

GLOBEC 프로그램의 목적, 운영체제 및 최근의 동향에 대하여

김수암

한국해양연구소 극지연구센터

Goal, Structure, and Recent Development of the GLOBEC Programme

SUAM KIM

Polar Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

기후변동에 따른 해양생태계의 변화를 예측하기 위한 국제 연구 프로그램인 Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC)은 해양의 탄소순환을 집중적으로 연구한 Joint Global Ocean Flux Study(JGOFS)의 후속조치로서, 이 논문에서는 GLOBEC 프로그램의 목적, 방향, 실천계획, 체제를 정리하였다. 해양과학위원회(SCOR)와 정부간해양위원회(IOC)의 후원을 동시에 받고 있는 대형과학프로그램인 GLOBEC은 기후변화에 따른 생태계의 중위 및 상위포식자의 반응에 대한 연구이며, GLOBEC 과학집행위원회는 연구를 수행하기 위한 실천계획을 1999년에 수립하였다. GLOBEC 프로그램은 국제생지권프로그램(IGBP)의 핵심과제로 지정되어 향후 10년 동안 지속될 것이며, 구체적으로 4개의 연구 초점, 체제구축활동, 지역프로그램, 종합화 등으로 구성되어 있다. 가장 중요한 연구활동인 4개의 연구초점은 다음과 같다: 과거자료분석(Retrospective analyses), 과정 연구(Process studies), 예측과 모델링(Predictive and modelling capability), 되먹임(Feedbacks). 현재, 남극해 GLOBEC(SO-GLOBEC), 소형표층 어류와 기후변화(SPACC), 대구와 기후변화(CCC), 기후변화와 환경수용력(CCCC)의 4개 국제적 지역프로그램이 있으며, 이들은 모두 우리나라 해양 및 수산연구와 밀접한 관련이 있다. 미국, 일본 등의 9개국은 국가프로그램을 운영하고 있으며, 이 수요는 점차 증가할 전망이다.

Goals, research direction, and operational structure of the Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC), which is co-sponsored by the Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR) and the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), are described. Following the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) activities on the lower trophic level in ecosystem during 1980s-90s, scientists have considered the responses of the mid and higher trophic levels to the environmental or climate change. The scientific steering committee of the GLOBEC published the implementation plan in 1999, and the IGBP will support the GLOBEC as one of its core projects for 10 years. The GLOBEC programme has four major components: the research foci, framework activities, regional programmes, and integrating activity. The core of GLOBEC research is the four research foci: retrospective analyses, process studies, predictive and modelling capabilities, and feedbacks. Currently, four regional programmes have been undergoing in the world ocean: Southern Ocean GLOBEC (SO-GLOBEC), Small Pelagic Fishes and Climate Changes (SPACC), Cod and Climate Change (CCC), and Climate Change and Carrying Capacity (CCCC). Also, national GLOBEC programmes were already established in 9 nations.

서론

인류는 해양으로부터 여러 가지의 이득을 받고 있다. 해양에서 생산되는 수산물은 인류의 동물단백질 공급의 약 16%를 차지하고 있으며, 20억의 인구가 해안에서 100 km 이내의 해안 지역에 살고 있으므로, 인류에 있어서 해양의 중요성과 영향은 참으로 막대하다(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. 이

러한 이득은 재화성 산물(goods)과 비재화성 혜택(services)으로 구분할 수 있는데(Table 1), 해양생태계의 역할도 이 범주에서 벗어나지 않는다. 우리는 어업활동과 같은 생산적인 활동을 통하여 해양에서 재화를 만들어 내기도 하지만, 금전적으로 환산할 수 없는 많은 혜택도 동시에 제공받고 있다. 즉, 해양으로 흘러들어 가는 오염물질의 자연적 정화, 혹은 해양의 기후 조절 능력과 같은 것이 모두 비재화성 혜택에 포함될 수 있다. 또한, 해양에서 발생하는 여러 현상은 기후에 의하여 많은 영향을 받고 있기도 하지만, 반면에 해양은 비열이 공기보다 훨씬 높은 해수가 지구 표면의 70%를 점유하고 있기 때문에 기후 변화에 많은 영향을

Table 1. 생태계가 인간에게 제공하는 재화성 산물과 비재화성 혜택(Christensen *et al.*, 1996)

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

미치고 있다.

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, 첨단 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 해양 자료, 통계분석 방법의 발전 등은 기후-해양 상호관계 규명에 커다란 실마리를 제공하고 있다. 그리고 과거의 생태계 자료를 기후변동의 시각에서 재분석하고 조명해 봄으로써, 기후변동에 따른 해양생태계의 예상되는 모습을 어느 정도 짐작하게 되었다. 본 논문은 급변하는 지구환경연구 분야에서 해양학이 어떻게 발전하고 있는지 가름하기 위하여 작성되었다. 그리고, 우리나라 해양학의 방향과 정부의 정책을 점검해 보는 계기를 마련하기 위해서, 선진국들이 해양연구를 바라보는 시각을 국제적 연구프로그램인 ‘전지구해양생태계 역학연구(Global Ocean Ecosystem Dynamics: GLOBEC)’ 프로그램을 통하여 유추하였으며, 향후 우리가 추진하여야 할 해양연구 방향을 고찰하여 보았다.

GLOBEC 프로그램의 탄생과 연구의 성격

‘국제과학연맹협의체(International Council of Scientific Unions: ICSU)’ 산하의 ‘해양과학위원회(Scientific Committee on Oceanic Research: SCOR)’는 비교적 짧은 3년 규모의 전문가 모임(Working Group)과 해양학계의 진로를 제시하는 10년 규모의 대형과학프로그램(Large-scale Global Change Programme)을 설치하여 국제해양학계를 선도해 가고 있다. 또한, UNESCO 산하의 ‘정부간해양위원회(Intergovernmental Oceanographic Commission: IOC)’는 해양에 관련된 제반 문제를 정부 수준에서 토의하고 검토하는 기구로서, 과학적인 문제에 대해서는 SCOR와 더불어 후원하고 있다. 이 두 기구는 ‘전지구적 해양순환연구(Joint Global Ocean Flux Study: JGOFS)’와 GLOBEC 프로그램을 운영하고 있다.

JGOFS 프로그램은 1987년에 시작되고, 1989년에는 ‘국제생지권프로그램(International Geosphere-Biosphere programme: IGBP)’의 핵심사업(Core Project)으로 인준 받아, 지난 80-90년대에 전 세계의 해양에서 진행되고 있는 탄소의 순환에 관한 연구를 수행하여 왔다. 이 연구는 대기 중의 이산화탄소가 해양식물플랑크톤의 활동에 따라 어느 정도 해양에 의하여 흡수되고 다시 대기

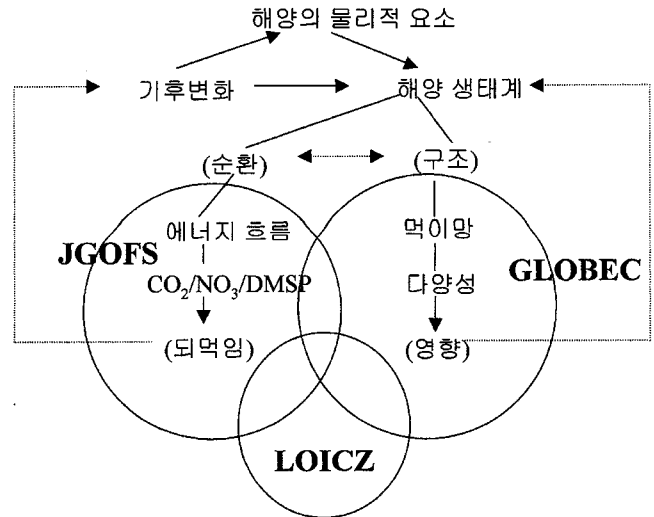


Fig. 1. 전지구적 해양과학 프로그램의 상호관계: 전지구적 해양순환 연구(JGOFS), 전지구적 해양생태계 역학연구(GLOBEC), 연안역 육상-해양 상호작용(LOICZ)(Steel, 1998).

로 배출되는지에 대한 과정을 밝히는 대기-해양 상호관계와, 해양의 표층-심층 사이에 형성되는 탄소(혹은, 유기물)의 생지화학적 순환과 이동에 관한 것으로(Fig. 1), 20여 개국의 JGOFS 과학자들은 지난 10년 동안에 약 1100번에 이르는 해양조사를 통하여 생태계의 기초생산력과 탄소순환에 관한 연구를 집중적으로 수행하였다. JGOFS 프로그램은 이제 그 동안의 해양관측과 실험결과를 종합화하고 모델에 적용시켜 미래의 변화에 대한 예측 연구를 하는 마무리 작업단계에 접어들었다. 이처럼 생태계의 가장 기본이 되는 기초생산력에 대한 연구가 어느 정도 진전을 보임에 따라, 과학자들은 자연스럽게 식물플랑크톤을 먹이로 하는 생태계의 중위(즉, 동물플랑크톤) 및 상위요소(즉, 어류와 포유류 등)에 대하여 관심을 기울이게 되었다. 그리고 이들의 증감은 기후 혹은 해양의 변동에 따라 유발되고, 그 결과가 해양생태계와 산업계에 커다란 영향을 미치게 됨을 인식하기 시작하였다.

지구 표면의 70%를 해양이 차지하고 있기는 하지만, 해양의 대부분은 생산력이 낮은 원양이다. 육지에 면한 얕은 바다, 특히 수심 200미터가 채 못되는 대륙붕이 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 GLOBEC 연구는 주로

대륙붕 지역에서 수행되고 있다. 이는 대부분의 JGOFS 연구가 원양에서 수행되었던 것과 좋은 대비를 이룬다(Steel, 1998).

지난 세기의 과학자들은 해양 어류자원이 무한정 존재할 것이라고 믿고 있었으나, 어류의 수요가 증가한 금세기에 들어와 어업 및 어류자원이 큰 폭으로 변동하고 있음을 발견하였다. 즉, 남획의 영향을 배제하더라도, 자연상태에서 어류군의 증감이 시대에 따라 반복되고 있음을 알게 되었다. 어류자원의 증감원인을 규명하고자 하는 해양학자의 노력은 비교적 최근에 와서 실행에 옮겨지게 되었는데, 해양의 물리적 현상을 더욱 정밀히 관찰할 수 있는 CTD, ADCP와 같은 과학기구들이 1970년대 이래 보편화되고, 생물현상에 대한 생화학적 연구가 발전됨에 따라, 컴퓨터를 이용한 생물-물리 접합 모델이 생태계 연구에 이용되기 시작하였다. 더욱이, 1990년대에 접어들어 지구환경 혹은 기후변화에 대한 인식이 지구과학의 각 분야에서 보편화되면서, 동물플랑크톤의 변성과 해양어류군의 변동도 기후변화의 시각에서 해석을 해 보려는 시도가 해양생태학의 주류로 등장하게 된 것이다. GLOBEC 프로그램은 이러한 배경에서 시작되었다.

GLOBEC 프로그램의 연구 목표

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 변성에 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.

이 목표를 달성하기 위해서는 수산학적인 지식만 필요한 것이 아니라, 기상학, 물리해양학, 생물해양학, 화학해양학에 대한 전반적인 이해가 선행되어야 하며, 각 부분에서 만들어진 자료를 하나의 틀(interdisciplinary)로 엮어서 총체적으로 해석하여야 한다. 또한, 해양생태계에 인위적 요소가 가미되었을 때, 이를 자연발생적 현상과 구분할 수 있는 능력을 향상시키고자 하는 것도 관건사항이다. 이러한 관점에서 현재의 과학 수준은 미흡하며, GLOBEC의 목표에 접근하기 위해서, 우리가 해양연구를 통하여 추구하여야 하는 사항이 무엇인지 구체화 할 필요가 있다. GLOBEC 과학계획(IGBP, 1997)에서는 구체적으로 다음과 같은 네 가지를 제시하고 있다. 먼저, 시공간적 규모가 다른 여러 물리환경이 해양생태계에서 대규모 변화를 유발시키는 과정에 대한 이해를 높여야 한다. 그리고, 각기 다양한 해양체계에서 생태계의 구조와 역학과의 관계를 정립하는데, 특히 생태계에서 에너지의 흐름을 연구하는 영양역학(trophodynamics)과정과 그들의 변동, 그리고 먹이망에서 영양물질의 역할을 중점적으로 강조하면서

지구해양생태계의 중요한 구성요소들을 분류하여야 한다. 또한, 적절한 해양관측체계를 갖추고 수집한 자료를 물리, 생물, 화학 접합모델을 이용하여 지구적 변화의 영향이 생물자원의 역학에 미치는 영향을 결정하고, 향후 발생할 수 있는 변화를 예견할 수 있는 능력을 개발하여야 한다. 마지막으로, 되먹임기작(feedback mechanism)을 파악하고 정량화 함으로써 계속 변화하는 해양생태계가 어떻게 전 지구계에 영향을 미칠지 결정하여야 한다.

GLOBEC 연구의 초점(Research Focus)과 실천계획(Implementation Plan)

GLOBEC 프로그램에서는 중점적으로 관심을 두어야 할 4가지의 초점연구 분야를 제시하고 있으며(IGBP, 1997), 연구목표를 달성하기 위한 구체적인 실천계획을 마무리하였다(IGBP, 1999). 즉, 과거의 자료를 기후변동의 시각에서 다시 분석하는 과거자료의 분석 및 시계열 연구(Retrospective analyses and time series studies), 목표 생물종과 주위 환경 혹은 생태계 구성요소들과의 상호반응과정에 대한 과정연구(Process studies), 관찰 결과를 생태계 모델에 적용하여 미래를 예측하는 예측과 모델링(Predictive and modelling capabilities), 변화된 생태계가 다시 지구환경에 미치는 영향을 분석하는 되먹임(Feedbacks from changes in marine ecosystem structure) 등이 4개의 연구 초점이며, GLOBEC 취지의 연구를 한다면 지구상의 어느 해양생태계를 연구한다고 할 지라도, 위의 네 가지 연구 분야를 고려하여야 한다. 그러므로, GLOBEC의 지역프로그램이나 국가 프로그램들은 모두 위에서 열거한 네 분야의 연구를 포함하고 있다(Fig. 2). 다만, 마지막 항목인 되먹임 분야에 대한 실천계획에 약간의 보완이 필요하며, 향후 많은 의견 교환이 필요한 것으로 지적되고 있다.

Fig. 2에서 제시된 요소들이 서로 원활하게 움직이기 위해서는 국제적 체제구축활동(Framework activities) 노력이 어느 정도 활성화되느냐에 달려있다. 체제구축활동이 활발하면, 즉, 국제프로그램이 서로의 합의하에 잘 조정되고 있다면, 그로부터 얻는 부가가치는 대단히 클 것이다. 예를 들어, 해양관측에 대한 절차와 기준을 미리 작성해 놓고 여러 연구팀들이 그 원칙에 맞추어 자료를 획득하였다면, 나중에 각국에 의하여 수집된 자료를 종합적으로 해석하거나 비교하기가 수월하게 된다. 이러한 사전조치는 어느 한 국가가 혼자서 할 수 있는 일이 아니고, 오직 각 연구팀의 대표들이 협의를 통하여, 혹은 GLOBEC과 같은 조직의 주도하에 성취될 수 있다.

또한, 생태계의 현상을 설명하기 위한 GLOBEC의 접근 방법은 여러 가지의 다른 규모로 진행되었던 관측이나 실험의 결과를 논리적으로 잘 연결시키고 종합화하는 것이다. 이러한 종합화에 대한 총괄 활동(Integrating activity)은 이미 수행되었거나 현재 진행 중에 있는 다른 연구의 결과를 정리하는 것으로부터 시작되는데, GLOBEC 프로그램의 초기단계부터 여러 사례를 수집하는 것이 좋다. 기후변화 연구에 관련하여, 지난 10여 년 동안은 대규모의 전 지구적 변화에 많은 관심을 두었으나, 21세기에는 각 지역적인 문제들에 대하여 더욱 많은 논의를 하여야 한다는 것이 1999년도 제 2차 IGBP Congress의 결론이다. 따라서 여러 유형의 생태계 별로 정리된 자료가 많이 축적되어 있으

Table 2. GLOBEC 실천계획에 예시된 초점연구별 활동표

	활 동
제 1초점 연구 (과거자료의 분석)	1.1 기존의 장기간 연구 및 자료의 보존 1.2 기존의 장기간 자료의 분석 1.3 새로운 장기간 자료의 창출 1.4 비교를 위한 새로운 자료의 개발
제 2초점 연구 (과거 연구)	2.1 생활사 및 영양역학에 대한 연구, 그리고 생태계 내에서의 상호관계 연구 2.2 물리-생물 상호관계에 대한 분별과 이해 2.3 어업과 외래도입 종에 대한 분별과 이해
제 3초점 연구 (예측과 모델링)	3.1 채집과 관찰방법에 대한 구상 및 시험 3.2 모델능력의 개발 3.3 접합모델과 관찰능력의 개발 및 적용

면, 우리가 연구하려는 어느 특정 생태계의 발달 단계를 쉽게 파악할 수 있으므로 연구의 방향이나 전략을 효율적으로 수립할 수 있다. 그리고 해양생태계가 지구환경 변화에 어느 정도 취약한지 점검해 볼 수 있는 자료를 제공할 것이다. 하지만, 아직 지구 생태계를 어떠한 원칙으로 구분하여야 하는가에 대해서는 과학자들 사이에 이견이 많이 있으며, GLOBEC 프로그램에서도 생태계의 유형(typology)을 구분하는 방법에 대해서는 아직도 많은 논의가 필요하다는 것이 중론이다.

GLOBEC은 향후 10년 동안의 실천계획을 수립하면서, GLOBEC의 목표를 달성하기 위하여 각 초점사업별로 필요한 실질적인 연구 내용이 무엇인지 구체적으로 제시하고 있다(IGBP, 1999). 제 1초점 연구에서는 현존하는 장기간 자료에 대한 연구를 증진시키고, 분석되지 않았던 시료들을 분석하며, 그러한 자료들을 잘 보관하는 것을 주요 활동사항으로 한다(Table 2). 수행하여야 할 과제로서 장기간의 시계열 자료를 얻는 방법을 다양하게 열거하였는데, 현재 진행 중인 해양조사를 유지하거나, 과거의 해양조사에서 얻은 시료 중에서 분석되지 않은 것을 선별하여 분석을 하거나, 역사책, 퇴적물, 유적지에서 과거의 흔적을 찾아내는 방법 등이 제시되었다. 이렇게 획득된 혹은 새로이 창출해 낸 시계열 자료에 대한 정보를 기후변동의 시각에서 새로운 통계기법에 의하여 분석하고 정리함으로써, 과거에 발생하였던 기후의 변동이 해양생태계에 미친 영향을 확인하는 것은 새로이 발생할 변화를 미리 예측하는데 필수불가결적 요소이다.

제 2초점 연구는 자연과학을 하는 해양학자의 입장에서는 가장 친숙한 분야이다. 해양에서 개체군 수준에서 발생하고 있는 생태학적, 생리학적 현상들을 해양환경의 변동이라는 틀에서 해석하기 위하여 여러 가지 실험 및 관찰을 시행하고 가설을 증명하는 작업은, 해양생태계의 기능과 구조를 파악하는데 매우 중요하다(Table 2). 현재까지는 주로 식물플랑크톤에 초점을 맞춘 많은 연구가 수행되었으며, 아직 동물플랑크톤이나 그들을 섭식하는 포식자들에 대한 연구 결과는 많지 않다. 따라서 동물플랑크톤과 어류와의 먹이연쇄를 통한 상호작용을 규명하는 연구 주제가 강조되고 있다. 또한 어업활동을 생태계에 대한 하나의 외부 요인이라고 간주하였을 때, 어업은 특정 어종의 사망률을 높임으로써 동물플랑크톤에 대한 포식압을 감소시킨다. 결과적으로 큰 크기의 동물플랑크톤의 변성과 연이은 작은 동물플랑크톤의 감소가 유발될 수 있다. 기후 및 환경의 변동과 더불어 어업이 지속

적으로 강도 높게 수행될 때, 상기한 생태계의 폭포 가설(cascade hypothesis)이나, 종의 대체(species replacement) 현상의 주요한 원인이 될 것으로 생각된다.

제 3초점 연구는 GLOBEC 프로그램에서 핵심적인 부분이다. 기후변동에 따른 생태계의 변화를 예측하는 것은 과학적인 관측 체계 하에 수집된 자료를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 가능하다. 따라서 자료의 수집, 모델링 능력의 개발, 또한 이 두 요소를 접합시키는 방법의 개선 등의 연구가 필요하다(Table 2). 최근에 들어와 비약적인 발전을 성취한 전자, 음향, 광학 기술의 응용으로 자료의 질이 정밀해지고, 물리-생물 접합 모델 그리고 모델-관측 접합 체제의 비약적인 발전이 성취되었다. 그러므로 제 1초점 연구, 제 2초점 연구에서 도출된 과학적 연구 결과를 생태계 모델에 접목한다면 특정한 해양생태계의 반응, 특히 물리적 환경요소나 생물간 상호작용에 대한 동물플랑크톤이나 어류 개체군의 반응을 예견할 수 있는 능력이 향상 될 수 있다.

제 4초점 연구는 위에서 설명한 세 분야의 연구에 비하여 구체적인 활동이나 수행과제를 규정하기가 어렵다. 하지만, 이 연구는 기후변동에 의하여 변화된 해양 혹은 해양생태계가 다시 지구 혹은 기후에 영향을 미칠 것이라는 개념으로 시작되었다. 특히, 해양의 존재는 기후 및 기상현상에 커다란 요인으로 작용하기 때문에 되먹임 기작이 매우 중요한 과학적 사안으로 다루어져야 할 것이다.

GLOBEC의 지역(regional) 프로그램과 각국의 국가(national) 프로그램

GLOBEC은 특정 지역에서 수행하는 연구에 직접적으로 연구비를 지원하지는 않지만, 각국의 GLOBEC 프로그램들과 연계하여 연구가 수행될 수 있는 기회와 여건을 제공하고 있다. 현재, 여러 국제 공동연구 프로그램이 추진 중에 있는데, 이를 지역 프로그램이라고 하며, 대표적인 것으로 '남극해 GLOBEC(Southern Ocean GLOBEC: SO-GLOBEC)', '해양표층어류와 기후변동(Small Pelagic Fishes and Climate Change: SPACC)', '대구와 기후변동(Cod and Climate Change: CCC)', '기후변동과 환경수용력(Climatic Change and Carrying Capacity: CCCC)' 프로그램이 있다(Fig. 2). 다음은 각 지역 및 국가 프로그램에 대한 개략적인 설명이다.

남극해는 남극대륙 주위의 해양으로, 남극수렴대에 의하여 다른 해양과 경계를 갖는다. 지구 전 해양 면적의 약 10%를 차지하는 남극해에는 남극크릴(*Euphausia superba*)을 중심으로 하는 고유한 생태계가 형성되어 있다. 여러 종류의 펭귄, 물개, 어류, 또한 열대해역으로 회유를 하는 고래들이 남극크릴을 주 먹이로 하고 있으며, 지난 수십 년 동안 크릴자원량의 변동폭이 심했다. 이러한 변동의 원인은 기후변동에 기인하는 것으로 추측하고 있다. 즉, 겨울 동안의 날씨가 추워서 남극해의 결빙상태가 크게 확장되었던 해에는 크릴의 산란성공률이나 새끼들의 생존률이 좋았던 반면, 날씨가 따뜻했던 해에는 크릴의 생존이 성공적이지 못했다(Loeb et al., 1997). 따라서 남극크릴의 생태, 생리현상과 기후, 기상, 및 해양현상을 동시에 연구하여야만 남극크릴생태계를 더욱 철저히 파악할 수 있다는 인식을 하기에 이르렀다. 이

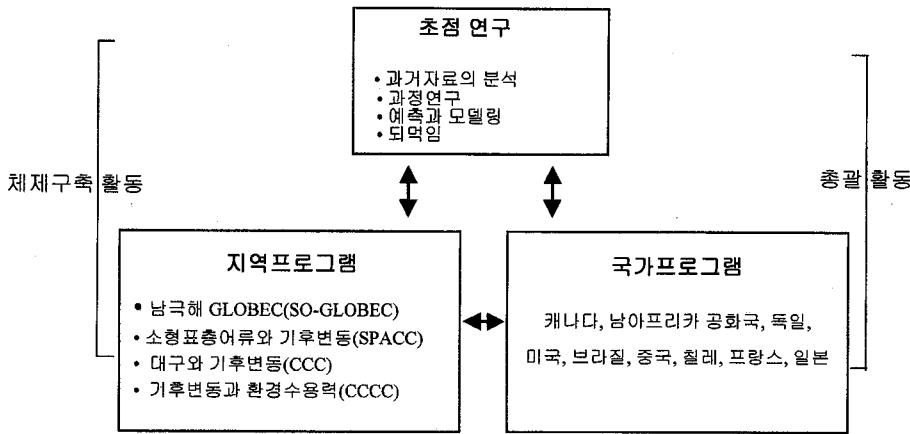


Fig. 2. GLOBEC의 실천계획에 설명되어 있는 주요 요소들간의 관계.

에, 현재 남극해에서 쇄빙선을 이용하여 연구활동을 펼치고 있는 국가들인 미국, 영국, 독일, 호주는 2001~2002년 겨울 동안에 남극해의 크릴에 대한 연구를 집중적으로 해 보고자 SO-GLOBEC 프로그램을 조직하게 되었고, 이는 GLOBEC 프로그램이 설립된 후 결실을 맺는 최초의 대규모 공동연구로 평가받고 있다.

전 세계의 해양에서 어획되는 어류는 현재 약 8000만톤 정도이다. 그 중에서 가장 많이 어획되는 어종을 10종 골랐을 때, 7종이 정어리, 멸치, 고등어 등의 소형표층어류에 속한다 (GLOBEC, 1995). 소형표층어류들은 전 세계 해양에, 특히 육지에 면한 대륙붕이나 용승해역에 분포하고 있으며, 이들의 어획량은 최소한 약 30%를 차지하기 때문에 많은 국가나 국제프로그램들이 수산학적 관점에서 연구를 수행하여 왔다. 장기간의 어획 자료를 분석하여 보면, 이들 소형표층어류의 어획량은 변동폭이 매우 크다는 공통점이 있으며, 그 원인은 이들이 기후의 변동에 매우 민감하게 반응하기 때문인 것으로 알려져 있다. 따라서 GLOBEC에서는 SPACC 프로그램을 설립하여 소형표층어류의 번성 및 성장에 영향을 미치는 물리적 요소를 추출하고, 향후 또 다시 기후가 변동될 때에 소형표층어류의 생산력이 변화하는 양상을 예측하기 위한 연구를 시작하였다. 소형표층어류는 종별로 생태적인 유사성이 많으며, 세계 곳곳에 널리 분포하기 때문에, 특히 개발도상국의 과학을 증진시킴으로써 각 생태계 별로 자료를 수집하여 비교하려는 노력이 필요하다.

북대서양을 둘러싸고 있는 국가들은 해양학과 수산학이 비교적 잘 발달되어 있으며, 해양학에 관련되는 연구자료도 매우 풍부하다. GLOBEC의 기본 개념인 해양어류의 가입에 대한 해양 물리학적 영향에 대한 가설도 북대서양의 중요한 어업종인 대구 (Atlantic cod)로부터 시작하였으며(Hjort, 1914), 이 해역의 해양 연구를 담당하고 있는 '국제해양조사협의회(The International Council for the Exploration of the Sea: ICES)'는 해양학의 발전에 지대한 공헌을 해 온 정부간 기구로서 19개국에 회원으로 가입되어 있다. GLOBEC 프로그램은 ICES와 함께 북대서양에 널리 분포하고 있으며, 생물학적인 그리고 수산학적인 지식이 잘 축적되어 있는 대구를 택하여 CCC 프로그램을 설립하였으며, 이곳으로부터 모범적인 연구결과가 도출되기를 기대하고 있다.

북태평양 국가들은 대서양의 ICES를 모델로 삼아, 해양 연구

를 증진시키기 위하여 '북태평양해양과학기구(The North Pacific Marine Sciences Organisation: PICES)'라는 정부간 기구를 1992년에 결성하였으며, 현재 우리나라를 비롯한 6개의 회원국이 있다. PICES는 GLOBEC과 연계하여 CCCC 프로그램을 시작하였는데, 이 프로그램의 목표는 북태평양 해양생태계에 영향을 미치는 기후변동에 관한 회원국의 연구를 조정하고 고무시키는데 있다(PICES, 1994). PICES 과학자들은 기후가 바뀔 때에 따라 생태계의 구성 요소들도 바뀌지만 그 생태계가 지탱할 수 있는 환경수용력도 변화하리라는 관점을 가지고 있다. 특히, 먹이망(food web), 시공간적 다양성, 주요 어종의 생산력과 환경수용력에 영향을 미치는 물리 및 생물과정을 밝히는 연구가 주요 관심사이다. CCCC 프로그램에는 4개 작업팀(Task Team: TT)이 설치되어 있다. REX (Regional Experiment) TT와 BASS (Basin Study) TT는 각각 북태평양의 해안역과 원양역을 각각 10개와 2개 해역으로 구분하여 연구를 수행하는데, 매년 workshop을 개최하여 자료를 정리하고 향후의 계획을 수립하고 있다. MODEL TT는 아직 하위영양수준의 모델을 비교하고 영양염 자료와 같은 기본자료들을 수집하는 단계이지만, 곧 물리/생물 접합모델도 이용할 계획에 있다. MONITORING TT는 가장 최근에 시작된 작업팀으로서, 회원국들이 기존에 수행하였던 활동을 정리하고 CCCC 프로그램의 목표를 달성하기 위하여 필요한 개선책을 제시하고 있다. 현재 북태평양에서 생태계를 모니터링 하는 연구선 일정에 대한 시간표를 만들고 있으며, 플랑크톤 연속채집기(Continuous Plankton Recorder: CPR)의 운영 계획을 수립하고 있다.

GLOBEC 연구의 성공적인 결실을 맺기 위한 가장 중요한 요소는 이 연구를 계획하고 실천하는 각국의 국내 프로그램의 활동 여부이므로, 국가 GLOBEC 위원회는 실천계획을 수립하는데 적극적으로 관여하여 왔다. 국내에 GLOBEC 위원회 및 사무실이 설치되어 있으며, 정부로부터 연구비가 후원되고 있는 국가는 현재 9개국(남아프리카, 독일, 미국, 브라질, 일본, 중국, 칠레, 캐나다, 프랑스)이며, 뉴질랜드는 현재 추진 중에 있다. JGOFS에 약 20여개국이 관여한 것과 비교해서는 아직 적은 수효이지만, 공식적인 국내 프로그램이 없다고 하더라도, 스페인, 영국, 이탈리아 등의 많은 국가들이 기존의 연구계획을 약간 변경하여 GLOBEC 취지의 연구를 수행하고 있기 때문에 시간이 지날수록 국가 GLOBEC 프로그램은 증가할 것으로 보인다.

선진국들은 GLOBEC 실천계획의 입안단계부터 개입을 하였으며, 의견을 충분히 조율하였기 때문에, 각국의 실정에 적합한 연구주제를 선정하고, 실천계획에 의거하여 연구를 추진하고 있다. 미국은 GLOBEC 개념을 처음으로 제공한 국가로서 어느 다른 국가에 비하여 연구활동도 활발한 편이다. 미국 과학재단(NSF)과 해양대기청(NOAA)은 기후변동과 관련된 해양생태계의 변화에 대한 연구를 지원하고 있는데, NSF는 장기간 변동에, NOAA는 단기간의 수산자원 변동에 대하여 연구를 추진하고 있다. 일본은 GLOBEC 연구의 시작은 늦었지만, 기존의 왕성한 수산연구를 해양연구와 접목하여 매우 빠르게 GLOBEC 형태의 연구를 진행시키고 있다. 태평양측 연안역에 2개, 북태평양 및 남극해에 각각 1개씩의 GLOBEC 프로그램을 운영하고 있으며, 연안역 GLOBEC 연구는 주로 소형표층어류와 명태자원의 가입과 해양의 변동양상에 대하여, 대양 GLOBEC 연구는 난바다곤쟁이류(cuphausiids)의 번성과 기후와의 관계 및 그들과 포식자와의 관계에 대한 연구에 치중하고 있다.

결언: 한반도 주변해역의 생태계와 GLOBEC 연구

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있으며, 수산업은 세계 10위권 이내에 들어가는 해양·수산국이다. 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. 이러한 관점에서 GLOBEC 취지의 연구는 굳이 선진국의 해양학 연구방향을 소개하지 않는다 할 지라도 해양학 연구에서 우선 순위가 높은 연구로 추진되어야 한다. 이러한 논리의 당위성은 우리와 사회적 환경이 비슷한 일본의 해양연구 우선순위목록에서 찾아볼 수 있는데, 1997년 일본의 제6회 과학기술예측 보고서에서 해양연구 우선 순위 15개를 선정한 결과를 보면, 지진에 관한 2개를 제외하고는 GLOBEC 취지의 연구가 가장 높은 점수를 받았다(임기철, 1998).

GLOBEC의 네 지역 프로그램은 모두 우리나라와 밀접한 관련을 가지고 있다. 남극해 크릴 어업국인 우리나라는 남극 크릴 연구 사업을 수행하고 있으며, 이 연구는 SO-GLOBEC과 연계되고 있다. 우리나라의 해역은 모두 CCCC의 REX 해역으로서 국제적인 관심이 고조되고 있는 해역인데, 특히 남해안에서 생산되는 소형표층어류의 생산은 간혹 국내 총 어류 생산의 50%를 상회할 정도로 많은 양이다. 이들은 기후의 변동에 따라 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있으므로 SPACC은 우리나라의 GLOBEC 연구에서 가장 먼저 접근하여야 할 프로그램이다. 동해의 명태 자원은 전통적으로 매우 중요한 어업이었으나 연간 어획량 변동이 심하며 최근에는 자원이 거의 고갈 상태에 있다. 이

러한 원인으로는 자원에 대한 부적절한 관리와 더불어 해양환경의 변동을 함께 생각할 수 있다. 따라서 명태 자원의 가입기작에 대한 실마리를 찾기 위하여 명태와 유사한 생태학적 특징을 갖는 대구에 대한 연구 결과를 조사할 필요가 있으며, 북한과 함께 CCC의 연구 과정을 검토하여야 한다. 이처럼, GLOBEC 연구는 우리와 동떨어진 연구프로그램이 아니라 오히려 해양 및 수산학에서 직면하고 있는 현안사항에 대한 실질적인 문제 해결 방법인 것이다. 그러므로, 이제부터라도, 우리 정부 및 연구자는 추진하여야 할 연구 사안을 발굴하기 위하여 국내의 GLOBEC 위원회를 활성화하고, 그들로 하여금 과학계획 및 실천계획을 수립하게 하여 연구사업의 우선 순위를 결정하여야 할 것이다.

참고문헌

임기철, 1998. 국가연구개발 사업의 기획과 기술평가. 한국해양연구소 세미나, 1998. 5. 15(unpublished manuscript).
 Christensen, N.L., 1996. The report of the ecological society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6: 665-691.
 GLOBEC, 1995. Small Pelagic Fish and Climate Change Program: Report of the first planning meeting. GLOBEC Report No. 8, SCOR, edited by J. R. Hunter and J. Alheit, La Paz, Mexico, June 1994, 72 pp.
 Hjort, J., 1914. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer.*, 20: 1-228.
 IGBP, 1997. Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC) Science Plan. IGBP Rep. 40 (GLOBEC Rep. 9). The Int'l Geosphere-Biosphere Programme. The Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, Sweden, 82 pp.
 IGBP, 1999. Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC) Implementation Plan. IGBP Rep. 47(GLOBEC Rep. 13). The Int'l Geosphere-Biosphere Programme. The Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, Sweden, 207 pp.
 Loeb, V., V. Siegel, O. Holm-Hansen, R. Hewitt, W. Fraser, W. Trivelpiece and S. Trivelpiece, 1997. Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature*, 387: 897-900.
 McGinn, A.P., 1999. Charting a new course for oceans. In: State of the World, 1999: A World Watch Institute. Report on progress toward a sustainable society, edited by L. Starke, W. W. Norton & Company, 259 pp.
 PICES, 1994. North Pacific Marine Science Organization (PICES), Annual Report, Third Meeting, Nemuro, Japan. Oct. 15-24, 1994, 114 pp.
 Steel, J.H., 1998. From carbon flux to regime shift. *Fish. Oceanogr.*, 7: 176-181.

1999년 6월 10일 원고 접수
 1999년 10월 26일 수정본 채택