

동해안 석호의 육수학적 조사(1): 청초호

허우명* · 이상균¹ · 권상용 · 김동진² · 김범철¹

(삼척대학교 환경공학과, 삼척 245-711, ¹강원대학교 환경과학과, 춘천 200-701, ²원주지방환경관리청, 원주 220-041)

The Limnological Survey of Lagoons in the Eastern Coast of Korea (1): Lake Chungcho. Heo, Woo-Myung*, Sangkyun Lee¹, Sangyong Kwon, Dongjin Kim² and Bomchul Kim¹ (Department of Environmental Engineering, Samchok National University, Samchok 245-711, ¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, ²Wonju Regional Environmental Management Office, Wonju 220-041)

Water quality and pollution state of Lake Chungcho were evaluated during three years from 1998 to 2000. We surveyed physicochemical parameters, and TSI (trophic state index) was calculated using TP, Chl. a, and SD (secchi disc transparency) data of growing season average. Water samples were collected bimonthly except freezing season. During the study period, total annual precipitation in 1998, 1999 and 2000 year was 1,797, 1,722 and 1,345 mm, respectively. Salinity and conductivity were high (29.3 ± 5.5 ppt, and $45,105 \pm 7,585$ μ S/cm) then other lagoons in the Eastern Coast of Korea. Chemocline was formed by salinity at 0.5~1.5 m water depth. As a result of this, DO concentration of hypolimnion was below 3.0 mgO₂/L. Especially, when intense chemocline was formed, temperature of hypolimnion was higher than epilimnion. Secchi disc transparency, chlorophyll a, and COD were 0.8 ± 0.3 m, 15.7 ± 20.7 mg/m³, and 3.1 ± 0.8 mgO₂/L, respectively. Most of TN/TP ratios below 20, but concentration of TN and TP was high. Values of TSI ranged between 59 and 77, indicating a eutrophic condition in this system.

Key words : Lagoon, Lake Chungcho, TSI, TN/TP ratio

서 론

현재 우리나라에는 약 18,000여 개의 인공호 및 자연호가 존재하고 있으나, 대부분 수자원 확보의 목적으로 건설된 인공호이며 자연호는 극히 일부분을 차지하고 있다. 특히 해수면의 상승과 연안하곡의 침수 및 파도에 의해 사주(沙州)나 사취(砂嘴)가 만 입구를 막아 생성된 자연 석호는 동해안 일대에 해안선을 따라 분포하는 것이 대부분이다.

동해안 일대의 석호들은 담수와 해수의 공존으로 인

한 생물상의 특이성 및 철새도래지 역할과 자연경관이 뛰어나 보존 가치가 매우 높다(허 등, 1999). 그러나 동해안 일대에 존재하는 대부분의 석호는 그간의 산업화와 도시화로 인한 생활하수 및 축산폐수 등이 정화되지 않은 채 호수로 유입됨으로써 녹조현상 등 부영양화가 가속화되고 있다. 최근에는 관광객 유치를 위한 무분별한 개발로 심각하게 훼손되어 가고 있는 실정이다(원주지방환경관리청, 1998). 현재 석호의 수질을 개선하기 위해 퇴적층 준설 등의 노력을 기울이고 있으나 아직 뚜렷한 효과를 보이지 않고 있다. 따라서 석호의 수질개선을 위해서는 장기적이고 종합적인 육수·생태학적 자료

* Corresponding author: Tel: 031) 570-6573, Fax: 031) 574-7262, E-mail: hlimnol@samchok.ac.kr

에 근거한 대책방안 마련이 시급하다고 볼 수 있다. 그러나 현재까지 석호를 대상으로 하는 연구는 수 편에 지나지 않고 있다. 그간의 연구로는 전 등(1996), 김(1996a), 김(1996b) 및 허 등(1999)의 연구가 있으며, 수질 및 생태 관련 보고서 등이 있다. 전 등(1996)은 동해안 자연 호수의 수질조사와 관련하여 대부분의 자연호가 엽록소 *a*와 총인(TP) 기준으로 볼 때 높은 부영양화 수준임을 지적하였다. 동해안 석호의 동·식물상은 염분이나 수온, 용존산소와 같은 기수호의 특이성 때문에 해양이나 담수에 비해 오히려 다양성이 현저히 낮은 것으로 보고된 바 있다(김, 1996a, b). 또한 허 등(1999)은 동해안 석호의 부영양화도 판정에서 청초호를 비롯한 6개 석호 모두 부영양화도가 매우 심각한 것으로 보고하였다.

이에 본 연구에서는 동해안 석호의 육수학적 조사의 일환으로 그중 인위적으로 원형이 가장 많이 변형된 청초호를 대상으로 수질요인 및 엽록소 *a*, 영양염류 등을 조사하였다. 또한 이들 자료를 근거로 청초호의 연간 수질변화 및 부영양화 상태를 판정하였다.

재료 및 방법

1. 기상 및 일반 현황

영동 북부지역에 위치한 청초호는 연간 강수량이 1,300~1,400 mm이며, 연평균 기온은 약 11.8°C이다. 바람은 겨울철과 봄철에 강풍현상이 자주 발생하며, 평균 풍속은 3.1 m/s, 최고풍속은 19.6 m/s로써 강한 편이다. 조사기간 동안 청초호가 위치한 속초시의 강수량은 예년 평균에 비해 매우 많았다. '98년과 '99년에는 연평균 강수량보다 400 mm 이상 많은 1,797 mm와 1,722 mm이었으며, 2000년에는 평년수준인 1,345 mm이었다. 연간 총 강수량의 약 70% 이상이 6월에서 9월 사이에 집중되었으며 월별로는 8월에 평균 444 mm로 최대강우를 나타내었다. 조사기간 중 월별 강수량으로는 '98년 7월에 551 mm로 최대량을 보였으며, '99년 1월에 1 mm로 최저를 기록하였다. 조사기간 동안의 월별 강수량 분포는 Fig. 1과 같다.

청초호는 속초시 청초동 일대에 위치한 자연 석호로서 호수면적은 1,362,000 m²이었으나 최근 남·서쪽 237,000 m²를 매립하여 현재 약 1,125,000 m²이다. 유역면적은 25.63 km²로 동해안 석호 중 가장 넓다. 동해안 일대 석호들의 주요 오염원은 가축배설물과 농경배수이나, 청초호는 도시생활하수가 주요 오염원인 것으로 보고된 바 있다(허 등, 1999). 허 등(1999)은 동해안 석호

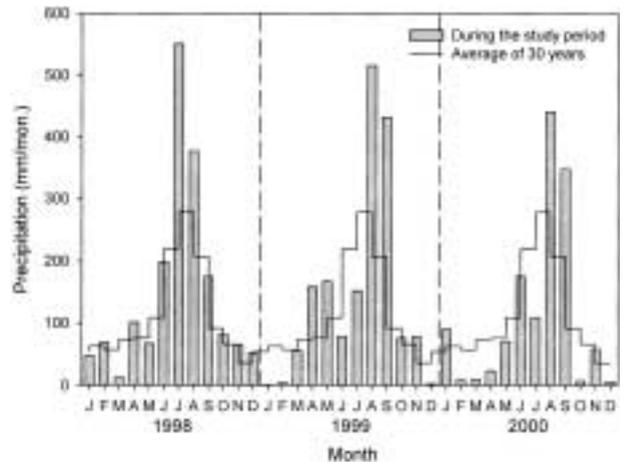


Fig. 1. Monthly precipitation of the Sokcho Area (1998~2000).

의 부영양화와 관련된 연구에서 청초호 유역내 오염원에 의한 오염발생량 중 질소(N)와 인(P)은 각각 681 kgN/day와 137 kgP/day로 동해안 석호중 가장 높은 것으로 보고하였다. 단위면적당 발생량도 청초호가 질소와 인이 각각 26.6 kgN/km² 및 5.3 kgP/km²로 가장 많았던 것으로 나타났다.

현재 항만으로 지정되어 있는 청초호는 호수 주변에 수산업과 관련된 소형 조선소, 수리소, 기계제작소, 제빙, 냉동 및 식품가공업 등이 있으며, 이곳에서 발생하는 오염물질이 청초호로 직접 유입되어 호수 수질을 악화시키는 것으로 사료된다. 최근에는 청초호 유원지개발과 관련하여 총면적 411,015 m²(육지 174,015 m², 호수 237,000 m²)을 매립하여 호수의 남측과 서측의 수초대가 대부분 소멸된 상태이다(원주지방환경관리청, 1998). 청초호는 유역면적이 21.355 km²인 청초천이 유입되고 있으며, 호수 주변의 오수가 10여 개의 하수구를 통해 호수로 유입되고 있다.

2. 조사지점 및 조사방법

수질조사는 호수내 상류, 중앙 및 하류지역의 세 정점에서 실시하였다(Fig. 2). 시료는 PVC Van Dorn 채수기로 표층에서 채수하였으며, 조사기간 중 '99년 이후에는 호수의 중앙부인 정점 2에서 수심별로 상, 중, 하로 채수하였다. 조사는 1998년 5월부터 2000년 11월까지 동계의 결빙시기를 제외하고 약 2개월에 1회씩 실시하였다. 채수된 시료는 실험실로 운반하여 운반 즉시 GF/C 유리 섬유 여과지로 여과하여 여과지는 냉동보관하였다가 엽록소 *a* 분석에 사용하였고, 계산은 Lorenzen(1967)의 방

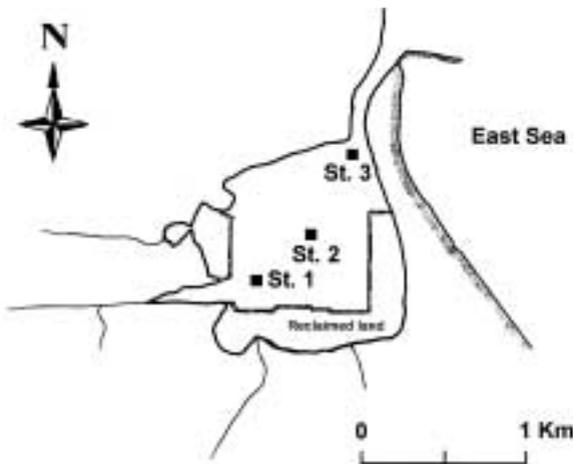


Fig. 2. Map showing the sampling sites.

법을 사용하였다. 여과액은 용존형태의 인 (P) 및 질소 (N) 분석에 사용하였으며 총인 (TP)과 총질소 (TN) 분석 용 시료는 여과하지 않은 원수를 사용하였다. 용존무기 인 (DIP)은 Standard Methods (1992)의 ascorbic acid법으로 분석하였으며, 총인 (TP)은 시료 250 ml를 냉장보관하였다가 Standard Methods의 persulfate digestion과 ascorbic acid법에 따라 측정하였다. 질소는 cadmium 환원법을 이용한 수질자동분석기 (AutoAnalyzer3, BRAN + LUEBBE)를 이용하였으며, 수온, 탁도, 염분도, 용존산소, 수소이온 농도 등은 Multiprobe (YSI 6000)를 사용하여 표층에서부터 약 1 m 간격으로 조사하였다. 총부유물질 (TSS)은 GF/C filter로 여과하여 105°C에서 2시간 이상 건조시킨 후 항량으로 여과 전·후의 무게 차를 이용하여 계산하였다. 지점별 투명도는 직경 250 mm 투명도판을 이용하였으며, 부영양화도 지수는 Carlson (1977)이 제안한 지수 (TSI)를 사용하여 계산하였다. 식물플랑크톤은 각 정점의 표층 (0~1 m)에서 PVC Van Dorn 채수기로 채수하여 현장에서 중성 포르말린용액으로 고정하여 실험실로 운반하고, 안정된 실험대에 1주일간 정치한 후 Siphon으로 위쪽부터 차례로 48시간 동안 농축하였다. 농축한 시료를 광학현미경하 (×400, ×600)에서 Mizuno (1964)와 Hirose and Yamagishi (1977)에 따라 동정하였다.

결과 및 고찰

1. 수질 및 식물플랑크톤

수온은 조사기간동안 평균 $18.0 \pm 4.7^\circ\text{C}$ 이었으며, 조사

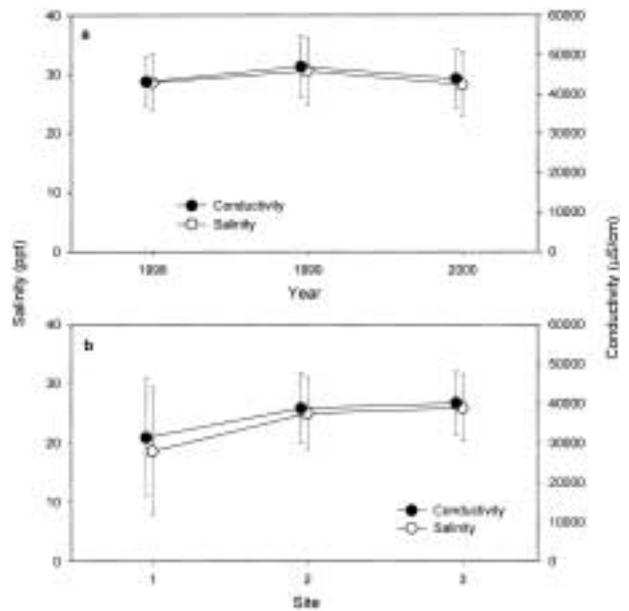


Fig. 3. Inter-annual (a) and horizontal (b) variations of salinity and conductivity using the mean of surface data.

기간 최고 수온은 26.7°C 최저 수온은 8.5°C 이었다. 최저수온이 다소 높은 이유는 겨울 결빙기간 동안의 조사가 이루어지지 않았기 때문이다. 수온은 계절적으로 매년 비슷한 양상을 보였으며, 호수 전반에 걸쳐 수심 (최고 4~6 m)이 얇아 바람이나 잦은 선박의 이동과 같은 외부의 물리적 요인들이 수체교란의 원인이 되기도 한다.

청초호는 유입되는 담수에 비해 해수의 영향이 큰 것으로 사료되며, 호수 전반에 걸쳐 전기전도도 및 염분이 매우 높았다. 조사기간 동안 전기전도도 및 염분의 평균 농도는 각각 $45,105 \pm 7,585 \mu\text{S/cm}$ 와 $29.3 \pm 5.5 \text{ ppt}$ 이었다. 염분의 표층 평균값은 1999년에 다소 높았으며, 정점별로는 해안으로 갈수록 증가하였다 (Fig. 3). 이러한 경향은 전기전도도에서도 매우 유사하게 나타났다. 청초호는 해수에 가까운 높은 전기전도도의 값을 보였으며, 이는 염분과 매우 깊은 상관성 ($R^2 = 0.95$)이 있다. 허 등 (1999)은 동해안 석호의 부영양화 평가에서 청초호의 경우 염분이 사계절 17.4~30.3 ppt로 높은 농도를 보여 해수와의 교환이 활발하다고 보고한 바 있다.

수온, 용존산소 및 염분 농도의 계절별 수직분포를 조사하기 위해 1999년의 자료를 이용하여 Fig. 4에 나타내었다. 수온은 3월과 5월에 수심별 차이가 없는 것으로 나타났으며, 7월과 9월에도 표층과 심층의 수온차가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 청초호가 수심이 얇고 선박의 이동 등으로 인한 수체의 교란이 잦은 것에 기

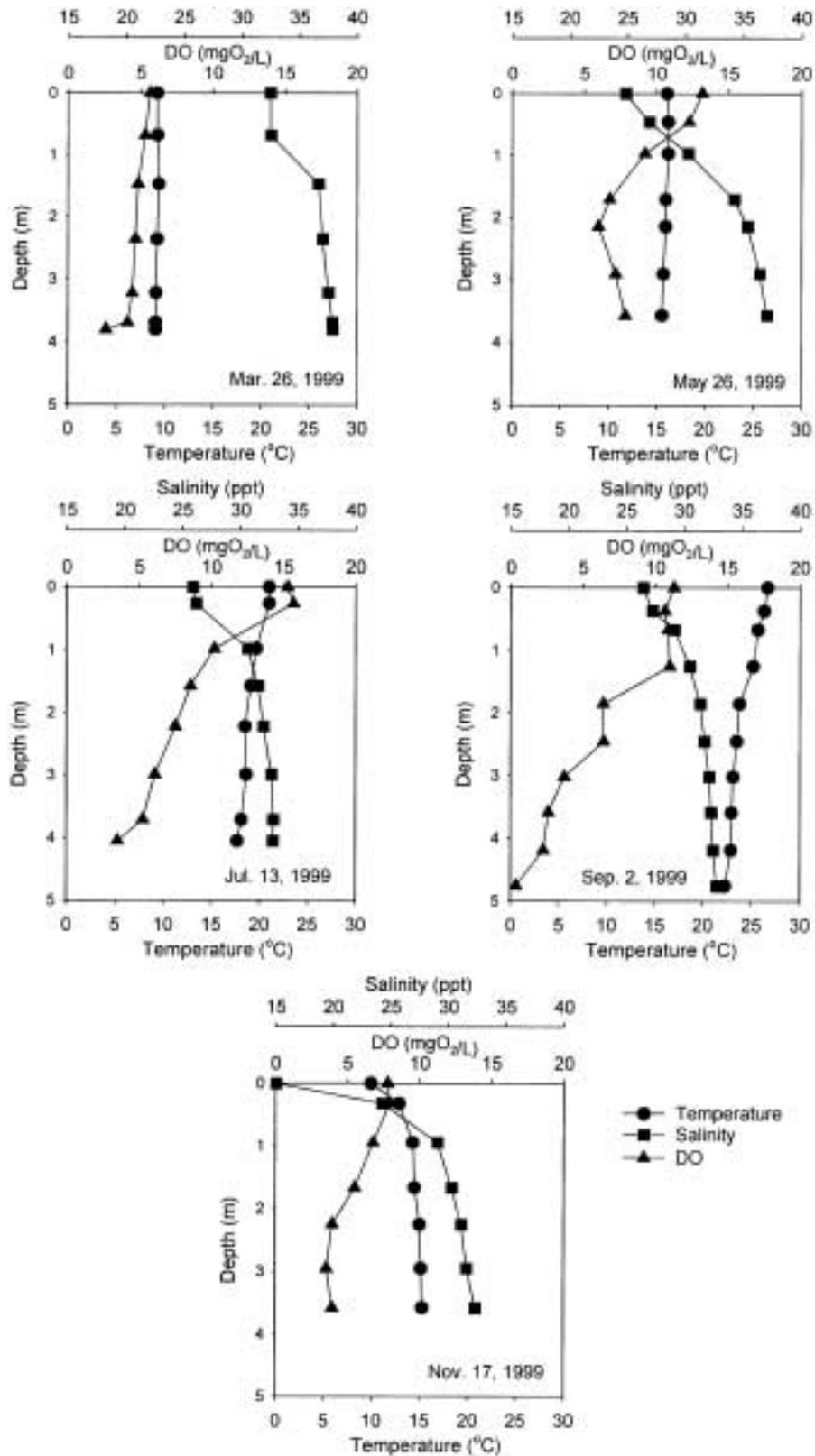


Fig. 4. Seasonal variations of vertical distribution on temperature, dissolved oxygen, and salinity at the center of the lake (St. 2) in 1999.

인하는 것으로 사료된다. 그러나 11월에는 표층보다 오히려 심층에서 수온이 더 높게 나타났는데, 이는 심층수의 높은 밀도로 인해 계절변화에 따라 표층과 심층의 수온변화가 시간적인 차이를 보인 것에 기인하는 것으로 판단된다. 조사시기에 따라 다소 차이는 있으나 대부분 0.5~1.5 m 부근에서 염분에 의한 성층현상(chemocline)이 강하게 형성되었다. 따라서 심층은 연중 높은 밀도류 때문에 표층과의 혼합이 제한되면서 산소 공급이 원활하지 못해 연중 낮은 용존산소량을 나타냈다. 특히 9월에 심층에서는 용존산소가 고갈되는 현상을 보이기도 하였으며, 다른 계절에도 심층은 약 3 mgO₂/L 이하의 값을 보였다. 3월의 경우 전수층에 걸쳐 수온이 약 9°C 내외로 일정하여 용존산소의 분포도 수심별 차이가 거의 없었다. 그러나 이 시기에 용존산소의 농도가 2.6~5.6 mgO₂/L로 다소 낮았는데, 이는 용존산소량이 적은 심층수가 수체가 혼합되면서 전수층에 영향을 준 것에 기인하는 것으로 판단되며, 또한 심층에 비교적 낮은 용존산소는 화학성층의 계속적인 잔존으로 수체의 완전한 혼합이 억제된 것에 따른 것으로 보인다. 거의 모든 시기에 걸쳐 심층에서의 용존산소가 매우 낮게 나타났는데, 전수층의 수온이 일정해지면서 심층의 저산소층이 표층에까지 영향을 미친 것으로 사료된다. 허 등 (1999)은 동해안 석호의 대부분이 중층에서 강한 화학성층이 형성되고, 화학성층 이하 지역에서는 염분이 증가하고 용존산소가 감소되었다고 보고하였다. 또한 화학성층 아래 수심의 수온이 표층보다 오히려 약 2°C 가량 높았다고 보고하여 본 조사와 유사한 경향을 보였다.

투명도의 계절 변화는 0.4±0.1~1.3±0.2 m로 대부분 매우 낮은 값을 보였다 (Fig. 5a). 허 등 (1999)은 동해안 대부분 석호의 투명도가 1.0 m 내외였다고 하였으며, 그 원인으로 식물플랑크톤의 다량 번식과 수체교란으로 인한 저니층의 영향을 중요 요인으로 보고하였다. 청초호 내의 각 정점별 투명도 값을 보면 담수가 유입되는 정점 1보다는 해수의 영향이 많은 정점 3으로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 5b).

호수내의 부유물질은 주로 강우시 유입되는 무기현탁물과 식물플랑크톤, 및 호수내에서의 저니의 부상 등으로 발생한다. 청초호의 부유물질 (SS) 농도는 세 지점의 표층 평균치가 1999년 5월과 9월 (10 mg/L 이하)을 제외하고는 조사기간 내내 20 mg/L 이상의 높은 값을 보였다 (Fig. 6). 반면 식물플랑크톤 생체량을 나타내는 Chl. a의 값은 1998년 5월 조사 (71.3±30.0 mg/m³)를 제외하고는 대부분 20 mg/m³ 이하의 값을 보여 상대적으로 낮았다 (Fig. 6). 허 등 (1999)의 연구에서도 청초호의 Chl. a

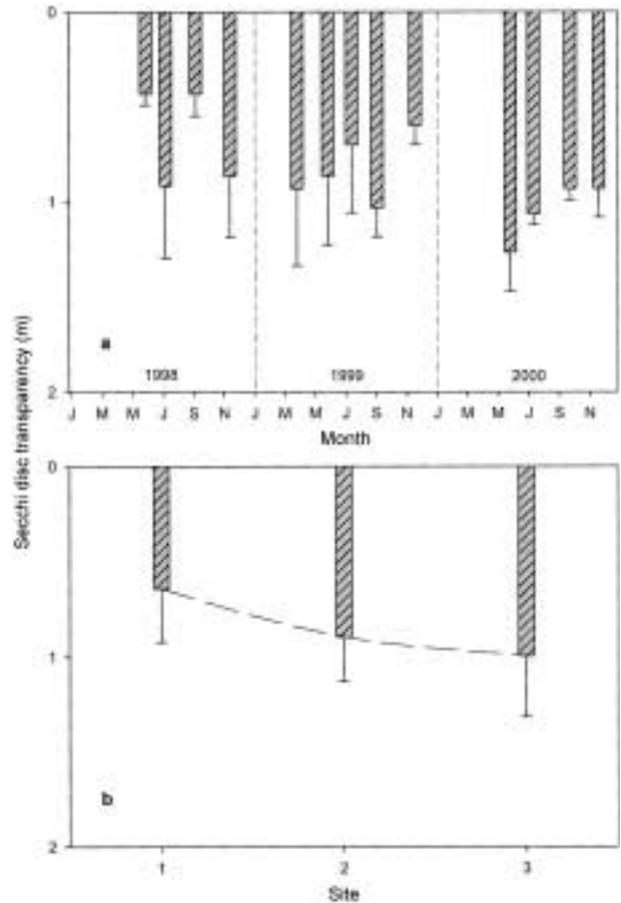


Fig. 5. The seasonal (a) and horizontal (b) variations of secchi disc transparency.

값이 다른 석호에 비해 낮은 수준임에도 불구하고 부유물질의 농도는 오히려 높은 것으로 나타났다. 허 등 (1999)은 이러한 원인으로 매립에 따른 부유물질의 증가로 조류에 대한 광저해가 있었을 것으로 지적하였다. 본 연구에서도 부유물질의 농도에 비해 상대적으로 엽록소 a의 농도가 낮은 것은 호수 연안부 매립공사로 인한 무기현탁물과 수심이 얕은 호수에서 선박의 잦은 이동 등으로 인해 호수 저층으로부터의 미립자 부상이 조류의 광저해 현상을 유발한 것으로 보인다. 또한 수체의 잦은 교란 역시 조류 성장의 장애가 되는 물리적 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

식물플랑크톤 밀도와 각 조사시기별 우점종을 Fig. 7에 나타내었다. 조사기간 중 1998년에 식물플랑크톤의 연간 평균 밀도가 가장 높았으며, 연중 녹조류인 *Microspora* sp.가 우점하였다. 1998년 7월에는 남조류의 *Microcystis aeruginosa*가 아우점종으로 출현하기도 하였다. 조사기간 중 1999년과 2000년에는 식물플랑크톤

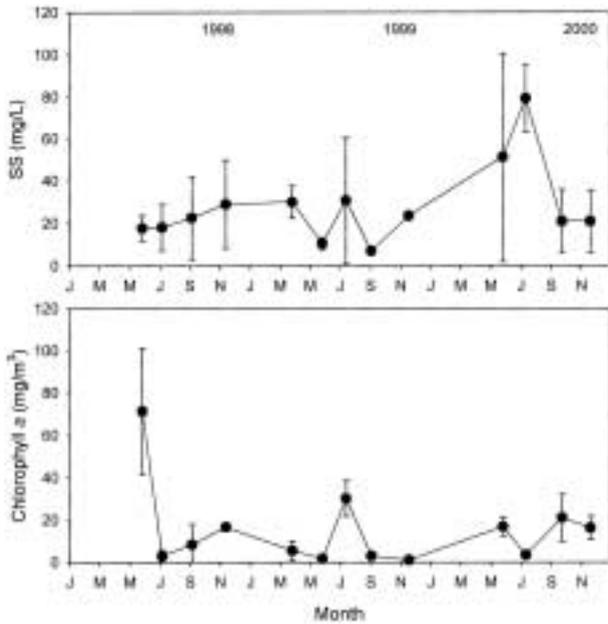


Fig. 6. The seasonal variations of suspended solids (SS) and chlorophyll a concentration.

밀도가 전년에 비해 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 봄에는 녹조류의 *Coelastrum* sp.나 *Chlamydomonas* sp.가 우점하였으며, 여름에는 남조류의 *Chroococcus* sp.와 *Coelosphaerium* sp., 그리고 Euglenophyceae의 *Euglena* sp.가 우점하였다. 2000년에는 Bacillariophyta의 *Melosira* sp.와 Dinophyceae의 *Gymnodinium* sp.와 *Peridinium* sp.이 우점하였다. 식물플랑크톤 밀도의 계절별 변화양상은 Fig. 6의 Chl. a 농도의 계절 변화와 유사한 것으로 나타났다. 그러나 Chl. a값과 식물플랑크톤 밀도가 매년 감소하는 반면 SS의 값은 점차 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 식물플랑크톤 이외의 무기현탁물이 점차 증가하고 있음을 의미한다.

COD 농도는 정점 1에서 $3.3 \pm 0.9 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 로 가장 높았으며, 정점 2와 3에서 각각 3.0 ± 0.7 , $3.0 \pm 0.9 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 이었다. 허 등(1999)이 보고한 바에 따르면 동해안 석호의 COD는 경포호가 $7.1 \sim 11.6 \text{ mgO}_2/\text{L}$, 영랑호가 $4.4 \sim 15.2 \text{ mgO}_2/\text{L}$, 화진포호가 $3.6 \sim 16.4 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 이었다. 따라서 청초호의 COD 농도는 이들 호수와 비교할 때 다소 낮은 것으로 보인다. 청초호의 염분도가 조사기간 동안 평균 $29.3 \pm 5.5 \text{ ppt}$ 이었던 것을 감안하여 청초호의 COD 값을 해수의 수질기준에 적용해보면, 해수 COD 수질등급 III등급인 것으로 조사되었다. 참고로 호수와 달리 해수 수질은 3등급으로 나누어지며 COD $1 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 이하를 I등급, $2 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 이하를 II등급, $4 \text{ mgO}_2/\text{L}$ 이하를 III등급

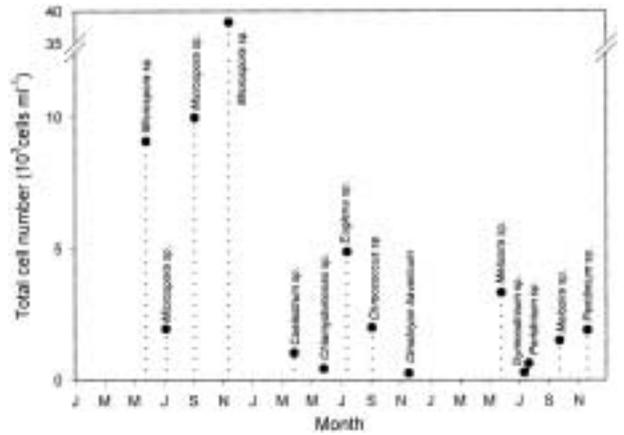


Fig. 7. Seasonal variation of phytoplankton total cell number at the center of the lake (St. 2). Dominant species were marked in each period.

으로 규정하고 있다.

2. 영양염류

총인(TP)과 용존무기인(DIP)은 강수량이 많은 여름 시기(7~9월)에 다소 높게 나타났다(Table 1). 조사기간 동안 총인과 용존무기인 농도는 각각 $0.048 \sim 0.253 \text{ mgP/L}$ 과 $0.006 \sim 0.111 \text{ mgP/L}$ 의 범위를 보였으며, 총인 및 용존무기인 농도 모두 1998년 9월 조사에서 각각 0.253 mgP/L 와 0.111 mgP/L 로 세 지점 표층 평균치로는 조사기간 중 가장 높았다. 총질소는 조사기간 중 1999년이 다른 해에 비해 다소 높게 나타났는데, 이 시기에 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 농도는 다른 시기와 유사하였으나, 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$)가 비교적 높았다.

일반적으로 담수에서는 인이 해수에서는 질소가 제한 영양소로 작용하는 것으로 알려져 있다(Schindler, 1978; Kim, 1987; Hecky and Kilham, 1988). 국내 주요 인공호의 경우 총질소와 총인의 비가 40~160, 하구호가 약 20~30 정도로 높아 인이 제한영양소임이 밝혀진 바 있다(Kim et al., 1997). 청초호의 총질소와 총인의 비는 7.0~19.4로 매우 낮았다. 따라서 청초호의 경우, 질소가 호수내 수중 생물의 성장과 생성에 제한 요소로 작용할 가능성이 있다. 그러나 전반적으로 인과 질소의 농도가 높은 상태이므로 단순히 총인과 총질소의 비만으로 조류의 제한요소를 평가하는 것은 무리가 있는 것으로 사료된다. 허 등(1999)은 동해안 석호의 경우 총질소와 총인의 비가 대부분 6~14로 하구호보다 낮은 수준이며, 질소가 인에 비해 상대적으로 낮은 수준이라고

Table 1. Monthly variations of nutrients and TN/TP ratio in lake Chungcho. Values are average of surface water of all sites.

Year	Month	TP mgP/L	DIP mgP/L	TN mgN/L	NO ₃ -N mgN/L	NH ₃ -N mgN/L	TN/TP
1998	May	0.161	0.006	1.807	0.019	0.533	11
	Jul.	0.084	0.033	1.231	0.309	0.407	15
	Sep.	0.253	0.111	1.764	0.690	0.134	7
	Nov.	0.141	0.029	1.678	1.071	0.586	12
1999	Mar.	0.188	0.100	2.167	0.330	0.119	12
	May	0.170	0.064	2.262	0.519	0.303	13
	Jul.	0.248	0.056	2.381	0.049	0.510	10
	Sep.	0.078	0.016	1.510	0.006	0.215	19
	Nov.	0.145	0.088	2.164	0.239	1.007	15
2000	May	0.048	0.030	0.930	0.234	0.477	19
	Jul.	0.100	0.051	1.287	0.174	0.244	13
	Sep.	0.133	0.074	1.852	0.704	0.506	14
	Nov.	0.101	0.059	1.411	0.539	0.541	14

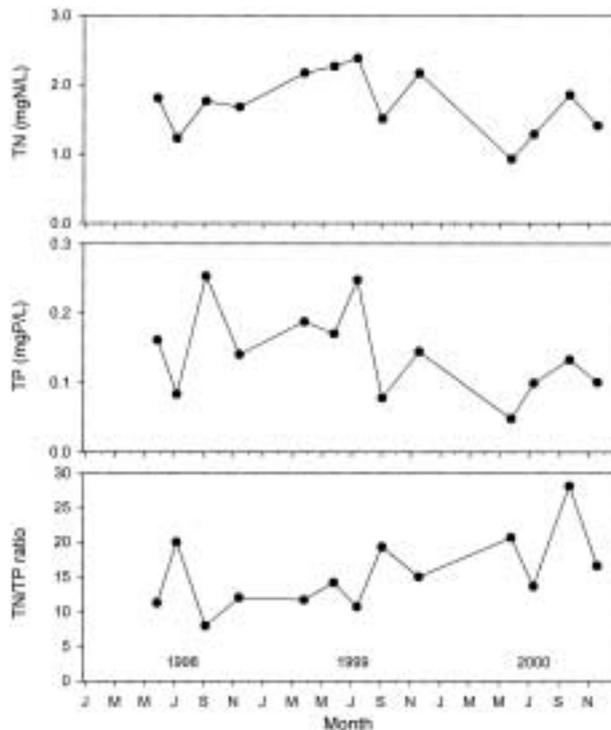


Fig. 8. The seasonal variation of TN, TP, and TN/TP ratio using mean value of all sites.

보고한 바 있다. 그러나 인과 질소의 농도가 대부분 높기 때문에 조류의 성장은 영양염류의 부족이 제한하고 있는지는 확실치 않다고 하였으며, 호수의 부영양화를 방지하기 위해서는 유역으로부터의 인부하량 감소가 절

대적으로 요구된다고 하였다.

TN/TP 비의 계절 변화는 정점별로 매우 유사하였으며, 대체적으로 20 이하의 낮은 값을 보였다. 세 지점 평균값은 계절별로 그 변화가 매우 불규칙적이었으며 매년 다소 증가하는 경향을 보였다(Fig. 8). 1998년 7월의 정점 2와 2000년 9월의 정점 1에서는 각각 37과 54로 비교적 높았다. 또한 각 정점별 표층수의 TN/TP 비는 연안으로 갈수록 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 해수로 인한 영향으로 판단된다.

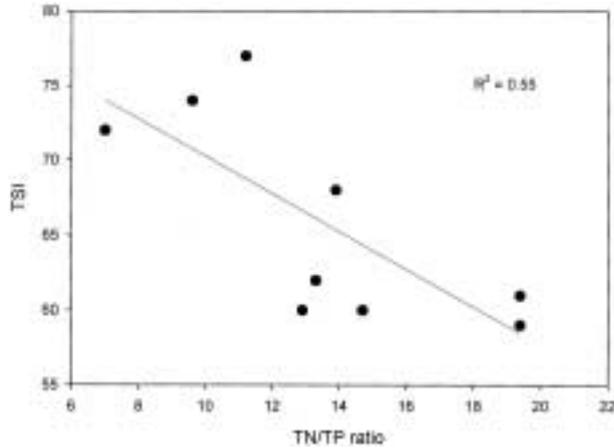
3. 수질영양단계

U.S. EPA (1976)에서는 엽록소 *a* 농도가 10 mg/m³ 이상이면 부영양화로 분류하고 있으며, Forsberg와 Ryding (1980)은 40 mg/m³ 이상을 과부영양화로 분류하고 있다. 이들 분류에 따르면, 청초호의 표층수 평균 엽록소 *a* 농도는 15.7±20.7 mg/m³으로 부영양화로 분류된다. 또한 각 정점별 평균값 또한 13.9~16.5 mg/m³으로 부영양 상태로 판단된다. 정점별 평균치는 정점 1, 2 및 3이 각각 16.5±23.9, 13.9±13.7 및 16.5±24.2 mg/m³으로 정점 2에서 다소 낮은 값을 보였다. 청초호의 투명도는 0.4~1.3 m 정도로 매우 낮게 나타났으며, 총인은 0.048~0.253 mgP/L의 범위이었다. TSI 계산에는 총인, 엽록소 *a* 및 투명도 값이 사용되었으며, 이는 식물플랑크톤 성장시기를 고려한 여름 평균치 자료를 사용하였다. Vollenweider and Kerekes (1981)의 방법은 이러한 자료들의 겨울을 포함한 연평균치를 사용하여 부영양화도를 판정하였으며, Forsberg and Ryding (1980)은 6월부터 9월까지 여름기간의 평균치를 사용하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 식물플랑크톤의 성장시기를 고려하여 5월, 7월 및 9월의 정점별 표층 평균치 자료를 사용하였으며(Table 2), 이를 이용하여 각 지표의 TSI를 구하였다. 일반적으로 식물플랑크톤을 제외한 무기현탁물이 SS에 미치는 영향이 거의 없는 호소의 경우, 투명도는 식물플랑크톤 이외의 무기현탁물에 의한 부분을 제외시키는 것이 바람직하나, 청초호의 경우 수심이 얕고 수체가 비교적 적으며, 수체의 교란 등으로 인한 무기현탁물의 부유물질(SS)에 대한 기여도가 식물플랑크톤의 부유물질 기여량보다 현저히 높은 것으로 판단되어 무기현탁물 자료만을 제외시키지 않고 모든 자료를 정상적으로 사용하였다.

청초호의 평균 TSI는 59~77이었으며, 계절별로는 1998년 5월에 77로 가장 높았고 1999년 9월에 59로 가장 낮았다. 낙동강 수계 본류의 경우 60~80으로 보고

Table 2. TSI of the Lake Chungcho. TSI; trophic state index (Carlson, 1977). TSI was calculated from warm season average by the surface water.

Year	Mon.	Concentration			TN/TP	TSI			
		TP (mgP/L)	Chl. <i>a</i> (mg/m ³)	S.D. (m)		TP	Chl. <i>a</i>	S.D.	Average
1998	May	0.161	71.3	0.4	11.2	77	81	72	77
	Jul.	0.084	3.0	0.9	14.7	68	50	61	60
	Sep.	0.253	8.3	0.4	7.0	84	60	72	72
1999	May	0.170	1.7	0.9	13.3	78	45	62	62
	Jul.	0.248	30.1	0.7	9.6	84	73	65	74
	Sep.	0.078	3.0	1.0	19.4	67	50	60	59
2000	May	0.048	16.8	1.3	19.4	60	67	57	61
	Jul.	0.100	3.4	1.1	12.9	71	52	59	60
	Sep.	0.133	21.0	0.9	13.9	75	69	61	68

**Fig. 9.** Regression analysis of average TSI vs. TN/TP ratio in growing season.

된 바 있으며(허 등, 1995), 허 등(1999)은 동해안 석호의 부영양화 판정에 관한 연구에서 영양호와 송지호를 비롯한 동해안 석호가 56~79 정도로 낙동강 본류와 유사한 영양상태를 보였다고 밝힌 바 있다. 총인의 TSI 값은 1998년 9월과 1999년 7월에 84로 가장 높았으며, 엽록소 *a*의 TSI는 1998년 5월에 81, 투명도의 TSI는 1998년 5월과 9월에 72로 가장 높았다. 세 지수 평균치의 연도별 변화는 점차 약간 감소하는 경향을 보였다. 본 연구에서 세 개의 지수(투명도, 엽록소 *a*, 총인)를 이용한 TSI 값은 호수의 TN/TP 비와 관계가 있는 것으로 판단되며($R^2 = 0.55$, Fig. 9), 전국 대형 인공호수($R^2 = 0.60$, Kim *et al.*, 1997)와 동해안 석호($R^2 = 0.58$, 허 등, 1999)의 연구와 유사하였다.

적 요

1998년부터 2000년까지 겨울 결빙기를 제외한 청초호의 수질 및 영양상태의 판정결과 부영양화가 심각한 것으로 조사되었다. 투명도는 0.4~1.3 m로 비교적 낮은 값을 보였으며, COD 농도는 전 조사지점에서 3.0 ± 1.0 mgO₂/L이었다. 염분은 29.3 ± 5.5 ppt로 매우 높았으며, 수심 약 0.5~1.5 m에서 염분에 의한 화학성층(chemocline)이 형성되어 심층에 산소공급이 제한되었다. 또한 표층보다 심층수의 수온이 높은 수온역전현상이 관찰되기도 하였다. 표층수의 총인은 0.048~0.253 mgP/L, 총질소는 0.9~2.4 mgN/L의 범위로 나타났으며, 청초호에서의 TN/TP 비는 대체적으로 20 이하로 질소가 수중 생물의 성장과 생식에 제한 요소로 작용할 수도 있음을 시사하였다. 그러나 일반적으로 인과 질소의 농도가 높게 유지되어 총질소와 총인의 비로서 제한 요소를 파악하는 것은 무리가 따르는 것으로 판단된다. 유입수가 유입되는 정점 1보다는 해수의 영향이 많은 연안으로 갈수록 점차 TN/TP 비가 감소하여 해수의 영향이 클수록 인함량에 대한 질소함량비가 상대적으로 감소하는 것으로 사료된다. 조사기간 식물플랑크톤의 경우는 연중 녹조류인 *Microspora* sp.가 우점하였으며, 식물플랑크톤에 의한 Chl. *a* 값은 매년 감소하는 반면 부유물질의 농도는 점차 증가하여 무기현탁물의 부유물질에 대한 기여도가 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 청초호의 엽록소 *a* 농도는 각 정점 평균 14.0 ± 25.0 mg/m³으로 나타나 U.S. EPA 기준으로 볼 때 부영양호로 분류되며, 여름 성장기 엽록소 *a*, 투명도, 및 총인의 평균치를 이용한 부영양화도지수(TSI)도 평균 59~77로 부영양 상태로 나타났다.

사 사

본 연구 수행에 많은 도움을 준 원주지방환경관리청 측정분석과의 석호조사팀과 삼척대학교 환경공학과 생태학 실험실 전원에 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 김일희. 1996. 동해안 기수호 동물상의 특징. 동해안 호수 보존 심포지움. 강릉경제정의실천시민연합 pp. 27-38.
- 김현준. 1996. 동해안의 호수의 Plankton 조성. 동해안 호수 보존심포지움. 강릉경제정의실천시민연합 pp. 39-48.
- 원주지방환경관리청, 1997. 동해안 석호의 수질개선대책. 145 pp.
- 원주지방환경관리청, 1998. '98 동해안 석호조사보고서. 325 pp.
- 원주지방환경관리청, 1999. 석호연구보고서. 376pp.
- 전상호, 전방욱, 유성환. 1996. 동해안 자연 호수의 수질조사. 동해안 호수 보존 심포지움. 강릉경제정의실천시민연합 pp. 83-118.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가. 한국육수학회지 **32**(2): 141-151.
- APHA, *Standard methods for the examination of Water and Wastewater*. 1992. 18th Ed., American Public Health Association, Washington, DC, 1081pp.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch fur Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments; A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 796-822.
- Hirose, H. and T. Yamagishi. 1977. Illustration of the Japanese fresh-water algae. Uchidaroka-kuno Publishing Co. Japan.
- Kim, B. 1987. An ecological study of phytoplankton in Lake Soyang. Ph. D. Thesis. Seoul Nat. Univ.
- Kim, B., J.H. Park, G. Hwang, and K. Choi. 1997. Eutrophication of Large Freshwater Ecosystem in Korea. *Kor. J. Limnol.* **30**: 512-517.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Mizuno, T. 1964. Illustrations of the Freshwater Plankton of Japan. Hoikusha Publishing Co. Ltd. Japan.
- Schindler, D.W. 1978. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwater. *Limnol. Oceanogr.* **23**: 478-486.
- U.S. EPA. 1976. Water Quality Criteria Research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsored Symposium, EPA-600 (3-76-079): 185.
- Vollenweider, R.A. and J. Kerekes. 1981. OECD cooperative programme on monitoring of inland waters. Synthesis Report.

(Received 25 Jul. 2001, Manuscript accepted 29 Aug. 2001)