

## 시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태

신 재 기·김 동 섭·조 경 제\*  
한국수자원공사 수자원연구소·\*인제대학교 환경시스템학부  
(1999년 12월 29일 접수)

### Dynamics of Water Environmental Factors and Phytoplankton Before and After Inflow of Seawater in Shihwa Reservoir

Jae-Ki Shin, Dong-Sup Kim, and Kyung-Je Cho\*  
Water Resources Research Institute, KOWACO, Taejon, 305-390, Korea  
\*Division of Environmental Science and Engineering, Inje University, Kimhae, 621-749, Korea  
(Manuscript received 29 December, 1999)

The dynamics of water quality and phytoplankton population had examined by monthly sampling from the upper to the lower part of watergate in an artificial Shihwa Reservoir in which situated near newly cities and industrial complex on the west coast of Korea from January 1997 to December 1998. Among environmental factors, yearly average concentration of chl-a, TN and TP seemed to eutrophic or hypertrophic conditions that ranged 146.4~245.8  $\mu\text{g}/\ell$ , 1.6~2.7 mg N/ $\ell$ , 258~448  $\mu\text{g P}/\ell$ , 26.9~80.7  $\mu\text{g}/\ell$ , 1.0~2.4 mg N/ $\ell$  and 74~239  $\mu\text{g P}/\ell$  respectively. Water quality was extremely deteriorated to consistently accumulation into inner reservoir by load of pollutants from autochthonous and allochthonous until early July 1997 after embankment. Water pollution of Shihwa Reservoir was remarkable on the biological condition with largely persistent bloom of phytoplankton and increase rate of standing crops was 2.4/yr. The development trend of phytoplankton in water ecosystem were closely related to increase and decrease of physico-chemical factors and those scale seemed to control by nutrient contents. Inflow of seawater into reservoir to object of repair of water quality began on July 1997. This action was caused to variable of algal flora as well as improvement of water quality. As to see dominant species, composition of those composed to mostly freshwater algae before inflow of seawater such as *Selenastrum capricornutum* of green algae, *Cyclotella atomus*, *C. meneghiniana* of diatom and *Microcystis* spp. of blue-green algae and the other hand brackish algae were dominated after inflow of seawater such as *Chaetoceros dicipiens*, *Skeletonema costatum* of diatom, *Dinophysis acuminata*, *Gymnodinium mikimotoi*, *G. sanguineum*, *Gyrodinium spirale*, *Prorocentrum minimum* of dinoflagellate and *Eutreptiella gymnastica* of euglenoid. Moreover, small flagellates including *Chroomonas* spp. of cryptomonad were abundant throughout the year. The cause of water deterioration during fill of the freshwater were complexly supported with extra and intra parameters. The variation pattern of phytoplankton were related to water temperature and salinity by inflow of seawater based to plentiful nutrients. The dynamics of phytoplankton were assessed to ecosystem that clearly condition of dominant by unique or a few algal species seasonally.

Key words : Shihwa reservoir, water pollution, environmental factors, phytoplankton, hypertrophic

#### 1. 서 론

우리나라 대부분의 담수를 비롯한 연안해역에서 겪고 있는 부영양화는 상류 또는 주변 유역으로부터 과도한 영양염 유입으로 인해 초래되고 있으며, 그 결과 담수의 수화 및 해양의 적조현상 등 식물플랑크톤이 대발생하는 결과에 이르기까지 다양한 악영향의 양상이 나타나고 있다.<sup>1,2)</sup> 또한 경제의 급속한 발전과 도시화의 팽창에 따른 위성도시의 생성은 수질 환경오염의 양적 또는 질적인

변을 확대시켰고, 그 수준은 매우 심각한 실정에 이르렀다.

1970년 후반에 건설된 신도시 안산과 반월 산업공단의 근교에 위치한 시화호는 담수의 수자원(농·공용수)과 농경지 확보의 일환으로 물막이 공사가 진행되어 1994년 1월에 완공되었다.<sup>3)</sup> 그 후 1996년까지 방조제 축조로 인해 호소는 폐쇄되어 해수의 유입이 거의 없었고 1997년 7월 이전에는 간헐적인 수문 조작이 있었을 뿐

호소의 상층은 해수보다도 담수의 영향이 강하였으며 상·하층 DO의 성층화는 뚜렷한 경계를 이루었다.<sup>4)</sup> 상류하천으로부터 고농도의 오염물질이 유입되는 반면, 호소내의 상류부에서는 유속이 급감하고 체류시간이 길어 지 유기물 분해에 의한 내적 오염부하도 수질오염의 또 다른 중요한 인자로 작용하였다. 결과적으로 호소의 전체 수질이 빠르게 악화되었고 급기야 사회적 문제로 대두되었다.<sup>5)</sup>

1996년 5월 이후, 환경부와 한국수자원공사는 매우 악화된 시화호의 수질을 개선하기 위한 노력의 일환으로 수중폭기와 유·무기물의 흡착, 응집 및 침전을 강화시키기 위한 다양한 처리제 투입 등의 이화학적 수처리 방법을 도입하여 다각적으로 적용하였으나 획기적인 대책은 수립되지 못하였다.<sup>6)</sup> 또한 간헐적인 해수의 유입으로 화석효과를 검토하였으나 그 결과는 기대에 미치지 못하였고,<sup>7)</sup> 1997년 7월부터 최종적으로 지속적인 해수 유입에 의한 호소수의 희석 방안을 실시하였다.<sup>8)</sup>

시화호의 조성을 전·후하여 호소 내부의 수중생태계와 관련된 연구로는 수환경의 분야별로 다양하였다. 수질 및 저질환경에서 수질문제의 현황 분석,<sup>9)</sup> 입자성 유기물의 침강양상,<sup>10)</sup> 용존 유·무기화합물의 생지화학적 순환,<sup>11~13)</sup> 1차 생산력 측정을 포함한 식물 및 동물플랑크톤의 생태,<sup>7,14)</sup> 저서동물의 분포,<sup>4,15)</sup> 미생물의 분포와 성장<sup>16)</sup> 및 어류의 종조성 변화<sup>17)</sup>에 관한 연구가 있었고 그 외 한국수자원공사<sup>18)</sup>와 한국해양연구소<sup>18)</sup>의 종합적인 연구보고가 있었다.

본 연구는 담수화 후 극도로 과염양화된 상태의 시화호에서 수질개선의 한 방안으로 해수 유입을 시도한 시기를 중심으로 수환경 요인과 주요 식물플랑크톤 종조성 및 개체군의 변동을 파악하고자 하였다. 또한 기존의 시화호에서 이에 관한 조사가 미흡하였으므로 본 연구결과는 심각하게 오염된 시화호의 수질을 평가하고 생태계의 변화 추이를 고찰하여 향후 환경생태학적인 면에서 유용한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지 개황

본 연구 대상지인 시화호는 서해안 경기만과 아산만 사이에 위치하고 있다(Fig. 1) 시화 담수호는 1994년 1월 시화방조제 공사가 완료됨에 따라 형성되었으며, 부근 공단에서 사용할 공업용수와 대규모 간척사업으로 새로이 조성되는 농경지에 농업용수를 공급할 목적으로 만들어졌다. 시화호의 전체 유역면적은 476.5 km<sup>2</sup>이고 담수호 면적은 56.5 km<sup>2</sup>에 해당하여 11.9%를 차지한다 총 저수량은 332×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>이고 유효저수량은 181×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>이다 유역의 내륙면적 249 km<sup>2</sup> 중에서 산림은 101.6 km<sup>2</sup>(40.8%), 논과 밭의 경작지는 89.9 km<sup>2</sup>(36.1%), 도시공간 및 주거면적은 57.5 km<sup>2</sup>(23.1%)에 해당한다.<sup>3)</sup>

시화호의 주요 유입하천은 농경지와 자연부락을 끼고 안산시 외곽부를 흐르는 신길천, 하천의 중·하류가 안산시가지를 관류하는 화정천과 안산천, 반월공단을 가로지르는 반월천 및 농촌을 주변으로 하는 동화천 등이 주

요 오염물질을 공급하는 전형적인 도시 및 농촌의 소하천에 해당한다 시화호의 유역내 55만명(1996년 기준)으로 추산되는 인구에 의한 생활하수와 농촌지역의 오수 및 축산폐수, 도시와 공단에서 생성되는 각종 오·폐수가 시화호로 흐르고 있으며 많은 양의 미처리 오·폐수가 직접 유입되고 있기 때문에 시화호는 당초 계획과는 달리 빠른 속도로 악화되어 전형적인 과염양상태의 호소로서 그 물은 각종 용수로서의 가치를 상실한 심각한 오염수로 전락하였다.<sup>5,19)</sup>

시화호 유역은 현재 농경지와 임야의 비율이 줄고 주거면적이 증가하고 있는 추세에 있기 때문에 안산·시화 환경기초시설의 증설에도 불구하고 오염물 처리량에 비해 발생량이 급증하고 있어, 수질오염은 더욱 가중될 가능성이 높으며 이에 대한 적절한 대책이 없이는 수질오염도가 좀처럼 개선되기 어려울 것으로 판단되었다

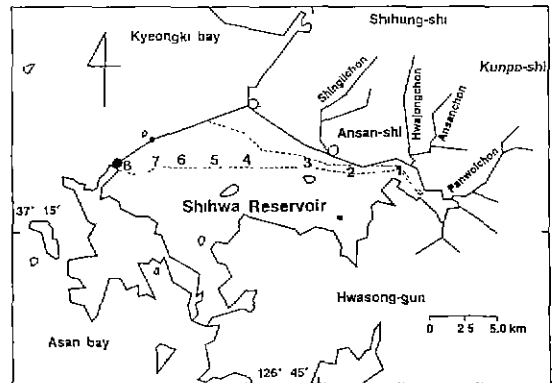


Fig. 1. Map showing sampling locations for surveys of water quality and phytoplankton population in Shihwa Reservoir from January 1997 to December 1998. Dotted contour lines indicates the shoreline before the dike construction. Closed circle is watergate of the lower part and open circle are district sewage treatment plant of the Shihwa (right) and Ansan-city(left).

### 2.2 연구방법

수환경 및 식물플랑크톤의 조사는 1997년 1월부터 1998년 12월까지 매월 1~2회씩 수행하였으며 본 연구는 악화된 시화호 수질개선을 목적으로 한 해수 유입 전·후를 중심으로 주요 식물플랑크톤 변동을 수질환경과 관련지어 파악하고자 하였다. 조사지점은 시화호 수문 조작시 물의 흐름방향을 고려하여 상류의 SR1에서 수문 부근의 SR8까지 8개 지점으로 선정하였다(Fig. 1). 현장 조사를 매회 수행할 때 동일한 지점을 확인하기 위해 GPSIII(Garmin, USA)를 이용하였고 동계에 결빙되거나 하계의 홍수 유입시 채수가 어려운 지점은 제외시켰다.

조사기간동안 배수갑문을 통해 호소수 방류 및 해수의 유입에 대한 수문자료는 한국수자원공사<sup>8)</sup>의 자료를 이용하였다. 현장의 수환경 요인 중 수온, DO, pH, 전기전도도 및 염분도는 매번 보정한 YSI-600XL meter로

측정하였다. 투명도는 지름이 0.25 m인 백색의 Secchi 원판으로 2회 측정된 평균값을 사용하였다. 수질분석을 위한 시료는 수심 1m의 상층수를 채수한 후 아이스팩이 담긴 박스에 담아 실험실로 운반하였고 즉시 분석하였다. 유기물과 chl-a의 분석은 원수를 그대로 사용하였으나 무기물은 GF/C로 여과한 후 분석하였다. TN, TP, SRP, COD 및 TSS는 Strickland & Parsons,<sup>20)</sup> APHA<sup>21)</sup> 및 환경부<sup>22)</sup>의 방법에 따라 분석하였다. Chl-a는 membrane filter(0.45 µm, Millipore)로 여과한 후 90% 아세톤을 사용하여 색소를 추출하는 Lorenzen법으로 정량하였다.<sup>20)</sup>

식물플랑크톤을 관찰하기 위한 정량시료는 현장에서 Lugol 용액으로 고정한 후 실험실로 옮겨 2~3일 이상 침장시킨 뒤 상등액을 제거하고 10배로 농축시켰고, 1% formalin으로 재고정하였다. 세포 계수 이전에 종 동정 및 조성을 파악하기 위하여 광학현미경으로 ×400배 또는 ×1,000배로 관찰하였다. 다른 분류군은 시료를 그대로 사용하였으나 규조류는 산처리 후 Pleurax 봉입제로 영구표본을 제작하여 동정하였다.<sup>21)</sup> 식물플랑크톤의 동정은 Jensen,<sup>23)</sup> Fukuyo,<sup>24)</sup> Hallegraeff,<sup>25)</sup> Thomas<sup>26)</sup> 및 Thomas *et al.*<sup>27)</sup>의 문헌을 주로 참고하였다. 농축시료 1 ml을 Sedgwick-Rafter chamber에 글고루 분산시킨 뒤 ×200배율에서 검경하면서 종별 세포수를 계수하였고 현존량은 단위부피(ml)당 세포수로 산출하였다. 환경요인 간에 상관분석은 SYSTAT 8.0(SPSS Inc.) 통계패키지를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수문·수질환경

시화호에서 94년 1월부터 98년 12월까지 수문조작에 따른 호소수의 유출량과 해수의 유입량을 나타낸 것은 Fig 2와 같다. 호소의 조성 후부터 97년 7월 이전까지 유입량은 전혀 없었고 유출량은 각종 공사 및 수질개선을 위한 시험조작으로 인해 간헐적인 갑문 개방의 영향이 있었을 뿐 많은 양은 아니었다. 이때까지 평균 유출량은  $16.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다. 97년 7월이후부터 유출량은 유입량과 거의 비례하여 수문이 개폐되었고 최대 유출 및 유입량은 98년 5월에 각각  $1,026.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다(Fig. 2). 따라서 이 시기를 전후로 최상류를 제외하고는 호소의 생태계가 담수에서 기수환경으로 전환되었던 것으로 추정된다.<sup>19)</sup>

수온은 분포 범위가  $-0.3 \sim 30.2^\circ\text{C}$ 였고 징검별 평균으로 볼 때 97년 8월에  $28.7^\circ\text{C}$ 로 가장 높았고 98년 1월에 평균  $-0.3^\circ\text{C}$ 로 가장 낮았으며 연평균값은  $16.1^\circ\text{C}$ 였다(Table 1, 2). 호소에 수온분포는 상류에서 하류 수문쪽으로 갈수록 하강하는 경향을 보였다.<sup>7)</sup> DO 농도는 최대 및 최소 차이가  $20.9 \text{ mg O}_2/\ell$ 로 를 뿐만 아니라 동일한 시기에 정점별 차이도  $17.9 \text{ mg O}_2/\ell$ 로 매우 컸으며 정점별 평균값은  $10.3 \sim 13.6 \text{ mg O}_2/\ell$  범위였고 연평균은  $12.0 \text{ mg O}_2/\ell$ 로서 표층에서는 항상 과포화상태였다. DO는 상류에서 높고 하류로 갈수록 감소하는 경향이 뚜렷하였고 식물플랑크톤의 생분량(chl-a)과 연관성이 있

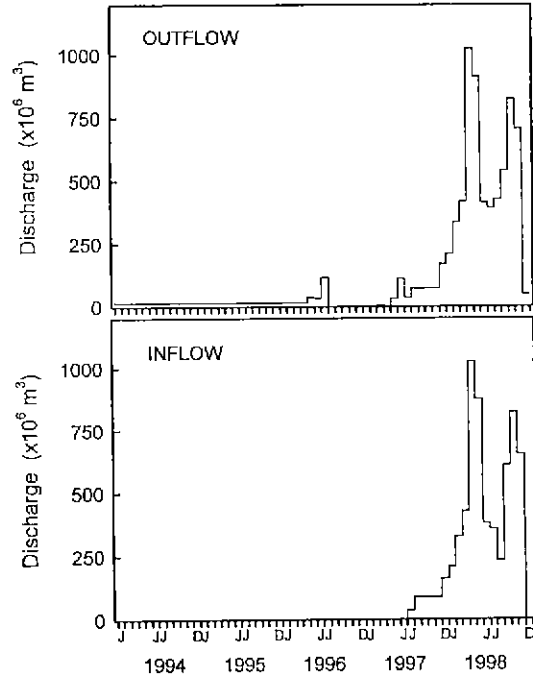


Fig. 2. Monthly changes of water discharge in Shihwa Reservoir from January 1994 to December 1998. Inflow of seawater into reservoir began at July 1997.

는 것으로 나타났다(Table 1, 2).<sup>7)</sup> pH는 정점간에 큰 차이가 없었고 해수의 유입 전·후에 큰 차이는 관찰되지 않았다. 97년~98년동안 평균값이 8.3이었고 그 범위는  $7.0 \sim 9.3$ 이었다(Table 1, 2). 전기전도도는 평균값이  $29.9 \text{ mS/cm}$ ( $1.2 \sim 59.8 \text{ mS/cm}$  범위)였고 담수 시기에는  $1.2 \sim 24.7 \text{ mS/cm}$  범위였으나 해수 유입후에는  $15.7 \sim 59.8 \text{ mS/cm}$  범위로 차이가 컸다(Table 1, 2). 전기전도도의 증감 변동은 수체의 염분도 변화와 관련이 컸다.<sup>19,21)</sup>

염분도는 담수화 시기와 해수유입 후에 큰 차이를 보였다. 담수 시기의 최고 및 최저 염분도는 각각  $14.5\%$ ,  $0.7\%$ 이었고 해수 유입후에는 각각  $30.9\%$ ,  $12.4\%$ 이었다(Table 1, 2). 97년 8월부터 98년 1월까지의 그 중간단계에 해당하여 일정하게 증가하는 경향을 보였으며 그 범위는  $8.2 \sim 29.9\%$ 이었다(Fig. 3). 또한 염분도는 계절적인 영향이 관찰되어 겨울철 갈수기에는 다른시기보다 평균 염분도가  $30.0\%$  정도로 높았고 강우가 빈번한 7월~9월에는 낮아  $9.9\%$  수준을 나타냈다. 또한 정점별 차이( $5.9 \sim 12.6\%$  범위 이상)가 큰 시기도 3회 이상 관찰되었는데 이는 강우로 인해 담수 유량의 증가에 의한 유입하천의 영향이 큰 시기로서 우리나라의 강우 특성에 의한 계절적인 결과와 수문 개폐의 영향으로 볼 수 있었다(Fig. 3).<sup>7)</sup>

호소에서 97년과 98년에 각 정점에서 chl-a의 평균 농도는 각각  $184.9 \mu\text{g}/\ell$ ,  $46.7 \mu\text{g}/\ell$  로서 해수 유입 후에 약 1/4 수준으로 감소하였다(Table 1, 2). Chl-a 농도는

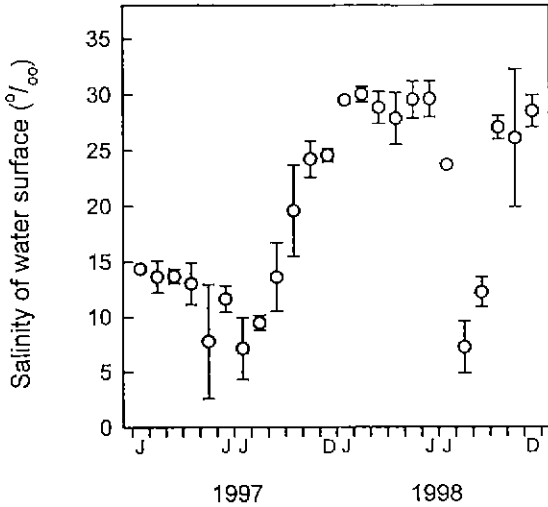


Fig. 3. Seasonal variations of water salinity in Shihwa Reservoir from January 1997 to December 1998. Vertical bars indicate standard deviation

94년에 평균 9.7  $\mu\text{g}/\ell$ 로서 매우 낮았으나,<sup>28)</sup> 95년 1월에 갑문을 폐쇄시키면서부터 수문학적으로 뚜렷한 정체성을 보였고 영양염 농도에 비례하여 이내 수질은 급격하게 악화되어 95년~96년간에 chl-a가 평균 168.6  $\mu\text{g}/\ell$ 로 증가하였다.<sup>7)</sup> 해수 유입전·후에 유입하천이 가까운 상류지점인 SR1정점에서 항상 최대를 보였고 하류로 갈수록 크게 감소하는 경향이 뚜렷하였다.<sup>7)</sup>

Chl-a농도로 본 수질 영양단계는 연평균 농도가 >20 ~25  $\mu\text{g}/\ell$ 을 부영양, >70~150  $\mu\text{g}/\ell$ 을 과영양으로 보는 기준<sup>29,30)</sup>에 적용할 때 97년에는 과영양 단계를 훨씬 초과하였으나 98년에는 부영양~과영양단계의 중간 수준으로 볼 수 있었다. 결과적으로 95년~96년에 걸쳐 조사된 내용<sup>7)</sup>에서 이미 과영양상태를 훨씬 초과한 것으로 평가한 것과 일치하였다. 따라서 이에 대한 결과를 정리 하던 해수 유입시기인 97년 7월 이전의 수질은 최악의 상태를 기록하였고 그 후 98년부터 시화호 내부의 수질은 회복의 방류효과로 인해 큰 폭으로 개선되고 있음이 뚜렷하였다(Table 1, 2). 그러나 앞으로 시화호 주변 연안생태계의 수질변화 양상에 대해서는 추후 지속적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 본다.

TSS와 투명도는 각각 연평균값이 97년에 31.4 mg SS/ $\ell$ , 0.52 m였으나 98년에는 21.0 mg SS/ $\ell$ , 1.16 m로서 해수 유입후에 TSS는 33%가 감소하였고, 투명도는 2.2배 증가하였다(Table 1, 2) Chl-a는 TSS와 투명도에 미치는 영향이 커 그 상관계수가 각각 0.91, -0.84였다. 따라서 호소의 수질에서 내부생성 유기물이 차지하는 비중이 매우 큰 것으로 판단되었고<sup>7)</sup> 이에 대한 저감 노력이 시급한 것으로 볼 수 있었다.

TN, TP 및 COD 농도는 97년과 98년에 각각 1.9 mg N/ $\ell$ , 1.6 mg N/ $\ell$ , 316.5  $\mu\text{g P}/\ell$ , 120.7  $\mu\text{g P}/\ell$  및 17.2 mg O<sub>2</sub>/ $\ell$ , 7.9 mg O<sub>2</sub>/ $\ell$ 로 각각 13%, 62% 및 54%

가 감소하였다(Table 1, 2). 또한 TN/TP 비는 해수 유입 전에 평균 6.7이었으나 유입후에 15.1로 증가하여 N/P비에 의한 식물플랑크톤의 성장에 대한 영양염 제한성은 N제한에서 P제한으로 전환되는 시기로 볼 수 있었다. 호소 수질의 상태를 판정하는 항목의 하나인 COD를 환경부<sup>31)</sup>에서 제시하고 있는 호소수와 해역의 기준에 적용시켜보면 각각 97년에 V등급, III등급, 98년에 IV등급, III등급에 해당하여 chl-a로 본 수질오염 수준 및 양상과 유사하였다

Table 1 Water environmental conditions of each station by average concentration on the epilimnetic (1m depth) water in impounded Shihwa Reservoir(SR) from January 1997 to December 1997

Factor/Stations	SR1	SR2	SR3	SR4	SR6	SR8	Mean±SD
Temperature(°C)	18.1	17.1	15.7	14.4	13.9	13.5	15.5 ± 1.9
DO(mg O <sub>2</sub> /ℓ)	11.7	12.4	12.8	12.3	11.7	10.8	12.0 ± 0.7
pH	8.2	8.6	8.6	8.5	8.4	8.4	8.5 ± 0.2
Conductivity(mS/cm)	14.0	18.0	18.4	19.9	20.5	20.6	18.6 ± 2.5
Salinity(‰)	10.6	13.2	14.3	15.2	15.7	16.0	14.2 ± 2.0
TSS (mg SS/ℓ)	39.7	35.9	27.8	34.1	26.1	25.0	31.4 ± 6.0
Transparency(m)	0.34	0.48	0.51	0.55	0.60	0.63	0.52 ± 0.10
Chl-a( $\mu\text{g}/\ell$ )	245.8	205.8	195.8	159.4	156.4	146.4	84.9 ± 38.0
T-N(mg N/ℓ)	2.7	3.0	2.1	1.6	1.6	1.6	1.9 ± 0.4
T-P( $\mu\text{g P}/\ell$ )	448.0	289.4	361.2	269.4	253.1	258.1	165 ± 79.8
TN/TP ratio	7.1	6.8	6.4	6.1	6.4	7.3	6.7 ± 0.5
COD(mg O <sub>2</sub> /ℓ)	19.0	18.7	17.1	16.7	16.8	14.8	17.2 ± 1.5

DO : dissolved oxygen, TSS : total suspended solids Chl-a : chlorophyll-a, T-N : total nitrogen, T-P : total phosphorus, COD : chemical oxygen demand

Table 2 Water environmental conditions of each station by average concentration on the epilimnetic (1m depth) water in impounded Shihwa Reservoir(SR) from January 1998 to December 1998.

Factor/Stations	SR1	SR2	SR3	SR4	SR6	SR8	Mean±SD
Temperature(°C)	17.5	17.1	17.1	16.4	15.9	14.9	16.5 ± 1.0
DO(mg O <sub>2</sub> /ℓ)	13.6	12.7	12.4	12.2	11.1	10.3	12.1 ± 1.2
pH	8.2	8.3	8.2	8.2	8.1	8.1	8.2 ± 0.1
Conductivity(mS/cm)	33.4	39.5	39.8	40.3	41.0	40.7	39.1 ± 2.9
Salinity(‰)	21.0	24.3	24.1	25.4	26.0	25.9	24.5 ± 1.9
TSS (mg SS/ℓ)	25.9	22.4	20.8	19.8	18.1	18.9	21.0 ± 2.8
Transparency(m)	0.66	0.90	0.92	1.17	1.43	1.85	1.16 ± 0.43
Chl-a( $\mu\text{g}/\ell$ )	80.7	48.1	52.7	41.3	28.6	28.8	46.7 ± 19.3
T-N(mg N/ℓ)	2.4	1.7	1.7	1.4	1.1	1.2	1.6 ± 0.5
T-P( $\mu\text{g P}/\ell$ )	239.2	127.6	113.3	83.7	86.9	73.5	120.7 ± 61.5
TN/TP ratio	10.8	12.9	15.1	16.9	15.9	18.9	15.1 ± 2.9
COD(mg O <sub>2</sub> /ℓ)	10.2	8.2	8.7	8.3	6.4	5.5	7.9 ± 1.7

DO : dissolved oxygen, TSS : total suspended solids. Chl-a : chlorophyll-a, T-N : total nitrogen, T-P : total phosphorus, COD : chemical oxygen demand

환경요인 중 식물플랑크톤의 성장에 제한 영양염으로

중요하게 작용하는 무기인(SRP)의 영향을 97년~98년 사이에 주요 유입하천의 최종지점에서 하천으로부터 공급되는 평균농도의 분포를 나타낸 것은 Fig. 4와 같다. SRP는 반월천에서 평균농도가 1,167.3 µg P/l (43%)로서 가장 높았고, 화정천과 안산천(693.5 µg P/l, 25%), 신길천(528.5 µg P/l, 19%) 및 동화천(368.8 µg P/l, 13%)의 순으로 높은 농도가 호소 내부로 유입되었고 이로 인해 식물플랑크톤의 생물량을 비롯하여 과도한 물질생산에 기여하는 정도가 매우 클 것으로 판단되었다.

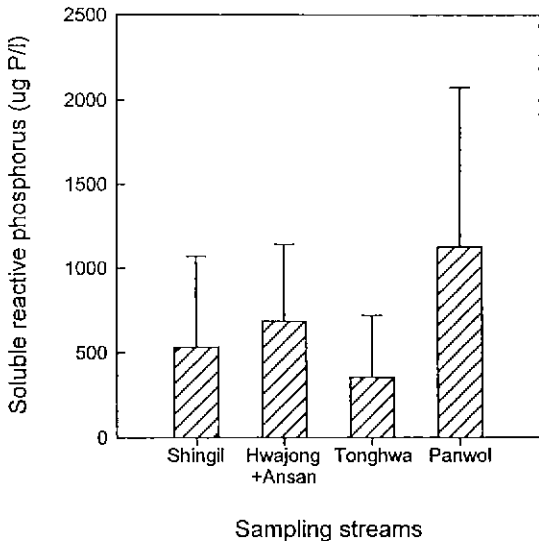


Fig. 4. Distribution of soluble reactive phosphorus (SRP) concentration at each inlet stream of Shihwa Reservoir from January 1997 to December 1998. Vertical bars indicate standard deviation.

3.2. 해수 유입 전·후에 종조성 변화

시화호가 형성되기 전과 후의 식물플랑크톤 종조성 변화는 Table 3에 나타난 것과 같다. 시기별로 볼 때 크게 4단계로 구분되었다. I 단계는 시화호가 완성되기 직전의 시기로 수온이 상승하는 하계를 제외하고는 규조류가 풍부하였고, II·III단계는 담수 시작 후 약 2년이 지난 시점과 담수 후 수질이 매우 악화된 시기로 담수종의 영향과 함께 기수 및 해양종의 혼합형태를 보였다. 시간이 경과함에 따라 담수종의 우점현상이 뚜렷한 것으로 관찰되었고 대발생 양상이 빈번하였다. 식물플랑크톤 증담수를 하자마자 이내 폭발적인 대발생을 보인 종은 규조류 *C. atomus*와 와편모조류 *P. minimum*, 유글레나조류 *E. gymnastica*, 남조류 *Microcystis* spp. 및 녹조류 *S. capricornutum*였고 은편모조류 *Chroomonas* spp.가 연중 관찰되었다. 끝으로 IV단계는 시화호 수질개선택의 일환으로 해수유입에 따른 희석효과를 거두기 위해 수문을 개방한 이후로서 종조성은 *P. minimum*을 중심으로 다시 기수 또는 해양종이 우점하는 수환경으로 전환되었다. 결과적으로 호소화 전·후에 식물플랑크톤의 전이양

상을 정리하면 규조류·와편모조류→녹조류·남조류→와편모조류의 순이었다.

Table 3 A change trend of important phytoplankton flora as a dominant species at before and after of dikes construction in the water ecosystem of Shihwa Reservoir Area.

Algal flora\Phase*	I	II	III	IV
<b>Bacillanophyceae</b>				
<i>Chaetoceros curvicietus</i>	+			
<i>Cha. decipiens</i>				+
<i>Chaetoceros</i> spp.		+		
<i>Cyclotella atomus</i>		+	+	
<i>Cyc. meneghiniana</i>			+	
<i>Deronula confervacea</i>	+			
<i>Leptocylindrus danicus</i>	+			
<i>Nitzschia</i> spp.	+			
<i>Rhizosolenia fragilissima</i>	+			
<i>Skeletonema costatum</i>	+			
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	+			
<b>Cyanophyceae</b>				
<i>Microcystis</i> spp.				+
<b>Chlorophyceae</b>				
<i>Scenedesmus</i> spp.		+		
<i>Selenastrum capricornutum</i>				+
<b>Dinophyceae</b>				
<i>Dinophysis acuminata</i>				+
<i>Prorocentrum minimum</i>		+	+	+
<b>Euglenophyceae</b>				
<i>Eutreptiella gymnastica</i>			+	+
<b>Cryptophyceae</b>				
<i>Chroomonas</i> spp.			+	+
<i>Cryptomonas</i> spp.		+		
<b>Prasinophyceae</b>				
<i>Pyramimonas</i> spp.				+

\* : I-before the formation of the reservoir in early 1994(KOWACO·RACO, 1995), II- after 2 years by embankment in October, 1995 to August, 1996(최 등, 1997), III-period of filled with a freshwater (1997), IV-after inflow of seawater into reservoir by always opening of the watergate(1998).

3.3 현존량 변동

점점별 식물플랑크톤의 현존량을 평균값으로 나타낸 것은 Fig 5와 같다. 전반적으로 97년에는 상류와 하류간에 큰 차이가 없었으나 98년에는 현존량이 격감하여 하류로 갈수록 그 기울기가 증가하는 다른 양상이 관찰되었다. SR1에서는 m당 평균  $15 \times 10^5$  세포를 중심으로 변화가 적었으나 하류의 수문으로 갈수록 해수 유입전보다도 유입후에 세포수도 감소하였을 뿐만 아니라 변동 폭도 매우 커 SR8에서 97년과 98년의 비교로부터 평균 세포수가 각각  $1.8 \times 10^5$ ,  $1.2 \times 10^4$  cells/ml로 93%가 감소하였다.

또한 본 연구기간 이전에 식물플랑크톤의 평균 현존량은 93년, 94년 및 95년~96년에 각각  $1.2 \times 10^2$  cells/ml,

$6.0 \times 10^3$  cells/ml 및  $3.0 \times 10^4$  cells/ml로서 매우 큰 폭으로 증가한 경향을 보였고 오염의 전개양상을 간접적으로 파악하는데 유용하였다.<sup>7,28,32)</sup> 식물플랑크톤의 증가는 93년에 비해 94년, 95년~96년, 97년 및 98년까지 각각 49배, 246배, 1,961배 및 210배로서 지수적인 증가를 보였고, 93년~97년에 세포밀도로 본 현존량의 연평균 증가율은 2.4/yr로 나타났다.

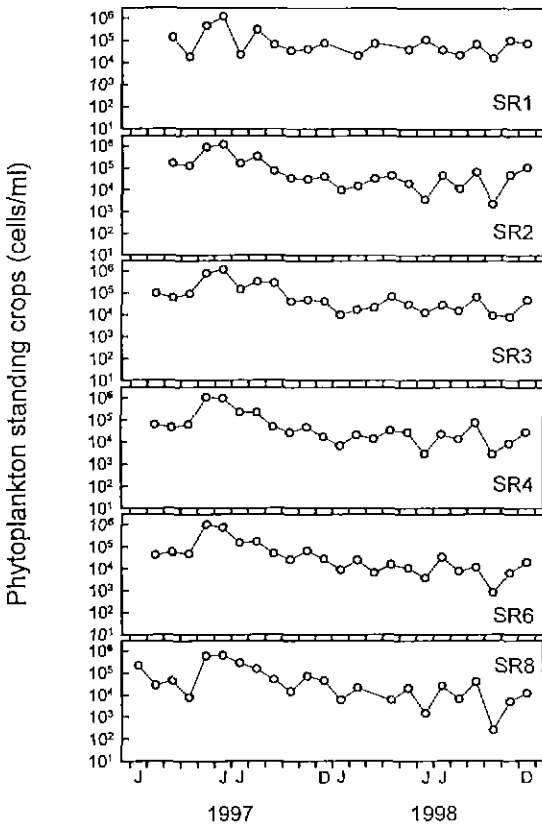


Fig. 5 Seasonal variations of average phytoplankton standing crops at each stations of Shihwa Reservoir (SR) from January 1997 to December 1998.

3.4. 분류군 및 주요 개체군 변동

호소의 정점별 평균 세포수로 본 분류군 및 개체군 변동을 나타낸 것은 Figs. 6~7과 같다. 시화호에서 식물플랑크톤의 분류군 변동은 담수와 해수에 의한 영향이 매우 뚜렷하였다(Fig. 6). 규조류와 와편모조류는 연중 계속 출현하였으며 총종수에 대한 비율은 각각 58~86%, 5~32%범위였고 계절적으로 봄 때 규조류는 하계에 많았고 동계에 적었던 반면 와편모조류는 그와 반대양상을 보였다. 남조류와 녹조류는 규조류와 마찬가지로 담수의 유입 영향이 클 때 높은 밀도로 관찰된 조류로서 유입 지천의 영향이 큰 시기에 증가하는 것으로 볼 수 있었으며 시기적으로는 1월과 4월~11월이었다. 라피도

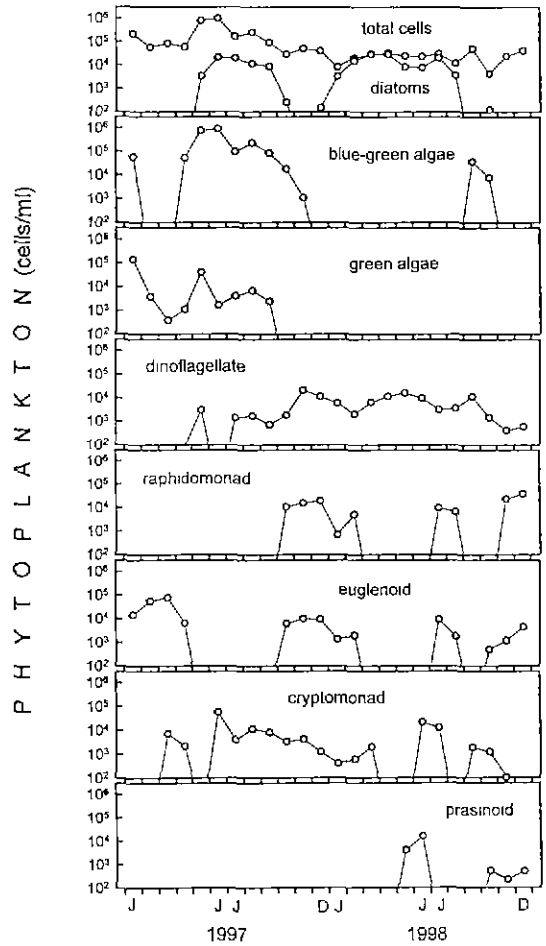


Fig. 6. Seasonal variations of phytoplankton phylum by average cell density in Shihwa Reservoir from January 1997 to December 1998.

조류는 고수온기인 7월~8월과 저수온기인 10월~2월에 만 높은 밀도로 출현하였다. 유글레나조류와 은편모조류는 연중 불규칙하게 대량 출현하였으며 프라시노조류는 5월~6월과 10월~12월에 많은 양이 관찰되었다(Fig. 6)

식물플랑크톤의 출현양상에서 규조류는 *Chaetoceros*, *Cyclotella* 및 *Skeletonema*를 제외하고는 높은 밀도는 아니지만 연중 고르게 나타났고 특히 1월~8월에 집중적으로 출현하였다(Fig. 6). 규조류가 적조를 일으킬 때에는 2종 이상이 혼합되어 유발하였고 *D. acuminata*와 *P. minimum*을 제외한 와편모조류는 규조류의 발생시기와 유사하여 3월~7월의 춘계와 하계에 집중되었다. 와편모조류는 규조류와는 달리 혼합형 적조가 아닌 단독종이 주로 번무하였고 규조류의 대발생 직후에 크게 번무하는 경향성이 관찰되었다.

환편 *Pyramimonas* spp로 추정되는 세포크기가 2~5 μm의 소형 편모조류가 시화호에서 많이 관찰되었다. 대발생 시기에 세포밀도는 총 세포밀도의 79%이상 차지하여 규

조류 또는 와편모조류보다 현저하게 높을 때가 많았다. 소형 편모조류는 규조류와 와편모조류의 대발생 시기를 피하거나 그 수가 감소하는 시기인 6월, 7월, 9월 및 11월에 *Chroomonas* spp., *Cryptomonas* spp., *Rhodomonas* spp. 및 *Pyramimonas* spp. 등 4종이 번갈아가며 폭발적인 발생을 보였고 평균 세포밀도는  $1.0 \times 10^4$  cells/ml을 훨씬 초과하는 수준이었다(Fig. 6). 또한 3월~6월에 SR6~SR8구간에서는 소형 편모조류가 거의 관찰되지 않았으나 SR1~SR3구간에서는  $3.0 \times 10^3 \sim 9.2 \times 10^4$  cells/ml 범위의 높은 밀도를 유지하였다. 이러한 현상은 저염분 환경과 영양염의 풍부함에 의한 영향이 지배적인 것으로 추정되었다.<sup>7)</sup>

담수의 영향이 컸던 시기인 97년 1월~10월에 녹조류 *S. capricornutum*은 장기간 출현하였고 특히 1월과 5월에 더욱 높아 각각  $14 \times 10^5$ ,  $40 \times 10^4$  cells/ml 수준이었고 2월~4월, 6월~10월에는 평균  $1.3 \times 10^3$  cells/ml 수준이었다. 남조류 *Microcystis* spp.는 97년 4월에 급증하여 11월에 소멸하는 경향을 보였다. 최대밀도는 6월에  $9.2 \times 10^5$  cells/ml이었고 녹조류 *S. capricornutum*과 함께 폭발적인 대발생이 관찰되었다. 남조류 *Microcystis* spp.는 97년에 장기간에 걸쳐 빈무한 반면 98년에는 10월에만  $78 \times 10^3$  cells/ml로서 일시적으로 출현하였을 뿐 다른 시기에는 관찰되지 않았다(Fig. 7). 남조류 *Microcystis* spp.와 녹조류 *S. capricornutum*의 대량 발생은 *Pyramimonas* spp.와 마찬가지로 정체수역이면서 표층은 저염환경을 유지하고 있는 시화호에서 유입하천으로부터 유입되는 담수의 증가와 풍부한 영양염의 공급이 이들 생육에 충분한 환경을 제공하였던 것으로 판단되었다.

규조류 *C. atomus*와 *C. meneghiniana*는 남조류 *Microcystis*의 출현시기와 일치하였고 *C. atomus*는 5월~9월, *C. meneghiniana*는 6월~7월, 9월~10월에 걸쳐 평균세포수가 각각  $9.9 \times 10^3$ ,  $1.2 \times 10^3$  cells/ml로 관찰되어 *C. atomus*의 밀도가 월등히 높았다(Fig. 7). 규조류 중 *C. atomus*는 담수에서 흔히 관찰되는 종으로서 본 연구 결과 뿐만 아니라 95년~96년의 추계에 대발생하여 우점한 것으로 보고된 결과<sup>7)</sup>와 일치하였다.

수질 악화의 심화로 인한 개선책의 한 방법으로 제시된 해수의 희석을 시도한 이후에는 종조성이 크게 변화된 것으로 나타났다(Fig. 7). 97년 7월이전에 대량으로 관찰되었던 녹조류와 남조류의 번무는 98년에는 없었거나 단기 발생 내지는 세포밀도가 현저하게 감소하였다. 반면에 규조류는 *Cyclotella*속 개체군에서 *S. costatum*과 *C. diciptiens*로 변화되었고 *Gymnodinium*과 *Gyrodinium* 등 와편모조류의 출현이 전개되었다. 규조류 *S. costatum*은 광온성 조류로 분류되고 있으며 97년 12월에 발생하여 98년 8월까지 9개월 이상 평균  $1.0 \times 10^4$  cells/ml로 출현하였고 최대밀도는  $2.9 \times 10^4$  cells/ml로서 98년 3월~4월에 관찰되었다. *C. diciptiens*는 *S. costatum* 세포수가 감소하는 무렵인 98년 7월~8월에 단기발생이 있었다

97년에는 관찰되지 않았던 와편모조류 *G. mikimotoi*, *G. sanguineum* 및 *G. spirale*은 98년 3월~4월, 6월~7월, 및 10월에 평균 세포수가 각각  $1.3 \times 10^3$  cells/ml,  $1.0$

$\times 10^3$  cells/ml 및  $2.4 \times 10^3$  cells/ml 수준을 보였다. 그의 와편모조류 *D. acuminata*는 97년 10월~12월에 평균세포수가  $11 \times 10^3$  cells/ml이었으나 98년에는 비슷한 시기에 메당 10 cells 정도로서 밀도가 매우 낮았다(Fig. 7).

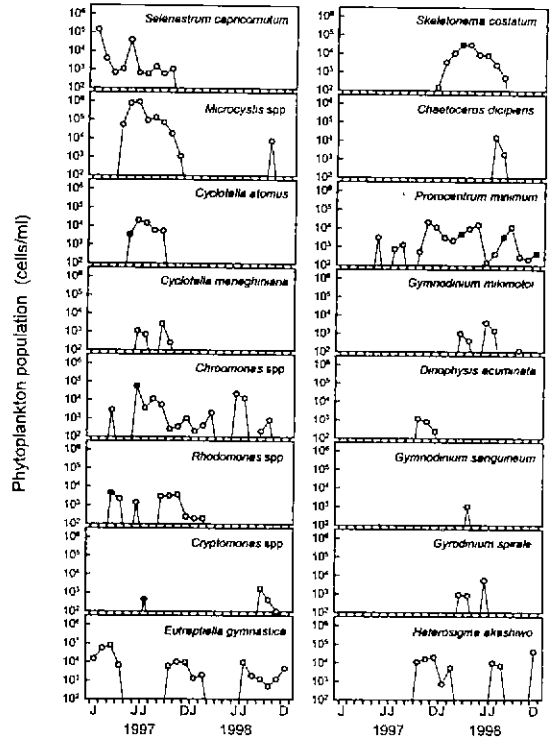


Fig 7. Seasonal variations of each algal species before and after inflow seawater in Shihwa Reservoir from January 1997 to December 1998

와편모조류 중 *P. minimum*은 시화호에서 만성적으로 발생하는 종으로서<sup>7,8,31,32)</sup> 97년 5월, 7월~8월, 10월~12월 및 98년 1월~12월에 걸쳐 장기간 관찰되었고 97년 11월~98년 5월과 8월~9월에 평균  $8.4 \times 10^1$  cells/ml로서 높은 세포밀도를 보였다(Fig. 7). 유글레나조류 *E. gymnastica*는 97년 1월~4월, 97년 10월~98년 2월 및 98년 7월~12월에 각각 평균  $3.8 \times 10^1$  cells/ml,  $2.5 \times 10^1$  cells/ml 및  $3.1 \times 10^3$  cells/ml로서 담수시기에 8~12배 더 높았다. 라피도조류 *H. akashiwo*는 97년 10월~98년 4월, 7월~8월 및 12월에 각각 평균  $1.1 \times 10^4$  cells/ml,  $8.2 \times 10^3$  cells/ml 및  $4.0 \times 10^4$  cells/ml 수준으로 많은 양이 관찰되었다

은편모조류 중 *Chroomonas* spp.는 97년~98년 6월에 세포밀도가 가장 높아 각각  $5.7 \times 10^4$ ,  $2.2 \times 10^4$  cells/ml이었고 *P. minimum*, *E. gymnastica* 및 *H. akashiwo* 개체수 증감과 관련성이 큰 것으로 볼 수 있었다(Fig. 7). *Rhodomonas* spp.는 97년에는 평균  $2.1 \times 10^3$  cells/ml로서 연중 출현하였으나 97년 12월부터 감소되어 98년 2월에 완전 소멸하였고 그 이후에는 관찰되지 않았다.

*Cryptomonas* spp.는 97년 7월과 98년 9월~11월에만 각각  $4.4 \times 10^2$  cells/ml,  $7.2 \times 10^2$  cells/ml 수준으로 관찰되어 다른 우점하는 조류에 비해 세포밀도는 높지 않았다.

시화호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동을 조사한 결과 상호 밀접한 관련성을 보였다. 담수 직후에 유역으로부터 다량의 영양염이 호소 내부로 유입되어 연중 식물플랑크톤의 대발생을 초래하는 등 수질이 급속도로 악화되어 TSS, 투명도 및 COD 등의 다른 환경인자들의 수준을 증감시키는 주된 요인이 되었다.

식물플랑크톤의 변동양상은 해수의 유입 전에 담수층이 월등히 많았고 유입 후에는 기수층 또는 해양층으로 전환되고 있음을 관찰할 수 있었다. 따라서 현재와 같이 배수갑문을 상시 개방하고 있는 한 향후 해양성 식물플랑크톤이 우세할 것으로 예상되며 이에 관한 지속적인 연구가 있어야 할 것으로 본다. 또한 전술한 바와 같이 식물플랑크톤의 증감은 N·P 등의 무기영양염과 관련성이 크기 때문에 유역으로부터 공급되는 이에 대한 대책이 강구되지 않고서는 시화호 수중생태계의 건강성 회복과 연안생태계의 부영양화 방지는 쉽지 않을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

서해안의 신도시 및 산업단지 근교에 위치한 시화호에서 유입지천 부근의 상류부터 최하류에 해당하는 수문까지 8개 지점에서 1997년~98년에 걸쳐 수환경 요인과 식물플랑크톤 변동을 매월 1~2회씩 조사하였다. 수환경 요인 중 97년과 98년에 연평균 chl-a, TN 및 TP 농도는 각각 146.4~245.8 µg/l, 1.6~2.7 mg N/l, 25.8~44.8 µg P/l, 26.9~80.7 µg/l, 1.0~2.4 mg N/l 및 74~239 µg P/l 범위로써 영양상태 수준은 부영양 또는 과영양 단계로 볼 수 있었다.

호소의 조성후 97년 7월이전까지 수질은 외부 또는 내부의 저층으로부터 부하되는 오염물질이 지속적으로 호소내에 축적되어 극도로 악화되었다. 수질오염은 연중 식물플랑크톤이 대발생하는 생물학적 현상에서 뚜렷하였고 식물플랑크톤의 생물량 증가율은 2.4/yr이었다. 수환경에서 식물플랑크톤의 발생양상은 이화학 인자의 증감과 밀접한 관련성을 보였고 그 규모는 영양염의 농도에 의해 지배적인 것으로 볼 수 있었다. 수질개선의 목적으로 97년 7월이후부터 해수의 유입을 시도하여 수질의 개선뿐만 아니라 식물플랑크톤의 식물상 변화도 초래하였다.

식물플랑크톤의 종조성은 우점종으로 볼 때 해수 유입 전에는 담수의 영향으로 녹조류 *Selenastrum capricornutum*, 규조류 *Cyclotella atomus*, *C. meneghiniana*, 남조류 *Microcystis* spp. 등 담수종이 많았고, 유입 후에는 규조류 *Chaetoceros decipiens*, *Skeletonema costatum*, 와편모조류 *Dinophysis acuminata*, *Gymnodinium mikimotoi*, *G. sanguineum*, *Gyrodinium spirale*, *Proocentrum minimum* 및 유글레나조류 *Eutreptiella gymnastica* 등 기수종이 풍부하였다. 또한 연편모조류 *Chroomonas* spp.를 비롯한 소형 편모조류가 연중 매우

풍부하였다.

담수화 기간동안 수질악화의 원인은 외부 또는 내부의 요인이 복합적으로 기여하였고 식물플랑크톤 변동양상은 풍부한 영양염을 기초로 하여 수온과 해수 유입에 의한 염분도에 밀접한 관련성이 있는 것으로 관찰되었으며 계절별로 단일 또는 소수종의 우점현상이 뚜렷한 수계로 평가되었다.

#### 감사의 글

본 연구를 위해 현장조사에서 여러모로 많은 도움을 주신 한국수자원공사 안덕건설단 연구지원팀 여러분들께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 국립환경연구원, 1993, 호소 만입부에서의 조류 대량 증식 제어기술 개발(III), 65~67pp
- 2) 국립수산진흥원, 1997, 한국연안의 적조: 최근 적조의 발생원인과 대책, 280pp.
- 3) 한국수자원공사, 1996a, 시화호 수질개선 종합관리대책 기본계획 보고서(요약), 130pp.
- 4) Lee, J. H and J. H. Cha, 1997, A study of ecological succession of macrobenthic community in an artificial lake of Shihwa on the west coast of Korea. An assessment of ecological impact by embankment, Ocean Research, 19, 1~12
- 5) 허성희, 오임상, 1997, 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구. 서문, 한국해양학회지(바다), 2, 49~52
- 6) 한국수자원공사, 1996b, '96년도 시화호 수질현황 및 조류제어 연구보고서, 163pp.
- 7) 최중기, 이은희, 노계훈, 허성희, 1997, 시화호와 주변해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구, 한국해양학회지(바다), 2, 78~86.
- 8) 한국수자원공사, 1997-98, 시화호 수질회복 추이에 관한 연구
- 9) Seo, D. I., 1997, Analysis of water quality problems in the Shihwa Lake, Korea, Korean J. Limnol., 30(Supplement), 518~523
- 10) 홍기훈, 박선규, 홍대벽, 이상한, 1996, 시화호인공호수 입자성 침강유기물, 해양연구, 18, 89~92
- 11) 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997, 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유기화합물의 생지화학적 연구, 한국해양학회지(바다), 2, 53~68.
- 12) 한명우, 박용철, 허성희, 1997, 시화호에서 암모니아와 납의 저층용출, 한국해양학회지(바다), 2, 69~77
- 13) 김은수, 김경태, 조성록, 1998, 시화호 해수 및 표층 퇴적물의 생지화학적 연구, 해양연구, 20, 237~250.
- 14) 박철, 허성희, 1997, 시화호와 인근 해역의 동물플랑크톤 분포로 본 시화호의 생태적 안정성, 한국해양학회지(바다), 2, 87~91
- 15) 류종성, 최진우, 강성길, 고철환, 허성희, 1997, 시화호 방조제 건설 이후 시화호 다모류의 종조성 및 서식



- 밀도 변화, 한국해양학회지(바다), 2, 101~109
- 16) 최동한, 강석원, 송기돈, 허성희, 조병철, 1997, 파영양성 시화호에서 박테리아의 분포 및 성장, 한국해양학회지(바다), 2, 92~100.
  - 17) 이태원, 문형태, 허성희, 1997, 시화호 수질 악화에 따른 시화호와 주변 해역 어류의 종조성 변화, 한국해양학회지(바다), 2, 110~116
  - 18) 한국해양연구소, 1996-98, 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(1-3차년도), 생태계분야.
  - 19) 김동섭, 박옥환, 박천홍, 박덕준, 1999, 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이, 한국육수학회 춘계학술발표회 발표논문집, 69p.
  - 20) Strickland, J D and T. R. Parsons, 1972, A Practical Handbook of Seawater Analysis, Bulletin of Fisheries Research Board of Canada, No 167, 310pp.
  - 21) APHA, AWWA, WEF, 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
  - 22) 환경부, 1993, 수질오염 공정시험법, 도서출판 동화기술, 561pp.
  - 23) Jensen, N. G., 1984, The pennate diatoms. A translation of Hustedt's "Die Kieselalgen, 2 Teil" published by Jensen, N.G. Strauss & Cramer GmbH, 918pp
  - 24) Fukuyo, Y., H Takano, M. Chibara, and K. Matsuoka, 1990, Red-tide organisms in Japan, An illustrated taxonomic guide, Uchida Rokakuho, Tokyo, Japan, 430pp.
  - 25) Hallegraeff, G. M., 1991, Aquaculturists' guide to harmful Australian microalgae, CSIRO Australia, 112pp
  - 26) Thomas, C. R., 1993, Marine phytoplankton' a guide to naked flagellates and coccolithophorids, Academic Press, Inc., California, 263pp
  - 27) Thomas, C. R., G. R. Hasle, E. E. Syvertsen, K. A. Steidinger, and K. Tangen, 1995, Identifying marine diatoms and dinoflagellates, 570pp
  - 28) 한국수자원공사, 농어촌진흥공사, 1995, 시화 담수호 수질보전 대책 수립 조사 보고서, 641pp
  - 29) Forsberg, C. and S. O. Ryding, 1980, Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. Arch. Hydrobiol., 89, 189~207.
  - 30) Vollenweider, R. A. and J. S Kerekes, 1982, Eutrophication of Waters Monitoring, Assessment and Control, OECD, Paris. France
  - 31) 환경부, 1993, 수환경정책자료집, 46~53pp.
  - 32) 한국수자원공사, 1993, '93 시화지구 개발 시화 공업단지 조성사업 환경관리 조사, 317pp
  - 33) 신계기, 김동섭, 1999, 시화호에서 해수 유입 전·후 식물플랑크톤 동태, 한국환경생물학회 춘계학술발표회 발표논문집, 127p.
  - 34) 신계기, 김동섭, 조경제, 1999, 시화호에서 식물플랑크톤 개체군의 계절 변동, 한국육수학회 추계학술발표회 발표논문집, 112p.