

70023956

해양한국발전프로그램(KSGP)연구개발사업

최종 연구보고서

생지화학모델 응용을 통한 동해 생태계 변화 연구
(A Study for Ecosystem Changes in the East Sea with
Integrated Physical-Biogeochemical Models)

서울대학(교) SG연구사업단

해양수산부

제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “생지화학모델 응용을 통한 동해 생태계 변화에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2007 년 8 월 22 일

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 김 경 렬

세부연구책임자 : 김 경 렬

연 구 원 : 노 일

요 약 문

I. 과 제 명

생지화학 모델 응용을 통한 동해 생태계 변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

- 동해 생태계의 변동 특성과 그 주요 원인 분석 및 이를 통하여 습득된 지식을 기존의 생지화학 모델에 적용 및 응용을 통한 동해 생태계 변화 연구

2. 연구개발의 필요성

- 동해의 장·단기적 물리·화학적 요소의 변화로 인한 생태계 변화의 중요성 대두
- 이러한 각 요소의 변화를 통한 생태계 먹이 사슬 구조 및 각 영양 단계의 생태적 기능 변화로 인하여 수산 자원량 변화가 예상됨.
- 그러나, 예상되는 동해 생태계의 변화에 대한 정량적인 연구 및 이해가 부족함.
- 기존의 자료만을 이용하여 각 요소들의 시·공간적 변동성을 이해하기 어려움.
- 이전 연구들은 하나의 시스템인 생태계의 관점보다는 각 요소의 변동 특성에 대하여 연구가 수행되었음.
- 모델링을 통한 체계적인 동해 생태계 변화에 대한 연구 및 이해가 필요함.
- 동해 생태계 특성을 고려한 생지화학 모델의 이용 및 응용에 대한 연구는 향후 한국 자원관리 연구로 활용 가능.

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 지속적인 D/B의 체계적 보완 및 생태환경 인자의 계량화

- 다양한 형태의 자료 수집 및 현장 관측을 통해 선행 연구로 구축된 D/B의 지속적 보완 및 모델에 적합한 형태로 생태환경 인자의 계량화

2. 동해 생태환경 인자의 변동성

- 계량화된 생태환경 인자들의 시·공간 변동성과 각 인자간의 상호 연관성 분석

3. 계량화된 생태 인자의 모델 적용 및 모델의 최적화

- 동해의 환경 특성을 고려한 1차원의 물리 모델 적용 방법 연구
- 계량화된 생태 인자의 모델 적용 및 최적화

4. 모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 연구

- 동해 극전선 형성에 따른 남과 북쪽 지역의 생태 특성 연구
- 저차 영양단계 생물의 변동성 연구
- 식물플랑크톤의 대량 번식 메카니즘 연구
- 주요 생태 환경 인자의 상호작용 연구
- 기후 변동에 따른 물리 환경 변화의 생태계 영향 연구

IV. 연구개발결과

- 선행 연구에 이어 동해 현장관측, 인공위성 자료, 기존의 관측·문헌 자료의 수집 및 이를 통한 생태 환경 인자들의 D/B 구축
- 인공위성, 관측 자료 등 수집한 자료의 계량화 및 모델의 입력 자료로 활용
- 인공위성 자료와 D/B의 분석을 통한 동해 생태 환경인자들의 시·공간 변동성과 상호 연관성 규명
- 동해 지역별 생태환경 특성 규명 및 각 지역에 적합한 형태의 물리모델 적용
- 계량화된 생태 인자의 모델 적용을 통한 모델의 최적화
- 모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 재현
 - 극전선을 기준으로 남·북 지역에서 저차 단계 생물의 장·단기 변동성 재현 및 그 원인 규명
 - 주요 생태 환경 인자의 상호연관성 분석
 - 식물플랑크톤의 대량 증식 메카니즘 규명
 - 동해 북쪽 지역에서 Fe이 식물플랑크톤 성장에 미칠 수 있는 영향에 대한 분석
 - 기후 변동과 관련된 물리 환경의 변화가 저차단계 생물에 미치는 영향 분석
- 향후 동해에서 현장 관측과 모델 연구의 방향 제시

V. 연구개발 결과의 활용계획

- D/B의 공개를 통한 자료의 공유
- 생지화학 모델 응용을 통한 동해 생태환경의 장기 변동 예측에 활용
- 통합적 해양자원 관리 시스템 구축에 활용
 - 해양생물자원과 여러 환경요인을 종합적으로 이해하기 위한 시스템 개발에 활용
 - 생지화학 모델을 바탕으로 하는 수산자원관리
 - 생지화학 모델을 바탕으로 어장의 예측
- 사막화에 따른 빈번한 황사의 발생, 지구 온난화 등 환경문제와 관련된 정책 결정에 필요한 기초 자료로 활용

SUMMARY

Taking into consideration of rapid changes on physical and chemical conditions in the East Sea, the needs of research for its potential effects on compartments of ecosystem, such as primary producer and fish, in the East Sea has been increased in recent years. However, it is difficult to understand the changes and its effects from analysis of field observation. Therefore, numerical experiments using biogeochemical models can help understanding of the changes and its effects in the East Sea quantitatively. This research project was carried out to investigate the changes and its effects through data analysis and numerical experiments using biogeochemical models. This project consists of four main parts: archive data and parameterization, biogeochemical characteristics in the East Sea, modification and optimization of models and model experiments. Data from field observation, satellite and references were collected systematically. In-situ observations during the project periods were also carried out to get data in the East Sea. Archive data were analysed and modified as input data for models. In the second part, temporal and spatial variability of factors consisting of ecosystem and relationship among the factors were investigated to understand biogeochemical characteristics in the East Sea. On the basis of the variability, the East Sea was divided two regions along the subpolar front. Three different types of typical biogeochemical models coupled with 1-D physical model were modified and optimized for the each region. Simulations of optimized models were carried out to reproduce and investigate characteristics of the ecosystem in each region. In addition, mechanism on phytoplankton bloom initiation, interaction among ecological factors and effect of changes of physical conditions derived from climate changes on phytoplankton were investigated. The results and knowledge gained throughout this research can be used as an infrastructure or basis for more complicated or advanced model that can be developed and used as a resource management tool in the East Sea.

CONTENTS

Chapter 1: Introduction	-----	12
Section 1. Objectives and the Need	-----	12
1. Objectives	-----	12
2. The Need	-----	12
Section 2. Content and Scope	-----	13
1. Archive data and parameterization	-----	13
2. Characteristics of Biogeochemistry in the East Sea	-----	13
3. Parameter input and model optimization	-----	13
4. Model experiments	-----	13
Chapter 2: Current Research Status	-----	14
Section 1. International Research Development	-----	14
Section 2. Domestic Research Development	-----	14
Chapter 3: Content and Results	-----	16
Section 1: Archive data and parameterization	-----	16
1. In-situ Observations	-----	16
a. The first year	-----	16
b. The second year	-----	17
c. The third year	-----	18
2. Satellite data and parameterization	-----	18
a. Chlorophyll <i>a</i> and AOT	-----	19
b. Aerosol index	-----	21
c. Precipitation	-----	22
d. SST	-----	22

e. Wind speed	-----	23
f. PAR	-----	23
g. Sea ice	-----	23
3. Observation data and parameterization	-----	24
Section 2: Characteristics of Biogeochemistry	-----	27
1. Variability of biogeochemical factors	-----	27
a. Seasonal variability	-----	27
b. Year-to-year variability	-----	28
c. Decadal variability	-----	29
2. Effects of physical factors on phytoplankton growth	---	30
a. Wind speed	-----	30
b. Sea ice	-----	30
c. Eddy	-----	32
3. Effects of Asian dust on phytoplankton growth	-----	32
Section 3: Modification of models and optimization	-----	33
1. Modification of models as biogeochemistry of the East Sea-		33
2. Model types	-----	34
a. Physical model	-----	34
b. Biogeochemical model	-----	35
3. Parameter input	-----	35
Section 4: Model experiments	-----	36
1. Biogeochemical characteristics	-----	36
a. Seasonal variability	-----	36
b. Year-to-year variability	-----	37
2. Effects of climate changes on biogeochemistry of the East Sea-		38
3. Effects of Fe on phytoplankton growth	-----	39
Section 5: Suggestions on future observation and research	-----	39

Chapter 4: Achievement and contributions	-----	41
Section 1: Achievements	-----	41
Section 2: Attribution to Related Discipline	-----	42
Section 3: Expected Contributions	-----	42
Chapter 5: Plan for Practical Applications	-----	43
Section 1: Needs for Further Research	-----	43
Section 2: Plan for Practical Applications	-----	43
Chapter 6: References	-----	44
Appendix 1. Figures and Tables	-----	47
Appendix 2. Model equations and parameters	-----	119
Appendix 3. Attachment of CD (D/B, parameters, and satellite images)		-129

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	-----	12
제 1 절	연구개발의 목적 및 필요성	-----	12
1.	연구개발의 목적	-----	12
2.	연구개발의 필요성	-----	12
제 2 절	연구개발의 내용 및 범위	-----	13
1.	지속적인 D/B의 체계적 보완 및 생태환경 인자의 계량화	-----	13
2.	동해 생태환경 인자의 변동성	-----	13
3.	계량화된 생태환경 인자의 모델 적용 및 모델의 최적화	-----	13
4.	모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 연구	-----	13
제 2 장	국내외 연구개발 현황	-----	14
1.	국외 연구개발 현황	-----	14
2.	국내 연구개발 현황	-----	14
제 3 장	연구개발 수행내용 및 결과	-----	16
제 1 절	지속적인 D/B의 체계적 보완 및 생태환경 인자의 계량화	-----	16
1.	현장 관측	-----	16
가.	1차년도	-----	16
나.	2차년도	-----	17
다.	3차년도	-----	18
2.	인공위성 자료 수집 및 계량화	-----	18
가.	Chlorophyll a, AOT	-----	19
나.	Aerosol index	-----	21

다. 강수량	-----	22
라. SST	-----	22
마. 바람	-----	23
바. PAR	-----	23
사. Sea ice	-----	23
3. 기존의 관측 자료와 문헌 자료 수집 및 계량화	-----	24
제 2 절 동해 생태환경 인자의 변동성	-----	27
1. 생태환경 인자의 변동성	-----	27
가. 계절 변동성	-----	27
나. 연 변동성	-----	28
다. 10년 이상의 장기 변동성	-----	29
2. 물리적 요소가 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향	-----	30
가. 바람	-----	30
나. Sea ice	-----	30
다. Eddy	-----	32
3. 황사가 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향	-----	32
제 3 절 동해 생태환경 특성을 고려한 모델 적용 및 최적화	-----	33
1. 동해 생태환경 특성을 고려한 모델의 적용 방법 연구	-----	33
2. 동해 생태환경 모사에 적용된 모델	-----	34
가. 물리 모델	-----	34
나. 생지화학 모델	-----	35
3. 계량화된 생태환경 인자의 모델 적용	-----	35
제 4 절 모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 연구	-----	36
1. 동해 생태환경 특성 재현	-----	36
가. 계절 변동성	-----	36
나. 연 변동성	-----	37

2. 기후 변화가 동해 생태환경에 미치는 영향	-----	38
3. 식물플랑크톤 성장에 대한 Fe의 영향	-----	39
제 5 절 향후 관측 방향과 연구 방향 제시	-----	39
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	-----	41
제 1 절 목표 달성도	-----	41
제 2 절 관련분야의 기여도	-----	42
제 3 절 기대 효과	-----	42
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	-----	43
제 1 절 추가연구의 필요성	-----	43
제 2 절 연구결과 활용 계획	-----	43
제 6 장 참고문헌	-----	44
부록 1. 그림과 표	-----	47
부록 2. 모델 equations과 parameters	-----	119
부록 3. CD 첨부 (D/B, 계량화된 parameters와 satellite images)	---	129

제 1 장 연구개발과제의 개요

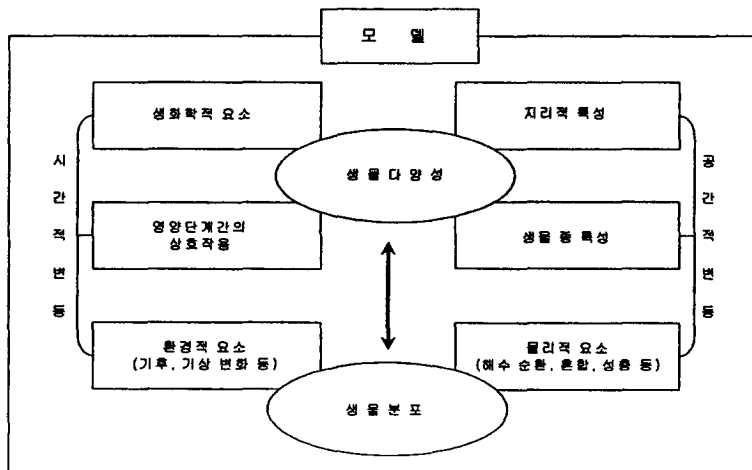
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

- 동해 향후 해양 자원관리를 위해 선행된 생지화학 모델 기반 구축 연구에서 수집된 D/B의 지속적 보완과 자료 분석을 통하여 동해 생태계의 변동 특성과 그 주요 원인을 분석 및 이를 통하여 습득된 지식을 기존의 생지화학 모델에 실제 적용 및 응용하여 최근 수십 년간 급격히 변화하고 있는 동해 생태계 변화와 그 주요 원인을 분석하고, 이를 바탕으로 미래 생태계 및 생태환경인자의 변화 예측의 근거를 마련함.

2. 연구개발의 필요성

- 동해의 물리·화학적 요소의 변화로 인한 생태계 변화의 중요성 대두
- 이러한 각 요소의 변화를 통한 생태계 먹이 사슬 구조 및 각 영양 단계의 생태적 기능 변화로 인하여 수산 자원량 변화가 예상됨.
- 그러나, 기존의 자료만을 이용하여 예상되는 동해 생태계의 변화에 대한 정량적인 연구에는 한계가 있음.
- 이전 연구들은 하나의 시스템인 생태계의 관점보다는 각 요소의 변동 특성에 대하여 연구가 수행되었음.
- 다학제간 연구의 일환으로 모델 개발 및 적용이 필수적임.



- 앞의 그림은 생태계 연구를 위해 고려되어야 할 필수 요소들을 나타낸 것으로서, 각 요소들의 특성에 따른 시·공간적인 변동의 중요성을 나타낸 것임.
- 각 요소의 개별적 특성만을 고려한 기존 연구 방법으로는 이들 요소들간의 상호작용을 파악하기 어려우나, 모델 적용시 수치실험(Numerical Experiments)을 통해 개별적 생태환경 인자의 중요도 및 그 상호 관련성 분석이 가능할 뿐만 아니라, 관측자료로는 인지 또는 표현될 수 없는 다른 스케일의 시·공간적 현상을 모델로 재현 가능.
- 모델링을 통한 체계적인 동해 생태계 변화에 대한 연구 및 이해가 필요함.
- 동해 생태계 특성을 고려한 생지화학 모델의 이용 및 응용에 대한 연구는 향후 한국 자원관리 연구로 활용 가능.

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

1. 지속적인 D/B의 체계적 보완 및 생태환경 인자의 계량화

- 다양한 형태의 자료 수집 및 현장 관측을 통해 선행 연구로 구축된 D/B의 지속적 보완 및 모델에 적합한 형태로 생태환경 인자의 계량화
- 모델의 개발 및 최적화를 위해서는 필수적임.

2. 동해 생태환경 인자의 변동성

- 계량화된 생태환경 인자들의 시·공간 변동성과 각 인자간의 상호 연관성 분석
- 이를 통해 습득한 동해 생태환경의 특성을 모델에 적용

3. 계량화된 생태환경 인자의 모델 적용 및 모델의 최적화

- 동해의 생태환경 특성을 고려한 1차원의 물리 모델 적용 방법 연구
- 계량화된 생태환경 인자의 모델 적용 및 최적화

4. 모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 연구

- 극전선 형성에 따른 남과 북쪽 지역의 생태 특성 연구
- 저차 영양단계 생물의 변동성 연구
- 식물플랑크톤의 대량 번식 메카니즘 연구
- 주요 생태환경 인자의 상호 작용 연구
- 기후 변동에 따른 물리환경 변화의 생태계 영향 연구

제 2 장 국내외 연구개발 현황

제 1 절 국외 연구개발 현황

- 과거 거의 전무하던 생지화학 모델링 개발은 최근 들어 전 세계적인 추세임.
- 선진국에서는 해양 생물자원과 여러 환경 요인을 종합적으로 이해하기위해 관련 자료를 축적하고 활용하는 시스템을 개발하고 있음(OBIS: Ocean Biogeographic Information System).
- PICES, GLOBEC, IPCC 등 국제기구에서도 생지화학 모델의 개발을 통하여 환경 문제를 이해하려는 연구를 적극적으로 지원함. IPCC 1995년도 보고서에는 생지화학 모델에 관한 내용을 독립된 하나의 chapter로 할애했.
- 북태평양 주변 국가들을 중심으로 개발된 NEMURO는 최근 어류부분이 접합되어 수산자원량 변동성 분석·예측 등 관련 연구 분야에 활용되고 있음.
- 유럽연합에서는 ERSEM, COHERENS, PROWQM 등의 모델 개발을 통해 북해 생태계에 대한 연구가 활발히 지속되고 있음.
- 대만에서는 남중국해를 대상으로 한 생지화학 모델링 워크숍이 정기적으로 개최되고 있으며 이를 통하여 모델 개발에 관한 연구를 활성화 하고 있음.
- SOLAS에서는 2003년부터 2년마다 summer school 개최를 통해 모델링 교육을 실시 하고 있음.
- 2006년부터 PICES의 주최로 모델링 워크숍과 모델링에 관한 summer school이 개최 되기 시작하였음.

제 2 절 국내 연구개발 현황

- 국내에서는 해양 환경과 수산자원 관리의 접합 시도를 위한 해양학, 수산학 등 학제간의 통합적인 연구가 매우 부족한 실정임.
- 최근 겨울의 장기화 현상과 같은 이상 기후 현상이 빈번히 발생함으로써 해양 생태계에 미칠 영향에 대한 정량적인 연구와 이에 대한 이해의 필요성 또한 대두되고 있음.
- 이러한 연구의 필요성과 관련하여 최근 국내에서도 3차원의 해양 순환모델과 생태환경 인자가 결합된 생지화학 모델링 개발에 관한 관심이 증가 되고 있음. 선행연구에서도

이의 일환으로 해양순환 모델과 생지화학 모델의 접합이 시도되었음.

- 그러나 관측 자료의 부족으로 인하여 해양 순환모델과 생지화학 모델과의 접합 및 접합된 모델의 검증이 현실적으로 어려운 상황임.
- 일부 연구자들은 box-model을 이용하여 동해 식물플랑크톤의 계절 변동에 대한 연구를 수행하였음[Kim et al., 2003].
- 2006년에는 EAST(East Asian Seas Time-series) 프로그램의 일환으로 정기 관측과 이로부터 획득한 자료를 이용하여 동해에 적합한 생지화학 모델개발에 관한 연구가 시작되었음.
- 따라서 본 연구결과는 국내 생지화학 모델 관련 연구에 있어서 선도적인 위치를 선점하고 있으며, 향후 연구들의 지침서로서 활용 및 연구 방향을 제시하게 될 것임.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 지속적인 D/B의 체계적 보완 및 생태환경 인자의 계량화

- 관측 자료와 생태 인자의 계량화는 모델 개발 및 적용에 필수적임.
- 이에 선행 연구로 구축된 D/B에 이어 지속적으로 다양한 형태의 자료를 수집 및 계량화하였음.
- 동해는 spring과 fall bloom이 형성되며 생물생산의 약 80%가 이 시기에 형성됨. 그러나 이 시기의 관측 자료의 심각한 부재로 인하여 식물플랑크톤 성장에 물리·화학적 환경 요인이 미치는 영향에 대한 정보가 매우 부족한 실정임. 따라서 연구기간동안 spring과 fall bloom 시기를 중심으로 현장관측을 수행하였으며, 이로부터 획득한 자료를 D/B에 추가하였음.

1. 현장 관측

가. 1차년도

- 러시아 연구선 Academic M.A. Larventyev를 이용하여 식물플랑크톤의 spring bloom 기간인 5월 7일에서 18일 동안 동해 현장관측을 수행하였음.
그림 1은 관측 정점을 보여줌. 수온, 염분, 산소, 영양염은 전 관측정점에서 시료를 채취하였음.
- 식물플랑크톤과 동물플랑크톤도 각 정점에서 채집 및 시료의 분석을 실시하였음.
그림 2는 채집에 사용된 동물플랑크톤 네트와 sediment trap 투하전의 사진임.
그림 3은 채집한 동물플랑크톤의 분류 분석 결과로 요각류가 거의 전 관측 정점에서 우점하는 것으로 나타났음.
그림 4는 관측한 정점에서 측정한 수온, 염분, 영양염(질산염, 인산염, 규산염)의 수직 profile을 보여줌.
- 관측기간 중 블라디보스톡 주변해역에서 eddy가 관찰되었으며(그림 5), eddy core 부분에 높은 chlorophyll a 농도가 관찰되었음.
- Sediment trap은 정점 5번에서 투하 후 24시간 후에 추적을 시작하였으나 RDF direction finder가 정착되어 있지 않은 관계로 radar와 xenon strobo 등에 의존할 수밖에 없어서 관측 기간 중에는 회수를 하지 못하였음.
그러나 투하된 trap은 투하 후 3일 후에 일본 순시선에 의해 일본 영해 내에서 발견되어 한국 해양경찰청 소속 해양순시선에 인양되었으나 trap의 목적을 인지하지 못한 일본 및 한국 순시선에 의해 trap에 포획된 포획물은 전부 유실되었음. 따라서

향후 사용될 trap을 추가 제작하였음.

- 제작된 trap은 본 연구를 위해 특별히 고안된 modified Soutar trap을 사용하였음. Trap은 원추형으로 FRP 소재로 만들었으며, Mouth diameter는 45cm, 측면 길이는 65cm이며, 사용된 trap의 aspect ratio는 하강하는 고형물질을 용이하게 bucket에 포집할 수 있는 범위임(그림 6). Trap의 내부는 gelatinous material로 별도처리를 하지 않아도 될 정도로 falling material의 sliding이 매우 효과적으로 일어나게 제작되었음. 한편, bucket 상부 10 cm 부근에 drain hole 을 장치하여 trap recover시 supernatant water를 손쉽게 제거할 수 있도록 제작되고 baffle material은 방수성 섬유용지를 사용하였으며 크기는 한 변이 1cm인 육각형모양이며 4cm 깊이로 제작되어 일단 bucket에 포집된 침강고형물의 재현탁이 거의 일어나지 않게 제작되었음. 침강물의 재현탁 여부를 알아보기 위해 현장에서 trap의 상하수직운동실험을 시도해보았으나, 재현탁은 거의 일어나지 않아 만족할 만한 결과를 얻었음.
- Euphotic zone(유광층) 밖으로 탈출하는 falling material 포획을 위해 1st trap을 수심 50 m, 2nd trap을 수심 100m, 3rd trap을 pycnocline 하의 수심 200m에 정지하게하여 free-floating 하게 하였음(그림 6). 회수를 위해 buoy에는 Radar reflector, Xenon strobo, Flag 등을 장착하였으며, 별도로 1,972 KHz를 송신하는 Radio Buoy를 floating buoy 에 부착하였음.

나. 2차년도

- 동해에서 가을 생물 생산이 차지하는 중요성에도 불구하고 이에 관한 관측이 매우 드문 상황임. 이에 2차 년도에는 2005년 10월 15일부터 27일까지 러시아 연구선 Academic M.A. Larventyev를 이용하여 동해 현장관측을 수행하였음. 그림 7은 관측 정점을 보여줌. 각 정점에서 수온, 염분, 산소, chlorophyll a 등을 측정하였으며, 그림 8은 관측 기간 동안 측정한 수온, 염분 그리고 이로부터 구한 밀도의 수직 분포를 보여줌. 관측 정점 중에서 그림 7의 SST image로부터 구분되는 극전선을 기준으로 극전선 이남과 이북지역, 그리고 극전선에 위치한 정점을 선택하였음. 여름철 영양염의 고갈로 식물플랑크톤의 성장이 제한되었으나, 가을이 되면서 수주 혼합층이 깊어져 이로 인한 영양염의 재공급으로 극전선 이남의 지역에 먼저 식물플랑크톤의 fall bloom이 관찰되었음.
- 1차 년도에 제작되어 현장에서 분실되었던 Soutar Trap을 다시 제작하여 동해 연안

지역인 고리에서 투하하였음(그림9). 1차년도에 RDF direction finder가 장착 되어 있지 않아 선상의 radar와 승선자들의 관찰에 의존하여 trap을 찾았으나 trap을 분실하였었음. 2차년도에는 이러한 문제점을 보완하여 trap을 투하한 뒤에, 24시간 후에 추적을 시작하였음. 그러나 direction finding의 불안정성의 문제로 trap의 recover에 실패하였음. 이러한 연속적인 trap 분실 문제의 해결을 위해 trap mooring을 위한 실험을 수행하였음.

- 2차년도에 제작된 trap은 1차년도보다 recover 시의 supernatant water 배수를 위한 plastic 배수구를 bucket 바로 위에 장착하여 handling의 용이성 증대시켰고, trap 내측의 윤활성을 제고하여 sliding효과를 증대하였음. 또한 trap bucket size의 이원화 (500ml, 1000ml) 및 swimmer problem(amphipods 등의 scavenging) 제거를 위해 bucket 상단에 여과 장치를 장착하였음.
- 1차년도인 2004년 5월에 현장관측기간동안 채집한 시료의 식물플랑크톤 종조성별 색소 분석을 마무리 하여 D/B를 보완함. 그림 10은 HPLC 분석 결과를 보여주며, 결과에서 알 수 있듯이 동해의 spring bloom은 극전선 남쪽 지역과 북쪽 지역이 대부분 diatom이 우점하는 것으로 나타남.

다. 3차년도

- 1, 2차년도에 봄과 가을 식물플랑크톤 bloom 시기를 중심으로 식물플랑크톤의 성장과 생산에 중요한 물리적 요인 및 각 생태환경 인자의 현장 관측을 실시하였음. 3차년도에도 식물플랑크톤의 bloom 시기를 중심으로 관측을 수행함. 그림 11은 11월 29일에 동해 남부 해역에서 실시한 관측 정점을 보여줌.
- 그림 12는 CTD를 이용하여 측정한 수온, 염분, 밀도의 수직 분포를 보여줌. 그림 13은 SeaWiFS의 8-day composite images로 관측이 수행된 시기의 전후의 표층 chlorophyll a 농도를 보여줌. 그림 12와 13으로부터 동해 남부해역의 fall bloom은 혼합층이 깊어지면서 영양염이 공급되어 bloom이 형성되었다가 혼합이 활발해 지면서 영양염은 충분하나 빛 조건이 제한되어 bloom 세기가 약해지고 있음을 알 수 있음.

2. 인공위성 자료 수집 및 계량화

- 관측 자료만으로는 동해의 생태적 특성을 이해하는데 시·공간적 제약이 크므로 이를 극복하기 위해 인공위성 자료를 이용하였음. 구름과 황사와 같은 기상요인 등에 의해

data가 없는 경우, 시간과 공간에 대해 interpolation, Gaussian curve fitting 방법 등으로 값을 산출하였음.

- 표 1은 본 연구에서 다양한 인공위성 센서들로부터 산출한 각 인자들의 시·공간 해상도를 보여줌.

CZCS와 MODIS로부터 표층 chlorophyll *a*, SeaWiFS로부터 표층 chlorophyll *a*, Photosynthetically Available Radiation (PAR), Aerosol Optical Thickness (AOT), AVHRR의 Sea Surface Temperature (SST), SSM/I의 sea ice, sea wind, precipitation rate, QuickScat의 sea wind, TOMS의 aerosol index 등 다양한 인공위성 센서로부터 자료를 수집 및 분석하였음.

- 각 센서로부터 산출된 자료 중 1978년부터 1986년 동안 CZCS로부터 산출한 동해에서 월별 표층 chlorophyll *a* 농도, 1997년 이후부터 2007년까지 SeaWiFS로부터 산출한 chlorophyll *a*, PAR, AOT의 월별 공간 분포, AVHRR로부터 얻은 SST의 월별 공간 분포, SSM/I의 월별 sea ice concentrations와 TOMS의 aerosol index의 일별 공간 분포 등 시간에 따른 공간 분포를 보여주는 그림들을 satellite images라는 폴더 명으로 CD에 첨부하였음(부록 3).

가. Chlorophyll *a*, AOT

- 식물플랑크톤 생체량에 대한 시·공간 변동성은 CZCS, SeaWiFS, MODIS로부터 산출한 표층 chlorophyll *a* 농도를 이용하였음.
- 동해의 표층 chlorophyll *a* 농도는 SeaWiFS는 OC4v4 global algorithm을, MODIS는 OC3M algorithm을 적용하여 공간해상도가 9km인 daily, 8-day 그리고 monthly images로부터 산출되었음. CZCS 센서는 ocean biology processing group(OBPG)에 의해서 2006년에 reprocessing된 자료를 수집하여 표층 chlorophyll *a* 농도 값을 산출하였음.
- AOT는 SeaWiFS로부터 chlorophyll *a*와 동일한 시·공간 해상도의 자료를 수집하여 값을 산출하였음.
- 대부분의 연구자들이 동해의 광 특성을 caseI으로 간주하여 global algorithm을 적용하여 ocean color data로부터 chlorophyll *a* 값을 산출하여 동해의 1차 생물 생산 연구에 적용하여왔음. 그러나 울릉분지 부근은 동해 극전선 이북의 지역 보다 suspended particles의 영향이 많은 지역으로 caseII에 가까운 지역임. 또한 봄철의

경우에는 중국 고비사막으로부터 불어오는 편서풍에 의해 동해를 경유하는 황사의 영향으로 실제 값보다 인공위성으로부터 얻은 값의 overestimation의 가능성이 큼. 따라서 현장관측 자료와의 실시간 자료의 match-up을 통해서 global algorithm의 동해 적용의 적합성과 보완 여부를 고려하여야함.

- 이에 연구기간 동안 수집한 D/B를 이용하여 현장관측 자료와 인공위성의 match-up을 통해서 위성 자료의 error 범위를 알아보았음. 그림 14는 현장관측 자료와 현장관측이 이루어진 시각으로부터 4시간 이내의 SeaWiFS Level 2의 4km 해상도 자료와 비교한 결과를 보여줌. 관측 자료의 한계로 인하여 비교에 사용된 값들은 대부분 동해 극전선 이남의 지역에서 측정된 값들임. 그림에서 파란색 원으로 표시된 부분은 황사 시기의 값들을 보여줌. 비 황사 시기에는 data의 error가 20% 내외로 좋은 상관관계를 보여주나 황사시기에는 error가 70%이상까지 증가하였음. 따라서 향후 황사시기에 적합한 algorithm으로 수정이 필요함.
- 이러한 사실로부터 본 연구에서 수집·산출한 chlorophyll a 농도의 신뢰성 여부가 확인되어야함. 이에 황사의 영향 여부를 확인하기위해 일별 AOT와 chlorophyll a 농도의 상관관계를 알아보았음. 한 예로 그림 15는 2001년 3월부터 5월동안 AOT와 chlorophyll a 농도의 상관관계를 보여주고 있음. 그림에서 보여주듯이 대부분의 chlorophyll a 농도의 값은 황사시기에는 자료의 산출이 없으며 AOT와 상관성을 보이지 않으므로, 본 연구에서 산출한 chlorophyll a 농도를 사용함에 있어서 황사에 의한 자료의 문제는 배제가 가능한 것으로 사료됨.
- 그림 16과 17은 CZCS(1978년-1986년)와 SeaWiFS(1997년-2007년) 센서로부터 획득한 자료를 global algorithm을 이용하여 산출한 climatological monthly chlorophyll a 농도를 보여줌. 두 그림으로부터 3월에서 5월동안 동해 전 지역에 spring bloom이 형성되며, 11월과 12월에 spring bloom에 비해서 세기가 약한 fall bloom이 형성되는 것을 알 수 있음.
- Chlorophyll a 농도는 구름, 황사 등 대기의 영향으로 인한 자료의 부족 그리고 식물플랑크톤이 patch를 이루며 분포하는 특성으로 정량적으로 농도의 시간에 따른 변동성 분석에 어려움이 있음. 그러나 동해 표층의 chlorophyll a 농도 분포는 시간에 대해서 Gaussian distribution을 보임. 따라서 각 센서로부터 산출된 chlorophyll a 농도에 Gaussian curve fitting을 실시하였음. 그리고 chlorophyll a 농도에 fitting된 Gaussian curve로부터 bloom의 시기, 기간, peak, 크기에 관한 정보를 산출하였음. Spring bloom 형성 시기는 겨울철 농도의 2배 이상 증가하기 시작하는 시기, fall

bloom은 여름철 농도의 2배 이상 증가하기 시작할 때를 bloom 형성 시기라고 정의함.

- Chlorophyll *a* 농도는 eddy와 sea ice melting과 같은 물리적 환경 요인에 의해 시·공간 분포의 영향을 받음. 동해 남부 해역은 세계적으로 eddy의 활동이 활발한 지역이며, 북부 지역의 Tatarskiy strait 등에는 겨울철 sea ice가 형성됨. 이러한 물리 요인과 chlorophyll *a* 농도의 상관관계를 이해하기 위해 4km 이상의 고 해상도 자료를 추가 수집·분석하였음(표1).

나. Aerosol index

- TOMS로부터 1998년부터 2002년 동안 공간해상도가 1.25°X1°인 daily aerosol index를 수집하였음. TOMS로부터 획득한 aerosol index는 황사의 경로와 경유 시기에 유용한 index로 사용되고 있음. 그러나 센서의 기술적인 문제로 2002년 이후의 자료는 data error로 인하여 본 연구에서는 제외하였음.
- 동해는 marginal sea로서 HNLC(High Nutrients Low Chlorophyll) 지역과는 달리 황사 등에 의해서 공급될 수 있는 철의 식물플랑크톤 성장에 대한 영향이 배제되어 왔었음. 그러나 Fe의 중요성이 배제되어 왔던 연안 용승지역, 북대서양과 같은 해역에서도 최근 Fe의 중요성이 알려지기 시작함. 특히 황사가 식물플랑크톤 성장에 필수적인 Fe, 질산염 등과 같은 영양염의 주요한 공급원으로 그 역할의 중요성이 인식됨. 이에 본 연구에서도 2차년도 부터 황사의 식물플랑크톤 성장에 대한 영향력의 여부를 조사하였음.
- TOMS로부터 산출된 aerosol index를 이용하여 황사의 동해 통과 경로와 시기를 결정하기 위한 기준을 정하였음. 1998년부터 2002년 동안 기상연구소의 관측에 의하면 1999년에는 서울에서 겨울과 봄에 각 1회의 황사가 보고되었고, 강릉에서는 겨울에 1회의 황사가 보고되었음. 따라서 1999년에는 동해를 경유한 황사가 거의 없었다고 가정하였음. 1999년 1월부터 6월동안 aerosol index의 99%가 2.5 이하이므로(그림18) 2.5보다 큰 값이 관찰 될 경우, 동해가 황사의 영향을 받은 것으로 정의함. 이 값에 대한 정량적인 적합성 여부를 좀 더 논의하기 위하여 동해 연안에 위치한 기상 관측소에서 얻은 시정(visibility) 자료의 수집 및 비교를 통해 그 신뢰성을 검증하였음. Aerosol index가 2.0-2.7 이상인 경우에는 중국과 몽고 사막 지역에서 시정 거리가 5km 미만인 황사의 발생을 의미하며[Darmenova et al., 2005], 동해의 경우에는 aerosol index가 2.0-2.5인 경우에 약 70% 이상이 시정이 5km 미만인 황사와 일치

하였음. 앞서 언급한 것과 같이 특히 1999년에는 동해 주변 연안을 따라서 위치한 기상 관측소에서 어떠한 황사도 관찰되지 않았으며, 이 시기에 aerosol index의 약 99%가 2.5보다 작았음. 따라서 황사의 기준으로 aerosol index 2.5 적용이 동해에서 적합함을 알 수 있었음. 그림 19는 2.5를 기준으로 하여 얻은 1998년부터 2001년의 3월에서 5월동안 동해를 경유한 황사의 주요 이동 경로를 보여줌. 그림 20은 1998년부터 2002년 3월에서 5월동안 동해에서 aerosol index가 2.5 이상인 날의 횡수를 보여줌. 그림에서 알 수 있듯이 동해의 북쪽 지역을 중심으로 대부분의 황사가 경유한 것을 알 수 있음. 1998년부터 2002년 동안 aerosol index가 2.5 이상인 값을 선택하여 일별 황사의 이동 경로를 도시한 그림들을 부록 3의 CD에 첨부하였음.

다. 강수량

- 강수량은 황사의 deposition을 통해서 대기로부터 공급되는 철과 같은 영양염이 식물플랑크톤이 이용 가능한 형태로 제거되는데 있어서 효율적인 process로 작용할 수 있음. 따라서 동해 각 지역별 강수량의 정보를 획득하기 위하여 SSM/I의 weekly 자료에서 rain rate를 산출하였음. 그러나 이 자료는 시간 해상도가 7일로 황사와 같은 짧은 시간의 events와 비교하기에는 한계가 있으므로 GPCP version2의 1979년부터 일별 precipitation rate의 값을 수집하였음. 그림 21은 1도 간격으로 SSM/I의 weekly 자료에서 산출한 1998년에서 2003년 동안 rain rate를 보여줌. 그림 22는 1979년 1월부터 2005년 12월 동안 GPCP version 2에서 산출한 precipitation rate의 월별 공간 분포를 보여줌.

라. SST

- 선행 연구에 이어 NOAA의 AVHRR Ocean Pathfinder를 통해 공간 해상도가 4km, 9km인 daily, 8-day, monthly 자료를 수집하였음. AVHRR은 밤(descending)과 낮(ascending), 하루 2번 자료를 제공해주므로 두 자료를 수집하여 하루 평균 SST의 값을 산출하였음.
- 그림 23은 1997년부터 2006년 동안 수집된 AVHRR의 version 5.0의 자료에서 산출한 climatological monthly SST의 공간분포를 보여줌. 약 38°N-40°N 지역에서 극전선이 형성되며, 대마 난류의 영향을 받는 극전선 이남의 지역은 sea ice의 영향을 받는 북쪽 지역보다 표층 수온이 높은 것을 알 수 있음.

마. 바람

- QuikScat과 SSM/I로부터 해양 표층에서 10m 높이의 sea surface wind speed와 wind direction 자료를 수집하였음. 수집된 자료의 공간 해상도는 0.25°, 시간 해상도는 daily, weekly, monthly임.
- 그림 24는 QuikScat이 하루에 밤과 낮으로 2번 제공하는 자료를 수집하여 wind speed와 wind direction을 산출한 것으로, 이 중 2003년도의 일별 자료로부터 산출한 월별 공간분포를 보여줌.
- 그림 25는 1998년부터 2003년 동안 QuikScat에서 수집한 자료로부터 산출된 wind speed의 월별 공간 분포를 보여주며, 그림 26은 SSM/I로부터 1997년부터 2007년까지 수집된 자료를 이용하여 산출한 월별 wind speed를 보여줌. 두 센서로부터 산출된 wind speed의 절대값의 차이는 있으나 wind speed의 계절변동성을 잘 보여주고 있음.

바. PAR

- 식물플랑크톤의 광합성에 이용 가능한 빛에 관한 정보는 SeaWiFS로부터 획득한 PAR 자료를 이용하였으며, 표층 chlorophyll a 와 동일한 시·공간 해상도 자료를 이용하였음.
- 그림 27은 1997년부터 2007년 동안 spring과 fall bloom이 형성되는 4월과 11월 동해 표층 PAR의 공간 분포를 보여주며, 그림 28은 spring bloom이 형성될 때 표층의 PAR를 보여줌. 식물플랑크톤 bloom 형성시기 때의 PAR도 매년 변동을 보이며, 전반적으로 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 PAR의 세기가 크게 나타남.

사. Sea ice

- 동해 북쪽 지역의 sea ice가 식물플랑크톤에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1997년부터 10월-5월동안 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)로부터 daily, weekly, monthly sea ice concentrations와 total sea ice area를 산출하였음. 그림 29는 일별 sea ice concentration의 공간 분포와 total sea ice area의 일 변동을 보여줌. 매년 sea ice area의 변동성이 큰 것을 알 수 있음.
- 1997년부터 2006년 동안 sea ice concentration의 각 월별 공간분포를 보여주는 그림들을 부록 3의 CD에 첨부하였음.

3. 기존의 관측 자료와 문헌 자료 수집 및 계량화

- 선행 연구에서 구축한 D/B에 이어서 기존의 관측 자료, 본 연구 기간 동안 수행한 현장 관측으로부터 얻은 자료, 그리고 문헌자료 수집 등을 통하여 지속적으로 D/B를 구축하였음. D/B는 수온, 염분, 산소, 영양염(N, P, Si), chlorophyll *a*, 동물플랑크톤 등의 자료로 구성되어 있으며, D/B의 효율적인 관리를 위해서 Ocean Data Viewer(ODV)라는 소프트웨어를 활용하였음. 구축된 D/B 중 일부는 부록 3의 CD에 Data Base라는 폴더 명으로 ascii 파일의 형태로 첨부하였음. 그림 30은 수집된 환경인자들 중에서 수온, 질산염(N), chlorophyll *a* 농도의 관측 정점의 공간 분포, 각 연도와 월별에 대해서 측정된 관측 정점수를 보여줌. 영양염과 chlorophyll *a* 등에 관한 자료는 수온과 같은 물리 환경 요인에 관한 자료에 비해서 자료의 시·공간 제약이 큰 것을 알 수 있음.
- 기존 관측 자료의 대부분은 National oceanographic Data Center(NODC), Korea Oceanographic Data Center(KODC), Japan Oceanographic Data Center(JODC)로부터 수집되었음.
- 수온과 밀도를 이용하여 산출되는 혼합층 깊이(MLD)는 봄과 가을 식물플랑크톤 성장에 있어서 저층으로부터 영양염의 공급과 빛의 이용 가능성을 통제하는 요인으로 중요한 역할을 함. 그러나 동해에서 염분의 자료 부족으로 밀도 기준으로부터 MLD 측정은 한계가 있음. 따라서 본 연구에서는 1960년 이후에 CTD, MBT, PFL (Argo), XBT로부터 측정된 고 해상도의 수온 자료를 추가 수집하여 각 profile로부터 MLD를 측정하였음.
- CTD, PFL 등에 의해 측정된 고 해상도의 수온 profile로부터 수심 10m에서 수온과 그 차이가 각각 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0도 이상 증가하기 시작하는 수심을 MLD라고 가정하였음. 공간 해상도 0.5도와 1도 별로 월별 MLD를 계산하였으며, 이때 D'Ortenzio *et al.*[2005]가 지중해에 적용한 방법을 따라서 quality control 등을 수행하였음. 또한 각 월별로 MLD의 자료 수가 3개보다 작은 경우에는 값이 없는 것으로 간주하였으며, 값이 비는 경우에는 시간에 대한 interpolation을 통해 MLD를 계산하였음. 그림 31은 공간 해상도 0.5도의 1월부터 4월 동안의 MLD를 보여줌. 겨울철에 deep convection이 일어나는 곳으로 알려진 일본 분지 서쪽지역에서 MLD가 300m에서 1000m 이상까지 깊어지는 것을 알 수 있음. 동해 극전선 이남의 지역은 2월부터 수심이 알아지기 시작하며 극전선 이북의 지역은 3월부터 수심이 알아지기

시작함. 그러나 동해 남동쪽 지역은 3월까지 MLD가 깊어지는 경향을 보임.

- 동해에서 spring bloom은 Sverdrup의 critical depth hypothesis[1953]로 설명될 수 있음[Kim *et al.*, 2000]. 따라서 primary production과 respiration이 같아지는 critical depth(CRD)와 MLD의 시간에 따른 변동성은 식물플랑크톤의 성장에 중요한 역할을 함. MLD는 수온 profile로부터 비교적 쉽게 정보 획득이 가능하나 CRD 경우에는 실제 현장 관측이 어려워 계산을 통한 추정이 필요함. 이에 spring bloom이 형성될 때의 CRD와 MLD가 같다고 가정하여, Sverdrup에 의해 제안된 식(1)을 이용하여 compensation light intensity (I_c) 값을 추정 및 이 값으로부터 critical depth를 측정하였음. K 는 빛 소멸계수, D_{CR} 은 critical depth, R_0 는 respiration. P_0 는 표층에서 production, I_0 는 표층에서 빛을 의미함.

$$\frac{1}{KD_{CR}}(1 - e^{-KD_{CR}}) = \frac{R_0}{P_0} = \frac{I_C}{I_0} \quad (1)$$

그림 32는 1998년부터 2002년 동안 각각 SeaWiFS daily chlorophyll a, PAR, 그리고 D/B에서 누적된 수온 profile들로부터 얻은 spring bloom 형성 시기(라)와 이 시기 PAR(나)와 MLD(다)를 보여줌. (가)는 이러한 정보로부터 구한 compensation light intensity를 보여줌. Compensation light intensity는 production과 respiration이 같아지는 수심의 light intensity를 의미하며, 극전선을 기준으로 남과 북쪽 지역이 값의 차이를 보이는데, 각 지역에서는 값이 거의 일정한 것을 알 수 있음. 이는 두 지역의 spring bloom 형성 기작의 차이를 의미함. 따라서 이전에는 동해에서 Sverdrup의 critical depth hypothesis에 의해서 빛이 spring bloom 형성 기작을 설명하는 중요한 요인이었으나, 이 결과는 극전선을 기준으로 남쪽과 북쪽 지역이 빛 조건 외에 다른 요인이 spring bloom 형성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 가능성을 보여줌.

- 동해에 유입되는 강물은 육상 기원의 영양염과 저염수에 의한 성층 형성을 통해서 식물플랑크톤 성장에 영향을 미칠 수 있음. 따라서 강물의 유입이 식물플랑크톤에 미치는 영향을 고려하기 위해 동해로 유입되는 강의 유출량을 정량화하였으며, Amur 강이 동해의 주요한 담수의 공급원임을 알 수 있음(그림 33). 그리고 겨울에는 sea ice가 동해 북부 지역에서 주요한 담수 공급원임을 알 수 있음(그림 33).

- 인공위성 자료와 더불어 동해 연안에 위치한 한국, 북한, 러시아의 기상 관측소에서 측정된 강수량을 수집하였음. 그림 34는 북한의 청진에서 측정된 2001년도 일별 강수량을 보여줌.
- 문헌 자료의 검색을 통해 일본 분지와 야마토 분지에서 sediment trap을 이용하여 측정된 mass flux (total mass flux, Al flux, opal flux) 자료를 수집하여 D/B에 추가하였음. 그림 35는 2001년에 동해의 일본 분지 서쪽에서 측정된 mass flux의 시간에 따른 변동량을 보여줌. 특히, spring bloom 기간과 황사가 경유한 후에는 Al과 opal flux가 높은 값을 보였음.
- 앞서 언급한 것처럼 TOMS의 aerosol index로부터 황사에 대한 기준 값 설정의 적합성 여부를 논의하기 위하여 동해 연안에 위치한 기상 관측소에서 얻은 시정 (visibility) 자료를 수집하였음.
- Fe이 식물플랑크톤 성장에 대한 중요성을 논하기 위해서는 최소한 계절별 Fe의 해수 중 농도에 관한 정보가 필요함. 그러나 아직 동해에서는 해수 중 Fe의 농도의 자료가 거의 전무한 상황임. 그러나 최근에 일본 홋카이도 대학 연구팀에서 일본분지 동쪽 지역에서 7월 Fe 농도를 측정하였으며, 이 농도의 정보를 입수하여 기존의 D/B에 추가함.
- 구축된 D/B로부터 각 생태환경 인자들을 공간 해상도 1도별로 data를 수집하여 각 월별로 standard depth(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500m)에 대해서 각 인자들의 대표 값을 산출하였음. 사용된 data 중 two standard deviation을 벗어나는 경우는 제외함으로써 quality control을 시행하였음. 산출된 각 생태환경 인자의 값들은 부록 3의 CD에 'Biogeochemical paramters'라는 명의 폴더에 그림으로 첨부하였음. 첨부된 폴더의 명 'an'은 계량화된 인자들의 평균 값, 'dd'는 값의 계량화에 사용된 data 수, 'sd'는 standard deviation, 'se'는 standard error를 뜻함. 그림 36은 표층에서 4월의 수온과, 질산염 농도의 공간 분포와 값의 산출에 사용된 data 수와 standard deviation을 보여줌.
- 그림 37은 구축된 D/B로부터 얻은 월별 동물플랑크톤의 생체량 변동을 보여줌. 극전선을 기준으로 남쪽과 북쪽 지역은 각기 다른 계절 변동성을 보임. 남쪽 지역은 spring bloom이 시작되는 시기와 거의 비슷한 시기에 작은 size에 속하는 요각류 (copepoda) 등이 우점하면서 급격하게 증가하다가 bloom이 약해지면서 생체량의 감소를 보이는 bottom-up의 패턴을 보임. 그러나 북쪽 지역에서는 spring bloom 형성 시기와 비슷한 시기에 동물플랑크톤의 생체량이 증가해서, 여름에도 생체량이 높게 유지되고 있음.

제 2 절 동해 생태 환경인자의 변동성

1. 생태 환경인자의 변동성

가. 계절 변동성

- SeaWiFS 표층 chlorophyll *a*의 월별 공간 분포(그림 17)에서 알 수 있듯이 동해의 경우 각 지역별로 식물플랑크톤 생체량의 계절 변동의 차이가 나타남. 특히 겨울철 sea ice가 형성되는 Primorye coast 지역(region1), 극전선이 형성되는 지역(region3)을 기준으로 북부 지역(region2)과 남부 지역(region4)으로 그 차이가 크게 나타남.
- 4개의 지역을 중심으로 각 인자들의 계절 변동성을 분석하였음. 그림 38은 4개의 지역에서 표층 chlorophyll *a*와 SST, MLD, MLD 내의 영양염(N, P, Si) 농도의 월별 변동성을 보여줌. 특히 bloom이 형성되는 시기와 끝나는 시기가 MLD와 질산염의 계절 변동성과 상관성이 큰 것을 알 수 있음.
- 그림 39는 4개의 지역에서 bloom 기간 동안 chlorophyll *a* 농도의 면적으로 spring과 fall bloom의 크기를 보여주며, Primorye coast 지역의 bloom의 크기가 다른 지역보다 적어도 2배 이상 큰 것으로 나타남.
- 혼합층 내의 질산염(N)과 인산염(P)의 비, 질산염과 규산염(Si) 비의 월별 변동성을 살펴보면(그림 40) 질산염이 인산염과 규산염에 비해서 식물플랑크톤의 중요한 제한 인자로 작용하는 것을 알 수 있음.
- 그림 41은 표층에서부터 수심 500m 사이의 질산염, 인산염, 규산염의 월별 변동을 나타낸 것으로, 겨울철에 deep mixing에 의해서 저층의 영양염이 상층으로 공급되며, 성층 형성과 spring bloom이 일어나는 시기에는 유광층 내의 영양염이 급격히 감소하는 것을 보여줌. 가을에 성층이 깨지면서 다시 유광층 내의 영양염 농도가 증가하기 시작함. 이러한 결과들은 유광층에서 영양염의 계절 변동성은 혼합작용과 식물플랑크톤 성장과 밀접한 연관성이 있는 것을 제시함.
- 그러나 Primorye coast 지역에서 인산염과 규산염은 다른 계절 변동성(그림 40)을 보이며, 겨울철 혼합 작용 이외에 이 지역에 인접해 있는 아모르 강과 Tatarskiy strait의 sea ice와 같은 공급원의 영향을 받는 것을 알 수 있음.

나. 연 변동성

- 각 생태 환경 인자의 연 변동성을 정량적으로 분석하기 위하여 인공위성으로부터 얻은 SST, 표층 chlorophyll *a*, wind speed를 중심으로 EOF mode 분석을 실시하였음.

그림 42부터 44는 각각 표층 chlorophyll *a*, SST, wind speed의 EOF 분석 결과를 보여줌.

- 표층 chlorophyll *a*의 Mode 1은 전체 chlorophyll *a* 농도 변화의 42.1%를 나타내고 있으며, 시간계수가 일년에 봄과 가을 2번의 주파수를 가지고 규칙적으로 변하고 있음. 분석 기간 중 2001년에서 2003년 봄에 다른 해보다 강한 chlorophyll *a* 농도의 분포를 보임. 이러한 Mode 1은 3월-5월 사이에 극전선과 Primorye coast, 일본 분지 서쪽 지역의 bloom을 표현하고 있음. Mode 2는 전체 chlorophyll *a* 농도의 시간변화의 9.9%를 차지하고 있으며, 3월-4월에 극전선 이남의 지역, 북한과 러시아 연안 지역의 bloom과 5월에 일본 분지 동쪽 지역에서 나타는 bloom을 보여줌. Mode 1의 경우처럼 Mode 2의 경우도 chlorophyll *a* 농도의 계절성과 더불어 강한 연 변동성을 보여줌.
- SST는 Mode 1이 전체 SST 변화의 96.9%를 차지하며, 겨울에는 수온이 낮고 여름에 높아지는 변동성을 뚜렷하게 보여줌. 극전선 이남의 지역은 겨울철에 대마 난류의 영향으로 북쪽보다 수온이 높고 여름에는 북쪽지역의 급격한 수온의 상승을 잘 보여주고 있음. 그러나 chlorophyll *a*와는 달리 강한 연 변동성을 보이지 않음.
- Wind speed는 Mode 1이 전체 바람 에너지의 85.2%를 차지하며, 주로 블라디보스톡을 지나는 차가운 북서계절풍을 표현하고 있음. 시간계수가 매년 1월에 peak를 보이는데, 2002년 11월에는 2003년 1월보다 강한 peak를 보임. 이는 2002년에는 겨울철 바람이 다른 해에 비해 2개월 정도 일찍 시작되었음을 의미함. Mode 1은 1년에 한 번의 에너지가 가장 우세하고, 나머지 단주기에서는 별다른 peak가 발견되지 않았음. 이에 반해 Mode 2는 1년에 한번에서 세 번 사이의 다양한 주기를 표현하고 있으며 이는 40°N 이북의 동해 북동부에서 부는 바람을 나타냄. 그리고 전체 변동성의 3.4%만을 차지하며 그 세기가 미약함.
- 그림 45는 공간 해상도 1도에 대해서 각 해별로 daily chlorophyll *a* 농도에 Gaussian curve fitting 방법을 적용하여 시간에 따른 chlorophyll *a* 농도의 정량적인 변동의 분석을 통해 얻은 spring bloom의 형성시기(가), 기간(나) 그리고 bloom의 크기(다)를 보여줌. 매년 spring bloom의 형성시기와 기간, 크기는 공간에 따라서 큰 변동을 보임. 그리고 전반적으로 남쪽 지역은 극전선 이북지역과 비교해서 봄철 bloom 형성이 1달 정도 빨리 형성되며 기간 또한 1달 정도 더 길게 지속되는 것을 알 수 있음. 그러나 평균 농도는 북쪽 지역에 비교해서 작게 나타남.

다. 10년 이상의 장기 변동성

- Regime shift와 같은 기후변동에 의한 해양의 물리적 환경 변화가 기초 생산단계에 미치는 영향을 알아보기 위해 그동안 누적한 각 인자들의 자료를 이용하여 anomaly를 구하여 각각의 평균값과 3년과 5년 단위의 running mean을 산출하였음. 그림 46과 47은 그 한 예로 표층에서 수심 300m까지의 chlorophyll 농도와 수온의 계절별 anomaly를 보여줌. 그러나 그림 48에서 보여 주듯이 anomaly 계산에 이용 가능한 data 수가 매우 부족하여 이러한 결과를 해석하는 데 있어서 주의가 필요함. Chlorophyll 자료 뿐 아니라 영양염 자료의 경우도 10년 이상의 장기 변동성을 분석하는데 있어서 자료의 제한이 크게 작용함(그림 30). 비교적 이용 가능한 data 수가 많은 수온의 anomaly는 동해 전 지역에서 상층부의 수온이 증가하고 있는 경향을 보여주며, 특히 1990년대에 1970년대와 1980년대에 비해서 수온이 높은 것을 알 수 있음.
- 그림 49는 동해에서 알려진 regime shift 시기와 ocean color 자료의 이용이 가능한 시기를 보여줌. 1976/77년의 regime shift와 1988/89년 regime shift 사이에 CZCS의 표층 chlorophyll a 농도의 활용이 가능하며, 1998/99년 regime shift 이후에는 SeaWiFS와 MODIS의 자료의 활용이 가능함. 따라서 CZCS와 SeaWiFS 관측 시기의 자료를 이용하여 기후 변동과 관련하여 동해 저차 단계의 생물에 미치는 영향에 대한 논의가 가능함.
- CZCS의 경우 부록 3에 첨부된 월별 chlorophyll a 농도의 공간 분포에서 알 수 있듯이 이용 가능한 자료가 대부분 극전선 이남에 존재함. 따라서 극전선 이남의 지역에서 CZCS 관측 시기와 SeaWiFS 관측 시기의 자료를 선택하여 비교·분석하였음.
- 그림 50은 CZCS 관측 시기와 SeaWiFS 관측 시기동안 동해 남쪽 지역에서 2월부터 5월동안 각 월별 chlorophyll a 농도 값의 frequency 분포임. 두 시기 모두 spring bloom이 전반적으로 3월부터 시작하여 5월에 끝나는 패턴을 보여주고 있음. 그리고 SeaWiFS 관측 시기에는 chlorophyll a 농도 값의 분포가 bloom이 peak에 도달하는 4월에는 일반적으로 해양에서 bloom 시기동안 관찰되는 Gaussian 분포를 보여줌. 그러나 CZCS 관측 시기의 경우에는 한쪽으로 skewed된 분포 패턴을 보여줌.
- D/B에서 위성자료를 산출한 지역과 동일한 지역의 chlorophyll a 농도의 자료를 이용하여 두 시기동안 chlorophyll a 농도의 수직 분포(그림 51)를 비교해 보면, SeaWiFS 시기에는 봄철에 maximum chlorophyll a 농도가 MLD 내에 분포하는 특성을

보이지만, CZCS 시기에는 maximum chlorophyll *a* 농도가 MLD 아래에 분포하는 특성을 보임.

- 두 시기동안 고 해상도 수온 자료를 이용하여 산출한 MLD를 살펴보면, 겨울과 봄에 눈에 띄는 차이를 보이지 않고 있음(그림 52). 그러나 Chiba와 Saino[2002]에 의해 보고된 바와 같이 CZCS 시기에는 solar radiation의 증가로 인해 SeaWiFS 시기 보다 성층이 강화된 것을 알 수 있음.
- 따라서 위의 결과들은 1980년대에 동해 남쪽 지역에서 성층강화로 인하여 봄철 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양염의 공급이 억제되어 결국 spring bloom이 SeaWiFS 시기보다 억제된 것을 보여줌.

2. 물리적 요소가 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향

가. 바람

- 바람은 식물플랑크톤 성장에 필수조건인 빛과 영양염의 유광층 내의 농도 변화에 영향을 미치므로 식물플랑크톤의 성장과 밀접한 관계가 예상되었음. 또한 Yamada *et al.*[2004]과 Kim *et al.*[2006]은 동해 몇몇 지역을 선택하여 바람과 spring bloom 사이의 밀접한 상관관계를 제시하였음. 그림 53은 본 연구에서 겨울과 봄철 동안의 바람과 spring bloom 형성시기, 기간, peak chlorophyll *a* 농도와의 상관 계수를 동해 전 지역을 공간 해상도 1도로 구분하여 구한 값을 보여줌. 그러나 예상되는 결과와 달리 일부 지역에서는 spring bloom 시기와 기간, peak와 밀접한 상관관계를 보이지만, 대체로 상관관계가 명확하지 않음. 이는 겨울철 강한 바람에 의한 영양염의 공급과 바람의 세기가 약해지면서 혼합층이 얇아 짐에 따른 빛 조건의 충족 외에 다른 요인이 중요한 성장 제한 인자로 작용하는 것을 의미함.

나. sea ice

- 동해 북부지역에는 Tatarskiy strait와 Primorye coast등을 따라서 겨울철에 sea ice가 형성됨(그림 29). 특히 Tatarskiy strait에서 형성된 sea ice는 겨울과 이른 봄 동안 Primorye coast를 따라서 흐르는 Liman current의 중요한 source로 작용하는 것으로 보고된 바 있음 [Martin and Kawase, 1998]. 이 시기의 Liman current는 sea ice의 영향으로 주변의 해수보다 상대적으로 염분이 낮아 상층부에 성층을 형성하여 식물플랑크톤 성장에 필요한 빛 조건을 충족시킬 수 있음.

- 그림 54는 1998년부터 2003년 동안 Primorye coast 지역에서 SeaWiFS로부터 산출한 표층 chlorophyll a 농도와 QuickScat으로부터 획득한 wind speed 그리고 47-52°N 지역에서 total sea ice area를 비교한 것으로 sea ice melting 시기와 spring bloom 형성 시기의 밀접한 연관성을 보여줌. 2001년의 경우는 spring bloom 형성 시기가 지연되었는데 wind speed는 다른 해보다 약 2배정도 높게 나타났음(그림 55).
- Sea ice melt water에 의한 성층이 Primorye coast의 bloom에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 2000년도 3월에 동해 북부 지역 현장 관측 자료를 분석한 결과 sea ice melt water에 의해서 Primorye coast를 따라서 bloom이 형성된 곳의 유광층에 저온 저염수에 의한 성층이 형성되어 있는 것을 확인 할 수 있었음(그림 56).
- 그림 57은 sea ice melting 시기와 spring bloom 형성 시기와의 상관관계를 보여줌. Sea ice melting 시기가 빠를수록 bloom 형성 시기도 빠른 경향을 보여줌. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 2001년에는 sea ice melting 시기에 강한 바람(그림 59)에 의해 성층 형성이 억제되어 bloom 형성 시기가 지연된 것을 알 수 있음. 그림 58은 sea ice melt water volume과 spring bloom 크기와의 상관성을 보여줌. 1999년을 제외하고는 sea ice melt water volume이 클수록 bloom의 크기도 커지는 경향을 보임. 이것은 sea ice melt water가 이 지역의 bloom 형성 시기뿐만 아니라 bloom의 크기도 영향을 미치는 것을 의미하며, 특히 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양염의 주요한 공급원으로서 역할의 가능성을 제시하는 것임.
- 그림 60은 Primorye coast를 따라서 chlorophyll a 농도와 wind stress의 phase diagram을 비교한 것으로 바람이 약해지면서 bloom이 형성되는 것을 알 수 있음. 이 지역의 sea ice melt water에 의한 성층 형성뿐 아니라 바람 또한 bloom 형성에 중요한 역할을 하는 것을 의미함.
- 선행 연구에서 사용된 MOM3를 이용하여 재현된 current speed에 의하면 이 지역의 유속은 겨울과 봄에 2-18km/day로 최대 북위 45°N의 범위 까지만 sea ice가 녹은 물의 이동이 가능함. 따라서 45°N 이남의 지역의 봄철 bloom은 Primorye coast를 따라 형성되었던 그 지역에서의 sea ice의 영향이 예상됨.

다. eddy

- 그림 61은 누적된 D/B의 수온 자료와 AVHRR 센서로부터 획득한 SST를 선행 연구에서 동해에 적용된 MOM3 모델을 이용하여 3-Dimensional Variational

Technique[Weaver and Courtier, 2001]을 적용하여 재현한 표층의 수온과 해류 구조의 한 예를 보여줌. 동해 남쪽 지역은 북쪽 지역과 비교해서 eddy의 활동이 활발한 것을 알 수 있음.

- 봄철 식물플랑크톤 농도의 시·공간 변동은 남쪽 지역의 경우에는 eddy의 분포와 일치함(그림 62). 특히 eddy의 가장 자리를 따라서 높은 농도의 chlorophyll a 농도가 분포하며 시간이 지나면서 eddy core에 높은 농도가 집중되는 것을 볼 수 있음. 이는 eddy에 의해서 저층의 영양염의 상층부로 공급이 증진 된 것을 의미함.
- Eddy의 영향을 받는 지역은 eddy에서 떨어져 있는 지역보다 spring bloom 형성 시기가 빠른 것을 알 수 있음(그림 63). 또한 eddy가 주로 관찰되는 지역에서는 바람과 spring bloom 시기와의 상관관계가 명확하지 않은 것을 알 수 있었음(그림 53). 따라서 동해 남쪽 지역에서는 eddy에 의한 영양염의 공급이 빛 조건보다 식물플랑크톤 성장에 중요한 요인으로 작용할 수 있음을 의미함.

3. 황사가 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향

- 동해를 경유한 황사는 주로 40도 이북의 지역을 중심으로 경유하여 지나갔으며(그림 20), 특히 봄에 일본 분지 서쪽 지역에 가장 많은 양의 황사의 deposition이 기대됨. 황사의 경유로 인한 dust 유입과 영양염의 공급이 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향을 알아보기 위해 동해 북부 지역에 위치하며 강이나 다른 지역에서 영양염의 advection의 영향이 비교적 작을 것으로 예상되는 두 지역(B1, B2)에 대해서 시간에 따른 chlorophyll a 농도(SeaWiFS의 daily 자료에서 산출)와, MLD(Argo drifter data와 선행연구에서 사용된 물리모델(MOM3)을 이용하여 data assimilation을 통해 구한 값), 그리고 aerosol index와 precipitation data로부터 황사 경유 시기와 dust deposition process를 구분하였음(그림 64). 황사가 관찰되지 않은 해의 봄철 bloom의 크기는 황사가 관찰된 해보다 약 2배정도 크기가 작았음. 그리고 bloom 형성 시기도 늦었음. 특히 wet dust deposition이 일어난 해의 경우 bloom의 크기와 시기가 가장 크고 빨랐는데 2001년과 2002년의 경우에는 bloom 시기가 약 한달 정도 빨리 형성 되었음.
- 두 지역에서 MLD는 바람과 밀접한 관계를 보임. 그러나 spring bloom의 형성 시기와 크기에 영향을 미칠 수 있는 바람의 세기와 MLD의 변동은 bloom과는 비교적 다른 경향을 보임. 예를 들어, 2001년의 경우에 다른 해와 비교해서 비교적 바람의 세기가

강한 해였으나 bloom은 오히려 두 지역에서 약 1달 정도 더 빨리 형성되었음. 이는 바람과 같은 물리적 요인 외에 다른 요인의 중요성을 보여줌(그림 65).

- Sverdrup의 critical depth hypothesis를 적용하여 두 지역의 spring bloom 기간의 critical depth를 추정하였음(표 2). 황사에 의해 많은 양의 Fe의 공급이 예상되는 2001년, 2002년에는 다른 해보다 critical depth가 약 3-5배까지 깊어진 것을 알 수 있음. 이는 황사에 의해 공급된 Fe이 두 지역의 식물플랑크톤 생산 증진을 통해 식물플랑크톤의 성장 촉진과 표층 chlorophyll a 농도 증가의 원인으로 작용하였을 가능성을 보여줌.
- 북대서양의 경우, 겨울철에 깊은 MLD에 의해 빛의 제한이 커지게 되면 식물플랑크톤의 광합성에 필요한 Fe의 요구량이 증가하게 되며, 이때 dust event와 같은 공급원에 의해 다량의 Fe이 공급되면 식물플랑크톤의 생산 증진 및 critical depth의 깊이가 깊어 질 수 있는 가능성이 제시되었음[Moore *et al.*, 2006]. 따라서 두 지역에서도 겨울철 깊은 혼합에 의해 북대서양의 경우처럼 Fe이 식물플랑크톤의 성장에 대한 중요한 역할을 할 수 있음.
- 또한 두 지역의 Fe의 annual budget을 추정해보면 식물플랑크톤이 성장을 위해 필요로 하는 Fe의 요구량에 비해서 대기과 저층으로부터 공급되는 Fe의 양은 50% 정도에 그침(그림 66). 이런 조건에서 황사와 같은 episodic events로부터 wet deposition과 같은process에 의해 생물이 이용 가능한 형태로 다량의 Fe이 공급되는 것은 동해 식물플랑크톤 성장에 큰 영향을 미칠 수 있음.

제 3 절 동해 생태 환경 특성을 고려한 모델 적용 및 최적화

1. 동해 생태환경 특성을 고려한 모델의 적용 방법 연구

- 선행연구에서 3차원의 약 10km의 공간해상도를 가진 상층물리순환 모델과 생지화학 모델의 접합을 시도하였으나, 동해 전 지역의 생태적 주요 현상을 모사 및 모델의 적합성을 논하기에는 자료의 시·공간 제한이 컸음.
- 본 연구의 생태 인자의 분석 결과에서 알 수 있듯이 동해의 경우 물리환경 조건이 지역에 따라 차이가 컸음. 예를 들어 극전선 이남의 지역은 대마난류의 영향과 eddy activity가 활발한 지역으로 horizontal process가 우세함. 극전선 이북 지역은

sea ice melt water의 영향을 받는 Primorye coast 지역을 제외하고는 비교적 vertical한 process가 주요하게 작용함. 따라서 동해를 생태 환경 특성에 따라서 지역을 구분하고 각 지역별 특성을 정의함으로써 각 지역 특성에 적합한 형태의 모델 적용이 필요함.

- 식물플랑크톤은 물리 환경 요인의 통제를 받는 passive한 요인으로 식물플랑크톤 변동성의 차이는 물리 환경 특성의 차이를 간접적으로 제시해 줄 수 있음. 또한 해양 생태계에서 생물생산의 가장 기초단계로 고차 단계의 생물생산과 직접적인 연관을 가짐. 그러므로 식물플랑크톤 생체량의 시·공간 변동성을 분석한 EOF Mode 1과 Mode 2의 결과를 기준으로 동해의 생태적 환경 특성을 구분할 수 있으며, 육상의 영향을 받기 쉬운 Primorye coast와 같은 연안지역을 제외하면 크게 극전선을 기준으로 남과 북으로 구분할 수 있음.
- 동해 북쪽 지역의 경우는 비교적 vertical physical process가 우세하므로, 1차원의 물리모델에 접합된 기존의 생지화학 모델을 적용하였음. 동해 남쪽 지역은 대마난류의 advection, eddy 등의 영향이 크게 작용하는 곳으로 1차원 물리모델과의 접합에는 한계가 있음. 따라서 water column을 저차 단계의 생물 성장과 생산이 일어나는 상층 부분과 밀도가 균일한 저층, 그리고 두 층 사이의 급격한 밀도 경사가 생기는 층으로 구분하여 box 개념의 모델을 적용하였음. 그러나 겨울에는 MLD가 깊어지므로 1개의 box로 간주하였음.

2. 동해 생태환경 모사에 적용된 모델

가. 물리 모델

- 1차원의 물리 모델은 bulk turbulent kinetic energy models, turbulence closure models, a non-local K-profile parameterization model로 크게 3가지로 구분됨. 이중 본 연구에서 1차년도에 동해에 적용한 모델은 bulk turbulent kinetic energy models에 속하는 PWP 모델이었음. 이 모델은 수온과 혼합층의 계절 변동과 같은 특성 재현에 적합한 모델로 1차년도에 극전선 이북 지역의 계절별 MLD 변동을 성공적으로 재현하였음.
- 그러나 이러한 모델은 작은 시간 규모의 물리적 특성을 재현에는 적합하지 않은 단점이 있음. 따라서 2차 년도부터는 계절변동보다 작은 시간 scale의 물리적 특성 재현에 유용하게 사용될 수 있는 non-local K-profile

parameterization model(Kpp)을 적용하였음. 모델 식들은 부록 2에 첨부하였음.

나. 생지화학 모델

- 생지화학 모델은 *Doney et al.*[1996]에 의해 제안된 NPZD 모델을 동해에 적용하였음(그림 67). 그리고 NPZD 모델의 compartments인 식물플랑크톤과 동물플랑크톤을 size에 따라서 좀 더 세분화한 형태의 NPZD 모델을 적용하였음(그림 68). 식물플랑크톤(PHY)은 diatom(PHYL)과 small size plankton(PHYL)으로 compartments를 구분하였고, 동물 플랑크톤(ZOO)도 size에 따라서 small(ZOOS), large(ZOOL), 그리고 육식성 type(ZOOP)의 compartments로 세분화하였음. N(DIN)의 경우도 NO₃와 NH₄로 구분하였고, detritus(DET)도 dissolved 형태의 DON과 particle 형태의 PON으로 구분하였음. 관련 식과 모델에 사용된 parameter 값은 부록 2에 첨부하였음.
- NPZD 모델과 extended NPZD 모델은 극전선 이북의 지역에서는 Kpp 모델과 접합하여 생태 특성 재현에 사용되었고, 극전선 이남의 지역은 3개의 층으로 구분된 box model 개념을 적용하여 MLD 내에서 각 compartments들의 시간에 따른 변동성을 재현하였음.
- 북해를 대상으로 개발된 1차원의 생지화학 모델인 PROWQM 모델(그림 69)을 선행 연구에 이어서 극전선 이북 지역의 생태 특성 모사를 위해 적용하였음. Doney에 의해 제안된 모델에서는 규산염을 고려하지 않았으나, 동해의 경우 spring bloom 시기에 대부분 diatom이 우점하므로 규산염이 모델의 compartment로 구성되어 있는 PROWQM의 적용은 diatom과 규산염과의 상호 연관성, 질산염과 규산염의 상대적 중요성 등의 이해에 적합함.

3. 계량화된 생태 인자의 모델 적용

- 동해 극전선 이북 지역에 적용된 물리모델의 surface forcing은 NECEP의 climatological heat flux, wind stress, wind stress curl 자료를 입력하였음.
- D/B를 이용하여 계량화된 각 생태환경 인자의 값들을(부록 3) 동해에 적용된 모델의 초기 값으로 입력하였음.
- 모델의 해는 parameters 값의 영향을 받음. 지금까지 동해에 적용되었던 이전의 모델들은 대양에 적용된 모델에 사용된 parameters를 사용하였으며,

이러한 parameters가 동해 생태 인자의 특성을 표현하는데 적합한지의 여부가 확인 되어야함. 계량화된 생태환경 인자들과 Evans과 Parslow[1985]에 의해 제안된 simple box model에 variational adjoint technique을 적용하여 data assimilation을 통해 동해에 적합한 parameters의 constrain을 시도하였음. 이를 위해 사용된 식과 box model의 parameters는 부록 2에 첨부하였음. 이러한 시도는 향후 그 구성이 복잡해질 동해 생지화학 모델 해의 error를 줄일 수 있을 것임.

제 4 절 모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 연구

1. 동해 생태 환경 특성 재현

가. 계절 변동성

- 생태 환경 인자들의 변동성 분석을 통해서 식물플랑크톤의 성장은 일반적으로 겨울과 봄의 초기에는 빛에 의해서 그리고 봄에서 여름에는 질산염에 의해 control되는 것을 알 수 있었음. 가을에는 다시 MLD의 깊어짐으로 인해 공급된 질산염에 의해 봄보다 규모가 작은 fall bloom이 일어남.
- 극전선 이북의 지역은 Kpp 모델과 NPZD, extended NPZD 모델의 접합을 통해 식물·동물플랑크톤 등의 변동성을 재현하였으며, 극전선 이남의 지역은 MLD에 의해 3개의 층으로 구분된 모델과 NPZD, extended NPZD 모델의 접합을 통해 계절 변동성을 재현하였음.
- 그림 70과 71은 MLD 내의 질산염, 식물플랑크톤의 농도를 남부지역과 북부지역 에서 재현한 결과를 보여줌. 그림에서 알 수 있듯이 모델은 동해 식물플랑크톤과 영양염의 계절 변동성을 잘 보여주고 있으며, 특히 동해 남쪽지역이 봄철에 북쪽지역보다 빠른 성층 형성으로 인해 bloom 형성 시기가 빠른 특성을 잘 보여 주고 있음. 또한 북쪽 지역은 겨울철 강한 혼합 작용에 의해 식물플랑크톤이 이용 가능한 영양염이 남쪽지역 보다 2-3배 정도 높고 봄철 bloom의 크기가 큰 특성 보여 주고 있음.
- 그림 72는 extended NPZD 모델로부터 얻은 극전선의 남쪽(SR)과 북쪽(NR)에서의 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 각각의 전체 생체량에서 diatom과 같은 large size의 식물플랑크톤(PHYL)과 요각류와 같은 초식성 동물플랑크톤(ZOOL)의 생체량의 시간에 따른 비를 보여줌. NR 지역에서는

PHYL이 spring bloom 시기에는 약 전체 식물플랑크톤의 90%로 우점하고 있으며 영양염이 고갈되는 여름에는 약 50% 정도를 차지하는 것으로 나타남. 가을에는 영양염의 조건이 충족되면서 여름보다 비가 다시 증가하는 패턴을 보임. SR 지역에서는 겨울과 봄에 PHYL이 전체 식물플랑크톤의 약 70%를 차지하며 우점하며, spring bloom 기간 이후부터는 약 40-50%를 차지함. 가을이 되면서 다시 그 비가 증가하기 시작함. 동물플랑크톤은 NR 지역에서는 spring bloom 기간 동안 전체 동물플랑크톤에서 ZOOL이 차지하는 비가 80%까지 증가하고 여름에도 60%로 비교적 높은 비를 유지함. 가을과 겨울에는 그 비가 약 40%로 낮게 나타남. 그러나 SR 지역에서 ZOOL의 비는 spring과 fall bloom 기간 동안 그 비가 60%까지 증가하고 겨울과 여름에는 약 40%를 유지하는 것으로 나타남. 초식성 동물플랑크톤의 SR 지역과 NR 지역에서 이러한 시간에 따른 변동성은 구축된 D/B의 동물플랑크톤 자료 분석 결과에서도(그림 37) 잘 나타남. NR 지역에서 spring bloom 시기에 PHYL인 diatom이 우점하는 결과도 2004년 5월에 동해에서 관측한 결과(그림 10)와 잘 일치함.

- 그림 73은 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 생체량의 trajectory로 SR 지역과 NR 지역에서 플랑크톤 dynamic의 차이를 보여줌. NR 지역에서는 spring bloom 시작 시기(90일) 전까지는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 농도가 낮음. 그 이후에는 식물플랑크톤 농도는 급격한 증가를 보이나 동물플랑크톤은 여전히 농도가 낮고 약 한 달 후에 식물플랑크톤의 농도가 감소하기 시작하는 시기인 150일 경에 농도의 peak를 보임. SR 지역에서는 식물플랑크톤 농도가 급격히 증가하는 peak 시기와 동물플랑크톤 농도의 peak 시기가 거의 일치함.

나. 연 변동성

- 인공위성으로부터 산출한 바람, solar radiation등을 forcing으로 입력하여 물리환경 조건의 연 변동이 저차 생산단계의 생물에 미치는 영향을 알아보았음. 그림 74는 동해 극전선의 북쪽지역에서 모델로부터 획득한 MLD 연변동 결과의 한 예로, Argo drifter에서 얻은 MLD와도 잘 일치함을 알 수 있음. 그림 75는 MLD와 CRD의 연변동이 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향에

대해서 알아본 것으로, MLD내의 chlorophyll *a* 농도는 MLD가 CRD보다 얕아지면서 chlorophyll *a* 농도가 급격히 증가하는 봄철 bloom의 initiation을 잘 보여주고 있음. 그리고 대체로 MLD가 얕은 해의 bloom의 크기가 MLD가 깊은 해보다 bloom의 크기가 작은 특성 또한 보여줌. 이는 MLD 변동에 의해 유광층 내에 식물플랑크톤이 이용 가능한 질산염 농도가 변동된 것을 알 수 있음.

2. 기후 변화가 동해 생태 환경 변화가 생태계에 미치는 영향

- CZCS와 SeaWiFS의 chlorophyll *a* 농도와 D/B의 자료로부터 산출한 MLD 등의 분석을 통해서 1980년대와 2000년대에는 solar radiation과 관련된 봄철 성층 세기의 차이가 유광층 내의 영양염과 식물플랑크톤의 생체량의 차이를 초래한 것을 알 수 있었음. 이와 같은 결과를 토대로 PROWQM 모델을 사용하여 mixing rate의 세기와 겨울철 질산염과 규산염의 비가 다른 환경 조건에서 식물플랑크톤의 농도에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 모델 실험을 수행하였음. NC01은 동해에서 알려진 N:Si ratio와 normal mixing 조건, NC02는 NC01 조건에서 mixing을 2배 이상 증가할 경우, NC03은 N:Si ratio를 두배로 증가하고 normal mixing 조건, NC04는 NC03 조건에 mixing을 2배 이상 증가한 조건에서 모델 simulation을 의미함.
- 그림 76은 42.5°N/137.5°E 지역의 수온과 영양염을 PROWQM의 초기값으로 입력하여 NC01-NC04 조건하에서 모델에서 산출된 수온과 diatom, flagellate, 질산염, 규산염의 농도를 보여줌. 그림 77은 혼합층 내 diatom과 flagellate의 농도 값을 보여줌. NC01의 경우 동해 북쪽 지역에서 diatom이 우점하는 spring bloom의 특성을 잘 보여주고 있음. 그러나 mixing의 세기가 강해질 경우(NC02) spring bloom 형성시기의 한 달 이상 지연과 bloom 크기의 증가, 여름에 flagellate의 우점이 관찰됨. 또한 mixing의 세기가 강해질 경우 식물플랑크톤의 농도가 표층 부근에 비교적 높은 농도가 집중되어 나타남. NC03의 경우 NC01보다 flagellate 농도의 급격한 증가가 5월과 10월 경에 나타남. NC04의 경우에는 NC03의 경우보다 spring bloom 시기가 지연되었으나 bloom의 크기는 증가하였으며 flagellate의 농도는 7월에서 10월 사이에 높은 농도를 보여 summer bloom이 형성된 것을 보여줌.

3. 식물플랑크톤 성장에 대한 Fe의 영향

- NPZD 모델을 이용하여 겨울과 봄 동안 식물플랑크톤 성장은 혼합층 내의 빛에 의해서만 통제 된다고 가정(영양염은 충분하고 포식압은 일정하다고 가정)하여 모델에서 얻은 spring bloom 형성시기와 SeaWiFS로부터 관찰된 bloom 형성시기를 비교하였음. 그림 78은 B2 지역에서 황사가 없었던 1999년과 황사의 빈번한 경유가 있었던 2001년도에 모델에서 얻은 chlorophyll *a* 농도와 SeaWiFS chlorophyll *a* 농도 값을 비교한 것임. 모델의 chlorophyll *a* 농도는 영양염과 포식압에 의한 제한이 없으므로 이상적인 성장 곡선을 보여줌.

1999년에는 모델의 bloom 형성 시기와 SeaWiFS의 bloom 형성시기가 대체로 일치함. 그러나 2001년의 경우에는 모델의 bloom 형성시기보다 SeaWiFS의 bloom 형성시기가 약 한달 정도 빠르게 나타남. 이러한 차이는 이 시기에 동해를 경유한 황사에 의한 Fe의 유입에 의한 것으로 사료됨.

- Fe은 일반적으로 식물플랑크톤의 광합성에 조효소로서 중요한 역할을 하므로 식물플랑크톤이 이용 가능한 형태의 Fe이 공급될 경우에 식물플랑크톤은 빛의 이용 효율이 더 증가한다고 가정할 수 있음. 따라서 이러한 가정 조건에서 Fe이 공급될 경우 (+Fe)와 아닌 경우(-Fe)에 P-I curve의 기울기 값의 차이가 유발 될 것임. 또한 식물플랑크톤 세포 내의 C:N, C:Chlorophyll의 비에도 영향을 미칠 것임. 이를 Fe의 유입이 있을 경우와 Fe의 유입이 없는 일반적인 조건일 때와 구분하여, NPZD 모델을 이용하여 식물플랑크톤의 chlorophyll *a* 농도의 변화를 비교하였음.

1999년의 경우에는 동해에 황사에 의한 Fe의 유입이 없었던 해이므로 이 해의 값을 선정하여 모델의 실험을 수행하였음. 그림 79는 B2에서 P-I curve 기울기의 2배 증가 여부에 따른 혼합층 내의 식물플랑크톤과 질산염 농도의 시간에 따른 변동을 보여줌. Fe이 충분한 환경에서는 식물플랑크톤의 생체량 증가 및 bloom의 형성 시기가 빨라진 것을 알 수 있음. 또한 Fe이 공급된 경우에 혼합층 내의 질산염 농도가 식물플랑크톤에 의해서 더 빨리 감소하며 소모되는 것을 볼 수 있음.

제 5 절 향후 관측 방향과 연구 방향 제시

- 동해에는 생지화학 모델을 적용하기 위해 필수적인 관측 자료, 특히 영양염과 chlorophyll 농도와 같은 자료가 매우 부족한 상황이어서(그림 80) 모델의 초기값 설정과 검증이 현 상황에서는 한계가 있음.

- 최근 EAST 프로그램이 시작되면서 동해 남쪽 해역에서 시계열 자료의 확보를 위한 관측이 수행되고 있음(그림 81). 향후 이외에도 다양한 해양관측 프로그램의 수행을 통하여 적어도 동해 남·북 두 지역에서 생태 인자들의 시계열 자료가 확보되어야 할 것임.
- 그림 82는 본 연구 결과를 토대로 동해에서 고려되어야 할 주요 생태환경 인자들을 보여줌. 동해는 다양한 물리, 화학, 생물학적 인자들이 밀접하게 연관되어 있음. 특히 이전의 연구에서는 고려되지 않았던 황사에 의한 Fe과 같은 영양염 공급의 중요성이 본 연구를 통해 제시되었음. 이러한 특성을 모델에 고려하기 위해서는 해수 중 Fe에 관한 정보와 대기로부터 공급되는 영양염의 정보 등이 필수적임. 향후 관측에서는 이와 관련된 측정 항목의 추가가 절실함.
- 본 연구에서는 box 모델과 1차원의 모델을 적용하여 동해 남·북 지역의 생태 특성 재현에 성공하였음. 그러나 동해는 극전선과 Primorye coast 지역 등, 다양한 생태 환경특성을 지닌 지역으로 구분됨. 따라서 동해의 특성 모사를 위해서는 궁극적으로 3차원 모델의 개발이 필요함. 그러나 현재 모델적용에 필요한 자료의 제약이 크므로 북해에서 개발된 ERSEM(그림 83) 모델의 경우처럼 동해를 생태 특성에 따라서 여러 개의 지역(box)으로 구분하고 각 지역을 수심에 대해서도 여러 개의 box로 구분하는 구조로 이루어진 모델의 적용은 현재의 문제 해결을 위한 대안이 될 수 있을 것임.

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표 달성도

연구내용		연구목표 달성도										%
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
D/B의 수집 및 생태환경 인자의 계량화	동해 현장관측											100
	인공위성 자료 수집 및 계량화											100
	기존의 관측 자료와 문헌 자료 수집 및 수집한 자료의 계량화											100
동해 생태환경 인자의 변동성	생태환경 인자의 시·공간 변동성											100
	물리적 요소가 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향											100
	황사가 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향											100
동해 생태환경 특성을 고려한 모델 적용 및 모델 최적화	동해의 특성을 고려한 모델의 적용 및 모델 최적화											100
	계량화된 생태인자의 모델 적용											100
모델 응용을 통한 동해 생태계 주요 현상 연구	동해 생태환경 특성 재현											100
	기후변화가 동해 생태환경에 미치는 영향											100
	Fe이 동해 식물플랑크톤 성장에 미치는 영향											100

제 2 절 관련분야의 기여도

- 동해 생지화학 인자들의 D/B를 체계적으로 구축함으로써 동해 생태연구에 필요한 data 제공
- 동해는 spring과 fall bloom 기간동안 관측 자료가 매우 부족한 실정임. 본 연구를 통해 이 기간동안 현장관측을 수행하여 부족한 자료 제공 및 bloom 기작 이해 증진
- 생지화학 인자들의 계량화를 통해 동해에 적용되는 모델에 필요한 초기 입력 자료 및 모델 검증에 필요한 비교 자료의 제공
- 동해의 생지화학적 특성 규명을 통해 향후 동해에 적합한 모델 개발 방향 제시
- 황사에 의한 Fe의 공급이 동해 생태계에 미칠 수 있는 영향에 대해 규명함으로써 동해와 같은 marginal sea에서 연구자들에 의해 고려되지 않았던 Fe의 중요성을 전세계의 과학자들에게 인식 및 관련 연구의 활성화에 기여
- 동해의 생지화학적 특성 규명과 모델 개발에 필요한 시계열 자료의 필요성을 부각함으로써 향후 이 지역에서의 관측 항목과 방향 제시

제 3 절 기대 효과

- 생지화학 모델에서 분석된 주요 환경 요인과 일차 생산량 등을 광역 생태모델에 접목함으로써 동해 주요 상업 어종의 어장 파악 시도
- 생지화학 모델로부터 얻어지는 광역 생태 자료와 주요 상업 어종의 과거 생산량과의 상관관계 모델링을 통한 자원량 예측
- 환경 변화가 해양 생태계내 생물자원에 광역적으로 미치는 영향 평가
- 환경 변화요인을 고려한 신개념의 수산 자원관리 도입
- 해양학, 수산학, 환경학을 망라한 다학제간의 총체적 연구 접근 방법 분야 개척
- 기초학문과 응용학문간의 접목을 통한 기초 학문의 활성화
- 모델을 통한 미래지향적 동해 생태계 관리 방향 제시
- 해양과학 및 수산과학 학문 후속세대에게 신개념의 연구 방향 및 비전 제시
- 동해 생태계 관련 러시아, 일본과 공동 연구를 수행할 수 있는 기틀을 마련하고 연구의 중추적, 선도적 역할을 수행할 수 있는 역량 강화

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

- 총 3년의 연구기간동안 선행연구에 이어서 D/B를 구축하였으나, 여전히 동해 생태 특성의 이해 및 동해에 적합한 모델의 개발을 위해서는 현존하는 자료가 부족함. 따라서 연속적인 시계열 자료 획득을 위한 정기적인 현장관측 프로그램 혹은 시스템의 구축이 필요함.
- 인공위성에서 산출된 생태인자에 관한 정보는 동해 생태특성 이해와 모델 재현에 필요한 관측 자료보다 시·공간의 제한이 비교적 작음. 따라서 인공위성으로 직접적인 측정이 어려운 영양염 농도와 같은 인자들의 정보를 위성 자료를 활용하여 산출할 수 있는 방안 모색이 필요함.
- 황사에 의해 공급되는 Fe의 중요성이 규명되었으나 이러한 특성을 모델에 적용하기 위해서는 Fe의 물리·화학·생물학적인 process의 이해를 위한 연구가 필요함.
- 본 연구에서는 1차원과 box 모델이 적용되었음. 그러나 이러한 모델들은 sea ice, 극전선, eddy 등 다양한 물리환경으로 구성되어 있는 동해 생태 특성을 재현하기에는 한계가 있음. 따라서 동해에서 이용 가능한 자료의 현황과 생태특성을 고려하여 ERSEM과 같은 모델의 개발이 필요함.

제 2 절 연구결과 활용 계획

- 구축된 D/B의 공개 통해 다양한 분야의 연구자들과의 자료 공유
- 생지화학 모델을 이용하여 동해 생태환경의 장기 변동 예측에 활용
- 통합적 해양자원 관리 시스템 구축에 활용
 - 생물 생산량 추정을 통해 탄소순환에 있어서 해양 식물플랑크톤의 기여도 분석
 - 생지화학 모델을 바탕으로 하는 수산 자원 관리
 - 생지화학 모델을 바탕으로 한 어장의 예측
- 최근 사막화에 따른 빈번한 황사의 발생, 지구 온난화 등 환경문제와 관련된 정책 결정에 필요한 기초 자료로 활용

제 6 장 참고 문헌

참고 문헌

- Chiba, S. and T. Saino (2002), Interdecadal change in the upper water column environmental and spring diatom community structure in the Japan Sea: an early summer hypothesis, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 231, 23-35.
- D'Ortenzio, F., D. Iudicone, C. B. Montegut, P. Testor, D. Antoine, S. Marullo, R. Santoleri, and G. Madec (2005), Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12605, doi:10.1029/2005GL0022463.
- Darменова, K., I. N. Sokolik, and A. Darменов (2005), Characterization of east Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data, *J. Geophys. Res.*, 110, D02204, doi:10.1029/2004JD004842.
- Doney, S. C. D. M. Glover, and R. G. Najjar (1996), A new coupled, one-dimensional biological-physical model for the upper ocean: Applications to the JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) site, *Deep-Sea Res. II*, 43, 591-624.
- Evans, G. T. and J. S. Parslow (1985), A model of annual plankton cycles. *Biol. Oceanogr.* 3, 327-347.
- Kim, H.-C., S. Yoo, and I. S. Oh (2006), Relationship between phytoplankton bloom and wind stress in the sub-polar frontal area of the Japan/East Sea, *J. Mar.* 10.1016/j.jmarsys.2006.05.016.
- Kim, S. W., I. Yutaka, and A. Tomonori (2003), Seasonal variation of phytoplankton in the East Sea using a surface mixed layer ecosystem model, *Journal of Korean Fihseries Society*, 36(2), 178-186.
- Kim, S. W., S. I. Saitoh, J. Ishizaka, Y. Isoda, and M. Kishino (2000), Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images, *J. Oceanogra.*, 56, 527-538.

- Lee J. Y. et al., (2002), The PROQWM physical-biological model with benthic-pelagic coupling applied to the northern North Sea, *J. Sea Res.*, 48, 287-331.
- Martin, S., and M. Kawase (1998), The southern flux of sea ice in the Tatarskiy Strait, Japan Sea and the generation of the Liman Current. *J. Mar. Res.*, 56, 141-155.
- Moore, C. M., M. M. Mills, A. Milne, R. Langolis, E. P. Achterberg, K. Lochte, R. J. Geider, and J. L. Roche (2006), Iron limits primary productivity during spring bloom development in the central North Atlantic, *Global Change Biology*, 12, 626-634.
- Sverdrup, H. U. (1953), On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 18, 287-295.
- Weaver, A., and P. Courtier (2001), Correlation modeling on the sphere using a generalized diffusion equation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 127, 1815-1846.
- Yamada, K., J. Ishizaka., S. Yoo, H. C. Kim, and S. Chiba (2004), Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East (JES), *Prog. Oceanogr.*, 61, 193-211.

연구 관련 web pages

1. Software

- Ocean Data View (ODV): <http://odv.awi.de>

2. Data center

- National oceanographic Data Center (NODC): <http://www.nodc.noaa.gov/>
- Korea Oceanographic Data Center (KODC): <http://kodc2.nfrdi.re.kr:8001/home/kor/main/index.php>
- Japan Oceanographic Data Center (JODC): <http://www.jodc.go.jp/>
- 기상청: http://www.kma.go.kr/dust/dust_01_02.jsp

3. Satellite data

- Ocean color: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
- SST: <http://podaac-www.jpl.nasa.gov/sst/>

- Sea ice: <http://nsidc.org/data/seaice/>
- Sea wind: http://www.ssmi.com/qscat/qscat_browse.html
http://www.ssmi.com/ssmi/ssmi_description.html
- Aerosol index: <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>
- Precipitation: <http://precip.gsfc.nasa.gov/index.html>

4. Model

- ERSEM: <http://web.pml.ac.uk/ecomodels/ersm.htm>
- COHERENS: <http://www.mumm.ac.be/~patrick/mast/>

5. Research project

- EAST: <http://east-1.snu.ac.kr/index.php>
- PICES: <http://www.pices.int/default.aspx>
- GLOBEC: <http://www.globec.org/>
- OBIS: <http://www.iobis.org/>
- IPCC: <http://www.ipcc.ch/>

부록 1. 그림과 표

The East Sea, May 2004 Cruise

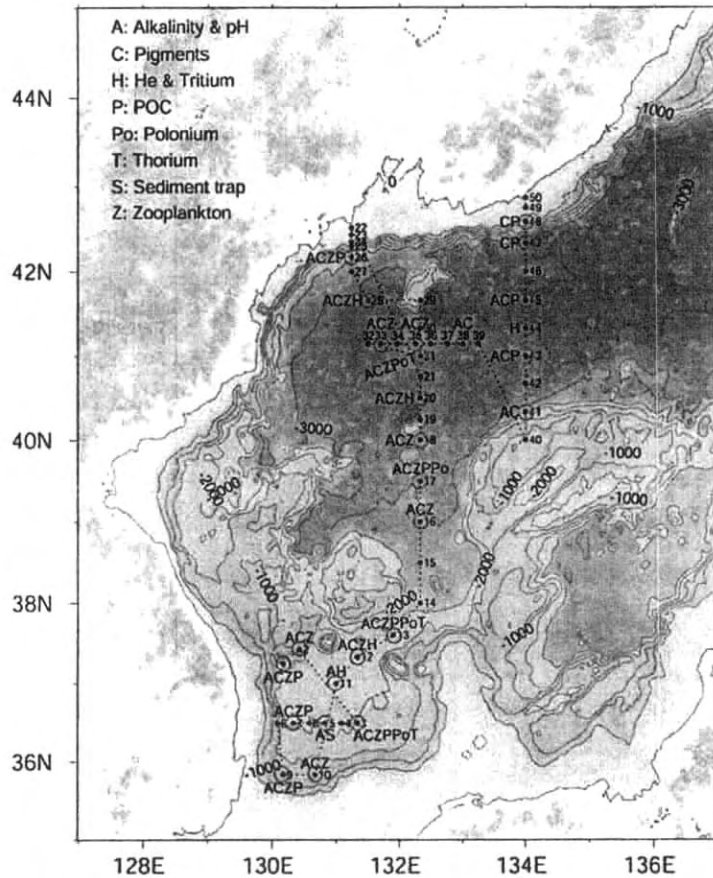


그림 1. 2004년 5월 7일부터 5월 18일까지 러시아 연구선을 이용하여 수행한 현장관측 정점 및 관측 항목



그림 2. 2004년 5월 현장관측에 사용된 동물플랑크톤 네트(좌)와 sediment trap(우)

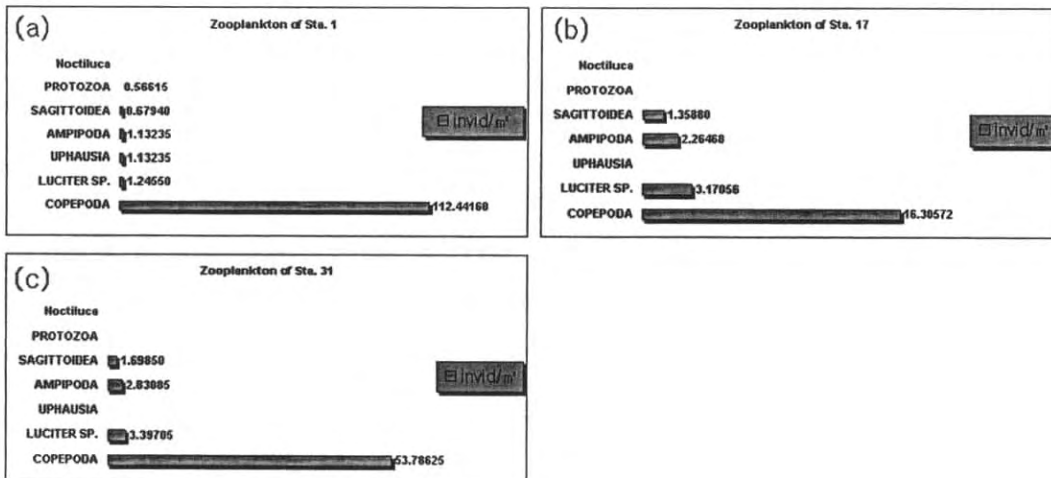


그림 3. 관측 기간동안 채집한 각 정점 중 정점 1(동해 남부지역), 정점 17(극 전선 형성 지역)과 정점 31(동해 북부지역, eddy 형성 지역)에서 채집한 동물플랑크톤의 구성분포. 요각류(Copepoda)가 90% 이상으로 우점하였음.

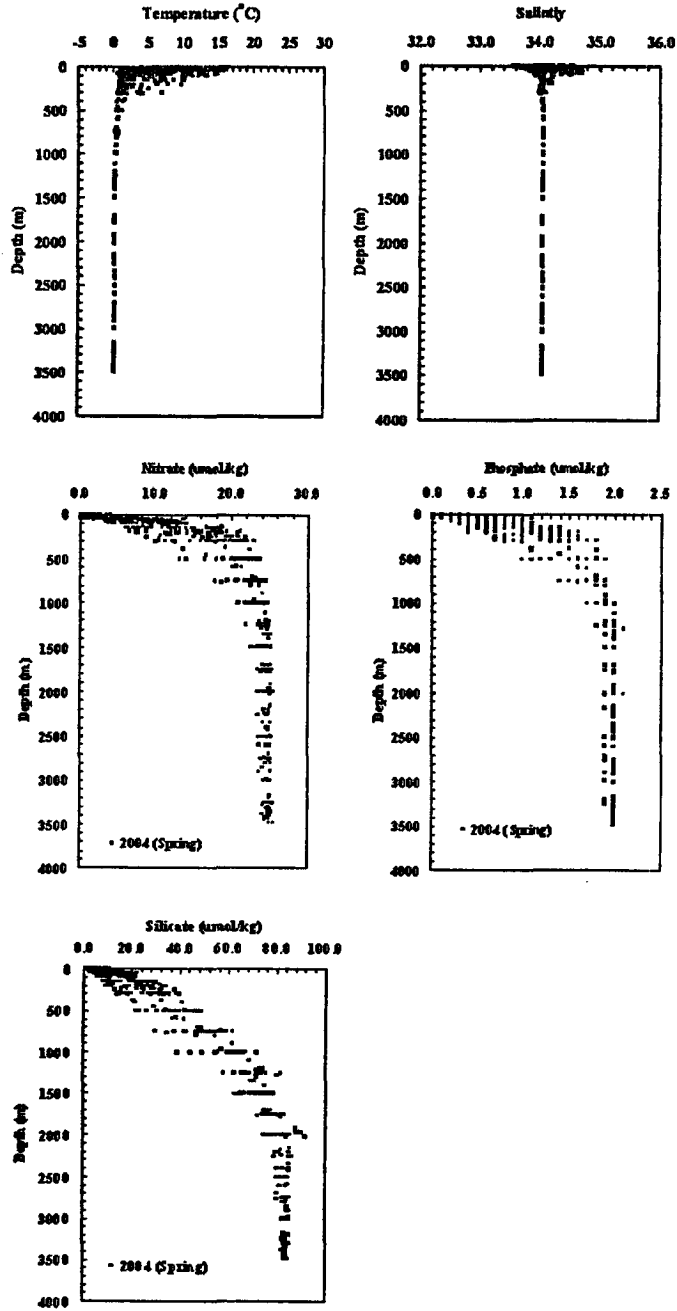


그림 4. 2004년 5월 관측 기간 동안 관측한 정점에서 수온, 염분 영양염(질산염, 인산염, 규산염)의 수직 profile

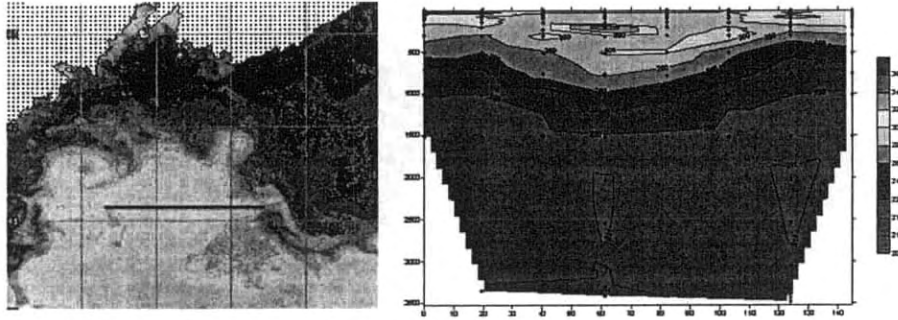


그림 5. 관측 기간 중 eddy가 발생한 지역(좌)에서 관측한 산소의 수직 profile(우)

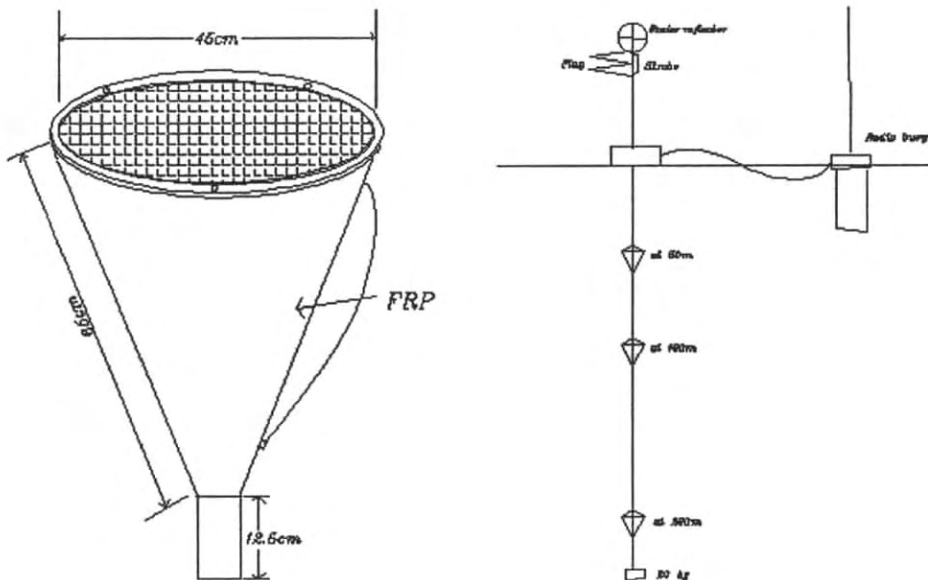


그림 6. 본 연구를 위해 고안된 modified Soutar trap(좌)과 유광층 밖으로 탈출하는 falling material 포획을 위해 제작된 trap array(우)의 모형도

[Period: 2005. 10. 15~10.27]

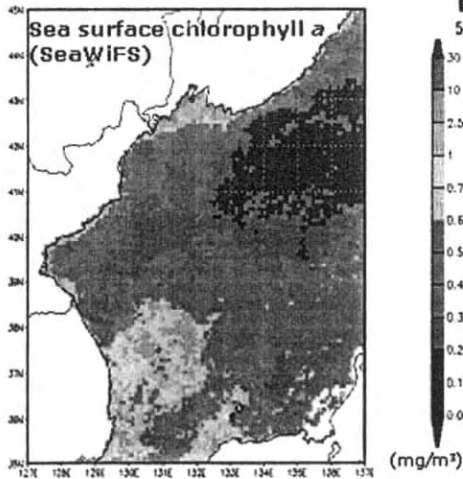
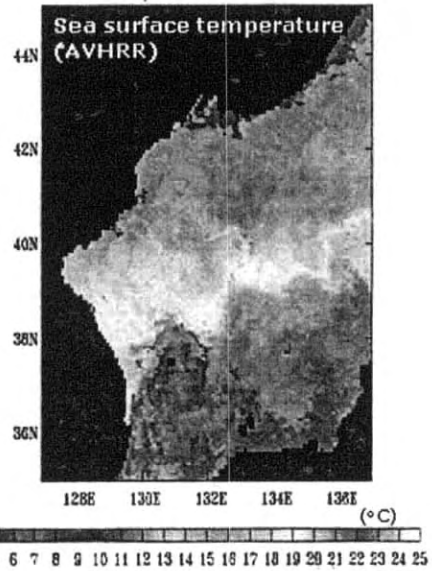
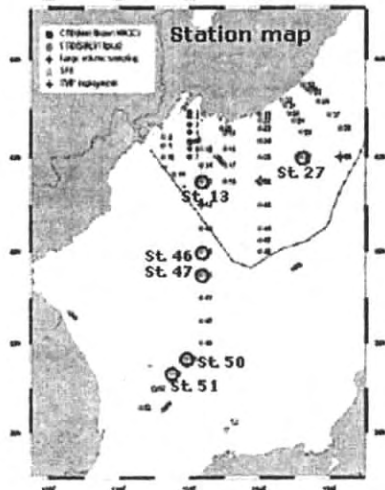


그림 7. 2005년 10월 15일부터 27일 동안 동해 현장 관측 정점 및 관측 시기동안 AVHRR과 SeaWiFS로부터 얻은 SST와 chlorophyll a 농도의 분포

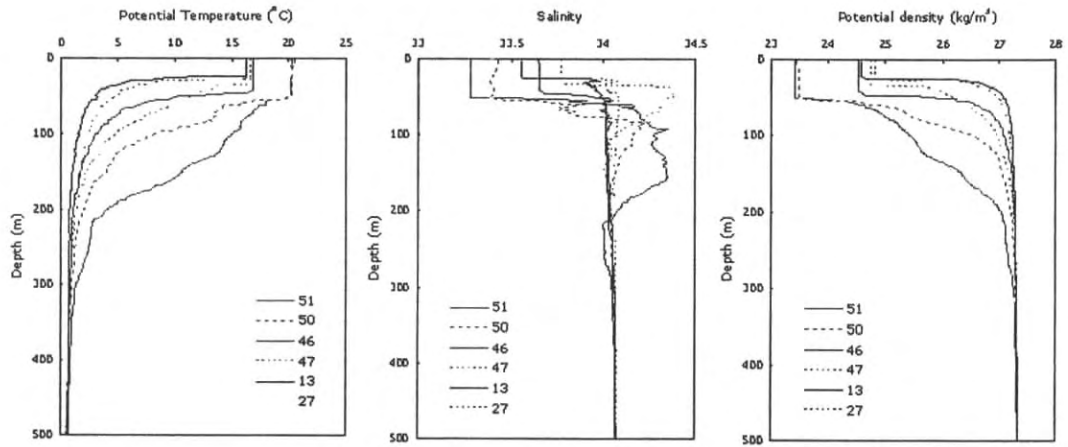


그림 8. 2005년 관측 기간동안 극전선 이남에 위치한 정점 (St. 50, 51), 이북에 위치한 정점 (St. 13, 27), 그리고 극전선 (St. 46, 47)에 위치한 정점에서 CTD로 관측한 수온, 염분, 그리고 이로부터 구한 밀도의 수직 분포

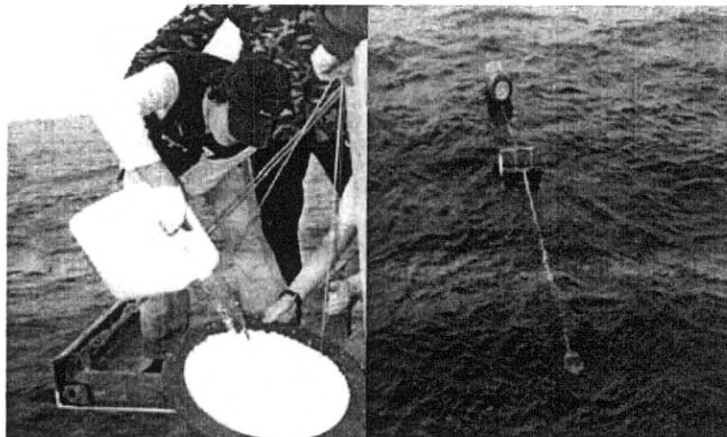


그림 9. 관측 기간 동안 동해 (고리)에서 modified Soutar Trap을 투하하는 모습.

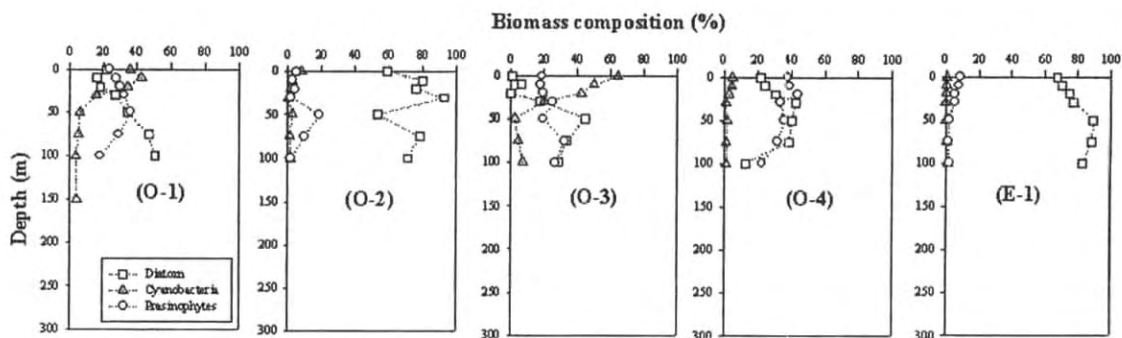


그림 10. HPLC 분석으로 구한 2004년 5월 동해의 식물플랑크톤의 biomass

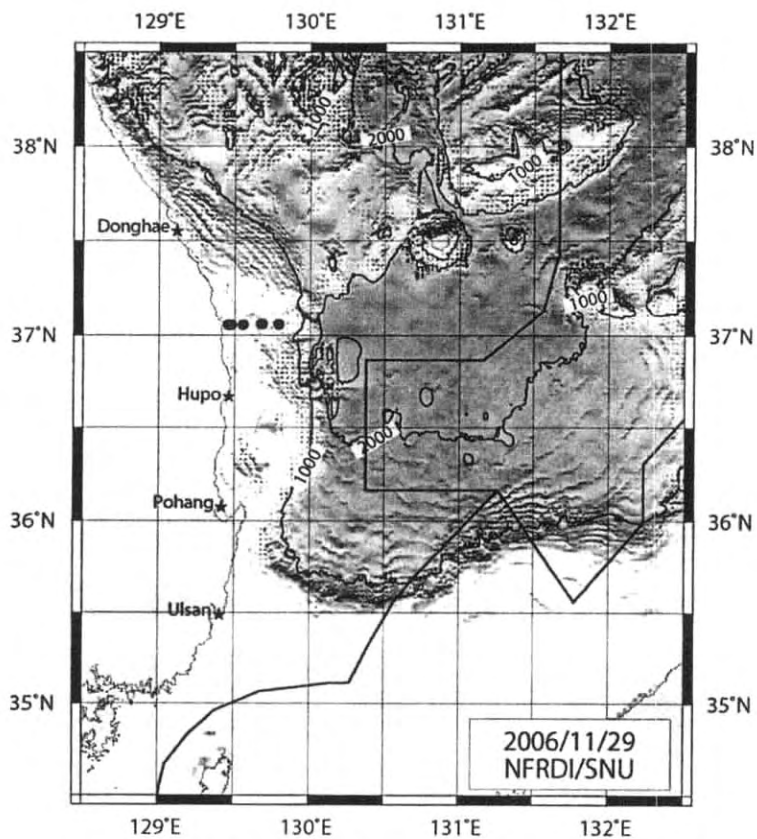


그림 11. 2006년 11월 29일에 동해 남부 해역에서 실시한 현장 관측 정점들.

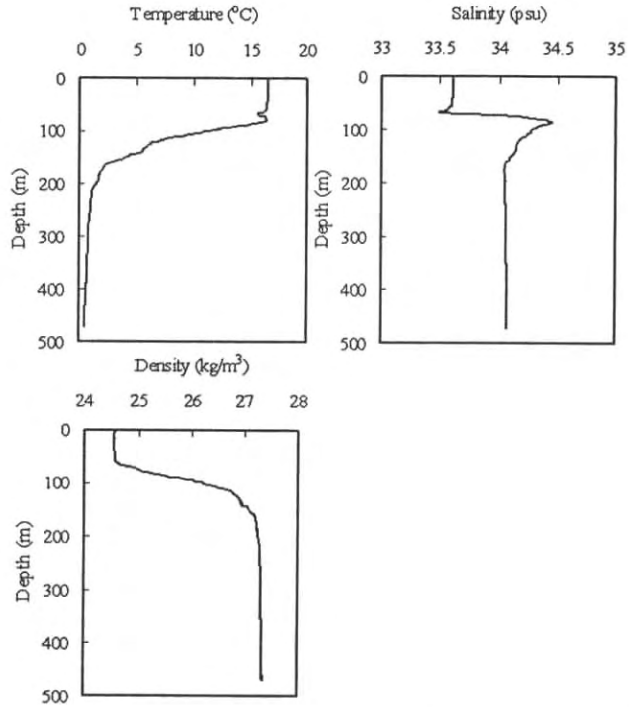


그림 12. 11월 29일 관측 정점 중에서 연안에서 4번째 정점에서 CTD로부터 측정된 수온, 연분, 밀도의 수직 profile

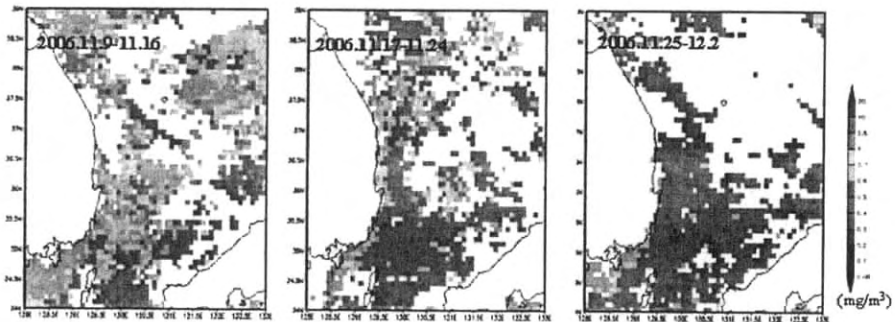


그림 13. SeaWiFS 8-day image로부터 얻은 2006년 11월 9일부터 12월 2일 동안의 표층 chlorophyll a의 농도

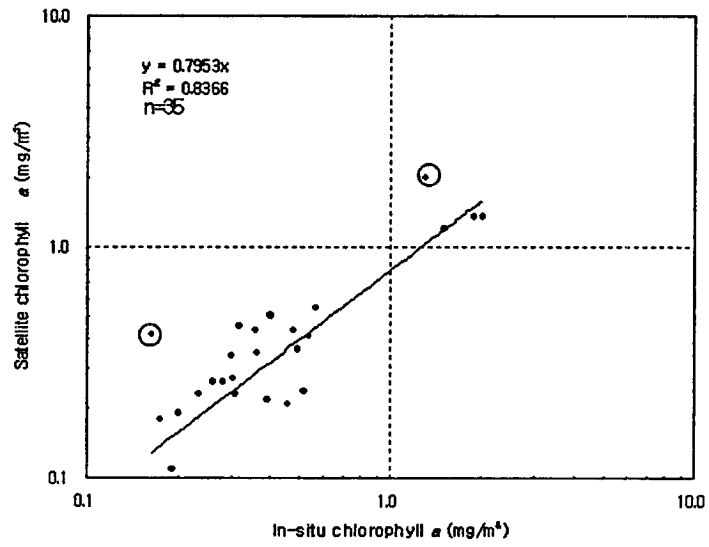


그림 14. 현장관측이 이루어진 시각으로부터 4시간 이내의 SeaWiFS Level 2의 4km 해상도 자료와 현장 관측 자료의 비교

2001. March-May, 46-47N/140-141E

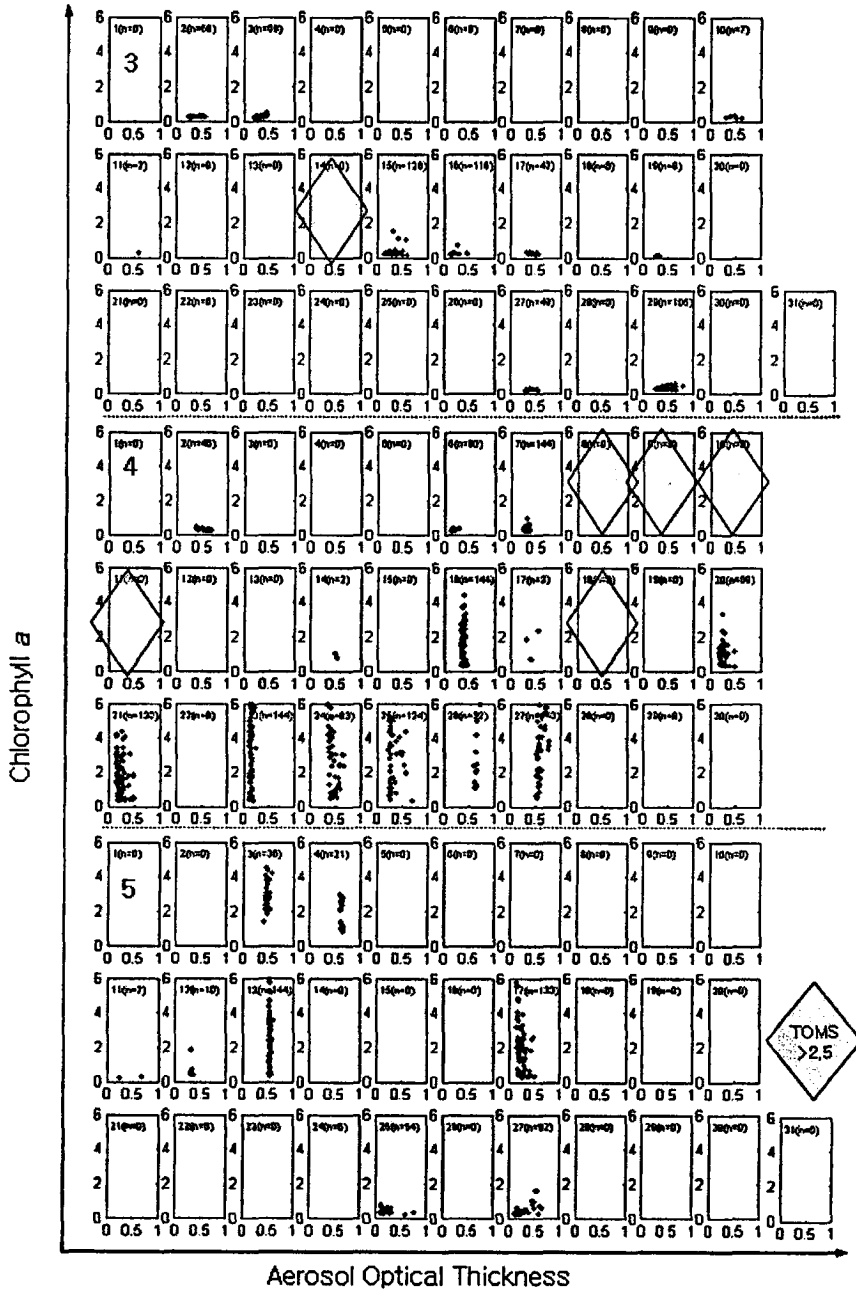


그림 15. 2001년 3월부터 5월동안 eastern Japan Basin에서 AOT와 chlorophyll a 농도의 상관관계와 중국 고비사막에서 기원하는 황사의 이 지역의 경유 시기

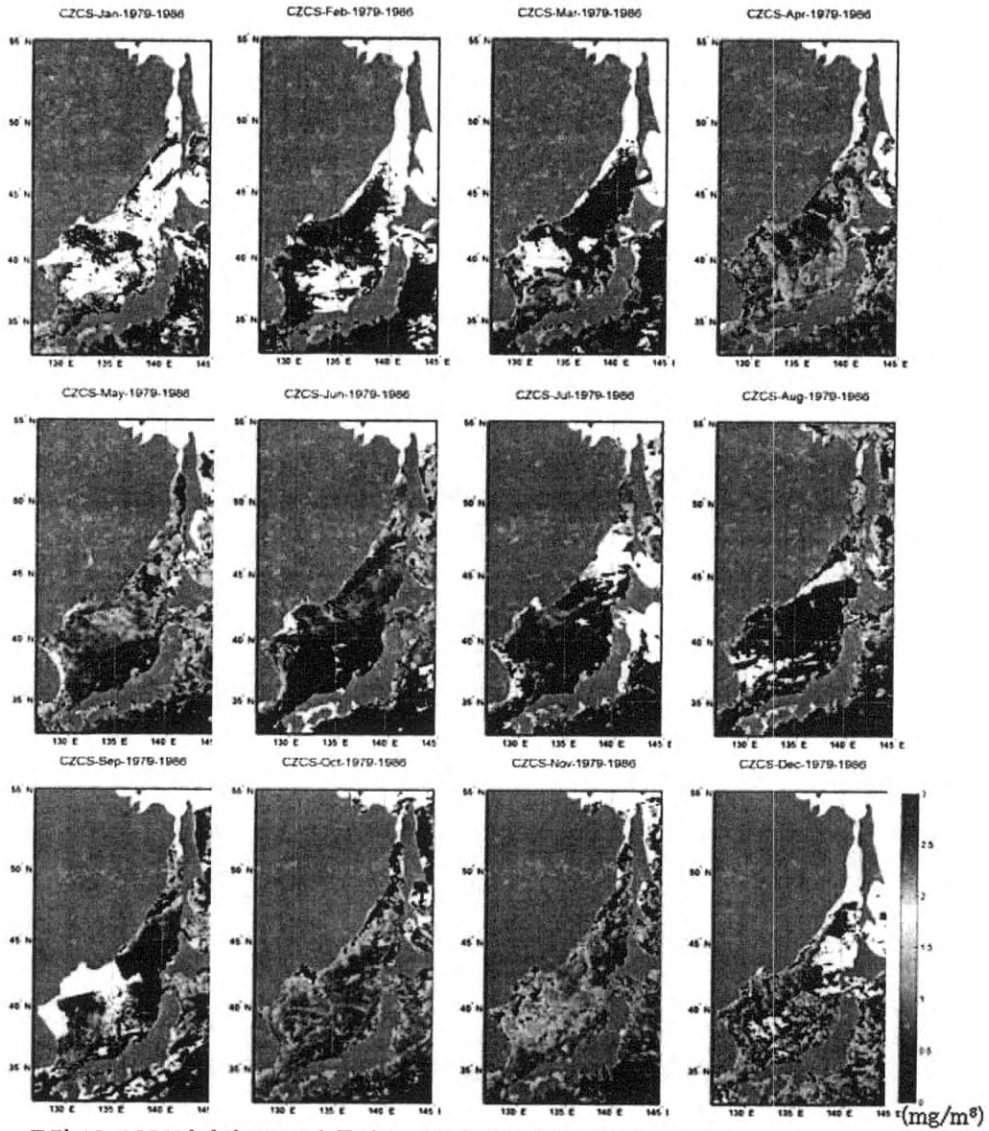


그림 16. 1978년에서 1986년 동안 CZCS의 자료에서 산출된 climatological monthly chlorophyll *a* concentration의 공간 분포

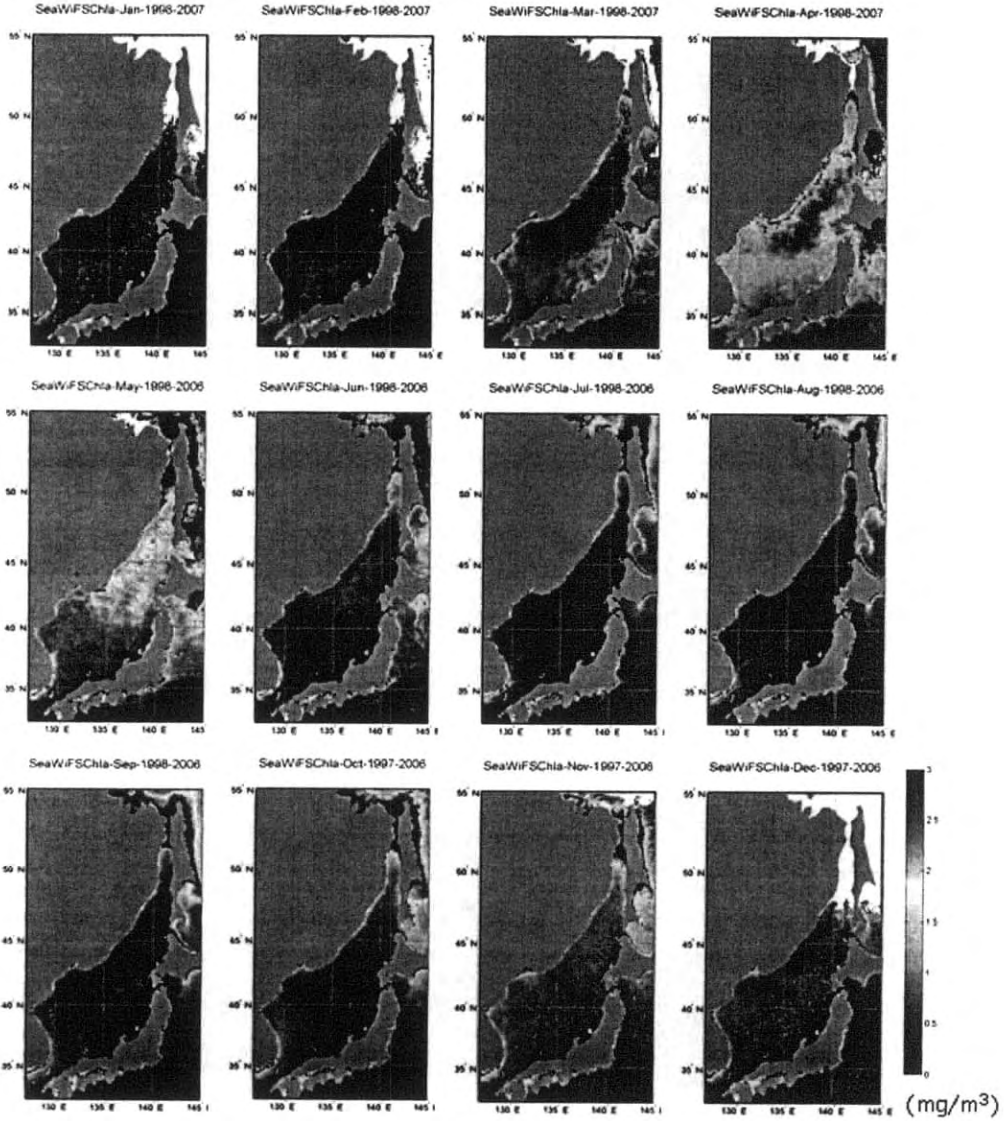


그림 17. 1997년에서 2007년 동안 SeaWiFS의 자료에서 산출된 climatological monthly chlorophyll a concentration의 공간 분포

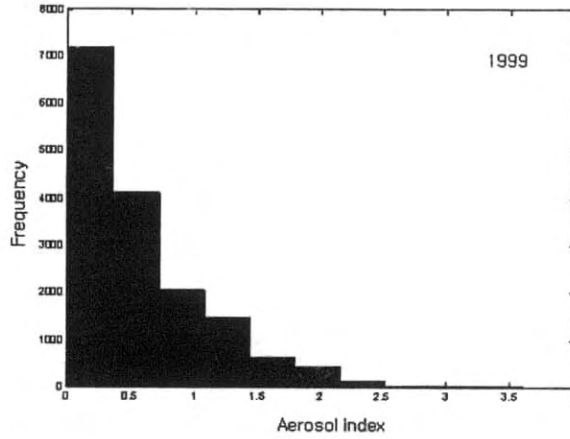


그림 18. 1999년 1월부터 6월동안 aerosol indices의 frequency

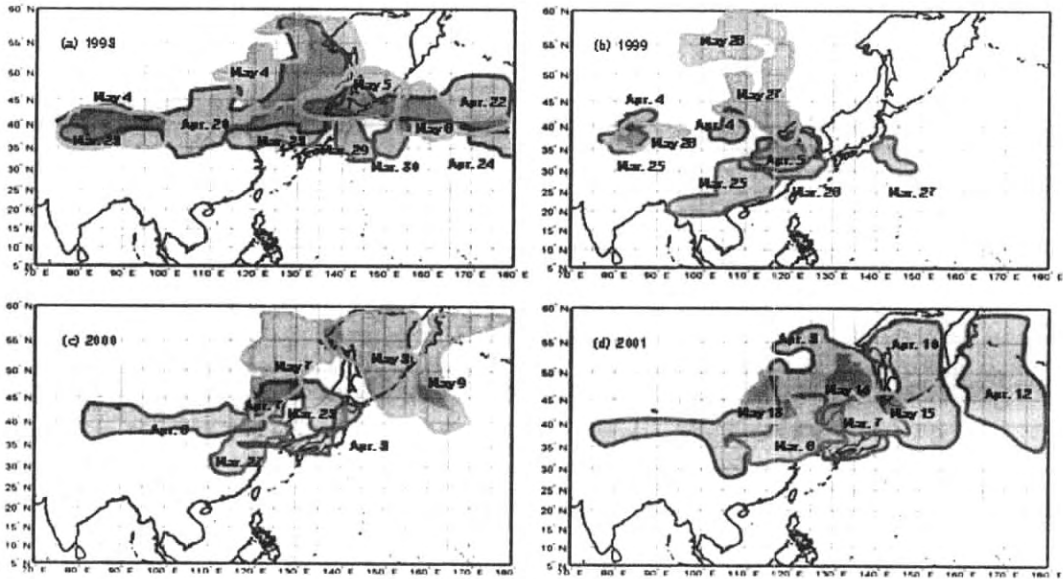


그림 19. 1998년부터 2001년 동안 3월부터 5월 사이에 황사가 동해를 경유하는 시기와 경로

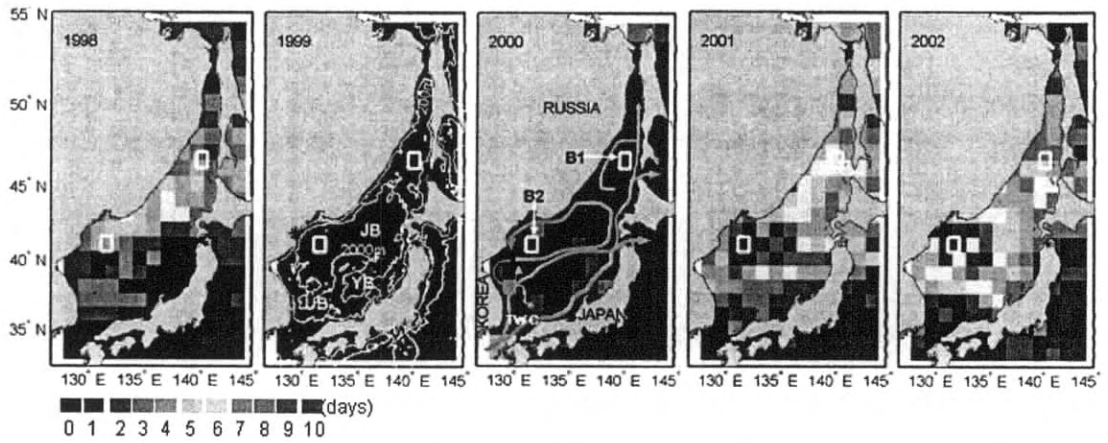


그림 20. 1998년부터 2002년 동안 3월부터 5월 사이에 황사가 동해 각 지역을 경유한 날의 횟수

36-37°N / 131-132°E

46-47°N / 138-139°E

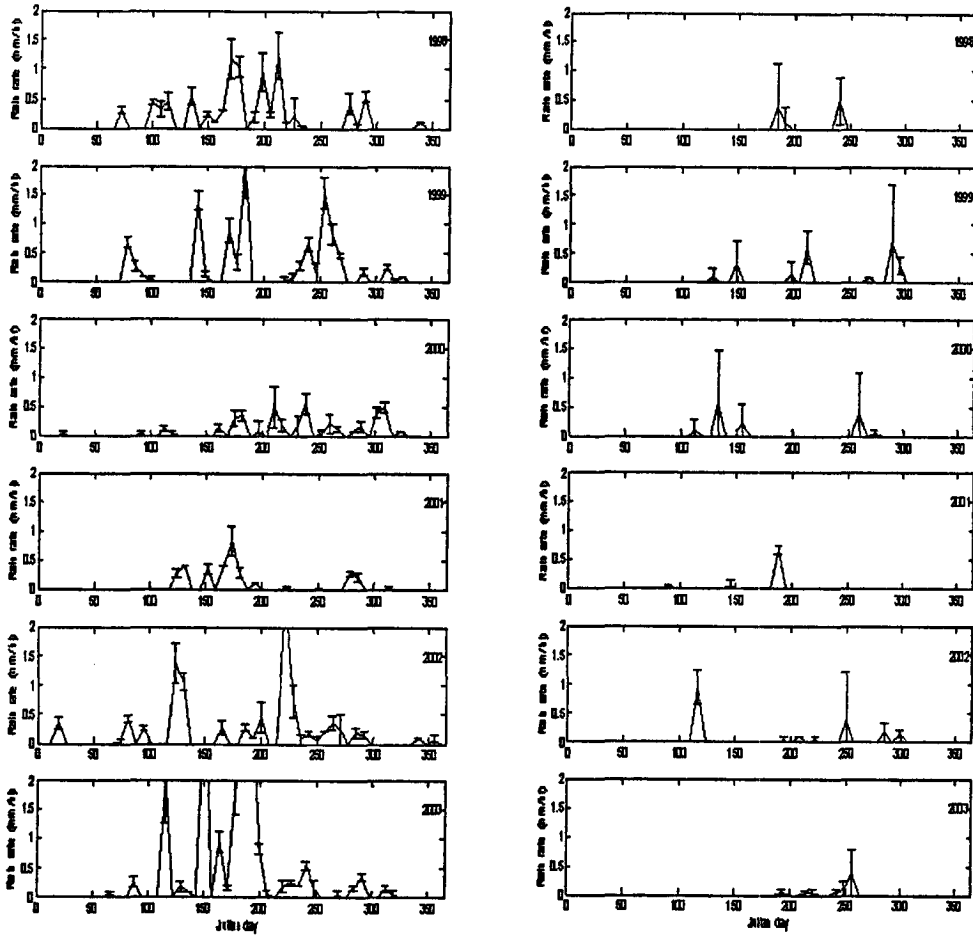


그림 21. SSM/I의 weekly 자료에서 산출한 1998년~2003년 동안 rain rate, error bar는 standard deviation을 나타냄.

January 1979-December 2005,
Precipitation rate (unit: mm/d)

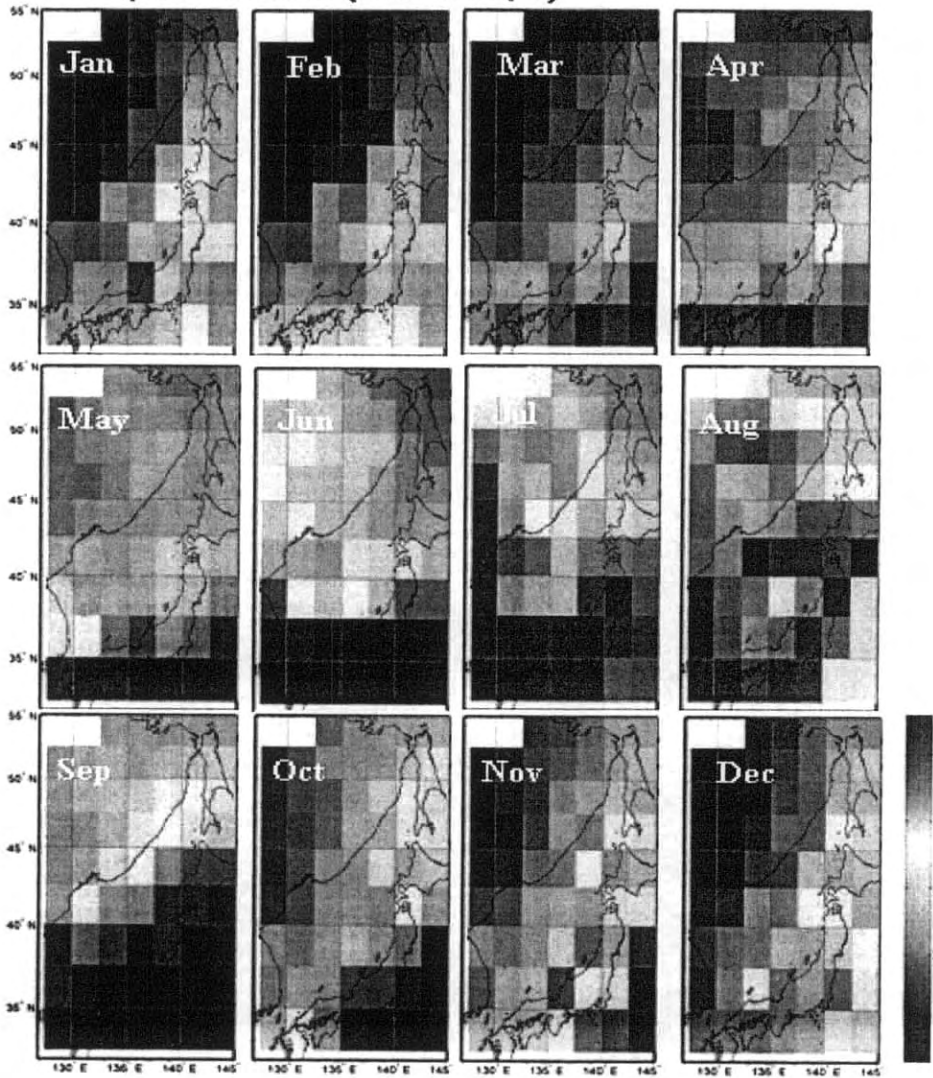


그림 22. GPCP version2로부터 1979년 1월부터 2005년 12월동안 수집한 precipitation rate에서 산출한 월별 공간 분포

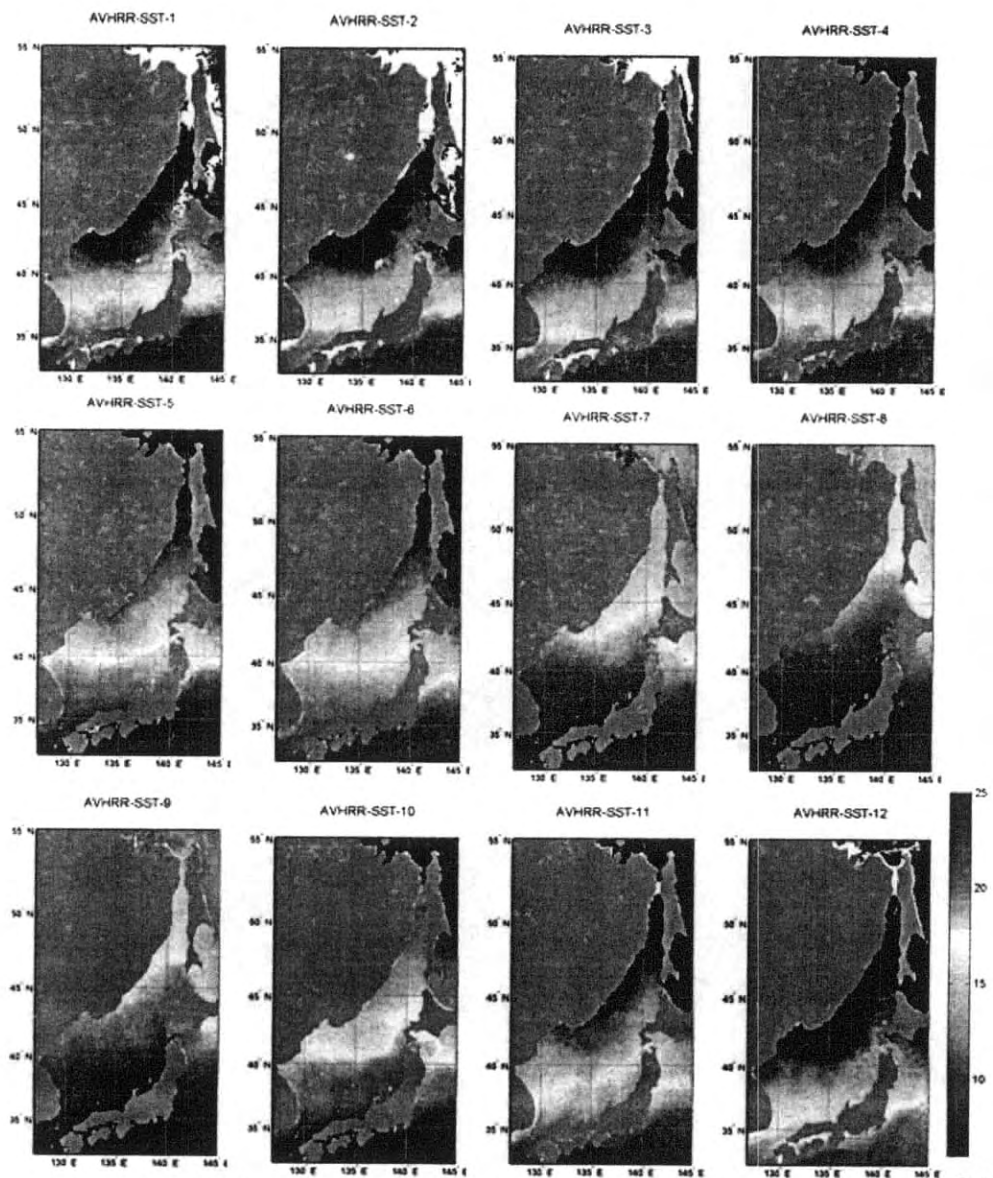


그림 23. 1997년부터 2006년 동안 수집된 AVHRR의 version 5.0의 자료에서 산출한 월별 SST 분포 (°C)

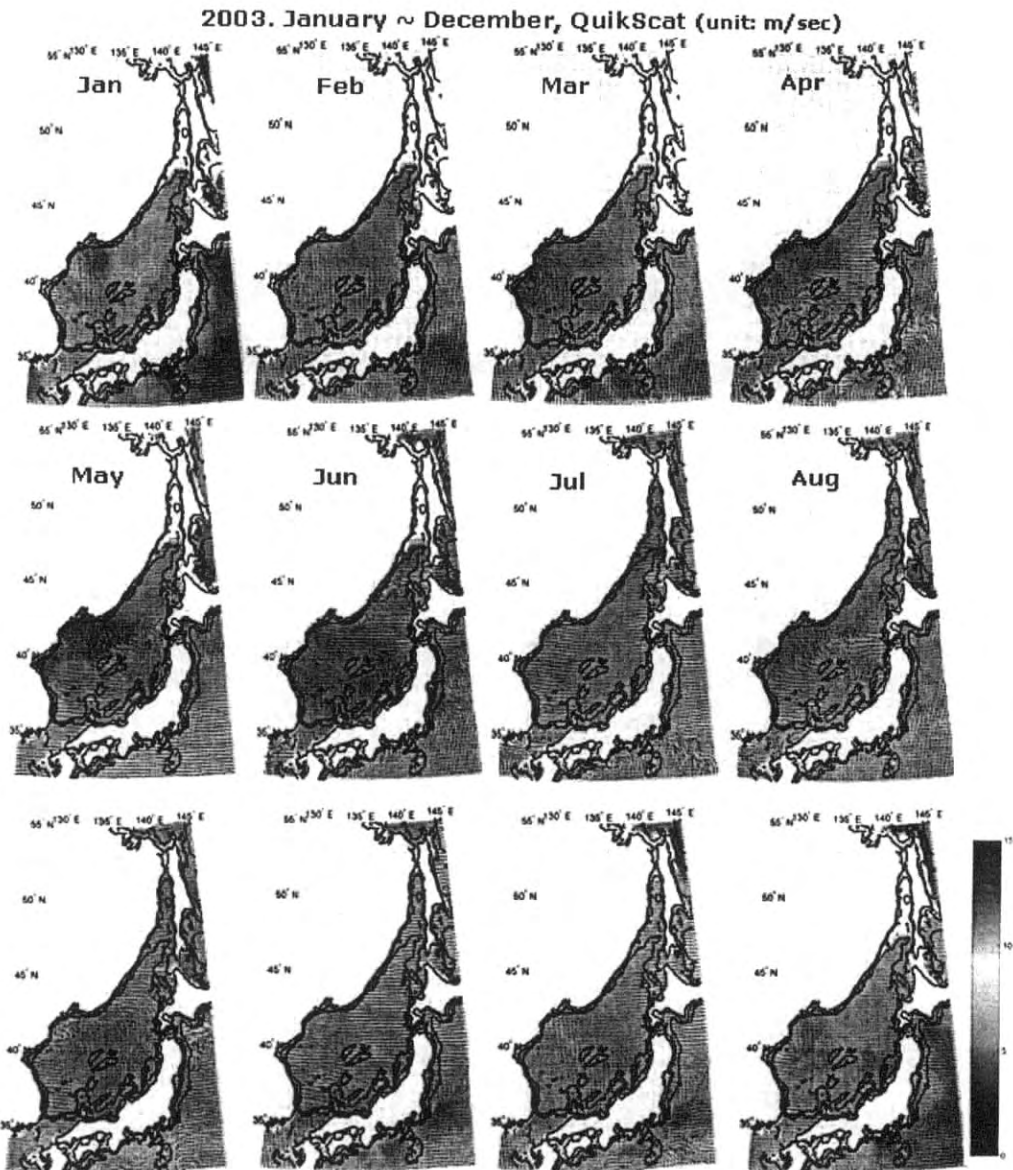


그림 24. Qscat의 일별 바람자료에서 산출한 2003년도 월별 wind speed와 wind direction의 공간 분포

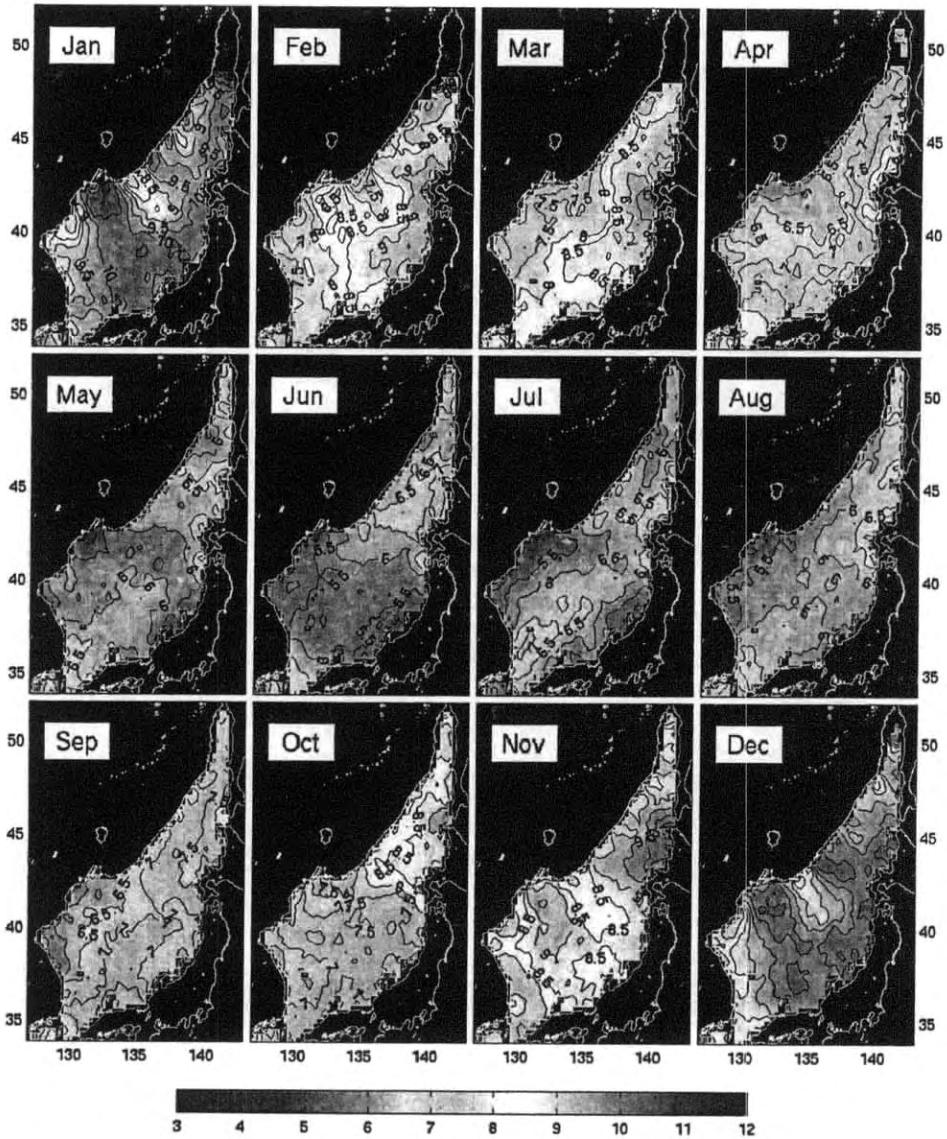


그림 25. 1998년부터 2003년까지 QuikScat 바람자료로부터 얻은 월별 wind speed의 분포도

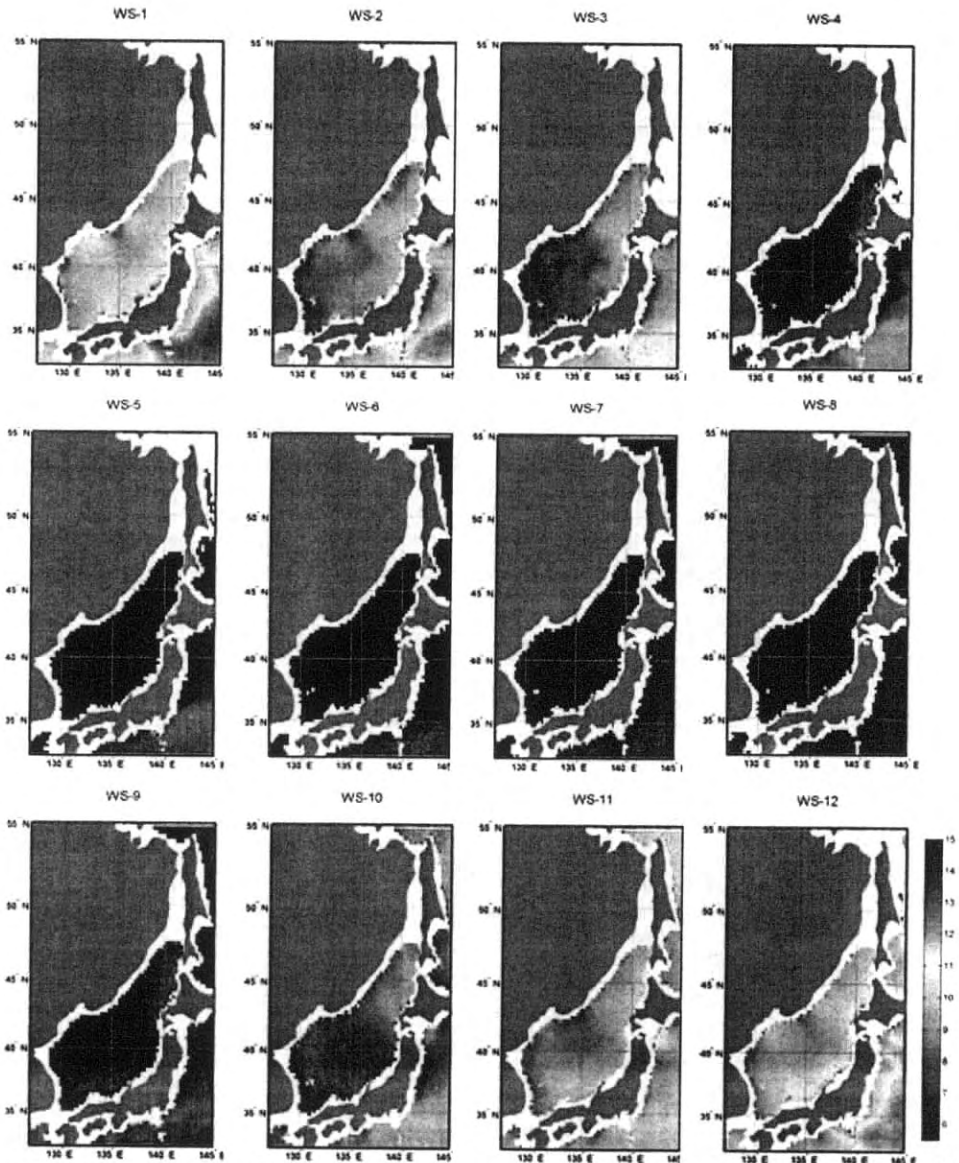


그림 26. 1997년부터 2007년까지 수집된 SSM/I 자료를 이용하여 산출한 월별 wind speed의 분포. (m/s)

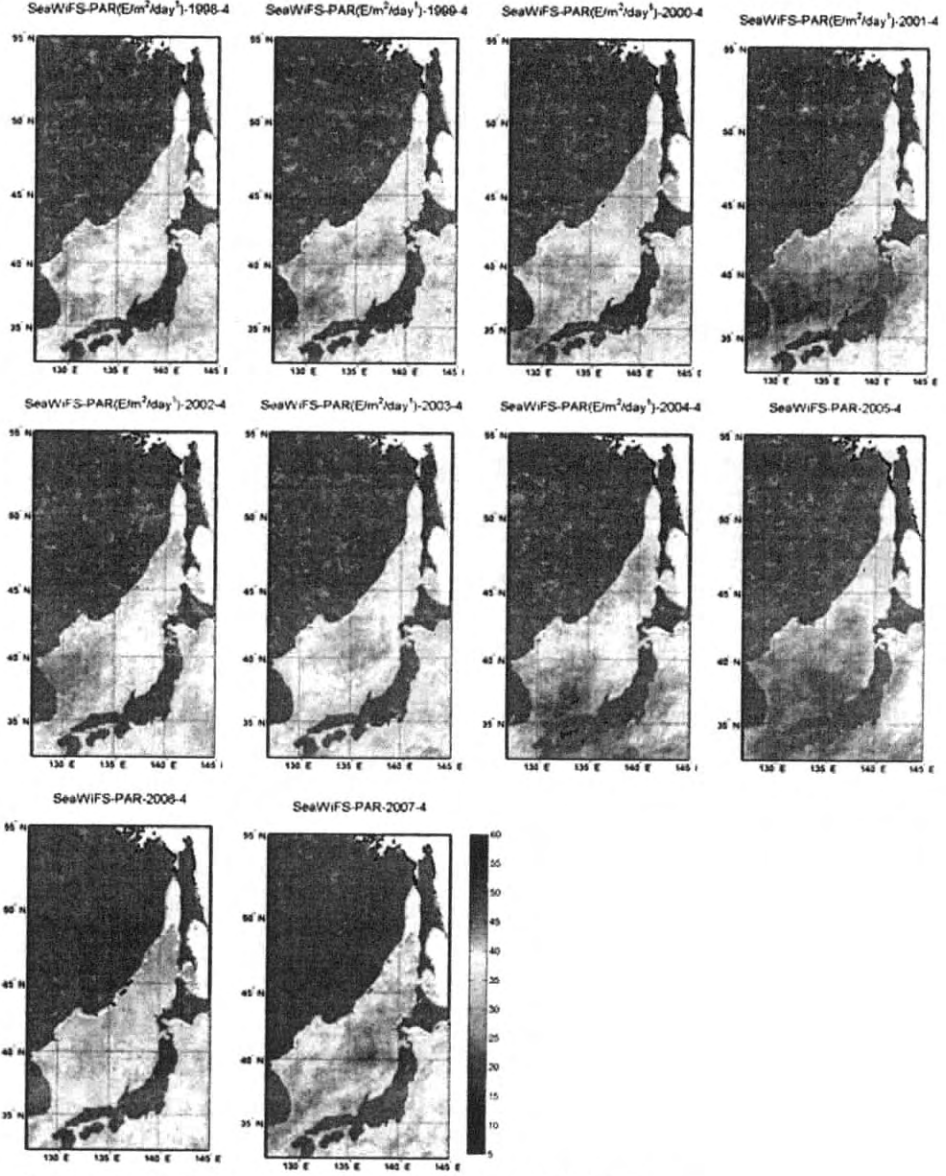


그림 27-1. SeaWiFS에서 얻은 PAR의 4월의 매년 공간 분포

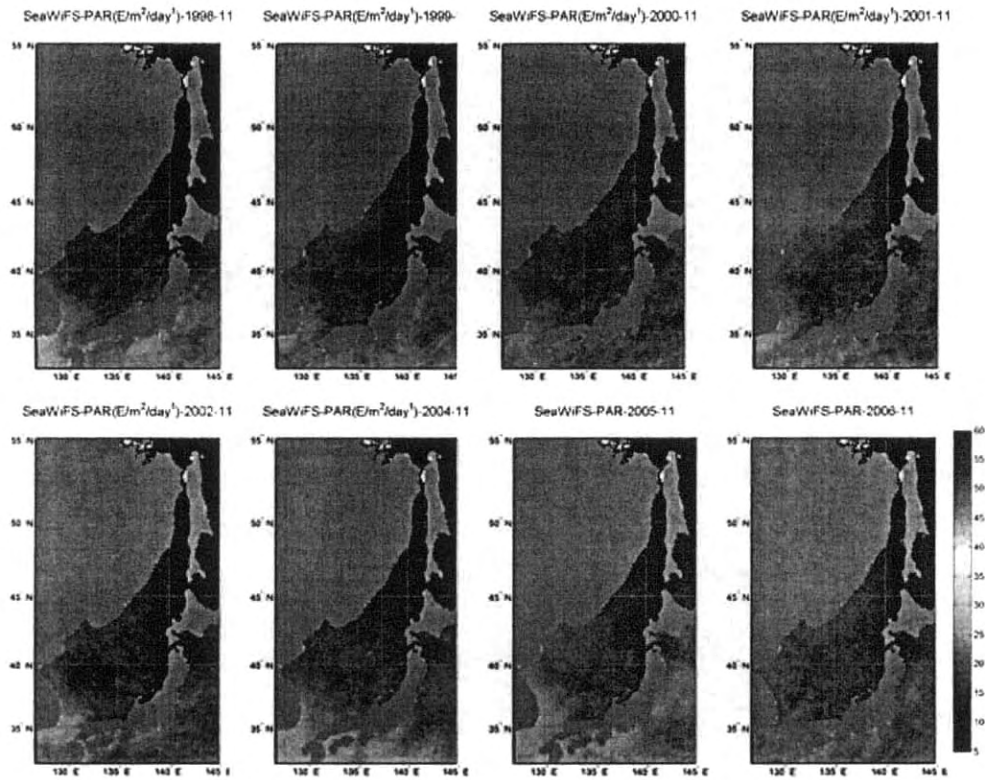


그림 27-2. SeaWiFS에서 얻은 PAR의 11월의 매년 공간 분포

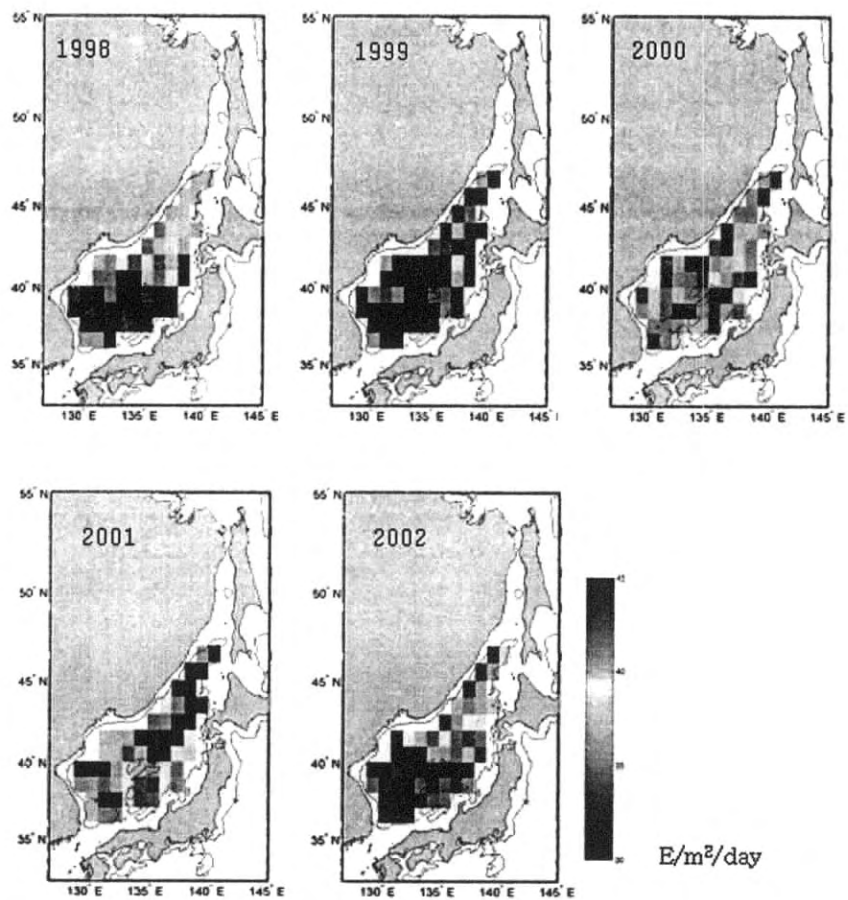


그림 28. 1998년부터 2002년 동안에 spring bloom이 형성 될 때의 PAR의 공간 분포.

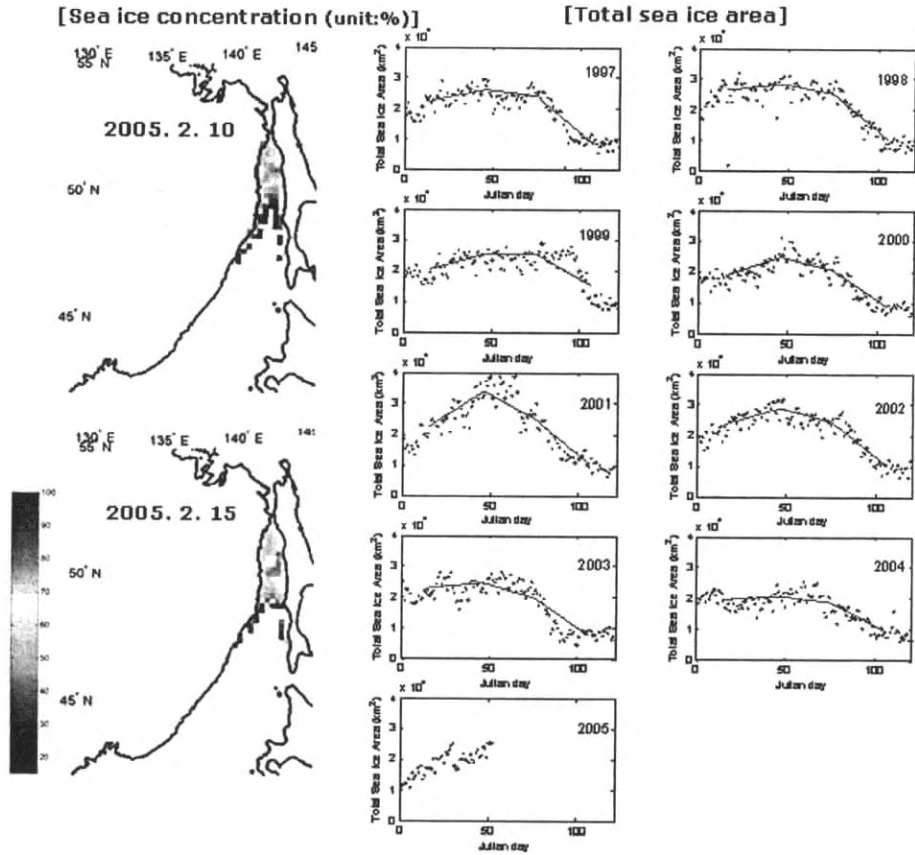


그림 29. (좌) SSM/I로부터 산출한 2005년 2월 10일, 15일의 sea ice concentration의 공간 분포와 (우) 이러한 일별 sea ice concentration 자료로부터 얻은 1997년부터 2005년 겨울동안 일별 total sea ice area.

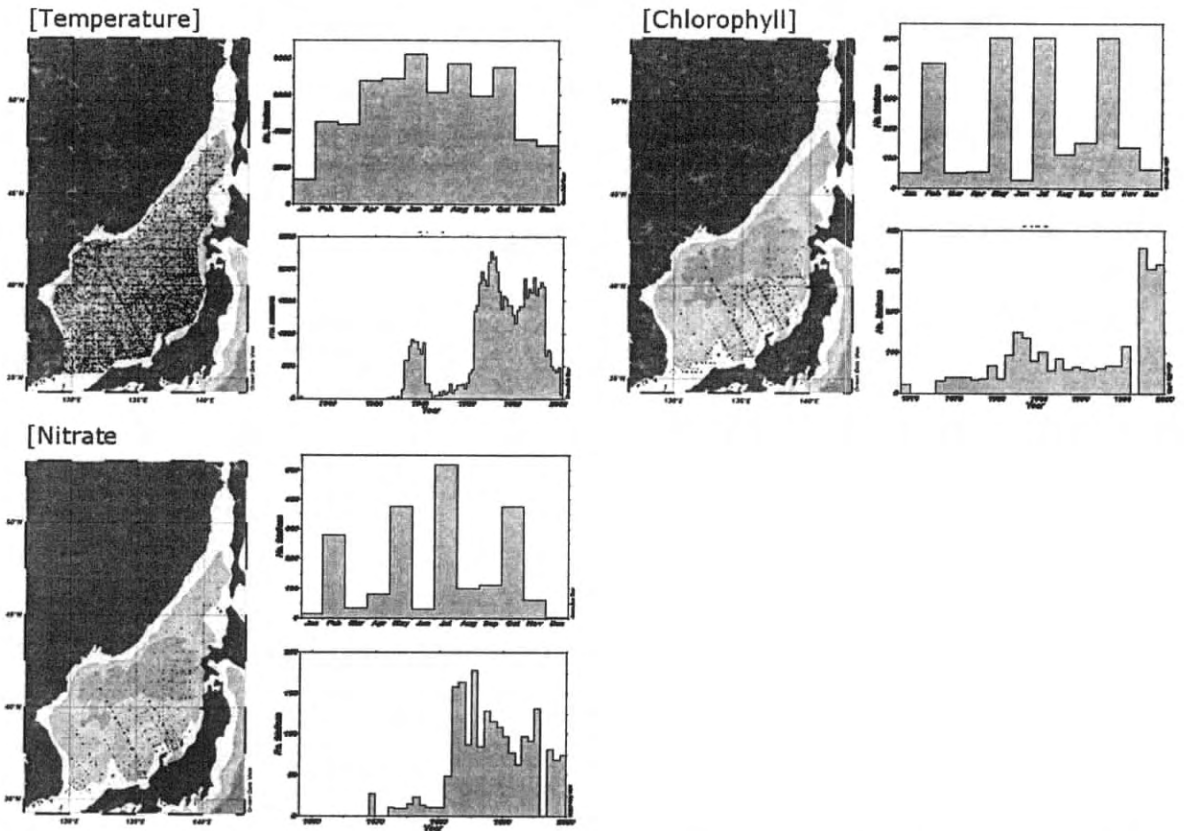


그림 30. 수집된 환경인자 중, 수온, chlorophyll, 질산염의 관측 정점의 공간 분포와 각 연도와 월별에 대해서 관측된 관측 정점수의 분포

MLD_WOD_05_0.5°C_Temp (unit: m)

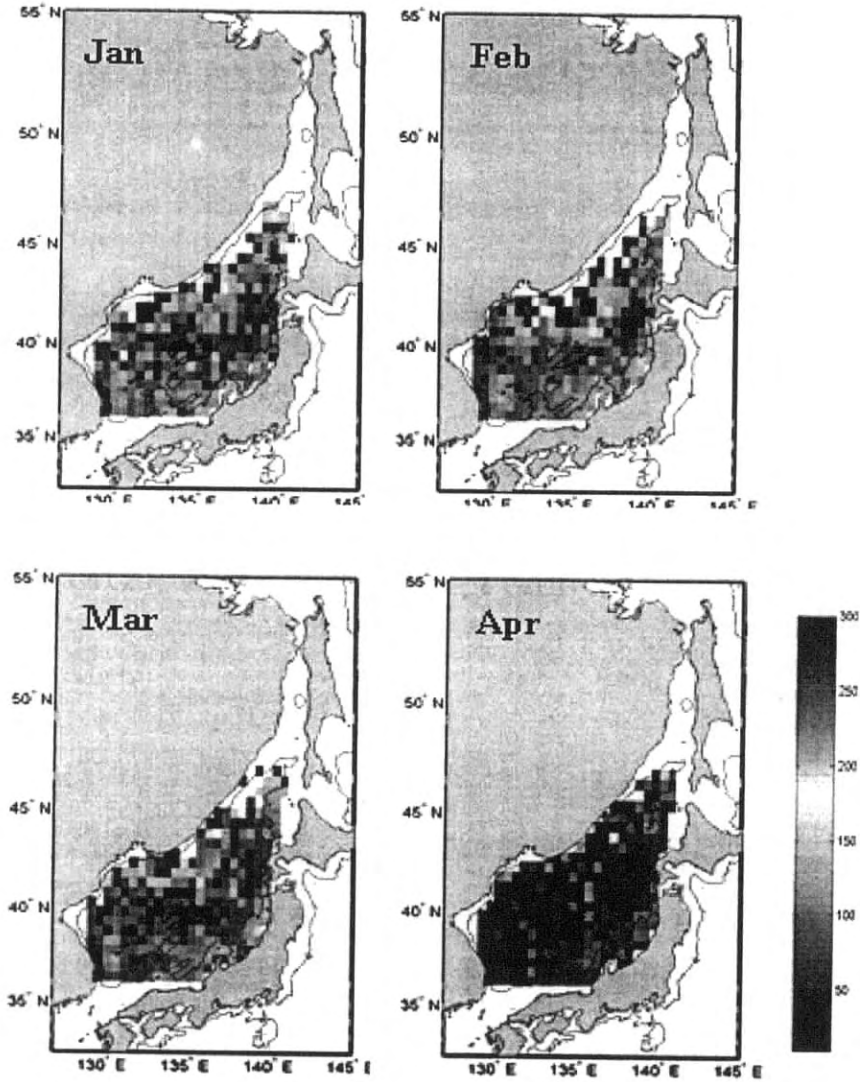
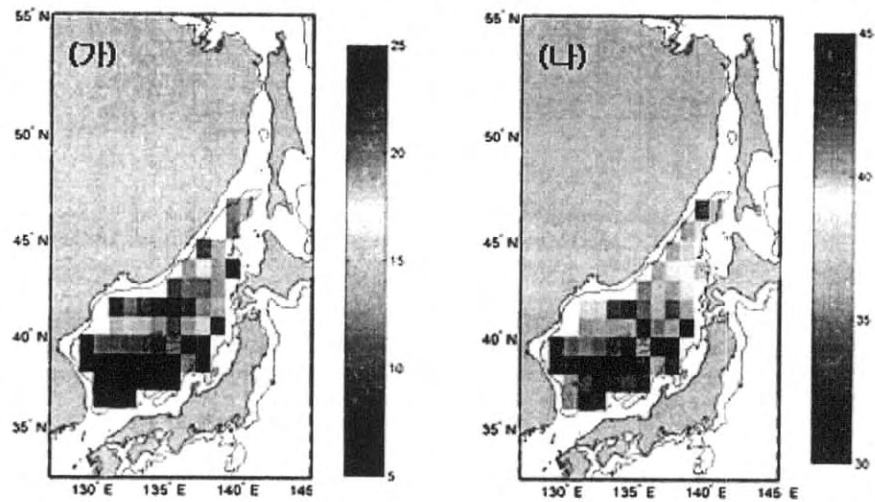
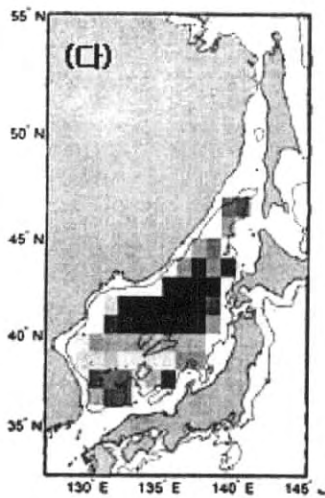


그림 31. 1월부터 4월동안 고해상도 수온 profiles로부터 산출한 수심 10m에서 수온과 차이가 0.5°C 이상 증가하시 시작하는 수심

Compensation light intensity (E/m²/day) PAR (E/m²/day) when spring bloom is initiated



Mixed layer depth when spring bloom is initiated



Spring Bloom timing (1998-2002)

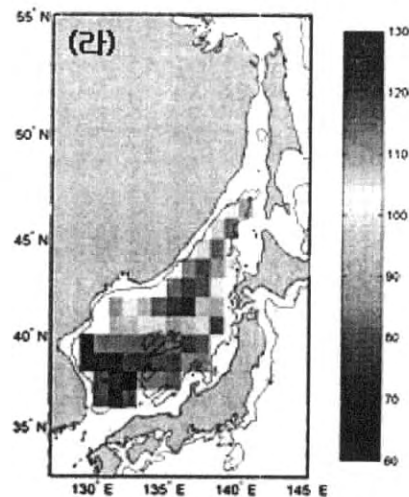


그림 32. 1998년부터 2002년 동안 각각 SeaWiFS chlorophyll *a*, PAR, D/B의 수온 profile로부터 산출한 spring bloom이 형성될 때의 (가) compensation light intensity, (나) PAR, (다) MLD 그리고 (라) spring bloom 형성 시기의 공간 분포

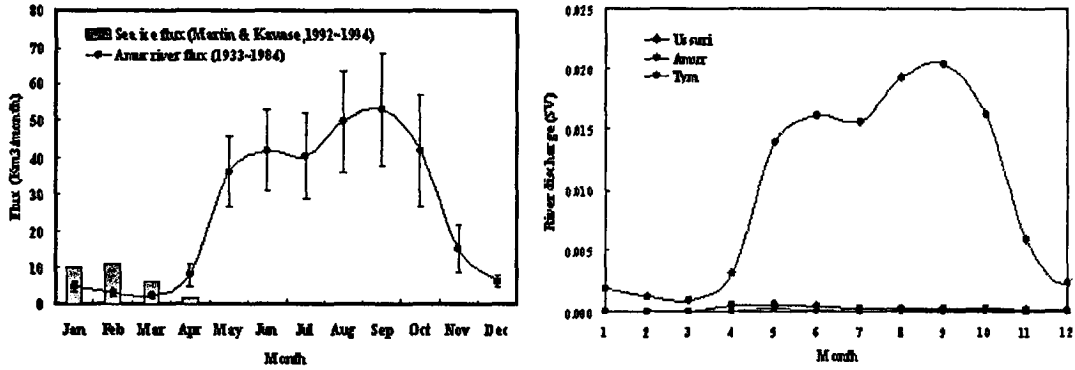


그림 33. 동해에 유입되는 담수의 주요 공급원 중 sea ice melting에 의한 공급과 Amur 강에 의한 공급 flux(좌)와 동해로 유입되는 강들의 flux 비교(우)

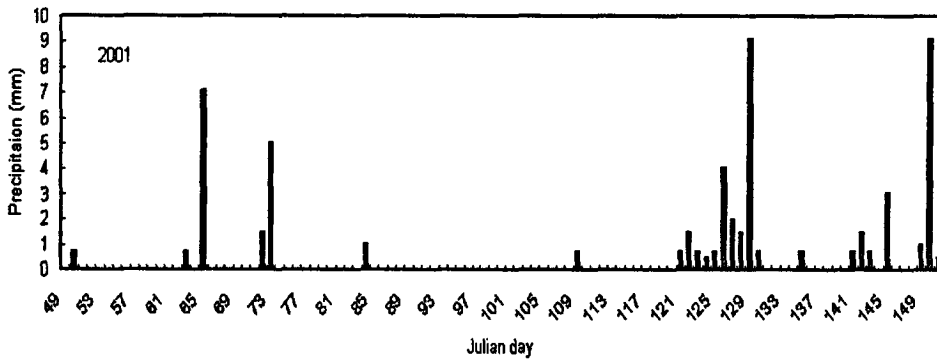


그림 34. 북한의 청진 지역에서 측정된 2001년도 강우량

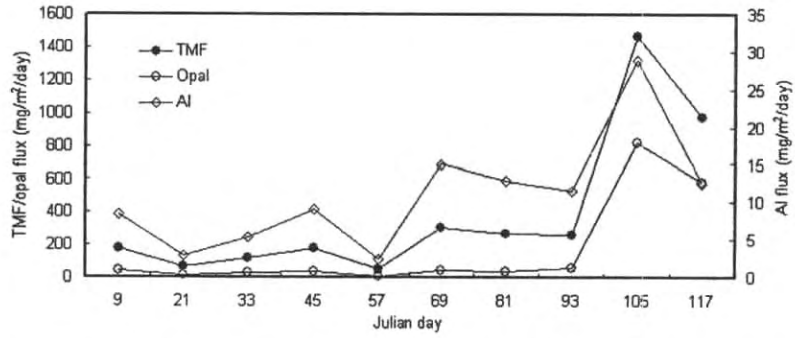


그림 35. 동해의 western Japan Basin에서 2001년도에 측정된 total mass flux, Al flux 그리고 opal flux를 보여줌.

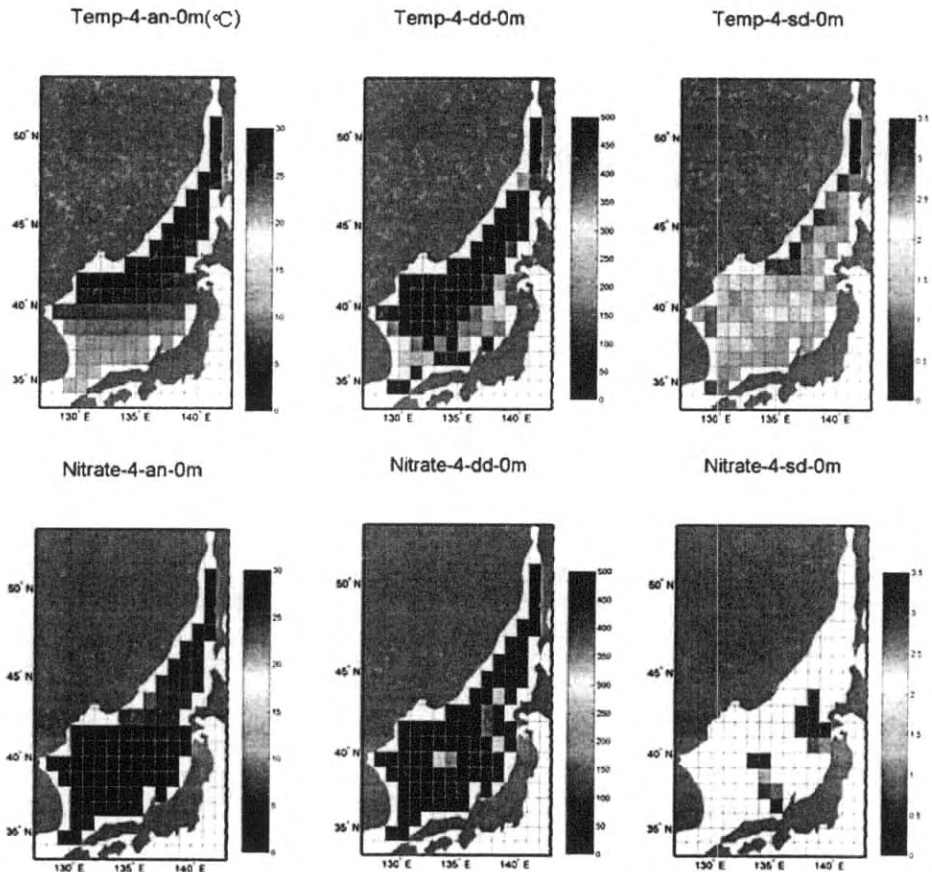


그림 36. D/B에서 산출된 4월 표층 수온과 질산염 농도의 공간 분포(an)와 계산에 사용된 자료 수(dd), standard deviation(sd)의 분포

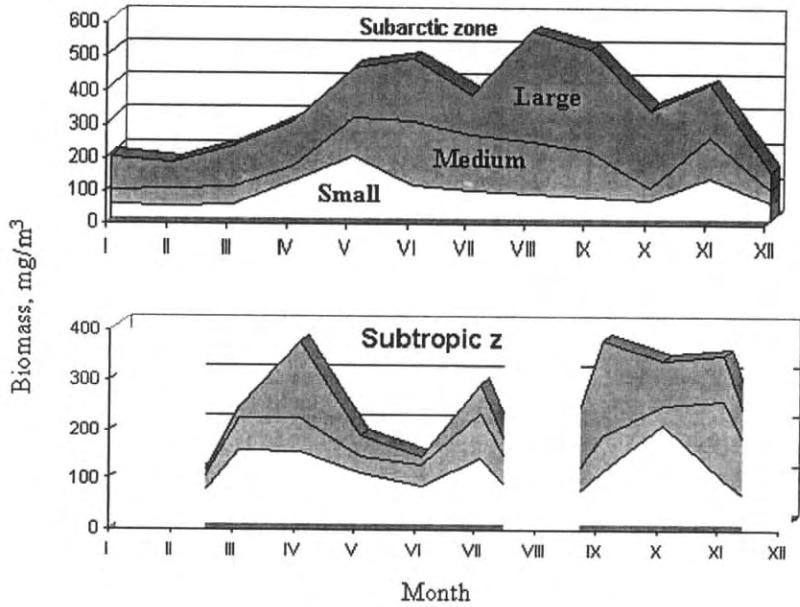


그림 37. 극전선 이남의 지역(하)과 이북 지역(상)에서 동물플랑크톤의 크기
따른 생체량의 월별 변동.

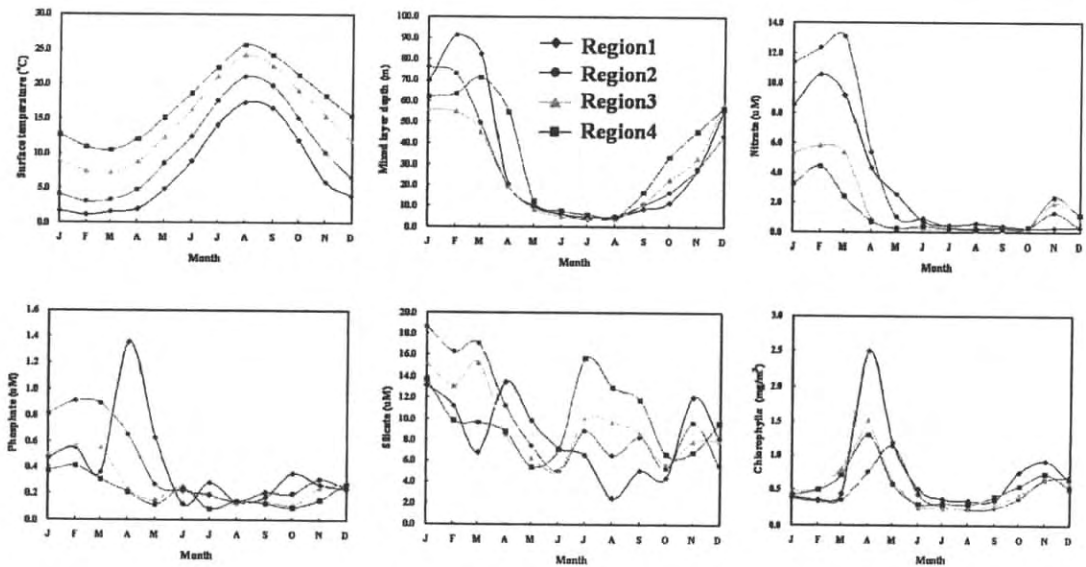


그림 38. Primorye coast 지역(region1), 극전선이 형성되는 지역(region3), 극전선의 북부 지역
(region2), 남부지역(region4)에서 표층 수온, 혼합층 깊이, 혼합층 내의 평균 영양염 농도,
표층 클로로필 농도의 월별 변동.

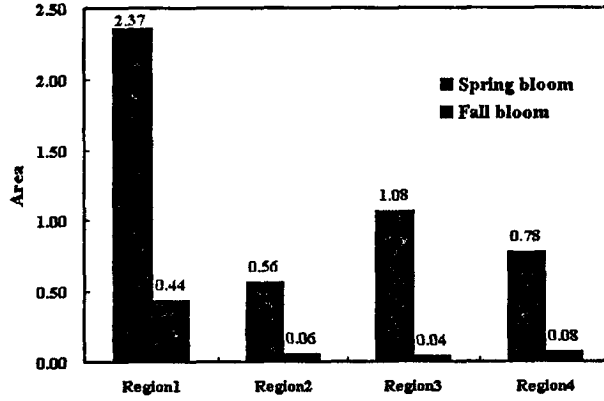


그림 39. 4개의 지역에서 bloom기간 동안 클로로필 농도의 면적, bloom의 크기를 보여줌

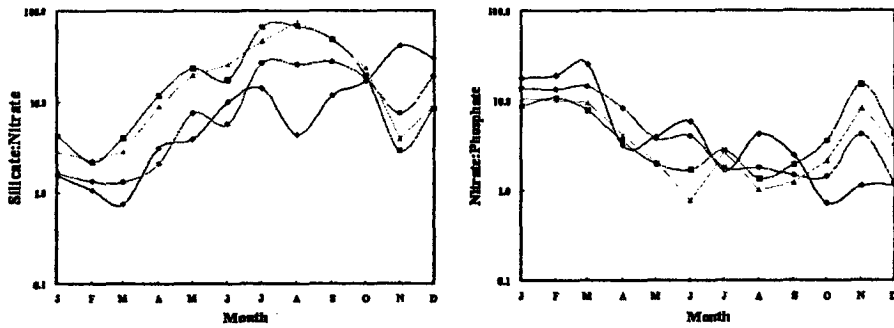


그림 40. 혼합층 내의 규산염:질산염의 비와 질산염:인산염 비의 월별 변동

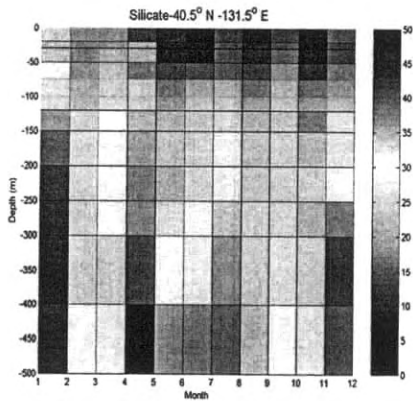
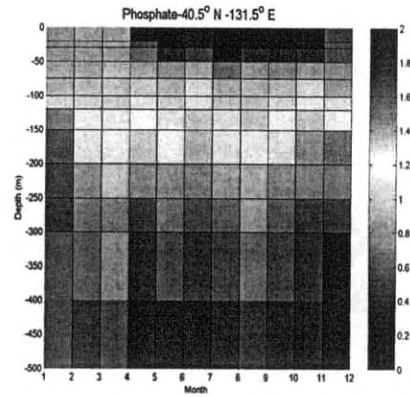
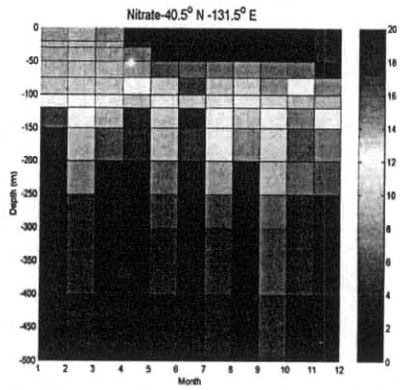


그림 41. 40.5N와 131.5E에서 표층부터 500m사이의 질산염, 인산염, 규산염 농도의 월별 농도 변화

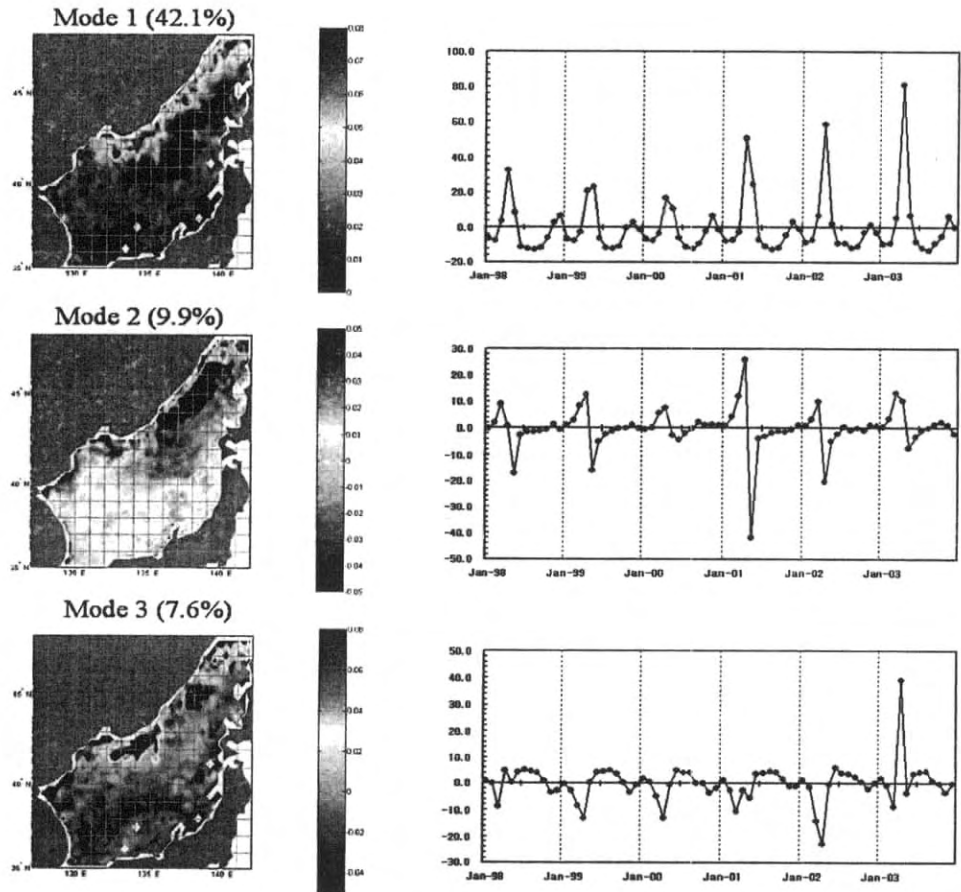


그림 42. 1998년 1월부터 2003년 12월의 SeaWiFS 자료에서 산출한 표층 클로로필의 EOF 제 1, 2, 3 모드

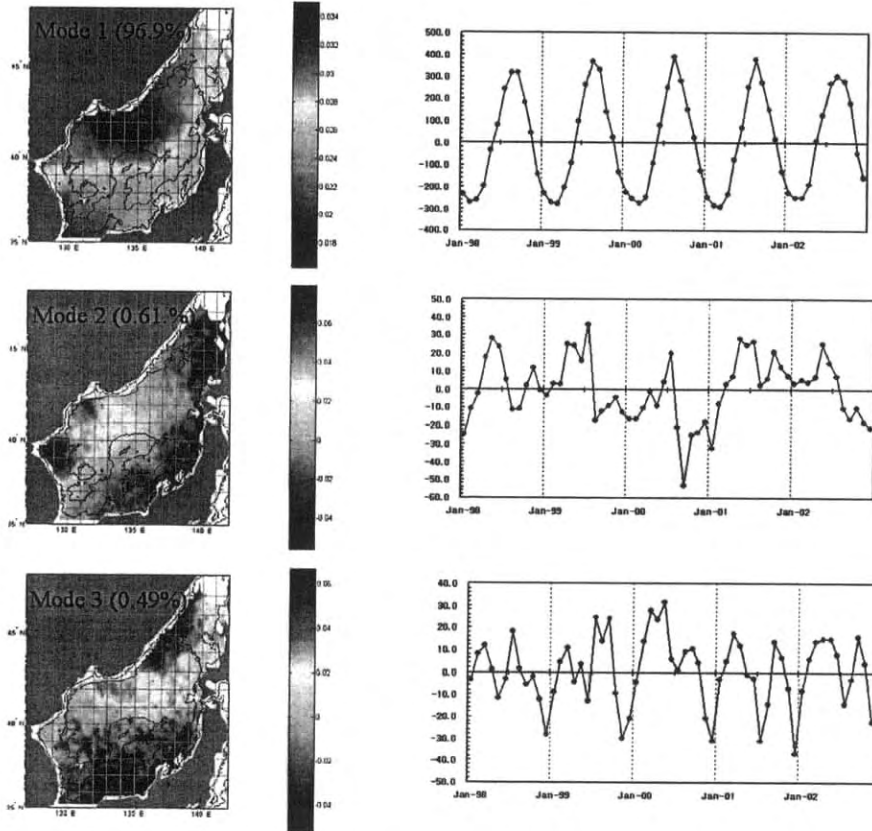


그림 43. 1998년 1월부터 2002년 12월의 AVHRR 자료에서 산출한 표층 수온의 EOF 제 1, 2, 3 모드

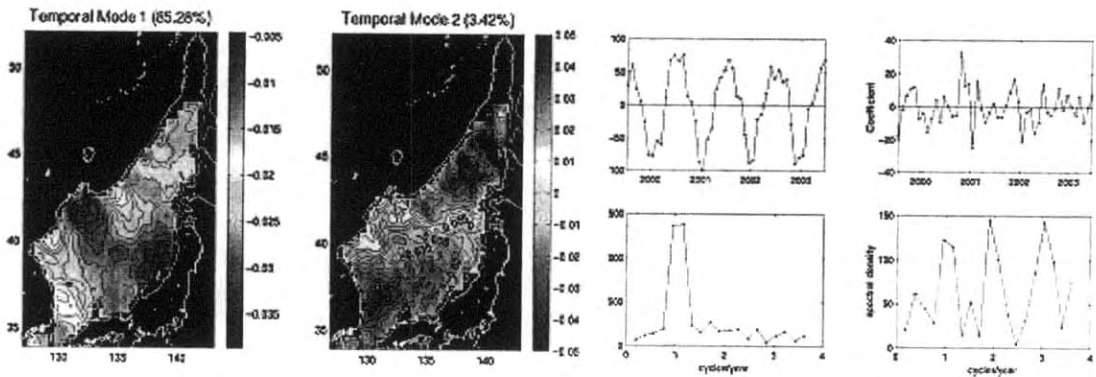


그림 44. 1999년 6월부터 2003년 5월까지 4년 동안 QuikSCAT 풍속의 EOF 제 1, 2 모드

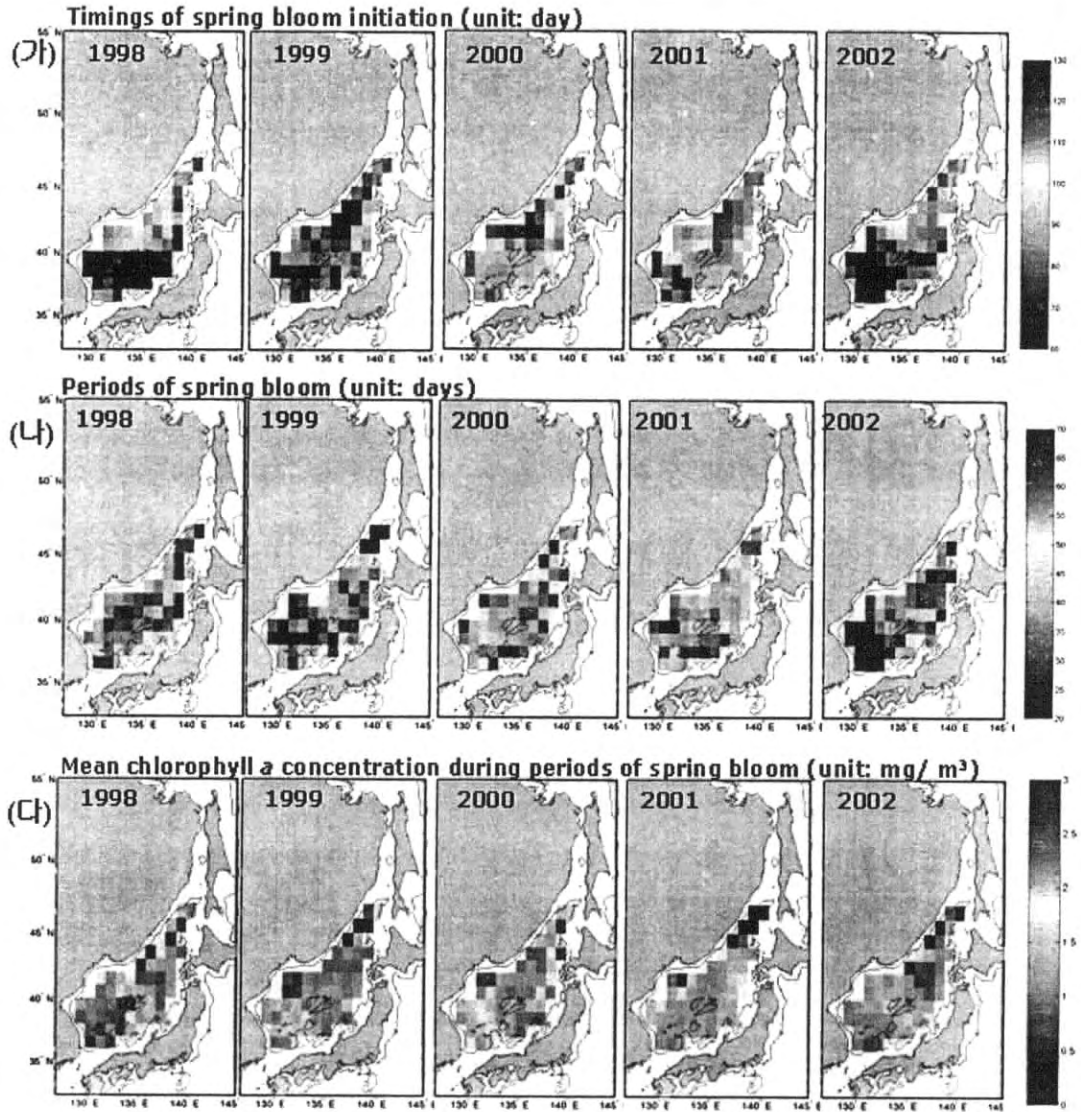


그림 45. (가) 1998년부터 2002년 동안의 SeaWiFS daily chlorophyll *a* 농도에 Gaussian Curve Fitting을 적용하여 얻은 봄철 bloom 형성 시기와 (나) 봄철 bloom 기간, 그리고 (다) bloom 기간 동안 평균 chlorophyll *a* 농도의 공간 분포.

Chlorophyll Anomaly

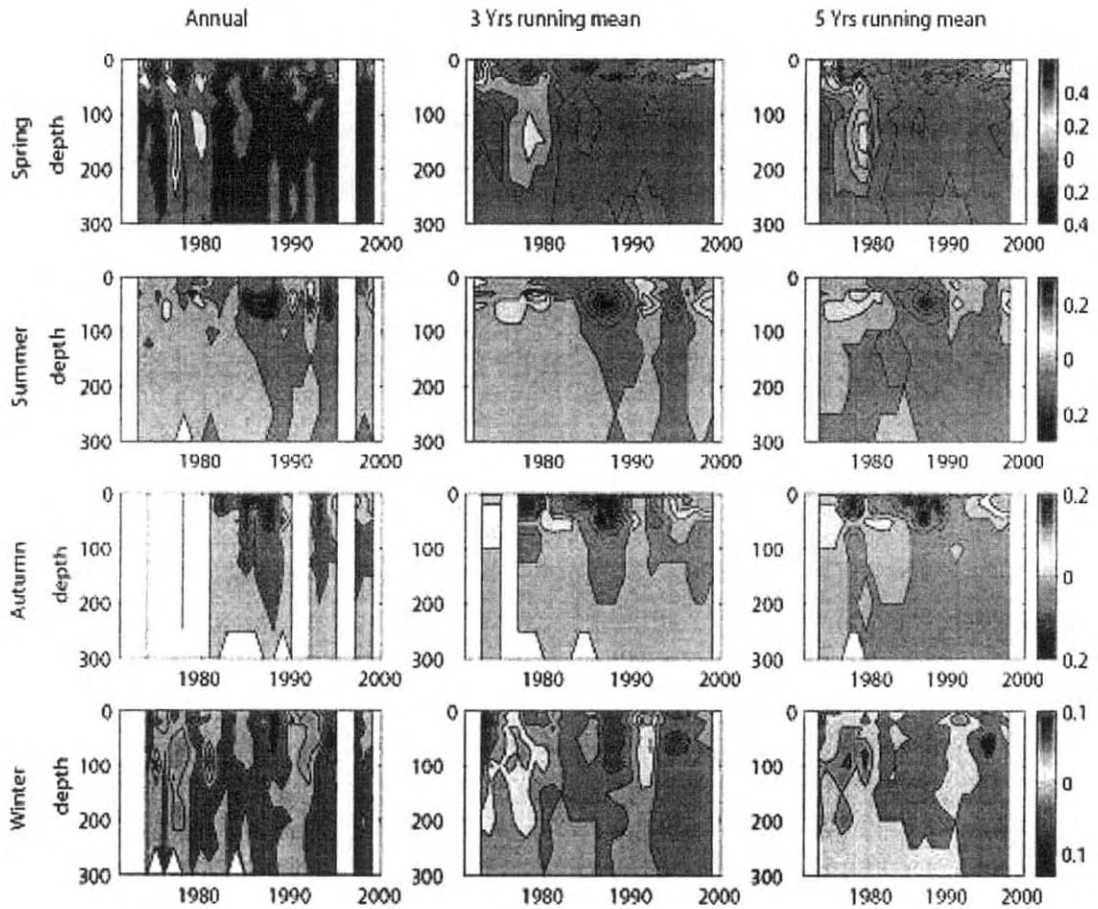


그림 46. 동해 전 지역의 표층에서 수심 300m까지의 계절별 클로로필 농도의 anomaly

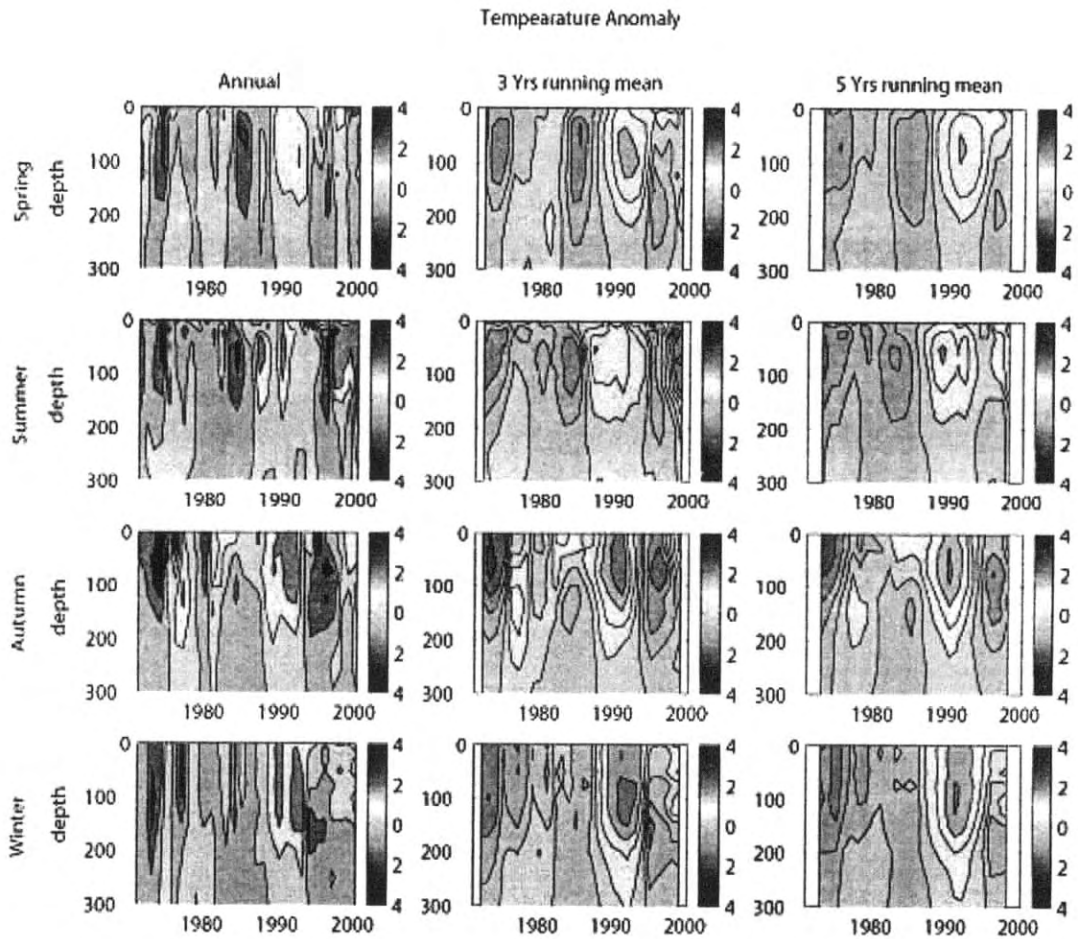


그림 47. 동해 전 지역의 표층에서 수심 300까지의 계절별 수온의 anomaly

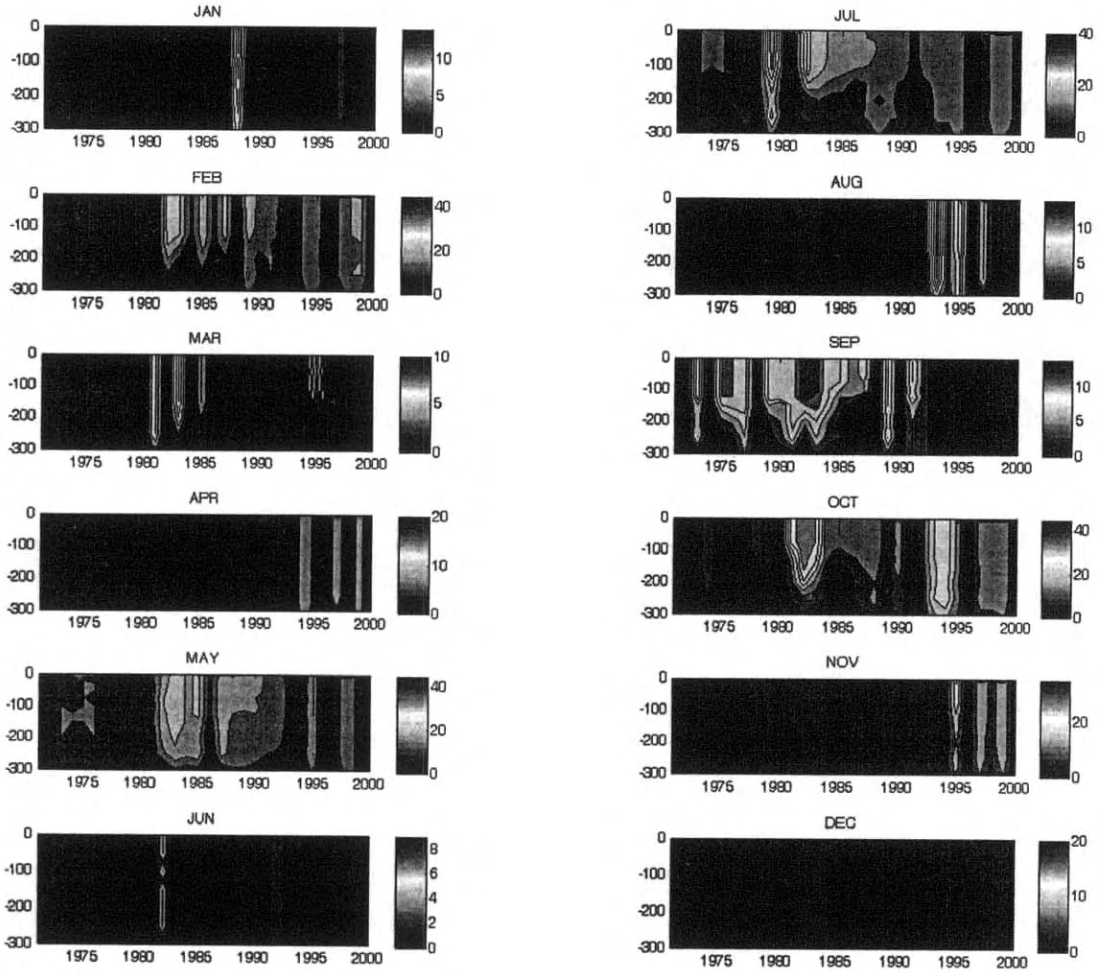


그림 48. D/B에서 얻은 동해 전 지역에서 이용 가능한 chlorophyll의 관측 정점 수

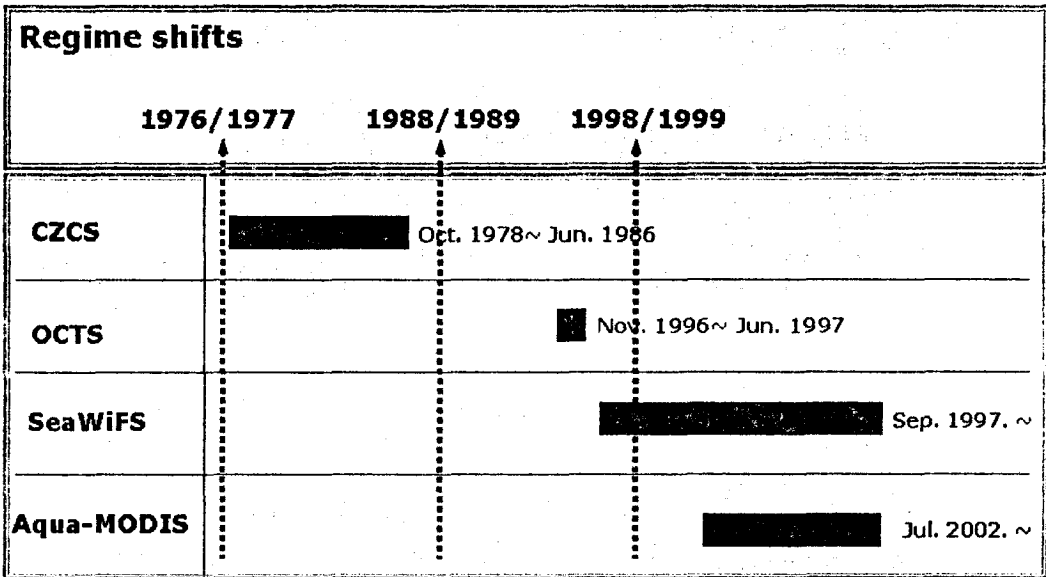
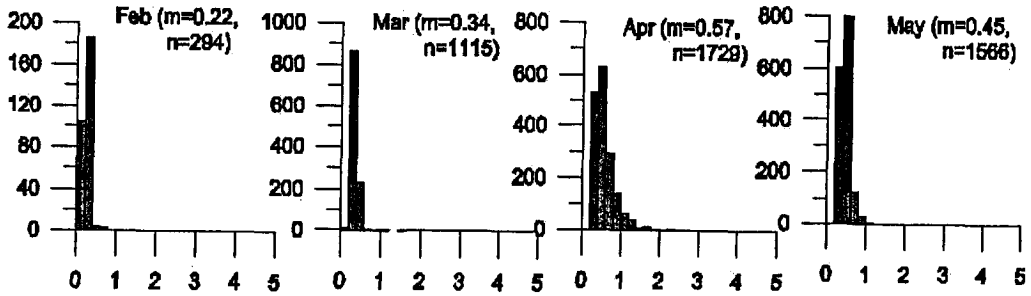
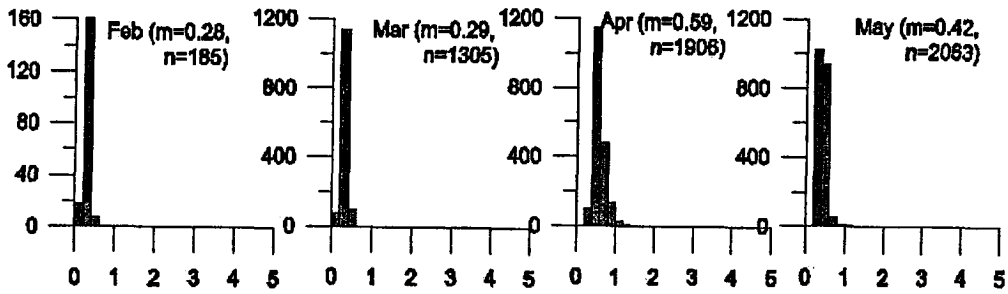


그림 49. Regime shift 시기와 ocean color data의 활용 가능 시기

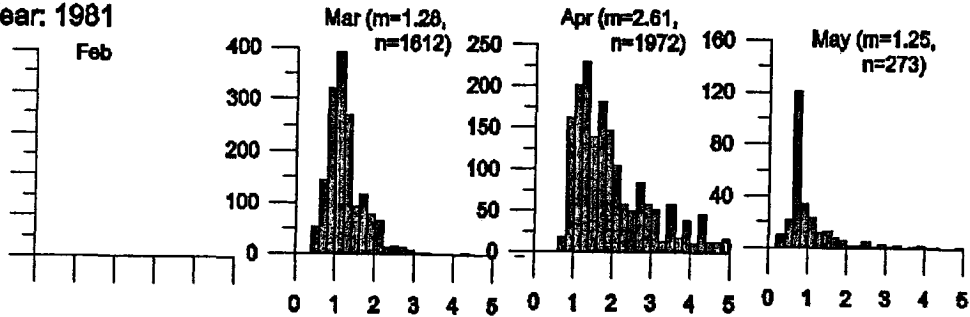
Year: 1979



Year: 1980



Year: 1981



Year: 1982

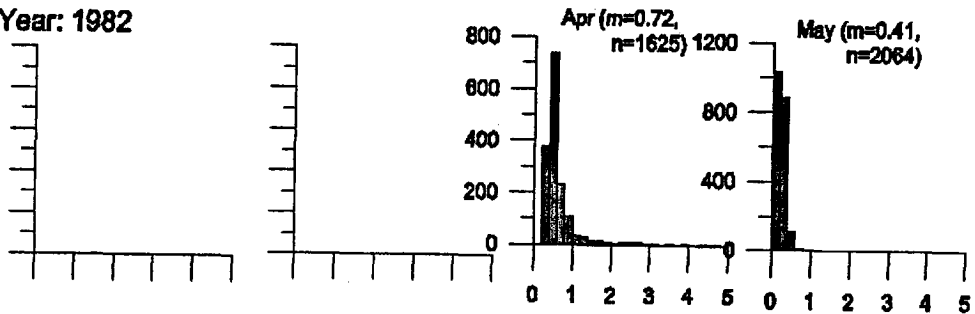
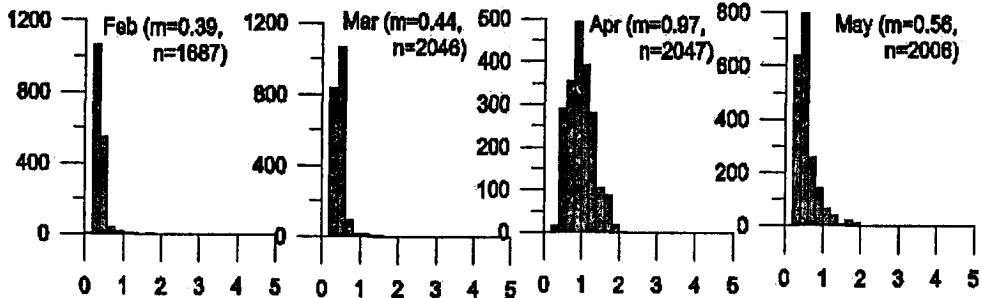
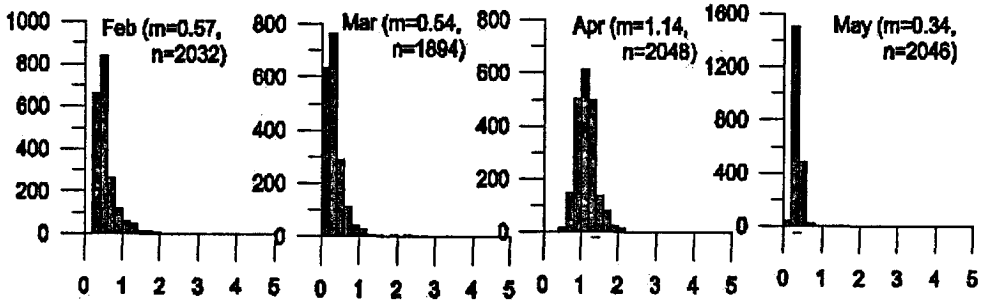


그림 50-1. CZCS로부터 산출된 2월부터 5월동안 chlorophyll a 농도의 frequency 분포

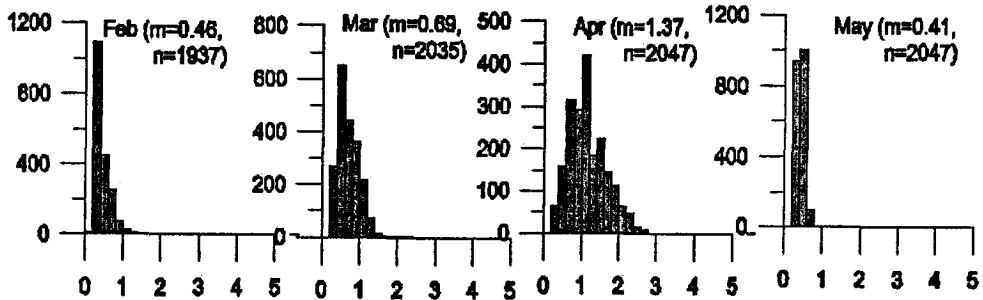
Year: 2000



Year: 2001



Year: 2002



Year: 2003

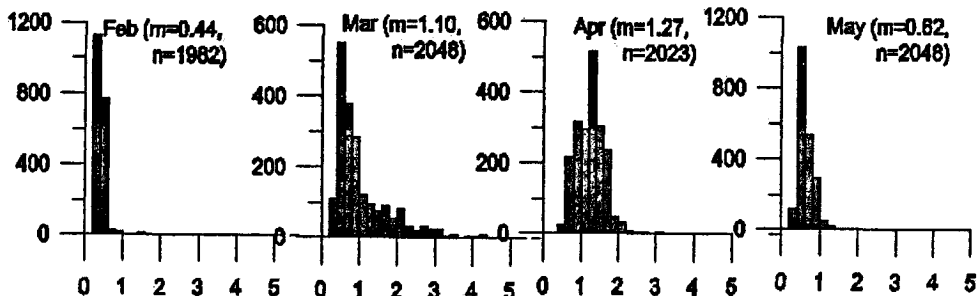


그림 50-2. SeaWiFS로부터 산출된 2월부터 5월동안 chlorophyll a 농도의 frequency 분포

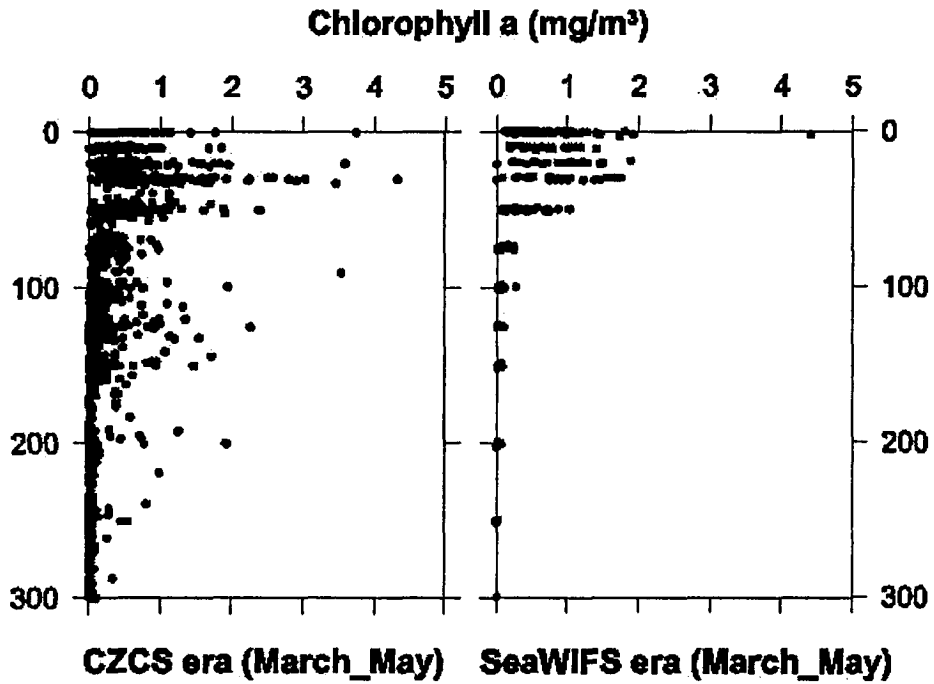


그림 51. D/B의 자료로부터 얻은 CZCS era와 SeaWiFS era동안 동해 남쪽 해역에서의 chlorophyll a 농도의 수직 profile

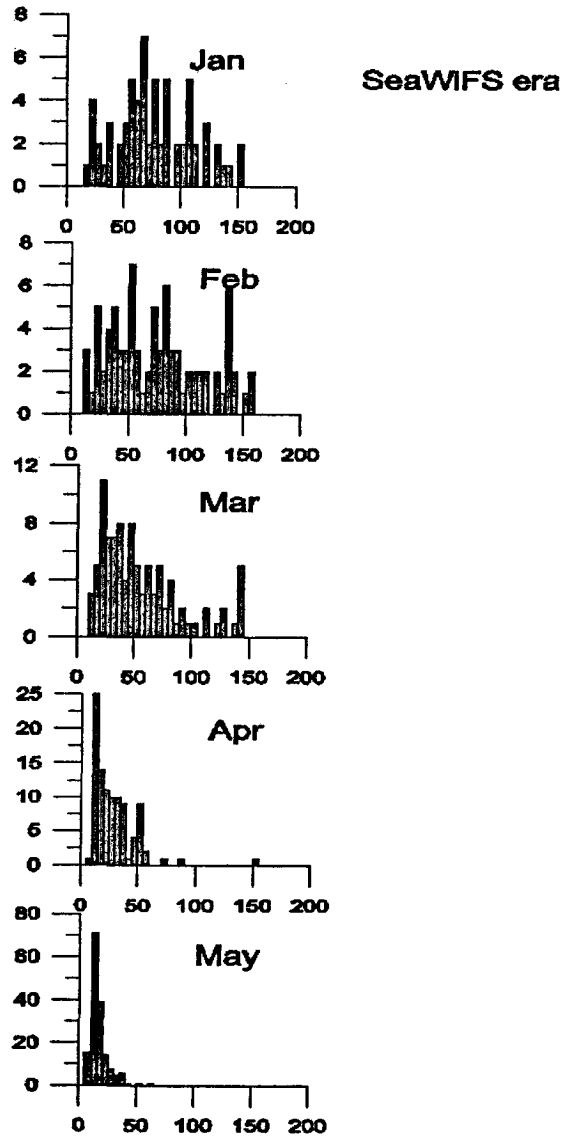
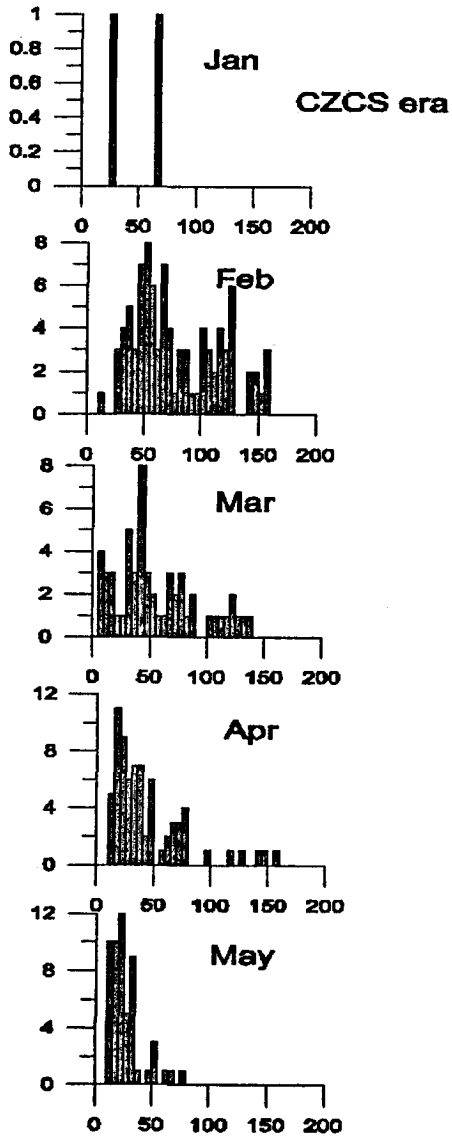


그림 52. D/B의 고해상도 수온 profile 자료를 이용하여 산출한 동해 남쪽 해역에서 CZCS era와 SeaWiFS era 동안 MLD의 각 월별 frequency 분포

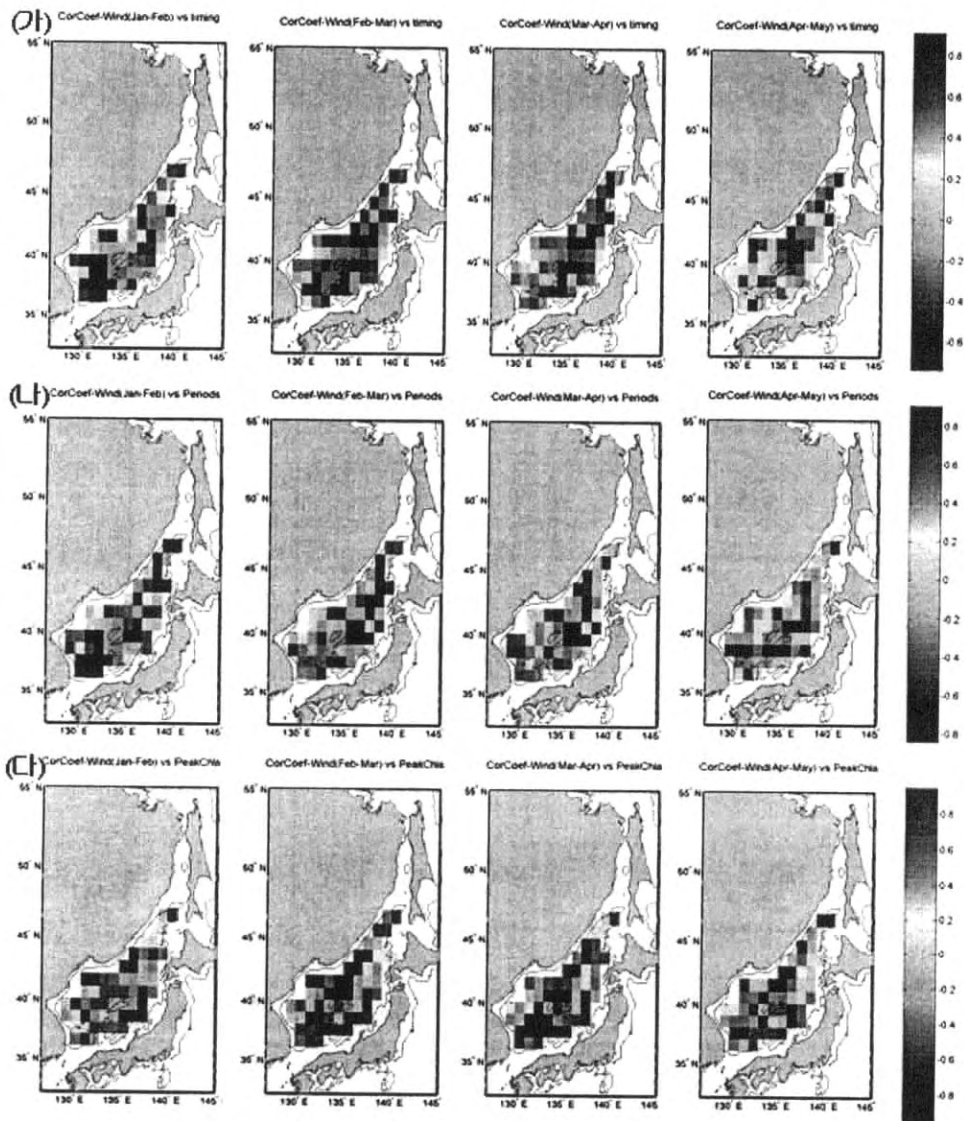


그림 53. 봄철 bloom 형성 시기(가)와 기간(나), 그리고 bloom 기간동안 peak chlorophyll a 농도 각각에 대해서 1~2월, 2~3월, 3~4월, 4월~5월동안 wind speed와의 correlation coefficient의 공간 분포.

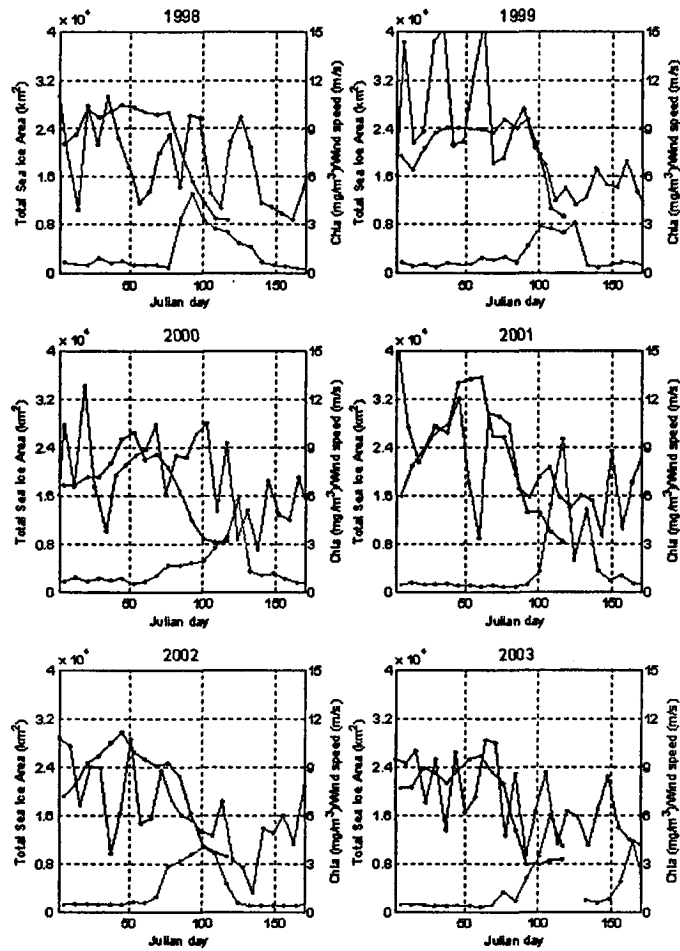


그림 54. 1998년부터 2003년 동안 Primorye coast 지역의 표층 클로로필 값과 바람 그리고 위도 47도부터 52도 사이의 total sea ice area의 비교, 파란 선은 바람, 검은 선은 total sea ice area 그리고 붉은 선은 표층 클로로필을 나타냄.

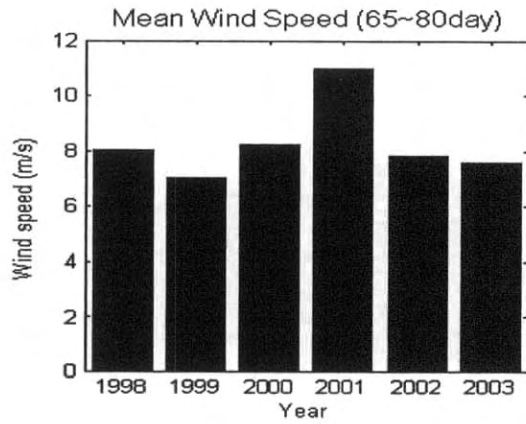


그림 55. 1998년부터 2003년 동안 Primorye coast 지역의 spring bloom 형성 시기동안 wind speed 비교

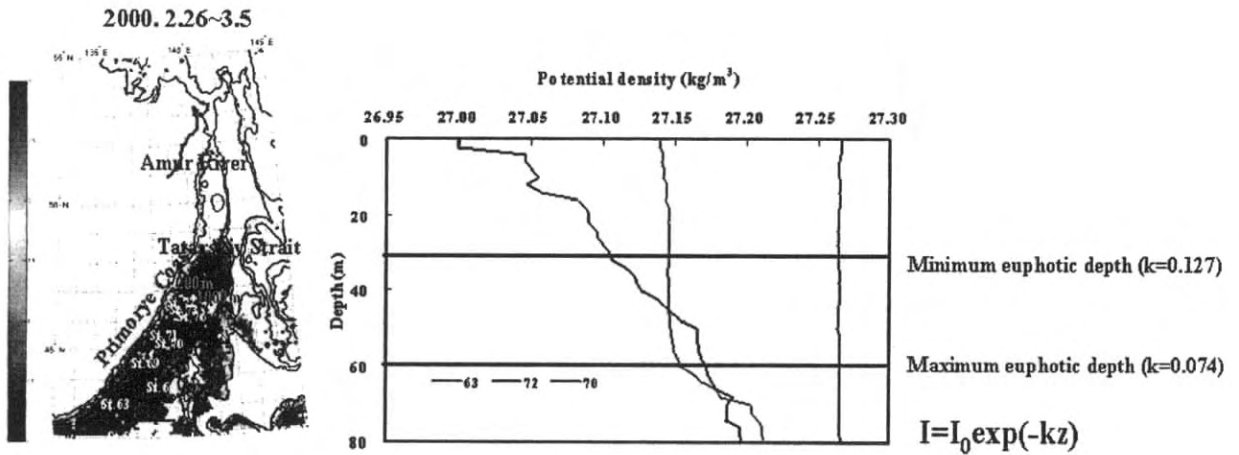


그림 56. Primorye coast 지역에서 bloom이 형성된 곳 (St. 72), bloom이 형성되기 전인 곳 (St. 63)과 open ocean에 위치한 곳 (St. 70) 에서 밀도의 수직 profile

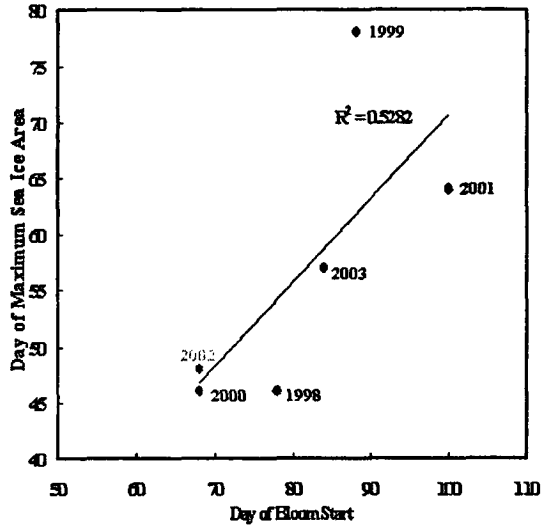


그림 57. Sea ice melting 시기와 spring bloom 형성 시기와 상관성

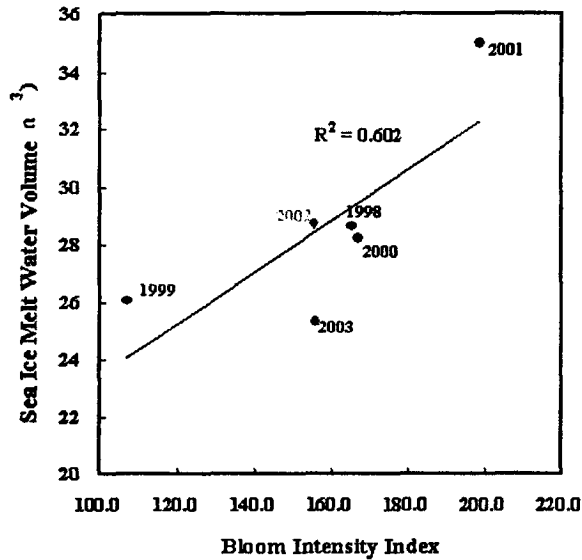


그림 58. Sea ice melt water volume과 spring bloom intensity와의 상관성

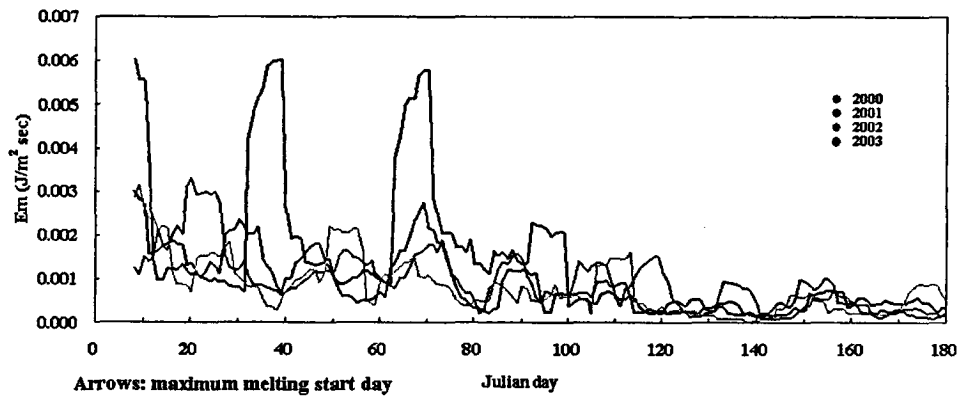


그림 59. 2000년부터 2003년 동안 수주의 혼합에 이용 가능한 바람 에너지의 시간에 따른 변동

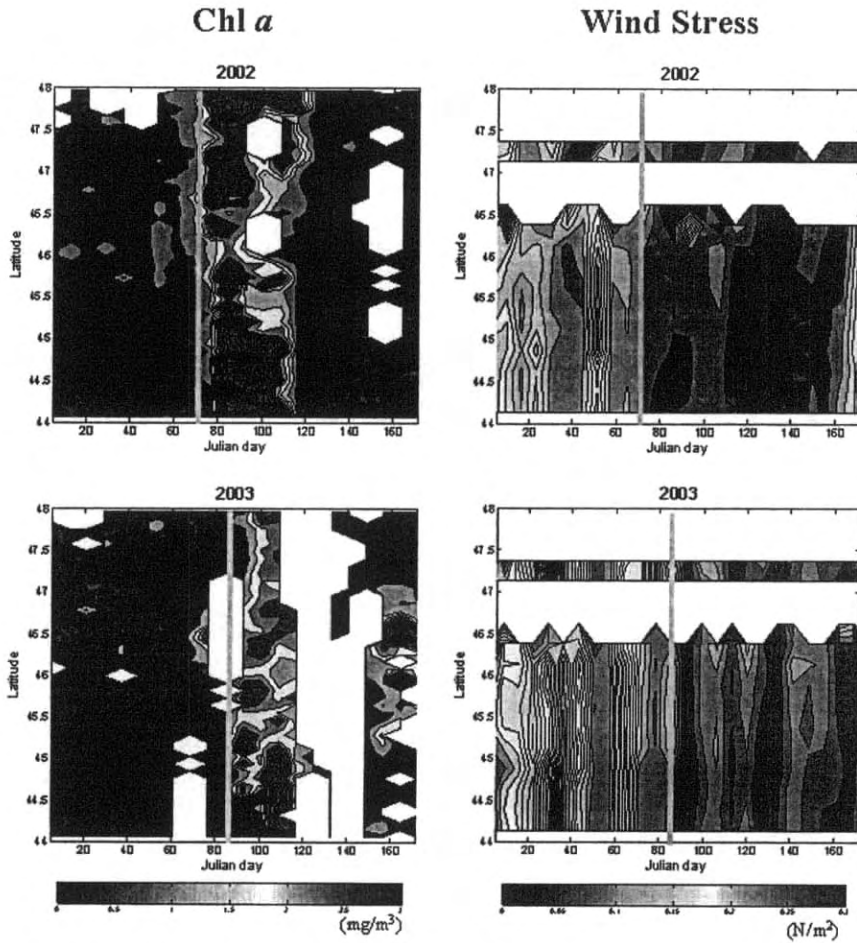


그림 60. Primorye coast 지역의 chlorophyll *a* 농도와 wind stress의 phase diagram

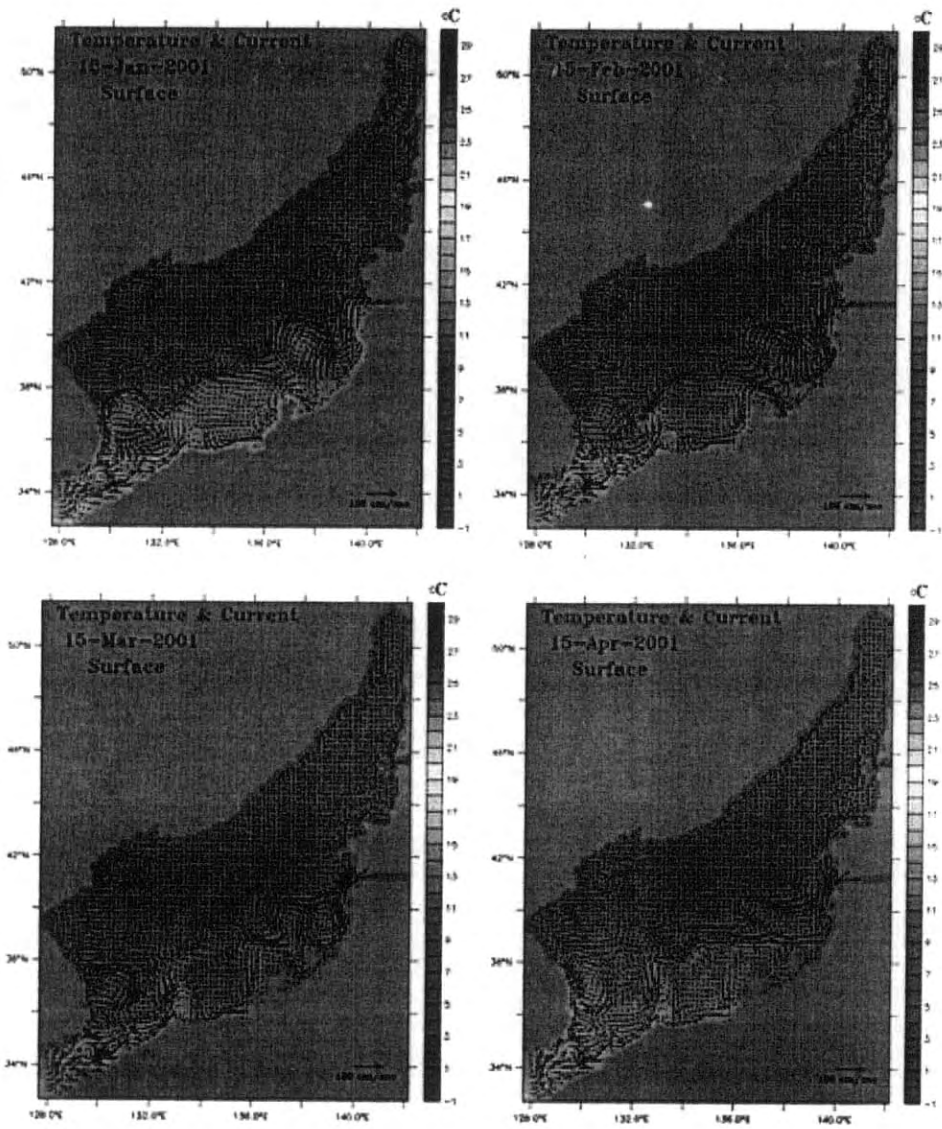


그림 61. MOM3와 D/B의 수온과 AVHRR의 SST를 이용하여 data assimilation technique을 적용하여 산출한 2001년도 1월부터 4월의 표층 수온과 해류의 공간 분포.

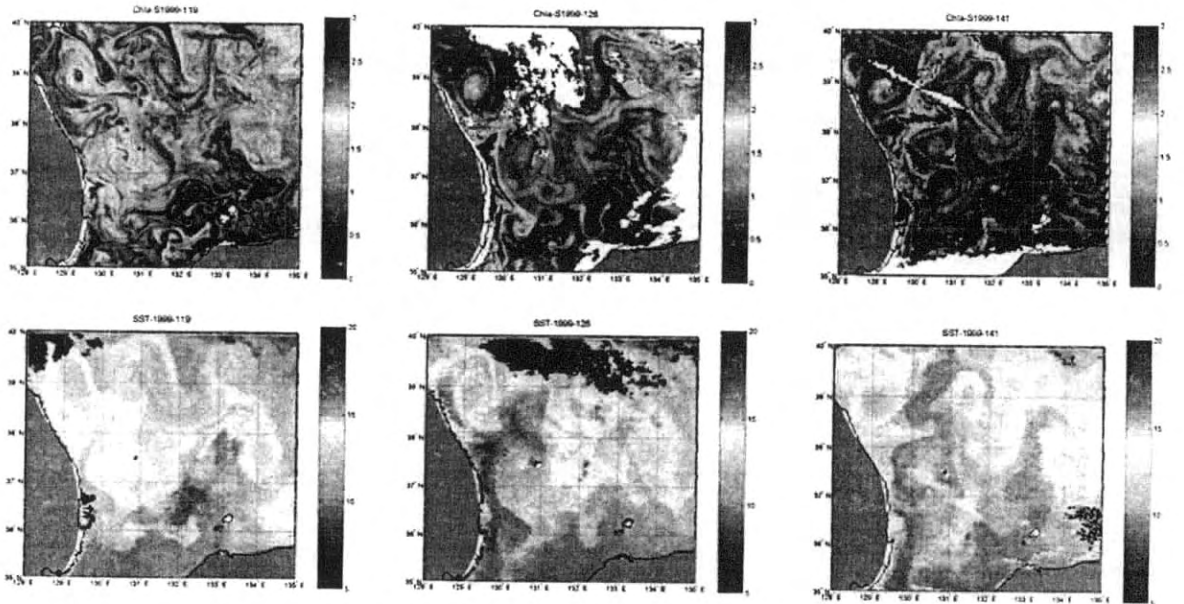


그림 62. 1999년 199, 126, 141일에 SeaWiFs Level2의 daily image로부터 얻은 공간 해상도 4km의 표층 chlorophyll a 농도(상)와 AVHRR로부터 획득한 공간 해상도 4km의 표층 수온(하).

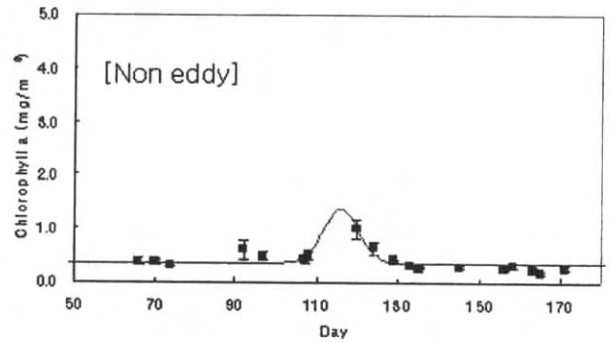
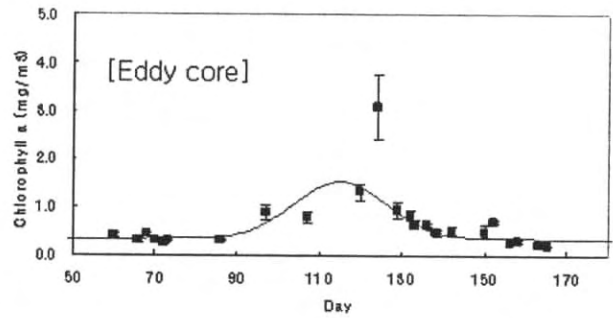
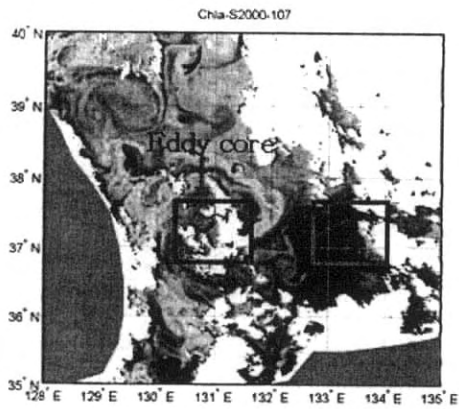


그림 63. Eddy core와 non eddy 지역에서의 봄철 chlorophyll a 농도의 시간에 따른 변동성

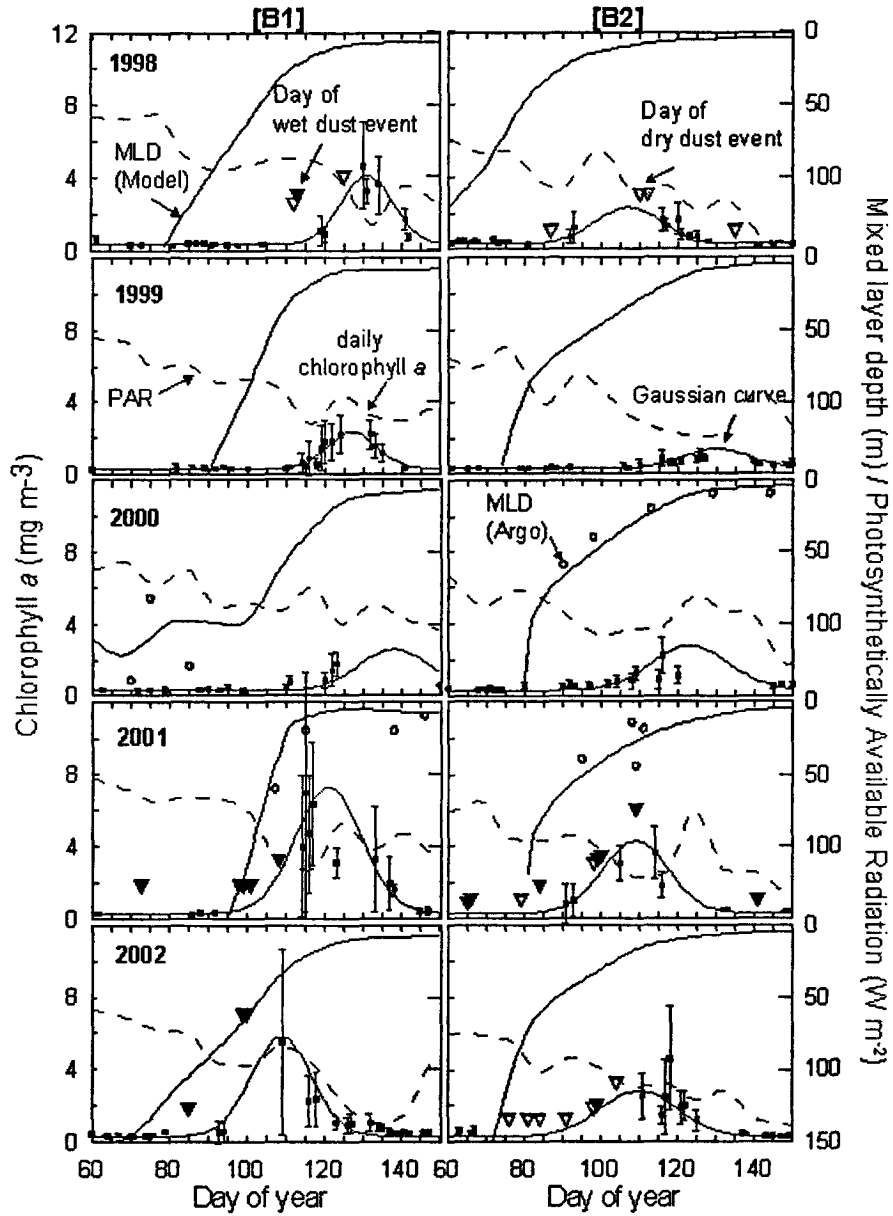


그림 64. B1과 B2 지역에서 chlorophyll a 농도와 Argo와 MOM3를 이용하여 산출한 MLD, aerosol index와 강수량 자료로부터 구분된 황사 경유 시기와 황사의 deposition process

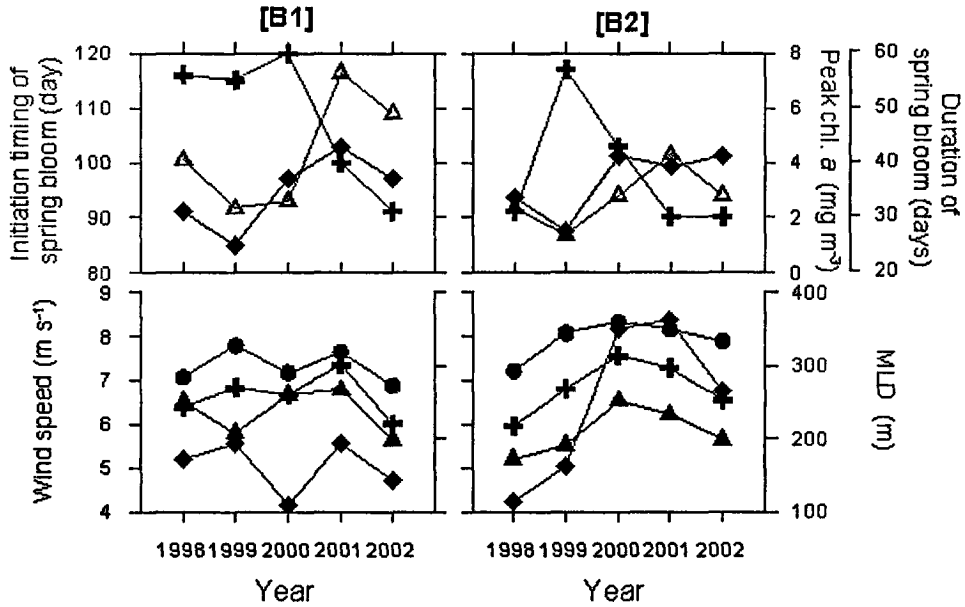


그림 65. B1과 B2 두 지역에서 spring bloom 형성 시기와 bloom 지속 기간, 그리고 bloom 기간 동안 peak chlorophyll a 농도의 연 변동(상)과 1~2월 (black circle), 2~3월 (black cross), 3~4월 (black triangle)의 wind speed와 2월 MLD의 연 변동(하).

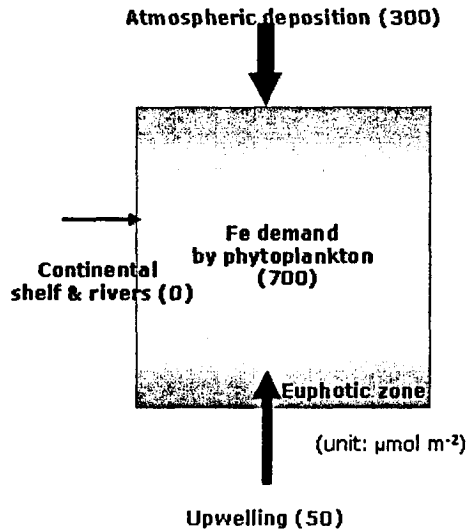


그림 66. B1, B2 두 지역에서 추정된 Fe의 annual budget

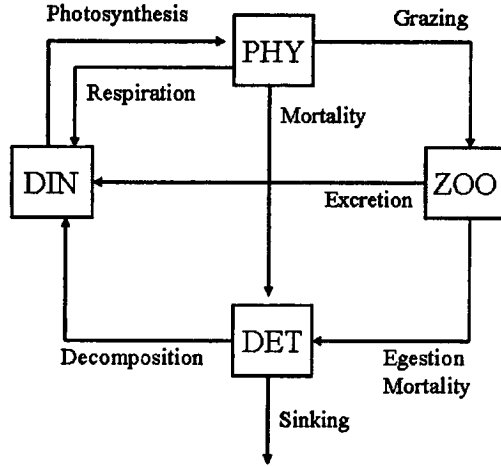


그림 67. 물리 모델(Kpp)과의 접합에 사용된 NPZD 모델

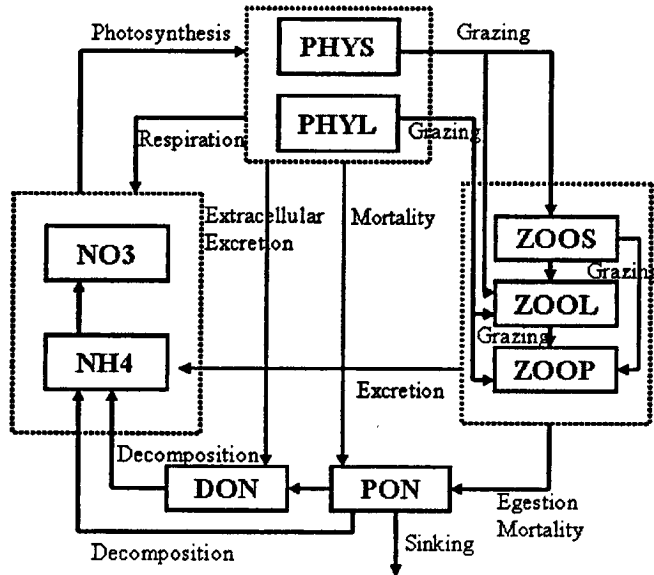


그림 68. 물리 모델과 접합에 사용된 extended NPZD 모델

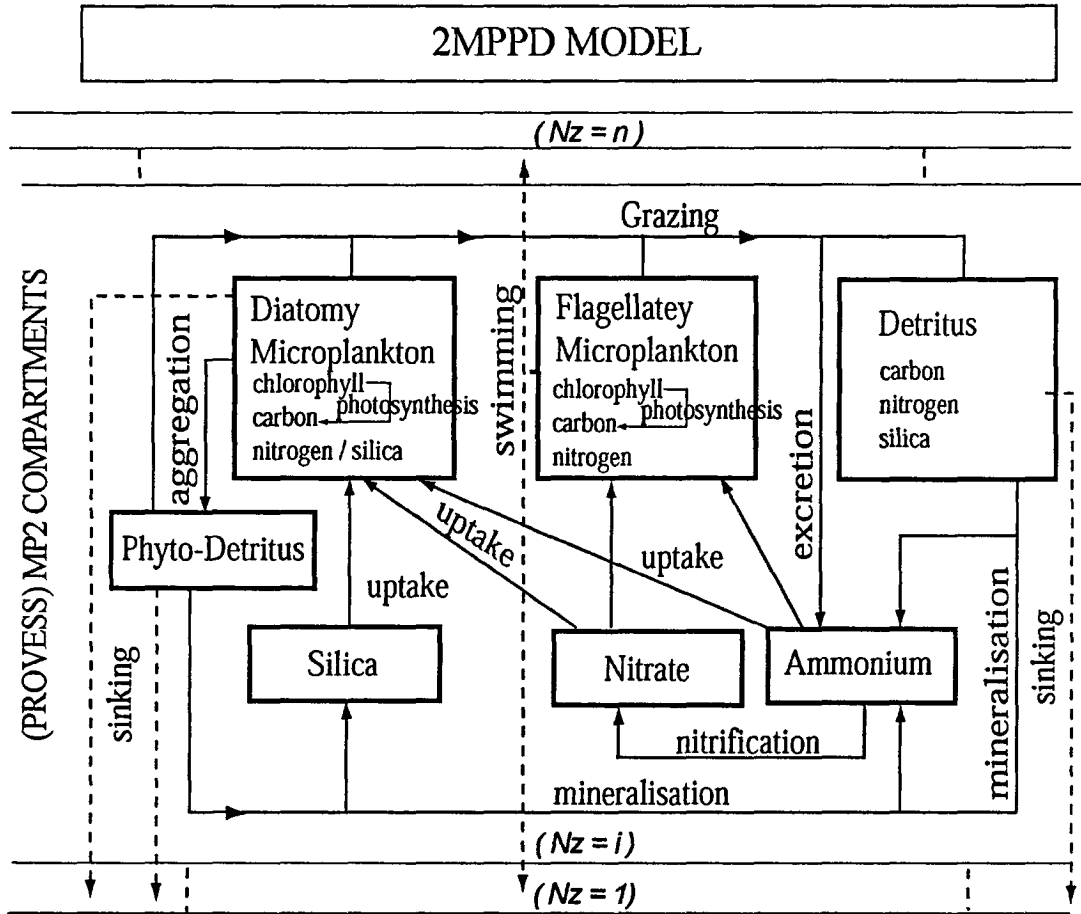


그림 69. 모델 PROWQM을 도식화 한 것

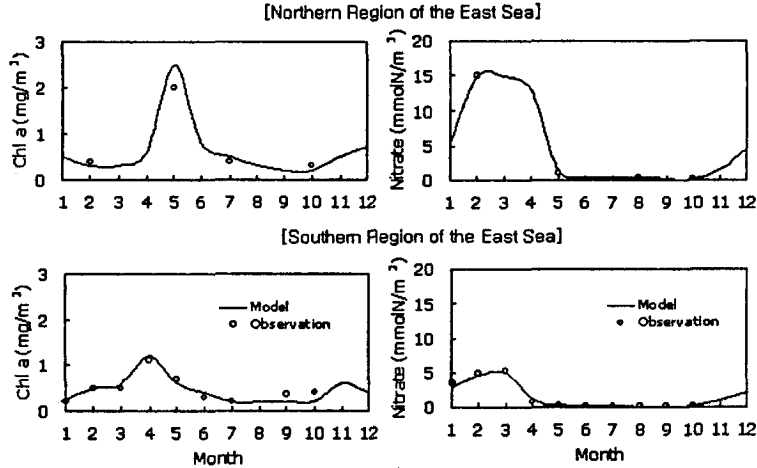


그림 70. (상) Kpp 모델과 접합된 NPZD 모델로부터 얻은 MLD내의 chlorophyll a 농도와 nitrate 농도의 계절 변동 (동해 북부지역). (하) MLD에 의해 3개의 층으로 구분된 모델과 접합된 NPZD 모델로부터 얻은 결과 (동해 남부지역). circle은 D/B에서 계량화된 관측치의 값을 보여줌.

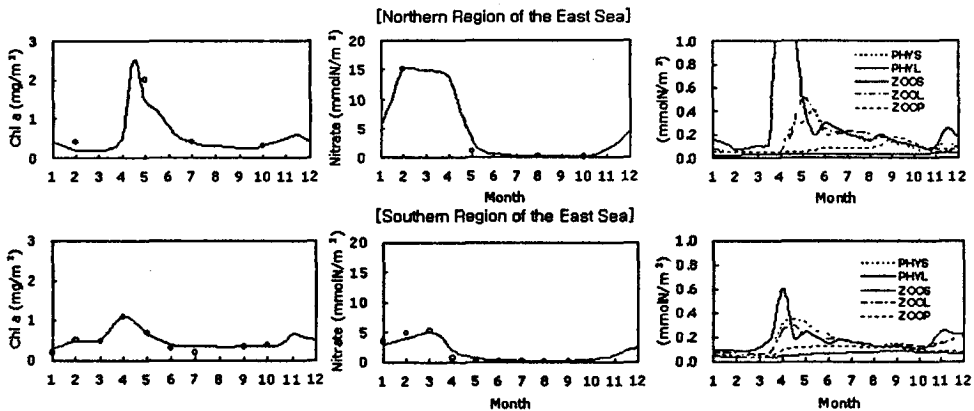


그림 71. (상) Kpp 모델과 접합된 extended NPZD 모델로부터 얻은 MLD 내의 chlorophyll a 농도와 nitrate, 플랑크톤 농도의 계절변동 (동해 북부지역). (하) MLD에 의해 3개의 층으로 구분된 모델과 접합된 extended NPZD 모델로부터 얻은 결과(동해 남부지역). circle은 D/B에서 계량화된 관측치의 값을 보여줌.

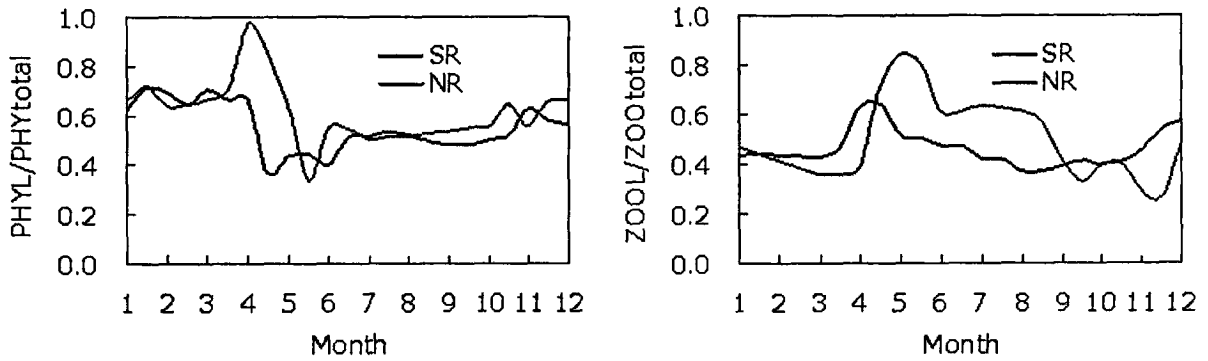


그림 72. Extended NPZD 모델에서 얻은 극전선 남쪽(SR)과 북쪽(NR)에서 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 각각의 전체 생체량에 대한 large size 식물플랑크톤(PHYL)과 초식성 동물플랑크톤(ZOO) 생체량의 시간에 따른 비의 변화

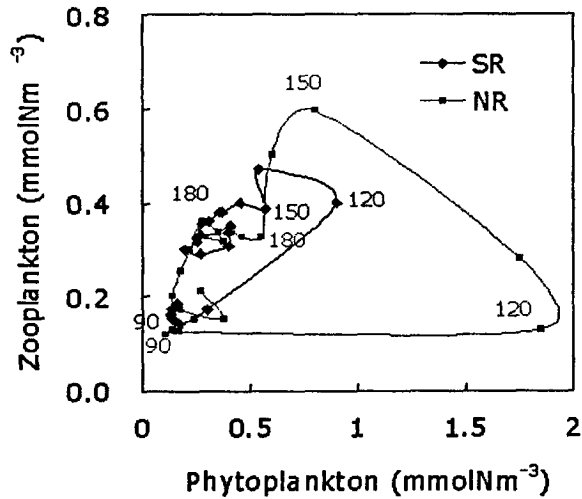


그림 73. Extended NPZD 모델에서 구한 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 생체량의 trajectory

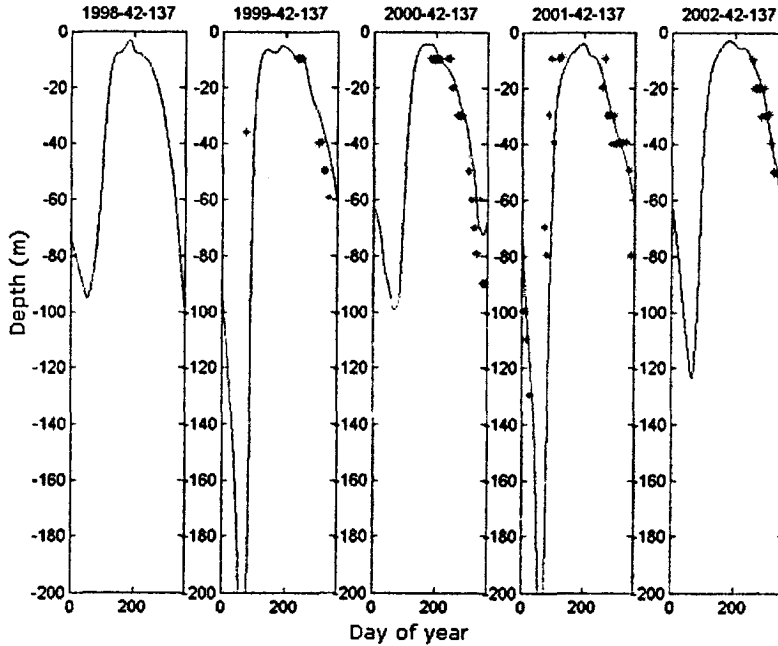


그림 74. 1차원의 물리 모델에서 얻은 1998년부터 2002년 동안 동해 북부 지역에서 MLD의 시간에 따른 변동. 녹색의 *는 Argo drifter로부터 구한 MLD를 보여줌.

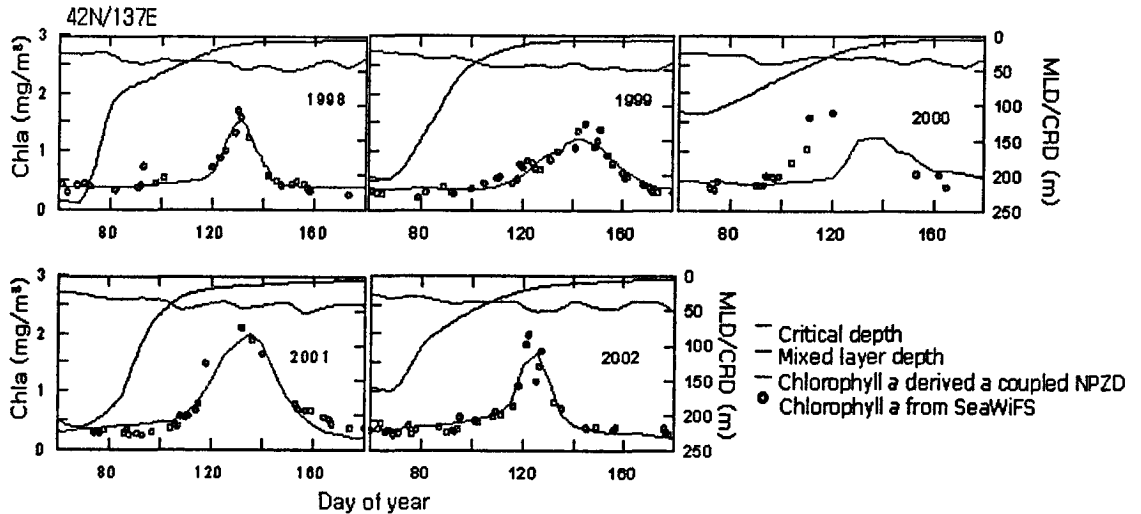


그림 75. 동해 북부지역에서 NPZD 모델에서 구한 1998년부터 2002년 동안 MLD내의 chlorophyll a 농도와 SeaWiFS의 daily chlorophyll a 농도

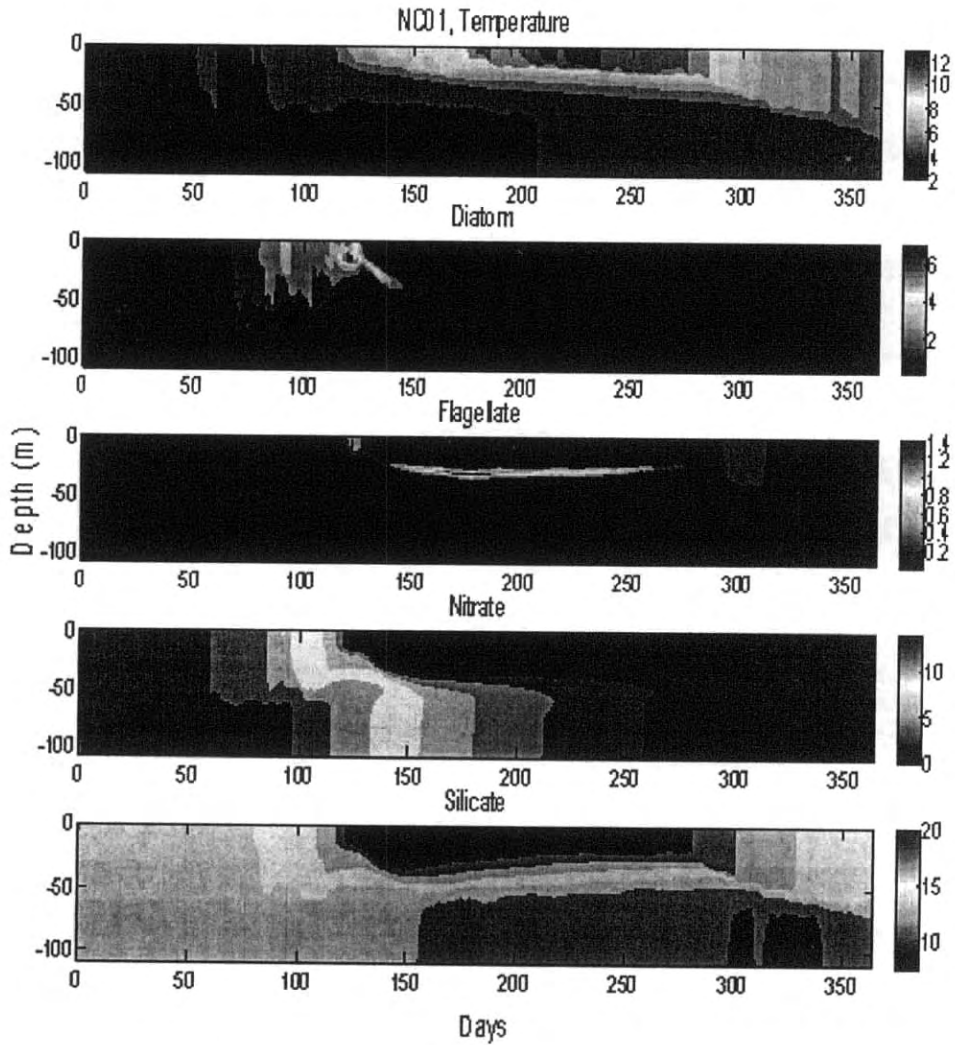


그림 76-1. PROWQM에 42.5°N/137.5°E 지역의 수온과 영양염 자료를 입력하여 동해의 N:Si ratio와 normal mixing 조건에서 모델 실험을 수행한 결과 (NC01)

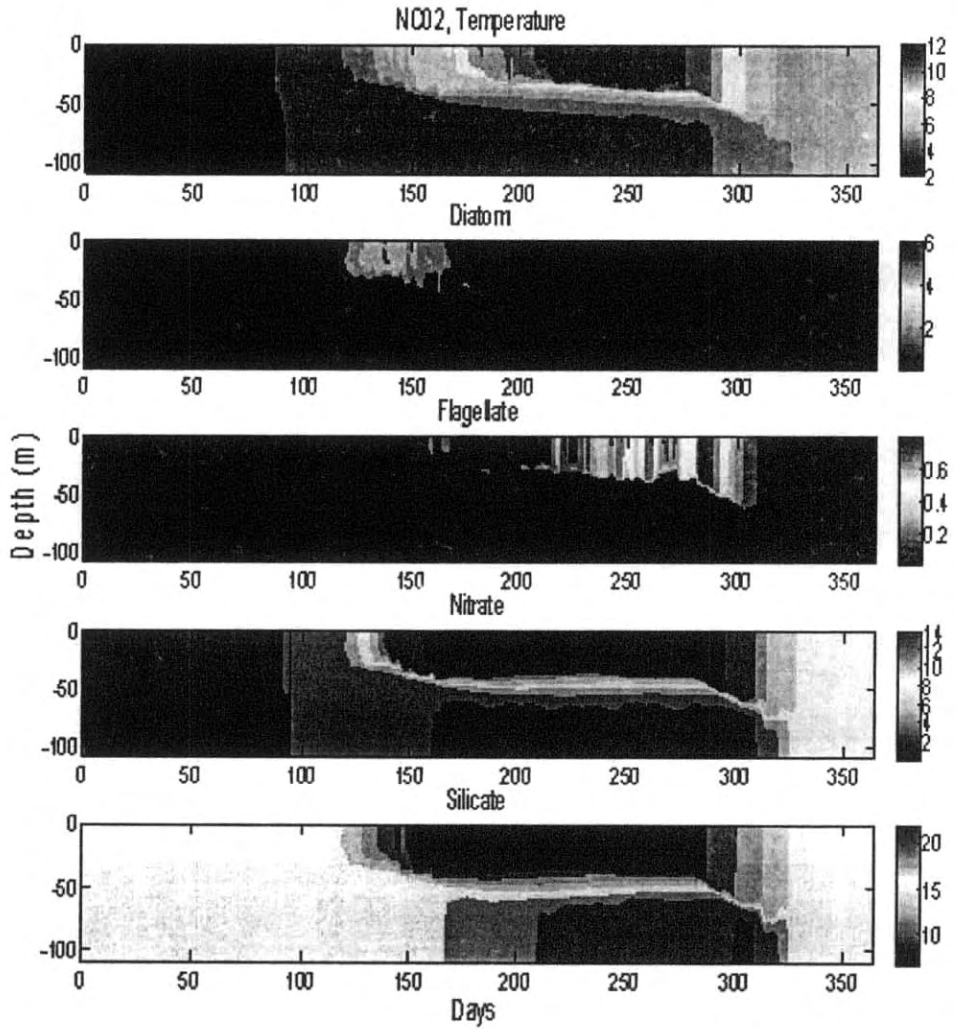


그림 76-2. PROWQM에 42.5°N/137.5°E 지역의 수온과 영양염 자료를 입력하여 동해의 N:Si ratio와 2배 증가된 mixing 조건에서 모델 실험을 수행한 결과 (NC02)

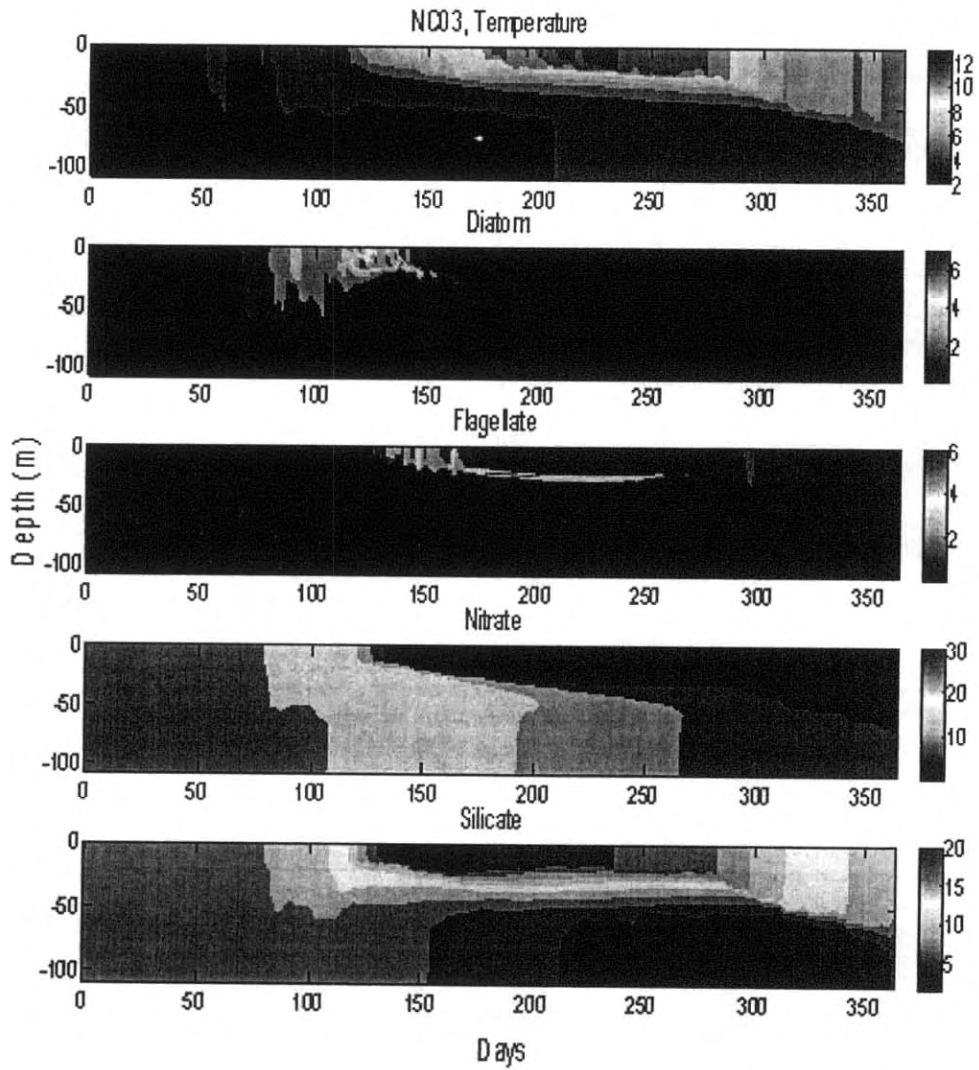


그림 76-3. PROWQM에 42.5°N/137.5°E 지역의 수온과 영양염 자료를 입력하여 동해의 N:Si ratio를 2배 증가하고 normal mixing 조건에서 모델 실험을 수행한 결과 (NC03)

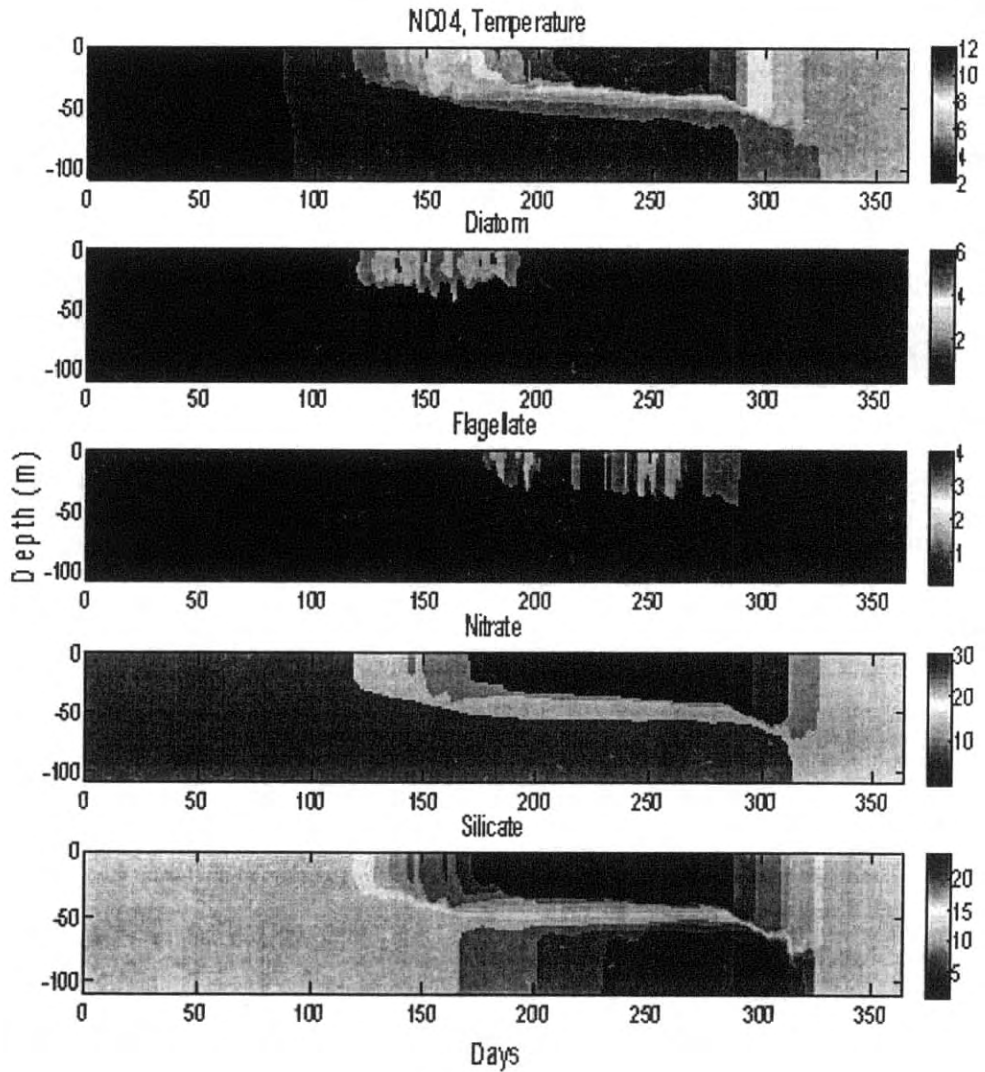


그림 76-4. PROWQM에 42.5°N/137.5°E 지역의 수온과 영양염 자료를 입력하여 동해의 N:Si ratio를 2배 증가하고 2배 증가된 mixing 조건에서 모델 실험을 수행한 결과 (NC04)

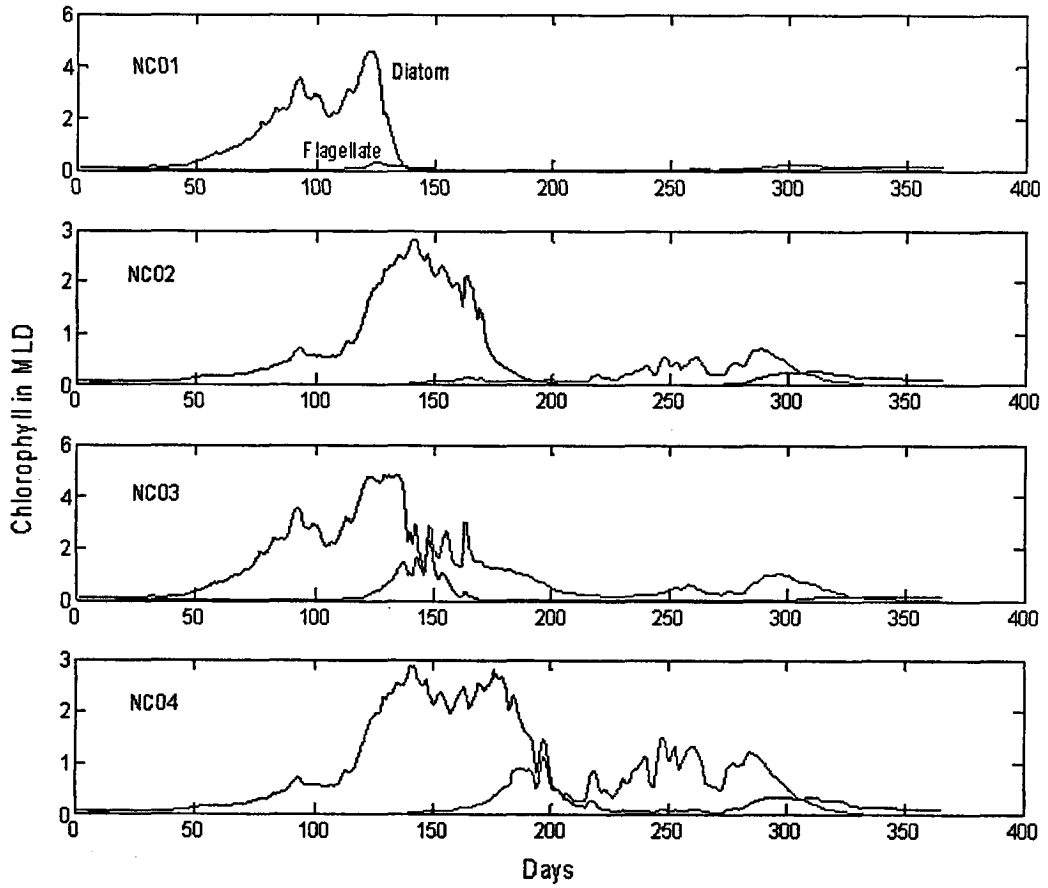


그림 77. NC01에서 NC04 조건에서 혼합층 내 diatom과 flagellate의 시간에 따른 농도 변화

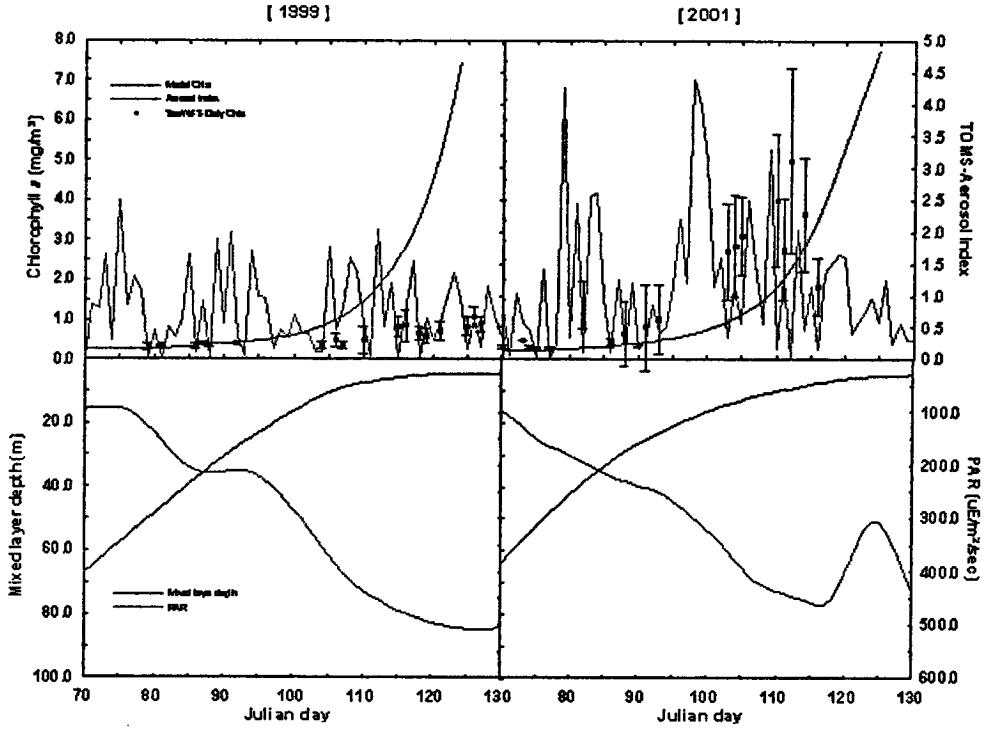


그림 78. NPZD 모델 실행 결과에 의한 B2 지역에서 chlorophyll a와 SeaWiFS chlorophyll a 농도 및 혼합층 내의 PAR와 혼합층의 시간에 따른 변동성, TOMS에서 산출한 aerosol indices

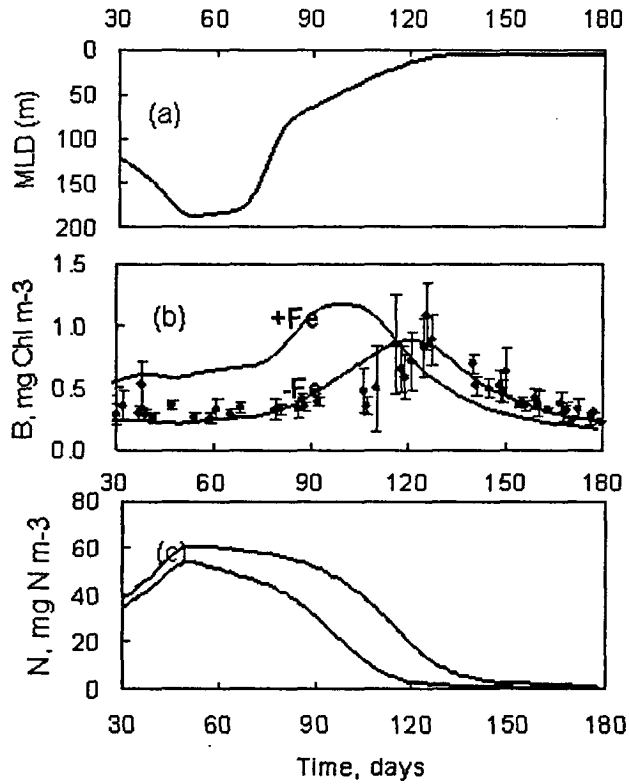


그림 79. 물리모델과 결합된 NPZD 모델로부터 산출된 결과로, 동해에서 황사의 경유가 없었던 1999년도에 B2에서 혼합층 깊이(상)와 철의 유입이 있는 경우(red line)와 철의 유입이 없는 경우(green line)에 혼합층 내의 chlorophyll a 농도의 시간에 따른 변화. 그리고 SeaWiFS의 daily chlorophyll a 농도를 함께 도시함(중). 하위에 위치한 그림은 철의 유입 여부에 따른 혼합층 내의 질산염 농도의 시간에 따른 변화를 보여줌.

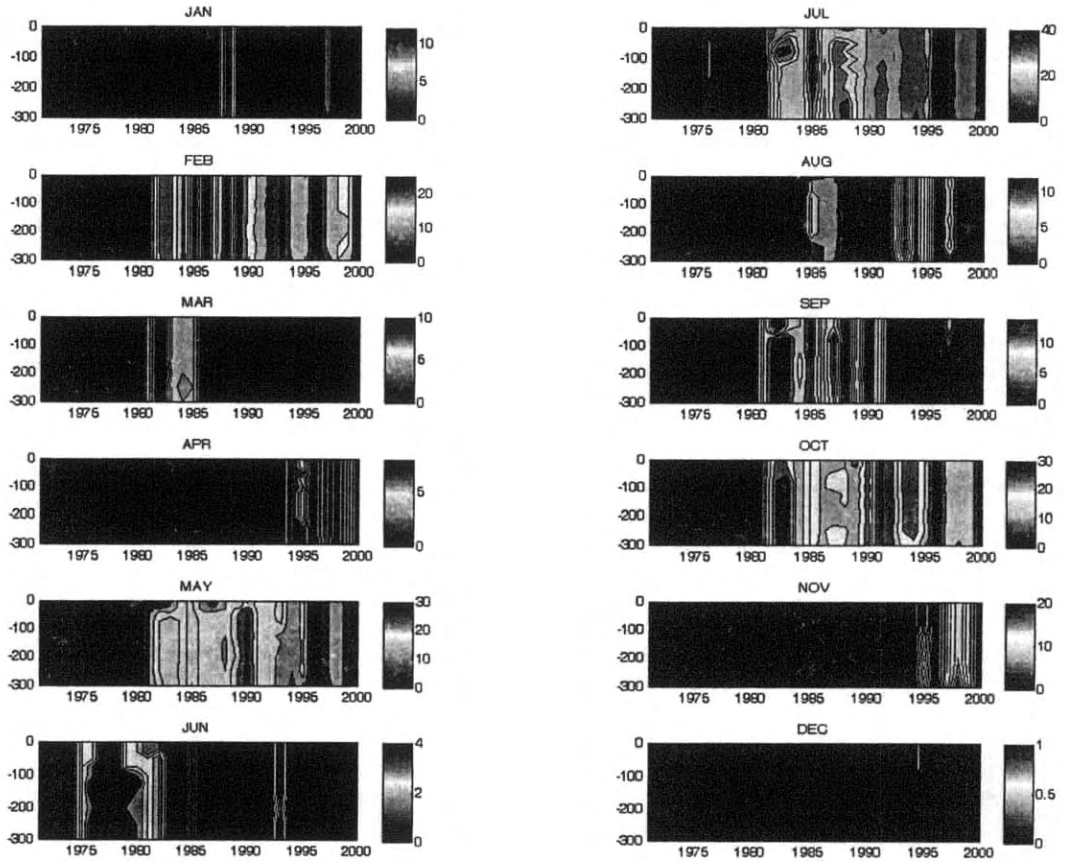


그림 80-1. 동해 전 지역에서 이용 가능한 질산염의 각 월별 관측 정점 수

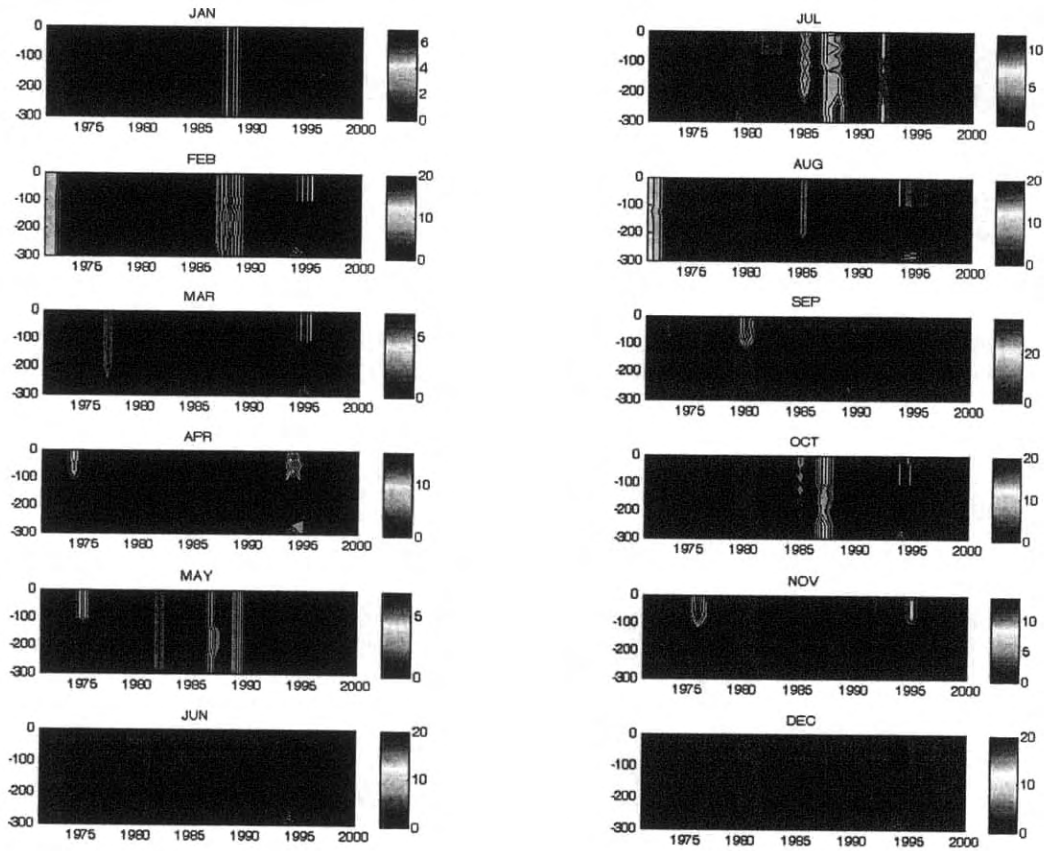


그림 80-2. 동해 전 지역에서 이용 가능한 규산염의 각 월별 관측 정점 수

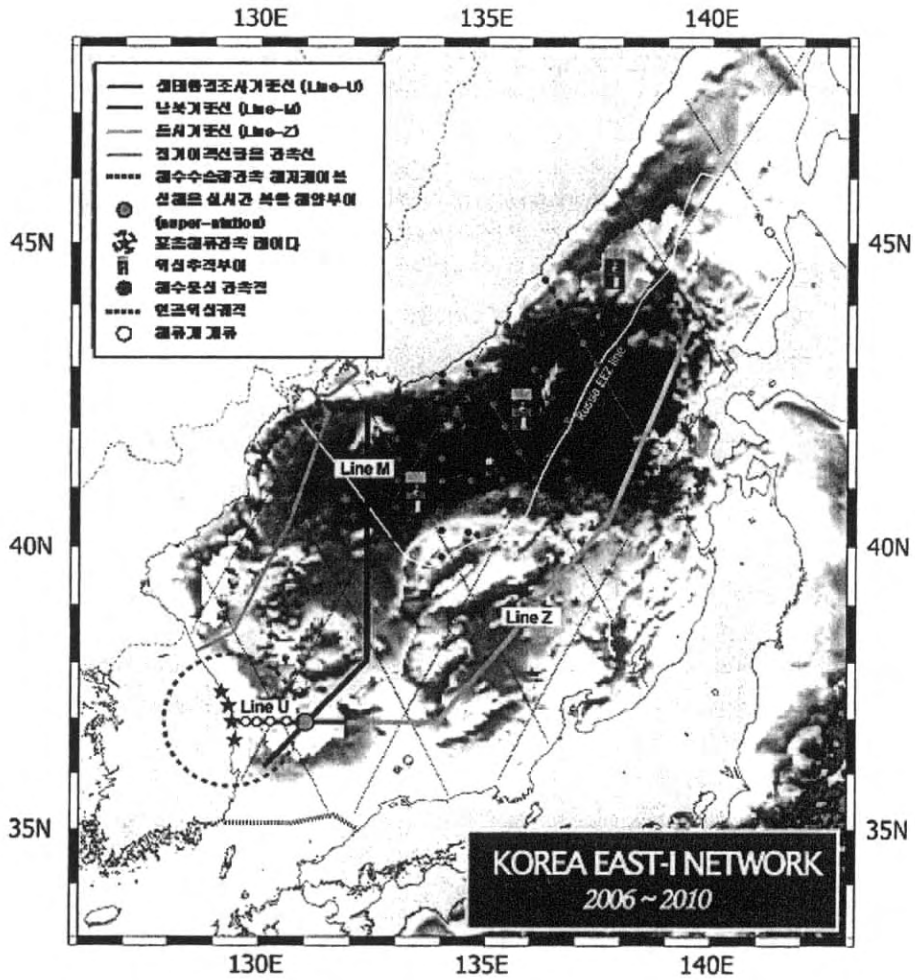


그림 81. 2006년부터 2010년 동안 EAST-I 관측 Line과 정점들

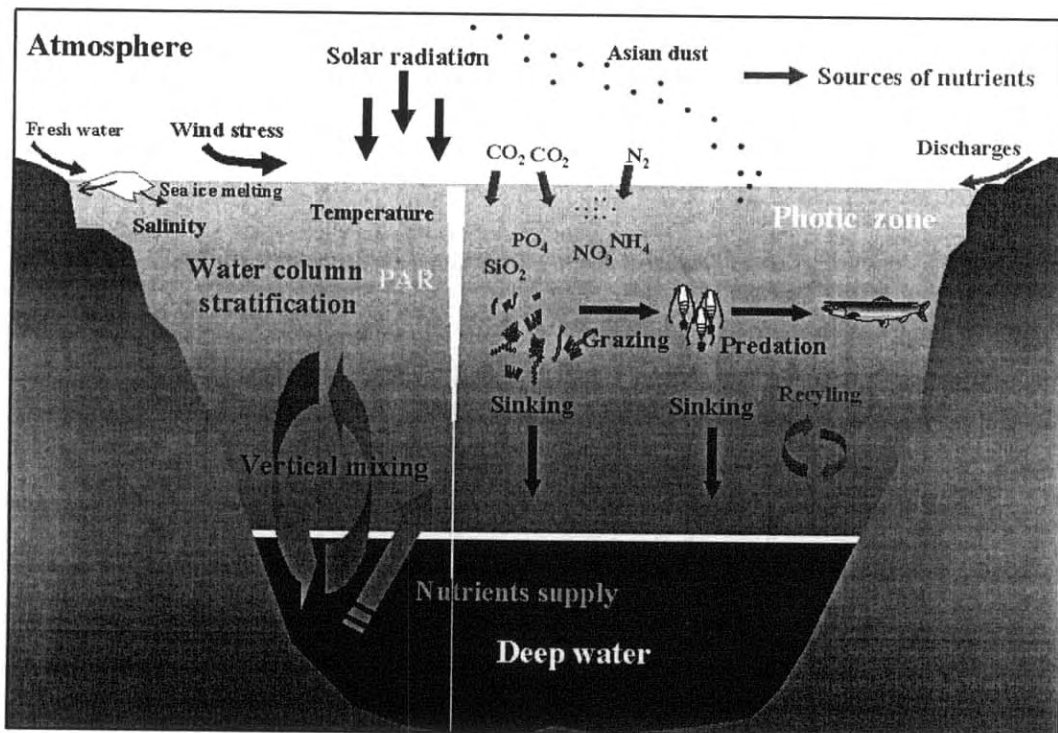


그림 82. 동해 생지화학 모델에서 고려되어야 할 주요 생태환경 인자들의 모식도

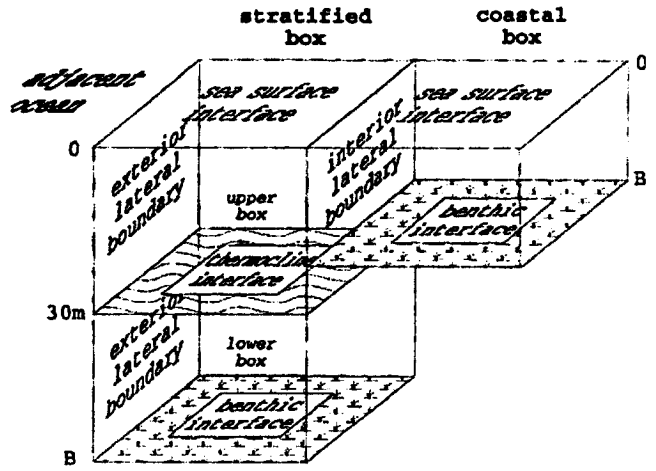
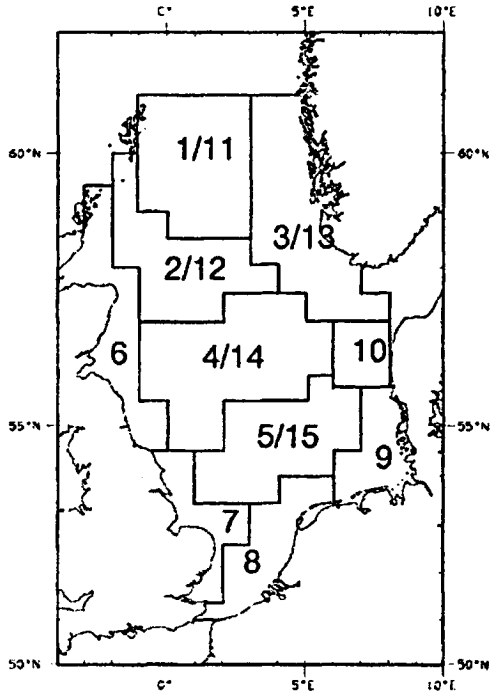


그림 83. 북해에서 개발된 ERSEM 모델을 구성하고 있는 수평, 수직 box 구조

표.1 연구기간 동안 인공위성 센서들로부터 수집한 생지화학 인자들

	Chlorophyll <i>a</i>	PAR	ACOT	SST	Seaice	Sea wind	Precipitation rate	Aerosol index
Sensor	SeaWiFS	SeaWiFS	SeaWiFS	AVHRR	SSM/I	QuickScat SSM/I	SSM/I	TOMS
Spatial resolution	4km, 9km	9km	9km	4km, 9km	25km	0.25°	0.25°	1.25° X 1°
Temporal resolution	daily, 8-day, monthly	daily, 8-day, monthly	daily, 8-day, monthly	daily, 8-day, monthly	daily, weekly, monthly	daily, weekly, monthly	daily, weekly, monthly	daily

표2. B1과 B2 두 지역에서 spring bloom 기간 동안 critical depth의 연 변동

	B1	B2
1998	17.1	28.7
1999	30.8	22.1
2000	36.2	42.3
2001	121.6	78.2
2002	91.6	39.4

부록 2. 모델 equations과 parameters

식 1. Data assimilation에 사용된 simple box model 관련 식 (Evans and Parslow (1985)에 의해 제안된 모델 이용)

- Total attenuation coefficient, k

$$k = k_w + k_c$$

(k_w : 해수에 대한 coefficient, k_c : chlorophyll에 대한 coefficient)

- CHL: C ratio는 수온과 PAR, 영양염에 따라 결정

$$CHL: C = 0.003 + 0.0154 (\exp(0.050 T)) X \\ \left[\exp\left(\frac{-0.059 PAR(1 - \exp(-kM))}{kM}\right) \right] u$$

$$u = \frac{N}{(k + N)}$$

M : mixed layer depth (MLD), 1998년부터 2002년 동안 동해에 대해 개발된 ESROM(MOM3) 모델에서 얻은 MLD 사용.

- 3개의 변수로 구성: phytoplankton (P), herbivores (H), dissolved inorganic nitrogen (N)

$$\frac{dN}{dt} = [-\mu u + \gamma \Phi_p] P + [(1 - \beta) G + \Phi_H] \Omega H + F_N$$

$$\frac{dP}{dt} = [\mu u - \Phi_p - \frac{m_r + w_e}{M}] P - GH$$

$$\frac{dH}{dt} = [\beta G - \Phi_p - \frac{m_r + w_e}{M}] H$$

- Dissolved inorganic nitrogen의 turbulent flux (F_N)

$$F_N = \frac{m_r + w_e}{M} \Delta N$$

MLD 내의 영양염 농도 (N_i)와 MLD 아래의 영양염 농도 (N_D)의 차

$$\Delta N = (N_D - N_i)$$

식 2. 1차원의 물리 모델 (Kpp)에 관련된 식

- Physical model

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}(\overline{wx}) - W\frac{\partial X}{\partial z} + production$$

- Surface forcing: Heat flux

(THF: total heat flux, RHF₀: incoming radiative heating

$I(z)$: down-welling irradiance)

$$THF = -255 - 100\cos\left(\frac{2\pi t}{t_{yr}} + 0.02\right) \text{ watts/m}^2$$

$$RHF_0 = 153.1 - 75.8\cos\left(\frac{2\pi t}{t_{yr}} + 0.01\right) \text{ watts/m}^2$$

$$I(z) = I(0) (0.62e^{-1.67z} + 0.38e^{-0.05z})$$

식 3. 1차원의 물리모델(Kpp)과 접합에 사용된 NPZD와 extended NPZD 모델에 사용된 식

[Extended NPZD]

$$d(PHYS)/dt = \textit{Photosynthesis}(PHYS) - \textit{Respiration}(PHYS) - \textit{Mortality}(PHYS) \\ - \textit{Extracelliular Excretion}(PHYS) - \textit{Grazing}(PHYS \rightarrow ZOOS) \\ + \textit{Entrainment}$$

$$d(PHYL)/dt = \textit{Photosynthesis}(PHYL) - \textit{Respiration}(PHYL) - \textit{Mortality}(PHYL) \\ - \textit{Extracelliular Excretion}(PHYL) - \textit{Grazing}(PHYL \rightarrow ZOOL) \\ - \textit{Grazing}(PHYL \rightarrow ZOOP) + \textit{Entrainment}$$

$$d(ZOOS)/dt = \textit{Grazing}(PHYS \rightarrow ZOOS) - \textit{Mortality}(ZOOS) - \textit{Egestion}(ZOOS) \\ - \textit{Excretion}(ZOOS) - \textit{Grazing}(ZOOS \rightarrow ZOOL) - \textit{Grazing}(ZOOS \rightarrow ZOOP) \\ + \textit{Entrainment}$$

$$d(ZOOL)/dt = \textit{Grazing}(PHYS \rightarrow ZOOL) + \textit{Grazing}(PHYL \rightarrow ZOOL) \\ + \textit{Grazing}(ZOOS \rightarrow ZOOL) - \textit{Mortality}(ZOOL) - \textit{Egestion}(ZOOL) \\ - \textit{Excretion}(ZOOL) - \textit{Grazing}(ZOOL \rightarrow ZOOP) + \textit{Entrainment}$$

$$d(ZOOP)/dt = \textit{Grazing}(PHYL \rightarrow ZOOP) + \textit{Grazing}(ZOOS \rightarrow ZOOP) \\ + \textit{Grazing}(ZOOL \rightarrow ZOOL) - \textit{Mortality}(ZOOP) - \textit{Egestion}(ZOOP) \\ - \textit{Excretion}(ZOOP) + \textit{Entrainment}$$

$$d(NO3)/dt = \textit{Nitrification} - (\textit{Photosynthesis}(PHYS) - \textit{Respiration}(PHYS))XR_{NO2S} \\ - (\textit{Photosynthesis}(PHYL) - \textit{Respiration}(PHYL))XR_{NO3L} \\ + \textit{Entrainment}$$

$$\begin{aligned}
d(NH_4)/dt = & \textit{Excretion} (ZOOS) + \textit{Excretion} (ZOOS) + \textit{Excretion} (ZOOS) \\
& + \textit{Deomposition} (PON \rightarrow NH_4) + \textit{Deomposition} (DON \rightarrow NH_4) \\
& - \textit{Photosynthesis} (PHYS) - \textit{Respiration} (PHYS) X (1 - R_{NO_3S}) \\
& - \textit{Photosynthesis} (PHYL) - \textit{Respiration} (PHYL) X (1 - R_{NO_3}) \\
& - \textit{Nitrification} + \textit{Entrainment}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d(PON)/dt = & \textit{Mortality} (PHYS) + \textit{Mortality} (PHYL) + \textit{Mortality} (ZOOS) \\
& + \textit{Morality} (ZOO) + \textit{Mortality} (ZOO) + \textit{Egestion} (ZOOS) \\
& + \textit{Egestion} (ZOO) + \textit{Egestion} (ZOO) \\
& - \textit{Decomposition} (PON \rightarrow DON) - \textit{Decomposition} (PON \rightarrow NH_4) \\
& - \textit{Sinking} + \textit{Entrainment}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d(DON)/dt = & \textit{Extracellular Excretion} (PHYS) + \textit{Extracellular Excretion} (PHYL) \\
& - \textit{Decomposition} (PON \rightarrow DON) - \textit{Decomposition} (DON \rightarrow NH_4) \\
& + \textit{Entrainment}
\end{aligned}$$

Photosynthesis은 다음과 같이 표현됨.

$$V_{mazi} X \left\{ \frac{NO_3}{NO_3 + K_{NO_3i}} \exp(-\psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_{NH_4i}} \right\} X \exp(kT) X \frac{I_x}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_x}{I_{opt}}\right) X PHYL_i$$

첫 번째와 두 번째 layer에서 light intensity는 각각 다음과 같음.

$$I_1 = \frac{1}{M} \int I_0 \exp(-k_e z) dz \qquad I_2 = \frac{1}{D} \int I_b \exp(-k_e z) dz$$

$$k_e = \alpha_1 + \alpha_2 (PHYS + PHYL)$$

Nutrient utilization의 비는 다음과 같이 표현됨.

$$R_{NO3i} = \frac{\frac{NO3}{NO3 + K_{NO3i}} \exp(-\psi NH4)}{\frac{NO3}{NO3 + K_{NO3i}} \exp(-\psi NH4) + \frac{NH4}{NH4 + K_{NH4i}}}$$

수온에 의해 dependent한 식물플랑크톤의 respiration, extracellular excretion, mortality는 다음과 같이 표현됨.

$$Respiration(PHYi) = R \times \exp(k_r T) \times PHYi$$

$$Extracellular excretion(PHYi) = \gamma \times Photosynthesis(PHYi)$$

$$Mortality(PHYi) = M_p \times \exp(k_{MP} T) \times PHYi^2$$

동물플랑크톤의 grazing는 다음과 같이 표현됨.

$$Grazing(ZOOS) = G_{RS} \times \max\{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - PHYS))\} \times \exp(k_g T) \times ZOOS$$

$$Grazing(PHYS \rightarrow ZOOL) = G_{RL} \times \max\{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - PHYS))\} \times \exp(k_g T) \times ZOOL$$

$$Grazing(PHYL \rightarrow ZOOL) = G_{RL} \times \max\{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - PHYL))\} \times \exp(k_g T) \times ZOOL$$

$$Grazing(ZOOS \rightarrow ZOOL) = G_{RL} \times \max\{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - ZOOS))\} \times \exp(k_g T) \times ZOOL$$

$$Grazing(PHYL \rightarrow ZOOP) = G_{RP} \times \max\{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - PHYL))\} \times \exp(k_g T) \times ZOOP \\ \times \exp\{-\psi_{PL}(ZOOS + ZOOL)\}$$

$$Grazing(ZOOS \rightarrow ZOOP) = G_{RP} \times \max\{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - ZOOS))\} \times \exp(k_g T) \times ZOOP \\ \times \exp\{-\psi_{ZS} ZOOL\}$$

$$\text{Grazing (ZOOS} \rightarrow \text{Zoop)} = G_{RP} \times \max \{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - \text{ZOOS}))\} \times \exp(k_g T) \times \text{Zoop} \\ \times \exp\{-\psi_{ZS} \text{Zool}\}$$

$$\text{Grazing (Zool} \rightarrow \text{Zoop)} = G_{RL} \times \max \{0, 1 - \exp(\lambda(\delta^* - \text{Zool}))\} \times \exp(k_g T) \times \text{Zoop}$$

동물플랑크톤에 의한 excretion과 egestion은 grazing에 비례한다고 가정하였으며, 다음과 같이 표현됨.

$$\text{Excretion (ZOOj)} = (\alpha_z - \beta_z) \times \text{grazing (ZOOj)}$$

$$\text{Egestion (ZOOj)} = (1 - \alpha_z) \times \text{grazing (ZOOj)}$$

동물플랑크톤의 mortality는 다음과 같음.

$$\text{Mortality (ZOOj)} = M_{Zj} \times \exp(k_{MZ} T) \times \text{ZOOj}^2$$

PON과 DON의 nitrification과 decomposition은 수온에 dependent하며 아래와 같은 식으로 표현됨.

$$\text{Nitrification} = k_{NO} \times \exp(k_{NT} T) \times \text{NH}_4$$

$$\text{Decomposition (PON} \rightarrow \text{DON)} = V_{PD} \times \exp(k_{PD} T) \times \text{PON}$$

$$\text{Decomposition (PON} \rightarrow \text{NH}_4) = V_{PN} \times \exp(k_{PN} T) \times \text{PON}$$

$$\text{Decomposition (DON} \rightarrow \text{NH}_4) = V_{DN} \times \exp(k_{DN} T) \times \text{DON}$$

PON의 sinking은 아래와 같음.

$$Sinking = \frac{S_d \times PON}{H} \quad (H: \text{the thickness of the layer})$$

[NPZD]

$$d(PHY)/dt = Photosynthesis - Respiration - Mortality(PHY) - Grazing + Entrainment$$

$$d(ZOO)/dt = Grazing - Mortality(ZOO) - Egestion - Excretion + Entrainment$$

$$d(DIN)/dt = Excretion + Decomposition(ZOO) - Photosynthesis + Entrainment$$

$$d(DET)/dt = Egestion + Mortality(PHY) + Mortality(ZOO) - Decomposition - Sinking + Entrainment$$

식물플랑크톤의 광합성은 다음과 같이 표현됨.

$$Photosynthesis(PHY) = V_{max} \times \left\{ \frac{DIN}{DIN + K_{DIN}} \right\} \times \exp(kT) \times \frac{I_x}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I_x}{I_{opt}}\right) \times PHY$$

표 1. Data assimilation을 위해 사용된 simple box model의 parameters

Symbol	Parameter	Unit
μ_m	Maximum growth rate	$1d^{-1}$
α	Slope of photosynthesis versus light intensity relation ($P-I$)	$m^2W^{-1}d^{-1}$
Φ_P	Phytoplankton loss	$1d^{-1}$
k	Half-saturation constant of N uptake rate	$mmolNm^{-3}$
g	Maximum grazing rate	$1d^{-1}$
ϵ	Prey capture rate	$m^6/mmol^{-1}$ $N^{-2}d^{-1}$
Φ_H	Herbivore mortality	$1d^{-1}$
β	Assimilation efficiency of herbivores	Dimensionless
m_r	Mixing rate	md^{-1}
Ω	remineralization rate of herbivore losses	Dimensionless
γ	remineralization rate of phytoplankton losses	Dimensionless

표 2. 1차원 Kpp 모델과 접합된 NPZD, extended NPZD 모델에 사용된 parameters

Symbol	Parameter	NPZD	Extended NPZD	Unit
V_{max}	Maximum photosynthetic rate of PHY at 0°C	0.6	-	d^{-1}
V_{maxS}	Maximum photosynthetic rate of PHYS at 0°C	-	0.3	d^{-1}
V_{maxL}	Maximum photosynthetic rate of PHYL at 0°C	-	0.6	d^{-1}
Ψ	Ammonium inhibition coefficient	-	1.5	m^3molN^{-1}
K_{DIN}	Half saturation constant of PHY for DIN	1.5	-	$mmolNm^{-3}$
K_{NO3S}	Half saturation constant of PHYS for nitrate	-	1.0 (3.0)	$mmolNm^{-3}$
K_{NO3L}	Half saturation constant of PHYL for nitrate	-	20. (3.0)	$mmolNm^{-3}$
K_{NH4S}	Half saturation constant of PHYS for ammonium	-	0.3	$mmolNm^{-3}$
K_{NH4L}	Half saturation constant of PHYL for ammonium	-	0.5 (0.3)	$mmolNm^{-3}$
k	Temperature coefficient for photosynthetic rate	0.0693	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$
I_{opt}	Optimum light intensity	70	70 (104.7)	wm^{-2}
α_1	Light dissipation coefficient for sea water	0.05	0.05	m^{-1}
α_2	Selfshading coefficient	0.06	0.06	m^2molN^{-1}
R	Respiration rate at 0°C	0.03	0.03	d^{-1}
k_r	Temperature coefficient for respiration	-	0.0519	$^{\circ}C^{-1}$
γ	Ratio of extracellular excretion to photosynthesis	-	0.135	
M_P	Phytoplankton mortality rate at 0°C	0.07	0.07 (PHYS: 0.0585 PHYL: 0.0293)	$m^3molN^{-1}d^{-1}$
k_{MP}	Temperature coefficient for phytoplankton mortality	0.0693	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$
G_R	Maximum grazing rate of ZOO at 0°C	0.3	-	d^{-1}
G_{RS}	Maximum grazing rate of ZOOS at 0°C	-	0.4	d^{-1}
G_{RL}	Maximum grazing rate of ZOOL at 0°C	-	0.1 (PHYS) 0.4 (PHYL, ZOOS)	d^{-1}
G_{RP}	Maximum grazing rate of ZOOP at 0°C	-	0.1 (0.2)	d^{-1}
λ	Ivlev constant	1.4	1.4	m^3molN^{-1}
σ^*	Threshold value for grazig	0.043	0.043	$mmolNm^{-3}$
k_g	Temperature coefficient for grazing	0.0693	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$
α_Z	Assimilation efficiency of zooplankton	0.7	0.7	
β_Z	Growth efficiency of zooplankton	0.3	0.3	
M_Z	Zooplankton mortality rate at 0°C	0.07	0.07 (0.585)	$m^3molN^{-1}d^{-1}$

Symbol	Parameter	NPZD	Extended NPZD	Unit
k_{MZ}	Temperature coefficient for zooplankton mortality	0.0693	0.0693	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
ψ_{PL}	Preference coefficient for PHYL	-	4.605	$\text{m}^3\text{molN}^{-1}$
ψ_{ZS}	Preference coefficient for ZOOS	-	3.01	$\text{m}^3\text{molN}^{-1}$
k_{NO}	Nitrification rate at 0°C	-	0.03	d^{-1}
k_{NT}	Temperature coefficient for nitrification	-	0.0693	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
V_{PD}	Decomposition rate at 0°C (PON→DON)	-	0.05 (0.1)	d^{-1}
k_{PD}	Temperature coefficient for decomposition (PON→DON)	-	0.0693	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
V_{PN}	Decomposition rate at 0°C (DET→DIN) or (PON→NH ₄)	0.05	0.05 (0.1)	d^{-1}
k_{PN}	Temperature coefficient for decomposition (DET→DIN) or (PON→NH ₄)	0.0693	0.0693	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
V_{DN}	Decomposition rate at 0°C (DON→NH ₄)	-	0.05	d^{-1}
k_{DN}	Temperature coefficient for decomposition (DON→NH ₄)	-	0.0693	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
S_d	Sinking velocity of DET or PON	10	40	md^{-1}
$C/chla$	Ratio of carbon to chlorophyll <i>a</i>	50	50	

부록 3. CD 첨부 (D/B, 계량화된 parameters와 satellite images)