

강화도 장화리 갯벌에서 저서미세조류의 계절적 분포 및 일차 생산력

유만호* · 최중기
인하대학교 해양학과

Seasonal distribution and primary production of microphytobenthos on an intertidal mud flat of the Janghwa in Ganghwa Island, Korea

MAN HO YOO* AND JOONG KI CHOI

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

강화도 장화리 펄 조간대 지역에서 2002년 5월-2004년 4월까지 저서미세조류의 계절분포를 조사하였으며, 저서미세조류의 일차생산력 측정과 HPLC를 이용한 색소분석 방법으로 저서미세조류의 생산능력 및 분류군별 분포를 파악하였다. 강화도 갯벌에서 저서미세조류는 조간대 중부에서 많은 현존량을 보였다. 강화도 갯벌에서 저서미세조류의 계절별 현존량 변동은 $2.3-140.9 \times 10^5$ cells cm^{-2} 의 범위로 하계와 동계에 낮은 현존량을 보였고 2003년 2월에서 4월까지 저서미세조류의 대증식 현상이 나타났다. 저서미세조류는 대부분 저서성 돌말류가 우점종으로 출현하였고, 특히 연중 *Paralia sulcata*가 전 정점에서 우점하여 출현하였다. 그외에 *Cylindrotheca closterium*과 *Nitzschia* sp.가 2월과춘계에 크게 우점하였다. HPLC 색소분석을 통한 저서미세조류 군집조성은 돌말류를 포함하여 유그레나류, 남조세균, 녹조류, 은편모조류, 황갈조류, 와편모조류 등 다양한 종류가 출현하고 있는 것으로 나타났다. Chl *a*의 함량은 $1.18-34.25$ mg m^{-2} 의 범위로 평균 7.60 mg m^{-2} 을 보였다. Fuco/Chl *a*는 평균 0.7로 나타나 연구기간동안 돌말류가 전체 저서미세조류 생물량의 대부분을 차지하고 있음을 보여주었으며, Chl *b*/Chl *a*는 평균 0.17로 유그레나류와 녹조류가 일정 시기에 서로 공존하여 서식하는 것으로 나타났다. 평균 일차생산력의 변화는 $4.2-113.0$ mgC m^{-2} hr^{-1} 의 범위로 평균 33.9 mgC m^{-2} hr^{-1} 로 나타났고, 초기기울기(α)의 변화범위는 $0.002-0.005$ (mgC mgchl- a^{-1} hr^{-1})-($\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) $^{-1}$ 로 측정되었다. 동화계수(P_m)는 $0.50-1.32$ mgC mgchl- a^{-1} hr^{-1} 의 변화범위를 보였고, 일일 일차생산력은 $20.9-678.1$ mgC m^{-2} d^{-1} 범위로 평균 206.7 mgC m^{-2} d^{-1} 을 보여 일반적인 갯벌에서의 생산력 범위를 보였다.

We studied seasonal distribution of the microphytobenthos and their primary production with C^{14} method and carried out pigment analysis with HPLC in an estuarine mudflat of the Ganghwa Island, Korea from May 2002 to April 2004. The abundances of microphytobenthos were higher at the middle than upper part and lower part of intertidal flat. Abundances of microphytobenthos ranged from 2.3×10^5 cells cm^{-2} to 140.9×10^5 cells cm^{-2} . The bloom of microphytobenthos was observed in the early spring and then it decreased from spring to summer and autumn. The pennate diatom was a predominated group among the microphytobenthos in this area. The dominant species were *Paralia sulcata*, *Cylindrotheca closterium* and *Nitzschia* sp.. *Nitzschia* sp. and *Cylindrotheca closterium* were predominant in February. The results of pigment analysis suggest the presence of diatoms, euglenophytes, chlorophytes, cyanobacteria, cryptophytes, chrysophytes, prymnesiophytes, dinoflagellates and prasinophytes. The biomass of microphytobenthos ranged from 1.18 to 34.25 mg chl-*a* m^{-2} , with a mean of 7.60 mg chl-*a* m^{-2} . The mean ratio of Fuco/Chl *a* was 0.7 which indicates that most of biomasses of microphytobenthos were due to diatoms. The ratios of Chl *b*/Chl *a* ranged from 0 to 0.82(with a mean of 0.17), implying that euglenophytes and chlorophytes lived together in special period seasonally. Temporal variation of primary production ranged from 4.2 to 113.0 mgC- m^{-2} - hr^{-1} (mean value was 33.9 mgC- m^{-2} - hr^{-1}) and initial slope(α) was measured from 0.002 to 0.005(mgC mgchl- a^{-1} hr^{-1})-($\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) $^{-1}$. Assimilation number(P_m) was in the range of 0.50-1.32 mgC-mgChl- a^{-1} hr^{-1} and daily primary production ranged from 20.9 to 678.1 mgC- m^{-2} - d^{-1} (mean value was 206.72 mgC- m^{-2} - d^{-1}).

Keywords: Benthic Diatoms, Microphytobenthos, Primary Production, Ganghwa Tidal Flat

*Corresponding author: ryu10005@hanmail.net

서론

조간대 지역은 육상 환경과 해양환경이 만나는 접이지역으로 우리나라의 서해안과 남해안에는 국토 면적의 2.8%에 해당하는 광대한 갯벌 조간대가 발달되어 있다(해양수산부, 1998). 갯벌조간대에는 육상으로부터 많은 양의 유기물과 영양염이 공급되어 비옥한 영양조건을 갖고 있으며 적절한 수분유지와 다양한 서식환경으로 다양한 해양생물들이 높은 밀도로 서식하고 있어, 갯벌 조간대는 면적에 비해 동·식물의 생산성이 매우 높은 곳으로 알려져 있다(Warwick and Price, 1975). 갯벌의 높은 생산성의 기저부에는 이를 담당하는 다양한 식물군이 있으며, 특히 펄 갯벌에서는 주로 저서미세조류군집이 이러한 일차 생산을 담당하고 있다. 펄 갯벌 표면에 서식하는 저서미세조류로는 돌말류, 남조세균, 유그레나류, 녹조류 등 다양한 미세조류가 출현하고 있으나 주로 저서성 돌말류가 우점한다(Admiraal *et al.*, 1982). 저서성 돌말류는 퇴적물내에서 먹이망의 중요한 탄소공급원(Sullivan and Moncreiff, 1988)이며, 퇴적물을 안정화 시키고 퇴적물과 수층사이의 영양염 순환에 조절자(Rizzo, 1990)로서 다양한 기능적 역할을 담당한다. 이러한 저서미세조류군집의 생태학적 역할을 연구하기 위하여 구조류군집 연구 등이 개체군을 중심(Sullivan, 1975; Sullivan, 1978; Sullivan and Moncreiff, 1988)으로 이루어졌으나, 최근에는 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용한 퇴적물의 식물 색소조성 분석을 통하여 군집을 분석하는 방법 등이 시도(Pinckney and Zingmak, 1994)되고 있다. 기존의 spectrophotometer와 fluorometer를 이용한 chlorophyll *a* 측정의 색소와 보조색소, 그리고 그들의 분해산물의 spectrum band 중복으로 인하여 chlorophyll *a* 농도를 과소 또는 과대평가할 수 있다(MacIntyre *et al.*, 1996). 반면 HPLC를 이용한 방법은 저서미세조류의 색소조성을 정성적으로 분석할 수 있고 정량적으로도 정확한 값을 얻을 수 있어 식물플랑크톤군집이나 저서미세조류군집을 분석하는데 유용하게 사용된다(Plante-Cunney *et al.*, 1993; Pinckney and Zingmak, 1994). 생산력에 관하여는 오래전부터 갯벌 조간대에서의 일차생산력에 대한 평가가 많은 연구자들의 관심이 되어 왔으나(Leach, 1970; Colijn and De Jonge, 1984) 최근 까지도 비교적 연구가 많이 이루어지지 않은 상태이다(Pinckney and Zingmak, 1993). 우리나라 서해안 조간대에서의 저서미세조류 연구는 인천연안 갯벌(심과 조, 1984), 금강하구 조간대(김과 조, 1985), 송도 갯벌(고, 1991), 만경·동진 갯벌(오, 1990) 등에서 주로 현미경을 이용한 저서구조류군집 연구를 중심으로 이루어져 왔고, 최근에 곱소만 갯벌(이, 2001), 강화도 갯벌(최, 2002), 새만금 갯벌(오 등, 2004) 등에서 HPLC를 이용한 색소분석을 통한 군집조성과 저서미세조류 생물량 추정 등의 연구가 진행되어왔다.

본 연구는 서해안 한강 하구역에 위치한 강화도 갯벌의 유기물 정화능력 추정을 위한 생지화학적 순환 연구의 일환으로 강화도 갯벌의 저서미세조류군집의 분포특성과 조성 특성을 밝히고 이들에 의한 일차생산력을 추정하기 위하여 시도되었다.

재료 및 방법

본 연구지역(Fig. 1)은 강화도 조간대 북위 37°35'~50', 동경

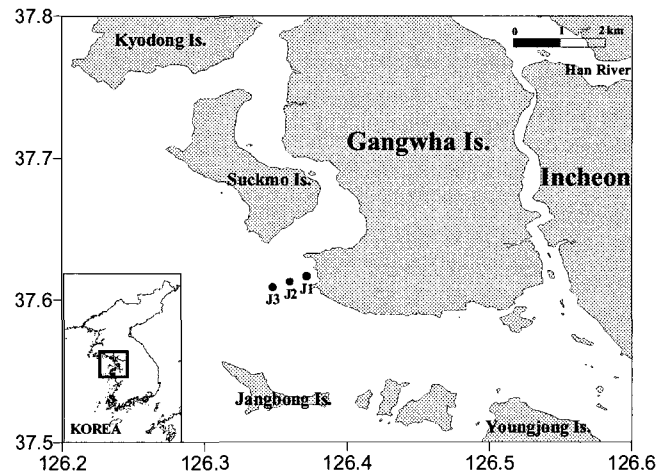


Fig. 1. A map showing the study area in the Ganghwa Island, Korea.

126°21' - 32'로 최저조시 총 면적 10⁵ km²인 평균조차 7.3 m인 대조차 환경이다(KORDI, 1998). 강화도 동부에는 300-1,500 m 폭의 비교적 좁은 염하수로가 있고, 서부에는 약 1,200-3,800 m 폭의 석모수로가 있다(수로국, 1981). 강화도 남부 갯벌은 서해로 유입되는 한강수의 영향을 일부 받으며, 염하수로와 석모수로에서 유입된 담수가 조석에 따른 해수와의 혼합으로 염분의 구배가 뚜렷한 기수의 특성이 나타난다. 노출시간이 동막리 지역에서 3-5시간, 여차리 지역에서는 7시간에 이르는 대형 하구형 갯벌이며, 서해안 갯벌들의 일반적 특징인 펄 퇴적물이 우세하고, 퇴적물은 생물에 의하여 교란되어 있고, 계절에 따라 퇴적과 침식이 반복되는, 상향 조립화 층서(coarsening-upward sequence)를 보인다(Woo and Je, 2002).

본 연구는 총 7회(2002년 5월, 6월, 9월, 12월과 2003년 2월, 4월, 6월)에 걸쳐 이루어졌으며, 연구 정점은 조간대 상부(이하: J1), 중부(이하: J2), 하부(이하: J3)로 나누어 이루어졌다(Fig. 1). 색소 분석은 2002년 12월, 2003년 2월, 4월, 6월, 10월, 12월, 2004년 2월, 4월 총 8회 걸쳐 조사하였고, 일차생산력은 J2에서 2003년 7월, 10월, 12월, 2004년 2월, 3월, 4월에 측정하였다.

퇴적물 온도와 염분은 Digital thermometer(Oregon scientific)와 salinometer(YSI Inco.)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 또한 현장 광량 측정은 Quantum meter LI-1000(LI-cor)을 사용하였다. 저서미세조류의 출현 개체수를 파악하기 위해 각 정점에서 직경 28 mm 주사기 코어를 사용하여 표층 1 cm 깊이까지 채집한 뒤 2.5 mm 간격으로 절단하였다. 이 시료를 루골용액으로 최종농도가 0.2-0.4%로 고정한 후 시료의 광산화를 방지하기 위하여 알루미늄 호일로 광을 차단, 암소에 보관하여 실험실로 운반하였다. 현미경 관찰은 시료를 최종 농도 150-200배로 희석하여 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경(Olympus BX50) 200배하에서 계수하였다. 출현 개체수는 단위면적당 세포수(cells·cm⁻²)로 환산하였다.

저서미세조류 색소 분석을 위한 퇴적물 채취는 직경 28 mm 주사기 코어를 이용해 표층퇴적물 상부 1 cm를 취해 2.5 mm 간격으로 절단한 후 드라이아이스에 보관하여 실험실로 운반하였다. 시료는 분석 전까지 Deep freezer(Unique model FD 240A)에서 -70°C로 보관하였다.

퇴적물 시료를 취해 10 ml의 acetone(100%)과 1 ml 내부 표준 물질(8'-apo- β -carotenal, Fluka)의 혼합액을 섞은 후 sonicator를 이용 30초 동안 처리하고 암냉소에서 24시간 이상 추출하였다(Buffan-Dubau and Carman, 2000). 추출은 퇴적물과 추출액을 분리하기 위해 원심분리기를 이용 2,500 rpm에서 15분간 처리하고 상등액을 취하여 막 여과지(0.45 μ m pore size)로 여과한 후 300 μ l를 취하여 분석하였다.

용매 시스템은 최(2002)와 동일하며, chromatogram의 peak에 대한 동정은 표준색소와 retention time을 비교하여 결정하였다. 표준색소는 chlorophyll c_{1+2} (Chl c_{1+2}), chlorophyll c_3 (Chl c_3), chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), prasinoxanthin(Pras), diatoxanthin(Diato), lutein(Lut), bb-carotene(bb-car), phaeophytin a (Phytin a), phaeophytin b (Phytin b), fucoxanthin(Fuco), alloxanthin(Allo), zeaxanthin(Zea), 19-hexanoyloxyfucoxanthin(Hex-fuco), peridinin(Perid), violaxanthin(Viola), 19-butanoyloxyfucoxanthin(But-fuco), diadinoxanthin(Diadino)를 이용하였고(VKI, Denmark), 내부 표준물질로는 8'-apo- β -carotenal를 이용하였다(Wright *et al.*, 1991; Jeffrey *et al.*, 1997). 표준색소의 농도는 이미 알고 있는 extinction coefficient를 사용해 spectrophotometer에서 보정되었다(Jeffrey, 1972; Davies, 1976; Lorenzen and Downs, 1986; Bidigare, 1991). 표준색소의 농도와 현장 시료의 색소 정량식은 Park and Park(1997)의 계산식에 따랐다.

일차생산력을 측정하기 위해 J2에서 직경 28 mm 코어를 이용하여 퇴적물 표층에서 5 mm 깊이까지 시료를 채집하였다. 현장에서 가져온 해수를 직경 47 mm 여과지(GF/F)로 여과한 후 멸균하여 pH 9.5 이상으로 맞춘 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ 일정량을 첨가한 뒤, 분배기를 이용하여 10개 배양용기(Falcon flask)에 60 ml씩 분배하여 광구배(100, 80, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 5, 1% 정도)가 이루어진 상자(radial photosynthetron)에 넣었다. 광원은 인공광(OSRAM lamp; 400W)을 사용하였으며 광구배는 스칼라 피복사도 측정기(quantum scalar irradiance meter; Biospherical Instruments Inc. Model QSL-100)를 사용하여 최대 광원이 약 $1,000 \mu\text{Em}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상이 되게 맞추었다. 항온수조를 사용하여 배양 용기가 담겨진 상자 내의 온도를 현장의 수온에 맞춘 후, 약 2 시간 배양하였다. 배양실험을 거친 시료는 직경 25 mm(0.45 μ m pore size) 막 여과지로 걸러내어 여과지를 20 ml 설파용기병

(LSC vial)에 담은 뒤 3N HCl을 1 ml 넣어 24시간 훈증(fuming)하여 무기탄소를 제거하였다.

훈증이 끝난 시료는 바로 설파액(scintillation cocktail)인 LUMAGEL SAFE(LUMAC-LSC)를 15 ml 넣어 냉암소에서 1-2일 보관한 뒤 설파광 계수기(RackBeta II Scintillation Counter)로 분당붕괴수(dpm)를 측정하였다. 해수의 알칼리도를 추정하기 위해서는 Parsons *et al.*(1984)의 방법에 따라 채수한 시료의 pH를 측정하고 시료 100 ml에 0.01N HCl 25 ml를 첨가하여 acid pH를 측정하였다. 배양 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 다음의 광합성-광도 모델에 비선형 회귀법으로 적합화하여(Press *et al.*, 1986) 매개변수들을 구하였고, P-I 실험에서 얻어진 결과는 Platt *et al.*(1980)의 모형에 적합화하여 매개변수화 하였다. 계절별 일일 일차생산력은 계절별 P-I 매개변수를 계절별 엽록소 a 량, 노출시간 및 광량과 결합하여 구하였다.

결 과

환경요인

조사기간 동안 연구지역에서의 염분 변화는 12.9-35.0 psu로 평균 26.4 psu이며, 2002년 6월 J1에서 35.0 psu로 가장 높았고, 2003년 4월 J1에서 12.9 psu로 가장 낮은 염분이 나타났다(Fig. 2). 대기온도 변화는 6.8-25.0°C의 범위로 평균 18.2°C로 나타났다. 2003

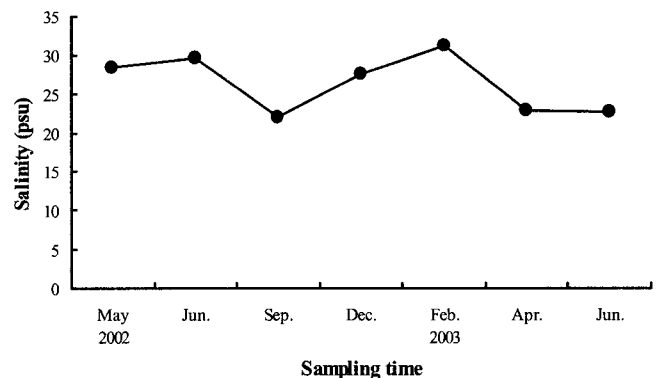


Fig. 2. Seasonal variation of mean salinity in surface sediment layer during the study period.

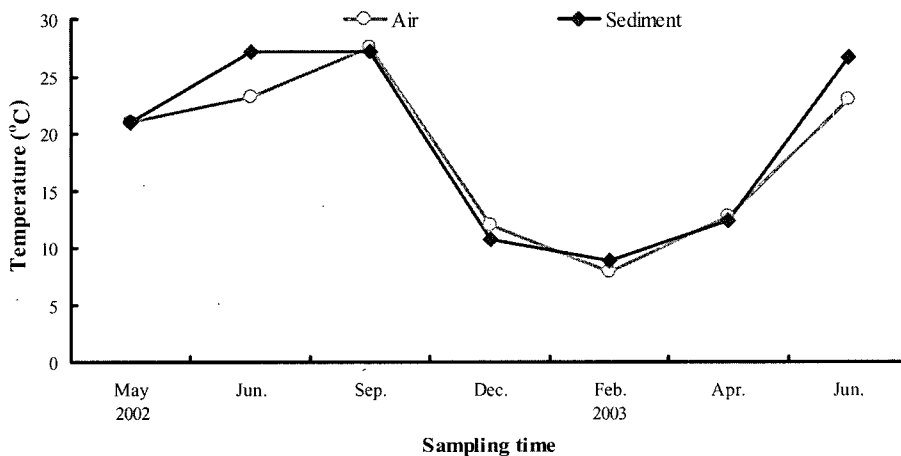


Fig. 3. Seasonal variation of temperatures (air and sediment) during the study period.

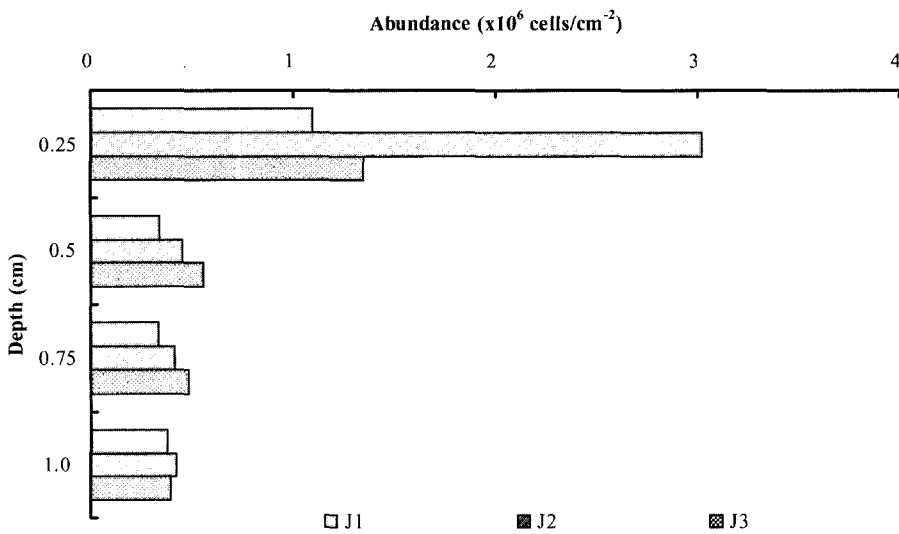


Fig. 4. Vertical distributions of the abundance of total average microphytobenthos during the study period.

년 2월에 6.8°C로 가장 낮았고, 2003년 6월에 25°C로 가장 높았다. 퇴적물의 온도 변화는 6.1-29.4°C의 범위로 평균 26.7°C을 보였다. 2003년 2월에 6.1°C로 가장 낮았고, 2002년 9월에 29.4°C로 가장 높았다(Fig. 3).

저서미세조류의 시-공간 변동

저서미세조류의 현존량 분포: 연구지역에서 저서미세조류의 깊이별 현존량 분포는 전반적으로 표층에서 아래 깊이로 내려 갈수록 감소하는 경향을 보였고, 퇴적물 표층 0-0.25 cm에서의 현존량이 그 아래 현존량보다 약 3-4배 정도 높게 나타났다(Fig. 4). 표층 퇴적물에서의 저서 미세조류의 현존량 분포는 J1에서 25,593-5,785,247 cells cm⁻²의 범위로 평균 1,094,516 cells cm⁻²로 출현하였고, J2에서는 20,600-11,010,247 cells cm⁻²로 평균 3,025,209 cells cm⁻²이 출현하였으며, J3에서는 103,001-5,333,778 cells cm⁻²로 평균 1,350,963 cells cm⁻²이 출현하여 조간대 중부에서 가장 많은 출현 양을 보였다. 계절별로는 J1이 5월에 최저 현존량을 보였고 J2와 J3는 6월에 최저 현존량을 보였다. 최고 현존량을 보인 시기

는 J1이 2월에, J2와 J3는 4월에 가장 높게 나타나 뚜렷한 계절 변화양상을 보였다(Fig. 5).

저서미세조류의 계절별 유형: 조간대 펄 갯벌에서 출현하는 미세조류를 대상으로 부유성(planktonic type)과 저서성(benthic type) 양상을 나타내는 종을 분류하여 각각이 차지하는 비율을 분석하였다(Fig. 6). 이는 각 유형이 차지하는 비율 변동을 통해 수층으로부터의 영향성을 비교하기 위함이다. 이 연구 결과 2003년 2월에 저서성 돌말류가 최고 87%로 가장 높은 비율을 보였고, 부유성 규조류는 2002년 9월에 71%로 가장 높은 출현율을 보였다. 이 결과로부터 동계와 이른 봄에는 주로 저서성 우상규조류에 의해 군집이 유지되는 것으로 보이며 여름과 초가을에는 저서성 우상규조류보다는 침강된 부유성 규조류가 군집의 형성에 크게 기여한 것으로 보인다.

저서미세조류 군집의 우점종 및 우점율: 강화도 갯벌에서 전반적으로 년중 우점하여 출현하는 종은 서해 연안의 대표적인 저서성 돌말류인 *Paralia sulcata*로 조간대 상부에서 하부까지 고루 분포한다(Table 1). 이 종은 년중 10-52%의 우점율을 보이며, 조간

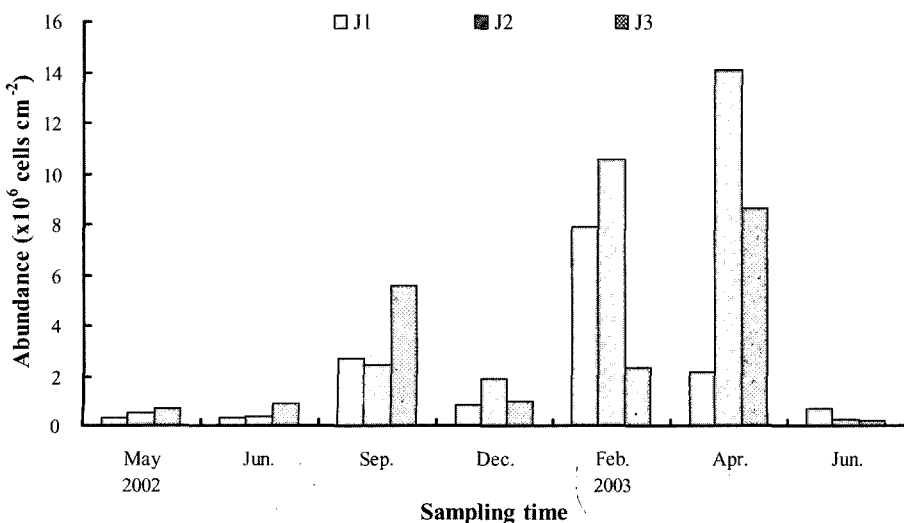


Fig. 5. Seasonal variations of microphytobenthic abundance on surface sediment during the study period.

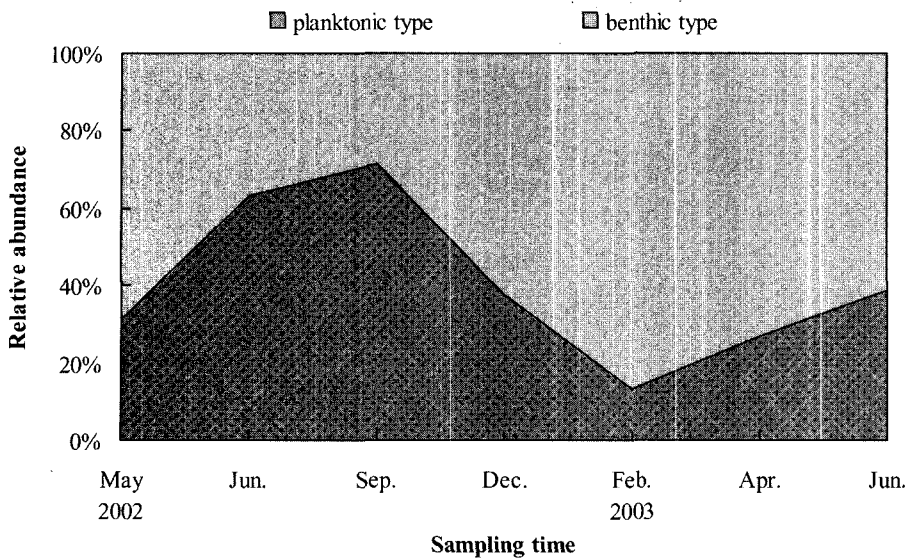


Fig. 6. Relative abundance of planktonic and benthic diatoms.

대 중부에서 2월과 4월에 최대 10^6 cells cm^{-2} 에 이르는 높은 현존량이 나타났다. 저서성 돌말류인 *Nitzschia* sp.는 다른 계절에는 많이 출현하지 않았으나, 2월부터 조간대 중부에서 대량 출현하기 시작하여 4월에 조간대 중부에서 최대 10^7 cells cm^{-2} 이 넘는 현존량을 보여 저서미세조류 군집의 춘계 대증식을 유도하였다. 이들 중외에 저서성 돌말류인 *Navicula* sp.가 동계에 많이 출현하였고, *Cylindrotheca closterium*은 2월에 전 조간대에서 크게 우점하였다. 특히 조간대 상부에서 약 4.6×10^6 cells cm^{-2} 의 많은 현존량이 출현하였다. 이외에 부유성 규조류인 *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* spp.가 하계와 추계에 갯벌에서 많이 발견되었다.

저서미세조류의 색소조성 및 Chlorophyll a 분포

2002년 12월부터 2004년 4월까지 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용해 장화리 갯벌에서의 저서 미세조류에 관한 색소분석을 한 결과 chlorophyll 계열과 carotenoid 계열이 총 16종 검출되었으며 분해산물인 phytin a와 b가 검출되었다. chlorophyll 계열로는 Chl a, b, c_{1+2} , c_3 가 검출되었고 carotenoid 계열로는 Fuco, Zea, Perid, Allo, Hex-fuco, But-fuco, Pras, Viola, Diadino, Diato, Lut 그리고 bb-car이 검출되었다. 검출된 색소의 종류와 농도 분포를 보았을 때, Chl a, c와 Fuco, Diadino, Beta-car을 주요 색소로 가진 돌말류가 전체 저서미세조류 생물량의 대부분을 차지하는 주요종으로 나타났으며, 이외에 cyanobacteria(Zea), dinoflagellates(Perid), cryptophytes(Allo), prymnesiophytes(Hex-fuco), pelagophytes(But-fuco) 그리고 chrysophytes(Fuco+Viola) 등이 소수 종으로 존재하였다.

Table 2와 Fig. 8에서 갯벌 표층의 chlorophyll a 분포는 1.18-34.25 $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 7.60 $mg\ m^{-2}$ 의 분포를 보였다. 조간대 하부에서는 평균 9.42 $mg\ m^{-2}$, 중부에서는 7.38 $mg\ m^{-2}$, 상부에서는 5.99 $mg\ m^{-2}$ 분포로 조간대 하부와 중부가 높았고, 상부가 적게 출현하여 저서미세조류의 현존량 분포와 유사하게 나타났다. 계절별로는 춘계에 평균 11.09 $mg\ m^{-2}$ 으로 가장 높았고, 하계에는 6.33 $mg\ m^{-2}$, 추계에는 3.51 $mg\ m^{-2}$, 동계에는 평균 5.81

$mg\ m^{-2}$ 분포로 추계에 가장 낮은 농도를 보였다.

퇴적물 중에서 검출된 보조색소 중 가장 높은 함량을 보인 Fuco는 0.09(2004년 2월, J2)-19.91(2003년 2월, J2) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 4.78 $mg\ m^{-2}$ 으로 정점과 계절에 따른 분포는 chlorophyll a 경향을 따른다. Zea는 0.07(2003년 4월, J1)-7.76(2003년 10월, J1) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 1.22 $mg\ m^{-2}$, Pra는 0.18(2002년 12월, J3)-5.14(2004년 2월, J3) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 1.21 $mg\ m^{-2}$, Viola는 0.09(2002년 12월, J3)-3.90(2004년 2월, J3) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 1.11 $mg\ m^{-2}$, bb-car는 0.29(2003년 2월, J1)-2.48(2004년 4월, J2) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 1.37 $mg\ m^{-2}$ 나타났다. Chl b 함량은 0.10(2004년 2월, J2)-1.79(2003년 10월, J1) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 0.73 $mg\ m^{-2}$ 로 나타났다. Chlorophyll의 분해산물인 Phytin a는 0.4(2004년 2월, J1)-12.32(2003년 2월, J1) $mg\ m^{-2}$ 의 범위로 평균 2.89 $mg\ m^{-2}$ 를 보였다(Fig. 7, Table 2).

저서미세조류의 일차생산력

강화도 장화리 중부 조간대에서 2003년 7월부터 2004년 4월까지 측정된 일차생산력 분포는 4.2-113.0 $mgC\ m^{-2}\ hr^{-1}$ 의 범위로 평균 33.9 $mgC\ m^{-2}\ hr^{-1}$ 로 나타났다(Table 3). 2004년 4월에 최대값이 측정되었고, 2003년 12월에 최소치가 나타났다. 이는 송도 펄 조간대에서 측정된 저서미세조류의 일차생산력인 4.3-36.4 $mgC\ m^{-2}\ hr^{-1}$ (평균 19.8 $mgC\ m^{-2}\ hr^{-1}$) 분포 보다 다소 높은 값이다. 저서미세조류의 일차생산력의 계절적 분포는 하계에서 동계로 갈수록 감소하다가 12월에 최소를 보이고 다시 증가하기 시작하여 춘계에 최대를 보이는 양상이었다.

Table 3에서 매개변수의 변화를 살펴보면, 광합성의 최대 광량자 수율인 α 는 0.002-0.005($mgC\ mgchl-a^{-1}\ hr^{-1}$)($\mu E\ m^{-2}\ s^{-1}$)로 평균 0.003($mgC\ mgchl-a^{-1}\ hr^{-1}$)($\mu E\ m^{-2}\ s^{-1}$)의 범위로 측정되었다. 2003년 10월에 최대값이 나타났고, 2003년 7월과 2004년 2월에 최소값이 나타났다. 동화계수(P_m)는 0.50-1.32 $mgC\ mgchl-a^{-1}\ hr^{-1}$ 로 2003년 10월에 최대값을 보였고, 2004년 2월에 최소값이 나타났다(Table 3, Fig. 8). 광적용 매개변수인 Ik 는 216.6-358.4

Table 1. Seasonal variation of dominant species during the study period.

Date/Station	J1			J2			J3		
	species	Abundance (cells cm ⁻²)	Dominant rate(%)	Species	Abundance (cells cm ⁻²)	Dominant rate(%)	Species	Abundance (cells cm ⁻²)	Dominant rate(%)
2002. 5	<i>Paralia sulcata</i>	114,513	37	<i>Paralia sulcata</i>	278,322	52	<i>Paralia sulcata</i>	323,182	46
	nano cell	31,809	10						
2002. 6	<i>Actinocyclus octonarius</i>	63,982	20	<i>Actinocyclus senarius</i>	50,313	13	<i>Paralia sulcata</i>	500,805	55
	<i>Skeletonema costatum</i>	63,982	20	<i>Nitzschia</i> sp.1(5x120)	50,313	13			
				<i>Thalassiosira</i> sp.(40~50)	49,150	13			
2002. 9	<i>Trichodesmium</i> sp.	630,126	23	<i>Paralia sulcata</i>	625,279	25	<i>Thalassiosira decipiens</i>	1,385,793	25
	<i>Paralia sulcata</i>	504,424	18	<i>Thalassiosira</i> spp.(<20)	583,594	24	<i>Skeletonema costatum</i>	1,220,022	22
	<i>Thalassiosira</i> spp.(<20)	298,017	11				<i>Thalassiosira</i> spp.(<20)	712,528	13
	<i>Paralia sulcata</i>	309,853	36	<i>Navicula</i> spp.(<20)	560,207	29	<i>Navicula</i> sp.2(10x30)	329,968	32
2002. 12	<i>Thalassiosira</i> spp.(<20)	103,244	12	<i>Nitzschia</i> sp.2(10x50)	265,138	14	<i>Amphiproora</i> spp.	135,720	13
				<i>Skeletonema costatum</i>	266,834	14	<i>Plagiogramma vanheurckii</i>	113,302	11
2003. 2	<i>Cylindrotheca closterium</i>	4,590,430	58	<i>Nitzschia</i> sp.2(10x50)	4,394,041	42	<i>Cylindrotheca closterium</i>	643,335	27
				<i>Navicula</i> sp.1(15x45)	1,450,503	14	<i>Navicula</i> sp.3(10x45)	591,349	25
				<i>Cylindrotheca closterium</i>	1,345,683	13	<i>Nitzschia</i> sp.2(10x50)	439,028	19
				<i>Paralia sulcata</i>	1,099,571	10			
				<i>Nitzschia</i> sp.2(10x50)	10,245,007	73	<i>Nitzschia</i> sp.2(10x50)	4,682,324	54
2003. 4	<i>Skeletonema costatum</i>	463,870	21	<i>Paralia sulcata</i>	1,390,519	10	<i>Paralia sulcata</i>	1,144,891	13
	<i>Paralia sulcata</i>	448,965	20						
2003. 6	<i>Paralia sulcata</i>	259,806	36	<i>Paralia sulcata</i>	114,635	46	<i>Thalassiosira</i> spp.(<20)	82,644	36
	<i>Thalassiosira decipiens</i>	92,701	13	<i>Thalassiosira</i> spp.(<20)	41,685	17	<i>Navicula</i> spp.(<20)	72,222	32
							<i>Thalassiosira</i> sp.(40~50)	31,022	14

Table 2. Concentration of pigments analyzed with HPLC in the Ganghwa tidal flat.

(unit: mg m⁻²)

Pigments	J1			J2			J3			Remarks*
	min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean	
Chl <i>c</i> ₇₊₂	N.D.	2.79	0.82	0.12	3.81	1.12	0.24	3.28	1.02	
Chl <i>c</i> ₃	N.D.	1.00	0.56	N.D.	1.00	0.43	N.D.	0.72	0.42	
Perid	0.14	1.34	0.54	0.11	1.73	0.65	N.D.	1.01	0.56	Dinoflagellates
But-fuco	0.07	0.39	0.22	N.D.	0.64	0.29	N.D.	1.35	0.39	
hex-fuco	0.05	0.51	0.26	N.D.	0.56	0.25	N.D.	0.73	0.30	Prymnesiophytes
Fuco	0.38	15.23	4.58	0.09	19.91	5.27	0.76	15.62	4.22	Diatoms
Pras	0.20	3.56	1.22	0.28	1.75	0.89	0.18	5.14	1.53	Prasinophytes
Viola	0.11	3.82	1.34	0.10	2.50	0.94	0.09	3.90	1.06	Chrysophytes
Diadino	0.17	1.31	0.53	0.16	0.85	0.38	0.05	0.49	0.27	
Allo	0.07	0.64	0.30	0.13	1.56	0.43	N.D.	0.84	0.41	Cryptophytes
Diato	N.D.	0.56	0.32	N.D.	2.93	0.88	N.D.	1.01	0.31	
Lut	N.D.	0.51	0.36	N.D.	0.60	0.32	N.D.	0.34	0.29	Cyanobacteria
Zea	0.07	7.76	1.66	N.D.	2.20	0.95	N.D.	2.77	1.05	Cyanobacteria
Chl <i>b</i>	N.D.	1.79	0.76	0.10	1.58	0.74	N.D.	1.40	0.68	Chlorophytes Euglenophytes
Chl <i>a</i>	1.18	9.84	5.99	1.42	23.47	7.38	2.00	34.25	9.42	
Phytin <i>b</i>	N.D.	0.27	0.15	0.03	0.28	0.19	N.D.	0.35	0.15	
Phytin <i>a</i>	N.D.	12.32	3.43	0.67	10.27	2.80	N.D.	4.76	2.42	Grazing pressure
bb-car	N.D.	1.99	1.37	N.D.	2.48	1.34	N.D.	1.96	1.40	

N.D.: not detected

Remarks*: microphytobenthic group

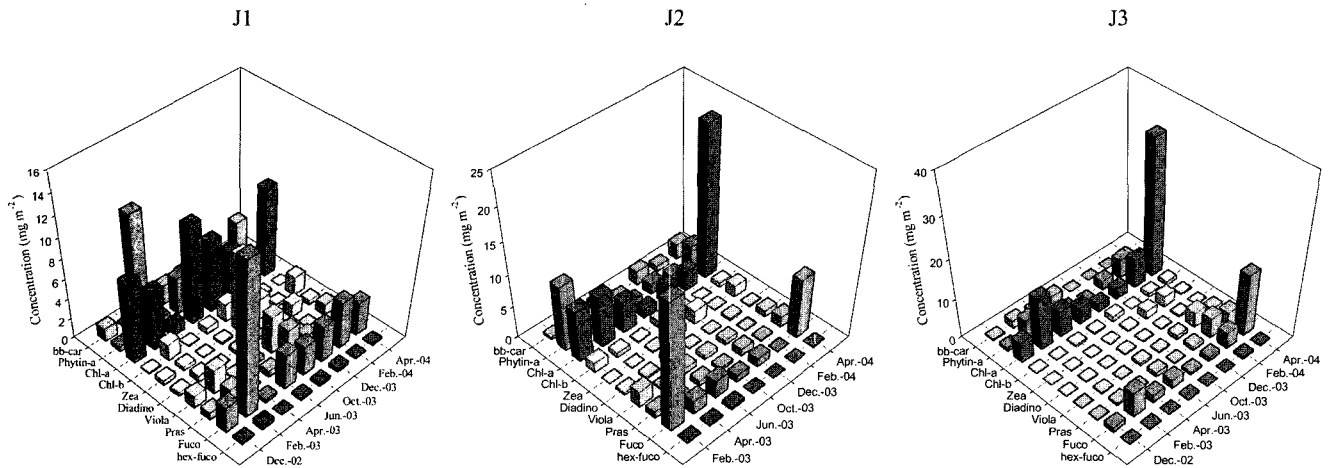


Fig. 7. Seasonal variation of pigments during the study period.

$\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 2004년 4월에 최대값을 보였고, 2004년 2월에 최소 값을 보였다. 노출 시간을 고려한 일일 일차 생산력은 20.9-678.1 $\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위로 평균 206.7 $\text{mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 을 보였다.

고찰

강화도 펄 갯벌에서 저서미세조류의 현존량 변동은 이른 봄인 2월부터 4월까지 저서미세조류의 대증식으로 높은 현존량을 보이며, 하계와 추계에 낮은 현존량을 나타내 계절적 변화양상이 뚜렷하였다. 이와 같은 저서미세조류 현존량의 계절별 변화는 다양한 갯벌에서 널리 밝혀졌으며(Colijn and Dijkema, 1981; Cariou-Le

Gall and Blanchard, 1995), 기존에 국내에서 보고된 최(2002)의 연구 결과와도 유사하다. 계절적 분포 양상은 춘계에 저서성 돌말류가 우점하는 양상에서 추계에는 부유성 중심형 돌말류가 우점하는 군집의 천이 현상이 나타났으나 이러한 천이는 춘계에 *Nitzschia* sp.와 *Cylindrotheca closterium*과 같은 저서성 돌말류들의 집적현상을 보이기 때문에 2월과 4월에는 저서성 돌말류가 차지하는 비율이 높았으며 2002년 9월에는 수층내에 우점하는 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira*속과 같은 부유성 규조류들이 일부 침강하여 높은 비율을 차지한 것에 의한다. 저서미세조류 중 *Paralia sulcata*는 연중 우점종으로 출현하였으나, 특히 동계와 춘계에 대량으로 출현하였다. 이종은 국내 기존 연구에서도 이와 같은 경향

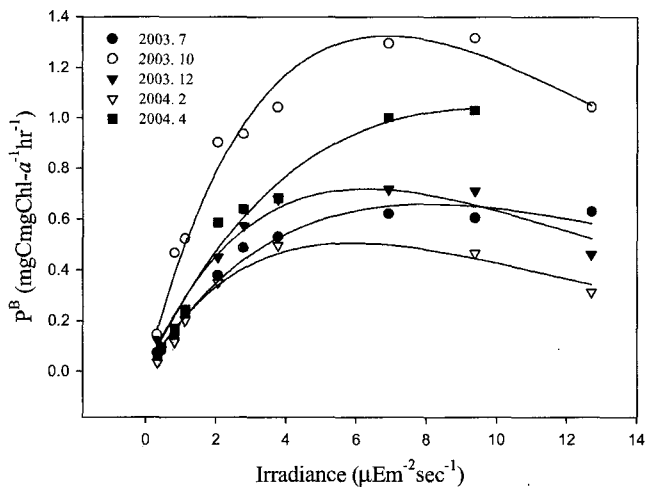


Fig. 8. Seasonal variation of P-I curve during the study period.

을 보이며(심과 조, 1984; 오, 1990; 최, 2002), 전형적으로 니질성 퇴적물에 서식하는 연안성 종으로 보고되었다(Shyu and Chen,

1984). 저서미세조류의 정점간 변동은 불규칙적이며, 다른 정점에 비해 중부 조건대에서 상대적으로 높은 현존량이 나타났다. 이는 춘계에 *Nitzschia* sp.와 *Cylindrotheca closterium*과 같은 저서성 돌말류에 의한 높은 현존량에 기인되기도 하나 다른 갯벌에서도 유사한 현상이 관찰되었다(오, 1990; 이, 2001; 오, 2003).

강화도 장화리 조건대에서 HPLC를 이용해 검출된 색소조성과 농도 분포를 Anderson *et al.*(1996)의 방법에 따라 비교했을 때, 장화리 갯벌에서는 돌말류를 포함하여 유그레나류, 남조세균, 녹조류, 은편모조류, 황갈조류, 외편모조류 등 다양한 종류가 출현하는 것으로 나타났다. Table 4에서는 전체 저서미세조류 생물량 중 각각의 분류군이 차지하는 비율을 나타내며, 돌말류가 전체 저서미세조류 생물량 중 대부분을 차지하는 것으로 나타났다(fuco/chl *a* 평균 0.70). 특히 fuco/chl *a*는 계절적으로 최대 2.60까지 나타났는데, 이는 Vesk and Jeffrey(1977)가 돌말류를 순수 배양해서 얻은 비율인 0.6보다 높은 수준이다. 그밖에 출현한 저서미세조류는 Chl *b* 색소를 갖는 유그레나류와 녹조류로 이들 그룹은 연안 퇴적물과 강하구 퇴적물에 흔히 출현하는 그룹으로(Riaux-Gobin *et al.*, 1987) 강화도 갯벌이 한강하구 갯벌의 특색을 일부 갖고 있

Table 3. Parameters of photosynthesis estimated in each P-I curve and primary productivity.

Parameters	2003. 7	2003. 10	2003. 12	2004. 2	2004. 4
α	0.002	0.005	0.003	0.002	0.003
P_m^B	0.63	1.32	0.72	0.50	1.04
I_k	264.8	253.2	231.2	216.6	358.4
Hourly productivity(mean)	2.4~32.3(20.4)	7.5~30.1(20.8)	0.5~9.3(4.2)	1.8~17.2(11.2)	40.7~159.6(113.0)
Daily productivity	142.6	124.8	20.9	67.3	678.1

Table 4. The ratio of pigments to chlorophyll *a* in the study area.

	Station	2002. 12	2003. 2	2003. 4	2003. 6	2003. 10	2003. 12	2004. 2	2004. 4	mean	min.	max.	Total mean
Fuco/Chl <i>a</i> (Diatoms)	J1	0.33	2.60	0.32	0.36	0.42	0.74	2.39	0.38	0.94	0.32	2.60	0.70
	J2	-	2.47	0.28	0.57	0.79	0.52	0.03	0.40	0.72	0.03	2.47	
	J3	0.27	0.49	0.31	0.55	0.38	0.44	0.57	0.46	0.43	0.27	0.57	
Chl <i>b</i>/Chl <i>a</i> (Chlorophytes, Euglenophytes)	J1	0.02	0.28	0.11	0.07	0.25	0.14	0.12	N.D.	0.14	N.D.	0.28	0.17
	J2	-	0.20	0.10	0.05	0.82	0.22	0.03	0.03	0.21	0.03	0.82	
	J3	0.04	0.01	0.09	0.11	0.70	N.D.	0.14	0.03	0.16	N.D.	0.70	
Perd/Chl <i>a</i> (Dinoflagellates)	J1	0.17	0.12	0.14	0.07	0.07	0.12	0.07	0.02	0.10	0.02	0.17	0.10
	J2	-	0.15	0.11	0.35	0.15	0.06	0.04	0.01	0.12	0.01	0.35	
	J3	0.05	0.07	0.05	0.24	N.D.	0.09	0.10	0.01	0.09	N.D.	0.24	
Vio/Chl <i>a</i> (Chrysophytes)	J1	0.16	0.42	0.22	0.04	0.54	0.24	0.06	0.13	0.23	0.04	0.54	0.21
	J2	-	0.31	0.05	0.21	0.54	0.30	0.03	0.04	0.21	0.03	0.54	
	J3	0.02	0.02	0.02	0.20	0.15	0.45	0.55	0.05	0.18	0.02	0.55	
Allo/Chl <i>a</i> (Cryptophytes)	J1	0.02	0.06	0.07	0.04	0.07	0.13	0.03	0.03	0.06	0.02	0.13	0.06
	J2	-	0.03	0.02	0.13	0.13	0.05	0.05	0.07	0.07	0.02	0.13	
	J3	0.01	0.06	0.01	0.15	N.D.	N.D.	0.06	0.01	0.05	N.D.	0.15	
Phytin <i>a</i>/(Chl <i>a</i>+Phytin <i>a</i>) (Grazing pressure)	J1	0.07	0.68	0.40	0.27	0.37	0.28	0.17	N.D.	0.32	N.D.	0.68	0.28
	J2	-	0.56	0.14	0.12	0.43	0.39	0.23	0.13	0.29	0.12	0.56	
	J3	0.15	0.27	0.15	0.19	N.D.	0.46	0.40	0.06	0.24	N.D.	0.46	
(Zea+Lut)/Chl <i>a</i> (Cyanobacteria)	J1	0.13	0.16	0.13	0.07	1.16	N.D.	0.30	0.24	0.31	N.D.	1.16	0.24
	J2	-	N.D.	0.03	0.13	0.99	N.D.	0.09	0.10	0.27	N.D.	0.99	
	J3	N.D.	0.03	N.D.	0.12	0.45	N.D.	N.D.	0.02	0.16	N.D.	0.45	

N.D.: not detected

-: no data

Table 5. Comparison of annual average chlorophyll *a* concentrations of microphytobenthos in each area (from Oh, 2003).

	Chlorophyll <i>a</i> (mg·m ⁻²)		References
	Range	Mean.	
Songdo tidal flat, Inchon (0.5 cm)	4.8~90.1**		Koh, 1991
Marrennes-Oleron (0.5 cm)	2~13*		Cariou-Le Gall and Blanchard, 1995
Wadden Sea (0.1 cm)	2.21~38.34*		Wolfstein <i>et al.</i> , 2000
Molenplatt (0.1 cm)	5.9~17.3*		Barranguet <i>et al.</i> , 1998
Western Schelde estuary (0.5 cm)	3.6~18.5*		de Jonge and de Jonge, 1995
Seto Inland Sea (0.5 cm)	27.7~120**	72.3**	Montani <i>et al.</i> , 2003
Falsterobo Peninsula (0.5 cm)	23~258**		Sundback, 1984
Manukau Harbour (2 cm)		97.5**	Cahoon and Safi, 2002
Onslow Bay (3 cm)		34**	Cahoon and Cooke, 1992
Mikawa Bay (1 cm)	83~149*	112.4*	Goto <i>et al.</i> , 2000
Mdloti Estuary (1 cm)	74~480***		Nozais <i>et al.</i> , 2001
Mangyung tidal flat (0.5 cm)	0.24~32.11*	6.08*	Oh, 2003
Ganghwa tidal flat (0.25 cm)	1.18~34.25*	7.60*	This study

The depth of sediment in parenthesis

*HPLC determination

**Spectrophotometric determination

***Fluorometric determination

음을 보여주는 것이다.

강화도 갯벌에서 chlorophyll *a*의 농도변화는 시기적인 차이를 보이나 주로 2월과 4월에 가장 높은 농도를 보이며 그 이후 12월 까지 지속적인 감소가 나타나 기존 연구결과인 새만금 갯벌(오 등, 2004)과 동일한 결과를 보였다. 강화도 갯벌에서는 현존량과 chlorophyll *a*의 계절적 변화양상은 대부분 유사한 경향을 보이나 추계에 다소 차이를 보인다. 이는 추계에 침강된 부유성 돌말류의 다수 출현에 의한 것으로, 노후한 세포일수록 침강속도는 증가하고(Mann and Lazier, 1996), 세포내 chlorophyll *a*함량이 감소되어 현존량과 chlorophyll *a*의 분포가 다르게 나타나기 때문이다.

강화도 갯벌에서의 HPLC분석을 통한 chlorophyll *a*의 분포는 1.18-34.25 mg m⁻²의 범위로 Wadden Sea(Wolfstein *et al.*, 2000), 새만금 조간대(오 등, 2004) 등과 유사하나, Mikawa Bay(Goto *et al.*, 2000)에서 보고된 값의 1/16에 해당된다. Mikawa Bay는 매우 부영양화된 수역으로 높은 밀도의 식물플랑크톤이 서식한다. 또한 지역적으로 반 폐쇄적인 만으로 해수의 흐름이 약하다. 따라서 수층내의 높은 밀도의 식물플랑크톤이 저층으로 침강하여 저서미세조류의 생물량에 영향을 준 것으로 사료된다. 이외에도 오(1990)

의 만경-동진강 펄 갯벌 연구결과와 같이 퇴적상이 세립해짐에 따라 저서미세조류의 서식밀도가 급격히 증가하여 저서미세조류의 현존량 분포가 높아지는 경향을 보인것과 유사한 결과일 수 있다.

갯벌에서의 조류의 유동이나 파도와 같은 수역학적 에너지로 인한 재부유로 퇴적물내의 chlorophyll *a* 함량이 영향을 받으며(De Jonge and De Jonge, 1995), 채집 깊이의 차이와 퇴적물의 유형에 따라 그 값들이 달라 그 값들을 단순히 비교하기는 어려우나 강화도 갯벌의 chlorophyll *a* 함량은 대체로 국내의 다른 갯벌과 유사한 범위의 저서미세조류 생물량을 보인다(Table 5).

강화도 갯벌의 일차 생산력은 기존에 보고된 인천의 송도 갯벌의 일차 생산력(고, 1991)보다 다소 높게 나타났다. 이는 송도 갯벌의 동화계수가 강화도 갯벌과 비슷한데 비해 강화도 갯벌의 평균 저서미세조류의 평균 생물량이 1.9배 정도 많고 빛 이용효율(0.002-0.005)이 송도 조간대(0.001-0.002)보다 높기 때문에 강화도 갯벌에서 상대적으로 높은 일차생산력이 측정된 것으로 보인다. 강화도 갯벌의 저서미세조류의 평균 일차 생산력 분포범위는 4.2-113.0 mgC m⁻² hr⁻¹로, 평균 33.9 mgC m⁻² hr⁻¹로 측정되었다. 다른 지역의 일차생산력 분포범위는 송도 갯벌(4.3-36.4 mgC m⁻²

Table 6. Primary production in various intertidal sediment.

Location	mgC·m ⁻² ·hr ⁻¹	mgC·m ⁻² ·d ⁻¹	Method	Reference
Tarty mudflat (Scotland)		9~226 (85.2)	¹⁴ C	Leach(1970)
Songdo Tidal Flat	4.3~36.4		¹⁴ C	Koh(1991)
North Inlet estuary (mudflat)	14.8~61.1(49.7)		¹⁴ C	Pinckney and Zingmark(1993)
San Antonio Bay		<1~90	¹⁴ C	Macintyre and Cullen(1996)
SW Netherlands Tidal flat (sand)	34.5±23.6		¹⁴ C	Barranguet <i>et al.</i> (1998)
(muddy sand)	41.1±11.6		¹⁴ C	
Wadden Sea (sediment)	1~120(37.0)	0.27~448.9	¹⁴ C	Colijn and De Jonge(1984) Wolfstein <i>et al.</i> (2000)
Mikawa Bay	(13.9±6.4)		¹⁴ C	Goto <i>et al.</i> (2000)
Ganghwa Tidal Flat	4.2~113.0	20.9~678.1 (206.7)	¹⁴ C	present study

() : mean value

hr^{-1}), North Inlet estuary($14.8\text{--}61.1 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$), SW Netherlands (sand: 평균 $34.5 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, muddy sand: 평균 $41.1 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$), Wadden Sea($1\text{--}120 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$), Mikawa Bay(평균 $13.9 \text{ mgC m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)로 나타나 강화도 갯벌의 일차생산력과 비슷하거나 다소 낮은 값을 보였다(Table 6).

이 연구를 통해 강화도 필 갯벌의 시·공간적 저서미세조류 분포와 일차생산의 변화를 확인할 수 있었으나, 저서미세조류의 분포와 일차생산에 영향을 미치는 다양한 물리, 화학적 환경 요인과의 정량적 관련성에 대한 연구와 저서미세조류의 공간적 분포의 변이성에 대한 추가적인 연구가 앞으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 해양수산부의 수산특정 연구 개발사업(20010021)의 연구지원으로 이루어졌음을 밝힙니다. 본 연구를 위해 많은 도움을 주신 양은진박사, 송태윤씨, 조혜연양과 이연씨기술연구소의 배려에 감사의 마음을 전하고, 본 논문을 세밀하게 심사해주신 두분의 심사위원께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김준호, 조경제, 1985. 금강 하구 조간대 저토의 물리화학적 특성, 저생규조의 종 조성 및 생물량. 한국생태학회지, **8**: 21-29.
- 고철환, 1991. 한국 서해 필 갯벌에서의 미세조류에 의한 제1차 생산 및 생물량, KOSEF 891-0505-015-2.
- 수로국, 1981. 영종도에서 용매도 해도 No. 311.
- 심재형, 조병철, 1984. 인천 부근 조간대의 저생규조류 군집. 서울대학교 자연과학대학 논문집, **9**: 135-150.
- 이용우, 2001. HPLC를 이용한 곰소만 퇴적물 중의 저서미세조류의 색소 연구. 부경대학교 석사학위 논문, 69pp.
- 오상희, 1990. 서해 만경동진 필 조간대의 환경과 저서규조류 군집. 서울대학교 석사학위 논문, 99pp.
- 오승진, 2003. 한국 서해 새만금 갯벌에서 저서미세조류의 생체량과 군집조성에 대한 HPLC 분석. 부경대학교 석사학위 논문. 76pp.
- 오승진, 문창호, 박미옥, 2004. 한국 서해 새만금 갯벌에서 저서미세조류의 생체량과 군집조성에 대한 HPLC 분석. 한국수산학회. **37**(3): 215-225.
- 유만호, 2004. 강화도 장화리 필 갯벌에서 저서 미세조류의 계절적 분포 및 일차생산력. 인하대학교 석사학위 논문. 82pp.
- 최휴창, 2002. 강화 필 조간대에서의 저서성 미세조류 연구. 인하대학교 석사학위 논문. 67pp.
- 해양수산부, 1998. 우리나라의 갯벌. pp.3-7.
- Admiraal, W., H. Peletier, and H. Zomer, 1982. Observations and experiments on population dynamics of epipellic diatoms from and estuarine mudflat. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* **14**: 417-487.
- Anderson, R.A., R.R. Bidigare, M.D. Keller and M. Latasa, 1996. A comparison of HPLC pigment signatures and electron microscopic observations for oligotrophic waters of the North Atlantic and Pacific Oceans. *Deep-Sea Res.*, **43**: 517-537.
- 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.
- Bidigare, R.M., 1991. Analysis of algal chlorophylls and carotenoides. In *Geophysical Monography*, **63**: 119-123.
- Buffan-Dubau, E. and L.R. Carman, 2000. Extraction of benthic microalgal pigments for HPLC analysis. *Marine Ecol. Prog. Ser.*, **204**: 293-297.
- Cahoon, L.B. and J.E. Cooke, 1992. Benthic microalgal production in Onslow Bay, North Carolina, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **84**: 185-196.
- Cahoon, L.B. and K.A. Safi, 2002. Distribution and biomass of benthic microalgae in Manukau Harbour, New Zealand. *J. Mar. Fresh. Res.*(in New Zealand). **36**: 257-266.
- Cariou-Le Gall, V. and G.F. Blanchard, 1995. Monthly HPLC measurements of pigment concentration from an intertidal muddy sediment of Marrennes-Oléron Bay, France. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **121**: 171-179.
- Colijn, F. and K.S. Dijkema, 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.
- Colijn, F. and V.N. De Jonge, 1984. Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **14**: 185-196.
- Davies, B.H., 1976. Carotenoids, In: *Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments*, edited by T.W. Goodwin Academic Press, N.Y. 538pp.
- De Jonge, V.N. and V.N. De Jonge, 1995. Dynamics and distribution of microphytobenthic chlorophyll a in the Western Schelde estuary(SW Netherlands). *Hydrobiol.* **311**: 21-30.
- Goto, N., O. Mitamura and H. Terai, 2000. Seasonal variation in primary production of microphytobenthos at the Isshiki intertidal flat in Mikawa Bay. *Limnol. Japanese*, **1**: 133-138.
- Jeffrey, S.W., 1972. Preparation and some properties of crystalline chlorophyll c₁ and c₂ from marine algae. *Bioch. Bio. Acta.*, **279**: 15-33.
- Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura and S.W. Wright, 1997. *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods.* UNESCO Publishing, 661pp.
- KORDI, 1998. Tidal flat studies for conservation and sustainable use(II). BSPI 980701-00-1053-3, Korean Ocean Research and Development Institute, 599 pp (in Korean).
- Latasa, M., R.R. Bidigare, M.E. Ondrusek and M.C. Kennicutt II, 1996. HPLC analysis of algal pigments: A comparison exercise and among laboratories and recommendations for improved analytical performance. *Mar. Chem.*, **51**: 315-324.
- Leach, J.H., 1970. Epibenthic algal production in an intertidal mud flat. *Limnol. Oceanogr.* **147**: 514-521.
- Lorenzen, C.J. and J.N. Downs, 1986. The specific absorption acetone, and comments on the fluorometric determination of chlorophyll and phaeopigments. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 449-452.
- MacIntyre, H.L., R.J. Geider and D.C. 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.
- Mann, K.H. and J.R.N. Lazier, 1996. Dynamics of marine ecosys-

- tems. Blackwell Science Publishing, 394pp.
- Montani, S., P. Magni and N. Abe, 2003. Seasonal and inter-annual patterns of intertidal microphytobenthos in combination with laboratory and areal production estimates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **249**: 79–91.
- Nozais, C., R. Perissinotto and S. Mundree, 2001. Annual cycle of microalgal biomass in a South African temporarily-open estuary: nutrient versus light limitation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **223**: 39–48.
- 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.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173pp.
- Pinckney, J. and R. Zingmark, 1993. Biomass and production of benthic microalgal communities in five typical estuarine habitats. *Estuaries*, **16**: 887–897.
- Pinckey, J., R. Papa and R. Zingmark, 1994. Comparison of high performance liquid chromatographic, spectrophotometric and fluorometric methods for determining chlorophyll *a* concentrations in estuarine sediments. *J. Microbiol. Methods*, **19**: 59–66.
- Plante-Cunney, M.R., C. Barranguet, D. Bonin and C. Grenz, 1993. Does chlorophyllide *a* reduce reliability of chlorophyll *a* measurements in marine coastal sediments? *Aquat. Sci.*, **55**: 19–30.
- Platt, T., C.L. Gallegos and W.B. Harrison, 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.* **38**: 687–701.
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling, 1986. Numerical recipes. Cambridge Univ. Press. 818pp.
- Riaux-Gobin, C., C.A. Llewellyn and B. Klein, 1987. Microphytobenthos from two subtidal sediments from North Brittany. II. Variations of pigment compositions and concentrations determined by HPLC and conventional techniques. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **40**: 275–283.
- Rizzo, W.M., 1990. Nutrient exchanges between the water column and a subtidal benthic microalgal community. *Estuaries* **13**: 219–226.
- Shyu, J.P. and M.P. Chen, 1984. Diatoms in the late Pleistocene sediments of southern Okinawa trough. *Acta Ocean. Taiwanica*, **15**: 71–129.
- Sullivan, M. and C. Moncreiff, 1988. Primary production of euphotic algal communities in a Mississippi salt marsh. *J. phycol.* **24**: 49–58.
- Sullivan, M.J., 1975. Diatom communities from a Delaware salt marsh. *J. Phycol.* **11**: 382–390.
- Sullivan, M.J., 1978. Diatom community structure: Taxonomic and statistical analysis of a Mississippi Salt Marsh. *J. Phycol.*, **14**: 468–475.
- Sundbäck, L., 1984. Distribution of microbenthic chlorophyll *a* and diatom species related to sediment characteristics. *OPHELIA*, **3**: 229–246.
- Vesk, M. and S.W. Jeffrey, 1997. Effect of blue-green light on photosynthetic pigments and chloroplast structure in unicellular marine algae from six classes. *J. Phycol.*, **13**: 280–288.
- Warwick, R.M. and R. Price, 1975. Macrofauna production in an estuarine mud-flat. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **55**: 1–18.
- Wolfstein, K. and P. Hartig, 1998. The photosynthetic light dispensation system: application to microphytobenthic primary production measurements. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **166**: 63–71.
- Wolfstein, K., F. Colijn and R. Doerffer, 2000. Seasonal dynamics of microphytobenthos biomass and photosynthetic characteristics in the Northern German Wadden Sea, obtained by the photosynthetic light dispensation system. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* **51**: 651–662.
- Woo, H.J. and J.G. Je, 2002. Changes of sedimentary environments in the southern tidal flat of Kanghwa Island. *Ocean and Polar Research* **24**: 331–343.
- Wright, S.W., S.W. Jeffrey, R.F.C. Mantoura, C.A. Llewellyn, T. Bjornland, D. Repeta and N. Welschmeyer, 1991. Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **77**: 183–196.

2004년 10월 27일 원고접수

2005년 1월 19일 수정본 채택

담당편집위원: 조병철