

하계 강우기 섬진강 하구역의 일차생산력 및 식물플랑크톤 색소조성 변화

민준오 · 하선용 · 최보형 · 정미희¹ · 윤원득¹ · 이재성¹ · 신경훈*

(한양대학교 해양환경과학과, ¹국립수산과학원)

Primary Productivity and Pigments Variation of Phytoplankton in the Seomjin River Estuary during Rainy Season in Summer. Min, Jun oh, Sun Yong Ha, Bo Hyung Choi, Mi Hee Chung¹, Won Duk Yoon¹, Jae Seong Lee¹ and Kyung Hoon Shin* (Environmental Marine Sciences, Hanyang University, An-San 425-791, Korea; ¹National Fisheries Research & Development Institute, Busan, Korea)

Field observations and culture experiments have been carried out during the rainy season (on the 6th, 8th and 27th July 2009) to examine changes in the primary productivity and associated plant pigments in the estuary of the Seom-jin River. Primary productivity was determined at four sampling stations along the salinity gradient. On 6th July (before heavy rain) primary productivity ranged from 689~1,169 mgC m⁻² d⁻¹. On the 8th, just after more than 216.5 mm of precipitation, euphotic layers at all stations were reduced to very shallow water because of the high concentration of suspended solids in the water. This resulted in dramatically decreased primary productivity down to as low as 12~32 mg C m⁻² d⁻¹. However, after the rain, primary productivity on the 27th ranged from 266~999 mgC m⁻² d⁻¹, demonstrating a fast recovery in the upper stream water to similar productivity levels to those before the rainy season. Concentration of fucoxanthin in the water was highest on the 6th July. Before the rain, concentration of the zeaxanthin, increased as the salinity decreased. Immediately after the heavy rain, the Chl *b* (Chlorophytes) concentration was higher at all sites than before the rainy season. The concentration of fucoxanthin decreased after the heavy rain. At the downstream site, peridinin (Dinoflagellates) were found. During the rainy season, the diatoms contributed to the primary productivity at all sites. However, after the rainy season, Chl *b* (Chlorophytes) and Peridinin (Dinoflagellates) increased, demonstrating the enhanced contribution of those species in addition to diatoms.

Key words : rainy season, primary productivity, pigment, HPLC, Seomjin river estuary

서 론

식물플랑크톤은 수생태계의 구조와 기능을 유지하기 위한 기초생산자로서 태양복사에너지를 화학에너지로 전

환시켜 유기물을 공급하는 중요한 역할을 한다(Odum, 1993). 식물플랑크톤의 일차생산성은 일반적으로 영양물질의 공급(bottom-up control)과 포식자에 의한 섭식(top-down control)에 의해서 조절되며(Carpenter *et al.*, 1987; Kivi *et al.*, 1993; Armstrong, 1994; Caraco *et al.*, 1997),

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

특히 우리나라의 경우 하계에 강우가 집중되는 기후 조건에서 발생하는 탁수는 일차생산자의 생체량 및 크기 구조에 영향을 주고 있다(Sin *et al.*, 2005). 주변 하천으로부터 유입되는 탁수는 수층 내 유광층 깊이를 감소시키며, 식물플랑크톤과 저서성 식물플랑크톤의 광합성에 영향을 미쳐 식물플랑크톤의 생산력과 생물량을 감소시키는 원인이 된다(Wofsy's, 1983; Peterson and Festa, 1984; Horne and Goldman, 1994; Park *et al.*, 2005). 또한 탁도 유도 물질인 점토 광물이 식물플랑크톤을 병합해서 식물플랑크톤의 생체량에 영향을 미친다고 보고하고 있다(Avnimelech *et al.*, 1982). 그러나 탁도가 소멸된 후에는 탁수와 함께 유입된 영양물질과 빛 투광도 증가 등에 의해 특정 분류군 개체 수 증가에 유리하게 작용되기도 한다(Park *et al.*, 2008).

한반도 남부 중부해역에 위치한 섬진강은 하구둑이 건설되지 않은 자연형 하구의 특성을 반영하고 있다. 한반도는 중위도 온대지역에 위치하여 여름과 겨울의 기온차가 매우 크고 사계절 변화가 뚜렷하다. 또한 연 강수량의 2/3가 여름철에 집중되는 특성을 가지고 있으며, 이러한 집중호우가 시작되는 여름철에는 담수유입량이 크게 증가하고 하구의 염분 변화를 초래한다.

그동안 식물플랑크톤 일차생산력에 대한 측정은 방사성 동위원소(^{14}C)를 이용한 측정방법이 일반적으로 사용되어 왔지만(Steehan-Nielsen, 1952; Parsons *et al.*, 1984), 본 연구에서 사용한 탄소 안정동위원소(^{13}C)를 이용한 방법(Hama *et al.*, 1983)은 방사붕괴를 하지 않아 안전하며, 현장 수역에 직접 배양할 수 있다는 장점을 가지고 있어 국내에서도 유용하게 이용되는 방법이다(Lee *et al.*, 2006, 2008). 일차생산력과 더불어 식물플랑크톤의 생체량과 군집구성은 수 생태계를 이해하는 데 있어 매우 중요한 구성요소이다. 기존 연구에서는 생물량을 측정하는 데 있어 Spectrophotometric (Lorenzen, 1967)을 이용한 방법과 Fluorimetric (Holm-hansen *et al.*, 1965)을 이용한 방법을 통해 결정하였고 군집구조 파악을 위해서는 현미경 관찰을 통해 분석하였다. 이러한 분석방법 등은 Chlorophyll의 분해산물(chlorophyllides, phaeophorbides, pheophytins)과 보조색소(accessory pigments)들의 중복으로 인한 어려움이 따르고 현미경 관찰을 통한 군집구조 파악은 상당한 분석시간과 정확한 동정기술을 필요로 한다(Rajdeep *et al.*, 2006). 하지만 고성능 액체크로마토그래피(HPLC)를 이용한 분석방법은 Chlorophyll의 분해산물 및 지표색소들을 분석할 수 있어 생물량을 보다 정확하게 측정할 수 있으며 분석된 지표색소를 통해 식물플랑크톤 군집구조를 파악할 수 있어 현미경을 통한

정량, 정성 분석에 비해 비교적 간편하고 빠른 분석시간을 자랑하며 또한 초 미소 크기의 조류군을 분석할 수 있어 그 활용가치가 높다(Susuki *et al.*, 1995).

그동안 섬진강 하구역에서 진행된 일차생산력과 식물플랑크톤의 군집구조에 관한 연구사례는 계절적 변동에 집중되었고(Kwon *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2005; Yi *et al.*, 2007), 여름철 집중 강우에 의한 식물플랑크톤의 일차생산력 및 군집구조 변화에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 집중 강우 전과 후의 식물플랑크톤 일차생산력을 비교하였고, 일차생산력에 기여하는 식물플랑크톤 군집을 파악하였다. 특히 섬진강 하구의 탁수 발생이 수계생태계의 기초생산자인 식물플랑크톤의 군집구조에 미치는 영향과 일차생산력 변화에 대하여 조사하였다.

재료 및 방법

1. 연구지역

본 연구는 경남 하동군 진월면에 위치한 섬진강에서 광양만 입구까지 염분구배에 따라 총 4개 정점을 선정하였다(Fig. 1). 최초 염분 결정은 8 psu를 기준으로 16, 24, 33 psu 범위로 결정하였으며 향후 조사에서는 같은 정점에서 염분변화만을 측정하였다. 조사기간은 총 3회(2009년 7월 6일, 8일, 27일)에 걸쳐 현장관측 및 현장 배양실험을 실시하였다.

조사기간 동안 정점별 염분변화는 같은 시기에 조사된 국립수산과학연구원(하구역 관리체제 구축 연구(III))의 결과를 사용하였으며 강우량은 기상청(순천기상대)의 7월 강수량자료를 활용하였다.

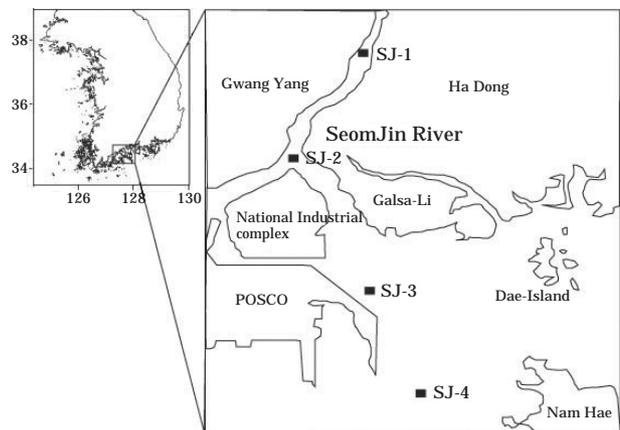


Fig. 1. Study area in the Seomjin River estuary.

2. ¹³C 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 채수 하였다. 채수된 시료는 대형 동물플랑크톤을 제거하기 위해 100 µm 망목으로 거른 후 Polycarbonate bottle (300 mL)에 채운 후 NaH¹³CO₃ (98%)를 첨가하여 ¹³C 존재 비를 현장수역보다 약 10% 높혀 준 후 4시간 동안 배양하였다. 배양이 끝난 후 시료는 미리 태운 (450°C, 4시간) 25 mm GF/F 여과지로 200~300 mL를 여과한 후 진한염산 증기로 무기탄소를 제거하여 원소-질량분석기 (EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)로 분석하였으며 일차생산력 산출은 Hama *et al.* (1983)의 계산식을 사용하였다.

$$\text{Production rate (pc (t))} = \frac{\Delta\text{POC (t)}}{t} = \frac{a_{is} - a_{ns}}{a_{ic} - a_{ns}} \times \frac{\text{POC (t)}}{t}$$

a_{is} : ¹³C atomic % of particulate matter at the end of the incubation

a_{ns} : ¹³C atomic % in natural sample

a_{ic} : ¹³C atomic % in DIC in the incubation bottle

t: Incubation time

POC (t): Concentration of POC concentration during the incubation

ΔPOC (t): Increase in POC concentration during the incubation

탄소순환속도 (SPR; Specific Production Rate)는 입자성 유기탄소의 생산속도를 농도로 나누어 계산하였으며, 배양하기 전, 후의 평균값을 사용하였다. 탄소순환속도 (SPR) 1은 입자성 유기탄소가 24시간에 100% 순환 (turn-over)됨을 의미한다.

3. 식물플랑크톤 색소 분석

고성능 액체크로마토그래피 (HPLC)를 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 Deep freezer (-80°C)에 보관하였다. 입자성 유기물 내 색소 추출은 여과지를 테프론 Bottle에 넣고 100% 아세

Table 1. HPLC System and solvent system (Zapata *et al.*, 2000).

HPLC	Agilent 1200s
Column	Waters Symmetry C8 column (150 × 4.6 mm, 3.5 µm)
Solvent A	Methanol: 50%, Acetonitrile: 25%, Aqueous pyridine: 25%
Solvent B	Methanol: 20%, Acetonitrile: 60%, Acetone: 20%

톤 5~10 mL 첨가하여 Ultrasonic sonicator (30 sec, 50 W)를 이용하여 추출 후 냉암소에서 24시간 추출하였다. 분쇄 시 손실을 보정하기 위하여 apo-8-carotennoate (Internal Standard)를 50 µL 첨가하여 회수율을 구하였다. 추출된 색소는 Syringe filter (PTFE 0.20 µm Hydrophobic)를 이용하여 여과 후 1 mL를 취하여 Water packing (300 µL 3차 증류수 혼합)하여 분석하였다. HPLC System과 분석 조건은 Table 1에 나타내었으며, 각 지표 색소의 피크 동정은 Standard pigment와 Retention time (R.T)을 비교하여 결정하였다. Standard pigment는 Chlorophyll a, b (Sigma-Aldrich Co.), c₂, c₃ (Chl a, b, c₂, c₃)와 Peridinin (Perid), 19-But-Fucoxanthin (But-fuco), Fucoxanthin (Fuco), Neoxanthin (Neo), Prasinoxanthin (Pras), Vioxanthin (Viola), Diadinoxanthin (Diadino), Alloxanthin (Allo), Zeaxanthin (Zea), β-Carotenoid (ββ-car) (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

조사기간 동안 총 강수량 변화 추이를 살펴보면 7월에 총 828.3 mm의 강수량을 보였다 (Fig. 2a). 현장 조사 시작일인 7월 6일 전까지는 2 mm의 적은 강수량을 보였으며, 집중호우가 시작된 7월 7일은 총 강수량의 26%에 해당하는 216.5 mm의 많은 비가 내렸으며 조사기간 중 가장 높은 강수량을 보였다. 7월 8일부터 현장 조사 직전인 26일까지 18일간 총 546.7 mm의 강수량을 보였다. 정점별 염분은 강우 전과 후에 매우 크게 변화하였다 (Fig. 2b). 강우가 시작되기 전인 7월 6일의 염분은 8~30 psu의 범위를 보였으며 7월 7일부터 시작된 집중호우의 영향으로 인해 수층 내 담수 유입의 증가로 7월 8일의 염분은 해양과 가까운 SJ-4에서도 10 psu 미만이 나타났다.

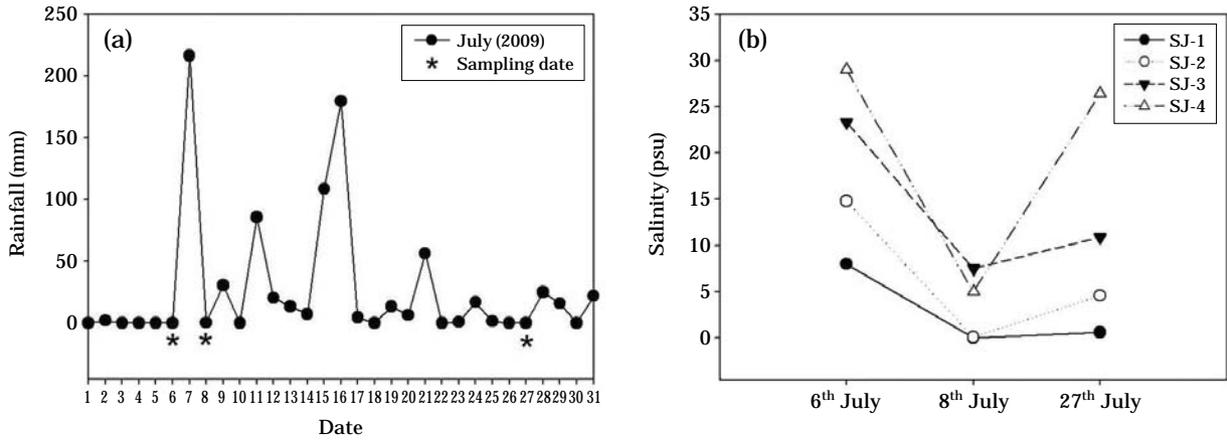


Fig. 2. Variation of rainfall and salinity in the surface water of Seom-jin estuary during the rainy season: (a) Rainfall, (b) Salinity.

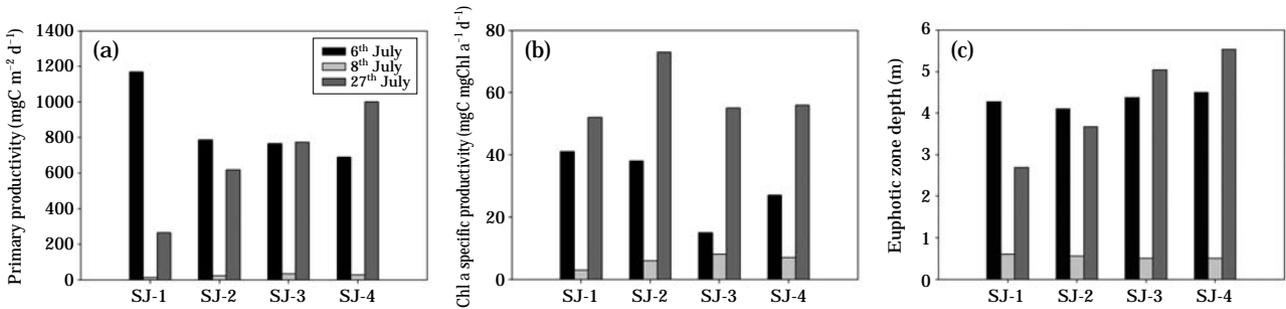


Fig. 3. Variation in primary productivity and chl *a* specific productivity and euphotic zone depth in the Seom-jin estuary during the rainy season: (a) Primary productivity, (b) Chl *a* specific productivity, (c) Euphotic zone depth.

19일 후인 7월 27일은 하류정점의 염분이 점차 회복되는 경향을 보이고 있으나 상류정점의 염분은 0.6 psu로 크게 회복되지 않았다.

1. ¹³C 추적자를 이용한 일차생산력

강우 전·후 일차생산력 변화를 보면, 7월 6일 강우 전에 측정된 일차생산력은 저염분 지역(8~16 psu)인 상류정점(SJ-1, SJ-2: 788~1,169 mgC m⁻² d⁻¹)에서 상대적으로 고염분 지역(24~30.3 psu)인 하류정점(SJ-3, SJ-4: 688~766 mgC m⁻² d⁻¹)보다 높은 생산력을 보이고 있다(Fig. 3a).

유광층 단위면적 당 1일 일차생산력을 유광층 단위면적 당 Chl *a*의 농도로 나누어 계산한 Chl *a*당 탄소고정속도 또한 높은 결과를 보이고 있다(Fig. 3b). 탄소고정속도가 높다는 것은 식물플랑크톤의 활성도가 높음을 의미하며 상류정점에서 식물플랑크톤의 활성도가 하류정점에 비해 상대적으로 높은 결과를 나타내고 있다. 7월 7일

216.5 mm의 집중호우 직후 조사된 7월 8일의 일차생산력은 평균 24 mgC m⁻² d⁻¹로 크게 감소하였으며, 강우 후 19일 후인 7월 27일의 일차생산력은 강우 전(7월 6일)으로 점차 회복하고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 3a). 강우기 동안 섬진강 내 일차생산력은 강우 전 후 반대 양상을 뚜렷하게 보이고 있다. 강우 전(7월 6일)에는 상류정점에서 높은 생산력을 보이는 반면 강우 후(7월 27일)에는 해양과 가까운 하류정점(SJ-3, SJ-4: 774~999 mgC m⁻² d⁻¹)에서 상류정점(SJ-1, SJ-2: 266~618 mgC m⁻² d⁻¹)보다 높은 일차생산력을 보이고 있다. 또한 단위 Chl *a*당 탄소고정속도 역시 전 정점에서 강우 전보다 높아진 것을 비추어 볼 때 강우 전, 후 식물플랑크톤의 생리활성도 차이가 일차생산력에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Fig. 3b).

수 생태 환경에서 유광층은 부유물질과 탁도 차이에 의해 깊이가 달라지게 되며 식물플랑크톤 광합성 기작에 제한요소로 작용할 수 있다(Sin *et al.*, 2005; Park *et al.*,

2008). 강우 전 (7월 6일) 유광층 깊이는 상류정점에서 6.5 m 이상의 깊이를 보이고 있으며 해양과 가까운 정점인 SJ-4 정점은 상류정점 (SJ-1)에 비해 약 2 m 이상 깊어진 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3c). 집중호우 직후인 7월 8일은 외부로부터 유입된 탁수가 전 수층으로 유입되면서 유광층 깊이가 1 m 미만으로 감소하였고 강우 후 19일 후에 진행된 현장조사에서는 하류정점 (SJ-4, SJ-3)부터 유광층 깊이가 회복되는 것을 볼 수 있다 (Fig. 3c).

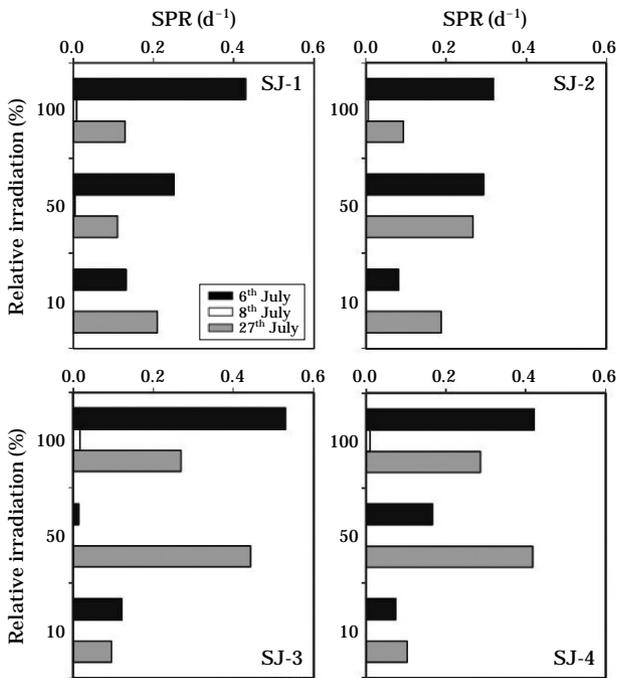


Fig. 4. Station Specific Production Rate (SPR) at each station of Seom-jin estuary.

조사시간 및 조사지점 별 탄소순환속도는 Fig. 4에 나타내었다. 섬진강 하구역의 탄소순환속도는 조사시기와 깊이에 따라 많은 차이를 보이고 있으며 조사시간 중 강우 전인 7월 6일에 높은 탄소순환속도를 보였다. 표층 수에 대한 상대광량 100% 수심에서 평균 0.43의 순환속도로 2일에 한번 입자성유기탄소 (POC) Pool이 순환하고 있는 것으로 나타났다. 상대광량 50%와 10% 수심에서는 각각 평균 0.18, 0.10로 표층 수에 비해 약 3배 이상 느린 탄소순환을 보였다 (Fig. 4). 7월 7일 강수량 216.5 mm의 집중호우 후 7월 8일의 탄소순환속도는 매우 낮은 값을 보이며 전 정점에서 0.01 미만의 순환속도를 보였다. 강우 후 19일 후인 7월 27일은 강우 전 (7월 6일)의 탄소순환속도로 점차 회복되고 있음을 볼 수 있다. 특히 상대광량 50% 수심에서 평균 0.31의 순환속도로 강우가 시작되기 전 (7월 6일)보다 약 2배 이상 빠른 순환속도를 보이고 있음을 확인할 수 있으며 10% 수심에서는 평균 0.15로 강우 전과 미세한 차이를 보이고 있다. 반면 상대광량 100%에서는 평균 0.19로 강우 전보다 느린 순환속도를 보이고 있다. 섬진강 하구에서 강우기 동안 유기탄소가 식물플랑크톤 광합성에 의해 모두 순환하는 데는 7일 이상 소요될 것으로 사료된다.

2. 식물플랑크톤 군집조성 및 지표색소 변화

식물플랑크톤은 분류군에 따라 지표색소를 가지고 있으며, HPLC로 분석된 지표색소를 통해 식물플랑크톤의 군집구조를 알 수 있다 (Table 2). 본 연구해역에서 검출된 색소는 Chlorophyll a, b, c₂, c₃와 Peridinin, 19-But-Fucoxanthin, Fucoxanthin, Neoxanthin, Prasincoxanthin, Vioxanthin, Diadinoxanthin, Alloxanthin, Zeaxanthin,

Table 2. Chemotaxonomic relationships used in the study of phytoplankton taxonomy (Jeffrey et al., 1997b; Gibb et al., 2001).

Diagnostic pigment	SCOR abbreviation	Occurrence
Chlorophyll a	Chl a	Total Algal Biomass
Chlorophyll b	Chl b	Chlorophytes, prasinophytes
Chlorophyll c ₃	Chl c ₃	Prymnesiophytes, chrysophytes
Chlorophyll c ₂	Chl c ₂	Diatoms , prymnesiophytes, chrysophytes, dinoflagellates
Peridinin	Perid	Autotrophic dinoflagellates
19'-Butanoyloxfucoxanthin	But-fuco	Chrysophytes , prymnesiophytes
Fucoxanthin	Fuco	Diatoms , prymnesiophytes, chrysophytes
Prasincoxanthin	Pras	Prasinophytes
Violaxanthin	Viola	Chlorophytes, prasinophytes
19'-Hexanoyloxfucoxanthin	Hex-fuco	Prymnesiophytes
Diadinoxanthin	Diadino	Diatoms, dinoflagellates, prymnesiophytes, chrysophytes
Alloxanthin	Allo	Cryptophytes
Zeaxanthin	Zea	Cyanobacteria

*Species in bold=major taxonomic pigment

β -Carotenoid로 나타났다.

강우기 동안 식물플랑크톤의 생체량 변화를 관찰하기 위해 HPLC로 분석한 Chl *a*의 변화를 살펴보면 강우 전 (7월 6일) 2.42~8.53 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며 특히 저염분역인 (8 psu) SJ-1 정점에서 가장 높은 농도를 보였다 (Fig. 5).

집중호우 직후 조사된 7월 8일의 Chl *a*의 농도는 0.8 ~ 1.46 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도 범위를 보였으며 강우 전보다 약 3~8배 적은 농도 차이를 보였다. 19일 후인 7월 27일의 Chl *a*의 농도는 큰 회복세를 보이고 있지 않았으며 1.53 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 낮은 농도 값을 보였다.

조사기간 중 전 정점에서 우점하는 지표색소는 Fuco로 나타났다. Fuco는 diatoms의 지표색소이며 농도 분석결과 심진강 하구역에 전반적으로 분포하는 것으로 나타났다. Fuco와 함께 검출된 색소 종류를 보았을 때, diatoms가 포함하고 있는 지표색소인 Chl *c*₂, Diadin, β -Car의 농도 또한 전 정점에서 검출 되었으며 Chl *a*의 비율로 각 주요 색소비를 계산한 결과에서도 Fuco비율이 높은

결과를 보이고 있다 (Fig. 6).

Fuco의 농도는 대체적으로 저염분 지역인 SJ-1, SJ-2 지역에서 높게 나타났으며 해양쪽으로 갈수록 검출 농도가 상대적으로 적게 나타났다. 강우의 영향과 다량의 탁수 유입이 있었던 7월 8일은 다른 조사시기에 비해 전반적으로 지표색소의 농도가 낮은 결과를 보였다. Chlorophytes의 지표색소인 Chl *b*와 cyanobacteria의 지표색소인 Zea의 농도가 저염분 지역 (SJ-1, SJ-2)에서 조사기간 중 가장 높게 나타났다. 강우 후 염분도가 크게 회복되지 않은 7월 27일은 식물플랑크톤 생물량과 Chl *a*의 농도가 낮았으며 하류지역 (SJ-3, SJ-4)에서 dinoflagellates의 지표색소인 Perid가 검출되었다. Allo는 cryptophytes의 지표색소이며 집중호우 전 (7월 6일) SJ-1 정점을 제외하고 조사기간 중 전 정점에서 검출 되었다. Allo는 강우기 기간 동안 0.005~0.04 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도 범위를 보였으며, 강우 전 (7월 6일) 하류 고염분 수역 (24~33 psu)인 SJ-3, SJ-4 정점에서 다소 증가된 농도 변화를 보였다. 집중호우 직후인 7월 8일과 19일이 지난 27일은 SJ-2와 SJ-4 정점에서 높은 농도 (0.01, 0.05 $\mu\text{g L}^{-1}$)를 보였다. 그러나 Allo의 Chl *a*의 농도비는 0.003~0.04로 매우 적은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그 밖에 적은 함량으로 검출된 색소 중 Viola는 Chl *b*와 함께 chlorophytes와 prasinophytes가 공통으로 가지고 있는 지표색소이며 Pras는 prasinophytes의 지표색소이므로 검출된 결과를 보았을 때는 일부 prasinophytes의 기여도 배제할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 But-fuco는 chrysoophytes의 지표색소이며 본 실험결과에서 적은 함량을 보이는 것으로 보아 전체 생체량에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다. Neo는 0.002~0.06 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도범위를 보였으며 전 정점에서 검출되었다. 이와 같은 지표색소로 가지고 있는 분류군은 green algae와 euglenophytes인데 Chl *b*와 함께 전 정점에서 검출된 것으로 보아 green algae 계열인 chlorophytes의 색소로 판단할 수 있다. 강우기 기간 동

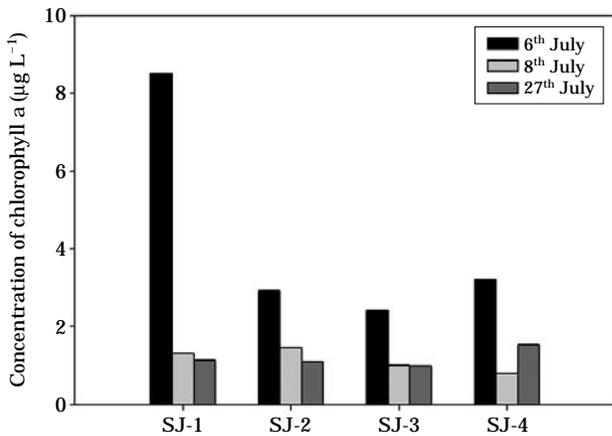


Fig. 5. The concentration of chl *a* in the Seom-jin estuary during the rainy season.

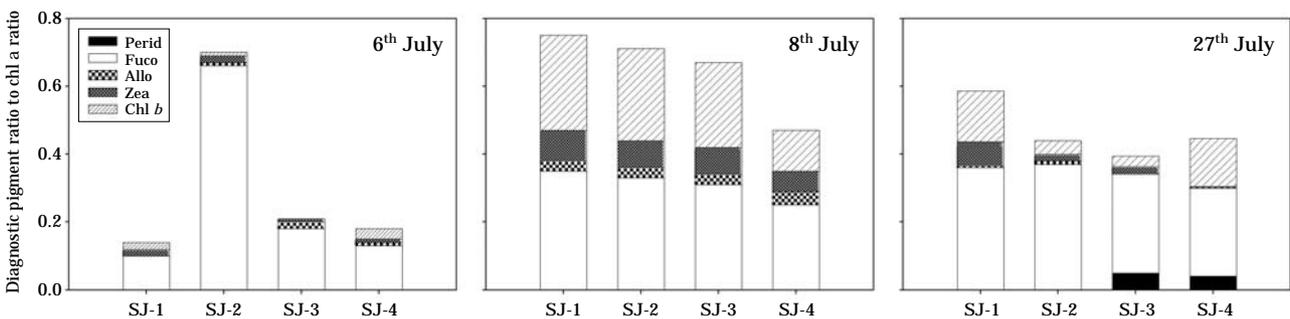


Fig. 6. Diagnostic pigments for chl *a* ratio in the Seom-jin estuary during the rainy season.

안 하구역내 식물플랑크톤의 군집비교를 위해 HPLC로 분석된 지표색소와 같은 시기에 조사된 국립수산과학연구소의 현미경 관측 결과(하구역 관리체제 구축 연구(III))를 비교한 결과, 모든 정점에서 규조류가 우점하는 것을 확인할 수 있었으나 현미경 동정결과에서는 상류정점(SJ-1)에서 담수성 남조류와 녹조류가 제1우점종으로 나타났고 집중호우 직후인 7월 8일에는 녹조류의 비율이 SJ-4 정점에서 높게 나타났으며 7월 27일에는 와편모조류가 SJ-4 정점에서 우점종으로 나타났다. 반면 HPLC로 분석한 지표색소 결과에서는 조사기간 동안 남조류의 우점비율보다 녹조류의 우점비율이 더 높은 것으로 나타났으며 와편모조류의 지표색소인 Perid는 현미경 동정 결과와 같은 시기에 SJ-3, SJ-4 두 정점에서 검출되었다.

고 찰

본 연구해역에서 강우 전·후 일차생산력의 변화는 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 강우가 시작되기 전 섬진강 하구역내 일차생산력은 상류지역(SJ-1, SJ-2)에서 높은 생산력을 보이고 있으며 단위 Chl a당 탄소고정속도 역시 상류정점에서 높은 결과를 보이고 있다(Fig. 3). 반면 유광층 깊이로 적분한 Chl a는 상류정점(SJ-1, SJ-2)보다 하류정점(SJ-3, SJ-4)에서 높게 측정되었는데(Fig. 7), 이러한 차이를 비교해 볼 때 집중호우 전 일차생산력은 식물플랑크톤의 생체량이 아니고 광합성 활성화 차이 즉 탄소고정능력이 일차생산력에 우세하게 적용된 것으로 사료된다. 또한 조사기간 중 높은 탄소순환속도(SPR)를 나타낸 것도 이와 같이 높은 식물플랑크톤 활성화에 의한 것으로 설명된다. 집중호우 직후 조사된 7월 8일의 일차생산력은 평균 $24 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 크게 감소하였는데 이는 현장 실험 당시 호우에 의하여 외부로부터 다량의 탁수가 전 정점에서 유입되어, 광제한 효과로 인해 유광층의 깊이가 1 m 미만으로 감소하였고 수괴의 빠른 흐름(flushing)으로 인해 식물플랑크톤이 지속적으로 제어되었기 때문으로 판단할 수 있다(McLusky, 1989). 강우 후 19일 후인 7월 27일의 일차생산력은 강우 전(7월 6일)으로 회복하고 있는 것을 볼 수 있으며 강우 전과 달리 하류정점이 상류정점보다 높은 일차생산력을 보이고 있다(Fig. 3). 탁수 환경에서 광 조건은 식물플랑크톤의 생산과 성장에 영향을 미치는 제한요소로 작용할 수 있다(Cloern, 1987; Grobelaar, 1990; Alpine and Cloern, 1992; Kocum et al., 2002). 따라서 강우 후 하류정점에서부터 일차생산력이 증가된 것은 섬진강 하구역내 유입된

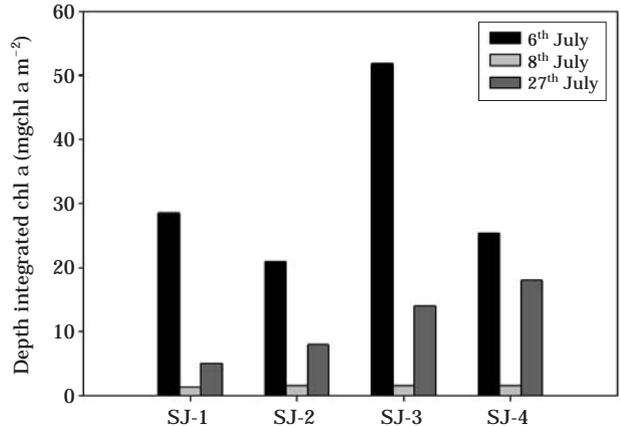


Fig. 7. Depth integrated chl a in the Seom-jin estuary.

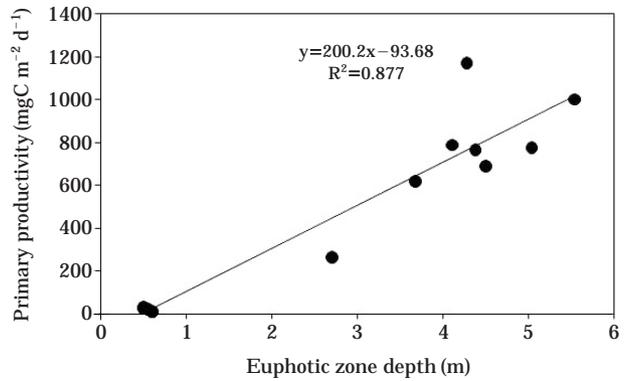


Fig. 8. A comparison of primary productivity and euphotic zone depth.

토사로 인해 크게 증가된 수층 내 탁도가 해양과 가까운 하류정점부터 줄어 들어 식물플랑크톤이 생산에 이용할 수 있는 광 조건이 좋았던 것으로 판단되며 7월 8일부터 7월 27일까지 내린 강우(총 강수량: 546.7 mm)로 인한 희석효과로 유광층 깊이가 깊어진 것도 중요한 이유라 설명할 수 있다. 또한 강우 전(7월 6일) 조사결과와 달리 유광층 단위면적으로 계산한 Chl a도 하류정점에서부터 순차적으로 높아지는 것을 볼 때 증가된 생체량의 영향도 배제할 수 없을 것으로 판단된다. Song et al. (2010)은 광 제한 지수가 광 소멸 계수와 유의한 상관성을 보이며, 광 제한이 식물플랑크톤 현존량과 변동에 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다. 강우 후 본 연구 결과에서도 해양과 가까운 하류정점부터 유광층 깊이와 현존량 그리고 일차생산력이 증가하는 결과를 보이고 있다. 또한 일차생산력과 유광층 깊이($r=0.94, P<0.01$)의 통계분석결과에서도 유의한 상관성을 보이고 있다(Fig. 8). 따라서 강우기를 지나면서 섬진강 하구역내 일차생산력 변동에 광

제한과 식물플랑크톤 생리활성도 차이가 일차생산력에 크게 영향을 미쳤다는 것을 시사해 준다.

한편, 본 연구에서 검출된 지표색소 분포를 살펴보면 Diatoms, Chlorophytes, Cryptophytes, Cyanobacteria, Prasinophytes, Chrysophytes, Dinoflagellates의 7개 그룹이 출현하는 것으로 나타났다. 강우기 동안 diatoms의 지표색소인 Fuco이 가장 높은 농도를 보였으며 전체 Chl *a*에 차지하는 비를 보았을 시 0.10~0.67 범위를 보여 다른 지표색소 비보다 높은 범위를 보였다(Fig. 6). 또한 현미경 중 조사 결과에서도 규조류(Diatoms)가 차지하는 비율이 68.8%로 매우 높은 비율을 차지하는 것으로 보아 섬진강 내 규조류가 전체 생물량에 차지하는 비율이 매우 큼을 알 수 있다. 집중 호우 직후(7월 8일) 진행된 조사에서는 chlorophytes의 지표색소인 Chl *b*의 색소비가 강우 전에 비해 약 4~30배 가량 증가된 양상을 보였으며, cyanobacteria의 지표색소인 Zea의 색소비도 약 4~6배가 증가한 변화를 볼 수 있다(Fig. 6). Park *et al.* (2008)은 임하호에서 실시된 현장조사에서 탁도 형성 시 현존량이 높은 분류군은 녹조강, 남조강이었으며 탁도 소멸과 함께 이들의 현존량이 급속히 감소하였다고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 집중호우 직후 탁수의 영향이 강하게 형성되었을 시 Chl *b*와 Zea의 색소비가 높은 경향을 보였으며 탁수가 소멸 되었을 시기인 7월 27일은 강우 전과 같은 상대적으로 낮은 색소 비 값을 보였다. 자연환경에서의 지표색소는 광 조건과 지표색소의 광 적응성에 따라 차이를 보이는데(Falkowski and La Roche, 1991) 이런 차이는 특정개체군의 현존량에 유리하게 작

용할 수 있으며 탁수 유입 시 탁수와 함께 영양염이나 다른 환경인자들이 유입되고 특정개체군이 선택적으로 침강되는 사례가 있어 향후 다양한 환경인자들과 비교분석해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

All은 cryptophytes의 지표색소이며 조사기간 동안 전 정점에서 꾸준히 검출 되었으나 현미경 동정에서는 확인 되지 않았다. 이러한 차이는 Park *et al.* (2001)에 의해 조사된 선행연구에서 보고된 것처럼 HPLC를 이용한 색소 분석에서는 검출되었으나 현미경 관찰에서는 고정시약에 의한 편모의 탈착과 현미경 관찰로 어려운 작은 크기의 조류가 포함되었을 가능성에 의해 설명될 수 있다. 또한 식물플랑크톤 동정을 위해 고정시약인 포르말린 또는 루골 용액을 사용하여 분석 전까지 보관하게 되는데 이러한 발색과정에 의해 식물플랑크톤 세포는 손상을 가져오며 특히 prymnesophytes와 cryptomonads는 고정시약에 의해 더 쉽게 소멸되는 것으로 보고되고 있다(Gieskes and Kraay, 1983; Jeffrey and Vesk, 1997; Wong and Wong, 2003). 이와 같은 이유로 현미경결과와 HPLC 색소분석 간 차이가 있었던 것으로 판단되며 향후 이러한 문제점을 보완하기 위해 색소분석결과와 현미경 동정 자료를 상호보완적으로 활용해야 할 것으로 보인다. 비록 Allo의 농도는 적은 함량으로 생체량에 많은 부분을 차지하고 있지 않지만 모든 정점에서 출현하고 있음을 확인할 수 있다.

Perid는 dinoflagellates의 지표색소로 여름철 수온이 높은 연안역에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(Jeffrey *et al.*, 1997c). 본 연구에서는 저 염분지역인 상류정점에서

Table 3. Pigment concentration of phytoplankton in the Seom-jin estuary during rainy season.

Diagnostic pigments	Concentration of pigments ($\mu\text{g L}^{-1}$)											
	6 th July				8 th July				27 th July			
Station	SJ-1	SJ-2	SJ-3	SJ-4	SJ-1	SJ-2	SJ-3	SJ-4	SJ-1	SJ-2	SJ-3	SJ-4
Chl <i>a</i>	8.51	2.92	2.42	3.21	1.32	1.46	1.02	0.80	1.15	1.11	1.01	1.53
Chl <i>b</i>	0.14	0.04	0.01	0.09	0.23	0.25	0.17	0.13	0.12	0.05	0.03	0.24
Chl <i>c</i> ₃	ND	ND	ND	ND	0.01	ND	0.05	ND	ND	ND	ND	ND
Chl <i>c</i> ₂	0.23	0.55	1.23	1.10	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04	0.07	0.18	0.30
Perid	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	55	74
But-fuco	ND	ND	ND	ND	0.03	0.04	0.05	0.04	ND	0.03	0.003	ND
Fuco	0.87	1.93	0.43	0.42	0.43	0.48	0.35	0.28	0.29	0.46	0.31	0.43
Neo	0.06	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.002
Pras	0.04	ND	0.02	ND	ND	0.08	0.06	0.04	0.06	0.02	0.006	0.02
Viola	0.04	ND	0.01	0.40	ND	0.01	ND	0.01	ND	0.004	0.007	0.01
Diadin	5.98	0.77	0.45	0.21	0.07	0.10	0.08	0.07	0.07	0.31	0.31	0.45
Allo	ND	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.005	0.01	0.005	0.005
Zea	0.19	0.05	0.03	0.02	0.12	0.12	0.09	0.07	0.06	0.03	0.02	0.004
$\beta\beta$ -Car	0.35	0.23	0.26	0.25	0.09	0.08	0.08	0.29	0.10	0.07	0.04	0.05

*ND: not detected

는 발견되지 않았으나, 고 염분역인 하류정점 SJ-3, SJ-4 정점에서 출현하였고(Table 3), 현미경 결과에서도 SJ-4 정점에서 우점하는 것으로 나타났다. Park *et al.* (2000), Oh *et al.* (2004)은 광합성을 하는 dinoflagellates는 Perid를 갖고 있으나 타기영양자인 dinoflagellates는 지표색소를 갖고 있지 않는 것으로 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 Perid색소와 현미경 결과가 SJ-4 정점에서 일치함을 보이고, SJ-3 정점에서는 현미경결과에서는 보여지지 않았으나 색소분석결과 Perid가 검출된 것으로 보아 광합성을 하는 자가영양자인 dinoflagellates의 존재를 확인할 수 있었다.

강우기 기간 동안 검출된 주요색소와 일차생산력을 비교했을 시 일차생산력에 규조류의 기여가 전체 생체량 중 가장 높았을 것으로 예상된다. HPLC로 분석된 지표색소와 현미경 결과를 토대로 보았을 때 가장 우점하는 것으로 나타났으며 전 정점에서 출현빈도가 가장 높은 것으로 볼 때 다른 개체군들에 비해 일차생산력에 가장 높은 기여를 하였을 것으로 판단된다. 또한, 집중호우 이후 강우 전과 달리 하류로 갈수록 녹조류의 지표색소인 Chl *b*와 dinoflagellates의 Perid가 증가하는 것으로 보아 일차생산력에 diatoms 외에도 chlorophyte와 dinoflagellates의 뚜렷한 기여가 있었을 것으로 판단된다.

적 요

섬진강 하구역의 강우기 동안 일차생산력은 $12 \sim 1,169 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 넓은 범위를 보였으며 강우 전과 후의 일차생산력의 변화는 뚜렷하게 나타났다. 강우 전인 7월 6일에 가장 높은 생산력을 보였으며 상류정점에서 높은 일차생산력과 생리 활성도를 보였다. 집중호우 직후 일차생산력은 현저히 감소하였으며 이러한 이유는 탁수의 영향이 전 수층으로 전이 되면서 식물플랑크톤 광합성 기작에 제한영향으로 적용되었음을 판단할 수 있다. 집중호우 19일 후의 일차생산력은 강우의 영향으로 유입된 탁도가 줄고 유광층 깊이가 깊어지면서 하류정점에서부터 회복되는 결과를 보였다. 또한 강우 전보다 식물플랑크톤의 생리활성도가 매우 좋음을 알 수 있었다. HPLC로 분석된 색소 조성 결과 Fuco가 전 정점에서 우점하는 것으로 나타났으며 현미경 결과와 비교 시 유사하였다. 일차생산력과 HPLC로 분석된 지표색소 결과를 비교하였을 시 규조류가 일차생산력에 가장 큰 기여를 했을 것으로 보인다. 본 연구에서는 하계 한반도의 우세한 기후적 특징인 강우기 동안 섬진강 하구역에서 일차생산력의 시

공간적 변동과 식물플랑크톤의 군집구조의 변화특성을 파악하였다. 이러한 연구 결과는 강우기 섬진강 수 생태 환경 변화를 이해하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 수질관리 및 수 생태계 에너지 흐름과 물질순환에 대한 연구를 위한 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), p. 153-190.
- Alpine, A.A. and J.E. Cloern. 1992. Trophic interactions and direct physical effects control phytoplankton biomass and production in an estuary. *Limnology and Oceanography* **37**: 946-955.
- Armstrong, R.A. 1994. Grazing limitation and nutrient limitation in marine ecosystems: Steady state solutions of an ecosystem model with multiple food chain. *Limnol. Oceanogr.* **39**(3): 597-608.
- Avnimelech, Y., B.W. Troeger and L.W. Reed. 1982. Mutual flocculation of algae and clay. Evidence and implication. *Science* **216**: 63-65.
- Caraco, N.F., J.J. Cole, P.a. Raymond, D.L. Strayer, M.L. Pace, S.E.G. Findlay and D.t. Fisher. 1997. Zebra mussel invasion in a large, turbid river: Phytoplankton response to increased grazing. *Ecology* **78**(2): 588-602.
- Carpenter, S.R., J.F. Kittchell, J.R. Hodgson, P.A. Cochran, J.J. Elser, M.M. Elser, D.M. Lodge, D. Kretchmer, X. He and C.N. von Ende. 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology* **68**: 1863-1876.
- Cloern, J.E. 1987. Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Continental Shelf Research* **7**: 1376-1387.
- Falkowski, P.G. and J. LaRoche. 1991. Acclimation to spectral irradiance in algae. *Journal of Phycology* **27**: 8-14.
- 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.
- Gieskes, W.W.C. and G.W. Kraay. 1983. Dominance of Cryp-

- tophyceae during the phytoplankton spring bloom in the central North Sea detected by HPLC analysis of pigments. *Marine Biology* **75**: 179-185.
- Grobbelaar, J.U. 1990. Modelling phytoplankton productivity in turbid waters with small euphotic to mixing depth ratios. *Journal of Plankton Research* **12**: 923-931.
- 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}C isotope. *Mar. Biol.* **73**: 31-36.
- Holm-Hansen, o., C.J. Lorenzen, R.W. Holmes, J.D.H. Strickland. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *Journal du Conseil Permanent International Pour L'Exploration de la Mer* **30**: 3-15.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc. New York.
- Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura and S.W. Wright. 1997a. *Phytoplankton Pigments in Oceanography* (Jeffrey, S.W. et al., eds.). UNESCO Publishing, Paris.
- 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 S.W. Wright. 1997c. Monographs on oceanographic methodology, p. 74-75. *In: Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods* (Jeffrey, S.W. et al., eds.). UNESCO, Paris.
- Kivi, K., S. Kaitala, H. Kuosa, J. Kuparinen. E. Ileskinen, R. Lignell, B. Marcussen and T. Tamminen. 1993. Nutrient limitation and grazing control of the Baltic plankton community during annual succession. *Limnol. Oceanogr.* **38**(5): 893-905.
- 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}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}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.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography* **12**: 343-347.
- McLusky, D.S. 1989. *The estuarine ecosystem*, 2d ed. New York, Chapman and Hall.
- Odum, E.P. 1993. *Ecology and our Endangered Life-Support Systems*. Sinauer Associates, Inc., 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. *J. Kore. Fish. Soc.* **37**(3): 215-225.
- Park, J.W., K.L. Lee, J.S. Choi and H.S. Kim. 2005. Dynamics of phytoplankton community after formation of turbid water in Lake Imha. *Korean Journal of Limnology* **38**(3): 429-434.
- Park, J.W., S.H. Yu, S.Y. Kim, J.E. Lee and E.W. Seo. 2008. 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. *J. Oceanol. Soc. Korea* **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.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, 173 pp.
- Peterson, D.H. and J.P. Festa. 1984. Numerical simulation of phytoplankton productivity in partially mixed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **19**: 563-589.
- Rajdeep, R., A. Pratihary, G. Mangesh, S.W.A. Naqvi. 2006. Spatial variation of phytoplankton pigments along the south west coast of India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **69**: 189-195.
- 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. Assess-

- ment 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 (C-14) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perma. Int. Explor. Mer.* **18**: 117-140.
- Susuki, K., N. Handa, H. Kiyosawa and J. Ishizaka. 1995. Distribution of the prochlorophyte *Prochlorococcus* in the central Pacific Ocean as measured by HPLC. *Limnol. Oceanogr.* **40**: 983-989.
- 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.
- Wolfsy, S.C. 1983. A simple model to predict extinction coefficients and phytoplankton biomass in eutrophic waters. *Limnology Oceanography* **8**: 1144-1155.
- Wong, C.K. and C.K. Wong. 2003. HPLC pigment analysis of marine phytoplankton during a red tide occurrence in Tolo Harbour, Hong Kong. *Chemosphere* **52**: 1633-1640.
- 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.

(Manuscript received 30 August 2011,
Revised 19 September 2011
Revision accepted 20 September 2011)