

삽교호의 수질특성에 관한 연구

Study on the Characteristics of the Water Quality in Lake Sapkyo

김형중* 윤경섭* 안열* 이광식*
Kim, Hyung Joong · Yoon, Kyung Sup · An, Yeoul · Lee, Kwang Sik

Abstract

The water quality indexes of Lake Sapkyo in Asan city Korea, were investigated and analyzed to diagnose and assess the water environment. The SS and T-P concentrations in influent streams were highly variable during the rainstorm event because of the first-flush washout from the impervious area and the soil loss from the cultivation area. The mean concentrations of SS, COD, T-N, T-P in Sapkyo Lake didn't satisfy quality criteria for agricultural water, and the Chlorophyll-a concentration was highly variable in summer. The limiting factor of Lake Sapkyo was phosphorus, and the trophic state was meso-eutrophic. Therefore, it is needed that water quality improvement for eutrophication. Among the relationships between water quality items, that of COD, T-P, and T-N have weak relationship with Chlorophyll-a compared with other lakes. The seasonal succession of phytoplankton was in the order of Cryptophyta, Bacillariophyta → Cyanophyta → Bacillariophyta in Lake Sapgyo.

The water quality was bad around the inlet of the Lake Sapkyo due to inflow. It was suggested that non-point source pollutant needed to be treated before entering Lake Sapkyo.

1. 서론

산악지가 많은 우리나라는 논으로 활용할 만한 토지가 그리 많지 않아서 비교적 논으로 이용 가능성이 높은 곳을 선택하여 간척지 개발을 시도했다. 또한 지형적으로 서남해안에는 복잡

한 해안선을 따라 광활한 간척지가 산재하고, 리아스식 해안이 발달하여 담수호 조성에 적합한 하구가 많아 옛날부터 간척사업이 성행해 왔다(윤경섭, 2001). 특히 1970년대부터 대규모 간척지 개발과 함께 서남해안 일대에 하구담수호가 조성되기 시작하였다. 하구언과 방조제의

*농업기반공사 농어촌연구원(iamwater@karico.co.kr)

키워드 : 물리적특성, 상관관계, 제한영양염류, 부영양화도, 식물성플랑크톤

축조로 간척농지를 확대하고, 담수호의 저류수로 관개하여 식량증산에 기여해 왔으며, 연안의 육로 거리를 단축하여 지역 교통의 개선에도 큰 역할을 하였다. 그러나 날로 증가되고 있는 상류지역의 오염원으로 인한 담수호 수질오염이 사회적인 문제로 대두되고 있다(윤경섭, 2001).

담수호 내의 수질은 다양한 환경인자에 반응하여 나타나는 결과물이기 때문에 유입수의 수질특성, 호내수질특성, 담수호 및 유역의 물리적 특성, 수질항목사이의 상관관계, 기후 등을 종합적으로 검토하여 수질개선방안을 수립해야 할 것이다.

우리나라 담수호를 포함한 인공호수의 평균수심은 대부분 10m 이하로서 일단 부영양화되면 호수바닥에 쌓이는 유기물이 많아져 저질층으로부터 용출되는 오염물질(특히 인)의 영향을 많이 받을 가능성이 높다. 이를 호수로부터 영양물질의 내부부하(internal loading)라고 하는데, 이 경우 부영양화의 조절을 위하여 외부유입수의 수질을 개선한다 할지라도 실제 호수내의 수질은 개선되지 못하는 경우가 발생할 가능성이 높다(환경부, 2001). 김좌관 등(1992)은 국내 인공호소는 외국의 자연호수에 비해 낮은 수심과 작은 저수용량으로 높은 생산성을 유발할 수리·수문학적 특성을 가지고 있다고 기술하고 있다. Vollenweider (1968)는 Rawson's (1955)의 깊은 호소는 낮은 호소에 비하여 부영양화에 덜 민감하다는 이론에 기초하여 인부하량과 평균수심사이의 관계를 유도하였으며, Vollenweider(1975)는 수심만이 아니라 체류시간도 부영양화에 영향을 미치는 제한 인자라고 보고하였다. 또한 C. D. Brown et. al.(2000), D. M. Soballe et. al. (1978) 등은 T-P와 Chl-a의 상관성에 대하여 심층적으로 분석한 바 있다.

본 연구는 농업용수원으로 이용되고 있는 삽교담수호에 대한 수질변화특성과 수질변동요인 등을 분석하여 효과적인 수질개선 및 관리에 대한 기초자료를 제공하고자 한다. 농업용수 수질 측정망 자료와 2000년부터 2002년까지의 3개년간의 조사자료를 이용하여 수질특성을 분석하였다.

II. 삽교호의 개황

1. 유역 특성

삽교호 유역은 충청남도 천안시, 아산시, 예산군, 당진군, 홍성군, 연기군, 청양군 등 2시 5군의 전체 또는 일부지역을 포함하고 있다. 삽교호 주요 입하천은 Fig. 1과 같이 곡교천, 무한천, 삽교천이다. 삽교호의 유역면적은 1,639.6 km²로서 논 406.7km² (24.8%), 밭 202.5km² (20.1%)를 포함하여 농경지가 609.2km² (44.9%)이며, 대지 56.0km² (4.2%), 임야 741.2km² (48.7%), 기타 233.5km² (6.0%)의 면적으로 구성되어 있다. 삽교호 유역내 총 가구수는 168,298호이며, 인구는 도시부가 396,430명 (66%), 농촌부가 206,957명 (34%)으로 도시 인구가 더 많다. 도시인구가 많은 것은 곡교천 유역에 천안시와 아산시가 있기 때문이다. 수계별 소사육 분포는 삽교천 수계가 53,437두 (59%), 무한천 수계가 25,057두 (28%) 및 곡교천 수계가 12,031두 (13%)로서 총 90,525두이다. 돼지 사육 분포는 무한천 수계가 100,396두 (24%) 및 곡교천 수계가 83,095두 (20%)로서 총 183,491두이다. 기타 가금류는 총 4,346,063두이다.



Fig. 1. Watershed and Sampling points of Lake Sapkyo

2. 삼교호 특성

삼교호는 하구 담수호로서 방조제의 연장은 3,360m이고, 제정고는 +8.5m이다. 상시 만수위는 +2.50m이고, 사수위는 -1.50m로서 배수갑문을 설치하여 호소의 유량을 조절하고 있다.

삼교호는 Table 1과 같이 저수면적 (L)은 20.20 km², 저수량 (B)은 84,100×103m³이다. 호소는 일반적으로 유역면적/호소면적(D/L)과 총면적(유역면적+호소면적)/저수량 (A/B)의 값이 크면 클수록 대상 호소의 상대적 오염부하량은 크다(김좌관 등, 1992).

삼교호는 Table 1과 같이 D/L이 81.16으로 외국의 호소(Biwa 4.71, Inawasiro 6.78, Laguna 4.24)에 비해 상당히 높은 값을 나타냈다. 또한 A/B도 19.8로서 위의 외국 호소에 비해 높은 특징을 갖고 있다. 이와 같이 삼교호는 호수면적에 비해 비교적 넓은 유역면적을 갖고 있어 넓은 유역면적으로부터 높은 영양염류 부하량이 일어나고 더불어 높은 호수생산성이 유발될 유역환경 특성을 지니고 있다.

유효수심을 나타내는 유효저수량/만수면적(C/L)는 3.1m에 지나지 않아 수면적이 넓고, 수심이 얕은 구조로서 내부생산에 의한 부영양화에 취약한 것으로 판단된다(윤경섭 등, 2003). 농업용수 수질측정망에 포함된 담수호 7개중 C/L이 7.3m인 영산호를 제외하고 3.4m 이하인 6개 담수호는 모두 부영양상태로서 우리나라 담수호의 경우는 호소의 형태면에서 부영양화에 취약한 구조인 것으로 보고되고 있다(이광식 외, 2003).

III. 재료 및 방법

삼교호의 수질특성을 파악하기 위하여 2000년부터 2002년까지 매월 정기조사와 강우시의 비정기조사로 구분하여 수질조사를 실시하였다. 호내 수질조사는 매년 4월부터 11월까지 월 1~2회 실시하고, 유입하천에 대해서는 2000년에

Table 1. Physical characteristics of Lake Sapkyo

Drainage area (D ; km ²)	Water surface (L ; km ²)	Storage (B ; 103m ³)	Effective Storage (C ; 103m ³)	C/L (m)	D/L	A [*] /B (km ² /10 ⁶ m ³)
1,639	20.20	84,100	62,787	3.1	81.16	19.80

A : Total Area = D + L

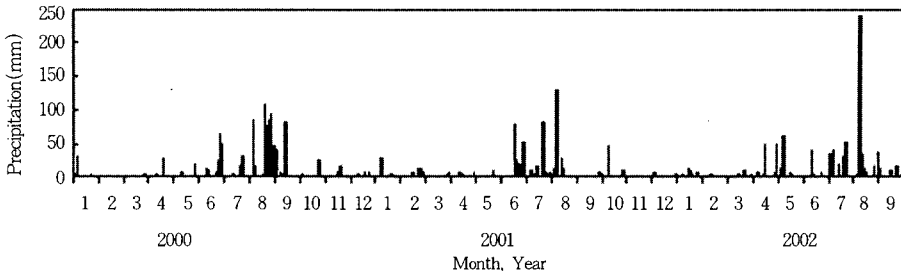


Fig. 2. Precipitation of Lake Sapkyo watershed

40회, 2001년에 38회, 그리고 2002년에는 20회 실시하였다. 조사위치는 Fig. 1과 같이 유입수 4개 지점과 호내 6개 지점을 선정하여 실시하였다. 수질분석은 현장에서 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO)를 측정하고, 화학적산소요구량(COD), 총용존고형물(TDS), 부유고형물(SS), 총질소(T-N), 총인(T-P), 엽록소 a(Chl-a) 분석용 시료는 각 지점의 수표면에서 채취하였다. 채취한 샘플은 전처리한 후 신속히 실험실로 운반하여 수질환경공정시험법에 의거하여 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 강우특성

삼교호 유역의 기상자료는 지배관측소인 천안 기상대 자료를 이용하였다. 연평균 강우량은 1,229mm(1971~2000 평균)인데, 2000년의 연강우량은 1,408mm로 179mm 많았으나, 8, 9월에 집중적으로 내려 평년보다 많은 것을 제외하고는 대부분 연평균 강우량보다 적었다(가뭄해). 2001년에는 총 838mm가 내려 평년보다 391mm가 적었고(가뭄해), 2002년에는 조사가

완료된 9월말까지 1,131mm가 내려 평년의 9월까지의 강우량 1,088mm에 비해 43mm가 많았다.(정상해).

2. 수질변화 특성

가. 유입하천의 수질변화 특성

삼교호 유입하천별 시간적 수질변동 조사자료를 이용하여 년중 수질변화 패턴을 일반화하면 Fig. 3, Fig. 4와 같다. 대도시를 관통하는 곡교천은 Fig. 3과 같이 평수기(건기)에는 대체로 TDS와 T-N 농도가 매우 높게 나타나고, 평수기 후 강우기 시작 직후에는 초기강우 유출효과에 의해 TDS, SS, T-N, T-P 모두 농도가 매우 크게 증가하였다. 강우기가 지속됨에 따라 T-P농도는 지속적으로 감소하나, TDS, T-N 농도는 점진적으로 감소하다 증가되는 경향을 보였다. 7, 8월의 강우시 지표면 유출로 인하여 SS 농도가 크게 증가하나 질소와 인의 농도에는 영향을 주지 않았다. 무한천의 경우도 변동폭은 적지만 곡교천과 크게 다르지 않는 변화패턴을 나타내었다.

한편, 소도시와 농경지를 흐르는 삼교천의 수질변동 패턴은 Fig. 4와 같이 농촌 소하천과

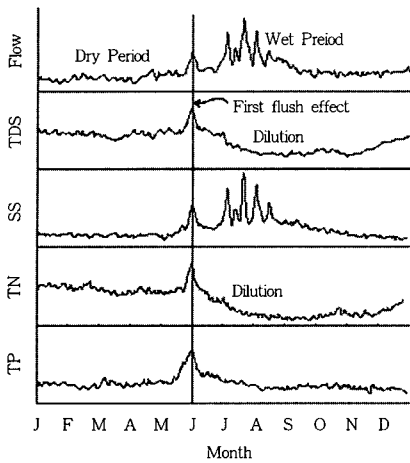


Fig. 3. Change of water quality in Gokgyo stream

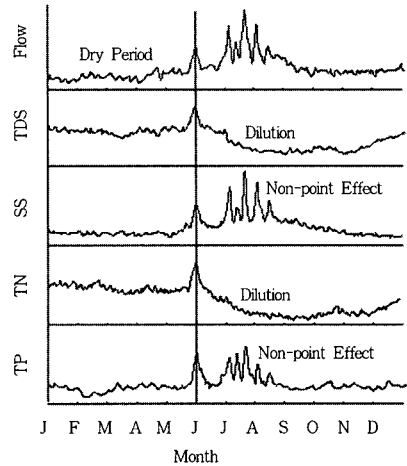


Fig. 4. Change of water quality in Sapkyo stream

도시관통 하천의 중간적 특성을 가지고 있는 것으로 보인다. 하천유량이 적은 평수기에 TDS, T-N 농도는 매우 높고, 강우기 시작 후 초기강우 유출효과 등은 곡교천과 같았다. 또한 삼교천에서도 7, 8월의 강우시 SS 농도도 크게 증가하는 특성을 가지고 있는데, 이는 강수시 도시의 지표면 유출과 함께 농경지로부터 토사가

유출되기 때문인 것으로 보인다. 그러나 곡교천과는 달리 7, 8월의 강우시 T-P 농도가 크게 증가하였는데, 이것은 강우시 농경지로부터 유실되는 토사에 부착된 인이 토사와 함께 유출되었기 때문으로 보인다. 이러한 결과는 삼교호 수질관리를 위한 유입 하천수 처리계획 수립시 매우 중요하다.

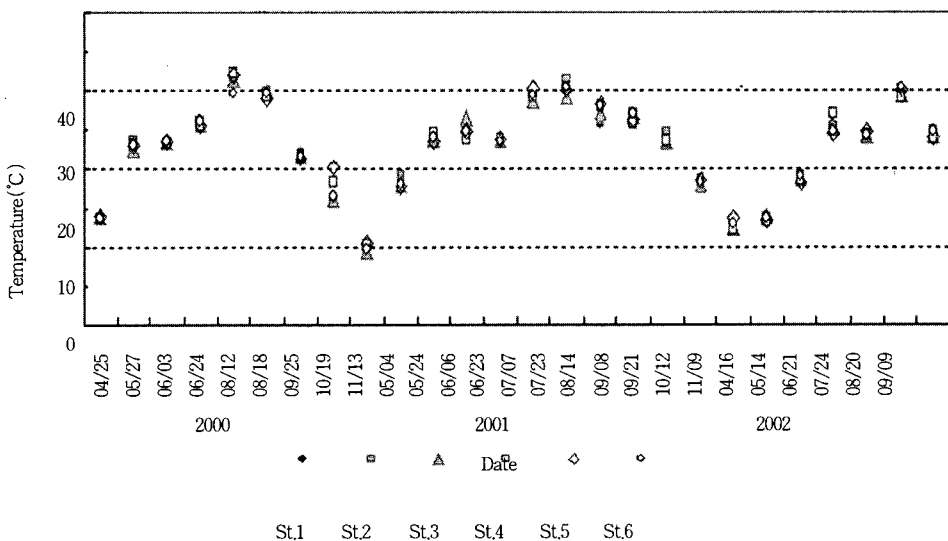


Fig. 5. (a) Horizontal Change of Temperature in Lake Sapkyo

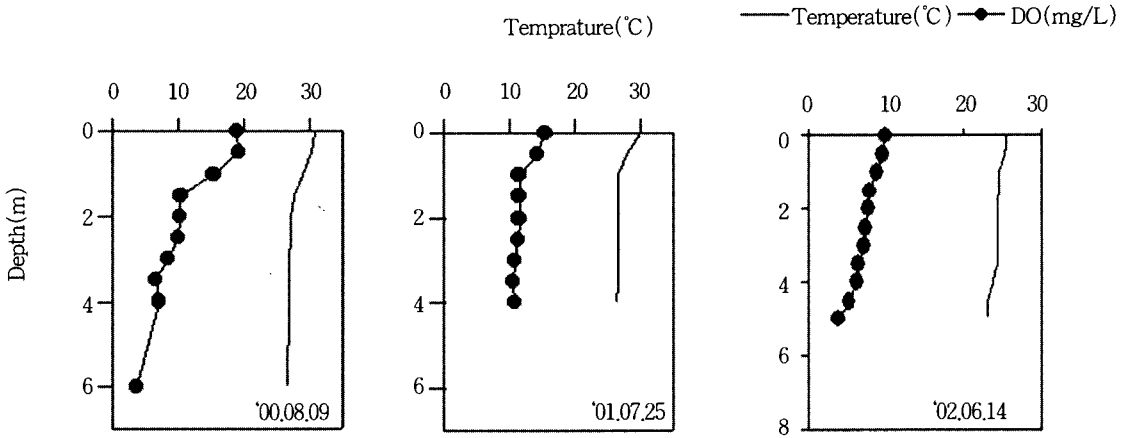


Fig. 5. (b) Vertical change of Temperature in Lake Sapkyo

나. 호내 수질변화 특성

1) 수온

삼교호의 수표면의 연간 수온 분포는 Fig. 5와 같이 봄부터 높아지기 시작하여 7~8월에 30℃ 전후로서 가장 높고 그 이후에 낮아지는 분포를 보이고 있다. 지점별로 큰 차이를 보이지

않고 전 수표면에서 비슷한 분포를 나타냈다. 수온의 수직분포는 Fig. 5 (b)와 같이 6~8월 사이에 강우가 있는 시기를 제외하고 두드러지는 않으나 수온성층이 발생하였다.

2) pH

pH는 Fig. 6과 같이 수심별, 지점별로 큰

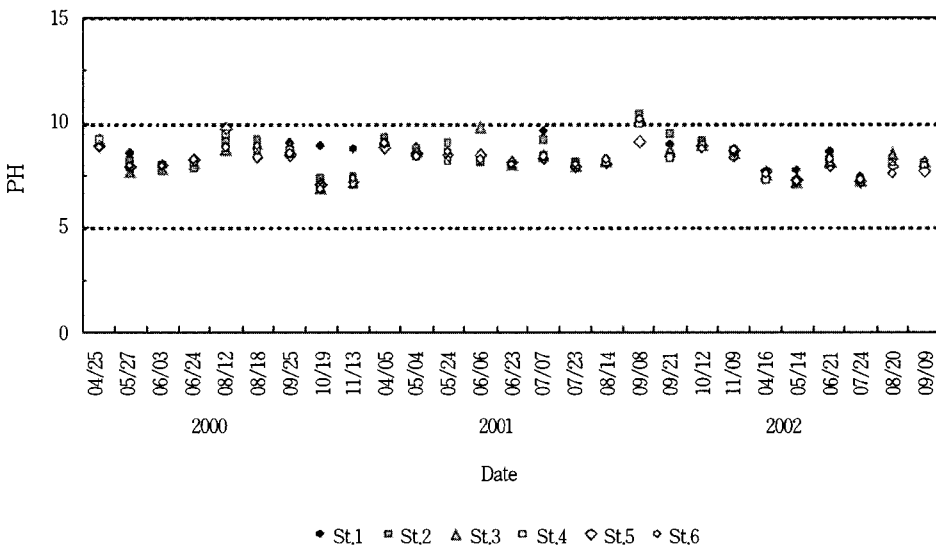


Fig. 6. Change of pH in Lake Sapkyo

차이가 없이 평균 8.4로서 비슷한 값을 나타냈다. 2000년과 2001년에는 6.9~10.5로 농업용수 수질기준(6.0~8.5)에 비해 알카리성이 높은 경향을 보이고, 8.5이상이 되는 경우도 많았다. 2002년에는 7.2~8.7로서 대부분 농업용수 수질기준을 만족하였다.

3) DO

DO의 수평분포는 Fig. 7과 같이 일정한 경향을 보이지는 않았으나, 농업용수 수질기준인 2mg/L 이상을 유지하고 있었다. 수표면의 DO는 대부분 부영양화현상이 일어나는 시기에 높게 나타났는데, 이는 수표면에서 조류가 활발히 광합성작용을 하기 때문이다. 수심별 DO농도는 대부분 큰 차이를 보이지 않고, 농업용수 수질기준 이상을 유지하였는데, 이는 두드러진 성층현상이 발생하지 않았다는 것을 의미한다. 두드러진 성층현상이 발생하지 않은 것은 삼교호의 수심이 평균 4.0m로서 매우 얇아 수체가 혼합

되기 쉽고, 성층현상이 발생하기 쉬운 여름에는 강우에 의해 쉽게 교란되어 수체가 수직혼합되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 Fig. 5(b)와 같이 수심이 깊어질수록 낮아지는 경향을 보이고, 6~8월 사이에는 두드러지지 않으나 성층현상이 발생하기도 하였다.

4) SD

투명도 (SD)는 Fig. 8과 같이 2000년 5월말에서 6월초를 제외하고는 대부분 평균 0.5m 이하의 매우 낮은 값을 나타냈다. 이는 연중 실시되는 준설의 영향으로 퇴적물이 부유되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 부영양화가 진행되어 플랑크톤이 증가된 것도 하나의 원인인 것으로 판단된다. 대체로 봄철인 4, 5월에 투명도가 높았는데 이는 동물플랑크톤 포식압의 증가에 의한 청수기이기 때문이다. 그 이후에는 투명도가 낮아지는데, 이는 영농기의 시작으로 혼탁된 영농배수가 유입되기 때문이다. 또한 강우직 후에는

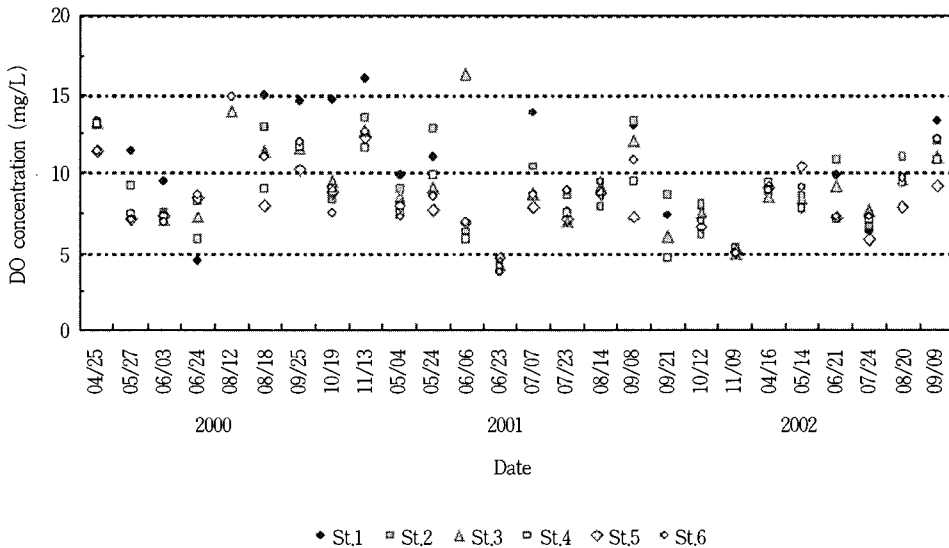


Fig. 7. Change of DO concentration in Lake Sapkyo

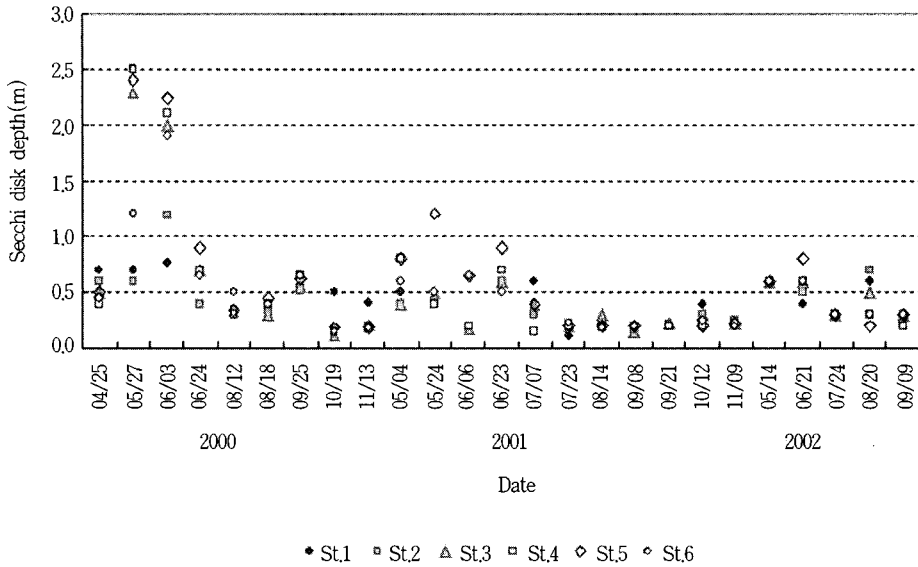


Fig. 8. Change of SD in Lake Sapkyo

투명도가 높아지는 경향이 있는데 이는 강우에 의한 희석효과 때문인 것으로 판단된다. SS농도가 높았던 2001년 7, 8, 9, 10, 11월에는 투명도가 낮았고, SS농도가 낮았던 2000년 5, 6월에는 투명도가 높게 나타났다. 투명도와 SS의 상관관계는 Table 2와 같이 회귀식과 결정계수가 각각 $\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.5829 \times \text{Log} [\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 5.178, 0.6821$ 로서 비교적 높은 부의 상관성을 보여주고 있다. 그러나 기타 수질항목은 투명도

와 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다.

5) SS

부유고형물(SS)의 농도는 Fig. 9와 같이 평균 35.0mg/L로서 농업용수 수질기준인 호소수질 기준 IV등급을 크게 상회하였고, 거의 대부분의 시기와 지점에서 수질기준을 상회하였는데, 이는 준설에 의해 퇴적물이 부유된 것이 큰 원인인 것으로 판단된다. 또한 부영양화가 심화되는

Table 2. Relationships between SD and other water quality items in Lake Sapkyo

항 목	회귀식*	결정계수 (R ²)
SS	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.5829 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 5.178$	0.6821
COD	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = 0.139 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 1.9801$	0.0080
Chl-a	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.0881 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 2.9405$	0.0479
T-P	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = -0.3603 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 3.376$	0.0883
T-N	$\text{Log}[\text{SD}(\text{m})] = 0.8268 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] - 0.4364$	0.2876

* : 95% of confidence level

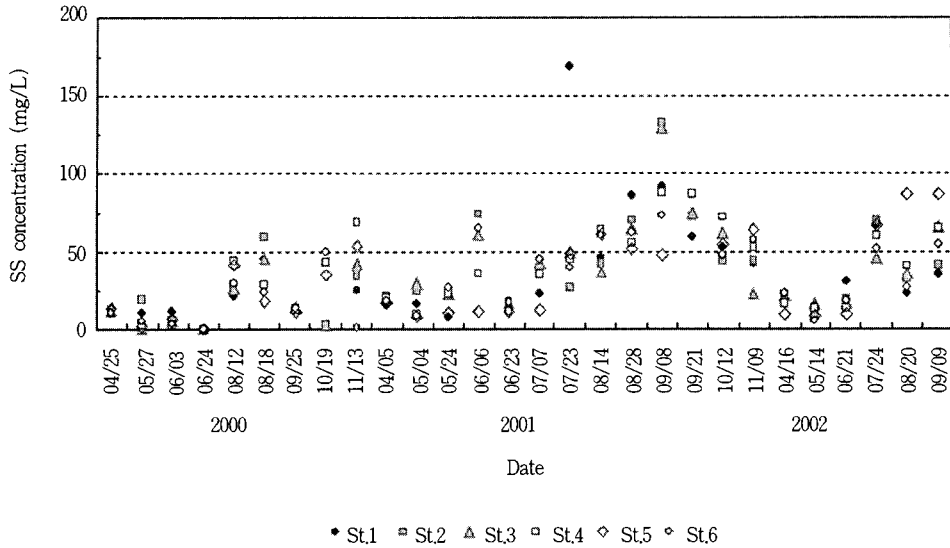


Fig. 9. Change of SS concentration in Lake Sapkyo

7, 8, 9월에는 조류의 영향으로 SS농도가 높아지는 경향을 보이고 있다. SS농도는 St. 1은 삼교천과 무한천이 유입하는 부분이고, St. 2는

곡교천이 유입하는 부분에 위치해 있으므로 유입수의 영향을 많이 받아 SS농도가 높고, St. 3, 4는 준설이 이루어지는 부분에 위치해 있으므로

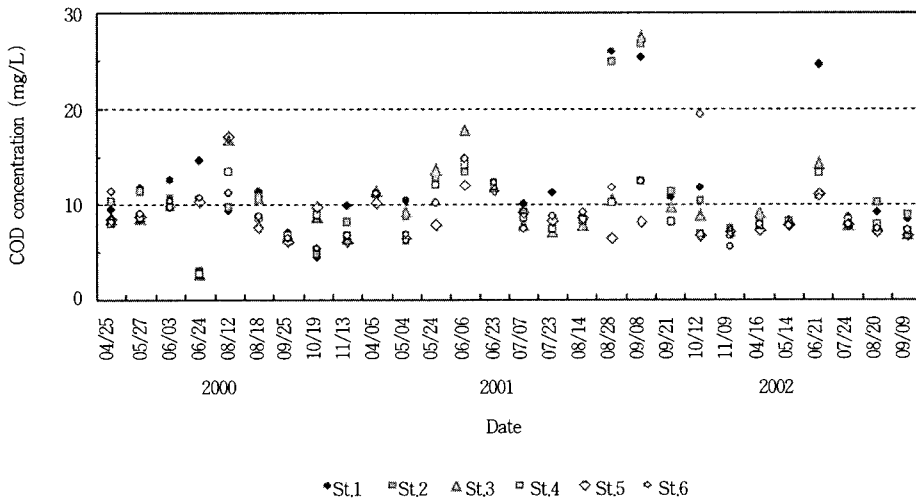


Fig. 10. Change of COD concentration in Lake Sapkyo

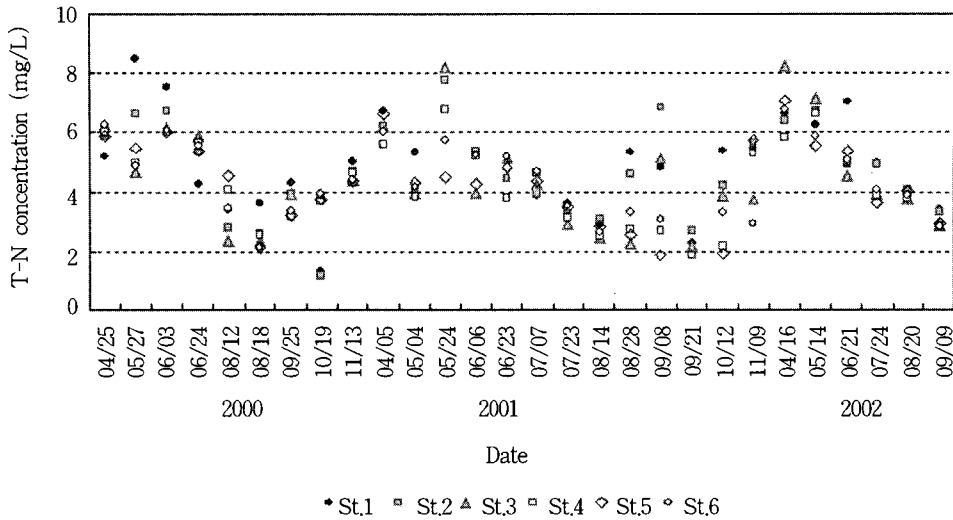


Fig. 11. Change of T-N concentration in Lake Sapkyo

준설의 영향을 많이 받아 SS농도가 높은 것으로 판단된다. 특히 준설지점에서 가장 가까운 St. 4의 경우는 3년간의 평균 SS농도가 36.7mg/L로 가장 높게 나타났다. 이와 같이 삼교호의 SS농도는 유입수와 준설의 영향을 모두 받는 것으로 판단되므로 수질대책을 세울 때 이 두 가지를 모두 고려하여야 할 것이다.

6) COD

화학적산소요구량(COD)은 Fig. 10과 같이 평균 10.0mg/L로서 농업용수 수질기준인 호소수질기준 IV등급을 상회하고 있다. 또한 지점과 시기에 관계없이 대부분 수질기준을 초과하고 있다. COD농도의 변화는 일정한 경향을 보이지는 않으나 10.0mg/L 내외로 변화되고 있다. COD농도도 삼교천과 무한천이 유입하는 St. 1은 평균 11.7mg/L로 가장 높고, 곡교천이 유입하는 St. 2지점에서는 평균 10.7mg/L로 두 번째로 높은 것으로 나타나 유입수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

7) T-N

총질소(T-N) 농도는 Fig. 11과 같이 평균 4.5mg/L이고, 대부분 3.0mg/L 이상으로서 농업용수 수질기준인 호소수질기준 IV등급을 크게 상회하고 있다. T-N 농도는 계절적, 수평적인 농도 변화가 크게 나타났으며, 질산염의 경우 Chl-a가 크게 증가하는 시기에 측정간격까지 낮아지는 경향이 나타났다. 시기별 T-N농도의 변화는 SS농도가 높은 2000년 8월, 2001년 8, 9월, 2002년 7, 9월에 오히려 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 질소는 SS와 상관없이 대부분 용존성의 형태로 존재한다는 것을 보여주는 결과이다.

8) T-P

총인(T-P)의 평균농도는 Fig. 12와 같이 0.22mg/L로서 호소수질기준 IV등급을 상회하였으며, 지점과 시기에 관계없이 대부분 수질기준을 초과하고 있었다. 2001년 8, 9월 강우로 인한 부유성 현탁물질의 유입이 증가하면서 T-

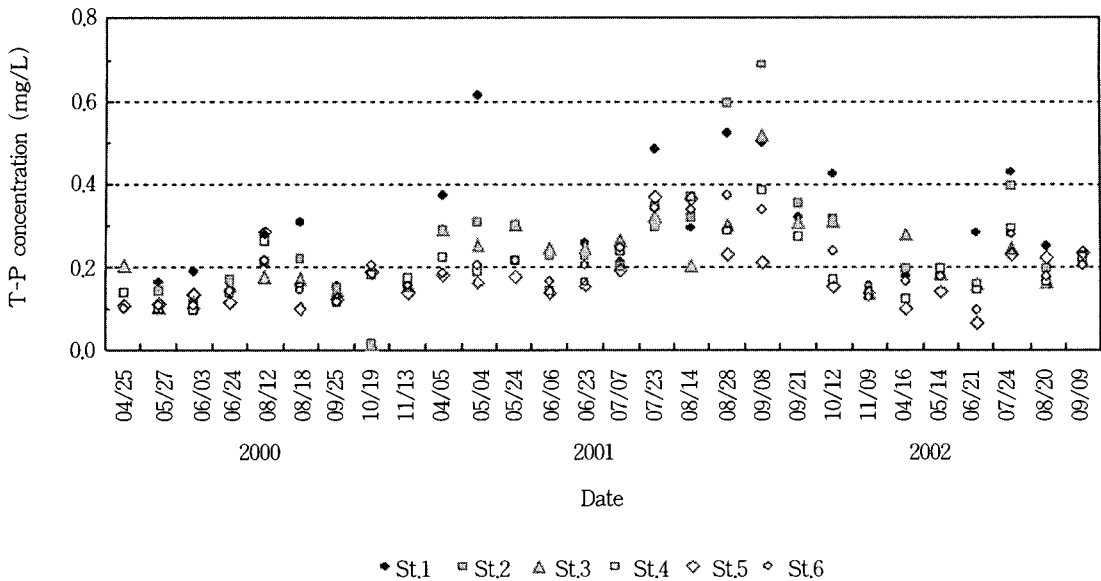


Fig. 12. Change of T-P concentration in Lake Sapkyo

P농도도 함께 증가하는 것을 볼 수 있으며 이때 유입된 T-P 농도가 방조제 앞까지 도달하지 못하는 양상을 관찰 할 수 있었다. 2000년도에는 T-P와 현탁성 고형 물질의 분포가 상류에서 유입된 유입수는 방조제 앞까지 거의 균일한 농도로 도달

하는 것으로 나타났다. 시기별 T-P농도의 변화는 SS농도의 변화와 유사하게 변화되고 있었는데, 서로의 상관성을 살펴본 결과 r^2 가 0.6으로서 비교적 높은 상관성을 나타냈다. 따라서 인은 현탁성으로 존재하고 있다는 것을 알 수 있다.

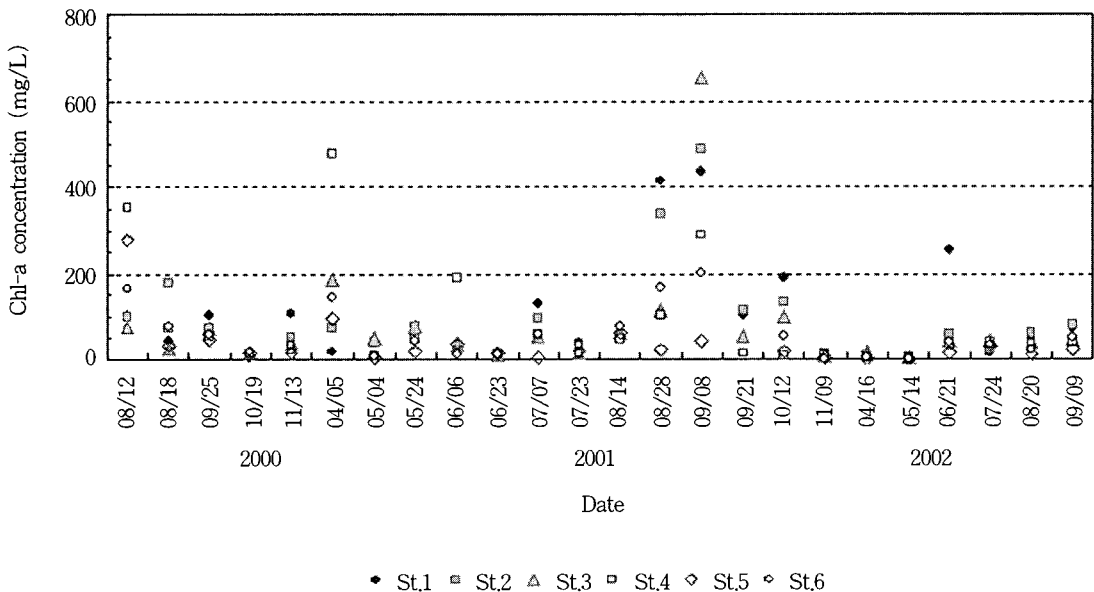


Fig. 13. Change of Chl-a concentration in Lake Sapkyo

Table 3. Relationships between Chl-a and other water quality items in Lake Sapkyo

항 목	회귀식*	결정계수 (R ²)
COD	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 2.1774 \times \text{Log}[\text{COD}(\text{mg}/\text{m}^3)] - 4.0486$	0.3195
SS	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 0.8691 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 0.6773$	0.2457
T-P	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 1.2447 \times \text{Log}[\text{TP}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 1.7091$	0.1707
T-N	$\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = -1.3216 \times \text{Log}[\text{TN}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 9.3674$	0.1191

* : 95% of confidence level

Table 4. Relationships between TP and Chl-a in other Lakes

Model (TP - Chl-a)	r ²	Model (TP - Chl-a)	r ²
An and Park ⁽⁷⁾	0.7800	Dillon and Rigler(1974) ⁽⁸⁾	0.7600
Florida LAKEWATCH(1988) ⁽⁸⁾	0.7600	Jones and Bachmann(1976) ⁽⁸⁾	0.9800
Baker et. al.(1981) ⁽⁸⁾	0.7600	Hoyer(1981) ⁽⁸⁾	0.7600
Huber et. al.(1982) ⁽⁸⁾	0.7600	Soballe and Kimmel(1978) ⁽¹²⁾	0.3800
Canfield(1983) ⁽⁸⁾	0.7600	Argentina, Quiros(1990) ⁽¹²⁾	0.7800

9) Chl-a

염록소 a(Chl-a) 농도는 Fig. 13과 같이 평균 74.0mg/m³으로서 OECD가 제시한 부영양상태의 기준인 25mg/m³ 보다 높아 삼교호는 부영양상태로 분류할 수 있다. Chl-a농도는 계절 변동이 크게 나타났고, 지점별로도 편차가 컸다. Chl-a 농도는 수화현상이 발생하는 8~9월에 높은 값을 보이고, 계절적으로 순차적인 증감이 나타났으며, 특히 2001년 9월초에 남조류의 녹조 현상이 심하게 발생하여 Chl-a 농도가 St. 3에서 625.3mg/m³로 조사 기간 중 최대값을 나타냈다. Chl-a 농도는 전반적으로 유입수쪽이 방조제 앞쪽보다 높게 나타났다. 2000과 2002년도의 경우 지점별 편차가 크지 않은 것으로 보아 유입수 부근에서 높아진 Chl-a 농도가 방조제 앞까지 영향을 미치는 양상을 보였으나,

2001년도에는 2000, 2002년과는 달리 유입수보다 방조제 앞쪽에서 낮게 나타나는 경향을 보였다.

삼교호에서 Chl-a와 다른 수질항목사이의 관계는 Table 3과 같이 Chl-a와 COD가 회귀식은 $\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 2.1774 \times \text{Log}[\text{COD}(\text{mg}/\text{m}^3)] - 4.0486$ 이고, 결정계수(r²)는 0.3195로서 낮게 나타났다. 또한 Chl-a와 SS는 회귀식과 결정계수가 각각 $\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 0.8691 \times \text{Log}[\text{SS}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 0.6773$, 0.2457, Chl-a와 T-P, T-N이 각각 $\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = 1.2447 \times \text{Log}[\text{TP}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 1.7091$, 0.1707, $\text{Log}[\text{Chl-a}(\text{mg}/\text{m}^3)] = -1.3216 \times \text{Log}[\text{TN}(\text{mg}/\text{m}^3)] + 9.3674$, 0.1191을 나타내 국내·외의 다른 호소(Table 4)에 비해 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

이상과 같이 유입수 쪽이 Chl-a 농도가 높고, 호내 수질항목과 Chl-a 사이에 상관관계가 낮은 것으로 보아 유역으로부터 영양염류가 많이 유입되고, 이 영양염류를 조류가 성장하는데 소비함으로써 호내 영양염류 농도는 낮아지는 반면 부영양화가 심화되는 것으로 판단된다. 이에 더하여 낮은 수심도 조류생장에 기여하는 것으로 판단된다.

10) 플랑크톤의 변화 특성

삼교호 식물플랑크톤의 경우 Fig. 14와 같이 2000년에는 8월에 15.5×10^4 Cells/mL, 2001년에는 9월에 17.7×10^4 Cells/mL, 2002년의 경우에는 9월에 0.32×10^4 Cells/mL로 가장 높게 나타나는 등 8, 9월에 높은 경향을 보였다. 식물플랑크톤의 최대값이 나타나는 시기가 8월인 경우도 있고, 9월인 경우도 있는 것은 일조시간과 강우의 영향인 것으로 판단된다. 즉, 2000년에는 8월에 일조시간이 길었고, 9월에는 약 1/3로 줄어들었기 때문에 8월에 식물플랑크톤이 가장 높은 값을 보였다. 반면 2001년의 경우에는 일조시간이 8, 9월에 지속적으로 예년에 비해 높아 9월에 식물플랑크톤이 가장 높았으며, 또한 2002년은 8월에 예년에 비해 일조시간이 낮은 반면 9월에는 예년에 비해 높았기 때

문에 9월에 식물플랑크톤이 많이 증식한 것으로 판단된다. 2002년에는 2000, 2001년에 비해 식물성플랑크톤의 농도가 낮았는데 이는 일조시간의 영향도 있으며, 또한 8월 초순에 240.5 mm/day의 기록적인 강우가 내리는 등 8, 9월에 예년에 비해 많은 비가 내렸기 때문인 것으로 판단된다. 이상과 같은 식물플랑크톤의 경년 및 계절변화는 Chl-a농도의 변화와 유사하게 나타났다.

삼교호 식물플랑크톤의 계절적 천이는 은편모조류 → 남조류 → 규조류 → 남조류순이었고, 그 시기의 우점종은 각각 *Cryptomonas* sp. → *Anabaena* sp. → *Melosira granulata* → *Microcystis aeruginosa*였다. 여름철인 7, 8, 9월에는 남조류인 *Microcystis*와 *Anabaena*가 매년 출현하는 경향을 보였다. 6월에는 남조류인 *Anabaena* sp.가 우점 출현하고, 이후에 감소하였다가 9월에는 같은 남조류종인 *Microcystis aeruginosa*가 우점 번성하여 한 해에 서로 다른 남조류종이 번갈아 우점하여 출현하였다. 2001년에는 4월 중순부터 *Anabaena* sp.의 생물량이 높게 나타났는데 이는 봄철 가뭄으로 물이 적은 반면 예년보다 수온이 높고, 일조시간도 길었기 때문인 것으로 판단된다.

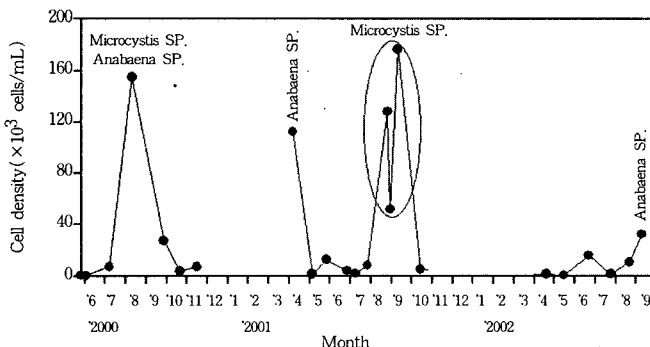


Fig. 14. Change of Phytoplankton in Lake Sapkyo

삼교호의 종다양성은 봄철인 4, 5월에는 매우 단순한 양상을 보였으나(2002년 최대 8종 8속) 6, 7월에 접어들면서 증가하여 8월에 19종 23속(2002년)으로 종다양성이 가장 높게 나타났다.

지점별 식물플랑크톤의 천이 양상은 큰 차이가 없이 진행되었으나 8, 9월에 상류부인 St.1에서는

극심한 남조류 bloom현상이 일어난 반면 St.5에서는 1,000Cells/mL 이하로 나타나 동물성 플랑크톤과 마찬가지로 유입부인 상류부보다 제방 근처에서 식물플랑크톤이 적은 것으로 나타났다.

삽교호에서 식물성플랑크톤의 수심별 분포는 2000년, 2001년 봄철에 은편모조류인 *Cryptomonas* sp.가 수심 4, 5m까지 출현하였으며, 최대 생물량은 0~1m 수심에서 각각 500 Cells/mL, 1,100Cells/mL로 2000년보다 2001년에 더 높은 생물량을 보였다. 봄철에는 은편모조류가 우점하고, 11, 12월에는 규조류인 *Synedra* sp.가 우점한다. 규조류가 우점하는 시기는 수체가 혼합되는 시기이며, 규조류의 세포 특성상 다른 조류와는 달리 비중이 크기 때문에 0~6m까지 전 수심에서 거의 균일한 생물량 분포도를 보였다. 봄철 규조류의 bloom 이후 7, 8월에는 남조류의 bloom이 이어진다. 남조류는 수심 0~2m에서 5.0×10^4 Cells/mL였고, 그 이하의 수심에서는 3.0×10^4 Cells/mL였다.

11) 제한영양염류 평가

총인에 대한 총질소의 농도비율(N/P비)이 7 미만일 경우는 총질소를, 16 이상일 경우는 총인을 한계영양물질로 볼 수 있는데, 삽교호의 경우 N/P 비가 평균 20으로서 총인이 한계인자인 것으로 나타났다. 따라서 삽교호의 부영양화에 의한 수질악화를 방지하기 위해서는 총인을 삭감할 수 있는 대책을 세워야 할 것으로 판단된다. 앞에서 살펴본 바와 같이 유입하천 및 호내 모두 T-P는 SS와 상관성이 높은 것으로 나타났으므로 유입부에서의 SS제거 대책을 세운다면 T-P제거에도 효과가 있을 것으로 판단된다.

12) 부영양화도 평가

삽교호의 부영양화도를 평가하기 위하여, Vollenweider, OECD, U.S.EPA의 분류기준에 적용하였다. 삽교호의 평균 T-P($\mu\text{g/L}$), T-N(mg/L), Chl-a($\mu\text{g/L}$), Secchi-disk depth(m)는 각각 222.0, 4.5, 74.0, 0.5로서 Vollenweider, OECD, U.S.EPA의 분류기준 모두에서 부영양단계인 것으로 나타났다. 따라서 삽교호는 조속히 부영양화 방지를 위한 대책을 세우는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

V. 결론

농업용수원으로 이용되고 있는 삽교호의 수질 관리를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 2000년부터 2002년까지 수질조사를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

유입하천의 경우 건기에는 T-N 농도가 높고, 강우시에는 농경지가 분포하는 삽교천에서 특히 SS와 T-P 농도가 함께 크게 증가하는 특성을 가지고 있었다.

삽교호 내의 pH와 DO는 대부분 농업용수 수질기준을 만족하였다. 투명도는 평균 0.5m로서 매우 낮은 값을 나타냈는데, 이는 준설, 농경배수, 녹조 등이 복합적으로 작용했기 때문으로 판단된다. SS농도는 평균 35.0mg/L로서 거의 대부분 농업용수 수질기준을 상회하였는데, 이는 유입수와 준설의 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다. COD도 평균 10.0mg/L로서 농업용수 수질기준을 상회하고 있는데, 유입수의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. T-N은 평균 4.5mg/L로서 농업용수 수질기준을 크게 상회하고 있으며, SS와 상관성이 낮은 것으로 보아

질소는 대부분 용존성의 형태로 존재하는 것으로 판단된다. T-P는 평균 0.22mg/L로서 대부분 수질기준을 초과하고 있었으며, SS와의 상관성이 높은 것으로 보아 인은 현탁성으로 존재하고 있는 것으로 판단된다. Chl-a 농도는 평균 74.0mg/m³으로서 OECD가 제시한 부영양상태 기준인 25mg/m³ 보다 높아 사교호는 부영양상태로 분류되어 부영양화 대책이 필요한 것으로 나타났다.

사교호 식물플랑크톤의 계절적 천이는 은편모조류 → 남조류 → 규조류 → 남조류순이었고, 그 시기의 우점종은 각각 Cryptomonas sp. → Anabaena sp. → Melosira granulata → Microcystis aeruginosa였다. 여름철인 7, 8, 9월에는 남조류인 Microcystis와 Anabaena가 매년 출현하는 경향을 보였다.

사교호는 총인이 제한인자인 것으로 나타났으며, 총인은 강우시 SS와 함께 증가되므로 부영양화에 의한 수질악화를 방지하기 위해서는 유입부에서의 SS제거 대책을 세운다면 효과가 있을 것으로 판단된다. 사교호는 유입수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으므로 생활하수 등이 하천에 유입하기 전에 정화하고, 기타 농경배수 등의 비점오염원은 사교호 유입부에 질소와 인의 흡수율이 높은 수생식물을 이용한 자연정화 시설 등을 도입하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김좌관, 홍옥희, 1992, 국내 인공댐호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구, 한국환경과학회지 1, pp.49-57.
2. 농업기반공사 농어촌연구원, 2002, 저수지와 담수호의 수질개선 방안(Ⅲ).

3. 윤경섭, 2001, 우리나라 하구담수호와 수자원, 인공간척호 수질개선 Workshop, 인하대학교, pp.1-15.
4. 윤경섭, 이광식, 김형중, 김호일, 2003, 농업용 저수지의 유형분류 및 수질관리, 한국농공학회지, 45(4), pp.66-77.
5. 이광식, 윤경섭, 김형중, 김호일, 2003, 농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안, 한국환경농학회지, 22(2), pp.166-171.
6. 전지홍, 윤춘경, 김호일, 황순진, 2002, 농업용 저수지의 수질항목간의 상관관계 조사, 농공학회지, 44(3), pp.136-145.
7. 환경부, 2001, 韓國의 湖沼環境 調査技法 開發에 關한 研究 - 최종보고서 -, 한국육수학회, pp.31.
8. An, K. G. and S. S. Park, 2002, Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study, Ecological modelling, 152(2-3), pp.191-203.
9. Brown C. D., M. V. Hoyer, R. W. Bachmann, and D. E. Canfield, 2000, Nutrient-chlorophyll relationships : an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north-temperate lake data, Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 57, pp.1574-1583.
10. Vollenweider, R. A., 1968, Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication, Technical Report DAS/CSI/68.27, Organization for Economic Co-operation and Development, Parix, France
11. Vollenweider, R. A. 1975. Input-output Models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology, Schweiz. A. Hydrol. 37, pp. 53-84.
12. Vollenweider, R. A., and J. Kerekes, 1980, OECD cooperative programme on monitoring of inland water, Synthesis Report.
13. Soballe, D. M. and B. L. Kimmel, 1987, A Large-Scale Comparison of Factors Influencing Phytoplankton Abundance in Rivers, Lakes, and Impoundments, Ecology, 68(6), pp.1943-1954.

본 연구는 농업기반공사 자체자금에 의해 수행된 연구결과와 일부임.