

시화방조제의 건설은 저서동물군집의 시·공간 분포에 어떠한 영향을 미쳤는가?

홍재상 · 정래홍 · 서인수 · 윤건탁 · 최병미 · 유재원
인하대학교 해양학과

How are the Spatio-Temporal Distribution Patterns of Benthic Macrofaunal Communities Affected by the Construction of Shihwa Dike in the West Coast of Korea?

Jae-Sang HONG, Rae-Hong JUNG, In-Soo SEO, Kon-Tak YOON,
Byong-Mee CHOI and Jae-Won YOO

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Changes in the benthic communities have been studied to investigate the environmental effects before and after the construction of Shihwa Dike in the West coast of Korea. It is suggested that sequential changes in macrofaunal assemblages progressed in two successional directions in the Shihwa lake under the influence of organic enrichment. First, the appearance of "azoic zone" or "grossly polluted zone" developed in the area of less than 6 m in depth resulted from the severe dissolved oxygen depletion due to the eutrophication from the increased organic loading. Second, the "polluted zone" characterized by the proliferation of the opportunistic species in organically enriched area, was found in the vicinity of the industrial discharges and nearby fluvial inputs.

This benthic community succession in the Shihwa Lake seemed to be caused by the various ecological events such as an eutrophication in this organically enriched environment after construction of the dike and other physico-chemical parameters like salinity and dissolved oxygen in the bottom water, which may be influenced by the irregular surface water discharge and dilution by outer seawater inflow through the water gate of the dike.

On the other hand, the benthic communities in the outside of the dike showed that the species richness was more than doubled and the abundance increased almost seven times more than that before the dike construction. This may be a typical characteristics of the initial phase in benthic eutrophication, suggesting that an increased organic input area may have been responsible for this faunal change in the study area.

Key words : benthic macrofaunal community, opportunistic species, organic pollution, oxygen depletion, succession, Shihwa Lake, West coast of Korea

서 론

1987년 6월에 착공하여 6년 7개월만인 1994년 1월에 물막이 공사를 완료한 1단계 시화지구 개발사업은 경기도의 안산시와 시흥시, 화성군, 인천광역시의 웅진군에 이르는 광활한 간석지를 개발하는 대규모 국토확장 사업이다. 이 사업의 계획을 좀 더 구체적으로 들여다보면 경기도 안산시 대부동 방아머리에서 시흥시 오이도에 이르는 12.7 km의 방조제를 축조하여 개발의 잠재력이 높은 17,300 ha의 국토를 종합적으로 개발하여 수도권의 인구분산 및 공업용지의 확보에 기여하고, 2,000년대 식량의 안정적 공급을 위한 농지조성과 6,100 ha의 담수호를 조성하여 1억 8천톤의 수자원을 확보함으로써 전천후 영농기반을 마련하고 도서지역을 균형개발하는 데 그 목적이 있었다.

그러나 시화호로 유입되는 오염부하량에 대한 정확한 조사와 이에 대한 적절한 조치없이 방조제 물막이 공사가 완료되어 외해수와와 순환이 차단되자 시화호 내의 수질은 급속히 악화되었다. 특히 시화호로 유입되는 오염부하량은 방조제 공사전인 1987년에 비해 공사가 완료된 1994년에는 유역내 인구의 급격한 증가와 가축수의 증가로 인해 화학적 산소요구량, 총인, 총질소 등이 크게 증가한 것으로 나타났다. 오염부하량을 가중시키는 주요 오염원은 반월공단 폐수, 생활하수, 축산폐수 등이며, 그 밖에도 논, 밭, 임야 등의 비료나 농약 사용에 기인하는 비오염원이 있다. 오염부하량이 가장 큰 반월공단은 1978년부터 공장이 입주하기 시작하여 1987년에 입주가 100%로 완료되었으며, 반월공단으로부터 배출되는 폐수는 절반 정도가 처리되지 않고 7개의 우수토관(雨水土管)을 통하여 유입되고 있으며, 안산 하수처리장의 미비로 1995년 하반기

기까지 1단계 처리만 하고 수중방류구를 통하여 배출되었다 (KWRC·RDC, 1995; KORDI, 1997).

현재의 시화호는 배수갑문을 통한 부분적인 해수유입을 제외하고는 해수의 순환이 차단된 폐쇄 환경을 이루고 있으며, 물막이 공사 후 6m 이심에 갇혀있는 잔존 저층해수로 인하여 수직적으로 강력한 염분 의존형 밀도 성층에 의한 2층구조를 보이고 있다. 이러한 물리적 조건하에서 시화호 주변의 6개 주요 하천으로부터 유입되는 막대한 양의 유기물질 및 암모니아염은 시화호의 저산소 및 무산소 환경을 가속화 시키고 있으며, 이로 인해 시화호는 전 계절을 통하여 6m 부근 심도의 밀도경사면 상하로 뚜렷한 산화 및 환원 환경으로 나뉘어 진다 (Park et al., 1997).

시화호가 형성된 후 호수 내 수질의 급속한 악화는 국가적인 문제로 대두되었으며, 이에따라 시화호에 대한 많은 조사가 이루어지고 있는 실정이다. 저서동물 군집에 대한 조사도 활발히 이루어져 호수 내에서의 저서동물의 분포패턴 (KORDI, 1995; SNU, 1997), 시간에 따른 변화 (KORDI, 1997; Lee and Cha, 1997)에 대한 연구가 이루어져 있다.

따라서 본 연구의 목적은 첫째, 해수와의 순환이 차단된 후 유기물오염과 담수화가 진행된 시화호 내에서 방조제 완공 전과 후의 저서동물 군집을 비교함으로써 시화호 내에서 군집이 어떤 천이과정을 거쳤는지를 알아내고, 또한 군집의 천이를 일으킨 주된 요인은 무엇인지를 밝히는 것이며, 둘째, 방조제 건설 전의 시화지구 해역 저서동물 군집과 방조제 건설 후 방조제 외곽해역의 저서동물 군집을 비교함으로써 방조제 건설이 주변 해역 생태계에 미친 영향을 파악하는 데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

저서동물의 채집은 시화 방조제 공사의 막바지 작업이 진행중이던 1993년에는 3월부터 11월까지 계절별로 7개 정점에서, 그리고 1994년 1월 24일 시화방조제 건설이 완공된 후에는 방조제 외곽해역에서 1996년 11월과 1997년 3월에 8개 정점에 대하여 수행되었다. 방조제 건설 후 시화호 내에서는 1997년 2월과 1997년 4월에 3개 정점에 대하여 조사를 실시하였다 (Fig. 1, Table 1). 채집은 van Veen grab (0.1 m²)을 사용하여 각 정점당 3회 채집하였고, 저서동물은 선상에서 망목 1mm의 체를 사용하여 분리하였으며, 잔존물은 10% 중성 포르말린으로 고정환

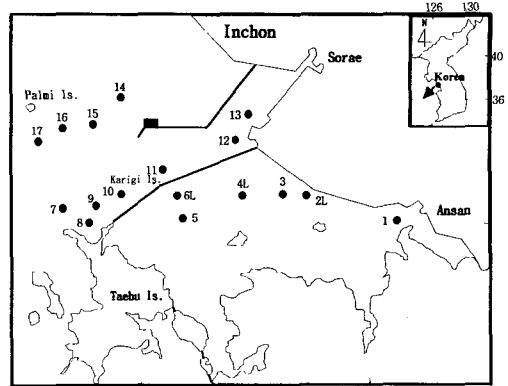


Fig. 1. Position of sampling stations in the study area.

(Refer to Table 1 for the sampling dates and stations).

Table 1. Sampling dates and stations in benthic samples collected before and after the Shihwa Dike construction

Sampling dates	Stations
1993. 3, 5, 8	1, 3, 5, 8, 11, 13, 15
1993. 11	3, 5, 8, 11, 13,
1996. 11, 1997. 2	7, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17
1997. 2, 4	2L, 4L, 6L

후 실험실로 운반하였다. 저서동물의 동정은 종 수준까지 수행하였으며, 완전한 몸통이나 머리부분이 있는 경우만을 계수하였다. 군집의 구조와 특성을 알아보기 위해 종수와 밀도 및 다양도지수 H' (Shannon and Weaver, 1963)와 균등도지수 J' (Pielou, 1966) 그리고 Squared Euclidean distance (Ludwig and Reynolds, 1988)를 이용하여 집괴분석을 실시하였으며, 각 시기별 그리고 지역간 군집의 상태를 비교하기 위해 순위-빈도 곡선 (Rank-Frequency Diagram ; Frontier, 1985) 방법을 사용하여 비교 분석하였다.

결 과

1. 집괴분석

시화방조제 건설이 주변해역의 저서동물 군집에 공사 전과 후에 대한 차이를 통하여 어떠한 영향을 미쳤는지를 알아보기 위하여 시화 방조제가 건설중이던 시기의 방조제 안과 밖의 정점, 그리고 방조제 완공 후 2년 정도가 지난 시점에서 방조제의 바깥 해역과 호수화된 안쪽에서 총 48개 정점중 생물이 출현한 46개의 정점에서

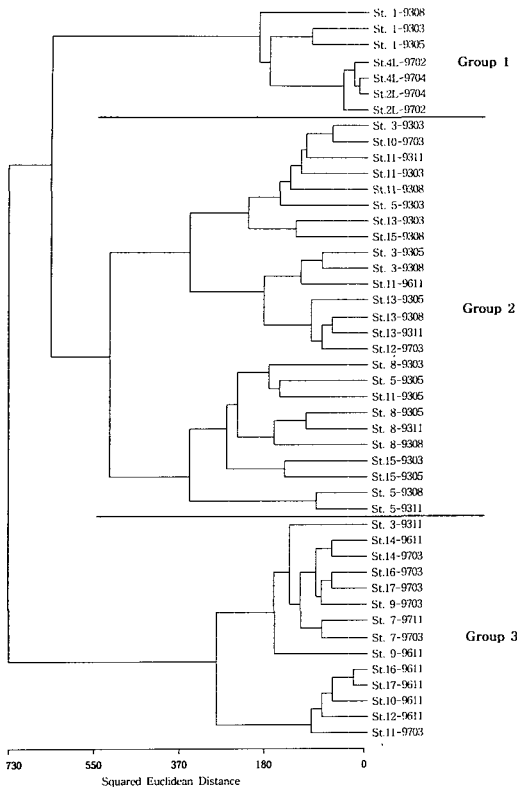


Fig. 2. Similarity between the benthic macrofauna at various stations inside and outside the Shihwa Dike.

4회 이상 출현한 98종을 가지고 집괴분석을 실시하였다.

집괴분석 결과 조사 정점들은 크게 3개의 그룹으로 나뉘었다 (Fig. 2). 그룹 1은 방조제 건설 전인 1993년 조사시 사리포구에 인접한 시화내만 가장 안쪽의 정점 1과 방조제 건설로 인공호가 형성된 후 시화호 내에 위치한 정점들로만 구성되어 있다. 그룹 2는 총 25개의 정점으로 구성되어 있으며, 이 중 1996/97년의 시화호 밖 3개 정점을 제외한 22개의 정점이 방조제 건설 전의 시화 내만 밖의 정점들로 그룹 2를 구성하고 있다. 그룹 3은 14개의 sample로 이루어져 있으며, 1996년 11월과 1997년 2월의 방조제 외곽 해역에 위치한 정점들로 구성되어 있다.

이와 같은 집괴분석 결과를 볼 때 시화호 주변해역의 저서동물 군집은 방조제 건설 중이던 1993년 군집과 건설 후의 1996/97년 군집이 크게 차이를 보여주고 있다. 또한 방조제 건설로 인하여 담수화 및 오염이 극도로 심화된 1997년 2월과 4월의 시화호 내의 정점들과 1993년 시화내만 가장 안쪽의 정점 1이 높은 유사도를 보이는 것이 특징적이다. 이와같은 결과를 바탕으로 그룹 1은 오염된 군집, 그룹 2는 공사중 군집 (1993년 군집), 그룹 3은 공사후 군집 (1996/97년 군집)으로 생각할 수 있다.

2. 시화만 내에서 방조제 건설 전과 후의 저서동물군집의 비교

시화 방조제가 건설되어 시화호가 형성된 후 담수화 및 오염물질 유입의 증가가 저서동물 군집에 미친 영향과 이로 인한 저서동물 군집의 천이현상을 파악하고자 방조제 완공 전 시화만 내에 위치한 3개 정점 (정점 1, 3, 5)과 호수가 형성된 후 3년 정도 지난 후의 3개 정점 (2L, 4L, 6L)을 비교하였다.

1) 종수 및 밀도

시화호가 형성되기 전인 1993년에 3개 정점에서 계절별로 4번의 조사시기 동안 총 84종이 출현하였다. 시기별로는 3월에 31종으로 가장 낮았으며, 8월에 가장 많은 40종이 출현하여 시기별로 큰 차이를 보이지는 않았다. 시화호 형성 후 3년이 지난 1997년 2월과 4월의 조사에서는 총 8종이 출현하였는데, 시기별로는 6종과 7종이 출현하여 시화호 형성 후 종수가 크게 줄어들었다. 정점별 종수의 출현양상은 가장 안쪽에 위치한 사리포구 근처의 정점 1에서 5~9종의 매우 낮은 종 수를, 중간 부근에 위치한 정점 3에서 평균 23종이 출현하여 가장 높은 종밀도를 보였으며 가장 외곽에 위치한 정점 5는 평균 13종으로 중간 정도의 값을 보였으며 이는 4번의 채집시기 모두에서 동일하게 나타났다 (Fig. 3). 시화호 형성 후인 1997년에는 가리기섬 근처의 수심이 12m 정도로 비교적 깊은 정점 6L에서는 두 번의 조사시기 모두에서 전혀 생물이 채집되지 않았으며 정점 2L과 4L에서는 4~7종이 출현하여 시화호 형성 전의 정점 1에서의 종수와 유사한 출현 종수를 보였다.

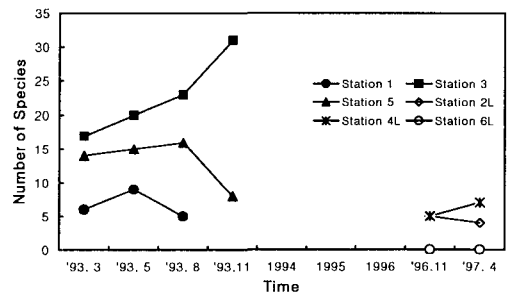


Fig. 3. Number of macrobenthic species in the Shihwa Lake collected before and after the dike construction.

밀도는 1993년에 평균 286 개체/m²을 기록하여 방조제 외곽의 두 정점을 포함한 밀도와 유사한 값을 보인 반면 1997년의 평균 밀도는 2,680 개체/m²으로 매우 높은 밀도를 기록하였으나 이 시기에는 생물이 채집되지 않은 정점이 있어 생물이 채집된 정점만을 대상으로 한 평균 밀도는 4,020 개체/m²으로 더욱 높은 밀도를 보인다.

Table 2. Numerically dominant taxa in the benthic samples collected before and after the dike construction in the Shihwa Lake

Species	Rank		Mean density (ind. · m ⁻²)		% Composition	
	Before	After	Before	After	Before	After
<i>Pseudopolydora kempfi</i>	—	1	—	2,880 ± 602	—	72
<i>Heteromastus filiformis</i>	1	—	108 ± 250	—	38	—
<i>Polydora ligni</i>	2	2	39 ± 125	453 ± 172	14	11
<i>Corophium sinense</i>	—	—	—	444 ± 578	—	11
<i>Tharyx</i> spp.	3	—	23 ± 45	—	8	—
<i>Neanthes succinea</i>	—	4	—	233 ± 227	—	6
<i>Sternaspis scutata</i>	4	—	12 ± 25	—	4	—
<i>Mediomastus californiensis</i>	5	—	8 ± 17	—	3	—

정점별 밀도 분포는 1993년의 경우 종수와 마찬가지로 정점 3이 평균 570 개체/m² 으로 평균 194 개체/m²와 78 개체/m²를 기록한 정점 1과 5에 비해 높은 밀도를 기록하였으며, 특히 정점 1의 경우 조사시기별 밀도의 차이가 다른 정점에 비해 컸다 (Fig. 4). 반면 1997년에는 종수와 는 반대로 정점 2L과 4L이 각각 4,308 개체/m²와 3,733 개체/m²로 매우 높은 밀도를 기록했다.

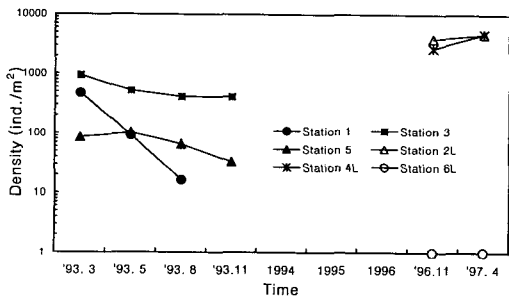


Fig. 4. Mean density (ind./m²) of macrobenthos in the Shihwa Lake collected before and after the dike construction.

2) 다양도 지수

1993년의 정점별 다양도 지수는 정점 1이 가장 낮은 다양도 지수를 보이며, 그 다음으로는 정점 3 그리고 정점 5에서 가장 높은 다양도를 기록했다. 그러나 정점 3의 경우 1993년 3월의 낮은 다양도를 제외한다면 정점 5와 큰 차이가 없음을 보여준다. 1997년에는 생물이 출현한 두 정점 모두에서 1.0 이하의 매우 낮은 다양도 값을 기록했다 (Fig. 5).

3) 우점종의 조성 and 변동패턴

방조제 완공 전 세 정점에서 저서동물 군집의 전체 개체수의 1% 이상 차지하는 우점종은 총 27종으로 최우점종인 *Heteromastus filiformis*가 전체 밀도의 38% (Table 2) 를 차지하는 높은 점유율을 보임에도 불구하고 나머지

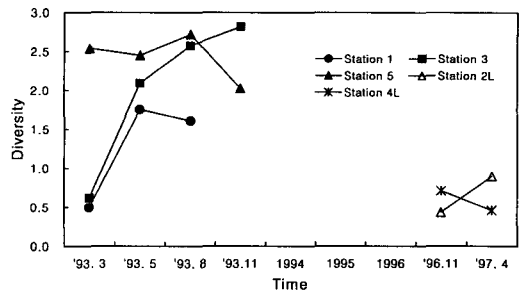


Fig. 5. Species diversity (H') of macrobenthos in the Shihwa Lake collected before and after the dike construction.

우점종들에 의해 비교적 고른 밀도 분포로 군집이 구성 되어 있음을 알 수 있다. 이처럼 비교적 고른 밀도 분포를 보이던 군집은 공사 완공 후 3년이 지난 1997년 초에 와서는 세 정점중 수심이 가장 깊은 정점에서는 전혀 생물이 출현하지 않았으며, 생물이 출현한 두 정점에서도 총 8종만이 출현하였다. 그 중 다모류인 *Pseudopolydora kempfi*가 평균 밀도 2,880 개체/m²의 높은 밀도로 전체의 72%를 차지하였으며, 그 밖에도 다모류인 *Polydora ligni*와 *Neanthes succinea* 그리고 단각류인 *Corophium sinense*가 평균 200~400 개체/m²의 높은 밀도를 보여 시화호가 형성된 후 현재까지 이들 5종이 극우점하는 매우 단순한 군집 구조를 보이고 있다.

3. 시화방조제의 외곽해역에서 1993년 군집과 1996/97년 군집의 비교

집괴분석 결과 그룹 1에 속한 정점 1의 샘플을 제외한 나머지 정점들의 샘플들과 1996년 11월과 1997년 2월에 시화방조제 외곽에 위치한 정점들에 대해 비교하였다.

1) 종수 및 밀도

1993년의 7개 정점에 대한 계절별 조사에서는 총 172종

이 출현하였으며 평균밀도는 255 개체/m² 이었다. 그러나 1996~1997년 8개 정점에 대한 추계 및 동계 조사에서는 총 207종, 평균밀도는 1,864 개체/m² 로 방조제 건설 후 총 출현 종수와 밀도가 증가하였다. 특히 밀도는 방조제가 건설된 후에 7배 이상의 매우 큰 폭의 증가를 기록하였다. 이와 같은 종수와 밀도의 시간에 따른 변화를 알아보기 위하여 각 시기별 평균종수와 밀도를 비교하였다 (Fig. 6). 평균 종수는 1993년 4회의 조사시기 동안에 14~18종의 출현종수를 보여 비교적 낮았으며 변동 폭도 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 1996년 11월과 1997년 2월에는 각각 평균 출현종수 49종과 41종으로 2배 이상 증가를 보여, 총 출현 종수의 증가 폭에 비해 더 큰 증가폭을 기록했다. 평균밀도는 1993년 3월에 325 개체/m² 로 최대값을 그리고 5월에 180 개체/m² 의 최소값을 기록해 1993년 1년 동안에는 낮은 밀도와 그 변화의 폭도 크지 않았으나 종수의 변화와 마찬가지로 1996년과 1997년에 와서는 각각 2,368 개체/m² 와 1,360 개체/m² 로 크게 증가하였다.

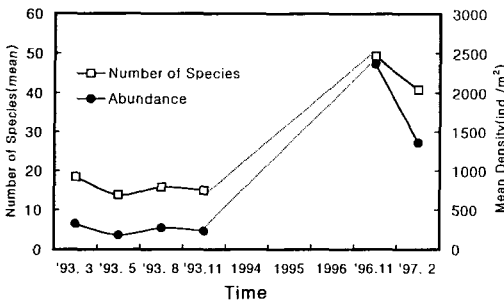


Fig. 6. Number of species and mean density of macrobenthos presented outside the Shihwa Dike collected before and after the construction.

이처럼 큰 폭의 종수와 밀도의 증가가 어떤 동물군에 의해 주도되었는지를 알아보기 위해 1993년 군집과 1996/97년 군집에서 채집 시기별 동물군의 종수와 밀도의 점유율을 조사하였다. 종수의 동물군별 조성은 1993년 군집에서 다모류가 44~53%로 가장 많은 부분을 차지하였다. 그 다음으로는 갑각류가 21~35% 범위를 보였으며, 연체동물이 15~20%를 차지하는 것으로 나타났다 (Fig. 7). 이와 같은 동물군의 종 조성은 종수가 급격히 증가한 1996/97년 군집에서도 다모류 44~46%, 갑각류 24~27%, 연체동물 22~23%의 비율을 나타내어 연체동물이 다소 증가하였을 뿐 다른 동물군에서는 눈에 띄는 변화를 보이지는 않았다. 반면 개체수의 조성에 있어서는 1993년 군집과 1996/97년 군집이 차이를 보였다 (Fig. 7).

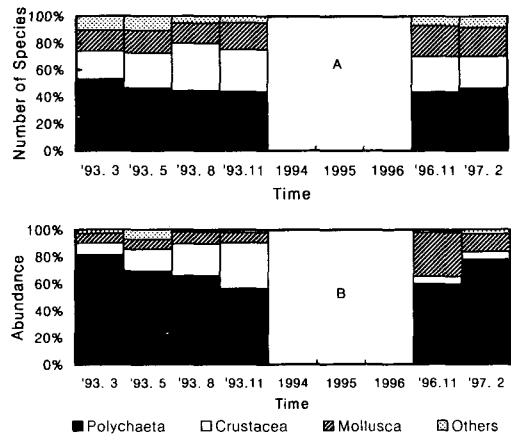


Fig. 7. Species richness (A) and relative abundance (B) of major taxa outside the Shihwa Dike collected before and after the construction.

다모류는 1993년 군집에서 56~81%를 차지하는 가장 우점하는 동물군이었으며 동시에 1996/97년에도 60%와 78%로 가장 우점하는 동물군으로 나타나고 있으며 1993년 군집과 점유율면에서는 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 갑각류는 1993년 군집에서는 평균 21% (9~34%)를 차지하였으나 1996/97년 군집에서는 두 번 모두 6%를 차지하여 감소한 반면에 연체동물은 1993년 군집에서는 7~9%의 일정한 비율을 보였으나 1996~1997 군집에서는 33%와 14%로 증가하였다.

2) 다양도 및 균등도 지수

1993년 군집의 다양도 지수는 각 조사 시기의 평균값이 2.09~2.22의 범위를 보여 시간에 따른 계절별 변화도 거의 없음을 보여주고 있다 (Fig. 8). 그러나 1996년과 1997년 군집에서는 각각 2.50과 2.61을 기록해 종 수나 밀도의 증가와 마찬가지로 각각 1993년 군집에 비하여 크게 증가하는 양상을 나타내었다. 반면에 균등도 지수

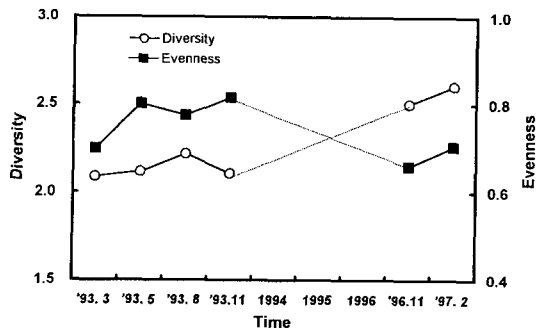


Fig. 8. Species diversity (H') and evenness (J') of the macrobenthos outside the Shihwa Dike collected before and after the construction.

Table 3. Numerically dominant taxa in the benthic samples collected before and after the dike construction outside the Shihwa Dike

Species	Rank		Mean density (ind. · m ⁻²)		% Composition	
	Before	After	Before	After	Before	After
<i>Heteromastus filiformis</i>	1	1	85 ± 198.4	427 ± 691.8	32.5	22.9
<i>Ringicula doliaris</i>	—	2	—	197 ± 412.5	—	10.5
<i>Minuspio japonica</i>	2	29	20 ± 37.9	9 ± 34.5	7.7	0.5
<i>Chaetozone setosa</i>	13	3	3 ± 7.9	108 ± 173.1	1.1	5.8
<i>Mediomastus californiensis</i>	7	4	6 ± 13.1	104 ± 183.2	2.1	5.6
<i>Amphicteis gunneri</i>	—	5	—	93 ± 261.1	—	5.0
<i>Moerella rutila</i>	54	6	1 ± 2.0	88 ± 188.0	0.3	4.7
<i>Tharyx</i> spp.	3	13	12 ± 32.4	32 ± 35.7	4.7	1.7
<i>Macrophthalmus japonicus</i>	4	39	10 ± 36.4	6 ± 23.9	3.8	0.3
<i>Theora fragilis</i>	22	7	2 ± 6.8	68 ± 11.0	0.8	3.7
<i>Mandibulophoxus mai</i>	5	—	8 ± 18.9	—	3.2	—
<i>Glycinde gurjanovae</i>	11	8	4 ± 7.8	59 ± 60.9	1.4	3.1
<i>Sternaspis scutata</i>	6	9	6 ± 17.7	56 ± 48.0	2.2	3.0

는 1993년에 0.70~0.81의 범위를 보였으나, 1996년과 1997년에는 각각 0.66과 0.70의 값을 보여 다양도 지수는 반대로 1996년과 1997년에 감소하였다.

3) 우점종의 조성과 변동패턴

1993년 군집과 1996~1997년 군집에서 전체 개체수의 1% 이상 차지하는 종을 우점종으로 선별하였다. 1993년 군집의 경우 다모류 10종, 갑각류 4종, 연체류 1종, 극피동물 1종으로 모두 16종이 전체의 1% 이상을 차지하였다 (Table. 3). 최우점종으로는 다모류인 버들갯지렁이과의 *Heteromastus filiformis*가 평균 85 개체/m² 의 밀도를 기록하였으며 출현율 면에서도 가장 우점하였다. 그 다음으로는 다모류인 *Minuspio japonica*와 *Tharyx* spp., 그리고 갑각류인 *Macrophthalmus japonicus*와 *Mandibulophoxus mai*가 우점하는 것으로 나타났다.

1996/97년 군집에서는 18종이 전체의 1% 이상 차지하였다. 우점종 조성에서는 다모류가 12종, 연체동물이 5종, 편형동물이 1종으로 연체동물이 증가하고 갑각류는 우점종에 포함되지 않은 것으로 나타나 1993년과는 다른 결과를 보였다. 최우점종에 있어서는 1993년 군집과 마찬가지로 *H. filiformis*가 차지하였으나 평균 밀도면에서는 426 개체/m² 으로 5배 이상 증가하였으며, 출현율에 있어서도 증가하였다. 이와 같은 밀도와 출현율의 증가는 다른 우점종에서도 동일하게 나타났다. 또한 담수의 영향을 받는 지역에서 비교적 높은 밀도로 서식하는 것으로 알려진 *Minuspio japonica* (Jung et al., 1997)의 감소와 유기물 오염이 증가되는 해역에서 유기물 오염의 지표종으로 보고되고 있는 아기반투명조개 *Theora fragilis* (Kikuchi and Tanaka, 1976; Lim, 1993; Lim et al., 1995)가 1996~1997년 군집에서 새로이 우점종으로 출현하였던

사실도 주목할만 하다.

고찰

본 연구의 목적은 시화 방조제 건설로 형성된 시화호 내에서의 호수형성 전과 후의 저서동물군집을 비교함으로써 호수 형성으로 인한 저서동물 군집의 천이를 추론하며, 또한 방조제 건설이 주변 저서동물 생태계에 미치는 영향을 파악하는데 있다. 따라서 공사전과 후의 저서동물 군집에 차이가 있는지를 알아보기 위해 방조제 막바지 공사가 진행 중인 1993년 7개 정점에 대한 계절별 4회 조사와 공사완료 후 3년이 지난 1996년 말과 1997년 초의 시화호 내부와 외부 해역 11개 정점에 대해 가을 및 겨울철 2회 조사를 가지고 집괴분석을 실시하였다. 그 결과 방조제 공사 전과 후의 저서동물 군집은 뚜렷하게 구별되어 시화 방조제 건설 이후 이 해역 저서동물 군집이 크게 변화했음을 극명하게 나타내주고 있다 (Fig. 9).

또한 방조제 건설로 인해 외해와의 해수 교환이 차단된 후 시화호는 시화 및 반월공단으로 부터의 폐수유입, 주변 하천에서 지속적인 담수 유입으로 인한 유기오염물질이 시화호 내에 축적되어 현재 심각한 오염현상이 나타나고 있는 실정이다. 그런데 본 연구결과 심하게 오염된 시화호 내의 정점들과 시화호 형성 전의 시화 내만 가장 안쪽의 정점(정점 1)이 하나의 군집으로 묶이고 있는 것으로 나타나 시화 방조제 건설 중인 시기에 이미 시화지구 안쪽의 정점은 외해수와의 소통 불량 및 시화와 반월공단의 공단오폐수로 인하여 심하게 오염되어 있음을 보여주고 있다.

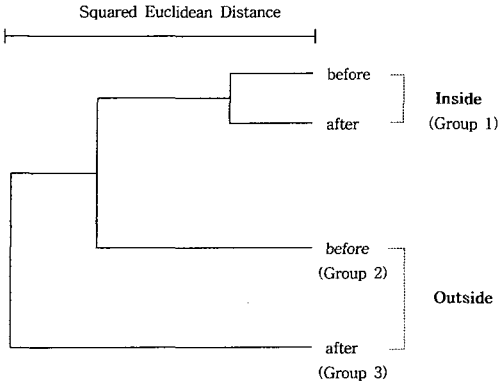


Fig. 9. Schematic dendrogram summarized from the Fig. 2 showing differences in macrobenthic communities before and after the dike construction.

따라서 본 논문에서는 첫째, 1993년 방조제 공사중인 시기에 이미 오염된 군집인 정점 1을 제외한 1993년의 군집과 방조제 건설 후 방조제 외곽해역 군집과의 차이점과 이런 차이를 유발한 원인이 무엇인지, 그리고 이와 같은 군집의 변화가 어떤 방향으로 진행되었는가를 파악하는 것이다. 둘째, 호수로 변한 지역에서 시화호 형성 전과 후의 군집을 비교함으로써 시화호 내에서 군집이 어떤 천이과정을 거쳤는지, 그리고 군집의 천이를 일으킨 주된 요인은 무엇인가에 대해 초점을 맞추었다.

1. 시화호 내에서의 변화

1) 시화호 형성 전후의 저서동물 군집의 비교

시화호가 형성되기 전의 저서동물의 군집 상태는 시화호 내만 가장 안쪽의 정점 1에서 종수와 다양도가 1년간의 계절별 조사 모두에서 매우 낮은 값을 기록하였으며, 중간 지점에 위치한 정점 3이 모든 조사시기에서 가장 높은 종수와 밀도를 보였으나 다양도 면에서는 바깥쪽의 정점 5에서 높게 나타나는 결과를 보였다.

호수가 형성된후 1997년 조사에서는 수심이 10m 정도로 비교적 깊은 가리기섬 근처의 정점 6L 지역에서는 저층수의 무산소 수괴 형성 (Park et al., 1997)으로 인해 생물이 전혀 출현하지 않는 무생물역(無生物域, azoic area)인 중오염역(重汚染域, 'Grossly Polluted Zone' sensu Pearson & Rosenberg, 1978)이 나타나게 되었다. 한편 수심이 낮은 지역인 정점 2L과 4L에서는 평균 5종 정도의 매우 적은 종수를 보이나 밀도는 4,000 개체/m² 이상의 극도로 높은 밀도를 기록하고 있다. 이 지역에서는 출현종 중 *Pseudopolydora kempfi*가 3,000 개체/m² 정도의 매우 높은 밀도를 보여, 낮은 출현종수와 일부 우점종에 의한 극도로 높은 밀도로 특징지어지는 전형적인

유기물오염에 의한 오염역(汚染域, 'Polluted Zone' sensu Pearson & Rosenberg, 1978) 군집 특성을 잘 나타내고 있다. 실제로 시화호 형성 후 종수는 1/3로 감소하였으며, 밀도는 14배 정도 증가하여 유기물 오염에 의해 군집이 크게 변화했음을 뚜렷이 보여주고 있다 (Fig. 10).

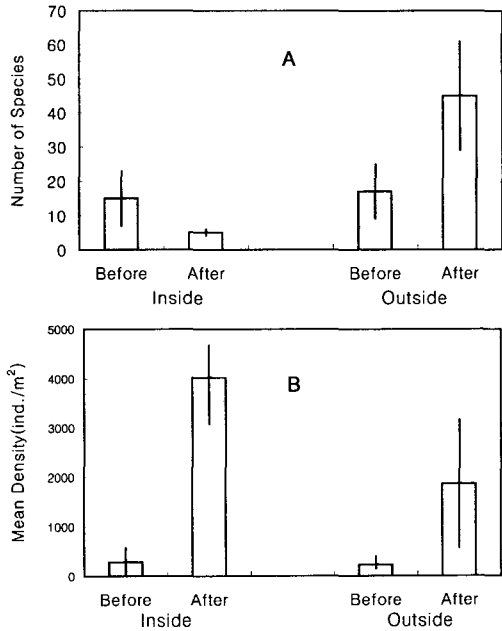


Fig. 10. Mean number (± SD) of species (A) and individuals (B) per 1 m² before and after the dike construction inside and outside of the Shihwa Dike.

이와 같은 결과를 1978년 반월공단이 입주하기 시작한 2년 후인 1980년 7월과 10월 그리고 1981년 2월에 현재의 조사 정점 1, 2L, 3, 4L과 거의 같은 해역의 5개 정점에서 van Veen grab (0.1 m²)으로 2회 채집한 KORDI (1981)의 결과와 비교해 보면, 정점 수와 채집 면적에서 다소 차이가 있지만 1980년 조사시에 총 출현종수는 106종으로 1993년 조사시의 84종과는 큰 차이를 보였으며, 특히 정점별 종수의 분포양상은 더욱 큰 차이를 보였다. 1993년의 경우 출현종수의 분포 특징은 정점 1이 위치한 시화만 가장 안쪽은 4계절 조사동안 5~9 종만이 출현하는 바깥쪽 정점에 비해 매우 빈약한 생물상을 보여 이미 오염이 심화된 지역으로 분류되었으나, 1980년 당시에는 이와 일치하는 정점에서 14~22종이 출현하였으며, 평균 종수도 19종으로 1993년에 비해 거의 3배에 가까운 풍부한 생물상을 보이며, 종수의 분포 양상도 1993년 처럼 안쪽이 낮고 바깥쪽이 높은 분포를 보이지 않고 안쪽과 바깥쪽이 차이가 없는 고른 분포를 보였다. 이러한 사실로

미투어 볼 때 이 지역은 현재의 주된 오염원 중의 하나인 반월공단은 공단이 형성되어가는 입주 초기인 1980년에는 저서동물 군집에 심각한 영향을 주고 있지는 않았던 것으로 보인다. 그러나 시화 방조제 건설 후 시화호 내의 오염역에서 높은 밀도로 출현하는 미소 단각류인 *Corophium sinense*가 1980년 10월과 1981년 2월에 반월공단 앞 정점 (정점 1과 2L 사이)에서 각각 4,735 개체/m²과 1,190 개체/m²의 높은 밀도로 출현하여 이 시기에도 일부 종의 간헐적인 대증식이 일어나고 있음을 알 수 있다.

또한 집괴분석 결과에서 나타난 정점 1과 시화호 형성 후 호수 내의 군집과의 높은 유사도는 시화호 형성 후 높은 밀도를 보이며 출현하는 유기물오염 지표종으로 알려진 *Polyodra ligni* (Reish and Winter, 1954; Tulkki, 1968; Watling, 1975)와 *Capitella capitata* (Bellan, 1967; Bagge, 1969; Anger, 1975; Wolff, 1973; Gray, 1976; Reish, 1959, 1971; Hong et al., 1982)가 1993년 당시 정점 1에서 높은 밀도로 출현하기 때문으로 이미 시화 내만의 안쪽 지역은 오염이 심화되어 있었음을 보여주고 있다.

이와 같은 군집의 상태를 보다 정량화하고 가시화하기 위해 순위-빈도 곡선 방법 (Rank-Frequency Diagram method)을 사용하였다. 순위빈도곡선은 곡선의 기울기로 군집의 천이과정을 추적할 수 있으며, 환경의 파괴나 오염과 같은 인간활동에 의한 환경의 교란 후 군집의 상태를 교란 전과 명확하게 구별해주는 장점이 있다 (Frontier, 1985; KORDI, 1993; Lim, 1993; Lim and Hong, 1994). 순위-빈도 곡선을 1993년의 3개 정점 (정점 1, 3, 5)과 1997년의 2개 정점 (정점 2L, 4L)에 적용한 결과 호수가 형성된 후의 정점 2L과 4L은 매우 가파른 기울기를 보여 심하게 오염된 군집임을 보여주고 있다 (Fig. 11). 1993년 군집의 상태는 집괴분석의 결과와 마찬가지로 정점 1이 세 정점중 가장 가파른 경사를 보이며, 1997년의 두 정점과 비슷한 상태를 나타내 1993년 군집 중 가장 오염이 진전된 상태인 것으로 나타났다. 또한 중간지점에 위치한 정점 3이 중간 정도의 기울기를, 그리고 가장 바깥쪽의 정점 5가 가장 완만한 경사를 보여 1993년의 군집의 상태는 바깥쪽에서부터 안쪽으로 갈수록 오염된 군집임을 보여주고 있다. 이와같은 현상은 이해역의 주요오염원인 반월공단의 폐수와 도시하수 및 축산 폐수는 만의 안쪽에서 유입되고 있는 반면에 외해역 해수와의 소통이 불량함으로 인해 안쪽부터 오염이 진행되고 있는 것으로 보이며, 이와같은 오염의 현상은 1980년대 초에도 이미 예견되었다 (KORDI, 1981).

결국, 1994년 1월에 완공된 시화방조제의 건설로 인하여 시화호 내에서는 반월 및 시화 공단의 오폐수와 인

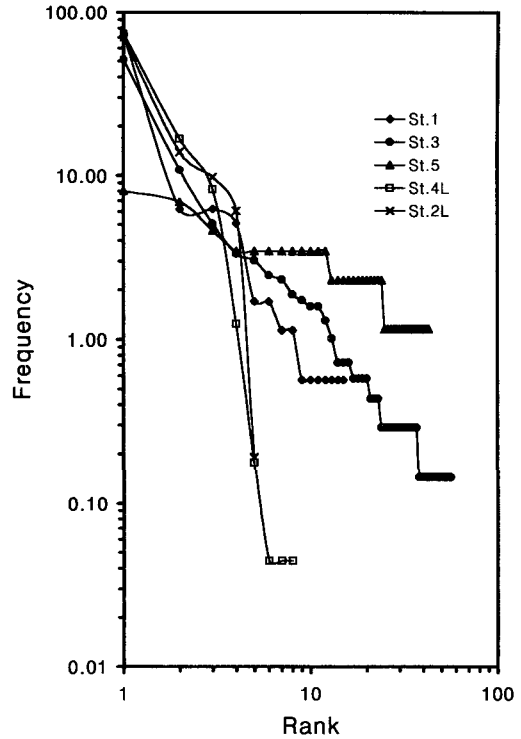


Fig. 11. Rank-frequency diagram of macrobenthos at each sampling station collected before and after the dike construction in the Shihwa Lake.

근 지천으로부터 흘러들어오는 오염물질의 농도가 높은 담수는 표층수괴를 부영양화 시키며 (Park et al., 1997), 이로인해 표층에서는 식물플랑크톤이 대증식을 일으키게 된다. 실제로 식물플랑크톤의 현존량은 1993년에 비해 500배 정도 증가하였으며, 이런 엄청난 양의 식물플랑크톤의 대증식은 방조제 건설 후 시화호 내에서 1년 내내 계속 발생한다 (Lee, 1997). 이렇게 생성된 유기입자는 곧 저층에 퇴적되며, 이는 주기적인 여름철 밀도성층의 형성으로 인하여 저층수의 무산소화 및 과영양화를 촉진시켜 저서동물 군집의 대량폐사를 유발하고 그 결과 정점에 따라 무생물구역 (azoic area)인 중오염역 (重汚染域, Grossly Polluted Zone)과 일부 오염 지표종만이 서식하면서 극도로 높은 밀도 분포를 보이는 전형적인 오염역 (汚染域, Polluted Zone)이 나타난다. 다만 일부 방조제 부근의 정점에서만 불규칙적인 배수갑문의 개폐에 따른 외해수와의 교환에 의해 일부 저서동물종의 생존이 가능한 것으로 나타나고 있다.

2) 방조제 완공 후 시화호 내에서 저서동물 군집의 천이과정

방조제 완공으로 인해 외해와의 해수 소통이 차단된

후 지속적인 반월공단과 시화공단의 공장폐수, 인근 지역의 축산폐수, 도시하수, 인근 지천으로 부터의 담수 유입 등으로 시화호 내의 유기물량은 계속 증가하는 추세이다 (KORDI, 1997). 시화호로 유입되는 오염물질의 농도가 높은 담수는 표층 수괴의 부영양화 및 식물플랑크톤의 과대번식을 일으키게 되며, 이렇게 생성된 유기입자는 침강되어 해저면에 쌓인후 저층수의 무산소 내지는 빈산소의 환원환경으로 변하게된다 (Park et al., 1997). 또한 지속적인 공단폐수와 도시하수, 강우에 의한 담수 유입으로 인한 담수화 현상이 지속되고 있다. 이와 같이 점점 악화되는 환경에서 저서동물 군집의 천이과정을 모식화하기 위해 Lee and Cha (1997), KORDI (1997), 그리고 SNU (1997)의 자료를 이용하여 천이과정을 재구성하였다 (Fig. 12).

시화방조제의 건설을 전후하여 시간의 변화에 따른 저서동물 군집과 환경요인과의 관계를 상기 자료를 토대로 종합적으로 분석하여 보면, 시화호 내에서의 저서동물 군집의 천이는 두 방향으로 진행되었음을 알 수 있다 (Fig. 13). 첫번째는 저서동물이 완전히 사라진 무생물지역의 출현이다. 무생물 지역은 시화방조제 완공 후 첫번째 여름부터 본격적으로 나타나기 시작했다 (KORDI, 1995). 그러나 이런 무생물 지역의 분포 양상은 방조제 건설 완공 후 첫 해인 1994년과 현재와는 다른 양상을 보이고 있다. 1994년의 무생물 지역은 사리 내만의 가장 안쪽과 반월공단 앞쪽의 정점들에 국한 되었으나, 현재에는 방조제 쪽의 수심 5m 이심의 넓은 지역이 무생물 지역으로 변하여 그 범위가 확산되었다 (SNU, 1997). 따

라서 현재 저서동물은 시화호 내에서도 안쪽과 바깥쪽 수심이 낮은 지역에 국한하여 분포하는 것으로 나타났다. 결과적으로 시화호 형성 후 1994년 1년간은 빈번한 수문의 개방으로 외해수와외의 해수교환이 어느 정도 이루어졌으나, 그 영향이 안쪽까지는 미치지 못하여 안쪽부터 유기물 오염으로 인한 용존산소의 결핍으로 인해 무생물구역이 형성되기 시작한 것으로 보인다. 또한 현재의 무생물 구역은 해수의 유입을 완전히 차단한 1995년부터 담수화가 진행되기 시작하여 방조제의 끝막이 공사 후 저층에 갇혀있던 잔존해수와외의 밀도차에 의한 밀도성층(密度成層)의 형성으로 저층과 표층간의 혼합이 이루어지지 않은 상태에서 막대한 양의 유기물 유입으로 인한 저층의 무산소화(無酸素化)에 의한 결과이며, 이런 상태는 1996년에 들어서면서 악화되는 수질을 개선하기 위해 오염된 많은 양의 호수물을 외곽으로 배출하고 해수를 유입하는 과정을 반복하면서도 계속 유지되는 것으로 생각된다.

두번째는 저서동물 군집이 계속 유지되고 있는 정점인 2L과 4L을 포함하는 방조제 근처의 낮은 수심에서의 저서동물 군집의 천이이다 (Fig. 12). 1994년 1월 방조제 물막이 공사 완료 후 3월까지의 저서동물 군집의 우점종의 조성에 있어서 1993년의 조성과는 큰 차이를 보이지 않았으며, 1994년 6월과 12월 사이에 우점종의 변화와 함께 종수와 다양도의 감소가 발생했다. 시화호 완공 후 1년간은 빈번한 수문의 개방으로 저서동물 군집이 계속 유지되는 방조제 근처의 지역에서 염분도와 용존산소의 급격한 감소는 발생하지 않았으나, 외곽 해역과의 해수

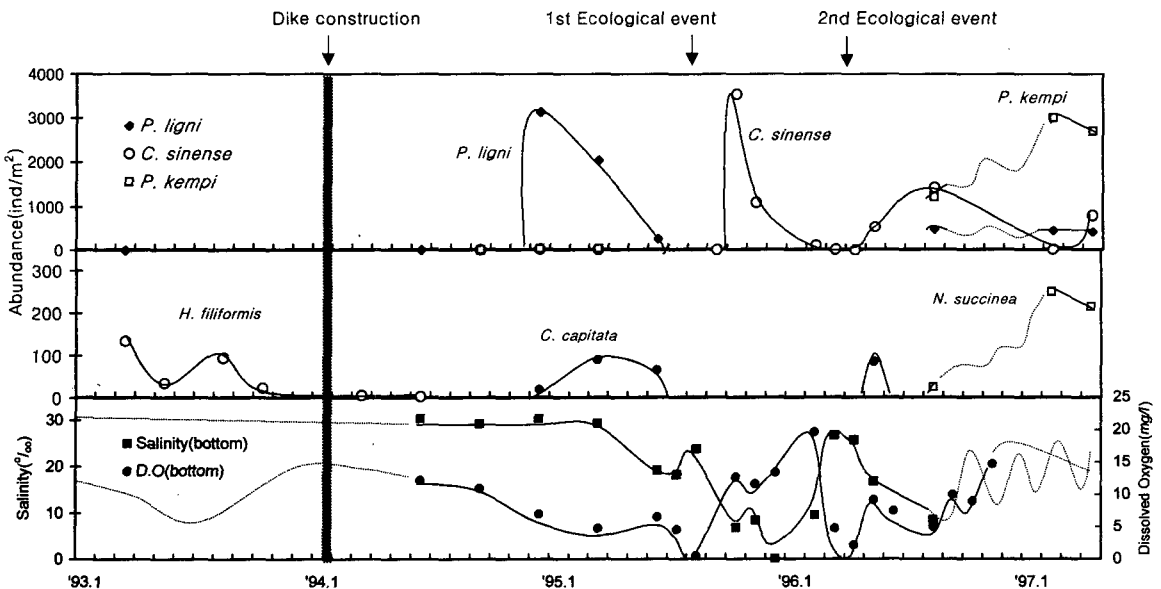


Fig. 12. Faunal succession on the basis of the densities of six opportunistic species in relation to salinity and dissolved oxygen fluctuation of bottom water in the Shihwa Lake. The shaded areas correspond to the ecological events. (Adapted from various sources)

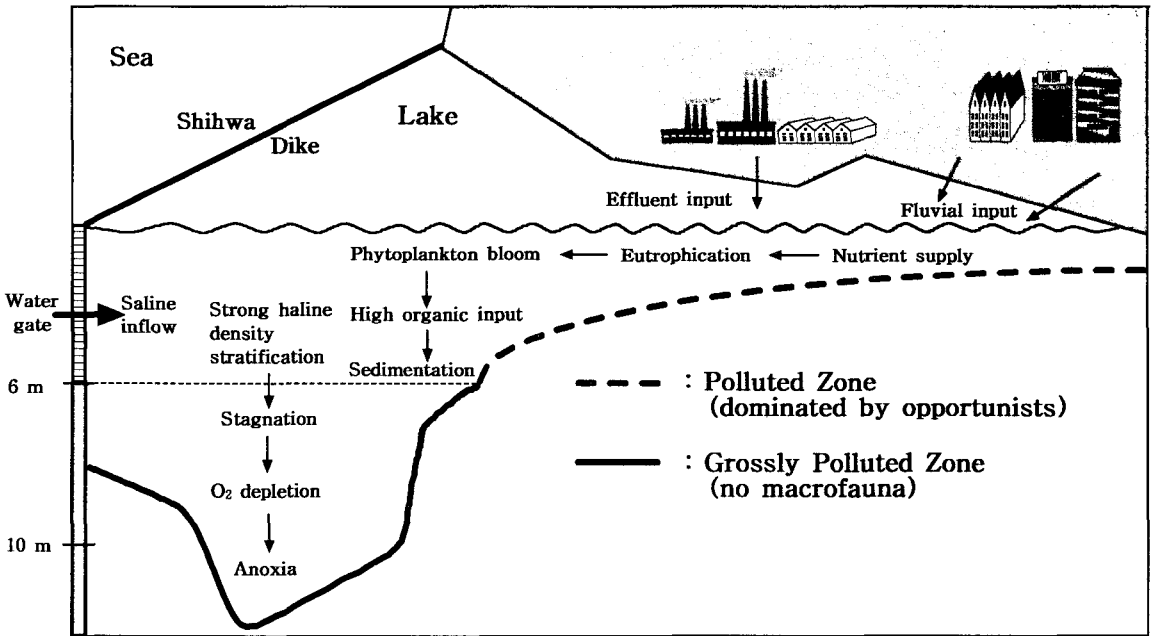


Fig. 13. Schematic representation of the various environmental factors affecting the distribution and abundance of macrobenthos in the Shihwa Lake. (Adapted from various sources)

교환이 불량해져 유기물 오염이 가중되는 상태였으며, 이로 인해 하계부터 저서동물 군집의 천이가 시작된 것으로 보인다. 그 후 1994년 12월 동계임에도 불구하고 하계에 비해 용존산소가 감소하는 현상이 나타나기 시작하였으며, 이 때 *Polydora ligni*가 급증하여 3,000 개체/m² 이상의 높은 밀도로 우점하는 군집이 형성되었다. 그 후 8개월간은 비교적 낮은 용존산소량이 지속되었으며, 이 기간동안에 *P. ligni*와 *Capitella capitata*가 우점하는 군집이 유지되었으며, *P. ligni*와 *C. capitata* 군집은 염분도가 감소하는 시기에 사라졌다. 그 후 1995년 8월과 9월에 지속적인 염분도의 감소가 진행되었으며, 용존산소도 또한 감소하여 8월에는 무산소에 가까운 환경으로 변화하였다. 이 두달간은 거의 생물이 출현하지 않았으며, 이 기간을 거치면서 미소 갑각류에 속하는 단각류의 일종인 *Corophium sinense* 으로의 우점종 천이가 발생하였다. *C. sinense*는 이후 4개월간 전체의 95% 이상을 차지하는 최우점종이었으며, 이 시기 동안의 염분도는 10‰ 이하의 낮은 염분도가 계속 유지되었으나, 저층수의 용존산소량은 다른 시기에 비해 높은 농도를 보였다. 그러나 시화호의 수질을 개선하기 위해 1996년 2월에 대규모의 해수 유입이 있었으며, 이로 인해 시화호 내의 염분도는 갑자기 증가하였으며, 저층수의 용존산소량은 감소하는 1995년의 7~8월과 같은 환경변화가 또 다시 발생하였다. 이처럼 급격한 환경의 변화를 보인 1996년 3월과 4월에는 *C. sinense*의 밀도가 급감하여 1995년의 8~9월과 같은 생물이 거의 없는 상태가 반복되었으며 이런 상태를 거

친후 *P. ligni*와 *C. capitata*로의 천이가 다시 일어났다. 그 후 시화호의 수질을 개선하기 위해 다시 1996년 4월부터 대규모의 방류 및 해수의 유입이 실시되었다. 그러나 1996년 5월 이후로는 연속적인 자료가 없으나, 1996년 8월, 1997년 2월과 4월의 자료를 통하여 추정해 보면, 이 1996년 8월 부터는 전에 우점종으로 나타나지 않았던 *Pseudopolydora kempfi*가 최우점하며, *C. sinense*, *P. ligni*, *Neanthes succinea*가 높은 밀도로 출현함으로써 우점종의 조성이 좀 더 다양화된 또 다른 우점종의 조성을 보여주고 있으며, 특히 새로이 우점종으로 나타난 *P. kempfi*와 *N. succinea*는 그 밀도가 점점 증가하는 추세에 있다. 따라서 1996년 봄부터 행해진 빈번한 대규모의 해수 유출입이 시화호 내 저서동물 군집에 직접적인 영향을 준 것으로 보인다.

이와 같은 결과로 미루어 볼 때 방조제가 건설되어 호수가 형성된 후 기회종에 의한 오염군집이 형성되기까지는 1년 정도의 기간이 소요되었으며, 이 기간동안 저서동물의 출현종수는 서서히 감소하였다 (Lee and Cha, 1997). Lee and Cha (1997)는 이 시기의 출현종수의 감소를 방조제의 축조로 인한 세립퇴적물의 증가가 그 직접적인 원인으로 추정하였다. 그러나 방조제 건설 후 시화호 내에서는 반월 및 시화 공단의 오폐수와 인근 지천으로부터 흘러들어오는 오염물질의 농도가 높은 담수가 표층수를 부영양화 시키며 (Park et al., 1997), 이로 인해 표층에서는 식물플랑크톤이 대증식을 일으켜 그 현존량은 1993년에 비해 500배 정도 증가하였으며, 이런 식

물플랑크톤의 대증식은 방조제 건설 후 시화호 내에서 1년 내내 계속 발생한다 (Lee, 1997). 이렇게 생성된 유기 입자는 곧 저층에 퇴적되며, 특히 여름철에는 밀도성층의 형성으로 인하여 저층수의 무산소화 및 부영양화를 촉진시킨다. 그 결과 정점에 따라서는 무생물구역 (azoic area)이나 일부 오염지표종만이 서식하면서 극도로 높은 밀도 분포를 보이는 오염역 (汚染域, Polluted Zone)이 나타나는 이른바 전형적인 유기물 오염에 의한 군집의 천이현상으로 보는 것이 보다 더 적합한 설명으로 생각된다.

한편, 하나 내지 두종으로 구성된 기회종 군집은 전반적으로 5~7 개월간 유지되었으며, 군집의 천이는 염분도와 저층 용존산소량의 변화와 연관이 있는 것으로 나타났다. 비교적 염분도가 높고 용존산소량이 낮은 시기에는 *P. ligna*와 *C. capitata*가, 그리고 낮은 염분도가 유지되고 용존산소량이 높은 시기에는 *C. sinense*의 군집이 형성되었다. 또한 군집의 천이는 염분도 변화 후 2개월 정도 거의 생물이 출현하지 않는 빈생물시기 (貧生物時期)를 거친 후 다른 기회종으로의 천이가 일어남을 알 수 있다. 1994년 4월부터는 빈번하게 대규모의 외해수와 교환이 이루어졌으며 이 영향으로 인해 1996년 8월 이후의 군집들은 보다 복잡한 우점종의 군집구조를 나타내었던 것으로 생각된다.

2. 시화방조제 건설이 시화호 외곽해역의 군집에 미친 영향

시화방조제 건설이 주변해역의 저서동물군집에 미친 영향을 알아보기 위해 방조제 공사중이던 1993년의 조사 정점 중 집괴분석 및 순위빈도곡선에서 이미 심하게 오염된 군집으로 드러난 정점 1을 제외한 1993년 군집과 방조제 외곽해역의 1996/97년 군집을 비교하였다.

시화 방조제가 공사중이던 1993년 군집과 완공 후 3년 정도가 지난 1996/97년 군집과의 가장 큰 차이는 종수와 밀도의 증가이다. 평균 출현종수는 1993년에 비해 2.6배 정도, 평균밀도는 7배 정도 증가하였다. 1993년 1년 동안 큰 변화없이 일정한 종수와 밀도가 3년 후에 매우 큰 차이를 보임으로 이와같은 종수와 밀도의 변화가 언제 일어났으며, 어떻게 변화하였는지를 알아보기 위해 인천연안역의 저서동물 군집을 조사한 Koh (1996)의 연구정점 중 본 연구지역과 일치하는 5개 정점의 계절별 종수와 밀도의 변화를 비교하였다 (Fig. 14). 그 결과 정점 수와 위치가 본 연구와 다소 차이가 있으나 종수와 밀도는 하계인 1994년 8월에 급증하였으며, 이 시기부터 밀도의 증가 폭이 종수의 증가 폭을 능가하였으며, 동계인 1995년 2월에 또한번의 밀도 급증현상이 나타났다. 결국 시화호 외곽해역은 방조제 완공으로 시화만과의 해수소통이 차단된 후 최소한 6개월 정도가 지난 후인 1994년 8월경부터 밀도와 종수의 증가현상이 나타났으며, 밀도와 종수가 현재와 유사한 수준으로 도달하는 데는 1년 정도 걸렸음을 알 수 있다. 이 시기에 다양도 지수도 또한 증가 하였으나 상대적으로 균등도 지수는 감소하였다. 이처럼 시화방조제 완공 후 주변 해역 저서동물군집에서 밀도 및 종수의 급증현상은 방조제 건설이 방조제 내측 뿐만 아니라 외해역에도 크게 영향을 주고 있음을 보여주는 결과이다.

그렇다면, 방조제 완공 후 종수와 밀도, 그리고 다양도 지수의 증가가 의미하는 것은 무엇일까? 여기에서, 위에서 나타난 결과 그대로 방조제 건설 후 오히려 주변해역의 저서동물군집이 생산력이 높아지고 안정된 군집으로 변화하는 것인지, 아니면 이와는 반대로 불안정한 군집으로 변하고 있는가에 대한 문제가 제기된다. 이런 문제에 답하기 위해 다음과 같은 분석이 가능하다.

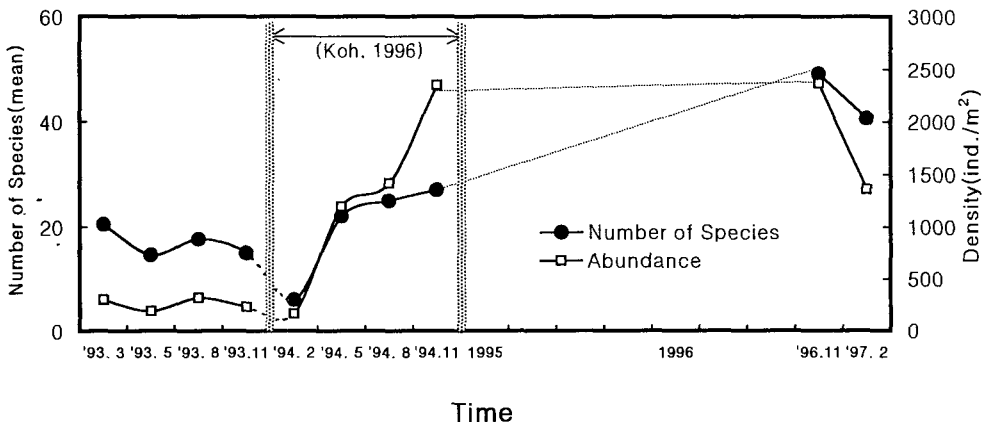


Fig. 14. Temporal variations in number of species and mean density outside the Shihwa Dike collected before and after the dike construction.

첫째, 시화호 내에서 군집의 변화와 오염의 정도를 파악 하는데 사용하여 군집의 상태를 잘 설명하는 것으로 나타난 순위-빈도 곡선을 1993년 군집과 1996/97년 군집의 상태를 비교하는데 적용하고, 군집간의 비교를 돕기 위해 이미 심하게 오염된 군집인 집피분석의 그룹 1을 함께 도시하였다 (Fig. 15). 순위-빈도 곡선을 그린 결과 그룹 1처럼 명확한 차이를 보이지는 않지만 1996/97년 군집인 그룹 3의 기울기가 1993년 군집인 그룹 2에 비해 가파르게 나타나 방조제 완공 후 종수 및 밀도는 증가하였지만 군집의 상태는 방조제 완공전에 비해 불안정한 상태로 변화하였음을 보여주고 있다. 둘째는 Long and Chapman (1985)과 Lim (1993)이 제시한 군집 내에서 다모류와 연체동물이 차지하는 비율, 즉 오염된 환경에서는 다모류와 연체동물의 점유율이 높은 반면 갑각류와 극피동물의 점유율이 줄어든다는 결과와 비교했을 때, 본 조사에서도 1993년 군집에서는 다모류와 연체동물이 75.9%, 갑각류가 20.7%를 차지하였으나, 1996~97 군집에서는 각각 92.0%와 5.6%로 다모류와 연체동물의 비가 증가한 반면 갑각류는 감소한 Long and Chapman (1985)의 결과와 잘 일치한다. 셋째로는 우점종의 조성 및 밀도 변화로서

1993년 군집에 비해 밀도가 큰폭으로 증가한 *Chaetozone setosa*, *Heteromastus filiformis*, *Theora fragilis*는 이미 기회종으로 잘 알려져 있으며, 유기물오염의 대표적인 지표종으로 나타나는 종들이다 (Kikuchi and Tanaka, 1976; Hilly, 1983; Jung et al., 1995; Lim et al., 1995). 넷째, 다양도 지수는 증가하였으나 반대로 균등도 지수는 감소하였는데, 여기에서 이것의 생태학적 의미를 살펴볼 필요가 있다. 균등도 지수는 정상 해역의 전형적인 저서동물 군집이나 (Gray, 1981), 또 유기물 오염의 구배를 나타내는 해역에서도 일반적으로 다양도 지수와 유사한 경향성을 나타내는 것으로 보고 되고 있다 (Pearson and Rosenberg, 1978). 그러나 본 조사에서 1993년도와 96/97년도의 다양성지수와 균등도지수의 변동패턴을 비교해보면 (Fig. 8), 1993년도에는 다양도 지수에 비해 상대적으로 높았으나 96/97년도에는 역전 현상이 나타났다. 이것은 96/97년의 경우 다양도 지수는 종수의 증가에 기인하여 증가하였으나, 균등도 지수는 오히려 감소하고 있는데 이는 우점종의 우점비율이 상대적으로 방조제 건설 전보다 그 후에 대체로 높아졌다는 증거로서 이는 96/97년도의 군집구조에 중대한 변화가 발생하였음을 간접적으로 나타내 주는 증거가 된다고 하겠다.

뿐만 아니라, Pearson and Rosenberg (1978) 및 Pearson and Stanley (1979)가 영국의 스코틀랜드 Creram 지역에서 유기물 오염과 저서동물 군집과의 관계를 조사한 결과에 의하면 퇴적물 속의 유기물 함량이 증가하면서 종수, 개체수, 및 생체량이 일정 수준까지 증가하다가 급감하는 경향을 보인다고 하였으며 이것은 해역에 따라 정도의 차이는 있으나 일반적인 현상으로 설명하고 있다. 따라서 본 조사지역의 방조제 외곽 해역에서도 위와같은 종수, 개체수, 그리고 생체량 등과 같은 생태학적 제지수는 방조제 건설 후 시화호 내만에서 보았던 것처럼 유기물 함량의 증가가 어느 한계점에 이르면 급격히 감소할 것으로 예측할 수 있으며, 따라서 현상태의 종수와 밀도의 증가는 그 전단계인 부영양화에 따른 한 단계를 거치는 과정중에 있다고 판단된다. 특히 최근에는 방조제 외곽지역까지도 방조제 바로 맞은 편 해역에 LNG 인수기지의 건설로 독이 형성되어 (Fig. 1) 이 지역은 지형학적으로 인공적인 반폐쇄성 내만 해역으로 바뀌고 있어 이러한 지형학적 환경조건은 앞으로 이 지역의 저서동물 군집에도 지대한 영향을 미칠것으로 판단된다.

이와 같은 결과를 볼 때 시화 방조제 건설은 외곽해역의 저서동물 군집에도 영향을 주었으며, 특히 방조제가 완공된 후 3년이 지난 현재 평균 출현종수에서는 2.6배, 평균 밀도에서는 7배에 가까운 대폭적인 증가가 관찰되었는데 이는 이 지역 저서생물 군집이 부영양화 또는

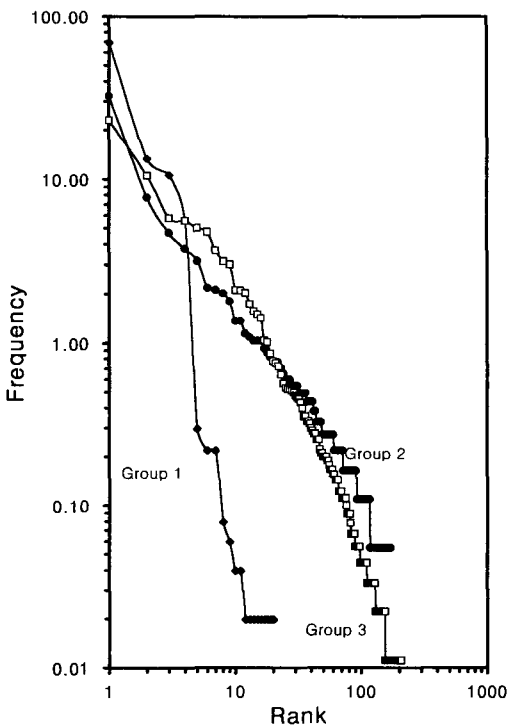


Fig. 15. Rank-frequency diagram of macrobenthos at each group obtained from the cluster analysis for total samples collected before and after the dike construction.

과영양화의 단계를 거치는 과정 중에 있다는 증거라고 생각된다.

요 약

본 연구는 시화방조제 건설로 인하여 외해수와의 순환이 차단된 후 유기물오염과 담수화가 진행된 시화호 내에서 방조제 완공 전과 후의 저서동물 군집을 비교함으로써 시화호 내에서 저서동물군집이 어떤 천이과정을 거쳤는지, 그리고 군집의 천이를 일으킨 주된 요인은 무엇인지, 또한 방조제 건설 전의 시화지구 해역 저서동물 군집과 건설 후 방조제 외곽해역의 저서동물 군집을 비교함으로써 방조제 건설이 주변 해역에 미친 영향을 파악하는데 그 목적이 있다.

방조제 완공 후 시화호 내에서의 저서동물 군집의 천이는 두 방향으로 진행되었다. 첫번째는 유기물 유입의 증가에 따른 저층수의 무산소 및 빈산소 환경의 형성으로 인해 저서동물이 완전히 사라진 중오염역 (Grossly Polluted Zone)의 출현이다. 두번째는 저서동물 군집이 계속 유지되고 있는 방조제 근처의 낮은 수심에서의 기회종으로 구성된 오염역 (Polluted Zone)으로의 저서동물 군집의 천이이다. 이런 군집의 천이는 방조제의 배수갑문을 통한 빈번한 해수 유입으로 인하여 저층수의 염분도와 용존산소량의 변화에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 시화방조제 건설은 주변 외곽지역의 저서동물 군집에도 영향을 미쳐 건설 전보다 후에 평균 출현 종수는 2.6배, 밀도는 7배나 증가하는 전형적인 부영양화의 특징적 현상을 보임으로서 방조제 외곽해역의 저서동물 군집 또한 불안정한 상태로 변하고 있음을 알 수 있다.

사 사

본 연구의 일부는 한국수자원공사의 “시화공업단지 조성 사업 환경관리 조사(1993, 1997)”의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Anger, K. 1975. On the influence of sewage pollution on inshore benthic communities in the south Kiel Bay: 2 Quantitative studies on community structure. *Helgoländer Wiss. Meeresunters*, 27, 408~438.
- Bagge, P. 1969. Effects of pollution on estuarine ecosystem. I. Effects of effluents from wood processing industries on the hydrography, bottom and fauna of saltkällefjord (W. Sweden). *Merentutkimuslait. Julk. Havsforskningsinst. Skr.*, 228, 3~118.
- Bellan, G. 1967. Pollution et peuplements benthiques sur substrat meuble dans la région de Marseille. I. Le secteur de Cortiou. *Rev. Int. Oceanogr. Med.*, 6~7, 53~87.
- Frontier, S. 1985. Diversity and structure in aquatic ecosystems. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 23, 253~312.
- Gray, J.S. 1976. The fauna of the polluted River Tees Estuary. *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, 4, 653~676.
- Gray, J.S., 1981. The ecology of marine sediments. Cambridge University Press, London, 185pp.
- Hilly, C. 1983. Macrozoobenthic recolonization after dredging in a sandy mud area of the Bay of Brest enriched by organic matter. *Oceanol. Acta*, In : Proceeding 17th European Marine Biology Symposium, 1982, 113~120.
- Hong, J.S., I.S. Seo, J.W. Yoo and R.H. Jung. 1994. Soft-bottom benthic communities in North Port, Incheon, Korea. *Nature Conservation*, 88, 34~50. (In Korean)
- Hong, S.Y., U.J. Han and E.I. Park. 1982. Marine macrobenthos distribution and the substrate condition of Suyeong Bay. *Publ. Inst. Mar. Sci. Nat. Fish. Unvi. Busan*, 14, 1~21.
- Jung, R.H., J.S. Hong and J.H. Lee. 1995. Temporal changes of community structure in two subtidal polychaete assemblages in Kwang-yang Bay, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30 (5), 390~402 (in Korean).
- Jung, R.H., J.S. Hong and J.H. Lee. 1997. Spatial and seasonal patterns of polychaete community during the reclamation and dredging activities for the construction of the Pohang Steel Mill Company in Kwangyang Bay, Korea. *Korea. Bull. Korean fish. Soc.*, (accepted) (in Korean)
- Kikuchi, T. and M. Tanaka. 1976. Some aspects on the ecology of a short-lived semelid bivalve, *Theora lata* (Hinds) with special reference to its opportunistic life history. *Physiol. Ecol. Japan*, 17, 261~271.
- Koh, B.S. 1997. A study on the marine environmental assessment based on the benthic macrofaunal community in the coastal area of Incheon, Korea. M.S. Thesis, Inha Univ., 86pp. (in Korean).
- KORDI, 1981. Report on water quality monitoring in coastal areas of Banweol, Ulsan, Changwon and Yeochon. Korea Ocean Research and Development Institute, 302 pp.
- KORDI, 1993. Marine environment assessment based on the benthic faunal communities. Korea Ocean Research and Development Institute, 95pp. (in Korean).
- KORDI, 1995. Management technique for marine environmental protection - Marine environmental assessment based on the benthic faunal communities. Korea Ocean Research and Development Institute, 339pp.

- (in Korean).
- KORDI, 1997. A study on environmental changes in Shihwa lake. Korea Ocean Research and Development Institute, 169pp. (in Korean).
- KWRC RDC, 1995. Report on the protection of water quality in the Shihwa lake. Korea Water Resources Corporation & Rural Development Corporation, 614pp (in Korean).
- Lee, E.H. 1997. The study on the phytoplankton bloom and primary productivity in the Shihwa lake and adjacent coastal area. M.S. Thesis, Inha Univ., 53pp. (in Korean).
- Lee, J.H. and J.H. Cha. 1997. A study of ecological succession of macrobenthic community in an artificial lake of Shihwa on the west coast of Korea: an assessment of ecological impact by embankment. *Ocean Res.*, 19 (1), 1~12
- Lim, H.S. 1993. Ecology on the macrozoobenthos in Chinhae Bay of Korea. Ph.D. Thesis, Nat'l. Fish. Univ. Pusan, 311pp. (in Korean).
- Lim, H.S. and J.S. Hong, 1994. An environmental impact assessment based on the benthic macrofauna in Chinhae Bay, Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 27 (5), 659~672 (in Korean)
- Lim, H.S., J.S. Hong, and J.G. Je, 1995. Abundance and distribution pattern of the smelid bivalve, *Theora fragilis* A. Adams in Chinhae Bay, Korea. *Korean J. Malacol.*, 11 (1), 21~34. (In Korean)
- Long, E.R, and P.M. Chapman, 1985. A sediment quality triad. *Mar. Poll. Bull.*, 16 (10), 405~415.
- Ludwig, J.A. and J.F. Reynolds. 1988. *Statistical Ecology: A primer on methods and computing.* John Wiley & Sons, Inc., New York, 337pp.
- Park, Y.C., J.K. Park, M.W. Han, S.K. Son, M.K. Kim, and S. H. Hui. 1997. Biochemical study of dissolved organic and inorganic compounds under oxic/anoxic environment in the Shihwa Lake. *The Sea*, in press. (in Korean)
- Pearson, T.H. and R. Rosenberg. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 16, 229~311.
- Pearson, T. H. and S.O. Stanley. 1979. Comparative measurement of the redox potential of marine sediments as a rapid means of assessing the effect of organic pollution. *Mar. Biol.*, 53, 371~379.
- Pielou, E. C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *T. Theoret. Biol.*, 13, 131~144.
- Reish, D. J. 1959. An ecological study of pollution in Los Angeles-Long Beach Harbors, California. *Occas. Pap., Allan Hancock Foundation*, 22, 1~119
- Reish, D. J. 1971. Effect of pollution abatement in Los Angeles harbours. *Mar. Poll. Bull.*, 2 (5), 71~74
- Reish, D. J. and H. A. Winter. 1954. The ecology of Alamitos Bay, California, with special reference to pollution. *Calif. Fish and Game*, 40, 105~121
- Tulki, P. 1968. Effect of pollution on the benthos of Gothenberg. *Helgolander wiss. Meeresunters.*, Bd 17, S., 209~215
- SNU. 1997. Marine environmental monitoring and assessment technology - Methodologies for the quality assessment of benthic environment of Korean coastal waters. Seoul National University, 584pp. (in Korean).
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. *The Mathematical Theory of Communication.* Univ. of Illinois Press, Urbana, 125pp.
- Wolff, W.J., 1973. The estuary as a habitat. An analysis of data on the soft-bottom macrofauna of the estuarine area of the rivers Rhine, Meuse, and Scheldt. *Zool. Verh., Leiden*, Bd 126, S., 242pp.
- Watling, L. 1975. Analysis of structural variations in a shallow estuarine deposit-feeding community. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 19, 275~313

1997년 8월 7일 접수

1997년 9월 8일 수리