

광합성색소 분석을 통한 광양만 갯벌 퇴적물 중 저서미세조류의 계절변화

이용우* · 최은정¹ · 김영상 · 강창근

부산대학교 생명과학과
¹한국해양연구원 극지연구소

Seasonal Variations of Microphytobenthos in Sediments of the Estuarine Muddy Sandflat of Gwangyang Bay: HPLC Pigment Analysis

YONG-WOO LEE*, EUN-JUNG CHOI¹, YOUNG-SANG KIM AND CHANG-KEUN KANG

Department of Biological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
¹Korea Polar Research Institute, KORDI, Incheon 406-840, Korea

광양만 조간대 갯벌에 서식하는 저서미세조류와 해수 중 식물플랑크톤의 생체량과 군집조성의 계절변동 양상을 밝히기 위하여, 2002년 1월부터 11월까지 매월 high-performance liquid chromatograph(HPLC)를 이용한 광합성색소(photosynthetic pigments) 분석을 실시하였다. 광합성색소 분석결과 규조류(diatoms)의 주요 지표색소인 fucoxanthin, diadinoxanthin 그리고 diatoxanthin이 퇴적물과 상부 해수에서 연중 우점하여 나타났다. 이들을 제외한 다른 색소들은 상대적으로 낮은 농도를 보였다. 깊이 0.5 cm까지의 표층퇴적물에서 측정된 chlorophyll *a* 농도는 3.44~169 mg m⁻²의 범위로 연평균 농도는 상부, 중부 그리고 하부 갯벌 퇴적물에서 각각 68.4±45.5, 21.3±14.3, 22.9±15.6 mg m⁻²로 나타났다. 반면 퇴적물 상부 수중 전체 수심(2.6 m)에 대해 적산한 chlorophyll *a* 농도는 1.66(11월)~11.7(7월) mg m⁻²의 농도 범위로 평균 6.96±3.04 mg m⁻²를 나타내었다. 이로부터 갯벌 퇴적물 내에 존재하는 저서미세조류의 농도는 해수 중 존재하는 식물플랑크톤의 농도보다 3~10배 정도 높은 것으로 추산되었다. 퇴적물과 상부 해수 중 미세조류의 농도에서 유사한 월별변화와 군집조성은 재부유된 저서미세조류가 광양만 해수 중 식물플랑크톤 생체량의 상당부분을 설명할 수 있음을 시사하였다. 따라서 이들 저서미세조류는 갯벌 생물뿐만 아니라 재부유에 의한 수송을 통하여 인근 연안 생태계의 생물군에 대한 중요한 영양원 역할을 할 수 있다는 점에서 이들의 거동에 대한 지속적인 관찰이 요구된다.

Seasonal variations of microalgal biomass and community composition in both the sediment and the seawater were investigated by HPLC pigment analysis in an estuarine muddy sandflat of Gwangyang Bay from January to November 2002. Based on the photosynthetic pigments, fucoxanthin, diadinoxanthin, and diatoxanthin were the most dominant pigments all the year round, indicating that diatoms were the predominant algal groups of both the sediment and the seawater in Gwangyang Bay. The other algal pigments except the diatom-marker pigments showed relatively low concentrations. Microphytobenthic chlorophyll *a* concentrations in the upper layer (0.5 cm) of sediments ranged from 3.44 (March at the middle site of the tidal flat) to 169 (July at the upper site) mg m⁻², with the annual mean concentrations of 68.4±45.5, 21.3±14.3, 22.9±15.6 mg m⁻² at the upper, middle, and lower tidal sites, respectively. Depth-integrated chlorophyll *a* concentrations in the overlying water column ranged from 1.66 (November) to 11.7 (July) mg m⁻², with an annual mean of 6.96±3.04 mg m⁻². Microphytobenthic biomasses were about 3~10 times higher than depth-integrated phytoplankton biomass in the overlying water column. The physical characteristics of this shallow estuarine tidal flat, similarity in taxonomic composition of the phytoplankton and microphytobenthos, and similar seasonal patterns in their biomasses suggest that resuspended microphytobenthos are an important component of phytoplankton biomass in Gwangyang Bay. Therefore, considering the importance of microphytobenthos as possible food source for the estuarine benthic and pelagic consumers, a consistent monitoring work on the behavior of microphytobenthos is needed in the tidal flat ecosystems.

Keywords: Microphytobenthos, Photosynthetic pigments, Tidal flat, Phytoplankton, Gwangyang Bay

*Corresponding author: wblueseaa@pusan.ac.kr

서론

갯벌에 서식하는 저서미세조류는 연안 생태계의 탄소순환에서 매우 중요한 역할을 하고 있다(MacIntyre *et al.*, 1996). 저서미세조류는 재부유를 통하여 수주(water column)로 공급되어 수주 내에 존재하는 chlorophyll *a*의 약 30~60% 정도를 차지할 정도로 갯벌 내에 고밀도로 집적되어 있는 것으로 알려져 있다(de Jonge and van Beusekom, 1992). 이들은 또한 영양염류의 재순환, 산소의 조절 그리고 퇴적물의 안정도 등에도 중요한 역할을 하고 있다(Paterson, 1989; Sundbäck *et al.*, 1991). 한편, 해수 중에 존재하는 식물플랑크톤의 경우 계절에 따른 번무(bloom)가 뚜렷하여 겨울철에 매우 낮은 농도를 보이는 반면, 저서미세조류는 겨울철에도 높은 기초 생산량을 보인다(Colijn and de Jonge, 1984; de Jonge and Colijn, 1994). 따라서, 갯벌에서 주요한 기초생산자인 저서미세조류는 연안역에서 저서 무척추동물은 물론 표영동물을 위한 영양원으로써 중요한 역할을 한다(Montagna *et al.*, 1995; Kang *et al.*, 2003).

저서미세조류는 운동성을 가지는 epipellic algae(epipellic diatoms, cyanobacteria, euglenoids, flagellate 등)와 모래 입자 표면에 강하게 흡착하여 서식하는 epipsammic algae 등 크게 2가지 군으로 구분된다(Meadows and Anderson, 1968). 이들은 광합성을 하므로 퇴적물 내에서 빛 투과 한계점인 표층 약 2~4 mm 상층부에서 주로 서식하며(Colijn, 1982; MacIntyre and Cullen, 1995), 운동성을 가진 epipellic algae의 활발한 수직 회유(migration)와 hydrodynamic forces 그리고 생물교란(bioturbation) 등에 의해서 10 cm 이하의 깊이에서도 이들의 존재가 확인되고 있다(Cadée and Hegeman, 1974; Montani *et al.*, 2003; Méléder *et al.*, 2005).

이전의 연구들에서 미세조류의 생체량은 주로 spectrophotometer (Lorenzen, 1967)나 fluorometer(Holm-Hansen *et al.*, 1965)를 이용하여 chlorophyll 농도를 측정해 왔으나, 이 방법들에 의한 측정은 다른 chlorophyll 계열과 그들의 분해산물에 의한 spectrum band의 중복에 의해서 과대 또는 과소 추정되는 것으로 지적되어 왔다(Trees *et al.*, 1985). 따라서 이를 보완하기 위해서 각각의 색소들을 분리한 상태에서 측정하는 HPLC를 이용한 분석 방법이 도입되었고, 이 방법은 조류의 생체량뿐만 아니라 강(class) 수준이지만 조류의 군집조성에 대한 중요한 정보를 제공하여 준다. 또한 chlorophyll 분해산물의 분석을 통하여 조류의 생리적 상태와 소비자에 의한 섭식강도(grazing intensity)를 파악할 수도 있다(Bidigare *et al.*, 1986; Burkill *et al.*, 1987). 특히, 육상이나 외양으로부터 다양한 타지성(allochthonous) 식물기원 유기물을 받아들이는 연안하구 갯벌은 흔히 광합성색소에서 높은 다양성을 나타내므로, 이와 같은 환경에서 식물체의 기원과 거동을 이해하고, 나아가 생체와 분해중인 유기체설물을 구분하여 연안역에서 유기물 동태를 이해하는데 있어서 색소분석이 유용하게 이용되고 있다(Levinton and McCartney, 1991; Bianchi *et al.*, 1993).

색소분석을 통한 한반도 주변에서 식물플랑크톤의 분포와 동태에 대한 연구들은 상당히 진행되어온데 반해(Park and Park, 1997; Park *et al.*, 1999), 하구 갯벌 퇴적물에서 저서미세조류의 생체량과 군집구조의 계절 변동에 대한 연구는 극히 초기 연구수준에 머물러 아주 제한된 자료만이 제공되어 있다(Oh *et al.*, 2004; Du

and Chung, 2007).

따라서 본 연구에서는 하구 갯벌에서 저서미세조류의 생태를 이해하기 위한 기초연구로서 HPLC를 이용한 광합성색소 분석을 통하여 광양만 내 수주(water column)와 갯벌 퇴적물에 서식하는 미세조류의 생체량과 군집구조의 계절변동을 비교하고, 갯벌의 조위대(tidal height)에 따른 저서미세조류의 생체량과 군집구조 및 퇴적물 내에서의 수직 분포 양상을 조사하였다.

재료 및 방법

연구해역

연구해역인 삼진강 하구역에 위치한 광양만 내 갯벌은 약 50 km² 정도였으나, 1980년대 중반 광양제철소와 대단위 공업단지의 건립(여천석유화학단지, 하동화력발전소 등)을 위한 매립과 항로 준설로 인하여, 현재 갈사 갯벌인 약 10 km²만이 남아있다. 또한 갈사 갯벌 아래쪽에는 약 3.3 km² 규모의 잘피밭이 형성되어 있어, 우리나라에서 유일하게 강과 갯벌, 잘피 군락이 형성되어 있는 생태학적으로 매우 중요한 지역이다(Kang *et al.*, 2006). 삼진강 유역면적은 약 4,897 km² 정도이며 광양만으로 공급되는 하천유량은 연간 5.8~8.7×10⁸ m³ 정도이다. 광양만 내 조석은 평균 대조차가 약 2.6 m이며, 광양만 중앙부에서 최고 조석류는 50~80 cm s⁻¹ 정도이다. 광양만 내 표층 퇴적물은 삼진강 유입구 쪽에서 모래질이 우세하고(> 90%), 만의 내부로 갈수록 실트질이 증가하는 경향을 보이며, 만 외부로 갈수록 실트와 점토가 우세하게 나타난다(Hyun *et al.*, 2004). 본 연구지역에서 상부, 중부, 하부 갯벌 내 퇴적물은 각각 모래(약 80, 75, 74%), 실트(약 19, 23, 24%), 점토(약 1, 2, 2%)로 조성되어 있다.

본 연구는 2002년 1월부터 11월까지 매월 대조기에 갈사 갯벌의 각각 상부, 중부, 그리고 하부 지역에서 현장 조사를 실시하였다(Fig. 1). 상부 갯벌 지역에서는 약 6시간, 중부와 하부 지역에서는 약 4시간 정도 썰물시 대기에 노출되었다.

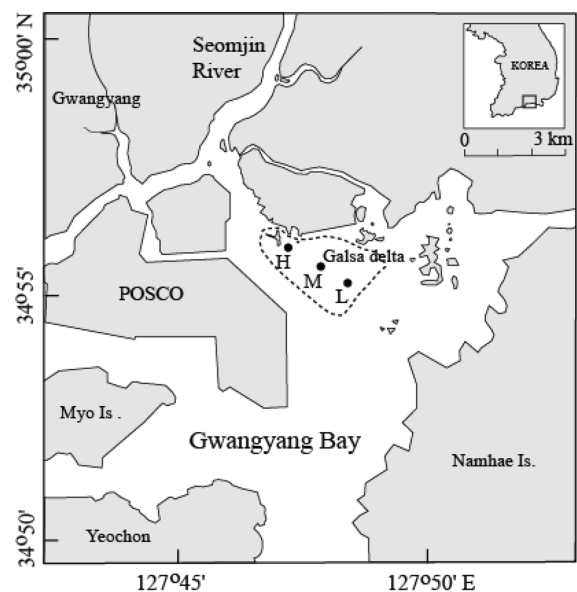


Fig. 1. Map showing the study area. Dashed line indicates the lower limit of the intertidal zone.

시료 채취 및 광합성색소 분석

해수 중 수온과 염분은 밀물시 중부 갯벌 정점에서 CTD meter (Sea-Bird Electronics, USA)를 이용하여 측정하였다.

광합성색소 분석을 위한 해수 시료는 밀물시에 중부 갯벌지역의 퇴적물 표층으로부터 0.5 m 상부의 수심에서 펌프를 이용하여 선상에서 채수하였고, 해수 약 1 L를 현장에서 47 mm GF/F 여과지를 이용하여 여과하였다. 여과지는 알루미늄 호일로 봉하여 드라이아이스에 저장한 후 실험실로 운반하였고, HPLC 분석 전까지 초저온 냉동고(-80 °C)에 보관하였다. 식물플랑크톤의 광합성색소는 100% 아세톤 5 mL로 암냉소에서 24시간 이상 추출하였으며, 분쇄시 손실을 보정하기 위해서 canthaxanthin(internal standard) 50 µL를 첨가하였다. 추출 과정 중 cell의 파쇄를 위하여 5분간 초음파 분쇄(sonication)를 실시하였다. 초음파 분쇄 후 2500 rpm에서 10분 동안 원심분리하고, 상등액 1 mL를 취하여 300 µL의 이온교환수와 잘 섞은 후, 100 µL의 loop에 주입하여 분석하였다.

퇴적물 시료는 1회용 주사기(φ 2.9 cm²)를 이용하여 각 정점별로 3개의 주상 시료를 수직 채취하여 각각 분석하였다. 채취한 시료는 표층에서 1 cm까지는 0.5 cm 간격으로 1 cm부터 4 cm까지는 1 cm 간격으로 절단하고, 드라이아이스에 보관 후 실험실로 운반하여 HPLC 분석 전까지 초저온 냉동고(-80 °C)에 보관하였다. 퇴적물 시료는 동결건조 후 건조량을 측정하고, 광합성색소는 100% 아세톤 10 mL로 암냉소에서 24시간 이상 추출하였다. 내부표준물질(internal standard)로 canthaxanthin을 이용하였으며, 추출 과정 중 5분간 초음파 분쇄(sonication)를 실시하였다. 추출 후 2500 rpm에서 10분 원심분리 하고 상등액을 25 mm GF/F로 필터한 후, 이 중 상등액 1 mL를 취하여 300 µL의 이온교환수와 잘 섞어 100 µL의 loop에 주입하여 분석하였다.

광합성색소는 HPLC(Waters Co. system, USA)를 이용하여 분리하였고, detector는 UV-VIS, 형광 그리고 photodiode array detector(PAD)를 사용하여 정성 및 정량분석을 실시하였다(Table 1). 각 색소의 정성과 정량은 주로 UV-VIS detector를 사용하였으며, 형광과 PAD는 색소를 정성하는데 보조자료로 사용하였다. 미세조류의 생체량과 군집조성을 파악하기 위해서 표준색소(standard pigments)는 chlorophyll 계열 3개(chlorophyll *a*, *b*, *c*₁₊₂), 보조색소인 carotenoids 계열 11개(peridinin, fucoxanthin, 19'-hexanoyloxy-fucoxanthin, 19'-butanoyloxy-fucoxanthin, prasinoxanthin, alloxanthin, violaxanthin, diadinoxanthin, diatoxanthin, lutein, zeaxanthin)의 색소를 분리하고 정량하였다.

Table 1. HPLC and solvent system

HPLC: Waters 2690 (Waters, USA)
Detector: absorbance (Waters 2487, USA) at 436 nm
fluorescence (Waters 474, USA) ex: 432 nm
em: 650 nm
photodiode array detector (Waters 996, USA)
Column: Rexchrom-S5-100-ODS
(Regis, USA, 250×4.6 mm, particle size : 5 µm)
Solvent A: MeOH 80%, Ammonium Acetate (0.5 M) 20%, BHT* 0.01%
Solvent B: 87.5%, H ₂ O 12.5%, BHT 0.01%
Solvent C: Ethyl Acetate 100%
Flow rate : 0.5 mL·min ⁻¹

*: Butylated hydroxy toluene

결과 및 고찰

수온은 겨울철인 2월에 7.5 °C로 조사기간 중 가장 낮았고, 여름철인 8월에 24.5 °C로 가장 높은 값을 기록하여, 온대해역의 전형적인 계절변화를 나타내었다(Fig. 2). 염분의 월별분포는 겨울철에 31 이상으로 상대적으로 높고, 우기인 여름철에 26 이하의 낮은 염분 분포로 수온의 월별분포와 상이한 계절 변동 양상을 나타내었다.

상부, 중부, 하부 갯벌의 표층 퇴적물 0.5 cm 안에 존재하는 chlorophyll *a* 농도는 각각 6.88~169, 3.44~49.0, 5.51~48.2 mg m⁻² 범위였으며, 연평균 농도는 각각 68.4±45.5, 21.3±14.3, 22.9±15.6 mg m⁻²로 나타났다(Fig. 2). 저서미세조류 생체량의 월별 변화는 조위대 별로 농도 차이는 보이지만, 대체로 연중 광조건이 좋고

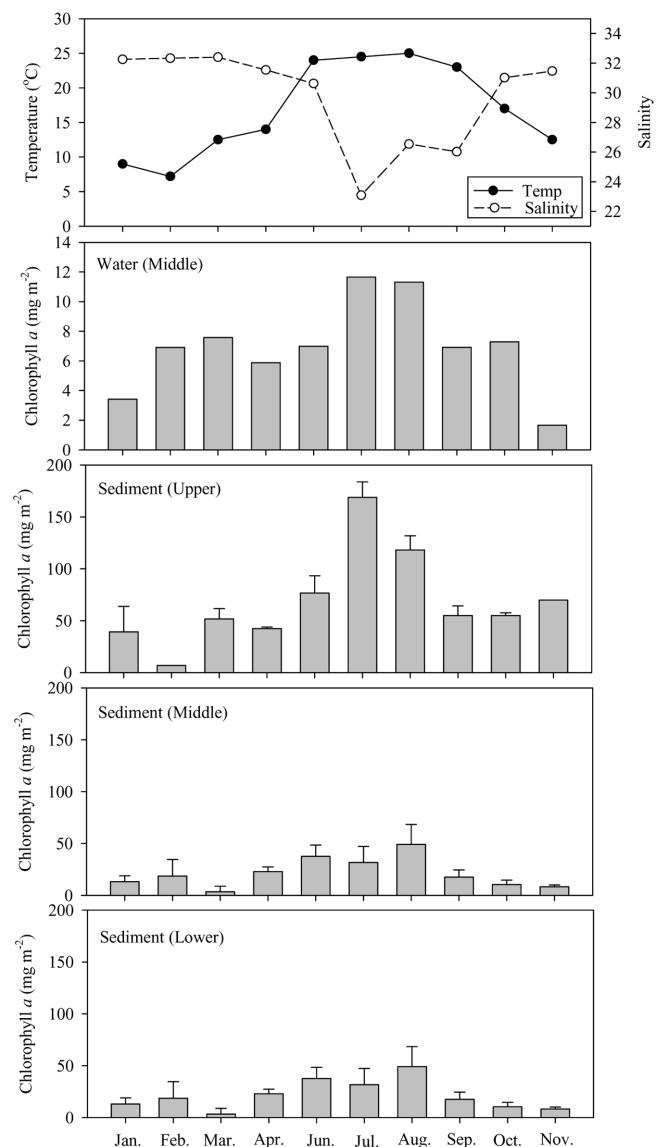


Fig. 2. Variation of temperature, salinity, and depth-integrated chlorophyll *a* concentration in the water column above middle site and chlorophyll *a* concentration in the top 5 mm of sediment at upper, middle, and lower sites in the intertidal flat of Gwangyang Bay. Error bars: SD.

Table 2. Regional comparison of annual means and ranges of chlorophyll *a* concentration in the surface sediments

	Chlorophyll <i>a</i> (mg m ⁻²)		Depth (cm)	Method	References
	Range	Mean			
Seto Inland Sea	12.9-145.5	72.3	0.5	Spectrophotometric	Montani <i>et al.</i> (2003)
Eastern Scheldt		125-207.5	1	Spectrophotometric	de Jonge and Colijn (1994)
Marennes-Oleron					Guarini <i>et al.</i> (1998)
in June	13.3-347.2	118	1	Fluorometric	
in January	4.2-465.4	85.7	1	Fluorometric	
Westerns Scheldt estuary	3.6-18.5	113.1	0.5	HPLC	de Jong and de Jonge (1995)
Western Dutch Wadden Sea	35-120			Spectrophotometric	Cadée and Hegeman (1974)
Ems estuary	23-120			Spectrophotometric	Colijn and de Jonge (1984)
Molenplatt	5.9-17.3			HPLC	Barranguet <i>et al.</i> (1998)
Geojon tidal flat	0.24-10.33	3.08	0.5	HPLC	Oh <i>et al.</i> (2004)
Mangyung tidal flat	0.69-32.1	8.29	0.5	HPLC	Oh <i>et al.</i> (2004)
Janghwa tidal flat	1.18-34.3	7.60	1	HPLC	Yoo and Choi (2005)
Nakdong estuary	8.7-88.4		1	Spectrophotometric	Du and Chung (2007)
Gwangyang Bay	3.44-168	21.3-65.1	0.5	HPLC	This study

연안으로부터 담수의 유입이 많은 6월에서 8월 사이의 여름철에 높게 나타났으며, 겨울철에 낮은 농도 분포를 보였다(Fig. 2). 갯벌 퇴적물에 서식하는 저서미세조류의 생산력은 온도와 퇴적물 안정도 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(MacIntyre *et al.*, 1996). 특히, 온대해역의 연안환경에서 저서미세조류는 광량에 의한 영향을 크게 받아 여름철에 생산력이 크게 증대되고(Montani *et al.*, 2003), 저서미세조류의 증대로 인해 퇴적물 표면에 규조류의 매트(diatom mats)에 의한 막(diatom films)이 형성될 때, 강한 유속하에서도 침식에 강한 저항을 나타내어 제한된 재부유(resuspension)가 일어나는 것으로 알려져 있다(Delgado *et al.*, 1991; Lucas *et al.*, 2000). 따라서 여름철의 높은 저서미세조류 생체량은 여름철에 높은 온도와 광량에 의한 높은 생산량과 함께 높은 생체량에 따른 규조막 형성으로 인한 제한된 재부유 현상에 의해 설명될 수 있다.

대기에 노출되는 시간에 따른 저서미세조류의 생체량의 분포양상은 노출 시간이 가장 긴 상부 갯벌에서 중부와 하부 갯벌에 비하여 약 3배 정도 높은 농도를 보였고, 중부와 하부 갯벌에서는 비슷한 농도를 보였다. 공간적으로 상부 조간대에서 높은 생체량을 보이는 것은 상부 갯벌이 광에 노출되는 시간이 길어 높은 생산량에 의한 규조막을 형성할 수 있는 생체량을 가지게 되고, 지리적으로 상부 갯벌의 위쪽에 섬이 위치하고 있어, 섬진강으로부터 유입되는 담수의 직접적인 영향을 받지 않을 가능성과 함께 하부 조간대에 비하여 상대적으로 조류(tidal current)의 흐름이 약하여 재부유의 영향을 약하게 받기 때문이라는 것을 시사해 준다(Delgado *et al.*, 1991; Lucas *et al.*, 2000).

한편, 그 동안 한반도 연안 갯벌에서 측정된 자료들을 살펴보면, 서해안에 위치한 거천 갯벌과 만경강 갯벌의 표층(0.5 cm)에서 연평균 chlorophyll *a* 농도는 각각 3.08과 8.29 mg m⁻²로 보고하였으며(Oh *et al.*, 2004), Yoo and Choi(2005)는 강화도 장화리 갯벌의 표층 1 cm에서 측정된 연평균 chlorophyll *a* 농도는 7.60 mg m⁻²로 보고하였다(Table 2). 더욱 최근 Du and Chung(2007)에 의해 측정된 낙동강 하구 갯벌에서 표층 1 cm 이내에 존재하는 저서미세조류의 chlorophyll *a* 농도는 8.7~88.4 mg m⁻² 범위로 나

타나 본 연구에서 관측된 생체량이 한반도의 다른 갯벌에서 관측된 결과에 비해서 상대적으로 높은 농도에 해당하는 것으로 나타났다. 반면 저서미세조류를 측정된 퇴적물의 깊이나 측정방법에 따라서 다소 상이한 값을 가지게 될 수도 있지만, 본 연구지역에서 측정된 저서미세조류 chlorophyll *a* 농도는 세계의 다른 여러 갯벌에서 보고된 농도 범위에 분포하였다(Table 2). 갯벌 퇴적물 중 chlorophyll *a* 농도는 지역에 따라 상당한 차이를 보이며, 본 연구에서 나타난 바와 같이 동일한 갯벌 내의 좁은 거리 간격에서도 큰 농도 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 저서미세조류의 생체량의 지리적 차이는 노출시간, 퇴적물의 조성, 위도에 따른 광량과 온도 조건, 종조성, 조차에 의한 조류의 세기, 바람장 그리고 생물교란의 정도 등 다양한 요인들에 의해 결정될 것으로 예상할 수 있다(MacIntyre *et al.*, 1996; Delgado *et al.*, 1991).

퇴적물과 해수 중 chlorophyll *a*의 농도 분포를 비교하기 위해서, 해수 중 chlorophyll *a* 농도는 광양만 내 평균 조차인 약 2.6 m를 평균수심으로 정하고, 수주(water column)를 적분(integration)하여 환산하였다(Fig. 3). 해수 중 chlorophyll *a*의 연평균 농도는 6.96±3.04 mg m⁻²로 나타났는데, 이 농도는 퇴적물 중 저서미세조

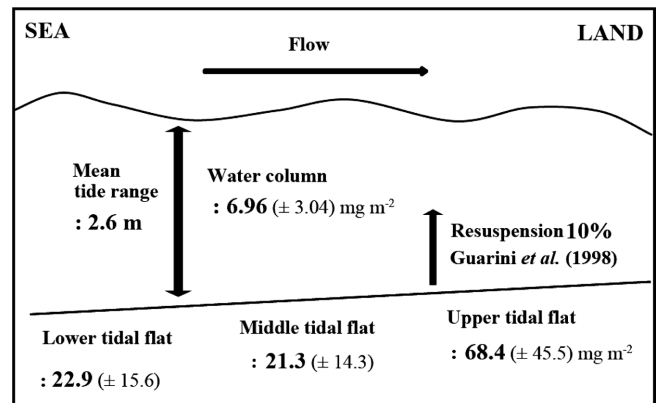


Fig. 3. Summeryzed scheme on the chlorophyll *a* concentrations in sediments and the overlying water column of the study tidal flat in Gwangyang Bay. See detailed explanation in the text.

류의 생체량 보다 약 3배에서 10배 정도 낮은 농도에 해당하였다. 또한, 상부 수주(overlying water column) 내 chlorophyll *a*의 월별 농도 분포는 퇴적물 중 chlorophyll *a*의 분포 양상과 유사한 여름철에 높은 농도를 보였다. 이와 같은 결과는 해수 중 chlorophyll *a*의 상당부분이 갯벌에 서식하는 저서미세조류의 재부유에 의한 기여에 의한다는 것을 시사해 준다. Delgado *et al.*(1991)은 강한 조류가 나타나는 곳에서 표층 퇴적물(5 mm) 질량의 약 6% 정도가 재부유 되고, 표층 퇴적물 5 mm에 존재하는 chlorophyll *a*의 약 11% 정도가 재부유 된다고 보고하였다. Guarini *et al.*(1998)은 썰물시에 갯벌에 존재하는 저서미세조류의 생체량의 약 10% 정도의 생체량이 재생산되고, 밀물시에 썰물시에 형성되었던 10%가 재부유 된다고 보고한 바, 만약 광양만 갯벌 내 저서미세조류 현존량의 10% 정도가 재부유 된다면 갯벌의 중부와 하부 지역에서는 수주(water column) 내 생체량(chlorophyll *a*)의 약 30%, 상부 지역에서는 약 90% 이상 기여할 것으로 추산할 수 있다. 따라서 저서미세조류는 갯벌에 서식하는 저서생물에게 뿐만 아니라 해수 중에 서식하는 생물에게도 먹이원으로써 상당히 중요한 부분을 기여할 것으로 기대된다.

이와 같이 저서미세조류의 재부유에 의한 수주 중 chlorophyll *a*에

대한 기여도를 검토하기 위하여, 해수와 퇴적물 중의 광합성색소 조성으로부터 군집구조를 비교하였다(Table 3, 4). 본 조사기간 중 해수와 퇴적물 중 광합성색소는 chlorophyll 계열 3개와 carotenoid 계열 11개의 색소가 동시에 검출되었으며, 유사한 조성 분포를 보였다. 이와 같은 결과는 광양만의 갯벌 퇴적물과 상부 수주에서 매우 다양한 군집의 조류가 서식하고 있음을 시사해 주었다. 그러나 다양한 색소의 출현이 미세조류의 높은 다양성을 나타내고 있지만, 실제로 chlorophyll *a*에 대한 각 주요색소의 비의 양상을 살펴보면 규조류(diatoms)의 주요 지표 색소(marker pigments)인 fucoxanthin, diadinoxanthin 및 diatoxanthin을 제외한 다른 색소들은 2% 미만의 매우 낮은 농도를 보였다. 이와 같이 규조류 지표색소의 우점 출현은 광양만의 해수와 퇴적물 중 미세조류의 대부분을 규조류가 차지하고 있으며, 앞에서 살펴 본 해수와 퇴적물 중 미세조류 생체량과 함께 두 매질에서 주요 색소들의 유사한 분포는 갯벌에 서식하는 저서미세조류의 대부분이 저서성 규조류로 구성되어 있으며 이들의 재부유에 의해 수주(water column)에 존재하는 규조류 생체량의 상당 부분을 설명한다는 것을 시사한다.

갯벌 퇴적물 내 chlorophyll *a*와 fucoxanthin은 양의 상관관계 ($R^2=0.693$)를 보여주고 있으며, chlorophyll *a*에 대한 fucoxanthin

Table 3. Concentrations (mg m^{-2}) of main pigments in surface sediments (0.5 cm) in Gwangyang Bay (January-November 2002)

	St.	Perid	But-fuco	Fuco	Hex-fuco	Pras	Viola	Allo	Lut	Zea	Chl <i>b</i>	Chl <i>a</i>
Jan.	H	0.12	0.01	11.1	0.23	0.04	0.05	0.28	0.07	0.10	0.48	39.1
	M	0.15	0.00	3.19	0.06	0.03	0.01	0.07	0.02	0.04	0.30	13.1
	L	0.26	0.01	17.6	0.30	0.09	0.02	0.24	0.15	0.13	1.39	48.2
Feb.	H	0.20	0.02	18.9	0.48	0.07	0.02	0.06	0.13	0.18	0.95	6.88
	M	0.76	0.03	44.8	0.23	0.04	0.03	0.11	0.09	0.12	0.45	18.6
	L	0.41	0.03	46.9	0.94	0.19	0.50	0.11	0.18	0.20	0.46	5.51
Mar.	H	0.13	0.01	18.0	0.27	0.04	0.00	0.56	0.02	0.10	0.24	51.6
	M	0.13	0.01	8.29	0.13	0.01	0.03	0.17	0.06	0.05	0.30	3.44
	L	0.13	0.01	8.72	0.12	0.01	0.02	0.19	0.07	0.10	0.45	12.7
Apr.	H	0.19	0.00	15.6	0.32	0.02	0.01	0.30	0.09	0.14	1.53	42.4
	M	0.14	0.00	8.24	0.09	0.02	0.06	0.21	0.05	0.05	0.87	22.9
	L	0.32	0.00	2.97	0.04	0.00	0.02	0.10	0.07	0.03	0.38	8.57
Jun.	H	0.11	0.00	12.7	0.26	0.00	0.02	0.07	0.16	0.45	0.55	76.6
	M	0.04	0.00	10.1	0.14	0.01	0.01	0.02	0.03	0.14	0.33	37.6
	L	0.06	0.00	5.70	0.09	0.01	0.00	0.06	0.03	0.24	0.21	21.2
Jul.	H	0.20	0.00	30.3	0.46	0.00	0.06	0.01	0.01	0.26	0.68	169
	M	0.23	0.00	7.53	0.14	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.35	31.7
	L	0.13	0.00	8.68	0.14	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.94	34.4
Aug.	H	0.10	0.00	22.2	0.31	0.00	0.02	0.15	0.03	0.11	0.37	118
	M	0.15	0.00	12.4	0.19	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.22	49.0
	L	0.21	0.00	13.8	0.21	0.00	0.01	0.17	0.10	0.06	0.87	41.2
Sep.	H	0.04	0.00	16.3	0.23	0.00	0.01	0.17	0.06	0.03	0.44	55.0
	M	0.04	0.00	5.00	0.07	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.19	17.6
	L	0.05	0.00	7.04	0.15	0.00	0.01	0.02	0.03	0.01	0.26	12.5
Oct.	H	0.12	0.00	24.3	0.24	0.00	0.02	0.01	0.00	0.04	1.03	55.0
	M	0.02	0.00	4.65	0.08	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.27	10.5
	L	0.02	0.00	3.56	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.15	8.59
Nov.	H	0.07	0.00	29.6	0.29	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.13	69.8
	M	0.03	0.00	3.45	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.06	8.28
	L	0.04	0.00	14.5	0.15	0.00	0.01	0.04	0.02	0.01	0.43	35.6

Table 4. Concentrations (mg m^{-2}) of main pigments in the overlying water column of sediments in Gwangyang Bay (January–November 2002)

	Perid	But-fuco	Fuco	Hex-fuco	Pras	Viola	Allo	Lut	Zea	Chl <i>b</i>	Chl <i>a</i>
Jan.	0.07	0.00	1.23	0.01	0.00	0.01	0.08	0.03	0.01	0.10	3.41
Feb.	0.11	0.00	1.90	0.03	0.00	0.02	0.11	0.04	0.01	0.10	6.92
Mar.	0.10	0.00	2.88	0.03	0.00	0.02	0.21	0.04	0.01	0.37	7.57
Apr.	0.08	0.00	1.15	0.04	0.01	0.04	0.31	0.07	0.01	0.74	5.88
Jun.	0.31	0.00	1.18	0.04	0.01	0.06	0.31	0.07	0.02	1.04	6.98
Jul.	0.64	0.00	4.21	0.04	0.00	0.05	0.26	0.08	0.03	0.37	11.7
Aug.	0.06	0.00	2.33	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	11.3
Sep.	0.13	0.00	1.17	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	6.92
Oct.	0.04	0.00	1.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	7.29
Nov.	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	1.66

*Abbreviations: Perid, Peridinin; But-fuco, 19'-butanoyloxy-fucoxanthin; Fuco, Fucoxanthin; Hex-fuco, 19'-hexanoyloxy-fucoxanthin; Pras, Prasinolaxanthin; Viola, Violaxanthin; Allo, Alloxanthin; Lut, Lutein; Zea, Zeaxanthin; Chl *b*, Chlorophyll *b*; Chl *a*, Chlorophyll *a*.

의 상대적인 비는 2월과 3월(중부갯벌)을 제외하고는 0.19~0.69 (평균 0.33)의 범위에 있었다. 이 값은 구조류가 우점하는 다른 갯벌에서 나타난 비와 유사한 범위에 분포하였다(Oh *et al.*, 2004; Méléder *et al.*, 2005; Yoo *et al.*, 2005). 반면 2월에는 상부, 중부, 하부 갯벌에서 각각 2.75, 2.41, 8.5 정도의 높은 비 값을 보였다. 이 시기에 chlorophyll *a*의 분해산물 중의 하나인 phaeophytin *a*의 농도($6.83 \pm 2.26 \mu\text{g g}^{-1}$)는 chlorophyll *a*에 비해서 10배 정도 높게 나타났다. 따라서 2월에 상대적으로 낮은 chlorophyll *a*의 농도는 생물체에 의한 섭이(grazing)에 의해서 상당부분 phaeopigments로의 분해로 인한 것으로 판단된다(Méléder *et al.*, 2005).

미세조류의 광합성색소 중 carotenoids 계열의 색소는 chlorophyll 계열의 색소가 이용하지 않는 과량의 광을 효과적으로 이용할 뿐만 아니라, 광산화로부터 pigment-protein complexes와 chloroplast 등을 보호하는데 중요한 역할을 한다(Young and Frank, 1996). 이들

carotenoids 계열 색소 중 특히 diadinoxanthin(DD)과 diatoxanthin(DT), zeaxanthin, violaxanthin 그리고 antheraxanthin이 대표적인 광보호 색소로 알려져 있다(Young and Frank, 1996). 본 연구해역에서 우점 출현군으로 나타난 구조류는 보조색소로써 DD와 DT를 가지고 있는데, 미세조류가 높은 광량에 노출되었을 때 광저해와 광산화 현상을 막기 위해서 DD가 DT로 전환되고, 광량이 약해지면 광량을 효율적으로 이용하기 위해서 다시 DT가 DD로 전환되는 특성을 보인다(Moline, 1998). 이들의 광에 대한 적응은 수초에서 적어도 한 시간 안에 서로 전환되는 것으로 보고되고 있으며(Welschmeyer and Hoepffner, 1986; Demers *et al.*, 1991), 따라서 이들 DD+DT에 대한 DT의 상대적인 비 값을 이용하여 해역에서 수직적 water mixing과 turbulence 등의 현상을 이해하는데 이용되고 있다(Therriault *et al.*, 1990; Brunet *et al.*, 1993). 본 해역에서 해수와 퇴적물 중 미세조류의 광보호 색소의 분포양상을

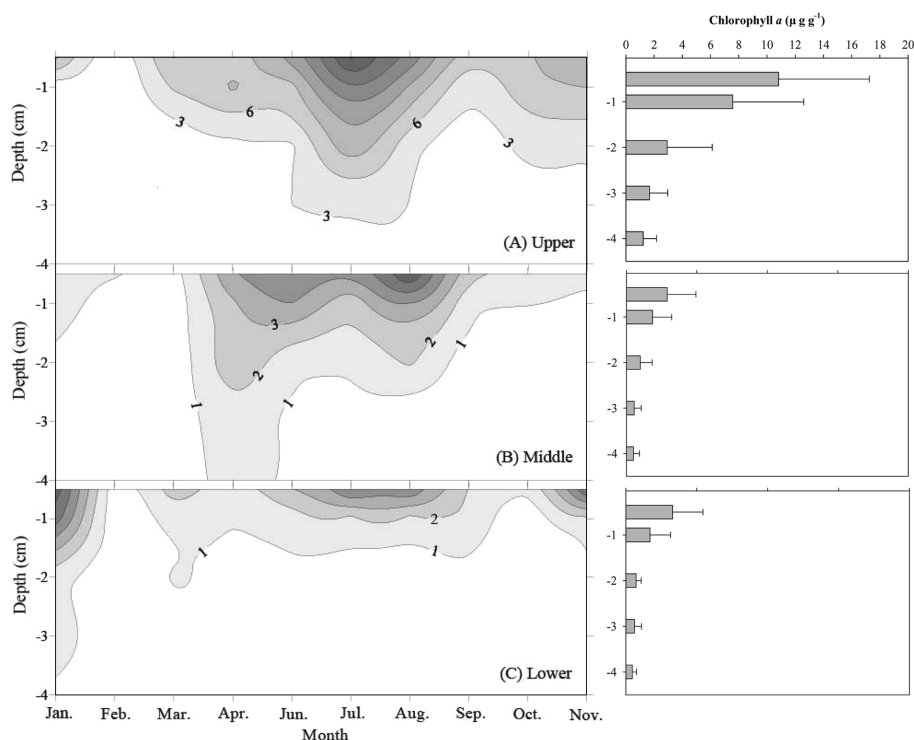


Fig. 4. The vertical distribution of chlorophyll *a* ($\mu\text{g g}^{-1}$) in the 0–4 cm of sediments at upper, middle, and lower sites in the intertidal flat of Gwangyang Bay. The figures on the right show the vertical distribution of the average annual biomass of microphytobenthos.

살펴보기 위해서 총 DD+DT에 대한 DT의 비 $[(DT/(DD+DT)) \times 100]$ 로 계산하였다. 그 결과, 해수 중에서는 11월(47.8) 자료를 제외하면 연평균 5.03 ± 1.42 로 나타났으며, 반면 갯벌 퇴적물에서의 이 비 값은 상부, 중부 및 하부 구간대의 조위대별로 각각 20.6 ± 10.8 , 21.7 ± 10.8 , 19.1 ± 9.0 로 나타났다. 갯벌 조위대별로 DT의 상대적인 비 값에서는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 상부 수주와 퇴적물 중 DT의 상대적인 비를 비교했을 때, 퇴적물 중 미세조류의 비 값이 4~5배 정도 높게 나타나 저서 규조류가 하루에 두 번씩 광에 직접 노출되는 매우 dynamic한 갯벌환경에서 전략적으로 잘 적응하여 높은 생산력을 나타내는 것을 잘 반영하고 있다.

갯벌 퇴적물 내 chlorophyll *a* 농도는 표층 퇴적물에서 가장 높고 퇴적물 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 4). 퇴적물 깊이별 chlorophyll *a* 농도의 연평균 분포 양상은 표층에서 4 cm까지 적산한 총 농도의 약 43~49% 정도가 표층에서 0.5 cm 사이에 존재하였으며 0.5~1 cm 사이에서 약 25% 정도를 차지하였다. 또한 1 cm 이하의 깊이에서도 25% 이상의 농도 분포를 나타내었다. 월별 수직 분포에 있어서는 겨울철에 비해서 저서동물의 밀도가 높고 성장이 활발하게 일어나는 봄과 여름철에 1 cm 이하의 깊이에서도 chlorophyll *a* 농도가 높게 존재하였다(Kang *et al.*, 2006). 갯벌에서 저서미세조류의 수직분포는 저서미세조류의 활발한 수직회유(migration)와 hydrodynamic forces 그리고 생물교란(bioturbation) 등에 의한 영향을 받는다(Cadée and Hegeman, 1974; Montani *et al.*, 2003; Méléder *et al.*, 2005). 따라서 본 연구해역에서 봄과 여름철에 저서미세조류의 수직 분포는 생물교란(bioturbation)의 영향을 더욱 크게 받을 수 있음을 시사해 준다. 또한 겨울철에 저서미세조류의 수직 분포는 주로 수리학적 요인(wave action)에 의한 영향을 받는 것으로 판단된다.

결 론

광양만 갯벌 퇴적물과 상부 수주(water column)에서 월별로 HPLC를 이용하여 미세조류의 광합성색소를 분석한 결과 규조류(diatoms)의 주요 지표색소인 fucoxanthin이 퇴적물과 해수 모두에서 연중 풍부하였으며, 미세조류의 생체량과 군집조성이 유사한 계절변동 양상을 나타내었다. 퇴적물 중 chlorophyll *a* 농도는 대체로 여름철(6~8월)에 높은 농도를 보이고, 상부, 중부 그리고 하부 갯벌에서 연평균 농도는 각각 68.4 ± 45.5 , 21.3 ± 14.3 및 22.9 ± 15.6 mg m⁻²로 나타나 상부 수주 전체 수심에 대해 적산한 chlorophyll *a*의 연평균 농도인 6.96 ± 3.04 mg m⁻²에 비하여 약 3~10배 정도 높게 나타났다. 또한 퇴적물 중 미세조류의 높은 DT/(DD+DT) 값은 저서 규조류들이 광저해 현상에 잘 적응하고 있다는 것을 나타내었다. 퇴적물 중 chlorophyll *a* 농도는 퇴적물 깊이 표층 1 cm 이내에서 약 70% 이상 차지하였으며, 1 cm 이하의 깊이에서도 약 25% 이상의 상당히 높은 농도 분포를 보였다. 이와같이 높은 생체량을 보이는 저서미세조류는 갯벌에 서식하는 동물뿐만 아니라 재부유를 통하여 다른 곳으로 수송될 때 연안 생태계에 서식하는 동물들에게 중요한 영양원 역할을 할 수 있다는 점에서 이들의 거동에 대한 깊이 있고 지속적인 조사가 요구된다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Barranguet, C., J. Kromkamp and J. Peene, 1998. Factors controlling primary production and photosynthetic characteristics of intertidal microphytobenthos. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **173**: 117-126.
- Bianchi, T.S., S. Findlay and R. Dawson, 1993. Organic matter sources in the water column and sediments of the Hudson River estuary: the use of plant pigments as tracers. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **36**: 359-376.
- Bigdare, R.P., T.J. Frank, C. Zastrow and J.M. Brooks, 1986. The distribution of algal chlorophylls and their degradation products in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res.*, **33**: 923-937.
- Brunet, C., J.M. Brylinski and Y. Lemoine, 1993. *In situ* variations of the xanthophylls diatoxanthin and diadinoxanthin: photoadaptation and relationships with a hydrodynamical system in the eastern English Channel. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **102**: 69-77.
- Burkill, P.H., R.F.C. Mantoura, C.A. Llewellyn and N.J.P. Owens, 1987. Microzooplankton grazing and selectivity of phytoplankton in coastal waters. *Mar. Biol.*, **93**: 581-590.
- Cadée, G.C. and J. Hegeman, 1974. Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea Res.*, **8**: 260-291.
- Colijn, F., 1982. Light absorption in the waters of the Ems-Dollard Estuary and its consequences for the growth of phytoplankton and microphytobenthos. *Neth. J. Sea Res.*, **15**: 196-216.
- Colijn, F. and V.N. de Jonge, 1984. Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **14**: 185-196.
- de Jong, D.J. and V.N. de Jonge, 1995. Dynamics and distribution of microphytobenthic chlorophyll-*a* in the Western Scheldt estuary (SW Netherlands). *Hydrobiol.*, **311**: 21-30.
- de Jonge, V.N. and F. Colijn, 1994. Dynamics of microphytobenthos biomass in the Ems estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **104**: 185-196.
- de Jonge, V.N. and J.E.E. van Beusekom, 1992. Contribution of resuspended microphytobenthos to total phytoplankton in the Ems Estuary and its possible role for grazers. *Neth. J. Sea Res.*, **30**: 91-105.
- Delgado, M., V.N. de Jonge and H. Peletier, 1991. Experiments on resuspension of natural microphytobenthos populations. *Mar. Biol.*, **108**: 321-328.
- Demers, S., S. Roy, R. Gagnon and C. Vignault, 1991. Rapid light-induced changes in cell fluorescence and in xanthophyll-cycle pigments of *Alexandrium excavatum* (Dinophyceae) and *Thalassiosira pseudonana* (Bacillariophyceae): a photo-protection mechanism. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **76**: 185-193.
- Du, G. and I.K. Chung, 2007. Spatio-temporal variation of intertidal microphytobenthos in the Nakdong Estuary. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **12**: 186-190.
- Guarini, J.M., G.F. Blanchard, C. Bacher, P. Gros, P. Riera, P. Richard, D. Gouleau, R. Galois, J. Prou and P.G. Sauriau, 1998.

- Dynamics of spatial patterns of microphytobenthic biomass: inferences from a geostatistical analysis of two comprehensive surveys in Marennes-Oléron Bay (France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **166**: 131–141.
- Holm-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.W. Holmes and J.D.H. Strickland, 1965. Fluorimetric determination of chlorophyll. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer.*, **30**: 3–15.
- Hyun, S., W.H. Paeng and T. Lee, 2004. Characteristics of surficial sediment and benthic environments based on geochemical data in Gwangyang Bay, Korea. *Korean J. Environ. Biol.*, **22**: 93–102.
- Kang, C.K., J.B. Kim, K.S. Lee, J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong, 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.
- Kang, C.K., Y.W. Lee, E.J. Choy, J.K. Shin, I.S. Seo and J.S. Hong, 2006. Microphytobenthos seasonality determines growth and reproduction in intertidal bivalves. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **315**: 113–127.
- Levinton, J.S. and M. McCartney, 1991. Use of photosynthetic pigments in sediments as a tracer for sources and fates of macrophyte organic matter. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **78**: 87–96.
- Lorenzen, C.L., 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, **12**: 343–346.
- Lucas, C.H., J. Widdows, M.D. Brinsley, P.N. Salkeld and P.M.J. Herman, 2000. Benthic-pelagic exchange of microalgae at a tidal flat. 1. Pigment analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **196**: 59–73.
- MacIntyre, H.L. and J.J. Cullen, 1995. Fine-scale vertical resolution of chlorophyll and photosynthetic parameters in shallow-water benthos. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **122**: 227–237.
- MacIntyre, H.L., R.J. Geider and D.G. Miller, 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.
- Meadows, P.S. and J.G. Anderson, 1968. Micro-organisms attached to marine sand grains. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, **48**: 161–175.
- Méléder V., L. Barillé, Y. Rincé, M. Morançais, P. Rosa and P. Gaudin, 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.
- Moline, M.A., 1998. Photoadaptive response during the development of a coastal Antarctic diatom bloom and relationship to water column stability. *Limnol. Oceanogr.*, **43**: 146–153.
- Montagna, P.A., G.F. Blanchard and A. Dinét, 1995. Effect of production and biomass of intertidal microphytobenthos on meiofaunal grazing rates. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **185**: 149–165.
- Montani, S., P. Magni and N. Abe, 2003. Seasonal and interannual patterns of intertidal microphytobenthos in combination with laboratory and areal production estimates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **249**: 79–91.
- 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. Kor. Fish. Soc.*, **37**: 215–225.
- Park, M.O., C.H. Moon, H.S. Yang and J.S. Park, 1999. Distribution of phytoplankton pigments in the Korea Strait. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **34**: 95–112.
- 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.
- Paterson, D.M., 1989. Short-term changes in the erodibility of intertidal cohesive sediments related to the migratory behavior of epipelagic diatoms. *Limnol. Oceanogr.*, **34**: 223–234.
- Sundbäck, K., V. Enoksson, W. Granéli and K. Pettersson, 1991. Influence of sublittoral microphytobenthos on the oxygen and nutrient flux between sediment and water: a laboratory continuous-flow study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **74**: 263–279.
- Therriault, J.C., D. Booth, L. Legendre and S. Demers, 1990. Phytoplankton photoadaptation to vertical excursion as estimated by an *in vivo* fluorescence ratio. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **60**: 97–111.
- Trees, C.C., M.C. Kennicutt II and J.M. Brooks, 1985. Errors associated with the standard fluorimetric determination of chlorophylls and phaeopigments. *Mar. Chem.*, **17**: 1–12.
- Welschmeyer, N.A. and N. Hoepffner, 1986. Rapid xanthophyll cycling: an *in situ* tracer for mixing in the upper ocean. *EOS (Trans. Am. Geophys. Un.)*, **67**: 969.
- Yoo, M.H. and J.K. Choi, 2005. Seasonal distribution and primary production of microphytobenthos on an intertidal mud flat of the Janghwa in Ganghwa Island, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **10**: 8–18.
- Young, A.J. and H.A. Frank, 1996. Energy transfer reactions involving carotenoids: quenching of chlorophyll fluorescence. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, **36**: 3–15.

2008년 11월 26일 원고접수

2009년 2월 3일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진