

< Review >

## 해양생태계 연구를 위한 폐쇄생태계의 활용

김 용 서

한국해양연구원 해양자원연구본부

### Application of Enclosed Experimental Ecosystem to the Study on Marine Ecosystem

Woong-Seo Kim

Marine Resources Laboratory, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract** - As researchers can modify environmental factors to fit the purpose of an experiment in monitoring marine ecosystem using enclosed experimental ecosystems, which is a strong advantage of them, mid-sized enclosed experimental ecosystems (mesocosm) are widely used in the world in basic ecology such as trophodynamic study and applied ecology such as the toxicity test of various chemicals and monitoring of ecosystem changes against marine pollution. Application of the mesocosm in the field has a merit to get more reliable result than that from the experiment in the laboratory. However, the result from the mesocosm study in marine ecosystem is very limited in Korea. Mesocosms which had been used in the marine ecological studies in both foreign countries and Korea were summarized, and application of them to the future study in various research field was suggested in this review paper.

**Key words** : Mesocosm, Marine ecosystem, Enclosed experimental ecosystem

## 서 론

실험용 폐쇄생태계 (Enclosed Experimental Ecosystem)는 자연생태계로부터 분리된 인위적으로 만든 생태계를 말하며, 연구자가 환경요인을 조사목적에 맞게 조절하여 생태계의 변화를 모니터링 할 수 있는 장점이 있어 기초학문 연구 뿐만 아니라 독성실험 및 환경오염에 대한 생태계의 반응 실험 등 응용분야에서도 활용도가 높다. 실험에 사용되는 폐쇄생태계는 물리적으로 주변환경과 분리되고, 자체적으로 그 안의 생태계가 유지되고, 일차 생산자와 소비자를 포함하여 여러 영양단계가 공존해야

하며, 실험 중에 여러 가지 항목을 측정하기 위해 시료를 채취하여도 폐쇄생태계의 구조나 기능에 영향을 주지 않아야 한다(Lalli 1990).

폐쇄생태계의 용량은 실험실에서 사용하는 플라스크에서 현장에 설치한 대용량의 실험용기까지 다양하며, 용기의 규모에 따라 소형 폐쇄생태계 (microcosm), 중형 폐쇄생태계 (mesocosm), 대형 폐쇄생태계 (macrocosm) 등으로 구분된다. 학자마다 차이는 있으나 일반적으로 1 m<sup>3</sup>보다 작은 것을 소형 폐쇄생태계, 1 m<sup>3</sup>에서 1,000 m<sup>3</sup>까지를 중형 폐쇄생태계, 1,000 m<sup>3</sup> 보다 큰 것을 대형 폐쇄생태계라 한다 (Lalli 1990). 소형 폐쇄생태계는 주로 시험관, 플라스크, 수조 등 실험실에서 사용되는 각종 실험용기가 해당되며, 중형 폐쇄생태계는 현장에 설치한 실험용기가 해당되고, 대형 폐쇄생태계는 작은 연못이나

\* Corresponding author: Woong-Seo Kim, Tel. 031-400-6217  
Fax. 031-418-8772, E-mail. wskim@kordi.re.kr

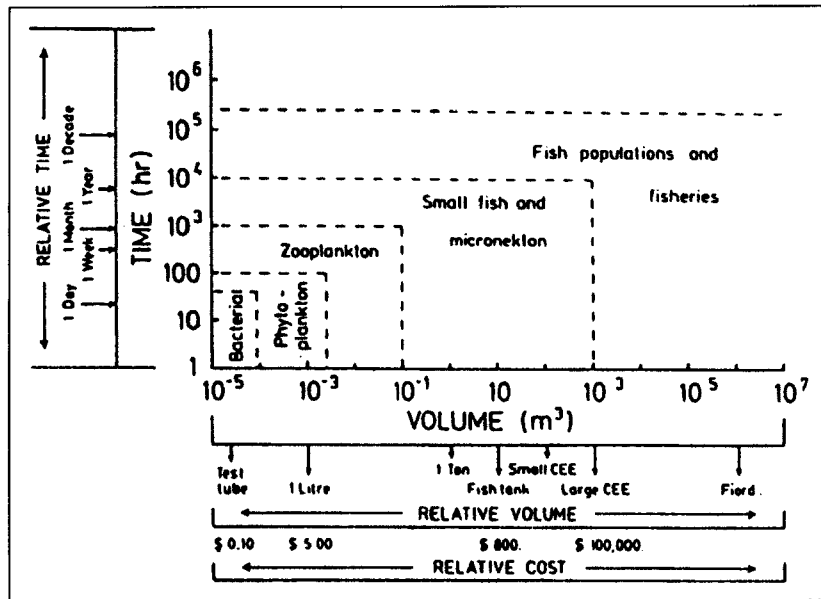


Fig. 1. Approximate relationship between aquatic organism life cycles and the relative size and cost needed for their containment (Parsons, 1982).

호수처럼 자연 생태계 그 자체를 실험대상으로 할 경우가 해당된다(Grice and Reeve 1982). 소형 폐쇄생태계는 규모가 작아 적은 비용으로 설치하여 실험할 수 있는 장점이 있으며, 소형 폐쇄생태계보다 규모가 큰 중형 폐쇄생태계나 대형 폐쇄생태계는 설치비용이 많이 드는 단점이 있으나 배양시 용기효과(container effect)를 줄일 수 있는 장점이 있다.

해양생태계를 연구하기에 소형생태계는 규모가 너무 작고, 대형 폐쇄생태계로 활용할 만한 곳을 찾기는 현실적으로 불가능하다. 그러므로 해양에서는 적절한 규모의 중형 폐쇄생태계를 이용하여 연구하고 수치모형을 통해 자연에서 일어나는 현상을 추론할 수 있다. 중형 폐쇄생태계는 실험실에서 사용하는 소형 폐쇄생태계보다 규모가 커서 자연 상태에 가까운 환경을 시뮬레이션 할 수 있다는 장점이 있다.

폐쇄생태계 실험에 사용되는 해양생물의 크기와 생활사에 따라 폐쇄생태계의 규모와 배양기간이 달라진다(Fig. 1). 예를 들어 박테리아의 경우는 시험관 정도 크기의 소형 폐쇄생태계이면 충분하고 배양기간도 수 일 정도면 충분하나, 동물플랑크톤의 경우 최소 1l에서 1,000 m³ 정도 용량의 폐쇄생태계가 필요하고 배양기간도 최대 몇 달 정도가 필요하다. 그러므로 실험대상 생물에 따라 폐쇄생태계의 크기 및 배양기간을 정하는 것이 필요하다.

폐쇄생태계를 이용하여 실험하면 실험 목적에 맞도록

특정 요인을 조절하고 그 이외의 요인은 자연상태로 유지하여, 특정 요인에 의한 생태계의 변화를 파악할 수 있는 장점이 있다. 해양생태계처럼 규모가 크고 개방되어 있는 경우에는 자연상태의 실험이 실질적으로 불가능하므로, 폐쇄생태계의 활용은 더욱 가치가 있다. 한편 같은 종류의 실험을 반복적으로 하거나, 또는 일시에 여러 개의 폐쇄생태계를 이용하여 실험하면 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있다. 반면 폐쇄생태계의 벽면이 해수의 유동이나 파도의 영향을 차단할 수 있으며, 부착생물들에게 새로운 서식지를 제공하므로 자연상태의 생태계와 차이가 생길 수도 있다(김 2000). 한편 폐쇄생태계는 시간이 경과함에 따라 주변 자연생태계와 차이가 점차 커질 수 있다. 예를 들어 식물플랑크톤의 경우 수일에서 수주간, 동물플랑크톤의 경우 수개월, 어류의 경우 수년이 지나면 그 차이는 확연히 달라질 수 있다. 폐쇄생태계는 그 규모의 한계 때문에 실험에서 유영생물이나 큰 동물플랑크톤이 제거될 수 있다는 단점도 있다. 실험 기간동안 폐쇄생태계의 약한 부분이나 부착된 해양생물의 제거, 강한 바람이나 파도에 의한 훼손이 있을 경우 보수작업 등이 필요하다.

이상과 같이 중형 폐쇄생태계는 장·단점이 모두 있으나, 해양생태계 연구의 중요한 도구가 된다. 이 논문에서는 세계 각국에서 해양생태계 연구에 활용된 폐쇄생태계를 정리하고, 국내에서 최근 시작된 폐쇄생태계를 활용한 해양생태계 연구를 소개하며, 향후 이들을 활용

한 연구 방향을 제안하고자 한다.

국외의 폐쇄생태계

현재까지 많은 연구 결과를 생산한 해양 폐쇄생태계는 Kiel Plankton Tower, Hamburg Enclosures, Den Helder Bag, Loch Ewe Enclosures, MERL (Marine Ecosystems Research Laboratory) Tank, CEPEX (Controlled Ecosystem Populations Experiment) Enclosures, MEEE (Marine Ecosystem Enclosed Experiments) Enclosures 등이 있다.

Kiel Plankton Tower는 플랑크톤과 퇴적물의 상호작용을 조사하기 위해 발틱해 서부의 Kiel Bight에 설치한 것이다(von Bodungen *et al.* 1976). 규모는 가로 10 m, 세로 10 m, 높이 16.5 m의 강철 구조물에 직경 2 m의 나일론을 코팅한 polyethylene으로 만든 주머니 4개로 이루어져 있고 길이는 11~12 m이고 용량은 약 30 m<sup>3</sup>가 된다(Fig. 2).

Hamburg Enclosures는 용존물질과 플랑크톤의 관계를 규명하기 위한 노르웨이의 POSER (Plankton Observations with Simultaneous Enclosures in Rosfjorden) 프

로젝트를 수행하기 위해 설치한 것으로 직경이 6 m이고 높이가 2 m인 알루미늄 구조물에 직경 1 m, 높이 40 m인 플라스틱용기를 부착하여 만들었다(Fig. 3, Brockman *et al.* 1974). 용량은 약 30 m<sup>3</sup>이고 플라스틱용기는 두 겹으로 되어 있으며, 안쪽은 100 μm 망목의 polyethylene으로 되어 있으며 바깥쪽은 30 μm 망목의 polyamide로 되어 있다.

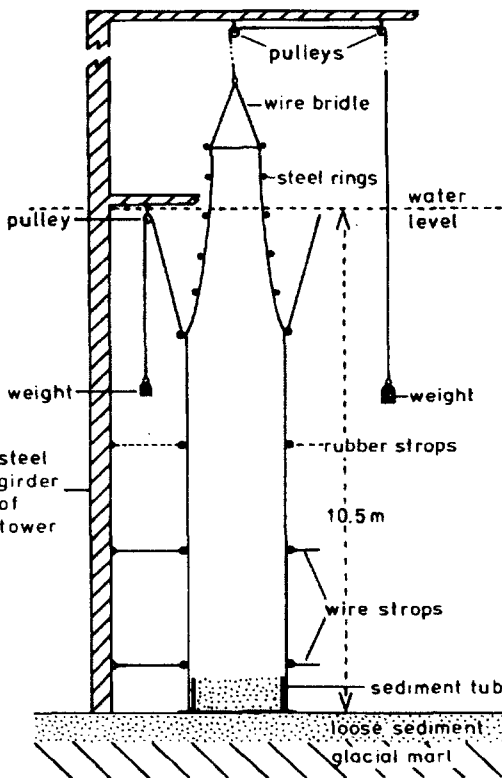


Fig. 2. Kiel Plankton Tower.

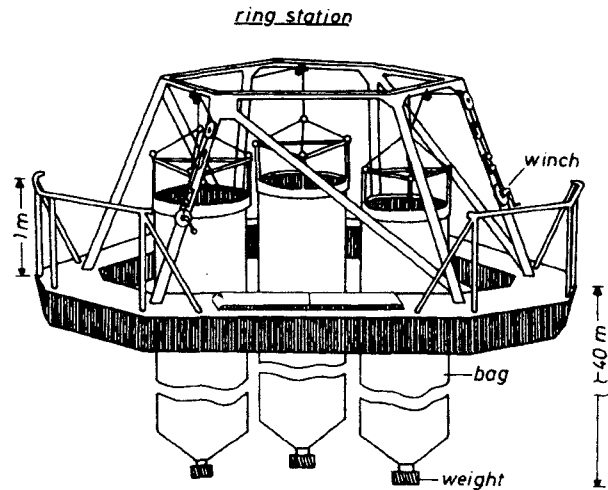


Fig. 3. Hamburg enclosures.

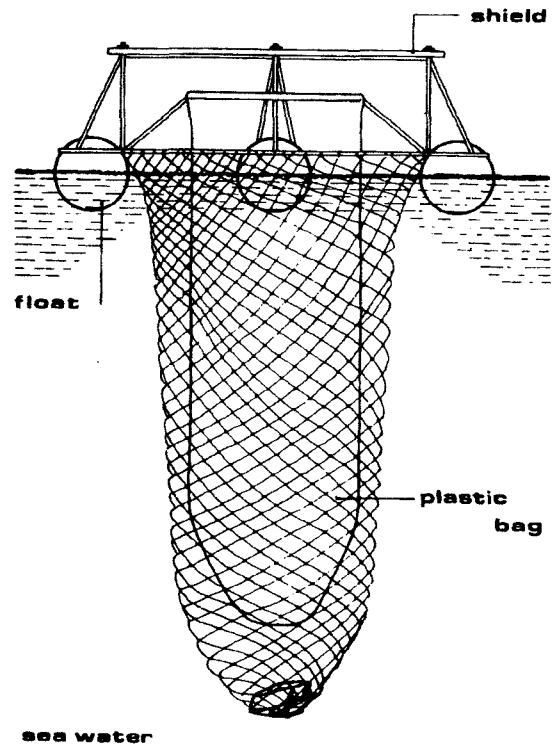


Fig. 4. Den Helder bag.

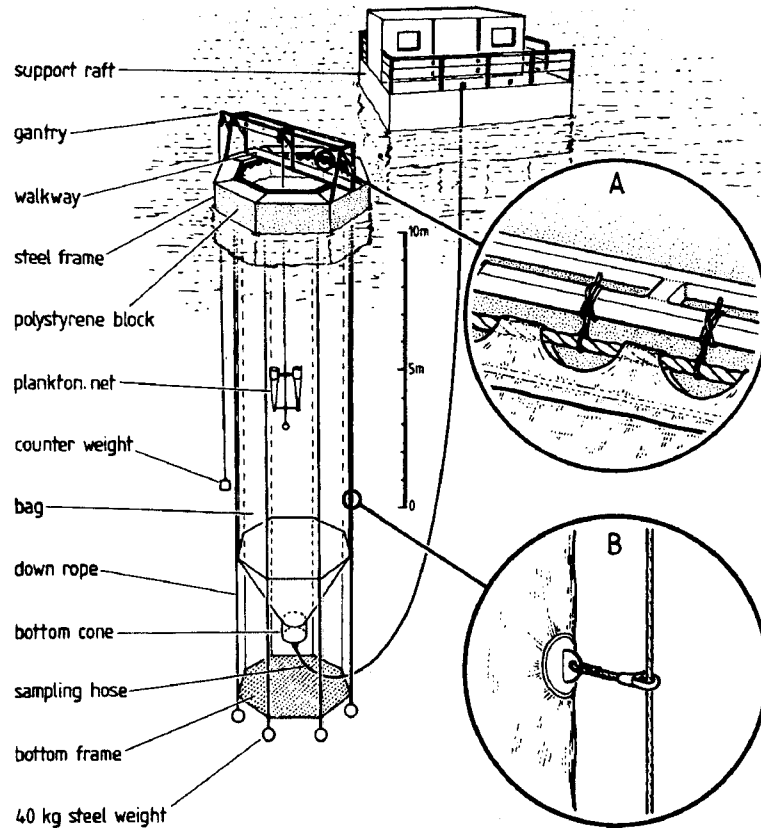


Fig. 5. Loch Ewe enclosure.

Den Helder Bag은 오염물질이 플랑크톤에 미치는 영향을 조사하기 위하여 네덜란드의 Den Helder항구에 설치한 것이다(Kuiper 1977). 크기는 두 종류로 작은 것은 직경 0.75 m, 깊이 3.5 m, 용량이 1.5 m<sup>3</sup>이고, 큰 것은 직경 0.75 m, 깊이 20 m, 용량이 16 m<sup>3</sup>이다. 주머니는 부이가 달린 알루미늄 구조물에 부착되어 있다(Fig. 4). 이 폐쇄생태계는 Brockmann *et al.* (1974)이 제작하였던 Hamburg Enclosures와 같은 재질로 만들어졌다. 폐쇄생태계 안에 펌프를 이용하여 해수를 채운다.

Loch Ewe Enclosures는 Scotland의 북서부 해안에 있는 Loch Ewe에 오염실험을 위해 설치한 것이다(Davies and Gamble 1979). 주머니는 망목이 0.52 mm인 polyester 천에 vinyl로 강화한 재질이고 polystyrene buoy에 의해 떠있으며 바닥에 고정되었다. 주머니는 직경이 3 또는 4.7 m이고 길이는 17 m, 용량은 각각 100 m<sup>3</sup>와 300 m<sup>3</sup>의 두 종류가 있다(Fig. 5).

MERL Tank는 미국 Narragansett Bay에 위치한 MERL 주변 육상에 설치된 실험용 폐쇄생태계이다(Nixon *et al.* 1980). 모두 14개의 탱크(높이 5.4 m, 직경 1.8 m, 용량 13 m<sup>3</sup>)에 0.3 m 두께의 퇴적물을 깔아 자연

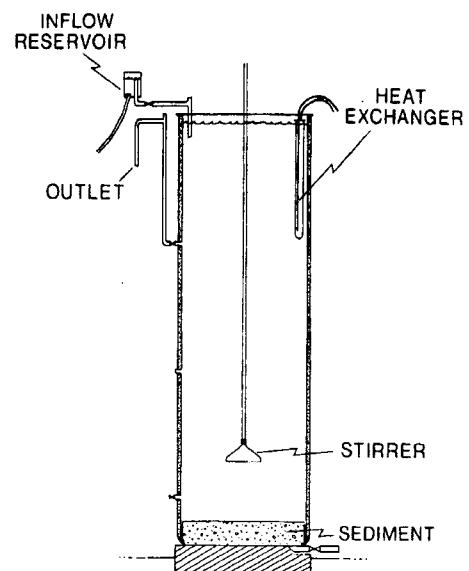


Fig. 6. MERL tank.

상태와 유사한 환경을 만들었으며, 탱크 속에는 교반시설(stirrer)을 갖춰 퇴적물이 부유할 수 있도록 설계되

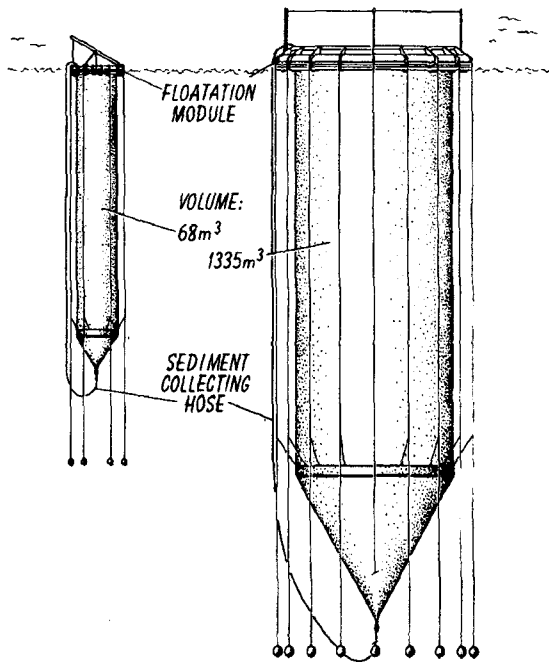


Fig. 7. CEPEX enclosure.

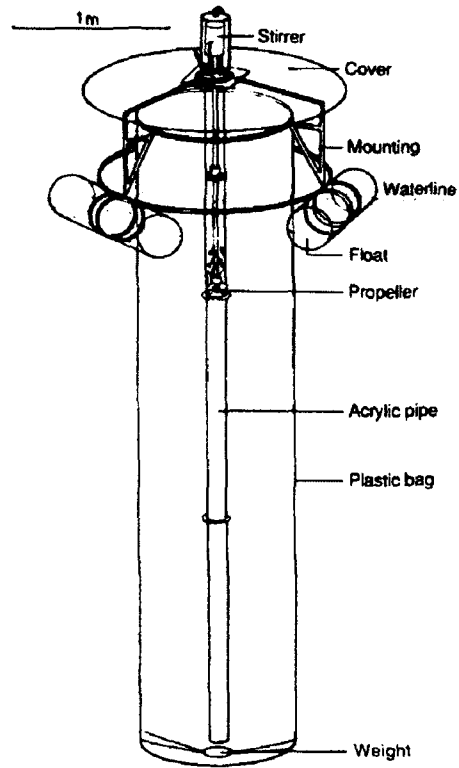


Fig. 9. Enclosure with a stirrer for monoculture experiments (Brockman *et al.* 1974).

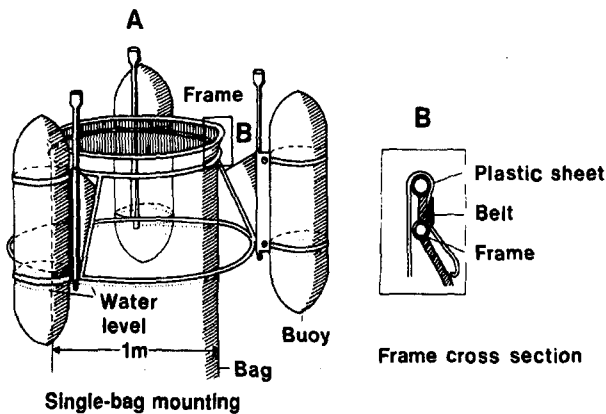


Fig. 8. Schematic of a single-bag mounting used in the North Sea for plankton studies. A: The seamless plastic tube is fastened to an aluminum ring, which is supported by three buoys. B: The bags are fixed to the frame by a canvas belt, in a groove (Brockmann *et al.* 1983).

었다 (Fig. 6). 이것을 활용하여 해양생태계가 유류나 희귀금속에 노출되었을 때 어떻게 반응하는지 조사하기 위한 많은 실험이 수행되었다.

CEPEX Enclosures는 오염물질이 플랑크톤 군집에 미치는 영향과 영양역학 관계를 조사하기 위해 Canada의 British Columbia에 설치한 나일론으로 강화한 polyethylene 실험용기이다 (Menzel and Case 1977; Grice *et*

*al.* 1980). 크기는 두 가지로 작은 것은 직경이 2.4 m, 길이 16.1 m, 용량이 68 m<sup>3</sup>, 큰 것은 직경 9.5 m, 길이 23.5 m, 용량이 1,300 m<sup>3</sup>이며, 실험 목적에 따라 선택할 수 있다 (Fig. 7). 이와 같은 폐쇄생태계는 각종 연구 프로젝트에 사용되어 생태계의 기능 및 오염물질에 대한 생태계의 반응 등을 이해하는데 큰 역할을 하였다.

북해에서 플랑크톤 연구에 사용된 폐쇄생태계는 직경이 1 m인 바닥이 막힌 플라스틱 튜브를 알루미늄 고리에 고정시키고 여기에 부이를 부착하여 물 표면에 띄우거나, platform에 고정시켜 설치되었다 (Fig. 8). 플라스틱 튜브 부분은 두 겹의 층으로 되어있는데, 안쪽은 망목 100 μm의 polyethylene 재질로 되어있고, 바깥쪽은 망목 30 μm의 polyamide 재질로 되어있다 (Brockmann *et al.* 1983). 이러한 재질은 실험 대상생물들의 생리활동에 영향을 미치지 않으며, 주변 해수와 열교환이 잘 일어나며, 색이 없는 재질의 경우 빛 투과율이 좋고 (주변해수의 약 90% 정도), 연성재질이라 조작하기가 쉬우며, 가격이 비교적 저렴하다는 장점이 있다.

Fig. 9는 용존유기물질 (DOM)과 식물플랑크톤 군집의 관계를 연구하기 위하여 규조류 *Thalassiosira* 한 종만을 배양하여 실험할 때 사용된 폐쇄생태계이다 (Brock-

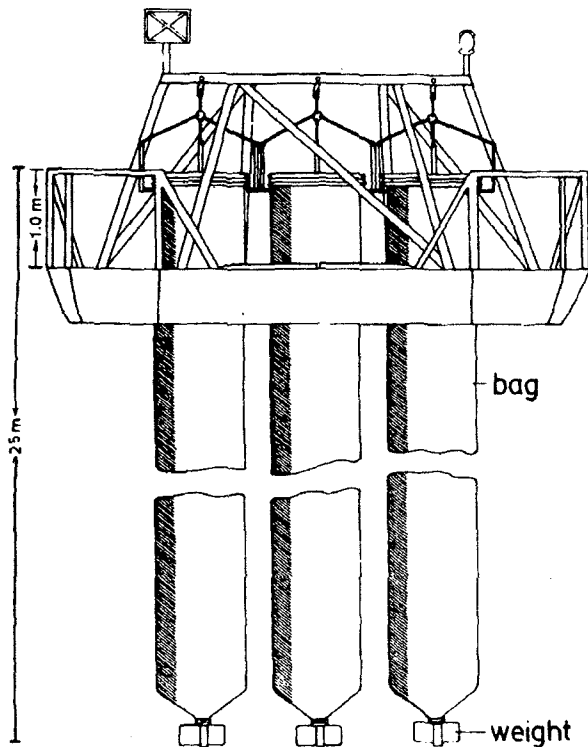


Fig. 10. Schematic of drift station for three enclosures.

mann *et al.* 1974). 특징은 교반시설이 갖추어져 폐쇄생태계 안의 해수가 인위적으로 잘 섞이도록 되어있고, 폐쇄생태계의 상부에 커버가 있어 외부로부터 오염물질이나 영양물질이 들어가지 않도록 설계된 것이다. 커버는 바닷새들이 폐쇄생태계 안에 배설물을 떨어뜨리는 것을 방지하는데 필요하다.

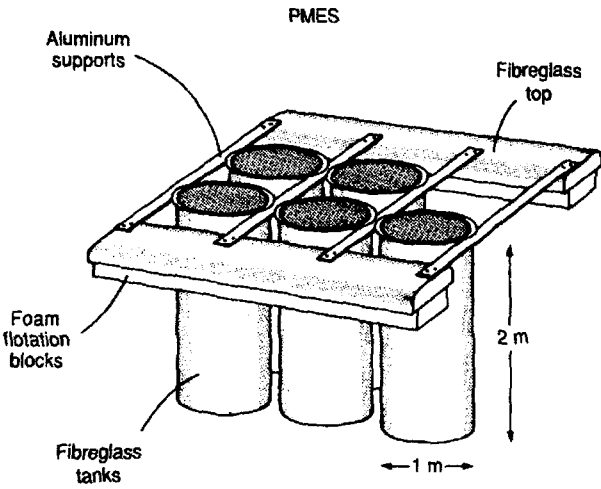
대부분의 폐쇄생태계는 한 장소에 고정된 형태로 설치되지만, 실험 목적에 따라 표류식 폐쇄생태계를 이용하기도 한다. 북해에서는 자연상태의 식물플랑크톤 군집과 폐쇄생태계 안의 식물플랑크톤 군집을 비교하기 위해, 해류에 따라 폐쇄생태계가 표류하도록 한 실험이 수행되었다 (Brockman 1992). 3개의 폐쇄생태계는 fiberglass로 된 부이에 의해 물위에 뜨고 2m 높이의 알루미늄으로 된 frame이 설치되어 있다 (Fig. 10). 폐쇄생태계의 위치 파악을 위해 radar reflector와 strobe light가 장착된 것이 특징이다.

### 폐쇄생태계를 활용한 연구

폐쇄생태계를 활용한 연구는 1970년대부터 활발하게 수행되어 꾸준한 발전을 해오고 있으며, 그동안 수행된 유명한 프로젝트는 CEPEX, MERL, POSER, MEEE 등

이 있다. 해양 폐쇄생태계에 대한 첫 번째 심포지움은 1977년 Scotland의 Edinburgh에서 개최되었으며, 이 심포지움은 주로 mesocosm의 설계에 관한 정보교환이 주목적이었다 (Parsons 1978). 두 번째 심포지움은 1980년 Canada의 British Columbia주 Sidney에 있는 IOS (Institute of Ocean Sciences)에서 열렸으며, 주로 해양 부유생태계를 대상으로 한 폐쇄생태계 실험결과에 대한 정보교환이 이루어졌다 (Grice and Reeve 1982). 이 심포지움의 결과는 책 (Marine Mesocosms. Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems. Grice, GD and MR Reeve (eds). New York. Springer-Verlag)으로 발간되었다. 1985년에는 해양에서 폐쇄생태계를 활용한 연구를 개발하기 위하여 SCOR (Scientific Committee on Ocean Research)에 WG (working group)이 만들어졌으며 (Lalli 1990), 여기서 Manual of Marine Experimental Ecosystems 이라는 책을 발행하였다 (Rokey 1991). 세 번째 심포지움은 1987년 중국의 북경에서 개최되었으며, 폐쇄생태계를 이용한 부유생태계 연구뿐만 아니라 조간대 저서생태계 연구의 결과도 발표되었다 (Wong and Harrison 1992).

CEPEX 프로젝트는 미국 NSF (National Science Foundation)의 지원으로 캐나다 British Columbia의 Saanich Inlet에서 6년간 수행되었다. MERL 프로젝트는 해양생태계가 유류나 희귀금속에 노출되었을 때 어떻게 반응하는지 조사하기 위해 미국 Narragansett Bay 근처에서 실시되었다. POSER 프로젝트는 용존물질과 플랑크톤의 관계를 규명하기 위해 노르웨이에서 수행되었다. 캐나다와 중국은 MEEE 프로젝트를 1983년부터 1987년까지 5년간에 걸쳐 공동으로 수행하였다 (Wong and Harrison 1992). 연구비는 캐나다의 IDRC (International Development Research Center)와 중국의 SOA (State Oceanic Administration)가 공동으로 지원하였다. MEEE의 목적은 해양 폐쇄생태계를 이용하여 (Figs. 11, 12, Wong *et al.* 1992) 해양환경에서 독성 화학물질이 어떠한 경로를 통해서 이동되며 소멸되는지 이해하고, 그 화학물질의 화학적, 생물학적 영향을 평가하는 것이었다. 1983년에는 polyethylene으로 만든 3개의 실험 폐쇄생태계 (직경 2.5 m, 깊이 16 m)를 캐나다의 Saanich Inlet에 설치하여 원유 유출에 따른 영향을 실험하였다. 1984년에는 중금속이 유출되었을 때의 영향을 실험하였으며, 1985년에는 중국의 Xiamen Bay 인근 육상에서 화강암으로 된 탱크 (20 m × 10 m × 5 m 깊이)를 설치하고 해수를 채워 실험을 하였다. 한편 polyethylene으로 된 실험 용기 (직경 2 m, 깊이 4 m) 9개를 나무로 만든 지지대에 부착·설치하여 수면에 띄워놓고 실험을 하였다. 이 중

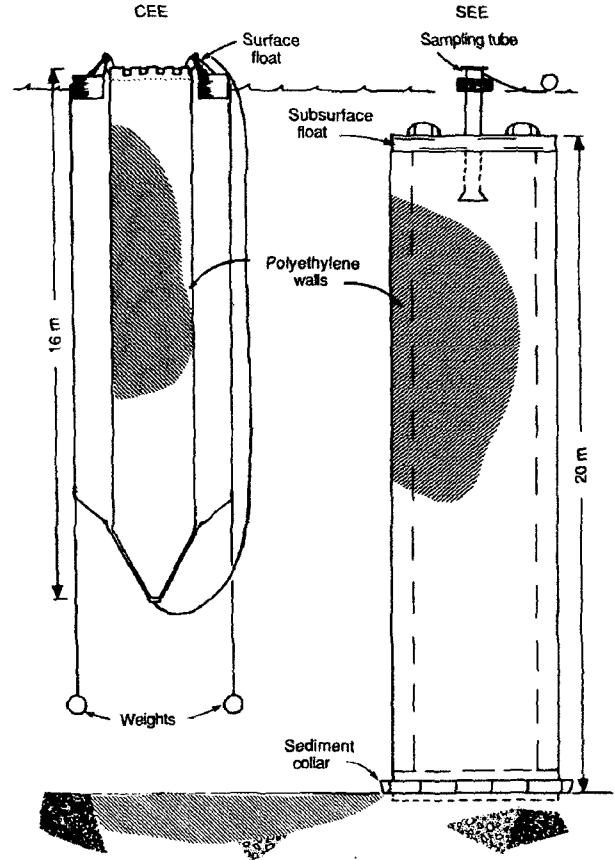


**Fig. 11.** Arrangement of experimental enclosures used in MEEE program. Portable multiple-enclosure system (PMES) consisting of a lightweight catamaran barge and up to six fiber glass tanks.

7개의 실험 폐쇄생태계에 항구에서 채취한 퇴적물이나, 다양한 농도의 금속을 첨가하였다. IOS에서는 5개의 fiberglass로 된 운반이 가능한 실험용기(직경 1m, 깊이 2m)를 IOS의 부두에 고정시켜 놓고 퇴적물에서 유출되는 금속의 flux를 측정하였다. 1986년에는 4개의 폐쇄생태계(직경 2m, 깊이 6m)를 중국의 Xiamen Bay에 설치하고 원유가 생태계에 미치는 영향을 조사하였다.

1992년 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에 의해 설립된 MEERC (Multiscale Experimental Ecosystem Research Center)에서는 지구환경 변화를 연구하고 있는데, 특히 인구 증가가 두드러진 연안해역에서 산업, 농축산 폐수의 유입에 의해 해수의 수질이 악화됨으로써 파생되는 각종 오염문제를 방지하기 위한 노력을 기울이고 있다. 또한 조간대 생태계에서부터 연안의 표영 및 저서생태계에 이르기까지 생태계 모델을 이용하여 인간의 영향에 의한 해양생태계 변화를 예측하고 있다. 연안해역 생태계 연구가 이 센터의 주된 사업이 된 것은, 해안에 인접한 곳의 인구가 급격히 늘어나고 있으며, 연안역 생태계가 인간활동에 의해서 민감하게 영향을 받으며, 이 센터가 설치되어 있는 Maryland의 Chesapeake Bay가 주변 대도시로부터 많은 폐수가 유입되고 있으며, 기존의 연안역 환경감시사업으로 인해 많은 자료가 축적되어 있고, 인근 University of Maryland의 CEES (Center for Ecosystem and Estuarine Studies)에 충분한 연구 인력이 있기 때문이다.

MEERC에서는 폐쇄생태계를 활용하여 실험하는 동안 광도, 수온, 염분, 용존산소, 영양염 농도, 엽록소 농도



**Fig. 12.** Mesocosm used in the MEEE program. Controlled ecosystem enclosure (CEE) redesigned from the quarter-scale CEPEX enclosures. Sediment seawater enclosure (SSE) anchored to the sediment by a steel and concrete collar, and kept taut by a buoyant top.

등을 기본적으로 측정하였다. 현장에서 측정되는 기본자료는 자동적으로 MEERC의 website에 올리므로 실험에 참여하는 모든 연구원은 실시간 자료를 이용할 수 있고, 일반인들도 볼 수 있도록 하였다 (<http://kibir.cbl.cees.edu/MEERC>).

폐쇄생태계를 활용한 연구는 부유생태계뿐만 아니라 저서생태계 연구에도 활용되어, 네덜란드의 갯벌에서는 MOTIFs (Model Tidal Flats) 프로젝트가 수행되었다 (Harrison 1992). 이 프로젝트에서는 크고 작은 인위적인 유류유출 사고를 일으켜 원유 및 유처리제의 영향 등을 조사하였다. 구체적으로 유류에 의한 급성효과(대형 및 중형 저서동물, 동물플랑크톤 사망률이나 행동 이상, 일차생산력 증대나 미생물 활동성 증가) 및 만성효과(저서생물 유생의 착생이나 생태계 회복 지연)가 조사되었다.

### 국내의 폐쇄생태계

폐쇄생태계를 활용한 해양생태계 연구가 많은 장점이 있음에도 불구하고 많은 연구인력과 연구비가 소요되므로, 우리 나라에서는 최근까지도 연구가 아주 미흡하였다. 그러나 한국해양연구원에서는 1999년 장목분원에 폐쇄생태계 KOMES (KORDI Mesocosm)를 설치하여 플랑크톤 동태 및 유기오염물질의 이동에 관한 예비실험을 시작하였으며 (Fig. 13, 김 2000), 2000년에는 실험 폐쇄생태계 8개를 동시에 활용하여 실험할 수 있는 대규모의 중형 폐쇄생태계를 장목분원에 설치하여 본격적인 실험에 착수할 준비를 마쳤다 (Fig. 14, 한국해양연구소 2000).

해양에서 사용되는 폐쇄생태계는 실험 목적에 따라 완전히 밀폐된 구조를 가진 폐쇄생태계와 screen을 통해 주변 해수의 출입이 가능한 반폐쇄형 폐쇄생태계가 있다. 전자는 해양생태계가 특정 오염물질에 노출되었을 때 받는 영향이나, 영양염을 첨가하였을 때 식물플랑크톤에 의한 일차생산을 평가하기 위한 조사 등에 주로 사용되고, 후자는 주변 해수로부터 영양염 공급 및 용존기체의 교환 등이 원활하게 일어나 자연 상태의 생태계

와 유사한 환경에서 플랑크톤 군집 역학 등을 연구할 때 주로 사용되기 때문에 두 종류를 모두 제작하였다. 한국해양연구원에 설치된 반폐쇄형 폐쇄생태계는 5 μm의 망목 (규격 PA-5/1)을 가진 Nybolt screen (원사는 monofilament nylon fabric, 원사의 원료는 polyamide 6, polyamide 66, polyamide 12)으로 만들었고, 폐쇄형 폐쇄생태계는 완전히 밀폐된 polyethylene으로 만들었다. 실험 용기부분의 규격은 Fig. 13에서 보듯이 직경이 120 cm, 높이가 320 cm의 원통형 모양이며, 용량은 3.6 m<sup>3</sup>이다. 상부 20 cm는 해수면 위로 올라와 부유 상판에 부착되어 있어 파도에 의해 외부 해수가 폐쇄생태계 안으로 들어가는 것을 방지하도록 설계하였다. 원통형 부분은 모양을 유지하기 위하여 바닥과 바닥에서 150 cm 떨어진 곳에 stainless steel로 된 ring을 넣어 보강하였으며, 윗 부분은 원형의 부유 상판에 고정하여 전체적으로 원통형 모양을 유지시켰다. 5 μm 망목의 screen으로 된 폐쇄생태계는 강도를 유지하기 위하여 canvas 천으로 양쪽 옆면을 따라 바닥에서 윗 부분까지 보강을 하였다. 그리고 polyethylene으로 된 폐쇄생태계는 실험 후 육상으로 들어올릴 때 내부의 물 무게를 줄이기 위해 바닥과 옆면에 각각 해수 배출구를 만들어 수압에 의해 배수가 가능하도록 설계하였다. 폐쇄생태계의 바닥 네 곳에는 남으로 된 추를 매달아 해수의 유동이나 와류 때문에 형태가 변형되는 것을 방지하였다. 부유 상판은 FRP (fiberglass reinforced plastic)로 만들었으며, 현장으로의 운반이 용이하도록 두 부분으로 분리되도록 설계하였다. 높이 20 cm인 세로 면은 파도로 인해 해수가 유입되는 것을 방지하며, 폐쇄생태계를 로프나 shackle을 이용하여 부착할 수 있도록 상단으로부터 2 cm 하부에 지름 15 mm의 구멍을 뚫어놓았다. 길이 40 cm인 가로 면은 실험에 사용할 기구를 올려놓거나, 연구자가 올라가서 작업할 수 있도록 제작하였다. 이 부유 상판은 내경이 130 cm이고, 외경이 210 cm이다. 부유 상판에는 용량 180 l의 styrofoam buoy 4개를 달아 부력을 조절하였다.

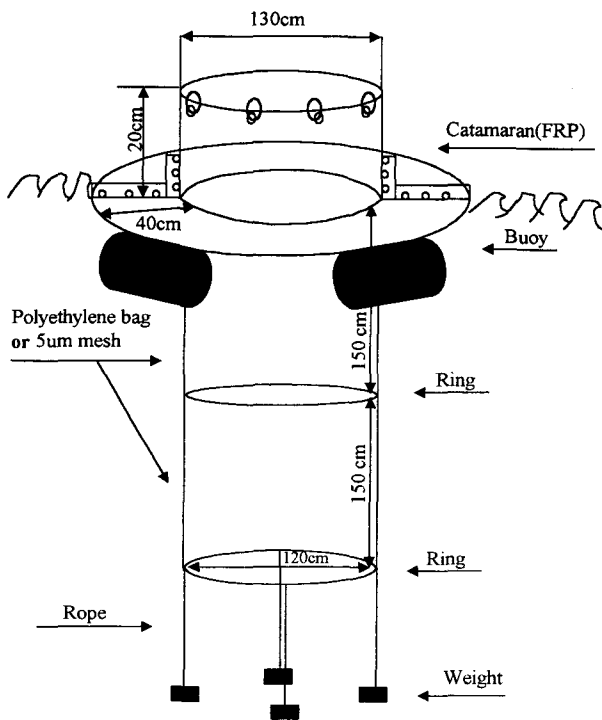


Fig. 13. Basic structure and size of KOMES. A prototype of mesocosm set up in the Jangmok Marine Station of KORDI.

### 폐쇄생태계를 활용한 향후 연구과제

폐쇄생태계를 이용하여 향후 국내에서 수행할 수 있는 구체적인 연구과제는 다음과 같다.

첫째는 폐쇄생태계를 이용한 해양생태계의 구조 및 기능에 관한 연구이다. 최근까지 국내에서 발표된 해양생태학 연구의 결과는 거의 군집 구조에 관한 것이었다. 해양생태학의 세계적인 연구추세는 생태계의 기능을 파악하는 방향으로 가고 있으며, 폐쇄생태계는 생태계의 기능 파악을 위한 훌륭한 도구가 된다. 예를 들어 미생



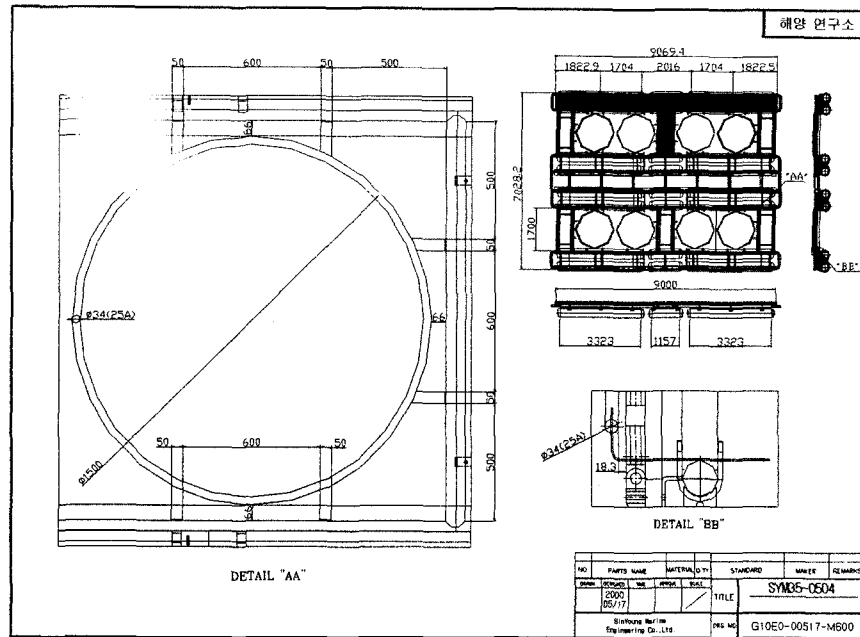


Fig. 14. Basic structure of mesocosm located in the Jangmok Marine Station of KORDI.

물에 의한 물질의 흡수 및 분해, 식물플랑크톤 군집의 천이, 영양염류에 의한 식물플랑크톤의 성장, 각종 오염물질에 대한 미소 동물플랑크톤의 반응, 중형 동물플랑크톤에 의한 2차생산, 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 섭식, 대형 동물플랑크톤에 의한 포식작용 연구 등에 폐쇄생태계가 활용될 수 있다. 이외에도 유기 탄소, 질소, 인의 흡수나 무기화과정의 경로 및 flux, DOM (Dissolved Organic Matter)이나 POM (Particulate Organic Matter)의 역할 및 생물학적 중요성, 생태계의 feedback작용과 조절작용의 이해 및 수치모형 개발, bioturbation, 대기와 해수의 경계면에서의 물질 flux, benthic-pelagic coupling, 수층의 수직 구조, 해양생물의 행동연구 등에도 활용될 수 있다. 한편 생물조작법 (biomanipulation)을 이용해 생태계의 기능을 파악하는데 사용될 수 있다. 생태계 내의 각 영양단계 사이에 상향조절 (bottom-up control)과 하향조절 (top-down control)의 상대적 중요성을 파악하고, 각 영양단계에 속하는 구성원의 생물량을 조절하였을 때 생태계의 구조가 어떻게 변화할지 연구할 때도 유용한 실험도구가 된다.

둘째는 생물부착 (biofouling)에 관한 연구이다. 폐쇄생태계의 설치 후 부착생물에 의한 착생이 불가피하므로 이들의 제거 및 부착생물의 천이기작에 관한 연구를 할 수 있다. 특히 생물의 부착에 관한 연구는 anti-fouling paint의 개발 등 산업적으로 유용한 연구이다.

셋째는 각종 오염물질에 대한 부유생태계의 변화 모

니터링 연구이다. 오염물질이 부유생물에 미치는 영향에 관한 대부분의 연구는 용량이 적은 소형 폐쇄생태계를 사용하여 실험실에서 진행되어 실험결과를 현장에 적용하는데 한계가 있다. 현장에 설치한 폐쇄생태계를 이용하면 이러한 단점을 보완한 실험결과를 얻을 수 있다. 또한 각종 오염물질이 생태계 내에서 먹이망을 통해 어떻게 이동하며 농축되는지, 오염물질이 생태계에 미치는 만성적인 영향이 어떤지 파악할 수 있다.

넷째는 화학물질의 독성에 관한 연구이다. 그동안 독성실험은 주로 실험실에서 대상 생물 한 종에 대하여 수행되었다. 그러나 이런 독성실험에 의한 개체생태학적 평가는 실제 생태계에서 환경 및 다른 생물들과 상호작용을 하면서 살아가는 생물들에게 적용을 하기에는 많은 문제점이 있을 것이다. 또한 대부분 실험실에서 행하여지는 실험이 높은 농도의 독성물질에 단기간 노출되었을 때의 영향을 주로 조사하므로 장기간에 걸친 독성물질의 효과에 대해서는 많은 정보를 얻을 수 없는 단점이 있다. 특히 이러한 단점은 크기가 크고 생활사기간 생물의 경우에 더 문제가 된다.

다섯째는 적조의 발생 및 소멸기작에 관한 연구이다. 최근 천적생물을 이용한 적조의 방제가 시도된 바 있다. 천적생물을 발굴하고 이들의 섭식률을 측정된 후 대량 배양과정을 거쳐 현장에서 사용하기 전에 폐쇄생태계를 이용한 검증과정이 필요하다. 또한 폐쇄생태계를 이용하여 특정 환경요인을 조절하여 적조를 인위적으로 유발

시키면서 적조의 발생기작을 연구할 수 있으며 포식자의 조절로 적조생물의 소멸기작을 연구할 수 있다.

여섯째는 해양목장 개발을 위한 연구이다. 폐쇄생태계를 이용하면 동·식물플랑크톤, 치자어 등 생태계의 구성원 사이에 일어나는 복잡한 현상을 한정된 공간에 유지하면서 시간에 따른 변화를 볼 수 있다는 장점이 있다. 특히 폐쇄생태계에서는 포식자의 수와 종류를 인위적으로 조절할 수 있으므로 그 이용가치가 높다. 유용어류자원의 치자어는 생태계내의 하위 영양단계의 생산량에 의존하며, 자연상태에서 포식자에 의한 사망률이 가장 높은 시기이므로 폐쇄생태계를 이용하여 영양역학적 연구를 하면 현장 조사에서 얻기 힘든 많은 자료를 얻을 수 있다(해양수산부 1998).

현재까지 폐쇄생태계를 이용한 수산자원에 대한 연구는 주로 유럽과 캐나다에서 수행되었다. 실험 내용은 치자어의 섭식 습성 및 먹이의 종류 파악, 성장률과 생존률 측정, 동종 또는 이종 간의 경쟁 등을 이해하기 위한 것이었으며, 궁극적으로 생태계의 환경 수용능력(carrying capacity)을 평가하는데 활용되었다(*Øiestad et al.* 1976; *Øiestad* 1982).

치자어의 먹이 습성을 파악하기 위해 폐쇄생태계에 먹이가 되는 동물플랑크톤을 첨가하고 치자어의 성장단계별 먹이선택지수(electivity index)를 측정하는 연구(Houde and Berkeley 1979)가 수행되었다. 또한 동물플랑크톤 군집에 대한 치자어의 포식효과가 어느 정도 되는지에 대한 연구도 이루어졌다(Jones 1973). 치자어의 성장률은 먹이 조건과 밀접한 관계가 있으며, 자원관리 측면에서 성장률에 대한 자료가 필요하다. 대부분의 치자어 성장률은 실험실 조건에서 측정되었고, 자연조건을 충분히 반영하지 못했다는 단점이 있었으나(Houde 1978), 이러한 단점은 현장에 설치한 폐쇄생태계를 이용함으로써 줄일 수 있다. 예를 들어 실험실에서 얻은 결과로는 치자어의 높은 성장률과 생존률을 위해서 먹이의 양이 많아야 된다고 알려져 있었으나, 현장에서 폐쇄생태계를 이용한 실험에 따르면 실험실에서처럼 높은 먹이생물 농도가 필요하지 않다는 결과가 도출되었다(Moffatt 1981). 이러한 것은 자연상태에서 대체 먹이가 풍부하고 또한 바람에 의한 난류가 형성되어 치자어들이 먹이생물을 만날 확률이 커지는데서 기인할 수도 있다(Rothschild and Osborn 1988).

또한 먹이의 종류 및 조건에 따라 성장률이 어떻게 달라지는지 조사가 수행되었다(Moksness and *Øiestad* 1979). 치자어의 성장률뿐만 아니라 난바다곤쟁이류, 해파리류와 빙해파리류, 단각류와 같은 육식성 동물플랑크톤 포식자에 의한 각종 어류자원의 치자어 사망률에 대

한 연구도 활발하게 이루어졌다. 폐쇄생태계를 이용하여 치자어의 나이를 측정하고 길이, 건중량, 각 기관의 발달 상태를 점검함으로써 치자어의 건강상태를 파악하는 기준을 만들 수 있다. 같은 나이의 다른 종류의 치자어를 같은 조건에 함께 배양을 하면서 먹이 선호도, 분포, 성장률과 생존률 등을 조사하면 이종간의 관계를 파악할 수 있다. 이상과 같이 폐쇄생태계를 이용하여 치자어의 섭식률, 성장률, 포식자에 의한 사망률, 독성 조류에 의한 사망, 종간의 경쟁 등을 측정하면 치자어의 가입기작을 밝힐 수 있어 자원관리에 유용할 것이다.

## 요 약

폐쇄생태계는 연구자가 다양한 환경 요인을 조사 목적에 맞게 조절하여 생태계의 변화를 모니터링 할 수 있는 장점이 있어 영양역학적 연구와 같은 기초학문 연구 뿐만 아니라 독성실험 및 환경오염에 대한 생태계의 변화 실험 등 응용분야에서도 활용도가 높다. 특히 현장에 해양 폐쇄생태계를 설치하기 때문에 실험실에서의 실험보다 자연에 가까운 조건에서 실험을 할 수 있어, 신뢰성 있는 실험 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 국내에서 폐쇄생태계를 활용하여 해양생태계를 연구한 결과는 극히 적다. 이 논문에서는 기존에 국내외에서 제작되어 실험에 사용되었던 폐쇄생태계와 이를 활용한 연구과제를 소개하고, 향후 폐쇄생태계를 활용하여 연구할 수 있는 연구과제를 제안하였다.

## 사 사

이 논문은 한국해양연구소에서 수행된 폐쇄생태계를 이용한 유기오염물질의 이동연구(BSPE 99765-00-1251-3)의 일부입니다. 폐쇄생태계 제작 및 설치를 도와준 한국해양연구원 강정훈 선생님께서 감사사를 포함합니다.

## 인 용 문 헌

- 김용서. 2000. 폐쇄생태계를 이용한 유기오염물질의 이동연구. 한국해양연구소. 133pp. BSPE 99765-00-1251-3.  
 해양수산부. 1998. '98 통영해역의 바다목장화 연구개발용역 사업 보고서. BSPM 98005-01-1116-3.  
 한국해양연구소. 2000. 연안역에서의 육지와 해양 상호작용 연구(1). 남해 동부연안역의 영양물질 유입과 생물생산력 개발 환경조성 기반기술. BSPE 00784-00-1294-4.

- Beyers RJ and HT Odum. 1993. Ecological Microcosms. Springer-Verlag: New York. 557 pp.
- Brockman UH, K Eberlein, HD Junge, M Trageser and KJ Trahms. 1974. Einfach folien-tanks zur Planktonuntersuchung in situ. Mar. Biol. 24:163-166.
- Brockmann UH, E Dahl, J Kuiper and G Kattner. 1983. The concept of POSER (Plankton Observation with Simultaneous Enclosures in Rosfjorden). Mar. Eco. Pro. Ser. 14:1-8.
- Brockmann UH. 1992. Enclosed plankton ecosystems in harbours, fjords, and the North Sea-release and uptake of dissolved organic substances. pp. 66-86. In Marine Ecosystem Enclosed Experiments (Wong CS and PJ Harrison eds). IDRC. Ottawa.
- Davies JM and JC Gamble. 1979. Experiments with large enclosed ecosystems. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 286:523-544.
- Grice GD, RP Harris, MR Reeve, JF Heinbokel and CO Davis. 1980. Large scale enclosed water column ecosystem. An overview of foodweb I, the final CEPEX experiment. J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 60:401-414.
- Grice GD and MR Reeve. 1982. Introduction and description of experimental ecosystems. pp. 1-9. In Marine Mesocosms. Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems (Grice GD and MR Reeve eds). New York. Springer-Verlag.
- Harrison PJ, FA Whitney, W Jingping, TR Parsons and CS Wong. 1992. Introduction to the MEEE project. pp. 2-6. In Marine Ecosystem Enclosed Experiments (Wong CS and PJ Harrison eds). IDRC Canada.
- Houde ED and SA Berkeley. 1979. Juvenile Pacific herring *Clupea harengus pallasii*: Feeding in CEPEX enclosures. Int. Coun. Explor. See CM 1979/L:23
- Houde ED. 1978. Critical food concentrations for larvae of three species of subtropical marine fishes. Bull. Mar. Sci. 28:395-411.
- Jones R. 1973. Density dependent regulation of the numbers of cod and haddock. Rapp. P. V. Reun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer. 164:156-173.
- Kuiper J. 1977. Development of North Sea coastal plankton communities in separate plastic bags under identical conditions. Mar. Biol. 37:97-107.
- Lalli CM. 1990. Enclosed Experimental Marine Ecosystems: A Review and Recommendations-A contribution of the scientific committee on oceanic research working group 85. Coastal and Estuarine Studies. Springer-Verlag, New York. 218pp.
- Menzel DW and J Case. 1977. Concept and design: controlled ecosystem pollution experiment. Bull. Mar. Sci. 27:1-7.
- Moffatt NM. 1981. Survival and growth of northern anchovy larvae on low zooplankton densities as affected by the presence of a Chlorella bloom. Rapp. P.-V. Reun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer 178:475-480.
- Moksness E and V øiestad. 1979. Growth and survival experiment with capelin larvae (*Mallotus villosus*) in a basin and in plastic bags. Int. Coun. Explor. Sea CM 1979/F:53.
- Nixon SW, D Alonso, MEQ Pilson and BA Buckley. 1980. Turbulent mixing in aquatic microcosms. pp. 818-849. In Microcosm in Ecological Research (Giesy JP Jr. ed). DOE Symposium Series 52, CONF-781101. National Technical Information Service, Springfield, Va.
- øiestad V, B Ellerton, P Solemdal and T Tilsteth. 1976. Rearing of different species of marine fish fry in a constructed basin. 10th European symposium on marine biology. Ostend, Belgium, Sept. 17-23. 1975. 1: 303-329.
- øiestad V. 1982. Application of enclosures to studies on the early life history of fishes. pp.49-62. In Marine Mesocosms. Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems (Grice GD and MR Reeve eds). New York. Springer-Verlag.
- øiestad V. 1990. Specific application of meso- and macrocosms for solving problems in fisheries research. pp. 136-154. In Enclosed Experimental Marine Ecosystems: A Review and Recommendations. (Lalli CM ed.). New York. Springer-Verlag.
- Parsons TR. 1982. The future of controlled ecosystem enclosure experiments. pp. 411-418. In Marine Mesocosm. Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems (Grice GD and MR Reeve eds). New York. Springer Verlag.
- Rokey BE. 1991. Manual on marine experimental ecosystems. Scientific Committee on Ocean Research, UN Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France. 178pp.
- Rothschild BJ and TR Osborn. 1988. Small-scale turbulence and plankton contact rates. J. Plankton Res. 10:465-474.
- Von Bodungen B, K von Brockel, V Smetacek and B Zeitzschel. 1976. The plankton tower. I. A structure to study water/sediment interactions in enclosed water columns. Mar. Biol. 34:369-372.
- Wong CS, FA Whitney and WK Johnson. 1992. Application of different types of marine experimental enclosures to

study the pathways and fate of chemical pollutants. pp. 174-185. In *Marine Ecosystem Enclosed Experiments* (Wong CS and PJ Harrison eds). IDRC. Ottawa.

Wong CS and PJ Harrison. 1992. *Marine Ecosystem En-*

*closed Experiments*. IDRC, Ottawa, Canada. 439pp.

(Received 5 July 2001, accepted 20 August 2001)