

## 화옹호의 식물플랑크톤과 환경요인

정미희 · 김호섭 · 최청일<sup>1</sup> · 황순진\*

(건국대학교 환경과학과, <sup>1</sup>한양대학교 지구해양과학과)

Phytoplankton and Environmental Factors in Lake Hwaong. *Chung, Mi-Hee, Ho-Sub Kim, Chung-Il Choi<sup>1</sup> and Soon-Jin Hwang\* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, <sup>1</sup>Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea)*

**This study was conducted to evaluate both temporal and spatial dynamics of phytoplankton community and environmental parameters in a newly made reclaimed estuarine lake (L. Hwaong). Monthly sampling was conducted at 4 sites covering the longest transect of longitudinal gradient of the lake from June to November, 2002. Total 5 classes 8 orders 26 families 63 genus 192 species were identified at all study sites during the study period. Phytoplankton total cell density ranged 24~1,882 cells mL<sup>-1</sup> and highly varied both temporally and spatially. Total cell density was significantly related with salinity, pH, BOD, COD, SS, TN and TP concentration. Diatom density also was significantly correlated with salinity, SS, BOD, COD and TN concentration. Although there was spatial difference, a longitudinal gradient appeared in phytoplankton cell density, Chl-*a*, TN and TP concentration from the mouth of river in June and August. In conclusion, phytoplankton community structure was dominated by diatoms (Bacillariophyceae), and appeared to be largely influenced by salinity, precipitation, and nutrients during the summer and the fall.**

**Key words : Lake Hwaong, phytoplankton, community dynamics, diatom, salinity, precipitation, nutrients**

### 서론

하구역 (estuarine zone)은 담수생태계와 해양생태계를 연결하는 전이지대로서 지구상 수생태계에서 가장 생산력이 높은 지역 중의 하나이다. 환경에 따라 변이는 있지만 하구역의 유기물 생산량은 약 10 kcal m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> 정도로 추정된다 (Odum, 1974). 하구생태계는 유역으로부터 수문학적 영향과 물질의 유입, 그리고 해양으로부터의 영향을 동시에 받기 때문에 염분의 변화를 비롯하여 물리·

화학적 환경의 변화가 크며 결과적으로 이러한 개방된 수역에 서식하는 생물들은 다양한 환경 변화에 따른 영향을 받는다 (권 등, 2001).

그러나 인공적으로 방조제를 건설하여 개방수역을 폐쇄성 수역으로 전환할 경우 생태계의 구조가 바뀌게 되고 결과적으로 기능의 변화를 가져오게 된다. 하구역에 조성되는 간척호의 경우 방조제 내측에 유입된 해수가 담수로 희석되고 또한 저층으로부터 소금기가 호수물 속으로 용출되면서 담수화를 거친다. 간척 하구호는 완공 초기에는 해수와 담수의 중간적 성향을 띠는 독특한 수

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

환경을 나타내며, 지리적 여건에 따른 수리·수문학, 유역의 지형 및 오염원 특성 그리고 물질순환 특성에 반응하여 독특한 생물상을 나타낼 수 있다.

관리적 목적으로 조성하는 하구의 간척호에 대한 생태학적 이해는 매우 중요한 의미를 가진다. 하구호의 효율적 관리를 위해서 호소의 생성기원과 특성을 이해하고 호수형성 초기부터 지속적인 수질 및 생물상 모니터링에 의한 장기 기초자료의 확보가 매우 중요하다. 특히 외부 영양물질의 유입과 내부 영양물질의 동태, 수중생태계 먹이망의 기초단계를 점유하고 있는 미생물, 동식물플랑크톤, 어류, 저서생물들과 연계된 생태학적 이해는 하구호 수질 및 생물상의 천이양상과 향후 수질관리를 위한 기초자료로 매우 중요한 가치를 가지며, 비슷한 수생태계의 현상을 이해하고 예측하는데 귀중한 역할을 한다. 예를 들어, 식물플랑크톤은 수생태계 먹이망을 구성하는 1차 생산자로서, 이·화학적 그리고 생물학적 요인에 의해 그 분포와 군집구조가 결정된다. 특히 연안역의 성격을 띤 지역에서는 담수의 유입으로 인하여 외양역보다 군집이 더욱 복잡하며 그 변화상이 다양한 뿐만 아니라 (Parsons *et al.*, 1984), 육상으로부터 영향을 많이 받으므로 외양역과는 달리 유역의 인구분포나 토지이용형태에 따라 환경의 차이가 나고 그 변화의 폭이 커질 수 있다 (고 등, 1997).

하구생태계에서의 식물플랑크톤은 그 환경의 특성과 해양과 육수역의 영향의 정도에 따라 해수와 육수생태계를 반영하는 특징적인 식물플랑크톤 군집이 존재할 수 있으며, 이들의 군집구조는 하구생태계의 생태학적 구조와 기능을 이해하는데 기본적인 요인이다 (최, 1969; 신, 2003). 또한 식물플랑크톤은 수체의 물리·화학적인 변화에 민감하게 반응하는 특성을 지니고 있어 환경오염의 지표성이 뛰어나기 때문에 관리적 측면에서 육수역의 오염지표로의 이용도 가능하다 (James and Evison, 1979; Chappmann, 1996).

국내에서 인공 간척호에 대한 연구중 식물플랑크톤에 관한 연구는 시화호 (최 등, 1997; 신 등, 2000), 평택호 (신 등, 2003) 및 아산호 (신과 김, 2002) 등에서 이루어져 왔으나, 인공호수 건설 초기 단계에서 시작된 연구는 매우 제한적이다. 특히 화옹호의 수질과 영양상태에 대한 연구는 경기도 (2002), Hwang *et al.* (2003) 에 의해 보고된 바 있으나 식물플랑크톤 등의 생물상에 대한 집중적인 연구는 전무한 실정이다. 화옹호는 서해안 우정만 하구역에 건설된 인공호수로서 2002년 3월에 체질이 완료되어 외형상 해양과 완전히 분리된 간척호수 되었다. 그러나, 현재는 수문을 통해 해수 교환이 빈번히 이루어지

고 있으며, 수질관리의 목적으로 인해 이러한 상태는 2007년까지 유지될 계획이다 (농업기반공사, 2002). 이러한 이유로 화옹호는 완전히 단절된 하구호의 상태와는 달리 앞으로 몇 년간은 담수화의 과정을 거치지 못할 것이며, 호 내의 생태학적 현상도 기존의 하구호들이 경험한 생태학적 천이과정과는 상당히 다를 것으로 예상된다.

본 연구에서는 형성 초기단계에 있는 간척 인공호수인 화옹호에서 식물플랑크톤 군집의 종조성과 계절적인 변화를 조사하였으며, 이들의 변화에 영향을 미칠 수 있는 물리·화학적 요인들과의 관계를 분석하여 화옹호 태동기의 식물플랑크톤 군집조성과 이에 영향을 미치는 요인들과의 관계를 이해하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황 및 조사지점

화옹호는 지리적으로는 126°40'E~127°00'E, 37°15'N, 행정적으로는 경기도 화성시에 위치하는 호수로 1991년 공사가 계획되어 2002년 3월 체질공사가 완료되어, 총 길이 9.8 km, 높이 12.5 m의 방조제에 의해 해양과 단절된 상태이다. 그러나 수질관리 목적으로 주기적으로 수문을 개폐하여 해수가 유입과 호소수의 유출이 이루어지고 있다. 호수의 유역은 경기도 화성시 남양면, 마도면, 서신면, 비봉면, 팔탄면, 우정면 장안면을 포함하며 유역으로

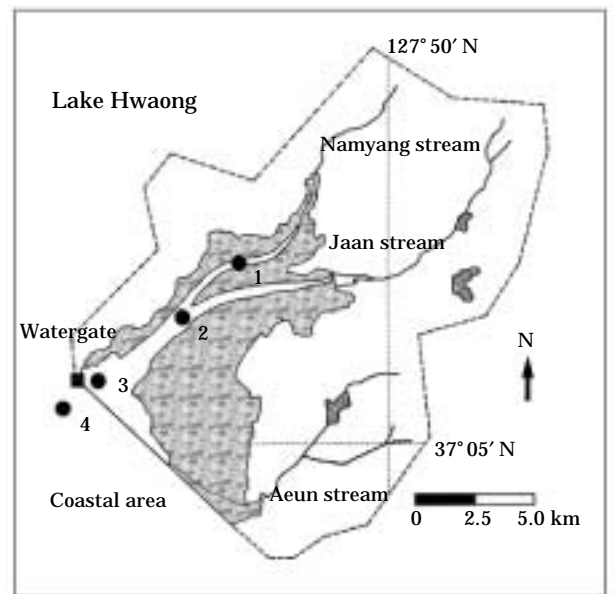


Fig. 1. The map showing sampling sites in Lake Hwaong and its coastal area.

부터 남양천, 자안천, 어은천이 지표수의 유입원이 되고 있다.

조사지점은 수문으로부터 가장 큰 유입하천인 남양천까지 종적인 구배를 고려하여 선정하였으며 (Fig. 1). 다음과 같은 각 정점의 특성을 고려하였다. 정점 1은 오염원이 밀집된 남양면을 거치고 상·하류 유량 변화가 규칙적으로 일어나는 남양천이 유입되는 곳으로 강수량의 변화에 따른 담수 유입량 변화의 영향이 큰 지점이다. 정점 2는 남양천과 자안천이 합류하는 지점이며 특히, 자안천의 경우 배수 갑문이 설치되어 있어 특히, 강우시에는 자안천의 수문을 통해 담수가 많이 유입되며 다소 규칙적인 남양천과는 달리 자안천의 담수 유입량의 변화 폭이 큰 지점이다 (경기도, 2002). 정점 3은 화옹호 내 배수갑문에 가깝게 위치한 지점으로 호 내로 유입되는 하천들과는 가장 멀리 떨어져 있어서 담수 영향이 가장 적은 반면 배수갑문의 개폐의 영향이 큰 지점이며, 정점 4는 방조제 외곽 지역으로 연안역의 특성을 가지고 있다.

**2. 환경요인의 분석**

강수량은 화성시와 가장 가까운 수원측후소에서 측정된 기상청 자료를 사용하였다. 수온, 염분도, 전기전도도는 CTD (Conductivity-Temperature-Depth meter, Seabird)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다.

화학적 또는 생화학적 요인들은 수질오염공정시험법 (환경부, 1997) 및 Standard Methods (APHA, 1995)를 기초로 분석하였다. 수질분석을 위한 시료는 각 정점에서 수심별로 Van Dorn Sampler를 이용하여 채수하였으며 실험실로 운반된 시료는 GF/F 여과지로 여과하여 여과액은 용존 무기영양염 그리고 원수는 입자성 영양염 분석에 이용하였다. 모든 시료의 분석은 일주일 이내에 완료하였으며, 그 기간동안은 냉동(-20°C) 보관하였다.

용존무기인 (Soluble reactive phosphorus: SRP), 총인, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소, 총질소, 규산염 규소 및 BOD는 Standard Methods (APHA, 1995)를 기초로 분석하였으며, 화학적산소요구량 (COD<sub>Mn</sub>)은 알칼리성 과망간산법으로 측정하였다 (환경부, 1997). 엽록소-a 농도는 100% 메탄올로 24시간 동안 추출한 후 흡광도계를 이용하여 측정하였으며, Maker가 제시한 식에 따라 계산하였다 (Maker, 1972; Maker et al., 1980)

**3. 식물플랑크톤 군집분석**

식물플랑크톤 시료는 표층, 중층, 저층에서 각 1L를 채수하여 중성 포르말린을 이용하여 최종농도가 0.4%가 되도록 고정하였다. 고정된 시료는 실험실에서 3~4일

정체시켜 100 mL로 농축한 후 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 100~600배의 광학현미경 (Nikon) 하에서 각 시료당 3번 반복 계수 하였으며 평균값을 사용하였다. 총 현존량(밀도)에 10% 이상을 차지하는 종을 우점종으로 분류하였다. 식물플랑크톤 중 규조류의 분류는 Simonsen (1979)의 분류체계를 따랐으며, 이후 이명 정리는 최 등 (1995)을 따라 정리하였다. 이 외의 식물플랑크톤의 분류 및 동정은 Isamu (1984), 심 (1994), Tomas (1997)를 참고하였다.

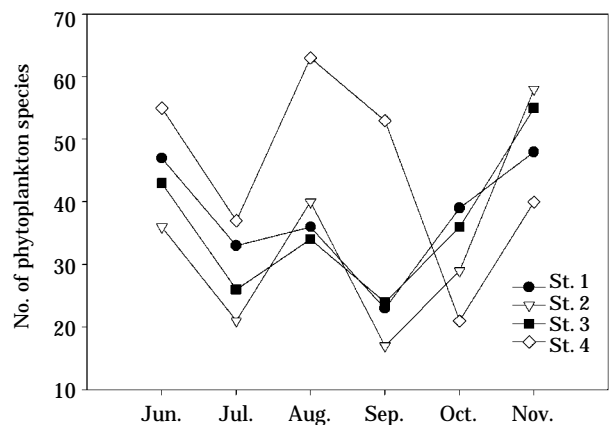
**4. 통계분석**

수질항목과 식물플랑크톤 밀도의 시공간적 변이는 One-way ANOVA를 통해 분석하였으며, 수질과 식물플랑크톤 변화와의 상호관계는 Pearson's correlation analysis를 통해 수행하였다. 통계적 분석에 있어서 유의수준은 p<0.05를 기준으로 하였다 (SPSS 10.0).

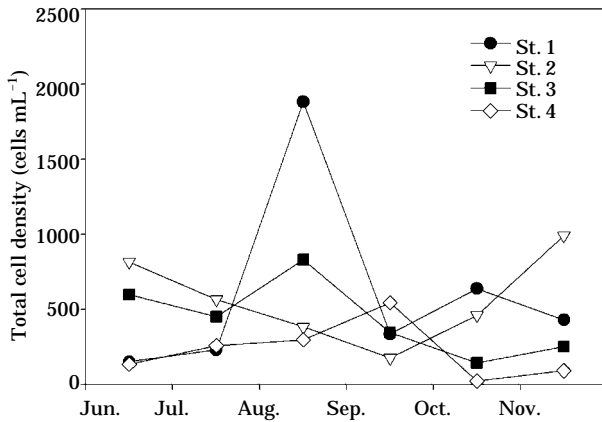
**결과 및 고찰**

**1. 식물플랑크톤 군집 변화**

조사기간 동안 호내의 3개 정점과 호외지점 (정점 4)에서 총 식물플랑크톤은 5강 8목 26과 63속 192종으로 나타났다 (황, 2002; 종목록은 제시하지 않았음). 본 조사기간 동안 화옹호를 포함하는 연안역에서 관찰된 식물플랑크톤 종수를 다른 간척호나 연안해역에서 발견된 종수와 비교할 때 약간 적었으나 커다란 차이는 나타나지 않았다. 신과 김 (2002)은 아산호 (평택호)에서 204종, Choi and Shim (1986)은 경기만에서 228종의 식물플랑크톤을



**Fig. 2.** Seasonal variation of phytoplankton species number in Lake Hwaong (St. 1, 2, 3) and coastal area (St. 4) from June to November, 2002.



**Fig. 3.** Phytoplankton total cell density in Lake Hwaong (St. 1, 2, 3) and coastal area (St. 4) from June to November, 2002.

보고하였다. 본 연구의 조사기간에 겨울과 봄철(12월~5월)이 포함되지 않은 점을 감안한다면 경기만에서의 식물플랑크톤 종수와 크게 차이는 나지 않을 것으로 추측된다.

본 연구의 조사기간 동안 화옹호의 내부와 연안역에서 출현한 식물플랑크톤 종수는 지점별 뿐 만 아니라 경시적인 변화를 나타냈다(Fig. 2). 종의 다양성이 가장 낮았던 10월과 11월을 제외한 다른 시기 동안에는 호외 정점

에서 가장 많은 종수가 발견되었다. 특히 8월과 9월 동안 호내 정점들과 연안역의 차이가 컸으며, 호외 지점의 식물플랑크톤 종수가 호내 지점 총 종수의 약 2배 정도 높았다. 여름동안 상대적으로 매우 많았던 종수는 가을동안에는 반대로 호내 지점에서 더 높게 나타났다. 이러한 차이는 수체의 물리적 안정도와 관계가 있었을 것으로 추정된다(Nybakken, 1997). 여름동안의 빈번한 강우로 인한 유입수량의 증가는 호 내부의 수체를 교란(예를 들면, flushing)시켰을 것이며, 빈번한 교란이 가을동안 안정화되면서 다양한 종류의 식물플랑크톤의 성장을 유도하였을 것으로 판단된다. 특히 여름동안 호내 지점들에서 발견된 식물플랑크톤 종수의 차이가 가장 적었던 것은 이러한 교란의 영향을 반영하는 결과이다.

식물플랑크톤의 밀도 변화는 종수의 변화와는 상당히 다른 형태로 나타났다(Fig. 3). 조사기간 동안 9월을 제외하고는 전반적으로 호내 지점의 밀도(150~1,880 cells mL<sup>-1</sup>)가 호외지점(20~540 cells mL<sup>-1</sup>)보다 높았으며(ANOVA,  $p < 0.05$ ), 호 내부에서는 정점별로 밀도의 경시적 변화가 나타났으나 평균적으로는 호수 상류부인 정점 1과 2에서의 밀도가 방조제에 가까운 정점 3 보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 하천으로부터 유입되는 높은 농도의 영양염과 유기물의 영향으로 판단되며(황, 2002), 하천의 영향을 지속적으로 받는 지점 1에서 밀도의 변화가

**Table 1.** The list of dominant phytoplankton species occurred (% density) in Lake Hwaong and coastal area from June to November, 2002.

	St. 1 (%)	St. 2 (%)	St. 3 (%)	St. 4 (%)
June	<i>Eucampia zodiacus</i> (92.8)	<i>Eucampia zodiacus</i> (88.3)	<i>Eucampia zodiacus</i> (88.4)	<i>Eucampia zodiacus</i> (87.4)
July	<i>Nitzschia sigma</i> (95.2)	<i>Nitzschia sigma</i> (95.1)	<i>Nitzschia sigma</i> (96.7)	<i>Nitzschia sigma</i> (58.9)
Aug.	<i>Thalassiosira eccentrica</i> (66.5) <i>Skeletonema costatum</i> (20.3)	<i>Skeletonema costatum</i> (83.6)	<i>Skeletonema costatum</i> (84.8)	<i>Skeletonema costatum</i> (68.8)
Sep.	<i>Nitzschia pungens</i> (33.4) <i>Thalassionema nitzschioides</i> (25.5) <i>Thalassionema frauenfeldii</i> (10.7)	<i>Cylindrotheca closterium</i> (44.9) <i>Thalassionema nitzschioides</i> (12.1) <i>Nitzschia seriata</i> (11.5)	<i>Thalassionema nitzschioides</i> (55.7) <i>Thalassionema frauenfeldii</i> (22.4)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (69.3) <i>Thalassionema nitzschioides</i> (18.2)
Oct.	<i>Prorocentrum triestinum</i> (89.8)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (77.4)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (83.0)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (26.6)
Nov.	<i>Chaetoceros affinies</i> (35.5) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (18.5) <i>Thalassiosira rotula</i> (10.9)	<i>Chaetoceros affinies</i> (87.5)	<i>Chaetoceros affinies</i> (84.6)	<i>Chaetoceros affinies</i> (31.7) <i>Chaetoceros curvisetus</i> (31.7) <i>Chaetoceros teres</i> (10.7)

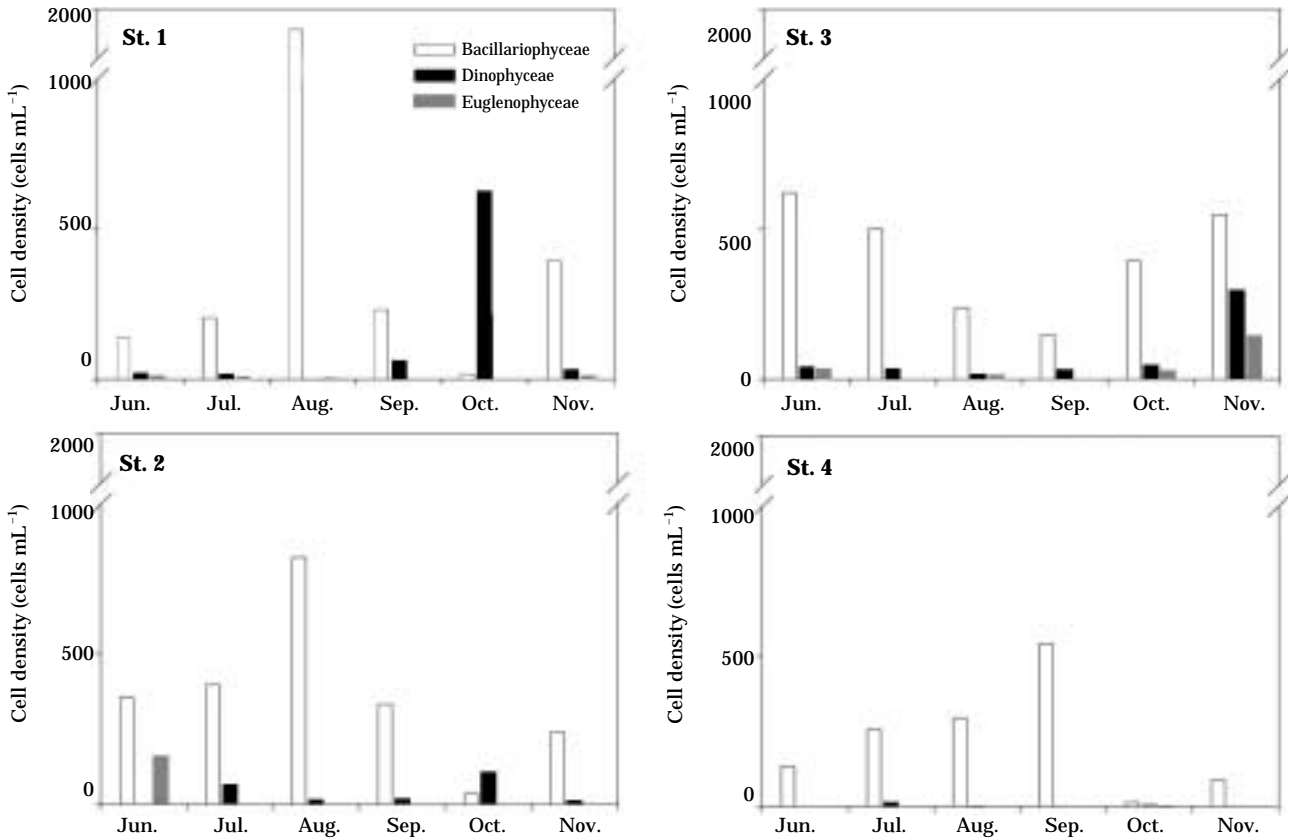


Fig. 4. Phytoplankton taxonal cell density in Lake Hwaong (St. 1, 2, 3) and coastal area (St. 4) from June to November, 2002.

가장 심했던 결과로 반영된다 (Fig. 3).

화옹호와 연안역의 식물플랑크톤은 대부분 규조류와 와편모조류로 구성되어 있었으며, 일부기간 동안 특정 조류군 (예를 들면, 유글레나)이 관찰되었다 (Fig. 4). 호내 정점인 정점 1, 2, 3에서는 10월을 제외하고 10여종의 규조류가 우점하였다. 각 조사시기별로 조사지역에서 식물플랑크톤 우점종 조성의 공간적 변이는 미약하였고, 모든 정점에서 거의 같은 종들이 공통적으로 우세하였다 (Table 1). 그러나 우점종의 시간적인 계절적인 천이양상은 뚜렷하였다.

조사기간동안 각 정점에서 총 출현한 우점종을 살펴보면 6월에는 전 정점에서 *Eucampia zodiacus*가 80% 이상 출현하였다. 7월에는 *Nitzschia sigma*가 호내 정점에서는 95% 이상으로 우점하였으나, 호외 정점인 정점 4에서는 59%를 차지하였다. 8월에는 호수의 최상류인 정점 1에서는 *Thalassiosira eccentrica* (66.5%)와 *Skeletonema costatum* (20.3%)이 우점하였으나, 호수의 중류 및 하류인 정점 2, 과 정점 3, 그리고 호외 정점인 정점 4에서는 *Skeletonema costatum*이 우점하였다. 9월에는 각 정점별

로 우점종이 다르게 나타났다. 정점 1에서는 *Nitzschia pungens* (33.4%), *Thalassionema nitzschioides* (25.5%), *Thalassionema fruenfeldii* (10.7%)가 우점하였으며, 정점 2에서는 *Cylindrotheca closterium* (44.9%), *Thalassionema nitzschioides* (12.1%), *Nitzschia seriata* (11.5%)가 우점하였다. 배수갑문 근처인 정점 3에서는 *Thalassionema nitzschioides* (55.7%), *Thalassionema fruenfeldii* (22.4%)로 나타났으며, 정점 4에서는 *Chaetoceros curvisetus* (69.3%), *Thalassionema nitzschioides* (18.2%)가 우점하였다. 9월에는 각 정점별 우점종이 달랐으나 *Thalassionema nitzschioides*가 공통 우점종으로 나타났다. 10월에는 전 정점에서 와편모조류인 *Prorocentrum triestinum*이 우점하였으나 정점 4에서는 22.6%로 호내 정점에 비해 우점 비율이 낮게 나타났다. 11월에는 전 정점에서 *Chaetoceros* spp.가 우점하였으며 정점 1에서는 *Chaetoceros* spp.와 함께 *Thalassiosira rotula* (10.9%)가 우점하는 것으로 나타났다.

여름과 가을동안 화옹호와 연안역의 식물플랑크톤 천이는 대부분 해양성 규조류가 주도하였고, 10월 중에는





와편모조류인 *Prorocentrum triestinum*이 우점하였다. 온대지역의 연안역에서 가을동안의 와편모조류의 대발생은 일반적인 현상이며 (Boney, 1975), 특히 부영양 연안역과 기수역에서의 대발생은 국내의 경우 시화호에서도 관찰된 바 있다. 신 등 (2000)은 지리적으로 서해안의 화옹호 북쪽에 위치하는 간척호인 시화호에서 1년 주기의 연구를 수행한 결과 5월과 8월에 두 번의 *Prorocentrum minium* 대발생을 보고하였다. 이 종은 호옹호에서 대발생한 *P. triestinum*과 유사한 형태와 생태적 특성을 가지는 종으로 광온성 및 광염성의 성장조건을 가지고 있다 (Kondo et al., 1990). 본 연구 대상지인 화옹호에서 조사 기간 동안 *P. minium*도 관찰되었으나 우점종으로 발생한 시기는 없었다. 이들 종은 정체성이 강한 수역에서 대발생할 수 있는 잠재력을 가지고 있으며 적조현상을 야기할 수 있는 조건은 다양한 것으로 알려져 있다 (Kondo et al., 1990). 특히, 수중의 광도조건과 무기질소의 영향이 크며,  $\text{NH}_4$  uptake에 대한 반포화상수  $K_s$ 값이 다른 종들에 비해 월등히 높아 암모니아에 대한 요구도가 높은 종에 해당한다 (Iwasaki, 1979; Seike et al., 1986). 본 연구에서는 5월 동안 조사가 수행되지 못하여 이 시기의 분포는 알 수 없으나, 2004년 5월 동안 수체의 안정기에 이들의 대발생을 관찰 (신재기 · 황순진, 미발표자료)한 결과를 토대로 할 때 화옹호에서도 이들은 연중 2회 이상 대발생을 하는 것으로 추정된다. 10월 동안 최상류부인 정점 1에서 가장 높은 밀도의 대발생은 이 시기동안의 수중의 높은 암모니아 및 무기인 농도와 분포와 일치하며, 상관성 분석에서도 와편모조류는 암모니아를 포함하는 무기질소와 높은 양의 상관성을 보였다 ( $r = 0.42$ ,  $p < 0.001$ ) (Table 2).

## 2. 식물플랑크톤과 이 · 화학적 요인과의 관계

화옹호에서 식물플랑크톤의 총 밀도와 Chl-*a*의 변화는 규조류의 밀도변화와 매우 높은 상관성을 나타내어, 화옹호 식물플랑크톤이 전반적으로 규조류에 의해 우점되고 있음을 보였다 (Table 2). 이외에 염분도, pH, BOD, COD, SS, TN, TP 등과 유의한 상관성을 보여주었다. 총 식물플랑크톤 밀도변화에 주요한 영향을 미치는 규조류의 밀도변화와 유의한 관계가 있는 요인은 염분, SS, BOD, COD, TN으로 나타났다 (Table 2, Fig. 5). 와편모조류의 밀도변화와 상관성이 높은 요인은 규조류와 마찬가지로 염분도 이외에 암모니아, 질산성 질소, 아질산성 질소, 용존 무기인, TP로 나타나, 염분도를 제외하고는 규조류와 관계있는 요인과 와편모조류와 관계가 있는 요인이 상당히 다른 것으로 나타났다. 또한, Chl-*a*는 규조류의

밀도 및 식물플랑크톤 총밀도와 양의 상관관계를 보임으로써 화옹호 수괴의 일차생산의 대부분을 규조류가 담당하는 것으로 나타났다. 연안지역에서 많은 영양염의 다량 유입으로 인한 적조 발생시기를 제외하고는 해양에서는 보통 규조류 위주의 군집이 주를 이루고 있고 (최와 심, 1986), 종 조성 및 규조류 위주의 군집변화에 기초할 때 현재 화옹호의 식물플랑크톤은 염분도에 의해 큰 영향을 받고 있다고 판단된다.

상관관계에서 식물플랑크톤의 총밀도 및 규조류의 밀도와 관계가 높게 나타난 총인과 총질소와 엽록소-*a*, 엽분도, 그리고 이들의 분포 및 농도에 영향을 미칠 수 있을 것이라고 생각한 경우량과 비교하였다. 규조류의 밀도와 엽록소-*a* 농도는 표층 ( $r = 0.71$ )과 중층 ( $r = 0.62$ )에서는 유의한 상관성을 나타내었으나 저층에서는 뚜렷한 관계가 없는 것으로 나타나, 화옹호에서 규조류는 주로 표층과 중층에서 발달하며 저층에서는 상대적으로 발달이 미약한 것으로 유추되었다. 그러나 식물플랑크톤의 총밀도는 표층 ( $r = 0.54$ ), 중층 ( $r = 0.62$ ), 저층 ( $r = 0.64$ )에서 모두 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타나, 빛이 제한되거나 퇴적물이 교란될 가능성이 있는 저층에서는 규조류 외의 분류군의 영향이 미침을 시사하였다. 규조류의 밀도와 총질소, 총인의 경우 모두 중층에서 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 식물플랑크톤 총 현존량 또한 중층에 분포하는 총질소, 총인의 양과 관련이 있는 것으로 나타났다 (Fig. 5). 표층에서는 담수의 유입과 함께 다량의 영양염이 유입될 수는 있으나, 염분도의 변화 등으로 인해 식물플랑크톤의 밀도변화 폭이 크고, 저층 또한 퇴적층에서 재부유하는 영양염으로 인해 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미칠 수는 있으나 빛이 제한된다면 높은 영양염에 비해 식물플랑크톤 성장이 낮을 수 있기 때문에 (Bougis, 1976), 중층에서의 식물플랑크톤의 현존량과 영양염과의 상관관계가 다른 수층에 비해 뚜렷할 수 있다. 식물플랑크톤의 일차생산은 수체 내에서 빛의 이용성에 의해 크게 영향을 받지만, 이들은 수체의 교란과 이동에 의해 유광층과 빛 제한 수심을 모두 경험할 수 있다. 식물플랑크톤의 광화학적 기작은 이들로 하여금 빠르게 빛 적응을 유도할 것이며 (Jewson and Wood, 1975), 이로 인해 광합성 효율이 극대화 될 수 있다. 혼탁한 환경과 빛 환경의 변화가 심한 공간에서도 식물플랑크톤 생산력의 유지가 가능할 수 있음은 선행연구에서도 보고된 바 있다 (Marra, 1978; Elser and Kimmel, 1985). 이러한 사실로부터 화옹호의 전반적인 빛 환경이 식물플랑크톤 성장에 악영향을 미쳤다 하더라도 표층과 심층보다는 상대적으로 안정된 중층이 이들의 생리적 활성에 보다 선택적일



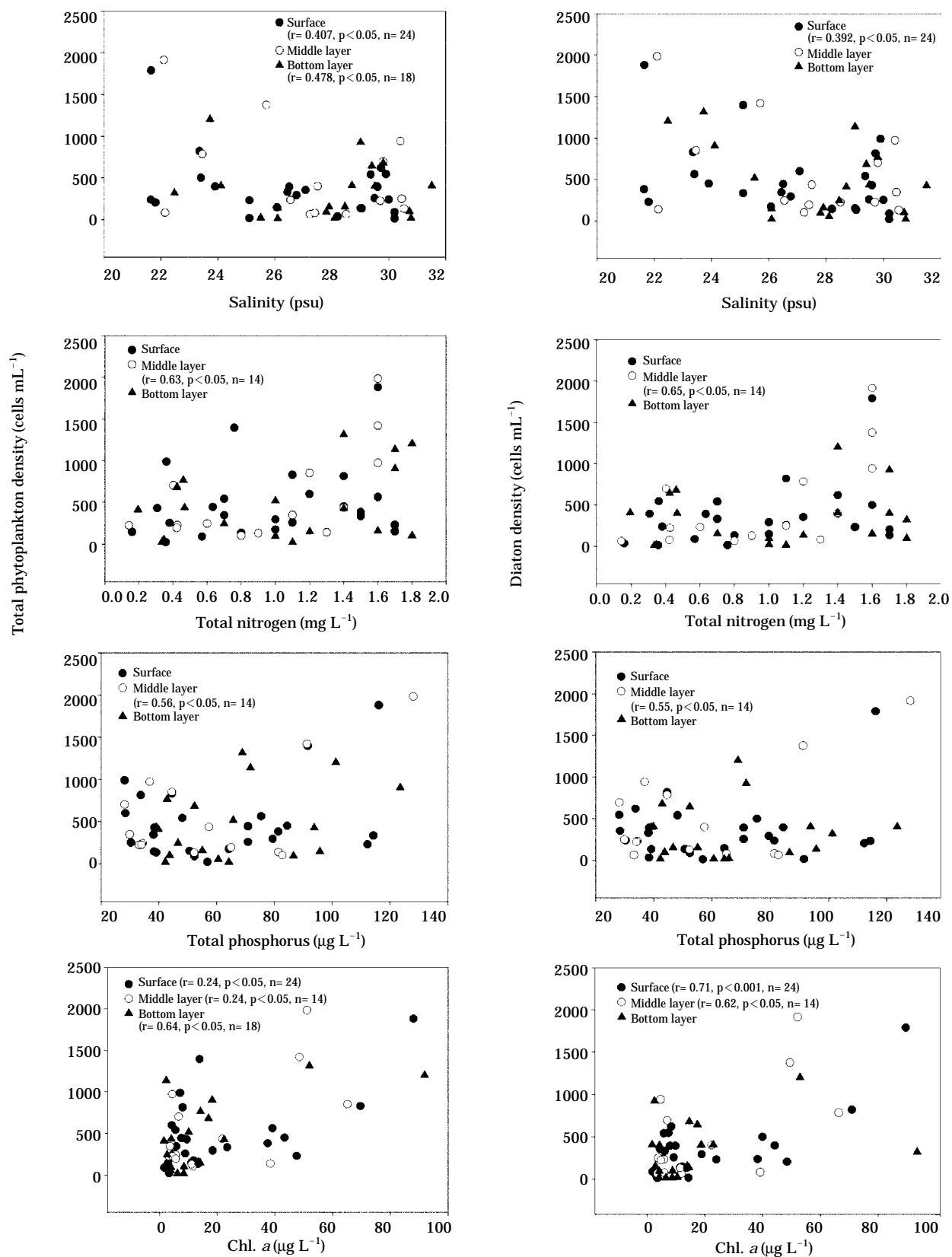
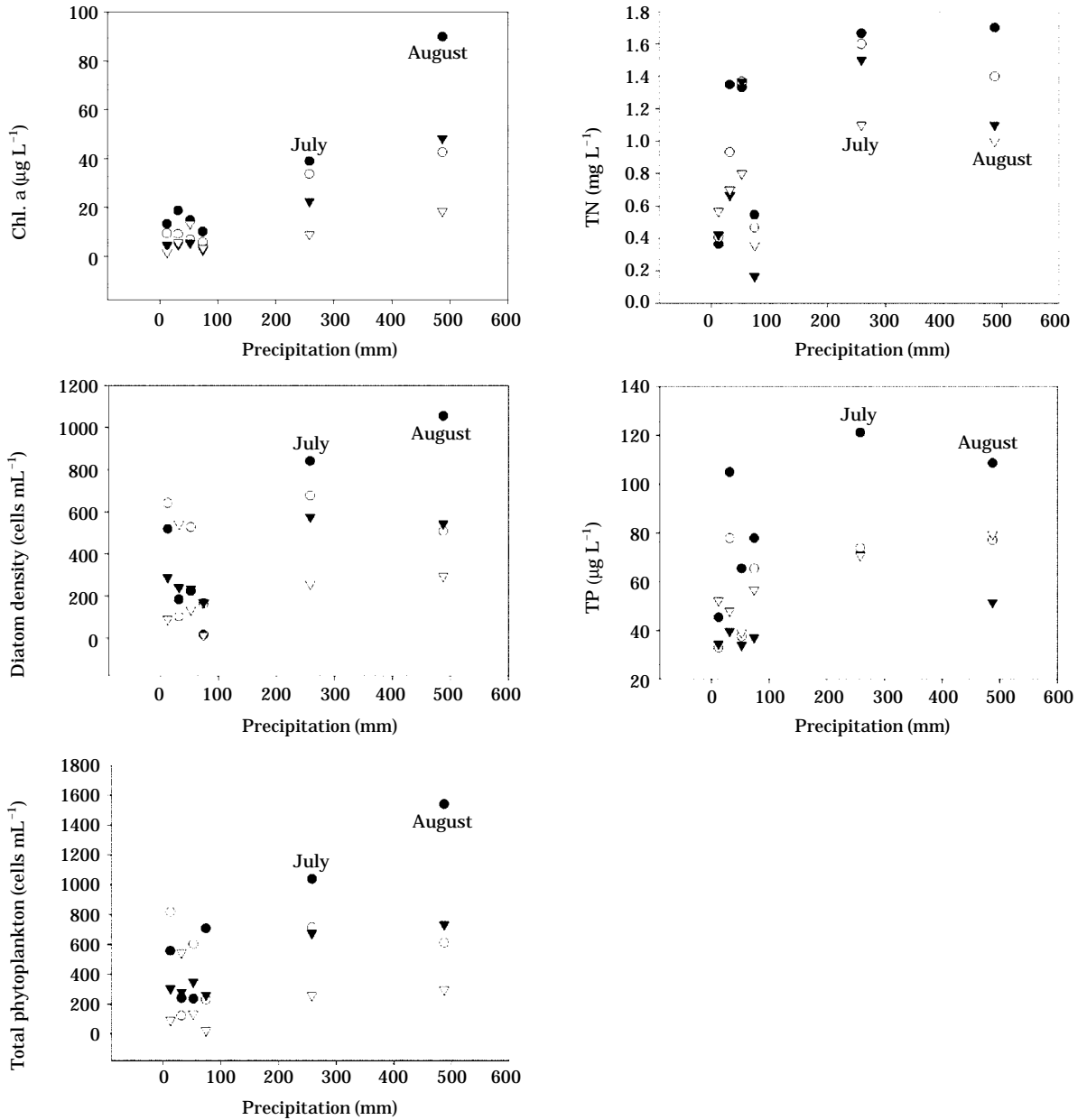


Fig. 5. Relationships between phytoplankton density and physico-chemical factors in Lake Hwaong and coastal area from June to November, 2002.



**Fig. 6.** Relationships between precipitation and phytoplankton density, TN, TP, and chl. *a* in Lake Hwaong and coastal area from June to November, 2002.

수 있을 것으로 추정되었다.

강우량과 각 정점에서 규조류의 평균 밀도, 식물플랑크톤의 총밀도를 비교한 결과, 규조류 및 식물플랑크톤 총밀도는 선형강우가 많았던 7월 호수 상류인 정점 1(남양천 유입부)부터 호외 정점인 정점 4까지 하천 유입부의 거리에 따라 밀도감소의 구배가 나타났다. 그러나, 8월에는 하류 지역인 정점 3이 중류 지역인 정점 2보다 엽록소-*a*, 규조류 밀도, 식물플랑크톤 총밀도 등이 높게

나타났다. 총 질소는 7월과 8월 모두 하천유입부로부터의 거리에 따라 농도가 낮아 졌으며, 총 인은 8월 정점 4에서 높은 농도를 나타낸 것을 제외하고는 총 질소와 마찬가지로 상류에서 하류지역으로 농도 구배가 있는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 상류에서 높은 농도를 나타내고 하류로 갈수록 농도가 낮아지는 이러한 현상은 하천이 유입되는 다른 호수에서도 관찰된 바 있다(신과 전, 2002). 다소 지역적인 차이는 있으나 거리에 따른 농도구배가

엽록소-a, 총인, 총질소 모두에서 똑같이 나타나는 것으로 볼 때, 강우사상이 빈번하거나 정도가 컸던 시기에는 그 영향이 호내 영양염과 엽록소-a의 농도구배를 나타내는데 주도적 역할을 한 것으로 추정된다. 영양염의 유입은 일시적으로 수체가 안정된 시기동안 식물플랑크톤의 발달로 이어졌을 것으로 추정되나, 강우 직후의 엽록소-a 농도 구배는 하천으로부터의 유입에 의한 영향도 배제하기는 어렵다.

결론적으로 여름과 가을동안 화옹호의 식물플랑크톤 군집구조는 해양성 조류, 특히 규조류에 의해 주도되고 있으며, 이들의 시·공간적 변이에 영향을 미치는 요인으로는 염분도, 강우사상, 영양염 등이 중요한 것으로 나타났다. 해수가 지속적으로 유통되는 시기동안 화옹호의 환경은 여름의 문순을 포함한 하천으로부터 또한 해수유통에 의한 바다로부터의 수문학적 요인이 호수내의 영양염의 거동에 주요한 영향을 미치며 이에 반응하는 생물학적 요인들이 화옹호의 생산력을 지배하고 있다고 추정된다. 그러나 보다 예측가능한 화옹호의 생물상과 수질변화를 이해하는데 최소한 1년의 주기를 포함하는 장기적인 조사분석의 필요성이 제기된다.

적 요

경기도 화성시 서해안 하구역에 조성된 간척 인공호인 화옹호에서 식물플랑크톤의 군집 변화와 종조성, 이에 영향을 미치는 요인을 평가하고자 2002년 6월에서 11월까지 호내 3개 정점과 호외 1개 정점에서 월별 조사를 실시하였다. 조사기간 동안 4개 정점에서 관찰된 식물플랑크톤은 총 5강 8목 26과 63속 192종이었으며, 식물플랑크톤의 총 밀도는 각 정점의 표층에서 24~1,882 cells mL<sup>-1</sup>로 시기와 정점에 따라 변화의 폭이 컸다. 식물플랑크톤의 총밀도는 염분도, pH, BOD, COD, SS, TN 및 TP 등과 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 규조류의 밀도와 관계가 있는 요인은 염분, SS, BOD, COD 및 TN으로 나타났다. 다소 지역적인 차이는 있으나 거리에 따른 농도 구배가 엽록소-a, 총인 및 총질소 모두에서 똑같이 나타남으로써 선행강우로 인한 영양염의 유입이 안정된 시기에 식물플랑크톤의 발달로 나타났다고 추정되었다. 화옹호 태동기의 식물플랑크톤 군집구조는 해양성 조류, 특히 규조류에 의해 좌우되고 있으며, 이들의 시·공간적 변이에 영향을 미치는 요인으로는 염분도, 강우사상, 영양염 등이 중요한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과로 판단할 때 화옹호의 현재 환경은 해수의 교환, 희

석(강우사상)과 하천으로부터 유입되는 외부기원 영양염에 의해 크게 영향을 받는 상태로 평가된다.

사 사

본 연구는 안산환경기술센터의 연구비 지원을 받아 수행 되었음(과제번호: 02-2-30-31). 본 연구를 수행하는 동안 현장조사에 많은 도움을 준 최광현 군과 오제혁 군에게 감사드리며, 간척 하구호 식물플랑크톤 생태와 관련하여 원고작성에 많은 조언을 준 한국수자원공사 수자원 연구원의 신재기 박사님께 사의를 표합니다.

인 용 문 헌

경기도. (2002). 화옹호 수질개선대책. 보고서.  
 권기영, 이평강, 박 철, 문창호, 박미옥. 2001. 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 등·식물플랑크톤의 현존량 및 종조성. 한국해양학회지 「바다」 6: 93-102.  
 신윤근, 김영길. 2002. 아산호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤 군집 구조. 한국육수학회지 35: 187-197.  
 신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태. 한국육수학회지 35: 181-186.  
 신재기, 김동섭, 조정제. 2000. 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. 한국육수학회지. 33: 109-118.  
 신재기. 2003. 평택호에서 수환경과 식물플랑크톤의 계절적 동태. Algae 18: 145-156.  
 심재형. 1994. 한국동식물도감 V. 34 식물편 (해양식물플랑크톤). 교육부.  
 황순진. 2002. 화옹호 조성에 따른 수질오염도 및 생태계 변화 추이 조사. 안산환경기술개발센터.  
 최 상. 1969. 한국해역의 식물플랑크톤의 연구 III. 1967년 5월 북동부 한국해협 표층수의 식물플랑크톤의 양과 분포 한국해양학회지 4: 1-8.  
 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희. 1997. 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구. 한국해양학회지 「바다」 2: 78-86.  
 최중기, 이진환, 이 경. 1995. 한국산 돌말류(규조류)의 분류학적 연구. I. 분류체계와 분류계급의 한국명화. 한국조류학회지 10: 1-11.  
 환경부. 1997. 수질오염공정시험법.  
 APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., American Public Health Association, Washington, D. C., USA.  
 Boney, A.D. 1975. Phytoplankton. Adward Arnold, London. pp.236.

- Chapmann, D. (Ed.) 1996. Water quality assessments. 626pp. E&FN Spon. London.
- Bougis, P. 1976. Marine plankton ecology. N.H. publishing. Netherlands.
- Choi, J.L. and J.H. Shim. 1986. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops, tychopelegic plankton. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **21**:156-170.
- Choi, J.L. and J.H. Shim. 1988. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. IV. The successional mechanism and the structure of the phytoplankton community. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **23**: 1-12.
- Elser, J.J. and B.L. Kimmel. 1985. Phytoinhibition of temperate lake phytoplankton by near-surface irradiance: Evidence from vertical profiles and field experiments. *J. Phycol.* **21**: 419-427.
- Hwang, S.J., H.S Kim, M.H. Chung and C.I. Choi. 2003. Water quality and chlorophyll-*a* at the birth stage of a large reclaimed estuarine lake in Korea (Lake Hw-aong). *Korean J. Limnol.* **36**: 455-462.
- Isamu, Y. 1982. Illustrations of the marine plankton of Japan. Hoikusha. Japan.
- Iwasaki, H. 1979. The physiological characteristics of neritic red tide flagellates. In: Toxic dinoflagellates blooms, Taylor, D.L. and H.H. Seliger (eds.) Elsevier, North Holland. pp. 95-98.
- James, A. and L. Evison. 1979. Biological indicators of water quality. John Wiley & Sons. New York.
- Jewson, D.H. and R.B. Wood. 1975. Some effects on integral photosynthesis of artificial circulation of phytoplankton through light gradients. *Verh. Int. Verein. Limnol.* **19**: 1037-1044.
- Kondo, K., Y. Seike and Y. Date. 1990. Red tides in the brackish Lake Nakanoumi (II), Relationships between the occurrence of *Procentrum minimum* red tide and environmental conditions. *Bull. Plank. Soc. Jpn.* **37**: 19-34.
- Marker, A.F.H. 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwat. Biol.* **2**: 361-385.
- Marker, A.F.H., E.A. Nusch, I. Rai and B. Riemann. 1980. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: Conclusions and recommendations. *Arch. Hydrobiol. Beih.* **14**: 91-106.
- Marra, J. 1978. Effects of short-term variations in light intensity on photosynthesis of a marine phytoplankton: A laboratory simulation study. *Mar. Biol.* **46**: 191-202.
- Moon, C.H. and W.M. Dunstan. 1990. Hydrodynamic trapping in the formation of chlorophyll *a* peak in turbid, very low salinity waters of estuaries. *J. Plankton Res.* **12**: 323-336.
- Nybakken, J.W. 1997. Marine biology: An ecological approach. Wesley Educational Publishers Inc.
- Odum, E.P. 1974. Fundamentals of ecology (3rd Ed.). W.B. Saunders, Philadelphia.
- Parsons, P.R. N. Takahasi N. and B. Hargrave. 1984. Biological Oceanographic Processes 3rd Edition. Pergamon Press Ltd, Oxford, England.
- Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J. Theoret. Biol.* **13**: 131-144.
- Seike, Y., K. Kondo, Y. Date and Y. Ishida. 1986. Nitrogen metabolism in the brackish Lake Nakanoumi (I), Uptake rate of inorganic nitrogen by phytoplankton. *Jpn. J. Limnol.* **47**: 121-132.
- Simonsen, R. 1979. The diatom system : Ideas on phylogeny. *Bacillaria* **2**: 9-71.
- Tomas, C.R. 1997. Identifying marine phytoplankton. Academic press. pp.853.

(Manuscript received 5 May 2004,  
Revision accepted 12 June 2004)