

Zostera 속 해초에 부착하는 규조류의 부착 특성과 해초 종별 군집 변화

정미희 · 윤석현* · 윤원득
국립수산과학원 수산해양종합정보과

Attaching Nature and Community Variation of Epiphytic Diatoms on Leaf of *Zostera* spp.

MI HEE CHUNG, SEOK HYUN YOUN* AND WON DUK YOON
National Fisheries Research and Development Institute, Busan, 619-705, Korea

부착규조류는 초기 부착 생물로서 부착 천이과정에서 부착성 박테리아 층 위 해초 잎 표면 맨 아래 층에 부착함으로써 잎 표면의 미세 지형을 결정하고 다른 부착 생물에게 알맞은 부착환경을 제공해 주는 중요 생물로 부착 기질과의 상호 작용에 대한 연구는 부착 생물 생태 연구에 기초적인 연구라고 할 수 있다. 부착규조류가 해초에 부착 서식하는 형태는 크게 3가지로 나눌 수 있으며 1) 해초 잎 세포에 평행하게 또는 세포 변형을 통한 부착 2) 해초 잎 끝부분에 주로 밀집하여 서식 3) 잎의 끝에서 2차 부착 규조류인 줄기를 이용한 규조류보다 1차 부착규조류인 타원형의 규조류 밀집 지역이 많은 것이었다. 또한, 해초의 종별 규조류의 부착 군집 변화를 살펴보면 우선 길이와 너비의 차이가 많으나 세포의 모양이나 크기가 비슷한 *Z. marina*와 *Z. japonica*는 규조류의 출현종수, 현존량, 우점종의 차이가 컸던 반면 길이와 너비는 비슷하나 세포의 모양과 크기가 다른 *Z. marina*와 *Z. caespitosa*의 경우에는 규조류의 출현종수, 현존량, 우점종이 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 본 논문에서는 해초의 미세지형이 될 수 있는 세포의 모양보다 해초의 길이와 너비 등 외형의 차이가 부착규조류 군집 변화의 주요 원인인 것으로 나타났다.

Epiphytic diatoms are very important organisms in the seagrass ecosystem because their colonization on leaves increases microtopography and provides attachment sites that make the leaves more hospitable for other epiphytes. Epiphytic diatoms were attached to the leaves in the following 3 manners: (1) parallel to the cells of the seagrass leaf or by molding the shape of the diatom along the cell shape of the leaf; (2) with increasing diatom density toward the leaf tip; (3) *Cocconeis* species as attaching species than the Naviculoid species as the second attaching species on the leaf tip. In addition, the epiphytic diatom communities on *Zostera marina* leaves differed from those on the *Zostera japonica* leaves, but were very similar to the epiphytic communities on *Zostera caespitosa* leaves. Our results suggest that the epiphytic community on seagrass leaves varied according to the leaf shape such as leaf length and width, but the leaf cell shape or size did not influence the dynamics of the diatom communities.

Keywords: epiphytic diatom, attaching nature, community variation, *Zostera* sp.

서 론

부착생물은 해양 동·식물의 표면에 부착하여 서식하는 중, 바위에 부착하여 서식하는 중 등 매우 다양하며, 이 중 해조류 또는 해초 표면에 부착하여 서식하는 부착생물을 식물부착생물(epiphyta)라고 총칭하고 있다. 이 중 일차 생산을 담당하고 있는 규조류와 홍조류 등을 부착조류(epiphytic algae)라고 하며, 일반적으로 거대조류나 해초의 잎 표면에 주로 부착하여 서식한다(Harlin, 1980).

이러한 부착조류 중 해초(seagrass)에 부착하여 서식하는 조류

는 녹조류, 갈조류, 홍조류, 남조류, 규조류 등 식물계 중 5문 이상으로 이루어진 매우 복잡한 군집으로 해초 생태계의 생물다양성을 증가시키는 요인이 되고 있으며, 해초가 유기 쇄설물 먹이망에 가입되는 반면 무척추동물의 주된 먹이 공급원이 되고 있다(McRoy and Helfferich, 1977; Heijs, 1987). 이외에도 부착조류는 해수 부영양화의 지표로 그 중요성이 인식되고 있을 뿐만 아니라(Coleman and Burkholder, 1995; Short *et al.*, 1995) 종다양성이 매우 커서 전체 부착생물에서 주요 부분을 차지하고 있다(Ballantine and Humm 1975; Harlin 1980; Borowitzka *et al.*, 1990).

이중 규조류는 자신의 세포 크기보다 큰 조류에는 규조류를 포함하여 어디에나 부착할 수 있는 것으로 알려져 있으며(Ramm,

*Corresponding author: shyoun@nfrdi.go.kr

1976), 부착조류가 가지는 일반적인 중요성 이외에도 다른 조류에 비해 해초 잎 표면과 다른 착생생물위에 빠르게 부착함으로써 생물다양성을 높이는 주요 생물군 중 하나로 그 중요성이 커지고 있다. 해초 생태계 내에서는 해초 잎에서 분비되는 용존 유기물이 부착규조류의 광합성을 위한 탄소 섭취를 방해함에도 불구하고 (Harrison and Durance, 1985) 규조류의 부착 여부는 다른 부착생물들이 부착할 수 있는 매우 좋은 기회를 제공해 준다는데 중요성을 가지고 있다(Corlett and Jones, 2007). 한 예로서 규조류 위에 부착하는 종의 하나인 석회 홍조류는 규조류에 의해 좋은 부착 장소가 제공되어 현존량이 증가될 수 있는 기회를 가지게 되는 것으로 보고된 바 있다(Hume, 1964; Ballantine, 1979; Wilcocks, 1982).

부착규조류를 포함하는 부착조류의 계절적, 지역적 분포를 결정할 수 있는 요인은 온도, 빛의 양(Hellebust, 1970), 영양염류의 이용성(Penhale and Thayer, 1980; Smith and Penhale, 1980), 그리고 이들에 대한 포식압(grazing pressure)등 (Orth and van Montfrans, 1984)으로 보고되고 있다. 이 외에도 기질이 되는 해초의 종별 특성과의 관계 또한 중요 요소로 생각될 수 있다. 그러나, 현재 국내 또는 해외에서도 연구의 어려움으로 인하여, 부착규조류 또는 부착조류와 해초의 종별 특성과의 관계에 대한 연구는 미비한 실정이다. 오로지 몇몇 해외 연구들을 통해 해조류의 종 차이에 따라 부착규조류 군집의 종조성이 달라질 수 있다는 것을 예상할 수 있을 뿐이다(Medlin, 1983, Trautman and Borowitzka, 1999).

따라서 본 연구는 모든 환경조건이 동일한 지역에서 해조류 종에 따른 부착규조류 군집의 종조성의 차이는 부착 기질의 특성에 따른 것이라 생각되어 실시되었다.

특히 해초는 종에 따라 잎의 너비, 길이, 세포구조등이 다르기 때문에 규조류의 부착 특성에 따라 군집의 차이가 있을 것이라 생각되었다. 따라서 본 논문에서는 부착규조류의 군집에 영향을 미치는 요소로서의 해초 잎 표면 세포 구조를 우선적으로 조사하였으며, 각 해초 종의 잎의 모양에 따른 부착규조류의 군집 변화를 관찰하여 그 관계를 규명하고자 하였다.

또한 이 연구는 거제 해역의 해초 부착 규조류의 종조성 연구 (Chung and Lee, 2008)의 후속 연구이다.

재료 및 방법

해초 채집 지역 및 채집시기

부착규조류 종조성 및 정량 조사를 위한 해초 채집은 2001년 7월에서 2002년 3월까지 격월로 총 5회 채집되었으며, 지역적 환경 특이성을 최대한 줄이고, 해초 종별 비교를 위해 거제도에서 수행되었다. 그러나, 3종이 한 해역에 서식하고 있는 경우는 매우 드물어 한 지역에 서로 다른 2종의 해초가 서식하는 거제도 다대리와 장목리를 선정하였다. 거제도 다대리에서는 *Z. marina*와 *Z. japonica*가, 거제도 장목리에서는 *Z. marina*와 *Z. caespitosa*를 채집하였다(Fig. 1).

거제도 다대리의 조사정점(34°44'04N, 128°37'48E)은 작은 방파제가 있어 매우 조용한 만의 형태를 취하고 있었다. 또한, 갯벌이 넓게 자리하고 있는 지역으로 중간대 상부에는 *Zostera japonica*가 서식하고 있었으며, 주기적으로 대기에 노출되고 있었다. 간조시 일부 *Z. marina*는 여전히 물에 잠겨 있기는 하나 수심이 1 m

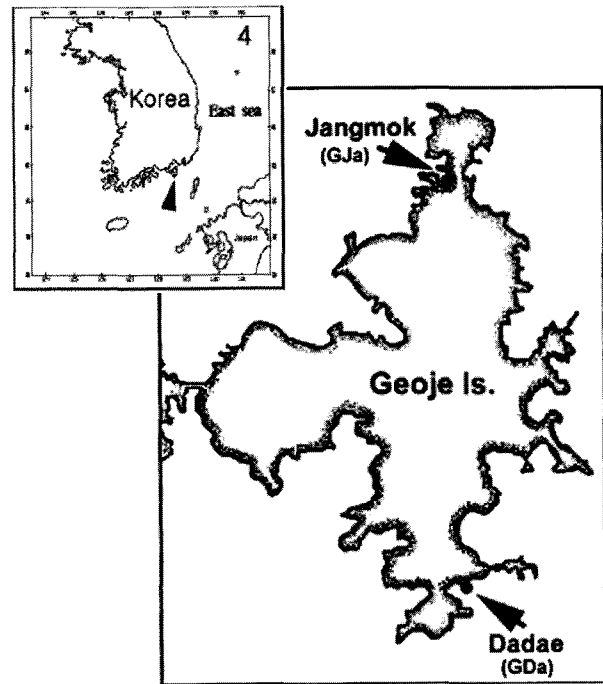


Fig. 1. Sampling sites in Geoje Island on the southern coast of Korea.

이하로서 전체 *Z. marina* 군집 중 대부분이 대기에 노출되는 것이 특징이었다.

거제도 장목리(34°59'36N, 128°40'30E)는 한국해양연구원 장목 분소에 가깝게 위치하며, 간조시에도 3 m 정도의 수심이 나오는 지역으로 *Z. marina* 및 *Z. caespitosa* 두 종 모두 항상 물 속에 잠겨 대기에 노출되는 일이 매우 드문 지역이었다.

해초와 부착규조류의 채집

해초 채집은 매 월 간조시에 수행되었으며, 장목리에서는 SCUBA 다이빙을 이용하여 무작위적으로 약 10개체를 채집하였다. 다대리에서는 장목리와 마찬가지로 매 월 간조시 샘플을 채취하였으며, 갯벌이 완전히 드러나 건조된 해초를 채집하지 않기 위해 수심 약 0.1~1.0 m에서 채집하였다. 또한, 저질에 서식하는 부착규조류와의 섞임을 방지하기 위해 해초는 지상 1 잎 부분의 줄기부분을 잘라 채집되었다. 채집된 해초는 실험실로 옮긴 후 염분을 제거하기 위해 흐르는 물로 잎의 표면을 부드럽게 세척하였다.

일반적으로 물리적 제거도구를 사용할 경우 잘피 잎에 상처를 주거나 또는 솔에 묻은 부착생물이 완전히 제거되지 않아 부착생물의 현존량 측정시 문제가 될 수 있다. 따라서, 부착 생물 제거용 도구는 부착생물이 잘 묻지 않는 나일론 제질의 솔과 고무끝 칼을 합친 형태로서 솔을 이용하여 1차 제거를 하였으며, 석회홍조류, 또는 소형 무척추동물이 잘피 잎에 단단하게 부착되어 있는 경우 고무 끝칼을 이용하여 조심스럽게 2차 제거를 하였다.

규조류 관찰 및 분석방법

모든 실험은 해초 10개체의 모든 잎에서 부착생물을 제거 후, H₂O₂로 유기물질을 제거하는 세척방법을 거쳐 전자현미경에서 관찰하였다(Snoeijs, 1994). 일반적으로 규조류의 계수는 세포수를

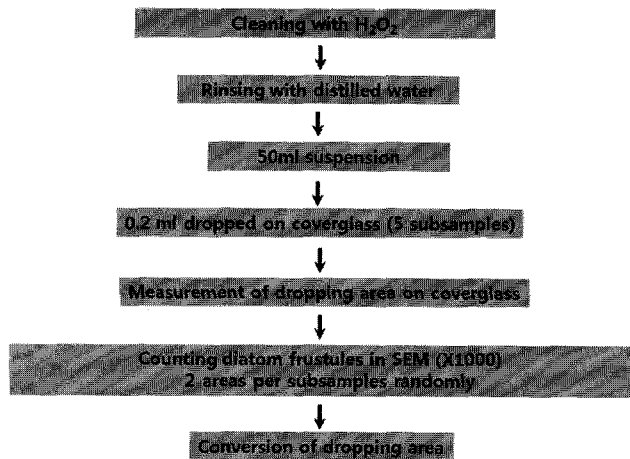


Fig. 2. The counting method of epiphytic diatom using SEM, modified after Snoijs (1994).

계수하지만, 해초 앞에서 규조류를 떼어내고, 유기물질을 제거하는 과정에서 규조류의 상각과 하각이 분리되는 경우가 많기 때문에 정확한 세포수를 계수한다는 것은 어렵다. 또한, 잎의 단위 면적당 세포의 수를 계수하는 방법은 잎의 가장 최상층에 있는 규조류의 종들만이 동정·계수되며, 해초 잎에 부착된 규조류 층이 두꺼운 경우 하위 층에 부착하는 규조류의 종동정 및 단위 면적당 세포의 계수는 매우 어려웠다. 따라서, 본 연구에서 규조류 군집 조성에 대한 연구는 세척된 규조류 각(frustule)을 계수하는데 기초하였다.

이렇게 제거된 부착규조류가 포함된 각 해초 종별 10개체의 현탁액을 50 μ로 희석시킨 후 이중 0.2 ml씩 5개의 커버글라스에 떨어뜨리고, 자연건조 시켰다. 이렇게 건조된 방울은 그 직경을 측정하여 면적을 계산하였다. 규조류의 계수는 전자현미경(1000X) 하에서 일정면적을 사진으로 찍은 후 이 면적안에 포함되어 있는 것을 모두 계수하였으며, 각 커버글라스당 이러한 작업을 두 번씩 반복하였다(Fig. 2).

규조류의 계수 후 규조류에 대한 현존량은 해초 잎의 단위 면적(cm²LA)당으로 표현하였으며, 이 방법으로 상대적인 종 풍부성, 각 지역별 우점종 및 종의 천이 양상을 파악하였다. 또한, 출현한 규조류는 전자현미경을 이용하여 동정되었다.

결 과

Zostera 속 해초 잎의 형태 및 세포적 특징

거제도 다대리의 *Z. marina* 잎의 길이와 너비는 평균 24.3(1월)~53.8 cm(7월), 0.4~0.7 cm 이었으며, 거제도 장목리의 *Z. marina*의 잎의 길이는 19.4(9월)~50.1 cm(7월), 너비는 0.4~0.7 cm 이었다. *Z. marina*의 세포는 전반적으로 6각형의 전형적인 식물세포의 모습을 가지고 있었으나 현미경 사진상으로 볼 때 길이와 너비의 변이가 심하였다. 세포 너비는 가장 큰 세포의 너비가 12.8 μm이였으며, 가장 작은 세포는 9.2 μm로 평균 10.84±0.39 μm(n=30)이었다. 세포 길이는 가장 큰 세포의 길이가 8.8 μm, 가장 작은 세포의 길이가 14.4 μm로 평균 12.20±0.68 μm(n=30)이었다(Fig. 3, 4A).

*Z. japonica*는 현재 남해안과 서해안의 조간대에 서식하는 것으로 알려져 있으며 본 연구를 위해 조사된 *Z. japonica*는 거제도

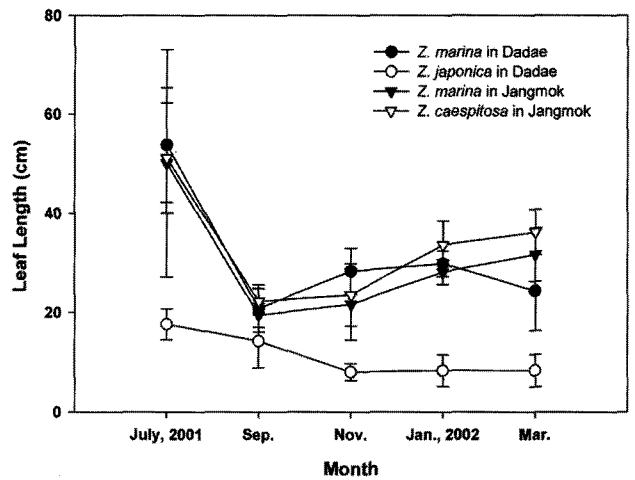


Fig. 3. Leaf length variation of *Zostera* spp. from July, 2001 to March, 2002 in Geoje Is. Korea.

대리에서만 채집되었으며 잎의 평균 길이와 너비는 각각 8.0(11월)~17.6 cm(7월), 0.2 cm이었다. *Z. japonica*는 *Z. marina*에 비하여 개체의 크기가 작은 만큼 세포의 크기도 매우 작을 것이라고 예상하였으나, 실제 세포의 크기는 크게 다르지 않았다. 세포의 크기는 너비 5.6~6.4 μm였으며 평균 6.0±0.11 μm(n=30)로 나타났다. 세포의 길이는 8.4~13.6 μm의 범위였으며, 평균 11.2±0.5 μm(n=30)로 측정되었다. *Z. marina*와 *Z. japonica*의 세포의 길이는 큰 차이가 없었으나 너비는 *Z. japonica*가 *Z. marina*에 비해 1/2정도로 전체적으로 긴 직사각형의 형태를 보였다(Fig. 3, 4B).

거제도 장목리에서 채집된 *Z. caespitosa*는 잎의 평균 길이와 너비는 22.2(9월)~51.2 cm(7월), 0.6~0.7 cm로 *Z. marina*의 잎의 길이와 너비가 유사하였다. 그러나, 전자현미경을 통해 살펴본 세포의 모습은 매우 다른 것으로 나타났다. *Z. marina*는 대부분의 세포가 육각형 또는 이와 유사한 형태를 뚜렷하게 갖춘 반면 *Z. caespitosa*는 세포의 형태가 뚜렷하지 않았다. 세포와 세포간에는 연결고리 형태가 관찰되었으며, 전체적으로 중심이 볼록한 타원형의 형태를 띠고 있었다. 세포의 크기는 폭이 7.8~10.0 μm, 평균 8.9±0.25 μm(n=30)였으며, 길이가 11.11~22.22 μm(n=30), 평균 16.9±1.37 μm로 측정되어 다른 해초 종의 세포에 비해 큰 것으로 나타났다(Fig. 3, 4C).

부착규조류의 부착방법

전자 현미경(SEM)으로 관찰된 규조류의 해초 잎에 부착형태는 크게 세 가지로 나누어서 볼 수 있었다. 첫째, 우선 규조류는 흠과 평행하게 자리잡아 부착하려는 경향을 보였다(Fig. 5A). 또한, 식물의 세포가 항상 직사각형 형태로 긴 형태를 지니고 있지 않은 경우에는 몸체의 굴곡 현상이 나타나는 것을 알 수 있다(Fig. 5B).

둘째, 부착규조류는 해초의 잎 끝, 중간 부분, 그리고 잎의 가장 아래부분으로 살펴보았을 때, 일반적으로 해초의 잎 끝 부분에 부착규조류가 밀집하여 서식하는 것을 알 수 있었으며 하루로 갈수록 부착규조류의 현존량이 줄어드는 것을 알 수 있었다(Fig. 6A, B, C). 또한, 최근에 생성된 해초의 가장 작은 잎에는 부착규조류가 거의 출현하지 않았을 뿐만 아니라, 성장기간이 가장 길었던 잎에도 현미경으로 관찰시 부착규조류의 현존량은 그다지 많아 보

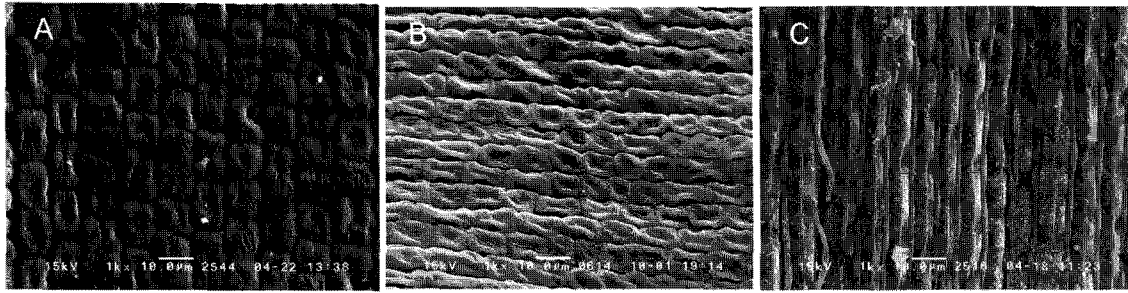


Fig. 4. The cell shape of *Zostera marina* (A), *Z. japonica* (B), and *Z. caespitosa* (C). SEM photos.

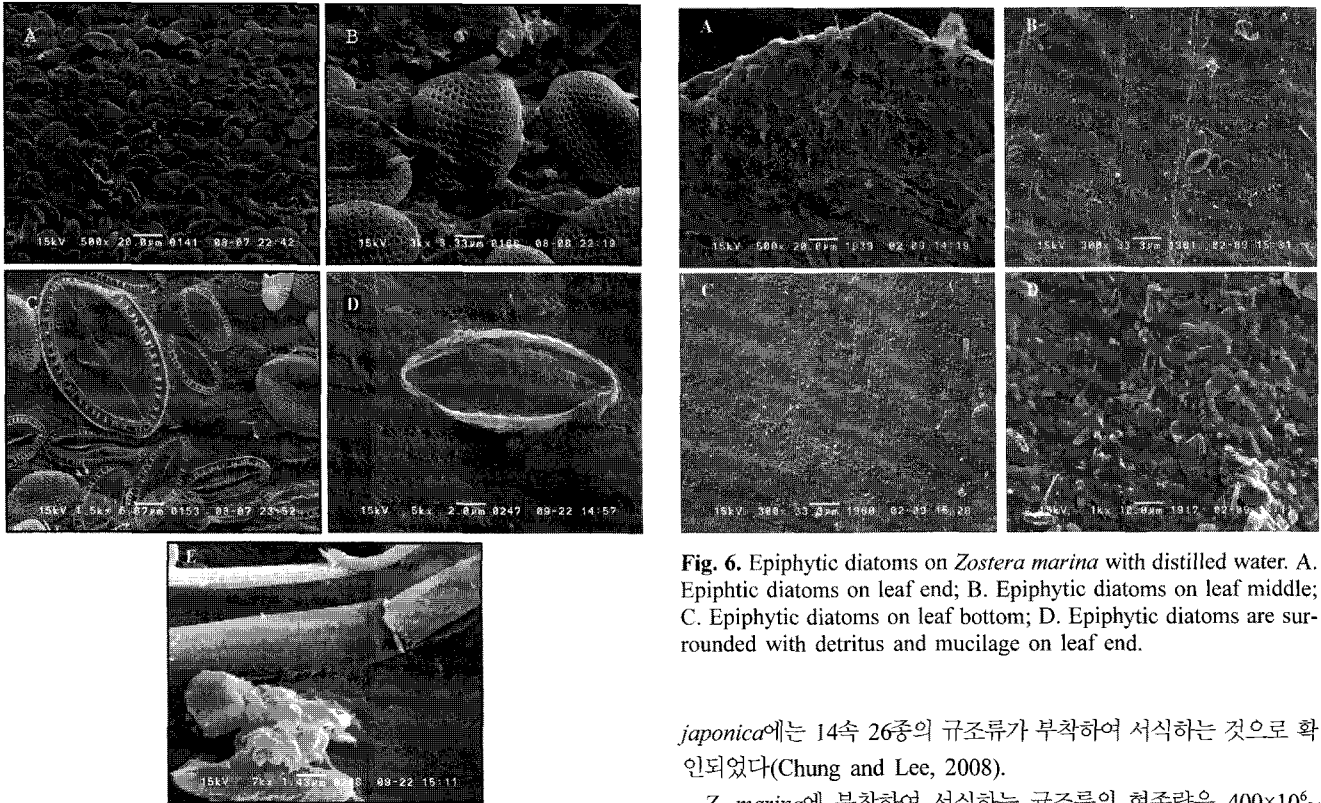


Fig. 5. Epiphytic diatoms (*Cocconeis* spp.) on *Zostera marina* treated with dilute phosphoric acid. A. Epiphytic diatoms arrangement; B. The epithecas of diatoms; C. The hypothecas of diatoms; D. Diatom (*Amphora* sp.) with mucilage; E. Epiphytic diatom with mucilage.

이지 않았다(Fig. 6D).

셋째, 잎의 가장 끝 부분에는 점액질 줄기를 이용한 종들(예: *Gomphonemopsis* sp., *Tabularia* sp.)의 수가 많을 것이라 예상하였으나 같은 잎 끝이라 하더라도 이러한 종들이 우점한 지역이 있는 반면 타원형의 종들(예: *Cocconeis* sp.)이 우점한 지역도 나타났다(Fig. 7A, B, C). 또한, 잎의 중간 부분도 타원형의 종들이 주로 관찰되는 지역과 점액질 줄기를 이용하여 부착하는 종들이 주로 관찰되는 지역이 존재하였다(Fig. 7D, E).

해초별 부착 규조류 군집 차이

다대리에 서식하는 *Z. marina*와 *Z. japonica*에 부착하는 규조류 군집의 차이

연구기간에 다대리에 서식하는 *Z. marina*에는 24속 73종, *Z.*

Fig. 6. Epiphytic diatoms on *Zostera marina* with distilled water. A. Epiphytic diatoms on leaf end; B. Epiphytic diatoms on leaf middle; C. Epiphytic diatoms on leaf bottom; D. Epiphytic diatoms are surrounded with detritus and mucilage on leaf end.

*japonica*에는 14속 26종의 규조류가 부착하여 서식하는 것으로 확인되었다(Chung and Lee, 2008).

*Z. marina*에 부착하여 서식하는 규조류의 현존량은 $400 \times 10^6 \sim 35,500 \times 10^6$ frustules/cm²LA 이었으며 2001년 7월에 최저값을, 2001년 11월에 최고값을 보였다. *Z. japonica*에 부착하여 서식하는 규조류의 현존량은 $200 \times 10^6 \sim 1,100 \times 10^6$ frustules/cm²LA로 *Z. marina*에 부착하는 규조류의 현존량이 적게는 약 2배에서 많게는 30배 이상 높게 나타났다(Fig. 8). *Z. marina*에 부착하는 규조류의 현존량의 변화를 살펴보면 2001년 11월까지 꾸준한 증가를 보이다가 2002년 1월부터는 감소하는 현상을 보였으나, *Z. japonica*에 부착하여 서식하는 규조류는 2001년 7월 가장 높게 나타난 이후 2002년 3월까지 꾸준히 감소하였다.

*Z. marina*와 *Z. japonica*에 부착하는 규조류의 종수는 매우 큰 차이를 나타내었으며 현존량과 마찬가지로 *Z. marina*에 전 기간 동안 많은 수의 규조류 종이 부착하였다. *Z. marina*에 부착한 규조류 종수는 40~78종으로 9월에 최고 종수를 나타낸 반면 *Z. japonica*에 부착한 규조류종수는 5~22종으로 7월에 최고 종수를 기록하였다 (Fig. 9).

이 해역에 서식하는 해초에 부착하여 서식하는 규조류 중 우점종은 총 9종으로 *Z. marina*에는 *Tabularia faciculata*(7월), *Gomphonemopsis exigua*(9월), *Berkeleya rutilans*(11월), *Berkeleya rutilans*(1월),

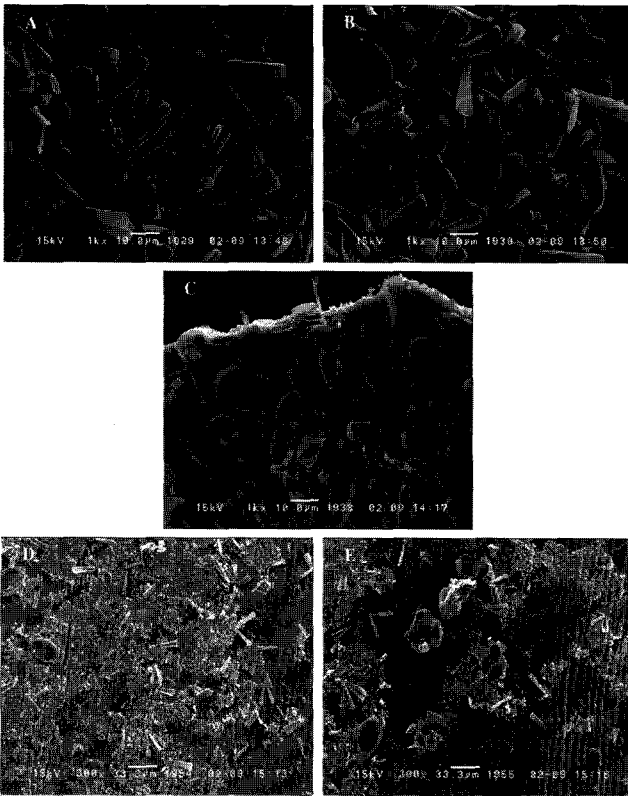


Fig. 7. Epiphytic diatoms on leaf end (A, B, C) and leaf middle (D, E) of *Zostera marina*. Epiphytic diatoms are composed naviculoid diatoms (A, B, D) and cocconical diatoms (C, E).

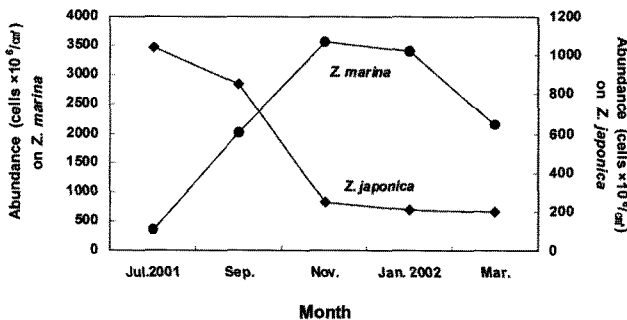


Fig. 8. Epiphytic diatom abundance on leaves of *Zostera* spp. at Dadae in Geoje Is., Korea.

Nitzschia sigmoid(3월)로 변화하였다. 이 중 *Berkeleya rutilans*는 11월과 1월 2번에 걸쳐 우점하고 있음을 알 수 있었다. 제1 우점종과 제2,3 우점종을 살펴보면 *Z. marina*에 우점하고 있는 종들은 모두 속이 다른 특징을 보였다. 반면 *Z. japonica*에는 *Cocconeis placentula*(7월), *Cocconeis scutellum*(9월), *Berkeleya rutilans*(11월), *Cocconeis placentula*(1월), *Cocconeis placentula*(3월)로 11월만을 제외하고는 *Cocconeis*속이 우점하는 양상을 보이고 있다. 또한, *Z. japonica*에 부착하는 우점종들은 제2, 제3 우점종에서도 *Coconeis*속이 우점하는 것으로 나타났다(Table 1).

*Z. marina*에 부착한 규조류와 *Z. japonica*에 부착한 규조류 간의 우점종 분석에서는 조사시기 동안 대부분 제 1우점종이 다를 만큼 뚜렷한 공통점을 찾을 수 없었으나, 2001년 11월 제1 우점종

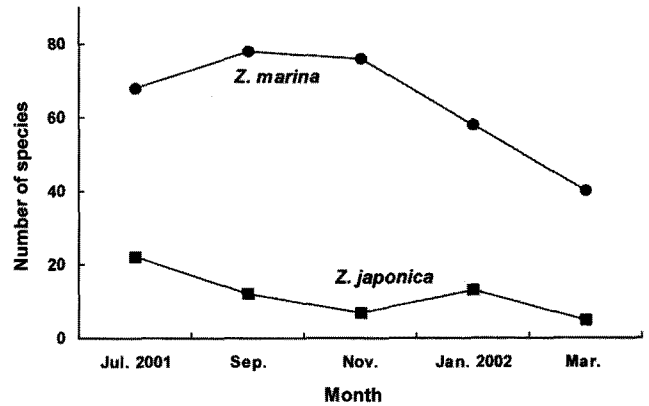


Fig. 9. Number of epiphytic diatom species on leaves of *Zostera* spp. at Dadae in Geoje Is., Korea.

Table 1. Dominant species of epiphytic diatoms on leaves of *Zostera* spp. surface from Dadae, Geoje Is., in Korea.

	Dominant species (%)	
	<i>Z. marina</i>	<i>Z. japonica</i>
Jul. 2001	<i>Tabularia fasciculata</i> (31.6)	<i>Cocconeis placentula</i> (51.9)
	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (11.4)	<i>Cocconeis scutellum</i> (21.2)
	<i>Haslea ostrearia</i> (8.8)	<i>Cocconeis maxima</i> (14.8)
Sep.	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (48.6)	<i>Cocconeis scutellum</i> (42.1)
	<i>Cocconeis placentula</i> (12.1)	<i>Cocconeis placentula</i> (39.6)
	<i>Tabularia babatula</i> (6.0)	<i>Berkeleya rutilans</i> (8.3)
Nov.	<i>Berkeleya rutilans</i> (59.0)	<i>Berkeleya rutilans</i> (31.6)
	<i>Navicula perminuta</i> (8.4)	<i>Cocconeis scutellum</i> (24.6)
	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (5.5)	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (19.3)
Jan. 2002	<i>Berkeleya rutilans</i> (32.1)	<i>Cocconeis placentula</i> (41.0)
	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (12.4)	<i>Cocconeis scutellum</i> (25.5)
	<i>Cocconeis scutellum</i> (10.1)	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (12.3)
Mar.	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (36.8)	<i>Cocconeis placentula</i> (41.2)
	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (11.9)	<i>Cocconeis scutellum</i> (24.49)
	<i>Berkeleya rutilans</i> (9.6)	<i>Cocconeis maxima</i> (8.4)

(*Berkeleya rutilans*)와 제 3우점종(*Gomphonemopsis exigua*)이 일치하였다.

장목리에 서식하는 *Z. marina*와 *Z. caespitosa*에 부착하는 규조류 군집

*Z. marina*에 부착하여 서식하는 규조류의 현존량은 $108 \times 10^6 \sim 3,580 \times 10^6$ frustules/cm²LA 이었으며 다대의 현존량과 마찬가지로 2001년 7월에 최저값을 2001년 11월에 최고값을 나타내었다. *Z. caespitosa*에 부착하여 서식하는 규조류의 현존량은 $458 \times 10^6 \sim 2,740 \times 10^6$ frustules/cm²LA로 전반적으로 *Z. marina*에 부착하는 규조류의 현존량이 높게 나타났다 (Fig. 10).

*Z. marina*와 *Z. caespitosa*에 부착하는 규조류의 현존량은 2001년 11월까지 꾸준한 증가를 보이다가 급격한 감소현상을 보이고 있다. 이러한 현존량의 변화는 다대에서 채집된, *Z. marina*에 부착하여 서식하는 규조류의 현존량의 변화와 같다.

*Z. marina*와 *Z. caespitosa*에 부착하는 규조류의 종수는 그다지 큰 차이를 나타내지는 않았으나 현존량과 마찬가지로 전반적으로 *Z. marina*에 전 기간 동안 많은 수의 규조종이 부착하였다. *Z. marina*에 부착한 규조종 수는 29~38종으로 11월에 최고 종수를

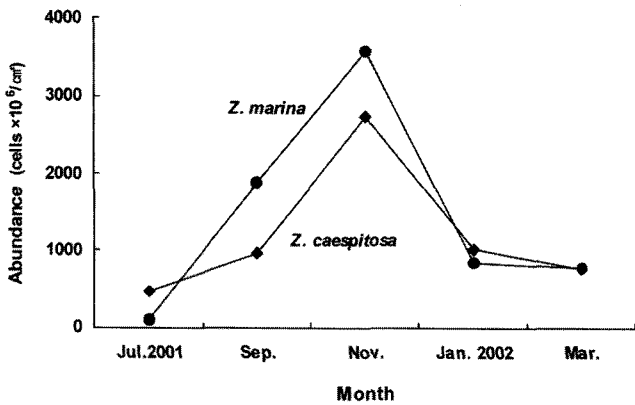


Fig. 10. Epiphytic diatom abundance on leaves of *Zostera* spp. at Jangmok in Geoje Is., Korea.

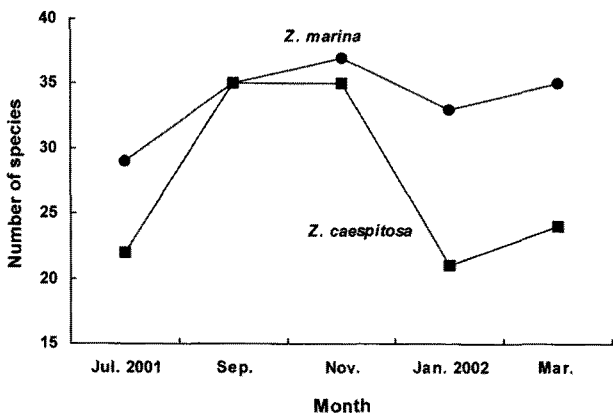


Fig. 11. Number of epiphytic diatom species on leaves of *Zostera* spp. at Jangmok in Geoje Is., Korea.

Table 2. Dominant species of epiphytic diatoms on leaves of *Zostera* spp. surface from Jangmok, Geoje Is., in Korea.

	Dominant species (%)	
	<i>Z. marina</i>	<i>Z. caespitosa</i>
Jul. 2001	<i>Tabularia fasciculata</i> (13.4)	<i>Berkeleya rutilans</i> (15.5)
	<i>Berkeleya rutilans</i> (7.5)	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (12.6)
	<i>Nitzschia sigmoid</i> (7.5)	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (8.6)
Sep.	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (38.9)	<i>Navicula perminuta</i> (15.2)
	<i>Tabularia fasciculata</i> (9.6)	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (14.0)
	<i>Berkeleya rutilans</i> (8.9)	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (11.3)
Nov.	<i>Berkeleya rutilans</i> (32.5)	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (14.6)
	<i>Gomphonemopsis exigua</i> (18.3)	<i>Navicula radiosa</i> (13.4)
	<i>Navicula perminuta</i> (10.4)	<i>Berkeleya rutilans</i> (8.2)
Jan. 2002	<i>Cocconeis placentula</i> (25.5)	<i>Navicula perminuta</i> (26.6)
	<i>Cocconeis scutellum</i> (21.0)	<i>Cocconeis placentula</i> (22.8)
	<i>Navicula perminuta</i> (13.6)	<i>Berkeleya rutilans</i> (11.6)
Mar.	<i>Navicula perminuta</i> (31.3)	<i>Cocconeis scutellum</i> (38.5)
	<i>Cocconeis placentula</i> (25.9)	<i>Cocconeis placentula</i> (31.2)
	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (22.6)	<i>Nitzschia sigmoidea</i> (11.3)

나타낸 반면 *Z. caespitosa*에 부착한 규조종 수는 21~35종으로 9월과 11월에 최고 종수를 기록하였다(Chung and Lee, 1998, Fig. 11).

*Z. marina*에서는 *Tabularia faciculata*(7월), *Gomphonemopsis exigua*(9월), *Berkeleya rutilans*(11월), *Cocconeis placentula*(1월), *Navicula radiosa*(3월)로 변화되었다. 반면 *Z. caespitosa*의 잎 표

면에는 *Berkeleya rutilans*(7월), *Navicula radiosa*(9월), *Gomphonemopsis exigua*(11월), *Navicula radiosa*(1월), *Cocconeis scutellum*(3월)이 변화하는 양상을 보였다(Table 2).

고찰

대부분의 생물이 서식지에 따라 크기의 차이가 있듯이, 본 연구에서 이용된 부착규조류의 기질이 되는 해초 종 또한 각 해역에 따라 너비와 길이의 차이가 나타나는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 남해안에 서식하는 *Z. marina*의 너비는 0.15~0.5 cm 정도로 동해안이나 서해안보다 그 너비가 넓게 나타나는 경향이 있다. 또한, 남해안에 서식하는 *Z. japonica*의 잎의 길이는 26~27 cm 정도이며, 잎의 너비는 0.1~0.2 cm 정도로 다른 해초들에 비해 그 길이와 잎의 너비가 매우 작게 측정된다고 보고된 바 있다(이, 2001). 따라서, 각 종별 해초에 부착하는 규조류의 군집 변화를 조사하기 위하여 여러 지역의 해초를 채집하는 대신 같은 해역에 서식하는 서로 다른 해초 종별로 부착 규조류 군집을 조사하는 방법을 선택하여 실험함으로써 지역적 차이를 최소화 하고자 하였다.

본 연구를 통해 전자 현미경(SEM)으로 관찰된 규조류의 부착 형태는 크게 3가지로 요약할 수 있다. 첫째는 세포에 평행하게, 그리고 세포의 모양에 따른 굴곡 현상을 통한 부착 등 물리적 영향에 의해 쉽게 떨어지지 않을 수 있는 형태로 부착한다는 것이다. 이러한 현상은 맨 처음 이들이 분열을 할 당시부터 굴곡이 형성된 것인지는 알 수는 없지만, 규조류 하각이 식물 세포의 굴곡에 따라 굴곡이 진 상태로 부착함으로써 쉽게 물리적 영향에 의해 떨어지지 않게 될 것임을 충분히 예상할 수 있었다. Fig. 3C 또한 이러한 경우인데, 이 경우 하각이 식물세포의 모습을 반영하고 있었다. 또한, 이들은 점액질을 다량 분비하여 기질에 부착하여 어떠한 물리적인 영향에도 매우 강하게 부착할 수 있는 것을 알 수 있었다(Fig. 3D, E). 이와 같은 결과는 특히 *Cocconeis placentula*는 형태를 변이하여 잎 표면에 부착한다고 하는 기존의 연구 결과와 일치하고 있었다(Ferreira and Seeliger, 1985). 또한, 규조류가 세포와 평행하게 부착하는 경향은 규조류가 기질에 부착시 부착을 용이하게 해 주는 이점을 가지고 있으나, 기질에서 이동시 생기는 하나의 현상으로 보고되고 있다(Akihiro, 2000). 규조류의 이러한 부착 형태 또는 이동 형태 등은 구조 종마다 선호하는 기질이 있을 수 있다는 것을 예상토록 해 준다.

둘째, 해초의 잎 끝에 규조류가 밀집하여 서식함을 알 수 있었다. 일반적으로 부착 생물의 다양성과 현존량은 해초 잎의 수명과 밀접한 관련이 있기 때문에 성장기간이 가장 길었던 잎 끝에 부착 종수 또는 현존량이 많은 것으로 알려져 있다. 또한 잎 끝은 광합성을 위해 태양에너지 흡수에도 지역적으로 매우 좋은 위치이기 때문에 잎의 다른 지역보다 규조류가 우선적으로 부착할 가능성이 높다(Borowitzka and Lethbridge, 1989).

셋째, 잎의 성장기간이 가장 긴 잎의 끝 부분에 규조류중 부착 순서가 늦은 *Tabularia*와 같은 점액질 줄기를 이용한 규조류의 수가 예상보다 적다는 것이다. 오히려 *Cocconeis* 처럼 1차 부착 규조류가 우점하는 곳이 많았다. 그러나, 실제적으로 우점종을 살펴보면 제 2차 또는 3차 부착규조류에 해당하는 점액질 줄기를 이용하는 규조류가 우점하는 경우들이 많았기 때문에, 어떠한 처리

없이 현미경하에서 잎을 관찰할 경우 부착 규조류 위에 부착한 규조류 만이 보이기 때문이라 생각한다. 그러나, 이것을 과학적으로 확인하기 위해서는 시간에 따른 해초 부착 규조류의 부착 순서에 대한 접근이 필요할 것으로 여겨진다.

해초 종별로 규조류의 군집 형태를 비교해 보면, 우선 다대에 서식하는 두 종 *Z. japonica*와 *Z. marina*에 부착하는 종 수가 5-26종, 40-73종으로 *Z. marina*에 부착한 규조류의 종 수가 월등히 많았으며(Chung and Lee, 2008), 이 외에도 현존량 또한 큰 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 두 해초의 길이, 너비등의 차이에 의한 것으로 생각되고 있는데, 긴 잎을 가지고 잎의 형태가 좀 더 복잡한 *Posidonia sinuosa*의 잎에 부착한 부착생물의 다양성이 *Posidonia australis*보다 더 높았다(Trautman and Borowitzka, 1999)는 기존의 보고와도 일치하고 있다.

특히, 우점종을 살펴보면, *Z. japonica*는 *Cocconeis* 속의 종들이 주로 우점을 하고 있는 반면, *Z. marina*에서는 줄기를 형성하여 부착하는 종들이 주로 우점을 하고 있는 것으로 나타났다. 이는 *Z. japonica*는 계절에 상관없이 주로 1차 부착규조종이 주로 우점하고 있는 것을 시사한다. 해초 잎에 부착하는 첫 번째 규조류는 *Cocconeis* 속으로 알려져 있는 것을 고려할 때(Sieburth and Thomas, 1973; Sieburth et al., 1974), *Z. japonica*에는 2차 또는 3차 부착규조종이 부착할 수 있는 시간적 여유가 없는 것으로 여겨진다. 이는 *Z. marina*가 평균 조간대 하부지역에서 48일, 조간대 상부지역에서 36일(Kentula and McIntire 1986)인 반면, *Z. japonica*의 평균 수명은 21-22일(Lee et al., 2005)이라는 연구로 유추해 볼 수 있다. 따라서, 해초 잎 표면에 부착하는 규조류는 해초의 모양과 함께 수명에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 또한, 기질이 되는 식물의 잎의 형태로 잎의 너비가 좁고 긴 형태인가, 아니면 넓고 두꺼운 형태인가에 따라서 부착 규조류의 종조성이 달라질 수 있다(Ramm, 1976)는 보고와 같이 잎의 길이가 길고 넓은 *Z. marina*에서는 주로 길고 좁은 형태(Naviculoid)의 종들이 우점하고 있는 반면 잎의 길이가 짧고 너비가 좁은 *Z. japonica*에서는 *Cocconeis*와 같이 넓고 둥근 형태의 종들이 우점하고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나, *Z. marina*와 *Z. japonica*의 세포의 길이나 모양의 큰 차이가 없는 것으로 볼 때 세포의 모양보다는 잎의 수명과 잎의 모양에 따른 그룹의 차이가 있는 것으로 여겨진다. 이는 *Z. marina*와 *Z. caespitosa*처럼 잎의 모양과 길이가 비슷하나 세포모양이 완전히 다른 두 종의 우점종과 현존량이 비슷한 것과 비교해 볼 때 부착 기질이 되고 있는 해초 잎 표면의 모양 차이로 순간적인 해수 유통 패턴이 조절되고, 이것은 하나의 잎이 다른 잎보다 부착하기 용이하게 만드는 원인이 될 수 있기 때문에 부착생물 군집 형성에 영향을 미칠 수 있다(Borowitzka and Lethbridge, 1989). 그러나, 본 연구결과로 볼 때 잎 표면의 구조보다 잎의 수명과 길이가 부착규조류 군집을 형성하는 데 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

일반적으로, *Z. marina*를 포함한 *Zostera* 속 세 종의 해초의 잎 표면은 눈에 보이거나 보이지 않는 많은 굴곡들이 존재할 뿐만 아니라 연안지역에 서식하므로 파도 및 조석과 조류의 영향을 받는다. 서식지의 이러한 환경은 규조류의 부착을 방해하는 요인 중 하나이기 때문에 이러한 불리한 환경을 극복하기 위한 부착방법이 발달하게 된다(Godward, 1937). 이와 함께, 초기 부착 생물 중 박테리아의 초기 부착은 매우 미미한 반면 규조류만이 선택적으로

부착할 수 있는 것으로 보고된 바도 있다(Sieburth and Thomas, 1973; Sieburth and Tootle, 1981). 이렇게 부착규조류는 해초 잎 표면 맨 아래 층 부착함으로써 잎 표면의 미세 지형(microtopography)을 증가시켜 다른 부착 생물에게 부착하기 알맞은 환경을 제공함으로써(Humm, 1964; Ballantine, 1979; Willcocks, 1982) 그 중요성이 커지며, 따라서 기질과의 상호 작용에 대한 연구는 부착 생물 생태 연구에 기초적인 연구라 할 수 있으며, 본 논문의 가장 큰 의의가 될 수 있다.

그러나, 현재까지는 부착규조류에서 기질에 대한 특이성을 가진 종이 있을 것이라는 가설이 받아들이기 힘든 상황이다(Borowitzka and Lethbridge, 1989). 그럼에도 특정 규조종은 특정 조류 또는 기질이 되는 식물의 일부 부분에서만 현존량이 증가하는 보고나(Snoeijs, 1994), 특정 조류에서 분비되는 물질로 인해 부착규조류를 포함한 부착생물의 성장이 방해 받거나 자극된다는 연구(Round, 1981)등이 지속적으로 보고됨으로써 논란은 계속되고 있는 실정이다. 그러나 본 연구에서와 같이 같은 속에 속한 해초 중에도 해초의 모양에 따라 규조류의 그룹이 나뉠 수 있는 것으로 나타났기 때문에 부착규조류를 포함한 부착 조류의 지속적인 연구는 해초 종에 따른 종 특이성을 갖는 부착 생물을 찾을 수 있는 기회를 만들어 줄 것이라 생각된다.

결론

Zostera 속 해초에 부착하여 서식하는 규조류의 부착 형태 및 군집 변화 연구 결과 주요 내용은 다음과 같다

1. 규조류가 해초 잎에 부착하는 형태는 크게 3가지로 나눌 수 있었다. 1) 해초 잎의 세포와 평행하게 위치하거나 규조류 세포를 변형시켜 물리적 영향에도 쉽게 탈락되지 않도록 부착하고 있었다. 2) 부착규조류는 주로 줄기보다는 잎 끝에 밀도가 많은 것으로 조사되었다. 이는 부착시간 획득의 이점과 광합성을 위한 자리 선점등의 이유인 것으로 생각된다. 3) 잎 끝은 잎 중에서도 다른 부분에 비해 가장 오랫동안 해수에 노출되어 있기 때문에 1차 부착규조류보다 2차 또는 3차의 부착규조류가 많은 것으로 예상하였으나, 부착 규조류를 제거하지 않은 상태로 잎을 관찰한 결과 최 상부에 1차 부착규조류인 *Cocconeis* spp가 2-3차 부착규조류에 해당하는 *Navicula* spp. 또는 *Tabularia* spp.와 같은 점액질 줄기를 형성하는 규조류보다 많은 것으로 나타났다.

2. 해초 잎의 규조류는 다음과 같은 이유로 해초의 수명을 결정하는 해초의 길이 또는 너비와 같은 외적인 모양에 의해 군집구조의 변화가 있는 것으로 나타났다. 1) 잎의 길이와 너비의 차이가 큰 *Z. marina*와 *Z. japonica*는 미세 지형을 결정하는 세포의 모양과 크기가 비슷함에도 불구하고 부착규조류의 종수, 현존량, 우점종들의 차이가 크게 나타났다. 2) *Z. marina*와 *Z. caespitosa*는 잎의 길이와 너비는 비슷한 반면 세포의 모양과 크기는 매우 달랐음에도 부착규조류의 종수, 현존량, 우점종들의 차이가 크지 않은 것으로 조사되었다.

사사

본 연구는 국립수산과학원의(하구어장 실험성 평가 및 관리전략 개발, RP-2010-ME-051)의 지원에 의해 운영되었습니다.

참고문헌

- 이상룡. 2001. 한국산 거머리말속(*Zostera*, Zosteraceae)의 생태 및 분류학적 특성에 관한 연구. 박사학위논문. 한양대학교.
- Akihiro, T., 2000. Observation of developmental processes in loosely attached diatom (Bacillariophyceae) communities. *Phycol. Res.*, **48**: 75–84.
- Ballantine, D.L., 1979. The distribution of epiphytes on macrophyte hosts offshore from la Parguera, Puerto Rico. *Bot. Mar.* **22**: 207–211.
- Borowitzka M.A. and R.C. Lethbridge, 1989. Seagrass epiphytes. In: *Biology of seagrasses-A treatise on the biology of seagrasses with special reference to the Australian region*, edited by Larkum, A.W.D., A.J. McComb and S.A. Shepherd. Elsevier, Netherlands, 458–499.
- Chung, M.H. and K-S. Lee, 2008. Species composition of the epiphytic diatoms on the leaf tissues of three *Zostera* species distributed on the southern coast of Korea. *Algae*. **23**: 75–81.
- Coleman, V.L., and J.M. Burkholder, 1994. Community structure and productivity of epiphytic microalgae on eelgrass (*Zostera marina* L.) under water-column nitrate enrichment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **179**: 29–48.
- Corlett H. and B. Jones, 2007. Epiphyte communities on *Thalassia testudinum* from Grand Cayman, British West Indies: Their composition, structure, and contribution to lagoonal sediments. *Sedimentary Geology*. **194**: 245–262.
- Godward, M., 1937. An ecological and taxonomic investigation of the littoral algal flora of Lake Windermere. *J. of Ecology*. **25**: 496–568.
- Ferreira S. and U. Seeliger, 1985. The colonization process of algal epiphytes on *Ruppia maitima* L. *Bot. Mar.* **28**: 245–249.
- Harlin, M.M., 1980. Seagrass epiphytes. In *Handbook of Seagrass Biology: An Ecosystem Perspective*, edited by Phillips, R.C. and C.P. McRoy, STPM press, New York, pp. 117–151.
- Harrison, P.G. and C.D. Durance, 1985. Reduction in photosynthetic carbon uptake in epiphytic diatoms by water-soluble extracts of leaves of *Zostera marina*. *Mar. Biol.* **90**: 117–119.
- Heijs, F.M.L., 1985. The seasonal distribution and community structure of the epiphytic algae on *Thalassia hemprichii* (Ehrenb.) Aschers. from Papua New Guinea. *Aquat. Bot.* **21**: 295–324.
- Hellebust, J.A., 1970. Light; Plants. In *Marine Ecology*, edited by Kinne O., Wiley-Interscience, New York, pp. 125–158.
- Humm H.J., 1964. Epiphytes of the seagrass, *Thalassia testudinum*, in Florida. *Bull. Mar.Sci. Gulf Carib.* **31**: 56–62.
- Kentula M.E. and C.D. McIntyre, 1986. The autecology and production dynamics of eelgrass (*Zostera marina* L.) in Netarts Bay, Oregon. *Estuaries* **9**: 188–199.
- Lee, S.Y., J.H. Oh, C.I. Choi, Y. Suh, and H. Mukai, 2005. Leaf growth and population dynamics of intertidal *Zostera japonica* on the western coast of Korea. *Aquatic Botany*. **83**: 263–280.
- McRoy, C.P. and C. Helfferich, 1977. *Seagrass Ecosystems: A Scientific Perspective*. Dekker. 314pp.
- Medlin L.K., 1983. Community analysis of epiphytic diatoms from selected species of macroalgae collected along the Texas coast of the Gulf of Mexico. PhD thesis, A&M University, Austin. TX. 151pp.
- Orth, R.J., and J. van Montfrans, 1984. Epiphyte-eelgrass relationships with an emphasis on the role of micrograzing: A review. *Aquat. Bot.* **18**: 43–69.
- Penhale, P.A., and G.W. Thayer, 1980. Uptake and transfer of carbon and phosphorus by eelgrass (*Zostera marina* L.) and its epiphytes. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **42**: 113–123.
- Ramm, G., 1976. Structure of epiphytic diatom populations of the phytal of the Kiel Bight (Western Baltic). In *Proceedings of Fourth Symposium on Recent and Fossil Marine Diatoms*, edited by R. Simonsen, Gante Verlag KG, Germany, pp. 379–387.
- Round, F.E., 1981. *The ecology of algae*. Cambridge University press. Cambridge. 653pp.
- Short, F.T., D.M. Burdick, and J.E. Kaldy, 1995. Mesocosm experiments quantify the effects of eutrophication on eelgrass, *Zostera marina*. *Limnol. Oceanogr.* **40**: 740–749.
- Sieburth, J.M. and J.L. Tootle, 1981. Seasonality of microbial fouling on *Ascophyllum nodosum* (L.) Lejoll., *Fucus vesiculosus* L., *Polysiphonia lanosa* (L.) Tandy and *Chondrus crispus* Stackh. *J. Phycol.* **17**: 57–64.
- Sieburth, J.M. and C.D. Thomas, 1973. Fouling on eelgrass (*Zostera marina* L.). *J. Phycol.* **9**: 46–50.
- Smith, W.O., and P.A. Penhale, 1980. The heterotrophic uptake of dissolved organic carbon by eelgrass (*Zostera marina* L.) and its epiphytes. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **48**: 233–242.
- Snoeijs, P., 1994. Distribution of epiphytic diatom species composition, diversity and biomass on different macroalgal hosts along seasonal and salinity gradients in the Baltic sea. *Diatom Research*. **9**: 189–211.
- Trautman, D.A. and M.A. Borowitzka, 1999. Distribution of the epiphytic organisms on *Posidonia australis* and *P. sinuosa*, two seagrasses with differing leaf morphology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **179**: 215–229.
- Willcocks, P.A., 1982. Colonization and distribution of the red algal epiphytes *Melobesia mediocris* and *Smithora naiadum* on the seagrass *Phyllospadix torreyi*. *Aquat. Bot.* **12**: 365–373.

2010년 10월 4일 원고접수

2010년 11월 25일 수정본 채택

담당편집위원: 김광용