

시화 방조제 건설 이후 시화호 다모류의 종 조성 및 서식밀도 변화

류종성 · 최진우¹ · 강성길 · 고철환 · 허성희²
서울대학교 해양학과, ¹한국해양연구소 해양생물연구부, ²부경대학교 해양학과

Temporal and Spatial Changes in the Species Composition and Abundance of Benthic Polychaetes after the Construction of Shihwa Dike (West Coast of Korea)

JONG-SEONG RYU, JIN-WOO CHOI¹, SEONG-GIL KANG,
CHUL-HWAN KOH AND SUNG-HOI HUH²

Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
¹Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea
²Department of Oceanography, Pukyung University, Pusan 608-737, Korea

시화 방조제 건설 이후, 1994년 3월부터 1996년 8월까지 시화호의 저서 다모류의 종 조성 및 서식 밀도, 우점종의 시공간적 변화를 조사하였다. 1994년 3월, 6월, 9월 12월, 1995년 3월, 10월 그리고 1996년 2월, 8월에 총 8회에 걸쳐 입구면적 0.1 m²인 반빈 채니기를 이용하여 크기 1 mm 이상인 저서동물을 채집하였다. 저서동물중 출현 종수의 59%와 서식 밀도의 80%를 점하는 저서 다모류는 조사 시기 동안 1~22종으로 총 43종이 출현하였으며, 종수는 시간이 지날수록 계속 감소하는 경향이 뚜렷하였다. 다모류의 전체 평균 서식밀도는 794±1,275 indiv. · m⁻²이었으며, 조사 시기별로 심한 변화를 보였다. 이는 총 서식 밀도의 83%를 점하는 오염 지시종인 *Polydora ligni*의 번식과 소멸에 의한 것이다. 역시 오염 지시종으로 알려진 *Pseudopolydora kempfi*가 평균 31 indiv. · m⁻²로, *Capitella capitata*가 평균 23 indiv. · m⁻²로 우점하였다. 종다양성(*H'*) 및 우점도 지수(*D*) 등 생태지수의 시기별 변화 역시 시화호에 서식하는 다모류의 종류가 감소하고 몇몇 종에 의해 점차 우점함을 반영하였다. 시화호 안쪽부터 방조제 부근의 지역으로 무생물대가 점차 확산하는 경향이 있었다. 출현 종수의 감소, 오염 지시종의 일시적인 대량 번식과 소멸 그리고 무생물대의 존재는 시화호의 저서환경이 심하게 오염되었음을 시사한다.

The present study was carried out to investigate the temporal and spatial changes in species composition and abundance of polychaetes in Lake Shihwa. Macrobenthic fauna were collected from eight sampling surveys performed in March, June, September and December of 1994, March and October of 1995, February and August of 1996, using a modified van Veen grab with 0.1 m² coverage area. Polychaete worms, the most abundant macrofaunal group, comprised of 1~22 species at each investigation; number of species continuously decreased during the survey period. The mean density of polychaete was 794±1,275 indiv. · m⁻² and showed a large fluctuation over time. The variation in abundance was mainly coupled with the domination of *Polydora ligni* occupying 83% in total density. The next dominant species were *Pseudopolydora kempfi* (mean density of 31 indiv. · m⁻²) and *Capitella capitata* (mean density of 23 indiv. · m⁻²). Abundant polychaetes in Lake Shihwa are known to be tolerant to sediment pollution. Ecological indices such as diversity (*H'*) and dominance (*D*) also indicated that the number of species significantly decreased and a few species predominated in Lake Shihwa after the dike construction. The azoic zone were extended from the upper reach of Lake Shihwa to the vicinity of the dike over time. The reduced number of species, predominance of pollution indicator species and development of an azoic zone reflect severe deterioration of benthic environments in Lake Shihwa.

서 론

행정 구역상 경기도 안산시, 시흥시, 화성군, 용진군에 접해 있는 시화호는 시화 간척사업의 일환으로 1994년 2월에 완공된 12.

4 km의 방조제에 의해 경기만 외해와 격리되어 조성된 인공 호수이다. 1987년부터 시작된 시화 간척사업은 경기만 안쪽, 즉 반월만의 갯벌 및 천해역 등 약 200 km²를 간척하여 농지 및 공단 조성, 도시개발을 하고자 계획한 대규모 간척사업이며, 시화호는

농공단지에 공급될 용수확보를 위해 호수의 면적이 약 60 km²인 대규모 담수호로 조성될 계획이었다. 그러나 방조제 공사가 완료됨에 따라 해수의 교환이 차단되고 인근지역으로부터 유입된 제반 오염물질이 호수에 축적되어 시화호의 오염현상이 진전된 후 이에 대한 대책이 요구되고 있다(한국수자원공사, 1995).

1994년 방조제 완공으로 시화호가 형성된 이후, 급속하게 진행된 시화호내 오염현상을 밝히고자 하는 지화학적 및 생물학적 조사가 많이 수행되었다. 즉, 시화호내 용존 유, 무기화합물의 생지화학적 순환(박 등, 1997; 한 등, 1997), 식물 및 동물플랑크톤 군집(박과 허, 1997; 최 등, 1997), 어류 군집(이 등, 1997) 그리고 저서동물 군집(홍 등, 1997; Lee and Cha, 1997) 등에 관한 연구가 이루어졌다.

박 등(1997)에 의하면, 최근 배수갑문을 통해 외해와의 해수교환을 시도함에도 배수갑문의 턱 보다 깊은 6 m 이심에 갖혀 있는 고염 저층수로 인해 시화호 수괴는 뚜렷한 2층의 밀도성층이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 이로 인해 시화호는 수심 6 m 부근의 밀도 경사면을 기준으로 하여 연중 뚜렷한 산화, 환원 환경으로 구분되어 있다. 저서동물 군집에 관한 연구에서 홍 등(1997)은 방조제 건설 전후의 저서동물 군집을 비교함으로써 시화호내에서 저서동물군집의 천이과정과 천이 유발요인을 분석하였다. 또한 시화호 외곽 해역과의 군집 비교를 통해서 방조제 건설로 인한 주변 해역의 생물상 변화 등에 관해서도 기술하였다. 본 연구에서도 시화호내 저서환경의 변화를 알아보고자 방조제 건설이 완료된 직후인 1994년 3월부터 1996년 8월까지 저서 동물중 우점 분류군인 저서 다모류를 대상으로 하여 종 조성 및 서식 밀도, 우점종의 시공간적 변화를 추적하고자 하였다.

재료 및 방법

1994년 3월부터 1996년 8월까지 시화호 내에서 8회에 걸쳐 다모류를 비롯한 저서동물을 채집하였다(Fig. 1). 1994년 3월, 6월, 9월, 12월 그리고 1995년 3월까지 5회 조사시에는 10개 정점(정점 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 15, 21, 22), 1995년 10월에는 4개 정점(정점 6, 9, 21, 22), 1996년 2월에는 5개 정점(정점 9, 15, 21, 22, 23), 그리고 1996년 8월에는 20개 정점(정점 6~정점 25)에서 반번 채니기(van Veen grab, 입구면적: 0.1 m²)를 사용하여 퇴적물 표본을 채취하였다.

조사 정점의 위치가 달라진 것은 시기에 따라 수심의 변화 및 수면의 결빙 등의 이유로 조사선의 접근이 용이하지 않았기 때문이다. 조사 시기에 따라 정점당 반복 채집횟수 역시 다르다. 즉, 1994년 3월부터 1995년 3월까지의 5회 조사 동안에는 정점당 3회, 1995년 10월과 1996년 8월에는 정점당 2회씩 수행하였으나, 대부분의 수면이 결빙된 1996년 2월에는 현장 조사시 생물이 거의 채집되지 않아 이를 확인하기 위해 정점당 8회씩 반복 채집하였다. 1996년 2월의 경우 반복수가 8회로 타 시기의 2~3회에 비해 많아서 채집횟수의 차이에 의한 오차가 발생할 수 있다. 그러나 이 시기에는 다모류가 거의 출현하지 않았기에 일반적으로 채집횟수를 늘릴 경우 출현 종수가 늘어나는 오차(Loehle, 1990)는 크지 않을 것이라 생각된다.

선상으로 인양된 퇴적물은 망목 크기 1.0 mm인 체를 사용하

여 걸렀으며, 체에 걸린 저서동물은 10% 중성 포르말린으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 채집된 저서동물을 동물군별로 구분하여 계수하였고, 다모류는 종 수준까지 동정한 후에 계수하였다. 다모류의 서식 밀도는 1 m²당 출현 개체수(단위: indiv. · m²)로 환산하여 제시하였다.

다모류 군집의 특성을 설명하는 생태지수로 종다양성지수(H'), 종풍부도지수(R), 균등도지수(J), 우점도지수(D)를 정점별로 계산하였다. 사용한 계산식은, $H' = -\sum[(P_i) \times \ln(P_i)]$ (Shannon and Wiener, 1963), $R = (S-1)/\ln(N)$ (Margalef, 1958), $J = H'/\ln(S)$ (Pielou, 1966), $D = 100 \times (n_1 + n_2)/N$ (McNaughton, 1968)이다. 여기서 S는 총 출현 종수, N은 총 출현 개체수, P_i는 각 종이 개체수에 있어서 차지하는 비율, n₁과 n₂는 우점하는 상위 두 종의 개체수를 의미한다. 1~2종의 다모류가 소수 출현한 1995년 10월과 1996년 2월의 경우에는 생태지수를 계산하지 않았다.

결 과

조사기간 동안 8회에 걸쳐 채집된 저서동물의 종류는 총 73종이었으며, 이들의 평균 서식밀도는 1 m²당 995개체이었다(Table 1). 이중 다모류는 가장 우점하는 동물군으로서, 출현 종류수는 43종(58.9%), 평균 서식밀도는 794 ± 1,275 indiv. · m² (79.8%)로 나타났다. 다음으로는 갑각류가 전체 출현종류의 17.8%, 평균 서식밀도의 16.4%를 점하였으며, 기타 연체동물, 극피동물 등이 소수 출현하였다.

시화호 내에서 출현한 저서동물의 종수와 서식 밀도를 시기별로 비교해 보면, 전체적으로 시간이 지남에 따라 저서동물의 출현 종수는 급격히 감소하였다(Fig. 2). 동일한 정점 및 채집 횟수에 의해 조사된 1994년 3월부터 1995년 3월의 경우, 1994년 3월과 6월에는 총 35종과 41종의 저서동물이 출현하였으나, 1994년 9월과 12월, 1995년 3월에는 17~26종으로 감소하였다. 1995년 10월, 1996년 2월, 8월의 경우에는 5종 이하의 몇몇 종만이 채집되었다. 저서동물 중 가장 우점하는 다모류의 출현 종수 역시 시간이 지남에 따라 계속해서 감소하였다. 즉, 1994년에는 12~24종, 1995년 3월에는 9종, 10월에는 1종, 1996년에는 2~4종만이 채집되었다.

다모류를 비롯한 저서동물의 서식 밀도를 보면, 1994년 3월에서 9월까지의 45~82 indiv. · m²의 비교적 낮은 값을 보이다가 94년 12월부터 95년 10월까지의 2,200~3,600 indiv. · m²로 급격히 증가하였다(Fig. 2). 그러나 1996년 2월과 8월의 경우 400 indiv. · m² 이하로 다시 감소하였다.

가장 우점하는 다모류의 경우도 전체 저서동물과 비슷한 출현양상을 보였다. 즉, 시화 방조제가 건설된 직후인 1994년 3월에 1 m²당 수십 개체의 낮은 서식 밀도를 보이다가 1994년 겨울철 동안에 1 m²당 2,000개체 이상으로 급격히 증가하였다. 그러나 1995년 가을 및 겨울에는 다시 감소하여 1 indiv. · m² 이하의 극히 낮은 서식 밀도를 보였다.

출현 종수와 서식 밀도의 특성을 나타내는 생태지수의 시기별 변화는 Fig. 3과 같다. 종다양성, 종풍부도, 그리고 균등도 지수는 전반적으로 감소하는 추세를 보여 시화호내 저서 다모류의 생물상이 빈약해지고 있음을 반영하였다. 1995년 10월과

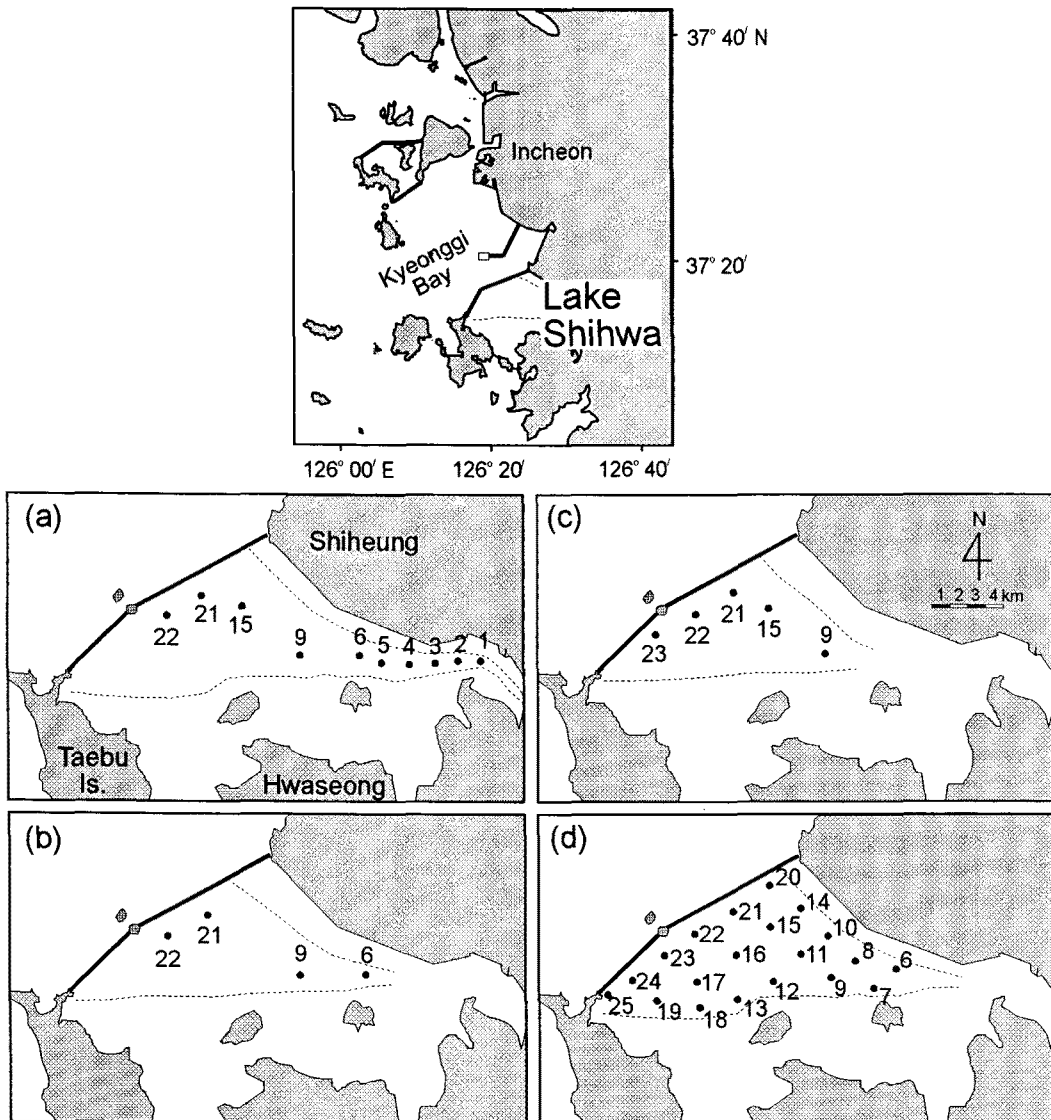


Fig. 1. Maps showing the sampling stations at surveys of (a) March, June, September, December 1994 and March 1995, (b) October 1995, (c) February 1996 and (d) August 1996 in Lake Shihwa, Kyeonggi Bay. Three replicates of sediment samples were collected from 10 stations on occasions of March, June, September, December 1994 and March 1995 (a). Two replicates of sediment samples were taken at four stations during survey of October 1995 (b). Eight replicates were collected from five stations in February 1996 (c). Two replicates were taken from 20 stations in August 1996 (d), using a modified van Veen grab with 0.1 m² coverage area. Dotted contour line indicates the shoreline of Lake Shihwa after the dike construction.

Table 1. Number of species and abundance (mean ± SD, indiv. · m⁻²) of major faunal groups collected in Lake Shihwa during March 1994–August 1996.

Taxon	No. of species		Density	
	Number	(%)	indiv. · m ⁻²	(%)
Polychaeta	43	(58.9)	793 ± 1275	(79.8)
Crustacea	13	(17.8)	163 ± 344	(16.4)
Mollusca	8	(11.0)	3 ± 5	(0.3)
Echinodermata	3	(4.1)	1 ± 1	(0.1)
Others	6	(8.2)	34 ± 79	(3.4)
Total	73	(100.0)	995 ± 1238	(100.0)

1996년 8월의 경우는 다모류가 거의 출현하지 않아 생태지수를 계산하지 않았다. 출현 개체수에서 가장 우점하는 두 종의 구성

비율로 계산한 우점도 지수의 경우, 1994년 이후로 전반적으로 증가하는 양상을 보였다. 이러한 생태지수의 시간에 따른 변화로부터 시화호에 서식하는 다모류의 종류가 감소하고 몇몇 종이 점차 우점함을 알 수 있다.

시기별로 우점하는 다모류의 종류와 서식 밀도를 Table 2에 나타냈다. 서식 밀도가 1 indiv. · m⁻² 이상인 다모류는 총 15종이었다. 평균적으로 가장 우점하는 다모류는 얼굴갯지렁이과 (Family Spionidae)에 속하는 *Polydora ligni*로서 전체 개체수의 83.1%인 659 indiv. · m⁻²의 서식 밀도를 보였다. 다음으로는 역시 얼굴갯지렁이과에 속하는 *Pseudopolydora kempfi*(31 indiv. · m⁻², 3.9%), 그리고 벼들가시갯지렁이과(Family Capitellidae)의 *Capitella capitata*(23 indiv. · m⁻², 2.9%), 고리갯지렁이과(Family Goniadidae)의 *Glycinde* sp.(11 indiv. · m⁻², 1.3%) 등이 우점하였

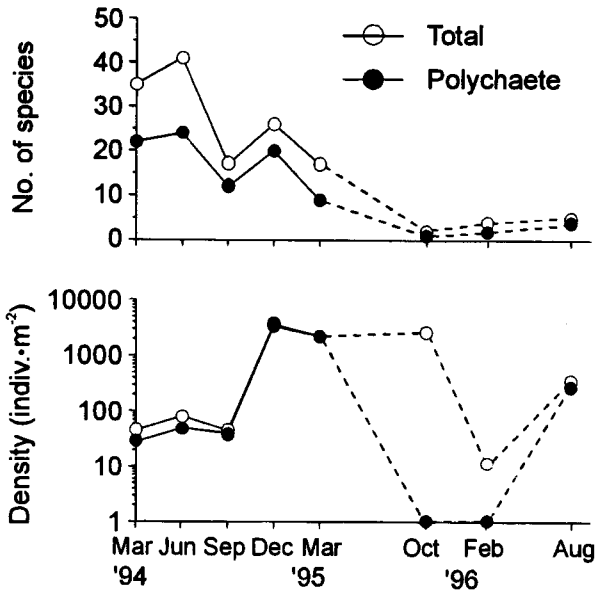


Fig. 2. Temporal changes in the number of species (upper) and density (lower) of total benthic macrofauna (○) and polychaetes (●) in Lake Shihwa from March 1994 to August 1996. Because of smaller number of stations investigated during October 1995 and February 1996, changes in the number of species and density in this period are plotted with dotted line.

다. 그 외에는 *Nephtys oligobranchia*, *Sigambra tentaculata*, *Mediomastus* sp., *Neanthes succinea*, *Prionospio japonicus* 등이 소수 출현하였다.

각 시기별로 보면, 비교적 다양한 다모류가 출현한 1994년 9월까지의 뚜렷한 우점종이 없고 *Mediomastus* sp., *N. oligobranchia*, *P. ligni* 등이 시기에 따라 약간 우점하였을 뿐이다 (Table 2). 그러나 1994년 12월과 1995년 3월에는 오염 지시종으로 알려진 *P. ligni*가 3,157 indiv. · m⁻²와 2,039 indiv. · m⁻²로 갑자기 극우점하는 바, 이들은 다모류 출현 개체수의 93%와 92%를 차지한다. 이들 중 이외에 같은 시기에 우점하는 다모류로는

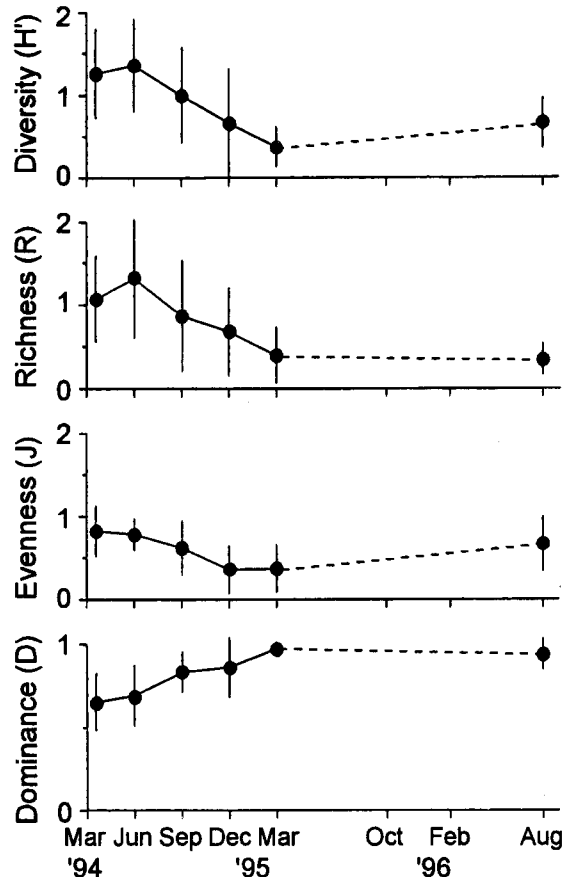


Fig. 3. Temporal changes in species diversity (H'), species richness (R), species evenness (J) and dominance (D) of polychaete community in Lake Shihwa from March 1994 to August 1996. Ecological indices in October 1995 and February 1996 couldn't be calculated because of the low abundance of polychaetes. Vertical bars indicate the standard deviation.

C. capitata(69~105 indiv. · m⁻²), *Glycinde* sp.(18~62 indiv. · m⁻²), *N. oligobranchia*(21~32 indiv. · m⁻²), *Pseudopolydora kempfi*(23~

Table 2. The list of 15 dominant species occurring above 1.0 indiv. · m⁻² and its density (indiv. · m⁻²). Species are ranked in order of the average density during the survey. Values in parenthesis represent the percentages of density of the total. The symbol of † means lower density than 1.0 indiv. · m⁻².

Species	1994				1995		1996		AVG (%)
	Mar.	Jun.	Sep.	Dec.	Mar.	Oct.	Feb.	Aug.	
<i>Polydora ligni</i>	1	10		3157	2039			67	659 (83.1)
<i>Pseudopolydora kempfi</i>		+	2	23	27		+	196	31 (3.9)
<i>Capitella capitata</i>		1		69	105	1		5	23 (2.9)
<i>Glycinde</i> sp.	3	2	+	62	18				11 (1.3)
<i>Nephtys oligobranchia</i>	4	12	2	32	12				8 (1.0)
<i>Sigambra tentaculata</i>		+	1	24	1				3 (0.4)
<i>Mediomastus</i> sp.		1	19	1					3 (0.3)
<i>Neanthes succinea</i>		+						13	2 (0.2)
<i>Prionospio japonicus</i>	+	6	4	3					2 (0.2)
<i>Aricidea</i> sp.	2		7	2					1 (0.2)
<i>Heteromastus filiformis</i>	6	4		+					1 (0.2)
<i>Eteone longa</i>				4	2				1 (0.1)
<i>Glyceria chirori</i>	+	3	2						1 (0.1)
<i>Tharyx</i> sp.		3	2	+					1 (0.1)
<i>Nectoneanthes latipoda</i>			+	3	+				1 (0.1)

27 indiv. · m⁻²) 등 이었다. 4~5개의 정점밖에 조사가 이루어지지 않았던 1995년 10월과 1996년 2월에는 1~2종의 다모류만이 빈약하게 출현하여 뚜렷한 우점종이 없었다. 제한된 지역에서만 조사가 이루어져서 우점종이 밝혀지지 않았을 수도 있다. 그러나 이전까지는 동일한 정점에서 다량의 다모류가 출현하였고 또한 96년 2월의 경우 정점당 8회 정도의 반복 채집하였음에도 불구하고 거의 생물이 채집되지 않은 것으로 보아 이전까지의 우점종이 이 기간 동안에는 대량 소멸한 것이 확실하다.

1996년 8월에는 다시 *P. kempfi*와 *P. ligni*가 각각 196 indiv. · m⁻², 67 indiv. · m⁻²로 극우점하였다. 특징적인 현상은 1994년

12월과 1995년 3월에 각각 3,157 indiv. · m⁻²와 2,039 indiv. · m⁻²으로 가장 우점했던 *P. ligni*와 기타 상대적으로 우점했던 *C. capitata* 등의 서식 밀도가 줄어들었다는 점이다. 또한 서식 밀도가 1 indiv. · m⁻² 이상인 우점종의 수가 4종으로 감소한 것으로 나타났다(Table 2). 이들 *P. kempfi*와 *P. ligni* 등의 우점종들은 대체로 크기가 작고 오염에 강한 기회종들이다.

다모류의 공간 분포를 알아보기 위해서 각 시기에 현장 조사가 이루어진 정점별로 출현 종수 및 서식 밀도를 Fig. 4에 나타냈다. 조사 시기와 정점의 위치에 따라 출현 종수와 서식 밀도가 심한 변동을 보였다. 즉, 생물이 전혀 살고 있지 않는 곳에서

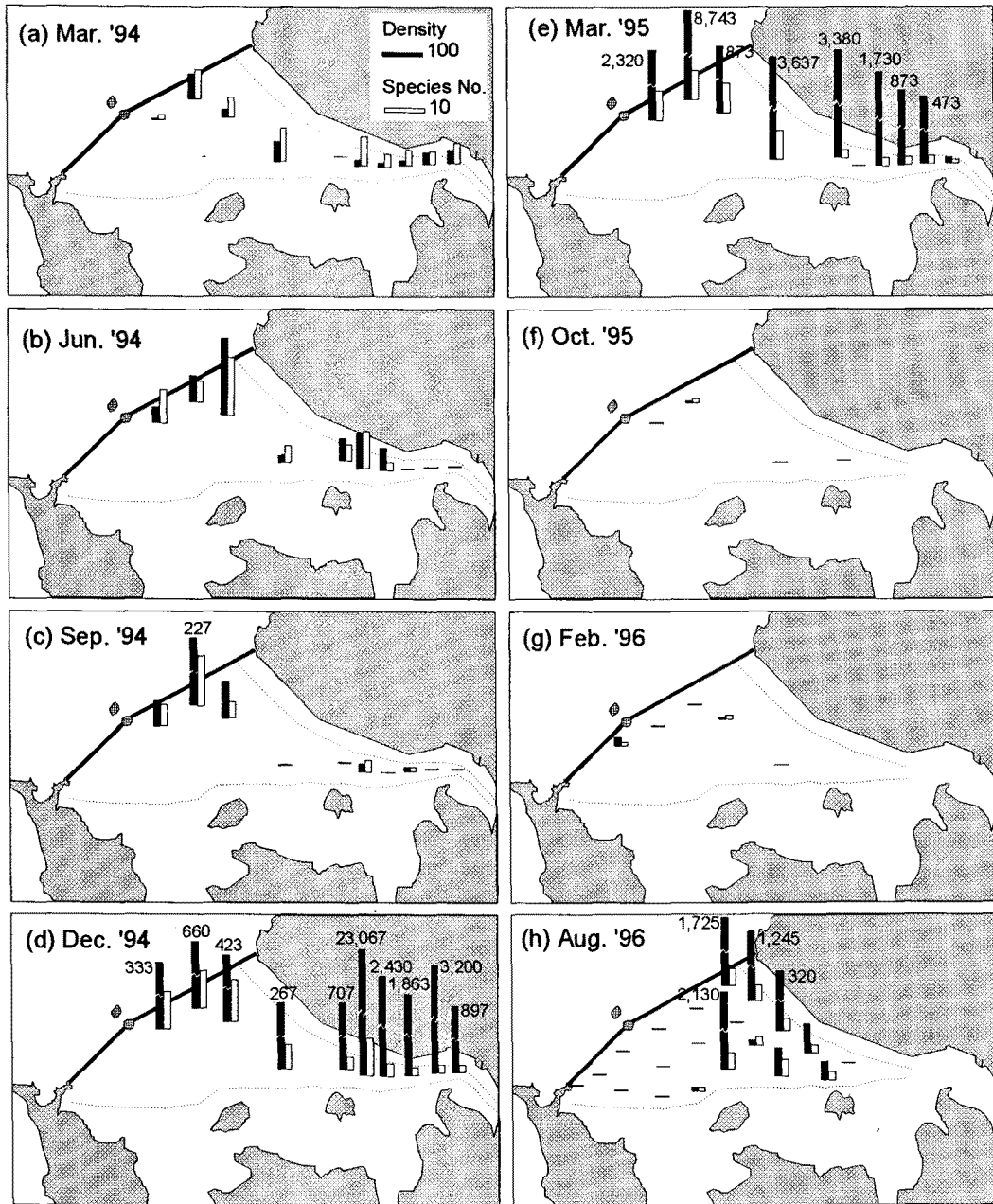


Fig. 4. Spatial variations in density (indiv. · m⁻²) and the number of the polychaete species in bar scale over time in Lake Shihwa. The replicate numbers of samples per station in each sampling investigation were presented at the caption of Fig. 1.

부터 최고 14종(94년 6월, 정점 15), 23,000 indiv. · m²의 서식 밀도의 변화 범위를 갖는다. 시화 방조제가 건설된 지 1개월 후인 1994년 3월까지의 시화호 동쪽(정점 1, 2, 3, 4) 끝까지 정점 당 3~5종의 다모류가 1 m²당 수십 개체 정도로 출현하였으나, 1994년 6월과 12월에는 이들 정점에서 다모류가 전혀 발견되지 않았다. 이후 1994년과 1995년 3월의 경우 조사지역 전체에서 1 m²당 수백에서 수만 개체의 다모류가 집중적으로 서식하는 현상이 나타난 바, 대부분 오염 지시종인 *P. ligni*이었다(Fig. 4, Table 2). 이들의 대량 번식 이후인 1995년 10월과 1996년 2월에는 거의 생물이 서식하지 않았으며, 이러한 무생물대는 1996년 8월 시화방조제 부근의 지역에서도 계속적으로 나타났다. 1996년 8월에 시화호 중앙부의 정점들에서는 4종 이하의 다모류가 1 m²당 최고 수천 개체 이상으로 대량 채집되었는데, 이들은 모두 오염 지시종으로 알려진 *P. kempfi*, *N. succinea*, *P. ligni* 그리고 *C. capitata* 등 뿐이었다.

정점별 생물상의 변화에서 특징적인 것은 오염 지시종의 일시적인 대량 번식과 소멸, 그리고 무생물 지역의 존재이다. Table 3에 나타난 바와 같이 대표적인 오염 지시종인 *Poly-*

*dora ligni*는 시화 방조제가 건설된 초기에는 시화호의 안쪽과 중앙부에 10 indiv. · m² 이하로 서식하였으나, 1994년 말과 1995년 초기에는 서식 범위가 시화호 전체로 확산되었으며, 서식 밀도 또한 1 m²당 수천 개체 이상까지 급증하였다. 역시 오염 지시종인 *C. capitata*와 *P. kempfi* 등도 *P. lingi*와 비슷한 공간 분포를 보이면서 1 m²당 수백 개체 정도로 개체군이 증가하였다.

시화호 중앙 및 방조제 부근의 4~5개의 정점에서 수행된 1995년 10월과 1996년 2월 조사에서는 저서 다모류가 거의 발견되지 않았으나, 단각류(Amphipoda)에 속하는 *Corophium sinensis*가 대량 출현하였다(Table 3). 특히 1995년 10월에는 정점 9에서 10,000 indiv. · m² 이상으로 극 우점하는 것으로 나타났다.

그러나 방조제 근처의 시화호 저층은 생물이 전혀 살지 않는 무생물 지역으로 변하였으며, 이러한 현상은 1996년 8월 조사까지도 지속되었다. 비록 1995년 10월과 1996년 2월에 조사된 정점수가 4, 5개로 다른 시기보다 적지만, 1996년 8월에 조사된 20개 정점 중 11정점에서 저서동물이 전혀 채집되지 않아

Table 3. Dominant polychaete speices occurring above 10 indiv. · m² at least at one station of Lake Shihwa. The symbol of (+) indicates the density ranges between 100 and 1,000 indiv. · m² and (++) higher than 1,000 indiv. · m². The symbol of * means a high occurrence of the amphipod species, *Corophium sinensis*.

Date of survey	Area of Lake Shihwa (St. 1~St. 4)	The upper reach of Lake Shihwa (St. 1~St. 4)	The central zone of Lake Shihwa (St. 5~St. 15, St. 20)	Around Shihwa dike of Lake Shihwa (The rest stations)
Mar. 1994		<i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Polydora ligni</i>	<i>Amaena</i> sp. <i>Heteromastus filiformis</i> <i>Glycinde</i> sp. <i>Scolecopsis</i> sp.	<i>Heteromastus filiformis</i>
Jun. 1994		<i>Capitella capitata</i> <i>Polydora ligni</i>	<i>Chaetozone setosa</i> <i>Heteromastus filiformis</i> <i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Polydora ligni</i> <i>Thraxys</i> sp.	<i>Glycera chirori</i> <i>Glycinde</i> sp. <i>Heteromastus filiformis</i> <i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Prionospio japonicus</i>
Sep. 1994	(AZOIC ZONE)		<i>Aricidea</i> sp. <i>Mediomastus</i> sp. (+)	<i>Aricidea</i> sp. <i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Prionospio japonicus</i> <i>Pseudopolydora kempfi</i>
Dec. 1994		<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Polydora ligni</i> (++)	<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Glycera chirori</i> <i>Glycinde</i> sp. <i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Polydora ligni</i> (+) <i>Pseudopolydora kempfi</i> (+)	<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Glycinde</i> sp. (+) <i>Nectoneanthes latipoda</i> <i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Polydora ligni</i> (+) <i>Prionospio japonicus</i> <i>Pseudopolydora kempfi</i> (+) <i>Sigambra tentaculata</i> (+)
Mar. 1995		<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Polydora ligni</i> (++)	<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Glycinde</i> sp. (+) <i>Polydora ligni</i> (++) <i>Pseudopolydora kempfi</i> (+)	<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Glycinde</i> sp. <i>Nephtys oligobranchia</i> <i>Polydora ligni</i> (++) <i>Pseudopolydora kempfi</i>
Oct. 1995	(Survey impossible)		* <i>Corophium sinensis</i> (++)	(AZOIC ZONE)
Feb. 1996	(Survey impossible)		* <i>Corophium sinensis</i>	* <i>Corophium sinensis</i>
Aug. 1996	(Survey impossible)		<i>Capitella capitata</i> (+) <i>Nectoneanthes japonica</i> (+) <i>Polydora ligni</i> (+) <i>Pseudopolydora kempfi</i> (++)	(AZOIC ZONE)

상당 기간동안 시화호 내에서 무생물지역이 실재하였음을 확인할 수 있다. 또한 1994년 3월의 시화호 안쪽(정점 1~4)에는 *N. oligobranchia*, *P. ligni*, *H. filiformis*를 포함하여 최고 5종 정도가 채집되었으나, 같은 해 6월과 9월에는 생물이 거의 채집되지 않았다. 이 지역은 1995년 이후 수심이 얕아짐에 따라 접근이 불가능하여 채집을 하지 못하였으나, 1996년 8월의 조사에서 이 지역과 가장 근접한 정점 6에서 생물이 전혀 출현하지 않았다.

토 의

시화 방조제가 건설된 이후인 1994년 3월부터 1996년 8월까지 시화호 저층 퇴적물에서 채집된 다모류의 종류는 총 43종이었다(Table 1). 각 조사 시기별로 살펴보면, 1994년 6월에 최대 24종이 출현하였을 뿐, 다른 시기에는 1~22종 정도만이 서식하였다. 이러한 종수는 한국의 다른 연안역에 비해 매우 적은 종수이다. 지리적으로 인접해 있고 다양한 퇴적상이 존재하는 경기만 북부 해역에서는 총 53종(신 등, 1989), 남양만 및 아산만 등을 포함하는 경기만 남부 해역에서 총 124종(신 등, 1992a)의 다모류가 출현하였다. 기타 연안역의 다모류 출현 종수를 보면, 남해의 여자만에서 72종(임 등, 1991), 가막만에서 84종(신, 1995), 광양만에서 76종(신과 고, 1990), 진해만에서 88종(한국해양연구소, 1993), 삼천포시 연안에서 50종(신과 고, 1993), 영일만에서 72종(신 등, 1992b)으로 시화호 내 저서 다모류의 종류가 상대적으로 빈약함을 알 수 있다.

시화 방조제가 건설되기 이전인 1980년 7월과 10월에 현재의 시화호내 5개 정점에서 van Veen grab(입구면적: 0.1 m²)으로 2회 채집된 저서동물의 출현종수는 106종이었다(KORDI, 1981). 또한 방조제가 건설중인 1993년 3월, 5월, 8월, 11월에 비슷한 정점에서 조사된 바에 따르면(홍 등, 1997), 총 4회 조사시에 84종의 저서동물이 출현한 바, 이는 방조제 건설 이후인 본 조사와 비교 시 매우 높은 생물상이다. 정점의 위치 및 채집면적에서 약간의 차이가 있지만, 본 조사에서는 방조제가 건설된 후에 총 8회에 걸쳐 조사되었음에도 불구하고 총 73종의 저서동물이 출현하였을 뿐이다(Table 1). 1980년 당시에는 현재와는 다르게 시화호 지역의 안쪽과 바깥쪽 생물상은 뚜렷한 차이가 없이 고른 분포를 보였다(KORDI, 1981).

비슷한 시기에 조사된 시화 방조제 외곽 해역의 생물상과 비교를 하더라도 시화호내 출현 저서동물상이 극히 빈약함을 알 수 있다. 즉, 홍 (1997) 등에 의해 조사된 시화 방조제 외곽해역의 7개 정점에서 1993년의 계절별 조사에서 총 172종이, 8개 정점에서 수행된 1996년과 1997년의 추계 및 동계에 총 207종이 출현하여 시화호와 방조제 외곽해역의 생물상의 뚜렷하게 차이를 알 수 있다.

서식 밀도를 보면 조사기간 평균 794±1,275 indiv. · m⁻²로 나타나 각 조사 시기마다 심한 변화를 보였다(Table 1, Fig. 2). 즉, 1994년 12월과 1993년 3월에는 각각 3,385 indiv. · m⁻², 2,205 indiv. · m⁻²로 극히 높게 나타난 반면, 1996년 8월에는 282 indiv. · m⁻², 그 외의 시기에는 최고 50 indiv. · m⁻²로 상대적으로 매우 낮은 생물량을 보였다. 이러한 생물량의 심한 변화는 오염

지시종으로 알려진 *Polydora ligni*의 일시적인 대량 번식 및 소멸에 의한 것이다. 즉, 서식 밀도가 높게 나타나는 1994년 12월과 1993년 3월에 *P. ligni*가 각각 3,157 indiv. · m⁻², 2,039 indiv. · m⁻²(Table 2)로 각 시기 서식 밀도의 93%, 92%를 차지하고 있다. 전체 조사시기 동안 평균 서식 밀도의 83.1%를 차지하는 *P. ligni*를 제외하면 평균 서식 밀도는 135 indiv. · m⁻²로 상대적으로 매우 낮다. 이는 한국의 다른 연안역의 다모류 서식 밀도, 즉 경기만 북부의 357 indiv. · m⁻²(신 등, 1989), 경기만 남부 해역의 211 indiv. · m⁻²(신 등, 1992a), 가막만의 253 indiv. · m⁻²(신, 1995), 광양만의 520 indiv. · m⁻²(신과 고, 1990), 진해만의 825 indiv. · m⁻²(한국해양연구소, 1993), 동해 영일만의 1,485 indiv. · m⁻²(신 등, 1992b)에 비해 낮은 값이다.

시화호에서 일시적으로 극우점하는 *P. ligni*는 퇴적물 오염이 상당히 진행된 곳에서 서식하는 것으로 알려져 있다(Pearson and Rosenberg, 1978). Pearson and Rosenberg(1978)는 *P. ligni*의 출현을 보고한 24편의 논문을 분석하여 이들이 심각하게 오염된 만이나 항구에서 출현하는 오염 지시종으로서 퇴적물내 유기물 및 황 화합물 함량이 매우 높아 생물이 거의 서식할 수 없는 지역에 출현한다고 하였다. 국내에서는 유사한 환경에서 출현하는 *Polydora ciliata*가 영일만 포항 항구와 형산강 입구의 오염이 심한 지역에서 평균 351 indiv. · m⁻²(신 등, 1992b)로 나타난 것으로 보고되었다. 이들 종은 크기가 수 mm에 불과하고 니질함량이 많고 오염이 심한 곳에서 사는 공통점이 있으나, *P. ligni*가 기수 지역에서 진흙의 관속에서 사는 반면, *P. ciliata*는 해수지역의 진흙 굴속에서 사는 차이가 있다.

Polydora ligni 다음으로 시화호에서 우점하는 *Pseudopolydora kempii*(평균 서식 밀도: 31 indiv. · m⁻²)와 *Capitella capitata*(23 indiv. · m⁻²)(Table 2) 역시 오염 지시종이다(Pearson and Rosenberg, 1978). 이들 오염 지시종은 국내에서도 만이나 항구 등 오염이 심한 곳에서 자주 출현한 바 있다. *P. kempii*의 경우 동해 영일만의 항구쪽에서 622 indiv. · m⁻²(신 등, 1992b), 인천 북항에서 20 indiv. · m⁻²(Ryu, 1997), 기타 인천 연안역과 군산항 주변역(이, 1995)에서 소수 출현한 바 있다. *C. capitata*는 포항 항구를 포함한 내만(238 indiv. · m⁻²; 신 등, 1992b), 경기만의 인천 북항 안쪽(1,900 indiv. · m⁻²; Ryu, 1997) 등에서 대량으로 발견되었으며, 기타 울산만(이 등, 1982), 여자만(임 등, 1991)에서 일부 출현하는 것으로 보고되었다.

이러한 오염 지시종의 대량 출현(Table 2)과 함께 조사 기간 동안 서식 밀도의 심한 변화, 지속적인 다모류 출현 종수의 감소(Fig. 2)는 시화호 저서환경이 급격하게 변화하였음을 시사한다. 시화호 안쪽(정점 1, 2, 3 등)은 이미 1994년 6월에 무생물대로 변화되어(Fig. 4) 시화 방조제가 건설된 지 몇 달만에 오염이 진행되었음을 보여주었다. 이(1995)의 결과에 의하면, 1994년 6월의 경우 시화호내 표층 퇴적물은 평균입도가 3.3~6.9φ인 사니질 퇴적상이었으나, 1995년 3월의 경우 6.8~9.8φ으로 니질 퇴적상으로 급격하게 변하였다. 유기물량을 지시하는 퇴적물 내의 탄소 함량도 역시 증가하였으며, 또한 주변 오염원으로부터 크롬, 구리, 아연 등의 중금속 등이 유입되어 축적되는 것으로 나타났다. 유기물의 증가와 함께 저층 수괴의 용존 산소량 역시 수온이 높은 봄철과 여름철에는 최저 3 mg · l⁻¹로 나타나 인천

연안역의 $7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 보다 낮은 빈산소 환경이 존재함을 보고하였다(이, 1995). 이러한 현상은 본 조사와 동시에 시화호 수층 환경에 대한 박 등(1997)의 연구에서도 확인되었다. 시화호 중앙부 및 방조제 부근의 저층 수괴는 표층으로 부터 과도하게 유입되는 유기 입자의 분해로 인한 산소 고갈로 최저 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (1996년 10월의 경우)에 이르는 무산소 또는 저산소 환경에 가까운 농도를 보였다. 이들은 시화 방조제의 건설로 인해 외해역과의 해수 교환이 차단되고 주변 오염원으로부터 유입된 제반 오염물질이 저층 퇴적물에 축적되면서 시화호 저서환경이 변화하고 있다고 하였다. 오염이 심함에도 불구하고 시화호 내에서 일부 다모류들, 즉 *P. ligni*와 *P. kempfi*, *C. capitata* 등이 일시적으로 대량 출현하는 것은 이들이 특히 유기물 함량이 높고 빈산소 환경에서도 잘 적응하는 기회종이기 때문이다(Grassle and Grassle, 1974; Pearson and Rosenberg, 1978). 이들은 짧은 생활사와 높은 번식력으로 인해 짧은 시간 동안에 개체수가 대량으로 늘어날 수 있다. 홍 등(1997)과 Lee and Cha(1997)등도 역시 시화호내에 유기물 유입의 증가에 따른 저층수의 무산소 및 저산소층의 형성으로 인해 무생물대가 형성되거나 일부 오염지시종의 천이현상이 유발된다고 추론하였다.

1994년 12월부터 1995년 3월 사이에 나타난 오염 지시종의 대번식이 끝난 후에 저층 퇴적물의 무생물대는 1994년 여름과 겨울의 시화호 안쪽에서 나타난 것 보다 넓은 지역으로 확산되었다. 즉, 1995년 10월과 96년 2월에는 모든 정점에서 저서 다모류가 거의 출현하지 않았으며, 1996년 8월에도 방조제 부근의 비교적 수심이 깊은 곳에서 무생물대가 존재하였다(Fig. 4, Table 3). 이러한 무생물대는 시화호의 수층내 용존 산소량과 관련되어 있는 것 같다. 즉, 같은 시기에 조사된 결과들을 보면(박 등, 1997; 한 등, 1997), 시화호 수심 6~7 m 이하에는 무산소층이 뚜렷하게 형성되어 있었다. 이러한 무산소층으로 인해 빈산소층에서 살수 있었던 몇몇 오염 지시종까지도 서식이 불가능해진 것으로 여겨진다. 특히 1996년 8월 조사시 저서 다모류가 출현하지 않은 지역이 수심이 6~7 m 보다 깊은 방조제 부근(Fig. 4)임을 고려하면, 수온약층의 형성으로 해수혼합이 제한되어 저층수로의 산소공급이 이루어지지 않고, 따라서 저층 퇴적물은 무산소 환경으로 변화되어 저서 다모류가 생존할 수 없게 되어 무생물대가 확산된 것으로 보인다. 1996년 8월에 시화호 중앙부를 중심으로 몇몇 종이 다시 우점하게 된 것은 시화호 수질 개선을 위해 1996년 3~7월경에 시행된 시화 방조제 수문 개방으로 인해 외해수가 유입되어 나타나는 일시적인 현상이라 생각된다. 그러나 이러한 수질 개선책에도 불구하고 방조제 부근의 수심이 깊은 곳에서는 계속적으로 다모류가 전혀 출현하지 않아 시화호 저서환경은 오염이 이미 심하게 진행된 것으로 여겨진다.

사 사

본 연구는 선도기술개발사업(G7 프로젝트), '연안 저서환경 건강평가 기술(Code No. 95-941-2) 사업의 일환으로 수행되었습니다. 본 원고 내용에 대해 세심하게 조언해 주신 심사위원들, 특히 인하대학교 홍재상 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997. 시화호 산화-환원 환경하에서의 용존 유·무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 53-68.
- 박 철, 허성희, 1997. 시화호 인근해역의 동물플랑크톤 분포로 본 시화호의 생태적 안정성. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 87-91.
- 신현출, 1995. 가막만의 저서다모류 군집. 한국해양학회지, 30(4): 250-261.
- 신현출, 고철환, 1990. 광양만 다모류 군집의 시, 공간적 변화. 한국해양학회지, 25(4): 205-216.
- 신현출, 고철환, 1993. 삼천포시 근해역의 다모류 군집. 한국해양학회지, 28(4): 305-312.
- 신현출, 강성길, 고철환, 1992a. 경기만 남부 해역의 저서다모류 군집. 한국해양학회지, 27(2): 164-172.
- 신현출, 최성순, 고철환, 1992b. 영일만 다모류 군집의 계절별, 공간적 변화. 한국해양학회지, 27(1): 46-54.
- 신현출, 최진우, 고철환, 1989. 서해 경기 내만해역 조간대, 조하대의 저서동물 군집. 한국해양학회지, 24(4): 184-193.
- 이순근, 홍재상, 이재학, 1982. 진해만의 저서동물군집에 관한 연구. 한국해양연구소보, 4(1, 2): 17-26.
- 이태원, 문형태, 허성희, 1997. 시화호 수질악화에 따른 시화호와 주변 해역 어류의 종조성 변화. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 110-116.
- 임현식, 제종길, 최진우, 이재학, 1991. 여자만에서의 여르철 저서동물의 분포. 해양연구, 13(2): 31-46.
- 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희, 1997. 시화호와 주변해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차생산력에 관한 연구. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 78-86.
- 한국수자원공사, 1995. 시화지구 담수호 수질보전대책수립 조사보고서. 한국수자원공사, 474pp.
- 한국해양학회지, 1993. 진해만의 저서동물에 대한 생태학적 연구. 한국해양연구소, BSPE 00314-536-3, 163pp.
- 한국해양연구소, 1995. 해양저서생물상에 의한 환경평가-해양환경관리기술, 선도기술개발사업보고서. 환경부, 과학기술처, 339pp.
- 한명우, 박용철, 허성희, 1997. 시화호에서 암모니아와 납의 저층 용출. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 69-77.
- 홍재상, 정래홍, 서인수, 윤건택, 최병미, 유재원, 1997. 시화방조제의 건설은 저서동물군집의 시, 공간 분포에 어떠한 영향을 미쳤는가? 한국수산학회지, 30(5): 882-895.
- Grassle, J.F. and J.P. Grassle, 1974. Opportunistic life histories and genetic systems in marine benthic polychaetes. *J. Mar. Res.*, 32(2): 253-284.
- KORDI, 1981. Report on water quality monitoring in coastal areas of Banweol, Ulsan, Changwon and Yochon. KORDI, 302pp.
- 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.
- Loehle, C. 1990. Proper statistical treatment of species-area data.

- Oikos*, **57**: 143-145.
- Margalef, R., 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.*, **3**: 157-175.
- McNaughton, S.J., 1968. Structure and function in California grassland. *Ecology*, **49**: 962-972.
- 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.
- Pielou, E.C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *T. Theoret. Biol.*, **13**: 131-144.
- Ryu, J.S, 1997. Changes in macrobenthic community along the gradients of heavy metals and organic carbon in sediments, Manseok Harbor, Incheon, Korea. M.S. Thesis, Seoul National University, 48pp.
- Shannon, C.E. and W. Wiener, 1963. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 177pp.