

Article

조간대 퇴적 환경에 따른 저서미세조류 색소와 총 아데노신
3인산(ATP: Adenosine-5' triphosphate) 비교 연구

하선용^{1,2} · 최보형¹ · 민준오^{1,2} · 전수아^{1,2} · 신경훈^{1*}

¹한양대학교 과학기술대학 해양융합학과
(426-791) 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55

²한국해양과학기술원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 갯벌로 12

Comparative Study on Microphytobenthic Pigments and Total Microbial
Biomass by ATP in Intertidal Sediments

Sun-Yong Ha^{1,2}, Bo-Hyung Choi¹, Jun-Oh Min^{1,2}, Su-A Jeon^{1,2}, and Kyung-Hoon Shin^{1*}

¹Department of Marine Science and Convergence Technology, College of Science and Technology,
Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

²Korean Polar Research Institute, KIOST
Incheon 406-840, Korea

Abstract : Biomass and community composition of microphytobenthos in tidal flats were studied by HPLC analysis and also investigated to examine the relationship between microphytobenthic pigments and Adenosine-5' triphosphate (ATP) as an index of total microbial biomass in intertidal environments (muddy and sandy sediment) of Gyeonggi Bay, west coast of Korea. Microphytobenthic pigments and ATP concentration in muddy sediment were the highest at the surface while the biomass of microphytobenthos in sandy sediment was the highest at the sub-surface (0.75 cm sediment depth). The detected pigments of microphytobenthos were chlorophyll a, b (euglenophytes), *c*₃, peridinin (dinoflagellates), fucoxanthin (diatom or chrysophytes), diadinoxanthin, alloxanthin (cryptophytes), diatoxanthin, zeaxanthin (cyanobacteria), β -carotene, and pheophytin a (the degraded product of chlorophyll a). Among the pigments which were detected, the concentration of fucoxanthin was the highest, indicating that diatoms dominated in the microphytobenthic community of the tidal flats. There was little significant correlation between OC (Organic Carbon) and ATP in both sediments. However, a positive correlation between chlorophyll a concentration and ATP concentration was found in sandy sediment, suggesting that microbial biomass could be affected by labile OC derived from microphytobenthos. These results provide information that may help us understand the relationship between microphytobenthos and microbial biomass in different intertidal sediment environments.

Key words : microphytobenthos, pigment, Adenosine-5' triphosphate (ATP), intertidal sediments

*Corresponding author. E-mail : shinkh@hanyang.ac.kr

1. 서 론

갯벌 내 대표적인 생산자로 저서미세조류는 퇴적물 섭식자의 직접적인 먹이원일 뿐만 아니라(Connor and Edgar 1982; Hughes and Sherr 1983), 재부유되어 부유 섭식자에게도 중요한 먹이원이 된다(Baillie and Welsh 1980). 또한 재부유된 저서미세조류의 생체량과 생산력이 수층 내 식물플랑크톤보다 높게 나타나는 경우도 있다(Varela and Penas 1985; Lukatelich and McComb 1986; de Jonge and van Beusekom 1995). 일반적으로 갯벌의 높은 생산성은 저서미세조류의 광합성 작용에 의해 발생하고 갯벌 생태계에서 중요한 탄소공급원 역할을 하게 된다(Sullivan and Moncreiff 1988). 해수 중 식물플랑크톤 변동은 겨울철에 매우 낮은 농도를 보이는 반면, 저서미세조류는 겨울철에 높은 생산량을 보인다(Colijn and de Jonge 1984; de Jonge and Colijn 1994). 저서미세조류는 광합성을 하기 위해 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 회유와 물리적인 공극수 흐름(hydrodynamic forces), 그리고 생물교란 등에 의해서 퇴적물 깊이 10 cm 이하의 깊이에서도 저서미세조류의 존재가 확인되고 있다(Cadée and Hegeman 1974; Montani et al. 2003; Méléder et al. 2005).

조류의 보조색소(Pigments)는 광합성을 할 수 있는 모든 자가 영양생물이 가지고 있으며, 빛을 흡수하여 광합성을 하는 기능과 광에 대한 보호 역할을 하는 기능을 가지고 있다(Jeffrey et al. 1997). 또한, 색소는 종에 따라 특이성(taxonomic specificity)을 가지고 있기 때문에 생체지표로서 유용하게 이용되고 있다(Jeffrey et al. 1997). HPLC를 이용한 미세조류 보조색소의 분석은 조류의 생체량 뿐만 아니라 강 수준이지만 조류의 군집조성을 파악하는데 중요한 정보를 제공한다(Lee et al. 2009). 또한 chlorophyll 분해산물의 분석을 통하여 조류의 생리적 상태와 섭식자에 의한 섭식강도를 파악할 수도 있다(Bidigare et al. 1986; Burkill et al. 1987).

저서생태계의 먹이망 내에서 미생물은 퇴적물을 섭취하는 상위 생물군들(deposit feeder)의 탄소 공급원으로서 중요한 역할을 한다(Rijken 1979; Montagna 1984). 특히, 미생물은 일차생산자로부터 유래된 유기물의 분해, 영양염 순환 및 혐기성환경 조성 등과 같은 저서생태계 내 생지화학적인 원소순환에도 중요한 역할을 담당한다(Fenchel et al. 1998; Hyun et al. 2002). 따라서 저서생태계 내에 에너지흐름 및 물질순환 그리고 영양상태를 이해하기 위해서 미생물 생체량의 측정이 필수적으로 선행되어야 한다(Hyun et al. 2002). 미생물 생체량의 파악을 위한 여러 방

법 중 세포 내에 항시 존재하는 생체 물질 분석으로부터 미생물의 생체량을 추정하는 생화학적인 방법들이 제안되었으며(White et al. 1979; Dobbs et al. 1993; Karl 1993; Hyun et al. 2002), 특히 생화학적인 방법 중 ATP의 경우는 모든 생물체 내에 존재하며, 생물학적으로 쉽게 분해되지만(Azam and Hodson 1977; Hodson et al. 1981), 화학적으로 안정한 형태를 이루어(Hulett 1970) 추출 및 분석이 용이하다. 따라서 최저분석 한계가 낮아 연안역 뿐만 아니라 열수 및 심해저를 포함한 여러 해양환경에서 총 미생물 군집의 생체량 측정 및 생태 연구에 널리 사용되어 왔다(Holm-Hansen and Booth 1966; Karl 1978; LaRock et al. 1979; Haberstroh and Karl 1989; Hyun et al. 1998, 2002).

우리나라 서해안 조간대에서의 저서미세조류 연구는 서해안 갯벌 중 금강 하구역 조간대(Kim and Cho 1985)와 만경 동진 갯벌의 표층 퇴적물(Oh and Koh 1995), 남서부 갯벌(Lee 2001)의 저서미세조류 분포에 대한 연구들이 보고되고 있으며, 이외에도 국내외적으로 HPLC를 이용하여 저서미세조류의 생체량과 분포에 대한 연구가 다수 보고되었다(Oh et al. 2004; Yoo and Chol 2005; Du and Chung 2007; Lee et al. 2009; Aneeshkumar and Sujatha 2012). 그러나 조간대 갯벌에서 저서미세조류 색소와 퇴적물 내 미생물 생체량과의 관계에 대한 생지화학적인 연구는 미비한 실정이다(Hyun et al. 2002). 따라서 본 연구에서는 퇴적물 내 저서 미세조류의 군집구조를 식물플랑크톤 색소 분석을 통하여 파악하고, 우점하는 저서미세조류의 지시 색소를 이용하여 퇴적 깊이별 생체량을 간접적으로 표현함과 동시에 총 미생물 생체량을 지시하는 ATP를 통하여 저서미세조류와 총 미생물간 상관 관계를 살펴 보았다. 또한 본 연구는 미생물과 저서미세조류의 퇴적 깊이별 분포 양상을 알아보고, 조간대 저서미세조류와 더불어 중요한 미생물 분포에 대해서 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

연구 지역 및 시료 채취 방법

본 연구지역(영흥도 및 선재도: 화성 반도)은 한강, 임진강, 예성강에서 공급되는 부유하중들이 8m 정도 조차의 조류 작용으로 운반되어와 넓은 간석지로 발달되었다(Fig. 1). 본 연구 지역은 화성반도 내 일부 지역인 영흥도 조간대 정점(HY 1)과 선재도 조간대 정점(SJ 1)에서 지질학적 특성에 따라 퇴적물 입도가 다른 니질과 사질의 퇴적 환경을 선정하였다(Fig. 2). 또한 본 연구 지역은 바지락 *Ruditapes philippinarum*이 서식하는 어장으로서 바지락은 여과섭식자로서 다양한 퇴적환경에 서식하고 있다(Liang et al. 2001). 2011년 11월 28일 대조기 썰물 시에

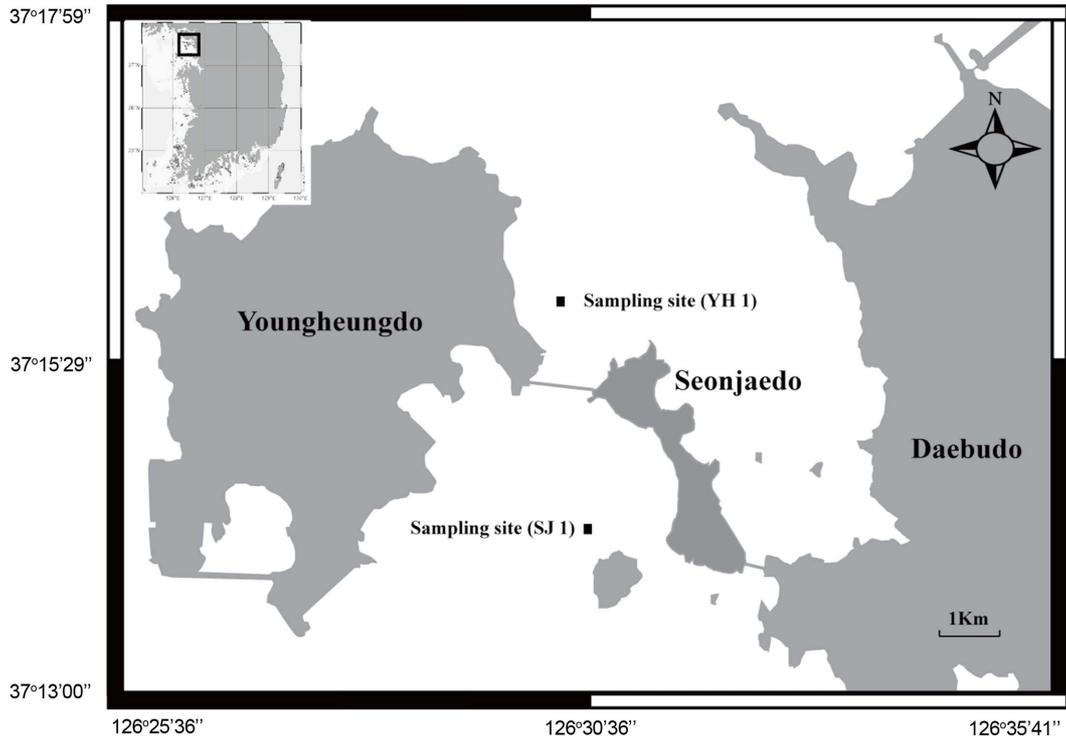


Fig. 1. Sampling site of island of Seonjae and Youngheung at Hwaseong peninsula

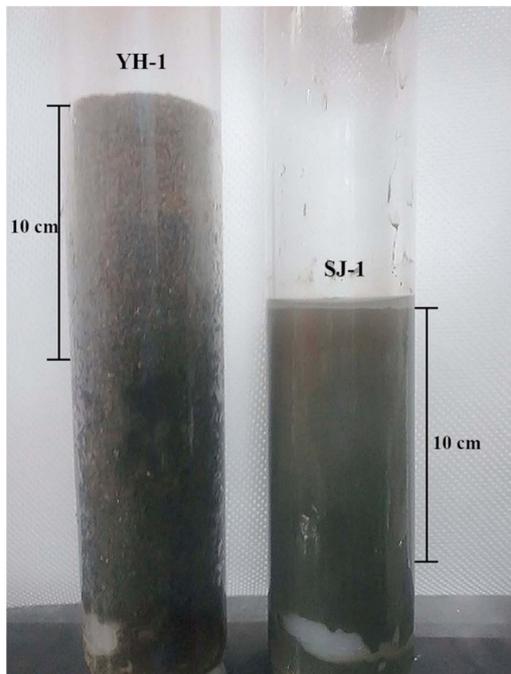


Fig. 2. Photograph of muddy and sandy intertidal sediments in YH-1 and SJ-1

퇴적환경이 다른 두 지역에서 직경 5 cm 코어 및 2.5 cm 코어를 사용하여 수직적으로 시료를 채취하였다. 채취된

퇴적물 내 유기탄소 함량 및 ATP, 색소 분석을 하기 위해 각각의 시료를 깊이에 따라 여러 층(1~3 cm(0.25 cm 간격), 3~4 cm(0.5 cm 간격), 그리고 4~10 cm(1 cm 간격))으로 나누어 취한 후 실험 목적에 따라 분석하였다.

퇴적물 내 유기탄소양은 퇴적물을 동결 건조 후 건조된 퇴적물 일정량을 1 N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거하였다. 무기탄소를 제거한 후 증류수를 이용하여 염산을 완전 제거 후 동결 건조기를 이용하여 시료를 재건조하였다. 건조된 퇴적물 시료는 원소-질량분석기(EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)를 이용하여 퇴적물 내 유기탄소 함량을 측정하였다.

퇴적물 내 저서미세조류 보조색소 분석 방법

고성능 액체크로마토그래피(High-Performance Liquid Chromatography; HPLC)를 이용한 저서미세조류의 광합성 색소 분석은 깊이 별로 채집된 퇴적물 시료를 동결 건조시킨 다음 건조량을 측정하였다. 그리고 퇴적물을 50 ml tube에 넣은 후, 100 μ l의 내부표준물질 canthaxanthin (internal standard)을 첨가한 후 100% 아세톤 10 ml를 넣은 후 냉암소(-20°C)에서 24시간 방치 후 추출하였다. 추출된 색소는 Syringe filter (PTFE 0.2 μ m Hydrophobic)를 이용하여 여과 후 1 ml를 취한 후 Water packing (300 μ l 3차 증류수 혼합)하여 분석하였다. High-Performance

Liquid Chromatography (HPLC)를 이용하여 Zapata et al. (2000)의 방법에 따라 분석 하였다. Waters Symmetry C8 (150×4.6 mm, 3.5 μm) 컬럼과 이동상 용매 A (Methanol: 50%, Acetonitrile: 25%, Aqueous pyridine solution: 25%) 와 이동상 용매 B(Methanol: 20%, Acetonitrile: 60%, Acetone: 20%)를 이용하여 분석하였으며, 이동상 용매의 조건은 분석 시간에 따라(time in min, %B): 0 min, 0%; 20 min, 40%; 26 min, 95%; 38 min, 95%; 40 min, 0% 각각 다른 gradient를 주었다. 초기 조건을 맞추기 위해 분석 후 10분간 시간 간격을 주었으며, 분당 1 ml의 이동상 용매 흐름을 주고, 100 μl를 주입하여 분석하였다. 각각의 물질들은 440 nm (wavelength range: 250-750 nm, 1.2 nm spectral resolution)에서 검출하였다. Chromatogram의 봉우리(peak)에 대한 동정은 표준색소(DHI water & Environment, Hørsholm, Denmark.)의 머무름 시간(retention time) 과 비교 결정하였다. 표준색소의 농도는 Jeffrey 의해 알려진 흡광계수(Jeffrey et al. 1997)를 이용하여 계산하였다. Standard response factor(RF) 값은 표준물질의 peak 면적을 계산하고, 이 면적으로 표준물질의 농도를 나누어 계산 하였다.

퇴적물 내 ATP 분석 방법

퇴적물 내 ATP 분석은 Hyun et al. (2002)의 방법을 이용하여 실시하였다. 총 ATP 시료의 전처리를 위해 층별로 채집된 퇴적물 시료(2.5 cm 코어사용)를 0.5 M 인산 용액 10 ml에 넣고 4°C에서 15분간 ATP를 추출한 후, 원심분리기(3,500 rpm에서 10분간)를 사용하여 ATP와 퇴적물을

분리하였다. 분리된 ATP 추출용액 5 ml에 이온물질 및 중금속 이온에 의한 발광감소 효과를 방지하기 위해 phosphate buffer (60 mM)로 만든 0.048 M Na₂-EDTA 용액 1 ml을 더한 후, 1 N NaOH 용액을 사용하여 pH를 7.4로 맞추었다. 마지막으로 phosphate buffer를 사용하여 총 시료의 부피를 11 ml로 맞춘 후 실험실에서 분석 때까지 -20°C에서 냉동 보관하였다(Karl 1993). 실험실에서 ATP 양이 luminometer (Turner designs model 20e)를 통해서 ATP standard (ATP disodium salt hydrate (Sigma #FLAAS))로 결정된 검량선을 사용하여 정량하였다.

통계

유기탄소 함량과 ATP, 조류의 색소와 ATP 간의 상관관계를 알아보기 위한 통계분석은 SPSS(Version 18.0)를 이용한 단순 회귀분석을 통하여 결정계수(R²)을 구하였으며, 두 정점간 색소의 차이는 T-test를 통하여 유의성을 검증하였다. 또한 모든 결과값은 표준편차와 함께하여 표시하였다.

3. 결 과

퇴적 환경에 따른 pigment 결과

웅진군 내 두 정점의 퇴적 깊이에 따른 chl a의 분포 양상은 표층에서 높고 깊이에 따라 점차 감소하는 경향을 두 정점 모두에서 보이고 있다(Fig. 3). 선재도 내 정점 SJ-1의 chl a의 깊이 별 분포는 표층에서 0.92(±0.25) mg m⁻² 값을 보인 후 퇴적 깊이 2 cm에서 최소값 0.28(±0.1) mg

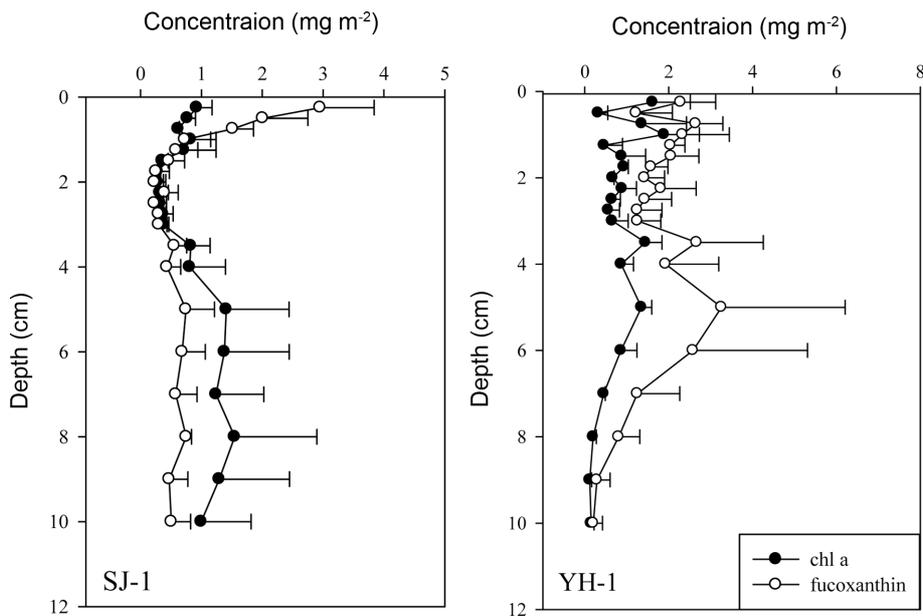


Fig. 3. Depth profiles of chlorophyll a and fucoxanthin concentration ($\mu\text{g/g}$ (dry wt.)) for muddy and sandy intertidal sediments of the Sunjae Do (SJ-1) and Younghyng Do (YH-1) estuary. Bars indicate standard deviation ($n = 3$)

m^{-2} 보이고 있다. Chl a 농도는 표층에서 2 cm까지 감소하다가 퇴적 깊이가 더 깊어질수록 오히려 증가한 경향을 보이고 있다. 그러나 영흥도 내 정점 YH-1은 사질로 이루어진 정점으로서 chl a의 절대값이 선재도에 비해 약 2배 이상 높은 농도를 보이고 있다. 정점 YH-1에서 chl a의 농도는 표층에서 $1.62(\pm 0.9) \text{ mg m}^{-2}$ 을 나타냈으며, 최소값은 $0.15(\pm 0.07) \text{ mg m}^{-2}$ 으로 깊이 10 cm에서 나타나고 있다. 정점 YH-1은 표층 퇴적물에서 최대값을 보인 후 퇴적 깊이에 따라 감소하는 특징을 보이고 있다(Fig. 3).

한편 두 정점 모두 퇴적물 내 측정된 보조색소 중 fucoxanthin이 가장 두드러지게 높은 농도를 보이고 있다(Fig. 3). 정점 SJ-1의 경우, fucoxanthin의 함량은 퇴적물 표층에서 chl a의 함량 보다 높은 $2.95(\pm 0.89) \text{ mg m}^{-2}$ 의 값을 보이고 있다. Fucoxanthin 함량의 깊이 별 분포는 표

층에서 가장 높은 값을 보인 후 퇴적물 깊이 1 cm 이후부터 낮은 값으로 거의 일정한 농도를 보이고 있다(Fig. 3). 정점 SJ-1의 fucoxanthin의 깊이 별 함량 분포는 표층에서 가장 높고 퇴적 깊이가 깊어짐에 따라 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 YH-1의 fucoxanthin의 함량은 표층 퇴적물에서 퇴적 깊이 6 cm까지 $1.22(\pm 0.87) - 3.26(\pm 2.95) \text{ mg m}^{-2}$ 값을 보인 후 퇴적 깊이 10 cm에서 최소값 $0.2(\pm 0.22) \text{ mg m}^{-2}$ 값을 보인다(Fig. 3). 정점 YH-1의 fucoxanthin 깊이별 함량은 SJ-1와 확연히 다른 깊이별 분포양상을 보이고 있다. 한편, 다른 보조색소의 경우 fucoxanthin에 비해 절대값은 상당히 낮은 값을 보이고 있지만 fucoxanthin과 chl a의 깊이 별 함량 분포 양상과 비슷하게 전체적으로 깊이에 따라 감소하는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다.

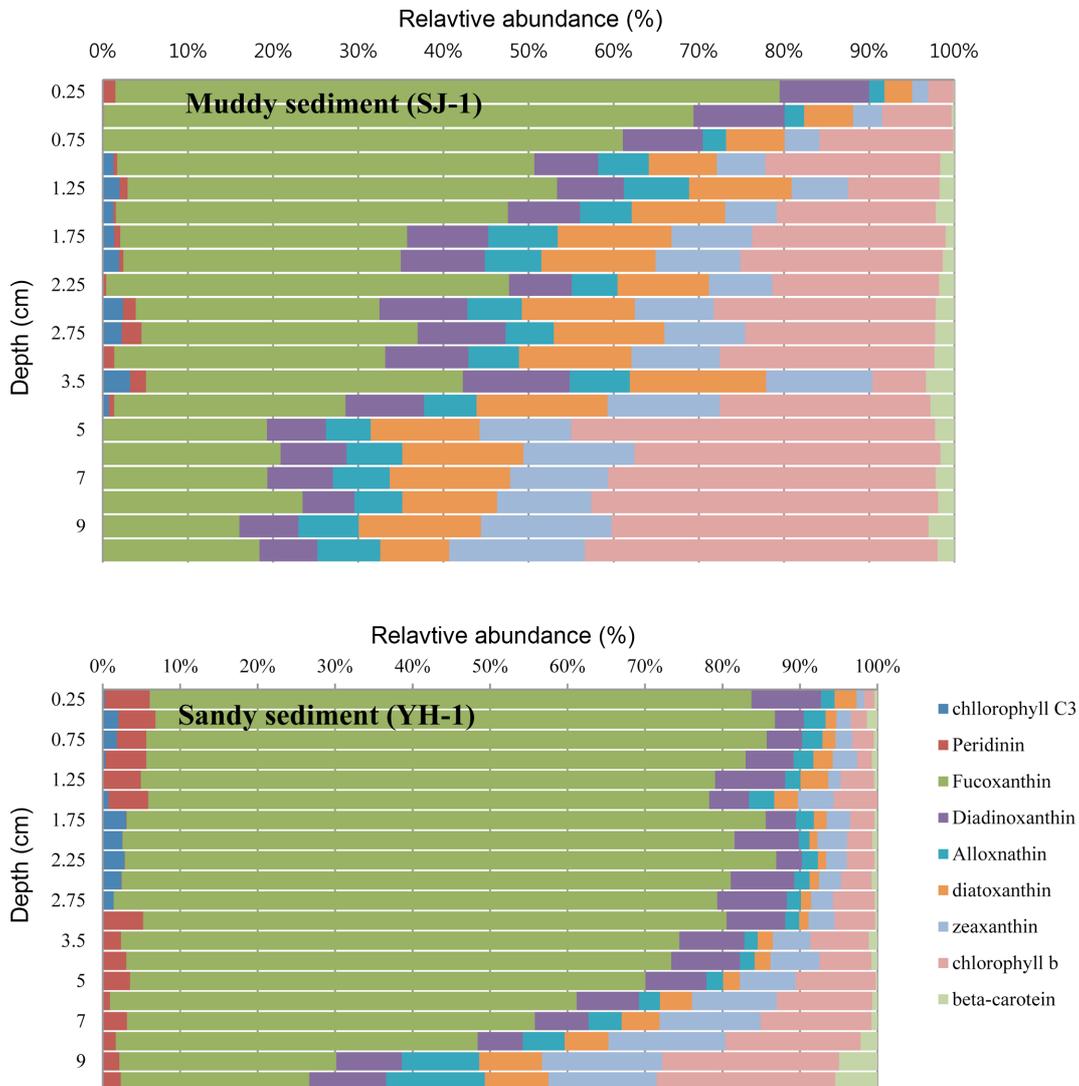


Fig. 4. Relative abundance (%) of each pigment at Sunjae Do (SJ-1) and Younghyng Do (YH-1) estuary. (Each pigment was expressed the relative ratio to chlorophyll a)

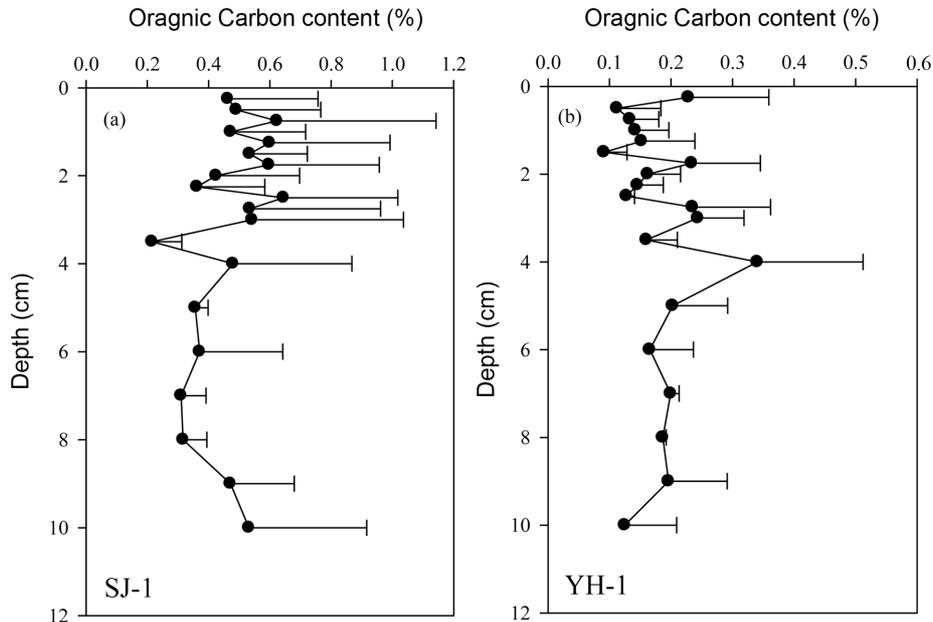


Fig. 5. Depth profiles of Organic Carbon content (%) for muddy and sandy intertidal sediments of the Sunjae Do (SJ-1) and Younghyng Do (YH-1) estuary. Bars indicate standard deviation ($n=3$)

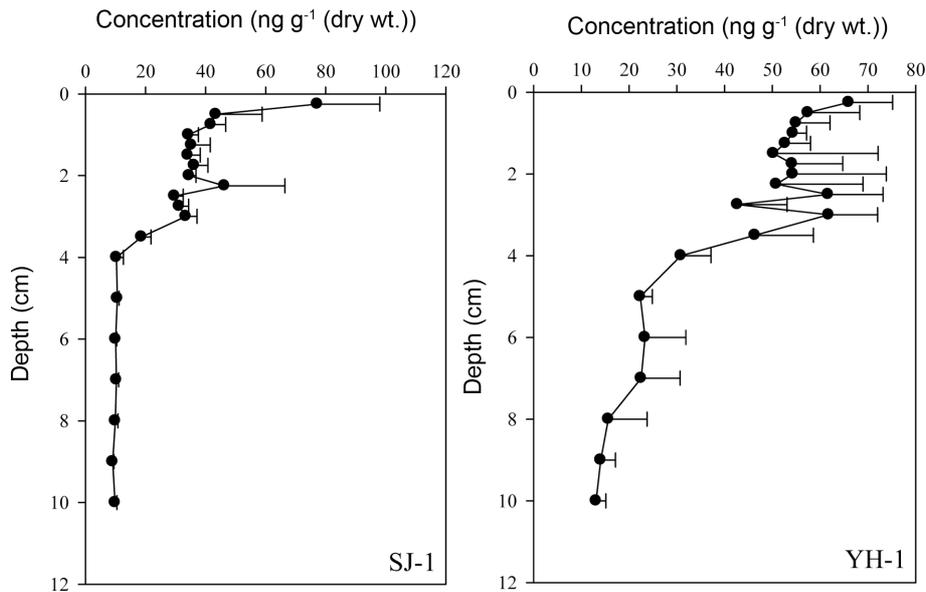


Fig. 6. Depth profiles of ATP concentration (ng/g (dry wt.)) for muddy and sandy intertidal sediments of the Sunjae Do (SJ-1) and Younghyng Do (YH-1) estuary. Bars indicate standard deviation ($n=3$)

두 정점 모두에서 chlorophyll C₃, peridinin, fucoxanthin, diadinoxanthin, alloxanthin, diatoxanthin, zeaxanthin, chlorophyll b, β -carotene, 그리고 색소 분해 산물인 pheophytin a가 검출되었다(Fig. 4). 퇴적 환경에 따라 chlorophyll C₃와 β -carotene은 유의한 차이를 보이고 있지 않지만, 나머지 보조색소들은 유의한 차이를 보이고 있다. 정점 SJ-1의 니질 퇴적물 내 peridinin, diadinoxanthin, alloxanthin, zeaxanthin, 그리고 chlorophyll b는 chl a에

대한 높은 상대적인 비를 가지고 있는 반면, 정점 YH-1의 사질 퇴적물은 fucoxanthin과 pheophytin a가 정점 SJ-1의 니질 퇴적물에 비해 상대적인 비가 높게 나타내고 있다(Fig. 4).

퇴적물 내 유기탄소의 깊이별 분포는 두 정점 모두 큰 변동 없이 나타나고 있다. 그러나 니질 퇴적 환경인 SJ-1의 평균 유기탄소는 $0.47 \pm 0.19\%$ 로 사질 퇴적 환경인 YH-1(평균: $0.18 \pm 0.04\%$) 보다 높은 유기 탄소 값을 나

타내고 있다(Fig. 5). 그러나 비록 SJ-1의 유기탄소 값이 YH-1보다 높은 값을 보이고 있으나, 다른 지역보다 상당히 낮은 유기 탄소 함량을 본 연구 지역에서 보이고 있다 (Hyun et al. 2002; Cartaxana et al. 2006).

퇴적 환경에 따른 ATP 결과

총 미생물 생체량(total microbial biomass)를 간접적으로 측정된 ATP의 깊이별 분포는 정점 SJ-1과 YH-1 모두 표층 퇴적물에서 가장 높은 값을 보이고 있다. 니질 퇴적물인 SJ-1($77.2(\pm 20.79)$ ng/cm³ sedi.)의 표층 퇴적물 내 존재하는 총 미생물 생체량은 사질 퇴적물인 YH-1($65.98(\pm 9.18)$ ng/cm³ sedi.)보다 상대적으로 높은 값을 보이고 있다(Fig. 6). 그러나 두 정점 모두 퇴적 깊이가 깊어짐에 따라 총 미생물 생체량은 줄어드는 경향을 보이고 있다. 정점 SJ-1의 경우의 ATP 함량은 최소 $9.06(\pm 0.43)$ ng/cm³ sedi. 값을 나타내고 있으며, 정점 YH-1의 최소값은 $13.1(\pm 2.05)$ ng/cm³ sedi. 값을 나타내므로 최소값에서는 YH-1이 상대적으로 SJ-1보다 높은 값을 보이고 있다. 정점 SJ-1의 경우 표층 퇴적물에서 급격하게 ATP 함량이 감소된 후, 퇴적 깊이가 0.5 cm에서 3 cm까지 비교적 고르게 분포하고 있는 반면 정점 YH-1은 표층 퇴적물(0.25 cm)에서 3 cm까지 고른 분포를 보이고 있다(Fig. 6).

4. 고 찰

퇴적 환경에 따른 pigment 분포 및 깊이 별 분포 양상

본 연구에서 퇴적물 내 chl a의 분포 양상은 퇴적 환경에 따라 서로 다른 경향을 보이고 있다(Fig. 3). 특히 사질 퇴적물 내 chl a 함량은 니질 퇴적물 내 chl a 함량에 비해 높을 뿐만 아니라 규조류의 지시 색소인 fucoxanthin의 함량 또한 높게 나타나고 있다. Cahoon and Safi (2002)의 보고에 따르면 Manukau Harbour의 경우 각각의 퇴적물 입도 구성에 따라 퇴적물 내 chl a의 함량 수준이 서로 다르게 나타나고 있으며, 그 외 여러 하구역에서도 니질의 퇴적물에서 사질의 퇴적물 보다 낮은 chl a의 함량을 보였다 (Cahoon et al. 1999; Miles and Sundbäck 2000). 니질 퇴적물 내 chl a 함량이 낮은 이유는 퇴적물 내 틈새 공간(interstitial space volumes), 영양염 플럭스(nutrient fluxes), 그리고 빛 투과와 같은 요인들에 의해 상대적으로 적은 저서미세조류의 생체량을 보인다고 보고하고 있다(Cahoon and Safi 2002; Cartaxana et al. 2006). 또한 니질 퇴적물 내의 저서 미세조류의 군집 구조는 사질 퇴적물 내 저서 미세조류 군집 구조와 다를 수 있는데(Round 1971), 이와 같이 퇴적 환경에 따라 서로 다른 저서미세조류 군집을 보이는 것은 퇴적 환경 내 저서미세조류 성장률과 최대 현존량(standing crop)이 다르기 때문이며, 나아가 퇴적 환

경 내 상위 포식자에 의한 제거 또는 섭식 선호도에 의한 영향으로 서로 다른 군집 구조를 보일 수도 있다(Cahoon and Safi 2002). 결국 퇴적물 조성 및 저서 미세조류 생체량 간의 관계는 그 지역 특성에 따른 환경 요인에 크게 좌우 되는 것으로 사료된다(Cahoon and Safi 2002).

본 연구 지역의 니질 표층 퇴적물은, 상대적으로 낮은 chl a 함량을 보이고 있으며, 오히려 높은 fucoxanthin 함량을 표층 퇴적물에서 보이고 있다(Fig. 3). 일반적으로 chl a 함량은 조류나 파도와 같은 물리적 에너지의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으며(de Jonge 1992; de Jonge and van Beusekom 1995), 서해안과 같이 조류가 세고 깊이가 얇은 퇴적물은 퇴적물과 수주 사이의 연직 혼합이 활발하게 일어나 퇴적물 교란이 활발해 퇴적물 내 chl a 함량이 낮아진다고 보고하고 있다(de Jonge 1992; Lee et al. 2009). 또한 우리나라 다른 지역에 비해서도 표층 퇴적물에서 상대적으로 낮은 chl a 함량을 나타내고 있다(Yoo and Choi 2005; Lee et al. 2009). 표층 퇴적물 뿐만 아니라 퇴적물 내 낮은 chl a 함량을 갖게 하는 중요한 요인은 저서 동물에 의한 높은 섭식 활동이며(Bayne et al. 1987; Hawkins and Bayne 1992), 특히 본 연구 지역은 바지락 어장으로서 다른 요인보다 저서 동물의 섭식 활동이 퇴적물 내 chl a 함량을 낮게 하는 중요한 요인 중 하나로 사료된다. 또한 저서 미세조류는 이매패류의 중요한 먹이원으로, 저서미세조류의 생체량은 이매패류의 높은 서식 밀도에 의해 제한되는 것으로 알려져 있다(Bayne et al. 1987; Hawkins and Bayne 1992). 본 연구 지역은 바지락 양식장이며, 두 정점의 연평균 바지락 서식밀도는 사질 퇴적물인 정점 YH-1은 $615(\pm 106)$ 개체/m² 임에 비해 니질 퇴적물인 정점 SJ-1의 바지락 서식밀도는 연평균 $91(\pm 24)$ 개체/m²로 상당히 낮은 개체군을 보이고 있다. 따라서 본 연구 결과는 바지락 개체수에 의해 저서 미세조류의 생체량이 조절되는 것 보다 낮은 저서미세조류 생체량에 의한 바지락 먹이원의 제한적 공급에 의해 바지락의 서식 밀도가 조절되는 반대의 결과를 보이고 있다. 또한 본 연구 지역 중 사질 퇴적환경에서 서식하는 바지락의 연 평균 비만도는 $0.48(\pm 0.10)$ 으로 니질 퇴적환경에서 서식하는 바지락(0.46 ± 0.12)에 비하여 높게 나타났다(not published). 이와 같은 결과는 니질 퇴적환경보다 사질 퇴적환경에서 높게 나타난 저서미세조류의 생체량이 바지락의 성장에 유리한 조건으로 작용하는 것으로 사료된다.

HPLC를 이용하여 분석된 보조색소의 분포는 니질과 사질 퇴적물 내 현존하는 조류 군집의 생체량을 표현하기 어렵지만, 두 정점에서 퇴적물 종류에 상관없이 모두 fucoxanthin, diadinoxanthin, diatoxanthin, 그리고 β -carotene이 검출되는 것으로 규조류가 우점하고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 또한 Zeaxanthin이 퇴적물 내에서 검

출됨으로서 저서미세조류 군집에 남조류가 포함됨을 알 수 있으며, chlorophyll b 역시 적은 양이지만 검출되는 것으로 두 정점 모두에 green algae 계열의 조류가 존재하고 있는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한 색소의 수직 분포 결과 니질의 경우 규조류의 지시색소인 fucoxanthin 이 약 50% 이상 차지한 퇴적 깊이는 1.5 cm에 이르는 반면, 사질 퇴적물의 경우 fucoxanthin의 엽록소 a에 대한 상대적인 비가 다른 색소에 비해 약 50% 이상인 깊이는 니질 퇴적물 보다 깊은 7 cm에 이르는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 4). 따라서 일반적으로 공극이 니질에 비해 높은 사질 퇴적물의 경우 저서규조류의 깊이별 분포가 상당히 깊은 것을 확인하였다. 이러한 결과는 저서규조류의 수직 이동에 의한 수직 분포 양상을 나타내는 것으로 사료된다. 저서규조류의 수직 이동은 퇴적물 입도크기에 따라 상당한 관계가 있다(Du et al. 2010). 저서규조류가 이동할 수 있는 입도 사이의 공간은 퇴적물의 입도크기와 공기 정도와 상당히 밀접한 관계를 가지고 있기 때문이다(Flemming and Delafonatione 2000). 또한 퇴적물의 특성은 저서규조류의 이동에 영향을 미치는 중요한 요인으로서, 큰 입도를 가진 퇴적물 내 저서규조류는 강한 빛 자극에 민감하고 반응할 수 있으며, 비교적 넓은 공간으로 인하여 쉽게 이동할 수 있기 때문이다(Du et al. 2010). 따라서 본 연구 결과, 사질 퇴적물 내 저서규조류 색소의 분포는 니질 퇴적물보다 더 깊은 퇴적 깊이까지 분포하고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 4).

퇴적 환경에 따른 ATP 분포와 저서미세조류 간 상관관계

본 연구 지역의 서로 다른 퇴적물내의 ATP 함량은 분석 결과 대부분의 미생물이 표층 3 cm 이내에 분포하는 것으로 나타났으며(Fig. 6), 유기탄소 함량과 ATP간의 상관관계에서는 Hyun et al. (2002)의 결과와 같이 연안 조간대에서는 유의성을 보이지 않았다(Fig. 7). 또한 본 연구 지역에서 분석된 ATP의 분포 양상은 연안조간대임에도 불구하고 다른 지역에 비해 상대적으로 낮은 값을 보이고 있으며(Table 1), 본 연구 지역은 유기탄소 함량과 ATP 간의 유의한 상관관계가 없이 ATP 함량의 증가에 비해 유기탄소 함량이 일정하게 나타났다(Fig. 7a). 그러나 정점 YH-1의 사질 퇴적물의 경우 저서미세조류 chl a 농도와 ATP 농도 사이에 유의한 상관관계를 확인할 수 있었다(Fig. 6b). 따라서 본 연구지역 중 사질 퇴적물이 우세한 YH-1 정점에서는 저서미세조류 기원 유기물이 다른 유기물 공급원(육상기원 또는 쇄설유기물 등)에 비해 기여가 크며, 퇴적물 내 미생물 활성이 저서미세조류 기원 유기물에 상대적으로 의존적인 것으로 사료된다(Fig. 7). Danovaro et al. (1994)의 보고에 의하면, 박테리아 생체량과 chl a 함량과 상당히 밀접한 관계를 보이고 있다. 박테리아와 저서미

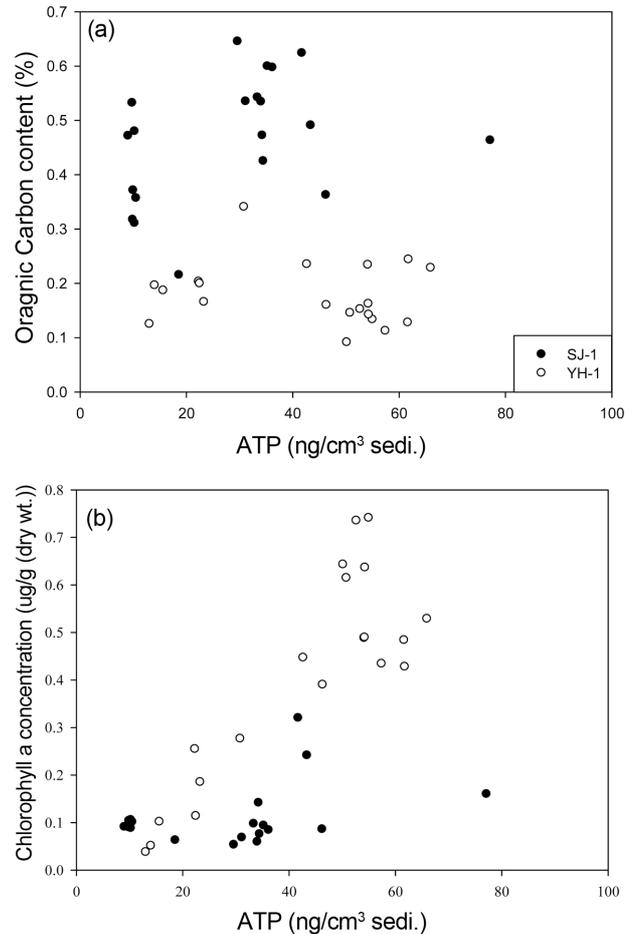


Fig. 7. Relationship between (a) organic carbon and ATP, (b) chlorophyll a concentration and ATP according to sediment type at Hwasung estuary

세조류는 무기영양염을 이용하는데 비슷한 양상을 보이고 있으며(Kirchman et al. 1989), 이러한 결과는 박테리아에 의해 재광물화(remineralization)된 영양염을 저서미세조류가 이용하기 때문이라고 설명하고 있다(Danovaro et al. 1994). 그러나 퇴적물 내 색소 분해산물인 pheophytin a 함량의 chl a 함량에 대한 상대적인 비와 ATP 함량과 비교할 때 사질 퇴적물(YH-1)에서 역의 상관관계를 나타내어, 미생물 생체량은 색소 분해산물인 pheophytin a 함량이 상대적으로 커질수록 미생물 생체량(또는 활성도)는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 8). 색소 분해 산물인 pheophytin은 labile 식물플랑크톤 쇄설물의 지시자로서 사용될 수 있는 것으로 알려져 있으며(Stephens et al. 1997), 박테리아 생체량은 specific labile compounds(지질, 탄수화물, 그리고 단백질)와는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다고 알려져 있다(Alongi 1990; Danovaro et al. 1994). 따라서 식물플랑크톤 기원 유기물의 분해 쇄설물을 지시하는 pheophytin과 박테리아의 생체량간 역의 상관관계를 통하여 박테리아의

Table 1. Distributions of ATP concentration (ng cm⁻³) in various marine sediments (From Hyun et al. 2002)

		ATP, ng cm ⁻³		References
Costal sediment	Spaleo Island, GA (0-1 cm)	April	1000	Christian et al. 1975
		July	3570	
		Oct	2040	
		Dec	2720	
		Feb	935	
	Newport River Estuary, NC (0-1 cm)	Winter	640	Ferguson and Murdoch 1975
		summer	1180	
	Youngjong tidal flat (June) (0-1 cm)	Clayey silt	2554	Hyun et al. 2002
		Sandy silt	1751	
	Hwasung tidal flat (Nov.) (0-1 cm)	Muddy	276-390	This study
sandy		429-486		
Deep-Sea sedimnet	Nares abyssal plain (6011 m depth) (0-1 cm)		2.4	Karl et al. 1980
	East Pacific Ocean (5300 m depth) (0-1 cm)		2.3-5.8 ^a	Hyun et al. 1998
	East Pacific Ocean (5000 m depth) (0-1 cm)		4.9-7.2	
	Ayu trough (3900 m depth) (0.1 cm)		30.1-64.0	Hyun et al. 2002
Hydrothermal vent	East Pacific Rise		98 ^a	Karl et al. 1984
	Guaymas Basin		68-1005	Haberstroh and Karl 1989

^aValues were recalculated from ng ATP per g dry sediment

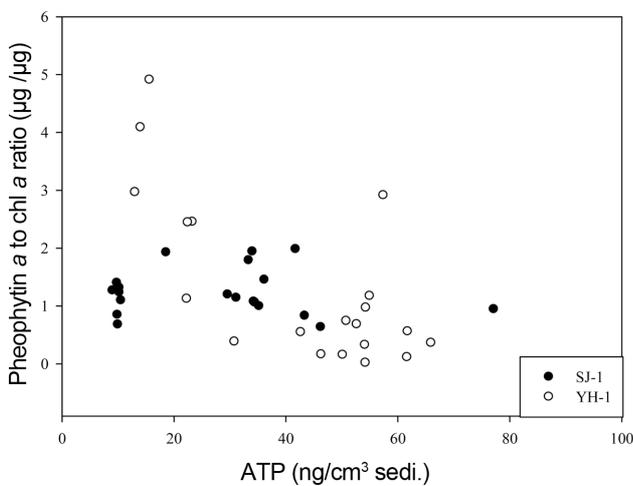


Fig. 8. Relationship between pheophytin a to chl a ratio and ATP according to sediment type at Hwasong estuary

생체량은 쇠설성 유기물 보다 저서미세조류의 chl a 농도에 의해 조절되고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

본 연구 결과, 수층 및 저서미세조류 기원 유기탄소가 표층 퇴적물에 원활하고 활발하게 공급됨으로 미생물 활성이 표층 퇴적물 3 cm 이내에서 높은 것을 보이는 것으로 사료되며, 특히 사질 퇴적 환경에서는 저서미세조류와 퇴적물 내 미생물 생체량사이에 높은 상관성을 확인할 수 있었다(Fig. 7). 그러나 니질 퇴적물이 우세한 SJ-1 정점의 경우 유기탄소 함량, chl a 함량에 대한 pheophytin a 함량의 비와 ATP 간 상관관계 모두 유의성을 나타내지 않고 있다(Fig. 7와 8). 저서미세조류 기원의 유기탄소가 미생물 생체량에 미치는 영향은 니질 퇴적물의 경우 상대적으로 매우 낮은 것을 볼 수 있으며, 오히려 쇠설성 유기물의 기여가 상대적으로 큰 것으로 보인다. 쇠설성 유기물의 기여가 니질 퇴적물에서 상대적으로 높은 것은 chl a와 org. C 함량비(chl a/org. C)에서도 나타난다. 니질 퇴적물

이 우세한 선제도 정점(SJ-1)에서의 chl a/org. C 값은 평균 $0.0009(\pm 0.0005)$ $\mu\text{g chl a}/\mu\text{gC}$ 으로 저서미세조류 기원 유기물의 공급이 원활한 영흥도 정점(YH-1)의 평균 $0.005(\pm 0.002)$ $\mu\text{g chl a}/\mu\text{gC}$ 보다 낮은 값을 보이고 있다. 따라서 본 연구지역의 니질 퇴적물은 사질 퇴적물에 비해 상대적으로 높은 유기탄소 함량을 보임에도 불구하고 오랜 시간 분해가 진행된 쇄설유기물의 크게 기여하는 것으로 여겨진다. 따라서 쇄설유기물의 기여가 많은 니질 퇴적물보다 상대적으로 저서미세조류가 주요한 유기물인 사질 퇴적물에서 미생물 생체량이 높은 것으로 해석될 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 퇴적물의 색소 분석을 통하여 퇴적 환경이 서로 다른 바지락 어장 퇴적물 내 저서미세조류의 생체량 및 분포 특성을 규명하고자 하였으며, ATP를 통하여 저서미세조류와 총 미생물간 상관 관계를 살펴 보고자 하였다.

본 연구에서 HPLC를 이용한 저서미세조류의 보조색소를 분석한 결과 두 연구 정점 모두 저서 규조류 군집이 절대 우점하고 있는 것을 볼 수 있었다. 또한 퇴적 환경에 따른 (사질 퇴적물과 니질 퇴적물) 저서 규조류의 수직 이동의 차이를 보이고 있었으며, 공극이 비교적 큰 사질 퇴적물에서 저서 미세규조류의 활발한 수직 이동이 확인되었다.

여과섭식자의 중요한 먹이원으로 알려져 있는 저서미세조류의 생체량은 사질 퇴적물이 니질 퇴적물보다 상대적으로 높았으며, 이러한 저서미세조류 생체량의 차이는 서식처의 퇴적환경에 따른 바지락의 서식 밀도의 차이를 야기하는 하나의 요인으로 사료된다.

또한 본 연구를 통해 사질 퇴적물 내 유기물 공급은 저서미세조류 기원 유기 탄소의 영향이 두드러짐을 볼 수 있었으며, 저서미세조류 기원 유기 탄소는 특히 사질 퇴적물 내 미생물 생체량 분포에 가장 큰 영향 인자로 작용하고 있는 것을 확인하였다.

이러한 퇴적환경에 따른 유기물의 차이는 서식환경에 따른 바지락의 성장, 서식 밀도등과 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 소관 해양생명공학기술개발사업(20090267)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 본 연구는 농림수산식품부 소관 천수만, 가로림만, 웅진군 어장 환경 생태조사(21123033800)와 수산 실용화 사업(112093-03-1-GC000)의 연구비 지원에 의해 수행되었습

니다. 본 연구에 있어 많은 도움을 주신 한양대학교의 현정호 교수님과 조혜연님께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- Alongi DM (1990) Bacterial growth rates, production and estimates of detrital carbon utilization in deep-sea sediments of the Solomon and Coral Seas. *Deep-Sea Res* **37**(5): 731-746
- Aneeshkumar N, Sujatha CH (2012) Biomarker pigment signatures in Cochin back water system - A tropical estuary south west coast of India. *Est Coast Mar Sci* **99**:182-190
- Azam F, Hodson RE (1977) Dissolved ATP in the sea and its utilization by marine bacteria. *Nature* **267**:696-698
- Bigdare RP, Frank TJ, Zastrow C, Brooks JM (1986) The distribution of algal chlorophylls and their degradation products in the Southern Ocean. *Deep-Sea Res* **33**(7): 923-937
- Baillie PW, Welsh BL (1980) The effect of tidal resuspension on the distribution of intertidal epipelagic algae in an estuary. *Est Coast Mar Sci* **10**(2):165-180
- Bayne BL, Hawkins AJS, Navaro E (1987) Feeding and digestion by the mussel *Mytilus edulis* L. (Bivalvia: Mollusca) in mixture of silt and algal cells at low concentrations. *J Exp Mar Biol Ecol* **111**(1):1-22
- Burkill PH, Mantoura RFC, Llewellyn CA, Owens NJP (1987) Microzooplankton grazing and selectivity of phytoplankton in coastal waters. *Mar Biol* **93**(4):581-590
- Cadée GC, Hegeman J (1974) Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. *Neth J Sea Res* **8**(2-3):260-291
- Cahoon LB, Nearhoof JE, Tilton SL (1999) Sediment grain size effect on benthic microalgal biomass in shallow aquatic ecosystems. *Estuaries* **22**(3):735-741
- Cahoon LB, Safi KA (2002) Distribution and biomass of benthic microalgae in Manukau Harbour, New Zealand. *NZ J Mar Freshw Res* **36**(2):257-266
- Cartaxana P, Mendes CR, van Leeuwe MA, Brotas V (2006) Comparative study on microphytobenthic pigments of muddy and sandy intertidal sediments of the Tagus estuary. *Est Coast Mar Sci* **66**(1-2):225-230
- Colijn F, de Jonge VN (1984) Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary. *Mar Ecol Prog Ser* **14**:185-196
- Connor MS, Edgar RK (1982) Selective grazing by the mud snail *Hyanassa obsolete*. *Oecologia* **53**:271-275
- Danovaro R, Faviano M, Boyer M (1994) Seasonal changes of benthic bacteria in a seagrass bed (*Posidonia oceanica*)

- of the Ligurian Sea in relation to origin, composition and fate of the sediment organic matter. *Mar Biol* **119**: 489-500
- De Jonge VN (1992) Physical processes and dynamics of microphytobenthos in the Ems estuary (the Netherlands). Ph.D. Thesis, University of Groningen, 176 p
- De Jonge VN, Colijn F (1994) Dynamics of microphytobenthos biomass in the Ems estuary. *Mar Ecol Prog Ser* **104**:185-196
- De Jonge VN, van Beusekom JEE (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
- De Jonge VN, van Beusekom JEE (1995) Wind and tide induced resuspension of sediment and microphytobenthos in the Ems estuary. *Limnol Oceanogr* **40**(4):766-778
- Dobbs FC, Findlay RH (1993) Analysis of microbial lipids to determine biomass and detect the response of sedimentary microorganisms to disturbance. In: Kemp PF, Sherr BF, Sherr EB, Cole JJ (eds) *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp 347-358
- Du G, Chung IK (2007) Spatio-temporal variation of intertidal microphytobenthos in the Nakdong Estuary. *J Korean Soc Oceanogr* **12**:186-190
- Fenchel T, King GM, Blackburn TH (1998) Bacterial biogeochemistry. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA, 307 p
- Haberstroh PR, Karl DM (1989) Dissolved free amino acids in hydrothermal vent habitats of the Guaymas Basin. *Geochim Cosmochim Acta* **53**(11):2937-2945
- Hawkins AJS, Bayne BL (1992) Physiological interrelations and the regulation of production. In: Gosling (ed) *The Mussel Mytilus: Ecology, Physiology, Genetics and Culture*. Elsevier, Amsterdam, pp 171-212
- Hodson RE, Maccubbin AE, Pomeroy LR (1981) Dissolved adenosine triphosphate utilization by free-living and attached bacterioplankton. *Mar Biol* **64**:43-51
- Holm-Hansen O, Booth CR (1966) The measurement of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance. *Limnol Oceanogr* **11**:510-519
- Hughes EH, Sherr EB (1983) Subtidal food webs in a Georgia estuary: Delta ¹³C analysis. *J Exp Mar Biol Ecol* **67**:227-242
- Hulett HR (1970) Non-enzymatic hydrolysis of adenosine phosphates. *Nature* **225**:1248-1249
- Hyun JH, Kim KH, Chi SB, Moon JW (1998) Distribution of ATP in the deep-sea sediment in the KODOS 97-2 area, northeast equatorial Pacific Ocean. *J Korean Soc Oceanogr* **3**:142-148
- Hyun JH, Kim KH, Kwon KK, Lee JH, Lee HK, Kim SJ, Kim KH (2002) Total microbial biomass measured by ATP in three marine sedimentary environments. *Korean J Microbiol* **38**:119-126
- Jeffrey SW, Mantoura RFC, Wright SW (1997) *Phytoplankton pigments in oceanography: Guidelines to modern methods*. UNESCO Publishing, 661 p
- Karl DM (1978) Distribution, abundance, and metabolic states of microorganisms in the water column and sediments of the Black Sea. *Limnol Oceanogr* **23**:936-949
- Karl DM (1993) Total microbial biomass estimation derived from the measurement of particulate adenosine-5'-triphosphate. In: Kemp PF, Sherr BF, Sherr EB, Cole JJ (eds) *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp 359-368
- Kirchman D, Soto Y, Van Wambeke F, Bianchi M (1989) Bacterial production in the Rhône Rive plume: effect of mixing on relationships among microbial assemblages. *Mar Ecol Prog Ser* **53**:267-275
- Kim JH, Cho KJ (1985) The physico-chemical properties of sediment, the species composition and biomass of benthic diatoms in the intertidal zone of Keum River estuary. *Korean J Ecol* **8**:199-207
- LaRock PA, Lauder RD, Schwarz JR, Watanabe KK, Wiesenburg DA (1979) Microbial biomass and activity distribution in an anoxic, hypersaline basin. *Appl Environ Microbiol* **37**:466-470
- Lee Y, Choi E, Kim Y, Kang C (2009) Seasonal variations of microphytobenthos in sediments of the estuarine muddy sandflat of Gwangyang Bay: HPLC pigment analysis. *J Korean Soc Oceanogr* **14**:48-55
- Lee YW (2001) Studies on pigment analysis of microphytobenthos by HPLC in the sediment of Gomso Bay, Korea. MS Thesis, Pukyong National University, 56 p
- Liang YB, Zhang XC, Wang LJ, Yang B, Zhang Y, Cai CL (2001) Prevalence of *Perkinsus* sp. in the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*, along the northern coast of the Yellow Sea in China. *Oceanol Limnol Sinica* **32**:502-511
- Lukatelich RJ, McComb AJ (1986) Distribution and abundance of benthic microalgae in a shallow south-western Australian estuarine system. *Mar Ecol Prog Ser* **2**:287-297
- MacIntyre HL, Cullen JJ (1995) Fine-scale vertical resolution of chlorophyll and photosynthetic parameters in shallow-water benthos. *Mar Ecol Prog Ser* **122**:227-237
- Mélédér V, Barillé L, Rincé Y, Morancais M, Rosa P, Gaudin P (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
- Miles A, Sundbäck K (2000) Diel variation in microphytobenthic productivity in areas of different tidal amplitude. *Mar Ecol Prog Ser* **205**:11-22
- Montagna PA (1984) *In situ* measurement of meiobenthic grazing rates on sediment bacteria and edaphic diatoms. *Mar Ecol Prog Ser* **18**:119-130
- Montani S, Magni P, Abe N (2003) Seasonal and interannual patterns of intertidal microphytobenthos in combination with laboratory and areal production estimates. *Mar Ecol Prog Ser* **249**:79-91
- Oh SH, Koh CH (1995) Distribution of diatoms in the surficial sediments of the Mangyung-Dongjin tidal flat, west coast of Korea (Eastn Yellow Sea). *Mar Biol* **122**:487-496
- Oh SJ, Moon CH, Park MO (2004) HPLC analysis of biomass and community composition of microphytobenthos in the Saemankeum tidal flat, west coast of Korea. *J Korean Fish Soc* **37**:215-225
- Rijken M (1979) Food and food uptake in *Arenicola marina*. *Neth J Sea Res* **13**:406-421
- Round FE (1971) Benthic marine diatoms. *Oceanogr Mar Biol* **9**:83-139
- Stephens MP, Kadko DC, Smith CR, Latasa M (1997) Chlorophyll-a and pheopigments as tracers of labile organic carbon at the central equatorial Pacific seafloor. *Geochim Cosmochim Ac* **61**:4605-4619
- Sullivan M, Moncreiff C (1988) Primary production of euphotic algal communities in a Mississippi salt marsh. *J Phycol* **24**:49-58
- Varela M, Penas E (1985) Primary production of benthic microalgae in an intertidal sand flat of the Ria de Arosa, NW Spain. *Mar Ecol Prog Ser* **25**:111-119
- White DC, Davis WM, Nickles JS, King JD, Bobbie RJ (1979) Determination of the sedimentary microbial biomass by extractible lipid phosphate. *Oecologia* **40**:51-62
- Yoo MH, Choi JK (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
- Zapata M, Rodriguez F, Carrido J (2000) Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Mar Ecol Prog Ser* **195**:29-45

Received Nov. 8, 2012

Revised Feb. 12, 2013

Accepted Mar. 13, 2013