

섬강수계 부착구조의 유입능 특성: 자연기질과 인공기질의 비교

윤성애 · 김난영 · 변명섭¹ · 김백호 · 황순진*

(건국대학교 환경과학과, ¹국립환경과학원 물환경제어과)

Relative Immigration Activity of Epilithic Diatom in Sum River : Comparison of Natural and Artificial Substrate. Yoon, Sung-Ae, Nan-Young Kim, Myeong-Seop Byoen¹, Baik-Ho Kim and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Water Environment Management Department, National Institute of Environment Research, Incheon 407-708, Korea)

Effects of substrates on the relative immigration activities (RIAs) of epilithic diatoms were examined in Sum River, a tributary of South Han River, Korea. Two hundreds of tile substrates coated with 5% agar were deposited at seven study stations (30 tiles per site) for one month from March 7 to April 7, 2008. Water sampling, physico-chemical factor measurement, and diatom analysis were performed in the field and laboratory. Over the study, major epilithic diatom species were *Nitzschia amphibia*, *Navicula subminuscula*, *Cymbella minuta* in both the natural and artificial substrates. Two dominant species, *Nitzschia amphibia* and *Cymbella minuta* often found at seven stations. Among all observed taxa, *Nav. subminuscula* and *Caloneis silicula* showed the highest RIA, with the value over 15 throughout the study. Regarding the algal morphology, the biraphe type species showed higher RIA than any other morph, while they comprised over 55% of total biomass, indicating a density effect. Additionally, a significant relationship between RIA and 20-day deposited substrate ($p < 0.05$) showed in two diatom species, *Nitzschia fonticola*, *Gomphonema quadripunctatum*, which showed relatively high RIAs. These results indicate that the relative immigration activities of epilithic diatom species can be influenced by algal density in the water and substrate, nutrients, and deposited time at least 20 days.

Key words : immigration rate, epilithic diatom, artificial substrates, Sum River

서 론

섬강은 횡성군 청일면 울실리를 기점으로 하여 원주시 부론면의 남한강 합류점까지 유역면적이 약 1,485 km²이고, 유로연장이 약 93.0 km²이며, 크고 작은 20여 개의 지류하천이 합류된다. 또한 원주 및 횡성읍 일대의 생활용

수 및 농·공업용수로 사용되고 있으며, 원주천은 섬강의 제1지류로서, 도시와 축산폐수처리장 및 원주공단이 위치하여 섬강의 주요오염원 중 하나이다(허 등, 1998; 김 등, 2007).

부착구조는 수생태계의 1차 생산자로서 주요한 먹이원이고, 수질환경 변화에 민감하며, 다양한 기질에 부착하여 서식하기 때문에 수질을 판정하는 지표로 널리 이용

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 452-3749, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

되고 있다(McCormick and Stevenson, 1998). 또한 세포벽에서 다당류(polysaccharide)를 분비하고(Round, 2007), 분비된 다당류를 통해 기질 표면을 인식하여 부착하게 된다(Wetherbee *et al.*, 1998). 규조류의 부착은 다양한 서식환경에서 교란(durbulence)과 같은 물리적 요인으로 인해 일시성 플랑크톤(tychoplankton) 형태로 기질 표면에 붙는 능동적인 형태를 보이고, 박테리아와 함께 기질 표면에 생물막을 형성한다(Cushing and Allan, 2001; Small *et al.*, 2008). 형성된 생물막은 보다 나은 수질을 유지시키고(Khatoon *et al.*, 2007), 과다한 영양분의 고립(Van Dam *et al.*, 2002)과 배양된 생물의 건강을 향상시킨다(Shankar and Mohan, 2001).

부착규조의 상대적 유입능(Relative immigration activities : RIA)은 단위시간당 기질에 부착되는 조류세포의 상대적인 생물량을 의미하며(Stevenson and Peterson, 1989), 영양염, 생물량, 유속, 빛, 온도 등에 크게 영향을 받으며(Biggs, 1996; Azim *et al.*, 2005), 일반적으로 수중 내 우점종일수록 높은 RIA를 나타낸다(Stevenson *et al.*, 1996). 유입능 조사를 위한 인공기질의 이용은 장시간 노출된 자연기질보다 객관성이나 개인차로 인한 오차를 줄이는데 효과적이며, 경시변화에 따른 영향을 효과적으로 파악할 수 있는 장점이 있다(Herder-Brouwer, 1975; Wilbert, 1976; 정 등, 1996).

본 연구는 섬강수계에 서식하는 부착규조 군집의 특성을 파악하고, 주요 우점종들의 유입능에 미치는 조류형태(배선) 및 기질(자연기질 및 인공기질)간의 유입능 차이를 이해하기 위해서, 비교적 수량이 안정된 시기(3~4월)에 섬강의 상류에서 하류 방향으로 7개 지점에 인공기질을 설치하고 10, 20, 30일 동안에 부착규조의 유입능을 각각 조사하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 시기

본 조사는 2008년 3월 7일부터 4월 7일까지 기질 설치 후 10일 간격으로 3회 실시하였고, 조사지점인 섬강은 하류로 갈수록 하폭이 넓어지는 전형적인 하천의 특징을 나타냈으며(Table 1), 도시하천인 원주천의 합류 전후로 섬강상류 3개(지점 1, 2, 3), 원주천 2개(지점 4, 5), 섬강하류 2개(지점 6, 7)로 총 7개 지점이었다(Fig. 1). 섬강상류 3개 지점은 강원도 횡성군에 위치하였고, 원주천 2개 지점과 섬강하류 2개 지점은 강원도 원주시에 위치

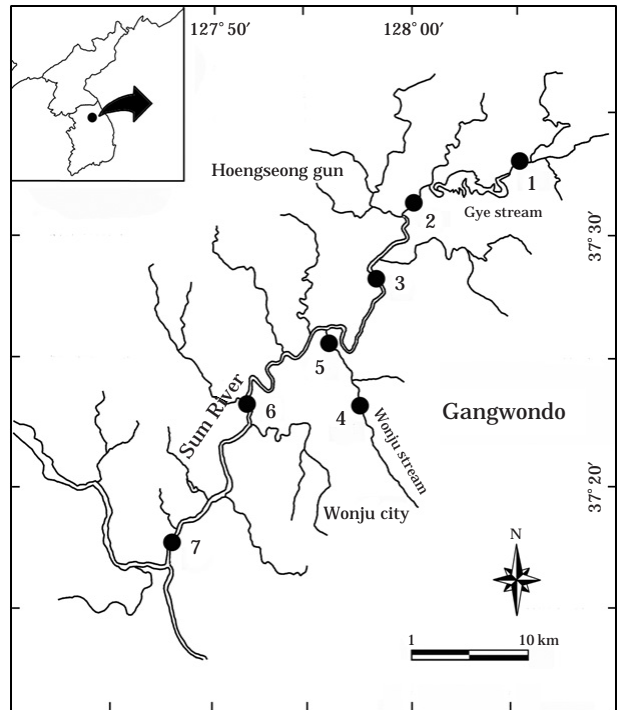


Fig. 1. A map showing the sampling stations in Sum River.

하였다.

2. 환경요인 측정

이화학적 요인이 조류 유입능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 환경요인을 측정하였다. 수온과 용존산소, pH, 전기전도도, 탁도는 사용직전 보정된 YSI-6920 MDS (Yellow Springs Instruments, Ohio, USA)로 측정하였고, 유속은 유속계(Swoffer Instruments, Inc., USA)로 현장에서 직접 측정하였다. BOD(biochemical oxygen demand)는 Winkler method(환경부, 1997)로 측정하였고, 영양염 NO₂(nitrite), NH₃(ammonia), TN(total nitrogen), SRP(soluble reactive phosphorus), TP(total phosphorus)와 SS(suspended solids), Chl-*a*(chlorophyll-*a*)는 채수한 시료를 4°C 아이스박스에 보관하여 실험실로 운반 후 Standard Methods(APHA, 1995)에 준하여 즉시 분석하였다.

3. 조류군집 조사

부착규조의 유입능 산출을 위하여 섬강의 식물플랑크톤과 부착규조를 채집, 동정하였다. 식물플랑크톤 채집은 200 mL용기(plastic bottle)에 현장수를 담아 Lugol's solution으로 고정하였다. 정량분석은 고정한 시료 1 mL을

Table 1. Physical characteristics of the sampling stations in the study stream.

Stations	Stream width (m)	Stream depth (cm)	Sediments (diameter : mm)*					
			Boulder > 256	Cobble 62~256	Pebble 16~64	Gravel 2~16	Sand 0.1~2	Silt < 0.1
1	10	44	10	10	30	40	10	-
2	27	51	-	10	10	60	20	-
3	37	47	10	20	20	30	20	-
4	12	16	50	10	10	10	10	10
5	31	67	20	10	20	30	30	-
6	82	61	-	10	30	40	20	-
7	230	71	-	10	20	50	20	-

St. 1, 2, 3, 6 and 7: the sampling stations in the Sum River (S)

St. 4 and 5: the sampling stations in the Wonju Stream (W)

*Modified Wentworth's classification by Cummins (1962)

취하여 Sedgwick-Rafter chamber에 넣고 광학현미경 (Zeiss, Germany)을 이용하여 400배 하에서 2회 계수한 평균치를 단위면적당 현존량으로 산출하였다. 부착규조 채집은 바닥에 있는 기질 내에서 실시하였다. 자연기질의 경우 조사 정점에서 가장 보편적인 상태를 지니고 있는 것으로 추정되는 지름 15~20 cm 정도의 자연석을 선정하여 평평한 면을 솔로 긁어 채집하였다. 또한 인공기질의 경우 인공기질 상표면의 100 cm²를 솔로 긁어 채집하였다. 부착규조의 종조성을 파악하기 위해 산 (HNO₃, K₂Cr₂O₇)처리 후 Mount media 봉입제로 영구 표본을 제작하였고, 광학현미경 (Zeiss, Germany)을 이용하여 1,000 배 하에서 종조성을 파악하였다. 부착규조는 시료당 500~1,000개체를 2회 계수 후 평균값을 이용하여 종별 상대도수를 백분율로 산출하였다. 조류의 동정은 Krammer and Lange-Bertalot (2007)와 정 (1993)을 각각 참고하였다.

4. 조류 유입능 조사

조사기간 동안 사용된 인공기질은 Hodoki (2005) 등이 권장한 Slate tile (10×10 cm)에 1% agar을 바르고 상에서 건조시켰다. 인공기질 설치는 외부의 인위적 영향을 크게 받지 않고, 광량이 바닥까지 도달할 수 있는 곳을 선정하였다. 또한 기질이 쉽게 떠내려 가지 않을 정도의 유속을 띤 여울지역의 바닥에 수평으로 놓아 설치하였다. 기질은 지점당 30개씩 설치하고, 채집시마다 종조성을 분석하는 데 2개씩 사용하였다.

각 부착규조의 상대적인 유입능 (relative immigration activities : RIA)은 단위시간당 기질에 부착되는 조류 세포의 상대적인 생물량을 의미한다 (Stevenson and Peterson, 1989).

$$RIA = (ni/Ns)/(ni/Nw)$$

ni : 수중 및 기질 내 동일 종

Ns : 기질 내 조류의 총 개체수

Nw : 수중 내 조류의 총 개체수

부착규조의 유입능은 유입능 수치에 따라 속도를 알아 볼 수 있으며, 유입능 수치 1을 기준으로 0~1의 범위는 기질 내 종 유입 속도가 비교적 느린 것이고, 1 이상일 경우 유입 속도가 비교적 빠른 것이다 (Stevenson and Peterson, 1989). 다만 수중에 분포하지 않거나 관찰된다고 하더라도 기질에 관찰되지 않은 종에 대해서는 유입능을 정의할 수 없는 단점이 있다.

5. 상관분석

수질항목과 부착규조의 유입능과 상관관계는 SPSS의 Pearson's correlation analysis를 통해 수행되었다 (ver. 12.0 Korea). 유의 수준은 $\alpha=0.05$ 를 기준으로 하였다.

결 과

1. 환경요인

본 조사지점은 하류로 갈수록 하폭이 넓어지고, 비교적 하상이 고르게 분포한 하천의 전형적인 특징을 나타냈다 (Table 1). 지점 1, 2, 3은 수심이 약 45~50 cm 정도를 보였으며, 지점 1, 2는 유속이 60 cm s⁻¹ 이상으로 매우 빠르고, 지점 3은 유속이 15 cm s⁻¹로 느렸다. 지점 4, 5는 하류로 갈수록 수심이 깊어졌고, 약 30 cm s⁻¹의 유속을 보였으며, 하상이 고르게 분포하고 있었다. 지점 6, 7은 하류로 갈수록 수심이 깊어졌고, 지점 6은 약 62 cm s⁻¹로

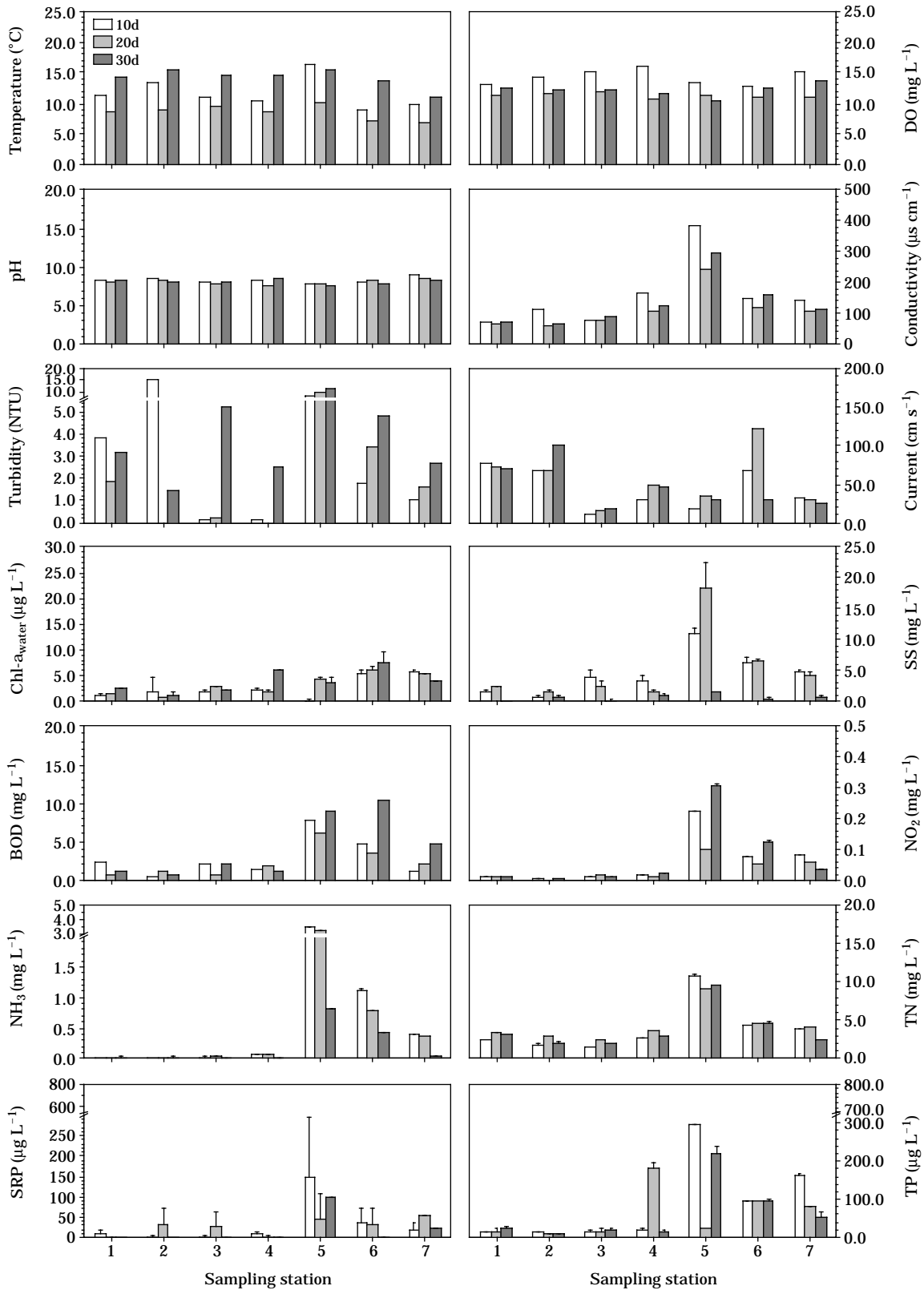


Fig. 2. Physicochemical factors in the sampling station in the Sum River from March 7 to April 7, 2008 (10d : 10 day, 20d : 20 day, 30d : 30 day).

Table 2. Dominant epilithic diatom species and their relative abundance (%) in each sampling stations with different deposition times (day) in the Sum River.

Stations		10 day	20 day	30 day
1	N	<i>Nitzschia amphibia</i> (35.3) <i>Fragilaria vaucheriae</i> (11.8)	<i>Gomphonema quadripunctatum</i> (31.1) <i>Cymbella minuta</i> (21.4)	<i>Gomphonema quadripunctatum</i> (24.6) <i>Cymbella minuta</i> (16.9)
	A	<i>Cymbella minuta</i> (16.2) <i>Nitzschia amphibia</i> (5.4)	<i>Cymbella minuta</i> (46.5) <i>Achnanthes convergens</i> (9.3)	<i>Cymbella minuta</i> (48.6) <i>Cymbella minuta</i> var. <i>silesiaca</i> (17.1)
2	N	<i>Navicula symmetrica</i> (18.2) <i>Cocconeis placentula</i> (13.6)	<i>Achnanthes convergens</i> (24.1) <i>Fragilaria capucina</i> (20.7)	<i>Navicula gregaria</i> (27.8) <i>Nitzschia fonticola</i> (27.8)
	A	<i>Fragilaria arcus</i> (10.0) <i>Gomphonema quadripunctatum</i> (10.0)	<i>Gomphonema parvulum</i> (24.0) <i>Nitzschia fonticola</i> (12.0)	<i>Caloneis silicula</i> (54.0) <i>Navicula minima</i> (16.0)
3	N	<i>Fragilaria vaucheriae</i> (16.7) <i>Navicula minima</i> (16.7)	<i>Navicula gregaria</i> (41.7) <i>Nitzschia amphibia</i> (25.0)	<i>Achnanthes convergens</i> (50.0) <i>Fragilaria crotensis</i> (20.8)
	A	<i>Cymbella tumida</i> (10.8) <i>Navicula gregaria</i> (10.8)	<i>Navicula symmetrica</i> (74.7) <i>Navicula gregaria</i> (13.0)	<i>Nitzschia amphibia</i> (19.2) <i>Achnanthes convergens</i> (17.8)
4	N	<i>Nitzschia amphibia</i> (54.3) <i>Nitzschia palea</i> (13.0)	<i>Nitzschia amphibia</i> (46.7) <i>Nitzschia fonticola</i> (20.0)	<i>Nitzschia amphibia</i> (40.5) <i>Cymbella minuta</i> (16.2)
	A	<i>Nitzschia amphibia</i> (72.4) <i>Nitzschia fonticola</i> (3.8)	<i>Nitzschia amphibia</i> (76.1) <i>Cymbella minuta</i> (10.4)	<i>Cymbella minuta</i> (55.6) <i>Cymbella minuta</i> var. <i>silesiaca</i> (11.1)
5	N	<i>Achnanthes convergens</i> (35.7) <i>Gomphonema quadripunctatum</i> (21.4)	<i>Navicula subminuscula</i> (26.1) <i>Gomphonema quadripunctatum</i> (21.7)	<i>Navicula subminuscula</i> (40.4) <i>Gomphonema quadripunctatum</i> (11.5)
	A	<i>Navicula symmetrica</i> (58.8) <i>Gomphonema gracile</i> (14.1)	<i>Navicula subminuscula</i> (61.5) <i>Gomphonema parvulum</i> (12.3)	<i>Navicula subminuscula</i> (81.1) <i>Epithemia adnata</i> (8.7)
6	N	<i>Navicula subminuscula</i> (39.4) <i>Nitzschia amphibia</i> (36.4)	<i>Nitzschia amphibia</i> (37.5) <i>Navicula subminuscula</i> (17.9)	<i>Nitzschia amphibia</i> (33.3) <i>Navicula minima</i> (15.9)
	A	<i>Fragilaria vaucheriae</i> (46.7) <i>Nitzschia amphibia</i> (23.6)	<i>Navicula subminuscula</i> (55.4) <i>Nitzschia amphibia</i> (17.4)	<i>Nitzschia amphibia</i> (52.8) <i>Epithemia adnata</i> (22.0)
7	N	<i>Navicula subminuscula</i> (28.3) <i>Achnanthes convergens</i> (18.9)	<i>Nitzschia amphibia</i> (46.4) <i>Nitzschia palea</i> (8.7)	<i>Navicula subminuscula</i> (39.0) <i>Nitzschia amphibia</i> (23.4)
	A	<i>Navicula subminuscula</i> (31.2) <i>Nitzschia amphibia</i> (17.8)	<i>Navicula subminuscula</i> (80.7) <i>Nitzschia amphibia</i> (3.5)	<i>Nitzschia amphibia</i> (57.7) <i>Nitzschia linearis</i> (16.3)

St. 1, 2, 3, 6 and 7: the sampling stations in the Sum River (S)

St. 4 and 5: the sampling stations in the Wonju Stream (W)

N: Natural substrates

A: Artificial substrates

유속이 빨랐으며, 지점 7은 약 31 cm s^{-1} 로 유속이 느렸다.

화학적인 환경요인 조사 결과는 Fig. 2와 같았으며, DO는 모든 조사지점에서 10 mg L^{-1} 이상으로 평균 12.9 mg L^{-1} 를 나타냈고, pH는 7.7~9.1의 중성범위였으며, 온도는 $3.6 \sim 16.3^\circ\text{C}$ 범위로 모든 지점에서 시간이 갈수록 증가하는 경향을 보였다.

지점별 환경요인은 전기전도도 및 탁도, BOD, SS, NO_2 ,

NH_3 , TN, SRP, TP가 지점 5에서 가장 높게 나타났고, 지점 5의 합류를 기준으로 지점 1, 2, 3에서 낮다가 합류 직후(지점 6)부터 점점 감소하는 하천의 전형적인 형태를 보였다. 또한 전기전도도 및 탁도, BOD, SS, NO_2 , NH_3 , TN, SRP, TP는 일부 지점을 제외하고 유속이 느릴수록 높은 경향을 보였다. 지점 3은 유속이 가장 느리고, SS가 지점 1, 2, 3 중에서 가장 높았다.

기간별 환경요인은 SS, NH_3 , SRP, TP가 30일에 감소

하는 경향을 나타냈고, Chl-*a*_{water} (수중 Chl-*a*)와 NO₂가 일부를 제외하고 30일에 증가하는 경향을 나타냈다.

2. 부착규조 군집 특성

연구기간 동안 모든 기질 내 출현한 부착규조 군집은 총 9과 83종으로 나타났다. 그 중 우점종은 총 42회 중 자연기질의 경우 *N. amphibia* (10회), *Nav. subminuscula* (6회), *C. minuta* (3회), 인공기질의 경우 *N. amphibia* (10회), *Nav. subminuscula* (5회), *C. minuta* (5회) 등의 순으로 우점하였고, 자연기질과 인공기질의 우점종은 비슷하였다 (Table 2).

자연기질 내 우점종은 총 14종 출현하였다. 그 중 가장 빈번히 출현한 종은 *N. amphibia* (10회)이며, 지점 2, 5를 제외한 모든 지점과 기간에서 고르게 우점하였고, 지점 4에서 40% 이상의 높은 우점율을 보였다. *Nav. subminuscula*는 지점 5, 6, 7에서 우점하였고, 모든 기간에 고르게 우점하였다. *C. minuta*는 지점 1, 4에서 우점하였다.

인공기질 내 우점종은 총 18종 출현하였다. 그 중 가장 빈번히 출현한 종은 *N. amphibia* (10회)이며, 지점 2, 5를 제외한 모든 지점과 기간에 고르게 우점하였고, 지점 4에서 70% 이상의 매우 높은 우점율을 보였다. *Nav. subminuscula*는 하천의 하류부인 지점 5, 6, 7에서 우점하였고, 10일의 지점 7을 제외하고 55% 이상의 높은 우점율을 보였다. *C. minuta*는 지점 1, 4에서 우점하였고, 모든 기간에 고르게 우점하였다.

3. 자연기질과 인공기질의 비교

기질 내 유입을 보인 전체 종을 대상으로 한 유입능은 20일 이후 자연기질과 인공기질이 유의한 상관성을 보였고 (Table 3), 조사기간 중 모든 지점에 고르게 분포하거나 비교적 높은 유입능을 보인 6종은 자연기질과 인공기질에 유입하는 경향이 비슷하였다 (Table 4).

10일째 자연기질과 인공기질의 유입능은 유의하지 않은 상관성을 보였으나 (Table 3), *N. amphibia*는 지점 2를 제외한 모든 지점과 기질에 유입하였다. *C. minuta*는 지점 1, 4, 6의 모든 기질에 유입하였고, 지점 5, 7에서 인공기질에서 유입하였다. *N. fonticola*는 지점 2, 4, 5, 6의 자연기질에서 유입하였고, *G. quadripunctatum*은 지점 2, 4의 모든 기질에 유입하였고, 지점 5의 자연기질에서만 24.21로 높은 유입능을 보였다. *Nav. subminuscula*와 *C. silicula*는 모든 지점과 기질에 유입하지 않았다 (Table 4).

Table 3. Correlation coefficients between relative immigration activities of the epilithic diatom community at the natural and artificial substrates in the Sum River during the study periods.

Substrate	10N	20N	30N
10A	0.090		
20A	-0.013	0.220*	
30A	0.008	-0.031	0.614*

* $p < 0.01$

10N, 20N and 30N : Natural substrate deposited for 10, 20, and 30 days in each sampling station in the Sum River, respectively.

10A, 20A and 30A : Artificial substrate deposited for 10, 20, and 30 days in each sampling station in the Sum River, respectively.

20일째 자연기질과 인공기질의 유입능은 유의한 상관성 ($p < 0.01$)을 보였다 (Table 3). *N. amphibia*는 지점 1, 5를 제외한, *C. minuta*는 지점 1, 7을 제외한 모든 지점과 기질에 유입하였다. *N. fonticola*는 지점 3, 4, 7의 모든 기질에 유입하였고, 지점 6의 인공기질에서 8.36으로 비교적 높은 유입능을 보였다. *G. quadripunctatum*은 지점 4 (7.53), 지점 7 (2.27)의 자연기질에서만 유입하였고, 1이상의 비교적 높은 유입능을 보였다. *Nav. subminuscula*는 지점 7에서 인공기질 (15.74)이 자연기질 (1.13)보다 약 15배 정도 높은 유입능을 보였고, *C. silicula*는 모든 지점과 기질에 유입하지 않았다 (Table 4).

30일째 자연기질과 인공기질의 유입능은 유의한 상관성 ($p < 0.01$)을 보였다 (Table 3). *N. amphibia*는 지점 3, 5, 6, 7의 모든 기질에 유입하였다. *C. minuta*는 모든 지점의 자연기질에 유입하였고, 지점 1, 3, 4의 인공기질에 유입하였다. *N. fonticola*는 지점 1, 3, 5의 모든 기질에 유입하였고, 지점 2, 4의 자연기질에서만 유입하였다. *G. quadripunctatum*은 지점 1, 6의 모든 기질에 유입하였고, *Nav. subminuscula*는 지점 5의 자연기질 (27.06)과 인공기질 (54.35)에 상대적으로 매우 높은 유입능을 보였으며, *C. silicula*는 지점 2의 자연기질에 유입하지 않았으나 인공기질에 34.02로 매우 높은 유입능을 보였다 (Table 4).

4. 조류 유입능의 경시적 변화

기질 내 유입을 보인 6종을 대상으로 인공기질의 경시적 변화를 알아보았다 (Table 4), *N. amphibia*와 *C. minuta*는 모든 지점에 고르게 유입된 종이었고, *Nav. subminuscula*와 *C. silicula*는 유입능이 높은 종으로 나타났다.

*N. amphibia*는 모든 지점과 기간에 고르게 유입하였고, 20일에 변화폭이 크게 나타났다. 지점 3에서 20일에

Table 4. Relative immigration activities of major epilithic diatom species in each sampling station of the Sum River over the study.

Station	NTAP		CBMT		NTFC		GPQP		NVSM		CNSC		
	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A	
10 day	1	3.53	0.44	0.13	0.28	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	0.30	-	0.91	0.74	-	-	-	-
	3	3.08	1.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	3.42	4.31	0.15	0.16	0.29	-	0.68	0.21	-	-	-	-
	5	3.23	1.07	-	0.50	4.04	-	24.21	-	-	-	-	-
	6	5.45	3.30	0.49	0.08	3.18	-	-	-	-	-	-	-
	7	0.38	0.50	-	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-
20 day	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	3.83	4.67	1.17	2.60	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	3.92	6.97	0.47	0.46	3.52	0.58	-	-	-	-	-	-
	4	0.84	0.42	0.56	0.28	1.67	0.19	7.53	-	-	-	-	-
	5	1.40	-	0.20	0.14	-	-	-	-	-	3.28	-	-
	6	4.95	2.28	0.39	0.07	-	8.36	-	-	-	-	-	-
	7	3.63	0.68	0.14	-	0.65	0.20	2.27	-	1.13	15.74	-	-
30 day	1	-	0.24	1.52	4.35	0.69	0.64	7.71	1.34	-	-	1.45	-
	2	-	-	3.50	-	0.63	-	-	-	-	-	-	34.02
	3	0.43	1.99	0.36	0.12	0.31	0.31	-	-	-	-	-	-
	4	1.52	-	0.90	3.07	0.59	-	-	-	-	-	-	-
	5	0.43	0.27	0.32	-	1.29	1.41	0.77	-	27.06	54.35	-	-
	6	1.59	2.52	0.79	-	-	-	0.44	0.09	-	-	-	-
	7	1.22	3.01	1.04	-	0.17	-	-	-	2.19	-	-	-

Nitzschia amphibia (NTAP), *Cymbella minuta* (CBMT), *Nitzschia fonticola* (NTFC), *Gomphonema quadripunctatum* (GPQP), *Navicula subminuscula* (NVSM), *Caloneis silicula* (CNSC)

N: Natural substrates

A: Artificial substrates

6.97로 가장 높은 유입능을 보인 반면, 지점 5에서 20일에 유입능을 보이지 않았고, 지점 6에서 20일에 2.28로 가장 낮은 유입능을 보였다. *C. minuta*는 10, 20일에 모든 지점에 고르게 유입을 하였으나, 30일에 지점 1, 3, 4에서 유입을 하였다. 또한 시간경과에 따라 유입능이 증가하는 경향을 보였고, 10일 (0.08~0.50), 20일 (0.07~2.60), 30일 (0.12~4.35) 각각 유입능 범위를 나타냈다. *N. fonticola*는 10일에 유입을 보이지 않았고, 20일에 지점 5에서 8.36의 비교적 높은 유입능을 보였다. *G. quadripunctatum*은 20일에 모든 지점에 유입을 보이지 않았다. *Nav. subminuscula*는 20일 이후 지점 5, 7에서 유입능을 보였고, 20일의 지점 7 (15.74)과 30일의 지점 5 (54.35)에서 매우 높은 유입능을 보였다. *C. silicula*는 30일에 지점 2에서만 유입을 보였고, 34.02로 매우 높게 나타났다.

5. 배선형태 및 조류 유입능

배선형태 (raphe form)에 따른 유입능은 자연기질과 인공기질의 모든 기간에서 복배선 형태가 가장 많이 차지

하였다 (Fig. 3).

복배선 형태 (biraphid)는 자연기질과 인공기질 모두 20일에 증가하다 30일에 감소하는 경향을 보였고, 55% 이상의 높은 점유율을 보였다. 단배선 형태 (monoraphid)는 인공기질보다 자연기질에서 더 높은 점유율을 보였고, 자연기질에서 10일 (23.5%), 30일 (12.5%)로 시간에 따라 감소하였다. 무배선 형태 (araphid)는 10, 20일에 자연기질보다 인공기질에서 높은 점유율을 보였으나 30일에 자연기질에서 높은 점유율을 보였고, 자연기질의 경우 8.8%에서 18.8%로 시간에 따라 증가한 반면, 인공기질의 경우 20.5%에서 13.9%로 시간에 따라 감소하였다. 중심형 형태 (centric)는 자연기질의 경우 0.0%~3.1%로 매우 낮은 점유율을 보였고, 인공기질의 경우 2.3%에서 8.3%으로 시간에 따라 증가하였다.

6. 밀도와 영양염 및 유입능 관계

조류밀도 (현존량)와 영양염은 모든 지점에 고르게 유입한 종과 비교한 결과, 유입능은 밀도와 영양염에 유의

한 상관성을 보였다 (Table 5). 밀도는 *G. quadripunctatum* ($p < 0.01$), *N. amphibia* ($p < 0.01$), *N. fonticola* ($p < 0.05$)의 자연기질과 유의한 상관성을 보였고, *C. minuta*

($p < 0.05$)의 인공기질과 유의한 상관성을 보였다. 영양염은 *G. quadripunctatum*의 자연기질과 NH_3 ($p < 0.05$), TN ($p < 0.05$), SRP ($p < 0.05$), TP ($p < 0.01$)가 유의한 상관성을 보였고, *N. amphibia*는 자연기질과 SRP ($p < 0.01$), TP ($p < 0.01$)가 유의한 상관성을 보였으며, *N. fonticola*는 자연기질과 NH_3 ($p < 0.05$), TN ($p < 0.05$), SRP ($p < 0.05$), TP ($p < 0.05$)가 유의한 상관성을 보였다.

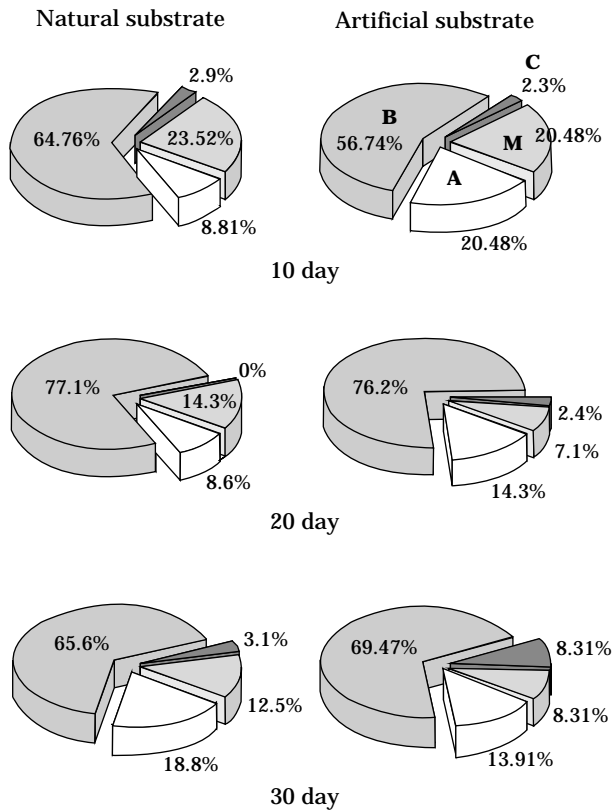


Fig. 3. Temporal changes in relative immigration activities (RIA) of epilithic diatom with different morphs fund in natural and artificial substrates in the Sum River from March 7 to April 7, 2008. Centric (C), araphid (A), monoraphid (M), and biraphid (B).

고 찰

연구결과, 자연기질 및 인공기질에서 높은 밀도를 보였던 우점종들은 비교적 높은 종 유입능을 나타냈다. *N. amphibia*의 경우, 배양 10일째 지점 4의 인공기질에서 우점을 72.4%, 유입능 4.31로 70% 이상의 높은 우점율과 1 이상의 비교적 높은 유입능을 보였고, *Nav. subminuscula*는 30일째 지점 5의 인공기질에서 유입능이 54.35로 매우 높게 나타났고, 81.1%로 기질 내 우점종으로 나타났다. 또한 *N. amphibia*와 *C. minuta*는 우점종으로 빈번히 출현하였고, 상대적으로 모든 지점과 기간에 고르게 유입을 보인 종으로 나타났다. 선행 연구에 의하면 주변수에 식물플랑크톤 현존량이 높을수록 부착될 가능성이 높아져 결국 주변수의 조류 밀도가 유입능에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 기질 내 부착규조 역시 유입능에 영향을 주는 것으로 판단되었다 (Müller-Haeckel, 1966; Hudon and Bourget, 1983; 강 등, 1998).

비교적 오염에 대한 내성이 강한 종 또한 높은 유입능을 보였는데 *Caloneis silicula*는 인공기질에 30일 동안 배양한 지점 2에서 34.02의 매우 높은 유입능을 나타냈으며 이종은 다양한 수질 조건에 대해 강한 내성을 가진

Table 5. Correlation coefficients between nutrients and density and relative immigration activities of the major epilithic diatom species in the Sum River.

Diatoms		Density	NH_3	TN	SRP	TP
CBMT	N	-0.013	-0.148	-0.148	-0.290	-0.249
	A	0.711**	-0.226	-0.201	-0.286	-0.259
GPQP	N	0.525*	0.783**	0.680**	0.729**	0.535*
	A	0.042	-0.178	-0.180	-0.234	-0.208
NTAP	N	0.507*	0.432	0.416	0.506*	0.514*
	A	0.247	-0.140	-0.114	0.006	-0.083
NTFC	N	0.902**	0.623**	0.588**	0.566**	0.666**
	A	0.064	0.026	0.043	0.012	0.048

Cymbella minuta (CBMT), *Gomphonema quadripunctatum* (GPQP), *Nitzschia amphibia* (NTAP), *Nitzschia fonticola* (NTFC)
 N : Natural substrates, A : Artificial substrates

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

종으로 알려져 있다(정, 1993). 한편 *Nav. subminuscula*는 배양 30일째 지점 5에서 54.35의 매우 높은 유입능을 보였으며, 이 종은 전기전도도가 높은 수역에서 보편적으로 출현하고, 오락된 수역에서 주로 생육하며 산업폐수 등 내성이 강하다(정, 1993). 또한 Watanabe *et al.* (1986)에 의해 제안된 유기물오염 평가지수(Diatom Assemblage Index : DAIp)를 보면 수질이 악화된 지역에 서식하는 호오탁성종(Saprophilous taxa)인 것으로 알려져 있다.

표면에 부착한 부착구조의 형태(morphological group)는 밀도가 높은 북배선 형태가 가장 많이 출현하였으며, 이는 강(1998)과 윤 등(2008)의 결과와 일치하였다. 강(1998)과 심 등(1998)의 연구에서는 유입된 종들의 유입능력을 알아보기 위하여 유입계수(immigration coefficients)를 구하였는데, 이를 통해 북배선 형태의 유입계수가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 단배선과 무배선보다 유입계수가 낮지만, 주변수에 분포하는 밀도가 높아서 결국 높은 유입능을 보인 것으로 판단되었다(Stevenson and Peterson, 1989).

자연기질과 인공기질을 통한 부착구조의 유입능 조사 결과, 두 기질의 유입능은 매우 높은 상관성을 나타냈으며, 인공기질의 배양기간은 20일 이상이면 자연기질의 대표성이 나타났다. 여기에 영양염의 부가적인 영향 또한 작용한 것으로 판단되었는데(Stevenson *et al.*, 1991; 윤 등, 2008), 본 연구에서 *N. fonticola*, *G. quadripunctatum* 등은 영양염에 대하여 유의한 상관성($p < 0.05$)을 나타냈다.

결국, 섬강수계의 부착구조 유입능은 수중 및 부착기질 내 조류밀도(현존량)와 주변수의 영양염에 의해 크게 의존되었으며, 인공기질의 배양기간은 최소한 20일 이상이면 자연기질을 대표할 수 있을 것으로 판단되었다.

적 요

남한강 상류인 섬강수계의 부착구조 군집 및 출현종의 특성을 알아보기 위하여 하천방향으로 수계 내 7개 지점을 선정하고, 자연기질과 인공기질에서 부착구조의 유입능(RIA) 및 기초환경조사를 실시하였다. 조사결과, 부착구조 군집 중은 모든 기질에서 *N. amphibia*, *Nav. subminuscula*, *C. minuta* 등이 우점하였고, *N. amphibia*, *C. minuta*는 전 지점에 고르게 분포하였다. 조사기간 중 가장 높은 유입능을 보인 종은 *Nav. subminuscula*, *C. silicula*로 RIA 15 이상이었다. 모든 조사지점에서 높은 유입능을 보인 종은 북배선 형태를 보였으며, 각 기질에서

55% 이상의 높은 밀도를 나타냈다. 비교적 높은 유입능을 보인 *N. fonticola*, *G. quadripunctatum*은 각각 주변수의 영양염($p < 0.05$)과 20일 동안 배양한 인공기질에($p < 0.05$) 높은 상관성을 보였다. 이상의 결과를 종합하면 섬강수계의 부착구조 유입능은 조류밀도와 영양염에 의해 영향을 받으며, 인공기질의 배양기간은 20일이 적당한 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 환경부, 국립환경과학원의 연구과제 “수생태계 건강성 조사 및 평가”(20080501169-01)에 의해 수행되었습니다. 본 연구를 위하여 시료 채집에 도움을 준 김건희 님께 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 강정훈. 1998. 해수중 인공기질표면에 대한 미세조류의 부착과 성장에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문.
- 김기동, 서정범, 서용찬. 2007. 섬강, 원주천, 매지천 그리고 주요 유입지천의 수질조사. 한국환경분석학회지 **10(4)**: 191-196.
- 심재형, 강정훈, 조병철, 김웅서. 1998. 해수에 잠긴 인공기질 표면에서 미세조류의 부착과 성장: I. 부착 및 천이. 한국해양학회지 **3(4)**: 249-260.
- 윤성애, 김난영, 김백호, 황순진. 2008. 저온기 부영양 수계 규조군집의 유입능. 하천호수학회지 **41(3)**: 311-319.
- 정연태, 최민규, 김백호, 위인선, 이종빈. 1996. 수질오염 판정을 위한 기법 개발 (I) 부착조류 군체화에 미치는 기질특이성 연구. 환경생물 **14(1)**: 95-111.
- 정 준. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적, 서울.
- 환경부. 1997. 수질오염공정시험법. 동화기술, 서울.
- 허인량, 오근찬, 최지용. 1998. 섬강유역 환경용량 및 수질 Modeling. 한국환경위생학회지 **24(1)**: 80-86.
- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Azim, M.E., M.C.J. Verdegem, A.A. van Dam and M.C.M. Beveridge. 2005. Periphyton: Ecology, Exploitation and Management. CABI Publishing.
- Biggs, B.J.F. 1996. Patterns in benthic algae of streams, p. 31-56. In: Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems (Stevenson, R.J., M.L. Bothwell and R.L. Lowe, eds.). Academic Press, San Diego, California.
- Cushing, C.E. and J.D. Allan. 2001. Streams: their Ecology and Life. Academic Press, Philadelphia.

- Herder-Brouwer, S.J. 1975. The development of periphyton on artificial substrates. *Aquatic Ecology* **9**(2): 81-86.
- Hodoki, Y. 2005. Bacteria biofilm encourages algal immigration onto substrata in lotic systems. *Hydrobiologia* **539** (1): 27-34.
- Hudon, C. and E. Bourget. 1981. Initial colonization of artificial substrate: community development and structure studied by scanning electron microscopy. *Canadian Journal of Fish and Aquatic Science* **38**(11): 1371-1384.
- Khatoon, H., F. Yusoff, S. Banerjee, M. Shariff and J.S. Bujang. 2007. Formation of periphyton biofilm and subsequent biofouling on different substrates in nutrient enriched brackishwater shrimp ponds. *Journal of Aquaculture* **273**(4): 470-477.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007a. Süswasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Elsevier Book Co., Germany.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 2007b. Süswasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Elsevier Book Co., Germany.
- McCormick, P.V. and R.J. Stevenson. 1998. Periphyton as a tool for ecological assessment and management in the florida everglades. *Journal of Phycology* **34**(5): 726-733.
- Müller-Haackel, A. 1966. Diatomeendrift in fließgewässern. *Hydrobiologia* **28**(1): 73-87.
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann. 2007. The diatoms; Biology & Morphology of The genera. Cambridge University Press, UK.
- Shankar, K.M. and C.V. Mohan. 2001. The potential of biofilm in aquaculture. *World Aquaculture Society* **32**: 62-63.
- Small, J.A., A. Bunn, C. McKinstry, A. Peacock and A.L. Miracle. 2008. Investigating freshwater periphyton community response to uranium with phospholipid fatty acid and denaturing gradient gel electrophoresis analyses. *Journal of Environmental Radioactivity* **99**(4): 730-738.
- Stevenson, R.J. and C. Peterson. 1989. Variation in benthic diatom (Bacillariophyceae) immigration with habitat characteristics and cell morphology. *Journal of Phycology* **25**(1): 120-129.
- Stevenson, R.J., C.G. Peterson and D.B. Kirschtel. 1991. Density-dependent growth, ecological strategies, and effects of nutrients and shading on benthic diatom succession in streams. *Journal of Phycology* **27**(1): 59-69.
- Stevenson, R.J., M.L. Vothwell, R.L. Lowe and J.H. Thorp. 1996. Algal ecology: freshwater benthic ecosystems. Academic Press, San Diego, California.
- Van Dam, A.A., M.C.M. Beveridge, M.E. Azim and M.C.J. Verdegem. 2002. The potential of fish production based on periphyton. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **12**(1): 1-31.
- Watanabe, T., K. Asai and A. Houki. 1986. Numerical estimation of organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage-Diatom Assemblage Index (DAIpo). *Science of the Total Environment* **55**: 209-218.
- Wetherbee, R., J.L. Lind, J. Burke and R.S. Quatrano. 1998. The first kiss: establishment and control of initial adhesion by raphid diatoms. *Journal of Phycology* **34**(1): 9-15.
- Wilbert, N. 1976. A standardized method for identifying and counting the vagile and sessile periphyton. *Oecologia* **24**(4): 343-347.

(Manuscript received 8 February 2009,
Revision accepted 8 March 2009)