

한강하류의 부영양화에 관한 환경 생태적 연구

수환경생태팀

서미연 · 김교봉 · 김린태 · 길혜경 · 유승성 · 김두래 · 윤호균 · 류동구 · 이종현 · 배경석 · 김민영

Environmental ecological studies on the Eutrophication of the Lower Han River, Korea

Aquatic Ecology Team

**Mi-yeon Suh, Gyeo-bung Kim, Lin-tae Kim, Hye-kyung Kil, Seung-seong Yoo,
Doo-rae Kim, Ho-gyun Ryun, Dong-koo Ryu, Jong-hyun Lee,
Kyung-seok Bae and Min-young Kim**

Abstract

This study was carried out to investigate on the trophic state of Lower Han River, Korea.

The results were as follows :

1. The concentration of phosphate ranged from 0.044 to 0.212 mg l^{-1} and silicate concentration varied from 0.119 to 2.647 mg l^{-1} . This seasonal variation was showed at spring and autumn.
2. The concentration of dissolved inorganic nitrogen appeared as 0.321~3.724 mg l^{-1} , the highest nitrogen concentration seemed to be caused by rainfall at september.
3. The concentration of total nitrogen and total phosphorus showed 3.533~7.529 mg l^{-1} (average 6.080 mg l^{-1}), and 0.080~0.233 mg l^{-1} (average 0.162 mg l^{-1}), respectively.
4. The concentration of chlorophyll-*a* showed 2.0~32.2 $\mu\text{g l}^{-1}$.

The correlation coefficient between T-P and chlorophyll-*a* was $r=0.994$.

5. When phytoplankton bloom occurred, cell numbers were increased to 20,000 cell ml^{-1} and drastically dropped by rainfall.

서론

한강은 지리적으로 한반도 중심부에 위치하여 있고 서울시를 동서로 관통하며 총 유로 연장이 481.7 km, 유역 면적이 26,018 km^2 로서 서울 및 수도권 지역의 상수원으로 중요한 역할을 하는 하천이다¹⁾

한강은 식수원으로서 중요성 뿐만 아니라 서울 시민들에게 쾌적한 휴식 및 레저공간의 제공, 철새 도래지로서

의 생태학적 측면 등에서 양호한 수질이 유지되도록 관리 되어질 필요가 있으며 특히 한강 강변의 10개소에 이르는 시민 공원지구의 조성에 따른 시민들의 한강 접근성 향상은 이의 필요성을 더욱 증가 시키고 있다. 그러나 지금까지의 한강은 갈수기, 강우기 및 조수간만의 영향에 따라 물의 색깔이 변하고 년중 탁도가 높아 맑고 푸른 강물을 나타내는 시기가 없어 시민들의 친수적 환경을 악화 시키고 있는 오염된 수계로 인식되기도 하였

으며 특히 년중 높은 농도를 나타내는 영양염류의 농도 때문에 일부 구간에서는 조류가 발생하여 용존산소를 과포화 시키거나 pH를 높이며 좋지 않은 냄새를 유발하기도 하였다^{2,3,4)}

기후 특성상 서울지역의 10년간 년평균 강수량은 1,350 mm로 전세계의 년평균 강수량에 비하면 적은 양은 아니지만 전 강수량의 70% 이상이 6~9월에 집중되고 있어 나머지 기간동안 한강 유지수의 대부분은 상류에 위치하고 있는 댐 수 특히 팔당댐 방류수에 크게 의존하고 있으며 주기적으로 갈수기에 수질이 악화될 우려가 있다. 이에 따라 서울시에서는 2000년 4월부터 조류예보제를 실시하여 한강의 영양염류, Chl-a 농도를 조사하고 남조류 세포수에 따른 한강의 영양상태를 파악, 이들과 연계된 팔당댐 방류량과의 관계분석등 향후 한강의 수질 개선 방향을 모색해보고자 한다.

조사시기 및 조사지점

조사는 2000년 4월 부터 6월~10월까지 매주 1회 실시 하였으며 7월부터 9월 사이에는 홍수로 인하여 월 2회~3회, 11월과 12월에는 월 2회 실시 하였다.

조사지점은 조류예보제 실시 지역인 한강 본류 성수대교부터 성산대교 구간 5개 지점이며 채수지점은 Fig.1과 같다.

환경 요인 조사

본 조사기간 동안의 기온과 강우량은 기상청 자료를

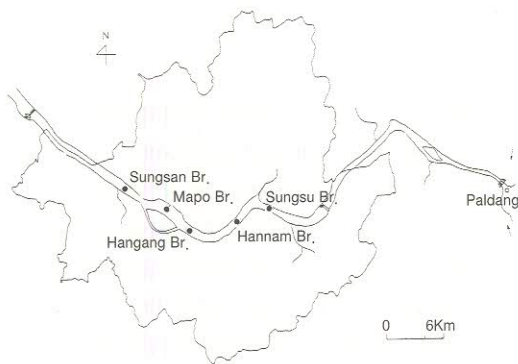


Fig. 1. A map showing the study area in the Han River

참조하였고 팔당댐 방류량은 (주)한국수력원자력에서 제공되는 팔당댐 수계자료를 이용하였다.

수질조사 항목중 수온과 pH, DO는 DO meter(YSI model 58)를 이용하여 현장에서 측정 하였으며 일부 시료는 조류 검경을 위하여 현장에서 Lugol's 용액으로 바로 고정 하였고, 나머지 시료는 실험실로 옮겨 Chlorophyll-a는 GF/C 여지로 여과한 다음 아세톤으로 추출하였으며 규산염 규소(SiO₂-Si)는 limnological analysis의 Rainwater and Thatcher method(1960)를 이용하여 UV/Visible Spectrophotometer(Beckman DU650)로 분석 하였다. 총인, 총질소 등 일반수질 항목은 수질오염 공정시험방법에 준하여 분석 하였다.

조류의 계수는 Sedgwick-Rafter counting chamber 에 Lugol's 용액으로 고정한 시료를 1ml 채우고 광학 현미경을 이용하여 200배 시야에서 행하였다.

결과 및 고찰

1. 수환경 요인

조사기간 중 서울지역의 기온과 강우량은 Table 1 과 같다.

2000년 서울지역의 년평균 기온은 12.7℃로 과거 10

Table 1. Meteorological condition of the sampling periods in Han River in 2000

Month	Item	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Discharge of Paldang Dam(m ³ /sec)
1		-2.1	42.8	266.6
2		-1.7	2.1	273.4
3		6.3	3.1	189.2
4		11.9	30.7	176.6
5		17.5	75.2	193.0
6		23.7	68.1	332.9
7		26.8	114.7	905.8
8		26.2	599.4	1487.7
9		20.7	178.5	1506.6
10		14.9	18.1	349.9
11		7.0	27.1	323.7
12		0.9	27.0	234.5
Total		152.1	1186.8	6239.9
Average		12.7	98.9	520

년간 평균 기온과 일치 하였다.

년간 강우량은 1186.8 mm로 과거 10년간 강우량 1546.5 mm에 비해 350 mm정도 적게 내렸으며 우리나라 기후 특성상 7, 8, 9월에 강우가 집중되어 연간 강수량의 75%를 차지하고 지난해(99년)년 강우량 1733.1 mm에 비해서도 올해의 강우량은 540 mm 정도 적게 내렸다.

한강수역의 생태환경은 주로 팔당 방류량의 변화에 따라 영향을 받게 되며 국지적으로 강우량, 유입지천 및 물리적 조건변화를 초래하는 외부의 일정성분 유입에 따라 변화한다.

수질에 미치는 영향은 방류량이 많아지면 편차는 있으나 대체적으로 희석효과를 나타내어 오염물질 함량을 다소 낮추는 효과를 나타내는 것으로 조사되었다⁵⁾

조사기간 동안의 년평균 팔당 방류량은 520 CMS로 지난해 보다 100 CMS 정도 적게 나타났으며 강우의 영향으로 8월과 9월에 평균 1520 CMS로 연중 가장 많은 방류를 하였다.

DO(용존산소)는 수중생물에게 필수적인 환경요소로서 수질환경을 평가하는데 가장 기본적인면서 중요한 수질측정 항목이다.

수중의 용존산소는 대기로부터 용해되어 유입되거나 광합성 생물에 의해 생성되고, 생물의 호흡과 분해에 의해 소비된다.

특히 여름철에 부영양화가 심해 유기물양이 많은 하천, 호소에서는 유기물 분해시 산소소비량이 많아지면 용존산소가 고갈되어 수중 생태계에 큰 영향을 미치는 경우도 발생하고 있다⁸⁾

조사기간중 수중 DO (Fig. 2)는 6.7~13.0 mg l⁻¹(평균 9.3 mg l⁻¹)로 전년도의 년평균 10.7 mg l⁻¹보다 약간 낮게 나타났으며 갈수기인 5월부터 8월까지는 6.7~

9.8 mg l⁻¹로 비교적 낮은 농도를 나타냈고 수온이 20℃ 이하로 떨어지는 9월 이후부터 9.3~13 mg l⁻¹까지 증가하는 경향을 보였다. 대부분의 기간 동안에 DO 농도는 하천의 수질환경 기준 1급수 기준인 7.5 mg l⁻¹ 이상을 유지하고 있어 산소부족으로 인한 수질악화는 없는 것으로 나타났다.

지점간의 평균 DO는 성수대교가 10.0 mg l⁻¹으로 가장 높게 나타났고 성산대교가 8.7 mg l⁻¹로 가장 낮게 나타났다.

2. 무기영양염

하천 생태계에서 질소와 인의 유입은 강우와 식생에서의 유출을, 그리고 인구 증가에 따른 인간활동의 증가에 의해 이루어지게 되는데 수체내의 영양단계를 나타내는 지표는 T-N, T-P와 같은 영양염류, 식물플랑크톤과 밀접한 관계에 있는 투명도, 심수층의 DO농도 등으로 영양상태를 판별하는데 여러 연구자들이 이들의 농도를 기준으로 하여 영양상태를 제시하였으며 서울특별시(1990)의 보고서⁷⁾에서도 이들 여러 가지 제안들을 종합하여 한강에 대한 부영양화 판정기준을 T-N : 0.2 mg l⁻¹, T-P : 0.02 mg l⁻¹, Chlorophyll-a : 10 µg l⁻¹ 제시한 바 있다²⁾

우리나라의 하천들은 하구언이나 보를 설치하여 자연 하천 보다는 체류시간이 상당히 길어 하천형 호소의 성격을 띠고 있다.

이와같이 체류시간이 길어지고 영양염류 부하량이 많으면 하천에서도 조류증식이 일어나 유기물을 증가시킬 가능성이 높다고 할 수 있다.

특히 인의 경우에는 담수에서 제한 영양소로 작용하기 때문에 조류의 양을 결정하는 중요한 환경요인이 되

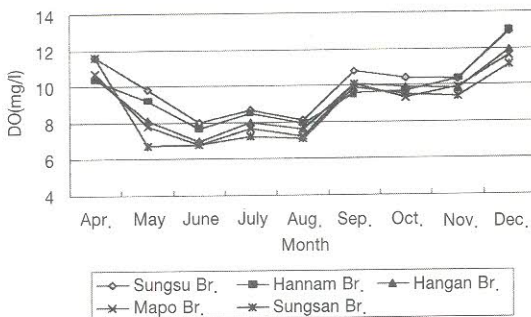


Fig. 2. Monthly variation of DO concentration in sampling sites at the Han River, Korea in 2000

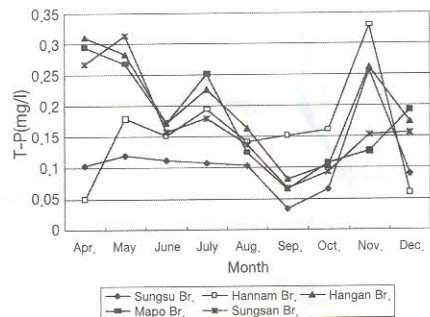


Fig. 3. Monthly variation of T-P concentration in sampling sites at the Han River, Korea in 2000

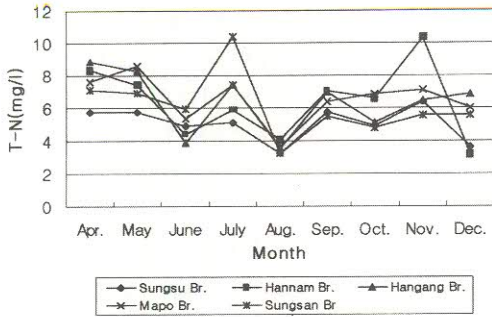


Fig. 4. Monthly variation of T-N concentration in sampling sites at the Han River, Korea in 2000

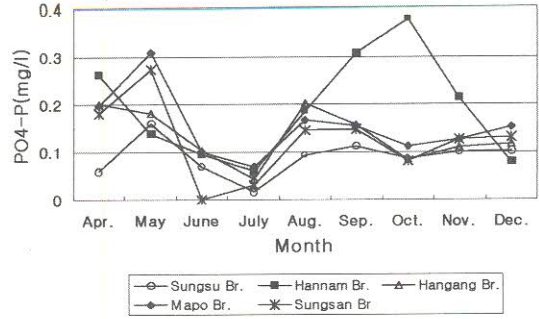


Fig. 5. Monthly variation of PO₄-P concentration in sampling sites at the Han River, Korea in 2000

기도 한다.

따라서 한강하류 정체수역에서도 인, 질소의 증가에 의해 녹조현상등 수질악화가 진행되고 있어 수질개선을 위해 우선적으로 영양염류 저감대책이 시급하다고 할 수 있다⁸⁾

조사기간중의 질소, 인 농도는 조사지점별 큰 차이는 없는 것으로 나타났으며(Fig. 3, 4) 질소는 8월 (3.533 mg l^{-1})에 인은 9월 (0.080 mg l^{-1})에 가장 낮은 농도를 보였으며 본 조사결과 T-N의 년평균은 6.080 mg l^{-1} , T-P는 0.162 mg l^{-1} 으로 나타났다. T-P는 홍수후 9월에 0.0796 mg l^{-1} 로 크게 감소한 것으로 나타났으며 T-N 역시 8월과 9월의 집중호우 전,후 보다 농도가 감소하였다. 이런 경향은 일반적으로 호소의 경우 내부의 T-P, T-N 농도가 홍수시 외부에서 유입되는 T-P, T-N 농도보다 낮아 외부 유입수의 T-P, T-N 부하에 의해 호소의 농도가 전반적으로 증가하는 경향을 보이지만 오염된 도시 하천의 경우에는 내부의 T-P, T-N 농도가 외부

유입수의 T-P, T-N 보다 높아 홍수기에는 특히 농도가 감소하는 특성을 보인 것으로 사료된다.

인산염과 더불어 규산염(SiO₂)은 규조류의 현존량에 영향을 주는 가장 중요한 요인중 하나이다. 일반적으로 규조류의 현존량이 증가하면 규산염의 농도는 감소되며 이때에 규조류의 성장에 관여하는 제한 영양염은 규소라고 알려져 있다^{9,10)}

조사 기간 동안 규산염의 농도는 최저 0.503 mg l^{-1} (3월)에서 최고 2.66 mg l^{-1} (8월)까지 변화 하였다.

규산염의 감소는 4월과 5월 그리고 10월부터 12월에 감소를 나타냈고(Fig. 6) 주로 수온이 20℃ 이하를 유지 하면서 식물플랑크톤의 규조류가 많이 출현하는 시기였으므로 제한 영양염으로서 작용한 것으로 보인다.

담수에서 조류의 생물량은 무기N, P 영양염의 유입량이나 그 정도에 비례하여 나타나며 특히, 제한 영양염류의 영향이 절대적이다¹¹⁾

대부분의 연구자들은 N/P비를 조류성장에 잠재적인

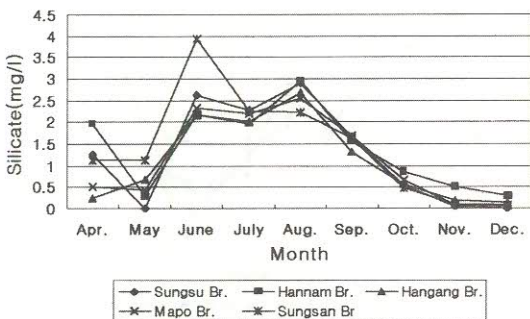


Fig. 6. Monthly variation of SiO₂ concentration in sampling sites at the Han River, Korea 2000

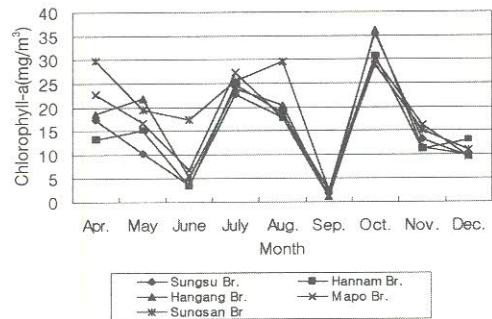


Fig. 7. Monthly variation of Chlorophyll-a concentration in sampling sites at the Han River, Korea 2000

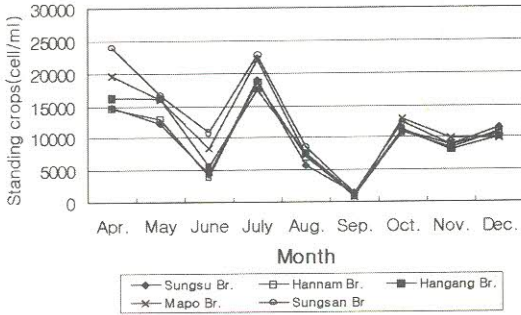


Fig. 8. Monthly variation of Standing crops in sampling sites at the Han River, Korea 2000

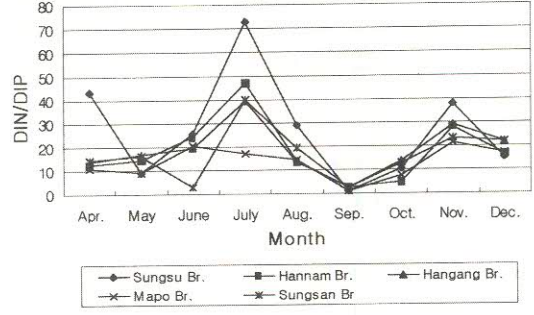


Fig. 9. Variation of DIN/DIP by sampling sites in the Han river

필수 제한 영양염을 나타낼 때 이용 하였다.

일반적으로 DIN/DIP ratio(weight)를 적용하여 10 이하 일때는 질소 결핍으로 20이상 일때는 P의 상대적 결핍으로 제시 하였듯이 본 조사지역에서는 10이하 일 때는 9월과 10월에 나타났고 20이상 일때는 7월과 11월에 두 번 나타난 것외에 대부분이 계절변화와 상관 없이 20이하로 나타났으므로 한강에서는 P이 식물플랑크톤 성장에 제한 요인으로 작용하기 보다는 빛과 체류시간인 것으로 사료된다.¹²⁾

이와 같은 사실은 한강중하개발 이후에 잠실, 신곡수중보의 건설로 담수능이 증가하였고, 수중보 및 시설물(교각, 수상건물등)의 설치로 유속의 감소와 함께 체류시간을 증가시키는 결과를 초래하였다.

따라서 한강 본류 수역에서는 상습적인 정체구간이 발생하였고 수리학적 체류시간이 길어지고, 인·질소등의 영양염류가 충분히 존재하면 발생할 가능성이 높을 것으로 추측된다. 다시 말해 조류가 유속에 의해 떠내려가지 않고 인·질소를 이용할 수 있는 기회가 많아지고 그 밖에 일사량이 충분하고, 수온이 25℃ 이상으로 조건이 맞으면 녹조가 발생할 가능성이 높아질 것이라는 것으로 설명될 수 있다.¹²⁾

7월에 DIN/DIP 비가 43으로 높은 것은 인의 낮은 농도와 질소가 풍부했기 때문이다 (Fig. 9).

SiO₂/DIP 변동의 계절적인 변화를 보면 강우 유입에 의해 규소의 농도가 증가된 춘계와 하계에 매우 높게 조사 되었으며 (Fig. 10) 추계에는 10이하의 낮은 값이 자주 관찰 되었다.

SiO₂/DIP 비가 높을 때에는 규조류는 남조류보다 효과적으로 성장할 수 있다고 보고 되었다.¹⁴⁾

본 조사 수역은 규소의 농도가 감소하는 시기인 추계에는 식물플랑크톤의 군집구조의 변동에 인 뿐만 아니라 규소도 중요한 제한 요인으로 작용할 수도 있음을 암시 하며 한강에서 식물플랑크톤의 천이에 대한 명확한 기작을 파악하기 위해서는 추후에 실험실에서 배양 실험을 통해 이에 대한 실험이 선행되어야 할 것이다.

3. Chl-a 및 식물플랑크톤 현존량

녹조현상을 간접적으로 평가하는 지표로 널리 이용되고 있는 Chl-a 농도는 강우량이 많은 시기에는 빠른 유속에 의해 부유성 조류가 대부분 떠내려 가기 때문에 감소한 후 유량이 감소하는 갈수기에 증가하는 경향을 보이고 있다.

본 조사기간동안 녹조현상의 지표종인 남조류 *Microcystis* sp.가 7월에 대량 발생하여 4일간 조류주의보를 발령하기도 하였다. 이 때의 식물플랑크톤 현존량은 20,000 cell ml⁻¹이었으며 (Fig. 8) Chl-a농도는 24.8 μg l⁻¹ (Fig. 7), 남조류의 세포수는 평균 4000 cell ml⁻¹로 나타났다.

특히 *Microcystis*는 Microcystin 이라는 독소를 발현하여 야생동물이나 가축등에 피해를 주고 최근에는 사람에 대한 간접피해 사례도 보고된 바 있다.⁸⁾

본 조사기간 동안에는 다행스럽게도 집중호우의 영향으로 대부분의 조류가 유속에 의해 쓸려 내려가 점차로 식물플랑크톤 현존량에 최소값을 나타냈다.

집중호우 후 수온이 20℃ 이하로 내려가면서 또다시 녹조류와 규조류가 증가하여 식물플랑크톤 현존량이 증가하는 경향을 나타냈으며 Chl-a농도의 계절 변화와 같이 식물플랑크톤의 현존량도 겨울철 규조류가 크게 증식

Table 2. Correlation matrix of environmental parameters in surface water of Han River, Korea in 2000

	Temp.	D.O	pH	BOD	SiO ₂	NH ₄	NO ₂	NO ₃	DIN	T-N	PO ₄ ³⁻	T-P	Chl-a
D.O	-0.612**	1.000											
pH	-0.162	0.274**	1.000										
BOD	-0.363**	0.034	0.058	1.000									
SiO ₂	0.576**	-0.414**	-0.378**	-0.354**	1.000								
NH ₄	-0.143	-0.190	0.049	0.434**	-0.213*	1.000							
NO ₂	0.046	0.121	-0.073	-0.027	0.189*	-0.195*	1.000						
NO ₃	-0.146	-0.191*	-0.171*	0.169	-0.035	0.024	-0.019	1.000					
DIN	-0.171	-0.205*	-0.153	0.319**	-0.056	0.374**	0.243**	0.874**	1.000				
T-N	0.126	-0.109	-0.039	-0.036	0.053	-0.050	0.118	-0.077	-0.048	1.000			
PO ₄ ³⁻	-0.153	-0.016	-0.104	0.236**	-0.016	0.275**	-0.082	0.181*	0.245**	-0.107	1.000		
T-P	-0.011	0.026	-0.046	-0.098	-0.043	-0.008	0.317**	0.394**	0.448**	-0.002	0.172	1.000	
Chl-a	0.003	0.047	-0.012	-0.158	-0.037	-0.066	0.301**	0.357**	0.385**	-0.008	0.126	0.994**	1.000
St.	-0.030	0.127	0.204*	0.546**	-0.233**	0.161	0.135	-0.092	0.033	0.150	-0.233**	-0.096	-0.114

- Temp : temperature (°C), D.O : dissolved oxygen (mg l⁻¹), T-N : total nitrogen (mg l⁻¹), T-P : total phosphorus (mg l⁻¹), Chl-a : Chlorophyll-a (µg l⁻¹).
- 0.01 < P **, 0.05 < P *

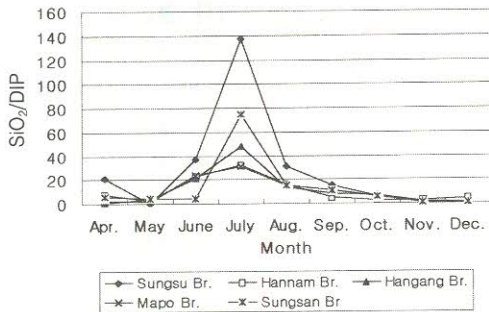


Fig. 10. Monthly variation of SiO₂/DIP in sampling sites at the Han River, Korea in 2000

하는 시기에 최대값을 나타냈고 봄철 규조류의 개체수가 감소하기 시작하여 집중호우 시기에 최소값을 보이는 계절변동을 나타냈다. 또한 집중호우 후 9월이 되면서 DIN(무기질소)과 T-N, T-P, Chl-a등도 함께 낮은 농도를 나타냈다.

일반적으로 녹조발생은 T-N/T-P ratio(weight)가 8 이상이면 나타나는 것으로 알려져 있으며⁸⁾ 본 조사 결과에서 한강본류 수역은 대부분 45 이상을 나타내고 있다.

남조류의 출현 및 bloom의 원인은 주로 수온, 광량등의 물리적 환경요인과 pH, 질소, 인 등의 영양염 및

N/P 비 등의 화학적 환경요인의 영향이 매우 크다고 알려져 있다¹³⁾

남조류는 인산을 흡수하는 능력과 질소 고정 능력을 지니고 있어 영양염류면에서 증식 속도가 매우 빠르므로 영양염류 농도에 관계없이 불리한 조건에서도 항상 발생할 가능성이 높은 것으로 사료된다.⁸⁾ 따라서 앞으로 녹조발생을 근본적으로 제어하려면 우선적으로 영양염류와 점오염원, 비점오염원을 저감시키고 하, 폐수 처리장의 배출허용기준의 강화와 적절한 수질관리를 위하여 하천 수질환경기준에도 인, 질소의 항목을 추가 시키는 방안도 검토해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

표층수의 환경요인 항목간의 상관성을 살펴보면 (Table 2) 남조류와 수온, 식물플랑크톤 현존량과 BOD 등에서 높은 상관관계를 나타냈고 Chl-a와 T-P에서는 상관계수 0.994로 큰 유의성이 있는 것으로 나타났다.

결론

2000년 4월부터 12월까지 한강에 대한 영양단체를 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 무기영양염 중 인산염 (PO_4^{3-})과 규산염 (SiO_2)은 각각 $0.044\sim 0.212\text{ mg l}^{-1}$, $0.119\sim 2.647\text{ mg l}^{-1}$ 범위로 변화 하였고 춘계와 추계에 농도변화가 관찰되었다.
2. 용존무기질소 (DIN)의 농도는 $0.321\sim 3.724\text{ mg l}^{-1}$ 범위로 나타났고 9월에 강우에 의한 급격한 농도 변화를 나타냈다.
3. T-N과 T-P는 각각 $3.533\sim 7.529\text{ mg l}^{-1}$ (평균 6.080 mg l^{-1}), $0.080\sim 0.233\text{ mg l}^{-1}$ (평균 0.162 mg l^{-1})로 T-N은 지난해 보다 높게 나타난 반면 T-P는 약간의 감소를 나타냈다.
4. Chl-a 농도는 $2.0\text{ }\mu\text{g l}^{-1}$, $32.2\text{ }\mu\text{g l}^{-1}$ 의 농도범위로 비교적 심한 변동폭을 나타내었으며 T-P와 강한 상관관계를 나타내었다 ($r=0.99$)
5. 식물플랑크톤 현존량은 7월 bloom이 일어나는 시기에 $20,000\text{ cell ml}^{-1}$ 를 나타냈고 강우후 9월에 1151 cell ml^{-1} 로 급격한 감소를 나타냈다.
6. Jack Edward Mckee and Harold W.Wolf : Water Quality Criteria. California state printing office. 2nd Ed. 181(1971).
7. 서울특별시 : 한강생태계 조사연구 보고서(1990).
8. 서울특별시 : 한강조류발생 방지대책 및 수질개선 방안연구 p67~73(1999).
9. Lund, J.W.G. : Studies on *Asterionella formosa* HASS. Nutrient depletion and the spring maximum J. Ecol. 38:1-35(1950).
10. Happey, C.M. : The effects of stratification on phytoplanktonic diatoms in a small body of water. J. Ecol. 58 : 635-651 (1970).
11. Hecky, R.E. and Kilham, P. : Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environment : A review of recent evidence on the effects of enrichment. Limnol. Oceanogr. 33 : 796-822(1988).
12. 서울특별시 : 한강생태계 조사연구 보고서(1990).
13. Prygiel, J. and Leitaó, M. : Cyanophyceae bloom in the reservoir of Val Joly (Northern France) and their development in downstream rivers. Hydrobiologia, 289 : 85-96(1994).
14. Holm, N.P and Armstrong, D.E. : Role of Nutrient limitation and Competition in controlling the populations of *Asterionella formosa* and *Microcystis aeruginosa* in semicontinuous culture. Limnol. Oceanogr, 26 : 622-634.(1981).

참 고 문 헌

1. 시정개발연구원 : 수질오염측정망 구성을 위한 조사연구 p17(1995).
2. 이인선 : 상수원 조류에 의한 이취미 발생. 첨단환경. 6:8, p8-9(1998).
3. 주기재 : 낙동강 생태연구, 금정, 서울 p150(1995).
4. 김좌관 : 수질오염개론, 동화기술, 서울 p194(1993).
5. 서울특별시 : 한강 생태계 조사연구. p47-48(1998).