

## 한국 태안군 진산리 저서미세조류의 계절별 종조성 및 생물량 변화

박서경 · 김보연 · 최한길\* · 오정순<sup>1</sup> · 정상옥<sup>2</sup> · 안경호<sup>2</sup> · 박광재<sup>2</sup>

원광대학교 생명과학부/기초자연과학연구소, <sup>1</sup>(주)생태와 환경, <sup>2</sup>국립수산과학원 갯벌연구소

### Seasonal Variation in Species Composition and Biomass of Microphytobenthos at Jinsanri, Taean, Korea

Seo Kyoung Park, Bo Yeon Kim, Han Gil Choi\*, Joung-Soon Oh<sup>1</sup>, Sang-Ok Chung<sup>2</sup>, Kyoung-Ho An<sup>2</sup> and Kwang-Jae Park<sup>2</sup>

Faculty of Biological Science and Institute for Basic Science, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk 570-749, Korea

<sup>1</sup>Institute of Eco and Environmental Incorporation, Bucheon 403-012, Korea

<sup>2</sup>Tidal Flat Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Kunsan, 573-882, Korea

Seasonal species composition and biomass of microphytobenthos were examined at the intertidal flats of Jinsanri, Taean, Korea, from April to December 2011. In total, 121 species were identified, including 109 diatoms, 5 blue-green algae, and 5 dinoflagellates. Seasonal variation in species number ranged from 49 to 56 species (minimum in October and maximal in April), while vertical variation across three different shore levels ranged from 64 to 77 species with maximum at high and minimum at low shore. Species diversity ranged from 3.22 to 3.42 seasonally and from 3.50 to 3.17 across vertical shore levels. Seasonal average values of the normalized difference vegetation index and the vegetation index were 0.06 and 1.14, respectively. Chlorophyll *a* concentrations were 66.00-120.73 mg/m<sup>2</sup>, with a seasonal minimum and maximum in July and October, respectively, and a vertical shore maximum of 137.35 mg/m<sup>2</sup> at mid shore. Phaeopigment concentrations peaked in October (50.78 mg/m<sup>2</sup>) and at high shore (61.58 mg/m<sup>2</sup>) and were lowest in December (22.53 mg/m<sup>2</sup>) and at low shore (15.28 mg/m<sup>2</sup>). The number of microphytobenthos ranged from 78,556 to 287,898 cells/cm<sup>2</sup>, reaching a maximum in April and a minimum in July. The diatoms *Paralia sulcata*, *Navicula* sp., and *Delphines surirella* were dominant at all tidal levels over the study period. Dinoflagellates were dominant in July at low shore, and blue-green algae were abundant between July and October at mid shore. In conclusion, species composition and primary production of microphytobenthos exhibited clear seasonal and vertical patterns.

Key words: Biomass, Chlorophyll *a*, Dominant species, Shore level, Species composition

### 서 론

갯벌은 육지와 해양의 전이대로서 육지에서 발생하는 각종 오염물질을 자연 정화하는 기능을 하는 동시에 다양한 생명체의 서식 및 산란장으로 이용되는 곳이다. 조간대 퇴적물의 상층부 수 센티미터 이내에는 규조류(diatoms), 남조류(cyanobacteria), 와편모조류(dinoflagellates)와 유글레나(euglenids) 등의 저서미세조류(microphytobenthos)는 점액성 물질을 방출하여 생물막(biofilm)을 형성하며 서식한다(Underwood and

Kromkamp, 1999; Kelly et al., 2001; Consalvey et al., 2004; Méléder et al., 2005). 저서미세조류는 연안 저서생태계의 일차 생산자로서 탄소 순환, 영양염 순환 조절 및 퇴적물 안정화 등에 기여할 뿐 만 아니라(Rizzo, 1990; De Jonge and Colijn, 1994; MacIntyre et al., 1996; Underwood and Kromkamp, 1999), 저서 무척추동물, 퇴적물 섭식자와 몇 종의 어류의 직접적이고 안정적인 먹이원으로서 중요한 생태학적 역할을 한다(Montagna et al., 1995; Kang et al., 2003; Krumme et al., 2008).

저서미세조류의 종조성과 생물량은 무생물적 환경(해수와 퇴

#### Article history;

Received 12 May 2012; Revised 14 January 2013; Accepted 11 April 2013

\*Corresponding author: Tel: +82. 63. 850. 6579 Fax: +82. 63. 857. 8837

E-mail address: hgchoi@wku.ac.kr

Kor J Fish Aquat Sci 46(2) 176-185, April 2013

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0176>

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

© The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science. All rights reserved

적물의 영양염 유용성, 파도, 조석, 건조, 광 및 퇴적물 입도 등)과 생물적 환경(macrofauna의 퇴적물 교란, 섭식자의 패치 등)에 의해 영향을 받으므로 시·공간적으로 매우 다양하게 나타난다(Montani et al., 2003). 저서미세조류는 계절성이 뚜렷하고, 동일한 갯벌에서도 퇴적물 입도, 영양염 상태, 조위에 따라서 종조성과 분포 및 생물량 등 군집구조가 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Oh et al., 2004; Lee et al., 2009; Lucas et al., 2003). 저서미세조류의 종조성과 출현 개체수는 광학현미경을 이용하여 확인하고 단위 면적 혹은 퇴적물 무게당 엽록소 *a*의 농도를 분광광도계(spectrophotometer)나 형광광도계(fluorometer)로 생물량을 측정한다(Holm-Hansen et al., 1965; Lorenzen, 1967; Kendrick et al., 1998). 특히, 아세톤에 의한 엽록소 추출법은 엽록소 *a*와 엽록소의 분해된(degraded) 형태인 phaeopigment의 함량을 측정할 수 있는데, phaeopigment의 양은 초식자의 섭식과 환경적 스트레스에 의해 변화하는 것으로 알려져 있다(Helling and Baars, 1985). 최근에는 저서미세조류의 생물량을 HPLC (High Performance Liquid Chromatography)로 정량화하거나 분광복사기(spectroradiometer)로 NDVI (normalized difference vegetation index)와 VI (vegetation index)를 측정하여 나타낸다(Jesus et al., 2006).

우리나라 갯벌 저서미세조류에 군집구조에 대한 연구는 금강 하구역조간대(Kim and Cho, 1985)와 만경 및 동진갯벌 퇴적물(Oh and Koh, 1995), 남서부 갯벌(Lee, 2002, 2003)에서 광학현미경을 이용하여 수행되었으며, HPLC의 색소분석을 이용하여 새만금 갯벌(Oh et al., 2004), 강화도 갯벌(Yoo and Choi, 2005)과 광양만(Lee et al., 2009)에서 계절별 종조성과 생물량을 추정하는 이전 연구가 있다. 하지만, 서해안은 다양한 환경과 퇴적물 입도를 가진 갯벌이 광활하게 발달되어 있어서 저서미세조류의 종다양성 및 생물량의 계절적 변동이 있을 것으로 추정되지만 충분한 연구가 수행되지 않아서 매우 한정된 자료만 존재한다. 따라서 본 연구의 목적은 전통적인 광학현미경법을 이용하여 저서미세조류의 종조성과 출현량, 엽록소 *a*와 phaeopigment함량, 그리고 식생지수를 측정하는 spectroradiometer를 이용하여 태안반도 갯벌에 서식하는 미세조류의 계절별 그리고 조간대 조위별 생물량의 변동을 파악하는 것이었다.

## 재료 및 방법

진산리 갯벌의 조위별 미세조류 종조성 및 생물량의 계절별 변화를 확인하기 위하여 2011년 4, 7, 10, 12월에 조간대 상부, 중부 및 하부에서 정성 및 정량채집을 실시하였다(Fig. 1). 정성 채집은 스파툴라(spatula)를 이용하여 조위별 퇴적물 표층을 채취한 뒤 이 시료를 루골용액(Lugol's solution)으로 최종농도가 0.2-0.4%가 되도록 고정된 후 광을 차단하여 아이스박스에 보관한 상태로 실험실로 운반하였다. 저서미세조류 생물량의 계절별 변화를 파악하기 위한 정량분석은 직경 3 cm의 sediment corer를 이용해 조위별로 표층에서 5 cm깊이로 8개의 주상시료

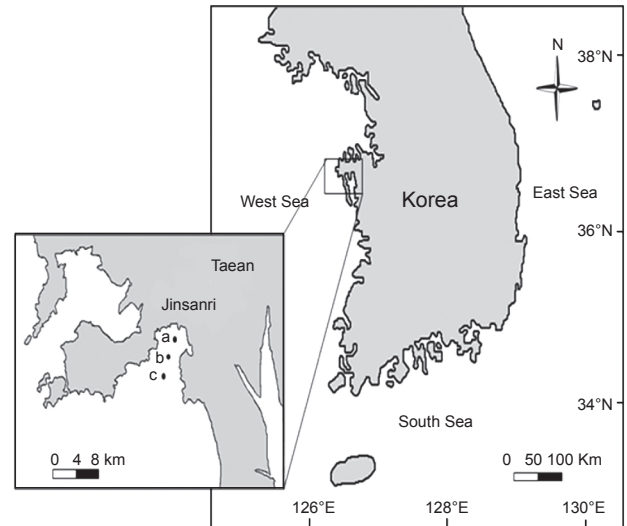


Fig. 1. A map showing the study area at Jinsanri, Taean, Korea. a: High, b: Mid, c: Low.

를 채집한 후 드라이아이스에 보관하여 실험실로 운반하였으며 분석 전까지 저온냉동고에서  $-70^{\circ}\text{C}$ 로 보관하였다.

저서미세조류의 출현종은 루골용액으로 고정된 시료를 멸균 해수로 희석하여 광학현미경(Olympus BX 53, Japan)하에서 다양한 문헌(Dodge 1982; Jin et al., 1985; Underwood, 1994; Falasco et al., 2009; Pitcher and Joyce, 2009)을 활용하여 관찰 및 동정하였다. 광학현미경으로 동정 후, 저서미세조류의 주요 분류군인 규조류의 관찰은 Park (2005)과 Woelfel et al.(2007)의 방법을 수정하여 규조각을 세척하여 광학현미경과 주사전자현미경(Hitachi S-4800, Japan)으로 종을 확인하였다. 조위와 계절별 출현종의 출현 유무에 따라 종 다양도지수와 유사도를 PRIMER version 6 (Clarke and Gorley, 2006)을 사용하여 분석하였으며 유사도 분석에 따른 각 그룹의 유의차는 SIMPROF (similarity profile) test를 실시하여 검정하였다.

식생분포는 Spectroradiometer (USB2000, Ocean Optics USA)로 조간대 조위별로 채집된 주상시료 8개의 반사율을 측정하였으며, 정규식생지수(NDVI)와 식생지수(VI)는 아래의 식으로 계산하였다(Rouse et al., 1973; Jordan, 1969).

$$\text{NDVI} = (\text{Infrared} - \text{Red}) / (\text{Infrared} + \text{Red})$$

$$\text{VI} = \text{Infrared} / \text{Red}$$

(InfraRed = 748-752 nm의 반사율 평균, Red = 673-677 nm의 반사율 평균)

저서미세조류의 생물량은 퇴적물 내 미세조류의 엽록소 *a*를 추출하여 측정하는데(Montani et al., 2003), 본 연구에서는 각 조위별로 채취한 8개 시료의 반사율을 측정 후 표층 1 cm를 절단하여 뚜껑이 있는 유리병에 넣고 아세톤(90%)을 첨가하여  $4^{\circ}\text{C}$ 의 암냉소에서 엽록소 *a*를 추출하였다. 20시간 후, 분광광도계(Libra S22, Biochrom England)를 사용하여 665와 750 nm

에서 흡광도를 측정하였고, 1 M의 HCl를 한 방울 떨어뜨린 후 5분 뒤에 다시 측정하였다. 퇴적물의 면적은 Image J 프로그램을 사용하여 측정하여 아래의 식(Lorenzen, 1967)으로 퇴적물의 단위 면적당 엽록소 *a*와 phaeopigment 농도를 계산하였다.

$$\text{엽록소 } a \text{ 농도(mg/m}^2\text{)} = \frac{11.0 \times K \times (665_o - 665_a) \times v}{Vf \times l}$$

$$\text{Phaeopigment 농도(mg/m}^2\text{)} = \frac{11.0 \times K \times (R \times 665_o - 665_a) \times v}{Vf \times l}$$

(11.0 = 엽록소 *a*의 흡광 계수, K = 초기 엽록소 농도에서 흡광도 감소 요소, 665<sub>o</sub> = 산처리 전의 흡광도, 665<sub>a</sub> = 산처리 후의 흡광도, v = 용매의 최종 부피, Vf = 시료의 면적, l = 분광광도계 cell의 직경, R = phaeopigment가 없는 상태에서 665<sub>o</sub>: 665<sub>a</sub>의 최대 비율)

저서미세조류의 출현한 개체수를 파악하기 위해서 각 조위별로 직경 3 cm의 sediment corer로 채집한 3개의 주상시료에서 표층부터 1 cm를 절단하여 150배 혹은 200배의 멸균해수로 희석하여 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 ×400배율의 광학현미경 하에서 계수하여 단위면적당 세포수(cell/cm<sup>2</sup>)로 환산하였다.

갯벌 저서동물이 저서미세조류의 생물량에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 조위별로 3개의 방형구(25×25 cm)를 무작위로 놓고 방형구내에 있는 퇴적물(깊이 3 cm)을 모종삽으로 채집하여 표준망체(2×2 mm, No. 10)에 넣고 해수로 세척한 후 망을 통과하지 않는 저서생물을 수집하여 플라스틱 시료통에 해수와 함께 넣고 포르말린으로 고정하였다. 샘플은 실험실로 운반한 후에 종별로 구분하여 계수한 후 단위 면적당 개체수로 환산하였다.

## 결 과

### 갯벌 환경

본 연구 지역인 충남 태안군 진산리 갯벌은 7.3 m의 조차를 가지는 지역이다. 채집 시기의 수온은 15.0 (12월)-32.4℃ (7월), 염분은 10.0 (10월)-33.1 psu (4월), pH는 8.01 (12월)-8.18 (10월), 용존산소(DO)는 4.20 (7월)-8.90 mg/L (12월), 부유물질농도(SPM)는 33.00 (7월)-89.40 mg/L (10월), Silicate는 0.06 (4

월)-0.30 mg/L (7월), 엽록소 *a* 농도는 1.01 (7월)-1.75 μg/L (10월)의 범위를 보였으며, 총인(TP)은 0.001 (7월)-0.021 mg/L (10월), NH<sub>4</sub>-N는 0.072 (10월)-0.199 mg/L (7월), NO<sub>2</sub>-N은 0.002 (4월, 10월)-0.003 mg/L (7월), NO<sub>3</sub>-N은 0.014 (7월)-0.029 mg/L (4월)의 농도를 보였다(NFRDI, 2011). 갯벌 상부에서소량의 담수가 유입되고 중부지역에는 바지락과 동족의 양식장이 위치해 있다. 퇴적물은 주로 미세한 모래와 실트로 구성되어 있고 저질의 입도는 니질사 또는 사질로서 모래가 상부에서 99.08%, 중·하부에서 99.98%로서 모래가 많이 함유되어 분급이 양호하게 나타났다. 진산리 갯벌의 대형저서동물은 총 11개 정점에서 총 31종이 출현하였고 다모류(15종), 갑각류(8종), 연체동물(6종)이 우점하였고 기타 다른 동물이 2종이었다(NFRDI, 2011). 조간대 상부와 중부에서는 별난가시갯지렁이류(*Aricidea pacifica*)와 캘리포니아백금갯지렁이(*Nephtys californiensis*)가 제1, 제2 우점종이었으며, 동족(*Mactra venrififormis*)이 다음 순서로 나타났다(NFRDI, 2011). 진산리 갯벌의 노출시간은 상부에서 390-450분, 중부에서 380-430분, 하부에서 290-340분으로 주간에 비해 야간 노출시간이 50-60분이 더 길었다. 상부는 중부보다 노출시간은 10-20분 많았으며, 하부는 상·중부에 비해 약 1시간 30분 내외로 차이가 있었다(NFRDI, 2011).

### 종조성

진산리 갯벌에서 4계절의 정성 샘플에서 출현한 저서미세조류는 총 121종이었으며, 규조류가 109종으로 전체 출현종의 90.08%를 차지하는 가장 우점하는 분류군이었으며, 남조류(5종, 4.13%)와 와편모조류(5종, 4.13%)가 아우점하는 분류군이고 편모조류(1종, 0.83%)와 유글레나류(1종, 0.83%)도 관찰되었다(Table 1). 계절별 출현종수는 49-56종으로 10월에 최소였고 4월에 최대로 나타났다(Table 1). 조위별 출현종수는 상부에서 77종(남조류 5종, 규조류 70종, 유글레나류 1종, 와편모조류 1종), 중부에서 68종(남조류 1종, 규조류 65종, 유글레나류 1종, 와편모조류 1종), 하부에서 64종(규조류 60종, 와편모조류 3종, 편모조류 1종)으로 상부에서 최대이고 하부에서 최소였다. 상부에서는 규조류·남조류가, 중부에서는 규조류가, 하부에서는 규조류·와편모조류가 주요한 분류군이었다. 규조류는 조간대의 모든 조위에서 고르게 분포하였으나 남조류는 상·중부

Table 1. The number of microphytobenthos species observed at three intertidal shore levels and four seasons in Jinsanri, Taean, Korea

Taxon	Apr.				Jul.				Oct.				Dec.			
	H	M	L	Total	H	M	L	Total	H	M	L	Total	H	M	L	Total
Cyanophyceae	1			1	1			1	4	1		5				
Dinophyceae					1	1	3	3			1	1				
Bacillariophyceae	29	31	29	54	26	28	25	46	29	23	21	42	38	21	17	53
Rhaphidophyceae															1	1
Euglenophyceae	1	1		1	1	1		1	1			1	1			1
Total	31	32	29	56	28	31	28	51	34	24	22	49	39	21	18	55

H, high; M, mid; L, low.

Table 2. Seasonal variations in biodiversity index at three tidal levels of Jinsanri, Taean, Korea during the study period

Shore level	Apr.	Jul.	Oct.	Dec.	Mean
High	3.43	3.33	3.53	3.71	3.50
Mid	3.47	3.43	3.18	3.05	3.28
Low	3.37	3.33	3.09	2.89	3.17
Mean	3.42	3.36	3.27	3.22	3.32

에서 그리고 와편모조류는 중·하부에서 출현하여 조위별 차이가 있었다.

종다양도지수

연구기간 동안에 종다양도지수는 3.22-3.42로 평균 3.32였다. 계절별로는 12월에 최저였고 4월에 최대였다(Table 2). 조위별 연 평균 종다양도 지수는 조간대 상부에서 최대(3.50)였고 하부에서 3.17로서 최소였으며, 계절별로는 상부에서 3.33-3.71로 여름인 7월에 최소값을 12월에 최대값을 보였다. 조간대 중부에서는 3.05-3.47, 하부에서는 2.89-3.37로서 모두 12월에 최소이고 4월에 최대값을 보였다.

유사도 분석

저서미세조류의 출현 유·무에 따라 유사도를 분석한 결과, 이들의 종조성은 계절성을 보이는 것으로 확인되었다(Fig. 2). 종조성에 따라 구분해 보면, 그룹 I은 12월(중·하부)와 10월(상·중·하부), 그룹 II는 4월(상·중·하부), 그룹 III은 12월(상부), 그리고 그룹 IV는 7월(상·중·하부)로 계절성을 보였다. 그룹 III과 그룹 IV의 유사도는 36.26%이고 그룹 II와 그룹 III·IV의 유사도는 35.77%였으며, 그룹 I과 그룹 II·III·IV는 34.16%의 유사도를 보여 유의차가 확인되었다( $P < 0.05$ ).

식생지수

태안군 진산리 갯벌의 정규식생지수(NDVI)는 0.05-0.08로서 10월에 최소이고 12월에 최대로 계절적 변화를 보였으며, 평균값은 0.06으로 나타났다(Fig. 3A). 조위별 NDVI의 평균값은 조간대 상·하부는 0.07로 동일하였고 중부에서는 0.06으로 약간 낮았다. 4월에 NDVI값은 상부에서 0.03이고 중·하부에서 각각 0.08로 높게 나타남으로써 조위별 차이를 보였으나, 7월에는 상·중·하부에서 0.06으로 동일하였다. 10월에는 조위별로 0.03-0.06으로 중부에서 최소값을 그리고 하부에서 최대값을 보였다. 12월에는 상부에서 0.11로 연구기간에 최대값을 보였으며, 중부와 하부에서는 0.07로 동일한 값을 보였다.

식생지수인 VI의 평균값은 1.14였으며, 계절별로는 1.10-1.19로서 10월에 최소였고 12월에 최대값을 보였다(Fig. 3B). 조위별 VI값은 1.13-1.15로서 조간대 중부에서 최소였고 하부에서 최대였다. 4월에 조위별 VI값은 상부에서 1.07로서 중·

하부의 1.17에 비해 낮았으며, 7월에는 상·하부에서 1.13으로 1.12를 보인 중부에 비해서 높게 나타났다. 10월에는 조위별로 1.05-1.13으로서 중부에서 최소였고 하부에서 최대였으나, 12월에는 상부에서 VI값이 1.27로 연구기간 중에서 최대였으며, 중부에서 1.16, 그리고 하부에서 1.14로서 높은 값을 보였다.

엽록소 농도

본 연구정점에서 엽록소 a 농도는 평균 92.52 mg/m<sup>2</sup>로 66.00-120.73 mg/m<sup>2</sup>의 계절적 변화를 보였으며, 7월에 최소였고 10월에 최대였다(Fig. 4A). 연구기간에 조간대 조위별 엽록소 a 농도는 상부에서 59.66 mg/m<sup>2</sup>, 중부에서 137.35 mg/m<sup>2</sup>, 하부에서 80.57 mg/m<sup>2</sup>으로 중부에서 최대값을 보였다. 조간대 상부에서 엽록소 a 농도는 31.47-90.88 mg/m<sup>2</sup>로서 7월에 최소이고 10월에 최대였다. 중부에서는 7월에 최소(97.11 mg/m<sup>2</sup>)이고 10월에 최대값(183.44 mg/m<sup>2</sup>)을 보였으며, 하부에서는 69.42-89.47 mg/m<sup>2</sup>로서 7월에 최소였고 4월에 최대였다.

Phaeopigment 농도는 연구기간에 평균 33.11 mg/m<sup>2</sup> (22.53-50.78 mg/m<sup>2</sup>)로서 12월에 최소였고 10월에 최대로 나타났다(Fig. 4B). 조위별 phaeopigment는 상부에서 61.58 mg/m<sup>2</sup>로서 중부(22.48 mg/m<sup>2</sup>)와 하부(15.28 mg/m<sup>2</sup>)에 비해 현저하게

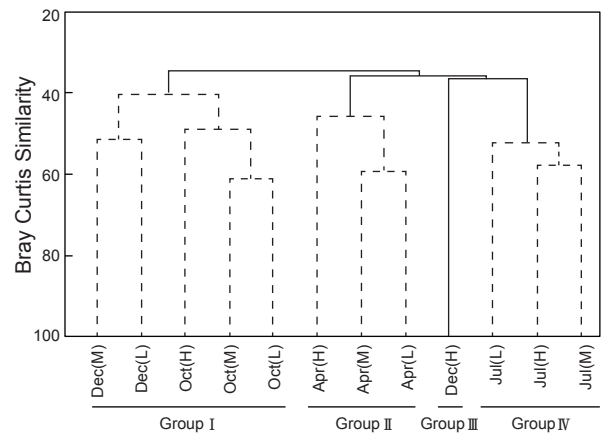


Fig. 2. Results of cluster analysis performed based on Bray-Curtis similarity from standardised species presence/absence transformed data. The dotted lines indicate no significant difference between the sampling times and shore height within each group (SIMPROF test).

Table 3. Seasonal variations in phaeopigment/chlorophyll a (P/C) at three tidal levels of Jinsanri, Taean, Korea over the study period

Shore level	Apr.	Jul.	Oct.	Dec.	Mean
High	0.67	1.28	1.10	1.38	1.11
Mid	0.18	0.33	0.13	0.06	0.18
Low	0.12	0.27	0.31	0.06	0.19
Mean	0.32	0.63	0.51	0.50	0.49

Table 4. Seasonal average abundance and percentage of dominant microphytobenthos species (>2%) growing at three intertidal shore levels of Jinsanri, Taean, Korea

Species	Abundance (cells/cm <sup>2</sup> )				Percentage (%)			
	Apr.	Jul.	Oct.	Dec.	Apr.	Jul.	Oct.	Dec.
<i>Amphora holsatica</i>		1,699				2.16		
<i>Amphora</i> sp.		2,548	10,333			3.24	4.36	
<i>Asteronella kariana</i>				3,397				2.63
<i>Biddulphia obtusa</i>	6,369	5,520		2,972	2.21	7.03		2.30
<i>Ceratium fusus</i>		8,917				11.35		
<i>Cylindrotheca closterium</i>				4,246				3.29
<i>Cylindrotheca gracilis</i>				7,219				5.59
<i>Delphineis surirella</i>	13,588	4,671	7,643	13,588	4.72	5.95	3.23	10.51
<i>Dinophysis fortii</i>		6,794				8.65		
<i>Gyrosigma</i> sp.			6,794				2.87	
<i>Merismopedia</i> sp.		6,794	101,062			8.65	42.68	
<i>Navicula cancellata</i>	25,902		9,200	5,945	9.00		3.89	4.60
<i>Navicula</i> sp.	18,259	5,520	7,360	12,739	6.34	7.03	3.11	9.86
<i>Oscillatoria</i> sp.			50,955				21.52	
<i>Paralia sulcata</i>	149,894	12,739	14,862	50,955	52.06	16.22	6.28	39.43
<i>Pediatrum</i> sp.		4,246				5.41		
<i>Plagiogramma appendiculatum</i>		2,548				3.24		
<i>Protoperdinium</i> sp.		1,699				2.16		
Dominant species	214,012	63,695	208,209	101,062	74.33	81.09	87.94	78.21
Total	287,898	78,556	236,801	129,229	100.00	100.00	100.00	100.00
No of species	56	35	39	40				

높게 나타났다. 조간대 상부에서 phaeopigment 농도는 40.19-100.10 mg/m<sup>2</sup>으로서 7월에 최소이고 10월에 최대였다. 중부에서는 12월에 최소(8.16 mg/m<sup>2</sup>)이고 7월에 최대값인 32.25 mg/m<sup>2</sup>을 보였으며, 하부에서는 4.48-27.49 mg/m<sup>2</sup>로서 12월에 최소 그리고 10월에 최대였다.

Phaeopigment/Chlorophyll *a* (P/C)의 비율은 평균 0.49였으며, 계절별로 보면, 4월에 최소인 0.32이고 7월에 0.63으로 최대였다(Table 3). 조위별로는조간대 상부에서 1.11로 최대였고 중부와 하부는 매우 유사한 값을 보였다. 조위별 P/C값의 변화를 보면, 상부에서는 4월에 최소값인 0.67을 그리고 12월에 최대값인 1.38을 보였다. 조간대 중부에서는 0.06-0.33으로 12월에 최소값을 7월에 최대값을 보였으며, 하부에서는 0.06-0.31로서 12월에 최소이고 10월에 최대값을 나타냈다.

주요종

연구기간 동안 정량샘플에서 계절별로 출현한 저서미세조류의 세포수는 평균 183,121 cell/cm<sup>2</sup>로 봄철인 4월에 최대이고 여름철인 7월에 최소였다. 출현종수도 4월에 56종으로 출현종이 최소인 7월(35종)에 비해 1.6배의 차이가 있었다(Table 4). 계절별 생물량을 구성하는 주요종(>2.0%)은 4월에 5종(전체 생물량의 74.34%), 7월에 12종(81.08%), 10월에 8종(87.93%), 그리고 12월에는 8종(78.20%)으로 나타났다(Table 4). 연구기간에 모든 계절에 세포수가 많은 종은 *Paralia sulcata*, *Navicula* sp.와 *Delphineis surirella*로 모두 구조류이며, 와편모조류 3종

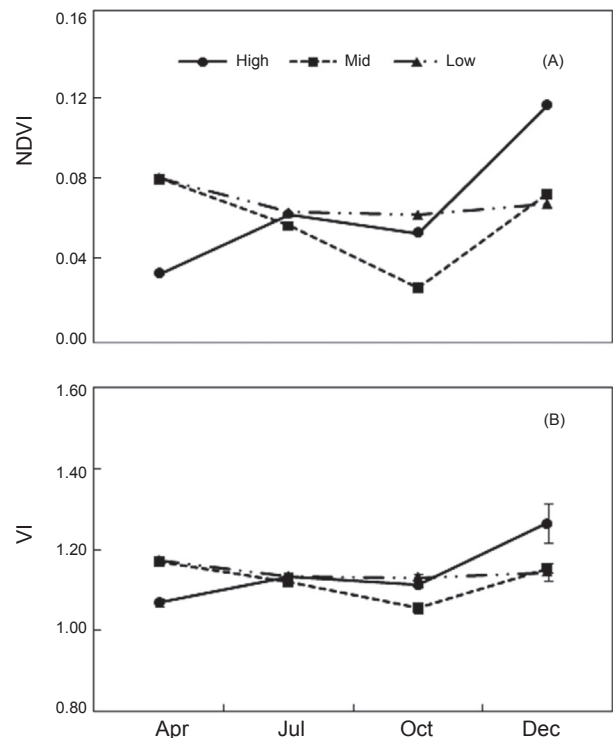


Fig. 3. Seasonal variations of NDVI (A) and VI (B) at three intertidal shore levels (High, Mid, and Low) of Jinsanri mudflat, Taean, Korea during the study period.

Table 5. Average abundance and percentage of dominant species (&gt; 2%) at three intertidal shore levels over the study period

Species	Abundance (cells/cm <sup>2</sup> )			Percentage (%)		
	High	Mid	Low	High	Mid	Low
<i>Amphora</i> sp.	7,643		3,291	3.54		3.38
<i>Biddulphia obtusa</i>			7,856			8.08
<i>Ceratium fusus</i>			6,688			6.88
<i>Cylindrotheca gracilis</i>	9,236			4.28		
<i>Delphineis surirella</i>	8,599	13,694	7,325	3.98	5.80	7.53
<i>Dinophysis fortii</i>			3,503			3.60
<i>Gyrosigma</i> sp.	5,732			2.65		
<i>Merismopedia</i> sp.		80,892			34.25	
<i>Navicula cancellata</i>		25,478	3,397		10.79	3.49
<i>Navicula</i> sp.	19,427	9,554	3,928	9.00	4.04	4.04
<i>Odontella aurita</i>			2,335			2.40
<i>Oscillatoria</i> sp.		38,217			16.18	
<i>Paralia sulcata</i>	111,783	24,522	35,032	51.77	10.38	36.03
Dominant species	162,420	192,357	73,355	75.22	81.44	75.43
Total	215,924	236,200	97,240	100.00	100.00	100.00
No of species	57	48	50			

(*Ceratium fusus*, *Dinophysis fortii*, *Protoperdinium* sp.)은 여름철인 7월에 우점(전체 생물량의 22.16%)하였다. 남조류인 *Merismopedia* sp.는 7월과 10월, *Oscillatoria* sp.는 10월에 우점하는 계절종이었으며, 담수 녹조류인 *Pediastrum* sp.도 여름철에만 관찰되었다(Table 4).

조위별 저서미세조류의 세포수는 97,240-215,924 cells/cm<sup>2</sup>였으며, 출현종은 48-57종으로서 생물량은 중부에서 최대였고 출현종수는 상부에서 최대였다(Table 5). 조위별 주요종(>2.0%)은 상부에서 6종(전체 세포수의 75.22%), 중부에서 6종(세포수의 81.44%), 하부에서 9종(87.93%)으로 확인되었다(Table 5). 모든 조위에서 우점하는 종은 저서성규조류인 *Paralia sulcata*, *Navicula* sp.와 *Delphineis surirella*였다. 외편모조류인 *Ceratium fusus*와 *Dinophysis fortii*는 하부에서 그리고 남조류인 *Merismopedia* sp.와 *Oscillatoria* sp.는 중부에서 우점하여 조위별로 우점종에서 차이가 있었다(Table 5). 담수의 영향을 받는 종들은 *Oscillatoria* sp.와 *Merismopedia* sp. 등으로 여겨지며, *Ceratium fusus*와 *Asterionella kariana*는 부유성 플랑크톤으로 사료된다.

## 저서 동물

연구기간에 출현한 저서동물은 서해비단고둥(*Umbonium thomasi*), 왕좁쌀무늬고둥(*Reticunassa festiva*), 동죽(*Macra veneriformis*), 백합(*Meretrix lusoria*), 민칭이(*Bullacta exarata*), 갯지렁이(*Neanthes japonica*), 맛조개(*Sinonova culaconstricta*), 좁쌀무늬고둥(*Hinia festiva*)와 밤게(*Philyra pisum*)로서 총 9종이 관찰되었으며, 계절별로는 3-7종이, 조위별로는 6-7종이 출현하였다(Fig. 5). 서해비단고둥은 조간대 상부에서 하부까지 고르게 분포하는 종이였으며, 조위별 개체수는 89-1,574 individuals/m<sup>2</sup>로서 조간대 하부에서 최대였고 상부에서 최소였

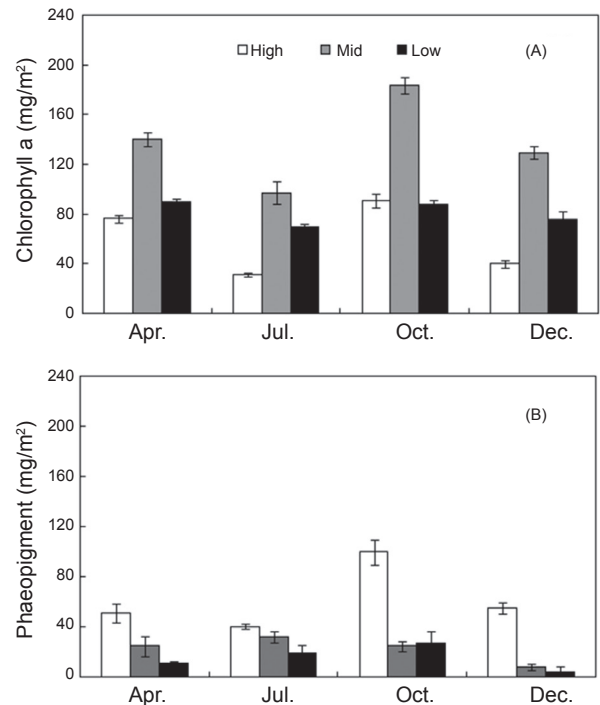


Fig. 4. Seasonal variations of chlorophyll a (A) and phaeopigment concentration (B) at three tidal levels (High, Mid, and Low) of Jinsanri mudflat, Taean, Korea during the study period.

다(Fig. 5). 서해비단고둥의 계절별 평균 개체수는 536-1,201 individuals/m<sup>2</sup>로 겨울에 최소였고 가을에 최대였다. 연구기간에 진산리 갯벌에서 아우점종인 동죽의 조위별 평균 개체수는 20-139 individuals/m<sup>2</sup>로서 조간대 상부에서 하부로 이동할수

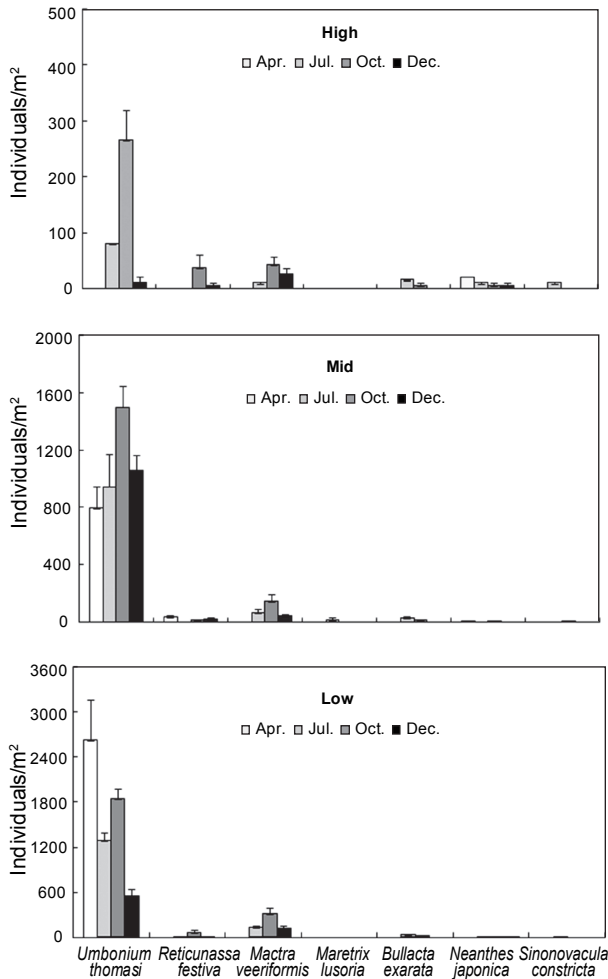


Fig. 5. Seasonal variations of macrobenthos abundance at high (A), mid (B), and low (C) tidal levels of Jinsanri, Taean, Korea. Please note different scales.

록 많은 개체가 출현하였으며, 계절별로는 4월에 조간대 상부에서 하부에 이르기까지 한 개체도 관찰되지 않았으나 7월에는 68 individuals/m<sup>2</sup>, 10월에는 165 individuals/m<sup>2</sup> 로서 증가하였다가 12월에는 62 individuals/m<sup>2</sup>로 다시 감소하는 계절성을 보였다(Fig. 5).

### 고찰

진산리 갯벌에서 저서미세조류의 출현종수는 계절별로 49-56종으로 총 121종이었으며, 규조류가 109종(90.08%)으로 출현빈도가 가장 높은 분류군으로 확인되었다. 저서 미세조류의 출현종수는 영광군 가마미에서 68종(Lee, 2003), 영광(27종) 및 강진에서 21종이었다. 서해안에서 출현한 규조류는 인천 송도에서 95종, 인천교 하부에서 68종, 송도 조간대에서 198종으

로 진산리 갯벌에서 비교적 출현종수가 많은 것으로 나타났다(Choi, 1988). 조간대 조위별 저서미세조류의 출현종수(상부 77종, 중부 68종, 하부 64종)와 종다양성지수(상부 3.50, 중부 3.28, 하부 3.17)로서 매우 밀접하게 관련되어있으며, 조간대 상부에서 하부로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 저서미세조류의 출현종 유·무에 의한 유사도 분석에서 봄철(4월 상·중·하부), 여름철(7월 상·중·하부), 가을·겨울(10월 상·중·하부와 12월 중·하부)로 뚜렷한 계절성을 보였으며, 규조류 38종과 유글레나류 1종으로 연구기간 중에서 최대 출현종수가 기록된 12월의 조간대 상부가 별개의 그룹으로 나타났다.

본 연구에서 저서미세조류의 세포수는 4월에 287,898 cells/cm<sup>2</sup>로서 7월의 3배(78,556 cells/cm<sup>2</sup>)로 봄철에 미세조류가 번무하였으며 여름철에 급감하는 계절적인 패턴을 보였다. 특히 봄철의 주요종(출현한 총세포수의 2.0%이상)은 5종으로 다른 계절(8-12월)에 비해 적었으며, 규조류인 *Paralia sulcata*가 출현한 총 세포수의 52.06%를 차지하였다. *Paralia sulcata*, *Navicula* sp.와 *Delphineis surirella*는 모든 조위와 계절에 번무하는 종이였으며, 와편모조류 3종(*Ceratium fusus*, *Dinophysis fortii*, *Protoperidinium* sp.)은 7월에, 남조류인 *Merismopedia* sp.는 7월과 10월, *Oscillatoria* sp.는 10월에 번무하는 계절종이었다. *Paralia sulcata*는 인천 연안의 전 지역, 강화도 장화리 갯벌의 조간대 상부에서 하부까지, 만경·동진강 하구의 갯벌과 전남 영광의 가마미 해수욕장 등에서 계절과 갯벌의 입자크기와 관계없이 출현하는 종(Lee, 2003; Yoo and Choi, 2005)으로서 서해안의 대표종이었다.

태안 진산리 갯벌의 엽록소 a 농도는 계절(66.00-120.73 mg/m<sup>2</sup>, 평균 92.52 mg/m<sup>2</sup>)과 조위별(59.66-137.35 mg/m<sup>2</sup>) 변동을 보였으며 10월에 그리고 조간대 중부에서 최대였고, 7월과 조간대 상부에서 최소로서 시·공간적 변화를 보였다. Noh (2008)는 태안군 근소만 갯벌의 엽록소 a 농도를 34.10-124.60 mg/m<sup>2</sup>로 보고하였는데, 이는 본 연구지역인 진산리와 유사하였다. 이외에도 한반도 다른 갯벌에서의 엽록소 a 농도는 백석에서 7-244 mg/m<sup>2</sup> (Cho and Kim, 1988), 송도에서 4.8-90.1 mg/m<sup>2</sup> (Yoo and Choi, 2005), 만경강 갯벌에서 0.69-32.11 mg/m<sup>2</sup> (Oh et al., 2004), 거전 갯벌에서 0.24-10.33 mg/m<sup>2</sup>, 그리고 강화도 장화리에서 1.18-34.25 mg/m<sup>2</sup> (Yoo and Choi, 2005), 광양만에서 3.44-168.00 mg/m<sup>2</sup> (Lee et al., 2009)로 다양하게 나타났다. 일부 연구에서 엽록소 a의 측정법(HPLC, spectrophotometer 또는 fluorometer)과 측정하는 퇴적물 깊이(0.1, 0.5, 1.0 cm)를 달리하여 분석한 값을 단순 비교하는 것은 다소 무리가 있지만, 이러한 점을 감안하더라도, 본 연구지역인 진산리 갯벌의 생물량은 다른 지역에 비해 높은 수준인 것으로 나타났다. Lee et al. (2009)은 HPLC 색소분석으로 광양만 갯벌의 엽록소 농도는 담수의 유입이 많은 6-8월에 높게 나타났으며, 조위별로는 상부(6.88-169.00 mg/m<sup>2</sup>), 중부(3.44-49.00 mg/m<sup>2</sup>), 하부(5.51-48.20 mg/m<sup>2</sup>)로서 상부에서 최대로 나타났는데, 본

연구에서는 7월과 상부에서 최소로 나타남으로써 담수의 유입 여부와 조위에 따른 환경변화 등에 의해서 엽록소 *a*의 농도에 차이가 있었다.

갯벌에서 엽록소 *a* 함량이 phaeopigment의 함량보다 상대적으로 높다는 것(낮은 P/C; Phaeopigment/Chl. *a* 비율)은 미세조류의 성장과 광합성 활동이 활발하다고 생각할 수 있다. 본 연구 지역인 진산리 갯벌에서 P/C 비율은 계절별로 0.32-0.63(평균 0.49)로서 4월에 최소이고 7월에 최대였다(Table 3). 이것은 미세조류의 생장이 봄철(4월)에 최대이고 고온에 노출되는 여름철(7월)에 엽록소 *a*의 분해산물인 phaeopigment가 증가한다는 것을 암시한다. 대기에 노출되는 조간대 상부에서 P/C값이 중·하부에 비해 모든 계절에 높게 나타나는 것은 상대적으로 열악한 환경요인(고온, 고조도, 미세퇴적물로 인한 혐기상태) 하에서 엽록소 *a*의 분해가 빨리 발생한 것으로 사료된다. 엽록소의 분해물질인 phaeopigment의 농도는 온도와 태양광과 밀접한 관련이 있으며(Dandonneau, 1982), 미세조류의 대발생(bloom)이 일어난 봄과 가을에 비해 온도와 광이 높은 여름에 높다는 Magni and Montani (1997)의 기록은 본 연구의 결과를 뒷받침하고 있다. 새만금 갯벌에서의 P/C값은 0.52로 약간 높게 나타났으며, Marennes-Oleron갯벌에서 평균 0.51 (Cariou-Le Gall and Blanchard, 1995), 그리고 North Euboikos Gulf 갯벌의 평균 0.5로서 본 연구지역과 유사하게 나왔다. 저서미세조류의 생물량이 봄철에 최고값을 보인 후 여름철에 급격하게 감소하는데, 주요 원인은 영양염 부족, 퇴적물의 무기탄소 결핍 및 저서동물의 섭식활동 등으로 알려져 있다(Colijn and Dijkema, 1981; Cariou-Le Gall and Blanchard, 1995; Oh et al., 2004). 본 연구에서 저서미세조류의 섭식자로 알려진 서해비단고둥은 모든 조위에서, 특히 조간대 중부와 하부에서 많은 개체수가 출현하여 엽록소 *a*의 농도가 조간대 상부에 비해 낮을 것으로 예견하였으나 오히려 중·하부에서 높은 생물량을 보였다. Helling and Baars (1985)는 저서 구조류를 섭식한 저서동물의 배설물에서 phaeopigment값이 높게 나타남으로 조식활동이 활발한 곳에서 phaeopigment값이 높다고 하였다. 하지만, 본 연구에서 phaeopigment값은 저서동물인 서해비단고둥의 밀도가 조간대 중·하부에 비해 낮은 상부에서 오히려 높게 나타났다. 이러한 결과는 진산리 갯벌에서 미세조류의 광합성 활동에 의해 생성된 엽록소 *a*는 저서동물의 조식활동과 같은 생물학적인 요인에 의해 phaeopigment로 분해되는 양보다는 조간대 중부와 하부에 비해 상대적으로 대기 노출시간이 긴 조간대 상부의 무생물적인 환경스트레스(온도, 노출시간, 광도 등)에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

진산리 갯벌의 정규식생지수인 NDVI는 계절별로 0.05-0.08(평균 0.06)로서 10월에 최소이고 12월에 최대였으며, 조위별로는 0.06-0.07로서 차이가 없었다. 식생지수인 VI의 4계절 평균값은 1.14였으며, 계절별로는 1.10-1.19로서 10월에 최소였고 12월에 최대로서 NDVI와 유사한 계절적 변화를 보였다. 본

연구의 NDVI값은 포르투갈 Tagus 갯벌의 0.1-0.4 (Jesus et al. 2009)와 Vista Aveiro 갯벌의 0.1-0.5 (Serôdio et al. 2006)보다 낮았는데, 이는 포르투갈에서 연구정점이 영양염이 풍부한 하구해역으로 생산성이 높았기 때문으로 사료된다. 이러한 식생지수는 비파괴적이고 노동력이 적게 들면서 엽록소 *a*와 밀접한 상관관계를 가지고 있어서 해외에서 많이 사용되고 있으므로(Jesus et al., 2006; Murphy et al., 2008; Coelho et al., 2009; Perkins et al., 2010), 향후 우리나라 연안의 갯벌 생산력에 관한 연구에도 많이 활용될 수 있기를 기대한다.

## 사 사

본 연구는 국립수산물과학원 갯벌의 생태환경 특성을 활용한 생산성 평가 및 향상(11-AQ-46) 과제의 일환으로 추진되었습니다. 좋은 논문이 되도록 유익한 지적을 해주신 심사위원님께 깊은 감사 드립니다.

## 참고문헌

- Cariou-Le Gall V and Blanchard GF. 1995. Monthly HPLC measurements of pigment concentration from an intertidal muddy sediment of Marrennes-Oléron Bay, France. *Mar Ecol Prog Ser* 121, 171-179.
- Cho KJ and Kim JH. 1988. Species composition and primary production of the benthic algal assemblage along a channel in salt marsh, Kyonggi Bay, Korea. *Korean J Ecol* 11, 1-15.
- Choi HS, 1988. A floristic study on benthic diatoms in Songdo tidal flat, Gyeonggi Bay. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Clarke KR and Gorley RN. 2006. PRIMER V6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E Ltd, Plymouth, UK, 1-190.
- Coelho H, Vieira S and Serôdio J. 2009. Effects of desiccation on the photosynthetic activity of Intertidal microphytobenthos biofilms as studied by optical methods. *J Exp Mar Bio Ecol* 381, 98-104.
- Colijn F and Dijkema KS. 1981. Species composition of benthic diatoms and distribution of chlorophyll *a* on an intertidal flat in the Dutch Wadden Sea. *Mar Ecol Prog Ser* 4, 9-21.
- Consalvey M, Jesus B, Perkins R, Brotas V and Paterson DM. 2004. Monitoring migration and measuring biomass in benthic biofilms: the effects of dark/far red adaptation and vertical migration on fluorescence measurements. *Photosynth Res* 81, 91-101.
- De Jonge VN and Colijn F. 1994. Dynamics of microphytobenthos biomass in the Ems estuary. *Mar Ecol Prog Ser* 104, 185-196.
- Dandonneau Y. 1982. A method for the rapid determination of chlorophyll plus phaeopigments in samples collected by merchant ships. *Deep Sea Research* 29, 647-654.
- Dodge JD. 1982. Marine dinoflagellates of the British Isles. Hobbs the Printers of Southampton, London, U.K., 303.



- Falasco E, Bona F, Ginepro M, Hlúbikova D, Hoffmann L and Ector L. 2009. Morphological abnormalities of diatom silica walls in relation to heavy metal contamination and artificial growth conditions. *Water SA* 35, 595-606.
- Helling GR and Baars MA. 1985. Changes of the concentrations of chlorophyll and phaeopigment in grazing experiments. *Hydrobio Bull* 19, 41-48.
- Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes RW and Strickland-JDH. 1965. Fluorimetric determination of chlorophyll. *J Cons Perm Int Explor Mer* 30, 3-15.
- Jesus B, Mendes CR, Brotas V and Paterson DM. 2006. Effect of sediment type on microphytobenthos vertical distribution: Modelling the productive biomass and improving ground truth measurements. *J Exp Mar Biol Ecol* 332, 60-72.
- Jesus B, Brotas V, Ribeiro L, Mendes CR, Cartaxana P and Paterson DM. 2009. Adaptations of microphytobenthos assemblages to sediment type and tidal position. *Cont Shelf Res* 29, 1624-1634.
- Jin DX, Chen ZD, Li JM, Junmin L and Li SC. 1985. *The Marine Benthic Diatoms in China, Vol 1*. China Ocean Press, Beijing, China, 314.
- Jordan CF. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50, 663-666.
- Kang CK, Kim JB, Lee KS, Kim JB, Lee PY and Hong JS. 2003. Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: dual stable C and N isotope analyses. *Mar Ecol Prog Ser* 259, 79-92.
- Kelly JA, Honeywill C and Paterson DM. 2001. Microscale analysis of chlorophyll-a in cohesive, intertidal sediments: the implications of microphytobenthos distribution. *J Mar Biol Ass UK* 81, 151-162.
- Kendrick GA, Langtry LS, Fitzpatrick J, Griffiths R and Jacoby GA. 1998. Benthic microalgae and nutrient dynamics in wave-disturbed environments in Marmion Lagoon, Western Australia, compared with less disturbed mesocosms. *Exp Mar Biol Ecol* 228, 83-105.
- Kim JH and Cho KJ. 1985. The physico-chemical properties of sediment, the species composition and biomass of benthic diatoms in the intertidal zone of Keum River estuary. *Korean J Ecol* 8, 199-207.
- Krumme U, Keuthen H, Barletta M, Saint-Paul U and Villwock W. 2008. Resuspended intertidal microphytobenthos as major diet component of planktivorous Atlantic anchoveta *Cetengraulis edentulus* (Engraulidae) from equatorial mangrove creeks. *Ecotropica* 14, 121-128.
- Lee HY. 2002. Comparison of the effects of physico-chemical factors on the zonation and vertical distribution of benthic microalgal communities in the tidal flats of south-west Korea. *J Environ Sci* 11, 529-535.
- Lee HY. 2003. Studies on the distribution of the microalgae in the tidal flats of Gamami beach, Young-Gwang, Korea. *J Environ Sci* 12, 715-724.
- Lee YW, Choi EJ, Kim YS, and Kang CK. 2009. Seasonal variations of microphytobenthos in sediments of the estuarine muddy sandflat of Gwangyang Bay: HPLC pigment analysis. *J Korean Fish Soc* 14, 48-55.
- Lorenzen CJ. 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnol Oceanog* 12, 343-346.
- Lucas DH, Widdows J and Wall L. 2003. Relating spatial and temporal variability in sediment chlorophyll a and carbohydrate distribution with erodibility of a tidal flat. *Estuaries* 26, 885-893.
- MacIntyre HL, Geider RJ and Miller DG. 1996. Microphytobenthos: the ecological role of the "Secret Garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. Distribution, abundance and primary production. *Estuaries* 19, 186-201.
- Magni P and Montani S. 1997. Development of benthic microalgal assemblages on an intertidal flat in the Seto Inland Sea, Japan: effects of environmental variability. *La Mer* 35, 137-148.
- Mélédér V, Barillé L, Rincé Y, Morancais M, Rosa P and Gaudin P. 2005. Spatio-temporal changes in microphytobenthos structure analysed by pigment composition in a macrotidal flat (Bourgneuf Bay, France). *Mar Ecol Prog Ser* 297, 83-99.
- Montagna PA, Blanchard GF and Dinét A. 1995. Effect of production and biomass of intertidal microphytobenthos on meiofaunal grazing rates. *J Exp Mar Biol* 185, 149-165.
- Montani S, Magni P and Abe N. 2003. Seasonal and interannual patterns of intertidal microphytobenthos in combination with laboratory and areal production estimates. *Mar Ecol Prog Ser* 249, 79-91.
- Murphy RJ, Underwood AJ, Tolhurst TJ and Chapman MG. 2008. Field-based remote-sensing for experimental intertidal ecology: case studies using hyperspatial and hyperspectral data for New South Wales (Australia). *Remote Sens Environ* 112, 3353-3365.
- NFRDI. 2011. Technical report of national fisheries and development institute. 619-638.
- Noh SM. 2008. Effect of tidal on microalgal distribution and primary production variation in Taean coastal environment. M.S. Thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Oh SH and Koh CH. 1995. Distribution of diatoms in the surficial sediments of the Mangyung-Dongjintidal flat, west coast of Korea (Eastern Yellow Sea). *Mar Biol* 122, 487-496.
- Oh SJ, Moon CH and Park MO. 2004. HPLC analysis of biomass and community composition of microphytobenthos in the Saemankeum tidal flat, west coast of Korea. *J Kor Fish Soc* 37, 215-225.
- Park JS. 2005. Taxonomic study of benthic diatoms in Nanauramudflat, Ariake Sea, Japan. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Perkins RG, Lavaud J, Serôdio J, Mouget JL, Cartaxana P,

- Rosa P, Barille L, Brotas V and Jesus BM. 2010. Vertical cell movement is a primary response of intertidal benthic biofilms to increasing light dose. *Mar Ecol Prog Ser* 416, 93-103.
- Pitcher GC and Joyce LB. 2009. Dinoflagellate cystproduction on the southern Namaqua shelf of the Benguela upwelling system. *J Plankton Res* 31, 865-875.
- Rizzo WM. 1990. Nutrient exchanges between the water column and a subtidal benthic microalgal community. *Estuaries* 13, 219-226.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA and Deering DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium. NASA SP-351, Washington, USA, 309-317.
- Serôdio J, Coelho H, Vieira S and Cruz S. 2006. Microphytobenthos vertical migratory photoresponse as characterised by light-response curves of surface biomass. *Estuar Coast Shelf Sci* 68, 547-556.
- Underwood GJC. 1994. Seasonal and spatial variation in epipelagic diatom assemblages in the severn estuary. *Diatom Res* 9, 451-472.
- Underwood GJC and Kromkamp J. 1999. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Adv Ecol Res* 29, 93-153.
- Woelfel J, Schumann R, Adler S, Hübener T and Karsten U. 2007. Diatoms inhabiting a wind flat of the Baltic Sea: species diversity and seasonal succession. *Estuar Coast Shelf Sci* 75, 296-307.
- Yoo MH and Choi JK. 2005. Seasonal distribution and primary production of microphytobenthos on an intertidal mud flat of the Janghwa in GanghwaIsland, Korea. *J Korean Soc-Oceanogr* 10, 8-18.