

한반도 해역 생태계 미래변화 예측 I

(한반도 해역 생태계 과거 변천도 및 미래변화 시범 전망도 개발)

The future projection of marine ecosystem
for the seas around Korea I

(Development of a pilot atlas for the past change and future projection of
marine ecosystem in the seas around Korea)

(최종보고서)

2018. 02

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “한반도 해역 생태계 미래변화 예측 I” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 02. 28

연구책임자:	소재귀	
참여연구원:	강현우	김성대
	장찬주	구본화
	권영신	김연경
	김한나	방민경
	서옥희	이승현
	정희석	

보고서 초록

과제고유번호	BSPE99494-11576-1	해당단계 연구기간	2017.01.01 - 2017.12.31	단계 구분	없음
연구사업명	중사업명	기관고유사업			
	세부사업명	주요사업(고유임무형사업)			
연구과제명	중과제명	(미래바다보기) 해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응			
	세부과제명	한반도 해역 생태계 미래변화 예측 I			
연구책임자	소재귀	해당단계 참여연구원수	총 : 12 명 내부: 4 명 외부: 8 명	해당단계 연구비	정부: 119,000천원 기업: 천원 계 : 119,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 26 명 내부: 4 명 외부: 22 명	총 연구비	정부: 486,000천원 기업: 천원 계 : 486,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 순환·기후연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	185
<p>■ 연구목표:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 한반도 주변해 해양환경 및 생태계의 과거변천도와 기후 및 환경변화 시나리오에 따른 미래변화 전망도를 시범적으로 개발하여 제시함. <p>■ 연구결과:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 한반도 주변해 해양순환-생태계 접합 모형을 개발하고 모형 검증 및 기술 개선함. - 과거의 외력 및 경계조건 변화를 분석하여 과거 30년 동안의 기후평균장을 재구성하고 주요 시기별 과거 변천도를 작성함. - 미래의 외력 및 경계조건 변화 시나리오, 특히 미래 장강 담수유출량 변화 시나리오를 통하여 50년 후의 미래 환경-생태계 변화를 모의하여 생태계핵심변수의 미래변화 전망도를 작성함. <p>■ 파급효과:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 한반도 주변해 생태계 변동성 이해 - 해양순환-생태계 모델 관련 기술, 과거진단, 미래전망 예측기술 확보 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	기후변화, 생태계변화, 순환생태계접합모형, 황해 및 동중국해, 동해, 미래전망			
	영 어	climate change, ecosystem change, physics-ecosystem coupled model, Yellow and East China Sea, East Sea, future projection			

요 약 문

I. 제 목:

한반도 해역 생태계 미래변화 예측 I

(부제: 한반도 해역 생태계 과거변천도 및 미래변화 시범 전망도 개발)

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구의 목적은 해양 순환-생태계 접합모형을 이용하여 한반도 해역 생태계의 과거변천, 미래변화를 예측하고 모형결과를 바탕으로 작성한 시공간적, 총합적 정보를 과학자, 정책입안자, 일반대중에게 제공하는 데 있으며, 이를 위하여 연차적으로

- 한반도 주변해 순환-생태계 접합모형 개발하고
- 주요시기별 해양 환경 및 생태계 (시범) 변천도 제시하며,
- 한반도 주변해 환경 및 생태계 (시범) 미래변화 전망도를 제시한다.

2. 연구개발의 필요성

한반도 주변해는 우리 삶의 터전이 되는 바다임에도 불구하고, 전 지구 평균 수온 상승률보다 높은 온난화, 급격한 개발로 인한 부영양화, 적조발생빈도 및 강도 증가, 해파리 등 외래종 출현빈도 상승, 남획에 의한 수산자원감소 등과 같은 수많은 인위적, 자연적 교란이 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 문제에 효과적으로 대응하기 위해서는 해양환경 및 생태계의 과거변화를 이해하고 및 미래 변화 예측할 필요가 있다.

본 연구의 목표는 한반도 주변해에 적용 가능한 해양순환-생태계 접합 모형을 개발하고, 생태계핵심변수(EVE: Essential Variables for Ecosystem)의 과거 변화상을 통해 해양환경 및 생태계의 변동성을 이해할 수 있는 과거변천도와 기후 및 환경변화 시나리오에 따른 미래 변화

를 가늠하고 대비할 수 있는 미래변화 전망도를 시범적으로 개발하여 제시하는 데 있다.

이를 위해 순환-생태계 접합모형을 개발하고 그 결과와 관측자료 비교 분석을 통한 모형 검증 및 기술 개선을 반복적으로 수행하며, 하천, 외해, 대기 등과 같은 외력 및 경계조건 변화를 분석하여 과거 30년 동안의 기후 평균장을 재구성할 뿐만 아니라 미래의 외력 및 경계조건 변화 시나리오 개발을 통해 50년 후의 미래 환경-생태계 변화를 모의하여, 생태계핵심 변수의 변화에 따른 생태계 변동성을 이해하고자 한다.

따라서 이 연구 사업을 통하여 한반도 주변해 순환-생태계 접합 모형, 과거 30년 동안의 생태계핵심변수 변천도 및 향후 50년 후의 미래변화 전망도가 구체적으로 제시될 성과물이다.

본 연구를 통해서 한반도 주변해 생태계 변동성을 이해하며, 해양순환-생태계 모델 관련 기술, 과거진단, 미래전망 예측 기술을 확보하여 우리 연구원이 한반도 주변해 생태계 예측/예보 기술 주도기관으로 자리매김할 수 있을 뿐만 아니라 각종 국제 해양과학프로그램에도 당당히 기여할 수 있을 것이다. 연구결과는 관련 과학자뿐만 아니라 정책입안자, 관리자, 일반 대중에게 제공되어 정책, 홍보 자료로 활용될 수 있음을 물론, 각종 해양기후 및 생태계 예측 연구의 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구 기간 :

2015. 01. 01 - 2017. 12. 31

2. 연구 개발의 내용 및 범위

- 한반도 주변해 해양순환-생태계 접합 모형 수립/개발
- 모형 결과와 관측자료 비교 분석을 통한 모형 검증 및 기술 개선
- 관측자료 및 재분석 모형자료 분석을 통한 하천/외해/대기 경계조건 산출
- 모형 결과 분석을 통한 한반도 주변해 과거 및 현재 생태계 변동성 이해

- 생태계핵심변수에 대한 과거 30년 기후평균 계절평균장 제시
- 주요 시기별(매 10년) 한반도 주변해 생태계 (시범)변천도 개발 및 제시
- 미래 환경변화 시나리오에 따른 경계조건 변화 분석 및 이해
 - 전 지구 기후모형 자료(CMIP5) 품위 평가 및 시나리오 산출
- 경계조건 변동 시나리오에 따른 한반도 주변해역 생태계 미래 변화 예측
 - 시나리오별 한반도 주변해 2050년대 생태계핵심변수 (시범)전망도 개발 및 제시

IV. 연구개발결과

- 한반도 주변해 순환-생태계 접합 모형 수립
- 주요시기별(과거 30년: 1981~2010년) 생태계 핵심변수 (시범) 변천도
- 장강 유출수 변화 시나리오에 따른 한반도 주변해 생태계 미래변화 시범 전망도

V. 연구개발결과의 활용계획

- 현장관측 자료와의 비교, 검증을 통한 지속적인 모형 개선
- 다양한 시나리오, 분석방법 개발을 통한 다음 단계 연구사업 개발
- 인위적, 자연적 변동요인에 대한 해양환경 및 생태계 영향 평가
- 한반도 주변해역 환경 및 생태계 변화에 대한 주기적 진단 및 미래 전망
- 기후변화 적응 및 대응 정책 입안시 과학적 근거 제공

S U M M A R Y

I . Title :

The future projection of marine ecosystem for the seas around Korea I
(subtitle: Development of a pilot atlas for the past change and future projection of marine ecosystem in the seas around Korea)

II. Objectives and necessities of the study

1. Objectives of the study

- Development of an ocean circulation–ecosystem coupled model
- Assessment and understanding the past changes of marine ecosystem in the seas around Korea.
- Information share with stakeholders, policy–makers and public by providing periodical future projection and knowledge–based guidance of marine ecosystem.

2. Necessities of the study

Observations and research results show dramatic changes of marine ecosystem in the seas around Korea. Various anthropogenic or natural disturbances such as warming with higher rate than the global average, eutrophication due to rapid and excessive coastal development, increasing frequency and strength of red tide, increasing invasive species such as jellyfish, decreasing fishery resources due to over–fishing continue to occur till quite recently.

In order to respond effectively to these changes, it is positively necessary of

understanding the past changes of marine environment and ecosystem and predicting the future changes. After a wide discussion, we have arrived at the conclusion that an ocean circulation–ecosystem coupled model is the best tool for synoptic, spatio–temporal understanding and future projection of the essential variables of marine ecosystem.

The goal of this study is to develop such a coupled model applicable to the seas around Korea, and finally to develop and present a pilot atlas for the past changes of marine environment and ecosystem, and a pilot atlas for the future change of them on the probable scenarios.

III. Contents and scopes of the study

1. Study period

Jan. 01. 2015 – Dec. 31. 2017 (3 years)

2. Contents and scopes of the study

- Developing an ocean circulation–ecosystem coupled model for the seas around Korea.
- Verifying and improving the model through comparison of the model results and observed data.
- Building the river, open sea and sea surface boundary conditions through analyzing the observed and reanalysis data.
- Understanding the past and present ecosystem variability in the seas around Korea through analyzing the model results.
- Producing the seasonal mean field of the EVE (Essential Variables for Ecosystem) for the past 30 years.

- Developing a pilot atlas of marine ecosystem change in the seas around Korea for the past major period (every 10 years).
- Analyzing and understanding changes of boundary conditions on the scenario of future environmental change.
- Evaluating the quality of global climate model data(CMIP5) and producing scenario for the future change.
- Predicting the future ecosystem change in the seas around Korea on the scenario of boundary condition change.
- Developing a pilot atlas for the future(2050s) changes of the essential variables of ecosystem in the seas around Korea.

IV. Results

- Development of an ocean circulation-ecosystem coupled model for the seas around Korea.
- Development of a pilot atlas of marine ecosystem change in the seas around Korea for the past major period (past 30 years: 1981~2010).
- Development of a pilot atlas for the future(2050s) changes of marine ecosystem in the seas around Korea on the scenario of future change of Changjiang River discharge.

V. Application plans of the results of the study

The results of this study can be used for:

- Continuous improvement and upgrade of the developed model through comparison and verification using the observed data.
- Preparing the next stage study based on the development of various future change scenario and model result analysis methods.
- Evaluating the marine environment and ecosystem change influenced by

anthropogenic or natural factors.

- Periodical diagnosis and future projection for the environmental and ecosystem change in the seas around Korea.
- Providing the scientific basis for policy-making on adaptation and response to the future climate change.

C O N T E N T S

Summary	v
Contents	ix
List of Figures	xvii
List of Tables	xxvii
Chapter 1. Outline of the study	1
Section 1. Necessity of the study	3
Section 2. Objective and content of the study	4
1. Objective of the study	4
2. Annual study goal and content	5
3. Strategic study plan and system	8
Chapter 2. Domestic and international research trends	13
Section 1. Domestic research trends	15
Section 2. International research trends	17
Section 3. The limits of current study	18
Chapter 3. Results of the study	21
Section 1. Setup and initial integration of the ocean circulation–ecosystem coupled model ..	23
1. Setup of the ocean circulation–ecosystem coupled model	23

2. Preparation of atmospheric forcing	27
3. Preparation of open boundary condition	47
4. Preparation of river boundary condition	50
5. Collecting and analyzing data for model verification	52
6. Verification and improvement of the model	53
Section 2. Reproduction and analysis of the past change of EVE	59
1. Evaluation of model performance	59
2. Monthly mean and seasonal variability of the past 30 years' EVE foreach regional sea	62
3. Interannual variability of EVE during the past 30 years	81
4. Pilot atlas of EVE change during the past (1981~2010)	88
Section 3. Future projection of EVE based on the future change scenario of Changjiang River discharge	94
1. Analysis and evaluation of CMIP5 data	95
2. Estimation of future change of Changjiang River discharge from CMIP5 data	98
3. Ecosystem change for 2050s on the future change scenario of Changjiang River discharge	104
4. Pilot atlas for the future projection of EVE on the future change scenario of Changjiang River discharge	121
Chapter 4. Achievements of objectives and outcomes	143
Section 1. Achievements of objectives	145
1. Achievements against study goals	145
2. Quantitative achievements	146
Section 2. Outcomes of the study	146

1. Comprehensive evaluation of the study	146
2. Spreading of outcomes	148
Chapter 5. Application plan of the study results	151
Section 1. Application plan	153
Section 2. Ripple effects	153
Chapter 6. References	155

- 목 차 -

한글요약	i
영문요약	v
영문목차	ix
한글목차	xiii
그림목차	xvii
표목차	xxvii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	3
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용	4
1. 연구개발의 목표	4
2. 연차별 연구 목표 및 내용	5
3. 연구 추진 계획 및 체계	8
제 2 장 국내외 연구 동향	13
제 1 절 국내 동향	15
제 2 절 국외 동향	17
제 3 절 현 기술의 한계 분석	18
제 3 장 연구 수행 내용 및 결과	21
제 1 절 해양순환-생태계 접합모형 수립 및 초기 적분	23
1. 해양순환-생태계 접합모형 수립	23

2. 과거 재현을 위한 대기강제력 산출 및 분석	27
3. 과거 재현을 위한 외해경계조건 분석 및 산출	47
4. 과거 재현을 위한 하천경계조건 분석 및 산출	50
5. 검증용 자료 수집 및 분석	52
6. 모형 검증을 통한 순환-생태계 접합모형 개선	53
제 2 절 생태계 핵심변수 과거 재현 및 변천 분석	59
1. 모형 재현성능 평가	59
2. 해역별 생태계 핵심변수 과거 30년 월평균장 및 계절변동성	62
3. 과거 30년 생태계 핵심변수 경년변동성	81
4. 생태계 핵심변수 시변 변천도(1981~2010)	88
제 3 절 장강유출량 미래변화 시나리오 기반 생태계 핵심변수 미래 전망	94
1. 전 지구 기후모형 자료(CMIP5) 분석 및 평가	95
2. 전 지구 기후모형 자료(CMIP5)로부터 장강 유출량 미래변화 추정	98
3. 장강유출량 증가 시나리오에 따른 2050년대 생태계 미래변화 산정	104
4. 장강유출량 증가 시나리오에 따른 생태계 핵심변수 미래변화 시범 전망도	121
제 4 장 연구목표 달성도 및 성과	143
제 1 절 연구목표 달성도	145
1. 연구내용 대비 달성도	145
2. 정량적 목표 달성도	146
제 2 절 연구 성과	146
1. 연구 성과 종합	146
2. 연구 성과 확산	148

제 5 장	연구개발결과의 활용계획 및 파급효과	151
제 1 절	연구개발 결과의 활용계획	153
제 2 절	연구개발 결과의 파급효과	153
제 6 장	참고문헌	155

– List of Figures –

Fig. 1-2-3-1 Research road map	8
Fig. 1-2-3-2 Research promotion system	11
Fig. 3-1-1-1 Schematic diagram of POLCOMS-ERSEM coupled marine system model ·	25
Fig. 3-1-1-2 Model domain and bathymetry for the marine ecosystem simulation for the East Asia	26
Fig. 3-1-2-1 Monthly mean surface air temperature(°C) field from the ERA-interim climatology(1981~2010)	28
Fig. 3-1-2-2 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim surface air temperature	29
Fig. 3-1-2-3 Monthly mean mean-sea-level pressure(hPa) field from the ERA-interim climatology(1981~2010)	30
Fig. 3-1-2-4 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim mean-sea-level pressure	31
Fig. 3-1-2-5 Monthly mean 10m wind vectors in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	33
Fig. 3-1-2-6a The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim 10m wind speed(zonal)	34
Fig. 3-1-2-6b The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim 10m wind speed(meridional)	35
Fig. 3-1-2-7 Monthly mean relative humidity(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	36
Fig. 3-1-2-8 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim relative humidity	37
Fig. 3-1-2-9 Monthly mean shortwave radiation(W/m ²) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	38

Fig. 3-1-2-10	The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim shortwave radiation	39
Fig. 3-1-2-11	Monthly mean thermal radiation(W/m^2) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	41
Fig. 3-1-2-12	The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim thermal radiation	42
Fig. 3-1-2-13	Monthly mean total cloud cover(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	43
Fig. 3-1-2-14	The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim total cloud cover	44
Fig. 3-1-2-15	Monthly mean total precipitation(mm/m^2) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	45
Fig. 3-1-2-16	The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim total precipitation	46
Fig. 3-1-3-1	Surface temperature(left) and salinity(right) climatology of NOC-NEMO 1/12 degree ocean circulation model	47
Fig. 3-1-3-2	Volume transport of major straits and annual mean surface current field of NOC-NEMO 1/12 degree ocean circulation model	48
Fig. 3-1-4-1	Monthly river discharge of top ten rivers in the model domain	51
Fig. 3-1-4-2	Comparison of annual mean nutrients from the top ten rivers in the model domain	52
Fig. 3-1-6-1	Chlorophyll_a concentration from the OCCCI-v2 satellite data(left) and that from the surface model result(right) (ex.: mean climatology in January)	54
Fig. 3-1-6-2	Comparison of monthly mean surface temperature(5m) from the model with WOA13 data in the Yellow Sea	55
Fig. 3-1-6-3	Comparison of monthly mean surface salinity(5m) from the model with WOA13 data in the Yellow Sea	55

Fig. 3-1-6-4 Comparison of monthly mean surface temperature(5m) from the model with WOA13 data in the East China Sea	56
Fig. 3-1-6-5 Comparison of monthly mean surface salinity(5m) from the model with WOA13 data in the East China Sea	56
Fig. 3-1-6-6 Comparison of monthly mean surface temperature(5m) from the model with WOA13 data in the East Sea	57
Fig. 3-1-6-7 Comparison of monthly mean surface salinity(5m) from the model with WOA13 data in the East Sea	57
Fig. 3-1-6-8 Model improvement through verification using the Station M (Korea Strait) data	58
Fig. 3-1-6-9 Changes in volume transport of the Korea Strait after modification of the model resolution	59
Fig. 3-2-1-1 Evaluation of model performance in the Yellow Sea: comparison with KHOA survey line data: temperature, salinity, nitrate, phosphate, silicate, dissolved oxygen	61
Fig. 3-2-1-2 Evaluation of model performance in the East China Sea: comparison with KHOA survey line data: temperature, salinity, nitrate, phosphate, silicate, dissolved oxygen	61
Fig. 3-2-1-3 Evaluation of model performance in the East Sea: comparison with KHOA survey line data: temperature, salinity, nitrate, phosphate, silicate, dissolved oxygen	62
Fig. 3-2-2-1 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface temperature(°C)	64
Fig. 3-2-2-2 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface salinity(PSU)	65
Fig. 3-2-2-3 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean mixed layer depth(m)	65
Fig. 3-2-2-4 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface phosphate(mmol P/m ³)	66

Fig. 3-2-2-5 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface nitrate(mmol N/m^3)	66
Fig. 3-2-2-6 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface silicate(mmol Si/m^3)	67
Fig. 3-2-2-7 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean euphotic depth(m)	67
Fig. 3-2-2-8 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface chlorophyll_a(mg Chl/m^3)	68
Fig. 3-2-2-9 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean depth of Chlorophyll_a maximum(m) ..	68
Fig. 3-2-2-10 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface temperature($^{\circ}\text{C}$)	70
Fig. 3-2-2-11 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface salinity(PSU)	71
Fig. 3-2-2-12 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean mixed layer depth(m)	71
Fig. 3-2-2-13 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface phosphate(mmol P/m^3) ...	72
Fig. 3-2-2-14 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface nitrate(mmol N/m^3)	72
Fig. 3-2-2-15 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface silicate(mmol Si/m^3)	73
Fig. 3-2-2-16 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean euphotic depth(m)	73
Fig. 3-2-2-17 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface chlorophyll_a(mg Chl/m^3) ·	74
Fig. 3-2-2-18 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East China Sea - monthly mean depth of Chlorophyll_a maximum(m)	74

Fig. 3-2-2-19 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface temperature($^{\circ}\text{C}$)	77
Fig. 3-2-2-20 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface salinity(PSU)	77
Fig. 3-2-2-21 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean mixed layer depth(m)	78
Fig. 3-2-2-22 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface phosphate(mmol P/m^3)	78
Fig. 3-2-2-23 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface nitrate(mmol N/m^3)	79
Fig. 3-2-2-24 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface silicate(mmol Si/m^3)	79
Fig. 3-2-2-25 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean euphotic depth(m)	80
Fig. 3-2-2-26 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface chlorophyll_a(mg Chl/m^3)	80
Fig. 3-2-2-27 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean depth of Chlorophyll_a maximum(m)	81
Fig. 3-2-3-1 Horizontal distribution of change trend of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the Yellow Sea	83
Fig. 3-2-3-2 Variabilities and trends of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the Yellow Sea	83
Fig. 3-2-3-3 Horizontal distribution of change trend of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East China Sea	85
Fig. 3-2-3-4 Variabilities and trends of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East China Sea	85
Fig. 3-2-3-5 Horizontal distribution of change trend of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East Sea	87

Fig. 3-2-3-6 Variabilities and trends of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East Sea	87
Fig. 3-2-4-1 Changes of volume transport of the East Sea currents in the major straits ·	89
Fig. 3-2-4-2 Periodical and regional change map of seasonal surface chlorophyll_a (deviation from the 30 year mean)	90
Fig. 3-2-4-3 Change maps of EVE for the past 30 years in the Yellow Sea (deviation from the 30 year climatological mean)	91
Fig. 3-2-4-4 Change maps of EVE for the past 30 years in the East China Sea (deviation from the 30 year climatological mean)	92
Fig. 3-2-4-5 Change maps of EVE for the past 30 years in the East Sea (deviation from the 30 year climatological mean)	93
Fig. 3-2-4-6 Periodical change map of EVE on the meridional section(124°E) of the Yellow and East China Sea (deviation from the 30 year climatological mean)	94
Fig. 3-3-1-1 Evaluation of simulation level of CMIP5 models for the mixed layer depth ·	97
Fig. 3-3-1-2 Evaluation of simulation level of CMIP5 models for the surface temperature ·	97
Fig. 3-3-2-1 Changjiang River area(left: existing study, Guo et al.(2015); right: google map)	98
Fig. 3-3-2-2 Precipitation in the Datong area by CMIP5 model and observation/reanalysis (mm/yr) (orange: present; green: future by rcp4.5 scenario; dark green: future by rcp8.5 scenario)	100
Fig. 3-3-2-3 Future change of precipitation (mm/yr) in the Datong area by CMIP5 model(%)	101
Fig. 3-3-2-4 Annual mean precipitation by CMIP5 model during 1981~2010	102
Fig. 3-3-2-5 Future change by CMIP5 model (future: 2041~2060 by rcp4.5, present: 1981~2000)	103
Fig. 3-3-2-6 Future change by CMIP5 model (future: 2041~2060 by rcp8.5, present: 1981~2000)	103

Fig. 3-3-3-1 Comparison of the Changjiang River discharge variation for the past 30 years(black) and the variation in case of 30% increased for only summer based on the future scenario(red); and the difference of two(below)	104
Fig. 3-3-3-2 Change in the monthly mean surface temperature of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	106
Fig. 3-3-3-3 Change in the monthly mean surface salinity of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	106
Fig. 3-3-3-4 Change in the monthly mean mixed layer depth of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	107
Fig. 3-3-3-5 Change in the monthly mean surface phosphate of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	107
Fig. 3-3-3-6 Change in the monthly mean surface nitrate of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	108
Fig. 3-3-3-7 Change in the monthly mean surface silicate of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	108
Fig. 3-3-3-8 Change in the monthly mean euphotic depth of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	109
Fig. 3-3-3-9 Change in the monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	109
Fig. 3-3-3-10 Change in the monthly mean depth of chlorophyll maximum of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea	110
Fig. 3-3-3-11 Change in the monthly mean surface temperature of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	111
Fig. 3-3-3-12 Change in the monthly mean surface salinity of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	112
Fig. 3-3-3-13 Change in the monthly mean mixed layer depth of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	112

Fig. 3-3-3-14 Change in the monthly mean surface phosphate of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	113
Fig. 3-3-3-15 Change in the monthly mean surface nitrate of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	113
Fig. 3-3-3-16 Change in the monthly mean surface silicate of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	114
Fig. 3-3-3-17 Change in the monthly mean euphotic depth of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	114
Fig. 3-3-3-18 Change in the monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	115
Fig. 3-3-3-19 Change in the monthly mean depth of chlorophyll maximum of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea	115
Fig. 3-3-3-20 Change in the monthly mean surface temperature of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	117
Fig. 3-3-3-21 Change in the monthly mean surface salinity of 2050s compared to the that of 2000s in the East Sea	117
Fig. 3-3-3-22 Change in the monthly mean mixed layer depth of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	118
Fig. 3-3-3-23 Change in the monthly mean surface phosphate of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	118
Fig. 3-3-3-24 Change in the monthly mean surface nitrate of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	119
Fig. 3-3-3-25 Change in the monthly mean surface silicate of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	119
Fig. 3-3-3-26 Change in the monthly mean euphotic depth of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	120
Fig. 3-3-3-27 Change in the monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	120

Fig. 3-3-3-28 Change in the monthly mean depth of chlorophyll maximum of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea	121
Fig. 3-3-4-1 Monthly mean surface temperature of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea	122
Fig. 3-3-4-2 Monthly mean surface salinity of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea	123
Fig. 3-3-4-3 Monthly mean mixed layer depth of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea	123
Fig. 3-3-4-4 Monthly mean surface phosphate of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea	124
Fig. 3-3-4-5 Monthly mean surface nitrate of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea ..	124
Fig. 3-3-4-6 Monthly mean surface silicate of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea ..	125
Fig. 3-3-4-7 Monthly mean euphotic depth of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea ..	125
Fig. 3-3-4-8 Monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea	126
Fig. 3-3-4-9 Monthly mean depth of chlorophyll_a maximum of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea	126
Fig. 3-3-4-10 Monthly mean surface temperature of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	127
Fig. 3-3-4-11 Monthly mean surface salinity of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	128
Fig. 3-3-4-12 Monthly mean mixed layer depth of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	128
Fig. 3-3-4-13 Monthly mean surface phosphate of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	129
Fig. 3-3-4-14 Monthly mean surface nitrate of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	129

Fig. 3-3-4-15 Monthly mean surface silicate of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	130
Fig. 3-3-4-16 Monthly mean euphotic depth of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	130
Fig. 3-3-4-17 Monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	131
Fig. 3-3-4-18 Monthly mean depth of chlorophyll_a maximum of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea	131
Fig. 3-3-4-19 Monthly mean surface temperature of 2050s(2051~2060년) in the East Sea	132
Fig. 3-3-4-20 Monthly mean surface salinity of 2050s(2051~2060년) in the East Sea ·	133
Fig. 3-3-4-21 Monthly mean mixed layer depth of 2050s(2051~2060년) in the East Sea	133
Fig. 3-3-4-22 Monthly mean surface phosphate of 2050s(2051~2060년) in the East Sea	134
Fig. 3-3-4-23 Monthly mean surface nitrate of 2050s(2051~2060년) in the East Sea ·	134
Fig. 3-3-4-24 Monthly mean surface silicate of 2050s(2051~2060년) in the East Sea ·	135
Fig. 3-3-4-25 Monthly mean euphotic depth of 2050s(2051~2060년) in the East Sea ·	135
Fig. 3-3-4-26 Monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s(2051~2060년) in the East Sea	136
Fig. 3-3-4-27 Monthly mean depth of chlorophyll_a maximum of 2050s(2051~2060년) in the East Sea	136
Fig. 3-3-4-28 Future change of EVE in 2050s compared to those in 2000s in the Yellow Sea (annual mean of 2050s - annual mean of 2000s)	138
Fig. 3-3-4-29 Future change of EVE in 2050s compared to those in 2000s in the East China Sea (annual mean of 2050s - annual mean of 2000s) ·	139
Fig. 3-3-4-30 Future change of EVE in 2050s compared to those in 2000s in the East Sea (annual mean of 2050s - annual mean of 2000s)	141

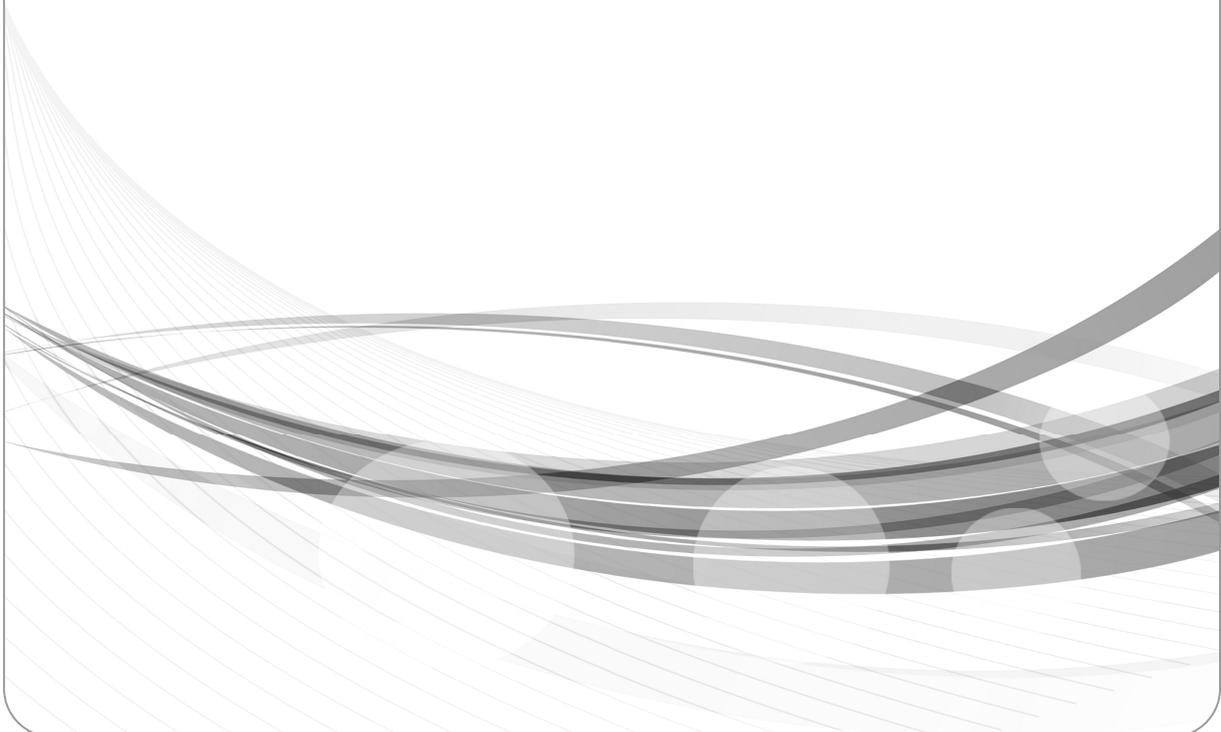
- List of Tables -

Table 1-2-2-1 Annual study goal (first year)	5
Table 1-2-2-2 Annual study goal (second year)	6
Table 1-2-2-3 Annual study goal (third year)	7
Table 3-1-2-1 Statistics of surface air temperature(°C) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	27
Table 3-1-2-2 Statistics of sea-level-pressure(hPa) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	30
Table 3-1-2-3a Statistics of zonal wind(m/s) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	32
Table 3-1-2-3b Statistics of meridional wind(m/s) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	33
Table 3-1-2-4 Statistics of relative humidity(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	36
Table 3-1-2-5 Statistics of shortwave radiation(W/m ²) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	39
Table 3-1-2-6 Statistics of thermal radiation(W/m ²) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	40
Table 3-1-2-7 Statistics of total cloud cover(%) in the seas around Korea from ERA-interim data (1981~2010)	43
Table 3-1-2-8 Statistics of total precipitation(mm/m ²) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010)	45
Table 3-1-4-1 Discharge data(m ³ /s) of top ten rivers for model river boundary condition ·	50
Table 3-3-1-1 A list of 23 CMIP5 models used for evaluating reproducibility of present climate	96

Table 3-3-2-1 A list of CMIP5 models used for analysis of future change
in Changjiang River discharge 99

제1장

서론



제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

□ 뚜렷한 한반도 주변 해역 생태계 변동성

- 최근 한반도 주변해역에서는 환경 및 생태계 변화의 증거가 뚜렷하게 나타나고 있다. 수온 증가율과 해수면 상승률이 전 지구 평균보다 높게 나타나고 있으며, 해파리 및 적조발생 빈도와 강도가 증가하고 있다. 또한 외래 어종 및 침입종 증가로 인한 생태계 교란이 심각해지고 있다.
- 위와 같은 변화는 지구 기후 시스템의 자연적인 변동성, 온실가스 배출에 의한 지구 온난화 영향, 인간 활동에 의한 하천 경계조건 또는 대기 경계조건 변화 등과 같은 복합적인 원인에 의한 결과로 추정되나, 아직까지 충분한 정량적인 분석이 미흡한 실정이다.

□ 총람적 정보의 필요성

- 해양생태계의 변동은 궁극적으로 사회, 경제적인 영향을 유발하게 될 것이므로 해양생태계 변화에 대해 국가적으로 대처하고 적응하기 위해서는 한반도 주변해 생태계의 현황과 미래 변화에 대한 총람적(synoptic) 정보가 필요하다.
- 해양생태계의 현황과 미래 변화에 대한 총람적(synoptic) 정보는 과학자 뿐 아니라 정책입안자, 관리자, 일반대중에도 유용하다.
- 해양생태계 변화 전망/예측은 검증, 불확실성 측정, 전 지구적 분석과의 비교 등 과학적 표준에 의해 제작되는 것이 바람직하다.
- 시공간적으로 제약을 받는 관측의 한계를 극복하고, 관측 자료를 더욱 풍부한 총람적 정보로 바꿀 수 있는 도구인 수치모형의 개발 및 활용이 필요하다.

□ 수치모형 개발/활용 필요성

- 해양 순환-생태계 접합모형은 생태계 변동성의 원인 규명 및 미래 변화 전망을 위한 최적 도구이며 이를 연구에 활용하기 위해서는 현황 파악, 진단 및 예측/전망을 병행하는 종합적인 연구와 다양한 기술 개발이 필요하다. 여기에 포함되는 주요 기술로는 관측 또는 재분석 자료 분석, 수치 모델 활용 기술,

해양 순환-생태계 모형 접합 기술, 과거 및 현재 생태계 진단 기술, 기후변화에 따른 장기 생태계 영향 예측/전망 기술 등을 들 수 있다.

□ 해양 순환-생태계 접합모형을 통한 미래 전망

- 기존의 산발적이고 국지적인 순환모형 및 생태계모형 개발에서 벗어나 통합적인 순환-생태 접합모형을 통한 미래 전망 연구가 필요하며, 이를 위해서는 선진 외국 기술을 도입하고 이를 바탕으로 독자적인 생태계모형 개발을 시도하며, 융합 연구 커뮤니티를 활성화 하는 등의 많은 노력이 필요하다.

제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발의 목표

본 연구의 목적은 해양 순환-생태계 접합모형을 이용하여 한반도 해역 생태계의 과거 변천, 미래 변화를 예측하고 모형실험 결과를 바탕으로 작성한 시공간적, 총람적 정보를 과학자, 정책입안자, 일반대중에게 제공하는 데 있으며, 이를 위하여 연차적으로

- 한반도 주변해 순환-생태계 접합모형을 개발하고
- 주요시기별 해양 환경 및 생태계 (시범) 과서 변천도를 작성하여 제시하며,
- 한반도 주변해 환경 및 생태계 (시범) 미래 변화 전망도를 작성하여 제시한다.

2. 연차별 연구 목표 및 내용

표 1-2-2-1 연차별 연구목표 (1차 년도).

구분 (년도)	세부 연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비 : 천원)
1차 년도 (2015)	한반도 주변해 순환-생태계 접합모형 수립 및 검증 (최근 30년 계절평균장 제시)	○ 순환-생태계 접합 모형 개발 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 모형 영역 및 초기조건 ▪ 모형 파라미터 선정 	○ 모형 범위 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 하위 표영 생태계 모형 ▪ 해수순환 모형 ▪ 조석 (>8개 분조) ○ 지역적 범위 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 황해 ▪ 동중국해 ▪ 동해 ○ 자료 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 재분석자료 ▪ 관측자료 ▪ 위성자료 ○ 자료 간격 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 월평균 ○ 자료 기간 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1981~2010년 	190
		○ 과거 대기 강제력 분석 및 산출 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 풍향, 풍속 ▪ 단파복사에너지, 장파복사에너지 ▪ 강수량 등 		
		○ 과거 외해 경계조건 분석 및 산출 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 수온, 염분 ▪ 해수면, 유향, 유속(해류, 조류) ▪ 영양염(N, P, Si), 		
		○ 과거 하천 경계조건 분석 및 산출 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 하천 방류량 ▪ 영양염 (인산염, 규산염, 질산염, 아질산염) ▪ 용존 유기 탄소, 질소 ▪ 입자성 유기 탄소, 질소, 규소 		
		○ 검증용 위성 및 관측자료 수집 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 위성자료: 수온, 해수면, 엽록소a ▪ 관측자료: WOD, 수산과학원, 해양조사원 		
		○ 최근 30년 적분 및 결과분석을 통한 모형 검증/개선 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 계절평균장 도출 및 분석을 통한 과거 변동성 이해 ▪ 모의실험 및 관측 자료와의 비교 검증을 통한 모형 개선 	○ 1981~2010년 기후평균 계절 변동장 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 생태계핵심변수 ○ 모형 파라미터 / 경계조건 개선	

※ 생태계핵심변수(EVE: Essential Variables for Ecosystem): 수온, 염분, 인산염, 용존 무기질소, 규산염, 엽록소a, 혼합층 깊이, 유광층 깊이, 일차생산

표 1-2-2-2 연차별 연구목표 (2차 년도).

구분 (년도)	세부 연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비 : 천원)
2차 년도 (2016)	주요시기별 생태계 핵심변수 (EVE) (시범) 변천도 제시	○ 모형 검증을 통한 순환-생태계 모형 개선 및 경계조건 재산출(필요시) ▪ 관측자료/위성자료/재분석자료와의 비교 분석 및 모형검증	○ 모형 파라미터/ 경계조건 개선 ○ 생태계핵심변수	177
		○ 최근 30년 재적분(필요시) 및 결과 분석 ▪ 계절평균장 도출 및 분석을 통한 과거 변동성 이해 ▪ 모의실험 및 관측 자료와의 비교 검증을 통한 모형 개선	○ 1981~2010년 기후평균 계절 변동장 ○ 모형 파라미터/경계조 건 개선 ○ 생태계핵심변수	
		○ 생태계핵심변수(EVE) 분석을 통한 (시범) 변천도 작성 및 제시 ▪ 기후평균 계절 변동장 ▪ 매 10년 평균 계절 변동장	○ 1981~2010년 월평균장 ○ 10년 평균장 ▪ 1980/90년대 ▪ 2000년대	
		○ 전 지구 기후모형 자료(CMIP5) 분석을 통한 미래 변화 시나리오 분석 및 경계조건 산출 ▪ 대기강제력 ✓ 풍향, 풍속 ✓ 단파복사에너지, 장파복사에너지 ✓ 강수량 등 ▪ 외해경계조건 ✓ 해수면, 수온, 염분, 해류, 영양염 ▪ 하천경계조건 ✓ 방류량 및 영양염 등	○ 기간 ▪ 2006~2060년 ○ 시나리오 ▪ RCP 8.5/4.5	
		○ 미래전망 실험계획 수립 ▪ 2011~2060년 모형 적분 시나리오 수립 ▪ 초기적분	○ 경계조건 변화 ▪ 대기강제력 ▪ 외해 수온, 염분, 해류, 해수면, 영양염 ▪ 하천 방류량 / 영양염	

※ 생태계핵심변수(EVE: Essential Variables for Ecosystem): 수온, 염분, 인산염, 용존 무기질소, 규산염, 엽록소a, 혼합층 깊이, 유광층 깊이, 일차생산

표 1-2-2-3 연차별 연구목표 (3차 년도).

구분 (년도)	세부 연구목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비 : 천원)
3차 년도 (2017)	장강유출수 변화 시나리오에 따른 한반도 주변해 생태계핵심 변수(EVE) 미래변화 시범 전망도 제시	○ 과거 30년 경년변동성 분석 및 이해 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 생태계 변화 추이 및 변동성 분석 평가 ▪ 해역별 특성 분석 및 제시 ▪ 동해 EAST-1 자료와의 비교 검증 	○ 분석 기간 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1981~2010년 ○ 분석 해역 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 황해 ▪ 동중국해 ▪ 동해 ○ 분석 변수 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 생태계핵심변수 	119
		○ 전 지구 기후모형 자료(CMIP5)로부터 산출한 경계 조건 변화 분석 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 대기강제력 ▪ 외해경계조건 ▪ 하천경계조건 	○ 분석 기간 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2011~2060년 ○ 분석 변수 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 경계 조건 	
		○ 장강유출량 미래변화 시나리오에 따른 2050년대 수치 적분 및 결과 분석 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 경계조건 변화 시나리오 수립 및 모형 입력자료화 ▪ 과거 기후평균장과의 비교를 통한 미래 변화 산정 	○ 분석 기간 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2051~2060년 ○ 해역 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 황해 ▪ 동중국해 ▪ 동해 ○ 변수 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 생태계핵심변수 	
		○ 장강유출량 미래변화 시나리오에 따른 생태계핵심변수(EVE) 미래변화 시범 전망도 제시 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2050년대(2051~2060년 평균) 계절평균장 분석 및 제시 ▪ 2000년대(2001~2010년 평균) 계절평균장에 대한 2050년대 변화전망도 개발 제시 	○ 변수 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 생태계핵심변수 ○ 해역 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 황해 ▪ 동중국해 ▪ 동해 	

※ 생태계핵심변수(EVE: Essential Variables for Ecosystem): 수온, 염분, 인산염, 용존 무기질소, 규산염, 엽록소a, 혼합층 깊이, 유광층 깊이, 일차생산

3. 연구 추진 계획 및 체계

가. 연구개발 로드맵

핵심기술	요소기술	1차년도 (2015)	2차년도 (2016)	3차년도 (2017)	Target 성과물
해양 순환-생태계 접합 모델링	순환모형	모형수립, 초기조건 및 경계조건 수립, 모형수행, 모형검증, 모형개선, 모형영역, 격자, 수심개선, 수평난류확산, 연직혼합 모수화, Scheme 개선			한반도 해역 해양순환 모형
	조석모형	모형수립, 모형수행, 조화분석, 모형검증, 모형개선, 분조 개수, 경계조화상수, 개방경계처리기법개선			한반도 해역 조석 모형
	생태계모형	초기조건, 경계조건 수립, 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 박테리아, 쇄설물, 기체교환, 탄소수지			한반도 해역 생태계 모형
	접합자	순환/조석/모형과 생태계모형의 접합, 생태계모형에 필요한 대기강제력, 생태계모형 변수의 이류/확산, 적분시간 동기화 및 입출력 제어			해양순환-생태계 접합 모형
	경계자료 분석 및 산출	대기, 하천, 외해 자료수집 및 경계조건 산출	미래변화 시나리오에 따른 대기, 하천, 외해 경계조건 산출		경계조건 산출 도구
	관측/위성 자료 비교검증	자료수집 및 분석		모형성능 평가	모형성능 평가서
	과거재현	모형결과 분석 및 표출기법, 생태계 핵심변수 정의 및 계절 평균장 도출			과거 변천도
	미래전망	미래경계조건 변화 시나리오 개발, 생태계 핵심변수 변화량 산정 및 불확실성 추정기법			미래전망도

Fig. 1-2-3-1 Research road map.

나. 추진전략

□ 해양 생태계 핵심변수 선정 및 분석

- 본 연구에서 사용할 생태계 모형은 동물플랑크톤까지를 포함하는 하위생태계 모형으로써 모형의 수십여 변수 가운데 생태계 핵심변수(EVE: Essential Variables for Ecosystem)를 선정하여, 이들 변수들의 과거 변동성 및 미래변화를 전망함으로써, 연구사업의 목적성을 명확히 하고자 한다.
- 생태계 핵심변수로는 수온, 염분, 인산염, 용존 무기질소, 규산염, 엽록소a, 혼합층 깊이, 유광층 깊이, 일차생산의 9개 변수를 선정한다.
- 선정한 생태계 핵심변수 9개를 ①물성을 대표하는 <표층 수온>, <표층 염분>, <혼합층 깊이>, ②영양염을 대표하는 <표층 질산염>, <표층 인산염>, <표층 규산염>, 그리고 ③일차생산을 대표하는 <유광층 깊이>, <표층 엽록소a>, <엽록소a 최대층 깊이> 등으로 분류하여 이에 대한 과거 변천 예측과 미래 변화 전망을 제시한다.

□ 대기, 외해, 하천 경계조건 변화에 대한 최적 시나리오 선정

- 해양환경 변화 요인인 대기, 외해, 하천 경계조건에 대하여 기후변화 및 인간 활동에 따른 가능성 있는 미래 변화 시나리오를 추정하고, 최적 시나리오를 선정하여 이를 미래 전망 실험 조건으로 적용한다.
- 미래 생태계 변화를 전망하기 위해서는 대기강제력 변화, 해양 경계조건 변화, 하천 경계조건 변화 등을 모두 고려해야 하지만, 이들에 대한 불확실성이 높기 때문에 모든 조건을 고려하는 대신, 우리나라 주변해역에 미치는 영향이 가장 큰 하천인 장강의 유량 변화를 예측하고 이에 대한 순환-생태계 반응 변화를 고찰하기로 한다.
- 장강 담수 유출량의 미래 변화는 전 지구 기후모형 CMIP5에서 전망한 강수량 미래 변화를 토대로 예측한다.

□ 해양 순환-생태계 접합 모델링 전문 인력 및 기반 확보

- 해양 순환-생태계 접합 모형의 수립, 수행, 분석 및 표출까지 일련의 과정을 전담할 핵심인력을 투입하여, 모형 검증 및 개선이란 반복적인 작업을 통해 모형 성능을 개선하고, 이 분야 전문 인력으로 양성한다.

- 슈퍼컴센터의 전산자원을 활용하여 모형의 수치적분을 수행하고, 연구 사업에서 확보하려는 클러스터 시스템을 이용하여 모형 개선 및 자료처리를 전담함으로써, 계산과 분석 비용의 효율성을 극대화한다.

□ 국내 및 국제 연구협력

- 과제 특성이 물리-화학-생물 해양학의 융합뿐만 아니라 관측-원격탐사-모델링 분야의 통합 과제 성격이기 때문에 분야별 국내외 전문가들과의 커뮤니티 구축을 위해 모형 결과를 개방하고 공동분석을 시도한다. 특히 원내 생물자원 변동 연구팀과의 협력을 통해 모델 입력변수 자료를 확보하고 모델 결과를 공동으로 분석해나갈 계획이다.
- 유럽에서 지역해 및 전 지구 해양 순환-생태계 접합모형 연구 분야의 선두 그룹인 영국 폴리머스 해양연구소(PML)와 KIOST-PML Lab을 통한 공동연구 및 연구 협력을 통해 최신 모형실험 및 분석 기법, 유사 과제 수행 경험을 도입하여 활용함으로써 연구 성과를 극대화한다.

다. 추진체계

한반도 주변해 해양 순환-생태계 접합모형을 이용한 생태계 과거 변천 재현 및 미래변화 전망 연구를 성공적으로 수행하기 위하여

- 해양 순환-생태계 접합모형의 대기, 외해, 하천 경계조건 자료를 수집하여 부과하며,
- 생태계 핵심변수(EVE)를 선정하여 모형실험을 통하여 이의 변동을 계산하고
- 관측 자료와 위성 자료를 사용하여 모형을 검증/개선한다.
- 모형실험 결과를 분석하여 기후 평균장, 계절 변동성, 경년 변동성을 검토한다.
- 10년 단위로 한반도 주변해 생태계의 과거 변천을 재현하고
- 2050년대 (2050-2060)의 생태계 미래 변화를 전망한다.
- 본 연구를 위하여 생지화학/생태계 연구자를 포함한 여러 분야의 원내 연구자와 자료 교환 및 모형 결과 공유를 시도하며,
- 국내 생태계모형 연구 활성화 및 연구 네트워크 구축을 위한 워크숍을 개최한다.
- 영국 PML을 방문하여 생지화학/생태계 모형에 대한 토의 시간을 가지며, PICES 등 국제학술대회에 참가하여 연구 성과를 공유한다.

- 연구 결과를 정책입안 기관, 교육기관, 일반대중과 공유한다.

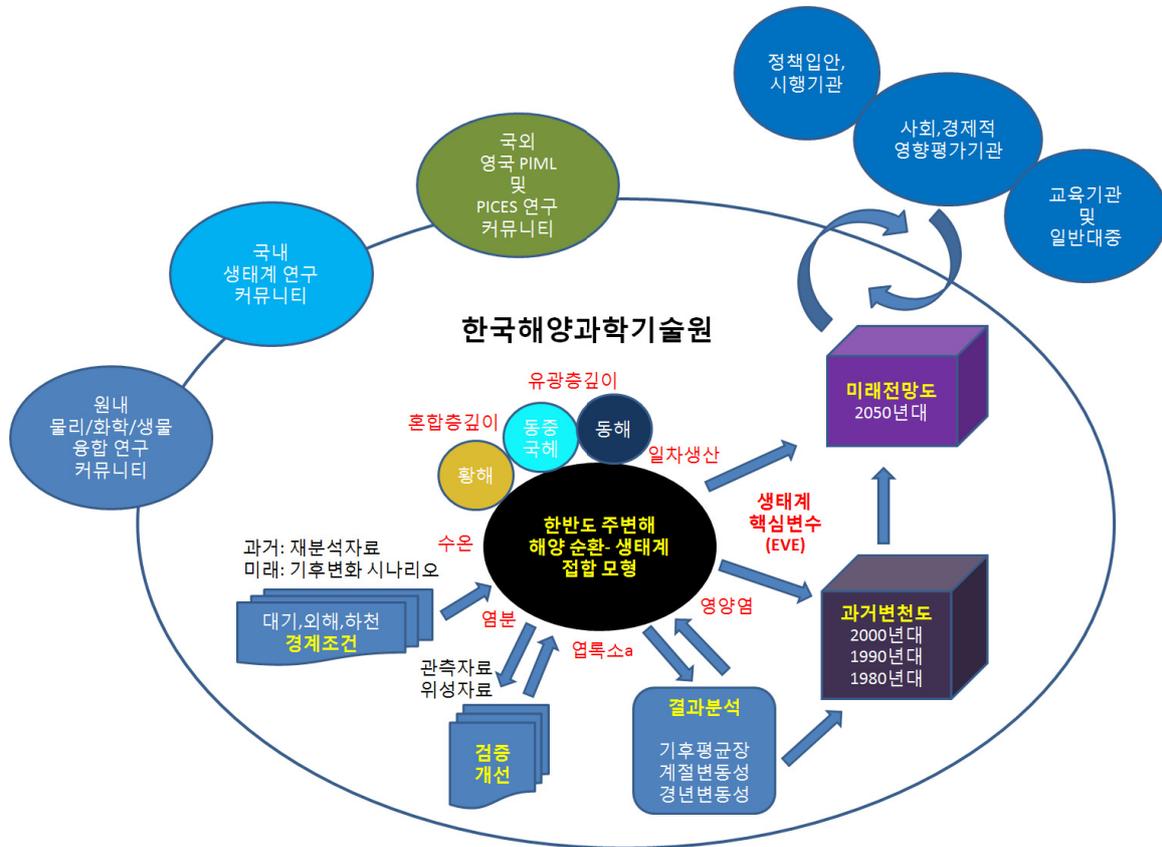
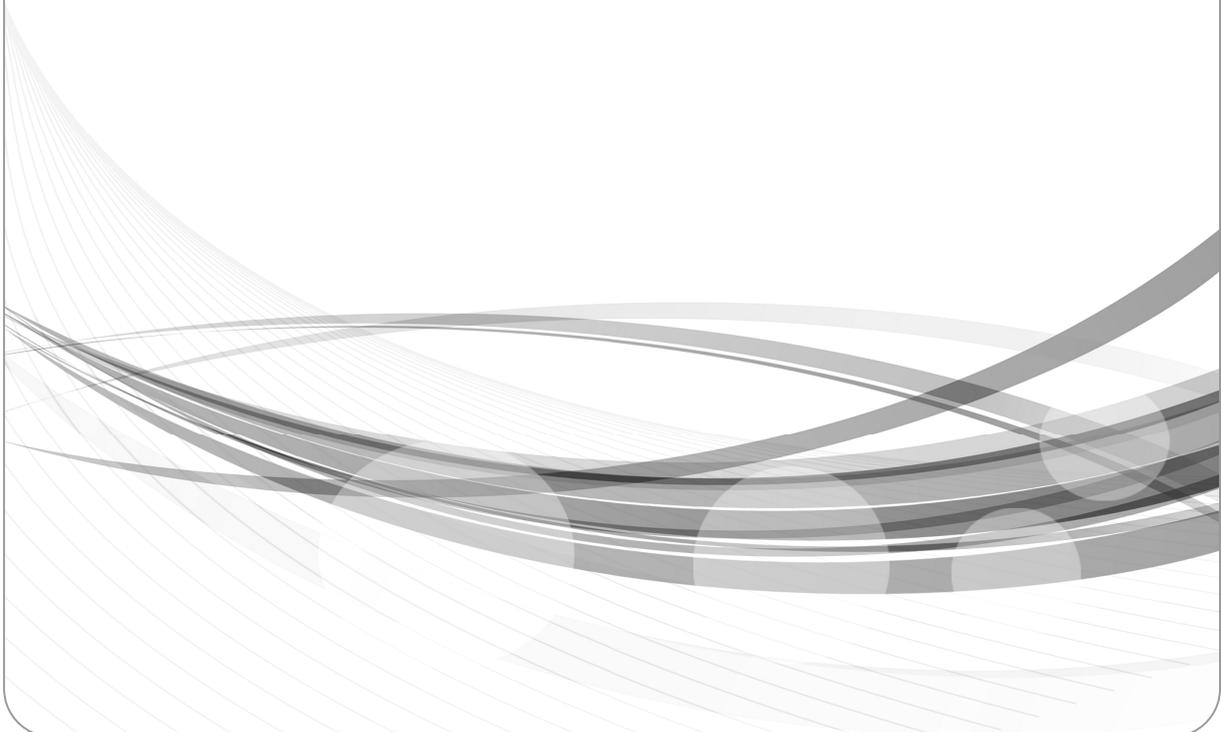


Fig. 1-2-3-2 Research promotion system.

제 2 장

국내외 연구 동향



제 2 장 국내외 연구 동향

제 1 절 국내 동향

□ 국내전반:

- 국내에서는 지난 20여 년 동안 한반도 주변해역에 대한 해양생태계 모형실험 연구가 꾸준히 지속되어 왔으나, 주로 황해, 남해 연안에서의 국지적인 모형 적용을 통한 연구 또는 동해에서의 실험적 연구에 국한되었다.
- 해양생태계 모형을 구성하는 생태계 요소모형 개발, 모형 개발을 위한 학제적 융·복합 연구, 해양 순환-생태계 접합모형을 통한 예측기술 개발 등을 포함하는 종합적이고 체계적인 생태계모형 연구는 여전히 미흡한 상태이다.

□ 해양과기원:

- 순환모형의 경우, 전 지구에서부터 지역해 및 연안역에 이르기까지 다양한 규모의 다양한 모형 수립 및 개발 능력을 보유하고 있으며, 과거 재분석 자료 생산 및 예측 기술을 보유하고 있으나, 독자 모형 개발은 극히 제한적으로 이루어고 있다.
- 해양생태계 모형의 경우, 단순한 NPZD 모형으로부터 복잡한 NPZD 모형 수립 및 운영경험이 있으나, 모형 내의 프로세스 수립이나 파라미터 산정 연구는 미흡한 수준이다.
- 해양 순환-생태계 접합모형의 경우, ROMS, POLCOMS-ERSEM, FVCOM, MOM-TOPAZ 등 지역해 및 전 지구 접합모형 수립 및 수행 능력을 가지고 있으나, 접합자 자체 개발 능력은 상대적으로 부족하다.

□ 국내의 전반적인 해양생태계 모형 관련 연구는 다음과 같다.

- 국립수산과학원(2010)은 「생태계모델 구축연구」를 통하여 황해 및 동중국해 생태계 변화를 예측하였다.
- 박성은 등(2010)은 「생태계모델을 이용한 수질관리 연구」(국립수산과학원)를 통하여 어장관리 등의 모형적용 연구를 수행하고 있다.
- 서울대학교(2003)는 「생지화학모델링을 통한 통합 해양자원 관리기반 구축

연구」를 통해 NEMURO, PROWQM, SCS 모형 구조/코드 분석 및 계량화된 생태계 인자를 초기 값으로 하여 실험하였다.

- 이대인(2004)은 진해만 해역 적조발생 연구를 위해 생태계 모형(EUTRO-2nd, 일본)과 해수유동 모형(COSMOS-4th)을 실험하였다.
- 권철휘 등(2009)은 아산만 해역에서 화학적 산소요구량, 용존 무기질소 및 용존 무기인에 대하여 장기 수질변화를 예측한 바 있다.
- 이종희 등(2008)은 NEMURO 모형을 사용하여 영양염과 플랑크톤의 계절적 변동을 분석하고 플랑크톤 생산량과 생체량을 추정하였다.
- 이원찬 등(2002)은 EUTRP2를 이용하여 환경용량산정 모형을 구축한 바 있다.
- 송규민 등(2007)은 1차원 수온-생태계모형을 이용하여 황해 투기해역에서 봄철 식물플랑크톤 대증식을 재현하고, 인과관계를 파악한 바 있다.

□ 해양과기원에서 수행한 해양생태계 모델링 관련 연구는 다음과 같다.

- 한국해양연구소(1993, 1994)는 「생태계 모델링에 의한 해양 생태계 동태 연구」 사업에서 2년에 걸쳐 자연변화가 해양생태계의 구조와 기능에 미치는 변화, 궁극적으로 해양생물의 자원량과 생산량에 미치는 영향을 예측하기 위하여 기존 모형(Evans & Parslow, 1985; Fasham et al., 1990; Walsh, 1975; Hoffman & Ambler, 1988)을 분석하고 적용하였다.
- 한국해양연구원(2005)은 「새만금 해양환경보전대책을 위한 조사 연구(4차년도)」에서 새만금 개발 형태 및 수문 개방 시 유출수 오염 정도에 따른 생태계의 변화 예측 시나리오에 대한 생태계모형 실험을 실시하였다.
- 한국해양연구원(2010)은 「기후변화에 따른 남해(동중국해 북부)의 해양환경 및 생태계 변동 연구」에서 해양생태계와 관련하여 동중국해 북부 해역에서 ①영양염의 계절 변화와 연 변화, ②하위영양단계 생태계의 특성 변동, ③살오징어 유생의 수송 및 변동을 파악하고 ④지구시스템 모형을 이용하여 동중국해의 일차생산 변화를 전망하였다.
- 해양연구원(2011)은 「싼샤댐 건설로 인한 남해(동중국해)의 해양환경 영향 연구」에서 상위영양단계에 Ecopath 및 Ecosim 모형을, 하위영양단계에 NEMURO 모형을 사용하여 생태계모형 실험을 실시하였다.
- 한국해양과학기술원(2012, 2013, 2015)은 「북서태평양의 해양환경 변화가

한반도 주변해에 미치는 영향 연구」(2012-2014)에서 우리나라 주변해에 대하여 POLCOMS-ERSEM 순환-생태계 접합모형을 수립하고, 기후변화에 따른 동중국해 및 남해역의 2030년대 미래 변화 전망 실험을 수행한 바 있다.

제 2 절 국외 동향

- 미국, 영국, 캐나다, 아일랜드 등은 자국 주변해에 대해 1~5년 주기로 상세 기후 및 생태계 과거 진단을 수행하고 평가보고서를 발간하여 정책 수립의 근거 자료로 활용하고 있다. 또한 미래 예측자료를 생산하여 기후변화 적응을 위한 과학정보 자료로 제시한다.
- 영국 및 유럽 선진국은 순환-생태계 접합모형을 이용한 기후변동 예측, 계절 예측, 주요 환경변화에 의한 신속 환경생태계 평가 연구, 침입종 동태 및 영향, 생물다양성 변동, 해양산성화 영향평가 등을 통해 정책입안자들이 효율적인 해양 관리 정책을 수립하고 추진할 수 있는 학문적 근거와 도구를 제공하고 있다.
- 선진국을 중심으로 해양 생태계 변동에 대한 체계적인 진단 및 예측 프로그램을 개발해오고 있으며, 국내에서도 이에 대한 요구가 커지고 있다. 최근 NEMURO, TOPAZ, EcoSYM, ERSEM 등 여러 생지화학 모형들이 개발되어 해양순환모형과의 접합이 시도되거나 현업에 운용되고 있다. 그러나 각 지역해 별로 생지화학 과정의 특성이 달라 해역별로 개별적인 개발과정이 필요하다.
- EU에서 추진한 MEECE 연구 사업은 전 지구 및 유럽 지역해를 대상으로 순환-생태계 접합모형을 수립하여 과거를 재현하고 IPCC 4차 보고서의 A1B 시나리오 등 미래변화 시나리오를 적용하여 2100년대를 전망하였으며, 수온, pH, 일차생산, 식물플랑크톤 생체량, 동물플랑크톤 생체량, 어류 생체량 등의 변수들에 대해서 전망도를 제시한 연구로써 본 과제와 가장 유사한 성격의 과제이다.
- EU에서는 OPEC 연구사업(2012-2014)을 통하여 북해, 발트 해, 지중해, 흑해 등 4개 지역해를 위주로 순환-생태계 접합모형을 개발하고, 이를 이용하여 과거

변동성을 재현하고, 신속 생태계진단 및 계절 예측 도구를 개발하였다.

- 영국 플리머스에 소재한 PML(Plymouth Marine Laboratory)은 AMEMR (Advances in Marine Ecosystem Modelling Research Symposium) 컨퍼런스를 2005년부터 매 3년마다 개최하여 유럽을 비롯한 전 세계 해양생태계 모형 연구자들에게 문제와 해결책을 공유할 포럼을 제공해오고 있다(www.amemr.info).

제 3 절 현 기술의 한계 분석

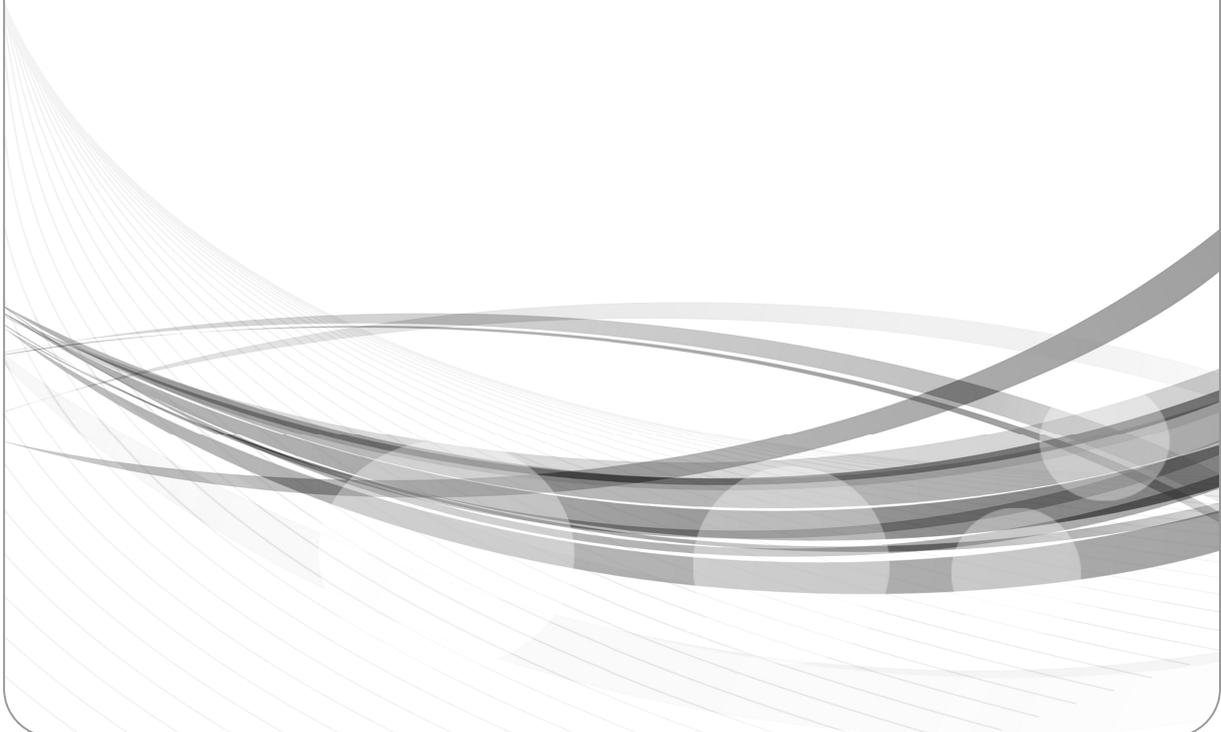
- 대기 강제력
 - 과거재현의 경우 재분석 자료를 이용할 수밖에 없으며, 대부분의 재분석자료는 외국 기관에서 개발된 것이다.
 - 최근 1/8도 등 상세 해상도 자료가 공개되고 있으나 지역에 따라 불확실성이 다를 수 있다.
- 하천 경계 조건
 - 하천 경계조건은 가용한 자료가 많지 않다. 특히 계절변동성을 반영하는 것조차 쉽지 않은 경우도 많기 때문에, 적절한 가설을 세우거나, 추론에 의존할 수밖에 없다.
- 외해 경계 조건
 - 대기 강제력과 마찬가지로 재분석 자료에 의존해야 하며, 비교적 수평해상도가 높은 모형은 국외에서 개발된 모형이다.
 - 조석을 고려하여 동시에 재분석 자료를 생산한 경우는 거의 없기 때문에 조석 조화상수를 이용한 경계조건을 추가로 산출해야 한다.
- 모형 특성
 - 순환 모형의 경우 연직 좌표계 및 수평 격자체계 등에 따라서 지형적 영향에 따라 민감하게 반응할 수 있기 때문에 모형 특성에 따른 문제인지, 실제적

자연현상인지를 구분하는 데 있어 주의가 필요하다.

- 대부분의 하위생태계 모형은 NPZD(영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 쇠설물)를 기반으로 설계되었으며, 특히 플랑크톤의 경우 크기에 따른 기능군 분류 방식을 적용하였기 때문에 실제 관측치와의 비교 분석에서 주의가 필요하다.
- 또한 하위생태계 모형이 갖고 있는 특성상 실험을 통해 얻어진 파라미터들이 많이 사용되는데, 이 값이 모든 해역에 일반적으로 적용되기가 쉽지 않다.

제 3 장

연구수행 내용 및 결과



제 3 장 연구수행 내용 및 결과

제 1 절 해양순환-생태계 접합모형 수립 및 초기 적분

1. 해양순환-생태계 접합모형 수립

가. 모형 개요

우리나라 주변해역에서의 하위생태계 과거 변동성을 재현하고, 기후변화 시나리오에 따른 미래 전망도를 제시하기 위한 도구로 3차원 해양 순환(POLCOMS)-하위생태계(ERSEM) 접합모형을 수립하였다.

수립한 모형은 동중국해 및 황해, 동해 그리고 오키나와 해를 포함하며, 쿠로시오와 오야시오 해류를 경계로 하는 GCOMS-KURO24 영역 모형을 영국 현지에서 있는 KIOST-PML Lab을 통하여 도입한 후, 이를 더욱 개선, 발전시킨 기존 모형을 근간으로 하고 있다(한국해양과학기술원, 2015).

POLCOMS-ERSEM 결합모형은 주로 북해를 대상으로 개발된 모형이었지만, 영국 GCOMS(Global Coastal Ocean Modelling System; Holt et al., 2009) 연구사업의 일환으로 추가 개발되어 전 세계 지역해 및 연안을 42개 해역으로 나누어 적용했던 모형이다.

POLCOMS는 Proudman Oceanographic Laboratory Coastal Ocean Modelling System (Holt and James, 2001)의 약자로서 영국 리버풀에 있는 국가해양센터(National Oceanographic Centre, Liverpool)의 전신인 POL(Proudman Oceanographic Laboratory)에서 개발된 3차원 해양순환 모형이다. POLCOMS는 모형 격자를 수평적으로는 아라카와(Arakawa)-B 격자체계를 사용하고, 연직 방향으로는 s-좌표계를 도입하여 정수압 가정 및 부씨네스크(Boussinesq) 가정 하에 도출된 운동방정식을 푸는 모형으로써, 연안역 및 대륙붕 해역과 심해와의 상호작용 연구에 적합하도록 설계되었다.

개발 시점에서부터 연안역의 복잡한 다학제적 현상을 연구할 수 있도록 퇴적물 이동 모듈 등이 같이 개발되었으며, ERSEM과 같은 생태계 모형이나 미국 로스알라모스의 해빙 모형과도 결합 운용될 수 있도록 구현된 것이 특징이다. 자체적으로 난류확산 모듈을 가지고 있기도 하지만, GOTM(Generalized Ocean Turbulence Model; Umlauf

and Burchard, 2005)과 연계하여 첨단 난류확산 모듈을 추가적으로 이용할 수 있는 장점이 있다.

ERSEM은 European Regional Seas Ecosystem Model(Baretta et al., 1995; Blackford et al., 2004)의 약자로서 탄소를 계산단위로 한다. 가장 발달되고 복잡한 NPZD(Nutrient, Phytoplankton, Zooplankton, Detritus) 기반의 생태계 모형 중 하나로써 1990년대에 유럽의 표준 해양생태계 모형으로 개발되었다.

ERSEM 개발에는 네덜란드해양연구소(NIOZ)의 욱 바레타(Job Baretta) 주도로 영국 플리머스 해양연구소, 스코틀랜드 스트라티클라이드(Strathclyde), 아버딘(Aberdeen) 대학, 독일의 함부르크(Hamburg), 올덴부르크(Oldenburg) 대학, 덴마크의 생태계모델링 센터, 그리고 스페인의 블라네스고등연구소(CEAB, Blanes) 등이 참여하였으며, EU 프로젝트(ERSEM, 1990~1993; ERSEM II, 1993~1996)로 지원을 받았다.

2000년대 들어 영국 플리머스해양연구소(PML: Plymouth Marine Laboratory)에서 후속 개발 및 버전 관리를 해오고 있으며, 다소 복잡한 플랑크톤 조성을 표현할 수 있고, 미생물 고리(Microbial loop), 변화 가능한 영양염 화학량론(Stoichiometry), 변동 가능한 탄소:엽록소 비 등을 사용할 수 있고, 저서생태계 모형도 구현되어 있는 것이 주요 특징이다.

ERSEM은 대표적으로 POLCOMS와 결합되어 POLCOMS-ERSEM 결합모형으로 북해의 대표적인 해양시스템 모형으로 자리매김 되었으며, 프린스턴 해양모형(POM), 유한체적해안모형(FVCOM), 유럽표준해양모형(NEMO) 등과 같은 다양한 해양순환모형과 결합되어, 연안역, 지역해 및 전 지구 모형에 널리 적용되고 있다.

Fig. 3-1-1-1은 POLCOMS-ERSEM 결합 모형의 모식도로써 POLCOMS는 해표면에서의 열속과 바람에 의한 운동량 등과 같은 대기강제력에 의해 구동되고, 담수 유입과 해양경계조건을 고려할 수 있으며, 궁극적으로 3차원 해수의 수온, 염분, 그리고 유속을 산출한다.

ERSEM은 Fig. 3-1-1-1 우측에서 보는 바와 같이 영양염, 동, 식물플랑크톤, 유기물 등의 상태변수들이 유기적으로 연결되어, 각 상태변수들의 탄소 및 인, 질소, 규소 량 등을 태양복사에너지를 입력 조건으로 하여 계산하고, 최종적으로 POLCOMS의 이동, 확산 계산 루틴에 의해 계산 시간별 값을 산출하도록 되어 있다.

나. 모형 영역

모형의 영역은 우리나라 주변해인 황해 및 동중국해, 동해뿐만 아니라 오호츠크 해를 포함하여 동북아시아 지역해를 망라하는 북위 22~65°N, 동경 117~167°E의 영역 (Fig. 3-1-1-2)으로 설정하였다. 오호츠크 해를 포함하여 동해를 관통하는 대마난류가 쓰가루해협이나 소야해협 등에서 부여하는 해양경계조건에 의해서 직접적으로 통제되지 않고, 북태평양 대양순환인 쿠로시오와 오야시오 해류 특성에 따라 간접적으로 제어됨으로써 모형의 자유도를 높이고자 하였다.

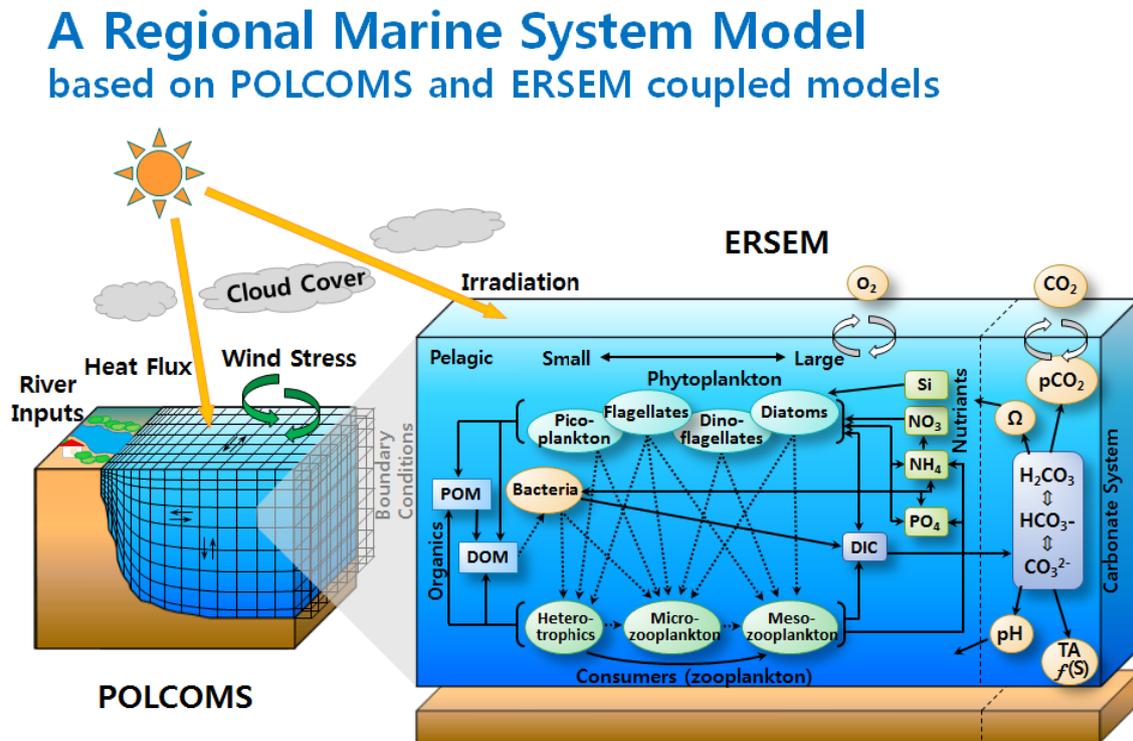


Fig. 3-1-1-1 Schematic diagram of POLCOMS-ERSEM coupled marine system model.

해양의 개방 경계역은 쿠로시오와 오야시오 해류를 포함하되 계산의 부담을 줄이기 위해서 이들 밖의 해역 수심 800 m까지를 포함하되 외해 쪽으로 200 km 정도를 더 확장하여 설정하였다. 이렇게 한 이유는 하위생태계 과정이 주로 이루어지는 수심대를 충분히 포함하면서도 경계조건을 줄일 수 있게 하기 위함이다.

다. 초기조건 및 적분기간

모형의 초기조건은 한국해양과학기술원 기본사업(한국해양과학기술원, 2015)에서 개발/수립하여 1989년부터 2011년까지 1차 적분한 결과로부터 구하였으며, 2011년 1월 1일자의 재시작 파일을 1980년 1월 1일 초기조건으로 다시 설정하고, 1981년부터~2010년까지 30년 적분을 통해 기후평균장을 산출하고자 하였다.

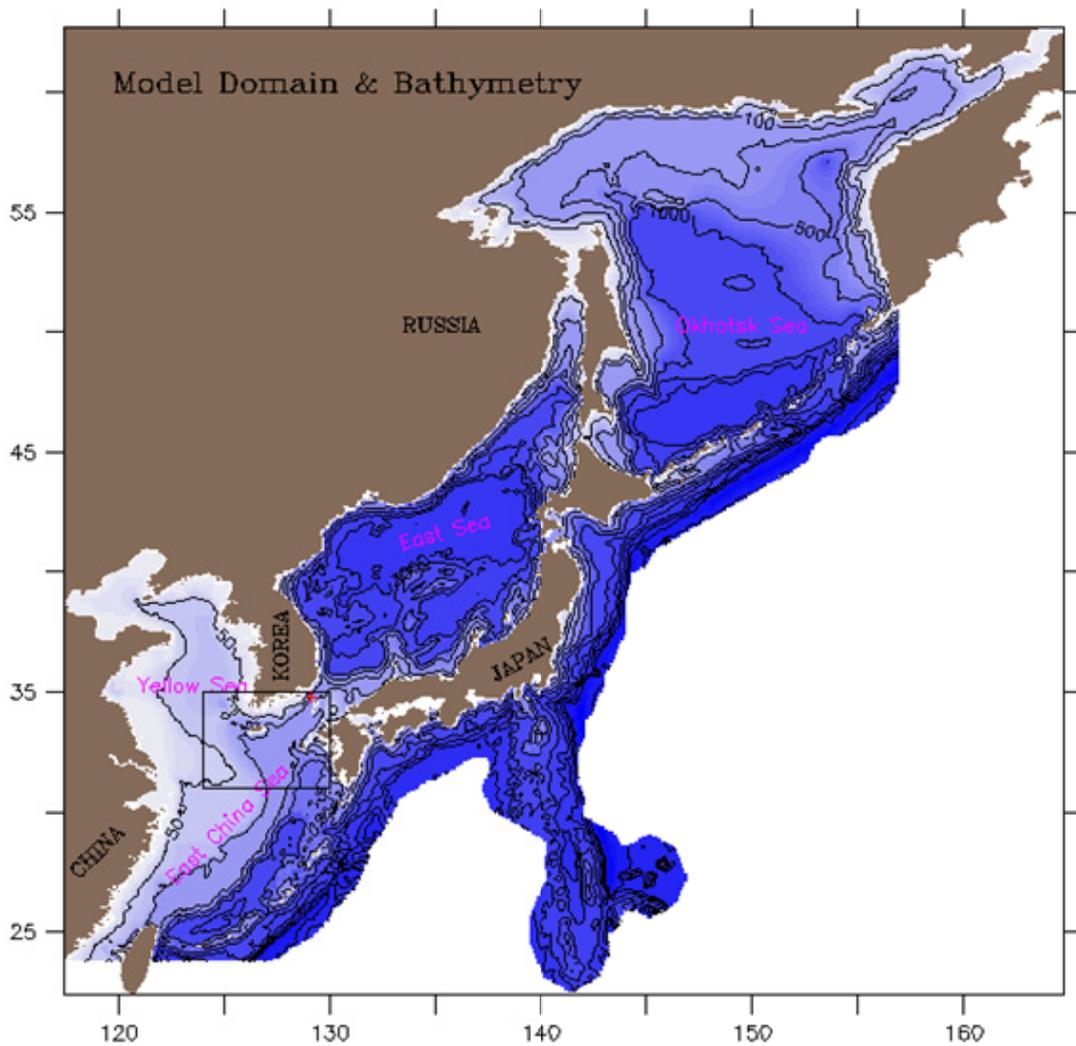


Fig. 3-1-1-2 Model domain and bathymetry for the marine ecosystem simulation for the East Asia.

2. 과거 재현을 위한 대기강제력 산출 및 분석

본 절에서는 1981년부터 2010년까지 30년 기후평균장을 생산하기 위한 대기강제력을 산출하고 이의 특성을 분석하였다. 기본적으로 대기강제력은 ECMWF-interim 재분석 자료(ERA-interim; <http://www.ecmwf.int>)를 이용하여 기온, 대기압, 상대습도, 바람, 단파복사량, 장파복사량, 운량, 강수량을 산출한 후 이를 모형의 입력 형식에 맞도록 변환하였다.

ERA-interim 자료를 생산한 대기 모형은 T255 spectral 격자 간격으로 되어 있으나, 모형 입력 규격에 맞게 경위도 1도 간격으로 다시 변환하여 기온, 대기압, 바람, 상대습도 등은 6시간 간격의 자료를 사용하였으며, 복사량과 운량 및 강수량은 일 누적 값을 시간 평균값으로 환산하여 사용하였다.

가. 기온

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-1, Table 3-1-2-1)

기온의 계절 변동성을 해역별로 보면 황해 기온의 연평균은 동해보다 높고 동중국해보다 낮으며, 표준편차는 동해와 비슷하고 연교차가 매우 크게 나타났다. 최저기온은 1월에 나타나며, 최고기온은 8월에 나타난다.

동중국해의 경우 황해 및 동해에 비해서 연교차가 다소 작은 편이며 황해와 마찬가지로 1월에 최저기온, 8월에 최고기온이 나타난다.

동해는 연평균 기온이 다른 해역에 비해서 가장 낮으며 월평균 최저기온은 1월에 최고기온은 8월에 나타나 우리나라를 둘러싼 전역에서 월평균 최저 및 최고 기온을 나타내는 시기는 비슷하였다.

Table 3-1-2-1 Statistics of surface air temperature(°C) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	12.9	8.8	0.7 (01)	25.1 (08)
East China Sea	19.7	6.0	11.6 (01)	27.9 (08)
East Sea	10.1	8.5	-1.6 (01)	22.6 (08)

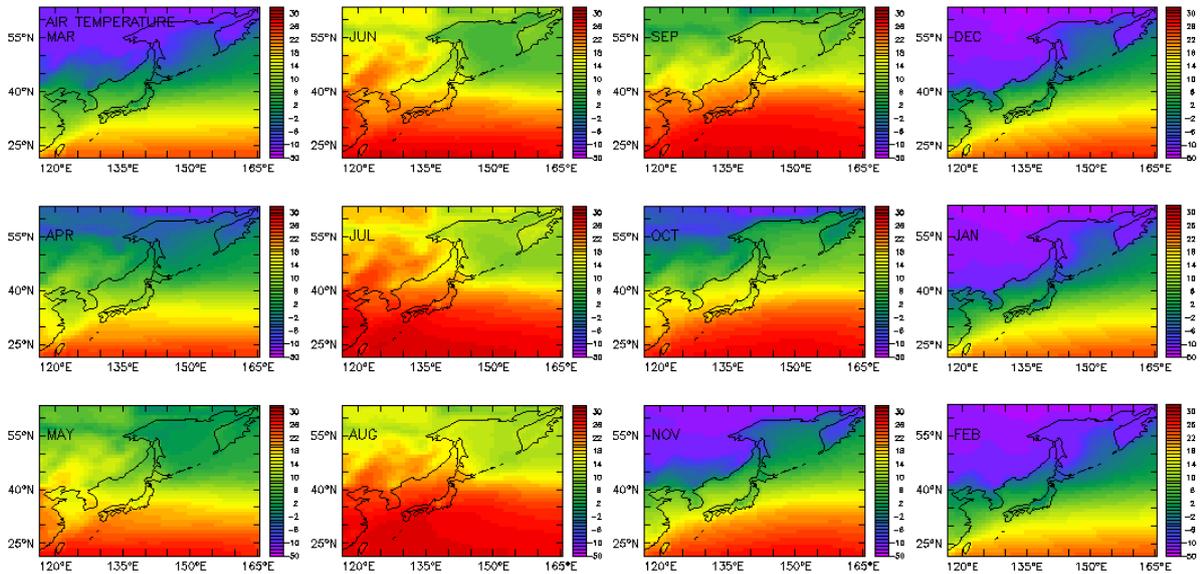


Fig. 3-1-2-1 Monthly mean surface air temperature(°C) field from the ERA-interim climatology (1981~2010).

2) 경년변화(Fig. 3-1-2-2)

해표면 기온의 경년변화를 보기 위해서 해역별로 경험직교함수 (EOF: Empirical Orthogonal Function) 분석을 하여 제1모드의 공간벡터와 시계열을 Fig. 3-1-2-2에 나타내었다. 황해의 경우 3~5년의 경년변동이 발해만과 산둥반도 이남에서 크게 나타나며, 전반적으로 1980년대가 1990년대와 2000년대에 비해서 해면기온이 낮았음을 알 수 있다.

동중국해는 황해와 비슷한 변동성을 보이며, 그 변동성은 장강 하구역에서 특별히 크게 나타났고 1998년 전후로 표층기온이 가장 높았던 것을 알 수 있다.

동해는 황/동중국해와 대체로 비슷한 변동성을 보이나, 동해 북서부 해역과 일본 서안에서 상대적으로 그 변동 폭이 크게 나타나는 특징을 보였다.

각 해역에서 경험직교함수 제1모드가 차지하는 비율은 황해가 88.5%, 동중국해가 81.1%, 그리고 동해가 76.8%를 보였다.

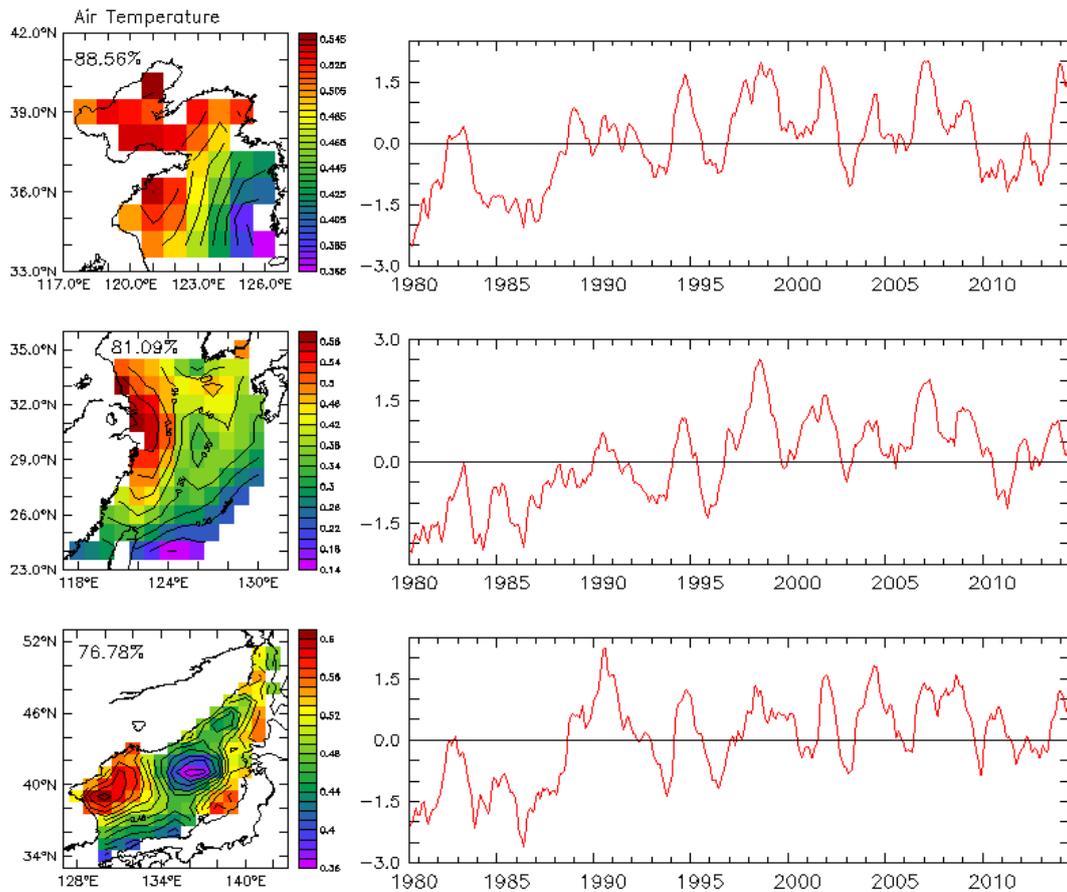


Fig. 3-1-2-2 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim surface air temperature.

나. 해면 기압

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-3, Table 3-1-2-2)

해면기압의 계절 변동성을 해역별로 살펴보면 다음과 같다. 황해의 연평균 대기압(1017 hPa)은 전반적으로 동중국해와 동해보다 다소 높다. 연교차가 크고 월평균 해면기압은 7월에 최저(1005.4 hPa), 1월에 최고(1026.8 hPa) 값이 나타났다.

동중국해는 연평균 대기압(1015.1 hPa)이 황해와 동해의 중간 값을 보이며, 월평균 해면기압은 8월에 최저(1006.9 hPa), 12월에 최고(1022.9 hPa) 값을 보여 황해보다 월평균 최저기압은 1개월 늦게 나타나고 월평균 최고기압은 1개월 빨리 나타나는 특징을 보였다.

동해의 경우 전반적으로 동중국해와 황해에 비해서 연평균 기압(1014 hPa)이 낮으며 표준편차도 작게 나타났다. 월평균 해면기압은 황해와 마찬가지로 7월에 최저(1007.7 hPa), 1월에 최고(1018.2 hPa) 값을 나타냈다.

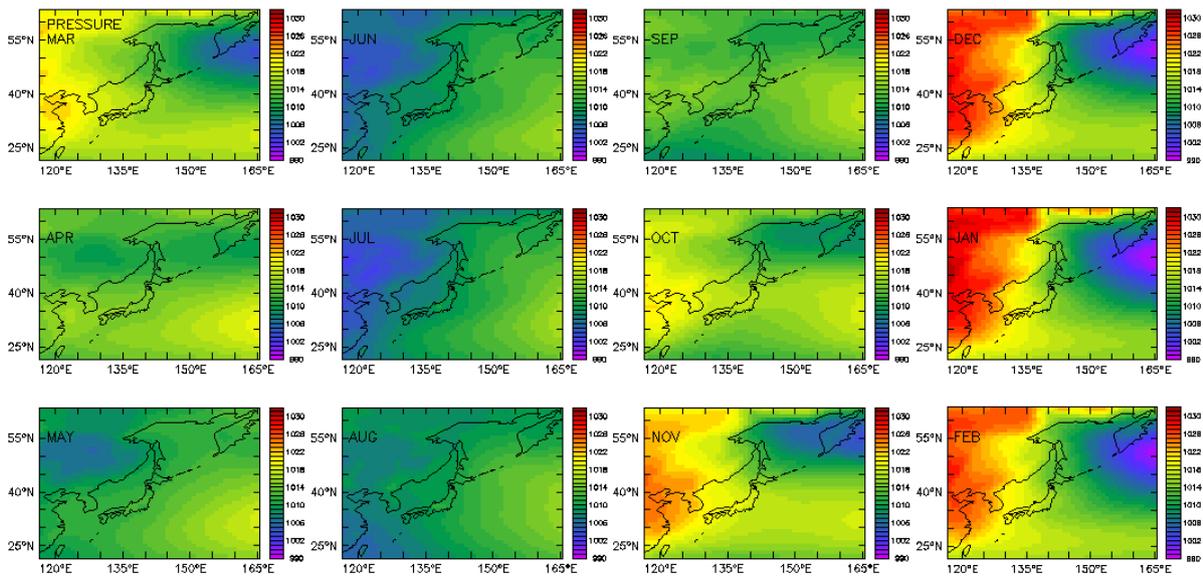


Fig. 3-1-2-3 Monthly mean mean-sea-level pressure(hPa) field from the ERA-interim climatology(1981~2010).

Table 3-1-2-2 Statistics of mean-sea-level pressure(hPa) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	1017.0	7.8	1005.4 (07)	1026.8 (01)
East China Sea	1015.1	6.2	1006.9 (08)	1022.9 (12)
East Sea	1014	4.0	1007.7 (07)	1018.2 (01)

2) 경년변화(Fig. 3-1-2-4)

기온과 마찬가지로 ERA-interim 해면기압 자료에 대한 경험직교함수 분석을 통해 주요 경년변동성을 파악하고자 하였다. 황해의 해면기압은 1990년 후반기까지는 전반적으로 기압이 낮았으며, 2000년대 이후 다소 높아지는 장주기 변동성을 보였고 2~5년

주기의 경년변동성이 우리나라 서해안을 중심으로 크게 나타나는 것이 특징이다.

동중국해의 경우 황해보다는 다소 장주기의 경년변동성을 보이며, 황해와 마찬가지로 90년대 후반부를 기점으로 양상이 달라진다. 이러한 변동성은 우리나라 남해 동부 해역에서 가장 크게 나타났고, 쿠로시오 해역의 경우는 상대적으로 해면기압의 변동성 제1모드가 크지 않은 것으로 나타났다.

동해는 황해와 동중국해의 중간 정도 시간 규모의 경년변동성을 보였으며, 이러한 변동을 좌우하는 핵심해역은 동해남부 해역인 것으로 나타났다.

각 해역에서 해면기압의 경험직교함수 제1모드가 차지하는 비율은 황해가 90.7%, 동중국해가 86.7%, 그리고 동해가 85.1%를 보였다.

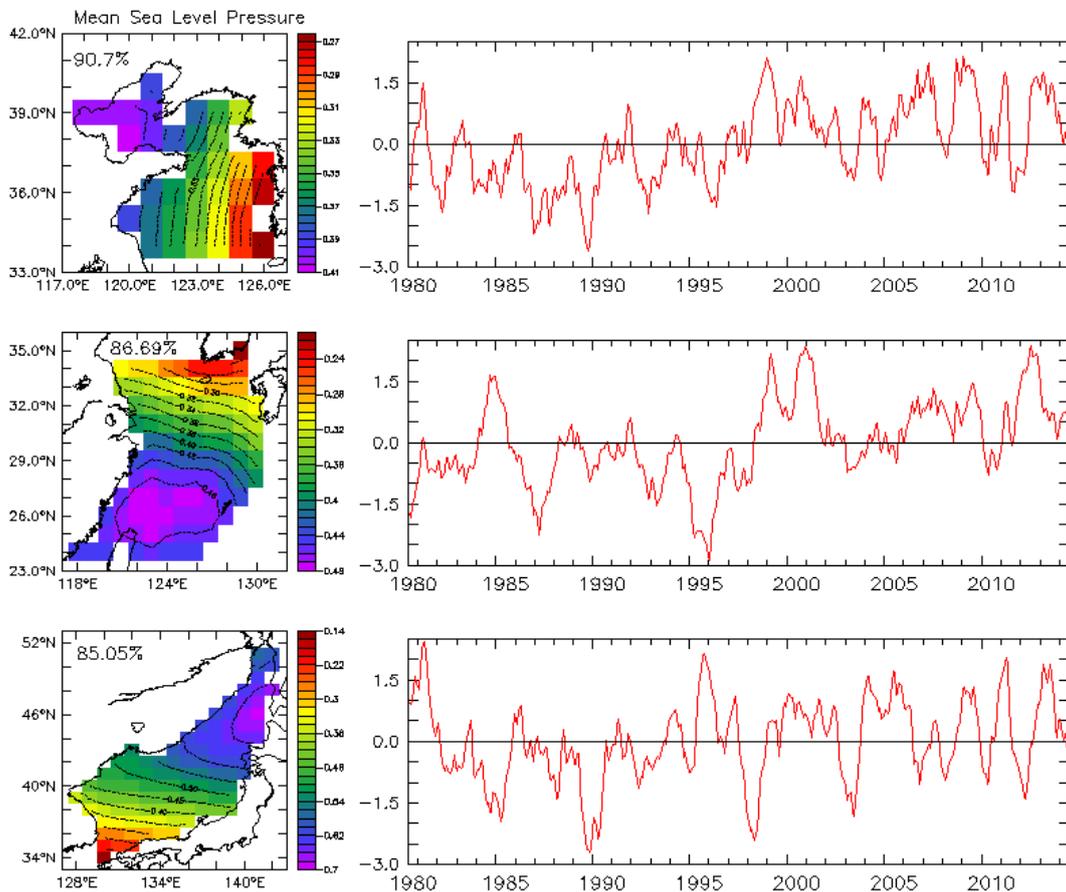


Fig. 3-1-2-4 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim mean-sea-level pressure.

다. 바람

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-5, Table 3-1-2-2a, Table 3-1-2-2b)

해상풍의 계절 변동성을 해역별로 살펴보면 다음과 같다. 우리나라 주변해역은 대표적인 계절풍대로써 전반적으로 겨울철 북서계절풍이 강하고 여름철 약한 남동풍이 우세하다.

황해의 동서방향 연평균 풍속은 0.58 m/s로써 서풍이 매우 작은 편이나 8월에는 동풍 계열의 바람이 우세하고 12월에는 서풍 계열의 바람이 우세하다. 한편 남북방향 연평균 풍속은 -1.08 m/s로 북풍이 우세하며, 북풍은 1월에 평균 -4.18 m/s로 가장 세고 7월에는 평균 2.35 m/s로 남풍이 우세하게 나타난다.

동중국해는 동서방향 연평균 풍속이 -1.04 m/s로 황해와 달리 동풍계열의 바람이 우세하며, 동풍은 10월에 평균 2.63 m/s로 가장 세게 부는 것으로 나타났고 7월에 0.21 m/s로 가장 약하게 부는 것으로 나타났다. 남북방향으로 보면, 연평균 풍속이 -1.98 m/s로 북풍계열의 바람이 우세하며, 1월에 가장 강해 평균 -5.39 m/s로 황해나 동해에 비해서 더 강한 것으로 나타났고, 7월에는 평균 3.18 m/s로 남풍이 강하게 불어 계절대비가 가장 큰 것으로 보인다.

동해의 경우는 동서방향의 연평균 풍속이 1.56 m/s로 다른 해역에 비해서 평균적으로 가장 큰 서풍이 불고 있으며, 6월에는 약한 동풍계열로 바뀌어 -0.31 m/s가 되고, 12월에 가장 강한 3.76 m/s를 보였다. 남북방향 연평균 풍속은 -1.21 m/s로 황해와 비슷하며 동중국해보다는 다소 약한 북풍이 우세한 것으로 나타났으며, 1월 평균 -4.56 m/s로 가장 강하고, 7월에는 풍향이 바뀌어 1.27 m/s의 남풍이 부는 것으로 나타났다.

Table 3-1-2-3a Statistics of zonal wind(m/s) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	0.58	0.89	-0.62 (08)	2.19 (12)
East China Sea	-1.04	0.85	-2.63 (10)	0.21 (07)
East Sea	1.56	1.51	-0.31 (06)	3.76 (12)

Table 3-1-2-3b Statistics of meridional wind(m/s) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	-1.08	2.26	-4.17 (01)	2.35 (07)
East China Sea	-1.98	3.007	-5.39 (01)	3.18 (07)
East Sea	-1.21	2.08	-4.56 (01)	1.28 (07)

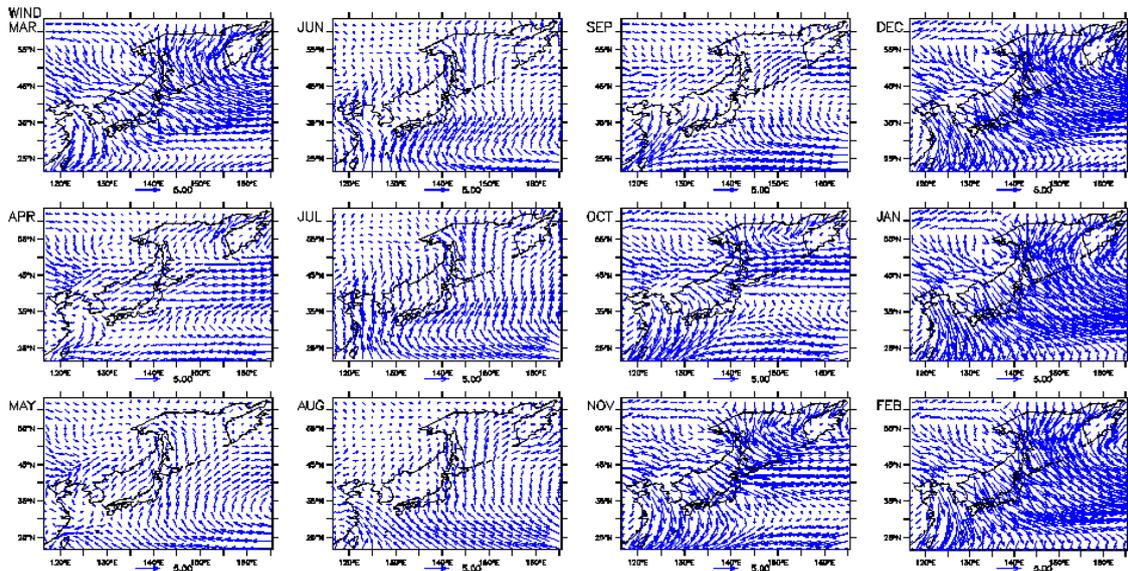


Fig. 3-1-2-5 Monthly mean 10m wind vectors in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

2) 경년변화(Fig. 3-1-2-6)

해상풍 자료에서 남북방향과 동서방향 각각에 대하여, 경험직교함수 분석을 통해 주요 경년변동성을 파악하고자 하였다.

황해의 동서방향 풍속 변동성은 황해 중앙부보다는 연안역에서 크게 나타났으며, 다른 변수들과 마찬가지로 1990년대 후반부를 기준으로 이전에는 동풍계열이 우세하다가 2000년대 이후에는 서풍계열이 우세해지는 변화를 보였다. 남북방향의 변동성은 연안역보다는 황해 중심부에서 우세하게 나타나는 모드로서 3~5년 주기의 변동성이 우세하게 나타났다.

동중국해의 동서방향 풍속의 경년변동성은 동중국해 북동부 해역에서 가장 크게

나타나는 데, 5~10년 주기의 변동성이 큰 것으로 보인다. 남북방향 풍속의 경우는 장강유역에서의 변동성이 가장 크게 나타났고, 그 1998년을 기준으로 이전에는 그 변동성이 크고 평균보다 작았으나 이후에는 단주기 변동성이 줄어들어 대신 평균보다는 큰 값을 보이는 것으로 나타났다.

동해의 경우, 동서방향 풍속은 동해 북부에서의 변동성이 가장 크게 나타났으며 시간적으로는 1981, 1987, 1995년에는 평균보다 동해 북부의 풍속이 약하고 1988, 1998, 2003, 2005, 2012년 등의 해에는 평균보다 풍속이 강한 해로 나타났다. 남북방향의 풍속은 연안역보다는 중앙부에서의 변동성이 크게 나타났으며, 3~5년 주기의 변동성이 우세하게 나타났다.

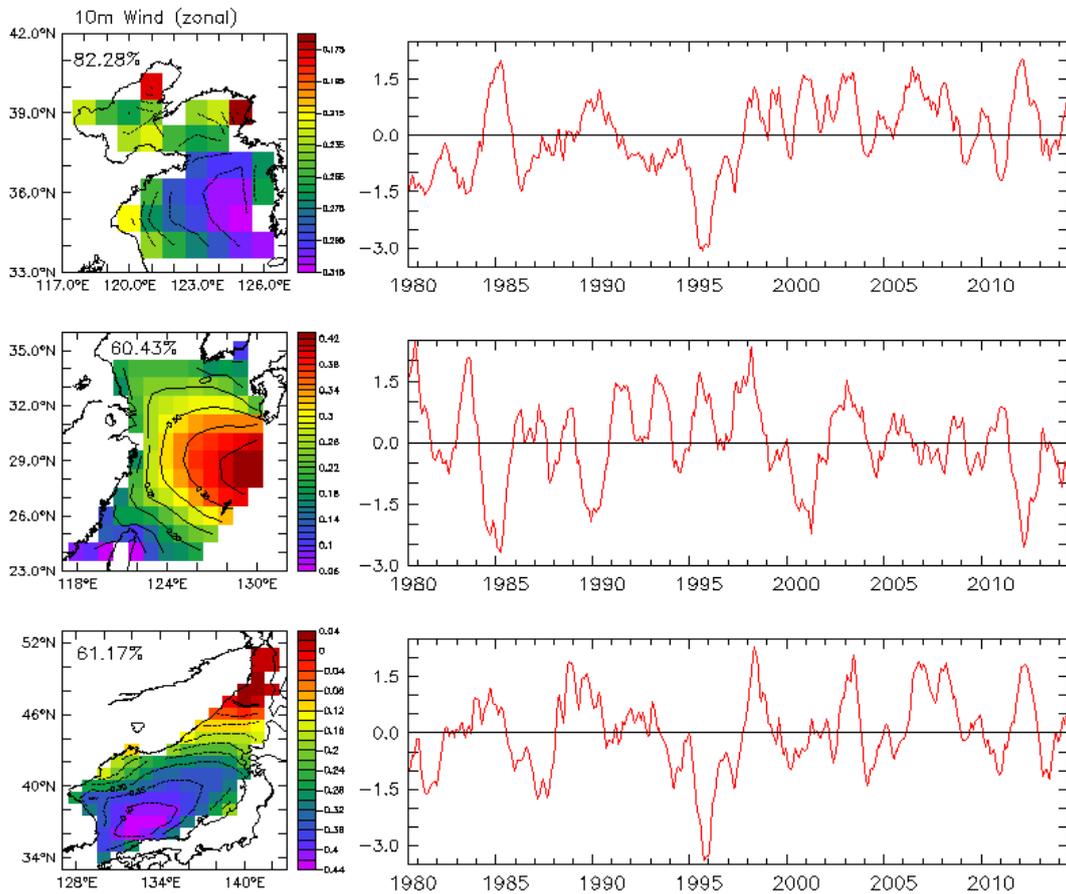


Fig. 3-1-2-6a The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim 10m wind speed(zonal).

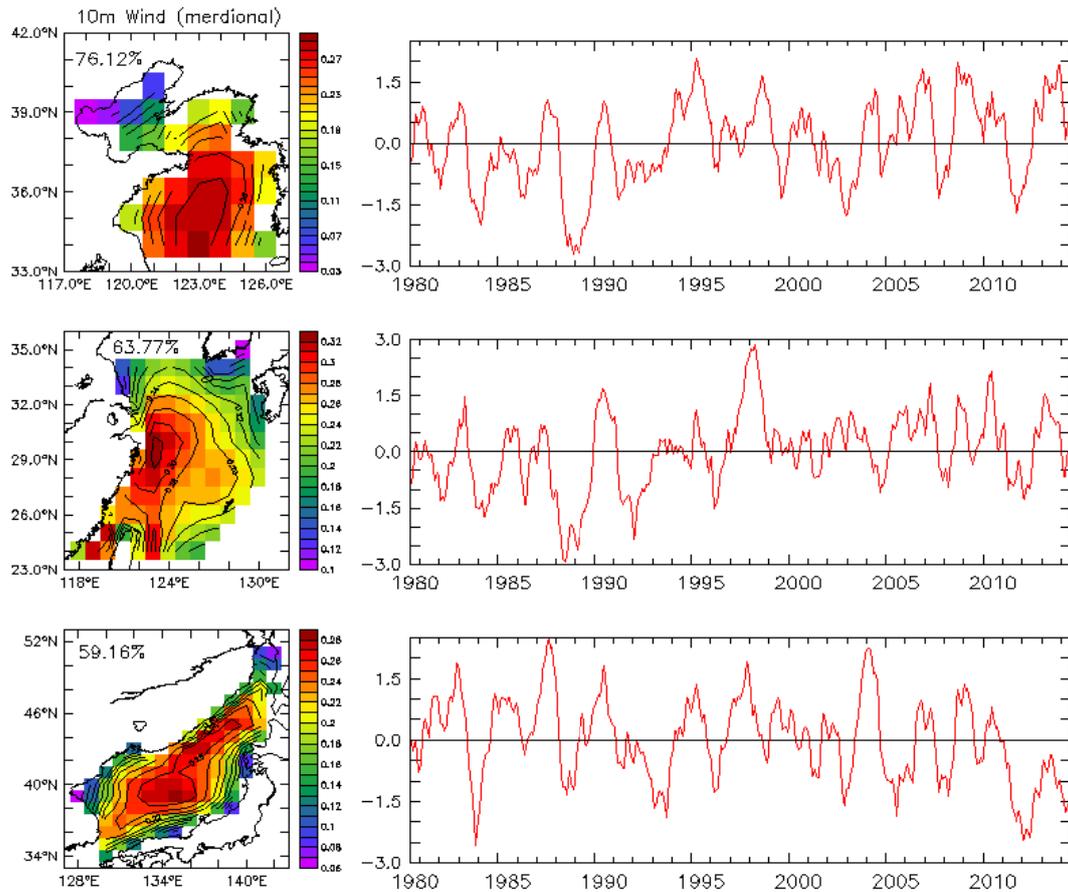


Fig. 3-1-2-6b The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim 10m wind speed(meridional).

라. 상대습도

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-7, Table 3-1-2-3)

우리나라 주변해역의 해면 상대습도는 일반적으로 여름철 습도가 높고 겨울철에 낮은 계절 대비가 뚜렷하게 나타난다.

황해의 연평균 상대습도는 73.6%로써 동중국해와 동해에 비해서는 다소 낮은 편이고 겨울철 최솟값은 12월 평균 65.9%로 나타났고, 여름철 최댓값은 7월 평균 87.5%로 나타나 계절편차가 가장 크다.

동중국해의 연평균 상대습도는 77.0%로써 황해나 동해에 비해서 가장 높은 값을 보였으며, 겨울철 최솟값은 12월 평균 70.3%, 여름철 최댓값은 6월 평균 85.4%로 나

타나 상대적으로 연 최고 상대습도는 황해와 동중국해에 비해서 다소 낮게 나타나는 특징이 있다.

동해의 연평균 상대습도는 75.5%로 황해와 동중국해의 중간정도이며, 겨울철 최솟값은 3월 평균 68.4%, 여름철 최댓값은 7월 평균 87.36%로 나타나, 동해는 다른 해역에 비해서 늦겨울에 상대습도가 최소가 되는 특징을 보였다.

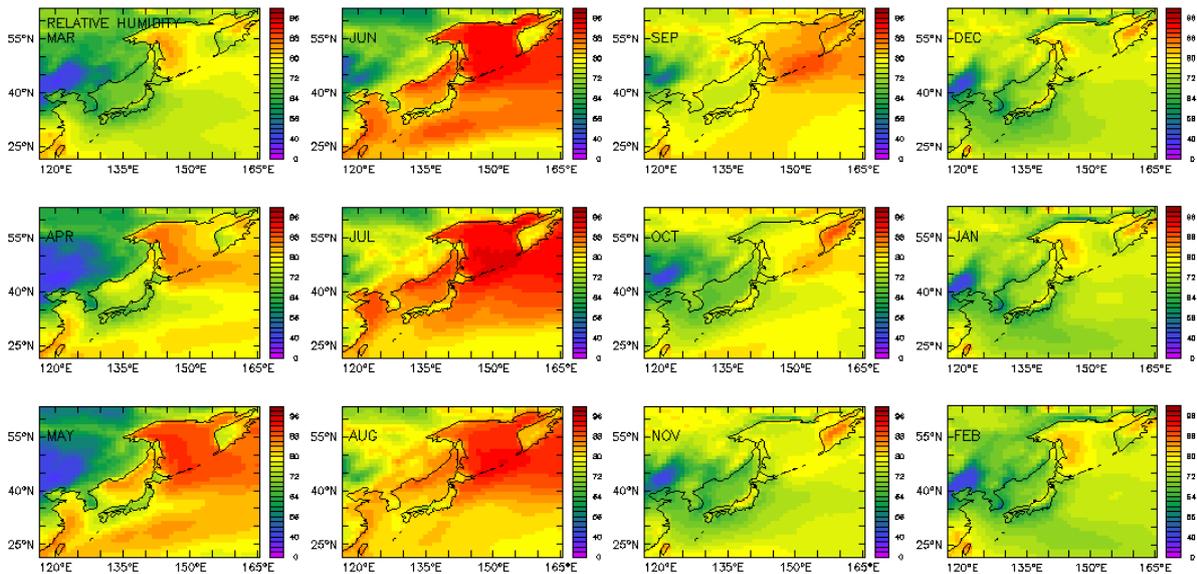


Fig. 3-1-2-7 Monthly mean relative humidity(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Table 3-1-2-4 Statistics of relative humidity(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	73.62	7.81	65.85 (12)	87.51 (07)
East China Sea	77.04	5.13	70.27 (12)	85.40 (06)
East Sea	75.45	7.24	68.35 (03)	87.36 (07)

2) 경년변동 (Fig. 3-1-2-8)

해면 상대습도 자료의 경험직교함수 분석 결과, 황해는 한국 해역보다 중국 측에서 제1모드 변동성이 우세하게 나타났으며, 발해만 에서 가장 크고, 시간적으로는 2~7년

정도의 복잡한 변동성을 보였다.

동중국해의 경우는 장강 북부와 낙동강 하구역에서 가장 큰 변동성이 나타났으며, 쿠로시오 해역보다는 동중국 대륙붕 해역에서 일반적으로 크게 나타났다. 시간변동성을 보면 2~7년의 변동성과 더불어 1990년대 이전과 2000년대 이후의 모두가 상반되게 나타남을 알 수 있다.

동해는 울릉분지를 포함하는 동해 남서부에서 변동성이 크게 나타났으며, 2000년대를 기준으로 이전과 이후가 뚜렷하게 대비된다.

제1모드가 차지하는 비율은 황해 및 동중국해의 경우 77%를 상회하나, 동해의 경우는 50% 정도로서 상대적으로 크지 않다.

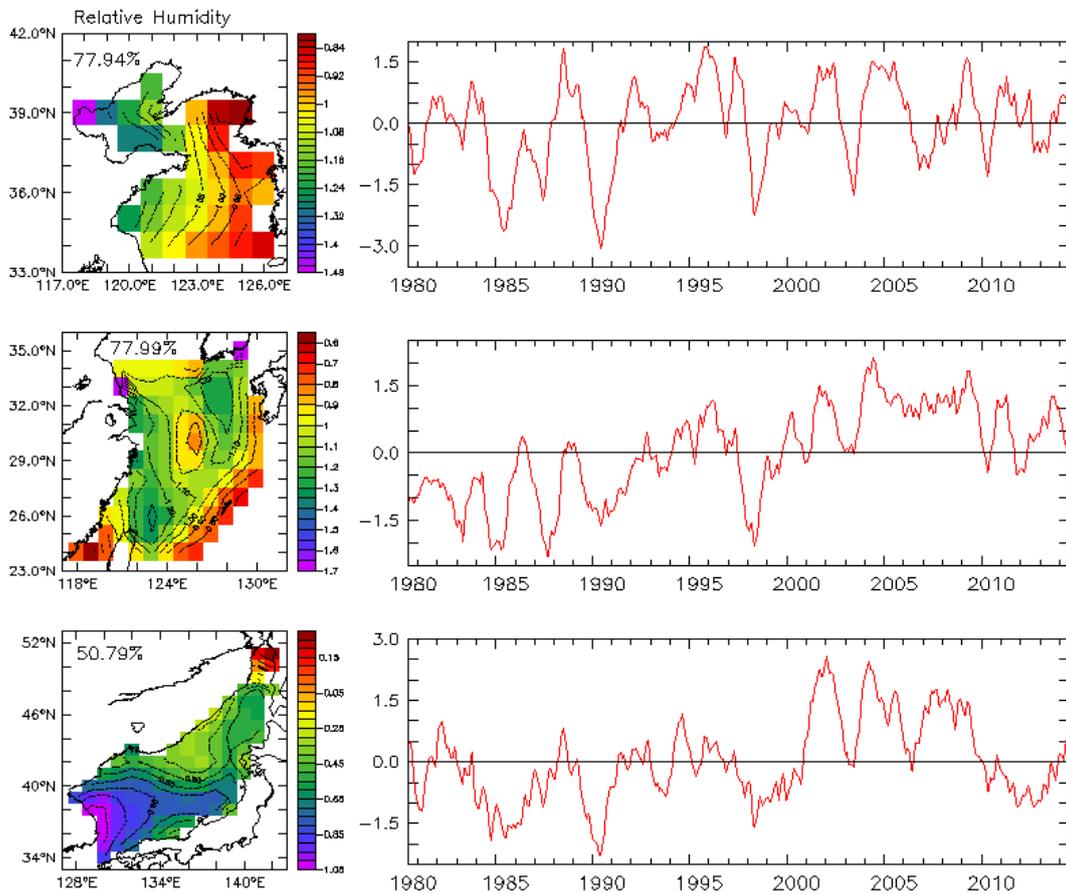


Fig. 3-1-2-8 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim relative humidity.

마. 단파복사량

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-9)

ERA-interim 자료에서 해면으로 하강하는 단파 복사량의 월평균 값은 Fig. 3-1-2-9에서 보는 바와 같이 여름과 겨울이 뚜렷이 대비된다.

황해의 연평균 단파복사량은 186.91 W/m^2 로 겨울철 최저값은 12월 평균 93.33 W/m^2 , 여름철 최고값은 5월 평균 260.79 W/m^2 로 나타나 한 여름에는 상대적으로 구름의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

동중국해의 연평균 단파복사량은 185.79 W/m^2 로 황해와 별 차이가 없고, 겨울철 최저값은 12월 평균 106.73 W/m^2 , 여름철 최고값은 7월 평균 263.55 W/m^2 로 나타났다.

동해의 연평균 단파복사량은 171.89 W/m^2 로 황해 및 동중국해에 비해서 약간 작은 값이나 대동소이하다. 겨울철 최저값은 12월에 68.77 W/m^2 로 상대적으로 다른 해역에 비해서 작으며, 여름철 최고값은 6월 평균 256.36 W/m^2 로 다른 해역보다 약간 작은 편이다.

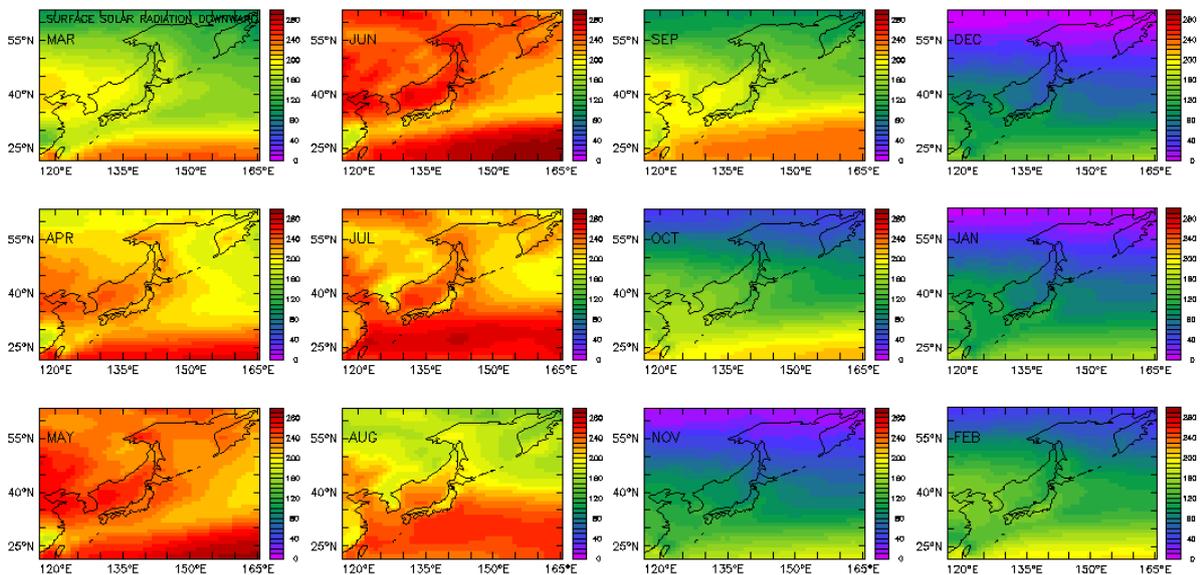


Fig. 3-1-2-9 Monthly mean shortwave radiation(W/m^2) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Table 3-1-2-5 Statistics of shortwave radiation(W/m^2) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	186.91	61.77	93.33 (12)	260.79 (05)
East China Sea	185.79	55.07	106.73 (12)	263.55 (07)
East Sea	171.89	69.08	68.77 (12)	256.36 (06)

2) 경년변동(Fig. 3-1-2-10)

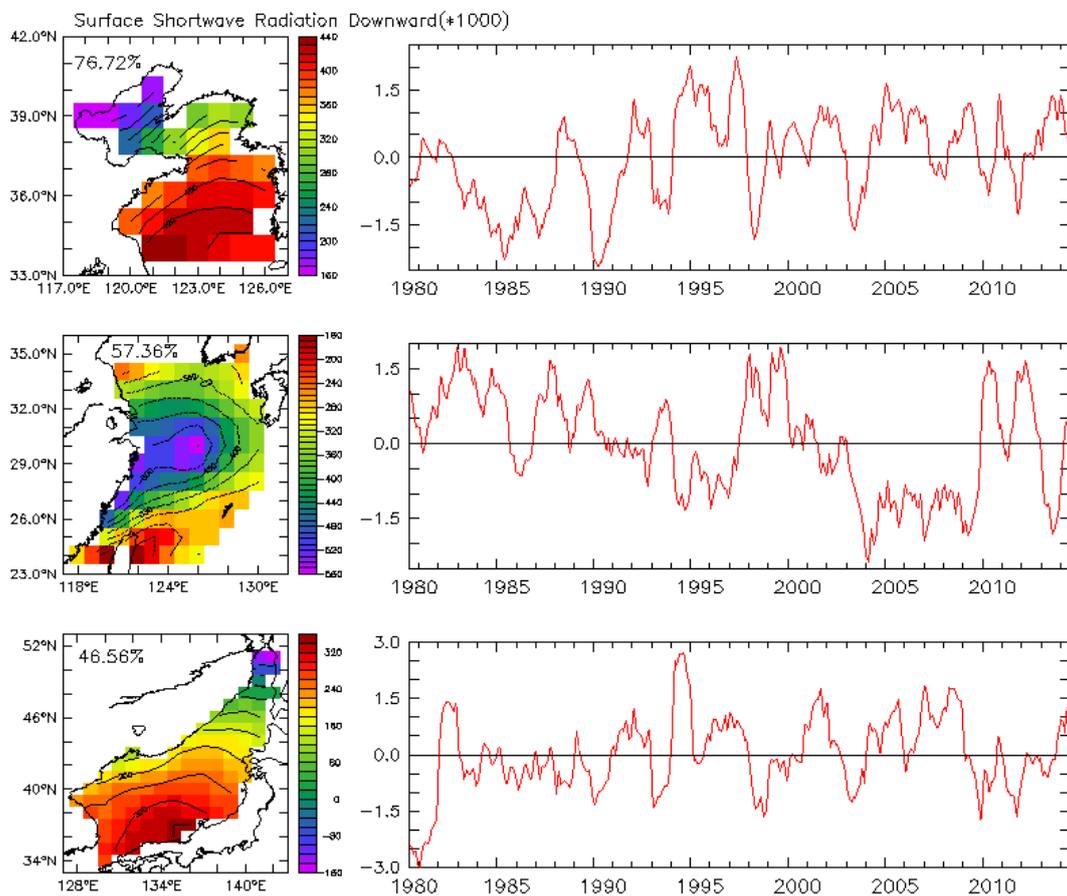


Fig. 3-1-2-10 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim shortwave radiation.

해면으로 투과되는 월평균 단파복사량의 경험직교함수 분석 결과, 황해는 북부해역보다 남부해역에서 제1모드에 의한 변동성이 우세하게 나타났으며, 1998년 이전에는

변동주기가 3~5년이었던가 2000년대 이후는 2~5년으로 그 주기가 다소 짧아진 특징을 보인다.

동중국해는 중앙부에서의 변동성이 가장 우세하게 나타났으며, 초기 양의 모드에서 후반부 음의 모드로 변해가는 장주기 경향성이 뚜렷하게 나타난다.

동해는 남부 해역에서의 변동성이 뚜렷하게 나타났으며 1981년과 1994년이 대표적으로 대별되는 해로 나타났다.

제1모드가 차지하는 비율은 황해가 76.7%, 동중국해가 57.4%, 동해가 46.6%로 동중국해 및 동해는 상대적으로 1모드가 차지하는 비율이 높지 않았다.

바. 장파복사량

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-11, Table 3-1-2-6)

대기로부터 해양으로 복사되는 장파복사량 역시 단파복사량과 마찬가지로 기본적으로는 저위도에서 높고 고위도에서 낮은 위도별 분포를 보이며, 여름철에 높고 겨울철에 낮은 계절대비가 뚜렷하게 나타난다.

황해의 연평균 장파복사량은 316.87 W/m^2 으로 나타났으며, 겨울철 최저값은 2월평균 252.37 W/m^2 , 여름철 최댓값은 8월평균 401.99 W/m^2 로 나타났다.

동중국해의 연평균 장파복사량은 370.52 W/m^2 로서 황해보다는 높으며, 겨울철 최저값은 327.71 W/m^2 , 여름철 최댓값은 422.13 W/m^2 으로 계절차이가 다른 해역에 비해서는 상대적으로 작게 나타났다.

동해의 연평균 장파복사량은 307.42 W/m^2 로서 동중국해보다는 작고 황해와 비슷하였다. 겨울철 최저값은 250.22 W/m^2 , 여름철 최댓값은 387.31 W/m^2 로 나타났다.

Table 3-1-2-6 Statistics of thermal radiation(W/m^2) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	316.87	55.39	252.37 (02)	401.99 (08)
East China Sea	370.52	35.73	327.71 (01)	422.13 (08)
East Sea	307.42	49.39	250.22 (02)	387.37 (08)

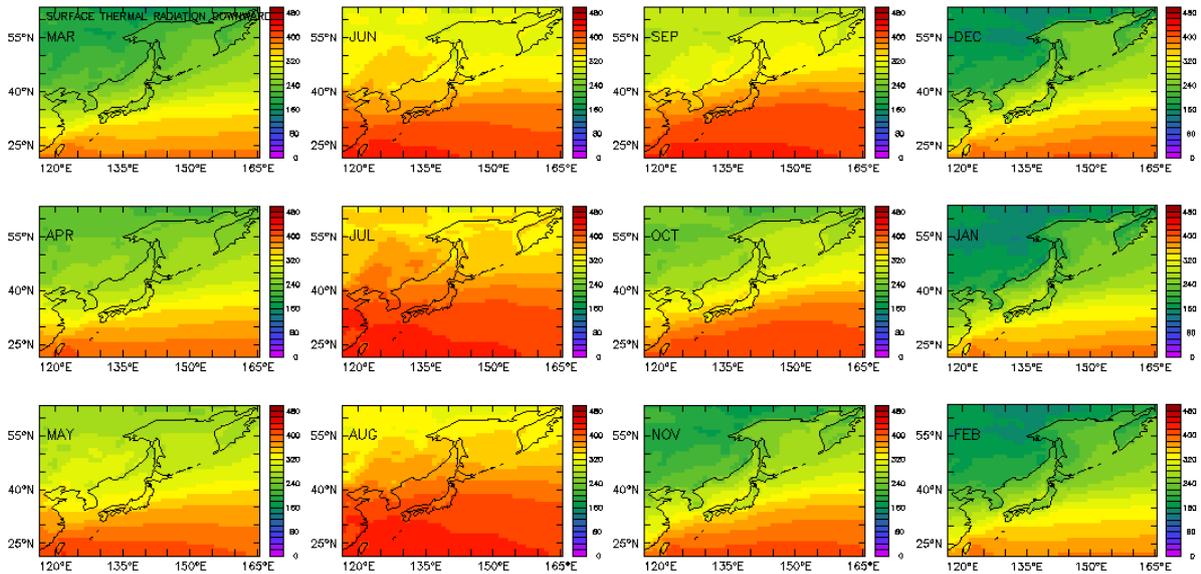


Fig. 3-1-2-11 Monthly mean thermal radiation(W/m^2)in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

2) 경년변화(Fig. 3-1-2-12)

대기에서 해면으로 복사되는 월평균 장파복사량의 경험직교함수 분석 결과, 황해는 산둥 반도 이남해역에서의 변동성이 크게 나타나며, 1998년 이전에는 3~8년 주기로 강해졌다가 이후에는 다소 약해지는 양상을 보인다.

동중국해는 장강 저염수 확장 해역에 해당하는 중앙부에서 강하게 나타나는 데, 역시 1998년에 가장 대표적으로 나타났으며 이전에는 다소 장주기적 성향이 이후에는 단주기적이며 그 세기가 크지 않은 양상으로 나타난다.

동해의 경우는 동서로 뻗어 있는 극전선 일대에서 나타나는 변동성으로서 2000년대 이전과 이후가 대별되는 양상이다.

제1모드가 차지하는 비율은 황해가 85.2%, 동중국해가 67.2%, 동해가 50.3% 정도로 나타났다.

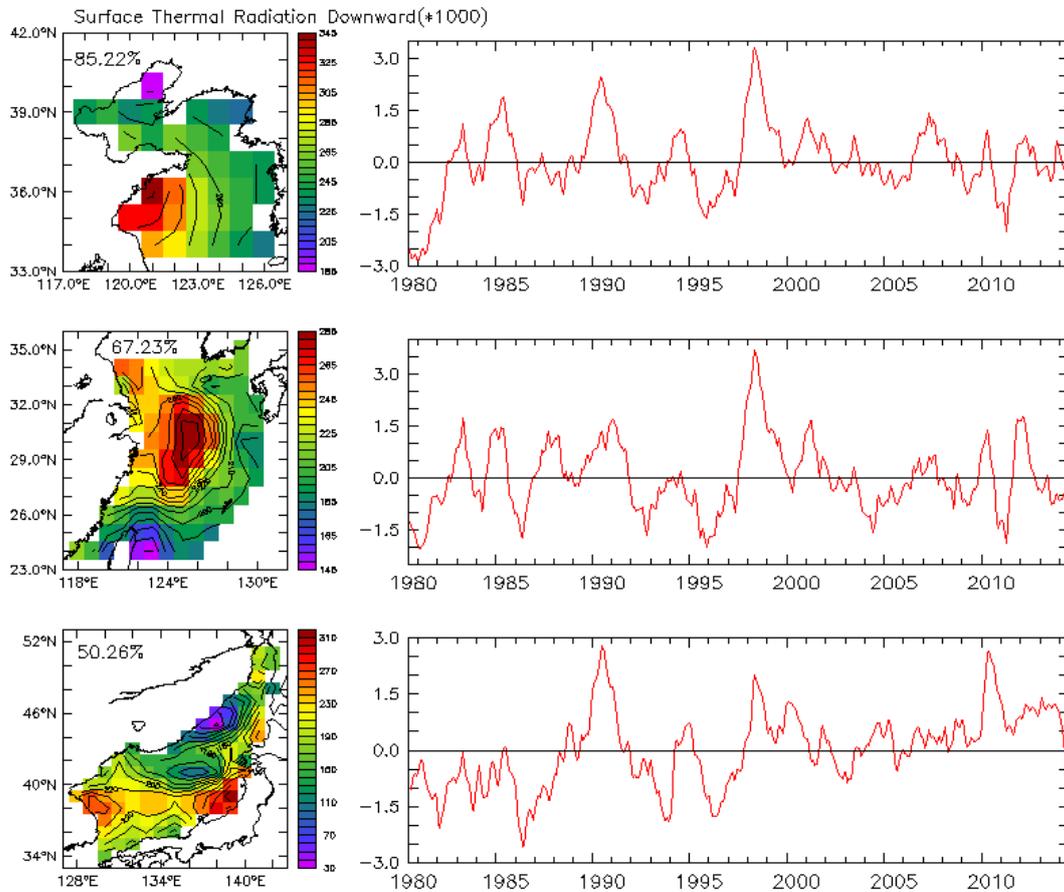


Fig. 3-1-2-12 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim thermal radiation.

사. 운량

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-13, Table 3-1-2-7)

ERA-interim 자료로 본 구름의 양은 일반적으로 겨울철에 많으며, 여름철에는 장마의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 연평균 50 ~ 60% 정도 구름에 덮여 있으며, 상대적으로는 황해가 작고 동중국해와 동해는 비슷하다.

황해의 연평균 운량은 50.91%로 나타났으며, 10월에 최저인 40.28%, 6월에 최고인 61.07%로 연간 차이가 상대적으로 크지 않다.

동중국해의 연평균 운량은 58.56%이며, 최저값은 10월에 47.01%, 최고값은 6월로 68.92%로 나타나 황해보다는 높지만 연간 차이는 비슷한 것으로 나타났다.

동해의 연평균 운량은 59.18%로 세 해역 중 가장 높으며, 최저값은 3월에 68.35%, 최댓값은 7월에 87.76%로 나타났다.

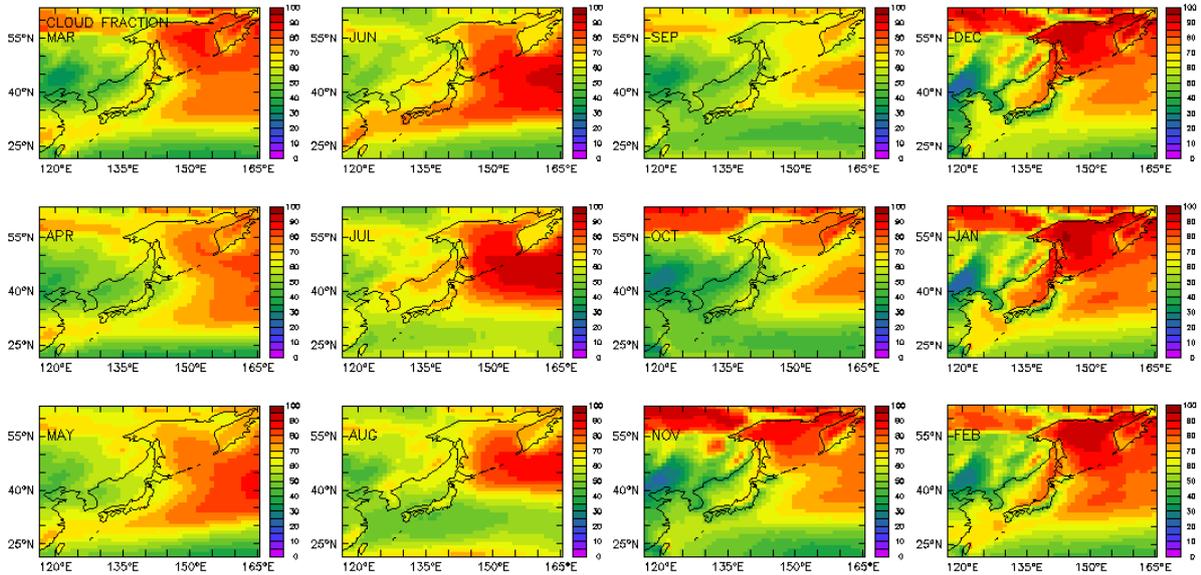


Fig. 3-1-2-13 Monthly mean total cloud cover(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Table 3-1-2-7 Statistics of total cloud cover(%) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	50.91	5.94	40.28 (10)	61.07 (06)
East China Sea	58.56	7.30	47.01 (10)	68.92 (06)
East Sea	59.18	8.23	68.35 (03)	87.36 (07)

2) 경년변화(Fig. 3-1-2-14)

운량의 경년변화를 경험적교함수 분석 결과, 제1모드의 특성으로 살펴보면 다음과 같다. 황해의 경우 중북부해역에서의 변동성이 크게 나타났는데, 시간적으로는 1986년과 1997년이 대별되는 양상으로 이런 변동성의 주기는 약 2~4년 정도로 나타났다.

동중국해는 변동성이 크게 나타나는 해역이 동중국해 북부와 중국 남부 연안으로

나타났으며, 1990년대 중반 이전과 2000년대 후반부가 대별되는 특징을 보인다.

동해는 북부 해역 일본분지에서 가장 크게 나타나는 데, 1980년대와 2000년대가 대별되는 특징을 보인다.

제1모드가 차지하는 비율은 황해가 85.3%, 동중국해가 72.4%, 그리고 동해가 65.5% 정도로 나타났다.

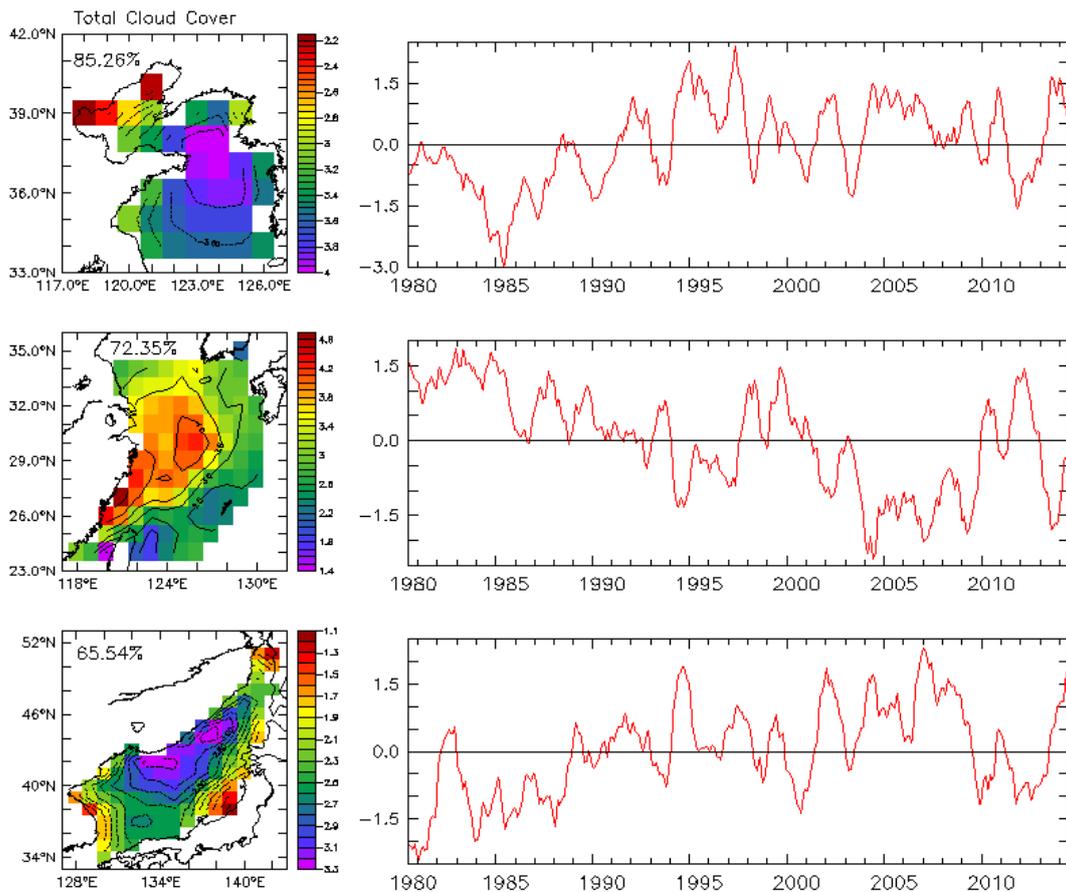


Fig. 3-1-2-14 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim total cloud cover.

아. 강수량

1) 계절변동(Fig. 3-1-2-15, Table 3-1-2-8)

ERA-interim 자료에서 나타난 강수량의 월별 분포를 Fig. 3-1-2-15에 나타내었

다. 동중국해는 연중 강수량이 많아 보이며, 황해 및 동해는 장마전선의 영향을 크게 받는다.

황해의 월평균 강수량은 59.2 mm/m², 연간 강수량은 710.4 mm/m² 정도로서 세 해역 중에서 가장 적은 강수량을 보인다. 월평균 강수량이 가장 적은 달은 1월로써 22.8 mm/m² 정도이고, 가장 많은 달은 7월로써 134.8 mm/m²이다.

동중국해는 강수량이 가장 많은 해역으로 월평균 강수량은 114.9 mm/m²로써 연간 강수량으로 환산하면 1378.8 mm/m²이 된다. 연중 최저 강수량을 보이는 달은 12월로써 평균 63.4 mm/m², 최고 강수량은 6월에 194.6 mm/m²을 보인다.

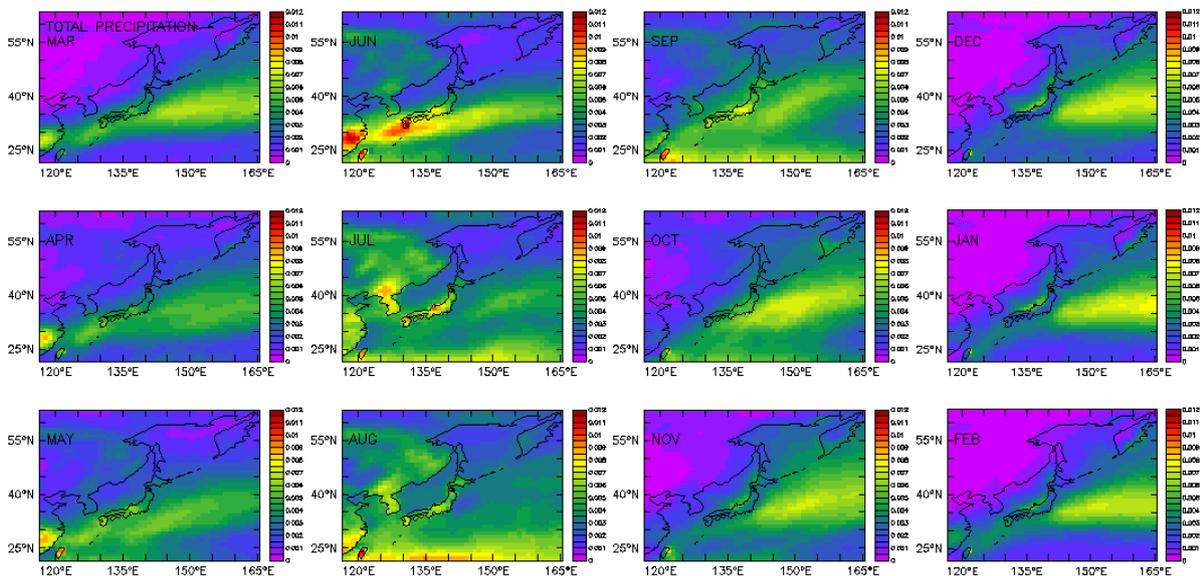


Fig. 3-1-2-15 Monthly mean total precipitation(mm/m²) in the seas around Korea from the ERA-interim data (1981~2010).

Table 3-1-2-8 Statistics of total precipitation(mm/m²) in the seas around Korea from ERA-interim data (1981~2010).

Region	Annual mean	Standard deviation	Lowest (month)	Highest (month)
Yellow Sea	59.2	38.8	22.8 (01)	134.8 (07)
East China Sea	114.9	38.4	63.4 (12)	194.6 (06)
East Sea	77.3	17.3	54.3 (03)	106.9 (09)

동해의 경우 월평균 강수량은 황해보다 많고 동해보다 적은 77.3 mm/m^2 으로써 연중 최저 강수량이 나타나는 달은 3월로 54.3 mm/m^2 정도이고, 최고 강수량은 9월에 평균 106.9 mm/m^2 을 나타낸다.

2) 경년변화(Fig. 3-1-2-16)

강수량의 경년변동성을 경험직교함수 분석 결과로 보면, 황해의 경우 변동성이 크게 나타나는 해역은 동남부로서 2~5년 주기로 변동하는 것으로 나타났다.

동중국해 강수량은 동중국해 중부에서 그 변동성이 가장 크게 나타나며, 1983, 1998, 2012년도와 1986, 1996, 2004년도가 대비되는 양상이 뚜렷하게 나타나 2~5년 정도의 변동주기가 우세하다.

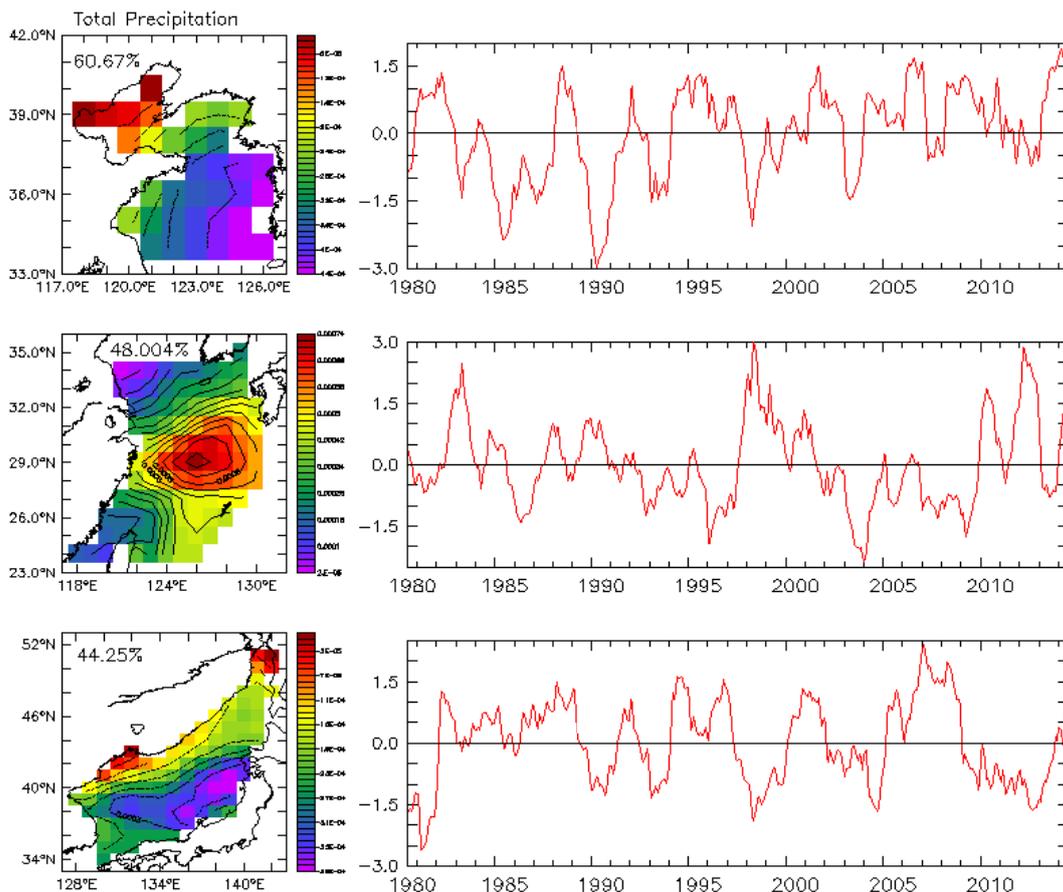


Fig. 3-1-2-16 The first mode of empirical orthogonal function in each regional sea: ERA-interim total precipitation.

동해의 경우는 일본 해안을 따라 변동성이 크게 나타는 것으로 보이며, 3~6년 정도의 비교적 장주기 변동을 하는 것으로 나타났다.

제1모드가 각 해역에서 차지하는 비율은 황해가 60.7%, 동중국해가 48.0%, 동해가 44.3% 정도로써 다른 변수에 비해서는 상대적으로 크지 않다.

3. 과거 재현을 위한 외해경계조건 분석 및 산출

가. 외해 경계 조건 산출 모형

본 모형에서 사용된 외해 경계조건은 유럽의 DRAKKAR 프로젝트 일환으로 영국 해양연구센터(NOC)에서 NEMO 3.2(Nucleus of European Modelling of Ocean)를 기반으로 수행한 3차원 해양순환모형 실험결과를 사용하였다. 모형의 결과는 <http://gws-access.ceda.ac.uk/public/nemo/>에서 수집 가능하다. 이 모형의 적분기간은 1972년부터 2010년까지이고, 수평격자 크기는 1/12도, 연직으로는 75개 수심 층을 사용하였다. 대기강제력은 DRAKKAR 그룹에서 ERA-interim을 기반으로 수정 보완한 DFS4.1 버전의 강제력을 사용하였다.

나. 외해 경계조건 산출 모형의 표층 수온/염분 계절평균장

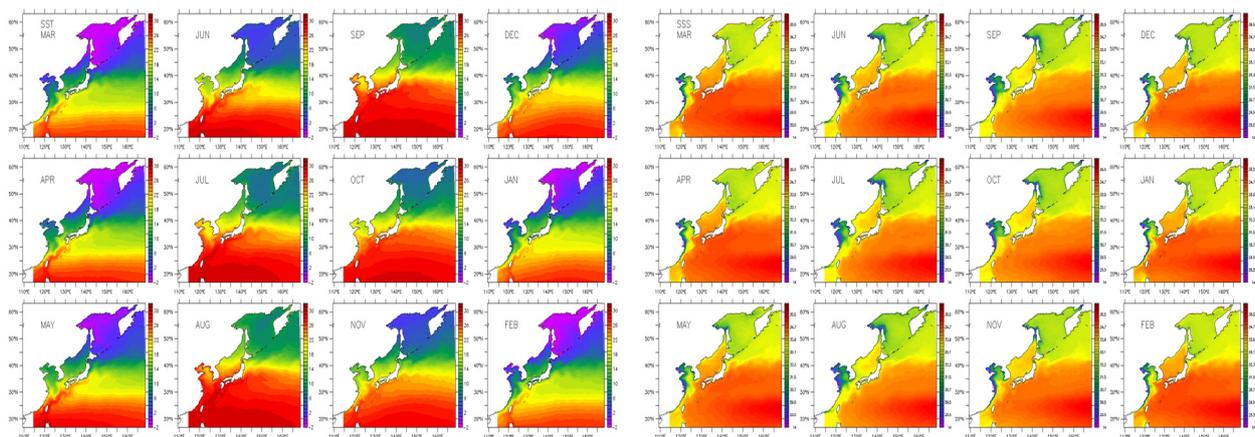


Fig. 3-1-3-1 Surface temperature(left) and salinity(right) climatology of NOC-NEMO 1/12 degree ocean circulation model.

외해 경계조건을 산출하기 위한 모형으로 채택한 NOC-NEMO 1/12도 모형 결과에서 표층 수온과 염분에 대해 월평균장을 산출하여 Fig. 3-1-3-1에 나타내었다. 거시적으로 볼 때 POLCOMS-ERSEM 접합 모형의 경계조건으로 사용하고자 하는 북서태평양 영역에서의 분포는 대체로 양호한 것으로 판단된다.

다. 해류 및 주요해협 수송량

해류 및 주요해협 수송량은 Fig. 3-1-3-2와 같다. 주요 해류의 수송량을 보기 위한 단면은 Fig. 3-1-3-2의 우하단 벡터 그림에서 붉은 색으로 표현하였으며, 상단에는 경년변동성을 좌하단에는 계절변동성을 도시하였다.

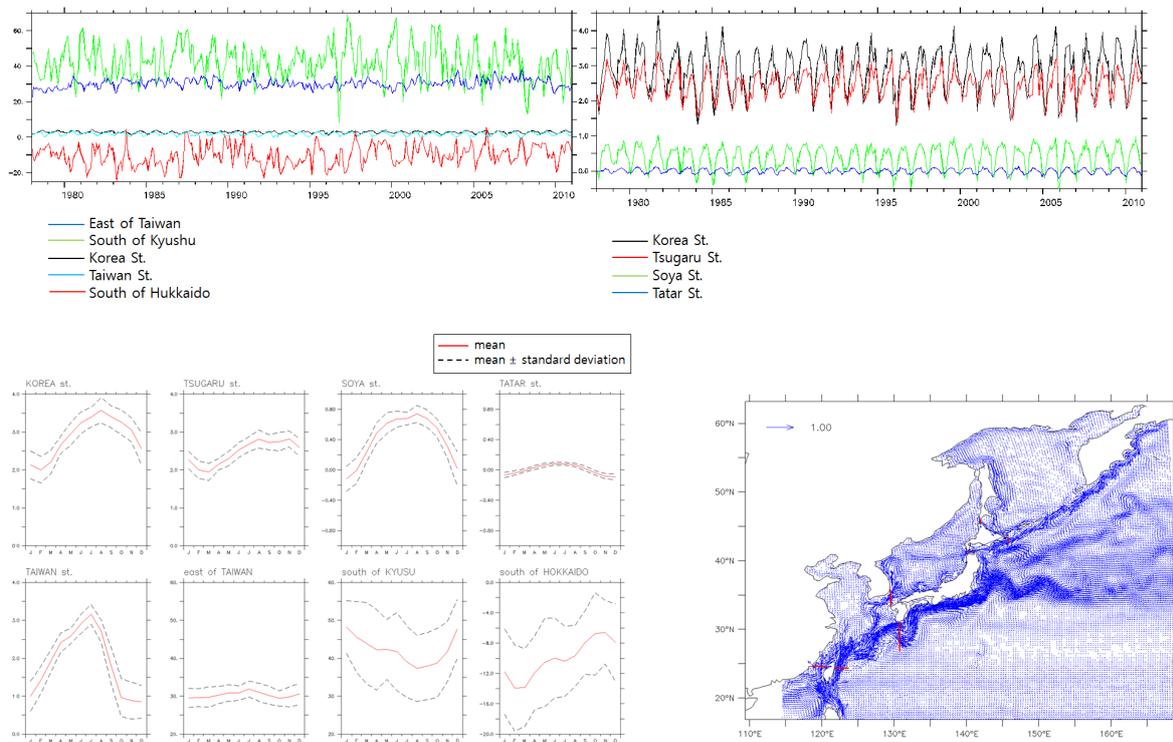


Fig. 3-1-3-2 Volume transport of major straits and annual mean surface current field of NOC-NEMO 1/12 degree ocean circulation model.

대만 동쪽을 통해 동중국해로 유입되는 쿠로시오 해류의 수송량은 30 Sv 전후로써 7월에 최대, 10월에 최소를 나타내지만 계절변동성 및 경년변동성의 크기는 매우 작은 것으로 모사되었다. 대만 서쪽의 대만해협 수송량은 최저 0.8 Sv, 최고 3.2 Sv 정도를

각각 12월과 7월에 나타냈다. 이렇게 동중국해로 유입된 해수는 일부가 대한해협을 통해 동해로 유입되고 대부분은 다시 일본 남쪽의 토카라 해협을 통해 태평양으로 유출되는데, 유출량은 평균적으로 40 Sv이 넘으며, 1월에 최대, 8월에 최소값을 보였다. 이는 대만 동쪽에서 유입되는 쿠로시오수 외에 자체적으로 재순환되는 수송량이 더해졌기 때문이다.

한편 북태평양 아극 순환의 일부로 남하하는 오야시오 해류의 수송량을 홋카이도 동쪽에서 계산한 바에 의하면, 평균 10 Sv 정도로 2월에 최대, 11월에 최소로 나타났다. 동해 통과류의 수송량은 대한해협을 통해 약 2.8 Sv이 유입되어 대부분 쓰가루 해협을 통해서 다시 태평양으로 빠져 나가고 소야해협으로는 0.6 Sv 이하의 작은 양이 여름에 오토츠크 해로 유출되고, 겨울에는 소량의 물이 오토츠크 해에서 동해로 유입되는 것으로 나타났다.

전반적인 해수유동과 수송량의 크기는 알려져 있는 값의 범위에서 비교적 잘 재현된 것으로 생각되어 POLCOMS-ERSEM 모형의 경계조건으로 사용하는 데 큰 무리가 없을 것으로 추론했다.

라. 외해 경계 조건 - 조석/조류

황해 및 동중국해는 조석 및 조류의 영향을 크게 받는 해역으로 해류와 함께 동시에 모사되지 않으면 재현성이 떨어지게 된다. 본 모형에서는 외해 경계조건에 사용할 조석 및 조류 조화상수로서 미국 오리건대학에서 계산 배포하는 TPX07.2 자료로부터 8개 분조(K2, S2, M2, N2, MU2, K1, P1, O1, Q1)를 사용하였다.

마. 외해경계조건 - 영양염

생지화학 모형을 접합한 생태계 모형을 적분하기 위해서는 영양염과 다른 변수들의 외해 경계조건도 필수적이다. 그러나 외해 경계 값으로 부여할 만한 좋은 관측 자료나 모형결과를 찾는 것이 쉽지 않은 실정이기 때문에 본 연구에서는 영양염에 대해서만 WOA09 (World Ocean Atlas, 2009) 자료를 이용해 외해경계에서 월평균 값으로 경년 변동 없이 질산염, 인산염, 규산염의 농도를 부여하였다. 다른 생지화학 변수들은 경계조건 내부 해역에서 생태계 과정에 의해서 산출되는 값과 동일한 값을 갖도록 조정하여 사용하였다.

4. 과거 재현을 위한 하천경계조건 분석 및 산출

가. 하천방류량

하천방류량은 기존 모형에서 연평균으로 343개의 하천에 적용했던 사항을 개선하여 31개 주요 하천에 대해서만 GRDC (Global Runoff Data Centre, http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html) 월별 방류량을 기준으로 산정하였다. 이렇게 하천 개수를 줄인 이유는 모형이 하천에서 방류되는 담수 및 영양염 농도에 매우 민감하기 때문에 모형의 모사 정도를 검증하고 개선하는 데에 있어 복잡성을 줄이고, 원인 분석을 상대적으로 용이하게 하기 위함이다.

Table 3-1-4-1 Discharge data(m³/s) of top ten rivers for model river boundary condition.

River/area	Annual mean discharge	Lowest (month) discharge	Highest (month) discharge
Changjiang	27,899 ± 12,549	11,151 (01)	44,562 (07)
Amur	9,561 ± 6,816	1,359 (02)	18,710 (09)
Menjiang	1,270 ± 784	472 (12)	2,678 (05)
Huanghe	1,393 ± 740	2,617 (01)	578 (09)
Fuchunjiang	925 ± 416	370 (01)	1,477 (07)
Huai	836 ± 573	292 (01)	1,893 (08)
Aprok	676 ± 440	132 (02)	1,369 (08)
Uda	530 ± 378	75 (02)	1,036 (09)
GHAASbasin829	511 ± 344	157 (01)	1,121 (08)
Hangang	509 ± 408	140 (01)	1,266 (07)

Table 3-1-4-1과 Fig. 3-1-4-1는 상위 10개 하천에 대한 방류량의 통계치와 계절변동성을 나타낸 것이다. 장강의 유출량은 상위 10개 유출량 대비 63.25%를 차지할 정도로 압도적이며, 아무르 강은 21.68%에 해당한다. 황하 등 나머지 하천의 방류량은 모두 3% 미만으로 그 영향이 장강과 아무르 강에 비해서 상대적으로 미미할 것으로 사료된다.

대부분 하천의 방류량은 여름철에 최대 겨울철에 최소값을 보였으며, 장강의 경우 7월 방류량이 가장 크고, 아무르 강은 9월, 황하는 8, 9월에 방류량이 많았다.

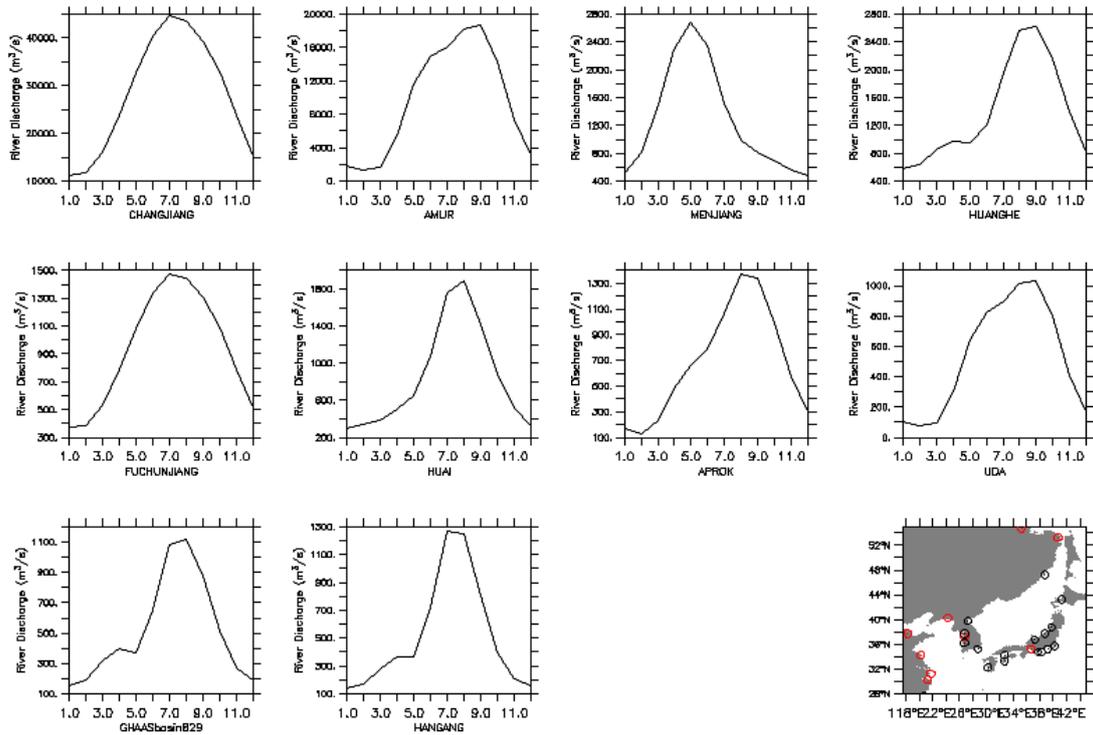


Fig. 3-1-4-1 Monthly river discharge of top ten rivers in the model domain.

나. 영양염/유기물 부하량

하천으로부터 방류되는 영양염의 농도는 이전 모형에서 사용된 Global NEWS 값에서 갱신된 Global NEWS 2 (Nutrient Export from Water Sheds 2; <http://marine.rutgers.edu/globalnews/>) 자료로부터 연평균 용존 무기질소(DIN), 용존 무기인(DIP), 용존 규산염(Si), 용존 유기탄소(DOC), 용존 유기인(DOP), 입자성 유기탄소(DOC), 입자성 무기인(PP), 입자성 무기질소(PN) 값을 부여하도록 설계하였다.

Fig. 3-1-4-2는 주요 영양염의 하천별 부하량을 분석한 파이차트로써 용존 무기질소(DIN) 농도는 Huai > Fuchunjiang > Han > Menjiang/Changjiang 순이었고, 용존 무기인(DIP)은 Huai > GHAASbasin829 > Han > Fuchunjiang > Changjiang, 규산염(Si)은 Fuchunjiang > GHAASbasin829 > Uda > Huai 순이었다.

용존 유기물의 경우 용존 유기탄소(DOC)의 농도는 거의 모든 하천에서 비슷한 규모를 보였으며, 용존 유기질소(DON)도 대부분 비슷하지만 Huai > Huanghe > Han 순의 농도를 보였다. 용존 유기인(DOP) 역시 거의 모든 하천에서 비슷한 규모로 나타났다.

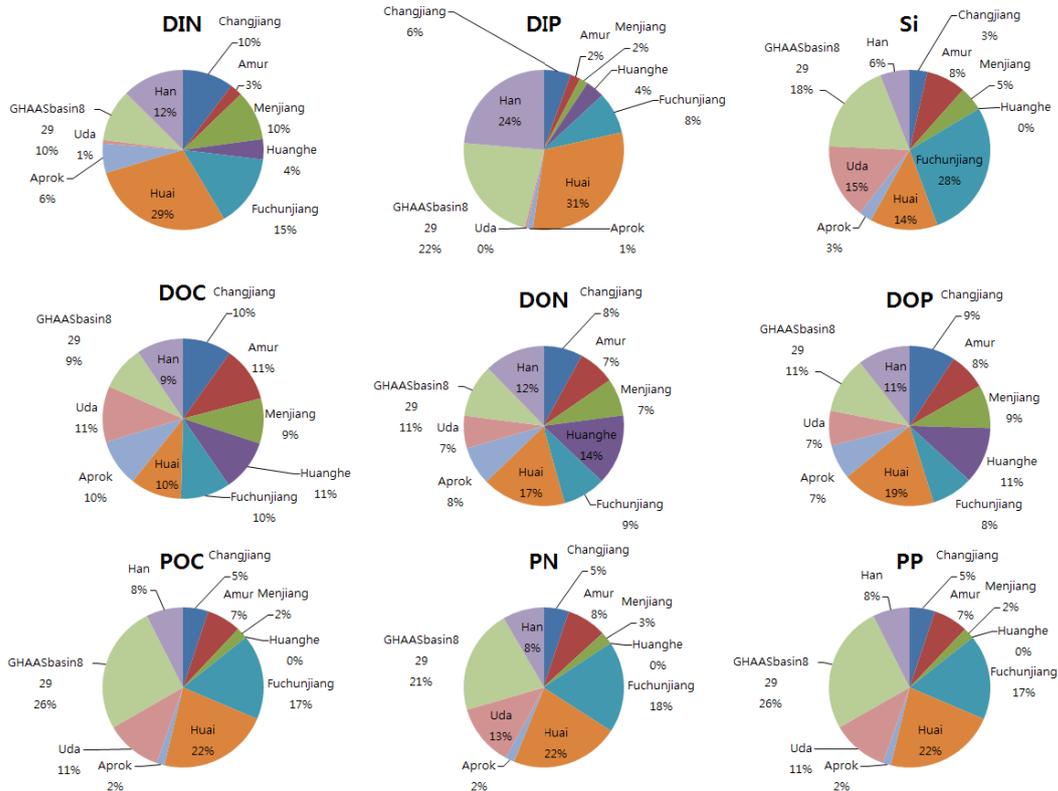


Fig. 3-1-4-2 Comparison of annual mean nutrients from the top ten rivers in the model domain.

입자성 또는 고형 유기물의 경우는 하천에 따라 차이가 뚜렷하게 나타났다. 고형 유기탄소(POC) 농도가 가장 많은 곳은 GHAASbasin829이었고 그 다음으로 Huai, 그리고 Fuchunjiang 순이었다. 이런 농도 순서는 입자성 질소나 입자성 인의 경우에도 같은 순으로 나타났다.

5. 검증용 자료 수집 및 분석

가. 위성자료

해양 순환-생태계 모형을 검증하기 위해서 인공위성 도출 표층수온 자료, 해수면 자료 그리고 월별 엽록소a 자료와 현장관측 자료를 수집하여 분석하였다. 표층수온 자료는 AVHRR 기반 자료를 활용하였으며, 해수면자료는 TOPEX/Poseidon, Jason1/2 및

유럽위성들을 활용한 자료를 이용하였다.

인공위성 도출 엽록소a 자료는 유럽항공우주국(ESA: European Space Agency)에서 배포하는 OCCCI(Ocean Colour Climate Change Initiative; <http://www.esa-ocean-colour-cci.org>) 버전 2 자료(1998년 1월 ~ 2013년 12월)를 netCDF 형식으로 수집하여 이로부터 기후평균 월평균장을 산출하였다. OCCCI 자료는 2017년 4월 현재 버전 3.1로 갱신되었다.

나. 현장관측 자료

해양 순환-생지화학 접합 생태계 모형을 검증하고 개선하기 위한 현장관측 자료로는 WOD13 (NOAA World Ocean Data 2013)과 국립수산과학원 정선관측 자료 (수온, 염분, 영양염), 국립해양조사원 자료, 일본 JODC 자료 등을 수집하여 모형결과와 비교할 수 있는 방식으로 자료 변환을 하였다.

대표적으로 국립수산과학원에서 2개월 간격으로 관측하는 정선해양관측 자료를 1980년부터 2010년까지 수집하여 netCDF 형식으로 변환하였으며, 이 자료를 이용하여 월평균 기후장을 도출하고 이를 모형 결과의 월평균 기후장과 비교하였다.

한편 한국해양과학기술원(2015)은 대한해협 서수도의 한 정점 (M; 129.098E, 34.790N) 에서 2006년부터 비교적 지속적으로 물리 및 생지화학 변수들을 관측해 왔다. 대한해협 정점 M 자료는 2~4주 간격으로 수온 및 염분 21개 깊이, 엽록소a 8개 깊이, 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 10개 깊이에서 관측하였으며, 이를 모형 결과와 비교하기 위해서 월 평균 기후 평균장으로 변환하였다.

6. 모형 검증을 통한 순환-생태계 접합모형 개선

OCCCI-v2 엽록소 위성자료로부터 기후 평균장을 산출하고 이를 모형 결과와 비교한 결과, 전반적인 분포와 값의 크기가 유의한 범위 내로 모사되도록 모형을 개선하였으나 쿠로시오 경계역에서 겨울철에 다소 높은 번성이 발생하는 문제는 앞으로 계속 개선해야 할 과제이다(Fig. 3-1-6-1).

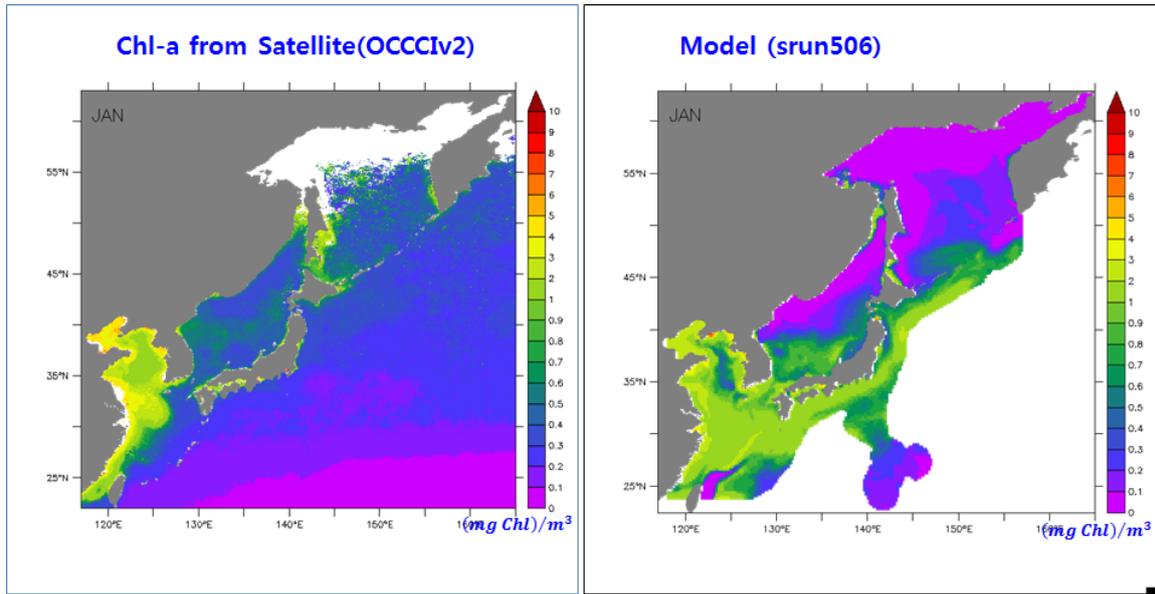


Fig. 3-1-6-1 Chlorophyll_a concentration from the OCCCI-v2 satellite data(left) and that from the surface model result(right) (ex.: mean climatology in January).

수온 및 염분에 대한 모형의 재현 정도를 평가하기 위해 WOA13 자료와 모형 결과의 계절평균장을 비교하였다. 황해의 표층 수온은 봄과 여름은 낮게 모사되고 가을과 겨울은 높게 모사되었다. 여름철에는 특히 황해 북부가 높게 모사되었다. 표층 염분의 경우 장강 영향을 받는 곳을 제외하고 모든 계절에 전반적으로 높게 모사되었다 (Fig. 3-1-6-2).

동중국해 표층수온의 경우 황해와 마찬가지로 봄, 여름에 낮게 모사하고 가을과 겨울에 높게 모사하였다. 염분은 봄에만 다소 높게 모사하였고 다른 계절엔 전반적으로 다소 낮게 모사하였다 (Fig. 3-1-6-3).

동해의 경우 봄, 여름엔 표층수온을 낮게 모사하고 가을과 겨울에는 높게 모사하였으며, 특히 동해 북부해역이 너무 높게 모사됨. 표층염분은 전반적으로 높게 모사하였다 (Fig. 3-1-6-4).

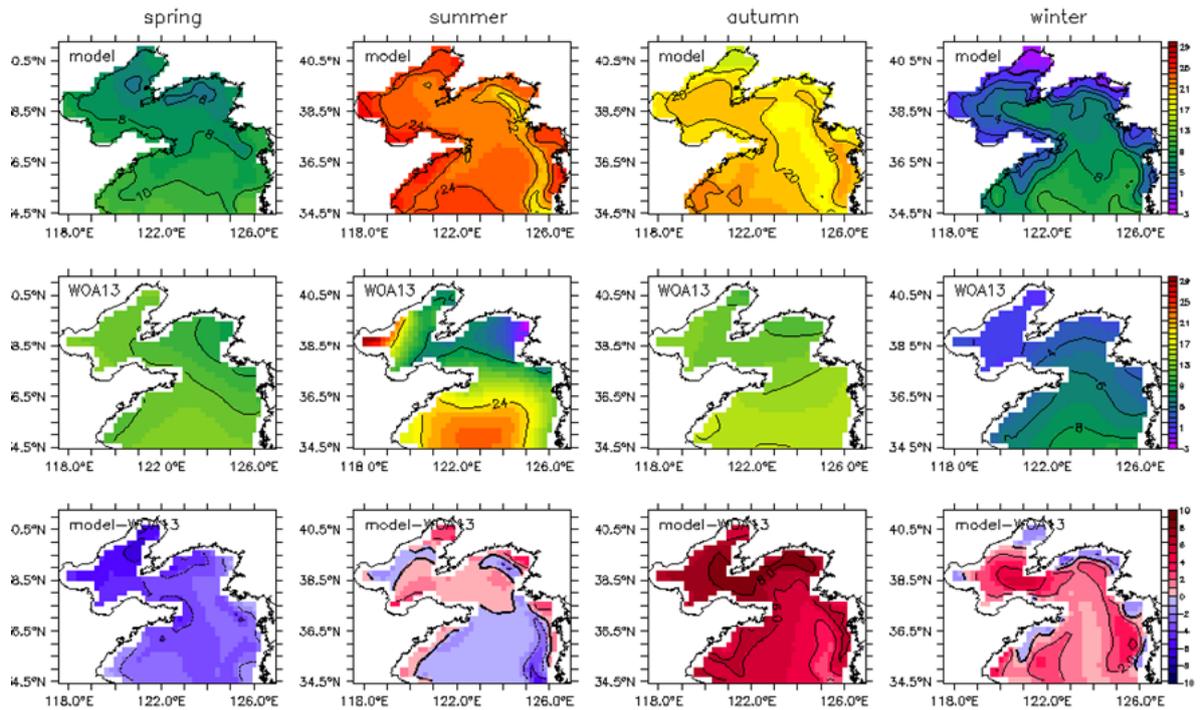


Fig. 3-1-6-2 Comparison of monthly mean surface temperature(5m) from the model with WOA13 data in the Yellow Sea.

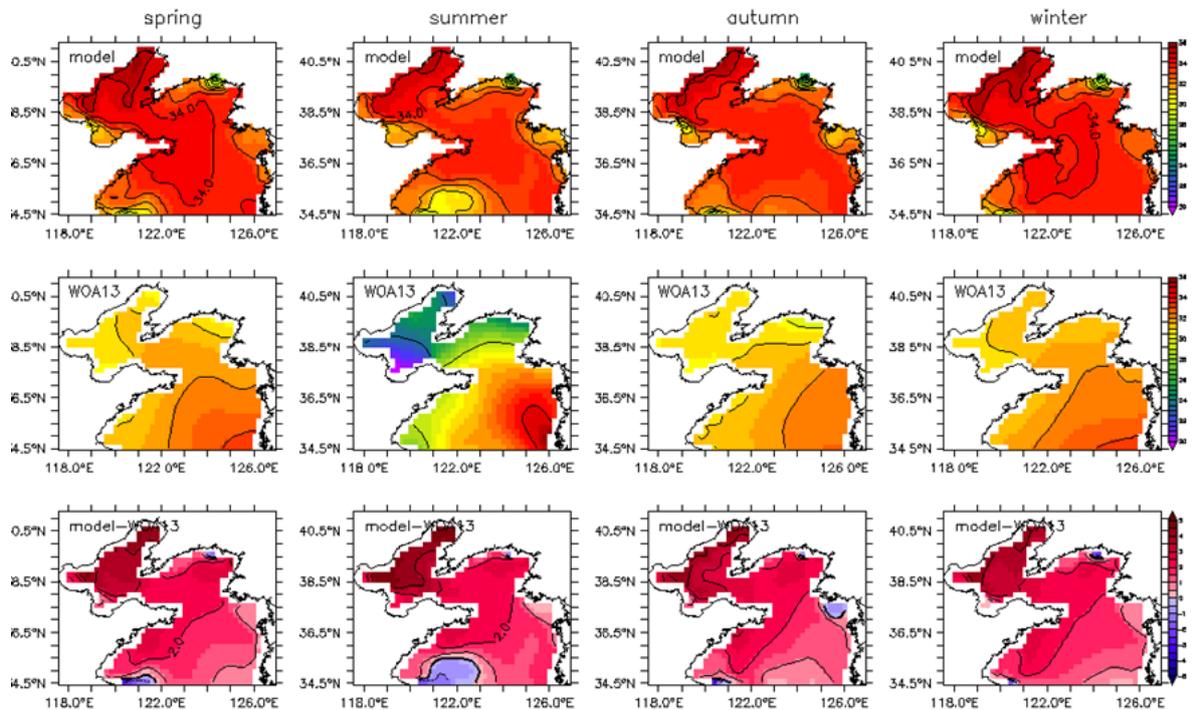


Fig. 3-1-6-3 Comparison of monthly mean surface salinity(5m) from the model with WOA13 data in the Yellow Sea.

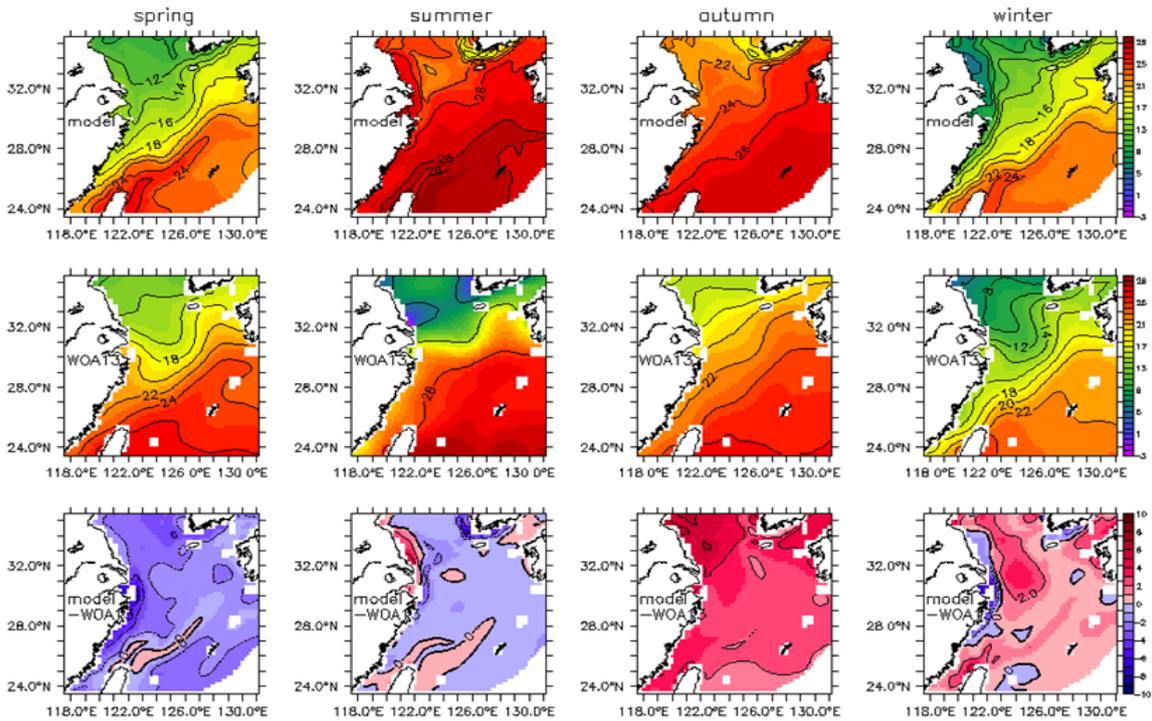


Fig. 3-1-6-4 Comparison of monthly mean surface temperature(5m) from the model with WOA13 data in the East China Sea.

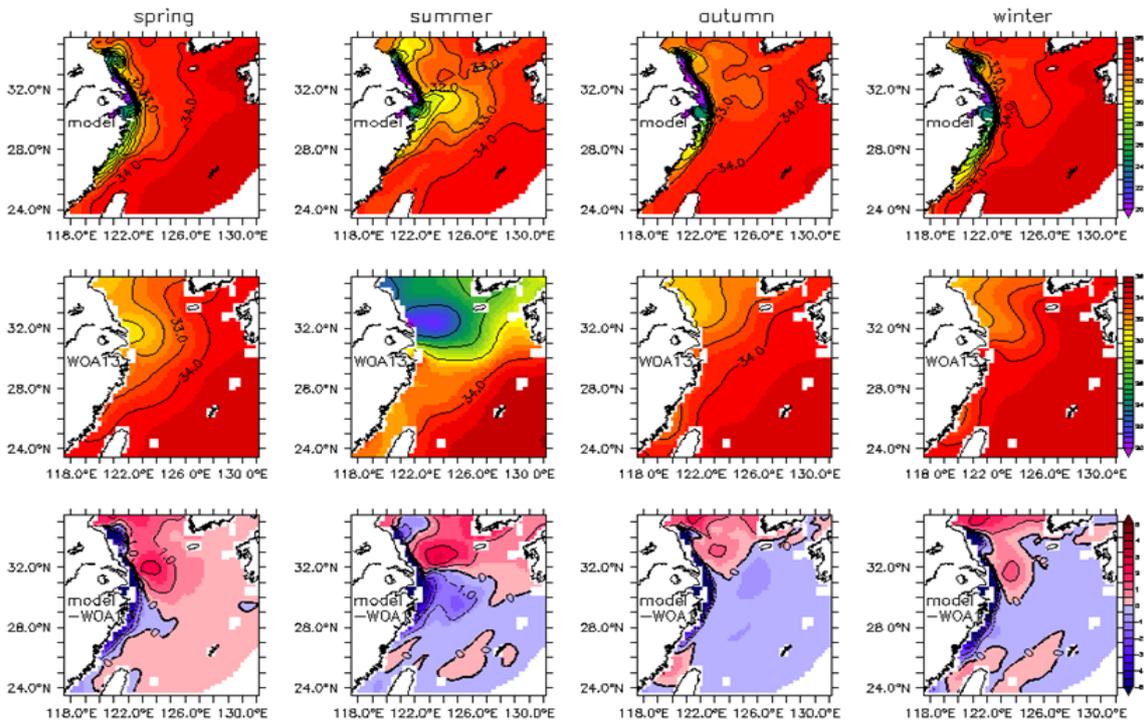


Fig. 3-1-6-5 Comparison of monthly mean surface salinity(5m) from the model with WOA13 data in the East China Sea.

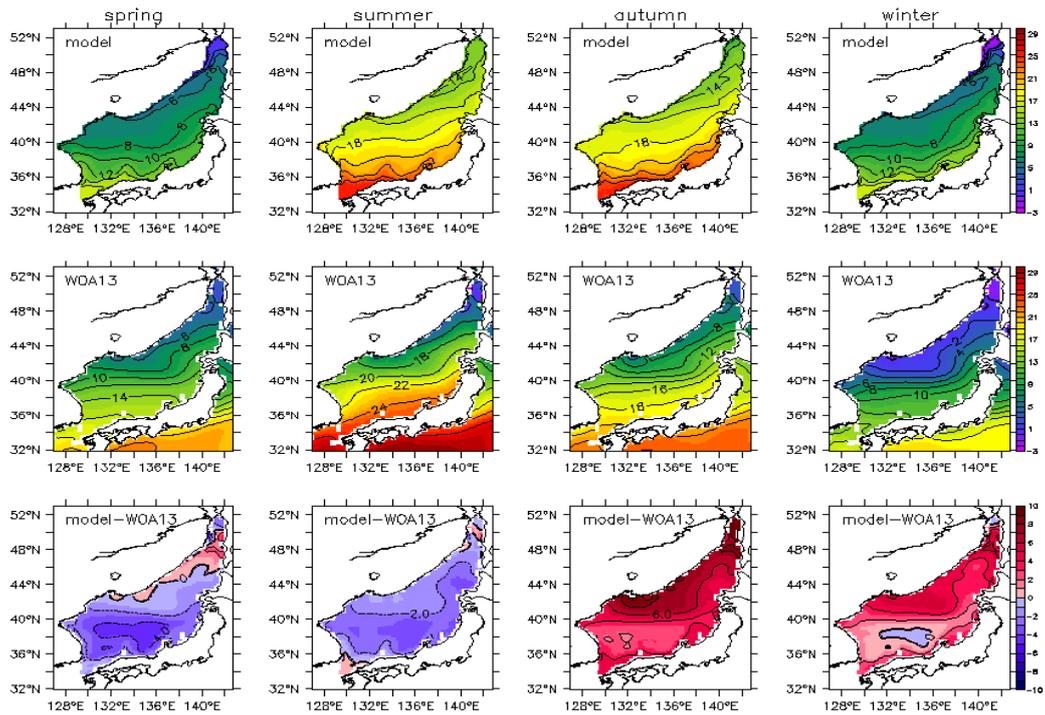


Fig. 3-1-6-6 Comparison of monthly mean surface temperature(5m) from the model with WOA13 data in the East Sea.

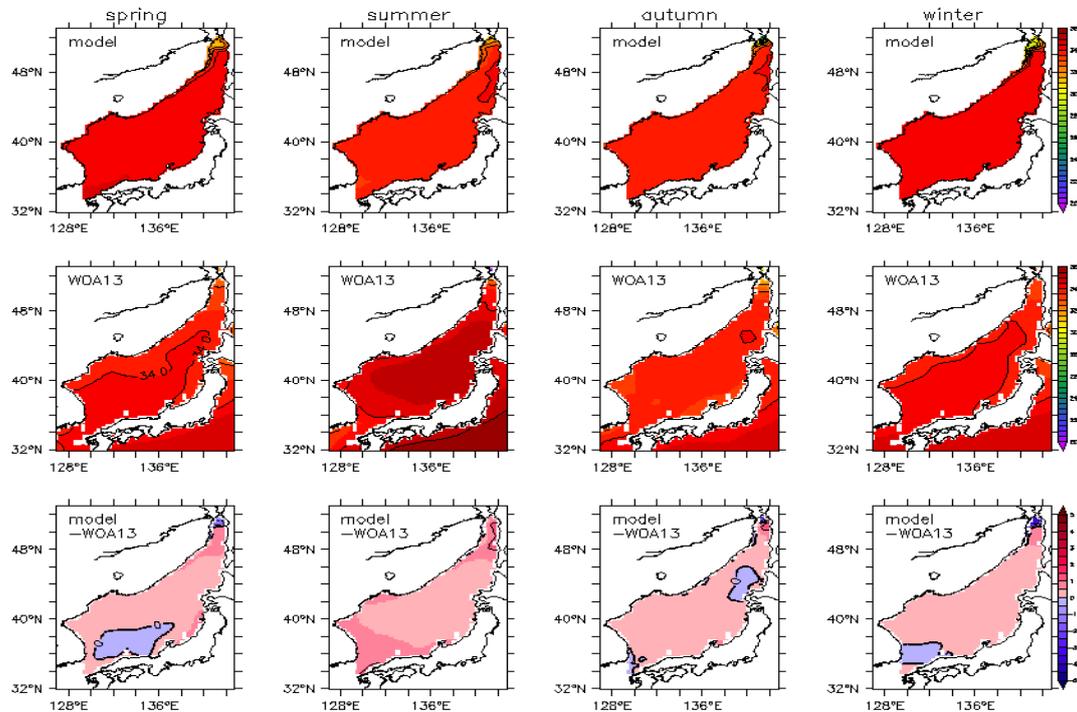


Fig. 3-1-6-7 Comparison of monthly mean surface salinity(5m) from the model with WOA13 data in the East Sea.

대한해협 관측정점 자료와의 비교 검증을 통해서 여름철 질산염이 과다하게 모사되는 문제점이 발견되었고 이는 여름철 장강 저염수 분포 변동에 매우 민감하게 반응한다는 사실을 확인할 수 있었다.

따라서 하천 유출 해역에서의 경계조건 및 해저경계조건 변화를 통한 모형 조정 작업을 통해 재적분한 결과 전반적으로 많이 개선되었으나 크게 다음의 세 가지 문제점을 보완해야 할 필요성이 있다.

첫째는 Fig. 3-1-6-8에서 보는 바와 같이 여름철 염분이 관측치보다 높아졌다는 것이다. 이는 장강에서 유출되는 담수가 모형 격자 내에서 혼합과정을 거쳐 만들게 되는 모형의 초기 혼합 염분 농도와 밀접한 연관이 있다.

둘째는 질산염이 개선된 반면에 인산염이 전 계절에 걸쳐 높게 나타난다는 것이고, 특히 여름철에조차 완전히 소모되지 않는다는 것이다. 이는 상대적으로 질산염의 고갈 정도가 너무 크기 때문인 것으로 생각된다.

또한 겨울철의 모형 인산염 농도가 관측치에 비해서 비교적 높게 나타나는 문제도 해결해야 할 과제이다. 규산염의 경우 여름철 모사 정도는 매우 양호하나 겨울철에 관측치에 비해서 모형의 농도가 매우 높은 단점이 있다.

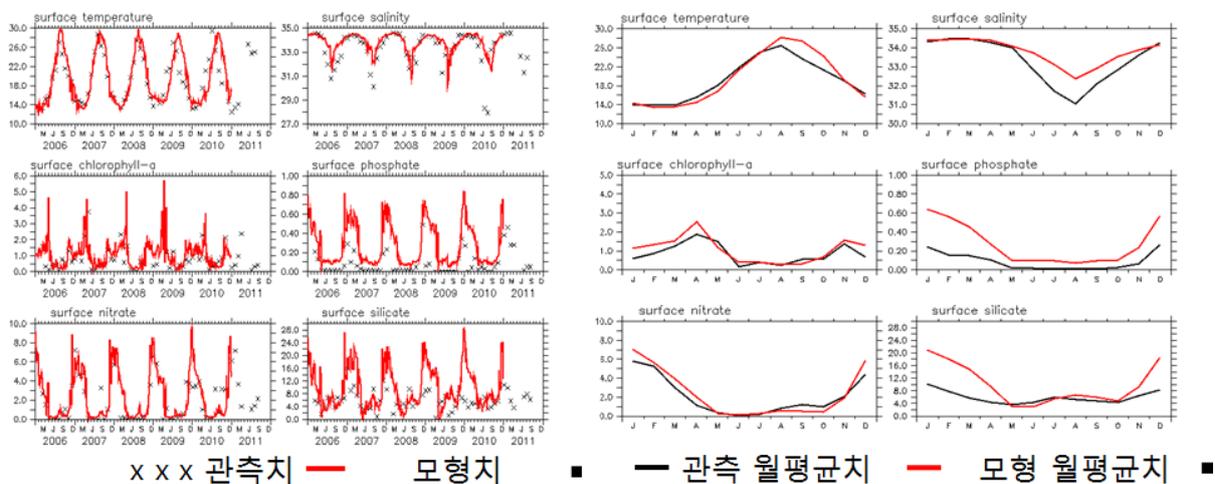


Fig. 3-1-6-8 Model improvement through verification using the Station M (Korea Strait) data.

1차 년도에 개발한 모형의 공간해상도는 0.1도로 비교적 좋은 해상도를 갖도록 수립하였지만, 관측 자료와의 비교를 통해 모형을 개선하는 데 있어 모형적분 시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 공간 해상도를 0.2도로 변경하여 모형을 재수립

하고 대기강제력, 해양경계조건 및 하천경계조건을 재산출한 후 다시 모형을 적분하고 관측치와 비교하며 개선의 과정을 거쳤다.

Fig. 3-1-6-9는 기존 0.1도 해상도의 모형(MESEAO.1)과 새로 수립한 0.2도(MESEAO.2) 모형과의 대한해협 수송량 비교 결과이다. 대한해협 수송량의 평균값은 크게 차이가 나지 않았고 계절변동성보다 작은 시간규모의 변동성은 차이가 있지만 기본적인 계절변동성도 잘 유지되고 있는 것으로 판단되어 Takikawa et al.(2010)의 관측치와 비교해 볼 때 모형의 해상도를 0.2도로 낮추더라도 물리적 결과에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 기대되어 이를 기본 모형격자로 설정하였다.

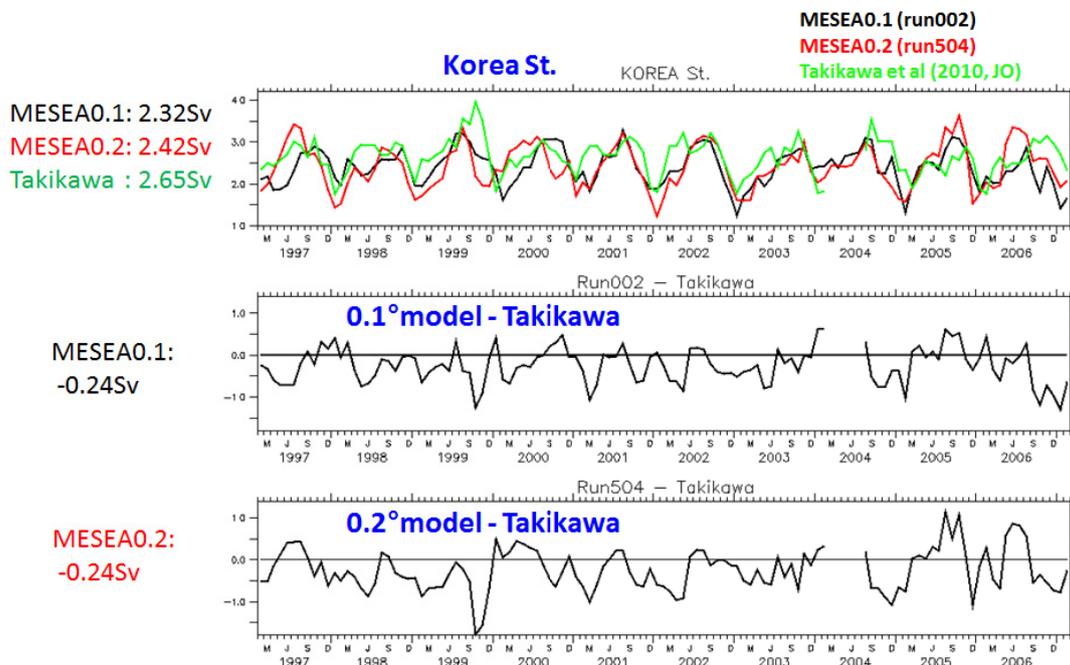


Fig. 3-1-6-9 Changes in volume transport of the Korea Strait after modification of the model resolution.

제 2 절 생태계 핵심변수 과거 재현 및 변천 분석

1. 모형 재현성능 평가

모형의 수평격자를 0.2도로 축소한 후 1981년부터 2010년까지 재적분하여 5일 평균장을 산출하고 이를 netCDF 자료로 변환하였다. 변환된 생태계 핵심변수들은 수온,

염분, 유속, 질산염, 인산염, 규산염, 암모니아, 엽록소a, 식물플랑크톤 4개 기능군, 동물플랑크톤 3개 기능군, 박테리아, 용존산소, 용존 무기탄소, 용존 유기물, 고형 유기물 등이다.

Fig. 3-2-2-1부터 3-2-2-3에 나타낸 바와 같이 해역별 모형 모사 정도를 파악하기 위해서 국립수산과학원 정선관측 자료와의 6개 변수(수온, 염분, 용존산소, 질산염, 규산염, 인산염)에 대해서 일대일 비교, 해역 평균 시계열 비교, 그리고 표적다이어그램 분석을 시행하였다. 표적다이어그램은 Jolliff et. al (2009)이 해양순환-생태계 접합모형의 성능 평가를 위한 도구로 제안한 것으로서 모형과 관측 값의 평균과 표준편차 그리고 평균편차가 전체 RMSD(Root Mean Square Difference)에 어떻게 영향을 주는가를 판단할 수 있는 유용한 도구이다.

황해의 경우 수온, 염분은 비교적 잘 맞으나, 염분의 경우 절댓값이 약 2 정도 높은 양의 편차가 뚜렷하며, 용존산소, 규산염, 인산염의 경우도 양의 편차를 보이며 규산염의 편차가 가장 크게 나타났다.

동중국해의 경우는 수온, 염분의 재현도가 다른 해역에 비해서 가장 높으며, 질산염의 경우 음의 편차가 나타나고 모형의 표준편차가 관측치의 표준편차보다 낮게 나타났다. 황해에 비해서 상대적으로 질산염과 인산염의 편차가 훨씬 작으며 규산염도 작은 양의 편차를 보였다. 그러나 용존산소는 여전히 높은 양의 편차를 보여 이에 대한 원인 분석이 추가적으로 필요하다.

동해는 수온이 다소 높게 모사되었으며, 모형의 표준편차가 관측치보다 낮게 나오는 경향이 보였으나 상관관계는 높은 편이다. 염분은 약간의 양의 편차를 보이나 매우 잘 맞는 것으로 사료된다. 규산염과 인산염은 양의 편차를 보이며 용존산소 역시 양의 편차를 보였다.

전반적으로 볼 때 각 변수별로 편차는 상이하나 계절변동성은 모형이 비교적 잘 모사하고 있는 것으로 사료된다. 한편 여기서 조심해야 할 것은 국립수산과학원 영양염 자료에서도 일부 일관성이 결여된 관측 결과가 많아서 관측 자료에 대한 정도 검사도 함께 이루어져야 한다는 것이다. 생태계 모형 검증을 위한 표준 자료체계가 구축되고 본 절에서 적용한 표적다이어그램과 같은 평가 도구의 개발 및 개선 연구가 필요하다고 생각한다.

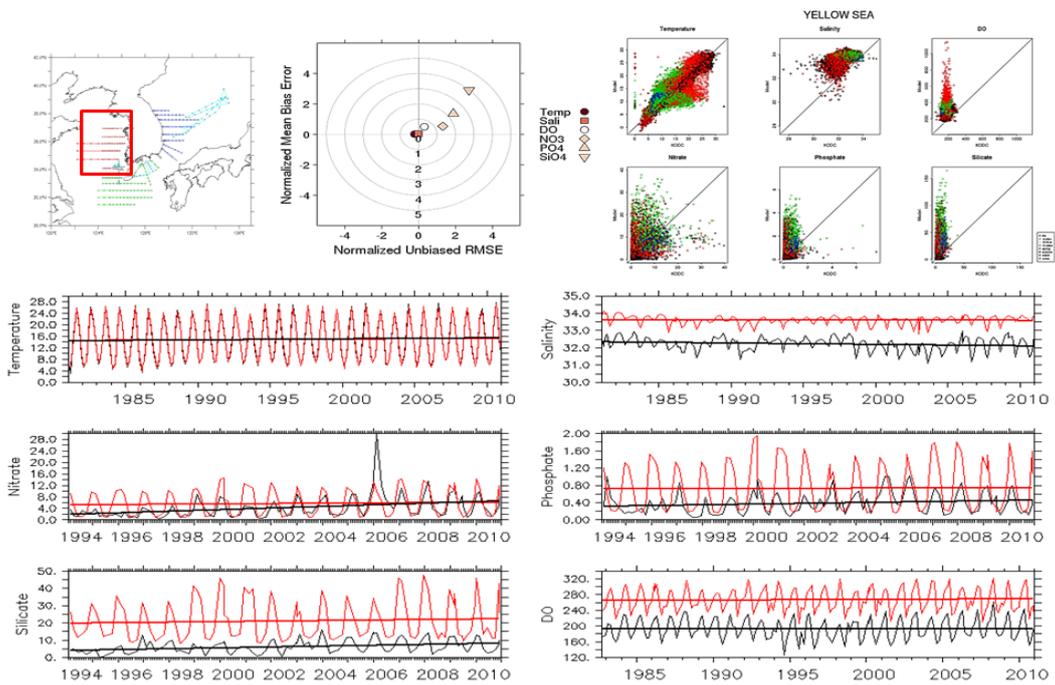


Fig. 3-2-1-1 Evaluation of model performance in the Yellow Sea: comparison with KHOA survey line data: temperature, salinity, nitrate, phosphate, silicate, dissolved oxygen.

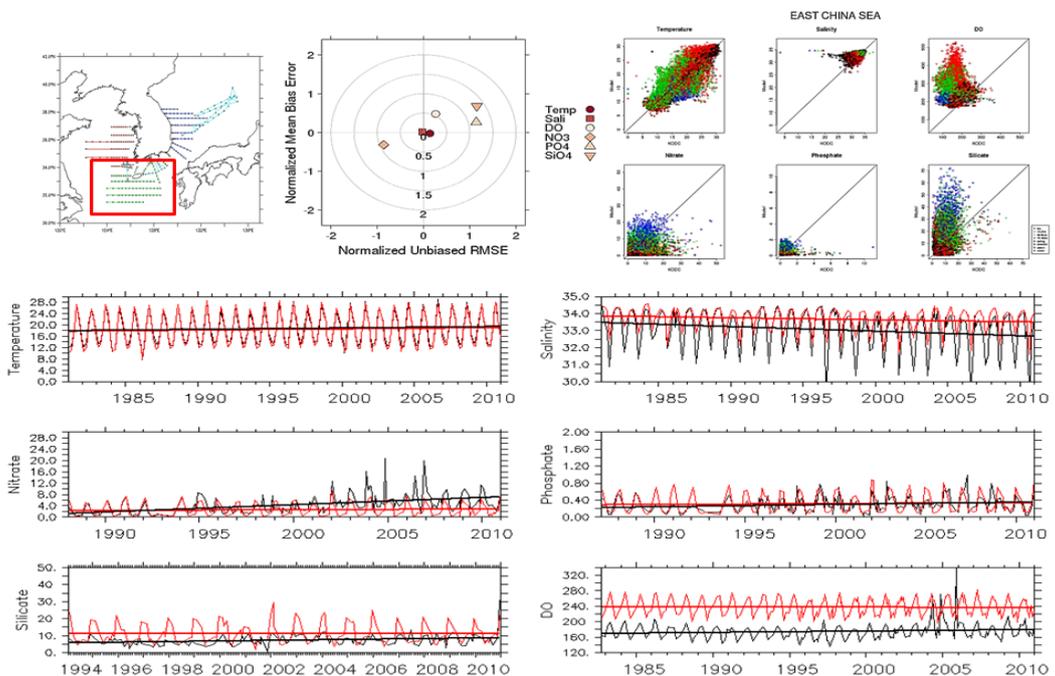


Fig. 3-2-1-2 Evaluation of model performance in the East China Sea: comparison with KHOA survey line data: temperature, salinity, nitrate, phosphate, silicate, dissolved oxygen.

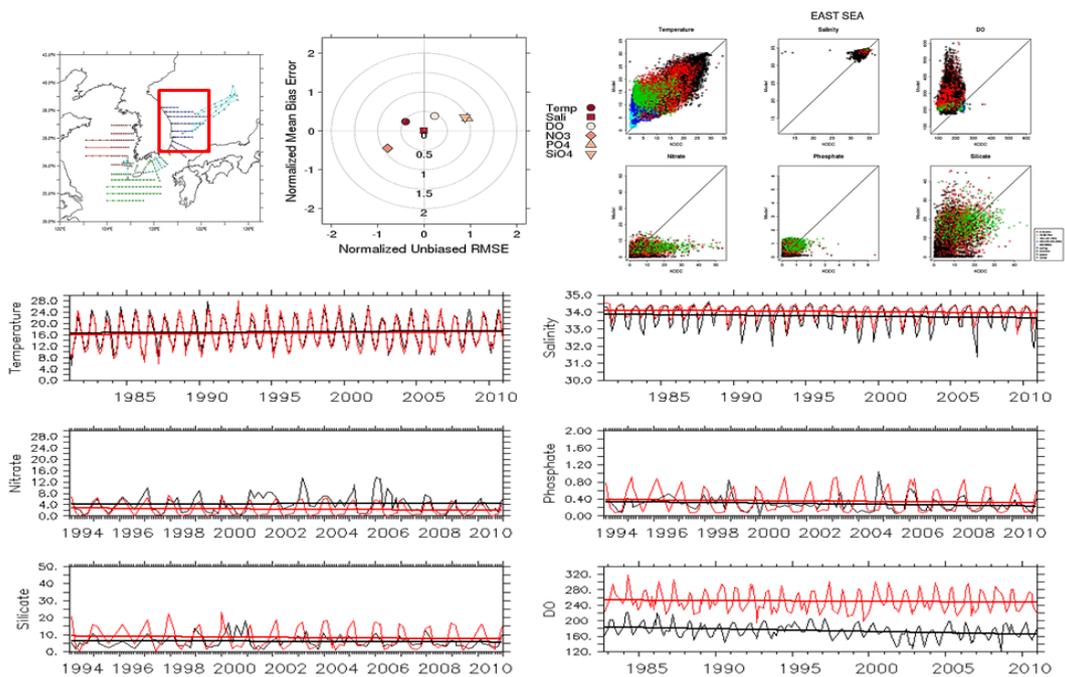


Fig. 3-2-1-3 Evaluation of model performance in the East Sea: comparison with KHOA survey line data: temperature, salinity, nitrate, phosphate, silicate, dissolved oxygen.

2. 해역별 생태계 핵심변수 과거 30년 월평균장 및 계절변동성

본 절에서는 1981년부터 2010년까지 과거 재현실험을 한 결과를 기반으로 생태계 핵심변수를 물성(수온, 염분, 혼합층깊이), 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산(유광층 깊이, 표층엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이)으로 구분하여 30년 기후평균 월평균장을 산출하였으며 표층에 대해서만 간단히 그 분포 특성을 기술하였다.

30년 기후평균 월평균장은 모형에서 매 격자마다 5일 간격으로 평균값을 계산해 저장하고, 이의 연직좌표계를 s-좌표계에서 수심좌표계로 변환한 후 다시 월평균을 산출한 후, 이 값을 이용하여 매월 평균값을 산출하는 방식으로 계산하였다. 이때 표준편차도 함께 산출하여 30년 월평균장과 표준편차를 netCDF 형식으로 변환 저장함으로써 사용자가 경위도 및 수심 좌표계에서 쉽게 분석에 활용할 수 있도록 하였다.

가. 황해 과거 30년(1981~2010) 표층 월평균장 분포 및 계절 특성

1) 수온, 염분, 혼합층 깊이

황해 중부의 표층수온은 8월에 최대, 2월에 최소로 나타나며 여름철 우리나라 연안으로 조석전선이 강하게 발달하여 상대적으로 수온이 낮게 나타나며, 이는 실제보다는 과장되게 모사된 것으로 생각된다(Fig. 3-2-2-1).

대체로 황해 중부는 염분이 높고 연안은 염분이 낮은 분포를 보이며 이는 하천에서 유입되는 담수의 영향이나 발해만 북부해역의 염분이 관측 값에 비해 매우 높은 편이다. 장강의 영향을 받는 저염수는 황해 남부 중국 연안을 따라 5월부터 영향을 받는 것으로 보이며 7, 8월에 최대가 되었다가 약화되는 양상을 보인다. 진도 남서부로부터의 고염수의 관입은 황해 중부와 연결성이 뚜렷하지 않고, 황해 중부의 염분은 여름철보다 겨울철에 높은 편이다 (Fig. 3-2-2-2).

한편 황해는 겨울철에는 대부분 바닥까지 모두 혼합되며, 여름철에는 조석전선에서 혼합층이 깊게 나타난다(Fig. 3-2-2-3).

2) 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 농도

인산염은 겨울철 황해 중북부에서 높게 나타나며 경기만에서 높은 값을 보인다. 여름철에는 대체로 소진되어 조석전선 인근에서만 비교적 높은 농도를 보인다(Fig. 3-2-2-4).

황해 월평균 표층 질산염 농도는 인산염과 마찬가지로 겨울철 황해 중북부에서 높게 나타나며 경기만과 중국연안에서 높은 값을 보인다. 여름철에는 장강의 영향을 받는 중국 남부 연안과 서안만 및 경기만 등 하천의 영향을 받는 곳에서 높게 나타난다 (Fig. 3-2-2-5).

규산염의 경우 인산염 및 질산염과는 달리 우리나라 서해안을 위주로 높게 나타나는 특징을 보였다. 다른 영양염과 다른 분포를 보이는 이유가 하천에 의한 규산염 유입에 의한 효과인지, 생물작용에 의한 결과인지 추가 분석과 연구가 필요하다(Fig. 3-2-2-6).

3) 유광층 깊이, 엽록소a 표층농도 및 최대층 깊이

연안은 낮은 수심으로 인해 전 수심이 유광층 안에 들며, 중부는 위도에 의한 태양 고도의 변화로 남부로 갈수록 유광층이 깊어지고 8월에 최대가 된다(Fig. 3-2-2-7).

황해 월평균 표층 엽록소a 농도는 연안에서 연중 높은 편이며, 중부해역은 5월에 최고값을 보이고 여름철엔 성층과 영양염 고갈로 인해 거의 나타나지 않는 것으로 보인다(Fig. 3-2-2-8).

황해 월평균 엽록소a 최대층 깊이를 보면 엽록소a 최대층은 황해 중부에서 6월부터 10월에 걸쳐 뚜렷하게 나타나며 7월을 전후로 약 20~30 m 정도로 가장 깊게 나타난다(Fig. 3-2-2-9).

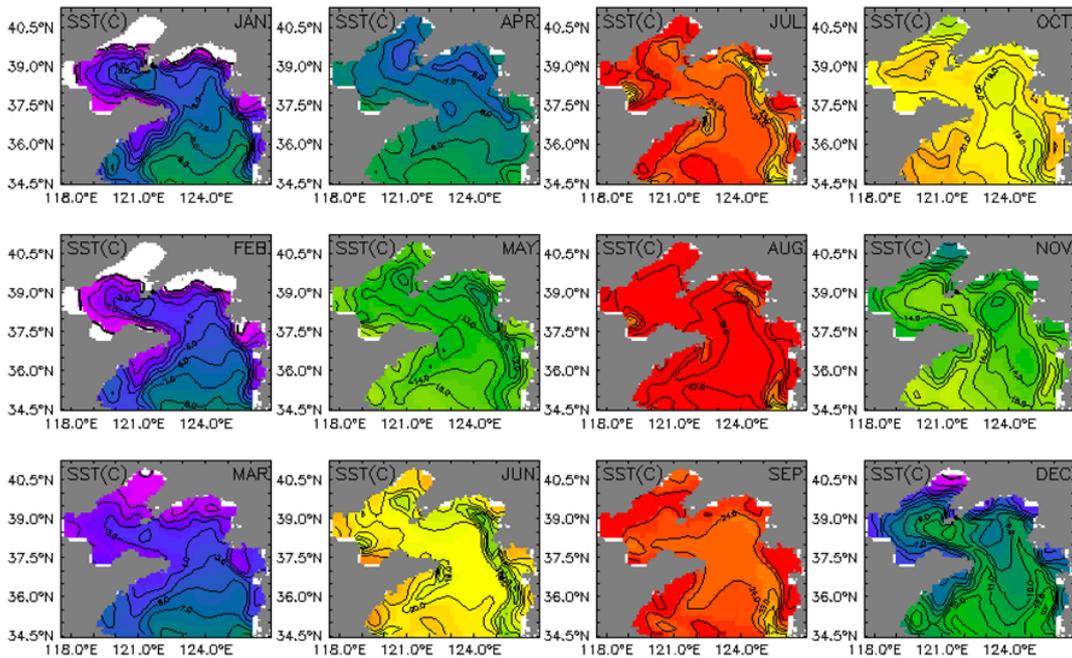


Fig. 3-2-2-1 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface temperature(°C).

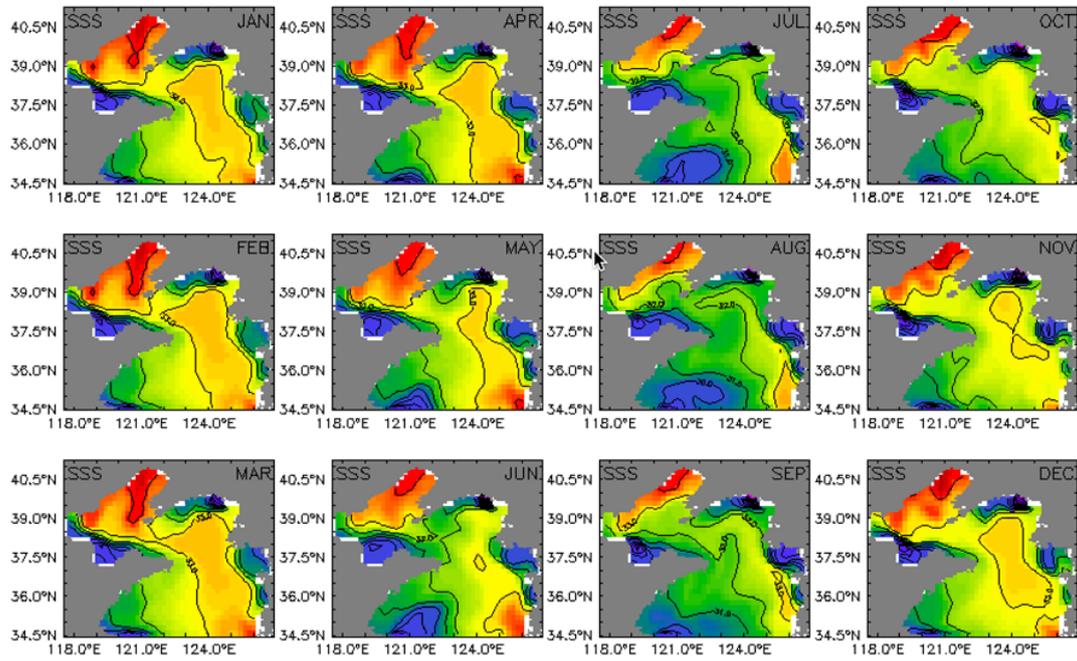


Fig. 3-2-2-2 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface salinity(PSU).

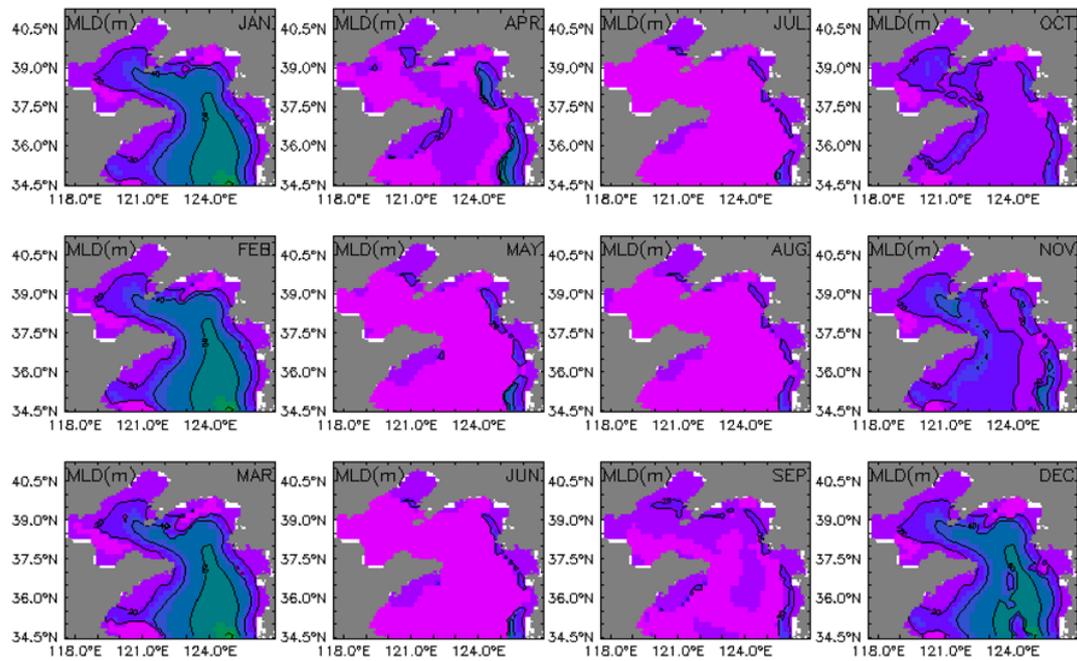


Fig. 3-2-2-3 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean mixed layer depth(m).

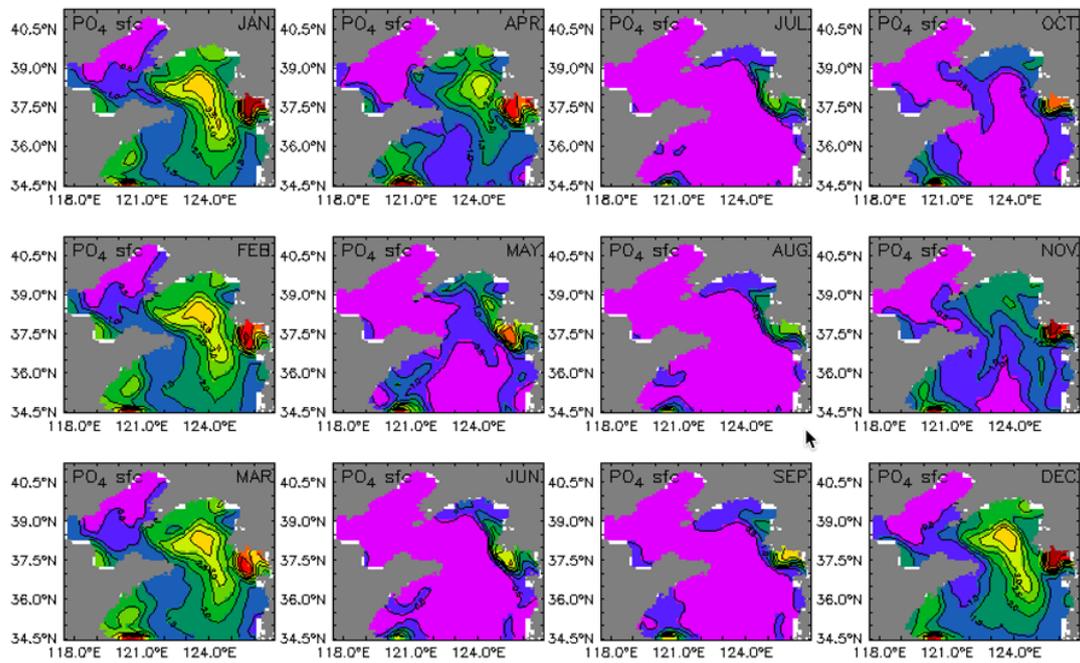


Fig. 3-2-2-4 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface phosphate(mmol P/m^3).

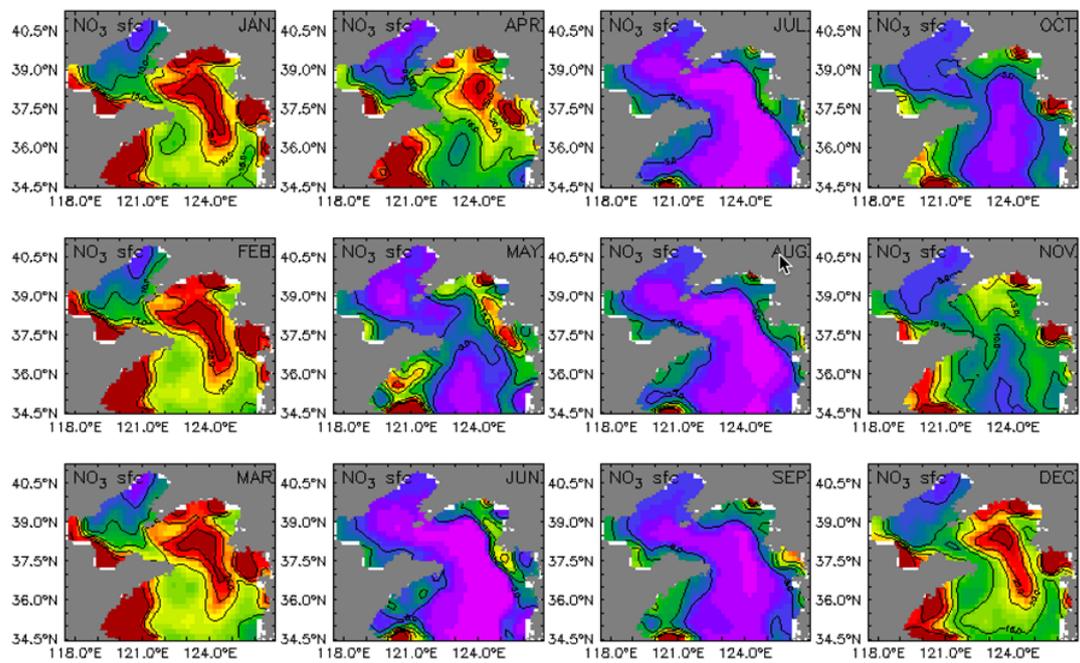


Fig. 3-2-2-5 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface nitrate(mmol N/m^3).

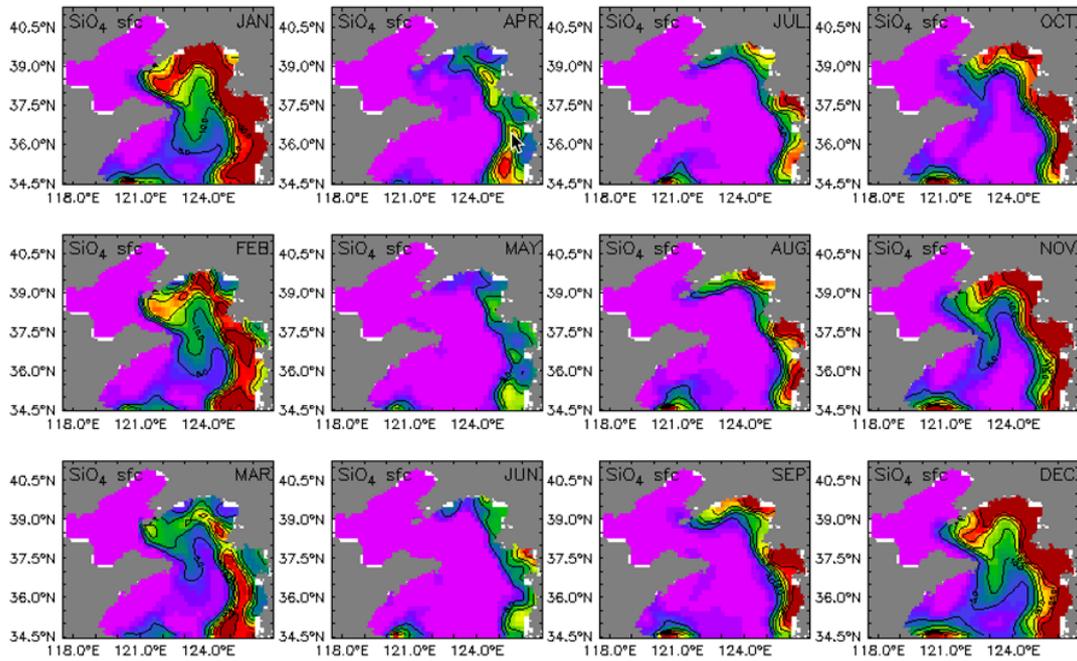


Fig. 3-2-2-6 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface silicate(mmol Si/m^3).

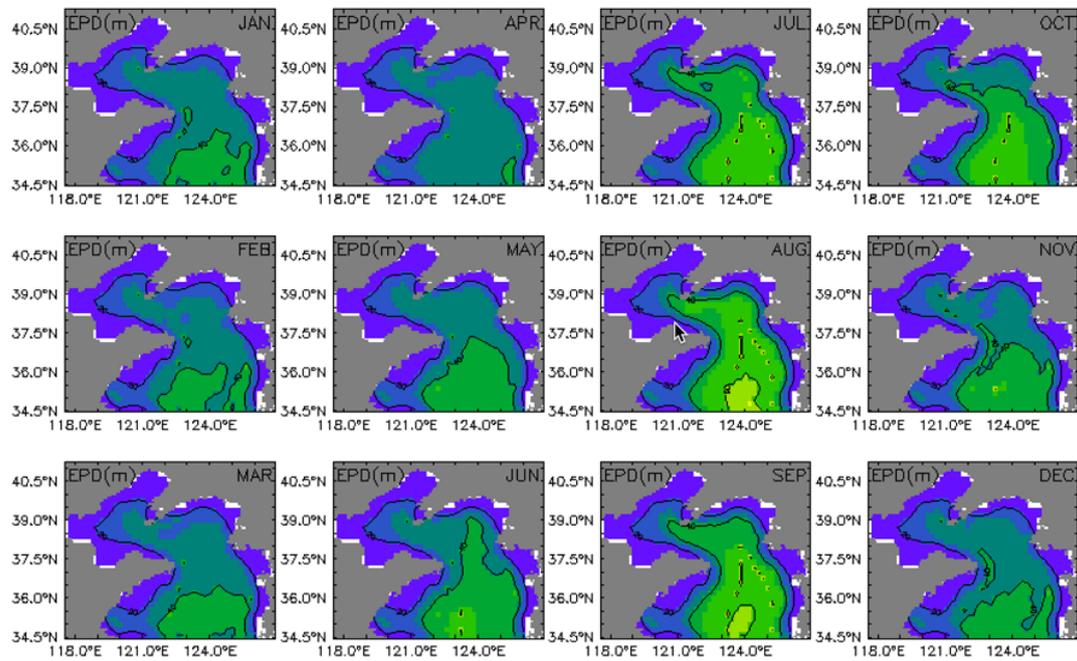


Fig. 3-2-2-7 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean euphotic depth(m).

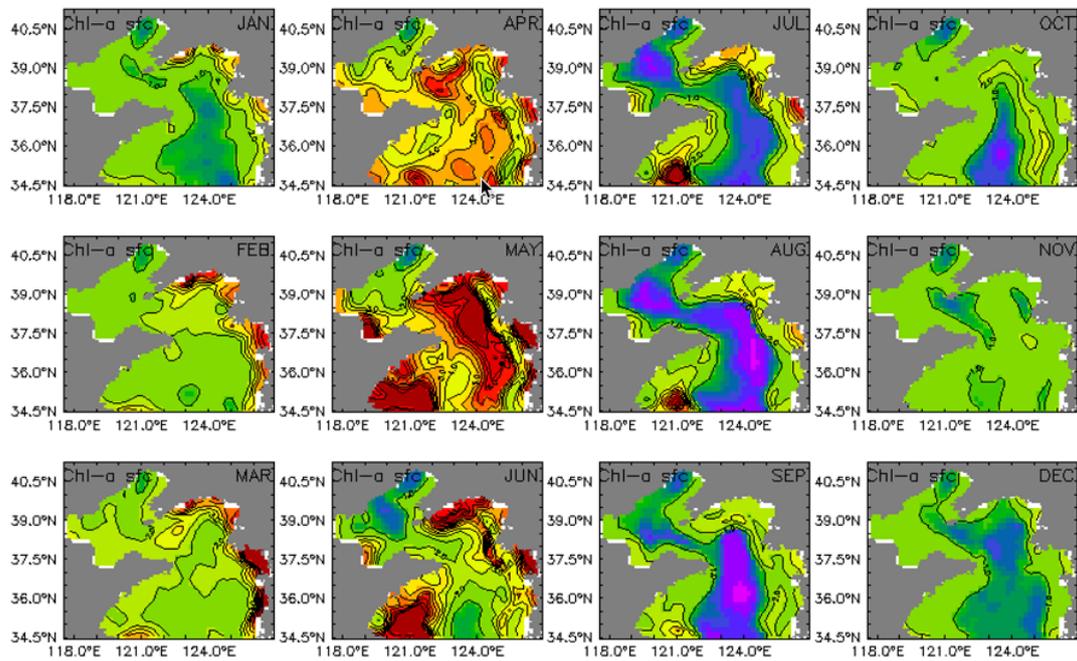


Fig. 3-2-2-8 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean surface chlorophyll_a(mg Chl/m³).

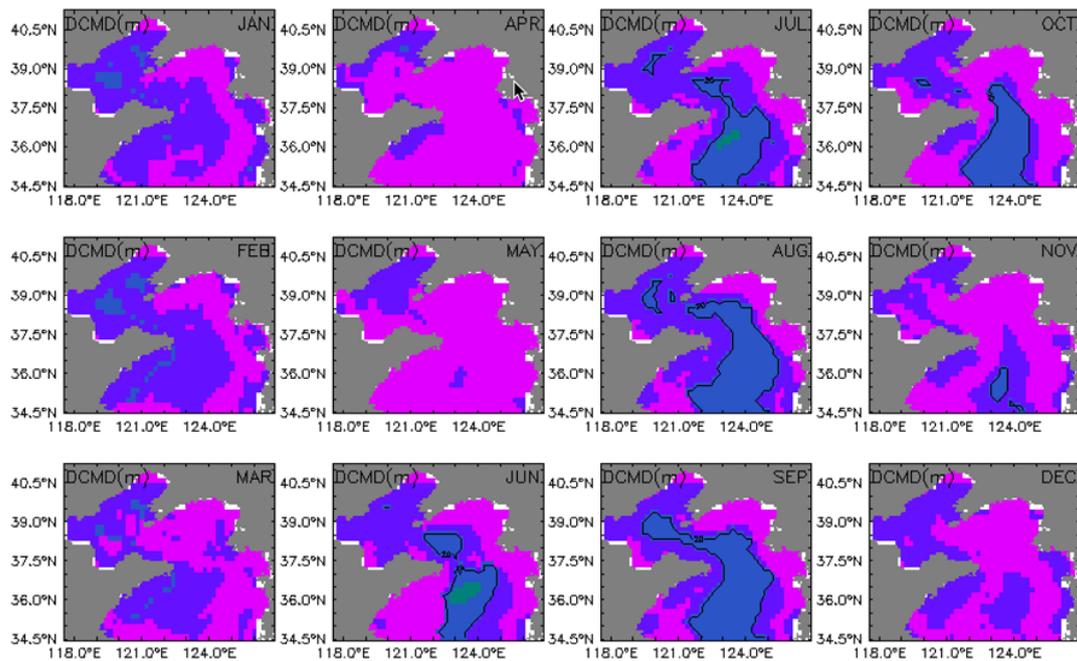


Fig. 3-2-2-9 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the Yellow Sea - monthly mean depth of Chlorophyll_a maximum(m).

나. 동중국해 과거 30년(1981~2010) 표층 월평균장 분포 및 계절 특성

1) 수온, 염분, 혼합층 깊이

동중국해 월평균 표층 수온은 12월부터 5월까지는 뚜렷하게 쿠로시오 해류와의 수온전선이 발달하여 나타나나 이후 여름~가을에 걸쳐서는 보이지 않는다. 겨울철에는 장강 저염수가 중국 연안에 고립되어 상대적으로 찬 냉수괴를 형성하는 것으로 나타나고 동중국해 중앙부는 8월에 최고 수온을 보인다(Fig. 3-2-2-10).

동중국해 월평균 표층 염분을 보면 장강 저염수는 4월부터 동중국해 남부에서 동쪽으로 세력을 확장하기 시작하여 점차 북동쪽으로 영향역을 넓히며 8월에 최대로 확장했다가 9월부터 쇠퇴하기 시작하는 것이 특징이다(Fig. 3-2-2-11).

동중국해 월평균 혼합층 깊이는 겨울철에 주로 쿠로시오의 영향을 받는 해역에서 약 100 m 정도까지 깊게 발달하며, 서쪽의 대륙붕 해역은 전 수심이 혼합되는 특징이 있다(Fig. 3-2-2-12).

2) 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 농도

동중국해 월평균 표층 인산염은 대체로 대륙붕 해역에서 높고 쿠로시오 해역에서 낮게 나타나며, 장강유역이 매우 높게 나타난다. 장강에서 유입되는 인산염의 분포는 6월에서 8월에 걸쳐 동중국해 북서부 대륙붕해역에 나타난다(Fig. 3-2-2-13).

동중국해 월평균 표층 질산염은 중국연안에서 최대이고 대륙붕 해역에서 상당히 높고 쿠로시오 해역에서 낮은 분포가 인산염에 비해서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 여름철 장강 저염수의 확장과 더불어 공급되는 질산염의 분포 특성도 모형 결과에서 잘 나타나는 편이다(Fig. 3-2-2-14).

동중국해 월평균 표층 규산염은 전반적으로 다른 영양염 분포와 유사하나, 장강 저염수 확장과 연계된 분포 특성은 상대적으로 작은 것으로 판단된다(Fig. 3-2-2-15).

3) 유광층 깊이, 엽록소a 표층농도 및 최대층 깊이

동중국해 월평균 유광층 깊이는 저위도인 쿠로시오 해역이 약 100 m 정도까지 깊게 나타나며, 100 m 이하의 대륙붕 및 연안역은 최대수심까지 유광층에 해당한다(Fig.

3-2-2-16).

동중국해 월평균 표층 엽록소a 농도는 겨울철에는 대륙붕 해역과 중국 연안역에서 높게 나타나며, 여름철의 경우 쿠로시오 해역에서 낮게 나타나는 것에 반하여 장강 저염수 영향역을 중심으로 상대적으로 높게 나타난다(Fig. 3-2-2-17).

동중국해 월평균 엽록소a 최대층 깊이는 천해역에서는 뚜렷하게 나타나지 않으나, 쿠로시오 해역에서는 겨울철을 제외하고는 평균 60 m 이상의 깊이를 보인다. 장강의 영향을 받는 중북부 해역에서는 여름철에 10~30 m 정도로 나타난다(Fig. 3-2-2-18).

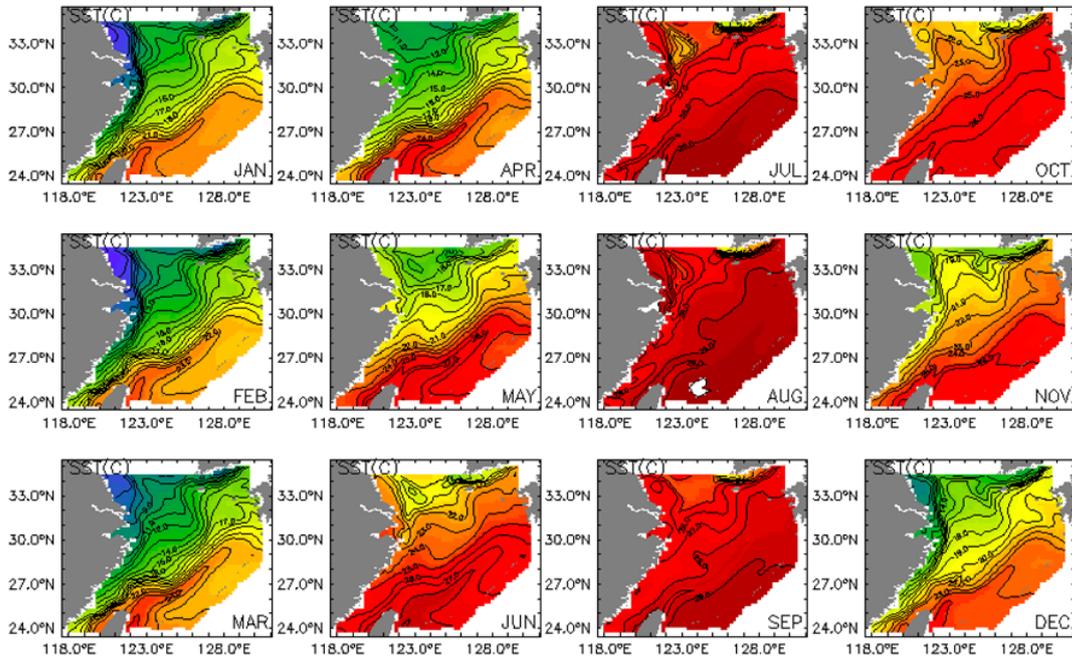


Fig. 3-2-2-10 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface temperature(°C).

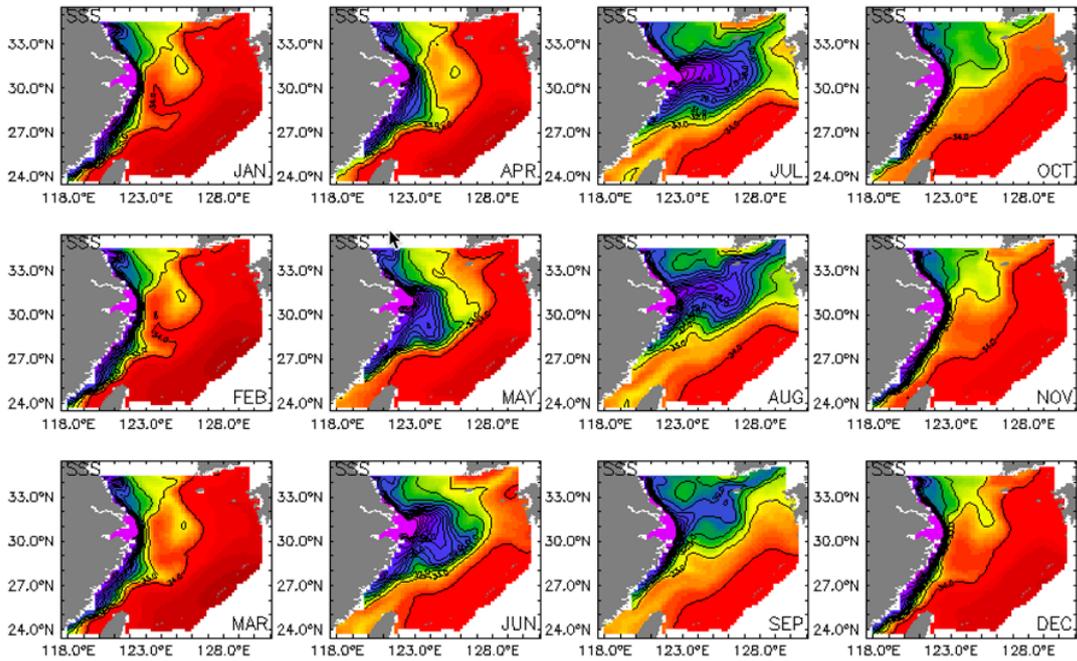


Fig. 3-2-2-11 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface salinity(PSU).

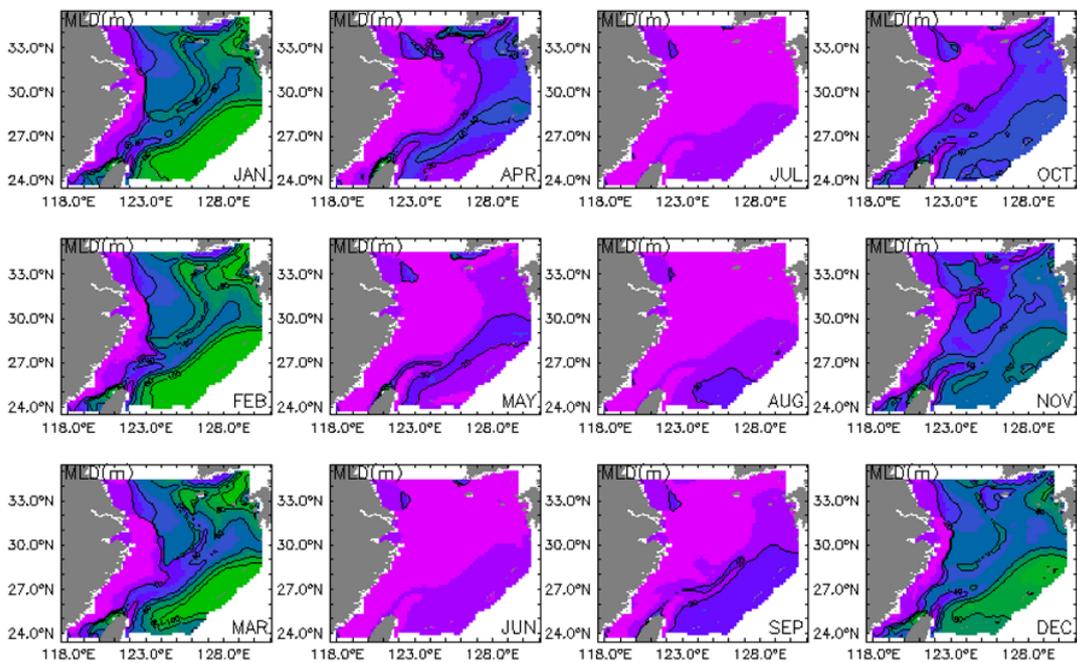


Fig. 3-2-2-12 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean mixed layer depth(m).

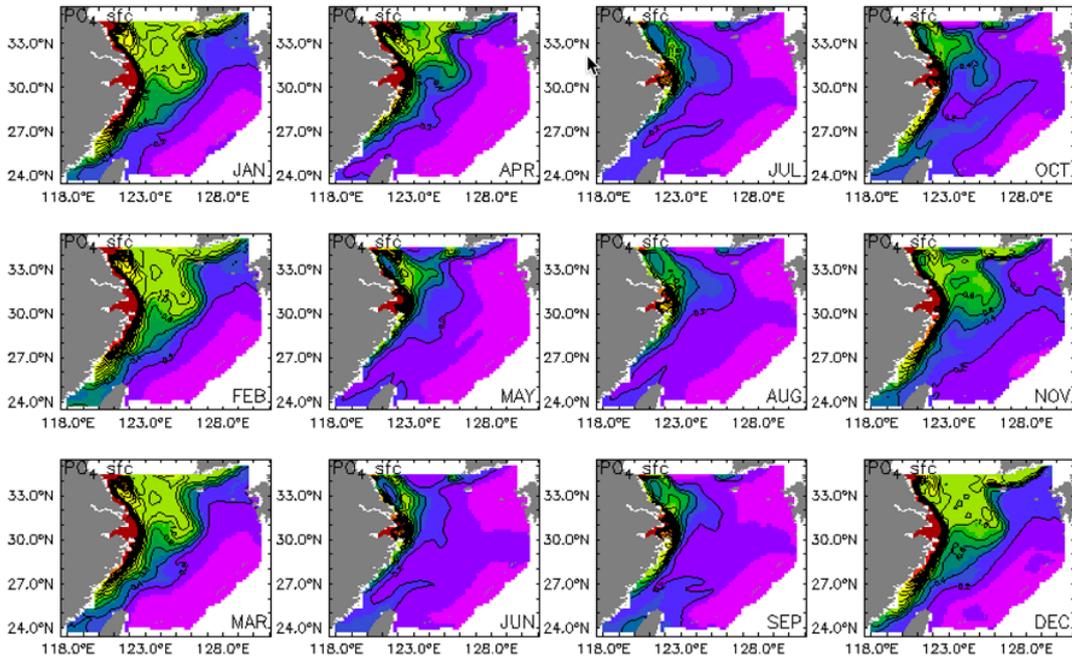


Fig. 3-2-2-13 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface phosphate(mmol P/m^3).

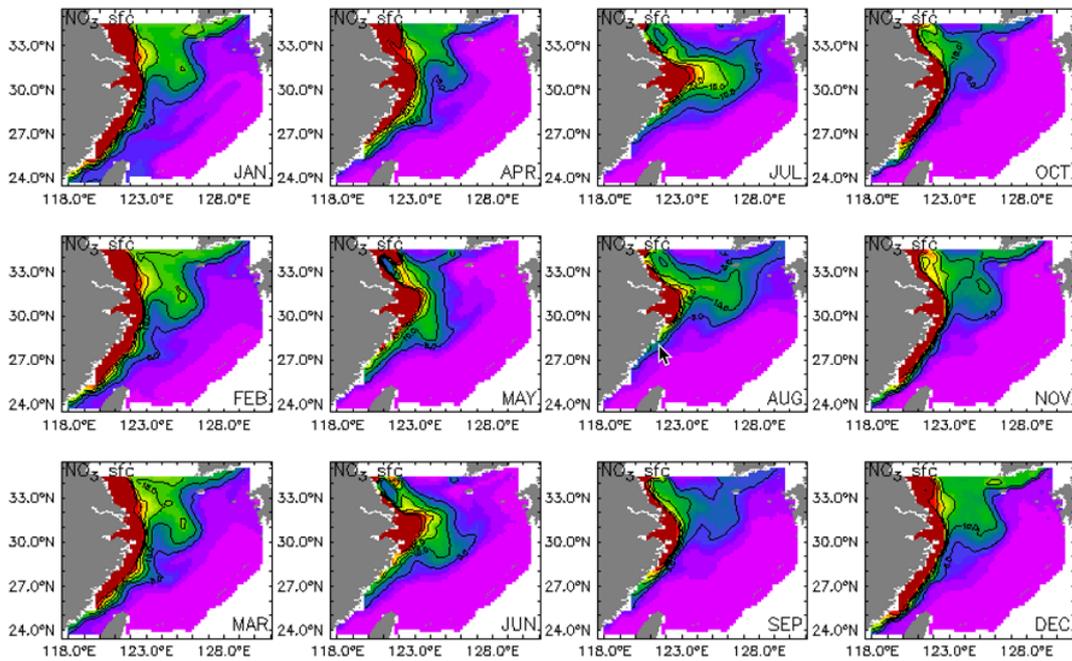


Fig. 3-2-2-14 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface nitrate(mmol N/m^3).

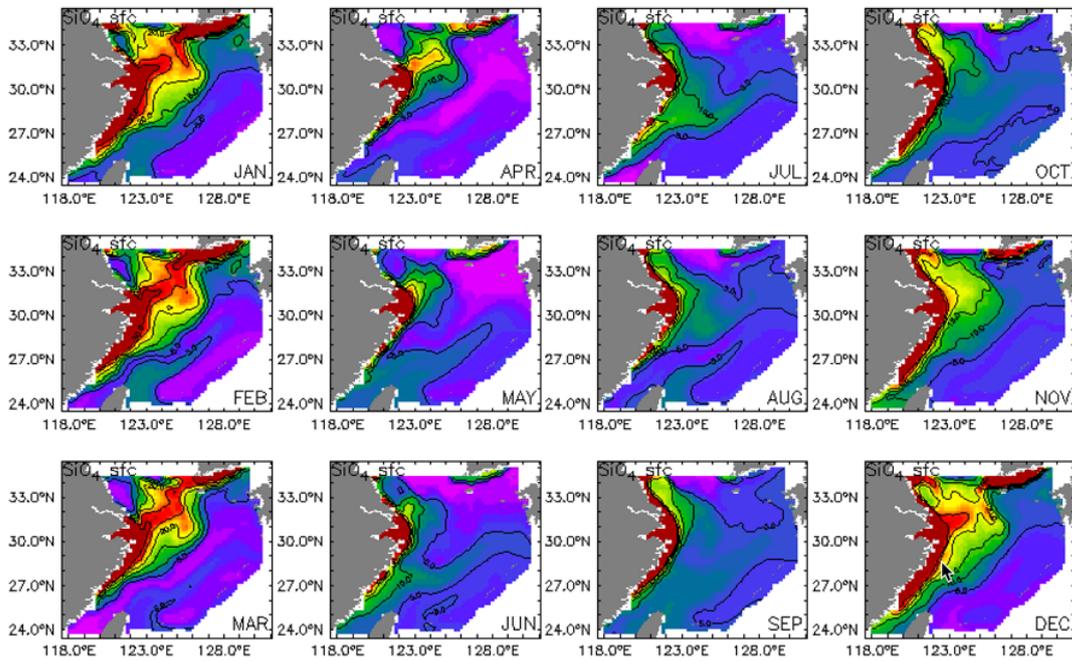


Fig. 3-2-2-15 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface silicate(mmol Si/m^3).

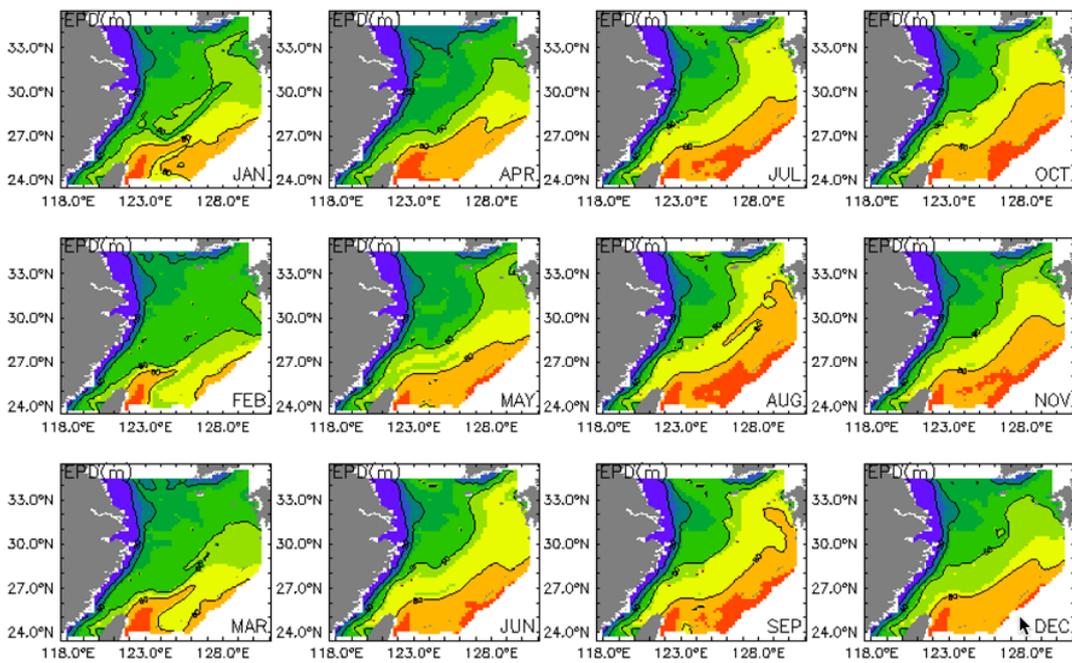


Fig. 3-2-2-16 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean euphotic depth(m).

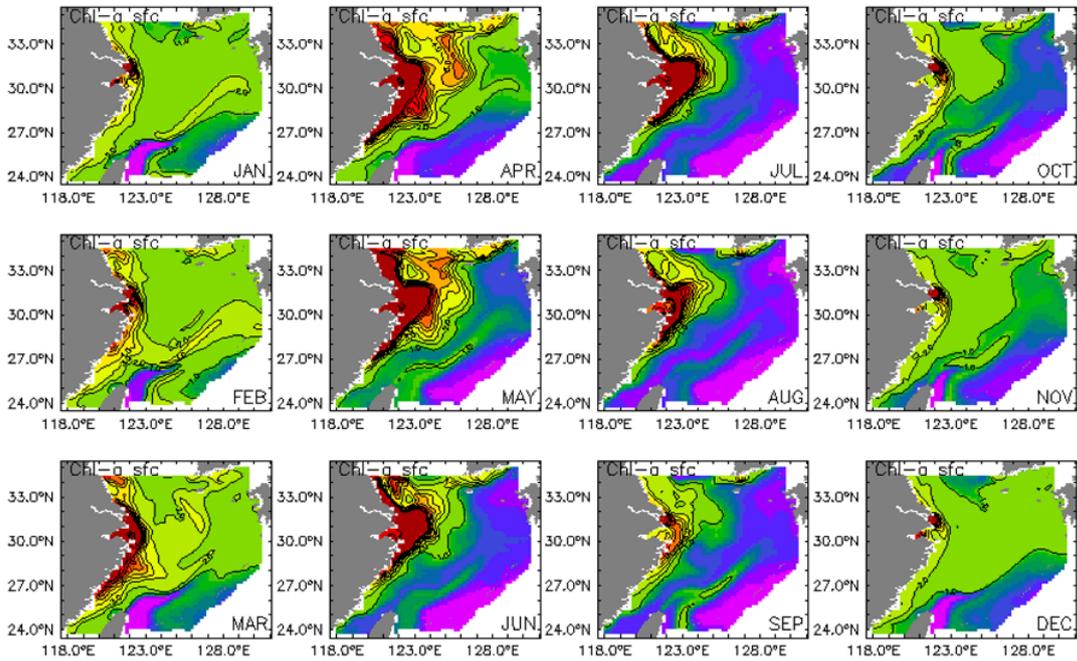


Fig. 3-2-2-17 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean surface chlorophyll_a(mg Chl/m³).

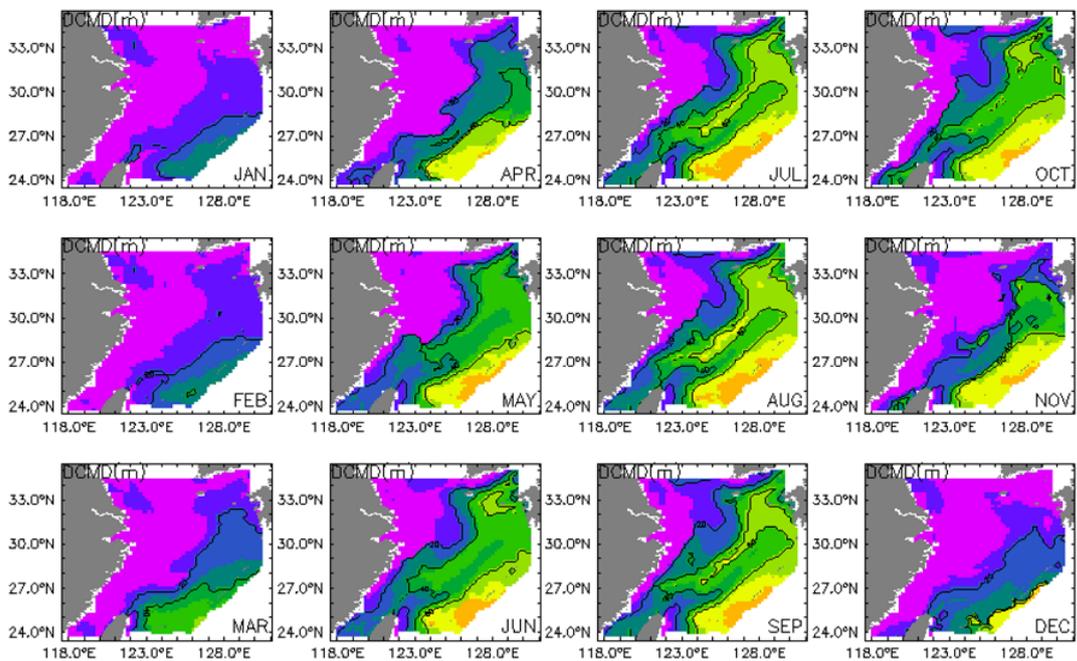


Fig. 3-2-2-18 Climatological mean field of the past 30 years (1981~2010) in the East China Sea - monthly mean depth of Chlorophyll_a maximum(m).

다. 동해 과거 30년(1981~2010) 표층 월평균장 분포 및 계절 특성

1) 수온, 염분, 혼합층 깊이

동해 월평균 표층 수온은 12월부터 이듬해 4월까지는 극전선이 잘 발달하여 남북으로 대별된 분포를 보이며, 여름철에는 표층가열에 의한 효과와 대마난류수의 영향으로 남북구배가 상대적으로 작게 나타난다. 최고 수온은 8월 중 나타나며, 최저 수온은 2~3월에 나타난다(Fig. 3-2-2-19).

동해 월평균 표층 염분을 보면, 겨울철 표층 염분은 타타르 해협을 제외하고는 수평구배가 거의 없을 정도로 높은 염분을 유지하나, 여름철에는 장강 저염수의 영향을 받아 9월에 동해 남부 해역 및 울릉분지 해역의 염분이 최소가 된다(Fig. 3-2-2-20).

동해 월평균 혼합층 깊이는 11월에 동해 북부부터 발달하기 시작하여 한 겨울에는 일본분지 내가 거의 균일해 지는 정도로 발달하였다. 이는 해양 혼합층의 깊이는 알려진 사실보다 크게 과장되어 모사되었으나, 정성적인 분포 양상은 기존 연구결과와 부합한다고 할 수 있다. 동해 모사의 경우 표층 200 m보다 깊은 해역의 모사 정도가 상대적으로 작아 모형 개선을 위한 추가적인 노력이 필요하다(Fig. 3-2-2-21).

2) 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 농도

동해 월평균 표층 인산염은 혼합층의 발달과 더불어 겨울철 농도가 높게 나타나며, 여름철에는 생물작용의 영향으로 소진되어 낮게 나타난다. 장강을 통한 인산염의 공급은 상대적으로 작아서 그 영향이 매우 약화되어 나타나는 것처럼 보인다(Fig. 3-2-2-22).

동해 월평균 표층 질산염은 인산염과 마찬가지로 겨울철 동해 전역의 농도가 높게 나타나나, 빈영양 상태의 대마난류가 흐르는 일본연안은 상대적으로 작게 나타난다. 한편 장강 저염수의 영향으로 인한 질산염의 공급은 8월에서 10월에 걸쳐 동해 남부 해역까지 뚜렷하게 나타나는 것으로 보인다(Fig. 3-2-2-23).

동해 월평균 표층 규산염 농도는 겨울철 타타르 해협에서 가장 높게 나타나는 특징이 있으며, 원산만에서도 높게 나타났다. 인산염 및 질산염과 달리 동해 북부해역에서 매우 높게 나타나고, 장강 저염수의 영향으로 여름철 동해 남부에서도 높게 나타난다(Fig. 3-2-2-23).

3) 유광층 깊이, 엽록소a 표층농도 및 최대층 깊이

동해 월평균 유광층 깊이는 겨울철 일본분지에서 깊게 나타나는 특징을 보인다. 이는 동해 남부가 상대적으로 겨울철에 구름의 영향을 많이 받는 것으로 생각된다. 여름철 유광층의 깊이는 평균 40~60 m 정도이며 최대 85 m까지도 나타난다(Fig. 3-2-2-24).

동해 월평균 표층 엽록소a 농도를 보면 동해 남부 해역은 3월에 최대 번성이 나타나며 북부 해역은 4월에 최대 번성이 나타난다. 일본분지의 4월 번성은 동해에서 나타나는 연중 최댓값으로 이는 모형에서 과장되어 나타나는 혼합의 영향으로 깊은 곳의 많은 영양염이 공급되기 때문인 것으로 사료된다. 여름철의 경우 특징적으로 동해 남부에서 원산만에 이르는 남서부 해역에서 표층 엽록소a가 높게 나타나는 특징이 있다(Fig. 3-2-2-25).

동해 월평균 엽록소a 최대층 깊이는 12월에 전 동해에 걸쳐 낮게 나타나며, 겨울철에도 동해 북부해역에서 20 m 정도가 나타나는 데, 이는 추가 연구가 필요해 보인다. 대체로 여름철에는 40~60 m까지 나타난다(Fig. 3-2-2-26).

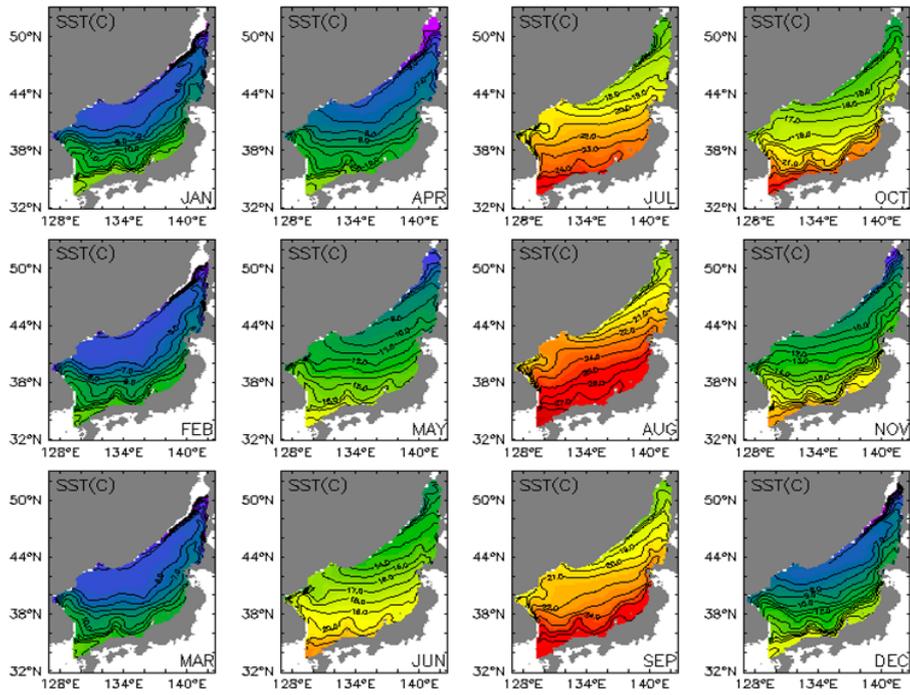


Fig. 3-2-2-19 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface temperature(°C).

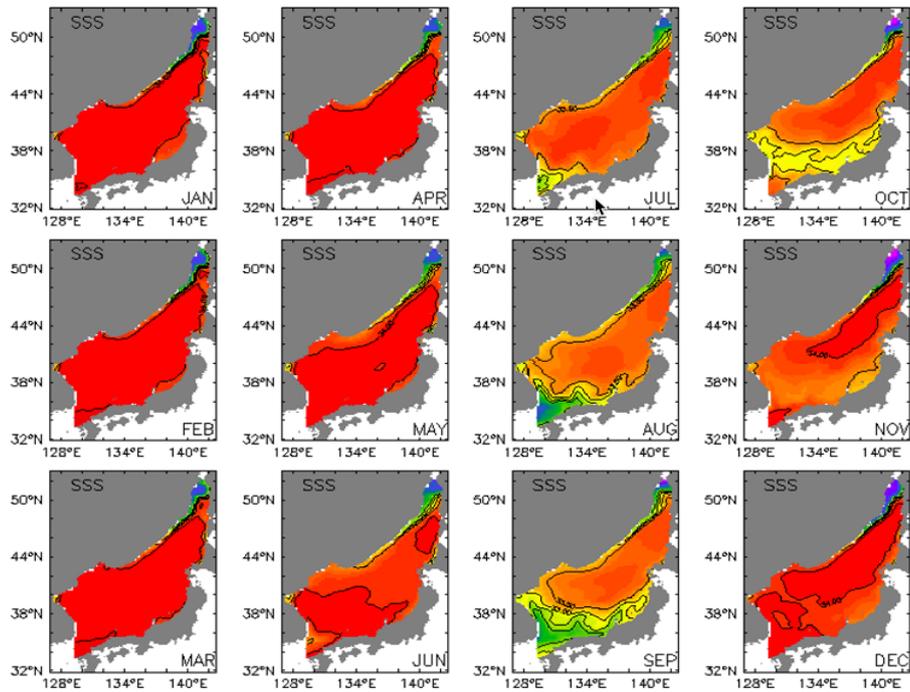


Fig. 3-2-2-20 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface salinity(PSU).

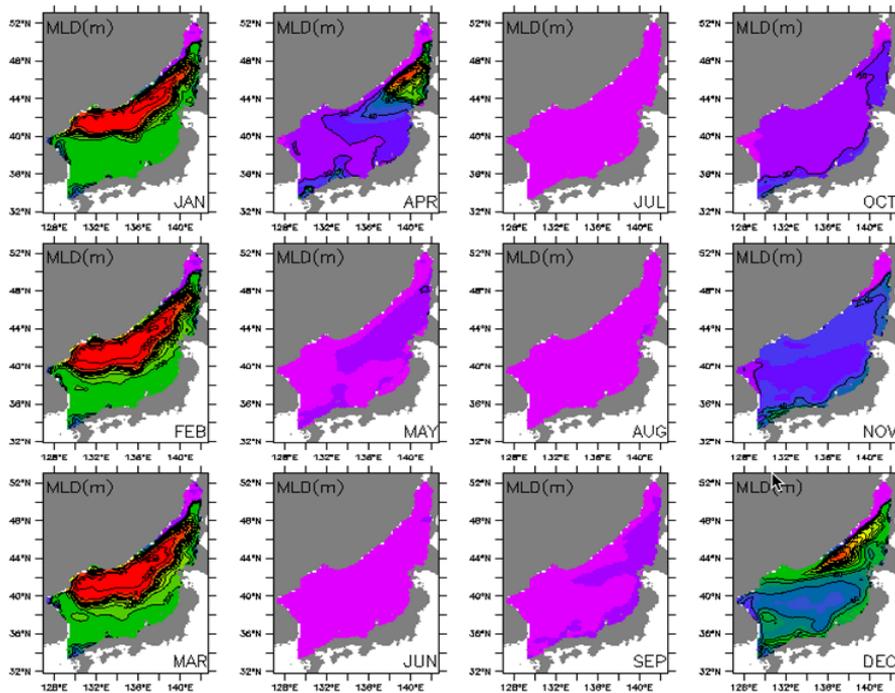


Fig. 3-2-2-21 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean mixed layer depth(m).

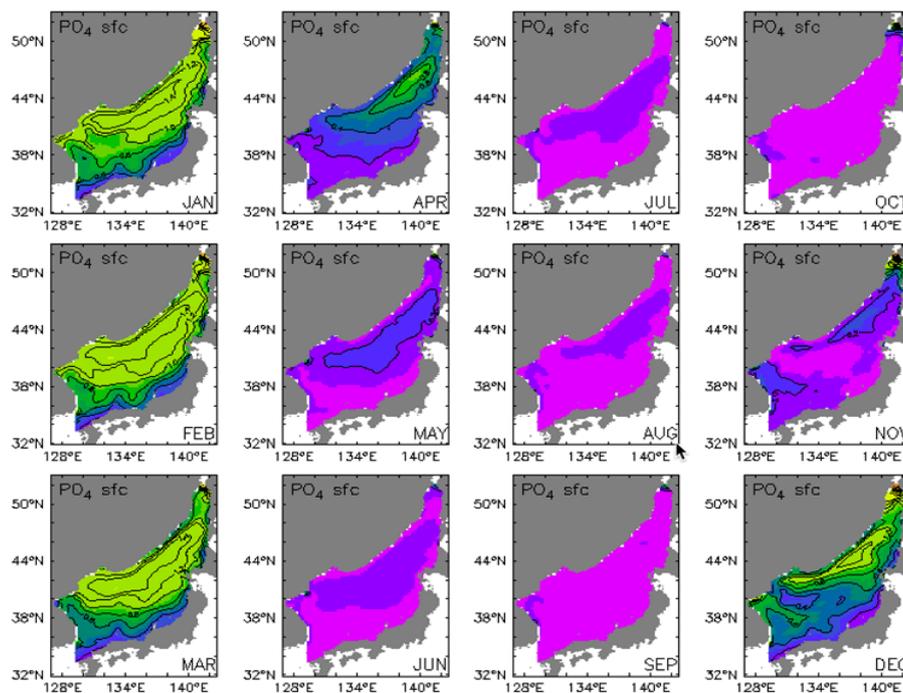


Fig. 3-2-2-22 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface phosphate(mmol P/m³).

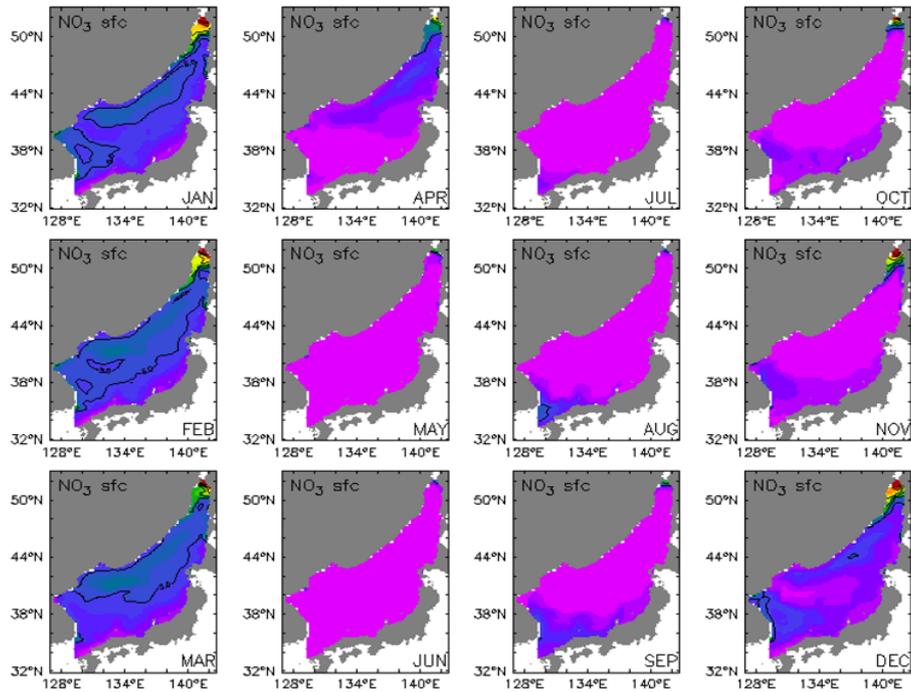


Fig. 3-2-2-23 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface nitrate(mmol N/m^3).

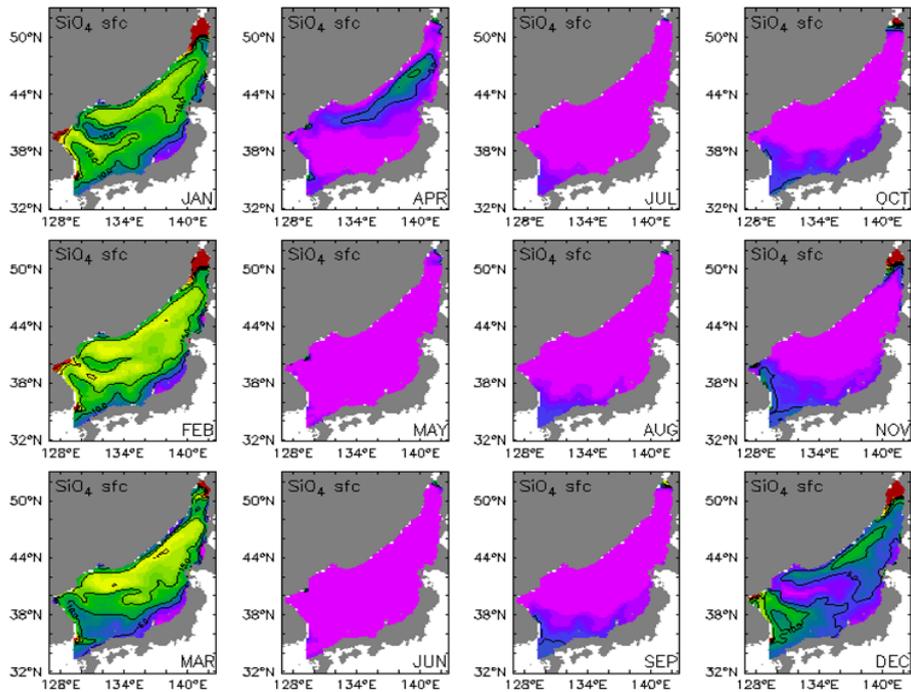


Fig. 3-2-2-24 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface silicate(mmol Si/m^3).

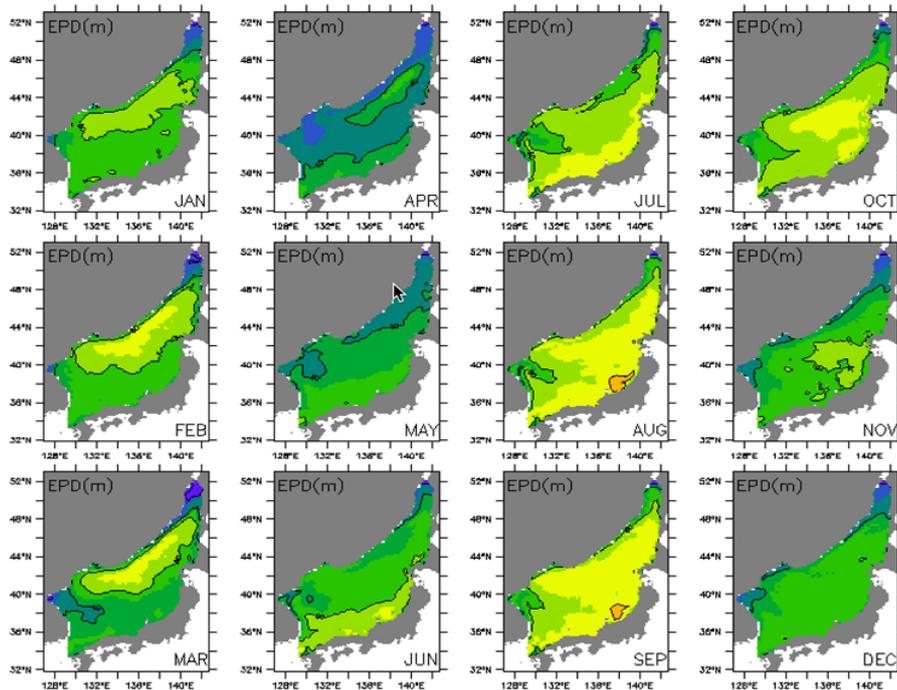


Fig. 3-2-2-25 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean euphotic depth(m).

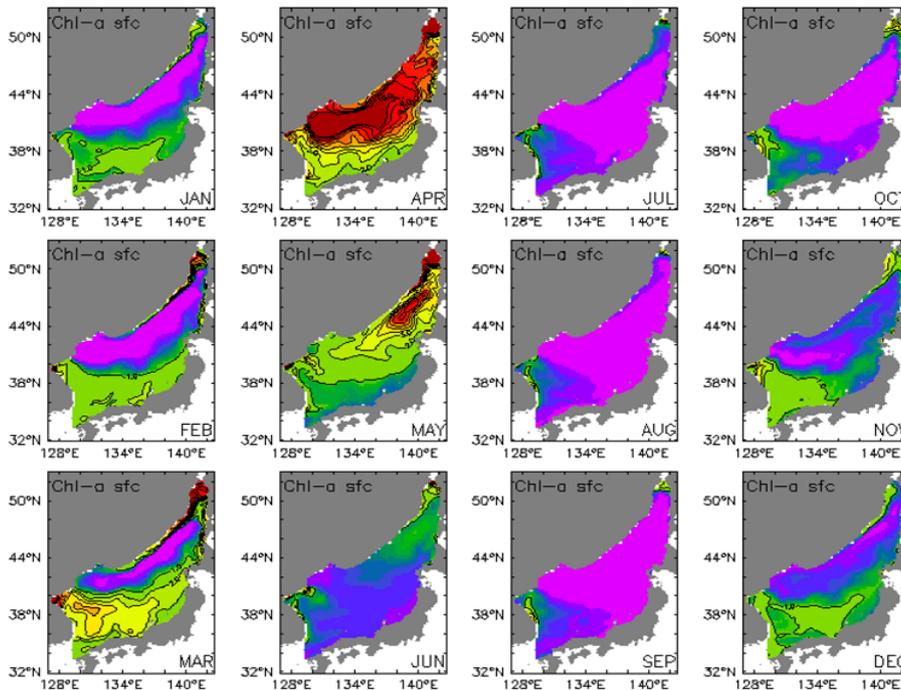


Fig. 3-2-2-26 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean surface chlorophyll_a(mg Chl/m³).

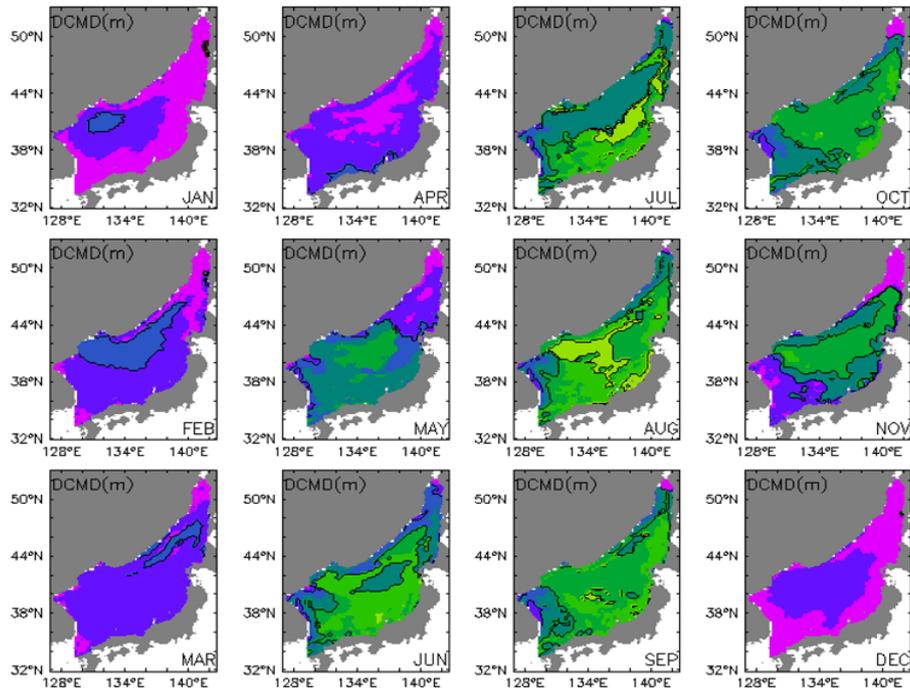


Fig. 3-2-2-27 Climatological mean field of the past 30 years(1981~2010) in the East Sea - monthly mean depth of Chlorophyll_a maximum(m).

3. 과거 30년 생태계 핵심변수 경년변동성

본 절에서는 1981년부터 2010년까지 과거 재현 실험을 한 결과를 기반으로 매년 매월 평균장을 토대로 해역별 생태계 핵심변수를 물성(수온, 염분, 혼합층 깊이), 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산(유광층 깊이, 표층 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이)의 측면으로 구분하여 그 선형적 변화 추이를 분석하고 그 특징을 간략히 기술하였다.

가. 황해 과거 30년(1981~2010) 변화 추이(Fig. 3-2-3-1, 3-2-3-2)

1) 표층 수온 및 염분, 혼합층 깊이

과거 30년 황해의 표층 수온은 평균 1.3 °C 증가하였으며, 공간적으로도 큰 차이를 보이지 않는다, 일반적으로 수심이 깊은 황해 중앙부보다는 연안역의 수온상승이 훨씬

크게 나타나났다.

염분은 평균적으로는 0.02 정도 감소하였으나, 공간적으로는 중국 연안은 전반적으로 높아진 반면 동경 124도 동쪽 우리나라 연해 쪽으로 많이 낮아졌다. 이런 가운데 특이하게도 경기만의 표층 염분은 중국연안과 마찬가지로 높아졌다.

황해의 평균 혼합층 깊이는 0.09 m 감소하였으나, 수심이 깊은 황해 중앙부는 그 감소율이 큰 편이며, 연안역은 오히려 증가하였다.

2) 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 농도

한편 표층 영양염의 농도는 대부분 증가하였는데 공간 평균값으로 볼 때 인산염은 0.56, 질산염은 4.59, 규산염은 5.47 mmol/m³ 각각 증가하였다.

표층 인산염 증가는 공간적으로 볼 때 산둥 반도 북쪽과 남쪽으로 중국 연안을 따른 증가가 두드러지며, 경기만과 서한만의 외해역인 황해 중부 해역에서의 증가율이 높게 나타난다. 이런 공간적인 차이는 질산염 증가에서도 동일한 양상으로 나타나는데 반해서 규산염의 경우 발해 만에서의 변동성은 거의 없는 것으로 나타났으며, 서한만 북쪽과 요동반도 남쪽으로 둘러싸인 해역에서 증가율이 가장 크게 나타났다.

3) 유광층 깊이, 엽록소a 표층농도 및 최대층 깊이

공간평균 유광층 깊이는 0.5 m 감소한 것으로 나타났는데, 공간적으로는 황해 중부에서의 감소율이 가장 크게 나타났으며 우리나라 서해안에서는 오히려 다소 깊어진 것으로 나타났다.

표층 엽록소a는 공간 평균값이 0.88 mmol/m³ 증가하여 생산성이 증대되었으며, 중국 연안과 요동반도 남쪽에서의 증가율이 두드러지게 나타났다. 특이하게도 황해 중남부와 우리나라 서해안에서는 변화가 거의 없는 것처럼 나타났다.

엽록소a 최대층 깊이는 약 1.6 m 정도 감소하였으며, 발해만과 산둥 반도 남쪽에서의 감소율이 가장 크게 나타났고 상대적으로 우리나라 서해안에서는 큰 변화가 없었던 것으로 나타났다.

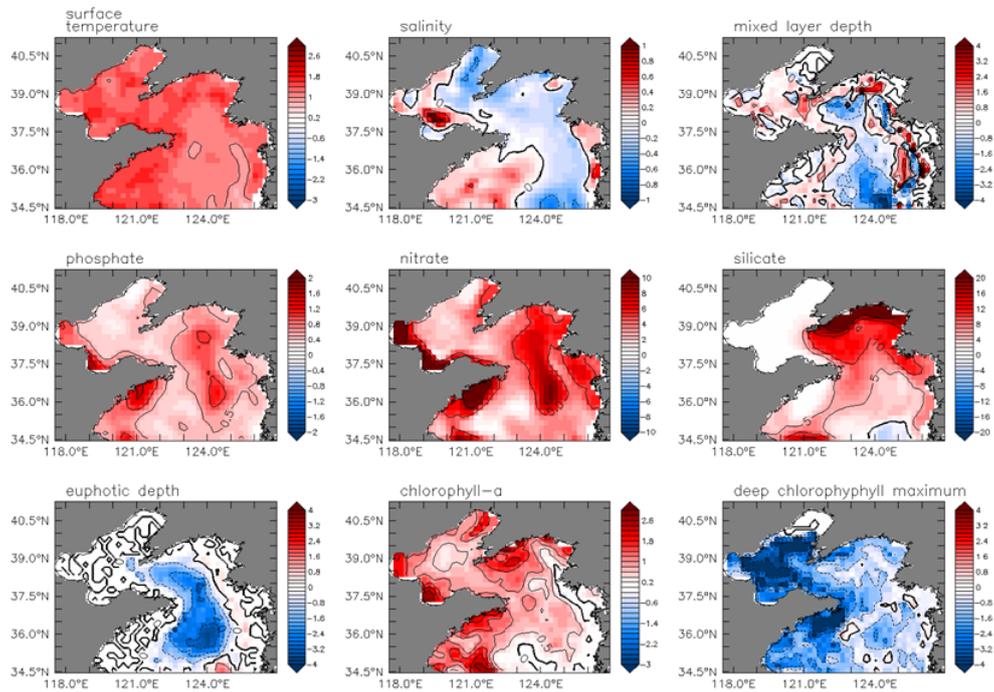


Fig. 3-2-3-1 Horizontal distribution of change trend of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the Yellow Sea.

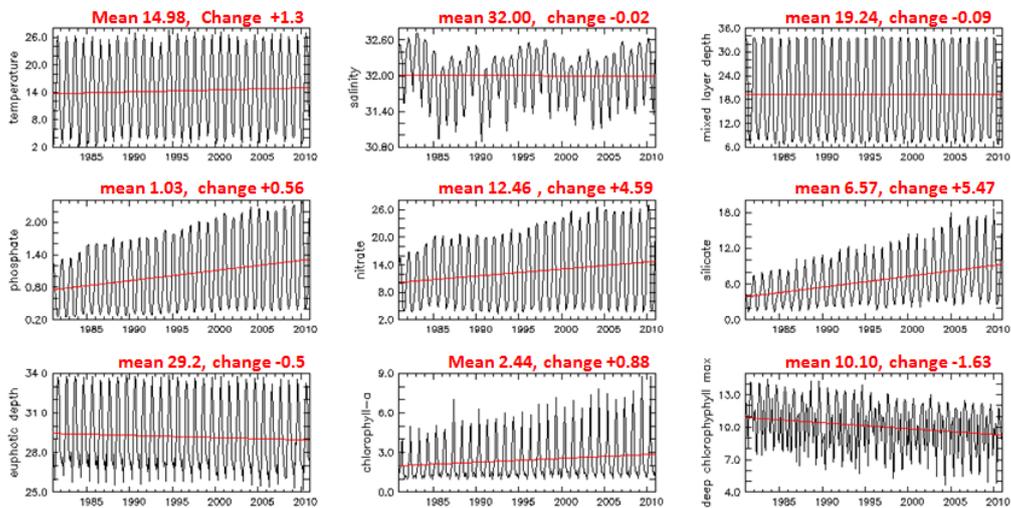


Fig. 3-2-3-2 Variabilities and trends of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the Yellow Sea.

나. 동중국해 과거 30년(1981~2010) 변화 추이(Fig. 3-2-3-3, 3-2-3-4)

1) 표층 수온 및 염분, 혼합층 깊이

과거 30년 동중국해의 표층 수온은 평균 $0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 증가하였으며, 그 증가율은 동중국해 대륙붕 해역에서 크게 나타났고 상대적으로 쿠로시오 해역에서는 크지 않았다.

표층 염분의 공간 평균값은 30년 동안에 0.06 PSU 정도가 감소한 것으로 나타났으나, 주로 쿠로시오 해역과 제주 이남 해역에서의 감소가 뚜렷하게 나타났고, 중국 연안 및 장강 저염수의 영향을 받는 해역에서는 오히려 염분이 증가하였다. 이는 최근 장강 유량의 감소에 따른 결과로 생각된다.

혼합층 깊이의 공간 평균값은 0.45 m 감소하는 것으로 나타났으나, 장강 저염수 영향역에서는 오히려 증가하였고, 규슈 남부 쿠로시오 해류 해역에서의 감소가 뚜렷하게 나타났다.

2) 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 농도

인산염의 농도는 공간평균 0.02 mmol/m^3 증가한 것으로 나타났으나 장강 저염수 해역에서는 오히려 감소한 것으로 나타났고, 증가율에 기여한 해역은 황해와의 접경 해역인 동중국해 북부 해역이었다.

질산염은 공간 평균으로 볼 때 1.07 mmol/m^3 감소하였는데, 이는 인산염과 마찬가지로 대부분 장강희석수의 영향을 받는 해역에서의 감소가 뚜렷하였고, 동중국해 북부 해역에서는 오히려 증가하는 추세를 보였다.

규산염 농도는 전반적으로 2.76 mmol/m^3 증가하였으며, 장강 이북 중국연안쪽에서의 증가율이 두드러지게 나타났고, 장강 저염수나 쿠로시오 해역에서의 증가율은 상대적으로 미미했다.

3) 유광층 깊이, 엽록소a 표층농도 및 최대층 깊이

동중국해 유광층 깊이는 지난 30년간 1.0 m 깊어진 것으로 나타났으며, 이는 주로 쿠로시오 해류 해역에서의 증가로 인한 것이었다.

표층 엽록소a의 농도는 0.005 mmol/m^3 로 미약하게 감소하였으며, 이는 주로 장강 희석수역과 쿠로시오 해류 해역에서의 감소와 장강 이북 중국연안에서의 높은 증가율

이 상쇄된 효과이다.

한편 엽록소a 최대층 깊이는 공간 평균 0.81 m 증가하였으며, 특이하게도 타이완 해협으로부터 대한해협에 이르는 쿠로시오-대마난류 해역에서의 증가율이 크게 나타났고, 이 해역 북쪽과 남쪽에서는 오히려 감소하였다.

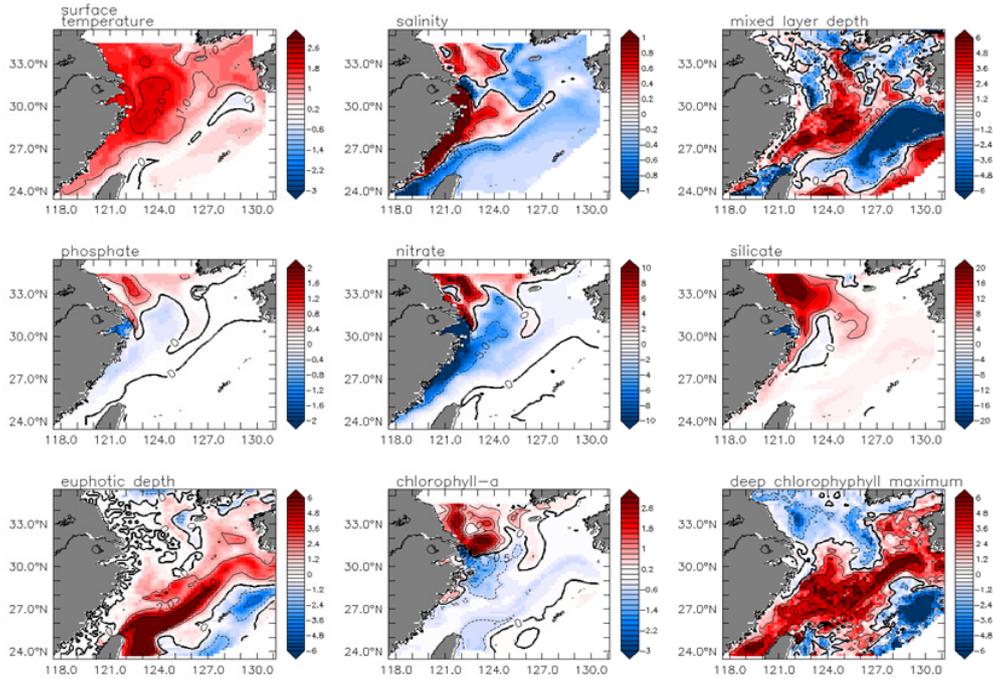


Fig. 3-2-3-3 Horizontal distribution of change trend of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East China Sea.

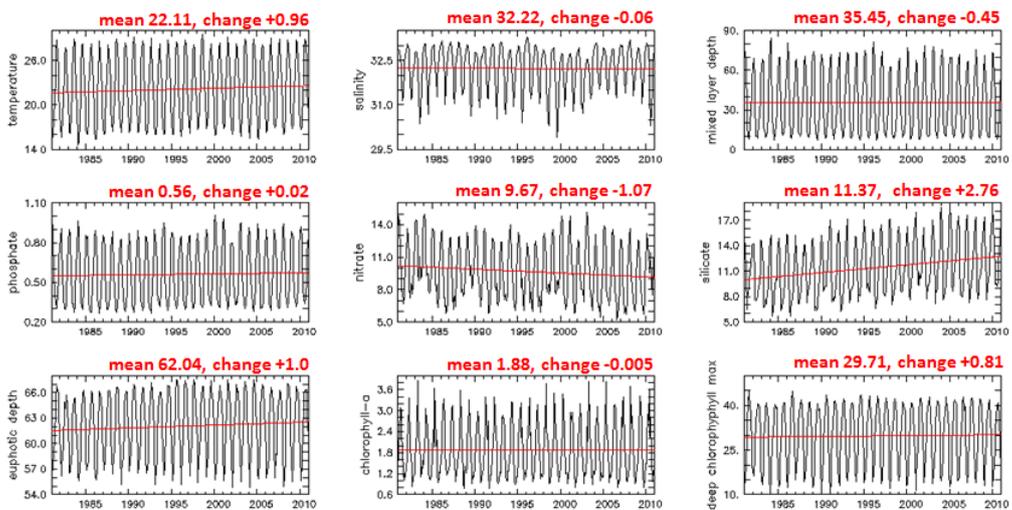


Fig. 3-2-3-4 Variabilities and trends of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East China Sea.

다. 동해 과거 30년(1981~2010) 변화 추이(Fig. 3-2-3-5, 3-2-3-6)

1) 표층 수온, 염분 그리고 혼합층 깊이

과거 30년 동안 동해의 표층 수온은 평균 1.35 °C 증가한 것으로 나타났으며 황해와 마찬가지로 전 해역 걸쳐 그 증가율이 비슷하다.

염분은 공간 평균값은 0.06 이 감소한 것으로 나타났는데, 대부분 극전선 남부해역에서 그 감소 경향이 크게 나타났으며, 러시아 연안역에서는 반대로 염분이 높아졌고 이런 양상은 타타르 해협에서 가장 크게 나타났다.

해양 혼합층 깊이는 평균적으로 17.91 m 증가하여 그 변화가 크게 나타났는데 무엇보다 일본분지에서의 증가 추세가 가장 컸으며, 이외의 해역은 오히려 혼합층의 깊이가 낮아졌다.

2) 표층 영양염(인산염, 질산염, 규산염) 농도

동해 표층 인산염 농도는 공간 평균적으로 0.07 mmol/m³ 감소하였으며, 감소 추세는 러시아와 홋카이도 사이인 동해 북동부에서 가장 크게 나타났다.

질산염 농도 역시 감소하여 30년 동안에 0.69 mmol/m³ 정도 줄어들었으며, 감소 추세는 러시아 연안역과 일본분지 북부해역에서 크게 나타났다.

규산염 농도는 공간평균값이 0.47 mmol/m³ 증가한 것으로 나타났으나, 일본분지 해역에서는 오히려 감소한 것으로 나타났다.

3) 유광층 깊이, 엽록소a 표층 농도 및 최대층 깊이

동해의 유광층 깊이는 공간 평균적으로는 0.25 m 증가하여 큰 차이가 없어 보이나 극전선역과 쓰가루 해협 서쪽에서는 오히려 감소한 것으로 나타났다.

엽록소a의 공간 평균 농도는 0.09 mmol/m³ 감소하였는데, 공간적으로는 동한난류 해역, 극전선 해역, 일본분지류 해역에서 국소적으로 높아진 해역들이 나타난다.

엽록소a 최대층 깊이는 공간평균 상 0.65 m 증가하였으나 울릉분지를 포함한 남서부해역에서는 오히려 감소하였고, 북동부 해역에서의 증가추세가 더 뚜렷하였다.

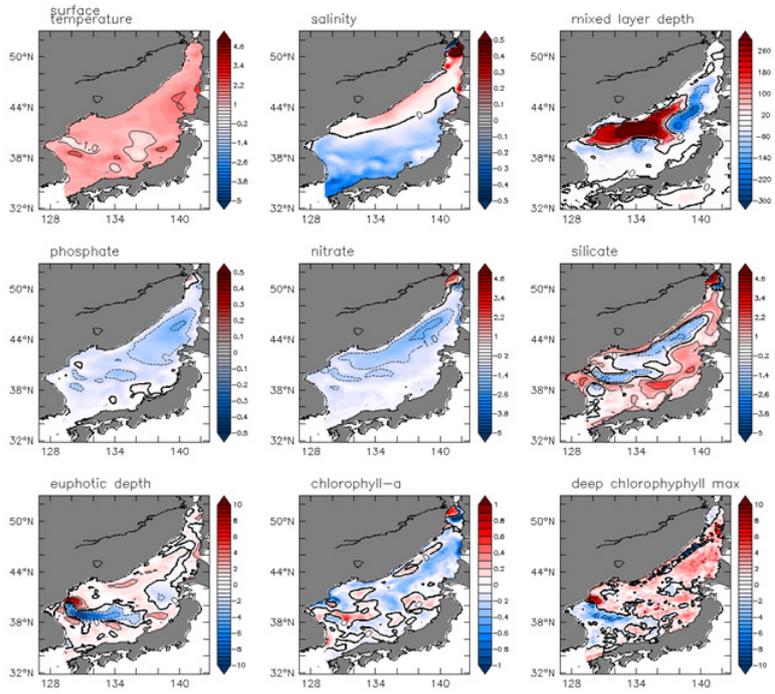


Fig. 3-2-3-5 Horizontal distribution of change trend of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East Sea.

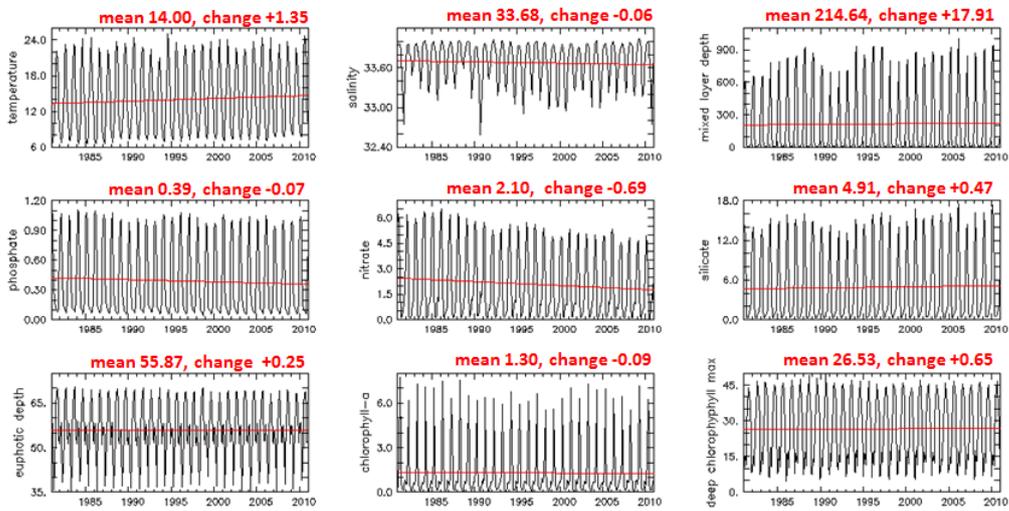


Fig. 3-2-3-6 Variabilities and trends of the past 30 years(1981~2010) in the surface layer of the East Sea.

4. 생태계 핵심변수 시범 변천도(1981~2010)

본 절에서는 1981년부터 2010년까지 과거 재현 실험을 한 결과를 기반으로 10년 단위로의 계절평균값을 산출한 후 이를 30년 평균값 대비 편차로 표현하여 지난 30년 동안에 각 해역별 표층 생태계 핵심변수가 기후평균장 대비 어떻게 변화해 왔는지를 볼 수 있는 시범 변천도를 작성하여 제시하였다.

해역은 황해, 동중국해 및 동해로 구분하였으며, 시범 변천도로 대한해협 수송량과 7개 생태계 핵심변수 (엽록소a, 수온, 염분, 용존산소, 인산염, 질산염, 규산염)를 위주로 표층 분포 변화도와 단면 분포 변화도를 제시하였다. 여기서 시범 변천도라고 명명한 이유는 현재까지 변천도 개발에 따른 용어나 과정 등이 정의되지 않았기 때문에 예로서 제시한다는 의미도 있지만, 모형 결과가 여전히 불완전하고 개선해야 할 점이 많기 때문에 결과 해석에 주의가 필요함을 상기시키기 위함이다.

가. 동해 통과류 주요 해협별 수송량 시범 변천도

대마난류로 통칭되는 동해 통과류의 수송량 변동성에 대해서 대한해협, 쓰가루해협, 소야해협, 타타르해협 각각에 대하여 1980년대, 1990년대, 2000년대로 나누어 계절변동성을 비교하였다(Fig. 3-2-4-1). 과거 30년 기후평균장은 점으로 표현하였으며, 관측을 기반으로 한 Takikawa et al.(2010))의 대한해협 수송량을 덧그렸다.

대한해협 수송량은 30년 평균장과 비교해 볼 때, 1980년대와 1990년대는 전반적으로 평균값보다 작으나 2000년대의 수송량은 컸으며, Takikawa et al.(2000)의 자료는 2000년대 모형 결과와 전반적으로 비슷하다. 모형에서는 대한해협 수송량의 최솟값이 8월에 나타났으나 관측 값은 10월에 최솟값을 보여 계절 변동장에 차이가 있다.

쓰가루해협에서는 1980년대와 1990년대가 비슷하다가 2000년대에 증가한 것으로 볼 수 있으며 소야해협의 경우는 1980년대에서 2000년대로 갈수록 점진적으로 수송량이 증가하는 추세를 볼 수 있다. 타타르해협에서는 여름철만 제외하고는 대부분 오후즈크 해에서 동해로 유입되는 양상을 보였으며 시대적으로 그 수송량은 큰 차이가 없다.

쓰가루해협의 계절변동성은 대한해협의 계절변동성과 매우 유사하지만 1980년대와 90년대 최소 수송량이 대한해협보다 1개월가량 늦게 나타나며 8월 이후 감소하던 수송량이 11월에 약간 증가하는 양상이 대한해협 수송량의 계절변동성과는 다르게 나타

난다.

반면 소야해협 수송량은 9월에 최대가 되어 최대 수송량이 나타나는 시기가 대한해협보다 1개월 늦게 나타난다. 대한해협과 쓰가루해협 수송량은 2000년대 들어 상대적으로 증가폭이 큰 반면 소야해협 수송량은 점진적으로 증가하는 경향이 나타난 것은 주목할 만 하다.

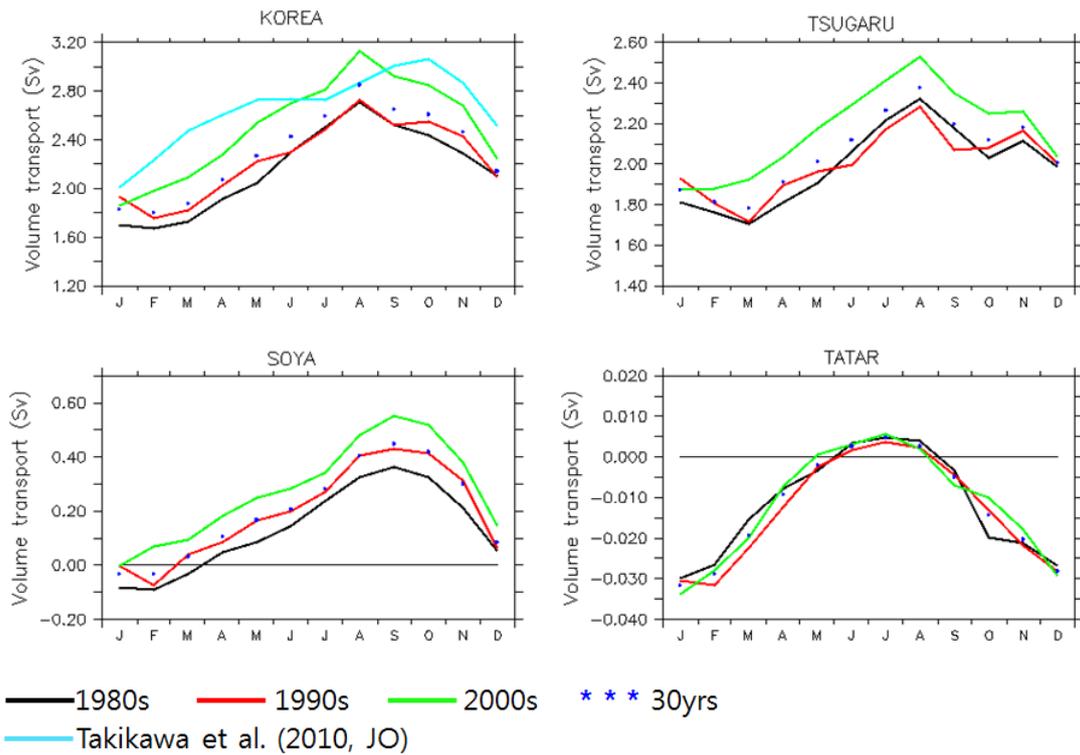


Fig. 3-2-4-1 Changes of volume transport of the East Sea currents in the major straits.

나. 표층 엽록소a의 시대별, 해역별 시범 변천도

30년 평균장에 대한 시대별 계절변화 변천을 보기 위해서 Fig. 3-2-4-2에 표층 엽록소a 농도에 대한 해역별 변천도를 예를 들어 제시하였다. 각 그림은 1981년부터 2000년까지 30년 평균장에 대한 편차이다.

황해의 경우 표층 엽록소a의 봄철 증가 추세가 뚜렷하게 나타나며, 겨울만 제외하고는 전반적인 증가추세를 보인다. 동중국해는 전 계절에 걸쳐 감소하는 추세로써 봄철

의 감소추세가 가장 뚜렷하여 황해와는 대조적으로 나타났다. 동해는 2000년대 들어 봄, 여름, 가을은 황해와 마찬가지로 증가했고 겨울에는 오히려 감소했다.

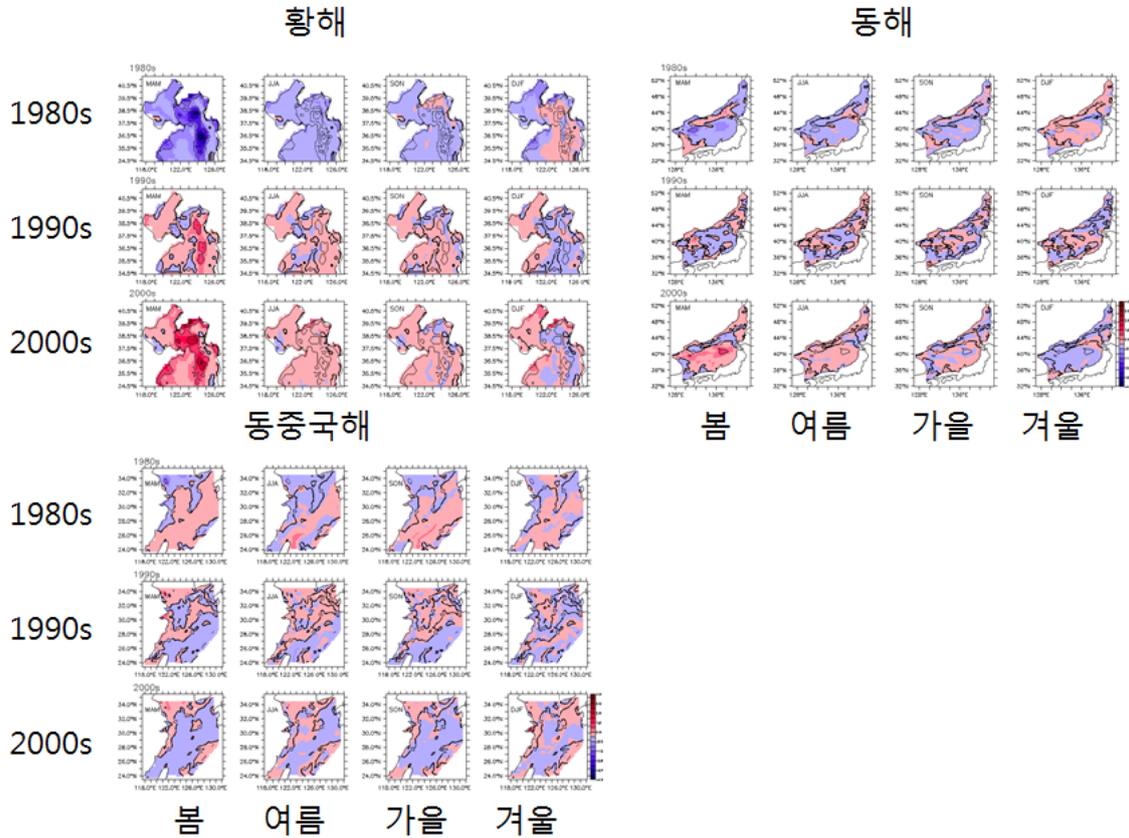


Fig. 3-2-4-2 Periodical and regional change map of seasonal surface chlorophyll_a (deviation from the 30 year mean).

다. 황해 표층 생태계 핵심변수 변천도

황해에서의 6개 표층 생태계 핵심변수의 30년 기후평균장에 대한 각 시기별 편차를 Fig. 3-2-4-3에 나타내었다. 표층 수온은 2000년대 들어 지난 30년 평균치보다 전반적으로 높아졌음을 알 수 있으며, 그런 변화는 계절에 상관없이 연중 발생했음을 알 수 있다.

염분은 1980년대가 상대적으로 낮았으며, 1990년대와 2000년대에 들어 높아졌고, 전 계절에 걸쳐 이런 변화가 일어났다. 용존산소는 수온 및 염분의 변화와 달리 봄, 여

름에 걸쳐 증가했으나 가을은 별 변화가 없고 겨울에는 오히려 감소하였다.

영양염의 경우, 인산염은 특이하게도 황해의 서쪽과 동쪽이 구분되어 1980년대에는 서쪽이 30년 평균보다 높고, 동쪽이 낮았지만 1990년대와 2000년대는 반대의 양상으로 나타나 서쪽은 인산염 농도가 감소했고 동쪽은 증가했다. 이런 변화는 전 계절에 걸쳐 비슷한 양상으로 나타났다.

질산염 농도는 전반적으로 1980년대에는 기후평균값보다 작았으며, 1990년대부터 평균보다 높아지기 시작해서 2000년대에는 전 계절에 걸쳐 평균보다 높아졌다. 규산염의 경우도 질산염과 마찬가지로 전 계절에 걸쳐 1980년대는 평균보다 낮고 2000년대에는 평균보다 높게 나타났다.

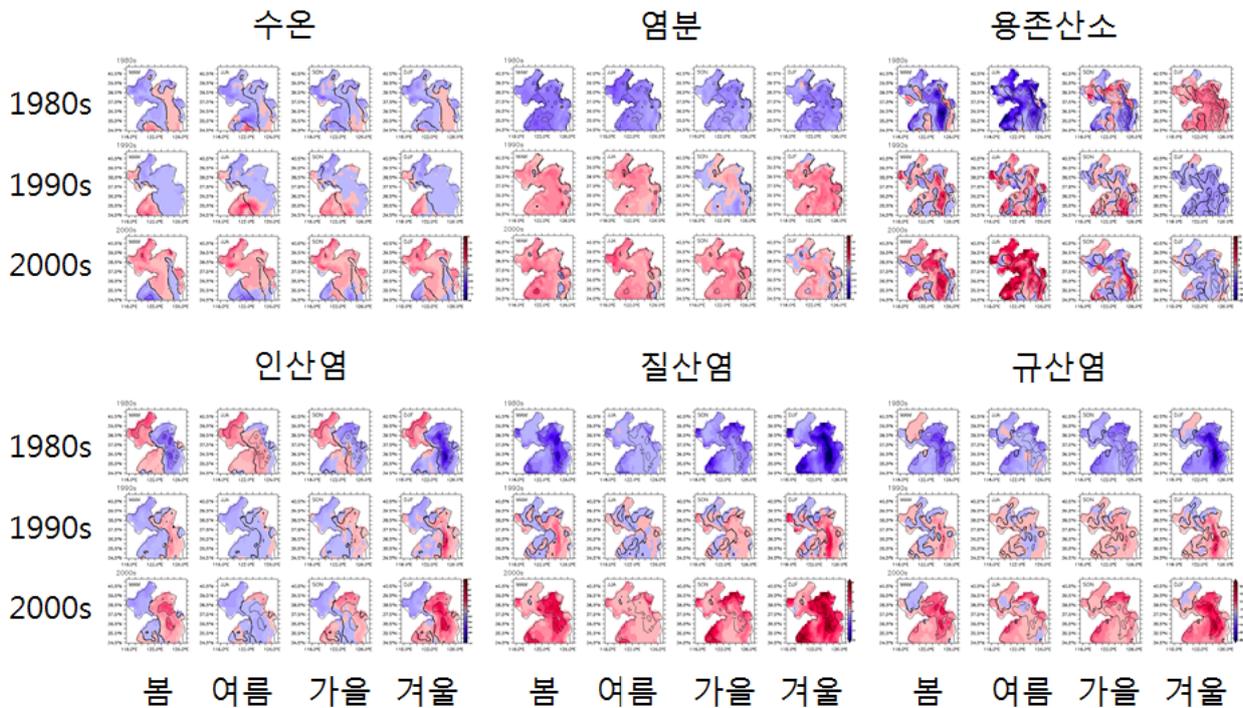


Fig. 3-2-4-3 Change maps of EVE for the past 30 years in the Yellow Sea (deviation from the 30 year climatological mean).

라. 동중국해 표층 생태계 핵심변수 변천도

동중국해에서의 6개 표층 생태계 핵심변수에 대한 30년 기후평균장에 대한 각 시기 별 편차를 Fig. 3-2-4-4에 나타내었다. 표층 수온은 1980년대가 가장 높았고 이후

낮아지기 시작해서 1990년대와 2000년대는 평균보다 낮아졌다. 계절적인 차이보다는 장강 저염수 영향을 받는 해역에서의 공간적 차이에 의한 분포 차이가 나타나는 것이 특징이다.

표층 염분은 쿠로시오 해역을 빼고는 1980년대에는 평균보다 낮았으며, 1990년대 들어 여름철에는 쿠로시오 해역의 염분이 높아졌지만, 겨울철에는 오히려 낮아진 양상을 보이다가 2000년대 들어 전 계절의 염분이 높아졌고 여름 가을에 걸쳐 쿠로시오 해역에서는 염분이 낮아졌다.

용존산소의 경우는 1980년에는 평균보다 높았고, 겨울철에 특히 높았으며, 2000년대 들어 중국연안을 제외하곤 전 계절에 높아졌다.

동중국해의 표층 인산염 농도는 겨울과 봄철에 북쪽에선 낮아지고 남쪽에선 높아지는 변화를 보였으며 여름, 가을에는 2000년대 들어 전반적으로 증가했다. 질산염 농도도 1980년대와 2000년대의 상반된 변화를 보이며, 규산염의 경우 전 계절에 걸쳐 1980년대는 낮았고 이후는 높아졌다.

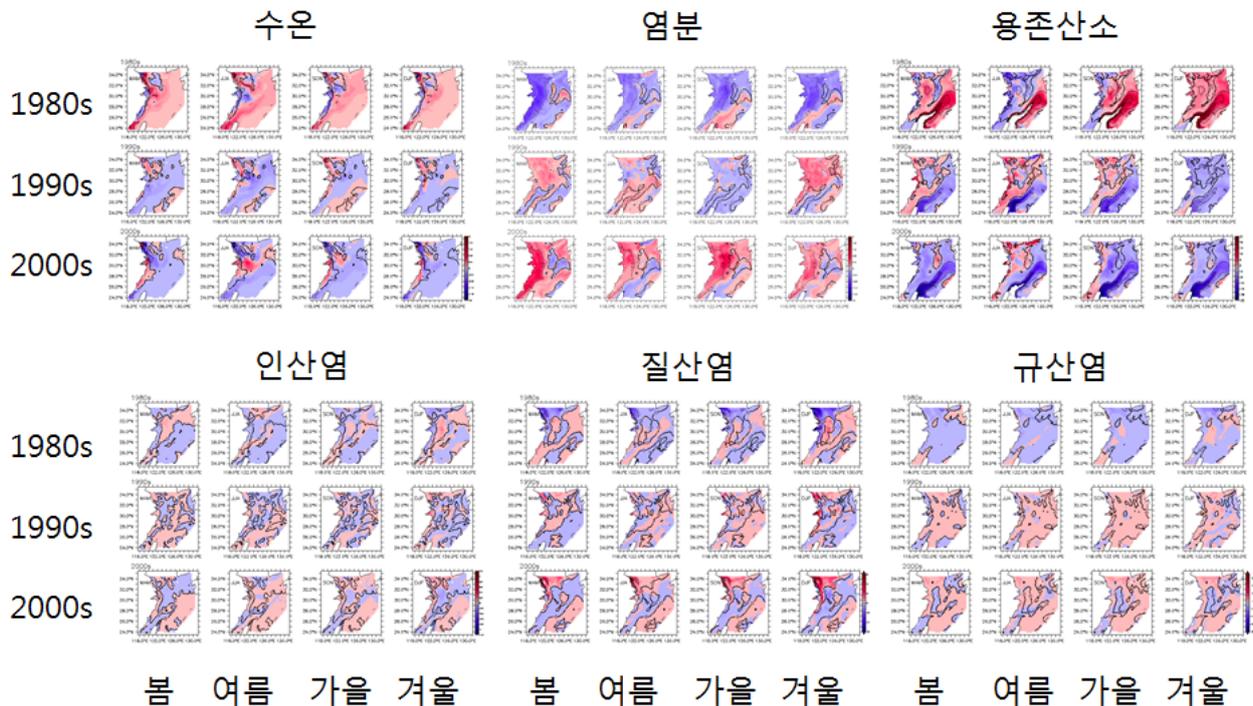


Fig. 3-2-4-4 Change maps of EVE for the past 30 years in the East China Sea (deviation from the 30 year climatological mean).

마. 동해 표층 생태계 핵심변수 변천도

동해에서의 6개 표층 생태계 핵심변수에 대한 30년 기후평균장에 대한 각 시기별 편차를 Fig. 3-2-4-5에 나타내었다. 표층 수온은 1980년대에 가장 낮았고 2000년대 들어서 평균보다 높아졌다. 계절적인 차이는 크지 않은 것이 특징이다. 염분의 경우, 1980년대와 1990년대 및 2000년대가 서로 상반되어 변화하였는데, 북쪽은 낮았다가 높아졌고, 남쪽은 높았다가 낮아졌다. 계절적인 차이는 크게 구별되지 않는다. 용존산소는 1980년대에 전반적으로 높았으며, 이후 봄과 겨울을 위주로 낮아졌다.

동해의 표층 인산염 농도는 봄과 겨울에는 1980년에 낮았다가 2000년대에 증가한 양상을 나타내고, 여름과 가을에는 1980년대와 1990년대가 2000년대보다 북쪽에서 높고 남쪽에서 낮게 나타났다. 표층 질산염 농도는 봄과 겨울철의 변화가 뚜렷하여 1980년대에는 평균보다 높았으나 2000년대에는 평균보다 낮아졌다. 규산염 농도 역시 겨울과 봄의 변화가 뚜렷하게 나타났는데, 전반적으로 1980년대보다 2000년대의 농도가 높아졌다.



Fig. 3-2-4-5 Change maps of EVE for the past 30 years in the East Sea (deviation from the 30 year climatological mean).

바. 황해-동중국해 남북단면(124E) 생태계 핵심변수 시범 변천도

Fig. 3-2-4-6은 황해 및 동중국해를 포함한 동경 124E의 남북 단면에서 수온, 염분, 인산염, 질산염, 규산염, 엽록소a 의 연직분포의 시기별 변천도이다.

수온의 경우 쿠로시오 해역부터 황해 북부 해역까지 전 층의 수온이 1980년에는 기후평균보다 낮았으며 2000년대에는 높아졌다. 염분의 경우 황해와 동중국해의 경계가 되는 위도에서 변화가 1980년대와 1990년에 대별되고 2000년대에는 전반적으로 남쪽은 낮아졌고 북쪽은 높아졌다.

영양염의 경우 황해 내부에서 1980년대에는 낮았다가 2000년대에는 높아졌으며, 엽록소a의 경우는 1980년대와 1990년대 및 2000년대가 대별되어 동중국해에서는 높았다가 낮아졌고, 황해내부에서는 낮았다가 높아지는 변화를 보였다.

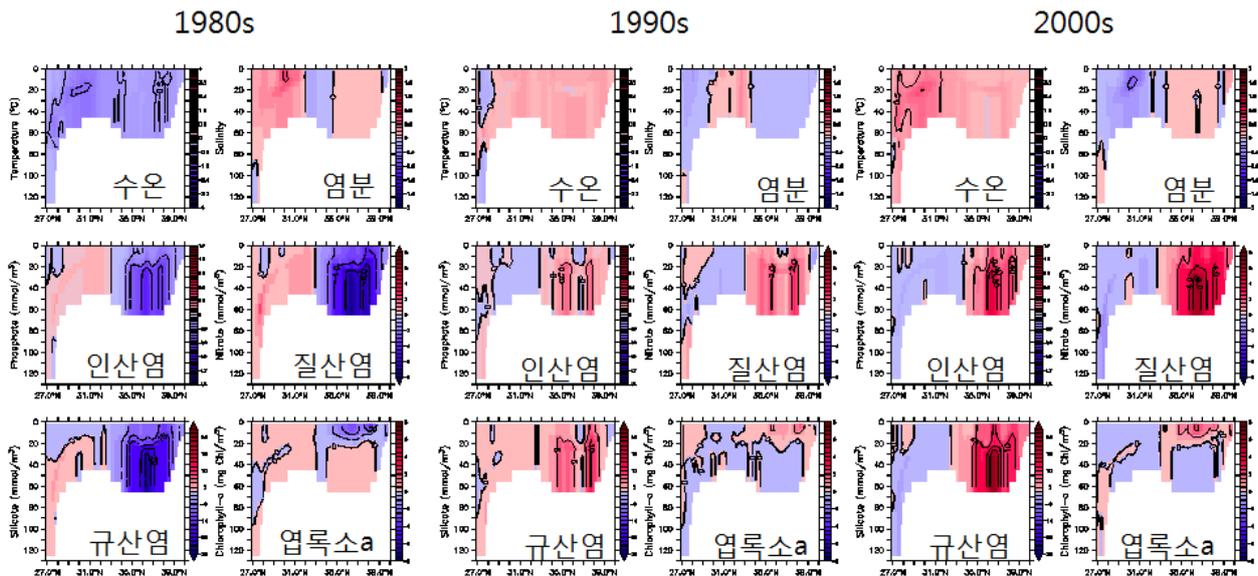


Fig. 3-2-4-6 Periodical change map of EVE on the meridional section(124°E) of the Yellow and East China Sea (deviation from the 30 year climatological mean).

제 3 절 장강유출량 미래변화 시나리오 기반 생태계 핵심변수 미래 전망

우리나라 주변해역의 해양생태계가 기후변화에 의해서 향후 어떻게 변할 것인가를 예측하는 것은 매우 어려운 일이지만, 이를 통해 미래를 준비하고 현재를 더 잘 관리해 나갈 수 있는 정책의 계획과 시행에 있어서 반드시 필요한 연구이다. 하지만 기후

변화 시나리오에 의한 미래변화 예측의 불확실성이 크기 때문에 가능하지만 다양한 시나리오를 설정하고 모형과 같은 도구를 이용해 시나리오에 대한 미래 변화상을 전망하는 방법밖에는 다른 대안이 없는 상태이다.

한편 미래를 전망하기 위한 모형을 도구로 사용하기 위해서는 모형의 현재 상태 재현 성능이 선결적으로 향상되어야 할 과제이나, 제 2 절에서 제시한 바와 같이 현 수준에서 우리나라 주변해역의 생태계에 대해서 진단할 수 있는 핵심변수에 대한 관측 결과조차 매우 제한적이다.

따라서 본 절에서는 미래 기후변화 시나리오에 대한 한반도 주변해역의 생태계 핵심변수 변화 전망을 위한 첫걸음 차원에서 우리나라 주변해역에 가장 큰 영향을 미치는 장강의 유출량 변화 시나리오에 초점을 맞추었다.

2050년대를 목표시기로 하여 IPCC AR5 모형 결과 분석을 통한 장강 유출량 변화를 전망하는 방법을 개발하고, 이를 해양 순환-생지화학 결합 생태계 모형의 하천 경계조건으로 부여하여 이에 대한 해양생태계의 변화상을 분석함으로써 장강 유출량 미래변화 시나리오에 따른 생태계 핵심변수들의 미래 변화상을 시범적으로 전망하고자 하였다.

1. 전 지구 기후모형 자료(CMIP5) 분석 및 평가

기후변화에 대한 국가간위원회(IPCC)의 제5차 보고서에 참여한 전 지구 기후모형 자료(CMIP5)의 공간 해상도나 현재 기후 모사 정도는 천차만별이라 할 수 있다 (Table 3-3-1-1). 따라서 본 연구에서는 이들 모형 결과 중 23개 모형 결과에 대해서 우리나라 주변 해역을 포함한 북태평양 해역의 혼합층 깊이, 해면수온의 시공간적 기후분포 모사 정도를 파악하고자 하였다.

Fig. 3-3-1-1은 해양 혼합층 모사 정도를 관측 자료와의 편차와 Taylor Diagram(Taylor, 2001)에 나타낸 것으로써 평가한 CMIP5 모형들과 관측간의 혼합층 차이는 대부분 비슷한 패턴을 보인다. 동해와 쿠로시오 확장 해역에서 모형들이 관측 값보다 깊게 모사가 되며, 북태평양 알류시안 열도 아래는 모형들이 관측 값보다 얇게 모사하였다.

일부 모형(FGOALS-g2, NorESM1-M, NorESM1-ME)의 경우 다른 모형과 다른 패턴을 보이며, 특히 쿠로시오 확장 해역 부분에 낮은 해수면 모사를 보인다는 특징이 있다.

Table 3-3-1-1 A list of 23 CMIP5 models used for evaluating reproducibility of present climate.

	Name	Country	Institution	Resolution	# of Vertical layers	grid (lonXlat)
1	bcc-csm1-1	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	1°, 1/3°@equator Tripolar	40	360X232
2	CanESM2	Canada	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	256X192	40	256X192
3	CCSM4	USA	US National Centre for Atmospheric Research	Nominal 1° (1.125° in longitude, 0.27-0.64° variable in latitude)	60	320X384
4	CESM1-CAM5	USA	NSF-DOE-NCAR	Nominal 1° (1.125° in longitude, 0.27-0.64° variable in latitude)	60	320X384
5	CMCC-CM	Italy	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	2 average, 0.5° at the equator(ORCA2)	31	182X149
6	CMCC-CMS	Italy	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	2 average, 0.5° at the equator(ORCA2)	31	182X149
7	CNRM-CM5	Italy	Centre national de Recherches Meteorologiques and Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Climat Scientifique	0.7° on average ORCA1	42	362X292
8	CSIRO-Mk3-6-0	Australia	Queensland Climate Change Centre of Excellence and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	The grid is a tripolar curvilinear grid with a 1° resolution. ORCA1	31	192X189
9	FGOALS-g2	China	LASG (Institute of Atmospheric Physics) - CESS(Tsinghua University)	1X1° with 0.5 meridional degree in the tropical region	30	360X196
10	GFDL-ESM2G	USA	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1° tripolar 360X 210L63	63	360X210
11	GFDL-ESM2M	USA	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1° tripolar 360 X200L50	50	360X200
12	GISS-E2-R	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies USA	1° latitude X 1.25° longitude Russell 1x1 Q	32	288X180
13	HadGEM2-CC	UK	UK Met Office Hadley Centre	1.875° in longitude by 1.25° in latitude N96		360X216
14	HadGEM2-ES	UK	UK Met Office Hadley Centre	1° by 1° between 30N/S and the poles; meridional resolution in creases to 1/3° at the equator	40	360X216
15	inmcm4	Russia	Russian Institute for Numerical Mathematics	1X0.5° in longitude and latitude generalized spherical coordinates with poles displaced outside ocean	40	360X340
16	IPSL-CM5A-LR	France	Institut Pierre Simon Laplace	2X2-0.5° ORCA2	31	182X149
17	IPSL-CM5A-MR	France	Institut Pierre Simon Laplace	2X2-0.5° ORCA3	31	182X149
18	IPSL-CM5B-LR	France	Institut Pierre Simon Laplace	2X2-0.5° ORCA4	31	182X149
19	MIROC-ESM	Japan	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1.4°(zonally)X0.5-1.4°(meridionally)	44	256X192
20	MIROC-ESM-CHEM	Japan	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1.4°(zonally)X0.5-1.5°(meridionally)	44	256X192
21	MPI-ESM-LR	Germany	Max Planck Institute for Meteorology	average 1.5° GR15	40	256X220
22	NorESM1-M	Norway	Norwegian Climate Centre	1.125° along the equator	53	320X384
23	NorESM1-ME	Norway	Norwegian Climate Centre	1.126° along the equator	53	320X384

마찬가지로 CMIP5 모형들과 관측간의 표층 수온 차이는 Fig. 3-1-1-2에 나타낸 바와 같이 북태평양 전체 해역에서 대부분 음의 편차를 보였다. 일부 모형(CCSM4, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M, NorESM1-ME)을 제외하고 아열대 지역(Sub tropical, 북위 30도 부근)에 강한 음의 편차가 나타나며, 동해와 쿠로시오 확장 해역 부근에서는 양의 편차를 모사하거나 아열대 지역보다는 낮은 음의 편차를 모사하였다.

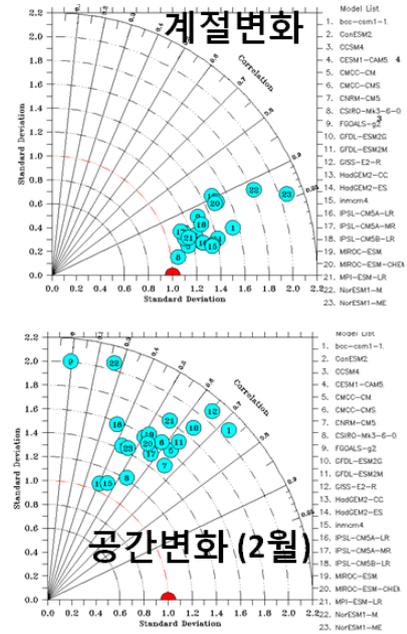
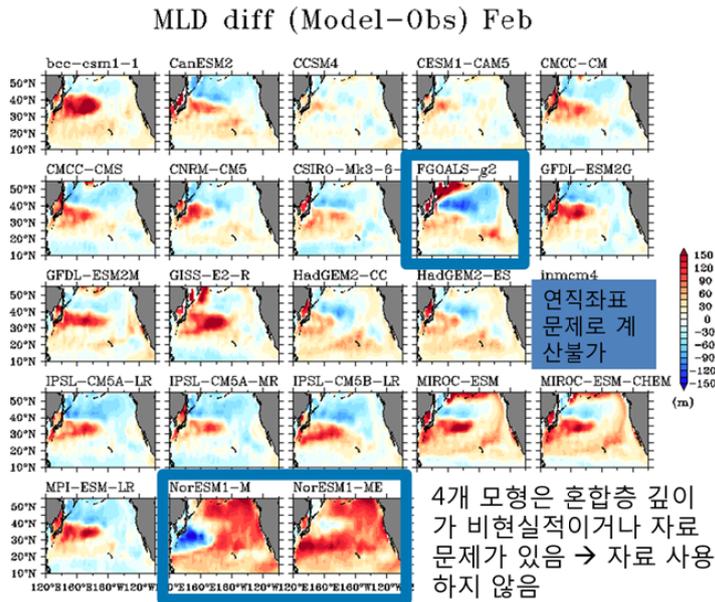


Fig. 3-3-1-1 Evaluation of simulation level of CMIP5 models for the mixed layer depth.

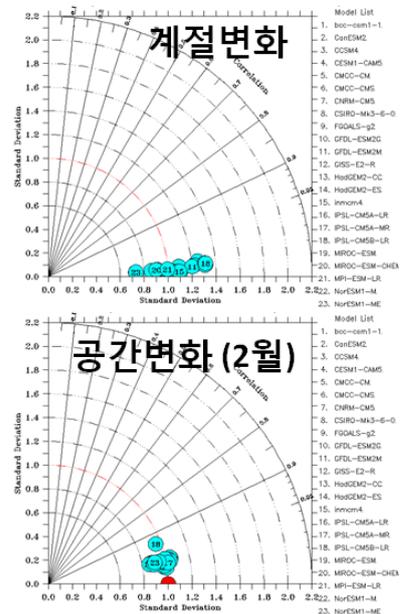
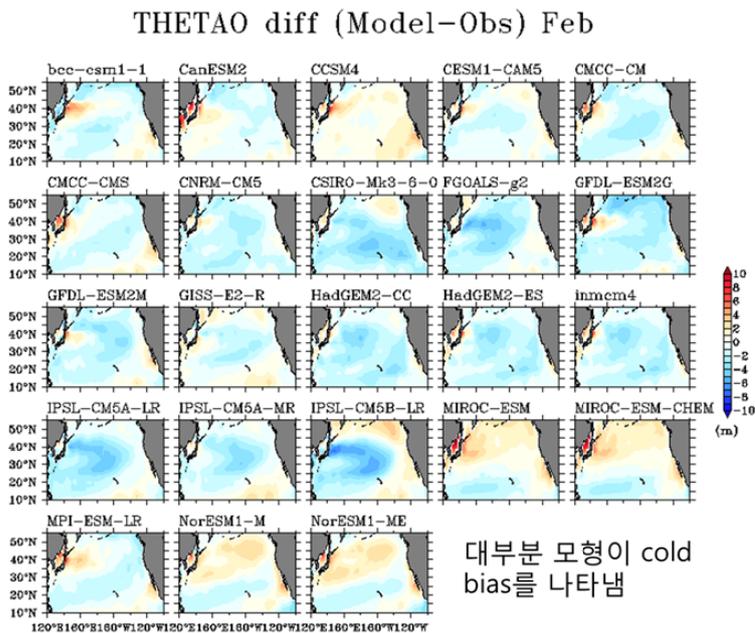


Fig. 3-3-1-2 Evaluation of simulation level of CMIP5 models for the surface temperature.

2. 전 지구 기후모형 자료(CMIP5)로부터 장강 유출량 미래 변화 추정

한반도 주변해역의 해양 생태계에 가장 큰 영향을 미치는 장강 담수 유출량의 미래 변화를 유추하기 위하여 전 지구 기후모형인 CMIP5 모형에서 전망한 강수량 미래 변화를 계산하고 이를 통해 기존에 알려진 장강 유역의 연평균 강수량과 장강 유출량과의 관계식을 이용하여 적용한 결과 장강 유출량의 미래 변화를 추정하였다.

가. 장강 유출량과 강수량과의 관계 설정 및 분석 기후 모형

장강 유출량과 강수량과의 관계 수립을 위해 Guo et al.(2015)을 기반으로 통령현의 Datongzhen(大通镇)을 포함하는 북위 30.45~31.45도, 동경 117.31~118.3도의 영역을 강수량 유역으로 설정하였다(Fig. 3-3-2-4).

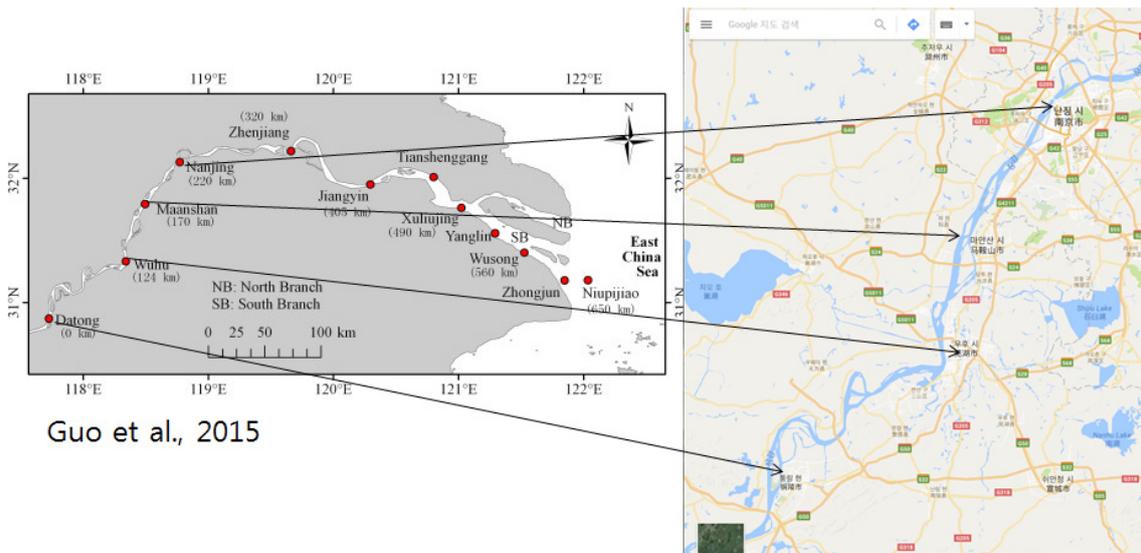


Fig. 3-3-2-1 Changjiang River area(left: existing study, Guo et al.(2015); right: Google map).

장강 유출량의 미래 변화를 계산하기 위하여 강수량의 미래 변화와 유출량의 미래 변화가 밀접한 관계를 갖는다고 가정하였으며, 강수량의 미래 변화는 전 지구 모형(CMIP5)의 미래(2041-2060)에서 현재(1981-2000)의 차이로 구하였고, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 경우인 RCP4.5, 현재 추세로 온실가스를 배출하는 경우인 RCP8.5 시나리오에 대하여 계산하였다.

여기서 분석한 CMIP5 모형은 3가지 실험(현재 재현시나리오, RCM4.5, RCP8.5)이

모두 존재하는 모형 33개를 사용하였다(Table 3-3-2-1).

Table 3-3-2-1 A list of CMIP5 models used for analysis of future change in Changjiang River discharge.

Model I.D.	Modeling Center	Resolution
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	1.9° x 1.2°
bcc-csm1-1	Beijing Climate Center(BCC),China Meteorological Administration, China	2.8° x 2.8°
BNU-ESM	GCESS,Beijing Normal University (BNU), China	2.8° x 2.8°
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	2.8° x 2.8°
CCSM4	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	1.3° x 0.9°
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti (CMCC),	0.8° x 0.8°
CMCC-CMS	Italy	1.9° x 1.9°
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM), Meteo-France and Centre Europeen de Recherches et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (CERFACS), France	1.4° x 1.4°
CSIRO-Mk3-6-0	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) Marine and Atmospheric Research in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE), Australia	1.9° x 1.9°
FGOALS-g2	Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences and Tsinghua University (THU), China	2.8° x 3.0°
FIO-ESM	The First Institute of Oceanography (FIO), SOA, China	2.8° x 2.8°
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), NOAA, USA	2.5° x 2.0°
GFDL-ESM2G		
GFDL-ESM2M		
GISS-E2-H	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA, USA	2.5° x 2.0°
GISS-E2-H-CC		
GISS-E2-R		
GISS-E2-R-CC		
HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research (NIMR), Republic of Korea	1.9° x 1.2°
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (MOHC), UK	1.9° x 1.2°
HadGEM2-ES		1.9° x 1.2°
inmcm4	Institute for Numerical Mathematics (INM), Russia	2.0° x 1.5°
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), France	3.8° x 1.9°
IPSL-CM5A-MR		2.5° x 1.3°
IPSL-CM5B-LR		3.8° x 1.9°
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan	2.8° x 2.8°
MIROC-ESM-CHEM		
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan	1.4° x 1.4°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI), Germany	1.9° x 1.9°
MPI-ESM-MR		
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI), Japan	1.1° x 1.1°
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	2.5° x 1.9°
NorESM1-ME		

나. CMIP5 강수량 검증 및 미래 강수량 변화

CMIP5 강수량 예측의 품위를 평가하기 위해서 인공위성 기반자료인 CPC Merged Analysis of Precipitation(CMAP), Global Precipitation Climatology Project(GPCP)와 재분석 자료 National Center for Atmospheric Research(NCAR), ERA-interim과 비교하였다.

다동 영역에서 CMIP5 모형 결과는 각각의 모형의 불확실성이 있지만, 모형 앙상블 평균은 강수량을 관측 자료와 유사하게 재현하고 있다(Fig. 3-3-2-2. 주황색 막대). 또한 강수량은 미래에 모두 증가하며, RCP4.5 시나리오일 때 더 많이 증가할 것으로 전망하였다. CMIP5의 연평균 강수량의 미래변화는 -4% ~ 20%로 강수가 변화할 것으로 나타났으며, 평균은 5% 증가할 것으로 전망하였다(Fig. 3-3-2-3).

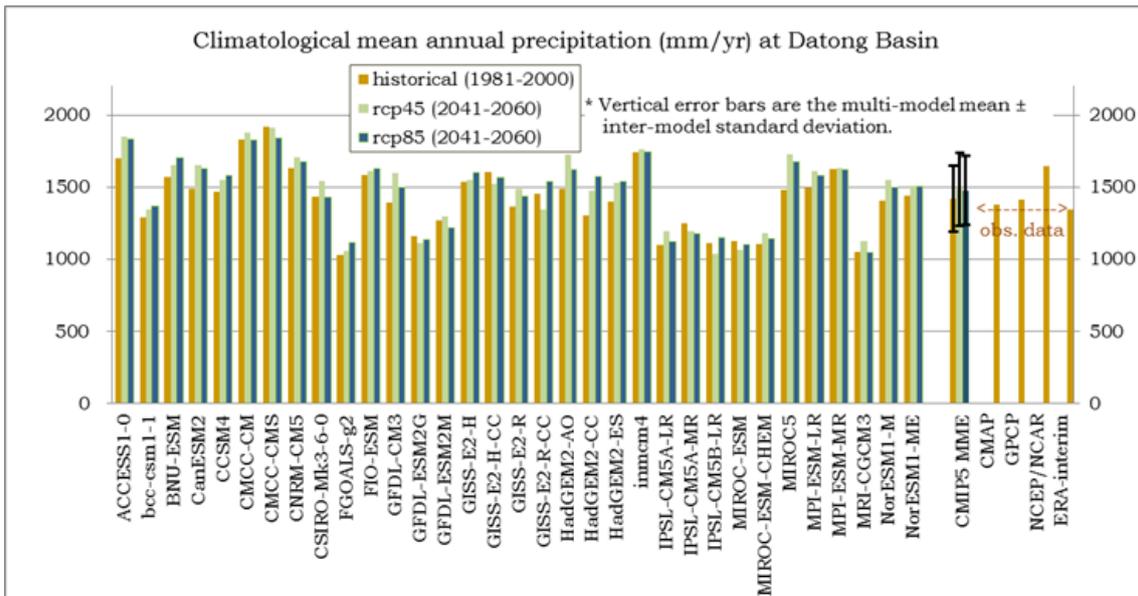


Fig. 3-3-2-2 Precipitation in the Datong area by CMIP5 model and observation/reanalysis (mm/yr) (orange: present; green: future by rcp4.5 scenario; dark green: future by rcp8.5 scenario).

CMIP5 모형들이 우리나라 주변해역에서 재현한 강수량의 공간적 분포를 Fig. 3-3-2-3에 나타내었다. 한반도 주변해 강수량의 특징 중 하나는 중국 남부와 쿠로시오 해역에서 강수량이 높게 나타난다는 것이다. ACCESS1-0과 HadGEM, FIO-ESM 등 한국, 중국, 일본 모형 등이 이런 패턴을 재현하긴 하지만 일반적으로 관측에 비해

강하게 모사하는 경향이 있다.

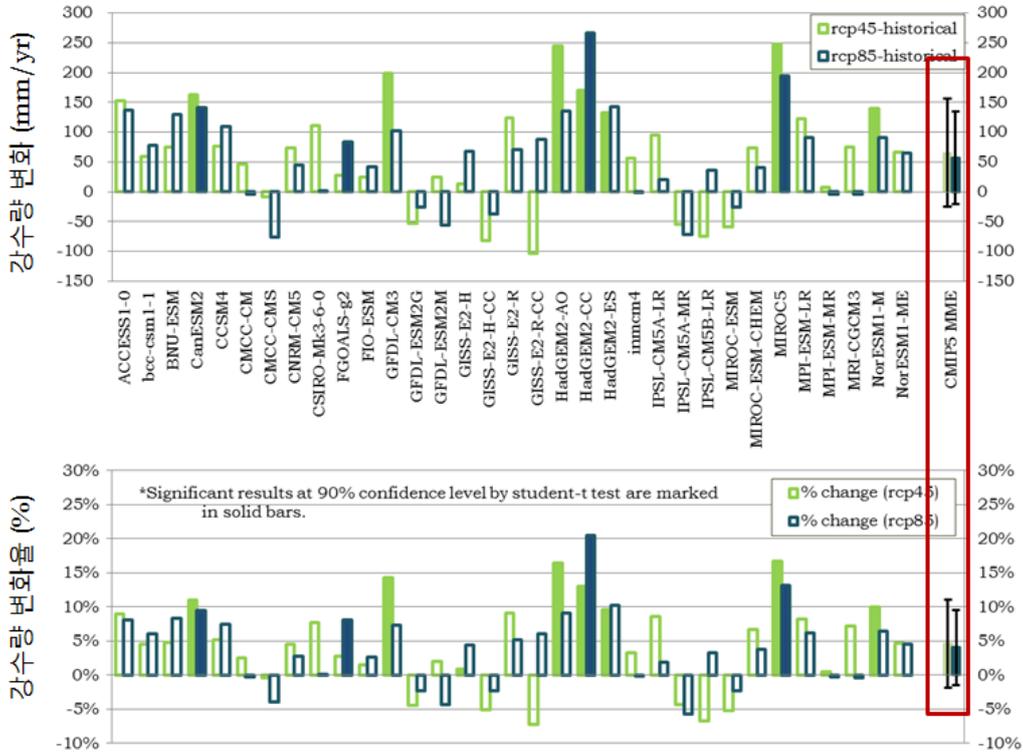


Fig. 3-3-2-3 Future change of precipitation (mm/yr) in the Datong area by CMIP5 model(%).

Fig. 3-3-2-5는 미래(2041~2060) 기후변화 시나리오에 대한 우리나라 주변해역의 강수량 변화량을 나타낸 것으로써 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오가 한반도 주변해에서 강수량을 증가시키는 것으로 나타났으나, 지역적으로 강수량의 미래 변화가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 대부분의 모형이 쿠로시오 해역에서의 강수량이 줄어들 것으로 예측하였고 한반도 북쪽 영역의 강수량은 증가할 것으로 예측하였다.

다. 미래 강수량 변화에 따른 장강 유출량 변화 추정

장강 유출량의 미래 변화를 계산하기 위하여 다음과 같은 장강 유역 강수량과 장강 유출량과의 관계식(Yang et al., 2016)을 이용하였다.

$$Q_{Datong} = 1.192P_{Datong} - 318,$$

여기서, Q_{Datong} 은 장강의 연평균 담수 유출량을, P_{Datong} 은 장강 유역(다통)의 연평균 강수량을 나타낸다.

강수량의 미래변화는 전 지구 모형(CMIP5)의 미래(2041-2060) 기후 연평균에서 현재(1981-2000) 기후 연평균의 차로 계산하였으며, 미래 강수량 계산은 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 경우인 RCP4.5 시나리오와 현재 추세로 온실가스를 배출하는 경우인 RCP8.5 시나리오 두 가지 실험 결과를 이용하였다. 위 관계식에 강수량 미래 변화를 대입하여 양자강 유출량 미래변화를 계산한 결과 장강 유출량은 최대 24%까지 증가할 것으로 추정된다.

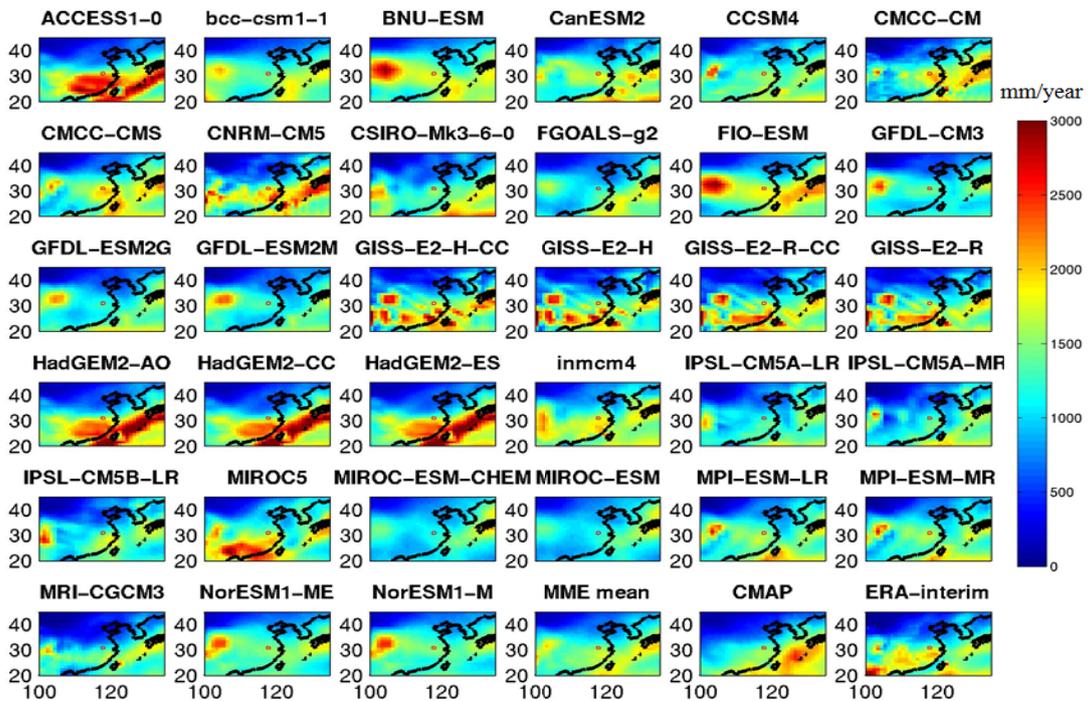


Fig. 3-3-2-4 Annual mean precipitation by CMIP5 model during 1981~2010.

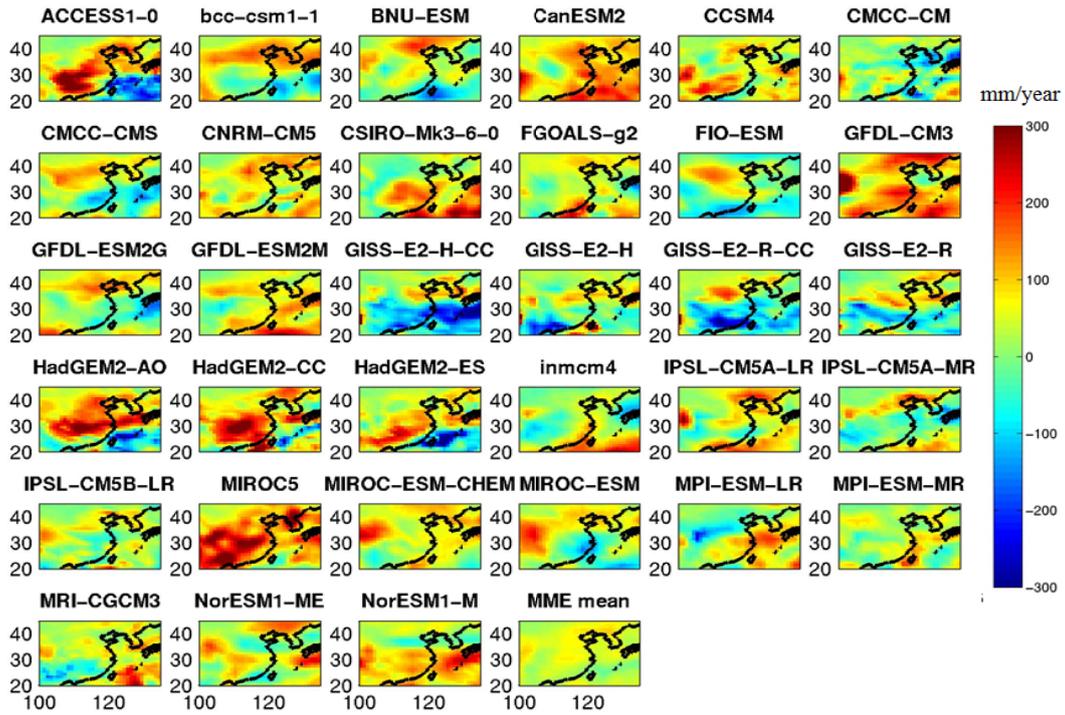


Fig. 3-3-2-5 Future change by CMIP5 model (future: 2041~2060 by rcp4.5, present: 1981~2000).

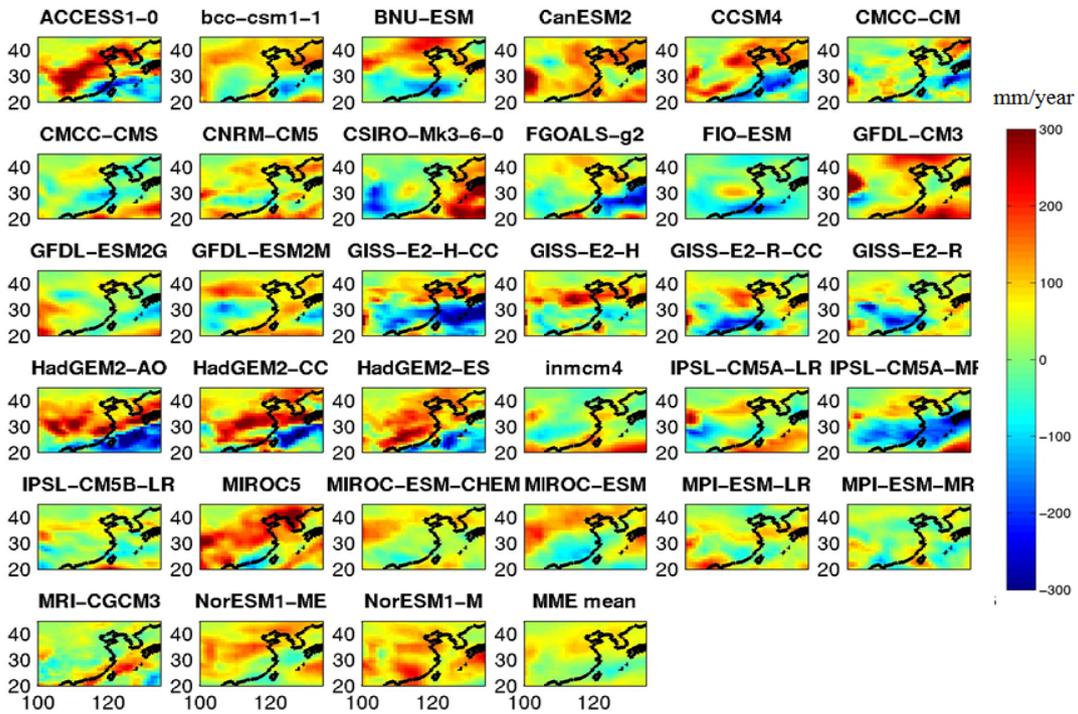


Fig. 3-3-2-6 Future change by CMIP5 model (future: 2041~2060 by rcp8.5, present: 1981~2000).

3. 장강유출량 증가 시나리오에 따른 2050년대 생태계 미래변화 산정

미래 생태계 변화 전망을 실험하기 위해서는 대기강제력 변화, 해양경계조건 변화, 하천경계조건 변화 등을 모두 고려해야 하지만, 이들에 대한 불확실성이 높기 때문에 모든 조건을 고려하기 보다는 우리나라 주변해역에 최대 영향을 미치는 하천인 장강에 대해서 이의 유량 변화를 예측하고 이에 대한 순환-생태계 반응 변화를 고찰하기로 하였다. 장강 유량의 미래 변화는 앞서 CMIP5 모형 분석 결과 연평균 최대 24%까지 증가할 것으로 예측되었다.

가. 경계조건 변화 시나리오 수립 및 모형 입력자료화

미래 장강 유출량이 연평균 최대 24% 증가할 것으로 예측되었으나, 장강의 유량은 여름철에 최대가 된다. 여름철에 그 영향이 최대가 되므로 해양순환-생지화학 결합 모형을 이용한 미래 생태계 변화 실험을 위해서 여름철(6~8월) 장강 방류량이 1981~2010년 대비 30% 증가한다는 시나리오를 2050년대 미래 변화 시나리오로 가정하였으며 장강 유량 증가에 따른 반응을 보기 위해서 대기강제력 및 해양경계조건은 1981~2010년과 동일하다고 가정하였다.

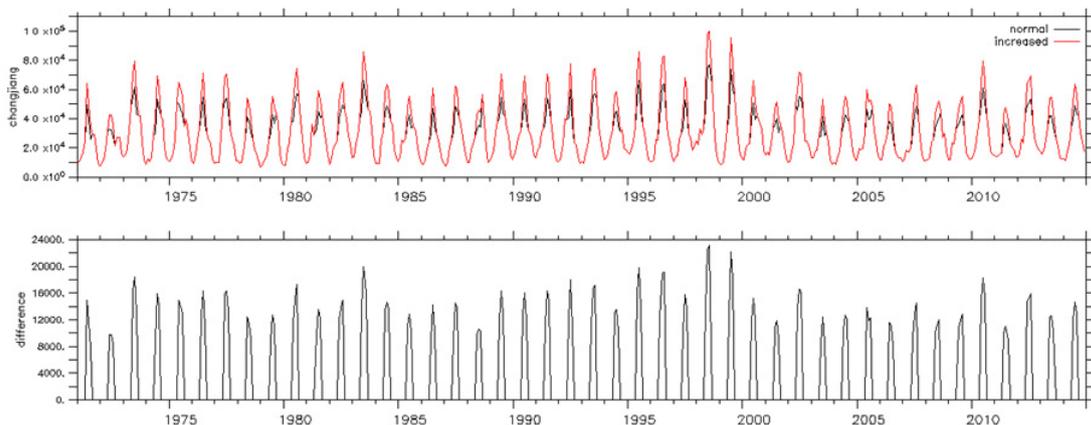


Fig. 3-3-3-1 Comparison of the Changjiang River discharge variation for the past 30 years(black) and the variation in case of 30% increased for only summer based on the future scenario(red); and the difference of two(below).

Fig. 3-3-3-1은 1981년부터 2010년 동안 유출된 장강 유량과 여름철 30%를 증가시킨 유량을 함께 도시한 것이다. 유출량 차이를 보면 여름철 장강 유량이 최대 약 20,000 m³/s까지 증가하는 셈이다. 현재의 결과와 비교하기 위해서 여름철에만 30% 증가시킨 모형을 1981~2010과 동일하게 30년 적분하였다.

나. 과거 기후평균장과의 비교를 통한 미래 변화 산정

1) 황해

현재(2000년대) 대비 미래(2050년대) 황해의 생태계 핵심변수를 물성(표층 수온, 표층 염분, 혼합층 깊이), 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산(유광층 깊이, 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이) 인자로 나누어 그 변화량의 분포 차이를 Fig. 3-3-3-2~10에 제시하였다.

황해 월평균 표층 수온의 경우 실험에서 양자강 유출량을 제외한 다른 대기강제력의 변화는 없었기 때문에 황해 월평균 표층 수온의 변화는 거의 나타나지 않았다. 한편 장강 유출량의 증가로 인하여 황해 표층 염분은 전체적으로 감소한다. 황해 월평균 혼합층 깊이는 전체적으로 약간 감소하나 뚜렷하지는 않다.

영양염의 경우 황해 북부에서 겨울과 봄에 표층 인산염의 농도가 증가하는 것으로 나타났고, 황해 북부와 발해만 해역에서 봄, 겨울철에 표층 질산염 농도가 증가하는 것으로 나타나며 여름철 변화는 적으며, 최대 증가폭은 2~3 mmol N/m³ 정도이다. 표층 규산염 농도는 한반도 서측 연안에서 증가가 뚜렷하며 최대 5 mmol Si/m³ 증가하는 것으로 나타났다.

황해 월평균 유광층 깊이의 변화는 장강의 유출량이 증가했다고 해서 크게 변화하지는 않았다. 한편 표층 엽록소a의 경우 4~6월에 차이가 크며, 대체로 증가한다. 월평균 엽록소a 최대층 깊이는 계절에 관계없이 차이가 나타나나 그 크기는 크지 않고 증감 영역이 혼재하여 나타난다.

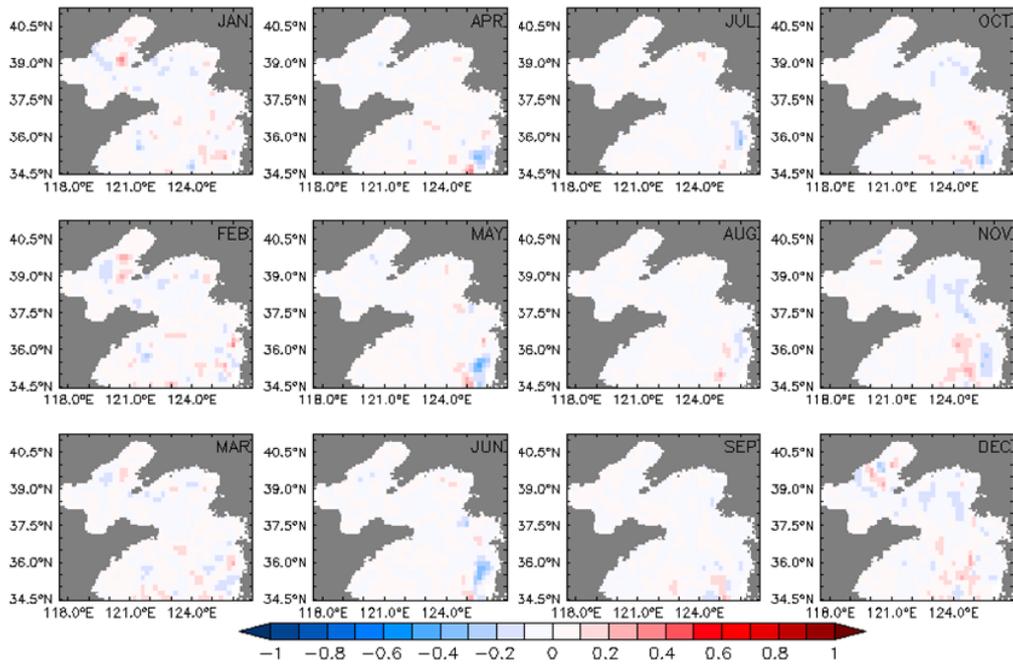


Fig. 3-3-3-2 Change in the monthly mean surface temperature of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

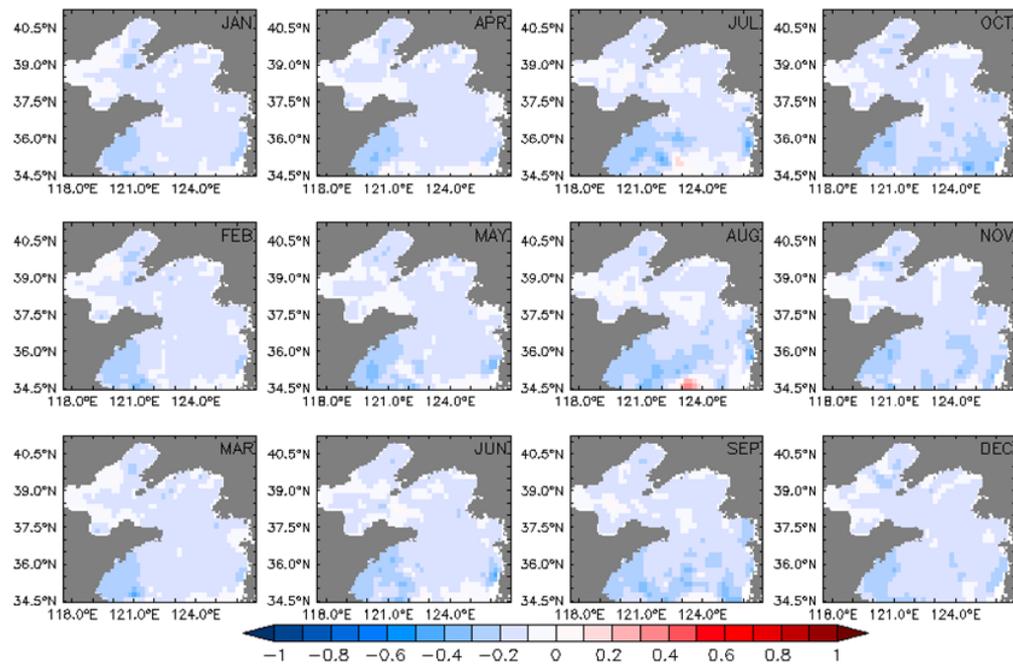


Fig. 3-3-3-3 Change in the monthly mean surface salinity of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

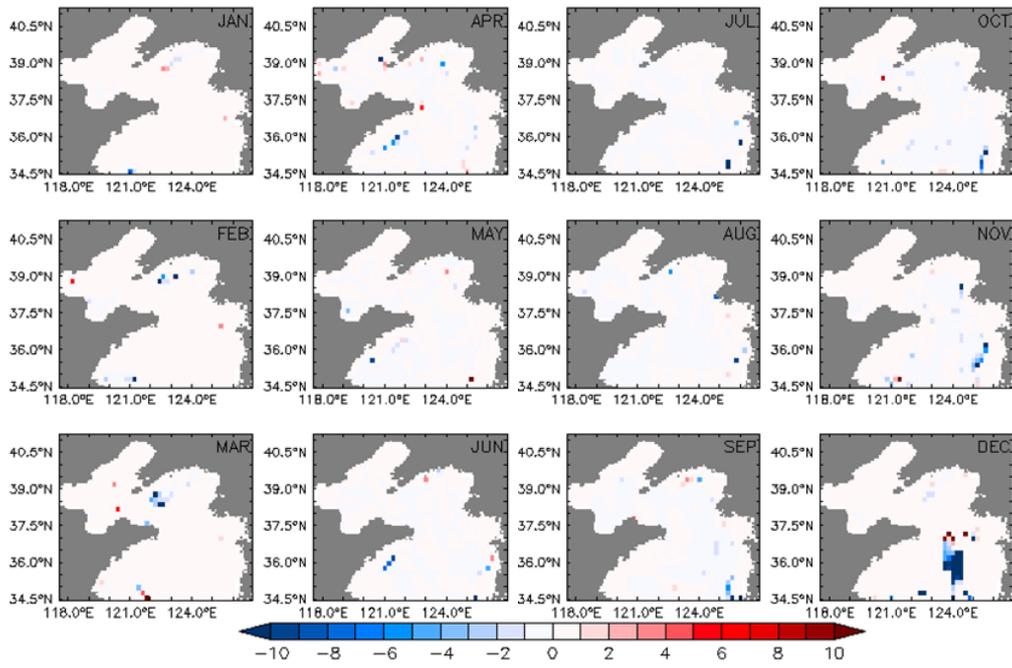


Fig. 3-3-3-4 Change in the monthly mean mixed layer depth of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

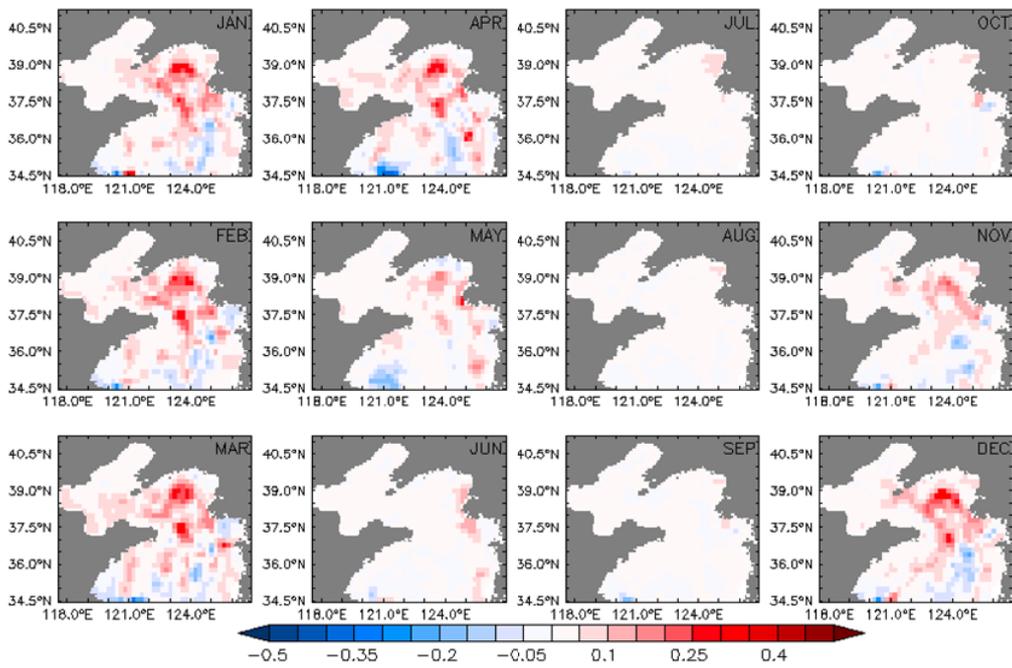


Fig. 3-3-3-5 Change in the monthly mean surface phosphate of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

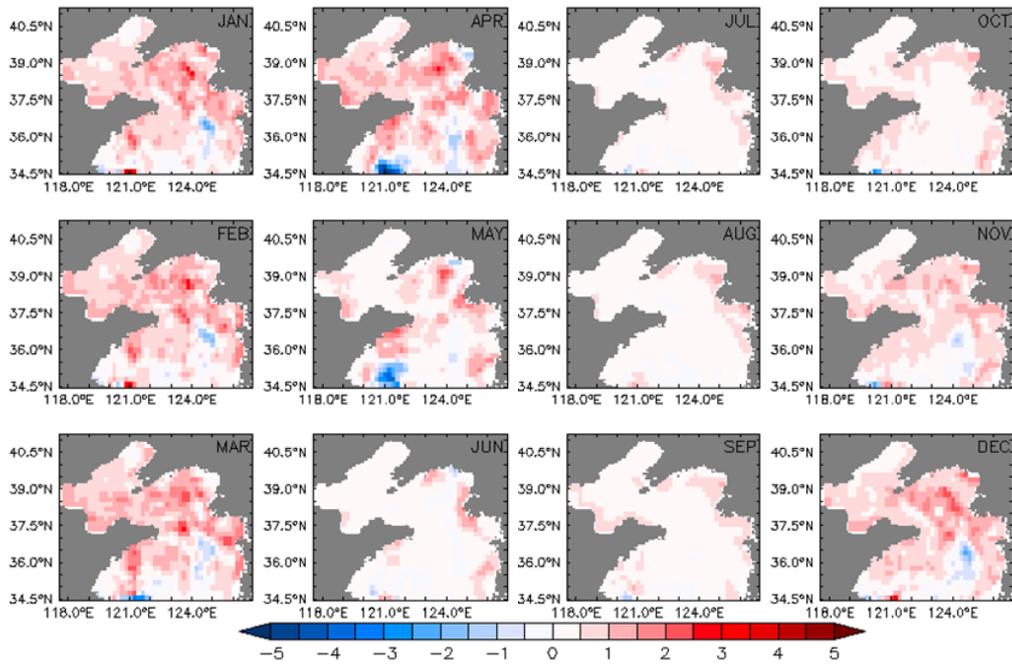


Fig. 3-3-3-6 Change in the monthly mean surface nitrate of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

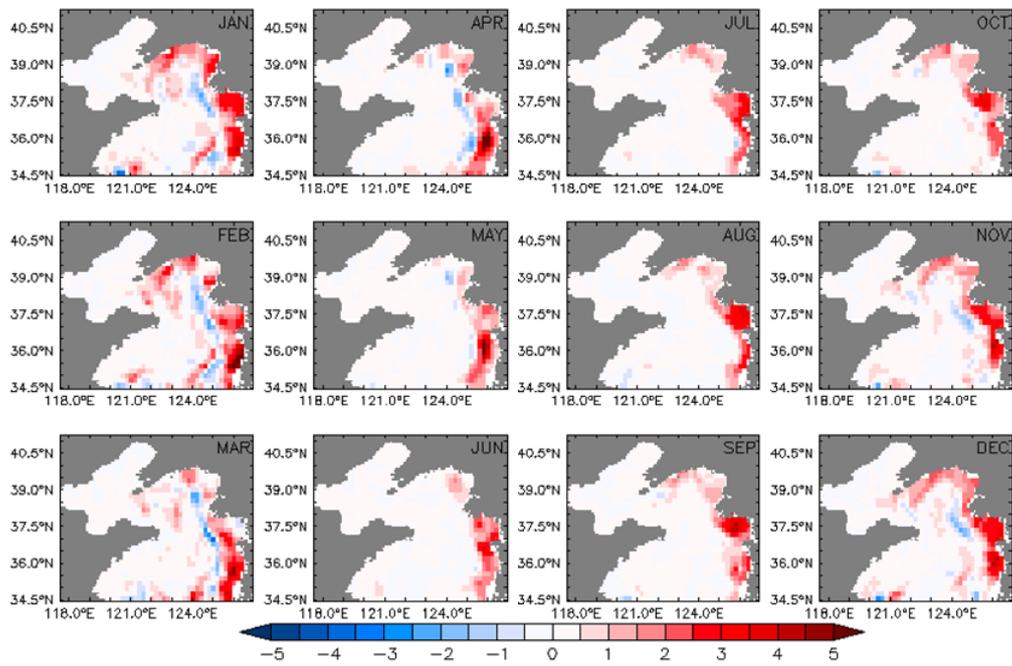


Fig. 3-3-3-7 Change in the monthly mean surface silicate of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

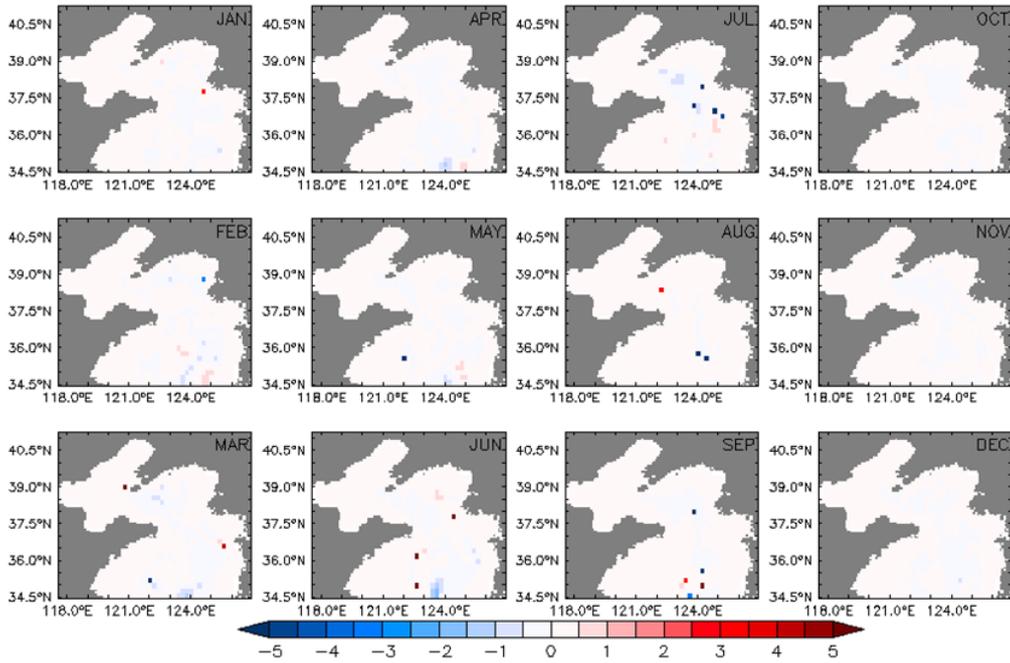


Fig. 3-3-3-8 Change in the monthly mean euphotic depth of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

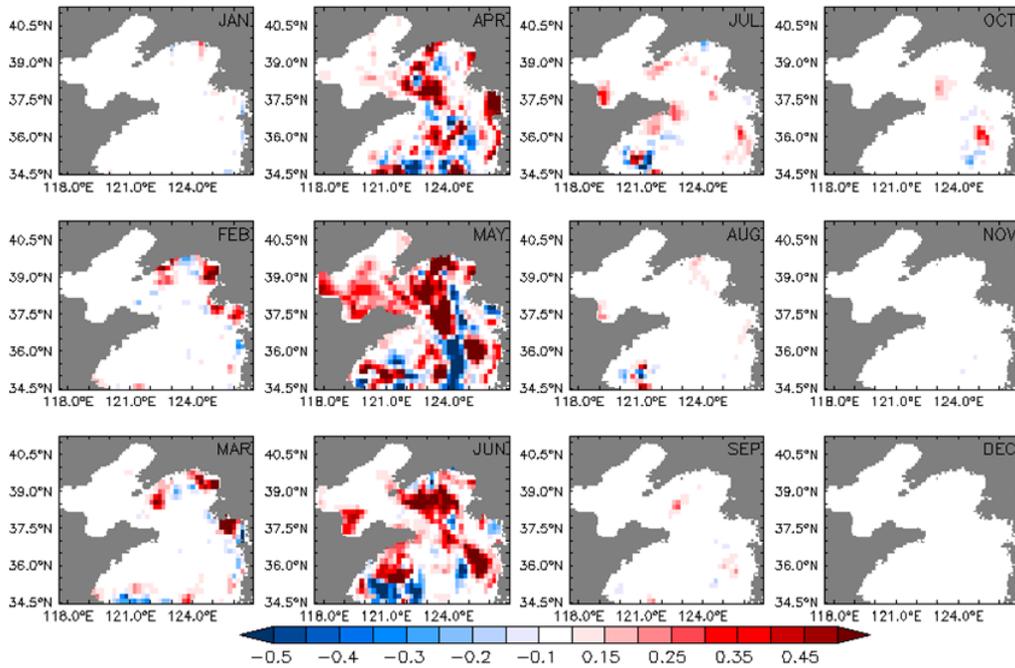


Fig. 3-3-3-9 Change in the monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

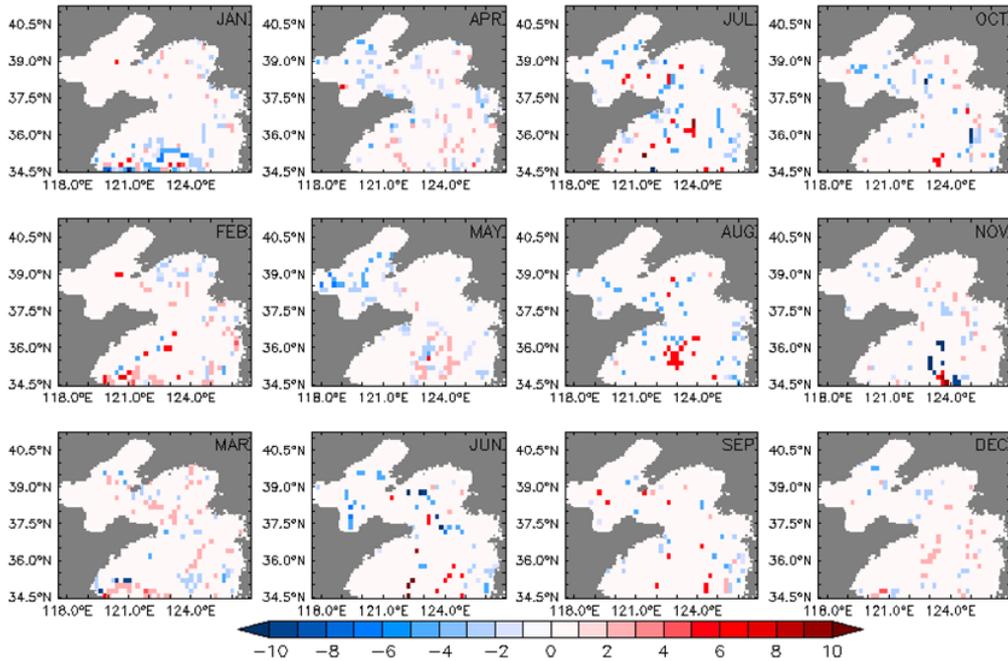


Fig. 3-3-3-10 Change in the monthly mean depth of chlorophyll maximum of 2050s compared to that of 2000s in the Yellow Sea.

2) 동중국해

현재(2000년대) 대비 미래(2050년대) 동중국해의 물성(표층 수온, 표층 염분, 혼합층 깊이), 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산(유광층 깊이, 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이) 인자들에 대한 변화량의 분포를 예측하여 Fig. 3-3-3-11~19에 제시하였다.

동중국해 월평균 표층 수온의 변화 역시 황해와 마찬가지로 별 차이가 나타나지 않는다. 하계 장강 유출량을 증가시켰지만 대기강제력이 변하지 않았기 때문에 수온 변화를 야기할 만큼 큰 영향이 나타나지 않은 것으로 사료된다. 월평균 표층 염분의 변화는 하계 장강 유출량 증가의 영향을 그대로 반영하여 장강 유출수가 확산하는 영역에서 염분 감소가 뚜렷하게 나타난다. 5월부터 염분이 감소하기 시작하여, 7~8월에 감소폭이 가장 크고 이는 10월~11월까지도 지속된다. 동중국해 월평균 혼합층 깊이는 10월~3월에 크게 나타나고 4월~9월에 약해진다. 2월과 3월 그리고 11월에 가장 증감 폭이 크게 나타났다.

동중국해 월평균 인산염은 전 계절에 대부분의 해역에서 증가하는데 특히 장강 방

류가 약해지는 11월~4월에 크게 증가하는 것으로 나타난다. 월평균 질산염의 변화 해역은 인산염과 유사하게 전역에서 전 계절에 증가하지만 장강 방류가 강해지는 계절에 증가폭이 작고 방류가 약해지는 계절에 증가폭이 크게 나타났다. 규산염의 경우 전역에서 증감 해역이 혼재 한다. 전반적으로는 증가하나 9월과 10월에는 감소하는 해역이 넓게 나타난다.

동중국해 월평균 유광층 깊이는 전역에 걸쳐 증감 해역이 혼재하나 1월~3월과 5월~7월에는 쿠로시오 해류의 영향을 받는 해역에서 변화가 크게 나타난다. 동중국해 월평균 표층 엽록소a 경우 3월~9월에 장강 유출수의 영향을 받는 해역에서 크게 증가하는 양상을 보인다. 월평균 엽록소a 최대층 깊이는 연중 차이를 보이나, 뚜렷한 양상은 보이지 않고 10월~12월에 증감의 폭이 크다.

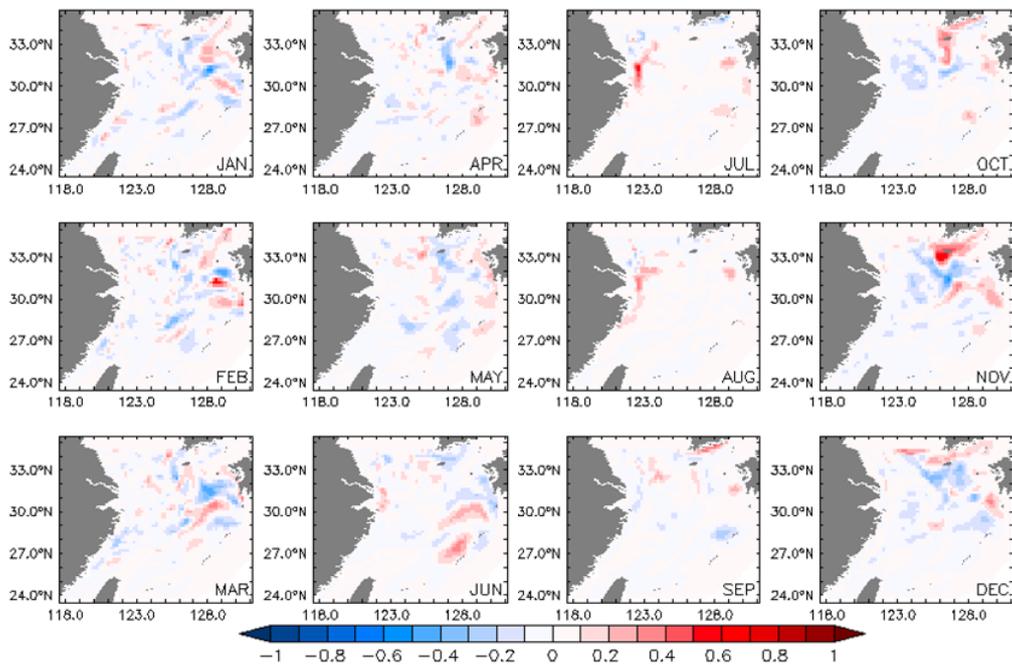


Fig. 3-3-3-11 Change in the monthly mean surface temperature of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

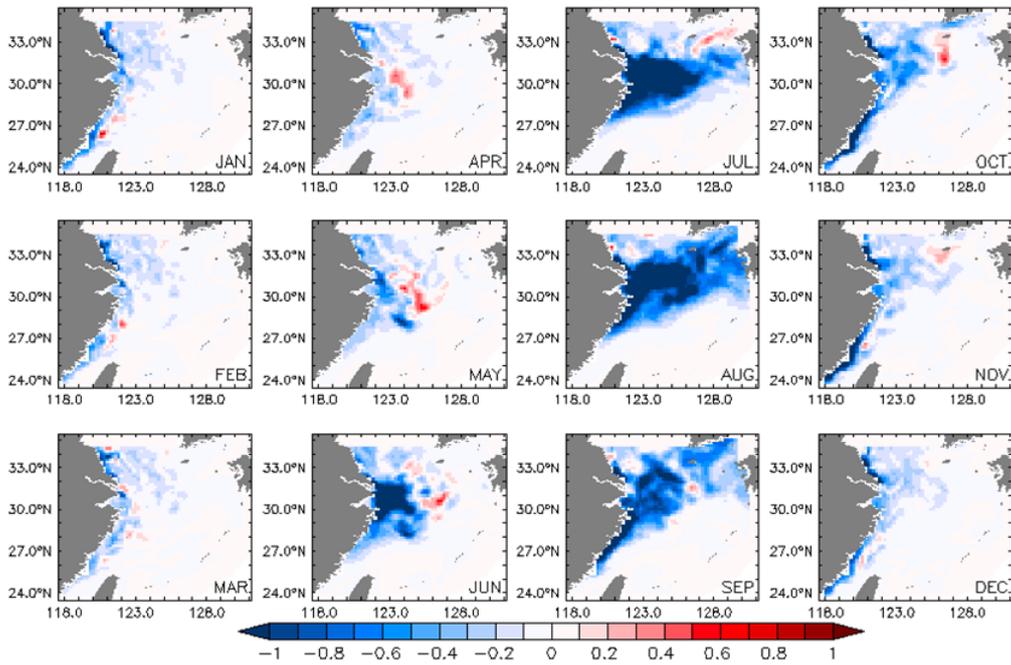


Fig. 3-3-3-12 Change in the monthly mean surface salinity of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

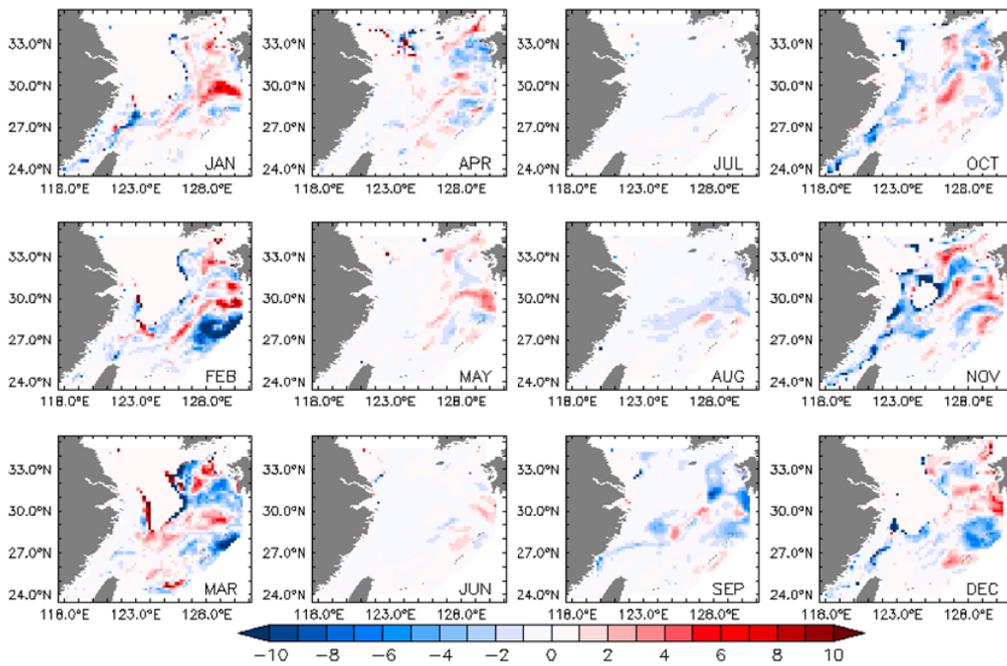


Fig. 3-3-3-13 Change in the monthly mean mixed layer depth of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

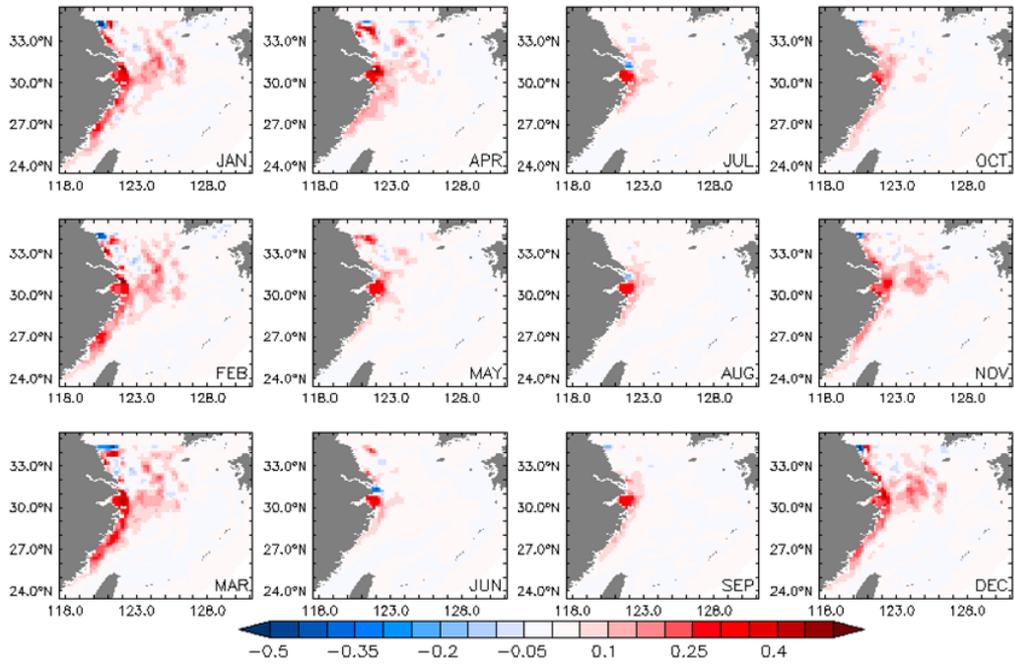


Fig. 3-3-3-14 Change in the monthly mean surface phosphate of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

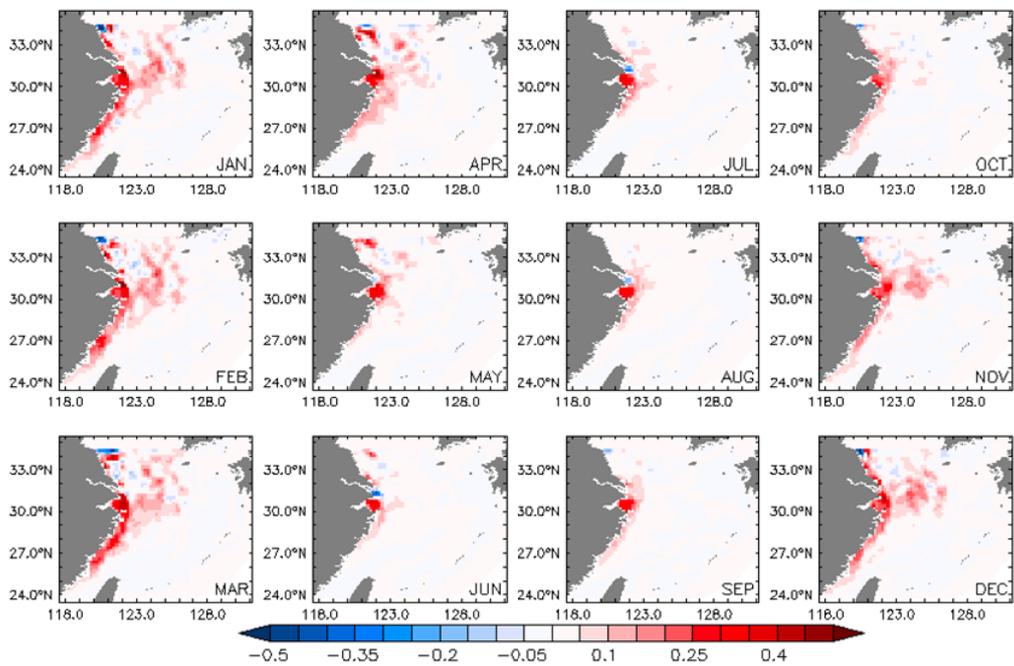


Fig. 3-3-3-15 Change in the monthly mean surface nitrate of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

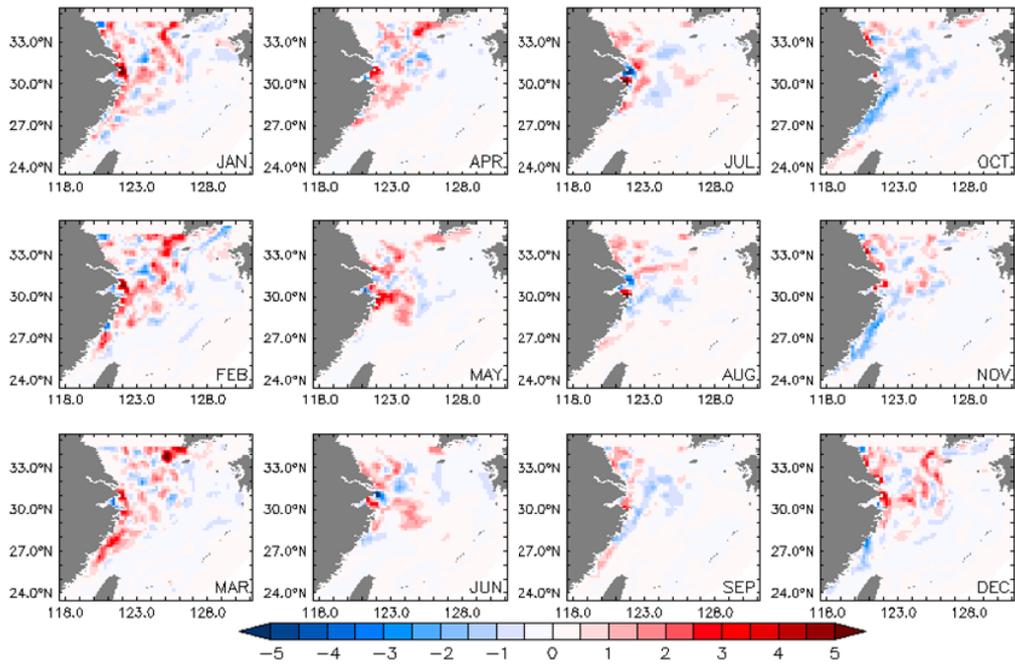


Fig. 3-3-3-16 Change in the monthly mean surface silicate of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

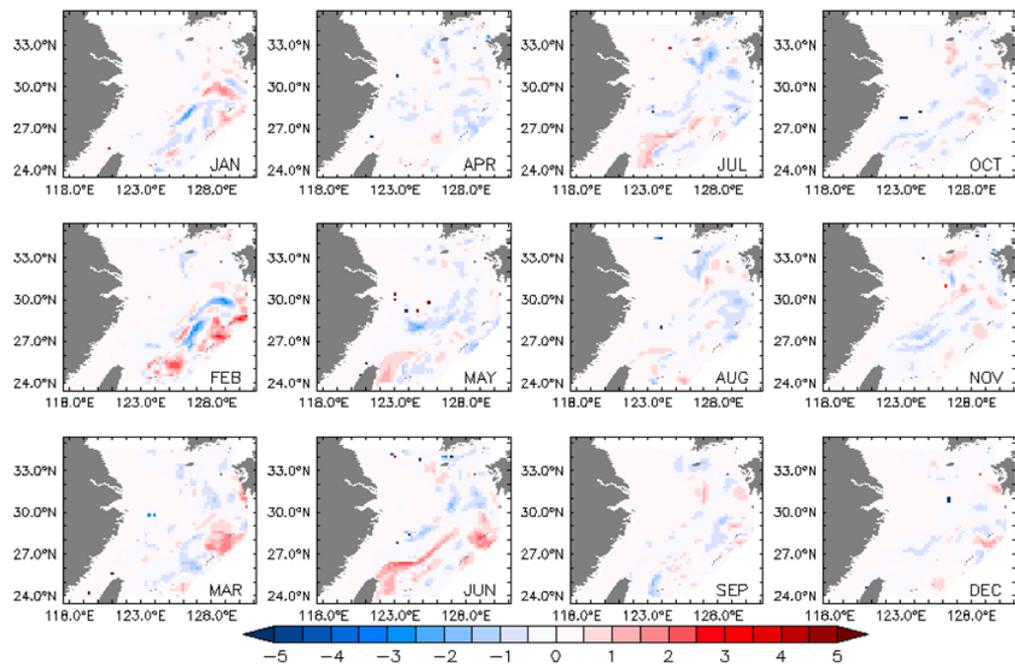


Fig. 3-3-3-17 Change in the monthly mean euphotic depth of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

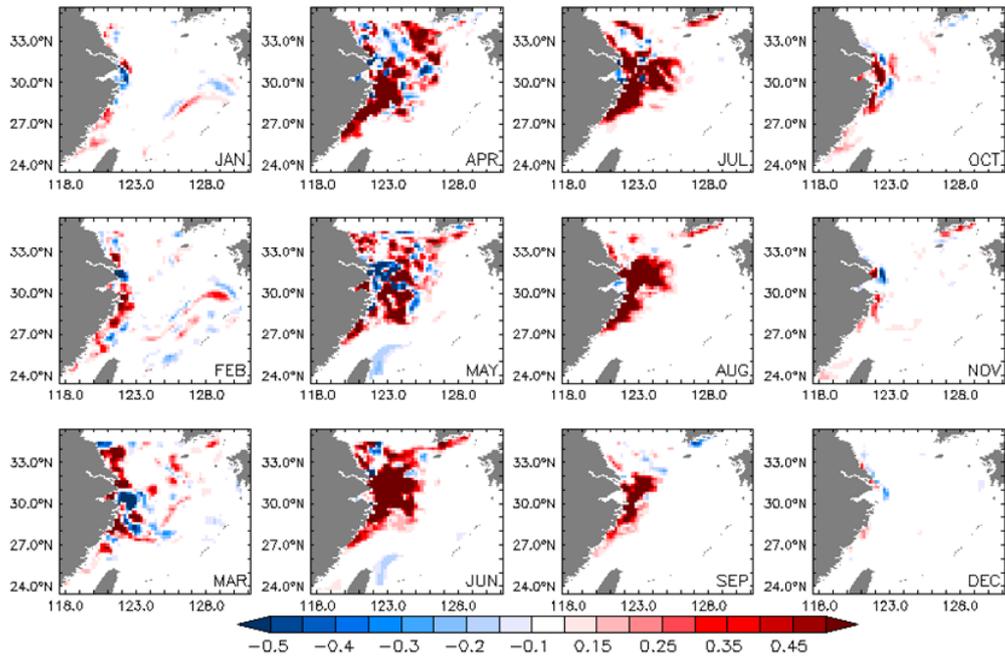


Fig. 3-3-3-18 Change in the monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

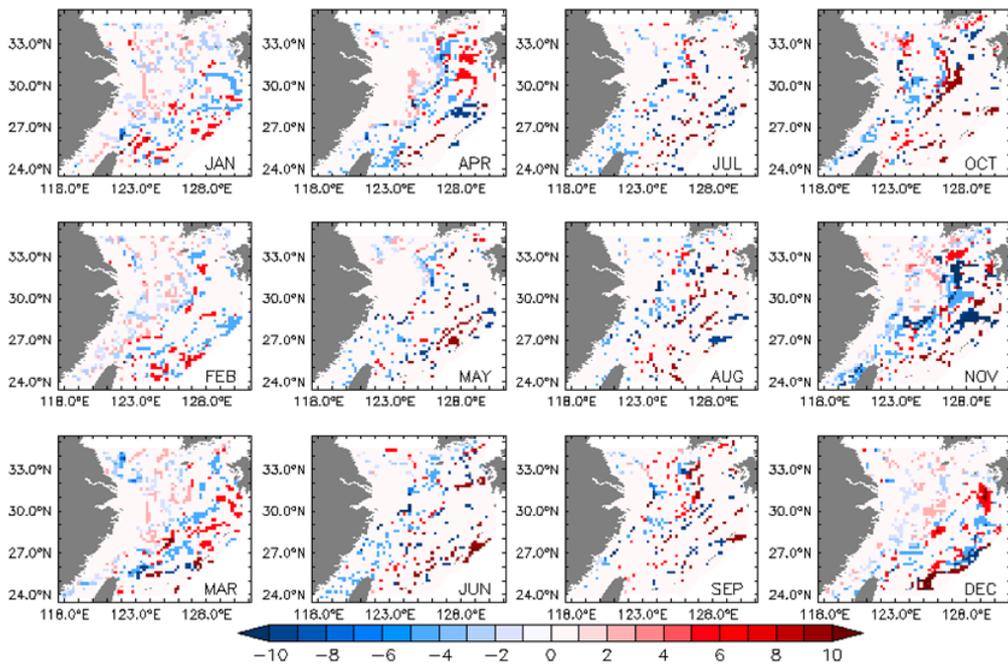


Fig. 3-3-3-19 Change in the monthly mean depth of chlorophyll maximum of 2050s compared to that of 2000s in the East China Sea.

3) 동해

현재(2000년대) 대비 미래(2050년대) 동해의 물성(표층 수온, 표층 염분, 혼합층 깊이), 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산(유광층 깊이, 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이) 인자들에 대한 변화량의 분포를 예측하여 Fig. 3-3-3-20~28에 제시하였다.

동해 월평균 표층 수온은 황해 및 동중국해와 달리 약간의 변화가 나타나는 데, 주로 일본과 한국 연안에서 나타나며, 증감 양상이 일정하지 않다. 변화의 크기는 봄과 여름에 작고 가을과 겨울에 크게 나타나는데, 이는 아마도 대마난류 흐름의 변화에 따른 변동으로 추정된다. 월평균 표층 염분의 변화는 8월~10월 대마난류가 유입되는 동남해역에서 염분이 감소하는 것으로 나타나는데, 증가된 장강수가 8월부터 이 해역에 유입되어 영향을 미치기 때문인 것으로 추정된다. 월평균 혼합층 깊이는 동해 중북부 해역에서 감소하는 것으로 나타나고 남부해역에서는 증감해역이 혼재하는 것으로 나타났다.

영양염의 경우 동해 전역에서 인산염의 변화는 매우 작는데, 이는 아마도 인산염 농도 자체가 매우 작기 때문에 그 효과가 상대적으로 작게 표현된 것으로 사료되며, 질산염의 변화 해역은 염분의 변화와 거의 일치하는데, 장강 유출수에 포함된 질산염이 동해에 유입되어 영향을 미치는 것으로 추정되나 그 크기는 크지 않다. 규산염의 경우 12월에서 이듬해 3월에 걸쳐 동해 전역에서 증감이 혼재하는 것으로 나타나나 대체로 감소하였다.

일차생산 인자로서 유광층 깊이는 2월~8월에 증감의 정도가 크게 나타난다. 특히 3월에 한국, 일본 연안 근처에서 증가하는 것으로 나타났다. 월평균 표층엽록소의 경우 엽록소a의 경우 3~5월에 증감의 폭이 급증하고 3월에는 남부해역에서, 4월에는 전역에서 5월에는 북부해역에서 커지며, 증감 영역이 혼재하여 나타난다. 10월~11월에도 약간의 증감이 곳에 따라 나타난다. 월평균 엽록소a 최대층 깊이는 연중 차이가 나타나는데, 2월~3월에는 북부해역에서 7월~11월에는 남부해역에서 증감의 폭이 크나 증감 영역은 혼재한다.

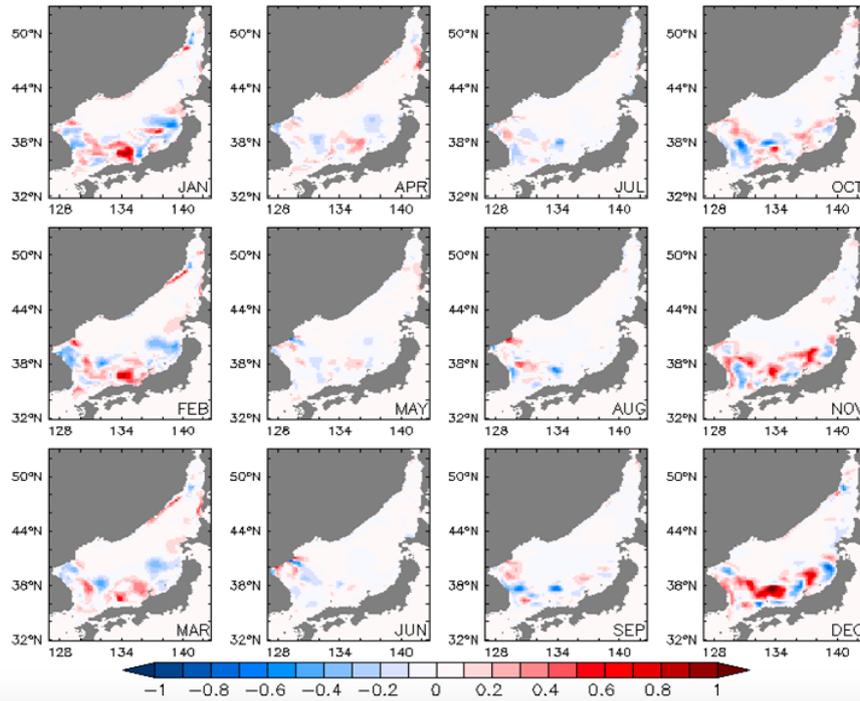


Fig. 3-3-3-20 Change in the monthly mean surface temperature of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

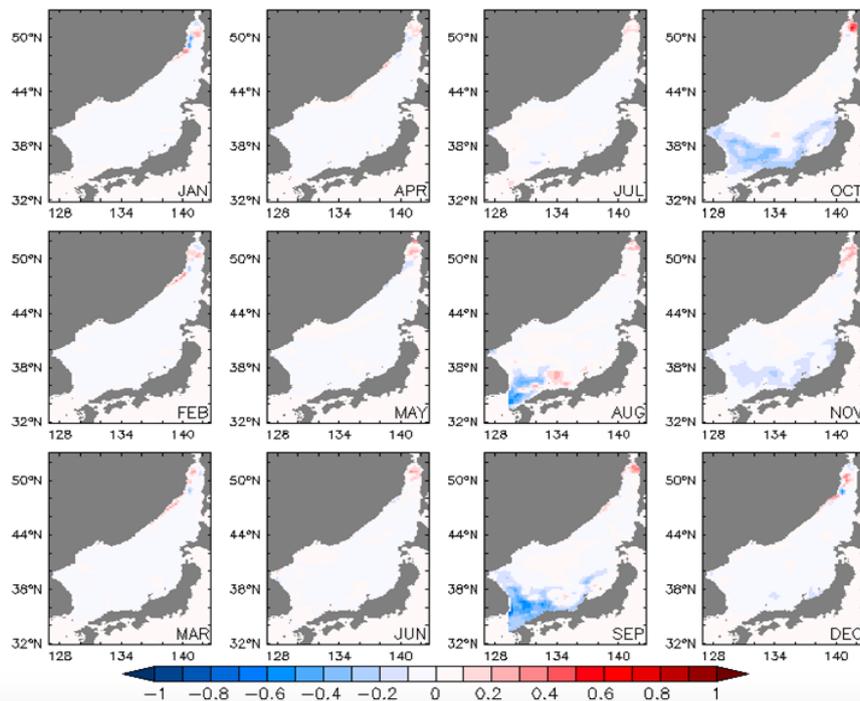


Fig. 3-3-3-21 Change in the monthly mean surface salinity of 2050s compared to the that of 2000s in the East Sea.

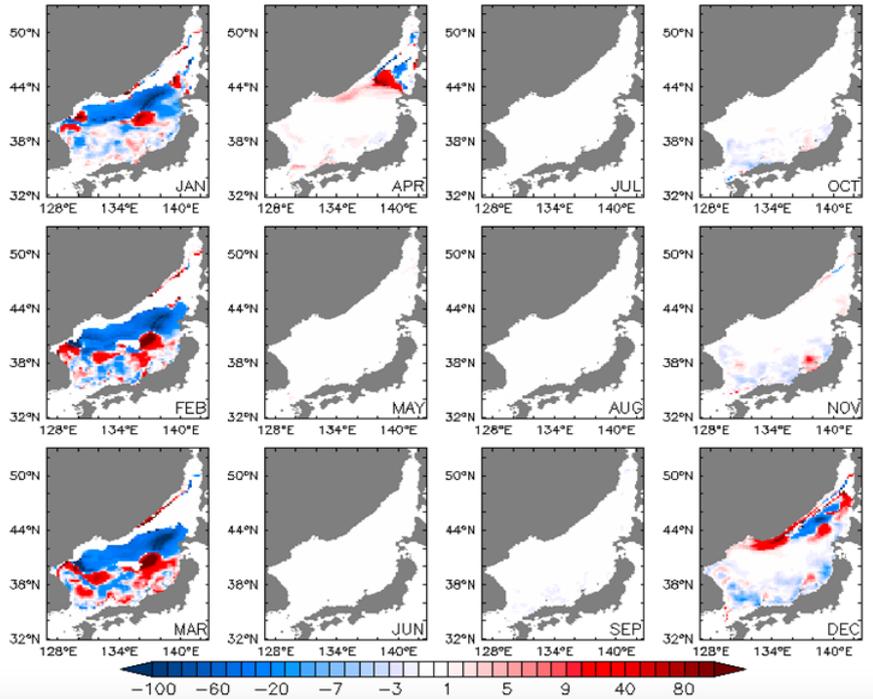


Fig. 3-3-3-22 Change in the monthly mean mixed layer depth of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

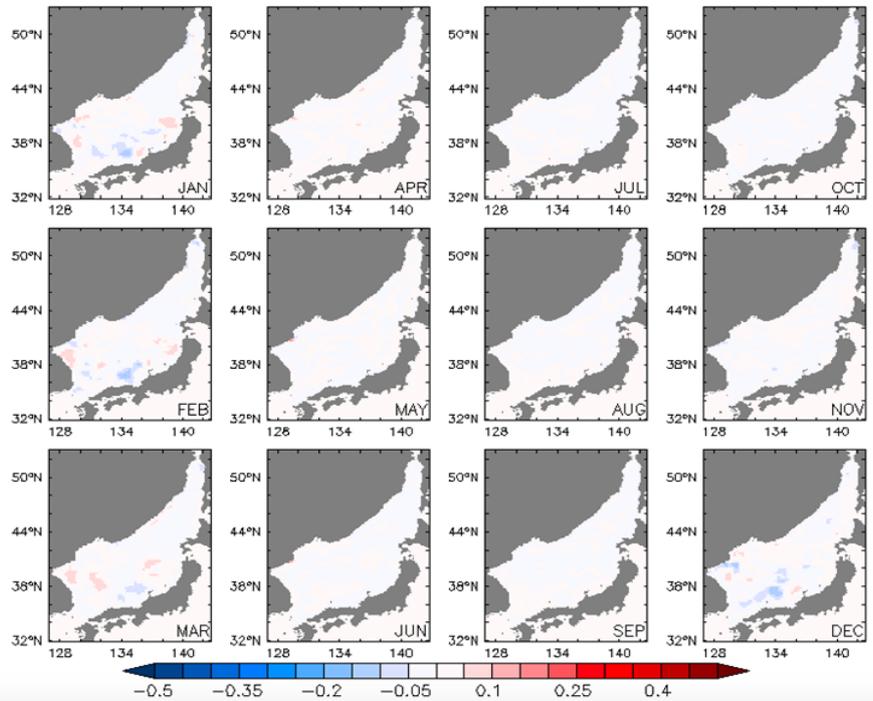


Fig. 3-3-3-23 Change in the monthly mean surface phosphate of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

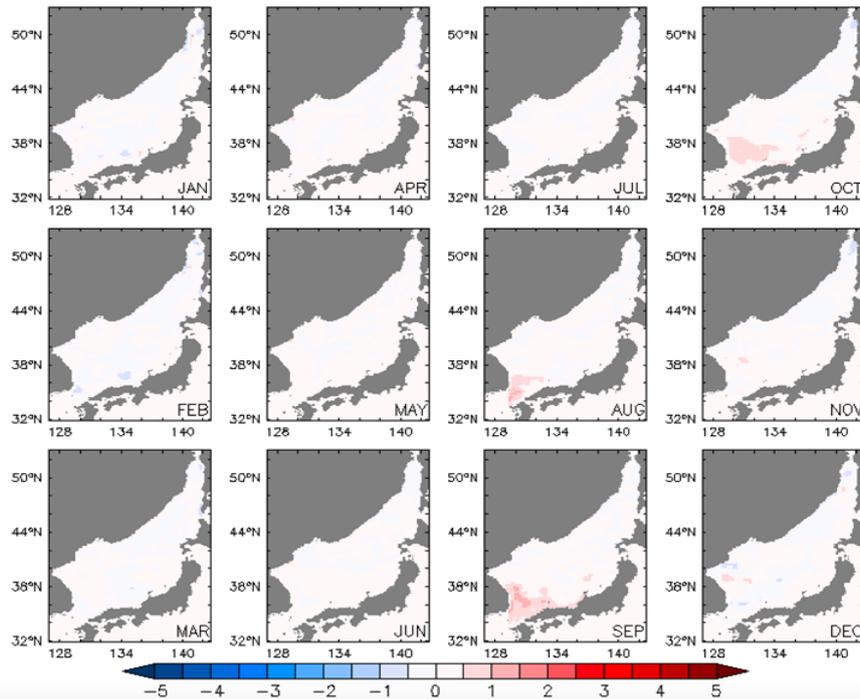


Fig. 3-3-3-24 Change in the monthly mean surface nitrate of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

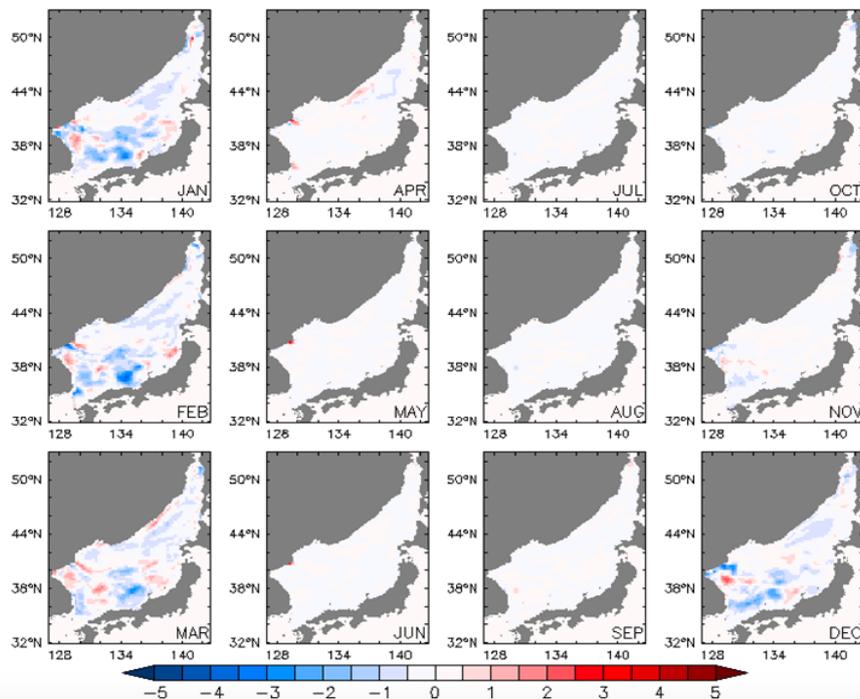


Fig. 3-3-3-25 Change in the monthly mean surface silicate of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea

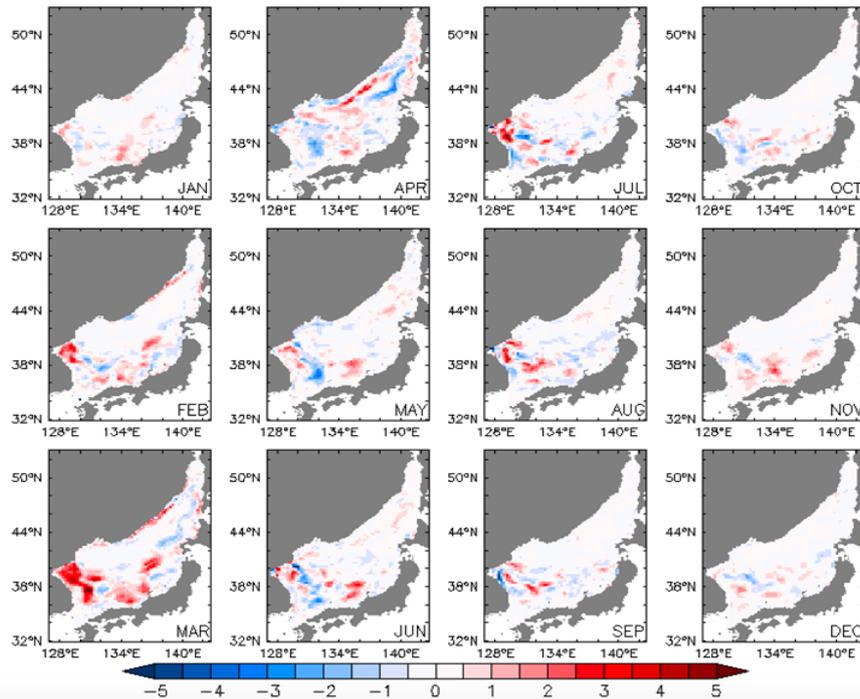


Fig. 3-3-3-26 Change in the monthly mean euphotic depth of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

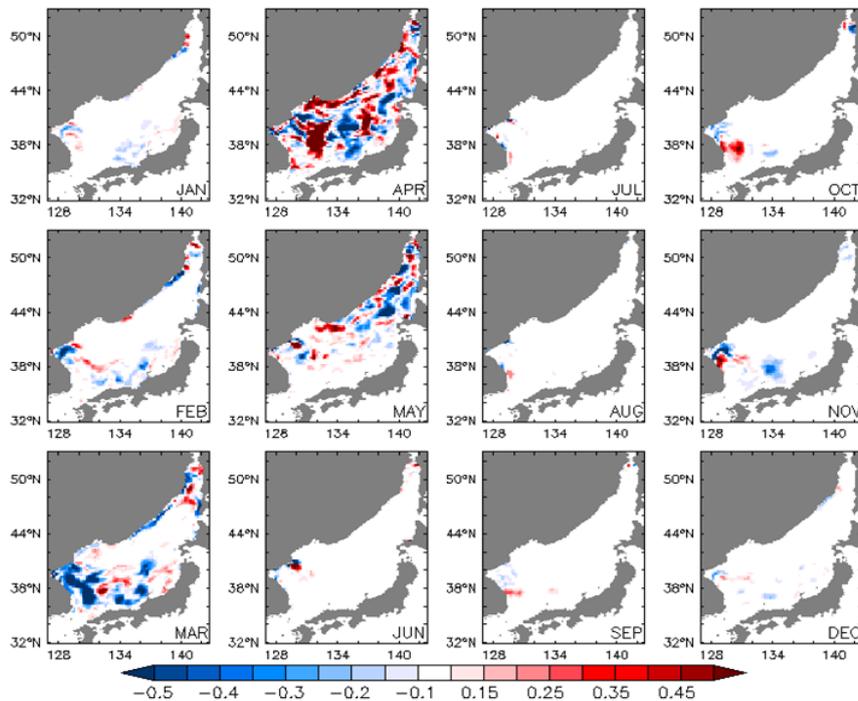


Fig. 3-3-3-27 Change in the monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

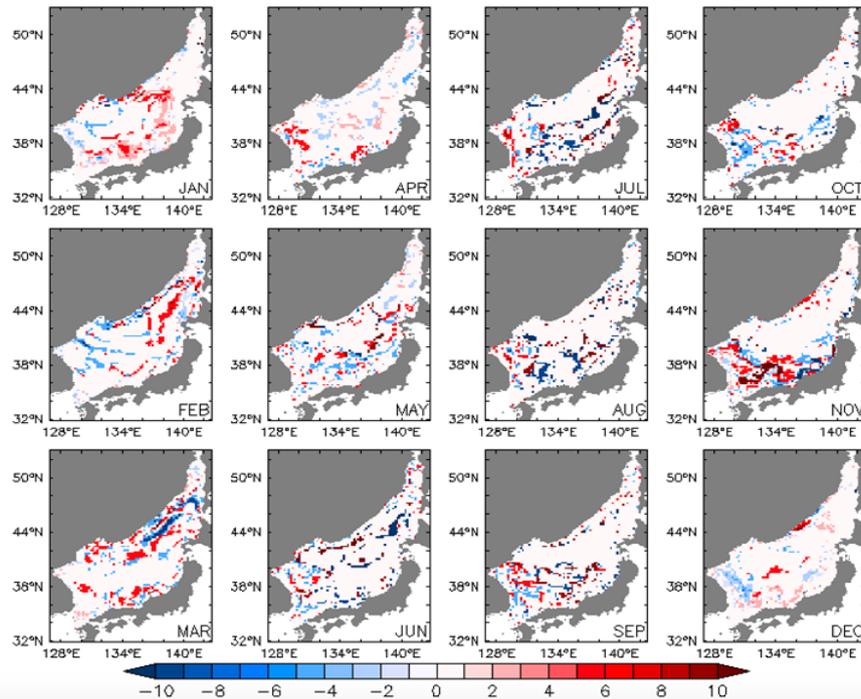


Fig. 3-3-3-28 Change in the monthly mean depth of chlorophyll maximum of 2050s compared to that of 2000s in the East Sea.

4. 장강유출량 증가 시나리오에 따른 생태계 핵심변수 미래변화 시범 전망도

본 절에서는 여름철 장강 유출량이 현재(1981~2010) 대비 30% 증가하는 시나리오에 대해서 미래(2050년대)의 해역별 생태계 핵심변수의 계절(월) 평균장과 연평균장 변화량을 이용해 미래변화 전망도를 시범적으로 제시하였다.

다른 대기강제력 및 외해경계조건의 변화를 고려하지 않았기 때문에 전망의 불확실성은 매우 높으나 해역별 생태계 핵심변수의 미래변화 전망도에 대한 기본적인 개념 정립과 시범 전망도를 제시함으로써 향후 해양 순환-생지화학 결합 생태계 모형을 좀 더 개선 보완하고, 다양한 시나리오에 대한 미래 전망도를 제시하는 데 밑바탕이 될 것으로 기대한다.

가. 2050년대 (2051~2060년 평균) 계절(월) 평균장

장강에서 방류되는 담수의 유량이 현재(2010년대) 대비 30% 증가한 시나리오에

따라 변화한 미래(2050년대) 생태계 핵심변수를 해역별 월평균장으로 제시하였다.

1) 황해

생태계 핵심변수는 물성(표층 수온, 표층 염분, 혼합층 깊이), 표층 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산인자(유광층 깊이, 표층 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이)로 구분하여 2050년대를 가정한 기후평균장을 Fig. 3-3-4-1~9에 제시하였다.

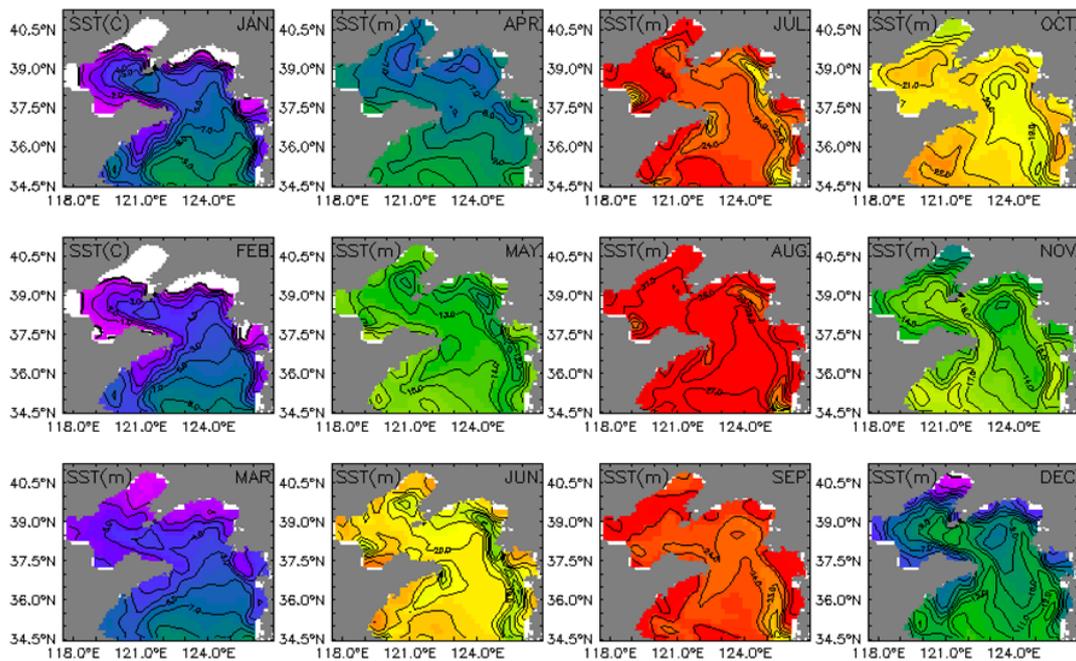


Fig. 3-3-4-1 Monthly mean surface temperature of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

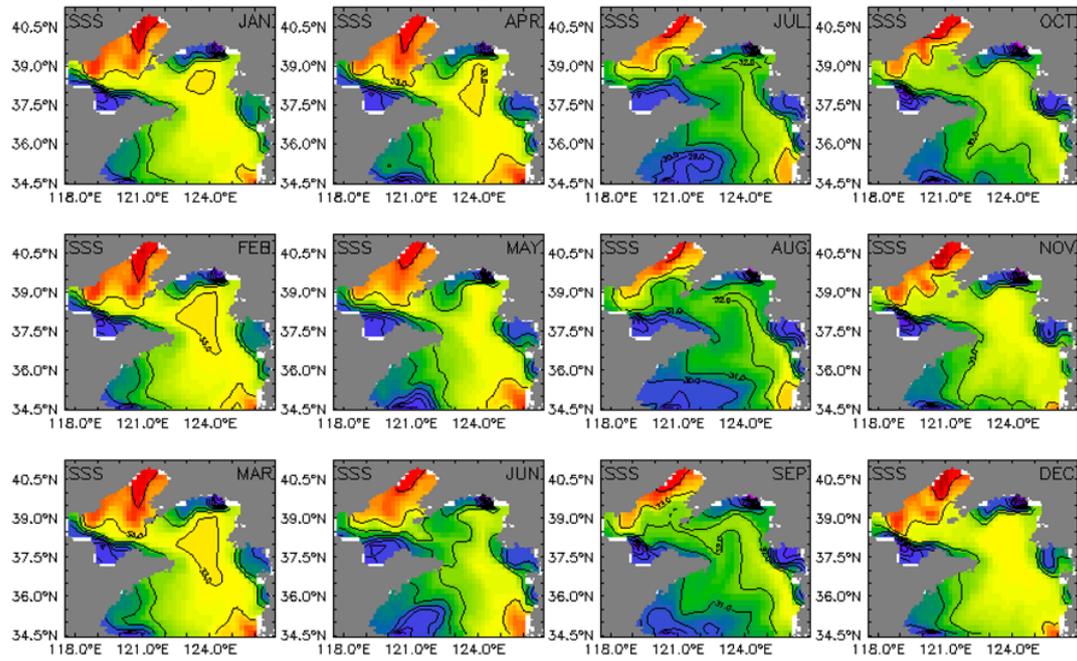


Fig. 3-3-4-2 Monthly mean surface salinity of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

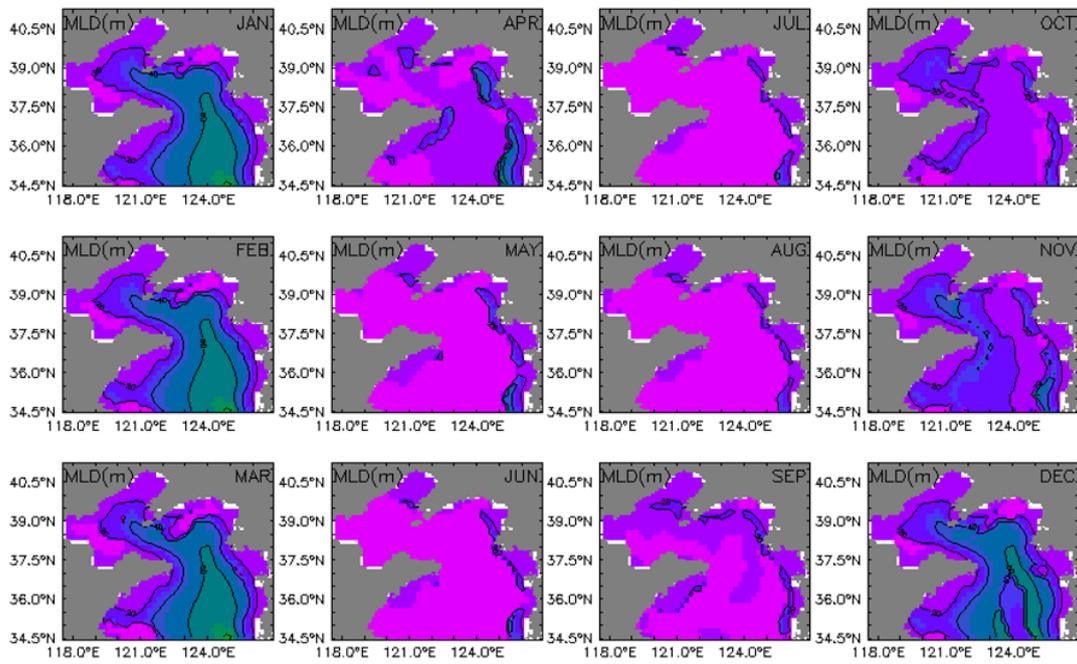


Fig. 3-3-4-3 Monthly mean mixed layer depth of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

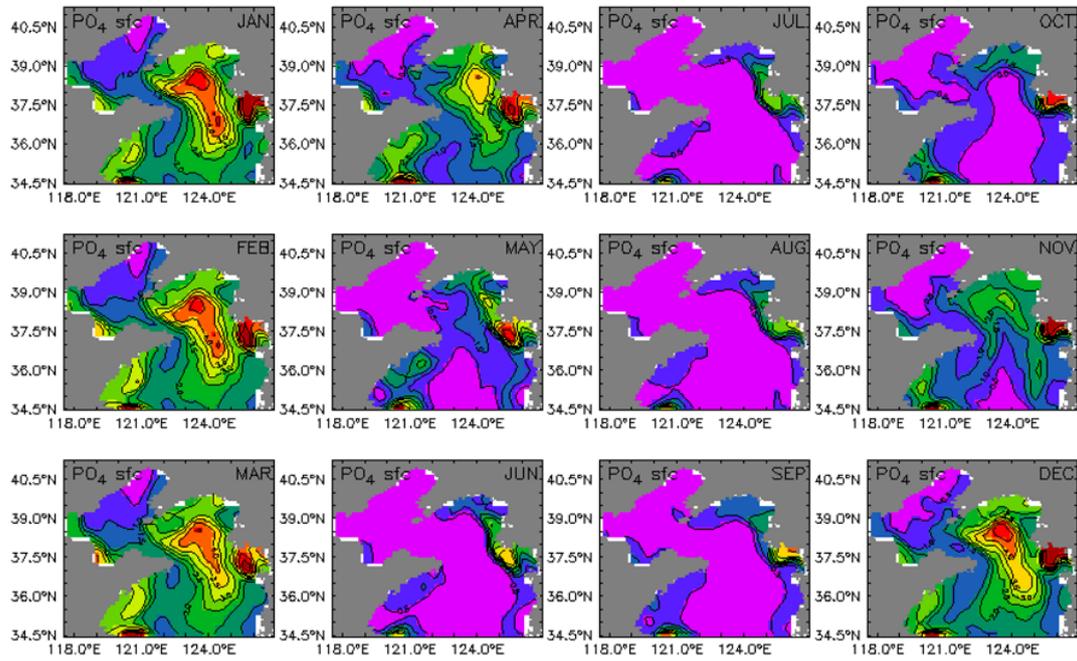


Fig. 3-3-4-4 Monthly mean surface phosphate of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

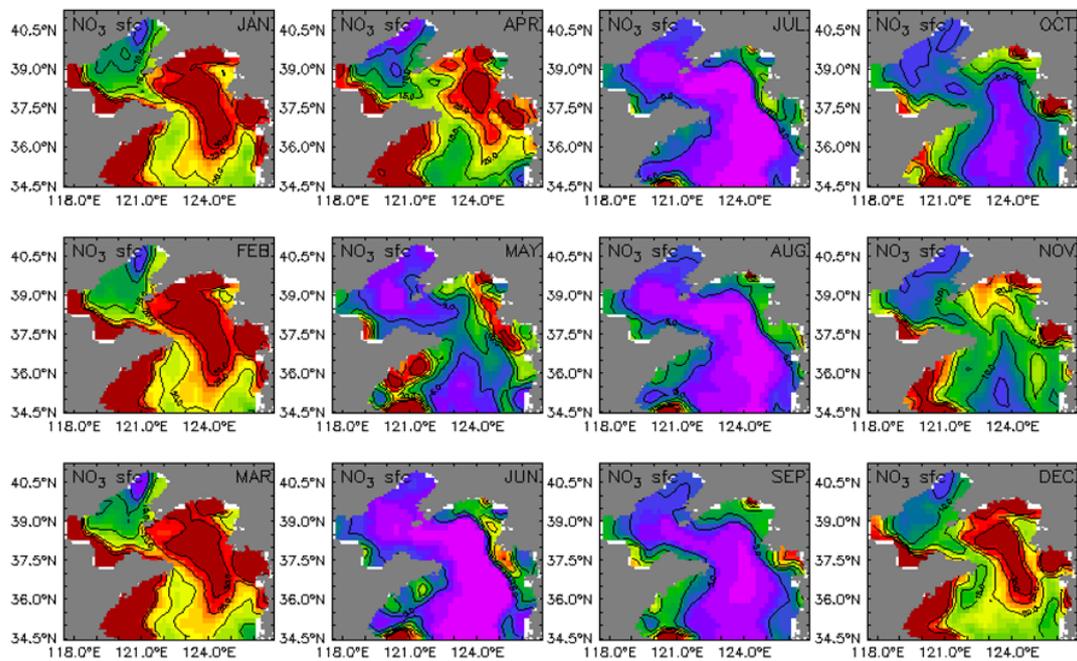


Fig. 3-3-4-5 Monthly mean surface nitrate of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

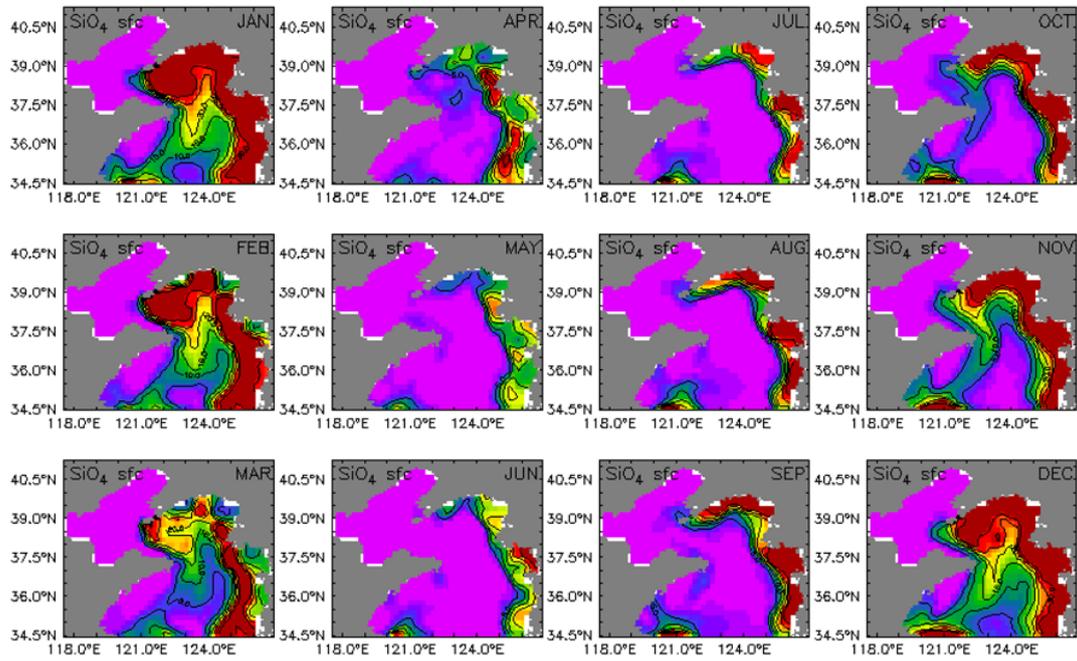


Fig. 3-3-4-6 Monthly mean surface silicate of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

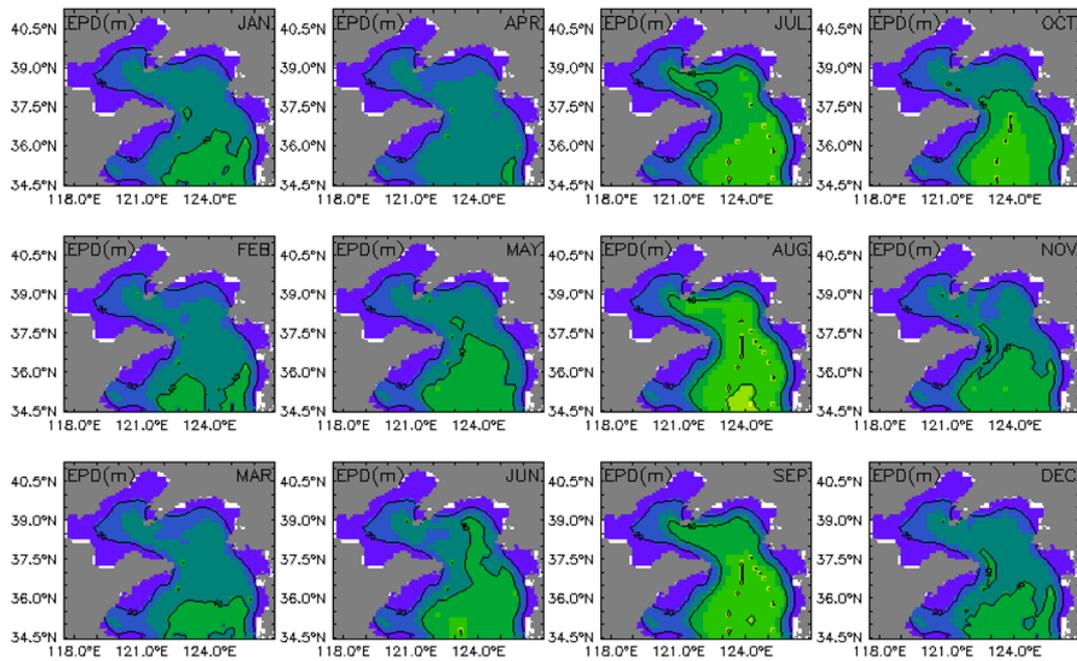


Fig. 3-3-4-7 Monthly mean euphotic depth of 2050s(2051~2060년) in the Yellow Sea.

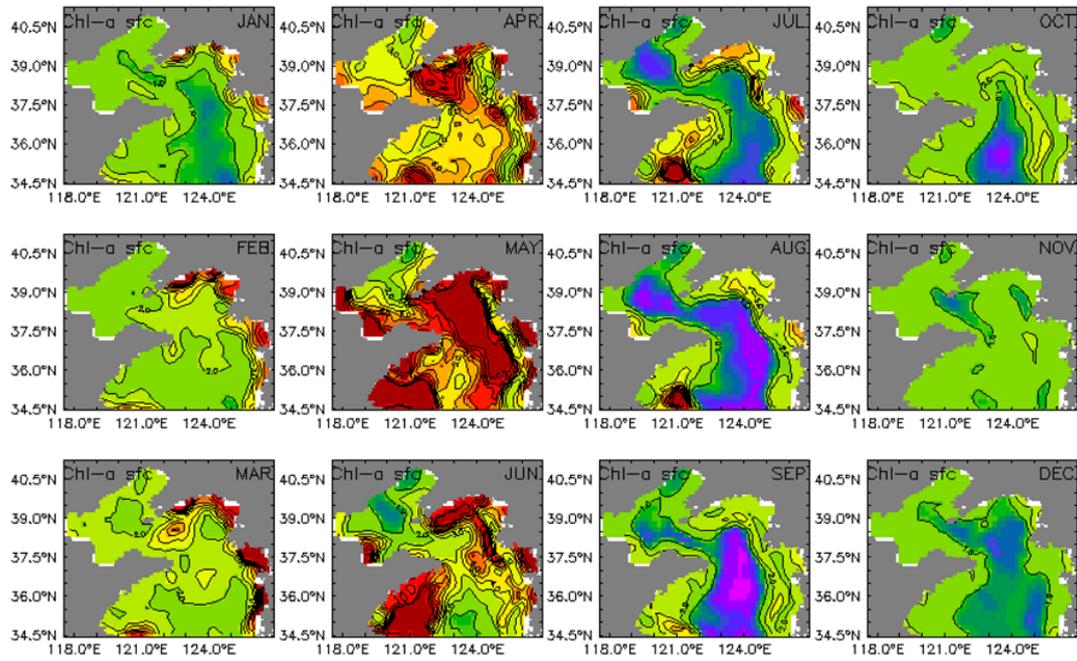


Fig. 3-3-4-8 Monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s (2051~2060년) in the Yellow Sea.

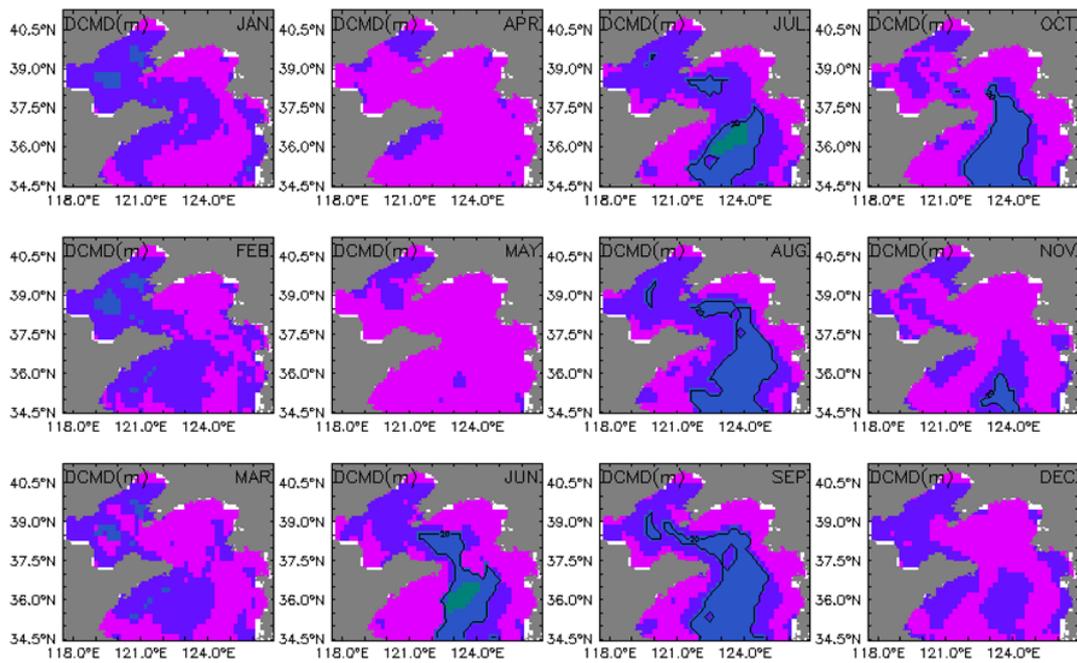


Fig. 3-3-4-9 Monthly mean depth of chlorophyll_a maximum of 2050s (2051~2060년) in the Yellow Sea.

2) 동중국해

동중국해도 황해와 마찬가지로 생태계 핵심변수는 물성(표층 수온, 표층 염분, 혼합층 깊이), 표층 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산인자(유광층 깊이, 표층 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이)로 구분하여 2050년대를 가정한 기후평균장을 Fig. 3-3-4-10~18에 제시하였다.

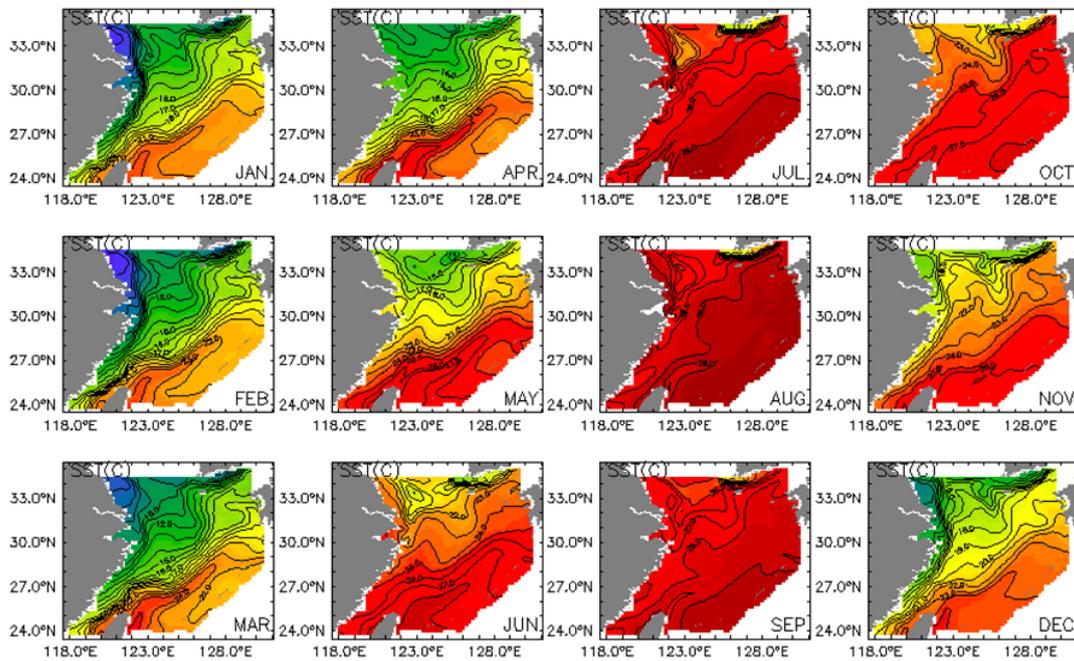


Fig. 3-3-4-10 Monthly mean surface temperature of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea

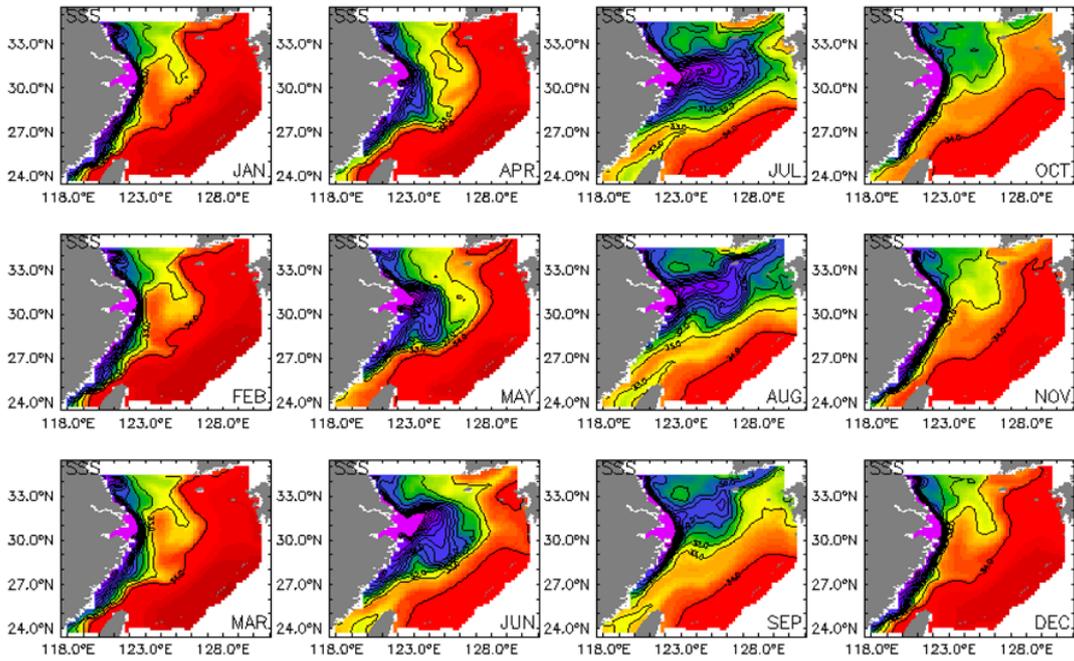


Fig. 3-3-4-11 Monthly mean surface salinity of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

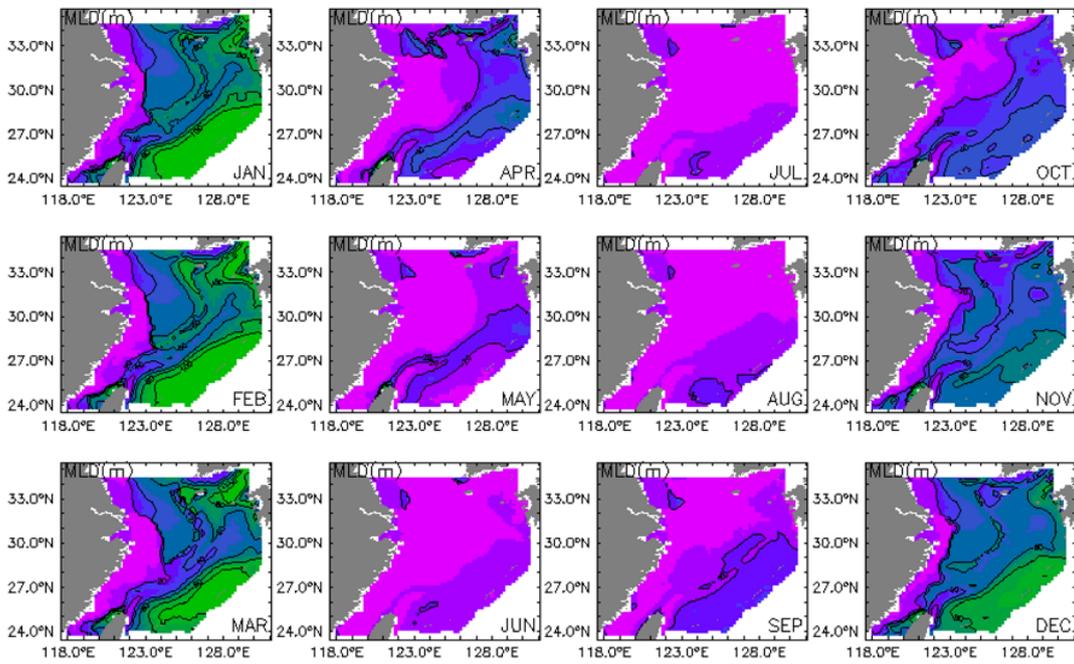


Fig. 3-3-4-12 Monthly mean mixed layer depth of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

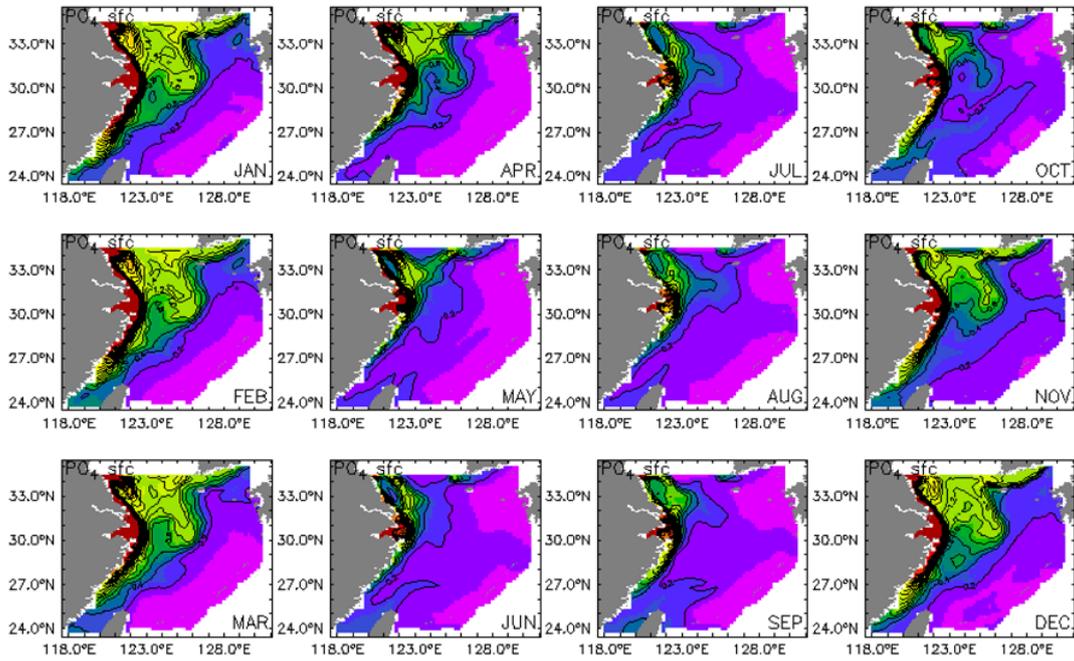


Fig. 3-3-4-13 Monthly mean surface phosphate of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

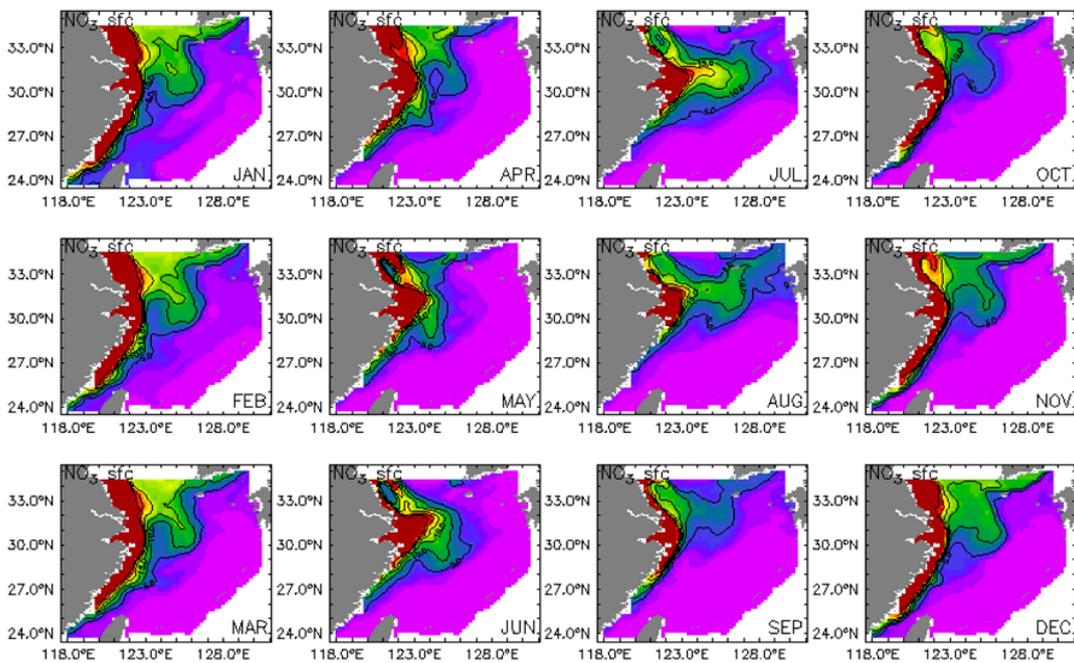


Fig. 3-3-4-14 Monthly mean surface nitrate of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

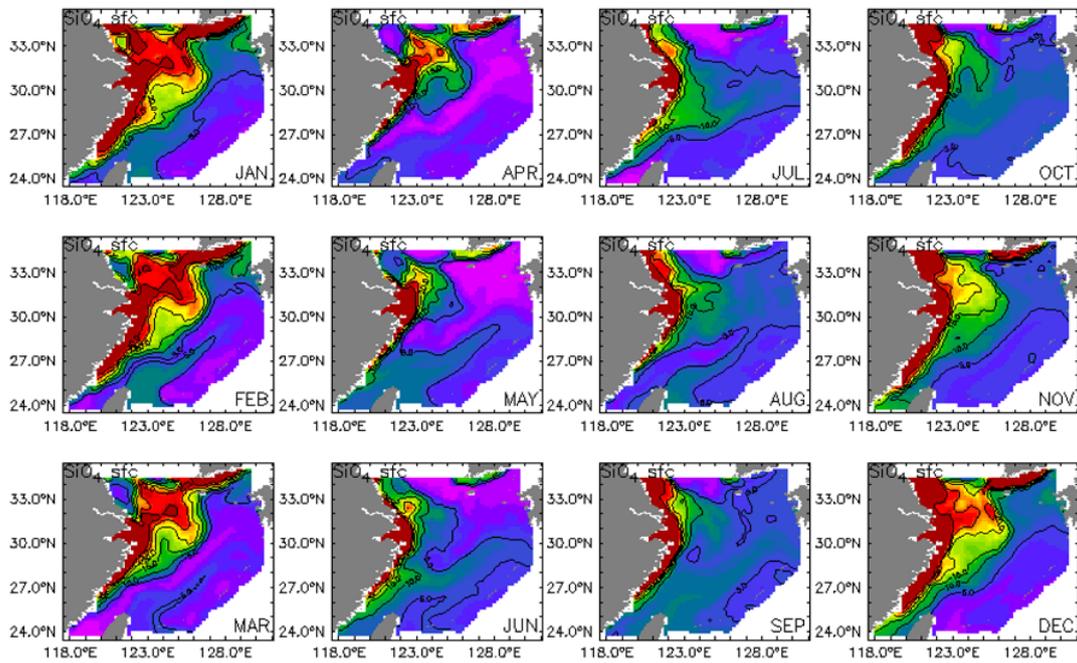


Fig. 3-3-4-15 Monthly mean surface silicate of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

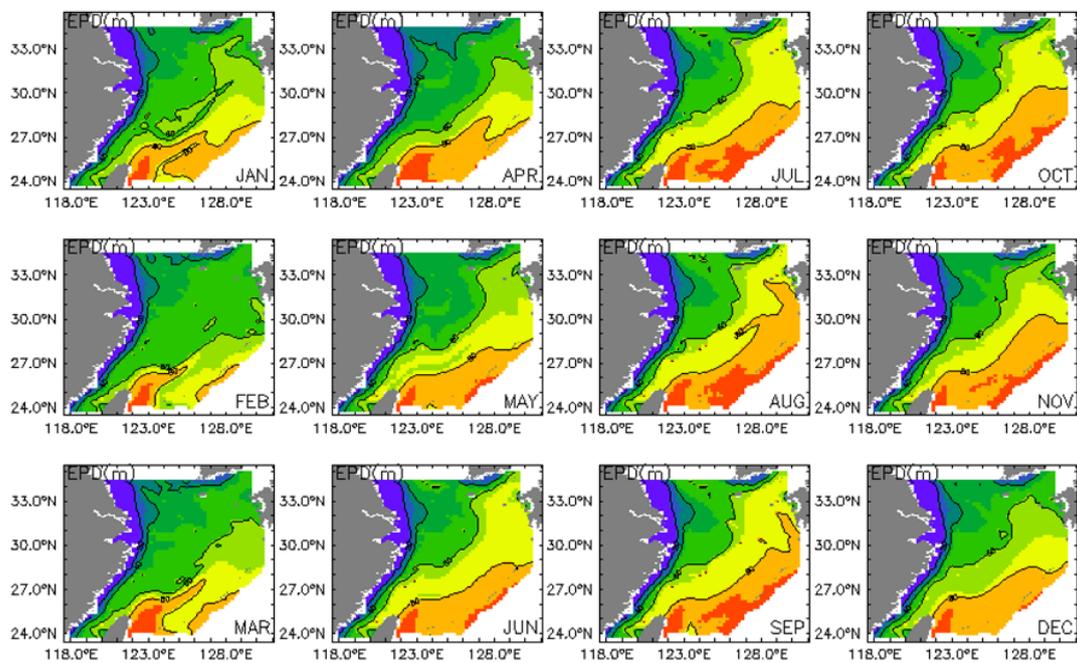


Fig. 3-3-4-16 Monthly mean euphotic depth of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

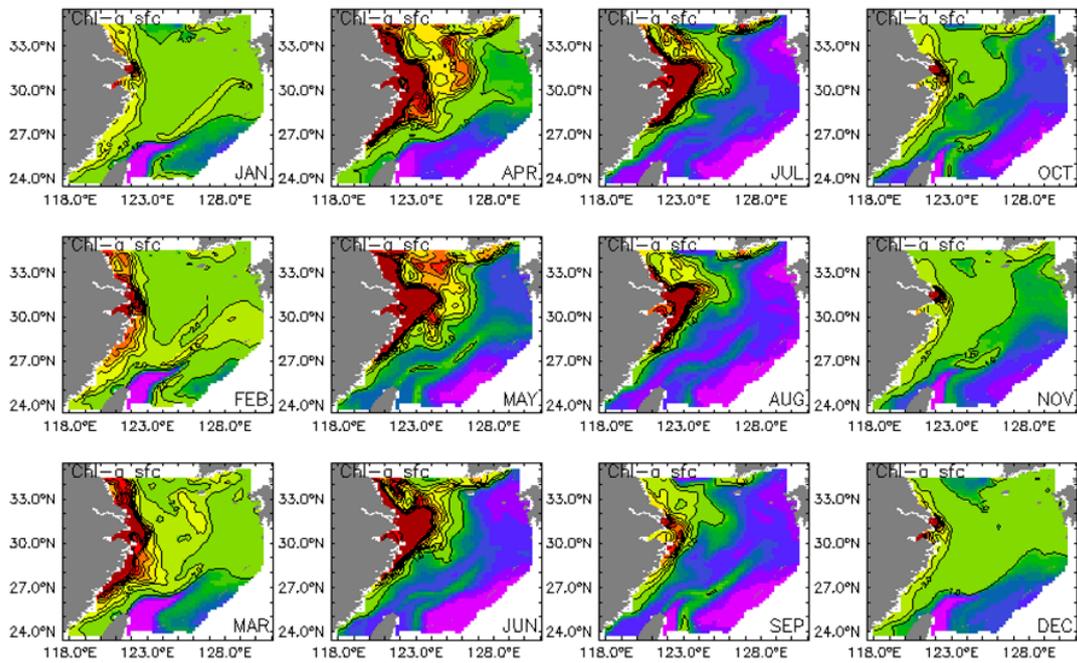


Fig. 3-3-4-17 Monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

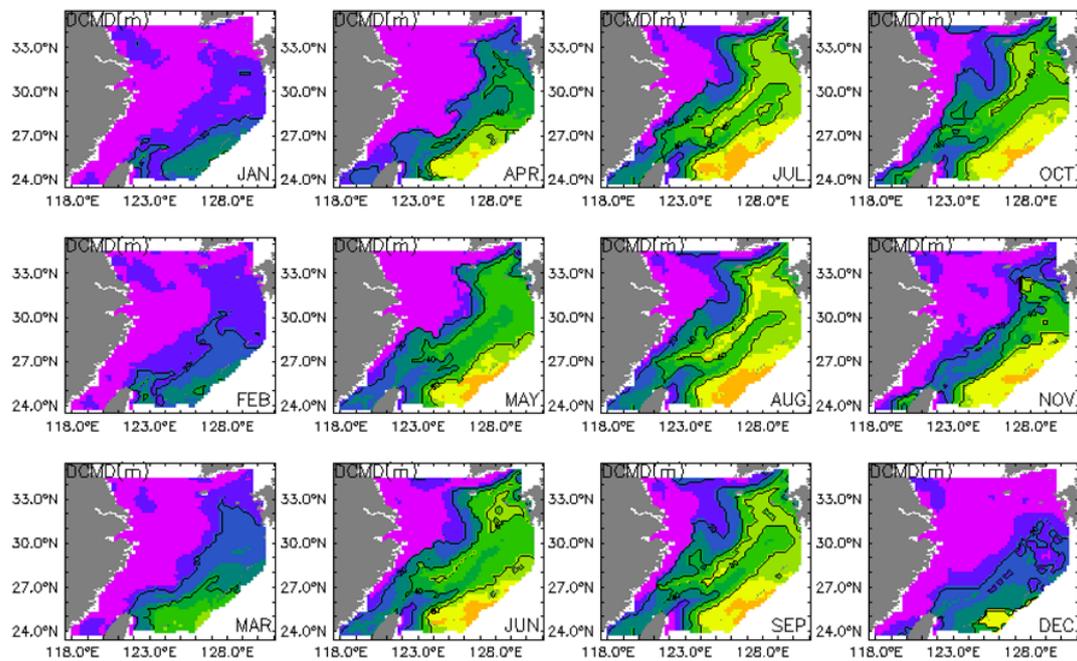


Fig. 3-3-4-18 Monthly mean depth of chlorophyll_a maximum of 2050s(2051~2060년) in the East China Sea.

3) 동해

생태계 핵심변수는 물성(표층 수온, 표층 염분, 혼합층 깊이), 표층 영양염(인산염, 질산염, 규산염), 그리고 일차생산인자(유광층 깊이, 표층 엽록소a, 엽록소a 최대층 깊이)로 구분하여 2050년대를 가정한 기후 평균장을 Fig. 3-3-4-19~27에 제시하였다.

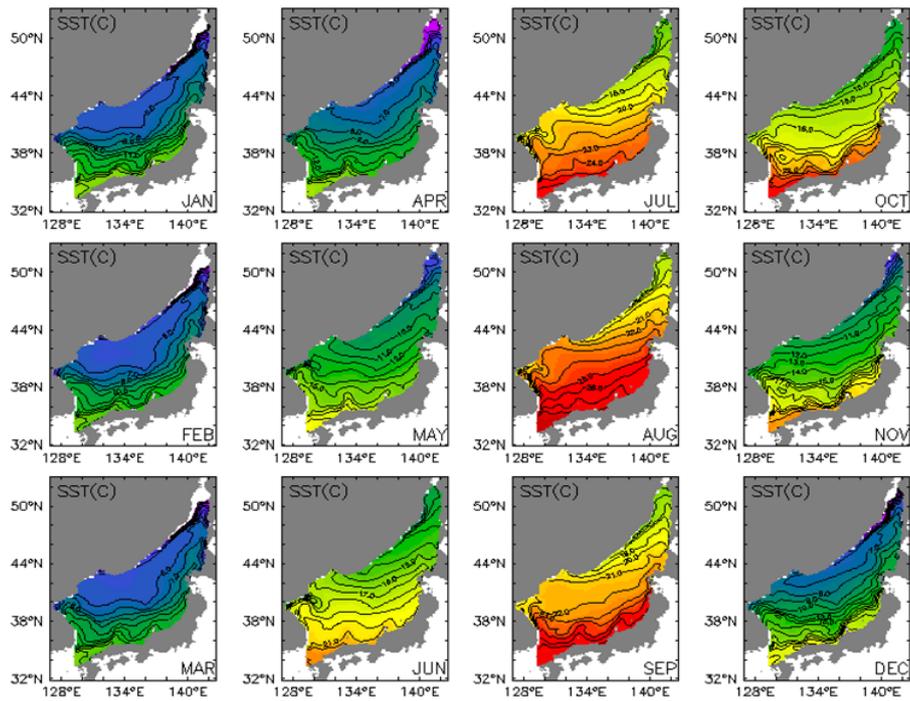


Fig. 3-3-4-19 Monthly mean surface temperature of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

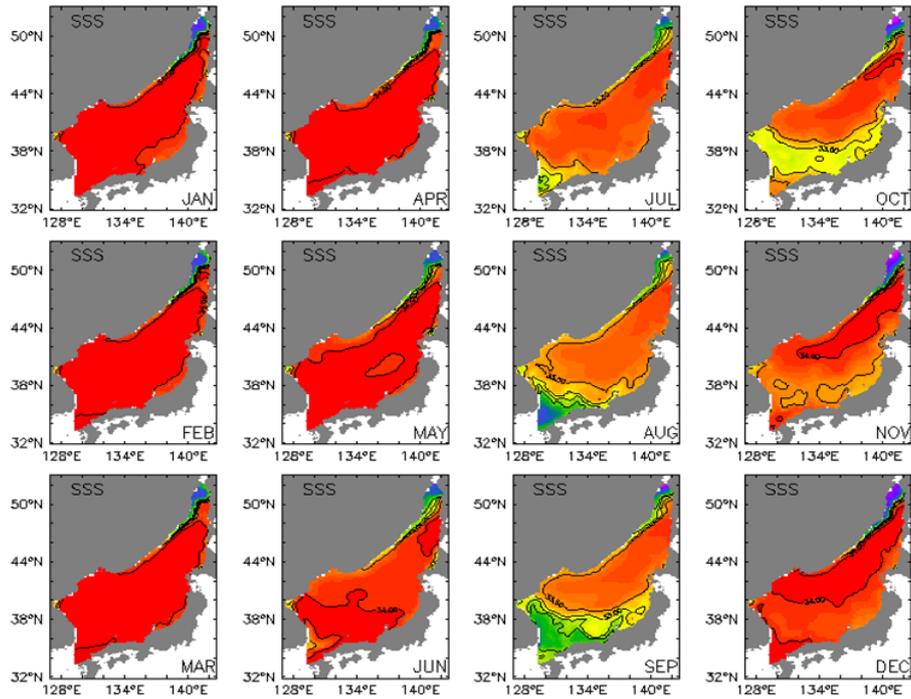


Fig. 3-3-4-20 Monthly mean surface salinity of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

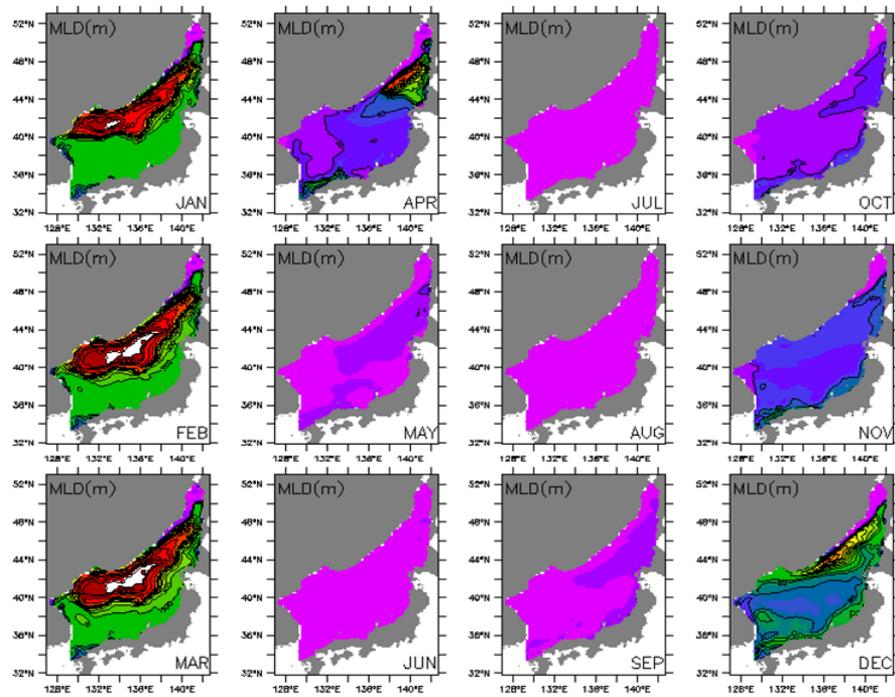


Fig. 3-3-4-21 Monthly mean mixed layer depth of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

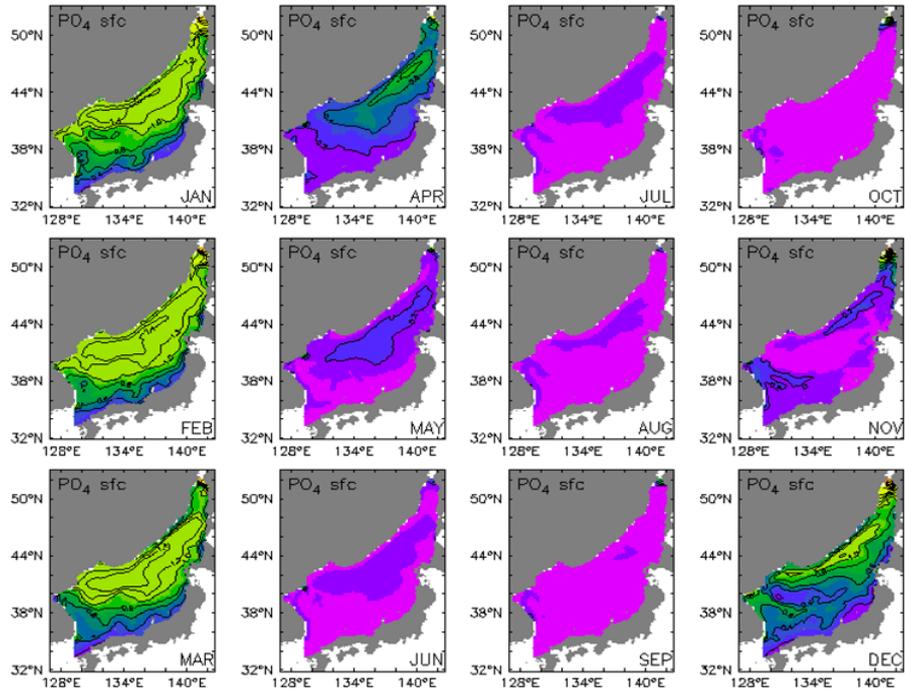


Fig. 3-3-4-22 Monthly mean surface phosphate of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

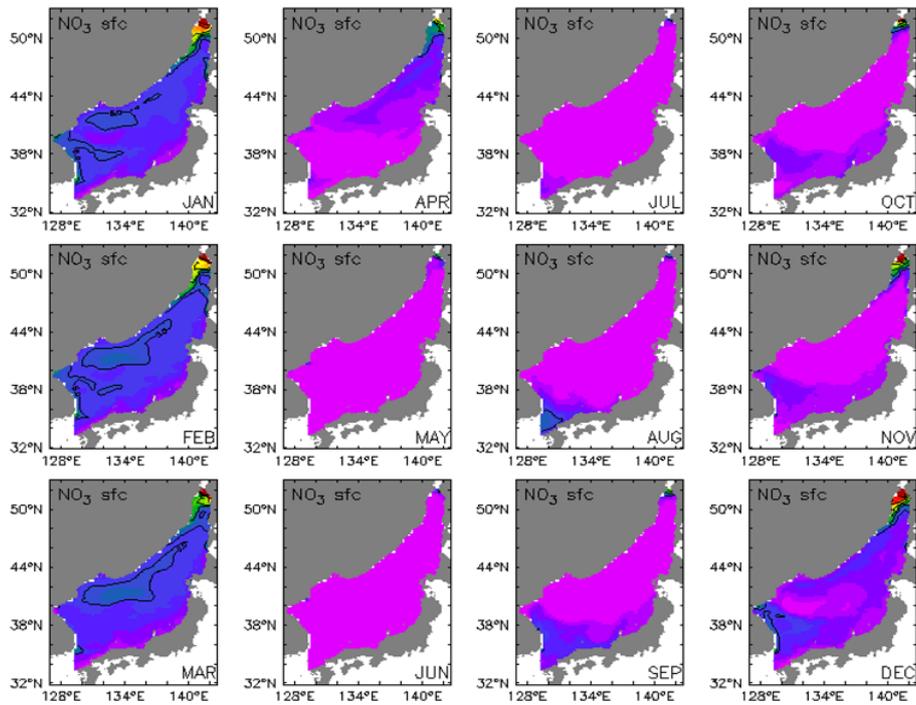


Fig. 3-3-4-23 Monthly mean surface nitrate of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

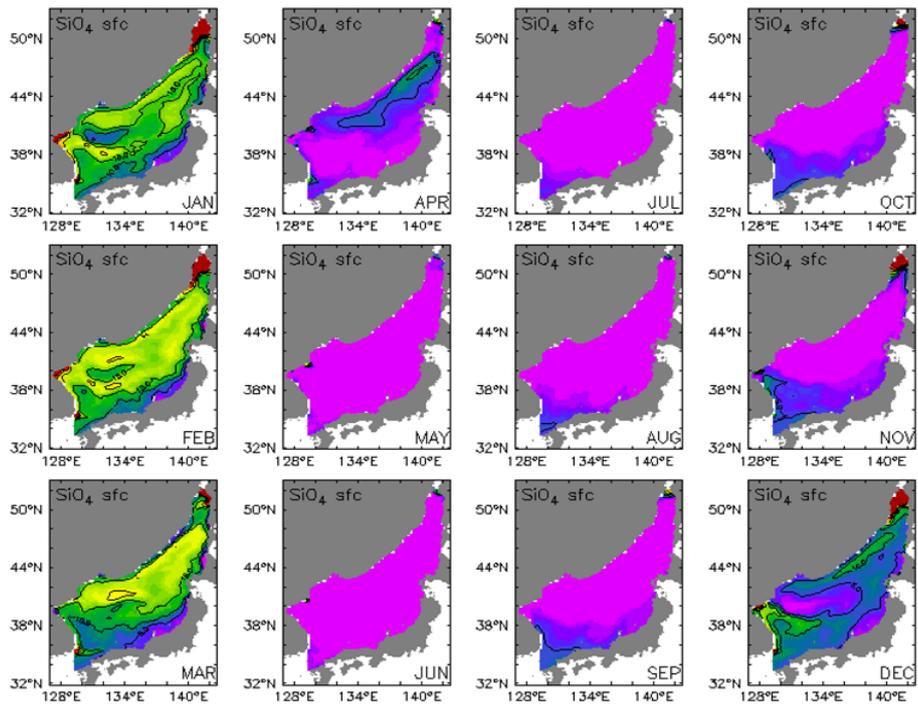


Fig. 3-3-4-24 Monthly mean surface silicate of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

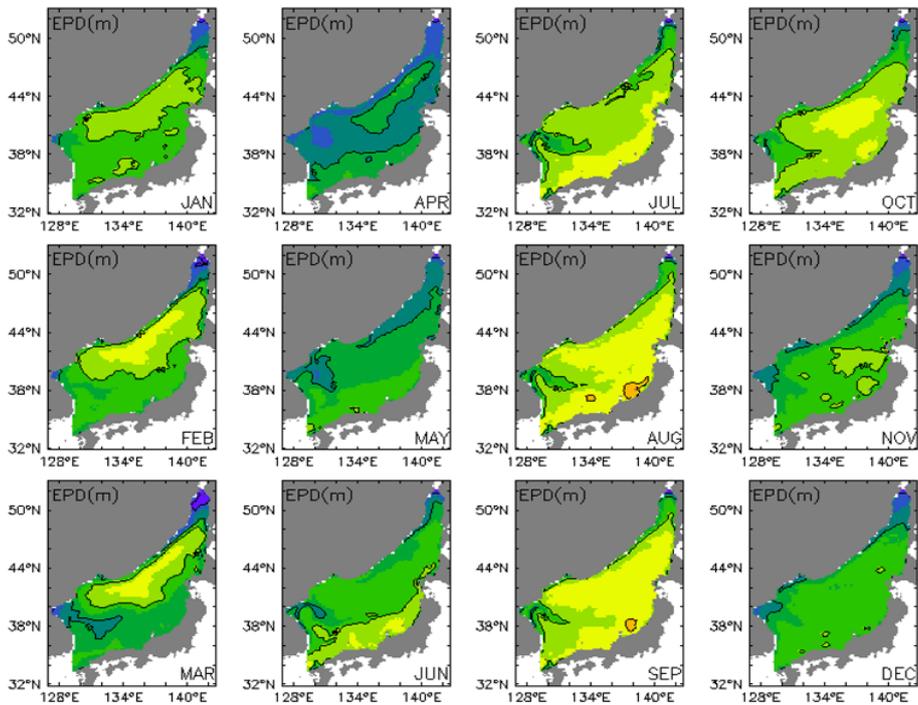


Fig. 3-3-4-25 Monthly mean euphotic depth of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

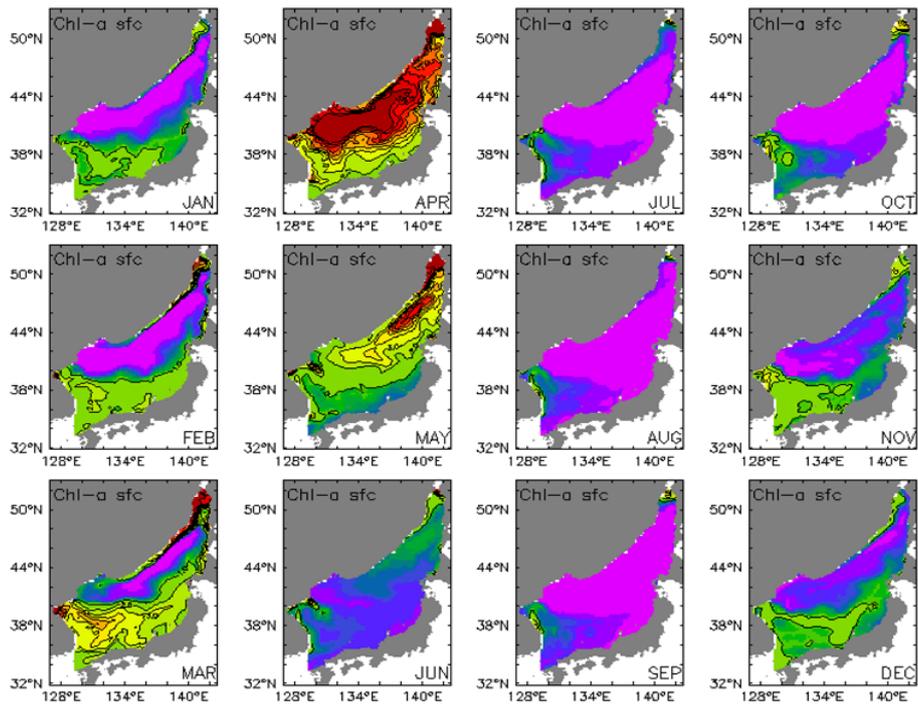


Fig. 3-3-4-26 Monthly mean surface chlorophyll_a of 2050s(2051~2060년) in the East Sea.

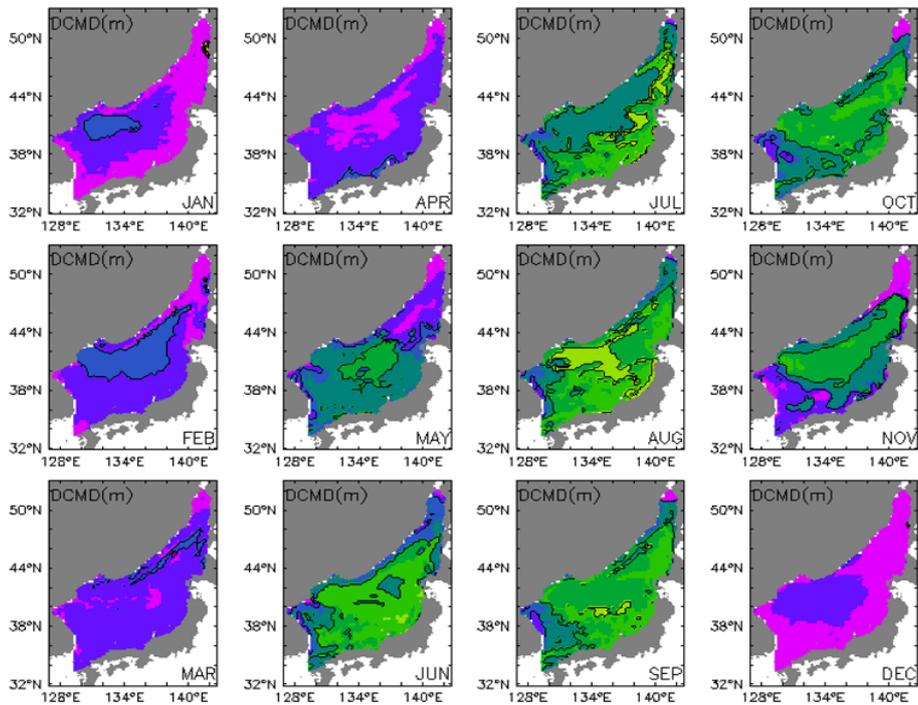


Fig. 3-3-4-27 Monthly mean depth of chlorophyll_a maximum of 2050s (2051~2060년) in the East Sea.

나. 2000년대(2001~2010년 평균) 연평균장에 대한 2050년대 변화 시범 전망도

본 절에서는 장강유량이 현재(2010년대) 대비 여름철에 30% 증가한다고 가정한 시나리오에 따른 생태계 핵심변수들의 미래 변화상을 해역별로 시범 전망해 보았다. 이 결과는 매우 제한된 시나리오에 의한 미래 전망임을 감안하여 반드시 모형의 한계 내에서 주의하여 해석해야 됨을 밝혀둔다.

1) 황해(Fig. 3-3-4-28)

- 2050년대 황해의 연평균 표층 수온은 2010년대에 비해서 황해 중앙부 및 발해만 연안에서 다소 증가하고 서한만 서쪽과 남한 서해안에서는 오히려 감소할 것으로 전망된다.
- 표층 염분은 대체로 감소할 것으로 전망되며, 산둥 반도 이남의 중국연안에서는 상대적으로 염분 감소가 뚜렷할 것으로 전망된다.
- 혼합층 깊이는 1 m 이내의 범위에서 중앙부는 얕아지고 연안은 깊어지는 작은 변화가 있을 것으로 전망된다.
- 표층 인산염 농도는 대체로 미약하게 증가할 것으로 전망되나 중부 일부해역에서의 증가율은 상대적으로 높을 것으로 전망된다.
- 표층 질산염 농도는 전반적으로 뚜렷하게 증가할 것으로 전망된다. 한편 표층 규산염 농도는 황해내부에서는 크게 증가하지 않거나 오히려 감소하고 우리나라 서해안에서는 크게 증가할 것으로 전망된다.
- 일차생산 인자로서 유광층 깊이는 대체로 미약하게 깊어지나 황해 중부에서 국소적으로 깊어지거나 얕아질 것으로 보인다.
- 표층 엽록소a 농도는 황해 전역에 걸쳐 대체로 증가할 것으로 전망된다.
- 엽록소a 최대층 깊이의 변화는 현재 대비 크게 차이가 나지 않을 것으로 전망된다.

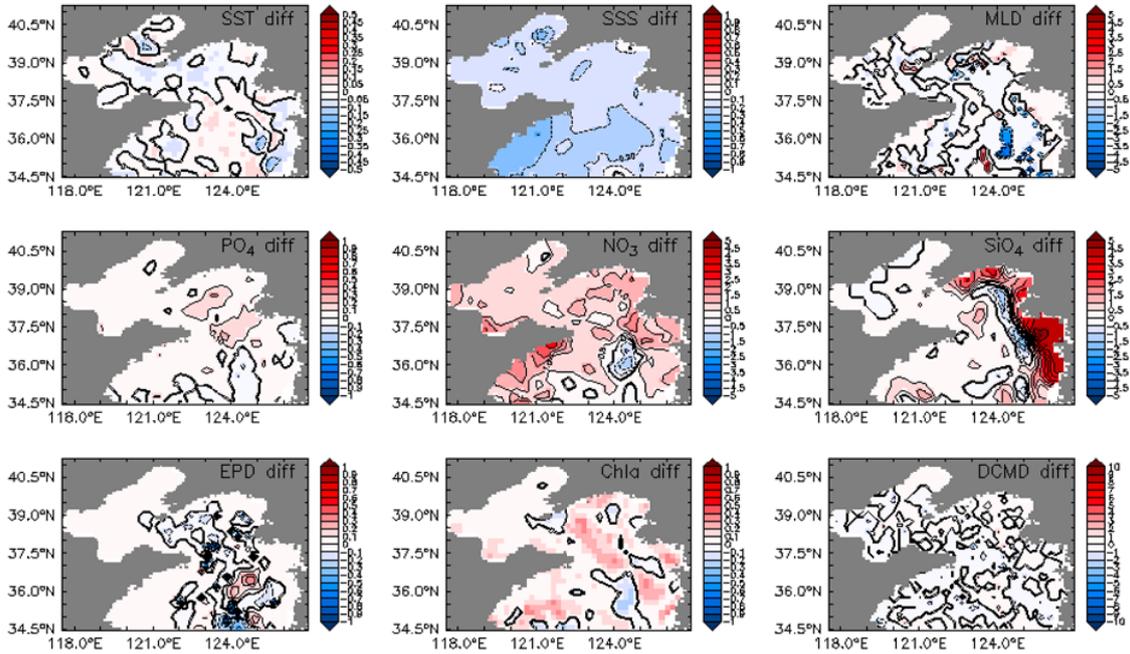


Fig. 3-3-4-28 Future change of EVE in 2050s compared to those in 2000s in the Yellow Sea (annual mean of 2050s - annual mean of 2000s).

2) 동중국해(Fig. 3-3-4-29)

- 2050년대 동중국해의 연평균 표층 수온은 2010년대에 비해서 동중국해 중앙부에서는 감소하고 중국연안, 우리나라 남해안 그리고 쿠로시오 해류가 흐르는 해역에서는 다소 증가할 것으로 전망된다.
- 표층 염분은 쿠로시오 해역을 제외하고는 전반적으로 감소할 것으로 전망되며 장강 유역의 감소가 가장 뚜렷할 것으로 전망된다.
- 혼합층 깊이는 대부분 얕아질 것으로 전망되나 지역적으로 깊어지는 곳도 있을 것으로 전망된다.
- 표층 인산염 농도는 쿠로시오가 흐르는 해역에서는 큰 변화가 없을 것으로 기대되나 장강희석수가 분포하는 대륙붕해역에서는 전반적으로 증가할 것으로 전망된다.
- 표층 질산염 농도의 경우 인산염 농도와 비슷한 경향이 더 뚜렷해 질것으로 보이며 장강 하구역으로부터 대륙붕해역을 포함하는 장강 희석수역에서의

증가가 두드러질 것으로 전망된다.

- 한편 표층 규산염 농도는 장강 하구역에서만 두드러진 증가를 보일 것으로 전망되고 대부분의 해역에서는 큰 변화가 없을 것으로 보인다.
- 일차생산 인자로서 동중국해 유광층 깊이는 대륙붕 해역에서는 큰 차이가 없을 것으로 보이나, 대륙사면과 쿠로시오해류가 흐르는 해역에서는 다소 얕아질 것으로 전망된다.
- 표층 엽록소a 농도는 동중국해 전역에서 대체로 증가할 것으로 전망되고 특히 장강하구역과 대륙붕 해역에서의 증가폭이 클 것으로 기대된다.
- 한편 엽록소a 최대층 깊이의 변화는 현재 대비 크게 차이가 나지 않을 것으로 전망된다.

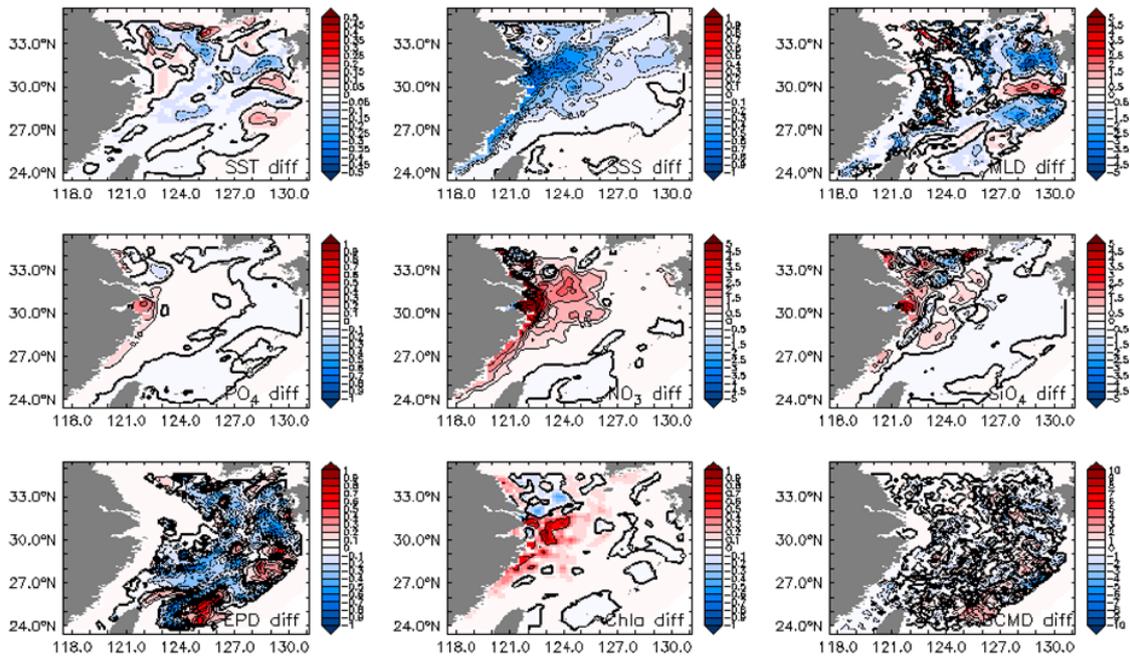


Fig. 3-3-4-29 Future change of EVE in 2050s compared to those in 2000s in the East China Sea (annual mean of 2050s - annual mean of 2000s).

3) 동해(Fig. 3-3-4-30)

- 2050년대 동해의 연평균 표층 수온은 2010년대에 비해서 울릉분지와 야마토 분지에서는 증가하며, 천해역에서는 감소할 것으로 전망된다. 상대적으로

일본분지에서는 수온변화가 크지 않을 것으로 보인다.

- 표층 염분은 러시아 및 우리나라 연안역은 미약하게 증가하나 울릉분지를 중심으로 감소할 전망이다.
- 해양 혼합층 깊이는 극전선을 중심으로 북부 해역은 증가할 것으로 전망되며, 남부 해역은 감소할 것으로 전망된다. 한편 일본 열도를 따라 흐르는 대만난류 해역에서는 다소 깊어질 것으로 보인다.
- 표층 인산염 농도는 일본 연안 및 일본 분지에서는 증가하고 다른 해역은 감소하나 그 크기는 매우 작을 것으로 전망된다.
- 표층 질산염 농도도 인산염 농도의 변화와 비슷할 것으로 생각되나 대한해협 입구부터 울릉분지 및 원산만 일대로 다소 증가하는 경향을 보일 것으로 전망된다.
- 표층 규산염 농도의 경우 동해 내부에서는 전반적으로 감소하며 중부의 감소율이 더 크나 극전선 북쪽해역은 미약하게 증가할 것으로 보인다.
- 일차생산 인자들을 보면, 유광층 깊이는 대체로 증가하나 원산만-울릉도-독도를 잇는 선을 중심으로 복잡한 변화 양상을 보이며 울릉분지 동북쪽에서는 오히려 감소하는 해역이 존재할 수 있다.
- 표층 엽록소a 농도는 울릉분지 및 동해 북부해역에서는 증가하나 중동부 해역은 오히려 감소할 것으로 전망된다.
- 엽록소a 최대층 깊이는 대체로 울릉분지와 일본분지에서는 다소 깊어지고 야마토 해령과 야마토 분지에서는 다소 얕아질 것으로 전망된다.

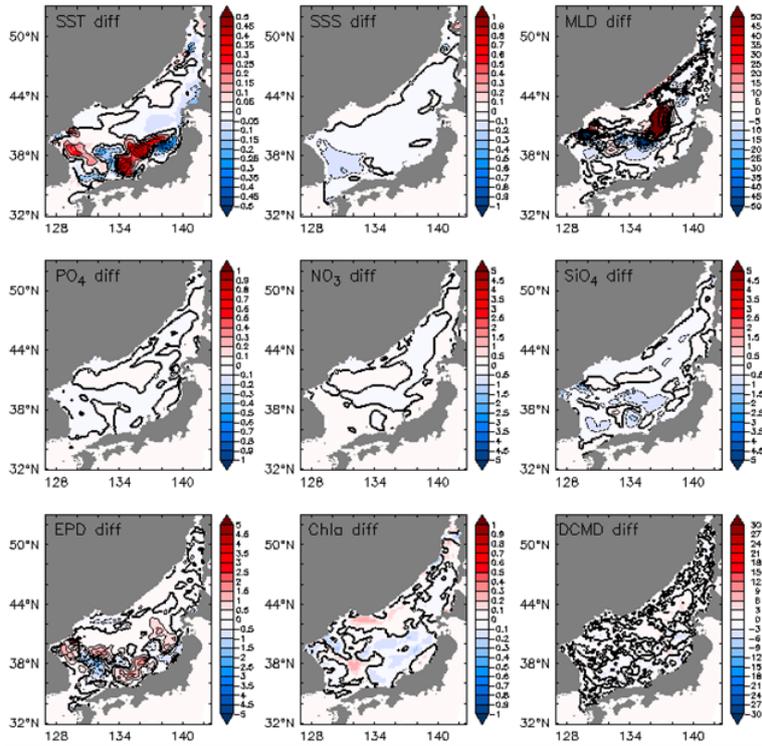
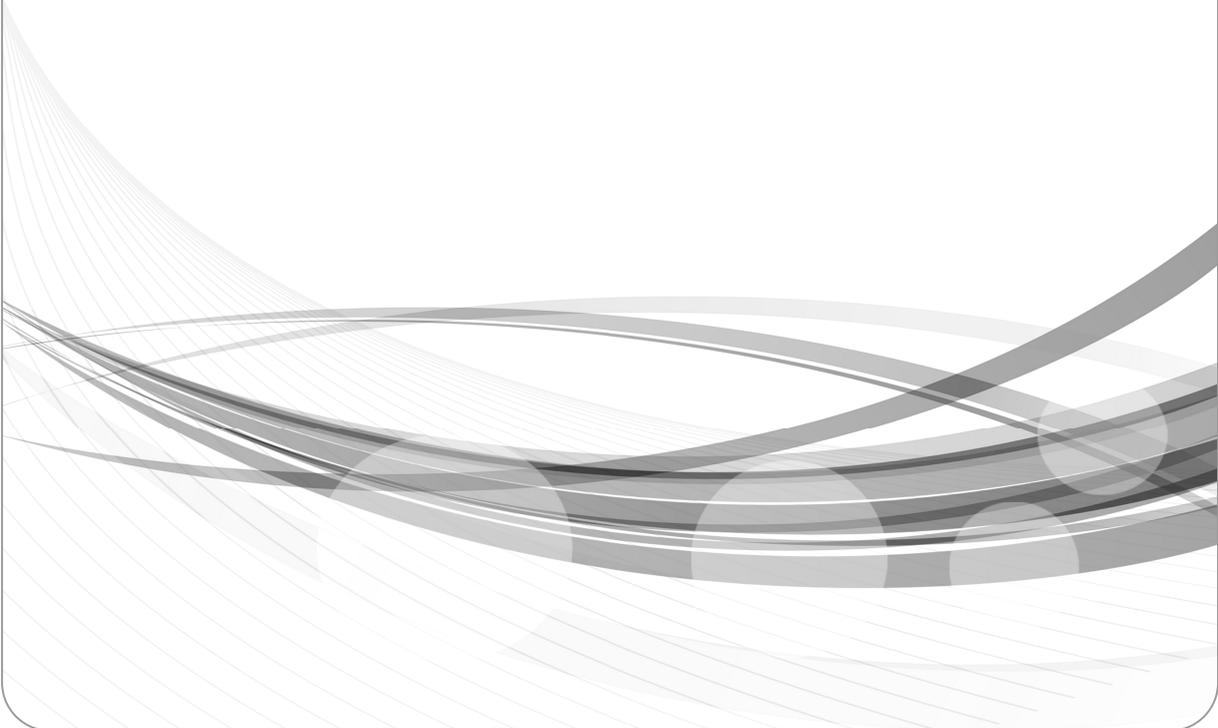


Fig. 3-3-4-30 Future change of EVE in 2050s compared to those in 2000s in the East Sea (annual mean of 2050s - annual mean of 2000s).

제 4 장

연구목표 달성도 및 성과



제 4 장 연구목표 달성도 및 성과

제 1 절 연구목표 달성도

1. 연구내용 대비 달성도

구분	세부연구목표	추진실적 및 계획												연구비 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1차 년도('15년): 한반도 주변해 순환-생태계 접합모형 수립 및 검증 (최근 30년 계절평균장 제시)	순환-생태계 접합 모형 개발	[실적]												190,000
	과거 대기 강제력 분석 및 산출				[실적]									
	과거 외해 경계조건 분석 및 산출				[실적]									
	과거 하천 경계조건 분석 및 산출				[실적]									
	검증용 위성 및 관측자료 수집 및 분석				[실적]									
	최근 30년 적분 및 결과분석을 통한 모형 검증/개선							[실적]						
2차 년도('16년): 주요시기별 생태계 핵심변수 (EVE) (시범) 변천도 제시	모형 검증을 통한 순환-생태계 모형 개선 및 경계조건 재산출(필요시)	[실적]											177,000	
	최근 30년 재적분(필요시) 및 결과 분석			[실적]										
	생태계핵심변수(EVE) 분석을 통한 (시범) 변천도 작성 및 제시							[실적]						
	전 지구 기후모형 자료(CMIP5) 분석을 통한 미래 변화 시나리오 분석 및 경계조건 산출	[실적]												
	미래전망 실험계획 수립							[실적]						
3차 년도('17년): 한반도 주변해 생태 계핵심변수 (EVE) (시범) 미래변화 전 망도 제시	과거 30년 경년변동성 분석 및 이해	[실적]											119,000	
	전 지구 기후모형 자료(CMIP5)로부터 산출한 경계 조건 변화 분석	[실적]												
	강유출량 미래변화 시나리오에 따른 2050년대 수치 적분 및 결과 분석				[실적]									
	장강유출량 미래변화 시나리오에 따른 생태계핵심변수(EVE) 미래변화 시범 전망도 제시							[실적]						

※ 파란색 : 계획 / 붉은색 : 실적

2. 정량적 목표 달성도

구분		1차 년도 (성과/목표)	2차 년도 (성과/목표)	3차 년도 (성과/목표)	최종
논문 게재	SCI(E)	-	0 / 1	1 / 1	1 / 2
	기타 국외 학술지	-	-	-	-
	국내 학술지	1 / 3	1 / 1	1 / 1	3 / 5
학회 발표	국외	6 / 1	3 / 1	5 / 3	14 / 5
	국내	6 / 2	3 / 2	3 / 2	12 / 6
특허	국외	출원	-	-	-
		등록	-	-	-
	국내	출원	-	-	-
		등록	1 / 1	0 / 1	0 / 1
기술료 (계약/징수)		-	-	-	-
단행본/기고문		1 / 1	-	-	1 / 1
워크숍/세미나 개최 (전문가 활용)		1 / 1	5 / 1	1 / 1	7 / 3
인터넷사이트 개설		-	-	1 / 1	1 / 1

제 2 절 연구 성과

1. 연구 성과 종합

가. 연차별 연구 성과

□ 1차 년도(2015년) 연구성과 및 의의

- 해양순환-생태계 접합모형(POLCOMS-ERSEM)을 수립하여 한반도 주변해역 생태계 변화 연구의 기반을 마련함.
- 해양생태계 변화를 나타낼 수 있는 생태계 핵심변수를 선정함.

□ 2차 년도(2016년) 연구성과 및 의의

- 기존 자료 및 전구 모형 자료를 이용하여 한반도 주변해역에 수립된 해양순환-생태계 접합모형의 대기/해양/하천 경계조건을 확보함.
- 과거의 경계조건 자료를 이용하여 한반도 주변해역에 대하여 생태계 핵심변수의 과거 상황을 재현함.
- 과거 30년간의 한반도 주변해역 생태계 핵심변수의 과거 변천도를 작성함.
- 해양생태계 모형 연구자 초청 세미나를 통하여 연구자 네트워크 구축을 시도함.

□ 3차 년도(2017년) 연구성과 및 의의

- 해양순환-생태계 접합모델 개선/세련화를 통하여 한반도 주변해역 생태계의 과거 30년 평균 변화를 산정.
- CMIP5 기후모델 자료를 이용하여 장강 유출량 미래변화를 예측하고 이를 기반으로 미래변화 예측을 위한 경계조건에 기반하여 미래변화 시나리오 작성
- 장강유출량 미래변화 시나리오에 따른 2050년대 한반도 주변해 환경/생태계 미래변화 전망도를 작성함.
- [해양생태계 모델링 연구 활성화 및 네트워크 구축 워크숍]을 개최하여 국내 해양생태계 모형 연구그룹 및 연구자 네트워크 활성화 방안을 협의함.

나. 자체 종합 평가

□ 첨단 해양순환-생태계 접합모형 개발/수립/운용 기술 확보

- 해양생태계 모형 연구의 최첨단 연구기관인 영국 PML의 해양순환-생태계 접합모형인 POLCOMS-ERSEM을 도입하고 이를 한반도 주변해역에 수립하여 실험/운용함으로써 우리 연구원의 해양생태계 예측 모델링 분야 연구 수준을 향상시켰으며,
- 이를 통하여 향후 독자적인 해양생태계 모형을 개발할 수 있는 기반을 마련하였음.

□ 해양생태계 과거변천 재현 및 미래변화 전망 기술 확보

- 본 연구를 통하여 수립한 POLCOMS-ERSEM 해양순환-생태계 접합모형을

이용하여 한반도 주변해역에 대하여 생태계 핵심변수를 특정하고 이 변수들의 과거 변천을 재현하고 미래 변화를 전망하는 과정으로 통하여 기후/환경 변화에 따른 지역해 해양생태계의 장기 변화를 예측할 수 있는 기술을 확보하였으며,

- 이를 기반으로 향후 후속연구를 통하여 확보한 기술과 성과를 더욱 발전시켜 나갈 예정이다.

2. 연구 성과 확산

가. 해양생태계 모델링 연구 활성화 및 네트워크 구축 워크숍

1) 개요

명칭	기술 분야	규 모		개최장소
		인원	기간(일)	
해양생태계 모델링 연구 활성화 및 네트워크 구축 워크숍	해양생태계 모델링	20	3일 (2017. 12. 19 ~ 21)	한양대학교 에리카 게스트하우스 회의장

2) 내용

- 참가자: 20여명 (한국해양과학기술원, 국립수산물과학원, 부산대학교, 전남대학교, 제주대학교, (주)지오시스템리서치)
- 발표자: 강현우(KIOST), 권은영(부산대), 김성대(KIOST), 김영호(KIOST), 김창신(수과원), 소재귀(KIOST), 송용식(수과원), 윤석현(수과원), 이준호(제주대), 장찬주(KIOST), 정석근(제주대), 최병주(전남대) 등 12인
- 토의내용 :
 - 한반도 해역 생태계 미래 변화 예측 연구 사업 소개
 - 국내 생태계 모델링 기관 및 연구자별 연구 주제 소개
 - 생태계 모델링 관련 핵심 연구 주제 도출
 - 생태계 모델링 핵심 연구 주제별 과학적 질문 사항 및 해결방안 토의

- 국내 생태계 모델링 연구 활성화 방안에 관한 보고서 작성
- 국내 생태계 모델링 연구 그룹 및 연구자 네트워크 활성화 방안 협의

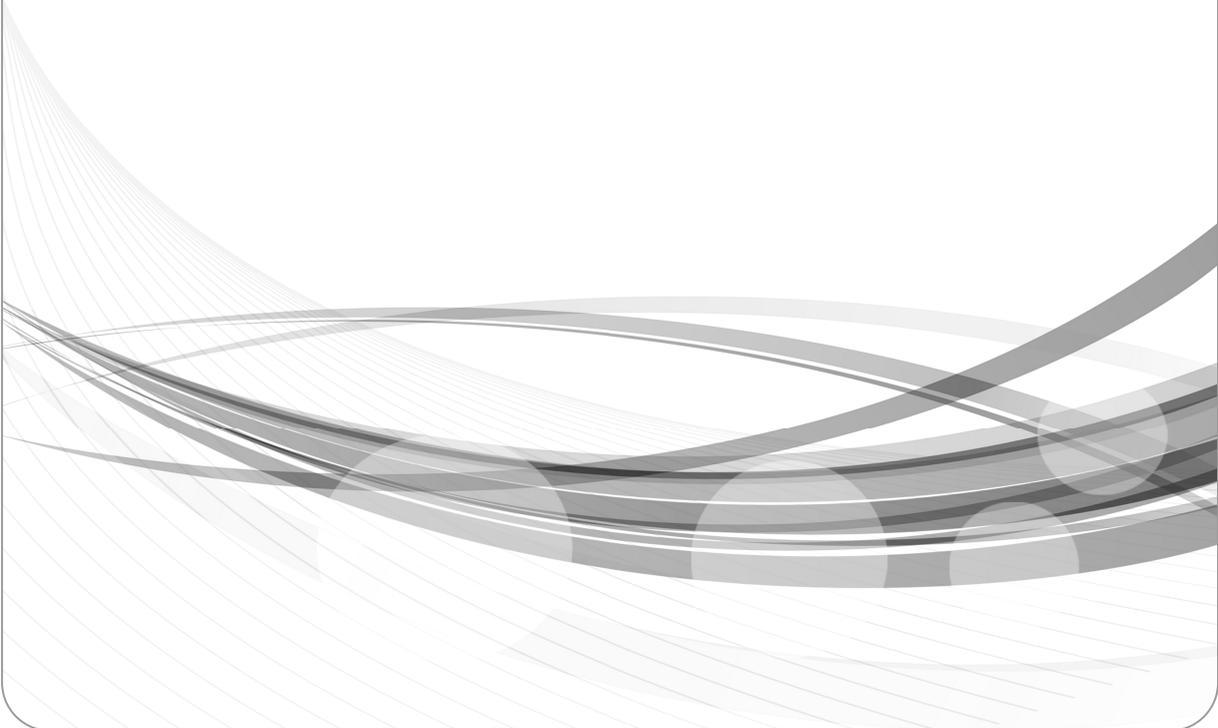
□ 기대효과

- 인터넷을 통한 생태계모델링 연구결과 공유
- 국내 해양생태계 모델링 연구 활성화
- 관련 연구자간 네트워크 구축



제 5 장

연구개발결과의 활용계획 및 파급효과



제 5 장 연구개발결과의 활용계획 및 파급효과

제 1 절 연구개발 결과의 활용계획

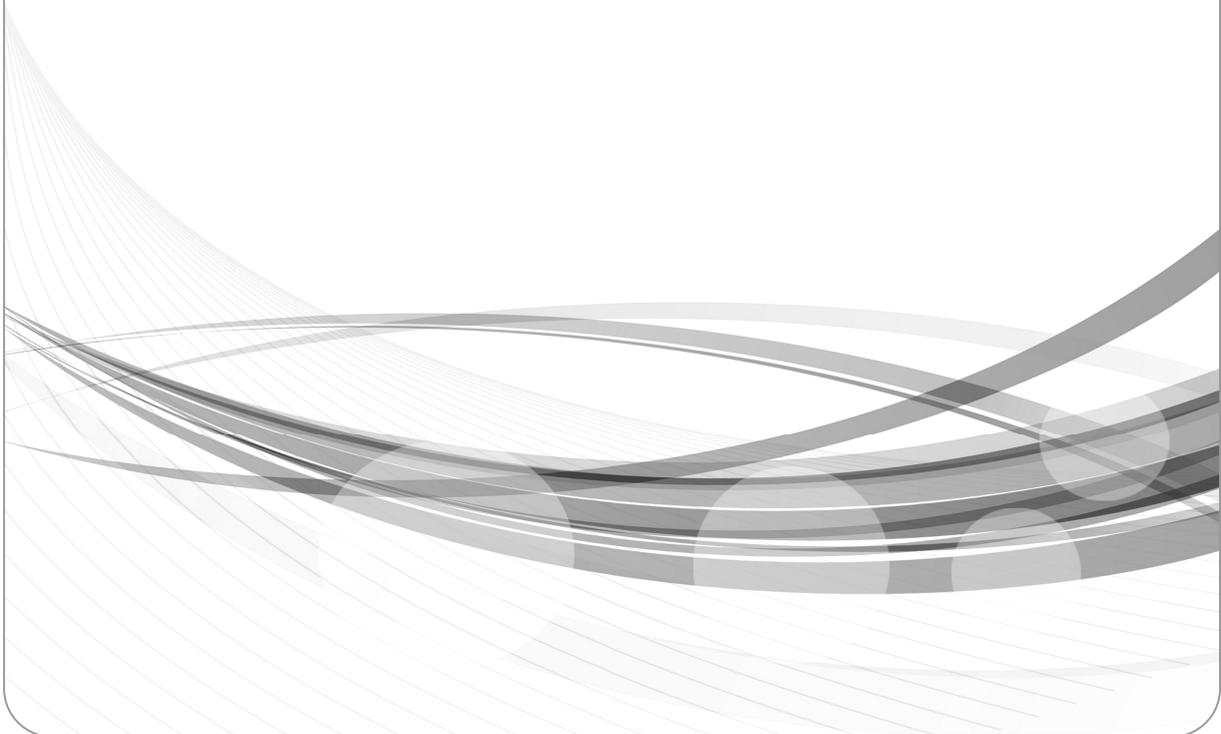
- 이 과제를 통해 개발된 한반도 주변해 해양환경, 생태계 과거변천도, 미래전망도를 과학자 뿐 아니라 정책입안자, 관리자, 일반대중에게 제공함으로써, 해양생태계에 대한 국민 인식을 제고한다.
- 본 과제의 연구 결과를 해양관련 기후변화 대응자료 (예: 【한국기후변화보고서: 해양기후 및 해양생태계 분야】) 로 활용한다.
- 해양생태계 모형개발 해양생태계 미래 전망을 포괄하는 장기적이고 종합적인 후속연구사업 개발을 위한 근거 자료 및 사회, 경제적 영향 평가 자료로 활용한다.
- 개발된 한반도 주변해 해양 생태계 과거 변천도 및 미래 전망도를 교육용 자료 등으로 개발하여 다음 세대들의 해양의 가치와 보전에 대한 인식 제고한다.
- 한반도 주변해 환경 및 생태계의 효율적인 관리를 위한 기초 자료로 활용한다.

제 2 절 연구개발 결과의 파급효과

- 본 과제를 통하여 해양 순환-생태계 접합 모형 개발/개선 기술 확보하였다.
- 한반도 주변해 해양환경 변화 및 (하위) 생태계 변동성에 대한 이해 증진시킨다.
- 한반도 주변해 해양생태계 과거진단, 미래전망에 관한 독자 기술을 확보하고 후속 프로그램 개발을 준비한다.
- 본 과제를 통하여 구축한 해양생태계 모형 연구 네트워크를 활용하여 한반도 주변해 해양생태계 예측/예보 기술 연구 관련 국내 커뮤니티를 활성화 하고 연구그룹을 주도한다.
- 국내외 해양생태계 모형 연구진들과의 연구협력을 증진하고 PICES, IMBER, YSLME 등 한반도 주변해 및 생태계 관련 국제해양과학 프로그램의 관련분야를 선도한다.

제 6 장

참고문헌



제 6 장 참고문헌

- 국립수산과학원. 2010. 생태계 모델 구축 연구. TR-2010-ME-012.
- 권철휘, 강훈, 조광우, 맹준호, 장규상, 이승용, 서정빈. 2009. 생태-유체역학모델을 이용한 아산만 해양수질의 장기 예측. 해양환경안전학회지, 15(2), 90-98.
- 박성은, 홍석진, 이원찬, 정래홍, 조윤식, 김형철, 김동명. 2010. 생태계 모델을 이용한 울산만의 하계 수질관리. 해양환경안전학회지, 16(1), 1-9.
- 서울대학교 SG 연구사업단. 2003. 생지화확모델링을 통한 통합 해양자원 관리 기반 구축 연구. 해양한국발전 프로그램(KSGP) 연구개발 사업.
- 송규민, 이상룡, 이석, 안유환. 2007. 생태계모델을 이용한 황해투기해역에서의 춘계 식물플랑크톤 대증식 연구. Ocean and Polar Research, 29(3), 217-231.
- 이대인. 2004. 진해만 적조에 있어서 수치모델링에 의한 Chl-a의 공간적 집적과 확산 평가. 한국해양환경공학회지, 7(1), 1-12.
- 이원찬, 김형철, 최우정, 박청길, 이필용, 구준호. 2002. 패류양식해역 환경용량 산정 모델 구축-1. 모델검정 및 민감도 분석. 한국수산과학회지, 35(4), 386-394.
- 이종희, 장창익. 2008. 북부 동중국해 생태계의 NEMURO 모델에 의한 하위생태계 분석. 바다:한국해양학회지, 13(1), 15-26.
- 한국해양연구소. 1993. 생태계 모델링에 의한 해양 생태계 동태연구(제1차 년도). BSPN00206-624-3.
- 한국해양연구소. 1994. 생태계 모델링에 의한 해양 생태계 동태연구(제2차 년도). BSPN00238-701-3.
- 한국해양연구원. 2010. 기후변화에 따른 남해(동중국해)의 해양환경 및 생태계 변동 연구. BSPM55670-2202-1
- 한국해양연구원. 2011. 산사댐 건설로 인한 남해(동중국해)의 해양환경 영향연구. BSPM56340-10031-5.
- 한국해양연구원. 2012. 황해 생태환경에 대한 접합모델링 및 물리-생지화학 과정 기

- 획연구. 2011년도 해양융·복합 기획연구사업. BSPE98716-10122-7.
- 한국해양과학기술원. 2012. 북서태평양의 해양환경 변화가 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(3단계 1차 년도). BSPE98731-10194-1
- 한국해양과학기술원. 2013. 북서태평양의 해양환경 변화가 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(3단계 2차 년도). BAPE99162-10322-1.
- 한국해양과학기술원. 2015. 북서태평양의 해양환경 변화가 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(3단계 3차 년도). BSPE99231-10618-1.
- Baretta, J.W., W. Ebennhoh and P. Ruardij. 1995. The European regional seas ecosystem model, a complex marine ecosystem model. *Netherlands Journal of Sea Research*, 33(3-4), 233-246.
- Blackford, J.C., J.I. Allen and F.J. Gilbert. 2004. Ecosystem dynamics at six contrasting sites: a generic modelling study. *Journal of Marine Systems*, 52, 191-215.
- Evans, G.T. and J.S. Parslow. 1985. A model of annual plankton cycles. *Biological oceanography*, 3, 327-347.
- Fasham, M.J.R., H.W. Ducklow and S.M. McKelvie. 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Plankton Research*, 48, 591-639.
- Guo, L., M. van der Wegen, D. A. Jay, P. Matte, Z. B. Wang, D. Roelvink and Q. He. 2015. River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary, *J. Geophys. Res. Oceans*, doi:10.1002/2014JC010491.
- Hofmann, E.E. and J. W. Ambler. 1988. Plankton dynamics on the outer southeastern U.S. continental shelf. Part 2: a time-dependent biological model. *Journal of Marine Research*, 46, 883-917.
- Holt, J., J. Harle, R. Proctor, S. Michel, M. Ashworth, C. Batstone, I. Allen, R. Holmes, T. Smyth, K. Haines, D. Bretherton and G. Smith. 2009. Modelling

the global coastal ocean. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1890). 939–951. [10.1098/rsta.2008.0210](https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0210).

Holt, J.T. and I.D. James. 2001. An s coordinate density evolving model of the northwest European continental shelf 1, Model description and density structure. *Journal of Geophysical Research*, vol.106, no. C7, pp:14015–14034, July 15, 2001.

Jolliff J. K., J. C. Kindle, I. Shulman, B. Penta, M. A. M. Friedrichs, R. Helber, R. A. Arnone, 2009, Summary diagrams for coupled hydrodynamic–ecosystem model skill assessment, *Journal of Marine Systems*, 76(1–2), 64–82.

Takikawa, T, J.H. Yoon, K.D. Cho. 2005. The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferry boat ADCP data. *J. Phys. Oceanogr.* 35, 1154–1168.

Taylor K.E., 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research*, 106 (2001), 7183–7192.

Umlauf, L. and H. Burchard. 2005. Second–order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work, *Cont. Shelf Res.*, 25, 795–827.

Walsh, J.J., 1975. A spatial simulation model of the Peru upwelling ecosystem. *Deep–sea Research and Oceanographic Abstracts*, 22(4), 201–236.

Yang, S. L., K. H. Xu, J. D. Milliman, H. F. Yang, and C. S. Wu (2015), Decline of Yangtze River water and sediment discharge: impact from natural and anthropogenic changes. *Scientific Reports* 5: 12581. DOI:10.1038/srep12581.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.