

조류성장잠재력 조사를 이용한 청계천 복원 이후 수질 평가

박명환 · 황순진 · 서미연¹ · 김용재² · 김백호^{3,*}

(건국대학교 환경과학과, ¹서울시 보건환경연구원,
²대전대학교 생명과학과, ³한양대학교 생명과학과)

Evaluation of Water Quality after Rehabilitation of Cheonggye Stream using AGP Test. Park, Myung-Hwan, Soon-Jin Hwang, Mi-Yeon Suh¹, Yong-Jae Kim² and Baik-Ho Kim^{3,*} (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Seoul Metropolitan Government, Research Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-130, Korea; ²Department of Life Science, Daejin University, Pochun, Kyonggi 487-711, Korea; ³Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

Algal growth potential (AGP) test was performed to evaluate the water quality and changes in phytoplankton communities before and after a heavy rain event at six sampling sites in Cheonggye Stream (St. 1 and 2), Jungnang Stream (St. 3 and 4), and Lower part of Han River System (St. 5 and 6) after rehabilitation of Cheonggye Stream, October 2005. To test AGP on each sampling site, cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* was applied as a standard alga. Total nitrogen (TN) showed high values at Jungnang Stream, while St. 4 recorded highest values in this study. However, TN values of Cheonggye Stream and Lower part of Han River showed similar levels. Total phosphate (TP) also showed high values at Jungnang Stream, while St. 4 recorded highest. However, TP in Cheonggye Stream were extremely low levels. Although chlorophyll-*a* (chl-*a*) contents before the rain event were similar through the sampling sites, chl-*a* after the rain increased dramatically at Jungnang Stream and Lower part of Han River. In particular, after the rain, TP was the highest at St. 4, where *Cyclotella* sp. dominated the phytoplankton community. When compared with control, AGP values before the rain were comparatively low in all sites, while those after the rain highly increased with the dose-dependently of field water added, due perhaps to the increased nutrients by rainfall. Similar results were observed in Cheonggye Stream. Therefore, for the aesthetic fostering for the citizens, although Cheonggye Stream was presently being sustained by treated water supply, they have a potential of outbreak of phytoplankton by the increased nutrients supply when a heavy rain comes.

Key words : AGP test, Cheonggye Stream rehabilitation, *Microcystis aeruginosa*, rain, water quality

* Corresponding author: Tel: 02) 2220-0956, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr

서론

서울 도심을 동서로 가로지르는 청계천은 일제 강점기를 거치며 그 모습이 다소 변모되긴 하였으나, 1958년에 복개되어 하류부분 약 2.4km만 남겨둔 채 그 모습을 숨겨왔다. 최근 서울시는 청계천 복개 후 약 40여 년이 경과한 2003년 7월 1일부터 다시 새로운 도심하천의 모습으로 탈바꿈하려는 복원사업을 시작해 2005년 10월 1일 복원화 사업이 완공되어 현재의 모습에 이르게 되었다(김, 2005; 김과 한, 2005).

지금까지 많은 오폐수를 흘려보냈던 도심하천인 청계천이 복원화 사업 후 어떻게 달라질 것인지에 대해 많은 사람들의 궁금증이 유발되었지만, 복원 후 생태조사가 제대로 이루어지지 못한 실정이다. 청계천 복원 이전에도 몇몇 연구자들에 의해 조사가 이루어졌지만 연구가 매우 적었고(이, 1976; 한, 1980), 복원화 사업과 관련하여 사회 전반의 각 분야에서 많은 이들의 관심이 집중되어 여러 연구가 이루어졌지만, 공학적, 사회·문화적, 지리학적, 대기·기상학적인 연구가 대부분이었으며(김 등, 2003; 이 등, 2004; 김, 2005; 윤, 2005 이와 박, 2005; 조, 2005; 김, 2006), 김(2004)의 보고 외에는 청계천 복원 이후의 물환경 생태조사 및 수계의 영양상태를 가늠할 수 있는 자료는 거의 전무한 실정이다.

일반적으로 수계의 영양상태를 예측할 수 있는 생물검정법(bioassay) 중 조류성장잠재력측정(AGP test)은 시험조류 또는 공시조류를 이용해 수중의 조류성장 조건을 파악한 결과를 활용하여 간접적으로 수질을 판정하는 방법으로서 제한 영양염, 오폐수 처리 효율 및 중금속 독성 평가 등에 다양하게 활용되고 있다(Payne, 1975). 이 방법은 1966년 Oswald and Golueke에 의해 수체의 영양상태를 파악하는데 처음 사용되었고(Lehmusluoto, 1978), 미 환경보호국(EPA)을 중심으로 수질오염과 부영양화 문제를 해결하기 위해 1970년대 초반부터 적용되어 왔다(Maloney et al., 1973; Miller et al., 1974). 이 방법은 조류가 수중에서 기초생산활동 등 중요한 생태적 역할을 담당하고, 어류나 무척추동물보다 오염물질에 더욱 민감하게 반응한다는 장점 때문에 현재에도 많은 국가에서 수질 평가에 폭 넓게 이용하고 있다(Nyholm and Källqvist, 1989; Wong, 1995; Geis et al., 2000; Weyers et al., 2000).

국내에서는 1990년대 이후 하천과 호소에서 AGP test를 이용한 부영양화 수준평가, 영양염의 상대적 결핍 현상 등을 밝히는 등 한편, 특정 수계의 잠재적 수질특성을 예측하는데 이용되어 왔다(위 등, 1991; 신과 조, 1999;

신과 황, 2003; 황 등, 2006). 실험에 사용되는 공시조류로는 *Selenastrum capricornutum*, *Chlorella vulgaris*, *Microcystis aeruginosa* 등이 있으며(AHPA, 1995; 위 등, 1997), 본 연구에 이용된 *M. aeruginosa*는 국내 담수역에서 대발생을 일으키는 유해조류로서 AGP test를 비롯한 많은 연구에 응용되고 있는 종이다.

본 연구는 국내·외에서 수질 부영양화로 인해 큰 관심을 받고 있는 남조 *M. aeruginosa*를 AGP test 시험조류로 선택하여 청계천 복원 이후 고수온기(하계)의 수질을 인근 수계와 비교, 평가하였다.

재료 및 방법

1. 청계천의 개황

청계천은 서북쪽인 인왕산과 북악산, 남쪽인 남산에서 발원하여 서쪽에서 동쪽으로 서울시가지를 관류하는 하천으로, 유역면적 50.96 km², 유로연장 10.92 km, 하천연장 8.12 km, 하상경사는 1/136~1/746로서 하류에서는 중량천과 합류하여 한강으로 유입된다(서울시정개발연구원, 2006). 청계천은 본래 우기시에만 물이 흐르는 건천으로서 하상이 낮아 예로부터 홍수로 인한 피해가 잦았고, 또한 도심의 한가운데 위치하며 하수처리 기능을 담당해 오면서 항상 하천의 오염으로 인해 오랜 논쟁의 중심이 되어왔다(김, 2006).

연구수역인 청계천은 2005년 복원된 이후, 친수 생태환경 조성을 위해 유지용수를 공급하여 평균 40 cm 정도의 수심으로 물이 흐르게 되었으며, 복원 계획시 1일 약 120,000 m³로 계획하였으나, 통수실험결과 1만 톤을 추가하여 1일 약 130,000 m³가 공급되고 있다(이, 2005). 청계천의 유지용수로는 한강에서 취수한 원수를 주로 사용하고 있고, 그 외에 지하철 지하수와 전력구 지하수를 공급하고 있으며, 필요시 중량물 재생센터의 고도처리수를 공급한다. 유지용수 공급시에는 정수 처리하여 평균 2 급수(BOD 기준) 이상을 유지하고 있다(서울시정개발연구원, 2006).

2. 조사정점 및 시기

조사정점은 청계천 및 주변 수역의 오염정도의 차이 등을 고려하여 청계천(정점 1, 2), 중량천(정점 3), 두 하천의 합류부(정점 4), 한강 본류의 상류(정점 5) 및 하류(정점 6) 등 총 6개 정점을 선정하였다(Fig. 1). 조사시기는 하계의 강우 전후에 따른 수질변화를 알아보기 위해

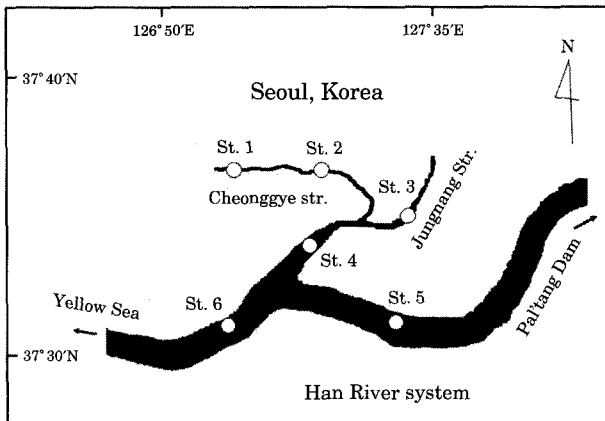


Fig. 1. A map showing the survey sites in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul.

집시 3일 동안 강우가 없었던 2006년 7월 25일(강우이전)과 채집전 3일 동안 총 65 mm 이상의 강우가 있었던 8월 28일(강우 이후)에 각각 1회씩 기초 환경조사 및 시료를 채집하였다. 각 조사점점의 물리적인 특성은 정점 1에서 정점 6으로 갈수록 하천의 폭과 수심이 증가하며, 대부분의 정점은 하상이 모래와 흙으로 이루어 졌지만 유속이 15 cm s^{-1} 이상인 정점 4의 경우 자갈이 포함되어 있다(Table 1).

3. 시료 채집과 분석

수온, 용존산소, pH 등 기초 환경요인은 YSI (650 MDS, USA)를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. 영양염 분석을 위한 시료는 각 정점 표층에서 약 10 cm 아래의 물을 채수하여 산처리된 polyethylene병(1 L)에 담아 실험실로 운반한 후 GF/F filter로 여과하여 분석하였다. 총질소(TN)는 persulfate법에 따라 시료에 포함되어 있는 모든 질소를 질산염으로 산화시킨 후 분석하였고, 총인(TP)은 persulfate법에 따라 인을 무기 인산염으로 산화시킨 후 분석하였다(APHA, 1995). 엽록소-a 농도는 GF/F filter를 이용하여 여과한 시료에 90% 아세톤을 가하여 냉암소에서 24시간 추출한 후 흡광도를 측정하였으며, Lorenzen법(1967)에 따라 계산하였다. 식물플랑크톤 시료는 polyethylene병(300 mL)에 채수된 시료를 넣은 후 현장에서 Lugol용액을 첨가하여 고정하였다. 고정된 식물플랑크톤 시료는 균일하게 혼합시킨 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Axiostar plus, ZEISS, Germany) 하에서 200배로 계수하였고, 동정은 한국담수조류도감(정, 1993)과 일본담수조류도감(Hirose et al.,

Table 1. Physical characteristics at each site in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul.

Site	Width (m)	Depth (cm)	Sediment	Current (cm s^{-1})
1	5~6	20~30	Sand	>10
2	10~11	20~40	Sand, Silt	<5
3	45~48	30~100	Sand, Silt	<5
4	55~60	30~50	Pebble, Sand	>15
5	350	400	Sand, Silt	<5
6	400	450	Sand, Silt	<5

1981) 등의 문헌을 참고해 광학현미경(Axiostar plus, ZEISS, Germany) 하에서 1,000배로 관찰하여 이루어졌다. 또한 조사시기의 강우자료는 기상청자료를 이용하였다.

4. 현장수의 AGP test

AGP 실험을 위해 현장수는 각 정점 표층에서 약 10 cm 아래의 물을 채수하여 산처리된 polyethylene병(2 L)에 담아 실험실로 운반한 후 GF/F filter로 여과하여 사용하였다. AGP 측정에 사용된 시험조류는 국외에서 널리 이용되고 있고(AHPA, 1995), 국내에서 수질 부영양화로 인해 크게 문제가 되고 있는 남조류 *Microcystis aeruginosa*를 선택하였고, 일본국립환경연구소(NIES)로부터 분양 받은 NIES 298을 CB배지에서 계대 배양하여 사용하였다.

AGP 실험을 위해 준비한 50 mL test tube에 배양액 30 mL을 첨가하고, 약 일주일 정도 계대 배양한 NIES 298을 각각의 배양액 30 mL에 10^6 mL^{-1} 의 세포수로 접종하였다. 각각의 배양액은 CB배지에 현장수를 넣지 않은 대조구, CB배지에 현장수가 5 mL이 첨가된 처리구(T 1/6), CB배지에 현장수가 10 mL이 첨가된 처리구(T 2/6), CB배지에 현장수가 15 mL이 첨가된 처리구(T 3/6)로서 최종 부피가 30 mL이 되도록 제조하였고, 3반복으로 실시하였다. 배양온도는 25°C 를 유지하였고, 광조건은 $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (14 h : 10 h LD cycle)이었으며, 100 rpm으로 11일간 배양하였다. 배양기간 중 시간에 따른 생물량 변화는 초기에 12시간 간격으로, 이후에는 1일 간격으로 측정하였는데, Lugol용액으로 고정한 시료를 200배의 광학현미경(Axiostar plus, ZEISS, Germany) 하에서 haemocytometer(Fuchs-Rosenthal; Paul Marienfeld GmbH & Co., Lauda-Königshofen, Germany)를 이용하여 직접 세포수를 계수하여 조사하였다.

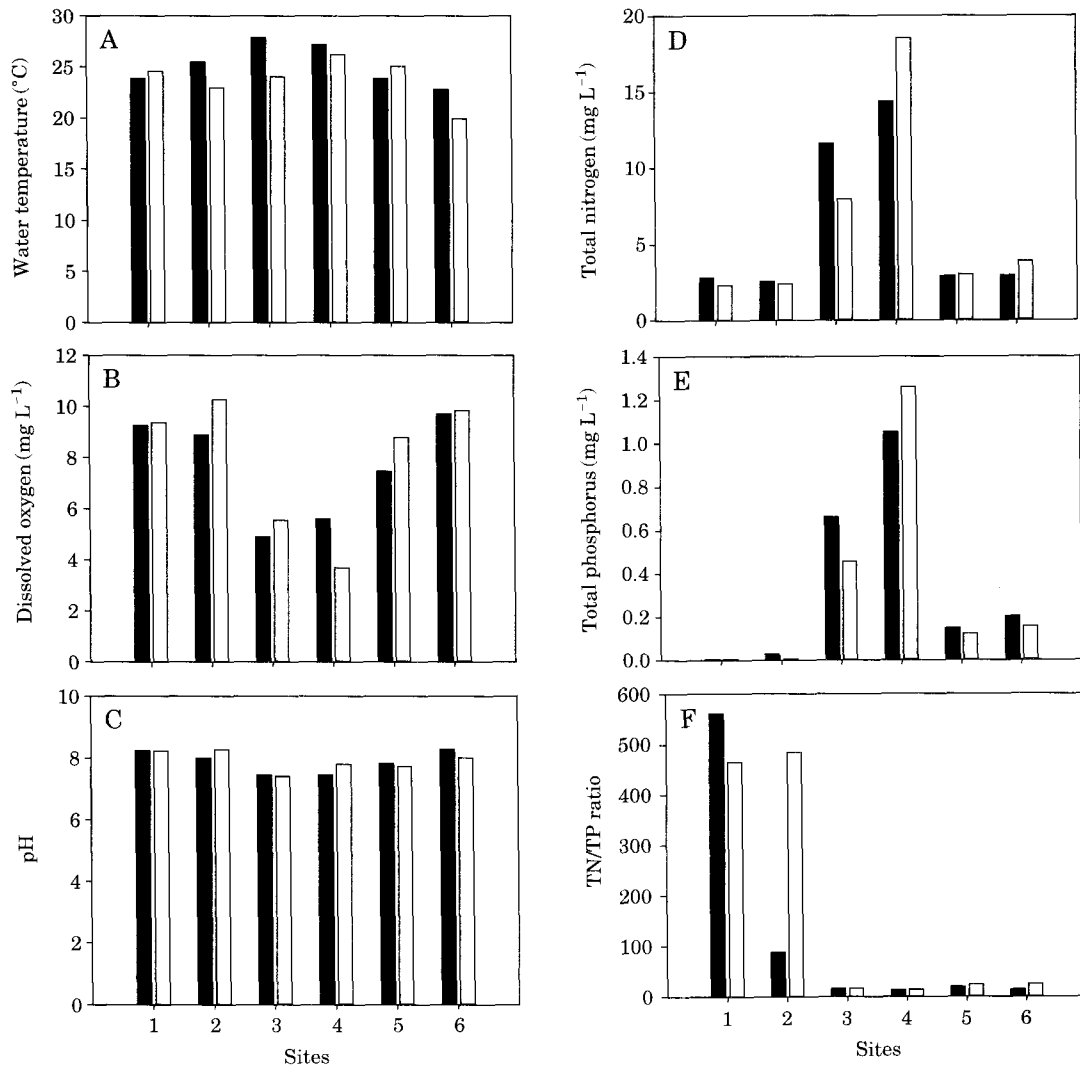


Fig. 2. Water quality data at each site in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul. ■, Before the rain; □, After the rain.

결과 및 고찰

1. 환경요인 및 조류 변화

청계천을 비롯한 각 조사정점(정점 1, 2, 3, 4, 5, 6)의 환경요인을 조사한 결과, 강우 전 수온은 정점 3이 28°C로 가장 높았으며 정점 6이 23°C로 가장 낮았고, 강우 후 수온은, 정점 4가 26°C로 가장 높았으며, 정점 6이 20°C로 가장 낮았다(Fig. 2A). 각 정점의 수온 분포는 조사가 이루어진 같은 시기의 평균기온과 큰 차이를 보이지 않았다(기상청, 2006).

강우 전 용존산소는, 정점 6이 9.71 mg L⁻¹로 가장 높

았으며 정점 3이 4.91 mg L⁻¹로 가장 낮게 나타났고, 강우 후에는 정점 2가 10.27 mg L⁻¹로 가장 높았으며 정점 4가 3.69 mg L⁻¹로 가장 낮았는데 오염수역인 정점 3과 정점 4의 용존산소가 다른 수역에 비해 비교적 낮은 수준을 보였다(Fig. 2B). pH는 전체적으로 7.4~8.3의 범위를 나타내어 강우 전후 및 정점간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 2C).

각 조사지점의 영양염은 강우에 상관없이 정점 3과 정점 4에서 높았다. 총질소는 정점 3과 정점 4에서 다른 정점보다 뚜렷하게 높았는데, 정점 4는 강우 전후 각각 14.4 mg L⁻¹와 18.5 mg L⁻¹로 가장 높은 값을 나타내었다. 그러나 정점 1, 2, 5, 6에서는 총질소가 강우 전후 및 정점에 따른 차이를 보이지 않았다(Fig. 2D). 총인 역시

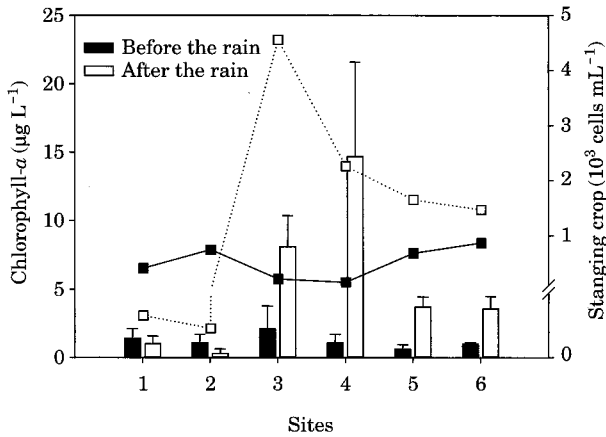


Fig. 3. Chlorophyll-*a* ($\mu\text{g L}^{-1}$) and standing crop (10^3 cells mL^{-1}) at each site in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul.

정점 3과 정점 4에서 높았는데, 정점 4의 총인은 강우 전 후 각각 1.1 mg L^{-1} 와 1.3 mg L^{-1} 를 기록하며 가장 높았다(Fig. 2E). 정점 1, 2, 5, 6에서는 총인의 농도가 전반적으로 낮게 나타났는데, 특히 정점 1과 정점 2에서 매우 낮았다. TN/TP ratio는 정점 1과 정점 2에서 강우 전에 각각 562과 89, 강우 후에 각각 466과 485으로서 높게 나타났다. 이에 비해 정점 3, 4, 5, 6에서의 TN/TP ratio는 강우 전 후에 따른 차이가 크지 않았고, 최저 14와 최고 25를 기록했다(Fig. 2F). 이 결과로 보아, 청계천 정점 1과 정점 2의 경우, 인이 조류성장의 제한요인으로 작용할 가능성이 높았다.

강우 전 후의 엽록소-*a* 농도를 비교해 보면, 강우 전에는 정점 3이 $2.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았고 정점 5가 $0.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았으나 나머지 정점간 엽록소-*a* 농도차는 크지 않았다. 반면, 강우 후에는 정점 4에서 $14.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 정점 2에서 $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았는데 정점 1과 정점 2를 제외한 모든 정점에서 강우 전에 비해 엽록소-*a* 농도가 급격히 증가하였으며, 특히 정점 4에서는 가장 높은 엽록소-*a* 증가를 보였다(Fig. 3).

식물플랑크톤 현존량은 강우 전에 정점 4에서 최저 $157 \text{ cells mL}^{-1}$, 정점 6에서 최고 $868 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 조사되었으며, 강우 후에는 정점 2에서 최저 9 cells mL^{-1} , 정점 3에서 최고 $4,554 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 조사되었다(Fig. 3). 엽록소-*a* 농도와 마찬가지로 강우 전의 식물플랑크톤 현존량은 정점간 차이가 크지 않았으나, 강우 후에는 정점간 차이가 크게 나타났다. 흥미롭게도 강우 후 엽록소-*a* 농도는 정점 4에서 가장 높았지만, 현존량은 정점 3에서 가장 높은 것으로 나타났는데, 이는 정점간 우점하는 조류의

크기에 따른 차이인 것으로서, 정점 3과 정점 4에서 우점한 조류는 각각 *Oscillatoria* sp.와 *Cyclotella* sp.이었다(Table 2).

부영양 하천에서 우점하는 대표적인 종으로 *Cyclotella*, *Stephanodiscus* 등이 알려져 있다(Lowe, 1974; Stoermer et al., 1985). 오폐수의 영향을 받고 있는 탄천에서 1996년 7~8월에 *Cyclotella pseudostelligera*, 2000년 8월에 역시 *Cyclotella* sp.가 우점한다고 보고하였다(김 등, 1998; 이 등, 2001). 본 조사에서 가장 높은 영양염(총질소, 총인)을 보였던 정점 4의 경우, 강우 전 *Phormidium* sp.에서 강우 후 *Cyclotella* sp.로 종 천이가 일어났다. 이 등(2001)은 청계천 복원이전인 2000년 8월 중랑천에서 *Cyclotella stelligera*가 우점한다고 보고하였는데, 복원전 후의 수질변화를 알 수 있었다. 또한 현재 청계천 하류인 정점 4는 강우전 보다 강우 후에 보다 높은 영양물질이 유입되어 부착성 남조보다 부유성과 부착성을 동시에 갖는 구조가 우점하는 특징을 보였는데, 조사정점인 중랑처리센터에서 방류되는 처리된 하수에 대한 세밀한 연구가 지속될 필요가 있다고 사료된다.

각 조사정점에서 출현한 식물플랑크톤은 남조 3종, 규조 15종, 녹조 10종, 유글레나 1종, 와편모조 1종 등 총 30종으로 조사되었다. 이들 중 강우 전에는 남조 2종, 규조 14종, 녹조 5종, 유글레나 1종 등 총 22종이 출현했으며, 강우 후에는 남조 3종, 규조 11종, 녹조 8종, 유글레나 1종, 와편모조 1종 등 총 24종이 출현했다(Table 2). 강우 전 후의 1개월 사이에 종천이가 발생하였고, 이에 따른 출현 식물플랑크톤 종의 변화가 정점 1과 정점 2에서 매우 뚜렷하였으며, 출현 종수의 감소와 더불어 개체수도 급격히 감소하였다. 또한 강우 후 남조류와 녹조류의 개체수는 강우 전에 비해 그 수가 현저히 증가하였다. 조사 시기에 출현한 식물플랑크톤 중 강우 전에는 각 정점별로 *Stigeoclonium lubricum* (정점 1), *Nitzschia* sp. (정점 2), *Oscillatoria* sp. (정점 3), *Phormidium* sp. (정점 4), *Aulacoseira granulata* (정점 5, 6)가 가장 우점하였고, 강우 후에는 각 정점별로 *Oscillatoria* sp. (정점 3), *Cyclotella* sp. (정점 4), *Scenedesmus quadricauda* (정점 5), *Sphaerocystis* sp. (정점 6)가 가장 우점하였다. 정 등(2003)에 의한 한강 하류 식물플랑크톤 조사에서 본 연구 정점 5, 6과 유사한 정점의 2001년 7월과 8월에 출현한 종(총 33종~총 42종) 중, 규조(19종~32종)와 녹조(3종~13종)가 대부분을 차지했는데, 본 연구의 우점종과 비슷한 *Aulacoseira granulata*와 *Scenedesmus quadricauda*가 주요 우점종으로 포함되어 최근의 본 자료와 큰 차이를 나타내지 않았다.

Table 2. Comparisons of species and individual numbers (cells mL⁻¹) of phytoplankton at each sites in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul.

Species	Before the rain						After the rain					
	S. 1	S. 2	S. 3	S. 4	S. 5	S. 6	S. 1	S. 2	S. 3	S. 4	S. 5	S. 6
Cyanophyceae												
<i>Merismopedia glauca</i>												320
<i>Oscillatoria</i> sp.	65		80						2200	300		
<i>Phormidium</i> sp.				100							200	200
Bacillariophyceae												
<i>Asterionella formosa</i>						24						
<i>Aulacoseira granulata</i>	36		28	10	276	464	4				370	50
<i>Cocconeis</i> sp.		1										
<i>Cyclotella</i> sp.	1		18	5	14	70		1	1220	910	130	25
<i>Cymbella tumida</i>					6	8					10	5
<i>Diatoma vulgare</i>					2	14						
<i>Eunotia</i> sp.									2			
<i>Fragillaria crotonensis</i>					128	68					100	
<i>Gomphonema</i> sp.	1		28	4	2	12	2	2	130	40	20	10
<i>Melosira varians</i>			16		32	34	4				40	10
<i>Nitzschia hantzschii</i>			6	24	6							90
<i>Nitzschia palea</i>		1			8	2						
<i>Nitzschia</i> sp.	2	737	14					5	210	190	50	10
<i>Synedra acus</i>	4	1	2	2	166	170	3		10		10	10
<i>Synedra ulna</i>			2			2			160	50	30	
Chlorophyceae												
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>												5
<i>Closterium</i> sp.					2				2			
<i>Coelastrum sphaericum</i>									260	200		
<i>Eudorina elegans</i>											200	
<i>Pediastrum duplex</i>				8								
<i>Scenedesmus acuminatus</i>									160	320	80	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>		4	22	4					200	240	400	40
<i>Sphaerocystis</i> sp.												550
<i>Spondylosium planum</i>					40							150
<i>Stigeoclonium lubricum</i>	302											
Euglenophyceae												
<i>Euglena</i> sp.		1						1			10	
Dinophyceae												
<i>Ceratium hirundinella</i>												5

2. 현장수의 AGP test

강우 전 각 정점의 현장수를 배양계에 1/6, 2/6, 3/6으로 각각 첨가했을 때, 정점에 관계없이 대부분의 처리구는 대조구에 비해 높은 조류성장 특성을 나타냈다. 또한 현장수의 첨가량이 증가할수록 조류의 성장 특성이 높았는데, 특히 3/6으로 처리한 실험구(T 3/6)는 이러한 특성이 매우 뚜렷하였다. 현장수를 1/6로 처리한 실험구(T 1/6)는 대조구에 비해 높은 조류성장 특성을 나타냈으나, T 3/6 실험구와 비교하면 대부분의 정점에서 비교적 낮은 조류성장 특성을 보였다(Fig. 4). 그러나 정점 3의 경우,

T 1/6 실험구와 T 2/6 실험구는 실험 8일 이후에도 꾸준히 세포수가 증가하였으나, T 3/6 실험구는 이때 조류의 생장이 감소하기 시작하여 실험 10일 이후에는 이들 실험구보다 낮은 세포수가 관찰되었다(Fig. 4). 또한 정점 4의 경우 역시, T 1/6 실험구와 T 2/6 실험구는 실험 8일 이후에도 지속적으로 조류가 생장을 했으나, T 3/6 실험구는 실험 9일부터 조류의 생장이 급격히 감소하였다(Fig. 4).

강우 후의 현장수 첨가실험에서는 강우 전 실험과는 달리 각 정점의 현장수를 배양계에 1/6, 2/6, 3/6으로 각각 첨가했을 때, 3/6으로 처리한 실험구(T 3/6)를 제외한

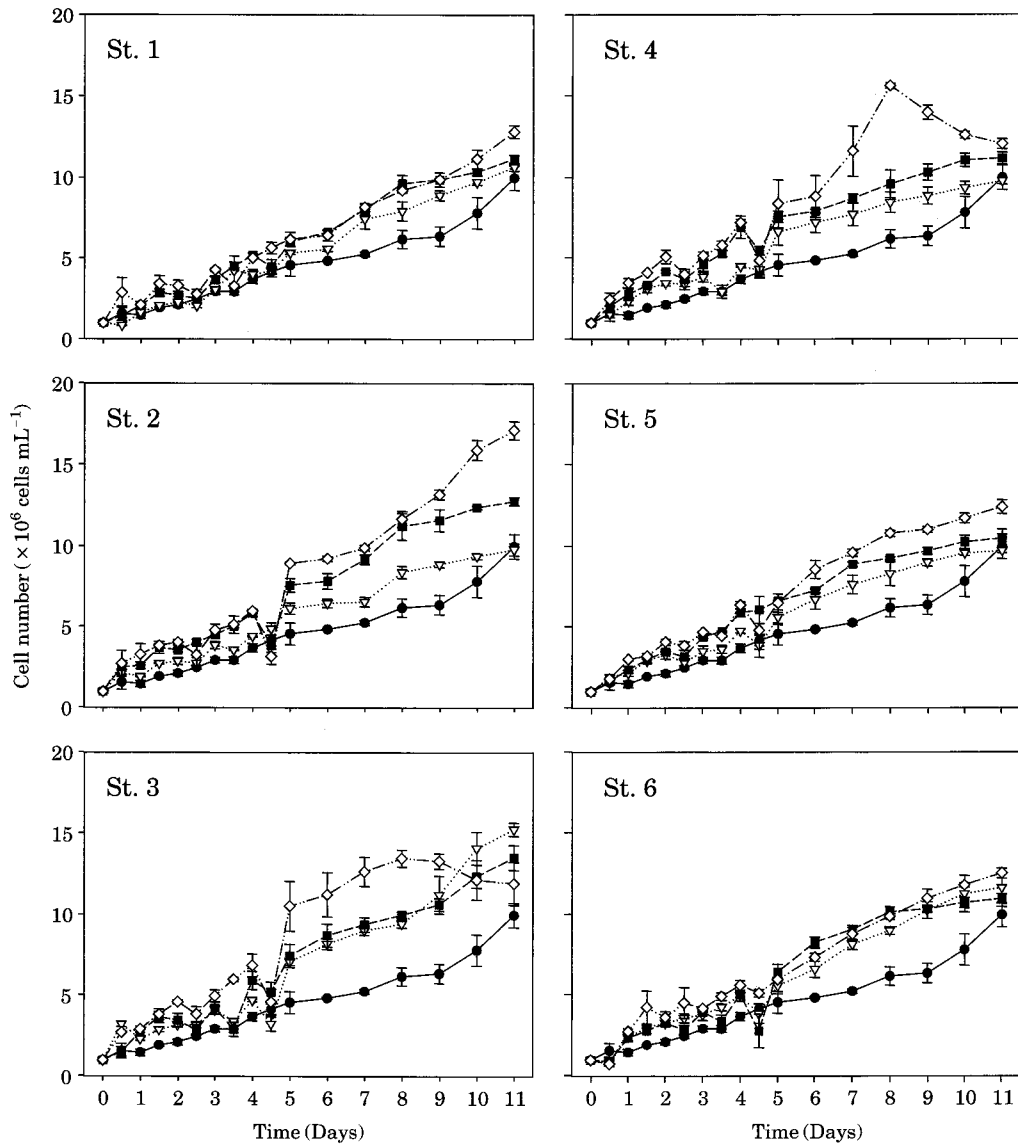


Fig. 4. AGP test before the rain at each site in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul. ●, Control; ▽, T 1/6; ■, T 2/6; ◇, T 3/6.

나머지 실험구(T 1/6, T 2/6)는 대조구보다 낮은 조류성장 특성을 나타냈다(Fig. 5). 그 중 정점 1과 정점 4에서는 실험 종료시 모든 처리구가 대조구보다 낮은 성장 특성을 나타냈다(Fig. 5).

본 연구에서 남조 *M. aeruginosa*를 이용한 강우 전후 현장수의 첨가량에 따른 조류성장잠재력을 조사한 결과, 공통점은 각각의 실험구(T 1/6, T 2/6, T 3/6)가 현장수의 첨가량에 비례하여 *M. aeruginosa*의 생장이 증가하였으며, 차이점은 강우 전의 현장수를 첨가량에 따라 처리한 실험구(T 1/6, T 2/6, T 3/6)는 대조구에 비해 높은 *M. aeruginosa*의 성장 특성을 보인 반면, 강우 후에는 T 3/6

을 제외한 실험구(T 1/6, T 2/6)가 대조구보다 낮은 *M. aeruginosa*의 성장 특성을 나타낸 것이다(Figs. 4, 5). 이러한 차이점은 강우 전에 채수한 각 정점의 현장수가 강우 후에 채수한 각 정점의 현장수에 비해 *M. aeruginosa*가 성장할 수 있는 잠재력이 크기 때문으로 판단된다. 그러나 실제 조사현장에서는 강우 전에 비해 강우 후의 식물플랑크톤 현존량과 엽록소-*a* 농도가 높게 나타남으로서 이러한 조류성장잠재력 특성과는 다른 양상을 나타냈다. 그럼에도 불구하고 이러한 조건에서도 남조 *M. aeruginosa*가 실제 조사현장에서는 전혀 관찰되지 않았지만, 이 시기의 각 정점의 현장수는 *M. aeruginosa*가 잘 자랄

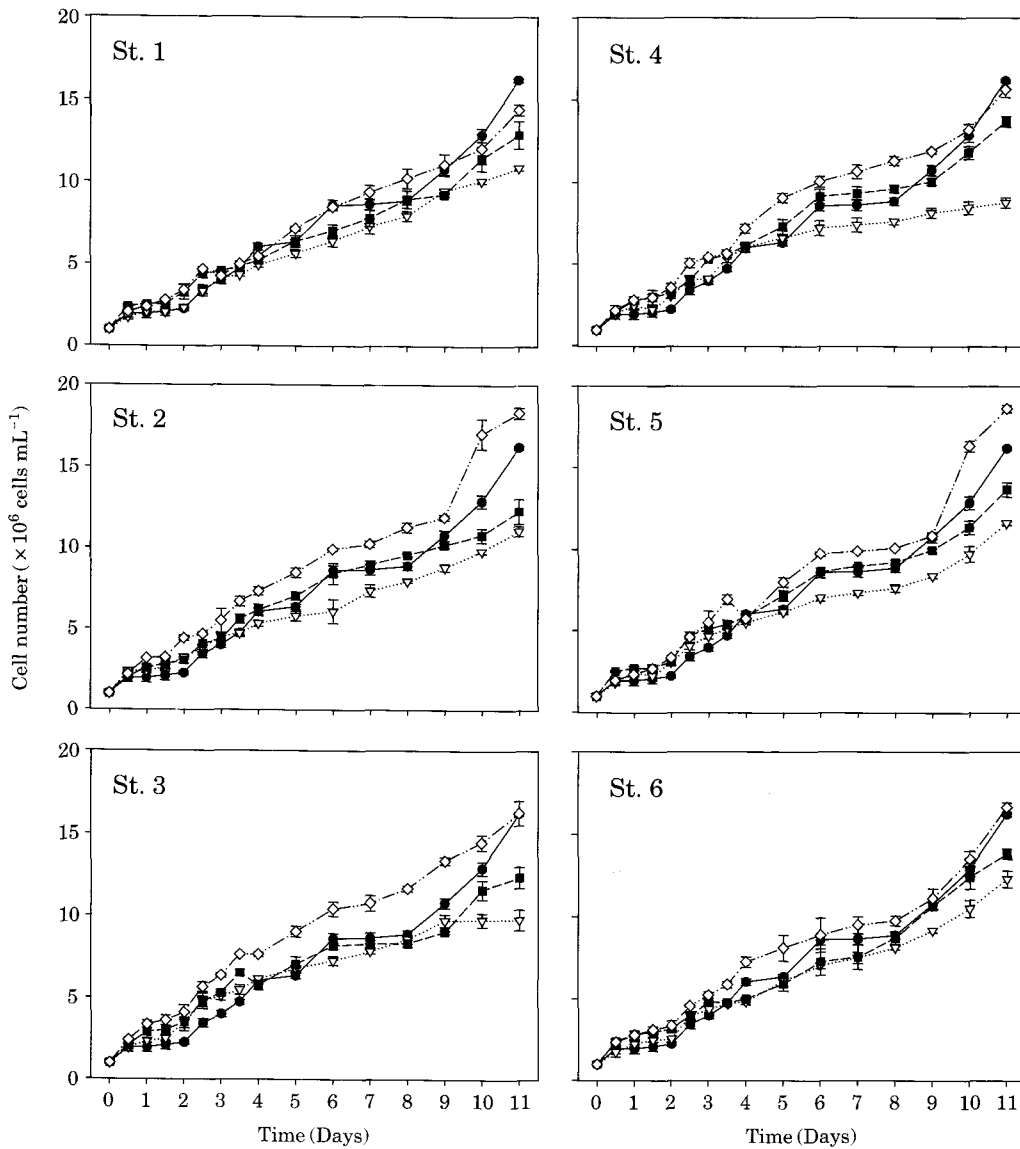


Fig. 5. AGP test after the rain at each site in Cheonggye Stream, Jungnang Stream and Han River of Seoul. ●, Control; ▽, T 1/6; ■, T 2/6; ◇, T 3/6.

수 있는 수준의 영양상태인 것으로 판단되며, 특히 강우 전 각 정점의 현상수는 *M. aeruginosa*의 성장조건에 좀 더 적합한 것으로 생각된다.

각 조사정점의 현상수를 이용한 조류성장잠재력은 강우 전후와 시기에 따른 수중 영양물질 농도에 따라 크게 좌우되며, 특히 정점 3과 정점 4는 중랑천의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다. 일반적으로 하수처리장 방류수에는 인 함유량이 높은 생활하수가 많이 포함되어 총인 농도가 평균적으로 높게 나타나는데(서 등, 2003), 중랑천에는 정점 3과 정점 4 사이에 하수처리장이 위치하며, 정점 4는 청계천 수역 정점 2와 중랑천 수역 정점 3 및

중랑하수처리장의 방류수가 합류되는 정점으로서 영양염의 농도가 특히 높게 나타났으며, 총인의 농도는 총질소의 농도에 비해 매우 급격히 증가하여 강우 전후 모두 가장 낮은 TN/TP ratio를 기록하였다. 본 연구 정점과 비슷한 정점에서 1990년부터 2000년 사이에 연구한 배 등(2002)의 자료에 따르면, 매 해마다 정점 4의 총질소와 총인 농도는 정점 3에 비해 높았고, 또한 정점 4에서는 총질소에 비해 총인의 증가 폭이 더욱 높았던 것으로 조사되었으며, 이러한 현상은 본 자료와 비교하여 현재에 이르기까지 비슷하게 지속되었다. 그러나 부영양화된 중랑천 수역에 비해 복원 이후 비교적 청정한 청계천 수역

이 중랑천에 합류됨으로서 청계천에 의한 희석효과가 어느 정도 있을 것으로 사료되었다. 결론적으로 청계천이 강우로 인한 다소의 영양물질 유입에 따른 수질악화의 가능성은 있으나 평상시에는 한강본류에 비해 청정한 수질을 유지하여 한강에 흘러 들어감으로서, 한강본류의 수질개선에도 도움이 될 것으로 판단되었다.

적 요

청계천 복원 이후 하천수질의 생태학적 평가를 하기 위하여 청계천을 비롯한 인접수역 중랑천 및 한강 본류를 대상으로 강우 전후 조류 및 수질변화와 현장수에 대한 조류성장잠재력(AGP)을 조사하였다. 조사는 청계천(정점 1, 2), 중랑천(정점 3), 두 하천의 합류부(정점 4), 한강 본류의 상류(정점 5) 및 하류(정점 6) 등 총 6개 정점을 선정하여 2006년 하계(강우 이전 7월 25일, 강우 이후 8월 28일)에 각각 1회씩 실시하였다. 한편, AGP 조사를 위해 각 정점에서 채수한 현장수를 공시종 남조 *Microcystis aeruginosa* 배양계에 1/6, 2/6, 3/6씩 각각 첨가하고, 온도 25°C, 광조건 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (14 h: 10 h LD cycle)에서 11일간 배양하였다. 조사결과, 총질소는 중랑천과 중랑천과 청계천의 합류부에서 높았는데, 특히 후자는 강우 전후 각각 14.4, 18.5 mg L^{-1} 를 기록하며 가장 높았다. 총인 역시 중랑천과 중랑천과 청계천의 합류부에서 높았는데, 총질소의 경우와 같이 정점 4의 총인은 강우 전후 각각 1.1, 1.3 mg L^{-1} 를 기록하며 가장 높았다. 엽록소-a는 강우 후에는 중랑하수처리장 방류지점을 포함하고 있는 청계천과 중랑천의 합류부인 정점 4에서 매우 높았으며 가장 우점한 조류는 *Cyclotella* sp.로 조사되었다. 현장수에 대한 AGP 조사결과, 강우 전에는 대조구에 비해 모든 정점에서 높은 성장을 보였으나, 강우 후에는 대조구에 비해 전반적으로 낮은 성장을 나타냈다. 다만, 강우 후에는 현장수 첨가량이 증가함에 따라 대조구와 큰 차이를 보이지 않았는데 이는 강우에 의한 영양물질의 증가가 원인인 것으로 판단되었다. 따라서 청계천을 포함한 조사하천들은 평상시에는 비교적 안정된 생태계를 유지하고 있으나 집중강우시 영양물질 유입으로 인한 하류의 조류번식 가능성이 우려되며, 특히 중랑천의 수질 개선이 시급한 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 2004년 한국학술진흥재단의 지원(KRF-

2004-050-C00018)에 의하여 수행되었으며, 실험을 도와 주신 김우미, 윤보람, 김보열 님들께 진심으로 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 김갑수. 2005. 청계천의 환경과 생태, 대한토목학회지 **53**: 111-116.
- 김백호, 한명수. 2005. 청계천 생태기능 복원의 가치와 부착조류에 의한 수질 및 생태계 관리, 원광대 환경과학연구지 **13**: 37-42.
- 김숙진. 2006. 생태환경 공간의 생산과 그 혼종성(hybridity)에 대한 분석: 청계천 복원을 사례로, 한국도시지리학회지 **9**: 113-124.
- 김용재, 김명운, 김상중. 1998. 한강 중·하류에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성, 한국조류학회지 **13**: 331-338.
- 김재욱, 이동근, 오규식, 성현찬. 2003. 하천 및 늪지와 온도의 관계에 대한 기초적 연구, 한국환경복원녹화기술학회지 **6**: 79-85.
- 김혜주. 2004. 청계천 수질 및 생태모니터링. 청계천 유역 물순환 해석 국제심포지움. 2004. 3. 9. 서울프레스센터.
- 배경석, 김교봉, 김혜경, 유병태, 김민영. 2002. 중랑천의 어류상과 어류군집 구조의 장기 변동, 육수지 **35**: 63-70.
- 서울시정개발연구원 보고서. 2006. 서울시 도시하천의 생태통로 기능향상 방안: 청계천을 중심으로. 서울시정개발연구원. 118pp.
- 서정관, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 낙동강 수계 하·폐수처리시설의 방류수가 조류 성장 잠재력에 미치는 영향, 한국조류학회지 **18**: 157-167.
- 신재기, 조경제. 1999. 낙동강에서 AGP에 의한 수질평가, 육수지 **32**: 349-357.
- 신재기, 황순진. 2003. 평택호와 유역 하천에서 조류성장잠재력측정, 육수지 **36**: 172-180.
- 위인선, 나철호, 이종빈, 주현수. 1997. 조류생산잠재력조사 방법개발에 의한 육수환경의 부영양화 방지대책에 관한 연구(I): 순수분리종의 형태 및 증식특성, 한국환경위생학회지 **23**: 18-27.
- 위인선, 이종빈, 주현수. 1991. 주암댐 및 이사천댐 유역의 조류생산 잠재력 조사에 관한 연구, 환경생물 **9**: 104-112.
- 윤병만. 2005. 청계천 하도의 수리특성 및 홍수소통 능력, 대한토목학회지 **53**: 134-139.
- 이영근, 엄향희, 남재철, 이부용. 2004. 2004년 3월 청정한 9일 동안 청계천 주변 증발량 관측, 한국기상학회지 **40**: 741-749.
- 이인근. 2005. 청계천 복원사업, 대한토목학회지 **53**: 117-126.
- 이재성, 박두현, 이대식, 정지형. 2001. 한강수계에서의 녹조류 현황조사에 관한 연구, 한국환경분석학회지 **4**: 41-47.
- 이학동. 1976. 오수생물학적 지표생물에 의한 청계천의 오염도

- 에 대한 연구, *육수지* **9**: 49-53.
- 이혜숙, 박석순. 2005. 합류식 하수관거 월류수 유입 기간 동안에 나타나는 청계천 수질 변화 모델 연구, *대한환경공학회지* **27**: 1340-1346.
- 정승원, 이진환, 유종수. 2003. 한강하류의 환경학적 연구. V. 식물플랑크톤의 군집 대발생의 특징, *한국조류학회지* **18**: 255-262.
- 정 준. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적, 서울. 496pp.
- 조명래. 2005. 청계천 복원의 성과와 한계, *대한토목학회지* **53**: 140-155.
- 한경남. 1980. 수질지표를 이용한 청계천의 수질평가, *대한보건의학회지* **6**: 59-65.
- 황순진, 유경아, 신재기. 2006. 낙동강 수계 대형 인공호 및 하천본류의 조류성장 잠재력 비교, *육수지* **39**: 138-144.
- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- Hirose, H., M. Akiyama, T. Iriya, K. Imahori, H. Kasaki, K. Tsumura, M. Hirano and T. Yamagishi, 1981. Illustrations of the Japanese freshwater algae, Uchidarockakuho Publishing Co., Tokyo, 931.
- Geis, S.W., K.L. Fleming, E.T. Korthals, G. Searle, L. Reynolds and D.A. Karner. 2000. Modifications to the algal growth inhibition test for use as a regulatory assay. *Environ. Toxicol. Chem.* **19**: 36-41.
- Lehmusluoto, P.O. 1978. Some aspects on the classification of natural waters by algal assays (AGP), prelude. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 437-440.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Lowe, R.L. 1974. Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms. EPA-670/4-74-005.
- Maloney, T.E., W.E. Miller and N.L. Blind. 1973. Use of algal assays in studying eutrophication problems. Proceedings: Advances in Water Pollution Research 6th International Conference. Pergamon Press, Oxford & New York. p. 205-214.
- Miller, W.E., T.E. Maloney and J.C. Greene. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Wat. Res.* **8**: 667-679.
- Nyholm, N. and T. Källqvist. 1989. Methods for growth inhibition toxicity tests with freshwater algae. *Environ. Toxicol. Chem.* **8**: 689-703.
- Payne, A.G. 1975. Responses of the three test algae of the algal assay procedure: Bottle test. *Wat. Res.* **9**: 437-445.
- Stoermer, E.F., J.A. Wolin, C.L. Schelske and D.J. Conley. 1985. An assessment of ecological changes during the recent history of Lake Ontario based on siliceous algal microfossils preserved in the sediments. *J. Phycol.* **21**: 257-276.
- Weyers, A., B. Sokull-Klüttgen, J. Baraibar-Fentanes and G. Vollmer. 2000. Acute toxicity data: a comprehensive comparison of results of fish, *Daphnia*, and algae tests with new substances notified in the European Union. *Environ. Toxicol. Chem.* **19**: 1931-1933.
- Wong, S.L. 1995. 'Algal assay approaches to pollution studies in aquatic systems', in B.C. Rana (ed.), *Pollution and Biomonitoring*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi, p. 26-51.

(Manuscript received 7 March 2007,
Revision accepted 15 May 2007)