

동해의 수산자원과 한반도 기후변동의 역학관계

Relationship and Dynamics between Climate  
Change and Fishery Resources  
in the East Sea of Korea

2003. 5

연구기관  
부경대학교

해양수산부

# 제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “동해의 수산자원과 한반도 기후 변동의 역학관계에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

주관연구기관명 : 부경대학교

총괄연구책임자 : 김 수 암

연 구 원 : 장창익, 오재호

오임상, 이장욱

김형근, 강형구

강수경, 강수연

김옥연, 김정희

박원선, 서영일

서현주, 손동화

양윤선, 윤상철

이만우, 이성일

# 여 백

# 요 약 문

## I. 제 목:

동해의 수산자원과 한반도 기후 변동의 역학관계에 관한 연구

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

한반도가 위치한 북서태평양은 세계 어획량의 약 30% 정도를 생산하는 중요한 해역이며, 이 해역 국가들은(즉, 한국, 일본, 중국, 러시아) 세계적으로 중요한 수산업국이다. 최근, 수산자원은 기후 혹은 해양환경의 변화에 따라 그들의 분포와 자원량이 큰 폭으로 변화하고 있다는 증거가 보고되었다. 본 연구진은 기상학, 해양학, 수산학을 동시에 고려하면서 우리의 실생활에 의미를 제공하는 연구 방법을 찾고자 노력하였으며, 그 방법은 어류가 서식하고 있는 동해의 해양생태계에 대한 기후변동의 영향을 파악하는 것이다.

그러므로, 한반도에서 과거에 발생하였던 기후변동 현상에 대한 이해가 동해 수산자원과의 역학관계를 규명하는 첫 단계가 된다. 과거에 수집된 기상, 해양, 수산자료를 기후변동의 시각에서 재조명함으로써, 한반도에서 발생하였던 기후의 변동이 생태계를 어떻게 변화시켰는가를 알아내는 것이 본 과제의 일차 목표이다. 이러한 연구는 향후 생태계 변화의 사례가 계속 수집되면서, 한반도에 새로운 기후가 형성될 때, 생태계의 모습이 어떻게 변화될 것이라고 예견할 수 있는 중요한 단서가 될 것이다.

한반도의 기후변동은 보다 큰 규모의 변동에서 영향을 받기 때문에 중위도 태평양 지역의 해양-대기 변동의 특징도 살펴보았으며, 우리나라에서 수집된 기상자료를 가지고 한반도의 기후변동의 특징 및 특성에 대하여 명확히 파악하고자 하였다. 또한, 기후의 변동에 따른 동해 표층 해수의 물리적 반응을 연구하여, 그 변화된 환경이 생태계(해조류, 플랑크톤, 수산자원)에 미치는 영향을 분석하였다. 환경변화와 그에 따른 생태계의 변화가 유추된 이후에, 합리적으로 자원을 관리하기 위하여 필요한 학문 분야를 고려하며, 생물자원을 효율적으로 관리할 수 있는 방안을 제안하는 것이 본 과제의 목적 중의 하나이다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 과제는 해양에서 기후변동의 영향을 파악하기 위한 2년 기간의 정책 과제이다. 따라서 각 분야에 축적되어 있던 관측 자료를 기후변동의 시각으로 재분석하여 기후의 변동과 생태계의 변화 증거를 찾아내는 것이 주요 연구내용이다. 연구방법론 및 세계적 추세 분석, 기후, 물리해양, 생태계의 생물적 요소(해조류, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤), 생태계 모델링(하위영양준위 모델링, 상위영양준위 모델링), 수산자원의 변동 및 환경변화와의 관계 등으로 구분하여 연구를 수행하였다. 한반도에서의 장기간 기후변동 현상을 이해를 위하여, 기상청의 지점의 기상자료의 파업분석을 실시하였고, 한반도의 장기변화의 분석을 위하여 서울지방 강수량 자료를 이용하여 Standard Precipitation Index(SPI)를 구하고 이의 파업분석을 실시하였다. 또한 한반도의 장기변동의 원인을 추적하기 위하여 태평양의 바람의 변동성을 살펴보고 SST와의 연관성을 찾아보았으며, Area Wind Index (AWI)를 구하여 바람의 변동성을 보다 상세히 분석하였다. 기후변동의 관점에서 해수, 해수면, 전선 변동을 연구하였다. 목적을 달성하기 위하여 해양 및 기후 자료 수집, 수온의 경년 변동의 특성과 그 원인 분석, 장주기 변동 분석, 해수면 자료 분석, 해양-대기 열교환 변동성 분석, 동해의 전선 및 와류 연구를 수행하였다.

해양생태계 연구에서는 동해 해조류의 지역별, 시대별 분포특성이 연구되었고, 동물플랑크톤 생물량의 세대적 변동과 해역별 출현 양상, 특정해역에서의 생산력이 연구되었다. 수산자원의 경우, 1차년도에서는 동해의 연도별 어업별 어종별 자원 특성 분석, 어종 조성의 변화, 기후변동이 수산자원에 미치는 생태기작에 관한 연구를 수행하였고, 2차년도에서는 기후변동에 민감한 주요 어종의 어장분포, 자원량, 단위노력당 어획량, 서식처 변동 특성, 서식 생물군 현황과 동해의 생태계 구조, 생태계 차원의 자원관리 방안에 대한 연구를 수행하였다.

생태계 모델은 목적에 따라 구조와 과정모델의 선정에 있어 다양한 선택이 가능하다. 이러한 유연성은 모델의 상호비교 또는 모델의 특이성이라는 문제를 수반하므로, 구조결정, 통화의 선택, 과정모델, 상위 주위와의 연결 등의 문제를 충분히 고려하여야 한다. 본 연구에서는 하위영양준위 모델링의 경우, JGOFS Model workshop, PICES-GLOBEC Model의 결과를 검

토하여 동해 생태계 모델의 수립과정에서 고려할 주요문제점을 제시하였으며, 상위영양준위 모델링에서는 영양단계의 구조를 파악하여 각 영양단위 사이의 에너지 흐름을 제시하였다.

#### IV. 연구개발결과

기후변화에 따른 해양연구의 방법에 대한 선진국 연구사례들이 수집되었으며, 이와 유사한 방법을 이용하여 우리나라에서의 수산자원변동을 분석하였다. 표층해수온의 변화, 엘니뇨, 북태평양의 기후체제변화 등이 생태계 및 수산자원의 변동을 유발하는 요소로 간주되었으며, 우리나라 해역의 소형 표층어류(small pelagic fish)들의 변화가 주목되었다.

한반도에서 장기간의 기후변동 현상은 지난 40 - 50년 동안 지표면 연평균기온이 매 10년 마다 0.23도의 증가율 나타나고 있음을 보여준다. 이미 여러 논문에서 알려진 1970년 중반의 갑작스런 증가는 뚜렷하지 않지만, 1970년대 중반 이후, 특이치 발생빈도는 그 이전에 비해 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 십년규모 변동 성분으로 인한 1980년대 이후 기온의 특이치 발생 빈도가 빈번하였으나, 경년변동 성분은 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 장기간의 변동을 알아보기 위하여 서울지방 강수량을 파악분석을 수행한 결과, 장기간에 걸쳐 나타나는 큰 규모의 변동 외에도, 강수량의 변동은 작은 규모의 변동과 관련하여 나타나고 있음을 알 수 있었다. 1820년대 초, 1830년대 초, 1870년대 말, 1940년 전후, 1990년 전후, 1990년대 말에 나타나는 강한 이상 습윤기는 20년 이상의 큰 규모의 변동과 일차적으로 관련되어있으며, 3 - 5년 주기의 변동에 의해 세부구조가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 중위도 태평양에서의 변동 현상은 1977년 전후를 기점으로 많은 변화가 일어난다. PDO(Pacific Decadal Oscillation)와 IOD(Indian Ocean Dipole) index는 1977년 이후부터 지금까지 계속 강화되는 모습을 가지고 있으며, AOI(Arctic Oscillation Index)는 점차 약화되고 있다. 또한 이 지역의 바람의 변동을 살펴보면, 상층의 대기는 대략 20년 주기의 변동성을 보이며, 하층 대기는 약 10년 주기의 변동성을 보인다. 또한 이를 SST와 비교하면, 지역에 따라 약 -0.2 - -0.6의 상관관계가 나타난다. 따라서 중위도

태평양의 10년 주기의 수산자원의 변동은 바람의 변동에 따라 SST가 변하고 이에 따른 현상이라 추정된다.

한반도 주변해역 및 동해 기후변동 연구에 필요한 방대한 양의 해양 및 기상 관측자료를 수집하였다. 자료 분석을 통하여 동해 수온의 경년 및 수십년 주기 변동 특성을 파악하였다. 수온의 경년 변동 중 가장 우세한 모드는 동아시아 몬순 변동과 밀접한 관계가 있었다. 엘니뇨와 관련된 수온 변화는 엘니뇨와 3 - 9개월의 시간차를 두고 영향을 받았다. 즉, 엘니뇨에 의한 적도 중앙 및 동부의 수온상승과 반대 위상이 지연되어 나타나서 엘니뇨 겨울 이후의 여름철 동해의 수온이 하강한 것으로 분석되었다. 동해의 장주기 변동에서 1960년대에 동해 남부 해역에서 수온하강이 일어났으며, 1990년대에는 지속적인 수온 상승이 일어났다. 해수면 자료에서도 수온변화에서 발견된 장주기 변동성이 나타났다. 동해 전선 및 해류의 반응 실험을 통해 기후변동에 의해 해표면 온도가 변할 경우 전선 및 해류의 패턴이 변할 수 있음을 제시하였다.

동해생태계 및 수산자원에 영향을 미치는 기후변동의 효과를 연구하기 위하여 플랑크톤 생태계의 중요성이 이론적으로 검토되었으며, 해조류, 동물플랑크톤의 분포 변동 및 생산력 변화, 수산생물의 변화 및 변화 요인들이 분석되었다. 그리고, 생태계 모델링에 대한 일반적 고찰과 적용 사례는 하위영양준위와 상위영양준위로 나누어 검토되었다.

아직 명확한 원인은 규명되지 않았으나, 동해 연안에서도 엽상해조류가 줄어들고 석회조가 증가하는 갯녹음 현상이 보고되었다. 지역별 차이를 보기 위하여, 고성, 양양, 강릉, 삼척, 울산 등에서 해조류가 채집되었다. 동해의 북부 해역은 남부해역에 비하여 갯녹음 현상이 덜 한 것으로 나타났다. 그리고, 일반적으로, 수심이 깊어질수록 출현종의 수가 적다.

동물플랑크톤의 생물량 분포를 조사하기 위하여 1968 - 1996년 사이에 두 달 간격으로 수집된 국립수산과학원의 자료가 이용되었다. 최신 통계기법인 EOF 분석 방법이 자료에 적용된 결과, 플랑크톤의 생물량은 1990년대에 들어와 급격히 증가하였으며, 특히 독도 부근의 동해 중앙부에서 대부분 높은 밀도로 출현한다는 사실이 밝혀졌다. 동해 남부의 일광만에서 수행된 동물플랑크톤의 생산력 연구에서는 요각류 *Acartia steueri*의 연간 생산력이

25 mgC/m<sup>3</sup> 혹은 166 mgC/m<sup>2</sup>이며, 11월, 5월, 7월, 8월에 최대치가 관측되었고, 일반적으로 12 - 4월, 9 - 10월 에는 낮은 값을 보이고 있다.

JGOFS Model workshop 에서는 3-7 개의 정상변수를 가진 10개의 모델을 비교하였다. JGOFS 모델의 특성은 통화로써 질소 만을 선택하였고 식물이나 동물플랑크톤은 크기, 식성, 연령구조 등을 무시하고 각각 하나의 격실로 대표한 것이다. PICES-GLOBEC 모델은 질소와 규소를 통화로 설정하고 식물은 2개, 동물은 3개의 격실로 하여 JGOFS 모델에 비하여 훨씬 더 복잡한 구조를 제시하였다. 광합성모델의 민감성은 크지 않았다. 영양염 흡수는 Michaelis-Menten 모델이 주로 사용된다. 성장률은 광합성율과 영양염 흡수율의 곱함수나 최소함수로 표현한다. 암모니아와 질산염의 선택성은 대개 지수함수로 표현한다. 포식은 가장 민감한 과정모델이며 주로 Holling Type III가 사용된다. 미생물 순환고리는 별도의 격실(정상변수)로 만들지 않고 DON의 분해나 미세동물플랑크톤의 성장에 대해 매개변수화한다. 상위영양준위와 연결은 두 가지 방법이 가능하다. 첫 번째 방법은 어류의 개체군 역학적 접근으로 우선 영역을 여러 개의 세부영역으로 나눈 후 하위 영양생태계 모델에서 세부영역별 계산을 한 후 세부영역 간의 개체군의 성장을 추적하는 것이다. 두 번째 방법은 개체의 이동과 성장을 개체기반모델로(IBM: Individual Based Model) 추적하여 개체군 전체로 합하는 방법이다. 동해 울릉분지에서 2000년 11월, 2001년 11월에 수행된 현장조사의 결과 초미세 식물플랑크톤이 일차생산의 18-75%를 차지하는 것으로 나타나 무엇보다 최소 2 개의 식물플랑크톤의 격실이 필요하고 미생물순환고리의 적절한 취급이 필요함을 보여주었다.

전 지구적인 규모의 기후체제전환이 우리나라 동해 수산자원 및 생태계의 구조에 미친 영향을 파악하기 위하여 어획량의 변화를 시대별, 어업별, 어종별로 구분하여 분석하였으며, 생태계 차원에서의 합리적인 수산자원관리 방안을 제시하였다. 1차년도 연구에서는 동해 수산자원의 연도별 어업별 어종별 변동 특성을 분석하기 위하여 한국 연근해 주요 어종 및 주요 어업에 대한 자료 정리 및 분석하여 동해 수산자원의 장·단기 변동을 나타냈다. 기후변동이 수산자원에 미치는 생태기작을 분석하기 위해 우리나라 동해에서 나타난 기후변동현상과 수산자원과의 관계 등이 분석되었는데, 기후체제

전환이 주요 표층어류의 어획량에 많은 영향을 미친 것으로 분석되었다. 2차년도 연구에서는 1차년도의 연구결과를 바탕으로 하여 기후변화에 따른 주요 어종의 서식처 변동 특성을 분석하였으며, 기후체제전환이후 고등어, 전갱이, 정어리의 어장은 기후체제 전환 이전과 다른 분포양상을 나타냈다. 기후체제전환 이후 해양환경이 변화함에 따라 동해 생태계의 구조에도 많은 변화가 나타났다. 동해 생태계 구조를 Ecopath/Ecosim 프로그램을 사용하여 나타내고 생태계 차원의 거시적인 관점에서의 수산자원관리 방안을 제시하였다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 수행하면서 수집된 광범위한 해양 및 대기 자료는 이후의 기후변동 분석에 이용할 수 있으며, 동해의 경년 변동이 동아시아 몬순 및 엘니뇨와 상관관계가 있다는 결과는 지구 규모의 기후 예측 결과를 바탕으로 동해의 기후 변동을 추정할 있는 기초 자료로 사용할 수 있다. 본 연구를 통해 밝혀진 물리변수의 자연적인 변동특성을 생물변수 변동과 비교하면 기후변동에 따른 생물량 변동을 추정하는데 도움이 된다. 생태계 연구 결과는 기후변동에 민감한 표영성 어류에 대해 기후변화가 해양생태계에 미치는 영향에 관련된 생태학적 과정과 구체적인 메카니즘을 밝히는데 기초 자료로서 활용될 수 있고, 해양환경을 고려한 합리적인 수산자원관리 방안을 수립하는 자료로 제공될 수 있다. 해양생태계 구조분석에 대한 방법론을 제공함과 동시에 생태계 차원의 거시적인 관점에서 수산자원을 평가하고 관리하는 인식 전환의 계기를 마련할 것이며, 이를 통하여 동해 생태계를 파악하기 위한 주변국과의 공동으로 자원조사 및 해양조사를 실시하여 주요 수산자원에 대한 계절적 회유경로, 자원량, 생태학적 파라미터 등에 관한 자료와 정보의 교환을 마련하기 위한 밑거름이 될 수 있다.

# S U M M A R Y

## **I. Title**

Relationship and Dynamics between Climate Change and Fishery Resources in the East Sea of Korea

## **II. Objectives and Significance**

The northwestern Pacific is the most productive Ocean in the world producing about 30 % of world catch, and four nations (Korea, Japan, China, and Russia) in the area are the top-level countries in fisheries. From time to time, however, it has been notified that abundance, distribution and species composition of major fish species were altered by climate events. This research team has always been to find meaningful ways to bring meteorology, oceanography and fisheries together, and the meaningful ways developed in the form of studying the effect of climate variation on marine ecosystem inhabited by fish.

Furthermore, primary productivity of the ocean is not stable under the changing environments, so that carrying capacity of the ocean varies from one climate regime to another. Due to the recent increase in greenhouse gas in atmosphere, world climate is rapidly changing, and, in turn, the earth ecosystem responds upon climate changes. Comparing the ecosystem in the past, the present shapes of ecosystem have been modified seriously. Fishery resources in marine ecosystem, which usually occupy the upper trophic level, are also inevitable from such changes, because they always react to the natural environmental conditions. Through the retrospective analysis on data sets collected from meteorology, oceanography, and fishery in the past we interpreted the environmental/ecological changes in view of climate change.

The climate change over the Korean Peninsula is always connected to the large-scale changes in the Pacific Ocean. The air-sea interaction of the Pacific was investigated to identify the characteristics of climate over Korea. Some physical properties such as temperature, sea-level, heat-exchange at the surface layer of East Sea of Korea were analysed to reveal long-term changes. The effects of climate changes were inferred from the changes in ecosystem components (macro-algae, plankton, and fish populations). Also, because ecosystem management principles for multi-species should be adopted for better understanding and management of ecosystem, some thought and suggestions on ecosystem management was made based on the results of this research.

We suggested the necessity of cooperative research with neighboring nations for the fisheries resources management considering the holistic ecosystem concept. In the first year, we studied variations in time-series production of fisheries resources and the effect of climate exchanges to them. In the second year, we conducted researches on the shifts of habitat distribution of major pelagic species by climatic changes, the structure of the East Sea ecosystem, and developed an ecosystem-based fisheries resource management procedure.

### **III. Contents and Scope**

Major climate events such as global warming, atmospheric circulation pattern, climate regime shift in the North Pacific, and El Nino event in the Pacific tropical waters were introduced in relation to fisheries aspects. The current status and future projection of fishery production was investigated, especially in the North Pacific including Korean waters. This new paradigm, ecosystem response to environmental variability, has become the main theme in marine ecology and fishery science, and the GLOBEC-type researches might provide a solution for cause-effect mechanism as well as prediction capability. This two-year research project aims to understand climate effects on marine

ecosystem. Some historic data sets were analysed in view of climate change. Methodology for the GLOBEC research, Climate, physical oceanography, ecosystem, fisheries, and modelling were the major components of this project.

To understand long-term variability of climate in Korea, wavelet transform analysis was applied to the data sets collected from weather stations in Korea. Standard Precipitation Index (SPI) was calculated using precipitation information in Seoul. Also, to find out the relationship of climate variability between Korean Peninsula and Pacific Ocean, analyses were performed using data sets from the National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) of the USA for 50 years (1950 - 1999). For the changes in ocean properties, massive oceanic and atmospheric data around the Korean Peninsula were collected and analysed for the climate variability.

To compare the regional difference in bleaching effect of macro-algae in the coastal area of the East Sea, six locations along the coast were selected for the collection of algae. Vertical distribution and species diversity by depth were analysed.

Long-term changes in zooplankton biomass in the East Sea was studied using data sets from bi-monthly oceanographic surveys (February, April, June, August, October and December, 1968-1996) by the National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI). Zooplankton was collected using NORPAC net, and a total of 35 stations were selected for the analysis. A series of data was collected in Ilkwang Bay, southeastern coast of Korea, from October 2, 1991 to October 8, 1992. The stage-specific abundance of a marine pelagic copepod *Acartia steueri* was re-analysed to estimate the secondary production. Biomass of an individual *A. steueri* was estimated from the length-weight relationships in the literature. Production was estimated from the growth rate method by knowing the biomass and instantaneous growth rate of each stage, and specific egg production rate of adult female.

Depending on the purpose of the ecosystem models, a variety of structure and process models are available. This flexibility inevitably introduces the

problem of model specificity and inter-comparison. For the East Sea ecosystem model, determining the model structure, model currency, process models, and linkage with higher trophic level should be properly considered. In this study, major issues in developing the East Sea ecosystem models are discussed by reviewing the results of JGOFS and PICES-GLOBEC workshops on ecosystem modeling.

In the first year, we conducted studies on the characteristic of fisheries resources by year, fishery and species, changes in species composition and mechanism of the effect of climatic changes to fisheries resources. In the second year, we conducted studies on the distribution of fishing grounds of major species, abundance, catch per unit effort (CPUE), changes in habitat distribution, the structure of the East Sea ecosystem and an ecosystem-based fisheries resource management procedure.

#### **IV. Results**

Fish populations have been adapted by oceanic phenomena through their long evolution process. Their survival and/or growth depends on the availability of food and presence of predators, and those parameters should be high in spawning, nursery, and feeding grounds chosen by marine fish in ordinary period. The episodic changes in climate/environments, however, result in the changes in productivity and species composition of ocean ecosystem, and the recruitment failure of fish population caused by high mortality of fish larvae might be occurred. Most hypotheses on recruitment processes are closely related to the plankton-based ecosystems, and the concepts of some recruitment processes emphasizing oceanic variability were introduced. Evidence and examples on this issue were extracted from studies in Korean waters.

The trend in temperature increase in Korea was estimated as 0.23 degree/decade, and the frequency of unusual events in temperature increased after

middle of 1970's and the frequency of unusual temperature variation with a decadal variability increased after 1980's. Also unusual wet periods were found with variability over twenty years at SIP<sub>12</sub> in Seoul. The correlation coefficient between zonal wind and SST over the Pacific indicated negative value. The phase of zonal and meridional wind variation in upper and lower atmospheric layers (1000, 850, 500, and 200 hPa) showed no phase difference of zonal and meridional wind variation in each atmospheric layers within relatively short term. To find the relationship between atmosphere and SST anomaly variation in middle latitude region, we computed the local area wind index (AWI) and found that there was a variability over twenty years in upper atmosphere and a variability over ten years in lower atmosphere.

The leading interannual mode of sea surface temperature (SST) was closely related to the variation of Asian monsoon. The SST change over the East Sea was also connected to the El Nino/Southern Oscillation with phase lags of 3- to 9- months, which means that there occurs cold summer in the East Sea after El Nino winter. Long-term variation of seawater temperature demonstrated the interesting cooling phenomenon in the 1960s over the southern part of the East Sea, while warming in the 1990s. Sea level data also showed long-term variability found in SST. It was shown that changes of SST due to climate variability could change the pattern of front and current system in the East Sea.

In the northern area of the Eastern coast of the Korean Peninsula, the bleaching effect of macro-algae was not serious compared to those in southern areas. The species diversity of macro-algae tends to decrease with depth. Highest species-diversity was found at around low tidal level or upper subtidal zone.

Zooplankton biomass was rather stable from 1968 to 1991, but it increased sharply since 1991. First mode of EOF analysis for zooplankton biomass indicated that zooplankton biomass increases from coastal to offshore areas, and was the highest in the middle of the East Sea close to Dok-do in 1994. Also, 1st mode of EOF for copepods biomass showed that the copepods biomass was

the highest in the middle of the East Sea in 1990 with decreasing trend in biomass since 1990, indicating changes in zooplankton composition in the area. For better understanding the relationship between zooplankton variability and climate change, zooplankton species-specific approach is recommended in the future study. *A. steueri* (nauplii+copepodidites+adults) was present in the plankton throughout the year with seasonal variation in abundance. Biomass, excluding NI stage, was 9.96-4545.81  $\mu\text{gC m}^{-3}$  (mean: 680.76  $\mu\text{gC m}^{-3}$ ) with peaks in November, February, May and July-early August, and relatively lower biomass in September-January. The stage-specific abundance fluctuated greatly with four distinct peaks in November, late February, May and July-August, without the presence of sequential well-defined pulses of the stage with time. Annual production of *A. steueri* was 25.21  $\text{mgC m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  (or 166.41  $\text{mgC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ), showing peaks in November, May, July-August with a small peak in February, and low production in December-April and September-October. There were no significant relationships between daily production rate of *A. steueri* and temperature or chl. *a*, indicating unknown other factors were also related to the production rate. Species-specific abundance and biomass of zooplankton are the most important initial parameters to estimate the secondary production of zooplankton in Korean waters.

JGOFS workshop compared 10 models each with 3-7 state variables. Characteristics of the models are that nitrogen was the model currency and that phytoplankton and zooplankton were represented by one compartment respectively disregarding grouping in the size, trophic status, and age structure. PICES-GLOBEC models had nitrogen and silicates as the model currency. There were two compartments for the phytoplankton and three compartments for the zooplankton making the model structure more complex than that of JGOFS models. The sensitivity of the photosynthesis process models was not significant. Michaelis-Menten model was used for the nutrient uptake. Preference of ammonia over nitrate was usually modelled by an exponential function. The growth rate was expressed as either a multiplicative function or

the minimum of the photosynthesis rate and nutrient uptake. Grazing was the most sensitive process model and Holling Type III model was typically used. Microbial loop has been usually parametrized with DON decomposition or the growth of the microzooplankton. Two methods are available for linking to the higher trophic level. The first method is to define the subareas in the domain and population dynamic model of the fish population is applied to each subarea. The second method is to use an IBM (Individual Based Model) model to trace the movement and the growth of the individual. Assemble of all the individuals represent the population. The surveys made in the Ulleung Basin, East Sea in Nov 2000 and Nov 2001 showed that the portion of picophytoplankton was 18-75% of the primary production. Such importance of picophytoplankton urges that at least two compartments are required for the phytoplankton and that the microbial loop should be appropriately modelled.

We detected the effect of global regime shift on fishery resources and their ecosystem in the East Sea, and developed an ecosystem-based fisheries resource management procedure. In the first year, long and short term shifts of fishery resources in the East Sea were detected through the analysis of major commercial species. In order to define the effect of ecological interaction among fisheries resources, we analyzed climate variations in the East Sea and the response in fisheries resources. Regime shift affected in particular to the production of major small pelagics. In the second year, we investigated changes in habitats of major species due to climatic changes. Different fishing grounds of common mackerel, horse mackerel and Pacific sardine were found between pre- and post- climatic regime shift. There were a lot of changes in the East Sea ecosystem, after the 76/77 regime shift through the changes in the marine environment. We used a Ecopath/Ecosim program to describe the structure of the East Sea ecosystem. We developed a procedure of the ecosystem-based fisheries resource management.

## **V. Application**

Various data sets from several organizations were collected in last two years. Those information would used for future study on climate change, physical variability, and ecosystem changes in the East Sea of Korea. The results of ecosystem study could be applied to identify the mechanism and to understand ecological process related to the climatic changes which strongly affected to small pelagics in the marine ecosystem. It could be also used to establish the appropriate fisheries resource management procedure, considering the marine environment. And, it will be used to establish the methodology of the marine ecosystem analysis. The result of this study made an opportunity to recognize paradigm shift in fisheries resource assessment and management.

This study recognized that a cooperative research is necessary to understand the East Sea ecosystem among neighboring countries. The cooperative research includes exchanges of data and information on the seasonal migration, abundance, ecological parameters of major fisheries resources, based on joint surveys on the oceanography and fisheries resources.

# CONTENTS

## I . Introduction

A. Needs . . . . .	.25
1. Scientific aspect . . . . .	.25
2. Economic aspect . . . . .	.26
3. Social aspect . . . . .	.26
B. Aims . . . . .	.27
1. Final goals . . . . .	.27
2. Annual goals and content . . . . .	.27

## II . Status, problems, prospects of the related research

A. Status . . . . .	.28
B. Problems and prospects . . . . .	.29
1. Domestic problems . . . . .	.29
2. Problems in international society . . . . .	.29
3. Prospects . . . . .	.30
C. GLOBEC activities in Korea . . . . .	.30
1. Symposium . . . . .	.30
2. Workshop . . . . .	.31

## III . Research results

A. Research methodology in climate change and oceanography . . . . .	.33
1. Introduction . . . . .	.33
2. Trends in climate change and climate index . . . . .	.35
3. Function of the ocean, and GLOBEC research . . . . .	.41
4. Long-term changes in climate and fishery resources . . . . .	.43
a. Natural records . . . . .	.44

b. Fishery statistics . . . . .	45
c. Regime shift and salmon in the north Pacific Ocean . . . . .	47
d. El Niño and fisheries . . . . .	49
e. Climate index and fluctuation of fisheries resources . . . . .	50
5. Environmental and resource variabilities in Korean waters . . . . .	52
6. Future modification of marine ecosystem and management direction . . . . .	57
a. Changes in fishes catch . . . . .	58
b. Global warming and distribution change of fish population . . . . .	59
c. Direction of fisheries management . . . . .	60
7. Direction of ocean research . . . . .	61
B. Climate change over the Korean Peninsula . . . . .	64
1. Climate change over the Korean Peninsula . . . . .	64
a. Research methods . . . . .	64
b. Result . . . . .	67
2. Characteristics of climate variability in the mid-latitude Pacific Ocean . . . . .	74
C. Physical responses to the climate change in the East Sea . . . . .	88
1. Collection of ocean and atmosphere data . . . . .	88
2. Interannual change of seawater temperature . . . . .	88
3. Long-term variability . . . . .	93
4. Sea-level data analysis . . . . .	96
5. Ocean-Air heat exchange . . . . .	97
6. Fronts and eddies . . . . .	100
D. Changes in ecosystem of the East Sea . . . . .	107
1. Pelagic environment and plankton . . . . .	107
a. Introduction . . . . .	107
b. Plankton-based ecosystem and fish resources . . . . .	109
c. Fluctuation of fish and plankton biomasses . . . . .	114
d. Discussion . . . . .	118

2. Distribution of macro-algae and environments . . . . .	119
a. Research methods . . . . .	119
b. Temporal patterns . . . . .	121
c. Spatial patterns . . . . .	122
3. Zooplankton variability . . . . .	128
a. Long-term changes in zooplankton biomass (EOF analysis) . . . . .	128
b. Changes in zooplankton production . . . . .	130
4. Lower trophic level modeling . . . . .	134
a. Structure . . . . .	134
b. Formulation . . . . .	137
c. Linkage with other trophic levels . . . . .	138
b. East Sea ecosystem model . . . . .	139
5. Higher trophic level modeling . . . . .	142
E. Climatic changes and fisheries resources in Korean waters . . . . .	144
1. Short and long-term variations of major fisheries resources in Korean waters . . . . .	144
a. Structure and regional distribution of fisheries resources in the East Sea . . . . .	144
b. Yearly fish catch variation . . . . .	146
c. Change of fisheries and species composition with time . . . . .	155
2. Ecological mechanism of the changes in climate and marine environment to fisheries resources . . . . .	157
a. Variation of ocean environments and fish catch . . . . .	157
b. Ecosystem mechanism on fisheries resources by the variation of climate and ocean environments . . . . .	157
c. Relationship between habitat characteristics of fisheries resources and climatic changes . . . . .	162
3. Ecosystem-based fisheries resource management . . . . .	167
a. Concepts of ecosystem management model . . . . .	167
b. Characteristics of marine ecosystem . . . . .	168

c. Research structure of ecosystem modeling . . . . .	171
d. Marine ecosystem model . . . . .	173
e. East Sea ecosystem variation with climate change . . . . .	174

#### **IV. Expectations and contribution**

A. Scientific aspect . . . . .	182
B. Economical aspect . . . . .	182

#### **V. Future plan**

A. Implication . . . . .	183
B. Next step . . . . .	185

#### **VI. Scientific information collected**

A. GLOBEC programs in neighboring nations . . . . .	186
1. China GLOBEC . . . . .	186
a. Goals and theme . . . . .	186
b. Step . . . . .	186
2. Japan GLOBEC . . . . .	187
a. Status . . . . .	187
b. Some important projects . . . . .	187
3. Japanese fishery statistics in the East Sea . . . . .	189
B. Scientific guideline for the international GLOBEC program . . . . .	191

<b>VII. Reference . . . . .</b>	<b>193</b>
---------------------------------	------------

# 목 차

## 1 장. 연구개발과제의 개요

1 절. 연구개발의 필요성 . . . . .	25
1. 과학·기술적 측면 . . . . .	26
2. 경제·산업적 측면 . . . . .	26
3. 사회·문화적 측면 . . . . .	26
2 절. 연구개발의 목표 . . . . .	27
1. 최종 목표 . . . . .	27
2. 연차별 연구개발 목표와 내용 . . . . .	27

## 2 장. 국내외 관련연구의 현황, 문제점, 전망

1 절. 관련분야의 현황 . . . . .	28
2 절. 문제점 및 전망 . . . . .	28
1. 국내의 문제점 . . . . .	29
2. 국외의 문제점 . . . . .	29
3. 앞으로의 전망 . . . . .	29
3 절. 우리나라에서의 GLOBEC 연구활동 . . . . .	30
1. 심포지움 . . . . .	30
2. 워크샵 . . . . .	31

## 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

1 절. 기후변화와 해양연구 방법 . . . . .	33
1. 서론 . . . . .	33
2. 기후변동의 추세와 기후의 지수 . . . . .	35
3. 해양의 기능과 GLOBEC 연구 . . . . .	41
4. 장기간 기후변화의 양상과 수산자원의 변동 . . . . .	43
가. 자연의 기록으로 본 양상과 수산자원 변동 . . . . .	44

나. 어업자료에 의한 어류의 성쇠 . . . . .	45
다. 북태평양에서의 기후도약과 연어 어획 . . . . .	47
라. 엘니뇨와 수산자원의 변동 . . . . .	49
마. 기후의 지수와 수산자원 변동 . . . . .	50
5. 우리나라 인근해역에서의 환경 변동과 수산자원 변동 . . . . .	52
6. 변화될 수산생태계 및 향후의 관리방향 . . . . .	57
가. 세계 어획량의 변화 . . . . .	58
나. 지구온난화에 의한 북태평양 수산자원의 분포 변화 . . . . .	59
다. 수산자원의 관리 방향 . . . . .	60
7. 해양연구의 방향 . . . . .	61
2 절. 한반도 기후변동 . . . . .	64
1. 한반도의 기후변동 . . . . .	64
가. 연구방법 . . . . .	64
나. 분석결과 . . . . .	67
2. 중위권 태평양 지역의 기후변동 특성 분석 . . . . .	74
3 절. 한반도의 기후변동과 동해의 물리적 반응 . . . . .	88
1. 해양 및 기후자료 수집 . . . . .	88
2. 수온의 경년변동의 특성과 그 원인 . . . . .	88
3. 동해의 장주기 변동 특성 . . . . .	93
4. 해수면 자료 분석 . . . . .	96
5. 해양-대기 열교환 변동성 분석 . . . . .	97
6. 동해의 전선 및 와류 연구 . . . . .	100
4 절. 동해 생태계 변화 . . . . .	107
1. 한국 연안 해역의 표영환경과 플랑크톤 . . . . .	107
가. 서론 . . . . .	107
나. 플랑크톤 생태계와 어류자원 . . . . .	109
다. 한국 연안의 수산자원과 플랑크톤의 변동 . . . . .	114
라. 고찰 . . . . .	118
2. 동해 연안해조류의 분포와 환경특성 . . . . .	119
가. 연구수행방법 . . . . .	119
나. 시대별 해조류의 분포 특성 분석 . . . . .	121

다. 동해 연안의 해역별 해조 분포의 특성 . . . . .	122
3. 동물플랑크톤 변동 연구 . . . . .	128
가. 동물플랑크톤의 장기변동에 대한 EOF 분석 . . . . .	128
나. 동물플랑크톤의 생산력 변동 . . . . .	130
4. 하위영양 준위 생물모델 . . . . .	134
가. 모델구조와 통화 . . . . .	134
나. 과정모델의 수식화 . . . . .	137
다. 다른 준위와의 연계 . . . . .	138
라. 동해 생태계 모델 . . . . .	139
5. 상위영양 준위 생물모델 . . . . .	142
5 절. 동해 수산자원의 변동 . . . . .	144
1. 동해 주요 수산자원의 장·단기 변동 특성 . . . . .	144
가. 동해 수산자원의 구조 및 지리적 분포 . . . . .	144
나. 연도별 어획량 변화 . . . . .	146
다. 연대별 어업 및 자원 종조성의 변동 . . . . .	155
2. 기후변동에 따른 수산자원 변동의 역학관계 . . . . .	157
가. 해양환경의 변동과 어획량 변동 . . . . .	157
나. 기후 및 해양환경 변동이 수산자원에 미치는 생태기작 . . . . .	157
다. 서식처 특성에 따른 수산자원의 변동과 기후변동과의 관계 . . . . .	162
3. 생태계관리 관점에서 수산자원관리 및 어업관리에 대한 제안 . . . . .	167
가. 생태계 관리모델의 개념 . . . . .	167
나. 해양생태계의 특징 . . . . .	168
다. 수산자원 관리에서 생태계 모델링 연구체계 . . . . .	171
라. 해양생태계 분석모델 . . . . .	173
마. 기후체제 변화에 따른 동해 생태계의 구조 변화 . . . . .	174

#### 4 장. 본 연구의 기대효과 및 관련분야에서의 기여도

1 절. 기술적 측면 . . . . .	182
2 절. 경제·산업적 측면 . . . . .	182

## 5 장. 연구개발 결과의 활용계획 및 향후 조치사항

- 1 절. 활용 방안 . . . . . 183
- 2 절. 연구개발 성공 시 다음단계 조치사항 . . . . . 185

## 6 장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보

- 1 절. 인근 국가의 GLOBEC 프로그램 . . . . . 186
  - 1. 중국 GLOBEC 프로그램 . . . . . 186
    - 가. 목표 및 연구 주제 . . . . . 186
    - 나. 단계별 연구 . . . . . 186
  - 2. 일본 GLOBEC 프로그램 . . . . . 187
    - 가. 현황 및 연구 주제 . . . . . 187
    - 나. GLOBEC 연구 프로그램 . . . . . 187
  - 3. 일본 해구 수산연구소 자료 정리 . . . . . 189
- 2 절. 국제 GLOBEC 프로그램의 해양연구 과학자침 . . . . . 191

## 7 장. 참고문헌 . . . . . 193

# 1 장. 연구개발과제의 개요

## 1 절. 연구개발의 필요성

기후 변동 및 지구환경보호 문제가 1990년대에 들어와 학계의 비상한 관심을 받고 있다. 세계 곳곳에서의 급속한 산업화는 온실가스의 방출을 증가시켜 지구온난화 현상을 가속시키고 있으며, 환경오염은 매우 빠른 속도로 전지구적으로 확산되어 지구 생태계를 위협하고 있다. 기후의 변동은 육상뿐 만 아니라 해양의 환경도 변화시키는데, 해양이라는 비교적 안정된 환경에 적응하고 있던 해양생물들은 급격한 환경 변화에 매우 취약하기 때문에 그 생태계의 구조가 재편된다. 따라서 인간이 주로 활용하고 있는 수산 생물자원의 분포나 양도 과거와는 다른 양상으로 나타날 것이다. 태평양에서 발생하는 엘니뇨(El Niño)와 라니냐(La Niña)와 같은 열대해역의 기상현상도 그 지역에만 영향을 미치는 것이 아니라 세계 전 지역에 직접적인 혹은 간접적인 기상이변을 발생시키는 것으로 알려져 있으며, 중위도권에 위치한 우리나라에도 영향을 미치리라고 생각된다.

정부간 기구인 Intergovernmental Panel of Climate Change(IPCC)에서는 기후변화의 사회적 영향이 엄청나게 크리라고 예상하여 1990년도 부터 매 5년 마다 각 분야별 전문가를 초빙하여 보고서를 만들었다(IPCC, 1990; IPCC, 1996). 해양 및 수산분야에서도 향후 수십년 동안에 대두될 수 있는 사안들에 대하여 토의하였는데, 과거에는 남획과 같은 요인이 수산자원을 고갈시켰지만, 앞으로는 기후변동에 따른 생태계의 변화가 어업체제를 개편시킬 것이라고 예견하였다. 따라서 과거에 진행되었던 생태계의 현상을 정밀하게 재진단하고, 과거에 있었던 기후의 변동이 생태계의 재편에 어떻게 영향을 미쳤는가를 파악할 수 있다면, 미래에 닥쳐올 기후의 변동에 따른 생태계의 변동을 예상할 수 있다. 이러한 국제해양학계의 분위기는 해양과학위원회(SCOR), 정부간 해양위원회(IOC), 국제생지권프로그램(IGBP)이 지원하는 국제 GLOBEC(Global Ocean Ecosystem Dynamics) 프로그램을 발족시켰으며, 세계 도처에서는 기후변동과 해양수산자원의 변동에 대한 연구계획이 활발히 진행 중에 있다(IGBP, 1997; IGBP, 1999).

대체로, 동해에서는 난류와 한류가 만나고 있어 생산력이 높으며, 각종 수산자원이 풍부하게 서식하고 있지만 해마다 수산자원의 분포와 출현하는 자원량의 크기가 다르게 나타난다(김과 강, 1998). 이러한 원인은 인간의 어로활동에 의한 영향과 해양의 변동에 의한 영향으로 구분할 수 있으며, 동해의 수산자원에 대한 기후변동

과의 역학관계 연구는 아직 개념 정립단계이다. 70년대에 북태평양에서 발생하였던 기후의 Regime shift 혹은 엘니뇨에 관련하여 동해에서 나타났던 현상에 대한 간략한 분석만 시도되었다(Kang *et al.*, 2000; 김, 1996). 따라서 한반도에서의 기후변동 현상이 동해의 수산자원에 어떻게 영향을 미치는 지에 대하여는 아직 예견이 잘 안되는 상황이므로, 이러한 연구의 필요성을 아래와 같이 요약할 수 있다.

### 1. 과학·기술적 측면

- 기상, 해황 변동 등 환경 변화와 생태계에 대한 파급효과를 예측할 수 있는 종합적 평가 기법이 필요함.
- 우리나라 동해 EEZ 해역에서의 총허용어획량(TAC) 추정에 환경변수를 포함하여 합리적인 수산자원 관리 방침을 제시하여야 함.
- 국지적 기후변동 및 그 영향에 대한 연구는 오로지 그 대상국에 의해서만 적극적으로 추진될 수 있음.

### 2. 경제·산업적 측면

- 기후변동이 수산자원에 미치는 영향은 어업 등 수산활동을 크게 변화시킬 것이고 이는 경제·산업 전반에 걸친 파급효과를 유발할 것이므로 사전 예측이 필요함.
- 기후변동에 대한 국제적인 규약은 각국의 산업활동과 무역에 영향을 미치므로, 우리와 같은 중진국은 과학적 결과를 바탕으로 하는 정부의 정책을 수립하여야 하며 국제 정치적으로도 노련하게 대처해야 함.
- 특히, 동해는 우리나라, 북한, 러시아, 일본의 해역으로 분할되어 있으므로, 자원 변동의 원인에 대한 정확한 기작이 파악되어야 국제협상에 유리함.

### 3. 사회·문화적 측면

- 기후변동에 따른 환경의 악화 혹은 변화는 산업구조를 변화시킬 뿐만 아니라, 그에 따른 사회적 문제를 야기 시킴.
- 사회의 격동은 문화의 정체 내지 후퇴를 유발시킬 가능성이 있음. 그러므로, 기후변동 연구에 선도적 역할을 담당하고 있는 선진국들과 지적 교류를 통하여, 우리의 문제해결능력을 향상시킴.

## 2 절. 연구개발의 목표

### 1. 최종 목표

과거 한반도에서 발생하였던 기후의 변동과, 그에 수반하는 동해 표층의 물리적 반응, 해양생태계 및 수산자원의 변동에 대하여, 아래의 3가지 결과를 이끌어 냄.

- 기후변동의 시각으로 과거에 동해에서 수집된 기상 및 해양자료를 분석함으로써 동해의 생태계에 영향을 미치는 기후변동에 관련된 과거 연구 결과를 종합함.
- 동해의 생태계에 영향을 미치는 기후변동에 관련된 과거 연구 결과를 종합하여 동해수산자원의 변동요인이 기후변동에 의한 것인지 아니면 남획에 의한 것인지 구분 함.
- 동해 수산자원에 대한 합리적인 수산자원관리, 생태계 관리 및 어업관리를 위한 대정부 제안을 수립함.

### 2. 연차별 연구개발 목표와 내용

#### 가. 1차년도

- 1960-1990년대에 동해에서 수집한 기상, 해양 및 수산 자료로 기후 및 해양변동에 대한 일차 분석을 시도함.

#### 나. 2차년도

- 기후변동과 동해 생태계 각 구성요인간(기후, SST, 동물플랑크톤, 수산자원)의 상관 관계를 파악하고 인과 관계를 유추함. 각 요인들에 대한 자료는 가급적 1950년대 부터 2000년도까지의 최신 자료를 이용할 계획임.
- 동해 수산자원에 대한 합리적인 관리방안을 제시함.

## 2 장. 국내외 관련연구의 현황, 문제점, 전망

### 1 절. 관련분야의 현황

지구과학 분야에서 기후변동의 문제가 제기된 것은 약 50년 전으로 거슬러 올라가지만, 국제연구 프로그램을 활성화 시켜 많은 과학자들이 관심을 집중하게 된 것은 20여년에 불과하다. 특히, 기후의 변동이 해양의 생물종이나 생산력을 변화시키고 있으며, 더 나아가 수산자원의 양을 조절하는 중요한 요인이라는 주장은 1990년대에 이르러서야 본격적으로 논의되었다. 1980년대 후반에 시작되었던 JGOFS 프로그램이 해양의 기초생산력과 기후변동의 관련성에 대하여 부각하였던 것에 비하여, 1990년대 초반에 등장한 국제 GLOBEC 프로그램은 기후변화와 해양의 상위영양단계(즉, 대부분의 해양수산자원이 이 범주에 들어 감)에 대한 연구였다. 이 분야는 각국의 식량정책이나 산업정책과 맞물려 있기 때문에, 수산학과 해양학계의 집중적인 조명을 받기 시작하였으며, 이러한 중요성을 인식한 국제해양과학위원회(SCAR), 정부간해양위원회(IOC), 국제생지권프로그램(IGBP)은 1999년 국제 GLOBEC 프로그램으로 하여금 실천계획(Implementation Plan)을 작성하게 하였으며, 10년 동안 이 실천계획을 추진하기로 결정하였다. 과학자들은 꾸준히 기후의 변동이 해양생태계를 변화시키고 있다는 증거를 수집하고 있으며, 이를 근거로 하여 향후 새로운 기후가 도래될 때에 해양생태계는 어떠한 모습으로 변할 것인가에 대한 예측연구에 관심을 기울이고 있다.

GLOBEC 연구는 선진국 혹은 해양 및 수산이 중요한 부분을 차지하는 국가에서 가장 중요한 해양연구로 분류되고 있다. 이미 20여개 국가가 자국내에 GLOBEC 프로그램을 설치하여 지원하고 있으며, 학문적으로도 수산학과 해양학이 하나의 새로운 학문체제 아래에 재편성될 수 있는 좋은 계기가 되고 있다. 미국이나 유럽의 국가들은 벌써 10여 년 이전부터 이 문제를 사회에 부각시켜 일반인들의 관심을 얻는데 성공하였으며, 우리 주변국들도 매우 적극적으로 대처하고 있다. 즉, 일본에서는 이 분야의 연구가 지진 다음으로 중요한 해양연구로 간주되고 있으며, 여러 과학프로그램을 가동하고 있는 중이다. 중국은 이미 발해만의 1차 연구계획을 종료하고, 2단계 연구를 황해생태계를 대상으로 시작하였다. 그리고, 해양관련 국제기구 및 과학프로그램에서도 이 문제가 가장 현안사항이라고 간주하고 있으며 국제심포지움, 워크숍을 꾸준히 개최하고 있는 중이다.

한편, 우리나라 정부에서도 국무총리실에 범부처간 기구인 기후변동대책반을 가동시켜 기후변동에 따른 정부의 대책을 논의하여 왔다. 그러나 대부분의 논의사항은 국내산업과 연관이 있는 온실가스 저감대책에 대한 것이었으며, 한반도 기후의 예측이나 기후의 변화가 사회전반에 미칠 영향연구에 대해서는 소홀한 점이 있었다. 하지만, 일부 국내의 학자들에 의해서도 기후변동 혹은 해양환경의 변화가 해양생태계와 수산자원의 구조를 바꾼다는 주장이 제기되었으며, 한국해양학회와 한국수산자원학회의 지원 아래에 국립수산과학원, 한국해양연구원, 그리고 대학의 연구진들이 주축이 되어 한국 GLOBEC 프로그램을 1998년에 결성하였다. 이러한 프로그램이 성공적인 결실을 맺기 위해서는 대규모의 학제간 공동연구가 필수적인 요소이지만, 정부의 인식 부족으로 실질적인 대형 연구과제가 탄생되지 못했다. 단지, 각 기관에서, 정책연구 차원의 소규모 연구만이 몇몇 수행되었다. 다행히도, 2002년에 접어들어 해양수산부와 과학기술부는 이 과제의 중요성을 재검토하여 장기적인 연구과제로 지원할 계획을 공식적으로 발표하기에 이르렀다.

## 2 절. 문제점 및 전망

### 1. 국내의 문제점

- 아직 전문가 그룹이 많이 형성되지 않았으며, 정부에서도 그 영향의 중대성에 대한 인식이 부족하여 지원이 모자람.
- 해양 및 기상 등에 대한 각 분야의 학문을 통괄적으로 연결하여야 기후변동 영향과 같은 복잡한 자연 현상을 예견할 수 있는데, 우리의 연구체계가 아직 미흡함.
- 동해는 4개국이 분할하고 있어 자료의 종합화와 표준화 체제가 갖추어져 있지 않음.

### 2. 국외의 문제점

- 수산자원은 국민의 해양자원 보전 및 영양공급원으로서 의미를 가지고 있으므로, 해양연구 중 가장 시급히 투자되어야 하는 분야로 대두되고 있음.
- 몇몇 국가들은 문제를 해결하기보다는 국제 정치적으로 이용하려고 하므로, 지구생태계 회생에 걸림돌이 됨.
- 미국에서는 지난 80년에서 90년 사이 남획자원의 수가 2.5배로 증가하고, 어획

되는 자원들이 먹이사슬에서 차지하는 지위가 낮아지고, 어획 가능 종의 수가 감소하자 어류자원을 생태계의 여러 요소들을 토대로 관리하자는 개념(Ecosystem Based Fishery Management)이 대두되고 있다. 이와 더불어 21세기에는 지금 보다 더욱 격렬한 기후변동 혹은 기상이변이 예견됨에 따라 기후변동과 관련된 연구가 세계 곳곳에서 진행되고 있음.

### 3. 앞으로의 전망

- 새로운 21세기에는 지금보다 더욱 격렬한 기후변동 혹은 기상이변이 예견됨.
- 따라서, 과학, 기술, 사회 전반에 걸쳐 기후변동에 따른 영향 연구가 더욱 활성화되리라고 예상됨.
- 남북한의 화해 분위기가 고조됨에 따라서, 당면하고 있는 해양식량자원 문제를 공동으로 해결하려는 노력도 증진될 것으로 생각됨.

## 3 절. 우리나라에서의 GLOBEC 연구 활동

### 1. 심포지움

아직 전문가 그룹이 많이 형성되지 않았으며, 정부에서도 그 영향의 중대성에 본 연구진은 2001년 8월 17일 “동해의 해양생태계, 수산자원 그리고 한반도 기후변동의 역학 관계”라는 제목으로 국립수산진흥원에서 한국 GLOBEC 심포지움을 개최하였으며, 기후, 해양물리, 해양생태계, 수산자원 분야의 연구 논문 17편을 균형 있게 다루었다. 특히, 동해에 서식하는 수산생물 약 400여 종 중에서, 최근의 급격한 기후 및 환경 변화에 민감하게 반응하는 대표적 사례들이 발표되었다. 본 심포지움을 통하여 해양의 생물들은 기후 및 환경의 변화에 매우 밀접하게 반응하고 있음을 알 수 있었으며, 참석자들은 해양 생태계의 연구가 여러 분야 학자들이 함께 수행하여야 하는 학제간 연구(interdisciplinary)가 되어야 함을 공감하였다.

2002년 12월 13일~15일에는“Processes and Dynamics in the Northwestern Pacific Ecosystem”이라는 제목으로 중국, 일본, 한국 GLOBEC위원회의 공동주관으로 한국해양연구원(안산)에서 중-일-한 GLOBEC 심포지움을 개최하였다. 중국, 일본, 한국, 러시아, 미국의 학자들에 의해 총 26편의 구두발표와 9편의 포스터 발표되었는데, 그 중에서 중국이 4편, 일본 8편, 한국 20편, 러시아 2편, 미국 1편을 받

표하였다. 발표 내용은 북서태평양 생태계에 대한 개관, 황해와 동중국해 생태계, 동해 생태계, 소형 표층어류라는 4개의 세션으로 나누어졌다. 북서태평양 생태계에 대한 개관에서는 이 해역에서의 기후변동과 해양의 물리적 변동 특성에 대하여 소개되었으며, 황해와 동중국해 생태계에서는 기후변동과 해양물리, 식물플랑크톤 동태, 양쯔강 하구의 생태계 먹이망, 고등어 자원의 변동과 번식 특성 등에 대하여 발표되었다. 동해 생태계에서는 해수순환, 식물플랑크톤의 일차생산력, 동물플랑크톤과 기후변동, 생태계 모델링, 주요 어종 및 오징어 자원의 변동, 연어의 유전적 분리 및 연어 이식의 미량원소 분석 등이 소개되었다. 마지막으로 소형 표층어류에 대해서는 멸치와 청어의 분포 특성과 자원변동 등의 연구결과가 소개되었다. 이번 심포지움을 통하여 북서태평양 생태계와 긴밀한 관련이 있는 국가들의 다양하고 의미 있는 최근의 연구결과들을 서로 공유할 수 있었으며, 앞으로 국내에서의 GLOBEC 관련 연구과제 수행 시 공동연구 또는 협력연구 시스템을 구성할 수 있는 발판이 되었다. 앞으로 이러한 국제 심포지움은 2년마다 한번씩 개최될 예정이며, 다음 심포지움은 2004년도 중국 또는 일본에서 열린 예정이다.

## 2. 워크샵

본 연구진은 심포지움에서 형성된 공감대를 바탕으로 하여 실질적인 연구를 수행하고 있는 연구자들이 의견을 교환할 수 있는 기회를 마련하였다. 2001년 11월 24~25일 양일에 걸쳐 국립수산진흥원 동해수산연구소 포항분소에서 개최된 워크샵에서는 기상, 해양, 수산 전문가 30여명을 초청하여 각 전문가들에 의한 분야별 개관 설명을 부탁하였으며, 그 이후에는 향후 동해에서의 기후변동 연구가 추진되어야 할 방향에 대하여 집중적으로 토의하였다. 장시간 진행된 토의에서, 동해의 GLOBEC 연구에서 다루어져야 할 연구 항목들이 일부 제시되기도 하였으나, 대부분 참석자들은 프로그램이 구체화되기까지는 좀 더 많은 토의가 필요하다는데 동의하였으며, 서면 답변을 통하여 구체적 계획을 제시하는 것으로 결론을 맺었다. 참석자들은 명태, 꽁치, 오징어, 도루묵이 동해 어업의 주종을 이루고 있으며, 이들 어종의 번성과 쇠퇴가 엘니뇨 혹은 북태평양의 기후도약 현상과 관련이 있음을 인지하였지만, 아직 그들의 역학관계에 대한 정확한 기작은 알 수 없음을 확인하였다. 그 외에, 심해에 서식하는 대게 자원, 방류사업이 진행 중인 연어자원, 확장 중에 있는 무척추 양식 생물, 해조류의 갯녹음 현상도 환경 변화에 민감하게 반응하고 있음을 지적하였고, 이들 종에 대해서도 GLOBEC 개념의 연구가 필요함이 강조되었다. 그러나 근본적으로 동해 해양환경 변화에 대한 구체적 현상이 아직 규명되

지 않은 상황에서 생물군집의 반응을 예측하기에는 무리가 있으며, 이러한 연구를 활발하게 진행하기 위해서는 사회적인 관심이 있어야 함을 토로하였다. 즉, 연구자 개인의 의제(personal agenda)를 공중/사회적 의제(public/social agenda)로 전환하려는 노력이 수반되어야 기후변동 연구가 활성화될 수 있다는데 의견을 같이 하였다.

한편, 2003년 1월 24일~25일 양일간에 걸쳐 국립수산과학원 동해수산연구소에서 “한반도 기후의 변화와 동해생태계의 변동”이라는 제목으로 워크숍을 개최하였다. 제 1부에서는 한반도 기후의 변화와 동해생태계의 변동과 관련하여, 기후변동, 동해의 물리적 특성, 해조류, 동물플랑크톤, 어장 생태계 및 생산량 변동이라는 제목으로 5편의 연구결과가 발표되었다. 그리고, 제 2부에서는 기후변동과 동해의 오징어 자원 연구에 대하여, 오징어 어업자원의 변동, 오징어 자원의 분포와 환경과의 관계, 오징어의 산란 특성 및 초기 생활사와 유생 채집 방법, 오징어 자원의 성쇠라는 제목으로 4편의 연구결과가 발표되었다. 제 2부에서는 주로 오징어 자원의 생태에 대하여 소개되었는데, 최근 오징어 자원량의 증가 추세에도 불구하고, 오징어 자원의 변동 특성과 그 원인에 대한 국내 연구결과는 매우 미흡하다는 것을 실감하게 되었다. 본 워크숍을 통하여 향후 국내에서 오징어 자원에 대한 종합적인 조사를 추진할 경우, 어떤 연구항목이 필요하며, 어떤 연구 방법이 좋으며, 대학 및 연구기관 간 협력체계는 어떤 방법으로 만들어갈 수 있는지에 대하여 토의하였다.

### 3 장. 연구개발수행의 내용 및 결과

#### 1 절. 기후변화와 해양연구방법

##### 1. 서론

최근의 1997/98년 엘니뇨는 우리 인류가 경험하였던 엘니뇨 중에서 가장 커다란 것이었고, 엄청난 피해가 지구 도처에서 보고되었다. 그리고, 새로운 강력한 엘니뇨의 조짐이 이미 페루 인근 해역에서 시작되고 있다는 미국 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)의 보고는 전 세계를 바짝 긴장시키고 있다. 이렇게, 기후 변동 및 지구환경 문제가 1990년대 이후부터 학계뿐만 아니라 사회적으로도 비상한 관심을 받고 있다. 세계 곳곳에서의 급속한 산업화는 온실가스의 방출을 증가시켜 지구 온난화 현상을 가속시키고 있으며, 환경오염은 매우 빠른 속도로 전지구적으로 확산되어 지구 생태계를 위협하고 있다. 이미 몇몇 선각자들은 향후 발생할 지구기후변동의 문제가 인류가 직면하고 있는 가장 커다란 위협이라고 경고를 한 바 있었으며, 각 국의 지도자들은 2000년 1월에 개최된 스위스의 다보스 포럼에서 새로운 밀레니엄의 첫 시기에 인류가 가장 시급히 취급하여야 할 일을 기후변화에 대비하는 것이라고 규정하였다. 선진국에서는 이미 지난 20-30년 전부터 지구의 역사에서 기후가 어떻게 변화하였으며, 앞으로 어떻게 변화할 것인지 예측하는 연구를 활발하게 진행하고 있다. 다행스럽게도, 우리 정부에서도 뒤늦게 기후변화의 심각성을 인지하고, 부처 별로 제각기 그 후유증을 최소화하고, 국제사회의 새로운 패러다임에 동참하기 위하여 고심을 하고 있는 듯 하다.

사실 지구의 역사에서 기후변화는 이상스러운 현상이 아니다. 지구의 탄생 이래에 기후는 끊임없이 변화하였으며, 기후가 바뀔에 따라 지구 생태계가 개편되곤 하였다. 하지만 대부분의 기후변화는 장기간에 걸쳐 서서히 진행되었기 때문에, 생물들은 비교적 무난하게 바뀐 환경에 적응을 할 수가 있었다. 요즈음 회자되고 있는 기후변화의 문제는 인간의 자연 파괴적 활동 혹은 과도한 공업활동의 결과로서 지구환경이 너무나도 급격히 변화하고 있으며, 생물체들은 바뀐 환경에 적응할 시간적 여유가 없다는 것이다. 소규모의 진폭은 있으나, 지구의 평균기온은 지난 100년 동안에 약 0.6도 상승한 것으로 관측되었다. 지구의 역사에서, 수만 년 동안 진행된 빙하기와 간빙기 사이의 기온 차이가 약 3도에 불과하였다는 것을 감안한다면, 이와 같은 기온의 상승은 매우 급격한 것으로 볼 수 있다. 하지만, 어떠한 기

작에 의하여 평균 기온이 결정되는지 아직 정확하게 밝혀지지 않았다. 인간사회에서도, 기후변화의 영향이 사회의 각 부문에 심각하게 미치고 있다는 사실에서, 단지 기후학자나 생태학자들만의 관심사가 아니라 전 인류가 지혜를 모아 함께 지구의 변화에 대응해 나가야 한다. 이미, 지구온난화를 방지하기 위한 이산화탄소의 배출량 감소 문제는 국제적으로 첨예한 사회, 경제적인 문제가 되고 있으며, 연안역 침수 문제는 인간의 거주지를 감소시키는 생존의 문제로 대두되고 있다. 또한, 이상기후의 빈번한 발생, 식량생산의 변화, 질병의 발생률 증가 등의 현상도 기후의 급격한 변동에 기인한 것으로 인식되어 각 국에서는 기후변화의 현상에 대한 연구뿐만 아니라, 기후변화의 영향에 대한 연구에 박차를 가하고 있다.

기후의 변동은 육상뿐 만 아니라 해양의 환경도 변화시키는데, 지구 표면의 71%를 덮고 있는 해양도 확실히 변하고 있다. 그리고, 근년에 이르러 해양에서도 환경변화의 속도가 유난히 빠르게 나타나고 있다. 해양의 변화를 유발하는 시키는 것은 분명히 기상 혹은 기후의 변화 때문이다. 기후는 해양을 변화시키며, 또한 바뀐 해양환경은 다시 기후에 영향을 미친다. 한편, 해양이라는 비교적 안정된 환경에 적응하고 있던 해양생물은 급격한 환경 변화에 매우 취약하기 때문에 그 생태계의 구조가 재편된다. 해양생물은 환경에 재빠르게 적응하여 종족을 유지하던가 아니면 그냥 절멸되던가 둘 중의 하나이다. 따라서 인간이 주로 활용하고 있는 수산생물자원의 분포나 양도 과거와는 다른 양상으로 나타날 것이다. 기후가 변동되면 그 기후의 영향을 받는 생태계가 변화한다. 육상에서는 기후 혹은 기상의 변화가 생물체에 직접 영향을 미치게 되므로, 기후변화가 예측된다면 생태계의 변화는 비교적 쉽게 예상할 수 있다. 그러나, 해양에서는 생물체들이 해수 속에서 살아가고 있으므로 상황이 다소 복잡해진다. 기후가 변화하면 해양의 환경(즉, 물리적 현상)이 변화하는데, 첨단인 현대과학으로도 기후의 변동이 야기 시키는 해양의 물리화학적 변동을 아직 상세히 예측할 수 없기 때문이다. 하지만, 최근에 들어와 컴퓨터 발전에 힘입은 모델링 기법의 개선과 상당기간 동안에 축적된 기상 및 해양환경 자료, 통계분석 방법의 발전 등은 기후-해양 상호관계 규명에 커다란 실마리를 제공하고 있다. 그리고 과거의 생태계 자료를 기후변동의 시각에서 재분석하고 조명해봄으로써, 기후변동에 따른 해양생태계의 예상되는 모습을 어느 정도 짐작하게 되었다.

본 보고서는 급변하는 지구환경연구 분야에서 기후가 변동함에 따라 해양생태계 및 해양수산자원이 어떻게 반응하고 있는지 파악하기 위하여 마련되었다. 특히, 우리나라가 위치하고 있는 중서부 태평양 해역에서의 해양생태계의 변화를 기후변화의 시각에서 해석한 실례들을 포함하였으며, 향후 해양유용생물자원의 전망에 대한

학자들의 견해를 열거하였다. 또한, 우리나라 해양학의 방향과 정부의 정책을 점검해 보는 계기를 마련하기 위해서, 선진국들이 추진하고 있는 국제적 연구프로그램인 '전지구해양생태계 역학연구(Global Ocean Ecosystem Dynamics: GLOBEC)' 프로그램을 간략하게 소개하였으며, 우리가 추진하여야 할 해양 및 수산연구 방향을 고찰하여 보았다.

## 2. 기후변동의 추세와 기후의 지수

기후변화에서 가장 민감하게 변화하는 요소는 기온이다. 인류는 1800년대 중엽인 약 150년 전부터 현대적인 기기를 이용하여 지구의 기온을 관측하였는데, 그 동안의 관찰결과로부터 지구가 점차로 온난화 되고, 추운 날이 감소하고 있으며, 따뜻한 날이 증가하고 있다는 사실이 알려지게 되었다. 그리고 이러한 온난화는 온실효과(greenhouse effect)라는 현상에 의하여 설명할 수 있는데, 대기 중 이산화탄소의 양이 증가하면 기온이 상승하게 된다. 즉, 산업혁명 이전에는 대기중의 이산화탄소의 양이 280 ppm이었으나, 지난 세기에 공장이나 산업시설이 엄청나게 증설되어 이산화탄소의 양이 370 ppm에 이르렀고, 이 결과 지구의 평균기온이 급격히 증가되었다는 것이다. 현재의 추세로 이산화탄소의 배출이 계속된다면, 21 세기의 중반에 대기중 이산화탄소의 농도가 산업혁명 시대의 두 배가 될 것이며, 기온의 상승도 현저하리라는 전망이다. 하지만, 어떠한 자연의 기작(mechanism)에 의하여, 지구의 기온이 결정되는지 아직 정확하게 밝혀지지 않았으므로, 이산화탄소의 증가에 따른 기온의 예측은 아직 부정확하다.

지구의 기온에 변화가 있었다는 것은 여러 가지 경로로 유추할 수 있다. 지구의 표면에 나타난 빙하의 확장/축소 흔적이라든지, 빙하나 퇴적층에 포함된 안정동위원소의 함량도 기온변동의 좋은 지시자들이다. 또한, 수명이 긴 식물(혹은 동물)의 나이테 성장형태도 시대적으로 바뀐 기후를 나타내는 좋은 증거물인 것이다. 천문학자나 기상학자들은 지구의 자전속도(Klyashtorin, 2001), 성층권 대기의 흐름양상(Klyashtorin, 1998), 태양 흑점의 활동주기(Friis-Christensen and Lassen, 1991)등이 지구의 기온변동과 유사한 형태로 변화하는 것을 관찰하였고, 이들 요소들이 기온변화에 관련이 있을 것이라고 보고있다(그림 1).

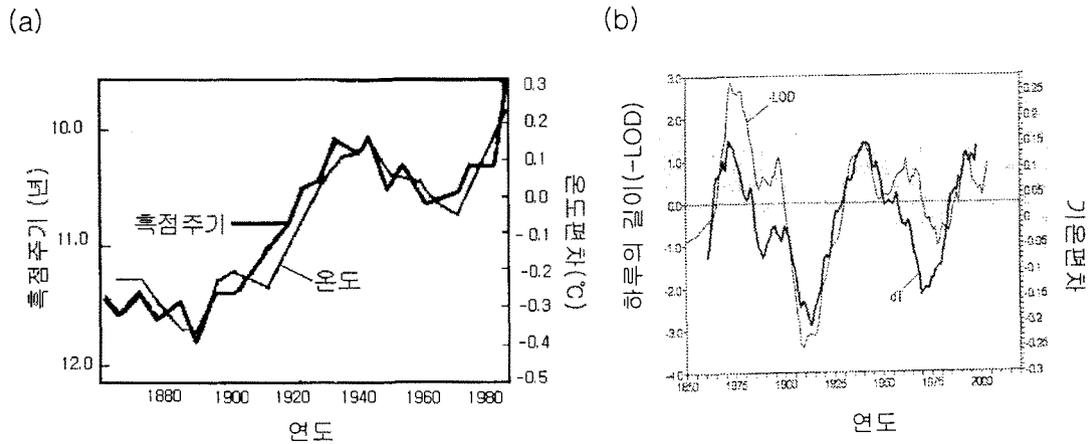


그림 1. 지구표면온도의 시대적 변화와 천문학적 관측치의 변화

(a) 태양흑점의 활동 주기, (b) 지구의 자전속도

정부간 기구인 ‘기후변화에 관한 정부간 협의회(Intergovernmental Panel of Climate Change: IPCC)’에서는 기후변화의 사회적 영향이 엄청나게 크리라고 예상하여 1990년도부터 매 5년마다 각 분야별 전문가를 초빙하여 보고서를 발간하고 있다(IPCC, 1996, 2001). IPCC의 제3차 보고서에서는 이산화탄소의 증가율이 현재와 같다면, 2080년에는 지구전체 평균 표면기온이 지금보다 3도 증가할 것으로 예상하였다(IPCC, 2001). 대륙은 해양보다 두 배정도 빠르게 더워질 것이며, 특히 고위도의 겨울이 심한 온난화에 직면할 것이라고 예견하였다. 또한, 지구의 온난화는 기온뿐만 아니라, 강수, 바람, 해빙, 해수면 상승 등에도 영향을 미치고 있다. 지구의 기후는 특히 1990년대는 들어 와 매우 온난해졌는데, 1998년은 1800년대 중반에 관측 기기가 기상관측을 시작한 이래에 가장 따뜻한 해였다. 그리고 북반구 고위도에서는 겨울에 습해지고, 여름은 건조해졌다. 컴퓨터 모델마다 약간 다른 결과를 보이기는 하지만, 미래에는 북반구 중위도의 겨울에는 강수량이 증가하게 되며, 북반구 고위도에서는 여름과 겨울에 강수량이 증가할 것이다. 강수량의 증가는 또한 극단적인 강수 현상을 동반할 것이 예상된다.

북극해는 지구온난화의 영향을 조기에 나타내는 장소로서, 대기중의 이산화탄소가 지금보다 두 배 증가하면 북극해 해빙 면적의 60%가, 얼음의 부피가 25-45% 감소할 것이며, 인근 대륙으로부터의 하천수 유입이 증가할 것으로 예상된다. 이미, 1978-1996년 사이에, 북극해의 얼음 면적이 10년 당 2.9-3.5%씩 감소하는 것으로 관찰되었으며, 향후에는 더욱 빠른 속도로 북극의 얼음이 녹을 것으로 전망된다. 과학자들은 2070년까지 북극권의 기온이 2-6도 상승하리라 (혹은 북위 60-90도 지

역에서, 1.5-7.6도 상승) 예상하지만, 이산화탄소 방출량을 예측할 수 없어, 정확한 기온예측은 불가능하다. 해수면 상승은 주로 해수의 열팽창과 빙하의 해빙에 의하여 야기되는데, 1990-2100년 사이에 약 0.09-0.88 m (중간값, 0.48 m) 해수면이 상승하리라 예상하는데, 이러한 상승률은 20세기에 관측된 속도의 2-4배에 해당된다. 만약, 이산화탄소 방출률이 550 ppm(혹은 750 ppm)으로 안정된다면, 2080년에 예상되는 40 cm의 해수면 상승은 40년(혹은 25년) 지연될 것이다.

지구 전반에 걸쳐 장기간으로 진행되고 있는 기후상태의 교대가 해양생태계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 여러 가지의 기후의 시계열 자료를 생각할 수 있다. 이러한 시계열 자료는 기온과 같은 직접적인 기상 관측치(global temperature anomaly)가 될 수도 있고, 지구의 자전 속도(length of day), 빙하의 규모, 혹은 얼음에 포함된 산소안정동위원소(oxygen stable isotope)의 함량, 나무의 나이테(tree ring) 등의 기온의 간접적인 추정치가 될 수도 있다(표 1). 또한, 기온 이외에도 대기순환의 지수(Atmospheric Circulation Index, ACI)을 남북(meridional)요소와 동서(zonal)요소로 구분하여 시대적으로 그 강도의 변화 경향을 파악하여 기후의 특징을 묘사하기도 한다. 이러한 자료들은 대체로 수백 년 간의 장기간 자료로서, 일정한 주기성을 보이고 있는 것들이 많다. 지난 110-150년 동안의 직접적인 관측으로부터 얻어진 시계열자료에 대한 spectral analysis 결과는 55-65년 주기를 보이고 있으며, 지난 1500년 동안의 합성된 지상표면기온에 대한 spectral analysis도 이와 유사한 55-60년의 주기를 나타내고 있다. 지구의 평균기온이나 자전속도도 기후변화를 지시하기도하지만, 이들은 변동(variability)이 크거나, 장기간 동안의 경향성이 있기 때문에 많이 이용되지는 않는다.

지역적으로 단기간 혹은 십수 년 주기로 발생하는 개별적인 기후사건은 단기적으로, 혹은 중규모의 시간 범위 내에서 해양생태계에 심각한 영향을 미치고 있다. 비교적 짧은 주기를 가지고 나타나는 현상으로는 열대동태평양에서 3-5년의 주기를 가지고 발생하는 엘니뇨(El Nino)와 같은 현상이 있다. 엘니뇨현상은 열대 동태평양 해양 상층부에 평소보다 2-5도 온난한 해수가 세 계절 이상 지속적으로 존재하는 현상을 말하며, 이 현상은 태평양의 동쪽과 서쪽 지역의 기압 배치에 의하여 야기되는 남방진동(Southern Oscillation)과 밀접한 관련이 있으므로 두 현상을 합쳐 ENSO라고 부른다. 그리고 열대 태평양 상의 두 지점인 타히티(Tahiti)와 호주의 다아윈(Darwin) 사이의 해면기압 차이를 사용하여 남방진동을 감시하게 되는데, 이를 남방지수(Southern Oscillation Index: SOI)라고 표현한다.

한 지역에서 비슷한 기후가 일정기간동안 지속되다가 다른 기후로 바뀌고, 이러한 교대 현상이 반복된다는 사실은 수산학계에서 잘 인식되어 있다. 북태평양에서

는 십수 년 및 수십 년 동안 지속되던 기후상태가 갑자기 바뀌는 기후도약현상 (climate regime shift)이 보고되었는데(Francis and Hare, 1994; Beamish *et al.*, 2000; Hare and Mantua, 2000), 과학자들은 아직 태평양 전체에서 발생하는 대표적인 기후현상(즉, 북태평양에서의 기후도약현상과 열대동부태평양에서의 엘니뇨현상)을 기후모델에서 효과적으로 재현하지 못하고 있다. 북태평양에서 기후의 지시자(index)로 흔히 이용되는 것에는 알류산저기압지수(Aleutian Low Pressure Index), 북태평양지수(North Pacific Index), 태평양십년주기변동(Pacific Decadal Oscillation, PDO) 등이 있으며, 대체로 이들 지수들은 엘니뇨의 지시자인 남방지수(SOI)와 음 혹은 양의 상관관계를 보이고 있다. 이러한 수십 년 규모의 기후변동(decadal-scale variability)은 북극해(Thompson and Wallace, 1998), 대서양(Hurrell, 1995)에서도 보고되었으며, 특히 북대서양생태계에서는 북대서양진동지수(North Atlantic Oscillation Index: NAOI)가 많이 이용되고 있다(표 1). '표 1'에 설명된 기후지수 이외에도 북동태평양기압지수(Northeast Pacific Pressure Index: NEPPI), 북반구표층기온(Northern Hemisphere Surface Temperatures: NHST), 태평양순환지수(Pacific Circulation Index: PCI) 등이 자주 인용되고 있으며, 지역적인 기후의 변화를 파악하기 위하여 빙하의 길이, 나무 나이테의 성장폭 등이 이용되고 있다(Beamish *et al.*, 2000). 이러한 지수들을 누적합(Cumulative Summation: CuSum)의 형태로 그려주면 시대별 기후의 특징이 잘 나타난다(그림 2).

표 1. 최근 많이 이용되고 있는 기후지수

기후 지수	측정 대상	참고 문헌
(북대서양의) 대기순환지수 (Atmospheric Circulation Index of the North Atlantic: ACI)	북대서양의 편서풍	Beamish <i>et al.</i> (1999)
알류산저기압지수 (Aleutian Low Pressure Index: ALPI)	북태평양의 저기압	Beamish and Boullion (1993) Beamish <i>et al.</i> (1997)
하루의 길이 (Length of the Day: LOD)	지구의 자전 속도	IERS (1997)
북대서양진동지수 (North Atlantic Oscillation Index: NAOI)	아이슬랜드 저기압과 아조레스 고기압	Hurrell (1995)
북태평양지수 (North Pacific Index: NPI)	북태평양의 알류산 저기압	Trenbirth and Hurrell (1995)
태평양십년진동지수 (Pacific Decadal Oscillation Index: PDO)	북태평양의 해양표층수온	Mantua <i>et al.</i> (1997)
남방지수 (Southern Oscillation Index: SOI)	적도태평양 대기 및 해양조건(해수면기압)	Walker (1924)

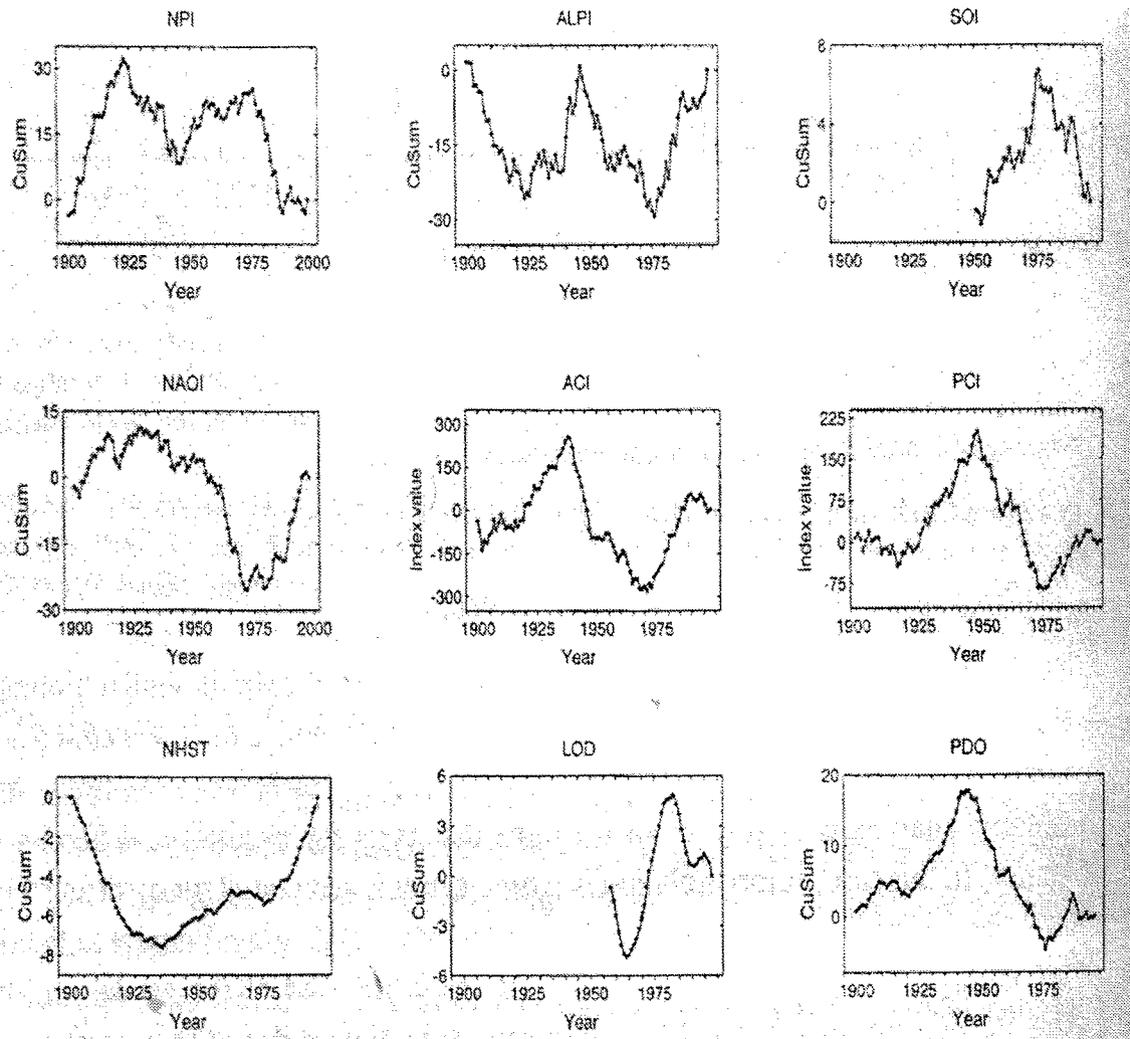


그림 2. 기후지수의 시대별 변동. 각 지수에 관한 설명은 본문 참조  
(Beamish *et al.*, 2000)

### 3. 해양의 기능과 GLOBEC 연구

인류는 해양으로부터 여러 가지의 이득을 받고 있다. 해양에서 생산되는 수산물은 인류가 필요한 동물단백질 공급량의 약 16 %를 차지하고 있으며, 20억의 인구가 해안에서 100 km 이내의 해안 지역에 살면서 해양을 직접적으로 혹은 간접적으로 이용하고 있으므로, 인류에 있어서 해양의 영향은 참으로 막대하다고 할 수 있다(McGinn, 1999). Christensen *et al.*(1996)은 자연 생태계가 인류에게 여러 가지의 이득을 주고 있으므로 우리가 생태계를 활용하여 누리고 있는 기회와 자원을 우리의 후손들도 계속 누릴 수 있도록 생태계가 관리되어야 한다고 주장하였다. 이러한 이득은 재화성 산물(goods)과 비재화성 혜택(services)으로 구분할 수 있는데, 해양생태계의 역할도 이 범주에서 벗어나지 않는다(표 2). 우리는 조력발전, 어업 활동, 광물자원의 채취와 같은 생산적인 활동을 통하여 해양에서 재화를 만들어 내기도 하지만, 금전적으로 환산할 수 없는 많은 혜택도 동시에 제공받고 있다.

기후가 변화하면 해양의 기능도 현재와 같지는 않을 것이다. 해양의 온난화에 의하여 표층수의 침강이 일어나는 해역이 따뜻해지면, 해류의 흐름이 바뀌게 되고, 더 나아가 심층수 순환의 고리가 끊어지게 된다. 이러한 결과는 해양으로부터 재화를 생산하는 모든 산업활동에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 지구의 기후를 조절하는 해양의 역할에 많은 변화를 줄 것이다. 또한, 해양환경이 바뀔에 따라 생태계에도 많은 변화를 유발시킬 것이다. 새로운 기후에 의하여 형성된 새로운 해양환경은 생태계 내의 먹이연쇄 구조를 변형시킬 것이며, 궁극적으로 각 해양에서의 생산력에 변화를 유발할 것이다. 이는 해양이 생산할 수 있는 수산자원의 양(혹은 해양생태계가 지탱할 수 있는 총 자원량, 즉 해양의 환경수용력(carrying capacity))이 새로운 환경에 따라 다시 정해짐을 뜻한다.

표 2. 생태계가 인간에게 제공하는 재화성 산물과 비재화성 혜택(Christensen *et al*, 1996)

재화성 산물(Goods)	비재화성 혜택(Services)
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 식량(Foods)</li> <li>· 건축자재(Construction materials)</li> <li>· 약용 식물(Medicinal plants)</li> <li>· 동· 식물 유전자(Wild gene for domestic plants and animals)</li> <li>· 관광 및 여가(Tourism and recreation)</li> <li>· 전기(Electricity)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 물의 순환(Maintaining hydrological cycles)</li> <li>· 기후 조절(Regulating climate)</li> <li>· 수질 및 대기 정화(Cleansing water and air)</li> <li>· 영양염의 저장과 순환(Storing and cycling essential nutrients)</li> <li>· 오염물질의 흡수와 해독(Absorbing and detoxifying pollutants)</li> </ul>

선진해양국들은 향후 수십 년 동안에 대두될 수 있는 사안들에 대하여 토의하여 왔는데, 과거에는 남획과 같은 요인이 수산자원을 고갈시켰지만, 앞으로는 기후변동에 따른 생태계의 변화가 어업체제를 개편시킬 것이라고 예견하였다. 따라서 과거에 진행되었던 생태계의 현상을 정밀하게 재진단하고, 과거에 있었던 기후의 변동이 생태계의 재편에 어떻게 영향을 미쳤는가를 파악할 수 있다면, 미래에 닥쳐올 기후의 변동에 따른 생태계의 변동을 예상할 수 있으며, 이러한 결과를 국가의 수산정책의 근간으로 삼을 수 있을 것이다. 이러한 국제해양학계의 분위기는 해양과학위원회(SCOR), 정부간 해양위원회(IOC), 국제생지권프로그램(IGBP)이 지원하는 국제 GLOBEC(Global Ocean Ecosystem Dynamics) 프로그램을 발족시켰으며, 세계 도처에서는 기후변동과 해양수산자원의 변동에 대한 연구계획이 활발히 진행 중에 있다(IGBP, 1997; IGBP, 1999, 김, 2000).

GLOBEC 프로그램이 궁극적으로 추구하는 목표는 새로이 탄생될 해양생태계의 모습을 예견하자는 것이다. 아직도 많은 사람들이 GLOBEC을 과거에 존재하였던 여러 수산학 연구와 비슷한 프로그램이라고 생각하고 있지만, GLOBEC은 기존의 수산학 범주를 훨씬 뛰어넘는 포괄적인 프로그램이다. 즉, 어류자원 혹은 동물플랑크톤의 번성에 영향을 미치는 생태계의 각 요소와의 상호작용과, 각 요소들에게 영향을 미치는 외부의 환경요소를 파악하고 그 생태학적 과정을 규명함으로써, 새로운 환경의 변화가 야기될 때에 만들어 질 수 있는 생태계의 모습을 예측하는 것인데, GLOBEC 과학계획(IGBP, 1997)에서는 “전 지구해양생태계 및 주요 해양생태계의 구조와 기능에 대한 이해를 증진시키고, 물리적 요인에 대한 해양생태계의 반응을 더욱 잘 이해함으로써, 지구적 변화에 대한 해양생태계의 반응을 예견할 수 있는 능력을 함양함”이라고 정의하고 있다.

GLOBEC 취지의 연구를 수행하기 위하여, 국제GLOBEC위원회에서는 4가지의 초점 연구분야를 강조하였다(IGBP, 1999). 즉, 역사적 자료, 과거에 수집된 기상, 해양, 수산등의 관측자료, 혹은 기후를 재현할 수 있는 재생된 자료 등을 정리하여 기후변동의 시각에서 다시 분석하는 과거자료의 분석연구(retrospective analysis), 대상 생물종과 주위의 환경 혹은 생태계의 구성요소들간의 상호반응작용에 대한 과정연구(process studies), 관찰결과를 생태계 모델에 적용하여 미래를 예측하는 예측연구(prediction and modeling), 변화된 생태계가 다시 지구환경에 미치는 영향을 분석하는 되먹임 연구(feedback) 등이다. GLOBEC 연구의 주목적은 미래에 대한 예측인데, 과학자들은 과거에 발생하였던 사건을 분석함으로써, 앞으로 변화될 생태계의 모습을 재현할 수 있다고 보았다. 이러한 과거자료의 분석연구는 새로운 현장 자료를 필요로 하는 것이 아니기 때문에 비교적 연구비가 적게 들어간다는 장점이 있으며, GLOBEC 연구의 초기에 많이 수행되었다. 하지만, 생태계 구성요소들 사이에 발생하는 기작을 밝혀내고, 미래에 발생할 현상을 정확하게 예견하기 위해서는 새로운 관측장비에 의한 관찰치를 얻어야 하고, 이를 개선된 모델링 기법에 적용시켜야 한다. 해양생태계의 구조와 기능을 더 잘 이해하고, 효율적으로 관리하기 위해서는 생태계를 통합적으로 이해하려는 노력이 필요하며, 해양 및 수산연구는 당분간 이러한 방향으로 발전해 나갈 전망이다.

#### 4. 장기간 기후변화의 양상과 수산자원의 변동

비교적 최근까지 해양수산자원의 증감상태와 기후를 연관지어려는 시도는 무모한 일이라고 생각하였다. 이 분야의 연구에서 가장 커다란 걸림돌은 우리가 기후라는 환경조건을 예측하기 힘들다는 것이었다. 실제로 우리의 과학수준으로는 단지 단기간의 기상현상만 예측할 수 있을 뿐이다. 하지만, 기후현상이 주기를 가지고 반복되고 있다는 사실이 밝혀지면서, 과학자들은 어류개체군의 풍도 변화가 기후의 이러한 주기성과 어떠한 연관성을 가지고 있는지 관심을 갖게 되었다. 지난 10년 동안에 기후와 중요한 상업어종의 자원량 사이에 존재하는 관계에 대한 연구활동이 부쩍 늘었지만, 아직 기후라는 환경요인과 생물개체군이 증감하는 과정에 대해서는 상세히 밝혀지지 않았다.

Kawasaki(1994)는 처음으로 지난 350년 동안에 발생한 기후의 주기적 변화와 일본 정어리 어획의 정규적 변화를 설명하였으며, Klyashtorin(2001)은 중요한 어종의 어획과 기후의 영향을 분석하였다. 물론, 어획량이 개체군의 생물량의 추정치는 아니지만, 주요 어종의 어획량은 자원의 증감 경향을 비교적 잘 반영한다고 알려져 있다. 이들의 논문에서는 수산자원 변동의 기작을 분명히 밝히지 못하였으나, 대부

분의 중요한 수산자원 어획량은 기후에 의하여 좌우된다는 것을 잘 보여주고 있다. 이처럼 기후, 해양, 수산 자료들이 축적되어 있을 때에는, 이들 사이에 존재하는 상관관계를 규명한다든지, 이들 자료들이 공통적으로 가지고 있는 통계적인 특성을 기후변동의 시각으로 분석함으로써, 환경과 개체군의 반응을 유추하여 볼 수 있다. 본 단원에서는, 과거의 역사시대와 최근의 어획기록을 통하여, 수산자원의 양이 항상 변동하고 있다는 사실을 보여 주고, 그러한 변동이 기후의 어떠한 요소들과 커다란 상관관계를 가지고 있는지 살펴볼 것이다.

#### 가. 자연의 기록으로 본 수산자원의 변동

요즈음에 들어 와 어류의 양식생산이 증가하고 있지만, 아직 해양어류생산의 대부분은 해양에서의 어업활동에 의하여 획득된다. 어업활동은 인류가 아직까지 유일하게 남겨 놓은 사냥행위로서, 우리 인류는 태고 이래로 해양의 수산자원을 이용하여 왔다. 하지만, 해양에 수산자원이 항상 안정적으로 존재하였다는 것은 아니고, 자연적인 요인에 의하여 수산자원은 심한 변동을 보여왔다. 인간의 어획통계가 기록된 것은 불과 100년에 지나지 않으므로, 과학자들은 어획자료가 아닌 자연의 기록에서 수산자원의 변동양상을 파악하려고 노력하고 있다.

무산소 환경조건이 형성된 해역에서 퇴적물이 쌓일 때, 그 퇴적물에 생물체의 사체가 함께 묻힌다면, 이는 생물체의 변성에 대한 기록을 보관하는 좋은 창고 구실을 하게 된다. 캘리포니아 앞바다의 퇴적층에는 계절적으로 무산소 조건이 형성되는데, 해양의 소형표층어류로부터 떨어진 비늘이 썩지 않고 퇴적층에 보관되고 있다. Baumgartner *et al.*(1992)은 이 퇴적층에서 정어리와 멸치의 비늘을 발견하고, 그 수를 헤아림으로써, 어류의 자원량을 유추하였다. 그들의 연구결과에서 나타난 비늘의 수효는 어업의 기록이 있었던 20세기의 초반과 중반의 어업의 성쇠를 그대로 반영하고 있다. 즉, 이 해역에서는 1930년대에는 정어리 어업이 활발하였고, 1950년대에는 정어리 자원이 거의 발견되지 않았는데, 지층에서 발견된 비늘의 수는 이러한 경향을 나타낸다. 또한, 이 해역에서 본격적인 어업활동이 수행된 것은 20세기에 들어 와서이지만, 이미 지난 1700년 동안 정어리와 멸치자원은 이 해역에서 성쇠를 반복하고 있었다(그림 3). 이 그림이 제공하는 주요한 결론 중의 하나는, 이 해역에서 남획에 의한 자원 고갈현상이 없었던 1900년대 이전에도 수산자원은 자연적인 현상에 의하여 성쇠를 반복하고 있었다는 것이다.

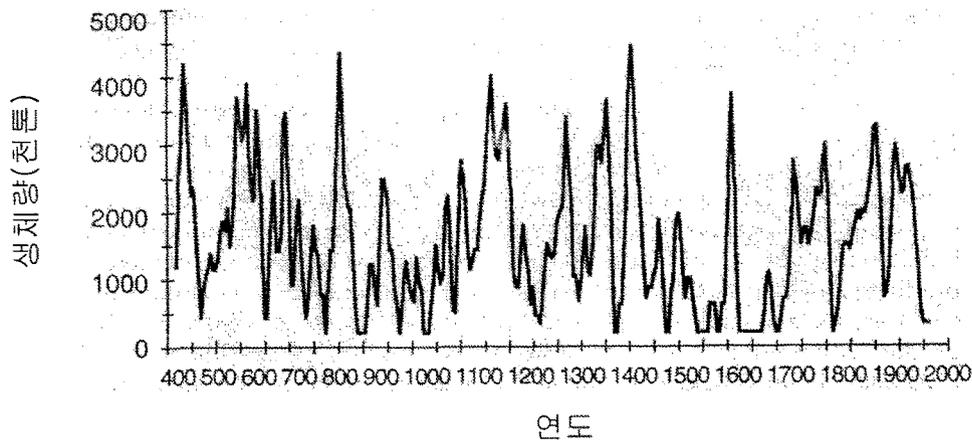


그림 3. 캘리포니아 앞바다 지층에서 발견된 비늘로부터 추정된 정어리 자원량

일본 연대기는 지난 400년간의 정어리 풍도에 관한 역사적 정보를 포함하고 있는데, 일본 해역에 정어리의 출현 양상이 크고 작음에 따라 해안의 어촌이 생성되었다가 폐허가 되곤 하였다(Kawasaki, 1994). 1800년대부터 관찰된 기온으로부터 계산된 지구의 기온편차는 그린란드 빙하로부터 재생된 기온과 같은 경향을 보이고 있으며(그림 4), 이러한 결과는 빙하 자료로부터 재생된 기온의 경향을 지구 기온의 변화 경향으로 볼 수 있게 한다. 지난 400년 동안의 기온의 편차와 일본 앞바다의 정어리 자원량과 비교하니, 기온이 비교적 높았던 시기에 정어리 자원이 증가하였으며, 지구가 추웠던 기간에는 정어리 자원이 자취를 감추었던 것으로 나타났다. 그리고, 정어리 자원 성쇠는 주기성이 있으며, 대략 60년의 주기를 가지고 있었다(Klyashtorin, 2001).

#### 나. 어업자료에 의한 어류의 성쇠

최근에 이르러 수산식품에 대한 수요가 늘고, 어로기술이 혁신됨에 따라, 지구상의 곳곳에서 남획에 의한 자원의 고갈현상이 발생하고 있다. 그러나, 어류의 성쇠는 인간의 활동에 의해서만 영향을 받는 것이 아니고, 우리가 아직 파악하지 못하고 있는 자연현상에 의하여 성쇠를 반복하고 있다. 어업기록에 의하면, 한 해역에서 어떤 어종이 번성하였을 때, 그 번성이 영구적으로 지속되는 것처럼 보이지는 않는다. 지난, 20세기의 후반기 이후 베링해를 포함한 북태평양에서 명태가 많이 어획되고 있지만, 40년 전인 1960년에만 해도 이 해역에 명태가 그렇게 번성하지는 않았었다(김, 1990). 또한, 우점종의 교대현상도 현저한데, 해역 내에서 정어리와 멸치의 교대현상은 세계의 여러 해양에서 보고되었다.

1900년대 이래의 청어와 정어리 어업자료를 분석하면, 매우 재미있는 현상이 발견된다. 우리나라에서는 1930-40년대에 정어리가 엄청나게 많이 어획되었으나, 그 이후에 원인 모르게 자취를 감추었다. 그러나 1970년대 후반부터 다시 정어리가 늘어나기 시작하였으며, 우연의 일치인지 지구 전체를 지배하는 자연현상인지 모르지만, 세계 곳곳에서 정어리 자원이 거의 같은 시간에 폭발적으로 증가하는 것을 볼 수 있다(그림 5). 지리적으로 격리되어 있는 세계의 정어리 자원(즉, 한국과 일본의 정어리, 캘리포니아 정어리, 칠레 정어리, 유럽 정어리)은 모두 거의 같은 시기에 증가하였으며, 그리고 동시에 쇠퇴하는 양상을 보이고 있다.

한편, 대서양 청어와 태평양 청어도 거의 같은 시기에 성쇠하고 있었음이 발견되는데, 공교롭게도 청어의 성쇠와 정어리의 성쇠가 정반대임을 알 수 있다(김, 1994). 이러한 자원량의 변화는 부분적으로는 어업활동에 기인한 이유도 있지만, 일반적으로는 자연현상이라고 받아들여진다. 아직, 자연의 어떠한 기작이 이렇게 어류의 번성을 좌우하고 있는지 잘 모르지만, 지구의 평균 기온과 정어리, 청어자원 사이에는 분명한 연관관계가 있는 듯이 보인다. 즉, 지구가 따뜻할 때(1930-40년대, 1970년대 이후, 그림 1 참조)는 온수성 어종인 정어리가 많이 어획되는 대신 냉수성의 청어가 적게 잡히고, 기온이 낮을 때(1950-60년대)에는 그 반대현상이 나타난다.

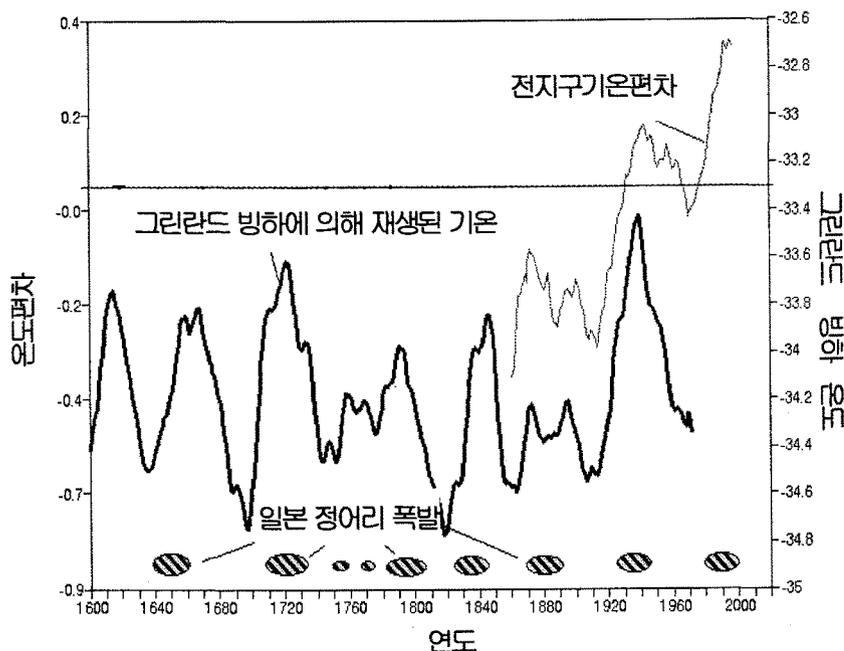


그림 4. 지난 400년간 주기적인 기온변동과 일본 정어리의 대번성

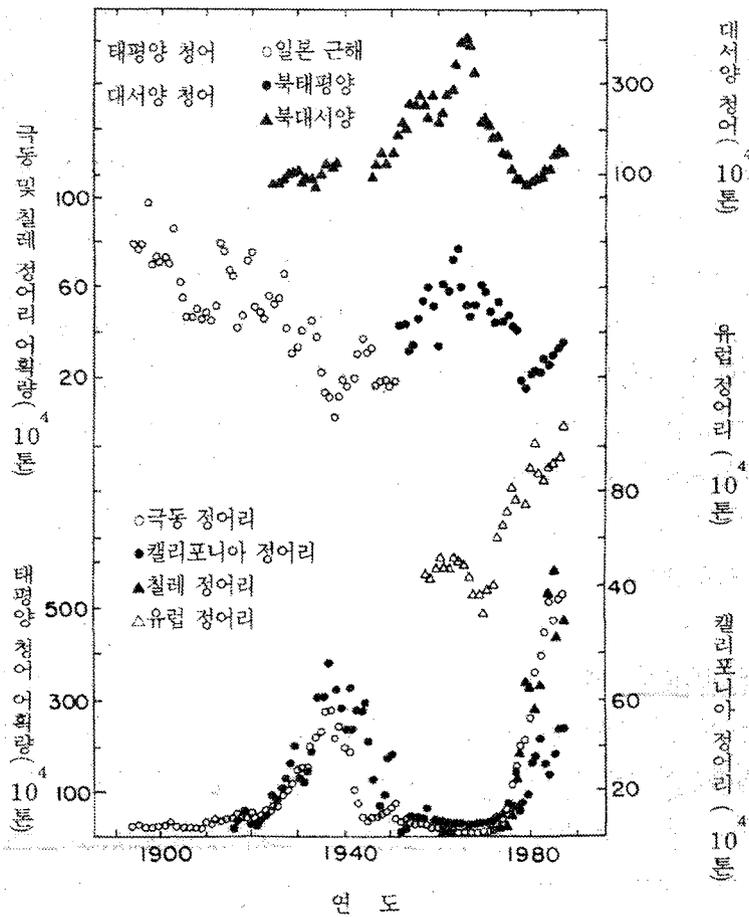


그림 5. 세계의 정어리와 청어의 연도별 어획량

#### 다. 북태평양에서의 기후도약과 연어 어획

학자들은 1960년대와 1980년대의 해수온도나 일차생산력 등을 비교함으로써, 북태평양에서의 변화가 있었음을 암시하였었고, 최근에 더욱 짧은 주기를 가지고 자주 출현하는 동부 태평양에서의 엘니뇨현상과 어획물의 급격한 변동 때문에 태평양에서의 기후변화에 대한 주장은 이미 예견된 것이었다. 최근에 제기된 기후의 도약현상에서, 북태평양에서는 1976년을 전후로 하여 기후가 순간적으로 변동되었고, 변동된 기후가 십수 년 혹은 수십 년 정도의 기간을 가지며 지속되는 특성이 있다는 것을 발견하였다. 예를 들면, 북태평양에서는 고기압이 발달하여 1940년대 중반부터 비교적 한랭한 기후가 형성되었었는데, 1976년부터 갑자기 저기압 세력이 확장하여 따뜻한 해역으로 변화하였다(그림 6). 이러한 기단의 변화로 이 해역에서는 폭풍의 빈도가 잦아졌으며, 더 나아가 해양의 생산력 및 생태계의 구조 개편이 진행되었다(Francis and Hare, 1994). 학자들은 1976년에 이렇게 변한 기후가 다시

1988년에 반전되었다고 한다.

북태평양에서 발생한 급격한 기후변화는 해양생태계를 구성하고 있는 어류의 생산력에도 많은 영향을 미쳤다. 특히, 이 해역에서의 연어 어획량은 1920-40년대에 는 많았다가, 1950-70년대에 큰 폭으로 줄어들었다. 하지만, 1977-78년을 전후로 하여 다시 크게 증가하였으며(그림 6), 이 증가 양상은 기후도약의 변화양상과 거의 같게 나타났다. 또한, 이 해역과 멀리 떨어진 한반도의 북한쪽 해역에도 연어류가 자생하고 있어 20세기 초반부터 어획되고 있었는데(로춘봉, 1986), 북한 해역에서의 연어생산 증감 상태는 북태평양과 거의 같은 유형을 보이고 있다. 이와 같은 사실은 비록 두 개체군이 서로 떨어져 있어 혼합되기는 어려웠지만, 이들 개체군을 지배하는 공통된 기후환경이 존재하고 있음을 암시하는 것이다.

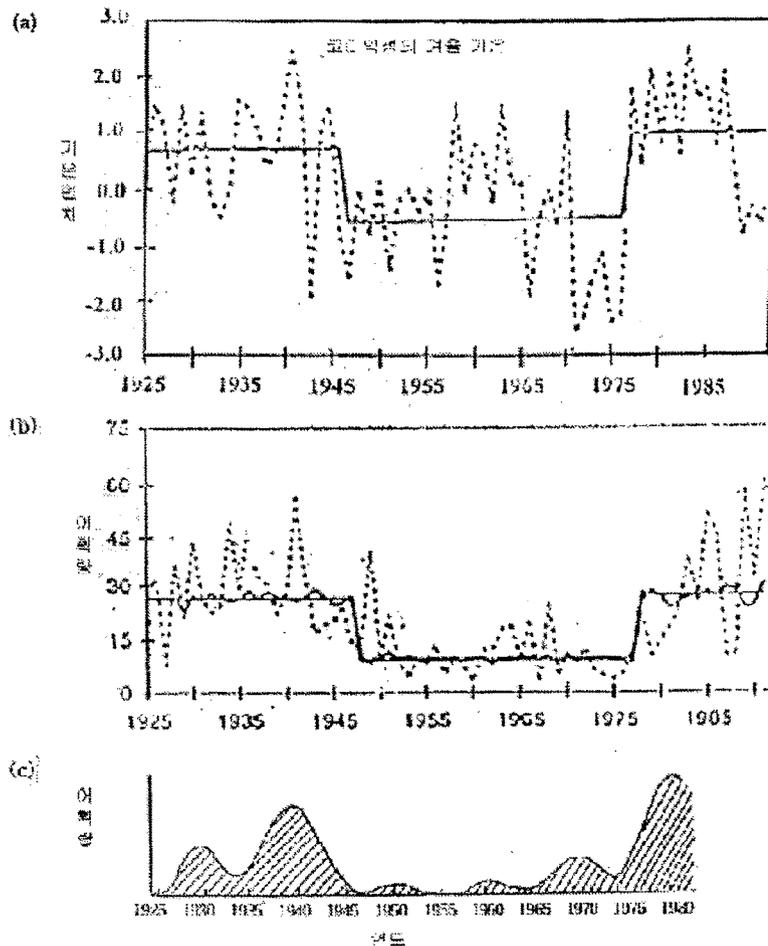


그림 6. 시대별 기온, 연어 어획량 편차

(a) 알래스카만 코디악 섬의 기온.

(b) 알래스카의 곱사 연어 어획, (c) 북한의 곱사연어 어획

라. 엘니뇨와 수산자원의 변동

엘니뇨가 발생하면서 상승하는 해수의 온도는 태평양의 동부해역의 수온을 현저히 상승시키고 있으며 특히 아메리카 대륙의 서해안을 따라 이상 고온의 해수가 나타나게 한다. 엘니뇨는 용승류의 활동을 억제하여 해양의 일차생산력을 낮추는 원인이 되기도 하며, 이들을 먹이로 하는 생태계의 중위 및 상위 포식자(즉, 동물플랑크톤, 어류, 조류, 포유류 등) 개체군 변동과 성장, 번식, 가입 등에 영향을 미쳐, 심할 경우에는 기아의 요인에 의한 어류와 바닷새의 사망이 초래된다. 특히 대표적인 실례로, 1970년대의 페루 해역에는 멸치자원이 번성하여 전 세계 해양어류 어획량의 20%를 차지할 정도였지만, 몇 번의 강력한 엘니뇨를 겪은 이 해역에서는 멸치자원이 급감하였고, 아직도 자원량이 예전의 수준으로 회복되지 않고 있다(Barber and Chavez, 1986; 그림 7).

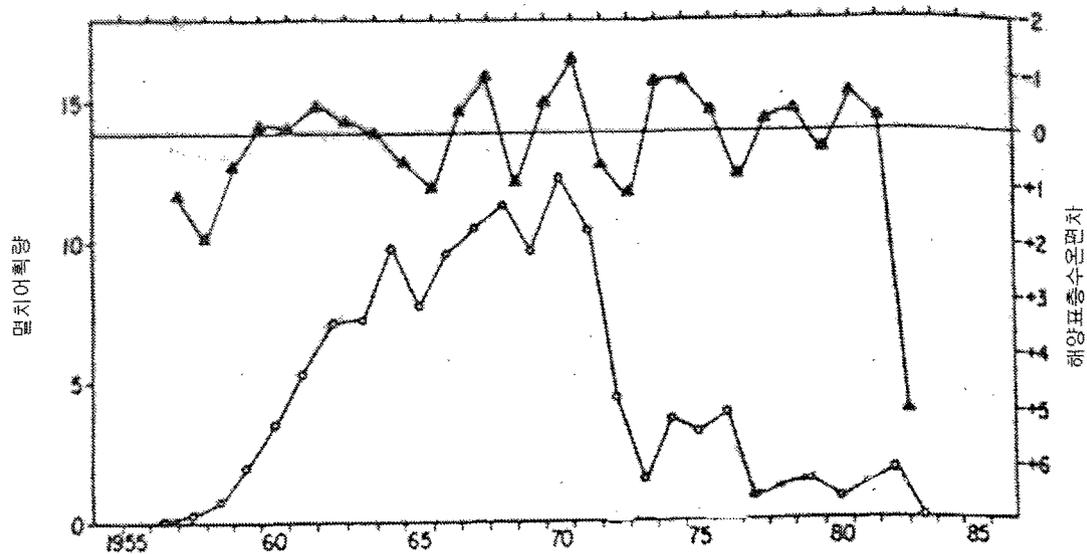


그림 7. 페루 앞바다의 엘니뇨 발생과 멸치의 어획량 변동  
(Barber and Chavez, 1986)

그리고 수온의 변화에 따라서 생물체들의 분포 범위가 달라지는데, 엘니뇨가 발생하는 해에는 열대해역에만 서식하던 열대 및 아열대 생물들이 중위도 및 고위도에까지 분포하게 만든다. 어류의 경우에, 변화된 환경은 어류의 성장에 영향을 미치는데, 종마다 다르게 나타나기도 하며, 같은 종이라고 하더라도 지역에 따라 긍정적인 혹은 부정적인 효과를 나타내기도 한다. 엘니뇨가 발생하여 표층수온이 증가하면, 수온약층이 깊어지고, 이에 따라 식물플랑크톤도 깊이 분포한다. 이 결과 연

안에 서식하던 어류가 찬물을 찾아 해안을 따라 남북으로 이동하거나, 이동을 할 수 없는 생물들은 높아진 수온과 먹이의 결핍으로 죽게 된다. 또한, 남북으로 이동한 어류라고 하더라도 수온의 급격한 차이가 발생할 때에는 어류가 사망하게 된다. 표층수온의 상승이나 용승류의 감소와 같은 커다란 영향은 아니지만, 엘니뇨에 동반하는 많은 강수량은 해안 가까이에 서식하는 어류들에게 영향을 준다. 호우는 염분을 감소시키며, 탁도(turbidity)를 증가시킴으로써 어류의 정상적인 생존에 나쁜 영향을 미치게 된다.

미국 서부 해안의 표층에 서식하는 민대구(Pacific whiting)과 연어류(salmons)의 성장은 ENSO event에 의하여 부정적인 영향을 받게 된다. 서부 해안을 따라서 서식하는 볼낙(rockfish)의 성장과 건강상태가 ENSO에 의하여 나빠지고 있다는 것도 흥미롭다. 은대구(sablefish) 처럼 깊은 수심의 어류 조차도 부정적인 영향을 받는다는 사실은 많은 저서어류들의 먹이가 ENSO에 의하여 감소되기 때문인 것으로 생각된다. 하지만 알래스카 연안에서는 서부 해안과는 달리 연어나 그 이외의 저서어류의 성장이 촉진되었고, 은대구의 경우에도 ENSO 시기에 서해안에서 성장이 지연된 반면, 알래스카에서는 촉진되었다. 이와 같은 사실은, 엘니뇨 발생지역 혹은 그 영향을 많이 받는 미국 남서부해안에서는 엘니뇨가 용승현상을 저지시키면서 낮아진 일차생산력이 어류 먹이의 감소를 유발한 때문이라고 생각된다. 하지만, 알래스카 해역에서는 엘니뇨에 의한 열파(heat wave)의 수평적 전파 때문에 해수온이 상승하게 되고(즉, 온난현상이라는 결과는 같음), 이러한 수온의 상승은 플랑크톤의 생체량과 풍도를 높히거나, 어류의 성장을 빠르게 만드는 계기가 된 것으로 보인다.

#### 마. 기후의 지수와 수산자원의 변동

기단의 흐름을 나타내는 대기순환지수(ACI)는 주요한 기후의 지수로서, 특히 변이가 적은 ACI의 방향성(즉, 남북 혹은 동서)은 주요 상업어종의 장기간 변동과 매우 높은 상관관계를 보이고 있다( $r=0.7\sim0.9$ , 그림 8). 페루 근해의 멸치자원의 변화는 ACI 남북요소의 변화와 잘 맞고, 같은 생태계 내의 정어리 자원의 역학과 반대 현상을 보이고 있다(그림 8). 즉, 정어리는 지구 기온이 상승하고, 대기순환의 동서 방향이 우세한 시기에 증가하지만, 멸치의 최대치는 지구기온의 하강기와 대기순환의 남북 방향이 우세한 시기에 나타난다. 이것은 이 두 종이 서로 다른 기후 조건을 좋아하기 때문인 것 같다. 이처럼 ACI의 방향성과 수산자원의 변동은 서로 비슷한 모습으로 변동되는 것이 많은데, 한국과 일본 근해의 정어리 자원, 캘리포니아 앞바다의 정어리 자원, 북태평양 서식 연어자원 등은 ACI의 동서 방향 요소와, 대서양 대구, 대서양과 태평양의 청어 등은 ACI의 남북 요소와 같은 유형으

로 변화한다(그림 8). 지역적인 기후의 지수가 지구전체의 지수보다 어획량과의 상관관계가 더욱 높을 것으로 생각되지만, 중요한 태평양 어종들은(연어, 일본 정어리, 캘리포니아 정어리, 페루 정어리, 명태, 칠레 전갱이) 지역적인 지수보다는 지구전체 기온편차 혹은 ACI와 같은 지구의 기후지수와 밀접한 관련이 있는 것처럼 보인다. 하지만, 이것은 지역적인 지수가 덜 중요하게 이용된다는 것은 아니며, 향후 이들 지수들을 더욱 잘 이용하기 위해서 기후와 어획생산간의 관계에 대한 상세한 연구가 필요함을 의미한다. 예를 들면, 최근 80년 동안의 곱사연어 어획은 지구 전반의 기후지수보다는 지역적인 지수인 알류산저기압지수(ALPI)와 상관관계가 좋았다(Klyashtorin, 1997).

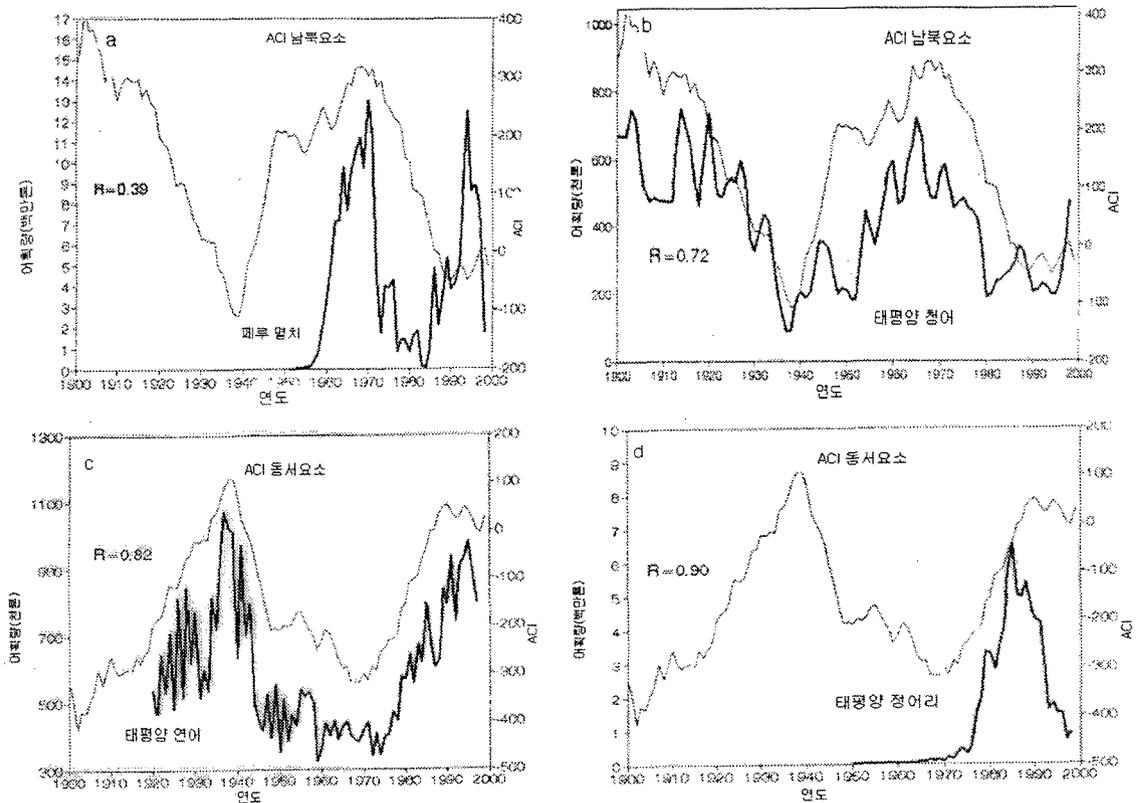


그림 8. 대기 순환지수의 방향성과 수산자원의 변동.

- (a) ACI 남북요소와 페루 멸치, (b) ACI 남북요소와 태평양 청어,
- (c) ACI 동서요소와 태평양 연어, (d) ACI 동서요소와 페루 정어리

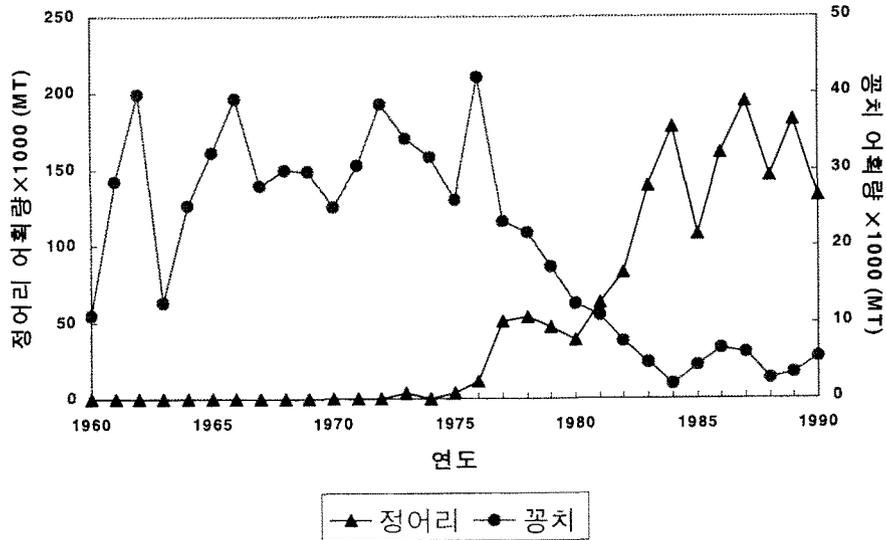
## 5. 우리나라 인근해역에서의 환경변동과 수산자원 변동

우리나라의 동, 서, 남해는 생태학적으로 각기 독특한 특징을 가지고 있다. 동해는 대륙붕이 극히 제한되어 있으며 평균 2000 m가 넘는 3개의 해분으로 구성되어 있고, 한류와 난류가 교차하므로 다양한 생물상들이 이 곳에서 발견된다(Chang *et al.*, 1998/1999). 동해의 경계는 대부분 육지와 섬으로 막혀 있으며, 이 곳에서 발생하는 해양현상들이 큰바다에서의 현상과 비슷하다고 하여 작은 대양이라고 불리고 있다. 남해는 쓰시마 해류가 동해로 들어가는 통로의 역할을 하는 비교적 따뜻한 바다로서, 멸치, 고등어, 정어리 등의 소형해양표층어류(small pelagic fish)가 이 해역의 주요 구성원이다(Kim and Kang, 2000). 많은 섬들과 얇은 수심은 천해의 어류 보육장을 형성하고 있으며, 연안역에는 양식업이 잘 발달되어 있다. 하지만 몇 년 전부터 적조현상이 두드러지게 심해지고 있으므로 생태학적인 관심을 받고 있다. 서해는 전 해역이 100 m 보다 얇은 대륙붕에 속하며, 육상으로부터의 유기물 및 담수의 유입이 비교적 많다. 해양의 일차생산력이 높기 때문에 많은 이동성 어류들의 성육장이 되고 있지만, 최근에 와서는 어류자원에 대한 남획과 더불어 해안 간척, 공해물질의 과다한 배출로 어장으로서의 가치를 상실해 가고 있는 중이다(Kim and Khang, 2000). 하지만 아직도 서해는 중국해와 황해를 계절적으로 이동하는 저서어류들의 주요 서식처이며, 서해 중부해역에서 발견된 거대한 멸치군은 장차 서해 어업을 활성화하는데 일조할 가능성이 있다.

대체로, 동해에서는 난류와 한류가 만나고 있어 생산력이 높으며, 각종 수산자원이 풍부하게 서식하고 있지만 해마다 수산자원의 분포와 출현하는 자원량의 크기가 다르게 나타난다(김과 강, 1998). 이러한 원인은 인간의 어로활동에 의한 영향과 해양의 변동에 의한 영향으로 구분할 수 있으며, 동해의 수산자원에 대한 기후변동과의 역학관계 연구는 아직 개념 정립단계이다. 1970년대 중반을 분기점으로 하여 동해의 해양생태계에도 많은 변화가 발생하였다. 봄철 표층혼합수심(MLD)은 1961-1975년 동안(평균 18.2 m)이 그 이후의 1976-1990년(평균 26.1 m)에 비하여 얇고, 변화가 적었다. 따라서 전반부의 얇은 혼합층은 그 이후의 시기보다 상대적으로 플랑크톤의 높은 풍도를 야기시켰으며, 이러한 변화는 동해의 해양유용생물자원의 가입과 생체량에도 영향을 미치는 것으로 생각된다. 아직, 기상 및 해양환경과 어류 자원량의 증감에 대한 기작은 밝혀지지 않았지만, 1970년대 중반부터 온수성 어종인 꽁치의 어획량이 줄어든 반면, 정어리 어획량은 증가한 현상이 발견되었다. 또한, 냉수성 어종에서는 명태와 도루묵이 시기에 따라 반대로 증감현상이 발생하였다(그림 9). 명태, 정어리, 꽁치의 어획량은 북태평양 기후지수인 NEPPI와 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 동해 연안역 생태계에서 소나무의 성장이

매우 좋았던, 1969, 1973, 1979, 1983, 1987년 중에서 1979년을 제외하고는 엘니뇨 현상이 5계절 이상 지속된 해로 판명되어, 동해는 북태평양의 기후와 엘니뇨의 영향을 동시에 받고 있는 해역이라는 것을 알 수 있다 (Kang *et al.*, 2000).

(a)



(b)

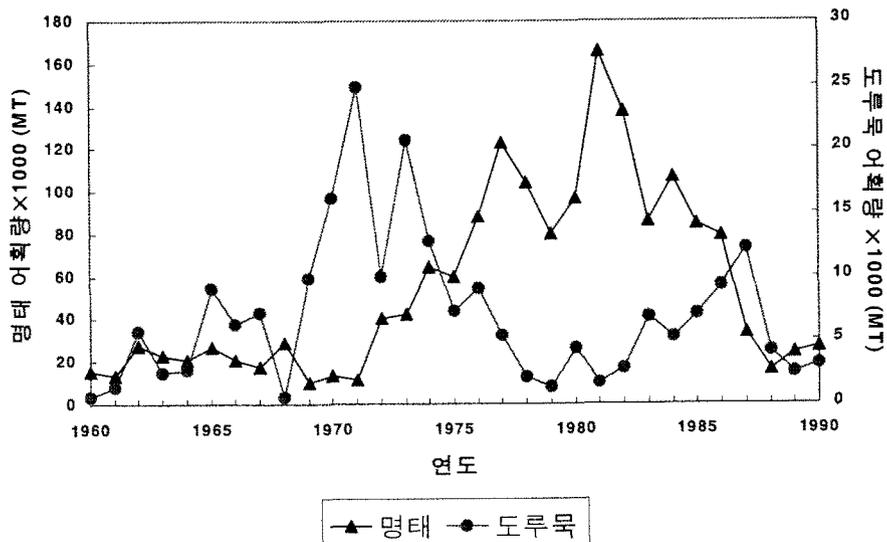


그림 9. 동해의 (a) 정어리와 꼼치, (b) 명태와 도루묵의 연평균 어획량 변동

남해의 주요 어종인 멸치와 고등어는 모두 소형표층성어종으로서 기후의 변동에 민감하게 반응하는 어종이다. 이들은 봄에 산란하고, 치어들은 여름과 가을에 급격한 성장을 하기 때문에 늦가을부터는 상업적 어업이 가능한 크기가 된다. 멸치, 고등어는 1970년대 중반부터 어획량이 급격히 증가하였으며, 1990년대까지 높은 어획량이 유지되었다. 이들 어획량의 증가는 먹이생물인 동물플랑크톤의 증가와 높은 연관성이 있으며, 엘니뇨의 영향을 간접적으로 받고 있는 듯이 보인다(Kim and Kang, 2000). 즉, SOI가 12월 남해의 표층수온(Sea Surface Temperature, SST)과 높은 음의 상관관계( $r=-0.473$ ,  $p<0.01$ )에 있으며, 겨울철 SST는 멸치와 고등어의 어획과 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다( $r=0.419$ ,  $0.436$ )(그림 10). 이 결과는 적도지방에서의 엘니뇨 발생이 시간이 지남에 따라 우리나라 남해 해역의 수온에도 영향을 미치고 있으며, 상승된 수온은 동물플랑크톤의 번성에 긍정적으로 작용하여, 결과적으로 어류의 성장에 도움을 줄 수 있다는 논리를 가능하게 한다.

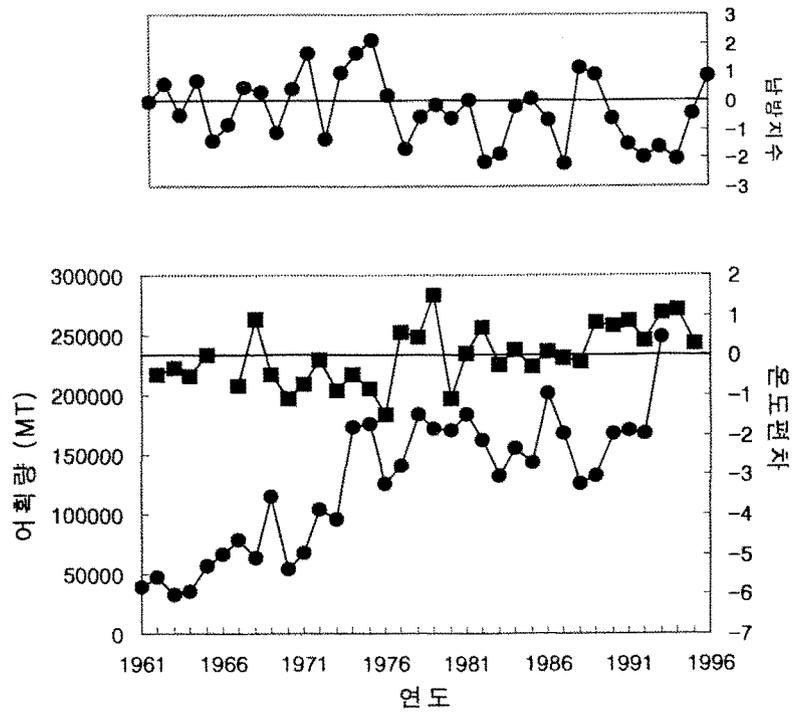
서해에서 어획되는 참조기는 비교적 깊은 물에 서식하는 어종으로, 태어난 지 1년 이상이 되면 어업으로 가입하게 된다. 1970년부터 1988년까지의 수온 및 염분(75 m)의 변동과 참조기 어획량과의 관계를 최신 통계기법을 이용하여 분석한 결과, 평균 수온보다도 따뜻하고 안정된 해양환경에서 참조기가 태어난다면, 그 해에 태어난 연급군(year-class)은 강연급군이 되어 1년후의 어획량이 커지게 되며, 그 반대의 경우는 약연급군이 되는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 1997). 그리고, 참조기의 어획량이나 가입과정의 경우, 염분의 영향은 거의 미미하였다.

엘니뇨의 영향이 서태평양의 아시아 대륙 연안에 미치는 영향에 대해서는 아직 분명히 밝혀지지 않았으며, 해양생태계의 변화에 대한 설명도 역시 아직 모호한 상황이다. 일반적으로 서태평양의 중위도권에 대한 엘니뇨의 영향은 동태평양에 비하여 적으며, 그에 따른 자연현상의 결과도 분명하지 않다고 한다. 하지만 우리나라 부근 해역의 온난화가 진행중인 것으로 생각되며, 이에 따라 온수성 표층어종의 증가가 지난 40년 동안에 현저하였다. FAO 수산통계에 의하면 서태평양의 중위도 해역은 어류생산량이 세계에서 가장 높은 해역으로, 이 곳에 위치한 중국, 일본, 러시아, 한국 등은 세계에서 손꼽히는 수산업국이다. 따라서 최근 더욱 빈번히 발생하는 엘니뇨 현상, 혹은 지구온난화와 수산자원의 변동간의 상관관계를 밝히는 작업은 시급히 연구되어야 할 것이다.

고등어는 전세계 해역에 고루 분포하며, 아시아 지역에서는 엘니뇨나 북태평양의 기후도약의 영향권인 아열대 지역에서부터 아북극 지역까지 태평양의 해안을 따라 넓게 서식하고 있다. 고등어는 계절에 따라 회유를 하는데, 여름철에는 성장을 위해 북쪽으로 이동하고, 겨울철에는 산란과 월동을 위해 남하한다. 따라서 서식해

역에서의 기후변동은 고등어 자원의 가입량 변화뿐 만 아니라 회유경로와 분포에도 영향을 미치게 된다. 동중국해에 서식하는 고등어의 어획량 변동은 표층수온 편차(SSTA)와 좋은 상관관계를 나타내었다(Kang *et al.*, 2001). SSTA는 십년 주기와 유사한 변동(quasi-decadal variability)을 보이는데, 고등어의 어획량은 SSTA의 변동을 따라 변한다. 이는 1970년대에는 높고, 1980년대에는 낮은 해양표층수온 변동(즉, PDO와는 반대경향으로 나타남)과 일치하였다. 연구지역에서 고등어 어장의 위치는 온난한 시기에는 북쪽으로 이동하였으며, 수온이 낮을 때는 반대로 나타났다. 그 예로, 1990년대 중반 대만 주위의 SST가 높았을 때, 대만의 어장은 1980년대에 비해 북쪽으로 이동하였다(그림 11). 이 사실은 일본과 대만의 어획량이 음의 상관관계를 보인다는 사실과도 일치한다. 이와 유사한 어장의 변동이 1960년대부터 1990년대까지 한반도 주위에서도 관찰되었다.

(a)



(b)

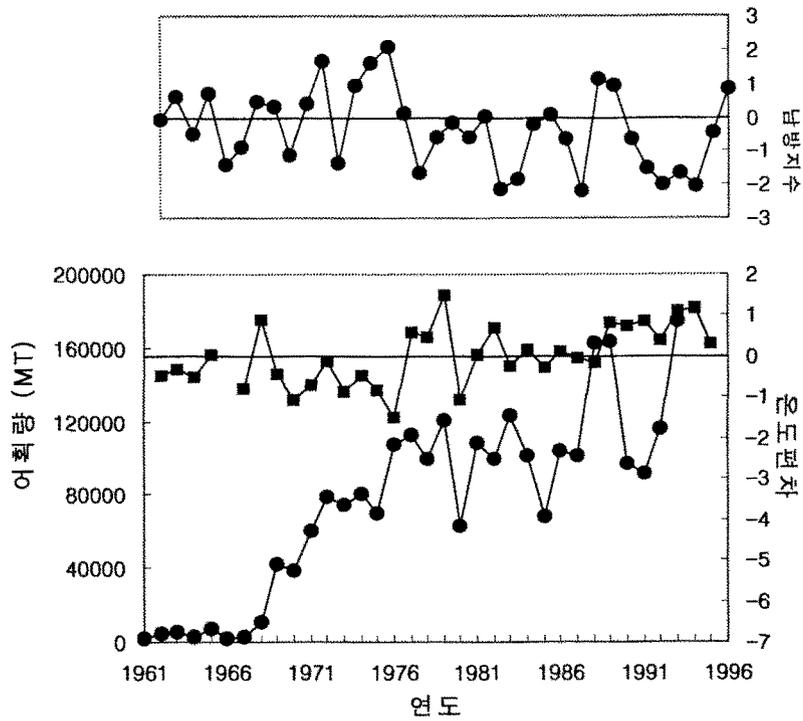


그림 10. 남해에서 SOI, SST의 연평균 anomaly와 주요어종  
(a) 멸치, (b) 고등어의 물리-생물의 상호작용

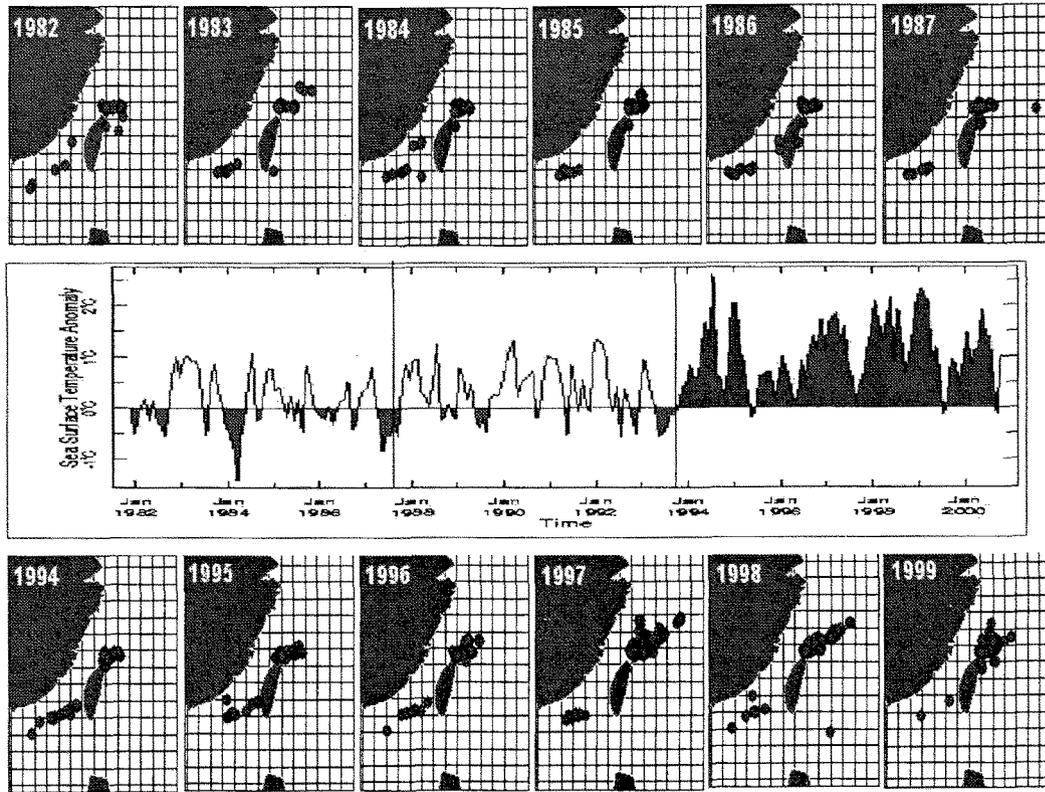


그림 11. 표층수온 편차와 대만의 고등어 어장 위치 변화

## 6. 변화될 수산생태계 및 향후의 관리 방향

지구가 온난화 되고 있다는 사실을 가정하였을 때에도, 앞으로 나타날 해양 물리현상 및 생태계의 반응에 대해서는 여러 가지 가설이 있다. Bakun(1990)은 지구 온난화가 대기의 흐름을 강화하여 용승현상이 활발해 질 것이며, 그 결과 해안 혹은 유광대에 영양염이 많이 유입되어 플랑크톤과 어류의 생물량이 증가할 것이라고 예견하였다. 그러나 Hsien과 Boer(1992)는 정반대로 대기순환을 약화시키고 궁극적으로 해양의 생산력을 감소시킬 것이라고 주장하였다. 기후의 변동은 대양 및 연해생태계에서의 급격한 변화를 유발하였는데, 생태계 내의 어류자원의 역학에 대한 변화를 예측하기 위한 여러 시도가 있었으나, 아직 충분히 설명하지 못하고 있다.

가. 세계 어획량의 변화

지구의 대기순환에 대한 양상은 남북방향의 세기가 감소하고 동서방향의 세기가 증가한 상태를 나타내고 있다. 만약, '그림 8'에서 본 것처럼 남북요소와 동서요소의 증감에 따라 번성과 쇠퇴하는 어종이 다르다면, 우리는 55-65년 기후주기를 기본으로 하여 각 대양에서의 어획량을 예측할 수 있다(Medley and Klyashtorin, 2001, unpublished manuscript). 북태평양에서는 2020년대까지 계속 어획이 감소할 것이고, 같은 기간에 북대서양에서는 늘어날 것으로 예상되는데, 구체적으로는 2000-2015년 동안의 대서양과 태평양 청어, 대서양 대구, 남아프리카 정어리, 페루와 일본 멸치의 어획량은 약 200만 톤 증가할 것이고, 그 이후는 감소할 것으로 예상된다. 같은 기간 동안에 일본, 페루, 캘리포니아, 유럽 정어리, 태평양 연어, 명태, 칠레 전갱이는 약 400만 톤 감소할 것이고, 그 이후에 늘어날 것 같으며, 이 결과, 북태평양에서의 어획생산은 150-200만 톤 감소하며, 북대서양에서는 170-200만 톤 늘어날 것이다(그림 12).

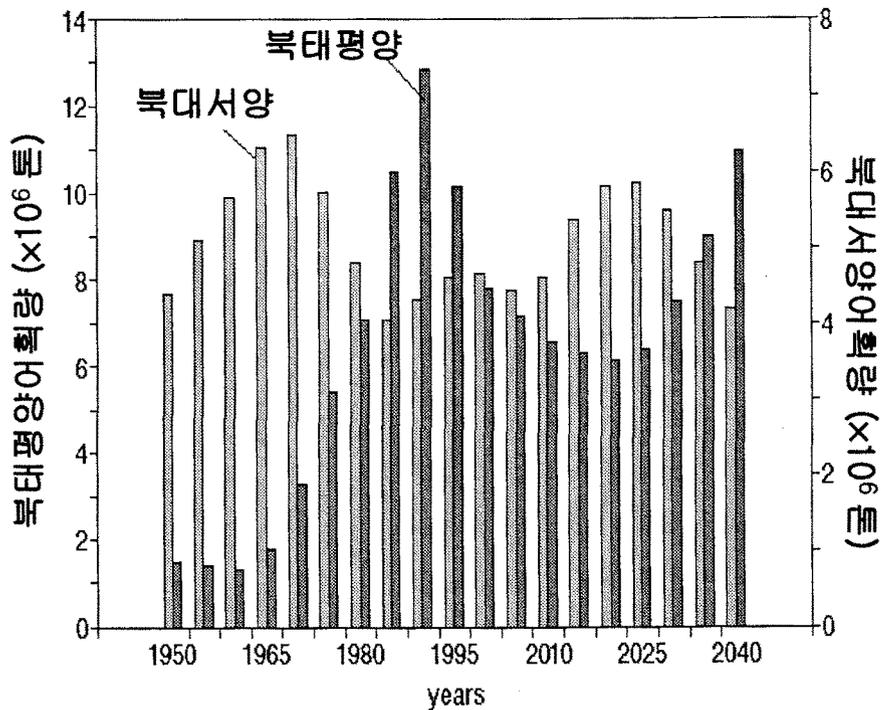


그림 12. 주요 상업어종의 실제 어획량(1950-1998)과 예측 어획량 (2000-2040)변화 (Medley and Klyashtorin, 2001, unpublished manuscript)

#### 나. 지구온난화에 의한 북태평양 수산자원의 분포변화

태평양 연어는 대양의 섭이장으로부터 그들이 태어난 강으로 모천회유하는 습성을 가진 것으로 알려져 있지만, 산란장으로 가는 길을 찾지 못하고 다른 곳을 헤매는 것도 약 10% 정도 된다고 알려져 있다(Groot and Margolis, 1991). 연어가 이렇게 헤매고 다닌다는 사실은 그들이 새로운 환경에 적응할 수 있는 능력을 갖고 있음도 보여주는 것이기도 하다. 즉, 과거의 빙하기/간빙기와 같은 대규모의 기후 변동이 있었을 때, 그들은 서식처를 축소하거나 넓혔을 것이다. 최근 Babaluk *et al.*(2000)은 북극해에 면한 캐나다의 해안(Beaufort Sea의 Banks Island의 Sachs Harbour)에서 홍연어와 곱사연어의 출현을 처음으로 보고하였고, 이 보고는 연어의 세력확장을 보여주고 있다. 그리고, 1987년 9월 25일 Great Bear Lake에서 어획된 은연어에 대한 보고는 그 이전의 Prudhoe Bay (Alaska)에서 포획된 것보다 동쪽으로 1500 km 확장된 것을 보이고 있다. 과거에는 북극에서 연어가 잘 발견되지 않았었지만, 북극해의 해양이 온난하여지면서 연어가 갈 곳을 못 찾고 이 곳에서 헤매고 있으며, 이 사실이 연어의 서식처 확장의 한 방법으로 생각되고 있다.

해양수산자원의 변동을 예측하기 위해서는 기후의 변화가 해수의 성질과 해류의 흐름에 어떻게 작용하는지 먼저 알아야 하지만, 아직 우리의 과학수준으로 기후변화 혹은 그에 따른 해양생태계의 변화를 정확하게 예측하기에는 어려움이 많다. 하지만, 북태평양에서 지구온난화에 따른 수산자원의 변동을 예측하여 본다면, 아열대 어종의 번성과 아한대권 어종의 쇠퇴가 가장 뚜렷하게 나타날 것이다. 특히 명태어업과 연어어업이 가장 심각하게 타격을 받으리라고 생각되는데, 북태평양 해류의 흐름에 변화가 생겨 명태와 연어가 서식할 수 있는 냉수괴의 분포가 지금보다 훨씬 줄어들 것으로 보인다. 이에 따라 연어의 서식처는 북태평양에서 베링해 혹은 북극해로 옮겨질 것이며, 명태를 비롯한 대구, 베링해 가자미, 청어 등의 냉수성 어종은 베링해의 일부분에 그 분포가 국한될 것으로 보인다. 하지만, 온수성 어종인 다랑어류는 그 세력이 지금보다 현저히 넓어질 것이다. 요즈음도 엘니뇨가 발생하여 수온이 따뜻하여지면 다랑어의 분포가 북쪽으로 확장되는데, 북태평양 전체가 지금보다 따뜻해진다면 다랑어의 분포는 매우 확장될 것이다. 또한, 다랑어류 뿐만 아니라, 정어리, 고등어 등의 온수성 표층어류들의 서식처도 지금보다 북쪽으로 북상하는 분포를 보일 것이다. 지난 10년 사이에도 고등어류 중에서 따뜻한 해역에 서식하는 망치고등어의 어획이 한국과 일본의 남부해역에서 크게 증가하였다 (Hiyama, pers. comm. Seikai National Fisheries Research Institute).

#### 다. 수산자원의 관리 방향

지구상에서 생물종이나 생태계가 조절되는 과정을 우리는 거의 알지 못한다. 우리가 아는 것은 기후가 먹이피라미드에 나타나는 각 영양단계의 관계와 종별 생산력에 심각한 영향을 미칠 것이라는 점이다. 어류는 생존경쟁이 치열한 환경에 살면서, 그들이 선호하는 서식처를 유지하는 한편, 기후의 임의성(즉, 단기간의 환경 변화)에 적응하도록 진화하여 왔다. 어떤 종이 새로운 환경에 적응하기 어려울 때에는 진화를 못하고 절멸하는 경우가 있는데, 이것은 자연의 정상적인 과정이다. 하지만, 어업이 극심한 환경에 처한 개체군의 적응능력을 감소시키는 경우도 있을 것이다. 어업은 생물종을 선택적으로 취하는데, 먹이연쇄의 최상위를 차지하는 종을 어획할 때, 그 영향이 생태계에 어떻게 미치고 있는지 아직 잘 모르고 있다. 또한 인간의 활동이 극심한 기후변화에 대한 개체군의 적응능력을 감소시키거나 혹은 기후변화의 빈도나 강도를 증가시킨다거나 한다면(즉, 우리 인류는 온실기체를 발생 시킴으로써 우리의 기후를 바꾸고 있음), 우리 인류의 행위는 현생종의 생존능력에 대한 중요한 요소가 된다.

기후가 어류개체군의 역학에 중요한 영향을 미치며, 향후 더욱 큰 기후의 변동으로 어획량 변동이 더욱 커질 것이라는 인식은 매우 중요하다. 어류 생산량에 영향을 주는 지구온난화의 영향은 온도, 강수, 바람, 해류, 해수면, 염분, 용승, 해빙, 자외선 등으로서, 이러한 비생물적 요소들은 기후변화에 의하여 영향을 받는다고 보았다. 만약 남획이 감소한다면 온실기체의 증가는 해양생산의 증가에 기여할 수도 있다. 이러한 결론은 자연의 기후변동과 바람과 해류의 구조와 강도가 현재와 동일하다는 가정을 기초하여 IPCC 2차 보고서에서 작성한 것인데, 생태계가 지리학적으로 변경되고, 내부적으로 변화가 생긴다면 생물군의 분포와 풍도가 바뀔 것이다. 어류개체군에 대한 긍정적인 효과는 계절적으로 길어진 성장시기, 낮아진 겨울의 자연사망률, 고위도에서의 빨라진 성장률 등을 열거할 수 있는데, 일부 해역에서의 생산력은 높아질 것이다. 만약, 이러한 변화가 발생하면, 몇몇 개체군이 새로이 나타나는 기회가 될 수도 있다.

기후변동에 따른 해양생태계의 모습을 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 더 나아가, 수산자원관리방안을 제시한다는 것은 더욱 어려운 것이다. 어류의 분포가 변화하고, 국경을 넘나드는 회유 경로가 더욱 빈번하여 지면서 수산협정이 새로운 국면으로 접어들 것이며, 이 결과 어업은 더욱 불안정해질 가능성이 있는 것이다. IPCC의 2차 보고서에서는 현재의 어선세력의 규모가 현존하는 자원량을 이용하는 데 충분하다고 평가한다. 그러므로 미래에는 기후의 변동이 남획 영향보다 더욱 중요하게 인식될 것이라고 예견한다. 이처럼 지구온난화는 수산자원관리를 더

욱 복잡하게 만들기 때문에 관심을 기울여야 하며, 그렇기 때문에 더욱 사전예방적(precautionary)으로 수산자원을 관리하는 것이 중요하다. 본 논문에서 제시한, 과거 자료에 대한 통계적인 분석방법은 기후변동과 생태계를 구성하는 각 요소 사이의 상관성을 파악할 수 있는 중요한 첫 걸음이다. 그러나, 이러한 경험적인 접근방법으로는 기후의 변동이 어떠한 과정(process)을 거쳐 얼마나 심각하게 생태계에 영향을 줄 수 있는지 설명할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 향후에는 보다 과정-중심적(process-oriented)인 연구, 혹은 기작(mechanism)구명적인 연구를 추진하여야 할 것이다. 그리고 과정연구로부터 생산된 매개변수를 가지고 생태계의 변화하는 모습을 예측하는 모델링 연구를 활발히 수행함으로써, 생태계와 유용생물자원을 관리하여야 할 것이다. 이러한 자원관리 개념은 과거 단일개체군 관리개념에서 다종관리(multi-species management)개념, 더 나아가 생태계 전체를 건강하게 보전하고 효율적으로 이용하자는 생태계관리(ecosystem management)개념으로 발전해 가고 있다.

## 7. 해양연구의 방향

IPCC 제3차 보고서에서는 무엇보다도 과거보다 더욱 해양서식지의 환경수용력에 대한 영향이 강조되었다(IPCC, 2001). 해양생태계가 안정되어 있다는 가정이 더 이상 받아들여지지 않는다는 것을 강조하였고, 실제로 과학자들은 미래의 자원량 평가에 대한 성공은 주로 해양생태계 역학에 대한 기후변동의 영향을 예견하는 능력에 달려 있다고 생각하게 되었다. 기후관련변화가 어업관련 변화와 마찬가지로 중요하다는 것은 확실하지만, 해양어류개체군의 역학에 대한 온실기체에 의한 기후변동 영향이 아직은 불확실하다. 미래에는 어류개체군 역학에 대한 기후관련 영향이 어업에 의한 영향이 더욱 중요할 것이지만, 기후예측의 일반적 어려움, 미래의 온실기체방출에 대한 가정, 현재 이용되는 모델의 불완전성 때문에 기후의 상태를 정확하게 예측하기는 어렵다. 우리가 기후 모델링에 대한 문제점을 해결한다고 하더라도, 어류개체군 역학에 관한 문제는 아직 남아 있는데, 수산업에 대한 기후변동의 잠재적 영향을 분석할 때 흔히 간과하기 쉬운 것이 여러 어종의 다양한 생활사 형태와 생존전략에 관한 것이다. 즉, 어류와 수산업에 대한 기후의 영향에 대한 평가는 어류의 각 생활사 시기에 영향을 미치는 수온과 염분과 같은 환경이 어종마다 각기 다른 생리적인 영향을 줄 수 있다는 고려를 해야 한다는 것이다. 우리가 개별 종의 풍도를 조절하는 자연의 과정을 이해한다면, 생태계 수준에서 기후효과의 모델 결과를 해석하는데 도움이 될 것이다. 우리가 왜 태평양 정어리가 변동하고,

명태가 어떠한 이유로 북태평양에서 번성하고 있는지 그 기작(mechanism)을 이해할 수 있다면, 우리는 어떻게 수온의 변화가 혹은 해류흐름의 변화가 이들 종과 다른 종의 풍도에 영향을 미치는지 정확하게 예측할 수 있을 것이다. 생물종들은 극심한 기후변동에서도 살아 남았는데, 실제로 어류들이 넓은 위도 분포 범위 내에서 서식하고 있으며, 어류의 수명이 매우 다양하다는 것이 그 증거라 할 수 있다.

아직 원인은 모르지만, 수십 년 규모 변동은 매우 클 수 있기 때문에 지구온난화의 가장 중요한 영향중의 하나가 수십 년 규모 변동의 특성이 바뀌는 것이라고 할 수 있다. 더욱 빈번한, 더욱 극단적인 변화는 어류역학, 수산업, 수산자원관리에 심대한 영향을 미칠 것이다. 만약 지구온난화가 수십 년 규모 변동 유발하는 기작에 영향을 미쳐, 해양환경의 변화가 잦아지고, 변화의 폭이 커지거나 속도가 빨라진다면, 해양수산자원의 규제나 관리에서 중요한 요소가 될 것이다. 이러한 결과는 해양에서의 어업뿐만 아니라, 양식업에 대한 직접적인 우려로 나타날 것이다. 예를 들면, 우리나라처럼 중위도권에 위치한 해역에서는 지역에 따라 냉수성 어종과 온수성 어종을 양식하고 있는데, 연안역 환경이 온난화됨에 따라 냉수성 어종의 양식 및 자원육성 방침에 심각한 문제를 야기 시킬 것이다. 이처럼, 우리가 해양-대기간의 상호반응을 예측할 수 있다면, 환경의 변화에 적절하게 대처하는 정책을 수립하여 인류의 활동에 커다란 도움이 될 것이다(그림 13).

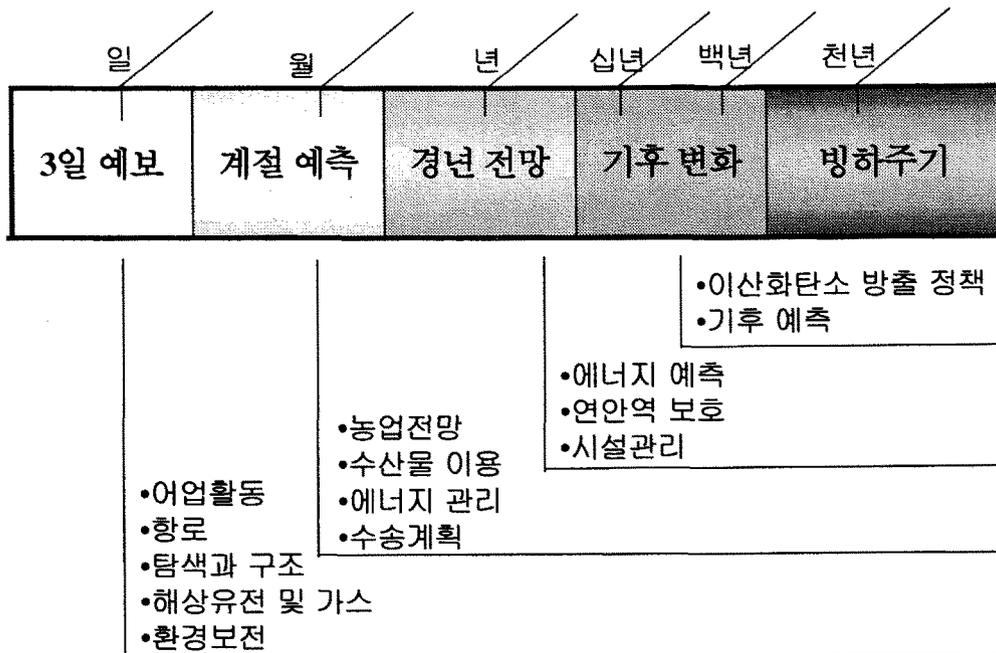


그림 13. 해양-대기 예측능력 향상에 따른 이득

지구 표면의 70 %를 해양이 차지하고 있기는 하지만, 해양의 대부분은 생산력이 낮은 원양(oceanic area)이다. 육지에 면한 얕은 바다, 특히 수심 200 미터의 대륙붕은 해양 전체의 10 % 정도에 해당된다. 하지만, 식물플랑크톤에 의한 해양의 생산력은 대륙붕 지역이 훨씬 높기 때문에 연안역에서 생산하는 유기물의 양은 전체 해양의 약 30 %를 차지하고, 이를 근간으로 하는 생태계의 먹이망도 대륙붕에서 잘 발달되어 있다. 따라서, 동물플랑크톤 및 어류도 연안역에서 풍부하며, 수산자원의 경우 세계 총 어획량의 90 %가 대륙붕 지역에서 어획되기 때문에 해양수산자원 연구는 주로 대륙붕 지역에서 수행되고 있다. 우리나라가 위치한 북서태평양은 대륙붕이 넓게 발달되어 있으며, 세계에서 어류생산량이 가장 많은 해역이다. 해양어류 어획의 30% 이상이 이 해역에서 생산되고 있으며, 단위면적당 어획량도 생산력이 비교적 높다고 하는 북대서양 해역보다 두 배 정도 높다. 따라서 기후가 변화함에 따라 우리나라 부근 해역은 어떻게 반응하는지 파악하는 중요하며, 우리 해역에서의 변화를 나타내는 지수를 발견하여 기후의 변화가 한반도 부근 어류의 풍도, 분포, 산란성공에, 치어 및 미성어의 생존에, 성장에, 특정 어종에게 가능한 먹이생물과 식량 생산물에 미치는 영향을 연구하여야 한다.

지구의 기후변동에 의한 영향은 어업종의 구성을 변화시키고 있으며, 새로운 국제어업질서는 더 이상 우리 어업을 안전지대에 머물지 못하게 하고 있다. 이와 같은 상황에서 국가의 수산정책은 더욱 냉철하여야 하고, 합리적이고, 과학적이어야 한다. 기후변동에 따른 수산자원 변동은 먼 미래의 일이 아니며, 이미 현실의 문제로 대두되어 있다. 우리나라의 해양도 급격히 변화하고 있는데, 바다의 환경변화에 매우 빠르게 반응하는 고등어, 오징어, 멸치 등의 소형표층어류는 1990년대에 들어와 우리나라 어획량의 50-70%를 차지하고 있으며, 대표적인 냉수성 어종인 명태는 거의 자취를 감추었다. 육지에서는 양식업이 급성장을 하고 있지만, 아직 기후변동에 대비하는 정책은 반영되지 않고 있다. 우리 국민은 해산물을 다양하게 섭취하고 있으며, 해양으로부터의 식품 의존도나 단백질 의존도가 높은 편이므로, 좁은 국토에 비하여 많은 학교와 연구기관들이 해양에 관련된 업무를 수행하고 있다. 따라서 기후의 변동이 해양생태계를 변화시키고, 더 나아가 수산생물의 변동을 유발할 수 있다면, 이에 대한 대처방안을 시급히 강구하여야 사회경제적인 손실을 줄일 수 있고, 국민에 대한 영양분 공급 수급 계획에 차질이 없게 된다. 수산학자, 수산업자, 정책 결정자 모두가 지혜를 모아 미래를 대비하여야 할 시점인 것이다.

## 2 절. 한반도 기후변동

### 1. 한반도의 기후변동

한반도에서의 기후변동 특성을 살펴보기 위해 기상청 산하 12개 관측소(강릉, 서울, 인천, 추풍령, 포항, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수)의 1954년 1월 1일-2000년 12월 31일까지 46년간의 일강수량, 일최고기온, 일최저기온을 사용하였다. 한반도에서의 강수는 야간-이른 아침에 극값을 가지는 일변동을 보이며, 강한비(집중호우)의 경우 이러한 경향은 더 뚜렷하다. 동일한 강수 시스템을 둘로 나누는 오차를 최소화하기 위해 본 연구에서는 1일 지속 강수량과 2일 지속 강수량에 대해 동일한 분석을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 또한 한반도 내의 장기 변동을 중점적으로 보기 위해 특이기후 모니터링 지수의 한가지인 표준강수지수(SPI : Standard Precipitation Index)를 적용하기 위해 서울의 1801년부터 2000년까지의 월 강수량 자료를 사용하였다.

#### 가. 연구방법

한반도 평균기온에 나타나는 다중 시간규모(경년변동, 십년규모 변동, 추세경향)의 변동성을 알아보기 위해 파엽분석을 실시하였다. 사용된 모 파엽은 Morlet Wavelet이다. 특이치를 뽑아내기 위해 각 관측소별로 "recurrence intervals"를 계산하였다. Recurrence intervals란 동일한 강도의 현상이 일어날 평균적인 시간 규모를 의미하며, 기준 시계열을 GEVD (generalized Extreme Value Distribution)에 적합시켰다. GEVD에 대한 확률분포 함수는 다음과 같다.

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - \gamma \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{1/\gamma}\right]$$

여기서  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$ 는 평균, 표준편차, 모양 변수이며, 각각은 적절히 결정되어야 한다. 그림 14는 겨울철(12월, 1월, 2월) 일최고기온에 대한 1년(좌), 2년(우) recurrence intervals을 각각 보여준다.

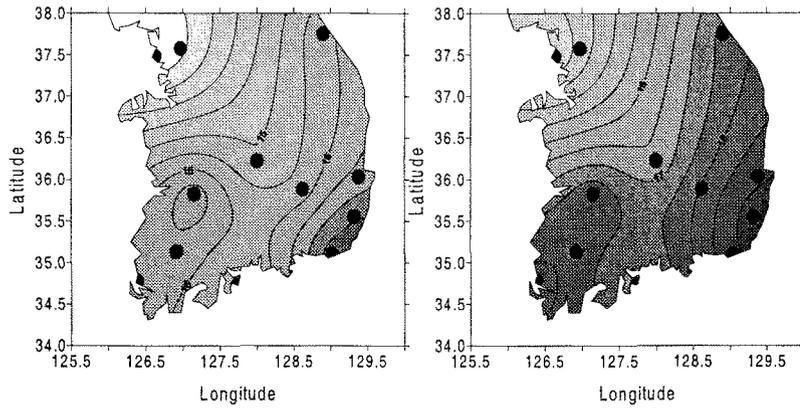


그림 14. 겨울철 일최고 기온의 1년과 2년의 recurrence intervals

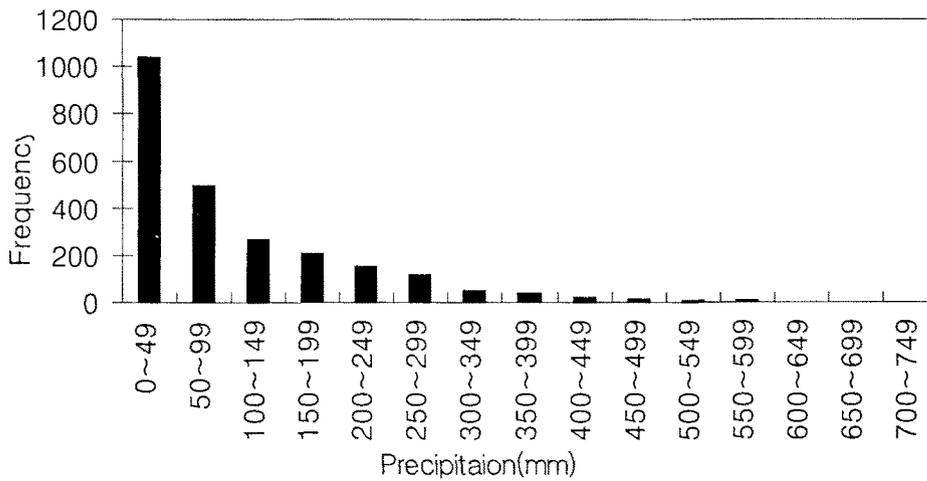


그림 15. 1801년에서 2000년까지의 서울지방 월평균 강수 빈도 그래프

한반도 내의 장기 변동을 중점적으로 보기 위해 한반도에서 제일 긴시간의 관측 자료인 서울 강수량을 가지고 표준강수지수를 구하였다. 표준강수지수는 감마함수로 근사한 표준화된 강수 지수로서 가뭄의 시기와 강도를 나타내는 지수이다. 그림 15와 같이 강수량은 양의 왜도(skewness)를 가진다. 이런 분포에서는 일반적인 가우스 분포(Gaussian distribution) 보다 감마 분포(Gamma distribution)가 많이 이용된다(Wilks, 1993).

감마 분포의 밀도 함수는

$$p(x) = \frac{x/\beta^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0$$

로 정의된다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 모양과 규모를 나타내는 계수이며,  $\Gamma(\alpha)$ 는

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

로 정의되는 감마함수(Gamma function)이다. 주어진 강수량 자료의 최적 감마 분포를 구하기 위해서는 먼저 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 적절히 결정되어야 한다. 일반적으로 이 값을 구하기 위해서는 최대우도추정법(maximum likelihood method)에 의한 반복법이 많이 사용된다(Wilks, 1993). 이 연구에서는 Thom(1958)의 최대우도추정법을 이용하여 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하였다. 주어진 분포의 수학적 평균과 기하학적 평균의 차이인  $D$ 는 아래의 식으로 주어지며,

$$D = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

여기서  $x$ 는 기준달에 대해 각각 3, 6, 12, 24 개월을 평균한 강수량을 나타낸다. 최대우도추정법으로부터 모양 계수 추정치  $\alpha$ 는  $D$ 를 이용하면 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4D/3}}{4D}$$

그리고 규모 계수 추정치  $\beta$ 는  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 의해 유일하게 결정되는 감마분포의 적률(moment) 성질을 이용하면 직접적으로 구할 수 있다. 감마 분포의 1차 적률( $\bar{x}$ )과 2차 적률( $\sigma$ )은 각각 아래와 같다.

$$\bar{x} = \alpha\beta, \quad \sigma = \beta\alpha^{1/2}$$

한편 SPI는 표준화 확률변수로서 그 분포는 0 평균(zero mean)과 단위 분산(unit variance)을 가지게 되며 아래 식과 같이 정의된다.

$$SPI_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} = \frac{x_i - \alpha\beta}{\beta\alpha^{1/2}}, \quad i = 3, 6, 12, 24 \text{ months}$$

다중 시간규모 3, 6, 12, 24개월에서 구해진 SPI는 통계적으로 정규화되어 있어 이상 습윤기와 건조기에 대해 분석할 수 있다. 또, 구해진 SPI지수의 특성을 보기 위해 연속 파엽분석(Continuous Wavelet analysis)과 이산파엽분석(discrete wavelet analysis)을 실시하였다. 연속파엽변환은 Multi-scale signal의 특성을 공간(또는 시간)-주파수 공간에 나타내어 신호의 정확한 특성 분석을 가능하게 한다. 여러 가지 파엽 변환 가운데서 Morlet은 연속파엽으로 시계열의 시간에 주파수 특성 연구에 유용하며 기상학 분야에서 점차 그 이용도가 커지고 있다(Torrence and Compo, 1998). Morlet 파엽은 다음의 식과 같이 구성되어 있다.

$$\phi(t) = \pi^{-1/4} (e^{-i w_0 t} - e^{-w_0^2/2}) e^{-t^2/2}$$

$$\phi(t) = \pi^{-1/4} e^{-i w_0 t} e^{-t^2/2}, \quad w_0 \geq 5$$

여기서  $\omega_0$ 의 값이 5보다 크거나 같을 때 두 번째 식으로 대체 가능하다. 이 파엽은 복소수 함수이며 시계열의 진폭과 위상에 대한 정보를 알 수 있다.

이산파엽분석은 Mallet(1998)에 의해 처음 개발되었으며, 모든 가능한 규모의 파엽 계수를 계산하여 매우 유용하고 방대한 양의 자료를 얻어 결과를 목적에 맞게 필요한 규모의 위치를 뽑아내어 다양한 분석에 사용된다. 또한, 이산파엽분석은 규모와 위치에 대한 정보를 2의 거듭승으로 뽑아 내며 그 개념도를 그림 16에 나타내었다. A는 거친부분(approximation), D는 상세부분(detail)을 각각 나타낸다. 이 연구에서는 기저 파엽으로 symlet을 사용하였다.

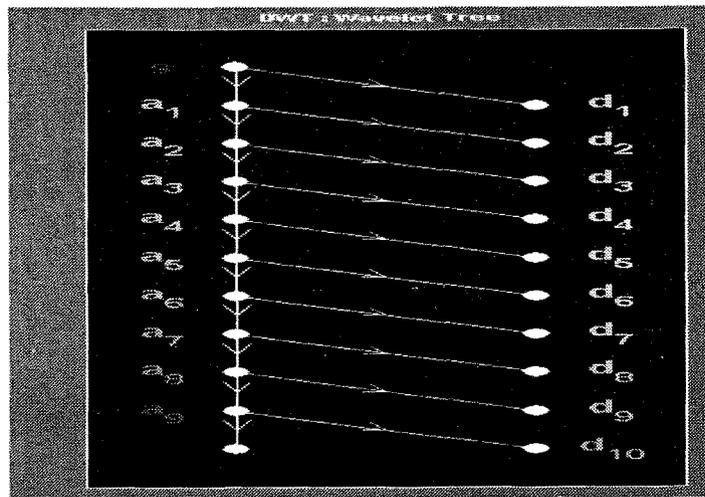


그림 16. 이산 웨이브렛 구조

## 나. 분석결과

### (1) 한반도의 기온분석

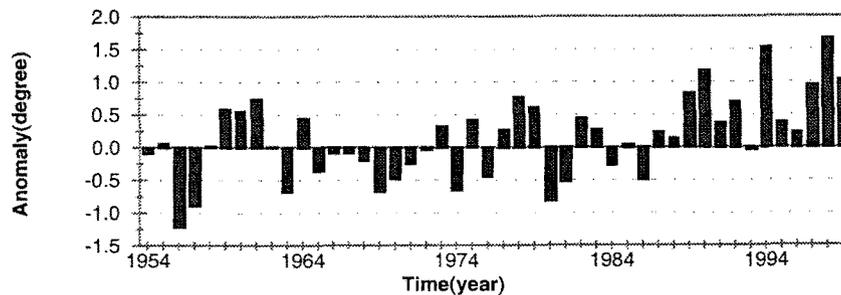


그림 17. 1961년에서 1990년까지의 지표기온편차의 시계열

그림 17은 한반도 12개 관측소에 대해 평균한 지표면 연평균기온의 편차를 보여 준다. 지난 4-5십년 동안 지표면 연평균기온의 편차값은 0.23/decade 정도의 증가율을 보여준다. 이미 여러 논문에서 알려진 1976(7)년 주위의 갑작스런 증가는 뚜렷하지 않지만, 1970년대 중반 이후, 특이치 발생빈도는 그 이전에 비해 상당히 증가하였음을 알 수 있다.

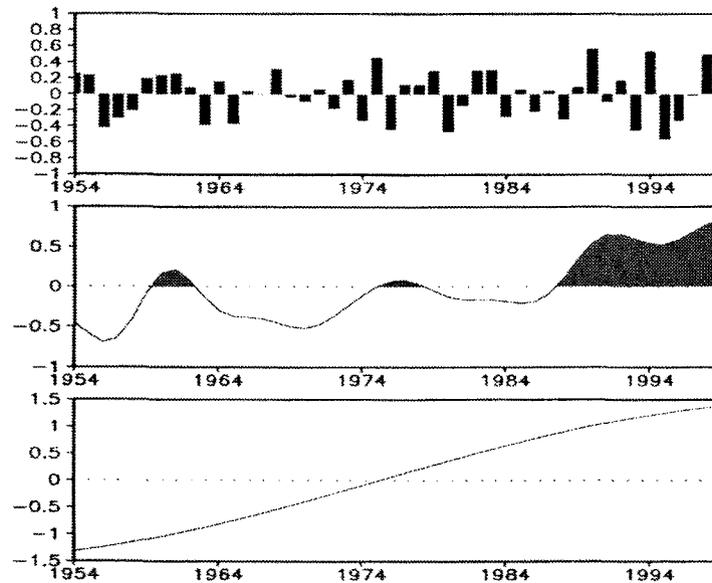


그림 18. 파엽분석 결과 (a) 년변동, (b) 수십년 주기 변동, (c) 선형 경향

그림 18은 그림 17의 지표면 연평균 기온을 파엽변환을 이용해서 시간-공간 영역으로 재분해한 결과이다. 각각 경년변동(2-8년 규모, 상단), 십년규모(8-64년 규모, 중간), 선형추세(128년 규모, 하단)에 대한 파엽계수의 실수 부분을 보여준다. 경년변동 성분은 1980년대 이후 기온의 특이치 발생 빈도가 빈번한 것은 잘 설명해주지만, 특이치의 강도가 더 강해진 현상(그림 17 참조)은 설명하지 못한다. 즉 경년변동 성분의 절대값은 해에 따라 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 한편 십년규모 변동 성분의 경우, 1970년대 중반-1980년대 중반까지 작은 값을 보이다가, 1980년대 중반에 급격한 증가와 함께 지속적으로 양의 값을 보인다. 이러한 변동성은 그림 17에 나타난 1980-1990년대의 빈번한 특이치 발생을 잘 설명해준다. 그림 17에서 가장 추운해로 나타난 1956년은 십년규모 변동 성분이 최저값을 갖는 시점이다. 선형추세에 해당하는 128년 규모의 변동 성분은 1970년대 중반 이후 지속적인 증가 경향을 보여주지만, 이 연구에서는 (자료 기간이 50년 미만) 큰 의미를 가지지 못한다(Lau and Weng 1999).

(2) 한반도 강수량 특성 분석

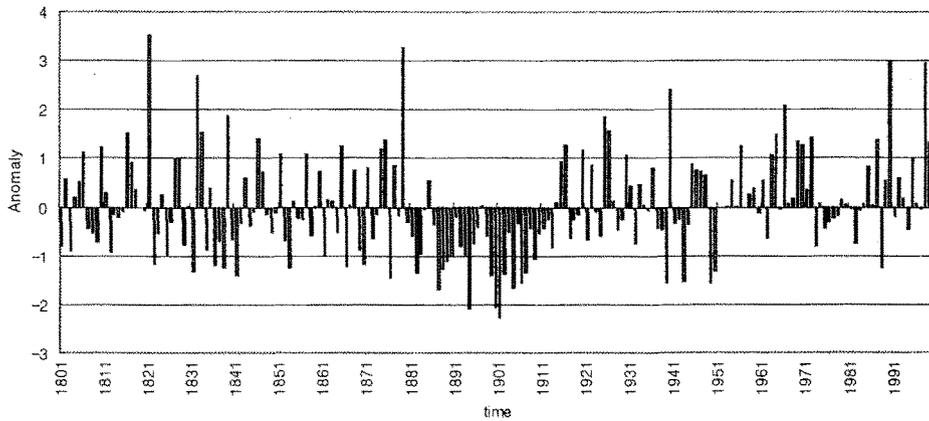


그림 19. 서울의 강수량 자료의 연평균 anomalies

그림 19는 서울지방 강수량자료의 연평균 anomaly이다. 전체적으로 2-4년 단위로 건조기와 습윤기가 차례로 보이고 있으나, 1880년대에서 1910년대 중반에 연속으로 건조기가 보이고, 1950년대에서 1970년대 초반까지는 습윤기가 보이고, 1970년대 중반에서 1980년대 중반의 건조기가 보인다. 이 이후로는 습윤기의 가세가 돋보인다. 이는 1880년대에서 1910년대 중반까지 강한 변동이 있었고, 그후 잠잠하다가 1950년대에서 1970년대 초반, 1970년대 중반에서 1980년대 중반, 그 이후 약 10년 이상의 주기성을 보이는 변화가 있음을 암시한다.

그림 20은 서울지방 표준강수지수(SPI)이다. SPI3은 3개월, SPI6은 6개월, SPI12는 12개월, SPI24는 24개월을 각각 이동평균을 한 후 강수지수를 구하였다. 이동평균을 한 후 강수지수를 구하는 것은 강수의 특성 때문이다. 표준강수지수중에서 SPI3과 SPI6은 다른 계절에 비해 여름철에 강수가 집중되는 아시아 몬순지역에 속한 한반도의 강수 특성을 잘 나타나고 있다.

SPI12와 SPI24는 상당히 유사한 형태를 보인다. 1801년부터 1870년대까지 이상 건조기와 이상 습윤기가 교대로 비교적 고르게 나타난다. 1880년대부터 1910년대 중반까지 장기적으로 이상 건조기가 나타나며, 1910년대 후반부터 1940년대까지는 또 이상 건조기와 이상 습윤기가 교대로 비교적 고르게 나타나고, 1950년대에서 1970년대 초반까지는 이상 습윤기가, 1970년대 중반에서 1980년대 중반의 이상 건조기가 보인다. 1990년대에는 비교적 강한 이상 습윤기가 자주 나타나고 있다. 또, 그림 19의 anomaly와 SPI12, 24는 매우 유사한 형태를 보인다.

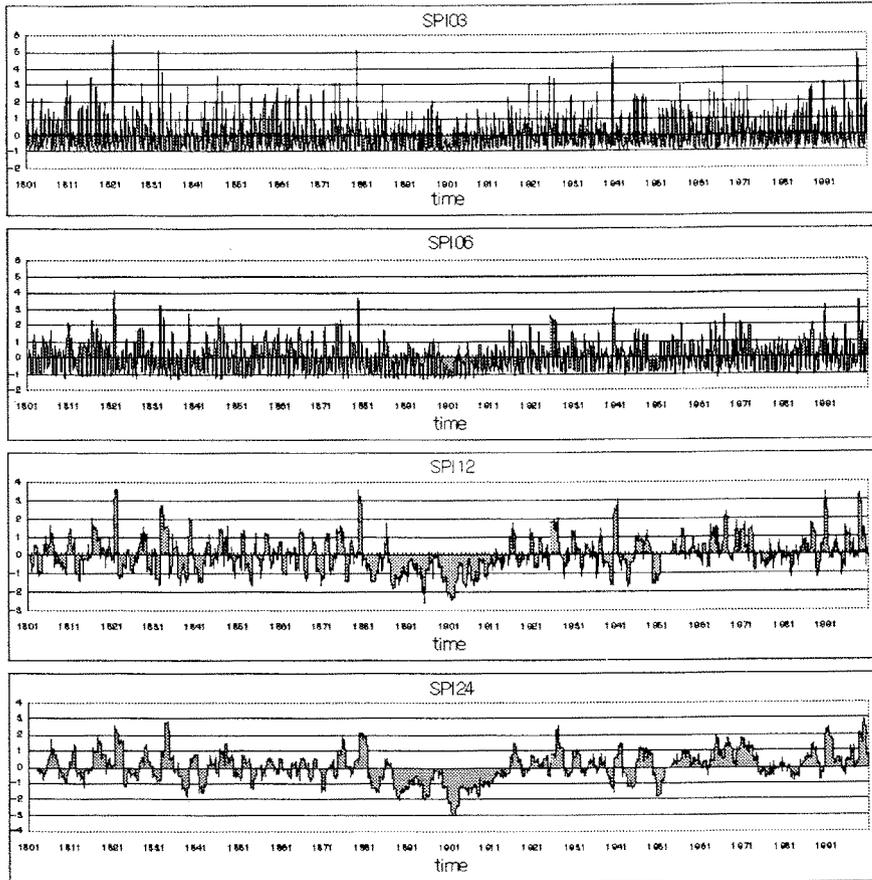


그림 20. 서울의 SPI의 시계열

### (3) 한반도 강수량의 시간-규모별 비선형 상호작용

SPI12의 시계열에 나타난 각 시간-규모별 비선형 상호작용을 알아보기 위해서 SPI12에 대하여 Morlet 연속 파엽분석을 실시하였다(그림 21 참조). 1850년 이후로는 다양한 규모의 변동들이 함께 나타나고 있다. 특히, 1860년대 후반부터 1920년대 중반까지 나타난 약 40년 규모의 변동이 전 기간을 통틀어 가장 강했음을 알 수 있으며, 이것이 차차 20-30년 규모의 장주기로 옮겨지는 형태로 나타난다. 특히 1920년대 중반이후로는 40년규모의 장주기가 급격히 20-30년 규모의 주기로 옮겨지는 모습이 보이는데, 이는 기후의 급격한 변동을 나타내는 것으로 보인다. 1801년부터 1850년까지, 1870년 후반부터 1900년까지, 1930년부터 1960년까지 그리고 1980년부터 현재에까지는 약 2년 규모의 변동이 약하게나마 나타나고 있지만 이들 변동들이 점차 장주기로 변하는 경향을 보이고 있다. 또한 10년 규모의 변동도 1801부터 1900년까지 매우 약하게 나타나고 있으나 점차 장주기로 변하다가 1920년 이후로는 나타나지 않고 있다.

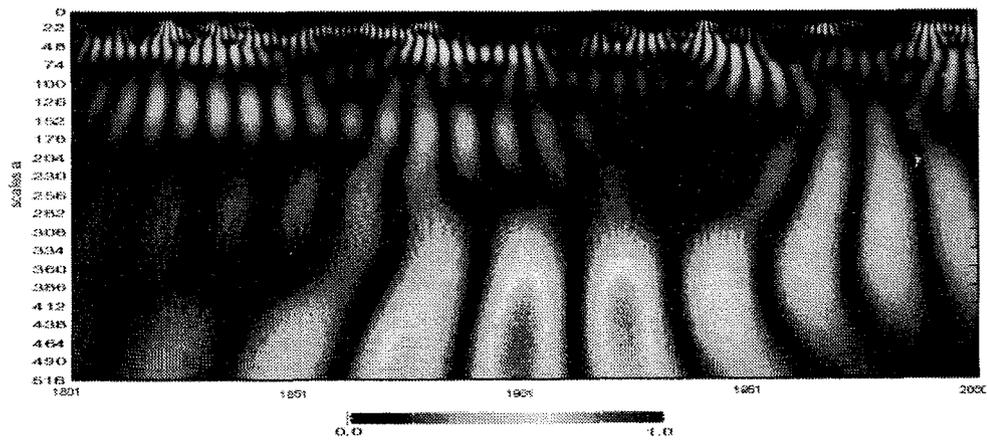


그림 21. 서울의 SPI12에 대하여 Morlet 연속 파엽분석을 한 결과

(4) 이산 파엽분석에 의한 한반도 강수량의 규모별 변동 특성

그림 22는 SPI12의 이산파엽분석이다. 이산 파엽분석은 연속 파엽분석과는 달리 분해와 재구성을 통해 각 규모별 특이기상의 발생 현황과 기여도를 알아볼 수 있다. 이산 파엽변환의 결과 중에서 Signal은 원자료의 시계열(SPI12)을 나타내며 a는 거친부분(approximation), d는 상세(detail)부분을 각각 나타낸다. 그리고 각 숫자는 각 규모 혹은 단계(level)를 나타내며 각 단계의 변동은 a10이 가장 장주기의 약 100년 규모, d10이 60년 규모, d9가 30년 규모, d8가 20년 규모, d7이 10년 규모, d6가 5년 규모, d5가 3년 규모의 변동에 중심을 두고 분해되어 진다. d10은 1881년부터 1911년까지의 이상 건조기와 이 시기를 제외한 나머지 전기간에 걸친 이상 습윤기를 설명하고 있다. 1881년부터 1911년까지의 이상 건조기는 d8에도 잘 나타나 있다.

장기간에 걸쳐 나타나는 큰 규모의 변동 외에도, 강수량 특이치는 작은 규모의 변동과 관련하여 나타나고 있다. 1820년대 초, 1830년대 초, 1870년대 말, 1940년 전후, 1990년 전후, 1980년대 말에 나타나는 강한 이상 습윤기는 a10, d10, d9, d8등과 같은 20년 이상의 큰 규모의 변동과 일차적으로 관련되어있으며, d6나 d5에 의해 세부구조가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 특히 단기간에 강하게 나타나는 강수량 특이치는 d5에 의해 잘 설명되고 있다. d7과 d6은 전기간에 걸쳐 교대로 나타나는 이상 습윤기와 이상 건조기를 잘 나타내고 있다.

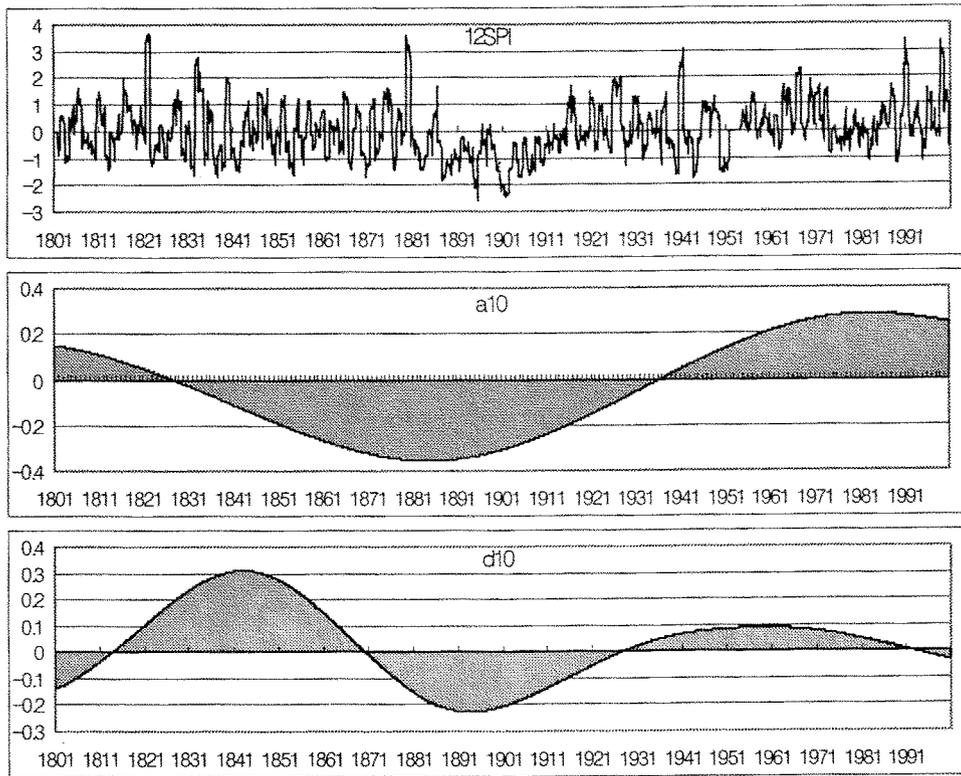


그림 22(a). 서울의 SPI12에 대하여 Symlet 연속 파염분석을 한 결과

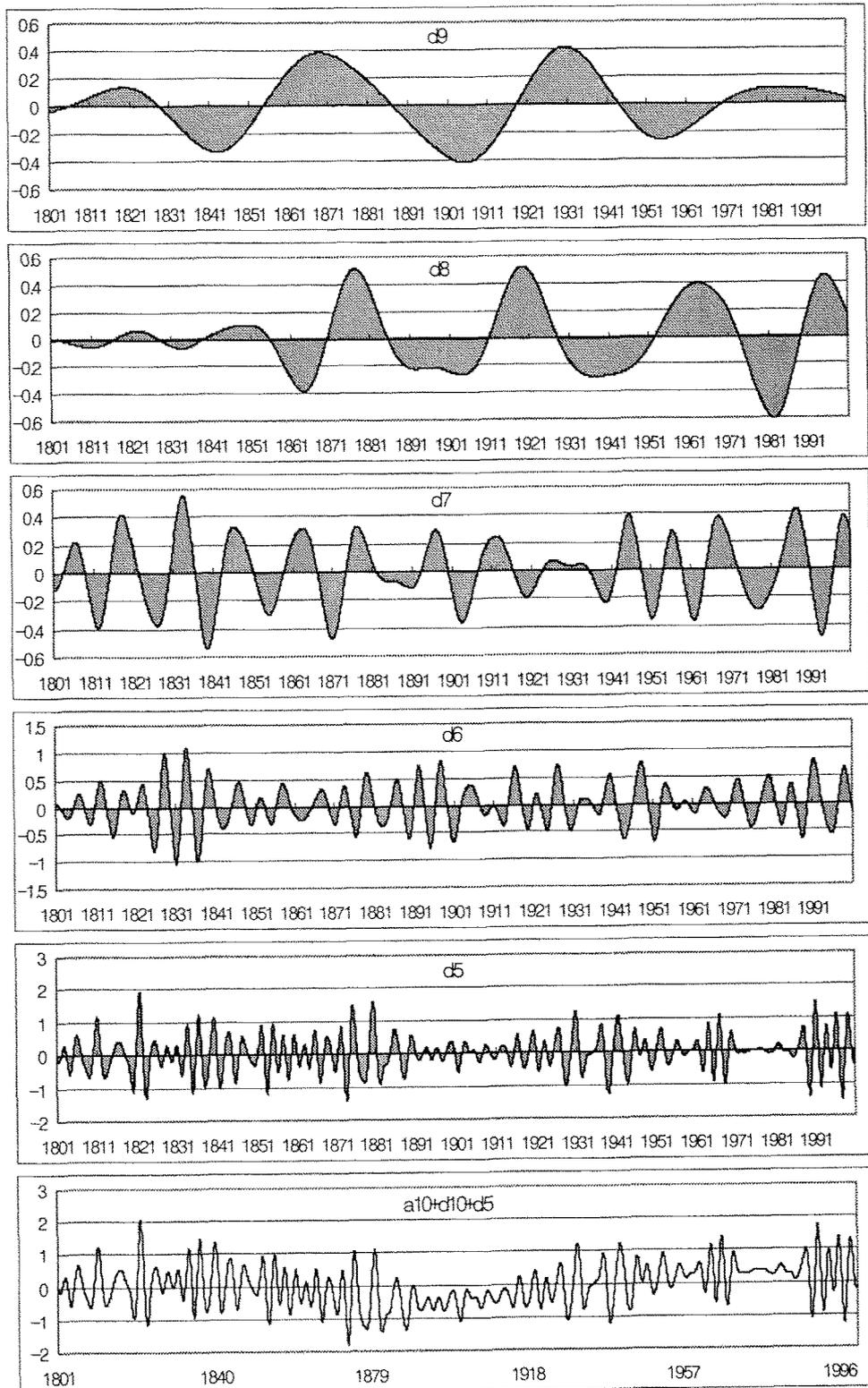


그림 22(b). 서울의 SPI12에 대하여 Symlet 연속 파엽분석을 한 결과

## 2. 중위도 태평양지역의 기후변동

한반도의 기후변동특성의 기원을 찾기 위해 먼저 태평양지역의 가장 큰 영향을 주는 Pacific Decadal Oscillation(PDO), Southern Oscillation Index(SOI), Artic Oscillation Index(AOI), Indian Ocean Dipole(IOD)의 4가지 변동을 파엽분석 분석을 통하여 살펴보았다.

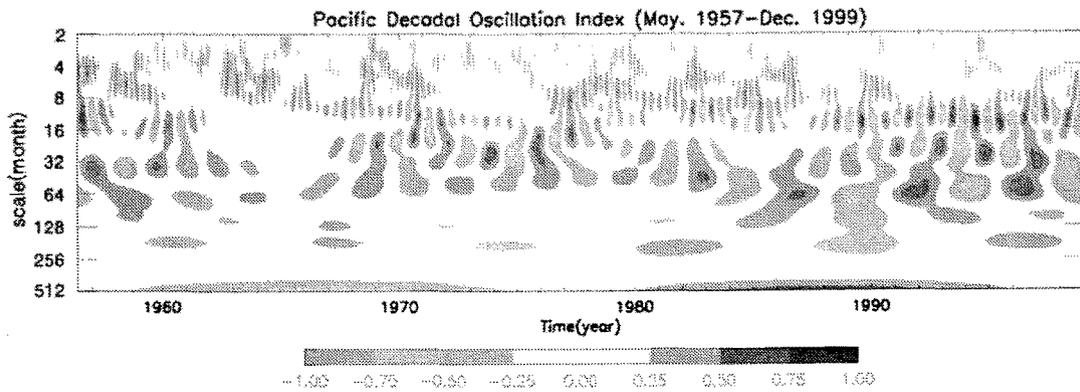


그림 23(a). PDO지수에 대한 Morlet 연속 파엽분석의 실수부

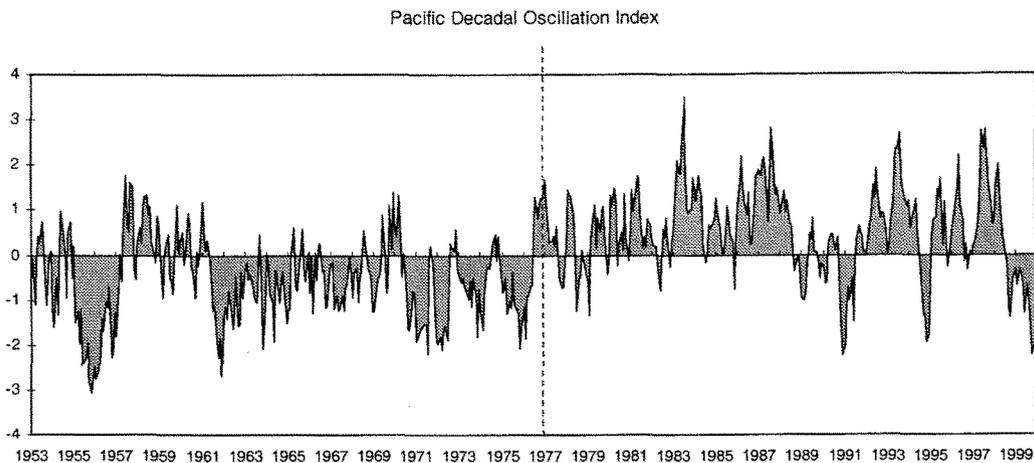


그림 23(b). PDO지수의 시계열

PDO(Pacific Decadal Oscillation)지수는  $20^{\circ}\text{N}$ 의 북쪽 태평양의 SST(Sea Surface Temperature)의 anomaly를 표준화한 값이다. 그림 23(a)을 보면 뚜렷한 10년 주기가 나타난다. 또한 70년대 중반을 기점으로 장주기가 뚜렷하고 강해짐을 알 수 있으며, 최근에 더욱 강해짐을 볼 수 있다.

그림 23(b)에서 1970년대 중반을 전후로 크게 음의 값이 양의 값으로 바뀌는 것

을 알 수 있으며, 1970년대 이전에는 음의 값의 빈도가 많이 나타나고, 70년대 이후에 그 반대다. 따라서, 1970년대에 들어서 기후요소에 어떤 큰 영향을 미치는 shifting이 일어났음을 알 수 있다.

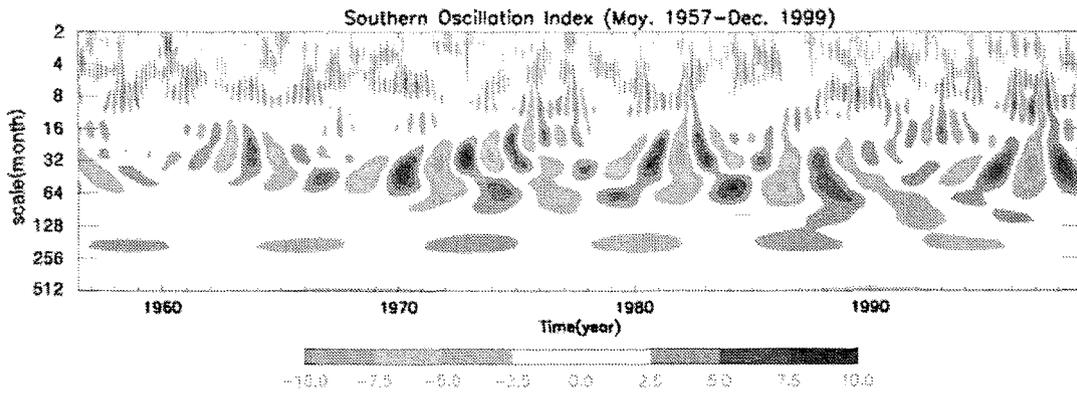


그림 24(a). SOI지수에 대한 Morlet 연속 파엽분석의 실수부

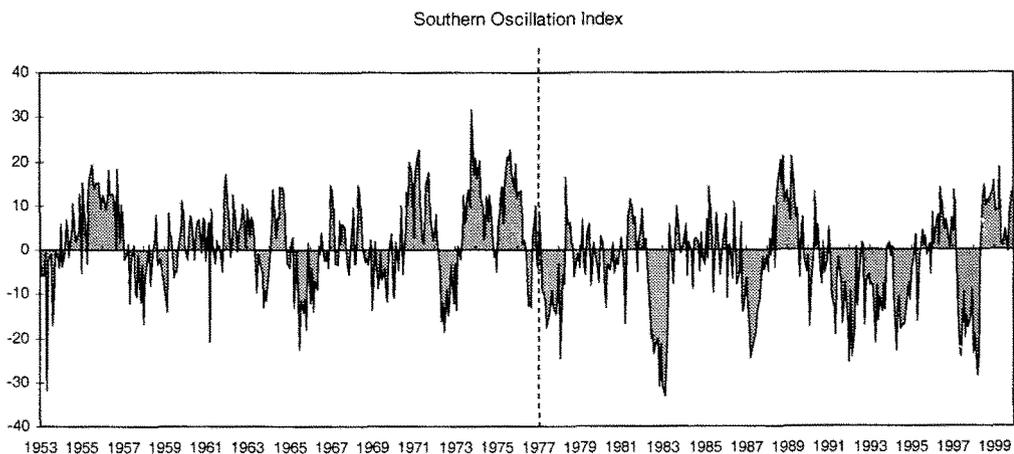


그림 24(b). SOI지수의 시계열

남방 진동 지수(Southern Oscillation Index, SOI)는 오스트레일리아의 다윈섬과 남태평양 동부 열대 지역 Tahiti 섬 사이의 해수면 기압차를 나타내는 지수로써 이 기압차의 크기에 따라 남동 무역풍의 강약을 알 수 있으며, 아래와 같은 식에 의하여 계산된다.

$$SOI = 10 \frac{[Pdiff - Pdiffave]}{SD(Pdiff)}$$

여기서 Pdiff=(Tahiti의 MSLP 평균) - (Dawin의 MSLP 평균, Pdiffave = 장기간의

Pdiff의 평균,  $SD(Pdiff)$ =장기간의 Pdiff의 표준편차를 가리킨다. 그리고 10을 곱하여 -35~35 까지의 범위를 가진다. 그래서 SOI의 음의 값은 엘니뇨(무역풍이 약해서 중앙과 동쪽 적도 태평양이 수온 상승)를 뜻한다.

그림 24(a)에서 3~5년의 주기가 강하게 나타나, 3~5년 주기로 두 지역 사이의 남동 무역풍의 정도가 변함을 알 수 있다. 또한 10~20년 주기가 반복적으로 나타나고 있으며, 70년대 이후로 접어들면서 3~5년 주기가 이전 보다 강해짐을 알 수 있다. 그림 24(b)는 SO index의 시계열 그래프이다. 70년대 이전 보다, 70년대 이후에 negative phase 가 더 많이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 엘니뇨가 70년대 이후에 더 강해지고 빈번해졌음을 말해준다.

AOI(Arctic Oscillation Index)는 35°N-65°N사이에 동서 평균된 SLP(Sea Level Pressure)의 차이를 표준화한 것이다. 그림 25(a)는 3~5년 정도의 엘니뇨 주기와 같은 주기성분이 강하게 나타나, 5년 이상의 장주기 성분은 나타나지 않는다. 또한 최근으로 갈수록 주기의 강도가 점점 약해짐을 알 수 있다. 그림 25(b)에서는 전체적으로 77년 이전에는 음의 값의 빈도수가 많이 나타나며, 77년 이후에는 그 반대이다. 77년에 가장 강한 negative peak가 나타난다.

Indian Ocean Dipole(IOD)은 인도양의 스리랑카섬의 동쪽과 서쪽의 SST(Sea Surface Temperature)의 차에 의하여 구해진다. 이는 인도 지역에서 가뭄과 홍수의 장기간 예보에 필수적인 지수이다. 그림 26(a),(b)에서 IOD는 뚜렷한 주기 변동을 보이는데 특히 3~5년의 단주기가 강하게 나타난다. 3~5년 주기는 일반적인 엘니뇨 주기와 비슷한 양상을 띄고 있는데, 이것 역시 70년대 이후에 강해짐을 알 수 있다. 또한 1990년대 이후부터 최근까지 아주 강한 값을 보인다.

PDO를 제외한 다른 지수들은 엘니뇨와 변동이 차이는 나더라도 주기는 비슷하다. 그래서 이 지수를 통해 엘니뇨의 변동을 추측할 수 있다. 여기서 PDO는 우리가 관심있어 가는 중위도의 장주기 진동을 보이는 지수있는 주기가 엘니뇨와 비슷함을 보아서 그 근원은 같음을 알 수 있다. 즉 엘니뇨의 영향을 받는 것이거나 엘니뇨와 같은 원인으로 변동함을 알 수 있다.

이러한 변동의 원인은 기후변화의 일부분이며, 이런 기후변화가 바람에 어떻게 반영되고 또 이 바람이 어떠한 메커니즘으로 SST의 변동을 유발하는지를 알아보려고 하였다.

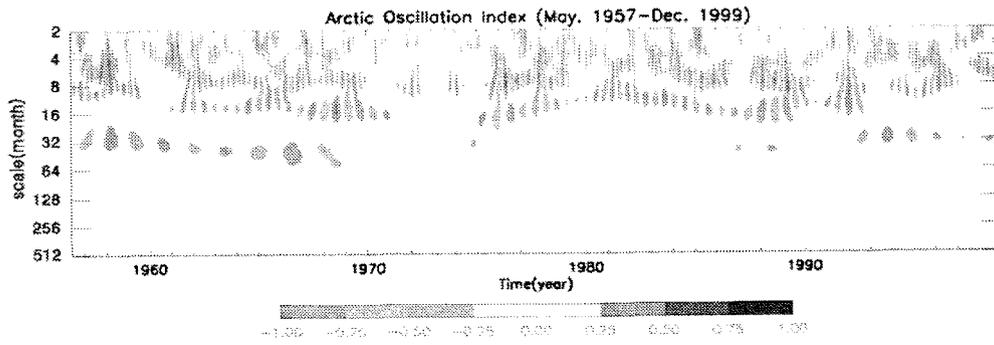


그림 25(a). AOI지수에 대한 Morlet 연속 파엽분석의 실수부

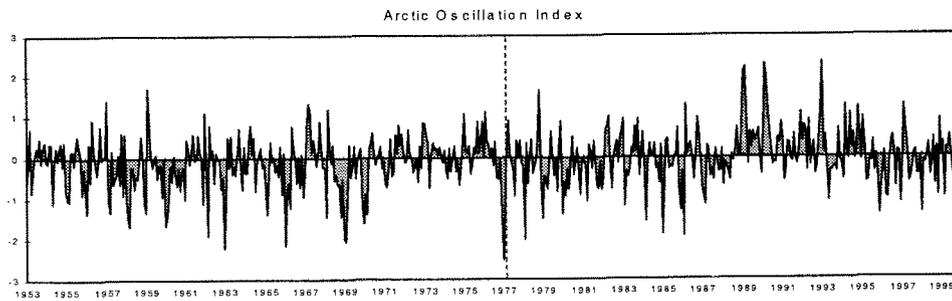


그림 25(b). AOI지수의 시계열

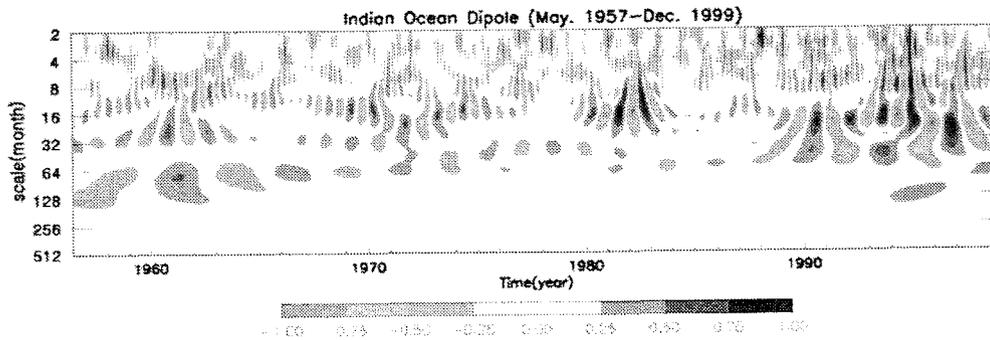


그림 26(a). Indian Ocean Dipole지수에 대한 Morlet 연속 파엽분석의 실수부

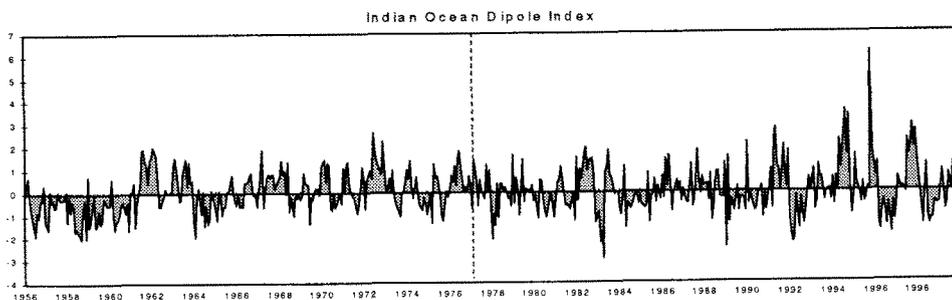


그림 26(b). Indian Ocean Dipole지수의 시계열

200hPa wind vector

1000hPa wind vector

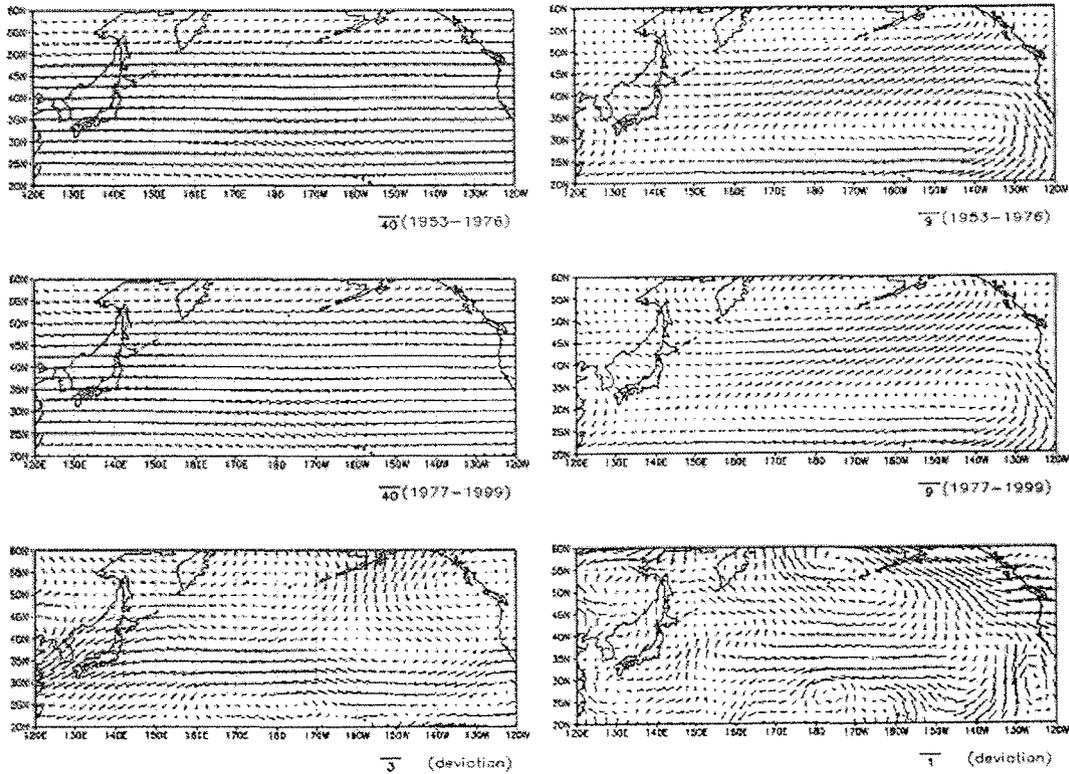
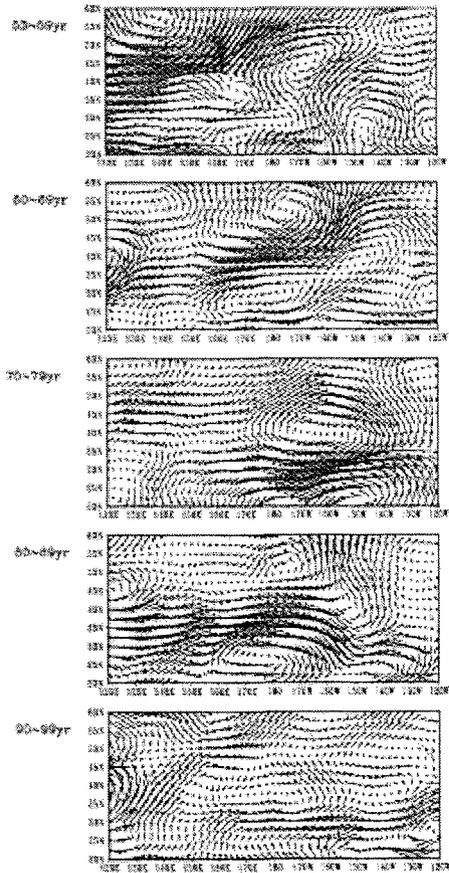


그림 27. 200hPa, 1000hPa 고도에서의 1977년 이전의 평균 바람벡터(상단), 1977년 이후(중간), 1977년 이전과 이후의 차이(하단)

그림 27은 1977년 이전의 바람과 이후의 바람을 평균하여 비교한 것이다. 200hPa 고도에서 jet는 77년 이전보다 77년 이후에 강해졌다. 시베리아 쪽에서 태평양 쪽으로 불어 들어오는 북서풍이 강해졌다. 알류산 지역의 저기압성 흐름도 77년 이전에 비해 강해져 180°E를 지나가는 서풍을 더 가속시켰다. 태평양 북동연안 알류산 저기압과 태평양 북동연안의 강화된 고기압성 흐름에 의해 남서풍이 강화되었다. 30°N~50°N 사이로 들어오는 편서풍은 우리나라와 일본을 지나가면서 더욱 강해진 것을 볼 수 있다. 이 흐름은 일본을 지나면서 약간 북향하는데 이 북향 성분도 77년 이전에 비해 강해졌다. 20°N~30°N 사이에서 들어오는 편서풍 또한 77년 이전에 비해 강해졌고, 이 흐름이 160°E를 지나면서 170°E~170°W 사이의 77년 이전에 비해 강해진 고기압성 흐름에 의해 남향하는 성분 또한 강해졌다. 남동쪽 연안에서는 남서풍이 강해졌으며, 고기압성 흐름이 강해진 150°W~135°W사이에서 적도 쪽으로 내려가는 북동풍이 강해졌다.

200hPa Decadal Wind Vector



500hPa Decadal Wind Vector

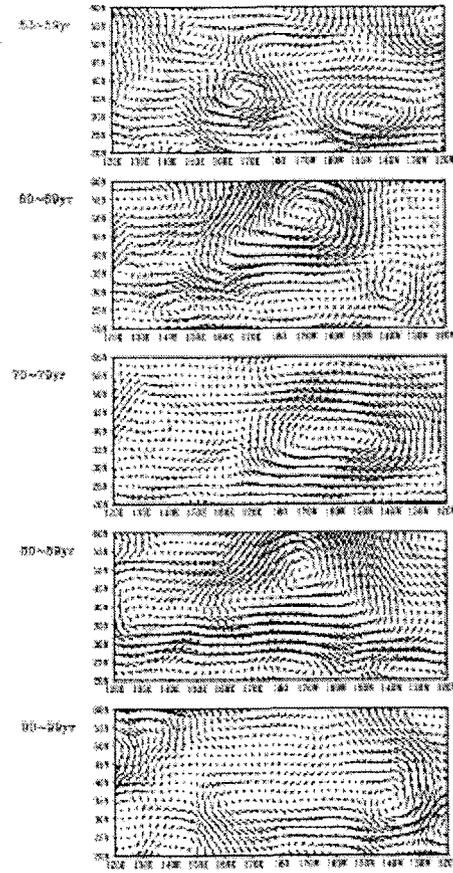


그림 28. 200hPa에서 수십년 주기의 바람장

그림 29. 500hPa에서 수십년 주기의 바람장

1000hPa 고도에서의 편서풍 역시 77년 이전에 비해 강해졌다. 시베리아 지역에서 유입되는 북서풍이 일본을 지나 태평양 중앙으로 이동하면서 알류산지역에서 저기압성 흐름을 만나 북향하는 성분이 77년 이전에 비해 강해져 태평양 북동연안에는 남동풍이 강해졌다. 북미지역으로 흘러 들어가는 서풍은 77년 이전에 비해 상대적으로 많이 약해졌다. 태평양 동안의 남쪽에 존재하는 고기압성 흐름은 77년 이전에 비해 약해졌으나, 20°N~35°N와 120°W~130°W 지역에서는 고기압성 흐름이 더욱 강해졌다. 따라서 전체적인 흐름을 볼때 1977년 이전과 이후가 서로 반대의 상이 나타나 보인다. 이를 보다 자세히 보기위하여 각 연대별로 anomaly를 구하였다. 그림 28은 200hPa 고도에서의 연대별 anomaly(평균에서 47년간 전체 평균을 뺀) 그림이다. 50년대에는 편서풍이 약해지고, 북서태평양에서 남서향 흐름이 강했다. 60년대에는 50년대에 강했던 남서향 흐름이 중앙태평양으로 이동한 것 같은 패턴을

된다. 70년대에는 35°N을 기준으로 하여 남북으로 상반된 패턴을 가지며, 북쪽에서는 편서풍이 강해졌고, 남쪽에서는 편서풍이 많이 약해졌다. 북동연안에서는 북향흐름과 남향흐름이 35°N에서 만나 태평양 중앙으로 휘어져 들어간다. 40°N~50°N에서 강한 편서풍이 태평양으로 흘러 들어온다. 80년대와 비교 했을때, 이 흐름은 북쪽에 위치한다. 그리고 특이한 것은 알류산 지역에 소용돌이가 나타나지 않는다. 80년대에는 25°N~40°N사이에서 강한 편서풍이 유입된다. 다른 년대에 비해서 남서풍 계열의 흐름이 강해졌고, 150°W~140°W에서 강한 북향성분이 나타난다. 전반적으로 70년대와 반대의 패턴을 보인다. 90년대에는 편차가 많이 나지는 않는다. 하지만 전반적으로 편서풍이 강해졌다. 80년대와 같은 강한 북동연안의 북향성분은 나타나지 않지만, 80년대와 비슷한 패턴을 가진다.

그림 29는 500hPa 고도에서의 년대별 anomaly다. 500hPa에서는 Wind vector differences들이 약하게 나타난다. 먼저 제일 크게 눈에 띄는 특징은 50년대부터 70년대에는 안티사이클론성 흐름이 나타나고, 80년대와 90년대에는 사이클론성 흐름이 나타난다. 50년대에는 기류가 좀 복잡하게 나타나는데 서태평양에서는 북향 기류가 나타나고 상대적으로 동쪽 50°N~60°N에서는 남향으로 퍼져 나가고, 50°N 이하에서는 안티사이클론성의 흐름이 넓게 나타난다. 500hPa에서 60년대에는 기류가 더 복잡하게 나타나는데 서태평양의 40°N을 기점으로 북쪽에서는 남서풍이 강해졌고, 남쪽에서는 편서풍이 약해졌다. 태평양 중심에서 30°N를 기점으로 북쪽에서는 강하고 넓은 안티사이클론성 흐름이 나타나고 남쪽에서는 약한 사이클론성 흐름이 나타난다. 태평양의 북동쪽에서는 평년과 비슷한 흐름을 보이고 남쪽에서는 안티사이클론성 흐름이 나타난다. 70년대에는 전체적으로 북서태평양에서 편서풍이 평년보다 강해져 북동태평양에서 안티사이클론성 흐름을 만든다. 이 흐름은 다시 남태평양에서 약해졌다. 35°N를 기점으로 남북으로 나뉘어 북쪽은 편서풍이 강해지고 남쪽은 편서풍이 약해졌음을 알 수 있다. 이런 흐름을 년대별로 비교해보면 70년대에 나타나는 특이한 현상임을 알 수 있다. 80년대는 전체적으로 편서풍이 강해졌다. 170°W를 기준으로 서태평양쪽은 아주 강한 남향의 흐름이 나타나고 동태평양쪽은 강한 북향의 흐름이 나타난다. 서태평양쪽에서 나타나는 남향 흐름은 120°E까지 걸쳐 내려오고, 그곳에서 사이클론성 흐름을 띄면서 20°N에서 편서풍이 강해지고 다시 120°W에서 북향한다. 이 북향 성분은 70년대와 상반된 패턴임을 알 수 있다. 90년대에는 다른 년대에 비해서 편차가 작았다.

850hPa Decadal Wind Vector

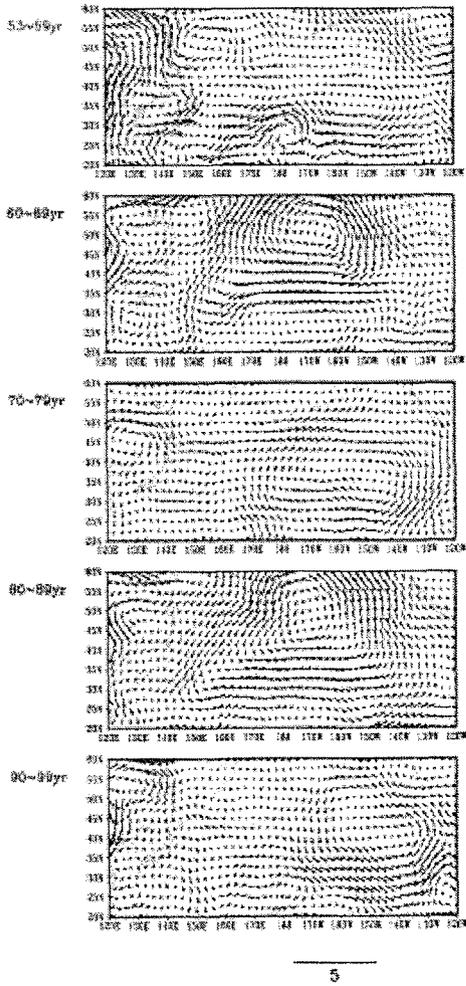


그림 30. 850hPa에서 수십년 주기의 바람장

1000hPa Decadal Wind Vector

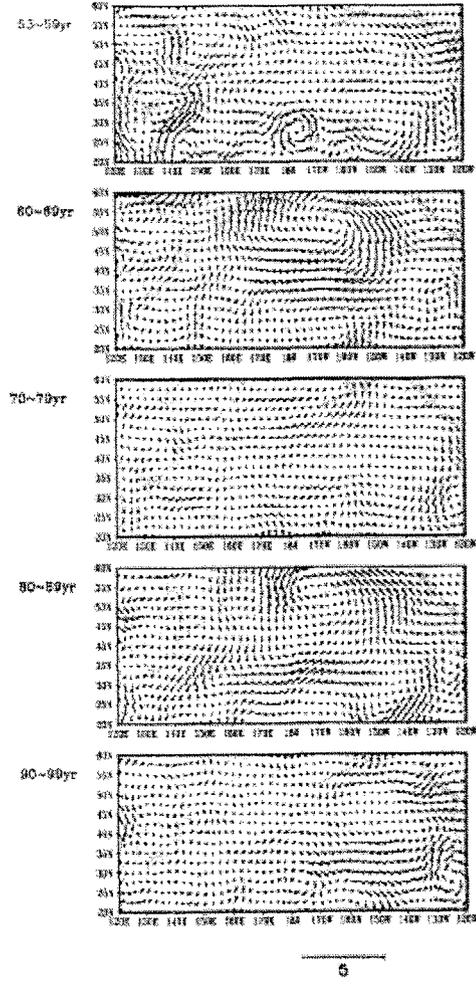


그림 31. 1000hPa에서 수십년 주기의 바람장

그림 30은 850hPa 고도에서의 년대별 anomaly이다. 850hPa 고도에서 1950년대와 60년대와 비교해보면, 태평양의 북서쪽인 북동아시아 지역에서는 50년대에 비해 60년대에 편서풍이 많이 약해졌다. 60년대에 북위 30도 이상 고위도에서의 편서풍이 50년대에 비해 강해졌다. 60년대에는 태평양 중앙부의 편서풍이 많이 약해졌지만, 70년대를 지나 80년대에 들어서 편서풍이 강해졌다. 그리고, 60년대와 80년대를 비교해보면 거의 반대의 흐름이 나타난다. 서태평양쪽에서는 35°N를 기점으로 북향 기류와 남쪽으로 하향하는 기류가 생긴다. 그리고 140°E에서 강하게 상향하는 기류가 나타나고 140°W에서 약하게 하향하는 기류가 나타난다. 70년대는 태평양의 서쪽에서는 하향하는 기류가 있고 150°E에서는 북쪽에서는 동쪽의 기류가 나타나고 남

쪽에서는 서쪽의 기류가 나타난다. 태평양의 동쪽에서는 태평양 전체를 흐르는 강한 안티사이클론성 소용돌이가 나타난다. 80년대 태평양의 서쪽에서는 하향하는 기류가 있고 그곳을 제외한 태평양 전체에서 강한 사이클론성 소용돌이가 나타난다. 90년대는 다른 곳의 기류는 약하고 동쪽에서는 사이클론성 소용돌이가 나타난다.

그림 31은 1000hPa 고도에서의 년대별 anomaly이다. 1950년대의 위도  $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{E} \sim 155^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강해지고 같은 위도 상의  $145^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 약해졌다. 태평양 중심부의 바람은 평년과 비슷하고 주변의 바람은 변화가 컸다. 1960년대의 위도  $30^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{E} \sim 155^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강하고 같은 위도 상의  $160^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강하다. 태평양 중심부의 바람변화가 컸고, 주변부의 바람은 변화가 작았다. 1970년대의 위도  $30^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{E} \sim 155^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강하고 같은 위도 상의  $145^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강하다. 70년대의 평균값과 전체 평균값이 편차값이 작고 지역적으로 고른 분포를 보인다. 그런데 위도  $35^{\circ}\text{N}$ 를 기준으로 북쪽은 바람이 세졌고 남쪽은 바람이 약해졌다. 80년대의  $30^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{E} \sim 155^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강하고 같은 위도 상의  $160^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 약하다. 태평양 중심부의 바람이 평년에 비해 변화가 심하고 태평양 주변부는 변화가 작다. 태평양에서 보이는 하나의 큰 소용돌이는 저위도의 따뜻한 공기를 고위도로 전달할 것으로 보인다. 90년대의 Wind vector differences는  $40^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 강하고 같은 위도 상의  $145^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 에서 서풍이 약하게 나타난다. 그림 28~31을 전체적으로 보았을 때, 상층에서는 약 20년 주기의 변동, 하층에서는 약 10년 주기의 변동이 나타난다.

태평양지역의 바람의 변동을 보다 세밀히 알아보기 위하여 중위도 태평양지역을 그림 32와 같이 6구간 및 각 구간의 고도 1000, 850, 500, 200hPa로 나누어 1953~1999년의 NCEP/NCAR Reanalysis의 SST, 동서류(U-wind), 남북류(V-wind) 자료를 이용하여 중위도 태평양지역의 시간 및 공간규모의 변동성 분석을 실시하였다. 이렇게 4개의 고도로 나눈 것은 100hPa은 지표 근처, 850hPa은 하층 대류권, 500hPa은 중층 대류권, 200hPa은 상층 대류권을 대표하기 때문에 고도별 대기상태를 알 수 있다. 즉, 지표마찰과 복사 때문에 일어나는 지표(해양)의 패턴을 보기 위해서는 1000hPa을 보는 것이 좋고 850hPa은 하층 jet를 보여주기 때문에 고려한다. 그리고 500hPa은 비발산 고도로, 편서풍을 잘 보여주고 대류권의 하층과 상층의 중간을 대표하기 때문에 고려했다. 그리고 200hPa은 상층 jet의 흐름과 함께 상층 대기흐름을 보기 위해 고려하였다.

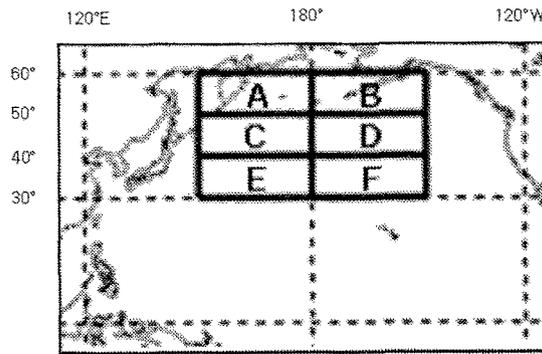


그림 32. 태평양의 연구지역

그림 33은 고도별 바람의 동서류와 SST의 시계열 분석 그림이다. 바람의 동서류와 SST의 변동은 위상이 서로 반대의 경향을 보였다. 이는, 바람이 강할 때 해수의 교란이 잘 일어나 혼합층이 두꺼워진다. 이렇게 되면, 하층의 찬 바닷물이 혼합층 해수와 섞이게 되어 해수의 온도가 하강한다는 것을 나타내고 있다. SST와 zonal wind의 음의 상관관계는 서태평양(즉, A, C, E 해역) 보다는 동태평양(즉, B, D, F 해역)에서 더욱 높게 나타난다. 또한, 고도 1000hPa, 850hPa, 500hPa, 200hPa의 바람의 동서류는 서로 간에 위상의 차이가 없이 동시에 변동하고 있음을 보였다. 이는 상하층 간의 바람 변동은 아주 짧은 시간 내에 이루어짐을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 표 3의 각 지역별 고도간의 상관관계를 보면 알 수 있다. 표 3을 보면 고도별 동서류의 상관관계가 아주 높다는 것을 알 수 있다. 즉, 대기는 고도별로 시간규모의 차이가 없이 변동 하고 있음을 알 수 있으며, SST는 1000hPa zonal wind의 A, C, D(동태평양), B, D, F(서태평양)의 상관관계에서 보면 동태평양 보다 서태평양의 상관관계가 높음을 알 수 있다.

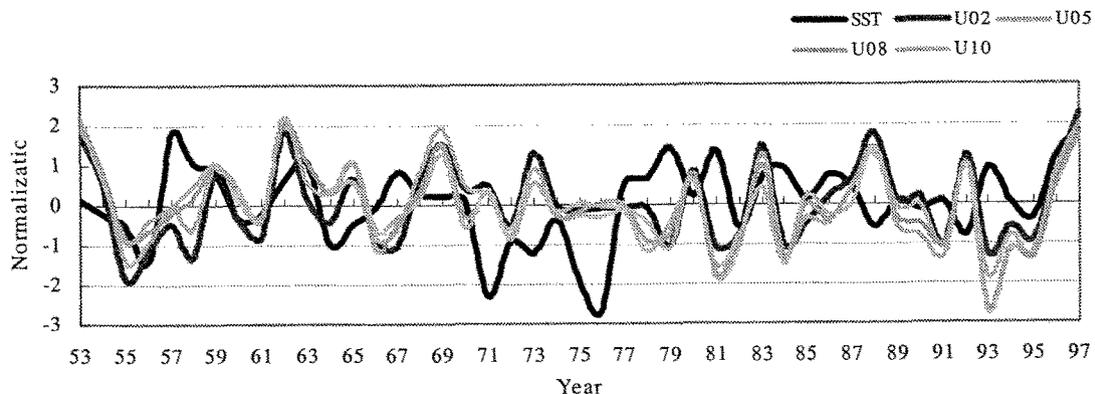


그림 33. 해수면온도와 각 고도별 동서풍(U)의 시계열

표 3. 동서풍(U)의 상관계수

	A	B	C	D	E	F
U200	0.8972	0.9262	0.8344	0.9469	0.9374	0.9332
U500	0.9060	0.9498	0.9343	0.9561	0.9020	0.9645
U850	0.9413	0.9730	0.9214	0.9664	0.9503	0.9805
U1000	-0.192	-0.437	-0.200	-0.572	-0.227	-0.604
SST						

연구지역에서의 바람의 변동(전체면적에 비해 바람의 변동이 얼마나 있었는가?)을 보다 자세히 알기 위하여 Area Wind Index(AWI)를 구하여 그 변동성을 살펴 보았다.

AWI는 아래와 같은 과정을 통하여 구하여 진다. 먼저 zonalwind(U)와 meridionalwind(V)를 아래와 같이 계산하여 속도로 바꾸어 monthly anomaly 값을 구한다.

$$WSA = \text{Anomalies of } \sqrt{U^2 + V^2}$$

(U : zonal wind velocity, V : meridional wind velocity )

구해진 각 anomaly의 값을 일정한 구간으로 나누고 그 구간에 해당하는 면적과 전체면적의 비를 아래와 같이 구한다.

$$AWI_k = \frac{\text{area of WSA's value}}{\text{total area}} \quad (k = \text{WSA's value})$$

이렇게 계산된 AWI를 12개월 아래와 같이 running mean하고 normalize하여 평활된 자료를 만들어 분석하였다.

$$M_{1\sim 564} = \frac{\sum_{n=5}^{n+6} \text{monthly AWI}_k \text{ data}}{12} \quad \begin{cases} n=6\sim 558 \\ M = \neq w \text{ monthly AWI}_k \text{ data} \end{cases}$$

$$A(\text{average of } 47\text{yr}) = \frac{\sum_{1}^{564} \text{monthly AWI data}}{564}$$

$$\sigma(\text{표준편차}) = \sqrt{\frac{1}{564} \sum_{1}^{564} (M - A)^2}$$

$$\text{Normalize} = \frac{M - A}{\sigma}$$

그림 34~37은 AWI(Area Wind Index)를 12개월 running mean하고 표준화시킨 값의 시계열 그래프이다. AWI는 동서류와 남북류를 합성하여 풍속의 크기를 계산하여 monthly anomaly를 구한값을 구간을 나누어 태평양 전체지역과 계산한 값의 각 구간별 면적비이다.

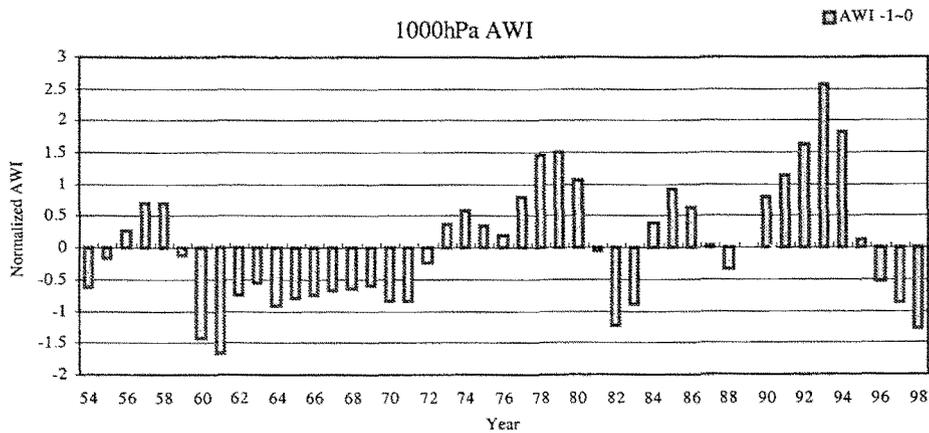


그림 34. 1000hPa 고도에서의 AWI(-1)의 12개월 이동평균의 표준화 값의 시계열

그림 34는 1000hPa에서 AWI(-1~0)의 시계열 그래프이다. 70년대에 접어들면서 지배적이던 음의 값이 양의 값으로 점차 바뀌는 것을 보여준다. 70년대 이전에, 바람의 크기가 -1~0 만큼 작은 지역의 면적이 평년보다 작은 해가 많았고, 70년대 이후에는 주기성을 띄면서 바람이 약해진 지역이 많아졌다. 그림 35는 1000hPa에서 AWI(1이상)의 시계열 그래프이다. 70년대 이후에 바람의 크기가 약해진 지역이 많아 졌음을 알 수 있다.

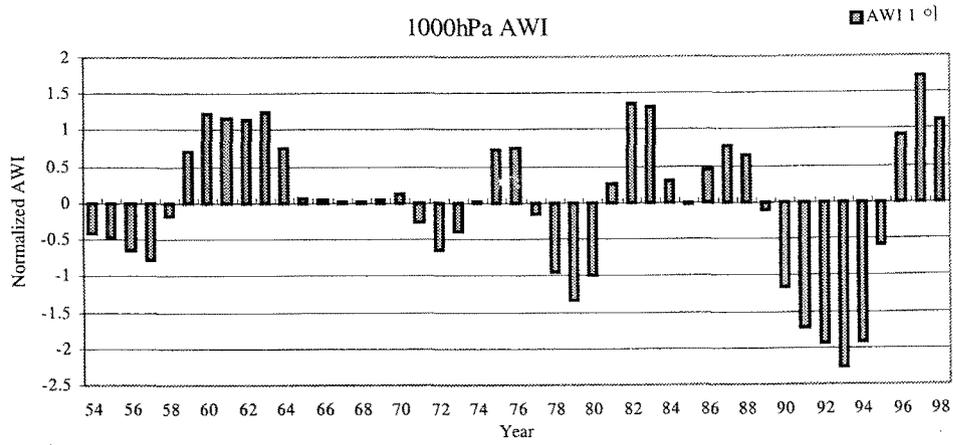


그림 35. 1000hPa 고도에서의 AWI(+1)의 12개월 이동평균의 표준화 값의 시계열

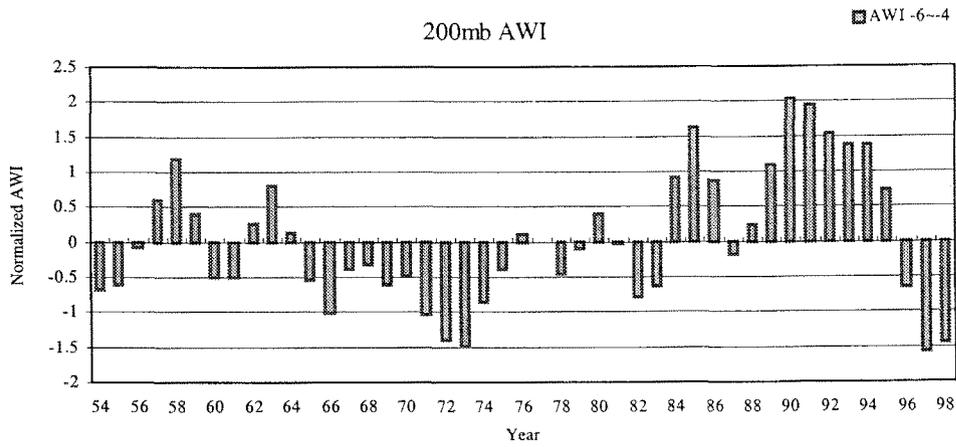


그림 36. 200hPa 고도에서의 AWI(-6~-4)의 12개월 이동평균의 표준화 값의 시계열

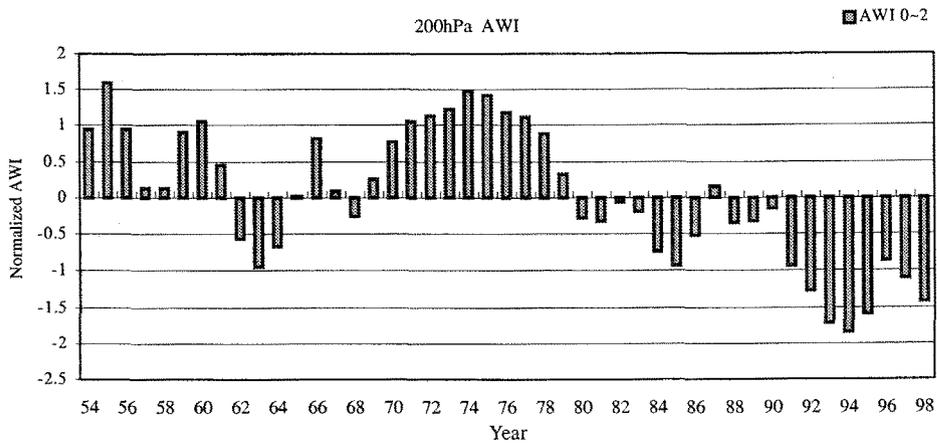


그림 37. 200hPa 고도에서의 AWI(0~2)의 12개월 이동평균의 표준화 값의 시계열

그림 36, 37에서 보면 주기는 유사하나 위상이 반대로 나타난다. 약 10년의 주기성이 나타난다. 그림 36, 37 역시 그림 34, 35와 마찬가지로 비슷한 주기에 반대의 위상이 나타나지만, 약 20년 이상의 주기성을 보인다. 이는 zonal wind 가 고도에 따라 같은 움직임을 보이는 것과는 다른 모습이다. 이는 아마도 AWI에 포함된 meridional wind 성분이 많이 반영된 것으로 보인다. 전체적으로 AWI를 요약하면, 하층에서는 10년 변동, 상층에서는 20년 변동이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이는 태평양의 10년 주기의 SST 변동 및 어획 수확량의 변동과 간단히 연관지을 수 있음을 알 수 있다.

### 3 절. 한반도의 기후변동과 동해의 물리적 반응

#### 1. 해양 및 기후 자료 수집

연구의 목적을 달성하기 위하여 한반도 주변해역을 포함한 북서 태평양 및 지구 규모 해양에 대해 수집한 자료는 다음과 같다. 자료의 대부분은 한국해양자료센터(KODC), 일본해양자료센터(JODC), 미국해양자료센터(NODC), 미국기상연구소(NCAR) 등을 통해 수집하였다.

가. 해양관측자료 (수온, 염분, 해류, 해수면 높이 등)

- 국립수산진흥원(NFRDI) 정선관측자료 (1960-1999)
- 일본기상청(JMA) 정선관측자료 (1961-1989)
- JODC southern East Sea data (1930-1989)
- CSK (1965-1977)
- KER (1988-1994)
- Russia TINRO oceanographic data (1992-1995)
- KODC coastal oceanographic data (1910-1998)
- JODC Temperature cd-rom (1940-1993)
- NODC TS cd-rom (1900-1990)
- MEDS drifter data (1979-1998)
- OISST (1981-2000)
- JODC surface current data (monthly mean)
- 해수면 자료 (해양조사원, Proudman Oceanographic Laboratory)

나. 해양기상자료 (해표면수온, 기온, 해면기압 등)

- COADS Raw data (1854-1997)
- COADS Gridded data (1960-1997)
- NCEP/NCAR Reanalysis data (1948-2000)

#### 2. 수온 경년변동의 특성과 그 원인

동해 해표면온도의 경년(interannual) 및 수십년(decadal- to inter-decadal) 변동의 특성 및 대양과의 상관성을 알아보기 위하여 COADS자료 중 수온 자료를 경험적주요함수(EOF)분석과 상관성(coherency)분석을 하였다.

1955년부터 1997년까지의 해표면온도 자료를 이용하여 각 격자별로 매월의 평균 값을 구하였다. 격자는 태평양과 같이 큰 규모 분석에서는 위·경도 각 5도, 한반도 주변해역 분석에서는 위·경도 1도로 하였다. 변수의 계절변동을 제거하기 위해 월 평균 기후값을 제거함으로써 모든 격자에서 월별 해표면온도 아노말리(anomaly)를 구하였다. 해표면온도 이외에 열교환량과 같은 다른 변수에도 아노말리를 구할 때는 동일한 과정을 적용하였다.

#### 가. 경험직교함수 1모드

수년 주기 변동의 특성을 구체적으로 알아보기 위해 해표면온도 아노말리를 1.5년에서 13년의 구간의 구간 필터(band-pass filter)를 사용하여 단주기 및 장주기 변동을 제거하였다. 경년 변동 구간에서 필터된 자료를 이용하여 경험직교함수 분석을 하였다. 분석에 사용된 자료는 1도 간격의 아노말리이다.

경험직교함수 분석 결과 1모드는 1.5년에서 13년 주기 사이 경년 변동의 23.1%를 차지하고 있다(그림 38). 공간적으로는 동해 중부해역에서 변동의 폭이 크게 나타나며, 일본 동부해역에서 가장 큰 변동폭을 보인다. 주성분(Principal Component)인 시간열에서 변동의 음(-)과 양(+)의 극(peak)은 대부분 여름철에 나타난다. 이 시계열에서 변동 주기를 알아보기 위해 스펙트럼 분석을 수행한 결과 2-3년과 5-7년 주기의 변동이 강하게 나타났다. 따라서 이 모드는 동해 중부해역에서 우세한 2-3년 및 5-7년의 변동임을 알 수 있다.

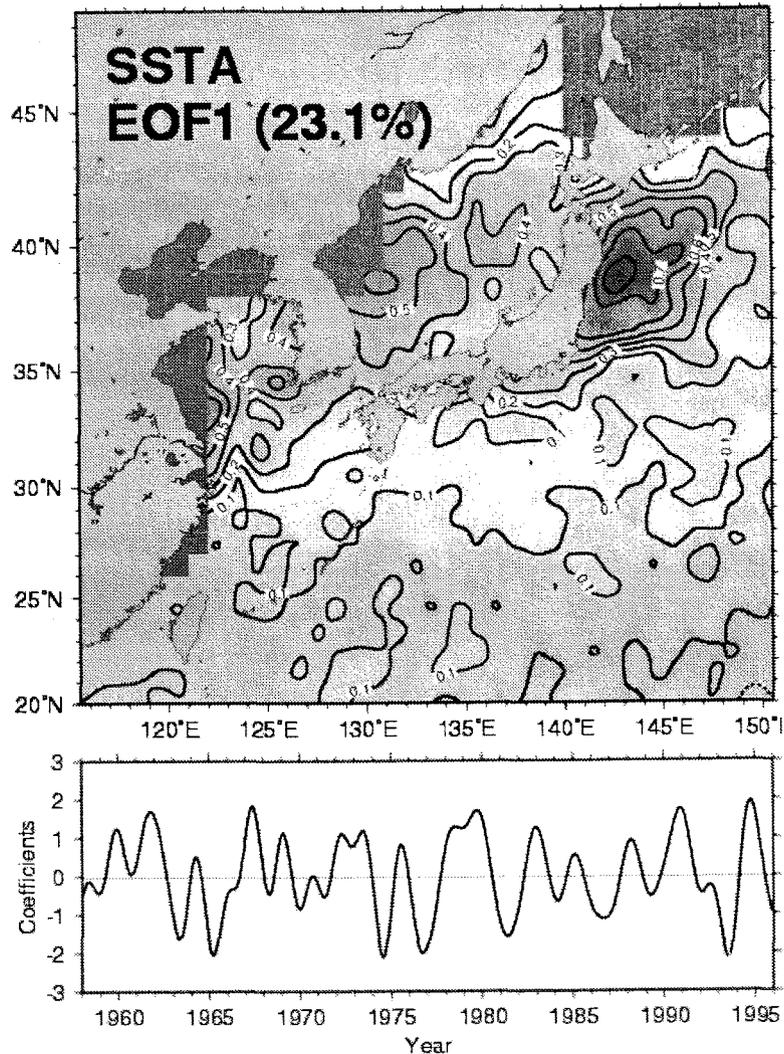


그림 38. 한반도 주변해역 SST 아노말리의 경험직교함수 1모드

한반도 주변해역, 특히 동해중부해역과 일본 동부에서 변동이 중요한 제 1모드가 나타나는 원인을 분석하기 위해 역학적으로 영향을 줄 수 있는 인자를 찾아보았다. 살펴본 인자 중의 하나는 동아시아 몬순 중의 하나인 RM2 인덱스이다. 연구해역인 동해는 대륙과 해양의 경계가 되는 연해(Marginal Sea)로서 기상학적으로 특히 계절풍의 영향이 탁월한 곳이다. RM2인덱스는 Lau *et al.*(2000)이 제시한 것으로서 동아시아 몬순, 특히 여름철 몬순을 잘 나타내는 것이다.

그림 39는 동아시아 몬순이 강했던 해의 여름철(6, 7, 8월) 수온 평균과 약했던 해의 여름철 수온 평균 사이의 차이를 나타낸 것이다. 음영은 composite analysis시에 t-test를 통해 95%(진한 음영) 또는 90%(약한 음영)에서 신뢰할 수 있는 구간을

나타낸다. 동아시아 몬순에 의해서 위도 약 35도를 중심으로 동해중부에서 동경 180도에 이르는 광범위한 해역에 높은 신뢰도(95%이상)를 갖는 수온차이가 나타남을 알 수 있다. 이러한 공간적 분포특성은 앞에서 얻은 경험직교함수 1모드의 공간 분포와 아주 유사하다. 특히 계절별 경험직교함수 분석을 해 보면 이러한 분포는 여름철에 잘 나타나고 있으며, 여름철 동아시아 몬순 인덱스가 강한 해와 약한 해가 여름철 수온의 1모드가 강한 해 및 약한 해와 잘 일치하였다. 따라서 경년변동에서 얻은 1모드는 동아시아 몬순의 영향이라고 판단할 수 있다.

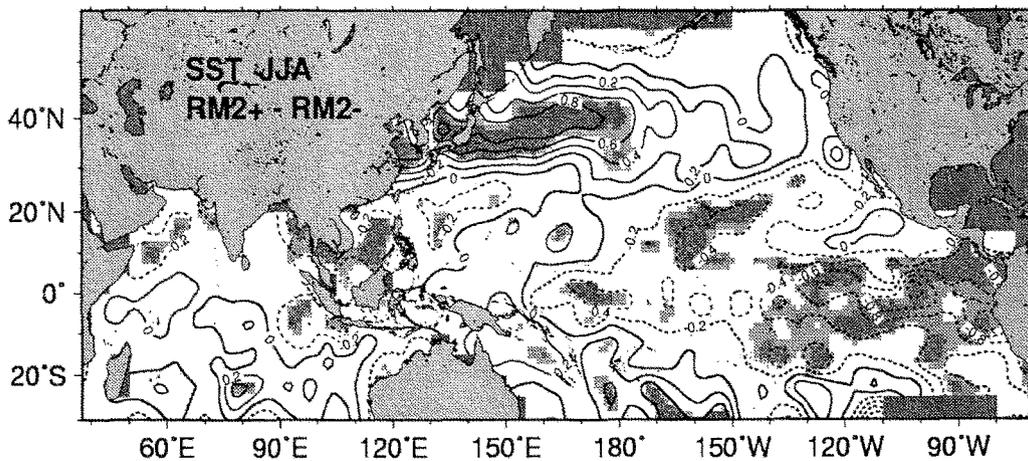


그림 39. 동아시아 몬순지수 RM2 (Lau 등, 2000)에 따른 여름철 수온의 composite map

#### 나. 경험직교함수 2모드

월별 수온 아노말리 경험직교함수의 2모드는 공간적으로 아열대해역과 동해의 수온변동이 반대의 위상으로 표현되는 형태로 나타나며, 시간적으로 2년과 3-4년 주기를 갖는 변동으로 표현된다(그림 40). 일본남부의 아열대해역과 동해의 수온이 반대가 되는 것은 흥미로운 것이다.

제 2모드와 같은 수온 변동의 분포가 나타나는 원인을 살펴보기 위해 전 지구규모, 특히 태평양에서 강한 해양-대기 변동인 엘니뇨/남방진동(El Nino/Southern Oscillation)과의 연관성에 주목하고 관련성을 살펴보았다. 이는 제 2모드와 엘니뇨/남방진동의 주기의 유사성을 고려한 결과이다. 엘니뇨/남방진동은 전지구 해양, 특히 태평양에서 경년 변동의 대표적인 것으로서 2년에서 7년의 주기를 갖으며, 특히 3-4년 주기에서 강한 변동을 나타낸다. 엘니뇨 남방진동은 많은 연구가 되어 그 역

학이 점차 알려지고 있으며, 수개월 전에 예측이 가능한 높은 예측성을 나타낸다.

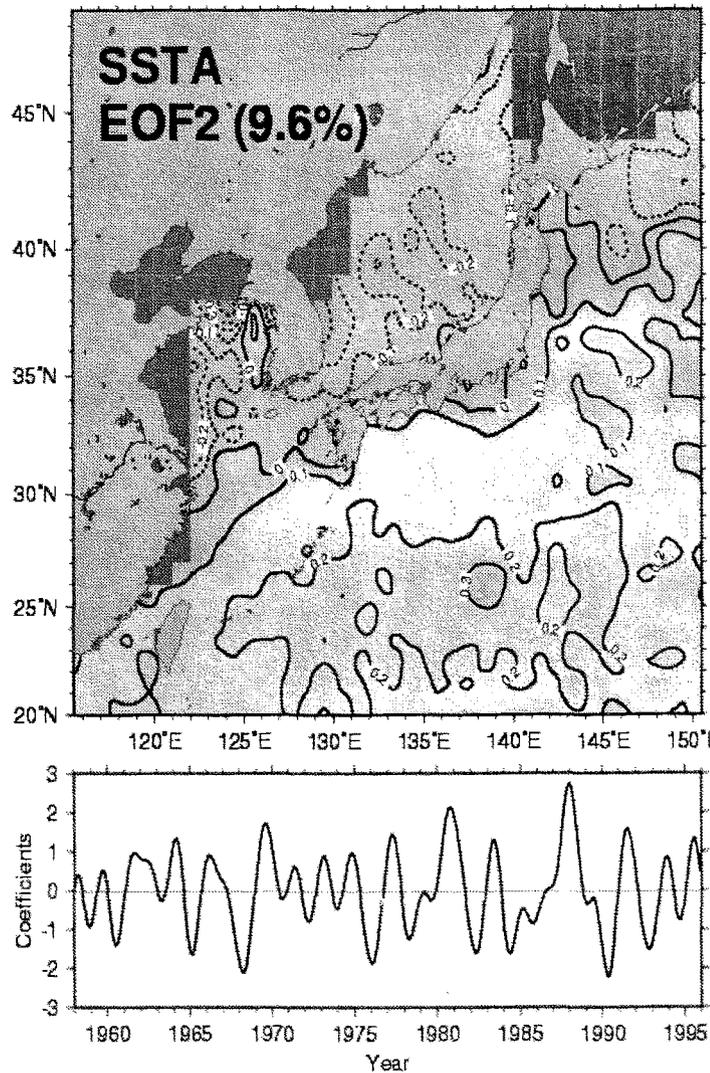


그림 40. 북서태평양 SST 아노말리의 경험적교함수 2모드

제 2모드 시계열과 엘니뇨/남방진동 지수의 하나인 Nino 3.4인덱스(Trenberth, 1997)와의 상관성 분석(coherency analysis)을 통해 주기별 관련성을 살펴보았다. 결과에 의하면 2년 및 3-4년 주기에서 엘니뇨/남방진동과 경험적교함수 2모드는 강하게 상관되어 있으며, 약 80도에서 90도의 위상차를 보이고 있다(그림 41). 이 위상차는 약 3-9개월에 해당한다. 따라서 북서태평양을 대상으로 경험적교함수 분석에서 얻어진 제 2모드는 엘니뇨의 영향에 의한 수온변동을 나타내는 것으로 보인다.

경험적교함수 2모드의 공간분포와 시계열 분포의 엘니뇨/남방지수와의 상관성을 종합하면, 엘니뇨와 관련된 동해의 반응은 시차를 두고 반대의 위상으로 나타남을

알 수 있다. 즉, 엘니뇨가 겨울철에 성숙기를 나타내는 것과 미루어 볼 때 엘니뇨가 발달한 후 3-9개월 사이, 즉 여름을 중심으로 동해는 수온이 하강하는 것으로 해석할 수 있다.

일본 남부 아열대해역의 수온은 엘니뇨와 같은 위상, 즉 적도의 수온이 상승한 후 몇 개월 후에 상승하게 된다. 엘니뇨에 대해 북서태평양 아열대 해역과 해표면 온도가 반대로 반응하는 것은 흥미로운 것이다. 실제로 북태평양 전역에 대해서 여름철 수온만을 대상으로 경험적교함수분석을 해보면 엘니뇨를 나타내는 모드가 1모드에 나타나며 공간적으로 동해에서는 적도와 반대의 위상이 나타난다.

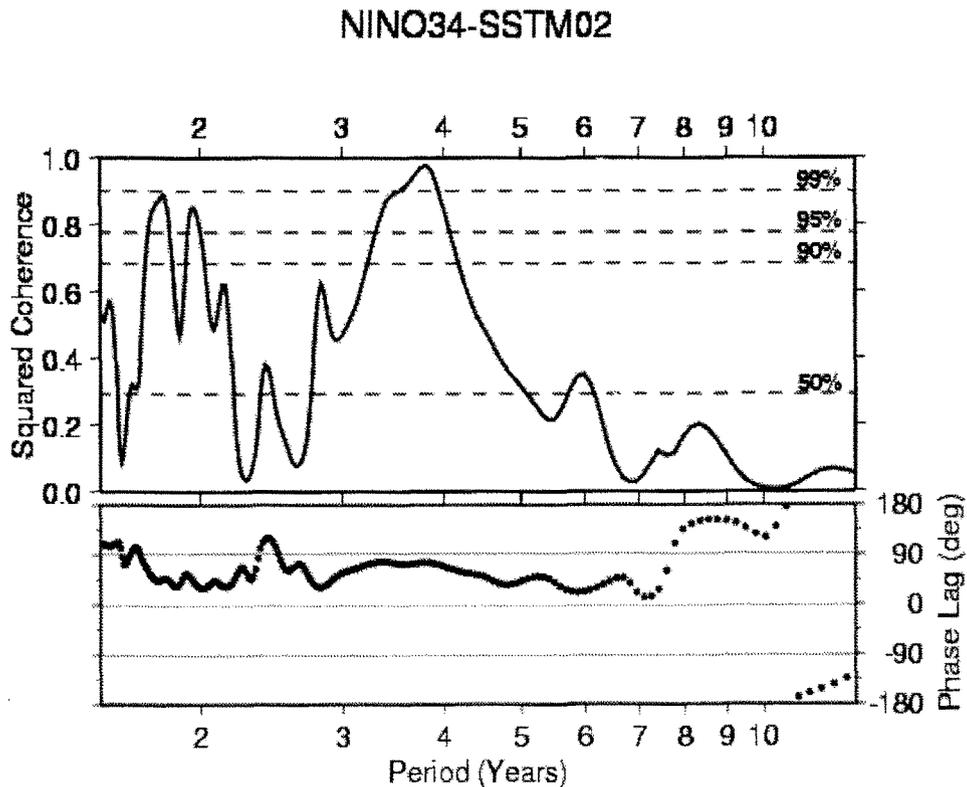


그림 41. Nino 3.4 index (Trenberth, 1997)와 EOF 2모드의 상관계수 및 위상차

### 3. 동해의 장주기 변동

동해에서 나타나는 장주기 변동을 보기 위해 동해만을 대상으로 8년 이하의 단

주기를 저주파 필터(low-pass filter)를 사용해 제거한 후 경험직교함수 분석을 수행하였다. 1960년대 중반을 전후로 동해 남부 해역에서는 수온의 하강이, 북서부에서는 수온이 상승한 것으로 나타났다. 특히 이러한 특성은 계절별로 나누어 분석을 한 결과 겨울에 두드러지게 나타났다(그림 42). 동해남부의 수온하강은 북태평양 대양의 수온변동이 1970년대 중반에 일어난 것과 비교할 때 차이가 있는 것이다. 실제로 이러한 수온하강은 북태평양 중위도 중앙부까지 미치지 못하고 동경 150도 서부에 국한된 것으로 나타났다.

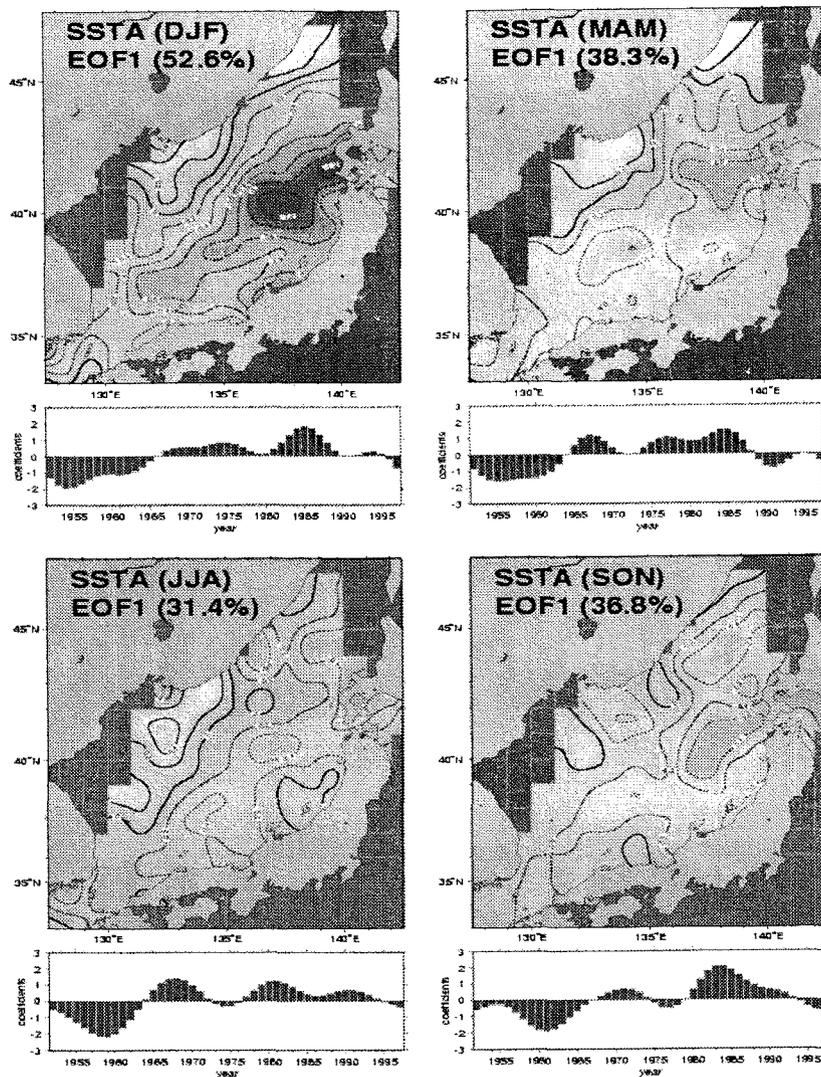


그림 42. 계절별 8년 저주파 필터한 SST의 1모드, 겨울(DJF), 봄(MAM), 여름(JJA), 가을(SON).

동해에서 장주기 수온변동의 또 다른 특징은 1980년대 말부터 수온이 상승한 것으로 이것은 1960년대의 것과는 반대의 위상이다. 1900년대까지 동해 수온을 조사해보면 1940년대에도 비슷한 수온상승이 일어났으며, 이러한 것으로 미루어보아 동해에서도 수십년 주기(예를 들어 20년과 약 50년 주기)의 변동이 중요한 것으로 사료된다(그림 43).

장주기 변동에서 특징인 것 중의 하나는 동해의 남동부 해역과는 다르게 북서부 해역에서는 SST가 자료의 기간 중 계속 증가하는 양상이다. 이러한 꾸준한 증가는 동해북서부 연안에서 관측한 수온관측자료에서도 나타난다. 기온의 경우도 수온의 경우와 같은 경향성이 나타나고 있어 해양의 변동이 대기의 변동과 밀접한 관련을 갖고 있음을 알 수 있다.

표층에서부터 수심 200m까지 평균한 상층 평균 수온에도 SST의 변동과 비슷한 장주기 특성을 나타내서 1960년대에 평균수온이 낮아져 1980년대 중반에 최소가 된 후 1980년 말부터 수온이 상승하였다. 그러나 표층이 아닌 깊은 곳에서는 수온이 계속 상승하는 경향이 나타난다. 동해 북서부 지역은 동해의 심층수가 생성되는 곳으로 알려져 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 동해 북서부해역에서 해표면온도가 계속 상승하는 것과 연관지어 볼 때 심층의 수온상승이 동해 북서부의 수온상승과 연관이 있을 가능성이 있다. 그러나 이를 증명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

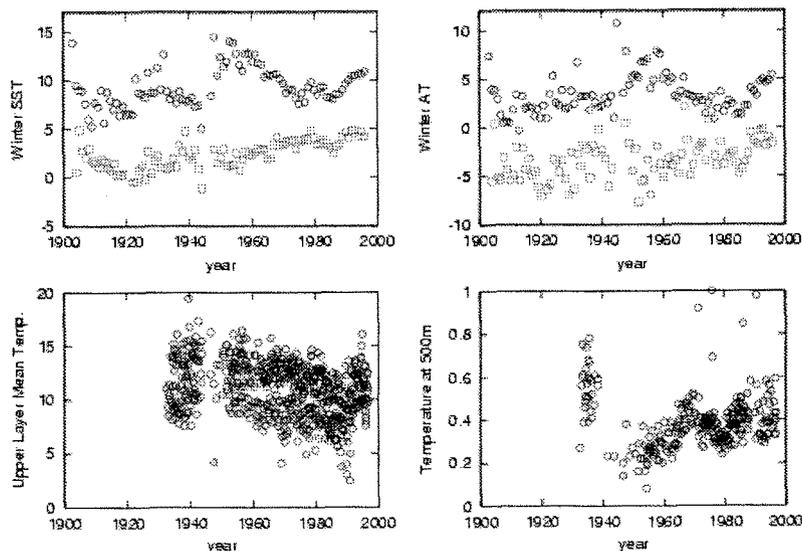


그림 43. 동해 남부(원) 및 북서부(사각)의 수온(SST), 기온(AT)의 겨울철 평균 및 상층열용량과 수심 500m 수온의 월평균 분포.

#### 4. 해수면 자료 분석

해수면 자료에서도 장주기 변동 특성이 나타나는지를 살펴보기 위해 묵호와 울릉도의 해수면 자료를 분석하였다. 두 해역은 동해 중부해역의 대표적인 두 지점으로 묵호의 연안해역이며, 울릉도는 연안의 영향을 덜 받는 해역이다.

묵호와 울릉도 자료 모두 장주기 경향성이 나타났다. 묵호의 월평균 해수면은 30년간(1970~1999) 상승하는 경향성을 보였다. 그 상승 기울기는 0.09cm/year로 나타났다. 월평균 울릉도 해수면의 21년간(1979~1999) 선형 경향성은 0.06cm/year로 나타났다. 그러나 사용한 자료의 길이가 30년밖에 되지 않으므로, 이를 영년 변동으로 보기는 어렵다. 단지 이 기간 중 해수면이 이와 같은 경향성을 가진다는 것을 말할 수 있을 뿐이다.

본 연구의 주요 관심 시간 규모는 경년 및 순년 주기이다. 따라서 위에서 언급한 선형 경향성을 제거한 후 다시 매월의 월평균을 제거하여 아노말리를 구한 후 시계열을 구성하였다. 묵호 해수면은 1980년대에 낮았다가 상승하였다(그림 44). 이는 수온 변동과 일치하는 것이다. 울릉도 해수면은 10-20년의 장주기 변동이 탁월하게 나타남을 알 수 있다(그림 45). 울릉도가 연안의 영향을 덜 받는 것으로 미루어 볼 때 해양 내부에 10-20년 주기의 변동이 중요할 수 있음을 생각해 볼 수 있다.

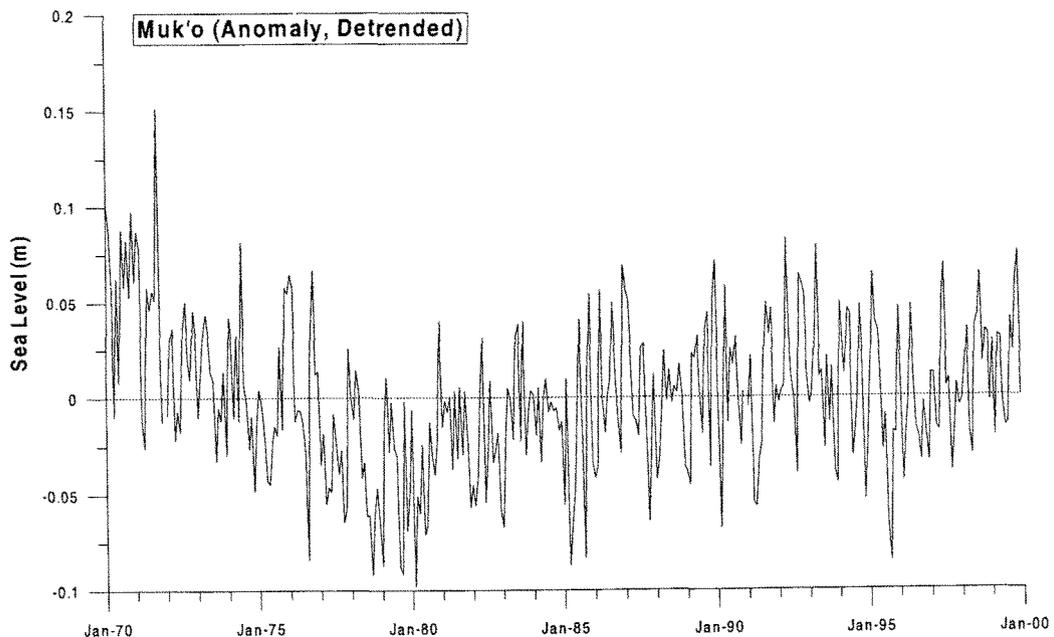


그림 44. 월평균 및 선형기울기를 제거한 묵호 해수면의 시계열

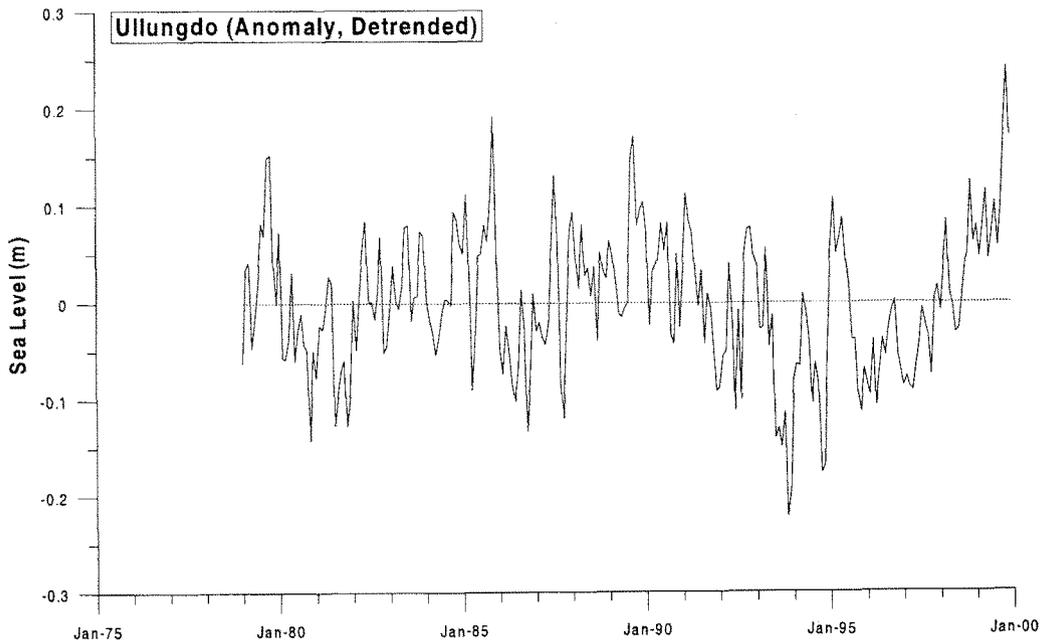


그림 45. 월평균 및 선형기울기를 제거한 울릉도 해수면의 시계열

### 5. 해양-대기 열교환 변동성 분석

해양과 대기는 해표면을 통하여 열, 물질 그리고 운동량을 교환한다. 간단한 예로 대기는 해양에 운동량을 공급하여 해양의 순환을 일으키며, 해양은 대기에 열을 공급한다. 그러나 이러한 에너지의 전달은 단순히 한 방향으로만 일어나는 것이 아니라 서로 되먹임(feedback)을 하며 복잡하게 나타나게 된다. 해양과 대기의 상호작용은 지구온난화 및 엘니뇨와 같은 지구규모의 이상현상과 기후시스템에 중요한 요소로 작용한다. 따라서 해양-대기 열교환량 변동을 분석하면 기후변동의 양상을 파악할 수 있을 것이다. 본 연구에서 주된 관심은 우리나라 주변해역의 기후변동의 양상이나, 열교환량의 경년 변동을 일으키는 주요한 요소는 더 큰 규모의 운동과 관련되어 있어서 열교환량 분석의 공간 규모를 태평양을 포함한 지구 규모로 하였다.

COADS 자료를 이용하여 복사항 (태양복사량, 장파복사량)과 난류항 (현열속, 잠열속)을 계산하였으며, 이를 산술하여 해양-대기 유효 열교환량을 계산하였다. 중위도에서 해양과 대기 사이의 열교환이 가장 활발히 일어나는 계절인 겨울철(12월-2월)기간 만을 택하여 계절평균을 구한 후 경험직교 함수 분석을 하였다.

겨울철 유효열교환량 경험직교함수 1모드는 북서태평양과 적도 중앙해역이 서로

반대의 위상을 갖게 나타난다(그림 46). 시계열을 살펴보면 양의 값을 갖는 해는 엘니뇨가 발생한 해와 상당히 일치한다. 시계열 분포와 공간분포를 종합하여 비교해보면 해양의 발열은 엘니뇨 기간 동안에 북서태평양에 억제되었다. 열교환량의 각 요소별 분석을 한 결과 해양의 발열이 억제된 것은 주로 잠열방출량의 감소에 따른 것으로 분석되었다.

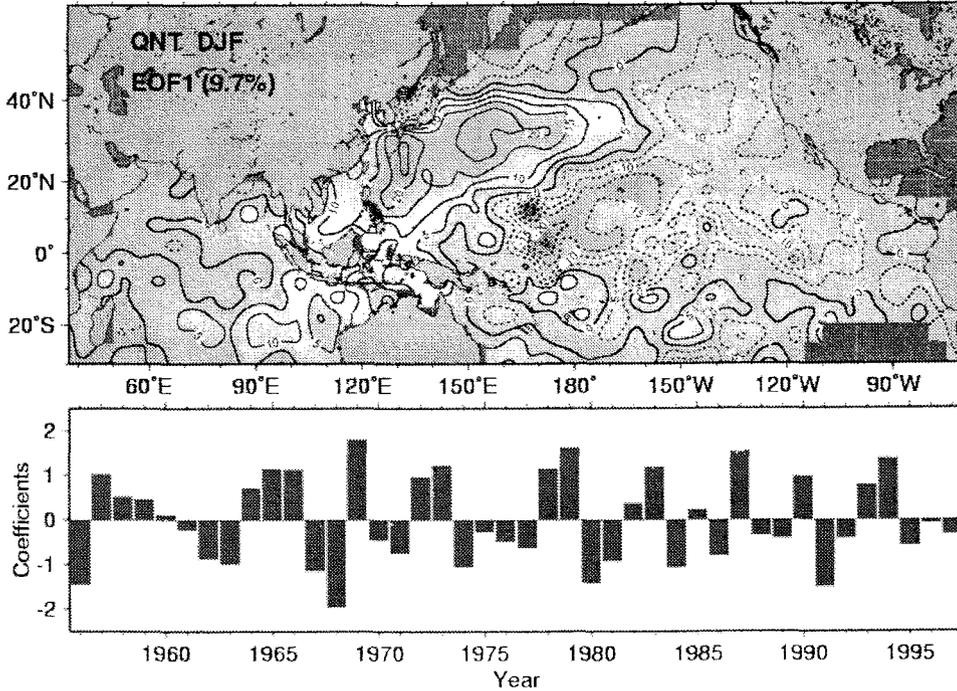


그림 46. 겨울철 해양-대기 유효 열교환량의 경험적교함수 1모드

엘니뇨 기간 중 북서태평양 해역에서 대기로 잠열 방출이 감소한 원인을 역학적으로 살펴보기 위해, 난류속에 영향을 미치는 중요한 인자인 해양-대기 온도 차 및 바람의 변화를 분석하였다.

해표면온도와 대기온도의 차이는 음의 값으로 나타나서 난류속의 감소와 같은 양상임을 보여준다(그림 47a). 이는 일반적으로 온도차가 줄어들수록 발열이 감소하는 것과 일치하는 것이다. 그러나 해양 및 대기의 온도를 대상으로 각각 분석한 결과 모두 동일하게 온도가 상승하였으나, 대기의 온도 상승치가 컸다. 따라서 해양-대기 온도차가 줄어든 것은 대기온도가 해양의 온도보다 많이 증가하여 나타난 현상으로 판단된다. 이는 원인이라기 보다는 다른 메카니즘에 의해 결과적으로 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

바람 편차를 보면 중위도 태평양 중부에 시계방향의 고기압성 순환이 강화됨을 알 수 있다 (그림 47b). 이는 중위도 중앙 태평양의 해면기압이 엘니뇨기간 중, 양

의 편차로 나타나서 고기압성 편차를 발생시키기 때문으로 분석되었다. 태평양 중위도 중부에 나타난 대기 운동의 고기압성 편차에 따라 편차의 서부에 속하는 북서태평양에서는 겨울철 북서계절풍이 약화된다. 바람의 약화는 겨울철 잠열 방출을 억제하게 작용한 것으로 보인다. 따라서 엘니뇨 겨울철에 북서태평양에 나타나는 해표면온도의 양의 편차는 해양에서 방출되는 열량이 억제되어 일어난 것으로 분석되었다.

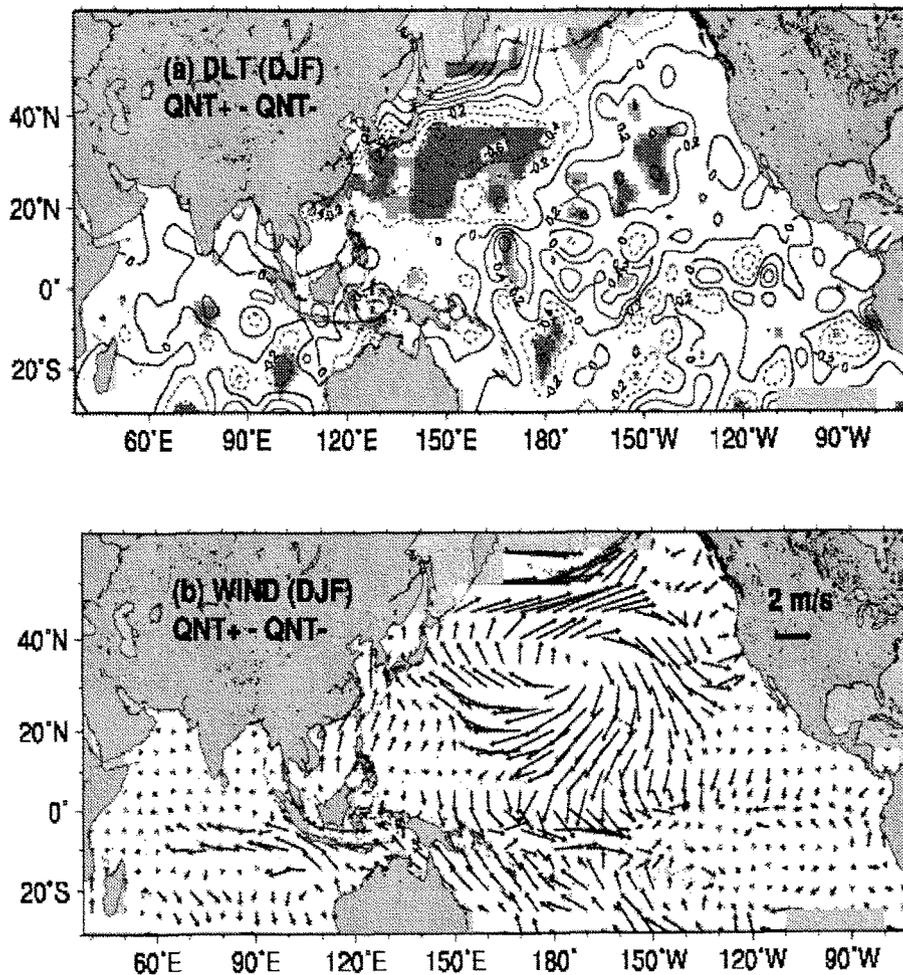


그림 47. 유효열교환량 경험직교 1모드에 따라 재구성한 Composite map  
(a) 해표면 온도와 대기온도의 차, (b) 10m의 바람

## 6. 동해의 전선 및 와류 연구

기후변동에 따라 동해의 전선 및 와류가 어떻게 반응할 것인가는 해양 변동 연구에서 중요한 사항이다. 앞에서 동해 해표면온도 변동의 특성 그 발생 역학을 어느 정도 밝혔다는 것은 해표면온도의 예측 가능성을 말해 준다. 해표면 온도가 변할 경우 동해의 전선과 와류가 반응하는 기작을 파악할 수 있다면 전선 변동의 예측이라는 측면에서도 흥미로울 것으로 판단된다.

인공위성에서 관측한 해표면온도 영상을 통해 동해 중부해역에서는 해류의 사행, 소용돌이, 전선 등과 같은 크고 작은 규모의 다양한 현상뿐만 아니라 난류와 같은 현상도 흔히 나타남을 알 수 있다(그림 48). 동해의 전선 및 와류는 공간적으로 복잡한 이외에도 시간적인 변화도 수온과 같은 물리 변수와는 다르게 복잡한 양상을 띤다.

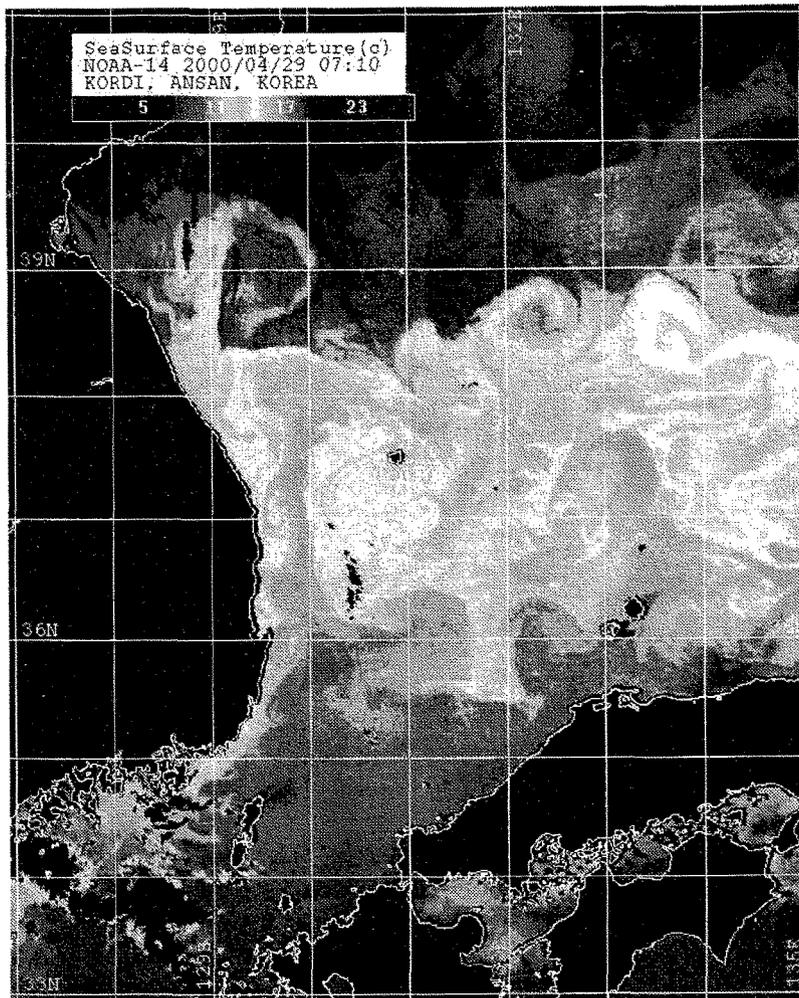


그림 48. 위성자료로부터 관측된 동해의 전선 및 와류의 예 (한국해양연구원)

동해의 전선 및 와류의 시·공간적인 변동을 연구하기 위해서는 공간적으로 조

밀하고, 시간적으로 비교적 짧은 간격의 관측 자료가 필요하다. 그러나 자료조사 결과 이러한 관측자료를 획득하는 것이 불가능하였다.

따라서 기후변동에 따른 전선과 와류의 반응을 분석하기 위한 대안으로 수치모델 접근법을 택하였다. 수치적인 접근은 여러 방향에서 이루어질 수 있으나, 본 연구에서는 동해의 해표면온도 변화에 따라 동해의 해수면 및 해류가 어떻게 변하는가를 살펴보았다. 해수면과 해류는 동해의 전선과 밀접하게 연관되어 있다. 해표면온도는 대기의 영향을 직접적으로 반영하는 변수이다. 따라서, 한반도 주변의 기후변동이 일어나고 그에 따라 해표면온도가 변한 것을 가정하여 동해 해수 흐름이 반응하는 실험을 실시하였다.

사용한 모델은 1977년 Blumberg와 Mellor에 의해서 개발된 Princeton Ocean Model (POM) 이다. 모델의 수평 격자는 동서 및 남북 방향으로 모두 1/6도 간격으로 하여 동서방향 94개, 남북방향 112개로 구성하였다. 대한해협을 통해 유입되는 유량은 2.4Sv, 쓰가루 및 소야해협을 통해 유출되는 유량은 각각 1.6, 0.8Sv으로 고정하였다. 경계조건으로 사용한 바람은 18년간 평균한 해상풍(Na and Seo, 1998)을 이용하였으며, 수온과 염분자료는 GDEM 자료를, 지형은 ETOPO 자료를 이용하여 구성하였다.

동해의 실제 해황에 가까운 상태가 위의 조건을 사용하여 실험을 수행한 결과 개발한 모형은 동해의 해수 순환을 잘 모의하는 것으로 나타났다(그림 49).

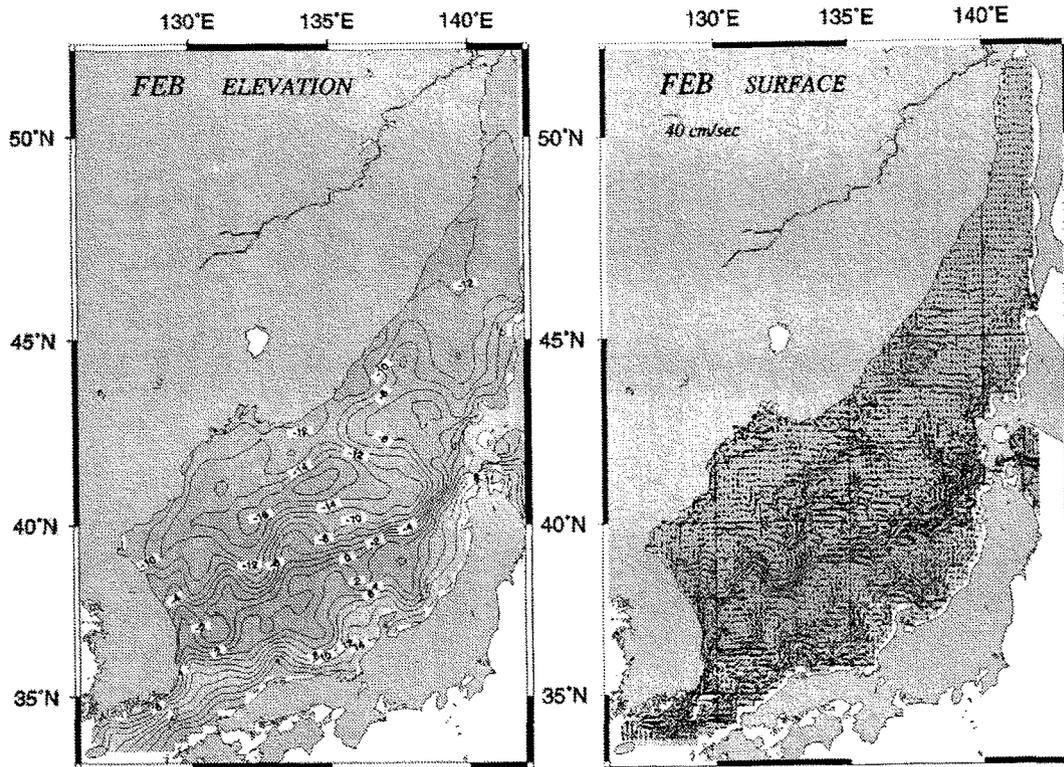


그림 49. 평년 기후값을 조건으로 모델을 수행한 경우의 해수면 변위와 해표면 해류

해표면 수온은 바람과 열교환 변동에 영향을 모두 받는 요소로서 본 수치실험에서는 해표면온도를 강제적으로 평년값에서 벗어나게 하여 경년 또는 장주기 변동에 의해 수온편차가 발생할 경우를 가정하였다. 이는 기온과 같은 동해상의 대기의 상태가 큰 규모의 기후변동에 의해 변할 경우 동해가 어떻게 반응할 것인가를 이상적인 조건하에서 추정하기 위함이다. 즉, 기후 변동이 동해 해표면의 수온변화를 가져올 경우 동해에서 전선의 변화가 어떻게 나타날지를 추정할 수 있는 기초적인 실험인 것이다.

여름과 겨울에 대해 각각 표층 수온이 높거나 낮은 경우를 설정하여, 각각에 대한 조합으로 실험을 구성하였다. 모델은 여름철부터 시작하여 겨울철까지 수행되도록 하였다. 각 실험에 대한 결과를 해수면과 표층 해류에 대하여 그림 50과 그림 51에 각각 제시하였다. 실험 결과의 특징을 요약하면 다음과 같다.

가. 무더운 여름에서 한랭한 겨울로 진행할 경우: 음의 해수면 영역이 감소하고, 해수면상에 전선이 발달한다. 해류에서는 동안난류의 이안지점이 남하하고 사행이

줄어들며 일본연안을 따른 북향류가 발달한다.

나. 서늘한 여름에서 한랭한 겨울로 진행할 경우: 위도 42도 부근의 음의 해수면 해역이 줄어들며, 해수면 경도도 줄어든다. 해류가 매우 약해지며 동안한류가 거의 나타나지 않는다.

다. 서늘한 여름에서 온난한 겨울로 진행할 경우: 음의 해수면 해역이 증가하며, 해수면 전선이 발달한다. 동안난류의 이안지점이 북상하며, 사행이 줄어들고 동향류가 발달한다.

라. 무더운 여름에서 온난한 겨울로 진행할 경우: 해수면 전선이 위도 38도까지 북상한다. 강한 동안난류가 존재하며, 위도 38도 부근에서 이안한다. 해류의 사행이 줄어든다.

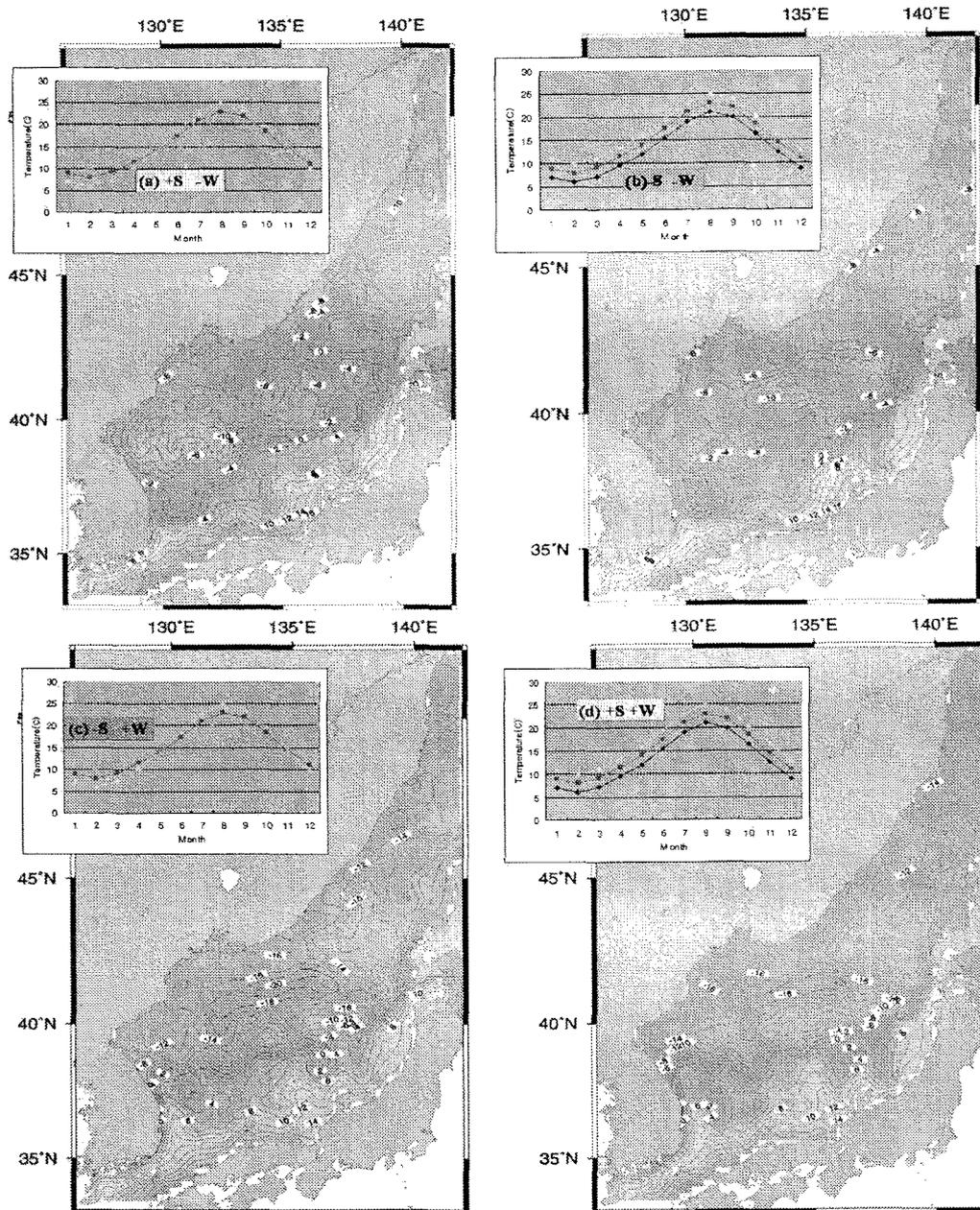


그림 50. 해표면온도를 평년값과 다르게 가정하여 수행한 경우의 겨울철 해수면 변위. 수온시계열은 1월부터 도시하였으나, 실제 모델은 8월부터 시작됨. (a) +S-W: 무더운 여름에서 한랭한 겨울로 진행, (b) -S-W: 서늘한 여름에서 한랭한 겨울로 진행, (c) -S+W: 서늘한 여름에서 온난한 겨울로 진행, (d) +S+W: 무더운 여름에서 온난한 겨울로 진행

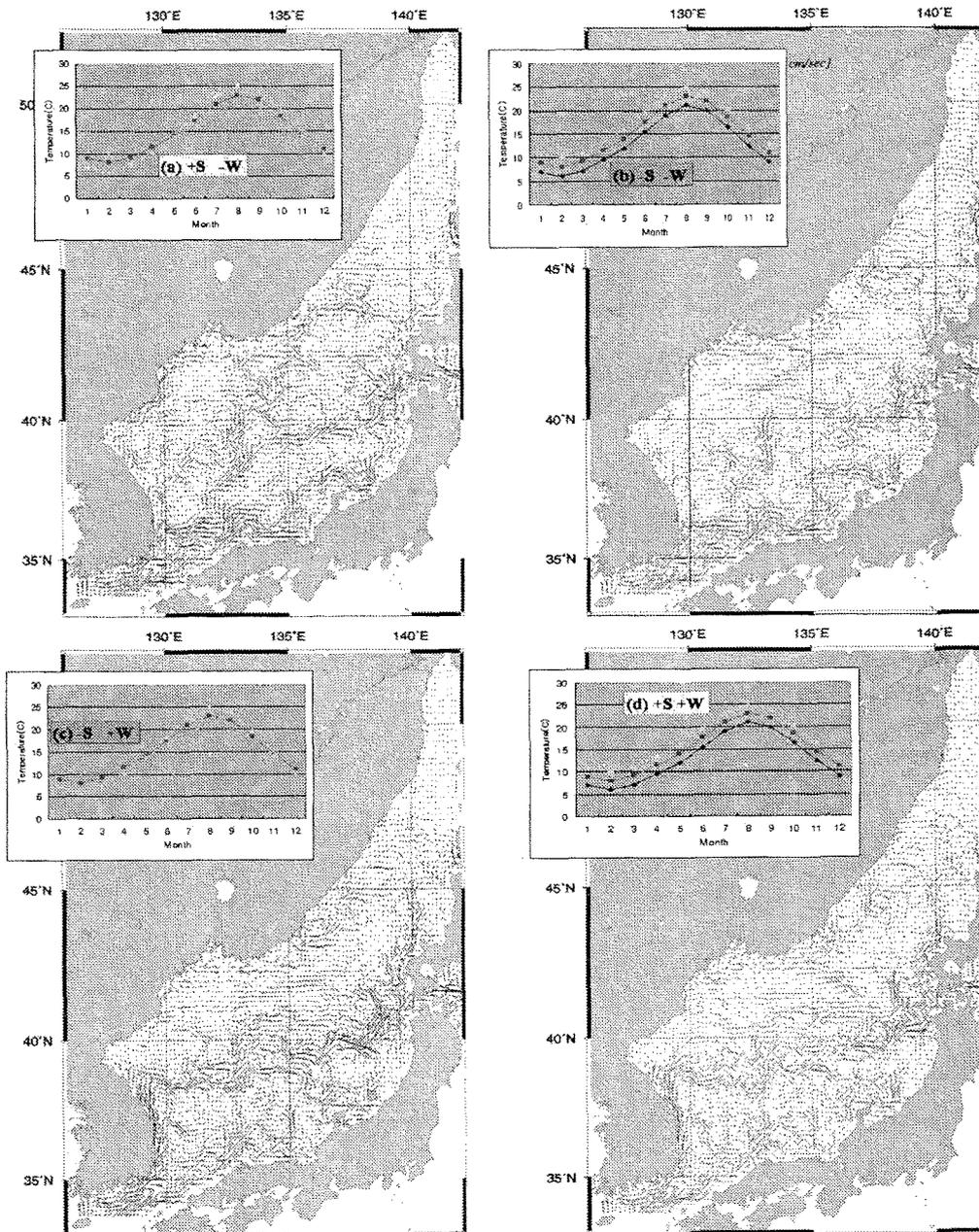


그림 51. 해표면온도를 평년값과 다르게 가정하여 수행한 경우의 겨울철 표층 해류. 수온시계열은 1월부터 도시하였으나, 실제 모델은 8월부터 시작됨. (a) +S-W: 무더운 여름에서 한랭한 겨울로 진행, (b) -S-W: 서늘한 여름에서 한랭한 겨울로 진행, (c) -S+W: 서늘한 여름에서 온난한 겨울로 진행, (d) +S+W: 무더운 여름에서 온난한 겨울로 진행

이와 같이 동해에서 평년보다 높거나 낮은 SST가 나타날 경우 해수면과 해류강도의 변화가 생기는 것으로 나타났다. 즉, 표층수온의 변화만으로 전선의 위치 및 동한 난류의 분기 위치와 같은 해류 패턴이 변경될 수 있는 것이다.

## 4 절. 동해 생태계 변화

### 1. 한국 연안 해역의 표영환경과 플랑크톤

#### 가. 서론

수산물은 어류, 갑각류, 연체류, 포유류, 해양식물 등으로 구성되는데, 인류는 필요한 동물단백질 공급량의 약 16%를 해양에서 생산되는 수산물로 충당하고 있으며 (McGinn, 1999), 이 중에서 가장 중요한 수산생물인 어류는 세계 해양수산물생산의 80% 이상을 차지하고 있다. 해양의 생태계는 광합성을 하는 식물플랑크톤을 기반으로 하고, 수산생물들은 대부분 이들을 직접적 혹은 간접적으로 포식하는 생태계의 중위 혹은 상위에 위치한 생물들로 구성되어 있다. 해양에서 모든 생물은 먹이망(foodweb)의 한 부분을 차지하고 있으며, 어류는 몇몇 포유류와 더불어 먹이망의 최상위에 위치하고 있다. 그러므로 해양생태계를 유지하는 원동력은 식물플랑크톤의 기초생산력이라고 할 수 있으며, 식물플랑크톤의 생산력 변화가 수산자원을 포함한 생태계 전체의 생산력을 좌우하게 된다.

해양은 물리적 특성과 지리적의 차이에 따라 대양, 연안역, 용승해역으로 구분할 수 있다. Ryther(1969)는 각 해역마다 식물플랑크톤의 광합성 작용으로부터 생산되는 유기물의 양이 다르고, 먹이연쇄를 구성하는 영양단계(trophic level)의 구조와 에너지 전달 효율이 다름을 감안하여 각 해역별 해양어류의 총 잠재자원량을 계산하였다. 즉, 유기물의 양은 각 영양단계를 거치면서 80-90%씩 줄어들게 되며, 먹이연쇄 단계의 수효와 영양단계의 에너지 전달효율에 따라 생태계의 최상위를 차지하고 있는 어류의 잠재생물량을 추정한 것이다. 물론 그의 접근법을 오늘날의 관점으로 평가한다면, 생태계를 너무 단순화하였다던가, 적절하지 못한 에너지 전달효율을 이용하였다던가 하는 문제점을 내포하고 있지만, 해역별 먹이연쇄의 구조와 플랑크톤 생산력으로부터 어류자원의 잠재생물량을 추정하는 기반을 제공하였다는 데 의의가 있다.

Ryther(1969)가 간단한 방식으로 제공한 잠재생물량 계산치를 현재 우리가 이용하고 있는 수산물 어획량과 비교하여 볼 때, 과히 무리가 없는 추정치라는 사실은 우리를 놀라게 한다.<sup>1)</sup> 한편, 그의 가설이 주장될 당시만 해도 해양은 안정한 상태(stable condition)에 있다고 보았으며, 해양생산력의 시대적 변동을 생각하지 못하고 있었다. 하지만, 해양생태학이 발전함에 따라 해양의 물리적 조건은 기후의 변

1 Ryther(1969)의 논문에서 계산된 전 세계 해양에 서식하는 어류의 잠재자원량은 약 2억4천만톤인데, 최근 해양에서 생산하는 어획량은 연간 약 8천만톤에서 9천만톤 사이이다. Ryther의 추정치가 옳다고 가정한다면 자원량의 약 35% 정도를 우리가 어획하는 셈인데, 어종마다 어획할 수 있는 비율이 다르기는 하지만 이 정도의 이용율은 무리없이 받아들여질 수 있다.

동에 의하여 항상 변화하고 있으며, 생태계 또한 이에 반응하면서 균형을 이루고 있다는 인식이 현재 보편적으로 받아들여지고 있다. 이처럼 기후변동에 의하여 생태계가 변화하면, 생태계 구성원의 종류, 먹이전달체계, 분포, 풍도, 생산력, 생물량, 어업으로 가입(recruitment) 등이 함께 변화하며, 이 결과는 수산자원의 자원량 변화를 유발하게 된다. 즉, 해양의 환경수용력(carrying capacity)이 변화한다는 것인데,<sup>2)</sup> 이러한 증거는 세계의 해양 곳곳에서 보고되고 있다. 과거 수십 년 동안 축적된 해양 및 수산자료를 분석한 결과, 북태평양, 북대서양, 남극해 등에서는 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 생물량, 어류의 자원량이 시대에 따라, 환경의 변화에 따라 현저하게 다르게 나타나고 있음을 알 수 있었다(Chavez et al., 2003; IGBP, 1999; Brodeur and Ware, 1992). 환경변화에 의한 어류자원의 경년가입변동(interannual recruitment variability) 주제의 연구는 1980년대에 들어와 수산해양학(fisheries oceanography)이라는 학문의 개념을 재정립하는 계기를 만들었고, 이를 수산생태학 혹은 해양학의 핵심적인 연구 분야로 떠오르게 하였다(김, 1990).

기후 및 해양환경이 해양생태계의 구조와 기능에 영향을 미쳐, 수산자원의 증감에 매우 중요한 요소가 될 수 있다는 인식은 매우 중요하다. 해양생태계의 생산력에 영향을 주는 지구적 변화요인은 해수온도, 강수, 바람, 해류, 해수면, 염분, 용승, 해빙, 자외선 등이 있으며, 이러한 비생물적 요소들은 여러 과정을 거쳐 플랑크톤 생태계에 막대한 영향을 미치고 있다. 몇 가지의 예로, 용승현상은 플랑크톤의 생산력을 높이는 작용(enrichment)을 하며, 해류가 만나는 전선(front)은 어류 치어가 먹을 수 있는 충분한 양의 먹이생물을 농축(concentration)시키고 있다(Bakun, 1993). 이처럼, 수산자원량 변동의 기반에는 항상 플랑크톤의 변화(즉, 종조성 변동 및 변성여부)와 함께, 이들에 영향을 미치는 해양의 물리적 요인이 함께 고려되고 있다. 우리나라에서는 아직 수산학이 해양학의 한 분야로 정착되지 못하고, 단순한 수학적 모델에 의한 자원관리방법으로 간주되는 경향이 있다. 하지만, 현재의 수학적 모델들은 해양의 변화무쌍한 여러 환경현상들을 지극히 단순한 가정으로 묶어 놓았기 때문에 수산자원량의 변동을 정확하게 추정하거나 예측하기에는 한계가 있다. 본 논문은 최근까지 보고된 수산자원의 변동에 영향을 미치는 생물학적 혹은 물리학적 환경요인 및 상호작용을 플랑크톤 생태계와 연관하여 설명하고, 우리나라 해역에서의 수산해양학적 연구 현황 및 나아가야 할 방향을 고찰하기 위하여 작성되었다.

---

2 이 곳에서는 해양의 환경수용력을 어류의 잠재생물량으로 생각하였다.

## 나. 플랑크톤 생태계와 어류자원

### (1) 해양어류자원의 구분

어류는 매우 오랜 기간동안 진화를 하였기 때문에, 지구상에서 물이 있는 곳이면 어느 곳이든지 적당한 형태의 적응전략을 보이며 존재하고 있다. 현재, 지구상에는 약 35,000여종의 어류가, 우리나라에도 약 1,000여종의 어류가 서식하고 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 우리에게 식량으로 이용되는 수산어류는 우리가 이름을 익히 잘 아는 몇 종에 국한되어 있는데, 그 이유는 수산의 대상이 되기 위해서는 그들 종이 번성상태가 매우 좋아야 하기 때문이다. 국제식량기구(FAO)의 세계 수산물 통계에는 약 1,000여종의 어류가 등재되어 있고, 우리나라의 통계에도 약 100여 종의 어획량이 보고되고 있다. 본 단원에서는, 해양에 서식하는 어류를 출현하는 깊이에 따라 부어류(pelagic species)와 저어류(demersal species 혹은 groundfishes)로 구분한다.<sup>3)</sup>

부어류는 해양의 표층에 서식하는 어종으로, 상어, 다랑어 등을 제외하면 대부분은 크기가 작은 소형표층어류(small pelagic fish)로서, 멸치, 정어리, 고등어가 이에 해당된다. 이들은 주로 플랑크톤 식성이며, 군집을 이루는 성향이 강하고, 풍도가 높다. 이들이 일생동안 서식하는 해양의 표층은 기상의 영향이 크고, 이에 따라 해양의 생산력 변화가 심하므로 소형표층어류들은 기후의 변동에 매우 민감하게 반응하는 종류로 알려져 있다. 이들 어류가 서식하는 표층수온의 온냉 정도에 따라 온수성 및 냉수성 표층어류로 세분하기도 한다. 한편, 바다의 바닥 가까이 혹은 바다 깊은 곳에 서식하는 저어류에는 명태, 대구, 참조기, 갈치, 가자미류 등이 있다. 연안역의 얕은 바다에 서식하는 연안 정착성 어류는 이동 범위가 제한되기도 하지만, 원양의 깊은 곳에 서식하는 어종들은 표층어류와 마찬가지로 비교적 넓은 회유 범위를 가지고 있다. 이들은 주로 깊은 곳에 서식하기 때문에, 표층에서 발생하는 기후의 변동에 비교적 덜 민감하다.<sup>4)</sup> 그러므로, 일정 기간 동안의 어획통계자료를 분석하여 보면, 표층어류는 상당한 진폭을 가지고 어획되는 것에 반하여, 저어류 어업은 남획의 요인만 없다면 비교적 안정된 상태의 어획을 보이고 있다(표 4). 세계 어획량 중에서 가장 어획이 많았던 10 종을 택하여 10여년 동안의 어획량 변동을

3 해양어류를 구분하는 여러 방법이 있겠으나, 본 논문에서는 플랑크톤 생태학에 관련이 많은 구분법을 선택하였다. 이외에 서식수온의 냉온에 따라 냉수종(cold-water species)과 온수종(warm-water species)으로 구분하거나, 담수어(freshwater species)와 해산어(marine species), 장수어종(long-lived species)과 단명어종(short-lived species) 등으로 구분하기도 한다.

4 저어류가 낚은 알과 자치어는 대부분 해양의 표층에서 생활하는 표층성이다. 이들은 초기생활사 동안 먹이가 풍부한 해양의 표층에서 보낸 후, 어느 정도 커지게 되면 깊은 곳으로 들어간다. 따라서, 표층생활을 하는 비교적 짧은 시기에 발생한 어류의 사망이 저어류의 가입성패를 결정하는 중요한 요소가 되기도 하므로, 해양표층에서의 환경변화와 이들의 번성이 아주 무관하지는 않다.

비교하면, 명태, 대서양 대구와 같은 저어류는 어획량 차이가 크지 않았지만, 페루 멸치, 칠레 전갱이, 우리나라 근해 정어리, 남미 정어리 등의 온수성 소형표층어류의 변동폭은 큰 것으로 나타났다.

표 4. 세계 주요 어종에 대한 지난 11년 (1990-2000)동안의 최소·최대 어획량 비교(단위: 톤)

1992년의 주요 어획대상 어종	최소	최대	비율(최대/최소)
명태(Alaska pollock)	3024796	5736171	1.9
페루 멸치(Peruvian anchovy)	1276357	8863714	6.9
대서양 대구(Atlantic cod)	945623	1491462	1.6
대서양 청어(Atlantic herring)	1404217	2533909	1.8
열빙어(Capelin)	748800	2115140	2.8
칠레 전갱이(Chilean jack mackerel)	1423447	4955186	3.5
대서양 정어리(European pilchard)	907348	1522015	1.7
정어리(Japanese pilchard)	295788	4732154	16.0
다랑어(Skipjack tuna)	1287073	1988276	1.5
남미 정어리(South American pilchard)	338131	4253718	12.6

## (2) 어류의 생활사와 해양환경

해양어류는 산란장(spawning ground), 보육장(nursery ground), 섭이장(feeding ground)을 계절적으로 회유하는 종류가 많다(그림 52). 일반적으로, 성어가 산란장을 선택하는 기본적인 원칙은 자손의 사망이 최소로 발생하는 장소이어야 하며, 태어난 새끼들이 보육장으로 흘러 들어가기 가장 유리한 장소라는 것이다. 해양에서 서식하는 어류는 그 크기와 번식전략이 다양하지만, 대부분의 어류는 태어날 때 대개 1-2 mm 크기의 작은 알(egg)로서 태어난다. 부화한 자치어(larva)들이 어느 정도 성장하여 유영능력을 지니게 될 때까지는 당분간 해류의 흐름에 의존하면서 생활을 하게 되는데, 이들을 어류플랑크톤(ichthyoplankton)이라고 부르며, 어류의 초기생활사(early life history) 시기에 해당된다. 어류플랑크톤은 해류의 흐름에 따라 수동적으로 흘러 보육장에 이르게 된다. 치어는 유영능력이 과히 좋지 못하여 표류하면서 생활하고 있지만, 생존에 적합한 장소라고 판단한 장소에서 해양의 특성

을 이용하여 능동적으로 머무를 수 있도록 적응하고 있다. 이렇게 치어가 살기에 좋은 장소에서 머물러 있을 수 있는 현상을 치어의 정체(larval retention)라고 하며, 치어가 머무는 정체지역은 대부분 생산력이 높아 치어의 성장에 유리한 해역이다. 예를 들면, 해양의 상층과 하층의 해류 방향이 다른 용승해역(upwelling area)이나 강하구(estuary)는 해양의 생산력이 매우 높고, 이 해역에 서식하고 있는 치어는 수직운동을 함으로써 정체지역을 벗어나지 않게 된다.

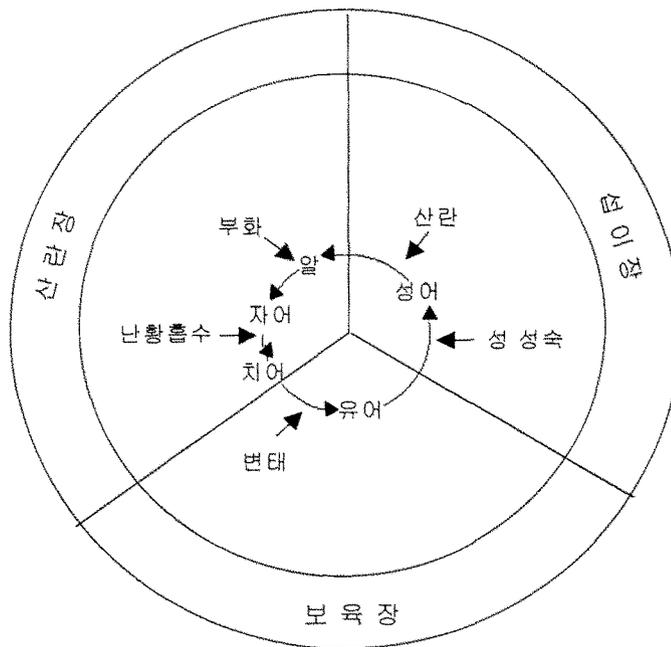


그림 52. 어류의 생활사

어류는 해양의 물리적 현상과 함께 생물학적 현상을 고려하여 산란장소와 시기를 결정한다. 일반적으로 조류가 강하여 수층이 잘 혼합되어 있으면 모든 계절에 걸쳐 생산력이 낮고, 약한 조류현상으로 수층이 층화(stratify)되어 있으면 봄과 가을에 플랑크톤이 번성하고 여름에는 생산력이 낮다(그림 53). 대서양에 서식하는 청어는 늦여름-가을에 산란하는 계군과 봄에 산란하는 계군으로 구분할 수 있는데, 태어난 시기에 관계없이 미성어(juvenile)로 변태(metamorphoss)되는 시기는 항상 이른 여름과 늦여름 사이로 정해져 있다. 따라서, 두 계군 사이에 성장기간의 차이가 생기는데, 늦여름-가을에 태어나서 긴 성장기간을 갖는 청어는 이른 여름에 변태하며, 그 해 봄에 산란된 청어는 가을이 되기 전에 변태를 한다. Sinclair and Tremblay(1984)는 이러한 현상을 산란장의 해양학적 특성과 연관시켜 설명하였다. 즉, 늦여름-가을 사이에 산란하는 청어는 조류가 강한 곳을 택하여 산란을 하고 있

으며, 이 곳에서는 해양의 생산력이 낮기 때문에 치어의 성장이 느려지게 된다. 반면, 봄에 산란하는 청어는 주로 조석에너지가 약하고 생산력이 높은 해역을 택하여 산란장을 정하기 때문에 치어의 영양상태가 좋고 개체군의 성장상태가 빠르게 나타난다.

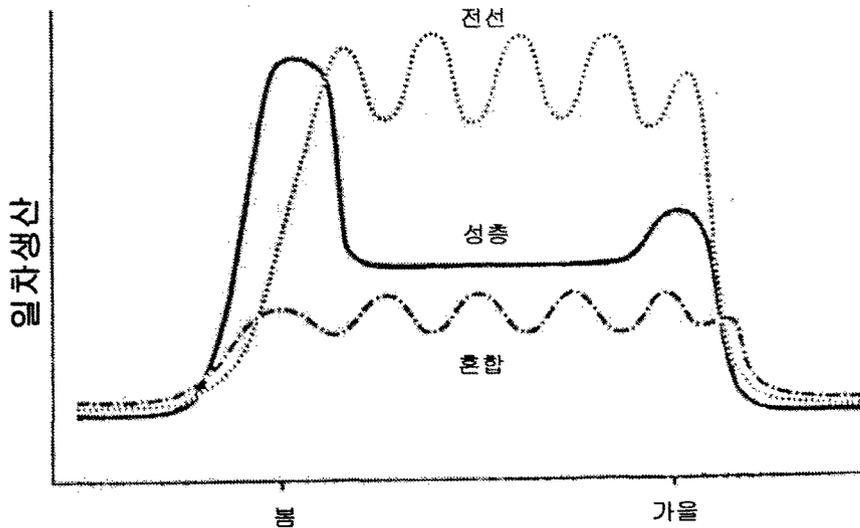


그림 53. 해양의 전선, 혼합, 성층 지역에서 일차생산의 계절적 순환에 대한 모식도 (Sinclair and Trembly, 1984)

보통의 경우, 보육장은 육지에 면한 해역으로서 해류에 의하여 보육장에 이른 어류의 새끼들이 일정기간 동안 살아가는 장소이다. 그러므로 보육장은 어류가 충분한 섭식활동을 할 수 있을 정도의 비옥한(즉, 플랑크톤의 생산력이 높은) 해역이다. 어류는 많은 알을 낳고, 알에서 부화한 치어는 주위의 동물플랑크톤과 먹이경쟁을 통하여 생존여부가 결정된다. 어류는 발달단계에 따라 동물플랑크톤의 먹이가 되기도 하고, 혹은 포식자가 되기도 한다. 즉, 이들은 알과 자어(yolked larva) 시기에는 동물플랑크톤의 주요한 먹이가 되지만, 성장하면서 동물플랑크톤을 먹이로 삼는다. 이들은 산란장과 보육장에서 보내는 초기생활사 시기에 대부분 사망을 하는데, 유생들은 가능한 빠른 시간 이내에 성장을 하여 다른 생물에게 포식될 위험을 줄여야 한다. 이 시기의 사망률이 크고 작음에 따라 성어로까지 생존하게 되는 개체수가 결정된다. 어류 미성어는 보육장에서 성장을 한 후 성어로 바뀌는데, 수산자원학에서는 성어가 되어 어업의 대상이 되는 상태를 가입된다고 부르며, 특정한 한 해에 태어난 동일 연령군 가입량의 크고/작음을 연급군의 강도(year-class strength)가 크다(strong)/작다(weak)로 표현하고 있다.

### (3) 가입의 변동

어류가 성어가 되어 가입이 되는 수는 해마다 변동이 심하며, 어류의 가입변동을 설명하는 이론은 크게 기작이론(mechanistic theory)과 통합이론(synthesis theory)으로 구분할 수 있다. 기작이론은 생명현상에 영향을 미치는 해양에서의 특별한 과정(process)을 설명하는 것으로서, 모두 플랑크톤에 기반을 둔 생태계의 과정(plankton-based ecosystem process)을 강조하고 있으며(김과 장, 1994), 통합이론은 여러 가지 기작이론들을 혼합하여 수산자원의 가입을 결정하는 여러 유형을 제시하는 것이다.<sup>5)</sup> 대표적인 기작이론은 어류 치어의 먹이생물인 플랑크톤이 출현하는 양상과 치어의 생존문제를 다루는 기아(starvation)가설, 어류의 가입성패가 이들의 알과 자치어를 잡아먹는 포식자와 관련이 있다는 포식(predation)가설, 어류플랑크톤의 운송 경로에 따라 가입정도가 달라진다는 운송(advection)가설의 세 가지이다(Cole and McGlade, 1998).

어느 생태계를 막론하고, 생태계의 영양단계를 구성하는 각 요인들은 외부적인 환경변화에 영향을 받고 있다. 하지만, 내부적으로도 생물체들은 먹이망을 통하여 서로 긴밀하게 연결되어 있다. 이들 구성원의 번성은 먹이생물의 풍도(abundance)에 따라 성쇠여부가 결정되기도 할 것이며, 혹은 이들을 포식하는 포식자의 풍도에 따라 개체군의 크기가 영향을 받기도 할 것이다. 이들 각각의 개념은 상향적 접근법(bottom-up approach)과 하향적 접근법 혹은 폭포가설(top-down approach, 혹은 cascade hypothesis)에 의하여 발전되었는데, 해양생태계의 경우 영양단계 구성원의 풍도나 생물량이 이 두 가설 중에서 어느 하나에 의하여 결정된다고 말하기는 쉽지 않다(김과 장, 1999).<sup>6)</sup> 하지만 해양에서는 생태계의 상위 영양단계를 차지하는 어류와 기초생산력을 담당하고 있는 식물플랑크톤이 서로 연결되어 있으며, 특히 어류의 초기발생시기의 식물플랑크톤 번성 양상이 어류플랑크톤의 사망과 성장에 막대한 영향을 미치고, 더 나아가 해양의 환경수용력을 결정하는 중요한 요소라는 사실은 분명하다. 최근에는 이러한 먹이망의 구조적인 상호작용을 포함하여 기후변동의 영향을 함께 고려하는 가설도 주장되고 있다.<sup>7)</sup>

5 생태학에서 자연현상을 규명하는 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째의 방법은 대상생물시료를 이용하여 실험을 통하여 파라미터를 추정하고, 그 결과를 자연현상의 특별한 과정(process)으로 이해하는 실험적 접근법(experimental approach)이다. 또 다른 방법은, 여러 군데의 다양한 자연생태계로부터 시료를 채집하고, 장기간 수집된 자료를 총체적으로 비교분석하여 생태계의 공통점, 다양한 발전과정, 생명현상에 미치는 영향을 도출해 내는 비교학적 접근법(comparative approach)이다. 어류자원의 가입이론 중 통합이론은 대부분 후자의 경우로부터 도출되었다.

6 일부 학자들은, 상하의 일방적인 방향이 아니라, 양 방향에서 생태계의 중간단계에 있는 생물들에게 영향을 주어, 그들의 생물량이 허리가 잘록한 형태로 줄어드는 wasp-waist 가설을 주장하고 있다.

다. 한국 연안의 수산자원과 플랑크톤의 변동

우리나라는 북태평양의 남방한계 부근에 위치하고, 대륙과 대양을 연결하는 반도이므로 기후 및 해양환경이 다소 복잡한 양상을 보인다. 더욱이, 한반도 주변의 동·서·남해는 면적, 수심, 해류, 해저지형 및 지질, 해양에 미치는 육상환경 등이 각기 독특하여, 각 해양의 생태학적 특징도 다르며, 그 해역 내에 서식하고 있는 생물상도 현저히 다르다(김, 2002). 수산자원의 경우, 연안 정착성 어류와 회유성 어류가 계절적으로 혼재하여 출현하기도 하며, 서식하는 수괴 및 수층에 따라 온수성과 냉수성이 함께 어획되기도 한다. 대부분의 회유성 어종들은 계절적으로 해역을 넘나들며 회유하고 있으며, 그들의 회유경로는 가장 효율적인 성장과 산란이라는 대명제 하에서 진행이 된다. 우리나라에서 많이 어획되는 어류를 중심으로 생태계 유형을 정리하면, 크게 세 가지로 나눌 수 있다(그림 54): 황해 저어류 생태계, 대마해류의 온수성 표층어류 생태계, 동해 냉수성 저어류 생태계.

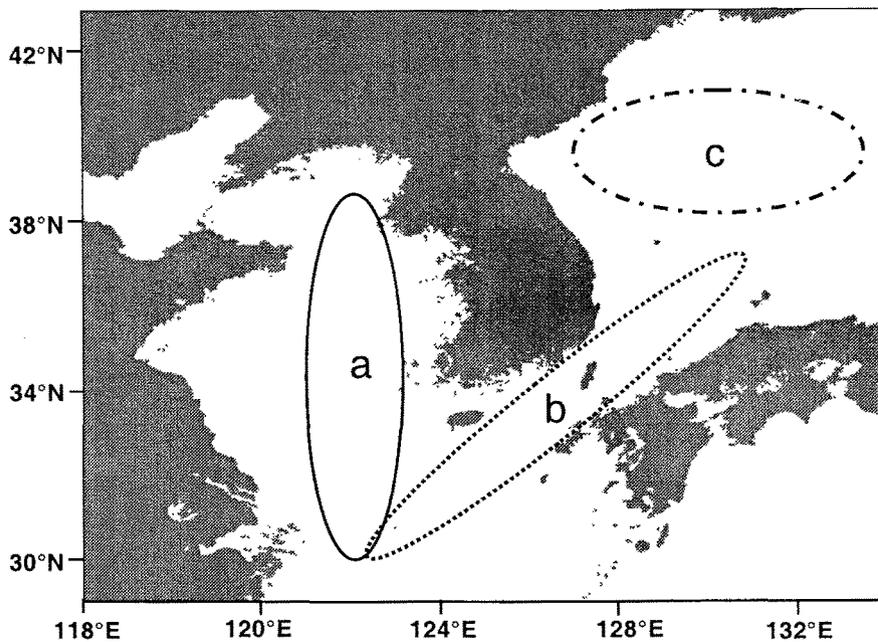


그림 54. 주요 상업어종을 대상으로 한 한국 근해 생태계의 구분

- (a) 황해 저어류와 저층수 생태계: 참조기, 갈치, 갯장어, 병어 등
- (b) 온수성 소형표층어류와 대마해류 생태계: 고등어, 전갱이, 오징어 등
- (c) 동해 냉수성 어류 생태계: 대구, 명태, 도루묵, 청어 등

7 Hunt and Stabeno (2002)는 진동조절가설(oscillating control hypothesis)을 제시하면서, 기후가 추웠던 때부터 따뜻한 시기를 거쳐 다시 추워질 때까지의 먹이생물의 번성, 치어의 생존, 포식자의 자원량, 가입량 등에 대한 변동을 모식적으로 보여주고 있다.

전 세계의 다른 해역과 마찬가지로, 우리나라에 서식하는 어종들도 그들의 번성이 플랑크톤의 생산력에 의존적일 것으로 생각하고 있다. 1977년부터 1986년까지 조사된 동물플랑크톤의 연평균 생물량 자료를 보면, 우리나라 해역에서 동물플랑크톤의 출현양상에 많은 변화가 있었다. 동물플랑크톤은 대체로 90년대에 들어와 급격하게 생물량이 증가하였으며, 남서쪽에서 생물량이 가장 높았고, 황해, 남해, 동해의 순서로 낮아졌다(Kang and Kim, 2002). 우리나라 남서부 해역은 동중국해와 면한 해역으로서, 대마해류계에 서식하는 소형표층어류와 황해 저어류가 월동하는 장소이다(Kim and Khang, 2000). 특히, 서해 중앙의 깊은 골을 따라 존재하는 냉수괴에는, 참조기, 대구, 갈치 등의 저어류가 서식하고 있다. Kim et al.(1997)은 참조기 자원의 어획량 변동에 영향을 미치는 요인에 대하여 연구하였는데, 따뜻한 산란시기와 환경변화가 적은 치어 성장기를 거친 참조기 연급군은 수온이 차고 변동이 심한 환경 속에서 성장기를 보인 연급군에 비하여 어업에 가입되는 양이 많은 것을 밝혀냈다. 아직, 참조기 자원의 가입을 규명하는 해양에서의 과정에 대하여 밝혀진 바는 없으나, 해수의 온도와 해양의 안정성이 플랑크톤 생태계에 영향을 미치며, 더 나아가 이 해역의 동물플랑크톤 밀도의 변화는 남획과 더불어 참조기 자원의 증감에 결정적인 역할을 할 것이라고 생각한다.

온수성 표층어류는 따뜻한 동중국해에서 겨울을 보낸 다음에, 우리나라, 중국, 일본의 연안역으로 계절적 회유를 하면서 산란 및 성장을 한다. 이 해역에 서식하는 주요 온수성 소형표층어류의 어획량을 비교분석하면, 전체 어획량에 대한 이들의 비율이 점점 증가하는 경향을 볼 수 있다(그림 55). 과거, 우리나라 전체 어획량의 40%대에 머물던 주요 10종의 온수성 소형표층어류의 어획량은 1990년대 중반부터는 60%를 상회하였으며, 점차 증가하는 추세를 보이고 있다.<sup>8)</sup> 한편, 1965-1998년까지의 겨울철 표층수온 자료로부터 1980년대 후반에 남해와 동해에서 수온이 상승하였다는 것을 알 수 있는데, 이 시기에 동물플랑크톤의 생물량이 함께 증가하는 경향으로 나타났다(그림 56). 또한, 대마난류 생태계권에 해당되는 동해 남부와 남해의 동물플랑크톤의 종조성에도 변화가 있었는데, 1990년대 초반까지 우세하던 요각류는 점차 감소를 보이고 있으며, 단각류, 난바다곤쟁이류, 모악류와 같은 대형동물플랑크톤이 증가하였다. 그러므로, 온수성 어류가 서식하는 표층에 출현하는 동물플랑크톤의 종조성과 밀도가 이들 어류의 번성 및 어획과 관계가 밀접할 것이다.

8 주요한 10종의 소형표층어류는 1992년 어획량 자료에서 선택한 고등어류, 꽁치, 농어, 멸치류, 방어, 삼치류, 송어류, 오징어, 전갱이류, 정어리이다.

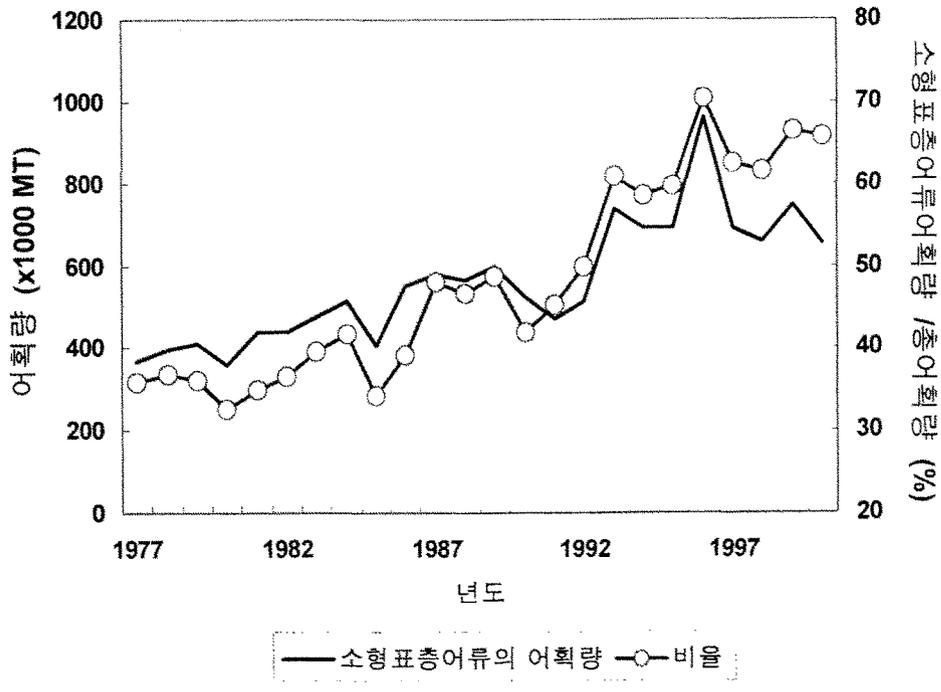


그림 55. 우리나라 주요 소형표층어류의 어획량 및 전체 수산자원 어획에 대한 비율 변화

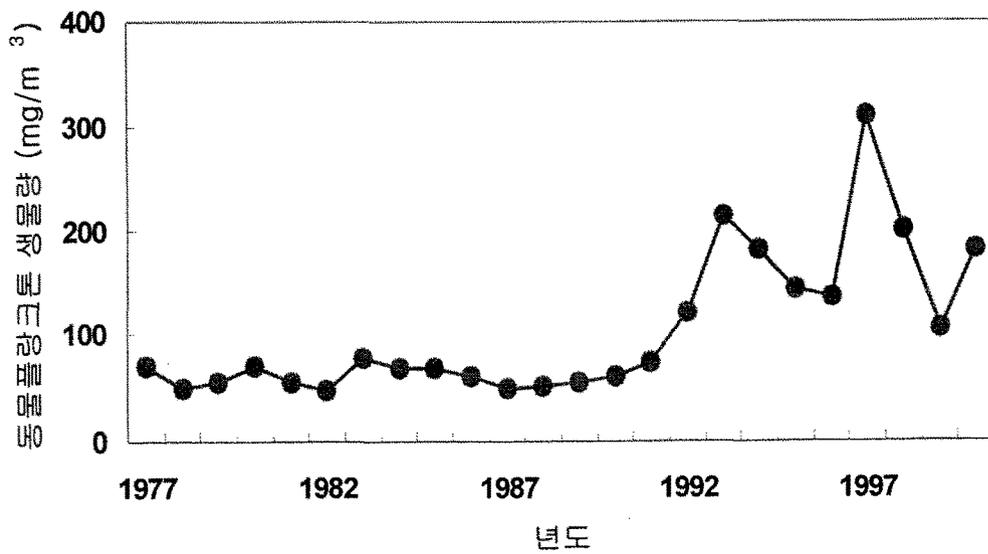


그림 56. 남해 및 동해에서 출현한 동물플랑크톤 생물량의 변동

일례로, 남해에 서식하는 멸치와 고등어는 대표적 온수성 소형표층어류로서, 봄에 태어나 여름과 가을에 걸쳐 빠르게 성장을 한다. 이들은 가을이 되면 어획의 대상이 되며, 수온과 먹이생물의 풍도가 이들의 성장에 중요한 요인으로 작용을 하고 있다. 엘니뇨가 발생하는 해에는 가을에서 초겨울에 걸쳐 남해 전역에 따뜻한 수온이 나타나고, 멸치와 고등어의 성장시기에 이들의 먹이생물인 요각류, 난바다곤쟁이류, 단각류의 생물량이 높게 나타나 어획이 좋아지게 된다(표 5; Kim and Kang, 2000). 이 결과는 적도지방에서 발생한 엘니뇨가 시간이 지남에 따라 우리나라 남해 해역의 수온에도 영향을 미치고 있으며, 상승된 수온은 동물플랑크톤의 번성에 긍정적으로 작용하여, 결과적으로 어류의 성장과 어업에 도움을 줄 수 있다는 논리를 가능하게 한다.

표 5. 우리나라 소형표층어류 어획량과 플랑크톤 생물량 사이의 상관계수  
\*는 상관관계가 0.05 수준, \*\*는 0.01 수준에서 유의함을 의미함  
(Kim and Kang, 2000)

	멸치	고등어
엽록소 a (4월)	0.186	0.019
엽록소 a (6월)	0.635**	0.523**
엽록소 a (8월)	0.442*	0.377
요각류 (4월)	0.563*	0.434*
요각류 (6월)	0.121	0.571
요각류 (10월)	0.635*	0.477
난바다곤쟁이류 (6월)	0.349	0.356
난바다곤쟁이류 (12월)	0.768**	0.603*
단각류 (4월)	0.713**	0.504*
단각류 (12월)	0.712**	0.616*
모악동물류 (4월)	0.647**	0.307
모악동물류 (10월)	0.728**	0.512*
모악동물류 (12월)	0.558**	0.129

북태평양에서 1970년대 후반에 발생하였던 기후의 체제변환(climate regime shift)현상이 동해의 해양생태계에도 상당한 영향을 미쳤던 것으로 나타났다(Zhang et al., 2000). 즉, 1970년대 중반을 분기점으로 하여, 동해의 봄철 표층혼합수심(mixed layer depth: MLD)은 1961-1975년 동안(평균 18.2 m)이 그 이후의 1976-1990년(평균 26.1 m)에 비하여 얇고 변화가 적었다. MLD의 차이는 해양의 생산력에 영향을 미쳐, 60년대의 기초 및 이차생산력이 80년대의 생산력보다 높았지만, 어류의 경우에는 그 결과가 다양하게 나타났다: 쾡치 자원량과 어획량은 기후 체제변환 동안에 감소하였지만, 정어리, 쥐치의 경우는 증가하였다. 특히, 기후체제변환의 한 지수인 북동태평양기압지수와 명태 어획량은 유의한 양의 상관관계를 보이고 있다(Kang et al., 2000). 어류자원의 경우, 자원량이 별로 크지 않을 때에는 해양환경조건이 자원변동에 큰 영향을 주고 있지 않으나, 어느 정도 이상의 자원량을 보일 때에는 해양의 환경조건이 그 어종의 성쇠에 주요한 요인으로 작용하는 것처럼 보인다.

#### 라. 고찰

해양환경의 변화는 플랑크톤의 번성시기, 출현종, 분포 등과 관계가 있으며, 이에 관련한 제반 현상과 어류자원의 증감 및 가입은 필연적으로 연결되어 있다. 그러나, 우리나라 해역에서는 플랑크톤 생태계와 연관하여 어류의 가입현상을 규명하는 과정규명적(process-oriented) 연구와, 이들 요인 사이의 변화를 정량화하고 미래의 모습을 예측하는 모델링(modelling) 연구는 아직 본격적으로 수행되지 않고 있다. 지구상에서 진행되고 있는 기후변동은 어업종의 구성 비율을 변화시키고 있으며, 해양 및 수산학자들은 생태계의 변화를 정확하게 예측하기 위한 노력을 기울이고 있다. 그리고 미래의 해양자원관리는 적절한 양의 생산과 함께 생태계를 건강하게 유지하려는 생태계관리(ecosystem management)가 강조되는 방향으로 발전할 것이다.

우리나라의 세 해역에서 공통적으로 나타나는 해양의 물리현상 중에, 전선의 형성은 수산자원의 변동에 매우 중요할 것이다. 두 개의 상이한 수괴가 만나는 전선을 경계로 하여 해양의 생산력이 달라지는데, 동해에는 한류와 난류가 만나 북위 약 40도와 평행한 극전선이 형성되고 많은 와류(eddy)가 그 부근에서 생성된다. 남해에는 해안과 도서 부근을 흐르는 연안류와 외양의 대마난류 사이에 강한 수온 전선이 형성되고 있으며, 서해에는 연안역과 외양역 사이에 조류의 차이로 인하여 형성되는 전선이 있다. 남해와 서해에서는 이들 전선이 대체로 해안선과 평행을 이루고 있다. 아직, 우리나라 해역에서 전선의 형성과 해양 생산력의 관계에 대해서

구체적으로 연구된 바 없으나, 전선 부근에서 생물학적 활동이 매우 왕성하고(그림 53 참조), 동물플랑크톤의 출현량이 높게 나타나는 것으로 보아(Kang and Kim, 2002), 어류자원의 가입도 전선의 형성과 밀접한 영향이 있으리라 생각된다.

우리나라의 해양도 급격히 변화하고 있는데, 바다의 환경변화에 매우 빠르게 반응하는 소형표층어류의 급격한 증가와 냉수 어종의 감소는 우리가 피부로 느낄 수 있는 현상들이다. 더욱이, 최근에 들어와 육지에서는 양식업이 급성장을 하고 있지만, 아직 기후변동에 대비하는 양식정책은 고려되지 않고 있다. 한반도 주변 해역에서의 전선 형성, 용승류 변화 등의 물리적 현상이 좀 더 자세히 밝혀져야 하며, 이러한 환경 현상이 지역 생태계 및 수산생물과 어떻게 관련이 있는지 규명하여야 수산자원이 효율적으로 관리될 수 있다. 해양의 제반 물리화학적 현상, 생태계 변동, 수산자원의 관리 등이 종합적으로 연구되어야 할 시점이다.

## 2. 동해 연안해조류의 분포와 환경특성

최근 우리나라 연안에는 엽상해조류가 줄어들고 석회조가 증가하는 갯녹음 현상이 크게 나타나 어민들의 생활에도 어려움을 겪고 있다. 이러한 이유는 아직 명확하게 규명되지 않았으며, 자연 해황의 변화에 의한 영향과 인간활동에 의한 연안오염에 의하여 갯녹음 현상이 가속화되고 있다고 보고 있다. 동해의 해황이 바뀌면서 동해연안에 분포하는 해양생물의 분포도 많은 변화가 이루어지고 있는데, 동해는 남, 서해안과는 달리 난류와 한류가 만나는 해역으로 해황의 변화를 어느 해역보다 잘 파악할 수 있는 곳이다. 지구의 온난화 등에 의한 쿠로시오 난류세력이 확장이나 연안 오염으로 해서 연안 수산자원생물이 줄어들고 있으며, 해조류는 저서생물로 착생하여 분포하기 때문에 환경의 총체적 상태를 나타내는 지표생물로서 해양환경의 변화를 모니터링하는데 적합한 것으로 알려져 있다.

1980년대 이후 강원도 연안에서 해조분포에 대한 연구가 조간대를 중심으로 활발히 이루어지기 시작하였다. 동해연안은 단조로운 해안으로 이루어지며 조간대가 넓게 형성되지 못하므로 잠수에 의한 조하대 연구가 이루어지기 시작하였다. 이 연구에서는 기후변동과 관련하여 1970년 이후 해양환경의 변동에 따른 시대별 해조류의 분포 특성과 동해의 해역별 해조상과 현존량을 분석하였다.

### 가. 연구수행 방법

동해연안 해조류 분포 특성의 조사는 북쪽은 DMZ 연안 고성외 저도어장에서 남쪽에는 울산에 이르는 해역에서 이루어졌다. 시대별 조사는 1966년(Kang)이 한국

연안 해조류의 분포연구 이후 최근까지의 자료와 문헌에서 분석하였다. 또한 해역별 조사는 동해연안은 여름에는 난류, 겨울에는 한류의 영향이 크게 미치는 해역으로 한류성 해조가 분포하는 것이 특징이다. 동해연안을 한류의 영향이 크게 미치는 강릉 이북을 북부 그리고 동해와 삼척해역을 중부, 그 이남을 남부로 나누어 동해연안의 해양환경 특성과 더불어 해조분포 특성을 분석하였다. 동해안의 북부에서 남부에 걸쳐 DMZ(고성 저도어장), 양양, 강릉, 삼척, 울산해역에서 해조상과 현존량 자료를 분석하였다 (그림 57).

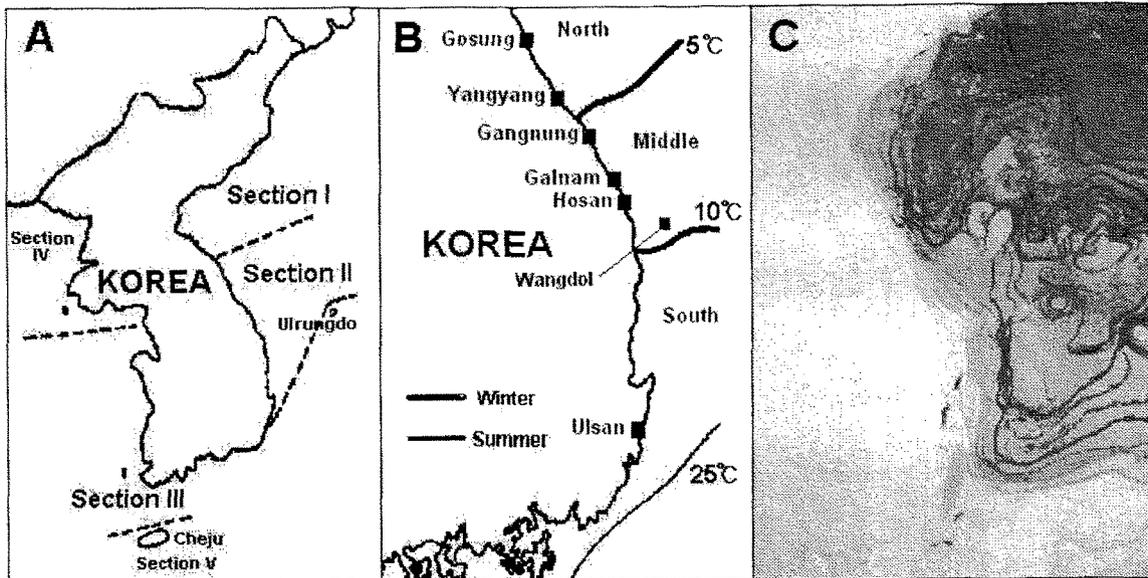


그림 57. 동해연안에서 해조류의 분포특성을 조사한 지점

(A: 한반도의 해조분포 구역, B: 동해연안의 분포구역, C: 동해연안의 해저지형)

조사방법은 조사지역의 연안선에 수직방향으로 line-transect를 설정하여 방형구(50Cm × 50Cm)를 차례로 놓아가며 출현하는 해조류의 종 조성을 기록하였고 방형구에 출현한 해조를 채취하여 연구실에서 분석하였다. 채집한 표본의 동정작업은 10% 포르말린-해수용액으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 각 방형구별로 채집된 해조류는 실험실에서 담수로 충분히 씻고 종류별로 구분하여 습중량의 무게를 0.01g 수준까지 측정하여 단위면적당(wet weight in g/m<sup>2</sup>)무게로 환산하였다. 종순위는 방형구별로 측정된 출현종의 생중량을 종별로 합한 값을 순위에 따라 나타내었다.

#### 나. 시대별 해조류의 분포특성 분석

우리나라의 해조류의 분포는 Kang(1966)이 한반도의 해양환경의 특성을 고려하여 5개 구역으로 나뉘었다. 동해안은 원산만 이북의 동해북구와 그 남쪽의 울기곶까지 동해남구로 구분한 바 있다. 이때 우리나라에 분포하는 해조류 414종 중에서 동해남구에 분포하는 해조류는 196종(남조 3종, 녹조 25종, 갈조 48종, 홍조 120종)으로 정리하였다. 다른 해역과 달리 한류세력이 미치는 곳으로 북방계가 10% 정도 출현한다고 분석하였다. 동해연안 해조류에 대한 연구는 1980년대 이후 정성, 정량적인 생태 연구가 활발히 이루어졌는데 부(1987)는 강원해역 해조류의 분포에서 남조 9종, 홍조 145종, 갈조 55종, 녹조가 22종 모두 231종이 분포한다고 정리한 바 있으며(그림 58), 강원지역에 분포하는 출현종중에서 삼나무말(*Cocophora langsdorfii*), 개다시마(*Kjellmaniella crassifolia*), 마른나무(*Tichocarpus crinitus*), 참빗풀(*Odonthalia corymbifera*) 종으로 나타내었다. 이들 종류는 한류성으로 동해연안의 표징종으로 나타내고 있다.

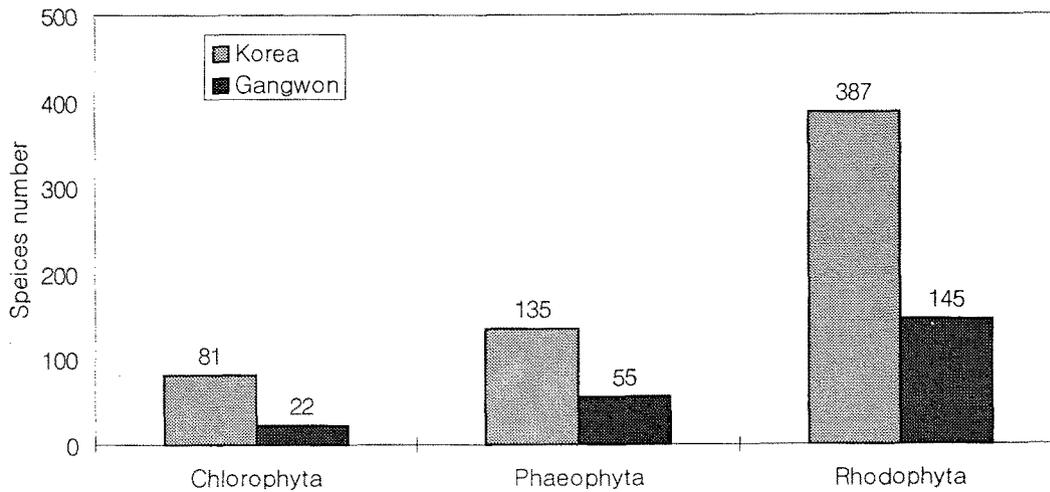


그림 58. 우리나라 전체와 강원도 연안에 출현하는 해조류의 종류 비교

북방계의 해조는 강원도 주문진과 강릉사이까지 남하하여 분포하는 것으로 알려져 있다. 그러나 구명쇠미역과 쇠미역은 경북까지 남하하여 분포하는 것은 표면에서는 한류세력이 미약해지고 하층으로 참류하는 경향이 있어 이와 같은 현상이 접심대 깊은 곳에 생육이 가능하게 된 것으로 생각해 볼 수 있다고 지적한 바 있다. 1976년 3월부터 8월에 걸쳐 조사에서 출현된 해조는 총 20종으로 이중 우뭇가사리, 미역, 도박 3종이 우점하였다(수산진흥원 사업보고, 1977). 그러나 2001년 5월과 9

월, 2회에 걸쳐 조사된 왕돌초의 암반생물상은 홍조류와 감태(*Ecklonia cava*), 쇠미역(*Costaria costata*) 종류가 우점하여 분포하는 것으로 밝혀졌다(박, 2002). 이는 제주도 해역의 난대역의 대표종인 감태와 한대성인 쇠미역이 공존하는 것으로 나타났다. 반면 연안에 분포하는 다시마(*Laminaria*)와 울릉도와 독도해역의 우점종인 대항(*Eisen bicyclis*)의 분포가 나타나지 않는다고 보고하였다. 이는 동해연안과 다른 식생을 보이고 있으며 또한 동해의 한가운데 위치한 독도해역과도 다른 독특한 외양성인 특징을 보이고 있다. 특히 25년이 경과한 시점에서 감태 종류가 새로운 종으로 이입되어 분포하게 된 것은 쿠로시오의 영향이 커지고 있다는 것을 단적으로 나타내고 있다고 볼 수 있다.

또한, 연안 생물자원을 증가시키기 위해 1960년대 후반에 일본 북해도에서부터 다시마의 포자를 이입시켜 동해연안에서 양식을 시도하였다. 양식산 다시마가 연안에 분포하기 시작하여 점차 확대되어 40년이 지난 현재는 강원도 어느 곳에도 일본에서 이입된 다시마가 자생하고 있다. 이 다시마의 분포로 성계의 먹이자원이 늘어나고 다시마를 채취하여 식용으로 하기도 하여 도움이 되고 있지만 몸체가 큰 다시마의 분포로 미역의 양이 줄어들고 다른 해조의 분포가 위축되고 있다. 뿐만 아니라 동해연안은 남, 서해안에 비해 빛의 투과가 좋아 수심이 깊은 50m 정도에 이르기 까지 해조가 분포하고 있다. 다시마의 이입현상으로 동해연안에 우점하는 대형조류인 미역, 모자반, 쇠미역, 구멍쇠미역과 수축과 확대를 반복하면서 생물적인 변화와 더불어 바다속 생태계가 변화되고 있다.

#### 다. 동해 연안의 해역별 해조분포의 특성

##### (1) 해조의 종조성 및 현존량 분석

동해안을 따라 울산부터 고성까지 분포하는 해조류를 조사하여 출현종과 분포특성을 살펴보았다(표 6).

##### - 고성 저도어장

무절석회조의 분포는 다소 있었으나 전체 다른 해조류와의 피도가 10% 이내로 갯녹음 현상이 다른 곳보다는 가장 적음을 알 수 있었다. 종 조성을 보면 녹조류에는 구멍갈파래와 청각, 갈조류에는 모자반, 구멍쇠미역과 다시마, 홍조류에는 지누아리, 미끌도박, 진두발, 우뭇가사리, 보라색우무, 붉은실, 비단풀 등 다양한 식생을 보였다. 이곳에는 말잘피 군락이 매우 발달하였다.

- 양양 남해

수심별로 출현종의 구성을 보면 조간대의 아래쪽 부분에서는 수심이 깊어질 수록 출현종수가 적게 나타났다. 계절별로 수심에 따른 출현종의 습중량이  $50\text{g}/\text{m}^2$  이상인 종은 2월에는 18종이 5월에는 14종이 8월에는 7종으로 여름철이 우점종 수가 가장 줄어들었다. 2월에 조사된 자료에서 미역은 수심이 0m, 3m, 5m에서 분포하여 수심별 분포대가 넓게 나타났다. 4월에는 미역, 다시마, 그물바탕말, 미끌도박, 돌가사리가 수심 10m에 분포하였다. 8월에는 서실이 우점종으로 새로 출현하였으며 다년생 모자반류인 알송이모자반과 돌가사리가 나타났다. 또한 구멍갈파래도 수심 5m에서 우점종으로 나타났다.

- 강릉

강릉시에 위치한 연곡천 하구의 연안에서 바깥쪽으로 갈수록 출현종수가 높게 나타났다. 하구 부근에는 녹조류는 납작파래, 구멍갈파래, 애기염주말, 갈조류는 참그물바탕말, 쌍발그물바탕말, 툫, 팽생이모자반, 진두발, 홍조류는 떨기나무붉은실이 조사되었다. 홍조류의 분포가 적고 녹조류와 갈조류가 비교적 많이 나타났다. 경포 십리바위 해역은 경포에서 떨어진 작은 섬으로 암반이 발달하여 있으며 해조식생이 다양한 곳이다. 외양의 영향을 직접 받으므로 외양성인 홍조류도 많이 분포하며 조하대도 완만한 경사로 이루어져 다양한 수직분포를 보여준다. 수심 10m 이하에도 *Laminaria* 종류가 우점하며 수심 20~30m 에는 *Kjellmaniella* 종류가 분포하며 *Agarum* 종류는 다시마류보다 더 깊은 곳에 분포하고 있다.

- 삼척갈남

갈남의 경우 수심 3m 이하는 거의 조사면적의 80% 이상 독점적으로 석회조류만이 분포한다. 그러나 조간대에서는 해조식생이 비교적 다양하게 나타났으며 수심 1m까지는 빈약한 식생을 보였다. 수심 1~2m에서 10여 m에 이르는 조하대에서 석회조류가 우점하고 엽상형 해조가 거의 없는 상태이기 때문이다. 그러나 조간대와 수심 1m에 이르는 곳은 매우 식생이 양호하였다. 특히, 2002년 봄철에 들면서 식생이 회복되는 경향을 보였다. 봄철에 팽생모자반(*Sargassum horneri*)이 매우 무성하여 4월과 5월에 현존량이 각각  $16\text{kg}/\text{m}^2$ ,  $27\text{kg}/\text{m}^2$ 으로 높게 나타났다. 연중 우점하여 나타난 종은 떡창각(*Codium adhaerens*), 참그물바탕말(*Dictyota dichotoma*), 우뭇가사리(*Gelidium amansii*), 도박(*Pachymeniopsis elliptica*), 부챗살(*Gymnogongrus flabelliformis*) 종류였다.

- 삼척호산

호산연안은 갯녹음이 심하게 된 곳으로 팽생이모자반(*Sargassum horneri*)이 수심 5m 에는 1 kg/m<sup>2</sup> 이상, 저조선에는 5~7kg/m<sup>2</sup> 로 한 종에 의해 매우 우점하여 나타났다. 8월과 10월에서는 모자반이 쇠퇴하여 우점종은 우뭇가사리(*Gelidium amansii*) 종으로 나타났다. 우뭇가사리종은 조하대에 석회조 식물에 상관없이 계절에 큰 변동없이 나타났다. 갯녹음해역에서의 해조군집의 특성은 출현종은 빈약하였으나 팽생이모자반, 우뭇가사리와 석회조류(Melobesioideae)가 대표적인 종으로 나타났다. 그외에 홍조류는 미끌도박(*Grateloupia turuturu*), 도박(*Pachymeniopsis elliptica*), 참곱슬이(*Plocamium telfairiae*), 분홍잎(*Acrosorium*), 진두발(*Chondrus ocellatus*) 종류가 나타났다.

- 울산해역

울산해역의 암초에서 녹조류가 구멍갈파래와 떡청각, 갈조류에는 개그물바탕말, 툫, 지충이, 우뭇가사리, 작은구슬산호말, 애기가시덤불, 참도박, 불등풀가사리, 부챗살, 애기돌가사리, 마디잘록이 개서실이 분포하였다. 이중 지충이, 툫, 작은구슬산호말, 마디잘록이가 우점종으로 나타났다.

표 6. 동해연안 해역별 해조류의 분포특성

Speices	Gosung (Feb., 02)	Yangyang (Feb. 01)	Gangnung (Nov. 01)	Galnam (Feb. 02)	Hosan (Oct. 02)	Ulsan (Oct. 01)
<b>CHLOROPHYTA (녹조류)</b>						
<i>Enteromorpha linza</i> (잎파래)		+		0.4		
<i>Enteromorpha prolifera</i> (가시파래)		+	20.8			
<i>Enteromorpha compressa</i> (납작파래)		+				
<i>Ulva japonica</i> (초록갈파래)					670.4	
<i>Ulva pertasa</i> (구멍갈파래)	12.8	82				56.0
<i>Caulerpa okamurae</i> (옥덩굴)		+	+			
<i>Chaetomorpha sakaii</i> (사카이대마디말)					10.4	
<i>Codium adhaerens</i> (떡칭각)				108.4	52.0	
<i>Codium fragile</i> (칭각)		+				56.0
<i>Derbesia marina</i> (초록영킨실)		+				
<i>Cladophora sp.</i> (대마디말)		14				
<b>PHAEOPHYTA (갈조류)</b>						
<i>Ectocarpus arctus</i> (납작솜털)		+				
<i>Sphacelaris sp.</i> (갯쇠털)		+	4.0			
<i>Colpomenia bullosa</i> (긴불레기말)		+		32.8		
<i>Colpomenia sinuosa</i> (불레기말)	266.4			8.0		
<i>Petalonia fascia</i> (개미역쇠)		+				
<i>Enderachne binghamiae</i> (미역쇠)	38.4			52.8		
<i>Scytosiphon lomentaria</i> (고리매)		+				
<i>Undaria pinnatifida</i> (미역)	554.8	220				
<i>Agaruum cribrosum</i> (야키시리 구멍쇠미역)				*		
<i>Costaria costata</i> (쇠미역사촌)	340.8	120	19.2			
<i>Laminaria religiosa</i> (애기다시마)	5,299.2		*			
<i>Dyctyotia dichotioma</i> (참그물바탕말)	127.2	+	1.6	279.6	0.4	
<i>Dictyota divaricata</i> (쌍발그물바탕말)		45				
<i>Dilophus okamurae</i> (개그물바탕말)			91.6			56
<i>Coccophora langsdorfii</i> (삼나무말)				100.8		
<i>Hizikia fusiformis</i> (툇)		46	*	553.6		76
<i>Sargassum Confusum</i> (알송이모자반)	609.2		87.6	1,152.8	44.0	
<i>Sargassum fulvellum</i> (모자반)	99.2					
<i>Sargassum horneri</i> (팽생이모자반)			32.8			
<i>Sargassum thunbergii</i> (지충이)		68	18.8	55.6		472
<i>Desmarestia ligulata</i> (산말)	4.0					

(표 6 계속)

Speices	Gosung (Feb.)	Yangyang (Feb.)	Gangnung (Nov.)	Galnam (Feb.)	Hosan (Oct.)	Ulsan (Oct.)
<b>RHODOPHYTA (홍조류)</b>						
<i>Porphyra surborbiculata</i> (둥근돌김)		20				
<i>Gelidium amansii</i> (우뭇가사리)	47.6	+		300.0		480
<i>Gelidium pusillum</i> (실우뭇가사리)						
<i>Gelidium sesquipedale</i> (가시우뭇가사리)					528.0	
<i>Pterocladia tenuis</i> (개우무)			*			
<i>Amphiroa ephedraea</i> (에페드라게발)		+				
<i>Corallina pilulifera</i> (작은구슬산호말)	225.2	42				400
<i>Melobesioideae</i> (무절석회조)		+	13.2			
<i>Gymnogongrus flabelliformis</i> (부챗살)	208.0	+	25.2			
<i>Carpopeltis cornea</i> (붉은부챗살)				40.0		
<i>Grateloupia filicina</i> (참지누아리)		+	20.4			
<i>Grateloupia fprolongata</i> (개지누아리)				6.4		
<i>Grateloupia okamurae</i> (털지누아리)		+				
<i>Laminaria japonica</i> (다시마)	1,481.6		*			
<i>Grateloupia sparsa</i> (명주지누아리)	4.4		*			
<i>Grateloupia turuturu</i> (미끌지누아리)		88				
<i>Caulacanthus okamurae</i> (애기가시덤불)		+	20.4			36
<i>Pachymeniopsis elliptica</i> (참도박)	14.0			46.4		56
<i>Prionitis crispata</i> (주름까막살)				5.6		
<i>Prionitis cornea</i> (붉은까막살)					6.4	
<i>Gloiopeltis furcata</i> (불등풀가사리)				89.6		72
<i>Gloiopeltis tenax</i> (풀가사리)	13.6					
<i>Callophyllis japonica</i> (벚붉은잎)				61.2		
<i>Plocamium leptophyllum</i> (가는곱술이)				88.8		
<i>Plocamium telfairiae</i> (가는곱술이)					1.6	
<i>Gymnogongrus flabelliformis</i> (부챗살)				3.6		360
<i>Chondrus ocellatus</i> (진두발)	24.4	+				
<i>Gigartina intermedia</i> (애기돌가사리)				34.4		76
<i>Lomentaria catenata</i> (마디잘록이)				842.4		184
<i>Lomentaria hakodatensis</i> (애기마디잘록이)			57.6	3.2		
<i>Campylaephora crassa</i> (굵은석목)			23.2			
<i>Ceramium sp.</i> (비단풀)				2.8		
<i>Acrosorium falbellatum</i> (부채분홍잎)			87.6			
<i>Acrosorium polyneurum</i> (잔금분홍잎)				294.0		
<i>Dasya sessilis</i> (민자루다홍풀)	15.2					
<i>Chondria crassioaulis</i> (개서실)		40		282.4		64
<i>Chondria sp.</i> (서실)				40.8		
<i>Laurencia intermedia</i> (검은서실)		+				
<i>Laurencia nipponica</i> (큰서실)				75.2		
<i>Polysiphonia sp.</i> (붉은실)		145	10.4	108.4		
<i>Symphocladia latiuscula</i> (참보라색무우)		+	2.4			56
Total	9346.0	930.0	536.8	4670.0	1313.2	772.0

(2) 수직분포에 따른 종다양성 군집분석

방향구별로 측정된 출현종의 생중량을 종별로 합한 값을 순위에 따라 수심별로 그림 59에 나타내었다. 수심이 깊어질수록 종순위를 나타낸 곡선의 기울기가 급하며 종수가 적은 반면 조하대 상부인 수심 0, 3m에서 종수가 많고 종간 차이가 크지 않게 나타나 종다양성이 높다고 볼 수 있다. 조간대에서는 해조의 분포수직층위가 낮을수록 종다양성이 높게 나타나고 수직층위가 높을수록 종다양성이 낮게 나타난다.

본 조사에 나타난 바와 같이 수심이 깊어질수록 종다양성이 낮게 나타나 해조분포의 종다양성은 저조선 또는 조하대 상부에서 가장 높다고 볼 수 있다. 조간대에서는 해조의 분포가 수직층위별로 공기 중에 노출되는 시간이 다르므로서 이에 따른 건조 등의 환경스트레스가 주요 요인이 될 수 있다. 수심 0m에서는 2월에 상위종으로 미역, 폴리시포니아, 4월에는 알송이모자반, 구멍갈파래, 3m에서는 2월에 상위종으로 지충이, 불레기말. 5m에서는 2월에 알송이모자반, 4월에는 디크티오타, 8월에는 애기다시마로 나타났다. 삼척 호산해역에서는 팽생이모자반이 2곳 모두 가장 우점하였다(그림 60). A 지점에서는 100g/m<sup>2</sup> 이상인 종은 구멍갈파래, 그물바탕말, 우뚝가사리 종류였으며 B 지점에서는 다시마(*Laminaria japonica*), 우뚝가사리, 붉은잎(*Callophyllis*) 종류였다. 강원북부인 양양남애와 남부인 삼척 호산 해역을 비교하면 북부인 남애해역의 해조상이 풍부하게 나타나는 것으로 보여 남부인 삼척 호산해역은 갯녹음 현상의 발생으로 해조의 식생이 매우 빈약한 것으로 나타났다.

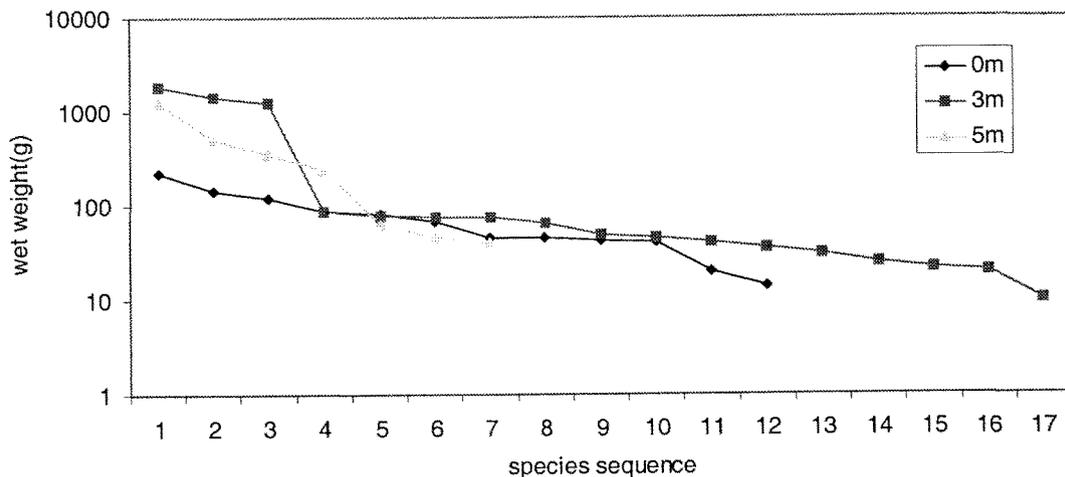


그림 59. 강원 북부 양양해역의 수심별 해조 종순위 곡선

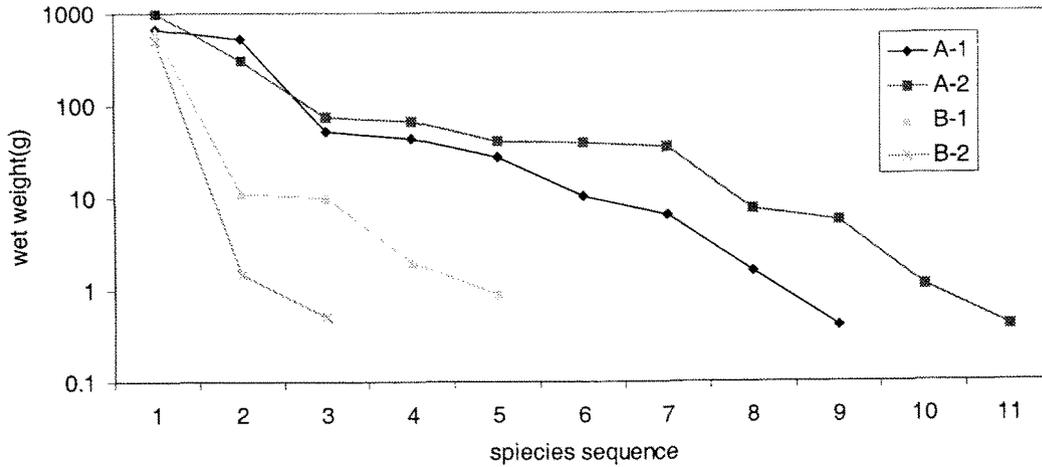


그림 60. 강원남부 호산해역의 지점별 종순위 곡선

### 3. 동물플랑크톤 변동 연구

동해 생태계의 영양단계는 크게 1차 생산자, 1차 소비자, 2차 소비자, 최고 소비자의 4단계로 나눌 수 있다. 1차 생산자는 잔해물, 식물플랑크톤, 저서식물로 그룹화되고, 1차 소비자는 동물플랑크톤, 복족류, 표생동물, 내생동물 등이며, 2차 소비자는 두족류, 표층·중층·저층 유영어류, 저서어류가 있다. 그리고 최고 소비자는 상어류로 이해되어진다.

#### 가. 동물플랑크톤의 장기변동에 대한 EOF 분석

수산경제에서 매우 중요한 어획량에 직접 영향을 미치는 먹이생물인 동물플랑크톤의 변동양상을 분석, 파악하기 위하여 국립수산과학원의 해양 정점 관측자료를 이용하였다. 본 연구에서는 1968년-1996년까지 매년 6회(2, 4, 6, 8, 10, 12월), 동해 35개 정점에서 실시된 해양관측 자료를 이용하였다. 각 정점별 동물플랑크톤의 경년 변동을 보기 위하여 1977년~1996년까지의 격월별 동물플랑크톤 생체량 자료로 EOF 분석을 시도하였다. 연평균 동물플랑크톤의 공간분포는 남에서 북, 연안에서 외양으로 갈수록 증가하는 경향이 있었다. EOF의 첫번째 모드는 동물플랑크톤 생체량 분산의 74.2%를 설명하였다. 80년대에는 동해 중부해역(울릉도 부근)의 동물플랑크톤 생체량이 다른 지역에 비하여 다소 낮다가 90년대 초반에 급격히 증가함을 보였다(그림 61). EOF 분석 결과, 90년대 동해에서 나타나는 높은 동물플랑크톤 생체량은 전 해역에서의 증가 현상을 의미하기보다는 울릉 해역에서의 급격한 생체량

증가가 원인인 것으로 생각된다.

요각류는 전체 동물플랑크톤 생체량의 변동과 다소 다르게 나타났다. 요각류는 대체로 동해 중부해역에서 번성하였으며, 조사기간동안 최대 번성은 90년에 나타났다. 90년 이후 중부해역에서 요각류의 감소 현상은 동물플랑크톤의 종조성 변화를 의미하는 것으로 이해된다(그림 62).

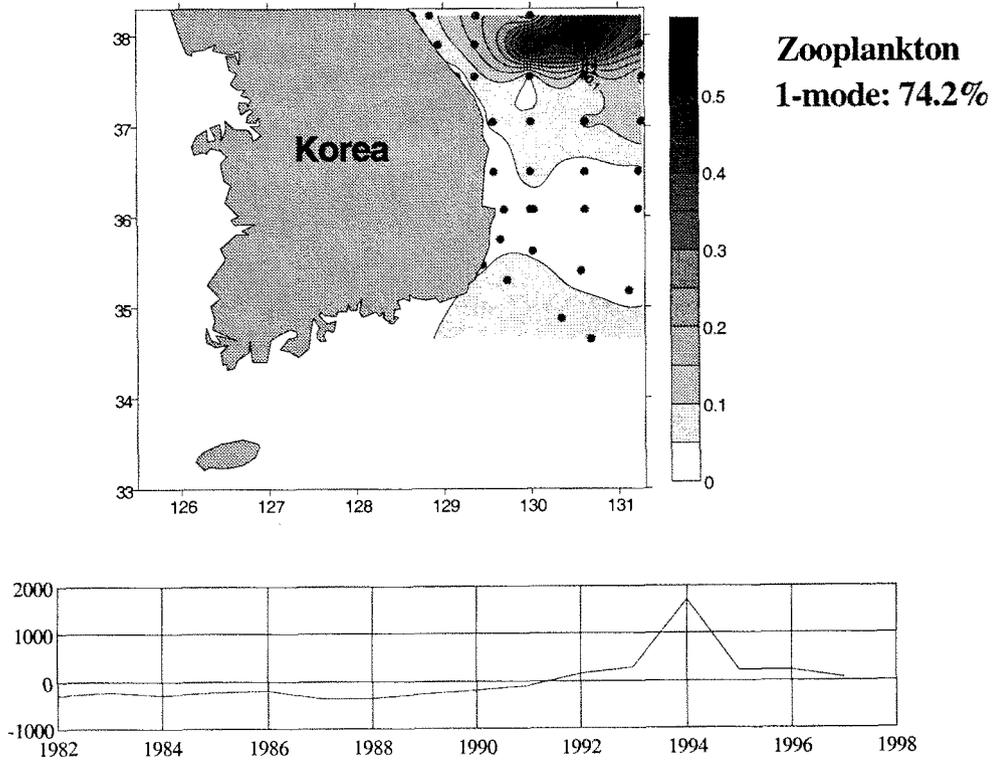


그림 61. 동해 동물플랑크톤 생물량의 EOF 1모드와 시간계수, 총분산의 74.2%를 설명함

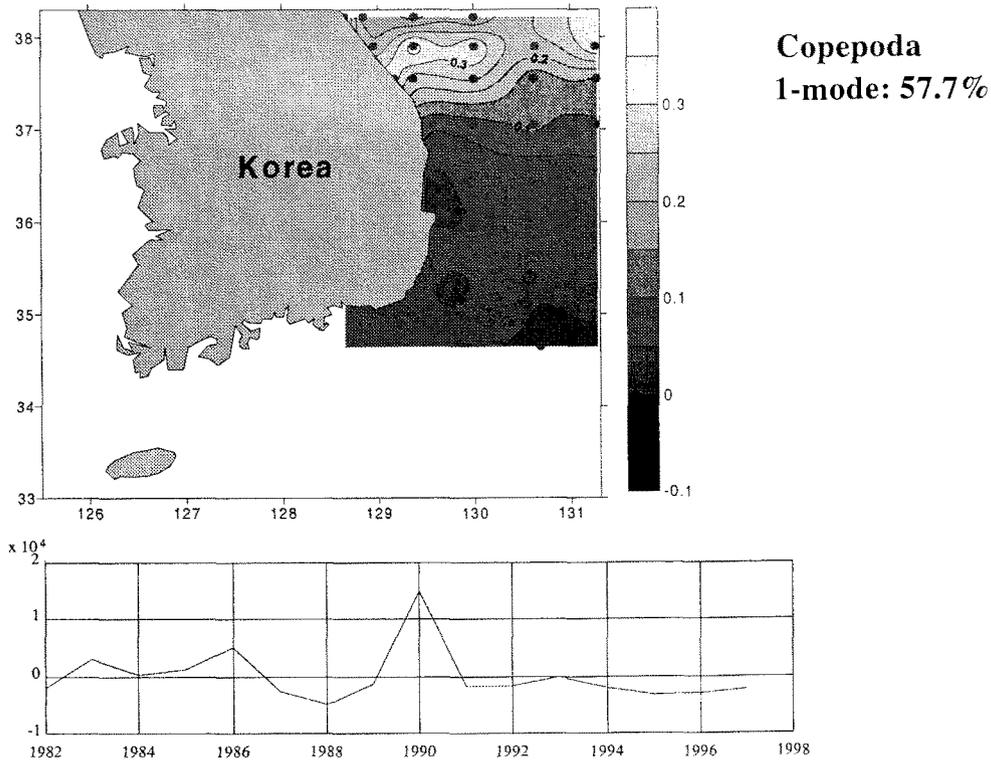


그림 62. 동해 동물플랑크톤 중 요각류 개체수의 EOF 1모드와 시간계수, 총분산의 57.7%를 설명함

#### 나. 동물플랑크톤의 생산력 변동

동물플랑크톤의 생산력을 정량화하기 위한 방법을 개발하기 위하여, 과거에 동해에서 채집된 동물플랑크톤 자료를 재분석하였다. 한국 동해 남부 연안에 위치한 일광만의 한 개 정점에서 1991-1992년까지 1년간(29회의 현장 채집) 원추형 네트(구경 31cm, 망목 64 $\mu$ m)를 이용한 수직 채집을 통하여 얻어낸 요각류 *Acartia steuerei*의 각 유생단계별 개체수를 계수하였다(그림 63). 이들의 생산력을 성장률법에 의하여 재분석하였으며, 현장조사시 측정된 수온 및 엽록소 *a* 자료를 이용하여 대상 요각류의 생산력 변동과의 상관성을 고찰하였다. 요각류 각 유생단계의 생체량은 길이-무게 관계식 자료를 이용하여 환산되었으며, 각 유생단계의 순간성장률과 성체 암컷의 알 생산력은 관련 문헌을 통하여 추정하였다.

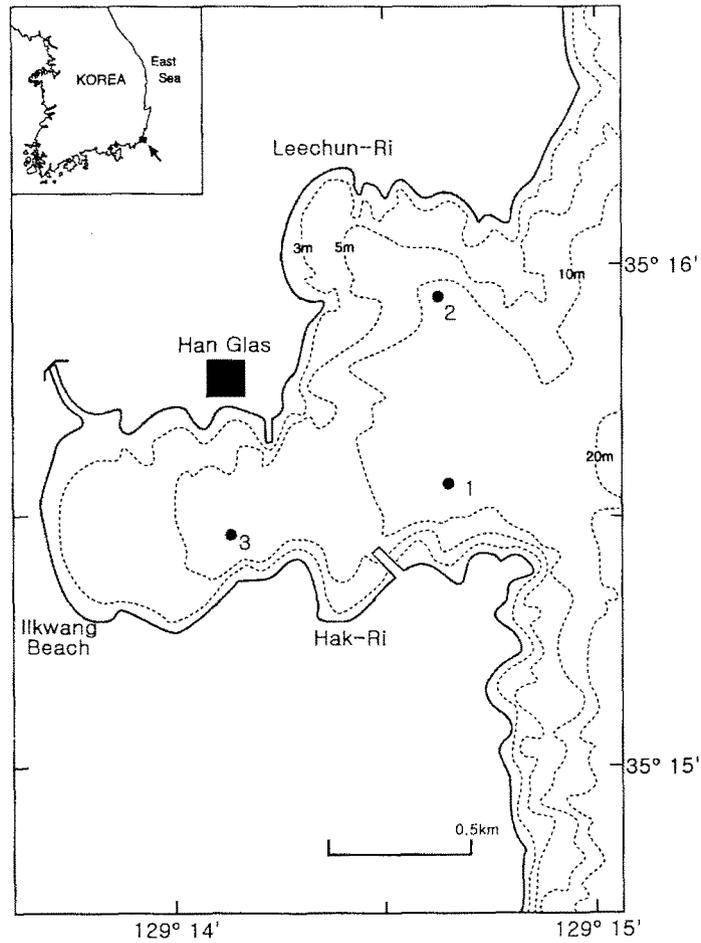


그림 63. 동물플랑크톤 연구를 위한 일광만의 해양 정점

일광만에서 대상 요각류인 *Acartia steueri*의 성체 또는 유생단계(nauplii와 copepodite)는 연중 플랑크톤으로 출현하였다. 개체수는 1991년 7월 15일에 가장 높았으며(8426 ind. m<sup>3</sup>), 11월 중순, 2월말, 5월에 작은 peak가 관찰되었다(그림 64). 각 유생단계별 출현 개체수는 조사기간에 큰 변화를 보였는데, 11월, 2월말, 5월, 7-8월에 peak가 관찰되었다(그림 65). 성체의 몸 길이는 계절에 따라 변하였는데, 온도가 높아질수록 몸 길이가 짧아지는 경향을 보였다.

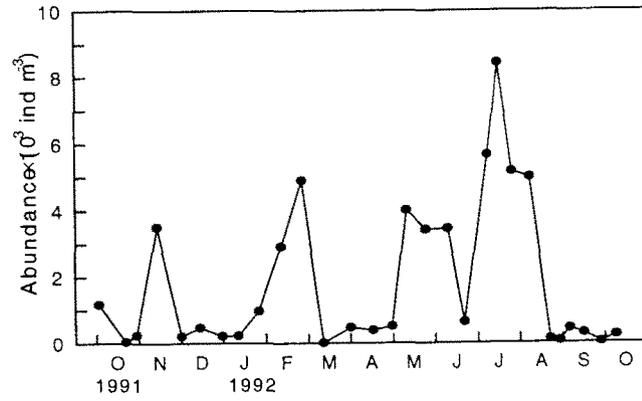


그림 64. 요각류 *Acartia steueri* (nauplii + copepodites + adults)의 개체수의 계절변동

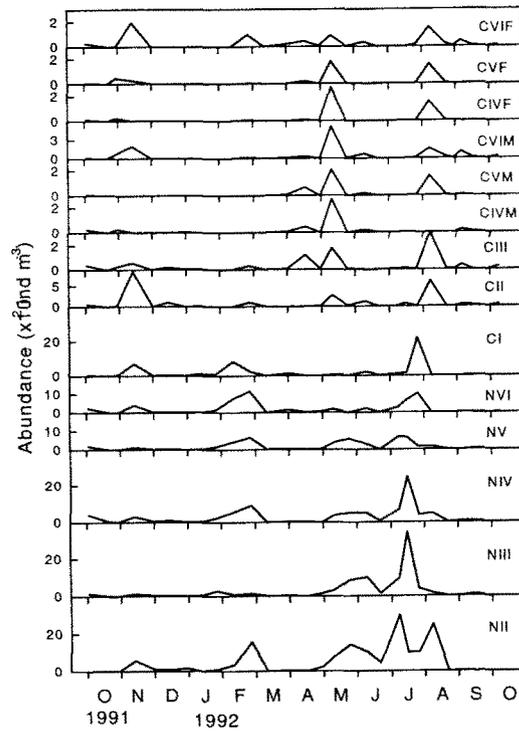


그림 65. 요각류 *Acartia steueri*의 각 유생단계별 개체수의 계절 변동

요각류의 길이 자료로부터 환산된 생체량을 기준으로 하여, 대상 요각류 개체군의 생체량의 계절변동을 보면, 11월, 2월말, 5월, 8월초에 peak가 관찰되었으며, 최고의 생체량은 1992년 5월 10일에 관찰되었다(그림 66A). 성장률법으로 추정된 대상 요각류의 일일생산력은 생체량의 계절변화 양상과 비슷하였지만, 최고의 일일생산력은 8월초( $0.46 \text{ mgC m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ )에 관찰되었다(그림 66B). 평균 일일생산력은  $69.08 \mu\text{gC m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ 이었으며, 연간 생산력은  $25.21 \text{ mgC m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ (또는  $166.41 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )이었다. 대상 요각류의 일일 생산력은 수온 또는 엽록소 *a*와 유의한 상관성이 없었다(그림 67와 68). 기초생산력에 대한 대상 요각류의 이차생산력의 비(ratio)인 먹이사슬효율(food chain efficiency)은 0.07%로 나타났다.

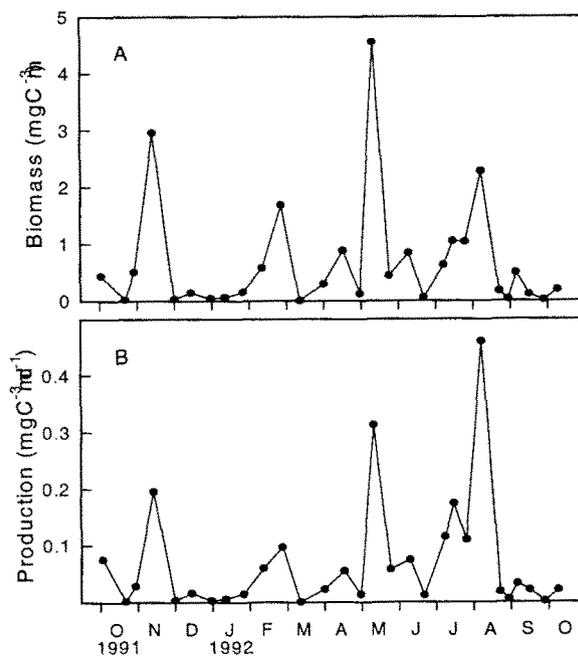


그림 66. 요각류 *Acartia steueri*의 생체량과 일일생산력의 계절변동

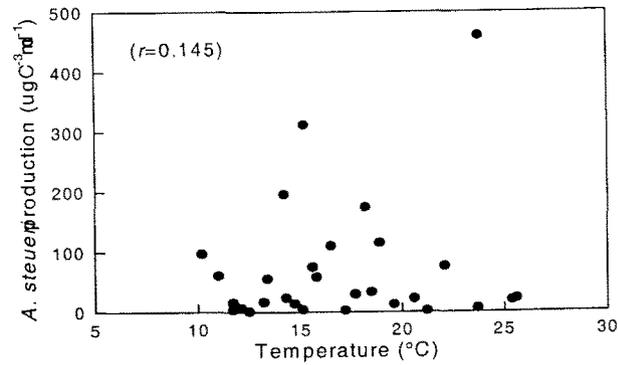


그림 67. 요각류 *Acartia steuerei*의 일일생산력과 수온과의 상관관계

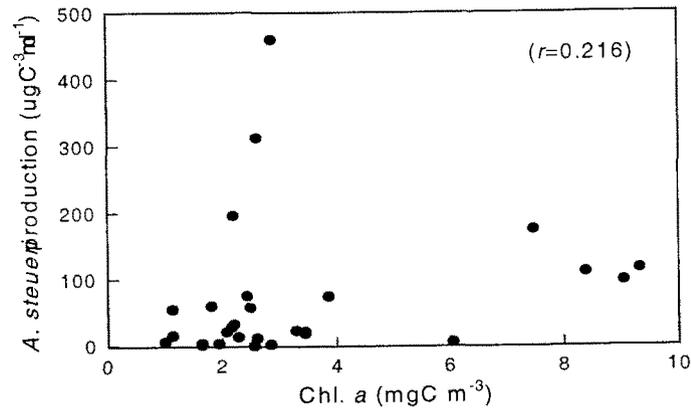


그림 68. 요각류 *Acartia steuerei*의 일일생산력과 엽록소 *a*와의 상관관계

#### 4. 하위영양준위 생물모델

##### 가. 모델구조와 통화

JGOFS는 1995년에 열린 모델링 workshop에서 다른 모델 간의 비교 문제를 집중적으로 다루었다. 워크샵 후 추가의 분석을 계속하여 보고서가 1997년에 출판되었으나 여전히 결론은 내리지 않고 있다. 여기서는 10개의 모델을 4개의 dataset에 적용하여 그 결과를 비교하는 것이 주 목표였다. 10개의 모델은 3-7개의 정상변수

를 가지고 있다. 그림 69-71에 이 중 3개의 모델 구조를 예시하였다. 그림 69는 가장 단순한 구조를 가진 Denman model로 질산염-식물 플랑크톤-동물 플랑크톤으로 정상변수가 설정되어 있다. 그림 70은 조금 더 복잡한 Doney모델로 Denman model에 쇄설물이 추가된 것이다. 이 모델에서는 엽록소의 수직구조를 다루기 위해 질소 대 엽록소 비율을 광량의 함수로 표현한 것이 특징이다. 최근 제안된 유사한 모델로 Edwards(2001)가 있다. 이 외에도 질산염외에 암모니아를 별도의 격실로 하거나 동물플랑크톤을 별도의 격실로 만들지 않은 경우와 같은 변형이 나머지 모델의 경우이다. JGOFS 워크샵에서 가장 복잡한 구조는 Fasham model을 차용한 7개의 정상변수를 가지는 모델이다(그림 71).

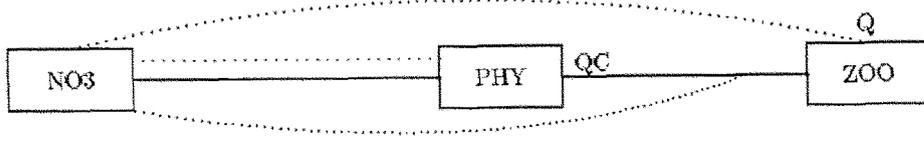


그림 69. Denman 모델의 구조(JGOFS, 1997)

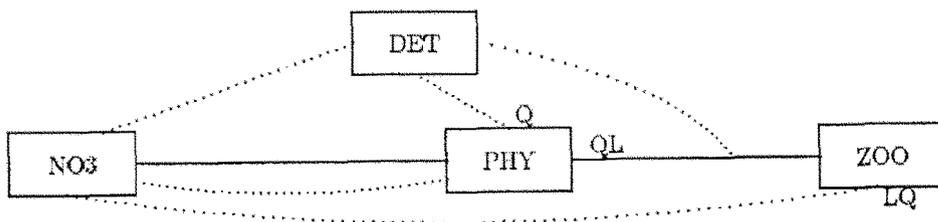


그림 70. NPZD 모델의 구조(JGOFS, 1997)

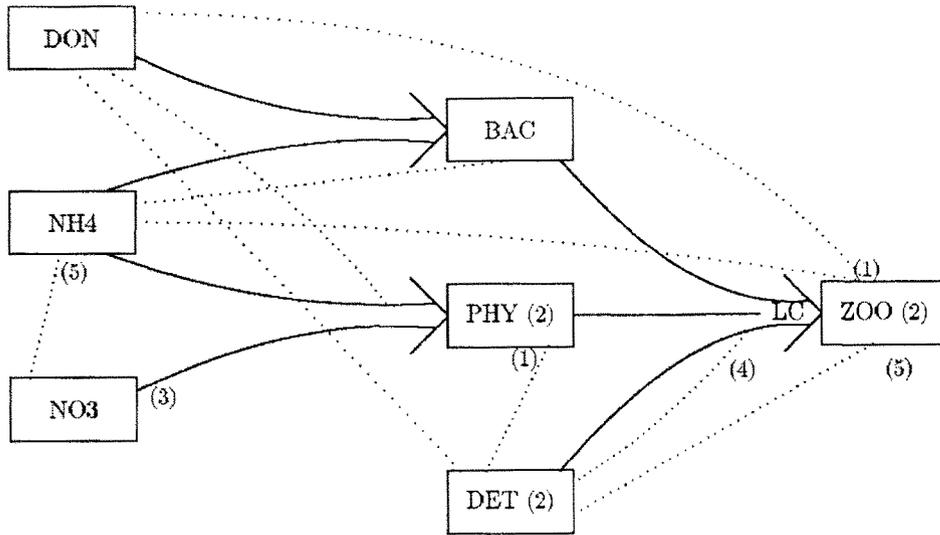


그림 71. Fasham 모델의 구조(Fasham and Evans, 1995)

애초에는 이들 10개의 모델을 각각 Station P, Eumeli, NABE, BATS 등 4개의 데이터세트에 적용하여 비교할 계획이었으나 자료에서 추출할 매개변수가 각각 달라 BATS 데이터세트에만 적용했다. 워크숍 후 사후분석 과정을 거쳐 1997년에 보고서를 내놓았으나 이렇다할 결론을 내리지 못하고 2001년 현재까지 답보상태에 있다. 이는 모델의 체계적 비교 문제가 얼마나 어려운가를 단적으로 보여주는 것이다.

JGOFS 모델들의 특성은 1) 모델통화(model currency)가 질소 하나라는 점과 2) 식물플랑크톤이나 동물플랑크톤이 각각 하나의 격실로 되어있고 분급구조(size fraction)를 별도로 나누지 않고 있다는 점이다. 반면에 PICES-GLOBEC 모델은 분급구조를 처음부터 최소한의 구조로서 명시하고 있다. GLOBEC에서는 생태계 구조와 에너지 전달이 주된 문제이기 때문이다. PICES에서는 JGOFS와 달리 모델 비교문제를 처음부터 주요 문제로 인식하고 공통된 구조를 유도하기 위한 방향을 설정하여 JGOFS와는 다른 접근을 피하였다. 1996년 workshop에서 전반적 문제를 다루며 2개의 식물 플랑크톤, 3개의 동물플랑크톤을 포함하는 최소구조를 제시한 바 있으며 2000년의 Nemuro workshop은 이러한 방향에서의 지속적인 노력이라고 볼 수 있다(그림 72).

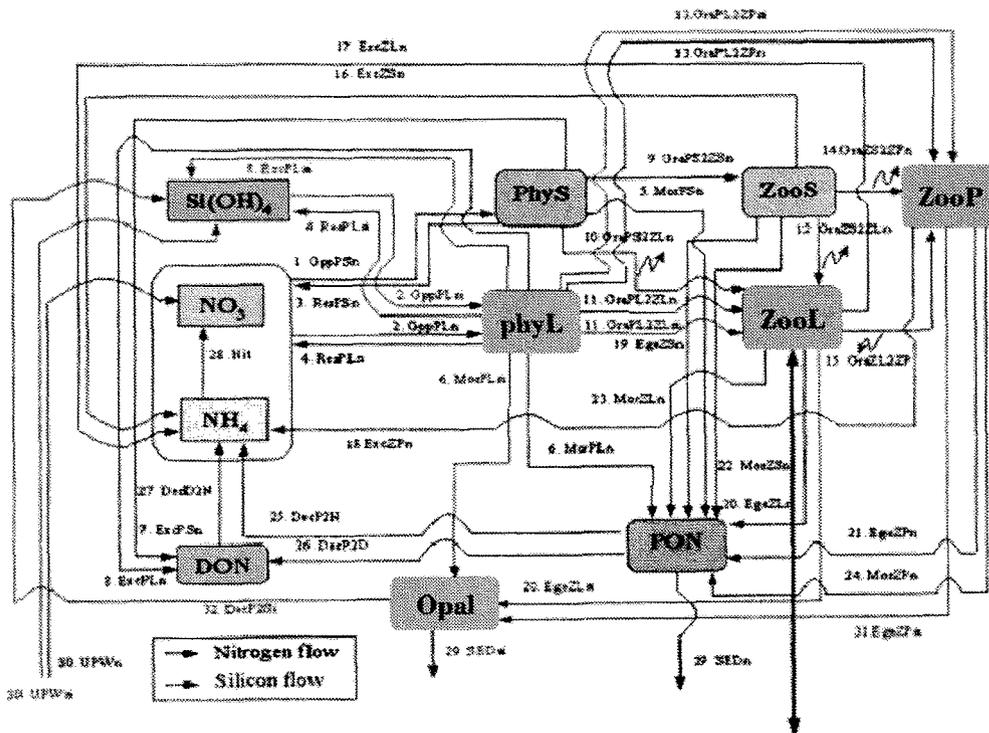


그림 72. PICES-GLOBEC 프로그램 중 Nemuro 모델의 구조(Kashiwai et al., 2000)

PICES 모델에서는 영양염 공급의 제한에 따른 분급별 또는 분류그룹 (특히 규조류 대 비규조류)별 비중의 변화를 추적하고자 하므로 질소와 규소를 통화(currency)로 규정하여 2개의 통화를 별도로 추적한다. 결과적으로 모델 구조는 JGOFS 모델에 비해 복잡하게 된다. 1996년 Nemuro workshop에서 동물플랑크톤에서 mesoplankton과 predatory plankton을 각각 3개의 연령집단으로 나눌 것을 제시한 바 이를 포함하게 되면 궁극적으로 모델 구조는 훨씬 복잡하게 된다.

나. 과정모델의 수식화

다음에서는 몇 가지 핵심적 과정에 대해 JGOFS나 PICES-GLOBEC model에서 채택하고 있는 process model을 검토하였다. 광합성 모델은 대개의 경우 Webb et al.(1974)의 지수모델이나 Michealis-Menten 타입, 또는 Smith(1936)의 quadratic 모델을 쓰고 있다. 이들 과정모델 간의 차이는 생태모델 전체의 행동에 큰 영향을 주지 못하므로 모델의 선택은 중요한 쟁점은 아니다.

$$P = P_m \left( 1 - e^{-\frac{\alpha I}{P_m}} \right)$$

$$P = P_m \left( \frac{\alpha I}{P_m + \alpha I} \right) = P_m \left( \frac{I}{I_k + I} \right)$$

$$P = P_m \left( \frac{\alpha I}{\sqrt{P_m^2 + (\alpha I)^2}} \right)$$

그러나  $P_m$ 의 온도 종속성은 아직 충분한 자료가 없어 불확실성이 큰 변수이다 (Behrenfeld and Falkowski, 1997). 영양염 흡수는 Michealis-Menten식이 널리 쓰이나 암모니아에 의한 질산염 흡수 억제는 무시하거나 지수함수를 사용하고 있다. 성장률은 광합성율과 영양염의 곱으로 나타내거나 둘중 최소함수를 취하는 것이 상례이다(Baird et al., 2001). Grazing은 전체 모델의 행동에 매우 민감한 영향을 주며 대개 Ivanov 모델이나 (지수포화모델) 아래와 같은 Holling type-III 모델을 쓰고 있다.

$$f(P) = \frac{f_m P^2}{S^2 + P^2}$$

#### 다. 다른 준위와의 연계

근자에 있어 미생물 순환고리 (Microbial loop)의 중요성은 강조되고 있으며 특히 에너지 전달 측면에 있어 큰 영향을 미칠수 있다. 기본적 모델은 Blackburn et al. (1997)이 제안한 바 있다. JGOFS 모델들은 이 부분을 대체적으로 무시하고 있다. 박테리아가 격실로 포함된 Fasham model 에서도 에너지 순환고리 측면 보다는 DON의 분해자로서의 역할 만이 강조되어 있다. 한편 PICES-GLOBEC 모델에서는 별도의 격실로 만드는 대신 영양준위 수를 결정하는 매개변수화하여 표현하고 있다. 즉, 대-소 식물플랑크톤의 비율과 연동하여 미세플랑크톤의 성장률을 조절하는 것으로 표현하고 있는 것이다. 아래 식에서처럼 미세 동물플랑크톤의 성장효율  $\beta_{zs}$ 를 미세식물플랑크톤의 비율의 함수로 표현하고 있다.

$$m = \left[ 1 + \alpha \left( \frac{PS}{PS + PL} \right) \right]$$

$$\beta_{zs} = 0.3^{(1+m)}$$

에너지 전달보다는 탄소의 유기화-무기화 과정에 초점이 맞추어진 JGOFS 모델

에서는 당연히 상위 영양준위와의 관계를 고려하지 않고 있다. 반면에 에너지 전달이 중요한 문제인 PICES-GLOBEC에서는 처음부터 이 문제를 명시하고 있으나 아직은 공식적으로 시도된적이 없다.

상위 영양준위로는 플랑크톤 식자인 멸치나 정어리가 플랑크톤과 연결이 될 것이나 이들의 시공간적인 규모가 플랑크톤 계와 상이하므로 이를 어떻게 연결하느냐 하는 것도 풀어야 될 문제이다. 가장 최근 PICES-GLOBEC model workshop (2003)에서는 개체군역학과 개체기반모델(Individual-Based Model)의 2가지 방향에서 시도하였다. 개체군 역학 모델 방식은 전 영역을 어류개체군 기준으로 몇 개의 구역으로 나눈 뒤 하위 영양준위모델의 출력치를 구역별로 평균하여 이를 토대로 개체군의 변화를 추적하는 것이다. 즉, 플랑크톤계 모델의 출력을 계절별 또는 월별로 적분하여 어류 시스템의 입력으로 하는 것이다. 두 번째 방법은 Lagrangian model로 어류 개체의 이동과 성장을 산란 후부터 추적하는 것이다. 개체들의 추적을 반복한 뒤 합하면 개체군 전체의 변화를 알 수 있게 된다. 이 2가지 방향은 기본 개념 단계에 있으며 아직 풀어야 할 기술적 문제가 남아 있으나 바람직한 방향을 제시하고 있음에 틀림없다.

#### 라. 동해 생태계 모델

동해의 하위영양준위 모델 구성에 있어 PICES Nemuro model은 시작점이 될 수 있을 것이다. 그러나 몇 가지 점에서 여전히 불확실하고 따라서 추후 연구가 필요한 부분이 있다. 2000년 11월과 2001년 11월에 한국해양연구원에서 수행한 울릉분지 조사에 따르면 전체 일차생산에 대한 Picoplankton의 비율은 18.2-75.4%로 넓은 범위에 걸쳐 있어 실제로 에너지 전달의 패턴이 크게 다를 수 있음을 보여준다. 따라서 적어도 2개의 식물플랑크톤 격실 구조가 필요함을 보여 준다. 한편 이러한 Picoplankton의 비율과 영양염 농도와의 관계를 비교할 때 규산염이나 무기질 소와는 별 상관관계를 보이지 않은 대신 무기인과는 뚜렷한 관계를 보여주었다(그림 73).

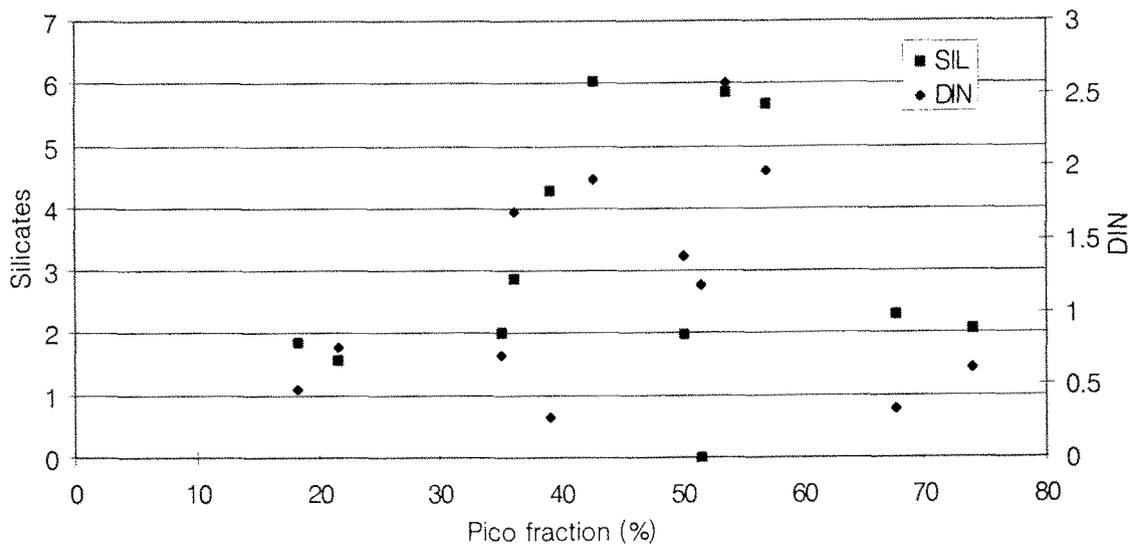
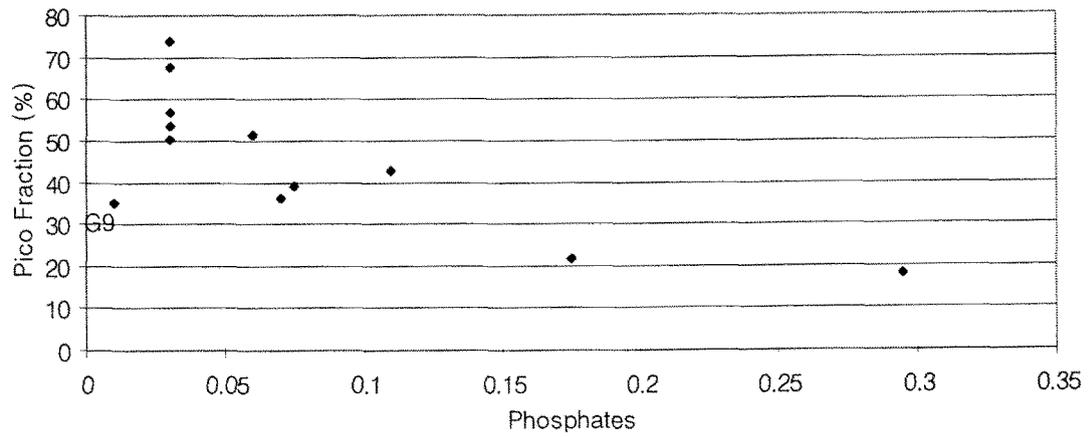


그림 73. 2000년 11월 2001년 4월 조사에서 얻은 결과

(a) pico-fraction과 무기인과의 관계

(b) pico-fraction과 무기질소, 규산염과의 관계

물론 위의 농도는 현장 농도이며 실제적으로 문제가 되는 것은 영양염의 플럭스이므로 인산염이 제한요인이라는 결론을 내리기에는 이르나 만약 그렇다면 무기질 소나 규산염외에도 무기인이 포함되어야 할 것이다. 추후 연구가 필요한 부분이다.

또다른 문제는 Pico-fraction의 비율이 크게 나타나 미세순환고리가 포함되어야 한다는 점이다. 미세순환고리를 어떤 식으로 전체 모델에 포함시킬 것인가 하는 것과 미세 동물플랑크톤과의 연계, 즉 포식 매개변수 같은 값들의 조사가 이루어져야 할 것이다.

이렇게 볼 때, 동해 생태계 모델은 PICES model과 유사한 구조로 시작할 수 있을 것이다(그림 74). 여기서 영양염의 격실과 이에 따른 통화는 규소나 인의 추가로 늘어날 수 있다. 동물플랑크톤의 연령 집단도 늘어날 수 있으며 이는 동해 하위 영양준위 구조에 맞추어 설정하게 될 것이다. 그러나 이러한 구조를 결정하기에는 현재로서 너무나 많은 부분이 조사되어 있지 않은 것도 사실이다. 또한 포식율이나 피-포식관계도 모르는 부분이 더 많다. 모델의 시험적 수립과 이의 수행은 이러한 미지의 분야의 우선순위를 결정하는데 도움이 될 것이다.

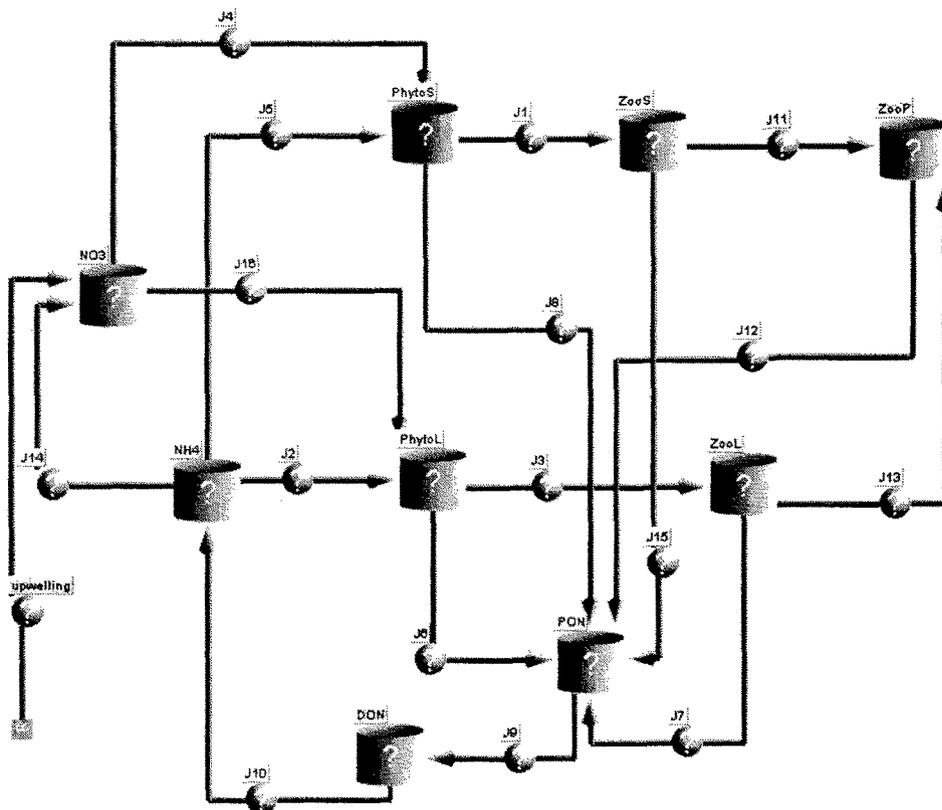


그림 74. 예비 동해 플랑크톤 모델을 위해 채택된 기본 구조.

## 5. 상위영양준위 생물모델

동해 생태계를 분석하기 위해 서식생물을 생태학적 특성에 따라 총 13개의 그룹으로 분류하였다. 여기에는 최고 포식자 (Apex predator), 저어류 (Benthic demersal fish), 저층부어류 (Benthopelagic), 중층부어류 (Mesopelagic), 표층부어류 (Epipelagic), 연체동물 (Mollusca), 표생저서동물 (Epifauna), 내생저서동물 (Infauna), 복족류 (Gastropoda), 동물플랑크톤 (Zooplankton), 해조류 (Marine algae), 식물플랑크톤 (Phytoplankton), 그리고 퇴적물 (Detritus)이 포함된다(표 7). 1970년대 생태계의 영양단계 및 먹이망 구조는 1980년대 생태계 구조와 거의 유사하게 나타났다(그림 75). 1차 생산자는 해조류, 식물플랑크톤, 퇴적물이었고, 1차 소비자는, 표생저서동물, 내생저서동물, 복족류, 동물플랑크톤이었고, 2차 소비자는 표층부어류, 중층부어류, 저층부어류, 저어류, 연체동물이었고, 최고소비자는 상어류와 밍크고래이다. 동해를 Ecopath 모델에 적용시키기 위해서는 본 해역에 서식하는 생물들의 자원생태학적 특성치 및 자원량, 그리고 식성연구에 대한 보다 세부적인 조사가 필요할 것이다.

표 7. 13그룹에 대한 1970년대와 1980년대의 영양 단계 추정치

Group name	Trophic level	
	1970년대	1980년대
Apex predator	3.4	3.4
Epipelagic	3.0	3.0
Mesopelagic	3.1	3.0
Mollusca	3.0	3.0
Benthopelagic	3.2	3.2
Benth. dem. fish	2.6	3.2
Epifauna	2.0	2.7
Infauna	2.0	2.0
Gastropoda	2.0	2.0
Zooplankton	2.0	2.0
Marine algae	1.0	1.0
Phytoplankton	1.0	1.0
Detritus	1.0	1.0

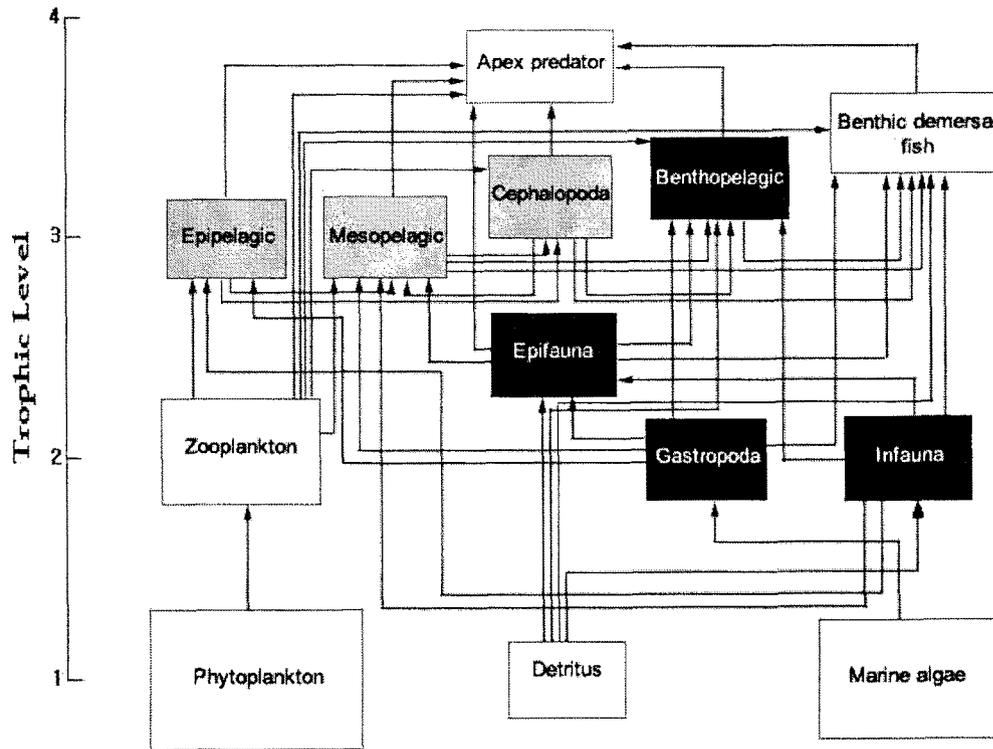


그림 75. 1970년대 동해에서의 각 생물종의 에너지 흐름. 검은색은 1980년대에 비해 생체량이 낮은 그룹, 회색은 생체량이 높았던 그룹을, 그리고 흰색은 거의 유사한 그룹을 나타내고 있음

## 5 절. 동해 수산자원의 변동

### 1. 동해 주요 수산자원의 장·단기 변동 특성

#### 가. 동해 수산자원의 구조 및 지리적 분포

한반도와 일본, 러시아에 의해 둘러싸인 동해는 반폐쇄해(semi-enclosed sea)로서 타타르(Tartar), 소야(Soya), 쓰가루(Tsugaru) 및 대한(Korea) 해협 등 4개의 해협에 의해 인근 바다와 분리되어 있다(그림 76). 동해는 면적이 1,070,000km<sup>2</sup>이고 (Preller and Hogan, 1998) 최고 수심은 3,700m, 평균수심은 1,350m이며 약 2% 밖에 안되는 좁은 대륙붕을 가지고 있다(Terazaki, 1999).

동해는 한반도 주변의 동·서·남해 중에서 가장 넓은 해역을 차지하고 있다. 경상남도에서 두만강 하구에 이르는 약 960km의 해안선을 가지고 있으며, 서해나 남해에 비해서 해안선이 단조롭고, 대륙붕이 좁은 것이 특징이다. 동해는 대마난류와 리만난류가 만나 생산력이 높고, 서식하는 생물도 다양하다. 대략, 동해에는 약 450여종의 어류가 서식하고 있다고 알려져 있으며, 깊은 바다에 사는 몇 종을 제외하고는 연안과 대륙사면 사이를 이동하면서 살며, 계절적으로 남북회유를 하는 종도 많다. 이중 상업적으로 이용 가능한 어종은 약 55종이다(김과 강, 1998). 북한에서 발간된 자료중 손(1980)은 동해의 북부에 서식하는 어종에 대해 비교적 잘 보고하고 있는데 이에 따르면 동해에 서식하는 어류는 21목, 126과, 257속, 376종이며, 이중에서 해수성 어류는 335종이며, 기수성 어류는 32종, 소하성 및 강하성 어류는 9종이다.

본 연구를 위해 1961~2000년 동안 동해의 수산자원 변동 및 어업현황은 총 어획량 및 주요 어종의 어획량 변동, 연도별 어업별 어획량 변동, 종 조성의 변동을 통해 분석하였다. 어획량 자료는 해양수산부 통계연보(1961~2000)와 배타적 경제수역 주요 어업자원의 생태와 어장(2000)을 이용하였다.

지난 40년간 우리나라 동해에서의 생산량을 주요 수산자원 그룹별로 보면 어류가 명태, 꽁치, 쥐치, 멸치, 까나리, 가자미류, 청어, 정어리, 고등어류 등 34종으로 55.9%, 두족류는 오징어, 갑오징어, 문어, 낙지 등 6종으로 22.9%, 갑각류는 붉은대게, 대게, 꽃게, 보리새우 등 4종으로 5.8%, 해조류는 미역, 다시마, 김, 파래 등 6종으로 5.6%, 패류는 소라고둥, 굴뱅이, 굴류, 백합류, 동죽, 피조개, 새조개, 개량조개 등 14종으로 1.3%, 기타 수산동물로는 해삼, 전복, 성게, 우렁쉥이 등이 3.1%를 차지하였다. 전체 생물종 중에서 오징어와 명태가 거의 50%를 차지하였다.

동해의 해면어업 생산량은 황해, 동중국해에서의 어획량보다 적은 편이다. 2000년 한국의 200해리 경제수역내의 일반 해면어업 총 어획량 119만톤 중 동해의 어획

량(강원, 경북)은 약 19만톤으로 16.2%를 차지하고 있다.

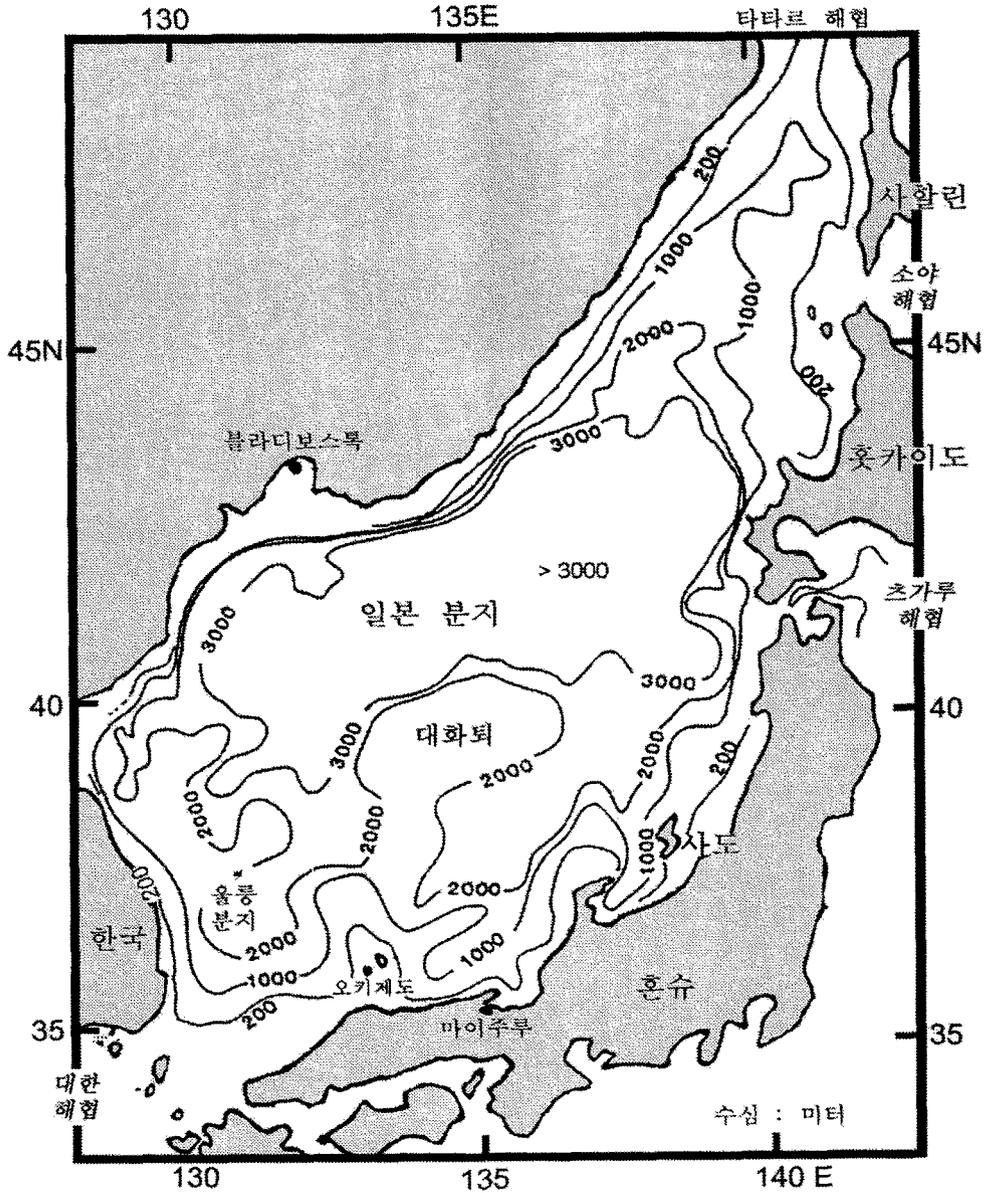


그림 76. 동해의 수역도

동해에 서식하는 어류들은 대부분 계절에 따라 회유하기 때문에 계절별로 다른 어장이 형성된다. 한반도의 남쪽에서 월동을 하고 난류를 따라 북상 이동하는 대표적인 난수종은 정어리, 멸치, 고등어, 꽁치, 방어 및 삼치 등이 있으며, 한류를 따라 남쪽으로 이동하는 종은 대구, 명태, 도루묵 등이 있다. 오징어는 동중국해, 황해, 동해 전역에 분포하며, 동해에서 어획되는 오징어는 동중국해에서 월동을 하고 남

해를 거쳐 7~8월까지 동해안을 따라 북상하며, 이 시기에 어획이 이루어진다(김 과 강, 1998). 붉은대게의 어장은 북위 37도를 중심으로 크게 남북으로 구분되어 있으며 37도 이북 해역의 어획량이 이남 해역보다 다소 높다. 붉은 대게는 3월 이후에는 중간수역인 대화퇴와 일본 서부해역에 서식하는 것으로 나타났다(김 등, 2000).

동해 서식어종의 지리적 분포를 살펴보기 위하여, 동해를 북부, 중부, 남부로 나누었다. 각 해역별로 서식어종의 수를 살펴보면, 북부 187종, 중부 343종, 남부 275종으로 난류와 한류가 만나는 중부해역에서 가장 많은 어종이 서식하고 있음을 알 수 있었다. 동해 전역을 살펴보면, 저층 서식어종이 많지만 남부지역의 경우 표층 어종의 분포 비율이 북부지역보다 상대적으로 높게 나타났다(표 8).

표 8. 동해의 해역 위치별 서식 어종

구분 지역	서 식 수 역			서 식 수 심		
	해수성	기수성	소하성	표층	중층	저층
북부 (187종)	152 (81%)	27 (14%)	8 ( 4%)	36 (19%)	11 ( 6%)	140 (75%)
중부 (343종)	305 (89%)	29 ( 9%)	9 ( 2%)	87 (25%)	57 (17%)	199 (58%)
남부 (275종)	252 (92%)	21 ( 8%)	2 (≒0%)	86 (31%)	64 (23%)	125 (45%)

#### 나. 연도별 어획량의 변동

##### (1) 연도별 총 어획량

동해는 한국, 북한, 일본, 러시아 등이 인접되어 있는 해역으로 1961~1990년 동안 이들에 의한 연도별 총 어획량은 1983년에 최고 334만톤에서, 1962년에 최저 104만톤의 범위였다(그림 77). 그러나 이 추정치는 북한과 러시아의 어획량이 명태의 자료 (Schuntov *et al.*, 1993) 만을 포함한 것이므로 이를 감안한다면 전체 어획량은 더 많을 것으로 추측된다. 동해에서 우리나라의 총 어획량 변동을 보면 1982년 최대 27만 5천톤에서, 1967년 최소 13만 2천톤의 범위를 보였다. 1976년 이후에는 어획량이 10년 주기의 증감을 반복하고 있다. 1980년대 어획량 감소의 원인은 명태의 어획량이 감소한데 기인한 것으로 보이며, 1990년대초 어획량의 증가는 오징어 어획량이 증가하였기 때문이다(그림 78).

러시아 명태어획량의 연간 변동은 약 17만톤에서 25만톤의 범위에서 증감을 반복하고 있고, 북한의 경우는 약 25만톤에서 190만톤의 변동을 나타냈다(그림 79). 이것은 북한이 러시아보다 많은 양의 명태를 어획하고 있음을 나타내는 사실로서 특이한 점은 1982~83년의 어획량이 약 90만톤에서 약 170~190만톤으로 급격히 증가하였다는 것이다. 일본의 경우 동해에서 어획량은 1960년부터 점점 증가하여 1987년에는 약 140만톤으로 증가하였다. 이것은 1976년 이후 정어리 어획량의 급격

한 증가에 기인하는 것으로 보인다(그림 79).

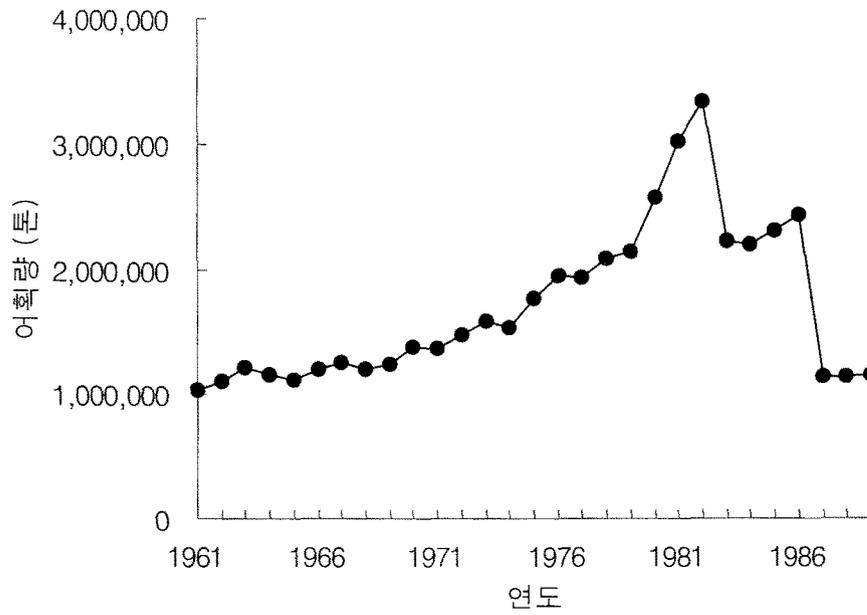


그림 77. 동해에서 한국, 일본, 러시아, 북한에 의한 총어획량

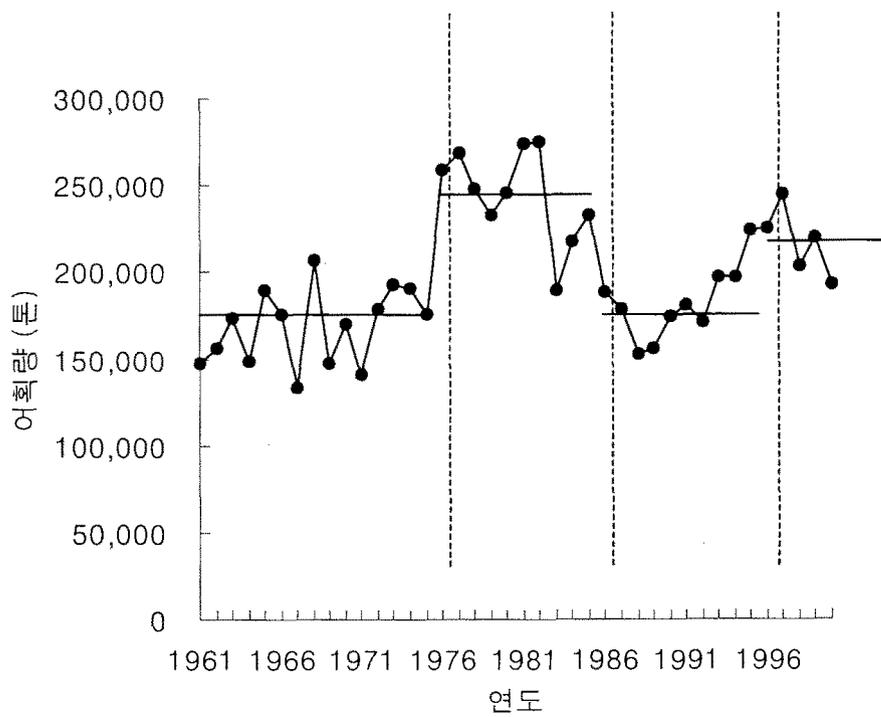


그림 78. 동해에서 한국의 어획량 (1961~2000)

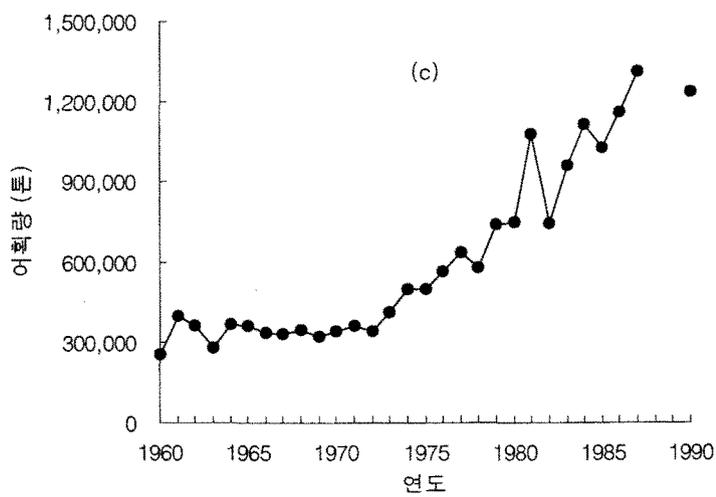
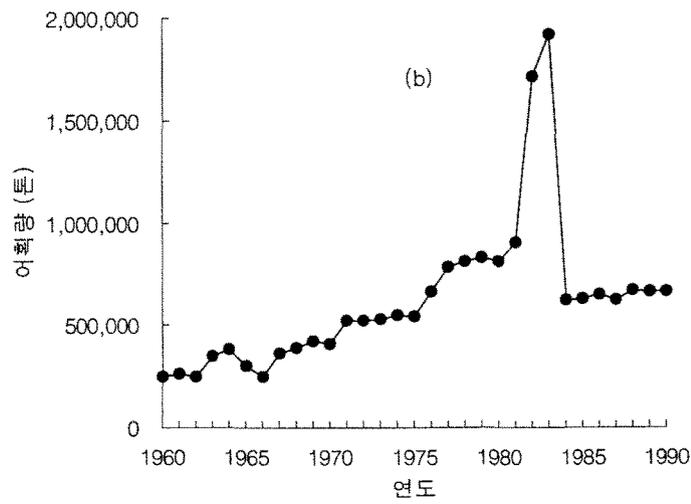
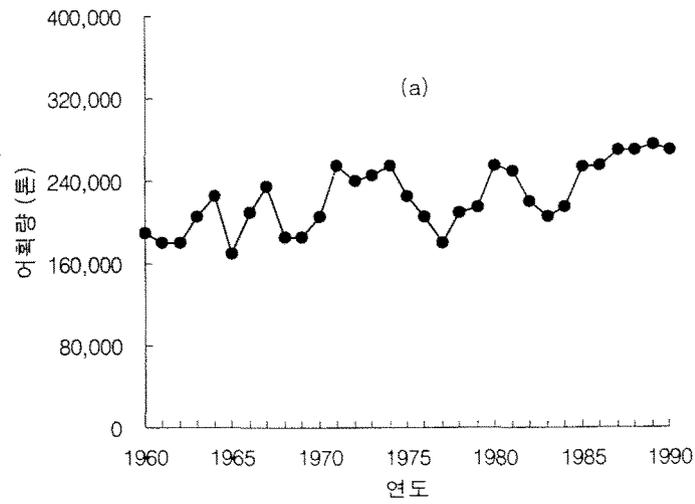


그림 79. 동해의 인접국의 어획량 (1960~1990). (a) 러시아, (b) 북한, (c) 일본  
 주 : 러시아와 북한의 어획량은 명태의 어획량만을 나타냄

## (2) 연도별 어종별 어획량

동해에서 지난 40년간 우리나라에 의한 주요 어종의 어획량을 순위별로 보면 오징어 (28.7%), 명태 (20.8%), 꽁치 (8.1%), 쥐치 (4.0%), 멸치류 (3.7%), 붉은대게 (2.7%), 도루묵 (2.6%), 까나리 (2.1%), 가자미류 (1.5%), 청어 (1.3%)의 순이었다. 주요 어종의 어획량 변동경향은 다음과 같다.

먼저, 어획량이 가장 많은 오징어의 연간 평균 어획량은 56,488톤이었으며, 어획량 변동 경향을 살펴보면 1963년 115,195톤으로 최고 어획량을 나타낸 후 1970년대에 접어들면서 감소하였지만 1980년대 후반부터 다시 증가하여 2000년 현재 93,345톤으로 예전의 높은 수준을 회복하였다(그림 80). 반면, 오징어 다음으로 많이 잡히는 명태의 연간 평균 어획량은 40,959톤이었으며, 어획량 변동 경향은 오징어의 어획량 변동과 상반되는 경향을 보였다. 오징어가 많이 어획되던 1960년대와 1990년대는 명태 어획량이 3만톤 미만으로 매우 낮았으나, 오징어의 어획량이 낮았던 1970~1980년대는 어획량이 높아서 1981년에 157,094톤으로 최고치를 기록하였다. 2000년 현재 명태의 어획량은 752톤으로 매우 낮은 수준이었다(그림 80).

꽁치의 연간 평균 어획량은 15,950톤이었으며, 어획량은 1976년 이전과 이후에 많은 차이를 보였다. 1976년 최고 42,046톤이었던 어획량이 점차 감소하기 시작하여 1992년엔 최저 267톤까지 감소하였다가 2000년 현재 17,062톤으로 약간 증가하였다. 1976년 이전과 이후의 평균 어획량을 비교해 보면 1961~1976년의 평균 어획량이 27,711톤으로 1977~2000년의 평균 어획량 8,109톤에 비해 3배 이상의 차이를 보였다(그림 80).

쥐치의 연간 평균 어획량은 12,060톤이었으며, 1976년 어획량이 증가하기 시작하여 1979년 63,269톤으로 최대를 나타냈고 이후 증감을 반복하다 최근 1천톤 미만으로 감소하였다. 2000년 현재 쥐치의 어획량은 367톤으로 매우 낮은 수준이었다(그림 80).

멸치의 연간 평균 어획량은 7,232톤이었으며, 특별한 어획량 변동 경향을 보이지 않고 40년 동안 증감현상을 반복하였다. 증가시기의 최대 어획량은 1만 6천톤~1만 7천톤을 나타냈고, 최소 어획량은 1962년 136톤이었다. 2000년 현재 멸치류의 어획량은 2,920톤으로 평균 어획량보다 낮은 수준이었다. 멸치는 우리나라 전 해역에서 어획되는 소형 표층성 어종으로 수온, 염분 등 해양환경 뿐만 아니라 대형 어류와의 먹이상호작용도 어획량 변동에 영향을 미치는 것으로 보인다(그림 80).

붉은대게의 최근 8년간 (1993~2000) 연간 평균 어획량은 26,838톤이었으며 (1993~2000) 1997년에 최대 약 3만 9천톤을 기록한 후 최근까지 계속 감소하는 경향을 보였다(그림 80).

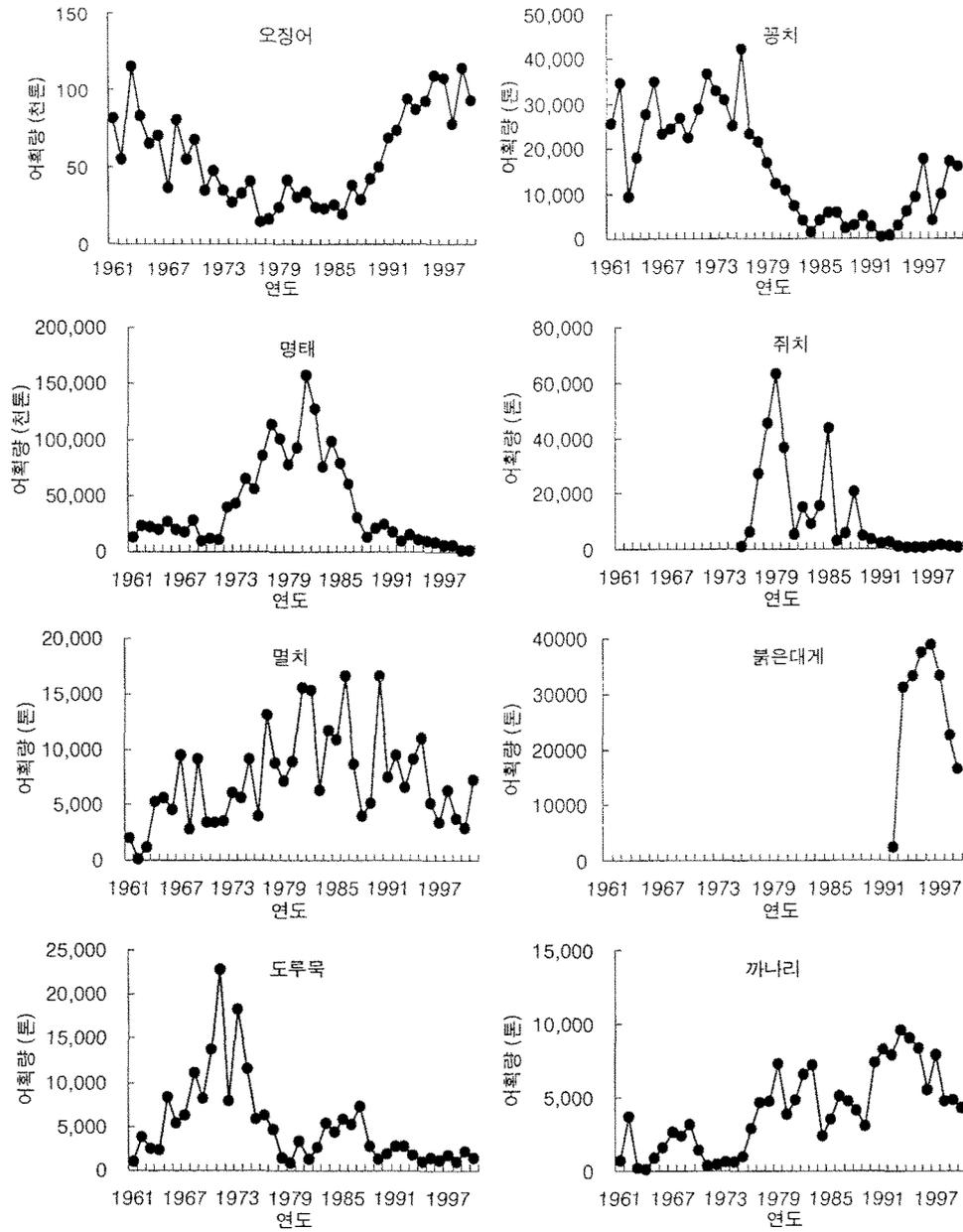


그림 80. 우리나라 동해 주요 어종의 연도별 어획량 (1961~2000)

도루묵의 연간 평균 어획량은 5,033톤이었으며, 1961년 1,067톤에서 점차 증가하기 시작하여 1971년에 최대 22,837톤을 나타낸 후 감소하여 1980년대 후반부터 약 1천~3천톤 정도가 어획되고 있다. 2000년 현재 도루묵의 어획량은 1,492톤으로 평균 어획량보다 낮은 수준이었다(그림 80).

까나리의 연간 평균 어획량은 4,059톤이었으며, 1964년 최저 66톤에서 5~6년 주기로 증감을 반복하며 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 2000년 현재 평균 어획량

수준보다 약간 많은 4,337톤의 어획량을 보이고 있다(그림 80).

가자미류의 연간 평균 어획량은 2,876톤이었으며, 1960년대는 약 1천~2천톤 정도의 수준을 나타냈고, 1970년대 초반 1천톤 미만으로 감소하다 점차 증가하기 시작하여 1999년 최고 7,377톤의 어획량을 기록하였다. 2000년 현재 가자미류의 어획량은 5,791톤으로 평균 어획량보다 약간 높았다(그림 81).

청어의 연간 평균 어획량은 2,855톤이었으며, 1985년까지 1천톤 미만의 어획량을 보이다가 1986년 이후 증감을 반복하며 점차 증가하는 경향을 보였으며, 1998년에 13,257톤으로 최대를 기록했다. 2000년 현재 청어의 어획량은 10,069톤으로 평균 어획량 보다 높은 수준이었다(그림 81).

정어리의 연간 평균 어획량은 3,705톤이었으며, 1975년부터 어획이 시작되었다. 1970년대 후반 낮은 수준에서 1980년대 초부터 어획량이 점점 증가하기 시작하여 1988년엔 최대 12,925 톤을 나타낸 후, 다시 감소하는 경향을 보였다. 2000년 현재 정어리의 어획량은 19톤으로 매우 낮은 수준이었다(그림 81).

고등어의 연간 평균 어획량은 2,309톤이었으며, 1970년대 중반까지 1천톤 미만의 어획량을 보이다가 증감을 반복하며 점점 증가하기 시작하여 1995년에 최대 17,327 톤을 나타냈다. 이후 다시 감소하여 1990년대 후반 1천톤에서 3천톤의 어획량을 보였으며, 2000년 현재 고등어의 어획량은 7,100톤으로 비교적 높은 수준이었다(그림 81).

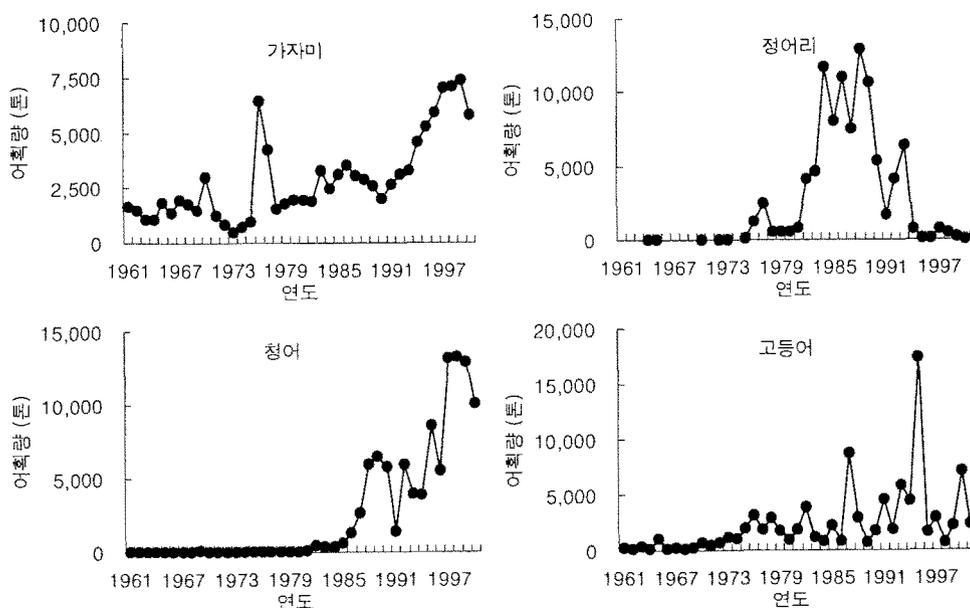


그림 81. 우리나라 동해 주요 어종의 연도별 어획량 (1961~2000)

### (3) 연도별 어업별 어획량

동해에서 행해지고 있는 어업의 종류는 약 40여종이다. 1970~2000년동안 어업별 연간 어획량 순위를 보면 유자망어업이 22.4%로 가장 많은 부분을 차지하였고, 다음으로 채낚기어업이 18.5%, 기선저인망어업이 13.2%, 정치망어업이 12.2%, 연승어업이 7.4%, 동해구트롤어업이 7.3%, 통발어업이 6.5%, 선망어업이 1.8% 순으로 나타났다.

유자망어업의 연간 평균어획량은 46,184톤이었으며, 1986년에 최대 64,279톤, 1974년에 최소 18,591톤이었다. 1986년 이후 3만톤 정도까지 감소하였지만 1990년 중반이후 다시 증가하여 2000년 현재 유자망어업의 어획량은 45,694톤으로 평균 어획량 수준을 유지하고 있다(그림 82).

채낚기어업의 연간 평균어획량은 38,223톤이었으며, 어획량은 1978년 13,292톤으로 최소였으나 1987년부터 어획량이 조금씩 증가하기 시작하여 2000년 현재 86,636톤으로 비교적 높은 어획량 수준을 보이고 있다(그림 82).

기선저인망어업의 연간 평균어획량은 27,258톤이었으며, 어획량 변동 경향을 살펴보면 1970년대 4만~6만톤 수준에서 증감을 반복하다가 1980년대에 접어들면서 점차 감소하기 시작하여 1994년부터 약 3천~4천톤을 유지하고 있다. 최대 어획량은 1979년 66,165톤, 최소어획량은 1992년 65톤이다. 2000년 현재 기선저인망어업의 어획량은 3,564톤으로 매우 낮은 수준을 나타내고 있다(그림 82).

정치망어업의 연간 평균 어획량은 25,148톤이었으며, 어획량은 2만~7만톤의 증감 범위를 나타내고 있다. 최대어획량은 1979년 73,509톤이었고, 최소어획량은 1970년 4,366톤이었다. 2000년 현재 정치망어업의 어획량은 18,776톤으로 평균어획량에 약간 못 미치는 어획수준을 나타내었다(그림 82).

연승어업의 연간 평균 어획량은 15,346톤이었으며, 1970년 77,072톤으로 최대를 기록한 후 점차 감소하여 1988년 이후 2천~4천톤으로 계속 낮은 수준을 유지하고 있다. 2000년 현재 연승어업의 어획량은 1,757톤으로 최저어획량을 나타냈다(그림 82).

동해구트롤어업의 연간 평균 어획량은 15,054톤이었으며, 어획량은 1981년 최대 56,599톤을 나타낸 후 점차 감소하기 시작하여 1987년 이후 현재까지 약 5천~1만톤의 수준을 나타내고 있다. 2000년 현재 동해구트롤어업의 어획량은 5,097톤이었다(그림 82).

통발어업의 어획량 변동 경향을 살펴보면 연간 평균 어획량은 13,344톤이었으며, 1979년 최저 1,140톤에서 점점 증가하기 시작하여 1996년 최대 41,321톤을 나타냈다. 2000년 현재 통발어업의 어획량은 19,527톤으로 약간 감소하였지만 평균 어획량

보다 높은 수준이었다(그림 82).

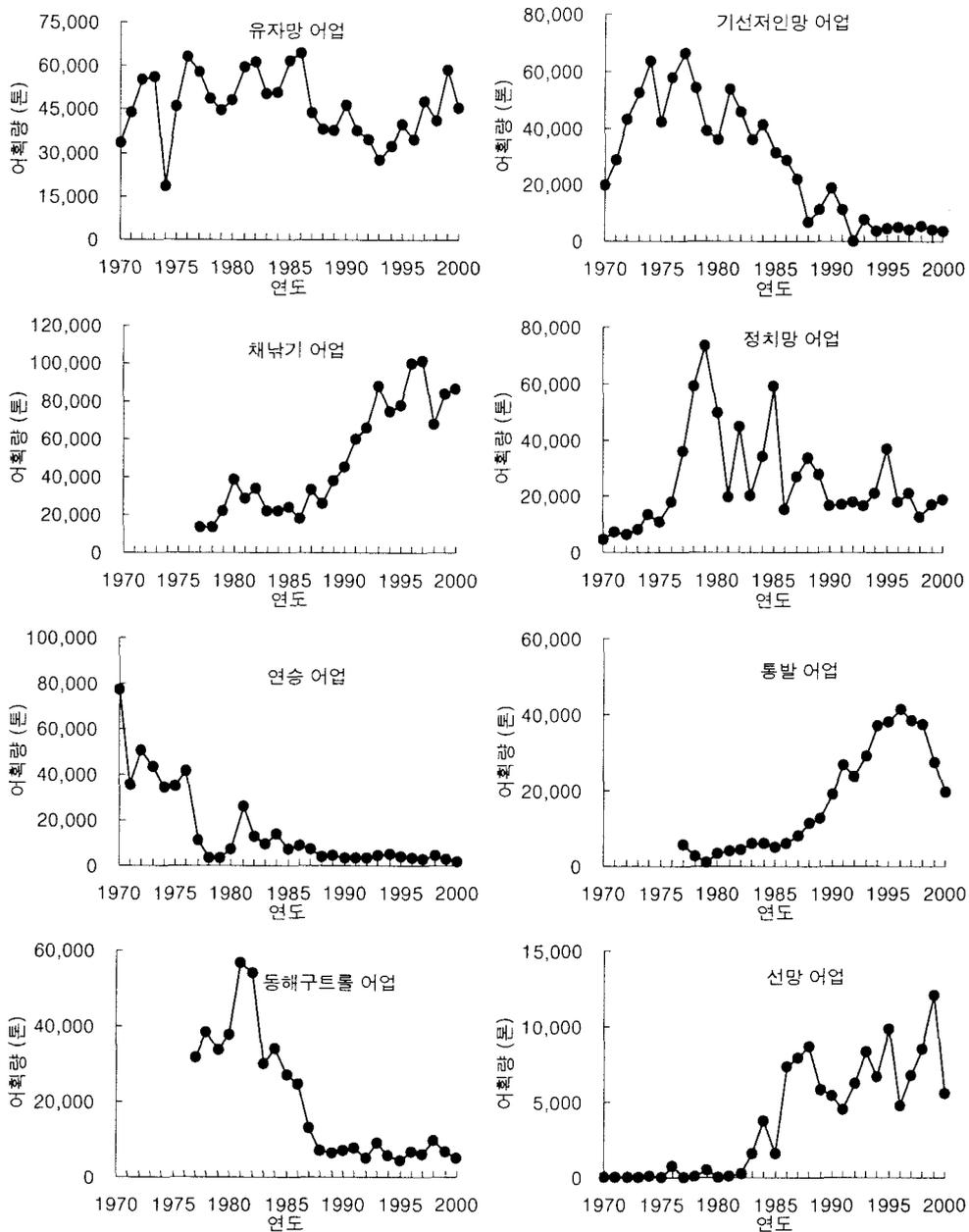


그림 82. 한국 동해의 연도별 어업별 어획량 (1970~2000)

선망어업의 연간 평균 어획량은 3,778톤이었으며, 1982년까지 1천톤 미만의 낮은 어획량 수준에서 점차 증가하여 1985년부터 현재까지 5천~1만2천톤 수준에서 증감을 반복하고 있다. 2000년 현재 선망어업의 어획량은 5,588톤으로 평균보다 약간 높은 수준이었다(그림 82).

한편, 우리나라 동해 전체 어업의 단위노력당 어획량은 점점 감소하는 추세에 있다. 평균 단위노력당어획량은 1.48톤/마력이었으며, 1962년 최대 5.20톤/마력에서 점점 감소하여 2000년 현재 0.15톤/마력으로 1962년 대비 2.9% 수준으로 감소하였다(그림 83).

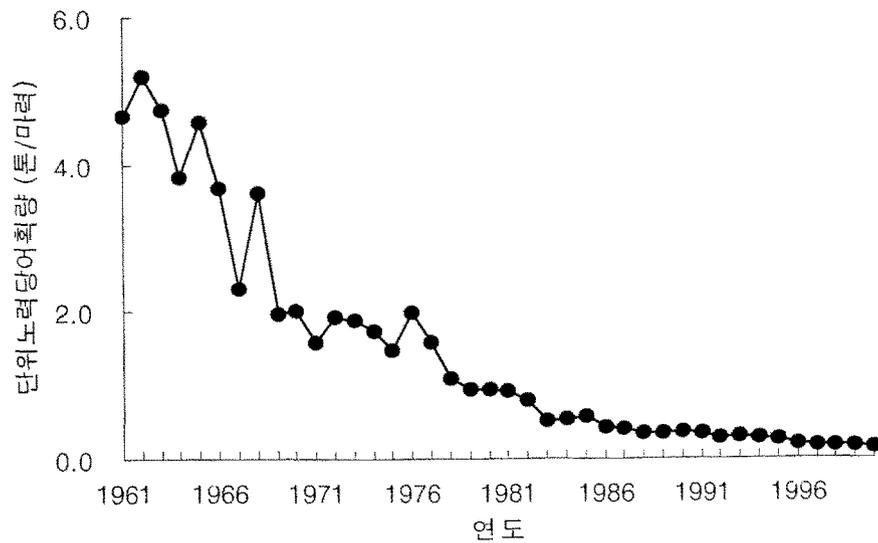


그림 83. 우리나라 동해어업의 단위노력당 어획량 변동 (1961~2000)

최근 동해의 어업별 어황을 알아보기 위해 2000년 동해안 주요어업의 어획량과 단위노력당 어획량의 변화를 살펴보았다. 먼저, 오징어 채낚기어업의 연간 어획량은 71,305톤이었으며, 1999년의 116%, 평년 (1995~1999년 평균)의 109% 수준이었다.

단위노력당어획량 (척당어획량)은 1.71톤으로 1999년의 157%, 평년의 139% 수준이었다. 명태자망어업의 2000년도 연간 어획량은 931톤이었으며, 1999년의 146%, 평년의 57% 수준이었다. 척당어획량은 0.02톤으로 1999년의 13%, 평년의 9%로 매우 낮은 수준이었다. 명태연승어업의 연간 어획량은 59톤이었으며, 1999년의 12%, 평년의 5% 수준으로 감소하였다.

척당어획량도 0.18톤으로 1999년 및 평년의 47%의 수준이었다. 푹치유자망어업의 연간어획량은 10,975톤이었으며, 1999년의 273%, 평년의 330%로 매우 높은 수준이었다. 척당어획량도 1.93톤으로 1999년의 205%, 평년의 186% 수준이었다. 동해구기선저인망어업의 연간 어획량은 3,151톤이었으며, 마찬가지로 1999년의 93%, 평년의 64% 수준이었다. 척당어획량은 0.74톤으로 1999년의 120%, 평년의 84% 수준이었다(표 9). 이상의 동해의 어업별 어황을 요약하면 오징어 채낚기어업과 푹치 유자망어업을 제외하고는 모든 어업의 어황이 평년 수준에 못 미치고 있다.

표 9. 2000년 우리나라 동해안 주요어업의 어획량과 단위노력당 어획량 (CPUE)

어업	어획량 (톤)			단위노력당 어획량 (톤/어선수)		
	현재	과거대비 (%)	평년대비 (%)	현재	과거대비 (%)	평년대비 (%)
오징어 채낚기 어업	71,305	116	109	1.71	157	139
명태 자망 어업	931	146	57	0.02	13	9
명태 연승 어업	59	12	5	0.18	47	47
꽁치 유자망 어업	10,975	273	330	1.93	205	186
동해구 기선저인망 어업	3,151	93	64	0.74	120	84

\* 현재 : 2000년

\* 평년 : 1995~1999년 평균

다. 연대별 어업 및 자원 종조성의 변동

(1) 40년 평균 연간 어획량의 어종별 비율

최근 40년간 동해의 어종별 연간 평균 어획량 비율을 살펴보면 오징어가 56,488톤으로 28.7%를 차지하였고, 명태가 40,959톤으로 20.8%, 꽁치가 15,950톤으로 8.1%, 쥐치가 12,060톤으로 4.0%, 멸치가 7,232톤으로 3.7%, 붉은대게가 26,838톤으로 2.7%, 그리고 도루묵, 까나리, 가자미류, 청어, 정어리, 고등어 등 기타가 32%였다(그림 84).

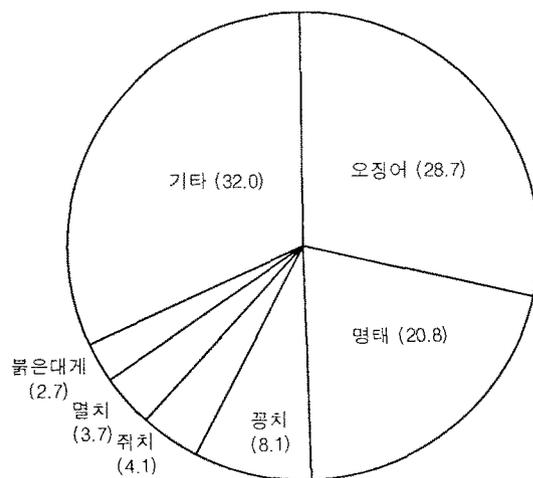


그림 84. 한국 동해의 어종별 비율 (1961-2000)

(2) 연대별 어획물의 종조성

동해에서 생산된 주요 수산생물의 연대별 종조성 변동을 보면 1960년대에는 오징어 50.1%, 콩치 17.4%, 명태 13.4%, 도루묵 4.4%, 멸치 3.1%순으로 연체류인 오징어가 가장 많았으며, 명태의 어획량은 그리 많지 않았다. 하지만 1970년대는 명태 37.2%, 오징어 16.7%, 콩치 14.3%, 쥐치 9.5%, 도루묵 4.4%순으로 명태가 가장 많았고, 콩치, 쥐치 등 어류의 어획량이 비교적 많은 부분을 차지한 반면 오징어의 어획량은 감소하였다. 1980년대 역시 명태가 37.0%로 최대였으며, 오징어 17.1%, 쥐치 6.8%, 멸치 6.0%, 정어리 4.2%, 콩치와 까나리가 각각 2.7%로 명태가 우점하였다. 1990년대는 오징어가 49.1%로 급격히 증가하였고, 붉은 대게 11.5%, 명태 4.5%, 청어 4.2%, 콩치와 까나리가 각각 3.8%로 1990년대는 오징어와 붉은대게의 어획량이 증가하였고, 명태와 콩치 등 전통적인 주요 어종의 어획량은 낮은 수준을 나타냈다 (그림 85).

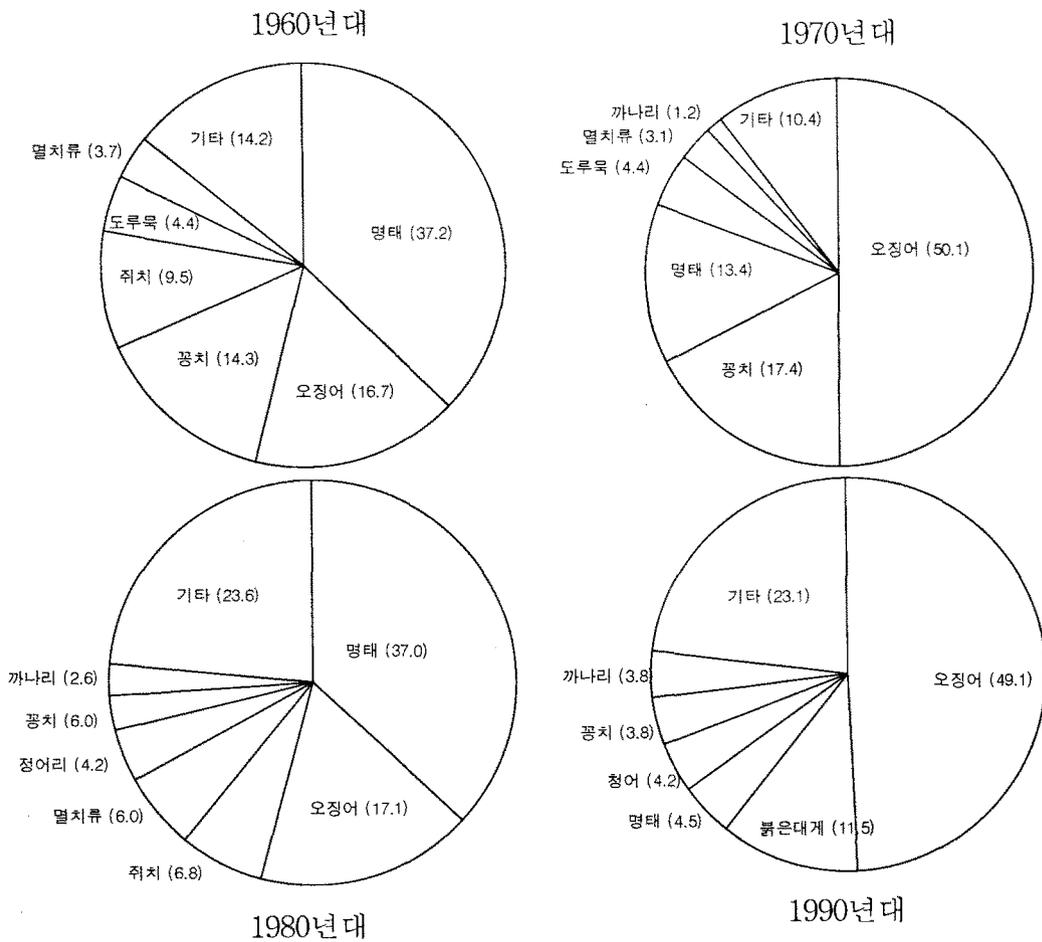


그림 85. 한국 동해의 연대별 어획물의 종조성

### (3) 연대별 어획물의 종 교체 현상

동해에서 어획된 어획물의 특징 중 하나는 오징어와 명태의 종 교체 현상이다. 즉, 오징어의 어획량이 약 10만톤 정도로 많이 어획되던 1960년대와 1990년대는 명태의 어획량이 약 3만톤 미만으로 매우 낮았다. 반대로 명태의 어획량이 10만톤 이상 최대 약 15만톤으로 높게 나타났던 1970~80년대는 오징어의 어획량이 2~4만톤으로 매우 낮게 나타났다. 또한 오징어와 명태는 지난 40년간 동해의 어획량 순위에서 1~2위를 차지했던 종이었으나, 최근 명태의 어획량이 감소하는 반면 붉은대게의 어획량이 예전에 비해 많이 증가하여 새로운 주요 수산자원으로 부각되고 있다. 전반적으로 1990년대에 접어들면서 수명이 긴 어종에서 짧은 어종으로, 영양단계가 높은 어종에서 낮은 어종으로, 어류가 줄어들고 갑각류가 늘어나는 현상을 보였다.

## 2. 기후변동에 따른 수산자원 변동의 역학관계

### 가. 해양환경의 변동과 어획량 변동

기후변화에 반응하는 해양생태계를 이해하기 위해 동해의 환경, 생물 요소를 분석하였다. 북동태평양압력 지수(NEPPI)의 연평균값은 엘니뇨의 지수인 SOI와 음의 상관관계를 나타내었다. 또한 강릉 지방 봄철의 기온도 1970년대 중반을 기준으로 낮은 기온에서 다소 높은 기온으로 변화됨이 관찰되었다. 1961~1975년 동안의 봄철 동해의 혼합층의 깊이는 후반기보다 다소 낮았다. 1961~1975년 동안의 낮은 혼합층의 깊이는 후반기보다 더 높은 chl a 농도를 나타내게 한다. 결과적으로 동물플랑크톤 생물량도 1960년부터 1980년까지 chl a 농도의 감소와 일치하여 감소함이 관찰되었다. 동해의 어류는 어획량 변화뿐 아니라 종조성의 변화도 관찰되었다. 명태, 정어리, 꽁치의 어획량은 연평균 NEPPI와 좋은 상관관계를 보였다(그림 86). 일본 과학자들은 기후변화에 반응하는 오징어의 어획량 변화를 살펴보았다. 가을산란 오징어와 겨울산란 오징어는 냉수기인 1970년대 중반부터 90년대 초반까지 감소하다가 그 이후 증가하는 것이 관찰되었다. 그러나 가을산란 오징어는 겨울산란 오징어에 비해 어획량의 변화가 크지 않았다(그림 87). 이는 겨울산란 오징어가 환경 변화, 즉 수온의 변화에 좀 더 민감하게 반응한다는 사실을 알 수 있다.

### 나. 기후 및 해양환경 변동이 수산자원에 미치는 생태기작

북태평양의 알류산열도 부근에는 겨울철에 항상 고기압이 형성되는데, 1976년 이후로 겨울철(11월~3월) 동안의 알류산 저기압이 상당히 강화되어 기압이 평균 4기압 정도 낮아졌으며, 저기압의 중앙부는 동쪽으로 이동하였다. 이러한 결과는

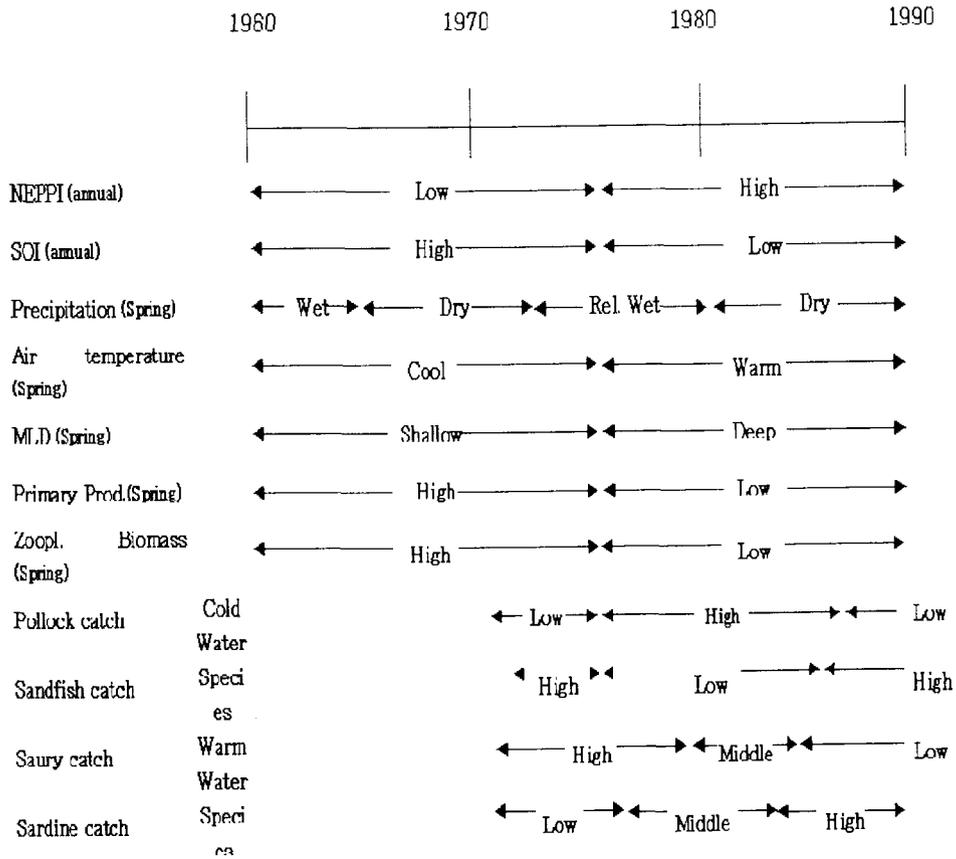


그림 86. 1960~1990년 동안 동해의 환경, 생물학적 요소들의 요약(Kang *et al.*, 2000)

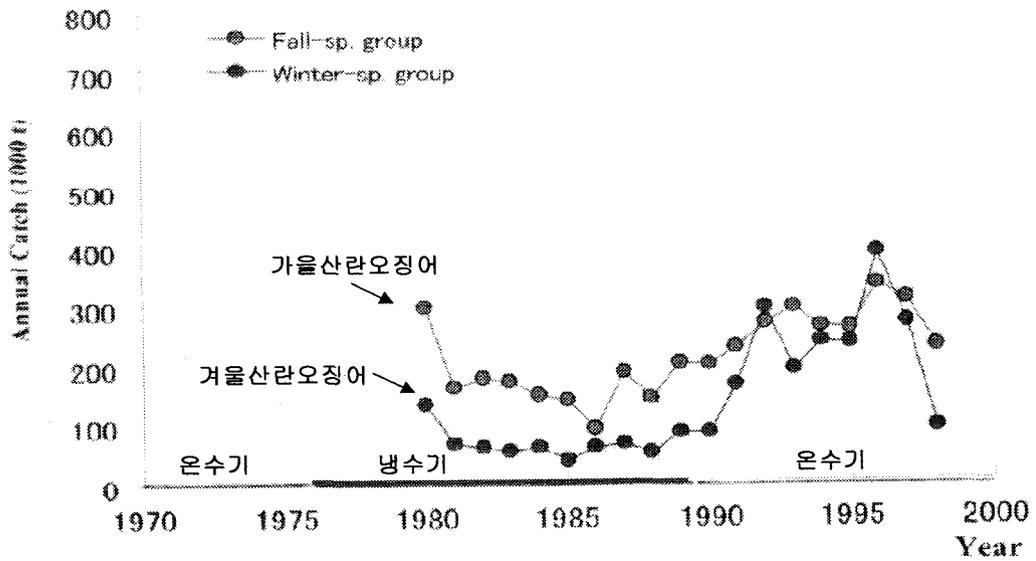


그림 87. 기후변화에 반응하는 일본 오징어의 어획량 (T. Sakurai, personal communication)

바람과 해수의 이동에 영향을 미쳐서, 결과적으로 알래스카 전역이 따뜻해 졌으며, 이와 동시에 태평양의 중앙부와 서부의 몇 해역에서는 냉각현상이 발생되었다(PICES, 1994). 과거 북태평양에서는 고기압이 발달하여 비교적 한랭한 기후를 유지하고 있었는데, 1976년부터 갑자기 저기압 세력이 확장하여 따뜻한 해역으로 변화하였다(Francis and Hare, 1994). 1976년 북태평양 기후의 regime shift로 알려진 이러한 기단의 변화로 이 해역에는 폭풍의 빈도가 잦아졌으며, 해양의 물리학적 특성을 변화시켜 해수의 온도와 혼합층의 두께 등에도 영향을 미치고, 더 나아가 해양의 일차생산력과 생태계의 구조개편을 야기시켰다. 이에 대한 정확한 기작은 아직 밝혀지지 않았으나 기후체제 전환이후 북한연어(Rho, 1986)와 알래스카 해역 연어의 어획량의 변화가 나타났음이 보고된 바 있다(Francis and Hare, 1994).

우리나라에서도 최근의 연구를 통하여 북태평양에서 감지되었던 기후체제 변화가 동해에서 나타났음이 부분적으로 밝혀졌고, 이로 인해 1976/77년 이후 동해 생태계와 주요 수산자원의 생산량에 변화가 나타났다(Zhang et al., 2000; Zhang and Lee, 2001; Zhang and Gong, in press). 우리나라 해역에서 나타난 기후체제 변화는 1976년에 열전선이 북쪽으로 많이 이동하여 평균 표면해수온도(SST)가 증가하였고, 1976년 이후 쿠로시오 해류 수송량도 증가하였으며, 또한 강수량과 혼합층의 깊이도 큰 변동을 보였다(그림 88)(Zhang et al., 2000).

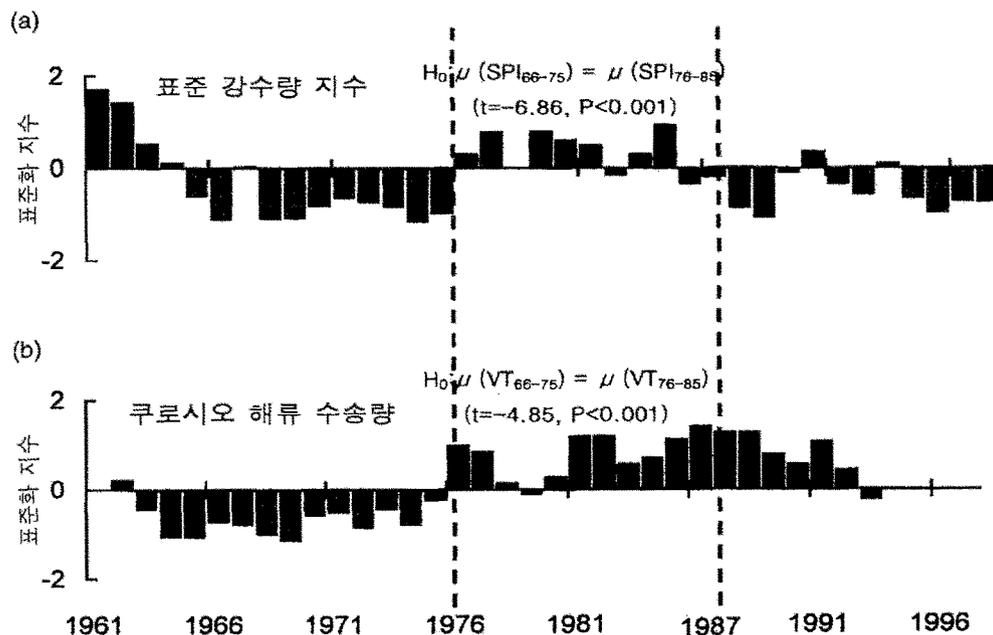


그림 88. 동해안의 강수량 (a)과 쿠로시오 해류 수송량 (b)의 변동  
(after Zhang et al., 2000)

동해 주요 어종의 어획량의 변동양상을 보면 위에서 언급한 기후체제 변동과 밀접한 연관성을 가지는 것으로 나타났다. 특히 부어류인 꽁치, 쥐치, 정어리, 청어, 고등어 등에서 유사한 변동 경향을 보였다. 기후체제 전환 시기를 기점으로 어획량이 감소한 어종은 꽁치와 저어류인 도루묵이었고, 어획량이 증가한 어종은 쥐치, 정어리, 청어, 고등어 등이었다(그림 89). 특히 꽁치, 정어리, 고등어 등 세 종의 온수성 어종은 1976년과 1988년을 전환점으로 하여 어종의 성쇠가 교차되었다. 이러한 온수성 어종의 교차는 일본 해역에서도 1970년대 중반이후에 일어났던 것으로 보고된 바 있다(Kawasaki, 1993).

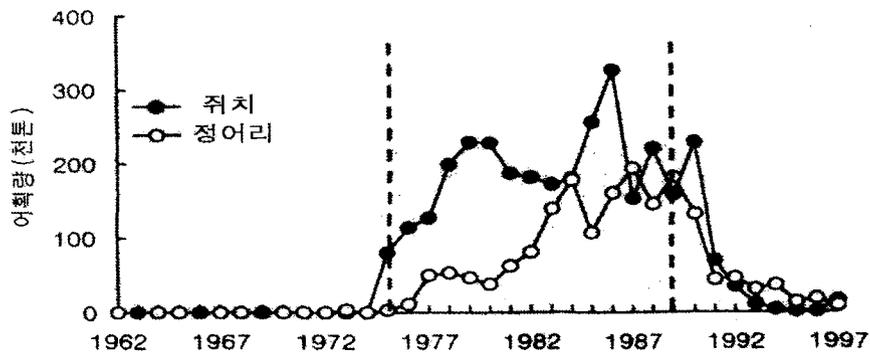


그림 89. 동해안의 쥐치와 정어리의 연간 어획량 변동 (after Zhang *et al.*, 2000)

연도별 어획량 변동계수는 부어류(115.0%)가 저어류(72.1%) 보다 더 높았다(표 10). 어종별로 보면 부어류인 쥐치(141.9%), 고등어(135.1%), 정어리(113.0%), 전갱이(182.1%)는 비교적 높은 변동폭을 보인 반면, 저어류인 붉은대게(46.3%), 가자미류(66.5%)는 비교적 낮은 변동폭을 나타냈다. 부어자원은 기후변화 등 생태계의 해황에 따라 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 연안역의 수온 변화는 오징어 뿐만 아니라 다른 회유성 어종의 어황에 크게 영향을 미친다(Kimura and Sugimoto, 1987).

기후변동에 민감한 소형부어류의 연도별 변동 경향을 살펴보았다(표 11). 동해에서 소형부어류의 연간 평균 어획량은 102,154톤이었으며, 동해 전체 어획량의 약 52%를 차지하였다. 어종별 평균 어획량은 오징어가 56,488톤으로 가장 많이 어획되었으며, 다음이 꽁치, 쥐치, 멸치, 정어리, 고등어, 전갱이 순이었다. 어종별 변동계수는 쥐치, 정어리, 고등어, 전갱이가 100%이상으로 변동폭이 높았으며, 이 종들은 기후변동에 매우 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

표 10. 한국 동해 부어류 및 저어류 어획량의 변동계수

구 분	어 종	변동계수 (%)
부어류	오징어	53.2
	꽁치	75.5
	쥐치	190.0
	멸치	58.2
	까나리	68.4
	정어리	157.7
	고등어	135.1
	전갱이	182.1
	평균	115.0
저어류	명태	79.2
	붉은대게	46.3
	도루묵	96.2
	가자미류	66.5
	평균	72.1

표 11. 한국 동해 소형부어류의 어획량 순위, 평균 어획량, 어획량 비율, 변동계수

순 위	어 종	평균어획량(톤)	어획비율 (%)	변동계수 (%)
1	오징어	56,488	28.7	53.2
2	꽁치	15,950	8.1	75.5
3	쥐치	7,839	4.0	190.0
4	멸치	7,232	3.7	58.2
5	정어리	2,409	1.2	157.7
6	고등어	2,309	1.2	135.1
7	전갱이	1,164	0.6	182.1
	기타 소형부어류	12,541	4.4	82.7
	소형부어류 합계	102,154	51.9	
	기타어류 합계	94,683	48.1	
	총계	196,837	100.0	

연대별 소형부어류의 어획량 비율은 1960년대와 1990년대는 동해 전체 어획량의 60%이상으로 높은 비율을 나타냈으나 1970년대와 1980년대는 40%대로 낮았다. 이것은 1970~80년대 명태의 어획량이 증가하고 오징어의 어획량이 감소하였기 때문이다. 연대별 어획량 순위의 변동 경향을 보면 1960년대는 오징어, 꽁치, 멸치, 1970년대는 오징어, 쥐치, 꽁치, 1980년대는 오징어, 쥐치, 멸치, 1990년대는 오징어, 꽁치, 멸치의 순이었다(그림 90). 그러므로 동해에서 주로 어획되는 소형부어류는 오징어, 꽁치, 쥐치, 멸치 등 4종으로 요약된다. 기후체제 전환이 있었던 1970년대

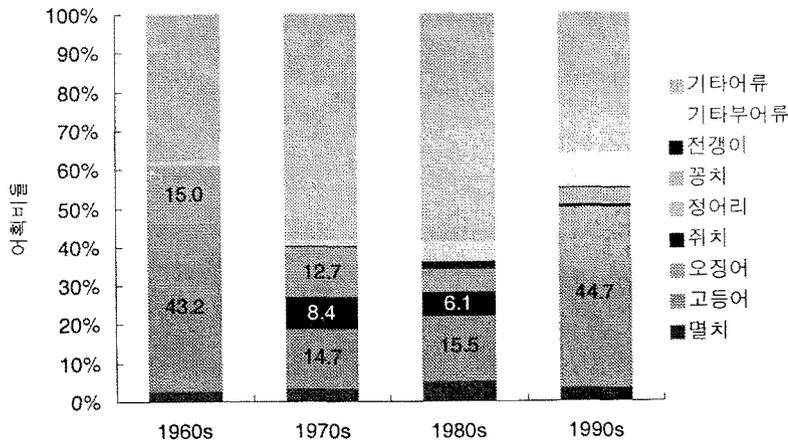


그림 90. 한국 동해 소형부어류의 연대별 어획량 비율의 변동

중반이후 쥐치가 갑자기 증가하면서 꽁치와 멸치의 어획량이 상대적으로 낮아졌으며, 1980년대에 접어들면서 정어리의 어획량이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 소형부어류는 동해의 총 생산량 중 절반이상을 차지하는 매우 중요한 자원으로 나타났으며, 기후 및 해양환경의 변화에 따라 동해 전체 어획량에도 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

#### 다. 서식처 특성에 따른 수산자원 변동과 기후변동의 관계

우리나라 연근해에서 행해지고 있는 선망어업의 어장은 우리나라 전해역에 걸쳐 넓게 분포하였으며, 해구별 분포를 보면 총 219개의 해구에서 어업이 이루어지고 있다(그림 91).

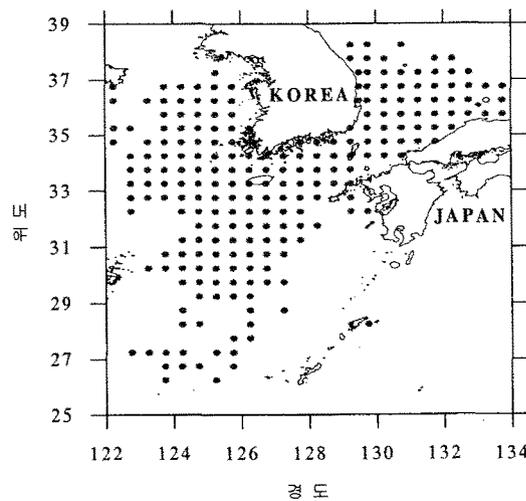


그림 91. 우리나라 연근해 선망어업 어장 분포도

선망어업에서 주로 어획되는 고등어, 전갱이, 정어리 등 세 어종의 자원량 분포를 알아보기 위하여 각 어종의 자원량 및 가입량을 추정하여, 간접 자원량 지수인 단위노력당 어획량(CPUE)자료와 자원량 및 가입량과의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 고등어의 연도별 가입량 및 자원량은 CPUE와 높은 상관관계를 나타냈으며 ( $P<0.001$ ), 전갱이와 정어리의 CPUE도 가입량 및 자원량과 높은 상관관계를 보였다 ( $P<0.001$ )(그림 92, 표 12).

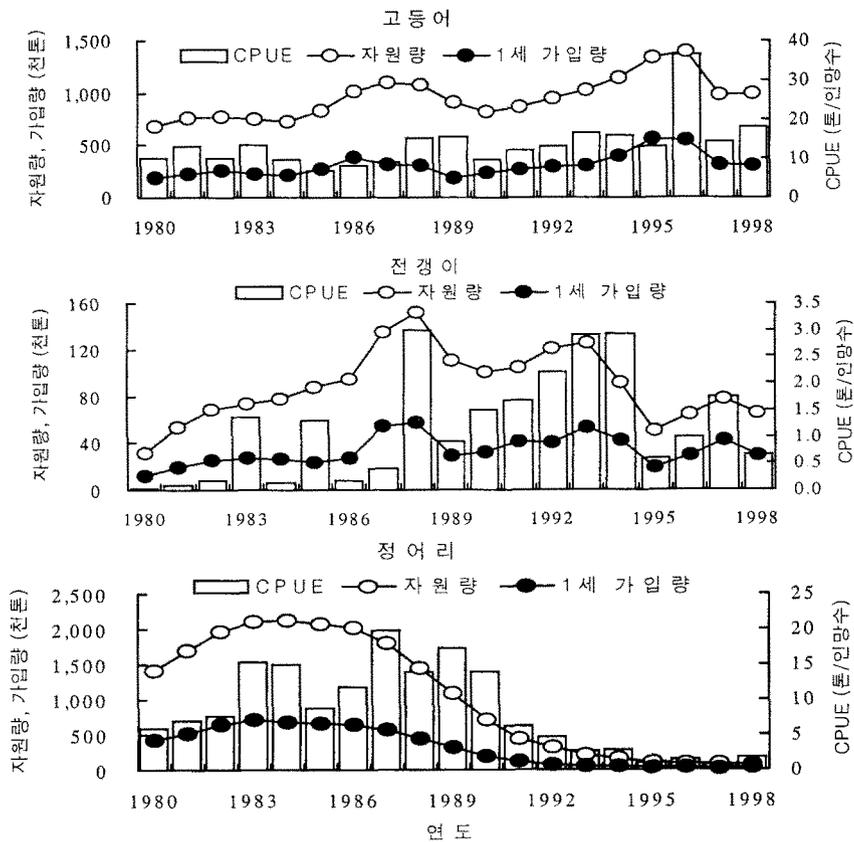


그림 92. 선망어업에서 어획된 고등어, 전갱이, 정어리의 CPUE, 자원량 및 가입량의 시계열 변화 (1980~1998)

표 12. 선망어업에서 어획된 주요 어종의 CPUE와 자원량 및 가입량의 상관관계

어 종	상관관계	CPUE	자원량
고등어	자원량	0.622	-
	가입량	0.666	0.771
전갱이	자원량	0.616	-
	가입량	0.643	0.574
정어리	자원량	0.719	-
	가입량	0.835	0.972

따라서, 위의 상관관계를 통해 CPUE의 분포에 의한 세 어종의 서식처 분포 특성을 파악할 수 있다. 고등어의 CPUE 분포는 북위 35° N 이남, 동경 126° E 이서 지역인 황해 남부와 동지나해 서부지역에 많이 밀집되어 분포하였다. 전갱이의 경우는 북위 29° N 이남지역인 동지나해 남부와 제주도 남동부의 일본 해역쪽으로 많이 분포되었다. 정어리의 경우는 다른 두 어종과는 달리 동해의 울릉도와 독도 근해에 CPUE가 밀집되어 분포하는 것으로 분석되었다(그림 93). 세 어종의 CPUE 분포 경향을 토대로 세 어종의 서식처 분포에 대한 95% 신뢰구간을 그림 39에 나타냈다. 세 어종간의 서식처 중복도를 살펴보면, 고등어의 경우 나머지 두 어종과 동시에 중복할 확률은 35.7%였으며, 전갱이와는 28.6%, 정어리와는 1.8%로 각각 나타났다. 전갱이는 고등어와 63.4%로 매우 큰 중복도를 나타냈으나, 고등어와 정어리의 어장과 동시에 겹칠 확률은 36.6%였다. 그러나 정어리 어장과는 중복되지 않는 것으로 나타났다. 정어리는 약 53%가 나머지 두 어종과 서식처가 중복되는 것으로 나타났으며, 고등어와는 38.9%의 중복도를 나타냈다(그림 94, 표 13).

1988/89년 기후 체제 전환을 계기로 대형선망어업에 의한 고등어, 전갱이, 정어리 등 주요 소형부어류의 어장이 기후 및 해양환경에 따라 변화한 것으로 나타났다(그림 95).

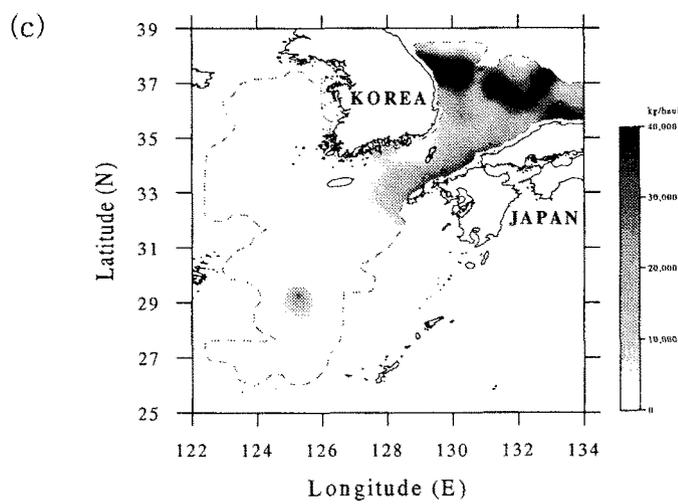
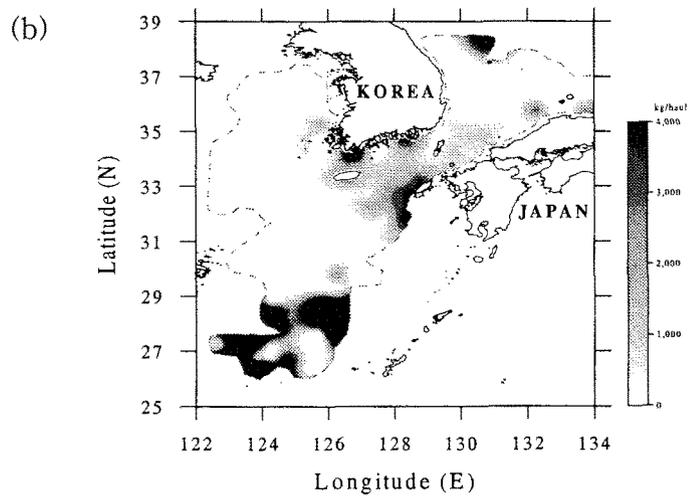
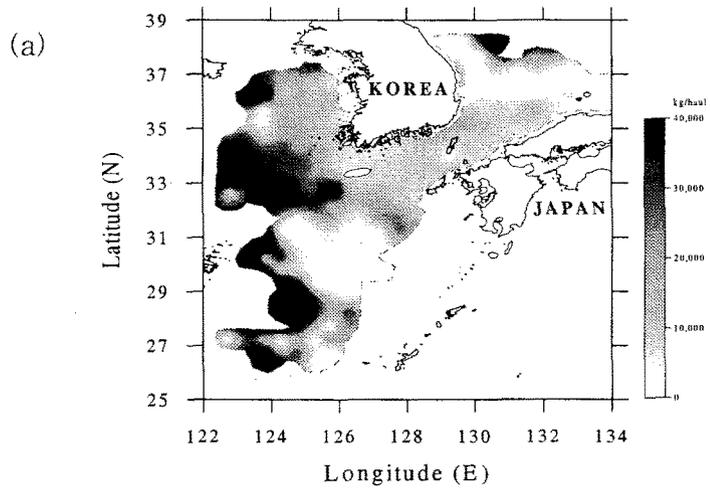


그림 93. 선망어업에서 어획된 (a) 고등어, (b) 전쟁이, (c) 정어리의 CPUE 분포

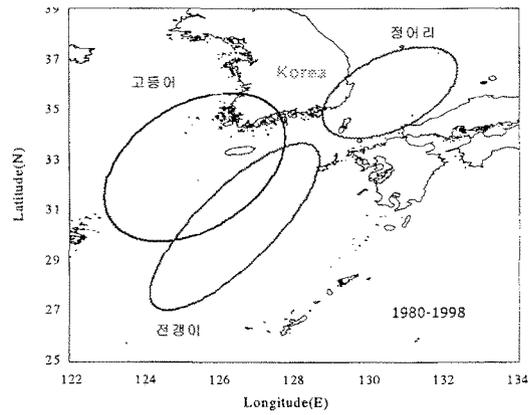


그림 94. 주요 소형 부어류의 서식처 중복도

표 13. 주요 소형부어류의 서식처 중복도

비율 (%)	고등어 단독	전갱이	정어리	전갱이+정어리	합계
고등어	32.6	28.6	3.1	35.7	100.0
비율 (%)	고등어	전갱이 단독	정어리	고등어+정어리	합계
전갱이	63.4	0.0	0.0	36.6	100.0
비율 (%)	고등어	전갱이	정어리 단독	고등어+전갱이	Total
정어리	38.9	0.0	8.2	52.9	100.0

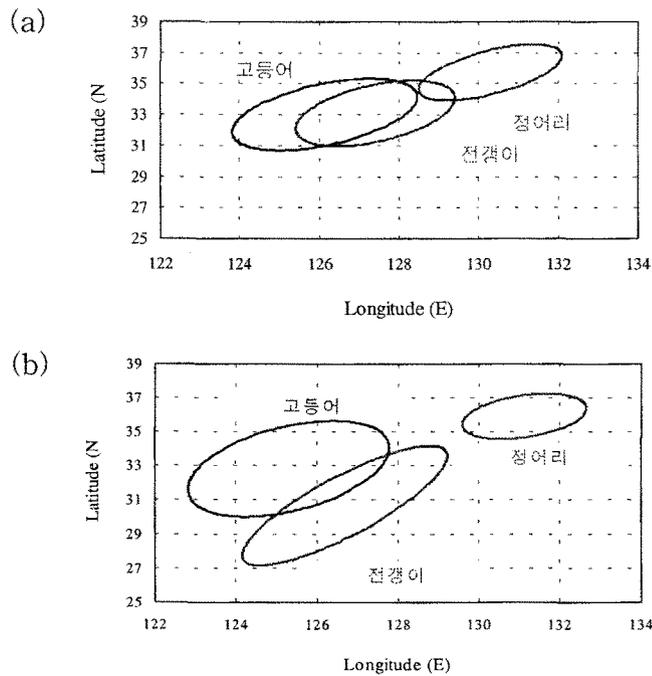


그림 95. 주요 소형 부어류의 1988/89년 기후 체제 전환 이전 (a)과 이후 (b)의 어장 변화

### 3. 생태계관리 관점에서 수산자원관리 및 어업관리에 대한 제안

#### 가. 생태계 관리 모델의 개념

현재 세계 해양의 어업자원은 상당 부분이 최대 지속적 생산량을 넘는 수준에서 개발 이용되고 있는 상황이며 1980년에서 1990년의 10년 동안 과도 어획된 종의 수는 2.5배가 증가하였다(Alverson and Larkin 1994). 세계 해양에서 어획되는 대부분의 어획물은 점진적으로 낮은 영양단계에 위치한 종의 상대적 비율이 증가되고 있다(Pauly et al. 1998). 어획활동은 해양생태계의 구조와 기능의 변화를 초래하지만 어획으로 인한 생태학적 변화는 종종 무시되어 연구의 대상이 되지 않았다. 이러한 생태학적 변화는 대개 남획이 일어난 이후에 인식되고 있다. 최근까지 수산자원 평가에서는 환경은 고려하지 않고 가입, 성장, 자연사망, 어획 등 네 요소만을 고려하여 수행되고 있다. 또한, 현재의 수산자원의 관리 체제에서는 어획으로 인한 생태학적 변화가 고려되지 않고 있으며, 과도어획으로 인한 생태계 변화를 모니터링 하지 않고 있다.

어업에 이용되는 수산자원은 해양생태계의 한 부분이고, 많은 종들은 서로 먹고 먹히는 관계에 있다. 지속 가능한 어업을 유지하기 위해서는 생태계 차원의 거시적인 관점에서 어업관리가 고려되어야 한다. 따라서, 근년에 들어 수산자원을 관리하는데 전통적인 단일어종을 대상으로 하는 접근방식에서 생태계를 기초한 방식으로의 인식전환(paradigm shift)이 점차 강조되고 있다.

지금까지 개발된 생태계 모델의 대부분은 실용성보다는 이론적인 부문에 주로 치중되어 왔다. 이 모델들은 수백 개의 파라미터를 가질 정도로 복잡하며 생태계의 일부분만 포함시킴에 따라 전체 생태계를 포함하지 못하고, 어업관리에 필요한 어업의 생태계에 미치는 영향을 충분히 설명하지 못하였다.

이러한 모델로는 북해의 Anderson and Ursin(1977) 모델과 북태평양의 Laevastu and Larkins(1981) 모델이 있다. 이 모델들은 어업을 생물학적 현상의 행위로 이해하지 않고 물리해양학적 과정에 포함시키는 경향이 있었다. 이런 모델들은 한 지역의 현상만을 설명하고 있으므로 다른 해역에 일반화시키기가 어려웠고, 이들을 사용하여 생태계 과정을 이해하거나 생태계 현상을 예측하는 것은 불가능하였다. 최근 들어서, 생태계를 구성하고 있는 생물들간의 관계를 영양역학적으로 해석하는 보다 더 실용적인 생태계 모델에 대한 연구가 점차 활발해 지고 있다. 여기에는 생태계 차원으로 확장시킨 생체량 역학 모델(Larkin and Gazey 1982)과 MSVPA(Sparre 1991), Ecopath(Polovina 1984, Christensen and Pauly 1992)들이 있다. Ecopath 모델은 질량균형 모델(mass-balance model)이라고도 불리는데 하나의 생태계 내에 존재하는 단일종 (혹은 종그룹)에 대한 현 상태와 각종의 변화율을

추정해서, 이 상태와 변화율 체제 내의 주어진 기간에 대해 해양생태계의 상태를 정량적으로 설명한다. 최근에는 이 모델을 발전시킨 Ecopath with Ecosim(Walters et al. 1997) 모델이 개발되었다. 이 모델은 기존의 모델에 역학 모델링 능력을 결합시킨 모델로서 어획과 환경변화가 생태계에 미치는 미래의 영향을 시뮬레이션 하는데 사용할 수 있다.

#### 나. 해양 생태계 특징

해양생태계는 서로 연결되어 살고 있는 생물그룹들과 그들의 서식처로 구성되어 있는 복잡한 체제이다. 생물들은 새로운 환경에 대해 끊임없이 적응하고 진화한다. 이 환경은 여러 가지의 다양한 스케일을 가지는 물리적인 환경 뿐 만 아니라 공존하는 다른 생물체들도 포함한다. 이런 진화는 생태계 구성요소들의 복잡하고 예측 불가능한 역학을 따른다. 또한, 해양생태계는 일반적으로 광범위하고 개방되어 있으므로 생물체들의 다양하고 불규칙한 변동이 종종 나타난다. 인간은 생태계에서 중요한 구성요소이다. 생태계의 구성요소로서 인간이 초래하는 어획은 종종 자연사망량 보다 크게 작용하며 목표 어종 뿐 만 아니라 생태계에도 큰 영향을 준다.

최근 미국의 국립해양수산청(NMFS 1999)은 생태계의 원칙을 아래와 같이 8개로 구분한 바 있다. 첫째, 생태계의 움직임을 예측할 수 있는 능력에는 한계가 있다는 것이다. 불확실성과 불확정성은 복잡한 시스템 역학의 기본적인 특성이다. 많은 과학적인 노력에도 불구하고 이런 시스템의 움직임에 대한 예측은 거의 불가능하다. 그러나 예상되는 움직임의 한계가 어디에 있는지를 알아내고 그 기본적인 요인들을 이해하는 능력을 높일 수는 있다. 그러므로, 생태계를 전부 예측하지는 못할지라도 어느 정도의 한계는 알 수 있으므로 이 한계 내에서 관리할 수 있다.

해양생태계 특성은 시간적으로나 공간적으로 매우 다양한 스케일로 변화한다. 예를 들면, 엘니뇨와 10년 주기 기후변동은 어종들을 이동시킬 뿐 아니라 군집의 구조를 바꾸고, 광대한 해양의 생산량을 변화시킨다(Steele 1996). 이런 사건을 예측하는 능력은 현재 조금씩 진전되고 있으나 불확실성의 정도가 아직은 크다. 그럼에도 불구하고, 해양생태계의 경계와 잠재생산량의 상한선 정도만을 이해한다면 이러한 지식을 동원해서 생태계 차원에서의 수산자원 관리에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

둘째, 생태계는 한계를 넘을 때 재구성이 불가능하게 되는 어떠한 정해진 한계 수준을 가진다. 생태계는 유한하며 붕괴될 수 있다. 그렇지만 높은 완충력을 가지며 외부압력에 대해 상당한 탄력성을 가진다. 이런 외부압력이 생태계에 종종 작용되는데 이 때에는 생태계의 구조나 특성이 단번에 눈에 띄게 변하지 않으며, 임계수

준(thresholds)에 도달한 후에는 급속하게 변화한다. 이러한 비선형 역학적 변동은 생태계의 하나의 기본적인 특성이다.

한계치(limits)에 대한 개념은 단일어종 어업관리에 잘못 사용되어 왔다. 왜냐하면 단일어종 관리에서는 생태계 차원의 한계치가 아니라 개체군 수준의 한계치인 적정어획사망을 또는 적정어획량과 같은 생물학적 기준점이다. 이 값들은 대부분 생태계의 다른 요소는 고려하지 않고 설정된다. 따라서, 과거에 사용되었던 자원관리의 목표수준들은 임계치에 너무 근접한 수준에서 추정되었기 때문에 결국 자원의 감소 또는 생물학적 균집에 대한 손실로 이어졌다(Caddy and Mahon 1995). 이러한 임계치는 종수준과 균집수준의 탄력성을 유지하기 위해서 피해야 한다. 어업의 목표수준은 잠재생산량과 생태계의 안정성을 절충하여 임계치 훨씬 이하의 수준에서 설정되어야 한다. 현재 비목표종의 임계수준은 대부분의 어업관리에서 고려되지 않고 있는 상황이다.

셋째, 생태계는 한번 한계를 초과하면 되돌릴 수 없다는 점이다. 생태계는 급격하게 변형되면 외부압력을 제거하더라도 원상태로 돌아오지 않는다. 이러한 현상은 대개 복잡한 시스템에서 보편적이다. 하구역이나 산호초(Hughes 1994), 망그로브 등의 생태계는 어획활동이나 양식, 서식처를 파괴시키는 기타의 행위들에 의해 되돌릴 수 없는 상태로 변화되어 왔다. 외양에서는 어획활동 만으로도 목표어종 뿐만 아니라 비목표 생물들의 균집과 생태계를 급변시켰다. 황해(Zhang et al. 1992)나 조지뱅크(Fogarty and Murawski 1998)와 같이 과도 어획된 시스템에서 어획노력량을 줄이더라도 이전 상태로 돌아올 수 있는지의 여부는 아직 확인되지 않은 시점에 있다. 연안 생태계에서는 종종 서식처의 파괴행위와 어획활동이 조합되어 생태계의 임계수준을 넘기는 경우가 많은데, 이 경우 원래 상태로 생태계를 되돌릴 수 있을지 회의적이다.

넷째, 다양성은 생태계 기능에서 중요하다는 점이다. 개체수준이나, 종, 균집차원에 있어서 구성요소들의 다양성은 생태계 특성에 강하게 영향을 미친다. 어떤 종이 생태계에 이입되거나 혹은 생태계로부터 제거되었을 때 그 생태계 전체의 생산량은 크게 변하지 않을지라도 그의 안정성과 탄력성은 영향을 받게 된다. 해양생태계에 있어서 남획이 다양성에 미치는 장기적인 영향에 대해서는 많이 알려져 있지 않다. 그렇지만, 남획으로 인해 한 생태계의 어획물 조성이 경제적 가치가 낮은 어종으로 대체되고 있다는 것은 명백한 사실이다(Deimling and Liss 1994, Fogarty and Murawski 1998, Zhang and Kim 1999). 생태계 수준에서 생각해 볼 때, 다양성의 급격한 변화가 확실히 일어나더라도, 생물학적 생산력은 대체 어종으로 전환되기 때문에 이러한 생태계가 비생산적이고 비효율적이라고 단언할 수는 없다. 그렇지만,

이러한 생태계는 종종 가치가 낮게 평가된다. 이 예로는, 파괴된 산호초 생태계를 가진 지역에서 관광수익이 떨어지는 것을 보면 알 수 있다.

다섯째, 생태계 내에서와 생태계 사이에는 다차원 규모의 상호작용이 존재한다는 사실이다. 생태계는 단일 시간이나 단일 공간의 차원으로 이해하기는 어렵다. 생태계에 어떠한 교란(perturbations)이 일어났을 때 그 영향이 분석되려면 관련되는 차원에서 한 단계 높은 차원과 한 단계 낮은 차원에서 동시에 고려되어야 한다.

해양생태계에 있어서 단일 차원에서의 교란으로 인한 영향은 한 단계 더 높은 차원이나 더 낮은 차원으로 확대되어질 수 있다(Langton et al. 1995). 예를 들어, 서식처의 일 부분에 해당하는 산란장이 파괴되면 서식처의 어종구성과 영양상호작용(trophic interaction)에 큰 영향을 주게 된다. 마찬가지로, 광역생태계에서 어획활동에 의한 영향은 시공간적으로 생태계의 구성요소들에 대해 심각한 영향을 준다. 미국의 동부베링해와 알래스카만에서의 저서어류의 어획이 바다사자 개체군의 감소에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 생태계 교란행위는 해양생태계가 개방되어 있으며 또한 해수에 의해 서로 연결되어 있다는 특징을 감안한다면 어떤 순간적인 작은 형태의 것일지라도 어떤 보이지 않는 영향을 줄 것이다. 이러한 특징은 한 차원에 가해진 외부압력이 생태계의 다른 차원에 전달되어 보이지 않는 영향을 미칠 수 있는 가능성을 더 높인다.

여섯째, 생태계 구성요소들은 서로 연결되어 있다는 원칙이다. 생태계내의 구성요소들은 복잡한 형태로 물질과 에너지의 흐름에 의해 연결되어 있다. 해양생태계에서 가장 중요한 연결은 포식자-피식자 관계에 의해 유지된다. 수명이 긴 대형의 포식자와 소형의 수명이 짧은 피식자(먹이생물) 모두 해양어업의 주요 대상이다. 과도한 어획은 어종들의 교체를 초래한다. 예를 들어, 대서양에서는 낮은 영양단계에 속하는 청어가 카나리로 교체되었으며, 높은 영양단계에 속하는 대서양 대구가 남획되어 상어와 가오리 개체군이 늘어났다(Fogarty and Murawski 1998). 한 생태계에서 수명이 긴 대형의 포식자의 감소는 특별한 관심 사항이다. 왜냐하면, 포식자들은 낮은 영양단계에서의 생물과정에 top-down control작용을 하기 때문이다. 전 세계의 어획자료에 의하면 어획된 어류의 평균 영양단계가 1950년~1994년간 상당히 감소되었다(Pauly et al. 1998). 영양단계를 감소시키는 어획은 본연의 포식자-피식자 관계를 붕괴시키면서 처음에는 어획량 증가를 가져 오겠지만, 곧 이어 어획량을 정체시키다가 궁극적으로는 감소시키게 된다.

일곱번째, 생태계의 경계는 개방되어 있다는 사실이다. 생태계는 평형상태에 있지 않으며 생태계의 경계와 에너지 흐름, 물질의 내부순환에 관한 지식이 없이는 생태계를 어느 정도 이해할 수 없다. 환경의 변화는 생태계의 공간적인 경계와 생

태계로의 에너지 유입형태를 변형시킬 수 있다.

해양생태계의 생산잠재력은 시공간적 차원에서 환경 변화에 특히 민감하다. 생태계의 경계는 장단기간의 기후변동에 따라 바뀐다. 어종들의 밀도와 분포는 해양 특성의 연변동이나 10년주기의 변동에 따라 변한다(Pearcy and Schoener 1987, Polovina et al. 1995, Roemmich and McGowan 1995, Francis et al. 1998, McGowan et al. 1998, Zhang et al. 2000). 개방된 생태계에서, 엘니뇨와 같은 해양 조건의 변동과 결합하여 한정된 지역에서 행해지는 과도한 어획은 어업의 붕괴와 영양단계간 에너지 흐름의 변동을 유발시킨 바 있다(Walsh 1981, Barber and Chavez 1983).

여덟번째로, 생태계는 시간에 따라 변화한다는 원칙이다. 생태계는 인위적인 영향에 의해서 뿐 아니라 자연적으로도 시간에 따라 변화한다. 생태계의 각 구성요소는 서로 다른 비율로 변화한다. 해양생태계에서 기후변동은 많은 변화를 초래하였지만, 인간에 의한 영향이 배제된 경우의 생물학적 상호작용은 대부분 알려져 있지 않다. 인위적인 해양생태계의 변화는 특히 연안과 하구 생태계 또는 폐쇄성 해역(샌프란시스코만 (Nichols et al. 1986), 미국의 5대호, 흑해, 아랄해, 체사피크만, 황해)에서 뚜렷하다. 종의 이식이나 부영양화, 하구연 축조, 미숙한 어업관리 등은 이러한 변화를 일으키는 좋은 예이다. 수명이 긴 포식자를 목표로 하는 어업은 군집구조에 상승효과를 주는 반면, 수명이 짧은 먹이생물에 대한 과도한 어업은 먹이에 대한 변화에 빨리 적응하지 못하는 고래와 같은 최고포식자에 대해 의도하지 않은 영향을 일으킬 수 있다. 연안 생태계 환경이 악화되면 양식이나 기타의 다른 수단에 의해서 생산을 증가시키기 위한 노력을 하게 되고 이것은 궁극적으로 또한 오염과 노폐물을 유발하게 된다(Wu 1995).

#### 다. 수산자원 관리에서 생태계 모델링 연구체제

##### (1) 대상생태계 정의

생태계 모델을 구축하기 위해서는 먼저 조사대상해역의 경계 및 면적이 명확히 정의되어야 한다. 경계를 정의함에 있어서 대상해역의 해수이동, 수온, 염분, 영양염류 분포 및 이동, 그리고 저질구조 등과 같은 해양물리학적 및 지화학적 특성, 생물의 분포양상과 이동경로의 파악 등 생태학적 관점에서 대상생태계의 설정이 필요하다.

##### (2) 서식 생물종 파악

대상생태계가 설정되면 그 해역에 서식하는 모든 생물들, 즉, 기초생산자에서부

터 최고포식자(상어류, 고래류)에 이르기까지 모두 파악되어야 하며, 또한 해양생물은 아니지만 이들에게 직·간접적으로 영향을 미치는 바다새류까지 포함되어야 한다.

### (3) 생물군 그룹핑

서식 생물종들이 파악되면, 이 수많은 생물들을 생태학적 유사성에 따라 하나의 종 또는 여러 종들을 묶어서 그룹으로 나누어야 한다. 따라서 세부적인 생태·생리학적인 연구가 이루어져야 의미 있는 그룹을 나눌 수 있다. 동일 그룹에 속하는 생물들은 영양단계(trophic level)가 같아야 한다.

### (4) 해양조사 및 자원조사

현재까지 연구된 관련 자료 및 보고서를 근거로 조사된 생물들을 개략적으로 분류하면 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 해조류, 저서동물 그리고 어류로 나눌 수 있고 여기에 고래류 및 바다새류를 포함시킬 수 있다.

#### (가) 해양조사

미세생물 및 플랑크톤 조사, 그랩샘플링, 방향구법 등에 의해 미세생물, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 해조류 그리고 저서동물에 대한 생산량(P)과 현존량을 조사하여 이들로부터 생체량(B) 및 사망률(P/B)을 구해야 한다. 또한, 각 생물의 식성조사에 의해 섭식량(Q) 및 먹이조성( $D_{ij}$ )을 구하고, 섭식량(Q)과 생체량(B)을 이용하여 체중당섭식량(Q/B)을 추정해야 한다. 고래류 및 바다새류의 경우도 마찬가지로 실제 채집조사 및 목시조사 등에 의해 생산량(P), 생체량(B), 사망률(P/B), 섭식량(Q), 먹이조성( $D_{ij}$ ) 그리고 체중당섭식량(Q/B)이 분석되어야 한다. 또한 미세생물 먹이망(microbial loop)을 밝혀서 이를 모델에 포함시켜야 한다. 각 파라미터의 기본단위는  $t/km^2/year$ 이다.

#### (나) 직접자원조사

주 관리대상이 되는 어류에 대해서는 직접자원조사를 실시해야 한다. 저어류의 경우에는 저층트롤조사, 그리고 부어류는 표층트롤조사 및 과학어탐조사를 수행하여 자원량(B)이 추정되어야 한다. 또한 각 생물들의 체장-연령조성을 분석하여 사망률(P/B)을 구해야 하며, 식성조사에 의해 섭식량(Q) 및 먹이조성( $D_{ij}$ )을 구해야 한다. 자원량(B)과 섭식량(Q)을 이용하면 체중당섭식량(Q/B)을 구할 수 있다. 각 파라미터의 기본단위는 동일하다.

#### (다) 어업자원조사

어업별 어종별 어획량(C)조사를 통해 어종별 연령조성 및 식성을 분석하여야 한다. 따라서 어획량과 연령조성자료를 사용하여 사망률(P/B)이 추정되고, 코호트 분석법을 사용하여 간접적으로 자원량(B)을 추정할 수 있으며, 식성연구에 의해 섭식량(Q), 먹이조성( $D_{ij}$ ) 그리고 체중당섭식량(Q/B)을 분석할 수 있다. 각 파라미터의 기본단위는 동일하다.

#### (5) 기본입력자료 비교 분석

직접조사방법(해양조사, 트롤조사, 과학어탐조사)과 간접조사방법(어업자원조사)에 의해 추정된 기본입력자료 (생산량(P), 자원량(B), 어획량(C), 사망률(P/B), 섭식량(Q), 먹이조성( $D_{ij}$ ), 체중당섭식량(Q/B))는 서로 비교 분석하여 수정·보완되어야 한다.

해양조사 및 자원조사에 의한 결과와 보정된 기본입력자료를 바탕으로 대상생태계를 재설정하고 조사에 의한 생태·생리학적 특성에 따라 생물군을 재그룹핑하여 생물군별로 기본입력자료를 재계산하는 feedback loop 체제를 구축해야 한다.

#### (6) 생태계 구조 파악

위 연구 결과를 이용하여 생태계 구조 분석 모델 (예로, Ecopath)에 의해 에너지 흐름에 의한 생태계 구조를 파악하고, 이에 근거하여 환경수용량을 추정한다.

#### (7) 생태계 변화 예측 및 기능 연구

생태계 구조 분석 모델에 의해 추정된 생태계 구조를 바탕으로 생태계 역학 모델 (예로, Ecosim)을 사용하여 생태계내 인위적인 시설에 대해서나 혹은 어업별 어종별 어획강도에 따른 생태계 구조의 변화를 시뮬레이션 하여 예측해 봄으로써 안정적인 생태계 구조 유지를 위한 관리 방안을 모색해야 한다

#### 라. 해양생태계 분석 모델

지금까지 많은 생태계 분석모델들이 제시되었지만 해양생태계의 영양관계 분석에 사용되는 실용적인 방법은 Polovina(1984)에 의해서 개발된 Ecopath 모델이다. 이것은 Christensen and Pauly(1992, 1995)에 의해 더욱 발전되었고, 수산자원의 평가나 양식장의 평가와 같이 수중 생태계에 널리 응용되고 있으며 또한, 최근에는 육상목장 시스템(farming system)을 분석하는데도 적용되고 있다(Dalsgaard et al., 1995). Ecopath는 주어진 시스템에 대한 정보를 요약할 수 있는 방법으로 인정을

받고 있다. 즉, 이 모델을 사용해서 생태계의 구조와 기능을 설명해 주는 다양한 생태계 특성치를 계산하고 이 값들을 다른 생태계의 값들과도 비교할 수 있다.

1976/77 기후체제 변화는 수산자원의 변동뿐만 아니라 더 나아가 해양 생태계 차원에서의 변화를 초래하였다. 그러므로 본 연구에서는 생태계 모델 가운데 가장 용이하게 적용이 가능한 모델로 알려진 Ecoph/Ecosim 모델(Polovina 1984; Christensen and Pauly 1992; Walters et al., 1997)을 사용하여 해양환경 변화로 인한 생태계의 구조 변화를 설명하고 생태계를 고려한 생태계 차원의 관리 방안을 제시하고자 하였다. 또한 자원 역학 모델을 생태계 차원으로 확장시켜 생태계를 구성하는 생물 그룹들 간의 생태학적 기본 파라미터를 추정하여 생태계의 구조 및 생물군의 지위와 역할을 규명하였다. 그림 96은 해양생태계 모델링 연구체제와 방법에 관한 flowchart이다.

#### 다. 기후체제 변화에 따른 동해 생태계의 구조변화

1976/77년 기후체제전환(climatic regime shift : CRS)을 전후하여 각 생물종의 생체량을 비교한 결과 유기퇴적물을 제외한 총 21개의 그룹 중에서 기후체제전환 후에 있어서 6개 그룹의 생체량은 감소한 반면 13개 그룹의 생체량이 증가하였다(표 14). 이 중 썩치, 도루묵의 생체량은 각각 64%, 79% 감소하였고 정어리, 쥐치, 명태의 생체량은 각각 165%, 21,700%, 174% 증가하는 경향을 보였다. 총 생체량은 15% 감소하였으며, 이것은 총 생체량의 대략 50%를 차지하는 식물성 플랑크톤의 생체량이 크게 감소하였음에 기인한다. 기후체제전환 이전과 이후의 어획량은 17개의 그룹 중에서 기후체제전환 이후 5개 그룹의 생산량은 감소하였고 12개 그룹의 생산량은 증가하였다(표 15).

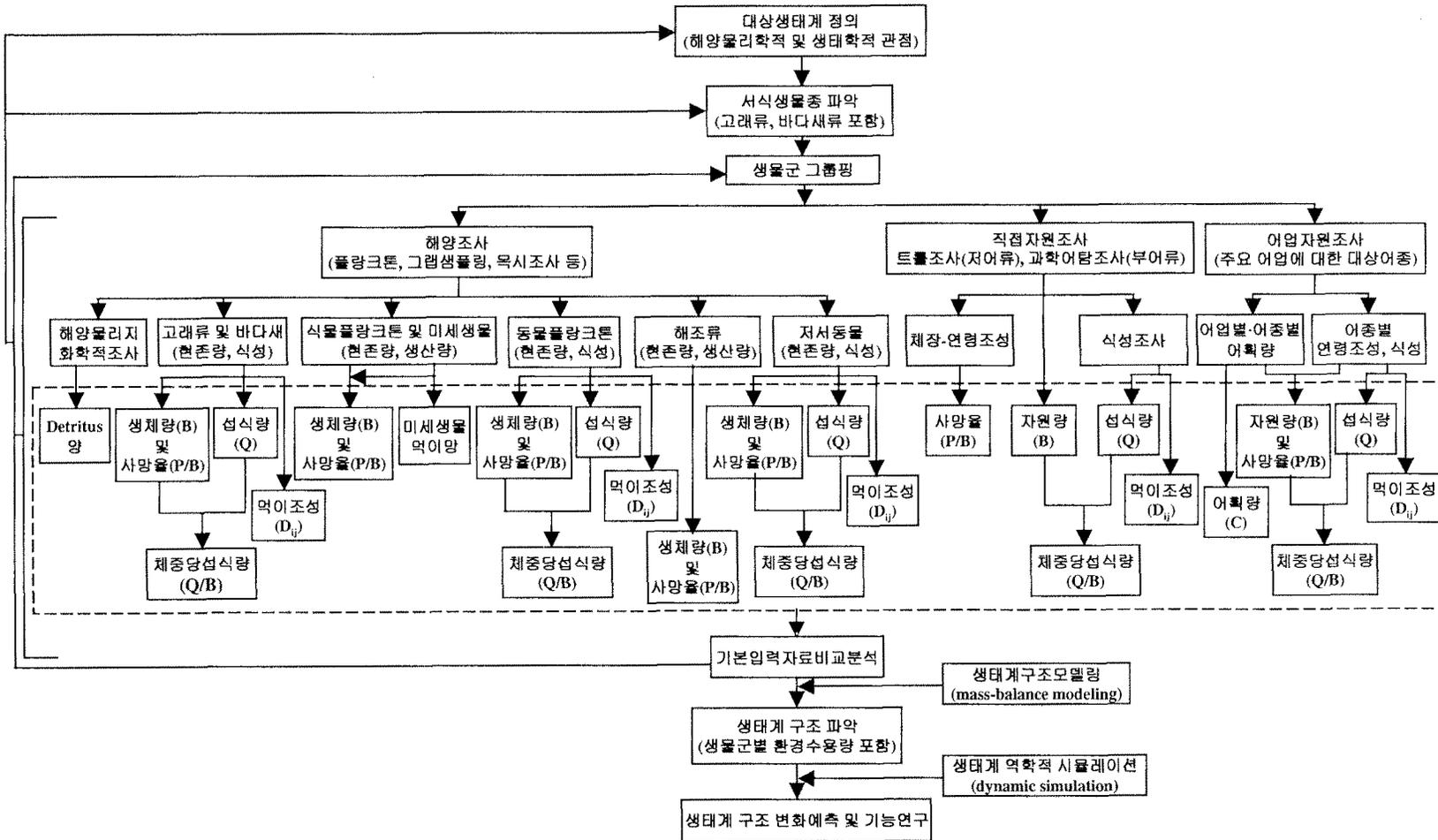


그림 96. 해양생태계 모델링 연구체제와 방법에 관한 도표

표 14. 동해 주요 생물군의 기후체제 전환 이전과 이후의 생체량 변화

그룹명	자원량 (t/km <sup>2</sup> )		변화율
	CRS 이전	CRS 이후	
최고포식자	0.003	0.003	-
고래류	0.032	0.045	41%
소형 상어류	0.011	0.008	-27%
바다새	0.006	0.006	-
꽁치	0.239	0.086	-64%
정어리	0.117	0.310	165%
쥐치	0.001	0.218	21,700%
소형 부어류	0.136	0.284	109%
대형 부어류	0.009	0.020	122%
명태	0.427	1.169	174%
도루묵	0.151	0.031	-79%
반저서성어류	0.041	0.061	49%
저서성어류	0.019	0.046	171%
두족류	0.431	0.319	-26%
저서 섭어자	0.230	0.685	198%
표생동물	0.044	0.107	143%
복족류	0.041	0.113	173%
내생동물	0.011	0.023	110%
동물플랑크톤	4.483	5.470	22%
해조류	3.813	0.079	-98%
식물플랑크톤	7.459	7.081	-5%
총생체량	17.702	16.164	-9%

\* CRS : 기후체제전환

표 15. 동해 주요 생물군의 기후체제 전환 이전과 이후의 어획량 변화

그룹명	자원량 (t/km <sup>2</sup> )		변화율
	CRS 이전	CRS 이후	
최고포식자	-	-	-
고래류	866	1,215	40%
소형 상어류	79	34	-57%
바다새	-	-	-
꽂치	29,418	10,641	-64%
정어리	17	3,260	19,076%
쥐치	126	27,181	21,472%
소형 부어류	7,341	23,113	215%
대형 부어류	1,087	2,485	129%
명태	37,929	103,858	174%
도루묵	13,370	2,775	-79%
반저서성어류	1,766	4,403	151%
저서성어류	2,128	5,647	164%
두족류	41,655	30,798	-26%
저서 섭이자	605	1,398	131%
표생동물	1,681	3,665	118%
복족류	1,306	3,568	173%
내생동물	148	1,635	1,005%
동물플랑크톤	-	-	-
해조류	18,245	7,549	-59%
식물플랑크톤	-	-	-
총생체량	157,767	233,226	48%

\* CRS : 기후체제전환

이 중 꽂치와 도루묵의 생산량은 감소하였고 정어리, 쥐치, 명태의 생산량은 큰 폭으로 증가하였다. 플랑크톤을 제외한 주요 생물종의 비율은 두족류가 가장 큰 비율을 차지하였으나 기후체제전환 이후에는 명태가 가장 많은 비율을 차지하였다.

그림 97은 동해 생태계에서 각 생물간의 상호작용과 에너지 흐름을 나타낸 그림이다. 이것은 22개의 그룹을 대상으로 추정된 것이며 기후체제 전환 이전과 이후의 에너지 흐름은 비슷하게 나타났다. 동해의 생물종은 대부분이 영양단계의 3단계인 2차 소비자에 속하였다.

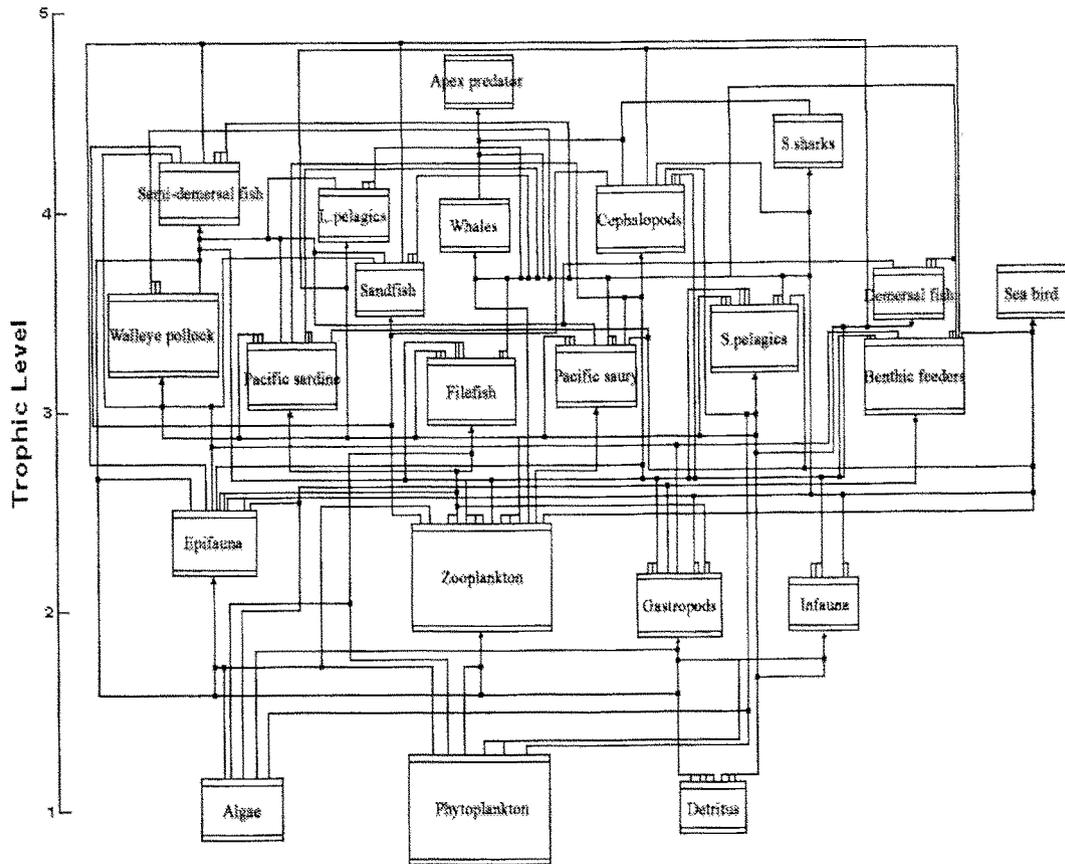


그림 97. 동해 생태계의 영양학적 상호 관계를 나타낸 흐름도

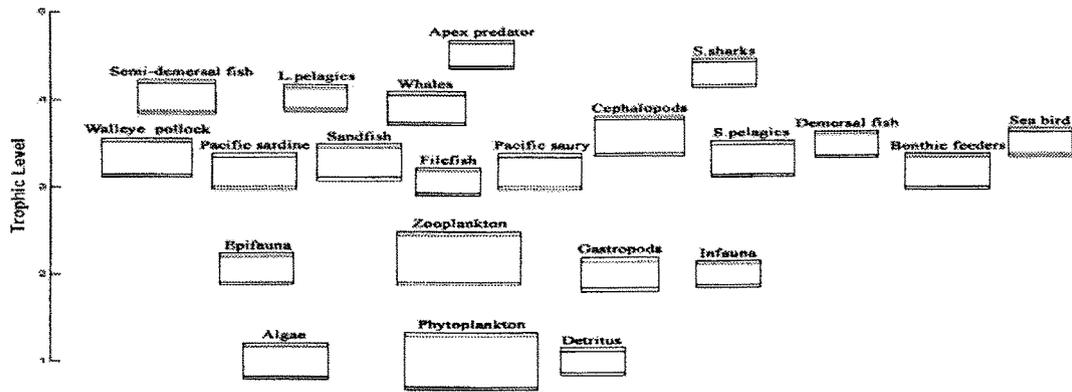
동해에 서식하는 각 생물종에 대한 어획물의 영양단계를 추정한 결과 평균 영양 단계는 3.09에서 3.28로 다소 증가한 경향을 보였으며(표 16), 이것은 어획물에 있어서 정어리, 쥐치, 명태 등의 생산량이 크게 증가하였기 때문이다. 기후체제 전환 이후 소형 상어류, 꽂치, 도루묵, 두족류 그룹을 제외하고 영양단계 III 또는 IV에 속하는 상위 포식자의 자원량 수준은 높아졌으며, 하위 영양단계인 I 또는 II에 속하는 그룹에서는 해조류와 식물 플랑크톤이 낮은 자원량을 나타낸 반면, 표생저서동물, 복족류, 내생저서동물, 동물 플랑크톤의 자원량은 높게 나타났다(그림 98).

동해 생태계의 대부분의 그룹들이 속하는 영양단계 3단계에서의 총 에너지 흐름에 대한 기여도를 기후체제 전후에 있어 비교해본 결과 기후체제 전환 이전에는 두족류 약 38%, 명태 19%, 저서섭이자 15%의 순이었다. 기후체제 전환 이후에는 명태가 약 33%, 저서섭이자가 27%, 두족류 17%의 기여도를 보였다. 이는 생태계 내에서 우점종에 의한 위상이 두족류에서 명태로 전환되었음을 의미한다. 또한 기후

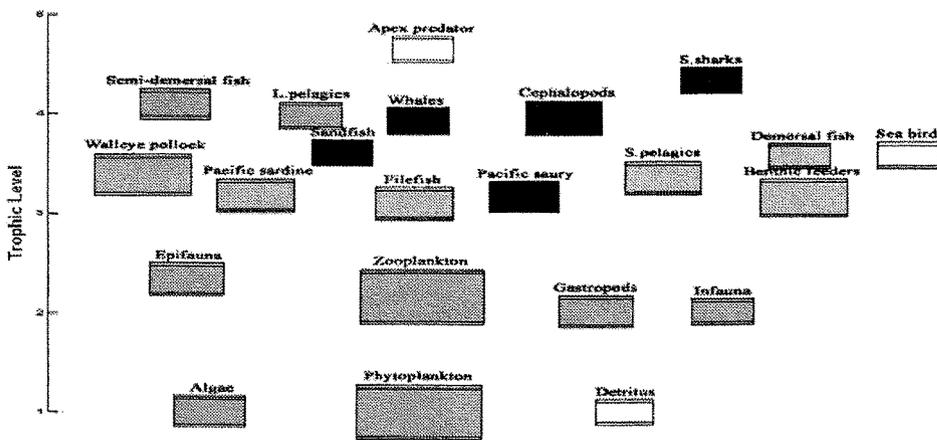
체제 전환 후에 어획량의 증가를 기록한 정어리, 쥐치, 명태와 어획량의 감소를 기록한 꽁치와 도루묵 등 5종의 기여도를 기후체제 전환 전후에 있어 비교해본 결과 정어리, 쥐치, 명태는 각각 63%, 16,237%, 69%의 기여도의 증가를 보인 반면, 꽁치와 도루묵은 각각 78%, 87%의 감소를 기록했다(그림 99). 기후체제전환은 생태계를 구성하는 주요 생물종의 지위와 역할뿐만 아니라 수산자원의 생산량에도 큰 변화를 초래하는 것으로 분석되었다.

표 15. 동해 주요 생물군의 기후체제 이전과 이후의 영양단계

그룹명	영양 단계	
	CRS 이전	CRS 이후
최고포식자	4.52	4.59
고래류	3.90	3.89
소형 상어류	4.30	4.29
바다새	3.50	3.54
꽁치	3.18	3.14
정어리	3.18	3.14
쥐치	3.07	3.07
소형 부어류	3.32	3.32
대형 부어류	4.03	3.94
명태	3.34	3.35
도루묵	3.30	3.57
반저서성어류	4.04	4.05
저서성어류	3.49	3.54
두족류	3.59	3.91
저서 섭이자	3.18	3.12
표생동물	2.07	2.33
복족류	2.00	2.00
내생동물	2.00	2.00
동물플랑크톤	2.18	2.00
해조류	1.00	2.14
식물플랑크톤	1.00	1.00
총생체량	3.09	3.28



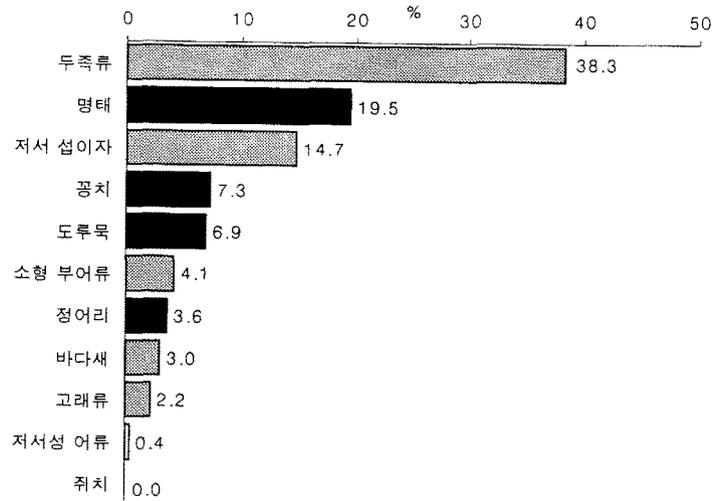
(a) pre-CRS



(b) post-CRS

그림 98. 기후제체 전환 이전 (a)과 이후 (b)의 동해 생태계 구조의 변화 (흰색은 자원량의 변화가 없는 생물군, 검은색은 자원량이 감소한 생물군, 회색은 자원량이 증가한 생물군을 나타낸다)

(a) CRS 이전



(b) CRS 이후

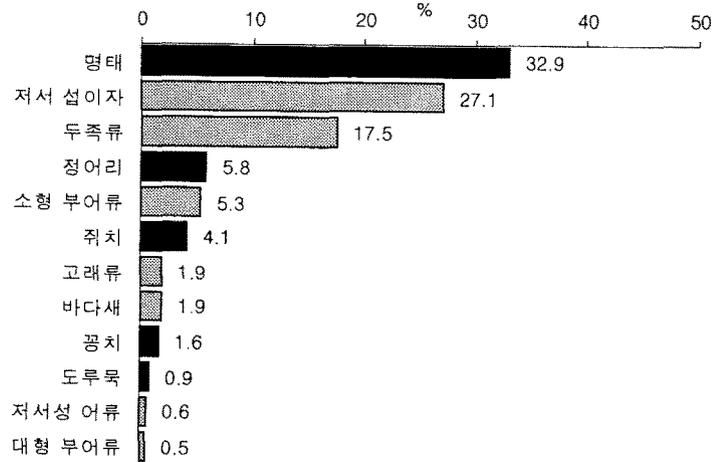


그림 99. 기후체제 전환 전후에 있어 영양단계 III에서의 총 에너지 흐름에 대한 각 생물군의 상대적 기여도

## 4 장. 본 연구의 기대효과 및 관련분야에의 기여도

### 1 절. 기술적 측면

- 기후변동 연구를 시작함으로써, 학문 분야별 유기적 연결 관계가 형성되어 학문적 성숙이 이루어짐.
- 새로운 연구주제를 제시함으로써, 선진국형 해양학을 시작하는 기점이 될 수 있음.
- 동해 해양환경 및 수산자원에 대한 새로운 발견.

### 2 절. 경제·산업적 측면

- 기후변동의 영향이 사회 전 분야에 걸쳐 발생한다는 사실을 일반인들에게 인식 시킴.
- 장기적으로, 예상되는 산업구조의 개편에 대처할 수 있는 방안을 만들어 경제적 파국을 막음.
- 남북한 및 다국간 해양 관리체제를 구축하는 시발점으로서의 역할.

## 5 장. 연구개발 결과의 활용계획 및 향후 조치사항

### 1 절. 활용방안

1. 수집된 해양 및 대기 자료는 이후의 기후변동 예측연구를 위해서도 유용하게 이용할 수 있으며, 물리 변수와 생물변수의 상관 관계를 통해서 생물량 변동을 예측하는데 사용할 수 있다. 해양환경을 고려한 합리적인 수산자원관리 방안을 수립하는 자료로 제공되며, 거시적인 관점에서 수산자원을 평가하고 관리하는 인식 전환의 계기를 마련한다.
2. 동해 생태계를 파악하기 위한 주변국과의 공동으로 자원조사 및 해양조사를 실시하고 주요 수산자원에 대한 계절적 회유경로, 자원량, 생태학적 파라미터 등에 관한 자료와 정보의 교환에 의한 공동 자원평가 및 관리의 필요성을 제시할 수 있다.
3. 동해의 경년 변동이 동아시아 몬순과 엘니뇨와 상관 관계가 있다는 연구 결과는 현재 전 세계적으로 연구가 집중되고 있는 지구 규모의 기후 예측 결과를 바탕으로 동해의 기후 변동을 추정할 있는 기초 자료가 될 수 있다. 또한, 동해 및 우리나라 주변해역 물리 변수의 자연적인 변동특성을 파악하였으므로, 우리가 해양모니터링 프로그램을 지속적으로 유지한다면, 동해에서 서서히 진행되는 해양환경 변화를 감지할 수 있다.
4. 동물플랑크톤 생산력에 대한 연구 결과는 하위영양단계에서의 생물생산력이 기후변동과 관련된 환경 변화에 어떻게 반응하는지에 대한 지표로서 이용될 수 있으며, 해양생태계의 구조와 기능 분석에 필요한 중요한 정보를 제공할 수 있다.
5. 기후변동에 민감한 표영성 어류에 대해 기후변화가 해양생태계에 미치는 영향에 관련된 생태학적 과정과 구체적인 메커니즘을 밝히는데 기초 자료로서 활용될 수 있으며, 해양생태계 구조분석에 대한 방법론과 생태계 차원의 종합관리방안을 제시하는 기초자료로 활용할 수 있다.
6. 동해의 해역별 해조분포의 특성을 분석함으로써 동해연안의 위도에 따른 쿠로시오 난류의 영향 변동을 모니터링 할 수 있다.

7. 기후변동에 따른 동해 수산자원 변동에 대한 구체적 연구과제를 제시함으로써, 국가 정책의 방향을 설정하는데 도움을 줌.

(예1) 고등어 자원이 엘니뇨가 발생하던 해에 급격히 증가한다는 결론을 도출한다면, 몇 달 전에 고등어 어황에 대한 예보를 실시할 수 있음.

(예2) 기후가 온냉기간 동안에 오징어 자원에 대한 어획 정도가 달라진다면 (그림 100), 그에 따라 향후 몇 년간의 오징어 어업에 대한 정부의 수산 정책을 수립하는데 도움이 될 것임.

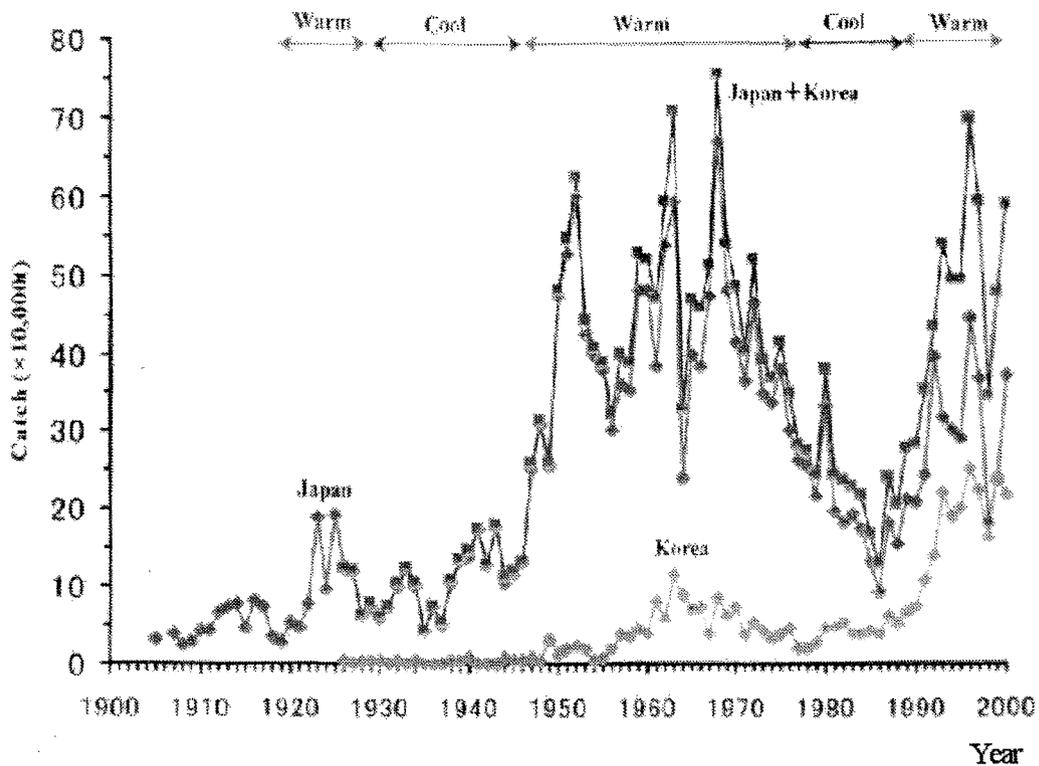


그림 100. 기후변동과 우리나라, 일본의 오징어 어획량 변동 (T. Sakurai, personal communication)

## 2 절. 연구개발 성공시 다음단계 조치사항

본 과제의 결과로서 과거 우리나라 해역에서 발생하였던 기후의 변동과 해양생태계 및 수산자원의 변동에 관한 상관관계가 개략적으로 파악될 수 있으리라 생각된다. 이미 앞의 “활용방안”에서 언급되었듯이 기후환경에 따른 특정 수산자원의 성쇠에 대한 경향이 발견된다면, 이를 향후의 수산정책의 근간으로 삼을 수 있다. 하지만, 이러한 결과는 환경과 특정생물군의 관계 및 경향에 대한 통계적 추론일 뿐, 두 요인 사이에 발생하였던 기작을 설명하여 주지는 않는다. 본 연구는 기상, 해양, 수산 분야에 산재하여 있었던 통계자료를 기후변동의 시각에서 통합적으로 재해석하겠다는 일차적인 목표를 설정하였다. 그러므로 과거의 해양조사가 환경과 생물들의 반응에 대한 인과관계를 파악하기 위하여 필요한 모든 사항에 대하여 조사된 것이 아니기 때문에, 향후에 발생할 기후변동이 생태계의 모습을 어떻게 개편할 것인가를 정확하게 예측하기에는 무리가 있다. 따라서 국가정책으로서 합리적인 수산자원관리 방안을 수립하기 위해서는 보다 정밀한 연구사업들이 제안되어, 동해 생태계에서 진행되고 있는 물리현상과 생명현상 사이에 존재하는 기작 (mechanism)과 그 작용에 의한 생태계의 모습을 예측(prediction)하는 연구가 진행되어야 한다. 관계기관과 협의하여 본 과제로부터 제안된 시급한 연구를 수행하기 위한 연구비를 확보하는 노력이 향후 단계의 첫 번째 조치사항이 될 것이다.

## 6 장. 연구개발 과정에서 수집한 해외 과학기술정보

### 1 절. 인근 국가의 GLOBEC 프로그램

#### 1. 중국 GLOBEC 프로그램

##### 가. 목표 및 연구주제

중국 정부(National Natural Science Foundation of China)는 1994년에 중국 GLOBEC 프로그램을 개설하여, 최우선 과제를 “중국해의 생태계 역학과 해양생물자원의 지속적 이용 (Ecosystem dynamic and sustainable utilization of living marine resources in China seas)”로 선정하였다. 중국 GLOBEC 프로그램의 목표는 기후와 인간활동의 변화가 연안역 생태계에 미치는 영향을 규명하며, 이에 따라 해양환경과 수산자원이 어떻게 변화하는지 예측하는데 있다. 중국 GLOBEC은 5개의 주요 연구 주제를 선정하여 중점적으로 다루고 있는데, 각각은 아래와 같다.

- (1) 연안역 생태계의 구조, 환경수용력, 건강상태,
- (2) 먹이망 및 영양역학,
- (3) 해양오염의 조절에서 물리학적 과정과 물리-생물 상호작용의 역할,
- (4) 주요 수산생물종의 가입과 교대에 대한 기작,
- (5) 물리-생물-화학 접합 모델

##### 나. 단계별 연구

중국 GLOBEC 프로그램은 1단계 연구사업으로 발해 프로그램(Bohai Sea Program)을 1997년~2000년 동안에 수행하였으며, 2단계에서는 동중국해 및 황해프로그램(East China Sea and Yellow Sea Program)을 1999년~2004년에 수행하고 있는데, 해양의 소형표층어류자원에 연구의 초점을 맞추고 있다.

- (1) Bohai Sea Program (1997-2000): “발해 생태계 역학 및 생물자원의 지속적 이용“이라는 주제로 주로 내부(Program)의 초기 발생, 동물플랑크톤의 개체군 동태 및 생태계 생산력에 대한 역할, 먹이망의 영양역학 및 우점종의 교대, 생태계 모델링 등의 연구를 추진하였음.

(2) East China Sea and Yellow Sea Program (1999-2004): 중국 GLOBEC의 일단계 연구인 발해만 연구계획이 성공적으로 수행되자, 중국 정부가 5년 동안에 450만 달러를 투자하여, 9개의 연구소와 약 100명의 해양학자들을 동원하여 수행하는 연구 프로그램이다. 주요 목표는 동중국해 및 황해에서 생태계 역학에 영향을 미치는 주요 과정을 규명하고, 모델링을 통한 생태계 예측 능력을 함양하고, 생태계의 지속적인 이용과 수산업과 해양생물에 대한 효율적 관리를 할 수 있는 과학적 근거를 제시하는데 있음.

## 2. 일본 GLOBEC 프로그램

### 가. 현황 및 연구주제

일본 정부는 해양지구과학 분야의 중요한 연구과제 15개 중에서 첫 번째와 두 번째를 지진 관련 연구과제로 지정하였으며, “기후변동과 수산자원 변동의 상관에 대한 수치모델 개발”과제를 세 번째의 중요한 연구과제라고 지정하였다. 이에 따라 일본 해양학자들은 1993년 일본과학평의회(Science Council of Japan) 산하에 Japan-GLOBEC Subcommittee를 구성하였다. 각 지역 국립수산연구소 및 대학교는 기존의 연구를 확대하여 GLOBEC 연구체제로 전환하거나 새로운 과제를 개발 중에 있다. 일본 GLOBEC 위원회는 이미 6차례의 심포지움을 개최하였으며, 2000년부터는 한국 GLOBEC 위원회와 2년에 한번씩 국제심포지움을 추진하고 있다.

일본 GLOBEC 프로그램의 목표는 기후 변화와 인간활동에 대한 해양생태계의 반응 규명, 탄소와 다른 영양염 순환의 생물학적 조절 기작 규명, 해양생물자원의 합리적 이용과 증식기술을 위한 기반연구의 3가지이다. 주요 연구주제는 4가지로 각각 아래와 같다.

- (1) 과거 자료의 재분석: 기후 도약 현상에 대한 해양생태계의 반응
- (2) 소형표층어류의 가입기작: 물리-생물 상호작용
- (3) 수치모델링과 해양관측: 생태계 분석 및 통합
- (4) 동물플랑크톤 및 소형 유영어류의 먹이망 역학: 영양 역학 상호관계

### 나. GLOBEC 연구 프로그램

일본의 GLOBEC 관련 연구는 크게 아래의 5가지 프로그램으로 구성되어 있으나, 이외에도 여러 국제 프로그램과 긴밀한 연계를 갖고 공동연구를 추진하고 있다.

- (1) HUBEC (Hokkaido University Subarctic Ecosystem Dynamic and Climate): 냉수성 어종인 명태와 그 주요 먹이인 난바다곤쟁이류에 대하여 초점을 맞춘 연구사업으로, 주로 홋카이도 대학의 연구진에 의하여 1993년부터 지속적으로 수행되고 있다. 홋카이도 연안, 북태평양, 베링해로 연구 해역을 확장 중에 있으며, 미국 알래스카 대학, 워싱턴 대학과 활발한 교류를 통하여 명태 생태학에 대한 동서 비교를 꾀하고 있다.
- (2) ORI-GLOBEC (Ocean Research Institute of Tokyo University-GLOBEC): 주로 동경대학 교수진에 의하여 난류인 쿠로시오와 한류인 오야시오가 만나는 해역에서의 물리현상, 생산력, 표층성 어류 자원의 가입 및 서식 등에 대한 연구를 수행하고 있다. 본 프로그램은 그들의 기존 연구에 GLOBEC 개념을 도입하여 연구를 수행하는 것이다.
- (3) VENFISH (Comprehensive Study of the Variation of the Oceanic Environment and Fish Populations in the Northwestern Pacific): 1997년부터 2002년까지 수행되는 국립연구소의 연구과제로서 쿠로시오/오야시오 해역에 서식하는 꽁치와 명태자원의 연간 변동 및 십년 주기 변동에 대한 기작을 규명하는 것이 주목적이다. 일년에 약 70만 달러의 연구비를 투입하고 있으며, Tohoku National Fisheries Research Institute (Tohoku NFRI), Hokkaido NFRI, National Research Institute of Fisheries Science (NRI Fisheries Science), NRI Far Seas Fisheries, National Fisheries University, Hokkaido Univ., Tohoku University가 연구에 참여하고 있다.
- (4) FRECS (Researches on the fluctuation of recruitment of fish eggs and larvae by changes of spawning grounds and transport pattern in the East China Sea): 일본 수산청에 의하여 개발된 또 다른 연구과제로서, 연간 약 80만 달러를 투입하여 2000~2005년 동안에 동지나해와 대만난류 해역에 서식하는 소형표층어류를 연구하는 프로그램이다. 크게 아래와 같은 4분야의 연구를 수행하고 있다.

- (가) 표층어류의 산란장 형성에 영향을 미치는 환경요소의 규명  
 (나) 동중국해의 해양 조건의 구조와 변화

(다) 표층어류의 초기 발생시기의 수동적, 능동적 이동 기작

(라) 가입과 자원량 변동에 대한 모델링

(5) SO-GLOBEC (Southern Ocean-Global Ocean Ecosystem Dynamics):

지구온난화가 지속적으로 진행된다면 남극해 및 남극해 생태계가 영향을 받게 될 것이며, 특히 펭귄과 크릴의 변화하기 위한 예측 프로그램이다.

주로 일본극지 연구소 연구원들이 그들의 기존 프로그램에 GLOBEC의 개념을 도입하여 연구 사업을 수행하고 있다.

### 3. 일본 해구수산연구소 자료 정리

일본에서는 1900년부터 해역별 어획량을 표층성어종과 저층성어종으로 나누어 정리하고 있다. 표층성 어종은 멸치, 정어리, 눈멸통, 쾡치, 날치류, 청어, 전갱이류, 물치다래류, 고등어류, 송어, 농어, 방어, 가다랑어의 13종이며, 저층성 어종은 도루묵, 홍살치, 넙치 종, 황돔, 참조기, 붉돔, 임연수, 감성돔, 명태, 참돔, 넙치, 대구, 갯장어, 갈치의 14종이다.

이중 1960~1985년까지의 어획량 자료를 토대로 일본의 어획량을 조사하였다. 표층성 어종은 1973년까지는 100만톤 이하의 어획량을 보이다가 이후 서서히 증가하여 1984년에는 약 200만톤을 어획하였다. 반면, 저층성 어종은 1973년과 1977년에 약간의 증가가 나타나기도 하지만 대체로 40만톤의 어획량을 보이고, 이후 1985년까지 서서히 감소하였다.

동해의 주요 어종인 명태, 도루묵, 쾡치의 자원량 변동을 살펴보기 위하여, 우리나라와 일본 서쪽 해역의 어획량을 합하여 분석하였다. 명태와 도루묵의 어획량은 우리나라와 일본에서 유사하게 나타났다. 1970년대 중반까지는 도루묵의 어획량이 높다가 이후 명태의 어획량이 높게 나타났다. 그러나 쾡치의 경우, 일본의 어획량은 대체로 일정한 반면, 우리나라의 어획량은 1970년대 중반을 기준으로 급격히 감소한 것이 관찰되었다(그림 101). 러시아와 북한의 자료를 보충하여 분석하면 동해 전해역에서의 어획량, 자원량의 변동을 파악할 수 있으리라 생각된다.

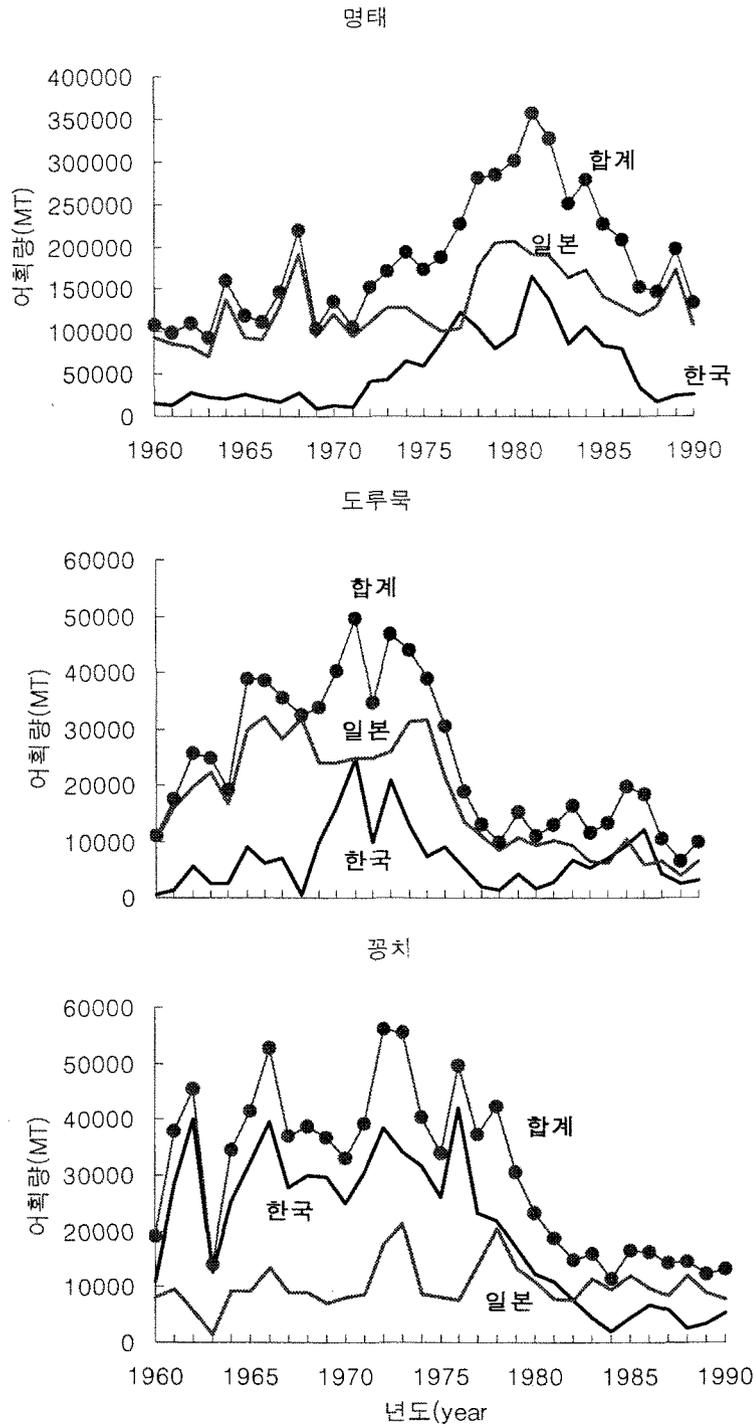


그림 101. 우리나라와 동해쪽 일본 해역의 명태, 도루묵, 공치의 어획량 변동 (1960~1990)

## 2 절. 국제 GLOBEC 프로그램과 기후변동에 따른 해양 연구 과학 지침

GLOBEC은 기후변화에 따른 생태계의 중위 및 상위포식자의 반응에 대한 연구이며, GLOBEC 과학집행위원회는 연구를 수행하기 위한 실천계획을 1999년에 수립하였다. GLOBEC 프로그램은 구체적으로 4개의 연구 초점, 체제구축활동, 지역프로그램, 종합화 등으로 되어 있다. 가장 중요한 연구활동인 4개의 초점연구는 다음과 같다: 과거자료 분석(retrospective analysis), 과정연구(process studies), 예측과 모델링(predictive and modelling capability), 되먹임(feedbacks). 국제적 지역 프로그램으로는 남극해 GLOBEC(SO-GLOBEC), 소형표층어류와 기후변화(SPACC), 대구와 기후변화(CCC), 기후변화와 환경수용력(CCCC)의 4개가 있다. 이들은 모두 우리나라 해양 및 수산연구와 밀접한 관련이 있다.

국제 GLOBEC 프로그램은 1997년과 1999년에 Science Plan과 Implementation을 출간하여, 향후 10년 동안 추진하여야 할 GLOBEC의 연구 방향을 제시하였다(IGBP, 1997, 1999). 실천적인 연구로서는 소형표층어류와 기후변동(SPACC), 대구와 기후변동(CCC), 기후변동과 환경수용력 CCCC), 남극해 GLOBEC(SO-GLOBEC)의 4개 지역 프로그램을 발족하였으며, 이들 프로그램은 각국의 국가 프로그램과 연계토록 하였다(그림 102). 각 프로그램은 고유의 목적과 특성에 맞추어 기후변동에 따르는 해양생태계의 변동을 예측하고자 하였으며, 4분야의 초점 연구가 필요함을 강조하였다. 즉, 과거자료의 분석(Retrospective analysis), 해양과정의 연구(Process Study), 모델링과 예측(Modelling and Prediction)의 자연과학적 연구가 인류의 실질적인 활동에 어떻게 기여하게 되는지 되먹임 연구(Feedback)를 통하여 규명함으로써, 본 프로그램의 사회적 관심을 고양시키고 있다.

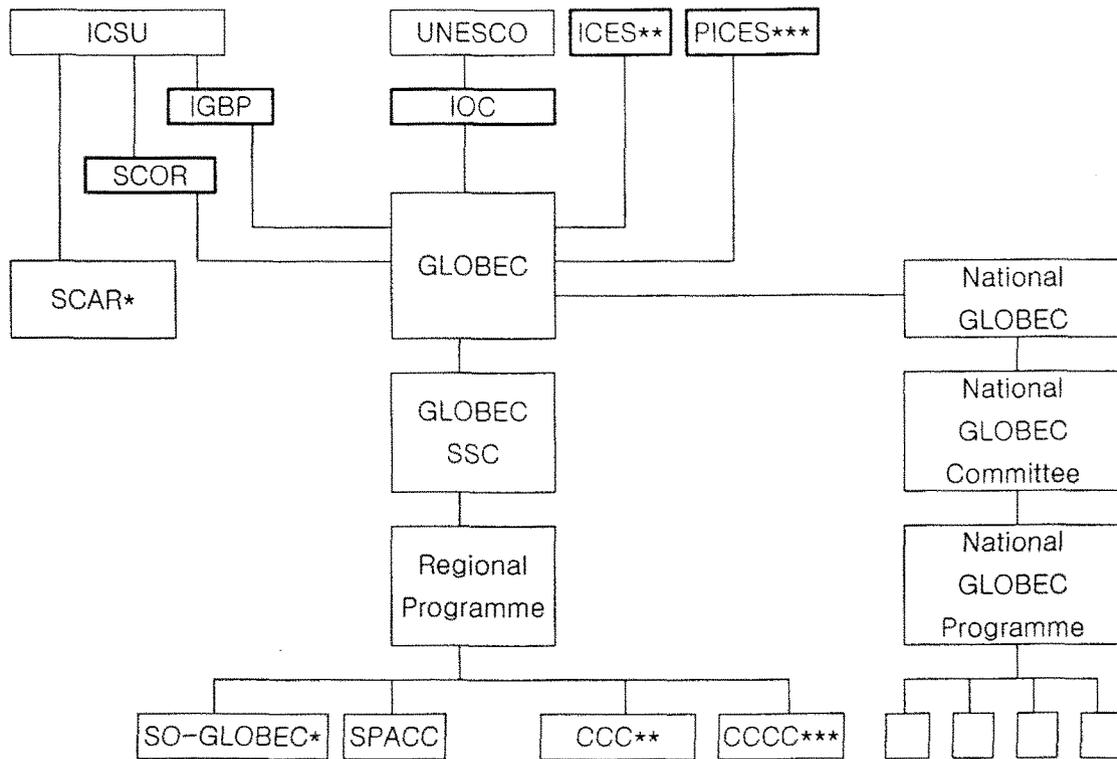


그림 102. GLOBEC 요소들의 조직과 관계. 국제 프로그램이나 조직에 의해 지원을 받는 지역 프로그램은 \*로 표시하였음

## 7 장. 참고문헌

- 고철환, 성낙길. 1983. 저서식물의 군집구조와 생산성(죽도, 동해안) I. 해조류의 식생과 환경. 식물학회지 26: 119-130.
- 고철환. 1983. 저서식물의 군집구조와 생산성(동해안, 죽도) II. 해조류 식생의 계절 변화와 대형갈조류 성장양상의 관계. 식물학회지 26: 181-190.
- 국립수산진흥원. 1996. 연근해 주요 어종별 어획동향 및 자원 상태 평가, 제 16호.
- 국립수산진흥원. 2000. 배타적 경제수역의 주요 어업자원의 생태와 어장.
- 김훈수, 이인규, 고철환, 김일희, 서영배, 성낙길. 1993. 한국 연안해역의 저서생물 군집에 관한 연구 I. 동해안(안인진)의 저서생물 군집구조. 서울대학교 자연대논문집 8: 71-108.
- 이재완. 1991. 한국 동해안 조간대의 해조류 군집구조와 지리적 분포. 서울대학교 박사학위논문, 210 pp.
- 해양수산부. 1961-2000. 농림수산 통계연보, 해양수산 통계연보.
- Alexander, M.A. 1992. Midlatitude atmosphere-ocean interaction during El Nino. Part II: The Northern Hemisphere atmosphere. *Journal of Climate*, 5: 959-972.
- Alverson, D.L. and P.A. Larkin. 1994. Fisheries: Fisheries Science and Management. pp. 150-167. In C.D. Voigtlander. ed., The state of the worlds fishery resources : Proceedings of the World Fisheries Congress, Plenary Session, Oxford and IBH Publishing, New Delhi.
- Anderson, K. P. and E. Ursin. 1977. A multispecies extension of the Beverton and Holt theory of fishing with account of phosphorus circulation and primary production. Meddr. Danm. Fisk.-og Havunders, N.S., 7: 319-435.
- Baird, M. E., S. M. Emsley, and J. M. Mcglade. 2001. Modelling the interacting effects of nutrient uptake, light capture and temperature on phytoplankton growth. *Journal of Plankton Research*, 23: 829-840.
- Barnett, T.P., W.P. David, R. Saravanan, N. Schneider, D. Dommengot, and M. Latif. 1999. Origin of the midlatitude Pacific decadal variability. *Geophysical research letter*, 26: 1453-1456.
- Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski. 1997. Photosynthetic rates derived from

- satellitebased chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, 42: 1-20.
- Blackburn, N., F. Azam, and A. Hagstrom. 1997. Spatially explicit simulations of a microbial food web. *Limnol. Oceanogr.*, 42: 613-622.
- Bond, N.A. and D.E. Harrison. 2000. The Pacific Decadal Oscillation, air-sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 731-734.
- Boo, S.M. 1985. Vertical distribution patterns of the intertidal algal community on a Kangreung rocky shore, east coast of Korea. *Proc. Nat. Sco. Res. Inst. KANU* 1: 46-53.
- Boo, S.M. and Lee I.K. 1986. Studies on benthic algal community in the east coast of Korea 1. floristic composition and periodicity of a Sokcho rocky shore. *Korean J. Phycol.*, 1: 107-116.
- Burkill, P.H. and T.F. Kendall. 1982. Production of the copepod *Eurytemora affinis* in the Bristol Channel. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 7: 21-31.
- Caddy, J.F. and R. Mahon. 1995. Reference Points for Fisheries Management. FAO Fisheries Technical Paper 347, Food and Agriculture Organization, Rome.
- Christensen, V. and D. Pauly. 1992. ECOPATH II-a software for balancing steady ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecol. Modelling*, 61: 169-185.
- Deimling, E. A. and W. J. Liss. 1994. Fishery development in the eastern North Pacific: A natural cultural system perspective, 1888-1976. *Fisheries oceanography*, 3: 60-77.
- Durbin, A.G. and E.G. Durbin. 1981. Standing stock and estimated production rates of phytoplankton and zooplankton in Narragansett Bay, Rhode Island. *Estuaries*, 4: 24-41.
- Edwards, A. M. 2001. Adding Detritus to a Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton Model:A Dynamical-Systems Approach. *Journal of Plankton Research*, 23: 389-413.
- FAO, 1997a: Review of the state of world fishery resources: Marine fisheries (by Marine Resource Service, Fishery resource Disivion, Fisheries

- Department). *Fisheries Circular 920*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Page 105.
- Fasham, M.J.R., and G.T. Evans. 1995. The use of optimization techniques to model marine ecosystem dynamics at the JGOFS stations at 47N 20W. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 348: 203-209.
- Feldmann J. 1937. Recherches sur la vegetation marine de la Mediterranee. *Rev. Alg.* 10: 1-340.
- Forgarty, M. J. and S. A. Murawski. 1998. Large-scale disturbance and the structure of marine systems: Fisheries impacts on Georges Bank. *Ecological Applications Supplement*, 8: 56-S22.
- Francis, R. C. and S. R. Hare. 1994. Decadal scale regime shifts in the large marine ecosystems of the North east Pacific : a case for historical science. *Fish. Oceanogr.*, 3: 279-291.
- Francis, R. C., S. R. Hare, A. B. Hollowed and W.S. Wooster. 1998. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. *Fish. Oceanogr.*, 7: 1-21.
- Frenette, J., F. V. Warwick, and L. Legendre. 1998. Size-dependent C:N uptake by phytoplankton as a function of irradiance: Ecological implications. *Limnol. Oceanogr.* 43: 1362-1368.
- Geider, R. J., H. L. MacIntyre, and T. M. Kana. 1998. A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature. *Limnol. Oceanogr.* 43: 679-694.
- Go, Y.B., B.C. Oh, B.Y. Ko and T.J. Sohn. 1994. Seasonal fluctuation of pelagic copepods on the coast of Cheju Island, Korea. *bull. Mar. Res. Inst. Cheju Nat'l Univ.*, 18: 15-26 (in Korean).
- Gulev, S.K. 2000-2001. Climatology and Interannual Variability in the Intensity of Synoptic-Scale Processes in the North Atlantic from the NCEP-NCAR Reanalysis Data. *American Meteorological Society*, 15: 809-828.
- Hare, S. R and N. J. Mantua. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Prog. in Oceanogr.*, 47: 103-145.
- Hare, S. R., N. J. Mantua and R. C. Francis. 1999. Inverse production regimes:

- Alaskan and West Coast Salmon. *Fisheries*, 24: 6-14.
- Hare, S.R. and R.C. Francis. 1995. Climate Change and Salmon Production in the Northeast Pacific Ocean: R.J. Beamish [ed.] Ocean climate and northern fish populations. *Can. spec. Pub. Fish. Aquat. Sci.*, 121: 357-372.
- Hare, S.R., S.R. Hare and N.T. Mantua. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Oceanography*, 47: 103-146.
- Hughes, T. P. 1994. Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 265: 1547-1551.
- JGOFS. 1997. One-dimensional models of water column biogeochemistry. JGOFS Report 23. pp85.
- Kang, H.-K. and Y.J. Kang. 1997. Length and weight relationship of *Acartia steueri* (Copepoda: Calanoida) in Ilkwang Bay, Korea. *J. Korean Fish. Soc.*, 30: 906-908.
- Kang, H.-K. and Y.J. Kang. 1998a. Egg production of the copepod *Acartia steueri* in Ilkwang Bay, southeastern coast of Korea. *J. Korean Fish. soc.*, 31: 288-295 (in Korean).
- Kang, H.-K. and Y.J. Kang. 1998b. Growth and development of *Acartia steueri* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory. *J. Korean Fish. Soc.*, 31: 842-851.
- Kang, J.W. 1966. On the geographical distribution of the marine algae in Korea. *Bull. Pusan. Fish. Coll.*, 7: 1-125.
- Kang, Y.S. and S. Kim. 2002. Zooplankton in the Korean waters. In: Ecology of Korea, D. Lee et al. eds, VIII. INTECOL International Congress of Ecology, Seoul, Korea, pp. 331-343.
- Kashiwai, M. B., Megrey. B., M. J. Kishi, D. M. Ware, D. L. Eslinger, and F. E. Werner. 2000. Preliminary Report of PICES Lower Trophic Level Modeling Nemuro Workshop, 2000.
- Kawasaki, T. 1993. Recovery and collapse of the far eastern sardine. *Fish. Oceanogr.* 2: 244-253.
- Kim, D.Y. 1985. Taxonomical Study on Calanoid Copepod (Crustacea: Copepoda) in Korean Waters. Ph.D. thesis, Hanyang Univ., 187 pp.

- Kim, H.S., I.K. Lee, C.H. Koh, I.H. Kim, Y.B. Suh and N.K. Sung. 1983. Studies on the marine benthic communities in inter and sub-tidal zones. I. Analysis of benthic communities structure at Aninjin, east coast of Korea. *Proc. Coll. Nat. Sci., SNU*. 8: 71-108.
- Kimura, S. and T. Sugimoto. 1987. Short period fluctuations in oceanographic and fishing conditions in the coastal Asia of Kumano-nada Sea. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 53: 585-593.
- Klyashtorin, L. and N. Sidorenkov. 1996. Long-term climate change and pelagic fish stock fluctuations in the Pacific. *Reports of Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography, TINRO-Centre, (Vladivostok)* 119: 33-54. (in Russian, English summary).
- Laevastu, T. and H.A. Larkins. 1981. Marine Fisheries Ecosystem: Its quantitative evaluation and management. Fishing News Books, Oxford. 159pp.
- Langton, R. W., P. J. Auster and D.C. Schneider. 1995. A Spatial and temporal perspective on research and management of groundfish in the northwest Atlantic. *Reviews in Fisheries Science*, 3: 201-229.
- Larkin, P. A. and W. Gazey. 1982. Application of ecological simulation models to management of tropical multispecies fisheries. In *Theory and Management of Tropical Fisheries*, pp. 123-140. ed., by D. Pauly and G.I. Murphy. ICLARM Conference Proceedings, 9.
- Lau, K. M. and H. Weng, 1999. Interannual, decadal-interdecadal, and global warming signals in sea surface temperature during 1955-97. *Journal of Climate*, 12: 1257-1267.
- Lau, K.M., K.-M. Kim, and S. Yang, 2000, Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon, *Journal of Climate*, 13: 2461-2482.
- Lau, N.-C. 1997. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, Princeton University, Princeton, New Jersey, 1997: Interactions between Global SST Anomalies and the Midlatitude Atmospheric Circulation. *Bulletin of American Meteorological Society*, 78: 21-33.
- Lee, Y.H., J.-H. Oh, H.-J. Beak and W.-T. Kwon, 1998. Climatic jump in

- precipitation data over Korean Peninsula, *Conf. Proceeding of International Conference on Monsoon and Hydrologic cycle, Kyongju, Korea*, pages 325-328
- Liang, D. and S. Uye. 1996. Population dynamics and production of the planktonic copepods in a eutrophic inlet of the Inland sea of Japan. II. *Acartia omorii*. *Mar. Biol.*, 125: 109-117.
- Liang, D., S. Uye and T. Onbe. 1996. Population dynamics and production of the planktonic copepods in a eutrophic inlet of the Inland Sea of Japan. I. *Centropages abdominalis*. *Mar. Biol.*, 124: 527-536.
- Lysne, J. and C. Deser. 2000-2001. Wind-Driven Thermocline Variability in the Pacific: *A Model-Data Comparison*, 15: 829-845.
- Mallet, S. G. 1989. A theory of multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11: 647-693.
- Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis, 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of American Meteorological Society*, 78: 1069-1079.
- McGowan, J. A., D. R. Cayan and L.M. Dorman 1998. Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. *Science*, 281: 210-217.
- Miller, A. J., and N. Schneider. 2000. Interdecadal climate regime dynamics in the North Pacific Ocean; Theories, observations and ecosystem impacts. *Progress in Oceanography*. 47: 2-4.
- Miller, A.J., D.R. Cayan, T.P. Barnett, N.E. Graham and J.M. Oberhuber, 1994: The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 7: 21-26.
- Mousseau, L., B. Klein, L. Legendre, S. Dauchez, E. Tamigneaux, J.-E. Tremblay, and R.G. Ingram 2001. Assessing the trophic pathways that dominate planktonic food webs: an approach based on simple ecological ratios. *Journal of Plankton Research*, 23: 765-777.
- Na, J.Y. and J.W. Seo, 1998, The sea surface winds and heat fluxes in the East Asian marginal seas. Hanyang University, 53 pp.
- National Marine Fisheries Service. 1999. Ecosystem-based fishery management. A

- report to Congress by the Ecosystem Principles Advisory Panel. US Dept. of Commerce, NOAA. 54p.
- Nichols, F.H., J.E. Cloern, S.N. Luoma and D.H. Peterson. 1986. The modification of an estuary. *Science*, 231: 567-573.
- Oh, J.-H. 2001. Reviews on Changing Climatic and Marine Environment, *J. Korean Soc. Fish. Res.*, 4: 1-19.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater and Analysis. Pergamon Press, 173 pp.
- Pauly, D., V. Christensen, J. Dalsgaard, R. Froese and F. Torres Jr. 1998. Fishing down marine food webs. *Science*, 279: 860-863.
- Pearcy, W.G. and A. Schoener. 1987. Changes in the marine biota coincident with the 1982-83 El Nino in the Northeastern Subarctic Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 92: 14417-14420.
- PICES. 1994. PICES-GLOBEC Science Plan. Submitted to the Third PICES Annual Meeting. Oct. 15-24. Japan.
- Pierce, D.W. 2002. The Role of Sea Surface Temperatures in Interactions between ENSO and the North Pacific Oscillation, *American Meteorological Society*, 15: 1295-1308.
- Polovina, J.J. 1984. Model of a coral reef ecosystems. I. The ECOPATH model and its application to French Shoals. *Coral Reefs*, 3: 1-11.
- Polovina, J.J., G.T. Mitchum and G.T. Evans. 1995. Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the Central and North Pacific, 1960-88. *Deep Sea Research*, 42: 1701-1716.
- Roemmich, D. and J. McGowan. 1995. Climate warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science*, 267: 1324-1326.
- Runge, J.A. and J.C. Roff. 2000. The measurement of growth and reproductive rates. In: ICES Zooplankton Methodology Manual, R.P. Harris, P.H. Wiebe, J. Lenz, H.R. Skjoldal and M. Huntley, eds. Academic Press, San Diego, pp. 401-454.
- Sokal, R.R. and Rohlf, F.J. 1995. Biometry. 3rd edition. W.H. Freeman and Company, 859pp.

- Sparre, P. 1991. Introduction to multispecies virtual population analysis. ICES Mar. Sci. Symp., 193: 12-21.
- Steele, J.H. 1996. Regime shifts in fisheries management. *Fisheries Research*, 25: 19-23.
- Thom, H. C. S. 1958. A note on the gamma distribution. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 86, 117-122.
- Torrence, C. and G.P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 79: 61-78.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Nino. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 12: 2771-2777.
- Uye, S., Y. Iwai and S. Kasahara. 1983. Growth and production of the inshore marine copepod *Pseudodiaptomus marinus* in the central part of the Inland Sea of Japan. *Mar. Biol.*, 73: 91-98.
- Walters, C., V. Christensen and D. Pauly. 1997. Structuring dynamics models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments. *Review in Fish Biology and Fisheries*, 7: 139-172.
- Wilks, D. S. 1995. *Statistical methods in the Atmospheric sciences*, Academic press, 467.
- Wu, R.S.S. 1995. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31: 159-166.
- Yoo, K.I., H.K. Hue and W.C. Lee. 1991. Taxonomical revision on the genus *Acartia* (Copepoda: Calanoida) in the Korean waters. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 24: 255-265 (in Korean).
- Zhang, C.I. and J.B. Lee. 2001. Stock assessment and management implications of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) in Korean waters, based on the relationships between recruitment and the ocean environment. *Progress in Oceanography*, 49: 513-530.
- Zhang, C.I. and S. Kim. 1999. Living marine resources of the Yellow Sea ecosystem in Korean waters: Status and perspectives. pp. 163-178. In Sherman K. and Q. Tang. ed., *Large Marine Ecosystems of the Pacific Rims*, Blackwell Science, Ltd. England.

- Zhang, C.I. and Sullivan, P.J. 1988. Biomass-based cohort analysis that incorporates growth. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 117: 180-189.
- Zhang, C.I. and Y. Gong. in press. Effect of ocean climate changes on the Korean stock of Pacific saury, *Cololabis saira* (BREVOORT). *Fisheries Oceanography*.
- Zhang, C.I., J.B. Lee., S. Kim and J.H. Oh. 2000. Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystem and fisheries resources in Korean waters. *Progress in Oceanography*, 44: 171-90
- Zhang, C.I., S. Kim and S.B. Yun. 1992. Stock assessment and management implications of small yellow croaker in Korean waters. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 25: 194-206.