

# 영산강 하구역의 연성저질에 서식하는 저서동물 군집

## 2. 여름철 빈산소 수괴의 출현과 저서동물 분포

임현식·박경양  
목포대학교 해양자원학과

# Community Structure of the Macroenthos in the Soft Bottom of Yongsan River Estuary, Korea

## 2. The Occurrence of Summer Hypoxia and Benthic Community

Hyun-Sig LIM and Kyung-Yang PARK

Department of Marine Resources, Mokpo National University, Muan, Chonnam 534-729, Korea

The relationship between summer hypoxia in bottom water layer and benthic community structure was discussed at forty sampling stations in semi-enclosed Youngsan River estuarine bay, Korea. The oxygen deficient layer less than 2.0 mg/l was widely developed in the inner estuarine stations in summer due to the summer stratification. A total of 141 species was occurred, with a mean density of 1,923 ind./m<sup>2</sup> and biomass of 79.44 g/m<sup>2</sup> in summer season. The species number was significantly increased with the increment of the bottom dissolved oxygen, whereas density and biomass were partially correlated within the low oxygen level of 2.0 mg/l. These results imply that benthic community structures are affected by bottom oxygen depletion in summer. Cluster analysis showed that the benthic community could be classified into three station groups. These station groups from the species composition coincided with the groups based on the environmental factors. This fact suggests that the overall spatial distribution of macrozoobenthos in Youngsan River estuarine bay in summer should be controlled by the summer hypoxia and clay content of the area. Group-I was located the innermost estuarine bay from Mokpo Harbour to near the dike, where summer hypoxia was developed and one bivalve *Theora fragilis*, two polychaetes, *Tharyx* sp. and *Lumbrineris longifolia* were dominated. Group-II, the central transitory area of the estuarine bay between two another station groups, where two bivalves *Theora fragilis*, *Raetellops pulchella* and a polychaete *Tharyx* sp. predominated with relatively low density compared to that of Group-I. Group-III, the mouth part of the estuarine bay exposed to the open sea, where 2 polychaetes *Pocillochaetus johnsoni* and a bivalve *Yoldia johanni* predominated.

Key words: summer hypoxia, benthic community, Youngsan River estuary

### 서 론

하구역은 지속적으로 유입되는 담수와 조수간만의 차이에 의해 해수의 혼합이 활발하게 일어나는 해역이다. 그러나 하구둑 건설로 인해 담수와 해수의 혼합이 차단될 경우, 기존의 조석작용이 약화되어 하구역의 해수는 정체되고 반폐쇄적인 환경을 나타내게 된다. 이러한 현상은 금강 하구역에서도 관찰되어 향후 퇴적상의 변화가 예측된다고 지적되었다 (Choi et al., 1995). 이와 같이 인위적으로 조류의 흐름이 약화된 해역에는 입도가 세립해질 가능성이 있으며, 이 때 유기물이 풍부한 도시하수 등이 유입될 경우, 외해로의 확산이 저해되어 하구역의 해양환경을 악화시킬 가능성이 있다. 영산강 하구역은 영산강 방조제가 건설되기 전에는 담수의 유입 및 원활한 해수교환이 이루어졌으나, 방조제 건설 이후에는 담

수 유입의 감소와 함께 조류의 흐름이 약해졌다. 최근에는 금호 방조제의 건설로 인해 조류의 흐름이 더욱 약해지고 주변으로부터의 유기물 유입 증가로 인해 해양환경의 변화가 진행되고 있는 해역이기도 하다 (Lim and Park, 1998). 특히 반폐쇄적인 특징을 가지고 있는 하구역에서 저층으로 운반되는 입자성 유기물 그리고 퇴적물 내의 유기물의 분해는, 저층 용존산소를 소비하여 산소 결핍 현상의 원인이 된다 (Rosenberg and Loo, 1988; Yang and Hong, 1988).

일반적으로 2.0 mg/l 이하의 용존산소 농도는 연안역의 대부분의 저서동물에 대한 최저 인내한계로서 알려져 있다 (Rosenberg et al., 1991). 따라서 저층 빈산소 수괴가 형성될 경우 산소 농도에 민감한 극피동물이나 갑각류 등이 폐사되거나 이동함으로써 저서동물 군집의 출현종수, 밀도 및 다양도 등이 급격히 감소하게 된다 (Zarka-

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비 (신진교수연구과제)에 의하여 연구되었으며, 교육부 11차 IBRD 교육차관 신진교수 연구기자재 지원을 받았다.

nellas, 1979). 그러나 빈산소수괴로 인해 저서동물의 일시적인 폐사 현상이 발생한 장소에서도, 저층 용존산소량이 증가할 경우 저서동물의 군집은 회복되는 것으로 알려져 있다 (Harper et al., 1981; Lim, 1993). 결국 빈산소 수괴가 형성되는 내만역에서의 저서동물 군집은 저층 용존산소 결핍에 큰 영향을 받고 있으며, 빈산소수괴 형성은 저서동물 군집의 계절적, 연간변동을 조절하는 주된 요인의 하나로 작용하게 된다. 특히 빈산소수괴가 저서동물의 군집에 미치는 영향은 여름철의 경우 더욱 뚜렷한 것으로 알려져 있다 (Frigos and Zenetos, 1988; Holland, 1985; Lim, 1993). 이러한 빈산소 수괴는 주로 내만역에서 형성되는 것으로 알려져 있으나 최근에는 멕시코만과 같이 광범위한 해역에서도 빈산소 수괴가 형성되어 수산생물이 폐사함으로써 어업에 영향을 미친다고 보고되었다 (Beardsley, 1997).

지금까지 우리나라에서 저서동물 군집과 저층 빈산소수괴 형성과 관련하여 수행된 연구들은 Hong (1987)이 진해만 전체 해역에서 여름철에 광범위하게 형성되는 저층 빈산소 수괴가 저서동물의 분포에 심각한 영향을 미치고 있음을 밝힌 것이 그 시초이다. 그 후 Lim et al. (1992)은 진해만 가조도 서부해역 양식장 밀집지역에서 여름철 저층 빈산소수괴로 인해 저서동물군집이 영향을 받고 있다고 지적하였다. 또한 Lim and Hong (1994)은 진해만의 저서환경 특성을 논하면서 빈산소 수괴의 출현과 저서동물 군집과의 관계를 논하였다. 특히 진해만의 내만 해역에서는 빈산소수괴가 형성되는 수개월 동안 대형저서동물이 사라지고 저층 용존산소가 회복된 뒤에도 정점에 따라 1~4개월까지 대형 저서동물이 출현하지 않는 무생물 상태도 보고되었다 (Hong and Lim, 1997; Lim, 1993). 한편 시화호의 경우에도 방조제의 건설 이후 호수 내에 무산소층이 형성되면서 저서동물의 폐사가 관찰되었다 (Hong et al., 1997). 영산강 하구역은 반폐쇄적인 특성을 나타내고 있어 해수 유동이 적고, 유기물 유입이 많으며 여름철에는 저층 빈산소 수괴가 형성되는 것으로 나타났다 (Lim and Park, 1998). 따라서 본 논문의 목적은 하구역 건설로 인해 해수교환이 불량한 영산강 하구역에서의 저서동물 군집의 공간분포가 빈산소수괴에 의해 어떤 영향을 받고 있는지를 파악하는 것을 목적으로 하였다. 아울러 향후 빈산소수괴의 형성 시기 및 그 지속기간, 규모, 저서동물 군집의 시간적인 반응 등에 대한 추가 연구에 필요한 자료를 축적하는데 그 목적을 두었다.

## 재료 및 방법

본 조사가 수행된 장소와 시기 및 정점은 Lim and Park (1998)에서와 같다. 이 가운데 여름철인 1996년 8

월의 자료만을 사용하여 빈산소 수괴의 출현과 저서동물 군집과의 관계를 논하였다. 저서동물의 채집은 van Veen 그랩 (채집면적 0.1 m<sup>2</sup>)을 이용하여 각 정점당 3회씩 퇴적물을 인양하였다. 인양된 퇴적물은 선상에서 1 mm 망목의 표준체를 사용하여 체질하였으며 잔존물을 중성 포르말린으로 10%되게 고정한 다음 실험실로 운반하였다. 실험실에서는 동물군별로 선별한 다음 습증량을 측정하였으며, 입체 현미경하에서 종 수준까지 동정하고 종별 개체수를 세었다. 습증량 측정시 다모류와 갑각류는 서식관을 제외하였으며, 연체동물은 패각의 무게를 포함하였다. 채집된 저서동물의 종별 개체수 자료를 이용하여 종다양도 (Shannon and Wiener, 1963), 균등도 (Pielou, 1984) 및 우점도 (Simpson, 1949) 등의 군집지수를 구하였다. 출현종에 근거한 각 정점간의 유사도를 알아보기 위하여 유사도 지수는 Chord distance를 사용하였고, 가중평균 결합법으로 수치도를 작성하는 집괴분석을 실시하였다 (Pielou, 1984). 이 때 사용된 개체수 자료는 극우점종의 출현으로 인한 자료의 편중을 피하기 위하여 전출현종의 개체수 자료를 대수변환하여 사용하였다 (Hughes et al., 1972). 한편 영산강 하구역의 가장 내만에 해당되는 하구둑에서부터 목포항 입구를 거쳐 외해역에 이르는 정점들 (정점 1, 10, 17, 24, 30 및 32)을 하나의 조사정선 (transect)으로 설정하고, 빈산소수괴가 형성된 정점들과 정상적인 정점들 사이의 저서동물 군집을 비교하였다. 본 논문에서 해역의 명칭은 하구역을 하나의 반폐쇄적인 만으로 보고, 하구둑 주변을 내만해역, 목포항을 중심으로 주변해역을 만중앙부 해역, 그리고 고하도 서측의 정점 31에서 40까지를 만입구역으로 칭하였다.

## 결 과

### 1. 저서동물의 종 조성 및 공간 분포

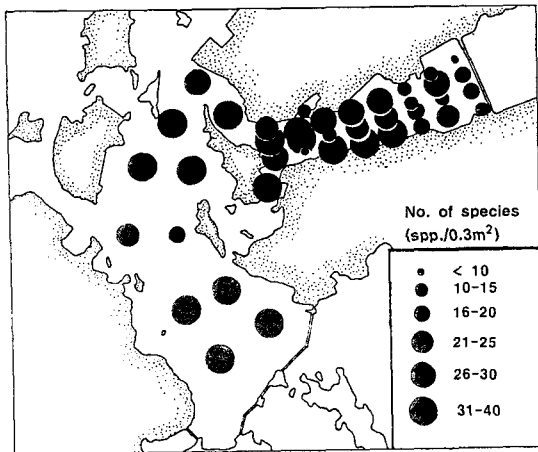
1995년 8월에 채집된 저서동물의 출현종수는 141종이었으며, 이 가운데 다모류가 67종이 출현하여 상대적으로 가장 많았으며, 전체 출현종수의 약 48%를 차지하였다. 또한 연체동물이 31종으로서 22%, 갑각류가 26종으로 18%를 차지하였다. 밀도는 1,923개체/m<sup>2</sup>였으며, 이 가운데 연체동물이 1,378개체/m<sup>2</sup>로서 전체 밀도의 72%, 다모류는 447개체/m<sup>2</sup>로서 전체 밀도의 23%를 차지하였다. 생물량은 79.44 g/m<sup>2</sup>이 출현하였는데, 이 가운데 연체동물이 가장 우점하여 26.98 g/m<sup>2</sup>로서 전체 생물량의 34%, 극피동물이 21.90 g/m<sup>2</sup>로서 28%, 그리고 다모류가 21.42 g/m<sup>2</sup>로서 27%를 차지하였다 (Table 1).

출현종수의 각 정점별 공간 분포를 보면 정점 1과 25에서는 각각 9종이 출현하여 상대적으로 가장 적었으며, 정점 32에서는 37종이 출현하여 상대적으로 가장 많았다.

**Table 1. Number of species, abundance and biomass of the macrobenthos in Youngsan River estuary in August 1995**

Taxon	No. of species (%)	Abundance (ind./m <sup>2</sup> ) (%)	Biomass (g/m <sup>2</sup> ) (%)
Polychaeta	67 ( 47.5)	447 ( 23.2)	21.42 ( 26.9)
Mollusca	31 ( 22.0)	1,378 ( 71.7)	26.98 ( 34.0)
Crustacea	26 ( 18.4)	83 ( 4.3)	5.47 ( 6.9)
Echinodermata	9 ( 6.4)	11 ( 0.6)	21.90 ( 27.6)
Others	8 ( 5.7)	4 ( 0.2)	3.66 ( 4.6)
Total	141 (100.0)	1,923 (100.0)	79.44 (100.0)

빈산소 수괴가 형성된 영산강 하구둑에서 목포항 주변에 이르는 정점들에서는 정점당 25종 이하의 출현양상을 나타내었다. 그러나 산소결핍현상이 나타나지 않는 외해역으로 나갈수록 출현종수는 증가하여 정점당 30종 이상의 분포를 나타내었다. 또한 영산강 하구둑에서 목포항 주변에 이르는 해역이라도 빈산소 수괴의 영향을 받지 않은 정점들에서는 30종 이상의 출현종수를 나타내었다. 한편 외해역과의 해수가 교환되는 주수로인 목포구 근처에 위치한 정점 35와 36에서는 상대적으로 주변 정점보다 적은 17종 및 23종이 출현하였다 (Fig. 1).

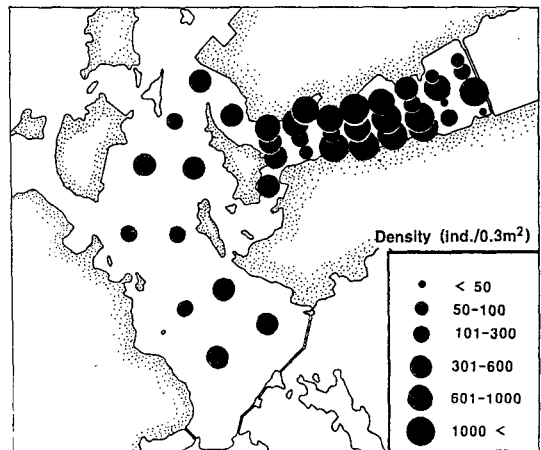


**Fig. 1. Spatial distribution of the number of macrozoobenthic species in Youngsan River estuary, Korea in summer season.**

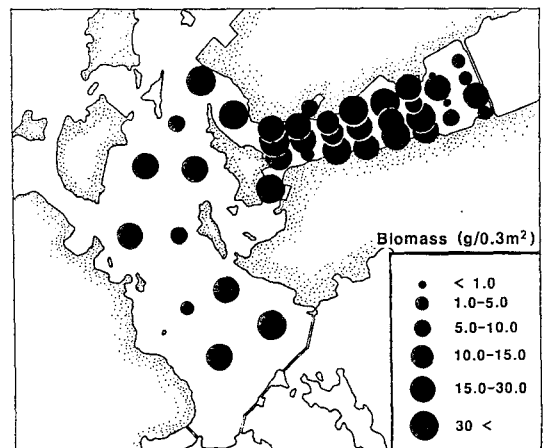
밀도의 경우 하구둑 수문앞에 위치한 정점 4에서 28개체/0.3 m<sup>2</sup>가 출현하여 가장 낮은 밀도였으며, 빈산소 수괴가 출현한 하구역 내만 정점들에서는 상대적으로 출현 밀도가 낮아 1000개체/0.3 m<sup>2</sup> 이하의 분포를 나타내며, 그 주변해역인 목포항에서 하구둑에 이르는 해역의 중앙부에 위치한 정점 3, 11, 12, 14, 16에서는 1000개체/0.3 m<sup>2</sup> 이상이 출현하였다. 그러나 빈산소의 영향을 받지 않는

외해역으로 나갈수록 밀도가 감소하여 300개체/0.3m<sup>2</sup> 이하의 상대적으로 낮은 밀도를 나타내었다 (Fig. 2). 하구역 내만의 경우 다모류와 연체동물의 출현개체수 비율이 높으며, 외해역으로 나갈수록 다모류의 개체수 구성비율이 낮은 양상을 나타내었다.

생물량은 정점 5의 0.04 g/0.3 m<sup>2</sup>~정점 30의 90.73 g/0.3 m<sup>2</sup>의 범위였는데, 빈산소 수괴의 영향을 받는 내만역과 산소결핍 현상이 발생하지 않는 외해역에서 상대적으로 낮은 생물량을 나타내었다 (Fig. 3).



**Fig. 2. Spatial distribution of the macrozoobenthic abundance in Youngsan River estuary, Korea in summer season.**



**Fig. 3. Spatial distribution of the macrozoobenthic biomass in Youngsan River estuary, Korea in summer season.**

한편 여름철에 출현하였던 개체수 우점종은 Table 2에 서와 같다. 이때패류인 *Theora fragilis*가 40개 정점에

**Table 2. Dominant species of the macrobenthos in Yongsan River estuary in summer season, August 1995**

Species name	Individuals	Abundance (ind./m <sup>2</sup> )	Station occurred	%	Cum. %
<i>Theora fragilis</i> (bi)	15,043	1,254	40	64.5	64.5
<i>Tharyx</i> sp. (po)	1,592	133	28	6.8	71.3
<i>Poecilochaetus johnsoni</i> (po)	635	53	18	2.7	74.0
<i>Raetellops pulchella</i> (bi)	576	48	32	2.5	76.5
<i>Lumbrineris longifolia</i> (po)	531	44	23	2.3	78.8
<i>Cirolana japonensis</i> (cr)	503	42	23	2.2	81.0
<i>Mediomastus</i> sp. (po)	448	37	24	1.9	82.9
<i>Yoldia jobanni</i> (bi)	408	34	21	1.8	84.7
<i>Cirriformia tentaculata</i> (po)	324	27	14	1.4	86.1
<i>Asthenognathus inaequipes</i> (cr)	215	18	17	0.9	87.0
<i>Micropodarke</i> sp. (po)	188	16	29	0.8	87.8
<i>Glycera chirori</i> (po)	171	14	30	0.7	88.5
<i>Macoma nipponica</i> (bi)	171	14	21	0.7	89.2
<i>Yokoyamaia ornatissima</i> (ga)	158	13	26	0.7	89.9

po: polychaetes, bi: bivalves, ga: gastropods, cr: crustaceans

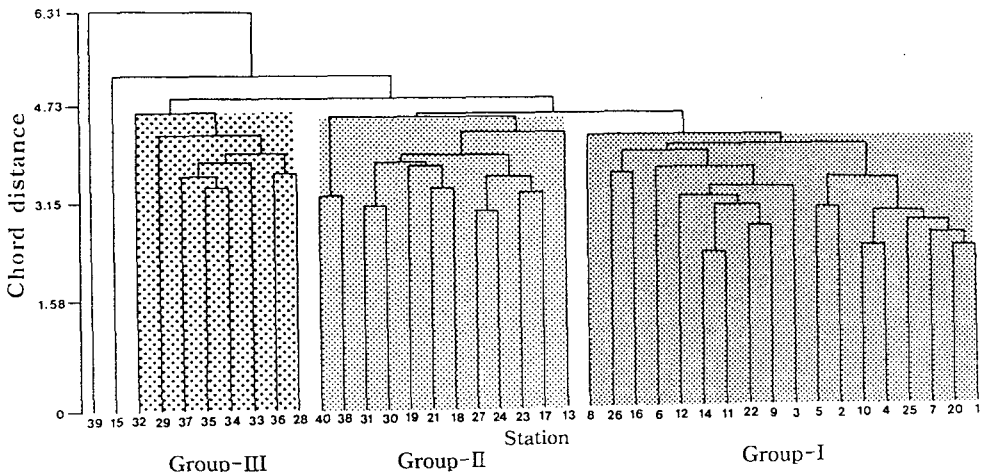
서 15,043개체가 출현하여 정점당 평균 1,254 개체/m<sup>2</sup>의 밀도였는데, 전체 출현 개체수의 약 65%를 점유하였다. 이 종의 주된 분포역은 목포항에서 영산강 하구둑까지의

정점에서 주로 출현하였으며 외해역으로 나갈수록 밀도가 감소하는 양상이었다. 또한 다모류인 *Tharyx* sp.는 28개 정점에서 1,592개체가 출현하여 133개체/m<sup>2</sup>의 밀도였는데, 전체 출현 개체수의 약 7%를 차지하였다. 이 종은 주로 내만에서 출현하고 있으며 외해역에서는 밀도가 낮았다. 다모류인 *Poecilochaetus johnsoni*는 635개체가 출현하여 53개체/m<sup>2</sup>의 밀도였는데, 주로 화원반도와 고하도 사이에 위치한 외해역에서 출현하였다.

각 정점별 출현종수 및 개체수의 출현 양상은 군집의 구조를 나타내는 제 2차원에서도 잘 나타나, 다양도는 정점에 따라 0.46~2.98 범위였는데, 37종이 출현하여 출현종수가 가장 많았던 정점 32에서 다양도가 가장 높았으며 ( $H'=2.98$ ), 목포항 내에 위치하여 15종이 출현한 정점 22에서 가장 낮았다. 또한 빈산소의 영향을 받고 있는 정점들에서의 다양도도 0.71~1.77의 범위로서 다른 정점들에 비해 상대적으로 낮은 양상이었다. 그러나 수문앞에 위치한 정점 4와 인근의 정점 7은 출현종수도 각각 12종과 14종으로서 상대적으로 적고, 저층 산소 농도도 2.0 mg/l 이하임에도 불구하고 다양도는 2.25~2.42를 나타내었다. 정점 8의 경우도 빈산소 수괴의 영향을 받는 지역이지만 25종이 출현하여 비교적 높은 다양도를 나타내고 있다 ( $H'=2.32$ ). 우점도는 다양도가 가장 낮은 정점 22에서 0.84로서 가장 높았고, 정점 39에서 0.65로서 가장 낮았다. 균등도는 정점 4에서 0.91로서 최고치였으며, 다양도가 가장 낮은 정점 22에서 0.17로서 상대적으로 낮았다.

3. 집괴 분석

각 정점별 출현개체수 자료를 사용하여 집괴 분석한 결과, 조사해역의 40개 정점들은 하구역 내만 해역과 중앙부 해역 및 외부 해역의 3개의 정점군으로 나누어졌다 (Fig. 4). 즉, 퇴적물 입도가 상대적으로 세립하며 퇴적물



**Fig. 4. Dendrogram of the sampling stations based on the cluster analysis.**

유기물 함량도 높고, 여름철 빈산소 수괴가 형성되어 출현종수도 상대적으로 적은 정점들로 이루어진 정점군 I, 외해수와의 교환이 원활한 외해역에 위치하여 퇴적물 입도가 상대적으로 조립하고 유기물 함량이 낮으며, 용존산소 함량이 높은 해역에 위치한 정점군 III, 그리고 그 중간역에 위치한 정점군 II로 구분되었다 (Fig. 5). 이러한 정점군의 구분은 Lim and Park (1998)이 제시한 바와 같이, 저층 용존산소량과 퇴적물의 점토 함량에 따라 구분된 정점군과 대체로 일치하였다. 결국 빈산소 수괴가 형성되는 여름철에 있어서 저서동물 군집은 빈산소수괴의 영향을 받는 정점군과 영향을 받지 않는 정점군으로 구분되고, 다시 퇴적물의 점토 함량 차이에 따라 구분되는 것을 알 수 있다. 이들 3개 정점군의 생태학적 특징을 요약하면, 정점군 I에서는 출현종수 및 생물량이 3개 정점군 가운데 가장 낮으며, 밀도는 정점군 II보다는 낮으나, 정점군 III보다는 높다 (Table 3). 또한 다양도와 균등도는 3개 정점군 가운데 가장 낮고 ( $H'=1.30$ ,  $J=0.47$ ), 우점도는 정점군 II보다는 낮으나, III보다는 높은 값을 나타내고 있다 ( $D=0.47$ ). 이 정점군에서는 이매패류인 *Theora fragilis*가 평균 1,330개체/m<sup>2</sup>로서 극우점하였으며, 다모류인 *Tbaryx* sp.는 232개체/m<sup>2</sup>, *Lumbrineris longifolia*는 88개체/m<sup>2</sup>로서 우점종으로 출현하였다. 정점군 II는 3개 정점군 가운데 출현종수도 가장 많은 22~42종 범위였으며, 밀도도 가장 높은 2,334개체/m<sup>2</sup>였고, 생물량도 110.47 g/m<sup>2</sup>로서 가장 높은 값이었다. 우점도는 3개 정점군 가운데 상대적으로 가장 높았으며 ( $D=0.50$ ), 다양도와 균등도는 정점군 I과 III의 중간값을 나타내었다 ( $H'=1.62$ ,  $J=0.48$ ). 이 정점군에는 이매패류인 *T. fragilis*와 *Raetellops pulchella*가 각각 764개체/m<sup>2</sup> 및 45개체/m<sup>2</sup>로서 우점하였다. 한편 정점군 III은 출현종수와 생물량은 정점군 II보다는 적으나 정점군 I보다는 높았으며, 밀도는 3개 정점군 가운데 가장 낮은 양상이었다. 또한 다양도와 균등도는 3개 정점군 가운데 가장 높았으며 ( $H'=2.24$ ,  $J=0.67$ ), 우점도는 상대적으로 가장 낮은 양상이었다 ( $D=0.21$ ). 이 정점군에서는 이매패류인 *T. fragilis*, *Yoldia jobanni* 및 다모류인 *Poecilochaetus johnsonii*가 우점종으로 출현하여 각각 361개체/m<sup>2</sup>, 153개체/m<sup>2</sup> 및 96개체/m<sup>2</sup>의 밀도를 보였다.

#### 4. 저층 용존산소량과 저서동물 군집

저층 용존산소량과 출현종수와의 관계를 보면 (Fig. 6), 용존산소량의 증가에 따라 출현종수는 직선적인 관계로 증가하여 양의 상관관계를 나타내었다 ( $r=0.4$ ,  $p<0.01$ ). 특히 저층 산소농도 2.0 mg/l 이하에서는 용존산소량의

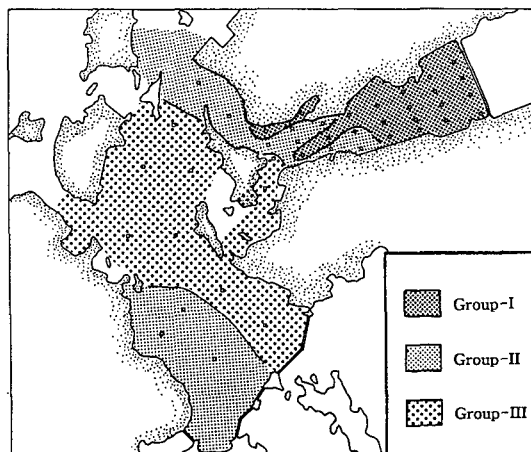


Fig. 5. Spatial delineation of each station group in Youngsan River estuary, Korea in summer season.

Table 3. Characteristics of the four station groups in Youngsan River estuary in August 1995

Parameters \ Group	Group I	Group II	Group III
<i>Environmental</i>			
Mean grain size ( $\phi$ )	9.93 $\pm$ 0.45	9.20 $\pm$ 0.38	8.84 $\pm$ 0.43
Bottom DO (mg/l)	1.48 $\pm$ 0.57	4.30 $\pm$ 1.08	6.80 $\pm$ 0.49
<i>Ecological</i>			
No. of species	3~25	22~41	17~37
Mean density (ind./m <sup>2</sup> )	1.910 $\pm$ 1,591	2,334 $\pm$ 1,458	962 $\pm$ 478
Mean biomass (g/m <sup>2</sup> )	44.71 $\pm$ 39.74	110.47 $\pm$ 74.31	61.58 $\pm$ 28.55
Mean diversity	1.30 $\pm$ 0.58	1.62 $\pm$ 0.57	2.24 $\pm$ 0.42
Mean dominance	0.47 $\pm$ 0.23	0.50 $\pm$ 0.18	0.21 $\pm$ 0.12
Mean evenness	0.47 $\pm$ 0.22	0.48 $\pm$ 0.17	0.67 $\pm$ 0.12
<i>Dominant species (ind./m<sup>2</sup>)</i>			
<i>Theora fragilis</i> (b)	1,330	764	361
<i>Tbaryx</i> sp. (p)	232	43	13
<i>Lumbrineris longifolia</i> (p)	88	9	7
<i>Cirriformia tentaculata</i> (p)	60	-	-
<i>Raetellops pulchella</i> (b)	53	45	4
<i>Mediomastus</i> sp. (p)	4	36	14
<i>Yoldia jobanni</i> (b)	1	35	96
<i>Poecilochaetus johnsonii</i> (p)	13	34	153
<i>Micropodarke</i> sp. (p)	6	14	35
<i>Ennucula tenuis</i> (b)	-	6	30

p: polychaetes b: bivalves

증가와 함께 출현종수가 급격하게 증가하였다. 밀도는 2.0 mg/l 이하에서는 용존산소량의 증가에 따라 급격히 증가하였으나, 그 이후 부터는 밀도의 증가와 용존산소량과는 뚜렷한 관계를 나타내지 않았다. 오히려 저층 용존산소의 증가에 따라 밀도가 낮아지는 경향이 있었다 (Fig. 7). 생물량과 용존산소량과의 관계에서는, 용존 산

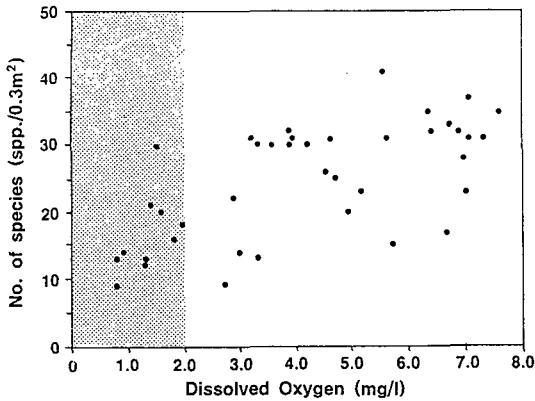


Fig. 6. Relationship between number of species and dissolved oxygen concentration in summer season. Shaded area indicates hypoxic level.

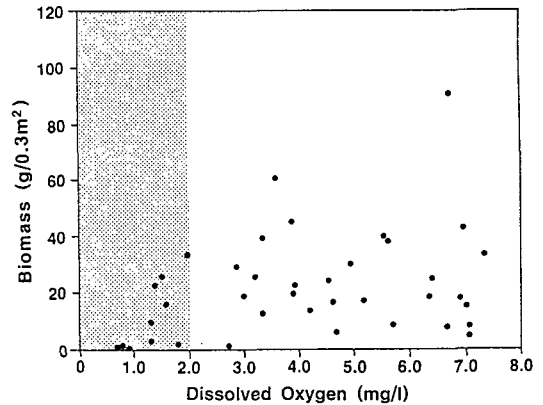


Fig. 8. Relationship between biomass and dissolved oxygen concentration in summer season. Shaded area indicates hypoxic level.

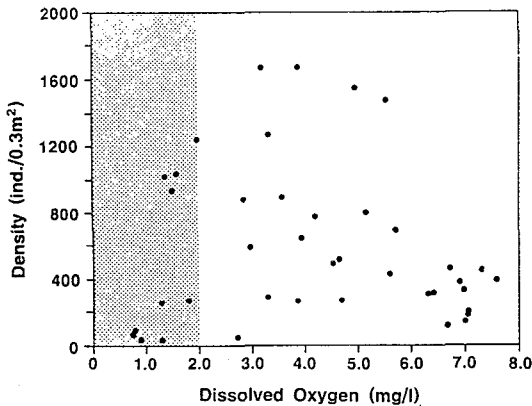


Fig. 7. Relationship between density and dissolved oxygen concentration in summer season. Shaded area indicates hypoxic level.

소량 2.0 mg/l까지는 용존산소 증가와 함께 생물량이 증가하였으나, 그 이상의 농도에서는 용존산소량 증가와 생물량 증가 사이에는 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았다 (Fig. 8).

한편 하구둑 근처의 정점 1에서 외해역에 이르는 정점들을 용존산소량 증가에 따라 하나의 조사정선으로 설정한 다음, 각 분류군별 출현종수, 개체수 및 생물량을 도시하였다 (Fig. 9). 저층 용존산소량과 출현종수는 내만에서부터 외해역으로 갈수록 점차 증가하는 양상을 나타내었으며, 내만인 정점 1과 10에서는 다모류의 출현종수 비율이 매우 높았다. 그러나 외해역으로 나갈수록 다모류의 비율은 적어지고 연체동물 및 갑각류의 출현종수 비율이 증가하는 양상이었다. 한편 밀도는 내만해역에는 상대적으로 낮았으나 중앙부에 위치한 정점 17에서 약 2,800개체/m<sup>2</sup>로서 최고 밀도를 나타내었다. 그 후 외해

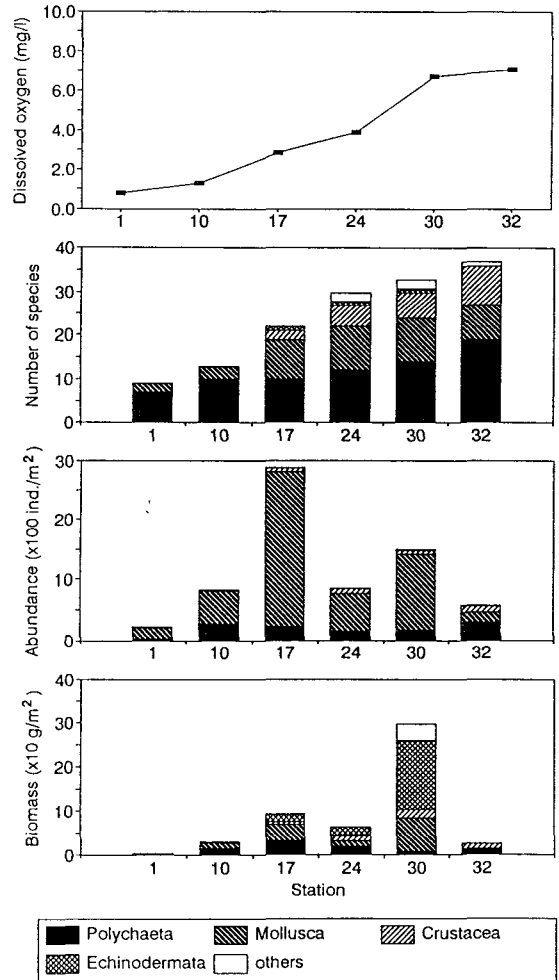


Fig. 9. Variations in dissolved oxygen concentration, number of species, abundance, biomass along the transect line from st. 1 to st. 32.

역으로 나갈수록 점차 감소하는 양상이었다. 특히 정점 17에서는 연체동물의 밀도가 출현밀도의 90% 이상을 차지하였는데, 기회종인 이매패류 *Theora fragilis*가 2,367개체/m<sup>2</sup> 출현하여, 정점 17에서 출현한 전체 개체수의 81%를 차지하였다. 그러나 생물량은 정점 17에서보다 정점 30에서 약 300 g/m<sup>2</sup>로서 최고치를 나타내었다. 한편 다양도 및 균등도는 외해역에서 내만역으로 들어오면서 감소하였으며, 반면 우점도는 증가하는 양상을 나타내었다 (Fig. 10).

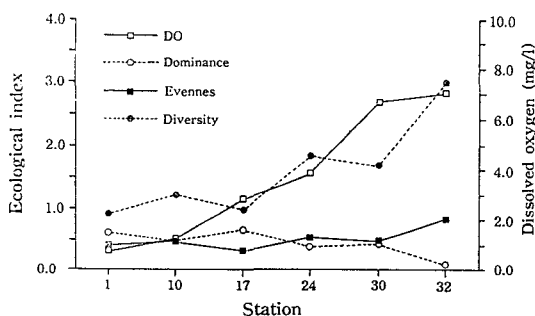


Fig. 10. Variations in dissolved oxygen concentration and ecological indices along the transect line from st. 1 to st. 32.

## 고 찰

여름철 빈산소 수괴 형성은 주로 하구역이나 연안 천해역 및 해수 교환이 원활하지 못한 폐쇄적인 만에서 표층수온의 상승과 염분의 하강으로 인해 형성되는 성층이 그 원인이 되고 있다. 이와 같이 성층이 형성되는 해역에 육상에서 유기물이 다량 유입되어 부영양화될 경우 빈산소 상태는 더욱 가속화 되는 것으로 알려져 있다 (Diaz and Rosenberg, 1995; Friiigos and Zenetos, 1988; Hong et al., 1997; Lim, 1993). 하구둑이 건설되어 있는 영산강 하구역에서도 여름철 저층 빈산소 수괴 형성은 표,저층 수온 차이에 의한 성층형성이 주된 원인으로 나타났다. 특히 반폐쇄적인 특성을 띠고 있는 영산강 하구역은, 하구역 중앙부에서부터 만 입구에 이르는 해역에서는 여름철 표,저층 수온 차이가 약 1°C인 반면, 하구둑 인접 내만역에서는 약 7°C의 차이가 나타났다. 이것은 여름철 내만역에 저층수의 정체 현상이 뚜렷하게 나타남을 의미한다 (Lim and Park, 1998). 영산강 하구역에서 빈산소 수괴가 형성되는 해역은 퇴적물의 입도가 상대적으로 세립하고 퇴적물 내의 유기물 함량도 높은 것으로 나타났다. 이러한 높은 함량의 유기물은 분해시 용존산소를 소비함으로써 산소결핍 현상을 가속시키는 요인으로 작용한다.

특히 입도의 세립화는 공극면적을 확대시켜 퇴적물의 유기물 함량을 높히는 것으로 알려져 있다 (Lim and Hong, 1994). 저층 빈산소수괴 형성에 대해 Harper et al. (1981)는 미국 Texas연안에서 대량의 육수 유입으로 인한 표,저층수의 염분차에 의한 성층 때문에 빈산소 수괴가 형성된다고 지적하였고, Pihl et al. (1991)은 Chesapeake Bay의 York River하구에서 6월 중순에서 9월초까지 대량의 담수유입으로 인한 표층염분의 저하와 높은 표층 수온으로 인한 성층형성 때문에 빈산소 상태가 발생한다고 지적하였다. 그러나 이들의 연구 해역은 영산강 하구역과 비교해 규모가 큰 강이 유입되기 때문에 유입 담수의 규모도 크다. 따라서 영산강 하구역은 유입 담수량이 적을 뿐 아니라 표,저층 염분차는 크지 않아 염분 약층에 의한 영향은 상대적으로 적은 것으로 추정된다 (Lim and Park, 1998). 결국 영산강 하구는 해수 교환 불량으로 인한 표층수온의 상승, 하구둑 부근 내만역의 세립한 퇴적상 및 상대적으로 높은 퇴적물의 유기물 함량 등이 빈산소 수괴 형성을 촉진시키고 있다고 결론지을 수 있다. 이러한 현상은 반폐쇄적인 내만 해역에서 나타나는 빈산소수괴 형성의 전형적인 패턴으로서, 앞으로 부영양화가 진행되거나 입자성 유기물이 과도하게 유입되어 저층 퇴적물의 유기물 함량이 증가할 경우 빈산소 형성은 더욱 심화될 것으로 예측된다 (Cho, 1991; Hong et al., 1997; Lim and Hong, 1994).

영산강 하구역에서 저층 용존 산소량과 출현종수 사이에는 양의 상관관계가 나타났으며, 밀도와 생물량 사이에는 2.0 mg/l 이하의 범위에서 양의 상관관계가 뚜렷하였고, 2.0 mg/l 이상에서는 상관관계가 뚜렷하지 않았다 (Figs. 6, 7, 8). 이것은 빈산소 수괴가 형성된 장소에서 서식하는 저서동물의 종수, 밀도 및 생물량은 저층 산소농도 저하에 영향을 받고 있음을 나타내는 증거가 된다고 할 수 있다. 또한 산소 결핍의 영향을 받는 내만역의 정점들에서는 다모류의 개체수 구성 비율이 만 중앙부나 입구역에 비해 상대적으로 높게 나타나, Hong et al. (1997)과 Lim (1993)이 보고한 바와 같이 극피동물, 이매패류, 갑각류는 저산소 농도에 매우 민감하게 반응하여, 산소결핍 영향을 받는 해역에서는 이들의 개체수 비율이 낮다고 하는 사실들과 일치한다.

또한 저층 용존산소 결핍이 균집에 미치는 영향은 집괴분석에 의한 정점군 구분에서도 잘 나타나 빈산소 수괴가 형성된 정점군 I에서는 출현종수가 3~25종 범위로서, 정점군 II의 22~41종, 정점군 III의 17~37종보다 적게 출현하였다. 밀도의 경우에는 1,910개체/m<sup>2</sup>로서 정점군 II보다는 낮으나 정점군 III의 962개체/m<sup>2</sup>보다는 높았

으며, 특히 생물량은 세 정점군 가운데 가장 낮은 44.71 g/m<sup>2</sup>였다. 아울러 다양도와 균등도도 낮고 우점도는 높은 양상이었다 (Table 3, Figs. 9, 10). 영산강 하구역에서의 이와 같은 결과들은 우리나라의 진해만 (Hong, 1987; Hong and Lim, 1997; Lim, 1993), 시화호 (Hong et al., 1997) 등에서 보고된 결과들과 일치되는 현상으로서, 결국 영산강 하구역의 빈산소 수괴는 여름철 저서동물의 공간분포에 영향을 미치는 요인임을 알 수 있으며, 아울러 저서동물 군집의 연간 계절변동을 조절하는 주된 요인 중의 하나임을 시사하고 있다 (Frigilos and Zenetos, 1988; Holland, 1985). 특히 저서동물의 군집변화에 대해 Harper et al. (1981)는 Texas 연안에서 빈산소 수괴 형성에 따라, 저서동물 밀도는 3,000~4,000 개체/m<sup>2</sup>에서 300~600 개체/m<sup>2</sup>의 밀도로 감소하고, 아울러 다양도도 감소하였다고 보고하였다. 지중해의 Elefsis만에서도 산소결핍이 저서동물의 종 풍부도와 밀도를 조절하는 요인으로 지적되었으며 (Zarkanellas, 1979), Western Baltic 에서도 8월~10월 사이에 주로 발생하는 빈산소수괴로 인해 저서동물 군집은 주기적으로 감소한다고 보고되었다 (Armtz, 1981). 또한 Hong (1987)은 진해만에서 9월에 전체 면적의 절반에 해당하는 면적에 빈산소수괴가 형성됨에 따라, 저서동물의 생물량이 큰 영향을 받고 있다고 보고하였으며, Hong and Lim (1997)과 Lim (1993)은 진해만에서 빈산소 형성시기를 5월부터 9월까지라고 지적하고, 저서동물의 폐사 현상을 보고하였다.

한편 빈산소 수괴가 형성되는 정점군 I에서는 이매패류인 *Theora fragilis*가 1,330개체/m<sup>2</sup>의 높은 밀도로 우점종으로 출현하였다. 이 종은 연안의 유기오염역에서 폭넓게 발견되는 종으로서 (Hong et al., 1997; Imabayashi and Tsukuda, 1984; Lim, 1993), 시화호에서도 입도가 세립해지고 유기오염이 진행됨에 따라 주요 우점종으로 출현하고 있다 (Hong et al., 1997). 특히 우리나라의 대표적인 유기오염해역으로서 빈산소 수괴 형성이 보고된 진해만에서는 세번째의 주요 우점종으로 출현하며, 정점에 따라 1,000개체/m<sup>2</sup> 이상의 밀도로 분포하고 있다. 그러나 진해만에서의 이 종은 여름철 빈산소 수괴가 형성되는 정점에서는 출현하지 않거나 극히 낮은 밀도이며, 오히려 여름철 저층 용존산소가 3.0~6.0 ml/l인 입구역에 위치한 정점들에서만 고밀도로 출현하고 있었다 (Lim et al., 1995). *T. fragilis*는 낮은 용존산소 및 높은 유화수소 농도에 대해 내성이 강한 종으로 보고되었는데 (Tamai, 1993), 본 연구해역의 저층 산소량은 이 종을 폐사시킬 정도로 결핍되지 않고 오히려 산소 내성이 약한 다른 종들에게 영향을 미쳐 이들을 폐사시킴으로서 r-전략자인 *T. fragilis*의 밀도 증가에 기여한 것으로 추정된다. 그러나 하구역 주위의 공단 및 도시로부터의 유기물 유입이 증가되고 입도의 세립화로 인해 저층 산소결핍 상태가 심

화될 경우에는 이 종의 밀도도 감소되고 분포역도 진해만과 같이 점차 만 중앙부와 입구역으로 이동될 가능성도 있다. 이외에도 유기 오염역에서 밀도가 높은 다모류인 *Tharyx* sp., *Lumbrineris longifolia*, *Cirriformia tentaculata*, 이매패류인 *Raetellops pulchella* 등도 정점군 I에서 우점적으로 출현하고 있다. 또한 대표적인 유기오염 지표종으로 알려진 다모류인 *Capitella capitata*도 빈산소 영향을 받고 있는 정점 1과 7에서 각각 3개체/m<sup>2</sup> 및 10개체/m<sup>2</sup>의 밀도로 관찰되었는데, 유기오염과 관련하여 이 종의 밀도 변동 및 분포역의 변화를 지속적으로 감시할 필요가 있다.

지금까지의 결과를 이용하여 영산강 하구역 내만역에서 외해역에 걸쳐 저층 용존산소량의 변동과 저서동물 군집의 출현종수, 개체수, 생물량 (Species, Abundance, Biomass: SAB)의 변동을 도시하면 (Fig. 11), 기회종의 최고 출현 (peak of opportunist: PO)을 나타내는 정점 17 부근까지가 여름철에 형성된 빈산소 수괴의 영향을 받고 있는 해역이라고 할 수 있으며, 외해역은 현재까지는 산소결핍 영향을 받고 있지 않다고 할 수 있다. 정점 17에서의 기회종은 *T. fragilis*로서 2,366개체/m<sup>2</sup>의 밀도로 출현하여 이 정점에서 출현한 밀도의 81%를 차지하였다. 이러한 SAB곡선은 산소농도에 따른 저서동물 군집의 변동을 잘 나타내고 있어 영산강 하구역의 빈산소 수괴는 저서동물의 공간분포를 조절하는 주된 요인 중의 하나임을 뒷받침해 주고 있으며, 계절적, 연간 변동도 조절하는 중요한 요인 중의 하나라고 판단된다 (Frigilos and Zenetos, 1988; Holland, 1985; Hong and Lim, 1997; Lim, 1993).

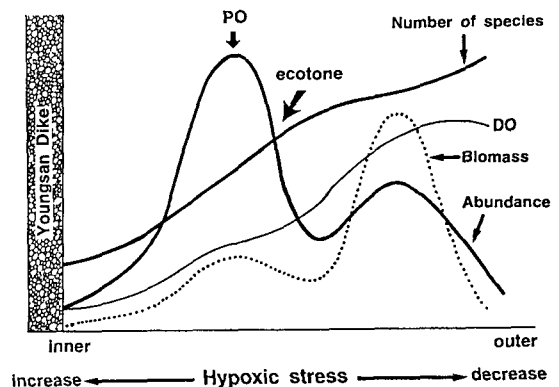


Fig. 11. A schematic diagram showing spatial variations in bottom dissolved oxygen concentration, number of species, abundance, biomass (SAB curve) along the transect line from inner estuarine bay to outer one in Youngsan River estuary, Korea. PO: peak of opportunist.



이상의 연구 결과를 종합하면, 영산강 하구역에서는 표저층수온의 차이에 의해 여름철 빈산소 수괴가 형성되며, 산소결핍의 영향을 받는 정점들에서의 저서동물 출현종수, 밀도 및 생물량 등은 산소 결핍의 영향을 받지 않는 곳보다 낮은 값을 나타내었다. 또한 빈산소 수괴가 형성된 곳에서의 다양도 및 균등도는 상대적으로 낮고 기회종의 대량 출현으로 인해 우점도는 높은 양상을 나타내었다. 따라서 영산강 하구역의 빈산소 수괴는 저서동물의 공간분포를 조절하고, 계절적, 연간 변동도 조절하는 중요한 요인종의 하나라고 판단된다. 이러한 산소 결핍현상은 반폐쇄적이며 해수교환이 불량한 영산강 하구역의 특성으로 미루어 보아 매년 여름철에 주기적으로 발생할 가능성이 높으며, 그 범위도 점차 확대되고 저서동물이 대량 폐사하여 심할 경우 내만에서는 무생물 지역이 형성될 가능성도 있다. 따라서 영산강 하구역의 생태계 변화를 감시하는 모니터링의 일환으로서, 향후 빈산소수괴의 형성 개시시기 및 그 지속기간, 규모, 저서동물 군집의 시간적인 반응 등에 대한 장기적이고 면밀한 조사가 필요하다고 판단된다.

## 요 약

영산강 하구역의 40개 정점에서 여름철 저층빈산소수괴의 형성과 저서동물 군집과의 관계를 조사하였다. 하구역에는 1995년 8월에 광범위한 해역에 걸쳐 저층 용존 산소량이 2.0 mg/l 이하인 빈산소수괴가 형성되었으며, 조사해역에서 여름철에 출현한 저서동물은 총 141종으로서 1,923개체/m<sup>2</sup> 및 79.44 g/m<sup>2</sup>였다. 출현종수는 저층용존산소량의 증가와 함께 증가하는 뚜렷한 양의 상관관계를 나타내었으며, 밀도 및 생물량은 저층용존산소량이 2.0 mg/l 범위까지 양의 상관관계가 뚜렷하여 저층빈산소형성이 저서동물의 공간분포에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 각 정점별 출현개체수 자료를 사용하여 집괴분석한 결과 3개의 정점군으로 구분되었는데, 이는 저층환경요인으로 구분된 정점군과 잘 일치하였다. 여름철 빈산소 수괴가 형성되는 정점군 I은 영산강 하구역에서부터 목포항까지의 해역으로서 이매패류인 *Theora fragilis*가 극우점하였으며, 다모류의 *Tharyx* sp. 및 *Lumbrineris longifolia*도 우점적으로 출현하였다. 정점군 II는 목포항 근처에서부터 달리도 인근까지의 해역으로서 정점군 I과 정점군 III사이에 위치한 정점군이다. 이 정점군에서는 이매패류인 *Theora fragilis*, *Raetellops pulchella*와 다모류인 *Tharyx* sp.가 우점적으로 출현하였으나 정점군 I에 비해 밀도는 상대적으로 낮았다. 한편 정점군 III은 가장 외해

역에 위치하고 있는 해역으로서 다모류인 *Poecilochaetus johnsoni*와 이매패류인 *Yoldia johanni*가 우점적으로 출현하였다. 영산강 하구역의 빈산소 수괴 형성은 저서동물이 완전히 폐사할 정도로 심각하지는 않지만, 여름철의 저서동물 분포에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 매년 여름철에 주기적으로 발생할 가능성이 높다. 또한 본 해역의 특성상 여름철 빈산소 수괴의 형성 범위가 확대될 가능성이 높기 때문에 형성시기, 기간 및 범위 그리고 여기에 대한 저서동물의 반응 등에 대한 보다 면밀한 조사가 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- Armtz, W. E. 1981. Biomass zonation and dynamics of macrobenthos in an area stressed by oxygen deficiency. In *Stress Effects on Natural Ecosystems*. G. Barret and R. Rosenberg, ed. John Wiley and Sons, N.Y. pp. 215~225.
- Beardsley, T. 1997. Death in the deep: "Dead zone" in the Gulf of Mexico challenges regulators. *Scientific American*, November. 11~12.
- Cho, C. H. 1991. Mariculture and eutrophication in Jinhae Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 23, 275~279.
- Choi, J. Y., H. Y. Choi and M. S. Seo. 1995. Physical and sedimentological changes in the Keum estuary after the gate-close of Keum River Weir. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 30 (4), 262~270 (in Korean).
- Diaz, R. J. and R. Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar. Biol. an Annu. Rev.* 33, 245~303.
- Frigilos, N. and A. Zenetos. 1988. Elefsis Bay anoxia: nutrient conditions and benthic community structure. *P.S. Z.N.I. Mar. Ecol.* 9 (4), 273~290.
- Harper, D. E., L. D. McKinney, R. R. Salzer and R. J. Case. 1981. The occurrence of hypoxic bottom water off the upper Texas coast and its effects on the benthic biota. *Contributions in Mar. Sci.* 24, 53~79.
- Holland, A. F. 1985. Long-term variation of macrobenthos in a mesohaline region of Chesapeake Bay. *Estuaries* 8 (2A), 93~113.
- Hong, J. S. 1987. Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay System, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea* 22 (4), 246~256.
- Hong, J. S. and H. S. Lim. 1997. Benthic community recovery after hypoxia stress in Chinhae Bay, Korea. 32 nd EMBS, p.117. Lysekil, Sweden.
- 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 ? Bull. Korean Fish. Soc. 30 (5), 882~895 (in Korean).
- Hughes, R. N., D. L. Peer and K. H. Mann. 1972. Use of multivariate analysis to identify functional components of the benthos in St. Margaret's Bay, Nova Scotia. Limnol. Oceanogr. 17 (1), 111~121.
- Imabayashi, H. and S. Tsukuda. 1984. A population ecology of the small bivalve *Theora lubrica* in northern Bingo-Nada. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 50 (11), 1855~1862.
- Lim, H. S. 1993. The study on the macrozoobenthic ecology in Chinhae Bay, Korea. Ph. D thesis Pukyung University, 311 pp. (in Korean)
- Lim, H. S. and J. S. Hong. 1994. Ecology of the macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea. 1. Benthic environment. Bull. Korean Fish. Soc. 27 (2), 200~214 (in Korean).
- Lim, H. S., J. S. Hong and J. G. Je. 1995. Abundance and distribution pattern of the smelid bivalve, *Theora fragilis* in Chinhae Bay, Korea. Korean J. Malacol. 11 (1), 21~34 (in Korean).
- Lim, H. S., J. W. Choi, J. G. Je and J. H. Lee. 1992. Distribution pattern of macrozoobenthos at the farming ground in the western part of Chinhae Bay, Korea. Bull. Korean Fish. Soc. 25 (2), 115~132 (in Korean).
- Lim, H. S. and K. Y. Park. 1998. Ecological study on the macrobenthic fauna in the soft bottom of Youngsan River estuary, Korea. 1. Benthic environment. Bull. Korean Fish. Soc. 31 (3), (in press).
- Pihl, L., S. P. Baden and R. J. Diaz. 1991. Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustaceans. Mar. Biol. 108, 349~360.
- Pielou, E. C. 1984. The interpretation of ecological data, Wiley, New York. 263 pp.
- Rosenberg, R., B. Hellman and B. Johansson. 1991. Hypoxic tolerance of marine benthic fauna. Mar. Ecol. Prog. Ser. 79, 127~131.
- Rosenberg, R. and L. D. Loo. 1988. Marine eutrophication induced oxygen deficiency: effects on soft bottom fauna, western Sweden. Ophelia 29 (3), 213~225.
- Shannon, C. E. and W. Wiener. 1963. The mathematical theory of communication. Urbana, Univ. of Illinois Press, pp. 125.
- Simpson, E. H. 1949. Measurement of diversity, Nature 163, 688.
- Tamai, K. 1993. Tolerance of *Theora fragilis* (Bivalvia: Semelidae) to low concentrations of dissolved oxygen. Bull. Japan Soc. Sci. Fish. 59 (4), 615~620 (in Japanese).
- Wright, D. A. and D. J. H. Phillips. 1988. Chesapeake and San Francisco Bays : a study in contrasts and parallels. Mar. Pollut. Bull. 19, 405~413.
- Yang, D. B. and J. S. Hong. 1988. On the biogeochemical characteristics of surface sediments in Chinhae Bay in September 1983. Bull. Korean Fish. Soc. 21 (4), 195~205.
- Yang, D. B. and K. W. Lee. 1983. Vertical distributions and diurnal variations of dissolved nutrients and chlorophyll a in Masan Bay. Bull. KORDI 5, 9~13.
- Zarkanellas, A. J. 1979. The effects of pollution induced oxygen deficiency on the benthos in Elefsis Bay, Greece. Mar. Environ. Res. 2, 191~207.

---

1997년 11월 18일 접수

1998년 5월 4일 수리