

운문호의 식물플랑크톤 군집동태와 영양단계 평가

서정관* · 유재정 · 이재정 · 양상용 · 정익교¹

(국립환경연구원 낙동강물환경연구소, ¹부산대학교 지구환경시스템학부)

Phytoplankton Community Dynamics and Evaluation of Trophic State in the Lake Unmoon

Jung Kwan Seo*, Jae Jeung Yu, Jay Jung Lee, Sang Yong Yang
and Ik Kyo Chung¹

Nakdong River Water Quality Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Daegu 702-832 and

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

The seasonal dynamics of phytoplankton and trophic state were evaluated weekly at three sites in the Lake Unmoon from May to November 2001. The seasonal succession pattern of phytoplankton community in the Lake Unmoon showed that the dominant species were; i) diatoms during the late spring, ii) dinoflagellates in June, iii) blue green algae, diatoms and dinoflagellates in July, iv) green algae and blue green algae in August, v) blue green algae in September and early November, and vi) diatoms in November. Members of *Microcystis* were dominant from middle August to late October and members of *Aulocoseira* appeared as important species in autumn in the Lake Unmoon. The concentration of chlorophyll-a ranged from 2.4 to 23.0 mg · m⁻³ (average: 8.6 mg · m⁻³) during the study period. Concentrations of total phosphorus were high during the period from July to November with the maximum of 0.028 mg · l⁻¹. The average N/P ratio was 121, indicating that concentrations of phosphorus may determine the high algal biomass in the Lake Unmoon. Concentrations of silicate were higher in the Lake Unmoon (average value: 10.016 mg · l⁻¹) than in other lakes (average values: 1.074-4.408 mg · l⁻¹), suggesting high potential of diatom growth. The average trophic state index in the Lake Unmoon was 52, which was close to eutrophic state, and the trophic state trend was increasing steadily since 1999.

Key Words: chlorophyll-a, phytoplankton, Trophic State Index, Unmoon Lake

서 론

우리나라는 매년 강수량의 계절변화가 크고 연간 강수량의 2/3가 우기에 집중되어 있으므로 하천으로 유입되는 수 자원의 대부분이 일시에 바다로 유출되는 특징을 가지고 있다. 우리나라 연간 수자원 총량 1,276억 m³ 중 74%는 바다 유실, 대기 증발, 지하 침투 등으로 손실되고 26%에 해당하는 331억 m³만이 이용되고 있다. 더욱이 하천으로 유출되는 총 수량 중 수자원으로 이용하기 어려운 홍수기 유출을 제외한 평상시 하천 유출량은 총 하천 유출량의 약 18%(238억

m³)에 불과한 실정이다. 따라서 수자원 확보를 위한 용수 공급 대책으로 인공 호소 축조가 활발히 이루어져 왔으며 만수 면적 1.0 km² 이상인 호소는 전국적으로 40개가 넘으며 10 km² 이상인 대형 호소도 20여 개 이상이 건설되어 있다. 또한 2011년 물 수요량이 1994년 대비 22%(66억 m³) 증가할 것으로 예상됨에 따라 정부는 수자원장기종합계획을 마련하여 2011년까지 7개 다목적 댐과 함께 신규 수자원을 개발할 계획을 가지고 있다(건설교통부 2001).

그러나 이와 같은 인위적인 수자원 확보 후 적절한 수질 관리가 이루어지지 않게 되면 호소의 부영양화가 뒤따르게 되고 더욱이 호소 주변부의 인간 활동과 맞물릴 경우 부영양화 정도가 더욱 가속화되는 문제점이 있다. 부영양화된 호소는 식물플랑크톤의 빈번한 수화(water-bloom)현상으로 인

*Corresponding author (jkseo@me.go.kr)

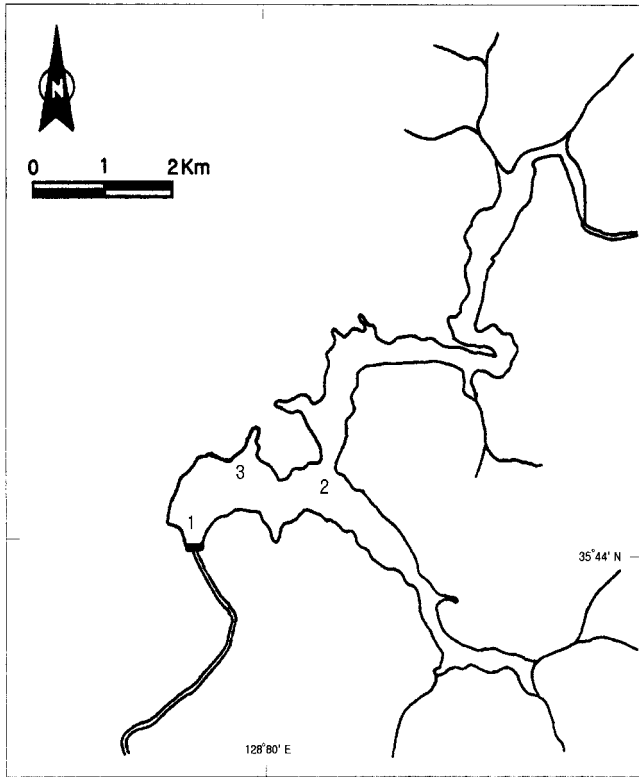


Fig. 1. A map showing the sampling sites in the Lake Unmoon.

해 원수의 수질 관리에 심각한 문제를 초래하여 여과장애, 독소, 불쾌한 냄새로 인한 정수 공정의 장애를 유발하기도 한다. 그러므로 호소의 식물플랑크톤의 동태와 부영양화 정도에 대한 조사는 호소 수질 관리를 위해 필수적으로 수행되어야 할 필요가 있다.

운문호는 대구광역시, 영천시와 경산시 등 금호강 주변도시의 급수난을 해결하고 장래 증가될 용수 수요량을 대비하여 1993년도에 건설되어 총 $1.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 의 저수능력을 가지고 있는 국내 최대 규모의 상수원 전용 댐이다. 또한 중요한 상수원으로 환경부에서 실시하고 있는 조류 예보제 실시대상 5개 호소 가운데 하나로서 1999년부터 조류 예보제가 운영되고 있다(국립환경연구원 2001). 운문호에 관한 주요 연구는 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택 취수 수심 결정에 관한 연구(이 등 2000)와, 저질의 인의 존재 형태별 특성 및 용존 유기물 용출 특성에 관한 보고가 있다(김과 이 2001).

본 조사에서는 운문호에서 생육하는 식물플랑크톤의 계절별 천이 양상과 여름철 수심 별 분포 특성, 영양염 농도 변화를 조사하였으며 이를 바탕으로 하여 호소의 영양단계를 평가하였다.

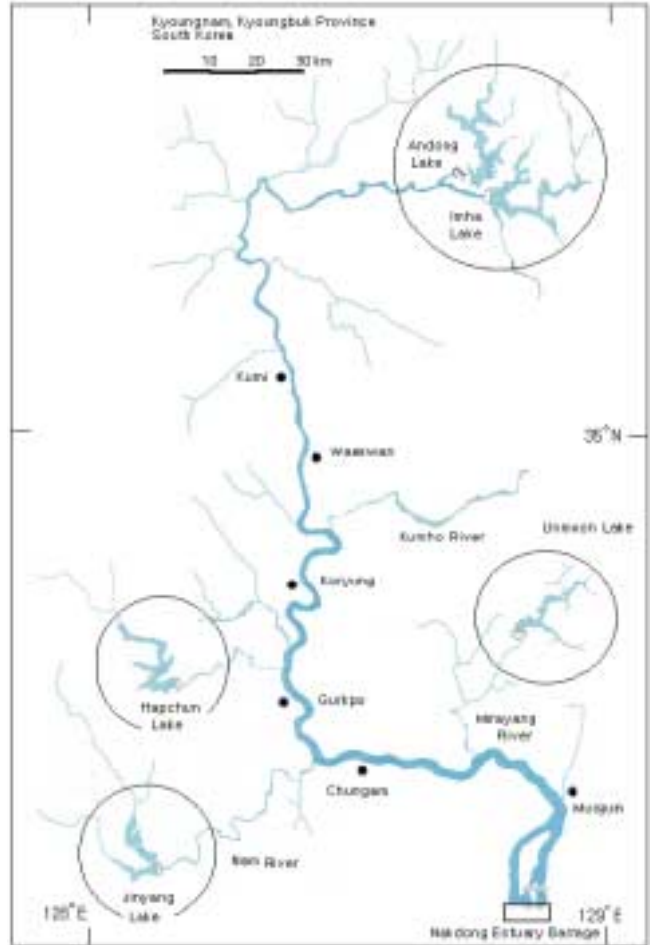


Fig. 2. A map showing the study area in the Nakdong River Basin.

재료와 방법

2001년 5월부터 11월까지 매주 1회씩 운문호 3개 지점에 대해서 조사를 실시하였다(Fig. 1). 운문호와 비교하기 위하여 고수온기인 7월부터 10월까지 낙동강 유역 내 주요호소인 안동호, 임하호, 합천호, 진양호에 대해 월1회 조사를 실시하였다(Fig. 2).

이화학적 수질 조사 항목 중 영양염류(암모니아성 질소, 질산성 질소, 총질소, 규산염, 인산염 인, 총인)는 시료 채수 후 실험실로 즉시 냉장 운반하여 수질오염 공정시험법에 따라 분석하였으며 pH, DO, 수온, 전기전도도, 투명도는 현장에서 측정하였다(환경부 2001).

식물플랑크톤 조사는 루골 용액으로 현장에서 고정된 시료에 대해 48시간 침전시킨 후 5배 이상 농축하였다. 농축된 시료는 Sedgwick Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경(ZEISS, Axioskop) 하에서 종별로 동정 후 계수하였다. 식물플랑크톤의 종 동정은 한국담수조류도감(정 1993)과 일본

Table 1. The monthly mean water level, total precipitation and mean influx in the Lake Unmoon

	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Nov.	Dec.
Mean Water level (E.L. m)	134.3	135.9	139.9	138.0	136.1	136.1	136.1
Precipitation (mm)	73.5	402	137.5	25.7	104.2	92.2	15.6
Mean Influx ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	188.3	2539.7	680.4	64.7	119.4	312.3	93.8

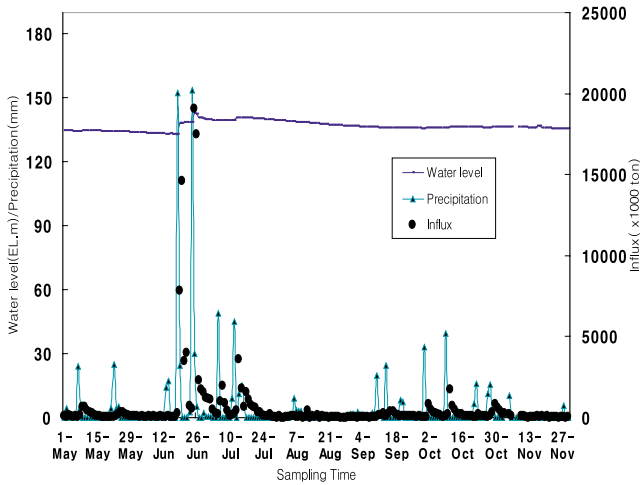


Fig. 3. The monthly mean water level, total precipitation and mean influx in the Lake Unmoon from May to November 2001.

담수조류도감(Masaru et al. 1977)을 참고로 하였다. 클로로필 a 농도는 수질오염 공정시험법에 의해 GF/C로 여과하여 분석하였고, 수심별 클로로필 a 분포 조사의 경우는 형광측정기(BBE, FluoroProbe)를 이용하여 수심 10 m까지 연속적으로 측정하였다.

댐 수문자료는 수자원공사 자료를 이용하였다(수자원공사 2001).

호소의 영양상태는 Carlson(1977)의 투명도를 기준으로 추정하는 연속적 부영양화도 지수인 영양상태지수(TSI)와 Aizaki 등(1981)이 클로로필 a 농도를 기준으로 만든 수정 Carlson 지수(TSI_m)을 이용하여 평가하였다.

결과와 고찰

수문자료

2001년 1월부터 12월까지 운문호 예서의 연간 총 강수량은 1027.9 mm이었고, 조사대상 기간인 5월부터 11월까지의 총 850.7 mm의 강수량을 나타내었다. 또한 조사 대상 기간 동안 일 평균 수위는 E.L. 136.6 m, 일 평균 유입 유량은 $575.3 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었다.

강수량의 경우 5월에서 11월까지의 총 강수량 850.7 mm 중 거의 절반에 해당하는 402 mm의 비가 6월 한달 동안 집중하여 쏟아졌다.

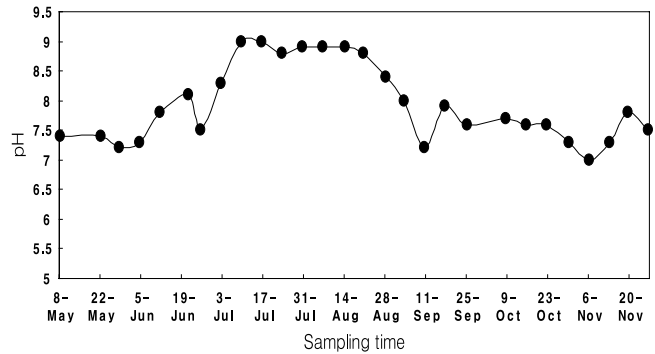


Fig. 4. The seasonal variation of the pH in the surface water of the Lake Unmoon.

Table 2. The seasonal variation of the vertical water temperature in the Lake Unmoon.

Water Depth(m)	Water Temperature(°C)			
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
0	29.0	26.8	23.2	18.6
5	26.5	26.0	22.1	17.5
10	21.7	22.6	21.2	17.3
15	19.2	18.1	17.3	17.4
20	18.0	17.1	16.1	17.0

6월 중순경까지 갈수기가 지속되어 최저 수위인 E.L. 133 m를 나타내던 운문호의 수위는 6월 말에 일시에 쏟아진 강수로 최고 E.L. 143 m까지 상승하였고 유입 유량도 6월 평균 $2,539.7 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로서 최고를 나타내었다 (Table 1)(Fig. 3). 그 결과 운문호의 수위와 유입 유량 역시 6월 말을 기점으로 큰 폭으로 상승하였다.

이화학 수질 요인 변화

수소이온 농도(pH)는 조사기간 동안 표층에서 7.0-9.0(평균: 7.9), 10 m 이하의 수층에서는 6.7-7.2(평균: 6.9)의 범위를 나타냈다(Fig. 4). 특히 7월에서 8월까지 표층에서 평균 8.8의 높은 수치를 기록하였는데 이는 같은 기간 클로로필 a 평균농도가 조사 기간 전체 평균 $8.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 보다 높은 $10.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 로 여름철 표층에서의 활발한 식물플랑크톤 생육 특성을 잘 반영하였다.

수온은 7월 초부터 9월 중순까지 표층에서 25°C 이상의

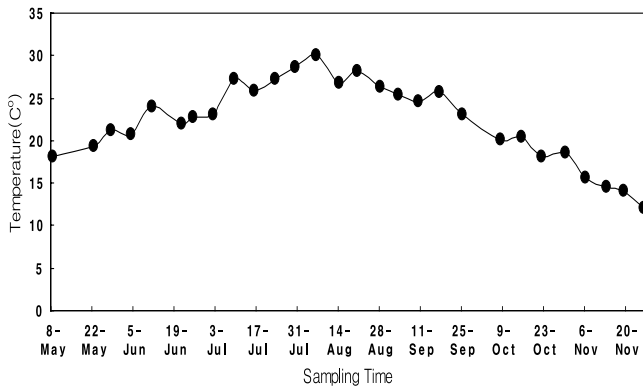


Fig. 5. The seasonal variation of the surface water temperature in the Lake Unmoon.

높은 수온을 유지하였으며 9월 중순 이후부터 서서히 수온이 떨어지기 시작하여 11월 초에는 15°C 내외로 감소하였다 (Fig. 5). 가을철 표층수온이 15°C 이하로 감소하면서 운문호의 식물플랑크톤 중 조성이 남조류에서 규조류로 완전 천이되는 현상이 관찰되었는데 이러한 사실로 미루어 볼 때 운문호의 가을철 식물플랑크톤 중 조성 결정 요인들 중 수온이 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

수층별 온도변화는 7월과 8월에 표층과 저층간의 온도차이가 10°C 이상의 차이를 나타내어 강한 성층이 형성되었으며 9월 이후 성층현상이 약화되기 시작하여 10월 말 경에는 표층과 저층간의 온도차이가 1.6°C로 좁혀져 성층현상이 거의 소멸된 것으로 나타났다 (Table 2).

전기전도도의 경우는 조사기간 동안 계절별, 수층별로 63-83 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 범위를 나타내어 큰 변동을 보여주지 않았으며 값 자체도 전반적으로 낮게 나타났다. 그러나 같은 기간 조사된 안동호와 임하호의 전기전도도 절대값은 최소 160 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 이상의 상대적으로 높은 값을 보였으며, 진양호의 경우는 월별 표층 전기전도도 값이 61-119 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 로 변동이 매우 심한 것으로 나타났다 (Fig. 6). 전기전도도 값의 심한 변동은 잦은 강수현상과 호소내로 유입되는 외부하천의 영향이 크다는 것을 것을 의미한다 (최 등 1998; 박 등 2002). 이러한 관점에서 볼 때 운문호는 외부인자에 의한 수체교란 요인이 다른 호소에 비해 상대적으로 적은 것으로 사료된다.

용존산소(DO) 농도는 표층의 경우 7.5-10.8 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (평균 8.8 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)를 나타내어 조사기간 동안 변동폭이 크지 않은 것으로 나타났다 (Fig. 7). 수심 20 m 이하의 저층의 경우 1.7-5.8 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며 8월과 9월은 1.7 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 의 낮은 값을 보여주었다 (Table 3). 표층 용존산소가 평균 9.7 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 의 높은 농도를 나타낸 7월의 경우 클로로필 a 함량 또한 평균 11.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 으로 가장 높게 나타났는데 이는 수소이온농도(pH)와 마찬가지로 표층에서 식물플랑크

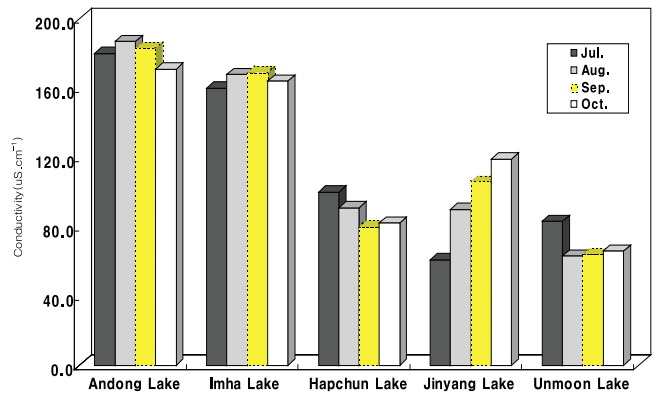


Fig. 6. The conductivity of the lakes in the Nakdong River Basin.

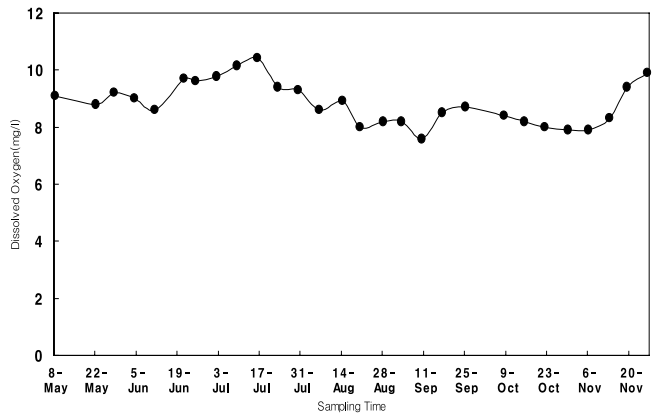


Fig. 7. The seasonal variation of the surface water dissolved oxygen concentration in the Lake Unmoon.

톤 광합성작용에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다 (임 등 2000; 이와 윤 2002; 신과 전 2002).

운문호의 영양염 농도의 변화는 7월부터 11월까지 조사하였으며 표층 총인의 경우 0.003-0.107 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 의 농도범위와 평균농도 0.028 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 을 나타내었다. 이와 같은 결과는 연간 총인 평균농도 (환경부 2001) 0.018 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 에 비해 비교적 높은 값이며 계절적으로는 여름, 가을철에 총인 농도가 높아지는 것으로 나타났다.

7월 초에 0.107 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 의 높은 총인 농도를 보인 것은 6월 말부터 장마가 시작되어 E.L. 133 m를 나타내던 운문호의 수위가 최고 E.L. 143 m까지 상승하는 등 호소 내 유입유량이 크게 증가함에 따라 주변유역 토양에서 유출된 인이 강우와 함께 호소로 유입되었기 때문으로 사료된다 (김 등 1998; 안 2000).

운문호와 같이 유역 내 가정 하수와 산업 폐수 등의 점 오염원이 적고, 비점 오염원이 우세한 지역에서는 유역의 토양에 축적되어 있던 오염물이 강우의 침식에 의해 유출되어 호

Table 3. The seasonal variation of the vertical dissolved oxygen concentration in the Lake Unmoon. (Unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Water Depth	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
0.5 m	9.3	8.1	8.7	7.9
0.5 m	8.8	7.9	8.5	8.2
10 m	6.2	3.8	8.0	7.9
15 m	6.7	4.2	2.1	8.1
20 m	5.8	1.8	1.7	5.6

Table 4. The seasonal variation of vertical phosphate concentration in the Lake Unmoon. (Unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Water Depth	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
0.5 m	0.001	0.002	0.001	0.002
5 m	0.025	0.001	0.001	0.002
10 m	0.034	0.001	0.053	0.003
15 m	0.042	0.004	0.003	0.002
20 m	0.051	0.007	0.0012	0.002

Table 5. Comparison of N/P ratio of the Lake Unmoon with other lakes in the Korea from January to November 2001

Lakes (month)	Andong (1-11)	Imha (1-11)	Hapchun (1-11)	Jinyang (1-11)	Unmoon (1-11)	Unmoon (7-11)	Paldang (1-11)	Daechung (1-11)	Soyang (1-11)
N/P ratio	97.8	88.7	99.8	33.9	77.8	120.8	42.0	81.1	102.6

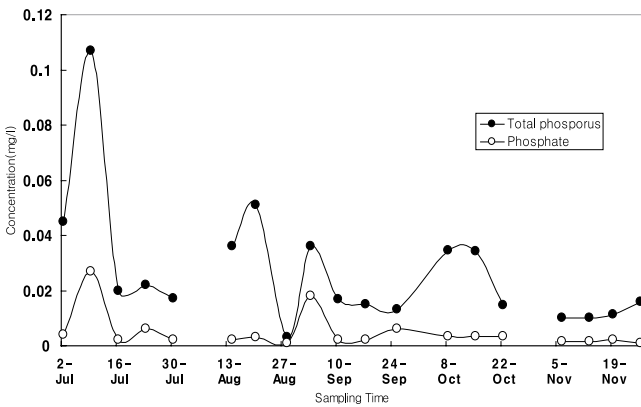


Fig. 8. The seasonal variation of total phosphorus, phosphate concentration in the Lake Unmoon.

소 내로 유입 되어지는 부분이 매우 중요해진다. 특히 질소 등과 같이 물에 잘 녹는 물질은 용존 형태로 유출이 되는 반면에 인은 용존형으로도 유출될 뿐만 아니라 토양에 흡착되어 축적되어 있다가 표토의 침식과 더불어 입자상으로도 유출되므로 강우 시 크게 증가하는 경향을 나타내기 때문이다 (김 등 1998).

인산염 인의 경우는 평균 $0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 전반적으로 낮은 값을 보여주었으며 7월초에 $0.027 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 가장 높은 농도를 나타내었다(Fig. 8). 총인, 인산염 인의 수체 내 연직분포는 저층으로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보여주었으며 7월의 경우 저질토에 가까운 수심 20 m에서 총인, 인산염 인 농도는 각각 $0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.051 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 호수 바닥 퇴적물이 호기성 상태로 존재 할 때는 퇴적물내의 철 이온과 인산염이 결합하여 인산제3철로 고착시키거나, 수산화 제3철로 침전시켜 인산염이 불활성화 되지만, 용존산소가 부족하여 혐기성 상태로 되면

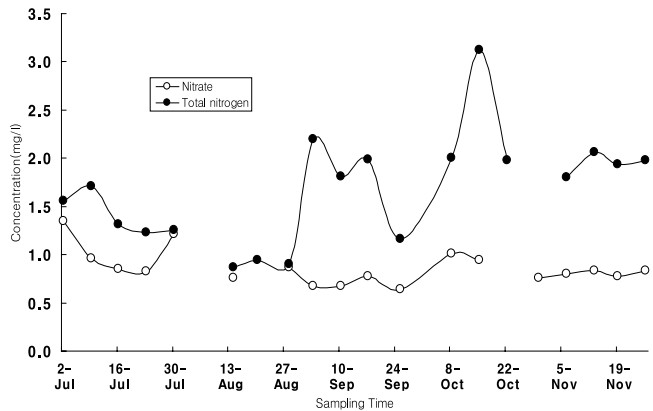


Fig. 9. The seasonal variation of total nitrogen, nitrate concentration in the Lake Unmoon.

저질층의 3가 철에 결합하고 있던 무기인인 철의 환원에 의해 수중으로 용출되게 된다(서와 정 1994; 김과 이 2001). 따라서 본 조사에서 심층으로 갈수록 인산염 함량이 높아지는 경향을 보인 것은 바다 저질층의 혐기성화와 관련이 깊은 것으로 판단된다(Table 4).

총질소의 경우는 7월부터 11월까지 표층에서 평균 $1.738 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 농도를 보였으며 여름철보다 가을철의 농도가 더 높았다(Fig. 9). 질산성 질소 농도는 표층에서 평균 $0.861 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 농도를 나타내었다.

총질소와 총인의 비율인 N/P 비율은 7월부터 11월까지 평균 121을 나타내었는데 이는 한국 호수의 N/P 비가 대개 100 정도로 인이 부족한 사실과 잘 일치하며 윤문호 역시 여름, 가을철 식물플랑크톤의 증식을 결정하는 제한 영양소로서 인(P) 제한성이 강하게 나타났다(Table 5)(김 등 1997).

규산염 농도는 7월에서 11월까지 표층에서 평균 $10.061 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 농도를 나타내어 같은 기간 다른 호수들의 평균

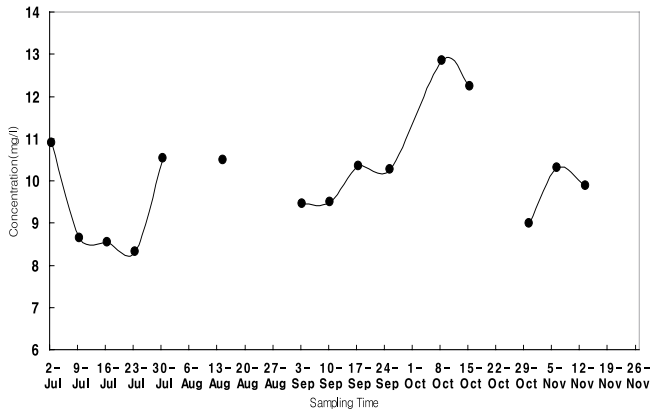


Fig. 10. The seasonal variation of the silicate concentration in the Lake Unmoon.

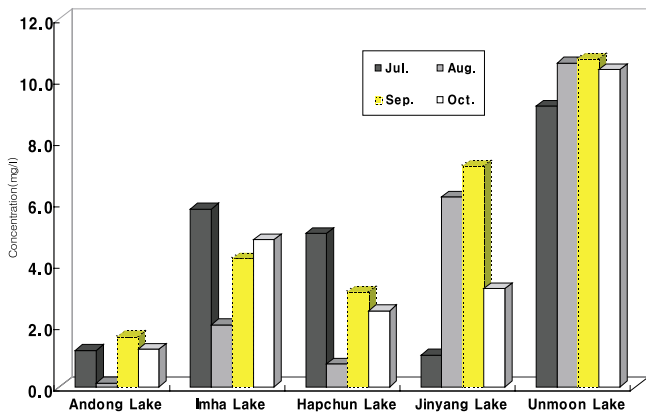


Fig. 11. The silicate concentration of the lakes in the Nakdong river basin from July to November 2001.

규산염농도 1.074-4.408 mg·l⁻¹ 범위보다 월등히 높은 농도 값을 보여주었다(Fig. 11). 규조류가 주요 우점종으로 출현하기 시작하는 11월에는 10월에 비해 규조류에 의한 규산염 섭취가 늘어나 표층 농도 값이 약간 감소하는 경향을 보여주었다(Fig. 10). 규산염은 규조류 증식에 중요한 영양원으로 작용하지만 운문호에서는 계절 변동 없이 연중 매우 풍부하게 존재하는 것으로 나타났다.

식물플랑크톤 천이 양상

운문호의 식물플랑크톤 월별, 계절별 천이 양상은 늦봄까지 규조류가 우점하다가 초여름부터는 편모조류로 천이가 일어나며 곧 남조류, 규조류, 편모조류가 혼재하는 양상을 보였다. 이후 고 수온이 지속되면서 8월초 녹조류가 일시 우점 하였으나 8월 중순 이후부터 10월 중순까지 남조류가 지속적으로 우점 하였다. 가을부터는 남조류가 소멸하고 규조류가 다시 우점하는 양상을 보여주었다(Fig. 12).

이러한 천이 양상은 일반적으로 온대 호수에서 나타나는

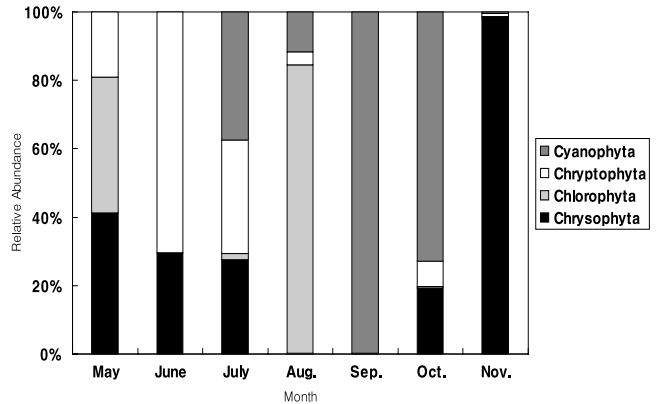


Fig. 12. Monthly variation of algal divisions in the Lake Unmoon from May to November 2001.

조류 천이 양상과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 온대 호수의 경우 봄철에는 증가된 일사량과 수온 그리고 상대적으로 낮아진 포식압으로 인해 규조류 증식이 활발하며, 여름이 되면 표층 영양염 고갈현상으로 규조류가 소멸하고, 운동성을 가진 편모조류가 우점하게 된다. 그리고 늦여름과 초가을에는 군집을 이루며 표층에 부유하는 남조류가 발생하여 가을까지 지속되는 것으로 알려져 있다(Yuri 1999).

5월의 경우 녹조류인 *Chlamydomonas*속이 월초에 우점종으로 출현 하였으나 곧 소멸하면서 규조류인 *Cyclotella*속으로 천이가 일어났다. 그러나 6월에 들어서면서 *Cryptomonas*속과 *Peridinium*속의 우점도가 증가하면서 편모조류가 규조류에 비해 우세하게 나타나는 경향을 보여주었다. 또한 규조류는 *Cyclotella*속에서 *Aulacoseira*속으로 천이가 나타났다. 수온이 25°C를 넘어서기 시작하는 7월초부터는 고수온기에 출현빈도가 높은 남조류가 주요 분류군으로 출현하기 시작하였다. 7월의 경우 조류 분류군의 분포 양상이 다양화 되는 경향을 보여 남조류(평균 188 cell·ml⁻¹), 규조류(평균 342 cell·ml⁻¹), 편모조류(평균 187 cell·ml⁻¹) 등 여러 분류군에서 조류 밀도가 유사하게 나타났다. 주요 출현종으로는 남조류에 속하는 *Anabaena*속과 *Aphanocapsa*속이 있었고, 규조류는 *Aulacoseira*속, 편모조류는 *Cryptomonas*, *Peridinium*속이 주요 종으로 출현하였다. 8월의 경우 녹조류인 *Elakatothrix*속이 일시적으로 우점 하여 8월 한달 동안 1,249-3,482 cell·ml⁻¹의 높은 세포밀도를 기록하였다. 남조류인 *Microcystis*속은 8월 중순부터 주요 종으로 출현하기 시작하여 10월 하순까지 우점 하였다. 9월은 남조류의 우점률이 99% 이상이였으며 남조류 중 *Microcystis*속의 우점률은 9월 초 48%에서 점차 증가하기 시작하여 9월 말경에는 99%로 거의 단일 속이 우점 하는 양상을 보여주었다. 세포수 역시 9월 말 정점 1에서 39,856 cell·ml⁻¹를 기록하여 최고 밀도를 보여주었다. 10월에도 남조류인 *Microcystis*가 계

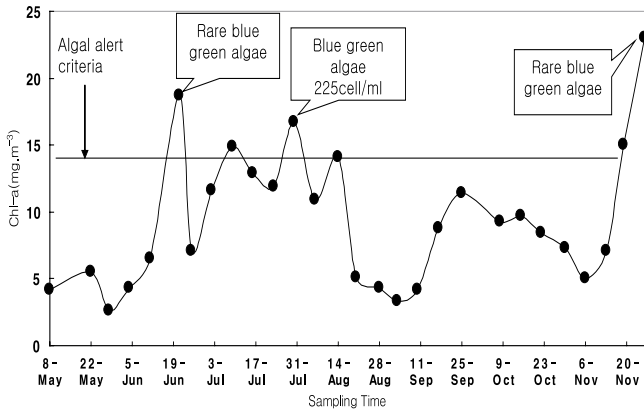


Fig. 13. The seasonal variation of chlorophyll-a concentration in the Lake Unmoon.

속 우점 하는 양상을 보여주었지만 수온하강에 따른 감소현상을 보이면서 10월 20일경에는 평균 $245 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 까지 감소하였다. 수온이 15°C 이하로 떨어지기 시작하는 10월 하순경부터는 *Microcystis*가 소멸되면서 규조류인 *Aulacoseira*속으로 완전한 천이가 일어났다. *Aulacoseira*속은 11월 초 평균 $461 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 에서 11월 말 $4,708 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 로 지속적인 증식 양상을 보이면서 가을철부터 운문호에서 우점하는 대표적인 조류 종으로 출현하였다.

운문호에서의 조류 천이 양상을 98년도 조사(이 등 2000)와 비교했을 때 남조류 발생 시기와 저수온기에 규조류가 주요 분류군으로 출현한 점 등은 일치하였으나, 출현 분류군 및 우점 조류종에서 약간의 차이를 나타내었다. 98년도의 경우 대체적으로 규조류, 편모조류가 우점하는 가운데 가을철에 남조류가 우점하는 양상을 나타내었으나, 본 조사에서는 5월과 8월에 녹조류도 중요한 분류군으로 출현하였다. 이러한 차이는 조사간격의 차이에서 기인한 것으로 보여지며, 98년도의 조사는 1개 정점에 대해 월 1회 조사에 국한 되었기 때문이다. 따라서 조류 천이와 관련된 조사는 월1회 조사보다는 최소 월 2회 이상의 조사가 바람직 할 것으로 여겨진다.

9월부터 10월까지 남조류가 운문호에서 우점종으로 출현 하였지만 조사기간 동안 조류주의보 기준을 초과한 경우는 없었다. 이것은 조류 개체수에 비해 클로로필 a 농도가 평균 $8.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 로 상대적으로 낮게 나타났기 때문이다(Fig. 13). 그러나 앞으로 남조류 우점 시기가 9월이 아닌 수온이 높은 7월 혹은 8월부터 시작된다면 클로로필 a 농도가 조류 주의보 이상을 초과할 가능성이 크므로 여름철 남조류 증식에 대한 보다 면밀한 관찰이 필요할 것으로 판단된다(조류 주의보 기준: 2회 연속 채취시 클로로필 a 농도 $15\text{--}25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 남조류 세포수 $500\text{--}5,000 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 의 두 조건 모두 해당시).

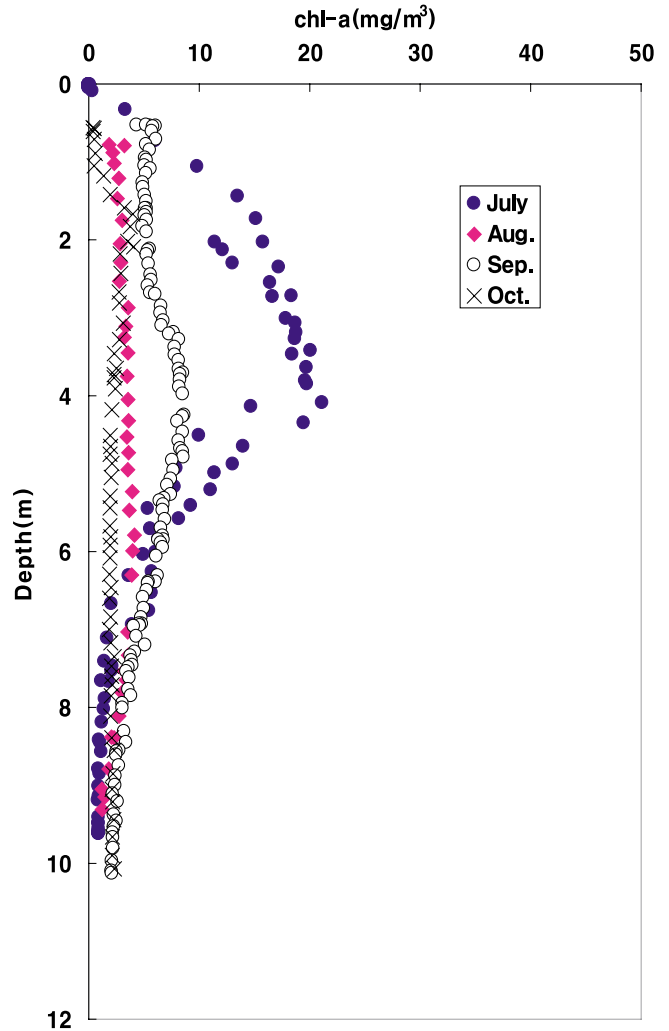


Fig. 14. Vertical distribution of chlorophyll-a concentration in the Lake Unmoon from July to October 2001.

클로로필 a 농도

운문호 표층수의 클로로필 a 농도는 봄철에 낮고 여름철과 늦가을철에 높아지는 경향을 보여주었다. 5월부터 11월까지의 월별 클로로필 a 농도변화는 $2.4\text{--}23.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 의 범위를 나타내었으며 평균 $8.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 을 기록하였다(Fig. 13). 5월, 6월, 9월은 평균 $7.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 이하의 전반적으로 낮은 값을 보여 주었고 7월부터 8월까지는 평균 $10.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 의 값을 나타내었다. 규조류인 *Aulacoseira*속의 우점도가 증가하는 11월부터는 다시 클로로필 a 농도가 증가하여 11월 말경에는 최고 $23.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 을 기록하였다. 클로로필 a 평균농도 만을 고려했을 경우 OECD에 의한 영양단계 기준에서 중영양에서 부영양 단계로 전이하는 단계라고 볼 수 있으며(조 등 1991) 국내 호소와 비교하여 소양호보다는 높고 팔당호보다는 낮은 수준에 해당된다(김 등 2002).

Table 6. Trophic state index (TSI) in the Lake Unmoon from July to November 2001

Lake	Year	TSI			TSIm			Average	
		Chl	TP	SD	Chl	TP	SD	TSI	TSIm
Unmoon	2001	52	52	52	49	53	55	52	52

Table 7. Trophic state index (TSI) range for the evaluation of trophic state in lakes (Kratzer and Brezonik, 1981)

Trophic state index (TSI)	status of nutrition in lake
< 20	highly oligotrophic
30-40	Oligotrophic
45-50	Mesotrophic
53-60	Eutrophic
> 70	Hypertrophic

운문호의 7월에서 10월까지 클로로필 a 농도의 수직 내 수직분포는 호소성층현상과 관련하여 월별 분포특성이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 14). 높은 표층수온으로 인해 수심 20 m인 심층과의 수온이 11°C의 차이를 나타내어 성층현상이 가장 뚜렷하게 나타났었던 7월의 경우 수심 2-4 m 사이에서 클로로필 a 농도가 가장 높게 나타났는데 최고농도가 30 mg·m⁻³에 근접하였다. 그러나 6 m 이후부터는 클로로필 a 농도가 급격히 감소하여 아주 낮은 값을 나타내었다. 9월에는 표층에서 수심 10 m까지 5-10 mg·m⁻³ 사이의 클로로필 a 농도 범위를 보여주었으며 10월에는 수체 내 클로로필 a 수직분포가 수심에 관계없이 거의 일정한 경향을 나타내었다.

이와 같은 클로로필 a의 월별 수직분포패턴은 호소에서 발생하는 수온 성층 현상(thermal stratification)과 밀접한 관련이 있다. 여름철에는 표수층(hypolimnion)에 높은 수온으로 인한 성층이 강하게 형성되어 식물성플랑크톤이 대부분 표수층에 머무르게 되나 9월, 10월 들어 수온 하강으로 성층현상이 점차 약화 되면서 혼합층(mixing layer)이 점차 더 깊어진다. 따라서 운문호의 경우도 가을철 표층수온이 감소함에 따라 표수층의 식물성플랑크톤이 하층으로 혼합이 원활해지게 되어 성층이 완전 파괴되는 늦가을부터는 수체 내 수직 분포 패턴이 상·하층 구별 없이 일정한 경향을 나타낸 것으로 보인다. 여름철 성층현상이 지속되는 8월의 경우 클로로필 a 연직 농도 분포가 일정한 것으로 나타났는데 이는 호소 내에 설치된 수중 폭기조가 가동되는 시기에 조사하였기 때문에 이로 인한 영향이 크게 미친 것으로 여겨진다.

영양단계 평가

운문호의 영양단계를 평가하기 위하여 7월부터 11월까지의 투명도, 클로로필 a 농도, 총인 농도를 영양상태 지수

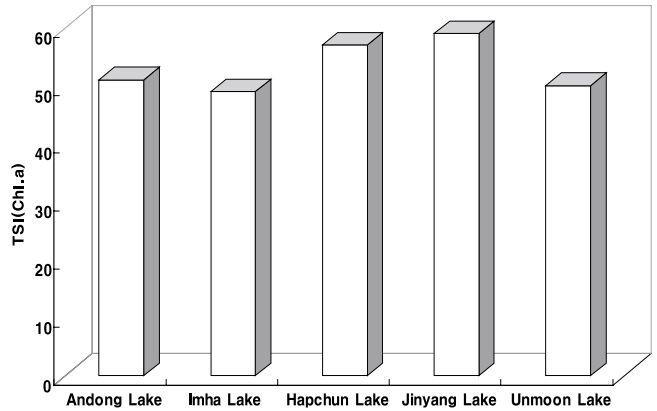


Fig. 15. Comparison of Trophic State Index (TSI) for chlorophyll-a among the lakes in the Nakdong River Basin from July to November 2001.

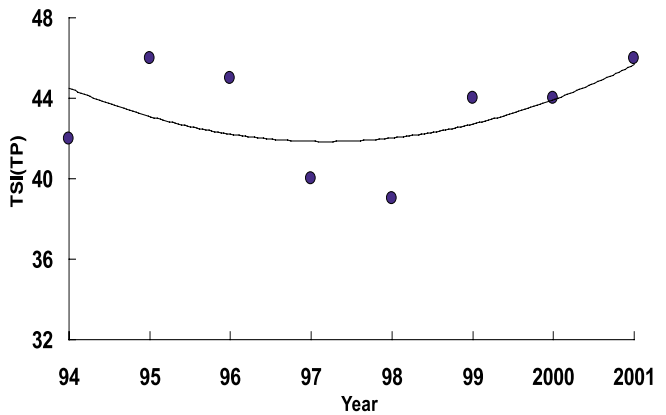


Fig. 16. Trophic State Index (TSI) for TP in the Lake Unmoon from 1994 to 2001.

(TSI, TSIm)로 바꾼 다음 분석하였다. 그 결과 TSI 지수는 평균 52 [(TSI(Chl.a):52, TSI(TP):52, TSI(SD):52)]를 나타내었고, TSIm 지수 역시 평균 52 [(TSm(Chl.a):49, TSm(TP):53, TSm(SD):55)]를 나타내었다(Table 6). 이러한 값은 Kratzer and Brezonik(1981)에 의한 영양상태 지수를 이용한 호소의 영양단계 판정표에 의하면 부영양 상태에 매우 근접한 것이다(Table 7). 동일한 조사 기간 동안 낙동강 권역의 기타 주요 호소들의 TSI(Chl. a) 지수와 비교한 결과 안동호, 임하호, 운문호는 지수범위 49-52를 나타내어 중영양 정도의 영양상태를 보여주었으나, 합천호, 진양호의 경우

는 각각 57, 59를 나타내어 부영양 정도가 심한 것으로 나타났다(Fig. 15)

운문호의 부영양화 정도에 대한 연도별 추세를 알아보기 위하여 1994년부터 총인 항목에 대해 환경부 측정망 자료(환경부 1994-2001)를 이용한 결과 99년 44이던 TSI(TP) 지수가 2001년에는 46으로 나타나 99년부터 부영양화 정도가 조금씩 증가하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 16).

참고문헌

- 건설교통부. 2001. 수자원장기종합계획.
- 국립환경연구원. 2001. 조류에보제 시행결과 보고서. 300 pp.
- 김법철, 박주현, 황길순, 최광순. 1997. 한국의 대형 담수생태계의 부영양화. 한국육수학회지 30: 512-517.
- 김법철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1998. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (2): 합천호. 한국육수학회지 31: 312-327.
- 김용환, 이순화. 2001. 운문호 저질중 존재형태별 특성 및 용존유기물의 용출. 경산대학교 환경연구지 6: 13-21.
- 김종민, 박준대, 노혜란, 한명수. 2002. 소양호와 팔당호 수질의 수질 및 계절적 변화. 한국육수학회지 35: 10-20.
- 박성배, 이상균, 장광현, 정광석, 주기재. 2002. 장마기의 강우가 낙동강 하류(물금) 수질에 미치는 영향. 한국육수학회지 35: 160-171.
- 서정관, 정익교. 1994. 낙동강하구의 식물플랑크톤 군집구조. 한국육수학회지 27: 227-250.
- 신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태. 한국육수학회지 35: 181-186.
- 수자원공사. 2001. 댐 수문 작동 자료. <http://www.kowaco.co.kr>.
- 안광국. 2000. 호수내 인의 주요원으로 몬순 유입수. 한국육수학회지 33: 222-229.
- 이 경, 윤숙경. 2002. 임진강 수계의 식물플랑크톤 군집의 계절적 변화. 한국육수학회지 35: 111-122.
- 이정호, 백인호, 김철호. 2000. 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택취수 수심 결정. 한국육수학회지 33: 331-318.
- 임창수, 신재기, 조경제. 2000. 금강 중 하류의 오염양상과 수질평가. 한국육수학회지 22: 51-60.
- 정 준. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적 387 pp.
- 조규송, 강인구, 권오길, 김법철, 나규환, 안태석, 김종범, 이인기, 이해금, 김상호, 최준길. 1991. 호소환경조사기법. 동화기술 pp. 314-330.
- 최상호, 하경, 주윤희, 김현우, 주기재. 우포 습지의 이화학적 특성. 1998. 한국육수학회지 31: 273-281.
- 환경부. 1994-2001. 수질측정망자료. <http://www.me.go.kr>.
- 환경부. 2001. 수질오염공정시험법. 458 pp.
- 환경부. 2001. 수질측정망자료. <http://www.me.go.kr>.
- Aizaki M., Otsuki A., Fukushima T., Kawai T., Hosomi M. and Muraoka K. 1981. Application of modified Carlson'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 (in Japanese).
- Calson R.E. 1977. A trophic stae index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369.
- Kratzer C.R. and Brezonik P.L. 1981. A Carson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Res. Bull.* 17: 713-715.
- Masaru A., Teru I., Kozo I., Hideo K., Shigeru K., Hiromu K., Eiji T., Kohei T., Minoru H., Hiroyuki H. and Takaaki Y. 1977. *Illustrations of the Japanese fresh water algae.* 933 pp.
- Sorokin Y.I. 1999. *Aquatic Microbial Ecology.* Backhuys publishers, leiden, The Netherlands. pp. 23-27.

Accepted 30 May 2003