

국내 주요 호수의 육수학적 조사(4) : 주암호

김범철 · 박주현^{1*} · 허우명² · 임병진³ · 황길순 · 최광순 · 최종수

(강원대학교 환경학과, 춘천 200-701, ¹한강유역환경관리청, 하남 465-030, ²삼척산업대학교 환경공학과, 삼척 245-080, ³국립환경연구원, 서울 122-706)

The Limnological Survey of Major Lakes in Korea (4): Lake Juam. Kim, Bomchul, Ju-Hyun Park¹, Woo-Myung Heo², Byung-Jin Lim³, Gilson Hwang, Kwangsoon Choi and Joongsoo Choi (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea, ¹Han River watershed Environmental Management Office, Hanam 465-030, Korea, ²Department of Environmental Engineering, Samchok National University, Samchok 245-080, Korea and ³National Institute of Environmental Research, Seoul 122-706, Korea)

In this study limnological characteristics of Lake Juam was surveyed from June 1993 to May 1994 in order to provides important information regarding water resources. Secchi disc transparency, epilimnetic chlorophyll *a* (chl-*a*), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) concentration and primary productivity were in the range of 2.0~4.5 m, 0.9~13.6 mgChl/m³, 0.78~2.32 mgN/l, 11~56 mgP/m³, 270~2,160 mgCm⁻² day⁻¹, respectively. On the basis of TP, Chl-*a* and Secchi disc depth, the trophic state of Lake Juam can be classified as mesotrophic lake. The phosphorus inputs from non-point sources are concentrated in heavy rain episodes during the monsoon season. As a result, phosphorus concentration are higher in summer than in winter. TP loading from the watershed were estimated to be 0.9 gPm⁻²yr⁻¹, which correspond to a boundary of the critical loading (1.0 gPm⁻²yr⁻¹) for eutrophication. From the results of the algal assay, both phosphorus and nitrogen act as limiting nutrients in algal growth. The seasonal succession of phytoplankton community structure in Lake Juam was similar to that observed in other temperate lakes. Diatoms (*Asterionella formosa* and *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*) were dominant in spring and winter, cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*, *M. sp.* and *M. viridis*) were dominant in warm season. The organic carbon, nitrogen and phosphorus content of lake sediment were 9.5~14.0 mgC/g, 1.01~1.82 mgN/g, and 0.51~0.65 mgP/g, respectively. The allochthonous organic carbon loading from the watershed and autochthonous organic carbon loading by primary production of phytoplankton were determined to be 1,122 tC/yr and 6,718 tC/yr, respectively. To prevent eutrophication of Lake Juam, nutrient management of watershed should be focus on reduction of fertilizer application, proper treatment of manure, and conservation of topsoil as well as point source.

Key words : Lake Juam, Limnological characteristics, Trophic state, Phytoplankton

* Corresponding author: Tel: 033) 257-2121, Fax: 033) 252-0128, E-mail: pjh4320@hanmail.net

서 론

국내 대부분의 호수들은 1980년대 후반에 들어 급격한 부영양화로 인한 수질악화를 겪고 있다(김 등, 1989; Cho *et al.*, 1991; 김 등, 1995). 호수 수질악화의 원인으로는 유기물, 중금속, 독성화합물질 등이 있을 수 있으나 가장 보편적으로 나타나는 형태는 부영양화에 의한 유기물의 증가이다. 국내 부영양화현상의 원인은 유역의 무분별한 개발로 인한 호수 유역의 교란과 생물학적처리에 의존하는 도시하수 정화시스템, 축산폐수나 농경지 등 비점오염원에 대한 관리 소홀로 인해 유역으로부터 인, 질소부하량이 증가하기 때문이다. 유기물 농도의 증가는 심층의 산소고갈에 따른 생물상변화, 독성환원물질의 발생, 수돗물의 정수비용증가, 관광자원의 심미적가치 하락 등의 피해를 초래한다. 국내 하천에는 대부분 많은 댐이 건설되어 있으므로 수자원의 근원이 하천에서 호수로 바뀌어 가고 있다. 많은 취수장이 대부분 직접 호수에서 취수하거나 저수지에 저류하였던 물을 방류하여 취수하므로 수자원은 궁극적으로 거의 호수에 의존하고 있으며, 저수지의 수질은 전체 수자원의 수질에 직접적 영향을 미치게 되었다. 따라서 부영양화는 국내 용수자원 수질악화의 가장 보편적인 주요 요인으로 등장하고 있다. 국내 수자원의 수질악화를 방지하기 위해서는 호수의 부영양화를 미리 예측하고 방지하려는 노력이 필요하다. 이를 위해서는 호수생태계의 구조와 기능의 파악은 물론 유역 및 퇴적층에 관한 정보의 축적이 필요하다. 이러한 취지로 본 연구는 수행되었으며 환경부(1993~1995년)의 전국 주요 10개 대형 호수와 3개 하구연에 대한 육수생태학적 동시조사 사업을 통해 수행되었다.

주암호는 국내 4대강중 하나인 섬진강의 제 1지류인 보성강 중류(전남 승주군 주암면)에 형성된 인공호로 이사천 수계의 조절지점인 상사호와 도수터널로 연결함으로써 수자원의 보전, 개발 이용의 효율성을 높일수 있는 유역변경식 댐이다. 최대 저수용량은 4.5억톤으로 광주권의 생활용수, 광양, 여천의 농업용수 및 생활용수등으로 이용되고 있으며, 전력의 공급과 홍수조절 및 휴양지의 기능을 담당하고 있다. 주암호는 90년대에 축조된 국내 대형 인공호중 하나로 짧은 호수의 역사로 인해 학술적인 연구가 부족한 실정이며 종합적인 육수학적 조사는 거의 수행되지 못하고 있다. 그간 수행된 학술적인 연구로는 황 등(1995)의 어류군집에 관한 연구, 한 등(1993)의 주암호 수질 변화에 관한 연구가 있으며 생

물학적연구로는 총 130종의 식물플랑크톤의 출현종을 보고한 최 등(1994)의 연구와 총 180종의 출현종을 보고한 이(1994)의 연구가 있다.

이 논문의 목적은 주암호의 물리, 화학, 생물학적 특성에 대한 조사뿐만 아니라 퇴적층의 오염정도와 유역으로부터 유입되는 물질부하를 측정하여 주암호에서 일어나는 물질 순환과정과 주암호의 전반적인 육수생태학적 특성을 고찰하여, 효과적인 호수 수질관리정책 수립에 필요한 기초자료를 제공하는데 있다.

재료 및 방법

1. 조사지역 개황 및 오염원

주암호는 전남 보성의 제암산이 발원지로서 하류로 93 km 지점인 섬진강의 제 1지류인 보성강 중류부(전남 승주군 주암면)에 1991년 높이 58 m, 길이 330 m의 중앙차수벽댐(Rockfill Dam)이 축조됨으로써 형성된 인공 호수로서 저수지 면적 33 km², 최대저수용량 4.5억톤, 최대수심 40 m, 수리학적 체류시간이 0.36년인 인공호다. 본 연구에서는 주암호 3개 정점과 유입수 2개 지점을 선정하여 조사하였다. 정점 1은 승주군 주암면 대광리로 주암댐에서 500 m 전방에 위치하며 정점 2는 승주군 송광면 신평리 수역이며 정점 3은 보성군 문덕면 덕치리 수역이다.

Table 1. Hydrological characteristics and utilization of drainage basin of Lake Juam. Yearly average records from 1993 to 1994.

Surface area (km ²)	22
Water capacity ($\times 10^6$ m ³)	457
Average water volume ($\times 10^6$ m ³)	311
Annual water inflow ($\times 10^6$ m ³)	623
Annual water outflow ($\times 10^6$ m ³)	673
Maximum water level	108.6
Average water level	104.1
Maximum depth (m)	40
Mean depth (m)	15
Hydraulic residence time (yr)	0.36
Drainage area (km ²)	1,010
Drainage area: lake area ratio	45
Paddy and dry field area in drainage basin (km ²)	179
Forest and mountain area (km ²)	744
Total population in drainage basin (persons)	58,553
Urban population in drainage basin (persons)	13,340
Rural population in drainage basin (persons)	45,193
Annual precipitation (mm/yr)	1,482
Air temperature (°C)	12.4
Wind speed (m/sec)	1.3

주암호의 수리학적 특성 및 유역의 이용현황은 Table 1과 같다. 주암호 유역은 3개시·군(순천시, 보성군, 화순군)에 걸쳐있으며 유역의 면적은 1,010 km²이며 유역의 기반암은 주로 변성암으로 되어 있다. 주암호로 유입되는 하천으로는 북서쪽에서는 동북천이 남쪽에서는 보성강이 유입하며 보성강의 유역면적이 전체의 약 70%를 차지하므로 유입수량의 대부분이 보성강을 통하여 유입 된다고 볼 수 있다. 유역의 인구는 약 6만명이며 유역면적의 74%는 산림이고 농경지는 18%를 차지한다.

주암호 유역에서 발생하는 오염물질 발생부하량을 유기물과 영양염류로 나누어 보면 유기물의 경우 (BOD) 생활하수, 축산폐수, 토지이용에 의한 부하량이 각각 3,014 kg/day, 2,022 kg/day, 2,493 kg/day이며, 영양염류 중 인의 부하량은 각각 96 kg/day, 63 kg/day, 37 kg/day 이고 질소의 부하량은 각각 453 kg/day, 322 kg/day, 759 kg/day 으로 조사되어 (환경부, 1994) 인부하량의 경우 생활하수와 축산폐수의 영향이 크고 질소부하량은 생활하수와 토지이용에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

2. 조사 및 분석방법

1) 시료채취

주암호에 대한 수질조사는 1993년 6월부터 1994년 5월까지 3개 정점을 선정하여 월 1회 실시하였다 (Fig. 1). 댐에서 500 m 전방인 댐앞 정점 (St. 1)에서는 수심별로 0, 2, 5, 10, 20, 30 m와 최저층 (bottom-2 m), 그 외 중류 (St. 2)와 상류 정점 (St. 3)에서는 표층수만 채취하였다. 유입수의 시료는 주암호의 주유입 하천인 보성강 (St. 5)과 동북천 (St.6)에서 월 1회 채취하였다. 퇴적물은 호수 내 6개 정점을 선정하여 1993년 7월과 10월, 그리고 1994년 2월의 총 3회에 걸쳐 Ekman식 채니기를 사용하여 채취하였다 (Fig. 1). 식물플랑크톤은 매일 댐 앞 지점의 표층수를 채취하여 시료 500 ml를 폴리에틸렌 시료병에 담아 Lugol's solution으로 고정한 후 실험실로 운반하였으며 동물플랑크톤은 계절별로 1993년 8월과 10월, 그리고 1994년 1월과 3월까지 총 4회에 걸쳐 호수용 플랑크톤 net (구경 20 cm, 망목의 크기 100 μ m)를 사용하여 댐 앞 정점의 수심 20 m에서 수표면까지 수직 예망 채집한 후 현장에서 중성 포르말린으로 최종농도가 5%가 되도록 고정하여 실험실로 운반하였다.

2) 분석방법

엽록소 a는 Lorenzen (1967)의 방법에 따라 분석하였다. 수중과 퇴적물의 총인과 총질소 분석은 Standard Method (APHA, 1992)의 persulfate digestion법을 사용

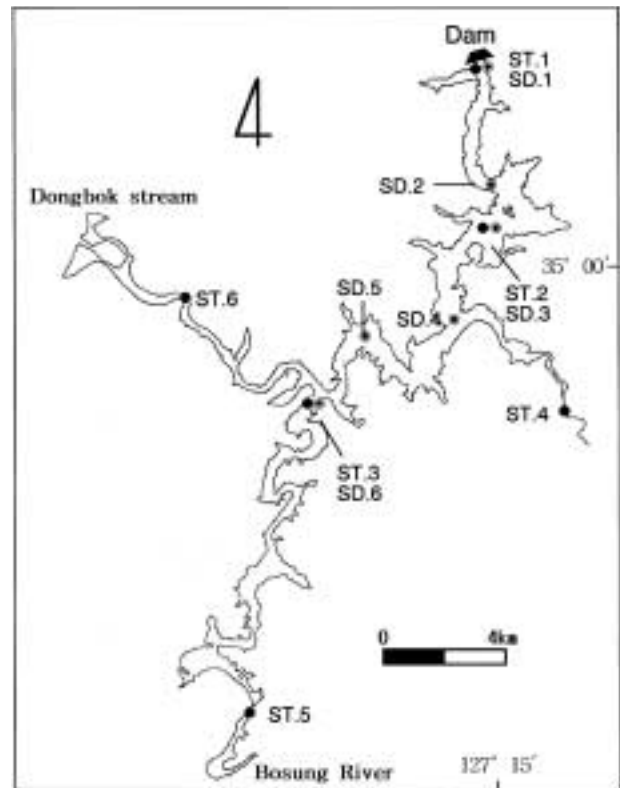


Fig. 1. Map showing the sampling sites in Lake Juam. (ST: site of water, SD: site of sediment)

하여 분해시킨 후 용존무기인과 질산성질소를 측정하여 총인과 총질소의 농도를 측정하였다. 용존무기인 농도는 ascorbic acid법으로 측정하였으며, nitrate는 cadmium reduction법을 적용한 autoanalyzer (Skalar-5,100)를 사용하여 분석하였다. 용존총인 (DTP)은 GF/F (pore size, 0.45 μ m)로 여과한 시료를 총인 분석과 같은 방법으로 측정하였다. 용존유기인 (DOP)은 용존총인과 용존무기인의 농도차로 계산하였고, 입자상유기인 (POP)은 총인과 용존총인과의 농도차로 계산하였다. COD는 환경오염공정시험법 (환경부, 1993)의 alkaline permanganate법으로 측정하였으며, 퇴적물의 COD는 Standard Method의 Cr법 (closed reflux, reflux, 적정법)으로 측정하였다. Cr법의 유기물분해율이 80~100% (신과 김, 1986)라고 알려져 있는데 본 조사에서는 100%로 분해되는 것으로 추정하여 퇴적물의 COD를 유기탄소량으로 환산하였다. 토양이나 여러 미립자의 표면에 흡착되어 있는 adsorbed-phosphorus는 Hieltjes와 Lijklema (1980)가 제시한 방법에 따라 시료 50 mg에 1.0 M 염화암모늄용액 50 ml로 pH 7.2에서 120분씩 2회 shaking하여 용출된 무기인을

ascorbic acid법으로 측정하였다.

일차생산력은 맨앞정점의 표층수를 채수하여 측정하였다. 수표면 광도 및 수심별 광도는 Li-COR의 underwater photometer (LI-188B)와 평면 quantum sensor (UWQ3465)를 이용하여 1 m 간격으로 수중광도를 측정하여 광도변화의 기울기로부터 흡광계수를 계산하였다. 총무기탄소 (total CO₂)는 Gran titration법 (Wetzel and Likens, 1991)으로 alkalinity를 측정하고 수온과 pH로부터 계산하였다. 식물플랑크톤에 의한 일차생산력은 ¹⁴C 흡수와 Platt *et al.* (1980)의 광저해를 고려한 세 개의 매개변수를 갖는 광합성-광도모델을 이용하는 Kim and Kim (1989)의 방법에 따라 측정하였다. 일차생산에 의한 유기물생산은 월간 수면적당 일차생산력에 월평균 수면적을 곱하여 연간 일차생산량 (tC/yr)을 계산하였다. 일차생산력이 측정되지 않은 11월과 1월의 자료는 보간법으로 추정하였다.

식물플랑크톤의 동정을 위해 채취한 시료를 약 2주일 이상 침강시킨 후 (APHA, 1992) 사이폰으로 상등액을 뽑아 농축하였다 (Sukhanova, 1978). 세포의 계수는 Palmer-Maloney counting chamber를 사용하여 광학현미경하에서 400배로 검경하였으며 종은 Mizuno (1964)와 Hirose and Yamagishi (1977)에 따라 동정하였다. 종다양성지수의 계산은 Shannon and Weaver (1948)의 방법에 따랐다. 동물플랑크톤의 정성분석을 위하여 시료를 hole-slide glass에 넣고 lactic acid로 연화시킨 후 해부현미경하에서 각 동물 군별로 특성이 되는 외부형태를 해부하였다. 이 후 water mountain에 봉입하여 일시 프레파라트를 만들어 광학현미경하에서 동정, 분류하였다. 한편 정량분석은 농축된 시료의 일정량을 취한 후 Bogorov counting chamber에 넣고 계수하여 이를 다시 단위 체적 개체수 (Indiv./m)로 환산하여 생물량으로 표시하였다. Algal assay를 통한 제한영양염조사와 인·질소 및 유기물 부하량에 대한 조사 및 분석방법은 김 등 (1997)이 사용한 방법에 따랐다.

결과 및 고찰

1. 수문학적 특성 및 수체의 물리학적 특성

조사기간 주암호 유역의 강수량과 수문학적 특성은 Fig. 2와 같다. 주암호의 연평균 강수량은 1,132 mm로 나타났으며 93년의 강수량은 연평균 강수량을 크게 상회하였고 반면 94년에는 매우 심한 가뭄으로 연간 강수량이 890 mm 정도에 그쳤다. 계절별로는 하계 (6~9월)

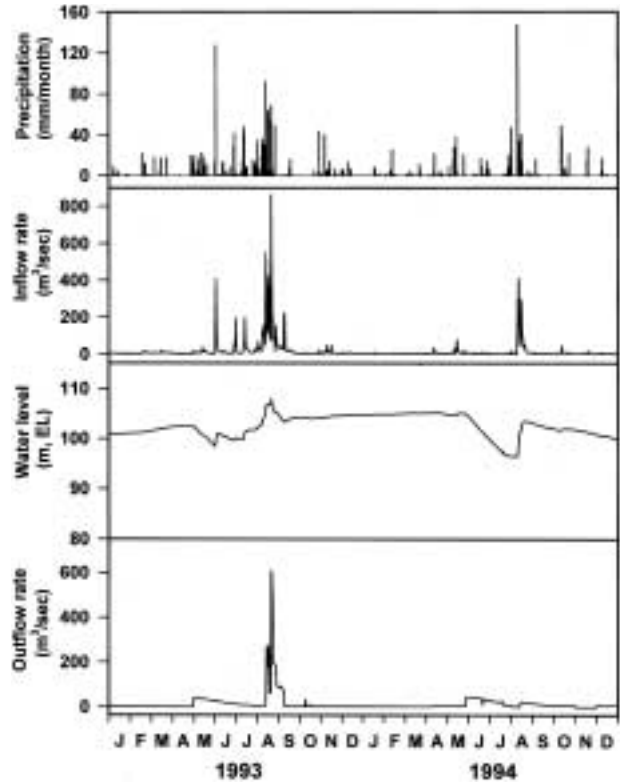


Fig. 2. The daily variations of hydrological parameters in Lake Juam.

Table 2. Monthly variations of flowing rates, water level, and lake surface area

Month	Inflow (m ³ /sec)			Outflow (m ³ /sec)	EL. (m)	Surface (km ²)
	*A	*B	Total			
June '93	9.7	20.7	30.4	26.2	100.2	17.2
July	7.2	15.4	22.6	52.1	101.9	19.3
Aug.	48.2	102.4	150.6	111.5	104.8	22.8
Sep.	3.1	6.6	9.7	22.5	104.2	22.0
Oct.	1.2	2.6	3.8	6.2	104.1	21.9
Nov.	1.9	4.1	6.0	11.1	104.6	22.5
Dec.	1.3	2.7	3.9	6.9	104.8	22.8
Jan. '94	0.8	1.8	2.6	6.2	104.9	22.9
Feb.	1.2	2.5	3.7	4.5	105.0	23.0
Mar.	0.9	1.8	2.7	5.8	105.1	23.1
Apr.	1.6	3.4	5.0	5.1	104.9	22.9
May	3.6	7.6	11.1	10.9	104.5	22.4

A: Inflowing water, the Dongbok stream
B: Inflowing water, the Bosung River

의 강수량이 연간 강수량의 71%를 차지하였고 집중호우기간에는 일간 최대 147 mm를 나타냈다. 주암호의 저수위 변화는 조사기간 10 m 이내로 비교적 다른 국내 대형인공호에 비해 작게 나타났으며 7월에 가장 낮은

수위를 나타냈다. 이러한 저수위 변화는 홍수대비와 각종 용수의 공급을 위해 인위적으로 방류량을 조절한 결과이다. 연평균 수리학적 체류시간은 114~188일로 변화폭이 크며 평균 151일이었다. 월간 수리학적 평균 체류시간은 하계(6~9월)에 107일, 춘계(3~5월)에 151일, 동계(12~2월)와 추계(10~12월)에 각각 209일과 149일로 하계에 짧고 동계에 길게 나타나 강수량에 직접 영향을 받는 것으로 나타났다. 호수의 저수위나 체류시간 등 수문학적 특성은 호수내에서 퇴적층과 수체의 영양염류 교환이나 식물플랑크톤의 영양염류섭취에 절대적인 영향을 미치기 때문에 호수 부영양화도를 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 조사기간 주암호의 수위, 수표면적, 유입수량, 방류수량의 월간 변화는 Table 2와 같다.

표층수의 수온은 계절에 따라 5.4~26.6°C의 분포를 나타냈으며 기온의 분포와 유사한 경향을 나타냈다. 주암호는 연중 4°C 이상의 수온으로 겨울에 결빙되지 않고 1년에 한번 수체가 혼합되는 온대 1순환(warm monomictic) 호수로 국내 대부분의 대형 인공호가 여기에 해당된다. 수온의 수직적 분포는 수온약층의 형성과 소멸에 따라 그 양상이 달라진다. 수온약층은 4월 이후에 형성되어 수층이 표층(혼합층)과 심층으로 분할되고 하계에는 매우 강한 성층을 나타낸다(Fig. 3). 추계로 가면서 점차 표층의 수온이 저하되고 심층으로 열전달이 일어나 혼합층 깊이(mixing depth)가 깊어지면서 2월에 수체가 완전히 혼합되고 3월 까지 혼합상태가 유지된다. 수체의 완전 혼합시기를 제외한 혼합층의 깊이는 5~20m의 분포로 춘계에 작고 추계에 큰 것으로 나타났다. 수체의 혼합층 깊이는 빛과 영양염을 공급받아야 하는 식물플랑크톤의 성장과 소멸에 매우 중요한 요소로 작용한다(Jassby and Powell, 1975; Hesslein and Quay, 1973). 혼합층이 진광대 깊이보다 작으면 해가 있는 동안은 광합성에 알맞은 환경 조건에 있게 된다. 반대로 혼합층 깊이가 증가하여 진광대 깊이보다 커지면 조류 세포는 낮 동안에도 광합성에 부적합한 낮은 광도대로 휩쓸려 들어가 조류 세포의 순광합성량이 감소하게 된다. 봄에 성층의 형성은 혼합층 깊이를 작게 하여 식물플랑크톤의 전반적인 침전율을 증가시키고 특히 무거운 규조류의 침전율을 증가되어 이들 조류가 사라지는 결과를 초래하기도 한다(Happer, 1992).

투명도는 연간 1.3~4.5 m로 계절별로는 하계에 낮고 조사 정점별로는 댐앞(정점 1)보다는 상류로 가면서 낮게 나타났다(Fig. 3). 댐앞 정점에서의 흡광계수는 조사기간 0.38~0.98 m⁻¹으로 연중 변화가 크며 특히 8월에 크게 나타났다. 흡광계수는 총 부유물질($r^2 = 0.35$)보다는

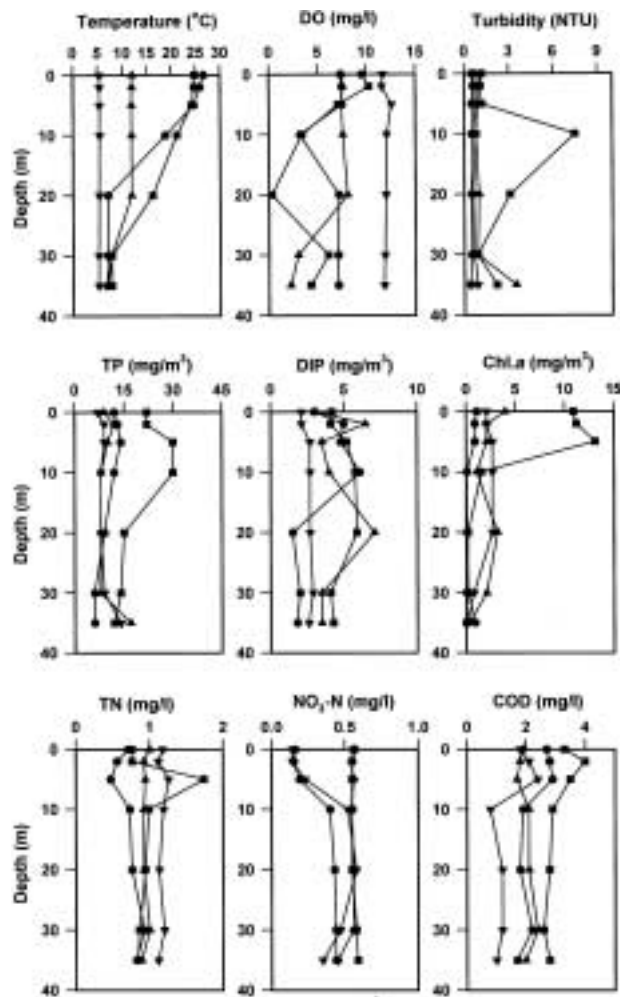


Fig. 3. Vertical profiles of limnological parameters at site 1 during 1993~1994. (▼: March, ●: June, ■: September, ▲: December)

식물플랑크톤의 현존량과 상관관계($r^2 = 0.54$)가 높게 나타났다. 이와 같은 경향은 체류시간이 비교적 긴 합천호나 옥정호에서 나타난 경향과 유사한 반면 진양호와 같이 총 부유물질에 무기현탁입자의 비중이 높은 하천형 인공호에서 나타난 경향(김 등, 1999)과는 상반되는 것이다. 따라서 체류시간이 긴 호수에서는 무기현탁입자보다는 식물플랑크톤의 현존량이 빛투과도에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 호수의 영양상태에 따라 흡광계수의 범위는 다양하며 빈영양호의 경우 하계에 대략 0.2 m⁻¹ 이하를 부영양호의 경우는 1.0 m⁻¹ 이상을 나타내는 것으로 보고 되었다(Wetzel, 1983). 흡광계수로부터 수표면 빛의 1%가 도달하는 진광대(euphotic zone)의 깊이를 추정한 결과 계절에 따라 4.7~12.1 m의 범위로 동계에 크게 나타났으며 혼합층의 깊이보다 변화폭이

작게 나타났다.

2. 수체의 화학적 특성

주암호의 이화학적 수질분포는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. pH는 6.6~9.3의 범위로 하계에 높고 정점 2와 정점 3에서 높았다. 알칼리도는 15.0~43.8 mgCaCO₃/l로서 계절적으로 큰 변동을 보였으며 하계에 비교적 높게 나타났다. 전기전도도는 51~96 μS/cm의 분포를 나타냈으며 계절적으로 하계에 비교적 높았고 정점별로는 큰 차이가 없었다. 표층의 용존산소는 7.4~12.4 mgO₂/l의 분포를 나타냈으며 계절적으로 큰 변동은 없었다. 수직적으로는 중층산소최저층이 6월 이후 형성되어 9월까지 지속되었다. 산소최저층이 나타난 수심의 탁도로 볼 때 이층으로 장마시 탁류가 유입된 것으로 볼 수 있으며 산소최저층의 형성도 유입수와 관련이 큰 것으로 보인다. 그러나 옥정호, 합천호, 소양호 등 국내 대형 인공호에서 중층산소최저층과 더불어 나타나는 심층산소고갈(Kim and Cho, 1989; 김 등, 1997; 김 등, 1998)은 없었다. 이는 주암호가 이들 호수보다 덜 부영양한 호수임을 나타내 주는 것이다.

표층의 총인(TP)은 7~51 mgP/m³로 장마 이후와 5월에 높은 농도를 나타냈으며 댐앞(정점 1)보다 상류지점인 정점 2와 정점 3에서 높았다. 수직적으로는 식물플랑크톤의 생체량이 높은 표층이 심층보다 높은 농도를 나타냈다. 연간 표층의 용존무기인(DIP)은 1.4~6.2 mgP/m³ 범위로 총인 농도의 계절변화와 유사하게 나타났다. 표층의 용존무기인은 대체로 4 mgP/m³ 이하의 낮은 농도를 나타냈고 8월과 9월에는 대체로 높았다. 식물플랑크톤에 직접 이용될 수 있는 용존무기인의 비율은 총인의 약 23%로 외국의 자연호가 5% 이하로 보고(Wetzel, 1983)되는 것에 비하면 상대적으로 높은 비율이다. 이는 유역에서 유출되는 용존무기인의 비율이 높고, 식물플랑크톤의 생체량이 크지 않아 호수내에서 용존무기인의 이용효율이 낮기 때문인 것으로 볼 수 있다.

표층의 총질소 농도는 0.53~1.42 mgN/l의 범위로 계절별 변화폭이 크게 나타났으며 정점별 차이는 크지 않았다. 질산성질소도 총질소와 유사한 계절적 경향을 보였으며 대체로 하계에 총질소에 대한 질산성질소의 비가 낮게 나타났다. 이는 식물플랑크톤의 증식으로 인해 질산성질소가 유기질소로 동화되었기 때문인 것으로 보인다. 주암호는 같은 기간에 조사된 국내 주요 10개 호수중 총질소 및 질산성 질소의 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 주암호의 TN/TP는 45~71수준으로 국내 주요 인공호의 TN/TP가 40~160의 수준(Kim et al.,

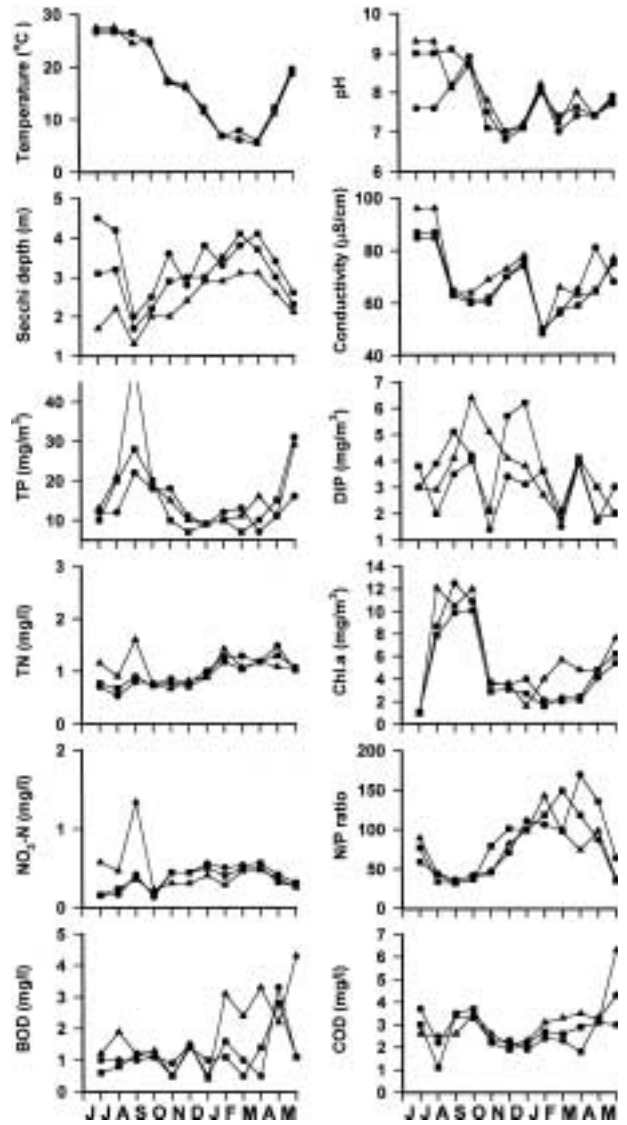


Fig. 4. Monthly variations of limnological parameters of surface water at site 1 (●), site 2 (■) and site 3 (▲) during 1993~1994.

1997)인 것과 비교하면 낮은 수준이며 특히 하계에 질산성질소는 상당기간 0.2 mgN/l 이하를 나타내고 있고, NO₃⁻-N/TP는 남조류 증식이 활발한 9월의 경우 7 이하를 나타내고 있어, 5 이하를 남조류증식에 유리한 환경으로 제시한 Mcqueen et al. (1986)의 ratio에 근접하고 있다.

유입수를 통해 유입되는 연간 총인은 19.5 tonP/yr이며 이중 용존무기인은 4.1 tonP/yr으로 총인의 21%를 차지했다(Table 3). 홍수기(6~8월)에 총인부하량이 연간 총인부하량의 79%에 해당된다. 유입수의 총인농도는

Table 3. Phosphorus and nitrogen loading from the two main inflowing river (the Dongbok stream, the Bosung River) into Lake Juam from June, 1993 to May, 1994.

Month	TP (mg/m ³)		TN (mg/l)		TP loading (tN/month)			TN loading (tN/month)		
	*A	*B	*A	*B	*A	*B	Total (DIP)	*A	*B	Total (DIN)
June '93	20	57	1.12	2.48	0.50	3.05	3.6 (0.6)	28	133	161 (95)
July	21	48	1.21	1.47	0.41	1.98	2.4 (0.5)	23	61	84 (49)
Aug.	24	23	1.32	1.40	3.10	6.31	9.4 (2.2)	170	384	554 (387)
Sep.	17	55	0.62	0.64	0.14	0.94	1.1 (0.2)	5	11	16 (7)
Oct.	8	17	0.63	0.79	0.03	0.12	0.1 (0.1)	2	5	8 (5)
Nov.	10	15	1.68	0.86	0.05	0.16	0.2 (0.1)	8	9	17 (8)
Dec.	22	19	1.11	1.31	0.07	0.13	0.2 (0.1)	4	9	13 (10)
Jan. '94	14	13	1.52	1.29	0.03	0.06	0.1 (0.1)	3	6	9 (7)
Feb.	15	14	1.70	1.68	0.04	0.09	0.1 (0.1)	5	10	15 (10)
Mar.	12	19	1.35	1.54	0.03	0.09	0.1 (0.1)	3	10	11 (6)
Apr.	46	48	1.01	2.39	0.19	0.42	0.6 (0.1)	4	8	25 (13)
May.	51	55	2.68	3.07	0.49	1.11	1.6 (0.2)	25	21	88 (34)
Sum (ton/yr)					9.0	61.1	19.5 (4.1)	282	719	1001 (631)

A: Inflowing water, the Dongbok stream B: Inflowing water, the Bosung River

유입수량의 증가에 따라 증가하며 대체로 집중강우가 시작되는 7~8월과 경작이 시작되는 4~5월에 높았고, 수량이 작은 동계에는 낮은 농도를 나타냈다. 따라서 강우시 인농도 증가는 유입수량의 증가와 맞물려 일시에 호수내로 많은 양의 인을 유입시키는 결과를 가져온다. 몬순기후에서 나타나는 하계 집중호우와 이로 인한 유역으로 부터의 인유출 증가는 국내 대부분의 호수에서 나타나는 전형적 현상이다. 우리나라의 경우 대도시는 하천의 하류지역에 형성되어 있기 때문에 하천의 상류 지역에 위치한 호수들의 경우 영양염류의 유입은 생활하수보다 농경지나 축산분뇨 등 비점오염원에서 유출되는 비점오염원의 영향이 크다고 볼 수 있다(허 등, 1992; 이 등, 1993; 심, 1998). 인은 질소에 비해 토양 입자와의 결합력이 강해 쉽게 수중으로 용존되지 않는 특성을 갖고 있지만 집중호우로 대변되는 우리나라의 강우특성이 비점오염원 관리를 더욱 어렵게 하고 있다. Kim *et al.* (1997)은 우리나라의 총 인발생량중 화학비료에 기인하는 양이 전체의 56%를 차지하고 있기 때문에 비료 사용량을 감소시켜야 비점오염원으로부터의 영양염류 유실을 최소화할 수 있다고 주장하는 등 최근에 비료 사용량의 감소가 비점오염원관리에 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 비료사용량의 감소는 농작물에 알맞은 시비량과 시비시기를 정확히 맞추는 경작이 이루어져야 가능하다. 또한 민감지역(질소규제지역)에서는 비료사용량을 법적으로 규제하는 영국의 수자원법령(UK Water Act, 1989)처럼 우리나라도 비료사용량을 줄이기 위한 다각적인 노력이 요구된다. 주암호로 유입되

Table 4. Monthly variations of phosphorus, nitrogen and organic carbon (OC) discharge out of the Lake Juam

Month	COD (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/m)	discharge (ton/month)		
				OC	N	P
June	1.8	0.76	9	86	52	0.6
July	1.8	0.79	8	178	110	1.1
Aug.	2.2	0.90	15	465	269	4.5
Sep.	2.8	0.94	12	116	55	0.7
Oct.	2.4	0.85	9	28	14	0.2
Nov.	3.0	0.75	10	61	22	0.3
Dec.	2.1	0.92	8	27	17	0.2
Jan.	1.7	0.86	17	20	14	0.3
Feb.	3.6	0.98	18	28	11	0.2
Mar.	1.2	1.13	8	13	18	0.1
Apr.	2.9	1.06	6	27	14	0.4
May	3.5	1.12	14	72	33	
Sum (ton/yr.)				1,122	627	8.6

는 수표면적당 인부하량은 0.9 gPm⁻²yr⁻¹으로 산정되었으며 이를 Vollenweider (1976)의 인부하모델에 적용하면 주암호의 부영양화 임계부하량인 1.0 gPm⁻²yr⁻¹에 거의 근접하는 것으로 나타났다. 주암호로 유입된 연간 총 인부하량중 8.6톤이 방류되고 10.9톤이 호수내에 체류하거나 바닥에 퇴적되는 것으로 나타나 호수내 체류율은 56%로 나타났다(Table 4).

유입수를 통해 유입되는 총 질소의 양은 1,001 tonN/yr으로 나타났으며 이 중 질산성질소의 형태로 유입되는

양은 631 tonN/yr으로 무기 질소의 비율이 같은 시기에 조사된 진양호, 합천호, 옥정호 등 다른 호수들의 경우보다 낮게 나타났다. 총질소의 부하량도 총인부하량과 유사하게 6~8월에 유입되는 질소량이 연간 총 유입량의 80%를 차지했다 (Table 3). 유입수의 질소농도는 계절에 따라 큰 차이를 나타내지 않았으나 춘계에 높게 나타났다. 연간 총질소 유입량중 627 tonN/yr (63%)이 방류수를 통해 방류되는 것으로 나타났다 (Table 4). 따라서 총질소의 호수내 체류율은 47%로 같은 기간 조사된 다른 호수들에 비해 비교적 높은 체류율을 보였다.

3. 동·식물플랑크톤의 군집동태 및 제한영양염

1994년 5월의 주암호 시료에 *Selenastrum capricornutum*을 여러가지 영양염을 첨가하여 배양하였으며 실험결과는 Fig. 5와 같다. 질산염과 인산염을 모두 첨가한 배양조에서 최대성장을 보였으며 인산염과 질산염만을 첨가한 경우에도 대조군보다 높은 성장률을 보였다. 이는 주암호에서 조류의 성장에 질소와 인이 모두 제한요소로 작용한다는 사실을 보여주는 것이다.

주암호 댐앞 표층수에서 출현한 식물플랑크톤은 총 69분류군으로 녹조류가 26분류군, 규조류가 23분류군, 남조류가 14분류군, 편모조류가 6분류군으로 조사되었다. 식물플랑크톤의 분류군별 출현 비율은 규조류가 조사기간 7~83%로 나타났으며 동계와 춘계에는 평균 50% 이상의 높은 종 구성비를 나타냈다. 녹조류는 조사기간 14~53%의 분포를 보였으며 9월과 10월에 40% 이상의 구성비를 나타냈다. 남조류는 하계에만 출현하였으며 6월과 8월에 30~40%의 종 구성비를 나타냈다. 전

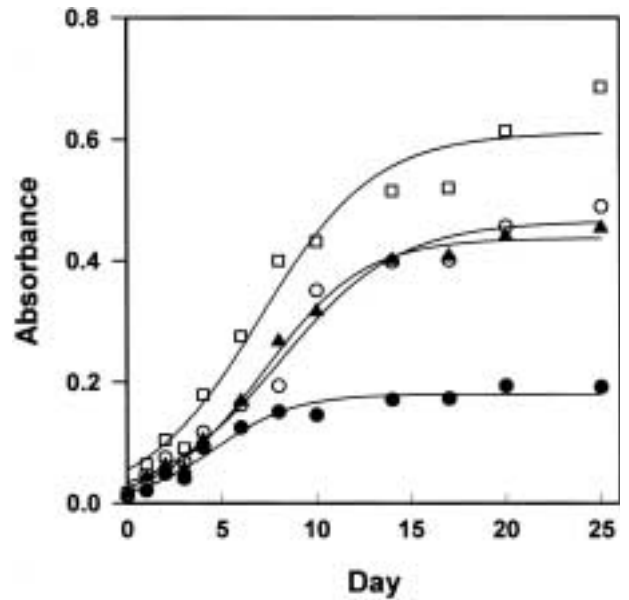


Fig. 5. The growth curves of *Selenastrum capricornutum* in algal assay for the determination of limiting nutrient (18 May 1994).

반적으로 규조류가 연평균 44%의 종구성비로 가장 높고 다음이 녹조류 (25%), 편모조류 (17%), 남조류 (14%)로 나타났다. 가장 많은 종들이 출현한 시기는 분류군별 출현비율이 비교적 유사하게 나타난 8월이었다. 식물플랑크톤의 세포수는 $2.03 \times 10^2 \sim 9.31 \times 10^3$ cells/ml로 하계에 매우 높고 동계에 전반적으로 낮은 출현도를 나타냈다 (Table 5). 이러한 계절변동은 빈영양호보다 부영양호에서 흔히 나타나는 특징이다. 연간 세포밀도는 규조

Table 5. Dominant species and standing crops (cells/ml) of phytoplankton at the dam site of Lake Juam from June, 1993 to May, 1994.

Dominant species	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Mar.	Apr.	May	Total
<i>Asterionella formosa</i>					17	184				85	3,857	4,143
<i>Fragilria crotonensis</i>	65		129	935	74	14	13	4			439	1,673
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	40	72			58	87	293	10	150			710
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>					129	151		28		55		363
<i>Eudorina elegans</i>			452									452
<i>Scenedesmus ecornis</i> var. <i>ecornis</i>	82	12	15	499			17		15			640
<i>Microcystis aeruginosa</i>	692	1,065	627	694								3,078
<i>Microcystis</i> sp.	1,304	1,435	570	162	935							4,406
<i>Microcystis viridis</i>	4,699	4,699										
Standing crops of dominant species	2,183	2,584	1,793	6,989	1,213	436	323	42	165	140	4,296	20,164
Total cell number	2,590	3,292	5,724	9,305	1,551	1,445	663	203	410	977	5,027	31,187
Species richness	9	14	26	17	19	22	15	14	17	22	12	69
Diversity	0.94	0.89	1.02	1.06	1.20	1.04	0.79	1.17	1.10	0.93	0.95	
Dominance	0.34	0.31	0.23	0.29	0.38	0.18	0.14	0.12	0.16	0.09	0.60	
Evenness	0.66	0.58	0.62	0.60	0.56	0.72	0.81	0.86	0.80	0.87	0.39	

Table 6. Seasonal fluctuations of zooplankton abundance (individuals/m³) at the dam site of Lake Juam from August, 1993 to March, 1994.

Species	Aug.	Oct.	Jan.	Mar.	Occupation rate
CLADOCERANS:					
<i>Bosmina longirostris</i>	5,605	51	491	178	6,325 (23%)
<i>Bosminopsis deitersi</i>	280	255			
<i>Ceriodaphnia pulchella</i>	140				
<i>Ceriodaphnia quadrangula</i>		153			
<i>Daphnia galeata</i>	1,121		24	12	
<i>Daphnia longispina</i>		102			
<i>Diaphanosoma brachyurum</i>	280				
<i>Moina weismanni</i>	140				
COPEPODS:					
<i>Cyclops vicinus</i>			24		
<i>Heliodyptomus kikuchi</i>	1,121				
<i>Mesocyclops leuckarti</i>	560				
<i>Microcyclops varicans</i>		358			
<i>Thermocyclops hyalinus</i>				12	
<i>Thermocyclops mongolicus</i>			49		
<i>Thermocyclops taihokuensis</i>	2,242				
<i>Thermocyclops vermifer</i>		255			
Copepoda, copepodids	8,127	3,583	147	50	11,907 (43%)
Copepoda, nauplius	1,401	153	417	191	
ROTIFERS:					
<i>Asplanchna priodonta</i>			98		
<i>Polyarthra vulgaris</i>	140				
Cladocera abundance	7,566	561	515	190	8,832 (32%)
Copepoda abundance	13,451	4,349	637	253	18,690 (67%)
Rotifera abundance	140		98		238 (1%)
Total abundance	21,157	4,910	1,250	443	27,760 (23%)
Number of species	10	6	5	3	18

류가 연평균 42%으로 가장 높았고 남조류 (37%), 녹조류 (12%), 편모조류 (10%)순으로 나타나 종수와는 달리 세포밀도 구성비에서는 남조류가 녹조류보다 크게 나타났다. 하계 남조류의 우점은 수체의 낮은 NO₃⁻/N/TP와 연관이 있는 것으로 보인다.

계절별 우점종의 분포를 보면 전반적으로 하계와 추계에는 남조류인 *Microcystis* sp, *M. aeruginosa*, *M. viridis*가 우점하는 가운데, 8월에는 녹조류인 *Eudorina elegans*가, 9월에는 남조류 이외에 규조류인 *Fragilaria crotonensis*의 세포밀도가 비교적 높았으며 이종은 연중 거의 출현하는 것으로 나타났다 (Table 5). 동계와 춘계에는 규조류인 *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *A. sp.* 등이 우점하였으나 5월에 *Asterionella formosa*가 높은 우점도를 나타낸 것 이외에 높은 우점도를 나타내는 종은 없었다. 이러한 우점종의 분포는 비슷한 시기에 조사된 최 등 (1994), 이와 송 (1995)의 연구와 거의 유사하

다. 전반적으로 여름에는 남조류와 녹조류가 우점하고 추계에는 남조류와 규조류, 동계와 춘계에는 규조류와 녹조류가 우점하는 양상으로 온대호수의 전형적인 천이 형태 (Hutchinson, 1967)를 따르고 있다. 종다양성지수 (H')는 조사기간 0.42~1.19으로 4월에 가장 높고 5월에 가장 낮은 값을 나타냈다. 또한 우점도지수와 균등도 지수는 각각 0.09~0.60, 0.39~0.87으로 변화 폭이 컸다.

조사기간 중 출현한 동물플랑크톤은 총 13속 18종류로서 지각류가 6속 8종 (44%), 요각류가 5속 8종 (44%), 그리고 윤충류가 2속 2종 (12%)으로 구성되어 있다 (Table 6). 하계 (10종)에 가장 다양한 종조성을 나타내었고 지각류와 요각류의 출현이 두드러지게 나타났으며 춘계와 동계에는 빈약한 출현양상을 보였다. 특히 요각류 중에서는 *Thermocyclops*속의 종들이 계절에 따라 다르게 나타나는 양상을 보였다. 일반적으로는 윤충류 > 지각류 > 요각류 순으로 점유율을 나타내는 것과 차이를 보였는데. 시료 채집시 네트의 크기와 조사빈도가 년 4

회 정도의 단기적인 조사에 국한된 것에 원인이 있는 것으로 사료된다(임, 1992).

생물량은 443~21,157 indiv./m³으로 종조성과 더불어 하계와 추계에는 높은 밀도를 나타낸 반면에 춘계와 동계에는 낮게 나타났으며 분류군별 점유율은 요각류(67%), 지각류(32%), 윤충류(1%)순으로 나타났다. 특히 요각류 중 유생(copepodid)이 전체 군집의 43%를 차지하였고 지각류인 *Bosmina longirostris*도 23%의 높은 점유율을 보이면서 하계에 높은 밀도를 나타내었다. 주암호에서는 이들의 점유율이 66%를 점유하여 동물플랑크톤 중 소형플랑크톤이 주요 구성원을 차지하는 특성을 보였다. 분류군별 생물량의 계절적 변화를 보면 하계에는 요각류 유생의 대발생으로 13,451 indiv./m³의 최대 생물량을 보였고 추계까지 지속되었고 지각류(7,566 indiv./m³)의 생물량도 탁월하였다. 하계와 추계에 요각류 유생의 밀도가 높게 나타났는데 김 등(1997, 1998)은 옥정호와 합천호에서도 동일한 결과를 보고하였다. 춘계와 동계에는 지각류, 요각류, 윤충류 모두 700 indiv./m³ 이하로 낮은 밀도를 보였다. 동물플랑크톤이 하계(8월)와 추계(10월)에 집중적으로 증식하는 경향은 6월과 7월에 남조류인 *Microcystis*가 이상 증식하다가 8월에 크게 감소하는 현상과 일부 관련이 있을 것으로 사료된다. 특히 윤충류의 점유율은 1% 미만으로 나타나 상대적으로 지각류와 요각류가 차지하는 비중이 크게 나타났다. 동물플랑크톤의 우점종은 하계와 추계에 높은 생물량을 보인 요각류 유생과 하계와 동계에 생물량이 탁월한 지각류인 *Bosmina longirostris*가 우점종으로 나타났다. 지각류 중 광온성 세계적 분포종인 *Bosmina longirostris*와 *Daphnia galeata*는 사계절 출현한 반면에 *Diaphanosoma brachyurum*와 *Ceriodaphnia pulchella*는 하계에만 출현하는 양상을 보였다. 임(1992)은 *Ceriodaphnia pulchella*는 수온에 대한 내성범위가 18~25°C 이내로 비교적 고온에서 출현하는 호온종으로 묘사했으며 Hutchinson(1967)은 *Diaphanosoma brachyurum*이 주로 열대수역에서 고밀도로 출현하는 주요종이며 온대수역에서는 계절적으로 하계에만 출현하는 호온종으로 분류하였다.

4. 유기물 분포 및 수치

표층의 엽록소 *a* 농도는 연중 0.9~12.1 mgChl/m³의 범위를 나타냈으며 하계 장마 이후인 8월과 9월에 비교적 높은 농도를 나타냈고 수평적으로는 상류지점인 정점 3에서 높은 농도를 나타냈다(Fig. 4). 엽록소 *a*의 수직적 농도 분포를 보면 혼합층이 표층에 국한되는 하계

에 표층 5 m 이내에서 높은 농도를 나타냈으며 10월 이후 혼합층이 깊어지면서 엽록소 *a* 농도는 수직적으로 균일한 농도 분포를 보였다(Fig. 3). 엽록소 *a* 농도의 증가는 계절적으로는 장마 이후 유입되는 영양염류에 영향을 크게 받고 수직적으로는 수온약층의 하강으로 인한 혼합층의 변화 등과 같은 물리적 특성과 관련이 큰 것으로 보인다.

수중 유기물 양의 간접지표인 BOD와 COD는 조사기간 각각 0.6~3.3 mgO₂/l, 1.1~6.3 mgO₂/l으로 댐앞정점보다 상류지점인 정점 3에서 높고, 계절적으로는 5월에 가장 높게 나타났다(Fig. 4). 이는 이시기에 유입수의 COD가 높고 식물플랑크톤의 현존량이 높기 때문인 것으로 보인다. 연간 호수내 평균 BOD/COD비는 0.46로 나타났으며 유입수(0.67)와 큰 차이를 나타내고 있어 호수내에서 생성되는 유기물의 BOD/COD비가 외부기원 유기물보다 낮다는 것을 알 수 있다. 일차생산력과 관련된 변수와 환경요인, 그리고 일차생산력의 계절변화는 Table 7과 같다. 댐앞 정점의 수면적당 일차생산력은 연간 304~2,549 mgCm⁻² day⁻¹로 남조류인 *Microcystis*가 대량 번식한 7월부터 9월까지는 1,000 mgCm⁻² day⁻¹ 이상으로 높았으며 4월에도 비교적 높은 생산량을 보였다. 그러나 추계와 동계에는 대체로 낮은 생산력을 보였다. 이시기에는 영양염류의 결핍이 관찰되지 않아 낮은 수온과 일사량이 일차생산력을 제한하는 것으로 보인다. 수표면적당 일차생산력에 수면적을 곱하여 계산한 연간 자체생성유기물은 6,718 tonC/yr으로 나타났다.

조사기간 광합성-광도곡선(P-I curve)에서 광도 증가에 대한 광합성속도의 증가 정도를 나타내는 변수인 초기기울기는 3.7~23.8 gC · m² gChl⁻¹ E⁻¹의 범위로 연중 큰 변화는 없었다. 최적 광도이상에서 광합성 감소를 나타내는 광저해 계수는 0~2.735으로 동계에 매우 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 같은 시기에 조사된 옥정호, 합천호, 진양호의 결과와 유사하다. 식물플랑크톤의 광적응을 나타내는 I_k는 조사기간 78~299 μEm⁻² sec⁻¹로 변동폭이 크며 하계와 추계에 크게 나타났다. 최대광합성속도는 6.5~101.6 mgCm⁻³ hr⁻¹으로 춘계와 하계에 높게 나타났다. 최대 광합성속도를 엽록소 *a* 농도로 표준화하여 나타내는 동화계수(assimilation number)는 4.0~16.6 gCgChl⁻¹ hr⁻¹으로 일차생산력이 높은 하계에 대체로 높았다.

유입수를 통해 유입되는 COD는 0.9~8.9 mgO₂/l으로 동북천보다 보성강의 유기물농도가 높았으며 춘계에 다소 높은 농도를 나타냈다(Table 8). 유입수의 COD를 유기탄소로 환산하여 평가한 월간 유기물 유입량은 11~

Table 7. P-I parameters and the daily productivity of phytoplankton at the dam site in Lake Juam K is light attenuation coefficient (m^{-1}); Temp. is water temperature ($^{\circ}C$); TCO_2 is total CO_2 (mgC/l); Chl. *a* is chlorophyll *a* concentration (mg/m) AN is assimilation number ($gCg\ Chl^{-1}\ hr^{-1}$); α is initial slope ($gC \cdot m^2\ gChl^{-1}\ E^{-1}$); β is photoinhibition coefficient ($gC \cdot m^2\ gChl^{-1}\ E^{-1}$); I_k were calculated from three parameters ($\mu Em^{-2}\ sec^{-1}$); P_{max} is maximal productivity ($mgCm^{-3}\ day^{-1}$); P_d is daily productivity per unit area ($mgCm^{-2}\ day^{-1}$).

Date	Depth	K	Temp.	TCO_2	Chl. <i>a</i>	AN	α	β	I_k	P_{max}	P_d
31 June '93	0	0.38	26.6	5.27	1.1	16.6	23.8	0.000	193	18.2	625
28 July	0	0.79	26.6	4.83	8.7	7.8	15.9	0.000	135	67.6	1583
24 Aug.	0	0.98	26.4	3.91	12.5	3.8	12.9	0.000	81	47.0	1090
23 Sep.	0	0.72	24.8	4.43	10.9	8.6	17.9	0.000	134	94.0	2549
26 Oct.	0	0.60	17.0	4.95	3.7	5.0	13.9	0.325	101	18.7	650
23 Dec.	0	0.72	12.1	4.16	4.6	5.3	17.5	1.231	84	21.1	474
19 Feb. '94	0	0.78	6.8	5.23	2.0	5.6	17.0	2.735	92	91.8	304
15 Mar.	0	0.40	5.4	4.25	2.1	4.4	15.0	1.299	82	9.3	588
19 Apr.	0	0.53	12.1	4.41	4.1	4.8	17.1	0.146	78	19.6	959
22 May	0	0.52	18.6	4.56	6.9	4.0	3.7	0.218	299	27.8	767

Table 8. Organic carbon loading (allochthonous organic carbon) from the main inflowing water into lake and primary production (autochthonous organic carbon) of phytoplankton in Lake Juam from June, 1993 to May, 1994.

Month	COD (mg/l)		Organic carbon loading (tC/month)			Primary Productivity (tC/month)
	*A	*B	*A	*B	Total	
June	3.1	4.2	55	159	215	323
July	1.8	1.7	25	50	74	946
Aug.	2.0	2.1	183	408	590	769
Sep.	2.9	2.3	17	28	44	1,685
Oct.	2.7	0.9	6	4	11	442
Nov.	1.0	2.2	4	16	20	320
Dec.	2.3	1.7	5	9	14	210
Jan.	2.8	3.8	4	13	17	214
Feb.	3.5	2.2	7	9	17	196
Mar.	2.5	3.2	4	11	15	421
Apr.	5.4	8.9	16	55	71	658
May	3.4	5.0	23	72	94	533
Total			349	384	1,183	6,718

A: Inflowing water, the Dongbok stream

B: Inflowing water, the Bosung River

590 tonC/month으로 월간변동이 심했으며 유입수량이 많은 8월에 가장 크다. 동북천과 보성강을 통해 유입되는 연간 유기물 총량은 1,183 tonC/yr으로 나타났으며 대부분이 보성강을 통해 유입되는 것으로 나타났다. 유역에서 유입되는 외부기원 유기물과 식물플랑크톤에 의한 자체생성유기물을 합한 주암호의 총 유기물 부하량은 7,901 tonC/yr으로 산정되었다 (Table 8). 연간 총 유기물 부하량의 85%가 식물플랑크톤에 의한 자체생성유기물로 평가되었으며 대청호의 68% (황 등, 1994)나 옥정호의 81% (김 등, 1997)보다 크게 나타났다. 이러한 사

실은 주암호에서 유기물 관리가 유역으로부터 유입되는 유기물보다 영양염류제어를 통한 내부생성유기물의 생성 억제에 있음을 시사하고 있다. 방류수를 통해 유출되는 유기물량은 연간 1,122 tonC/yr으로 이는 호수 전체의 유기물 부하량의 15%에 해당하는 것으로 유기물 부하량의 대부분은 방류가 되기전에 호수내에서 분해되거나 퇴적된다고 볼 수 있다.

5. 퇴적물의 화학적 특성

퇴적물에 함유된 총인, 총질소, 총유기탄소 및 유기물 함량은 Table 9와 같다. 3회 조사를 평균한 유기물 함량은 정점별로 1.7~2.8%이었으며 유기탄소는 8.2~14.0 mgC/g으로 정점별 차이가 크게 나타났다. 총인 농도도 0.51~0.65 mgP/g으로 정점별 차이가 크지 않았으며 댐 앞정점 (정점 1)보다 상류지점 (정점 4, 6)에서 다소 높은 농도를 나타냈다. 총인 농도는 평균 0.57 mgP/g으로 나타났다. 이는 부영양호로 판정되는 옥정호 (김 등, 1997)나 합천호 (김 등, 1998)보다 낮은 수준이다. 퇴적물 내 존재하는 여러 형태의 인종 퇴적물 입자의 교환, 수층의 pH나 인농도 변화등에 의해 쉽게 용출될 수 있는 adsorbed-phosphorus (NH_4Cl-RP)는 0.012~0.020 mgP/g으로 총인에서 차지하는 비율이 작게 나타났으며 정점 1을 제외하면 정점별 차이는 크지 않았다. 주암호 퇴적물에 함유된 총질소는 1.01~1.82 mgN/g으로 총인과 같이 상류지점에서 높은 농도를 나타냈다. 퇴적물의 이러한 인, 질소농도 분포는 수층의 인질소 농도 분포와 매우 유사하게 나타나고 있어 수층의 인 농도가 퇴적물의 인 농도를 크게 좌우한다고 볼 수 있으며 따라서 퇴적물의 인, 질소 농도로 호수의 영양상태를 간접적으로 알 수 있다. N/P (weight) 비와 C/P (weight)비는 조사지

Table 9. Content of organic carbon, nitrogen, and phosphorus in lake sediment (Average of Jul., Oct. 1993 and Feb.1994) OC is organic carbon calculated from COD, IG is Loss on ignition; Ads. P: adsorbed inorganic phosphorus, NH₄Cl-extractable.

Site	Ads. P (μg/g)	TP (μg/g)	TN (mg/g)	COD (mg/g)	OC (mg/g)	IG (%)	C/N	C/P	N/P
St. 1	12±7	510±115	1.01±1.90	26.7±10.7	10.0±3.0	2.0±0.8	10.0	19.7	2.0
St. 2	18±1	548± 22	1.27±1.70	20.9± 1.0	8.2±0.3	1.7±0.1	6.5	15.0	2.3
St. 3	17±5	543±120	1.17±0.24	25.3±14.2	9.5±5.4	1.9±1.0	8.1	17.5	2.2
St. 4	21±1	649±109	1.73±0.45	37.3±16.7	14.0±6.3	2.8±1.3	8.1	21.5	2.7
St. 5	20±1	564±140	1.82±0.35	31.2±10.2	11.7±3.8	2.4±0.8	6.5	20.8	3.2
St. 6	19±2	625± 77	1.54±0.34	28.5± 7.8	10.7±2.9	2.1±0.6	7.0	17.1	2.5

점에 따라 각각 2.0~3.2, 15.0~21.5으로 정점별 차이가 컸으며 C/N비 (weight)도 조사지점에 따라 6.5~10.0의 범위로 정점별 차이가 크게 나타났다. N/P의 경우 수층보다 매우 낮은 값을 나타내어 질소에 비해 인이 쉽게 퇴적 된다는 사실을 알 수 있다.

주암호 퇴적물의 유기물 함량은 평균 3% 이하로 외국의 수심이 낮은 부영양 호수들의 평균 유기물 함량이 10% 이상인 것에 비하면 (Hakanson, 1984) 매우 작은 수치인데 이는 표층에서 생산된 유기물이 침강하면서 상당부분 퇴적 전후에 분해되는 것으로 추정된다.

주암호의 C/N비는 연평균 7.7로써 이는 옥정호나 합천호와 유사하며 주암호 퇴적물의 부식화도를 Hansen (1961)의 기준에 따라 분류하면 주암호는 oligohumic lake로 분류할 수 있다. 이와 같이 유기물 분해정도가 초기단계인 주암호 퇴적물의 경우 이들이 분해될 때 간극수나 퇴적물에 가까운 수층의 DO를 소비함으로써 철이 환원되는 환경이 조성될 경우 금속과 착물을 이루고 있던 인이 간극수나 수체로 이동할 수 있다.

6. 부영양화도 및 판정항목간의 상호관계

하계 표층 (0, 2, 5 m)의 투명도, 총인, 엽록소 a의 평균은 각각 3.4 m, 15 mgP/m³, 6.6 mgChl/m³으로 나타났으며 이를 Calson (1977)의 부영양화도 지수로 표현하면 주암호는 TSI가 48로서 중영양호에 해당된다. 또한 Forsberg and Ryding (1980), USEPA (1974), Rast and Lee (1978) 기준으로도 중영양호 기준에 해당되는 것으로 나타났다. 이러한 수질평가항목 이외에 호수내에서 식물플랑크톤의 유기물 생산능력으로 호수의 부영양화도를 판별할 수 있는데, 수면적당 1차생산력은 수체간의 1차생산을 비교하거나 부양양화도를 판정하는데 유용한 변수이다. 주암호의 연간 수면적당 1차생산력은 평균 958 mgCm⁻² day⁻¹를 나타내 600 mgCm⁻² day⁻¹를 부영양호로 간주한 Likens (1975)의 분류에 의하면 부영양호에 해당된다. 또한 일차생산력과 관련된 변수인 동화계수로 부영양화도

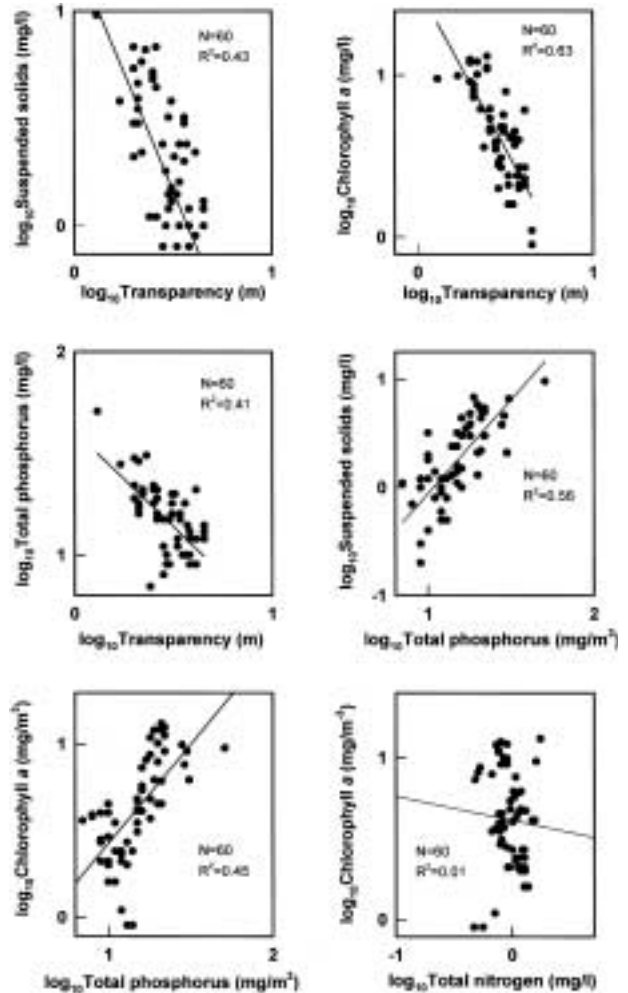


Fig. 6. Interrelationships of eutrophication parameters in Lake Juam.

를 판정할 경우 주암호의 동화계수는 3.7~23.8 gCg Chl⁻¹ hr⁻¹로 Ichimura and Aruga (1964)의 부영양호 기준인 2~6 gCgChl⁻¹ hr⁻¹를 초과하는 부영양 상태이다. 그리고 호수내 서식하는 생물군집 (지표종)은 서식기간

동안 변화하는 수환경의 상태를 종합적으로 반영하기 때문에 이를 호수의 부영양화도를 판정하는데 사용될 수 있다 (Harper, 1992). 식물플랑크톤의 우점종으로 영양상태를 판정할 경우에 부영양 호수에서 주로 하계에 우점하는 것으로 알려진 *Microcystis*가 절대 우점하고 있는 주암호는 부영양호로 분류될 수 있을 것이다. 이와 같이 평가 기법에 따라서 호수의 영양도는 달라질 수 있기 때문에 호수의 부영양화도 판정은 이화학적 수질 기준과 생물학적 지표종, 수문과 지형적 특성 등을 종합하여 신중하게 평가해야 될 것으로 사료된다.

주암호에서 수질항목간의 상호관계는 Fig. 6과 같다. 투명도는 총부유물질 ($r = -0.66$)과 엽록소 a ($r = -0.64$), 총인 ($r = -0.64$) 등과 3항목 모두 유사한 상관관계를 보여 이들 4개 항목들이 거의 각각의 항목에 대해 유사한 상관성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이들의 변화가 투명도 변화의 41~43%를 설명할 수 있는 것으로 나타나 부영양 호수에서 나타난 일반적인 결과 보다 상관성이 다소 낮게 나타났다.

엽록소 a 는 총인 ($r = 0.67$), 총부유물질 ($r = 0.75$)과는 상관성을 보였으나 총질소 ($r = 0.1$)와는 상관성을 보이지 않았다. 총인과 엽록소 a 농도는 일반적으로 온대호수에서 상관관계가 높은 것으로 알려져 있으나 주암호에서는 총인 농도의 변화가 엽록소 a 변화의 45% 정도 밖에 설명할 수 없다는 사실은 식물플랑크톤의 성장에 있어 인산염 이외에 다른 성장 제한요소가 있음을 시사하는 것이다. 하계에 용존인 농도가 높게 유지되고 있음에도 불구하고 엽록소 a 농도가 크게 증가하지 못한 것은 이 시기의 질산성 질소의 농도로 보아 질소결핍의 가능성이 있고 장마기간의 낮은 일사량과 수체의 교란도 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미친 것으로 보인다.

적 요

수자원관리에 중요한 육수학적 정보를 제공하기 위해 1993년 6월에서 1994년 5월까지 주암호에 대하여 월간 조사를 실시하였다. 표층의 투명도, 엽록소 a , 총질소, 총인농도 및 일차생산력은 조사기간 각각 1.7~4.5 m, 0.9~12.5 mgChl/m³, 0.53~1.48 mgN/l, 6~29 mgP/m³, 304~2,549 mgCm⁻² day⁻¹로 이들의 하계 평균농도로 산정한 주암호의 영양상태는 중영양호에 해당된다. 유역으로부터의 인 유입은 집중호우시에 다량 유입되기 때문에 총인 농도도 하계에 높고 동계에 낮다. 주암호의 연간 수면적당 인부하량은 0.94 gPm⁻² yr⁻¹로 부영양화 임계부하량 (1.0 gPm⁻² yr⁻¹)에 거의 근접하고 있다. 주암호

에서 식물플랑크톤에 대한 제한영양소 조사결과 인과 질소가 동시에 성장을 제한하는 요소로 나타났다. 식물플랑크톤군집의 계절별 천이양상은 온대호수의 일반적 경향과 같이 동계와 춘계에는 규조류 (*Asterionella formosa*, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*)가 우점하였고, 하계에는 남조류 (*Microcystis aeruginosa*, *M. sp.*, *M. viridis*)가 우점하였다. 동물플랑크톤은 요각류 유생이 연중 우점하였고 8월에는 요각류 유생 이외에 지각류인 *Bosminopsis longirostris*가 각각 우점하였다. 조사기간 주암호 퇴적물의 조사 정점별 유기탄소 및 인, 질소의 평균 함량은 각각 9.5~14.0 mgC/g, 1.0~1.82 mgP/g, 0.51~0.65 mgN/g의 분포를 보였다. 주암호 유역으로부터의 유기물 유입량은 1,122 tonC/yr이며 식물플랑크톤의 일차생산에 의한 자체생성 유기물량은 6,718 ton/yr으로 전체 유기물부하량중 자체생성 유기물 비율이 대부분을 차지했다. 주암호의 부영양화를 방지하기 위해 앞으로의 유역관리는 점오염원의 관리와 더불어 비료사용량의 감소, 축산분뇨의 적절한 처리, 토양유실방지 등 유역의 비점오염원에 대한 관리에 더욱 집중해야 할 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 환경부의 1993년도 연구용역비의 일부로 수행되었음. 시료채집을 도와준 강원대학교 환경학과 전 만식, 채기숙, 이윤희에게 감사의 뜻을 표한다.

인 용 문 헌

- 김범철, 조규송, 허우명, 김동섭. 1989. 소양호 부영양화의 연 변화 추이, 한국육수학회지 **22**: 151-158.
- 김동섭, 김범철, 황길순, 박주현. 1995. 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994), 한국수질보전학회지 **11**: 295-302.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 최광순, 채기숙. 1997. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (1): 옥정호, 한국육수학회지 **30**: 431-449.
- 김범철, 박주현, 임병진, 허우명, 황길순, 채기숙, 최광순. 1998. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (2): 합천호, 한국육수학회지 **31**: 312-327.
- 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내 주요호수의 육수학적 조사 (3): 진양호, 한국육수학회지 **32**: 111-126.
- 신정래, 김영환. 1986. 산소소비량 (OC)분석법. "환경오염측정 분석법 수질분야 2; DO, BOD, OC측정분석법"에서. 녹원출판사, 서울.
- 심수용. 1998. 우리나라의 비료와 사료에 기인하는 비점오염

- 원의 질소, 인 배출량, 강원대학교 석사학위논문.
- 이기중, 허우명, 김범철. 1993. 대청호 유역과 가두리양어장으로부터의 인부하량과 인수지, 한국수질보전학회지 **9**: 114-121.
- 이옥민. 1994. 주암호의 연간('92) 식물플랑크톤의 분포 및 현존량의 동태, 한국육수학회지 **27**: 327-337.
- 이옥민, 송호영. 1995. 주암호의 연간('93) 식물플랑크톤의 분포 및 현존량의 동태, 한국육수학회지 **28**: 427-436.
- 임병진. 1992. 한강하류계에서 동물플랑크톤 군집의 생태학적 연구, 한양대학교 박사학위 청구논문 pp. 192.
- 최민규, 김백호, 정연태, 위인선. 1994. 주암호의 식물플랑크톤 군집의 출현과 동태, 한국육수학회지 **27**: 79-91.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로부터의 인 부하량 및 인수지, 한국육수학회지 **25**: 207-214.
- 환경부. 1993. 수질오염공정시험법.
- 환경부. 1994. 전국호소환경현황조사 및 주요호소영향권역설정 최종보고서.
- 황길순, 김동섭, 허우명, 김범철. 1994. 대청호의 일차생산과 가두리양어장 및 유역으로부터의 유기물 부하량, 한국육수학회지 **27**: 299-306.
- 황영진, 김종선, 나명석, 최한호, 최종길. 1995. 이사천수계 및 주암호와 상사호의 어류군집에 관한 연구, 한국육수학회지 **28**: 403-412.
- APHA, AWWA, AEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. APHA. Washington.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Cho, K.S., B. Kim, W.M. Heo and D.S. Kim. 1991. Eutrophication of the major reservoirs in Korea. *Rep. Suwa Hydrobiol.* **7**: 21-29.
- Forsberg, D. and Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. für Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Hakanson, L. 1984. On the relationship between lake trophic level and lake sediments. *Water Res.* **18**: 302-314
- Hansen, K. 1961. Lakes types and lake sediments. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **14**: 285-290.
- Happer, D. 1992. Eutrophication of Freshwaters. Chapman and Hall, UK. pp. 327.
- Hesslein, R., and P., Quay. 1973. Vertical eddy diffusion studies in the thermocline of a small stratified lake. *J. Fish. Res. Bd. Canada* **30**: 1491-1500.
- Hieltjes, A.H.M. and L. Lijklema. 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediment. *J. Environ. Qual.* **9**: 405-407.
- Hirose, H. and T. Yamagishi. 1977. Illustration of the Japanese fresh-water algae. Uchidaroka-kuno Publishing Co.
- Hutchinson, G.E. 1967. A Treatise on Limnology. Vol II. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Ichimura, S. and Y. Aruga. 1964. Photosynthetic natures of natural algal communities in Japanese waters. In Recent Researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry. Eds. Y. Miyake and T. Koyoma, Maruzen, Tokyo. pp. 13-37.
- Jassby, A.D. and T. Powell. 1975. Vertical patterns of eddy diffusion during stratification in Castle Lake, California. *Limnol. Oceanogr.* **20**: 530-543
- Jones, J.R. and M.F. Knowlton. 1993. Limnology of Missouri reservoirs; An analysis of regional patterns. *Lake and Reserv. Manage.* **8**: 17-30
- Kim, B. and D.S. Kim. 1989. Primary productivity by photosynthesis-irradiance model method in Lake Soyang and the behavior of model parameters. *Korean. J. Limnol.* **22**: 167-177.
- Kim, B. and K.S. Cho. 1989. The Hypolimnetic Anoxic Zone and the Metalimnetic Oxygen Minimum Layer in a Deep Reservoir, Lake Soyang. *Korean. J. Limnol.* **22**: 159-166.
- Kim, B. J.H. Park, G. Hwang and K. Choi. 1997. Eutrophication of large freshwater ecosystems in Korea. *Korean J. Limnol.* **30**: 512-517.
- Likens, G.E. 1975. Primary production of inland aquatic ecosystems. In H. Lieth and R. W. Whittaker, eds. The Primary Productivity of the Biosphere. New York, Springer-Verlag. pp. 185-202.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- Mcqueen, D.J., D.R.S. Lean and M.N. Charlton. 1986. Influence of water temperature and nitrogen to phosphorus ratio on the dominant bluegreen algae in Lake St. George, Ontario. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.* **44**: 598-604.
- Mizuno, T. 1964. Illustrations of the Freshwater Plankton of Japan. Hoikusha Publishing Co. Ltd. Japan.
- Platt, T., C.L. Gallegos and W.B. Harrison. 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.* **38**: 687-701.
- Rast, W. and G.F. Lee. 1978. Summary analysis of the North American{U.S.portion}OECD Eutrophication Project: Nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices. U.S. Environm. Protection Agency Rept. EPA.600/3-78-008. pp. 455
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1948. The Mathematical Theory of Communicatin University of Illinois Press,

- Urbana.
- Sukhanova, I.N. 1978. Settling without the inverted microscope. in "phytoplankton Manual"ed. A. Sourinia, UNESCO.
- USEPA. 1974. Lake Restoration. US Environmental Protection Agency, Minneapolis, Minnesota.
- Vollenweider, R.A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* **33**: 53-83.
- Wetzel, R.G. 1983. Limnology. 2nd ed. W.B. Saunders, Philadelphia.

(Received 10 Jan. 2001, Manuscript accepted 2 Mar. 2001)