

ORIGINAL ARTICLE

## 울산지역 상수원 호수 환경에 따른 식물플랑크톤 분포

이혜진\* · 탁보미

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

### Phytoplankton Community, Pollution Sources and Water Quality of Drinking Water Lakes in Ulsan

Hae-Jin Lee\*, Bo-Mi Tak

*Nakdong River Environment Research Center, NIER, Gyeongbuk 717-873, Korea*

#### Abstract

This study presented the phytoplankton communities of the three lakes (Sayeon, Daeam, Hoeya) using for drinking water in the Ulsan reservoir. The water storage of the Lake Sayeon, Daeam and Hoeya were 25, 13, 21 million ton respectively and most of which were being utilized for industrial and residential purposes. The total precipitation of the Ulsan region in 2010 was 1,162 mm, decreasing 10% from 1,275 mm of the annual. As for pollutant loads, BOD and TN discharge loads of Daeam was the highest with 3,277 kg/day, 1,931 kg/day and 90% of them were came from non-point pollutant sources. TP discharge loads showed the highest in the lake Hoeya with 643 kg/day and 97% of them were came from point sources as household, industry and livestock. We assessed water quality of the lake Sayeon, Daeam and Hoeya using 17 variables. The water quality assessment found that the lake Daeam met the fourth to fifth grade because of high concentration of COD, SS and chlorophyll-a. Eutrophication assessment was conducted by revised Carlson's Index (TSM, Aizaki) and found that Lake Daeam was more eutrophicated than the other two lakes all the year through as for chlorophyll-a, transparency and the total phosphorus (TP). A total of 95~111 phytoplankton species were identified from the three lake samples. Among them, the largest number of species were Chlorophyceae with 35~51, followed by Bacillariophyceae with 36~45, Cyanophyceae with 9~11, and Cryptophyceae with 6~9 species. The total cell number of phytoplankton was the highest in February (15,254 cells/mL) with Bacillariophyceae in the lake Daeam and the seasonal succession shows that Bacillariophyceae (*Stephanodiscus* spp.) in the spring, Cyanophyceae (*Anabaena* spp.) in the summer and the autumn, Bacillariophyceae (*Stephanodiscus* spp.) in the winter.

**Key Words** : Pollution loads, Water quality, Phytoplankton, Eutrophication, Seasonal succession

#### 1. 서론

우리나라는 계절에 따라 강우량의 편차가 크며 여름철에는 강우의 집중으로 인해 하천 유량이 증가하여 홍수 등의 피해를 일으키는 반면, 늦가을 이후부터 봄

철까지는 갈수기로 인해 수자원 확보에 어려움을 가진다. 따라서 인구가 밀집되고 많은 공업용수를 필요로 하는 도시지역에서는 수자원을 효율적으로 이용하기 위해 하천을 막아 인공호를 조성하여 생활용수와 공업

received 7 July, 2012; revised 20 November, 2012;

accepted 22 November, 2012

\*Corresponding author : Hae-Jin Lee, Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gyeongbuk 717-873, Korea  
Phone: +82-54-950-9731  
E-mail: hjlee76@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용수로 이용하고 있다. 이러한 목적으로 조성된 인공 호는 수리수문학적 요인과 더불어 유역에서 발생하는 오염원의 유입으로 쉽게 부영양화 되기 쉽다.

특히 호수의 부영양화는 수질문제와 더불어 식물플랑크톤의 종조성과 현존량에 중요한 영향을 미치며, 상수원으로 이용하는 호수의 경우, 취·정수장에서 식물플랑크톤으로 인한 이수장애가 발생하기도 하는데 주로 여과지 조기폐쇄, 응집 및 침전장애, 이취미 유발이 해당되었다(국립환경과학원, 2009).

본 연구 대상 3개 호수(사연호, 대암호, 회야호)는 모두 울산지역의 생활용수와 공업용수 등으로 이용되고 있으며, 그 중 사연호의 유역면적은 124.1 km<sup>2</sup>, 저수면적 1.9 km<sup>2</sup>, 만수위 저수용량 25.0 백만 톤, 유효 저수량은 20.0 백만 톤이다. 주요 유입하천으로는 구량천, 마병천, 인보천, 반곡천이 있으며, 대곡천으로 유출된다. 대암호의 경우, 유역면적 69.7 km<sup>2</sup>, 총저수용량은 13.1 백만 톤, 유효저수용량은 5.0 백만 톤이며, 유입하천으로는 보은천, 둔기천, 출강천이 있으나 집수량의 80~90%는 원동취수장에서 도수관을 통하여 낙동강 원수를 유입하며, 주요 유출하천은 태화강 수계이다. 회야호는 유역면적 125.5 km<sup>2</sup>, 만수위 저수량 21.0 백만 톤, 연평균 저수량 11.0 백만 톤이며, 주 유입하천은 회야강, 곡천천, 대북천, 덕계천 등이 있으며 다시 회야강으로 유출된다. 회야호 역시 수자원이 부족한 갈수기에는 낙동강 원동취수장에서 취수된 원수

가 호수로 유입되어 이용되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 울산지역의 상수원 호수인 사연호, 대암호, 회야호의 호수유역 오염원, 오염부하량을 조사하고, 호수 수질과 식물플랑크톤 분포 특성을 파악하여 향후 이들 호수의 지속적이고 효율적인 관리를 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지점 및 조사기간

본 연구는 울산시에서 주요 상수원으로 이용하는 사연호, 대암호, 회야호 등 3개 호수를 대상으로 하였으며 조사지점은 호소환경조사지침(환경부, 2009)에 따라 유입부와 호수 중앙, 유출부 등 2~3개 지점을 선정하였으며, 조사기간은 2010년 2월부터 12월까지 매월 표층수를 채수하였다(Fig. 1).

### 2.2. 호수유역 기상, 오염원 및 오염부하량

호수 유역의 강우량과 유입, 방류량 자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)과 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)의 일자료를 사용하였다. 오염원의 경우, ArcGIS 기반의 수문해석 프로그램인 Arc Hydrotool을 이용하여 호수로 유입하는 주요 지천을 중심으로 호수 상류 유역을 소유역으로 분할한 후, 각 유역에 해당하는 행정구역을 추출하고 유역 내 포함되는 행정구역 점유율을 적용하였다. 사연호 등 3

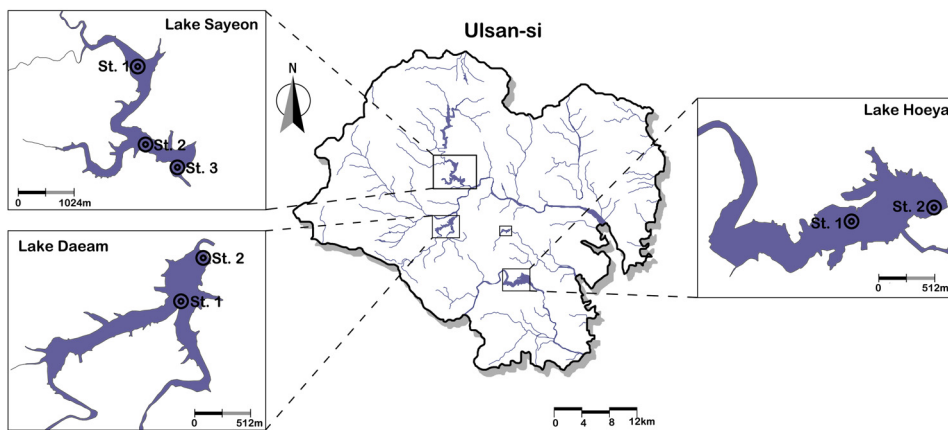


Fig. 1. Map showing watershed and the survey site.

개 호수의 오염부하량은 “수계오염총량관리지침”(국립환경과학원, 2008)에서 제시한 부하량 산정방법과 원단위를 적용하여 유역 내 발생부하량과 배출부하량을 산정하였다.

2.3. 호소수질 및 식물플랑크톤 군집

수질조사항목 중 수온, 수소이온농도 (pH), 용존산소량 (Dissolved oxygen, DO), 전기전도도 (Conductivity, EC)는 휴대용 수질자동측정기 (YSI 556MPS)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 투명도는 투명도판 (지름 20 cm, 백색/흑색 원판)으로 측정하였다. 실험실 분석항목은 현장 시료를 냉암소에서 보관하여 가능한 한 빨리 실험실로 옮긴 후, 생화학적산소요구량 (Biochemical Oxygen Demand, BOD), 화학적산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD), 부유물질 (Suspended Solids, SS), 클로로필 a (Chlorophyll-a), 총대장균군수 (Total Coliforms), 분원성 대장균군수 (Fecal Coliforms), 총질소 (Total Nitrogen, TN), 총인 (Total Phosphorus, TP), 암모니아성 질소 (Ammonium Nitrogen, NH<sub>3</sub>-N), 질산성질소 (Nitrate Nitrogen, NO<sub>3</sub>-N), 인산염인 (Phosphate Phosphorus, PO<sub>4</sub>-P)는 수질오염공정시험 방법에 준하되 필요한 경우 국제적으로 통용되고 있는 표준시험방법 (Standard methods, 2005)에 따라 분석하였다. 호수별 영양상태 분석은 조사기간 동안 측정된 자료 중 클로로필 a 농도와 총인 농도를 이용하여 부영양화 단계를 수정 Carlson 지수인 TSI<sub>m</sub> (Aizaki, 1981) 기준으로 산정하였고, 산정된 지수가 40 미만이면 빈영양호, 40~50이면 중영양호, 50을 초과하면 부영양호로 구분하였다.

식물플랑크톤을 분석하기 위해 현장에서 채취한 정

량시료를 Lugol 용액으로 고정하고 실험실로 옮겨 48 시간 이상 침강시킨 후 상등액을 제거하고 5배 이상 농축하였다. 농축된 시료 1 mL을 정량 분석용 Sedgwick Rafter 격자 슬라이드에 옮긴 후 10분 이상 침전시킨 다음 광학현미경 (Zeiss, Axioskop, Germany)을 이용하여 200배~1,000배율로 검경하면서 종별로 동정한 후 세포수를 계수하고 현존량은 단위부피 (mL)당 세포수로 산출하였다. 식물플랑크톤의 종 동정은 한국담수조류도감 (정, 1993)과 일본 담수조류도감 (Masaru, 1977) 등에 따라 실시하였다. 식물플랑크톤의 군집 구조의 특성을 파악하기 위하여 우점도 지수 (Dominance index)는 Simpson (1949)의 우점도 지수 (DI)를 사용하였고, 종 다양도 지수는 Shannon and Weaver (1963)의 공식 (H')를 이용하여 월별 출현 개체군을 분석하였다.

- Dominance Index, DI :  $\lambda = \frac{SUM Ni^x (Ni - 1)}{N^x (N - 1)}$

- Diversity index, H :  $H' = -SUM [Pi^x Log_e (Pi)]$

(N: 개체군 총 개체수, Pi: 총 출현개체수에 대한 i종의 개체수 비율)

3. 결과 및 고찰

3.1. 수리수문

2010년 2월부터 12월까지 조사기간 동안 울산지역 3개 호수 수리수문 현황의 경우, 사연호는 연간 평균 저수위 53.4 EL.m, 평균 유입량 1.7 m<sup>3</sup>/s, 평균 방류량 1.8 m<sup>3</sup>/s를 보였으며, 대암호의 연간 평균 저수위는 47.0 EL.m, 유입량과 방류량은 조사기간 동안 평균 3.6 m<sup>3</sup>/s를 보였으며, 유입량의 경우 강우기와 비례하여 증가하

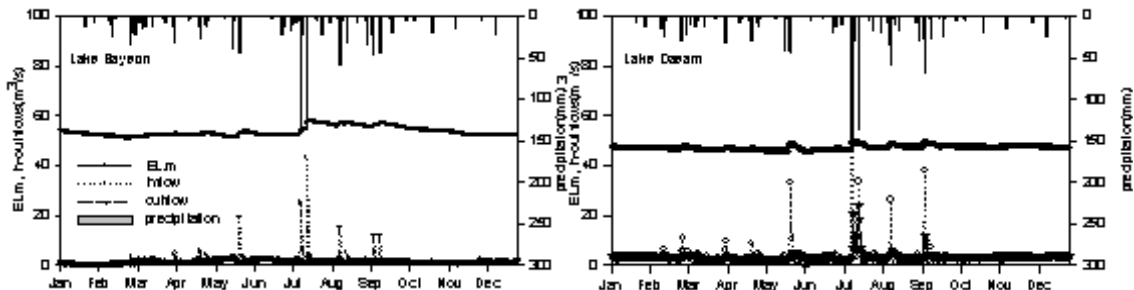


Fig. 2. Daily variations of hydrological factors of the lake Sayeon and Daeam in 2010.

였으나, 방류량은 연중 일정한 경향을 보였다(Fig. 2).

### 3.2. 오염원 및 오염부하량 평가

호수 수질에 영향을 미칠 수 있는 오염원 및 오염부하량의 경우, 인구에 의한 생활 오염원과 가축사육에 의해 발생하는 축산 오염원, 공장 등 산업시설에서 유출되는 산업계 오염원 등을 점오염원으로 구분하고, 논, 밭, 임야 등 유역 내 토지이용으로 인해 발생하는 비점오염원으로 구분하여 나타내었다(Table 1, 2). 오염물질은 수체로 직접 유입되기도 하지만, 강우시 토양층을 통해 비점오염원의 형태로 유입되기도 하며 오염물질별로 각종 처리시설 등을 통해 제거되는 양이 다르므로 발생량과 배출량은 차이가 있을 수 있다. 총 BOD 배출부하량은 대암호에서 3,277 kg/day 로 가장 높았으며, 그 중 토지계 등 비점오염원이 차지하는 비율이 90%를 보였으며, 그 외 생활계, 축산계 등

점오염원이 10%를 차지하였다. 총 TP 배출부하량의 경우, 회야호에서 186 kg/day 로 조사대상 호수 중 가장 높게 나타났는데, 이는 유역 내 인구 밀도가 높고 축산계 오염원이 많아 점오염원이 97%, 그 외 토지계 등 비점오염원이 3%의 비율을 나타내었다.

### 3.3. 수질 및 부영양화도

식물플랑크톤 성장과 천이를 일으키는 중요한 요인 중 하나인 수온의 경우, 사연호에서는 평균 17.7 °C (3.7~28.0 °C), 대암호 18.0 °C(4.4~29.5 °C), 회야호 17.6 °C(3.8~30.6 °C)의 범위를 보였으며, 수소이온농도(pH)는 사연호에서 연평균 8.1, 대암호 8.5, 회야호 8.0의 범위를 나타내었다. 수온의 영향을 받는 용존산소농도는 사연호에서 평균 10.8 mg/L(7.9~14.0 mg/L), 대암호 12.4 mg/L(9.5~17.7 mg/L), 회야호 10.1 mg/L(8.8~14.2 mg/L)로 호수수질환경기준 Ia(아주 좋음)에 해당되었으며, 수온이 낮은 겨울철(2월)에는 용

Table 1. Pollution sources of Lakes Sayeon, Daeam, Hoeya

	Point pollution source						Nonpoint pollution source					
	Domestic	Livestock (%)					Land use(km <sup>2</sup> ) (%)					
		Korean cattle	Diary cattle	Pig	Etc.	Sub Total	Paddy	Crop land	Forest	Pasture	Etc.	Sub Total
Lake Sayeon	3,241	5,685 (0.3)	429 (3.7)	11,636 (7.6)	135,963 (88.5)	153,713 (100)	4.4 (3.5)	13.6 (11.0)	93.0 (75.0)	4.9 (4.0)	8.1 (6.5)	124 (100)
Lake Daeam	2,584	915 (0.6)	5 (0.0)	222 (0.1)	154,568 (99.3)	155,710 (100)	1.6 (2.3)	4.7 (6.8)	53.9 (77.4)	2.4 (3.4)	7.0 (10.1)	69.6 (100)
Lake Hoeya	76,269	1,031 (1.4)	1,203 (1.6)	15,584 (20.5)	58,069 (76.5)	75,887 (100)	3.0 (2.4)	14.8 (11.8)	83.5 (66.5)	12.6 (10.0)	11.6 (9.2)	125.5 (100)

Table 2. Comparison of BOD, TN, TP generation loads by point and nonpoint sources.

	BOD (kg/day)		TN (kg/day)		TP (kg/day)	
	Point(%)	Non-Point(%)	Point(%)	Non-Point(%)	Point(%)	Non-Point(%)
Lake Sayeon	5,446(91)	539(9)	1,131(75)	383(25)	349(92)	32(8)
Lake Daeam	1,970(40)	2,936(60)	409(19)	1,797(81)	140(45)	172(55)
Lake Hoeya	15,694(98)	293(2)	3,833(92)	344(8)	901(97)	25(3)

Table 3. Comparison of BOD, TN, TP Discharge loads by point and nonpoint sources.

	BOD (kg/day)		TN (kg/day)		TP (kg/day)	
	Point(%)	Non-Point(%)	Point(%)	Non-Point(%)	Point(%)	Non-Point(%)
Lake Sayeon	679(56)	539(44)	346(47)	383(53)	37(54)	32(46)
Lake Daeam	341(10)	2,936(90)	134(7)	1,797(93)	14(8)	172(92)
Lake Hoeya	1788(94)	107(6)	1319(82)	294(18)	625(97)	18(3)

존산소 포화도가 비교적 높았고 수온이 증가하기 시작하는 봄철과 여름철에 감소하는 경향을 보였다. 대암호와 회야호의 경우, 여름철 고수온기에 용존산소 농도가 일시적으로 증가하였는데, 이는 표층을 중심으로 남조류 개체수가 증가하여 이들의 광합성으로 인해 용존산소 포화도가 증가한 것으로 보인다. 전기전도도의 경우, 사연호에서 평균 126.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (115.8~139.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )으로 조사대상 호수 중 오염도가 낮았고, 대암호 232.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (79.5~456.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 회야호 272.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (174.0~501.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 분포를 보였으며, 월별로는 낙동강 유입량이 비교적 많았던 1~2월, 12월에 높았다.

호수의 유기물 오염도를 나타내는 COD의 경우, 사연호에서 평균 4.7 mg/L(3.8~5.9 mg/L), 대암호 5.5 mg/L(3.3~8.0 mg/L), 회야호 4.7 mg/L(3.5~6.1 mg/L)로 호수환경기준으로 보통(III)을 나타내었다. 조류발생 정도를 나타내는 클로로필 a는 사연호에서 평균 12.5 mg/m<sup>3</sup>(5.1~23.5 mg/m<sup>3</sup>)로 연중 농도 변화폭이 크지 않았으며, 회야호에서는 평균 13.1 mg/m<sup>3</sup>(7.2~47.2 mg/m<sup>3</sup>)로 겨울철인 2월에 조류 농도가 높았고, 그 외에는 비슷한 분포를 보였다. 대암호에서는 평균 39.5 mg/m<sup>3</sup>(9.3~100.9 mg/m<sup>3</sup>)로 호수수질환경기준 나쁨(V)상태

를 보였으며, 겨울철(2월)에는 규조류, 수온이 증가하는 여름철부터 가을철(7~10월)까지는 남조류 개체수가 증가하여 연중 클로로필 a의 농도가 높았다.

총질소(TN)는 사연호에서 평균 0.900 mg/L(0.411~1.395 mg/L)로 조사대상 호수 중 가장 낮은 분포를 보였고, 대암호 1.609 mg/L(0.385~3.148 mg/L), 회야호 1.646 mg/L(0.482~2.973 mg/L)의 범위를 나타내었다. 암모니아성질소(NH<sub>3</sub>-N)는 사연호 0.052 mg/L(0.023~0.134 mg/L), 대암호 0.042 mg/L(0.021~0.077 mg/L), 회야호 0.121 mg/L(0.035~0.283 mg/L)의 범위를 나타내었다.

총인(TP)은 사연호 0.025 mg/L(0.010~0.050 mg/L), 대암호 0.046 mg/L(0.022~0.066 mg/L), 회야호 0.034 mg/L(0.014~0.055 mg/L)의 범위를 보였으며, 인산염 인(PO<sub>4</sub>-P)은 사연호에서 평균 0.008 mg/L, 대암호 0.011 mg/L, 회야호 0.010 mg/L의 농도를 보였다.

울산지역 상수원 호수의 영양단계를 평가하기 수정 Carlson 지표(TSI<sub>m</sub>)의 평가 기준에 따라 부영양화 지수가 40 미만일 경우 빈영양(Oligotrophic), 40~50은 중영양(Mesotrophic), 50 이상일 때 부영양(Eutrophic)

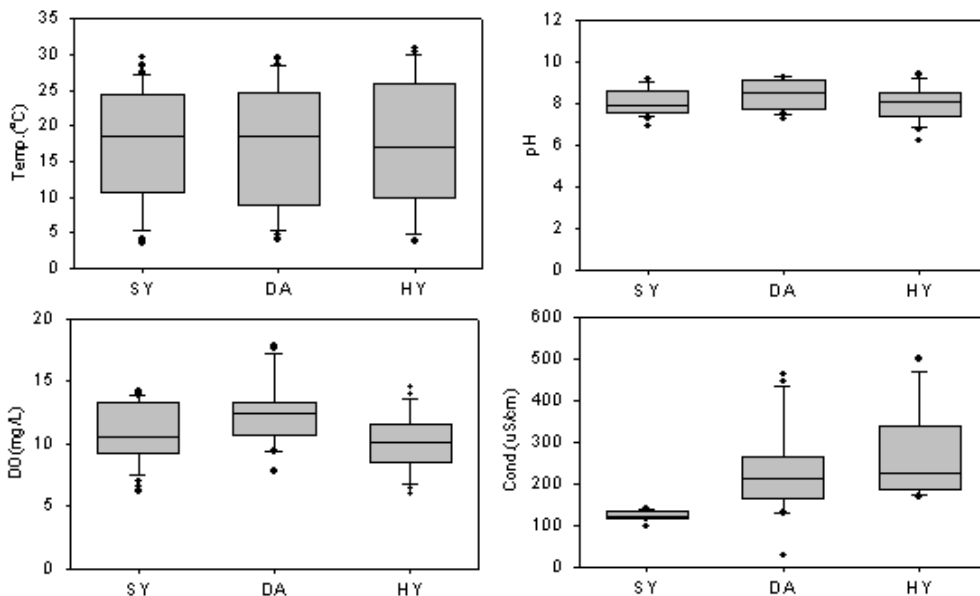


Fig. 3. Box Plot of water qualities (Temperature, pH, DO, Conductivity) indicating minimum, 10%, 25%, median, 75%, 90% and maximum in each reservoir (SY: Lake Sayeon, DA: Lake Daeam, HY: Lake Hoeya).

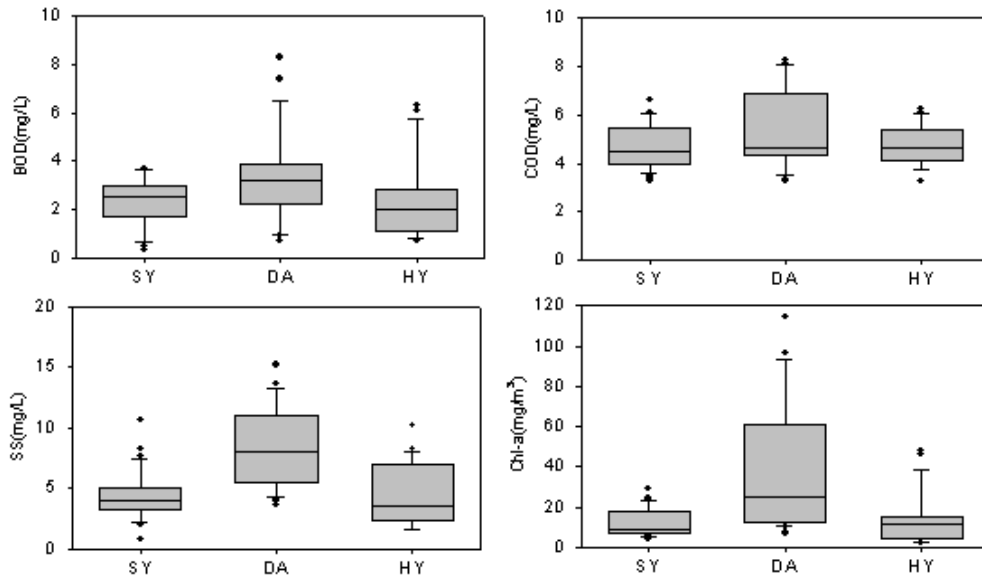


Fig. 4. Box Plot of water qualities (BOD, COD, SS, Chl-a) indicating minimum, 10%, 25%, median, 75%, 90% and maximum in each reservoir (SY: Lake Sayeon, DA: Lake Daeam, HY: Lake Hoeya).

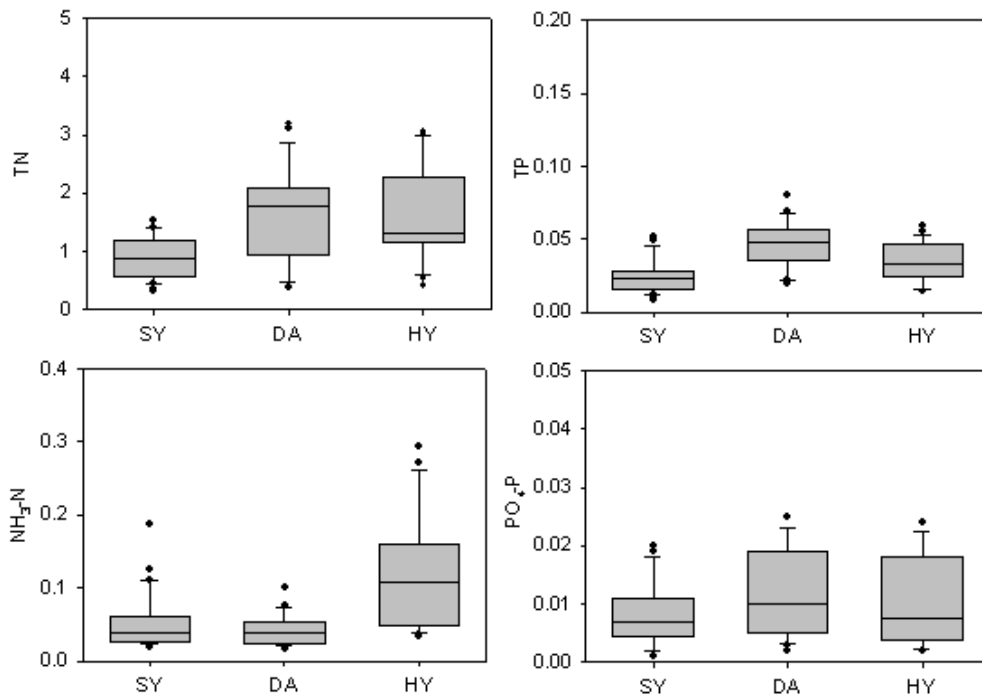


Fig. 5. Box Plot of water qualities (TN, TP, NH<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P) indicating minimum, 10 %, 25 %, median, 75 %, 90 % and maximum in each reservoir(SY: Lake Sayeon, DA: Lake Daeam, HY: Lake Hoeya).

으로 평가하였다. 대암호의 경우, 조사기간 동안 평균 61(50~70)으로 연중 부영양상태를 나타내었고 사연호와 회야호에서는 각각 53(43~60), 53(37~63)으로 6월과 7월에 빈영양 또는 중영양, 그 외에는 부영양상태를 보였다(Fig. 6).

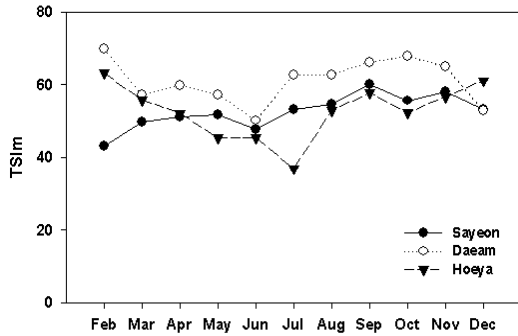


Fig. 6. Monthly changes of TSM in the Lake Sayeon, Daeam and Hoeya.

3.4. 식물플랑크톤 분석

울산지역 상수원 호수에서 출현하는 식물플랑크톤 분석결과, 사연호에서는 총 111종이 조사되었고, 분류군별로는 녹조류가 51종(45.9%), 규조류 45종(40.5%), 남조류 9종(8.1%), 기타 편모조류 6종(5.4%)으로 나타났다. 식물플랑크톤의 현존량은 조사기간 동안(2010년 2~12월) 평균 1,662.4 cells/mL(337~4,213 cells/mL)의 범위로 출현하였으며 가을철(11월)에 4,213 cells/mL로 가장 많은 개체수를 나타내었고, 겨울철(2월)에 337 cells/mL로 가장 낮았다. 분류군별 주요 우점종을 살펴보면, 규조류는 *Synedra acus*, *Aulacoseira ambigua*, *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira*

*distans*, *Aulacoseira granulata* 등 5종이 주요 우점종으로 출현하였으며 편모조류는 *Cryptomonas* sp., 남조류는 *Oscillatoria* spp., *Anabaena* spp. 등의 출현 빈도가 높은 것으로 조사되었다. 계절별로는 겨울철(2월, 12월)에 편모조류인 *Cryptomonas* spp., *Dinobryon* sp., 규조류 *Fragilaria crotonensis*, 봄철(3~5월)에는 규조류 *Synedra acus*, *Aulacoseira ambigua*, 편모조류 *Rhodomonas* spp., 여름철(6~8월)에는 규조류 *Fragilaria crotonensis*, 남조류 *Anabaena* spp., 가을철(9~10월)에는 규조류인 *Aulacoseira distans*가 주로 출현하는 것으로 조사되었다.

대암호에서는 총 95종이 출현하였으며, 분류군별로는 녹조류 35종(36.8%), 규조류 43종(45.3%), 남조류 11종(11.6%), 기타 편모조류 6종(6.3%)으로 조사되었다. 현존량은 조사기간 동안 평균 4,649 cells/mL(272~15,254 cells/mL)의 범위를 보였고, 겨울철(2월)에 규조류가 우점하면서 현존량이(15,254 cells/mL) 가장 높았고, 봄철(5월)에 평균 620 cells/mL로 가장 낮았다. 분류군별 주요 우점종을 살펴보면, 규조류 *Stephanodiscus* spp., *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira ambigua*가 주요 우점종으로 출현하였으며 남조류 *Anabaena* spp. 등의 출현 빈도가 높은 것으로 조사되었다. 계절별로는 겨울철(2월, 12월)에 규조류 *Stephanodiscus* spp., *Aulacoseira ambigua*, *Aulacoseira granulata*, 봄철(3~5월)에는 규조류 *Stephanodiscus* spp., 여름철(6~8월)에는 남조류에 속하는 *Anabaena* spp., 가을철(9~10월)에는 규조류인 *Fragilaria crotonensis*, 남조류인 *Microcystis aeruginosa*, 주요 우점종으로 출현하였다.

회야호에서는 총 104종의 식물플랑크톤이 출현하

Table 4. Annual water quality of the three lakes based on Korea's lake water quality standards

	pH	DO (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Coliform Group (MPN.100 m/L)	
								Total	Fecal
Sayeon	8.1	10.8 (I a)	4.7 (III)	4.4 (I b)	12.5 (II)	0.895 (IV)	0.025 (II)	17 (I a)	8 (I a)
Daeam	8.5	12.4 (I a)	5.5 (IV)	8.5 (III)	39.5 (V)	1.609 (VI)	0.046 (III)	8 (I a)	1 (I a)
Hoeya	8.0	10.1 (I a)	4.7 (III)	4.5 (I b)	13.1 (II)	1.646 (VI)	0.034 (III)	18 (I a)	2 (I a)

는 것으로 조사되었으며, 분류군별로는 녹조류 49종 (47.1%), 규조류 36종(34.6%), 남조류 10종(9.6%), 기타 편모조류 9종(8.7%)으로 나타났다. 식물플랑크톤의 현존량은 평균 1,408 cells/mL(132~4,544 cells/mL)의 범위였으며 겨울철(2월)에 4,544 cells/mL로 가장 많은 개체수를 나타내었고, 봄철(5월)에 132 cells/mL로 가장 낮았다. 분류군별 주요 우점종을 살펴보면, 규조류 *Stephanodiscus* spp., *Cyclotella* spp., *Fragilaria crotonensis* 등 3종이 주요 우점종으로 출현하였으며 녹조류 *Eutetramorus globosus*, *Coelastrum microporum*, 남조류 *Oscillatoria* spp. 등의 출현 빈도가 높으므로 조사되었다. 계절별로는 겨울철(2월, 12월)에 규조류 *Stephanodiscus* spp., 봄철(3~5월)에는 규조류 *Stephanodiscus* spp., 녹조류인 *Eutetramorus globosus*, 여름철(6~8월)에는 규조류인 *Cyclotella* spp., *Synedra acus*와 녹조류에 속하는 *Oocystis* spp., 가을철(9~10월)에는 남조류 *Anabaena* spp., *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria* spp., 규조류 *Aulacoseira granulata*가 주로 조사되었다.

상수원 호수별 식물플랑크톤 군집구조를 분석하기 위해 월별 종 다양도지수(H')와 우점도지수(DI)를 비교 해 본 결과, 종 다양도와 우점도 지수는 역의 상관관계를 보였으며, 사연호에서는 규조류의 출현량이 많았던 11월에 우점도 지수가 높았고, 대암호의 경우, 규조류 *Stephanodiscus* spp.이 우점하였던 2월과 남조류 *Anabaena* spp. 출현량이 많았던 10월에 우점도 지수는 높고 종다양도는 낮은 경향을 보였다. 회야호에서는 *Stephanodiscus* spp.의 현존량이 높았던 2월에 우점도가 높은 것으로 나타났다(Fig. 7, 8).

울산지역 상수원 호수별 수질항목과 식물플랑크톤 상관분석결과, 3개 호수 모두 유기물 항목인 COD, SS와 상관관계수가 높게 나타났으며(사연호  $r^2=0.725$ ,  $p<0.05$ , 대암호  $r^2=0.896$ ,  $p<0.01$ , 회야호  $r^2=0.885$ ,  $p<0.01$ ), 영양염류 항목의 경우, 사연호에서는 총인과 전체 식물플랑크톤 현존량의 상관도가 높게 나타난 반면( $r^2=0.722$ ,  $p<0.05$ ), 대암호와 회야호에서는 질소 계열 항목과 유의한 상관성을 보이는 것으로 분석되었다(Table 5).

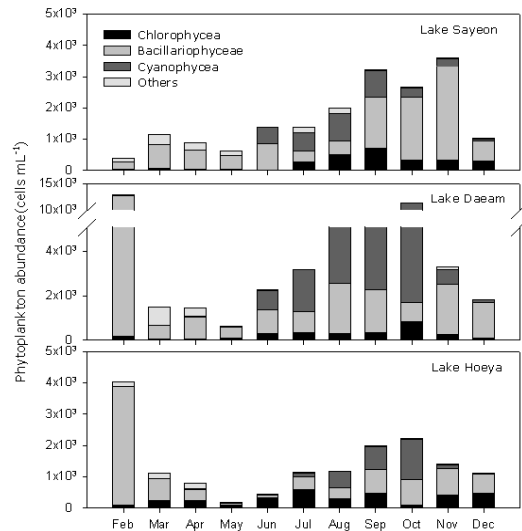


Fig. 7. Monthly variations of phytoplankton abundance during the survey period in the Lake Sayeon, Daeam, Hoeya.

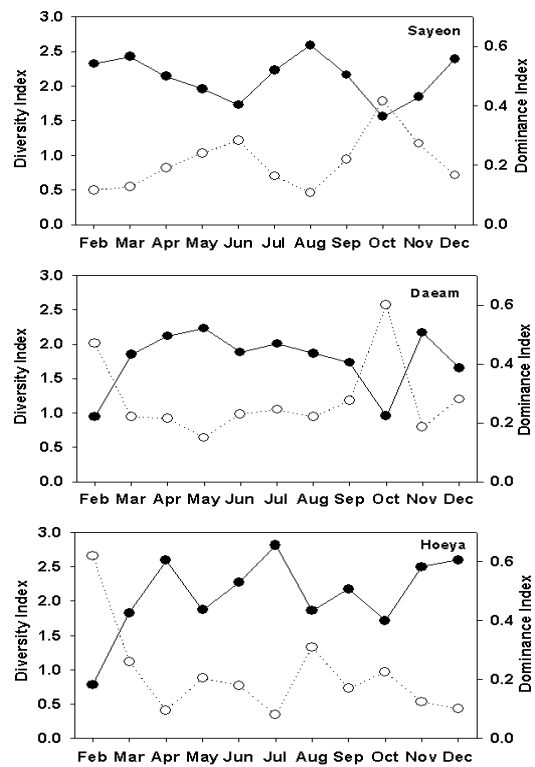


Fig. 8. Monthly changes of phytoplankton diversity index (H') and dominance index (DI).

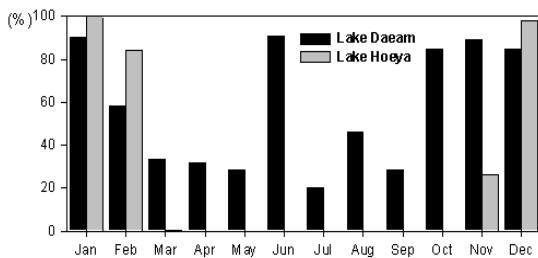
●— Diversity Index(H')    ●— Diversity Index(H')  
 ○- - Dominance Index(DI)    ○- - Dominance Index(DI)



**Table 5.** Correlation analysis between phytoplankton and environmental factors in the Lake Sayeon, Daeam and Hoeya

		Temp.	Secchi	DO	COD	SS	Chl.a	TN	NH <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	TP	PO <sub>4</sub>
Lake Sayeon	Total Phytoplankton	.562	-.665*	-.731*	.725*	.808**	.939**	-.263	.226	.103	.722*	-.231
	Chlorophycea	.622*	-.681	-.739**	.796**	.436	.805**	-.454	.576	-.318	.846**	.075
	Bacillariophycea	.232	-.543	-.474	.477	.833**	.835**	-.003	-.150	.378	.433	-.566
	Cyanophycea	.868**	-.299	-.767**	.696*	.204	.420	-.657*	.700*	-.406	.687*	.508
	Others	-.374	.137	.582	-.548	-.215	-.418	.501	-.001	-.021	-.290	.496
Lake Daeam	Total Phytoplankton	-.041	-.569	.671*	.896**	.736**	.983**	.269	.058	.240	.577	-.378
	Chlorophycea	.509	-.326	-.115	.683*	.371	.605*	-.177	.201	-.333	.291	-.326
	Bacillariophycea	-.480	-.363	.849**	.450	.597	.664**	.615*	-.174	.669*	.417	-.208
	Cyanophycea	.507	-.305	-.053	.710*	.324	.582	-.316	.284	-.423	.299	-.304
	Others	-.562	-.012	.158	-.350	-.161	-.256	-.085	-.203	.092	.033	.490
Lake Hoeya	Total Phytoplankton	-.297	-.371	.392	.885**	.438	.928**	.197	-.411	.343	.572	-.291
	Chlorophycea	-.277	.405	-.331	-.140	.126	-.303	-.545	.294	-.462	.081	.237
	Bacillariophycea	-.532	-.372	.547	.718*	.505	.973**	.455	-.320	.568	.545	-.228
	Cyanophycea	.514	.138	-.338	.474	-.245	-.008	-.512	-.424	-.468	.015	-.274
	Others	-.805**	-.253	.765	.225	.336	.466	.775**	.391	.835**	.303	.061

\*\* : p-value<0.01, \* :p-value<0.05



**Fig. 9.** Nakdong River inflow ratios of the lake Daeam and Hoeya in 2010.

**4. 결론**

본 연구에서는 호수환경 관리대책 마련을 위한 장기 기초 자료 확보를 목적으로 울산지역에 위치하고 있는 상수원호수를 대상으로 유역 내 오염원 및 부하량, 연간 수질변동에 따른 식물플랑크톤 군집 동태를 조사하였다. 기상 및 수리수문 분석결과, 조사기간 동안 연간 강우량은 1,162 mm로 평년(1,275 mm)에 비해 10% 가량 감소하였으며, 연간 평균 유입량과 방류량은 사연호에서 각각 1.7 m<sup>3</sup>/s, 1.8 m<sup>3</sup>/s, 대암호에서는 평균 유입량과

방류량이 3.6 m<sup>3</sup>/s로 일정하게 유지되었다. 유역 내 오염부하량은 배출부하량은 토지계 등 비점오염원이 차지하는 비율이 90% 이상으로 많았으며, 그 외 생활계 축산계 등의 순으로 높은 비율을 나타냈다.

수질변화를 살펴보면, COD의 경우, 사연호와 회야호에서 연간 평균값이 4.7 mg/L로 호수환경기준으로 보통(Ⅲ)을 나타내었다. 조류발생정도를 나타내는 클로로필 a 역시 사연호와 회야호는 약간좋음(Ⅱ), 대암호에서는 나쁨(V)상태를 보였는데, 이는 낙동강 원수를 유입하지 않는 사연호에 비해 회야호와 대암호의 경우, 연중 수질 오염도가 높은 낙동강 원수를 유입하여 호내 영양염의 농도가 다른 호수에 비해 높았기 때문이다. 수정 Carlson 지표(TSI<sub>m</sub>)의 평가 기준에 따라 투명도, Chl-a, TP를 이용한 호수 부영양화도 평가 결과, 특히 대암호에서 평균 61로 연중 부영양 상태를 나타내었고 사연호와 회야호에서는 평균 53으로 6월과 7월에 빈영양 또는 중영양, 그 외에는 부영양상태를 보였다.

울산지역 상수원 호수에서 조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤은 사연호 111종, 대암호 95종, 회야호 104종이 출현하였다. 분류군별로는 사연호와 회야호에서는 녹조류가 40% 이상으로 가장 많은 비율을 차지하

였으며, 그 외 규조류, 남조류, 기타 편모조류의 순으로 나타났으나, 대암호의 경우, 규조류의 출현율이 가장 높은 것으로 조사되었다. 식물플랑크톤 현존량은 사연호에서는 수온이 높아지는 6월부터 11월까지 개체수 밀도가 1,000 cells/mL 이상으로 증가하였으며, 회야호에서는 낙동강 원수가 유입된 2월에 현존량이 가장 높았다. 반면 대암호의 경우, 2월에 15,000 cells/mL 이상으로 최대 현존량을 보인 후, 여름철에는 남조류의 밀도가 증가하는 등 연중 개체수 밀도가 높았다. 월별 우점종 변화를 살펴보면 갈수기 동안 낙동강 원수를 유입하는 대암호와 회야호에서는 겨울철인 2월과 봄철인 3월부터 5월까지 규조류 *Stephanodiscus* spp.가 우점하였으며, 여름철에는 3개 호수 모두 남조류인 *Anabaena* spp.가 우점하는 경향을 보였다. 호수별 식물플랑크톤 군집분석 결과, 종다양도지수는 사연호에서 가장 높았으며, 우점도지수는 규조류와 남조류의 출현량이 많았던 대암호에서 높은 것으로 조사되었다.

낙동강원수 사용량의 경우, 대암호에서 연평균 57%, 회야호에서 25%를 보였다. 대암호의 월별 낙동강 원수 유입량의 경우 1월, 10월부터 12월까지 7백만 톤 이상(총 유입량의 80% 이상을 차지)으로 많았으며, 6월에는 연중 유입량이 가장 적었다. 회야호에서는 월별로는 1~2월, 12월에 낙동강 유입량이 많았으며 갈수기인 1월과 12월에 각각 98%, 100%의 낙동강원수를 유입하였다(Fig. 9). 이상의 결과로부터 울산지역에 위치하는 호수 중 낙동강 원수를 유입원으로 하는 상수원 호수의 수질은 유입 원수의 수질에 의해 크게 영향을 받으며, 이러한 물리적인 요인이 수체 내 영양염의 농도를 증가시키고 1차 생산자인 식물플랑크톤 군집변화와 부영양화도를 일으키는 직접적인 원인으로 작용하는 것으로 보인다. 따라서 이러한 호수들의 수질관리를 위해서는 오염원, 수리수문, 수질뿐만 아니라 유입원수의 수질을 고려한 호수 관리가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

Aizaki, M., Otsuki, A., Fukushima, T., Kawai, T., Hosomi, M., Muraoka, K., 1981, Application of modified Calson's Trophic State Index to Japanese and its

- relationships to other parameters related to trophic stage, Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud, 23, 13-31.
- Eaton, A. D., Clesceri, L.S., Rice, E. W., Greenberg, A. E., 2005, Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 21th ed., American Public Health Association.
- Guillermo, C., 2009, The use of phytoplankton patterns of diversity for algal bloom management, *Limnologica*, 39, 200-208.
- Huh, W. M., Kwon, S. Y., Kim, Y. G., Lee, W. H., Lim, B. J., Kim, B. C., 2006, Spatial and Temporal variations of Environmental Factors and Phytoplankton Community Lake Yongdam, Korea, *Korean Journal of Limnology*, 39(3), 366-377.
- Kim, S. C., Kim, H. S., 2004, Dynamics of Phytoplankton Community and the Physico-chemical Environmental Factors in Youngchun Dam, *Algae*, 19(3), 227-234.
- Kim, W. J., Choi, E. S., 1996, Application of Trophic State index for Korean Lakes, *Proceeding of the Korean Society on Water Environment Conferences*, 11-15.
- Lee, J. W., Lee, H. W., Lee, S. M., Kang, H. M., 1997, Environmental Factors and Phytoplankton Flora in the Sayon and Daeam Reservoirs, 15(1), 19-38.
- Masaru, A., Teru, I., Kozo, I., Hideo, K., Shigeru, K., Hiromu, K., Eiji, T., Kohei, T., Minoru, H., Hiroyuki, H. and Takaki, Y., 1977, Illustrations of the Japanese fresh water algae.
- Ministry of Environment, 2001, Criteria for Lake Environment Survey in Korea.
- Ministry of Environment, 2008, National Pollution Sources Survey.
- National Institute of Environmental Research, 2007, Technical Guidance Manual for Total Water Pollution Load Management System in Korea.
- Shannon, C. E., Weaver, W., 1963, The mathematical theory of communication. Illinois Univ. Press, London.
- Simpson, E. H., 1949, Measurement of diversity, *Nature*, 163.
- Smith, W. H., 1986, Prediction the proportion of blue-green algae in lake phytoplankton, *Can. J. Fish. Aquatic Sci.*, 43, 148-153.
- Tilman, D., Kiesling, R., Sterner, R., Kilman, S. S., Johnson, F. A., 1986, Green, blue-green and diatom algae: taxonomic differences in competitive ability for phosphorus, silicon and nitrogen, *Archive fur Hydrobiologie* 106, 473-85.



