

# 해수에 잠긴 인공기질 표면에서 미세조류의 부착과 성장: I. 부착 및 천이

심재형 · 강정훈 · 조병철 · 김응서<sup>1</sup>  
서울대학교 해양학과 및 해양연구소, <sup>1</sup>한국해양연구소 해양생물연구부

## The Microalgal Attachment and its Growth on the Artificial Surfaces Immersed in Seawater: I. Attachment and Micro-succession

JAE HYUNG SHIM, JUNG HOON KANG, BYUNG CHEOL CHO AND WOONG-SEO KIM<sup>1</sup>  
Department of Oceanography and Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
<sup>1</sup>Biological Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

해수에 잠긴 인공기질 표면에서 미세조류의 부착과 후속적으로 나타나는 성장과정을 이해하기 위해 규조류의 부착과 주변수의 종 급원(species pool)과의 관계를 조사하였다. 1995년 7월부터 1997년 2월까지 인천항 내에서 아크릴 슬라이드를 이용하여 규조류의 부착에 관해 연구하였고, 주변 해수를 조사하였다. 또한 생물막 초기형성 과정에서 노출시간의 증가에 따라 나타나는 부착미세조류 군집의 종조성과 수도의 변화를 유리, 아크릴, 티타늄, 구리 및 생물오손방지 페인트로 도포된 슬라이드 등 다양한 인공기질 표면을 이용하여 조사하였다. 아크릴 슬라이드에서 규조류의 이입률은 주변수의 저서규조류의 수도변화와 유의성 있는 상관관계를 나타냈으며( $r^2=0.78$ ,  $p<0.01$ ,  $n=42$ ), 이는 주변수의 저서규조류의 수도에 의해 영향을 받는 것을 지시한다. 아크릴 슬라이드에서 봄철에 단배선 형태 규조류의 부착능력(이입계수)이 복배선 형태에 비해 5 배 높게 나타났다. 그러나 부착점유율은 단배선 형태가 복배선 형태에 비해 3 배 낮게 나타났다. 겨울철에는 중심형 규조류의 부착능력이 다른 형태들에 비해 높게 나타났고 부착점유율도 높게 나타났다. 이는 규조류의 부착이 주변해수에 출현한 저서 규조류의 수도 및 부착능력에 의한 결과임을 지시한다. 우상형 규조류가 연구기간동안 모든 인공기질 표면에 대부분 부착 출현하였고, 겨울철에는 중심형 규조류가 모든 인공기질 표면에 우점 부착하였다. 생물오손방지 페인트로 처리된 표면에서는 독성에 대한 내성이 강한 것으로 판단되는 *Hantzschia virgata*, *Licmophora abbreviata*, *Melosira nummuloides*가 우점하여 부착하였다. 노출시간이 증가함에 따라 부착규조류의 수도는 유리, 티타늄, 아크릴 슬라이드에서 지속적으로 증가하였고, 최대수도는 유리  $\geq$  아크릴 > 티타늄 > 구리  $\geq$  페인트처리 슬라이드의 순으로 높게 나타났다. 모든 인공기질 표면에서 부착규조류의 성장률은 2~3°C에서 보다 24~25°C의 수온에서 높게 나타났다. 유리 슬라이드에서 다른 표면에 비해 전반적으로 높은 값을 보였다. 해수 중에서 노출시간의 증가에 따라 관찰된 우점종은 납작한 형태인 *Amphora coffeaeformis*, 부채꼴 형태인 *Synedra tabulata*, stalk 형태인 *Licmophora paradoxa* 그리고 사슬형태인 *M. nummuloides*로 나타났고, 부착미세조류 군집에서 미소천이(micro-succession)가 관찰되었다. 이러한 우점종 조성은 미세조류 생물막이 발달하여 서식공간이 제한됨에 따라 나타난 종 적응의 결과로 보인다.

To understand the attachment of microalgae and their subsequent growths on artificial surfaces immersed in seawater, the relationship between attachment of diatoms on the immersed artificial substrates and species pool in the surrounding water was investigated. We used acryl slides for the study of diatom attachment and examined the surrounding water samples collected in Incheon Harbour from July 1995 to February 1997. Variations of species composition and abundances by exposure time in seawater were investigated during the early phase of biofilm formation on various substrates, e.g. glass, acryl, titanium, copper and antifouling paint-treated slides. Immigration rates of diatoms to acryl slides during spring and winter were significantly correlated with the abundance of benthic diatoms in surrounding water ( $r^2=0.78$ ,  $p<0.01$ ,  $n=42$ ), suggesting that immigration rates were affected by variations of benthic diatom abundances in surrounding water. Immigration coefficient of monoraphid diatoms was 5 times higher than that of biraphid diatoms, but relative abundance of monoraphid diatoms

was 3 times lower than that of biraphid diatoms on acryl slides in spring. In winter, immigration coefficient and relative abundance of centric diatoms were higher compared to other raphe forms. These results suggest that the attachment of diatoms seems to be caused by the abundance and immigration coefficients of benthic diatoms in surrounding water. Pennate diatoms predominantly attached to all artificial surfaces throughout all experimental periods. Interestingly, centric diatoms predominantly attached to all artificial surfaces in winter. *Hantzschia virgata*, *Licmophora abbreviata* and *Melosira nummuloides* appeared dominantly on antifouling paint-treated slides, probably being tolerant of the antifouling paint. During incubations, the abundance of attached diatoms increased exponentially on glass, titanium and acryl slides with exposure time. The maximum abundance was highest on glass slide, followed by acryl, titanium, copper and antifouling paint-treated slides. The growth rates of attached diatom community on all artificial surfaces were higher at temperature of 24–25°C than that of 2–3°C. The growth rate of attached diatoms on glass slide was generally higher compared to other slides during the study period. Dominant morphotypes of observed species with exposure time in seawater were prostrate form *Amphora coffeaeformis*, fan shape *Synedra tabulata*, stalk type *Licmophora paradoxa* and chain type *M. nummuloides*. A micro-succession in the attached microalgal community was observed. The composition of dominant species seems to be the result of species-specific response to gradually limited space with development of microalgal film.

## 서 론

해양 수생환경에 노출된 해양 구조물은 시간이 경과함에 따라 생물오손균집이 부착, 발달하여 열 효율의 저하, 금속표면 부식, 그리고 선박 운항속도 저하 등이 나타난다. 그러므로 경제적 손실을 야기하는 생물오손균집의 부착에 관한 연구가 필요하며, 그 결과는 생물체에 의한 해양 구조물의 오손을 저감하는데 중요한 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

생물오손균집의 발달과정은 크게 두 단계로, 단세포 생물들이 부착하여 노출시간에 따라 천이를 나타내는 microfouling 단계와, 이후 다세포 생물들이 부착하여 천이를 나타내는 macrofouling 단계로 구분된다. 생물오손균집의 발달 초기 과정인 microfouling 단계에서는 1차 생물막(primary biofilm)이 형성되며, 대형 고착생물을 유도하는 것으로 밝혀졌다(Caron and Sieburth, 1981; Meenakumari and Nair, 1994). 그리고 1차 생물막은 주로 규조류가 우점하는 것으로 나타났다(Callow, 1993).

규조류의 초기 부착과정에 관한 생태학적 연구는 국외에서 이미 활발히 수행되어왔고, 최근에는 초기단계에서 규조류의 부착 제어와 관련하여 생화학적 연구기법이 도입되었다(Yan et al., 1997). 한편 국내에서는 진해항과 마산만 수역에서 Shim and Jung(1987)에 의해 수행된 대형 고착생물의 인공기판 표면 부착 후 발달 및 천이에 관한 연구결과가 있다. 그러나 이 연구에서는 중요한 부분으로 인식되고 있는 microfouling 단계의 부착규조류에 관한 세부적인 생태학적 연구가 부족하였다.

규조류의 부착은 여러 형태의 서식지에 있던 저서규조류들이 교란(turbulence)과 같은 물리적 요인으로 인해 일시성 플랑크톤(tycho plankton) 형태로 해양 구조물 표면에 다다르게 되어 일어나며(Breznak et al., 1985; Cooksey and Cooksey, 1992에서 재인용; Hudon and Bourget, 1983), 이는 대사작용의 결과로 나타나는 능동적인 형태이다(Cooksey and Cooksey, 1995).

규조류가 표면에 부착한 후 시간이 경과함에 따라 수도와 종 조성에서 변화를 나타내는데, 상이한 기질표면을 해수에 노출

시켰을 때, 부착규조류 군집이 각 표면에서 어떻게 발달하는지, 또한 주변수의 비생물적 환경요인중 어떤 요인이 군집발달에 영향을 미치는가에 관한 연구는 부착규조류 군집의 천이를 이해하는데 필요하다.

따라서 본 연구에서는 첫째로 규조류의 이입률(immigration rate)을 통해 이입률과 주변 해수의 종 급원과의 관계를 규명하고, 종 수준에서 부착양상을 이해하고자 하였다. 두 번째로 부착 후 시간의 증가에 따른 부착규조류 군집의 종조성과 천이양상의 차이를 다양한 인공기질 표면에서 확인하고자 하였다.

## 재료 및 방법

아크릴 슬라이드를 이용한 부착규조류의 이입률 조사는 1996년 5월 1일부터 19일까지 9 회에 걸쳐, 그리고 1997년 1월 18일부터 2월 18일까지 5 회에 걸쳐 실행되었다. 다양한 인공기질 표면을 이용한 부착규조류 군집의 종조성과 수도조사는 1995년 7월부터 1997년 2월까지 총 5 차례에 걸쳐 인천항 내 제 7 부두의 한 연구정점에서 이루어졌다. 연구정점은 기관설치가 용이하고, 장시간 기관노출이 가능한 곳을 택하였다(Fig. 1).

기관은 아크릴로 제작하여 선박접안 잔교에 줄을 매달아 부이(buoy)를 띄워 설치하였으며, 기관간의 충돌을 방지하기 위해 부이 사이의 간격을 일정하게 유지시키고, 기관의 노출깊이는 수면 아래 0.7 m로 하였다(Fig. 2). 그리고 수온·염분 측정기(AST 500)를 이용하여 매 기관 회수시마다 수온을 측정하였다.

### 슬라이드 및 기관

투명 아크릴 슬라이드(25 mm×75 mm)는 직접 계수를 통해 초기 부착을 조사하는데 용이하였다. 아크릴 슬라이드는 중류수에 세척하여 건조시킨 뒤 해수에 노출시켰고, 2 일 간격으로 기관에서 회수하여 노출되지 않은 면을 깨끗이 닦은 후, 최종 농도 4%의 glutaraldehyde 용액에 넣어 현장에서 20 분간 고정하였다. 고정한 후 노출된 표면을 위로 향하게 하여 슬라이드

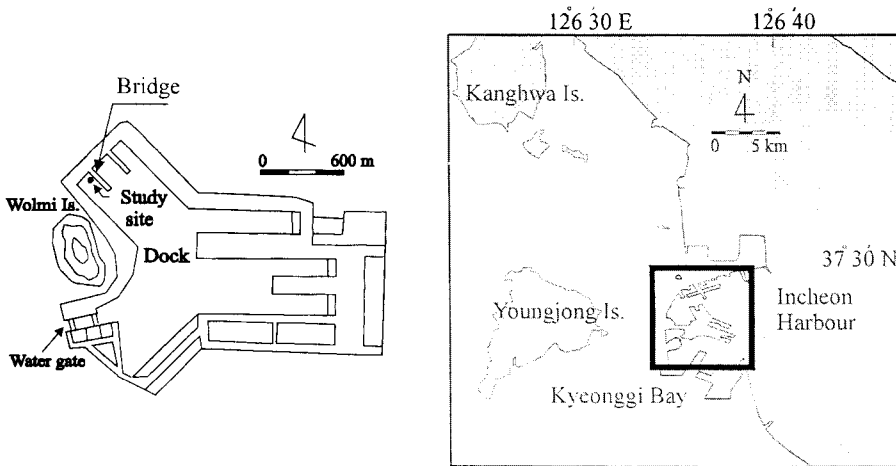


Fig. 1. Map of the study site in Incheon dock.

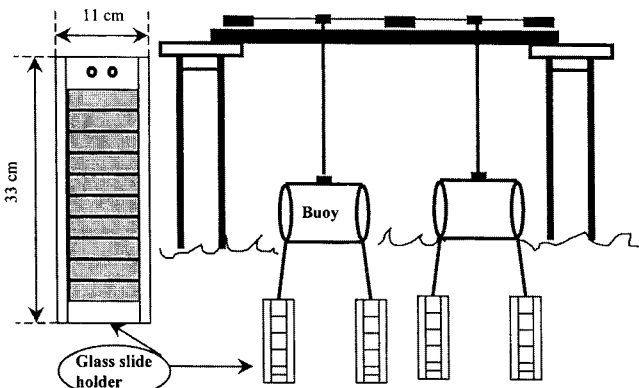


Fig. 2. A diagram showing slide holders held to buoys which were tied to a bridge.

박스에 보관하여 운반하였다.

부착규조류 군집의 발달을 확인하기 위해 사용된 다양한 인공기질 표면은 유리, 아크릴, 티타늄, 구리, 그리고 생물오손방지 페인트를 도포한 슬라이드였다(25 mm × 75 mm). 유리는 10% 염산에 2 일 동안 담가두어 유기물을 제거하고, 증류수로 세척한 뒤 건조 오븐에서 건조시켰다. 페인트처리 슬라이드는 붓으로 유리 표면에 2~3 회 덧칠한 뒤 공기 중에서 건조하였고, 티타늄과 아크릴 그리고 구리 슬라이드는 증류수로 세척하여 공기 중에 건조시킨 후 기판에 끼워 넣었다. 슬라이드는 아크릴기판(110 mm × 330 mm) 1 개당 10 개씩 끼워 넣어 부이에 줄로 연결하여 수직으로 해수에 노출시켰다(Hoagland *et al.*, 1982; Hoagland, 1983). 일정시간 간격으로 회수하여 유리와 페인트 도포 시료는 4% 포르말린 용액에서 20 분간 고정시켰고, 아크릴과 금속재질의 시료는 4% glutaraldehyde 용액에 20 분간 고정시킨 뒤, 슬라이드 박스에 넣어 실험실로 운반하였다.

**수도분석**

규조류의 이입률은 아크릴 슬라이드를 해수에 48 시간 동안 노출시켜 부착된 규조류를 광학현미경(Olympus BH2)을 이용하여 계수한 뒤, 하루동안 부착한 세포수(cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)로 환산하여 구하였다(Stevenson and Peterson, 1989). 측정된 규조류의 이

입률은 48 시간 동안에 인공기질 표면에서 규조류의 부착과 이탈 및 성장과 사망과정으로 인한 모든 과정의 결과로 가정하였다(Stevenson, 1983). 비교적 긴 시간인 48 시간의 노출은 현미경 관찰시 유의성 있는 수도측정을 위해 필요하였다. 기관 회수시 주변수에 출현한 규조류의 수도를 동시에 조사하였다. 규조류의 부착능력을 추정하기 위한 이입계수(immigration coefficient)는 이 입률과 주변수에 출현한 규조류 수도의 비[(cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) · (cells ml<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>]로 구하였다.

유리와 아크릴 슬라이드 상의 규조류 동정과 계수는, 광학현미경을 이용하였고, 티타늄과 구리, 페인트처리 슬라이드 시료의 동정과 계수는 형광현미경(Olympus BH2)을 이용하였다. 400~1000 배의 배율에서 가능한 한 중수준까지 동정하였고, 중수준의 동정이 어려운 것은 속수준까지 하였다. 계수방법은 중앙부분을 횡단선 방향으로 먼저 계수하고, 등 간격으로 두 줄을 더 계수하는 방식을 적용하였다. 이 방법은 슬라이드 표면에서 다양한 형태의 군집형성으로 인해 비롯되는 오차를 제거할 수 있다는 장점이 있다(Stevenson, 1983).

전체 개체수가 100 개체 미만인 초기단계에는 일률적으로 200 fields를 계수하여 군집을 대표한 Marcus(1980)의 방법을 따랐고, 이후에 수적증가를 나타내기 시작하는 시료는 최소 100 개체를 계수하였고, 지수적인 증가를 나타내는 시기부터는 300 개체 이상을 계수하여 단위 면적당 개체수로 환산하였다. 위 방법은 부착규조류를 100 개체만 계수하여 얻은 종 다양성지수가 보다 많은 개체를 계수하여 얻은 다양성지수와 차이가 없었다는 결과에 근거하였다(Cooper and Wilhm, 1975). 동일한 방법으로 티타늄, 구리, 생물오손방지 페인트처리 슬라이드의 시료를 계수하였다.

형광현미경을 이용하여 티타늄과 구리재질 슬라이드를 계수할 때는 DAPI 염색법을 이용하였다. 염색시약으로 금속재질 표면을 20 분간 염색한 뒤 커버글래스(22 mm × 22 mm)를 슬라이드의 중앙 부분에 위치시킨 뒤 immersion oil을 가하여 400 배의 배율에서 계수 하였다. 그리고 단위 면적당 개체수로 환산하였다. 금속재질 슬라이드에 부착된 규조류 계수방법도 유리 슬라이드와 동일한 방법으로 400 배의 배율로 3 줄의 횡단선을 설정하여 계수하였다(Marszalek *et al.*, 1979).

**종조성**

연구기간동안 유리, 아크릴, 티타늄, 구리 그리고 페인트처리 슬라이드에 부착 출현한 규조류를 조사하였으며, 동정에 참조한 문헌은 Chin(1985), Hustedt(1985), Choi(1988), 조(1989), Round *et al.*(1990), 심(1994)이다. 그리고 노출기간동안에 부착 출현한 모든 규조류를 총 종수로 결정하였다.

**자료처리 및 분석**

부착규조류의 수도(abundance)는 Hoagland(1983)의 식을 변형하여 표면에서의 단위면적당 세포수(cells · cm<sup>-2</sup>)=계수된 세포수/계수된 면적으로 구하였다. 부착규조류 군집의 성장률은 최소자승회귀법(least squares regression)에 따라 노출기간 동안 나타난 수도로부터 다음 식을 이용하여 구하였다(Stevenson *et al.*, 1991).

$$\ln(n) = \alpha + r \cdot T$$

$\alpha$ : T=0 일 때 부착규조류 수도를 자연로그 변환한 값

T: 노출시간(일)

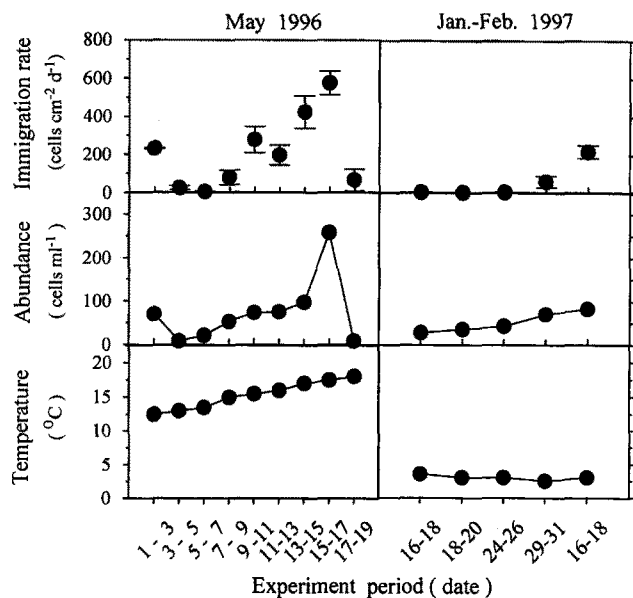
n: 노출시간 T에 부착출현한 수도(cells cm<sup>-2</sup>)

r: 성장률

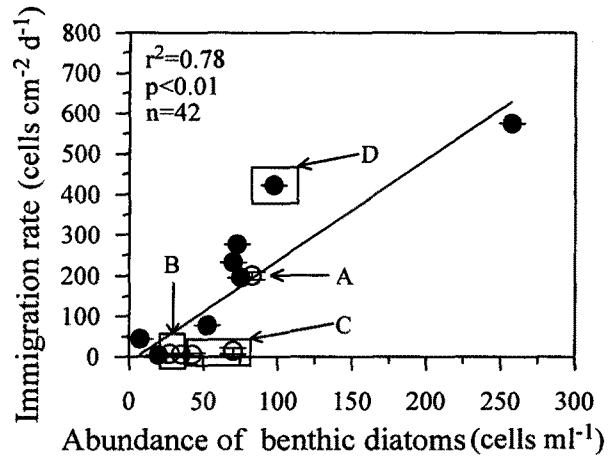
**결 과**

**이입률**

봄철과 겨울철에 나타난 이입률은 각각 4~575 cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 6~220 cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 이었으며, 봄철과 겨울철 조사시 수온차이는 평균 10°C 정도였다(Fig. 3). 주변수의 규조류 수도는 봄철과 겨울철에 각각 8~258 cells ml<sup>-1</sup>, 28~83 cells ml<sup>-1</sup> 이었다(Fig. 3). 실험기간 중 총 14 회에 걸쳐 얻어진 이입률은 평균적으로 주변수피 내의 저서규조류 수도의 변화와 유의성 있는 상



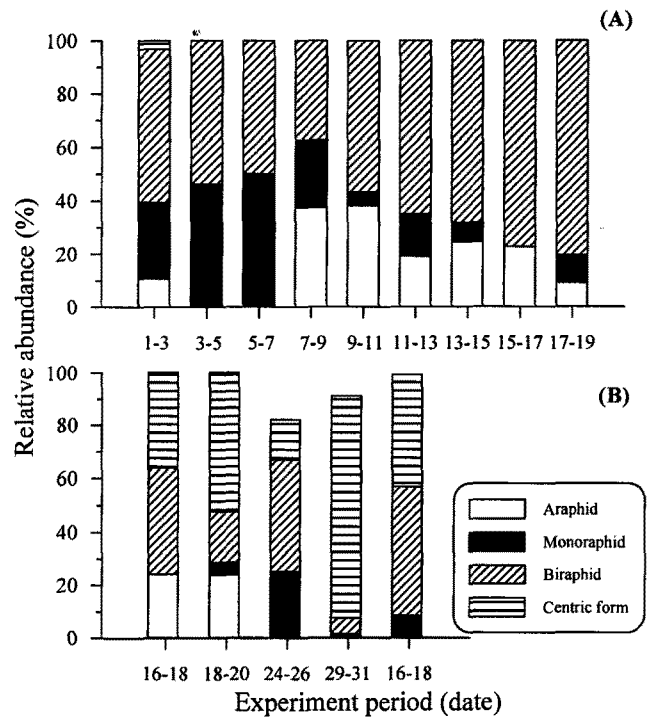
**Fig. 3.** Immigration rates of diatoms, abundances of benthic diatoms and temperatures in the water columns in spring and winter. Bars indicate the range of standard deviation (n=3).



**Fig. 4.** Relationships between immigration rates of benthic diatoms to acryl slides and abundances of benthic diatoms in surrounding water. ● = May 1996, ○ = January—February 1997. Bars indicate the range of standard deviation (n=3).

관관계를 나타냈다( $r^2=0.78$ ,  $p<0.01$ ,  $n=42$ )(Fig. 4). 그러나 계절별로는 차이가 있어 봄철에는 유의성 있는 상관관계를 보였으나( $r^2=0.84$ ,  $p<0.001$ ,  $n=27$ ), 겨울철에는 뚜렷하게 유의성 있는 상관 관계가 나타나지 않았다( $r^2=0.76$ ,  $p>0.05$ ,  $n=15$ ).

아크릴 슬라이드에 부착한 규조류의 배선 형태(raphe form)별 상대적 수도는, 봄철에는 복배선 형태(biraphid form)가 가장 우세하였으며, 이어 무배선(araphid), 단배선(monoraphid), 중심형(centric form) 규조류의 순서로 나타났다(Fig. 5A). 겨울철에는 중심형 규조류가 가장 우위를 점하고 있으며, 다음으로 복배선, 무



**Fig. 5.** Relative abundances of 4 morphotypes of attached diatoms to acryl slides in the immigration rate experiment. (A) May 1996, (B) January—February 1997.



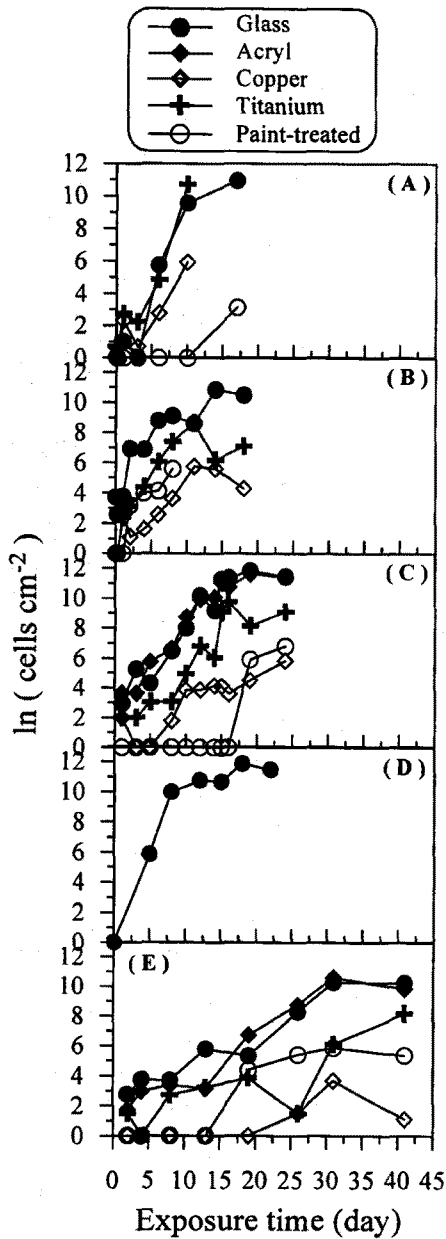


Fig. 7. Natural log-transformed abundances of attached diatoms developed on the artificial substrates during the study period. (A) July 1995, (B) August 1995, (C) May 1996, (D) June 1996, (E) January–February 1997.

일찍 나타났다.

유리와 아크릴은 다른 표면들에 비해 높은 수도로 빠르게 증가하였으며, 다음으로 티타늄, 구리, 생물오손방지 페인트처리 슬라이드의 순으로 점차 낮은 수도범위를 나타내며 증가하였다. 최대수도도 동일한 수생환경 내에서 표면재질에 따라 상이하게 나타났는데, 1997년 1, 2월을 제외한 전 시기에서 유리 ≥ 아크릴 > 티타늄 > 구리 ≥ 페인트처리 슬라이드의 순으로 나타났다(Table 2).

**성장률:** 노출시간이 증가함에 따른 부착규조류 군집의 성장률은 유리, 티타늄, 아크릴, 구리 슬라이드에서 각각 0.21~0.73 d<sup>-1</sup>,

0.16~0.93 d<sup>-1</sup>, 0.24~0.41 d<sup>-1</sup>, 0.10~0.53 d<sup>-1</sup>의 범위에서 변화를 나타냈다. 전반적으로 유리에서 발달한 부착규조류 군집의 성장률이 가장 높게 나타났으며, 구리에서 발달한 군집의 성장률이 가장 낮게 나타났다. 부착규조류 군집의 성장률이 가장 높게 나타난 시기는 조사된 4 가지 슬라이드에서 모두 24~25°C의 수온범위를 나타낸 1995년 7월이었으며, 가장 낮은 값을 나타낸 시기는 2~3°C의 수온범위를 나타낸 1997년 1, 2월이었다(Fig. 8).

**종조성:** 전 연구시기에 걸쳐 가장 많은 종 수(species number)의 규조류가 부착 출현한 슬라이드는 유리였으며, 아크릴, 티타늄 그리고 구리의 순으로 부착, 출현하였다(Table 3). 그리고 페인트를 처리한 슬라이드에서 가장 적은 수가 부착, 출현하였다.

1995년 7월 조사에서 유리 슬라이드에 부착, 출현한 규조류는 총 33 종으로 19 종이 부착한 티타늄과 13 종이 부착한 구리, 그리고 3 종이 부착한 생물오손방지 도료로 처리한 슬라이드에 비해 다양한 종 수를 나타냈다. 각 슬라이드에 부착, 출현한 규조류 중 *Amphora*, *Achnanthes*, *Navicula*, *Nitzschia* 등 4 개 속의 종 수가 전체의 73% 이상을 차지하여 우점속으로 나타났다(Table 3).

1995년 8월에 유리 슬라이드에 부착 출현한 규조류는 총 48 종으로 1995년 7월에 비해 15 종이 많은 수이며, 티타늄(32 종), 구리(21 종), 페인트처리 슬라이드(14 종)에 비해 많은 종이 부착 출현하였다. 위에 언급된 4 개 속의 종들이 조사된 모든 재질에서 64% 이상의 점유율을 차지하여 우점속으로 나타났다(Table 3).

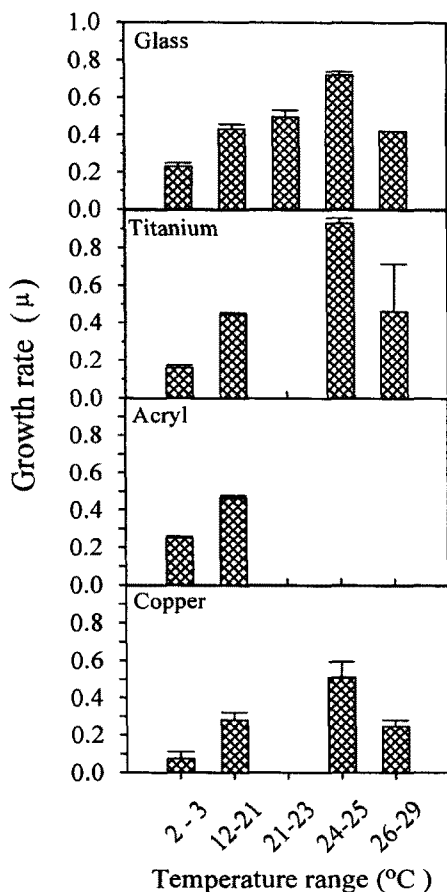
1996년 5월에는 아크릴 슬라이드를 추가 도입하여 조사하였는데, 유리 슬라이드에 부착한 총 종 수는 46 종으로 아크릴에 부착한 총 종 수(31 종)보다 15 종이 많았으며, 티타늄(27 종), 구리(22 종), 페인트처리 슬라이드(3 종)보다 많은 종이 부착 출현하였다. 이 중 위에 언급된 4 개 속의 종들이 전체 종 수의 67% 이상을 점유하였다. 이와 같은 경향은 겨울철 조사(1997년 1~2월)에서도 유사하게 나타나 유리 슬라이드에 34 종으로 가장 많이 부착 출현하였으며, 다음으로 아크릴(23 종), 티타늄(12 종), 구리(3 종) 그리고 페인트처리 슬라이드(1 종) 순이었다. 겨울철에도 위에 언급된 4 개 속의 종 수가 59% 이상을 차지하여 우점속으로 나타났다(Table 3).

연구기간동안 모든 인공기질 표면에 부착한 종의 형태는 *Amphora*, *Achnanthes*, *Navicula*, *Nitzschia* 등 4 개 속의 우상형 규조류가 대부분이었고, 그 외에 *Licmophora*, *Synedra* 속의 우상형 규조류도 부착, 출현하였다. 겨울철에는 우상형 규조류 외에도 중심형 규조류인 *Melosira nummuloides*가 부착 출현하여 특이한 양상을 나타냈는데, 이 종이 전체수도에서 차지한 점유율은 유리, 티타늄, 구리, 아크릴 그리고 페인트처리 슬라이드에서 각각 45%, 83%, 84%, 62% 그리고 100%를 차지하여 단일종으로는 매우 높은 부착수도를 나타냈다.

배양기간의 최종 단계에서 누적 수도(accumulative abundance)에 의한 우점종(Table 4)은 유리에서 1995년 7월과 8월에 *Amphora coffeaeformis*, *A. ovalis* var. *pediculus*, 1996년 5월과 6월에는 *A. coffeaeformis*, 1997년 1, 2월에는 *Melosira nummuloides*였다. 티타늄에서는 1995년 7월에 *Hantzschia virgata*, 8월에 *A. coffeaeformis*가, 1996년 5월에는 *A. ovalis* var. *pediculus*, 1997년 1, 2월

**Table 2.** Summary of previous data on maximal abundance of attached diatoms and exposure time

Environment	Study site	Substrate	Season	Exposure time (days)	Maximal abundance ( $\times 10^4$ cells $\text{cm}^{-2}$ )	Source
Freshwater	Elk Lake	Slideglass	summer	33	6	Brown, 1973
	Elk Lake	Slideglass	winter	24	1	Brown, 1973
	Reservoir	Slideglass		8	40	Hoagland, 1983
	Stream	Clay tile		32	41	Stevenson, 1986
	Danube River	Sand-blasted slideglass		14	370	Acs and Kiss, 1993
Marine	Biscayne Bay	Slideglass		21	100	Marszalek, 1979
	Tampa Bay	Bivalve		3	10	Cuba and Blake, 1983
	St. Lawrence Estuary	Plastic panel		49	10	Hudon and Bourget, 1983
	Incheon Harbour	Glass	spring	19	14	This study
			summer	17	6	
			winter	31	3	
	Acryl	spring	16	11		
		winter	31	4		
	Titanium	spring	15	2		
		summer	10	5		
		winter	41	0.36		
	Copper	spring	19	0.03		
		summer	10	0.04		
		winter	31	0.005		
	Antifouling Paint treated	spring	24	0.09		
summer		8	0.03			
		winter	41	0.04		



**Fig. 8.** Growth rates of attached diatoms developed on the artificial substrates under different temperature. Bars indicate the range of standard deviation (n=3).

에는 *M. nummuloides*로 나타났다. 구리에서는 1995년 7월과 8월에 각각 *Amphora lineolata*와 *Grammatophora marina*가, 1996년 5월에는 *Cylindrotheca closterium*, 1997년 1, 2월에는 *Melosira nummuloides*로 나타났다. 아크릴에서는 1996년 5월에 *Licmophora abbreviata*가, 1997년 1, 2월에는 *M. nummuloides*가 우점하였다. 페인트처리 표면에서는 1995년 7, 8월에 *H. virgata*가, 1996년 5월에는 *L. abbreviata*로 나타났고, 1997년 1, 2월에는 *M. nummuloides*만이 부착하였다.

### 토 의

#### 이입률과 종 급원과의 관계

본 연구는 인공기질 표면에 규조류가 부착될 때 주변해수의 종 급원이 미치는 영향을 보고자 한 것이다. 따라서 계절이 다름(즉, 광, 수온, 영양염 농도 그리고 종조성의 현저한 차이를 의미)에도 불구하고, 일관성 있는 결과가 나올 수 있는지를 확인하고자 하였다. 봄철과 겨울철에 수행된 연구결과들을 합쳐서 종 급원과 비교한 결과, 이 두 가지 변수들은 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 여러 가지 다른 환경적 변이를 내포하고 있음에도 불구하고 두 변수간에 나타난 유의성 있는 상관관계는 매우 흥미있는 사실로서, 인공기질 표면이 노출된 주변수에 부착능력이 있는 규조류 즉 우상형 규조류와 일부 중심형 규조류가 많이 출현할수록 부착가능성이 높아짐을 시사하고 있다. 이는 유리 슬라이드가 노출된 주변수에 *Navicula* sp.가 상대적으로 우점할 경우, 슬라이드표면에 *Navicula* sp.가 대부분 부착하였다는 Hudon and Bourget(1983)의 결과와 부합하였다.

본 연구에서 겨울철의 일부자료(자료군 A와 B; Fig. 4)는 전

**Table 3.** Total species number and species number of dominant genus attached to artificial substrates in diatom colonization experiments

Period	Substrate	Total species number	Species number of dominant genus					Frequency of 4 dominant genus (%)
			<i>Amphora</i>	<i>Achnanthes</i>	<i>Navicula</i>	<i>Nitzschia</i>	Centric	
July 18–August 4, 1995	Glass	33	7	3	5	9	<sup>1</sup> na	73
	Titanium	19	5	2	4	4	na	79
	Copper	13	3	<sup>1</sup> na	2	6	na	85
	Paint-treated	3	1	na	<sup>1</sup> na	2	na	100
August 10–28, 1995	Glass	48	12	3	5	13	na	69
	Titanium	32	7	3	5	6	na	66
	Copper	21	4	na	3	7	na	67
	Paint-treated	14	4	1	na	4	na	64
May 1–25, 1996	Glass	46	9	6	5	12	na	70
	Acryl	31	8	4	2	7	na	68
	Titanium	27	4	6	3	6	na	70
	Copper	22	2	4	2	7	na	68
	Paint-treated	3	1	1	na	<sup>1</sup> na	na	67
June 6–28, 1996	Glass	25	6	2	4	7	na	76
January 16–February 26, 1997	Glass	34	1	2	4	11	2	59
	Acryl	23	1	2	3	6	2	61
	Titanium	12	<sup>1</sup> na	1	3	5	2	92
	Copper	3	na	na	1	1	1	100
Paint-treated	1	na	na	na	na	1	100	

<sup>1</sup>na=not attached.**Table 4.** Dominant species of accumulative attached diatoms in each experiment (GL=glass, AC=acryl, Ti=titanium, Cu=copper, A-F=antifouling paint-treated)

Period	Exposure time (days)	Substrate	Dominant species	Abundance ( $\times 10^3$ cells $\text{cm}^{-2}$ )	Relative abundance (%)
July 1995	17	GL	<i>Amphora coffeaeformis</i>	29	43
	10	Ti	<i>Hantzschia virgata</i>	31	68
	10	Cu	<i>Amphora lineolata</i>	0.2	56
	17	A-F	<i>Hantzschia virgata</i>	< 0.1	52
August 1995	18	GL	<i>Amphora ovalis</i> var. <i>pediculus</i>	64	59
	18	Ti	<i>Amphora coffeaeformis</i>	2	26
	18	Cu	<i>Grammatophora marina</i>	0.1	20
	18	A-F	<i>Hantzschia virgata</i>	0.2	85
May 1996	24	GL	<i>Amphora coffeaeformis</i>	249	59
	24	AC	<i>Licmophora abbreviata</i>	92	25
	24	Ti	<i>Amphora ovalis</i> var. <i>pediculus</i>	10	27
	24	Cu	<i>Cylindrotheca closterium</i>	0.2	29
	24	A-F	<i>Licmophora abbreviata</i>	1	93
June 1996	22	GL	<i>Amphora coffeaeformis</i>	112	34
January–February 1997	41	GL	<i>Melosira nummuloides</i>	28	45
	41	AC	<i>Melosira nummuloides</i>	40	61
	41	Ti	<i>Melosira nummuloides</i>	3	83
	41	Cu	<i>Melosira nummuloides</i>	< 0.1	84
	41	A-F	<i>Melosira nummuloides</i>	0.9	100

체적 경향과 부합되고, 또 일부자료(자료군 C; Fig. 4)가 매우 낮은 이입률을 보인 현상은 이입계수와 연결시켜 해석될 수 있었다. 겨울철 자료의 경우 2월 16~18일(Fig. 4의 자료군 A)과 1월 16~18일, 18~20일(Fig. 4의 자료군 B)의 이입률은 봄철자료와 같은 경향을 갖고 나타났으며, 이때의 이입계수는 각각 2.66,

0.29, 0.2로 나타났다. 봄철의 경우 겨울철 자료군 A와 B에 해당되는 저서규조류의 수도에서 이입계수가 각각 0.2, 2.61로 나타나, 겨울철의 자료군 A와 B의 이입계수와 유사하게 나타났다. 한편, 겨울철 자료의 1월 24~26일과 29~31일(자료군 C; Fig. 4)의 이입률이 낮게 나타났는데, 이는 자료군 C의 이입계수



(0.2, 0.89)가 이보다 높은 이입률을 나타낸 봄철의 이입계수 (1.48, 3.32)에 비해 현저히 낮게 나타났기 때문인 것으로 보인다. 봄철 자료에서 D는 전반적인 경향에 비해 높게 나타났는데, 이 때의 이입계수는 4.33으로 매우 높은 값 (봄철의 이입계수 범위는 0.2~4.33)이었다. Stevenson and Peterson(1989)도 주변수의 규조류 수도는 유사하였으나, 이입계수가 각각 0.71, 6~10, 14.3~18.6일 때 이입률이 각각 100 cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 900~1,500 cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 2,000~2,600 cells cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 상이하게 나타났음을 보고하였다.

2월 16~18일의 이입계수가 다른 시기에 비해 비교적 높게 나타난 것은 *H. virgata*와 *M. nummuloides*가 주변해수에 출현했기 때문인 것으로 보인다. 이에 비해 1월 29~31일에는 주변수에 *H. virgata*가 출현하지 않아 이입계수가 낮게 나타난 것으로 보인다. 또한 이입률이 매우 낮게 나타난 것은 이 두 종 이외에 주변해수에 출현한 규조류들이 확인되지 않은 환경요인과 매우 낮은 부착능력으로 인해 부착이 일어나지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 연구결과는 규조류의 부착에 계절적 요인보다 주변해수에 출현한 종의 구성과 종의 부착능력 요인이 중요할 가능성을 시사한다. 이 연구결과의 보편적인 타당성을 확인하기 위해 다양한 수역과 계절로의 확대연구가 필요하다.

규조류의 부착은 종 급원의 영향 외에도 규조류의 형태적 특징 중 배선형태와 관련있음이 밝혀졌으며, 하천환경에서 clay tile을 이용하였을 때, 크기가 큰 중심형과 운동성이 없는 무배선 형태의 규조류 부착능력이 복배선과 단배선 형태보다 높게 나타났다(Stevenson and Peterson, 1989). 아크릴 슬라이드를 이용한 본 연구에서는 봄철에 단배선 형태의 규조류가 가장 높은 이입계수 즉 부착능력을 나타냈고, 복배선 형태보다 평균 5 배 높은 부착능력을 나타냈다. 그러나 부착점유율은 복배선 형태의 규조류가 단배선 형태에 비해 3 배 높은 값을 나타냈다. 겨울철에는 배선에 따른 부착능력의 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않았으나, 전반적으로 중심형 규조류가 높게 나타났으며 부착점유율 또한 전반적으로 높게 나타났다. 이는 겨울철의 경우 중심형 규조류가 높은 부착능력을 나타낸 것으로 보고한 Stevenson and Peterson(1989)의 결과와 유사하였으나, 봄철의 경우는 상반되는 결과를 보였다.

여기에서 주목할 만한 점은, 봄철에 수괴 내의 종 급원에서는

단배선 형태의 규조류가 7% 정도의 비율로 출현하였고, 복배선 형태는 80% 정도의 비율로 출현하였다는 것이다. 따라서 복배선 형태의 규조류가 부착능력은 낮았지만, 수괴 내에 높은 수도로 존재하여 높은 부착점유율을 보인 것이며, 단배선 형태의 규조류는 수괴 내에 적은 수도로 출현하여 높은 부착능력을 갖고 있음에도 불구하고 낮은 부착점유율을 나타낸 것으로 보여진다. 겨울철에는 중심형 규조류 *M. nummuloides*가 전반적으로 높은 부착능력(평균 1.3)을 보였고, 수괴 내에서도 평균 64% 정도의 비율(36 cells ml<sup>-1</sup>)로 출현하여 다른 형태의 규조류에 비해 높은 부착점유율(61.2%)을 나타냈다.

특히 연속적으로 우점하여 부착한 규조류를 대상으로 하나의 예를 보면, 봄철에 복배선 형태인 *C. closterium*의 이입계수가 무배선 형태인 *Licmophora paradoxa*보다 평균 3.5 배 낮으나, 수괴내의 수도가 *L. paradoxa*보다 8.1 배 높아서 *C. closterium*이 전체의 평균 35%의 부착 점유율을 나타낸 반면, *L. paradoxa*는 평균 16%의 부착 점유율을 나타냈다(Table 1). 이와 같은 결과는 인공기질 표면이 해수에 노출된 후 초기에 우점부착한 규조류들은 부착능력이 강한 종들만이 아닌, 부착능력은 낮지만 높은 수도로 출현한 종들도 차지하였음을 의미한다. 따라서 수괴 내 규조류의 종 급원의 부착능력과 수도가 이입률에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

기존 연구결과에 따르면 이입률은 또한 수역특성과 사용된 인공기질 표면의 차이에 따라 상이한 값을 나타냈는데, 담수환경에서 clay tile을 이용한 실험에서는 본 연구결과의 3 배 이상의 값이 나왔고, 염하구 수역에서 유리를 사용한 실험에서는 본 연구결과에 비해 8 배 낮은 값을 나타냈다(Table 5). 따라서 이입률은 주변수괴의 환경적 차이와 물리적 요인 그리고 종 급원의 차이 외에도 표면의 재질에 따라서도 상이하게 나타남을 보여주고 있다.

### 인공기질 표면에 따른 발달형태

해수에 노출되기 전의 유리, 아크릴, 티타늄의 표면과 배양이 끝난 뒤에 각 표면을 세척하여 비교한 결과 부식과 같은 표면변화는 관찰되지 않았으나, 구리표면은 미생물체에 독성을 나타내는 것으로 알려진 산화된 표면(Marszalek et al., 1979)이 관찰되었다. 조사기간동안 구리와 페인트 처리 표면에 부착 발달한

**Table 5.** Immigration rates in various study areas

Environment	Study site	Substrate	Immigration rate (cells cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Source
Freshwater	River	Clay tile	50	Stevenson and Peterson, 1989
	River	Clay tile	1500—1800	Stevenson and Peterson, 1989
	Creek	Clay tile	45	Stevenson and Peterson, 1989
	Creek	Clay tile	1000—2300	Stevenson and Peterson, 1989
	Creek	Clay tile	2100—2600	Stevenson and Peterson, 1989
	Stream	Clay tile	2200—5000	Stevenson et al., 1991
Marine	Estuary (1 m)	Glass	13	Hudon and Bourget, 1983
	Estuary (1 m)	Glass	74	Hudon and Bourget, 1983
	Estuary (5 m)	Glass	20	Hudon and Bourget, 1983
	Harbour (0.7 m)	Acryl	4—575	This study
	Harbour (0.7 m)	Acryl	6—220	
	Incubator (0.5 m)	Glass	5680	
	Incubator (0.5 m)	Acryl	6058	

**Table 6.** Most important diatoms on 4 different surfaces in the colonization experiments, classified according to their colonization strategy (Parenthesis represents each month conducted colonization experiment)

Substrate	Classification according to their colonization strategy	
	Pioneer and intermediate colonists	Late colonists
Glass	<i>Cylindrotheca closterium</i> (5, 6, 8) <i>Hantzschia virgata</i> (1-2, 5, 6, 7, 8) <i>Licmophora abbreviata</i> (5) <i>Licmophora paradoxa</i> (5) <i>Melosira nummuloides</i> (1-2) <i>Navicula</i> spp. (5) <i>Nitzschia longissima</i> (6) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (5, 6, 7, 8)	<i>Achnanthes haukiana</i> (7) <i>Amphora coffeaeformis</i> (5, 6, 7, 8) <i>Amphora ovalis</i> var. <i>pediculus</i> (6, 8) <i>Cocconeis placentula</i> (7) <i>Licmophora paradoxa</i> (1-2) <i>Melosira monoliformis</i> (1-2) <i>Melosira nummuloides</i> (1-2) <i>Synedra tabulata</i> (7)
Acryl	<i>Cylindrotheca closterium</i> (5) <i>Licmophora abbreviata</i> (5) <i>Licmophora paradoxa</i> (1-2, 5) <i>Melosira monoliformis</i> (1-2) <i>Nitzschia frustulum</i> (1-2) <i>Nitzschia</i> sp. (1-2)	<i>Amphora coffeaeformis</i> (5) <i>Amphora ovalis</i> var. <i>pediculus</i> (5) <i>Grammatophora</i> sp. (5) <i>Hantzschia virgata</i> (1-2) <i>Melosira nummuloides</i> (1-2) <i>Synedra tabulata</i> (5)
Titanium	<i>Achnanthes</i> sp. (1-2, 5) <i>Amphora coffeaeformis</i> (7) <i>Cylindrotheca closterium</i> (5, 7, 8) <i>Hantzschia virgata</i> (5, 8) <i>Licmophora abbreviata</i> (5) <i>Navicula parva</i> (1-2, 8) <i>Navicula</i> sp. (1-2) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (7)	<i>Amphora coffeaeformis</i> (5, 7, 8) <i>Amphora ovalis</i> var. <i>pediculus</i> (5, 8) <i>Hantzschia virgata</i> (7, 1-2) <i>Melosira nummuloides</i> (1-2) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (8)
Copper	<i>Amphora coffeaeformis</i> (8) <i>Amphora lineolata</i> (5) <i>Cylindrotheca closterium</i> (8) <i>Hantzschia virgata</i> (7, 8) <i>Licmophora abbreviata</i> (5) <i>Navicula parva</i> (5, 7) <i>Navicula</i> sp. (7) <i>Nitzschia longissima</i> (5) <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (8) <i>Synedra tabulata</i> (5)	<i>Amphora lineolata</i> (7) <i>Cylindrotheca closterium</i> (5) <i>Grammatophora marina</i> (8)

규조류는 매우 낮은 수도범위에서 증가경향을 나타냈다. 또한 최대수도와 부착 출현한 총 종수에 있어서도 구리와 페인트 처리 표면에 부착한 종 수가 유리, 아크릴 그리고 티타늄에 비해 적게 나타났다. 이는 해수환경에 노출된 후 구리와 페인트 처리 표면이 부착미세조류에 독성을 제공한 결과로 표면적응능력을 갖고 있는 종들만 선택적으로 부착 출현한 결과로 추정된다. 일례로 *A. coffeaeformis*는 독성이 함유된 페인트에 대한 내성이 있는 종으로, 금속결합작용제를 분비하여 독성을 무력화시켜 부착하는 것으로 알려져 있다(Brown *et al.*, 1988; Thomas and Robinson, 1987).

본 연구에서도 페인트를 도포한 슬라이드에서 *H. virgata*, *L. abbreviata* 그리고 *M. nummuloides*가 각각 여름, 봄, 겨울에 극우점종으로 출현함이 관찰되었으며(Table 4), 이들 종도 *A. coffeaeformis*처럼 독성에 대해 내성이 있는 것으로 보여진다.

수온범위가 각각 상이한 조사시기에 발달한 부착규조류 군집은 상이한 성장률을 나타냈으며, 또한 표면재질에 따라 상이한 범위의 값을 나타냈다. 2~3°C의 범위에서 발달한 군집의 성장률은 4 가지 모든 표면에서 낮게 나타났고, 24~25°C의 범위에서

서는 반대로 높게 나타났다. 그리고 유리 슬라이드에서 전반적으로 높은 성장률을 나타냈고, 구리에서 가장 낮게 나타났다. 26~29.5°C 수온에서의 성장률은 12~21°C 수온에서의 성장률보다 오히려 낮게 나타나, 26°C 이상의 수온이 부착군집 발달에 있어서 일종의 스트레스 요인으로 판단한 Tuchman and Blinn (1979)의 연구결과와 일치한다.

이와 같이 부착규조류 군집의 성장률과 총 종수, 최대수도 그리고 우점종의 종 조성이 표면재질에 따라 상이하게 나타나므로, 표면재질의 차이가 모든 발달과정에 영향을 미치는 것으로 사료된다. Korte and Blinn(1983)의 연구결과에 따르면 plexiglass와 알루미늄 슬라이드를 21 일 동안 동일한 수생환경에 노출시킨 결과 plexiglass에 부착 발달한 규조류의 평균 최대수도가 알루미늄에서보다 100 배 정도 높게 나타났는데, 이는 표면재질의 차이로 인한 것이라 하였다.

#### 미소천이

Stevenson(1986)은 총 24 일의 노출시간동안 인공기질 표면에서 발달한 부착규조류 군집은 개척종(pioneer colonists), 매개종

(intermediates), 극상종(late colonists)의 세 가지 그룹으로 나뉘어 미소천이를 나타냈음을 보고하였다. 여기서 개척종은 시간의 경과에 따라 상대적 수도가 점차적으로 감소하는 종이며, 매개종은 다른 그룹보다 안정한 상대적 수도를 나타내는 반면, 극상종은 시간이 경과함에 따라 상대적 수도가 증가하는 형태이다. 또한 McCormick and Stevenson(1991)의 자료에 따르면, 부착규조류의 미소천이는 24 일의 노출시간동안에 나타났고, Hoagland *et al.*(1982)도 4 차례의 조사에서 부착규조류의 천이가 14 일에서 35 일 사이의 노출기간중에 나타났음을 보고하였다. 본 연구에서 각 조사시기의 노출기간은 17 일부터 41 일까지로 이 기간에 나타난 우점종의 변화는 미소천이로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 미소천이가 관찰된 기존의 연구에서 사용된 인공기질 표면은 clay tile과 유리 슬라이드였으며, 일관성 있는 비교를 위해 본 연구에서는 유리 슬라이드에서 발달한 부착규조류 군집을 주 대상으로 언급하였다.

연구기간동안 유리 슬라이드에서 발달한 부착규조류 군집들은 겨울철(1997년 1~2월)에 *M. nummuloides*가 초기부터 우점하여 후기까지 지속된 경우를 제외하면, 모든 조사시기에 개척종이 매개종의 지위를 담당하여 다른 극상종이 나타날 때까지 군집의 발달을 이끄는 양상을 나타냈다(Table 6). *C. closterium*, *H. virgata*, *L. abbreviata* 그리고 *Pseudo-nitzschia pungens*는 겨울철을 제외한 조사시기에서 개척종과 매개종의 지위를 담당하였고, *A. coffeaeformis*, *A. ovalis* var. *pediculus*는 극상종으로 나타났다. 이외에 극상종으로 나타난 종은 *Synedra tabulata*와 *L. paradoxa* 그리고 사슬형 군체인 *M. nummuloides*로 나타났다. 위에 언급된 극상종들은 한정된 공간 내에서 노출시간이 증가함에 따라 생물량이 누적 증가하여 나타난 경쟁의 결과(Hudon and Bourget, 1981; Hoagland *et al.*, 1982; Katoh, 1992)로 보여진다.

또한 생물량의 증가로 두꺼운 막의 algal mat가 형성되어 해수층의 무기영양염의 이온교환이 둔화되어 결과적으로 규조류의 영양염과 빛의 이용률이 떨어지게 된다(Wetzel, 1996). 이와 같은 환경에서 부착 출현하는 납작한 형태의 *Amphora* 속의 종들은 낮은 영양염농도와 빛의 환경에 강한 내성을 지닌 종이며(Hudon and Bourget, 1981), 특히 부채꼴모양(fan-shape)의 종인 *Synedra tabulata*는 암소에 강한 적응력을 나타내며, 수도의 증가와 더불어 나타난다(Hudon and Bourget, 1983).

이처럼 노출시간이 증가함에 따라 단독형인 *A. coffeaeformis*, *A. ovalis* var. *pediculus*, stalk가 있는 형태인 *L. paradoxa*, 부채꼴 모양의 *S. tabulata*, 연쇄상 군체형태인 *M. nummuloides* 등이 한정된 공간과 자원 이용률이 감소된 환경에 적응한 결과로 나타나 결과적으로 미소천이(micro-succession)를 나타낸 것으로 보여진다. 따라서 이와 같은 결과의 일치는 본 연구에서 사용된 노출시간이 극상종 및 미소천이를 분석함에 있어 타당성이 있음을 다시 한번 지지해 주고 있다.

요약하면, 수괴 내 규조류의 종 급원의 부착능력과 수도변화가 이입물에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표면재질에 따라 부착규조류 군집의 성장률과 총 종수, 최대수도 그리고 우점종의 종조성이 상이하게 나타났는데, 이는 표면재질의 차이가 모든 발달과정에 영향을 미치는 것을 시사한다. 24~25°C의 수온

범위에서 나타난 부착규조류 군집의 성장률은 4 가지 표면에서 모두 가장 높게 나타났고, 2~3°C의 범위에서는 4 가지 표면에서 모두 가장 낮게 나타났다. 노출시간이 증가함에 따라 부착규조류 군집 내에서 규조류의 우점종이 바뀌어 극상종으로의 미소천이를 나타냈으며, 극상종의 형태는 제한적 공간에 다양하게 적용하여 나타난 결과로 보여진다. 생물오손방지 페인트를 도포한 표면에 몇 종의 규조류가 우점적으로 부착한 결과는 연안수역에서 이에 적응하는 규조류가 출현함을 시사하여 현장에서의 생물오손방지의 필요성을 촉구하고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다(KOSEF 94-0703-05-01-2). 원고를 검토하여 주신 두분의 심사위원께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 심재형, 1994. 한국동식물도감: 식물편(해양식물플랑크톤). 교유부, 서울, 487 pp.
- 조경제, 1989. 낙동강 하구 저토의 환경구배에 따른 저서규조류의 군집구조. 이학박사학위논문, 서울대학교, 서울, 107 pp.
- Acs, E. and K.T. Kiss, 1993. Colonization process of diatoms on artificial substrates in the River Danube near Budapest (Hungary). *Hydrobiologia*, **269/270**: 307-315.
- Breznak, J.A., K.E. Cooksey, F.E.W. Eckardt, M. Fletcher, R.J. Gibbons, H. Gude, W.A. Hamilton, T. Hattori, H.G. Hoppe, A.G. Matthyse, D.C. Savage and M. Shilo, 1985. Activity on surfaces. In: *Microbial Adhesion and Aggregation*, edited by Marshall, K.C., Springer, Berlin, pp. 203-221.
- Brown, S.D., 1973. Species diversity of periphyton communities in the littoral of a temperate lake. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, **58**: 787-800.
- Brown, L.N., M.G. Brown and B.D. Hall, 1988. Mechanisms for copper tolerance in *Amphora coffeaeformis*—internal and extreme binding. *Mar. Biol.*, **97**: 581-586.
- Callow, M.E., 1993. A review of fouling in freshwaters. *Biofouling*, **7**: 313-327.
- Caron, D.A. and J.M. Sieburth, 1981. Disruption of the primary fouling sequence on fiberglass-reinforced plastic submerged in the marine environment. *Appl. Environ. Microbiol.*, **41**: 268-273.
- Chin, T.G., 1985. *The Marine Benthic Diatoms in China*. China Ocean Press, Beijing, 313 pp.
- Choi, H.S., 1988. A Floristic Study on Benthic Diatoms in Songdo Tidal Flat, Gyeonggi Bay. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, 74 pp.
- Cooksey, B.W. and K.E. Cooksey, 1992. Can diatoms sense surfaces?: state of our knowledge. *Biofouling*, **5**: 227-238.
- Cooksey, K.E. and B.W. Cooksey, 1995. Adhesion of bacteria and diatoms to surfaces in the sea: A review. *Aquat. Microb. Ecol.*, **9**: 87-96.

- Cooper, J.M. and J. Wilhm, 1975. Spatial and temporal variation in productivity, species diversity, and pigment diversity of periphyton in a stream receiving domestic and oil refinery effluents. *Southwest. Natural.*, **19**: 413–428.
- Cuba, T.R. and N.J. Blake, 1983. The initial development of a marine fouling assemblage on a natural substrate in a subtropical estuary. *Bot. Mar.*, **26**: 259–264.
- Hoagland, K.D., 1983. Short-term standing crop and diversity of periphytic diatoms in a eutrophic reservoir. *J. Phycol.*, **19**: 30–38.
- Hoagland, K.D., S.C. Roemer and J.R. Rosowski, 1982. Colonization and community structure of two periphyton assemblages, with emphasis on the diatoms. *Am. J. Bot.*, **69**: 188–213.
- Hudon, C. and E. Bourget, 1981. Initial colonization of artificial substrate: community development and structure studied by scanning electron microscopy. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **38**: 1371–1384.
- Hudon, C. and E. Bourget, 1983. The effect of light on the vertical structure of epibenthic diatom communities. *Bot. Mar.*, **26**: 317–330.
- Hustedt, F., 1985. The Pennate Diatoms. Koeltz Scientific Books, Koenigstein, 918 pp.
- Kato, K., 1992. Correlation between cell density and dominant growth form of epilithic diatom assemblages. *Diatom Res.*, **7**: 77–86.
- Korte, V.L. and D.W. Blinn, 1983. Diatom colonization on artificial substrata in pool and riffle zones studied by light and scanning electron microscopy. *J. Phycol.*, **19**: 332–341.
- Marcus, M.D., 1980. Periphytic community response to chronic nutrient enrichment by a reservoir discharge. *Ecology*, **61**: 387–399.
- Marszalek, D.S., M.G. Sol and R.U. Lanny, 1979. Influence of substrate composition on marine microfouling. *Appl. Environ. Microbiol.*, **38**: 987–995.
- McCormick, P.V. and R.J. Stevenson, 1991. Mechanisms of benthic algal succession in lotic environments. *Ecology*, **72**: 1835–1848.
- Meenakumari, B. and N.B. Nair, 1994. The effects of slime film on barnacle settlement. In: Recent Developments in Biofouling Control, edited by Thompson, M.F., R. Nagabhusanam, R. Sarojini and M. Fingerman, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 3–9.
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann, 1990. The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera. Cambridge University Press, New York, 747 pp.
- Shim, J.H. and M.S. Jung, 1987. Development and succession of marine fouling organisms on artificial substrata. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **22**: 257–270.
- Stevenson, R.J., 1983. Effects of current and conditions simulating autogenically changing microhabitats on benthic diatom immigration. *Ecology*, **64**: 1514–1524.
- Stevenson, R.J., 1986. Importance of variation on algal immigration and growth rates estimated by modelling benthic algal colonization, In: Algal Biofouling, edited by Evans, L.V. and K.D. Hoagland, Elsevier Science Publishers, New York, pp. 193–210.
- Stevenson, R.J. and C.G. Peterson, 1989. Variation in benthic diatom immigration with habitat characteristics and cell morphology. *J. Phycol.*, **25**: 120–129.
- Stevenson, R.J., C.G. Peterson, D.B. Kirschtel, C.C. King and N. C. Tuchman, 1991. Density-dependent growth, ecological strategies, and effects of nutrients and shading on benthic diatom succession in streams. *J. Phycol.*, **27**: 59–69.
- Thomas, T.E. and M.G. Robinson, 1987. Initial Characterization of the mechanisms responsible for the tolerance of *Amphora coffeaeformis* to copper and tributyltin. *Bot. Mar.*, **30**: 47–53.
- Tuchman, M. and D.W. Blinn, 1979. Comparison of attached algal communities on natural and artificial substrata along a thermal gradient. *Br. Phycol. J.*, **14**: 243–254.
- Wetzel, R.G., 1996. Benthic algae and nutrition cycling in lentic freshwater ecosystems. In: Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems, edited by Stevenson, R.J., M.L. Bothwell and R.L. Lowe, Academic Press, New York, pp. 641–667.
- Yan, W., L. Jingjie, C.M. Jean, M.R. Gretz and K.D. Hoagland, 1997. Extracellular matrix assembly in diatoms. *Plant. Physiol.*, **113**: 1071–1080.

---

1998년 4월 27일 원고 접수

1998년 9월 18일 수정본 채택