

천수만 조하대에 서식하는 대형저서동물의 생태학적 변화 연구^{1a}

한형섭²·마채우^{3*}·최만식⁴

Ecological variations of macrobenthos in subtidal at Chonsu bay in Chungcheongnam-do, Korea^{1a}

Hyoung-Sum Han², Chae-Woo Ma^{3*}, Man-Sik Choi⁴

요 약

본 연구는 천수만 조하대에 서식하는 대형저서동물의 군집을 분석하여 방조제 건설에 따른 천수만 저서생태계의 변화를 이해하고자 하였다. 생태학적인 변화를 이해하기 위하여 대형저서동물의 분포, 우점종, 시·공간적 변화 그리고 유기물 오염을 분석하였다. 천수만에는 총 252종이 출현하였고, 출현밀도는 681 ind./m²이었다. 종 다양도는 모든 계절에서 방조제를 기준으로 만 입구 지역으로 갈수록 증가하는 양상이었다. 천수만 내 연중 우점한 대형저서동물은 송곳갯지렁이로 나타났다. 우점종 출현양상은 종 다양도 그리고 정점별 퇴적물 내 유기물 함량과 상관관계를 갖는 것으로 확인되었다. BPI분석 결과, 방조제 인근 정점에서는 4~5등급으로 유기물 오염이 진행된 것으로 확인되었고, 만 입구 지역에서는 1~3등급으로 상대적으로 유기물 오염이 되지 않은 것으로 확인되었다. SAB-curve 분석 결과, 방조제를 기준으로 만 입구로 갈수록 생태계 전이지역이 감소하는 것으로 나타났다.

주요어: 방조제, 군집, 시·공간적 변화, BPI분석, SAB분석

ABSTRACT

This study was carried out to understand the ecological variations of macrobenthos communities by construction dikes in the subtidal zone of Chonsu Bay. This study analyzed the distribution of benthos, the dominant species, spatial and temporal changes of benthos communities and benthic pollutions in the subtidal zone of Chonsu Bay. A total of 252 species of subtidal macrobenthos with a density of 681 ind./m² were studied. In all the seasons, the species diversity was found to be higher near the mouth of the bay. For all the seasons of the year, *Lumbrineris japonica* was found to be the most dominant species. These dominant species were found to have positive correlations with species diversity and sedimentary parameters such as organic content in sediments. Dominant species of benthos as well as species composition and diversity showed spatial and temporal distribution patterns. Benthic Pollution Index (BPI) values estimated for the stations near the embankment were in the 4~5 levels, which indicates that the organic matter has been polluted. And as for the stations near the mouth of the bay, the BPI values were in the 1~3 levels, which indicates that the organic matter

1 접수 2014년 10월 29일, 수정 (1차: 2015년 1월 16일, 2차: 2015년 1월 23일), 게재확정 2015년 1월 24일

Received 29 October 2014; Revised (1st: 16 January 2015, 2nd: 23 January 2015); Accepted 24 January 2015

2 순천대학교 생명시스템학과 Dept. of Bio. Sys. Soonchunhyang Univ., Asan 336-745, Korea (stoyman@naver.com)

3 순천대학교 생명시스템학과 Dept. of Bio. Sys. Soonchunhyang Univ., Asan 336-745, Korea (cwooma@sch.ac.kr)

4 충남대학교 충청씨그랜트사업단 Chungcheong Seagrant office Chungnam Nat. Univ. Daejeon 305-764 Korea (mschoi@cnu.ac.kr)

a 본 논문은 충청씨그랜트 연구개발비 지원사업과 순천향대학교 논문게재료 지원사업에 의해 수행되었습니다.

* 교신저자 Corresponding author: cwooma@sch.ac.kr

has been relatively less polluted. According to the SAB-curve analysis, the number of transitional point stations became less in the mouth of the bay.

KEY WORDS: DIKE, COMMUNITY, SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS, BENTHIC POLLUTION INDEX, SAB-CURVE ANALYSIS

서론

천수만은 반폐쇄형 천해성 내만으로 하천을 통한 담수유입이 많아 영양염류가 풍부한 지역이다. 그러나 농경지와 산업공단 확대사업의 일환으로 1980년 초반에 방조제가 건설되었고, 그에 따라 유속의 감소와 해류방향의 변화가 발생하였다(Shim *et al.*, 1988). 이러한 물리적 환경변화는 조하대 퇴적환경을 바꾸었으며, 이는 직접적 혹은 간접적으로 조하대와 조간대에 서식하는 대형저서동물의 생태계에 영향을 주었다(Park *et al.*, 2000). 조하대에 서식하는 대형저서동물은 해양의 바닥 기질을 서식지로 생활하고 있고, 대부분은 이동성이 없거나 운동성이 미약하여 행동반경이 좁은 편이다. 또한 대형저서동물 군집은 서식 환경의 변화에 능동적으로 대처하지 못하여 변화의 영향을 직접적으로 받는 것으로 보고되었다(Koh *et al.*, 1997). 그러므로 이들 대형저서동물의 시·공간적 분포양상을 파악하는 것은 먹이사슬이나 먹이망 등 해양생태계의 역학관계를 이해하는데 필수적이고, 방조제 및 인위적 환경 변화가 해양생물에 미치는 영향을 간접적으로 평가하거나 생태계 변화를 예측하는데 가장 효율적인 연구방법이다(Gray, 1974, 1981; Hartley, 1982; Clark and Warwick, 1994; Hong *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 1997). 천수만 조하대 대형저서동물 분포에 대한 연구는 과거 보령화력발전소 주변의 온배수 영향에 따른 환경조사(KORDI, 1978), 형망을 이용한 대형저서동물의 분포조사(Je *et al.*, 1991) 그리고 Shim *et al.*(1988)에 의한 천수만 해양생태계 조사를 통해 보고되었고, 천수만 방조제 건설에 따른 대형저서동물 군집 변화에 대한 연구는 Lee and Park(1998)에 의한 종 조성 변화 연구, Park *et al.*(2000)에 의한 천수만 조하대 연성저질의 저서환경과 저서동물 군집의 시·공간적 양상 연구 그리고 Park *et al.*(2006)에 의한 천수만 조하대 연성저질에 서식하는 저서동물 우점종의 분포양상과 저서환경 연구가 있다. 하지만 아직까지 방조제 건설에 따른 대형저서동물의 장기변동 연구는 전무하고, 현재의 천수만 내 저서생태계를 이해하려는 연구는 미미한 실정이다. 본 연구는 천수만 조하대에 서식하는 대형저서동물 군집의 특성을 파악하며, 우점종의 분포양상 분석을 통해 천수만 방조제 건설에 따른 저서생태계 변화를 간접적으

로 이해하고, 본 연구의 대형저서동물의 군집 분석 결과를 선행 연구결과와 비교·분석하여 조하대 저서생태계의 장기적인 시·공간적 변화를 밝히는 것에 목적이 있다.

연구방법

1. 조사지역 및 대형저서동물 채집

천수만 조하대 대형저서동물의 채집은 2009년 추계(11월)부터 2010년 하계(7월)까지 계절별로 24개 정점에서 매월 만조시에 실시하였다(Figure 1). 정점 선정은 Park *et al.*(2000)와 Park *et al.*(2006)의 연구 정점 중 계절별로 중복되는 정점을 기준으로 22개 정점으로 하였으며, 천수만 방조제 인근 지역과 만 입구와의 대형저서동물 군집의 차이를 분석하기 위하여 만 입구 인근에 2개의 정점(St. 23; St. 24)을 추가하였다.

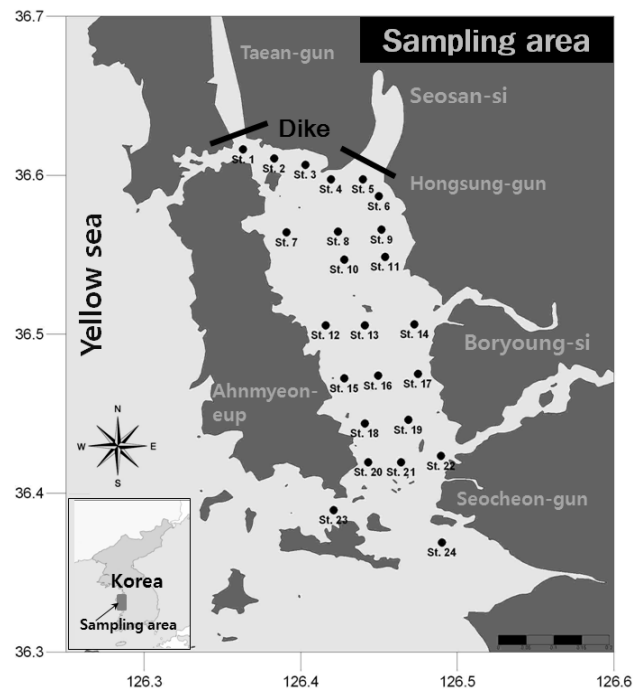


Figure 1. Sampling sites of macrobenthos in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast of South Korea

저서환경 요인 중 DO, pH, PSU 및 수온(°C)은 정점별로 Van Dorn water sampler(용적: 1 L)를 사용하여 저층에서 0.5 m 위에 있는 해수를 채수하였고, YSI-556MPS를 사용하여 측정 하였다. 조하대 대형저서동물의 채집은 정점별로 Petersen grab(용적 0.1 m³)을 사용하여 정점별 2~3회 퇴적물을 견인하였고, 견인된 시료는 현장에서 대형저서동물만을 분리하였다. 분리된 대형저서동물은 현장에서 고정하여 실험실로 운반하였으며, 분급과정(sorting) 및 대분류작업을 실시하였다. 대분류된 대형저서동물은 Barnard (1969), Kim (1973), Kim (1998), Jung (2004) 그리고 Baek (1989) 등을 참고하여 해부 현미경 하에서 중 수준까지 동정하였고, 계수 및 생체량(wet weight)을 측정하였다.

2. 종 다양도, BPI (Benthic Pollution Index) 및 SAB (Species, Abundance and Biomass) curve 분석

조사지역 정점별 종 다양도는 Shannon and Weaver (1949)의 방법을 사용하였고, 저서생태계의 공간적인 종 다양도 변화양상을 파악하기 위하여 정점별로 종 다양도를 산출하여 비교하였다. 계절에 따른 정점별 우점종 선정은 출현빈도와 출현밀도를 고려한 Le Bris index를 사용하였다(Le Bris, 1988).

BPI 등급 구분기준은 Lee(1993, 1994, 1995)와 Lee *et al.*(2003)의 연구 결과를 기준으로 하였으며, 출현 대형저서동물의 섭식유형 및 오염 지표종을 구분하고, 정해진 지수식에 대입하여 BPI를 산출 하였다. 비교를 용이하게 하기 위해서 1~100까지의 수치를 임의의 5단계로 나누어 사용하였다. 정점별 BPI 값과 Surfer ver. 9을 사용하여 지도에 표시하고 방조제 건설에 따른 조사지역 조하대 저서생태계의 시·공간적인 변화 양상을 파악하기 위하여 비교 및 분석하였다. 천수만 조하대 저서환경의 시·공간적 유기물 오염 정도를 파악하기 위하여 선행 연구인 Park(1998)의 연구 결과와 본 연구결과를 비교하였다.

천수만 조하대 유기물 오염의 공간적 변화 양상을 파악하기 위하여 종수, 출현밀도 그리고 생체량을 사용하여 SAB curve (Pearson and Rosenberg, 1978)를 분석하였다. 요인별 우선순위에 따라서 유기물 비 오염지역 또는 안정화된 지역(equilibrium point), 전이지역(transitional point), 교란지역(colonization point) 그리고 교란지역 중 우점종의 대량출현에 따라서 급격하게 출현밀도가 높아지는 추이대(ecotone point)로 구분하였다.

3. 통계분석

방조제 건설에 따른 시·공간적 변화 양상은 비교대상 요

인의 데이터 정규성 검정 (normality test)을 실시한 후, 정규성을 이루는 데이터가 두 개 집단인 경우는 T-test를 사용하였으며, 두 개 이상 집단인 경우는 ANOVA를 사용하였고, 비정규성을 이루는 데이터가 두 개 집단 그리고 두 개 이상 집단의 경우는 각각 Kruscal-Wallis test (KW-ttest) 그리고 Mann-Whitney test (MW-test)를 사용하였다. 통계분석은 SPSS ver. 12와 Sigma Stat ver. 3.0를 사용하였다.

결 과

1. 천수만 조하대 환경요인

1) 천수만 조하대 수심

천수만 내 평균 수심은 16.2 ±1.3 m이었고, 천수만 가운데에 위치한 정점 St. 3, St. 8, St. 10, St. 13 그리고 St. 21 기준으로 서부지역과 동부지역은 각각 14.9 ±0.79m, 18.0 ±1.61m로 동부지역의 수심이 깊은 것으로 나타났다. 천수만 내 공간적 수심 변화는 북부지역에 위치한 방조제의 수문 입구 주변과 하천과 만나는 천수만 중부 및 하부지역의 수심이 상대적으로 깊은 것으로 나타났다(KW-test, p<0.05)(Figure 2).

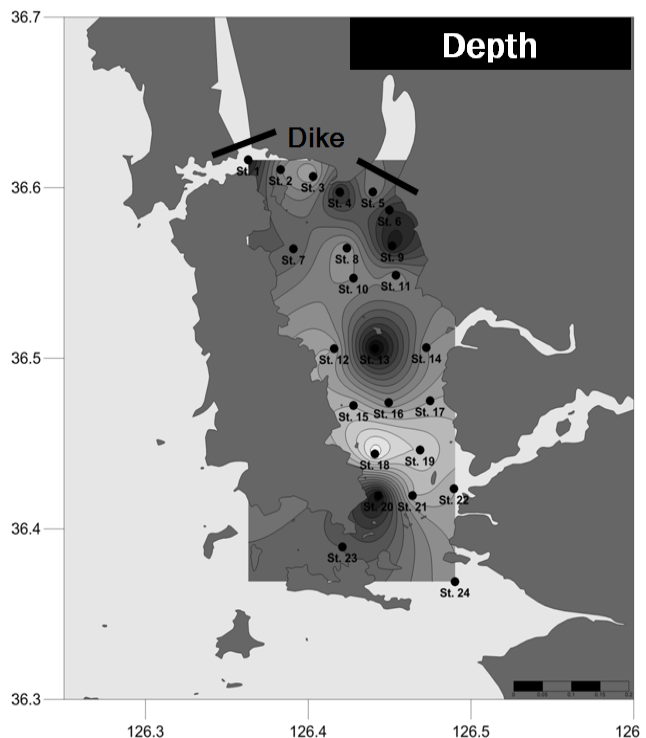


Figure 2. Distribution map of depth at each sampling sites in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast

2) 저서생태계 수질환경 요인

DO(dissolved oxygen)는 계절에 따라 추계에 4.6 ±0.5mg/L, 동계에 5.6 ±0.5mg/L, 춘계에 10.4 ±0.8mg/L 그리고 하계에 4.3 ±0.8mg/L로 나타났다. DO는 방조제를 기준으로 만 입구로 갈수록 계절적 변화 폭이 적은 것으로 나타났다. 수온(temperature)은 변화의 폭이 4.7 ~ 24.5℃로 연중 약 20℃의 변화가 있는 것으로 나타났고, 계절적 차이가 있는 것으로 나타났다(MW-test, p<0.05). 연중 수온의 변화 양상은 DO와 다르게 공간적인 분포 양상이 없는 것으로 나타났다. PSU(practical salinity unit)은 2010년 동계와 춘계에 각각 33.4 ±0.2 그리고 하계와 추계에 각각 32.2 ±0.1, 32.2 ±0.2로 계절에 따른 변화의 폭이 적은 것으로 나타났다. pH(hydrogen exponent)는 추계에 pH 7.9 ±0.1, 동계에 pH 8.2 ±0.1, 춘계에 pH 8.1 ±0.3 그리고 하계에 pH 7.9 ±0.4로

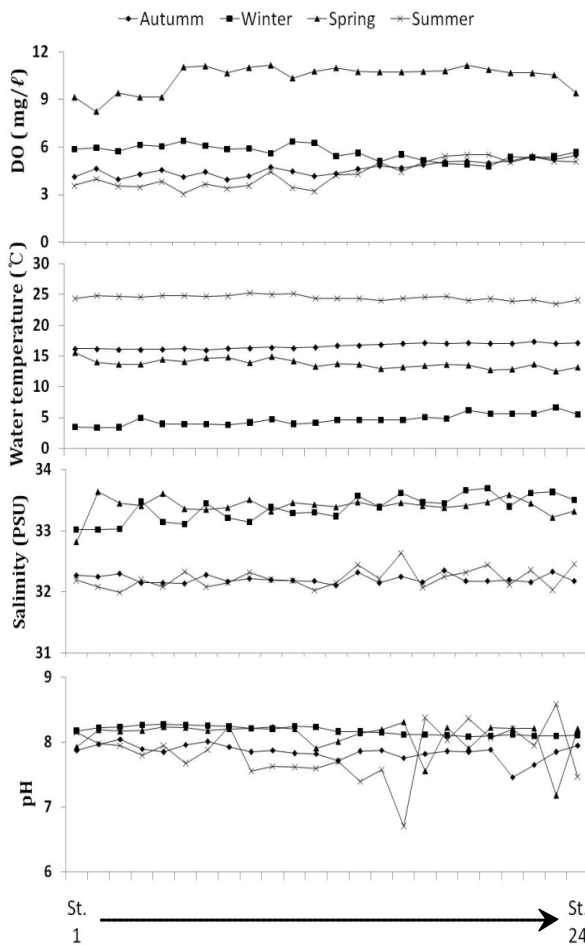


Figure 3. Compositions of DO, salinity, water temperature and pH at each sampling sites in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast

계절에 따른 변동 폭은 ±0.5 이었으며, 강수량이 상대적으로 많은 하계에 그 변동 폭이 ± 0.4 로 다른 계절에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났고, 공간적인 분포 양상은 나타나지 않았다(Figure 3).

2. 대형저서동물 군집 분포 양상 및 BPI 변화

1) 공간적 출현 양상

천수만 조하대의 대형저서동물은 11개 분류군, 252종이 출현하였다. 정점별 출현 종수는 방조제 인근 정점을 기준으로 만 입구로 갈수록 증가하는 양상이었으며, 만 입구 인근 지역인 St. 23과 St. 24에서는 각각 66종, 77종으로 다른 정점에 비해 출현 종수가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 분류군별 출현 종수는 환형동물이 111종, 절지동물이 82종, 연체동물이 21종, 극피동물이 11종 그리고 나머지 분류군 순으로 나타났다. 환형동물과 절지동물의 출현 종수는 공간적으로 만 입구 인근 지역에서 높았고, 방조제 인근 지역에서 출현 종수가 상대적으로 낮았다(KW-test, p<0.05)

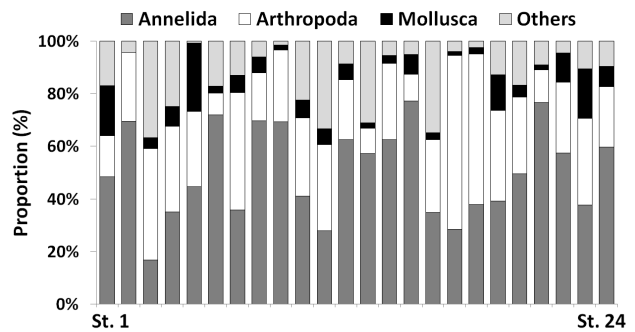


Figure 4. Proportion of each taxon at each sampling sites in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast

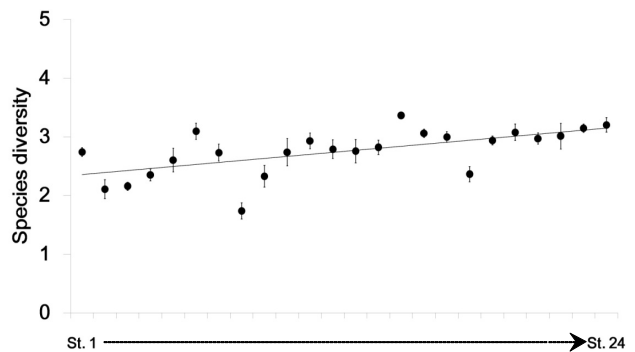


Figure 5. Species diversity at each sampling sites in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast

(Figure 4). 종 다양도(species diversity)는 평균 2.94 ± 0.24 이었으며, 만 입구 인근 정점인 St. 22, St. 23 그리고 St. 24에서 3.5이상으로 출현 종수와 마찬가지로 방조제 인근 정점을 기준으로 만 입구 인근 정점으로 갈수록 증가하는 양상이었다(Figure 5).

출현밀도는 평균 681.3 ind./m^2 이었으며, 분류군별 출현 밀도는 환형동물이 54%로 다른 분류군에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났고, 이후 절지동물, 극피동물, 연체동물 그리고 유형동물 순으로 확인되었다(Figure 6). 천수만 중부에 위치한 St. 12를 기준으로 천수만 북부지역의 출현밀도는 582.1 ind./m^2 이었고, 남부의 출현밀도는 773.8 ind./m^2 로 만 입구와 가까운 정점에서 출현 밀도가 높은 것으로 나타났(T-test, $p < 0.05$). 또한 계절에 따른 출현밀도 변동 폭이 방조제에서 만 입구로 갈수록 감소하는 양상이 나타났다. 이러한 차이는 방조제에서 만 입구로 갈수록 특정 종의 극우점도가 감소하는 것과 분류군별 출현밀도가 동일한 폭으로 변화하는 것이 원인으로 확인되었다(ANOVA, $p < 0.05$). 천수만 조하대 대형저서동물의 평균 생체량은 567.05 g/m^2 이었으며, 분류군별 생체량은 연체동물이 34.8%로 다른 분류군에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났고, 이후 환형동물 그리고 극피동물 순으로 높았다(Figure 6).

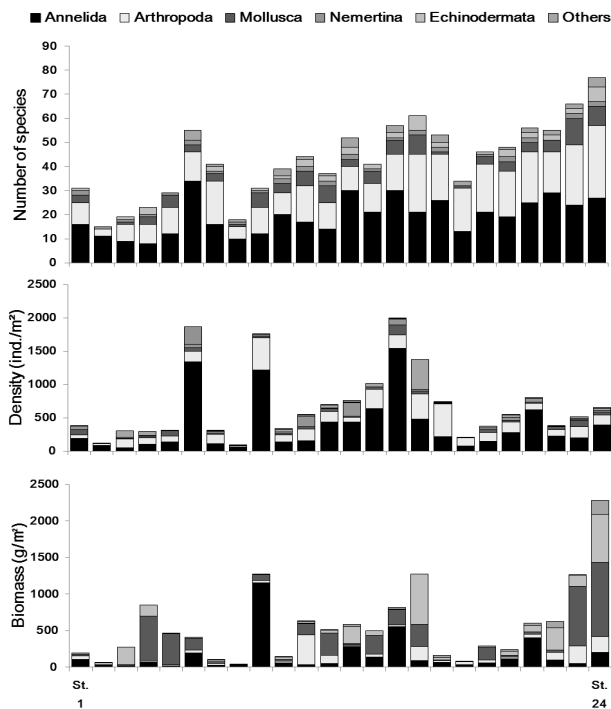


Figure 6. Number of species, density and biomass at each sampling sites in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast

2) 우점종 출현양상 변화 및 유기오염물 변화

1994년 천수만 조하대에 서식하는 대형저서동물의 우점종은 상위 19종 중 환형동물이 12종이었고, 연체동물 4종 그리고 절지동물 3종 순으로 나타났고, 2010년에는 우점종 15종 중 환형동물 10종, 절지동물 4종, 연체동물 1종, 유형동물 1종, 극피동물 2종 그리고 선형동물 1종 순으로 나타났다. 1994년과 2010년의 최우점종은 송곳갯지렁이류(*Lumbrineris* sp.)로 동일하였으며, 이 종의 출현밀도는 1994년에 127 ind./m^2 그리고 2010년에 96 ind./m^2 로 상대적으로 감소한 것으로 나타났다(T-test, $p < 0.05$). 단각류(*Corophium* sp.)는 1994년보다 2010년에 25 ind./m^2 가 증가하였고, 치로리미갯지렁이(*Glycera chirori*)는 1994년보다 2010년에 14 ind./m^2 가 증가하였다. 반면, 아기반투명조개(*Theora fragilis*)는 1994년보다 2010년에 큰 폭으로 감소하였다. 또한 유기물 오염지표종으로 보고된 송곳갯지렁이류, 오투기갯지렁이(*Sternaspis scutata*) 그리고 아기반투명조개는 1994년과 2010년에 모두 상위 우점종으로 나타났다(Table 1).

과거 Park(1998)의 1994년 우점종과 2010년 우점종 분석 결과를 토대로 BPI의 공간적 변화를 분석하였다. 1994년 BPI 등급은 방조제 부근에서 5등급으로 가장 낮았고, 만 입구 인근 정점으로 갈수록 1~2등급으로 유기물 오염 수준이 낮아지는 양상이었다. 반면, 2010년 천수만 조하대의 BPI는 방조제 서쪽 부근 정점, 남당항 부근 정점 그리고 2개의 하천이 유입되는 지역의 정점에서 3~4등급이었고, 나머지 지역에서는 1~2등급인 것으로 나타났다. 또한 방조제 인근 정점에서의 BPI 등급은 1994년보다 2010년에 높은 것으로 나타나 유기물 오염이 진행되지 않은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 2010년 이곳에 서식하는 대형저서동물의 출현 종수와 출현밀도가 BPI 분석을 할 수 없는 정도로 낮은 것이 원인으로 다른 지역에 비해 상대적으로 BPI가 높게 나타난 것으로 확인되었다(Figure 7). 천수만 조하대의 1994년 BPI 등급과 2010년 BPI 등급의 공간적 변화 양상을 비교한 결과, 1994년에 비해 2010년에 방조제 인근에서 유기물 오염정도가 심각한 것으로 확인되었으며, 과거에는 확인되지 않은 2개의 하천이 유입되는 지역에서 유기물 오염이 확인되었다. 또한 방조제 중간부에 위치한 간월도 부근에서는 오염지표종이 출현하지 않아 과거 BPI 등급보다 높은 것으로 나타났고, 천수만 동쪽에 위치한 남당항 인근 정점에서 유기물 오염 수준이 증가하여 과거 유기물 오염 분포와 차이가 있는 것으로 나타났다. 반면, 천수만 방조제를 기준으로 만 입구로 갈수록 BPI 등급이 높아져 유기물 오염 수준이 낮아지는 양상은 동일한 것으로 나타났다(Figure 7).

Table 1. Seasonal dominance species by Le Bris's (1988) method

Autumm			Winter		
Species name	Density (ind./m ²)	Le Bris index (X 104)	Species name	Density (ind./m ²)	Le Bris index (X 104)
<i>Lumbrineris japonica</i>	190	2.79	<i>Lumbrineris japonica</i>	47	2.38
<i>Corophium</i> sp.	40	1.38	<i>Nemertea</i> sp.	47	2.15
<i>Sternaspis scutata</i>	13	1.12	<i>Corophium</i> sp.	14	1.90
<i>Pisidia serratifrons</i>	15	1.01	<i>Glycera chirori</i>	20	1.41
<i>Nemertea</i> sp.	18	1.00	<i>Tharyx</i> sp.	7	1.34
<i>Phycnogonidae</i> sp.	12	0.95	<i>Pisidia serratifrons</i>	7	1.08
<i>Protankyra bidentata</i>	65	0.82	<i>Theora fragilis</i>	10	1.00
<i>Ancistrosyllis hanaokai</i>	7	0.68	<i>Gammaridae unid.</i>	15	0.87
<i>Moerella jedoensis</i>	6	0.66	<i>Ancistrosyllis hanaokai</i>	41	0.83
<i>Lunbrineris nipponica</i>	10	0.60	<i>Maldanidae</i> sp.	31	0.71

Spring			Summer		
Species name	Density (ind./m ²)	Le Bris index (X 104)	Species name	Density (ind./m ²)	Le Bris index (X 104)
<i>Lumbrineris japonica</i>	123	4.95	<i>Nemertea</i> sp.	45	8.91
<i>Corophium</i> sp.	80	4.32	<i>Lumbrineris japonica</i>	38	5.78
<i>Glycera chirori</i>	54	2.04	<i>Corophium</i> sp.	13	1.98
<i>Moerella jedoensis</i>	15	1.56	<i>Sternaspis scutata</i>	17	1.90
<i>Diopatra sugokai</i>	42	1.27	<i>Pisidia serratifrons</i>	15	1.74
<i>Ampelisca</i> sp.	13	0.88	<i>Upogedia major</i>	54	1.67
<i>Maldanidae</i> sp.	21	0.87	<i>Ancistrosyllis hanaokai</i>	16	1.59
<i>Amage auricula</i>	28	0.81	<i>Prionospio pinnata</i>	9	1.59
<i>Prionospio pinnata</i>	29	0.75	<i>Protankyra bidentata</i>	18	1.54
<i>Tharyx</i> sp.	13	0.71	<i>Nephtys caeca</i>	13	1.06
<i>Sternaspis scutata</i>	10	0.71	<i>Theora fragilis</i>	19	0.80

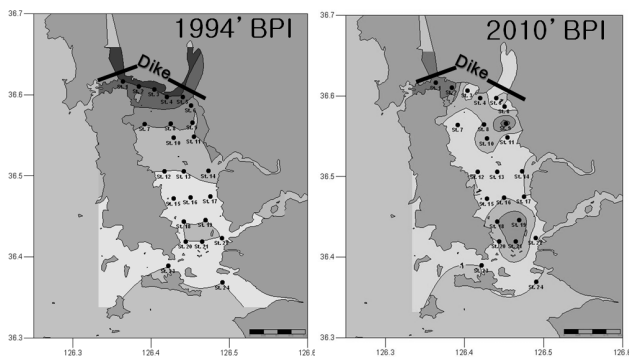


Figure 7. Distribution map of BPI level at each sampling sites in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast of South Korea

3. SAB-curve 분석에 따른 유기물 오염의 공간적 변화 양상

천수만 조하대 대형저서동물의 공간적 변화 양상을 파악하기 위하여 출현 종수, 출현밀도 그리고 생체량을 이용하여 SAB curve를 분석하였다. 2010년 SAB curve 분석 결과, 방조제 인근의 지역인 St. 1 ~ St. 8 그리고 St. 16 ~ St. 21에서 종수가 가장 높고, 출현밀도 그리고 생체량 순으

로 나타나 유기물오염 진행되었거나, 진행중인 전이지역 (transitional point)의 생물상을 나타냈다. 반면 천수만 중부에 위치한 St. 11~ St. 14와 만 입구지역인 St. 22 ~ St. 24에서는 종수, 생체량 그리고 출현밀도 순으로 나타나 비 유기물오염지역(equilibrium point)으로 안정된 생물상으로 나타났다. 남당항 부근의 정점과 2개의 하천이 유입되는 지역의 정점은 출현밀도, 생체량 그리고 종수 순으로 나타나 유기물오염이 진행되었거나, 생물상이 변화하는 추이대 (ecotone point)로 교란지역으로 확인되었다. SAB curve 결과, BPI 분석결과와 동일하게 유기물 오염의 공간적 변화 양상이 있는 것으로 나타났다(Figure 8).

과거 Park(1998)의 1994년 연구 결과를 토대로 SAB curve를 분석한 결과, 천수만 방조제 인근 지역인 St. 2 ~ St. 9 그리고 내만 중간부인 St. 12 ~ St. 16에서 출현밀도가 가장 높고, 출현 종수 그리고 생체량 순으로 나타나 서식환경이 불안정하여 생물상이 급변하는 교란지역(colonization point)의 생물상이 나타났다. 반면, 천수만 중부에 위치한 St. 10과 만입구 인근에 위치한 St. 20에서는 종수, 생체량 그리고 출현밀도 순으로 나타나 비유기물오염지역으로 안정된 생물상이 나타났고, 상대적으로 하부지역에 위치한 St. 18부터 출현 종수가 출현밀도를 역전하는 양상으로 1994년 BPI의 공간적 분포양상과 동일한 것으로 나타났다.

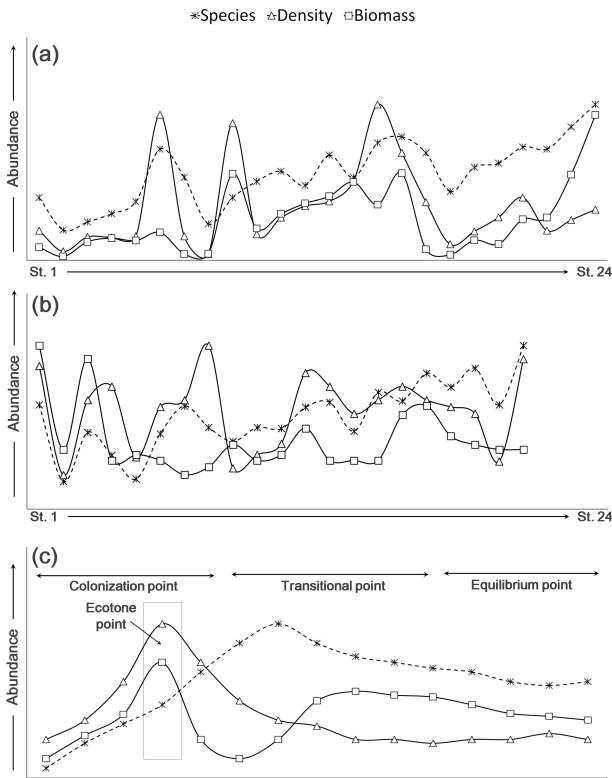


Figure 8. The results of SAB (Species Abundance and Biomass) curve analysis and general model of SAB curve. (a) The result of SAB curve in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast in 2010. (b) The result of SAB curve in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast in 1994. (c) General model for benthic communities by Pearson and Rosenberg(1978)

천수만 조하대의 1994년과 2010년 SAB curve를 비교한 결과, 1994년이 2010년에 비해 상대적으로 교란지역의 범위가 넓어 불안정한 생물상을 가지는 것으로 확인되었고, 1994년에 교란지역이 2010년에 전이지역으로 변하는 양상을 확인하였다. 반면, 1994년과 2010년 모두 방조제를 기준으로 만 입구로 갈수록 안정화된 생물상으로 변하는 동일한 양상으로 확인하였다(Figure 8).

고찰

천수만과 같은 반폐쇄형 내만은 서식환경요인 중 수심, DO, 염분, 수온 그리고 pH 등이 수서생물의 서식범위와 군집 형성 영향을 주는 주요 요인이며(Buchanan and Moore, 1986), 방조제를 통한 담수유입은 DO 및 염분의 농도를 변화시켜 대형저서동물의 생물량을 감소시키거나, 일부 종에게는 민감하게 작용하여 대량 폐사를 유발하는

것으로 알려져 있다(Boesch *et al.*, 1976; Pearson and Rosenberg, 1978). 또한 방조제건설은 담수의 급격한 유입, 해류흐름의 변화, 유기물오염 그리고 퇴적상의 변화 등 직접적 혹은 간접적으로 저서환경을 변화시켜 조하대에 서식하는 대형저서동물에게 직접적인 영향을 주는 것으로 보고되었다(Shim *et al.*, 1988). 본 연구 대상지역인 천수만은 1990년대 초반에 농경지와 산업적인 목적으로 내만 안쪽에 위치한 지역에 방조제를 건설하였고, 이에 따라 해수흐름의 변화 및 담수유입에 따른 내만 염분, DO 그리고 pH 등 연안 서식환경이 변화된 것으로 확인되었다(Park *et al.*, 2000). 이러한 방조제 건설에 따른 천수만 조하대 서식환경의 변화는 조하대 대형저서동물 군집에 간접적 또는 직접적으로 영향을 주고, 시간적 그리고 공간적으로 군집 형성 및 분포 변화를 가져왔을 것으로 판단된다.

천수만과 같은 국내 반폐쇄형 내만 조하대에 출현하는 대형저서동물의 출현 종수를 살펴보면, 진해만 287종(Lim, 1993), 울산만 127종(Shin *et al.*, 2001), 여자만 142종(Lim *et al.*, 1991) 그리고 경기만 87종 (Shin *et al.*, 1989, 1992) 이 출현하는 것으로 보고되었다. 본 연구를 통해 관찰된 천수만 조하대에 서식하는 대형저서동물은 252종으로 다른 국내 내만에 비해 상대적으로 다양한 분류군과 종이 관찰되는 것으로 나타났다. 하지만 본 연구와 동일지역에서 Park *et al.*(2000)이 보고한 1994년 천수만 조하대 대형저서동물 연구결과와 비교하면 2010년에 출현 종수가 다소 감소하였지만, 종 다양도는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 과거보다 우점종의 분포가 천수만 내부에 전반적으로 고르게 분포하여 종 균등도가 증가한 것이 원인으로 파악되었다. 시·공간적 대형저서동물 군집 변화를 파악하기 위해 정점별 종 다양성을 비교하여 본 결과, 1994년과 2010년 종 다양도는 방조제를 기준으로 만 입구로 갈수록 다양도가 증가하는 양상과 연중 종 다양도 편차가 방조제 인근 정점에 비해 만 입구인근 정점에서 변동 폭이 적은 양상이 동일한 것으로 나타났다. 이 결과는 Boesch (1972)와 Wolff (1973)가 제시한 담수영향을 받는 연안 하구지역에서는 염분 농도와 종 다양도가 상관관계를 가진다는 주장과 동일하게 본 연구 조사지역에서도 천수만 방조제 건설에 따라서 해수의 유통을 제한시키고, 밀물 때 해수가 하천 내 역류를 막았다가 썰물 때 가뭇둔 담수를 일시에 방류하여 담수와 의 적정혼합이 아닌 급격한 염분 농도의 변화로 생물상 불안정하여 종 다양도가 급변하는 것이 원인으로 판단된다.

천수만 조하대 대형저서동물 구성원 중 오염지표종 (pollution indicators)인 송곳갯지렁이류, 단각류, 가시뿔해삼(*Protankyra bidentata*), 아기반투명조개 그리고 오투기갯지렁이는 1994년부터 2010년까지 장기간 우점하였고, 천수만 입구 지역보다 방조제 인근 지역에서 우점종의 변화

Table 2. Comparisons between community of macrobenthos in the subtidal in Chonsu Bay on the west coast in 1994 and 2010

Time of research	Distributions of macrobenthos			Dominance species		Results of BPI level		Results of SAB-curve	
	Number of species	Density	Biomass	Species name	density (ind./m ²)	Stations		Stations	
						Near to embankment	Near to bay mouth	Near to embankment	Near to bay mouth
1994'	311 species	769 ind./m ²	104 g/m ²	LU	127	V level	I~III level	Colonization point	Equilibrium point and transitional point
				CO	12				
				GL	8				
				TH	100				
2010'	252 species	681 ind./m ²	567 g/m ²	LU	96	IV~V level	I~II level	Transitional point	Equilibrium point
				CO	37				
				GL	22				
				TH	8				

* LU: Lumbrineris sp., CO: Corophium sp., GL: Glycera chirori, TH: Theora fragilis

가 적은 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2000). 이 결과는 아산만 방조제(Yu *et al.*, 2011)와 시화호 방조제(Lee *et al.*, 2003) 건설에 따른 우점종 출현 양상과 동일한 것으로 천수만의 반폐쇄형 내만이라는 지리학적 특성에 따라서 외해 기원의 물리적인 영향이 천수만 입구 인근 지역으로 국한되어져 있기 때문에 내만 제일 안쪽에 위치한 방조제 인근 지역 대형저서동물 중 조성의 변화는 상대적으로 만 입구 지역보다 느리게 변화하는 것이 원인으로 판단된다. 즉 천수만 조하대 전체 저서환경의 변화는 단시간 내에 급격하게 일어나는 것이 아니라, 반폐쇄형 내만의 특징을 잘 반영되어 점진적으로 변화 하는 것으로 판단된다. 또한 우점종 중 퇴적물 내 유기물을 먹이로 하는 퇴적물식자(deposit feeder)인 송곳갯지렁이와 아기반투명조개는 1994년에 비해 2010년에 감소하는 것으로 나타났고, 표층퇴적물식자(surface deposit feeder)인 치로리미갯지렁이와 단각류는 1994년에 비해 2010년에 증가하는 것으로 나타났다(Table 2). 이러한 결과는 Sanders(1968)와 Lianso(1992)의 연구결과와 동일하게 방조제 건설에 따른 해수유동의 변화 및 퇴적물 경화 등이 조하대 퇴적환경에 영향을 주어 침전된 유기물이 퇴적물내로 공급되지 못하고, 표층에 쌓이게 되는 형태로 변화한 것이 원인으로 판단된다.

그리스 학자인 Friligos and Zenetos(1988)는 반폐쇄형 내만인 Elefsis만의 방조제 건설에 따른 해수 유동 변화 연구를 통해 방조제 건설은 반폐쇄형 내만의 지리학적 특성상 육상기원 유기물 유입량이 자정작용 능력을 초과시켜 외해역으로 유기물 확산을 제안하고, 이러한 환경변화는 유기물이 퇴적층에 정체 및 축적되어서 저서환경 및 저서생태계 변화를 가속화시키는 것으로 보고하였다. 또한 천수만 BPI와 SAB-curve 분석 결과에서도 만 입구에서 방조제 인근 지역으로 갈수록 전이지역이 증가하는 불안정한 상태로 파악되고, 유기물 오염 지표종이 증가하는 것으로 나타났다.

이에 천수만 방조제 건설은 반폐쇄형 내만의 특성상 외부의 환경변화 인자 유입과 더불어 서식환경의 변화를 급격하게 가속화시키는 인자로 작용할 것으로 예상되고, 변화 이전에 복원사업과 적절한 관리방안이 없다면 유기물오염 전이지역이 확산되어서 결국은 저서생태계를 포함한 천수만 생태계는 회복 불가능한 환경으로 변이 할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 천수만은 반폐쇄형 내만이기 때문에 외해로의 유기물 확산량 보다 방조제 방류에 따른 육상 기원 유기물 유입량이 계속적으로 증가하여 천수만 저서생태계가 점차적으로 과거의 하구 및 연안 생태계에서 담수 생태계로 변화 될 가능성이 있고, 향후에 생태계복원을 위한 경제적 및 시간적인 노력은 현재의 그것 보다 막대할 것으로 판단 된다.

본 연구를 통해 현재의 천수만 조하대 대형저서동물 군집을 이해하였으며, 과거 연구결과와 비교 및 분석하여 장기적인 군집변화를 분석함으로써 방조제건설에 따른 직접적 또는 간접적으로 조하대 저서생태계에 미치는 영향에 대해서 파악하였다. 방조제 건설에 따른 해수유동의 제한 및 담수의 급격한 대량방류가 천수만 조하대 저서생태계에 변화를 주었다고 단정할 수는 없지만, 시·공간적인 대형저서동물 군집변화 양상을 통해 본 변화인자 중 상대적으로 높은 비중을 가지고 있다고 판단된다. 이에 본 연구자는 연구결과를 기초자료로 천수만 조하대 저서생태계의 회복을 위해 방조제 담수 방류량의 모니터링과 조절, 대형저서동물 서식환경 개선 방안마련 및 정기적인 저서생태계 모니터링을 실시하여야 한다고 사료된다.

REFERENCES

- Barnard, J.L.(1969) The families and genera of marine Gammaridean Amphipoda. US. Nat. Mus. Bull. 271: 535.

- Beak, E.I.(1989) Illustrated encyclopedia of fauna and flora of Korea, VOL. 31 Polychaeta. Educ. Min. Kor. 764. (in Korean)
- Boesch, D.F.(1972) Species diversity of marine macrobenthos in the Virginia area. *Chesapeake Sci.* 13:206-211.
- Boesch, D.F., R.J. Diaz and R.W. Virnstein(1976) Effects of tropical storm Agens on soft-bottom macrobenthic communities of the James and York estuaries and the lower Chesapeake Bay. *Chesapeake Sci.* 17: 246-259.
- Buchanan, J.B. and J.J. Moore(1986) A broad review of variability and persistence in the Northumberland benthic fauna. *J. Mar. Biol. Assoc. UK.* 66: 641.
- Clark, K.R. and R.M. Warwick(1994) Change in marine communities : An approach to statistical analysis and interpretation. *Plymouth Mar. Lab.* 177.
- Friligos, N. and A. Zenetos(1988) Elefsis Bay anoxia: nutrient conditions and benthic community structure. *Mar. Ecol.* 9(4): 253-312.
- Gray, J.S.(1974) Animal-sediment relationships. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 12: 233-261.
- Gray, J.S.(1981) Detecting pollution induced changes in communities using the log-normal distribution of individuals among species. *Mar. Pollut. Bull.* 13: 150-154.
- Hartley, J.S.(1982) Methods for monitoring offshore macrobenthos. *Mar. Pollut. Bull.* 13: 150-154.
- Hong J.S., R.H. Jung, I.S. Seo, K.T. Yoon, B.M. Choi and J.W. Yoo(1997) How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of Shihwa dike in the west coast of Korea. *J. Kor. Fish Soc.* 30(5): 882-895. (in Korean with English abstract)
- Je J.G., H.S. Park, H.G. Lim and J.S. Lee(1991) Distribution pattern of benthic invertebrates dredged in the coastal waters of Chungchongnamdo, Korea. *Yellow Sea Res.* 4: 103-119. (in Korean with English abstract)
- Jung D.G.(2004) Mollusks in Korea. *Edu. Min. Kor.* 566 pp. (in Korean)
- Kim H.S.(1973) Illustrated encyclopedia of fauna and flora of Korea, VOL. 14 Anomura-Brachyura. *Edu. Min. Kor.* 694 pp. (in Korean with English abstract)
- Kim I.H.(1998) Illustrated encyclopedia of fauna and flora of Korea, VOL. 38 Cirripedia-Symbiotic copepoda-Pycnogonida. *Edu. Min. Kor.* 1038 pp. (in Korean)
- Koh B.S., J.H. Lee and J.S. Hong(1997) Distribution Patterns of the Benthic Macrofaunal Community in the Coastal Area of Incheon, Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 2(1): 31-41. (in Korean with English abstract)
- KORDI(1978) A preliminary marine ecological study for Gojeong-Ri power plant site, BSPI00014-14-3, 138 pp. (in Korean)
- Le Bris H.(1988) Fonctionnement des ecosystems benthiques cotiers au contact d'estuaires: l'arade de Lorient et la baie de Vilaine. Ph.D. Thesis, Bretagne Occidental Univ. Brest. 311 pp.
- Lianso, R.J.(1992) Effects of hypoxia on estuarine benthos: the lower Rappahannock River (Chesapeake Bay), a case study. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 35: 491-515.
- Lim H.S., J.G. Je, J.W. Choi and J.H. Lee(1991) Distribution Pattern of the Macrozoobenthos at Yoja Bay in Summer. *Ocean. Polar. Res.* 13(2): 31-45. (in Korean with English abstract)
- Lim H.S.(1993) Ecology on the macrozoobenthos in Chinhae Bay of Korea. Ph.D. Thesis, Pukyong Nat. Univ. Busan. 311 pp. (in Korean with English abstract)
- Lee J.H.(1993) Marine environment assessment based on the benthic faunal communities. KORDI, KORD98782, 95 pp. (in Korean with English abstract)
- Lee J.H.(1994) Marine environment assessment based on the benthic faunal communities. KORDI, KORD98783, 224 pp. (in Korean with English abstract)
- Lee J.H.(1993) Marine environment assessment based on the benthic faunal communities. KORDI, KORD98784, 339 pp. (in Korean with English abstract)
- Lee J.H. and H.S. Park(1998) Community structures of macrobenthos in Chonsu Bay. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 33(2): 18-27. (in Korean with English abstract)
- Lee J.H., B.S. Koh and H.S. Park(1997) Marine environmental assessment based on the benthic macroinfaunal compositions in the coastal area of Incheon, Korea. *J. Kor. Fish Soc.* 30(5): 771-781. (in Korean with English abstract)
- Lee J.H., J.Y. Park, H.G. Lee, H.S. Park and D.S. Kim(2003) Environmental Assessment of the Shihwa Lake by using the Benthic Pollution Index. *Ocean. Polar. Res.* 25(2): 183-200. (in Korean with English abstract)
- Park H.S.(1998) Effects of dike construction on benthic environment and macrofaunal community in Chonsu Bay, Korea. Ph.D. Thesis, Inha Univ. Incheon. 226 pp.
- Park H.S., H.S. Lim and J.S. Hong(2000) Spatio and temporal patterns of benthic environment and macrobenthos community on subtidal soft-bottom in Chonsu Bay. *J. Kor. Fish Soc.* 33(3): 262-271. (in Korean with English abstract)
- Park H.S., R.S. Kang and J.H. Lee(2006) Distribution Patterns of the Dominant Macrobenthos and the Benthic Environments on Subtidal Soft-bottom in Chonsu Bay. *J. Kor. Fish Soc.* 39: 214-222. (in Korean with English abstract)
- Pearson, T.H. and R. Rosenberg(1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanol. Mar. Biol. Annu. Rev.* 16: 229-311.
- Sanders, H.L.(1968) Marine benthic diversity: A comparative study. *Am. Nat.* 102: 243-282.

- Shannon, C.E. and W. Weaver(1949) *The Mathematical Theory Of Communication*. Univ. of Illinois Press, Illinois. 117 pp.
- Shim J.H., C.H. Koh, S.J. Kim, T.W. Lee and Y.C. Park(1988) *Analysis of the ecosystem. Yellow Sea. KOSEF*, 246 pp.
- Shin H.C., J.W. Cho and C.H. Koh(1989) Faunal assemblages of benthic macrofauna in the inter-and subtidal region of the inner Kyeonggi Bay west coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 24(4): 184-193. (in Korean with English abstract)
- Shin, H.C., S.M. Yoon and C.H. Koh(2001) Spatial distribution of benthic macrofaunal community in Ulsan Bay and Onsan Bay, eastern coast of Korea. *The Sea* 6: 180-189. (in Korean with English abstract)
- Shin H.C., S.S. Choi and C.H. Koh(1992) Seasonal and spatial variation of polychaetous community in Youngil Bay southeastern Korea. *J. Oceanol. Soc. Kor.* 27: 46-54. (in Korean with English abstract)
- Wolff, W.J.(1973) The estuary as a habitat. An analysis of data on the soft-bottom macrofauna of the estuarine area of the river Rhine, Meuse and Scheldt. *Zool. Verhandl. Leiden*, 126:1-242.
- Yu, O.H., H.G. Lee and J.H. Lee(2011) The influence of environmental variables on macrobenthic communities after dike construction in Asan Bay. *J. Korea. Soc. Environ. Biol.* 29(4): 326-344. (in Korean with English abstract)