

# 남서부 동해에서 1970년대의 기후체제전환이 생태계의 구조에 미친 영향

장창익 · 윤상철\*  
 부경대학교 해양생산관리학과

## Effects of Climatic Regime Shift on the Structure of Marine Ecosystem in the Southwestern East Sea during the 1970s

Chang Ik ZHANG and Sang Cheol YOON\*

Department of Marine Production Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

The changes in structure and abundance of taxon or species groups in the East Sea ecosystem were compared between pre- and post-Climatic Regime Shift (CRS) occurred in the mid 1970s using an ECOPATH model. Although the East Sea ecosystem consisted of primary producers, primary consumers, secondary consumers and terminal consumers, most species groups were classified as secondary consumers. The mean trophic level between pre- and post-CRS increased from 3.09 during the pre-CRS period to 3.28 during the post-CRS period. Total biomass of the species groups in the East Sea ecosystem increased by 9% due to the CRS, and total catch increased by 48%. The most significant differences between pre- and post-CRS models occurred at the mid/high trophic levels occupied by fishes and cephalopods. Relative contribution of the different species groups to the total energy flow was calculated for the trophic level III. As a result, the status by the dominant species in the East Sea ecosystem shifted from cephalopods to walleye pollock due to the CRS. Relative contribution of 5 species, which were commercially important, such as Pacific saury, Pacific sardine, filefish, walleye pollock and sandfish in trophic level III, were also changed due to the CRS. Finally, the CRS turned out to cause large variations in biomass and catch of fisheries resources as well as the status and role of the major species.

Key words: Climatic regime shift, Marine ecosystem, East Sea, Trophic level, Biomass

### 서론

동해는 한반도 주변의 동·서·남해 중에서 가장 넓은 해역으로 경상남도에서 두만강 하구에 이르는 약 960 km의 해안선을 가지고 있으며, 서해나 남해에 비해서 해안선이 단조롭고, 대륙붕이 좁은 것이 특징이다. 동해는 대마난류와 리만난류가 만나 생산력이 높고, 서식하는 생물도 다양하다. 동해에는 약 350-400여종의 어류가 서식하고 있다고 알려져 있으며, 깊은 바다에 사는 몇 종을 제외하고는 대부분이 연안과 대륙사면 사이를 이동하면서 서식하고, 계절적으로는 남북회유를 하는 종이 많다 (Kim and Kang, 1998).

20세기에 들어 세계인구의 급증과 이에 따르는 산업활동이 꾸준히 증가함에 따라, 최근에는 전지구적으로 환경이 위협을 받는 수준까지 이르렀다. 또한 자연생태계에서 물리적·생물적 시스템의 변동이 흔히 발견되고 있으며, 이러한 변동은 인간의 관찰 기록이 짧거나 불완전하기 때문에 어떠한 자연적 혹은 인위적 요인이 자연생태계를 어떻게 변화시키고 있는지 쉽게 증명되지 않는다. 하지만 해양생태계에 가해진 부가적인 압박이나, 그 결과로 초래된 생태계의 변동은 단힌 해양환경에서 서식하는 수산자원생물의 변동을 초래하였다. 그 예로서 최근 1976년 북태평양 해역에서 전지구적 규모로 일어났던 것으로

보고된 기후체제전환 (Climatic Regime Shift, CRS)을 들 수 있다 (KOSEF, 1999).

지금까지 밝혀진 1976년 북태평양 기후체제전환의 기작을 보면 북태평양의 알류산열도 부근에는 겨울철에 항상 고기압이 형성되는데, 1976년 이후 겨울철 (11월-3월)의 알류산 저기압이 상당히 강화되어 기압이 평균 4기압 정도 낮아졌으며, 저기압의 중앙부는 동쪽으로 이동하였다. 이러한 현상은 바람과 해수의 이동에 영향을 미쳐서, 결과적으로 알라스카 전역은 따뜻해졌으나 태평양의 중앙부와 서부의 몇 해역에서는 냉각 현상이 발생하였다 (PICES, 1994). 1976년 북태평양의 기후체제전환은 폭풍발생빈도를 증가시켰으며, 해양의 물리학적 특성을 변화시켜 해수의 온도와 혼합층의 두께 등에 영향을 미쳤고, 또한 해양의 일차생산력과 생태계의 구조개편을 야기시켰다. 북태평양에서 기후체제전환이 감지되었던 것처럼 동해에서도 1976/77년 기후체제전환으로 동해의 생태계와 주요 수산자원 생산량에 변화가 있었던 것으로 최근 밝혀졌다 (Zhang et al., 2000; Zhang and Lee, 2001). 우리나라 해역에 나타난 기후체제전환은 1976년에 열전선이 북쪽으로 많이 이동하였으며 평균 표면해수온도(SST)가 증가하였고, 1976년 이후 쿠로시오 해류 수송량도 증가하였으며, 또한 강수량과 혼합층의 깊이에도 큰 변동을 보였다 (Zhang et al., 2000). 이러한 기후체제전환은 동해의 주요 어종의 어획량에 큰 변화

\*Corresponding author: adam75@mail1.pknu.ac.kr

를 야기했는데 특히 부어류인 꽁치 (Pacific saury), 쥐치 (filefish), 정어리 (Pacific sardine), 명태 (walleye pollock), 도루묵 (sandfish) 등에서 큰 변동 경향을 보였다 (Zhang et al., 2000; Kang et al., 2000). 꽁치와 도루묵의 어획량은 감소하였고, 쥐치, 정어리, 명태의 어획량은 증가하였다. 특히 꽁치, 정어리, 고등어 등의 온수성 어종은 1976년과 1988년을 전환점으로 하여 어종의 성쇠가 교차되었다 (KOSEF, 1999).

본 연구에서는 생태계 분석 모델을 이용하여 이러한 기후체제전환이 동해 생태계 구조와 주요 수산자원에 어떠한 영향을 미쳤는지를 생태영양학적 (ecotrophical)으로 분석하였다.

### 재료 및 방법

#### 자 료

본 연구에서는 우리나라 동해의 어획량 자료를 사용하였고 어장은 동해 전체 해역에서 남서부 동해해역을 대상으로 하였다 (Fig. 1). 어장면적은 근해어업의 조업어장을 고려하였고 (NORI, 1999), 북측의 경계는 북방어로 한계선을, 남측의 경계는 국립수산물과학원에서 구분하고있는 동해와 남해의 경계에 기초하였다 (NFRDI, 2001). 대상 해역의 전체 면적은 약 193,086 km<sup>2</sup> 이었다 (Fig. 1). 1976/77 기후체제전환 전후의 영향을 검토하기 위하여 기후체제전환 이전 (pre-CRS)모델은 1970년에서부터 1975년까지의 기간을, 기후체제전환 이후 (post-CRS)모델은 1978년에서부터 1984년까지의 기간을 적용하였다.

생태계에는 기초생산자에서 최고포식자까지 수 많은 생물종이 서식하므로 생태계 분석 모델에서는 서식지, 먹이습성 등 유사한 생태학적 특성에 따라 단일종 또는 여러 종을 하나의 생물군으로 묶어서 모델에 적용시켰다.

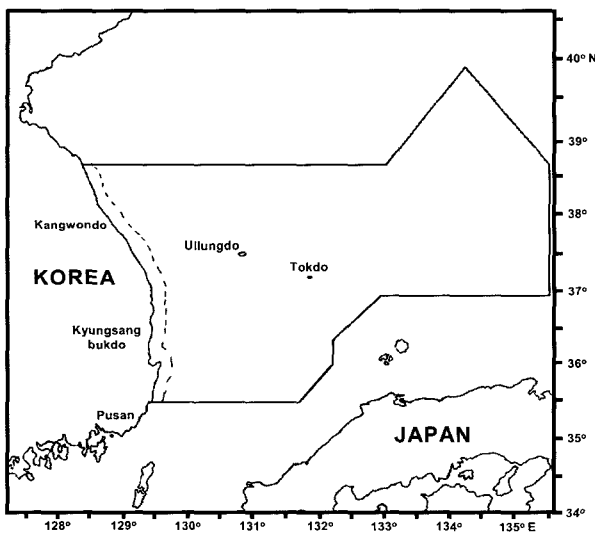


Fig. 1. Area defined for the ecosystem model in the southwestern East Sea. Thick line indicates the boundary of offshore fishing ground. Dotted line indicates the baseline of the Korean territorial waters.

본 연구에서는 동해에 서식하는 생물종을 기존의 생태계 분석 모델 연구결과 (Trites et al., 1999)를 참고하여 그룹 구분을 한 후 해양수산부 통계연보에 어획량이 기록된 생물종은 동해에 서식하는 것으로 간주하여 분류군 (taxon)에 따라 각각의 생물군으로 분류하였다. 그 외 생물종은 이미 연구된 문헌 (Chyung, 1977; NFRDI, 1994, 1999, 2000b; Park and Choi, 1997)을 참고하여 생태학적 유사성에 따라 구분한 결과 21개의 생물군과 1개의 유기퇴적물로 분류하였다 (Table 1). 기후체제전환으로 인해 어획량에 큰 변화를 보였던 꽁치, 정어리, 쥐치, 명태, 도루묵은 기후체제전환에 따른 중간, 생물군간 영향을 검토하기 위해 각각 하나의 생물군으로 분류하였다.

Table 1. Species groups used in the ecosystem model in the southwestern East Sea

Biota	Groups used in the model
Sharks and Whales	Apex predators
	Baleen whales
	Small sharks
Birds	Sea birds
Fishes	Pacific saury ( <i>Cololabis saira</i> )
	Pacific sardine ( <i>Sardinops melanostictus</i> )
	Filefish ( <i>Stephanolepis cirrifer</i> )
	Walleye pollock ( <i>Theragra chalcogramma</i> )
	Sandfish ( <i>Arctoscopus japonicus</i> )
	Small pelagics
	Large pelagics
Cephalopods	Semi-demersal fish
	Demersal fish
	Cephalopods
Benthos	Benthic feeders
	Epifauna
	Gastropods
Plankton	Infauna
	Zooplankton
Others	Phytoplankton
	Algae
	Detritus

어획량 자료는 해양수산부 통계연보 (MOMAF, 1971-1985)에 기록된 일반해면어업의 어획량을 사용하였다. 이 중 강원도와 경상북도에서 기록된 어획량을 동해의 어획량으로 간주하여 적용기간 동안의 평균 어획량을 기후체제전환 전후 모델에 사용하였다. 생물군의 어획량은 생물군내 총별 평균 어획량의 합으로 구하였다. 그러나 멩크고래의 어획량은 해역별로 세분되어 있지 않기 때문에 어획량의 절반이 동해에서 어획되는 것으로 가정하여 각 적용기간에 대한 평균 어획량을 사용하였다 (Gong, 1981; 1988).

#### 방 법

본 연구에서 사용한 생태계 모델은 해양생태계의 영양관계 분석에 사용되는 ECOPATH 모델로서 Polovina (1984)에 의해

서 개발되었고 Christensen and Pauly (1992), Christensen (1995)에 의해서 더욱 발전되었다. 수산자원의 평가나 양식장의 평가와 같이 수중 생태계에 널리 응용되고 있으며 또한, 최근에는 육상목장 시스템 (farming system)을 분석하는데도 적용되고 있다 (Dalsgaard et al., 1995).

ECOPATH 모델은 각 그룹으로부터의 유입량과 유출량이 균형을 이룸을 가정하여 질량균형 모델식 (the mass-balance equation)과 에너지 균형 모델식 (the energy-balance equation)을 기본식으로 한다.

질량균형 모델식은

$$P_i = Y_i + B_i \cdot M2_i + E_i + BA_i + P_i \cdot (1 - EE_i) \dots\dots\dots (1)$$

또는

$$B_i \cdot (P/B)_i \cdot EE_i - \sum_{j=1}^m B_j \cdot (Q/B)_j \cdot DC_{ji} - Y_i - E_i - BA_i = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $P_i$ 는 생물군  $i$ 의 총해양생산력,  $Y_i$ 는  $i$ 의 총어획량,  $M2_i$ 는  $i$ 의 포식자에 의한 사망량,  $E_i$ 는 순회유량 (이출-이입),  $BA_i$ 는  $i$ 의 누적생체량,  $P_i \cdot (1 - EE_i) = M0_i$ 는  $i$ 에 대한 기타사망,  $(P/B)_i$ 는  $i$ 의 생산량/생체량의 비,  $(Q/B)_i$ 는  $i$ 의 섭식량/생체량의 비, 그리고  $DC_{ji}$ 는 포식자 ( $j$ )의 먹이조성 중 피식자 ( $i$ )의 비이다.

에너지균형 모델식은 섭식량 (consumption, Q), 생산량

(production, P), 호흡량 (respiration, R), 미동화량 (non-assimilated food, NA)과의 관계로서

$$Q = P + R + NA \dots\dots\dots (3)$$

ECOPATH에 의한 생태계 모델링에 필요한 기본 입력자료는 각 그룹에 대한 B, P/B 비, Q/B 비, EE 중 세 개의 자료와 어획량 (C), 먹이조성(DC) 자료가 필요하다. 나머지 하나의 파라미터는 질량균형에 의해 계산된다.

총 에너지 흐름은  $t \cdot km^2 \cdot year^{-1}$ 로 표현되는 시스템내의 총 에너지 흐름의 합이다 (Ulanowicz, 1986). 그것은 네 가지 흐름 구성요소의 합으로 추정된다.

$$\begin{aligned} & \text{총섭식량} + \text{총이출량} + \text{총호흡량} + \text{퇴적물로의 총흐름} \\ & = \text{총 에너지 흐름} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

이것은 에너지 흐름 네트워크의 비교를 위해서 아주 중요한 파라미터이다.

생태계 분석 모델에서는 서식면적비 (A), B, P/B, Q/B, DC, C 등의 기본입력자료를 필요로 한다 (Fig. 2). 생물군이 서식하는 총면적의 비로 유영생물의 경우 전 대상해역에 서식하는 것으로 보고 1을 적용하였으며 표생저서동물, 복족류, 내생저서동물, 해조류의 경우 서부 동해 영해기선 내부에서만 분포 및 어획되는 것으로 간주하여 영해기선 내부의 면적 (9,569  $km^2$ )을 총면적 (193,086  $km^2$ )에 대하여 나누어준 0.050을 적용하였다. 생체량은 대상해역에서 생물군의 단위 면적당 평균

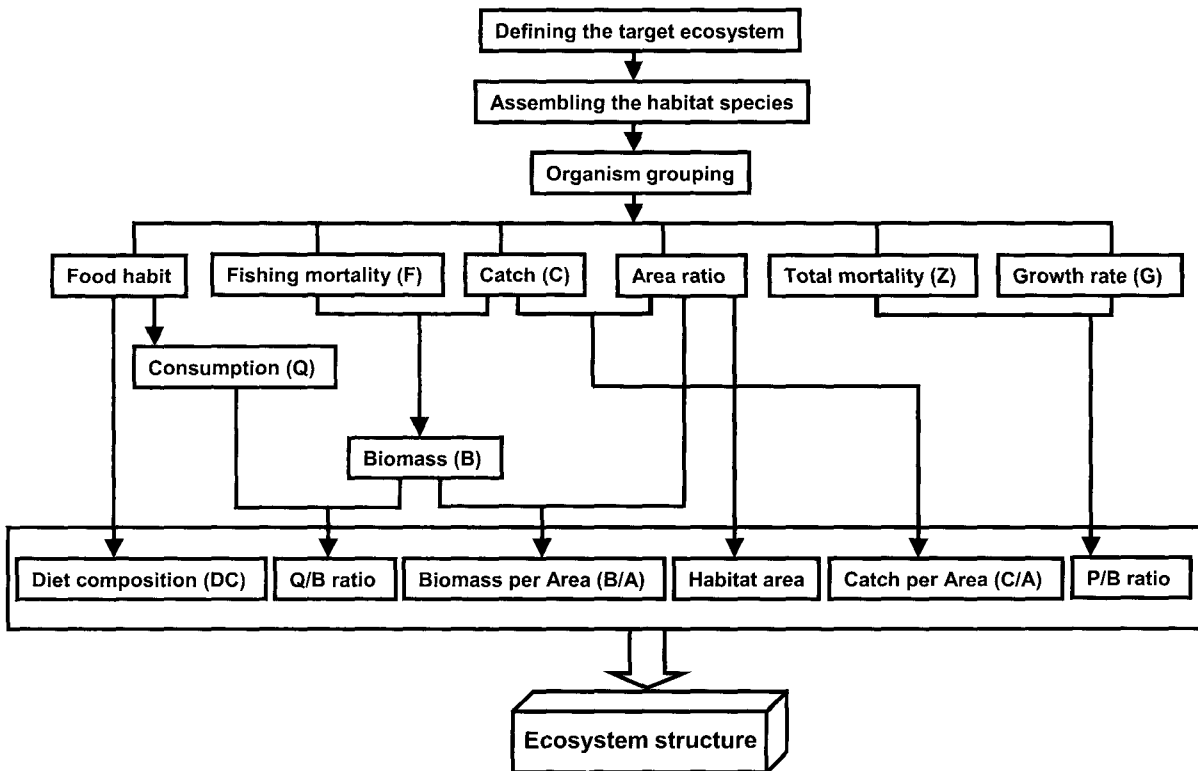


Fig. 2. Flowchart of the steps and processes for studying ecosystem modeling.

생체량이다. 해당 기간동안 생체량 자료를 이용할 수 있었던 정어리, 동물플랑크톤, 식물플랑크톤의 생체량은 기존 연구에 의한 결과를 이용하였고 나머지 생물군의 생체량은  $B = C/F$ 의 관계로부터 계산하였다. 여기서, C는 어획량, F는 어획량에 따라 가중평균된 순간어획사망계수이다. P/B는 성장률과 같다 (Mertz and Myers, 1998). 따라서 어류 생물군의 생산량/생체량 비는 NFRDI (1994, 2000a)의 체중자료, 표생저서동물, 복족류, 내생저서동물은 PKNU (1999, 2000)의 체중자료를 사용하여 각 생물종의 성장률을 구한 후 생물군 내 각 생물종의 어획량으로 가중평균하여 구하였다. Q/B는 체중당 섭식량으로 각 생물종이 체중의 몇 배를 소비하는가를 나타내는 것으로, 동해 생태계 생물에 대해 사용 가능한 자료가 거의 없었으므로 베링해 서식 생물에 대한 연구 자료를 사용하였다 (Trites et al., 1999).

먹이조성은 생물군간 피식-포식 관계를 나타내는 것으로서, 생물군의 전체 먹이 중 피식자별로 먹힌 정도를 비율로 나타내며 합은 1이다. 위내용물 조사에 의해 먹이생물 중요도가 정확히 추정된 생물종에 대해서는 그 결과를 그대로 이용하였고, 먹이생물 중요도가 정확하게 분류되지 않은 생물종에 대해서는 문헌에서 조사된 먹이생물 중에서 가장 선호하는 먹이에 중요도 2를, 선호도는 낮으나 섭식하는 먹이에 대해서 중요도 1을, 섭식하지 않는 생물은 중요도 0을 부여하여 어획량이 있는 생물군에 대해서는 이것을 생물군내 생물종의 어획량으로 가중평균하여 그 총합이 1이 되도록 계산하였다. 최종적으로 먹이생물의 비율은 그것의 총합으로 나눠준 비율을 적용하였다.

### 모델 균형 조정

ECOPATH가 실행될 때 이입과 이출의 균형을 이루기 위해서, EE값은 모델의 평형을 유지하기 위해 0과 1 사이에 있도록 조정한다. 여기서 0이라는 값은 시스템 내에서 어떤 다른 생물군도 해당 생물군을 소비하지 않음을 나타낸다. 반면, 1 혹은 1에 가까운 값은 생물군이 강한 포식압력 혹은 어획압력을 받음을 의미한다. 특히, 평형상태에서 이 값은 1을 초과하여서는 안된다 (Christensen et al., 2000). 본 연구에서 최초로 추정된 기본 입력값에 의한 모델은 균형을 이루지 않았기 때문에, 모델의 균형을 이루기 위해서 기본 입력값을 조정하였다. 기후 체제전환 이전 및 이후의 각 모델에 대한 기본 입력값은 Tables 2-5와 같다.

## 결 과

### 동해 남서부 해역 생태계의 구조

ECOPATH 모델을 사용하여 추정된 동해 남서부 생태계 영양구조로서 각 생물군간의 영양학적 상호작용, 즉 피식/포식 관계와 에너지 흐름은 Fig. 3과 같다. 각 박스의 크기는 생체량을 나타내고, 화살표는 에너지가 이동하는 방향을 보여준다. 동해 생태계에서의 영양단계는 크게 4단계 즉, 1차 생산자, 1차 소비자, 2차 소비자, 그리고 최고 소비자였다. 1차 생산자에 해당하는 생물군은 유기퇴적물, 식물플랑크톤, 해조류였고, 1차 소비자는 동물플랑크톤, 내생저서동물, 복족류, 표생저서동물이었고, 2차 소비자는 두족류, 저서어류, 반저서어류, 도루묵, 명태, 대형부어류, 소형부어류, 쥐치, 정어리, 꽂치, 바다새,

Table 2. Basic parameters for the pre-CRS model

Group name	Habitat area (fraction)	Biomass in habitat area (t/km <sup>2</sup> )	Production/Biomass (/yr)	Consumption/Biomass (/yr)	Catch (t/km <sup>2</sup> )
Apex predators	1.000	0.003	0.020	11.156	-
Baleen whales	1.000	0.032	0.280	8.331	0.005
Small sharks	1.000	0.011	0.280	11.156	0.000
Sea birds	1.000	0.006	0.800	60.000	-
Pacific saury	1.000	0.239	1.554	3.650	0.152
Pacific sardine	1.000	0.117	0.928	3.650	0.000
Filefish	1.000	0.001	1.184	3.650	0.001
Small pelagics	1.000	0.136	0.882	3.650	0.038
Large pelagics	1.000	0.009	2.214	4.500	0.006
Walleye pollock	1.000	0.427	0.928	5.487	0.196
Sandfish	1.000	0.151	1.554	5.487	0.069
Semi-demersal fish	1.000	0.041	1.224	2.640	0.009
Demersal fish	1.000	0.017	1.164	2.679	0.011
Cephalopods	1.000	0.431	3.200	10.667	0.216
Benthic feeders	1.000	0.230	3.320	7.690	0.003
Epifauna	0.050	0.879	1.008	5.777	0.009
Gastropods	0.050	0.827	1.130	5.777	0.007
Infauna	0.050	0.219	1.302	12.000	0.001
Zooplankton	1.000	4.483	5.546	22.000	-
Algae	0.050	3.813	10.000	-	0.095
Phytoplankton	1.000	7.459	687.506	-	-
Detritus	1.000	-	-	-	-





Table 5. Continued.

Prey \ Predator	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1 Apex predators									
2 Baleen whales									
3 Small sharks									
4 Sea birds									
5 Pacific saury		0.015		0.006					
6 Pacific sardine		0.054		0.020					
7 Filefish		0.038	0.059	0.007					
8 Small pelagics		0.030	0.048	0.010					
9 Large pelagics		0.003							
10 Walleye pollock		0.204							
11 sandfish	0.081	0.005	0.008						
12 Semi-demersal fish	0.099	0.006	0.010						
13 Demersal fish		0.008	0.013						
14 Cephalopods	0.200	0.161	0.184	0.188					
15 Benthic feeders		0.218	0.126	0.399					
16 Epifauna		0.033	0.038	0.000	0.003				
17 Gastropods		0.081	0.084	0.001	0.003				
18 Infauna		0.016	0.004	0.000					
19 Zooplankton	0.421	0.127	0.242	0.369	0.976	0.285			0.126
20 Algae	0.200				0.018	0.480	0.392		
21 Phytoplankton						0.056	0.304	0.333	0.766
22 Detritus		0.001	0.184			0.180	0.304	0.667	0.108
SUM	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

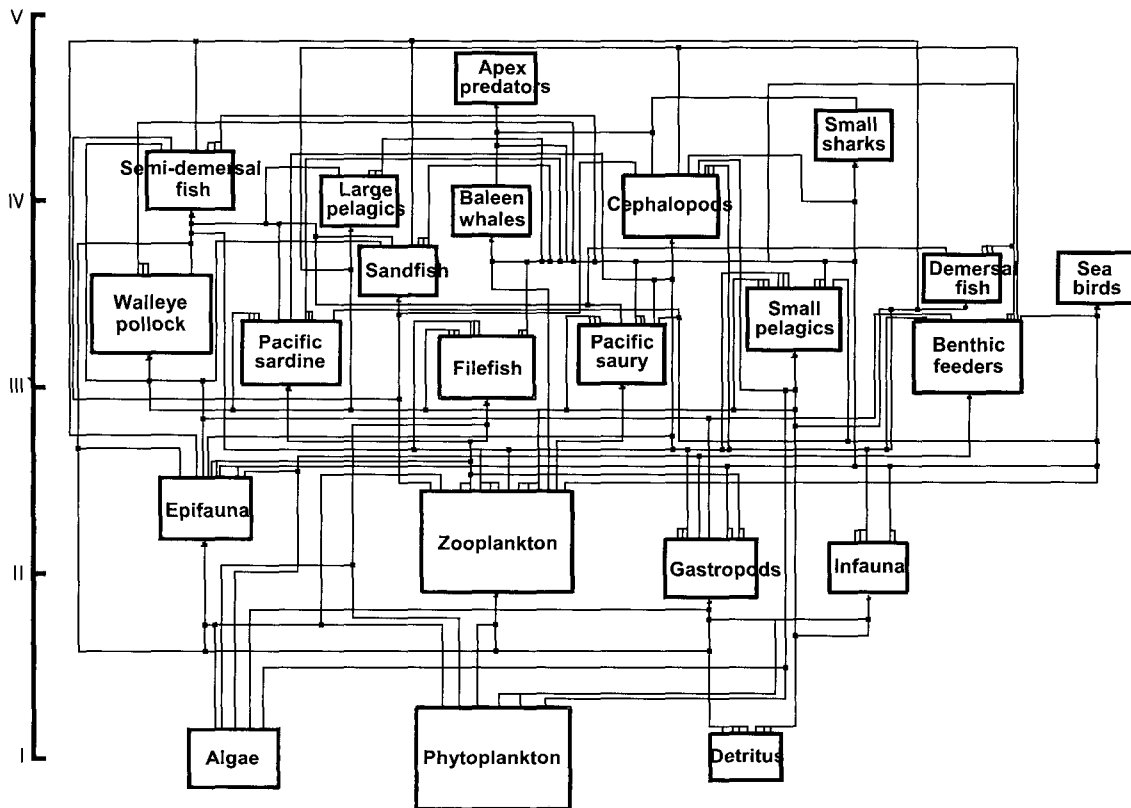


Fig. 3. Flowchart of trophic interactions in the marine ecosystem of the southwestern East Sea.

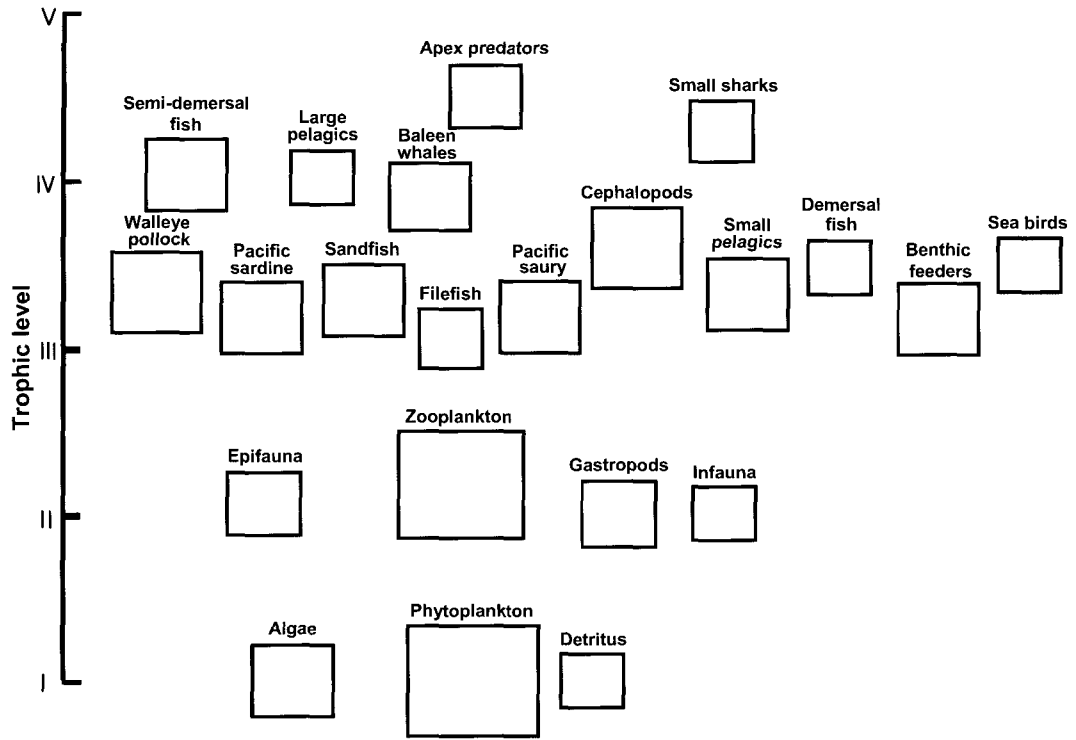


Fig. 4. Estimated trophic levels and relative abundance of species in the southwestern East Sea ecosystem for the pre-CRS model.

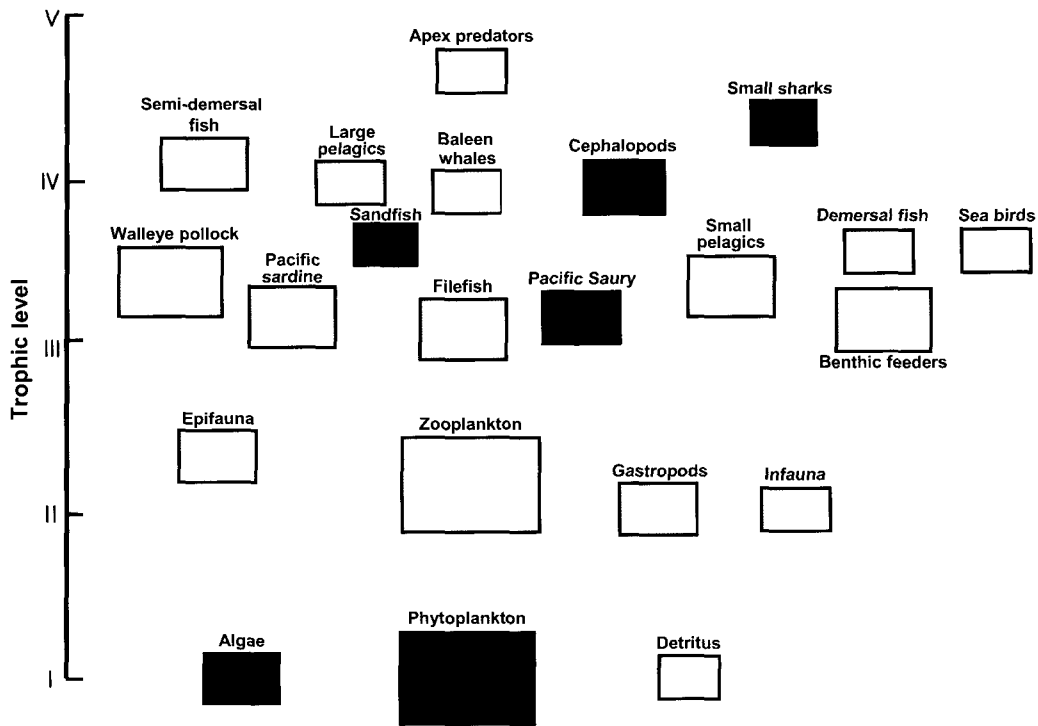


Fig. 5. Estimated trophic levels and relative abundance of species in the southwestern East Sea ecosystem for the post-CRS model. Blackened boxes indicate the groups showing negative change of its abundance, while shaded boxes showing positive change in the post-CRS model.



수염고래류였다. 그리고 최고 소비자는 대형상어류와 이빨고래류가 포함된 최고 포식자와 소형상어류였다.

기후체제전환 전과 후에 있어 동해 생태계의 구조를 비교하면 (Figs. 4-5) 동해 생태계의 대부분의 생물군은 영양단계 3단계, 즉 2차 소비자에 해당하였다. 영양단계 3단계와 4단계 근처의 생물군은 대부분이 기후체제전환 이후 상대적으로 생체량이 증가하였지만, 소형상어류, 두족류, 썩치, 도루묵의 생체량은 기후체제전환 이전에 비해 감소하였다. 영양단계 2단계 근처의 생물군은 기후체제전환 이후 모두 생체량이 증가하였지만, 유기퇴적물을 제외하고 영양단계 1단계의 생물군은 기후체제전환 이후 생체량이 모두 감소하였다.

**생체량과 어획량의 변화**

기후체제전환 이전과 이후의 생체량을 비교해 본 결과, 기후체제전환 이후 6개 생물군의 생체량이 감소하였으며, 13개 생물군의 생체량이 증가하였다 (Table 6). 어획량의 변동양상에서 큰 변화를 보이는 종은 5종이었으며 이들의 생체량은 썩치와 도루묵이 각각 64%와 79%의 큰 감소를 보였으며, 정어리, 쥐치, 명태는 각각 165%, 21,700%, 174%의 큰 증가를 나타내어, 전체적으로 총 생체량은 15% 증가하였다.

기후체제전환 이전과 이후의 단위면적당 어획량을 비교해

Table 6. Comparison of biomass between pre-CRS and post-CRS models

Group name	Biomass (t/km <sup>2</sup> )		Change (%)
	Pre-CRS	Post-CRS	
Apex predators	0.003	0.003	-
Baleen whales	0.032	0.045	41%
Small sharks	0.011	0.008	-27%
Sea birds	0.006	0.006	-
Pacific saury	0.239	0.086	-64%
Pacific sardine	0.117	0.310	165%
Filefish	0.001	0.218	21,700%
Small pelagics	0.136	0.284	109%
Large pelagics	0.009	0.020	122%
Walleye pollock	0.427	1.169	174%
Sandfish	0.151	0.031	-79%
Semi-demersal fish	0.041	0.061	49%
Demersal fish	0.017	0.046	171%
Cephalopods	0.431	0.319	-26%
Benthic feeders	0.230	0.685	198%
Epifauna	0.044	0.107	143%
Gastropods	0.041	0.113	173%
Infauna	0.011	0.023	110%
Zooplankton	4.483	5.470	22%
Algae	0.189	0.079	-58%
Phytoplankton	7.459	7.081	-5%
Total	14.078	16.164	15%

본 결과, 기후체제전환 이후 5개 생물군의 단위면적당 어획량이 감소하였으며, 12개 생물군의 단위면적당 어획량이 증가하였다 (Table 7). 단위면적당 어획량의 변동 양상에서 큰 변화를 보이는 썩치, 정어리, 쥐치, 명태, 도루묵의 변화를 살펴보면, 썩치와 도루묵은 각각 64%와 80%의 감소를, 정어리, 쥐치, 명태는 각각 16,900%, 14,000%, 174%의 증가를 보여, 전체적으로 총 단위면적당 어획량은 48% 증가를 기록하였다. 기후체제전환 이전에는 두족류가 가장 큰 단위면적당 어획량을 나타내었으나 기후체제전환 이후에는 명태가 가장 큰 값을 기록하였다.

Table 7. Comparison of catch per area between pre-CRS and post-CRS models

Group name	Catch (t/km <sup>2</sup> )		Change (%)
	Pre-CRS	Post-CRS	
Apex predators	-	-	-
Baleen whales	0.004	0.006	58%
Small sharks	0.0004	0.0002	-50%
Sea birds	-	-	-
Pacific saury	0.152	0.055	-64%
Pacific sardine	0.0001	0.017	16,900%
Filefish	0.001	0.141	14,000%
Small pelagics	0.038	0.120	216%
Large pelagics	0.006	0.013	117%
Walleye pollock	0.196	0.538	174%
Sandfish	0.069	0.014	-80%
Semi-demersal fish	0.009	0.023	156%
Demersal fish	0.011	0.029	164%
Cephalopods	0.216	0.160	-26%
Benthic feeders	0.003	0.007	133%
Epifauna	0.009	0.019	111%
Gastropods	0.007	0.018	157%
Infauna	0.001	0.008	700%
Zooplankton	-	-	-
Algae	0.094	0.039	-59%
Phytoplankton	-	-	-
Total	0.816	1.207	48%

**영양단계와 상대적인 공헌도의 비교**

각 기간에 대한 평균 영양단계는 기후체제전환 이전 3.09에서 기후체제전환 이후 3.28로 증가하였다 (Table 8).

기후체제전환 이전과 이후에 있어 가장 큰 차이는 동해 생태계에서 대부분의 어류와 두족류가 속하는 중간 영양단계에서 나타났다. 총에너지 흐름에 대한 영양단계 3단계에 있어서 각 생물군의 기여도 (relative contribution)를 기후체제전환 이전과 이후의 비교에서 기후체제전환 이전에는 두족류 38.3%, 명태 19.5%, 저서섭이자 14.7%의 순이었고, 기후체제전환 이후에는 명태가 32.9%, 저서섭이자가 27.1%, 두족류 17.5%의 순이었다. 어획량의 변동양상에서 큰 변화를 보이는 5종의

Table 8. Estimated trophic levels for the pre-CRS and post-CRS model

Group name	Trophic level	
	pre-CRS	post-CRS
Apex predators	4.52	4.59
Baleen whales	3.90	3.89
Small sharks	4.30	4.29
Sea birds	3.50	3.54
Pacific saury	3.18	3.14
Pacific sardine	3.18	3.14
Filefish	3.07	3.07
Small pelagics	3.32	3.32
Large pelagics	4.03	3.94
Walleye pollock	3.34	3.35
Sandfish	3.30	3.57
Semi-demersal fish	4.04	4.05
Demersal fish	3.49	3.54
Cephalopods	3.59	3.91
Benthic feeders	3.18	3.12
Epifauna	2.07	2.33
Gastropods	2.00	2.00
Infauna	2.00	2.00
Zooplankton	2.18	2.14
Algae	1.00	1.00
Phytoplankton	1.00	1.00
Mean trophic level	3.09	3.28

기여도를 기후체제전환 이전과 이후의 비교에서 정어리는 기후체제전환 이전 3.6%에서 기후체제전환 이후 5.8%로 63%의 증가를, 쥐치는 기후체제전환 이전 0.0%에서 4.1%로 16,238%의 증가를, 명태는 기후체제전환 이전 19.5%에서 기후체제전환 이후 32.9%로 69%의 증가를 보였다. 반면, 꽁치는 기후체제전환 이전 7.3%에서 기후체제전환 이후 1.6%로 78%의 감소, 도루묵은 기후체제전환 이전 6.9%에서 기후체제전환 이후 0.9%로 87%의 감소를 보였다 (Fig. 6, Table 9).

## 고 찰

1976/77년 북태평양에서 일어난 기후체제전환이 최근의 연구를 통하여 알려지면서 동해에서도 1976/77년 이후 생태계와 주요 수산자원의 생산량에 변화가 나타났다 (Zhang et al., 2000). 특히 부어류인 꽁치, 정어리, 고등어 등에서 큰 변동 경향을 보였는데 이러한 온수성 어종의 어획량 교차는 일본 해역에서도 1976년을 기점으로 고등어의 어획량은 감소하는 경향을 보이는 반면, 정어리의 어획량은 급격히 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 7). 지금까지 기후체제전환이 생태계를 구성하고 있는 생물자원에 어떠한 영향을 미쳤는지에 관한 기존의 연구는 플랑크톤 혹은 어류자원의 증감에 관한 연구가 대부분이었다. 생태계내 한 구성요소의 증감은 이와 피식/포식 관계를 맺고 있는 다른 생물종에도 영향을 미치게 된다. 그러나

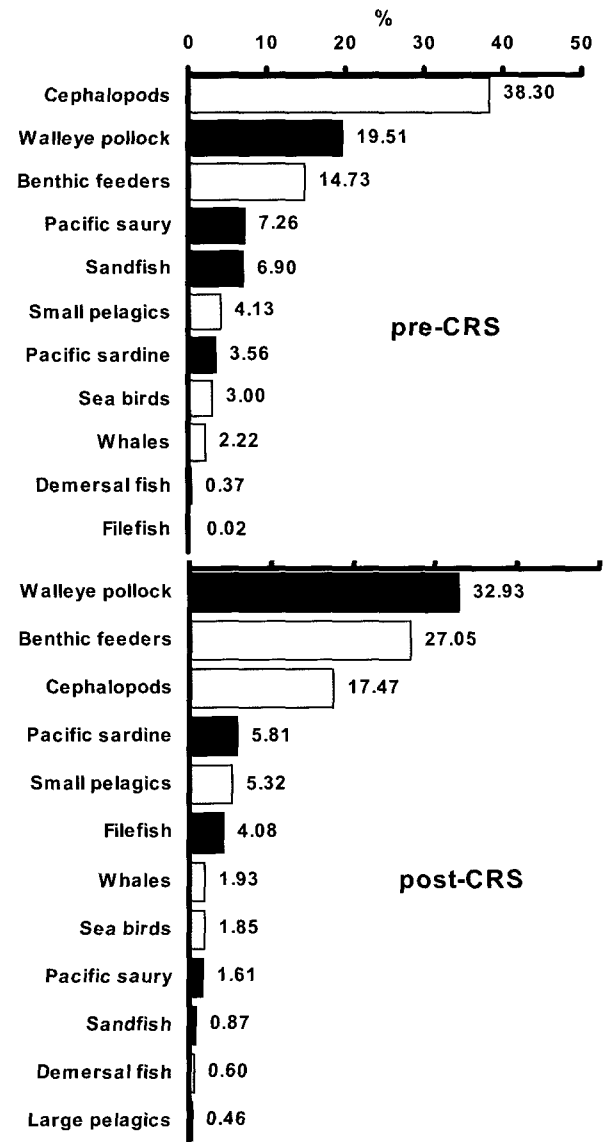


Fig. 6. Relative contribution (%) of species to the total flow of energy (throughput) at trophic level III in the pre-CRS and post-CRS model.

어느 정도로 또 얼마 만큼의 영향을 미치게 되는지를 정량적으로 분석하는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서 본 연구에서는 생태계를 분석하는 질량균형모델의 하나인 ECOPATH 모델을 사용하여 생태계 내에 존재하는 단일종 (혹은 종그룹)에 대한 현 상태와 각 종의 변화율을 추정해서, 이 상태와 변화율 체제내의 주어진 기간에 대해 생태계의 상태와 변화를 정량적으로 설명하였다.

추정된 동해 생태계의 구조는 1차 생산자, 1차 소비자, 2차 소비자, 최고 소비자로 구성되었는데 동해 생태계의 대부분의 생물군은 영양단계 3단계, 즉 2차 소비자에 해당하는 것을 알 수 있었다. 각 기간에 대한 평균 영양단계는 기후체제전환

Table 9. Variations in relative contribution of five species for the pre-CRS and post-CRS model

	Species	Contribution (%)		Change (%)
		Pre-CRS	Post-CRS	
Increase	Pacific sardine	3.56	5.81	63%
	Filefish	0.02	4.08	16,238%
	Walleye pollock	19.51	32.93	69%
Decrease	Pacific saury	7.26	1.61	-78%
	Sandfish	6.90	0.87	-87%

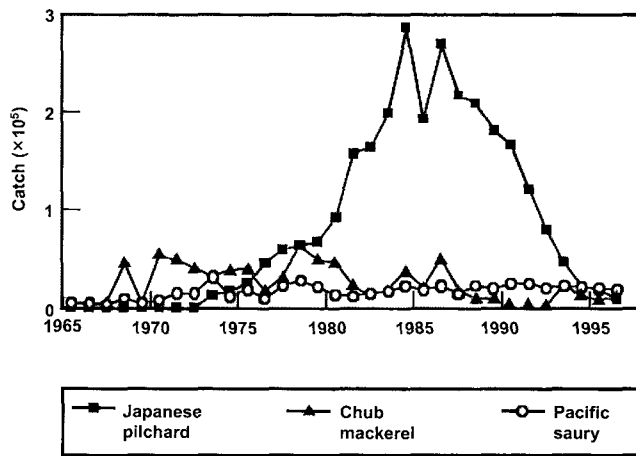


Fig. 7. Variations in catches of Pacific sardine, common mackerel and Pacific saury (modified from Tsutomu and Fujise, 2002).

이전 3.09에서 기후체제전환 이후 3.28로 증가하였다. 이 평균 영양단계는 어획물의 평균 영양단계를 의미하는 것으로서 기후체제전환 이전에 비해 상대적으로 높은 영양단계를 가지는 생물군이 높은 비율을 차지하였음에 기인한다. 또한 ECOPATH 프로그램에서는 평균 영양단계를 추정함에 있어 어획량을 가중치로 하는데 중간 영양단계에 속하는 정어리, 쥐치, 명태 등의 어획량 증가에도 기인한다. 유기퇴적물을 제외한 총 21개 생물군의 기후체제 이전과 이후의 생체량을 비교해 본 결과 기후체제전환 이후 13개 생물군의 생체량이 증가하였고, 6개 생물군의 생체량이 감소하였다. 이중 최고포식자와 바다새의 생체량은 기후체제 이전과 이후의 값을 동일하다고 가정하였기 때문에 분석에서 제외되었다. 총 생체량은 15% 증가하였는데 이것은 쥐치, 저서섭이자, 명태, 저서어류, 정어리 등의 생체량의 큰 증가에 기인한다. 상업적으로 이용되는 총 17개 생물군에 대한 어획량을 기후체제전환 이전과 이후의 비교에서 기후체제전환 이후 12개 생물군의 어획량이 증가하였고, 5개 생물군의 어획량이 감소하였다. 총 어획량은 48% 증가하였는데 이것은 어획량에서 큰 부분을 차지하는 명태 어획량의 큰 증가와 기후체제전환 이전에는 어획량이 미미하였지만 이후 큰 폭으로 상승한 쥐치 어획량의 큰 증가에

기인한다.

동해 대부분의 생물군이 속하는 영양단계 3단계에 있어서 총에너지 흐름에 대한 각 생물군의 기여도는 기후체제전환 이전에는 두족류, 명태, 저서섭이자의 순이었으나 기후체제전환 이후에는 명태, 저서섭이자, 두족류의 순이었다. 이는 생태계 내 우점종에 의한 지위가 두족류에서 명태로 전환되었음을 나타낸다. 또한 어획량의 변동양상에서 큰 변화를 보이는 5종의 기여도를 기후체제전환 이전과 이후에 있어 비교해 본 결과 어획량 증감의 경향과 같이 기여도도 증감하였다. 이는 어획량의 증감, 즉 풍도의 변화가 생태계 내 총 에너지 흐름에서도 변화를 야기시켜 이들이 생태계 내에서 갖는 지위와 역할도 변화하였음을 간접적으로 증명해 준다. 위의 결과를 종합해보면 기후체제전환은 수산자원의 생체량 및 어획량뿐만 아니라 생태계를 구성하는 주요 생물종의 지위와 역할에도 변화를 초래하는 것으로 해석할 수 있다.

그러나 위의 결과는 다음과 같은 요인으로 인하여 해석시 유의해야 한다. 본 연구에 사용된 생체량은 자료의 부족으로 인하여 대부분 어획량과 순간어획사망계수와의 관계로부터 추정할 수 밖에 없었는데 추정에 사용된 각 어종의 자원생태학적 특성치는 기 추정된 자료로서 동일한 해에 추정된 것이 아니라는 문제점을 가지고 있다.

대형상어류, 수염고래류, 바다새와 같은 최상위 포식자에 속하는 동물군에 있어서는 동해 생태계에 대한 생체량, 생산량/생체량 비 등의 자료가 전무하였다. 최상위 포식자는 생태계 내에서 가장 상위 영양단계를 가지는 종들로서 가장 복잡하고 다양한 포식행위를 하는 것으로 알려져 있다. 이들의 증감은 하위 영양단계에 속하는 종들의 풍도에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이들에 대한 자료의 부족으로 인하여 기후체제전환 이전과 이후에 있어 동일하다고 가정하였다.

본 연구에서는 생태계를 구성하고 있는 생물들간의 영양역학적인 관계의 척도가 되는 먹이조성자료의 정확성이 결여되어 있다는 문제점을 가지고 있다. 현 상황에서 각 종이 무엇을 얼마만큼의 비율로 포식하는지에 관한 결과는 미흡한 수준이다. 따라서 위내용물 조사가 이뤄지지 않은 종에 대해서는 문헌에 간략하게 제시되어 있는 주요 먹이생물에 중요도를 부여하여 사용하였다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 주요 어종 뿐만 아니라 상위 포식자에 속하는 상어류, 수염고래류, 바다새에 대한 생태학적 특성치인 연령과 성장, 사망률 등에 관한 광범위한 연구가 수행되어야 한다. 또한 다양한 어종에 대한 위내용물 조사결과를 중간 피식/포식을 나타내는 먹이조성에 접목시켜 보다 정확한 종간의 영양역학적인 관계를 분석해야 할 것이다.

본 연구에서 질량균형 모델인 ECOPATH 모델을 사용하여 기후체제전환 이전과 이후의 동해 생태계에 대해 분석된 결과는 기후체제전환의 영향을 정확히 밝혀내는 데는 미흡한 수준이다. 그렇지만 최근 그 중요성이 대두되고 있는 생태계에 기초한 수산자원 관리를 위한 기초적인 연구로서 동해 생태계

의 구조를 파악하고 생태계를 구성하고 있는 각 생물종 및 생물군의 영양역학적인 관계를 밝히는 첫 시도라는데 의의를 둘 수 있다.

### 참 고 문 헌

- Christensen, V. and D. Pauly. 1992. ECOPATH II a software for balancing steady ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecol. Model.*, 61, 169-185.
- Christensen, V. 1995. Ecosystem maturity towards quantification. *Ecol. Model.*, 77, 3-32.
- Christensen, V., J. Walters and D. Pauly. 2000. ECOPATH with ECOSIM: A user's guide. UBC Fisheries Centre & ICLARM Vancouver, Canada & Penang, Malaysia, 125 pp.
- Chyung, M.K. 1977. *The Fishes of Korea*. Il-ji Publ. Co. Seoul, 64-87. (in Korean)
- Dalsgaard, J.P.T., C. Lightfoot and V. Christensen. 1995. Towards quantification of ecological sustainability in farming systems analysis. *Ecol. Eng.*, 4, 181-189.
- Gong, Y. 1981. Minke whales in the waters off Korea. *Rep. Int. Whale Comm.*, 31, 241-244.
- Gong, Y. 1988. Distribution and abundance of the Sea of Japan-Yellow Sea-East China Sea Stock of minke whales. *Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Ag. Korea*, 41, 35-54. (in Korean)
- Kang, S.K., S. Kim and S.W. Bae. 2000. Changes in ecosystem components induced by climate variability off the eastern coast of the Korean peninsula during 1960-1990. *Prog. Oceanogr.*, 47, 205-222.
- Kim, S. and S.K. Kang. 1998. The status and research direction for fishery resources in the East Sea / Sea of Japan. *J. Kor. Soc. Fish. Res.*, 1, 44-58. (in Korean)
- KOSEF (Korea Science and Engineering Foundation). 1999. A study on the climate regime shift and fisheries resources in Korean Waters. Korea Science and Engineering Foundation, 265 pp. (in Korean)
- Mertz, G. and R.A. Myers. 1998. A simplified formulation for fish production. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55, 478-484.
- MOMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries). 1971-1985. *Korean Fisheries Yearbook*. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 47 pp. (in Korean)
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 1994. *Commercial Fishes of the Coastal and Offshore Waters in Korea*. National Fisheries Research and Development Institute. Ye-Moon Publ. Co. Pusan, 304 pp. (in Korean)
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 1999. *Commercial Molluscs from the Freshwater and Continental Shelf in Korea*. National Fisheries Research and Development Institute. Gu-Deok Publ. Co. Pusan, 197 pp. (in Korean)
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2000a. *Ecology and Fishing Ground of Major Commercial Species in the Korean EEZ*. National Fisheries Research and Development Institute. Ye-Moon Publsh. Co. Pusan, 317 pp. (in Korean)
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2000b. *Whales and Dolphins Off Korean Peninsula*. National Fisheries Research and Development Institute. Hangul Graphics, 135 pp. (in Korean)
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2001. *Handbook of Korean Oceanography*. National Fisheries Research and Development Institute. 4th edition, 435 pp. (in Korean)
- NORI (National Oceanographic Research Institute). 1999. *Map of the Fishery Fact of Korea-Japan*. National Oceanographic Research Institute. (in Korean)
- Park, C. and J.K. Choi. 1997. Zooplankton community in the front zone of the East Sea of Korea (The Sea of Japan): 1. Species list, distribution of dominant taxa, and species association. *J. Kor. Fish. Soc.*, 30, 225-238. (in Korean)
- PICES. 1994. PICES-GLOBEC Science Plan. Submitted to the Third PICES Annual Meeting. Oct. 15-24. Japan. North Pacific Marine Science Organization, 114 pp.
- PKNU (Pukyong National University). 1999. *Fishery Damage Research on Pusan New Harbor Construction*. 2nd ed. Production Computation. Korea Inter-University Institute of Ocean Science, 512 pp. (in Korean)
- PKNU (Pukyong National University). 2000. *Oceanographic Impact Research on Hadong Thermoelectric Power Plant Operation and Construction Work*. 2nd ed. Production Computation. Korea Inter-University Institute of Ocean Science, 439 pp. (in Korean)
- Polovina, J.J. 1984. Model of a coral reef ecosystem. Part I. The ECOPATH application and its application to French Shoals. *Coral Reefs*, 3, 1-11.
- Trites, A.W., P.A. Livingston, S. Mackinson, M.C. Vasconcellos, A.M. Springer and D. Pauly. 1999. Ecosystem change and the decline of marine mammals in the eastern Bering Sea: testing the ecosystem shift and commercial whaling hypotheses. *Fish. Cent. Res. Rep. Vol. 7*. Vancouver, 106 pp.
- Tsutomu, T. and Y. Fujise. 2002. Geographical and seasonal changes of the prey species of minke whale in the

Northwestern Pacific. ICES J. Mar. Sci., 59: 516-528.  
Ulanowicz. 1986. Growth and development: Ecosystem  
phenomenology. Springer Verlag. New York, 204 pp.  
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. Prog.  
Oceanogr., 47, 171-190.  
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. Prog.  
Oceanogr., 49, 513-537.

---

2003년 4월 22일 접수  
2003년 7월 25일 수리