

동해안 석호의 육수학적 조사(3): 화진포호

허우명* · 권상용 · 이재일 · 김동진¹ · 김범철²

(삼척대학교 환경공학과, ¹원주지방환경관리청, ²강원대학교 환경학과)

The Limnological Survey of a Coastal Lagoon in Korea (3): Lake Hwajinpo. Heo, Woomyung*, Sangyong Kwon, Jaeil Lee, Dongjin Kim¹ and Bomchul Kim² (Department of Environmental Engineering, Samchok National University, Samchok, 245-711, Korea. ¹Wonju Regional Environmental Management Office, Wonju 220-041, ²Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chunchon, 200-701)

Physicochemical parameters, plankton biomass, and sediment were surveyed from 1998 to 2000 at two months interval in a eutrophic coastal lagoon(Lake Hwajinpo, Korea). The lake is separated from the sea by a narrow sand dune. Littoral zone is well vegetated with floating-leaved aquatic plants. The lake basin is divided into two subbasins by a shallow sill. It has intrusion of seawater by permeation and stormy waves. Stable chemoclines are formed by salinity difference at 1m depth all the year round. DO was often very low ($< 1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$) at hypolimnion. Temperature inversions were observed in November. Nitrate and ammonium concentrations were very low ($< 0.1 \text{ mgN L}^{-1}$), even though TN was usually $2.0 \sim 3.5 \text{ mgN L}^{-1}$. TN/TP was generally lower than the Redfield ratio. Transparency was $0.2 \sim 1.7 \text{ m}$, and COD, TP, and TN of sediment were $3.1 \sim 40.3 \text{ mgO}_2 \text{ g}^{-1}$, $0.91 \sim 1.39 \text{ mgP g}^{-1}$, and $0.34 \sim 3.07 \text{ mgN g}^{-1}$, respectively. Phytoplankton chlorophyll-*a* concentrations were mostly over 40 mg m^{-3} . Two basins showed different phytoplankton communities with *Oscillatoria* sp., *Trachelomonas* sp., *Schizochlamys gelatinosa*, and *Anabaena spiroides* dominant in South basin, and with *Trachelomonas* sp., *Schroederia* sp., *Schizochlamys gelatinosa*, and *Trachelomonas* sp. dominant in the North basin. The seasonal succession of phytoplankton was very fast, possibly due to sudden changes in physical conditions, such as wind, turbidity, salinity and light.

Key words : Lagoon, Lake Hwajinpo, chemocline, TSI, TN/TP ratio

서 론

화진포호는 해류의 작용으로 사구(dune)에 의해 생성된 자연호수로서 수심이 얇고 해수의 영향을 항상 받고 있으며 수면의 경사가 완만하고 연중 수위가 안정되어 습지 식생이 잘 발달되어 있다. 화진포호는 담수호와 달리 해수와 담수가 혼합되어 기수(汽水)호의 특성을 지니

며 수심이 비교적 얇음에도 불구하고 표층과 심층의 수직혼합이 극히 제한되어 심층 산소고갈 현상이 자주 발생한다. 동해안의 기수호는 담수와 해수의 교류가 빈번하며 내륙의 인공호나 자연호에 비하여 생태학적으로 독특한 특징을 지니고 있다(홍 등, 1969). 이러한 특징 때문에 기수호에는 고염분에 대한 내성이 강한 담수기원종과 저염분에 대한 내성이 강한 해양기원종 등이 서식한다. 기수호는 영양염류의 주기적 유입으로 특정종의 대량번식

* Corresponding author: Tel: 033) 570-6573, Fax: 033) 574-7262, E-mail: woomyheo@samcheok.ac.kr

에 의해 생산성은 높으나 생물다양성이 낮은 특징이 있다. 기수호는 특정생물과 환경과의 상관관계를 연구하는데 필요한 여러 가지 제반 조건을 갖추고 있는 야외실험실이라 할 수 있다(김 등, 1997). 또한 기수호는 담수생물과 해양생물 및 기수생물 등이 공존하는 생태계로서 담수와 해양 생태계에서 찾아 볼 수 없는 독특한 자연환경 특성을 지니고 있다(원주지방환경관리청, 1997).

동해안의 석호는 최북단에 위치한 화진포호부터 풍호까지 10여개에 이른다. 이중 화진포호는 호수면적이 가장 넓으며, 유역면적이 비교적 넓고 오염원이 많은 남호와 오염원이 비교적 적은 북호로 되어 있다. 남호와 북호는 좁은 수로로 연결되어 있어 수평적 혼합이 극히 제한되며 남호의 경우 수체의 정체가 극히 심하다. 담수와 해수가 공존하는 특성 등으로 인해 호수내에는 화학성층이 항상 형성되어 있다(Huzzey et al., 1994). 유역에 산재한 면오염원 등으로부터 다량의 영양염류가 유입되어 종종 식물플랑크톤의 대량 증식이 발생한다. 일반적으로 호수의 부영양화현상은 인의 유입에 의해 일어나며, 이에 따라 식물플랑크톤의 현존량 및 생산력이 증가하고 투명도가 감소하게 된다. 질소(N), 인(P) 등 영양염류가 과다하게 유입되면 일차적으로 조류가 증가하고 저질 퇴적층이 축적되어 영양염 재순환이 활발해 지는 등 수질이 악화된다. 인은 토양 또는 생물체가 분해된 유기물 입자에 존재하여 용해성 인의 양은 적으며 생물학적으로 유용한 인이 질소보다 적다(Horne and Goldman, 1994). 일반적으로 N/P 비율이 10~17 이상일 때는 P가 N에 비해 상대적으로 결핍된 것으로 평가하며 일차적으로 조류의 성장을 제한하는 것으로 알려져 있다(Smith, 1982). 허 등(1999)은 동해안 석호의 부영양화 평가에서 동해안 석호의 TN/TP 비는 6~14로 하구호(20~30)보다 낮은 수준이라 하였다. 국내에 비교적 규모가 큰 호수 및 저수지 등에 관한 연구는 오랜기간 지속적으로 이루어져 많은 연구 자료가 있으나 화진포호와 같은 동해안의 석호는 자연 호수가 가지는 희소성에도 불구하고 연구 결과가 미비한 실정이다. 화진포호는 홍 등(1969)이 2회에 걸쳐 이화학적 수질과 플랑크톤상을 밝힌 연구가 있으며, 엄(1971)은 기수호인 화진포와 영랑호 등을 대상으로 식물플랑크톤군집의 생산구조를 엽록소의 수직분포로서 파악하고 이로써 각 호소의 유형화를 시도한 바 있다. 홍과 나(1975)는 향호, 매호, 영랑호, 송지호, 광포호 및 화진포 등을 대상으로 4회에 걸쳐 수질과 플랑크톤을 조사하여 육수학적 특징을 조사하였다. 그리고 조 등(1975)은 같은 시기에 동해안의 기수호군인 향호, 매호, 영랑호, 광포호, 송지호 및 화진포호 등 6개 기수호에 대하여 플랑크톤의

분포를 조사하고 수질과의 관계에 따른 기수호의 특성을 밝힌 바 있다. 김 등(1981)은 이화학적 수질 특성, 생산잠재력, 부유생물, 저서생물 및 유영생물 등을 조사한 바 있다. Osamu et al. (1984)은 요소 및 용존유기탄소, 질소, 인에 관하여, 편(1984) 등은 기수호 환경 및 생물상 등을 조사 보고한 바 있다. 전 등(1996)은 동해안 자연 호수의 수질조사와 관련하여 동해안 대부분의 자연호가 엽록소 a와 총인을 기준으로 볼 때 과부영양화 수준에 있음을 지적하였다. 허 등(1999)도 수질 및 식물플랑크톤 등의 자료를 토대로 동해안 석호의 부영양화 평가를 시도하였다. 동해안의 석호는 우리나라에 몇 안되는 자연호로 과거부터 절경으로 이름난 곳이며 자연경관이 매우 아름다울 뿐 아니라 기수호 생태계로서의 희소가치와 자연호가 지닌 습지의 생태학적 특성 등으로 볼 때 보존가치가 매우 높다.

따라서 본 연구에서는 화진포호에 대한 육수 생태학적 연구의 기초자료가 되는 기초수질항목, 영양염류, 저질 및 플랑크톤의 분포를 조사 하였다.

재료 및 방법

화진포호의 수표면적과 유역면적은 각각 2.3 및 19.9 km²이다 (Table 1). 수표면적은 북호에 비해 남호가 4배 정도 크며, 유역면적은 3배 정도 크다. 수위 변동은 유입수량이 적어 강우시를 제외하고는 비교적 적다. 화진포 지역의 지난 30년간 연평균 강수량은 약 1,422 mm이었으며, 여름철인 6월부터 9월 사이에 전체 연 강수량의 약

Table 1. Hydrological characteristics and utilization of drainage basin and generation loadings (N, P) of Lake Hwajinpo.

Surface area (km ²)	2.3 (0.46 ¹ /1.84 ²)
Drainage area (km ²)	19.9 (4.86 ¹ /15.08 ²)
Maximum depth (m)	4.6 (3.5 ²)
Drainage area : Surface area ratio (N)	8.7 (11 ¹ /8 ²)
Field area in drainage basin (km ²)	4.19
Forest area in drainage basin (km ²)	10.97
Livestock in drainage basin	
cattle	753
pig	936
poultry	227
Population in drainage basin (persons)	1,739
Generation N loading (kg day ⁻¹)	270
Generation P loading (kg day ⁻¹)	48

¹North area, ²South area

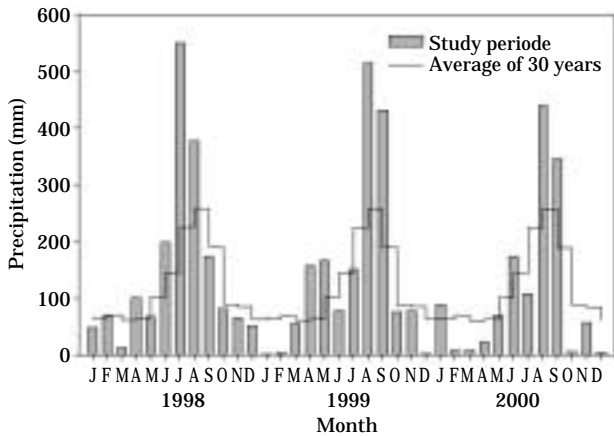


Fig. 1. Monthly Precipitation of the Sokcho city.

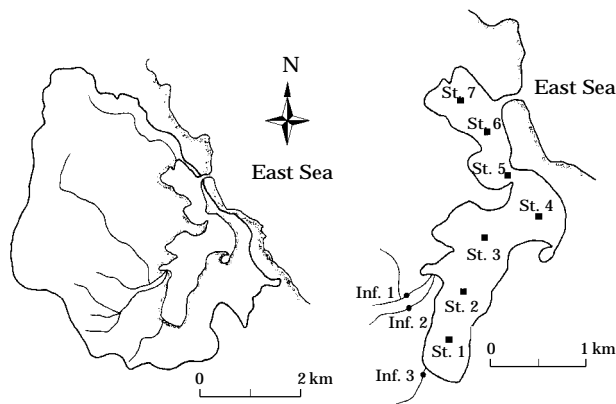


Fig. 2. Map showing the watershed (left) and sampling sites (right) of Lake Hwajinpo.

60% 정도가 집중되는 것으로 나타났다 (Fig. 1). 2000년에는 약 1,345 mm로 6월부터 9월 사이에 80% 정도가 내려 유역의 토양 유출 등으로 인한 수중 생태계에 많은 영향을 미친 것으로 보인다. 특히, 최근 몇 년간은 엘리뇨 등 이상기온 현상으로 예년과 달리 강우량의 분포가 일정하지 않은 것으로 나타났다. 화진포호의 수리학적 특성 및 유역의 이용현황, 오염 부하량은 Table 1과 같으며, 각 발생원별 원단위는 국립환경연구원 (1990)의 자료를 사용하였다. 오염발생량은 질소와 인의 경우 각각 270와 48 kg day⁻¹이었다.

수질 및 저질 조사는 1998년부터 2000년까지 4~7개의 정점에서 겨울의 결빙시기를 제외하고 2개월 간격으로 조사하였다 (Fig. 2). 시료는 PVC Van Dorn 채수기로 채수하였으며 채수된 시료는 GF/C 0.45 μm glass filter로 여과하였다. Filter paper는 냉동보존 하였다가 엽록소 a

측정에 사용하였고 Lorenzen (1967)의 방법으로 농도를 계산하였다. 여과한 물은 영양염류 분석을 위해 사용하였으며 질산성질소, 암모니아성 질소는 수질자동분석기 (AutoAnalyzer3, BRAN+LUEBBE), 용존 무기인 (PO₄-P)은 Standard methods (APHA, 1992)의 ascorbic acid법으로 분석하였다. 총인과 총질소 분석용 시료는 여과하지 않은 시료를 사용하여 persulfate digestion 후 총인은 ascorbic acid법, 총질소는 cadmium 환원법을 이용한 수질자동분석기 (AutoAnalyzer3, BRAN+LUEBBE)를 이용하여 분석하였다. COD는 과망간산칼륨법 (수질오염 공정시험방법)으로, 투명도는 30 cm 투명도판을 사용하여 측정하였으며 수온 (Temperature), 용존산소 (Dissolved oxygen), 염분도 (Salinity), 전기전도 (Conductivity) 및 pH는 Multiprobe (YSI6000)을 이용하여 현장에서 측정하였다. 저질내의 존재형태별 인 (P) 분석은 Hieltjes와 Lijklema (1980)의 방법을 따랐다.

식물플랑크톤은 PVC Van Dorn 채수기로 채수하여 Lugol's solution으로 고정하고 실험실로 운반하여 안정된 실험대에 1주일간 정치한 후 Siphon으로 위쪽부터 차례로 48시간 동안 농축하여 광학현미경하에서 Mizuno (1964)와 Hirose and Yamagishi (1977)에 따라 동정하였다. 동물플랑크톤은 호소용 플랑크톤 네트 (구경 25 cm, 망목의 크기 75 μm)을 사용하여 선정된 1개 정점에서 수직에망 채집한 후 현장에서 중성포르말린으로 최종농도가 5%가 되도록 고정하여 실험실로 운반하였다. 동물플랑크톤의 정성분석을 위하여 시료를 hole-slide glass에 넣고 lactic acid로 연화시킨 후 해부현미경하에서 각 동물군별로 분류의 특징이 되는 외부형태를 해부하였다. 이후 표본보존액에 봉입 일시 프레파라트를 만들어 광학현미경하에서 동정, 분류하였다. 한편 정량분석은 농축된 시료의 일정량 (10 mL)을 취한 후 Bogorov Counting Chamber에 넣고 계수하여 이를 다시 단위체적당 개체수 (indiv. m⁻³)로 환산하여 생물량으로 표시하였다. 부영양화도 지수 (Trophic State Index, TSI)는 Carlson (1977)과 Havens (2000)이 제시한 투명도, 엽록소 a 농도, 총인 및 총질소로부터 계산하였다.

결과 및 고찰

1. 수온, 염분, 용존산소 및 투명도

수온은 조사기간 중 7.9~28.6°C의 범위로 계절적으로 대기 기온 변화와 유사하였으며 심층으로 갈수록 낮았다. 그러나 11월의 경우 정점 7에서는 심층의 수온이 더

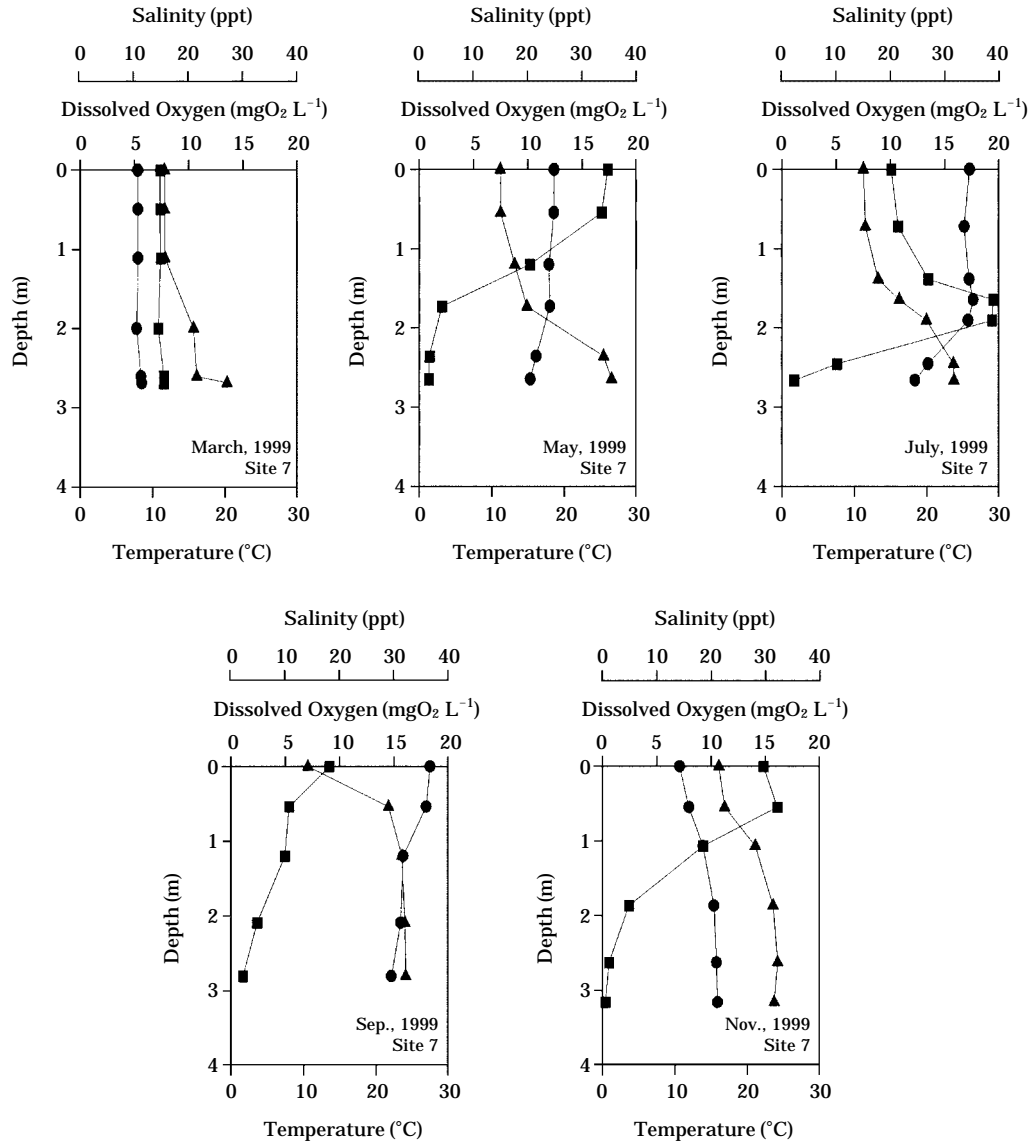


Fig. 3. Vertical profiles of temperature, dissolved oxygen and salinity at the Site 3 (●: Temp., ■: DO, ▲: Sal).

높은 수온 역전현상이 나타났다(Fig. 3). 이는 수심이 얇음에도 불구하고 대기의 기온에 의해 낮아진 표층의 수온이 중층에 강하게 형성된 화학성층(chemocline)으로 인해 표층과 심층간의 수직혼합이 극히 제한되었기 때문인 것으로 보인다. 허 등(1999)도 동해안 석호의 부영양화 평가에서 겨울 기간에 심층에서 수온역전 현상이 나타난다고 밝힌 바 있다.

염분의 수직분포는 용존산소(DO) 및 수온(temperature)의 분포에도 많은 영향을 미치는 것으로 보인다. 염분이 급격한 증가를 보이는 수심에서 화학성층이 형성되었으며 수층간의 상하 혼합이 제한되는 것으로 나타났

다. 이러한 결과로 수체의 정체가 심화되는 심층은 혐기성 상태가 유지되면서 유기물분해가 매우 느리게 진행되는 것으로 판단된다. 또한 염분은 복호의 배수구역 부근과 심층에서 해수의 영향으로 높게 나타났다(Fig. 4). 화진포호는 해수의 영향을 항상 받는 곳으로 중층에 염분에 의한 화학성층이 형성되어 있어 수심이 얇음에도 불구하고 표층과 심층의 수체 혼합이 극히 제한된다. 하구나 석호에서는 담수의 유입이나 지하수의 침투로 화학성층이 형성된다(Huzzey et al., 1994). 화학성층은 바람, 조수 및 담수의 유입에 의해 파괴되기도 한다(Schroeder et al., 1990; Uncles et al., 1990). 이러한 요인들 중에서 담

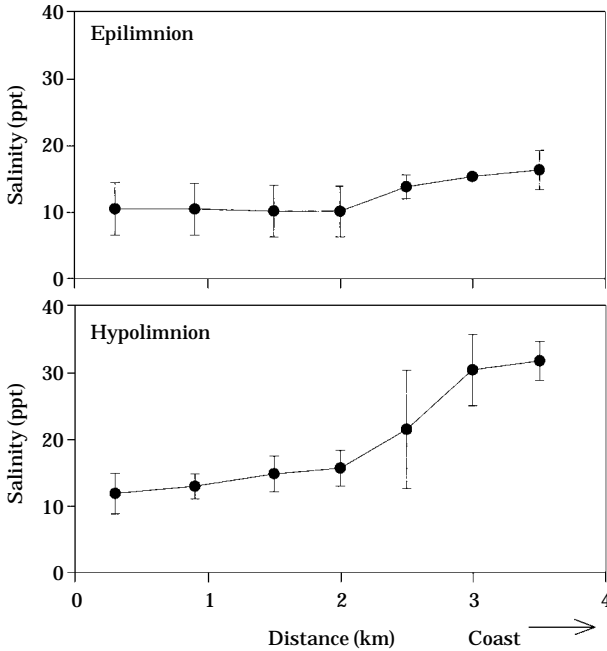


Fig. 4. Horizontal variations of salinity (%) in the epilimnion and the hypolimnion.

수의 유입은 성층화와 성층파괴 과정에서 가장 중요하다 (Schroeder *et al.*, 1990). 일반적으로 연안의 석호에서는 혼합이 잘 일어나더라도 담수의 유입으로 인한 수평적인 염분 분포가 나타나는 것으로 알려져 있다 (Wolanski *et al.*, 1990).

표층의 용존산소는 1999년 5월에 모든 정점에서 $15.6 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 보였는데 이는 식물플랑크톤의 과다 번식으로 광합성량이 크게 증가하였기 때문으로 보인다. 화학성층 이하의 수심에서는 염분에 의한 용해도 감소와 다량의 유기물 분해과정에서 용존산소 농도가 급격히 낮아진 것으로 보인다. 2000년 7월 남호의 정점 4를 제외한 대부분의 수심에서 $1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 내외의 낮은 농도를 보인 것은 바람에 의한 수체의 혼합으로 용존산소량이 적은 심층수가 표층으로 이동한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 유기물을 함유하고 있는 저니층의 부상으로 유기물 분해 과정에서 용존산소를 소모했을 가능성 등을 들 수 있다. 수심이 얇은 해안의 석호에서는 바람이 혼합을 일으키는 중요한 인자이다 (Simth, 1990). Mizuno *et al.* (1980)은 화진포호 조사에서 심층의 용존산소가 고갈상태를 보였고, 특히 여름철의 경우 무산소층이 중층부근까지 상승한다고 밝힌 바 있다. 본 조사에서도 계절적으로는 5월부터 심층에서 무산소층이 형성되는 것이 관찰되었으며, 매년 반복되는 것으로 보인다.

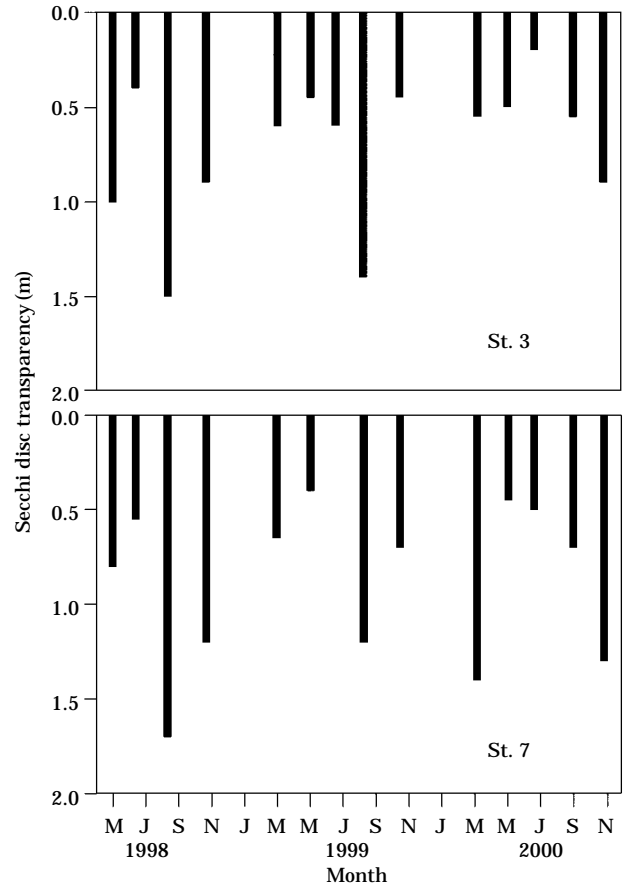


Fig. 5. Monthly variations of Secchi disc transparency (m) in the Site 3 and Site 7.

수환경에서 투명도에 영향을 주는 주요 요인으로는 용해성 물질에 의한 색도, 토사 등의 무기성 현탁고형물과 유기성 현탁고형물 등이 있는데, 일반적으로 호수에서는 총인 농도와 엽록소 농도가 높은 상관성이 있으며, 투명도는 엽록소 농도와 역상관을 갖는 것이 일반적으로 알려진 사실이다 (오, 1998). 조사기간 동안 투명도는 0.2~1.7 m의 범위로 2000년 7월에 정점 3에서 0.2 m로 가장 낮은 값을 보였는데 (Fig. 5) 이는 식물플랑크톤의 다량번식 및 강우로 인한 토사유출에 기인한다. 2000년 7월에 남호의 엽록소 a와 SS의 농도는 각각 145.8 mg m^{-3} 및 35.0 mg L^{-1} 로 높았었다. 호수내의 부유물질은 주로 식물플랑크톤, 강우시 유입되는 무기현탁물 및 호수내에서 저니의 부상 등으로 발생한다. 화진포호에서는 북호에 비해 남호에서 낮은 투명도를 보이고 또한 COD와 SS의 농도가 높게 나타나는데 이는 ① 호수의 부영양화에 따른 식물 플랑크톤의 다량 번식, ② 강우로 인한 무기현탁물의 유입, ③ 파도 등 기상변화에 의한 저니층의 교란 및 부

상에 따른 부유물질의 증가가 주요한 원인으로 판단된다. 허 등(1999)은 경포호 및 영랑호의 투명도가 0.5 m 내외로 낮은 것은 준설에 따른 퇴적층의 교란으로 부유물질이 증가한 것에 기인한다고 하였다. OECD(1982) 기준으로 볼 때, 연평균 투명도가 1.5 m 이하는 과영양 단계인데, 화진포호의 경우 조사기간동안 강우로 인한 토사 유입 및 바람에 의한 저질의 교란을 감안하더라도 매우 부영양화된 호수임을 알 수 있다.

2. 영양염류, 엽록소 a 농도 및 부영양화도 지수 (TSI)

표층의 총인 농도는 0.024~0.275 mgP L⁻¹의 분포로 북호에 비해 남호에서 비교적 높았으며 (Fig. 6), '98년 9월에 정점 2와 '99년 7월에 정점 1에서 각각 0.255와 0.275 mgP L⁻¹로 가장 높았다. 총인 (TP) 및 용존무기인 (DIP)은 계절별로 경작이 시작되는 봄철과 우기 이후의 시기에 높은 농도를 보였다. 또한 북호에 비해 남호에서 높은 농도를 보인 것은 주위에 산재된 비점 오염원으로부터 유입되는 하천이 남호에 치우친 영향이 큰 것으로 보인다. 특히 이 시기에 남호에서 암모니아성 질소의 농도도 높아진 것으로 보아 시비지역의 농경배수에 따른

것으로 보인다. 일반적으로 호수에 유입되는 인 농도는 우기시에 증가한다는 허 등(1992)의 보고가 있다. 또한 허 등(1999)은 동해안 석호의 부영양화 평가에서 해수와 가까운 호수에서 인의 농도가 낮아진다고 보고하였는데 화진포호에서도 이와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 유입된 용존무기인은 조류가 바로 이용할수 있는 형태로써 해로운 조류의 대발생은 무기인 농도가 0.010 mgP L⁻¹ 이상일 때 일어난다 (Sawyer, 1947). 따라서 화진포호의 무기인 농도는 '98~'00년 평균 0.015 mgP L⁻¹로 해로운 조류 발생이 예상된다. 특히 화진포호의 높은 인 농도는 첫째, 수체의 체류시간이 길고 둘째, 유역으로부터 유입되는 토사의 대부분이 호수내에 침전되고 셋째, 호수 주변에 번성한 수초대가 자라고 죽고를 반복하면서 수체에 배출된 퇴적물들이 심층 무산소층 형성으로 인해 저질토로부터의 인용출이 활발하게 일어나기 때문인 것으로 보인다 (권, 2000). Theis and McCabe (1978)는 저질토로부터의 인용출이 호기성 상태보다 혐기성 상태에서 더 빠르게 일어난다고 보고한 바 있다. 총질소는 표층의 경우 0.24~3.15 mgN L⁻¹의 범위로 북호에 비해 남호에서 높았다 (Fig. 7). 총질소 (TN)의 경우 봄철과 우기시에 증가하였고, 총질소와 마찬가지로 암모니아성 질소의 농도도 높은 것으로 보아 봄철 주변 농경지의 시비와 관련이 큰 것으로 보인다. 질소 유실은 토지이용 정도와

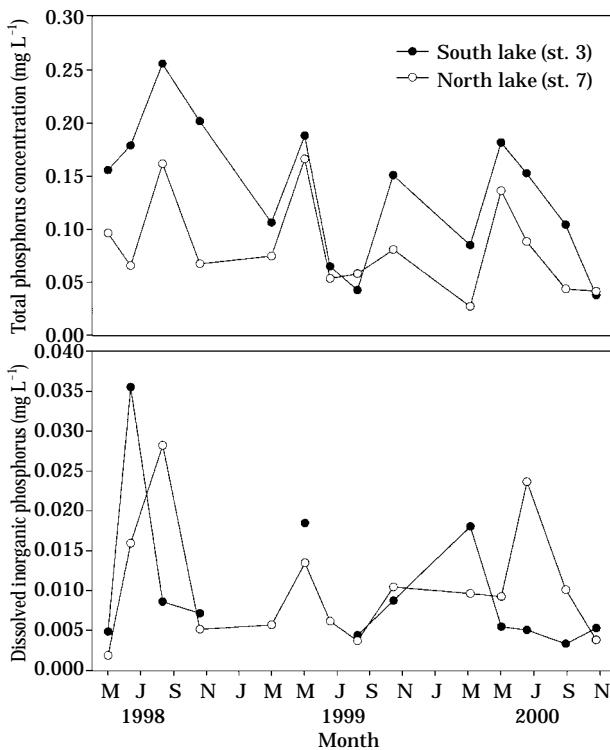


Fig. 6. Monthly variations of TP and DIP concentration (mgP L⁻¹) in the Site 3 and Site 7.

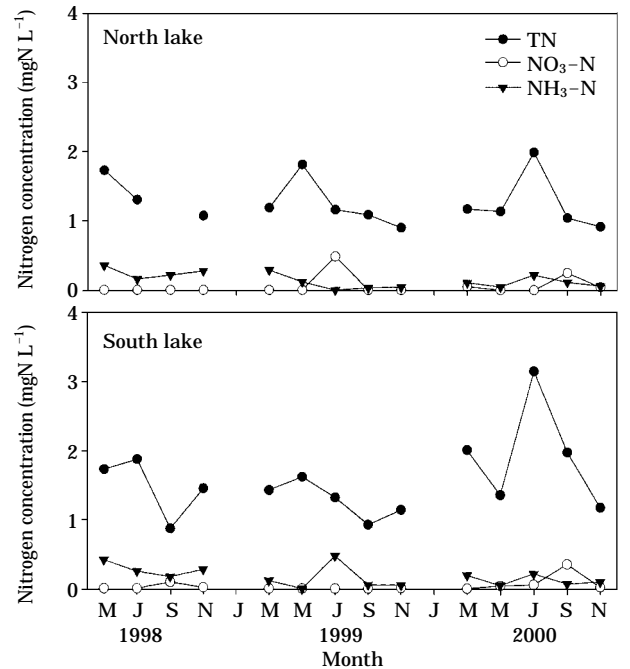


Fig. 7. Monthly variations of nitrogen concentration (mgN L⁻¹).

Table 2. Monthly variations of nutrients and chlorophyll *a* concentration. Values are average of south and north lake of Hwajinpo.

Year	Month	Site	SiO ₂ (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	DIP (mg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (mg m ⁻³)	TN/TP	
'98	May	South	—	0.159	0.004	1.88	0.00	0.43	45.5	12	
		North	—	0.121	0.002	1.90	0.00	0.32	34.7	16	
	Jul.	South	—	0.126	0.033	1.77	0.00	0.21	42.1	17	
		North	—	0.128	0.011	1.00	0.00	0.14	11.6	12	
	Sep.	South	—	0.199	0.012	1.01	0.55	0.19	10.4	6	
		North	—	0.163	0.021	—	0.01	0.21	7.2	—	
	Nov.	South	—	0.131	0.008	1.44	0.01	0.28	60.3	15	
		North	—	0.091	0.033	1.17	0.00	0.28	33.4	13	
'99	Mar.	South	—	0.143	0.013	1.48	0.00	0.12	40.6	11	
		North	—	0.073	0.005	1.15	0.00	0.20	28.6	16	
	May	South	—	0.220	0.020	1.77	0.00	0.02	81.1	8	
		North	—	0.177	0.014	1.81	0.00	0.07	86.9	10	
	Jul.	South	—	0.169	0.018	1.94	0.00	0.25	69.9	15	
		North	—	0.071	0.007	1.36	0.24	0	22.2	20	
	Sep.	South	—	0.058	0.016	0.97	0.01	0.12	24.5	18	
		North	—	0.051	0.029	0.96	0.00	0.05	26.1	19	
	Nov.	South	—	0.124	0.009	1.03	0.00	0.05	76.2	8	
		North	—	0.071	0.010	0.76	0.01	0.05	17.9	11	
	'00	Mar.	South	0.0	0.081	0.019	1.75	0.00	0.18	48.7	22
			North	0.1	0.049	0.016	1.36	0.06	0.17	53.1	33
May		South	0.0	0.195	0.007	1.41	0.07	0.07	33.1	7	
		North	0.1	0.079	0.009	0.69	0.00	0.04	33.2	9	
Jul.		South	21.1	0.134	0.023	2.95	0.04	0.50	122.4	22	
		North	6.9	0.094	0.022	2.01	0.04	0.26	34.8	22	
Sep.		South	8.4	0.118	0.003	1.80	0.38	0.08	92.6	16	
		North	6.8	0.056	0.008	1.26	0.30	0.10	26.5	23	
Nov.		South	4.9	0.047	0.005	0.95	0.09	0.09	36.8	22	
		North	4.9	0.045	0.004	0.81	0.08	0.31	10.3	18	

시비량 증가에 따라 크게 늘어나는데 이는 용해성 질소 복합물의 이동이 용이하기 때문인 것으로 판단된다. 표층의 질산성질소는 대부분 지점에서 고갈 상태를 보였으나 남호의 유입수 부근이나 해안과 인접한 부근에서는 낮은 농도지만 질산성질소가 관찰되었다. 낮은 질산성 질소의 농도는 식물플랑크톤의 성장에 제한 영양염으로 작용하고 있을 가능성이 큰 것으로 판단된다 (Table 2). 암모니아성 질소는 0.00~0.78 mgN L⁻¹의 범위로 남호에서 비교적 높았으며, 조사기간중 북호에서의 평균값은 0.00~0.32 mgN L⁻¹로 비교적 낮았다. 특히 '99년 7월 북호에서는 고갈상태를 나타냈다. 표층과 심층에서 질소의 존재형태별 구성 비율은 유기질소, 암모니아성질소 및 질산염순으로 유기질소가 많은 부분을 차지하고 있으며, 암모니아성 질소의 경우 표층에 비해 심층에서 2배 이상 높았다 (Fig. 8). 이는 심층에서의 무산소층 형성으로 인한 혐기성 분해로 표층에 비해 심층에서 2배 이상 높아진 것으로 보인다. TN/TP 무계비는 3~44의 범위로 '98년 9월

에 정점 2에서 가장 낮았으며, 남호와 북호의 평균값은 각각 14와 17로 남호에서 낮았다. 또한 TN/TP 비가 16보다 대부분 낮았으며, 엽록소 *a*의 양이 증가하는 시기에 낮은 TN/TP 비를 보이는 것으로 보아 인보다는 질소가 제한영양염으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 정점별 TN/TP 무계비는 남호에서 북호로 갈수록 다소 증가하는 것으로 나타났다. 남호가 북호에 비해 좀더 부영양화된 상태를 고려할 때, TN/TP 비가 부영양화와 크게 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한 전반적으로 TN/TP 비가 작은 값을 보였는데, 이는 질소가 상대적으로 인에 비해 적기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 호수의 부영양화를 방지하기 위해서는 유역으로부터 유입되는 인부하량 감소가 절대적으로 필요하다고 판단된다. 일반적으로 해수의 경우 질소가 제한영양염으로 작용하는 것으로 알려져 있으며, 화진포호의 경우는 해수의 특성을 보이는 것으로 보인다. U.S. EPA (1976)에서는 Chl. *a* 농도가 10 mg L⁻¹ 이상, Likens (1975)는 총인과 총질소에 대해 총인은 30

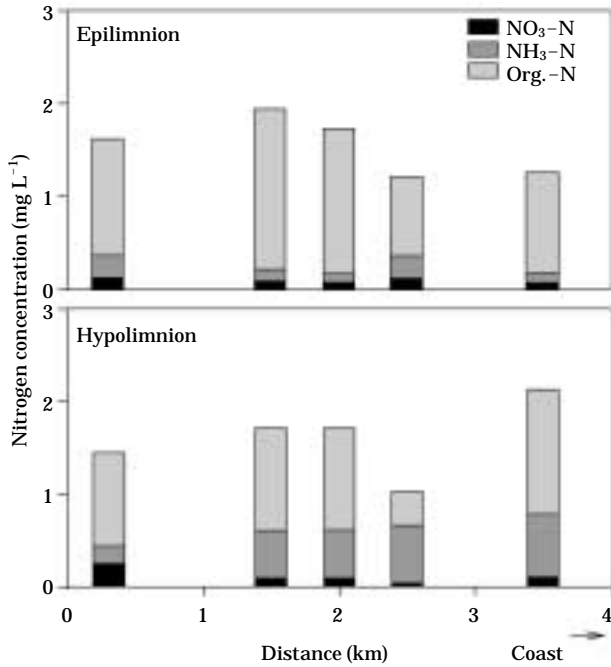


Fig. 8. Distributions of the monthly average nitrogen concentration (NO₃-N, NH₃-N, Org.-N) in the epilimnion and the hypolimnion according to distance.

mgP m⁻³ 이상, 총질소는 1.1 mgN L⁻¹ 이상, Vollenweider (1968)는 총인과 무기질소에 대해 각각 10 mgP m⁻³과 300 mgN L⁻¹이면 부영양화 수준이라고 분류하였다. 이러한 기준으로 볼 때 화진포호는 부영양화 수준을 초과하고 있는 것으로 보인다.

표층의 엽록소 *a* 농도는 조사기간동안 3.5~145.8 mg m⁻³의 비교적 넓은 범위를 보였다. 계절적으로는 여름보다 봄에 높은 경향을 보였으나 남호의 경우 겨울철인 11월에 50 mg m⁻³ 내외의 높은 값을 보였다. 조사기간중 남호의 11월 평균 농도는 '98, '99 및 '00년에 각각 60.3, 68.9 및 54.7 mg m⁻³이었다. 이는 봄철의 규소 (silicate) 농도가 고갈 상태를 보이고 여름철에 유입되었던 규소가 11월에 급격히 줄어드는 것으로 보아 규조류의 대량증식에 기인한 결과로 보인다. 따라서, 규조류의 성장에 규소가 제한 영양염으로 작용했을 가능성이 큰 것으로 판단된다. 북호에 비해 남호에서 높은 농도를 보인 것은 북호에 비해 해수의 영향을 덜 받고 영양염의 농도가 높아 식물플랑크톤이 성장하기 좋은 조건이기 때문인 것으로 보인다. 또한 질소농도와 엽록소 *a* 농도 사이에 양의 상관관계 (Fig. 9)가 있는 것으로 보아 화진포호에서는 질소가 제한 영양염으로 작용할 가능성이 큰 것으로 보인다.

TSI 계산에 사용된 자료는 식물플랑크톤의 성장기를

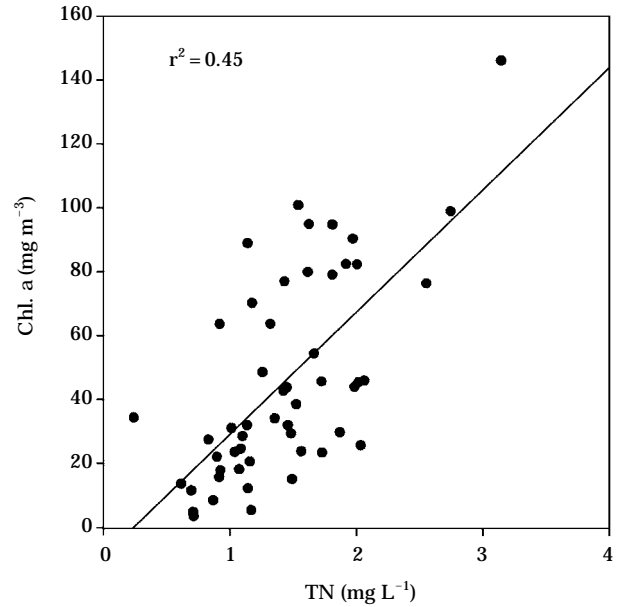


Fig. 9. Scatterplot of Chl. *a* vs. TN.

Table 3. TSI; trophic state index. TSI was calculated from warm season average (July~September).

		TSI				Average
		SD	Chl	TP	TN	
1998	South	67	69	76	59	68
	North	62	60	75	57	63
1999	South	63	76	68	59	67
	North	60	71	63	58	63
2000	South	74	85	74	63	74
	North	69	73	66	61	67
Avg.	South	68	77	73	61	70
	North	64	68	68	59	64
Total average		66	72	70	60	67

고려하여 7월과 9월 자료를 사용하였다. 남호와 북호의 평균값이 각각 67~74 및 63~67로 남호가 더 부영양화되어 있음을 알 수 있다 (Table 3). 이는 허 등 (1999)에 의해 계산된 동해안 석호의 TSI (56~79)와 비교해 볼 때 유사한 것으로 보인다. Havens (2000)은 TSI와 관련하여 다음과 같이 제안하였다.

TSI (TP) < TSI (CHL), P is limiting

TSI (TN) < TSI (CHL), N is limiting

TSI (TP) and TSI (TN) < TSI (CHL), neither P nor N are limiting

TSI (CHL) < TSI (SD), light is limiting

TSI (CHL) > TSI (SD), zooplankton grazing is limiting

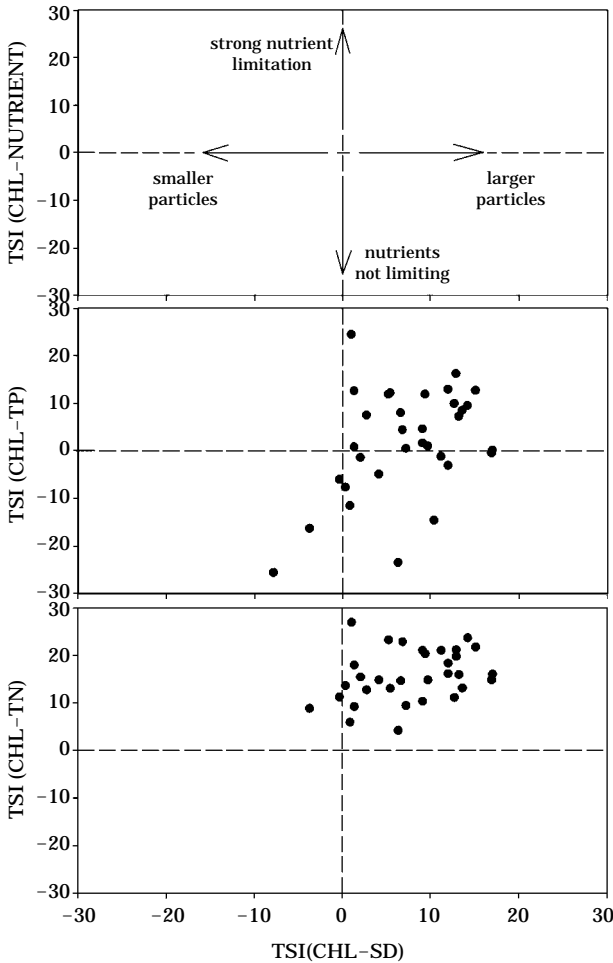


Fig. 10. Differences among trophic state index (TSI) indicating the extent of nutrient limitation and the composition of seston.

이러한 근거에 비추어 볼 때 화진포호에서는 식물플랑크톤의 성장에 질소가 제한 영양염으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 또한 수중의 빛을 산란시키는 입자들의 크기가 크다고 추정할 수 있고, 이 경우 조류의 성장은 동물플랑크톤의 섭식에 제한을 받을 가능성이 큰 것으로 보인다 (Fig. 10). 이러한 분석 결과는 신뢰성과 일관성이 매우 높으며, 일반적으로 다른 직접적인 방법들에 의해 얻어진 결과들과도 잘 일치한다 (Havens, 2000).

3. 저질내의 수분, 고형물, COD, TN 및 TP

정점 1, 3, 4, 5 및 7의 5개 정점의 수분 및 고형물 함량을 보면, 정점 5를 제외한 모든 지점에서 고형물 함량이 약 40% 내외인 것으로 조사되었다 (Fig. 11). 정점 5의 경우, 다른 정점과 달리 약 70% 이상의 고형물 함량을 보

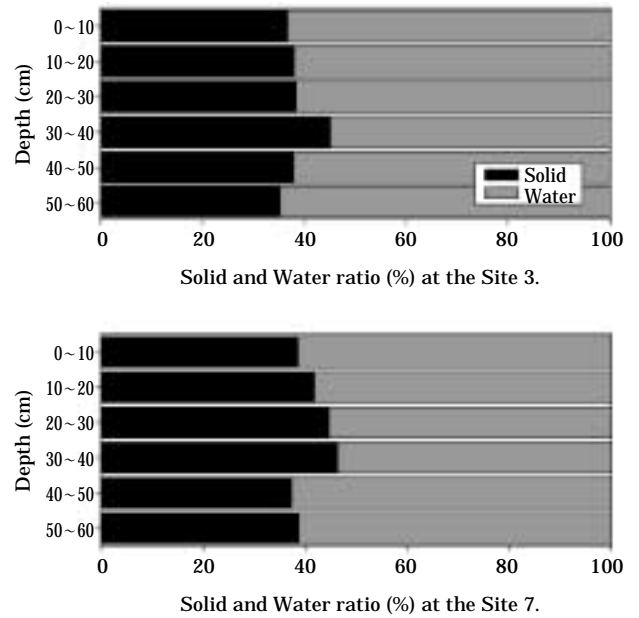


Fig. 11. Vertical distributions of solid and water ratio in lake sediment.

였는데 이는 다른 정점과 달리 주변의 공사 등으로 인해 저질의 구성성분이 유기물이나 미생물 및 식물의 사체보다는 모래입자가 많은 것에 원인이 있는 것으로 보인다. 또한 모든 정점에서 저질의 깊이에 따른 수분 및 고형물 함량의 변화는 특별한 특성을 갖고 있지 않은 것으로 조사되었다. 표층저질의 COD 농도는 북호에서 12.2 mg gdw⁻¹이며, 남호에서 32.1 mg gdw⁻¹이었다. 남호의 표층저질 COD가 북호에 비해 약 2배 이상 높게 나타난 것은 ① 유입수에 의한 유기물의 유입, ② 북호에 비해 과도하게 증식하는 플랑크톤 사체의 퇴적, ③ 좁은 배수구역으로 인해 유기물의 유출이 제한되기 때문인 것으로 보인다 (Fig. 12). 저질의 표층에서 총인의 평균 농도는 남호와 북호가 각각 1.05 mgP gdw⁻¹와 1.11 mgP gdw⁻¹으로 나타났다. 또한 총질소의 평균 농도는 남호와 북호가 각각 2.81 mgN g⁻¹과 2.88 mgN g⁻¹으로 나타났다. 정점 5에서는 특히 낮은 농도를 보였으며, 총인과 총질소가 각각 0.15 mgP gdw⁻¹와 0.7 mgN gdw⁻¹ 이하로 다른 정점에 비해 낮았다. 그러나 두 항목 모두 남호와 북호의 차이는 크게 나타나지 않았다 (Fig. 13). 화진포호는 생성이래 오랜 세월동안 많은 유기물과 수초 및 생물사체로 인해 저질층이 호수 전반에 걸쳐 약 1~3m 이상의 깊은 층을 이루고 있는 것으로 추정된다. 저질의 총인 함량은 정점 1에서 약 1.38 mgP gdw⁻¹로 가장 높은 것으로 나타났으며, 정점 4에서 0.03 mgP gdw⁻¹로 가장 낮았다. 두

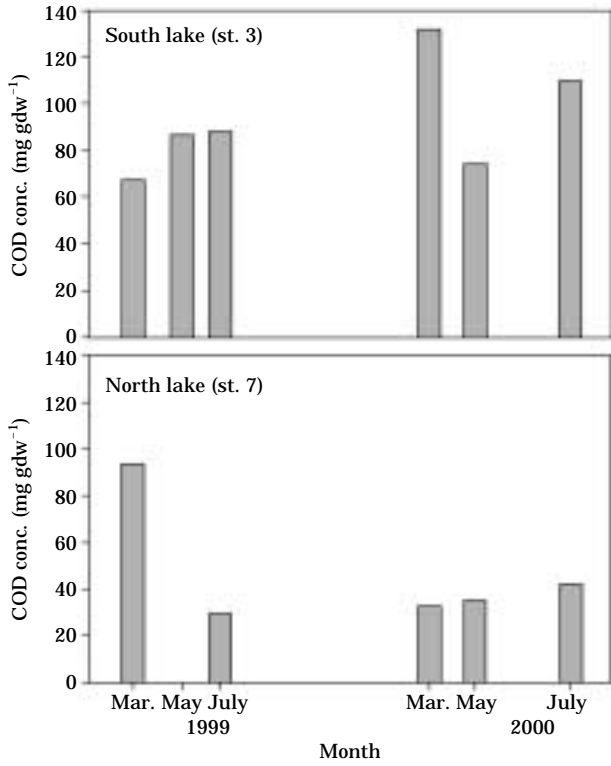


Fig. 12. Monthly variation of COD in surface sediment at the Site 3 and Site 7.

Table 4. Fractional composition of phosphorus in the sediment (mgP gdw⁻¹).

Ext. sol.	Adsorbed-P		NAI-P	Apatite-P	Residual-P	T-P
	H ₂ O	NH ₄ Cl	NaOH	HCl		
Site 1	0.0699 (5.1%)	0.0100 (0.7%)	0.1697 (12.3%)	0.0058 (0.4%)	1.1227 (81.5%)	1.3781
Site 3	0.0248 (2.7%)	0.0048 (0.5%)	0.1267 (14.0%)	0.0091 (1.0%)	0.7415 (81.8%)	0.9069
Site 4	0.0611 (5.4%)	0.0122 (1.1%)	0.1589 (14.1%)	0.0040 (0.4%)	0.8923 (79.1%)	1.1285
Site 5	0.0004 (1.6%)	0.0010 (4.0%)	0.0186 (72.8%)	0.00004 (0.1%)	0.0055 (21.4%)	0.0255
Site 7	0.0561 (4.9%)	0.0132 (1.2%)	0.1684 (14.7%)	0.0093 (0.8%)	0.9004 (78.5%)	1.1475

(): fractional percentage of total phosphorus

지점에서 존재형태별로 Adsorbed-P (H₂O+NH₄Cl), NAI-P, Apatite-P 및 Residual-P의 양은 각각 정점 1에서 0.08, 0.17, 0.01 및 1.12 mgP gdw⁻¹로 나타났으며, 정점 5에서는 각각 0.001, 0.019, 0.000 및 0.006 mgP gdw⁻¹로 정점 1에 비해 매우 낮은 값을 보였다. 이는 저질의 구성

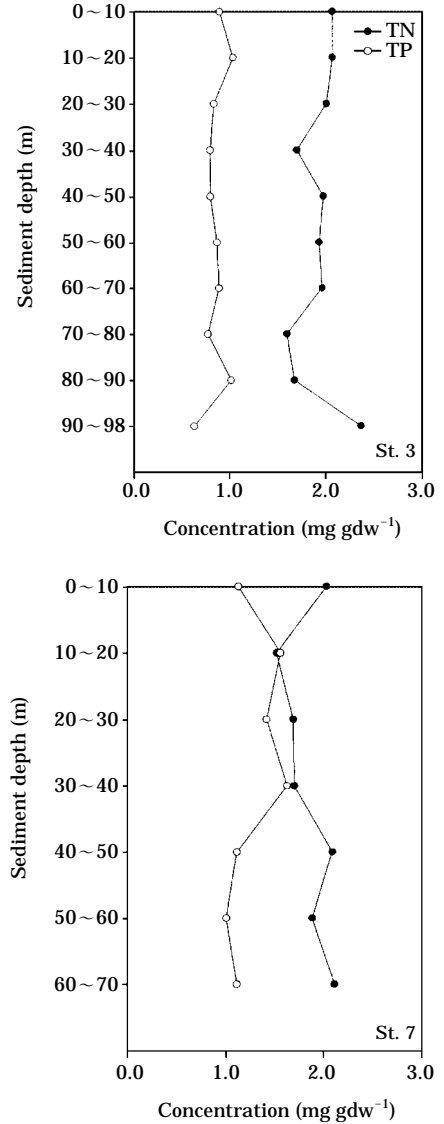


Fig. 13. Vertical distributions of TP and TN concentration in lake sediment.

성분의 차이에 기인되는 것으로 사료된다. 존재형태별 인 (P)을 백분율로 살펴보면 정점 5를 제외하고는 모든 정점에서 약 82% 가량이 Residual-P로 나타났으며, 정점 5에서는 NAI-P가 약 73% 존재하는 것으로 나타났다 (Table 4). 호수내에서 작은 물리화학적 변화에도 Adsorbed-P와 NAI-P는 용출 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있는데 모든 정점에서 전체 저질내 총인의 3.2~6.5%가 Adsorbed-P인 것으로 조사되었으며, NAI-P는 정점 5에서는 72.8%로 가장 높고 그 외 정점에서도 12~14%로 이었다. 일반적으로 저질과 수층사이의 인 (P) 이동 방향은 저질의 간극수와 수층사이의 인 농도차에 따

라 다르며 인 (P)의 평형이 상부수층의 인 (P) 풍부도에 의해 방해받을 경우 저질토로의 인 (P) 이동이 발생하며 역으로 수체에서 식물플랑크톤이 성장하면서 소모된 양이 평형농도 이하 수준으로 인 (P) 농도를 감소시킨다면 저질로부터 인 (P) 용출을 유도할 수 있다고 알려져 있다 (Imboden and Lerman, 1980). 특히 NAI-P는 환경변화에 매우 민감하여 수층의 pH나 산화환원전위에 따라 이동될 수 있으므로 이러한 형태의 인 (P) 존재량은 매우 중요하다. 또한 본 연구에서 대부분의 저질내의 인이 Residual-P와 NAI-P로 구성되어 있는 것으로 나타났는데 이는 소양호에서의 연구 결과와 유사한 수준으로 볼 수 있다(전과 박, 1989; 박 1992).

4. 동 · 식물 플랑크톤

화진포호에서 출현한 식물플랑크톤은 총 61종이 출현하였으며 이중 녹조강 22종, 규조강 19종, 남조강 13종, 유글레나강 2종, 외편모조강 2종 및 황색편모조강, 갈색편모조강, 황녹색조강이 각각 1종이었다. '98년의 경우 주요식물군의 우점종은 5~11월까지 남조류인 *Oscillatoria* sp.인 것으로 조사되었다. 99년의 경우 전체적인 우점종은 유글레나류이었으며, 2000년의 경우에는 3월과 5월에 남조류가 크게 우점하고 있는 것으로 나타났고 7월과 9월에는 남조류가 우점하고 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 남조류의 우점현상은 일반적으로 온대지역의 부영양호에서 여름에 남조류가 증가하는 계절적 변화와 동해안의 다른 석호에서 여름에 대부분 남조류가 우점하고 있는 현상과 유사한 결과로 보인다. 또한 화진포호의 경우 얇은 수심으로 인해 바람이나 파도에 의해 저니층이 쉽게 교란되어 영양염의 표층 공급량의 증가로 식물플랑크톤 현존량 증가에 기여했을 것으로 판단된다. 일반적으로 남조류의 번성은 부영양화되고 질소가 고갈되는 호수에서 발생된다(Tezuka, 1988). 화진포호의 경우 생물다양성은 낮지만 생물 현존량은 매우 큰 것으로 보인다(Fig. 14). 즉, 종 수는 제한되어 있지만 종 당 개체수는 많았다. 이는 천적이거나 경쟁자가 없고 영양이 풍부하기 때문인 것으로 보인다(김 등, 2001). 조 등(1975)의 조사에서도 netplankton 상이 불안정한 기수호 상태로 인해 매우 단순하다고 밝힌 바 있다. 홍 등(1969)의 조사에서는 하천, 전담에서의 유입과 해수의 직접적인 영향을 받지 않아 북호에 비해 남호에서의 생물량 및 다양성이 높다고 하였다. 조 등(1975)과 편 등(1984)도 남호에서의 다양성이 높음을 보였으며, 대부분 담수종이 우점하는 것으로 보고한 바 있다.

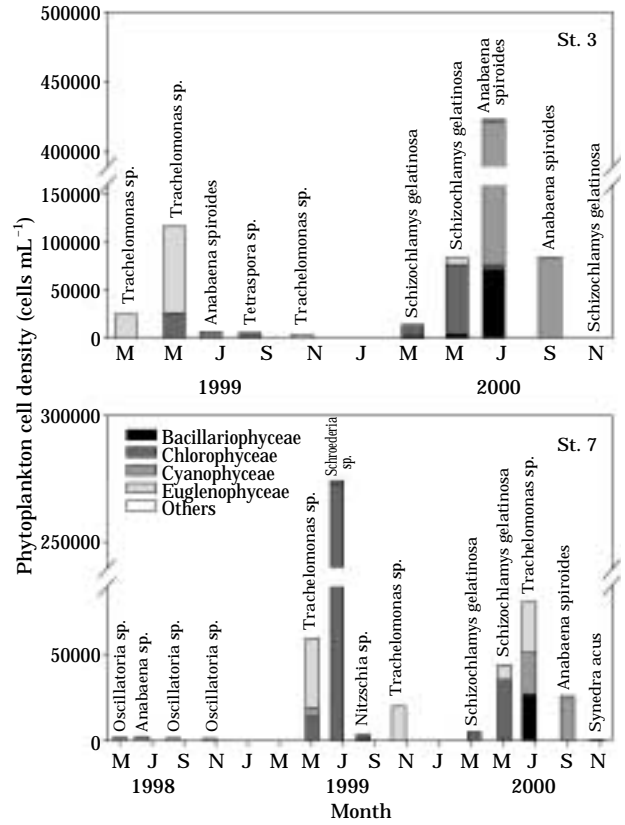


Fig. 14. Seasonal variations of phytoplankton cell density (cells mL⁻¹) and dominant species.

동물플랑크톤은 1998년에 총 3문 4강 28종으로 나타났으며 11월에 정점 7에서 712,137 indiv. m⁻³으로 가장 많은 생물량을 보였다. 1999년의 경우 3문 4강 28종으로 나타났으며 북호에 비해 남호에서 많은 개체수를 보였다. 2000년 화진포호에서 출현한 동물플랑크톤은 총 3문 4강 3목 19종이었으며, 이 중 원생동물문은 3강 5종, 절족동물문은 1강 5종, 유행동물문은 1강 6종, 유생은 2종이었다. 화진포호는 내륙의 담수호와는 달리 담수종, 해수종 및 담·기수종의 특성을 지닌 동물플랑크톤이 모두 출현하였다. 계절적으로는 11월에 가장 많은 종들이 출현하였다. 전체 동물플랑크톤에서 유행동물문이 차지하는 비율은 3월에 정점 3과 정점 7에서 각각 99.5%와 94.5%로 매우 높은 것으로 조사되었다. 7월의 경우 남호에서는 절족동물문이 우점하였으며 북호에서는 유행동물문이 우점하였다. 유생은 7월에 정점 1을 제외한 모든 정점에서 전체생물량의 70% 이상으로 출현 빈도가 높았다. 본 조사 기간 중 대체적으로 호수 생태계내의 물리 화학적 영향에 의해 단일 종에 의한 우점현상이 나타나고 있으며 전

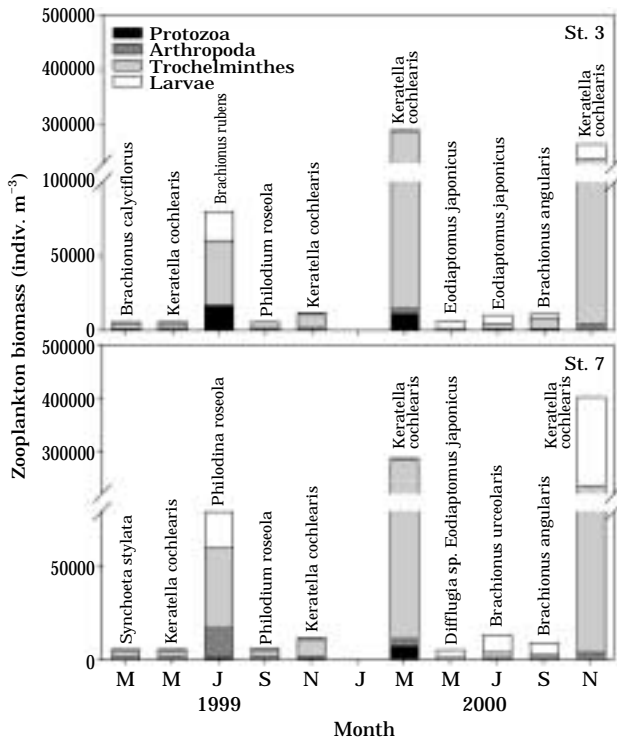


Fig. 15. Seasonal variations of zooplankton density (indiv. m^{-3}) and dominant species.

체적인 생물량은 뚜렷한 경향이 없이 없었다 (Fig. 15). 조사기간 동안 대부분의 지점에서 유충류 종이 우점한 것은 수온에 내성을 갖는 종들의 대량번식과 어류의 선택적인 포식으로 인한 대형동물플랑크톤의 제거로 유충류에 대한 대형동물플랑크톤의 포식압이 감소한데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 또한 절지 동물문의 갑각강에 속하는 지각류와 요각류, 원형동물문에 속하는 유충류는 호소생태계의 저차 영양단계에서 1차 생산자인 식물플랑크톤을 직접 섭식하는 미세 초식자로서 생물생산 및 물질순환의 과정에서 중요한 역할을 담당하고 있으며 물리적, 화학적 그리고 생물학적 변화에 따라서 종조성 및 생물량이 달라지게 된다. 또한 이로 인해 저서 생물상 및 어류상이 영향을 받게 된다. 조사기간동안 우점종으로 출현한 동물플랑크톤은 소수 종으로 우점종에 의한 생물량 변화가 이루어지고 있다. 종 다양성 지수 및 우점도 지수는 각각 0.31~1.72와 0.2~0.99의 범위로 나타났다. 조 (1985)에 의하면 종 다양성은 생태계의 안정성과 직접적으로 관련되며 물리 화학적(물리, 화학적 제한 요인에 의해 크게 영향을 받기 쉬운)으로 지배된 생태계에서는 낮고 생물적으로 지배된 생태계에서는 높게 나타난다고 하였다. 본 조사에서 나타난 바와 같이 가을철에 생물량 및

다양성 지수가 높은 것은 호수 생태계가 안정되기 때문인 것으로 판단된다.

적 요

회진호호의 육수생태학적 특성을 연구하기 위해 1998년 5월부터 2000년 11월까지 겨울의 결빙시기를 제외하고 2개월 간격으로 호수내 4~7개 정점에서 이화학적 수질항목, 총인 (TP), 총질소 (TN), 투명도 (SD), 엽록소 a 농도를 조사하였다. 수온은 10~30°C의 분포로 계절적인 차이를 나타내었으며, 11월에는 표층보다 심층에서 약간 높은 값을 보였다. 엽록소의 수직분포를 보면 정점별, 계절별로 차이는 있으나 약 1 m 수심에서 화학성층 (chemocline)이 형성되었고, 바다와 인접한 북호에서는 남호보다 높게 나타났다. DO는 화학성층 이하 수심과 수체의 혼합시에 $1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 내외의 낮은 농도가 빈번히 관찰되었다. 투명도는 0.2~1.7 m의 범위를 나타냈으며 COD는 $0.2 \sim 20.5 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 의 농도범위를 보였다. 표층의 총인 농도는 $0.024 \sim 0.275 \text{ mgP L}^{-1}$ 의 분포로 북호에 비해 남호에서 비교적 높은 농도를 나타냈다. 계절적으로는 봄철과 우기 이후에 높은 값을 보였다. 표층의 엽록소 a 농도는 $3.5 \sim 145.8 \text{ mg m}^{-3}$ 의 범위를 보였다. 계절적으로는 여름철보다 봄철에 높은 농도가 빈번히 나타났으며 남호의 경우 겨울철인 11월에도 50 mg m^{-3} 내외의 높은 값을 보였다. 표층의 총질소는 $0.24 \sim 3.15 \text{ mgN L}^{-1}$ 의 범위로 정점별, 시기별 변화는 총인과 유사한 경향을 보였다. 표층의 질산성질소는 대부분 정점에서 고갈 상태를 보였고 해안과 인접한 북호로 이동하면서 농도가 증가하는 현상을 보였다. 표층과 심층의 질소의 존재형태별 구성 비율은 유기질소, 암모니아성질소, 질산성질소 순으로 나타났다. 암모니아의 경우 표층에 비해 심층에서 2배 이상의 값이 나타났다. TN/TP는 3~44의 범위로 북호에서 높게 나타났다. Carlson (1977)식에 의한 부영양화도지수 (TSI)는 '98, '99 및 '00년에 투명도와 엽록소 a가 각각 65, 62, 72 및 65, 73, 79로 나타났으며, 총인과 총질소는 각각 76, 66, 70 및 59, 59, 62이었다. 식물플랑크톤은 총 61종이 출현하였으며 이중 녹조강 22종, 규조강 19종, 남조강 13종, 유글레나강 2종, 외편모조강 2종 및 황색편모조강, 갈색편모조강, 황녹색조강이 각각 1종 이었다. 2000년에 출현한 동물플랑크톤은 총 3문 4강 3목 19종이었으며, 이중 원생동물문은 3강 5종, 절족동물문은 1강 5종, 유행동물문은 1강 6종, 유생은 2종 이었다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원. 1990. 팔당상수원 보호 종합계획에 관한 연구 251-268p.
- 권상용. 2002. 화진포호의 육수생태학적연구. 삼척대학교 공학 석사 학위논문.
- 김일희. 2001. 동해안 기수호 수질 정화에 대한 수생동물의 기여. 동해안 석호 수질보전 대책 심포지움. 원주지방환경관리청, 삼척대학교 환경기술연구소 73-81p.
- 김형섭, 황일기, 김양배. 1997. 강원연안 기수호의 수생식물분포와 식물플랑크톤 군집의 계절변동. 강릉대학교 48-76p.
- 김종만, 이순길, 허성범, 김동엽, 이재학, 이진환, 허형택. 1981. 동해안 기수호(향호, 송지호, 영랑호)의 해양생태학적 연구. *Bulletin of KORDI* 3: 29-38.
- 박주현. 1992. 소양호에서의 인의 동태에 관한 연구, 강원대학교 이학석사 학위논문.
- 염규백. 1971. 호소에 있어서의 생산구조에 관한 연구. 식물학회지 14: 15-23.
- 오인혜. 1998. 대청호의 생태학적 연구 (-'97). 한국육수학회지. 31(2): 79-87.
- 원주지방환경관리청. 1997. 동해안 석호 수질개선 대책. 1-2p.
- 전상호, 박용안. 1989. 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출가능성에 대하여. 한국육수학회지 22: 262-272.
- 전상호, 전방욱, 유성환. 1996. 동해안 자연 호수의 수질 조사, (강릉경실련) 동해안 호수 보존 심포지움, 강릉 83-118p.
- 조규승, 홍사욱, 나규환. 1975. 동해안 기수호군의 육수조건과 Plankton상의 비교 연구. 한국육수학회지 8: 25-37.
- 조규승, 1985. 한국의 담수산 plankton개요와 그 지리적 분포 2) 요각류에 관하여. 호림수산 양식개발연구소 62-103p.
- 편충규, 1984. 기수호(향호·매호·영랑호·송지호·화진포)의 환경 및 생물상 조사 보고. 제주대학교논문집 18: 93-105.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호 유역과 가두리로 부터의 인부하량 및 인수지(Phosphorus Budget). 한국육수학회지 25: 207-214.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가. 한국육수학회지 32(2): 141-151.
- 홍사욱, 나규환. 1975. 동해안기수호의 육수학적 연구. 성대논문집 20: 87-95.
- 홍사욱, 조규승, 나규환. 1969. 화진포의 수질과 Plankton에 관한 연구. 한국육수학회지 2: 35-42.
- APHA (American Public Health Association), 1992. "Standard Methods for the examination of water and wastewater 18th ed", Washington D.C.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369.
- 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(3): 187-196.
- Hieltjes, A.H.M. and L. Lijklema, 1980. fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediment. *Jour. Environ. Qual.* 9(3): 405-407.
- Hirose, H. and T. Yamagishi. 1977. Illustration of the Japanese fresh-water algae. Uchidaroka-kuno Publishing Co. Japan.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, etc., 576p.
- Huzzey, L.M., M.A. Noble and G.F.m. Ryan. 1994. Temporal changes in stratification in Mobile Bay. *Eos* 75(3), 81.
- Imboden, D.M. and A. Lerman. 1980. Chemical models of lakes. pp.341-356. In A. Lerman[ed.] Lakes: chemistry, geology, physics, Springer-Verlag, New York, NY.
- Likens, G.E. 1975. Primary production of inland aquatic ecosystem. In H. Lieth and R.H. Whittaker (eds). Primary productivity of the biosphere. springer Verlag. New York. 185-202p.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* 12: 343-346.
- Mizuno, T. 1964. Illustrations of the freshwater plankton of Japan Hoikusa publishing co., LTD.
- Mizuno, T. and K.S. Cho. 1980. Paleolimnological study from the present status of the lake hwajin-po and yeong-rang. *Kor. J. Limnol.* 13: 17-22.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris. 154p.
- Osamu M. and K.S. Cho. 1984. Urea, DOC, DON, and DOP in two brackish lagoons on the eastern coast of Korea. *Kor. J. Limnol.* 17: 73-80.
- Sawyer, C.N. 1947. Fertilisation of lakes by agricultural and industrial drainage. New England Water Works Association. 61: 109-27.
- Schroeder, W.W., S.P. Dinnel and W.J.W. Wiseman. 1990. Salinity stratification in a river-dominated estuary. *Estuaries* 13(2): 145-154.
- Smith, N.P. 1990. Wind domination of residual tidal transport in a coastal lagoon. *Ir. Cheng, R.T. (ed.), Residual currents and longterm transport*, New York: Springer-Verlag, 123-133p.
- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* 27: 1101-1112.
- Tezuka, Y., 1988. Phosphorus as a possible factor stimulating in the appearance of Anabaena bloom in the south basin of Lake Biwa. *Jap. J. Limnol.* 49: 201-214.

- Theis, T.L. and P.J. McCabe, 1978. Phosphorus dynamics in hypereutrophic lake sediments. *Water Res.* **12**: 667–685.
- Uncles, R.J., J.e. Ong and W.K. Gong. 1990. Observations and analysis of a stratification–destratification event in a tropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **31**: 651–665.
- U.S. EPA. 1976. Water Quality Criteria Research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsored Symposium, EPA-600 (3-76-079): 185.
- Vollenweider, R.A. 1976. Advance in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Inst. Idrobiol.* **33**: 53–83.
- Wolanski, E., Y. Mazda, B. King and S. Gay. 1990. Dynamics, flushin and trapping in Hinchinbrook Channel, a giant mangrove swamp, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **31**: 555–579.
- (Manuscript received 28 January 2004,
Revision accepted 28 February 2004)