

소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석

이 혜 원 · 안 광 국 · 박 석 순*

(이화여자대학교 공과대학 환경학과)

Long-Term Annual Trend Analysis of Epilimnetic Water Quality and Their Longitudinal Heterogeneities in Lake Soyang. *Lee, Hye-Won, Kwang-Guk An and Seok-Soon Park** (Dept. of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea)

The spatial and temporal trends of water qualities in Lake Soyang was statistically analyzed in this study. The water qualities include nutrients, ionic contents and chlorophyll-*a* (Chl-*a*) measured during 1993~2000. The rainfall intensity and runoff from the catchment appeared to play an important role in water quality trends in the lake. According to seasonal Mann-Kendall test, conductivity, TP, and Chl-*a* did not show any trends of increase or decrease over the 8 year period, while TN declined slightly. It was found that the variation of TP was a function of interannual inflow and rainfall. In the analyses of spatial trend, conductivity, based on the mean by site, showed a downlake decline over the eight year period. Minimum conductivity was found in the headwaters during summer monsoon of July to August and near the dam during October. This result indicates a time-lag phenomenon that the headwater is diluted by rainwater immediately after summer monsoon rain and then the lake water near the dam is completely diluted in October. During summer period, TP and TN had an inverse relation with conductivity values. Concentrations of TP peaked during July to September in the headwaters and during September in the downlake. Also, TN increased during the summer and was more than 1.5 mg/L regardless of season and location, indicating a consistent eutrophic state. Values of Chl-*a* varied depending on location and season, but peaked in the midlake rather than in the headwaters during the monsoon. Regression analyses of log-transformed seasonal Chl-*a* against TP showed that value of R² was below 0.003 in the premonsoon and monsoon seasons but was 0.82 during the postmonsoon, indicating a greater algal response to the phosphorus during the postmonsoon. In contrast, TN had no any relations with Chl-*a* during all seasons.

Key words : Nutrients, Conductivity, Rainfall, Inflow, Chlorophyll-*a*, Lake Soyang

서 론

소양호는 1973년 건설되어 우리 나라 수도권 수자원 공급에 중요한 역할을 해왔으나 1980년대 후반부터 수

질이 악화되는 것으로 보고되었다(김, 1997). 심층산소소 모율 (hypolimnetic oxygen deficit) 기준으로 1980년 초 에 빈영양상태를 보였으나 1980년대 후반에는 부영양상 태로 전환되었으며, 총인은 1984~85년에 평균 5~6 µg/L였던 것이 1990년에는 15 µg/L로 증가한 것으로 보

* Corresponding author: Tel: 02) 3277-3546, Fax: 02) 3277-3275, E-mail: ssp@ewha.ac.kr

고되었다(허 등, 1991). 또한, Thurman (1985)이 제시한 용존유기탄소와 입자성유기탄소 기준으로도 소양호는 중영양에서 부영양으로 진행되는 과정에 있는 것으로 나타났다(김 등, 1998).

소양호는 길고 좁은 호수이기 때문에 물의 수평적 혼합이 제한되어 수온, 전기전도도, 영양염류 및 식물성 플랑크톤 밀도가 국지적으로 큰 차이를 보인다(김 등, 1985a, b). 유역에서 부하되는 연간 인부하량은 104톤으로서 이 중 장마철(7~9월)에 유입되는 양이 약 70%로 연간 유입되는 인부하량의 대부분이 우기에 집중된다고 보고하였다(허 등, 1992). 소양호 유역에서 연평균 강우의 70% 이상이 우기인 6~9월 사이에 집중되어 호수의 유입량을 결정하기 때문에 수리수문학적 변화에 따른 이화학적 변화는 불가피하다. 또한 소양호의 수질이 1990년 이후부터는 부영양화도의 큰 진전은 없으며 강우량에 따라 변동이 있는 것으로 연구되었다(김, 1996). 이와 같은 수리수문학적 특성의 중요성은 국외 인공호에 대한 다각적인 연구에서 밝혀지고 있다. Thornton *et al.* (1990)과 Carmack *et al.* (1977)은 호수의 화학적, 생물학적 특성은 하천의 수리수문학적 특성, 즉 유입량, 수체 유동, 방류량, 방류수심 및 방류빈도 등에 의해 역동적으로 변화된다고 지적한 바 있다. 이런 특성은 하절기 몬순의 영향으로 국외 호수 보다 국내에서 더 복잡하게 나타날 수 있음이 지적되었다(안, 2000a, b, 2001).

따라서 우리나라에서 대형 인공호 수질 상태를 판단할 때 다음과 같은 점이 고려되어야 하며 소양호의 경우도 예외가 될 수 없다. 첫째, 모든 대형 호수가 하천에 인공댐을 건설하여 형성되었기 때문에 상하류간의 수질 변이가 크게 나타나며 수질 평가시 이점이 고려되어야 한다. 둘째, 하절기에 집중되는 강우현상으로 인하여 호수내 수리수문 현상이 계절에 따라 크게 다르기 때문에 수질 평가시 장마기와 전후를 구분하여야 한다. 대형 인공호에서 나타나고 있는 수질의 시공간적 변이의 중요성은 지금까지 많은 연구에서 지적되어 오고 있다.

본 연구는 상기 우리나라 인공호 특성에서 제시한 바와 같이 호수 내 상하류간의 공간적 변이와 계절적 수문현상을 고려하여 소양호의 장기간 육수학적 특성을 규명하는데 목적이 있다. 계절적 특성을 반영하기 위해 장마를 기점으로 장마 전, 장마 중 그리고 장마 후로 수문현상을 구분하였고, 댐으로부터 본류를 기준으로 상류 및 하류 표층수 수질의 공간적 이질성을 파악하였다. 1993년부터 2000년까지 소양호에서 측정된 수질자료와 수리수문학적 특성을 대상으로 하였다.

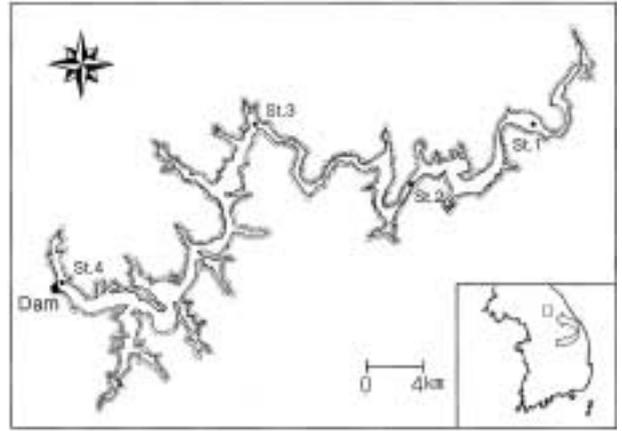


Fig. 1. Study area and locations of collected data.

재료 및 방법

1. 연구대상 호수 및 자료

본 연구대상인 소양호는 북한강 상류에 위치한 우리나라 최대 규모의 인공호로 유역면적이 2,703 km², 평균 저수량이 15억 톤, 수리학적 체류시간이 0.75년 정도이다. 유역의 대부분은 인구밀도가 낮은 산간 지역에 위치하여 국내 다른 인공호에 비해 점오염원이 적다.

연구에 사용된 자료는 Fig. 1에 제시한 4지점에서 1993년부터 2000년까지 8년 동안 월별로 표층수에서 측정된 환경부 수질자료로, 총인(total phosphorus: TP), 총질소(total nitrogen: TN), 엽록소(chlorophyll-a: Chl), 전기전도도(conductivity: Cond.)이다. 측정지점은 신남선착장, 양구대교 및 양구선착장으로 댐으로부터 호수의 중심선으로 따라 각각 56, 48, 23 km의 상류에 위치해있다. 유입수량은 수자원공사의 자료를 이용하였고, 강수량은 기상청 일별 자료를 사용하였다.

2. 자료분석

수집된 자료는 우리나라 몬순현상에 의한 수질변화 및 수리수문학적 반응의 특성을 파악하기 위해 앞서 기술한 바와 같이 분류하였다. 시간적으로 장마 전기는 1월부터 6월, 장마 기간은 7월에서 8월, 장마 후기는 9월부터 12월까지로 구분하였고, 공간적으로 본류를 댐에서의 거리를 기준으로 편의상 제1지점을 상류로, 제4지점을 하류로 구분하였다. 그러나 중류의 구분은 모호하여 구분하지 않았다. 자료의 시간적 경향을 파악하기 위해 맨-켄달 경향분석(Mann-Kendall Trend Analysis)

을 실시하였다. 맨-켄달 경향분석은 관찰치의 차이를 상대적인 크기로 계산하는 비모수 통계방법으로 아래 식에 제시된 맨-켄달 통계치(Z)를 산정하고 이를 유의수준의 표준통계치와 비교하여 경향을 파악한다.

$$Z = \frac{S-1}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad \text{if} \quad S > 0$$

$$= 0 \quad \text{if} \quad S = 0$$

$$= \frac{S+1}{[VAR(S)]^{1/2}} \quad \text{if} \quad S < 0 \quad (1)$$

여기서 S는 관찰치간의 차이의 합으로 계산되며, 각 수질인자들의 관찰치를 x_1, x_2, \dots, x_n 으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = 1 \quad \text{if} \quad x_j - x_k > 0$$

$$= 0 \quad \text{if} \quad x_j - x_k = 0$$

$$= -1 \quad \text{if} \quad x_j - x_k < 0 \quad (2)$$

$\text{sgn}(x_j - x_k)$ 는 j 시점과 k 시점의 관찰치간의 차이를 1, 0, -1로 나타내 주는 지시자(Indicator)이며, 이에 따른 $x_j - x_k$ 가 각각 양(positive), 영(zero), 음(negative)일 때, +1, 0, -1로 표현하여 이들의 합인 S를 구한다. 또한, VAR(S)는 S의 분산으로 다음과 같이 표현한다.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3)$$

여기서, n 는 관찰치의 총 개수이고, q 는 자료에서 같은 수로 묶여져 있는 전체 개수이며, t_p 는 같은 수의 개수이다. 이 방법은 자료의 순서에 기초한 비모수적 통계기법으로 비정규 분포를 가지는 자료분석에 적합하며 계절성과 결측치가 결과에 영향을 주지 않기 때문에 수질의 계절적 경향성을 판단하는 유용한 지표로 사용된다(박과 박, 2001). 연별경향분석은 SPSS 8.0 통계 패키지를 이용하여 5% 유의 수준으로 양측검정을 수행하였다(SPSS Inc., 1998). 자료의 공간적 경향을 분석하기 위해서 수질측정 지점과 댐 사이의 거리로 구분하여 회귀분석(Regression Analyses)하였다.

결과 및 고찰

1993년에서 2000년까지의 8년 간의 소양호의 영양염류, 엽록소 및 전기전도도의 수질분석 결과는 Table 1로

요약하였다. 8년 간의 평균 총인(TP) 농도는 $17 \mu\text{g/L}$, 범위는 $4.69 \mu\text{g/L}$ 로서 큰 변이를 보였다. 소양호의 총인 농도는 팔당호 평균($67 \mu\text{g/L}$; 이 등, 1994), 대청호 평균($26 \mu\text{g/L}$; 안, 2000)에 비해 낮은 경향을 보였다. 소양호에서 총질소(TN)의 평균농도는 1.706 mg/L 였고, $0.73 \sim 3.65 \text{ mg/L}$ 범위로 총인보다 약 100배 이상 높은 값을 보였다. Table 1에 제시한 바와 같이 질량기준 TN:TP 값은 최소 18에서 최대 620으로 Forsberg and Ryding (1980)의 기준에 따르면 인이 조류 성장의 1차적 제한요인임을 보여준다. 인농도보다 상대적으로 질소 농도가 높은 현상은 우리 나라 대부분의 인공호에서 나타나는 일반적인 현상이나 외국 호수와 비교할 때 매우 특이한 현상이다. 소양호 내의 질소 농도는 Forsberg and Ryding

Table 1. The means and ranges of water quality parameters in Lake Soyang during 1993~2000.

Parameters	Mean ± S.E.	Range	no.
Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	62.4 ± 11.3	40.4 ~ 117.4	366
Total phosphorus (TP $\mu\text{g/L}$)	17 ± 10	4 ~ 69	375
Total nitrogen (TN mg/L)	1.706 ± 0.475	0.73 ~ 3.65	382
Chlorophyll- <i>a</i> (Chl $\mu\text{g/L}$)	5.5 ± 7.6	0.2 ~ 85.8	369
TN: TP	126 ± 72	18 ~ 620	375
Chl: TP	0.74 ± 0.47	0.01 ~ 3.73	362

Table 2. Statistical analyses of seasonal Mann-Kendall test in Lake Soyang during 1993~2000.

Parameter	Location	Statistic S	Z-value	p-value	Slope	Trend
Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	1	-6.14	-0.20	0.42	-0.20	NO
	2	19.87	0.72	0.24	0.27	NO
	3	35.29	1.30	0.10	0.28	NO
	4	29.99	1.10	0.14	0.35	NO
Total phosphorus ($\mu\text{g/L}$)	1	27.98	1.02	0.15	0.33	NO
	2	34.13	1.22	0.11	0.67	NO
	3	-24.97	-0.88	0.19	-0.29	NO
	4	-50.11	-1.81	0.04	-0.50	NO
Total nitrogen (mg/L)	1	-93.01	-3.33	0.00	-0.08	DOWN
	2	-80.59	-2.89	0.00	-0.07	DOWN
	3	-100.52	-3.56	0.00	-0.07	DOWN
	4	-108.67	-3.85	0.00	-0.05	DOWN
Chlorophyll- <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	1	1.84	0.03	0.49	0.00	NO
	2	4.24	0.12	0.45	0.05	NO
	3	-15.90	-0.54	0.29	-0.09	NO
	4	-28.45	-1.03	0.15	-0.10	NO

(1980) 및 OECD (1982)의 기준에 따르면 부영양 혹은 과영양상태로 판단된다. 이는 우리 나라에 독특한 지질학적 특성과 대기의 질소강하 그리고 비료 사용의 과잉 등으로 추정해 볼 수 있다(김, 1998).

1. 맨-켄달 경향분석 (Mann-Kendall Trend Analysis)

맨-켄달 검정법 (Mann-Kendall test)을 이용하여 1993년부터 2000년까지 8년 동안 전기전도도, 총인, 총질소, 엽록소-a의 연별 변화에 대한 경향분석을 실시하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 전기전도도의 경우 각 지점별 (St.1~St.4) 기울기 범위는 $-0.20 \sim 0.35$, Z값은 $-0.20 \sim 1.10$ 범위로서 p값은 모두 0.1 이상 (범위: $0.04 \sim 0.19$)이었다. 이는 주어진 기간 동안 대상 수질의 증가나 감소가 없었으며 점오염원이 적은 상태에서 수

계 지질 내 양이온 (cations) 및 음이온 (anions)이 보존적 특성을 유지하고 있음을 나타낸다. 총인의 경우 지점별 기울기 범위는 $-0.50 \sim 0.67$, Z값은 $-1.81 \sim 1.22$, p값은 $0.04 \sim 0.19$ 이었다. 따라서 인의 경우 역시 대장기간동안 통계학적으로 유의성이 없는 것으로 나타났다. 즉, 인농도의 증가 혹은 감소하는 경향이 나타나지 않았다. 소양호의 1984년부터 1988년까지의 이전 조사에 따르면 총인의 농도는 연별로 점차 증가하는 것으로 보고된 바 있다(김 등, 1989). 그러나 본 연구 대상 기간인 1993년부터 2000년 동안은 인농도에 큰 변화를 보이지 않았다. 이런 두 연구 결과를 종합해 보면 인공호 건설 초기에 부영양화현상은 급격히 일어나지만 그 후에 진행속도가 감소할 수 있는 것으로 사료된다. 실제 인공호는 시간에 따른 자연적 부영양화 및 인위적 부영양화 현상 (cultural eutrophication)이 호수천이 단계에서 나타나는 일반적 현상이지만 본 연구 분석에서는 연별변화추

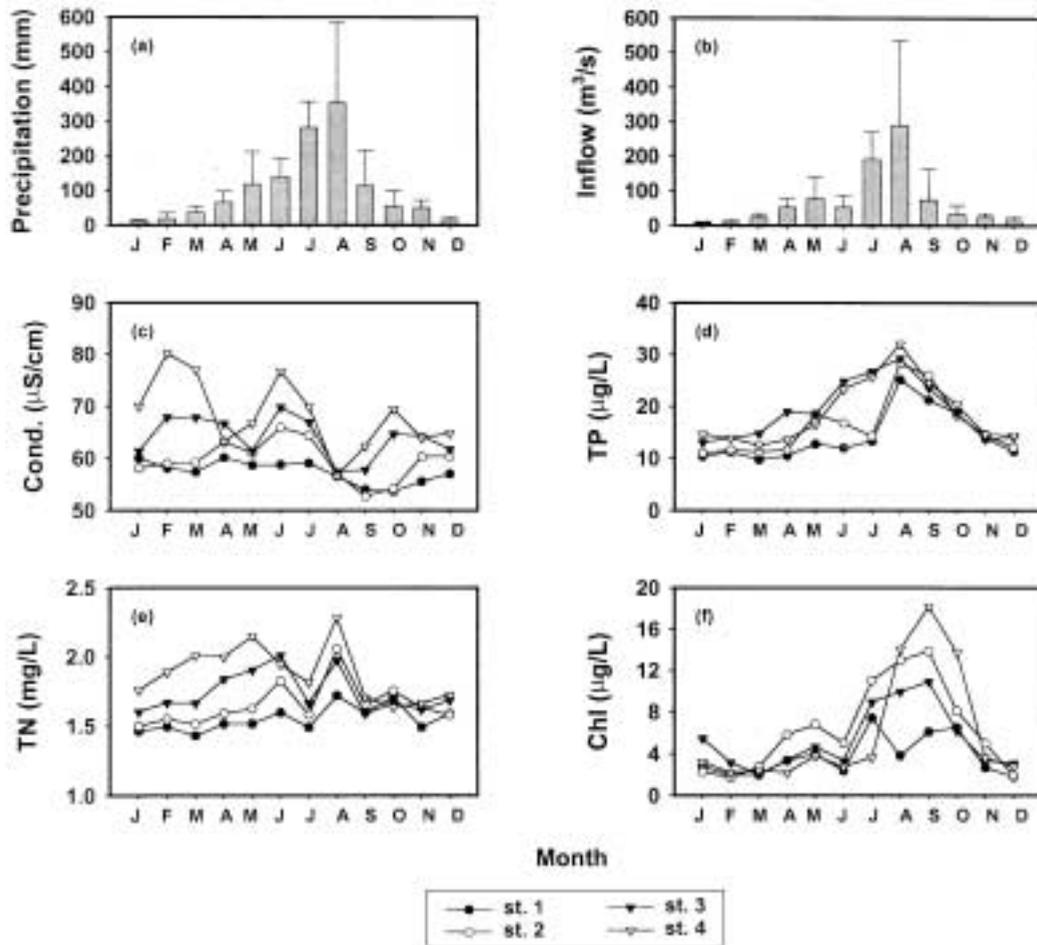


Fig. 2. Seasonal variation of hydrology and water quality parameters in Lake Soyang during 1993~2000. Each data point indicates an average of 8 years.

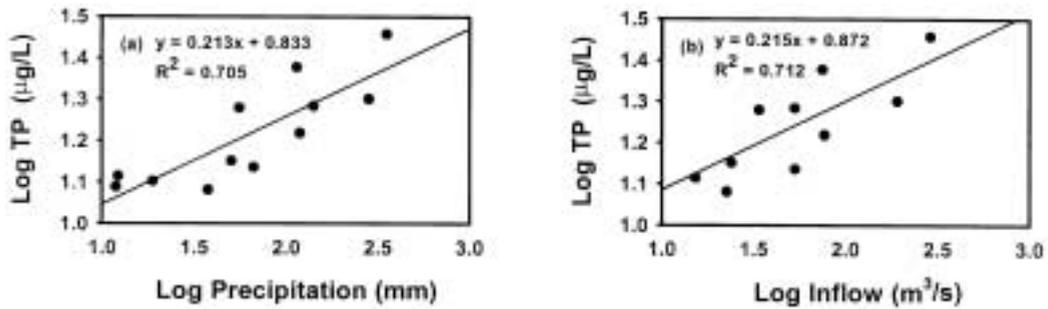


Fig. 3. Regression analyses of TP against the precipitation (a) and inflow volume (b).

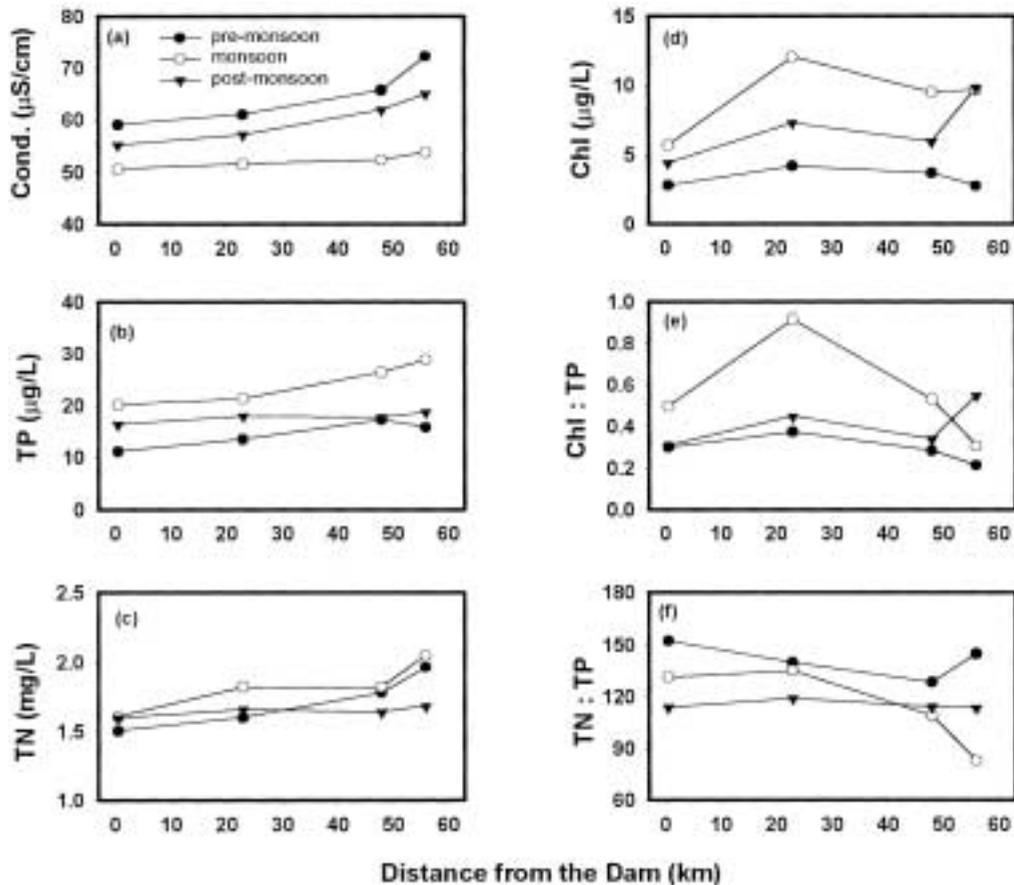


Fig. 4. Longitudinal patterns of water qualities by hydrologic seasons.

이가 없었다. 본 연구기간동안 연별 총인 농도는 연별 강우량 ($R^2 = 0.70$, $n = 12$) 및 호수 내 유입량 ($R^2 = 0.71$, $n = 12$)에 의해 설명되었고, 월별 총인의 농도 역시 월별 강우에 의해 조절되는 것으로 나타났다 (Fig. 3a). 소양호의 경우 1986년부터 1989년 사이에 내수면개발촉진법에 의해 어민소득증대의 일환으로 가두리 양식장이 11개

설치 운영되다가 1998년 모두 철거되었다. 따라서 양식장 철거 후 수질의 향상(인농도 감소)을 기대하였으나, 본 분석에서는 철거 전후의 인농도는 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서 호수내 수질은 점오염원이 감소하더라도 곧 바로 회복되지 않는 것을 제시하는 바이다. Edmonson and Lehman (1981)이 워싱턴호의 연구에서

제시하듯이 오염원의 차단에도 불구하고 부영양화 현상의 연속성은 이전에 존재하던 영양염류의 내부부하 (Internal loading)에 기인하는 것으로 사료된다. 엽록소-a농도의 p 값은 0.15~0.49의 범위에 있어 증가 혹은 감소의 경향을 보이지 않는 반면 TN은 극히 미약한 감소경향 (slope = -0.05~0.08)을 보였다.

2. 시간적, 공간적 수질분석

수리수문학적 변화에 따른 수질의 월별 농도변화는

다음과 같다. 8년 동안 호수내 인의 월별 농도는 소양호 수계 내 수리수문학적 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 사료되었다 (Fig. 2). 본 수계내 연평균 강우량과 월별 총 유입량은 하절기의 7~8월 동안 집중되었다. 호수내 인의 월별 농도 분포는 연평균 강우량과 월별 총 유입량과 유사한 분포를 나타내었다 (Fig. 2d). 로그 (log) 변환된 총인과 강우의 1차 회기 분석에 따르면 총인 농도는 강우에 70.5% 설명되었고 (Fig. 3a), 호수내의 유입량은 총인 변화를 71.2%까지 설명되었다 (Fig. 3b). 따라서 수

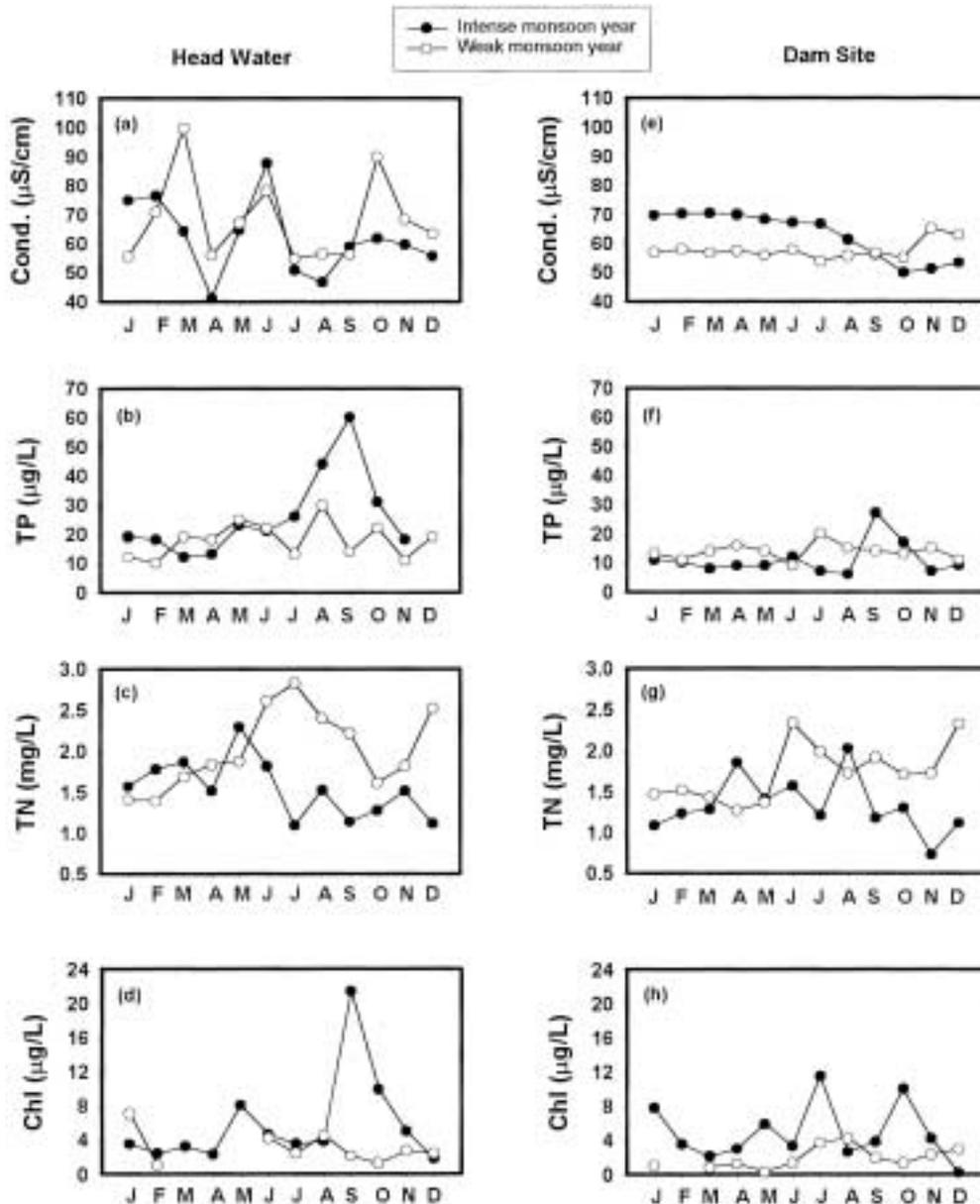


Fig. 5. Seasonal differences between the headwater (St. 1) and dam site (St. 4) in the intense monsoon year (1998) vs. the weak monsoon year (1994).

리수문학적 특성, 특히 강우 변화에 의해 호수 내 월별 총인 농도가 조절되는 것으로 사료되었다.

호수내의 3개 조사지점에서 8년 동안 측정된 전기전도도도 자료의 평균결과에 따르면, 하절기 장마에 의해 이온농도는 희석효과를 나타냈다. 전기전도도는 6월에 최대값 ($67.8 \mu\text{S}/\text{cm}$)을 나타내며 8, 9월에는 최소값을 나타냈다 (Fig. 2c). 장마 후 유입수가 감소하면서 전기전도도는 다시 상승하기 시작하였다. 이와 같은 결과는 An and Jones (2000)의 다른 국내 대형 인공호에서의 염분도, 양이온, 음이온 및 전기전도도에 대한 연구결과와 일치한다. 엽록소-a로 측정된 조류의 생체량의 최대값을 나타내는 시기와 영양염류의 최대값을 나타내는 시기는

일치하지 않았다. 즉, 총인 농도는 8월에 최대였고 엽록소-a 농도는 장마 이후 수층이 안정되는 9월에 최대치를 보인다. 이것으로 보아 조류 생체량은 영양염류의 농도 뿐만 아니라 수층의 안정화 정도에 영향을 받는 것으로 판단되었다.

호수 내 수질은 시간(장마 전, 장마 중, 장마 후)과 공간(상류에서 하류)에 따라 변이를 보였다 (Fig. 4). 전기전도도는 시간적으로는 장마 중에 장마 전에 비해 감소하고 장마 후에 다시 증가(12.4%)하였으며 공간적으로 상류에서 하류로 감소하였다 (Fig. 4a). 반면 총인은 장마 중에 상류에서 $29.75 \mu\text{g}/\text{L}$ 로서 장마전에 비해 90.5% 증가하였고, 하류에서도 뚜렷한 증가 양상을 보였다 (93.6

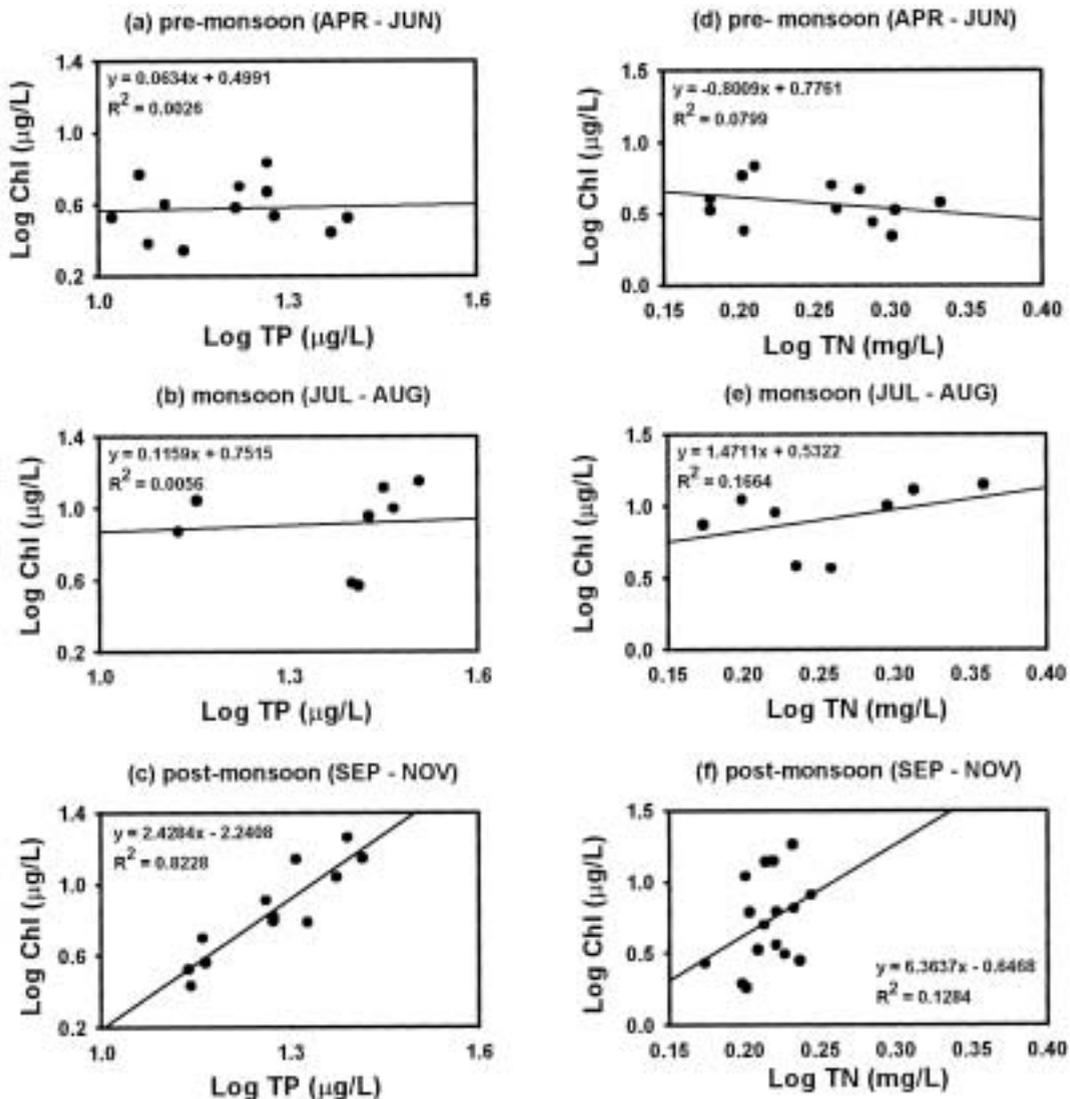


Fig. 6. Relationships of chlorophyll-a (Chl) to total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) by hydrologic season (premonsoon, monsoon and postmonsoon).

%). 총질소는 장마중에 상류에서 최대값 (2.05 mg/L)을 보였고 호수 전체에서 1.5 mg/L 이상을 유지하였다 (Fig. 4c). 엽록소-a의 농도는 영양염류 (N, P) 농도와 계절의 변화에 따라 차이를 보였다. 장마 중에 최대값을 보였고 장마전에 호수 전체에서 4.1 µg/L 이하로서 Nurnberg (1996)의 엽록소-a 분류기준에 의해 중영양상태 (mesotrophic condition)로 판명할 수 있다 (Fig. 4d).

3. 강우 강도에 따른 수질분석

강우의 강도와 공간에 따른 수질차이를 분석하였다. 강우의 정도에 따라 강우집중해 (1998)와 가뭏해 (1994)로 구분하였고 공간적으로 제1지점인 상류부와 제4지점인 댐 근처로 구분하였다. 비교결과에 따르면 상류에서 전기전도도는 강우 강도와 무관하게 7~8월에 최소값 (50.4-46.6 µS/cm)을 보였고 하류에서는 강우집중해에 10월에 최소값 (49.8 µS/cm)을 나타낸다. 이것은 상류에서는 7~8월에 집중강우에 의해 이온 농도가 감소하지만 하류에서는 중층 유입현상으로 인해 하류 수질에 바로 영향을 주지 않고 수체류시간 영향으로 10월에 최대 희석현상이 일어나기 때문으로 사료된다 (안, 2000a). 총인 농도의 차이는 Fig. 5b, f에서 보여주는 바와 같다. 총인은 강우집중해에 상류에서 강우의 영향이 단시간에 나타나기 때문에 7월에 증가하기 시작하지만 하류에서는 9월에 최대치 (27 µg/L)를 보였다. 엽록소-a는 상류에서 7월과 8월에는 수체류시간의 영향으로 총인의 증가에도 크게 성장하지 못하고 강우 및 유입량의 감소로 수체 안정성이 증가하는 9월에 급격히 성장한다 (Fig. 5d). 이러한 사실은 호수의 수화현상 (algal bloom)이 하절기 집중 강우 약 30일 후에 나타날 가능성을 시사하기 때문에 이 시기의 수자원의 집중적인 관리가 요구된다. 하류에서 엽록소-a의 최대값은 두 해 모두 11.5 µg/L 이하이지만 강우집중해의 엽록소-a 농도가 가뭏해보다 약 63.9% 높은 값을 보였다.

4. 영양염류와 조류 생체량의 관계

로그 (log) 변환된 영양염류에 대한 조류 생체량의 관계는 Fig. 6과 같다. 회귀분석시 엽록소-a가 온도의 영향을 지배적으로 받게 되는 1월부터 3월 및 12월의 자료는 제외하였다. 연평균 총인에 대한 엽록소-a의 회귀분석에 따르면, 장마전과 장마중의 R²값은 0.007 이하로 상관성이 없었다 (Fig. 6a, b). 장마중에 조류량과 인의 관계가 미약한 것은 수체류시간의 감소 및 무기현탁물의 유입으로 투명도가 감소하여 빛이 제한되기 때문으로

사료된다. 반면에, 영양염류가 풍부하고 수체가 안정되는 9월에서 11월 사이의 엽록소 농도변화는 총인 농도의 변화에 의해 82.3%까지 설명되었다 (기울기 = 2.43, $p < 0.001$). 총질소와 엽록소-a농도의 회귀분석에 따르면, 시간에 따라 구한 R²값은 0.08-0.17 범위로서 총질소는 엽록소의 변이를 거의 설명할 수 없었다. 이것으로 일차 생산력의 조절 요소가 인 (phosphorus)인 것으로 사료된다.

연구된 결과를 종합적으로 판단해 볼 때, 본 연구기간 동안 호수 내 부영양화의 주요인으로 판단되는 연별, 계절별 인의 농도는 강우 및 유입수의 증감에 의해 크게 영향을 받았고, 가두리 양식작의 철거 전후를 비교해 볼 때 인농도에 있어서 유의한 차이를 보이지 않았다. 한편 본 소양호에서 식물성 플랑크톤의 인 제한 효과에도 불구하고, 장마기간 중 엽록소의 변화는 인의 증감에 미약한 반응을 보였다. 이는 짧은 수체류시간의 효과로서 판단되었다. 그러나 장마 이후 수체가 안정되는 기간동안 엽록소는 인농도와 1차 함수관계를 보였다. 따라서 수체가 안정되는 장마후의 기간에 부영양화 현상이 심화되며 이 기간동안의 수질관리가 집중되어야 할 것으로 사료된다. 이와같은 결과에 따르면 연간 인농도의 계산에 의한 호수의 부영양화도를 나타내는 Vollenweider (1976)의 수질 평가는 우리나라 인공호에 적용하는 것은 오류를 가져올 수 있음을 제시하는 바이다.

적 요

본 연구는 1993년부터 2000년까지 소양호의 총인, 총질소, 전기전도도, 엽록소의 시·공간적 경향을 통계기법을 적용하여 파악하였다. 호수내의 수질특성은 연간 강우량 및 수계의 유입량에 의해 변동되었으나, 변동 정도는 조사지역에 따라 역동적인 차이를 보였다. 맨-켄달 검정법 (Mann-Kendall test)으로 연별 수질변화를 분석한 결과, 전기전도도, 총인, 엽록소-a는 8년 동안 모든 지점에서 증가 및 감소 경향이 없으나 TN은 극히 미약하게 감소하는 경향을 보였다. 총인은 유입량 및 강우에 의해 결정되는 것으로 밝혀졌다.

공간적 분석결과에 따르면, 전기전도도는 호수내 상류에서 하류로 감소하는 경향을 보였고 장마중 상류에서는 집중 강우동안 최소값을 보이고 하류에서는 수체류현상으로 10월에 최소값을 나타냈다. 총인 및 총질소는 장마중에 최대값을 나타내면서 전기전도도의 변화 양상과 역관계를 나타냈다. 호수내 1차 생산력의 척도로서

측정된 엽록소-a의 농도는 영양염류의 농도 및 계절에 따라 큰 차이를 보였다.

계절별 총인에 대한 엽록소 농도의 회귀 분석결과에 따르면, 장마 전 및 장마 중에는 R^2 값이 0.003 이하이지만 장마후 R^2 값은 0.82로서 조류생장이 인의 농도에 의해 결정되는 것을 확인하였다. 반면 질소의 농도는 계절에 상관없이 엽록소의 농도와 극히 미약한 관계를 보였다.

인 용 문 헌

- 김범철, 심재형, 조규승. 1985a. 소양호 클로로필 농도의 시간적·공간적 변화, 한국육수학회지 **1**: 18-23.
- 김범철, 조규승, 안태석. 1985b. 소양호의 일차생산 및 환경요인의 수평적 변이, 한국육수학회지 **18**: 1-10.
- 김범철, 조규승, 허우명, 김동섭. 1989. 소양호 부영양화의 연변화 추이, 한국육수학회지 **22**(3): 151-158.
- 김범철. 1996. 소양호 맑은물 지키기 운동, 심포지움 논문집 **9**-16.
- 김범철, 최광순, 심수용. 1997. 비점오염원으로부터 인의 홍수 유출, 하천·호수의 수질보전과 유역관리에 관한 한일공동세미나 proceeding 165-177.
- 김범철, 최광순, 김철구, 이유희, 김동섭, 박제철. 1998. 소양호의 DOC와 POC의 분포, 한국육수학회지 **31**(1): 17-24.
- 김재윤. 1998. 우리나라 인공호의 부영양화 평가 및 예측에 관한 연구, 한국환경과학회지 **7**(4): 441-449.
- 박석순, 박선영. 2001. 국내 주요 호수에서 관측된 조류 성장에 관한 경향 분석, 한국물환경학회지 **17**(4): 400-410.
- 안광국. 2000a. 호수내 인의 주요원으로 몬순 유입수, 한국육수학회지 **33**(3): 222-229.
- 안광국. 2000b. 호수 지형 및 수리수문학적 변화에 대한 몬순 영향, 한국육수학회지 **33**(4): 342-349.
- 안광국. 2001. 인공호에서 수운의 수직분포와 수층혼합의 계절적 변화 및 중층수 유입 현상의 영향, 한국육수학회지 **34**(1): 9-20.
- 허우명, 김범철, 조규승. 1991. 소양호 부영양화에 따른 N/P비의 변화와 남조류 Bloom. 한국육수학회지 **24**(4): 283-288.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로부터의 인부하량 및 인수지, 한국육수학회지 **25**: 207-214.
- An, K.-G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia*, **436**: 179-189.
- Carmack, J.P., P. Stadelman and H. buhrer. 1977. Primary production and sedimentation in the eutrophic zone of two Swiss lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 511-526.
- Edmonsoon, W.T. and J.T. Lehman. 1981. The effect of changes in the nutrient income on the condition of lake Washington. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 1-29.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne, 1990. Reservoir limnology: ecological perspectives. *John Wiley and Sons*. 133-194.
- Nurnberg, G.K. 1996. Trophic state of clear and colored, soft- and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish. *Lake and Reserv. Manage.* **12**: 432-447.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring assessment and control OECD. Paris. 314.
- SPSS, Inc. 1998. SPSS Student version 8.0. *Thomson Learning*.
- Thurman, E.M. 1985. Organic geochemistry of natural waters. Dordrecht: Junk Publ.
- Vollenweider, R.A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in the lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* **33**: 53-83.

(Received 13 Nov. 2001, Manuscript accepted 27 Feb. 2002)