

청계천의 수질과 부착조류의 계절적 변동

신명선 · 김범철* · 김재구 · 박미숙 · 정성민
장창원 · 신윤근¹ · 배연재²

(강원대학교 환경과학과, ¹상지대학교 환경공학과
²서울여자대학교 환경생명과학부)

Seasonal Variations of Water Quality and Periphyton in the Cheonggyecheon. Shin, Myoung Sun, Bomchul Kim*, Jai-Ku Kim, Mi Suk Park, Seong Min Jung, Chang Won Jang, Yoon Keun Shin¹ and Yeon Jae Bae² (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; ¹Department of Environmental engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea; ²Devison of Environmental and Like Sciences, Seoul Women's University, Seoul 139-774, Korea)

The seasonal variations of water quality and periphyton were investigated in an artificial stream (the Cheonggyecheon Stream) flowing through the Seoul City. TP showed a longitudinal gradient: 10 to 59 $\mu\text{gP L}^{-1}$ in the upper stream sites, and 15 to 90 $\mu\text{gP L}^{-1}$ in downstream sites. POP was a major form of TP in the water, occupying over 60%, while the proportion of DIP was less than 10% except for St. 4. N/P atomic ratio ranged from 78 to 554, which implies phosphorus would limit algal growth more than nitrogen. The biomass of periphyton did not show much difference among sites, and it was relatively higher in spring and fall season (10~20 $\mu\text{gChl } a \text{ cm}^{-2}$) and lower in August (<5 $\mu\text{gChl } a \text{ cm}^{-2}$), possibly because biofilms were washed off during spates of summer monsoon. Cyanobacteria was the dominant taxon in the periphyton community throughout the year. The periphyton standing crop can be classified as a nuisance level. It seems that phosphorus level is sufficiently high even though the input water is treated chemically, and modest water velocity (20~90 cm sec^{-1}) and rocky bottom provide optimal conditions for periphyton growth.

Key words : Cheonggyecheon, cyanobacteria, periphyton, water quality

서론

청계천은 유역면적이 약 50.96 km^2 이고, 유로연장이 약 10.92 km인 도시하천이다. 청계천의 하류부에는 성북천과 정릉천이 합수되고 국가하천인 중랑천에 유입된다. 청계천은 1961년에 도심구간이 완전히 복개된 이후 40년 이상 자취를 감추었다. 최근 서울시의 청계천 복구사업결정으로 2003년 7월부터 2005년 10월까지 약 2년간에 걸쳐

하천복원사업이 진행되었으며, 그 결과 청계천은 대표적인 도심형 인공하천으로 새로이 조성되었다. 서울시는 청계천의 안정적 수량 확보를 위해 하루 약 12만 톤 정도의 유지용수를 공급하여 하천의 평균 수심을 30~40 cm 정도로 일정하게 유지하고 있다. 또한 공급되는 용수의 수질관리를 위해 수질이 비교적 양호한 지하철 지하수 2만 2천 톤과 한강에서 취수된 약 9만 8천 톤의 한강 물을 화학적 응집침전법으로 처리하여 청계천으로 유입시키고 있다. 지금까지 청계천을 대상으로 복원하기 전과

* Corresponding author: Tel: 033) 252-4443, Fax: 033) 251-3991, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

후, 그리고 복원 중에 보고된 생태계 및 수질모니터링 결과들이 몇몇 있다(오와 김, 1980; 한, 1980; 최 등, 2004; 김과 한, 2005; 이와 박, 2005; 강 등, 2007; 김, 2007; 박 등, 2007).

김과 한(2005)은 청계천 복원 이후 지속적인 수질관리와 생태계 변화에 대한 모니터링의 중요성을 강조하였으며, 특히 이동성이 적은 부착조류를 활용한 생태계 건강성 평가를 제안하였다. 수중생물상의 평가는 이화학적 수질평가에 비하여 장기간 수중생물에 미치는 영향을 총체적으로 파악할 수 있다는 장점을 가지므로 생물군집의 조사를 통하여 수체의 건강성을 판정하려는 시도가 많이 이루어 지고 있다. 하천의 부착조류는 수심이 얕은 유수 생태계에서 하상의 각종기질에 부착하여 분포하며, 하천의 물질순환에 대한 중요성도 매우 크며(Lamberti, 1993; 신과 조, 1998) 이동성이 적기 때문에 부착조류 군집의 시·공간적 변화를 관찰함으로써 수환경을 평가하는 것이 가능하며(Fjordingstad, 1964; Watanabe, 1977), 국내 여러 수계에서 이러한 연구가 활발히 진행되고 있다(Choi and Chung, 1990; 이와 김, 1996; 최 등, 1997; 하 등, 1997; 최 등, 1998; 이 등, 2000; 김, 2004; 최 등, 2004)

최 등(2004)은 한강원수의 수질악화와 지하수 자체의 높은 인, 질소 농도로 인한 청계천의 부영양화 가능성을 제시하였고, 청계천 복원 공사가 시작된 이후 일부 수질과 생태모니터링을 실시한 결과, 수질이 매우 악화되어 있고 동·식물상이 거의 존재하지 않는다고 보고된 바 있다(김, 2004). 박 등(2007)은 청계천과 그 주변 하천을 대상으로 2회에 걸쳐 수질을 조류성장잠재력으로 측정하여 있다. 이와 같이 청계천이 완성되기 전부터 부영양화의 우려가 제기되었으며 준공 이후에는 시민들이 부착조류의 과잉증식으로 인한 미관상 불쾌함을 문제시하고 있어 부착조류의 증식 실태 파악이 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 청계천이 준공된 후 부착조류의 증식 실태와 영양염류 농도 등의 환경요인의 변화를 조사하였다.

재료 및 방법

본 연구는 청계천 복원 후 2005년 12월 1일부터 2007년 4월까지 17개월 동안 수질은 11회, 부착조류는 6회에 걸쳐 계절변동을 조사하였다. 조사는 상류에서 하류인 중랑천 합류지점까지 4개 지점을 선정하여 실시하였다(Fig. 1).

St. 1: 청계 4가 배오개다리

St. 2: 청계 6가 오간수교

St. 3: 성동구 고산자로 고산자교

St. 4: 성동구 사근동 중랑천 합류전

청계천의 상·중류에 위치한 St. 1(배오개다리)과 St. 2(오간수교)지점은 도심을 관통하는 구간으로 하천을 직강화하여 다양한 친수공간을 확보하고 있다. 반면 수변부의 발달이 미약하고 수폭이 10m 이내로 좁아 유속이 매우 빠른 구간이다. St. 3인 고산자교는 전체 구간 중 비교적 자연성이 높고 생태적인 공간으로 버드나무와 각종 수생식물을 식재하여 생물들의 서식공간으로 조성된 구간이다. 수폭이 약 30m에 이르며 유속이 상류에 비해서 크게 감소하였다. St. 4는 청계천 하류의 중랑천 합류전 지점으로 자연형 하천 구간이다. 수변 식물들이 잘 발달되어 있으며 하폭이 크게 넓어지고 하상은 대부분 모래질로 구성되어 있다. 이 지점은 유속이 매우 느리며, 정체수역도 나타난다. 하류부에는 중랑천과 한강으로부터의 어류 유입을 위해 어도가 설치되어 있다.

조사 날짜는 2005년 12월, 2006년 2월, 3월, 5월, 8월, 9월, 10월, 11월, 12월, 2007년 2월, 4월이었다. 수질과 부착조류 현존량 조사는 2005년 12월부터 2007년 4월까지 행해졌으며, 2006년 9월부터 2007년 4월까지의 부착조류의 종조성도 함께 조사하였다. 수온 및 용존산소와 전기전도도(YSI-85 DO/conductivity meter)는 현장에서 측정하였고, 유속은 마그네틱 유속계(FLO-MATE MODEL

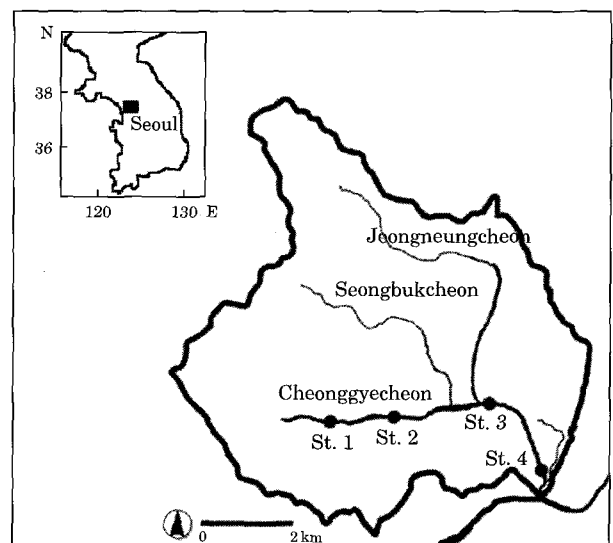


Fig. 1. Map showing watershed of the Cheonggyecheon. Closed circles indicate four sampling sites from upper to downstream.

2000)를 이용하여 수심의 약 2/3지점에서 측정하였다. 조사지점을 횡단하여 0.2 m 간격으로 유속을 측정 후 평균하였다. 현장에서 채수된 시료는 보냉상자(ice box)에 넣어 실험실로 운반하여 탁도(HACH 2100P)와 영양염류를 분석하였다. 총인(TP), 총질소(TN)와 용존유기인(DOP)은 Standard Methods에 따라 Potassium persulfate 법으로 산화하여 흡광광도법으로 측정하였다. 용존무기인(DIP)은 GF/F 여과지로 여과하여 Ascorbic acid 법으로 측정하였다(APHA, 1998).

부착조류 현존량은 대표성을 고려하여 조사지점을 횡단하여 부착조류가 잘 발달된 기질을 선택하여 3개의 샘플을 채취하였다. 선택된 기질은 5×5 cm² 면적을 부드러운 솔로 긁어 채취하였다. Chlorophyll-*a* 분석을 위한 시료에는 50 mL의 dimethyl formamide (DMF)를 가하여 채취하고 원심분리관에 담아 보관하였다. 추출된 시료는 원심분리하여 부유물질을 제거하고 상등액을 채취하여 흡광광도법으로 엽록소 *a*를 측정하였다. 농도의 계산에는 Standard Methods의 trichromatic method를 사용하였다(APHA, 1998).

종조성을 분석하기 위해서 같은 기질, 같은 면적에 있는 부착조류 시료를 증류수를 가하여 부드러운 칫솔로 채취한 후, Lugol's solution을 넣어 보존하였다가 현미경으로 검경하였다. 종의 동정 및 분석은 400배의 현미경(Olympus BH2) 하에서 실시하였다. 규조류의 경우는 Hartley (1986)의 분류체계를, 그 밖의 종류는 広瀬弘幸와 山岸高旺 (1977)에 따라 동정하였다.

결 과

1. 환경요인

수온은 여름에 높고 겨울에 낮은 전형적인 경향을 나타냈는데, 여름에는 수온이 25°C로 높았기 때문에 용존산소 농도가 낮았다(Table 1). 봄, 가을, 겨울의 용존산소는 상·하류가 비슷한 농도를 나타냈으나, 여름에는 하류로 갈수록 낮은 용존산소 농도를 나타냈다(Table 1). pH는 7.34~7.89의 범위를 나타냈으며, BOD는 06년 5월부터 07년 4월까지 1년간 조사하였는데, 전지점에서 매우 낮은 농도를 나타냈다. BOD는 지점이나 계절에 상관없이 1.7 mgO₂ L⁻¹ 이하의 낮은 값을 나타냈고, St. 3과 4의 경우, 최대 2.8 mgO₂ L⁻¹를 나타냈다(Table 1).

유속은 상류에서 하류까지 0.2~0.9 m sec⁻¹의 범위를 나타냈으며, 하폭이 약 28 m로 넓은 고산자교 지점이 가장 낮은 유속을 보였다(Fig. 2A). 전기전도도는 상류에서

하류로 갈수록 증가하였다(Fig. 2B). St. 1과 St. 2는 비슷한 전기전도도를 나타냈으며(평균 184 μS cm⁻¹), St. 3은 199 μS cm⁻¹, St. 4는 215 μS cm⁻¹의 전기전도도를 나타냈다. St. 3부터 전기전도도가 증가하였는데, 이 지점은 지류하천인 성북천과 정릉천이 청계천에 합류된 지점이기

Table 1. Seasonal changes of water temperature and turbidity in the Cheonggyecheon.

Site	Date	Temperature (°C)	DO (mgO ₂ L ⁻¹)	pH	BOD (mgO ₂ L ⁻¹)
St. 1	05-12-01	8.1	13.1	7.36	
	06-02-24	3.9	14.0	7.76	
	06-03-27	8.8	12.2	7.55	
	06-05-25	18.1	10.2	7.64	0.6
	06-08-04	18.7	10.1	7.53	0.4
	06-09-08	23.3	9.4	7.53	1.4
	06-10-30	17.4	10.9	7.85	1.1
	06-11-23	10.6	11.9	7.74	0.2
	06-12-21	3.7	13.8	7.43	0.2
St. 2	07-02-23	5.8	14.7	7.70	1.0
	07-04-07	11.4	11.8	7.86	1.2
	05-12-01	8.1	13.1	7.36	
	06-02-24	4.5	13.6	7.80	
	06-03-27	8.8	12.1	7.49	
	06-05-25	18.0	10.0	7.65	0.8
	06-08-04	21.0	9.9	7.53	0.7
	06-09-08	23.2	10.3	7.53	1.3
	06-10-30	17.4	11.0	7.89	1.5
St. 3	06-11-23	10.4	12.5	7.75	0.4
	06-12-21	3.5	13.5	7.36	1.4
	07-02-23	5.0	14.3	7.78	0.4
	07-04-07	11.4	11.9	7.89	0.6
	05-12-01	8.7	13.1	7.43	
	06-02-24	3.8	14.2	7.73	
	06-03-27	8.8	12.5	7.51	
	06-05-25	18.0	9.7	7.60	0.8
	06-08-04	20.1	9.1	7.69	0.5
St. 4	06-09-08	23.7	8.2	7.69	1.4
	06-10-30	16.1	10.6	7.68	1.7
	06-11-23	9.6	12.2	7.73	0.8
	06-12-21	3.5	13.5	7.55	2.8
	07-02-23	5.5	14.3	7.80	0.6
	07-04-07	9.3	11.9	7.84	1.1
	05-12-01	7.5	11.3	7.34	
	06-02-24	3.4	13.3	7.66	
	06-03-27	7.8	11.6	7.49	
06-05-25	18.2	7.3	7.66	2.8	
06-08-04	21.0	6.9	7.68	0.7	
St. 4	06-09-08	22.8	7.2	7.68	1.5
	06-10-30	15.7	9.4	7.57	1.7
	06-11-23	9.5	11.5	7.75	0.2
	06-12-21	3.5	12.6	7.51	1.0
	07-02-23	4.3	14.5	7.85	1.3
	07-04-07	10.3	10.8	7.73	1.1

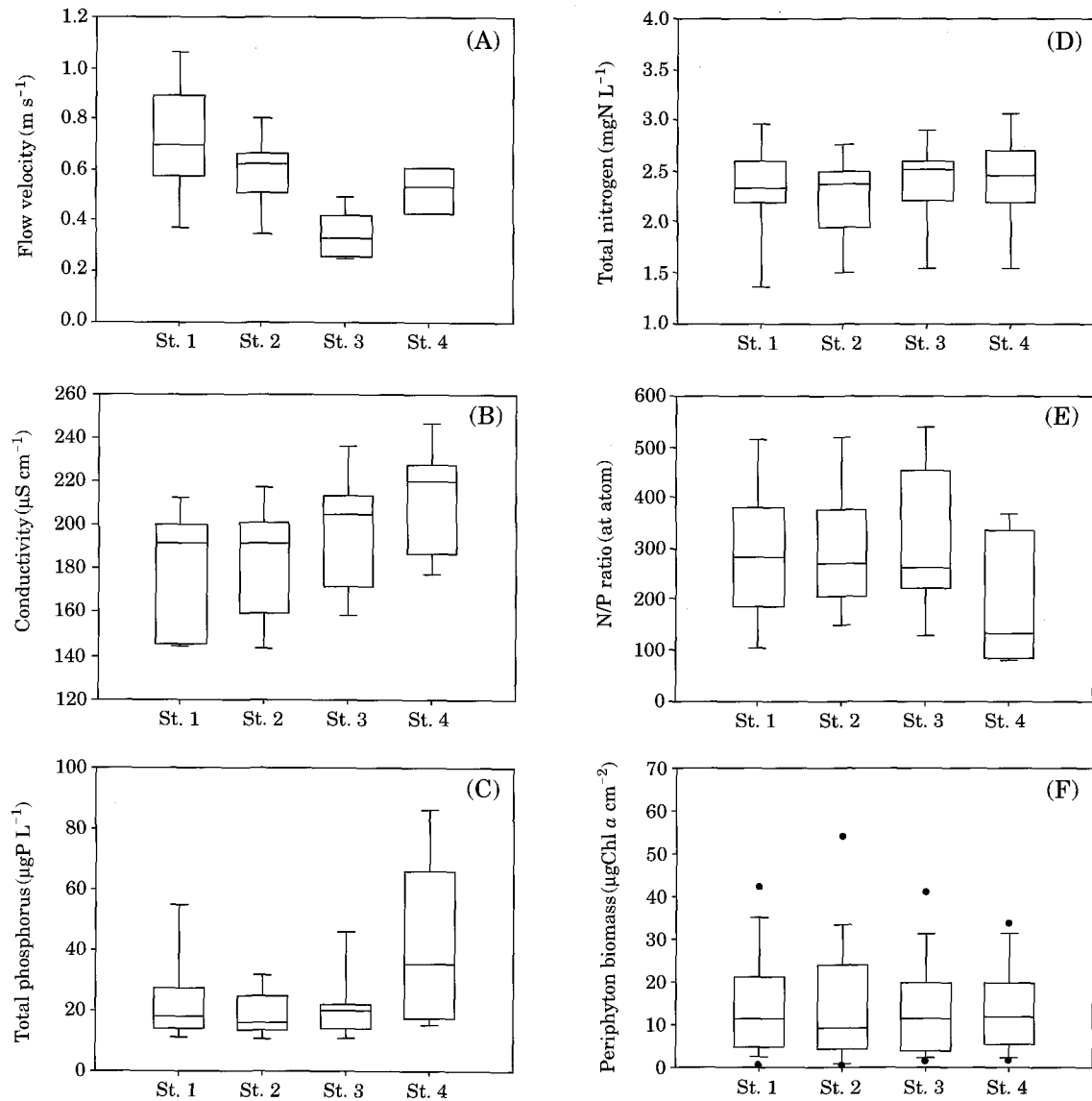


Fig. 2. Comparison of water quality and periphyton biomass among sampling sites.

때문이다. 성북천의 전기전도도는 $186\sim 334\ \mu\text{S cm}^{-1}$ 이고, 정릉천은 $473\sim 614\ \mu\text{S cm}^{-1}$ 로서(환경부 수질측정망 자료), 청계천 본류보다 더 높은 전기전도도를 나타내는 물이 유입된다. 통계분석 결과(t-test), St. 1과 St. 4의 전기전도도는 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 총질소는 $2.34 \pm 0.45\ \text{mgN L}^{-1}$ 의 범위를 나타내어 지점이나 계절에 따른 차이가 크지 않았으나, 총인은 $10\sim 47\ \mu\text{gP L}^{-1}$ 으로 변동이 컸다. 총인의 농도를 보면, St. 1~St. 3까지는 $10\sim 59\ \mu\text{gP L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으나, 하류의 St. 4는 $15\sim 90\ \mu\text{gP L}^{-1}$ 이어서 상류보다 높은 경향을 보였다(Fig. 2C, 2D). 용존무기인과 용존유기인 역시 조사기간

Table 2. Mean concentrations of DIP, DOP and POP in Cheonggyecheon. A parenthesis indicates relative content (%) for total phosphorus.

Site	(unit: $\mu\text{gP L}^{-1}$)		
	DIP (%)	DOP (%)	POP (%)
1	1.20 (7)	4.17 (28)	12.01 (65)
2	1.44 (10)	3.40 (22)	11.76 (68)
3	1.53 (10)	3.61 (21)	11.94 (69)
4	5.53 (18)	4.60 (15)	23.09 (67)

동안 간헐적으로 조사하였는데, 각각 $0.56\sim 9.80\ \mu\text{gP L}^{-1}$, $0.36\sim 8.79\ \mu\text{gP L}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 총인 농도 가운

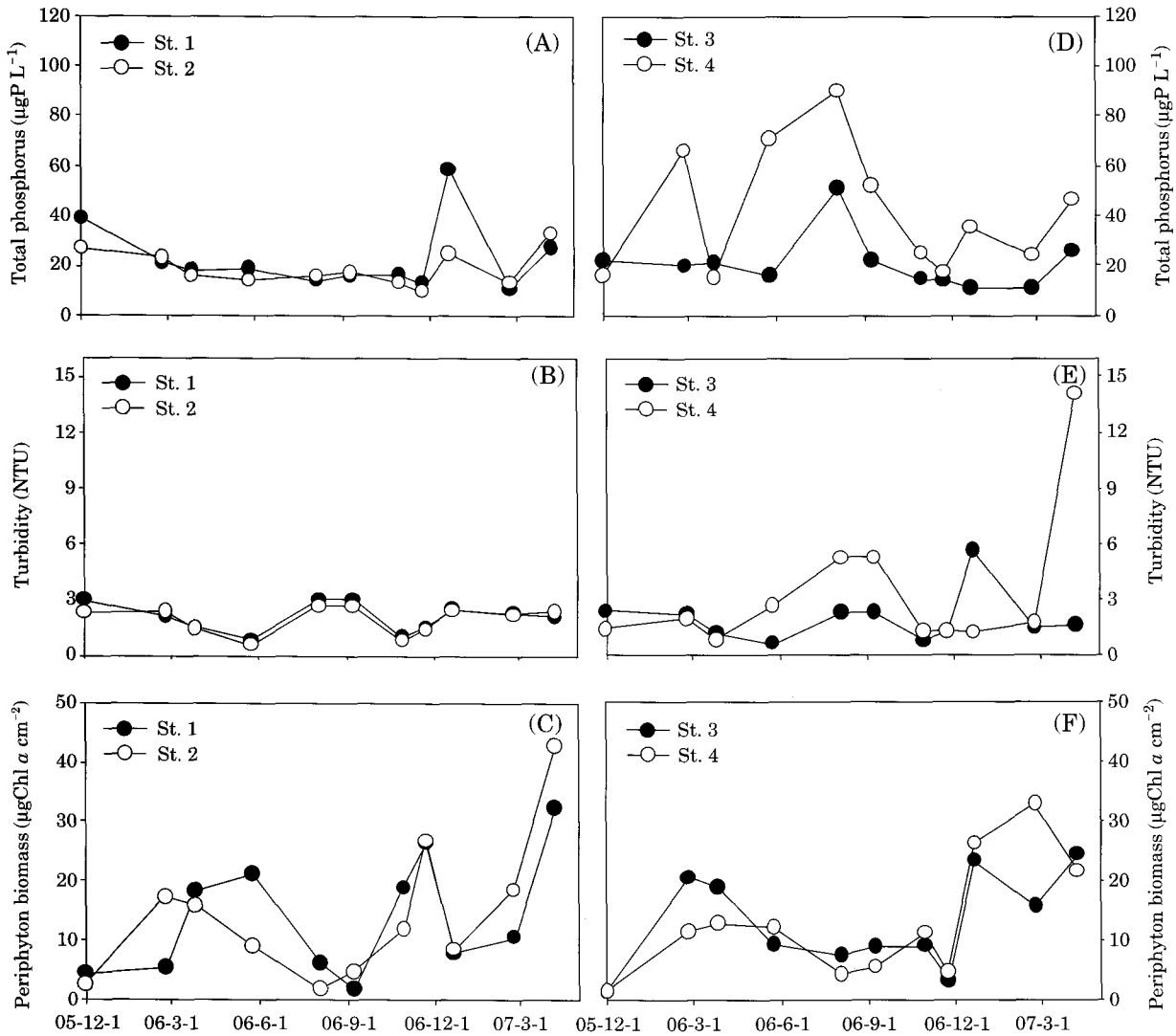


Fig. 3. Seasonal dynamics of TP, turbidity and biomass of periphyton during the sampling periods.

데 입자성유기인이 60% 이상을 차지하였으며, St. 4를 제외하고 용존무기인(DIP)은 10% 이내의 낮은 농도를 나타냈다(Table 2). N/P 원자비는 78~554의 범위로서 수체는 전형적인 인 제한이었다. 청계천의 질소농도는 상대적으로 일정하기 때문에 N/P 비는 주로 인농도에 의해 좌우되었다(Fig. 2D, 2E). St. 1~St. 3의 N/P 원자비는 유사한 값을 나타냈으나(median=273), 총인 농도가 높았던 St. 4는 N/P 원자비가 134로 상류보다 상대적으로 작았다.

총인, 탁도, 부착조류 현존량의 경우, St. 1과 St. 2가 계절적으로 유사한 변동을 보였고, St. 3과 St. 4가 유사한 변동을 보였다(Fig. 3). 탁도는 0.83~5.22 NTU의 범위를 나타냈는데, 지점별 유의적인 차이는 없었고($F_{(3, 40)} =$

0.198, $p=0.897$), 계절적으로는 8월과 9월에 높은 탁도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3B, 3E). 인농도는 St. 1과 St. 2는 겨울에 높은 농도를 나타냈고, St. 3과 St. 4는 8월에 높은 값을 나타냈다(Fig. 3A, 3D).

2. 부착조류 현존량 및 종조성

청계천의 부착조류 현존량은 0.3~48.6 µgChl a cm⁻²의 범위를 보였다. 부착조류 현존량의 범위는 전지점에서 유사하였지만(Fig. 2F), 계절적으로는 지점에 따라서 달랐다. St. 1과 St. 2가 유사한 변동을 보였고, St. 3과 St. 4가 유사한 변동을 보였다. St. 1과 St. 2의 경우, 4월과 5월 그리고 10월과 11월 조사에서 높은 현존량을 보였으며,

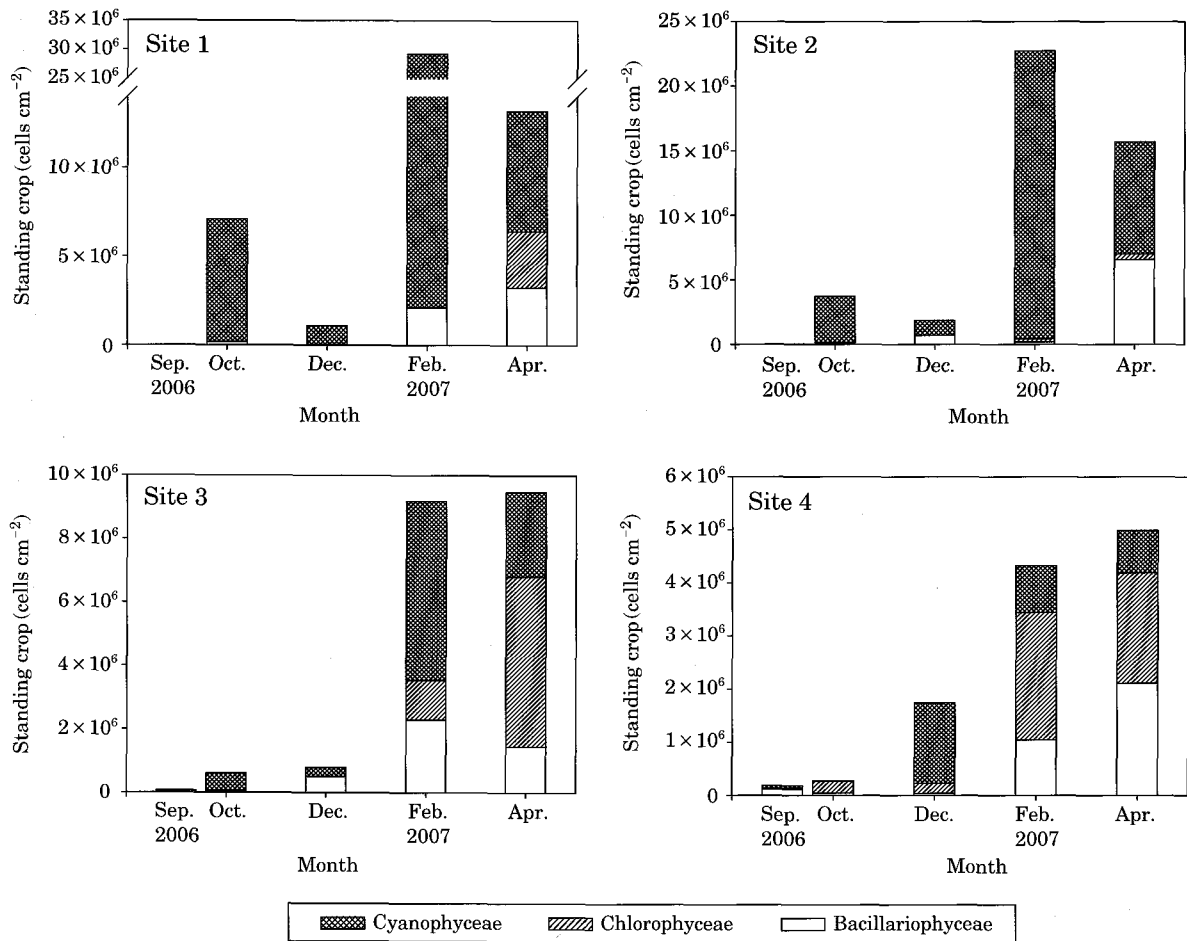


Fig. 4. Seasonal variation of standing crop at each sites in Cheonggyecheon.

8월과 9월은 상대적으로 낮은 현존량을 보였다. St. 3과 St. 4의 경우는 2월과 3월, 그리고 06년 12월~07년 4월 까지 높은 부착조류 현존량을 나타냈고, 8월~12월에 낮은 현존량을 나타냈다(Fig. 3C, 3F). 조사기간인 06년 9월부터 07년 4월까지 청계천에서 출현한 부착조류는 총 6강 93종이었다. 분류군별 출현현황을 보면 규조강 54종, 녹조강 25종, 남조강은 9종 그리고 기타 5종이 나타났다. 규조강의 종 다양성이 가장 높게 나타났으나, 현존량은 남세균의 세포밀도가 가장 높았다(Fig. 4). 그 외 계절에 따라 와편모조강, 갈색편모조강이 각각 1종, 2006년 10월 조사에서는 유글레나강이 2종 출현하였다(상류~고산자교 부근). 부착조류 현존량(cells mL⁻¹)은 2006년 9월 조사에서 2007년 4월 조사로 갈수록 높게 나타났으며, 상류가 하류보다 높게 나타났다(Fig. 4). 청계천 상·하류 전 지점에서 우점종과 아우점종은 남세균인 *Oscillatoria* spp.로 나타났다(Table 3).

고찰

전반적으로 청계천의 부착조류는 미관상 불쾌감을 줄 수 있는 부영양 하천의 수준을 보이고 있다. 청계천이 가지는 시민공원으로서의 가치를 볼 때 이는 우려할 만한 현상이며 앞으로 이에 대한 대책이 필요한 것으로 보인다. 부착조류 현존량의 계절적 변동을 보면 봄에 가장 높은 값을 보였고 여름과 겨울에 낮은 값을 보였다. 여름에 현존량이 낮아진 것은 빈번한 강우로 인한 부착조류의 탈리효과가 크게 작용하였을 것으로 해석된다. 겨울에는 낮은 수온이 부착조류의 성장을 억제하였을 것으로 추정되며 한강의 인농도도 낮기 때문에 그 영향을 받았을 가능성도 있다. 저서동물의 섭식활동에 의한 부착조류의 증감요인은 본 연구에서는 확인되지 않았으나 여름에 수서곤충의 활성이 높았을 가능성도 있다.

Table 3. Seasonal variation of periphyton species in the Cheonggyecheon.

Sampling period	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
September	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>klinoraphis</i>	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Navicula</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.
	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>klinoraphis</i>	<i>Oscillatoria</i> sp.	<i>Navicula</i> sp.
	<i>Merimopedia elegans</i>	<i>Melosira</i> sp.	<i>Fragilaria capucina</i>	<i>Fragilatia capucina</i>
2006 October	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Scenedesmus</i> <i>quadricauda</i>
	<i>Oscillatoria limosa</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i> var. <i>tergestina</i>	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Scenedesmus acutus</i>
	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	<i>Oscillatoria limosa</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i> var. <i>tergestina</i>	<i>Ulothrix subconstricta</i>
December	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Melosira varians</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>
	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Fragilaria</i> sp.	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Phormidium</i> sp.
	<i>Oscillatoria tenuis</i> var. <i>tergestina</i>	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	<i>Surirella</i> sp.	<i>Oscillatoria limosa</i>
2007 February	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Microspora</i> sp.
	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Oscillatoria limosa</i>
	<i>Stephanodiscus</i> <i>hantzschii</i>	<i>Stephanodiscus</i> <i>hantzschii</i>	<i>Stephanodiscus</i> <i>hantzschii</i>	<i>Fragilaria construens</i> var. <i>venter</i>
April	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>Microspora</i> sp.	<i>Fragilaria construens</i> var. <i>venteur</i>
	<i>Ulothrix zonata</i>	<i>Stephanodiscus</i> <i>hantzschii</i>	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Scenedesmus ecornis</i>
	<i>Stephanodiscus</i> <i>hantzschii</i>	<i>Phormidium</i> sp.	<i>Ulothrix zonata</i>	<i>Ulothrix subconstricta</i>

청계천의 총인 농도는 한강 중류인 동강과 같이 비교적 오염도가 낮은 하천들과 유사한 농도 범위를 보였으며(이, 2004), 한강 하류 수역이나 낙동강하류(국립환경과학원, 2003, 2004), 금강하류(국립환경과학원, 2006) 등의 하류 수역보다는 낮은 인 농도를 나타내었다. 일반적으로 유속이 빠른 하천에서는 부착조류의 증식에 필요한 인 요구량이 정체수역의 인 요구량보다 적은 것으로 보고되고 있다. 빠른 유속은 생물막 주변의 영양염이 희석된 물을 제거해 줌으로써 영양염 농도의 구배를 크게 하여 확산속도를 높여 주는 효과를 가진다. 따라서 유속이 빠른 경우에는 동일한 농도의 영양염 일지라도 조류에 의해 효과적으로 흡수될 수 있다. Walton (1990)은 규조류와 남세균(*Phormidium*)이 거의 1,000 mgChl *a* m⁻²의 최대생체량까지 성장하는데 수체내 SRP가 20 µg L⁻¹ 정도만 존재하면 충분하다는 점을 조사한 바 있고, Horner *et al.* (1990)은 사상 녹조류인 *Mougeotia*가 매트형태로 우점했을 때 (350 mgChl *a* m⁻²), SRP의 요구량이 대략 7 µg L⁻¹임을 보고한 바 있다. 특히, 인공하천인 경우에는 규조류가 얇은 생물막을 만드는 데에 1~4 µg L⁻¹의 SRP (Bothwell, 1985, 1988), *Cladophora*종은 5 µg L⁻¹의 SRP만 존재하면 충분하다고 보고된 바 있다(Freeman, 1986). 따라서 청계천의 인의 농도가 호수나 정체수역의 부영양화 수준을 초과하지는 않았지만 부착조류의 현존량이 부영양하천 수준인 것으로 보아 영양염류의 농도가 부착조

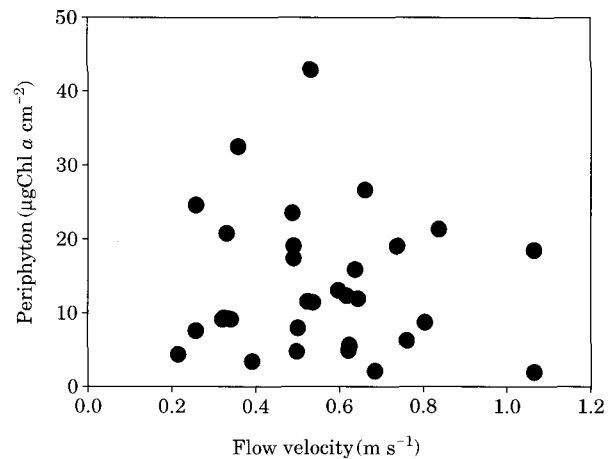


Fig. 5. Relationship between periphyton biomass and water velocity.

류의 성장을 유발하는 데에는 충분한 농도인 것으로 보인다.

청계천에는 한강원수 또는 하수처리장 방류수를 자양 취수장에서 취수하여 화학적 응집침전을 거친 후 청계천 시점부, 삼각동, 동대문, 성북천 하류로 분산하여 공급한다. 한강원수 외에도 간헐적으로 지하철 역사 지하수가 유입된다. 한강물을 알루미늄염으로 정수하는 과정에서 인이 제거되었기 때문에 청계천의 용존무기인의 농도는

평균 $1.36 \mu\text{g L}^{-1}$ (St. 4 제외)의 낮은 수준이었다. 그럼에도 불구하고 부착조류가 미관상 좋지 않은 부영양 하천의 수준으로 성장하였으며 이는 유속이 빠른 하천이기 때문에 정체수역에 비하여 낮은 인농도의 수역에서도 부착조류가 잘 성장할 수 있기 때문인 것으로 해석된다.

부착조류의 생체량을 결정짓는 요인에는 빛, 온도, 탁도, 영양염류의 농도, 유속 등이 있다. 이 중에서 하천에서 중요하게 생각하는 첫 번째 요인이 유속이다. 자연하천에서는 유속이 너무 빠르면 부착조류가 탈리되기 때문에 유속이 0.5 m sec^{-1} 이상이 되면 부착조류의 생체량을 감소시키는 것으로 조사된 바 있다(Horner and Welch, 1981). 그러나 인공하천에서는 부착조류의 생체량이 0.7 m sec^{-1} 의 유속에서도 감소되지 않으며, 심지어 0.8 m sec^{-1} 이상의 높은 유속에도 적응하는 것으로 관찰되기도 하였다(Traaen and Lindstrom, 1983). 자연형 하천에서는 부착조류가 빠른 유속에 의해 직접적인 영향을 받을 뿐만 아니라, 물과 함께 쓸려온 부유물질에 의해서도 크게 감소됨이 보고된 바 있다(Horner et al., 1990). 청계천은 인위적으로 유량을 조절하는 인공하천이며, 평균유속은 0.54 m sec^{-1} 이었다. 이 유속은 자연하천에서 부착조류의 생체량을 감소시키는 임계유속과 유사하며 인공하천에서는 유속에 의한 부착조류의 탈리효과가 없을 것으로 사료된다. 청계천에서는 유속이 부착조류를 탈리시킬 만큼 빠르지 않기 때문에 부착조류 생체량이 유속의 영향을 받지 않는 것으로 사료되며, 상대적으로 유속이 느린 St. 3과 다른 지점과의 부착조류 현존량에 유의적인 차이가 없었다(Fig. 5).

청계천에서 부착조류 현존량의 수준은 Nordin(1985)의 기준에 의하면 무척추동물의 다양성을 감소시킬 수 있는 정도이며, Quinn(1991)의 기준에 의하면 nuisance growth 수준인 것으로 판정된다(Fig. 3). 청계천은 혼탁하지 않아 빛에 제한이 없으며, 총인 역시 부착조류가 성장하기에 충분하게 존재한다. 청계천에서는 DIP의 농도는 낮으나, 유속이 빠르고 DOP 농도도 높기 때문에 이들 조건이 합하여 조류가 성장하는데 충분한 조건을 제공한 것으로 추정된다. 그리고 조류의 우점종을 보면, 계절에 상관없이 남세균(특히, *Oscillatoria* sp.)이 우점종이며, 청계천의 출현종 중에 *Navicula pupula*, *Oscillatoria tenuis*, *Scenedesmus quadricauda*와 *Synedra ulna* 등은 주로 유기물이 많은 오염된 수역에 분포하는 오염 지표종들이며(Palmer 1969, 1977; Harper 1992), 그 외에 출현종인 *Nitzschia* spp.와 *Stephanodiscus hantzschii*는 알고 부영양하며 탁한 하천이나 물에서 주로 사는 종들로 알려져 있다(Reynolds et al., 2002). *Scenedesmus*속 역시 수

심이 얇고 부영양한 호수나 연못, 하천에서 흔히 볼 수 있는 속이다(Reynolds et al., 2002). 청계천에 생존하는 조류의 종들로부터 청계천이 부영양한 하천임을 판정할 수 있었으며, 특히 남세균의 우점화 경향이 높다는 것은 하천의 부영양화 관리측면에서 매우 우려해야 할 일이다. 청계천은 관광자원으로서의 가치로 볼 때 앞으로 부착조류 현존량과 군집구조 등을 장기간 연구하여 관리할 필요가 있을 것으로 사료된다.

적 요

청계천의 하도복원사업 이후 부착조류의 증식 실태와 영양염류 농도 등의 종적변이와 계절적 변화를 조사하였다. 조사기간은 복구된 직후인 2005년 12월부터 2007년 4월까지였으며, 영양염류와 부착조류 현존량, 물리적 요인 등이 조사되었다. 유속은 0.63 m sec^{-1} 에서 1.07 m sec^{-1} 의 변위를 보였으며, 부착조류의 현존량에 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. 총질소($2.34 \pm 0.45 \text{ mgN L}^{-1}$)는 계절이나 지점에 상관없이 농도의 변동이 없었으며, 총인($10 \sim 90 \mu\text{gP L}^{-1}$)은 중랑천 합류 전 지점이 계절에 상관없이 가장 높은 농도를 나타냈고 중·상류 두 지점은 겨울에, 하류 두 지점은 여름에 높았다. 총인 농도 가운데 입자성유기인은 60% 이상을 차지하였으며, 중랑천 합류 전 지점을 제외하고 용존무기인(DIP)은 10% 이내의 낮은 농도를 나타냈다. 부착조류의 현존량은 $0.3 \sim 48.6 \mu\text{gChl a cm}^{-2}$ 의 범위를 보였는데, 이는 타 연구 보고에 의하면 무척추동물의 생체량을 감소시킬 수 있을 정도의 높은 밀도이다. 부착조류 군집의 우점종은 대부분 남조류로서 부영양한 수역에서 나타나는 종들이 출현하였다. 청계천은 부착조류 종조성과 현존량으로 볼 때 부영양한 하천인 것으로 판정된다.

사 사

본 연구는 2006년 국가 장기생태 연구사업(환경부)과 한강생태계 조사 연구(서울특별시)의 지원을 받았으며, 저자 중 신명선, 장창원, 정성민은 2006년도 BK 21사업의 지원금을 받았습니다.

인 용 문 헌

국립환경과학원. 2003. 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자

- 조사. p. 24-27.
- 국립환경과학원. 2004. 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사(II). p. 31-37.
- 국립환경과학원. 2006. 금강수계 수중생태계 수질모델인자 조사. p. 28-29.
- 김명진. 2007. 생태하천 복원 방안. *환경영양평가지* **16**(1): 59-68.
- 김백호, 한명수. 2005. 청계천 생태기능 복원의 가치와 부착조류에 의한 수질관리 및 생태계관리. *원광대학교 환경과학연구소* **13**: 37-42.
- 김용재. 2004. 한탄강의 돌 부착조류 군집의 시, 공간 동태. *Algae* **19**(1): 15-22.
- 김정수, 구태희. 2005. 양재천에서 생태적 복원구간과 비복원구간에 서식하는 조류군집의 비교. *한국환경복원녹화기술학회지* **8**(4): 1-11.
- 김혜주. 2004. 청계천 수질 및 생태모니터링. 청계천 유역물순환 해석국제심포지움, 서울프레스센터.
- 박명환, 황순진, 서미연, 김용재, 김백호. 2007. 조류성장잠재력 조사를 이용한 청계천 복원 이후 수질 평가. *육수지* **40**(2): 234-243.
- 배경석, 서미연, 신진호, 길혜경, 신재영. 1999. 양재천의 수환경과 수서동물군집 특성. *한국환경위생학회지* **25**(4): 107-117.
- 신재기, 조경재. 1998. 대청천 부착조류의 1차 생산성. *육수지* **31**: 294-302.
- 이삼희, 최정권. 2007. 안양천 도시하천 복원의 실행과 평가에 관한 연구. *한국환경보전녹화기술학회지* **10**(1): 1-8.
- 이재연, 김자현, 배대열, 안광국. 2005. 양재천의 생태계 복원구간 및 비복원구간에서의 어류에 의거한 생물학적 특성 평가. *대한상하수도학회, 한국물환경학회 추계학술발표회 논문집*.
- 이진환. 2004. 강원도 동강의 수질과 식물플랑크톤 군집. *Algae* **19**(3): 217-226.
- 최두형, 양재하, 전성진, 현윤정, 이강근, 김윤영. 2004. 청계천 유역의 지하수기초조사. 청계천 유역물순환 해석국제심포지움, 서울프레스센터.
- 최민규, 김백호, 최환석, 이경보, 이덕배, 정연태. 1997. 섬진강수계의 부착조류에 대한 생태학적 연구. *Wonkwang J. Environ. Sci.* **6**: 1-27.
- 최철만, 박연규, 문성기. 2004. 인공기질 부착조류에 의한 대천의 수질평가. *Korean J. Environ. Biol.* **22**(1): 242-245.
- 広瀬弘幸, 山岸高旺. 1977. 日本淡水藻類圖鑑, 内田老鶴圃. 933 p.
- Allan, J.D. 1995. *Stream Ecology*. Chapman & Hall, London, UK.
- APHA, AWWA and WEF. 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th eds. American Public Health Association, Washington, DC.
- Bothwell, M.L. 1985. Phosphorus limitation of lotic periphyton growth rates: An intersite comparison using continuous-flow troughs (Thompson River System, British Columbia). *Limnol. Oceanogr.* **30**: 527-542.
- Bothwell, M.L. 1988. Growth rate responses of lotic periphytic diatoms of experimental phosphorus enrichment: the influence of temperature and light. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **46**: 1293-301.
- Choi, J.S. and J. Chung. 1990. An assessment of water quality by epilithic diatoms of Namchun water system. *Kor. J. Phycol.* **5**: 173-191.
- Fjordingstad, E. 1964. Pollution of streams estimated by benthic phytomicro organism. 1. A saprobic system on communities of organism and ecological factors. *Int. Revue Hydro. Biol.* **49**: 63.
- Freeman, M.C. 1986. The role of nitrogen and phosphorus in the development of *Cladophora glomerata* (L.) Kützling in the Manuwatu River, New Zealand. *Hydrobiologia* **31**: 23-30.
- Harper, D. 1992. *Eutrophication of freshwaters: Principles, problems and restoration*. Chapman & Hall, London. 327 p.
- Hartley, B. 1986. A check-list of fresh water, brackish and marine diatoms of the British Isles and adjoining Coastal Waters. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* **66**: 531-610.
- Hilsenhoff, W.L. 1988. Rapid field assessment of organic pollution with a family level biotic index. *J. Nor. Amer. Benthol. Soc.* **7**: 65-68.
- Horner, R.R. and E.B. Welch. 1981. Stream periphyton development in relation to current velocity and nutrients. *Can J. Fish Aquat. Sci.* **38**: 449-457.
- Horner, R.R., E.B. Welch, M.R. Seeley and J.M. Jacoby. 1990. Responses of periphyton to changes in current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration. *Freshwater Biol.* (24): 215-232.
- Hynes, H.B.N. 1970. *The ecology of running waters*. Univ. of Toronto Press, Toronto, Canada.
- Lamberti, G.A. 1993. Grazing experiments in artificial streams. *J. N. Am. Benthol. Soc.* **12**: 337-343.
- Nordin, R.N. 1985. Water quality criteria for nutrients and algae (technical appendix). Water Quality Unit, Resources Quality Section, Water Management Branch, British Columbia Ministry of the Environment, Victoria, BC. (Available from: <http://www.env.gov.bc.ca> or Water Quality Section, BC Environment, PO Box 9340, Station Provincial Government, Victoria, BC V8W 9M1).
- Palmer, C.M. 1969. A composite rating of algae tolerating organic pollution. *J. Phycol.* **5**: 78-82.
- Palmer, C.M. 1977. *Algae and water pollution*. Municipal environmental research laboratory office of research and

- development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio. 124 p.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, S.K. Gross and R.M. Hughes. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrates and fish. U.S. Environmental Protection Agency EPA/444/4-89-011, Washington D.C.
- Quinn, J.M. 1991. Guidelines for the control of undesirable biological growths in water. Consultancy Report No. 6213/2. National Institute of Water and Atmospheric Research. Hamilton, New Zealand.
- Reynolds, C.S., V. Huszar, C. Kruk, L. Naselli-Flores and S. Melo. 2002. *Journal of Plankton Research* **24**(5): 417-428.
- Traaen, T.S. and E.A. Lindström, 1983. Influence of current velocity on periphyton distribution, *In: Periphyton of Freshwater Ecosystems* (Wetzel, R.G., eds.). *Developments in Hydrobiology* **17**: 97-99.
- Walton, S.P. 1990. Effects of grazing by *Dicosmoecus gilvipes* (caddisfly) larvae and phosphorus enrichment on periphyton. MS thesis, University of Washington. Seattle.
- Watanabe, T. 1977. Water pollution of Kanzaki river on Osaka prefecture and the diatom flora of the bottom mud on the river bed. *Nara. Hydrobiol.* **6**: 27-25.

(Manuscript received 3 July 2007,
Revision accepted 27 February 2008)