

한강 하류에서 환경요인의 변동과 식물플랑크톤의 군집 동태

서 미 연* · 김 백 호¹ · 배 경 석

(서울시 보건환경연구원 수환경생태팀, ¹한양대학교 생명과학과)

Fluctuation of Environmental Factors and Dynamics of Phytoplankton Communities in Lower Part of the Han River. Suh, Mi-Yeon*, Baik-Ho Kim¹ and Kyung-Seok Bae (Seoul Metropolitan Government, Research Institute of Public Health and Environment, 427-070, Korea; ¹Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

Concentrative samplings of 35 times on standing crops of phytoplankton and physicochemical factors were conducted at five sites over Seongsu Bridge to Seongsan Bridge in lower parts of the Han River from January to December 2006. Over the study, all physicochemical factors showed no large differences among the sampling sites except station 2 having high concentrations of BOD, TN, and TP. Heavy rain also cause these concentrations to decrease. The phytoplankton species and abundance (88 taxa and 1~41,104 cells mL⁻¹) were varied according to the season, and sharply decreased during heavy rains. In particular, cyanobacteria dominated the phytoplankton community during dry seasons, while green algae and diatom dominated during the rainy seasons. However, after the termination of rain, high water temperatures over 20°C and low N/P ratios (9.4~18.9) evoked the cyanobacterial bloom. These results indicate that although the heavy rain (huge outflows of Paltang Dam) temporarily diluted the nutrient level and effected the cyanobacterial bloom in the lower parts of the Han River, cyanobacterial abundance was recovered by the high temperature and low N/P ratio as the rainfall discontinued.

Key words : phytoplankton, heavy rain, cyanobacterial bloom, N/P ratio

서 론

우리나라는 연평균 1,344.3 mm의 강우가 풍수기인 6월과 9월 사이에 장마전선, 고온 다습한 해양성 기후, 태풍 등에 의해 집중호우로 내리며, 지면경사가 높아 이들의 약 60% 이상이 단시간 내에 바다로 유입되기 때문에 하천만으로는 수자원 수요 증대에 대응할 수가 없어 인공호를 건설하여 공급하고 있다. 한강도 여러 곳에 댐을 설치하여 호수형 하천이라 할 수 있는데, 현재 취수하는 물은 대부분 직접 호수에서 취수하거나 저수지에 저류하

였던 물을 방류하여 하류에서 취수하므로 수자원은 궁극적으로 거의 호수에 의존하고 있으며 저수지의 수질은 전체 수자원의 수질에 직접적인 영향을 미치게 되었다.

한강은 지리적으로 한반도 중심부에 위치하여 있고 서울시를 동서로 관통하며 총 유로 연장이 481.7 km, 유역면적이 26,018 km²으로서, 서울 및 수도권 지역의 상수원으로 중요한 역할을 하는 하천이다. 또한 수도권 시민들에게 쾌적한 휴식 및 레저공간의 제공, 철새 도래지 등 생태학적으로도 그 가치가 매우 높기 때문에 지속가능한 수자원의 보호 및 관리가 요구되고 있지만, 한강의 수서생태계는 하계에 편중된 강우(몬순)에 의해 심한 생태계

* Corresponding author: Tel: (02) 570-3387, Fax: (02) 570-3388, E-mail: mysuh55@hanmail.net

교란을 받고 있다(박 등, 2002). 한강은 1982~1986년까지 실시한 한강종합개발사업이 완료된 이후, 수질은 점차 개선되고 있으나(Park *et al.*, 1992), 회복속도가 매우 느리고 하천 수로 내 수중보, 교각 등 시설물의 증가로 정체수역이 발생하여 국지적 수질오염이 심하며, 이로 인한 하류 수역의 영양염 농도가 계속하여 증가하기 때문에 조류 대발생 가능성이 매우 높다(서울시, 1998).

호소나 하천 등이 부영양화 될 경우 가장 문제가 되는 것은 1차 생산자의 역할을 담당하고 있는 조류 특히 식물플랑크톤의 대량 증식현상이다. 국내의 크고 작은 많은 호소나 하천에서도 1990년대 이후 부영양화로 인한 조류의 대량 증식현상이 담수적조나 녹조현상 등으로 가지화되고 있어 이에 대한 관리대책이 시급하다(최, 1990).

호소나 하천의 부영양화가 심화되면 앞서 언급한대로 녹조현상과 같은 미세조류가 대량 발생하여 수체 중에 집적되어 이용상의 문제를 유발하게 된다. 우리나라 녹조현상의 경우 여러 문제들 중에서 이취미 문제와 더불어 유독 남조류에 의한 동물과 인체에 유해한 독성물질의 생산이 최근 가장 큰 관심의 대상이 되고 있다. 또한 조류의 발생현상도 일률적인 패턴으로 나타나는 것은 아니며, 하천이나 호소에 따라 계절천이, 우점종, 증식정도가 다르게 나타난다. 따라서 부영양 하천의 수질 관리 및 개선을 위해서는 그 하천의 특성과 조류 발생 특성에 대한 조사가 우선적으로 이루어져야 한다(박 등, 2000).

한편, 한강유역에 대한 연구는 팔당호를 포함하여 주로 중, 상류 지역에서 집중적인 연구가 수행되었으나(이, 1985; Cho *et al.*, 1989; 김과 김, 1990; 한 등, 1993; 한 등, 1995; 박 등, 2000) 상대적으로 하류에 대한 연구는 빈약하며 특히, 중, 하류에서 유입되는 점, 비점오염원과 하류로 직접 유입되는 유기오염원에 따른 식물플랑크톤의 거동에 대한 조사가 미흡한 실정이다. 특히 2005년 청계천 복원 이후 보다 많은 시민들의 친수공간 확보를 위한 효율적인 수자원 이용 및 관리면에서도 조류발생 현황을 파악하고 연구하는 것은 매우 시기 적절하다 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 한강하류 지역인 성수대교~성산대교 구간을 대상으로 환경요인에 따른 식물플랑크톤의 발생현황 및 그 영향 요인에 대해 조사하여 남조류 발생양상 및 계절적 변동을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사기간

조사지점은 성수대교부터 성산대교까지 총 5개 대교의

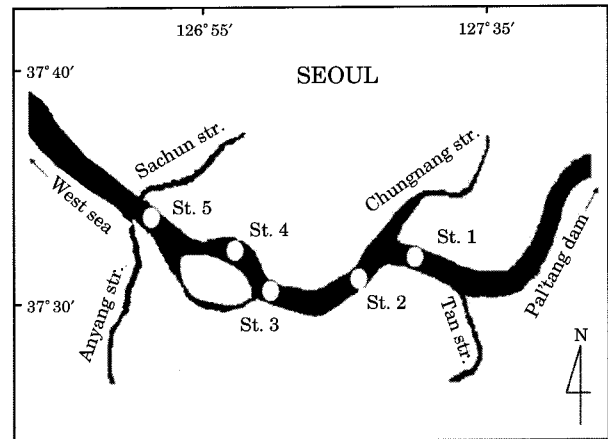


Fig. 1. The water sampling sites in the lower part of Han River from January to December 2006.

중심부를 선정하였으며 위치는 다음과 같다. St. 1은 성동구 성수동에서 강남구 압구정동을 잇는 성수대교, St. 2는 용산구 한남동에서 강남구 신사동을 연결하는 한남대교, St. 3은 용산구 한강로 3가에서 동작구 본동까지 연결되는 한강대교, St. 4는 마포구 도화동부터 영등포구 여의도동을 연결하는 마포대교, St. 5는 마포구 망원동에서 영등포구 양평동을 잇는 성산대교 등 총 5개 지점이다(Fig. 1). 시료채수는 한강사업본부에서 운영하는 선박을 이용하여 하폭 중심부에서 표층수(50 cm)를 채수하였다. 조사기간 동안 한강 유역 강수량은 기상청 자료를 이용하였으며 팔당댐 방류량은 (주)한국수력원자력의 자료를 참고하였다. 조사기간은 2006년 1월부터 12월까지 월별로 1~4회씩 식물플랑크톤 및 기초 환경조사를 실시하였으며, 8월에는 집중호우로 수질이 안정되지 않아 제외하였다.

2. 현장조사 및 환경요인 분석

현장의 수온, pH, Conductivity, 용존산소 측정은 선상에서 Portable multiparameter를 이용하여 직접 측정하였다(YSI, 600QS-O-M, USA). 영양염 분석을 위한 시료는 5 L Van Dorn 채수기를 이용하여 채수후 4 L 폴리에틸렌 채수통에 시료를 넣고 ice box에 담아 실험실로 운반한 후 수질오염공정시험방법(환경부, 2004)에 준하여 분석하였다. 생물학적산소요구량(BOD)은 윙클러-아지드화나트륨 변법으로 20°C에서 5일간 소비되는 산소량을 BOD₅로 정량 하였고, 총질소(TN)는 알칼리성 과황산칼륨의 존재하에 120°C에서 유기물과 함께 분해하여 질산이온으로 산화시킨 다음 산성에서 자외부 흡광도를 측정

하여 정량하는 자외선 흡광광도법을 이용하였으며, 총인 (TP)은 시료중의 유기물을 산화 분해하여 모든 인 화합물을 인산염 (PO₄) 형태로 변화시킨 다음 인산염을 아스코르빈산환원 흡광광도법을 이용하여 UV/Visible Spectrophotometer (Thermo, evolution 500, 2005)로 정량하였다. 클로로필 *a*는 Algae Online Analyzer (AOA) (bbe, Germany, 2002)를 이용하여 측정하였다.

3. 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤의 계수는 5 L Van Dorn 채수기로 표층수를 채수한 후, 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 시료를 넣고 현장에서 Lugol's 용액으로 고정하여 실험실에서 운반하였다. 식물플랑크톤 현존량은 세포밀도를 고려하여 잘 혼합한 다음 광학현미경 (Axioskop, Zeiss, Germany) 200~400배 하에서 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 계수하였다. 각 출현종의 현존량을 기본 자료로 하여 Shannon-Weaver (1963)의 종다양성 지수, Simpson (1949)의 우점도 지수를 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 환경요인의 변화

조사기간 동안 한강유역의 강수량은 최저 11.1 mm (9월)에서 최고 1,014 mm (7월)로써 총 1681.9 mm의 강수량을 나타냈으며 (Fig. 2), 최근 7년간의 강수량을 살펴보면 5월~8월 사이에 총 강수량의 57.6~86.8%를 차지하였다. 조사기간 중 팔당댐의 방류량은 최저 129.9 m³ sec⁻¹ (2월)에서 최고 4579.3 m³ sec⁻¹ (7월)로써 강우가 집

중되었던 5월부터 8월까지 방류량이 급격히 증가하여 평균 389.1~952.2 m³ sec⁻¹로 방류하였다 (Fig. 2). 하천 및 호소와 같은 담수생태계는 대개 강수에 의한 유입량, 수체의 흐름 및 방류 등에 의해 생태계의 특성이 결정되는데 (Carmack, 1979), 특히 한강하류의 경우, 강우 집중 시기에 팔당댐의 방류량 및 서울시를 중심으로 하는 주변 도시로부터 유입되는 비점오염원에 의한 높은 방류량에 의해 수온 및 수중 내 화학물질의 감소현상이 뚜렷하다 (최, 1990).

한강하류 유역의 이화학적 변동은 다음과 같다 (Fig. 3). 수온 및 용존산소는 계절성이 뚜렷하였다. 수온은 최저 2.5°C (1월 St. 1)에서 최고 26.1°C (6월 St. 4)의 범위로 전형적인 온대지역의 수온분포를 나타냈다. 용존산소 농도는 최저 4.7 mg L⁻¹ (10월 St. 4)~16.3 mg L⁻¹ (1월 St. 1)의 범위로, 남조류의 현존량이 높은 10월에 가장 낮은 농도를 나타냈고, 대기온도가 감소하는 겨울철에 높아지는 경향을 보였으며, 수온과 상반된 결과의 높은 상관성을 나타내었다. pH의 변화는 탄소원 (H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻)의 변화와 관련이 있어서 하계의 경우 식물플랑크톤이 광합성에 필요한 용존 HCO₃⁻를 흡수함으로써 pH가 높아진다 (김과 김, 2004). 조사기간 동안 pH는 남조류의 현존량이 높은 10월에 모든 지점에서 비교적 높은 값을 나타내었는데 이는 *Anabaena* sp.와 *Phormidium* sp. 등 남조류의 활발한 광합성에 의한 것으로 판단된다. pH는 최저 7.4 (10월 St. 5)에서 최고 10.6 (10월 St. 1)의 범위로, St. 1 지점이 비교적 높고 St. 5 지점이 가장 낮은 것으로 조사되었다. BOD는 최저 0.5 mg L⁻¹ (6월 St. 4, 9월 St. 1)에서 최고 15.6 mg L⁻¹ (6, 9월 St. 2)로써 강우기에는 낮은 농도를 보였으며, 수리학적 체류시간이 길어지는 겨울~봄 (갈수기)에 비교적 높은 농도를 나타냈다. 지점별 변동을 살펴보면, St. 2가 연평균 5.3 mg L⁻¹로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 조사수역에서 가장 하류인 St. 5가 연중 비교적 낮은 농도를 보였다. 이전의 서 등 (2005)의 연구에서 조사된 한강하류의 BOD 농도 (0.7~10.7 mg L⁻¹)와 비교해 볼 때 현저하게 높아진 것을 알 수 있었으며, 특히 St. 2 지점의 BOD 농도는 다른 지점에 비해 연중 높은 농도를 나타내, 수질환경보전법 하천수 생활환경 기준의 매우나쁨 (very poor) 상태로써 심각한 오염수준을 보이고 있는 것으로 조사되었다. 이는 중랑천에서 유입되는 수질의 영향을 받는 것으로 판단되며, 중랑천 본류의 수질과 하수처리장 방류수 수질의 특별한 관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 전기전도도 (Conductivity)는 전해질의 농도를 쉽게 파악할 수 있는 항목으로 127 µm cm⁻¹ (6월 St. 1)~487 µm cm⁻¹ (6월 St. 2) 범위로써 봄

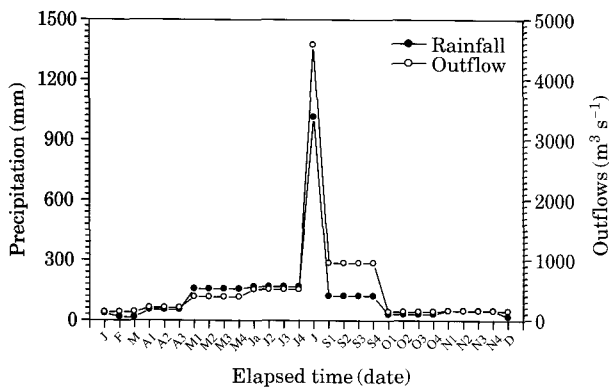


Fig. 2. Precipitation in the lower part of Han River and outflow from Pal'tang Dam from January to December 2006.

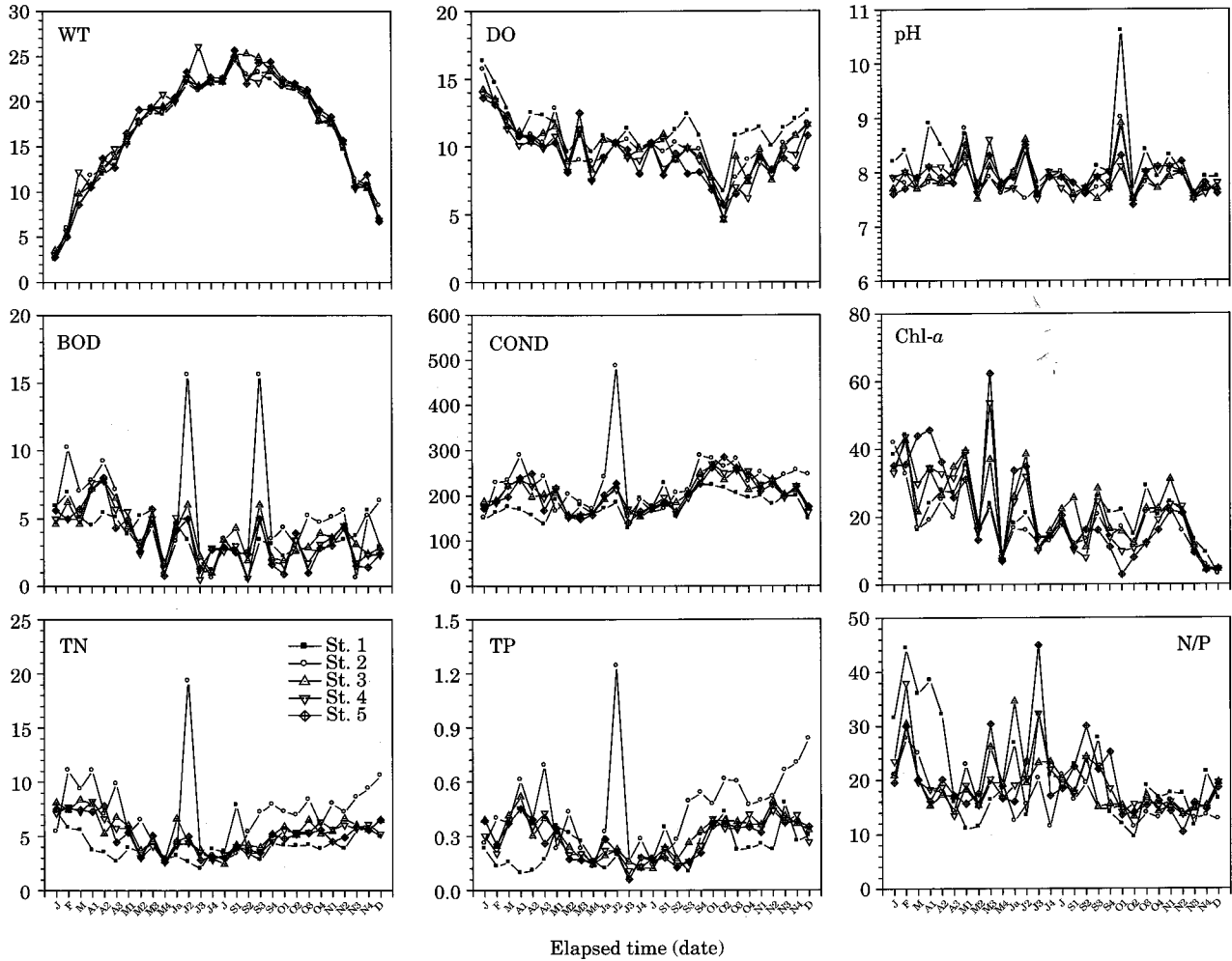


Fig. 3. Water temperature (WT, °C), dissolved oxygen (DO, mg L⁻¹), pH, biochemical oxygen demand (BOD, mg L⁻¹), conductivity ($\mu\text{m cm}^{-1}$), chlorophyll *a* (Chl-*a*, mg m⁻³), total nitrogen (mg L⁻¹), total phosphorus (mg L⁻¹) and N/P ratios in the lower part of Han River from January to December 2006.

과 가을보다 식물플랑크톤 출현종수가 풍부하였던 여름에 낮은 경향을 보였다.

총인은 최저 0.062 mg L⁻¹ (6월 St. 1)~최고 1.244 mg L⁻¹ (12월 St. 2)의 범위로 연중 St. 2 지점(년평균 0.456 mg L⁻¹)이 가장 높았던 것으로 조사되었다. 총인은 부영양화를 일으키는 중요한 수질 오염원으로 특히 남조류는 영양염류 중에서 인이나 질소의 농도에 따라 생장이나 종의 구성이 결정된다(국립환경연구원, 1997). 총질소는 1.992 mg L⁻¹ (6월 St. 1)~19.344 mg L⁻¹ (6월 St. 2)였으며 총인과 마찬가지로 St. 2 지점이 연중 가장 높은 농도(연평균 0.705 mg L⁻¹)를 나타냈다. 또한 조사기간 중의 총인 및 총질소는 5월부터 12월까지 서로 비슷한 경향을 보였고 집중 강우가 있었던 6월과 7월에 낮은 농도를 나

타냈는데, 이와 같은 결과는 이전의 서 등(2005)의 연구에서 제시하였던 한강수계의 질소와 인 성분은 강우에 의해 큰 영향을 받으며, 남조류의 현존량에 영향을 준다는 결과와 일치하였다. 조사기간 동안 클로로필 *a*는 2.8 mg m⁻³ (12월 St. 1)~62.2 mg m⁻³ (4월 St. 5) 범위로 시기에 따라 농도차가 컸으나 지점간에는 변동이 크지 않은 것으로 나타났다. 강우가 있는 후 클로로필 *a* 농도는 12월까지 감소하는 경향을 나타냈는데 이와 같은 현상은 댐의 수문조작과 강우에 의해 영양염의 희석과 함께 물의 흐름이 빨라지면서 수중에 존재하던 조류가 쓸려내려가 증식하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 또한 강우량이 적었던 시기인 11월에 다소 높아지는 경향을 나타냈지만 그 변동폭은 크지 않은 것으로 조사되었다.

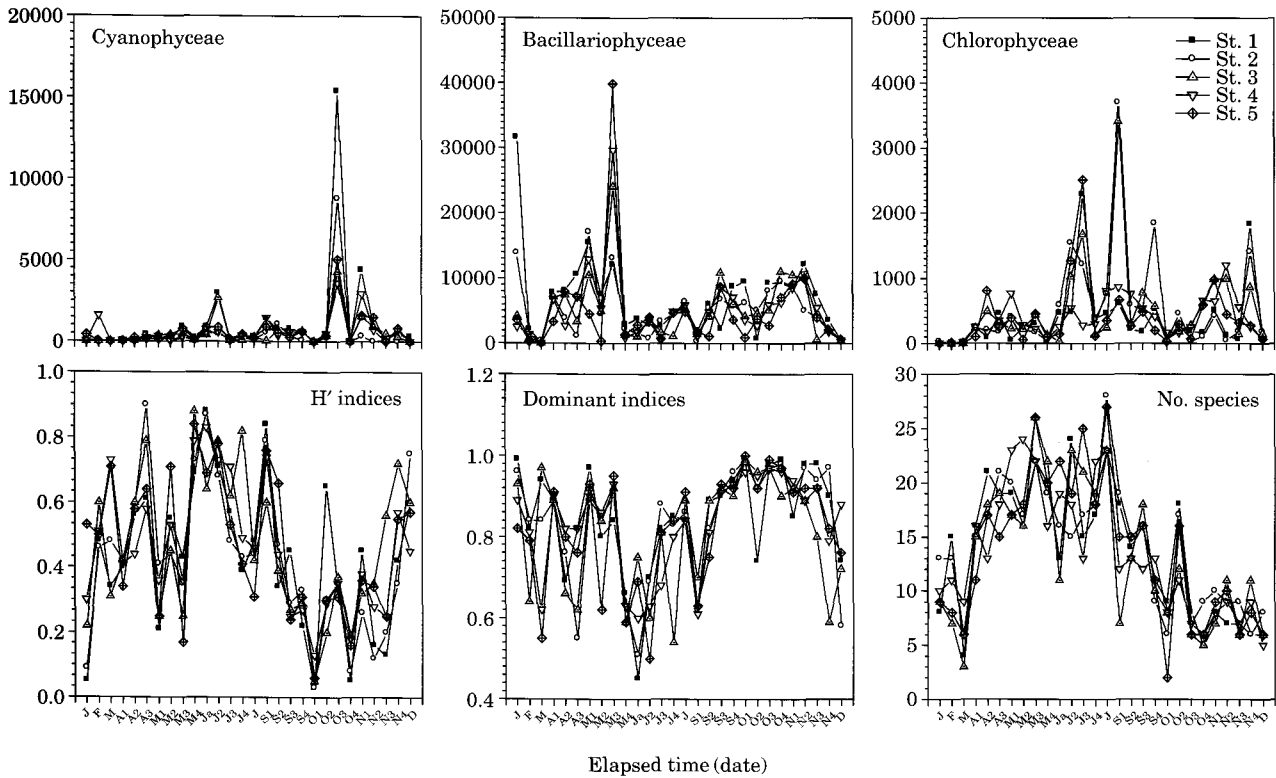


Fig. 4. Standing crops in each phytoplankton class, community indices and number of species in five sampling stations in the lower part of Han River from January to December 2006.

2. 식물플랑크톤의 변화

수중 생태계에서 식물플랑크톤의 종조성이나 현존량은 수중환경에 따라 변화하기 때문에 수질을 판정하는 지표로 활용되고 있다(Harper, 1992). 조사지역 5개 지점에서 식물플랑크톤은 총 88종이 동정되었으며 강별 출현종수는 남조류 6종, 규조류 31종, 녹조류 46종, 갈색편모조류 1종, 와편모조류 3종, 황금조류 1종이 동정되었다(Fig. 4). 월별 변동을 살펴보면 3월과 12월에 가장 낮고 강우가 가장 많았던 7월에 St. 2 지점에서 녹조류 16종, 규조류 11종, 남조류 1종, 총 28종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 총현존량에서도 3월과 12월이 가장 낮았고 5월에 St. 5 지점에서 *Cyclotella* sp.의 우점으로 총 41,104 cells mL⁻¹이 출현하여 가장 많은 현존량이 조사되었다(Fig. 5). 조사기간동안 남조류, 규조류, 녹조류는 서로 다른 경향을 나타냈는데 남조류 총 세포수는 0~15,410 cells mL⁻¹(10월 St. 1)의 범위로 계절에 따라 큰 변동을 나타냈다(Fig. 4).

남조류는 4월부터 *Phormidium* sp.이 조금씩 출현하기 시작하여 갈수가 지속되는 10월에는 주요 우점종이

Anabaena sp.로 천이되면서 가장 많은 현존량을 나타내 남조류 대발생이 일어났으며 따라서 이 시기에 서울시에서는 한강 하류지역(성수대교~성산대교)에 9일간 조류주의보를 발령하기도 하였다. 반면 정 등(2003)의 조사에 의하면 한강하류는 부영양화 수역이지만 수온이 상승하는 여름철 몬순기후에 따라 집중강우에 의한 유량의 짧은 체류시간으로 남조류의 수화에 크게 영향을 미치지 못한다는 결론을 제시하였지만 이전의 서 등(2005)의 연구에서 강우가 있는 시기에는 남조류가 현저히 감소하더라도 강우가 끝나는 시점에서 수온이 20°C 이상 지속되면 급격한 남조 대발생을 야기할 수 있다는 결과가 본 연구와 일치하였다. 또한 남조류 성장이 정체되는 것은 수온뿐만 아니라 일사량 부족과도 관련이 있으며(김 등, 1999) 한강에서 남조류 발생도 및 우점도는 하천의 특성 때문에 강우에 의해 그리고 그에 따른 수문조작에 의해서도 많은 영향을 받는다고 하였다(박 등, 2000). 한강에서 남조류 대발생 제어를 위한 수질관리대책 수립시 이러한 점이 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다. 특히 *Anabaena*속은 Anatoxin이라고 하는 신경독소를 내는 종으로 알려져 있어(Codd, 1995) 이 종이 우점하여 수화

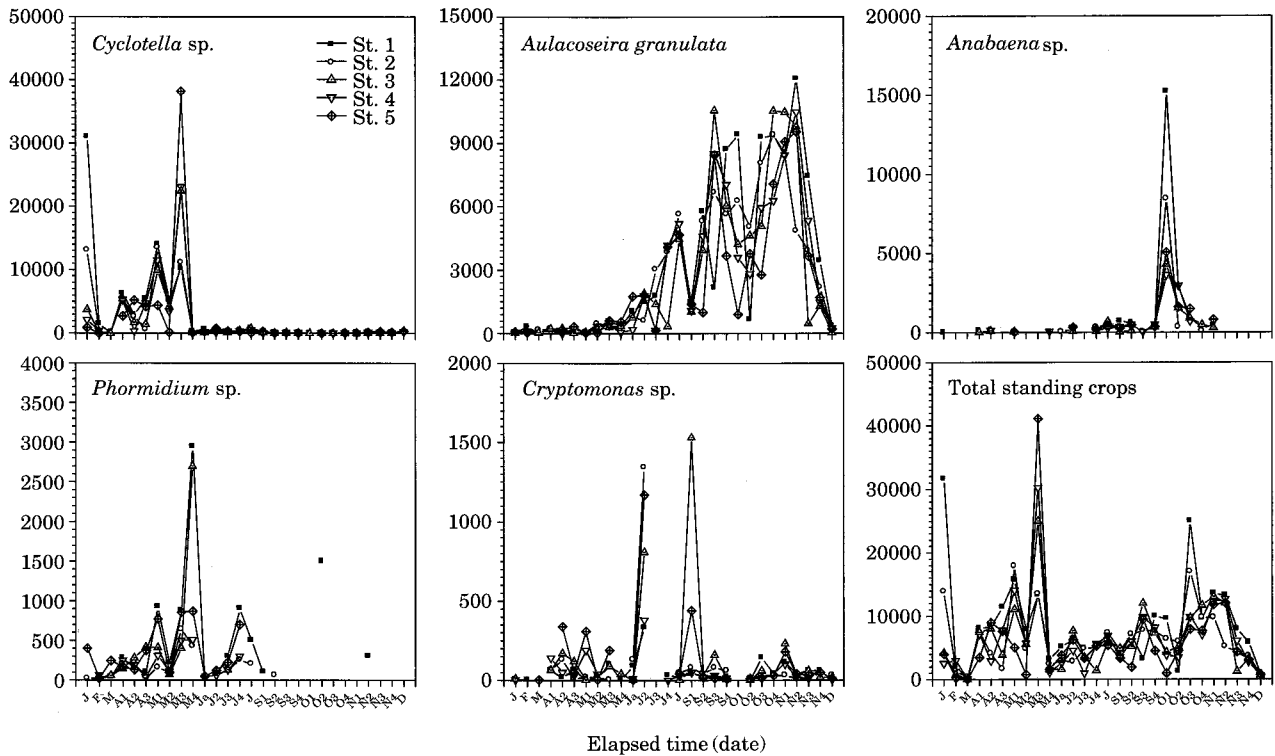


Fig. 5. Total standing crops and dominant phytoplankton standing crops in five sampling stations in the lower part of Han River from January to December 2006.

현상(water bloom)을 일으킬 경우 직접적인 접촉으로 인해 인체에 가려움증을 수반한 피부염이나 심한 경우에는 화상과 같은 증상이 나타나므로(Moore, 1984), 이러한 시기에는 수영, 낚시, 수상스키 등과 같은 친수활동을 제어해야 할 것으로 사료된다.

남조류 발생과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 보고되고 있는 질소/인 비와 수온과의 관계를 살펴보면 Stockner and Shotreed (1988)는 남조류가 수온이 20°C 이상이고 인이 충분히 공급되며 질소/인 비가 낮은 조건 하에서 나타나는 것으로 보고하고 있으며 또한 Smith (1986)는 표층의 총질소/총인 비가 29보다 작을 때 남조류가 우점종이 되고 남조류의 현존량은 온도와 양의 상관관계를 보인다고 보고하였다.

한강하류 지점의 질소/인 비는 조사기간 동안에 1~4월에 St. 1, 2월 St. 3, 4, 5와 5월 St. 5, 6월 St. 3, 4, 5를 제외한 모든 지점에서 Smith(1986)가 언급한 29보다 낮은 값을 나타내어(Fig. 3) 남조류가 우점하기에 적절한 조건인 것으로 조사되었다. 또한 남조류가 우점하기 시작 하였던 6월에는 수온이 19.9~26.1°C였으며 이때의 질소/인의 비는 11.4~44.9 범위였다. 그러나 남조류 대발생을

일으켰던 10월에는 수온이 6월보다 낮은 조건(17.6~22.5°C)이었음에도 불구하고 질소/인의 비가 가장 낮게(9.4~18.9) 나타나 남조류 대발생에 다소 기여했을 것으로 사료됨으로써 한강하류에서 남조류의 출현양상은 온도와 의 관계도 중요하지만 질소/인의 비에도 영향을 받는 것으로 판단되었다. 다만, 6월의 경우 10월보다 유입 유량이 많고 강우량에 의한 수리학적요인과 다른 인자에도 영향이 있었을 것으로 추후 종합적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

규조류는 1월에 *Cyclotella* sp.에 의한 높은 현존량을 나타냈고, 이후 3월에 서서히 증가하여 5월에도 *Cyclotella* sp.의 현존량이 높은 peak를 보였다. 강우가 시작되는 6월부터는 출현종이 *Aulacoseira granulata*로 천이되면서 급격히 증가하여 11월까지 높은 현존량을 나타냈다(Fig. 5). 규조류 내에서는 *Cyclotella* sp. (38,200 cells mL⁻¹, 5월 St. 5)가 제1우점종이었으며 주로 봄철에 출현하였고, 제2우점종인 *Aulacoseira granulata* (12,040 cells mL⁻¹, 11월 St. 1)는 가을철에 발생량이 많았다. 이와 같은 결과는 팔당댐의 조사(2001~2003년)에서도 같은 양상을 보였다(국립환경연구원, 2004). Poulickova (1993)에

의하면 *Cyclotella*의 최대 성장온도는 5~15°C의 범위이고, *Aulacoseira granulata*는 25°C에서 최대 생장을 한다지만, 한강의 경우 건기인 겨울에 *Cyclotella*의 현존량이 높은 것은 다른 적정 환경요인이 유입되면 수온이 3°C 이하로 감소하여도 충분한 생장을 한다는 신(1998)의 보고와 일치하였다. 또한 *Aulacoseira granulata*는 한강수계에서 늦봄, 여름, 가을철에 주요 우점종으로 출현하였음을 보고하였고(유와 임, 1990), Lee and Yoon (1996)도 높은 빈도로 출현한다고 보고하였다. Hutchinson (1967)과 Stoermer *et al.* (1985)은 *Aulacoseira granulata*가 부영양호의 지표종으로서 수온의 영향을 크게 받지 않는 것으로 보고하였다. 그 외 주요 우점종으로는 *Fragillaria crotonensis*, *Asterionella formosa*, *Nitzschia sp.*, *Synedra acus* 등이 출현하였는데 이 종들은 주로 3월을 제외한 1월부터 6월까지 우점하는 양상을 보였다. Hutchinson (1967)은 *Asterionella sp.*가 온대지역의 부영양화 수역에서 출현하는 종이라 하였으며, Stoermer *et al.* (1985)은 봄철에 높은 증가율을 나타내는 것으로 보고하였다.

녹조류는 (Fig. 4) 1~3,700 cells mL⁻¹로 수온이 10°C 이상으로 높아지기 시작하는 4월부터 증가하여 6월 (St. 5)에는 제1우점종인 *Hormidium sp.* 2,360 cells mL⁻¹ (6월 St. 5), 9월에 제2우점종 *Eudorina elegans* 1,880 cells mL⁻¹ (St. 3)로 가장 많은 현존량을 나타냈다. 그 외 주요 우점종으로는 *Epipyxis utirculas*, *Ankistrodesmus falcatius*, *Scenedesmus quadricauda*가 출현하였다. 다른 조류나 이화학적 농도가 강우의 영향을 받아 희석되는 현상과 달리 녹조류는 집중호우가 있었던 시기에 출현발생량이 오히려 증가하는 경향을 나타내 강우나 댐 방류에 의한 물 흐름에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 녹조류는 남조류의 대발생을 야기하였던 10월에 현저한 감소를 제외하면 4월 봄부터 11월 늦가을까지 다양한 종들로 출현하였다.

갈색편모조류에 속하는 *Cryptomonas sp.*의 현존량은 녹조류의 출현양상과 마찬가지로 1~3월을 제외한 나머지 시기에는 지속적으로 출현하여, 9월 (St. 3)에 가장 많은 현존량(1,530 cells mL⁻¹)이 조사되었다 (Fig. 5). *Cryptomonas*는 이취미 원인 조류로서 앞으로도 계속해서 출현경향을 관찰할 필요가 있는 속이다 (국립환경연구원, 2004).

일반적으로 부영양화 된 호소에서 나타나는 식물플랑크톤의 계절적 천이는 소형 편모조류(겨울), 규조류(봄), 녹조류(늦봄), 남조류(여름, 초가을), 규조류(가을)의 주기성을 보인다고 하였다 (Wetzel, 1983; Reynolds, 1984). 본 조사기간 동안 위와 같은 보고와 일치하는 식물플랑크톤

의 천이는 한강 하류가 부영양화 수역이며(정 등, 2003) 현재와 같은 수질이 계속된다면 해마다 반복되는 조류의 대발생 현상은 불가피할 것으로 판단되어진다.

우점도 지수는 1월에 St. 1지점이 0.99로 가장 높았고 6월에 St. 1에서 0.45로 가장 낮게 나타났다. 종다양도 지수는 10월에 St. 1지점에서 0.03으로 가장 낮고 4월에 St. 2에서 0.9로 가장 높은 종다양성을 보였다 (Fig. 4). 우점도 지수와 종다양도 지수는 지점간에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났지만 조사기간동안 특정종이 우점되는 시기에 종다양성은 낮아지는 군집지수의 특징을 잘 나타내주었다.

적 요

한강하류에서 환경요인에 따른 식물플랑크톤의 변화를 조사하기 위하여 2006년 1월부터 12월까지 총 35회 채수하여, 분석하고 동정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 환경요인의 변화에서는 모든 항목에서 지점간에 큰 차이가 없는 것으로 조사됐으나, BOD와 TN, TP 등에서 St. 2 지점이 높은 농도를 나타냈으며 집중 강우가 있었던 시기에 비교적 낮은 농도 분포를 나타냈다. 식물플랑크톤은 총 88종이 출현하였으며, 현존량은 1~41,104 cells mL⁻¹ 범위로써 계절과 조류종에 따라 변동이 큰 것으로 나타났다. 강별로는 남조류, 규조류, 녹조류가 서로 다른 경향을 나타냈는데, 남조류는 여름에서 가을로 접어드는 시기에 (5월~9월) 현존량이 낮은 반면, 녹조류와 규조류의 출현이 우세하였고, 특히 규조류 중 *Cyclotella sp.*는 주로 봄철에, *Aulacoseira granulata*는 가을철에 주요 우점종으로 출현하면서 하절기인 6월을 기점으로 종 천이가 일어났다. 강우기에 현저하게 감소하였던 남조류는 강우가 끝난 후 수온이 20°C 이상 지속되면서 질소/인 비가 가장 낮아지는 시기인 10월 (9.4~18.9)에 현존량이 급격하게 증가하여 대발생을 야기하였다. 주로 한강하류에서 식물플랑크톤의 천이가 일어날 수 있는 환경요인은 집중강우로 인한 팔당댐의 방류량과, 수온, 질소/인 비에 의해 영향을 받는 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 2004년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 (KRF-2004-050-C00018), 연구수행에 협조해 주신 서울시 보건환경연구원에 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 국립환경연구원. 1997. 상수원에서의 이취미 발생 원인 및 대책에 관한 연구(I). 106p.
- 국립환경연구원 한강물환경연구소. 2004. 팔당호의 식물플랑크톤 사진집.
- 김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산, 육수지 **23**: 167-179.
- 김범철, 김은경, 박호동, 전준균. 1999. 호수의 독성남조류. 동화기술. 32p.
- 김숙찬, 김한순. 2004. 영천댐의 식물플랑크톤 군집과 환경요인의 동태, *Algae* **19**: 227-234.
- 박성배, 이상균, 장광현, 정광석, 주기재. 2002. 장마기의 강우가 낙동강 하류(물금)수질에 미치는 영향, 육수지 **35**: 160-171.
- 박혜경, 정원화, 권오상, 류재근. 2000. 팔당호에서 남조류 및 남조류 생산 독성물질의 계절변동, *Algae* **15**: 29-35.
- 서미연, 김백호, 배경석, 한명수. 2005. 한강하류의 남조류 및 환경요인의 연간(2000~2003)변화에 대하여, 육수지 **38**: 315-321.
- 서울특별시. 1998. 한강생태계 조사연구.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 대학원 박사학위 논문.
- 유광일, 임병진. 1990. 한강하류계의 식물플랑크톤 군집과 수질 오염지표에 대하여, 육수지 **23**: 267-277.
- 이 경. 1985. 팔당댐 침수구역 식물플랑크톤의 수직 분포, 한국식물학회지 **29**: 117-127.
- 정승원, 이진환, 유종수. 2003. 한강하류의 환경학적 연구. V. 식물플랑크톤 군집 대발생의 특징, *Algae* **18**: 255-262.
- 최재범. 1990. 한강종합개발과 관련한 한강의 수질개선효과(보고), 한국하수도학회지 **1**: 38~44.
- 한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집구조와 변화, 육수지 **28**: 335-344.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재, 육수지 **26**: 141-149.
- 환경부. 2004. 수질오염공정시험방법.
- Carmack, E.C. 1979. Combined influence of inflow and lake temperature on spring circulation in a riverine lake. *J. Phy. Oceanogr.* **9**: 422-434.
- Cho, K.S., B.C. Kim, W.M. Heo and S.J. Cho. 1989. The succession of phytoplankton in Lake Soyang. *Kor. J. Limnol.* **22**: 179-189.
- Codd, G.A. 1995. Cyanobacteria toxins: Occurrence, properties and biological significance. *Water Sci. Tech.* **32**: 149-156.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwaters: principles, problems and restoration. Chapman & Hall, London. 327p.
- Hutchinson, G.E. 1967. A Treatise on Limnology. Vol. II. Introduction to lake biology and the limnoplankton. John Wiley and Sons, New York. 1115p.
- Lee, K. and S.K. Yoon. 1996. A study on the phytoplankton in the Paldang Dam Reservoir III. The changes of diatom community structure. *Algae* **11**: 277-283.
- Moore, R. 1984. Public health and toxins from marine blue-green algae, 369-376. In: "Seafood Toxins" E.P. Ragelis ed., *Amer. Chem. Soc.*, **114**: 7941-7942.
- Park, H.K., S.U. Cheon, S.I. Park, M.H. Lee and J.K. Ryu. 1992. Seasonal succession of phytoplankton in some artificial lakes of Korea. *J. KSWPRC* **8**: 150-158.
- Poulickova, A. 1993. Ecological study of seasonal maxima of centric diatoms. *Algol. Studies* **68**: 86-106.
- Reynolds, C.S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biol.* **14**: 111-114.
- Shannon, E. and W. Weaver. 1963. *The Mathematical Theory of Communication*. Illinois Univ. Press, Urbana. 177p.
- Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 1-688.
- Smith, W.H. 1986. Prediction the proportion of blue-green algae in lake phytoplankton. *Can. J. Fish. Aquatic Sci.* **43**: 148-153.
- Stockner, J.G. and K.S. Shortreed. 1988. Response of *Anabaena* and *Synechococcus* to manipulation of nitrogen: phosphorus ratios in a lake fertilization experiment. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 1348-1361.
- Stoermer, E.F., J.A. Wolin, C.I. Schelske and D.J. Conley. 1985. An assesment of ecological changes during the recent history of Lake Ontario based on siliceous algae microfossils preserved in the sediments. *J. Phycol.* **21**: 257-276.
- Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*. 2nd ed. Saunders Coll. Publ., Philadelphia. 767p.

(Manuscript received 13 April 2007,
Revision accepted 8 August 2007)