

소양호 부영양화의 연변화

삼척산업대학교 환경공학과 허우명

Abstract

The trend of eutrophication in Lake Soyang from 1985 to 1992 was studied by the measurement of chlorophyll a, total phosphorus, nitrate-nitrogen concentration, and the rate of hypolimnetic oxygen deficit. The phytoplankton community succession and the cause of the cyanobacterial blooms was studied by measuring *Anabaena* cell density, cell density of heterocyst, and $\text{NO}_3\text{-N/TP}$ ratio. And the phosphorus loading was estimated by determining phosphorus input via runoff of drainage basin and the phosphorus discharge from floating-net fishfarms within the lake. The loading from drainage basin was determined by measuring total phosphorus concentration in the main inflowing stream, Soyang River, from July 1990 to May 1992.

The increasing trend of chlorophyll was obvious at the rate $0.4\text{mg/m}^3/\text{yr}$. The advent and expansion of *Anabaena* bloom was the major cause of chlorophyll increase and transparency reduction. The rate of hypolimnetic oxygen deficit also increased from $0.034\text{ mgO}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ in 1986 to $0.080\text{ mgO}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ in 1992.

The seasonal succession of dominant species was distinct. Diatoms, *Asterionella formosa* and *A. gracillima* were dominant in winter and spring, while *Peridinium bipes* and bluegreen algae were dominant in warm seasons. The dominant species in warm season, *Peridinium*, has been replaced with *Anabaena* in late summer since 1986, and the dominance of *Anabaena* increased year by year, which is thought to be enhanced by the increase of phosphorus concentration and the decrease of N/P ratio that is caused partly by the phosphorus discharge from fishfarms within the lake. Cyanobacterial blooms in a water without nitrogen depletion is the unique

feature of Lake Soyang. Nitrate-nitrogen was maintained always above 0.5 mgN/l throughout the year, though the $\text{NO}_3\text{-N/TP}$ ratio decreased from 100 in 1985 to 25 in 1992 due to the increase of phosphorus concentration.

Because the total phosphorus concentration and the flow rate of Soyang River was high in flood period, most of phosphorus loading was concentrated in rainy season. Phosphorus discharge of fishfarms was estimated from the amount of fishfeeds applied annually and the unit rate of phosphorus excretion per feed weight. The loading from the watershed and fishfarms were calculated to be 104 and 48 tP/yr, respectively. Both combined, the phosphorus loading of Lake Soyang far exceeded the critical loading for eutrophication. The amount of phosphorus discharge through outflowing water was 62 tP/yr. Thus the retention rate of phosphorus was 0.59.

I. 서 론

소양호는 북한강지류인 소양강에 건설된 국내 최대의 인공호수로 현재 춘천시의 용수공급원으로 이용되고 있으며 많은 수량이 북한강으로 유입되어 수도권 일원에 중요한 용수공급원이 되고 있다. 소양호 유역에는 작은 소도시가 형성되어 있을뿐 산업의 발달이 적어 국내 다른 수역에 비해 최근까지 청정수역을 유지하여 왔다. 그러나 최근 가두리 양식장으로부터의 배출량 증가, 축산폐수량의 증가, 비료 사용량 증가 및 세제 사용증가등으로 인해 수자원의 가치하락이 큰 문제가 되고 있다. 소양호는 저수량이 크고 체류시간이 크기 때문에 외부기원 유기물(allochthonous organic matter)보다 자가생성유기물(authochthonous organic matter)이 큰 비중을 차지한다. 호수의 부영양화는 식물플랑크톤의 성장의 제한영양소인 인의 유입량이 증가함으로써 식물플랑크톤의 양이 증가하는 것을 말한다. 즉, 일차생산에 의한 자가생성유기물량이 증가하는 것을 의미 한다. 이러한 자가생성유기물은 호수가 부영양화됨에 따라 호수 유기물량의 더욱 많은 부분을 차지하게 되며, 이들의 분해에 따른 호수 심층의 산소고갈 현상이 가속화되어 수생태계에 여러가지 악영향을 초래하게 된다.

본 연구는 소양호의 부영양화 연변화를 조사하기 위하여 1985년부터 1992년까지 호수내의 인농도, 질소농도, 엽록소 a 농도 및 식물플랑크톤의 우점종에 대한 밀도를 조사하였다. 호수내의 전체적인 인부하량을 평가하기 위하여 소양호의 주 유입 하천인 소양강상류에서 매월 3 -4회씩 시료를 채취하여 인농도를 조사하였고, 호수내 가두리 양어장으로부터의 부하량도 산정하여 전체 인부하량에 포함시켰다.

II. 재료 및 방법

호수 조사는 1985년 1월 부터 1992년 8월까지 1~2개월에 1회씩 담양 지점에서 수심별로 실시하였다. 채수는 PVC Van Dorn 채수기로 채수하고 당일내 실험실로 운반하여 GF/C glass filter로 여과하였으며 여과지는 냉동보존 하였다가 4주 이내에 엽록소 a 농도측정에 사용하였다. 영양염류 분석을 위한 시료는 여과한 물을 염산으로 세척된 폴리에틸렌 시료병에 담아 냉동보존 하였다.

심층산소소모율(HODR : rate of hypolimnetic oxygen deficit)은 수직혼합기의 수온에 해당하는 포화농도와 실측된 DO의 차이를 나타내는 absolute oxygen deficit로 계산하였다(Wetzel, 1983). 소양호의 심층을 정의 하기가 곤란하여 여름에 중층류가 유입되는 수심인 160m 이하를 심층으로 간주하고 해발 160-150, 150-140, 140-130 및 130-bottom의 4층으로 나누어 평균 DO를 결정하고 이 DO를 혼합기의 포화 DO에서 뺀다음 이 결핍량에 각 층의 부피를 곱하고 연평균 수면적으로 나누어 산소결핍량(oxygen deficit)을 계산하였다.

인 분석은 Standard Method(APHA, 1989)의 Ascorbic acid법으로 분석하였다. 총인(TP)은 시료 500ml에 황산 20N 0.5ml를 첨가하여 보관하였던 시료를 사용하여 persulfate digestion과 ascorbic acid법에 따라 측정하였다. 질산성질소(NO₃-N) 측정에는 cadmium reduction법을 사용하였다. 암모니아성질소(NH₃-N)는 phenate법으로 측정하였다.

Chlorophyll a 는 채수한 시료를 GF/C glass filter로 여과하였으며, 여과지는 냉동보관 하였다가 4주 이내에 냉동보관 시켰던 glass filter를 tissue homogenizer에 넣고 90% acetone을 가하고 분쇄하여 상층액을 취해 Spectrophotometer 로 흡광도를 측정하였다. Chlorophyll a 의 농도는 Lorenzen(1967)의 방법 또는 Moss(1967)의 방법을 사용하여 계산하였다.

유역으로부터의 인부하량은 유입수의 총인농도에 유입수량을 곱하여 계산하였다. 인방류량도 방류수의 총인농도에 방류수량을 곱하여 산정하였다. 유입 및 방류수량은 한국 수자원공사 소양댐 관리사무소에서 작성된 일간 유량 자료를 이용하였다. 가두리 양식장에 의한 인부하량은 김등(1993)에 의해 산출된 원단위 부하량인 사료 1 kg당 8.4 g을 사용하여 가두리 m²당 연간 사료 120 kg이 투여되는 것으로 보고(조동, 1990) 계산하였다. 인의 부영양화 임계부하량은 다음의 Vollenweider-OECD(1976)의 critical loading(L_c) model을 사용하여 계산하였다.

$$\text{허용임계부하량(permissible critical loading)} = 10 \times Q_s(1+(z/Q_s)^{0.5})$$

$$\text{과잉임계부하량(excessive critical loading)} = 20 \times Q_s(1+(z/Q_s)^{0.5})$$

III. 결과 및 고찰

최근 수년간의 엽록소 a 농도는 연간 0.4 mg/m³의 평균적 증가율을 나타내고 있다(Fig. 1). 그러나 최근 1990년 이후 약간의 감소추세를 보였다. 소양호의 식물플랑크톤 우점종은 계절적인 천이가 뚜렷하게 나타나고 있다. 겨울과 봄에 규조류인 *Asterionella formosa*와 *Asterionella gracillima*, 하절기인 늦여름에 *Peridinium bipes*와 남조류 이었다. 그러나 1986년 이후 늦여름에 *Anabaena*로 우점종이 바뀌었으며 계속적으로 증가하였다(Fig. 2). 이러한 식물플랑크톤의 연변화 및 계절변화 양상은 온대지역 호수에서는 빈번한 현상으로 알려져 있다(Hutchinson, 1967).

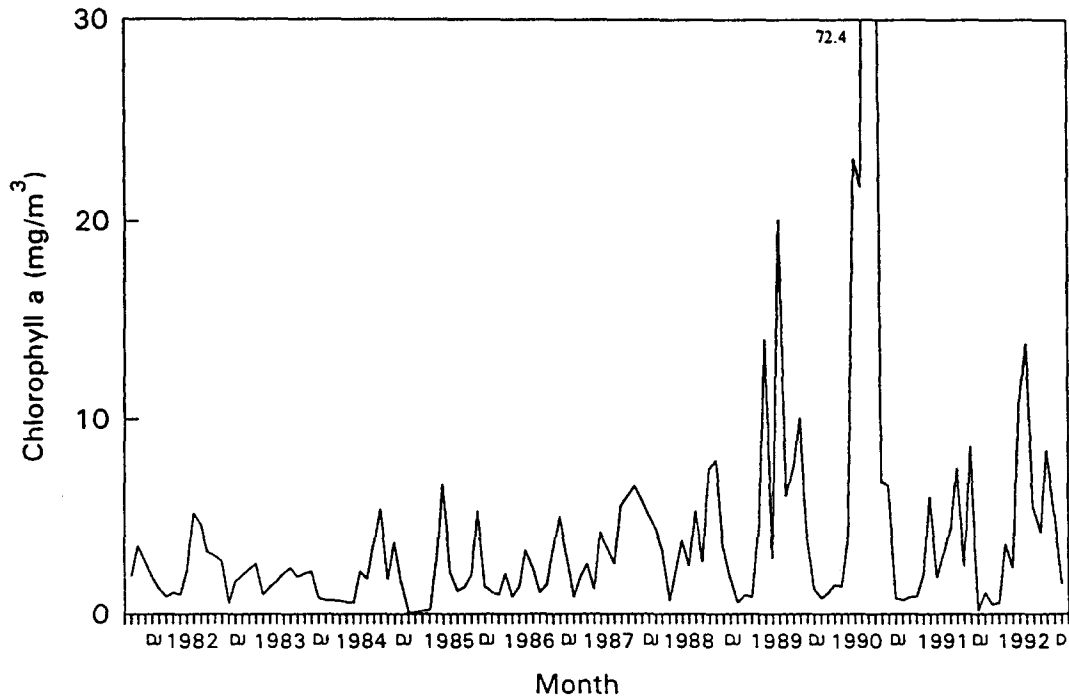


Fig. 1. The monthly variations of average chlorophyll a concentration in the surface 5m in Lake Soyang.

이와 같이 매년 남조류가 증가 추세에 있는 것은 N/P비의 감소에 따른 것으로 사료되며 이는 부영양화가 급격히 진행되고 있음을 암시하는 것으로 보인다. Forsberg(1979)는 호수의 영양상태가 부영양화로 진행됨에 따라 TN/TP비가 점차 작아진다고 보고하였으며, Schindler(1977)는 TN/TP 무계비를 15에서 5로 낮추었을 때 질소가 결핍되어 질소고정 능력이 있는 남조류가 우점하게 된다고 보고하였다. 소양호의 NO₃-N/TP비는 1984년에 100 정도에서 1990년에는 50 정도로 매년

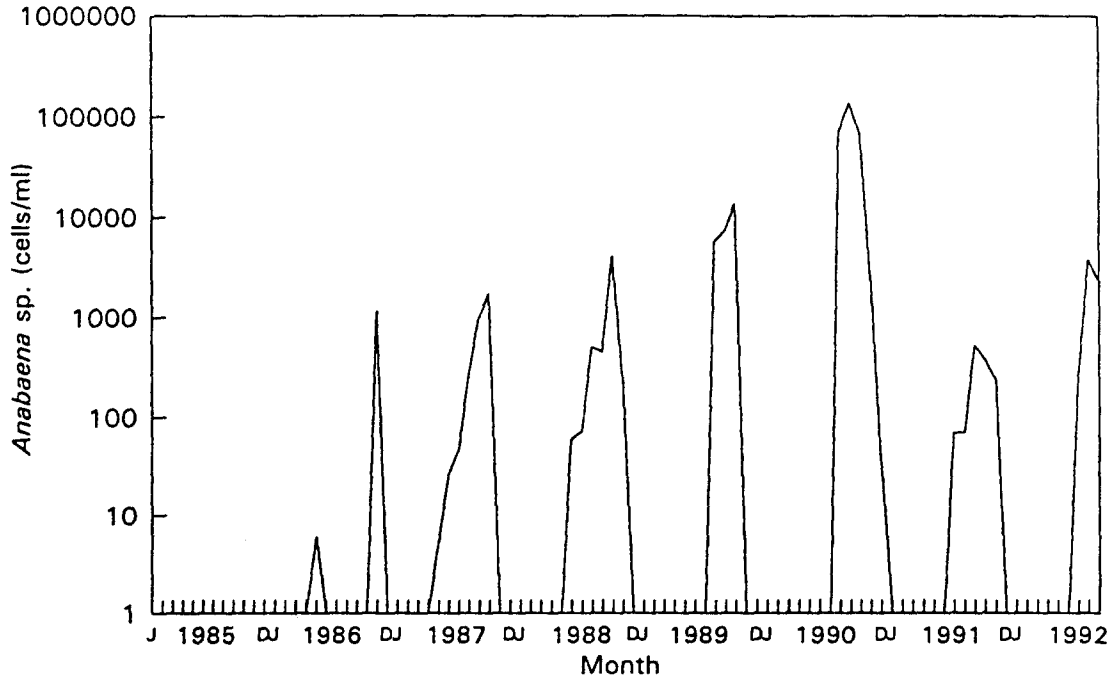


Fig. 2. The monthly variations of *Anabaena* sp. cell density at the surface of Lake Soyang.

감소되고 있다. 이처럼 소양호의 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{TP}$ 비가 점차 감소하는 것은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 감소에 따른 것이 아니라 TP의 증가에 따른 것이다. 본 연구기간동안 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 매년 0.6mgN/l 정도로 고갈을 보이지 않았고 식물플랑크톤 성장에 충분한 농도를 유지하였으나 총인 농도는 Fig. 3 에서 보여주는 바와 같이 1985년에 $5\sim 6\text{mg/m}^3$ 이던 것이 1992년에는 15mg/m^3 로 매년 점차 증가하였다.

소양호에서 *Selenastrum carpicornutum*을 사용한 algal assay에 의해 조사된 식물플랑크톤의 일차 제한영양염류는 계절적인 차이는 있겠지만 1985년 여름에는 인이었으나 1992년 여름에는 질소인 것으로 나타났다.

수중에서의 용존산소농도는 식물플랑크톤의 광합성과 호흡 및 미생물의 활동 등에 따른 여러가지 기작에 의해 결정된다. 소양호는 겨울동안 turnover가 일어나는 warm monomixis의 혼합형태를 보이며 전층이 완전히 혼합되는 시기에 용존산소농도가 가장 높고, 여름성층기에는 중층에 산소의 최저층(metalimnetic oxygen minimum)이 형성된다. 수온약층에서는 물의 밀도가 증가하므로 표층에서 침강하는 유기물이 오랜시간 정체하기 때문에 용존산소의 변화가 유기물량에 따라 많이 소비될 수 있다. 중층산소최저층은 수온약층과 혼합층 사이에서 생성되는데 이러한 중층산소최저층형성의 원인으로서는 박테리아(Gordan and Skelton, 1977)와 동물플랑크톤(Baker et al, 1977)에 의한 seston의 분해량 증가, DO가 낮거나 BOD가 높은 물의 중층 유입, 우기에 탁도가 높은 물의 중층유입(Lyman, 1944), 중층방류에 의한 산소가 적은 물에 의한 withdrawal currents 형성 등을 들 수 있다. 또한

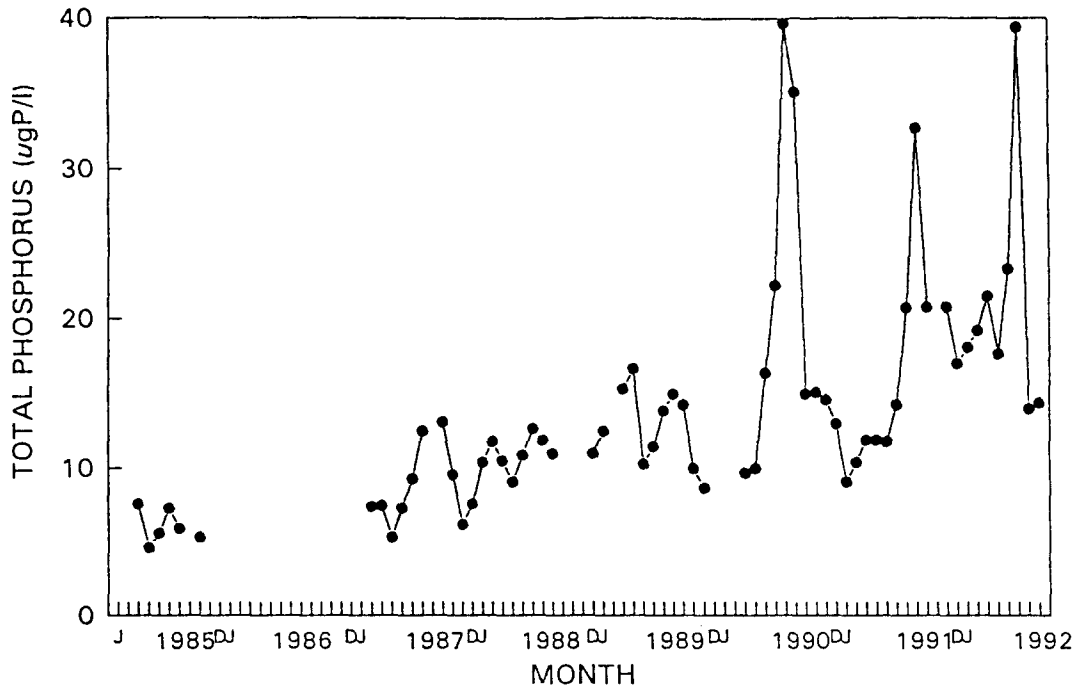


Fig. 3. The monthly variations of total phosphorus concentration in Lake Soyang(average of 0, 2, 5m).

Wetzel(1983)도 표층부근에서의 높은 산소소비 및 heterotrophic organism의 집적등과 같은 몇가지 mechanism을 보고한 바 있다. 소양호의 경우 중층산소최저층이 우기가 집중된 이후에 높은 탁도층과 함께 나타나는 것으로 보아 강우가 집중될때 많은 양의 유기물 유입에 따른 것으로 사료된다.

봄부터 겨울까지 심층산소의 감소속도를 심층산소소비율(the rate of hypolimnetic oxygen deficit)이라 하는데 소양호의 산소소비율은 1986년에 0.034 mg/cm²/day, 1987년에 0.047, 1988년에 0.059, 1989년에 0.067, 1991년에 0.051, 1992년에는 0.083 mg/cm²/day로 나타나 1991년을 제외하고는 빠르게 증가하는 추세를 보이고 있다(Fig. 4). 1991년에 약간 낮은 수준을 보인 것은 대홍수로 인하여 유입수의 증가에 따라 어느 정도 심층수가 교체되었던 때문인 것으로 사료된다. 심층산소소비율은 호수의 부영양화도 또는 일차생산량과 비례하므로 이를 이용하여 호수의 부영양화 정도를 판정할 수 있다. 심층산소소모율에 대하여 Hutchinson (1957)은 0.017 mgO₂cm²/day이하를 빈영양호, 0.033이상을 부영양호로 분류하였고, Mortimer (1941)은 0.025이하를 빈영양호, 0.055이상을 부영양호로 분류하였는데, 소양호의 심층 산소소모율은 Hutchison의 분류에 따르면 1986년부터 부영양호 수준이며 Mortimer의 분류에 따르면 1991년을 제외하고는 1988년부터 부영양호 수준을 보이는 것으로 판정된다.

소양호에서 투명도의 변화를 보면 1985년 부터 1990년 까지 매년 여름 평균치가 낮아지고 있는 것으로 나타났으나 1991년과 1992년에는 약간 높은 값을 보였다

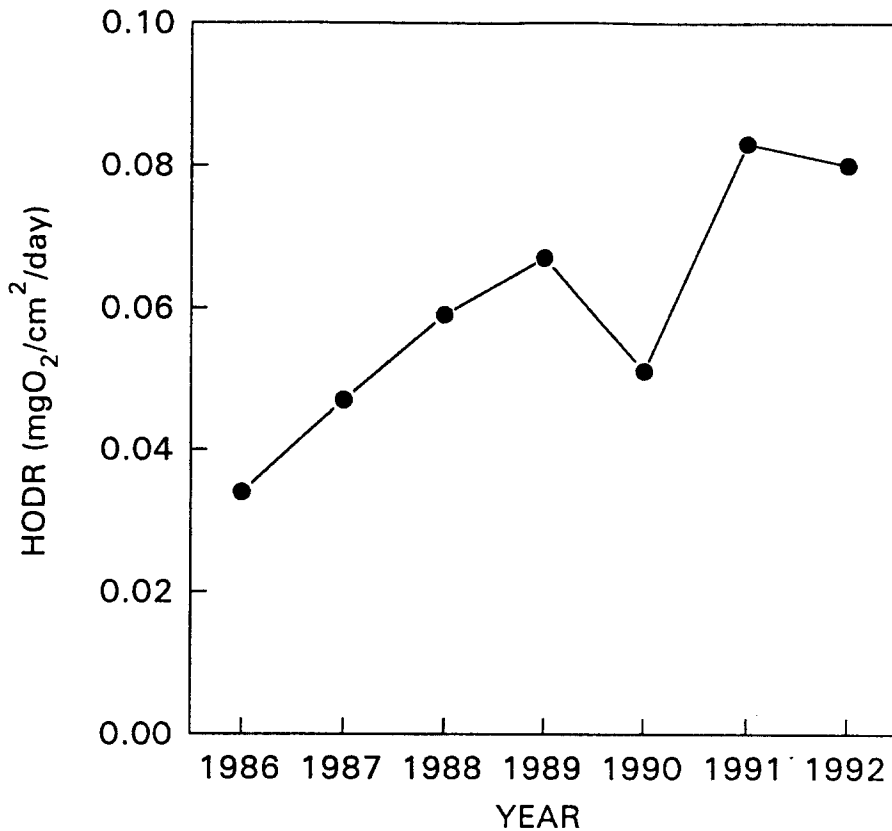


Fig. 4. Annual variations of the rate of hypolimnetic oxygen deficit(HODR) in Lake Soyang.

(Fig. 5). 1985년경에는 투명도가 4-6m내외로 여름에도 4m 이상을 보였으나 1987년부터는 겨울을 제외하고는 대개 4m 이하로 낮아졌으며, bloom이 일어나는 시기에는 전 호수가 2m 내외로 낮은 값을 보였다. 이는 식물플랑크톤의 증가에 따른 것으로 사료되며 특히 여름에 낮은 값을 보이는 것은 1986년부터 출현한 남조류 bloom에 기인 하는 것으로 볼 수 있다. 그러나 1990년 이후 약간 높아진 것으로 나타났다.

소양호의 주 유입수인 소양강의 총인 농도와 용존무기인(SRP)은 유량이 큰 시기에 높게 나타났으며 그 이외의 계절에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 6). 따라서 인부하량은 유입수량에 따라 큰 차이를 보이고 있는데 유입수량이 많은 장마철(7, 9월)에 유입되는 부하량이 연간 인부하량 104 tP/yr의 약 70%에 해당하는 것으로 나타났으며(Table 1), 이중 생물이 직접 이용할 수 있는 용존무기인(SRP) 유입량은 42%인 것으로 산정되었다. 방류되는 인도 방류수량이 크게 증가했던 시기인 9월에 연간 방류량 62 tP/yr의 52%가 방류되는 것으로 나타났다.

소양호내에 설치되어 있는 가두리 양식장에 의한 인부하량은 소양호 전체 인부하량의 32%에 해당되는 48 tP/yr인 것으로 산정되었다. 그러므로 소양호의 인부하

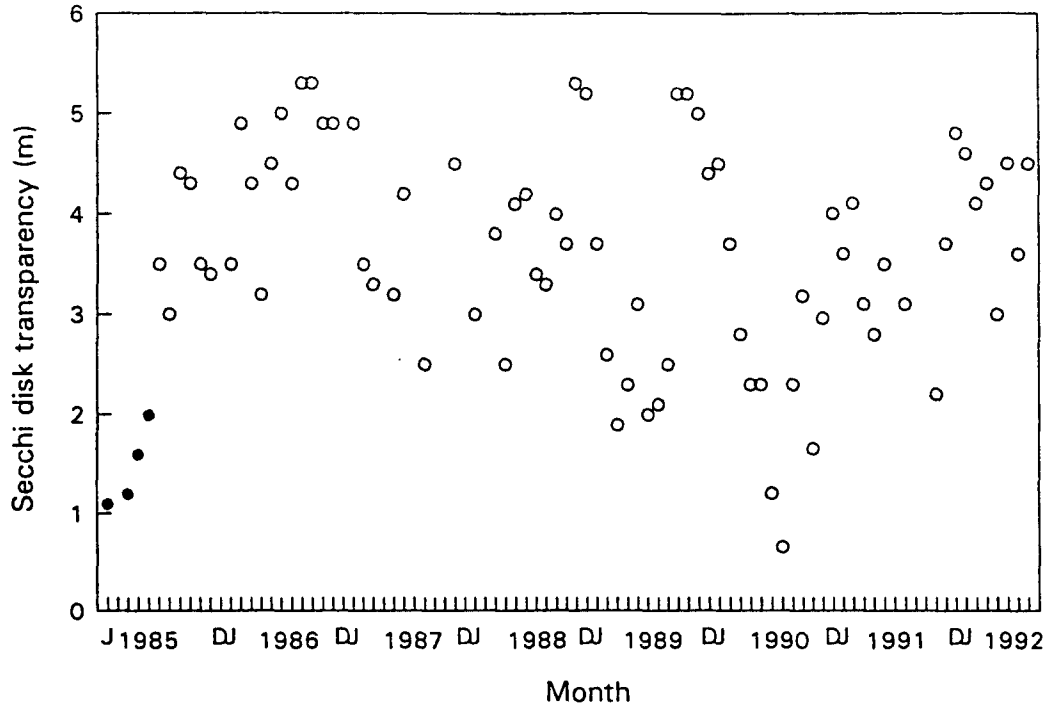


Fig. 5. The monthly variations of Secchi disk transparency in dam site of Lake Soyang(●: the period of inorganic turbidity due to storm runoff).

량은 유역과 양어장 부하량을 합하여 총 152 tP/yr인 것으로 계산되었다. 또한 용존형태의 인(SRP) 부하량은 총 인부하량의 43 %에 해당하는 65 tP/yr으로 유역과 양어장으로부터 각각 44 tP/yr와 21 tP/yr가 부하되는 것으로 나타났다. 호수내의 체류량은 총유입량의 59 %에 해당되는 90 tP/yr가 되는 것으로 산정되었다(Table 2). Vollenweider(1976)가 제안한 임계 인부하량의 계산 결과 수면적당 인부하량은 3.4 gP/m²/yr로 나타났으며, 양어장을 포함시키지 않았을 경우는 2.3 gP/m²/yr로 산정되었다. 유역에서 발생된 인이 호수까지 도달되는 도달율은 대기로부터의 유입량 13.5 tP/yr을 포함하여 계산한 결과 약 22% 정도로 산정되었다.

인부하량의 계산결과 소양호의 수면적당 인부하량은 3.4 gP/m²/yr로 나타났으며, 양어장을 포함시키지 않았을 경우는 2.3 gP/m²/yr로 산정되었다. 이는 Cho등(1991)이 최근 보고한 3.1 gP/m²/yr 과 비슷한 값이며, 충주호의 3.1 gP/m²/yr, 대청호의 4.6 gP/m²/yr 의 중간 정도의 수치이다. 또한 Cho등(1991)은 소양호 뿐만아니라 충주호와 대청호도 호수의 환경용량이라 할 수 있는 과잉임계부하량을 초과하고 있다고 하였다. 본 연구 결과에서도 소양호의 경우 과잉임계부하량을 1.54 gP/m²/yr 정도 초과하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 소양호의 인부하량은 이미 부영양호의 수준에 있는 것으로 사료되며, 양어장의 부하량을 포함시키지 않았을 경우도 위험임계부하량을 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

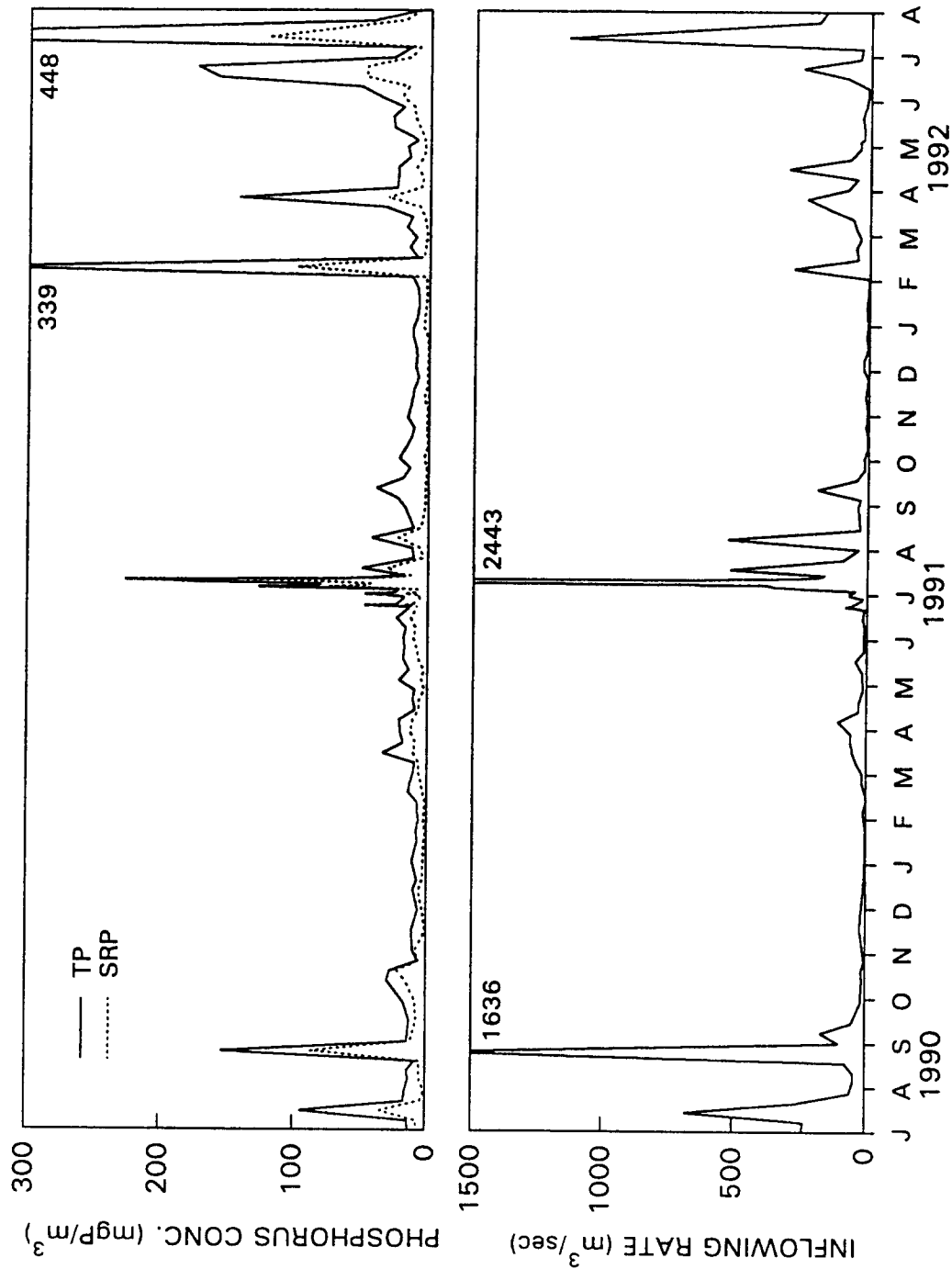


Fig. 6. Monthly variations of the phosphorus concentration and the inflowing rate of the Soyang River.

Table 1. Total phosphorus(TP) and soluble reactive phosphorus (SRP) loading of inflowing water into Lake Soyang (Inflow rate, TP and SRP are monthly averages from July 1990 to May 1992)

Month	Inflow rate (t/sec)	TP ($\mu\text{gP/l}$)	SRP ($\mu\text{gP/l}$)	TP Loading (tP/month)	SRP Loading (tP/month)
Jan.	7.4	10.0	2.2	0.2	0.04
Feb.	23.4	41.3	11.7	2.4	0.69
Mar.	59.4	14.4	4.7	2.3	0.75
Apr.	84.6	35.0	10.9	7.7	2.39
May	60.6	19.0	4.4	3.1	0.71
Jun.	143.5	18.3	9.2	6.8	3.42
Jul.	327.9	46.0	21.5	40.4	18.88
Aug.	104.5	18.8	8.4	5.3	2.35
Sep.	335.2	37.3	15.4	32.4	13.38
Oct.	31.4	21.1	8.4	1.8	0.71
Nov.	57.0	11.1	3.2	1.6	0.47
Dec.	13.9	8.7	2.5	0.3	0.09
Total (tP/yr)				104	44

Table 2. Total phosphorus budget in Lake Soyang (SRP:Soluble Reactive Phosphorus, OP: Organic Phosphorus (=TP-SRP))

Sources		Phosphorus Discharge (tP/yr)
Input	Fishfarm	
	SRP	21 (44%)
	OP	27 (56%)
	-----	-----
	Subtotal	48 (100%)
	Watershed	
	SRP	44 (42%)
	OP	60 (58%)
	-----	-----
	Subtotal	104 (100%)
	SRP	65 (43%)
	OP	87 (57%)
	-----	-----
	Total	152 (100%)
Output	Outflow	62 (41%)
Retention	Amount of Retention	90 (59%)

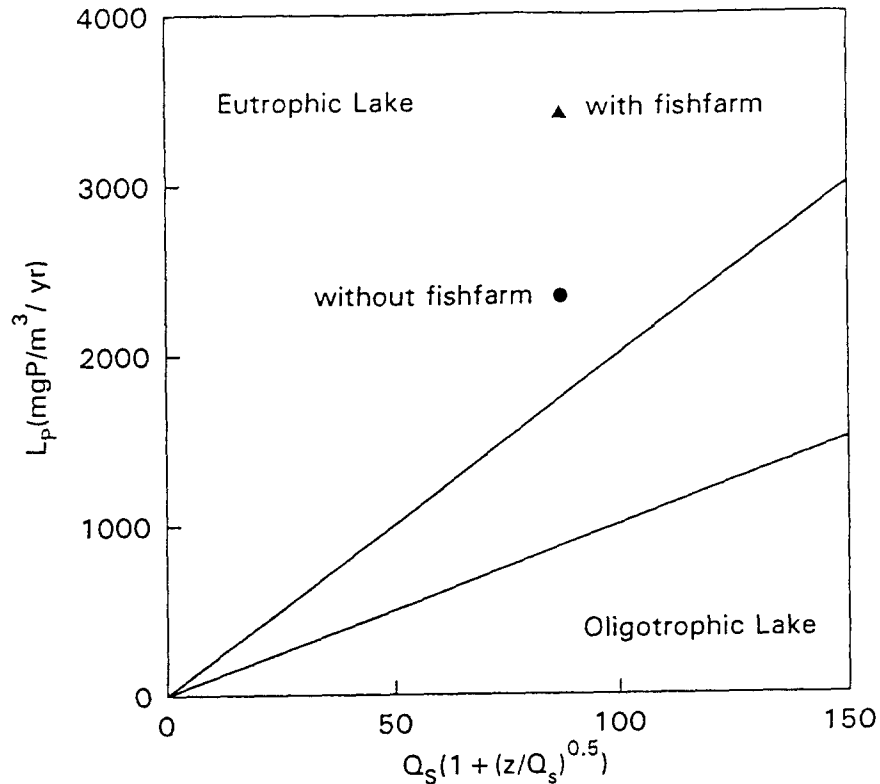


Fig. 7. Plot of phosphorus loading into Lake Soyang and critical loading of Vollenweider-OECD model.

IV. 결 론

1. 최근 수년간의 엽록소 a 농도는 연간 0.4 mg/m^3 의 평균적 증가율을 나타내고 있으며, 1986년 이후부터는 늦여름에 우점종이 *Peridinium bipes* 에서 *Anabaena*로 바뀌었다. 한편 조류성장에 대한 1차 제한영양염도 1985년에는 인이었으나 1992년에는 질소로 바뀌었다.

2. 심층산소소비율은 호수의 유기물생산의 지표로서 장기간의 누적된 결과를 보여주는 것이므로 순간변화가 심한 표층수에 의한 지표들에 비해 부영양화도를 정확히 파악할 수 있는 것으로 소양호의 산소소비율은 1986년에 $0.034 \text{ mgO}_2/\text{cm}^2$ 이었으며 1990년에는 0.080으로 증가하여 Mortimer의 분류에 따르면 1988년부터 부영양호의 수준인 것으로 판정할 수 있다.

3. 소양호의 총인농도는 1984년에 $5 \text{ } \mu\text{gP/l}$ 에서 1991년에는 $15 \text{ } \mu\text{gP/l}$ 정도로 매년 증가 추세에 있으나, 질산성 질소는 연중 $0.5\text{--}0.7 \text{ mgN/l}$ 정도로 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 $\text{NO}_3\text{-N/TP}$ 비는 1984년에 100 정도에서 1991년에는 50 이하로 감소하였다. 그러므로 소양호에서 1992년에 조류성장에 질소가 1차 제한영양염으로 작용한 것은 매년 증가추세에 있는 인에 기인된 것으로 사료된다.

4. 소양호의 인부하량은 유역으로부터의 유입량 104 tP/yr 와 양어장으로부터의

배출량 48 tP/yr을 합하여 총 152 tP/yr 이었다. 용존무기인(SRP)의 부하량은 유역과 양어장이 각각 44 tP/yr와 21 tP/yr 이었으며, 입자상인의 부하량은 각각 60 tP/yr과 27 tP/yr 이었다. 유역에서 발생된 인이 호수까지 도달되는 유출율은 22% 인 것으로 나타났다. 인유입량과 방류량의 차이로부터 계산된 인의 호수내 체류량은 인부하량의 59%인 90 tP/yr 이었다.

5. 소양호의 환경용량이라할 수 있는 허용임계부하량은 $0.87 \text{ gP/m}^2/\text{yr}$ 이며 위험임계부하량은 1.75로 계산되었다. 1990년 ~ 1992년의 수면적당 인부하량은 $3.4 \text{ gP/m}^2/\text{yr}$ 이며 양어장을 포함시키지 않았을 경우에도 $2.3 \text{ gP/m}^2/\text{yr}$ 로서 부영양화 임계부하량모델에 의한 위험임계부하량을 초과하는 것으로 나타났다.