

## 섬진강 하구역의 계절별 일차생산력 및 식물플랑크톤 색소 조성 변화

민준오 · 하선용 · 정미희<sup>1</sup> · 최보형 · 이연정  
윤석현<sup>1</sup> · 윤원득<sup>1</sup> · 이재성<sup>1</sup> · 신경훈\*

(한양대학교 해양환경과학과, <sup>1</sup>국립수산과학원)

Seasonal Variation of Primary Productivity and Pigment of Phytoplankton Community Structure in the Seomjin Estuary. *Min, Jun Oh, Sun Yong Ha, Mi Hee Chung<sup>1</sup>, Bo Hyung Choi, Yeon Jung Lee, Seok Hyun Youn<sup>1</sup>, Won Duk Yoon<sup>1</sup>, Jae Seong Lee<sup>1</sup> and Kyung Hoon Shin\** (Environmental Marine Sciences Hanyang University, An-San 425-791, Korea, <sup>1</sup>National Fisheries Research & Development Institute, Busan, Korea)

Four *in situ* incubation experiments were conducted in May, August and November 2009, as well as February 2010 to determine the seasonal primary productivity and the community structure of phytoplankton at the Seomjin estuary. The primary production of phytoplankton ranged from 9 to 3560 mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Primary productivity was the highest in the summer season (August), which was influenced by improved optical and temperature conditions of the water, as well as the supply of nutrients derived from its surrounding watershed. Particularly, the upper station (SJ-1, SJ-2) of Seom-jin estuary showed a higher productivity, as a result of inflow of input nutrients originated from the terrestrial source. The fucoxanthin, as an index pigment of diatoms showed the highest concentration (0.74~9.51 µg L<sup>-1</sup>) at all stations, occupying 30~80% to total Chl *a* concentrations. The phytoplankton species composition determination, using a microscope showed similar results to the pigment analysis, which indicated diatom *Skeletonema costatum*, as the dominant species. The primary productivity in Seom-jin estuary indicates temporally and spatially large variation, according to different environmental conditions. Also, *Skeletonema costatum* has euryhaline features with relatively higher contribution.

**Key words :** phytoplankton, primary productivity, pigment, HPLC, Seomjin river estuary

### 서 론

섬진강 하구역은 한반도 남부 중부해역에 위치하고 있

으며 하구둑이 설치되지 않은 국내 유일의 자연형 하구이다. 이러한 자연형 하구는 식물플랑크톤에 의한 생산성이 높고 어류나 패류들에게 서식처와 먹이를 공급하는 해

\* Corresponding author: Tel: 031) 400-4158, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

산식물 군집구조를 이루고 있다 (Ryther, 1969; Levinton, 1982; Cloern, 1987).

담수생태계와 해양생태계의 전이지역 (transition zone) 인 하구 환경은 염분 변화를 비롯하여 물리 화학적 환경이 끊임없이 변화하는 지역이다. 특히 하구에서 일어나는 여러 생지학적 과정은 육상 및 하천으로 공급되는 유기물과 하구의 해수 순환 등 물리적 요인들이 관여하고 있다 (Hager and Schemel, 1992; Zwolsman, 1994). 수권물질 순환 과정 중 중요한 생태적 지위를 차지하고 있는 식물플랑크톤은 수 생태계의 일차생산자로서 해당 수역 전체 생물량을 지탱하고 유기물을 공급하는 생산자로서의 역할을 수행하고 있다 (Odum, 1993). 식물플랑크톤의 일차생산력은 광량, 영양염, 온도, 포식자에 의한 섭식활동, 수층 혼합현상에 의해 조절된다고 알려져 있다 (Parsons *et al.*, 1984a; Valiela, 1984). 또한 하구역 식물플랑크톤 생체량은 하구로 유입되는 담수량에 따른 염분의 변동에 의하여 영향을 받으며 (Fisher *et al.*, 1988), 섬진강 하구의 경우, 식물플랑크톤 일차생산에 가장 커다란 영향을 미치는 요인은 조석 주기와 강으로부터 유입되는 담수에 의한 염분변화라 보고하고 있다 (Yang *et al.*, 2005). 하구역에서 서식하고 있는 생물은 이러한 주기적인 환경 변화에 적응이 되어 있으나, 식물플랑크톤은 특히 염분의 변화에 따른 삼투압의 급격한 변화를 견디지 못하고 사멸되어 종 조성의 변화를 가져오기도 한다 (Park *et al.*, 2001; Kwon *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2005).

식물플랑크톤 일차생산력에 대한 측정은 방사성 동위원소 ( $^{14}\text{C}$ )를 이용한 측정방법이 일반적으로 사용되어 왔지만 (Steeman-Nielsen, 1952; Parsons *et al.*, 1984b), 본 연구에서 사용한 탄소 안정동위원소 ( $^{13}\text{C}$ )를 이용한 방법 (Hama *et al.*, 1983)은 방사붕괴를 하지 않아 안전하며, 현장 수역에 직접 배양할 수 있다는 장점을 가지고 국내에서도 유용하게 이용되는 방법이다 (Lee *et al.*, 2006, 2008; Min *et al.*, 2011). 또한 일차생산력과 더불어 해당 수역의 식물플랑크톤 생체량을 평가하고 식물플랑크톤 군집구조를 이해하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 고성능 액체크로마토그램 (HPLC)을 이용하여 식물플랑크톤의 각 지표색소의 정성 및 정량적 분석을 통해 식물플랑크톤의 군집구조와 생체량을 평가하였다. HPLC를 이용한 방법은 현미경 관찰법에 비해 신속하게 식물플랑크톤의 군집구조를 파악할 수 있다. 또한 초 미소플랑크톤까지 분석할 수 있어 국내외적으로 많이 사용되는 방법이다 (Jeffrey *et al.*, 1997a, b; Park *et al.*, 1997, 2001, 2008b; Schluter *et al.*, 2000; Zapata *et al.*, 2000; Gibb *et al.*, 2001; Oh *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2009).

그동안 섬진강 하구역에서 진행된 일차생산력과 식물플랑크톤의 군집 구성에 관련한 선행 연구사례는 많지 않다 (Yang *et al.*, 2005; Yi *et al.*, 2007; Min *et al.*, 2011). 따라서 본 연구에서는 섬진강 하구역의 계절별 염분 변화에 따른 일차생산력 변화를  $^{13}\text{C}$  추적자를 이용하여 현장 일차생산력을 측정하였으며, 계절별 식물플랑크톤 군집의 변화를 색소 분석을 통하여 파악함과 동시에 현미경 분석법과 비교하여 고찰하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구지역

본 연구는 경남 하동군 진월면에 위치한 섬진강에서 광양만 입구까지 염분구배에 따라 총 4개 정점을 선정하였다 (Fig. 1). 최초 염분도 결정은 8 psu를 기준으로 16, 24, 33 psu 범위로 결정하였으며 향후 조사에서는 같은 정점에서 염분변화만을 측정하였다. 조사기간은 총 4회 (2009년 5월, 8월, 11월, 2010년 2월)에 걸쳐 현장관측 및 현장 배양실험을 실시하였다. 조사기간 동안 정점 별 이화학적 수질분석자료와 식물플랑크톤 동정 자료는 같은 시기에 조사된 하구역 관리체제 구축 연구 (III) (국토해양부, 2010)의 결과를 인용하였다.

### 2. $^{13}\text{C}$ 추적자를 이용한 일차생산력

유광층 깊이는 광량계 (Li-1000, Li-COR, USA)를 이용하여 표층의 상대광량 0.1%까지 측정된 실측 값을 사용하였다. 식물플랑크톤 일차생산력을 측정하기 위한 모든 시료는 표층 광량을 기준으로 상대광량 100%, 50%, 10% 지점 깊이에서 채수하였다. 채수된 시료는 100  $\mu\text{m}$  망목으로 대형 동물플랑크톤을 제거 후 PC (Polycarbonate) bottle (300 mL)에 시료를 넣고  $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$  (98%)를 첨가하여 4시간 동안 배양하였다. 배양이 끝난 후 시료는 미리 태운 (450°C, 4시간) 25 mm GF/F 여과지로 200~300 mL을 여과한 후 진한염산 증기로 무기탄소를 제거하여 원소-질량분석기 (EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)로 분석하였다. 일차생산력 산출은 Hama *et al.* (1983)의 계산식을 사용하였으며, 단위 Chl *a* 당 탄소 고정 속도 (Chl *a* specific productivity)는 유광층 깊이 별 Chl *a* 농도를 계산하여 적분한 값을 일차생산력으로 나누어 계산하였다. 탄소순환속도 (SPR; Specific Production Rate)는 입자성유기탄소의 생산속도를 농도로 나누어 계산하였으며, 배양하기 전, 후의 평균값을 사용하였다. 탄

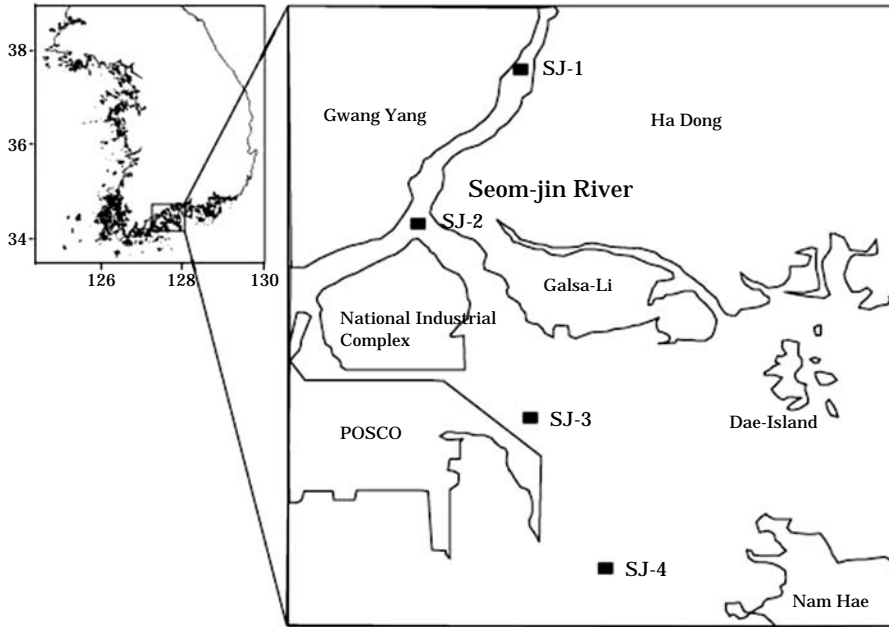


Fig. 1. Study area in the Seomjin River estuary.

소순환속도 (SPR) 1은 입자성유기탄소가 24시간에 100% 순환 (turnover)됨을 의미한다.

### 3. 식물플랑크톤 색소 분석

고성능 액체크로마토그래피 (HPLC)을 이용한 식물플랑크톤의 색소조성 변화 규명을 위한 시료는 표층 현장수 1,000 mL를 채수하여 450°C에서 4시간 태운 47 mm GF/F 여과지로 여과한 후 여과지는 광분해를 막기 위하여 알루미늄 호일로 싸 후 드라이아이스(-78°C)에 넣어 냉동 후 실험실로 운반하였다. 운반 후 시료 분석 전까지 초 저온 냉동고(-80°C)에 보관하였다. 색소 추출은 여과지를 테프론 병에 넣고 100% 아세톤 5~10 mL 첨가하여 Ultrasonic sonicator (30 sec, 50 W)를 이용 분쇄한 후 냉암소(-20°C)에서 24시간 추출하였다. 분쇄 시 손실을 보정하기 위하여 apo-8-carotennoate (Internal Standard)를 50 µL 첨가하였다. 추출된 색소는 Syringe filter (PTFE 0.20 µm Hydrophobic)를 이용하여 여과 후 1 mL을 취하여 Water packing (300 µL 3차 증류수 혼합)하여 분석하였다. 광합성 색소의 분석은 HPLC (Agilent 1200s)를 이용하였으며 분석조건은 Zapata *et al.* (2000)의 방법을 사용하였다. 각 지표색소의 피크 동정은 Standard pigment와 Retention time (R.T)을 비교하여 결정하였다. Standard pigment는 Chlorophyll *a*, *b* (Sigma-Aldrich Co.), *c*<sub>2</sub>, *c*<sub>3</sub>와 Peridinin, 19-But-Fucoxanthin, Fucoxanthin, Neo-

xanthin, Prasinoxanthin, Vioxanthin, Diadinoxanthin, Alloxanthin, Zeaxanthin, β-Carotenoid (DHI Inc., Denmark)를 이용하였다.

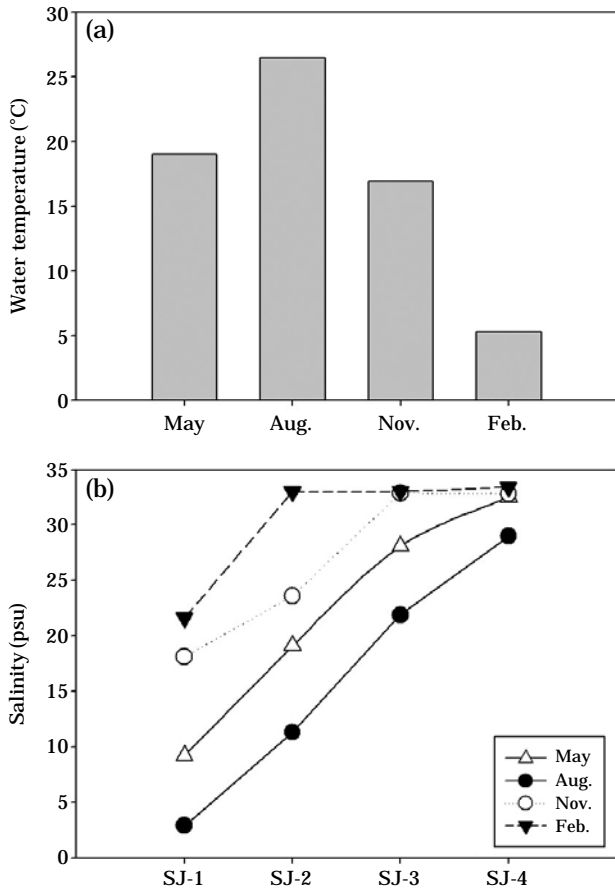
표준색소의 정량식은 Jeffrey에 의해 알려진 흡광계수 (Jeffrey *et al.*, 1997a)를 이용하여 Park *et al.* (1997)에 의해 계산하였다.

## 결 과

### 1. 수온 및 염분

섬진강 하구 조사시점에서의 평균 수온 범위는 5.3~26.50°C의 범위 (Fig. 2a)를 보였으며 해양쪽으로 갈수록 수온이 감소하는 특성을 보였다. 수온이 상승하는 여름철인 8월에 평균 26.5°C로 가장 높게 나타났으며, 2010년 2월에 가장 낮은 수온(5.03°C)을 보였다.

섬진강 하구의 염분은 조사시기에 따라 정점 별 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 춘계의 갈수기를 대표하는 5월의 정점간 염분범위는 8~33 psu의 범위를 나타냈다. 집중강우가 지난 후 측정된 8월은 다량의 담수 유입이 섬진강 전 수층에 유입되어 3~29 psu 범위를 보였으며 5월보다 낮은 염분범위를 보였다. 11월과 2010년 2월은 각각 18~33, 21~33 psu 염분범위를 보였으며, 추계와 동계 동안 상류정점에서 높은 염분분포를 보였다 (Fig. 2b).

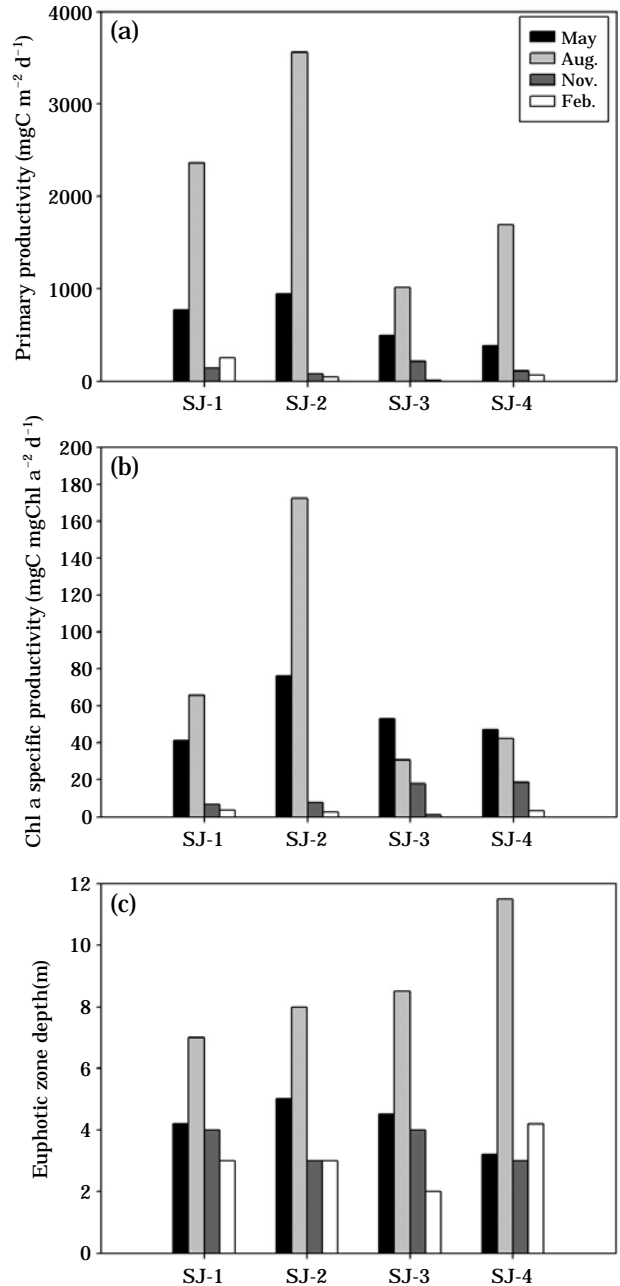


**Fig. 2.** Variation of water temperature and salinity in the surface of Seomjin estuary : (a) water temperature, (b) salinity.

**2. 일차생산력**

현장배양실험을 통해 얻어진 식물플랑크톤의 일차생산력 (Primary productivity) 및 단위 Chl a 당 탄소고정 속도 (Chl a specific productivity)는 조사지점 및 조사기간에 따라 넓은 범위를 보였다(Fig. 3a, b). 5월의 일차생산력은 381~769  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$  범위를 보이고 있으며 상대적으로 저염분 지역인 상류 정점 (SJ-1, SJ-2 : 769~944  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )에서 해양과 가까운 하류정점 (SJ-3, SJ-4 : 496~381  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )보다 높은 일차생산력을 보였다. 단위 Chl a 당 탄소고정 속도 역시 상류정점에서 높은 것으로 나타났다(Fig. 3a, b).

강우기가 끝난 후 조사된 8월의 일차생산력은 1074~3560  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 보였으며 조사기간 중 최대치를 보였다. 5월과 비교하여 약 3배 이상 높은 일차생산력을 보이고 있으며 특히 상류정점에서 높은 일차생산력과 단위 Chl a 당 탄소고정 속도를 보이고 있다. 8월에



**Fig. 3.** Variation in primary productivity and chl a specific productivity and euphotic zone depth in the Seomjin estuary : (a) Primary productivity, (b) Chl a specific productivity, (c) Euphotic zone depth.

일차생산력이 높은 이유는 높아진 광 조건과 생체량, 생리활성도 등이 일차생산력에 영향을 미쳤으며, 이후 추계와 동계인 11월과 2월의 일차생산력은 각각 81~213, 9~256  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$  범위로 나타났다. 단위 Chl a 당 탄소고정 속도는 11월과 2월에 7~19, 1~3  $\text{mgC mgChl a}^{-1} \text{d}^{-1}$ 으로 나타났다. 2월은 조사기간 중 가장 낮은 일차생

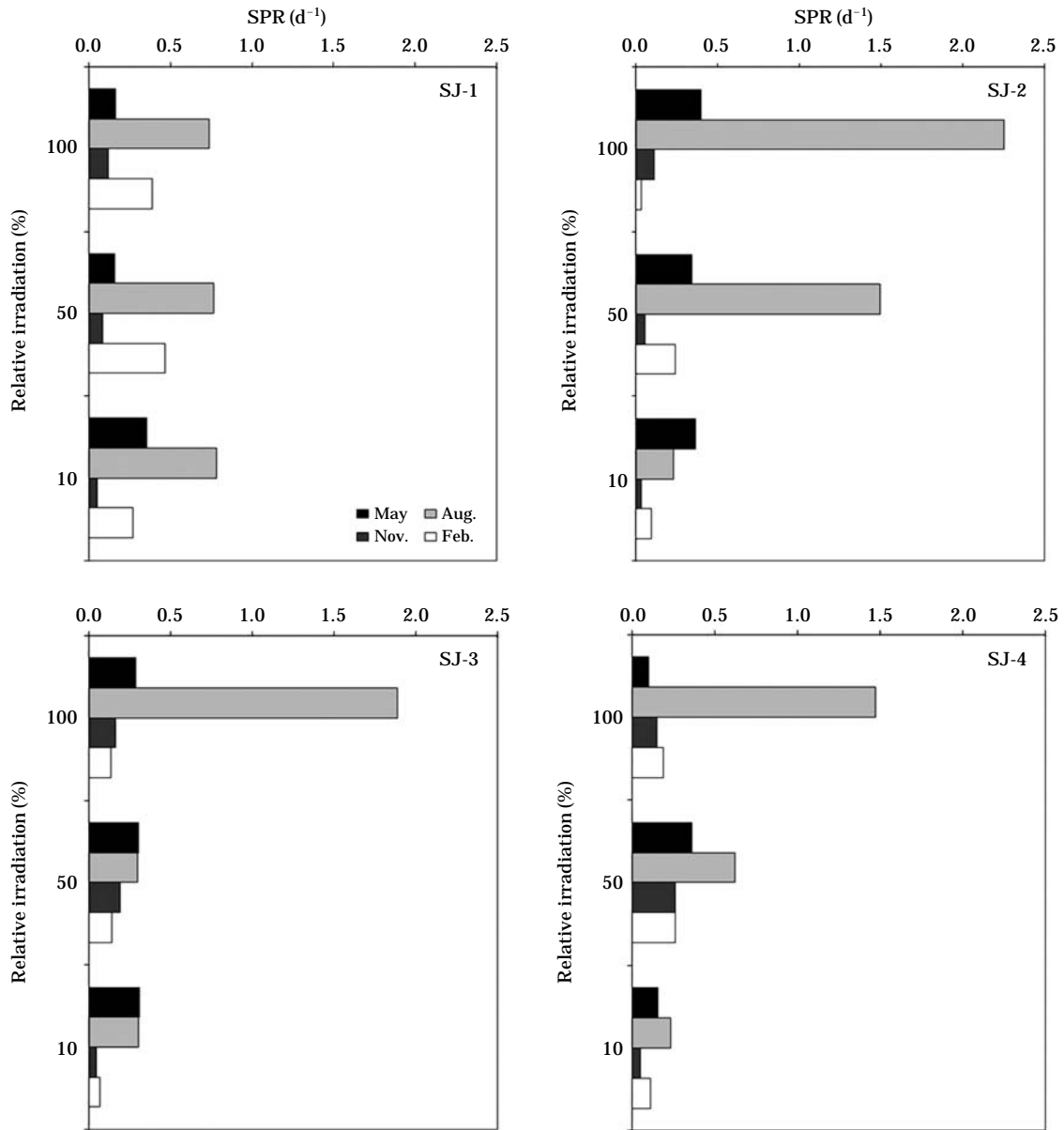


Fig. 4. Specific Production Rate (SPR) at each station of Seomjin estuary.

산력과 탄소고정 속도를 보였다.

섬진강 하구역내 유광층 깊이는 8월을 제외하고 모두 평균 5 m 미만의 낮은 깊이를 보였고 8월은 평균 8.7 m로 가장 높게 나타났다(Fig. 3c). 유광층 깊이는 부유물질과 수층 내 탁도 차이에 의해 깊이가 달라지게 되는데(Shin *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2008a), 7월 경우에 의한 희석효과로 깊어진 영향도 배제할 수 없다.

섬진강 하구 내 탄소순환속도는 5월은 상대 광량 100% 수심에서 평균 0.24의 순환속도를 보이고 있으며 상대 광량 50%와 10% 수심에서는 각각 0.29, 0.30의 순환속도

를 보였으며 깊이 별 큰 차이는 보이지 않았으나 10% 수심에서 소폭 증가된 순환속도를 보였다(Fig. 4). 8월은 조사기간 중 가장 높은 탄소순환속도를 보였다. 표층 수에 대한 상대광량 100% 수심에서 평균 1.58의 순환속도로 1일에 한번 이상 입자성유기탄소(POC) Pool이 매우 빠르게 순환하고 하는 것으로 나타났으며 5월에 비해 약 6.5배 가량 빠른 순환속도를 보였다. 11월과 2010년 2월은 춘계와 하계에 비해 매우 낮은 탄소순환속도를 보였으며 각각 평균 0.11, 0.20의 순환속도를 보였다. 11월과 2월은 식물플랑크톤 광합성에 의해 유기탄소가 모두 순

**Table 1.** Range values of concentrations of diagnostic pigments in the surface water of Seomjin estuary.

Diagnostic pigments	Concentration of pigments ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )			
	May 2009	Aug. 2009	Nov. 2009	Feb. 2010
Chlorophyll <i>a</i>	2.20~3.25 (3.06)*	1.14~9.21 (5.56)	1.78~5.86 (3.31)	1.08~12.05 (4.87)
Chlorophyll <i>b</i>	0.13~0.85 (0.50)	0.02~0.16 (0.09)	0.02~0.04 (0.02)	0.02~0.12 (0.05)
Chlorophyll <i>c</i> <sub>3</sub>	ND**	ND	ND~0.47 (0.12)	ND~1.59 (0.40)
Chlorophyll <i>c</i> <sub>2</sub>	0.06~1.18 (0.39)	0.23~1.04 (0.82)	0.17~0.94 (0.39)	0.35~1.92 (0.79)
Peridinin	ND	ND~0.16 (0.05)	ND	ND
19'-Butanoylox-fucoxanthin	ND	ND~0.12 (0.03)	ND	ND
Fucoxanthin	0.74~2.08 (1.15)	0.81~5.18 (3.61)	1.30~4.64 (2.32)	1.32~9.51 (4.36)
Neoxanthin	0.08~0.22 (0.14)	ND~0.02 (0.01)	ND~0.02 (0.01)	ND~0.05 (0.02)
Prasincoxanthin	ND	ND~0.03 (0.01)	ND~0.03 (0.01)	ND
Violaxanthin	ND~0.06 (0.02)	ND~0.03 (0.01)	ND~0.01 (0.004)	ND
Diadinoxanthin	0.15~0.73 (0.56)	0.007~0.43 (0.16)	0.008~0.02 (0.15)	0.005~0.61 (0.14)
Alloxanthin	0.04~0.13 (0.08)	ND~0.03 (0.01)	ND~0.67 (0.18)	0.03~0.19 (0.09)
Zeaxanthin	0.01~0.05 (0.03)	0.001~0.02 (0.01)	ND~0.01 (0.004)	ND~0.04 (0.01)
$\beta$ -Carotene	0.07~0.14 (0.09)	0.05~0.41 (0.25)	0.08~0.40 (0.18)	0.80~0.51 (1.56)

\*Values in parentheses are monthly means, \*\*Not detected

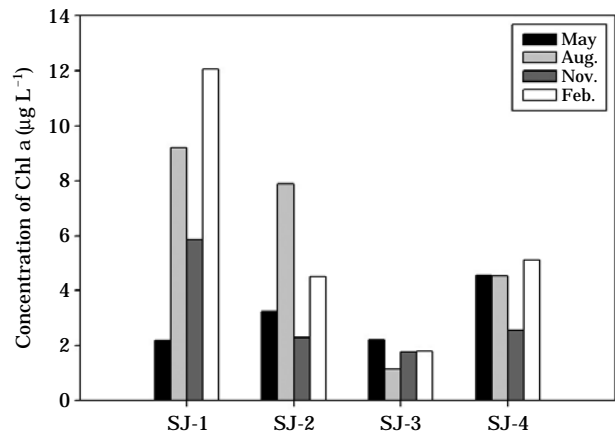
환하는데 5~9일 이상 걸릴 것으로 사료된다.

### 3. 식물플랑크톤 색소 조성

식물플랑크톤은 분류군에 따라 지표색소를 가지고 있으며 이러한 지표색소를 통해 식물플랑크톤의 군집구조를 알 수 있다 (Jeffrey *et al.*, 1997b; Schluter *et al.*, 2000; Gibb *et al.*, 2001). HPLC로 분석된 섬진강 하구의 Chl *a* 농도는  $1.14 \sim 12.10 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 계절별 변화가 뚜렷하게 나타났다 (Table 1). 5월은 조사기간 중 가장 낮은 Chl *a*의 농도를 보였으며 특히 해양과 가까운 SJ-4 정점에서 높은 농도를 보였다. 여름철 집중 강우기 이후 8월의 Chl *a*의 농도는 조사기간 중 가장 높은 농도를 보였다. 특히 상류 정점 (SJ-1, SJ-2)에서 평균  $8.55 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 하류정점 (SJ-3, SJ-4:  $2.83 \mu\text{g L}^{-1}$ )보다 약 3배 이상 높은 농도 범위를 보였다. 11월과 2010년 2월의 농도 범위 또한 상류정점에서 높은 농도를 보였다 (Table 1, Fig. 5).

본 연구해역에서 검출된 색소분석 결과를 토대로 식물플랑크톤 군집구조를 살펴보면 chlorophytes (Chl *b*), chrysophytes (But-fuco), cryptophytes (Allo), cyanobacteria (Zea), diatoms (Fuco), dinoflagellates (Perid), prasinophytes (Pras)의 7개 그룹이 출현하는 것으로 나타났다 (Table 1).

Fuco는 규조류의 지표색소로써 조사기간 동안 전 정점에서 높은 농도 ( $0.74 \sim 9.51 \mu\text{g L}^{-1}$ )를 보였다. 또한 규조류의 보조색소인 Chl *c*<sub>2</sub>, Diadin,  $\beta\beta$ -Caro도 전 정점에서 높은 농도로 검출된 것으로 보아 전체 식물플랑크톤 생체량 중 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것을 시사해



**Fig. 5.** The concentration of Chl *a* in the Seomjin estuary.

준다. Fuco의 농도는 5월 SJ-4 정점을 제외하고 상류정점 (SJ-1, SJ-2)에서 높은 농도를 보였으며 Chl *a* 농도 변화와 유사하였다.

Chlorophytes의 지표색소인 Chl *b*는 조사기간 중 5월에 높은 농도 분포를 보였다. 특히 24~33 psu 염분 범위를 보이는 SJ-3, SJ-4 정점에서 평균  $0.78 \mu\text{g L}^{-1}$  농도를 보였으며 상류 지역보다 3배 이상 높은 농도 분포를 보였다. 8월과 11월 2010년 2월은 평균  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$  이하의 적은 농도 값을 보였으며 정점 별 뚜렷한 차이는 보이지 않았다.

Allo와 Zea는 cryptophytes와 cyanobacteria의 지표색소이며 생체량 중 매우 적은 부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. Allo는 색소분석 결과 8월과 11월 SJ-2 정점을 제외하고 모두 검출 되었으나  $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$  이하의 낮

은 농도를 보였고 *Zea* 또한  $0.004 \sim 0.03 \mu\text{g L}^{-1}$  범위로 조사기간 동안 매우 낮은 농도 범위를 보였으며 11월 SJ-2 정점에서 *Allo*와 마찬가지로 검출되지 않았다.

*Prasinophytes*는 지표색소로 *Pras*를 갖고 있으며 보조 색소로 *Chl b*, *Viola*를 공통으로 가지고 있다. 8월에 SJ-2 정점에서 이와 같은 색소가 모두 검출되었으며 11월 SJ-1, SJ-2 정점에서도 모두 검출된 것을 보았을 때 생체량에 차지하는 비율은 적으나 상류정점에서 일부 *prasinophytes*의 기여도 배제할 수 없을 것으로 판단된다.

*Perid*와 *But-fuco*는 *dinoflagellates*와 *chrysophytes*의 지표색소이며 각각 8월 SJ-1, SJ-2 정점과 SJ-2 정점에서 검출되었으며  $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$  이하로 적은 농도분포를 보였고 다른 조사시기에는 검출되지 않았다.

## 고 찰

본 연구해역인 섬진강 하구의 일차생산력은 계절별 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 여름철인 8월에 일차생산력 및 단위 *Chl a* 당 탄소고정 속도는 최대치를 보이고 있다. 특히 상류정점인 SJ-1, SJ-2 정점 (2~11 psu)에서 높은 일차생산력을 보였다 (Fig. 3a, b). 여름철 섬진강 평균 수온은  $26.5^\circ\text{C}$ 로 높았으며 (Fig. 2a), *Chl a*의 농도 또한 조사기간 중 가장 높게 나타났다 (Fig. 5). 같은 시기에 조사된 하구역 관리체제 구축 연구 (III) 결과에 따르면 질산염과 규산염의 농도는 염분이 낮은 상류정점에서 높게 나타났고 해양과 가까운 하류로 갈수록 감소하였으며, 인산염 역시 상류 (0~7 psu)에서 높게 나타나고 그 이후 염분 구간 7 psu 이상에서는 염분 구배에 따른 감소의 특성을 보였다. 또한 식물플랑크톤의 일차생산력 및 생체량은 광 제한의 영향을 받는다 (Kocum *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2010). 특히 염분에 의한 생체량 결정이 하구환경에서는 중요한 역할을 하고 있으며 (Fisher *et al.*, 1988; Park *et al.*, 2001; Kwon *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2005), Jun *et al.* (2009)은 영양염과 빛 제한에 따라 동식물플랑크톤의 군집구조와 성장 그리고 생산특성에 영향을 미친다고 보고하고 있다.

따라서 이러한 특성을 고려해볼 때 증가된 수온과 영양염 그리고 늘어난 식물플랑크톤 생체량과 광합성 활성도에 의해 상류정점의 일차생산력이 높게 나타난 것으로 해석될 수 있다. 또한 8월에 1일에 한번 이상 매우 빠른 속도로 입자성 유기탄소 (POC)가 순환하는 것 또한 이와 같은 이유로 설명될 수 있다 (Fig. 4). 5월의 일차생산력은

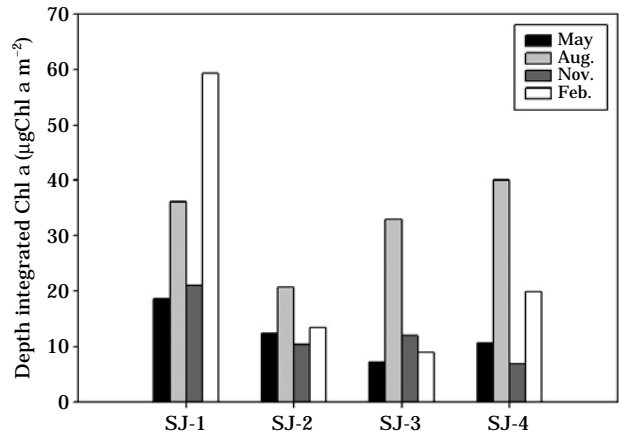


Fig. 6. Depth integrated Chl a in the Seomjin estuary.

8월과 마찬가지로 상류정점에서 높은 일차생산력을 보였다. 유광층 단위면적으로 적분한 *Chl a* 농도 (Fig. 6)는 SJ-1 정점과 SJ-4 정점에서 높은 값을 보인 반면 일차생산력은 SJ-2와 SJ-3 정점에서 높은 결과를 보였다. 반면 단위 *Chl a* 당 탄소고정 속도는 일차생산력과 같은 경향을 보여 5월은 식물플랑크톤의 생체량 보다 광합성 활성도 즉 탄소고정 속도가 우세하게 작용하였을 것으로 사료된다 (Fig. 2b). 11월과 2월은 낮은 일차생산력을 보이고 있다. 11월은 *Chl a*의 농도가 조사기간 중 가장 낮게 나타났으며 유광층 깊이로 적분된 *Chl a*의 농도 경향과 유사한 것으로 미루어 볼 때 식물플랑크톤 생체량 차이가 일차생산력에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다 (Fig. 6). 반면 2월은 상류정점에서 높은 생체량을 보이고 있지만 낮은 일차생산력을 보이고 있다. 그러나 식물플랑크톤 탄소고정 속도를 보았을 때 1~3으로 조사기간 중 가장 낮은 활성도를 보였으며 감소한 수온 ( $5.3^\circ\text{C}$ ) 또한 낮은 일차생산력에 기여한 것으로 판단된다.

국내 주요 하구역인 영산강 하구와 섬진강 하구에서 진행된 선행연구와 비교해 본 결과 영산강 하구역보다는 낮은 일차생산력을 보였으며 2005년에  $^{14}\text{C}$ 로 측정된 섬진강 하구의 일차생산력과는 비슷한 수준을 보이고 있다 (Table 2).

섬진강 하구 내 식물플랑크톤 군집구조를 나타내는 색소 중 *diatoms*의 지표색소인 *Fuco*는 계절과 관계없이 모든 조사해역에서 가장 높은 농도를 보였으며 전체 식물플랑크톤 생체량에 차지하는 비가 매우 높게 나타났다 (Fig. 7a).

본 연구조사와 같은 시기에 채집한 시료에 대해 국립수산과학원에서 광학현미경을 사용한 동정 결과에서도

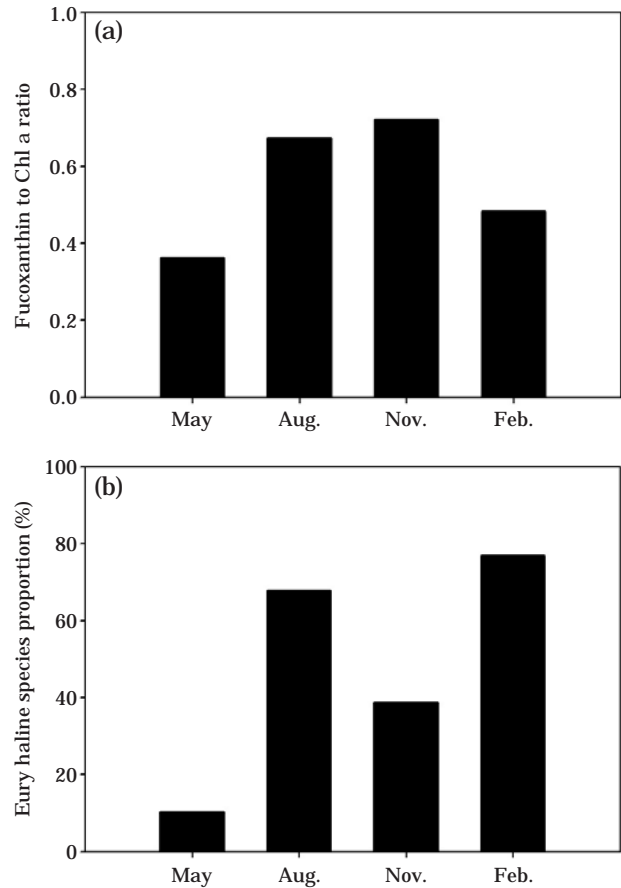
**Table 2.** Comparison of primary productivity of phytoplankton in each area.

Study area	P.P (mgC m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Method	Reference
Young-san estuary (Mokpo Harbor)	35 ~ 8926	<sup>13</sup> C	Lee <i>et al.</i> , 2011
Seom-jin estuary	1789 ~ 3180	<sup>14</sup> C	Yang <i>et al.</i> , 2005
Seom-jin estuary (Rainy season)	12 ~ 1169	<sup>13</sup> C	Min <i>et al.</i> , 2011
Seom-jin estuary	9 ~ 3560	<sup>13</sup> C	This study 2009~2010

\*P.P=Primary productivity

구조류가 섬진강 내 우점율이 가장 높은 것으로 나타났으며 특히 광염성 성질의 *Skeletonema costatum*이 주 우점종으로 나타났다 (Fig. 7b; 국토해양부, 2010).

또한 식물플랑크톤의 현존량과 염분관계를 살펴보았을 때 염분이 높을수록 현존량이 낮아지는 경향을 보이고 있으며 5월과 11월에 현존량이 낮은 시기에는 상관관계수가  $r = -0.734$  ( $p < 0.01$ )을 나타냈으며 8월에는  $r = -0.858$  ( $p < 0.01$ ), 2010년 2월에는  $r = -0.836$  ( $p < 0.01$ )로 나타남으로써 현존량이 높았던 8월과 2월의 상관성이 높게 나타난다고 보고하고 있다 (국토해양부, 2010). 이러한 결과를 미루어 볼 때 섬진강 하구의 *Skeletonema costatum*은 염분에 따라 생체량의 변화가 있음을 확인할 수 있으며, 따라서 이 종의 변동은 전체 생체량 변화에 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. *Skeletonema costatum*은 하구 환경에서 봄과 여름에 주로 우점하는 종으로 광염성의 성질을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며 계절에 관계없이 빈번한 출현 빈도를 보이며, 여름철 고온 저염분 환경에서 빠른 성장을 하는 것으로 보고되고 있다 (Han *et al.*, 1992; Baek *et al.*, 2010). 그러나 본 연구에서 수온이 낮은 시기인 2월에도 높은 농도를 보였으며 *Skeletonema costatum* 현존량도 매우 높은 것으로 나타났다. Baek *et al.* (2011)은 광양만에서 실시한 선행연구에서 동계 저수온 (5~8°C)에서도 *Skeletonema costatum*은 적응성이 뛰어나며 DIN이 높은 환경에서 극 우점종임을 보고하였다. 따라서 본 연구에서 8월과 2월 Chl *a*의 농도와 Fuco의 농도가 높았던 것은 *Skeletonema costatum* 현존량과 관계가 있는 것으로 생각되며 상류지역 저염분 해역에서 높았던 이유는 섬진강 기원의 질소원 영양염을 효율적으로 이용한 결과라 볼 수 있다. 또한 2월에 높은 생체량에도 불구하고 낮은 일차생산력을 보이는 이유로 현미경 관찰로 보기 힘든 nano size의 prymnesiophytes의 존재 가능성이 충분히 있었을 것으로 보인다. Prymnesiophytes는 Hex-fuco를 지표색소로 가지고 있으나 본 연구에서는 Hex-fuco의 표준색소를 분석하지 않아 검출 유무를 정확히 판단할 수는 없었다. 그러나 diatoms은 Chl *c*<sub>3</sub>를 거의 가지고 있지 않는데 2월 색소 조성 중 Chl



**Fig. 7.** The ratio of Fucoxanthin to Chl *a* and eury haline species proportion (%) the Seomjin estuary: (a) The ratio of Fucoxanthin to Chlorophyll *a*, (b) Eury haline species proportion (May: *Cymbella ventricos*, Aug. ~ Feb.: *Skeletonema costatum* (%)).

*c*<sub>3</sub>의 농도 값 (Table 1)을 보면 다른 시기에는 검출한계 이하거나 최대 0.5 μg L<sup>-1</sup> 미만의 농도 값을 보인 반면 2월에는 최대 1.59 μg L<sup>-1</sup> (평균: 0.4 μg L<sup>-1</sup>)로 다른 시기에 비해 높은 농도를 보이는 점이 이를 뒷받침 할 수 있을 것으로 사료된다. Chl *b*는 chlorophytes의 지표색소이며 조사기간 중 5월이 가장 높게 나타났다. Chl *a*에 대한 Chl *b*의 비를 보면 0.1~0.31로 Fuco를 제외한 다른 지표



색소보다 높은 비를 보였다. 또한 8월, 11월, 2010년 2월에 비해 10~25배 높은 농도를 보여 5월에 chlorophytes가 diatoms와 함께 전체 식물플랑크톤 생체량의 대부분을 차지하는 것으로 보이며 일차생산력에도 크게 기여한 것으로 사료된다. 5월을 제외한 다른 조사시기(8월, 11월 2010년 2월)는 매우 낮은 비(0.008~0.01)를 보였으며, 생체량의 차지하는 비도 매우 낮은 것으로 나타났다.

Allo은 cryptophytes의 지표색소이며 8월과 11월 SJ-2 정점을 제외하고 모든 정점에서 검출되었다. Allo은 낮은 농도범위를 보이고 있으나 섬진강 하구역내 계절과 관계없이 고루 출현하는 것으로 나타났다. Neo은 green algae와 euglenophytes의 지표색소인데 Chl b와 일부 정점을 제외하고 같이 검출되어 green algae 계열의 chlorophytes의 색소로 판단할 수 있으나 현미경 중 동정결과에서는 해양 및 기수에서 euglenophyta가 출현한 것으로 보아 일부 euglenophytes의 기여도 배제할 수 없을 것으로 판단된다. 그 밖에 dinoflagellates의 색소인 Perid과 chryso-phytes의 But-Fuco는 8월 상류정점(SJ-1, SJ-2)에서만 매우 적은 농도로 검출되었으며 일차생산력 및 식물플랑크톤 생체량에 대한 기여도 매우 미약할 것으로 판단된다.

## 적 요

섬진강 하구역의 계절별 일차생산력의 변화는 하계 8월에 가장 높은 일차생산력을 보이고 있으며, 수온과 광 조건이 향상되고 주변 육지로부터 유입되는 영양염의 영향으로 높은 결과를 보이고 있다. 특히 섬진강 하구역의 상류정점들은 육상기원 영양염의 유입이 다른 정점들에 비해 활발하게 이루어 짐으로 더 높은 생산력을 보이고 있다.

식물플랑크톤 색소 조성 결과 diatoms의 지표색소인 Fucoxanthin이 조사시기와 정점에 상관없이 높은 농도를 나타냈다. 이는 현미경 중 동정 결과와 일치함을 보이고 있으며 일차생산력과 보조색소 분석 결과 그리고 중동정 결과를 비교하여 볼 때 규조류(*Skeletonema costatum*)가 일차생산력에 가장 크게 기여하는 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 자연형 하구인 섬진강에서 시 공간적 일차생산력 변동을 확인할 수 있었으며 또한 식물플랑크톤의 대략적인 군집구조와 일차생산력 계절 변동을 평가할 수 있었다. 이러한 연구결과는 향후 섬진강 하구 내 생태 모니터링에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며 수계 내 건강성 평가 및 수질관리를 위한 연구에 유용한 자료로 활용될 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 하구역 관리체제 구축 연구(III)(섬진강 하구)의 지원으로 수행된 과제입니다.

## 인 용 문 헌

- 국토해양부. 2010. 하구역 관리체제 구축 연구(III) 섬진강 하구(제1권 자연과학 연구분야).
- Baek, S.H., D.S. Kim, B.G. Hyun, H.W. Choi and Y.O. Kim. 2011. Characteristics of horizontal community distribution and nutrient limitation on growth rate of phytoplankton during a winter in Gwangyang Bay, Korea. *Ocean and Polar Research* **33**(2): 99-111.
- Baek, S.H., K.S. Shon, B.H. Hyun and P.G. Jang. 2010. Distribution characteristics and community structure of phytoplankton in the different water masses during early summer of southern sea of Korea. *Ocean and Polar Research* **32**(1): 1-13.
- Cloern, J.E. 1987. Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Continental Shelf Research* **7**: 1376-1387.
- Fisher, T.R., L.W. Harding, Jr., D.W. Stanley and L.G. Ward. 1988. Phytoplankton, nutrients and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **27**: 61-93.
- Gibb, S.W., D.G. Cummings, X. Irigoien, R.G. Barlow, R. Fauzi and C. Mantoura. 2001. Phytoplankton pigment chemotaxonomy of northeastern Atlantic. *Deep Sea Research II* **48**: 795-823.
- Hager, S.W. and L.E. Schemel. 1992. Sources of nitrogen and phosphorus to northern San Francisco Bay. *Estuaries* **15**: 40-52.
- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura. 1983. Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable  $^{13}\text{C}$  isotope. *Marine Biology* **73**: 31-36.
- Han, M.S., K. Furuya and T. Nemoto. 1992. Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* in the inner part of Tokyo Bay. *Marine Ecology Progress Series* **79**: 267-273.
- Jeffrey, S.W. and M. Vesk. 1997b. Introduction to marine phytoplankton and their pigment signatures, p. 37-84. *In: Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods* (Jeffrey, S.W. et al. eds.).

- UNESCO, Paris.
- Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura and Wright, S.W. (eds.). 1997a. *Phytoplankton Pigments in Oceanography*. UNESCO Publishing, Paris.
- Jun, M.S., K.H. Ryu, M.S. Kim, J.H. Park and J.C. Park. 2009. Effect of Light : Nutrients ratio on the zooplankton and phytoplankton community. *Korean Journal of Limnology* **42**(3): 295-302.
- Kocum, E., G.J.C. Underwood and D.B. Nedwell. 2002. Simultaneous measurement of phytoplanktonic primary production, nutrient and light availability along a turbid, eutrophic UK east coast estuary (the Colne estuary). *Marine Ecology Progress Series* **231**: 1-12.
- Kwon, K.Y., P.G. Lee, C. Park, C.H. Moon and M.O. Park. 2001. Biomass and species composition of phytoplankton and zooplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *Journal of the Korea Society of Oceanography* **6**(2): 93-102.
- Lee, Y.J., M.S. Kim, E.J. Won and K.H. Shin. 2006. An application of  $^{13}\text{C}$  tracer for the determination of size fractionated primary productivity in upper stream of Lake Shihwa. *Korean Journal of Limnology* **39**(1): 93-99.
- Lee, Y.J., M.S. Kim, K.H. Shin and S.J. Hwang. 2008. An application of  $^{13}\text{C}$  tracer for the determination of primary productivity and fatty acid production rate in Shingu Reservoir. *Korea Journal of Limnology* **41**(Special issue): 21-26.
- Lee, Y.J., J.O. Min, Y.S. Shin, S.H. Kim and K.H. Shin. 2011. Temporal and spatial variations of primary productivity in estuary of Young-san River and Mokpo Coastal areas. *Korea Journal of Limnology* **44**(4): 327-336.
- Lee, Y.W., E.J. Choi, Y.S. Kim and C.K. Kang. 2009. Seasonal variation of microphytobenthos in sediments of the estuarine muddy sandflat of Gwangyang Bay: HPLC pigment analysis. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **14**(1): 48-55.
- Levinton, J.S. 1982. *Marine Ecology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. p.526.
- Min, J.O., S.Y. Ha, B.H. Choi, M.H. Chung, W.D. Yoon, J.S. Lee and K.H. Shin. 2011. Primary productivity and pigments variation of phytoplankton in the Seomjin river estuary during rainy season in summer. *Korea Journal of Limnology* **44**(3): 303-314.
- Odum, E.P. 1993. *Ecology and our Endangered Life-Support Systems*. Sinauer Associates, Sunderland, Mass, p. 301.
- Oh, S.J., C.H. Moon and M.O. Park. 2004. HPLC analysis of biomass and community composition of microphytobenthos in the Saemankeum Tidal flat, West Coast of Korea. *Korean Journal of Fisheries and Sciences* **37**(3): 215-225.
- Park, J.W., S.H. Yu, S.Y. Kim, J.E. Lee and E.W. Seo. 2008a. Effect of turbid water on the phytoplankton community in Imha Reservoir. *Journal of Life Science* **18**(12): 1671-1678.
- Park, M.O. and J.S. Park. 1997. HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *The Journal of the Korean Society of Oceanography* **32**: 46-55.
- Park, M.O., C.H. Moon, S.Y. Kim, S.R. Yang, K.Y. Kwon and Y.W. Lee. 2001. The species composition of phytoplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary in autumn, 2000: Comparison of HPLC analysis and microscopic observations. *Algae* **16**(2): 179-188.
- Park, M.O., S.W. Kang, C.I. Lee, T.S. Choi and L.F. Lantone. 2008b. Structure of the phytoplanktonic communities in Jeju Strait and Northern East China sea and dinoflagellate blooms in spring 2004: Analysis of photosynthetic pigments. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **13**(1): 27-41.
- Parsons, T.R., M. Takahashi and B. Hargrave. 1984a. *Biological Oceanographic Processes*. 3rd ed. Pergamon Press, Oxford, p. 330.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984b. *A manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *American Association for the Advancement of Science* **166**: 72-76.
- Schluter, L., F. Mohlenberg, H. Havskum and S. Larsen. 2000. The use of phytoplankton pigments for identifying and quantifying phytoplankton groups in coastal areas: testing the influence of light and nutrients on pigment/chlorophyll a ratios. *Marine Ecology Progress Series* **192**: 49-63.
- Shin, Y.S., H.Y. Soh and B.K. Hyun. 2005. Effect of salinity change on biological structure between primary producer and herbivores in water column. *Journal of the Korea Society of Oceanography* **10**(2): 113-123.
- Song, E.S., Y.S. Shin, N.I. Jang and J.B. Lee. 2010. Assessment of nutrient and Light Limitation of phytoplankton in the Youngsan Lake. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 35-43.
- Steeman-Nielsen, E. 1952. The use of radioactive carbon ( $^{14}\text{C}$ ) for measuring organic production in the sea. *ICES Journal du Conseil* **18**: 117-140.
- Valie, I. 1984. *Marine ecological processes*. Springer-Verlag,

- New-York, p. 546.
- Yang, S.Y., H.S. Song, K.C. Kim, C. Park and C.H. Moon. 2005. Changes in environmental factors and primary productivity in the Seomjin River estuary. *Journal of the Korea Society of Oceanography* **10**(3): 164-170.
- Yi, H.H., Y.S. Shin, S.Y. Yang, N.I. Chang and D.H. Kim. 2007. Size-structure and primary productivity of phytoplankton from major lakes in Sumjin and Yeongsan, watershed. *Korean Journal of Limnology* **40**(3): 419-430.
- Zapata, M., F. Rodriguez and J.L. Garrido. 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine containing mobile phases. *Marine Ecology Progress Series* **195**: 29-45.
- Zwolsman, J.J.G. 1994. Seasonal variability and biogeochemistry of phosphorus in the Scheldt Estuary, Southwest Netherlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **39**: 227-248.

(Manuscript received 23 November 2011,  
Revised 22 December 2011  
Revision accepted 30 May 2012)