

도심의 얇은 인공호인 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가

김 호 섭 · 황 순 진* · 고 재 만¹

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹(주)청호이엔씨)

Evaluation of Water Quality Variation and Sediment of a Shallow Artificial Lake (Lake Ilgam) in Located the Metropolitan Area. Ho-Sub Kim, Soon-Jin Hwang* and Jae-Man Ko¹ (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, ¹Chungho ENC, Gojan-Dong, Danwon-Gu, Ansan 425-020, Korea)

The present study evaluated water quality variation, limiting nutrient, and sediment of a shallow eutrophic lake (Lake Ilgam) in the metropolitan area from 2000 to 2002. According to annual mean chl. *a* ($77.2 \pm 36.6 \mu\text{g/l}$) and TP ($66.6 \pm 20.5 \mu\text{g/l}$) concentration and trophic state index (> 60), Lake Ilgam was in very eutrophic status. Both inorganic nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$) and phosphorus (SRP) concentrations in the water column increased during winter and spring, but decreased during summer followed by the phytoplankton development. Evidence for phosphorus and nitrogen as being the potential limiting nutrients for phytoplankton growth was supported by the ratio of DIN/DIP (by mass) (~ 835.8), TSI derivations analysis, and algal growth potential bioassay. Based on the results of TSI derivations, strong nutrient limitation by both N and P occurred from September to November when P content in sediment (114.6 mg P/kg) was relatively low compared with the summer. Sediment contained a large amount of nitrogen (TKN: $4,452 \pm 283.0 \text{ mg N/kg dry sediment}$). Phosphorus content in sediment (TP: $313 \pm 155 \text{ mg P/kg}$) was relatively low with temporal change. P release rate ($0.29 \pm 0.02 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) was high under the aerobic condition at pH 9. These results indicate that the sediment could play an important role as a source of a limiting nutrient, and temporal change of P content in the sediment is closely related with water quality, especially algal biomass change in Lake Ilgam.

Key words : Shallow artificial lake, Eutrophic, AGP, DIN/DIP ratio, TSI, P release, Sediment

서 론

1970년대 이후 인구집중, 산업발달 및 도시화와 함께, 농업부분에서는 생산성 증대를 위하여 농약, 비료의 과다사용, 집약화 등의 결과로 인해 유역에서 오염물질이 증가하여 하천과 호소의 부영양화 현상이 심각해지고

있다. 호수의 부영양화는 물의 이용과 생태계의 건전한 기능수행을 저해하는 조류의 비정상적인 대발생을 초래하며, 호소 및 저수지에서 심층수의 산소고갈, 저서생물의 고사, 독성물질의 용출로 인한 어패류 및 기타 주요한 생물들의 피해, 어업 등 수산양식업에 피해, 착색으로 인한 혐오감 유발, 정수장 여과지 패쇄, 이취미 발생 등의 부작용을 나타낸다(Persson, 1982; Codd and Poon,

* Corresponding author: Tel: (02) 450-3748, Fax: (02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

1988; Robert *et al.*, 1993; Smith and Gilbert, 1995; Dawson, 1998; Pouria *et al.*, 1998).

대도시를 중심으로 생활수준의 향상과 더불어 도심 및 대도시 주변에 공원이 조성되면서 서울시 올림픽공원내 몽촌호수와 88호수, 성남시 중앙공원에 위치한 호수, 일산호수 그리고 한강의 범람원에 형성된 자연적 기원을 가진 석촌호수 등과 같은 소규모의 호수들이 여가를 즐길 수 있는 휴식공간으로 활용되고 있다. 이러한 도심내의 대부분의 호수들은 저수용량에 비해 유입수량이 적어 장기간 체류되는 수리·수문학적 특성(생산기술연구소, 1988; 강, 1997)과 현재 오염원이 차단되었다 하더라도 생성초기에 많은 오염물질의 유입과 저층에 유기물 축적(Jeppesen *et al.*, 1991; Van der Molen and Boers, 1994) 그리고 유입수의 수질자체의 악화(고양시, 1997) 등과 같은 요인들이 복합적으로 작용하여 부영양한 상태에 있다. 최근에 이러한 도심 호수에서 조류의 발생량이 매우 심각하게 증대되어 녹조현상이 장기간 지속됨으로써 수질이 매우 악화되고 휴식공간으로서의 가치하락 뿐만 아니라 인근 지역에 악취나 유해곤충의 발생과 같은 피해가 나타나 수질개선에 대한 요구가 점점 증가하고 있다. 이런 호수들에 대해서 이미 수질개선을 위한 방안으로 Alum 투여나 폭기시설 등의 호수관리 노력이 시도된 바 있으나(생산기술연구소, 1988; 강, 1997), 유입수에 대한 처리와 가압부상장치를 통해 호수 수질을 관리하고 있는 일산호를 제외하고는 구체적인 대안 마련이 없는 실정이다(고양시, 1997).

도심 내 위락형 호수는 조성위치 및 목적에 따라 호수의 유·출입 조절방법, 주 오염원 등이 다르기 때문에 수질악화 원인의 파악이나 수질관리계획을 수립하기 위해서는 해당호수에 대한 집중적인 조사가 필요하다. 호수의 수질 및 이에 영향을 미치는 요인들에 대한 기초 자료의 확보와 더불어 생태학적 관점에서 수환경을 이해하는 것은 적절한 수질개선의 방법을 수립함에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 이와 유사한 다른 호수에 대한 수질관리대책을 수립함에 있어 활용가치가 클 것이다.

본 연구에서는 서울 도심에 위치하고 있으며 하수관거가 완비된 1975년 이후 우수와 간헐적으로 펌핑에 의해 유입되는 지하수를 제외하고는 오염원의 유입경로가 없음에도 불구하고 부영양화가 지속되고 있는 얇은 인공호인 일감호의 수질 변화, 제한영양염 및 퇴적환경을 평가하고, 퇴적물과 호수 내 수질변화와의 연계성을 고찰하였다.

조사지 개황

본 연구 대상 수역인 일감호는 서울특별시 광진구 화양1번지 건국대학교 내에 위치한 인공호수로 총 수표면적은 약 55,661 m²이며 최대 수심이 2.0 m 정도이고 평균 보유수량은 수위가 해발고도 14.88 m일 때 약 54,288 m³이다. 일감호의 유입수원은 1957년 완공초기에는 뚝섬으로부터 취수된 한강물이었으나, 인근이 도시화되면서 취수가 중단되었다. 호수의 유량은 강우와 지하수에 의존하고 있으며, 배출구는 자연유하식의 구조로 호수가 만수위가 되는 경우에만 유출되고 있다. 건기에 호수의 수량이 감소하는 시기에는 지하수를 펌핑하여 호수로 공급하고 있으며, 지하수가 어느 정도 호수의 수위에 영향을 주는지에 대해서는 아직까지 연구된 바 없으나, 유입원이 없는 일감호의 수위가 지하수에 의해 상당 부분 영향을 받고 있는 것으로 생각된다. 호수의 체류시간을 호수의 부피와 지하수량 그리고 서울 지역의 연평균강우량 1,316 mm를 기준으로 계산하면 약 288일로 매우 길게 나타난다.

일감호의 주 오염원은 하수관거가 완비된 1975년 이전에는 생활하수, 실험실폐수 및 공장폐수 등이었으나, 하수관거가 완비된 이후에는 오·폐수의 유입이 중단되었고 1975년 이후에는 오염부하량이 적을 것으로 추정되는 우수와 지하수만이 주 유입오염원이다. 지하수 유입 및 조사지역이 대기오염정도가 심한 서울이라는 점에서 강우시 대기 중의 많은 오염물질이 빗물과 더불어 호수로 유입되는 경우 소규모 정체수역의 수질에 미치는 영향 정도는 무시할 수 없을 것으로 생각되나, 본 연구에서 이와 관련된 연구는 진행되지 않았다. 일감호의 부영양화 진행에 대해서는 과거에 조사된 자료가 미흡하여 정확히 추정할 수 없으나, 1982년 이전부터 이미 상당히 부영양화되었던 것으로 판단되며, 1975년 이후 외부유입 오염물의 감소에도 불구하고 지금까지 일감호의 수질은 부영양 상태로 유지되고 있다.

재료 및 방법

1. 조사기간 및 시료채취

수질분석을 위한 시료는 2000년 3월부터 2002년 9월까지 월 1회 일감호의 가장 깊은 지점의 수심 0, 1.0, 1.5 m에서 시료를 채취하였고, 수심별 평균값을 조사당

시의 대표값으로 하였다. 2000년 1월과 2월에는 호수결빙으로 인해 조사가 이루어지지 않았으나, 2001년 12~1월에는 얼음 위에서 조사되었고, 2000년 9월은 표층만 채취하였다.

2. 수질환경조사

수온 (Temperature)과 수소이온농도 (pH), 전기전도도 (Conductivity) 및 투명도는 현장에서 측정하였다. 시료는 수심별로 Varn Dorn 채수기를 이용하여 수심별로 채취하였고 2시간 내에 실험실로 운반하여 GF/F filter로 여과하였다. 여과지는 분석 전 (일주일 이내)까지 -20°C에서 냉동 보관하였다가 부유물질 (SS)과 엽록소 a 측정에 사용하였다. 부유물질 (SS)은 무게 중량법으로 측정하였으며 (APHA *et al.*, 1995), 엽록소 농도는 여과지에 90% 아세톤 5 ml를 가한 후 homogenizer로 분쇄하여 냉암소에서 2시간 추출한 후 흡광도를 측정하였으며, Lorenzen법 (1967)에 따라 계산하였다. 여과액은 용존 무기영양염 분석을 위해, 그리고 원수는 입자성영양염 분석을 위해서 각각 2N 염산으로 세척된 250 ml 플라스틱 용기에 담아 분석 전까지 -20°C에서 냉동 보관하였다. 분석은 일주일 이내에 모두 이루어졌다.

용존무기인 (Dissolved inorganic phosphorus; DIP)은 ascorbic acid법으로 분석하였고, 암모니아 (NH₃-N)와 아질산성 질소 (NO₂-N), 질산성 질소 (NO₃-N)는 각각 phenate (4500 NH₃-F, APHA, 1995), Colorimetric (4500 NO₂-B, APHA, 1995) 그리고 카드뮴 환원법으로 측정하였다. 총인 (Total Phosphorus)은 과망간산칼륨 (persulfate)으로 분해한 후, ascorbic acid 법으로 용존무기인 농도를 측정하였으며, 총질소 (Total Nitrogen)는 과망간산칼륨으로 분해한 후 카드뮴 환원법으로 질산성질소의 농도를 정량하였다. 화학적 산소요구량 (CODMn)은 알칼리성 과망간산법으로 측정하였다 (환경부, 1998).

3. 퇴적물조사

호수 내 퇴적물은 2000년 5, 8, 10월에 중력식 채니기 (gravity corer)를 이용하여 채집하였다. 현장에서 채집한 퇴적물 시료를 채취한 즉시 표층으로부터 10 cm를 절개하여 실험에 사용하였다. 시료의 함수율은 습중량과 105 °C dry oven에서 24시간 이상 건조한 후의 시료의 무게 차로 계산하였다. 시료 내 총인의 농도를 측정하기 위해서 건조된 시료를 막자사발로 파쇄하였다. 마쇄된 토양 시료 일부를 perchloric acid로 분해한 후 Vanadomolybdo-phosphoric acid colorimetric법으로 분석하였고, 유기

질소 (TKN)는 황산칼륨 (K₂SO₄)과 황산동 (CuSO₄) 혼합 시약으로 분해시킨 후 Macro-Kjeldahl법으로 분석하였다 (APHA, 1995).

퇴적물로부터의 인용출률 (mg m⁻² d⁻¹)은 1 l 용량의 메스실린더에 10월에 채취된 표층퇴적물을 2 cm 두께로 넣은 후, 퇴적물이 교란되지 않도록 멸균된 증류수 1 l (수층의 높이 36 cm)를 첨가한 후 0.1 N HCl과 0.1 N NaOH를 첨가하여 pH를 7, 8, 9로 조절하였다. 호기적 조건을 유지하기 위해서 수표면으로부터 약 10 cm 위치에서 지속적으로 폭기를 하였으며, 어두운 상태를 유지하였다. 실험은 17일 동안 지속되었으며 무기인 농도를 측정하기 위해 매일 50 ml씩 표층으로부터 시료를 채수하였고 인이 첨가되지 않은 증류수를 동일양 재보충 하였다. 인의 용출률은 다음식에 의해 계산하였다 (Bengtsson, 1975).

$$r \text{ (mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{)} = \frac{1}{t} \sum_{x=1}^{x=t} (C_{x+1} - C_x) h_x$$

여기서, C_x는 시료채취 시기 (x)의 인 농도 (mg PO₄-P/l)이고, h_x는 시료채취 (x) 후의 수층의 높이 (mm)이며 t는 실험기간 (day)이다.

4. 조류의 제한영양염 및 호수영양상태 평가

표수층 (0 m)의 수심에서 채수된 표층수를 사용하여 조류 성장잠재력 (Algal Growth Potential; AGP) 실험을 실시하였다. 실험을 위해 GF/F로 여과한 호수 물과 원수를 각각 1:1로 희석하여 네 가지로 제조된 200 ml의 실험수를 500 ml 삼각 flask에 담았다. 실험은 N과 P의 첨가가 없는 대조구 (Control)와 N, P, N+P가 각각 1 mg/l로 조절된 조건에서 3반복으로 실시하였다. 배양온도는 24°C를 유지하였고, 광도는 100 μmol m⁻² sec⁻¹로 24시간 연속조사 하였다. 시간에 따른 생물량의 변화는 엽록소 a 농도를 통해 조사하였다.

호수의 영양상태는 Carlson (1977) (SD, Chl. a 그리고 TP 자료 이용)과 Kratzer and Brezonik (1981) (TN 자료 이용)에 따른 영양상태지수 (trophic state index; TSI)를 계산하였으며, 항목간의 편차를 이용하여 식물플랑크톤 성장을 제한하는 요인에 대해 계절에 따른 변화를 평가하였다.

5. 통계분석

각 수심별로 조사된 결과 값을 토대로 Pearson's correlation analysis와 요인분석 (Principal component an-

alysis)을 수행하였고(SPSS 10.0), 영양염첨가에 따른 조류 생물량의 차이는 one-way ANOVA를 이용해 분석하였으며, 유의 수준은 $P < 0.05$ 를 기준으로 하였다. 영양상태 지수를 통한 편차분석은 수심별 평균값을 토대로 분석하였다. 조사 항목별 계절 변화는 0, 1, 1.5 m 수심에서의 측정된 값의 평균값이며, 표준편차의 크기는 표층과 심층간 항목별 측정값의 차이를 의미한다.

결과 및 고찰

1. 물리·화학적 환경

시기의 차이는 있으나 약 2개월간(12~2월) 결빙하는 일감호에서의 수질은 결빙시기를 중심으로 계절별로 큰 차이를 나타냈다(Fig. 1). 수온은 $3.7 \sim 28.2^\circ\text{C}$ 였고, pH는 겨울철 결빙기간 동안에 가장 낮은 7.8에서 식물플랑크톤 생물량이 증가한 시기에는 9.8까지 상승함으로써, 광합성 활동에 의한 pH의 전형적인 증가가 나타났다(Philip, 1927; Wetzel, 1983). 강우량은 7, 8 그리고 9월에 집중되었고 겨울에는 거의 없었다. 전기전도도는 $136.0 \sim 264.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 겨울보다는 여름철의 전기전도도가 10배 높았으며, 투명도는 0.2~1.0 m의 범위로 결빙시기에 증가하였다가, 식물플랑크톤의 생물량이 증가와 더불어 감소하였다($r^2 = 0.87$, $P < 0.001$, $n = 29$). 용존 산소농도는 $8.6 \sim 12.4 \text{ mg O}_2/\text{L}$ 의 분포였으며, 여름철 표층과 심층간의 농도 차이를 나타내기는 했지만, 심층 산소고갈은 관찰되지는 않았다(Figs. 1, 2). 이것은 일감호의 수심이 얇아 바람에 의한 교란으로 인해 수층간의 혼합이 쉽게 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 수심이 얇은 호수에서 여름철 수온약층이 형성되고 심층에서의 산소고갈이 이루어지기 위해서는 수층의 교란이 야기되지 않을 3 m/s 이하의 약한 풍속이 수일동안 유지되거나(Scott *et al.*, 1969; Harris, 1980), 표층과 심층간의 화학적성향이 다른 수체가 존재하는 경우(허 등, 1999)에 나타날 수 있다. 조사기간 동안 서울지역의 평균풍속은 2000, 2001 그리고 2002년에 각각 2.2, 1.8 그리고 1.9 m/s였으며 2002년을 제외하고는 8월부터 11월 사이의 평균풍속이 1.8 m/s로서(기상청, 2003), 앞선 문헌과 비교시 바람에 의해 유도되는 수층 교란이 억제되고 성층이 형성되었을 가능성이 있지만 풍속의 차이는 하루 동안에도 크게 나타날 수 있기 때문에 수층간의 교란 가능성을 배제할 수는 없다.

2. 영양염류

물리적환경과 유사하게 입자성과 용존성 영양염류농도도 계절에 따라 뚜렷한 변화가 관찰되었다(Fig. 1). 부유물질 농도는 결빙시기에 $4.7 \sim 13.0 \text{ mg}/\text{l}$ 에서 7~8월에 $30.0 \sim 48.0 \text{ mg}/\text{l}$ 로 약 3~4배 증가였으며, 화학적산소요구량은 $10.8 \sim 32.6 \text{ mg}/\text{L}$ 의 분포로 식물플랑크톤의 증가와 밀접한 관련이 있었다($r^2 = 0.63$, $P = 0.038$, $n = 27$). 용존무기인 농도는 $0 \sim 20.6 \mu\text{g}/\text{L}$ 의 분포를 보였으며, 2002년 7월을 제외하고는 해빙시에 수체 내 농도가 증가하였다가 이후 급격히 감소하여 검출한계 미만($< 2 \mu\text{g P}/\text{l}$)으로 나타났다. 겨울철 결빙과 해빙에 따른 수체 내 농도변화는 다른 연구에서 관찰되었듯이(Agbeti and Smol, 1995; 조와 신, 1997, 1998; 신 등, 2000) 무기질소에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 질산성 질소와 암모니아성 질소는 여름 한 두달 동안 $20 \mu\text{g N}/\text{l}$ 이하의 낮은 수준을 유지하였으나, 결빙과 더불어 수체 내 무기질소의 농도가 증가하였으며, 특히 해빙시 질산성질소의 급격한 증가가 모든 해에 관찰되었다. 무기질소의 증가는 결빙기간 동안에 미생물 분해활동으로 생성된 암모니아의 축적과 빛 제한에 따른 조류생물량 및 영양염 이용율 감소 등과 관련이 있을 수 있다(Odum, 1959; Talling, 1962; Løvstad and Bjørndalen, 1990).

총인은 $34.3 \sim 108.8 \mu\text{g P}/\text{l}$ 의 분포를 나타냈으며, 용존 무기인의 농도가 낮게 검출된 6, 7, 8월에 높은 값을 보였고 결빙기간 동안에는 낮았다. 용존무기인의 제한이 예측된 호수에서 용존무기인 농도가 낮음에도 불구하고 여름철 질소를 제외한 입자성 영양염류의 높은 농도가 유지된 것은 퇴적층과 수층내 인의 교환과 이용의 가능성으로 유추할 수 있다. 반면에, 총 질소농도는 $1.0 \sim 2.8 \text{ mg N}/\text{l}$ 의 분포로, 다른 영양염류와는 달리 여름에 비해 겨울에 높게 나타났으며, 특히 해빙된 직후인 3월에 질산성질소 농도의 증가와 더불어 가장 높은 농도를 나타냈다. 이것은 결빙시기에 퇴적층에서의 분해활동에 의해 생성된 무기형태의 질소가 대기로의 확산이 차단되어 나타난 결과로 생각할 수 있다.

3. 엽록소 a 농도와 이화학적요인간의 상관성

엽록소 a 농도는 $7.9 \sim 166.7 \mu\text{g}/\text{l}$ 의 분포로, 겨울과 여름철의 농도 차이는 약 21배로 크게 나타났다(Fig. 3). 엽록소 a 농도는 해빙과 더불어 수온 상승, 용존 무기영양염류의 증가가 나타난 3월부터 급격히 증가하였으며 생물량이 높은 시기에 수층간에 큰 차이를 나타냈다. 일감호에서 여름철 주요 우점종은 *Microcystis*, *Oscillato-*

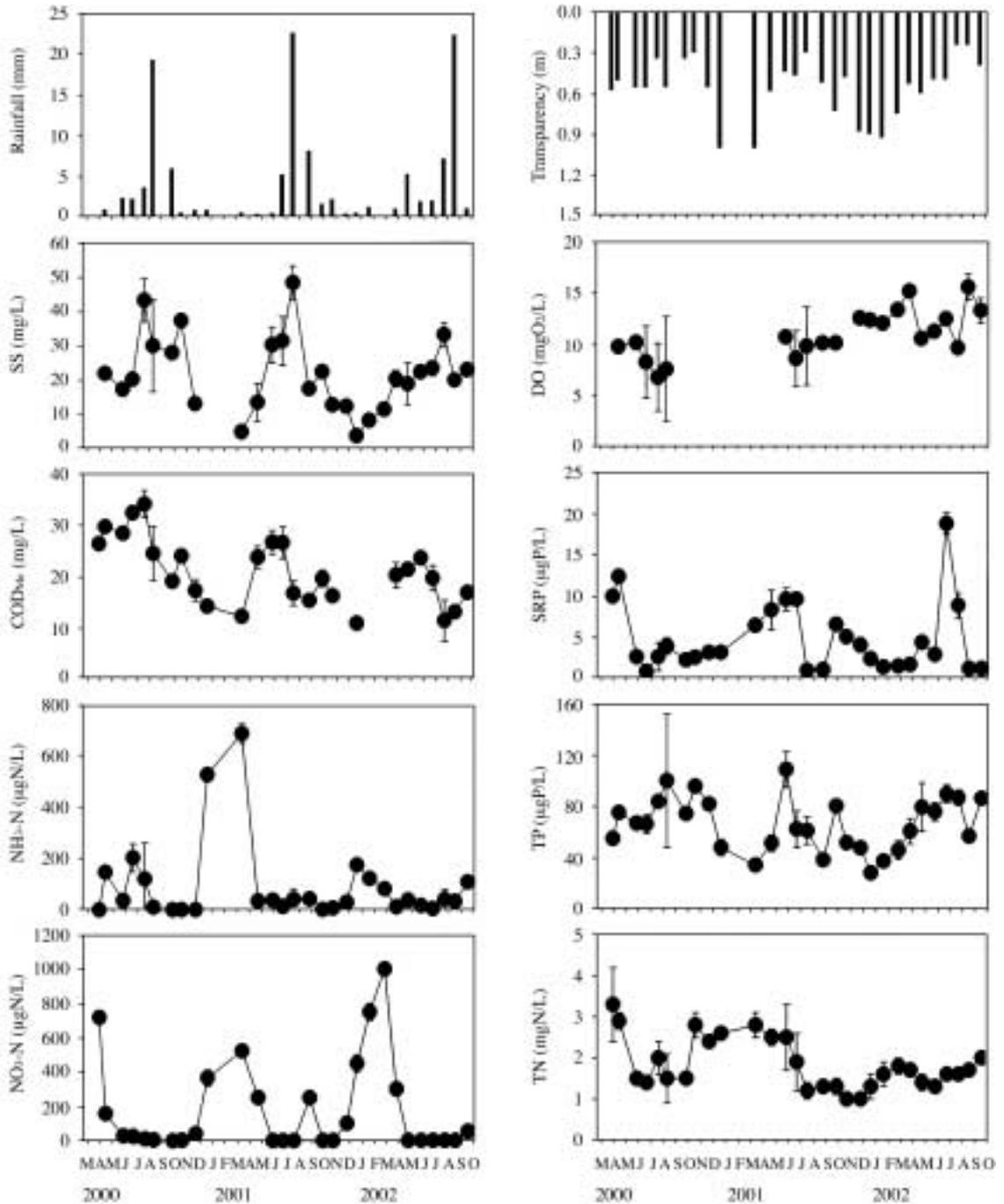


Fig. 1. Monthly variation of rainfall, transparency (SD), suspended solids (SS), dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), dissolved inorganic phosphorus (DIP), total phosphorus (TP), ammonium nitrogen (NH₃-N), nitrate nitrogen (NO₃-N) and total nitrogen (TN) in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002.

ria, *Lyngbya*, *Merismopedia* 등과 같은 부유능력이 있는 남조류들로서 이러한 조류의 운동능력과 불규칙적인 풍속의 세기는 엽록소 *a* 농도의 수직적 분포를 나타낸 주원인으로 생각할 수 있다 (Heiskanen and Olli, 1996; 김

과 문, 2000; Ha *et al.*, 2000).

봄과 가을 사이에 해마다 시기적으로 차이는 있으나 엽록소 *a* 농도가 일시적으로 감소하는 기간이 관찰되었다 (2000년 6월, 2001년 7월, 2002년 5월과 8월). 비록 식

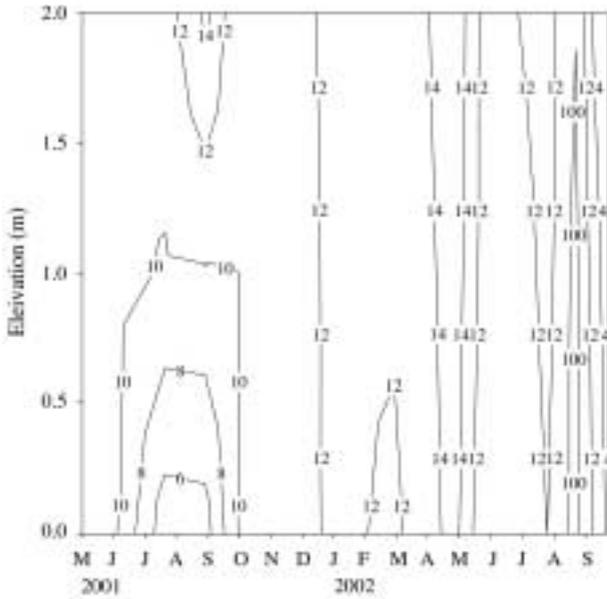


Fig. 2. Monthly and vertical profile of dissolved oxygen concentration in Lake Ilgam from May 2001 to September 2002.

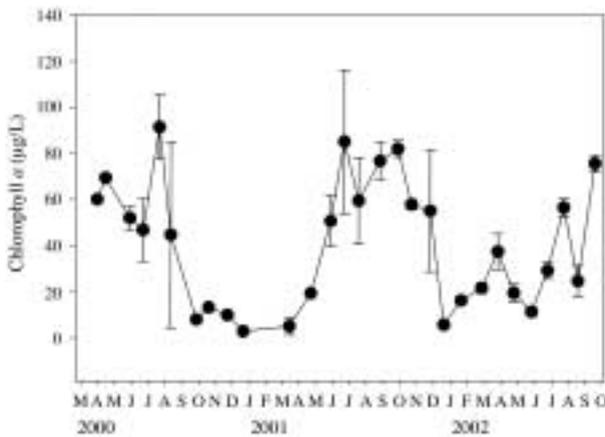


Fig. 3. Monthly variation of chlorophyll *a* concentration in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002.

물플랑크톤 현존량이 수온, 빛, 동물플랑크톤섭식 그리고 제한영양염의 존재 여부 등 많은 요인에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있지만 (Hutchinson, 1957; Lampert *et al.*, 1986; Vanni *et al.*, 1990; 김 등., 1999), 이러한 시기에 무기용존인 농도가 $2.8 \mu\text{g P/l}$ 이하로 낮았기 때문에, 영양염 제한이 생물량 감소의 중요한 원인 중의 하나였던 것으로 추정된다.

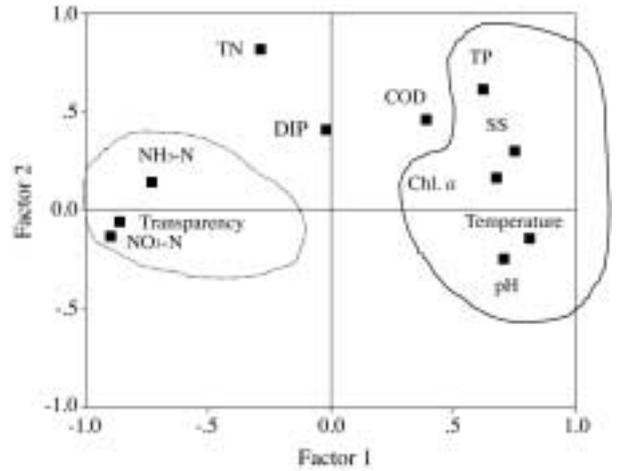


Fig. 4. Correlation between chlorophyll *a* concentration and other water quality parameters. Solid and dot circle denotes positive and negative relationship, respectively.

조류의 생물량과 이화학적 환경요인과의 상관성을 조사하기 위해 수심별 측정된 값의 평균을 사용하여 요인 분석을 실시하였다 (Fig. 4). 요인 1이 설명해 주는 분산의 양은 44.8%였고, 요인 2가 설명해주는 분산의 양은 14.6%로 나타나 두 요인이 설명해 주는 분산의 양은 59.4%였다. 엽록소 *a* 농도는 총인, SS, 수온 그리고 pH 와 양의 상관관계를 나타냈으며 ($r^2 > 0.63$, $P < 0.01$), 용존무기질소 ($\text{NH}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$)와 투명도와는 음의 상관관계를 나타냈다 ($r^2 > 0.65$, $P < 0.05$). 용존무기질소와의 음의 상관관계는 결빙과 해빙기간에 나타난 높은 무기질소의 농도에 비해 상대적으로 낮은 조류의 생물량이 반영된 것이다 (Fig. 1). 통계적인 방법에 의해서 조류의 성장에 직접적으로 이용될 수 있는 용존무기인과 엽록소 농도와의 직접적인 상관관계는 확인할 수 없었다 (Fig. 4). 용존무기인은 인이 제한된 호수에서 조류 성장과 밀접한 관련이 있으나, 용존무기인의 성장에의 이용에 따른 수체내 농도 감소 (Jaroslav *et al.*, 1995) 및 외부로부터 많은 양의 인이 일시적으로 유입되는 경우에는 (예: 집중 강우에 따른 탁수 유입) (홍, 2000) 용존무기인과 생물량간의 상호관계는 역의 상관성을 내거나 본 연구에서의 결과와 마찬가지로 상관성이 없는 것으로 평가될 수 있다. 또한, 알고 부영양한 호수에서는 조류가 이용할 수 있는 인이 수중 뿐만 아니라 퇴적물에도 존재하며 (Scheffer, 1998), 입자성무기인 또한 조류에 의해 쉽게 이용 가능한 형태로 빠르게 전환될 수 있기 (Rigler, 1956) 때문에 용존무기인과 생물량 사이의 관계

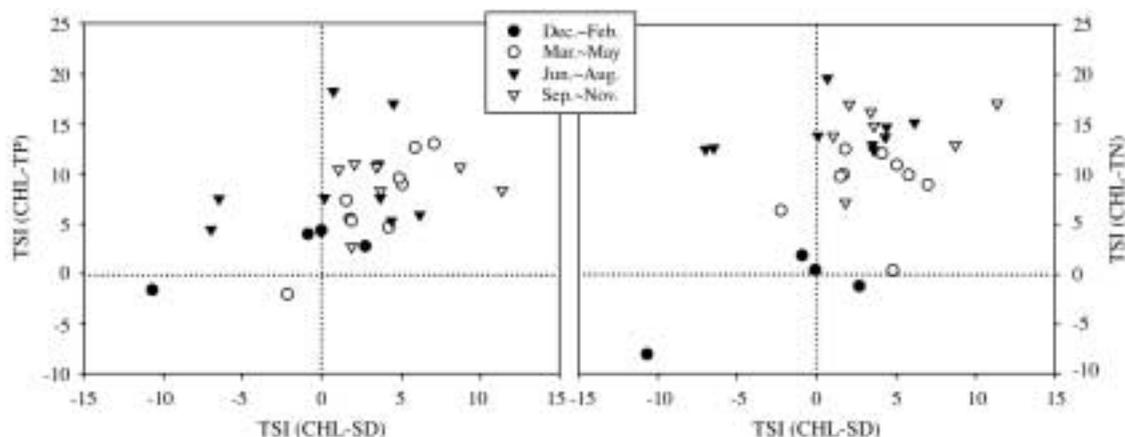


Fig. 5. Monthly variation of trophic state index (TSI) deviation based on 3 years of averaged data from an three water column (0, 1, 1.5 m) in Lake Ilgam.

를 이해하기 위해서는 수중 뿐만 아니라 퇴적환경까지 고려해야할 필요가 있다.

4. 조류의 제한영양염 및 호수영양상태

조사기간 동안 일감호에서 엽록소 a, 총인, 총질소농도, 그리고 투명도에 의해 계산된 영양상태지수는 각각 평균 72 ± 6.1 , 64 ± 4.8 , 61 ± 2.2 그리고 69 ± 5.5 로 부영양 상태를 유지하였다. 호수내 부유물의 조성과 식물플랑크톤 성장을 제한하는 요인들을 평가하기 위해서는 일반적으로 시료가 담긴 용기내에 영양물질을 투입하는 생물검정 방법이나, 섭식 실험, 부유물질의 크기분석 등과 같은 직접적인 방법을 이용한다. 그러나, 총인, 엽록소 a, 투명도 자료에 의해 계산된 Carlson의 부영양화도 지수들의 상호편차를 이용하면 보다 간편하게 동일한 목적을 이룰 수 있다 (Havens, 2000). 일감호에서 조사된 항목별 TSI의 편차분석결과 영양염 측면에서 인과 질소 모두가 제한인자로 나타났다 (Fig. 5). 시기적으로 결빙기간(12~1월)에 편차분석 결과가 0에 가까움에 따라 인과 질소의 결핍정도가 가장 적은 것으로 나타났으며, 9월부터 11월 사이에는 조사기간 내내 인과 질소 모두의 제한이 평가되었다. 수체내 존재하는 인과 질소의 농도에 대한 비율에서는 DIN/DIP (무게비)는 0~835.8 범위로 질소가 제한되는 기간 또한 전체 조사기간 중 34.5%로 대부분 5월부터 10월 사이에 나타났다 (Fig. 6).

현장시료에 인과 질소를 첨가한 생물검정에서는 DIN/DIP (무게비) 7을 기준으로 제한 영양염을 예측한 결과와 일치하였다 (Fig. 7). DIN/DIP (무게비)가 6이하였던 5, 6, 7월에는 질소가 그리고 DIN/DIP (무게비)가 40 이상

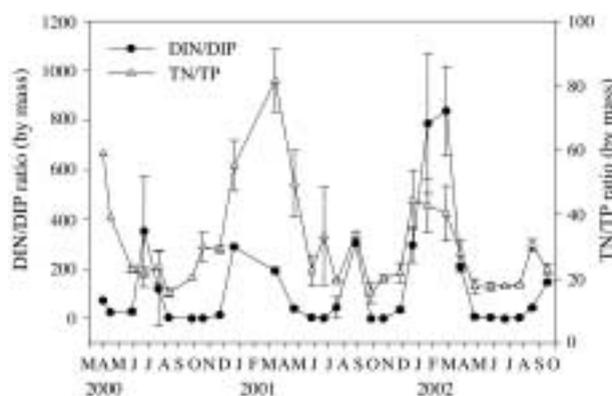


Fig. 6. Monthly variation of DIN/DIP and TN/TP ratio (by mass) in Lake Ilgam from March 2000 to September 2002. DIN = $\text{NH}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$.

이었던 8월과 9월에서는 인이 제한인자로 조사되었다. 반면에 TN/TP (무게비)는 15.6~58.8의 범위로 인 제한만이 예측됨으로써, 앞선 결과와는 다르게 나타났다.

5. 퇴적환경

퇴적층내 입자조성은 진흙이 $28.6 \pm 1.6\%$ 였고 나머지는 모래 ($71.4 \pm 1.6\%$)로 구성되어 있었으며 평균함수율은 $83.8 \pm 1.3\%$ 였다. 퇴적물내 질소함량은 평균 $4,452 \pm 283.0 \text{ mg N/kg}$ 으로, 기 조사된 몇몇 인공호 중 가장 높은 농도를 나타낸 팔당호 ($1,842 \text{ mg N/kg}$)와 안동호 ($1,838 \text{ mg N/kg}$)에 비해 3배 정도 높은 농도였다 (환경처 1994). 퇴적물내 질소함량과 달리 인 함량은 국내 주요호수 중 인 함량이 적은 것으로 보고된 주암호 (510 mg P/

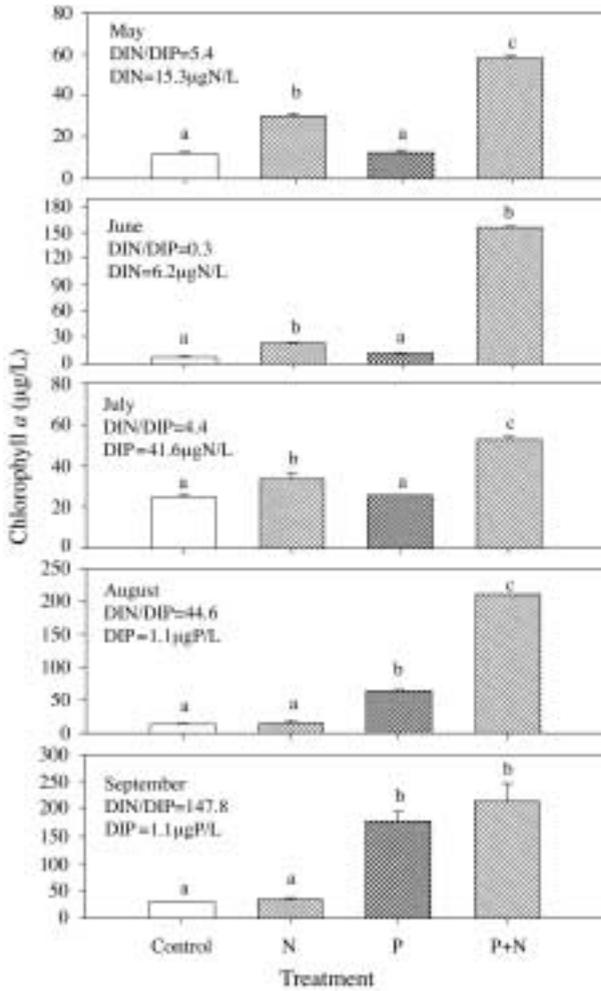


Fig. 7. Changes of chlorophyll *a* in the addition of nutrients from May to September 2002. N, P and N+P denotes addition of nitrogen, phosphorus and both nutrients, respectively. a, b, and c indicates significant difference among treatments ($P < 0.05$, ANOVA).

kg) 보다도 낮은 농도 ($313 \pm 155 \text{ mg P/kg}$)를 나타냈다 (Table 1) (환경처 1994). 2000년 10월에 채취된 상층퇴적물을 서로 다른 pH에 노출시켜 측정된 인 용출률에 있어서는 pH 8 이상에서 인의 용출이 나타났고, pH 9에서 $0.29 \pm 0.02 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높았으며 매우 부영양한 호수로 알려진 일본의 Kasumigaura호에서 측정된 값 ($0.032 \sim 0.323 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)과는 유사하였다 (농어촌진흥공사, 1998). 그러나, 국내에서 연구된 사례 중 대청호에서 조사된 결과 ($0.5 \sim 4.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)와 비교해서는 매우 낮은 수준이었다 (한국수자원공사, 1990). 일감호 퇴적층으로부터 나타난 낮은 인 용출율은 다른 조사 시

Table 1. TP, TKN concentration and moisture content of Lake Ilgam sediment (upper 10 cm) from June to October, 2000.

	TP (mg P/kg dry sediment)	TKN (mg NH ₃ -N/kg dry sediment)	Moisture (%)
June	214.6	4,130	82.7
July	432.5	4,452	83.2
August	492.5	4,326	86.0
October	114.6	4,900	83.5

Table 2. Phosphate (PO₄-P) release rate from Lake Ilgam sediment (upper 10 cm) under different pH (± 0.5) conditions in laboratory (October, 2000)

pH	7	8	9
Release rate ($\text{mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	-0.06 ± 0.02	0.18 ± 0.01	0.29 ± 0.02

기에 비해 상대적으로 인 함량이 낮았던 것과 관련이 있을 것이다. 2000년 10월에 퇴적물내 적은 인함량은 인 외부부하가 없는 일감호에서 식물플랑크톤 성장에 대한 인 제한을 예측할 수 있으며, TSI 편차분석에서 모든 해의 9~11월에 인이 제한요인으로 나타난 결과와 일치한다 (Table 1, Figs. 5, 7).

일감호는 매년 여름 높은 생물량을 유지하고 있으며, 이것은 지하수나 강우에 의한 제한 영양염의 공급 외에도 수체의 교란(얕은 호수에 대한 바람의 영향)에 의한 퇴적물의 재부유와 미생물의 활성도 그리고 심층산소조건의 변화에 따라 퇴적층으로부터 많은 양의 인이 수체로 용출되어 식물플랑크톤에 의해 이용되었을 가능성을 배제할 수 없다. Søndergaard *et al.* (1992)은 퇴적물의 재부유에 따른 인용출에 관한 연구에서 퇴적물 재부유시 내부 인부하가 $60 \sim 70 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 교란되지 않은 퇴적물에서 용출되는 양보다 20~30배 높다는 실험 결과를 토대로 얕은 호수에서 재부유된 퇴적물에 흡착된 인은 인이 제한되는 수체내에서 조류의 성장을 유지할 수 있음을 제시하였다. 비록 본 연구 조사 기간 중에는 퇴적층 근처에서의 산소고갈은 관찰되지 않았지만, 일감호 수체내 화학적산소요구량(COD_{Mn})이 10.8~32.6 mg/L 정도로 유기물 농도가 높기 때문에 여름철 바람에 의한 교란이 없는 시기에는 이러한 유기물이 퇴적층으로 침강되어 분해되는 과정에 심층에 혐기성 상태가 조성되어 인의 용출이 증가했을 가능성이 있다 (Porcella *et al.*, 1970). 퇴적물내 인 함량이 적음에도 불구하고 조류 성장에 필요한 인공급원으로서의 퇴적물의 역할이 강조된 것과

달리, 질소함량이 비교적 많음에도 여름철 무기질소가 낮은 농도를 유지하고 질소 제한이 예측된 것은 인과 질소의 입자와의 결합특성과 탈질에 따른 대기중으로의 질소 확산과 관련이 있을 수 있다. 인과 달리 질소는 퇴적물 구성입자와의 결합이 어렵기 때문에 퇴적층에 축적이 어려운 것으로 알려져 있으며 (Jensen *et al.*, 1991), 이를 통해 일감호 퇴적층에 존재하는 질소는 대부분이 조류에 의해 쉽게 이용될 수 없는 유기질소로 구성되어 있는 것으로 생각할 수 있다. 또한, 일감호와 같이 수심이 얕고 부영양 상태의 호수에서는 퇴적층내 유기물이 분해되어 암모니아가 생성되었다 하더라도 바람에 의한 수체교란으로 혐기적조건과 호기적 조건이 퇴적층 근처에서 상층되어 질산화 그리고 탈질화과정이 빠르게 진행됨에 따라 대부분의 질소가 대기 중으로 손실되었을 가능성이 있다 (Jensen *et al.*, 1991).

적 요

본 연구는 도시에 위치한 얕은 인공호수의 수질변화 특성, 제한영양염 및 퇴적물 특성을 평가하기 위해서 이루어졌다. 일감호는 연 평균 엽록소 *a* ($77.2 \pm 36.6 \mu\text{g/l}$)와 TP ($66.6 \pm 20.5 \mu\text{g/l}$)농도 그리고 영양상태지수 (>60)모두를 토대로 할 때 매우 부영양상태였다. 결빙시기와 해빙되는 시기에 수층내 무기질소와 인의 수체내 농도가 증가하였다가 여름철에는 감소하는 계절적인 변화가 나타났다. 수체내 DIN/DIP (무게비)비율과 TSI편차분석 그리고 생물검정 (AGP)실험을 통해서 질소와 인 모두가 식물플랑크톤의 성장을 제한함이 제시되었다. TSI 편차분석 결과에서는 1년 중 생물검정을 통해서도 인 제한이 예측된 바 있는 9월부터 11월에 인과 질소 모두의 식물플랑크톤 성장에 대한 제한정도가 가장 큰 것으로 나타났다. 퇴적물내 인 함량 ($313 \pm 155 \text{ mg P/kg}$)은 계절에 따른 변화를 나타냈고, 인용출률은 pH 9에서 $0.29 \pm 0.02 \text{ Pmg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 가장 높았다. 질소함량은 평균 $4.452 \pm 283.0 \text{ mg N/kg}$ 였으며 계절에 따른 큰 차이는 없었다. 이러한 결과들은 퇴적물이 제한영양염의 공급원으로서의 중요한 역할을 수행하며, 퇴적물내 인 함량의 계절에 따른 변화가 조류의 생물량을 조절할 수 있음을 의미한다.

사 사

본 연구는 '(주) 청호이엔씨'의 일부 지원에 의해 "도심

내 호수의 수질개선 및 생태계복원을 위한 기초조사 연구"의 일환으로 수행되었다. 현장조사에 도움을 준 건국대학교 육수학/생태공학 연구실의 박구성, 최광현, 박정환, 이우향, 유경아, 유영선에게 감사드린다. 원고심사를 통해 문제점의 지적과 중요한 코멘트를 해준 두 심사자에게 감사드린다.

인 용 문 헌

강필구. 1997. 석촌호수의 육수학적 환경조사 및 응집제의 효과, 강원대학교 자연과학대학 환경학과 학사논문, p. 29-32.

기상청. 2003. 기상통계자료 (www.kma.go.kr).

고양시. 1997. 일감호의 최적수질관리연구.

김범철, 김재욱, 전만식, 황순진. 1999. 소양호 동·식물플랑크톤의 계절변동. 한국육수학회지 32: 127-134.

김한순, 문주환. 2000. 공산호에서 수화발생동안 *Microcystis aeruginosa* 수직분포의 변동. 한국육수학회지 33: 119-127.

농어촌진흥공사. 1998. 새만금호의 내부오염부하량 산정 및 수질영향연구. p. 133-134.

생산기술연구소. 1988. 석촌호 수질분석 및 개선관리 방안 연구보고서, 서울대학교 공과대학. p. 7-13.

조경제, 신재기. 1997. 낙동강 중·하류에서 무기 N·P 영양염의 변동. 한국육수학회지 30: 85-95.

조경제, 신재기. 1998. 낙동강 하류에서 동·하계의 N·P 영양염류와 식물플랑크톤의 동태. 한국육수학회지 31: 97-75.

신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염특성. 한국육수학회지 33: 387-394.

한국수자원공사. 1990. 대청댐 저수지 Model 생태계를 이용한 부영양화 방지 수법 연구. p. 90-54.

홍성수. 2000. 수도권 상수원 수질과 부영양화에 관한 환경생태적 연구. 한양대학교 대학원 석사학위논문. p. 19.

환경부. 1998. 수질오염공정시험법. 동화기술. p. 134

환경처. 1994. 전국호소환경 현황조사 및 주요 호소영향권역 설정.

허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가. 한국육수학회지 32: 141-151.

Agbeti, M.D. and J.O. Smol. 1995. Winter limnology : Comparison of physical, chemical and biological characteristics in two temperate lakes during lakes during ice over. *Hydrobiol.* 304: 221-234.

APHA, AWWA, and WEF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, D.C., USA.

Bengtsson, L. 1975. Phosphorus release from a highly eu-

- trophic lake sediment. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **19**: 1107-1116.
- Carlson, R.E. 1997. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Codd, G.A. and G.K. Poon. 1988. Cyanobacterial toxins. p. 283-296. *In*: Biochemistry of the algae and cyanobacteria (L.J. Rogers and J.R. Gallon eds.). Clarendon Press, Oxford.
- Dawson R.M. 1998. The toxicology of microcystins. *Toxicon.* **36**: 953-962.
- Ha, K., H.-W. Kim, and K.-S. Jeong. 2000. Vertical distribution of Microcystis population in the regulated Nakdong River, Korea. *The Jap. Soci. Limnol.* **1**: 225-230.
- Harris, G.P. 1980. The measurement of photosynthesis in natural populations of phytoplankton. p. 129-187. *In*: Physiological ecology of phytoplankton (I. Morris ed.). Blackwell, Oxford.
- Havens, K.E. 2000. Using Trophic state index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Kor. J. Limnol.* **33**: 187-196.
- Heiskanen, A.-S. and K. Olli. 1996. Sedimentation and buoyancy of *Aphanizomenon cf. flos-aquae* (Nostocales, Cyanophyta) in a nutrient-replete and nutrient-depleted coastal area of the Baltic Sea. *Hycologia.* **35**: 94-101.
- Hutchinson, C.E. 1957. A treatise on limnology. I, Geography Physics and Chemistry. New York, John Wiley and Sons Inc. p. 1015.
- Jaroslav, V., V. Vojtěch, H. Josef, and N. Jiri. 1995. Comparison of phosphorus deficiency indices during a spring phytoplankton bloom in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biol.* **33**: 73-81.
- Jensen, J.P., P. Kristensen, and E. Jeppesen. 1991. Relationships between N loading and in-lake N concentrations in shallow danish lakes. *Ver. Int. Ver. Theor. Ang. Limnol.* **24**: 201-204.
- Jeppesen, E., P. Kristensen, J.P. Jensen, M. Søndergaard, E. Mortensen, and T.L. Lauridsen. 1991. Recovery resilience following a reduction in external phosphorus loading of shallow eutrophic danish lakes: duration, regulating factors and methods for overcoming resilience. *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiologia* **48**: 127-148.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Wat. Res. Bull.* **17**: 713-717.
- Lampert, W., W. Flecker, H. Rai, and E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 478-490.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Løvstad, Ø. and K. Bjørndalen. 1990. Nutrients (P, N, Si) and growth conditions for diatom and *Oscillatoria* spp. in lakes in south-eastern Norway, *Hydrobiol.* **196**: 255-263.
- Odum, E.P. 1959. Fundamentals of Ecology, p. 546. W.B. Saunders, Philadelphia.
- Persson, P.E. 1982. Muddy odour: a problem associated with extreme eutrophication. *Hydrobiol.* **86**: 161-164.
- Philip, C.B. 1927. Diurnal fluctuations in the hydrogen ion activity of a Minnesota lake. *J. Ecology.* **8**: 73-89.
- Porcella, D.B., J.S. Kumagai, and E.J. Middlebrooks. 1970. Biological effects on sediment-water nutrient interchange. *J. San. Eng. Div. Proc., Amer. Soc. Civil Engr.* p. 96.
- Pouria, S., A de Andrade, R.L. Cavalcanti, V.T.S. Barreto, C.J. Ward, W. Preiser, G.K. Poon, G.H. Neild, and G.A. Cood. 1998. Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil. *The Lancet.* **352**: 21-26.
- Rigler, E.L. 1956. A tracer study of the phosphorus cycle in lake water. *Ecology* **37**: 550-562.
- Robert, R., F.S. Soong, J. Fitzgerald, L. Turczynowicz, O. E. Saadi, D. Roder, T. Maynard, and I. Falconer. 1993. Health effects of toxic cyanobacteria (blue-green algae). Univ. Adelaide. South Australia.
- Scheffer, M. 1998. Ecology of shallow Lakes. Chapman & Hall, London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras. p. 49-61.
- Scott, J.T., G.E. Myer, R. Stewart, and E.G. Walther. 1969. On the mechanism of Langmuir circulations and their role in epilimnion mixing. *Limnol. Oceanogr.* **14**: 493-503.
- Smith, B.A.D. and J.J. Gilbert. 1995. Relative susceptibilities of rotifers and cladocerans to *Microcystis aeruginosa*. *Arch. Hydrobiol.* **132**: 309-336.
- Søndergaard, M., P. Kristensen, and E. Jeppesen. 1992. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiol.* **228**: 91-99.
- Talling, J.F. 1962. Freshwater algae, p. 743-757. *In*: Physiology and biochemistry of algae (R.A. Lewin, ed.). Academic Press, New York.
- Van der Molen, D.T. and P.C.M. Boers. 1994. Influence of internal loading on phosphorus concentration in shal-

- low lakes before and after reduction of the external loading. *Hydrobiol.* **275-276**: 379-389.
- Vanni, M.J. and J. Temte. 1990. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 411-418.
- Wetzel, R.G. 1983. *Limnology* (2nd ed.), W.B. Saunders Comp, Harcourt Brace Jovanovich College Publ. Inc., Philadelphia. p. 767.

(Received 20 Apr. 2003, Manuscript accepted 30 May 2003)