

한강 하류의 환경학적 연구 VIII. 식물플랑크톤 군집의 변화에 미치는 물리 화학적 요인

권 오 윤^{1,2} · 정 승 원^{3,4} · 이 진 환^{1,*}

(¹상명대학교 자연과학대학 생명화학시스템학부, ²국립환경과학원 한강물환경연구소
³한양대학교 자연과학대학 생명과학과, ⁴(주) 한국연안환경생태연구소)

Environmental Studies in the Lower Part of the Han River VIII. Physicochemical Factors Contributing to Variation of Phytoplankton Communities. *Kwon, Oh Youn^{1,2}, Seung Won Jung^{3,4} and Jin Hwan Lee^{1,*}* (¹Department of Life Science and Chemical System, Sangmyung University, Seoul 110-743, Korea; ²Present address: Han-River Environment Research Laboratory, NIER, Kyunggi Province 476-723, Korea; ³Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-743, Korea; ⁴Korea Institute of Coastal Ecology, Inc. Incheon 402-835, Korea)

To reveal physicochemical factors contributing to variation of phytoplankton communities, the study was carried out biweekly at 6 stations from Feb. 2004 to Feb. 2005 in the lower part of the Han River, Korea. As results, water temperature was changed from 0.3°C to 26.6°C, pH: 6.6~9.1, DO: 1.89~22.23 mg L⁻¹, BOD: 0.38~9.20 mg L⁻¹, COD: 1.4~15.2 mg L⁻¹, Conductivity: 62.5~500.0 μs cm⁻¹, SS: 3.00~159.3 mg L⁻¹, and Chl *a* 1.7~71.3 μg L⁻¹. Phytoplankton standing crops ranged from min. 3.6 × 10² cells mL⁻¹ (July 2004, St. 3) to max. 2.3 × 10⁴ cells mL⁻¹ (Feb. 2005, St. 6), and mean of those varied from 5.9 × 10³ cells mL⁻¹ in spring, 2.1 × 10³ cells mL⁻¹ in summer, 4.1 × 10³ cells mL⁻¹ in autumn and 8.5 × 10³ cells mL⁻¹ in winter, respectively. In order to investigate factors influencing the total phytoplankton standing crops a multiple regression analysis was adopted for the correlation between standing crops and environmental factors. The coefficient of determination (R²) value of the regression was 0.465, it showed that environmental factors which predominantly influenced phytoplankton standing crops were water temperature, COD, NO₂-N, PO₄-N, Discharge and pH. Six stations could be divided into 3 groups based on similarity index in terms of environmental factors. In ANOVA analysis for physicochemical and biological factors, water temperature, chlorophyll *a*, silicate, phytoplankton standing crops were the same group differed little from stations. However, Station 1 and 2 were grouped followed in dissolved oxygen, conductivity, COD, nitrite, nitrate, ammonia and phosphate, and Station 3, 4 and 5 were followed in dissolved oxygen, conductivity, pH and phosphate.

Key words : Han River, multivariate analysis, physicochemical factors, phytoplankton

* Corresponding author: Tel: 02) 2287-5152, Fax: 02) 394-9585, E-mail: jhlee@smu.ac.kr

서론

한강은 이천만명 이상의 상수원 및 휴식장소로 이용하는 국가 하천으로, 북한강과 남한강 및 경안천이 팔당호에서 합류하여 하류로 흐른다. 1980년대 이후부터 한강의 지리학적, 사회·보건학적 인식의 전환에 따라 수질 개선 및 휴식공원의 정비 등 지속적인 사업이 이루어지고 있다. 특히 수질과 직접적으로 연관되어 있는 식물플랑크톤에 대한 연구는 1990년대부터 팔당호를 포함한 중·상류지역에서 활발히 수행되어 왔으나(김과 김, 1990; 한 등, 1993; 한 등, 1995; 장과 전, 1996; 김, 1996; 박 등, 2000; 한 등, 2002; 박과 정, 2003; Hong *et al.*, 2002), 상대적으로 한강 하류역에서는 활발하지 않은 편이다(유와 임, 1990; 이와 장, 1997; 김 등, 1998; 정 등, 2003, 2004; 이와 정, 2004).

한강 하류역에서 초기의 식물플랑크톤 조사는 佐藤(1940) 및 정 등(1965)에 의해 종 분류가 시작되었으며, 정(1969)은 한강의 Microflora에 연구로 감소수역의 환경조건과 식물플랑크톤을, 정과 심(1969)은 기수역 유형에 관한 연구 중 식물플랑크톤을 조사하였다. 1970년대 이후로 식물플랑크톤군집의 종조성 뿐만 아니라 정량적인 조사를 실시하였고, 환경적인 요인을 이용하여 수질의 오염 정도와 수질 및 식물플랑크톤군집과의 연구가 시작되었다. 이(1977)는 한강 오염도에 따른 오수 생물학적 연구를, 심과 최(1978)는 식물플랑크톤군집의 우점종, 종다양성 지수, 정점 간 유사도 지수, 현존량 및 종조성에 관한 연구를 하였다. 연세대학교 열대의학연구소(1978)에서는 한강 상·중·하류의 생태학적 연구를 하였으며, 1980년대의 연구는 거의 없었다. 서울특별시(1990)는 한강 하류역에서 식물플랑크톤 생태학적 천이 양상 및 분포 특성을, 유와 임(1990)은 팔당호에서 행주대교까지의 연구에서 식물플랑크톤 군집과 수질오염지표성에 대하여 조사하였다. 또한 이와 장(1997)은 한강 하류역에서 갈수기의 식물플랑크톤 현존량과 우점종을, 정 등(2003)은 2001년 2월부터 2002년 2월까지 격주간격으로 한강 하류의 6개 정점에서 연간 식물플랑크톤 종 천이기작을 규명하였다. 정 등(2004)은 한강 하류역에서의 부영양화 요인을 통계적으로 해석하였으며, 이와 정(2004)은 70년대부터 30년간 장기간 식물플랑크톤군집의 천이 양상을 규명하였다.

그러나 한강하류역에서는 주로 일부 정점을 선택하여 계절별 천이양상 및 환경요인과의 관계를 규명하는데 주로 초점을 두었으나, 지류 및 하천의 유입 등 외부 유입

인자에 따른 식물플랑크톤 변화 양상에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 2004년 2월부터 2005년 2월까지 격주 간격으로 25회에 걸쳐 팔당대교부터 행주대교까지 6개 정점에서 식물플랑크톤 군집변화와 현존량의 변화에 미치는 영향을 통계적으로 규명하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사시기와 지역

본 연구는 2004년 2월 29일부터 2005년 2월 27일까지 격주 간격으로 팔당대교부터 행주대교사이에서 6개 정점을 선정하여 식물플랑크톤군집과 환경요인을 조사하였다. 정점 1은 팔당호의 수계에 직접적인 영향을 받고 있는 팔당대교 아래, 정점 2는 암사시민공원 수변 지구, 정점 3은 탄천의 영향을 받고 있는 영동대교 아래, 정점 4는 반포시민공원 수변 지구, 정점 5는 성산대교 아래, 정점 6은 안양천의 영향을 받는 행주대교 아래에 각각 선정하였다(Fig. 1).

2. 식물플랑크톤

식물플랑크톤의 조사는 시수 1L를 채수하여 4% 중성 포르말린으로 고정된 후 실험실로 운반하여 침전법에 의해 150~200 mL로 농축하여 공시재료로 하였다. 정량분석은 농축된 시료를 희석병에서 균일하게 희석한 후 1 mL를 취하여 Palmer Meloney 계수판에 넣고 광학현미경(Zeiss, Axioskope 40) 400배하에서 3회 계수한 후 평



Fig. 1. A map showing the sampling stations in the lower part of the Han River.

균치를 단위체적당 세포수로 환산하여 식물플랑크톤 현존량으로 하였다. 정성분석은 농축된 시료를 적당량 slide glass 위에 놓고 100~1,000배하에서 검경·동정하였으며, 미세조류는 주사전자현미경 (Jeol, JSM 5600LV)으로 동정하였다.

3. 환경요인

수온, pH, 전기전도도, 용존산소는 Portable T-S meter (YSI, model 85)와 pH meter (YSI, model 60)로 현장에서 측정하였고, BOD와 COD는 APHA (1995)에 따라 분석하였다. 부유물질은 사전에 여과지 (pore size: 0.45 μm , diameter: 47 mm)를 건조시켜 무게를 측정하고 시수 1L를 여과하여 105°C의 건조기에서 24시간동안 건조시킨 후 건조 중량을 0.1 mg까지 측정하여 최초 여과지의 무게를 뺀 값을 최종 농도로 하였다. 영양염류는 시수를 채수하여 얼음을 채운 아이스 박스에 보관한 후 실험실로 운반하여 여과지 (Millipore membrane, HA type, d=45 mm, pore size 0.45 μm)로 여과한 다음 자동 영양염류 분석기 (Alliance, Continuous Flow Manager)로 분석하였으며, chlorophyll a는 표층에서 시수 1L를 위와 같은 여과지로 여과하여 Wetzel and Linkens (1991)에 따라 농도를 측정하였다. 강수량과 팔당댐의 방류량 자료는 기상청 (www.kma.go.kr)과 한국수자원공사 (www.kowaco.or.kr)에서 얻었으며, 한강 본류로의 유입하천에 관한 자료는 물환경정보시스템 (www.water.nier.go.kr)에서 획득하였다.

4. 통계분석

생물학적인 요인과 환경요인과의 상관관계를 파악하기 위하여 Pearson 상관계수를 계산하였고, 조사정점 및 지류하천과 인근 조사정점간의 측정요인의 영향력을 파악하기 위하여 변량분석 (ANOVA)을 하였으며, 사후분석으로는 Duncan's test를 실시하였다. 또한 정점간 유사성을 파악하고자 유사도 분석을 실시하였다. 식물플랑크톤 현존량에 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 단계적 중회귀분석 (Stepwise Multiple Regression Analysis)을 실시하였으며, 각 변수의 다른 단위를 맞추기 위해 각 변수들을 표준화변수 (β)로 환산하였다. 이때 자료의 다중공선성 (Multicollinearity)의 문제를 피하기 위하여 독립변수 사이의 상관관계가 큰 요인들을 제외시켰다. 통계 처리는 SAS (Statistical Analysis System program, v 8.1)를 사용하였다.

결 과

1. 물리·화학적 환경요인

수온은 최저 0.3°C (2005년 1월 30일, 정점 1)에서 최고 26.6°C (2004년 8월 15일, 정점 6)로 평균 13.6°C를 보였으며, 월별 변화는 대기의 기온과 유사한 변화양상이었다. 정점간 평균 수온은 정점 1에서 12.3°C, 정점 2에서 13.0°C, 정점 3에서 13.7°C, 정점 4에서 14.0°C, 정점 5에서 13.7°C, 정점 6에서 14.7°C로 하류로 갈수록 높아지고 있었다. pH는 최저 6.61 (2004년 7월 21일, 정점 1)에서 최고 9.09 (2004년 3월 14일, 정점 1)까지 변화폭이 매우 컸으며, 평균 7.59이었다 (Fig. 2). 계절별로는 봄철에 평균 7.84로 가장 높았으며, 정점별 평균 변화는 정점 1과 2에서 각각 8.00, 7.68을 보였고, 정점 5와 6에서 각각 7.47과 7.32로 하류로 갈수록 낮아졌다. 전기전도도는 정점 1에서 112.3 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 였고 하류로 갈수록 높아져 정점 6에서 평균 259.3 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 약 2.3배 높았다. 용존산소량의 변화는 최저 1.89 mg L^{-1} (2004년 8월 15일, 정점 6)에서 최고 22.23 mg L^{-1} (2005년 2월 27일, 정점 2)까지 평균 8.64 mg L^{-1} 이었다. 계절별 변화는 여름철에 낮았고 겨울철에 높았다. 정점별로는 정점 1과 2에서 각각 평균 10.42 mg L^{-1} 와 10.47 mg L^{-1} 로 유사하였으나 하류로 갈수록 점차 낮아져 정점 6에서 평균 6.46 mg L^{-1} 를 보였다. 부유물질 농도는 최저 3.00 mg L^{-1} (2004년 12월 27일, 정점 1)에서 최고 159.33 mg L^{-1} (2004년 4월 11일)까지 변화폭이 매우 컸다. 정점별 농도는 정점 1에서 11.33 mg L^{-1} , 정점 2에서 17.10 mg L^{-1} , 정점 3에서 23.72 mg L^{-1} , 정점 4에서 27.40 mg L^{-1} , 정점 5에서 17.80 mg L^{-1} 으로 낮아졌다가 정점 6에서 31.84 mg L^{-1} 로 증가하여 전반적으로 하류로 갈수록 높아졌다. BOD는 최저 0.29 mg L^{-1} (2005년 1월 16일, 정점 1)에서 최고 9.20 mg L^{-1} (2004년 3월 14일, 정점 3)까지 변화폭이 컸으며, 평균 3.1 mg L^{-1} 였다. 월 평균 변화는 2004년 2월부터 5월까지 3.7~6.0 mg L^{-1} 으로 높은 농도를 보이다가 6월부터 이듬해 2월까지 2.4 mg L^{-1} 을 유지하고 있었다. 정점별 평균 변화는 정점 1에서 2.2 mg L^{-1} , 정점 2에서 2.5 mg L^{-1} , 정점 3에서 4.7 mg L^{-1} , 정점 4에서 3.5 mg L^{-1} , 정점 5에서 2.6 mg L^{-1} , 정점 6에서 3.4 mg L^{-1} 로 상류의 농도가 낮았다. COD는 최저 1.4 mg L^{-1} (2004년 5월 23일, 정점 1)에서 최고 15.2 mg L^{-1} (2004년 7월 5일, 정점 6)까지 변화폭이 컸으며, 평균 5.9 mg L^{-1} 였다. 월별 변화는 2004년 8월과 9월 중순, 10월 초순에 2.9~4.6 mg L^{-1} 으로 약

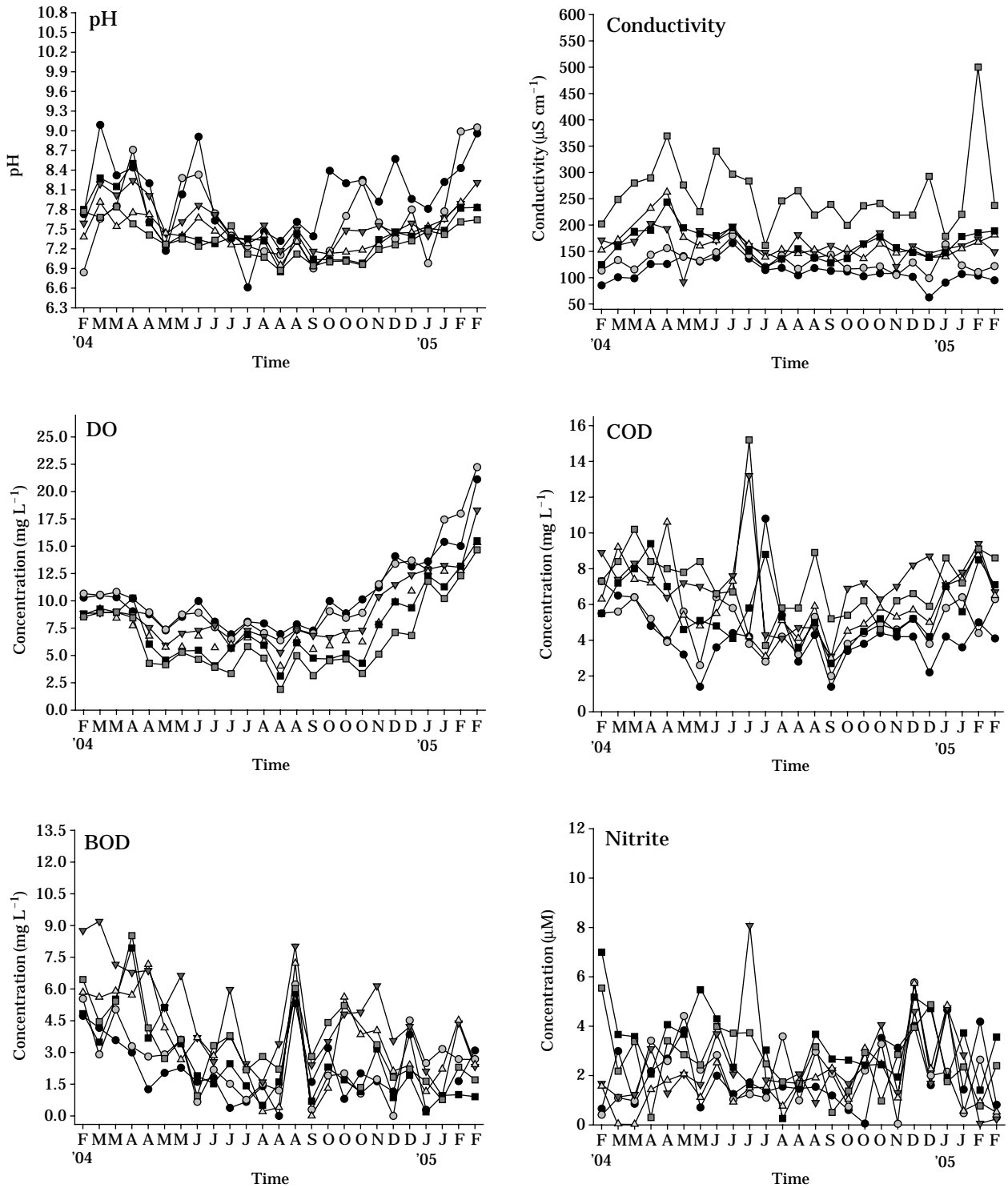


Fig. 2. Biweekly variation of physicochemical factors in the lower part of the Han River from Feb. 2004 to Feb. 2005.

간 낮았고, 그 이외에는 평균 6.2 mg L^{-1} 를 유지하였다. 정점별 평균 변화는 정점 1에서 4.4 mg L^{-1} , 정점 2에서

4.7 mg L^{-1} , 정점 3에서 7.1 mg L^{-1} , 정점 4에서 6.0 mg L^{-1} , 정점 5에서 5.7 mg L^{-1} , 정점 6에서 7.4 mg L^{-1} 로 BOD와

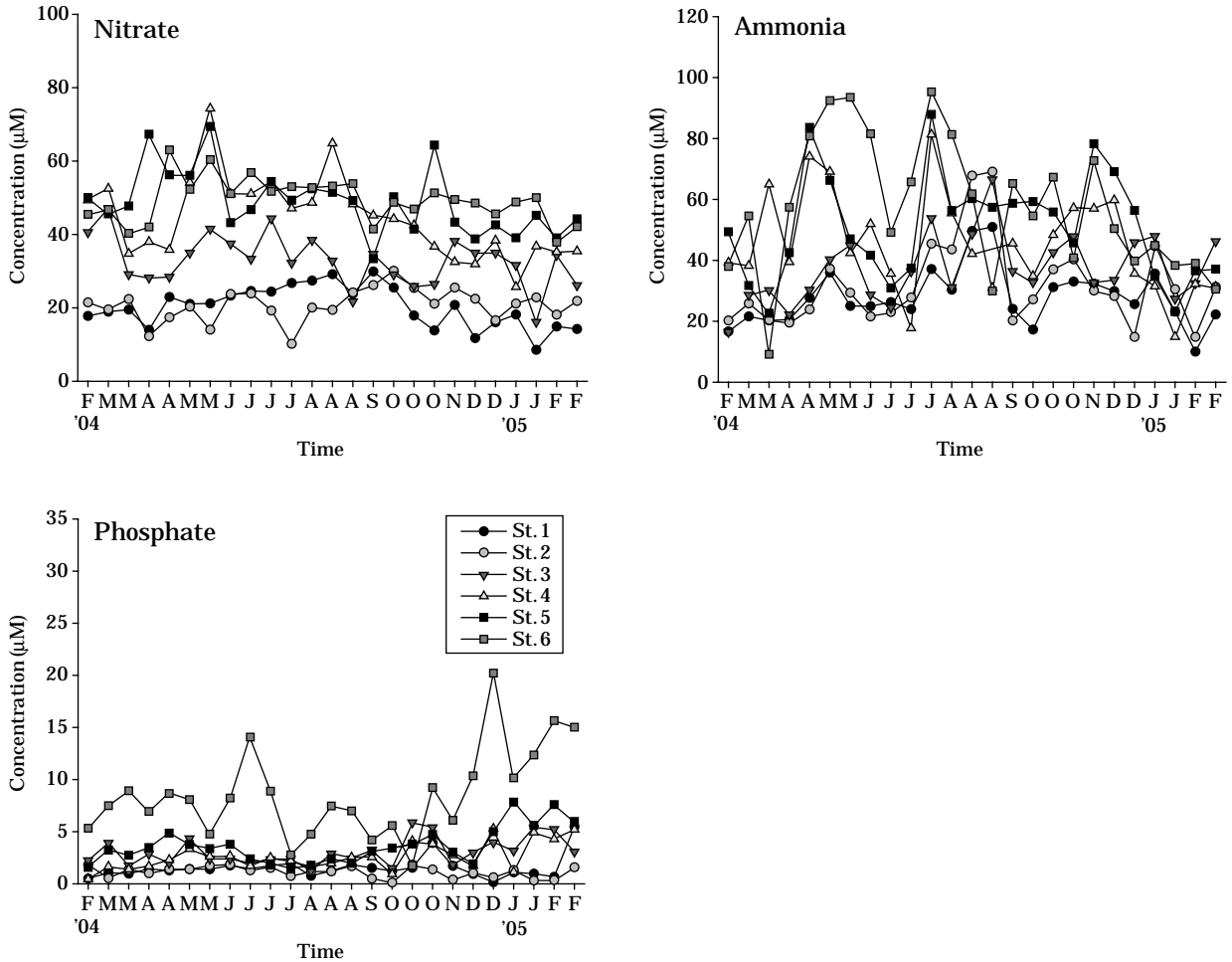


Fig. 2. Continued.

마찬가지로 상류의 농도가 낮았다.

영양염류 중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 겨울철에 평균 $31.79 \mu\text{M}$ 에서 여름철에 평균 $39.16 \mu\text{M}$ 로 증가하였고, 정점별로는 정점 1에서 평균 $20.27 \mu\text{M}$, 정점 6에서 평균 $49.36 \mu\text{M}$ 로 약 2.4배의 증가하였다. 특히, 정점 2에서는 평균 $20.80 \mu\text{M}$ 로 정점 1과 유사한 값을 보였으나, 탄천의 영향을 받는 정점 3에서는 평균 $32.91 \mu\text{M}$ 로 $12.11 \mu\text{M}$ 이 증가하여 하류로 갈수록 점차 증가하고 있었다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 도 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 변화와 같이 겨울철에 평균 $34.05 \mu\text{M}$ 에서 여름철에 평균 $47.22 \mu\text{M}$ 로 증가하였으며, 정점 간 변화도 정점 1에서 평균 $27.83 \mu\text{M}$, 정점 6에서 평균 $57.37 \mu\text{M}$ 의 농도를 보여 하류로 갈수록 점차 증가하는 양상을 보였다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 겨울철에 평균 $2.67 \mu\text{M}$ 부터 점차 감소를 하여 가을철에 평균 $1.97 \mu\text{M}$ 의 낮은 농도를 보였으며, 월별 및 정점별 차이가 그리 크지 않았다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 변화와 반대로 겨울철에 평균 $4.54 \mu\text{M}$ 의 높은 농도

를 보였으며, 여름철에 평균 $2.85 \mu\text{M}$ 로 낮았다. 정점 간 변화경향은 하류로 갈수록 증가하여 지류에 직접적인 영향을 받는 정점 3과 정점 6에서 각각 평균 $3.07 \mu\text{M}$, $8.56 \mu\text{M}$ 로 높았다.

2. 식물플랑크톤

본 조사기간 중 식물플랑크톤군집의 출현 종수의 월별 변화는 2004년 3월 14일 (평균 21종)부터 서서히 증가하다 5월 23일에 평균 43종을 기록하였으며, 집중 호우기인 2004년 7월 4일 (평균 29종)과 7월 21일 (평균 34종)에 일시 감소하였다가 이후 증가하여 8월 15일 (평균 54종)에 최고치를 보였다. 가을철인 10월 31일에 평균 36종을 보였고 이후로는 평균 30종 이상의 종수를 보였다. 정점별 출현 종수의 변화양상은 전 정점에서 평균 34종 이상의 종수를 보였으며, 정점 3에서 평균 38종으로 가

장 높았으나 정점별 차이는 그리 크지 않았다.

2004년 2월부터 2005년 2월까지 매 격주 간 모든 정점에서 출현한 종은 *Asterionella formosa*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Aulacoseira italica*, *Cyclotella radiosa*, *Cymbella minuta*, *Diatoma vulgare*, *Fragilaria crotonensis*, *Melosira varians*, *Navicula gregaria*, *Synedra acus* 등 10종으로 한강 하류에서 상시 출현하는 대표종으로 판단되었다. 한편, 계절적으로 출현 빈도가 높은 종은 가을철에 *Achnanthes minutissima*, 녹조 *Scenedesmus quadricauda*, 여름철에 *Diatoma tenue*, 남조 *Merismopedia* sp., 여름철부터 가을철까지는 *Achn-*

anthes convergens, 가을철부터 봄철까지는 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*가 밀도 높게 출현하였다.

본 수역에서 식물플랑크톤군집의 주요 우점종은 돌말류와 남조류였다. 즉, 돌말류인 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*가 2004년 2월부터 4월까지 1.2×10^3 cells mL⁻¹ 이상의 현존량으로 37.9% 우점하였으며, 2004년 12월부터 2005년 2월까지 55.8%를 차지하여 겨울철에 대표적인 우점종이었다. 2004년 3월부터 5월까지에도 돌말류 *Asterionella formosa*가 평균 37.9% 우점하였고, 4월부터 7월까지 돌말류 *Fragilaria crotonensis*가 18.5% 우점하였다. 한편, 남조류인 *Microcystis aeruginosa*는 5월과 6

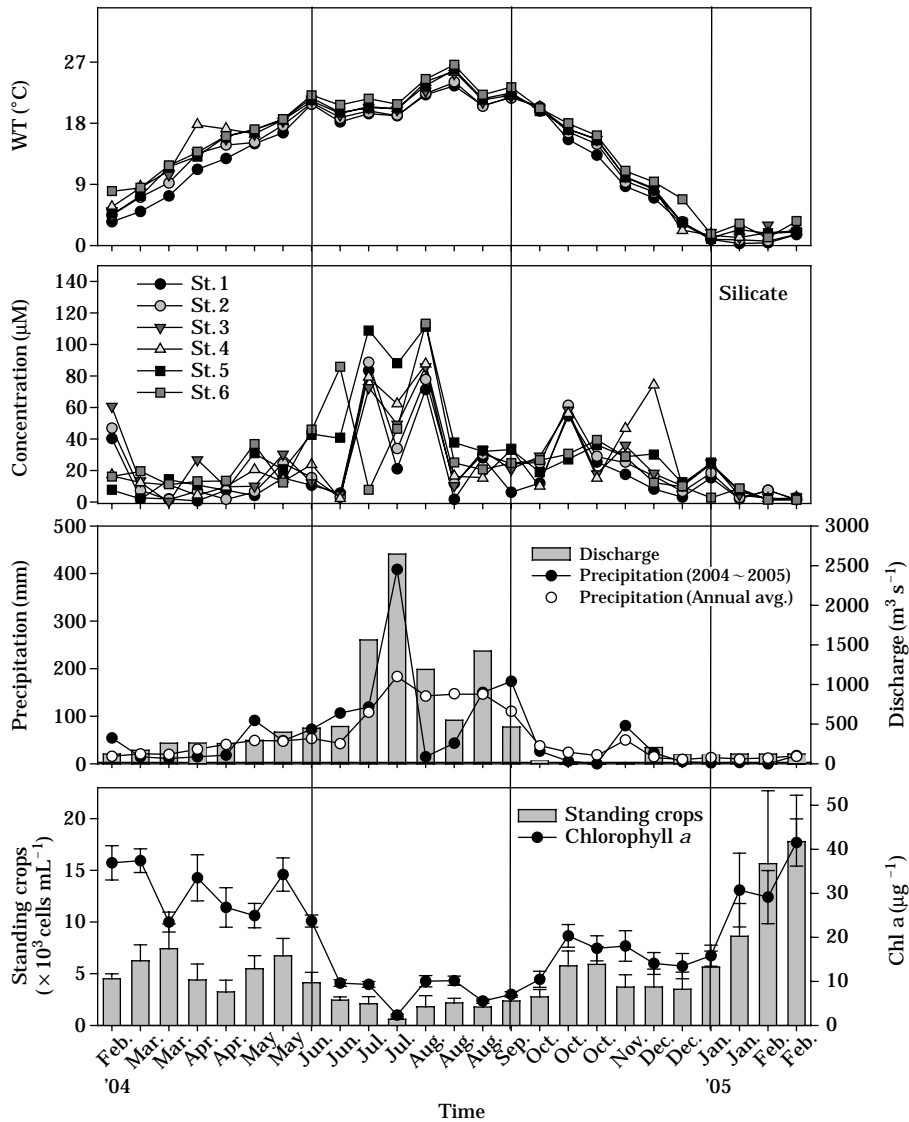


Fig. 3. Biweekly variation of water temperature, silicate, precipitation, discharge, chlorophyll *a* and phytoplankton standing crops in the lower part of the Han River from Feb. 2004 to Feb. 2005.

월에 각각 1.9%와 3.9%를 제외하고 연중 15.7% 우세하게 출현하였으며, *Merismopedia* sp.는 7월부터 10월에 평균 18.1% 우점하였다. 또한 돌말류 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*는 6월부터 7월까지, 9월부터 11월까지 각각 21.1%와 30.8%의 높은 우점율을 보였으며, *Synedra acus*는 10월부터 12월까지 14.9% 우세하게 출현하였다.

3. 일차생산과 환경요인

계절별 식물플랑크톤 현존량 소장은 봄철에 평균 5.58×10^3 cells mL⁻¹를 보였고, 풍수기인 여름철에는 평균 2.14×10^3 cells mL⁻¹로 매우 낮았다 (Fig. 3). 특히 강수량이 가장 높았던 2004년 7월 21일에 평균 0.59×10^3 cells mL⁻¹로 가장 낮은 현존량을 기록하였다. 가을철부터 점차 현존량이 증가하여 겨울철에는 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*의 대발생에 의해 평균 8.49×10^3 cells mL⁻¹로 높았다. 정점별 평균 현존량의 변화는 정점 1에서 $3.28 \pm 2.11 \times 10^3$ cells mL⁻¹, 정점 2에서 $4.88 \pm 4.13 \times 10^3$ cells mL⁻¹, 정점 3에서 $5.99 \pm 4.47 \times 10^3$ cells mL⁻¹, 정점 4에서 $5.52 \pm 4.39 \times 10^3$ cells mL⁻¹, 정점 5에서 $5.94 \pm 5.22 \times 10^3$ cells mL⁻¹, 정점 6에서 $5.23 \pm 5.21 \times 10^3$ cells mL⁻¹로 하류로 갈수록 높았다. 특히, 탄천의 영향을 받는 정점 3에서 식물플랑크톤 현존량의 급속한 증가를 보였으며, 안양천의 영향을 받는 정점 6에서도 계절별 약간의 차이는 있었지만 식물플랑크톤 현존량이 상대적으로

로 높았다.

계절별 평균 chlorophyll *a*의 농도는 봄철에 $30.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 여름철에는 $10.1 \mu\text{g L}^{-1}$, 가을철 $14.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 보이다가 겨울철에는 $25.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 증가하였다. 정점별 평균 농도는 봄철에 정점 1에서 $18.7 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 2에서 $23.9 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 3에서 $33.2 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 4에서 $31.9 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 5에서 $38.3 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 6에서 $34.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 하류역에서 높았다. 여름철에 정점 1과 2에서 각각 $9.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $10.9 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 3과 4에서 각각 $10.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $10.4 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 5와 6에서 각각 $10.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $9.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었다. 가을철에 정점 1에서 $13.9 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 2에서 $19.7 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 3에서 $21.0 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 4에서 $13.5 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 5에서 $12.5 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 6에서 $7.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 였다. 겨울철에 정점 1과 2에서 각각 $21.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $33.3 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 3과 4에서 $22.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $19.7 \mu\text{g L}^{-1}$, 정점 5와 6에서 $30.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 과 $28.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었다.

조사기간 중 한강 하류역의 강수량은 1,500 mm로 평년의 1,344 mm보다 다소 높았으며, 특히 장마 기간이었던 7월 말에는 408.6 mm의 집중호우로 인하여 연 평균 강수량인 183.4 mm보다 약 2.2배 높았다. 한강하류역의 유량 변동은 강수량의 변화양상과 같이 여름철에 평균 $1,184.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 겨울철에는 평균 $130.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 로 여름철과 약 9배 정도 차이를 보였다. SiO₂-Si는 정점별 변화보다 계절별 변화가 매우 뚜렷하였다. 즉, 갈수기인 봄철과 겨울철에 각각 평균 $12.30 \mu\text{M}$ 과 $13.83 \mu\text{M}$ 로 낮았고, 장마기인 여름철에 $43.91 \mu\text{M}$ 로 높았으며,

Table 1. Pearson correlation matrix between physicochemical factors and phytoplankton standing crops in the lower part of the Han River (n=150; *p<0.05; **p<0.01; - not significant).

	DO	WT	pH	Con.	COD	BOD	Chl <i>a</i>	SS	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	SiO ₂ -Si	PO ₄ -P	Pre.	Dis.	S.C.
DO	1.00															
WT	-0.81**	1.00														
pH	0.63**	-0.43**	1.00													
Con.	-0.32**	-	-0.23**	1.00												
COD	-	-0.24**	-	0.47**	1.00											
BOD	-	-	-	0.17*	0.41**	1.00										
Chl <i>a</i>	0.42**	-0.46**	0.40**	0.19*	0.36**	0.34**	1.00									
SS	-0.21**	0.19*	-0.16*	0.36**	0.47**	0.28**	-	1.00								
NO ₂ -N	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00							
NO ₃ -N	-0.53**	0.28**	-0.43**	0.52**	0.30**	-	-	0.19*	-	1.00						
NH ₄ -N	-0.48**	0.35**	-0.47**	0.37**	-	-	-	0.26**	-	0.50**	1.00					
SiO ₂ -Si	-0.40**	0.43**	-0.36**	-	-	-	-0.35**	-	-	0.20*	0.26**	1.00				
PO ₄ -P	-	-0.16*	-0.16*	0.72**	0.38**	-	-	-	-	0.42**	0.20*	-	1.00			
Pre.	-0.31**	0.43**	-0.31**	-	-	-	-0.42**	0.26**	-	-	0.29**	0.27**	-0.15*	1.00		
Dis.	-0.32**	0.50**	-0.28**	-	-	-	-0.45**	0.35**	-	-	0.27**	0.49**	-0.14	0.82**	1.00	
S.C.	0.59**	-0.57**	0.33**	0.21**	0.35**	-	0.67**	-	-	-	-0.19*	-0.36**	0.30**	-0.38**	-0.39**	1.00

*WT: Water temperature, Con.: Conductivity, DO: Dissolved oxygen, COD: Chemical oxygen demand, BOD: Biochemical oxygen demand, SS: Suspended solids, Pre.: Precipitation, Dis.: Discharge, S.C.: Standing crops

가을철에는 29.90 μM의 농도를 나타내었다.

4. 식물플랑크톤과 환경요인의 영향

본 조사기간 중 한강 하류의 식물플랑크톤 현존량은 평균 5.14×10^3 cells mL⁻¹로 중영양역 (mesotrophication) 이상으로 수온이 낮은 봄·겨울철에 높았으며, 수온이 높은 여름철에 낮았다 ($r = -0.57, p < 0.01$). 특히 여름철 400 mm 이상의 집중 호우에 따른 강수량 증가 때에 식물플랑크톤 현존량은 낮았다 ($r = -0.38, p < 0.01$). 규산염 농도는 식물플랑크톤 현존량과 음의 상관성을 보였으며 ($r = -0.36, p < 0.01$), 강수량 ($r = 0.27, p < 0.05$)과 유량 ($r = 0.49, p < 0.05$)과는 양의 상관성을 보였다 (Table 1). 한편, 전기전도도는 COD, 아질산염, 인산염과 $r = 0.47 \sim$

0.72 범위의 비교적 높은 양의 상관관계를, 용존산소량과 pH의 상관관계는 $r = 0.63$, 식물플랑크톤 현존량과 용존산소량은 $r = 0.59$, 유량과 규산염 및 강우량은 각각 $r = 0.49, r = 0.82$ 로서 상관성이 비교적 높았다. 식물플랑크톤 현존량에 영향을 주는 환경요인 분석을 위한 단계적 중회귀분석 (stepwise multiple regression analysis) 결과, 중요한 환경요인은 수온, COD, NO₂-N, PO₄-N, 유량, pH로 나타났다. 이들 환경요인의 R² = 0.465 (F = 22.61, p < 0.01)였다 (Table 2).

Table 2. Stepwise multiple regression of phytoplankton standing crops in the lower part of the Han River (n=150; *P<0.05; **P<0.01).

Independent variable	Variables	β	Remarks
Standing crops	DO	0.772**	$r^2 = 0.605$ $F = 38.992^{**}$
	Con.	0.271**	
	NO ₃ -N	0.225**	
	Dis.	-0.173**	
	NO ₂ -N	-0.129**	
	COD	0.129*	

*DO: Dissolved oxygen, Con.: Conductivity, Dis.: Discharge, COD: Chemical oxygen demand

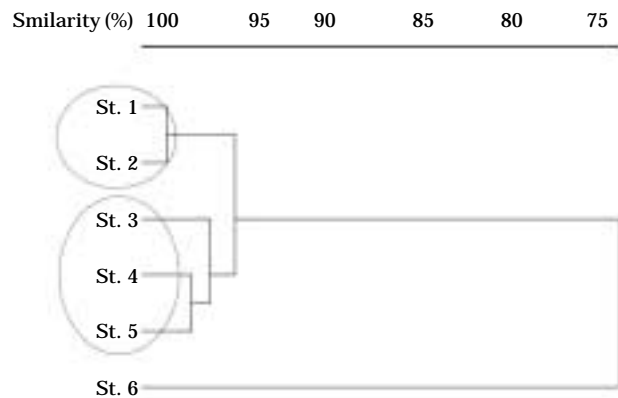


Fig. 4. Dendrogram from the Hierarchical cluster analysis of environmental factors on stations in the lower part of the Han River from Feb. 2004 to Feb. 2005 (Group A: St. 1 and 2; Group B: St. 3, 4, 5, Group C: St. 6).

Table 3. ANOVA analysis of the sampling stations affecting the physico-chemical and biological factors in the lower part of the Han River (n=150; *P<0.05; **P<0.01; ***P<0.001).

Variable	F value	Stations					
		St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
DO	5.92***	10.42 ^a	10.47 ^a	8.92 ^{bc}	8.02 ^{bc}	7.55 ^{bc}	6.46 ^c
WT	0.27	12.34 ^a	13.02 ^a	13.68 ^a	14.01 ^a	13.73 ^a	14.68 ^a
pH	7.42***	7.99 ^a	7.68 ^b	7.62 ^b	7.44 ^{bc}	7.47 ^{bc}	7.32 ^c
Con.	49.21***	112.31 ^c	130.98 ^c	161.84 ^b	164.97 ^b	164.24 ^b	259.38 ^a
COD	10.46***	4.38 ^e	4.71 ^{de}	7.04 ^{ab}	6.01 ^{bc}	5.68 ^{dc}	7.39 ^a
BOD	6.12***	2.06 ^c	2.47 ^{bc}	4.66 ^a	3.45 ^b	2.53 ^{bc}	3.33 ^b
Chl a	0.98	15.79 ^a	22.10 ^a	21.44 ^a	18.83 ^a	23.15 ^a	20.17 ^a
SS	3.71**	11.33 ^c	17.07 ^{bc}	23.68 ^{ab}	27.35 ^{ab}	17.77 ^{bc}	31.79 ^a
NO ₂ -N	3.22**	1.99 ^b	2.01 ^b	2.32 ^{ab}	1.74 ^b	3.15 ^a	2.60 ^{ab}
NO ₃ -N	80.38***	20.26 ^d	20.79 ^d	32.90 ^c	44.31 ^b	48.85 ^a	49.35 ^a
NH ₄ -N	13.11***	27.82 ^d	31.77 ^d	37.11 ^{cd}	45.22 ^{bc}	50.81 ^{ab}	57.37 ^a
SiO ₂ -Si	0.79	17.90 ^a	23.01 ^a	25.83 ^a	26.19 ^a	31.50 ^a	26.16 ^a
PO ₄ -P	41.10***	1.52 ^{cd}	1.13 ^d	3.06 ^b	2.61 ^{bc}	3.62 ^b	8.55 ^a
S.C.	1.31	3.28 ^a	4.87 ^a	5.98 ^a	5.52 ^a	5.93 ^a	5.23 ^a

WT: Water temperature, Con.: Conductivity, DO: Dissolved oxygen, COD: Chemical oxygen demand, BOD: Biochemical oxygen demand, SS: Suspended solids, S.C.: Standing crops
Results of the Duncan's multiple comparison test: Different character means that the mean value is significantly different.

Table 4. ANOVA analysis between the streams (Tan stream and Anyang stream) effecting the Han River and physico-chemical and biological factors contributing to the adjacent sampling stations in the lower part of the Han River (n=13; *P<0.05; **P<0.01; ***P<0.001).

Variable	F value	St. 2	St. 3	Tan stream	F value	St. 5	St. 6	Anyang stream
pH	6.52**	7.63 ^a	7.61 ^a	7.13 ^b				
BOD	99.72***	2.54 ^b	4.84 ^b	23.138 ^a	39.29***	2.63 ^b	3.44 ^b	9.75 ^a
COD	50.43***	4.66 ^b	4.98 ^b	12.43 ^a	30.73***	5.61 ^c	7.35 ^b	10.77 ^a
NO ₃ -N	21.55***	21.01 ^c	33.76 ^b	67.76 ^a	17.78***	47.89 ^b	48.77 ^b	73.65 ^a
NH ₄ -N	17.13***	1.09 ^b	2.98 ^b	17.56 ^a	59.58***	3.55 ^c	8.32 ^b	20.07 ^a
PO ₄ -P	24.91***	29.62 ^b	35.52 ^b	80.59 ^a	12.01***	51.74 ^b	57.63 ^b	107.54 ^a

COD: Chemical oxygen demand, BOD: Biochemical oxygen demand

Results of the Duncan's multiple comparison test: Different character means that the mean value is significantly different.

6개 정점을 물리·화학적 환경요인을 매개변수로 유사도 분석을 한 결과 크게 3개 그룹(group)으로 나눌 수 있었다. 즉, 정점 1과 2는 A group, 정점 3, 4, 5가 B group, 정점 6이 C group으로 구분되었다(Fig. 4). 또한 물리·화학적 환경요인과 생물학적 요인을 대상으로 ANOVA 분석한 결과 수온, chlorophyll *a*, 규산염, 식물플랑크톤 현존량은 정점간 차이가 없이 하나의 group이었으며, 용존산소량, 전기전도도, COD, 아질산염, 질산염, 암모니아염, 인산염이 정점 1, 2에서 같은 group으로, 용존산소량, 전기전도도, pH, 인산염이 정점 3, 4, 5에서 같은 group으로 묶였다(Table 3). Table 3에서 보는 바와 같이 COD와 BOD 및 NO₂-N은 탄천의 직접적인 영향을 받는 정점 3에서 급속한 증가를 보이다가, 희석 등의 자정작용에 의해 정점 4, 5에는 감소하였고, 안양천 및 불광천의 영향을 받는 정점 6에서 증가하여 위의 정점간 구분과 잘 일치하고 있었다.

지류하천과 가장 인접한 조사정점에서 탄천 및 안양천의 영향으로 영양염류 및 BOD, COD가 한강 본류에 비해 월등히 높은 농도를 보였으며, 이는 정점 3 및 6으로의 부영양화를 가속시키는 결과를 초래하였다. 그러나 탄천 및 안양천의 과영양역(hypertrophication)에 따라 Table 4와 같이 사후분석(Duncan test)은 과영양상태의 이질 하천으로 구분이 되었다.

고 찰

본 수역은 전형적인 온대지역의 대기의 영향권에 있었으며, 영양염류는 전 계절에서 상시 중·부영양 수준으로 계절의 영향 보다는 지류하천에 따른 하류 누적 오염부하가 심하였다. 한강 하류의 오염 부하량 중 질산계의 영양염류와 인산염이 탄천의 영향을 받는 정점 3과 안양천

의 영향을 받는 정점 6에서 높은 농도를 보여 이를 반증하고 있었다. 다만 규산염은 정점간의 변화보다는 계절별로 큰 변화를 보였는데, 특히 여름철 고농도는 장마기에 한강 상류로부터 유입에 기인하는 것으로 판단된다.

수생태계에서 식물플랑크톤 현존량은 환경 변화에 따라 변동하기 때문에 수질의 지표로 활용할 수 있다(Harper, 1992). 한강 하류역에서 조사기간 중 식물플랑크톤 현존량은 평균 5.14×10^3 cells mL⁻¹를 보였으며, 계절별로는 집중강우를 보인 여름철에는 평균 2.14×10^3 cells mL⁻¹로 감소를 하였으나 갈수기의 가을철부터 점차 증가하여 겨울철 및 봄철에 각각 8.49×10^3 cells mL⁻¹와 5.58×10^3 cells mL⁻¹로 가장 높은 값을 보였다. 정점별 식물플랑크톤 현존량은 조사 수역 중 상류인 팔당댐과 가장 가까운 정점 1과 2에서 낮은 반면 정점 3, 4, 5, 6에서는 상대적으로 높았다. 1960년대부터 1970년대까지 10^3 cells mL⁻¹ 이상의 식물플랑크톤 현존량은 거의 보이지 않았으나(심과 최, 1978), 1989년 11월부터 1990년 8월까지 평균 2.3×10^3 cells mL⁻¹을 나타내었는데, 특히 겨울철인 12월에 1.5×10^4 cells mL⁻¹의 대발생을 나타낸 것을 비롯하여, 1990년 1~2월에 $0.9 \sim 2.1 \times 10^3$ cells mL⁻¹(팔당대교)에서 최고 5.6×10^4 cells mL⁻¹(한남대교)까지 식물플랑크톤 대발생을 보고하였다(서울특별시, 1990). 유와 임(1990)도 12월에 7.2×10^4 cells mL⁻¹의 대발생을 보고하였으며, 서울시정개발연구원(1994)은 1993년 6월과 8월의 $3.0 \sim 8.4 \times 10^2$ cells mL⁻¹의 식물플랑크톤 현존량을 제외하고 조사기간 중 10^3 cells mL⁻¹ 이상을 나타내었고, 특히 1993년 11월에서 1994년 2월까지 $1.6 \sim 14.2 \times 10^3$ cells mL⁻¹로 겨울철 대발생을 보였다. 이와 장(1997)도 조사기간 중 $10^3 \sim 10^4$ cells mL⁻¹로 식물플랑크톤 대발생이 항상 일어난다고 보고하였다. 정 등(2003)도 2002~2003년의 봄철에 1.0×10^4 cells mL⁻¹, 여름철에 5.3×10^3 cells mL⁻¹, 가을철에 5.3×10^3 cells

mL⁻¹, 겨울철에 7.8×10^3 cells mL⁻¹로 본 조사와 유사하였다.

한강 하류는 정 등(2003)의 보고와 같이 잠실 및 신곡 수중보에 의해 물의 체류시간을 정체시켜 10^3 cells mL⁻¹ 이상의 대발생을 보이고 있었으나, 여름철의 집중강우는 식물플랑크톤 현존량을 희석시켜 밀도가 낮아지는 경향을 보이고 있었다. 또한 한강 하류역에서 식물플랑크톤 현존량의 소장은 1990년대 후반부터 현재까지 현존량의 큰 증감을 보이지 않은 중영양수준의 안정된 상태를 보이고 있었으며, 여름철 집중강우에 따른 짧은 체류시간에 따라 식물플랑크톤 현존량에 영향을 받고 있었다(김 등, 1996; 김 등, 1998; 김 등, 2002; 정 등, 2003). 이렇게 하천과 호소생태계에서 강수량과 유량은 식물플랑크톤 증감에 영향을 주는 중요한 요인으로 잘 알려져 있다(Sommer, 1989; Reynolds *et al.*, 1993). 따라서 한강 하류역은 팔당댐의 방류량에 직접적인 영향을 받고 있으며, 총 강수량의 79.95%의 집중 강우를 보이는 여름철 빠른 유속 및 유량이 식물플랑크톤 현존량의 소장에 크게 기여하고 있었다. 한편, 본 연구에서 규산염은 계절별로 차이를 보였다. 특히, 봄철과 겨울철 *Stephanodiscus hantzschii f. tenuis*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Synedra acus* 등의 높은 현존량을 보일 때 낮은 규산염의 농도를 보였으며, 상대적으로 녹조류 및 남조류가 우점한 여름철에는 높은 농도를 나타내었다. 이는 담수생태계에서 규산염의 농도가 돌말류의 성장을 조절하는 중요 조절인자로서(Tilman, 1977; Sell *et al.*, 1984), 한강 하류역에서도 큰 영향인자로 작용하고 있다고 판단된다(정 등, 2003).

Chlorophyll *a*의 농도는 영양 상태를 평가하는데 식물플랑크톤 현존량과 함께 Biomass를 나타내는데 매우 유용한 척도로 사용된다(USEPA, 1976; Forsberg and Ryding, 1980; Yang and Dickman, 1993). 본 조사에서 chlorophyll *a*의 농도는 평균 $20.24 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 식물플랑크톤 현존량의 변동과 매우 유사하게 변화하였고($r=0.67$, $p<0.01$), 중·부영양 수준으로 각 조사 정점간 구분이 없는 하나의 수계로 판정되었다($F=0.98$, $p>0.05$).

식물플랑크톤 현존량에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 단계적 중회귀 분석을 한 결과, 수온, COD, 아질산염, 인산염 및 강수량이 중요한 요인이었다. 부영양 수역에서 수온이 식물플랑크톤 대발생을 조절하는 주요 인자 중에 하나이다(Heinle, 1969). 여름에 높은 현존량을 보인 *Microcystis spp.*와 *Anabaena spp.* 등의 남조류 대발생은(Horne and Goldman, 1994), 우리나라에서도 팔당호나 대청호 및 주요 호수에서 여름철에 대

발생이 빈번한 것은 수온과 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다(오와 김, 1995; 박 등, 2000). 또한 겨울-봄철에 주요 우점종인 *Stephanodiscus hantzschii f. tenuis*는(정 등, 2004) 저수온기의 대발생을 보이는 대표종으로(Kobanova and Genkal, 1989), 이렇게 수온은 종 조성 및 현존량이 큰 차이를 보이고 있어 한강 하류에서 식물플랑크톤 현존량을 조절하는 중요인자로 파악되었다. BOD와 COD의 경우 수질 판정의 척도로서 2002년도 수질과 유사하여 일관된 수질을 나타내고 있었다(정 등, 2004). BOD를 기준으로 정점 1과 2에서는 평균 I~II급수를 나타내고 있었으나, 정점 3에서는 급격히 수질이 나빠져 II~III급수를 보였으며, 하류로 갈수록 회복하는 경향을 보였다. COD는 BOD의 변화와 달리 하류로 갈수록 지속적인 오염부하에 따라 수질이 악화되고 있었다. 즉 한강 본류의 COD 농도는 탄천(평균 23.14 mg L^{-1})에 따라 유기물이 유입되어, 안양천(평균 10.77 mg L^{-1})의 유입에 따라 지속적인 유기물 축적에 따라 수질 악화를 간접적으로 나타내고 있었다. 따라서 한강 본류로의 수질의 영향은 지류하천에 따라 크게 영향을 받고 있다는 것을 암시하고 있었다.

물리·화학적 환경요인에 대한 정점간 유사성을 파악하고자 유사도 및 일원변량 분석 결과 크게 3개의 group으로 분석되었는데, 탄천을 경계로 A group(정점 1, 2)과 B group(정점 3, 4, 5)으로 구분되었고 안양천을 경계로 B group과 C group(정점 6)으로 구분되어 탄천과 안양천은 한강 본류에 크게 영향을 미치고 있다는 사실을 알 수 있었다. 또한 물리·화학적 환경요인과 생물학적 요인을 대상으로 ANOVA 분석한 결과에서도 용존산소량, 전기전도도, COD, 아질산염, 질산염, 암모니아, 인산염 등 많은 환경요인이 정점 1, 2에서 같은 경향성을 띄어 수계 특징이 구분되었다. 이와 같은 사실은 용존산소량, 전기전도도, pH, 인산염 등의 환경요인이 정점 3, 4, 5에서 또 다른 특징으로 하나의 group으로 구분된 것이 반증이라 할 수 있다. COD와 BOD 및 NO₂-N은 탄천의 직접적인 영향을 받는 정점 3에서 급속한 증가를 보이다가, 희석 등의 자정작용에 의해 정점 4, 5에는 감소하였고, 안양천의 직접적인 영향을 받는 정점 6에서 증가하여 위의 정점간 구분과 잘 일치하고 있었다.

따라서 물리·화학적 환경요인 및 강수량 등에 따른 한강 하류역의 영향은 탄천 및 안양천이 본류로 큰 영향(부영양화)을 미치고 있었으며, 계절별로는 여름철 집중강우에 따라 식물플랑크톤 희석에 영향을 미치고 있었다.

적 요

2004년 2월부터 2005년 2월까지 1년 동안 매 격주간 한강하류역의 6개 정점에서 식물플랑크톤군집에 미치는 물리화학적 환경요인을 조사하였다. 조사결과 수온은 $0.3 \sim 26.6^{\circ}\text{C}$, pH: $6.6 \sim 9.1$, DO: $1.89 \sim 22.23 \text{ mg L}^{-1}$, BOD: $0.38 \sim 9.20 \text{ mg L}^{-1}$, COD: $1.4 \sim 15.2 \text{ mg L}^{-1}$, Conductivity: $62.5 \sim 500.0 \mu\text{s cm}^{-1}$, SS: $3.00 \sim 159.3 \text{ mg L}^{-1}$, chlorophyll *a* $1.7 \sim 71.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 변화하였다. 식물플랑크톤 현존량은 최저 $3.6 \times 10^2 \text{ cells mL}^{-1}$ (2004년 7월, 정점 3)에서 최고 $2.3 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ (2005년 2월, 정점 6)까지 변화하였으며, 계절별 평균 현존량은 봄철에 $5.9 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$, 여름철 $2.1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$, 가을철 $4.1 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$, 겨울철에 $8.5 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 겨울철에 가장 높았다.

식물플랑크톤 현존량에 미치는 환경요인의 영향을 규명하기 위하여, 종속변수인 현존량과 독립변수인 환경인과의 단계적 중회귀 분석을 한 결과 $R^2=0.465$ 였으며, 그 중 중요한 요인은 수온, COD, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-N}$, 유량, pH로 나타났다. 6개 정점을 환경요인을 매개변수로 유사도 분석을 한 결과 크게 3개 group으로 나눌 수 있었으며, 물리·화학적 환경요인과 생물학적 요인을 대상으로 ANOVA 분석에서는 수온, chlorophyll *a*, 규산염, 식물플랑크톤 현존량은 정점간 차이가 없이 하나의 group이었으며, 용존산소량, 전기전도도, COD, 아질산염, 질산염, 암모니아염, 인산염이 정점 1, 2에서 같은 group으로, 용존산소량, 전기전도도, pH, 인산염이 정점 3, 4, 5에서 같은 group으로 묶였다.

인 용 문 헌

김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산, 육수지 **23**: 167-179.
 김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭. 2002. 낙동강 부영양화 수질 환경요인의 통계적 분석, 한국조류학회지 **17**: 105-115.
 김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규. 1996. 부영양화한 낙동강 수계에서 유기물오염에 대한 조류 1차생산의 기여도, 한국조류학회지 **11**: 231-237.
 김용재. 1996. 팔당호의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 고찰과 지표종을 이용한 영양단계 평가, 육수지 **29**: 323-345.
 김용재, 김명운, 김상중. 1998. 한강 중·하류 수계에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성, 한국조류학회지 **13**: 331-338.
 박혜경, 정원화, 권오상, 류재근. 2000. 팔당호에서 남조류 및

남조류생산 독성물질의 계절변동, 한국조류학회지 **15**: 29-35.
 박혜경, 정원화. 2003. 팔당호의 장기간 식물플랑크톤 발생추이, 한국물환경학회지 **19**: 673-684.
 서울특별시. 1990. 한강생태계 조사연구 보고서. 586pp.
 서울시정개발연구원. 1994. 한강 수질 관리의 효율화 방안 연구. 서울특별시 시정연 **94-R-18**. 640pp.
 심재형, 최중기. 1978. 한강하류에 있어서 부유성 조류 군집의 구조 및 기능변화에 관한 구조 및 기능변화에 관한 연구, 한국해양학회지 **13**: 13-41.
 연세대학교 열대의학연구소. 1978. 자연보호를 위한 한국주요 하천의 생태학적 기초조사 연구, 연세대학교 열대의학연구소 보고서. 48pp.
 유광일, 임병진. 1990. 한강하류계의 식물플랑크톤 군집과 수질 오염지표에 대하여, 육수지 **23**: 267-277.
 오희목, 김도환. 1995. 대청호의 남조류 수화발생에 대한 단기적 예측, 육수지 **28**: 127-135.
 이진환, 장만. 1997. 한강하류의 환경학적 연구 II. 식물플랑크톤의 동태, 육수지 **30**: 193-202.
 이진환, 정승원. 2004. 한강하류의 환경학적 연구 VII. 식물플랑크톤군집의 장기간 변화와 전망, 한국조류학회지 **19**: 321-327.
 이학동. 1977. 한강수의 오염도에 따른 호수생물학적 연구, 육수지 **10**: 47-51.
 장윤경, 전숙례. 1996. 팔당담 담수수역의 식물 플랑크톤에 관한 연구 II, 식물플랑크톤 중 조성의 변화, 한국조류학회지 **11**: 217-229.
 정승원, 이진환, 유종수. 2003. 한강하류의 환경학적 연구 V. 식물플랑크톤 군집 대발생의 특징, 한국조류학회지 **18**: 255-262.
 정승원, 이진환, 허회권. 2004. 한강하류의 환경학적 연구 VI. 부영양 요인의 통계적 해석, 육수지 **37**: 78-86.
 정영호, 심재형, 이민재. 1965. 한강의 Microflora에 관한 연구 (제1보): 한강하류의 식물플랑크톤과 해수의 영향, 한국식물학회지 **4**: 47-69.
 정영호. 1969. 한강의 Microflora에 관한 연구 (제3보). 한강하구 감조수역의 환경조건과 식물성 플랑크톤, 대한민국 학술원 논문집 **8**: 59-132.
 정영호, 심재형. 1969. 한강하구의 기수역 유형에 관한연구, 한국식물학회지 **12**: 35-42.
 한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집구조의 변화, 육수지 **28**: 335-344.
 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재, 육수지 **26**: 141-149.
 한명수, 홍성수, 어윤열. 2002. 팔당호의 생태학적 연구 4. 경안천 하류의 영양염 및 입자대 유기물 거동과 식물플랑크톤의 천이, 육수지 **35**: 1-9.
 佐藤月二. 1940. 初冬に 於ける 漢江の河流プランクトン. 陸

- 水學雜誌. **10**: 128-130.
- APHA, AWWA, WPCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. APHA, Washington D.C., 1100pp.
- Forsberg, C. and S.O. Ryling. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lakes. *Arch für Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwater: Principles, problems and restoration. Chapman & Hall, London, 327pp.
- Heinle, D.R. 1969. Effects of elevated temperature on zooplankton. *Chesapeake Sci.* **10**: 186-207.
- Hong, S.S., S.W. Bang, Y.O. Kim and M.S. Han. 2002. Effects of rainfall on the hydrological conditions and phytoplankton community structure in the riverine zone of the Pal'tang reservoir, Korea. *J. Freshwater Ecol.* **17**: 507-519.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill, Inc, New York. 576pp.
- Kobanova, G.I. and S.I. Genkal. 1989. Representatives of the genus *Stephanodiscus* Grun. (Bacillariophyta) in the Angara River reservoirs and their ecological features. *Biol. Vnutr. Vod.* **81**: 29-32.
- Reynolds, C.S., J. Padisak and U. Sommer. 1993. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: A synthesis. *Hydrobiol.* **249**: 183-188.
- Sell, D.W., H.J. Carney and G.L. Fahnensties. 1984. Inferring competition between natural phytoplankton population: The lake Michigan example reexamined. *Ecology* **65**: 325-328.
- Sommer, U. 1989. The role of competition for resources in phytoplankton succession, in *Plankton Ecology: Succession in Plankton Communities* (ed. U. Sommer). Springer-Verlag, Berlin. pp. 57-106.
- Tilman, D. 1977. Resource competition between planktonic algae: An experimental and theoretical approach. *Ecology* **58**: 338-348.
- USEPA. 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsored Symposium, EPA-600 (3-76-079). 185 pp.
- Wetzel, R.G. and G.E. Linkens. 1991. Limnological Analyses, 2nd. Springer-Berlag, New-York.
- Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatoms as indicators of lake trophic status in central Ontario, Canada. *Diatoms Research* **8**: 179-193.

(Manuscript received 10 July 2006,
Revision accepted 11 September 2006)