

## 함평만 갯벌 저서규조류의 다양성과 생물량

이 학 영\*

전남대학교 자연과학대학 생물학과

### Diversity and Biomass of Benthic Diatoms in Hampyeong Bay Tidal Flats

Hak Young Lee\*

Department of Biological Science, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**Abstract** - The diversity and biomass distribution of benthic diatom flora at tidal flats of Hampyeong Bay were studied from 2006 to 2013 as a part of KLTER Program. A total of 83 species (77 strains in 2006, 65 strains in 2007, 41 strains in 2008, 45 strains in 2009, 54 strains in 2010, 55 strains in 2011, 56 strains in 2012 and 40 strains in 2012) were identified as benthic diatoms of Hampyeong Bay tidal flats. The most dominant species were *Paralia sulcata* and *Cyclotella litoralis*. *Cyclotella* sp., *Diploneis* sp., *Entomoneis alata*, *Gyrosigma* sp., *Navicula abunda*, *Navicula gregaria*, *Navicula* spp. and *Nitzschia palea* were the other common species which contributed to the high benthic diatom biomass in the Bay. The diversity of benthic diatoms varied according to the sample stations and seasons. The highest diversity was observed in August samples. The range of chlorophyll-*a* concentration in sediments of tidal flats for 8 years was 21 ~ 65 mg m<sup>-2</sup>. The standing crops of benthic diatoms varied according to the studied stations and sampled seasons. The number of taxa and standing crops showed decreasing tendency year after year from all sampled stations. The distributions of standing crops and cell volumes of benthic diatoms showed similar pattern. The taxa and biomass of benthic diatoms showed low correlation coefficients with temperature variables expressed as the following equations  $Y = -0.0208X^2 + 0.5264X + 19.529$  ( $r^2 = 0.0269$ ) and  $Y = -0.9181X^2 + 27.011X + 310.07$  ( $r^2 = 0.0797$ ) respectively.

**Key words** : benthic diatoms, biomass, tidal flat, Hampyeong bay

## 서 론

갯벌은 조간대가 길고 큰 강이 있으며 조석간만의 차이가 큰 지역에 잘 발달하는데 (Hopner and Wonneberger 1985; Ko *et al.* 1997), 주변 환경에서 유입되는 영양물질

에 의해 생물생산력이 높고 (Rizzo 1990; Mulamootil *et al.* 1996; Park 1998; Hao *et al.* 2011), 분해와 자정작용에 의한 오염정화의 능력도 뛰어나며 (Ko *et al.* 1997; Hasanudin 2004), 심미적 (Armitage *et al.* 2007; Leujak and Ormond 2008) 으로나 연안어업 (Ko *et al.* 1997; Igulu *et al.* 2013), 생태 (Archambault and Bourget 1999; Boschker *et al.* 1999; Broitman *et al.* 2001; Levington 2001) 등의 측면에서도 중요한 공간이다.

갯벌생태계의 높은 생산력과 종다양성은 저서미세조

\* Corresponding author: Hak Young Lee, Tel. 062-530-3401, Fax. 062-530-3409, E-mail. haklee@jnu.ac.kr

류(microphytobenthic algae)의 생산력에 크게 기인한다(de Jonge and van Beusekom 1995; Dawes 2005; Cahoon 2006, Hao *et al.* 2011). 저서미세조류는 갯벌에 서식하는 패류와 무척추동물들을 비롯한 다양한 생물군의 주요 먹이가 되며 먹이망을 통해 연안의 생물 생산력에 큰 영향을 미친다(Teal 1962). 갯벌에서 발견되는 저서미세조류의 대부분은 규조류이다(Colijn and Dijkema 1981; Lucas *et al.* 2001; Du *et al.* 2009). 이들 저서규조류는 간조 시 갯벌에 연황색의 얼룩을 형성할 정도로 많이 분포하며 이들이 이동할 때 배출하는 점액물질(extracellular polymeric substances)이 갯벌 퇴적층의 안정에 큰 영향을 주기도 한다(Austena *et al.* 1999). 따라서 갯벌 생태계의 특성을 해석하기 위해서는 저서규조류의 동태에 대한 데이터 수집과 해석이 요구된다. 또한 지구 온난화로 인한 기온변화에 대해 저서규조류가 세포내적 적응기작(intercellular adaption)을 통해 다양한 형태의 적응을 하는 것으로 알려져 있어(Scholza and Liebezeit 2012), 적응의 가장 보편적인 표현인 종다양성과 생물량에 대한 연구는 온난화와 관련한 장기적인 저서규조류 생태 분석의 핵심적인 내용이 될 것이다.

국내 갯벌에서의 저서규조류에 관한 연구는 종조성과 생산력 분석 등의 항목에서 시도된 바 있으나 그 수와 조사된 지역이 많이 부족하다(Lee 2002; Lee and Jung 2011). 특히 기온과 수온상승으로 나타나는 지구온난화로 인한 연안환경의 변화(Petchey *et al.* 1999)가 예상되고 있는 상황에서 이에 따른 갯벌 생물의 서식패턴 변화를 분석하기 위해서는 갯벌의 주요 일차생산자인 저서규조류의 연구는 필수적이다.

본 연구에서는 우리나라 서해안의 대표적인 갯벌인 함평만 갯벌에서 3 지점을 선택하여 나노-미세(2~200  $\mu\text{m}$ ) 범위의 저서규조류의 구성과 분포의 양상을 조사하고 온도의 변화에 따른 종다양도와 생물량의 변동 패턴을 분석하였다.

## 재료 및 방법

본 조사가 이루어진 함평만 갯벌은 해제반도의 동북쪽 도리포 내측과 안악해안, 톱머리해안이 둘러싸고 있는 공간에 형성된 대규모의 갯벌이다. 저서규조류의 종 다양성과 생물량의 장기적인 변동양상을 파악하기 위해 함평만 갯벌의 현화리(N 35° 03'14.62", E 126° 26'60.93"), 가입리(N 35° 05'33.83", E 126° 21'13.08"), 송석리(N 35° 09' 11.56", E 126° 20'49.39")의 세 곳의 조간대에서 2005년

부터 2013년까지 연 4회 씩 표층 퇴적물 시료를 채취하였다.

함평만의 입구에 위치한 송석리 지점은 좁은 조간대 폭(약 500 m)을 가지고, 함평만의 중앙부에 위치한 가입리는 넓은 조간대 폭(약 2 km)을 가졌으며 함평만의 가장 내 측에 위치한 현화리 지점은 조간대의 폭이 약 1.5 km 정도 였다.

입도 구분(Folk 1966)에서 현화리와 가입리의 갯벌은 사질 성분이 우세하였고, 송석리의 갯벌은 니질과 점토질이 우세한 입자조성을 나타냈다. 그러나 퇴적물의 조성은 동일한 지점에서도 조사시기와 조사지점, 샘플의 채취장소 등에 따른 변이가 매우 컸다.

### 1. 저서규조류 분석

저서규조류의 샘플 채취는 물때표(www.badatime.com)를 보고 간조가 가장 크게 일어난 시각을 고려하여 실시하였다. 갯벌 샘플은 표층 10 cm 깊이까지의 퇴적물을 코어 샘플러(지름 10 cm)를 이용하여 채취하여 고정액(10% 포르말린+10% 아세트산)으로 고정한 후에 실험실로 운반하였다. 과산화수소수와 염산을 이용하여 유기물을 제거한 후 각 정점 당 0~1 mm, 1~2 mm, 2~3 mm 깊이에서 각 2개씩의 프레파라트를 만들어 400~1,000배의 배율하에서 동정하였다. 저서규조류의 생물량 측정을 위하여 1/10~1/500로 희석한 프레파라트를 만들어 200~400 배로 검경하면서 규조류 피각을 계수하고 피각의 입체적인 구조에서 체적을 구하여 생물량으로 환산하였다(Wetzel and Likens 2000). 개체수의 계수는 프레파라트 커버슬립 면적의 20% 이상을 계수하고 출현 개체수가 250개체 이상이 되게 하여 통계적 의미를 확보 하였다. 저서규조류의 각 조사항목과 온도와의 상관성은 다중회귀분석을 이용하여 해석하였다.

### 2. 엽록소 *a* 농도 분석

엽록소 분석을 위한 갯벌 샘플은 코어 샘플러(지름 10 cm)를 이용하여 퇴적물 표층 10 cm를 채취한 후 냉동 보관 상태로 실험실로 운반하였다. 냉동된 퇴적물 시료 0~1 mm 층을 총 면적이 4 cm<sup>2</sup>가 되게 긁어내어 100% 아세톤 15 mL를 넣고 약 1분간 초음파 처리를 하고 4°C 암실에 24시간 동안 저온 추출한 후 시료를 1,500 rpm에서 5분간 원심분리하고 상등액을 따라내어 spectrophotometer(Shimadzu, UV-2100)를 이용하여 추출 시료의 흡광도를 665, 750 nm에서 각각 측정 후 시료에 1 N HCl을 첨가하여 잘 흔들어 주고 약 5분 후에 665, 750 nm에서

시료의 흡광도를 측정하였다. 측정된 흡광도 값을 Lorenzen's equation (1967)에 대입하여 엽록소 *a*의 농도를 산출하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 저서규조류 다양성

함평만 갯벌에서 2005년부터 2013년까지의 조사를 통해 동정된 저서규조류 중 가장 우점도가 높은 종은 *Paralia sulcata*로 전 지역에서 출현빈도가 가장 높음으로 나타났다. *Cyclotella litoralis*, *Cyclotella* sp 1., *Diploneis* sp., *Entomoneis alata*, *Gyrosigma* sp., *Navicula abunda*, *Navicula gregaria*, *Navicula* spp., *Nitzschia palea* 등도 함평만의 주요 우점 저서규조류 종으로 조사되었다. 서해안에서 조사된 다른 연구 (MOF 1999; Lee 2002; MOE 2004)에서 동정된 종과는 조성에서 큰 차이가 없었으나 남부해안의 갯벌에서 조사된 저서규조류 우점종 (Du *et al.* 2009)과는 차이가 많았다. 서해안 저서조류 구성종에는 부유성의 성격이 강한 중심규조목 (Sze 1998)의 종들이 많은데 비해 남부해안의 조사에서 나타난 우점종은 부착성의 성격이 강한 우상규조목의 종들이 많은 것으로 나타났는데 이는 서해안 갯벌의 조간대가 더 넓고 수위의 변동폭이 커 부유성의 잔존이 더 많은 것에 기인한 것으로 추측된다 (Ko *et al.* 1997). 최우점종으로 조사된 *Paralia sulcata*나 우점도가 높았던 *Cyclotella litoralis*, *Cyclotella* sp 1. 등의 종은 서해안의 대표적인 식물플랑크톤 종이라는 조사결과 (Ko *et al.* 1997; Lee 2002)에서 함평만 갯벌 저서규조류의 많은 양이 부유성 종의 잔존임을 추론할 수 있었다. 우점종은 지역별, 조사시기별, 연도별로 종조성과 출현량에서 일부 변동이 있는 것으로 조사되었으나 본 조사에서 중점을 두고 분석하는 온도변화와의 관련성은 크지 않은 것으로 조사되었다.

함평만 갯벌에 서식하는 저서규조류 종조성 현황은 2006년에는 77종, 2007년에는 65종, 2008년 조사에서는 41종, 2009년 조사에서는 45종, 2010년에는 54종, 2011년에는 55종, 2012년에는 56종, 그리고 2013년에는 40종이 동정되었다. 전반적으로 연간 40종에서 70여종이 출현하는 것으로 나타났는데 이는 연간 20~50여종이 동정된 다른 지역의 출현종과 비교했을 때 상대적으로 더 다양한 종이 출현한 것으로 분석되었다 (Colijn and Dijkema 1981; Agatz *et al.* 1999; Easley *et al.* 2005; Montani *et al.* 2013). 연도별 출현종 분포의 분석에서 조사가 이루어진 지점 모두에서 완만하지만 지속적으로 감소하는 경향을

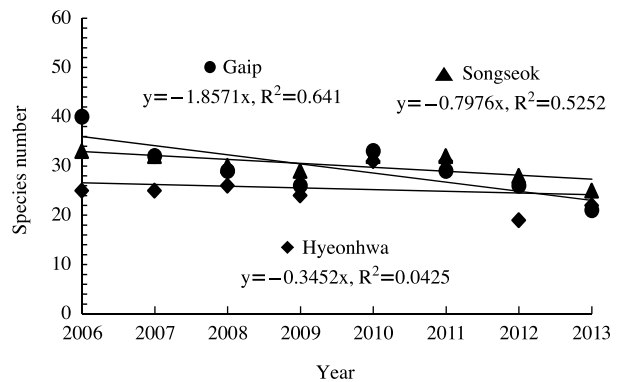


Fig. 1. Species numbers of benthic diatoms in Hampyeong Bay tidal flats.

나타냈다. 가입리 갯벌지역에서의 출현종수 감소율(경사도  $-1.8751$ )이 가장 높았고 현화리 지점의 감소율(경사도  $-0.3452$ )이 가장 낮았지만 지점간의 차이는 크지 않았다 (Fig. 1).

출현종의 지역별 현황을 살펴보면, 2010년까지는 가입리와 송석리의 갯벌에서 2006년 이후 지속적으로 종다양도가 낮아지고 있는 것으로 나타났었으나 2010년 조사에서는 약간 증가했었고 2011년 이후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 현화리에서도 2010년 조사에서 출현종수가 약간 증가한 것으로 나타났으나 2011년과 2012년에 다시 감소하였고 2013년에는 약간 증가한 것으로 나타났다. 전체적으로 출현종의 분포 현황은 지점별, 시기별, 그리고 동일 표본에서도 종수의 편차가 커 경향을 분석하는데 어려움이 많았다. 조사지점에 따른 출현종수 분포에서는 현화리에서 상대적으로 낮은 것으로 나타났고, 조사시기에 따른 출현종 분포에서는 전 지점에서 5월과 7월에 비교적 다양했고 3월에 종조성이 가장 단순한 것으로 나타났으나, 유의성이 없는 것으로 나타났다.

### 2. 저서규조류 엽록소 *a* 농도

전 조사 기간 동안 함평만 조사대상지역의 조간대 표층 퇴적물 시료의 연 평균 엽록소 *a* 농도는  $21 \sim 65 \text{ mg m}^{-2}$ 이었으며 전체적으로 연간 변동 폭은 매우 컸다 (Fig. 2). 엽록소 *a* 농도의 조사지점별 분포는 함평만의 가장 내측에 위치한 현화리 표층 퇴적물에서의 농도는  $21 \sim 60 \text{ mg m}^{-2}$ 이었고, 평균 농도는  $33.3 \text{ mg m}^{-2}$ 이었다. 조사기간 중 5월에 가장 높고 10월에 가장 낮았으나 계절에 따른 농도의 차이는 크지 않았다. 가입리의 엽록소 *a* 농도는  $27 \sim 65 \text{ mg m}^{-2}$ 였고, 평균 농도는  $32.2 \text{ mg m}^{-2}$ 이었

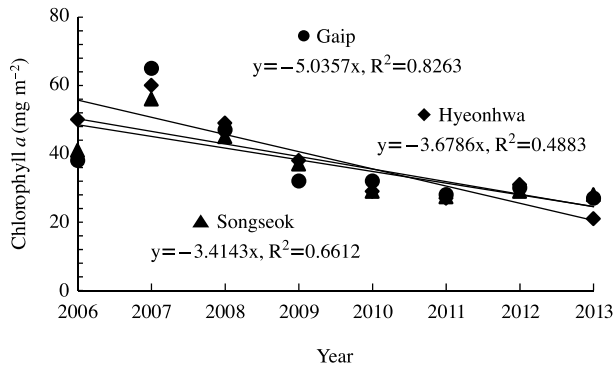


Fig. 2. Yearly variation of chlorophyll-*a* concentration in Ham-pyeong Bay tidal flats.

으며, 계절별 농도분포에서는 5월에 가장 높고 3월에 가장 낮았다. 만의 유입부에 위치한 송석리의 엽록소 *a* 농도는  $27 \sim 56 \text{ mg m}^{-2}$ 이었고, 평균  $27.1 \text{ mg m}^{-2}$ 이었으며, 5월에 가장 높고 10월에 가장 낮았다. 전체적으로 각 지점의 엽록소 *a* 농도는 큰 차이가 없었고 계절에 따른 변이가 일부 관찰되었으나 변동 폭은 크지 않았다. 2009년 조사에서는 엽록소 *a* 농도가 4월에서 10월로 진행되면서 감소하는 경향을 보여주었으나 2010, 2011, 2012, 2013년 조사에서는 뚜렷한 패턴이 없었다. 일부 갯벌에서는 엽록소 *a*의 농도가 봄철이나 겨울철에 최대 농도를 나타내고 여름에 농도가 상대적으로 낮은 것으로 보고되었는데 (Colijn and Dijkema 1981; Hao *et al.* 2011; Liu *et al.* 2013) 함평만의 갯벌에서는 봄철에 가장 높고 여름에서 가을로 접어드는 시점에 가장 낮은 것으로 나타났다. 사질이 우세한 현화리와 가입리의 엽록소 *a* 농도와 니질과 점토질이 우세한 송석리의 엽록소 *a* 농도 사이에는 유의한 차이가 없었는데, Hao *et al.* (2011)도 갯벌 입자의 조성에 따른 생물량과 생산력에는 차이가 크지 않다고 보고했다.

연도별 엽록소 *a*의 농도 분포는 2006년 이후 지속적으로 감소하는 경향을 나타내다가 2011년에는 세 지점 모두에서 증가한 후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 갯벌에서 엽록소 *a* 농도는 다양한 범위를 갖는 것으로 보고되고 있다. 함평만 갯벌에서 조사된 표층 퇴적물 내 엽록소 *a*의 농도는 1999년 8월의 함평만 조사자료  $5.51 \sim 214.5 \text{ mg m}^{-2}$  (MOF 1999)와 비교해보면 약간 낮은 값을 보이며, 2003년 11월 조사자료  $9.3 \sim 26.0 \text{ mg m}^{-2}$  (MOE 2004)보다는 약간 높은 값을 보였으나 낙동강 하구 갯벌의 조사결과 (Du *et al.* 2009)와는 유사한 범위를 나타냈다. 또 상대적으로 온도가 높고 생산력이 낮은 Yueqing

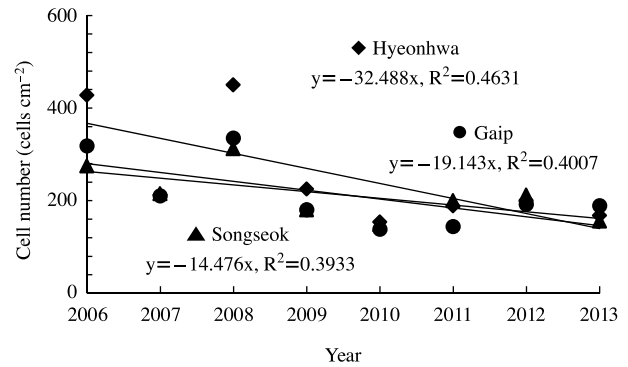


Fig. 3. Yearly variation of benthic diatom cell numbers in Ham-pyeong tidal flats.

bay (Hao *et al.* 2011)의  $4.6 \sim 19 \text{ mg m}^{-2}$ 보다는 많이 높았고  $2 \sim 83 \text{ mg m}^{-2}$ 으로 조사된 Zhujiang estuary에서의 농도 (Liu *et al.* 2013)나 Wadden Sea의 갯벌에서 조사된  $20 \sim 100 \text{ mg m}^{-2}$  범위에 포함되는 것으로 나타났다.

### 3. 저서규조류 개체수와 생물량 현황

함평 갯벌의 저서규조류 단위면적당 출현 개체수는 지점별, 조사시기별 큰 차이를 보여주었다 (Fig. 3). 연도별 출현 개체수의 비교에서는 매우 다양한 밀도 분포를 나타냈다. 전반적으로 2008~2010년 사이의 낮은 밀도, 그 이전과 이후의 상대적으로 높은 밀도, 그리고 2011년 이후 다시 증감을 반복하여 단기간의 조사로는 경향성 분석이 어려운 복잡한 패턴을 보여주었다. 그러나 전반적인 추세는 조사된 세 지점 모두에서 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 저서규조류의 개체수 밀도가 가장 높았던 것은 2008년의 현화리 지점으로  $450 \text{ cells cm}^{-2}$ 이었고, 가장 낮았던 것은 2013년의 현화리 지점으로  $168 \text{ cells cm}^{-2}$ 로 최대 밀도의 37.3% 수준이었다. 저서규조류에 대한 조사가 1회씩 이루어진 2005년과 2006년을 제외하면 엽록소 *a*의 결과에서와 같이 2008년 이후 2010년까지 개체수 밀도가 점차적으로 감소하는 경향을 보였으나 2011년 이후 일시적으로 증가추세를 보였다. 그러나 2013년에는 다시 전 지점에서 감소하였다. 일시적인 정체 또는 증가가 함평만 갯벌의 어떤 환경요인과 관련이 있으며 어떤 의미를 가지는지는 추후의 조사를 통해 분석이 이루어져야 할 것으로 보인다.

출현 규조류 중의 기하학적 형태를 토대로 산출한 생물량의 분포는 개체수 밀도의 분포와 유사한 양상을 나타냈다 (Fig. 4). 연도별 생물량 분포에서는 2005년부터

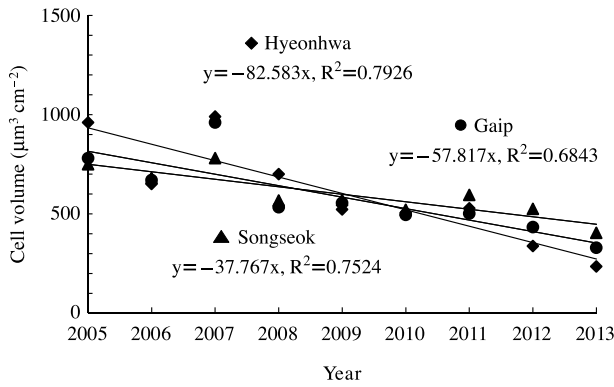


Fig. 4. Yearly variation of benthic diatom cell volumes.

2006년까지는 큰 차이가 없었으나 2007년 이후 지속적으로 감소하는 경향을 보여주었다. 특히 현화리 지점에서 2012, 2013년에 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 전 조사지점에서 관찰되었던 2006년의 낮은 생물량은 개체수 밀도의 감소와 동일한 패턴으로 나타났고 2007년 이후 감소하는 생물량의 분포도 개체군 밀도와 동일한 패턴이었다. 이것은 생물량이 출현종수에서 산출되는 관계로 출현종수와 높은 상관성을 보여주는 것이며 또한 함평만에 출현하는 저서규조류의 종 조성이 비교적 동일하고 우점 분류군 사이에 단위 생물량(unit biomass per cell)의 편차가 그다지 크지 않은 때문으로 보인다.

4. 기후변화와 저서규조류 분포

갯벌의 저서규조류는 계절적 변동뿐만 아니라 조석의 반복에 따른 빛, 염도, 온도의 급격한 변동에 노출되어 있어 이들 환경에 대한 최소한의 적응성을 확보하는 방향으로의 선택이 이루어졌다(Alsterberg *et al.* 2012). 특히 동계와 하계의 만조와 간조 시에 단기적인 큰 온도 변화가 나타나는데도 불구하고 계절적 종조성의 일정한 패턴이 유지되는 것은 저서규조류가 갖는 온도 적응성을 보여주는 한 예이다. 그러나 일정한 경향성(기온상승)을 가진 온도 변화가 지속적으로 유지될 때 각 종의 민감도 차이에 따른 반응성의 차이가 축적되면서 저서규조류의 군집변화가 나타나게 된다(Scholza and Liebezeit 2012; Alsterberg and Sundbäck 2013). 2005년부터 2012년까지 8년간 함평만 갯벌의 저서규조류 분포양상을 기후변화와 연관하여 해석하기 위해 온도에 따른 저서규조류의 분포양상을 분석하였다. 일차원 선형회귀분석에서는 상관성이 거의 없는 것으로 나타났고 2차원 회귀분석에서도 낮은 상관성을 나타냈다. 온도에 따른 출현종

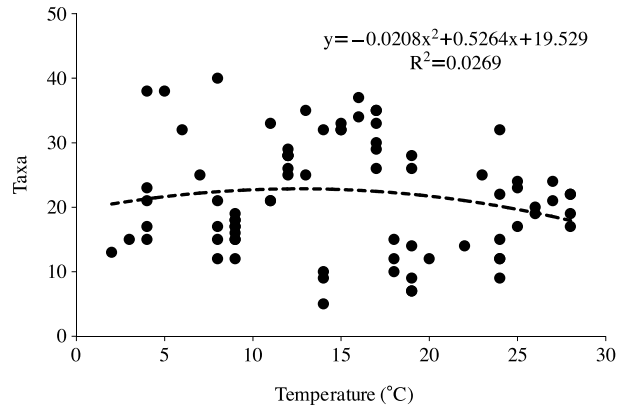


Fig. 5. Second order regression of temperature and species number of benthic diatoms in Hampyeong Bay tidal flats.

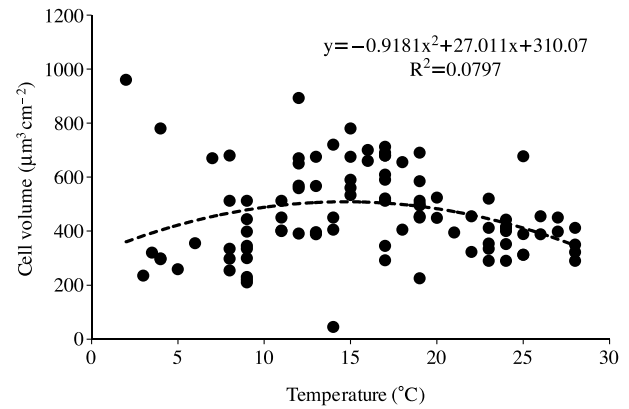


Fig. 6. Second order regression of cell volume and temperature.

수의 2차 회귀분석 결과는 Fig. 5와 같다. 온도에 따른 저서규조류 출현종수  $Y = -0.0208X^2 + 0.5264X + 19.529$  ( $r^2 = 0.0269$ )의 식으로 표현되어 2012년까지의 결과에서도 도출되었던  $Y = -0.0433X^2 + 1.2646X + 15.952$  ( $r^2 = 0.0869$ )와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 최고의 출현종수는 15°C에서 23.1종인 것으로 나타났고 18°C 이상의 온도에서는 출현종수가 감소하는 것으로 나타나 중간 정도의 교란에 최적의 분포가 이루어진다는(Cain *et al.* 2011) 중간교란가설 (intermediate disturbance hypothesis)에 유사한 반응 모델을 나타냈다.

온도에 따른 저서규조류의 생물량 분포도 2차원 회귀분석에서 매우 낮은 상관성을 보여주었다(Fig. 6). 온도에 따른 저서규조류 생물량  $Y = -0.9181X^2 + 27.011X + 310.07$  ( $r^2 = 0.0797$ )의 식으로 표현되어 2012년까지의 결과에서도 도출되었던  $Y = -1.0917X^2 + 32.399X + 286.160$  ( $r^2 = 0.1174$ )와 큰 차이가 없었으며 온도분포에 따른 전

체적인 패턴도 일치하였다. 최고의 생물량은 15°C에서  $502.38 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-2}$ 인 것으로 나타났고 16°C 이상의 온도에서는 온도가 상승함에 따라 생물량이 감소하는 것으로 나타나 온도와 생물량에서도 중간교란에 유사한 반응 모델을 나타냈다. 갯벌에서 저서조류의 생물량이 온도에 의존한다는 사실은 중국의 Yueqing bay 조사(Hao *et al.* 2011)에서 가을에서 봄 사이에 3배 이상의 높은 생물량을 나타내고 고온의 여름에 가장 낮은 생물량을 보였다는 결과에서도 잘 나타난다. 네덜란드의 Wadden Sea(Colijn and Dijkema 1981)에서도 봄과 가을에 최고의 농도를 나타냈고 여름에 낮은 농도를 나타냈다. 그러나 최저 농도는 위도가 더 낮은 Yueqing bay와는 달리 겨울철에 관찰되었다.

현재까지 분석된 결과로 함평만 갯벌 저서규조류의 분포가 온도에 의존적이며 온도변화가 중간교란의 패턴을 만든다고 판단할 수는 없다. 영양물질의 계절적 유입이나 생물군집 사이의 상호작용에 의한 개체군의 소장도 가능하기 때문이다. 따라서 다양한 환경요인의 차이에 따른 저서규조류 동태에 대한 분석도 추가적으로 이루어져야 한다. 이러한 연구들을 통해 갯벌의 저서규조류 분포를 규정하는 요인들의 종류와 조절의 기작에 대한 해석이 이루어질 수 있을 것이다.

## 적 요

함평만 갯벌에서 2005년부터 2013년까지의 조사를 통해 동정된 저서규조류 중 가장 우점도가 높은 종은 *Paralia sulcata*였으며 연간 40종에서 77종의 범위로 동정되었다. 조사가 이루어진 8년 동안 출현종의 분석에서 완만하지만 지속적으로 다양도가 감소하는 경향을 나타냈다. 조사시기에 따른 출현종 분포에서는 전 지점에서 5월과 7월에 비교적 다양했고 3월에 종조성이 가장 단순한 것으로 나타났으나, 유의성이 없는 것으로 분석되었다. 표층 퇴적물의 연 평균 엽록소 *a* 농도는  $21 \sim 65 \text{ mg m}^{-2}$ 이었으며 2006년 이후 지속적으로 감소하는 경향을 나타내다가 2011년에는 세 지점 모두에서 일시 증가한 후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 계절 분포에서는 봄철에 가장 높고 여름에서 가을로 접어드는 시점에 가장 낮은 것으로 나타났다. 단위면적당 출현 개체수도 세 지점 모두에서 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈고, 생물량도 감소하는 경향을 보여주었다. 온도에 따른 저서규조류 출현종수  $Y = -0.0208X^2 + 0.5264X + 19.529$  ( $r^2 = 0.0269$ )의 식으로 표현되어 최고의 종 다양도는 15°C에서 23.1종

인 것으로 나타났고, 저서규조류 생물량  $Y = -0.9181X^2 + 27.011X + 310.07$  ( $r^2 = 0.0797$ )의 식으로 표현되어 최고의 생물량은 15°C에서  $502.38 \mu\text{m}^3 \text{cm}^{-2}$ 인 것으로 나타났다.

## REFERENCES

- Agatz M, RM Asmus and B Deventer. 1999. Structural changes in the benthic diatom community along a eutrophication gradient on a tidal flat. *Helgoland Mar. Res.* 53:92-101.
- Alsterberg C and K Sundbäck. 2013. Experimental warming and toxicant exposure can result in antagonistic effects in a shallow-water sediment system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 488: 89-101.
- Alsterberg C, K Sundbäck and S Hulth. 2012. Functioning of a shallow-water sediment system during experimental warming and nutrient enrichment. *Plos One* 7:1-10.
- Archambault P and E Bourget. 1999. Influence of shoreline configuration on spatial variation of meroplanktonic larvae, recruitment and diversity of benthic subtidal communities. *Exp. Mar. Biol. Ecol.* 238:161-184.
- Armitage AR, SM Jensen, JE Yoon and RF Ambrose. 2007. Wintering shorebird assemblages and behavior in restored tidal wetlands in southern California. *Restor. Ecol.* 15:139-148.
- Austena I, TJ Andersen and K Edelvinga. 1999. The influence of benthic diatoms and invertebrates on the erodibility of an intertidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 49:99-111.
- Boschker HTS, JFC de Brouwer and TE Cappenberg. 1999. The contribution of macrophyte-derived organic matter to microbial biomass in salt-marsh sediments: stable carbon isotope analysis of microbial biomarkers. *Limnol. Oceanogr.* 44: 309-319.
- Broitman BR, SA Navarrete, F Smith and SD Gaines. 2001. Geographic variation of southeastern Pacific intertidal communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 224:21-34.
- Cahoon LB. 2006. Upscaling primary production estimates: Regional and global scale estimates of microphytobenthos production. In Kromkamp JC *et al.* eds., *Functioning of Microphytobenthos in Estuaries*. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences. 400 p.
- Cain ML, WD Bowman and SD Hacker. 2011. *Ecology*, 2nd ed. Sinauer Associated, Inc., Sunderland, MA. 646p.
- Colijn F and KS 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.
- Dawes CJ. 2005. *Marine Botany*, 2nd Ed. John Wiley and Sons

- Inc, New York.
- de Jonge VN and JEE van Beusekom. 1995. Wind- and tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the Ems estuary. *Limnol. Oceanogr.* 40: 766-778.
- Du GY, M Son, M Yun, S An and IK Chung. 2009. Microphytobenthic biomass composition in intertidal flats of the Nakdong River estuary, Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82:663-672.
- Easley JT, SN Hymel and CJ Plante. 2005. Temporal patterns of benthic microalgal migration on a semi-protected beach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 64:486-496.
- Folk RL. 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6:73-93.
- Hao Q, Y Cai, X Ning, C Liu, X Peng and X Tang. 2011. Standing crop and primary production of benthic microalgae on the tidal flats in Yueqing Bay. *J. Ocean Univ. China* 10:157-164.
- Hasanudin U, T Kunihiro, M Fujita, H-Y Hu, K Fujie and T Suzuki. 2004. The contribution of clams on tidal flat purification capacity. *J. Water Environ. Technol.* 2:83-90.
- Hopner T and K Wonneberger. 1985. Examination of the connection between the patchiness of benthic nutrient efflux and epiphytobenthos patchiness on intertidal flats. *Netherlands J. Sea Res.* 19:277-285.
- Igulu MM, I Nagelkerken, G Velde and YD Mgaya. 2013. Mangrove fish production is largely fuelled by external food sources: A stable isotope analysis of fishes at the individual, species, and community levels from across the globe. *Ecosystems* 16:1336-1352.
- Ko CH, C Park, SJ Yoo, WJ Lee, TW Lee, CE Jang, JK Choi, JS Hong and HT Heo. 1997. *Marine Biology*. Seoul National Univ. Press, Seoul.
- Lee HY. 2002. Comparison of the effects of physico-chemical factors on the zonation and vertical distribution of benthic microalgal communities in the tidal flats of south-west Korea. *Kor. J. Environ. Biol.* 11:529-535.
- Lee, HY and MH Jung. 2011. Distribution of benthic diatoms in tidal flats of Hampyeong Bay, Korea. *Kor. J. Environ. Biol.* 29:17-22.
- Leujak W and RFG Ormond. 2008. Reef walking on Red Sea reef flats-Quantifying impacts and identifying motives. *Ocean Coast. Manag.* 51:755-762.
- Levinton JS. 2001. *Marine Biology: Function, Biodiversity and Ecology*, 2nd Ed. Oxford University Press, Oxford.
- Liu W, J Zhang, G Tian, H Xu and X Yan. 2013. Temporal and vertical distribution of microphytobenthos biomass in mangrove sediments of Zhujiang (Pearl River) estuary. *Acta Oceanol. Sin.* 32:82-88.
- Lorenzen CJ. 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* 12:343-346.
- Lucas CH, C Banham and PM Holligan. 2000. Benthic-pelagic exchange of microalgae at a tidal flat. 1. Pigment analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 196:59-73.
- Lucas CH, C Banham and PM Holligan. 2001. Benthic-pelagic exchange of microalgae at a tidal flat. 2. Taxonomic analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 212:39-52.
- Ministry of Environment. 2004. Reports on Long-term Ecological Research.
- Ministry of Oceans and Fisheries. 1999. Researches on ecology and sustainable usage of tidal flats-Hampyeong Bay.
- Montani S, P Magni and N Abe. 2003. Seasonal and interannual patterns of intertidal microphytobenthos in combination with laboratory and areal production estimates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 249:79-91.
- Mulamootil G, BG Warner and EA McBean. 1996. *Wetlands-Environmental gradients, boundaries, and buffers*. Lewis Publishers, London.
- Park YA. 1998. *Science of the Ocean-Introductory Oceanography*. Seoul National Univ. Press, Seoul.
- Petchey OL, PT McPhearson, TM Casey and PJ Morin. 1999. Environmental warming alters food-web structure and ecosystem function. *Nature* 402:69-72.
- Rizzo W. 1990. Nutrient exchanges between the water column and a subtidal benthic microalgal community. *Estuaries* 13: 219-226.
- Scholz B and G Liebezeit. 2012. Growth responses of 25 benthic marine Wadden Sea diatoms isolated from the Solthörn tidal flat (southern North Sea) in relation to varying culture conditions. *Diatom Res.* 27:65-73.
- Sze P. 1998. *A Biology of the Algae*. WCB McGraw-Hill, Boston.
- Teal JM. 1962. Energy flow in the salt marsh ecosystem of Georgia. *Ecology* 43:473-490.
- Wetzel RG and GE Likens. 2000. *Limnological Analysis*. Springer-Verlag, New York.

Received: 28 October 2013

Revised: 4 November 2013

Revision accepted: 4 November 2013