

## 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구

최중기 · 이은희 · 노재훈 · 허성희<sup>1</sup>  
인하대학교 해양학과, <sup>1</sup>부경대학교 해양학과

### The Study on the Phytoplankton Bloom and Primary Productivity in Lake Shihwa and Adjacent Coastal Areas

JOONG KI CHOI, EUN HEE LEE, JAE HOON NOH AND SUNG HOI HUH<sup>1</sup>

*Department of Oceanography, Inha University, Incheon, 402-751, Korea*  
*<sup>1</sup>Department of Oceanography, Bukyung University, Pusan, 608-737, Korea*

시화 방조제 건설 후 급속도로 오염되고 있는 시화호 내의 식물플랑크톤 대증식 현상을 파악하기 위하여 1995년 10월부터 1996년 8월까지 시화호 내외에서 환경요인들과 식물플랑크톤 chlorophyll-a, 현존량, 우점종, 일차생산력 등을 4계절 조사하였다. 시화호는 부영양화된 기수호의 성격을 띠고 있으며 저층에는 밀도가 높은 잔류해수가 남아있다. 시화호의 표층에서 육상으로부터 유입된 오염된 하천수의 영향으로 chlorophyll-a 농도가 평균  $168.0 \mu\text{g l}^{-1}$ 에 이르는 식물플랑크톤 대증식 현상이 연중 지속적으로 일어났다. 식물플랑크톤의 대증식은 추계와 동계에는 돌말류 *Cyclotella atomus*에 의해 주로 일어났고, 춘계와 하계에는 와편모류 *Prorocentrum minimum* 등과 황갈조류 등에 의해 일어났다. 시화호 바깥해역에서도 시화호수의 방류로 동계에서 하계에 걸쳐 돌말류 *Thalassiosira nordenskioldii*, *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* sp. 등에 의해 대증식이 계속 일어났다. 시화호의 식물플랑크톤에 의한 일차생산력은 연평균  $3,972 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 높게 일어났다. 그러나 일차생산력의 대부분은 표층에서의 높은 광합수로 수심 3 m 내로 국한되고, 추계와 동계에는 규산염이 제한요인으로 작용하여 더 이상 높게 나타나지 못하였다. 저층에서는 광제한 등으로 광합성 작용이 거의 없었고, 표층에서 떨어진 유기물이 분해되어 산소가 고갈되는 양상을 보였다.

To clarify the phytoplankton blooms in Lake Shihwa after the construction of a dyke, a study on the environmental factors, the distribution of chlorophyll-a, phytoplankton standing stocks, dominant species and primary productivity was carried out in Lake Shihwa and adjacent coastal areas from October, 1995 to August, 1996. Lake Shihwa is brackish water with mixing of freshwater from tributaries and the remaining salt water at the bottom. The dense phytoplankton bloom of average value of  $168.6 \mu\text{gChl-a l}^{-1}$  have occurred throughout the year in Lake Shihwa which is eutrophicated by the large input of nutrients from inflowing 5 tributaries and Shihwa Industrial Complex. The major organisms of algal bloom in Lake Shihwa were diatoms, *Cyclotella atomus*, *Nitzschia* sp. and *Chaetoceros* sp. in autumn and winter, and dinoflagellate *Prorocentrum minimum* and Chrysophyceae in spring and summer. The autumn and winter diatom blooms were limited by the depletion of silicate in the lake. Diatom blooms have occurred in the coastal areas adjacent to Shihwa lake from winter to summer due to the inflow of nutrient rich-water from Lake Shihwa. The primary productivities in the Lake Shihwa ranged from  $2,653 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  to  $9,505 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  with an average of  $3,972 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ . However, most of the high primary production was limited to the shallow euphotic zone due to the inhibition of light penetration. The primary productivities during autumn and winter were limited by the depletion of silicate. Lack of photosynthesis and the decomposition of falling organic matter under the middle of water column accelerated the depletion of dissolved oxygen in the bottom layer.

서 론

시화호는 1987년 4월 안산시 대부동 방아머리에서 시흥시 오이도에 이르는 12.7 km의 방조제 착공으로, 1994년 1월 호수 면적 6,100 ha, 총 저수 용량 3억 2천 만 톤의 대규모 인공호로 조성되었으나 준공과 더불어 이 인공호수는 인근도시에서 유입되는 오폐수로 인하여 수질 오염 문제가 대두되었다. 특히, 방조제 안의 저조면 아래에 잔류된 해수가 오염되기 시작하면서 시화호의 수질은 급속도로 악화되기 시작하였다. 이후 시화 호수 종말 처리장이 1995년에 건설되어 매일 17만 톤의 오폐수가 2차 처리 후 인천 연안 소래 앞바다로 방류되고 있으나, 오수 30여만톤은 계속 시화호로 유입되고 있다. 5개 하천을 통하여 시화호로 유입되는 오염물질의 부하량은 COD 14,008 kg day<sup>-1</sup>, 총질소(T-N) 6,646 kg day<sup>-1</sup>, 총 인(T-P) 736 kg day<sup>-1</sup>로 시화호로 유입되는 전체 오폐수 유입량의 57.3%를 차지하고 있으며, 그 외 안산 하수 처리장과 반월공단 우수토구를 통하여 나머지 오폐수가 유입되는 것으로 보고되고 있다(한국수자원공사, 농어촌진흥공사, 1995). 이와 같이 대량의 오폐수가 인공호수 내로 유입되고, 1995년 1월부터 방조제 내 사면보호 공사를 위하여 해수 유입을 차단하면서 호수내의 수질은 더욱 악화되었다.

본 연구는 호수내의 수질이 악화된 1995년에 호수내에 식물플랑크톤의 대증식이 대규모로 발생하므로 이에 관한 변화과정을 추적하기 위하여 호수내외의 식물플랑크톤에 관한 조사를 수행하게 되었다. 시화호에 대한 식물플랑크톤에 관한 자료는 물막이 공사 이전에 한국 수자원 공사(1993)에 의해 조사된 바 있으며, 물막이 공사 이후인 1994년과 1995년 한국 수자원 공사와 농어촌 진흥공사(1995)에 의해 조사된 자료가 있다.

그러나, 시화호 내의 식물플랑크톤 생태에 대한 구체적인 연구는 현재까지 이루어진 바 없다. 본 연구는 담수화가 진행되고 있는 부영양화 수역에서의 환경변화에 따른 식물플랑크톤의 우점종과 현존량 및 일차생산력 변화와 그 요인에 대하여 연구하고자 하였다.

재료 및 방법

조사는 1995년 10월, 1996년 3월, 1996년 5월, 1996년 8월 등에 걸쳐 계절별로 이루어졌으며 조사정점은 Fig. 1에 보는 바와 같다. 단 조사수역의 동계 조사는 호수의 결빙 관계로 해빙되는 3월초에 조사가 이루어졌다. 조사정점은 호수내의 경우 1995년 10월 초기 조사에 호수 전반에 걸쳐 10개 정점에서 이루어졌으나, 그 조사결과를 토대로 1996년 3월부터는 담수 유입부인 정점 1, 중간 지점인 정점 2와 3, 방조제에 인접하여 수심이 깊고 저층의 무산소 현상이 나타나는 정점 4와 5, 배수갑문 앞의 정점 6의 6개 정점으로 조정하여 이루어졌다. 또한, 호수 외측의 조사는 배수갑문 바깥 정점에서만 조사하였다. 채수는 조사당시 물리자료에 따라 변화가 나타나는 수심을 선별하여 Niskin 채수기로 시행하였다.

식물플랑크톤의 chlorophyll-a는 채수한 시료를 1995년 10월 조사시에 20 μm와 3 μm mesh로 여과시켜 크기별로 구분하여 Parsons et al.(1984)에 의거 측정하였다. 이를 기본으로 1996년

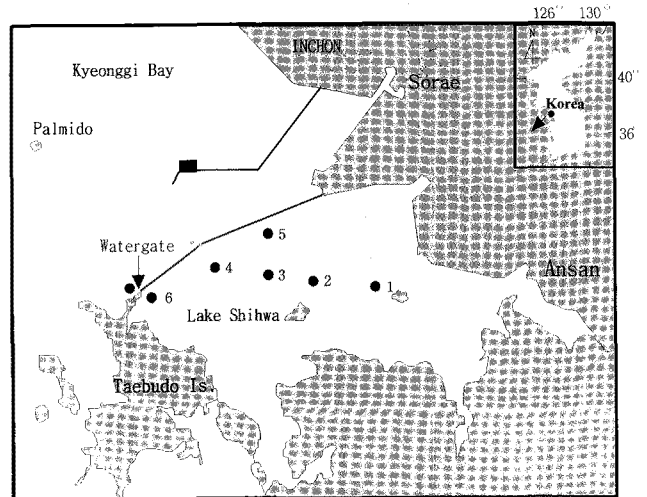


Fig. 1. Sampling stations in Lake Shihwa.

3월부터는 total과 nano fraction에 대해 조사하였다.

식물플랑크톤의 정량 및 우점종을 조사하기 위하여 채수한 시료를 Lugol Iodine 용액과 Bouin 용액으로 고정한 후, 실험실에서 1cc를 Sedgwick-Rafter chamber에 넣어 Zeiss 현미경(Axioskop 50)하에서 계수하였다. 또한 우점하는 미소형 플랑크톤의 동정과 계수를 위하여 현장에서 glutaraldehyde로 고정시킨 후 실험실에서 시료의 10%에 해당하는 양의 DAPI로 염색시켜 형광현미경(Zeiss, Axioskop 50)하에서 관찰하였다.

식물플랑크톤의 일차생산력은 Choi et al.(1995)에 따라 방사성 동위원소인 <sup>14</sup>C-bicarbonate를 사용하여 측정되었다. 그리고 식물플랑크톤의 일차생산력에 큰 영향을 미치는 총 CO<sub>2</sub>량 측정은 온도, 염분도, 시료내의 pH와 acid pH를 측정하여 구하는 방법을 사용하였다(정, 1996). 광조건은 광량계(Li-Cor. quantum meter, Li-1000)를 사용하여 일본 간격으로 PAR(Photosynthetically Available Radiation)를 측정하였다.

수온과 염분, 투명도, 용존산소 등에 관한 기본조사가 이루어졌으며, 영양염에 관한 자료는 본 조사시 동시에 측정된 박 등(1997)에 의하여 분석된 자료를 참고 인용하였다.

호수내의 부영양화도를 정량적으로 나타내기 위한 방법으로 Chlorophyll-a와 Secchi disc 투명도를 사용하여 부영양화도 지수(TSI : trophic state index)를 계산하였다(Carlson, 1977).

$$TSI(SD) = 10 \times (6 - \ln(SD) / \ln(2)), \quad TSI(Chl) = 10 \times (6 - (2.04 - 0.68 \ln(Chl) / \ln(2)))$$

(SD : Secchi disk 투명도 (m), Chl : Chlorophyll-a (μg l<sup>-1</sup>))

결과 및 토의

조사해역의 물리 화학적 환경 특성

시화호의 수온분포는 추계에는 배수갑문쪽보다 호수안쪽에서 다소 높고, 수직적으로 하계에 형성된 저층 고온수의 잔류에 의해 수온역전 현상이 나타나고 있다(Fig. 2). 동계에도 표층수 온은 5°C 이하로 전반적으로 낮은 편이나 일부수역의 저층에서 10°C 이상 높게 나타나 추계와 마찬가지로 수온역전 현상이 계

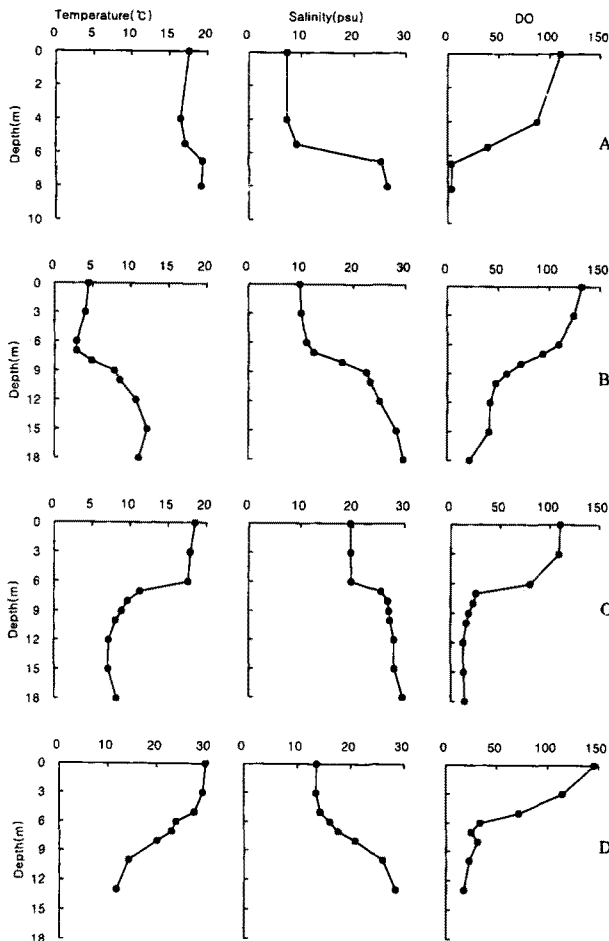


Fig. 2. Vertical profiles of water temperature, salinity and dissolved oxygen (DO) at station 4. A: Autumn, B: Winter, C: Spring, D: Summer.

속 나타나고 있다. 춘계의 수온분포는 표층에서 16.8°C~22.8°C 분포로 호수 안쪽에서 높고, 배수갑문 앞쪽에서 낮게 나타나고 있다. 수직적으로 저층에 10°C이하의 수온분포로 수심 8 m 부근에 강한 수온약층이 형성되어 있다. 하계에도 수온은 표층에서 28.3°C~31.5°C, 저층에서 11.7°C~15.9°C 분포로, 수심 8~10 m 사이에 수온약층이 형성되어 있다(Fig. 2). 시화호 바깥 해역의 수온분포는 호수내 수온과 유사하나 표저층간에 큰 차이가 없이 나타나고 있다.

염분분포는(Appendix 1) 추계에 표층에서 6.9 psu~7.4 psu이나, 저층에서 22.7 psu~26.5 psu 분포로 수심 6 m 이심의 저층에 잔류해수가 남아있음을 보였다. 동계의 염분분포는 표층에서 9.4 psu~10.4 psu, 저층에서 22.6 psu~29.7 psu 분포로 추계보다 다소 증가된 양상을 보이고 있어 추계 조사후 외해수의 유입이 있었음을 알 수 있다. 춘계의 염분분포는 표층에서 17.8 psu~19.8 psu 분포로 추계와 동계에 비해 크게 증가되었다. 이는 춘계 조사 전에 외해수의 대량유입이 있었음을 보여주는 것이다. 시화호 하계의 염분분포는 표층에서 11.9 psu~13.9 psu, 저층에서 20.0 psu~28.4 psu 분포로, 표층 염분 분포가 춘계에 비해 낮아졌다. 이는 하계 조사 전에 장마로 인하여 호수내에 담수의 유입이 많았음을 의미한다. 이와같이 시화호의 표층수는 외해

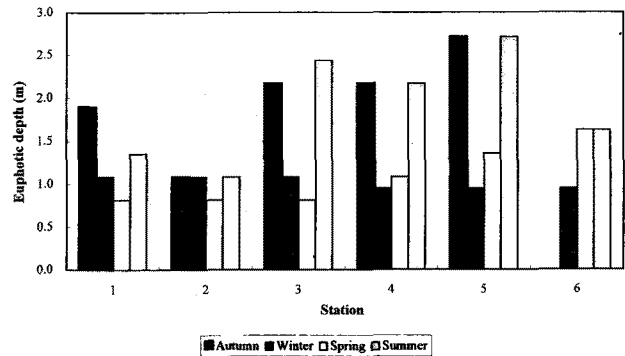


Fig. 3. Distribution of euphotic depth in Lake Shihwa.

수와 담수유입량에 따라 염분농도가 크게 변하나, 저층수는 조사 기간동안 20.0 psu~29.7 psu 분포로 계절에 따라 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이는 시화호의 저층수가 담수의 유입이나 해수의 유입 등에 큰 영향을 받지 않고 잔류 해수로서 저층에 계속 남아있음을 의미한다.

Secchi 깊이에 의한 진광대의 평균 깊이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 추계 1.6 m, 동계 1.0 m, 춘계 1.1 m, 하계 1.8 m로 4계절 모두 2 m를 넘지 못하고 있다. 이와 같이 낮은 진광대를 보이는 것은 표층 1 m내에 극도로 많은 식물플랑크톤이 쌓여 빛을 흡수하고 광투과를 저해하기 때문이다(Mihnea, 1992).

용존산소 분포는 호수내 표층에서 추계에는 평균 125.9%, 동계에는 134.9%, 춘계에는 161.4%, 하계에는 171.8%의 높은 포화율을 보여 용존산소가 표층에서 전계절에 걸쳐 과포화되어 있음을 보이고 있다(Fig. 2). 호수바깥 해역에서의 용존산소 포화율은 평균 104.8%로 인천연안의 일반적인 용존산소 포화율의 범위에 있다(Choi and Shim, 1986). 한편 시화호수 내 수심 6 m이심의 저층에서의 용존산소 분포는 4계절 0.3 mg l<sup>-1</sup>~5.0 mg l<sup>-1</sup> 분포로 평균 25.9%의 낮은 포화율을 보였다. 이와 같이 호수 밖 해수에서는 조석작용에 의한 혼합으로 표층과 저층 큰 차이 없이 100% 내외의 용존산소 포화율을 보이는 반면에, 호수내 표층에서는 과도한 용존산소 포화를 보이고 저층에서는 낮은 포화율을 보이는 이유는 시화호수내 표층에서 연중 chlorophyll-a 농도 100 µg l<sup>-1</sup>가 넘는 다량의 식물플랑크톤의 광합성으로 생성된 산소로 인하여 높은 과포화 상태에 이르렀고, 저층에서는 광합성이 거의 일어나지 않고 표층에서 침강한 유기물의 분해로 인하여 저층에서 용존산소의 고갈현상이 일어났기 때문이다(홍 등, 1996; 박 등, 1997).

조사해역의 영양염 분포는 높은 암모니아 농도로 인하여 질소의 부영양화 현상을 보였고, 높은 N:P 비에 의거 시화호수의 영양상태는 담수에 의해 주로 영향을 받는 것으로 추정되었다(박 등, 1997). 시화호의 인산염과 규산염은 전 계절에 걸쳐 표층에서 낮고 저층에서 높은 전형적인 수직분포를 보이고 있다(박 등, 1997). 본 조사수역에서 규산염과 인산염의 비율이 3:1~18:1로 낮게 나타났다. 이는 표층에 유입된 규산염이 다량의 돌말류에 의해 흡수되어 표층에서 규산염의 고갈이 일어난 것에 기인 된 것으로 보인다.

**Chlorophyll-a 분포와 부영양화 지수(TSD)**

식물플랑크톤의 계절별 chlorophyll-a 분포는(Appendix 2) 추계에 표층에서 평균 80.8  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 분포를 보였고, 동계(3월)의 표층 chlorophyll-a 분포는 조사기간중 가장 높은 평균 285.7  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 분포를 보였다. 춘계와 하계에도 chlorophyll-a 농도는 각각 평균 188.7  $\mu\text{g l}^{-1}$ , 116.8  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 높은 chlorophyll-a 농도를 보였다. 시화호 물막이 공사 이후 시화호 내 chlorophyll-a 농도 변화를 보면, 1994년 5월부터 12월까지 평균 9.7  $\mu\text{g l}^{-1}$  chlorophyll-a로 그렇게 높지 않았다(한국수자원공사, 농어촌진흥공사, 1995). 그러나 95년 1월부터 외해수의 유입이 중지되면서 호수내의 chlorophyll-a 농도는 증가하기 시작하여 본 조사기간에 표층 평균 168.6  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 높은 chlorophyll-a 농도를 보였다. 본 조사기간 중인 1996년 5월에서 7월에 걸쳐 약 2억톤에 가까운 호수내 물을 방류하고 외해수를 유입시켰지만 춘계와 하계의 chlorophyll-a 농도는 계속 높게 나타나고 있다. 이는 호수내의 높은 부영양화로 인하여 외해수의 유입이 호수내 수질을 크게 개선하지 못하였다는 것을 보여준다. 다만 하계에 정점 4, 5, 6의 표층에서 평균 39.7  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 chlorophyll-a 농도를 보여 해수 유입에 따른 chlorophyll-a의 감소를 보였지만, 이는 일시적인 현상일 것으로 사료된다. 이와 같이 시화호 내의 높은 chlorophyll-a 농도는 식물플랑크톤의 대증식이 일어난 시화호 외해수의 평균 chlorophyll-a 농도 18.4  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 9배나 되는 높은 농도이다. 미국의 EPA(1976)에서는 chlorophyll-a 농도가 10  $\mu\text{g l}^{-1}$  이상이면 부영양 수역으로 분류하고 있으며, Forsberg and Ryding(1980)은 chlorophyll-a 농도가 40  $\mu\text{g l}^{-1}$  이상이면 과영양 수역으로 분류하고 있다. 해역에서의 chlorophyll-a 영양분류는 Marchetti(1984)에 의하면 10  $\mu\text{g l}^{-1}$  이상이면 과영양 수역으로 분류하고 있고, OECD(Vollenweider and Kerekes, 1982) 분류에 의하면 chlorophyll-a 농도가 100  $\mu\text{g l}^{-1}$ ~150  $\mu\text{g l}^{-1}$  범위에 있으면 과영양 상태로 분류하고 있다. 시화호수의 chlorophyll-a 농도는 위와 같이 담수 기준이나 해수기준 모두 부영양 수역을 초과한 과영양 상태를 알 수 있다.

Carlson(1977)의 chlorophyll-a 농도, Secchi disk 투명도 깊이를 기준으로 한 수괴의 영양도 지수(TSI)를 시화호에 적용하면 Appendix 3과 같이 chlorophyll-a의 경우 사계절 73.2~86.0, Secchi disk 투명도 지수 66.6~74.2 분포로, 부영양 지수 범위인 60~80내에 있거나 일부 초과하고 있다. 이와 같이 시화호의 영양상태는 육지로부터 유입되는 과도한 영양염류로 부영양화를 이루어 극도의 높은 chlorophyll-a 농도를 보이고 있다. 특히, 표층에서 이와 같이 높은 chlorophyll-a 농도를 보이는 것은 하천과 우수망을 통해 유입된 담수의 영양염이 시화호 내의 밀도가 높은 저층 잔류해수로 인하여 표저로 섞이지 못하고 표층에서 식물플랑크톤에 의하여 왕성하게 이용되기 때문이다.

표층에 비하여 저층에서 chlorophyll-a 농도가 급격하게 감소되는 것은(Fig. 4) 표층의 높은 식물플랑크톤으로 인하여 빛의 투과가 제한되어(Mihnea, 1992), 저층에서 식물플랑크톤의 생산이 제한되고, 식물플랑크톤의 사체가 급격하게 분해되기 때문이다. 반면에 중층에서는 표층의 많은 식물플랑크톤이 가라앉기 때문에 chlorophyll-a가 비교적 높게 나타나고 있다(홍 등, 1996).

Chlorophyll-a의 정점별 분포를 보면 시화호의 내측인 정점 1과 2에서는 사계절 평균 227.6  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 높은 chlorophyll-a 농도를 보

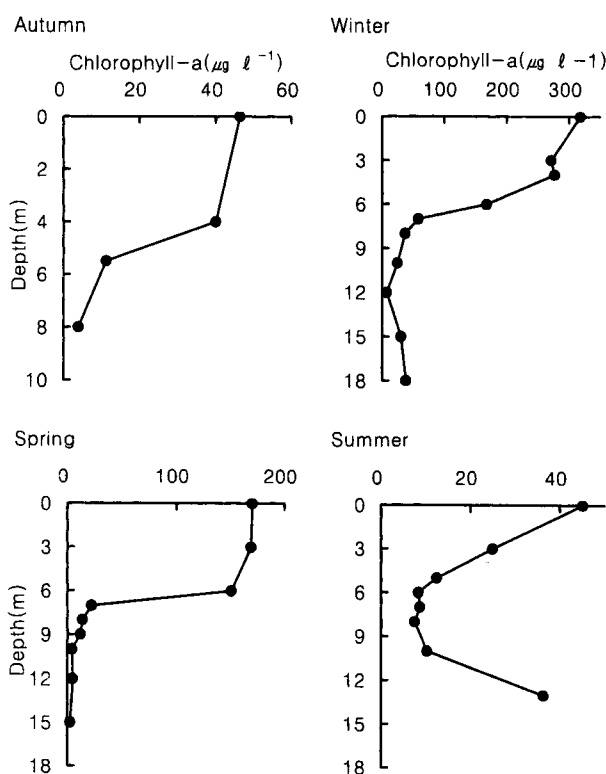


Fig. 4. Vertical profiles of chlorophyll-a at station 4 in Lake Shihwa.

이고 있고, 시화호 중간지점인 정점 3에서는 평균 152.3  $\mu\text{g l}^{-1}$ 의 분포를 보이고 있으며, 시화호수의 방조제 앞 정점인 정점 4와 5, 6에서는 평균 119.6  $\mu\text{g l}^{-1}$  분포를 보이고 있다. 이는 시화호 내 측 수역이 지속적인 영양염 유입으로 식물플랑크톤의 대증식이 대규모로 계속 일어나고 있음을 의미하며, 중앙수역과 방조제 앞 수역에서는 해수의 유입이 있는 하계에 chlorophyll-a가 급감하는 희석효과가 있음을 보여주고 있다.

조사수역의 chlorophyll-a의 크기별 분포는 미소식물플랑크톤에 의한 chlorophyll-a가 정점 1에서 추계에 50% 이하로 나타난 적이 있으나 거의 대부분 80% 이상을 차지하고 있어 본 조사수역의 식물플랑크톤 변화가 이들 미소조류에 의해 좌우되고 있음을 알 수 있다.

#### 식물플랑크톤의 대증식 현상과 우점종 분포

시화호 내 표층에서 출현한 3  $\mu\text{m}$  이상의 식물플랑크톤의 현존량은 추계에 평균  $21.8 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ , 동계에 평균  $57.2 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ , 춘계에 평균  $20.2 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ , 하계에 평균  $12.1 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$  출현하여 연평균  $30 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ 의 극히 높은 현존량이 출현하였다(Appendix 4). 이는 식물플랑크톤의 일반적인 대증식 기준인  $1.0 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ 를 30배나 초과하는 양으로 더구나 연중 이와 같이 높은 대증식이 지속적으로 일어난 경우는 매우 드물다. 우리 나라에서 가장 부영양화된 수역중 하나인 낙동강 하구역의 경우  $69.0 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ 까지 출현한 것으로 보고되었으나 춘계(5월)에는  $3.0 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$ 이하로 출현한 것으로 보고되고 있다(서와 정, 1994). 세계적으로 오염된 수역의 하나인 흑해 연안에서는 외편모류인 *Prorocentrum cordatum*에 의해  $807.0 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$

1<sup>l</sup>까지 대증식이 일어난 바 있으나 식물플랑크톤 현존량은 연 평균 최대  $6.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 이하로 나타나고 있다(Bodeanu, 1993).

시화호 내의 식물플랑크톤 현존량 변화는 1994년에는  $0.1 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> ~  $12.4 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 분포로 평균  $6.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 출현하였으나(한국수자원공사·농어촌진흥공사, 1995), 본 조사시에 5배나 증가하였다. 이는 시화호 물막이 공사 이전인 1993년에 조사한 식물플랑크톤 표층 현존량 122,000 cells l<sup>-1</sup>(한국수자원공사, 1993b)의 약 25배에 해당하는 식물플랑크톤이 1994년 물막이 공사 이후에 나타나고, 1995년 방조제 사면공사 이후에는 1993년의 약 250배에 달하는 식물플랑크톤이 출현하여 방조제 공사로 인하여 식물플랑크톤의 현존량이 단시일 내에 급격하게 증가되고 있음을 보여주고 있다. 특히 동계에 축적된 영양염이 해빙이 되면서 3월초에 대량으로 공급되어 4계절 중 가장 큰 대증식 현상을 보였다. 반면에 하계에는 3차에 걸친 해수의 대량 유입으로 해수의 유입이 많은 방조제 바로 안쪽 수역에서는 대증식 현상을 보이지 않았다. 그러나 담수의 유입이 많은 호수 안쪽 수역은 계속 대증식이 크게 일어났다(Appendix 4).

시화호 바깥해역의 식물플랑크톤 현존량은 추계에 197,000 cells l<sup>-1</sup> ~ 222,000 cells l<sup>-1</sup> 분포로 비교적 낮은 현존량을 보였으나 3월에는 평균  $13.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 분포로 대규모 증식 현상을 보였다. 인천연안에서 동계 대증식은 이미 수차례 보고된 바 있으나(최, 1995), 본 조사시와 같이  $10.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 이상 출현한 예는 없다. 이와 같이 3월에 높은 현존량이 출현한 것은 시화공단 하수처리장에서 불완전 처리된 오폐수가 대량 유입되고(1일

17만톤), 2월에 영양염이 풍부한 시화호 내의 물이 해역으로 유입되고 광조건이 양호해 지면서 저온종인 *Thalassiosira nordenskioldii*와 광온성 종인 *Skeletonema costatum*이 대량증식하였기 때문이다. 춘계와 하계에도  $3.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 출현하여 동계 이후에 계속적으로 식물플랑크톤이 대증식되고 있음을 보여주고 있다. 이는 인천연안이 원래 부영양 상태인데, 춘계와 하계동안 수 차례에 걸쳐 시화호로부터 부영양수가 대량으로 해역에 유입되었기 때문에 식물플랑크톤 대증식이 하계에도 일어난 것으로 보인다.

시화호의 수심별 현존량 분포는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 수심이 얇은 수역에서는 표층에서 가장 높게 나타나고, 수심이 다소 깊은 수역에서는 표층 또는 표층 직하에서 높게 나타나고, 중층 또는 저층에서 급격하게 감소되어 나타나고 있다. 이는 광투과가 표층에 국한된 데 기인한 것으로 사료된다. 일반적으로 광투과가 정상적인 상태에서 수온약층 또는 밀도약층이 형성될 때 발견되는 약층 위의 높은 식물플랑크톤 현존량은 본 조사에서는 발견되지 않았다(Fig. 5).

시화호의 조사수역의 현존량 분포를 우점종 및 우점 그룹으로 구분하여 비교하여 보면, 추계에는 돌말류가 식물플랑크톤 현존량의 평균 72.4%를 차지하며 우점하고 있다. 돌말류 중 가장 우점하는 종은 *Cyclotella atomus*로 표층의 저염환경에서  $5.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> ~  $4.8 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup> 출현하여 평균 78.4%의 우점율을 보이고 있다. *Cyclotella atomus* 외에 해산성 돌말류 *Chaetoceros* sp.가 표층에서  $3.0 \times 10^6$  cells l<sup>-1</sup>까지 출현하고 있으나

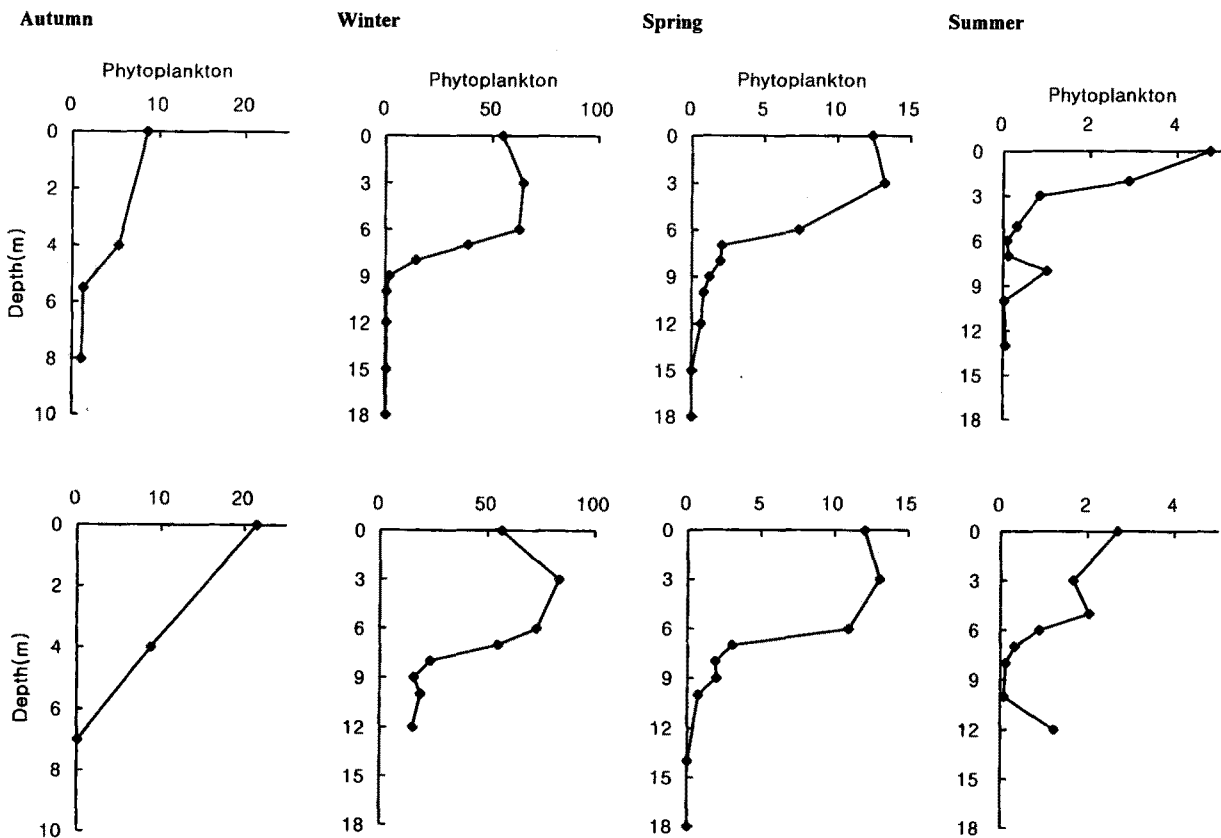


Fig. 5. Vertical profiles of standing stocks of phytoplankton at station 4 and 5 (Unit:  $10^6$  cells. l<sup>-1</sup>).

우점율은 8.6%로 낮게 나타나고 있다. 그 외에 *Nitzschia* sp.와 *Synedra* sp. 등의 돌말류가 출현하고 있으나 우점율은 5% 미만이다. 이와 같이 돌말류의 높은 출현으로 시화호 표층수의 규산염의 농도는 담수 유입지점을 제외하고는 1  $\mu\text{M}$  이하의 낮은 농도를 보이고 있다(박 등, 1997). 박 등(1997)에 의하면 해양환경에서는 규산염과 인산염의 비율이 40:1 정도이나 본 조사해역에서는 전 계절에 걸쳐 평균 3:1에서 18:1로 규산염이 전반적으로 고갈된 것으로 나타났다. 따라서 시화호 내의 표층 돌말류는 영양염 중 규산염에 의해 성장제한을 받는 것으로 추정된다. 추계에 돌말류 외에 우점한 식물플랑크톤은 해산 와편모류 *Prorocentrum minimum*과 담수 녹조류 *Scenedesmus* sp.와 해산 은편모류 *Cryptomonad* sp. 등이다. 이들은 각각 9.0%, 6.4%, 10.7%의 우점율을 보여 시화호수가 저염의 기수환경에 적응된 담수종 들에 의해 크게 우점하는 양상을 보였다. 그러나 시화호 바깥 해역에서는 *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros compressus* 등 해산 돌말류가  $2.0 \times 10^5$  cells l<sup>-1</sup>의 현존량을 보이며 우점하였다.

동계에도 추계와 유사한 양상으로 돌말류가 전체 현존량의 73%를 차지하며 우점하고 있고 나머지는 식물성 편모류와 *Euglena* sp. 등에 의하여 우점하고 있다. 그러나 춘계에 들어 염분의 증가와 규산염의 감소로(박 등, 1997) 돌말류 대신에 해산 와편모류 *Prorocentrum minimum*, *Cryptomonad* sp., *Chryso-phyceae* 등에 의해 80%이상 우점하였다. 하계에도 이와 유사하게 *Prorocentrum minimum*에 의해 80% 이상 우점하였다. 그러나 하계의 경우는 염분이 감소되고 규산염이 증가되었음에도 담수성 돌말류의 출현이 거의 없었다. 이는 돌말류가 규산염 외에도 다른 환경요인에 의해 출현이 제한받고 있음을 뜻한다. 본 연구에서는 이 수역에서 돌말류와 와편모류가 계절적으로 서로 다른 대증식 양상을 보이고 있는 것으로 뚜렷이 보여주고 있어 그 요인에 대하여는 좀 더 많은 연구가 필요하다.

본 조사기간 동안 시화호에서는 추계에 *Chaetoceros* sp., 동계에 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira nordenskiöldii*가 춘계에는 *Skeletonema costatum*과 *cryptomonads* 계통의 편모류가, 하계에는 *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Chaetoceros socialis*, *Eucampia zodiacus* 등이 우점하여 시화호 내측과는 상당한 차이를 보였다. 시화호 내의 식물플랑크톤 우점종 분포는 1994년까지는 *Detonula confervacea*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Nitzschia* sp., *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros curvisetus*, *Rhizosolenia fragillissima*, *Leptocylindrus danicus* 등 해산 돌말류에 의해 우점하였으나, 1995년 부영양화가 급격히 진행됨에 따라 *Euglena* sp.와 *Prorocentrum minimum* 등의 편모류 들과 동정되지 않는 미소형 종류들에 의해 우점되었다(한국수자원공사, 농어촌진흥공사, 1995).

이상과 같이 시화호 내의 식물플랑크톤 우점종 구성은 초기에는 연안성 돌말류들이 우점하였으나 그 후 광온 광염성 돌말류가 우점하였고, 현재 호수의 담수화와 부영양화로 인하여 담수성 돌말류와 광염성 조류들에 의해 우점하는 양상으로 바뀌고 있다.

**일차생산력**

식물플랑크톤의 일차생산력은 Table 1에서 보는 바와 같이

**Talbe 1.** Seasonal variations of daily primary productivity (mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>) and assimilation number (mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>).

Season	Station	Primary productivity	Assimilation number
Autumn	1	2,698	2.59
	4	2,653	2.54
Winter	1	3,686	2.04
	4	3,479	2.01
Spring	Sea water	1,888	3.89
	1	5,007	3.59
Summer	4	4,479	3.41
	1	9,505	3.3
Sea water	4	2,857	4.45
	Sea water	1,382	7.17

추계에는 평균 2,676 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>, 동계(3월)에는 평균 3,583 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>, 춘계에는 평균 4,743 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>, 하계에는 평균 6,181 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>를 보여, 총 평균 3,972 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>의 높은 생산력을 보였다. 본 조사수역에서 물막이 공사 이전인 1993년 측정된 일차생산력은 0.68~6.31 mgC m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup>로 평균 3.48 mgC m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup>를 보여(한국수자원공사, 1993b) 본 조사시에 측정된 일차생산력이 100배 이상 높게 나타나고 있다. 이는 표층 chlorophyll-a 증가와도 유사한 결과로 1994년 물막이 공사 이후에 부영양화로 표층의 일차생산이 급증한 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 표층에서 다량의 식물플랑크톤이 광을 흡수하여 유광대의 깊이가 깊지 않다(Fig. 3). 일차생산의 대부분은 표층 1 m 이내에서 일어났다(Fig. 6). 그 결과 수층의 전체 생산력은 수층의 chlorophyll-a 농도에 비해 높지 않으며, 낙동강 하구연 등의 부영양화 수역에서 하계에 측정된 최대 12,675 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>(Lee et al., 1994)이나 8,000~23,000 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>(김 등, 1996)에 비해 다소 낮은 생산력을 보이고 있다. 그러나 본 조사수역의 4계절 평균 일차 생산력은 일반 부영양 담수호나 하천에 비하여 높게 나타났다. 부영양 담수호인 대청호의 4계절 평균 일차생산력은 2,637 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>(한국수자원공사, 1993a)로 본 조사수역보다 낮게 나타났으며, 낙동강 하구 수역에서도 동계에는 93~287 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>로 낮은 일차생산력을 보였다. 시화호 바깥해역의 일차생산력은 동계 1,888 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>, 하계 1,382 mgC m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup>의 생산력을 보여, 시화호 안쪽 수역보다 낮게 나타나고 있다.

식물플랑크톤의 광포화시 최대 광합성 효율을 나타내는 동화계수(assimilation number)의 분포는 시화호 내에서 2.01~4.45 mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>의 분포로(Table 1), 평균 3.46 mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>를 보여 시화호 바깥해역의 3.89~7.17 mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>에 비해 낮게 나타나고 있다. 조사해역인 경기만에서 측정된 동화계수는 1.24~24.28 mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup> 분포로 평균 7.69 mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>(강 등, 1992)로 시화호 내의 일차생산력 동화계수보다 2배 이상 높게 보고된 바 있으며, 부영양화된 대청담에서의 동화계수는 평균 13.09 mgC mgChl-a<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>(한국수자원공사, 1993a)로 높은 값을 보였다.

본 조사수역이 높은 부영양화 상태에도 불구하고 대청담이나 경기만에 비해 동화계수가 낮게 나타난 것은 본 조사수역에 출현한 대부분 종들이 기수환경에 장기적으로 적응된 기수종들이 아니고 담수종이나 해산종으로서 기수내에 유입되어 단기간에

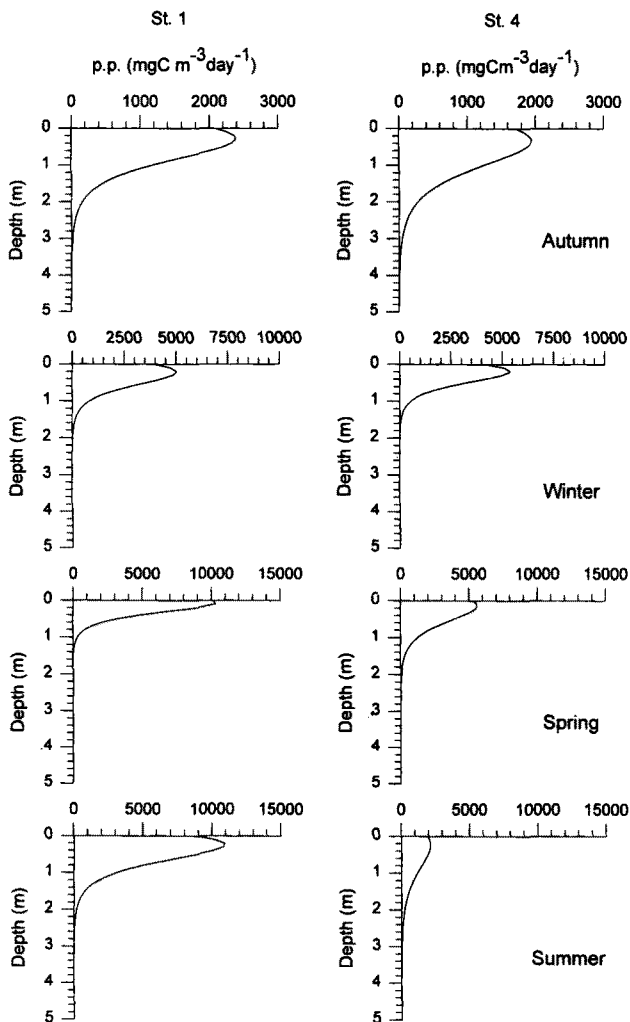


Fig. 6. Seasonal variations of primary productivity in Lake Shihwa.

적응된 종들이기 때문에 담수 해역이나 해수역에 비해 활성도가 낮은 것으로 사료된다(Smetacek, 1986).

계절별로 보면 3월이 낮은 수온으로 낮은 동화계수를 보였으나 높은 chlorophyll-a 농도로 일차생산력이 높았고, 하계에는 높은 수온 조건으로 높은 동화계수를 보였으나 해수의 유입에 따른 염분의 급격한 변화와 영양염 공급의 감소로 상대적으로 다소 낮은 일차생산력을 보였다.

결 론

시화방조제 건설 후 육상으로부터 유입된 오폐수로 인하여 시화호는 급속도로 부영양화되었다. 높은 부영양화로 인하여 호수내의 표층에서는 chlorophyll-a 농도가 평균 168.6 µg Chl-a l<sup>-1</sup>에 달하는 식물플랑크톤의 대증식 현상이 4계절에 걸쳐 계속 발생하였다. 이는 물막이 공사 이전에 측정된 chlorophyll-a 농도 1.8 µg Chl-a l<sup>-1</sup>(한국수자원공사, 1993b)의 94배에 달하는 대규모 대증식으로 방조제 물막이 공사후 2년만에 나타난 결과이다. 이와 같은 양상은 식물플랑크톤 현존량에서 더욱 뚜렷하여 1993년 식물플랑크톤 현존량에 비하여 본 조사기간 동안 약

250배의 증가가 일어났다. 시화호의 부영양화 지수(TSI)는 chlorophyll-a 에 의해 70이상의 높은 부영양화를 보였다. 시화호 바깥 해역도 시화호수의 부영양수 방출로 동계와 춘계, 하계에 걸쳐 대증식 현상이 나타났다. 시화호내의 식물플랑크톤 대증식은 추계와 동계에 담수 돌말류인 *Cyclotella atomus*, *Nitzschia* sp., *Synedra* sp. 등과 해산 돌말류인 *Chaetoceros* sp.에 의해 우점하였으나, 춘계와 하계에는 규산염의 감소와 수온의 상승으로 외편모류인 *Prorocentrum minimum*과 녹조류인 *Scenedesmus* sp., 황갈조 식물에 의해 대증식이 일어났다.

시화호수내의 일차생산력은 연평균 3,972 mgC m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>의 높은 생산력을 보여 표층에서 높은 chlorophyll-a 농도와 용존산소의 과포화를 보였다. 그러나 표층에서의 높은 광합수로 일차생산이 수심 3 m내로 국한되었고 저층에서는 표층에서 떨어진 유기물의 산화로 저산소 상태가 나타났다. 표층에서는 계절적으로 돌말류의 대증식에 의한 규산염의 빠른 흡수로 규산염 고갈 현상이 나타났다.

이상과 같이 시화 호수는 지속적으로 유입되는 오폐수로 부영양화되어 식물플랑크톤의 대증식이 연중 계속 일어나고 있어 시화호의 수질은 더욱 악화될 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 1996년도 인하대학교 교내 연구비 지원과 부경대학교 허성희 교수의 지원에 의하여 수행되었습니다. 시화호 조사에 동참하여 주신 여러분들에게 감사드리고 본 논문을 심사하고 수정하여 주신 김학균 박사와 양성렬 교수에게 사의를 표합니다.

참고문헌

강연식, 최중기, 정경호, 박용철, 1992. 서해 중동부 연안 수역과 경기만에서 일차생산력과 동화계수에 관한 연구. 한국 해양학회지, 27: 237-248.

김범철, 김동섭, 황길순, 허우명, 박원규, 1996. 부영양한 낙동강 수계에서 유기물 오염에 대한 조류 1차생산의 기여도., Algae, 11: 231-237.

박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 「바다」, 2(2): 53-68.

서정관, 정익교, 1994. 낙동강 하구역의 식물플랑크톤 군집구조 변화. 한국육수학회지, 27(3): 227-250.

정경호, 1996. 한국 연안 해역의 해양 기저생산력 결정 요인에 관한 연구, 인하대학교 이학박사 학위논문. 191pp.

최중기, 1995. 송도 매립지 사후 환경 영향 보고서, 인천시 공영개발단. 465pp.

한국수자원공사, 1993a. 댐저수지 수질회복 기술 개발에 관한 연구보고서. 311pp.

한국수자원공사, 1993b. '93 시화지구 개발 시화 공업단지 조성사업 환경 관리조사. 317pp.

한국수자원공사, 농어촌진흥공사, 1995. 시화지구 담수호 수질 보전 대책 수립 조사 보고서. 641pp.

- 홍기훈, 박선규, 홍대벽, 이상한, 1996. 시화 인공호수 입자성 침강 유기물. *해양연구* **18**: 89-92.
- Bodeanu, N., 1993. Microalgal blooms in the romanian areas of the Black Sea and contemporary eutrophication consitions. In: Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, edited by T.J. Smayda and Y. Shimiz, Elsevier.
- Carlson, R.E., 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **22**: 361-369.
- Choi, J.K. and J.H., Shim, 1986. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. I. Environmental chaeracteristics. *J. Oceanol. Korea* **21**(1): 56-71.
- Choi, J.K, J.H. Noh, K.S. Shin and K.H. Hong, 1995. The early autumn distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea, 1992. *The Yellow Sea* **1**: 68-80.
- EPA, 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental Protection Agency. *Proceed. of EPA sponsored symp.*, EPA-600 (3-76-079) 185pp.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding, 1980. Water quality criteria. *Arch. für. Hydrobiol.*, **89**: 189-207.
- Lee, J.A., K.J. Cho, O.S. Kwon and I.K. Chung, 1994. Primary production of phytoplankton in Naktong estuarine ecosystem. *Korea J. Limnol.* **27**: 69-78.
- Marchetti, R., 1984. Quadro analitico complessivo dei risultati delle indangini condotto negli acque costiere dell'Emilia Romagna: situazione e ipotesi di intervento, Regione Emilia Romagna, 310pp.
- Mihnea, P.E., 1992. Conventional methods applied in pollution control of the romanian coastal waters of the Black Sea. In: Marine Coastal Eurtrophication, edited by R.A. Vollenweider, R. Marchetti and R. Viviani, Elsevier.
- Parsons, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M., 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press. 173pp.
- Smetacek, V.S., 1986. Impact of freshwater discharge on production and transfer of materials in the marine environment. In: NATO series, Vol. 67, The Role of Freshwater Outflow in Coastal Marine Ecosystems, edited by Skreslet, Springer-Verlag.
- Vollenweider, R.A. and J.S. Kerekes, 1982. Eutrophication of Waters, Monitoring Assessment and Control. OECD, Paris, 82pp.

### Appendix

**Appendix 1.** Distributions of water temperature and salinity in Lake Shihwa and adjacent coastal areas.

Station	Autumn			Winter			Spring			Summer		
	Depth (m)	Tem. (°C)	Sal. (psu)	Depth (m)	Tem. (°C)	Sal. (psu)	Depth (m)	Tem. (°C)	Sal. (psu)	Depth (m)	Tem. (°C)	Sal. (psu)
1	0.0	16.6	6.9	0.0	4.2	9.4	0.0	22.8	17.8	0.0	31.5	11.9
	3.5	16.8	7.3	4.5	3.0	10.2	7.0	18.8	20.8	7.0	30.5	12.5
2	0.0	16.9	7.0	0.0	4.3	9.6	0.0	21.3	19.3	0.0	30.6	13.0
	4.0	16.5	7.1	5.0	3.9	10.2	8.0	12.8	26.6	8.0	24.5	15.7
3	0.0	16.8	7.2	0.0	3.5	10.1	0.0	20.4	19.6	0.0	30.2	13.5
	2.0	16.7	7.2	5.0	3.4	10.2	4.0	19.5	19.8	4.0	11.6	27.5
	4.5	16.8	7.9									
4	0.0	17.6	7.3	0.0	4.5	9.8	0.0	18.5	19.5	0.0	30.0	13.6
	4.0	16.5	7.3	3.0	4.1	10.1	3.0	17.9	19.6	3.0	29.4	13.5
	5.5	17.1	9.2	6.0	2.9	11.1	6.0	17.6	19.7	5.0	27.7	14.3
	6.5	19.4	25.3	7.0	2.9	12.4	7.0	11.3	25.5	6.0	24.0	16.1
	8.0	19.2	26.5	8.0	4.9	17.9	8.0	9.7	26.8	7.0	23.0	17.6
				9.0	7.9	22.6	9.0	8.9	27.0	8.0	20.0	20.8
				10.0	8.6	23.3	10.0	8.1	27.2	10.0	14.2	26.0
				12.0	10.7	25.1	12.0	7.2	28.0	13.0	11.7	28.4
			15.0	12.2	28.3	15.0	7.1	28.0				
			18.0	11.1	29.7	18.0	8.2	29.6				
5	0.0	17.6	7.1	0.0	4.1	9.9	0.0	17.7	19.8	0.0	29.3	13.7
	4.0	16.1	7.1	3.0	3.3	9.9	3.0	17.4	19.8	3.0	28.8	13.7
	5.5	18.0	22.7	6.0	3.0	10.0	6.0	16.2	20.4	5.0	28.0	14.0
	7.0	19.4	25.1	7.0	2.8	10.7	7.0	14.2	22.6	6.0	27.4	14.5
				8.0	3.3	16.6	8.0	9.7	26.8	7.0	25.4	15.5
				9.0	4.6	25.0	9.0	8.8	26.8	8.0	20.9	20.0
			10.0	5.7	23.1	10.0	7.5	27.8	10.0	15.9	25.7	
			12.0	6.3	25.1	12.0	7.0	27.8	12.0	14.6	26.5	
						14.0	6.9	27.7				
6	0.0	17.2	7.4	0.0	3.8	10.4	0.0	16.8	19.8	0.0	28.3	13.9
	3.0	17.2	13.5	3.0	3.4	10.3	3.0	16.7	20.0	3.0	27.6	13.9
	5.0	17.5	16.6	6.0	2.3	29.2						
A	0.0	18.8	29.9	0.0	2.8	32.5	0.0	14.2	32.1	0.0	25.4	30.6
	7.0	18.8	29.9	-	-	-	8.0	13.1	32.1	botton	24.8	30.9



**Appendix 2.** Seasonal variations of chlorophyll-a in Lake Shihwa and adjacent coastal areas.(Unit:  $\mu\text{g l}^{-1}$ )

Station	Autumn			Winter		Spring	Summer	
	Total	Nano	Pico	Total	Nano	Total	Total	Nano
1	118.1	108.6	2.2	302.4	246.5	218.0	314.9	304.2
2	119.0	59.5	2.2	267.7	262.6	269.8	210.6	-
3	65.7	-	-	260.3	251.5	227.3	56.0	52.4
4	46.4	41.1	2.9	318.3	266.0	170.1	45.1	44.2
5	70.6	60.3	1.4	279.7	241.0	152.2	32.5	30.5
6	64.8	-	-	-	-	94.8	41.5	35.6
Sea Water	2.3	1.7	0.5	31.4	-	15.0	12.0	-

**Appendix 3.** Seasonal variations of TSI (trophic state index) values in Lake Shihwa.

## (1) TSI (Secchi disk Transparency)

Station	Autumn		Winter		Spring		Summer	
	S.D. (m)	TSI	S.D. (m)	TSI	S.D. (m)	TSI	S.D. (m)	TSI
1	0.70	65.15	0.40	73.22	0.30	77.37	0.50	70.00
2	0.40	73.22	0.40	73.22	0.30	77.37	0.40	73.22
3	0.80	63.22	0.40	73.22	0.30	77.37	0.90	61.52
4	0.80	63.22	0.35	75.15	0.40	73.22	0.80	63.22
5	1.00	60.00	0.35	75.15	0.50	70.00	1.00	60.00
6			0.35	75.15	0.60	67.37	0.60	67.37
Min.	0.40	60.00	0.35	73.22	0.30	67.37	0.40	61.52
Max.	1.00	73.22	0.40	75.15	0.60	77.37	0.90	73.22
Avg.	0.74	64.96	0.38	74.18	0.40	73.78	0.65	66.99

## (2) TSI (Chlorophyll-a)

<Chl-a: Chlorophyll-a( $\mu\text{g l}^{-1}$ )>

Station	Autumn		Winter		Spring		Summer	
	Chl-a	TSI	Chl-a	TSI	Chl-a	TSI	Chl-a	TSI
1	118.1	77.4	302.4	86.6	218.0	83.4	314.9	87.0
2	119.0	77.5	267.7	85.4	269.8	85.5	210.6	83.1
3	65.7	71.6	260.3	85.1	227.3	83.8	56.0	70.1
4	46.4	68.2	318.3	87.1	170.1	81.0	45.1	67.9
5	70.6	72.3	279.7	85.8	152.2	79.9	36.3	65.8
6	64.8	71.5	-	-	94.8	75.2	41.5	67.1
Min.	46.4	68.2	260.3	85.1	94.8	75.2	36.6	65.8
Max.	119.0	77.5	318.3	97.1	269.8	85.5	314.9	87.0
Avg.	80.8	73.1	285.7	86.0	188.7	81.5	117.4	73.5

**Appendix 4.** Standing stocks of phytoplankton at surface layer in Lake Shihwa.(unit:  $\times 10^6$  cells  $\text{l}^{-1}$ )

Station	Phytoplankton standing stocks			
	Autumn	Winter	Spring	Summer
1	50.6	71.4	11.0	33.5
2	21.4	49.6	55.1	23.8
3	12.2	59.4	10.3	7.1
4	8.6	54.9	12.4	4.8
5	21.4	56.6	12.0	2.7
6	16.3	51.3	-	0.5
Min.	8.6	49.6	10.3	0.5
Max.	50.6	71.4	55.1	33.5
Avg.	21.8	57.2	20.2	12.1