued publication of the ecosystem status report on the North Pacific ecosystems starting in 2004. This report will be regularly updated and the results of this study can be used in the future editions.

목 차

한글요약	i
영문요약	vii
한글목차	xv
영문목차	xxi
그림목차	xxxii
표목차	xxviii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
1. 기술적 측면	1
2. 경제·산업적 측면	1
3. 사회·문화적 측면	2
4. 기술원 고유기능 발전과의 연관성	2
제 2 절 연구개발목표 및 내용	3
1. 연구개발의 목표	3
2. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용	3
가. 1차년도(2011년)	3
나. 2차년도(2012년)	4
다. 3차년도(2013년)	5
3. 연구 추진계획 및 수행 방법	5
가. 추진 체계	5
나. 추진 전략	6
제 2 장 국내외 기술개발 현황	7
제 1 절 국내 연구동향	7

제 2 절 국외 연구동향	7
제 3 절 현재까지의 연구개발 현황	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절 재분석 해양자료 분석	9
1. 해양재분석 자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가	9
가. 자료동화모형 결과 분석	9
나. 용승 현상	9
다. 동해중층수 저염의 기원에 관한 연구	10
2. 동해 및 혼합층 과거 변화 통계분석 및 혼합층 변화와 대기강제력/순환변화 연관 성 파악	12
가. 자료 및 분석 방법	12
나. 동해 계절별 해양혼합층 변화	12
3. 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성	14
가. 자료 및 분석 방법	14
나. 재분석 자료에서 재현한 해양 혼합층	14
제 2 절 장기 생태자료 생산 및 분석	19
1. 생태 장기 시계열 자료 생산	19
가. 엽록소- <i>a</i> 와 투명도의 상관관계	19
(1) 현장조사	19
(가) 엽록소- <i>a</i> 농도	21
(나) 투명도	21
(2) 엽록소- <i>a</i> 농도와 투명도의 관계식 유도	21
나. 엽록소- <i>a</i> 장기 시계열 자료 생산	22
(1) 투명도 장기 시계열 자료	22
(2) 투명도 장기 시계열 자료 검증	22
2. 생태 장기 시계열 자료 분석	23
가. 동해 남동부 생태계 변동기작	23
나. 동해 남동부 생태계 변동기작에 대한 유의성 검증	24

다. 주성분 분석	25
(1) 자료 취득	25
(가) 겨울철 기후인자	26
(나) 물리변수	26
(다) 생물변수	27
(2) 각 자료에 대한 주성분 분석	27
3. 동해 남동부 생태계 변동기작 규명	28
가. 동해 남동부 생태계 변동기작에 대한 가설 수립	28
(1) 가설 1: 겨울철 대마난류 수송량의 증가	28
(2) 동해 남동부 해역의 공간적인 엽록소- <i>a</i> 농도의 변동 차	29
(2) 가설 2: 연안 용승의 강화	32
4. 기후 지수와 생태계 변동 간의 상관성 분석	33
가. 일차생산 알고리즘 검증	33
나. 일차생산 추정	34
다. 동해 일차생산의 시공간적 패턴	34
라. 동해의 국지적 요인이 일차생산력에 미치는 영향 분석	36
제 3 절 물리-생태계 접합모형을 이용한 생태계 변동기작 규명	39
1. 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 측정	39
가. 생태모델 개선을 위한 culture apparatus 설계 및 제작	39
(1) Turbidostat	39
(2) 광도-수온 조절배양기	39
나. 실험에 의한 기능성 그룹 생리학적 자료의 측정	40
(1) 2011년 실험 측정	40
(가) 재료 및 방법	40
(나) 실험 결과	41
(2) 2012년 실험 측정	43
(가) 재료 및 방법	43
(나) 실험 결과	46
(3) 2013년 실험 측정	49
(가) 재료 및 방법	49
(나) 실험 결과	49

2. 생태모형 개선	50
가. ERSEM 1D 모형 구축	51
(1) ERSEM 1D 모형 구축	51
(2) ERSEM 1D 모형 동해 적용 실험 결과	52
나. ERSEM 박스모형 구축	58
(1) ERSEM 박스모형 장기 자료 형성	59
(가) 물리 장기 자료	59
(나) 식물플랑크톤 엽록소- <i>a</i> 자료	60
(2) ERSEM 박스모형 개선	61
(가) 모형 구조 개선	61
(나) 모델 매개변수 조정	62
(3) ERSEM 박스모형 결과	65
(가) 실험 결과	65
(나) 혼합층 깊이 변동에 따른 식물플랑크톤 기능성 그룹 변화	68
3. 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태계 모형 시범 결합	69
가. 북태평양 모형	69
(1) 수치 모형	69
(2) 모형 구성	69
(3) 모형 결과	69
나. 용승 모형	70
다. 물리-생태계 접합모형 (ROMS-NPZD)	72
(1) 물리 모형 구성	72
(2) 물리 모형 결과	72
(3) 생태모형 (NPZD 모형)	74
라. 용승 생태계 시범 모사	76
4. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명	76
가. 물리-생태계 접합모형 (ROMS-NPZD)	76
나. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명-대한해협 영양염 공급량 영향	80
(1) 대한해협 영양염 공급량 영향	80
(2) 대한해협 영양염 공급량 영향 실험	80
(2) 대한해협 영양염 공급량 영향 실험 결과	83

제 4 장 기술평가 및 제언	89
제 1 절 재분석 해양자료 분석	89
1. 해양재분석 자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가	89
2. 동해 및 혼합층 과거 변화 통계분석 및 혼합층 변화와 대기강제력/순환변화 연관성 파악	89
3. 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성	90
제 2 절 장기 생태자료 생산 및 분석	91
1. 생태 장기 시계열 자료 생산	91
2. 생태 장기 시계열 자료 분석	91
3. 동해 남동부 생태계 변동기작에 대한 가설수립	92
4. 기후 지표와 생태계 변동 간의 상관성 분석	92
제 3 절 물리-생태계 접합모형을 이용한 생태계 변동기작 규명	94
1. 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 축적	94
2. 생태모형 개선	94
3. 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태계 모형 시범 결합	95
4. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명	95
제 5 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	96
제 1 절 연구개발목표 달성도	96
1. 2단계 연구 기간 내 연구내용 대비 달성률(%)	96
2. 정량적 목표 달성도(부록 참조)	97
제 2 절 대외기여도	98
1. 기술적 측면	98
2. 경제·산업적 측면	98
제 6 장 연구개발 결과의 활용계획	99

제 7 장 참고문헌	100
제 8 장 부 록	105

CONTENTS

Summary	i
Contents	xv
List of Figures	xxxii
List of Tables	xxviii
Chapter I Outline of the study	1
Chapter II States of technical development in the home and foreign countries	7
Chapter III Results of the study	9
Section 1 Analysis of ocean reanalysis data	9
Section 2 Production and analysis of long-term chlorophyll- <i>a</i> dataset	19
Section 3 Mechanism study of marine ecosystem variation using coupled physical-ecological model	39
Chapter IV Technical reports	89
Chapter V Achievements of objectives and contributions to the related area	96
Section 1 Achievements of objectives	96
Section 2 Contributions to the related area	98
Chapter VI Application plans of the results of the study	99
Chapter VII References	100
Chapter VIII Appendix	105

List of Figures

Fig. 3.1.1.1. Mean sea surface temperature averaged on January and February from 2004 to 2011. Cold pool on the coast of North Korea is strong on January and February in 2011.	10
Fig. 3.1.1.2. (a) Thickness (m) of East Sea intermediate water, (b) temperature at salinity minimum layer, (c) wind stress in winter and (d) salinity at salinity minimum layer.	11
Fig. 3.1.1.3. Trajectories of floats passing through 38° N locations. Red dots in the right figure is locations of 6 months ago of floats which were arrived in red box area in winter.	11
Fig. 3.1.2.1. Seasonal distribution of mixed layer depth (m) of East Sea calculated using Argo profiling float from March 1999 to April 2011. ·	13
Fig. 3.1.2.2. QuickSCAT wind field (m s^{-1}) in summer.	13
Fig. 3.1.3.1. Chlorophyll- <i>a</i> anomaly from 2004 to 2010.	15
Fig. 3.1.3.2. Mixed layer depth (m) and Chlorophyll- <i>a</i> (mgC m^{-3}) in Ulleung basin.	15
Fig. 3.1.3.3. Mixed layer depth (m), wind speed (m s^{-1}) and heat flux (W m^{-2}) in East Sea.	16
Fig. 3.1.3.4. Sea level pressure (hPa) on February in 2008 in East Asia. ·	16
Fig. 3.1.3.5. Time series of wind speed in East Sea and difference between Siberian High and Aleutian Low.	17
Fig. 3.1.3.6. Volume transport (Sv) through the Korea Strait from ADCP observations in 2004 and 2008.	17
Fig. 3.1.3.7. Monthly concentration of particle matter 10 micrometer (mg m^{-3}) in Sockcho observed by Korea Meteorological Administration.	18
Fig. 3.2.1.1. Map of the study area. The markers indicate sampling stations. See table 1 for details.	20
Fig. 3.2.1.2. Relationship between chlorophyll- <i>a</i> concentrations and Secchi depths.	22
Fig. 3.2.1.3. A map showing sampling stations observed by the NFRDI since 1960s. The grey markers indicate OW (Open waters) and black markers indicate CW (Coastal waters).	23

Fig. 3.2.2.1. (a) Time-series of chlorophyll-*a* concentrations from 1970 to 2005 and (b) regime shift index estimated by STARS for chlorophyll-*a* concentrations. The dotted lines represent the averages of 1970-1989 and 1990-2005.25

Fig. 3.2.2.2. (a) The EOF mode 1 variations of time-series of winter climate indices and physical factors (PC1=36.5%) and (b) biological factors (PC1=61.0%).28

Fig. 3.2.3.1. Anomaly time series and Cumulative sums of (a) volume transport of Tsushima current, (b) SST, and (c) Surface difference of temperature 0 m and 50 m during 1970-2007.29

Fig. 3.2.3.2. Time-series of chlorophyll-*a* concentrations from 1970 to 2005 in (a) OW (Open waters), (b) CW (Coastal waters), and (c) regime shift index estimated by STARS for chlorophyll-*a* concentrations. The dotted lines represent the averages of 1970-1989 and 1990-2005.31

Fig. 3.2.3.3. The percentage difference between the averages of 1970-1989 and 1990-2005 per month. The difference was divided by means of chlorophyll-*a* concentrations in CW (Coastal waters) and OW (Open waters) during 1970-2005.32

Fig. 3.2.3.4. SST long-term trends for 1998-2006 years (Shin and Oh, 2009). 33

Fig. 3.2.4.1. Classification of the five areas by the k-means algorithm based on the seven largest PCs of monthly primary production.35

Fig. 3.2.4.2. (a) Seasonal and (b) inter-annual variations of primary production in the five areas. The bold line indicates average for East Sea.36

Fig. 3.3.1.1. Turbidostat.39

Fig. 3.3.1.2. Light-temperature controlled semi-continuous culture apparatus. · 40

Fig. 3.3.1.3. Growth curves of *T. erythraeum* with silicate limitation at 15 °C (circle), 20 °C (triangle), 25 °C (diamond). Days represent the cumulative days that cultures were subjected to light.42

Fig. 3.3.1.4. Growth curves of *S. costatum* with silicate limitation at 15 °C (circle), 20 °C (triangle), 25 °C (diamond). Days represent the cumulative days that cultures were subjected to light.43

Fig. 3.3.1.5. Dynamic changes in population densities and growth rate of (a) *H. akashiwo*, (b) *Nitzschia sp.*, (c) *C. antiqua* at 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and

20 °C.	46
Fig. 3.3.1.6. Dynamic changes in population densities and growth rate of each species. (a)–(d) at 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and 20 °C, (e)–(h) at 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and 15 °C.	47
Fig. 3.3.1.7. Growth rate of each species in 2012.	48
Fig. 3.3.1.8. Growth response of each species to light condition. Curves were plotted using the equation of Eilers–Peeters(1988) model.	50
Fig. 3.3.2.1. Schematic of the ERSEM model (Blackford and Gilbert, 2007). .	51
Fig. 3.3.2.2. Three stations applied by ERSEM 1D.	52
Fig. 3.3.2.3. (a) Vertical distributions of simulated chlorophyll- <i>a</i> (mgC m^{-3}) and (b) nitrate (mmol m^{-3}) at 131° E, 37° N using temperature and salinity from global model as initial conditions and applying data assimilation for temperature and salinity.	54
Fig. 3.3.2.4. Vertical distributions of simulated temperature (°C) by ERSEM 1D and Argo profiling float at 131° E, 37° N in (a) February, (b) May and (c) November. Line with triangle is temperature of Argo profiling float, line with circle is simulated temperature and line with cross is temperature for data assimilation.	54
Fig. 3.3.2.5. (a) Vertical distributions of simulated chlorophyll- <i>a</i> (mgC m^{-3}) and (b) nitrate (mmol m^{-3}) at 131° E, 37° N using temperature and salinity from global model as initial conditions and not applying data assimilation for temperature and salinity.	55
Fig. 3.3.2.6. (a) Vertical distributions of simulated temperature (°C) and (b) salinity at 131° E, 37° N using temperature and salinity from global model as initial conditions and not applying data assimilation for temperature and salinity.	55
Fig. 3.3.2.7. (a) Time series of simulated surface and (b) subsurface chlorophyll- <i>a</i> (mgC m^{-3}) of diatom (square), flagellates (triangle), pico phytoplankton (cross) and large phytoplankton (circle) at 131° E, 37° N using temperature and salinity from global model as initial conditions and not applying data assimilation for temperature and salinity.	56
Fig. 3.3.2.8. (a) Vertical distributions of simulated irradiance (W m^{-2}), (b) turbulence kinetic energy ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), (c) temperature (°C), (d) salinity and (e) sigma- t at 131° E, 37° N using KODC bi-monthly data at	

104–11 observation point for data assimilation by ERSEM 1D.	57
Fig. 3.3.2.9. (a) Time series of simulated carbon concentration (mgC m^{-3}) of surface diatom (square), flagellates (triangle), picophytoplankton (cross) and large phytoplankton (circle) and (b–d) vertical distributions of simulated carbon concentration (mgC m^{-3}) of each four phytoplanktons at 131° E , 37° N using KODC bi-monthly data at 104–11 observation point for data assimilation by ERSEM 1D.	58
Fig. 3.3.2.10. Monthly running averages of: (a) Surface temperature ($^\circ\text{C}$), (b) Surface salinity (psu), (c) MLD (m) and (d) Surface Irradiance at noon.	60
Fig. 3.3.2.11. Predicted effects of the three functional traits on species' responses to environmental variation (Edward <i>et al.</i> , 2013). (a) Species with higher competitive ability for nitrate (higher $N_{\text{aff ex}}$ picophytoplankton), (b) Species with greater tolerance of low light (higher $\mu_{10, \text{ex}}$ diatoms), (c) Species with greater maximum growth rate due to faster growth under non-limiting conditions (higher μ_{max} , $P_{\text{m ex}}$ diatoms).	62
Fig. 3.3.2.12. Baseline run. (a) Simulated total chlorophyll- <i>a</i> , (b) phytoplankton succession following the sequence of diatoms (solid line), flagellates (dashed line), picophytoplankton (dotted line) and dinoflagellates (dotdash line, fill = grey color), (c) Irradiance (W m^{-2}) in MLD and (d) MLD (m).	66
Fig. 3.3.2.13. Standard run 2000–2012. (a) Simulated total chlorophyll- <i>a</i> (solid line) as compared with OC.v6 chlorophyll- <i>a</i> (points overlaid by a line), (b) phytoplankton succession with diatoms (solid line), flagellates (dashed line), picophytoplankton (dotted line) and dinoflagellates (dotdash line, fill = grey color), (c) modelled nitrate concentration (mmol m^{-3}), (d) phosphate concentration (mmol m^{-3}) and (e) MLD (m).	67
Fig. 3.3.2.14. Results of variability of mixed layer depth. Baseline run (solid line), -30% (dashed line) and +30% (dotted line).	68
Fig. 3.3.3.1. (a) 37th-year simulated mixed layer depth (m), (b) sea surface temperature ($^\circ\text{C}$), (c) sea surface salinity on February by North Pacific model. Uppers are results of model, middle is Levitus climatology and lowers are difference between model and climatology.	70
Fig. 3.3.3.2. Upwelling along the east coast of Korea. (a) MODIS satellite	

chlorophyll- <i>a</i> on 3rd August in 2006 and (b) GOCI satellite chlorophyll- <i>a</i> at 12 PM on 5th April in 2011.	71
Fig. 3.3.3.3. Vertical distributions of simulated temperature (°C) by upwelling model from 6 hour to 30 days. Horizontal axis represents meridional distance (km) and vertical axis represents depth (m).	71
Fig. 3.3.3.4. Simulated sea surface temperature and current on (a) February and (b) August in the East Sea by three dimensional physical-biological model.	73
Fig. 3.3.3.5. Simulated mixed layer depth (m) on (a) February and (b) August in the East Sea by three dimensional physical-biological model.	73
Fig. 3.3.3.6. Mechanic diagram of ecosystem model (Powell <i>et al.</i> , 2006). ..	75
Fig. 3.3.3.7. Vertical distribution of simulated temperature (°C), phytoplankton (mmolN m ⁻³), zooplankton (mmolN m ⁻³), detritus (mmolN m ⁻³) and nitrate (mmolN m ⁻³) by upwelling model. Uppers represent initial conditions, middle and lowers represent simulated results with 0.02 and 0.1 Pa wind speed respectively.	76
Fig. 3.3.4.1. Simulated surface chlorophyll- <i>a</i> concentration (mgC m ⁻³) by 3D physical-biological model.	77
Fig. 3.3.4.2. Surface chlorophyll- <i>a</i> concentration (mgC m ⁻³) from SeaWiFS satellite from 1998 to 2012.	78
Fig. 3.3.4.3. Simulated surface chlorophyll- <i>a</i> concentration (mgC m ⁻³) on April in 10th simulated year (left) and SeaWiFS and MODIS satellite chlorophyll- <i>a</i> concentration (mgC m ⁻³) on in North (a) and South (b) of the East Sea which are indicated black boxes in the left figure.	79
Fig. 3.3.4.4. Simulated surface nitrate, phytoplankton, zooplankton and detritus (mmolN m ⁻³) in (a) North and (b) South of East Sea in 10th simulated year. North (a) and South (b) of the East Sea which are indicated black boxes in Fig. 3.3.4.3.	79
Fig. 3.3.4.5. Vertical distribution of (a) chlorophyll- <i>a</i> (mgC m ⁻³) and (b) nitrate (mmolN m ⁻³) along 134° E on July and October in 10th simulated year.	80
Fig. 3.3.4.6. South boundary condition of water mass transport (mass transport through the Korea Strait) (Sv) of 3D physical-biological model from 2004 to 2012. Middle line is averaged mass transport (2.64 Sv).	

Water mass transport is HYCOM results.	83
Fig. 3.3.4.7. Simulated surface chlorophyll- <i>a</i> (mgC m ⁻³) in spring (uppers) and fall (lowers) (a) in case of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation, (b) in case of no nutrient flux through the Korea Strait and (c) normalized surface chlorophyll- <i>a</i> difference between two cases with surface chlorophyll- <i>a</i> in the cast of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation.	85
Fig. 3.3.4.8. Vertical distribution of simulated nutrient concentration (mmolN m ⁻³) on February along 130° E (a) in case of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation and (b) in case of no nutrient flux through the Korea Strait. Black line indicate mixed layer depth.	86
Fig. 3.3.4.9. Simulated surface (uppers) and subsurface (lowers) annual mean chlorophyll- <i>a</i> (mgC m ⁻³) (a) in case of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation, (b) in case of no nutrient flux through the Korea Strait and (c) normalized surface and subsurface annual mean chlorophyll- <i>a</i> difference between two cases with surface chlorophyll- <i>a</i> in the cast of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation.	87
Fig. 3.3.4.10. Correlation between anomalies of (a) nutrient flux (kmolN s ⁻¹) through the Korea Strait and surface chlorophyll- <i>a</i> (mgC m ⁻³), (b) nutrient flux through Korea Strait but subsurface and surface chlorophyll- <i>a</i> , (c) nutrient flux through Korea Strait and subsurface chlorophyll- <i>a</i> and (d) nutrient flux through the Korea Strait but subsurface and subsurface chlorophyll- <i>a</i>	88

List of Table

Table 3.1.2.1. Mixed layer depth (m) for each season of North and South of East Sea	14
Table 3.2.1.1. Region and time of observations in the dataset	20
Table 3.2.4.1. Statistical evaluation of primary productivity algorithms	34
Table 3.2.4.2. Schematic table to summarize to linkages between the climatic variability, physical factors and primary productivity in the East Sea ..	38
Table 3.3.1.1. Phytoplankton species used in 2011	40
Table 3.3.1.2. Experimental condition in 2011	41
Table 3.3.1.3. Growth rate of species at each temperature and Si limitation	42
Table 3.3.1.4. Phytoplankton species used in 2012	44
Table 3.3.1.5. Experimental condition in 2012	45
Table 3.3.1.6. Growth rate of each species in 2012	48
Table 3.3.1.7. Experimental condition in 2013	49
Table 3.3.2.1. Locations of three stations applied by ERSEM 1D	52
Table 3.3.2.2. Oc v6 coefficients for SeaWiFS and MODIS Aqua	61
Table 3.3.2.3. Parameters for the phytoplankton functional groups	63
Table 3.3.2.4. Parameters for te zooplankton functional groups and bacteria	64
Table 3.3.2.5. Model food matrix (%)	64
Table 3.3.2.6. Averaged physical observations data for baseline run	65
Table 3.3.3.1. Biological parameters (Powell <i>et al.</i> , 2006)	75
Table 3.3.4.1. Configuration of three numerical experiments to analyze effects of nutrient transport through the East Sea	81

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

- 기후변화가 진행됨에 따라 해양 탄소 순환 뿐 아니라 생산력, 군집구조, 다양성 등이 변할 것으로 예측되며 부수적으로 어업 생산도 변하게 될 것으로 예측되고 있다. 이러한 생태계 변화에 대처하기 위해서는 장래에 생태계가 어떻게 변할 것인가를 예측하는 것이 필수적이다.
- 현재 진행되고 있는 기후 온난화로 인해 해양에서 생태환경 변화가 가속화 되고 있는 것으로 밝혀지고 있다. 기후변화에 따라 해양의 수온이 상승하고 있으며, 특히 한국근해의 표층 수온은 지난 37년 간(1968-2004년) 약 1.0 °C 상승하였다. 이것은 해양의 성층이 강화되는 것으로 이로 인하여 해양생태계에 여러 가지 복합적인 현상이 일어나고 있다. 따라서 기후변화 시나리오에 따른 해양예측모델 결과를 분석하고 동해의 성층화가 어떻게 진행될 것인지 예측할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.
- 용승은 수온약층이 형성된 해양에서 영양염이 고갈된 표층에 저층의 풍부한 영양염을 공급함으로써 해양생태계에 중요한 역할을 한다. 용승은 바람의 방향과 세기 그리고 성층구조와 관계가 있다. 우리나라 동해 남부해역에 맞는 이론모델을 수립하여 바람과 성층구조를 매개변수로 용승을 정량화할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 또한 기후변화에 따른 몬순의 변화와 관련하여 바람의 변화에 따른 용승의 빈도 및 강도가 장기적으로 어떻게 변화될 것인지 예측하는 기술이 필요하다.
- 기후변화와 관련된 생태계 예측 기술은 다양한 분야를 아우르는 복합적 기술의 성격을 지니고 있다. 그러나 기후변동에 따른 미세생물 구조변화 및 해양생태계 반응 전반에 대한 복합적 현상파악-원인규명-대안제시를 위한 중장기적인 생태계 프로세스 연구는 전무한 실정이다. 생태계 모델, 기후-해양물리 분야와의 연계 기술과 자료 재해석, 동화, 생리 실험 등이 종합되어야 하므로 장기적인 투자와 능력 제고가 필요하다.

2. 경제·산업적 측면

- 전 세계적으로 기후변화에 대한 국제적인 규약과 규제가 강화되고 있다. 예상 되는 기후협약의 강화에 대비하여 우리나라 해양생태계의 장기적 경향과 변동 예측에 대한 자료를 생산 보유하는 것이 필요하다.
- 최근 수 십 년 사이에 동해의 생태 환경의 다양한 변화에 대한 기작을 정확하게 진단하고 향후 변동에 대한 예측 능력을 확보하는 것은 동해의 수산업과 환경 보전 등 해양생태계 부가가치를 지속적으로 개발, 관리하기 위하여 국가가 보유하여야 할 핵심적 과학 기술 중 하나이다. 따라서 해양생태계 모델 개발에 대한 연구는 궁극적으로 합리적인 수산자원 관리에 기여하여 국가 산업에 이바지 할 수 있게 한다.
- 용승은 직접적으로 해양의 생산성과 관련이 있어 용승이 활발하게 일어나는 해역이나 시기에는 수산자원이 풍부해진다. 따라서 용승을 정량화하여 예측할 수 있다면 수산업에 큰 도움이 될 것이다. 또한 성층현상 역시 장기적으로 예측하여 해양생태계에 미칠 영향과 그에 따른 수산자원의 변동을 가늠할 수 있다면 수산업의 방향을 결정할 수 있는 중요한 정책 자료가 될 수 있다.

3. 사회·문화적 측면

- 근래 빈번히 발생하고 있는 가뭄, 홍수 등 기후와 관련된 환경재해와 이와 관련된 재정적 부담에 대해 국민적 관심이 커지고 있어 과학적인 근거에 의한 전망을 제공하는 것이 국가적 요구라고 할 수 있다. 체계적인 연구를 통해 기후변화에 따른 생태계의 장기 변동에 대한 예측을 제시할 필요가 있다.
- 지구온난화 등 기후변화에 대한 국민들의 관심이 고조되고 있는 상황에서 체계적인 연구를 통한 기후변화에 따른 해양생태계 장기 변동에 대한 연구가 필요하다.

4. 기술원 고유기능 발전과의 연관성

- 본 사업은 한국해양과학기술원의 기능 및 역할의 일환으로 한반도 주변해역에 대한 다 학제적 과학기술 능력을 향상시키며 해양관련 공공부분의 기초, 응용, 개발 연구를 담당하는데 부응하는 사업이다.
- 특히 해양기후변화에 대비하고 우리나라 근해 생태계와 관련하여 국가정책 수립에 필요한 자료를 제공한다는 의미에서 기술원의 고유기능에 해당한다. 따라서 기후변화에 대한 해양생태계 변화를 분석하고 예측하는 연구는 국가적인 연구 방향 뿐 만 아니라 기술원의 연구 방향과 잘 부합된다.

제 2 절 연구개발목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

- 장기 생태 자료, 재분석 해양 자료, 물리-생태계 결합 모형을 이용한 동해 생태계 변동기작 규명

2. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용

가. 1차년도(2011년)

구 분	세 부 목 표	내 용 및 범 위
1차년도 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> · 재분석 해양자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가 · 생태 장기 시계열 자료 생산 	<ul style="list-style-type: none"> · 동해를 포함한 한반도 주변해 재분석 해양 자료 (기간: 1998-2009, 10년) 수집 및 특성 파악 · 순환, 수온 구조 등 재분석 자료 기본 평가 · 국립수산과학원 정선 해양 관측 자료 중 Secchi depth (1961-2010) 자료 재분석 · 본 연구팀의 과거 Secchi depth와 엽록소 실측값을 사용한 상관관계 분석 · 기존 시계열 자료에서 엽록소, 영양염 등 프록시 자료 생산, 과거 변동 패턴 분석

구 분	세 부 목 표	내 용 및 범 위
1차년도 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> · 생태모형 개선 · 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태계 모형 시범 접합 	<ul style="list-style-type: none"> · 생태모형 개선을 위해 기능성 그룹 위주로 생태모형 구조 개량 · 생태모형에 필요한 생리 매개변수 측정을 위한 Turbidostat 설계 및 제작 · 배양 실험 수행: trichodesmium erythraeum, ditylum brightwell, skeletonema costatum, synechococcus nidulans, eucampia zoodiacus · 순환모형 수립 및 기후 적분 · 동해 용승환경 물리-생태계 모형 시범 접합 및 초기 실험

나. 2차년도(2012년)

구 분	세 부 목 표	내 용 및 범 위
2차년도 (2012)	<ul style="list-style-type: none"> · 재분석 자료에서 재현한 해양 혼합층 비교 · 생태 장기 시계열 자료 분석 · 생태모형 개선 · 물리-생태계 접합 2단계 	<ul style="list-style-type: none"> · 동해 해양 혼합층 특성(수온, 염분, 혼합층 깊이) 계산 및 관측 기후 분포와 비교 평가 · 국립수산과학원의 Secchi depth 자료(1961-2010) 자료 검증 및 재처리 · 장기 엽록소 농도 시계열 자료 생산 · 장기 엽록소 농도와 용승과의 상관관계 분석 · Microcosm 실험 · ERSEM 1D 모형 구축 및 시범 적용 · 동해 물리-생태계 모형 접합 및 초기 실험

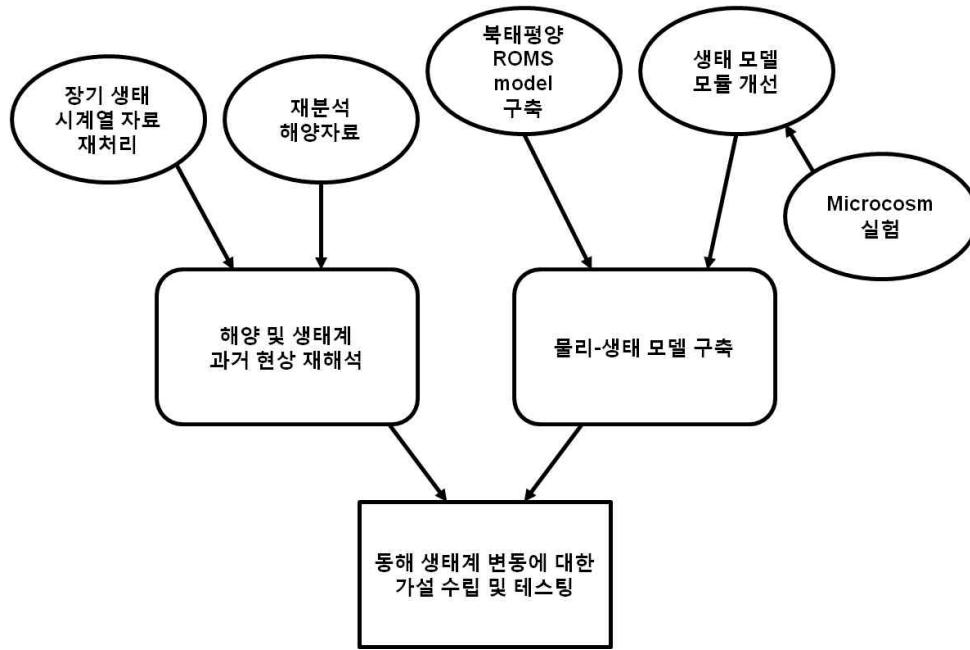
다. 3차년도(2013년)

구 분	세 부 목 표	내 용 및 범 위
3차년도 (2013)	<ul style="list-style-type: none"> · 장기 생태 자료 및 재분석 해양자료 분석 종합 · 동해 생태계 변동기작 규명 	<ul style="list-style-type: none"> · 동해 혼합층 과거 변화 통계 분석 · 혼합층 변화와 대기강제력/순환 변화 연관성 파악 · 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성 · 동해 남동부 생태계의 변동기작에 대한 가설 수립 · 물리-생태계 접합모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명 · 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 추적

3. 연구 추진계획 및 수행 방법

가. 추진 체계

아래와 같은 흐름으로 상호 연계된 연구를 추진하여 최종적으로 동해 생태계 변동기작에 대한 가설을 제시할 수 있도록 한다. 물리-순환 분야는 장찬주 박사팀이 맡고 생태 분야는 유신재 박사팀이 맡아서 수행하며 총괄은 유신재 박사가 한다.



나. 추진 전략

- 장기적인 자료 분석을 통하여 변동기작에 대한 가설을 수립하고 물리-생태 모델을 이용하여 이 가설을 테스트한다.
- 개발되어 있는 생태 모델을 마이크로코즘 실험 등을 이용하여 매개변수나 구조를 개선한다.
- 다양한 생태모형을 포함한 ROMS (Regional Ocean Modeling System)를 이용하여 모형 코딩보다는 개선, 활용에 보다 많은 연구 시간과 자원을 투자함으로써 연구 효율성을 높인다. 또한 방법론의 표준화를 통하여 연구 결과 해석의 상호 비교성을 높일 수 있다.
- 외국의 선행연구자들과의 교류를 통하여 연구 효율성을 제고한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구동향

- Kang *et al.*(2000)은 국립수산물과학원 자료를 이용하여 1960-1990년간의 동해 연안의 엽록소, 동물플랑크톤 생물량, 어획량의 변화와 기후 지수와의 관계를 분석하였으나 변동기작은 다루지 않았다.
- Zhang *et al.*(2000) 역시 유사한 기간의 어획량과 기후 지수간의 분석을 통하여 체제 변환에 대해 연구하였으나 변동기작은 다루지 않았다.
- Zhang *et al.*(2004)은 동해의 어획량을 분석하고 Ecopath model을 이용하여 생태계 내의 에너지 흐름을 추정한 바 있다.
- Lee *et al.*(2008)은 1970-2000년 기간 동안 동해에서 일어났던 오징어 어획량의 변동이 수온 및 대마난류의 변동에 따라 달라지는 것으로 보고하였다. 이 연구는 주로 오징어 어획량과 수온의 상관관계를 분석하였고 그 기작은 다루지 않았다.
- 물리 해양학자들에 의한 순환모형 연구가 다수 있으나 물리-생태계 모형 접합 연구는 국내에서 매우 드물다.

제 2 절 국외 연구동향

- 해양-대기 상호 작용, 해면수온, 모드수 형성, 해양생태계 등에 해양 혼합층이 미치는 영향을 평가하기 위하여 관측 자료(과거 역사 자료, 아고 뜰개 자료) 분석, 수치 모형링 등 다양한 연구가 진행되고 있다.
- 특히 최근에는 전 지구에서 자료가 관측되는 아고 뜰개를 이용한 혼합층 분포 및 변동성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 자료동화를 적용한 재분석 해양자료를 이용한 비교 평가 연구가 시도되고 있다.
- 지난 수 십 년간 다양한 종류의 마이크로코즘을 이용한 에너지 흐름, 상호작용, 다양성, 안정성 등에 대한 다양한 연구가 수행되었다(Abott, 1966; Lund, 1978; Grice and Reeve, 1982; Levy *et al.*, 1985; Kaushik *et al.*, 1986).
- 다양한 국제프로그램(예. PICES (North Pacific Marine Science Organization), ICES (International Council for the Exploration of the Sea), JGOFS (Joint

Global Ocean Flux Study), GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics), IMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem research, endorsed by IGBP and SCOR) 등)에서 미래 해양생태계 변동을 예측하기 위해 물리-생태계 접합모형을 이용한 연구를 해왔다.

- 최근 순환모형과 생태모형을 접합하여 미래의 해양생태계 변화를 예측하는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Nakata *et al.*, 2004; Sarmiento *et al.*, 2004; Popova *et al.*, 2006; Hashioka and Yamanaka, 2007).

제 3 절 현재까지의 연구개발 현황

- 과거에는 동해만을 포함한 동해국지모형을 주로 사용하였으나 최근에는 대양과의 상호작용, 대한해협수송량 지정 등 경계조건 문제 등으로 동해를 포함한 한반도, 북태평양 등에 대한 광역모델링 연구가 활발하다.
- 아고 뜰개 자료 등 관측 자료의 증가로 관측 자료를 이용한 해양 혼합층에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 여전히 과거자료는 부족하므로 이에 대한 보완책으로 해양 재분석 자료를 이용하는 추세에 있다. 그러나 다양한 재분석 자료 사이의 차이점, 문제점, 그 원인에 대한 분석은 부족하다.
- 동해순환모델링은 현상재현, 장단기 예보, 기후변화 등의 관점에서 매우 활발하게 진행되었으나 생태계와 관련된 연구는 여전히 부족하다.
- 본 사업의 이전 단계 연구(2008-2010)에서 7개의 격실을 가진 생태계 모델을 개발하여 울릉 분지의 엽록소의 계절성을 재현한 바 있으며 순환모델과 결합하여 이용할 준비가 되어 있다.
- 순환모델은 연안과 대양 현상 모두에 ROMS모형이 널리 사용되고 있으며 특히 ROMS모형에는 다양한 생태모형이 코딩되어 있어 생태모형 코딩에 필요한 자원과 시간을 줄일 수 있어 접합모형, 실제 현상 적용에 더 많은 연구시간을 투자할 수 있고 상호 비교가 용이하다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 재분석 해양자료 분석

1. 해양재분석 자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가

가. 자료동화모형 결과 분석

HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model)에서 사용하는 하이브리드 좌표계는 성층화된 대양에서는 밀도 면을 따르는(isopycnal) 연직 좌표계를 사용하지만, 수심이 얇은 연안지역에서는 자연스럽게 해지지형을 따르는(terrain-following) 연직 좌표계로 변환되고, 혼합층 혹은 성층이 형성되지 않은 해역에서는 z-level 연직 좌표계를 사용하는 복합적인 좌표계이다.

본 연구에서 사용된 수치모형 자료는 준 실시간으로 자료동화모형 컨소시엄 (Consortium for Data Assimilative Modeling)에서 서버를 통해 실시간으로 공개하는 일일 간격 수온, 염분 및 유속자료이다(www.hycom.org). 자료동화에 사용된 주된 해양 관측 자료는 위성에서 관측된 해수면 수온 및 해면 고도자료, Argo profiling float에 의해 관측된 연직 수온, 염분 자료, 그리고 정선 관측 자료이다.

나. 용승 현상

해양 재분석 자료를 이용하여 동해 생태계의 주요 물리 요인 중 하나인 용승이 전년도 겨울의 냉수대 형성과 관계가 있다는 해석을 하였다. 2011년 6-7월에 부산 및 울산 앞바다에서 이례적으로 발생한 용승 현상은 직전 겨울에 형성된 동해 북부와 북한 연안 찬 해수와 관련이 있을 것으로 판단되며(Fig. 3.1.1.1) 해양 재분석 자료를 이용한다면 용승현상을 물리적으로 이해하는 데 도움이 될 것이다.

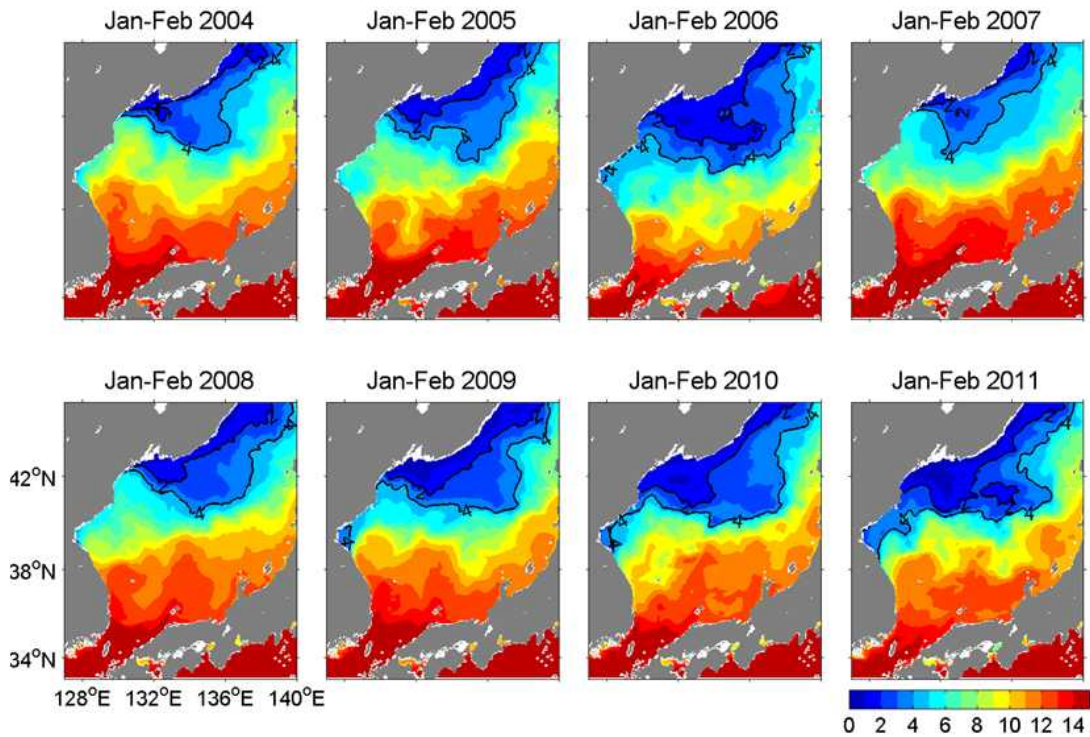


Fig. 3.1.1.1. Mean sea surface temperature averaged on January and February from 2004 to 2011. Cold pool on the coast of North Korea is strong on January and February in 2011.

다. 동해중층수 저염의 기원에 관한 연구

기존의 모형 기반 연구결과에 따르면 아무르강에서 유입되는 저염수가 동해 중층수의 기원으로 알려져 있다. 동해 중층수의 염분최소층은 2-3 °C에서 34.0 psu 이하로 나타난다(Fig. 3.1.1.2). 러시아 연안에서 발견되는 아무르강 기원의 저염수는 온도가 1 °C 이하로 낮아 동해중층수의 염분최소층을 형성하기 부적합하다. 열/염 budget 모형 결과에 따르면 동해중층수가 형성되기 위해선 고온/저염의 수괴가 이동해 와야 한다. 관측 자료 분석 결과에 따르면 동해중층수의 저염은 대한해협을 통해 들어오는 대마난류 저염표층수가 그 기원임을 알 수 있다(Fig. 3.1.1.3). 동해중층수 형성해역에 겨울철 도달하는 표층 뜰개는 대부분 동해 남서부에서 여름철 이동해 온 것이다. 중층(대략 수심 50 m-400 m), 즉 수온약층 바로 아래 위치하면서 동해 연안을 따라 남하하기도 하기 때문에 연안에서 발생하는 용승 현상 혹은 강한 수직 혼합작용 등에 의해 표층 수온에 영향을 주어, 동해안의 기온 저하나 해무 발생 등과 같은 날씨 변화 및 기후변화에도 영향을 줄 수 있으며 이에 따라 연안 해양생태계에도 지대한 영향을 끼칠 가능성이 있어 동해 중층수의 형성 기작 및 기원에 대한 연구가 필요하다.

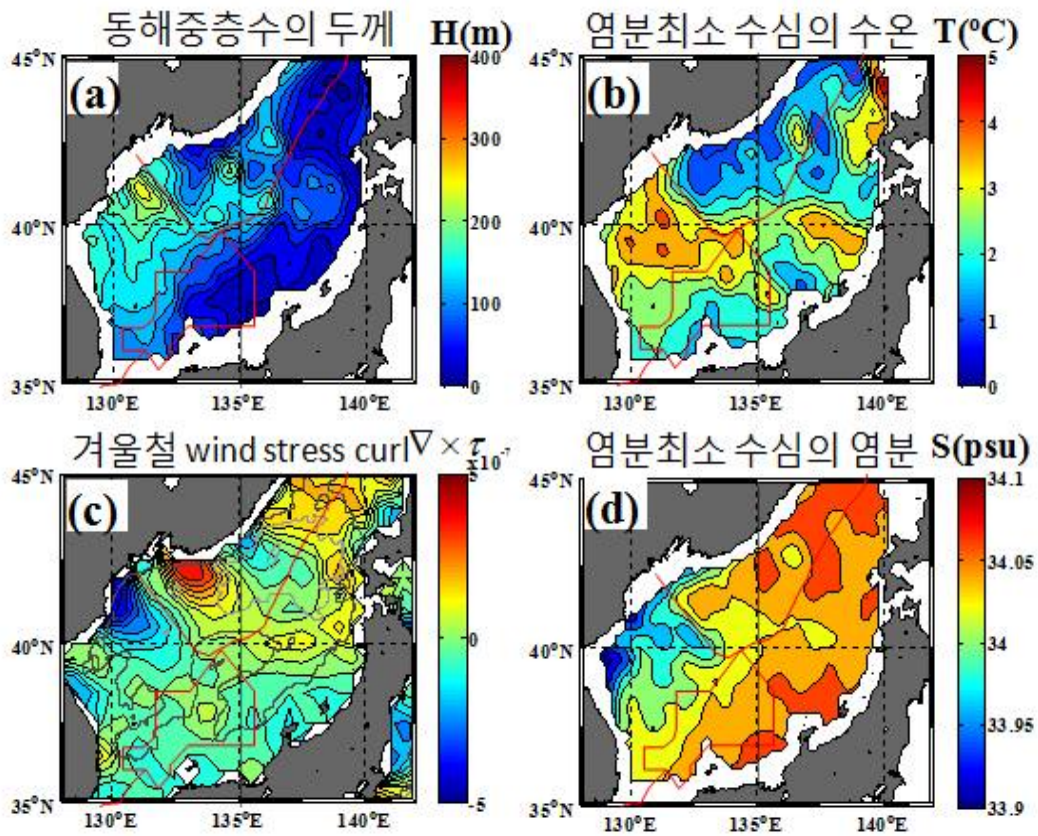


Fig. 3.1.1.2. (a) Thickness (m) of East Sea intermediate water, (b) temperature at salinity minimum layer, (c) wind stress in winter and (d) salinity at salinity minimum layer.

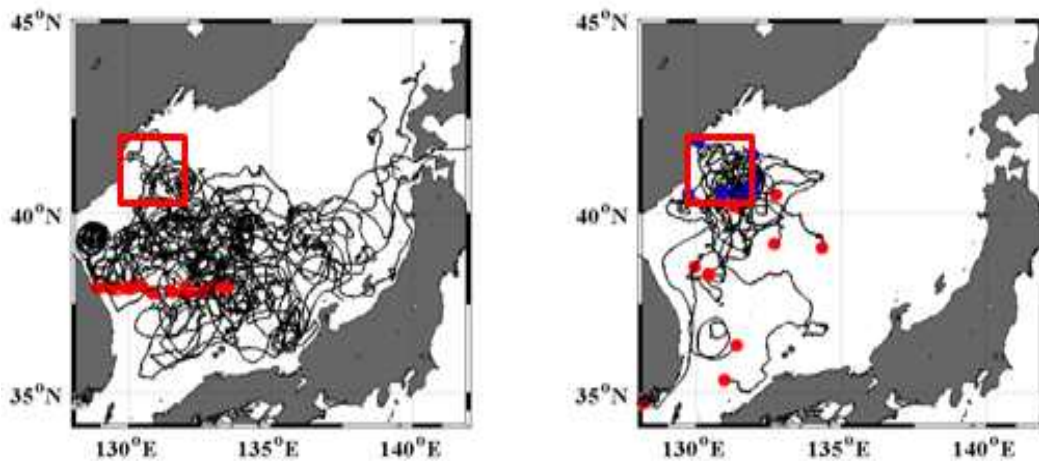


Fig. 3.1.1.3. Trajectories of floats passing through 38° N locations. Red dots in the right figure is locations of 6 months ago of floats which were arrived in red box area in winter.

2. 동해 및 혼합층 과거 변화 통계분석 및 혼합층 변화와 대기강제력/순환변화 연관성 파악

가. 자료 및 분석 방법

1999년 3월부터 2011년 4월까지의 13년간의 아고 뜰개 수온 자료를 이용하여 동해 혼합층 깊이를 산정하여, 동해 계절별 혼합층 깊이 변화를 살펴보았다. 혼합층 깊이에 영향을 미치는 대기강제력인 바람과의 연관성을 파악하기 위해 QuickSCAT (Quick Scatterometer) 바람 관측 자료를 이용하였다.

나. 동해 계절별 해양혼합층 변화

동해의 혼합층 깊이는 겨울철에 가장 깊고 여름철에 가장 얇게 나타났다(Fig. 3.1.2.1). 한편, 혼합층 계절변화는 해역 간의 차이가 보였는데 봄과 겨울철에는 동해 북부해역에서 혼합층이 깊게 나타난 것에 반해 여름과 가을철에는 남부해역에서 혼합층이 깊게 나타났다. 특히, 여름철 남부해역의 혼합층 깊이가 북부해역보다 5 m 정도 깊게 나타나는 것은 여름철 남부와 북부해역의 평균 혼합층 깊이가 각각 15 m, 10 m 인 것을 고려했을 때 무시할 수 없는 차이로 판단된다(Table 3.1.2.1). 혼합층 깊이에 영향을 미치는 바람의 세기를 살펴보기 위해 QuickSCAT 바람 관측 자료를 이용하였고 여름철 남부해역의 바람속도가 더 강한 것을 확인하였다(Fig. 3.1.2.2). 일반적으로 바람 속도와 혼합층 깊이가 양의 상관관계가 있는 것을 고려할 때 여름철 남부해역의 깊은 혼합층은 여름철 남부해역의 강한 바람에 의한 것으로 사료된다.

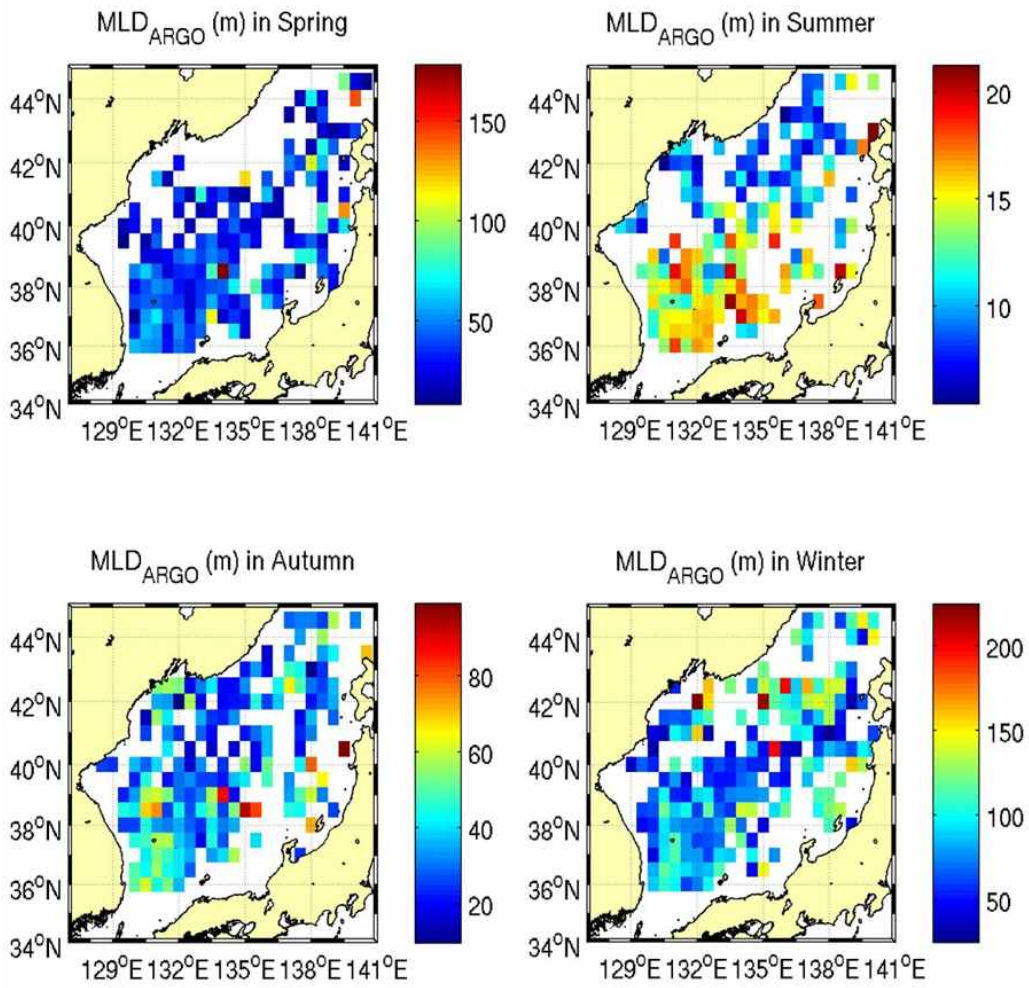


Fig. 3.1.2.1. Seasonal distribution of mixed layer depth (m) of East Sea calculated using Argo profiling float from March 1999 to April 2011.

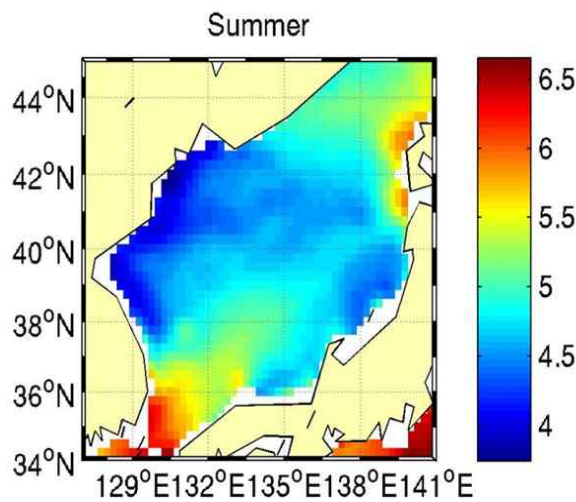


Fig. 3.1.2.2. QuickSCAT wind field (m s^{-1}) in summer.

Table 3.1.2.1. Mixed layer depth (m) for each season of North and South of East Sea

	봄	여름	가을	겨울
북	53	10	25	90
남	52	15	34	78

3. 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성

가. 자료 및 분석 방법

해양 혼합층 깊이 자료는 2004년부터 2011년 까지 $1/12^\circ$ HYCOM 수온과 염분 자료를 사용하여 계산하였고 엽록소-*a* 농도자료는 98년도부터 최근까지 존재하는 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 자료와 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua 자료를 엽록소-*a* 농도 분석에 이용하였다.

나. 재분석 자료에서 재현한 해양 혼합층

2008년 4월 동해 울릉분지 해역에서 엽록소-*a* 농도가 평년에 비해 9배 가량 높았는데 (Fig. 3.1.3.1 and Fig. 3.1.3.2) 2008년 2월 울릉분지 해역에서 나타난 깊은 해양 혼합층과 관련된 것으로 판단된다. 2008년 2월에는 해면 풍속이 강했으며 해양에서 대기로 빠져나가는 열속도 강하여 해양 혼합층이 깊게 형성된 것으로 보인다 (Fig. 3.1.3.3). 겨울철 동해상의 바람의 세기는 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 기압 차이가 영향을 받는데 2008년 두 기압의 차이가 크게 나타났다 (Fig. 3.1.3.4 and Fig. 3.1.3.5). 반면, 2004년 4월의 경우 같은 해역에서 해양 혼합층이 깊게 나타났음에도 불구하고 4월 엽록소-*a* 농도가 낮게 나타났는데 (Fig. 3.1.3.2) 엽록소-*a* 농도 변동이 겨울철 해양 혼합층 깊이의 변동 이외에 봄철 해양 혼합층 깊이 변동 영향을 다르게 받았을 가능성을 시사한다. 1월부터 4월 달에 대한해협을 통해 유입되는 해수 수송량이 2008년이 2004년에 비해 약 0.2 Sv 정도 크게 나타나는데 (Fig. 3.1.3.6) 이로 인해 두 해 모두 겨울철 혼합층 깊이가 깊었으나 봄철 엽록소-*a* 농도는 2008년의 높고 2004년에는 낮게 나타날 수 있다. 또한 2004년과 다르게 2008년 봄철 황사가 강하게 발생하여 기록적으로 높은 엽록소-*a* 농도가 나타났을 가능성

을 가지고 기상청에서 제공한 속초의 월 누적 황사농도를 살펴본 결과(Fig. 3.1.3.7) 2008년의 황사 농도는 평년보다 크게 높게 나타나지는 않아 황사와 관련될 가능성이 적다고 잠정 결론지었지만 추가 분석이 필요하다.

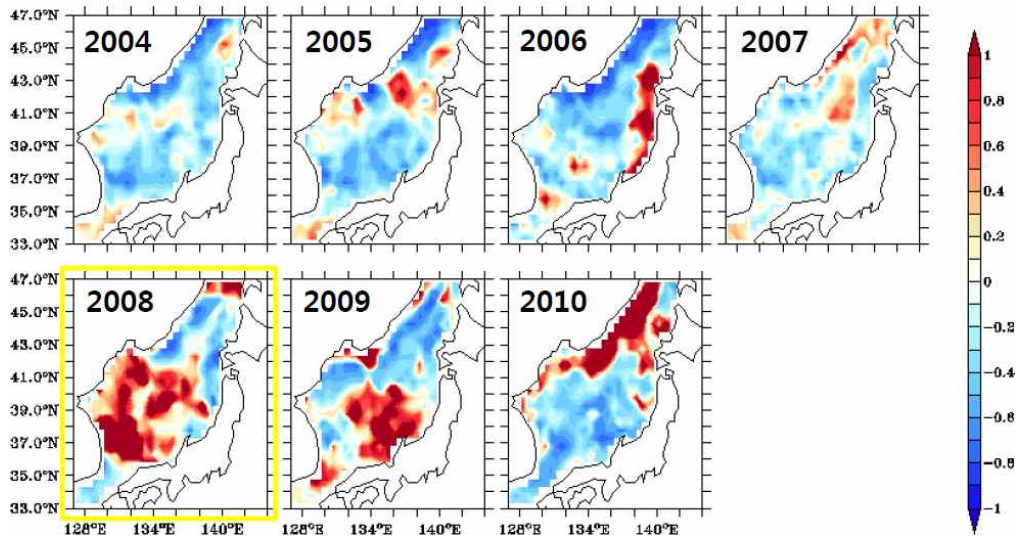


Fig. 3.1.3.1. Chlorophyll-*a* anomaly from 2004 to 2010.

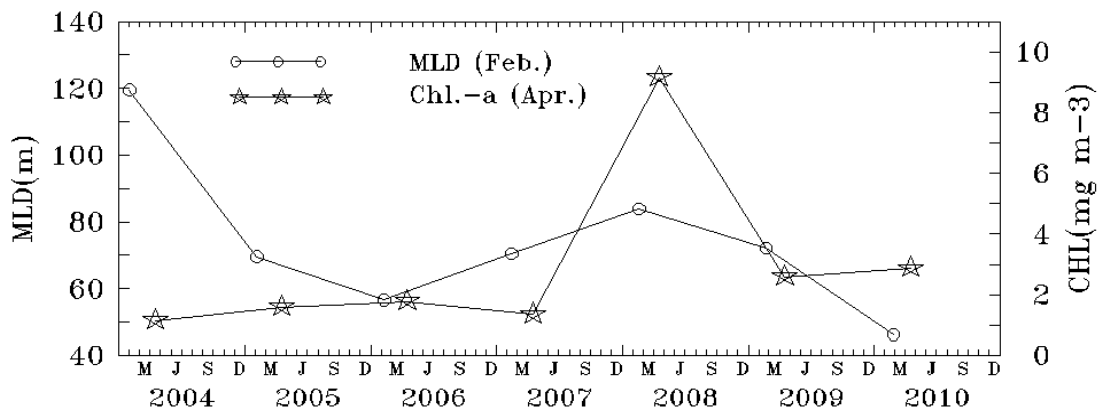


Fig. 3.1.3.2. Mixed layer depth (m) and Chlorophyll-*a* (mgC m⁻³) in Ulleung basin.

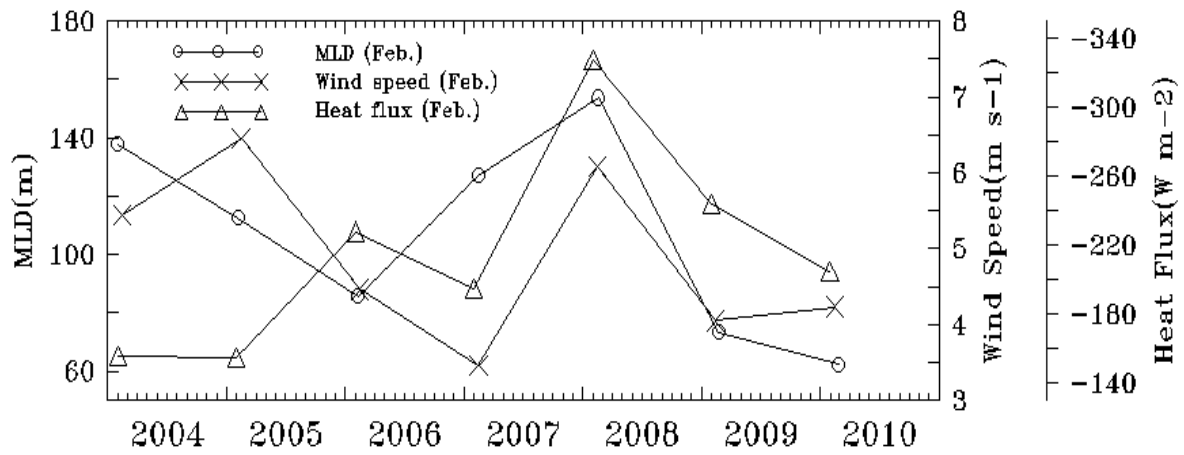


Fig. 3.1.3.3. Mixed layer depth (m), wind speed (m s^{-1}) and heat flux (W m^{-2}) in East Sea.

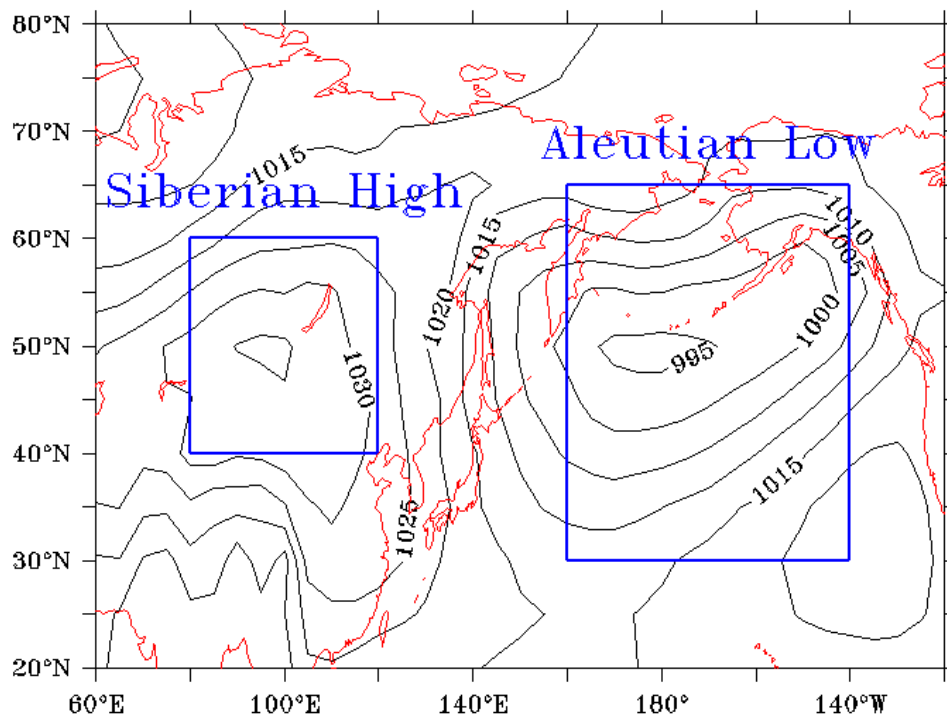


Fig. 3.1.3.4. Sea level pressure (hPa) on February in 2008 in East Asia.

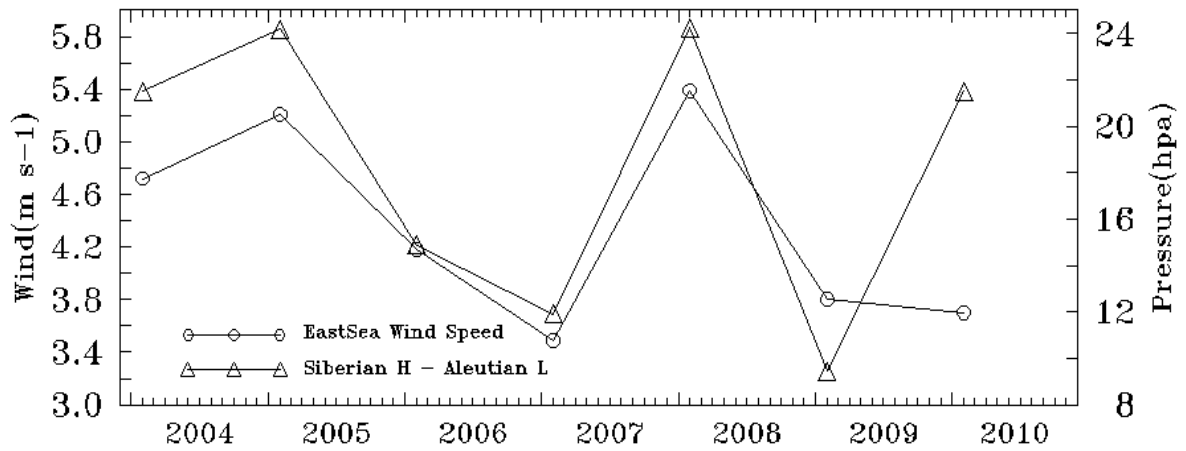


Fig. 3.1.3.5. Time series of wind speed in East Sea and difference between Siberian High and Aleutian Low.

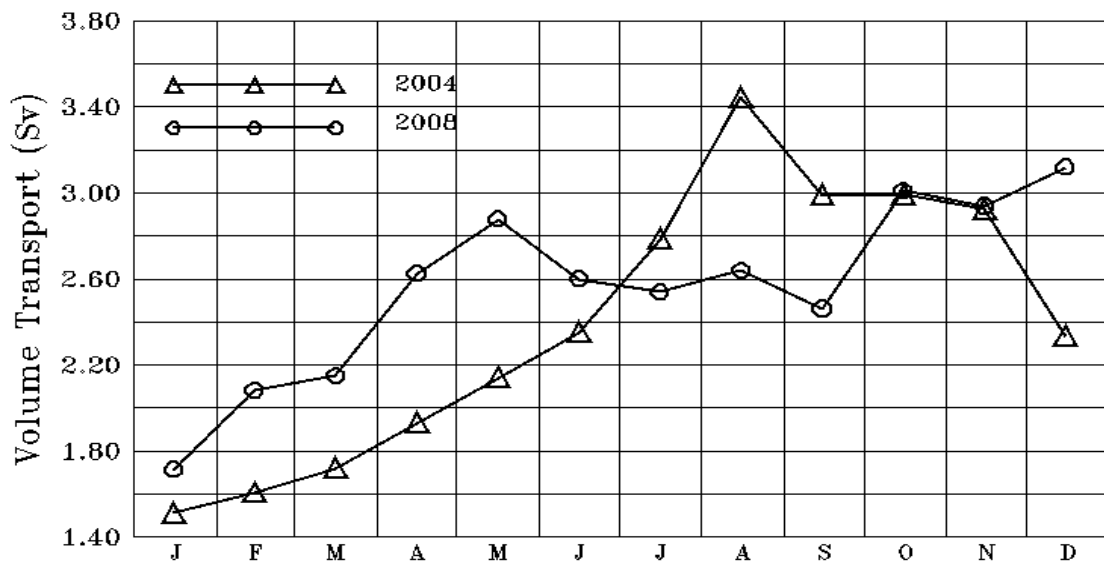


Fig. 3.1.3.6. Volume transport (Sv) through the Korea Strait from ADCP observations in 2004 and 2008.

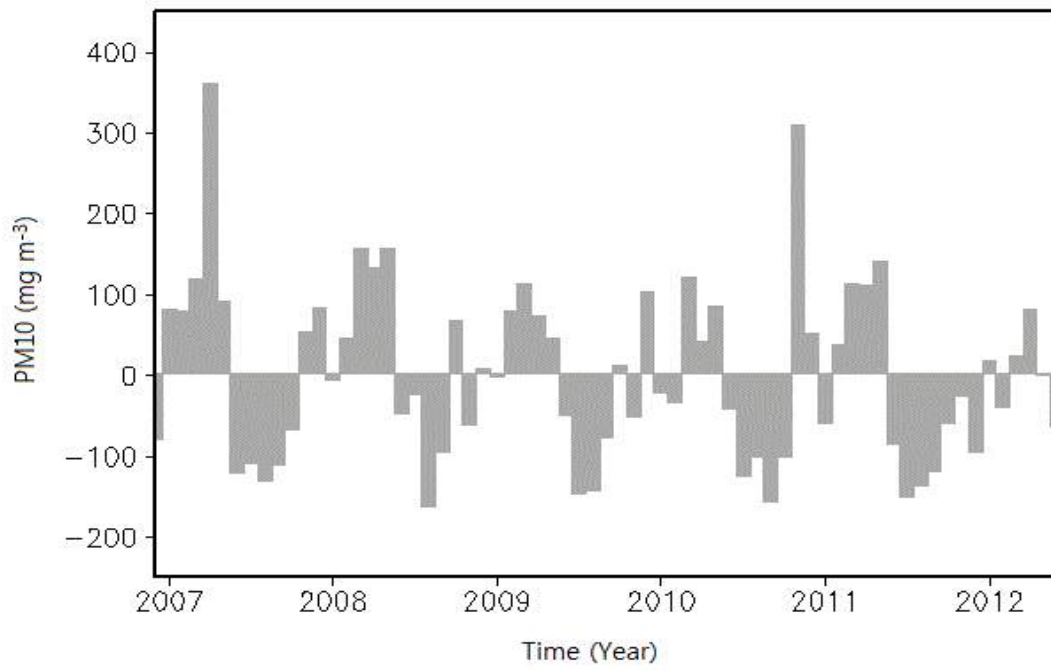


Fig. 3.1.3.7. Monthly concentration of particle matter 10 micrometer (mg m^{-3}) in Sockcho observed by Korea Meteorological Administration.

제 2 절 장기 생태자료 생산 및 분석

1. 생태 장기 시계열 자료 생산

현재 전 지구적으로 기후변화가 진행됨에 따라 수온 상승과 해수면 상승 등의 해양 환경의 변화 뿐 아니라 해양 생물의 군집구조와 다양성 등이 변화하고 있다(Antoine *et al.*, 2005; Martinez *et al.*, 2009; Irwin and Oliver, 2009; Boyce *et al.*, 2010). 기후변화에 따른 생태계 변동의 예측을 위해서는 생태계 장기 변동에 대한 이해가 요구된다. 따라서 본 절에서는 동해 남서부 생태계 장기 자료를 생산하고 분석하여 동해의 생물자원의 변동과 예측을 제공하고자 한다. 이는 생태계 기초자료가 되어 수산관리 효율을 높일 것으로 예상된다.

가. 엽록소-*a*와 투명도의 상관관계

(1) 현장조사

동해지역의 과거 엽록소-*a* 장기 자료를 확보하기 위해서는 현장 관측 자료와 문헌 조사에 의존해야 하나 자료의 수가 현저히 부족하며, 위성자료 또한 1980년대 초 일부 자료가 있으나 1997년 이후 부터 본격적인 자료가 생산 되었다. 따라서 본 연구에서는 투명도(Secchi depth, m)와 엽록소-*a* 농도(Chlorophyll-*a*, mg m^{-3})간의 유의한 상관성을 적용하여 장기 투명도 자료로부터 동해 엽록소-*a* 장기 시계열 자료를 생산하였다.

본 연구팀은 동해에서 1999-2010년 기간 동안 총 8회에 걸쳐 현장조사를 수행하였다(Table 3.2.1.1). 엽록소-*a* 농도와 투명도는 총 73개 정점에서 측정하였으며 각 정점에 대한 위치는 Fig. 3.2.1.1에 나타내었다.

Table 3.2.1.1. Region and time of observations in the dataset

Cruise	Year	Month	Data number (N)
E1	1999	Oct.	1
E2	2000	May	17
E3	2000	Nov.	5
E4	2001	Apr.	3
E5	2002	Sep.	5
E6	2007	Jul.	15
E7	2009	May	18
E8	2010	Jul.	9
Total			73

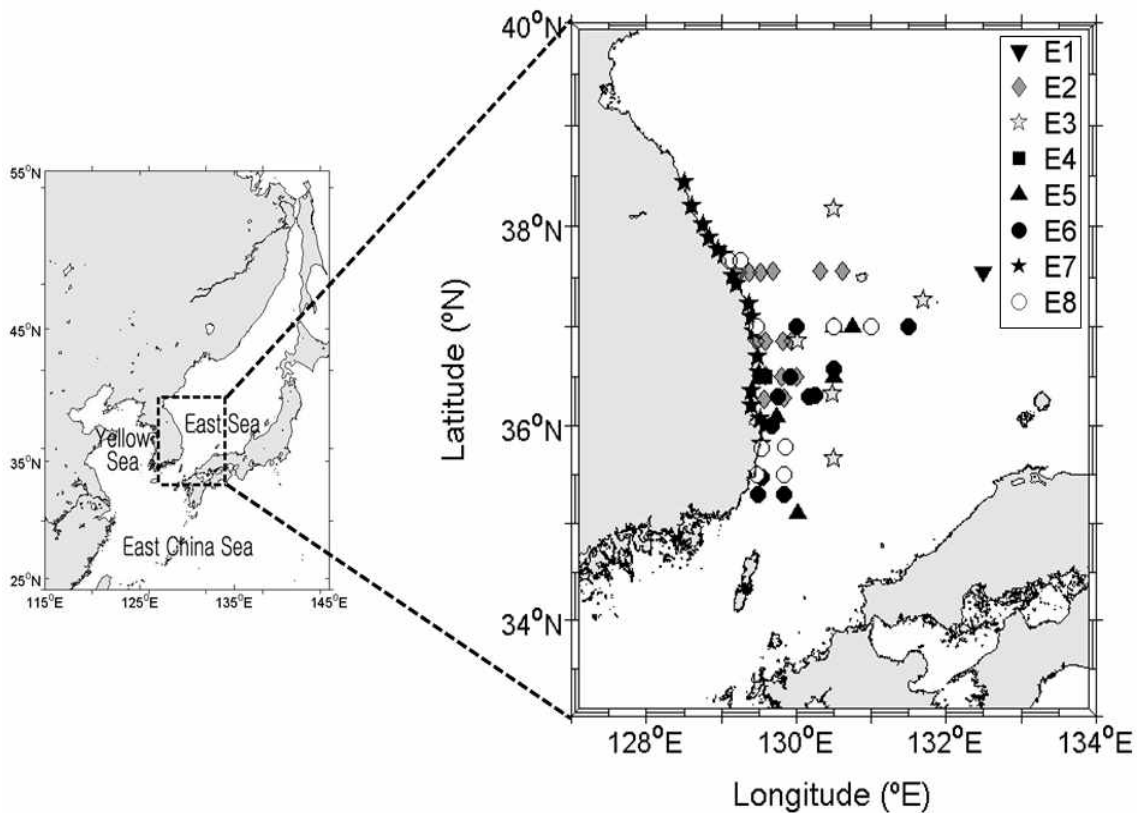


Fig. 3.2.1.1. Map of the study area. The markers indicate sampling stations. See table 1 for details.

(가) 엽록소-a 농도

엽록소-a는 각 정점마다 표층에서 채수한 해수 약 500-1000 ml를 직경 47 mm의 Whatman GF/F 여과지에 여과하여 90% 아세톤으로 24 시간동안 냉암소에서 추출하였다. 추출한 시료는 유리섬유여과지를 이용하여 용액 내 입자 및 이물질을 걸러낸 뒤, 표준 엽록소-a(Sigma Co.)로 보정한 형광광도계(TD-700, Turner Design)로 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984).

(나) 투명도

각 정점에서는 해수의 탁도를 알기 위해 직경 30 cm의 백색 원판인 투명도판(Secchi disk)을 해수 중에 내려 투명도를 측정하였다. 투명도는 투명도판이 시야에서 사라질 때의 깊이로 정의하였다. 관측하는 시간에 따라 변화하는 태양고도의 효과를 제거하기 위해 다음과 같은 모델을 사용하여 투명도를 보정하였다(Verschuur, 1997; Kleppe and Girdner, 2008).

$$Z = \frac{S(1+F)}{2F}$$

여기에서 $F = \cos(\sin^{-1}(\frac{\cos A}{1.33}))$ 으로 계산된다.

A는 태양고도이고, S는 관측한 투명도이다. Z는 천정각(Zenith angle)으로 보정된 투명도를 나타낸다.

(2) 엽록소-a 농도와 투명도의 관계식 유도

Fig. 3.2.1.2는 1999년부터 2010년 기간 동안 동해현장조사에서 관측한 투명도와 엽록소-a 농도사이의 관계를 나타낸다. 투명도와 엽록소-a 농도의 결정계수(r-square)는 0.7524(p < 0.05)로 두 자료는 높은 상관관계를 보이고 있다. 본 연구에서는 투명도와 엽록소-a 농도의 유의한 상관관계를 바탕으로 아래와 같은 관계식을 유도하였다.

$$Chlorophyll-a = 24.52 \times Secchi\ Depth^{-1.539} \quad (r^2 = 0.7524, p < 0.05, n = 73)$$

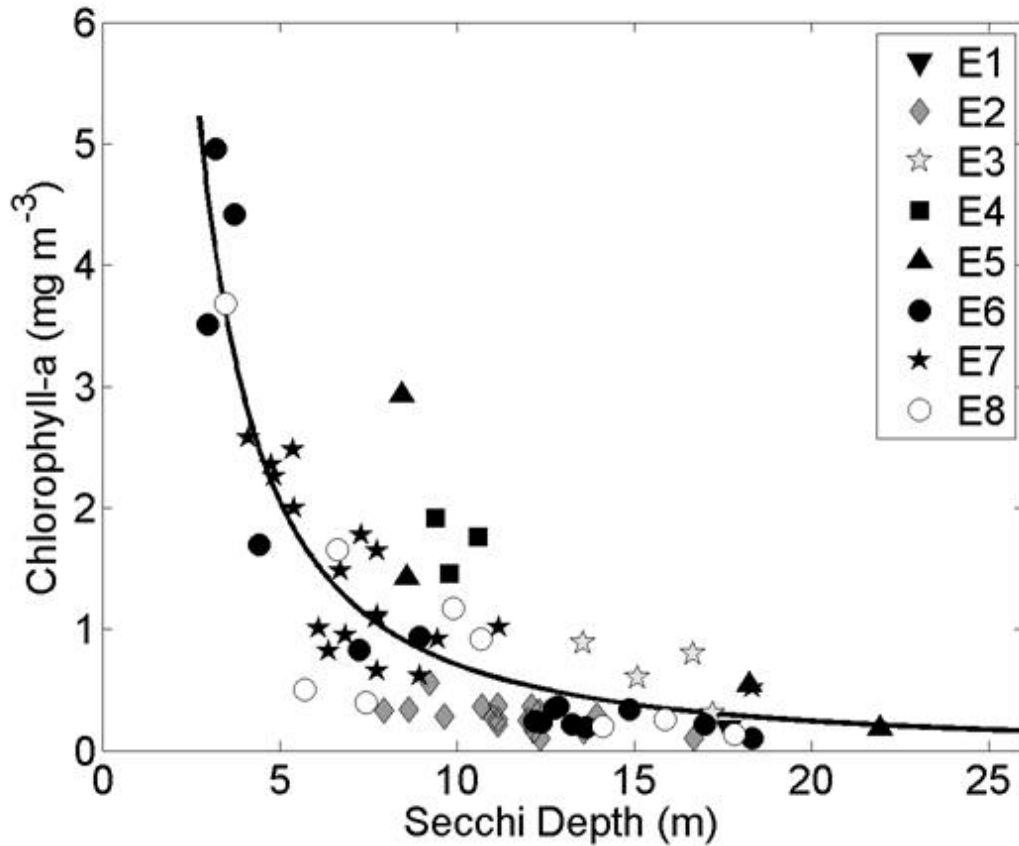


Fig. 3.2.1.2. Relationship between chlorophyll-*a* concentrations and Secchi depths.

나. 엽록소-*a* 장기 시계열 자료 생산

(1) 투명도 장기 시계열 자료

현장조사 자료를 바탕으로 유도된 투명도와 엽록소-*a* 농도의 관계식에 국립수산과학원에서 제공하는 정선 관측 자료인 장기 투명도 자료를 적용하여 엽록소-*a* 장기 시계열 자료를 생산하였다. 정선 해양 관측 자료는 1961년부터 현재까지 격월로 조사된 자료이며 동해에서 관측한 장기 시계열자료는 투명도외에 수온, 염분, 동물플랑크톤, 영양염류 등이 있다. 각 자료는 국립수산과학원 한국해양자료센터에서 다운로드 받아 사용하였다(<http://kodc.nfrdi.re.kr>).

(2) 투명도 장기 시계열 자료 검증

투명도 자료는 관측된 시간에 대한 태양고도의 효과를 제거하기 위해 태양적위 (Solar declination angle, δ)가 20도 이하인 자료를 제외시켰다. 또한 연평균 자료 분석을 위해 각 월당 관측된 자료의 수가 전체 정점의 20%이하로 관측된 월의 자료

및 연간 20%이하로 관측된 정점 자료를 제외시켰다. Fig. 3.2.1.3은 본 연구에서 분석한 국립수산과학원의 정선 해양 관측 정점을 나타내고 있다. 총 65개의 정점자료를 분석하였으며 공간적으로 연안(24개 정점)과 외해(41개 정점)로 구분하여 분석되었다.

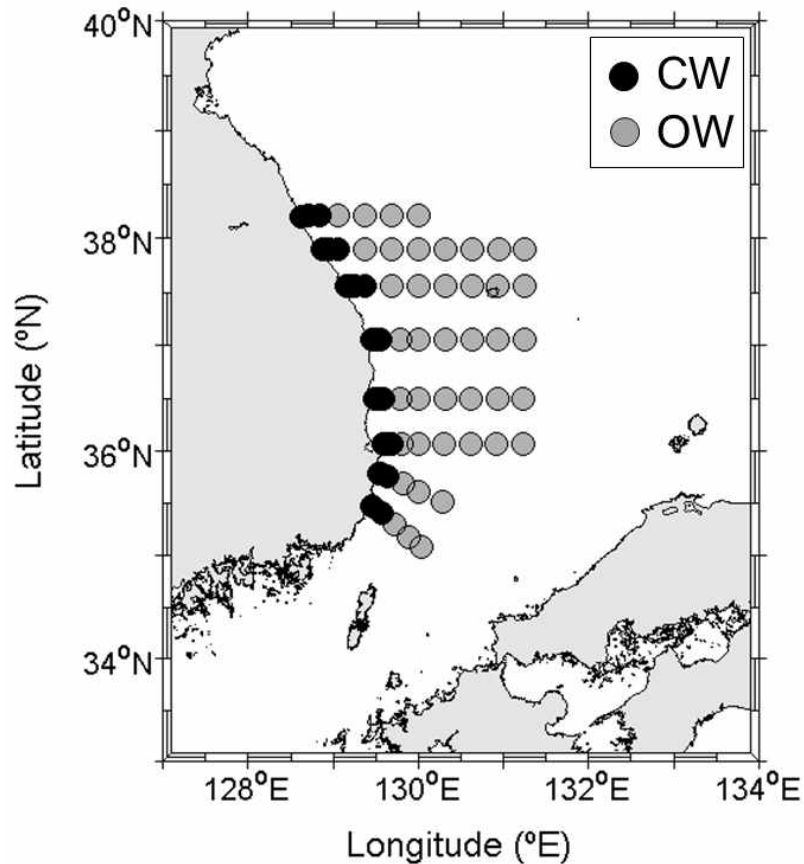


Fig. 3.2.1.3. A map showing sampling stations observed by the NFRDI since 1960s. The grey markers indicate OW (Open waters) and black markers indicate CW (Coastal waters).

2. 생태 장기 시계열 자료 분석

가. 동해 남동부 생태계 변동기작

Fig. 3.2.2.1(a)는 현장자료로 유도한 투명도와 엽록소-*a* 농도 관계식에 국립수산과학원 정선 해양 관측 자료인 투명도 자료를 적용하여 재생산한 1970년부터 2005년까지의 엽록소-*a* 농도를 나타내고 있다. 1970년부터 2005년까지의 평균 엽록소

-a 농도 값은 0.4351 mg m^{-3} 이며 표준편차는 0.0513 mg m^{-3} 이다. 엽록소-a 농도는 1975년에 0.5447 mg m^{-3} 로 가장 높았으며, 1977년에 0.3121 mg m^{-3} 로 가장 낮은 값을 보였다. Fig. 3.2.2.1(a)는 동해에서 1980년대 후반 이후 엽록소-a 농도의 뚜렷한 증가 현상이 나타나는 체제 전환(Regime shift)이 있었음을 보여주고 있다. 이 현상은 엽록소-a의 장기 변동 분석에서는 처음으로 관측된 체제 전환이다.

나. 동해 남동부 생태계 변동기작에 대한 유의성 검증

동해 남동부 생태계 변동기작이 발생한 정확한 시점을 검증하기 위해 엽록소-a 장기 자료에 대해 sequential T-test를 적용하였다(Rodinov, 2005). Fig. 3.2.1.1(b)는 동해 남동부 해역에서 1990년에 통계적으로 유의한 생태계 변동기작이 발생하였음을 나타낸다($p < 0.05$). 1990년을 기준으로 엽록소-a 농도의 연 평균값은 0.0533 mg m^{-3} 이 증가하였다.

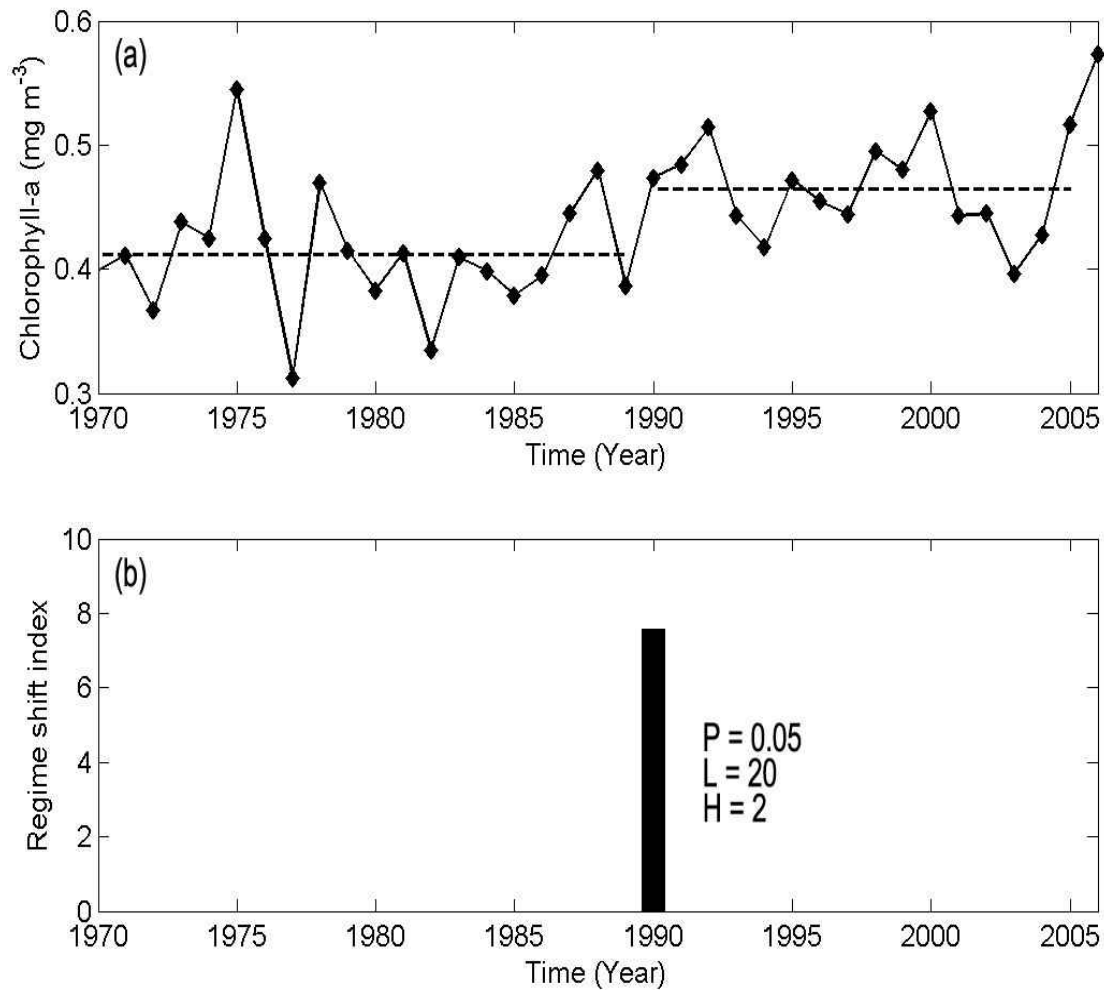


Fig. 3.2.2.1. (a) Time-series of chlorophyll-*a* concentrations from 1970 to 2005 and (b) regime shift index estimated by STARS for chlorophyll-*a* concentrations. The dotted lines represent the averages of 1970–1989 and 1990–2005.

다. 주성분 분석

엽록소-*a* 농도 외에 동해 해역에서의 생물변수 및 물리변수, 기후인자의 장기 변동 현상을 파악하기 위해 동해 남동부 해역에 영향을 미치는 겨울철 기후인자(겨울철 몬순, 시베리안 고기압, 태평양 진동, 극 진동, 알류산 저기압 지수) 및 물리변수(표층 수온, 표층 염분, 50 m 수온, 대마난류 수송량)와 생물변수(엽록소-*a* 농도, 동물플랑크톤, 오징어 어획량, 정어리 어획량)에 대해 각각 주성분 분석을 시행하였다.

(1) 자료 취득

(가) 겨울철 기후인자

겨울철 몬순(EAWM, East Asian Winter Monsoon) 지수는 12-2월의 300 hPa에서의 동서 바람장(U_{300})을 이용하여 아래와 같이 계산되었다(Jhun and Lee, 2004).

$$EAWM = U_{300}(27.8^{\circ} - 37.8^{\circ} N, 110^{\circ} - 170^{\circ} E) - U_{300}(50^{\circ} - 60^{\circ} N, 80^{\circ} E - 140^{\circ} E)$$

여기서 *EAWM*는 겨울철 몬순 지수이며, U_{300} 는 동서 바람장을 의미한다. 동서 바람장 자료는 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research)의 월별 자료를 적용하였다. NCEP/NCAR 재분석 자료의 공간해상도는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이다.

시베리안 고기압(SH, Siberian High pressure) 지수는 12-2월의 $80-120^{\circ} E$, $40-65^{\circ} N$ 지역에 대한 평균 해면 기압 자료를 적용하여 계산하였다. 해면 기압 자료는 월별 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하였다.

태평양 진동(PDO, Pacific Decadal Oscillation) 지수는 북위 20도 이상의 북쪽 태평양의 표층 수온의 주성분 분석을 통해 계산되며 NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration, www.esrl.noaa.gov)에서 제공받았다(Zhang *et al.*, 1997; Mantua *et al.*, 1997).

극진동(AO, Arctic Oscillation) 지수 역시 북위 20도 이상의 평균 해면기압의 주성분 분석을 통해 계산되며 Climate Prediction Center (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml)에서 제공을 받아 사용하였다(Thompson and Wallace, 2000).

알류산 저기압(ALP, Aleutian Low Pressure)은 알류산 열도 부근에 중심을 두고 있는 저기압으로 북태평양의 12-3월 기간 동안의 100.5 kPa 이하의 해면기압의 면적지수로 정의된다(Beamish *et al.*, 1997). 알류산 저기압 지수는 <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/>에서 다운로드 받아 처리하였다.

(나) 물리변수

표층 수온 및 표층 염분, 50 m 수온은 국립수산과학원 정선 해양관측 장기 자료를 사용하였다. 수온과 염분은 CTD (Conductivity-Temperature-Depth) profiler (Sea-Bird Co.)를 사용하여 측정되었다. 겨울철 대마난류 수송량은 SODA (Simple Ocean Data Assimilation)의 월평균 해류 자료로부터 계산하였다. 공간해상도는

0.4° x 0.25° 이다.

(다) 생물변수

동물플랑크톤은 국립수산과학원 정선 관측 자료를 적용하였다. 동물플랑크톤은 각 정점에서 NORPAC 네트(구경 0.45 μm , 망목 330 μm)를 사용하여 수심 100 m부터 표층까지 0.5–1.0 m s^{-1} 로 정량 채집하였다. 동해의 오징어 어획량과 정어리 어획량 역시 국립수산과학원에서 제공받았다.

(2) 각 자료에 대한 주성분 분석

Fig. 3.2.2.2(a)는 겨울철 기후인자 및 물리변수에 대해 주성분 분석을 한 결과 제 1 성분을 나타내고 있고 Fig. 3.2.2.2(b)는 생물변수에 대한 제 1 성분을 나타내고 있다. 각 변수에 대한 주성분 분석 결과는 제 1 성분에서 엽록소-*a* 농도의 체제 전환과 시기적으로 일치하는 패턴이 나타나며, 겨울철 기후인자 및 물리변수에 대한 주성분 분석 결과보다 생물변수에 대한 제 1 성분이 더 뚜렷한 체제 전환 현상을 보이고 있다. 또한 겨울철 기후인자 및 물리변수에서의 체제 전환은 1989년으로 엽록소-*a* 장기 시계열 자료의 체제 전환시기보다 1년 빠르게 일어났고, 생물변수의 체제 전환은 1991년으로 엽록소-*a* 농도의 체제 전환시기보다 1년 늦게 나타났다. 따라서 1990년에 일어난 동해 해역의 엽록소-*a* 장기 변동의 체제 전환 현상은 엽록소-*a* 농도를 포함한 생물 현상 뿐 아니라 기후인자 및 동해 해역의 생태계 전반에 걸쳐 나타난 현상으로 보여 진다.

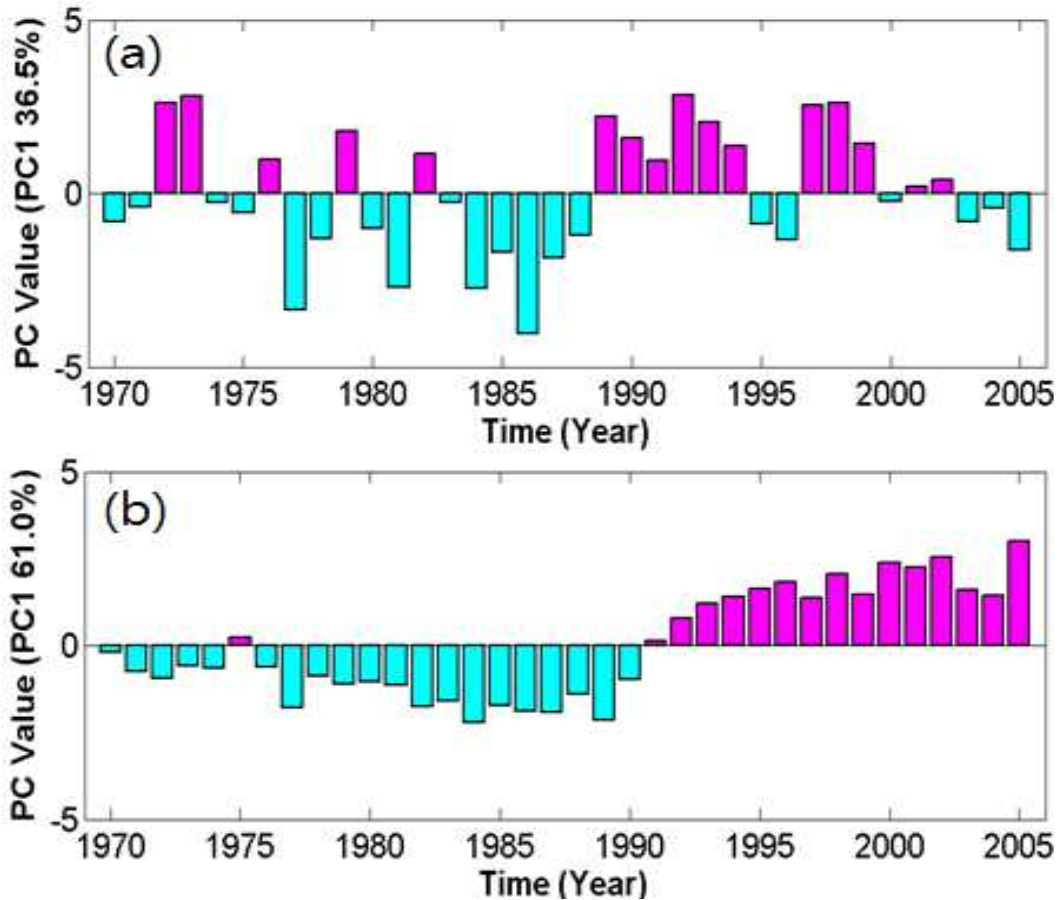


Fig. 3.2.2.2. (a) The EOF mode 1 variations of time-series of winter climate indices and physical factors (PC1=36.5%) and (b) biological factors (PC1=61.0%).

3. 동해 남동부 생태계 변동기작 규명

가. 동해 남동부 생태계 변동기작에 대한 가설 수립

(1) 가설 1: 겨울철 대마난류 수송량의 증가

Tian *et al.*(2008)에 따르면 식물플랑크톤 중 규조류와 동물플랑크톤 등은 대마난류 해역에서 1980년대 후반 이후 뚜렷하게 증가하였으며, 이 현상은 겨울철 수온 증가와 관련된다. Fig. 3.2.2.2와 같이 1980년대 후반에 일어난 체제 전환은 겨울철 동해에 영향을 미치는 여러 기후인자에도 뚜렷이 나타난 현상으로 겨울철 기후변동은 겨울철 대마난류 수송량의 증가와 동해 남동부 해역의 겨울철 수온 증가에 영향을 미친 것으로 보여 진다. Fig. 3.2.3.1은 겨울철 대마난류 수송량 및 표층 수온과 표층과

50 m 수온 차에 대한 편차와 누적 합을 나타낸다. 각 변수의 편차뿐 아니라 누적 합에서도 1990년 이전까지 감소되는 경향을 보이다가 1990년 이후 증가되는 패턴을 확인할 수 있다. 따라서 1980년대 후반의 겨울철 기후인자 변동에 의해 동해 남동부 지역으로 들어오는 따뜻한 대마난류 수송량이 증가하고 대마난류에 의해 증가된 겨울철 수온은 1990년 이후 엽록소-*a* 농도의 연평균 증가 및 생물자원 변동에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

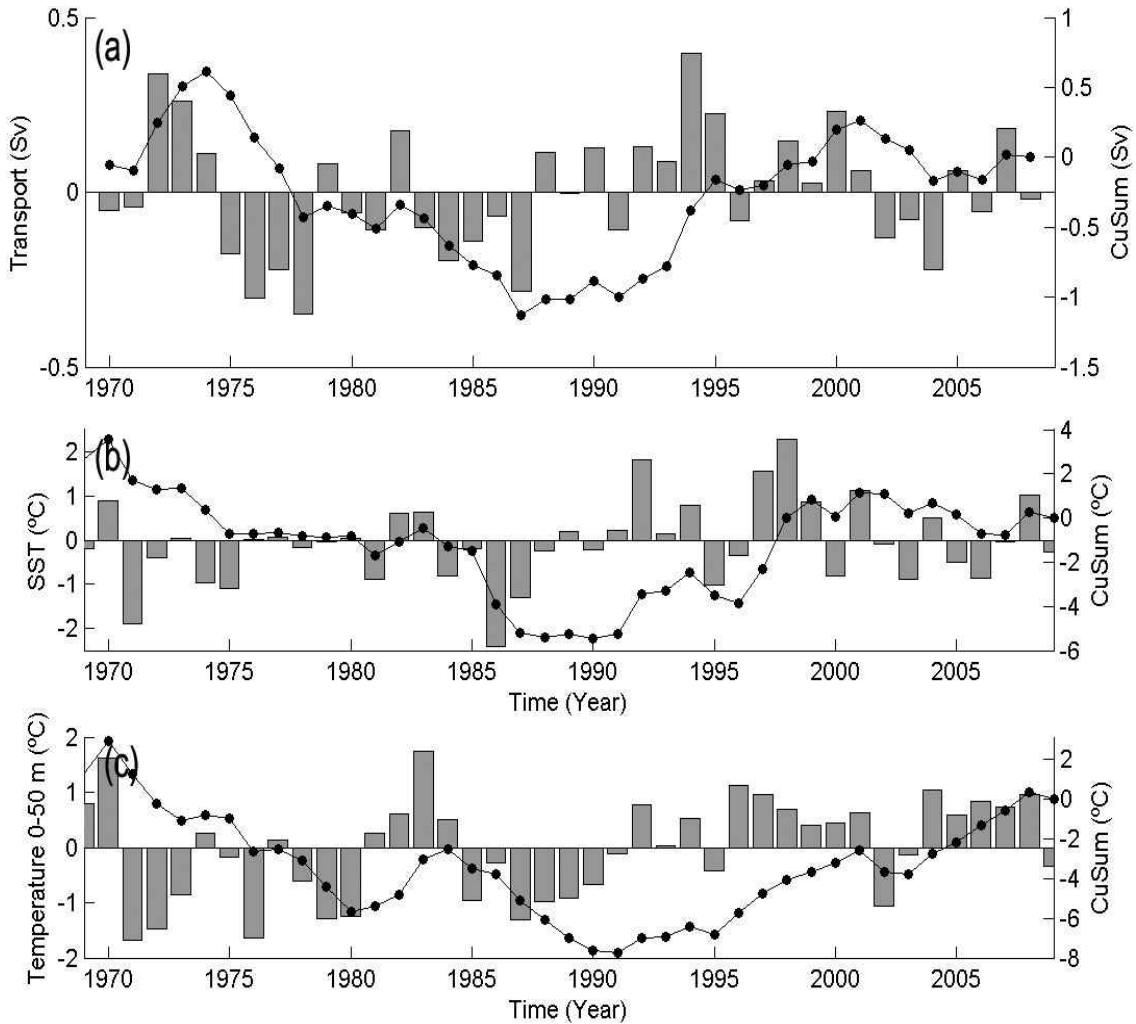


Fig. 3.2.3.1. Anomaly time series and Cumulative sums of (a) volume transport of Tsushima current, (b) SST, and (c) surface difference of temperature 0 m and 50 m during 1970–2007.

(2) 동해 남동부 해역의 공간적인 엽록소-*a* 농도의 변동 차

엽록소-*a* 농도의 변동 현상을 공간적으로 분석하기 위해 동해 남동부 해역을 공간

적으로 외해와 연안으로 나누어 1970년부터 2005년까지의 장기 엽록소-*a* 시계열 자료를 분석하였다(Fig. 3.2.3.2). 연 평균값은 공간적으로 외해($0.3817 \pm 0.0420 \text{ mg m}^{-3}$)보다 연안($0.5254 \pm 0.0759 \text{ mg m}^{-3}$)에서 높았으며, 연안에서는 엽록소-*a* 농도가 0.7031 mg m^{-3} 로 1975년에 가장 높은 값을 보였다. 또한 T-test를 적용하여 체제 전환 시기를 동해 남동부 해역을 공간적으로 나누어 분석한 결과에서도 외해와 연안 각각 1990년에 유의한 체제 전환이 나타났음을 확인하였다($p < 0.05$). 1990년의 체제 전환을 전 후로 연평균 값의 차이는 외해(0.0348 mg m^{-3})보다 연안(0.0797 mg m^{-3})에서 컸다. 그러나 Fig. 3.2.3.3을 살펴보면, 외해와 연안에서 모두 1990년을 기점으로 연평균 값은 증가했으나 계절적으로 다른 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 4-10월 기간 동안은 평균 엽록소-*a* 농도가 증가하였으나 가설 1과 같이 체제 전환 이후 겨울철 시기 동안 대마난류에 의한 표층 수온의 증가로 엽록소-*a* 농도가 증가하는 현상은 나타나지 않았다. 따라서 체제 전환 이후 나타난 연평균 엽록소-*a* 농도의 증가는 겨울철 시기를 제외한 시기동안 발생하였으며, 공간적으로는 용승이 발생하는 4-10월 동안 특히 연안에서 체제 전환이후 평균값 대비 엽록소-*a* 농도가 20% 이상 증가되었으나 외해에서는 용승현상이 약한 4, 6월 시기에는 평균값 대비 엽록소-*a* 농도의 증가가 10% 미만으로 낮게 일어났다가 용승이 강하게 나타나는 여름에 증가폭이 15% 이상 높은 결과를 보였다.

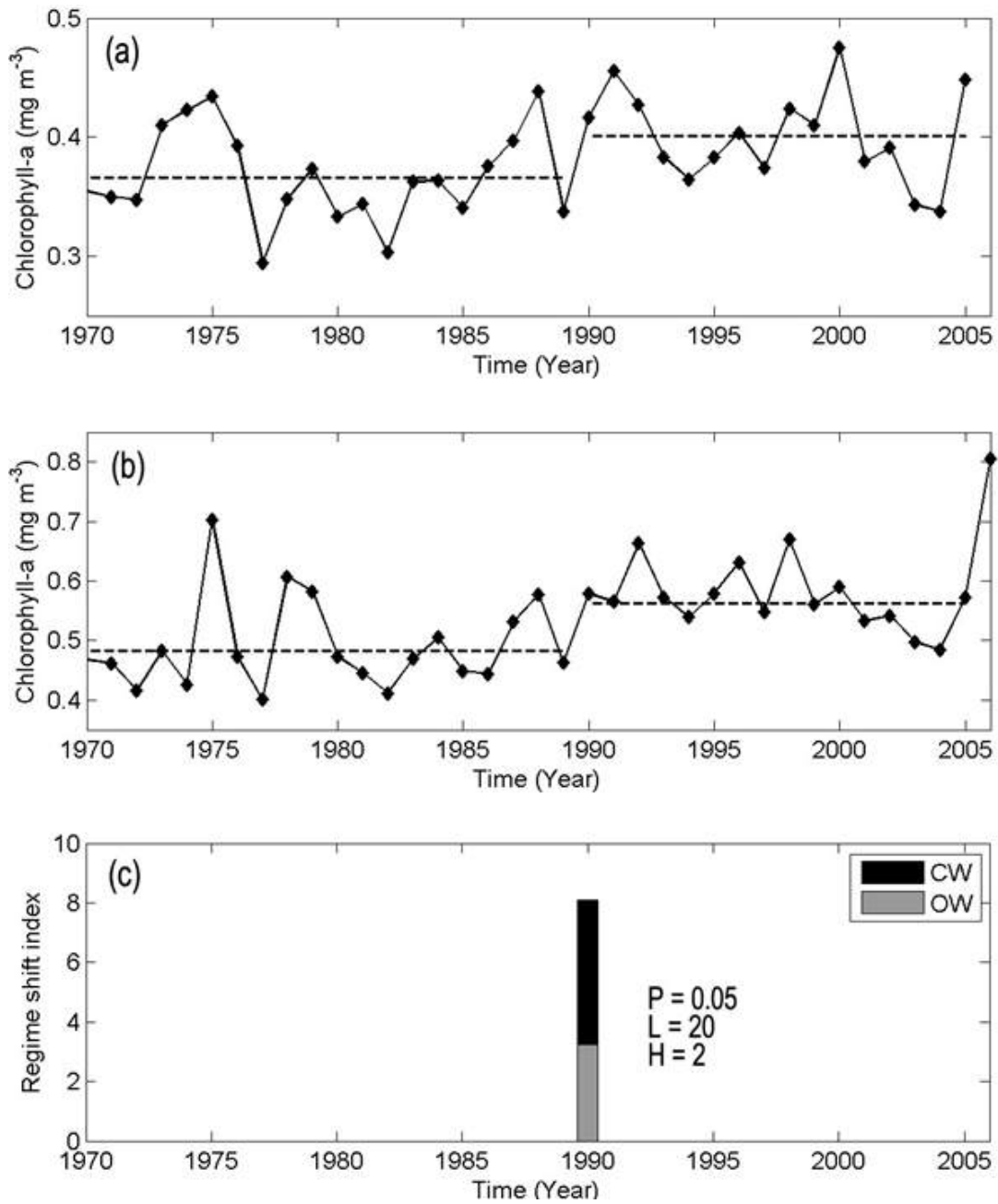


Fig. 3.2.3.2. Time-series of chlorophyll-*a* concentrations from 1970 to 2005 in (a) OW (Open waters), (b) CW (Coastal waters), and (c) regime shift index estimated by STARS for chlorophyll-*a* concentrations. The dotted lines represent the averages of 1970-1989 and 1990-2005.

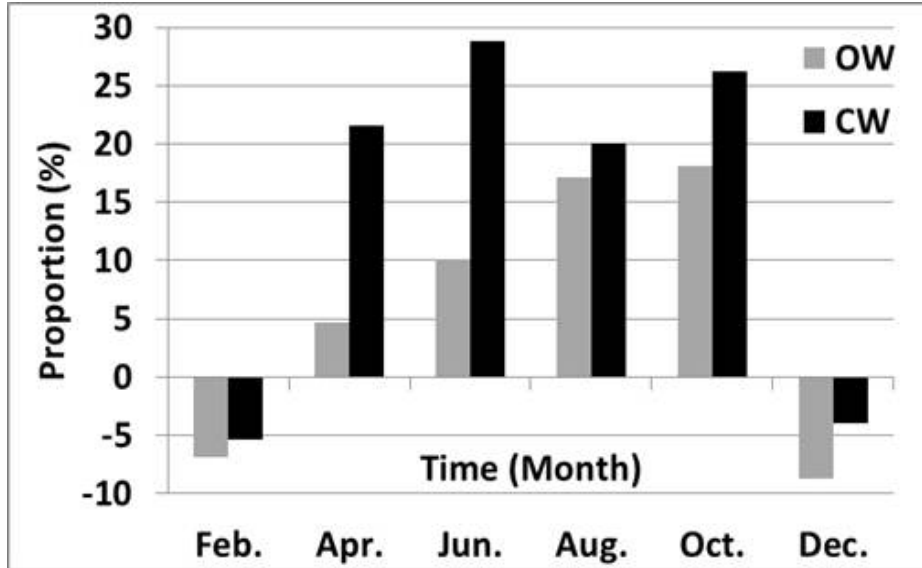


Fig. 3.2.3.3. The percentage difference between the averages of 1970–1989 and 1990–2005 per month. The difference was divided by means of chlorophyll-*a* concentrations in CW (Coastal waters) and OW (Open waters) during 1970–2005.

(3) 가설 2: 연안 용승의 강화

Yoo and Park (2009)에 따르면 동해에서 용승은 해안을 따라 겨울을 제외한 모든 계절에 주기적으로 발생하며 용승에 의해 연안의 엽록소-*a* 농도가 증가된다. 또한 용승이 강한 시기에 외해의 엽록소-*a* 농도는 연안의 엽록소-*a* 농도에 비례하는 경향을 보인다. Fig. 3.2.3.4는 1968년부터 2006년까지의 8월 표층 수온 경향을 나타낸다. 감포-울기 부근의 연안에서 표층 수온이 낮아지며, 연안을 따라 바깥부근까지 표층 수온이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 3.2.3.3에서 특히 연안에서 체제 전환 이후 4-10월 기간 동안 엽록소-*a* 농도가 증가되고 외해에서는 용승이 강해지는 여름에 엽록소-*a* 농도의 증가폭이 커지는 현상과 연안 용승의 증가가 어느 정도 관련이 있음을 보여준다. 그러나 1980년대 후반에 일어난 생태계 변동기작은 동해 남동부 해역에 국한된 현상이 아닌 동해 전 해역에 걸쳐 나타난 현상이다. 따라서 연안 용승 외에 또 다른 기작이 동해 생태계 변동에 영향을 끼친 것으로 보인다. 추후 연안 용승과 대마난류의 수송량을 복합적으로 고려하여 분석하는 것이 필요하다.

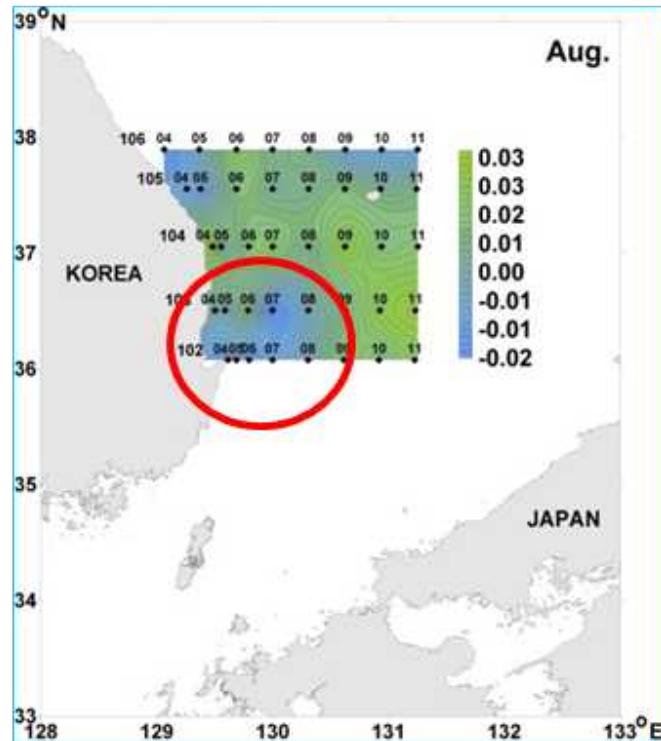


Fig. 3.2.3.4. SST long-term trends for 1998–2006 years (Shin and Oh, 2009).

4. 기후 지수와 생태계 변동 간의 상관성 분석

기후 지수와 생태계 변동 간의 상관관계를 살펴보기 위해 10년 동안(1998–2007년)의 SeaWiFS 위성 자료를 활용하여 일차생산력의 변화와 기후인자와의 상관성을 분석하였다.

가. 일차생산 알고리즘 검증

동해 해역에 대한 일차생산을 추정하기 위해 한반도 주변해역에서 관측한 현장자료를 바탕으로 개발된 일차생산 알고리즘들을 통계적으로 비교 평가하였다(Table 3.2.4.1). 분석 결과는 4가지 알고리즘 중 KI (Kameda and Ishizaka, 2005) 알고리즘이 현장 관측 자료와의 평균 제곱근 편차가 낮고 r^2 가 높은 것을 보여준다. 또한 회귀직선 기울기는 0.916–1.18로 현장 자료와 일대일 관계에 가까웠다. 따라서 전반적으로 본 연구결과에 따라 한국 주변해역에서의 일차생산 추정을 위한 알고리즘으로 비교적 편차가 작고 높은 정확도를 보이는 KI 알고리즘을 추천한다. 알고리즘 적용 결과에 대한 자세한 내용은 부록에 수록하였다(Yoon *et al.*, 2012).

Table 3.2.4.1. Statistical evaluation of primary productivity algorithms

Model	RMSD (90 %)	RMSD (70 %)	S (90 %)	S (70 %)	STD	R ²	P	N
VGPM	582	589	1.65	2.12	686	0.282	< 0.001	117
KI	301	270	0.916	1.18	323	0.356	< 0.001	
SI	587	572	1.04	1.34	600	0.106	< 0.001	
SB	288	255	0.774	1.00	313	0.393	< 0.001	

The slope (S) and coefficient of determination (R²) were derived from a type II linear least squares fit between *in situ*-PP (NPP = 90 % of GPP and NPP = 70 % of GPP) and model-retrieved IPP. The intercept (I) was fixed at 0. STD is Standard deviation (STD) and Root Mean Square Deviation (RMSD) is centered root mean square difference.

나. 일차생산 추정

10년(1998-2007년) 동안의 동해의 일차생산은 KI 알고리즘을 적용하여 추정되었다. KI의 입력변수는 표층 수온, 표층 엽록소-a 농도, 표층 광량, 유광층 깊이가 있다. 표층 수온은 JPL (Jet Propulsion Laboratory/Caltech)에 있는 PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)의 NOAA AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer) 레벨-3 자료를 획득해 사용하였다. 공간해상도는 4 km x 4 km 이다. 표층 수온을 제외한 위성자료는 NASA GSFC (National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center)에서 얻어진 레벨-3 SeaWiFS 자료를 사용하였다. 자료들의 공간 해상도는 9 km x 9 km이며, 월 평균 합성 자료를 사용하였다.

다. 동해 일차생산의 시공간적 패턴

본 연구에서는 연간 일차생산력 변화에 주성분 분석 및 K-means clustering 통계 방법을 적용하여 Fig. 3.2.4.1과 같이 동해해역을 5개 해역으로 분류하였다. 각 해역은 계절별, 연별로 뚜렷하게 일차생산의 시, 공간적 패턴을 보인다(Fig. 3.2.4.2). 일차생산력은 남쪽이 북쪽보다 높고, 서쪽이 동쪽보다 높은 경향을 보인다. 동해 전체 해역에 대해 연간 일차생산력은 비슷하나 각 해역별로는 연간 일차생산력의 변동성이 컸다. 본 연구의 대상해역인 동해 남동부 해역은 1번 해역으로 동해 전 해역의 계절 변화에 비해 특히 겨울과 초봄에 일차생산력이 높으며 4월과 10월에 두 번 피크 값

을 보였다. 또한 1번 해역의 연 평균 값은 $220.1 \pm 7.527 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 로 동해 전 해역의 연 평균값($197.6 \pm 2.927 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$)에 비해서도 $22.5 \text{ gC m}^{-2}\text{y}^{-1}$ 이상 높으며 연 변화 또한 평균값에 비해 컸다(Fig.3.2.4.2).

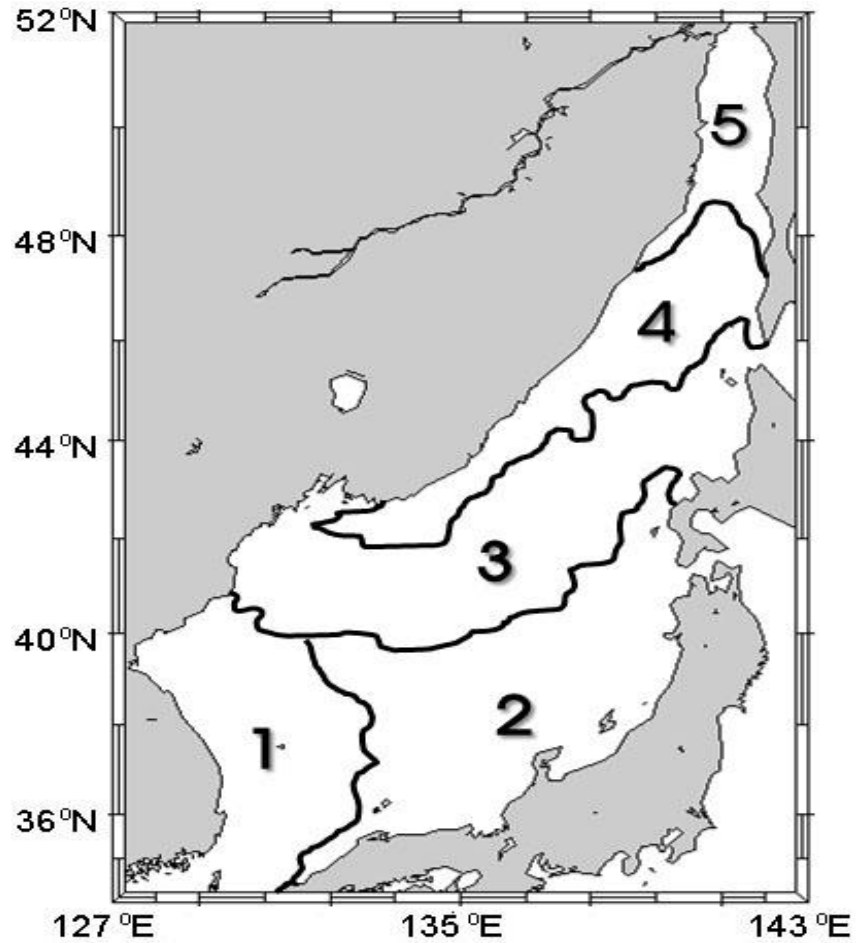


Fig. 3.2.4.1. Classification of the five areas by the k-means algorithm based on the seven largest PCs of monthly primary production.

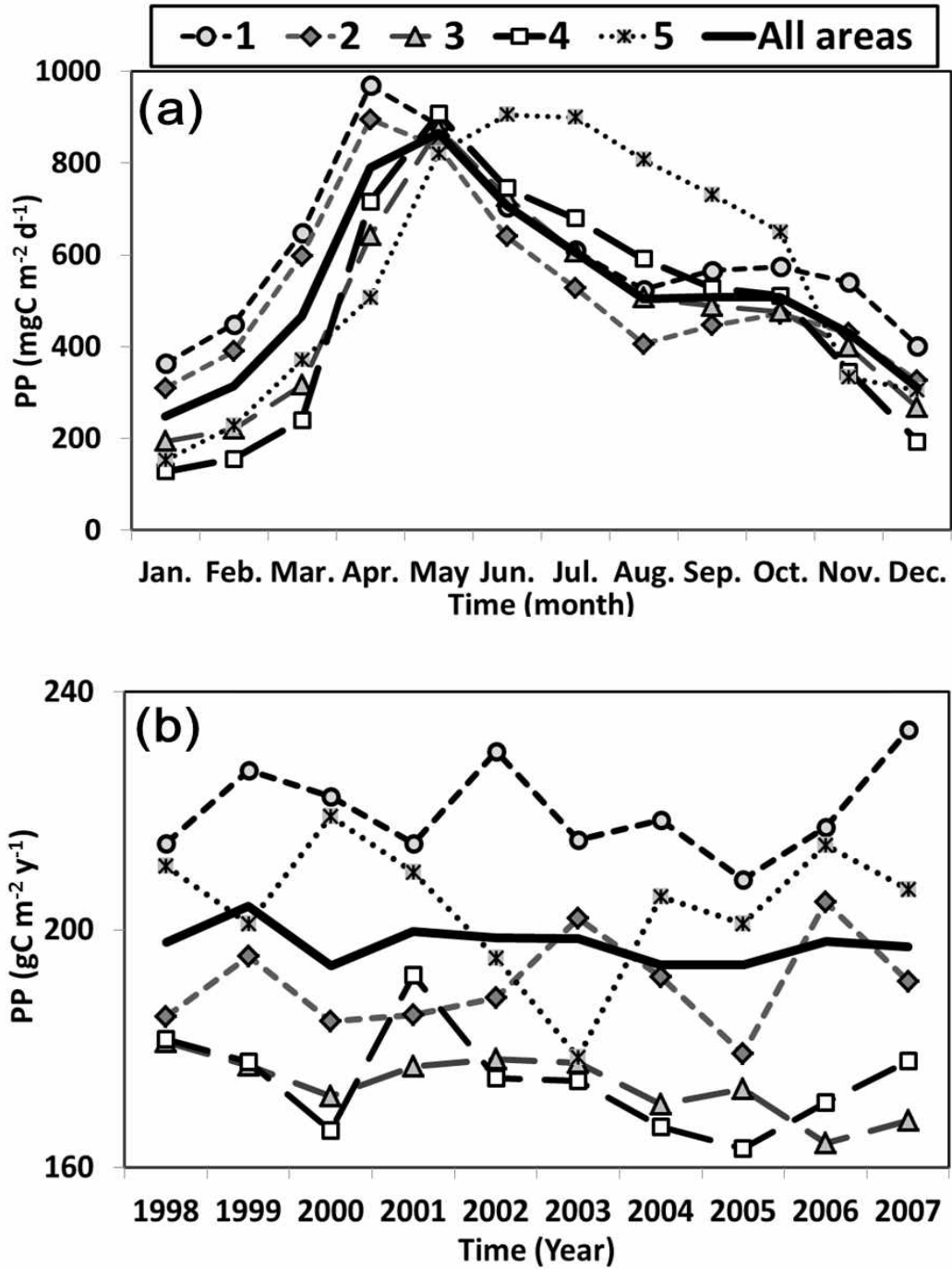


Fig. 3.2.4.2. (a) Seasonal and (b) inter-annual variations of primary production in the five areas. The bold line indicates average for East Sea.

라. 동해의 국지적 요인이 일차생산력에 미치는 영향 분석

각 해역별로 일차생산력의 시, 공간적 패턴 차이에 영향을 주는 요인을 파악하기 위해 여러 기후인자 및 물리인자와의 상관성을 분석하였다(Table 3.2.4.2).

두 변수 간의 상관관계는 Non-parametric Spearman rank correlation coeffi-

cients를 적용하여 계산하였다(Bland, 2000). 겨울철 기후인자는 3절 2.2.다의 주성분 분석의 겨울철 기후인자 자료와 같다. 물리인자는 바람 속도, 혼합층 깊이(MLD, Mixed layer depth), 표층 광량(Surface PAR), 대마난류 수송량(Volume transport of Tushima Warm Current)으로 바람 속도는 DMSP (Defense Satellite Meteorological Satellite Program)에서 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 자료를 받아 사용하였고, 공간해상도는 각 픽셀 당 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 로 월평균 자료를 사용하였다. 혼합층 깊이는 ECCO2 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean, Phase II) 수온 및 염분 자료를 받아 계산하였으며 ECCO2의 공간해상도는 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 로 de Boyer Montégut *et al.*(2004)에 따라 계산하였다. 대마난류 수송량은 Fukudome *et al.*(2010) 자료를 참고하였다.

Table 3.2.4.2는 일차생산력의 연 변동이 각 해역별로 기후인자 및 물리변수와 다른 상관관계를 보이는 것을 나타낸다. 특히 본 연구해역인 1번 해역의 연간 일차생산력의 변동은 다른 해역과 달리 겨울철 기후인자 중 태평양 진동에 반비례($r = -0.636$, $p < 0.1$)하고 극 진동에 비례($r = 0.685$, $p < 0.05$)하였다. 또한 극 진동은 겨울철 대마난류 수송량(12월, $r=0.633$, $p < 0.1$)과 4월의 대마난류 수송량($r=0.683$, $p < 0.1$)에 비례하는 결과를 보였다. 월별로 살펴보면 1번 해역에서만 4월의 대마난류 수송량은 4월의 일차생산력과 비례하는 결과를 보였는데($r = 0.795$, $p < 0.05$), 이는 4월에 대마난류 수송량의 증가가 일차생산력의 증가와 어느 정도 관계가 있다는 것으로 볼 수 있으나 추후 대마난류 수송량과 일차생산력간의 정확한 메커니즘을 이해할 필요가 있다.

Table 3.2.4.2. Schematic table to summarize to linkages between the climatic variability, physical factors and primary productivity in the East Sea

Area	Primary productivity	Physical factor	Climate index
1	Annual mean (+)	–	Winter PDO (–) and AO (+)
	February (+)	Surface PAR (+)	Winter SH (–)
	April (+)	Volume transport of TWC (+)	Winter AO (+)
2	Annual mean (+)	–	–
	February (+)	Surface PAR (+)	Winter SH (–) and EAWM (–)
	March (+)		Winter ALP (+)
3	Annual mean (+)	–	Winter ALP (+)
	January–April (+)	MLD (–) and Wind (–)	Winter SH (–) and EAWM (–)
	March (+)	Surface PAR (+)	Winter ALP (+)
4	Annual mean (+)	–	Winter EAWM (–)
	January–April (+)	MLD (–) and Wind (–)	Winter SH (–) and EAWM (–)
	April (+)	Surface PAR (+)	Winter ALP (+)

제 3 절 물리-생태계 접합모형을 이용한 생태계 변동기작 규명

1. 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 측정

가. 생태모델 개선을 위한 culture apparatus 설계 및 제작

식물플랑크톤 기능성 그룹 모형과 관련하여 생리변수자료가 절대적으로 부족하며 이것으로 인한 모형결과의 불확실성이 유발되므로 실험에 의한 생리학적 자료의 축적이 필요하다고 판단하였다. 이를 위하여 turbidostat, culture apparatus를 제작하였으며 동해 출현종을 대상으로 최대성장률 측정실험을 실시하였다.

(1) Turbidostat

생리실험에 의한 생리 매개변수에 대한 자료 축적을 위해 microcosm 초기 모형을 Turbidostat형으로 설계하여 제작하였다. 이 모델은 탁도(세포 밀도)의 차이에 따라 배양액을 공급하는 개방 연속 배양기이며 광센서와 자동펌프가 부착되어 있다.

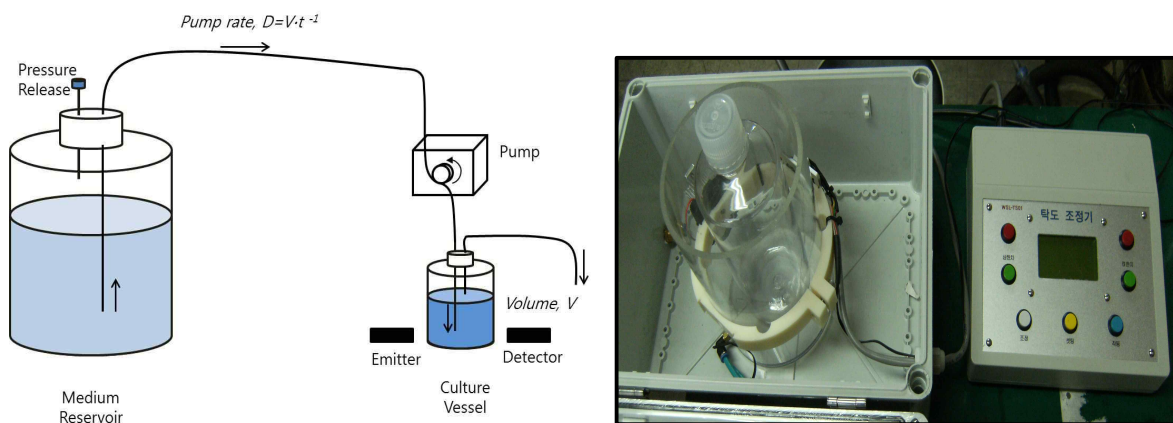


Fig. 3.3.1.1. Turbidostat.

(2) 광도-수온 조절배양기

여러 개의 광도-수온 구배 조건으로 동시에 배양하기 위한 광도 4구간, 수온 3구간 조절할 수 있는 배양기를 제작하였다.

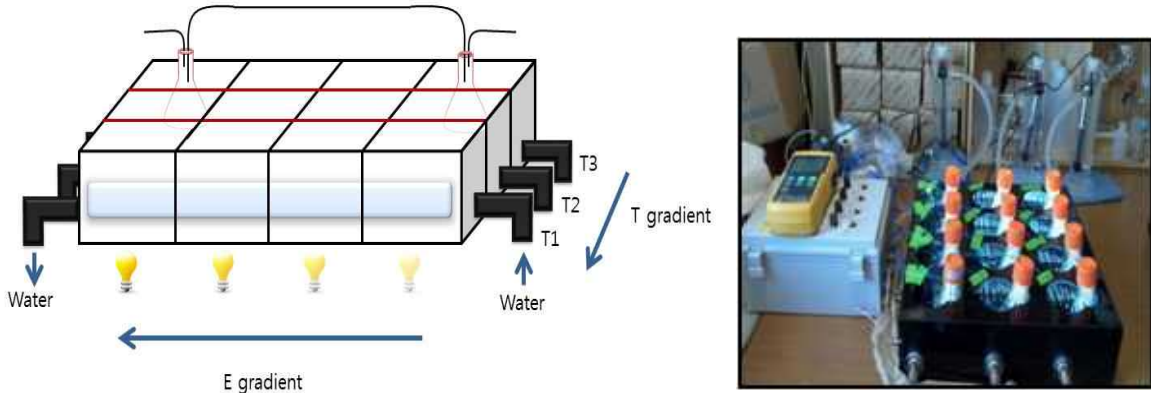


Fig. 3.3.1.2. Light-temperature controlled semi-continuous culture apparatus.

나. 실험에 의한 기능성 그룹 생리학적 자료의 축적

(1) 2011년 실험 측정

(가) 재료 및 방법

기존문헌을 참고하여 동해에 나타나는 식물플랑크톤 출현종 및 우점종을 조사하여 이를 바탕으로 2011년에 총 8종의 대상종을 선정하였고(Table 3.3.1.1) 실험조건은 Table 3.3.1.2와 같다.

Table 3.3.1.1. Phytoplankton species used in 2011

Diatoms	Cyanobacteria	Coccolithophore
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	<i>Synechococcus nidulans</i>	<i>Emiliania huxleyi</i>
<i>Cylindrotheca closterium</i>	<i>Trichodesmium erythraeum</i>	
<i>Ditylum brightwellii</i>		
<i>Asterionella sp</i>		
<i>Skeletonema costatum</i>		

Table 3.3.1.2. Experimental condition in 2011

항목	조건
온도 (°C)	15, 20, 25
광도 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	100-150
광주기 (light : dark)	12h : 12h
영양염 조건	-Si, +Si
실험기간	8-12일
측정방법	24시간 간격으로 각 샘플의 엽록소-a 농도 3번씩 측정

(나) 실험 결과

Table 3.3.1.3에 성장 실험에서 측정한 성장률을 온도 조건별로 요약하였다. 온도에 따라 큰 변화가 없는 종은 *Astrionella sp.*과 *T. eccentrica* 두 종이며 15 °C에서 가장 큰 성장률을 보이는 종은 *S. costatum*과 *D. brightwelli*, 그리고 25 °C에서 가장 큰 성장률을 보이는 종은 *T. erythraeum*으로 나타났다. *T. erythraeum*의 경우 규산염이 성장을 크게 제한하였고 최종 생물량(yield) 또한 온도에 따라 제한됨에 반해(Fig. 3.3.1.3) *S. costatum*의 경우는 온도의 차이보다 규산염의 포함과 미포함 여부에 따라 매우 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3.3.1.4).

Table 3.3.1.3. Growth rate of species at each temperature and Si limitation

종	영양염(Si)	온도(°C)	성장률(d ⁻¹)
<i>Asterionella sp.</i>	F/2(Silicate 포함)	15	1.808
		20	1.808
		25	1.808
	F2(Silicate 미포함)	15	1.808
		20	1.808
		25	1.808
<i>D. brightwellii</i>	F/2(Silicate 포함)	15	1.124
		20	0.765
		25	0.847
	F2(Silicate 미포함)	15	0.441
		20	0.842
		25	1.684
<i>E. Huxleyi</i>	F/2(Silicate 포함)	15	0.689
		20	1.251
		25	1.331
	F/2(Silicate 포함)	15	2.220
		20	1.385
		25	1.443
<i>S. costatum</i>	F2(Silicate 미포함)	15	1.668
		20	1.051
		25	1.946
	F/2(Silicate 포함)	20	0.847
		25	0.836
		15	0.165
<i>S. nidulans</i>	F2(Silicate 미포함)	20	0.847
		25	0.836
		15	0.453
	F/2(Silicate 포함)	20	0.514
		25	0.675
		15	1.453
<i>T. eccentrica</i>	F/2(Silicate 포함)	20	1.175
		25	2.317
		15	0.836
	F2(Silicate 미포함)	20	0.985
		25	0.568

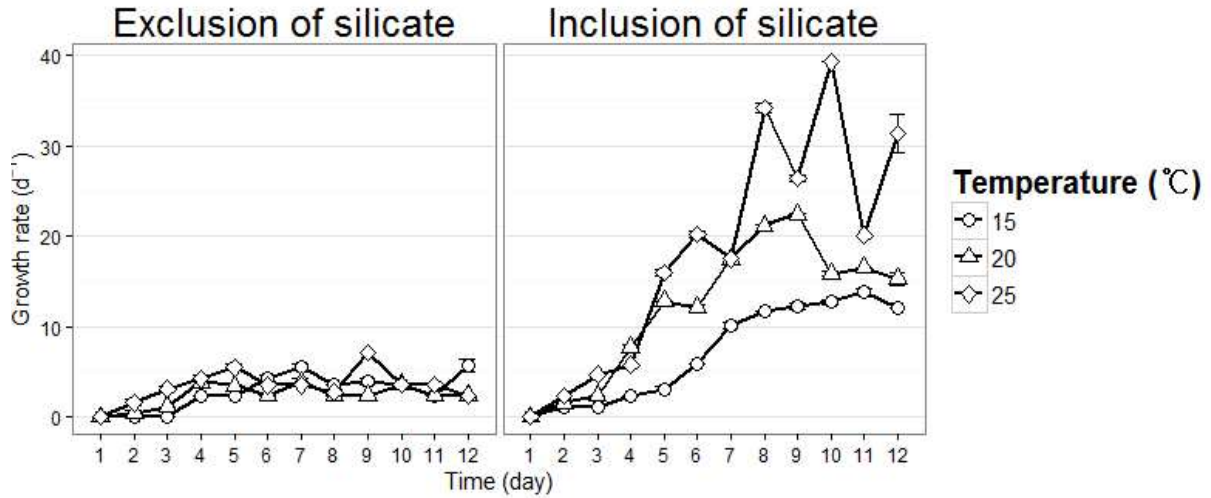


Fig. 3.3.1.3. Growth curves of *T. erythraeum* with silicate limitation at 15 °C (circle), 20 °C (triangle), 25 °C (diamond). Days represent the cumulative days that cultures were subjected to light.

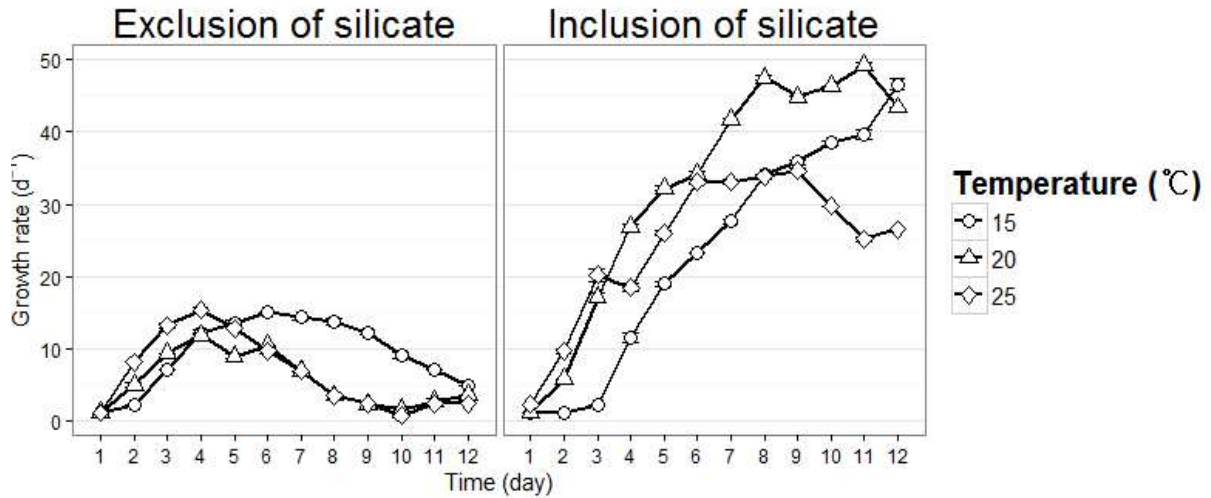


Fig. 3.3.1.4. Growth curves of *S. costatum* with silicate limitation at 15 °C (circle), 20 °C (triangle), 25 °C (diamond). Days represent the cumulative days that cultures were subjected to light.

(2) 2012년 실험 측정

(가) 재료 및 방법

기존문헌에서 동해에 나타나는 식물플랑크톤 출현종 및 우점종을 추가 조사하여 이를 바탕으로 규조류 12종, 와편모조류 5종, 석회비닐편모조류 1종, 총 18종을 선정하

였고(Table 3.3.1.4) 아래와 같은 실험조건으로 생리매개 변수 축적을 위한 실험을 실시하였다(Table 3.3.1.5).

Table 3.3.1.4. Phytoplankton species used in 2012

Diatoms	Dinoflagellates	Coccolithophore
<i>Actinoptychus senarius</i>	<i>Alexandrium tamarense</i>	<i>Emiliana huxleyi</i>
<i>Nitzschia sp.</i>	<i>Alexandrium catenella</i>	
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	<i>Heterosigma akashiwo</i>	
<i>Bacteriastrum sp.</i>	<i>Prorocentrum micans</i>	
<i>Coscinodiscus sp.</i>	<i>Chattonella antiqua</i>	
<i>Pseudonitzschia sp.</i>		
<i>Chaetoceros didymus</i>		
<i>Odontella longicruris</i>		
<i>Skeletonema costatum</i>		
<i>Paralia sulcata</i>		
<i>Cylindrotheca fusiformis</i>		
<i>Pleurosigma angulatum</i>		

Table 3.3.1.5. Experimental condition in 2012

항목	조건	비고
온도 (°C)	15, 20	
광도 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	100, 200	
광주기 (light : dark)	12h : 12h	
난류	culture flask 안의 난류형성	baffled designed flask
회전기속도 (rpm)	70	
샘플 희석율	0.1	semi-continuous culture
배지	f/2 medium	Guillard and Ryther, 1962
배양방법	batch culture, semi-continuous culture	
culture volume (ml)	100	

실험기간은 약 8-12일로 식물플랑크톤의 종별 및 배양방법에 따라 차이가 있다. 실험은 식물플랑크톤의 개체수 변화가 증식기(exponential phase)에서 안정기(stationary phase)로 변하는 전 구간에 걸쳐 진행하였고 12시간 또는 24시간 간격으로 sedgwick counting cell과 혈구계수판을 이용하여 개체수를 측정하였다.

식물플랑크톤의 성장률 계산은 개체수가 지수적으로 증가하는 구간에서 각각의 배양방법에 따라 아래의 수식들을 적용하였다. Batch culture에 적용되는 수식은 다음과 같으며 N 은 식물플랑크톤의 개체수, T 는 개체수 측정 시간으로 나타낸다 (Guillard, 1973).

$$r = \ln(N_2 - N_1) / (T_2 - T_1)$$

Semi-continuous culture에 적용되는 수식은 다음과 같으며 r_{24} 는 24시간 동안의 성장률, D 는 배양액 희석률을 나타낸다.

$$\mu = r_{24} + D$$

(나) 실험 결과

Fig. 3.3.1.5는 광도 $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 온도 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, batch culture 조건으로 실험한 결과를 나타낸다. 대체적으로 개체수의 지수적 성장을 보이는 구간이 잘 나타나며 각 구간별 성장률이 비교적 일정하게 나타났다. 성장률은 (b) *Nitzschia sp.*가 가장 높으며, (a) *H. akashiwo*는 (c) *C. antiqua*에 비해 성장률이 약 두 배 높게 나타났다.

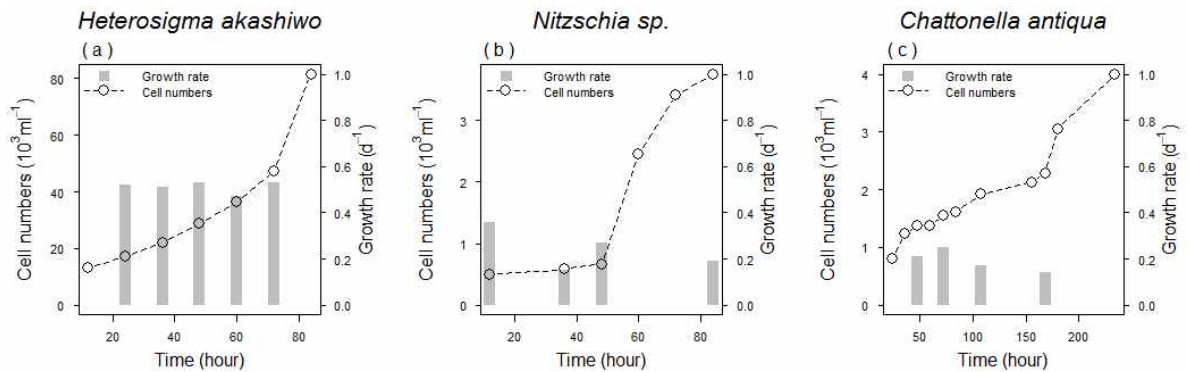


Fig. 3.3.1.5. Dynamic changes in population densities and growth rate of (a) *H. akashiwo*, (b) *Nitzschia sp.*, (c) *C. antiqua* at $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Fig. 3.3.1.6은 semi-continuous culture로 실험한 결과이며 (a)–(d)는 광도 $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 와 온도 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, (e)–(h)는 광도 $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 와 온도 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 실험하였다. (a)–(d)에서 성장률은 *Pseudonitzschia sp.*, *O. longicruris*, *S. costatum*, *T. eccentrica* 순으로 낮아졌다. 그러나 *Pseudonitzschia sp.*가 exponential phase에 이르는 시간이 제일 늦고 *T. eccentrica*와 *O. longicruris*가 가장 먼저 exponential phase에 이르는 것을 확인 할 수 있다. (e)–(h)에서 성장률은 *C. didymus*, *Coscinodiscus sp.*, *C. fusiformis*, *Emiliana huxleyi* 순으로 낮아졌고 이 중 exponential phase에 이르는 시간은 *Coscinodiscus sp.*가 가장 늦었다. *C. didymus*의 경우, 초기농도가 높아 lag phase와 exponential phase의 경계를 정확히 알 수 없는 것으로 나타났다.

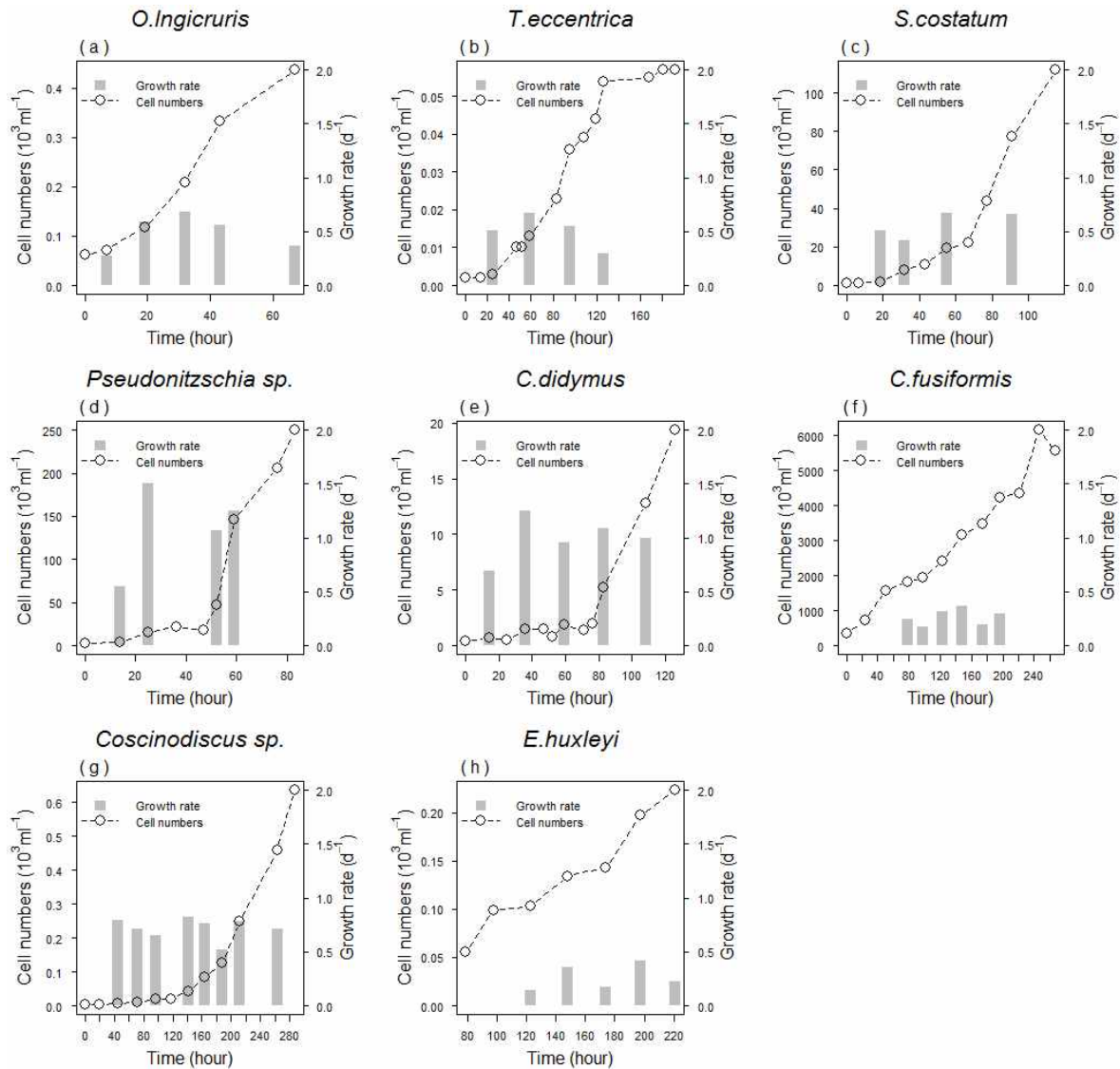


Fig. 3.3.1.6. Dynamic changes in population densities and growth rate of each species. (a)–(d) at $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and $20 \text{ }^\circ\text{C}$, (e)–(h) at $100 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

본 실험을 통해 계산한 식물플랑크톤의 종별 성장률은 Table 3.3.1.6과 Fig.3.3.1.7에 나타내었다. 종합적으로 본 실험에서는 규조류보다 와편모조류와 석회조류의 성장률이 낮은 값을 보였다.

Table 3.3.1.6. Growth rate of each species in 2012

Class	Species	광 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	성장률 (d^{-1})
Diatoms	<i>Chaetoceros didymus</i>	100	15	0.549
	<i>Cylindrotheca fusiformis</i>	100	15	0.242
	<i>Pleurosigma angulatum</i>	100	15	0.596
	<i>Actinoptychus senarius</i>	200	20	0.851
	<i>Nitzschia sp.</i>	200	20	0.254
	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	200	20	0.993
	<i>Bacteriastrum sp.</i>	200	20	0.817
	<i>Coscinodiscus sp.</i>	200	20	0.646
	<i>Pseudonitzschia sp.</i>	200	20	2.03
	<i>Odontella longicruris</i>	200	20	1.17
	<i>Skeletonema costatum</i>	200	20	1.256
Dinoflagellates	<i>Heterosigma akashiwo</i>	200	20	0.524
	<i>Prorocentrum micans</i>	200	20	0.45
	<i>Chattonella antiqua</i>	200	20	0.197
Coccolithophore	<i>Emiliana huxleyi</i>	100	15	0.278

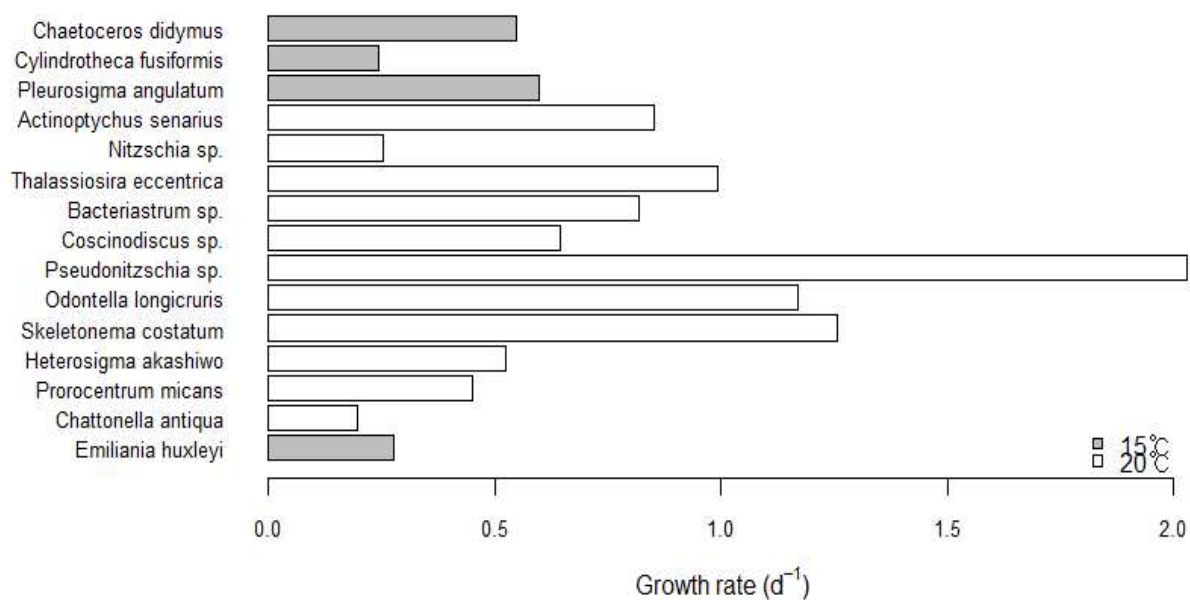


Fig. 3.3.1.7. Growth rate of each species in 2012.

(3) 2013년 실험 측정

(가) 재료 및 방법

실험종은 규조류 4종(*Coscinodiscus sp.*, *Coscinodiscus oculoides*, *Cylindrotheca fusiformis*, *Pleurosigma angulatum*), 와편모조류 2종(*Amphidinium sp.*, *Heterocapsa circularisquama*)을 대상으로 하였다. 온도와 영양염은 모든 종에 최적의 조건으로 일정하게 설정하고 광도의 변화만을 준 상태에서 최대성장률을 구하였다 (Table 3.3.1.7).

Table 3.3.1.7. Experimental condition in 2013

항목	조건
실험기간	6일
배양방법	batch culture
배지	f/2 medium (Guillard and Ryther 1962)
온도 (°C)	20
샘플링 및 계수방법	6 or 12시간 간격/ 현미경
total volume (ml)	50
광도 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)/	20, 50, 80, 120 /
광주기 (light: dark)	Light: Dark=10h:14h

(나) 실험 결과

대체적으로 규조류 4종의 성장률이 와편모조류의 2종보다 높게 나타났고(Fig. 3.3.1.8) 가장 높은 성장률을 보인 종은 *C. fusiformis* 이며, 가장 낮은 성장률을 보인 종은 *H. circularisquama* 로 나타났다. 각 그래프의 광도 반포화상수는 대체로 5-12(광 $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 전후에서 최대성장률을 보임)이나 가장 성장률이 높은 *C. fusiformis* 는 45(광 $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대성장률을 보임)로 측정되었다.

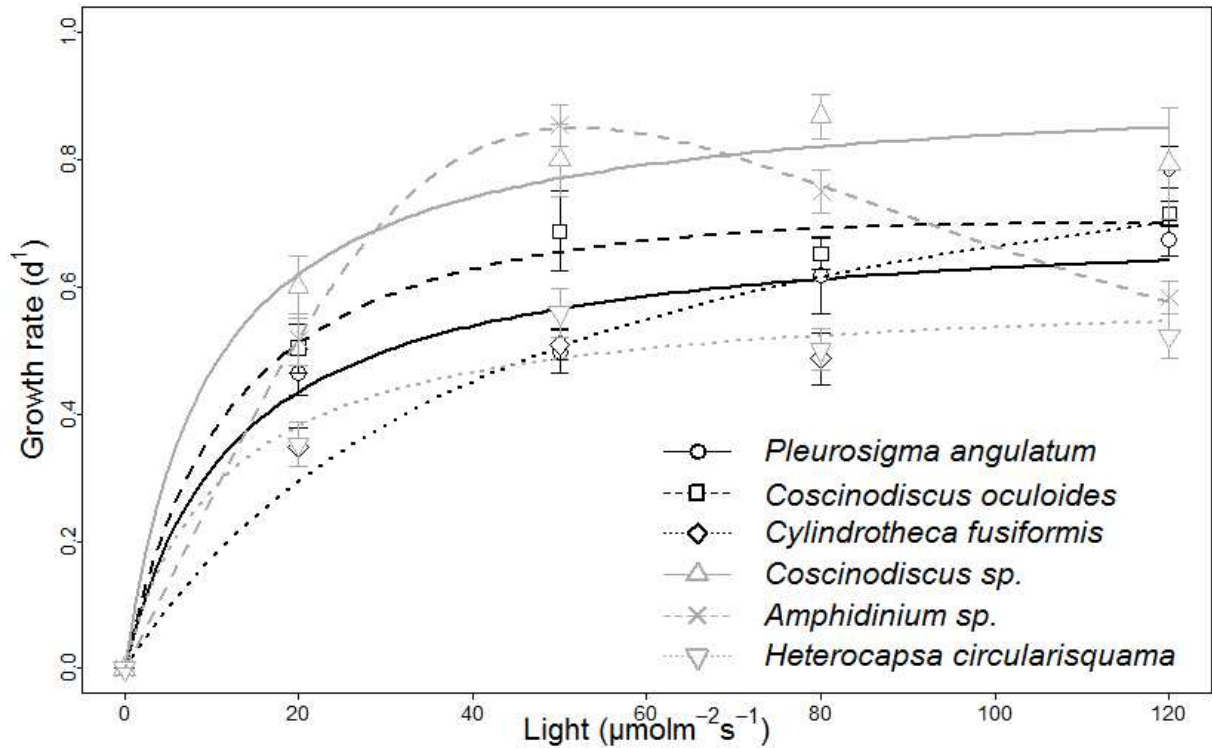


Fig. 3.3.1.8. Growth response of each species to light condition. Curves were plotted using the equation of Eilers–Peeters(1988) model.

2. 생태모형 개선

생태모형은 생태계를 이루는 생물군의 복잡한 군집을 다루고 있기 때문에 해양순환 모형과 달리 구조가 매우 복잡하다. 생지화학 과정에 관여하는 생물 그룹의 생태학적 특성이 기능에 따라 매우 다르므로 NPZD모형과 같이 단순한 모형으로는 다양한 환경조건 하에 일어나는 생지화학 과정을 이해하기 어렵다. 뿐만 아니라 하위영양준위에서 일어나는 변화가 상위로 전달/파급되는 효과를 이해하기 위해서도 생태계구조의 변화를 반영할 필요가 있다. 따라서 생물 그룹의 기능성과 이와 관련된 물질순환의 모형화는 생지화학 과정과 생물군집의 변화를 모사하는데 있어 중요하며 지역 모형 개발에 있어서도 핵심적인 발전 방향이 된다.

영국 플리머스 해양연구소(Plymouth Marine Laboratory)에서 개발한 ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model)모형은 기능그룹 단위로 구성되어 있어 보다 현실적인 생태계를 반영하게 해 준다. 모델통화로 탄소, 질소, 인, 규소를 이용하며 식물플랑크톤 4개의 그룹, 동물플랑크톤 3개의 그룹 그리고 저서생물을 포함하고 있어 한반도 주변 생태계를 모형화 하는데 유용하다. 또한 기후변화에 따른 전

지구 수산자원 변화 연구 프로젝트인 ‘QUEST- Fish’ 등에 사용 중인 모형으로 전 지구 해양생태계 비교에 사용이 가능하다(Fig. 3.3.2.1).

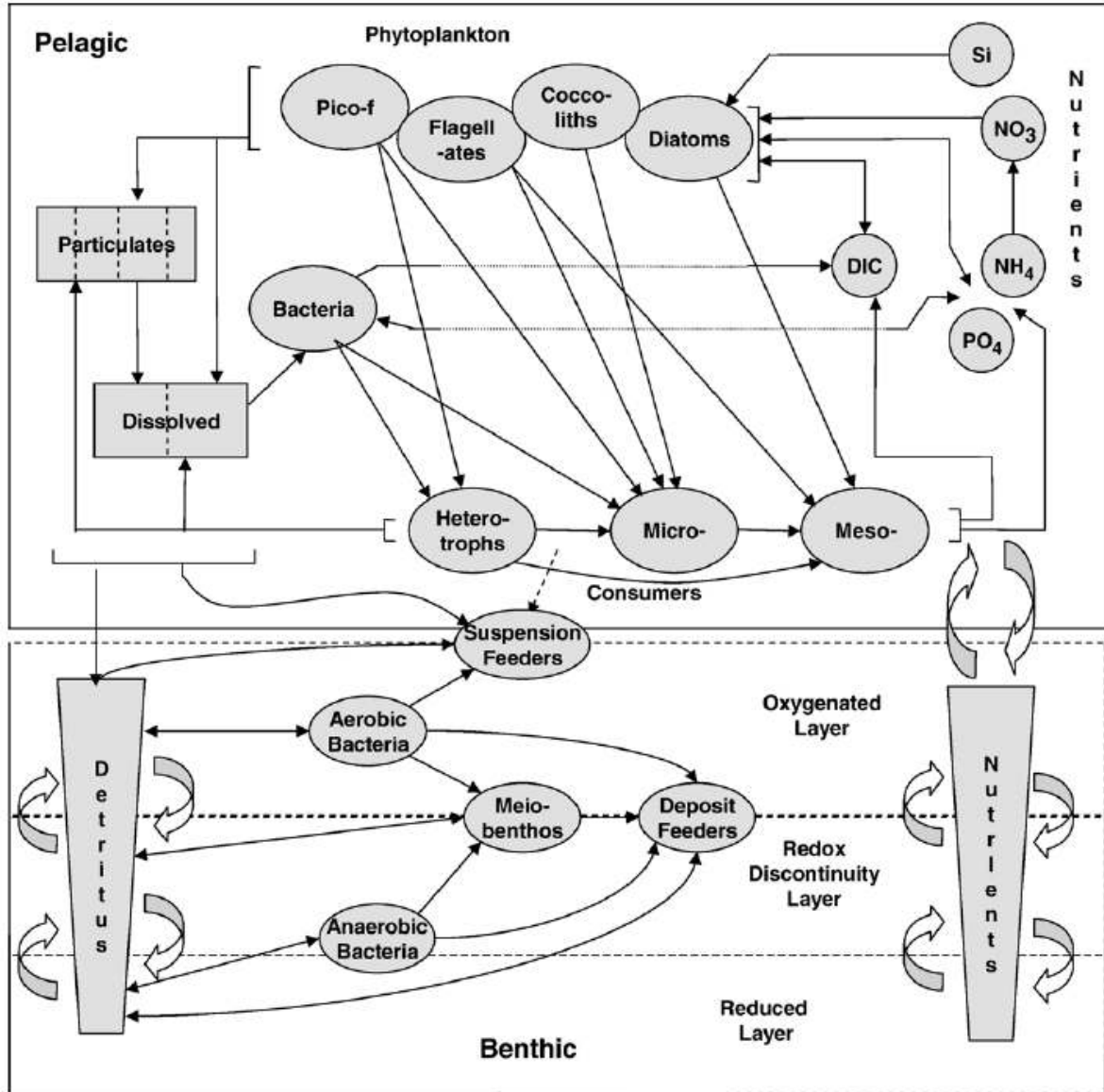


Fig. 3.3.2.1. Schematic of the ERSEM model (Blackford and Gilbert, 2007).

가. ERSEM 1D 모형 구축

(1) ERSEM 1D 모형 구축

ERSEM 1D 모형은 GOTM (General Ocean Turbulence Model) 1D 모형이 접합된 모형으로, ERSEM 1D 모형을 통해 3개 정점(울릉분지, 아극전선 형성 해역, 러

시아 블라디보스토크 앞바다)에 적용하였다(Fig. 3.3.2.2 and Table 3.3.2.1). 대기 강제력 자료로 ECMWF Interim 자료를 사용하였고 수온과 염분의 초기조건은 전 지구 모형의 결과를 사용하였다. 생태모형의 초기조건은 연직으로 균일하게 주어 1995년 1월부터 2005년 1월까지 재현 실험을 실시하였다.

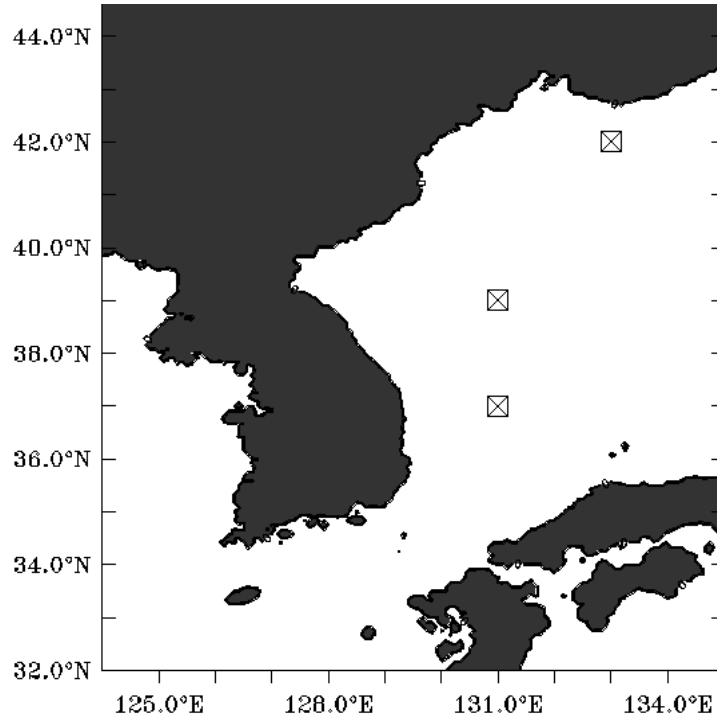


Fig. 3.3.2.2. Three stations applied by ERSEM 1D.

Table 3.3.2.1. Locations of three stations applied by ERSEM 1D

정점	위도	경도	비고
1	37° N	131° E	울릉분지
2	39° N	131° E	아극전선
3	42° N	133° E	블라디보스토크 앞바다

(2) ERSEM 1D 모형 동해 적용 실험 결과

동해 3개 정점의 실험 결과 모두 표층 영양염 공급이 미약하고 그에 따라 표층 엽록소-*a*의 계절적 변동이 제대로 재현되지 않는 문제점이 나타났다(Fig. 3.3.2.3). ERSEM 1D 모형의 수온, 염분 동화 자료는 편의상 전구모형결과를 이용했는데 모형

의 수온자료와 아고 뜰개 수온자료를 비교해보면 모형의 겨울철(2월) 혼합층은 더 얇고 가을철(11월)에는 더 깊게 나타나는 차이가 있었다(Fig. 3.3.2.4). 이는 겨울철 연직 혼합에 의한 표층 영양염 공급이 적고 마찬가지로 가을철에도 혼합층이 깊어지면서 표층으로 공급되는 영양염이 적음을 의미한다. 이와 같이 모형에서 모사된 성층과 연직 혼합이 비현실적 문제로 표층으로의 영양염 공급이 미약한 것으로 판단된다. 그 결과, 봄 번성과 가을번성이 제대로 재현되지 않았다. 모형과 비교 가능한 아고 뜰개 자료는 2004년의 2월, 5월 그리고 11월 자료뿐이었고 자료 동화 기간이 하루로 짧아 수온 동화 자료(십자 마크된 점선)와 모형 자료(원 마크된 점선)는 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3.3.2.4).

모형의 수온과 염분 동화 자료로 사용된 전 지구 모형 자료의 정확도가 떨어지기 때문에 자료의 부정확도로 인해 발생하는 오차를 줄이고자 모형의 수온과 염분의 동화 적용하지 않고 실험을 실시하였다. 이는 GOTM 1D 모형이 일반적인 대양의 수온과 염분을 자료 동화 없이 어느 정도 잘 모사한다는 점에 착안한 것이다. 겨울철(1-3월)에 표층 영양염 공급이 이뤄져 봄 번성이 나타난다(Fig. 3.3.2.5). 하지만 가을철(11월 이후)에 혼합층이 깊어지지 않아(Fig. 3.3.2.6) 표층 영양염 공급이 이뤄지지 않고 그에 따라 식물플랑크톤의 가을번성이 나타나지 않는다(Fig. 3.3.2.5). 수온과 염분의 동화를 적용하지 않은 까닭에 모사된 수온과 염분의 구조가 가을철 혼합층이 깊어지지 못하는 식의 실제 동해의 수온 염분 구조와 차이가 나타났다. 특히 여름철 저염의 표층 해수 재현이 불가능하였다(Fig. 3.3.2.6). 한편, 식물플랑크톤의 천이과정이 재현되었는데, Fig. 3.3.2.7의 2004년의 모형 결과를 보면, flagellates, picophytoplankton, large plankton 순으로 나타나는 식물플랑크톤의 천이과정이 나타난다. 다만, 규조류(Fig. 3.3.2.7의 사각형 마크된 선)의 엽록소-*a* 농도가 거의 0에 가깝게 나타나는데, 이는 규산염 제한에 의한 것으로 보인다. 1차원 모형에서 고려하지 않는 이류에 의해 공급되는 규산염의 영향을 살펴볼 필요가 있다.

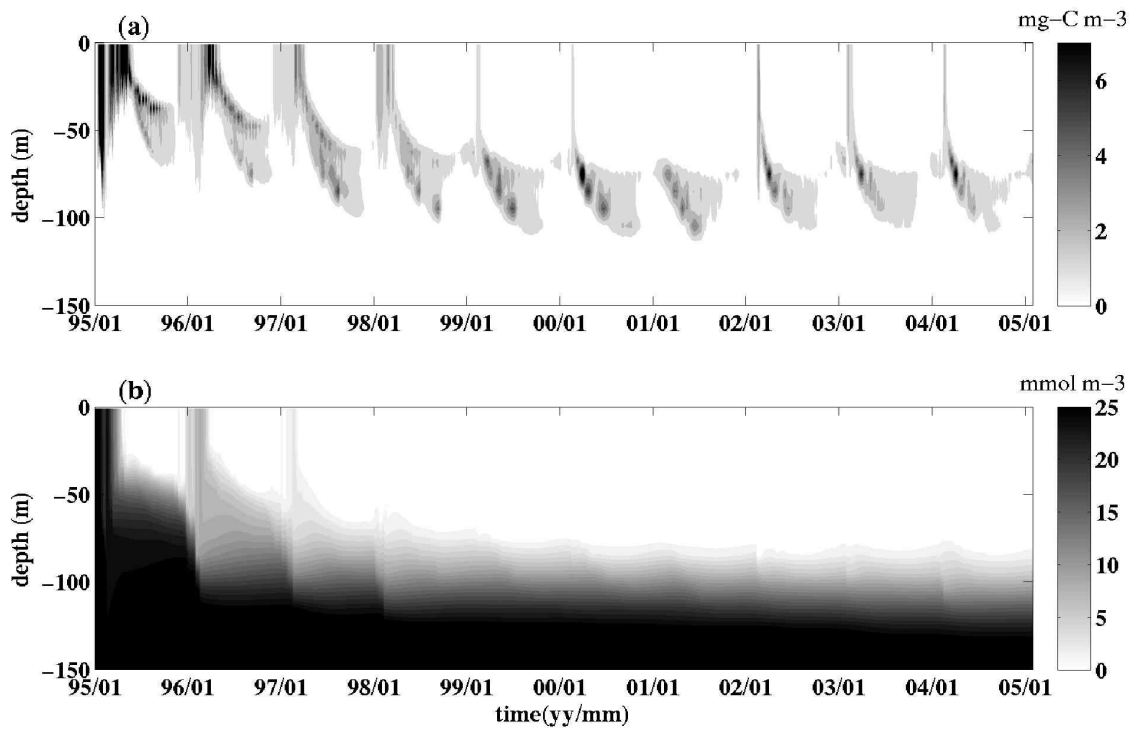


Fig. 3.3.2.3. (a) Vertical distributions of simulated chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}) and (b) nitrate (mmol m^{-3}) at 131°E , 37°N using temperature and salinity from global model as initial conditions and applying data assimilation for temperature and salinity.

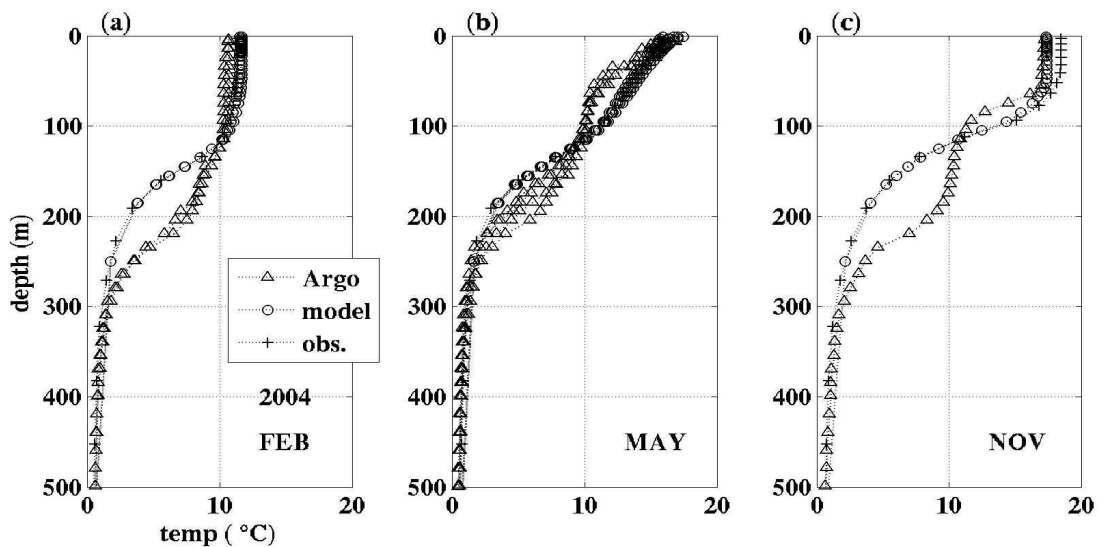


Fig. 3.3.2.4. Vertical distributions of simulated temperature ($^\circ\text{C}$) by ERSEM 1D and Argo profiling float at 131°E , 37°N in (a) February, (b) May and (c) November. Line with triangle is temperature of Argo profiling float, line with circle is simulated temperature and line with cross is temperature for data assimilation.

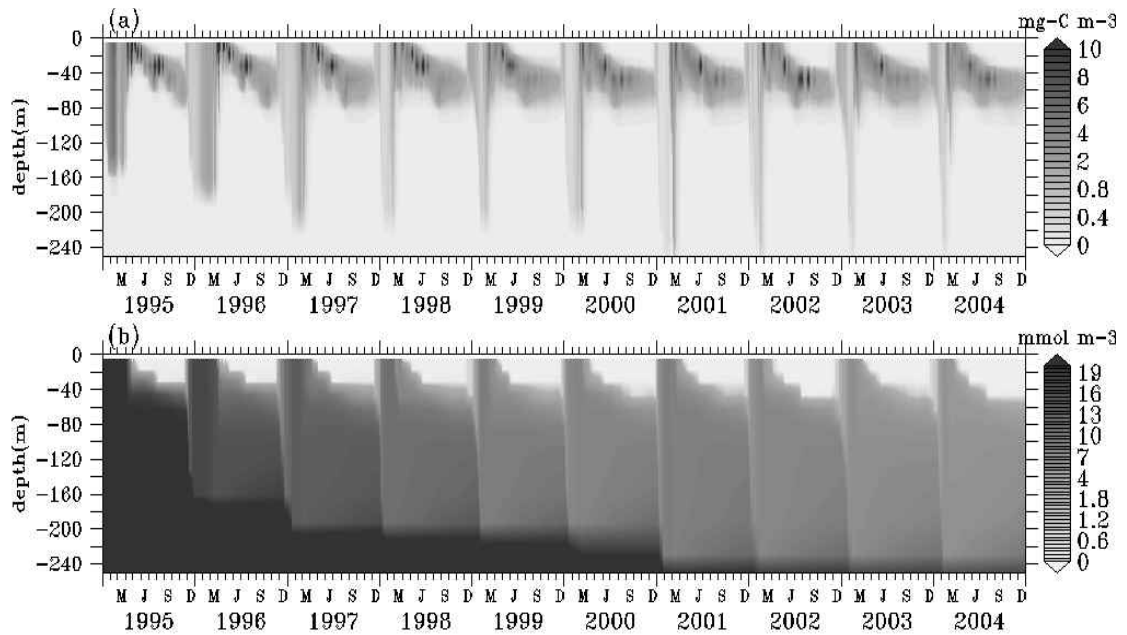


Fig. 3.3.2.5. (a) Vertical distributions of simulated chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}) and (b) nitrate (mmol m^{-3}) at 131° E , 37° N using temperature and salinity from global model as initial conditions and not applying data assimilation for temperature and salinity.

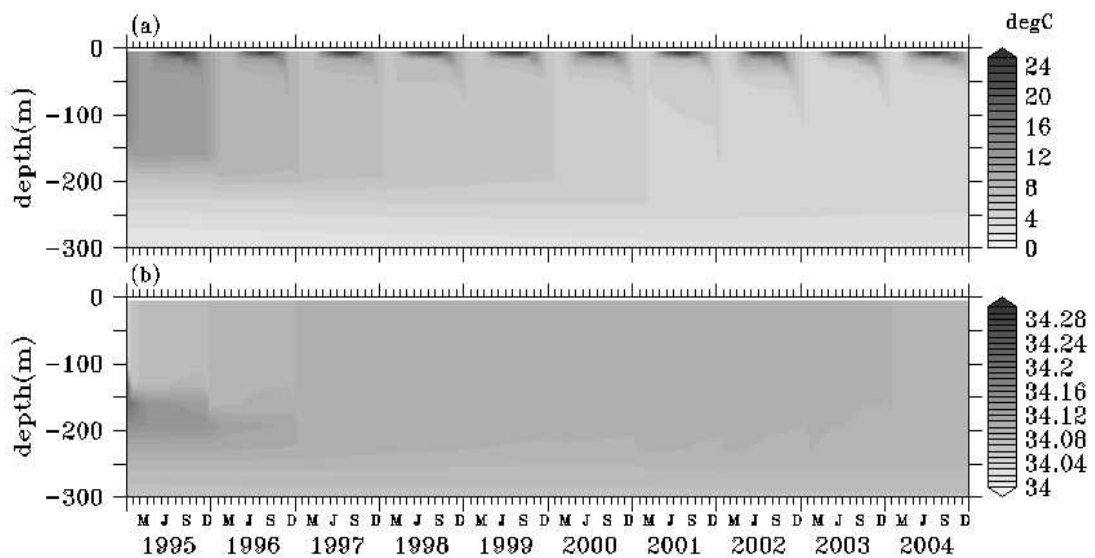


Fig. 3.3.2.6. (a) Vertical distributions of simulated temperature ($^\circ\text{C}$) and (b) salinity at 131° E , 37° N using temperature and salinity from global model as initial conditions and not applying data assimilation for temperature and salinity.

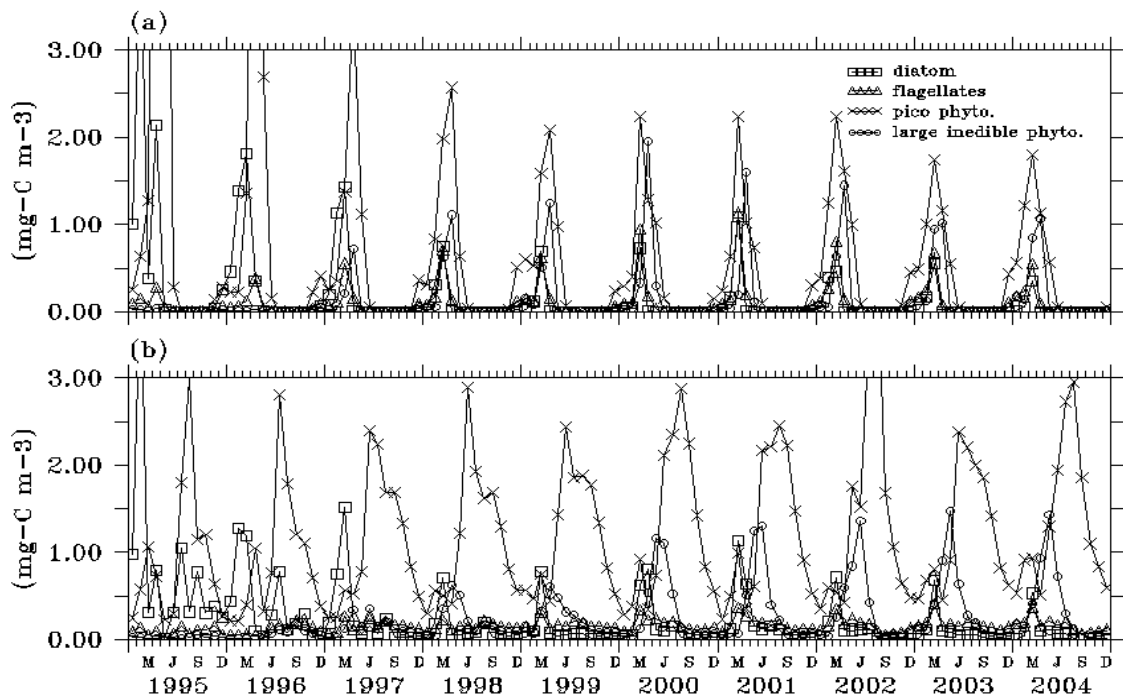


Fig. 3.3.2.7. (a) Time series of simulated surface and (b) subsurface chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}) of diatom (square), flagellates (triangle), pico phytoplankton (cross) and large phytoplankton (circle) at 131°E , 37°N using temperature and salinity from global model as initial conditions and not applying data assimilation for temperature and salinity.

ERSEM 생태모형 지배방정식은 수온의 함수를 포함하며, 수온과 염분의 구조가 연직혼합을 중요한 결정 요소이다. 자료 동화를 실시하지 않는 모형의 수온과 염분의 구조가 실제 동해의 수온과 염분 구조와 차이 나는 것을 보완하고자 ERSEM 1D 모형의 수온, 염분 동화 자료로 KODC 정선 관측(104-11) 격월 자료를 이용하여 실험하였다. 그 결과, 실제의 동해 수온과 염분의 구조를 표현할 수 있었으며(Fig. 3.3.2.8) 동시에 식물플랑크톤의 봄 번성 및 식물플랑크톤 천이과정(flagellates, picophytoplankton, large plankton 순)을 모사할 수 있었다(Fig. 3.3.2.9). 하지만 식물플랑크톤의 가을 번성은 재현되지 못하였다. 겨울철 혼합층 깊이가 약 200 m, 여름철 혼합층 깊이가 약 50 m로 모사되는 등 물리량들이 관측치 수준으로 모사되었다(Fig. 3.3.2.8). 하지만 여전히 규조류의 클로로필 농도가 거의 0에 가깝게 나타나, 모형 상에서의 연직 공급 이외의 규산염 공급원에 대한 추가 연구가 필요하고, 가을 번성 재현에 되지 못하는 것에 대한 추가 분석이 필요하다(Fig. 3.3.2.9).

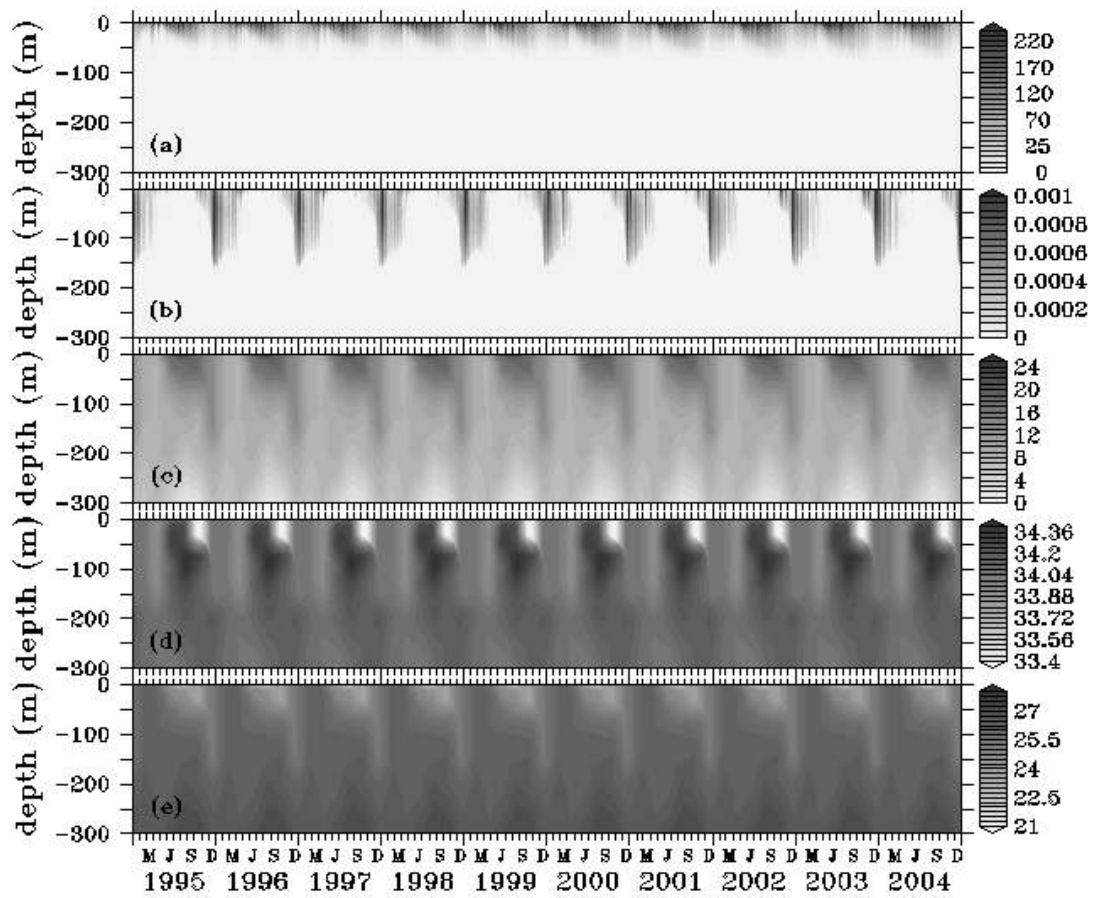


Fig. 3.3.2.8. (a) Vertical distributions of simulated irradiance (W m^{-2}), (b) turbulence kinetic energy ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), (c) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (d) salinity and (e) sigma-t at 131°E , 37°N using KODC bi-monthly data at 104–11 observation point for data assimilation by ERSEM 1D.

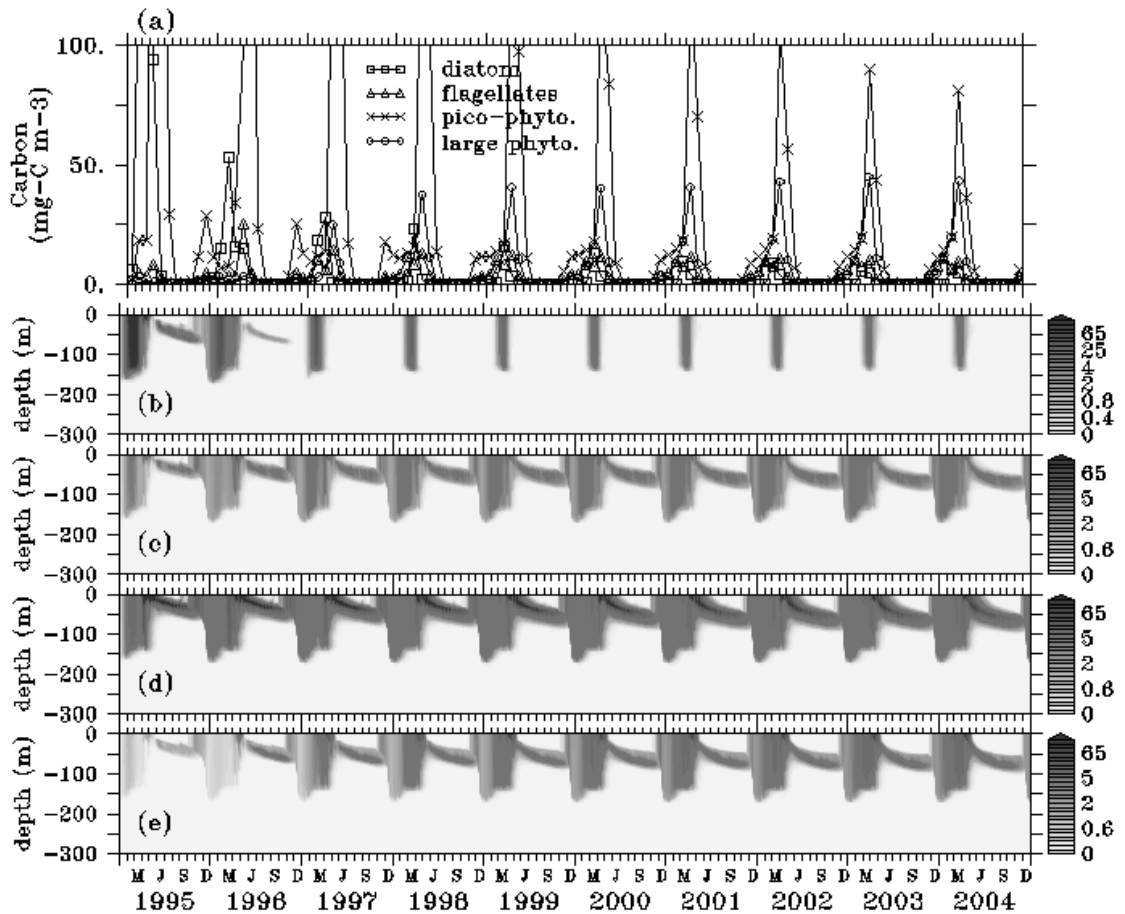


Fig. 3.3.2.9. (a) Time series of simulated carbon concentration (mgC m^{-3}) of surface diatom (square), flagellates (triangle), picophytoplankton (cross) and large phytoplankton (circle) and (b-d) vertical distributions of simulated carbon concentration (mgC m^{-3}) of each four phytoplanktons at 131°E , 37°N using KODC bi-monthly data at 104-11 observation point for data assimilation by ERSEM 1D.

나. ERSEM 박스 모형 구축

GOTM-ERSEM의 대기-해양 상호작용에는 바람, 기압, 건조기온, 상대습도, 운량 등의 장기 자료가 들어가도록 설정되어 있어 2000년 이전의 사용 가능한 관측 자료의 불충분으로 동해의 경우 이를 사용하는 데에 많은 어려움이 있다. 혼합층 깊이는 열유량(heat flux), 바람응력(wind stress) 뿐만 아니라 대마난류의 수평 열이류(horizontal heat advection)에도 영향을 받으나 1D GOTM의 경우 오직 열유량과 바람응력만 고려하게 되어 있어 혼합층 깊이 변동을 알맞게 모사할 수 없다. 게다가 GOTM-ERSEM을 구축하여 수심에 대한 여러 변수들(온도, 질산염, 엽록소-a, 박테

리아, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 등)의 시계열자료를 살펴본 바 관측치와 달리 영양염, 식물플랑크톤 등의 연직혼합이 제대로 모사되지 못하는 현상이 발견되었다. 따라서 ERSEM의 구조 및 매개변수 기능 등을 정확하게 파악하기 위해서 우선 가장 단순한 박스모형에서부터 테스트를 시작하기로 결정하였다.

(1) ERSEM 박스모형 장기 자료 형성

(가) 물리 장기 자료

모형에 필요한 물리 장기 자료를 생성하기 위하여 국립수산과학원 정선 해양 관측 자료의 정점 104-08(37.057° N, 130.31° E), 104-09(37.057° N, 130.63° E) 그리고 104-10(37.057° N, 130.94° E)에서 2000년부터 2012년까지 수심 10 m에서의 수온, 염분의 격월 장기 자료를 추출하였다(Fig. 3.3.2.10(a) and Fig. 3.3.2.6(b)). 혼합층 깊이(MLD, Mixed layer depth)를 계산하기 위해 국립수산과학원 수심 0-500 m의 수온자료로부터 표준 수심층의 수온 값을 유지하면서 보간이 가능한 monotone cubic interpolation 기법을 사용하여 수심층 1 m 간격의 수온 자료를 산출하였다(Yoon and Choi, 2012). 동해 울릉분지의 경우 강의 유입이 크지 않아 혼합층 깊이 계산은 수온자료만을 이용하였다. 따라서 $\Delta T=0.2$ °C, reference depth = 10 m 을 이용하여(Lim *et al.*, 2012) 혼합층 깊이 장기 시계열을 생성하여(Fig. 3.3.2.10(c)) 세 정점(104-08, 104-09, 104-10) 값을 평균하였다. 표층 일사량은 위도, 경도, 시간, 운량, 그리고 알베도를 고려한 천문공식을 이용하여(Rosati and Miyakoda, 1988) 기상청에서 제공하는 울릉도의 운량을 가지고 계산하였다(Fig. 3.3.2.10(d)).

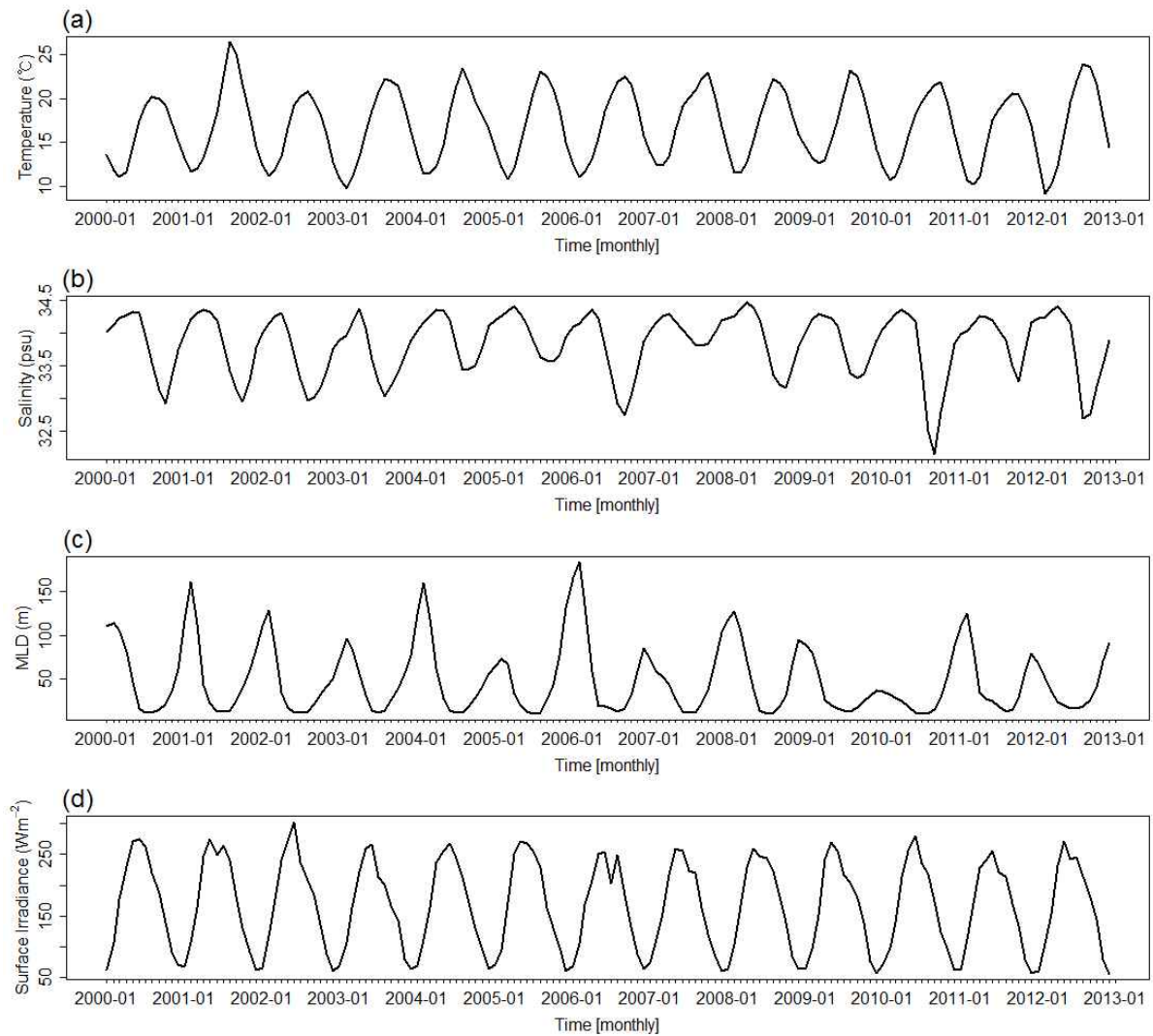


Fig. 3.3.2.10. Monthly running averages of (a) surface temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) surface salinity (psu), (c) MLD (m) and (d) surface irradiance at noon.

(나) 식물플랑크톤 엽록소-*a* 자료

NASA에서 제공하는 Ocean Color Chlorophyll (Oc) v6 알고리즘(Werdell, 2009)을 이용하여(Table 3.3.2.2) SeaWiFS와 MODIS Aqua 엽록소-*a* 장기 자료를 변환하였다. 병합된 엽록소-*a*에서 2000-2012년 기간의 울릉분지 위도 $36.7-37.2^{\circ}\text{N}$, 경도 $130.3-131.1^{\circ}\text{E}$ 범위의 월 평균값을 추출하여 모델 검증 자료로 활용하였다.

Table 3.3.2.2. Oc v6 coefficients for SeaWiFS and MODIS Aqua

	sensor	a0	a1	a2	a3	a4
OC4	SeaWiFS	0.3272	-2.9940	2.7218	-1.2259	-0.5683
OC3M-547	MODIS Aqua	0.2424	-2.7423	1.8017	0.0015	-1.2280

algorithm $X=10\lg10(R_{rs1}/R_{rs2})$, chlorophyll- $a = 10^{(a_0 + a_1*X + a_2*X^2 + a_3*X^3 + a_4*X^4)}$. R_{rs1} = blue wavelength R_{rs} (e.g., 443, 490, or 510-nm), R_{rs2} = green wavelength R_{rs} (e.g., 547, 555, or 565-nm)

(2) ERSEM 박스모형 개선

(가) 모형 구조 개선

현재 쓰이는 생태모형들은 영양염 순환의 지역적 차이, 생활사 전략의 계통적 차이 그리고 먹이망 내의 연결에 따라 구조의 개량이 필요하다. 사인곡선을 이용하여 빛, 수온, 염분의 물리적 변수들을 나타내었던 기존의 ERSEM 박스모형은 이러한 환경 차이, 장기간 변동을 모사하는 데에는 부적합하므로 이를 보완하기 위해 수온, 염분, 혼합층 깊이, 운량 등 관측치를 이용하여 나타낼 수 있도록 수정하였다. 모델 구조는 혼합층 깊이에 의한 두 층 구조로 간소화 하였고 하층은 상수로 표현된 영양염풀로 나타내었다. 혼합층 깊이 내에서의 영양염은 entrainment와 인터페이스 상의 diffusive mixing에 의해 공급된다. 혼합층 깊이 $M(t)$ 의 시간변화 $h(t)$ 는 다음과 같이 구하였으며 entrainment와 detrainment의 영향을 고려하기 위해 $h^+(t) = \max[h(t), 0]$ 이 사용되었다. 다만 동물플랑크톤의 경우 유영능력이 있기 때문에 $h(t)$ 를 이용하였다.

$$h(t) = \frac{dM(t)}{dt}$$

수온약층 상의 diffusive mixing, k 는 상수로 나타내었으며 전체 수식 K 는 다음과 같다(Fasham, 1993).

$$K = \frac{k + h^+(t)}{M(t)}$$

혼합층 깊이 내에서의 광도 I_{mld} 는 아래의 수식으로 표현되며 I_0 는 표층에서의 광도, k_e 는 소광계수이다.

$$I_{mld} = \frac{1}{M(t)} \int_0^{M(t)} I_0 e^{-k_c M(t)} dz$$

또한 입자성유기물과 식물플랑크톤은 항상 일정 비율로 혼합층 밖에 침강하여 순환되지 않는 것으로 하였다.

(나) 모델 매개변수 조정

식물플랑크톤 기능성 그룹의 성장은 낮은 빛에서의 내성, 영양염이 제한된 경우의 높은 경쟁 능력 등에 따라 좌우된다. 예를 들어 규조류는 낮은 빛에서의 내성을 가지고 있지만 영양염에 대한 경쟁 능력은 다른 기능성 그룹에 비해 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서 모델에서 사용하고 있는 대부분의 매개변수 값은 Blackford *et al.* (2004)를 바탕으로 하였으나 Fig.3.3.2.11과 같이 기능성 그룹의 특성과 동해 울릉분지 생태계에 적합도록 매개변수를 조정하였다(Table 3.3.2.3, Table 3.3.2.4). 또한 모형에서 정의된 영양구조에 따라 각 포식자들의 포식능력에 관한 먹이 매트릭스 값(%)도 동해에 맞게 조절하였다(Table 3.3.2.5).

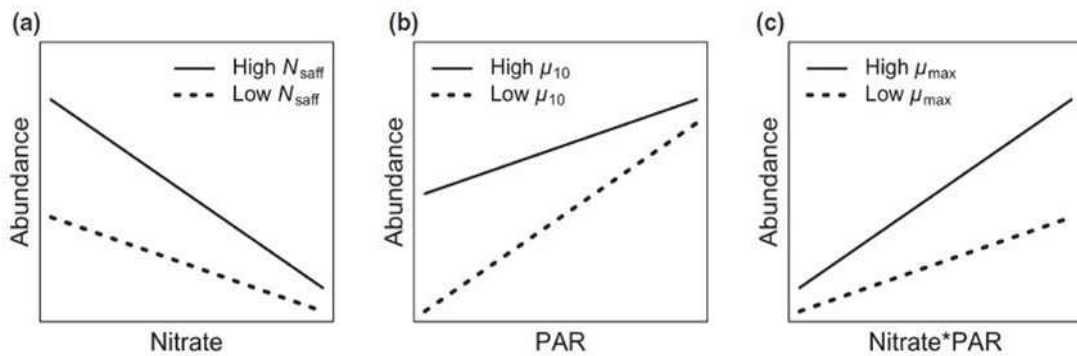


Fig. 3.3.2.11. Predicted effects of the three functional traits on species' responses to environmental variation (Edward *et al.*, 2013). (a) Species with higher competitive ability for nitrate (higher N_{saff} ex) picophytoplankton), (b) Species with greater tolerance of low light (higher μ_{10} , ex) diatoms) and (c) Species with greater maximum growth rate due to faster growth under non-limiting conditions (higher μ_{max} , Pm ex) diatoms).

Table 3.3.2.3. Parameters for the phytoplankton functional groups

Description	Notation	Unit	Diatoms	Flag ^a	Pico ^b	Dino ^c
Maximum assimilation rate (10 °C)	r_{ass}	d^{-1}	3.7	2.5	2.7	1.5
Initial slope of P-I curve	α	$(W m^{-2})^{-1}d^{-1}$	2.40	1.70	1.80	0.80
Maximum chlorophyll- <i>a</i> to carbon cell ratio	θ_{max}	mgChl mgC^{-1}	0.025	0.025	0.025	0.025
Minimum chlorophyll- <i>a</i> to carbon cell ratio	θ_{min}	mgChl mgC^{-1}	0.025	0.025	0.025	0.025
Exudation under nut. stress	p_{ex}	–	0.20	0.20	0.25	0.20
Activity respiration	r_{actr}	–	0.25	0.25	0.25	0.25
Basal respiration (10 °C)	r_{restr}	d^{-1}	0.1	0.05	0.1	0.05
Affinity for Ammonium	a_{nh4}	$(mgC)^{-1}d^{-1}$	0.0025	0.0026	0.0030	0.0025
Affinity for Phosphate	a_p	$(mgC)^{-1}d^{-1}$	0.0025	0.0026	0.0030	0.0025
Maximal silicate to carbon ratio	qP_{rdf}^{Si}	mmol Si $(mgC)^{-1}$	0.012			
Minimal N/C ratio	qP_{min}^N	mmol N $(mgC)^{-1}$	3.78E-03	3.78E-03	3.78E-03	3.78E-03
Minimal P/C ratio	qP_{min}^P	mmol P $(mgC)^{-1}$	1.965E-04	1.965E-04	3.930E-04	1.965E-04

a: Flagellates

b: Picophytoplankton

c: Dinoflagellates

Table 3.3.2.4. Parameters for the zooplankton functional groups and bacteria

Description	Notation	Unit	Hetero ^a	Micro ^b	Meso ^c	Bacteria
Maximum assimilation rate (10 °C)	r_{ass}	d^{-1}	2.0	1.2	0.8	4.0
Food concentration where relative uptake is 0.5	h	$mgC\ m^{-3}$	100	20	40	–
Lower threshold ($mgC\ m^{-3}$) for feeding	$Z_{minfood}$	$mgC\ m^{-3}$	10	10	1	–
Q_{10} value	Q_{10}	–	2.0	2.0	2.0	2.95
Basal respiration (10 °C)	r_{restr}	d^{-1}	0.02	0.02	0.02	0.02

a: Heterotrophic flagellates

b: Microzooplankton

c: Mesozooplankton

Table 3.3.2.5. Model food matrix (%)

From	To		
	Heterotrophic flagellates	Microzooplankton	Mesozooplankton
Bacteria	1.00	0.10	0.00
Diatoms	0.00	0.25	1.00
Flagellates	0.25	1.00	0.00
Picophytoplankton	1.00	0.50	0.00
Dinoflagellates	0.00	0.25	1.00
Heterotrophic flagellates	0.20	1.00	0.00
Microzooplankton	0.00	1.00	1.00
Mesozooplankton	1.00	0.00	0.00

(3) ERSEM 박스모형 결과

(가) 실행 결과

모형의 검증과 계절적 천이 패턴 및 해양생태계의 경년변동을 살펴보기 위하여 2000년부터 2012년까지 평균한 물리 자료를 이용하여(Table 3.3.2.6) 기준실행(baseline run)을 실시하였다. 이 모형을 통하여 영양염 계절 순환을 재생하였고 울릉분지의 전형적인 규조류의 봄, 가을 번성도 모사하였다. 울릉분지에서의 식물플랑크톤 천이는 대부분의 온대해역과 마찬가지로 규조류-편모조류-초미세조류-외편모조류 순으로 나타났다(Fig.3.3.2.12). 여름이 끝나갈 무렵부터 점점 깊어지는 혼합층 깊이는 수괴 안정성의 약화로 혼합층 내로 영양염을 공급하지만 빛의 이용도를 감소시켜 이에 적합한 군집의 번성을 야기하였다.

Table 3.3.2.6. Averaged physical observations data for baseline run

month	SST (°C)	SSS (psu)	MLD (m)
1	13.164	34.065	96.642
2	11.297	34.171	107.235
3	11.421	34.272	82.722
4	12.672	34.352	45.879
5	15.413	34.255	26.305
6	18.336	34.067	15.418
7	20.482	33.682	13.215
8	22.232	33.276	13.132
9	21.991	33.153	20.443
10	20.855	33.239	32.928
11	18.302	33.562	55.709
12	15.415	33.915	79.905

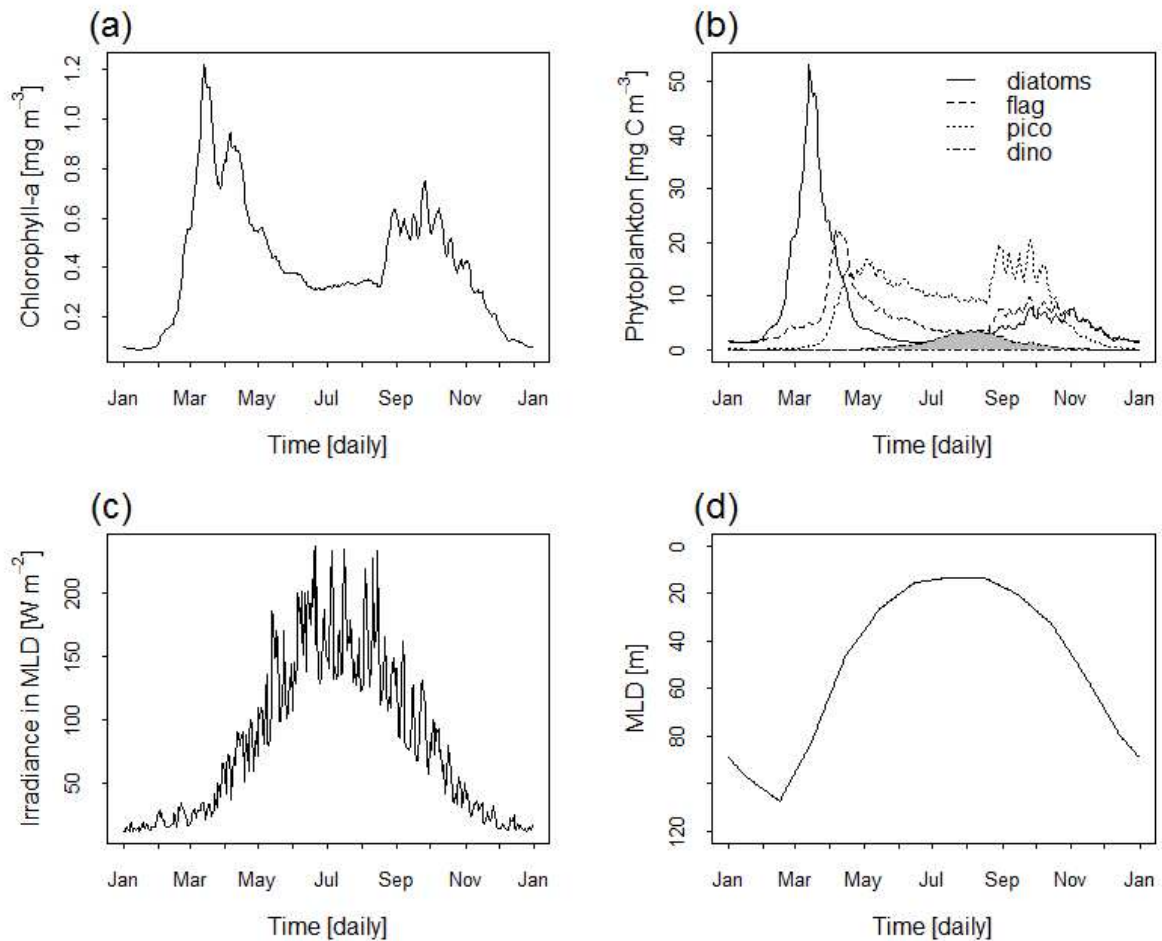


Fig. 3.3.2.12. Baseline run. (a) Simulated total chlorophyll-*a*, (b) phytoplankton succession following the sequence of diatoms (solid line), flagellates (dashed line), picophytoplankton (dotted line) and dinoflagellates (dotdash line, fill = grey color), (c) Irradiance (W m^{-2}) in MLD and (d) MLD (m).

2000년부터 2012년까지 최적화된 매개변수를 이용하여 실시한 표준실행(standard run)은 식물플랑크톤 경년변동의 적합한 예측을 가능하게 하였다. 모형의 총 엽록소-*a*는 Oc v6 엽록소-*a*와 비교하여 Fig. 3.3.2.13(a)에 결과를 보여주고 있고 이때의 상관관계수 r 은 0.52를 나타내었다. 아울러 모형을 이용한 울릉분지에서의 식물플랑크톤 천이의 경년변동은 Fig. 3.3.2.13(b)에 나타내었다. 매우 낮은 규조류 농도가 2010년 2월에 관측된 반면 매우 높은 농도의 규조류가 2006년 4월에 관측되었다. 이와 달리 매우 높은 농도의 와편모조류가 2010년 8월에 관측되었다. 이는 2006년 겨울에는 수직 혼합의 증가로 의해 영양염이 많이 공급된 반면 2010년 겨울에는 수직 혼합의 감소로 인해 영양염이 매우 적게 공급되었기 때문인 것으로 보인다(Fig.

3.3.2.13(c)–(d). 또한 2010년 늦겨울부터 규조류의 변성이 다른 년도에 비해 일찍 일어났는데 이는 상대적으로 알아진 혼합층 내에 빛의 이용도가 좋아져 규조류가 일찍 변성하게 된 것으로 볼 수 있다. 이를 통해 혼합층 깊이가 식물플랑크톤 군집의 생물량 변동에 지대한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

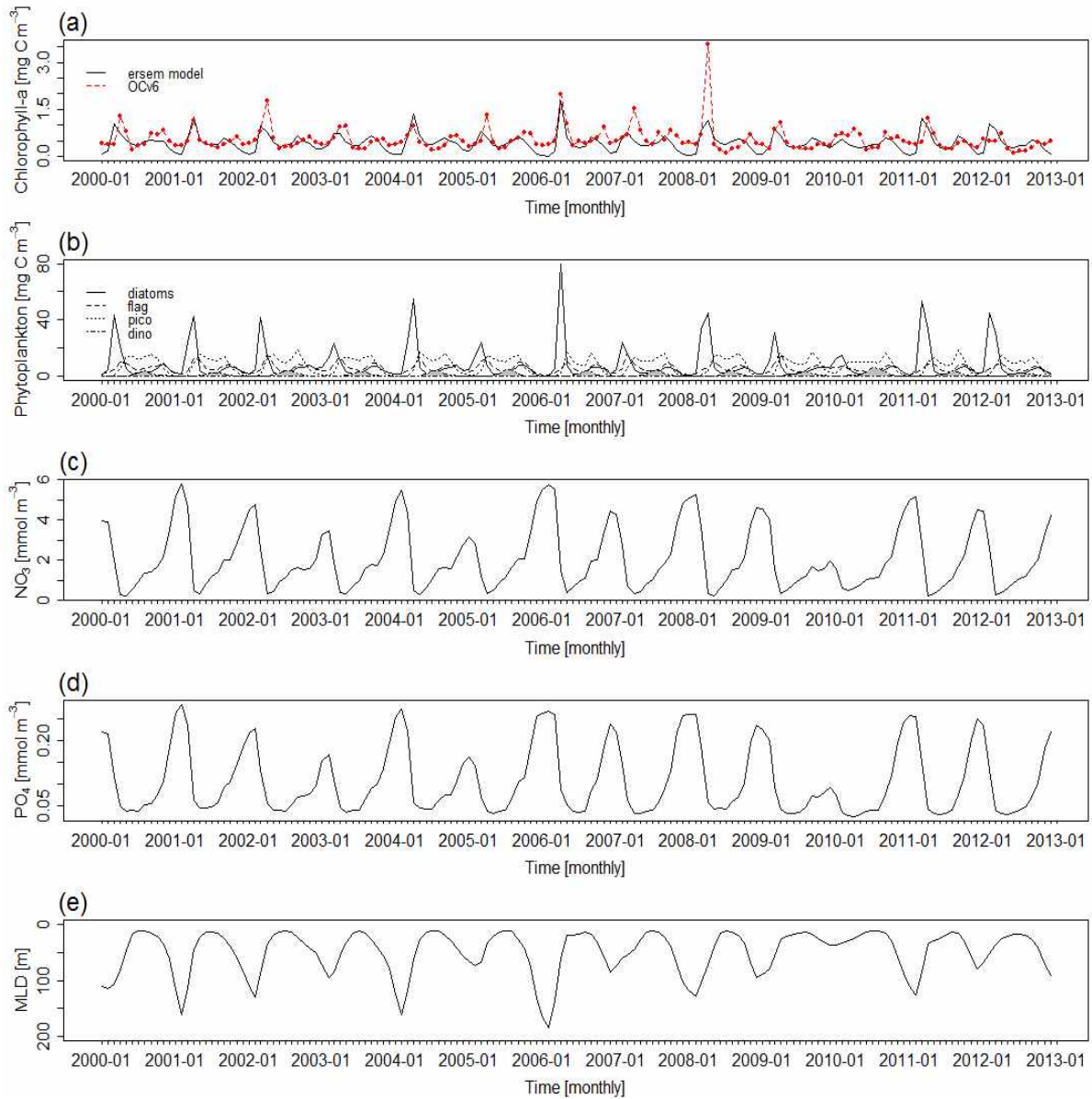


Fig. 3.3.2.13. Standard run 2000–2012. (a) Simulated total chlorophyll-*a* (solid line) as compared with OC.v6 chlorophyll-*a* (points overlaid by a line), (b) phytoplankton succession with diatoms (solid line), flagellates (dashed line), picophytoplankton (dotted line) and dinoflagellates (dotdash line, fill = grey color), (c) modelled nitrate concentration (mmol m^{-3}), (d) phosphate concentration (mmol m^{-3}) and (e) MLD (m).

(나) 혼합층 깊이 변동에 따른 식물플랑크톤 기능성 그룹 변화

혼합층 깊이가 식물플랑크톤 천이에 어떠한 영향을 미치는 지 좀 더 자세히 알아보기 위해 기준실행의 혼합층 깊이 -30%, 30%, 증감을 통해 결과를 Fig.3.3.2.14에 나타내었다. 일반적으로 2010년과 같이 잔잔하고 따뜻한 늦겨울에는 얇은 혼합층 깊이가 기준실행에 비해 일찍 형성되어 강한 수온약층을 만든다. 혼합층 내의 식물플랑크톤과 영양염은 강한 성층에 의해 격리되며 새로운 영양염의 공급 없이 규조류는 결국 낮은 레벨의 현존량을 보이게 된다. 반대로 강한 성층으로 알아진 혼합층 내에서 풍부한 빛의 공급으로 와편모조류는 매우 높은 레벨의 현존량을 보인다. 혼합층 깊이의 변화에 의한 식물플랑크톤 엽록소-a의 변화는 혼합층 깊이 30% 증가 시 엽록소-a 봄철 peak가 98.9 % 증가, 30% 감소 시 엽록소-a 봄철 peak가 28.2 % 감소를 보였다.

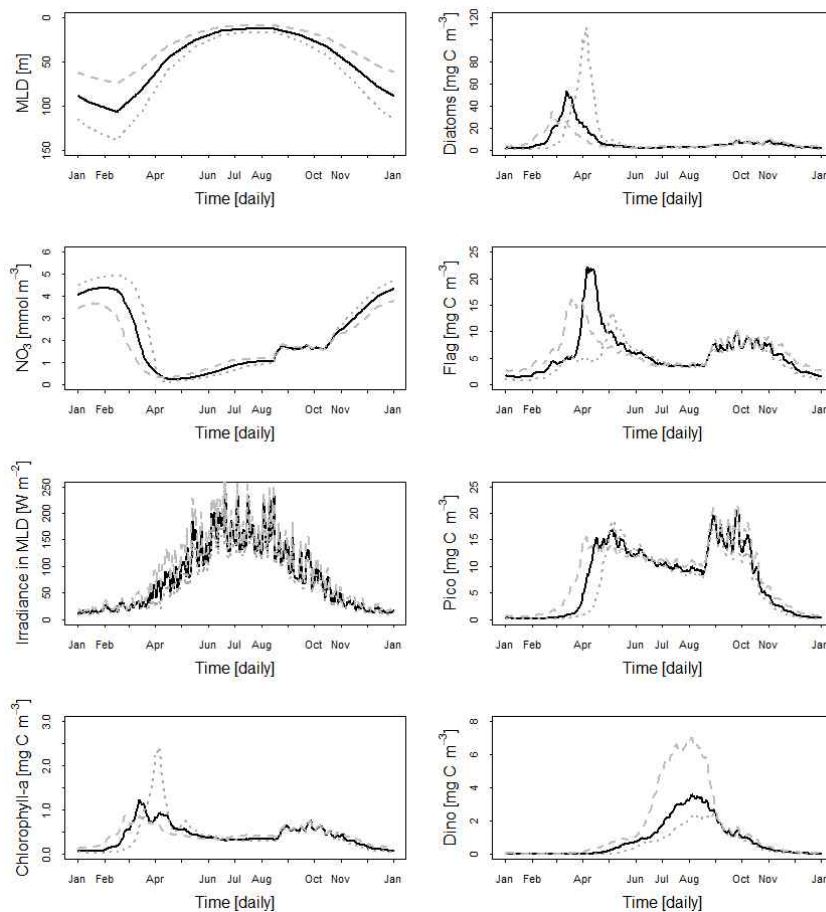


Fig. 3.3.2.14. Results of variability of mixed layer depth. Baseline run (solid line), -30% (dashed line) and +30% (dotted line).

3. 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태계 모형 시범 결합

가. 북태평양 모형

(1) 수치 모형

연안과 분지 규모 현상 재현에 널리 사용하는 ROMS (Regional Ocean Modeling System)를 사용하였다. 지배방정식은 원시방정식으로 정수 어림과 부씨네스크 어림을 사용하였다. 경계조건 중 열 경계조건은 복원조건보다는 좀 더 현실적인 벌크형식을 사용하였다. 이 형식은 바람, 기온 차이, 습도 차이, 태양복사량 등을 이용하여 열수지를 계산하였다. 연직 격자체계는 지형에 민감하게 반응하는 압력구배항의 계산 오차가 작도록 개발된 s-좌표계(stretched terrain-following coordinate)를 사용하였다.

(2) 모형 구성

동해 순환 및 생태계 재현 및 예측에 중점을 둔 북태평양의 3차원 순환모형을 영역을 $20^{\circ} \text{S}-66^{\circ} \text{N}$, $105^{\circ} \text{E}-80^{\circ} \text{W}$ 로 설정하였다. 이는 동해만을 포함하는 지역해 모형을 이용할 때 동해로 유입하는 대마난류 물성과 수송량을 인위적으로 설정하는 문제점을 피하기 위함이며, 더불어 북태평양 모형을 이용할 때 북태평양이 동해에 미치는 영향도 함께 살펴볼 수 있다. 수심 자료는 NGDC (National Geophysical Data Center)의 ETOPO5를 사용하였다. 수평 격자 간격은 약 $1/6^{\circ}$ 이며, 수직적으로는 20개 층으로 구성하였다. 초기 수온과 염분은 World Ocean Atlas 2001 (WOA01) 자료를 사용하고, 유속은 수온과 염분자료로부터 지형류(geostrophic current)를 구하여 사용하였다. 염분복원 시간규모는 5일로 두었다. 벌크형식에 사용한 대기 입력 자료는 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 에서 제공하는 월평균 해상풍, 기온, 상대 습도, 해면기압 및 일사량을 사용하였다.

(3) 모형 결과

북태평양 혼합층 깊이, 해면수온 그리고 해면 염분(Fig. 3.3.3.1)이 관측 기후분포를 비교적 잘 모사하였다. 그러나 쿠로시오 확장역에서 깊은 혼합층 깊이 편차를 보

이는 등 순환모형에 존재하는 계통오차가 본 모형에서도 있는 것으로 판단된다.

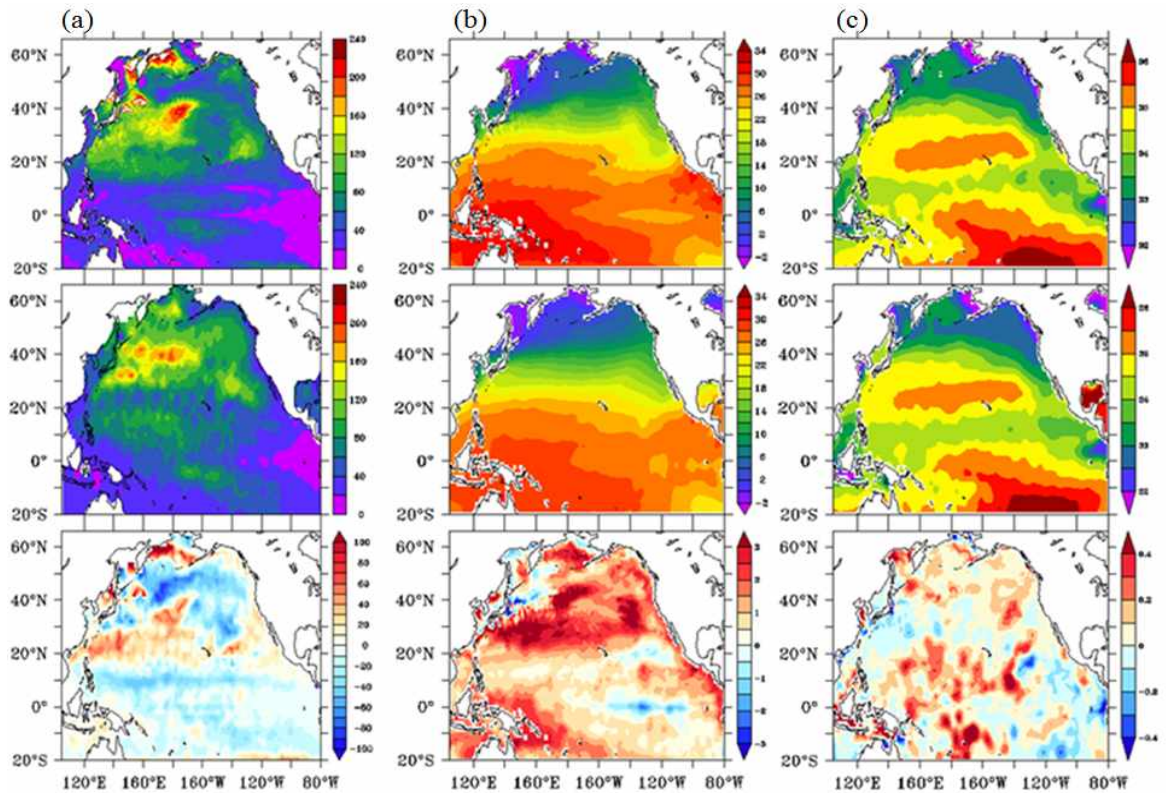


Fig. 3.3.3.1. (a) 37th-year simulated mixed layer depth (m), (b) sea surface temperature (°C), (c) sea surface salinity on February by North Pacific model. Uppers are results of model, middle is Levitus climatology and lowers are difference between model and climatology.

나. 용승 모형

북태평양 모형에서 사용한 모형인 ROMS를 사용하였다. 동해연안용승환경(Fig. 3.3.3.2)을 모사하기 위해 모형 영역은 41 km x 80 km x 16 layer로 구성하였다. 수심은 연안에서 외해로 150 m까지 점점 깊어진다. 초기 수온은 표층 22 °C에서 저층 14 °C, 초기 염분은 35 psu로 설정하였다. f 평면을 가정하고 전향력은 $8.46E-05 \text{ s}^{-1}$ 로 설정하였다. 바람 세기가 용승 및 관련 생태계에 미치는 영향을 보기 위해 바람을 0.02, 0.05, 0.1 Pa 세 가지를 적용하였고, 바람은 수평 방향으로만 변화가 없다. 시간이 지남에 따라 연안에서 용승 효과가 재현되었다(Fig. 3.3.3.3).

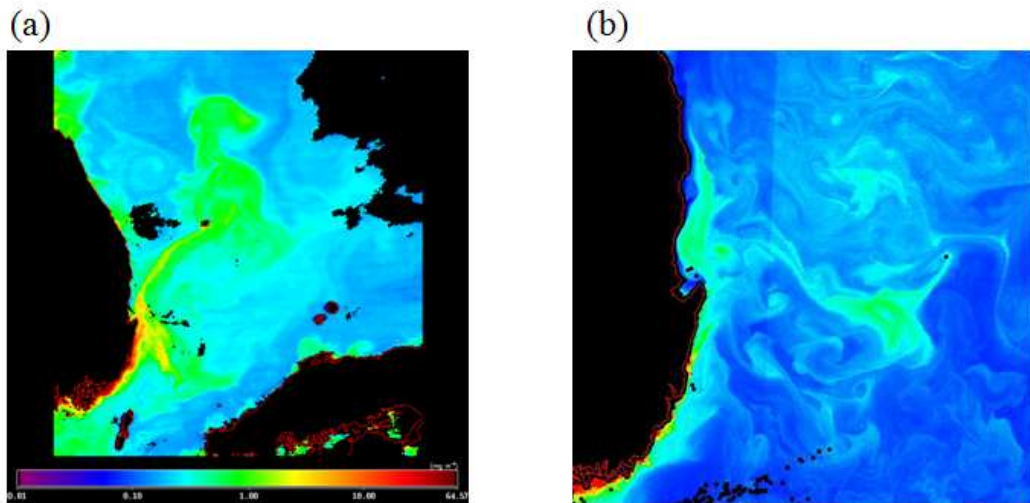


Fig. 3.3.3.2. Upwelling along the east coast of Korea. (a) MODIS satellite chlorophyll-*a* on 3rd August in 2006 and (b) GOCI satellite chlorophyll-*a* at 12 PM on 5th April in 2011.

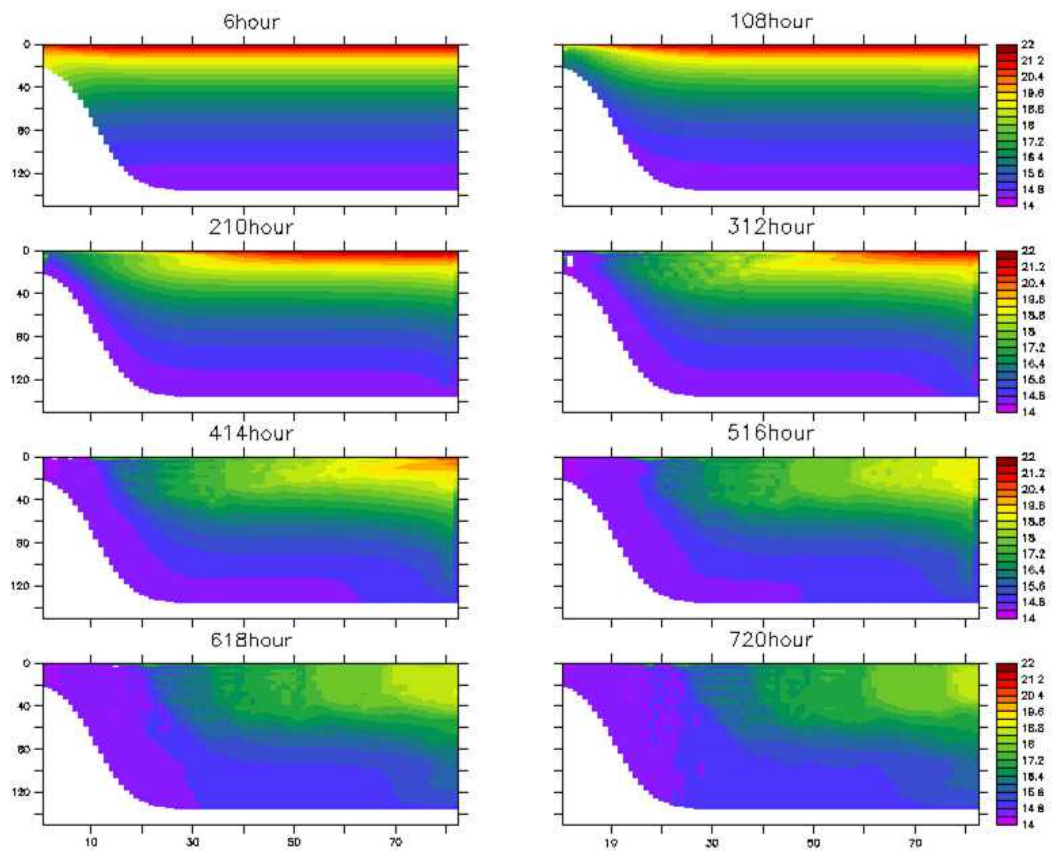


Fig. 3.3.3.3. Vertical distributions of simulated temperature ($^{\circ}\text{C}$) by upwelling model from 6 hour to 30 days. Horizontal axis represents meridional distance (km) and vertical axis represents depth (m).

다. 물리-생태계 접합모형 (ROMS-NPZD)

물리-생태계 접합모형은 3차원 해수순환모형 ROMS와 Powell *et al.* (2006)에서 제시한 4개의 생태변수, 질산염(nitrate: N), 식물플랑크톤(phytoplankton: P), 동물플랑크톤(zooplankton: Z), 유기 쇄설물(detritus: D)로 구성된 하위영양단계 모형이 접합되어 있는 모형이다. 생태 방정식의 연직 및 수평 혼합/확산의 계산을 순환모형인 ROMS에서 계산하게 된다.

(1) 물리 모형 구성

북태평양 모형과 사용한 ROMS을 동일하게 사용하였다. 동해 순환 및 생태계 재현 및 예측에 중점을 둔 3차원 순환모형 영역을 126.58-142.42° E, 33.08-51.92° N 으로 설정하였다. 수심자료는 NGDC (National Geophysical Data Center)의 ETOPO5를 사용하였다. 수평 격자 간격은 약 1/6° 이며, 수직적으로는 30개 층으로 구성하였다. 초기 수온과 염분은 COADS에서 제공하는 월평균 기후 자료를 이용하여 물리 단독 모형을 10년 spin-up한 결과를 사용하였고, 유속은 수온과 염분자료로부터 지형류(geostrophic current)를 구하여 사용하였다. 대기 강제력은 ECMWF-Interim Data의 월평균 해상풍, 기온, 상대 습도, 해면기압 및 일사량을 사용하였다.

(2) 물리 모형 결과

3차원 물리-생태계 접합모형은 대마난류가 분지하여 동한난류와 일본 연안류로 흘러 들어가는 모습, 아극전선 형성 등, 동해의 대표적인 물리 현상을 어느 정도 재현하고 있다(Fig. 3.3.3.4). 해양 혼합층 깊이는 겨울철(2월)에 동해 북부해역(러시아 앞바다)에서는 최대 340 m, 남부해역에서는 평균 160 m 로 모사되며, 여름철(8월)에는 동해 전 해역에 약 40 m로 모사되고 있어 혼합층의 계절적 변화를 비교적 잘 모사하고 있다(Fig. 3.3.3.5). 그러나 동해 표층 해수 수온이 전 계절에 걸쳐 과대모사하고, 대마난류가 북상하여 아극전선이 동해 북쪽해역으로 치우쳐 모사되는 등, 모형 수평 격자의 해상도가 낮고 경계조건으로 기후 자료를 이용하는 까닭으로 모사가 제한적인 면이 있다.

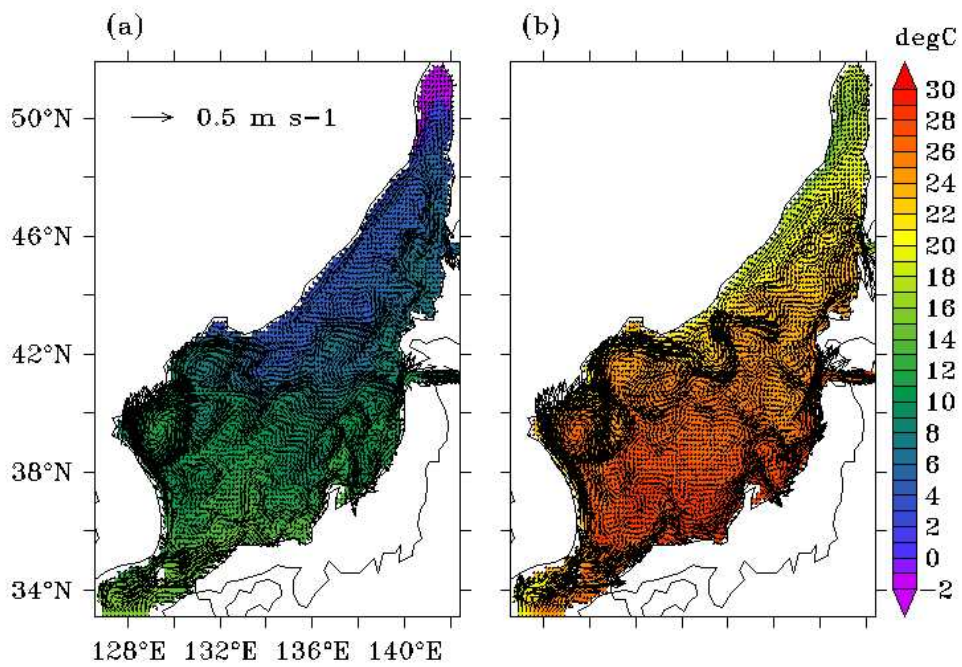


Fig. 3.3.3.4. Simulated sea surface temperature and current on (a) February and (b) August in the East Sea by three dimensional physical-biological model.

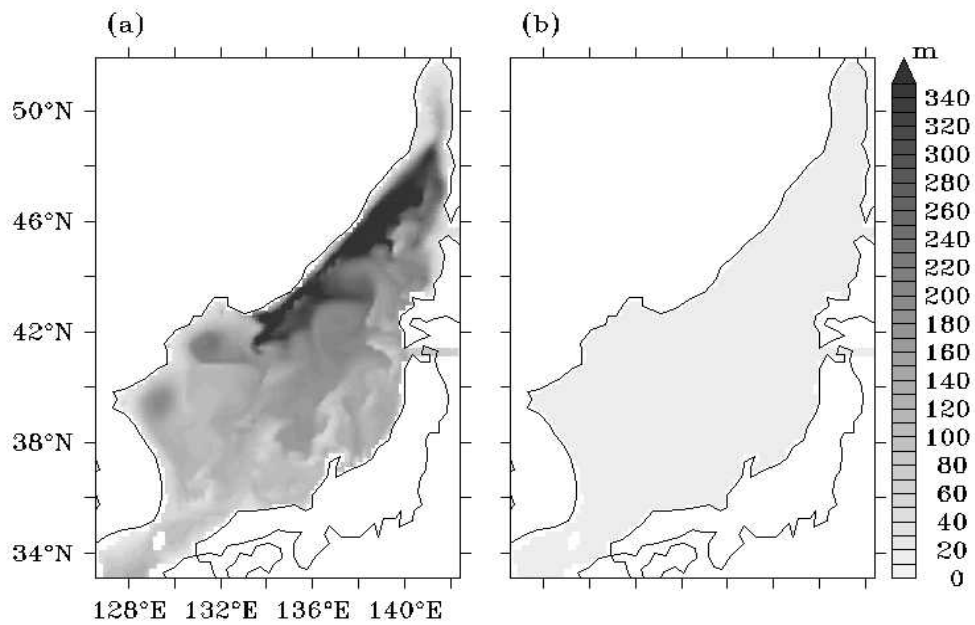


Fig. 3.3.3.5. Simulated mixed layer depth (m) on (a) February and (b) August in the East Sea by three dimensional physical-biological model.

(3) 생태모형 (NPZD 모형)

Powell *et al.* (2006)에서 제시한 4개의 생태변수, 질산염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기 쇄설물로 구성된 하위영양단계 모형(Fig. 3.3.3.6)이다. 7가지 생지화학과정에 의한 생태변수 간의 질소 순환을 계산한다. 본 보고서에서는 편의상 NPZD 모형이라 부른다.

생태모형 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \cdot \nabla N = \delta D + \gamma_n GZ - UP + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial N}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \cdot \nabla P = UP - GZ - \sigma_d P + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial P}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \cdot \nabla Z = (1 - \gamma_n) GZ - \zeta_d Z + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial Z}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + u \cdot \nabla D = \sigma_d P + \zeta_d Z - \delta D + w_d \frac{\partial D}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial D}{\partial z} \right)$$

$$G = R_m (1 - e^{-AP})$$

$$I = I_0 \exp(k_z z + k_p \int_0^z P(z') dz')$$

$$U = \frac{V_m N}{k_N + N} \frac{\alpha I}{\sqrt{V_m^2 + \alpha^2 I^2}}$$

U는 식물플랑크톤 섭식률, G는 동물플랑크톤 포식률, σ_d 와 ζ_d 는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사멸률, ω_d 는 유기쇄설물 침강률, δ 는 유기쇄설물의 분해율을 나타낸다. 생리 매개변수 값은 Powell *et al.* (2006)을 참고하였다(Table 3.3.3.1). 질산염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기 쇄설물 초기 조건은 동해 전역에 걸쳐 균일하게 주었다. 물리 모형과 온라인 접합되어 계산된다.

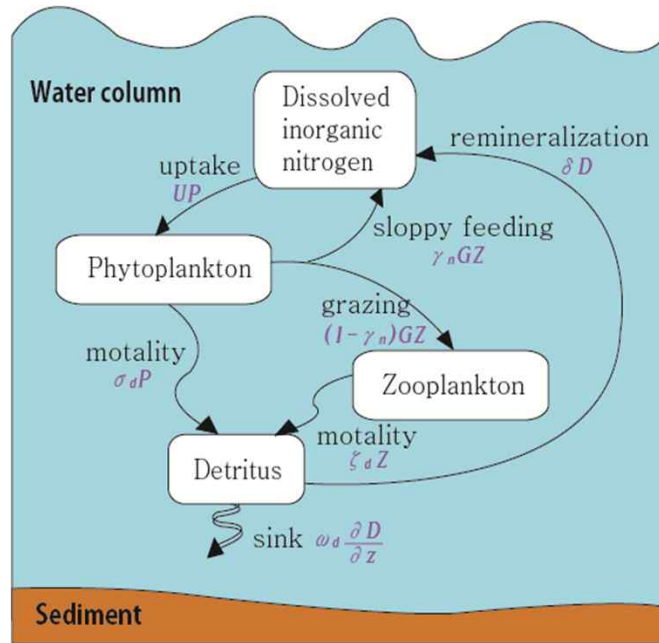


Fig. 3.3.3.6. Mechanic diagram of ecosystem model (Powell *et al.*, 2006).

Table 3.3.3.1. Biological parameters (Powell *et al.*, 2006)

Parameter Name	Symbol	Value	Dimension
Light extinction coefficient	k_z	0.067	m^{-1}
Self-shading coefficient	k_p	0.0095	$\text{m}^2 \text{mmolN}^{-1}$
Initial slope of P-I curve	α	0.025	$\text{m}^2 \text{W}^{-1}$
Surface irradiance	I_0	158.075	W m^{-2}
Nitrate uptake rate	V_m	1.5	d^{-1}
Uptake half saturation	k_N	1.0	mmolN m^{-3^2}
Phytoplankton senescence	σ_d	0.1	d^{-1}
Zooplankton grazing rate	R_m	0.52	d^{-1}
Ivlev constant	Λ	0.06	$\text{m}^3 \text{mmolN}^{-1}$
Excretion efficiency	γ_n	0.3	
Zooplankton mortality	ζ_d	0.145	d^{-1}
Remineralization	δ	1.03	d^{-1}
Detrital sinking rate	w_d	8.0	m d^{-1}

라. 용승 생태계 시범 모사

세 가지 바람세기(0.02, 0.05, 0.1 Pa)를 적용하여 바람세기에 따른 용승 효과를 재현하였다(Fig. 3.3.3.7). 바람세기가 0.1 Pa 일 경우 용승이 발생하는 해역은 식물플랑크톤의 농도가 크고 동물플랑크톤의 농도는 낮은 반면, 에크만 수송류가 흘러가는 해역에서는 반대로 식물플랑크톤의 농도가 낮고 동물플랑크톤의 농도가 높다. 즉, 동물플랑크톤의 포식 작용이 용승환경에서는 약하고, 에크만 수송류가 흘러가는 해역에서는 강하게 나타났다.

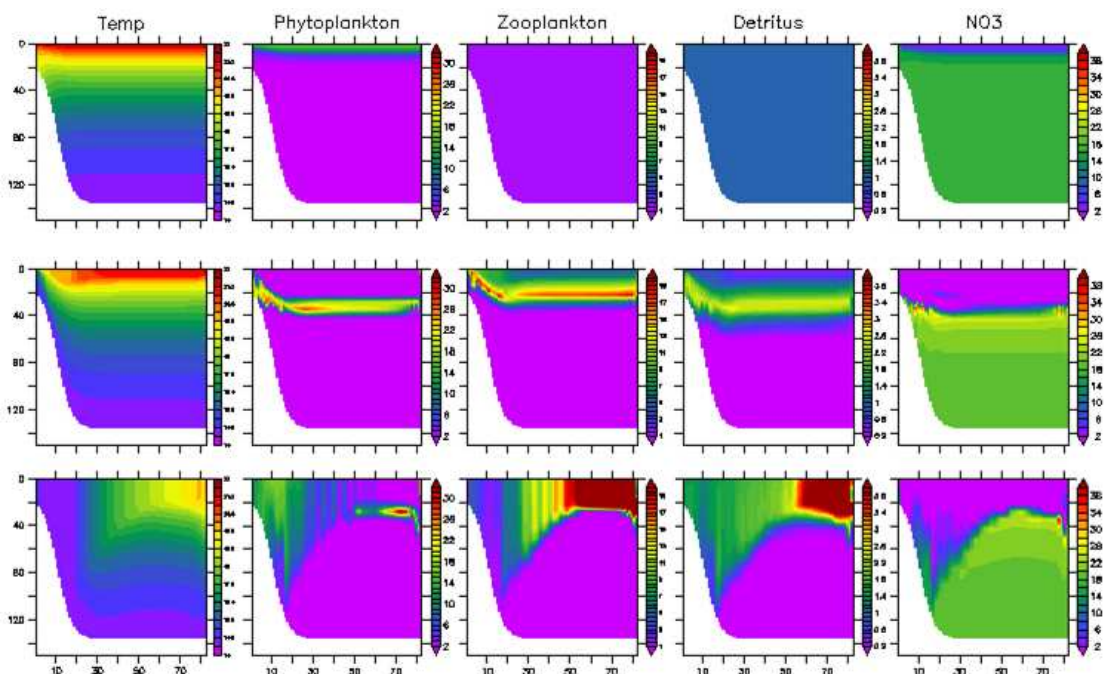


Fig. 3.3.3.7. Vertical distribution of simulated temperature ($^{\circ}\text{C}$), phytoplankton (mmolN m^{-3}), zooplankton (mmolN m^{-3}), detritus (mmolN m^{-3}) and nitrate (mmolN m^{-3}) by upwelling model. Uppers represent initial conditions, middle and lowers represent simulated results with 0.02 and 0.1 Pa wind speed respectively.

4. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명

가. 물리-생태계 집합모형(ROMS-NPZD)

물리-생태계 집합모형에서 모사한 엽록소-a는 SeaWiFS 위성 엽록소-a 보다 그 농도가 과대 모사되지만, 봄 번성(3-5월)과 가을번성(11-12월)이 재현되고 있으며 여름철에 엽록소-a가 최솟값을 보이는 계절 변화가 나타난다(Fig. 3.3.4.1 and Fig.

3.3.4.2). 또한 동해 용승해역을 따라 식물플랑크톤이 높게 모사되었고 3월에서부터 5월에 걸쳐 남쪽 해역에서 발생하여 북상하는 식물플랑크톤 봄 번성 관측 결과 (Nagata, 1994; Yamada *et al.*, 2004)와 비슷한 양상이 재현되었다(Fig. 3.3.4.1). 모형의 4월 달 동해 남부해역과 북부해역의 엽록소-*a*와 SeaWiFS와 MODIS 위성 엽록소-*a* 자료를 비교해보면, 남부와 북부해역에서 모두 엽록소-*a* 번성 시기가 약 1개월 정도 이르게 나타나는 차이를 보인다(Fig. 3.3.4.3). 식물플랑크톤 번성 후 동물플랑크톤 번성이 뒤따르는 등, 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기쇄설물의 계절 변화가 모사되었다(Fig. 3.3.4.4). 또한 봄철 식물플랑크톤 번성 후 표층 영양염이 고갈되면서 표층 아래의 수층에 형성되는 아표층 엽록소 최대층(Subsurface Chlorophyll Maximum: SCM) 층이 연안에서 외해로 갈수록 깊어지는 현상이 재현되었다(Fig. 3.3.4.5).

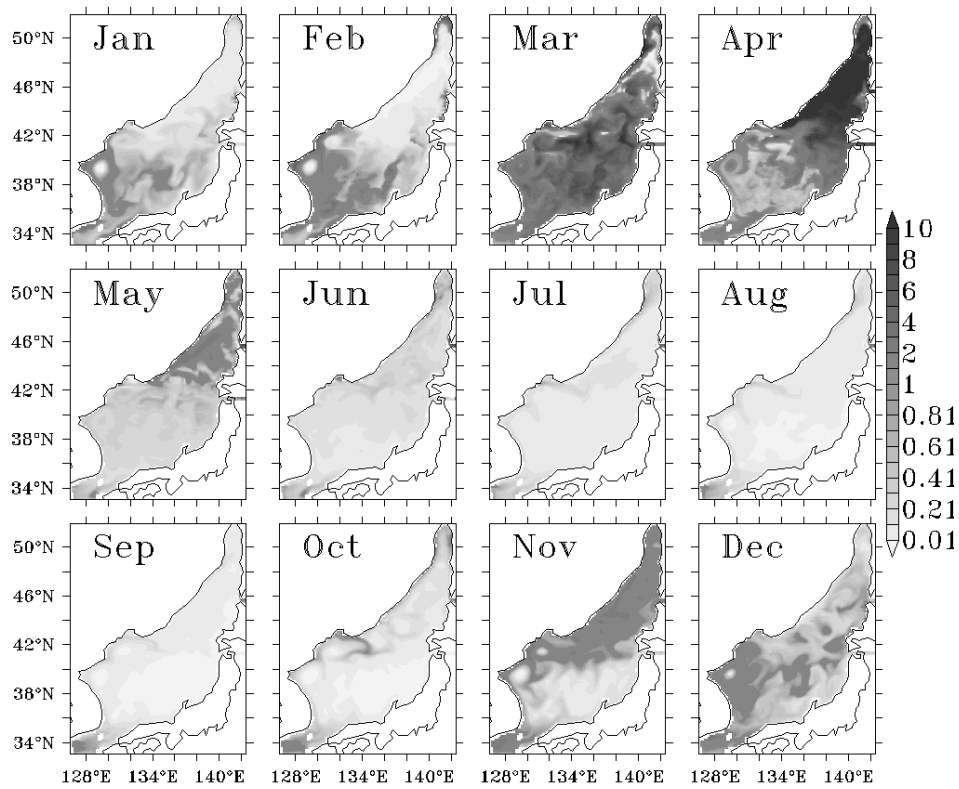


Fig. 3.3.4.1. Simulated surface chlorophyll-*a* concentration (mgC m^{-3}) by 3D physical-biological model.

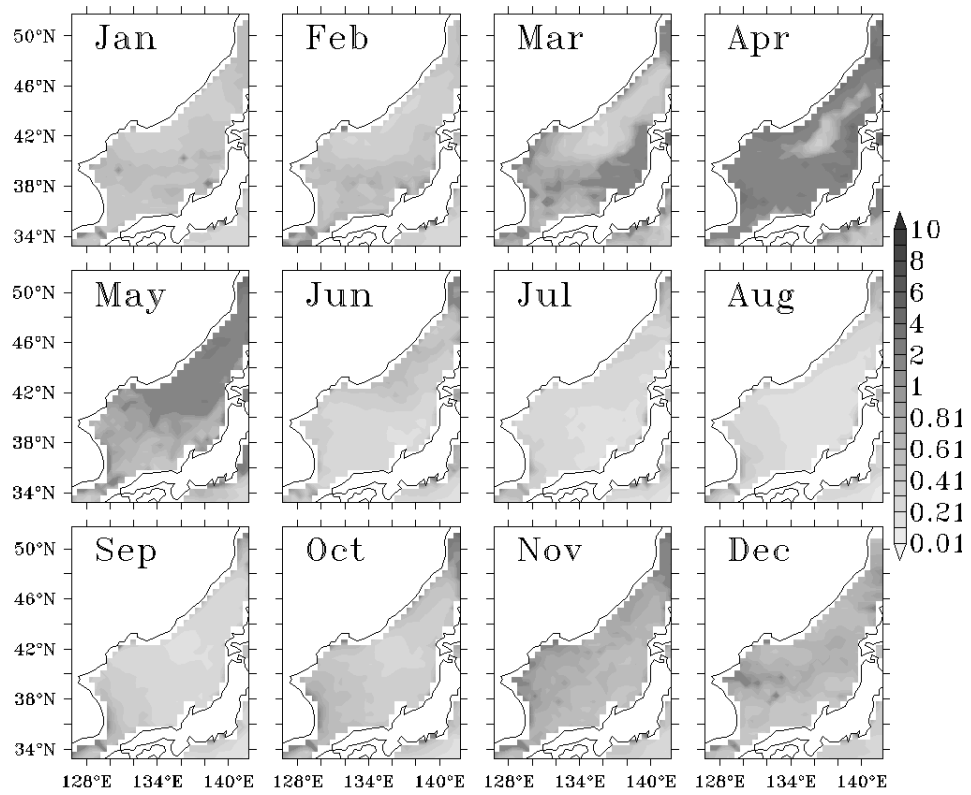


Fig. 3.3.4.2. Surface chlorophyll-*a* concentration (mgC m^{-3}) from SeaWiFS satellite from 1998 to 2012.

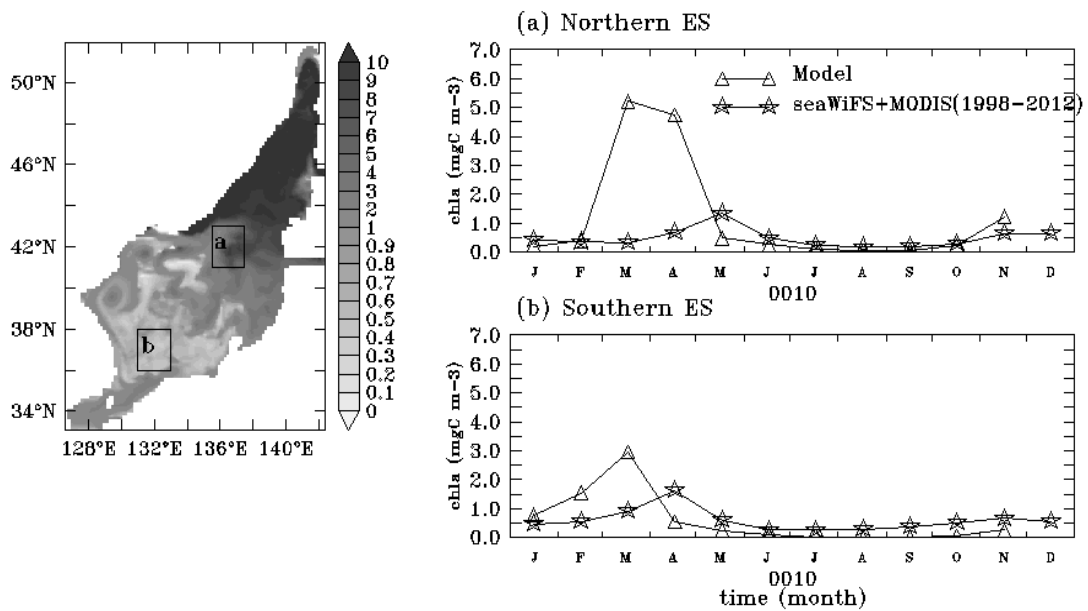


Fig. 3.3.4.3. Simulated surface chlorophyll-*a* concentration (mgC m^{-3}) on April in 10th simulated year (left) and SeaWiFS and MODIS satellite chlorophyll-*a* concentration (mgC m^{-3}) on in (a) North and (b) South of the East Sea which are indicated black boxes in the left figure.

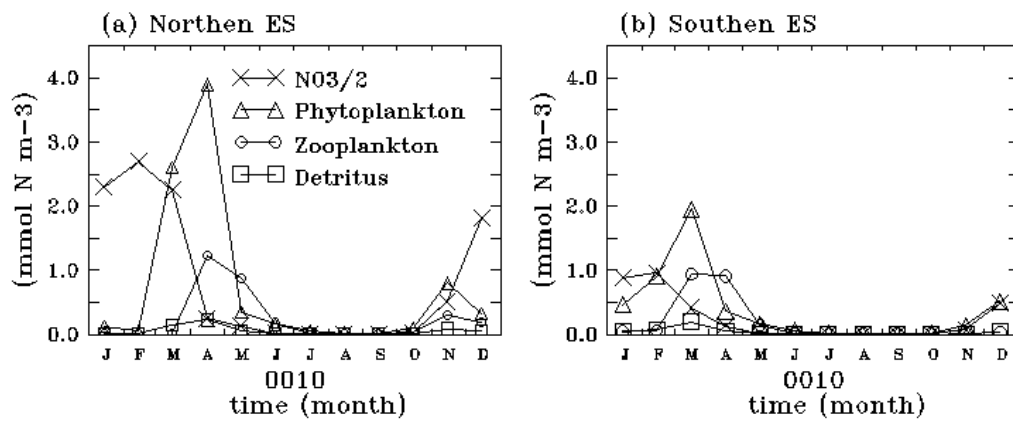


Fig. 3.3.4.4. Simulated surface nitrate, phytoplankton, zooplankton and detritus (mmolN m^{-3}) in (a) North and (b) South of East Sea in 10th simulated year. North (a) and South (b) of the East Sea which are indicated black boxes in Fig. 3.3.4.3.

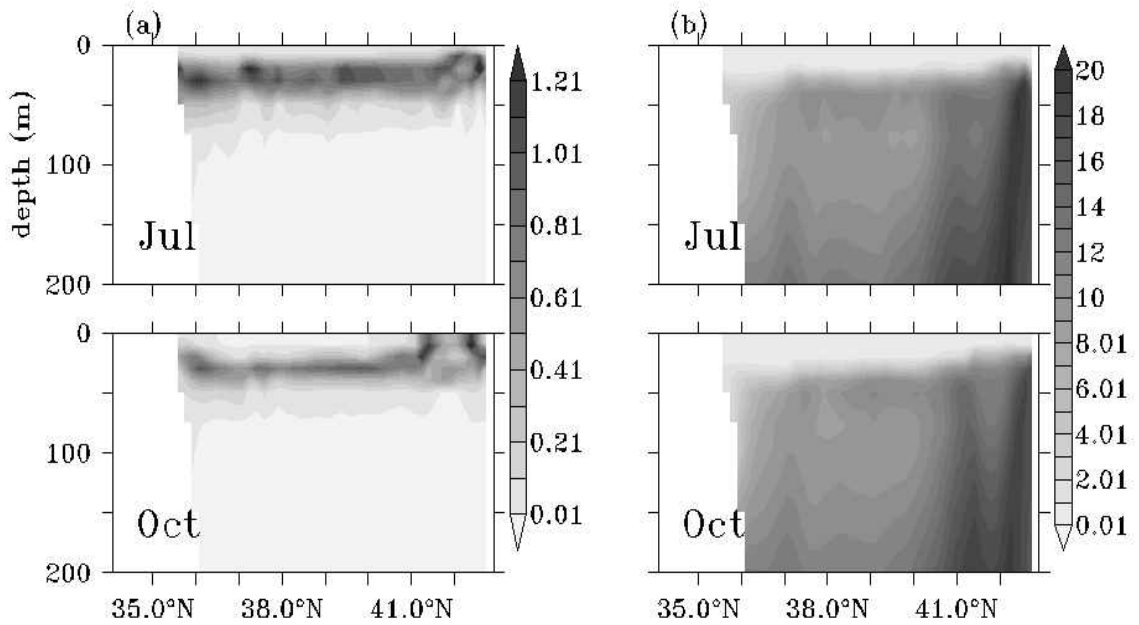


Fig. 3.3.4.5. Vertical distribution of (a) chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}) and (b) nitrate (mmolN m^{-3}) along 134°E on July and October in 10th simulated year.

나. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명-대한해협 영양염 공급량 영향

(1) 대한해협 영양염 공급량 영향

학계에서는 동해 남부해역의 영양염 주요 공급원으로 대한해협 수송과 동해안 용승을 들고 있다. 한편 대마난류는 빈영양염인 해수인 쿠로시오에서 기원하기 때문에 대한해협을 통한 영양염 수송량이 작다는 주장이 있는 반면에, 최근 관측에 기반한 연구에서는 대마난류가 아표층 엽록소 최대층에 직접적으로 영양염을 공급한다고 주장하고 있다.

(2) 대한해협 영양염 공급량 영향 실험

표영 생태계의 계절 변동기작 규명 연구의 일환으로 대한해협을 통한 영양염 공급량이 동해 남부해역의 생태계(일차생산량)의 계절 및 경년 변동에 미치는 영향을 파악하고자 3차원 물리-생태계 접합모형을 이용하여 수치 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 대마난류가 동해 남부해역의 주요 영양염 공급원이라고 가정하고 대한해협을 통한 영양염 공급량의 조건을 다르게 주어 세 가지 수치실험을 실시하였다(Table 3.3.4.). 첫 번째 실험은 계절 변동성이 있는 영양염이 수송되는 경우이고(실험 1) 두

번째는 대한해협을 통해 영양염 수송이 전혀 없는 경우(식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기쇄설물의 수송도 전혀 없음)이며(실험 2), 단, 해수 수송은 첫 번째 실험과 동일한 조건이 적용된 것이다. 마지막으로 세 번째는 계절 및 경년 변동하는 영양염이 수송되는 경우이다(실험 3). 실험의 남쪽 경계(대한해협에 해당)에서의 영양염 조건은 World Ocean Atlas 2009 자료를 사용하였고, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기쇄설물의 조건은 SeaWiFS 엽록소-*a* 자료를 사용하였는데, 각 요소와 엽록소-*a*의 비율을 이용해 엽록소-*a* 자료를 환산하여 사용하였다. 계절 및 경년 변동하는 영양염 공급량은 계절 및 경년 변동하는 해수 수송량과 경년변화 없이 계절 변화하는 영양염 농도의 합으로 적용하였다(Fig. 3.3.4.6). 실험은 2004년부터 2012년까지 9년간 실시하였는데 남쪽 경계에서의 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기쇄설물의 조건은 SeaWiFS 엽록소-*a* 기후 자료를 사용하고 해수 수송량 조건은 2004년부터 2012년까지의 HYCOM 모형자료를 사용하였다(Table 3.3.4.1).

Table 3.3.4.1. Configuration of three numerical experiments to analyze effects of nutrient transport through the East Sea

Numerical experiment	exp.1) Nutrient transport with seasonal variation
initial condition	Physical field: spin-up result with ocean-only model(ROMS) Nutrient : World Ocean Atlas 2009 Phytoplankton, Zooplankton, Detritus: vertically uniform field
boundary condition (at Korea Strait)	Nutrient: World Ocean Atlas 2009 Phyto.: 50% of SeaWiFS Chlorophyll Zoo., Det.: 20% SeaWiFS Chlorophyll
Forcing	ECMWF interim (climatology, bulk formula)

Numerical experiment	exp.2) No nutrient transport
initial condition	Physical field: spin-up result with ocean-only model(ROMS) Nutrient : World Ocean Atlas 2009 Phytoplankton, Zooplankton, Detritus: vertically uniform field
boundary condition (at Korea Strait)	closed (boundary = adjointed model inner)
Forcing	ECMWF interim (climatology, bulk formula)
Numerical experiment	exp.3) Nutrient transport with seasonal/ interannual variations
initial condition	Physical field: spin-up result with ocean-only model(ROMS) Nutrient : World Ocean Atlas 2009 Phytoplankton, Zooplankton, Detritus: vertically uniform field
boundary condition (at Korea Strait)	Water transport: 2004–2012 HYCOM (http://hycom.org) Nutrient: World Ocean Atlas 2009 Phyto.: 50% of SeaWiFS Chlorophyll Zoo., Det.: 20% SeaWiFS Chlorophyll
Forcing	ECMWF interim (climatology, bulk formula)

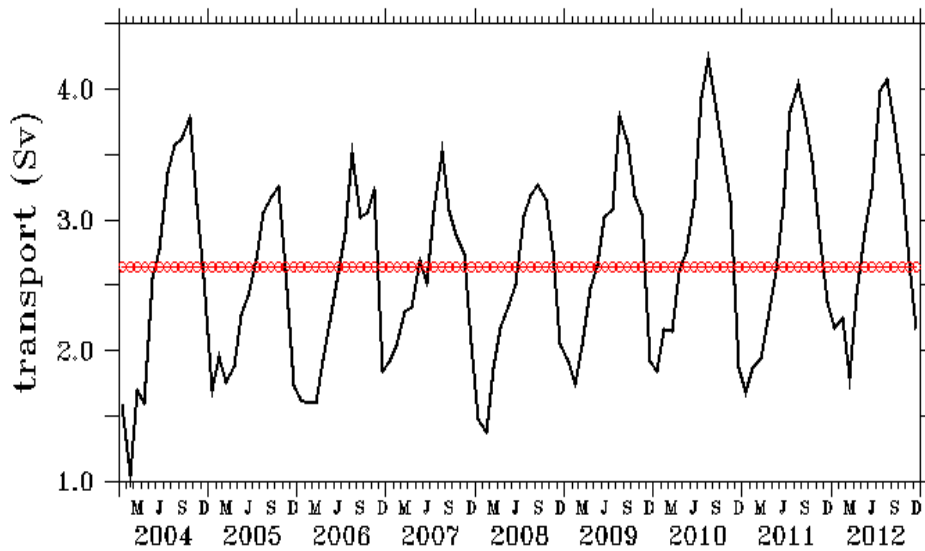


Fig. 3.3.4.6. South boundary condition of water mass transport (mass transport through the Korea Strait) (Sv) of 3D physical-biological model from 2004 to 2012. Middle line is averaged mass transport (2.64 Sv). Water mass transport is HYCOM results.

(3) 대한해협 영양염 공급량 영향 실험 결과

실험 1과 2의 수치실험 결과를 비교해 볼 때 대한해협의 영양염 공급이 표층 엽록소-*a* 농도(mgC m^{-3})에 미치는 양의 영향(positive effect)은 봄철에 동해 북부해역으로 갈수록 약하게 나타나고 가을철에 아극전선(subpolar front) 이남의 동해 남부해역으로 갈수록 강하게 나타남을 확인하였다(Fig. 3.3.4.7). 특히, 봄철에는 대마난류 지류가 흐르는 우리나라 동해안과 일본의 서해안의 표층 엽록소-*a* 농도는 0에 가깝게 나타났다(Fig. 3.3.4.7 (b)). 대한해협을 통한 영양염 공급이 없는 경우 이 해역의 겨울철 영양염 농도가 전 수층에 걸쳐 거의 0에 가까운데(Fig. 3.3.4.8) 이로 인해 겨울철 연직 혼합이 발생하여도 표층으로의 영양염 공급이 없으며 이 해역의 봄철 표층 엽록소-*a*가 거의 0으로 나타났다. 이는 이 해역의 영양염 공급원은 오직 대마난류임을 시사한다. 반면, 이 해역 이외의 다른 해역의 영양염 농도는 줄어드는 것으로 나타나는데(Fig. 3.3.4.8) 이것은 이 해역의 영양염 공급원이 대마난류 뿐만 아니라 다른 공급원이 있음을 시사한다. 한편, 대한해협의 영양염 공급이 표층과 표층 못지않게 생산성이 높다고 알려진 아표층의 연평균 엽록소-*a*에 미치는 영향을 살펴본 결과, 연평균 엽록소-*a*에 미치는 양의 영향은 표층에서는 동해 북부해역으로 갈수록 줄어들고 아표층에서는 아극전선 중심으로 이남인 동해 남부해역에 양의 영향, 이북

인 동해 북부해역에서는 음의 영향(negative effect)이 나타났다(Fig. 3.3.4.9). 특히 이 같은 동해 북부해역의 아표층 엽록소-*a*에 음의 영향이 모형의 계통 오차인지에 대해 추가 연구를 통해 명확히 할 필요가 있다.

실험 3을 통해 모사한 계절 및 경년 변동하는 대한해협 영양염 공급량(kmolN s^{-1})의 편차(anomaly)와 표층 엽록소-*a*(mgC m^{-3}) 편차의 상관관계를 분석한 결과, 대마난류의 지류가 흐르는 해역에서 상관관계가 높게 나타났다(Fig. 3.3.4.10). 일본 서해안을 따라서는 양의 상관관계, 우리나라 동해안을 따라서는 음의 상관관계가 나타났는데, 실험 2의 결과에서 보는 것과 같이 대마난류 지류가 흐르는 해역의 영양염 공급원이 오직 대마난류이라는 결과를 미루어 볼 때(Fig. 3.3.4.7(b) and Fig. 3.3.2.8(b)) 대한해협 영양염 공급량의 경년 변동은 일본 서해안의 표층 엽록소-*a* 경년 변동에 실시간으로 영향을 미치며 우리나라 동해안의 표층 엽록소-*a* 경년 변동에는 시간차를 두고 영향을 미친다고 판단된다.

현재 NPZD 모형은 한계점이 몇 가지 있는데 영양염, 식물플랑크톤 등의 생태요소 변수의 개수 각각 한 개인 점, 생태방정식이 수온을 고려하지 않고 있는 점, 생태 매개 변수 자료가 부족하여 문헌의 자료를 그대로 적용한 점 등이다.

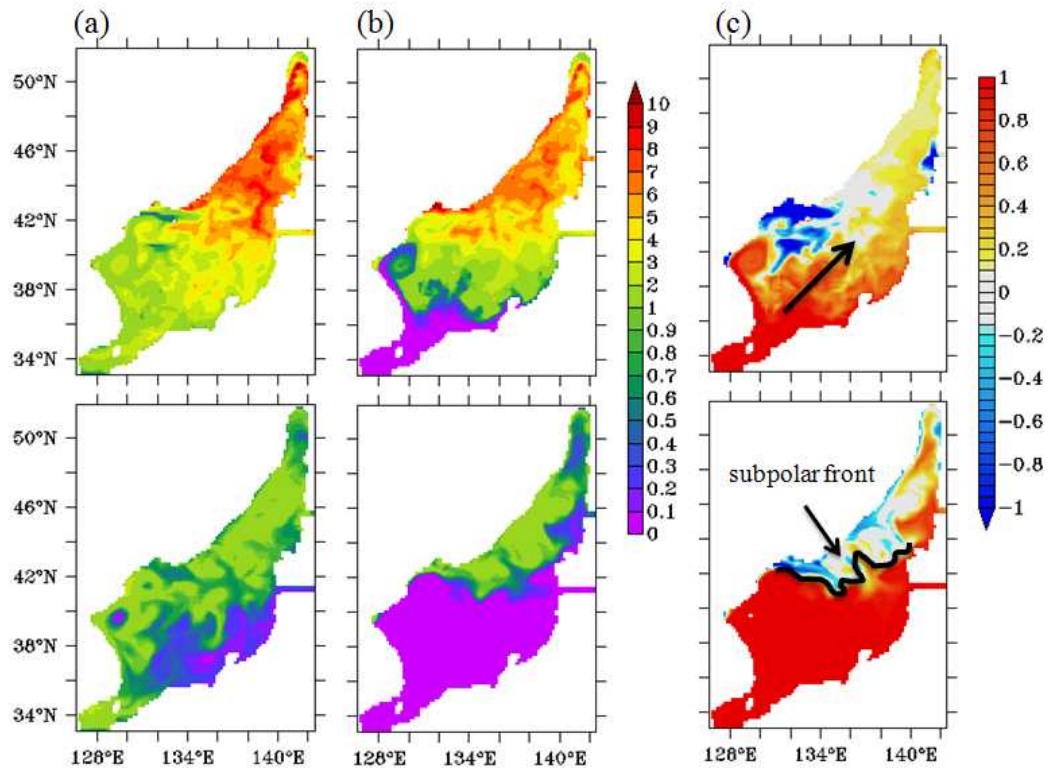


Fig. 3.3.4.7. Simulated surface chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}) in spring (uppers) and fall (lowers) (a) in case of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation, (b) in case of no nutrient flux through the Korea Strait and (c) normalized surface chlorophyll-*a* difference between two cases with surface chlorophyll-*a* in the cast of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation.

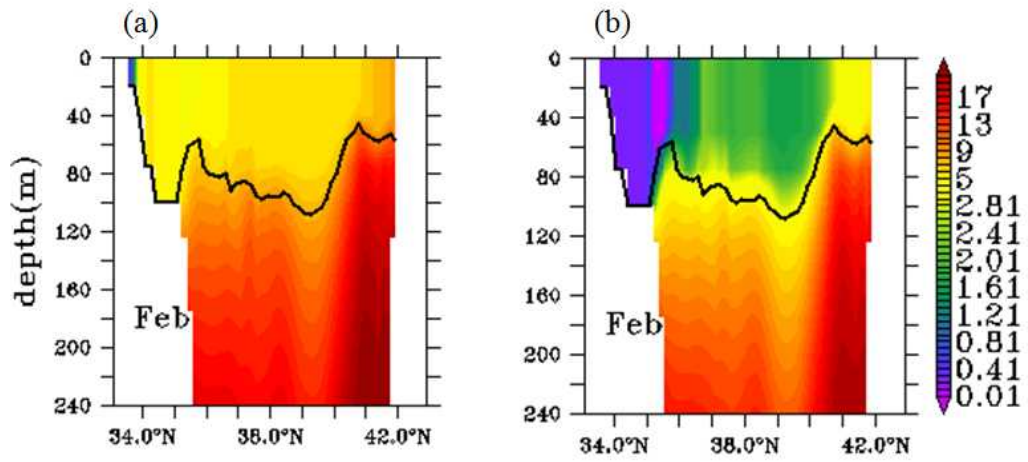


Fig. 3.3.4.8. Vertical distribution of simulated nutrient concentration (mmolN m⁻³) on February along 130° E (a) in case of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation and (b) in case of no nutrient flux through the Korea Strait. Black line indicate mixed layer depth.

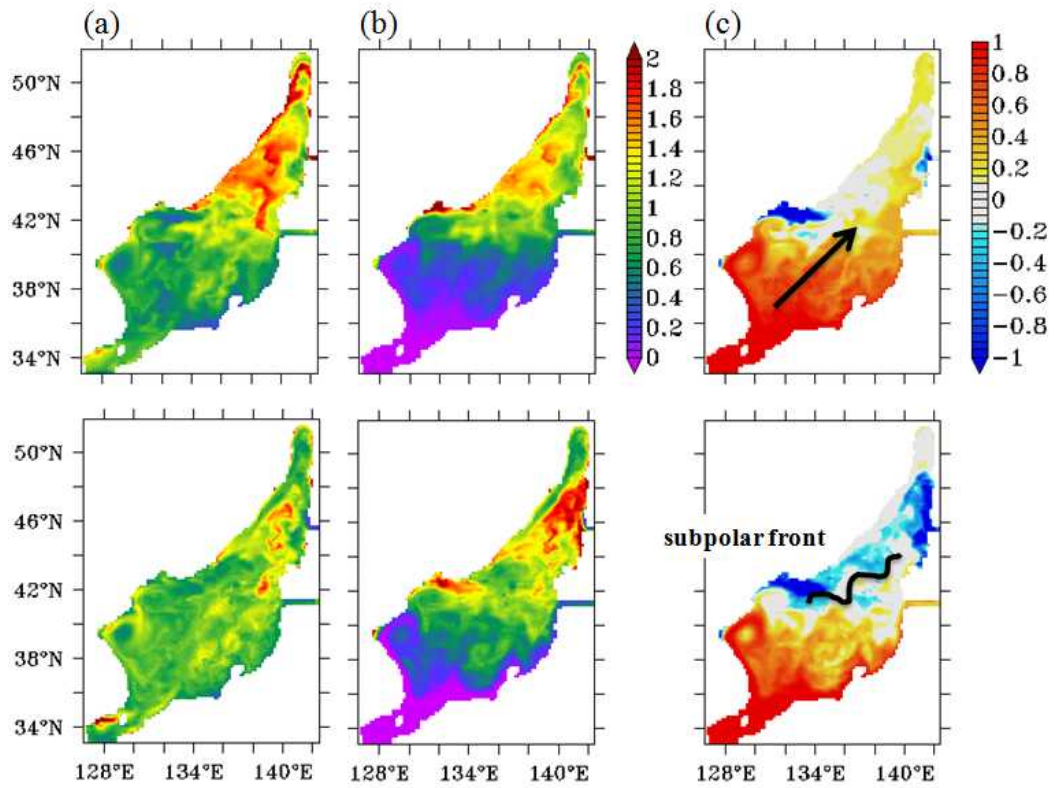


Fig. 3.3.4.9. Simulated surface (uppers) and subsurface (lowers) annual mean chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}) (a) in case of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation, (b) in case of no nutrient flux through the Korea Strait and (c) normalized surface and subsurface annual mean chlorophyll-*a* difference between two cases with surface chlorophyll-*a* in the cast of nutrient flux through the Korea Strait with seasonal variation.

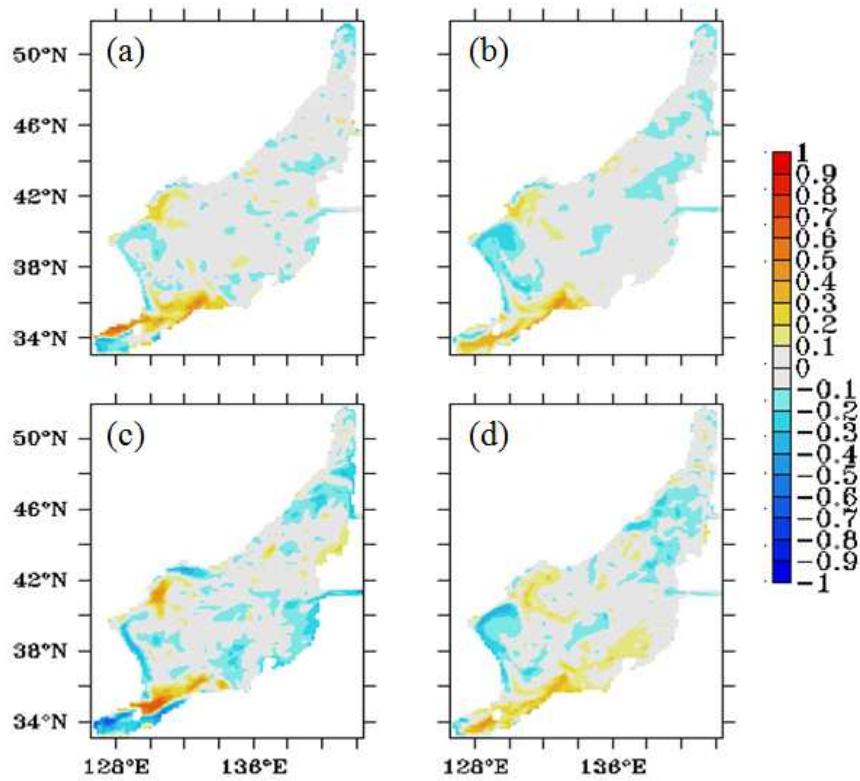


Fig. 3.3.4.10. Correlation between anomalies of (a) nutrient flux (kmolN s^{-1}) through the Korea Strait and surface chlorophyll-*a* (mgC m^{-3}), (b) nutrient flux through Korea Strait but subsurface and surface chlorophyll-*a*, (c) nutrient flux through Korea Strait and subsurface chlorophyll-*a* and (d) nutrient flux through the Korea Strait but subsurface and subsurface chlorophyll-*a*.

제 4 장 기술평가 및 제언

제 1 절 재분석 해양자료 분석

1. 해양재분석 자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가

위성에서 관측된 해수면 수온 및 해면 고도자료, 아고 뜰개 자료에 의해 관측된 연직 수온, 염분 자료, 그리고 정선 해양 관측 자료가 동화된 HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) 결과를 이용하여 동해 생태계의 주요 물리 요인 중 하나인 용승이 전년도 겨울의 냉수대 형성과 관계가 있다는 해석을 하였다. 또한, 중층(대략 수심 50 m-400 m) 즉, 수온약층 바로 아래 위치하는 동해 중층수의 저염수의 기원에 대한 연구를 표층 뜰개 관측 자료를 기반으로 실시하였다. 동해 중층수의 염분 최소층을 수온 2-3 °C에서 34.0 psu 이하로 규정짓고, 동해 중층수의 저염수는 러시아 아무르강에서 유입된다고 제시한 기존의 모형 기반 연구 결과에 반해, 표층 뜰개 관측 자료 분석 결과에 기반하여 동해 중층수 저염수는 대한해협을 통해 들어오는 대마난류 저염표층수가 그 기원임을 제시하였다. 동해 중층수는 수온약층 바로 아래 위치하면서 동해 연안을 따라 남하하기도 하기 때문에 연안에서 발생하는 용승 현상 혹은 강한 수직 혼합작용 등에 의해 표층 수온에 영향을 주어, 동해안의 기온 저하나 해무 발생 등과 같은 날씨 변화 및 기후변화에도 영향을 줄 수 있으며 이에 따라 연안 해양생태계에도 지대한 영향을 끼칠 가능성이 있어 동해 중층수의 형성 기작 및 기원에 대한 연구가 필요하다.

2. 동해 및 혼합층 과거 변화 통계분석 및 혼합층 변화와 대기강제력/순환변화 연관성 파악

최근 들어 아고 뜰개 관측 자료와 같이 시공간상 해상도의 관측 자료가 생산됨에 따라 동해 계절 및 해역 별 해양혼합층 변화 분석이 가능해졌다. 이전 연구에서는 동해 겨울철 혼합층 깊이에 대한 연구가 다수인 까닭에 동해의 혼합층 깊이의 계절 및 해역별로 분석한 점에서 의미 있는 결과라 할 수 있다. 더욱이 여름과 가을철에 남부해역의 혼합층이 봄과 겨울철과 반대로, 북부해역보다 깊게 나타난 결과는 그간 보고된 바 없는 연구 결과이며 이는 QuickSCAT 바람 관측 자료를 통하여 여름철 남부해

역의 바람 세기가 강한 것과 연관 지어 설명할 수 있다. 추후 정량적인 상관관계를 제시할 필요가 있으며, 다른 위성 바람 자료나 혹은 ncep/ncar 재분석 자료에서도 여름철 남부해역의 바람의 세기가 크게 나타나는 지 확인해 볼 필요가 있다.

3. 동해 클로로필 경년 변동 및 혼합층 깊이 연관성

재분석 해양자료를 이용하여 동해 생태계의 주요 물리 요인 중 하나인 동해 혼합층 변동성과 관련 클로로필 변동성을 상관관계를 제시하였다. 2008년 울릉분지 해역에서 나타난 봄철 엽록소- a 대 번성은 2월에 나타난 깊은 해양 혼합층과 관련된 것으로 판단된 것에 반해, 2004년에는 2월에 같은 해역에서 해양 혼합층이 깊게 나타났음에도 불구하고 4월 엽록소- a 농도가 낮게 나타났다. 이를 미루어 보아 엽록소- a 농도 변동이 겨울철 해양 혼합층 깊이의 변동 이외에 봄철 해양 혼합층 깊이의 영향을 받았을 가능성이 있으며, 이에 대해 추가 분석이 필요하다. 또한, 잠정적으로 봄철 황사와 엽록소- a 대번성의 상관관계가 적다고 결론지었지만, 추가적인 분석이 필요하다.

제 2 절 장기 생태자료 생산 및 분석

1. 생태 장기 시계열 자료 생산

본 연구는 과거 장기 생태 시계열 자료를 생산하여 과거 생태계 현상 및 생태계 변동 경향의 메커니즘을 파악하고자 진행되었다. 과거 장기 생태 시계열 자료는 관측 자료를 통해 분석되는 것이 가장 좋으나 장기 관측 자료의 수가 현저히 부족하기 때문에 본 연구에서는 투명도와 엽록소- a 농도와의 상관관계를 적용하여 생태 장기 시계열 자료를 생산하였다. 그러나 수치적 관계를 바탕으로 한 투명도와 엽록소- a 농도의 관계식의 적용은 해수의 특성에 따라 제한된다(Carlson and Simpson 1996). 식물플랑크톤이 빛의 흡광을 결정하는 Case-1 해역의 경우 투명도가 식물플랑크톤의 주색소인 엽록소- a 농도에 의해 결정되기 때문에 투명도로부터 엽록소- a 농도의 관계식을 유도하는 것이 가능하나 해수의 광 특성이 식물플랑크톤 외에 용존 유기물질이나 부유물질에 의해 영향을 받는 Case-2의 경우에는 관계식을 적용하기 어렵다. 본 연구의 대상해역인 동해는 해수의 광학적 분류에 의해 Case-1 해역으로 분류되기 때문에 본 연구에서는 투명도와 엽록소- a 농도의 관계식을 적용하여 생태 장기 시계열 자료를 생산하였다(Gordon and Morel 1983, Morel 1988, Yoo *et al.*, 2002). 또한 투명도와 엽록소- a 농도간의 관계식은 동해 현장에서 관측한 자료를 바탕으로 유도하였는데, 관계식의 오차를 줄이기 위해서는 투명도와 엽록소- a 농도에 대한 정확한 측정이 요구된다. 관측된 투명도는 관측 시간과 지역에 따라 변화하는 태양고도에 영향을 많이 받는데, 본 연구에서는 태양고도의 효과를 제거하기 위해 관측된 투명도를 Kleppe and Girdner(2008) 모델에 적용시켜 보정하였다.

추후 정확한 생태계 변동을 파악하기 위해 장기 엽록소- a 시계열 자료를 바탕으로 장기 일차생산 자료를 생산하고자 한다. 기초생산 자료를 생산하기 위해서는 엽록소- a 농도 뿐 아니라 표층 수온, 표층 광량, 소광계수 등의 입력 변수가 필요하다. 현재 투명도를 바탕으로 엽록소- a 농도 및 소광계수를 계산하였고 국립수산과학원의 표층 수온 자료를 정리하였다. 향후 표층 광량 자료를 계산해 장기 기초 생산 자료를 생산하여 체제 전환 시기 동안의 먹이망 관계에 대해 분석하고자 한다.

2. 생태 장기 시계열 자료 분석

동해 남동부 생태계 장기 시계열 자료를 바탕으로 1980년대 후반에 기후 체제 전환이 일어났던 유사한 시기에 엽록소- a 변동에 있어 체제 전환이 있었음을 최초로

밝혀냈다. 이는 그동안 알려지지 않았던 현상으로 동물플랑크톤의 증가 및 수산자원의 체제 전환과 유사한 시기에 일어나 1980년대 후반에 동해 생태계 전반에 큰 변화가 있었던 것을 암시하며 장래 동해 생태계의 변동을 이해하는데 중요한 단서가 될 것이다.

3. 동해 남동부 생태계 변동기작에 대한 가설수립

본 연구에서 재생산한 장기 엽록소- a 시계열 자료에서 1990년에 일어난 체제 전환 현상의 원인을 파악하기 위해 기존 연구를 바탕으로 2가지 가설을 수립하였다. 첫 번째 가설은 겨울철 수온의 증가로 인한 엽록소- a 농도의 증가이다. 1980년대 후반에 일어난 체제 전환은 동해에 영향을 미치는 겨울철 기후인자에서부터 일어난 현상으로 겨울철 기후인자의 변화는 겨울철 대마난류 수송량의 증가에 영향을 끼치고 따뜻한 대마난류 수송량의 증가로 인해 겨울철 수온이 증가되는 체제 전환 현상이 나타났다. Tian *et al.*(2008)은 겨울철 기후인자 중 1980년대 후반에 겨울철 몬순 지수와 극진동 지수의 유의한 변동을 관측했고 이 현상이 대마난류와 상관성이 있다고 밝혔다. 본 연구에서는 장기 엽록소- a 시계열 자료를 연안과 외해로 나누어 분석함으로써 동해 남동부 해역의 연안과 외해에서 1990년에 유의한 체제 전환이 나타난 것과 계절별로 다른 패턴을 보이는 것을 확인하였다. 특히 연안에서의 체제 전환 현상이 더 두드러졌으며, 연안 용승 현상이 나타나는 4-10월 기간 동안에는 1990년 이후 엽록소- a 농도가 증가하였으나 겨울철 기간 동안에는 엽록소- a 농도가 오히려 감소하였다. 또한 외해에서는 연안 용승이 강해져 연안에 영향을 줄 수 있는 여름철 시기에 1990년 이후 엽록소- a 농도의 증가가 두드러졌다. 따라서 본 연구에서는 두 번째 가설로 연안 용승의 강화의 영향을 살펴보았다. 그러나 본 연구에서 발견한 체제 전환 현상은 연안에 국한돼 나타나는 현상이 아니라 기후인자를 포함해 동해 전 해역의 물리인자와 생물인자에서 나타나는 현상이다. 따라서 추후 기후인자의 변동과 연안 용승 및 대마난류 수송량의 증가 등 다양한 현상을 복합적으로 고려하여 분석해 보고자 한다.

4. 기후 지수와 생태계 변동 간의 상관성 분석

본 연구에서는 생태계 변동기작에 대한 기후인자의 영향을 확인하기 위해 SeaWiFS 위성자료로 추정된 동해 전 해역의 일차생산 변화를 분석하였다. 연간 일차생산력의 변화에 주성분 분석 및 K-means clustering 통계방법을 적용한 결과, 동해 해역은 연간 일차생산력의 변화가 5가지 해역으로 구분된다는 것을 확인하였다. 각 해역은

계절별, 연별로 뚜렷하게 일차생산의 시, 공간적인 패턴을 보이며 각 해역별로 기후인자 및 물리변수가 다르게 일차생산력에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구 기간 동안 일차생산과 물리변수 및 기후인자 간의 정확한 메커니즘을 파악하기는 어려웠다. 추후 이 부분에 대한 연구를 지속해 나아가자 한다.

제 3 절 물리-생태계 접합모형을 이용한 생태계 변동기작 규명

1. 물리-생태계 접합모형 입력 생리매개변수 축적

식물플랑크톤 기능성 그룹 모형과 관련하여 생리변수자료가 절대적으로 부족하며 이것으로 인해 모형결과의 불확실성이 유발된다. 따라서 본 연구에서는 turbidostat, culture apparatuses를 제작하여 동해 출현종을 대상으로 실험에 의한 생리학적 자료를 축적하였다. 광도, 온도, 영양염에 대한 최대성장률 실험을 실시하였으나 앞으로 광합성과 관련된 변수들, 영양염에 대한 친화도 등을 기능성 그룹별로 구할 필요가 있다. 이러한 노력은 단기에 완성되는 것이 아니므로 장기에 걸쳐 이루어져야 하며 축적된 생리매개변수 자료를 통하여 모형결과의 불확실성을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 생태모형 개선

최근 대두되고 있는 기능성 그룹의 중요성에 맞추어 GOTM-ERSEM 모형 구조를 개선하고 동해 3개 정점에 이를 구축하고 시행하여 식물플랑크톤의 천이과정을 어느 정도 모사하였다. 하지만, 규조류의 클로로필 농도가 거의 0에 가깝게 나타나는데 이는 규산염의 제한에 의한 것으로 보여 이류에 의한 규산염의 공급원에 대해 살펴볼 필요가 있다.

이러한 1D 모델의 문제점을 보완하기 위하여 동해 울릉분지 정점에 혼합층 깊이에 의한 ERSEM 박스모형을 구축하였다. 혼합층 깊이는 동해 울릉분지 생태계 변화와 밀접한 관련이 있으므로 본 연구에서는 지구온난화에 따른 혼합층 깊이 변화가 미래의 생태계에 어떤 영향을 미칠 수 있을지에 대한 제시를 할 수 있게 되었다. 한편으로 혼합층 깊이를 계산할 수 있는 장기 관측 자료의 확보가 쉽지 않고 ERSEM 박스 모델의 경우 여름에 생성되는 아표층 엽록소 최대층을 구현하지 못하므로 식물플랑크톤의 외부유출이나 성층화된 환경에서의 박테리아와 암모늄이 과대평가될 가능성을 배제할 수 없다. 또한 ERSEM의 많은 불확실한 생리매개변수는 결과 해석에 큰 어려움을 주고 있다. 따라서 기존문헌 및 실험을 통하여 지속적으로 매개변수자료를 확보하고 ERSEM 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시할 예정이다.

이러한 단계를 거친 후 향상된 ERSEM 모델을 통하여 동해 울릉분지에서의 주요 식물플랑크톤 기능성 그룹의 중요한 기능을 판별하고 이들의 계절적 변동, 주요 포식

자와의 관계를 분석하여 동해 울릉분지의 하위생태계 변동기작을 규명할 계획이다.

3. 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태계 모형 시범 결합

북태평양을 도메인으로 하는 ROMS 모형을 구축하고 이를 구동하여 북태평양 혼합층 깊이, 해면수온, 해면염분, 혼합층 수심을 비교 분석하였다. 또한 모형을 적합화하여 동해 생태계의 계절적 변동을 재현하고 미래의 생태계 변화를 예측할 연구토대를 마련하였다. 울릉분지 생태계의 중요한 변화요인 중 하나인 용승 효과를 보기 위하여 ROMS 모델로 세 가지 바람 강도에 대한 모사를 한 결과 용승의 기본 유형을 파악할 수 있었으며 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기 쇄설물의 계절변화와 아표층 엽록소 최대층이 외양으로 갈수록 깊어지는 현상을 어느 정도 재현하였다. 다만 연안 용승, 중규모 eddy, 동한 난류 등의 해양 순환 재현이 생태계 모사에 있어 중요함 부분이므로 향후 모형 해상도(1/6도)를 높여 해양순환 모사 성능 향상을 꾀해야 할 것이다. 또한 지역모형의 중차대한 사안인 경계조건을 개선함으로써 해양순환 모사 성능 향상시킬 수 있을 것이다. 한편, 현재 NPZD 모형은 한계점이 몇 가지 있는데, 영양염, 식물플랑크톤 등의 생태요소변수의 개수 각각 한 개인 점, 생태방정식이 수온을 고려하지 않고 있는 점, 생태 매개 변수 자료가 부족하여 문헌의 자료를 그대로 적용한 점 등이다. 따라서 추후 이에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 물리-생태계 모형을 이용하여 표영 생태계의 계절 변동기작 규명

본 연구의 목표는 해양 및 생태계 장기 시계열 자료를 재분석/재생산하여 과거 동해 연안에서 나타난 생태계 변동을 분석하고 이를 토대로 생태계 변동기작에 대한 가설을 세운 후 이를 테스트하기 위한 물리-생태모형을 구축하고 궁극적으로 동해 생태계 변화의 기작을 이해하는 것이다. 대한해협을 통한 영양염 공급에 대한 여러 학설이 존재하는 현 시점에서, 3차원 물리-생태계 모형을 이용하여 대한해협으로부터의 영양염 공급이 동해 하위생태계(일차생산량)에 미치는 영향을 제시한 점에서 큰 의미가 있다. 3년이라는 짧은 시간 동안에 동해 생태계를 완전하게 재현할 수 없었지만 동해 하위생태계의 계절변화를 어느 정도 재현하고 이에 대한 분석 연구를 실시함으로써 동해 생태계 변화와 대한해협을 통한 영양염 공급에 대한 상관관계를 제시할 수 있었다. 물리-생태모형 수립, 변동기작에 대한 가설 수립 등의 연구기반을 구축한 것에 큰 의의가 있으며 앞으로 이 방향의 연구가 지속되기를 희망한다.

제 5 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

1. 3단계 연구 기간 내 연구내용 대비 달성률(%)

년차	달성내용	년차별 계획대비 연구실적 달성률	총연구기간 대비 연구 진척율
1차년 (2011)	• 재분석 해양자료 수집 및 특성 평가 및 기본 평가	100	20
	• 생태 장기 시계열 자료 생산	100	20
	• 생태모형 개선	100	30
	• 동해 중심 북태평양 순환모형 수립 및 물리-생태 계 모형 시범 접합	100	30
2차년 (2012)	• 재분석 자료에서 재현한 해양 혼합층 비교	100	70
	• 생태 장기 시계열 자료 분석	100	60
	• 생태모형 개선	100	65
	• 물리-생태계 모형 접합 2단계	100	60
3차년 (2013)	• 장기 생태 자료 및 재분석 해양자료 분석 종합	100	100
	• 동해 생태계 변동기작 규명	100	100

2. 정량적 목표 달성도(부록 참조)

구 분		3년간 실적	
논문 게재	SCI	6	
	기타 국외학술지	-	
	국내 학술지	2	
학회 발표	국외	26	
	국내	17	
특허	국외	출원	
		등록	
	국내	출원	
		등록	
단행본			
세미나 개최		2	
인터넷 사이트 개설			

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 동해 남서부 생태계 장기 자료 확보
- 동해 혼합층 특성에 대한 재분석 자료 평가 통계 기술 개발
- 생태모형 기술 확보
- 물리-생태계 접합모형 구축
- 물리-생태계 접합모형 동해 적용 기술 확보 및 미래변화 전망 도구 확보

2. 경제·산업적 측면

- 기후변화협약에 능동적으로 대처 할 수 있는 과학적 기반을 마련
- 동해 생물자원의 변동과 예측을 제공하여 생태계 및 수산자원 관리의 기초 자료로 활용될 수 있도록 하고 수산자원관리 효율을 높임
- 해양환경 관측 및 생태계 장기 변동 모형을 통해 얻은 자료를 이용해서 어류의 먹이 생물 생산의 시·공간적인 분포를 파악함으로써 생태계 관리에 이용할 수 있음

제 6 장 연구개발 결과의 활용계획

- 동해 환경 장기 변화 예측에 대한 표준적 연구사례를 제시: 본 연구에서는 모델 연구를 통하여 향후 동해 환경 변화 연구에 대한 표준적 연구사례를 제시하고자 함.
- 물리-생태계 접합모형 시스템으로 동해의 부각: 동해는 축소대양(miniature ocean)의 특성을 가지고 있어 대양 연구에서는 어려운 시스템 전체의 연구가 비교적 용이하여 접합모형을 통한 동해 생태계 장기 변화 예측이 가능함. 이러한 연구결과는 국제해양학 사회의 주목을 받을 수 있으며 동해 명칭 문제와 관련하여 국제적 홍보효과도 얻을 수 있음.
- IMBER 프로그램에 참여: JGOFS와 GLOBEC 후속 프로그램으로 출범한 IMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem research, endorsed by IGBP and SCOR)의 지역 프로그램으로 참여
- 북태평양 생태계 상태 보고서 (North Pacific Ecosystem Status Report, PICES) 수록: PICES는 2004년을 시작으로 동해를 포함한 북태평양 해양생태계의 상태 변화를 평가하는 보고서를 발간할 예정임. 이 보고서는 주기적으로 지속적으로 증보될 예정이며 동해 생태계 장기 변동 분석에 대한 연구결과는 개정판에 포함되어 국제적으로 널리 홍보될 수 있음.

제 7 장 참고문헌

- 박종규, 1996. 한국 동해 남부해역의 환경변화에 따른 식물플랑크톤 생물량의 장기간 변동과 광합성 특성. 서울대학교 대학원 해양학과.
- 오유리, 장찬주, 김웅, 민홍식, 신창웅, 김철호, 2009. 동서 남서해역의 성층 장기변화. 2009 한국해양학회 추계학술발표대회. 47-50.
- Antoine, D., Morel, A., Gordon, H.R., Banzon, V.F., Evans, R.H., 2005. Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. 110(C6).
- Abbott, W., 1966. Microcosm Studies on Estuarine Water I: the Replicability of Microcosms. *Journal Water Pollution Control Federation*. 38, 258-270.
- Beamish, R.J., Neville, C.E.M., Cass, A.J., 1997. Production of Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to decadal-scale changes in the climate and the ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 54(3), 543-554.
- Blackford, J.C., Allen, J.I., Gilbert, F.J., 2004. Ecosystem dynamics at six contrasting sites: a generic model study. *J. Mar. Syst.* 52, 191-215.
- Blackford, J.C. and Gilbert, F.J., 2007. pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea. *Journal of Marine Systems*. 64, 229-241.
- Bland, M., 2000. An introduction to medical statistics. Oxford; Oxford University Press.
- Boyce, D.G., Lewis, M.R., Worm, B., 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*. 466(7306), 591-596.
- Carlson, R.E., Simpson, J., 1996. A Coordinators Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. North American Lake Management Society. 96pp.
- C.de Boyer Montégut, Madec, G., Fischer, A.S., Lazar, A., Iudicone, D., 2004. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 109(C12), C12003.
- Edwards, K.F., E. Litchman, and C.A. Klausmeier., 2013. Functional traits explain phytoplankton community structure and seasonal dynamics in a marine ecosystem. *Ecology Letters*. 16, 56-63.
- Eilers, P.H.C., and J.C.H. Peeters., 1988. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. *Ecol. Model.* 42, 199-215. doi:10.1016/0304-3800(88)90057-9.
- Fasham. M.J.R., H.W. Ducklow, and S.M. McKelvie, 1990. A nitrogen-based

- model of plankton dynamics in the ocean mixed layer. *J. Mar. Res.* 48, 591–639.
- Fasham, M.J.R., 1993. Modelling marine biota. In: Heimann, M. (Ed.), *The Global Carbon Cycle*. Springer Heidelberg. pp. 457–504.
- Fennel, K.J., Wilkin, J., Levin, J., Moisan, J., O'Reilly, and D. Haidvogel, 2006. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Glb. Biogeochem. Cycles*. 20, GB3007. doi:10.1029/2005GB 002456.
- Fukudome, K., Yoon, J.H., Ostrovskii, A., Takikawa, T., Han, I.S., 2010. Seasonal Volume Transport Variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 Years of ADCP Observations. *Journal of Oceanography*. 66(4), 539–551.
- Guillard, R.L.L., Ryther, J.H., 1962. Studies on marine planktonic diatoms *Cyclotella lllanana* Hustedt and *Detonula Confervacea* (Cleve). *Can. J. Microbiol.* 8, 229–239.
- Guillard, R.L.L., 1973. Division rates. In: Stein JR (ed) *Handbook of phycolgical methods*. Cambridge University Press. Cambridge. 289–312.
- Grice, GD., and Reeve, MR.(eds), 1982. *Marine Mesocosms: Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystem*. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Gordon, H. R., Morel, A. Y., 1983. *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: a Review*. Springer–Verlag New York. 114 pp.
- Hashioka, T., and Yamanaka, Y., 2007. Seasonal and regional variations of phytoplankton groups by top–down and bottom–up controls obtained by a 3D ecosystem model. *Ecological Modeling*. 202, 68–80.
- Irwin, A.J., Oliver, M.J., 2009. Are ocean deserts getting larger?. *Geophysical Research Letters*. 36.
- Jhun, J.G., Lee, E.J., 2004. A New East Asian Winter Monsoon Index and Associated Characteristics of the Winter Monsoon. *Journal of Climate*. 17:4, 711–726.
- Jung, J., Jo, E., Cha, J., Kim, M., Kim, K., 2001. Community Structures of Phytoplankton According to Environmental Factors in the Coastal Waters of Ullungdo and Tokdo Islands. *Algae*. 16(3), 325–335.
- Kameda, T., Ishizaka, J., 2005. Size–fractionated primary production estimated by a two–phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *Journal of Oceanography*. 61(4), 663–672.
- Kang, S., Kim, S., Bae, S.W., 2000. Changes in ecosystem components induced

- by climate variability off the eastern coast of the Korean Peninsula during 1960–1990. *Progress in Oceanography*. 47, 205–222.
- Kang, Y., Choi, C., Lim, J., Jeon, I., Seo, J., 2005. Dynamics of the Phytoplankton Community in the Coastal Waters of Chuksan Harbor, East Sea. *Algae*. 20(4), 345–352.
- Kang, Y., Choi, J., Eum, M., 2003. Ecological Characteristics of Phytoplankton Communities in the Coastal Waters of Gori, Wolsong, Uljin and Younggwang III. Distribution of Dominant Species and Environmental Variables. *Algae*. 18(1), 29–47.
- Kaushik, NK., Solomon, KR., Stephenson, GL., and Day, KE., 1986. Use of Limnocorrals in Evaluating the Effects of Pesticides on Zooplankton Communities. In: Cairns JJr(ed) *Community Toxicity Testing*. (ASTM STP 920) American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 269–290.
- Kim, M., Shin, J., 2007. Variations of Water Environments and Species Compositions of Microalgae during Summer in the Coast of Dokdo, Korea. *Algae*. 22(3), 193–199.
- Kleppe, J.A., Girdner, S.F., 2008. Proposed Normalization of Secchi Disk Data for Ultra Clear Lakes. EMBE Department/MS 260. University of Nevada, Reno.
- Lee, C.I., Lee, J–Y., Choi, K.–H., and Park, S.–E., 2008. Long–term Trends in Pelagic Environments of the East Sea Ecosystem. *Ocean Science Journal*, 43:1–7.
- Le Quërë, S.P. Harrison, I.C. Prentice, E.T. Buitenhuis, O. Aumont, L. Bopp, H. Claustre, L. Cortrim da Cunha, R. Geider, X. Giraud, C. Klaas, K.E. Kohfeld, L. Legendre, M. Manizza, T. Platt, R.B. Rivkin, S. Sathyendranath, J. Uitz, A.J. Watson and D. Wolf–Gladrow, 2005. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. *Global Change Biology*. 11, 2016–2040.
- Levy, D., Lockett, G., Oldfather, |., Rees, J., Saegbarth, E., Schneider, R. & Harte, J., 1985. Realism and replicability of lentic freshwater microcosms. In: Boyle TP(ed) *Validation and predictability of laboratory methods for assessing the fate and effects of contaminants in aquatic ecosystems*. (ASTM STP 865) American Society for Testing Materials, Philadelphia. 43–56
- Lim, SH., Jang, CJ., Oh, IS., Park, JJ., 2012. Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea. *J. Marine Sys.* 96–97, 1–14.
- Litchman, E., Klausmeier, C. A., Miller, J. R., Schofield, O. M. and Falkowski, P. G., 2006. Multi–nutrient, multi–group model of present and future oceanic

- phytoplankton communities. *Biogeosciences*. 3, 585–606.
- Lund, JWG., 1978. Experiments with lake phytoplankton in large enclosures. *Ann Rep Freshwater Biol Assoc*. 46, 32–39.
- Martinez, E., Antoine, D., D'Ortenzio, F., Gentili, B., 2009. Climate-Driven Basin-Scale Decadal Oscillations of Oceanic Phytoplankton. *Science*. 326 (5957), 1253–1256.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C., 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78(6), 1069–1079.
- Morel A., 1988. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content(Case 1 waters). *Journal of Geophysical Research*. 93, 10749–10768.
- Nagata, H., 1994. The relationship between chlorophyll a and transparency in the southern Japan Sea. *Bull. Japan Sea Natl. Fish. Res. Inst*. 44, 39–47.
- Nakata, K., Doi, T., Taguchi, K., and Aoki, S., 2004. Characterization of ocean productivity using a new physical-biological coupled ocean model. *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*. 1–44.
- Park, C., Park, JH., Son, M., Choi, S., Sung G., Ko, W., 1994. East Sea Regional FRI Oceanography and Marine Fisheries Resources News. *East Sea Fish. Res. Inst*. 2, 6–17.
- Parsons, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M., 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 135–142.
- Popova, E.E., Coward, A.C., Nurser, G.A., de Cuevas, B., Fasham, M.J.R., and Anderson, T. R., 2006. Mechanisms controlling primary and new production in a global ecosystem model-Part I: Validation of the biological simulation. *Ocean Science*. 2, 249–266.
- Powell, TM., Lewis, CVW., Curchitser EN., Haidvogel, DB., Hermann, AJ. and Dobbins, EL., 2006. Results from a three-dimensional, nested biological-physical model of the California Current System and comparisons with statistics from satellite imagery. *J. Geophys. Res*. 111, C07018. doi:10.1029/2004JC002506.
- Rosati, A. and Miyakoda, K., 1988. A general circulation model for upper ocean simulation. *J. Phys. Oceanogr*. 18, 1601–1626.
- Ryu, E., Yit, S., Lee, S., 2005. Late Pleistocene-Holocene paleoenvironmental changes inferred from the diatom record of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Micropaleontol*. 55, 157–182.
- Rodionov, S.N., 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*. 31:L09204, doi: 10.1029/2004GL019448.

- Sarmiento, J.L., Slater, R., Barber, R., Bopp, L., Doney, S.C., Hirst, A.C., Kleypas, J. et al., 2004. Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles*. doi:10.1029/2003GB002134.
- Tian, Y., Kidokoro, H., Watanabe, T., Iguchi, N., 2008. The late 1980s regime shift in the ecosystem of Tsushima warm current in the Japan/East Sea: Evidence from historical data and possible mechanisms. *Progress in Oceanography*. 77(2-3), 127–145.
- Thompson, D.W.J., Wallace, J.M., 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*. 13(5), 1000–1016.
- Yamada, K., Ishizaka, J., Yoo, S., Kim, H., and Chiba, S., 2004. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES). *Prog. Oceanogr.* 61, 193–211.
- Verschuur, G.L., 1997. Transparency measurements in Garner lake, Tennessee; the relationship between Secchi depth and solar altitude and a suggestion for normalization of Secchi depth data. *Journal of Lake and Reservoir Management*. 13(2), 142–153.
- Yoo S., Kim, H.C., Lee, J.A., Park, M.O., 2002. Validation of chlorophyll algorithm in Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Remote sensing of Environment*. 18(1), 35–42.
- Yoo, S. and Park, J.S., 2009. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan. *J. Marine Sys.* 78, 301–315.
- Yoon, D.Y. and Choi, H.W., 2012. Development of Algorithms for Extracting Thermocline Parameters in the South Sea of Korea. *Ocean and Polar Research*. 34(2), 265–273.
- Yoon, J.-E., Park, J., Yoo, S., 2012. Comparison of primary productivity algorithms for Korean waters. *Ocean Science Journal*. 47(4), 473–487.
- Werdell, P.J., 2009, Ocean Color Chlorophyll (Oc) v6. Available online at: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/Reprocessing/R2009/ocv6/> (accessed 27 Oct 2009).
- Zhang, C.I., Lee, J.B., Kim, S., Oh, J.H., 2000. Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystem and fisheries resources in Korean waters. *Progress in Oceanography*. 47, 171–190.
- Zhang, C.I., Lee, J.B., Seo, Y.I., Yoon, S.C., Kim, S., 2004. Variations in the abundance of fisheries resources and ecosystem structure in the Japan/East Sea. *Progress in Oceanography*. 61, 245–265.
- Zhang, Y., Wallace, J.M., Battisti, D.S., 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *Journal of Climate*. 10(5), 1004–1020.

제 8 장 부록

발간 논문목록 및 자료

○ 논문 실적

계재월	논문명	저 자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2011/03	The Spatial Distribution of Surface fCO ₂ in the Southwestern East Sea/Japan Sea during Summer 2005	최상화	최상화	김동선 김정희 민홍식	Ocean Science Journal	46	국내	SCIE
2011/06	Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production	장찬주	유신재	박지수 박태욱	ICES Journal of Marine Science	68	국외	SCI
2011/07	Interannual-to-interdecadal Variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967–2008: Characteristics and Seasonal Forcings	Sunghyea Park	Sunghyea Park	Peter Chu 이재학	JOURNAL OF MARINE SYSTEMS	87	국외	SCI
2011/12	Observation of semi-diurnal internal tides and near-inertial waves at the shelf break of the East China Sea	박재훈	박재훈	이흥재 Binghuo Guo	Ocean and Polar Research	33	국내	
2012/02	Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea	임세한	장찬주	오임상 박종진	JOURNAL OF MARINE SYSTEMS	97	국외	SCI
2012/04	Seasonal Variation of Freshwater Budget in the Yellow and East China Seas Simulated from an Ocean General Circulation Model	박태욱	박태욱	장찬주	Ocean Science Journal	47	국내	SCIE
2013/03	Comparison of Primary Productivity Algorithms for Korean Waters	윤주은	유신재	박지수	Ocean Science Journal	47	국내	SCIE
2013/06	위성 해색자료에서 추정된 동중국해 클로로필 선형경향의 계절별 차이	손영백	장찬주	장찬주 김상현	Ocean and Polar Research	35	국내	

○ 학술회의 발표 성과

발표일	논문명	주발표자	학술회의명	국내외 구분
2011/06/02	Effects of the Changjiang freshwater on sea surface warming in the Yellow and East China Seas	박태욱	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2011/06/02	Seasonal variation of freshwater budget in the Yellow and East China Seas simulated from an ocean general circulation model	박태욱	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2011/09/01	Evaluation of mixed layer depth in the North Pacific Ocean simulated from CMIP3 models	장찬주	China-Korea Joint Workshop on Northwestern Pacific-Indian Ocean Circulation and their Climate Effect	국제
2011/10/24	적도태평양에서 엘니뇨와 관련한 클로로필 변동 및 이 변동이 기후 후에 미치는 영향	박종연	PICES 2011 annual meeting	국제
2011/10/24	Mixed layer depth variability and its associated changes in chlorophyll concentration in the North Pacific Ocean	장찬주	PICES 2011 annual meeting	국제
2011/10/24	Projected changes in the North Pacific Ocean mixed layer depth and their impacts on primary production	장찬주	PICES 2011 annual meeting	국제
2011/10/26	기후모형(CMP3)에서 전망한 북태평양 변화	장찬주	기후공동워크숍	국내
2011/10/26	Mixed layer depth variability and its associated chlorophyll-a concentration changes in the East Sea	소지현	Development and Application of Regional Climate Models	국제
2011/10/26	Evaluation of regional ocean simulation from CMIP3 models: a case for the North Pacific Ocean mixed layer depth	장찬주	Development and Application of Regional Climate Models	국제
2011/10/26	Interannual surface salinity variability in the Yellow and East China Seas in response to ENSO	박태욱	Development and Application of Regional Climate Models	국제
2011/10/26	Sea surface salinity variability in the Yellow and East China Seas and its relation to ENSO	박태욱	PICES 2011 annual meeting	국제
2011/10/26	Changjiang freshwater effects on summer sea surface warming in	박태욱	PICES 2011 annual meeting	국제

	the Yellow and East China Seas			
2011/10/26	Responses of the Yellow and East China Seas to Freshwater Flux in a Global Ocean General Circulation Model	박태욱	기후공동워크숍	국내
2011/11/07	Variability of chlorophyll-a concentration with mixed layer in the East Sea	소지현	한국해양학회	국내
2011/11/10	Contribution of the Changjiang river discharge to sea surface warming in the Yellow and East China Seas in summer	장찬주	IUGG	국제
2011/11/28	Changes in the mixed layer depth due to global warming and their impacts on primary production	장찬주	East China Normal University, SKLEC, the China GLOBEC IMBER Programme	국제
2012/06/08	동해 혼합층 깊이 변동에 따른 클로로필 농도변화	소지현	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012/06/08	Effect of ENSO on summer salinity variability in the Yellow and East China Seas	박태욱	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012/06/08	Simulated seasonal variation of freshwater budget in the Yellow and East China Seas	박태욱	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012/10/16	Enhanced stratification in the southwestern East Sea (Japan Sea)	오유리	PICES 2012 annual meeting	국제
2012/11/01	한국근해의 일차생산 추정을 위한 알고리즘 비교	윤주은	한국해양학회	국내
2012/11/01	3차원 해양순환-생태계 접합모형을 이용한 동해 생태계 모사	오유리	한국해양학회	국내
2012/11/08	아고 뜰개 자료와 1차원 혼합층 모형을 이용한 동해 혼합층 분석	김보연	한국해양학회	국내
2012/11/09	ENSO effect on surface salinity variability in the Yellow and East China Seas in summer	박태욱	PICES 2012 annual meeting	국제
2012/11/27	How can Changjiang freshwater contribute to maintain warm sea surface in the Yellow and East China Seas?	박태욱	Ocean Sciences Meeting	국제
2012/11/29	Projected mixed layer depth change in the North Pacific Ocean and its impacts on primary production	장찬주	Ocean Sciences Meeting	국제
2012/11/30	Comparison of primary production	윤주은	KJWOC	국제

	algorithms for Korean waters			
2013/01/28	Year-to-year variability of chlorophyll-a in relation with mixed layer depth changes in the East Sea (Japan Sea)	장찬주	IMBiZO III	국제
2013/01/28	Application of the nested biological-physical model to the East Sea	오유리	IMBiZO III	국제
2013/05/23	동중국해에서 클로로필의 계절적 양극화 현상 및 원인 연구	손영백	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013/05/29	한국 주변해역의 엽록소 형광과 14C 방법을 이용한 일차생산 비교	고은호	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013/05/29	Estimation of primary production and its tempo-spatial variability for East Sea (Japan Sea), 1998-2007	윤주은	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013/06/14	Validation of a Western North Pacific Ocean Model for Development of a Regional Climate Coupled Model	고철민	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013/06/14	아고 뜰개 수온자료에 근거한 동해 혼합층 계절변화	김보연	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013/06/14	An Effect of Nutrient Transport through Korea Strait on the East Sea Ecosystem: A Biological-Physical Couple Modeling	오유리	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2013/07/24	Co-existence of phytoplankton species under non-equilibrium conditions	유신재	Plymouth	국제
2013/07/24	Climate changes and regional climate modeling for the seas around Korea	장찬주	EU-Korea	국제
2013/07/25	Decadal changes in the marine ecosystems adjacent to Korean Peninsula	유신재	EU-Korea	국제
2013/10/04	Comparison of the two methods for primary production measurement	고은호	IMBER	국제
2013/10/15	Primary productivity and its interannual variability in the East Sea, 1998-2007	윤주은	PICES 2013 annual meeting	국제
2013/10/15	Effects of nutrient transport	오유리	PICES 2013 annual meeting	국제

	through the Korea Strait on the seasonal and interannual variability in the East Sea (Japan Sea) ecosystem			
2013/10/17	Mixed layer depth in the North Pacific Ocean simulated from climate models: Common biases	장찬주	PICES 2013 annual meeting	국제
2013/10/25	A Regional Climate Coupled Model for the Western North Pacific: Assessment of a Present Climate Simulation	고철민	PICES 2013 annual meeting	국제



The Spatial Distribution of Surface $f\text{CO}_2$ in the Southwestern East Sea/ Japan Sea during Summer 2005

Sang-Hwa Choi^{1*}, Dongseon Kim², JeongHee Shim³, and Hong Sik Min²

¹Ocean Data Management Team, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Climate Change and Coastal Disaster Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

³Marine Environment Research Division, NFRDI, 408-1 Sirang-ri, Gijang-eup, Gijang-gun, Busan 619-705, Korea

Received 24 March 2010; Revised 7 December 2010; Accepted 21 March 2011

© KSO, KORDI and Springer 2011

Abstract – Fugacity of CO_2 ($f\text{CO}_2$), temperature, salinity, nutrients, and chlorophyll-*a* were measured in the surface waters of southwestern East Sea/Japan Sea in July 2005. Surface waters were divided into three waters based on hydrographic characteristics: the water with moderate sea surface temperature (SST) and high sea surface salinity (SSS) located east of the front (East water); the water with high SST and moderate SSS located west of the front (West water); and the water with low SST and SSS located in the middle part of the study area (Middle water). High $f\text{CO}_2$ larger than $420 \mu\text{atm}$ were found in the West water. In the Middle water, CO_2 was undersaturated with respect to the atmosphere, with values between 246 and $380 \mu\text{atm}$. Moderate $f\text{CO}_2$ values ranging from 370 to $420 \mu\text{atm}$ were observed in the East water. For the East and West waters, estimates of temperature dependency of $f\text{CO}_2$ (12.6 and $15.1 \mu\text{atm } ^\circ\text{C}^{-1}$, respectively) were rather similar to a theoretical value, indicating that SST is likely to be a major factor controlling the surface $f\text{CO}_2$ distribution in these two regions. In the Middle water, however, the estimated temperature dependence was somewhat lower than the theoretical value, and relatively high concentrations of surface chlorophyll-*a* coincided with the low surface $f\text{CO}_2$, implying that biological uptake may considerably affect the $f\text{CO}_2$ distribution. The net sea-to-air CO_2 flux of the study area was estimated to be $0.30 \pm 4.81 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in summer, 2005.

Key words – surface $f\text{CO}_2$, sea-air CO_2 flux, the East Sea/Japan Sea, Ulleung Basin, CO_2 source

1. Introduction

Marginal seas play important roles in the global carbon cycle, not only as annual sinks with high biological activities

but also by connecting major terrestrial, oceanic, and atmospheric carbon reservoirs (Omar et al. 2007). Although the marginal seas are generally regarded as CO_2 sinks, air-sea CO_2 flux estimates for marginal seas still contain much uncertainty due to insufficient spatial and temporal observation data; reported estimates of air-sea CO_2 flux range from 0.1 to $0.45 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (Liu et al. 2000; Thomas et al. 2004; Borges et al. 2005; Chen and Borges 2009). Researchers are increasingly recognizing the importance of marginal seas to the global carbon cycle, particularly in regard to the “continental shelf pump” carbon sequestration process by which carbon absorbed by biological activity in a shallow water body sinks to the subsurface water and is transported to the deep ocean for long-term sequestration (Tsunogai et al. 1999; Yool and Fasham 2000; Thomas et al. 2004; Bozec et al. 2005; Omar et al. 2007). Thus better understanding of carbon processes in marginal seas should help improve our estimations of the global carbon budget.

The East Sea/Japan Sea (hereafter, East Sea) is a semi-closed marginal sea surrounded by Korea, Japan, and Russia. The sea has an average depth of $1,740 \text{ m}$ and connects to the western North Pacific through four shallow straits with depths less than 140 m . Because of these strait depths, subsurface waters cannot be directly exchanged between the East Sea and North Pacific. Deep cold water forms below the thermocline (located at 100 – 200 m) in the East Sea and has relatively uniform hydrographic properties. The thermohaline circulation and biogeochemical cycle of the East Sea are independent of those in the open ocean, and

*Corresponding author. E-mail: choish@kordi.re.kr

Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production: a case for the North Pacific Ocean

Chan Joo Jang, Jisoo Park, Taewook Park, and Sinjae Yoo*

Korea Ocean Research and Development Institute, 1270 Sa-dong, Ansan, Gyeonggi-do, 426-170 Republic of Korea

*Corresponding Author: tel: +82 31 4006221; fax: +82 31 4085934; e-mail: sjyoo@kordi.re.kr

Jang, C. J., Park, J., Park, T., and Yoo, S. 2011. Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production: a case for the North Pacific Ocean. – ICES Journal of Marine Science, 68: 996–1007.

Received 1 July 2010; accepted 20 March 2011; advance access publication 17 May 2011.

This study investigates changes in the mixed layer depth (MLD) in the North Pacific Ocean in response to global warming and their impact on primary production by comparing outputs from 11 models of the coupled model intercomparison projects phase 3. The MLD in the 21st century decreases in most regions of the North Pacific, whereas the spatial pattern of the MLD is nearly unchanged. The overall shoaling results in part from intensified upper-ocean stratification caused by both surface warming and freshening. A significant MLD decrease (>30 m) is found in the Kuroshio extension (KE), which is predominantly driven by reduced surface cooling caused by weakening of wind. Associated with the mixed layer shoaling in the KE, the primary production component resulting from seasonal vertical mixing will be reduced by 10.7–40.3% (ranges of medians from 11 models) via decreased nitrate fluxes from below it. Spring blooms in most models are projected to initiate earlier in the KE by 0–13 d (ranges of medians from 11 models). Despite the overall trends, the magnitude of changes in primary production and timing of spring blooms are quite different depending on models and latitudes.

Keywords: coupled models, global warming, mixed layer depth, North Pacific Ocean, primary production.

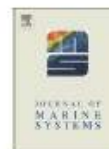
Introduction

This study investigates changes in the mixed layer depth (MLD) in the North Pacific Ocean in response to global warming and their impact on primary production by comparing outputs from 11 models of the coupled model intercomparison project phase 3 (CMIP3). The ocean mixed layer defines a vertically quasi-homogeneous surface region of temperature, salinity, or density, which directly interacts with the overlying atmosphere. Atmosphere–ocean interaction, therefore, can be modulated by the ocean mixed layer, whose depth is determined by wind-driven mechanical stirring, surface buoyancy forcing, such as heat flux or freshwater flux, or ocean circulation changes. Changes in the MLD, for example, influence the variability of the sea surface temperature and oceanic uptake of atmospheric CO_2 (Kraus and Businger, 1995). In addition to air–sea interaction, MLD also affects phytoplankton dynamics through controlling the availability of nutrients and light and hence biological productivity in the ocean (Sverdrup, 1953; Yentsch, 1990).

Significant changes in circulation in the ocean or the atmosphere have been projected by coupled climate models under global warming (Lu *et al.*, 2007; Vecchi and Soden, 2007; Xie *et al.*, 2010). Therefore, MLD would change in response to the circulation changes under global warming. For example, the deep mixed layers in the Southern Ocean are projected to shoal and shift south in response to intensified surface warming and a poleward shift in the windfield (Sen Gupta *et al.*, 2009). The

winter MLD is also projected to decrease (Merryfield and Kwon, 2007; Luo *et al.*, 2009) in most of the North Pacific Ocean, resulting in a reduction in formation of mode waters in response to global warming (Luo *et al.*, 2009). However, previous studies either focused on general circulation changes (Sen Gupta *et al.*, 2009) or ensemble means, rather than individual model simulations (Luo *et al.*, 2009). This study investigates both individual model projections and multimodel ensemble changes in the MLD in the North Pacific Ocean resulting from global warming, because multimodel means often hide biases from individual models through averaging procedures (Lefebvre and Goosse, 2008).

Biological consequences of MLD changes are also of interest, because MLD changes can affect primary production and the timing of spring phytoplankton blooms, by altering conditions of nutrients and light. The changes in primary production and timing of seasonal blooms will affect higher trophic levels further. However, it is not easy to predict the changes in primary production, which is controlled by many factors. Primary production consists of two components, regenerated production, and new production, fuelled by different sources of nutrient inputs (Eppley and Peterson, 1979). Because new production depends on the nutrient inputs from outside the surface layer, primary production largely depends on the change in new production. Sources of new production are diverse: seasonal vertical mixing, upwelling of deep waters, eddies, typhoons, nitrogen fixation, river run-offs, coastal current transportation, and aeolian



Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967–2008: Characteristics and seasonal forcings

Sunghyea Park ^{a,*}, Peter C. Chu ^a, Jae-Hak Lee ^b

^a Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA

^b Marine Environment and Climate Change Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 June 2010

Received in revised form 15 March 2011

Accepted 24 March 2011

Available online 5 April 2011

Keywords:

Yellow Sea Cold Water Mass

Interannual-to-interdecadal variability

Seasonal forcings

ABSTRACT

We identified characteristics of interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass and examined mechanisms to generate variability using the Korea Oceanographic Data Center dataset. Regional/background variables (sea level pressure (SLP), surface air temperature (SAT), and sea surface temperature (SST)) and five climate indices were used to explore the linkage to seasonally-differential forcings. The first EOF mode (53%) represents warming/cooling over the entire bottom cold water with the dominant periods of 2–7 and 10–20 years. Three cold and two warm events occur in 1967–2008. The variability preliminarily attributes to previous winter surface forcings; however, summer surface forcings intensify bottom cold water temperature anomaly (BWTa) induced in the previous winter and also trigger a new anomaly, especially in the cold event after 1996. Cold events relate to the winter forcing (strengthening of the Siberian High, the Aleutian Low, East Asian Jet Stream, Pacific Decadal Oscillation, and Arctic Oscillation) and the summer forcing (increased SLP in the Asian continent and the Aleutian Islands and increased SST in the Kuroshio and the Alaskan Current). In both seasons, SST and SAT anomalies on the tropical to subtropical western North Pacific are strongly correlated to BWTa; however, mechanisms are different.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The Yellow Sea (YS; also known as the Huanghai Sea) is a semi-enclosed marginal sea of the western North Pacific bordering the Korean Peninsula to the east and the Chinese mainland to the west, and the Bohai Bay to the north (Fig. 1). It is open to the East China Sea to the south, containing a well-developed shallow continental shelf. Many rivers drain into the YS, providing a huge quantity of sediments. In addition, high primary productivity of the sea water, a prevailing monsoon regime, abundant species in marine and coastal habitats, and approximately 600 million people around the YS demonstrate a wide diversity of the YS in perspectives of geography, biological environment, and socio-economics (Teng et al., 2005). These diverse characteristics have been drawing attentions from many academic and industrial sectors and drive us to focus on any changes in the YS related to a recent climate change.

The YS waters show marked seasonal variations owing to the shallow depth (average of 44 m) and the monsoon. However, the water in the central trough of the YS (Yellow Sea trough) displays less seasonality. In spring increased solar radiation heats the YS, but the water in the central trough, which is a remnant of cold, vertically well-mixed water in the previous winter, remains cold because of the depth.

As temperature gradient around the water becomes greater in spring through summer, the water is distinctively seen as a dome on the trough. The strong temperature gradient prevents the heat transfer from the surrounding so that the water can remain cold until breaking down in early winter (November). This cold water, because it is more noticeable in the temperature field, is called the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM) in many literatures, also known as the Yellow Sea Bottom Cold Water. (Chu et al., 1997a, 1997b, 2005; Hur et al., 1999; Lie, 1986; Su and Weng, 1994; Zhang et al., 2008). It occupies ~30% of the total volume of the YS (Su and Weng, 1994). Since YSCWM is the most conservative among water masses in the YS, it is likely to contain clearer long-term signals than any other water masses in the YS. The long-term signals are essential to understand climatological evolutions of the YS.

In addition to the suitability of YSCWM for exploring the long-term variations of the YS, the year-to-year variation of YSCWM influences catches and fishing grounds of demersal fishes (Cho, 1982). YSCWM serves as an overwintering site for many temperate species (Wang et al., 2003; Wang and Zuo, 2004). The intensity of summer southward/southeastward-migration of YSCWM including the cold water over the eastern Yangtze Bank affects the upstream path of the Tsushima Warm Current, and eventually induces changes in the regional hydrography in the southern YS and the northern East China Sea (Park and Chu, 2006b). For these reasons, the study on the long-term variations of YSCWM would be informative to interpret variations in the related fields.

Earlier studies explored the relation of YSCWM to winter sea surface temperature or heat flux using observations for 10 to 20 years

* Corresponding author at: Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, CA93943, USA. Tel.: +1 831 656 7819; fax: +1 831 656 3686.
E-mail address: spark@nps.edu (S. Park).

Article

Observation of Semi-diurnal Internal Tides and Near-inertial Waves
at the Shelf Break of the East China Sea

Jae-Hun Park^{1*}, Heung-Jae Lie¹, and Binghuo Guo²

¹*Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

²*Physical Oceanography Division, FIO
Qingdao 266-061, China*

Abstract : Semi-diurnal internal tides and near-inertial waves are investigated using moored current meter measurements at four sites along the shelf break of the East China Sea during August 1987 and May-June 1988. Each mooring is equipped with four current meters spanning from near surface to near bottom. Spectral analyses of all current data reveal dominant spectra at the semi-diurnal frequency band, where the upper and lower current measurements show out-of-phase relationship between them with significant coherences. These are consistent with typical characteristics of the first-mode semi-diurnal internal tide. Strong intensification of the near-bottom baroclinic currents is observed only at one site, where the ratio of the bottom slope to the slope of the internal-wave characteristics at the semi-diurnal frequency is close to unity. An energetic near-inertial wave event is observed during the first half of May-June 1988 observation at two mooring sites. Rotary spectra reveal that the most dominant signal is clockwise rotating motion at the near-inertial frequency band. Upward phase and downward energy propagations, shown in time-depth contour plots of near-inertial bandpass filtered currents, are confirmed by cross correlations between the upper- and lower-layer current measurements. The upward-propagating phase speed is estimated to be about 0.13 cm s^{-1} at both sites. Significant coherences and in-phase relationships of near-inertial currents at the same or similar depths between the two sites are observed in spite of their long distance of about 110 km.

Key words : semi-diurnal internal tide, near-inertial wave, East China Sea, current mooring

1. Introduction

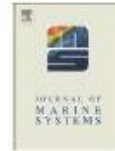
The East China Sea (ECS) is a marginal sea located between Korea, China, and Japan. It has a wide continental shelf in the northwestern side which connects to a deep trough in the southeastern side through a steep continental slope (Fig. 1). In the ECS, semi-diurnal tides are stronger than diurnal tides with predominance of the onshore tidal currents (Choi 1980; Larsen et al. 1985). Baines (1982) predicted that the ECS continental slope is one of the energetic internal tide generation regions in the global ocean. Using full three-dimensional numerical simulations, Niwa and Hibiya (2004) showed that ener-

getic barotropic-to-baroclinic conversion of M2 tidal energy distributes along the continental shelf break in the ECS.

Using data from an underwater sliding vehicle and a shipboard acoustic Doppler current profiler (ADCP), Kuroda and Mitsutera (1995) investigated the structures of internal tides near the ECS shelf break. Matsuno et al. (1997) studied the small scale internal waves near the ECS shelf break and turbulent fluctuations near the bottom from current data collected for a few days. However, internal wave studies using relatively long-term current moorings (>2 weeks) are rare in the ECS probably because of the frequent fishing activity which prevents moorings from being safely retrieved.

Near-inertial waves (NIWs) are a ubiquitous physical

*Corresponding author. E-mail : jhpark@kordi.re.kr



Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea

SeHan Lim ^{a,b}, Chan Joo Jang ^{c,*}, Im Sang Oh ^b, JongJin Park ^d

^a Department of Oceanography, Division of Science, Faculty, Republic of Korea Naval Academy, Changwon-si Jinhae-gu P.O. Box 88-1-4, 645-797, Republic of Korea

^b School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

^c Climate Change and Coastal Disaster Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Republic of Korea

^d Physical Oceanography Department, Woods Hole Oceanographic Institution, Clark 350A, MS021, Woods Hole, MA 02543, United States

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 April 2011

Received in revised form 13 January 2012

Accepted 17 January 2012

Available online 1 February 2012

Keywords:

Mixed layer depth

Climatology

East/Japan Sea

Seasonality

Basin-scale variability

ABSTRACT

A climatology for the mixed layer depth (MLD) in the East/Japan Sea was produced using temperature profile data collected from 1931 to 2005. MLD is defined as the depth at which the temperature differs from that at 10 m depth by 0.2 °C. It varies seasonally with a range of about 20 m, a minimum, near the subpolar front (SPF, 38°–41°N), 60–100 m in south of 38°N and north of 41°N, and about 200 m near the winter convection region (132°–135°E & 41°–43°N). The weaker seasonality near the SPF seems to result from year-round strong stratification sustained largely by advected warm water of the East Korean Warm Current and a result of complex dynamic process of frontogenesis including lateral dynamics or wind-induced friction. The temperature-based MLD does not show any significant difference (mostly less than 20 m) from the density-based values over most of the East/Japan Sea except a few localized regions near the Russian and Japanese coasts where barrier layers form from late fall through early spring. This study confirms that atmospheric forcing largely dominates the overall magnitude of MLD seasonal variability in most of the East/Japan Sea.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

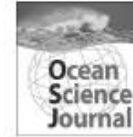
The oceanic mixed layer is defined as the vertically well-mixed near-surface layer that can be induced by both atmospheric forcing (surface cooling or wind stirring) and ocean processes (lateral advection, Langmuir circulation, wave–current interaction, internal wave, etc). The mixed layer directly affects air–sea exchange of heat and momentum, thereby contributing to sea surface temperature, which is one of the most important oceanic variables for Earth's climate. Major oceanic biological and chemical processes that play crucial roles in Earth's climate also occur in the mixed layer (Falkowski et al., 1998). Numerous researchers have investigated variability of the mixed layer depth (MLD) over the global ocean or regional oceans, including the North Pacific Ocean (e.g., de Boyer Montégut et al., 2004; Kara et al., 2003; Levitus, 1982; Monterey and Levitus, 1997 [hereafter, dBM04]; Carton et al., 2008; Holte and Talley, 2009; Lorbacher et al., 2006; Sato et al., 2006; Suga et al., 2004).

It has been suggested that MLD variability in the East/Japan Sea (hereafter, East Sea) can be affected by basin-scale circulation patterns (Fig. 1), boundary currents, mesoscale eddy activity, deep-water formation, and pronounced monsoons. In particular, geographic location and the high spatio-temporal variability of atmospheric forcing (Dorman et al., 2004, 2005) are most likely to

control the distribution and variability of the MLD in the East Sea. Jang et al. (1995), on the other hand, found that temporal change of the mixed layer in the Korea Strait in autumn is mainly controlled by advection rather than air–sea interactions such as wind stress or buoyancy flux. Kim and Isoda (1998) provided a description of the MLD in the East Sea using the World Ocean Atlas (WOA) 1994 (Monterey and Levitus, 1997) and long-term repeated hydrography along the PM line made since 1972 by the Maizuru Marine Observatory. They focused on interannual variability rather than details of seasonality over the entire East Sea. Also, some recent studies of the MLD in the East Sea focused on local watermass formation area in a specific year (Kawamura et al., 2007; Talley et al., 2003). However, basin-wide distribution of climatological MLD in the East Sea has never been fully investigated before, although it is a fundamentally important information for understanding spatio-temporal variability of bio-geochemical materials and for evaluating performance of numerical models.

Studies of bio-geochemical material such as chlorophyll concentration, fishery resources, and CO₂ exchange require robust understanding of MLD seasonality which may strongly affect these materials' temporal and spatial variabilities (e.g., Jang et al., 2011; Jo et al., 2007; Oh et al., 1999; Yamada et al., 2004; Zhang et al., 2000). For example, spring and fall blooms in temperate seas are related to seasonal changes in the MLD: in the East Sea, the spring bloom starts in February–March, when the critical depth (CRD) becomes equal to the MLD, and the fall bloom appears in November–December when the MLD becomes equal to the CRD (e.g., Kim et al., 2000, 2007). Furthermore,

* Corresponding author. Tel.: +82 31 400 6317.
E-mail address: cjjang@kordi.re.kr (C.J. Jang).



Seasonal Variation of Freshwater Budget in the Yellow and East China Seas Simulated from an Ocean General Circulation Model

Taewook Park* and Chan Joo Jang

Climate Change and Coastal Disaster Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Received 17 May 2011; Revised 19 December 2011; Accepted 19 March 2012
© KSO, KORDI and Springer 2012

Abstract – This study investigates a freshwater budget in the Yellow and East China Seas (YECS) using a global ocean general circulation model with a regional focus on the YECS. A freshwater budget analysis finds that major freshwater contributors over the YECS change seasonally. In summer, freshwater inflow from Changjiang and positive precipitation minus evaporation (P-E) dominates freshwater outflow across the boundaries around the YECS, resulting in net freshwater gain in the YECS. In winter, evaporation, intensified by strong winds, dominates freshwater inflow from Changjiang and precipitation, while net freshwater transport across the boundaries around the YECS is negligible, causing freshwater loss in total over the YECS. Although P-E has often been assumed to be negligible by supposing that the annual mean of precipitation is nearly equal to that of evaporation, this study suggests that P-E needs to be included in the seasonal freshwater budget in the YECS.

Key words – freshwater budget, seasonal variation, Yellow and East China Seas, global ocean general circulation model

1. Introduction

In the Yellow and East China Seas (YECS), freshwater gain or loss mainly results from river discharge, precipitation minus evaporation (P-E), and freshwater exchange through the straits (the Taiwan and the Korea Straits) and by the Kuroshio intrusion. One of the major rivers in terms of freshwater sources in the YECS is the Changjiang (also called the Yangtze River) that supplies about 90% of the total discharge of rivers around the YECS (Beardsley et al. 1985). Observational measurements (e.g. Siswanto et al. 2008) and numerical simulations (e.g. Chang and Isobe 2003; Moon et al. 2009) have investigated the effect of

Changjiang river discharge (CRD) on surface salinity distribution in the YECS. On the other hand, both P-E and freshwater inflow from strait-through flows and Kuroshio intrusion are likely to be additional important freshwater sources. In particular, the Kuroshio intrusion can be a contributor of freshwater because some studies (Isobe 2008; Lee and Matsuno 2007; Teague et al. 2003) suggest that the Kuroshio intrusion exchanges continental shelf water over the YECS with the Kuroshio Current. Nevertheless, the role of freshwater transport through the Kuroshio intrusion on freshwater budget in the YECS has been poorly understood mainly because it is hard to conduct direct observation of both volume transport and salinity for the Kuroshio intrusion.

An estimation of freshwater transport through the Korea Strait (Isobe et al. 2002) based on observation data suggests that the total river discharge in the YECS and freshwater transport through the Korea Strait are two dominant components in the freshwater budget, averaged annually in the YECS. They suggest that the freshwater transport through the sea surface is a minor contributor to annually-averaged freshwater budget of the YECS, assuming that the annual mean of evaporation is nearly equal to that of the precipitation in these areas (Chen et al. 1994). On the other hand, few studies have focused on the seasonal variations of freshwater components such as precipitation, evaporation, freshwater inflow from advection across the boundaries around the YECS as well as the CRD (Isobe et al. 2002). The primary reason is that it is hard to conduct annual observations of surface freshwater exchanges, volume transports and hydrography of the strait-through flows and Kuroshio intrusion that veers over the shelf break of the

*Corresponding author, E-mail: twpark@kordi.re.kr



Comparison of Primary Productivity Algorithms for Korean Waters

Joo-Eun Yoon^{1,2}, Jisoo Park³, and Sinjae Yoo^{1*}

¹Marine Ecosystem Research Division, KIOST, Ansan 426-744, Korea

²Department of Marine Biology, University of Science & Technology, Daejeon 305-350, Korea

³Korea Polar Research Institute, KIOST, Incheon 406-840, Korea

Received 2 July 2012; Revised 6 August 2012; Accepted 14 December 2012
© KSO, KIOST and Springer 2012

Abstract—This study compares five primary productivity algorithms for Korean waters. Five algorithms are in the form of vertical generalized production models: One algorithm is for gross primary production and four are for net primary production. The five algorithms were evaluated using 117 *in situ* primary production datasets observed by 20 cruises from 1994 to 2011 in Korean waters (East Sea, Yellow Sea, East China Sea, and Yeosu Bay). The results show that the regionally-tuned variants give better results than the original formulation. We recommend, among the tested algorithms, YSVGPM (Yellow Sea Vertically Generalized Productivity Model) for gross primary productivity algorithm and Kameda-Ishizaka algorithm for net primary productivity algorithm for estimating primary production in Korean waters.

Key words – primary production, remote sensing, algorithm, Korean waters

1. Introduction

Marine primary production accounts for almost half of the global primary production (Field et al. 1998; Behrenfeld et al. 2001). The accurate quantification of ocean primary production is therefore important for better understanding of global carbon cycling. Historically, marine primary production has been determined using light/dark incubations, ¹⁸O-labeling techniques, ¹⁴C methods, fast repetition rate fluorometry (FRRF) measurements (Steemann-Nielsen 1952; Grande et al. 1989; Luz and Barkan 2000; Barber and Hiltling 2002; Juranek and Quay 2005; Sarma et al. 2005; Pringault et al. 2007). Even though many *in situ* measurements were made in many parts of the world's oceans, they only

provide information at discrete locations and times biased both spatially and seasonally. Thus, spatial and temporal variation of primary production cannot be adequately characterized from *in situ* measurements.

Recently, satellite observations of optical data, which are necessary to estimate global ocean primary production, has made it possible to estimate regional and global production (Sathyendranath and Platt 1988; Platt and Lewis 1987; Bidigare et al. 1992; Behrenfeld and Falkowski 1997). However, primary production cannot be estimated by remote sensing data without the support of algorithms (Babin et al. 1995). It is also important to accurately model primary production to reflect *in situ* primary production. In the past decades, various algorithms including several empirical, semi-empirical and bio-optical models have been developed to estimate primary production from satellite data (Eppley et al. 1985; Balch et al. 1989a, b; Howard and Yoder 1997; Iverson et al. 2000). Among these algorithms, Vertically Generalized Production Model (VGPM) proposed by Behrenfeld and Falkowski (1997; hereafter BF) is the simplest and most commonly used algorithm. The VGPM is also a practical algorithm that has minimum input parameters and therefore is useful in making a provisional estimation of primary production when minimum local information is available. However, local algorithms are needed to make a better estimation of primary production because complex optical environment exists in coastal waters unlike the open ocean where VGPM was developed (Harding et al. 2002; Hyde et al. 2008).

This study was motivated by the launch of Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) in 2010. GOCI is the first

*Corresponding author. E-mail: sjyoo@kiost.ac

Article

위성 해색자료에서 추정된 동중국해 클로로필 선형경향의 계절별 차이

손영백¹ · 장찬주^{2*} · 김상현³

¹한국해양과학기술원 해양생태계연구부
²한국해양과학기술원 해양순환·기후연구부
 (426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787
³한성대학교 공과대학 기계시스템공학과
 (136-792) 서울시 성북구 삼선동 3가 389

Seasonal Difference in Linear Trends of Satellite-derived Chlorophyll-a in the East China Sea

Young Baek Son¹, Chan Joo Jang^{2*}, and Sang-Hyun Kim³

¹Marine Ecosystem Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology
²Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology
 Ansan 426-744, Korea
³Department of Mechanical Systems Engineering, College of Engineering, Hansung University
 Seoul 136-792, Korea

Abstract: The purpose of this study is to investigate seasonal difference in linear trends in satellite-derived chlorophyll-a concentration (Chl-a) and their related environmental changes in the South Sea of Korea (SSK) and East China Sea (ECS) for recent 15 years (Jan. 1998–Dec. 2012) by analyzing climatological data of Chl-a, Rrs(555), sea surface wind (SSW) and nutrient. A linear trend analysis of Chl-a data reveals that, during recent 15 years, the spring bloom was enhanced in most of the ECS, while summer and fall blooms were weakened. The increased spring (Mar. - May) Chl-a was associated with strengthened winter (Dec. - Feb.) wind that probably provided more nutrient into the upper ocean from the deep. The causes of decreased summer (Jun. - Aug.) Chl-a in the northern ECS were uncertain, but seemed to be related with the nutrient limitation. Recently (after 2006), low-salinity Changjiang diluted water in the south of Jeju and the SSK had lower phosphate that caused increase in N/P ratio with Chl-a decrease. The decreased fall (Sep. - Nov.) Chl-a was associated with weakened wind that tends to entrain less nutrient into the upper ocean from the deep. This study suggests that phytoplankton in the ECS differently changes in response to environmental changes depending on season and region.

Key words : seasonal difference, satellite-derived chlorophyll-a, East China Sea, linear trend

1. 서 론

동중국해는 북쪽 경계인 대한민국의 남해와 연결되고,

서쪽의 중국, 동쪽의 일본 남부 열도, 남쪽으로 대만의 북쪽 해안에 둘러싸인 바다이다(Fig. 1). 중국 대륙에서 유입되는 장강(또는 양자강)의 영향 및 연안 용승으로 인하여 상대적으로 높은 생산성을 나타내는 해역과 고온·고염의 쿠로시오 분류와 대만난류 해역의 빈영양 해양환경으로

*Corresponding author. E-mail : cjjang@kiost.ac

주 의

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