

## 강화도 펄 갯벌에서 저서성 원생동물 분포의 시간적 변이와 박테리아 및 미세 조류에 대한 포식압

양은진 · 최중기\* · 유만호 · 조병철<sup>1</sup> · 최동한<sup>1</sup>

인하대학교 해양학과  
<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

### Temporal Variation in the Distributions of the Benthic Heterotrophic Protozoa and Their Grazing Impacts on Benthic Bacteria and Microalgae in the Ganghwa Tidal Flat, Korea

EUN JIN YANG, JOONG KI CHOI\*, MAN HO YOO, BYUNG CHEOL CHO<sup>1</sup>, DONG HAN CHOI<sup>1</sup>

Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea  
<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

강화도 장화리의 펄 갯벌에 서식하는 저서 원생동물 군집의 계절 분포 및 섭식률을 파악하기 위하여 2002년 4월부터 2004년 4월까지 총 3개의 정점을 선정하여 2-3개월 간격으로 조사를 수행하였다. 저서 원생동물의 현존량과 생물량은 섬모충류와 중속영양 편모류에 의해 98% 이상 우점하여 나타났으며, 그 외 중속영양 와편모류와 아메바 그룹이 일부 시기에 관찰되었으나 중요하지 않은 그룹으로 나타났다. 중속영양 편모류의 현존량과 탄소량은 각각  $0.2-5.9 \times 10^5$  cells  $\text{cm}^{-3}$ 와  $0.02-9.2 \mu\text{gC cm}^{-3}$ 로 분포하였으며, 생물량은 춘계와 추계에 비교적 높은 분포를 보였다. 중속영양 편모류는 표층 2.5 mm 이내에서 다른 층에 비해 높은 분포를 보였으며, 중속영양 편모류의 수평적 분포는 정점별로 차이가 없는 것으로 나타났다. 중속영양 편모류는  $10 \mu\text{m}$  이하의 크기에 의하여 주로 우점하여 나타났으나, 2월과 4월 사이에  $20 \mu\text{m}$  이상의 중속영양 유글레나가 높게 출현하였다. 섬모충류의 현존량과 생물량은 각각  $0.1-17.8 \times 10^3$  cells  $\text{cm}^{-3}$ 와  $0.02-9.1 \mu\text{gC cm}^{-3}$  범위로 분포하였으며 춘계와 추계에 높은 분포를 보였다. 섬모충류 그룹은 주로 하모류에 의해 우점 하였으며, 계절별로 두드러진 우점 종들은 관찰되지 않았다. 섬모충류의 수직적 분포는 표층 2.5 mm 이내에서 높은 분포를 보였으며, 정점별 분포는 조간대 상부 정점에 비해 조간대 하부 정점에서 높은 분포를 보였다. 섬모충류의 시-공간적 분포는 저서 미세조류의 생물량 분포와 유사한 양상을 보였다. 조사기간 동안 저서 원생동물 그룹의 탄소량은 섬모충류에 의해 평균 66%의 높은 우점률을 보였으며, 저서 원생동물의 계절 변동은 저서 미세조류의 변동과 유사한 양상을 보였다. 본 연구에서 저서 원생동물의 섭식률을 측정된 결과 박테리아 생산력과 저서 미세조류 생산력의 각각 13.4-40.7%와 20.1-36.4%를 제거하였으며, 박테리아에 대한 섭식률은 섬모충류에 비해 중속영양 편모류에 의해 더 높은 것으로 나타났다. 박테리아와 돌말류에 대한 저서 원생동물의 섭식률은 춘계에 가장 높았으며 저서 미세생물 먹이망에서 저서 원생동물은 미세생물 군집의 생물량이 높은 춘계에 박테리아와 돌말류의 포식자로서 중요한 역할을 하고 있음을 시사하였다.

To investigate the seasonal distribution and grazing impacts of benthic protozoa in mud flat, their abundance, biomass and grazing rates of benthic protozoa were evaluated at interval of two or three month in Ganghwa Island from April, 2002 to April, 2004. Heterotrophic flagellates and ciliates accounted for an average 98% of benthic protozoa biomass. Abundance and carbon biomass of heterotrophic flagellates ranged from  $0.2 \times 10^5$  to  $5.9 \times 10^5$  cells  $\text{cm}^{-3}$  and from  $0.02$  to  $9.2 \mu\text{gC cm}^{-3}$ , respectively. Biomass of heterotrophic flagellates was high in spring and fall, and showed no differences among stations. Abundance and biomass of heterotrophic flagellates decreased with the depth and were high within the surface 2.5 mm sediment layer. The majority of heterotrophic flagellates were less than  $10 \mu\text{m}$  in length, and few euglenoid flagellates were larger than  $20 \mu\text{m}$ . Abundance and carbon biomass of ciliates ranged from  $0.1 \times 10^3$  to  $17.8 \times 10^3$  cells  $\text{cm}^{-3}$  and from  $0.02$  to  $9.1 \mu\text{gC cm}^{-3}$ , respectively, and those of ciliates were high in spring and fall. Biomass of ciliates was high within the surface 2.5 mm sediment layer and was higher at st. J2 and st. J3 than st. J1. Among the revealed benthic ciliates, the hypotrichs were the most important group in terms of abundance and biomass. During the sampling

\*Corresponding author: jkchoi@inha.ac.kr

periods, an average 66% of benthic protozoa biomass was covered by ciliates. The seasonal distribution of benthic protozoa showed an almost similar fluctuation pattern to that of chlorophyll-a. The results suggest that the biomass of benthic protozoa were mainly controlled by prey abundance, for example, diatoms. Based on ingestion rates, benthic protozoa removed from 13.4 to 40.7% of bacterial production and from 20.1 to 36.4% of primary production. Ingestion rates of benthic protozoa on bacteria and microphytobenthos were high in April. Benthic protozoa in this study area may play a pivotal role in the carbon flow of the benthic microbial food web during spring.

**Keywords:** Benthic protozoa, heterotrophic flagellates, ciliates, Population ingestion rates, Microbial community, Gangwha tidal flat

## 서 론

저서 생태계에서 유기물 입자의 중요성이 인식되면서부터 유기물 입자에 기반한 먹이사슬에 대한 연구의 필요성이 강조되어 왔으나, 저서 생태계에서의 물질 순환과 전달을 이해하는데 있어서 필수적인 저서 미세생물의 생태에 대한 연구는 극히 적다(Epstein, 1997a, 1997b). 일차 생산력과 외부로부터 유입되는 높은 유기물 순환은 소형, 중형, 대형 저서동물 군집으로 구성되어 있는 복잡한 먹이망에 기본을 두고 있다. 중형과 대형 저서생물에 대해서는 많은 연구가 있었으나 조간대 지역에서 소형 원생동물에 대하여는 많은 연구가 이루어지지 않았다. 표영 생태계에서 원생동물은 작은 크기와 상대적으로 빠른 신진대사 활동으로 인해 생태계의 에너지 흐름을 촉진 시키며, 미세생물 먹이망과 중형 동물플랑크톤 먹이망을 연결하는 에너지 전달과 유기물 순환에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 왔다(Sieburth, 1978; Azam *et al.*, 1983; Sheldon *et al.*, 1986; Sherr and Sherr, 1994). 그러나 저서 생태계에서는 복잡한 환경과 저서 원생동물의 생물량 측정 방법상의 어려움으로 인하여 저서 원생동물의 생물량 분포와 섭식률에 관한 연구가 적었다(Finlay *et al.*, 1979; Bak and Nieuwland, 1989; Epstein and Shiaris, 1992.; Epstein and Rossel, 1995; Epstein, 1997a,b; Dietrich and Arndt, 2000; Lee and Patterson, 2002a; Hamels *et al.*, 2004). 이러한 연구의 대부분이 시료처리가 다소 용이한 사질 또는 사니질에서 수행되었고, 이러한 연구를 통해 저서 원생동물의 중요성이 높게 평가되었음에도 불구하고 저서 생태계의 펄 갯벌에서 원생동물의 종조성과 생물량에 관한 연구는 많지 않은 편이다.

우리나라 조간대에서의 생태 연구는 주로 중-대형 저서 생물의 개체군 및 군집, 분포 등에 집중되어 왔기 때문에 저서 미세생물 군집에 대한 연구는 소수의 연구자들에 의해 수행되었다(고, 1991; 오, 1990; 노와 최, 1998; 최, 2002; 오 등, 2004; 유, 2004). 그러나 이들의 연구는 주로 저서 미세조류의 분포와 일차생산력, 그리고 HPLC를 이용한 색소분석에 대한 연구에 국한되어 수행되었으며, 저서 생태계에서 유기물 순환을 이해하기 위한 원생동물에 대한 연구는 없었다. 강화도 펄 갯벌에서 생태 연구는 대형 저서동물의 군집분포, 중형 동물의 분포, 저서 미세조류의 분포와 색소 분석 등이 수행되었다(김, 2000; Kim *et al.*, 2000; 최, 2002; 유, 2004).

강화도 남부 갯벌은 서해로 유입되는 한강의 지류와 본류의 영향을 동시에 받으며, 염하수로와 석모수로부터 유입되는 담수와

조석에 의한 해수의 혼합으로 기수역의 특성을 보이며, 모래, 펄, 혼합갯벌 등의 다양한 종류의 갯벌이 존재한다(Woo and Je, 2002). 이러한 갯벌들은 서로 다른 수리적, 화학적, 퇴적학적 요인들이 서로 다르게 작용하므로 생물들에게 다양한 서식처를 제공하고 있다. 강화도 남부 갯벌은 노출시간이 동막리에서 3-5시간, 여차리 지역에서는 7시간에 이르는 대형 하구형 갯벌로 일반적인 펄 퇴적물이 우세하고, 만조선에서 간조선으로 표층 퇴적물의 입도가 조립해지는 경향을 보이며, 계절에 따라 퇴적과 침식이 반복되는 상향 조립화 층서를 보인다(Woo and Je, 2002).

본 연구는 강화도 조간대 펄 갯벌에서 저서 원생동물의 시-공간적 분포와 계절 변화에 대하여 조사하였다. 또한 저서 미세조류의 생물량 분포, 박테리아와 저서 미세조류에 대한 저서 원생동물의 섭식률을 통해 강화도 갯벌에서 저서 원생동물의 역할에 관하여 논의하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 조사 수역 및 조사 시기

본 조사는 2002년 4월, 6월, 9월, 12월, 2003년 2월, 4월, 6월, 7월, 10월, 12월과 2004년 3월, 4월에 강화도 장하리 갯벌에서 세 정점을 선정하여 수행하였다. 각 조사지선당 거리는 갯벌이 시작되는 곳으로부터 썰물시 물이 빠지는 지점까지 하였으며, 갯벌이 시작되는 상부 100 m 지점을 정점 J1, 중부 500 m 지점을 정점 J2, 하부 1 km 지점을 정점 J3으로 선정하였다(Fig. 1).

### 온도 및 염분

표층 퇴적물의 온도는 온도계를 이용하여 퇴적물 상부 표층 5 mm 깊이에서 측정하였으며, 염분은 염분계(YSI Inco.)로 각 정점의 조수 웅덩이에서 측정하였다.

### 염록소-a 측정과 저서 미세조류의 탄소량 측정

염록소-a 분석은 직경 28 mm의 코어를 이용하여 세 정점에서 표층 1 cm 깊이까지 각 정점당 2개의 코어를 채집한 후 2.5 mm 간격으로 각 4개의 깊이로 절단하였다. 각각의 시료를 50 ml conical tube에 담아 드라이 아이스에 보관하였으며, 실험실로 옮긴 후 분석전까지 -70°C에서 보관하였다. 퇴적물 시료(1.65 cm<sup>3</sup>)에 10 ml acetone(100%)과 1 ml 내부 표준물질(8'-apo-β-carotenol, Fluka)의 혼합액을 섞은 후 sonicator를 이용하여 30초 동안 처리하고 하루 동안 암 냉장상태에서 보관하였다(Buffan-Dubau and Carman,

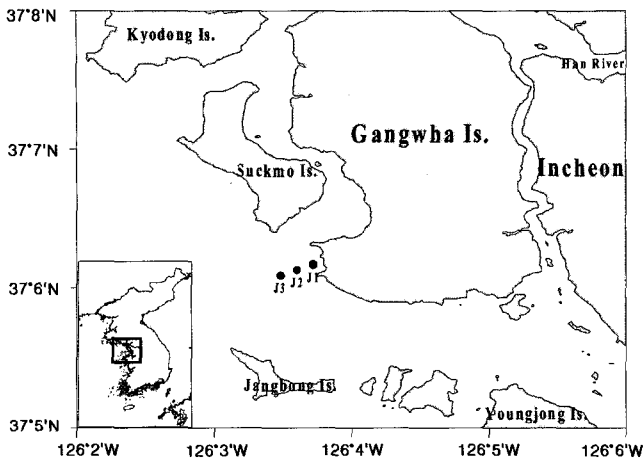


Fig. 1. A map showing sampling stations.

2000). 추출은 퇴적물과 추출액을 분리하기 위해 원심분리기를 이용 2,500rpm에서 15분간 처리하고 상등액을 막 여과지(0.45 μm pore size)로 여과한후 HPLC를 이용하여 색소를 분석하였으며, 엽록소-a 농도값을 산출하였다(유, 2004). 식물플랑크톤 탄소량 측정 은 C/Chl-a 전환상수인 40을 사용하였다(De Jonge and Colijn, 1994).

**저서 원생동물의 현존량 및 탄소량 분석**

직경 28 mm의 코어를 이용하여 세 정점에서 표층 1 cm 깊이까지 각 정점당 1 m<sup>2</sup> 내에서 4개의 코어를 채집한 후 2.5 mm 간격으로 각 4개의 깊이로 절단하였다. 각 시료(1.65 cm<sup>3</sup>)를 50 ml tube에 넣고 2개의 코어시료는 글루타알데하이드로 최종농도 1%로 고정된 후 냉동 보관하였으며, 나머지 2개의 코어시료는 생시료 상태로 보관하였다. 현장에서 채수한 해수를 필터하고 멸균한 후 고정된 시료와 생시료에 50 ml 씩 각각 넣어준 후 분석하였다. 갯벌로부터 종속영양 편모류를 추출하기 위해 글루타알데하이드로 고정된 시료를 Sonicator로 80초 동안 분쇄하였다(Lee and Patterson, 2002b). 계절과 정점에 따라 전체 시료에서 0.5-1%의 시료를 취하여 0.8 μm nuclepore polycarbonate black filter로 여과하여 DAPI(최종농도 5 ug m<sup>-1</sup>)로 염색한후 형광 현미경(Nikon type 104)을 사용하여 독립영양 편모류와 종속영양 편모류를 구분하여 측정하였다. 즉, UV filter 아래에서 미소 편모류를 인식하였으며, 독립영양 편모류와 종속영양 편모류의 구분은 B filter에서 붉은 빛을 발하는 엽록소의 유무로 결정하였다. 종속영양 편모류의 탄소량은 체적을 구한 후 Børsheim and Bratbak(1987)의 전환값인 220 fgC μm<sup>-3</sup>을 이용하여 환산하였다. 섬모충류와 그 외의 원생동물 분석은 멸균 해수로 희석된 생시료에서 계절과 정점에 따라 전체 시료의 1-3%를 취하여 S-R chamber에서 위상차 Olympus 현미경으로 관찰하였다(Gasol, 1993; Finlay et al., 1996). 살아 있는 상태에서 저서 섬모충류의 탄소량 전환값은 현미경하에서 각 세포 크기를 측정된 후 세포 용적을 Edler(1979)의 방법에 따라 구하였으며, 탄소량 전환값인 0.132 pgC μm<sup>-3</sup>(Turley et al., 1986)을 사용하여 환산하였다. 현존량 값은 각 2개의 코어시료에서 측정된 값을 평균하여 산출하였다.

**박테리아와 저서 미세조류에 대한 저서 원생동물의 섭식률 측정**

2003년 10월, 12월, 2004년 3월, 4월에 정점 J2의 표층 2.5 mm에서 퇴적물을 채취하여 형광표지 박테리아(FLB: Fluorescently labeled bacteria)와 형광표지 돌말류(FLD: Fluorescently labeled diatom)에 대한 원생동물의 섭식을 실험을 수행하였다. 형광표지 박테리아는 인천연안 해수를 이용하여 Sherr et al.(1987)의 방법에 따라 제작하였으며, 형광표지 돌말류는 강화도 퇴적물에서 채집하여 배양된 *Navicula* sp.(15×10 μm)를 이용하여 제작하였다. 퇴적물내에 포함되어 있는 박테리아와 돌말류 농도의 약 30-50%의 형광표지 박테리아와 형광 표지 돌말류를 각각 주입한 후 1시간 동안 매 10분 간격으로 시료를 채집하였으며, 시료의 고정은 Sherr et al.(1987)의 방법을 따랐다. 고정된 시료는 DAPI(최종농도 5 μg ml<sup>-1</sup>)로 염색하였다. 염색한 시료는 Nikon 형광현미경을 이용하여 B filter 하에서 원생동물의 내부에 섭식된 형광표지 박테리아와 형광표지 돌말류를 각각 계수 하였다. 저서 원생동물의 개체군 섭식률은 다음과 같은 방법으로 계산하였다. 시간에 따른 저서 원생동물 한 마리당 섭식한 평균 형광표지 박테리아와 형광표지 돌말류 농도의 증가를 도식화하여 회귀직선(linear regression)식을 구한 후 초기 기율기로 저서 원생동물의 개체별 섭식률을 산출하였으며(FLB or FLD, predator<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), 개체군 섭식률은 개체별 섭식률에 저서 원생동물의 현존량과 탄소량을 곱하여 산출하였다(Sherr et al., 1987).

**결 과**

**퇴적물 온도와 염분 분포**

퇴적물에서 측정된 온도는 세 정점에서 평균 0.3-32.0°C의 분포를 보였으며, 6월과 7월에 가장 높고, 3월에 가장 낮은 온도를 보였다(Fig. 2). 염분의 분포는 21.3-31.3 psu의 분포를 보였으며, 계절적으로 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

**저서원생동물의 수평·수직적 분포**

**종속영양 편모류:** 종속영양 편모류의 현존량과 탄소량은 0.2-5.9 × 10<sup>5</sup> cells cm<sup>-3</sup>와 0.02-9.2 μgC cm<sup>-3</sup>로 각각 나타났다(Fig. 3). 계절별 종속영양 편모류의 현존량 분포는 춘계, 하계, 추계에 높은 생물량 분포를 보였고, 동계에 비교적 낮게 나타났으나 탄소량은 춘계와 추계에 높게 나타났으며, 특히 2004년 3월과 4월에 가장 높은 탄소량을 보였다. 깊이별 종속영양 편모류의 현존량은 일부 시기를 제외하고는 대부분 상층 2.5 mm에서 가장 높게 나타났고, 정점간 종속영양 편모류의 현존량은 큰 차이를 나타내지 않았으나, 정점 J1에서 년 평균 1.32×10<sup>5</sup> cells cm<sup>-3</sup>의 값을 보여 다른 정점에 비하여 다소 높게 나타났다. 조사기간 동안 종속영양 편모류의 분포는 깊이별로 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 정점간의 차이는 없는 것으로 나타났다(Table 1). 종속영양 편모류는 10 μm 이하크기의 생물에 의해 높은 현존량 분포를 보였으며, 20 μm 이상의 종속영양 유글레나 종이 출현한 2월과 4월의 일부시기를 제외하고는 10 μm 이하의 크기의 생물에 의해 높게 분포하였다.

**섬모충류:** 섬모충류의 현존량과 탄소량은 0.1-17.8×10<sup>3</sup> cells cm<sup>-3</sup>와 0.02-9.1 μgC cm<sup>-3</sup>로 각각 나타났으며 춘계와 추계에 비교적 높은 분포를 보였으며, 종속영양 편모류의 탄소량 분포와 유사한

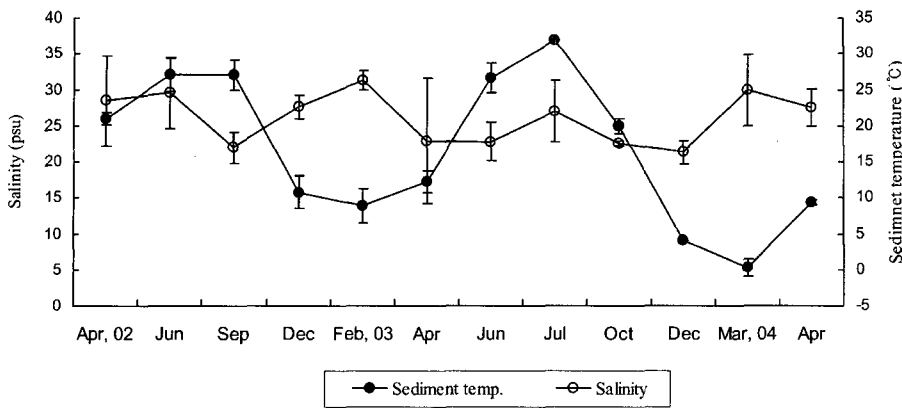


Fig. 2. Seasonal variations in the salinity and sediment temperature in the study area.

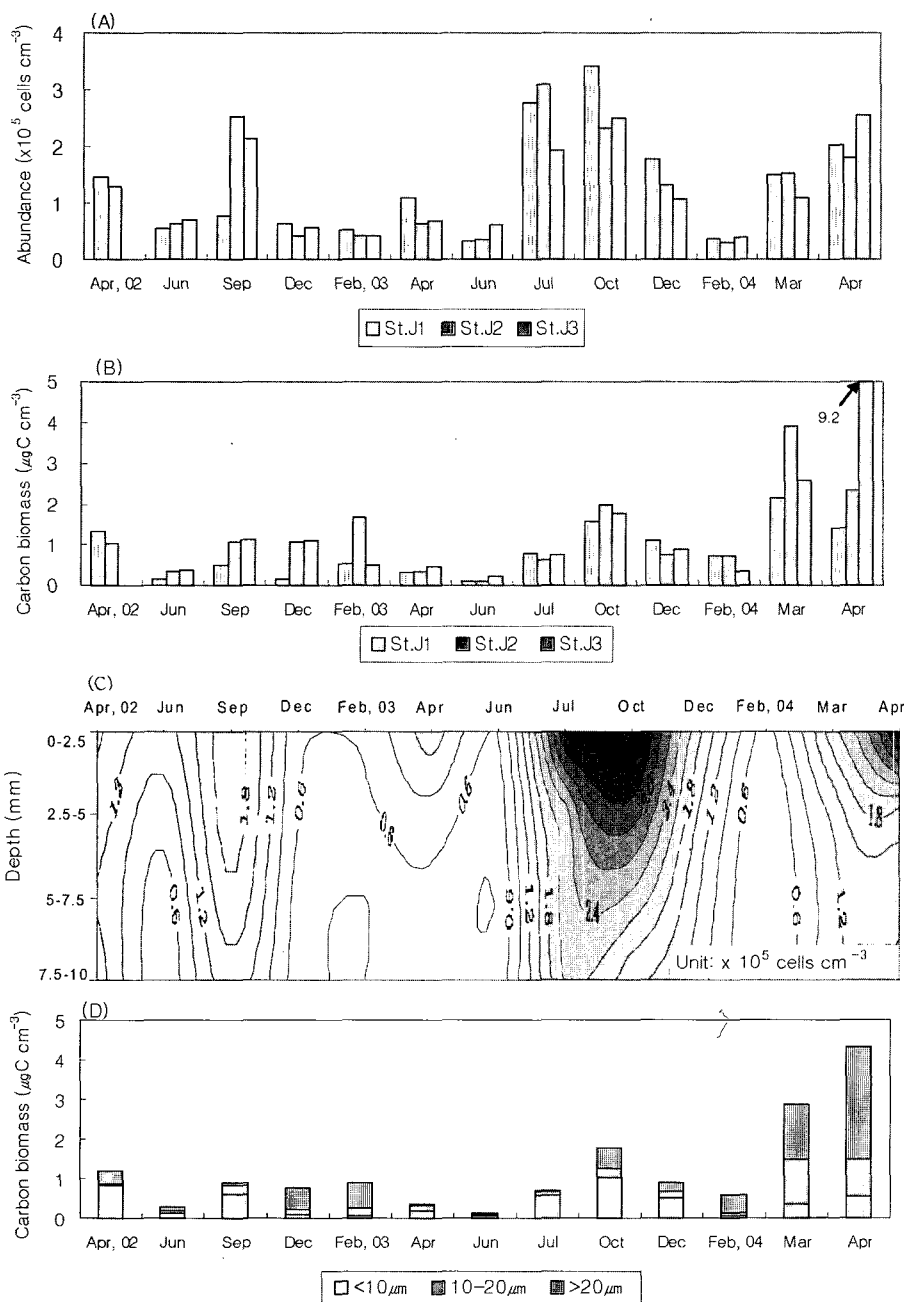
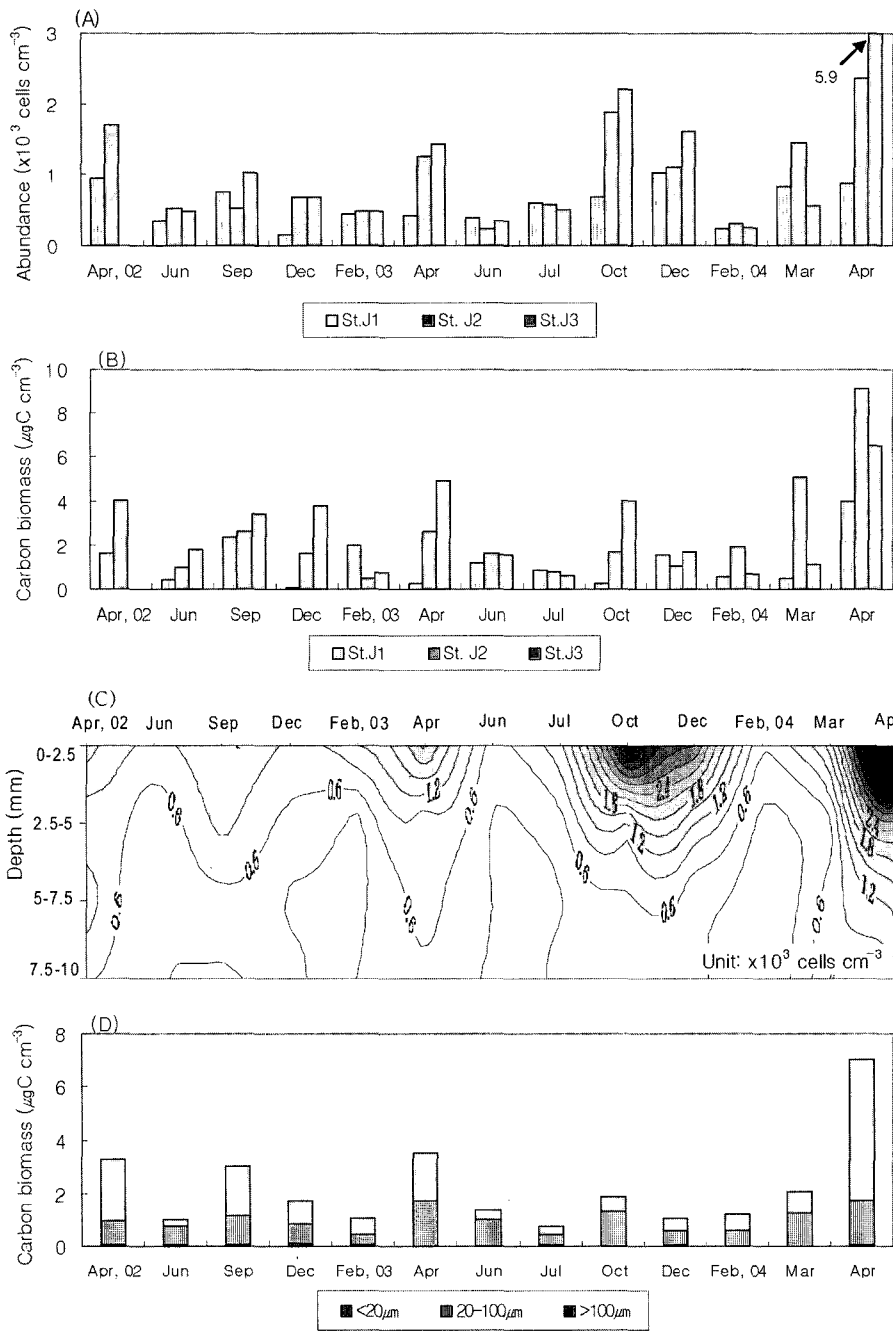


Fig. 3. Seasonal distributions of heterotrophic flagellates (A) abundance and (B) biomass in each station, (C) abundance in each depth interval and (D) biomass in each size fraction.



**Fig. 4.** Seasonal distributions of ciliates (A) abundance and (B) biomass in each station, (C) abundance in each depth interval and (D) biomass in each size fraction.

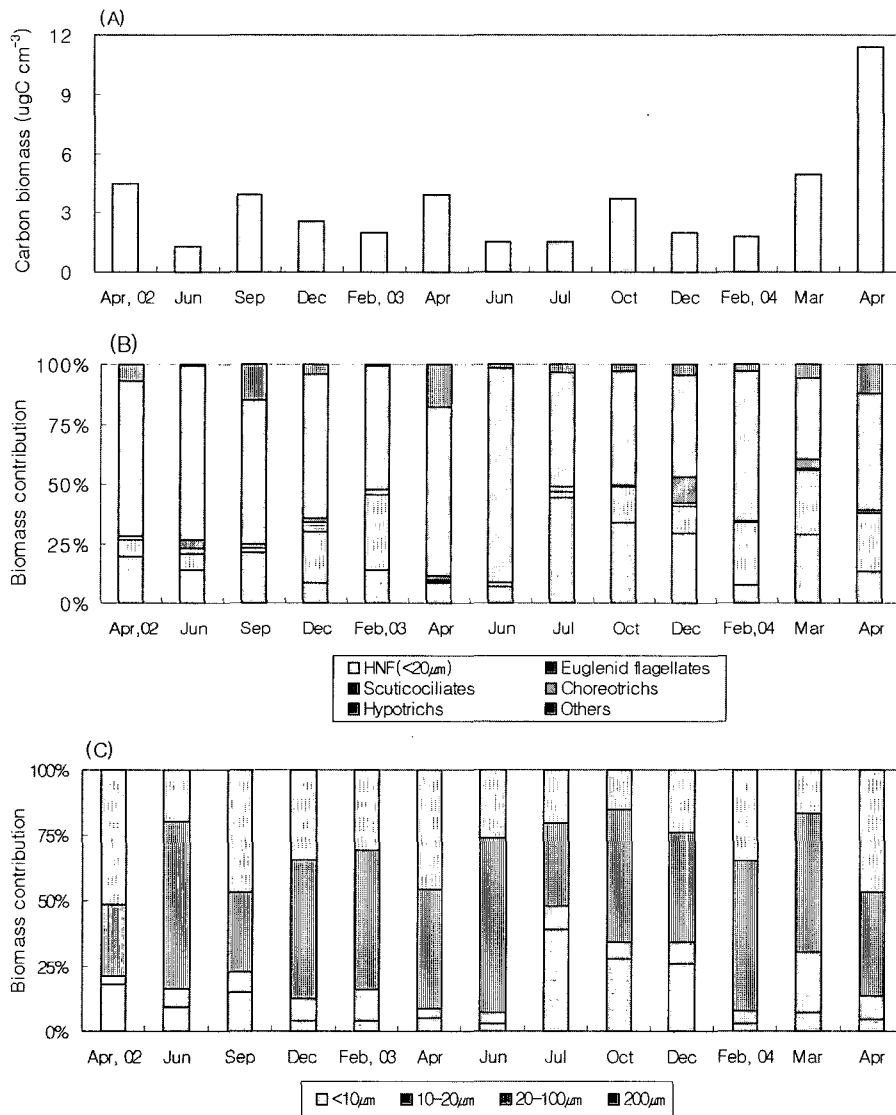
경향을 보였다(Fig. 4). 깊이별 섬모충류의 현존량은 상층 2.5 mm 내에서 높게 분포하였으며, 현존량의 평균 60-80% 이상이 상층 2.5 mm 내에서 분포하였다. 정점별 섬모충류의 현존량은 갯벌이 시작되는 조간대 상부 정점에 비해 조간대 하부인 정점 J3에서 비교적 높은 현존량 분포를 보였다. 조사수역에서 저서 섬모충류의 생물량 분포는 깊이별, 정점별로 차이를 보이는 것으로 나타났다 (Table 1). 섬모충류의 크기별 군집 구조는 20-100 µm 크기의 섬모충류에 의해 높은 현존량 분포를 보였으며, 구조류가 높게 분포한 층계에 100µm 이상의 섬모충류에 의해 높은 탄소량 값을 보였다. 본 조사수역에서 섬모충류 군집은 저서성 섬모충류인 *Aspidisca*, *Diophrys*, *Euplotes*, *Holosticha*, *Gastrostyla*, *Stichotricha*, *Trachelostyla*,

*Uronychia*속 등의 하모류 군집(Hypotrichs)이 우점하여 나타났으며, 그 외 20 µm 이하의 크기인 *Cohnilembus*, *Cyclidium*, *Pleuronema*, *Uronema* 등의 체적 섬모충류와 Haptorida 군집인 *Chenea*, *Lacrymaria*, *Loxophyllum* 그리고 Choreotrichs에 속하는 *Strombidium*과 *Tintinnopsis* 등도 일부 시기에 출현하였다.

**저서 원생동물 군집의 분포:** 조사기간 동안 원생동물의 총 탄소량은 월평균 1.30-11.30 µgC cm<sup>-3</sup>으로 분포하였으며, 평균 3.45 µgC cm<sup>-3</sup>으로 나타났다. 계절별 탄소량은 춘계와 추계에 가장 높게 나타났으며, 하계와 동계에 비교적 낮은 값을 보였다(Fig. 5). 저서 원생동물 생물량의 크기별 군집은 주로 20 µm 이상의 원생동물로 구성되었으며, 총 원생동물 탄소량의 평균 75% 이

**Table 1.** Two-way analysis of variance for heterotrophic flagellates and ciliates. Data were untransformed.

Source	DF	SS	MS	F-ratio	P-value
<b>Heterotrophic flagellates</b>					
Depth(D)	3	1.81E+13	6.03E+12	5.48	0.001
Station(S)	2	1.42E+11	7.14E+10	0.06	0.937
D×S	6	1.27E+12	2.12E+11	0.19	0.978
<b>Ciliates</b>					
Depth(D)	3	1.70E+08	5.68E+07	20.5	0.0001
Station(S)	2	3.27E+07	1.63E+07	5.9	0.003
D×S	6	5.36E+07	8.90E+06	3.2	0.004



**Fig. 5.** Seasonal distributions of benthic protozoa carbon biomass and community structure in the study area. (A) carbon biomass of benthic protozoa; (B) percent of benthic protozoa community structure; (C) percent of size-fractionated benthic protozoa. HNF: heterotrophic nano flagellates.

상을 차지하였다. 그러나 돌말류의 분포가 높은 춘계와 추계에는 100 µm 이상의 섬모충류에 의해 40-50% 이상을 차지 하였다. 또한 저서 원생동물 그룹별 생물량 분포는 중속영양 편모류에 비해 섬모충류가 총 생물량의 45-90%를 차지하였으며, 평균 66%를 차지하였다. 중속영양 편모류는 일부 시기에 출현한 유글레나류에 의한 높은 분포를 제외하고는 대부분 미소형 중속영양 편모류에 의해 더 높은 분포를 보였고, 섬모충류는 2004년 3

월을 제외하고는 대부분 하모류가 평균 50% 이상을 차지하는 것으로 나타났다.

**미세생물 군집의 탄소량**

조사기간 동안 박테리아, 저서 미세조류, 원생동물을 포함한 미세생물 군집의 탄소량은 165-776 µgC cm<sup>-3</sup>로 나타났으며, 2004년 4월에 가장 높은 값을 보였다(Table 2). 그중 원생동물은 미세

**Table 2.** POC concentration and carbon biomass of the microbial communities at station J2.

Month	POC <sup>a</sup> ( $\mu\text{gC cm}^{-3}$ )	Microalgae ( $\mu\text{gC cm}^{-3}$ )	Bacteria <sup>b</sup> ( $\mu\text{gC cm}^{-3}$ )	Protozoa ( $\mu\text{gC cm}^{-3}$ )	Microbial communities ( $\mu\text{gC}^{-3}$ )	Protozoa /M.C. <sup>c</sup> (%)	M.C./POC (%)
Apr. 02	8,900	224	29.4	5.1	258	2.0	2.9
Jun. 02	-	184	34.7	1.3	220	0.6	-
Sep. 02	5,660	241	-	3.7	245	-	4.3
Dec. 02	7,440	321	-	2.7	324	-	4.4
Feb. 03	13,564	321	42.8	2.2	366	0.6	2.7
Apr. 03	14,553	318	114.7	3.0	435	0.7	3.0
Jun. 03	8,635	188	56.4	1.7	246	0.7	2.8
Jul. 03	3,923	145	43.8	1.5	190	0.8	4.8
Oct. 03	4,485	119	62.6	3.7	185	2.0	4.1
Dec. 03	7,317	114	49.9	1.8	165	1.1	2.3
Feb. 04	2,217	173	-	2.6	176	1.5	7.9
Mar. 04	4,490	486	37.5	9.0	532	1.7	11.8
Apr. 04	17,000	743	21.5	11.5	776	1.5	4.6
Avg.	8,182	275	49.0	3.8	317	1.2	4.6

<sup>a</sup>POC data was quoted from KMI (2004).

<sup>b</sup>Bacteria data was quoted from KMI (2004) and depth was 10 mm.

<sup>c</sup>M.C. is microbial communities.

생물 군집 탄소량의 0.6-2.0%를 차지하여, 평균 1.2%를 차지하였고, 미세생물 군집 탄소량의 평균 75%는 저서 미세조류가 차지하는 것으로 나타났다. 또한 미세생물 군집의 탄소량은 갯벌 입자성 유기탄소 농도에 2.3-11.8%를 차지하며 평균 4.6%를 차지 하였다.

**박테리아와 돌말류에 대한 저서 원생동물의 섭식률**

박테리아에 대한 종속영양 편모류의 개체군 섭식률은  $2.5 \times 10^6$ -

$8.3 \times 10^7$  cells  $\text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ 로 나타났으며, 종속영양 편모류의 생물량이 가장 높은 2004년 4월에 높은 섭식율을 보였다(Table 3A). 종속영양 편모류는 하루에 박테리아 생산력의 12.6-38.6%를 제거하는 것으로 나타났으며, 4월에 가장 높은 제거율을 보였다. 박테리아에 대한 섬모충류의 개체군 섭식률은  $3.5 \times 10^5$ - $4.6 \times 10^6$  cells  $\text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ 로 나타났으며, 섬모충류의 생물량이 가장 높은 2004년 4월에 가장 높은 섭식율을 보였다(Table 3A). 섬모충류는 하루에 박테리아 생산력의 0.8-7.3%를 제거하는 것으로 나타났으며, 3월

**Table 3.** Population ingestion rate of benthic protozoa on bacteria and diatoms in the study area.

(A)

Year	Month	Population Ingestion rates					Bacterial production <sup>a</sup> ( $\mu\text{gC cm}^{-3}\text{d}^{-1}$ )	% of P.P <sup>b</sup>
		cells $\text{cm}^{-3}\text{d}^{-1}$		$\mu\text{gC cm}^{-3}\text{d}^{-1}$				
		HF <sup>c</sup>	Ciliates	HF <sup>c</sup>	Ciliates	Protozoa		
2003	October	$1.5 \times 10^7$	$9.0 \times 10^5$	0.30	0.018	0.32	2.38	13.4
	December	$2.5 \times 10^6$	$3.5 \times 10^5$	0.05	0.007	0.12	0.33	36.4
2004	March	$1.1 \times 10^7$	$3.3 \times 10^6$	0.22	0.066	0.29	0.90	31.8
	April	$8.3 \times 10^7$	$4.6 \times 10^6$	1.66	0.092	1.75	4.30	40.7
Avg.				0.56	0.05	0.61	1.98	30.8

<sup>a</sup>B.P data was quoted from KMI (2004).

<sup>b</sup>Percent of bacterial production removed by protozoa.

<sup>c</sup>Heterotrophic flagellates.

(B)

Year	Month	Population ingestion rates of ciliates		Primary production <sup>a</sup> ( $\text{mgC cm}^{-3}\text{h}^{-1}$ )	% of P.P <sup>b</sup>
		cells $\text{cm}^{-3}\text{d}^{-1}$	$\text{mgC cm}^{-3}\text{h}^{-1}$		
2003	October	$9.1 \times 10^5$	5.4	20.7	26.0
	December	$8.1 \times 10^4$	0.6	3.0	20.1
2004	March	$2.6 \times 10^7$	11.1	37.3	29.8
	April	$3.8 \times 10^7$	41.1	113.0	36.4
Avg.			14.6	43.5	33.6

<sup>a</sup>P.P data was quoted from Yoo and Choi (2005).

<sup>b</sup>Percent of primary production removed by protozoa.

**Table 4.** Comparison of benthic protozoan abundance reported from various aquatic sediments

	Study area	Sediment type	Abundance (cells cm <sup>-3</sup> )	References
Heterotrophic flagellates	Georgia, USA	Marsh mud	2.4×10 <sup>3</sup>	Kemp, 1988
	Wadden Sea (Netherlands)	Muddy sand	0.36-2.16×10 <sup>5</sup>	Bak and Nieuwland, 1989
	North sea	Sand	0.5-30×10 <sup>5</sup>	Bak <i>et al.</i> , 1991
		Mud	<20×10 <sup>3</sup>	
	Wadden Sea (Netherlands)	Sand	1.0-1.9×10 <sup>5</sup>	Hondeveld <i>et al.</i> , 1992
		North sea	Sand	
	Baltic Inlet (North-Rugian Bodden)	Muddy sand	0.08-1.0×10 <sup>5</sup>	Dietrich and Arndt, 2000
		Schelde estuary	Sand	
	Botany Bay (Sydney)	Silty	0.2-5.2×10 <sup>5</sup>	Hamels <i>et al.</i> , 2001
		Sand	0.4-4.7×10 <sup>5</sup>	
Sand		0.1-1.6×10 <sup>5</sup>		
Schelde estuary (Netherlands)	Silty	0.1-1.8×10 <sup>5</sup>	Lee and Patterson, 2002a	
	Sand	0.1-1.6×10 <sup>5</sup>		
	Silty	0.1-1.8×10 <sup>5</sup>		
Ciliates	Gangwha tidal flat (Korea)	Muddy sand	0.2-5.9×10 <sup>5</sup>	This study
	Piles Creek (New Jersey)	Mud	1,180	Tso and Taghon, 1997
	Baltic Inlet (North-Rugian Bodden)	Muddy sand	39-747	Dietrich and Arndt, 2000
		Sand	220	
	Botany Bay (Sydney)	Silty	0-2,700	Lee and Patterson, 2002a
		Sand	500-3,500	
	Schelde estuary (Netherlands)	Silty	<100-1,200	Hamels <i>et al.</i> , 2004
		Silty	<100-1,200	
	Gangwha tidal flat (Korea)	Muddy sand	100-17,800	This Study

에 가장 높은 제거율을 보였다. 조사수역에서 저서 원생동물은 하루에 박테리아 생산력의 13.4-40.7%를 제거하며, 춘계인 4월에 가장 높은 제거율을 보였다. 또한 돌말류에 대한 섬모충류의 개체군 섭취율은  $8.1 \times 10^4$ - $3.8 \times 10^7$  cells cm<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>로 나타났으며, 동계에 가장 낮고 춘계에 가장 높게 나타났다(Table 3B). 섬모충류는 저서 미세조류 생산력의 20.1-36.4%를 제거하는 것으로 나타났으며, 섬모충류와 저서 미세조류의 현존량이 높았던 춘계에 가장 높은 제거율을 보였다.

## 고 찰

### 저서 원생동물의 시·공간적 분포 및 조절 요인

해양 퇴적물에서 종속영양 편모류의 현존량은 10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup> cells cm<sup>-3</sup>로 분포한다(Table 4). 조사수역에서 종속영양 편모류의 현존량은 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> cells cm<sup>-3</sup>로 분포하여 다른 지역에서 조사된 최대값의 범위에 포함되어 있다. 최근까지 저서 종속영양 편모류의 현존량은 주로 모래갯벌에서 많이 조사되었으며, 연안의 펄 갯벌에서는 많이 연구되지 않았다(Bak and Nieuwland, 1989; Epstein and Shiaris, 1992; Dietrich and Arndt, 2000). 펄 갯벌에서 조사된 종속영양 편모류의 현존량 분포는 10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup> cells cm<sup>-3</sup>로 보고 되었고, 그중 50% 이상은 2-5 μm 크기로 구성되었으며(Bak and Nieuwland, 1989; Lee and Patterson, 2002a), 5-10 μm 크기의 종속영양 편모류도 전체 미세생물 군집중에 약 30%를 차지하는 것으로 보고 되었다(Dietrich and Arndt, 2000). 본 조사수역에서도 종속영양 편모류는 20 μm 이상의 유글레나에 의해 높게 나타난 2월과 4월을 제외하고는 대체로 10 μm 이하의 종속영양 편모류에 의하여 높게 분포하였다. 또한 종속영양 편모류의 생물량은 춘계와 추계에 비교적 높은 값을 보였으며, 정점별로는 뚜렷한 차이를 보이지 않은

반면, 상층 2.5 mm 이내에서 높은 분포를 보였다(Table 1). 이는 종속영양 편모류의 현존량은 퇴적물의 최상부에서 높게 분포하고, 깊이 에 따라 감소하며, 이들 현존량의 약 60% 정도는 상층 0.3 cm 내에 분포한다는 연구와 유사한 결과이다(Bak and Nieuwland, 1989; Dietrich and Arndt, 2000). 깊이에 따른 종속영양 편모류의 감소는 기존에 보고된 바와 같이 깊이가 깊어질수록 공극수의 부족, 낮은 산소 농도, 그리고 이용할 수 있는 먹이 농도의 부족등에 기인된 것으로 생각된다(Bak and Nieuwland, 1989; Patterson *et al.*, 1989).

섬모충류의 생물량은 종속영양 편모류처럼 연안의 펄 갯벌에서 조사된 경우는 많지 않으나 퇴적물에서 10<sup>3</sup>-10<sup>5</sup> cells cm<sup>-3</sup>로 분포한다(Table 4). 본 조사수역에서 관찰된 섬모충류의 현존량은 일반적인 분포 범위보다 다소 높게 나타났지만 2004년 4월에 정점 J3의 표층에서  $17.8 \times 10^3$  cells cm<sup>-3</sup>로 분포한 것을 제외한다면 일반적인 분포 범위에 포함된다. 이시기에는 *Holosticha*, *Stichotricha*, *Loxophyllum*에 속하는 종에 의하여 높은 분포를 보였다. 이와 같이 섬모충류의 높은 현존량은 담수 퇴적물의 표층에서 >10<sup>4</sup> cells cm<sup>-3</sup>로 보고된바 있다(Baldock and Sleight, 1988; Garstecki *et al.*, 2000). 계절별 섬모충류의 생물량은 춘계와 추계에 비교적 높은 분포를 보여 엽록소-a 농도의 분포와 유사한 경향을 보였다. 이시기에 섬모충류의 높은 분포는 높은 먹이 농도에 영향을 받은 것으로 사료된다. 정점별로는 정점 J1에 비하여 정점 J2와 정점 J3에서 더 높게 분포하여 정점별로 차이가 큰 것으로 나타났다. 깊이별로는 상층 2.5 mm 이내에서 가장 높은 분포를 보였으며, 퇴적물의 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다. 퇴적물의 깊이에 따른 섬모충류의 현존량 분포 양상은 다른 연구에 의해서 조사된 결과와 유사하였다(Sundbäck *et al.*, 1996; Hamels *et al.*, 2004). 또한 섬모충류는 Baltic inlet의 퇴적물에 보고된 것과 같이



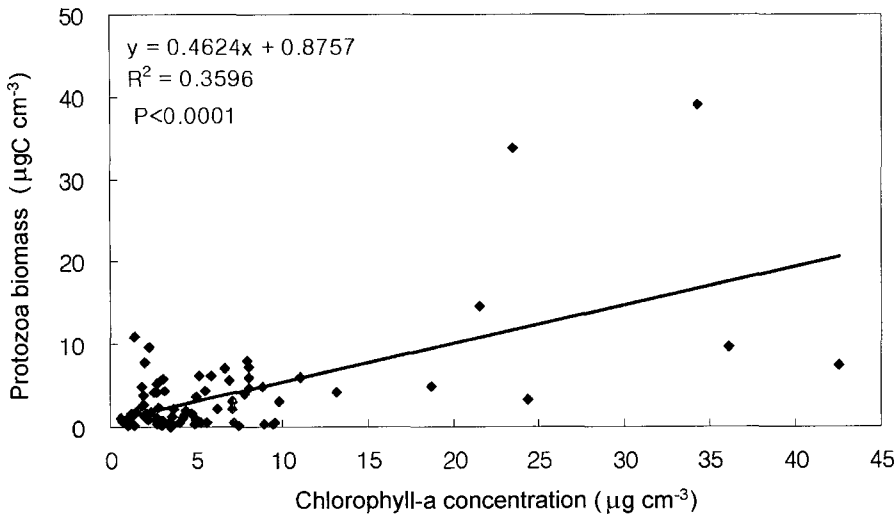


Fig. 6. Relationship between benthic protozoa biomass and chlorophyll-a concentration in the study area.

년중 20-100  $\mu\text{m}$  크기의 생물들에 의해 높게 나타났으며(Dietrich and Arndt, 2000), 돌말류가 높게 분포한 준계와 추계에는 100  $\mu\text{m}$  이상의 섬모충류에 의하여 높게 나타났다.

저서 생태계에서 시·공간적으로 변하는 원생동물의 분포와 생물량은 온도, 염분, 빛, pH, 용존 산소농도, 퇴적물 입도, 유기물 농도, 먹이 농도, 섭식자등과 같은 생물학적, 무생물학적 요인에 의하여 주로 영향을 받는다(Fenchel, 1969; Patterson *et al.*, 1989; Epstein, 1997a; Lucchesi and Santangelo, 1997; Lee and Patterson, 2002a). 본 조사에서 저서 원생동물의 시공간적 분포는 박테리아 보다는 저서 미세조류의 생물량과 높은 관계를 보여(Fig. 6), 기존의 펄 모래 갯벌에서 조사된 결과와 유사하게 나타났다(Dietrich and Arndt, 2000). 조사수역에서 저서 미세조류의 생물량 역시 정점 J1에 비해서 정점 J2와 J3에서 더 높게 나타났으며, 표층 퇴적물에서 주로 높게 분포하였다(유, 2004). 특히 섬모충류의 분포가 펄의 함량이 높은 정점 J2와 정점 J3에서 높게 나타나는 것은 퇴적물 입도 특성과 섬모충류의 먹이원이 될 수 있는 저서 미세조류의 분포와 관련이 있는 것으로 사료된다(Fenchel, 1969; Epstein, 1997a; Wickham *et al.*, 2000; Hamels *et al.*, 2004).

#### 저서 원생동물의 군집 분포

종속영양 편모류, 섬모충류, 외편모류, 아메바, 유공충류 등을 포함하는 저서 원생동물 군집은 저서 생태계에서 폭넓게 분포하지만, 저서 원생동물의 군집구조에 대한 연구는 많이 수행되지 않았다(Dietrich and Arndt, 2000; Gregorio, 2000; Hamels *et al.*, 2004). 그러나 기존의 연구를 통해 저서 원생동물중 종속영양 편모류와 섬모충류가 갯벌의 미세생물 먹이망의 생물량 조성이나 에너지 흐름의 측면에서 그 역할이 큰 것으로 보고 되었다. 강화도 갯벌에서도 저서 원생동물은 주로 종속영양 편모류와 섬모충류로 구성되었고 극히 일부 시기에 표층 퇴적물에서 종속영양 외편모류와 아메바가 관찰되었으나 현존량이 너무 낮았기 때문에 본 조사에서는 제외시켰다. 강화도 갯벌에서 저서 원생동물 탄소량의 평균 66% 이상은 섬모충류로 이루어졌으며, 크기별 분포는 20  $\mu\text{m}$  이상의 원생동물에 의해 75% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 그러나 돌말류의 분포가 높은 준계와 추계에는 100  $\mu\text{m}$  이상의 섬모

충류가 40-50% 이상을 차지하였다. 저서 생태계에서 종속영양 편모류는 저서 원생동물 탄소량의 60% 이상을 차지하여 저서 생태계에서 섬모충류에 비해 중요한 역할을 하는 것으로 보고 되었으나(Dietrich and Arndt, 2000; Lee and Patterson, 2002a; Hamels *et al.*, 2004), 때때로 섬모충류가 종속영양 편모류의 생물량에 비해 높은 것으로 보고 되기도 하였다(Garstecki *et al.*, 2000; Gregorio, 2000). 본 조사에서 섬모충류의 높은 탄소량은 주로 50  $\mu\text{m}$  이상의 하모류에 의한 높은 우점율과 돌말류가 높게 나타난 시기에 크기가 100-400  $\mu\text{m}$  되는 저서 원생동물의 높은 분포에 원인이 있는 것으로 생각된다. 다양한 생태환경에서 섬모충류는 종속영양 편모류에 비해 양적으로는 적게 나타나지만 세포의 크기가 크기 때문에 탄소량은 유사하거나 더 크게 나타난다. 또한 섬모충류는 중형 저서동물이나 대형 저서동물에 비해 탄소량은 적지만 대형 저서동물에 비해 현존량은 50-300배 정도 많이 나타나고 전체 대사율도 대형 저서동물의 최대 8배까지 나타나고 있어(Patterson *et al.*, 1989), 섬모충류의 높은 분포는 저서 생태계의 에너지 흐름에 중요한 역할을 할수 있음을 시사하였다.

#### 미세생물 군집의 분포

본 조사에서는 미세생물 군집의 73-95%(평균 86%)는 저서 미세조류로 구성되어 있으며, 박테리아에 의해 3-33%(평균 13%), 저서 원생동물에 의해 0.6-2%(평균 1%)를 차지 하는 것으로 나타났다. 스웨덴의 모래 갯벌에서의 연구에 의하면 미세생물 군집에 저서 미세조류는 평균 66%, 박테리아는 평균 4%, 저서 원생동물은 평균 <1%를 차지하는 것으로 보고하였다(Sundbäck *et al.*, 1996). 또한 호주의 Botany만의 모래 갯벌에서 저서 미세조류의 탄소량은 미세생물 군집의 평균 78%를 차지하며, 박테리아는 평균 15%, 저서 원생동물은 평균 7% 정도를 차지하는 것으로 보고 되어 원생동물은 갯벌의 미세생물 그룹중에 가장 낮은 기여율을 보였다(Lee and Patterson, 2002a). 이러한 기존의 연구를 통해 저서 미세생물 군집의 생물량에서 원생동물의 기여율은 비교적 낮은 것으로 나타났다.

또한 본 조사수역 퇴적물내의 입자성 유기탄소 농도에서 미세생물 군집은 2.3-11.8%(평균 5%)를 차지하여 입자성 유기탄소 농

도에 낮게 기여하는 것으로 나타났으나 입자성 유기탄소 농도와 미세생물 군집사이의 계절적 분포는 유사한 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 모래 퇴적물에서 총 입자성 유기탄소 농도에 미세생물 군집이 3-12% 차지한다는 결과와 유사하여(Sundbäck *et al.*, 1996), 저서 생태계에서 입자성 유기탄소의 많은 부분은 미세생물 군집에 의해서가 아닌 중형 저서 동물로 구성되어 있을 것으로 사료된다. 그러나 저서 원생동물의 생물량이 전체 미세생물 군집과 입자성 유기탄소 농도에 작은 부분을 차지한다 하더라도, 원생동물은 성장이 빠르고 대사 활동이 활발하여 외부 환경에 빨리 반응할 수 있으므로 특히 모래 갯벌의 호흡에 중요한 역할을 할 수 있음이 제시된 바 있다(Hamels *et al.*, 2004).

### 저서 원생동물의 섭식률

해양 생태계에서 원생동물은 에너지 흐름에 중요한 역할을 하지만 저서 생태계에서 저서 원생동물의 섭식을 이용한 에너지 흐름에 관한 연구는 많이 보고 되지 않았다(Kemp, 1988; Epstein and Shiaris, 1992; Hondeveld *et al.*, 1992; Epstein, 1997a). 강화도 갯벌에서 조사된 박테리아에 대한 종속영양 편모류의 섭식률은  $2.5 \times 10^6 - 8.3 \times 10^7$  cells  $\text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ 로 나타났고, 섬모충류에 의한 섭식률은  $3.5 \times 10^5 - 4.6 \times 10^6$  cells  $\text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ 로 나타났다. 따라서 박테리아에 대한 저서 원생동물의 섭식률은 섬모충류 보다는 종속영양 편모류에 의해 더 높은 것으로 나타났다. 또한 종속영양 편모류는 박테리아 생산력의 평균 28%를 제거하며, 섬모충류는 박테리아 생산력의 평균 3%를 제거하여, 본 조사수역에서 박테리아에서 종속영양 편모류로 이어지는 에너지 흐름이 더 컸다. 조사기간중 4월에 박테리아에 대한 원생동물의 섭식률이 가장 높게 나타났는데, 이는 4월에 저서 원생동물의 생물량이 가장 높은 것이 기인된 것으로 판단된다. 이제 까지 조사된 다른 수역에서의 연구에 의하면 Schelde 연안의 모래 퇴적물에서 박테리아 생산력의 6-60%는 종속영양 편모류에 의해 제거되며, 실트 퇴적물에서 박테리아 생산력의 <2.1%가 제거되어, 모래 퇴적물에서 원생동물의 중요성이 강조된 바 있다(Hameals *et al.*, 2001). 그러나 Savin Hill Cove의 세립질 퇴적물에서 저서 원생동물은 박테리아 생물량의 단지 0.03-0.2%를 제거하여 박테리아의 아주 작은 부분을 제거하는 것으로 보고하였다(Epstein and Shiaris, 1992). Georgia의 Sapelo 퇴적물에서 저서 섬모충류는 박테리아 생산력의 평균 4% 미만을 제거하여 저서 섬모충류는 박테리아 생산력에서 중형동물 먹이망을 연결하는데 작은 역할을 하는 것으로 나타났다(Kemp, 1988). 또한 메사추세츠의 세립질 모래 퇴적물에서 저서 원생동물은 박테리아 생산력의 평균 10.5%를 제거하나, 조립질 모래 퇴적물에서는 박테리아 생산력의 <1%를 제거하여 세립질 모래 퇴적물에서 원생동물의 중요성을 강조하였다(Epstein, 1997a). 이상과 같이 다른 지역의 연구에서는 저서 생태계에서 저서 원생동물이 박테리아 생산력의 작은 부분을 소비하며, 박테리아에 대한 저서 원생동물의 역할이 작은 것으로 나타났다. 그러나 강화도 갯벌에서는 저서 원생동물에 의해 평균 30% 이상의 박테리아 생산력이 제거되는 것으로 나타나고, 원생동물의 생물량이 박테리아 생물량 또는 생산력과 높은 상관관계가 있어(Bak and Nieuwland, 1989), 강화도 갯벌이 다른 지역에 비해 박테리아에서 저서 원생동물로의 탄소 이동이 다소 활발한 것으로 보인다. 따라서 강화도 갯벌의

저서 원생동물은 박테리아 생산력에서 중형동물 먹이망으로 연결하는데 일부 역할을 하는 것으로 보인다.

조사수역에서 돌말류에 대한 원생동물의 섭식률은  $8.1 \times 10^4 - 3.8 \times 10^7$  cells  $\text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ 의 범위를 보이며, 저서 미세조류 생산력의 20-36%를 소비하는 것으로 나타났다. 메사추세츠의 세립질 모래 퇴적물에서 저서 원생동물은 저서 미세조류 현존량의 평균 25.8%를 제거하며, 조립질 모래 퇴적물에서는 평균 3.8%를 제거하여 세립질 모래 퇴적물에서 원생동물에 의한 돌말류의 제거율이 더 높은 것으로 나타났다(Epstein, 1997a). 강화도 갯벌에서 저서 미세조류에 대한 섬모충류의 제거율은 다른 수역에 비하여 높은 것으로 나타났으며, 섬모충류는 저서 미세조류의 생산력이 높은 층계에 높은 제거율을 보였다. 이는 높은 먹이 농도와 높은 섬모충류의 생물량에 기인된 것으로 판단된다. 따라서 강화도 남단 갯벌에서는 층계에 저서 미세조류에 의한 높은 일차 생산력을 섬모충류가 활발히 이용함으로써 평균 33.6%의 제거율을 보였다. 이상과 같이 강화도 갯벌에서 저서 원생동물은 박테리아 생산과 미세조류에 의한 생산의 30% 이상을 제거 이용하고 있다. 이는 강화도 갯벌에서 저서 원생동물에 의한 미세생물 먹이망이 저서생태계의 유기물 순환에 있어서 비교적 활발하게 작용하고 있음을 의미하며 특히 층계에는 그 역할이 중요함을 보여 주고 있다.

### 감사의 글

본 논문을 세밀하게 심사해주신 정해진 교수님과 이원제 박사님께 진심으로 감사드립니다. 또한 본 연구를 위해 현장 작업을 함께 한 박재영씨에게도 감사의 마음을 전합니다. 본 논문은 해양수산부 수산특정연구 개발사업(20010021)의 지원으로 이루어졌습니다.

### 참고문헌

- 고철환, 1991. 한국 서해 펄 갯벌에서의 미세조류에 의한 제1차 생산 및 생물량, KOSEF 891-0505-015-2.
- 김기웅, 2000. 강화 여차리, 대부 방아머리, 화성 주곡리 갯벌의 저서 동물 군집, 서울대학교 석사학위 논문, 88pp.
- 노재훈, 최중기, 1998. 펄갯벌 저서규조류의 이동력이 갖는 생태학적 기능. 해양연구, 20: 179-187.
- 오상희, 1990. 서해 만경-동진 펄 조간대의 환경과 저서규조류 군집. 서울대학교 석사학위 논문, 99pp.
- 오승진, 문창희, 박미옥, 2004. 한국 서해 새만금 갯벌에서 저서 미세조류의 생체량과 군집 조성에 대한 HPLC 분석. 한국수산학회, 37: 215-225.
- 유만호, 2004. 강화도 장하리 펄 갯벌에서 저서 미세조류의 계절 변동 연구, 인하대학교 석사학위 논문, 82pp.
- 최휴창, 2002. 강화 펄 조간대에서의 저서성 미세조류 연구, 인하대학교 석사학위 논문, 67pp.
- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Gray, L.A. Meyer-Reil and F. Thingstad, 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10: 257-263.
- Bak, R.P.M. and G. Nieuwland, 1989. Seasonal fluctuations in benthic protozoan populations at different depths in marine sediments. *Neth. J. Sea. Res.*, 24: 37-44.

- Bak, R.P.M., F.C. van Duyl, G. Nieuwland and A.J. Kop, 1991. Benthic heterotrophic nanoflagellates in North Sea filed/mesocosm bottoms and their response to algal sedimentation. *Ophelia*, **33**: 187-196.
- Baldock, B.M. and M.A. Sleight, 1988. The ecology of benthic protozoa in rivers-seasonal variation in numerical abundance in fine sediments. *Arch. Hydrobiol.* **111**: 409-421.
- Børshem, K.Y. and G. Bratbak, 1987. Cell volume to cell carbon conversion factors for a bacterivorous *Monas* sp. enriched from sea waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **36**: 171-175.
- Buffan-Dubau, E. and L.R. Carman, 2000. Extraction of benthic microalgal pigments for HPLC analysis. *Marine Ecol. Prog. Ser.*, **204**: 293-297.
- De Jonge, V.N. and F. Colijn, 1994. Dynamics of microphytobenthos biomass in the Ems estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **104**: 185-196.
- Dietrich, D. and H. Arndt, 2000. Biomass partitioning of benthic microbes in a Baltic inlet: relationships between bacteria, algae, heterotrophic flagellates and ciliates. *Mar. Biol.* **136**: 309-322.
- Epstein, S.S., 1997a. Microbial food webs in marine sediments. I. Trophic interactions and grazing rates in two tidal flat communities. *Microb. Ecol.*, **34**: 188-198.
- Epstein, S.S., 1997b. Microbial food webs in marine sediments. II. Seasonal change in trophic interaction in a sandy tidal flat communities. *Microb. Ecol.*, **34**: 199-209.
- Epstein, S.S. and M.P. Shiaris, 1992. Rates of microbenthic and meiobenthic bacterivory in a temperate muddy tidal flat community. *Appl. Environ. Microb.*, **58**: 2426-2431.
- Epstein, S.S. and J. Rossel, 1995. Methodology of in situ grazing experiments; evaluation of a new vital dye for preparation of fluorescently labeled bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **128**: 143-150.
- Edler, L., 1979. Phytoplankton and chlorophyll recommendations for biological studies in the Baltic Sea. Baltic Marine Biologists Publication, **5**: 1-38.
- Fenchel, T., 1969. The ecology of marine microbenthos IV. Structure and function of the benthic ecosystem, its chemical and physical factors and the microfauna communities with special reference to the ciliated protozoa. *Ophelia*, **6**: 1-182.
- Finlay, B., P. Bannister and J. Stewart, 1979. Temporal variation in benthic ciliates and the application of association analysis. *Freshw. Biol.* **9**: 45-53.
- Finlay, B.J., J.O. Corliss, G. Esteban and T. Fenchel, 1996. Biodiversity at the microbial level: the number of free-living ciliates in the biosphere. *Q. Rev. Bio.*, **71**: 221-237.
- Garstecki, T., R. Verhoeven, S.A. Wickham and H. Arndt, 2000. Benthic-pelagic coupling: a comparison of the community structure of benthic and planktonic heterotrophic protists in shallow inlets of the southern Baltic. *Freshw. Bio.*, **45**: 147-167.
- Gasol, J.M., 1993. Benthic flagellates and ciliates in fine freshwater sediments: calibration of a live counting procedure and estimation of their abundance. *Microb. Ecol.*, **25**: 247-262.
- Gregorio, F.-L., 2000. Protozoan species in three epibenthic areas of the Canabrian Sea: relations with environmental factors. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* **80**: 407-418.
- Hamels, I., K. Muylaert, G. Casteleyn and W. Vyverman, 2001. Uncoupling of bacterial production and flagellate grazing in aquatic sediments: a case study from an intertidal flat. *Aquat. Microb. Ecol.*, **25**: 31-42.
- Hamels, I., K. Sabbe, K. Muylaert and W. Vyverman, 2004. Quantitative importance, composition, and seasonal dynamics of protozoan communities in polyhaline versus freshwater intertidal sediments. *Microb. Ecol.*, **47**: 18-29.
- Hondeveld, B.J.M., R.P.M. Bak and F.C. van Duyl, 1992. Bacterivory by heterotrophic nanoflagellates in marine sediments measured by uptake of fluorescently labeled bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **89**: 63-71.
- Hondeveld, B.J.M., G. Nieuwland, F.C. Duyl and R.P.M. Bak, 1994. Temporal and spatical variations in heterotrophic nanoflagellates abundance in North Sea sediment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **109**: 235-243.
- Kemp, P.F., 1988. Bacterivory by benthic ciliates: significance as a carbon source and impact on sediment bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **49**: 163-169.
- Kim, D.S., J.G. Je and J.H. Lee, 2000. The community structure and spatial distribution of Meiobenthos in the Kanghwa tidal flat, west coast of Korea. *Ocean Res.*, **22**: 15-23.
- Korea Marintime Institute(KMI), 2004. Development of evaluation techniques on biogeochemical purification capabilities of microorganisms in the mud flat.
- Lee, W.J. and D.J. Patterson, 2002a. Abundance and biomass of heterotrophic flagellates, and factors controlling their abundance and distribution in sediments of Botany Bay. *Microb. Ecol.*, **43**: 467-481.
- Lee, W.J. and D.J. Patterson, 2002b. Optimizing the extraction of bacteria, heterotrophic protists and diatoms, and estimating their abundance and biomass from intertidal sandy sediments. *J. Kor. Soc. Ocean.*, **37**: 59-65.
- Lucchesi, P. and G. Santangelo, 1997. The interstitial ciliates microcommunity of a Mediterranean sandy shore under differing hydrodynamic disturbance. *Ital J. Zool.*, **64**: 253-259.
- Patterson, D.J., J. Larsen and J.O. Corless, 1989. The ecology of heterotrophic flagellates and ciliates living in marine sediments. *Progr. Protistol.*, **3**: 185-277.
- Sheldon, R.W., P. Nival and F. Rassoulzadegan, 1986. An experimental investigation of a flagellate-ciliate-copepod food chain with some observations relevant to the linear biomass hypothesis. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 184-188.
- Sherr, B.F., E.B. Sherr and R.D. Fallon, 1987. Use of monodispersed, fluorescently-labeled bacteria to estimate *in situ* protozoan bacterivory. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**: 958-965.
- Sherr, E.B. and B.F. Sherr, 1994. Bacterivory and herbivory: key roles of phagotrophic protists in pelagic food webs. *Microb. Ecol.*, **28**: 223-235.
- Sieburth, J. McN., V. Smetacek and J. Lenz, 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic components of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.*, **23**: 1256-1263.
- Sundbäck, K., P. Nilsson, C. Nilsson and B. Jönsson, 1996. Balance between autotrophic and heterotrophic components and processes in microbenthic communities of sandy sediment: A field study. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **43**: 689-706.

- Tso, S.F. and G.L. Taghon, 1997. Enumeration of protozoa and bacteria in muddy sediment. *Microb. Ecol.*, **33**: 144-148.
- Turley, C.M., R.C. Newell and D.B. Robins, 1986. Survival strategies of two small marine ciliates and their role in regulating bacterial community structure under experimental conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **33**: 59-70.
- Wickham, S., A. Gieseke and U.G. Berninger, 2000. Benthic ciliates identification and enumeration: an improved methodology and its application. *Aquat. Micro. Ecol.*, **22**: 79-91.
- Woo, H.J. and J.G. Je, 2002. Changes of sedimentary environments in the southern tidal flat of Kanghwa Island. *Ocean and Polar Res.*, **24**: 331-343.
- 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. *The sea*. In press.
- 

2004년 10월 27일 원고접수

2005년 1월 20일 수정본 채택

담당편집위원: 서해립