

漢江의 富營養化에 대한 考察

環境生態科

鄭鍾洽·金教鵬·李尙壽·崔容碩
許美淑·柳童球·申正植·申載英

The Investigation of the Han River Eutrophication

Division of Environment Ecology

Jong Heub Jung, Gyeo Bung Kim, Sang Su Lee, Yong Suk Choi,
Mi Suk Heo, Dong Koo Ryu, Jung Sik Shin and Jae Young Shin

= Abstract =

Most river quality problems are generated by pollutants which are discharged into the river as a consequence of human activities. And eutrophication occurs when water is over enriched with nutrients, principally nitrate and phosphate. Both these nutrients are found in many waste products, especially sewage, even when the waste is treated.

Eutrophication is concern in lakes, but it also causes prblems in river.

Wide growth of phytoplankton in rivers, leads to blockage of channels, but the main concern is deoxygenation because of the increase in plant life's demand for oxygen in rivers. Fish, plant and animals die due to lack of oxygen. The increase of algae floating on the tops of water looks ugly and has attracted public attention and concern in recent years.

One way of controlling eutrophication is to restrict the amount of waste carrying nitrate or phosphate from entering the water in the first place. Another way is to remove it from the water after it has been entered.

This study was carried out to investigate on the trophic state, nutrients and chlorophyll-a concentrations in the Han River.

The results were as follows :

1. Concentrations of total nitrogen were 2.208~9.221(5.133)mg/ℓ.
2. Concentrations of total phosphorus were 0.045~0.614(0.195)mg/ℓ.
3. Chlorophyll-a concentrations were 0.0~25.3(9.6)mg/m³.
4. The correlation coefficient, between T-P and chlorophyll-a concentration was $r = -0.586$ at sungsan sampling site.
5. The correlation coefficient was $r = -0.578 \sim -0.767$, between Paldang Dam outflow and chlorophyll-a concentration at all sampling sites.

序 論

한강은 서울 600년 역사 이래 우리 민족의 젖줄이었다. 한강의 물줄기는 497.5km에 이르고 유역면적은 26,219km²이며 한반도에 있는 하천 중에서 네번째로 긴 강이다.¹⁾ 이러한 한강은 서울시계로 접어들어 서울의 거의 중앙을 관통하여 동쪽에서 서쪽으로 흐르고 있으며 일천만 수도권인구의 식수공급원, 수상레저 및 휴식공간의 제공원으로서 서울 600년의 역사는 한강의 역사라 해도 과언이 아닐 정도로 서울과 한강은 밀접한 관계를 유지하여 왔다.

이에따라 한강은 식수원으로서 중요성뿐만 아니라 서울시민들에게 쾌적한 휴식 및 레저공간의 제공, 철새도래지로서의 생태학적측면 등에서 양호한 수질이 유지되도록 관리되어야 할 필요가 있으며 특히 한강 강변의 10개소에 이르는 시민공원지구의 조성에 따른 시민들의 한강 접근성 향상은 이의 필요성을 더욱 증가시키고 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 악화시키고 있는 오염된 수계로 인식되기도 하였으며 특히 년중 높은 농도를 나타내는 영양염류의 농도 때문에 일부구간에서는 조류가 발생하여 용존산소를 과포화시키거나 pH를 높이며 좋지 않은 냄새를 유발하기도 하였다.^{2), 3), 8)}

기후 특성상 서울지역의 10년간 년평균 강수량은 1350mm로 전 세계의 연평균 강수량에 비하면 적은 양은 아니지만 전 강수량의 70% 이상이 6~9월에 집중되고 있어 나머지 기간동안 한강유지수의 대부분은 상류에 위치하고 있는 댐수 특히 팔당댐 방류수에 크게 의존하고 있어 주기적으로 갈수기에 수질이 악화될 우려가 있다.

이런 한강이 4계절 시민들에게 보다 친숙한 공간이 되도록 하려면 한강에 대한 영양염류의 저감 등 오염도 저감대책수립으로 좀더 맑고 깨끗한 수질유지를 위한 관리목표 설정이 필요하다.

본 조사는 한강의 영양염류, Chlorophyll-a 농도를 조사하여 한강의 영양상태 파악 및 이들과 연계된 팔당댐 방류량과의 관계 분석 등 향후 한강의 수질개선 방향을 모색해 보고자 실시하였다.

調査對象 및 方法

漢江의 잠실수중보에서 신곡수중보 사이 총 7개 지점에서 98년 1월부터 12월까지 월 2회 시료를 채취하여 수온, 용존산소 및 pH는 현장측정하고 기타 항목은 실험실로 운반하여 수질환경오염공정시험법에 의해 분석을 실시하였다.

주요 조사항목은 수온, 용존산소(DO), pH, 총인(T-P), 총질소(T-N) 및 Chlorophyll-a로 하였으며 채수지점은 그림 1과 같다.

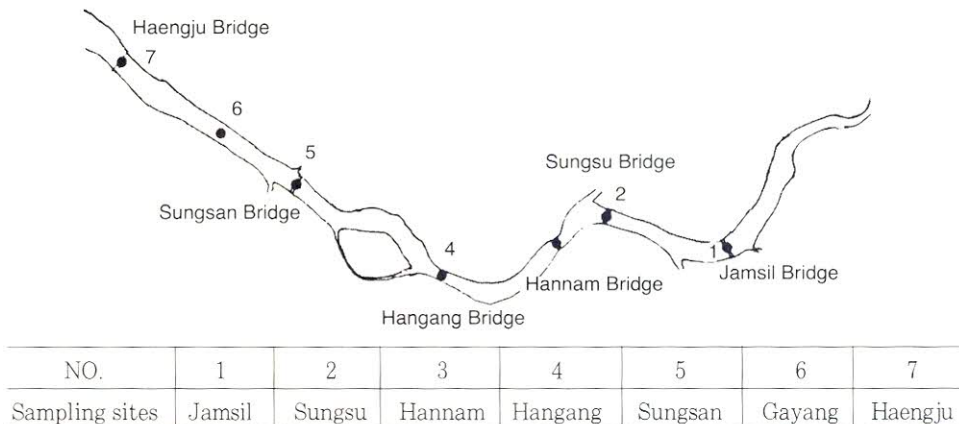


Fig. 1. Sampling sites in the Han river.

結果 및 考察

조사기간중 서울지역의 기후 특성은 표 1, 2와 같다.⁴⁾
 표 1에서 '98년 서울지역의 년 平均氣溫은 13.8℃로 표 2의 과거 10년간 평균기온 12.6℃ 및 지난해의

년 平均氣溫인 12.9℃보다 높았다. 년간 降水量은 2349.1mm로 과거 10년간 平均강수량 1357.0mm 및 지난해의 년 강수량 1210.2mm에 비해서 약 1000mm 많이 내렸으며 지난해와 달리 8월에 강우가 집중되어 년간 강수량의 약 53%를 차지하는 집중호우의 형태였다. 년간 강수량이 2000mm를 넘은 경우는

Table 1. Weather condition of Seoul in sampling periods(1998).

Item Month	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Wind Speed (m/s)	Relative Humidity (%)	Wind Direction	Evaporation (mm)
1	-1.4	10.4	2.4	59	NW	43.8
2	3.3	32.3	2.4	59	WNW	53.1
3	7.3	45.1	2.8	58	WSW	90.2
4	15.6	120.2	2.2	65	SW	102.6
5	19.0	121.5	2.2	59	WSW	144.3
6	21.9	234.1	2.1	67	WSW	128
7	24.9	311.8	2.5	74	SW	12.3
8	25.0	1237.8	2.0	78	NW	100.6
9	23.0	177.9	1.8	70	NNW	113.4
10	17.0	27.4	1.9	67	SW	90.4
11	7.3	26.9	2.2	61	WNW	54.2
12	2.3	3.7	2.2	59		
SUM		2349.1				932.9
Average	13.8	195.8	2.2	65		84.8
Maximum	25.0	1237.8	2.8	78		144.3
Minimum	-1.4	3.7	1.8	58		12.3

Table 2. Weather condition of Seoul in last 10 years(1988~ 1997).

Item Month	Temperature (°C)	Annual Precipitation (mm)	Wind Speed (m/s)	Relative Humidity (%)
88	12.1	760.8	2.5	61
89	13.0	1426.3	2.4	66
90	12.8	2355.5	2.4	71
91	12.3	1158.2	2.3	66
92	12.5	1454.9	2.2	67
93	12.0	1292.7	2.4	68
94	13.5	1055.8	2.6	65
95	12.2	1598.6	2.3	63
96	12.2	1256.6	2.2	62
97	12.9	1210.2	2.3	62
average	12.6	1357.0	2.4	65
maximum	13.5	2355.5	2.6	71
minimum	12.0	760.8	2.2	61

지난 '90년에 이어 근 10년만의 현상이었다. 년 평균 相對濕度는 65%로 전년도의 62%보다 높아졌고 과거 10년 평균 65%와 같았다. 이와 같이 '98년 서울지역의 기후는 '97년보다 온도, 습도가 높고, 강우량도 많은 무더운 기후였던 것으로 나타났다.

漢江 하류지역의 수질에 커다란 영향을 미치는 '98년의 팔당댐의 放流量은 그림 2와 같이 예년 보다 많아진 강수량 때문에 특히 7, 8월에 방류량이 크게 증가하였으며 년 평균 방류량도 크게 증가하여 년 평균 713CMS로 지난해의 년 평균 464CMS보다 많았다.

일반적으로 부영양화의 정도는 연간의 강우량에 의해 크게 좌우되며 팔당방류량은 수체의 체류시간에 영향을 주고 홍수시에는 부착물이나 퇴적물을 씻겨 내려가게 하여 하천생태계에 영향을 미치는 요인으로서 대개 팔당댐 방류량이 증가하면 한강의 수질오염도는 낮아지는 경향이 있다.⁹⁾

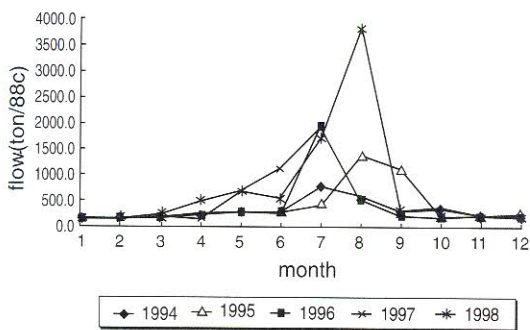


Fig. 2. Monthly discharge of Paldang Dam.

조사기간중의 수중 용존산소(DO)농도는 4.7 ~ 14.7 (평균 10.0)mg/l로 전년도의 년 평균 9.2mg/l보다 증가하였으며 그림 3과 같이 잠실지점을 제외한 6개 조사지점에서 8월의 최대 강우기 뒤를 이어 연중 최고수온을 나타냈던 9월에 최저농도(평균 6.2mg/l)를 나타냈으나 US EPA에서 언급하고 있는 물고기 생존을 위한 최저 DO농도 5.0mg/l 이하로⁷⁾ 내려간 경우는 가양지점에서 1회만 나타나 DO농도수준은 지난해보다 전반적으로 좋아졌다.

조사기간동안 한강의 7개 조사지점 별 년평균 수중 DO농도와 Chlorophyll-a 농도 사이의 상관성은 잠실($r = 0.599$), 성수($r = 0.398$), 한남($r = 0.400$),

한강($r = 0.692$), 성산($r = 0.729$), 가양($r = 0.707$) 및 행주($r = 0.575$)로 성산지점을 중심으로 높게 나타났다.

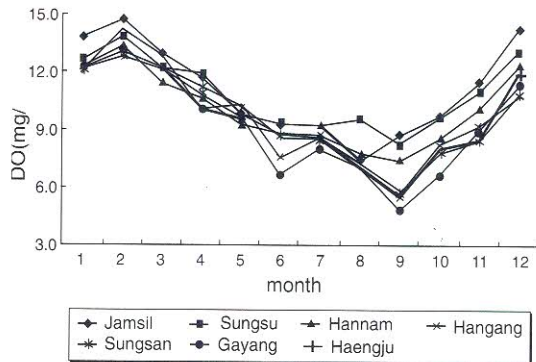


Fig. 3. Variation of DO by sampling sites.

대기압 760mmHg, 산소 20.9%인 수증기포화 대기중의 순수한 수증기포화 DO농도를 기준으로 한 각 측정지점의 수중 DO포화도는 113.1 ~ 56.1(평균 93.8)%로 지난해의 년 평균 88.2%보다 높아졌으며 잠실, 성수지점은 지난해와 같이 년 중 거의 과포화상태에 있었다.

일반적으로 하천의 溶存酸素는 대기중에 존재하는 산소의 수표면 재포기작용으로 유지되지만 부분적으로 조류의 光合成作用에도 영향을 받아 과포화될 수도 있으므로^{3), 8)} 잠실, 성수지점의 연중 과포화된 수중 DO농도는 이들 조류의 영향과 잠실수중보 월류에 의한 수표면 산소전달을 증가의 영향 때문으로 추측되며 8

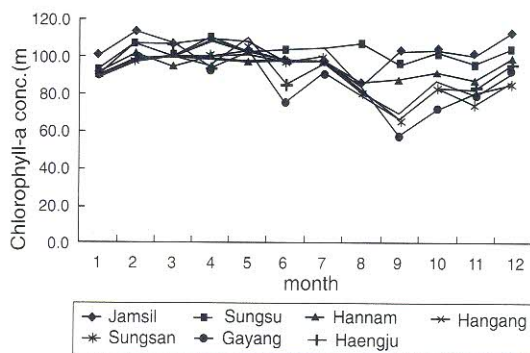


Fig. 4. Variation of DO saturation by sampling sites.

월에 집중되어 내린 강우의 영향으로 조류농도가 낮아지고 수온이 년 중 최고치를 나타내는 9월에 한강하류를 중심으로 포화도가 내려가는 현상이 지난해에 이어 계속 나타났다.

한편 하천생태계에서 질소와 인의 유입은 강우와 식생에서의 유출물, 그리고 인구증가에 따른 인간활동의 증가에 의해 이루어지게 되는데 수체내의 영양단계를 나타내는 指標는 T-N, T-P와 같은 영양염류, 植物性 플랑크톤의 농도 등으로 여러 자료들에 이들에 대한 富營養化 判定基準이 제시되고 있지만⁶⁾ 본 조사결과에서 나타난 영양염류의 농도는 표 3, 4와 같이 T-P : 0.045 ~ 0.614(평균 0.195)mg/ℓ 및 T-N : 2.208 ~ 9.221(평균 5.133)mg/ℓ로 지난해의 년 평균 T-P : 0.277mg/ℓ 및 T-N : 6.968mg/ℓ에 비해 농도가 감소하기는 하였다.

그러나 이것은 평년에 비해 유난히 많았던 강우의 영향이 컸던 것으로 T-P 농도는 1월부터 5월까지 낮아지는 추세를 보이다가 집중강우기 이후 9월부터는 성수지점보다 하류지점에서의 농도가 급격히 증가하여 예년의 높은 농도를 유지하였다. 잠실지점에서의 T-P 농도는 다른 6개 지점의 T-P농도와 달리 연중 변화폭이 적고 그 농도가 다른 지점보다 낮아 한강의 T-P농도는 잠실수중보하류에서 유입되는 오염원에 더 많은

영향을 받는 것으로 나타났다.

일반적으로 인은 담수에서 가장 결핍되어 있는 원소 중 하나이므로 수중식물의 양은 보통 인의 농도에 의해 좌우되며 이론적으로는 수중에 존재하는 인의 농도만큼 식물성플랑크톤이 성장할 수 있어 식물성플랑크톤(chlorophyll-a)의 농도와 인(T-P)의 농도는 대체로 비례하는 것으로 알려져 있지만⁹⁾ T-P의 농도가 높아져 50~100mg/m³ 이상이 되면 Chlorophyll-a 농도는 T-P농도에 비례하여 증가하지 않게 되는데 조사 기간 중 한강에서는 TN/TP 비가 26으로 높고 연중 T-P의 농도가 50mg/m³이상의 높은 상태를 유지하므로 일반 호소수에서와 같이 T-P의 농도가 더 이상 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 한계인자로서의 기능이 약화되었다. 따라서 한강에서는 오히려 식물성플랑크톤의 성장제한요소로 작용하는 것은 빛과 체류시간인 것으로 생각된다.^{7),11)}

'98년 한강에서 Chlorophyll-a와 T-P사이의 상관성은 Chlorophyll-a 농도와 DO농도 사이의 상관성이 가장 높았던 성산지점에서 r = 0.586으로 7개 측정 지점 중 가장 높게 나타났다.

이번 조사기간 중 강우현상이 8월에 집중되었기 때문에 이 기간에는 오염물질농도가 희석 및 쓸려내려가는 효과로 일시 개선될 수도 있어 T-N의 농도는 8월

Table 3. Concentrations of T-P by sampling sites. (unit : mg/ℓ)

Month \ Sites	Sites									
	Jamsil	Sungsu	Hannam	Hangang	Sungsan	Gayang	Haengju	avg.	max.	min.
1	0.068	0.172	0.206	0.330	0.303	0.408	0.414	0.272	0.414	0.068
2	0.076	0.200	0.255	0.324	0.331	0.336	0.359	0.269	0.359	0.076
3	0.075	0.140	0.121	0.206	0.234	0.239	0.241	0.180	0.241	0.075
4	0.064	0.088	0.201	0.192	0.205	0.239	0.217	0.172	0.239	0.064
5	0.056	0.055	0.076	0.090	0.095	0.126	0.109	0.087	0.126	0.055
6	0.058	0.073	0.159	0.117	0.146	0.356	0.231	0.163	0.356	0.058
7	0.058	0.059	0.108	0.071	0.119	0.127	0.220	0.109	0.220	0.058
8	0.077	0.305	0.149	0.089	0.100	0.092	0.309	0.160	0.309	0.077
9	0.058	0.070	0.159	0.201	0.215	0.227	0.203	0.162	0.227	0.058
10	0.076	0.151	0.263	0.216	0.228	0.537	0.210	0.240	0.537	0.076
11	0.045	0.061	0.230	0.244	0.242	0.237	0.614	0.239	0.614	0.045
12	0.066	0.127	0.427	0.392	0.330	0.281	0.371	0.285	0.427	0.066
avg.	0.065	0.125	0.196	0.206	0.212	0.267	0.291	0.195		
max.	0.077	0.305	0.427	0.392	0.331	0.537	0.614		0.614	
min.	0.045	0.055	0.076	0.071	0.095	0.092	0.109			0.045

Table 4. Concentrations of T-N by sampling sites.(unit : mg/ ℓ)

Month	Sites									
	Jamsil	Sungsu	Hannam	Hangang	Sungsan	Gayang	Haengju	avg.	max.	min.
1	3.874	4.666	5.175	5.328	5.842	5.774	5.904	5.223	5.904	3.874
2	3.677	5.821	6.522	7.110	7.520	7.756	8.445	6.693	8.445	3.677
3	2.738	5.606	4.474	5.723	5.793	6.026	6.195	5.222	6.195	2.738
4	2.980	3.828	7.101	6.043	5.113	5.458	5.670	5.171	7.101	2.980
5	2.734	2.705	2.706	3.722	3.303	4.431	3.973	3.368	4.431	2.705
6	4.185	4.032	4.692	4.394	4.572	6.799	5.323	4.857	6.799	4.032
7	4.052	4.232	4.823	4.673	4.490	4.602	4.522	4.485	4.823	4.052
8	2.246	2.429	2.208	2.429	2.880	3.057	5.649	2.985	5.649	2.208
9	2.719	3.440	5.275	4.291	4.322	7.816	5.115	4.711	7.816	2.719
10	3.289	3.419	5.175	5.083	5.698	8.869	6.725	5.466	8.869	3.289
11	4.351	4.951	6.576	6.890	6.183	6.363	9.221	6.362	9.221	4.351
12	3.312	5.549	7.222	8.589	8.110	8.025	8.568	7.053	8.589	3.312
avg.	3.347	4.223	5.162	5.356	5.319	6.248	6.276	5.133		
max.	4.351	5.821	7.222	8.589	8.110	8.869	9.221		9.221	
min.	2.246	2.429	2.208	2.429	2.880	3.057	3.973			2.208

에 대부분의 지점에서 일시적으로 농도가 감소하였지만 9월이후 갈수기로 접어들면서 다시 그 농도가 지속적으로 증가하여 한강에의 T-N 유입원에 대한 발전적인 개선은 미미했던 것으로 나타났으며 T-N은 T-P와 달리 잠실지점부터 년중 높은 농도를 나타내고 있어 T-N의 한강에 대한 오염 부하원은 T-P와는 다른 양상을 나타내어 T-N 농도제어는 잠실수중보 상류지역에 대한 오염도저감대책마련이 필요할 것으로 보인다.

Table 4. Concentrations of T-N by sampling sites.(unit : mg/ l)

일반적으로 식물성플랑크톤이 증식하기 위해서는 영양염류의 농도 이외에도 다른 인자의 작용이 필요하기 때문에 영양염류의 농도가 높다고 해서 반드시 조류의 증식이 많다고 볼 수는 없지만⁸⁾ 한강은 년 중 높은 상태인 영양염류농도를 기반으로 온도의 계절적 변화, 느린 유속 등 주변환경이 조류증식에 유리한 여건을 충분히 가지고 있다.

그러나 '98년에는 '97년보다 많았던 팔당 방류량과 '97년보다 낮아진 일조시간 및 수평면일사량으로 한강에서의 조류성장조건을 '97년보다 악화시킨 것으로 나타났다.

이에 따라 '98년 chlorophyll-a 년 평균농도는 '97년도의 15.4mg/m³보다 크게 감소한 년 평균 9.6mg/

m³로 나타났다. chlorophyll-a 농도는 체류시간이 짧은 수체에서는 체류시간이 가장 중요한 요소로 작용하여 우기에는 떠내려가는 효과에 의해 식물성플랑크톤의 농도가 감소하고 갈수기에 농도가 높아지는 경향이 있어 그림 5와 같이 비교적 저온기인 1월 ~3월에 걸쳐 높은 농도를 보이던 chlorophyll-a 농도가 집중강우기인 8월에는 모두 없어졌으나 상류보다 수질오염도가 높은 성산지점 하류를 중심으로 11월까지 chlorophyll-a 농도가 높아졌다.

조사기간 중 년간 팔당댐 방류량과 각 지점별 년간

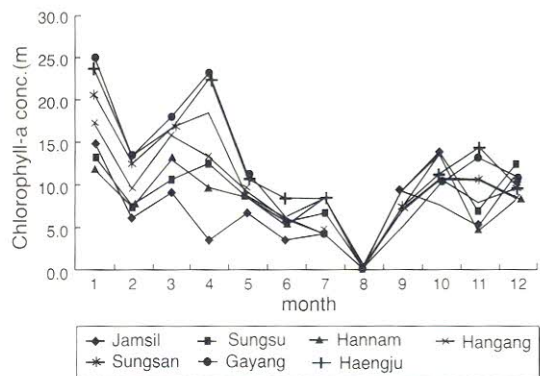


Fig. 5. Variation of Chlorophyll-a by sampling sites.

chlorophyll-a 농도사이에는 $r = -0.578 \sim -0.767$ 의 상관성을 나타냈다.

일반적으로 식물성플랑크톤의 光合成 最適溫度는 종과 분류군에 의해 상당히 차이가 있지만 규조류가 낮고 녹조류와 남조류가 높은 경향이 있으며(8) 한강에 출현하는 식물성플랑크톤은 수체의 계절적인 온도변화에 적응하여 저온기 및 고온기에 규조류 → 녹조류 → 규조류의 순환을 반복하면서 한강에서 년중 높은 chlorophyll-a 농도를 나타내고 있다.

이와 같이 한강은 이미 계절적으로 높은 식물성플랑크톤의 농도를 나타내고 있으며 T-N, T-P 등 영양염류가 년중 높은 상태이고 일조시간, 수온의 계절적인 변동과 수중보 및 조수의 영향으로 수체의 체류시간이 갈수기에 길어지는 요인 등으로 식물성플랑크톤의 성장에 적당한 다수의 환경조건이 존재하며 특히 오염이 심한 성산지점 하류 구간에서 한강의 수리특성에 따른 유속의 저하, 조수의 영향 등으로 Chlorophyll-a의 농도가 높아지는 특성을 나타내므로 한강의 영양단계에 대한 수질관리는 한강으로 부하되는 영양염류유입원에 대한 충분한 대책이 이루어질 때까지는 팔당방류량에 연계된 한강하류부근 Chlorophyll-a의 농도제어 대책이 필요할 것으로 생각된다.

結 論

1998년 1월부터 12월까지 조사기간동안 漢江에 대한 營養鹽類 농도는 다음과 같다.

1. T-N : 2.208 ~ 9.221 (평균 5.133)mg/l로 지난해보다 감소하였다.
2. T-P : 0.045 ~ 0.614 (평균 0.195)mg/l로 지난해보다 감소하였다.
3. Chlorophyll-a : 0.0 ~ 25.3 (평균 9.6)mg/m³로 강우의 영향으로 지난해보다 크게 감소하였다.
4. T-P농도와 Chlorophyll-a농도 사이에는 성산지점에서 $r = 0.586$ 로 조사구간중 가장 높은 상관성을 나타냈다.
5. 팔당댐 방류량과 Chlorophyll-a농도 사이에는 각 지점별로 $r = -0.578 \sim -0.767$ 의 마이너스

상관 성을 나타냈다.

參 考 文 獻

1. 한강관리사업소 : 한강. (1994)
2. 이인선 : 상수원 조류에 의한 이취미 발생, 첨단환경기술, 6:8, p8-9 (1998)
3. 주기재 : 낙동강 생태연구, 금정, 서울 p150(1995)
4. 기상청 : 기상월보, p12(1998)
5. 정종흡 : 한강의 부영양화에 대한 고찰, 서울시보 건환경연구원, p264(1996)
6. 서울특별시 : 漢江生態系調查研究, p.233(1994).
7. Jack Edward Mckee and Harold W. Wolf : Water Quality Criteria, California state printing office, 2nd Ed., p.181(1971).
8. 金坐官 : 水質汚染概論, 東和技術, 서울 p194 (1993).
9. 류재근 : 담수생태계 보존대책(우리나라 호소수질의 현황과 보전전략), '93공동심포지움 한국생태학회·한국육수학회, p104(1993).
10. 崔榮吉, 韓明洙, 安泰永, 郭魯泰 : 담수의 부영양화, 신광문화사, 서울 p194(1995).
11. 서울특별시 : 漢江生態系調查研究報告書(1990).
12. 曹圭松, 姜寅求, 權伍吉, 金凡徹, 羅圭煥, 安泰奭, 李種範, 李燦基, 李海金, 全相洙, 崔俊吉 : 湖水環境調査法, 동화기술, 서울, p.321(1991).
13. 金微鎬 : 댐, 貯水池(延草湖)의 富營養化 模型의 比較研究, 한양대학교환경과학대학원석사학위 논문, p.21(1989).
14. 西澤一俊, 千原光雄 : 藻類研究法, 共立出版(株), 東京, p.448(1979).
15. 김범철, 박주현, 황길순, 최광순 : 호소의 부영양화에 관한 한, 일 세미나, 국립환경연구원, 수질 보전학회, p39(1996).
16. 이시진, 윤세의, 박석순 : 水質模型과 管理, 東和技術, 서울 p.383(1993).
17. 李鉉東, 柳亨烈, 金元滿 : 生物學的 窒素 및 磷 除去法에 관한 研究, 대한위생학회지, 12:48(1992).
18. 岩佐義朗 : 湖沼工學, 壯光舍印刷(株), 東京 p224(1990).