

시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태

신 재 기* · 김 동 섭 · 조 경 제¹

(한국수자원공사 수자원연구소 수자원연구부, 대전 305-390,

¹인제대학교 환경시스템학부, 김해 621-749)

Dynamics of Inorganic Nutrients and Phytoplankton in Shihwa Reservoir. *Shin, Jae-Ki,* Dong-Sup Kim and Kyung-Je Cho¹* (Division of Water Resources Research, Water Resources Research Institute, KOWACO, Taejon 305-390 and ¹Division of Environmental Science and Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea)

The dynamics of inorganic nutrients and phytoplankton population were examined at eight stations of Shihwa Reservoir, which situated near the cities newly constructed and the industrial complex of West-sea in Korea, from January to December 1999. Among environmental factors, average concentration of NH₄, SRP and SRSi were 522.7 µg N/l, 9.8 µg N/l and 0.26 µg Si/l, respectively. Water quality was extremely deteriorated by a great amount of pollutants load into inner reservoir after the event of rainfall. Nutrients concentration was suddenly decreased toward the lower part. While NO₃ concentration did not much varied among stations, but it was relatively high in winter season. Chlorophyll-*a* concentration was high at the upper part of the reservoir, with average of 37.2 µ/l, and closely related to the fluctuation of NH₄, SRP and SRSi concentrations. The phytoplankton development in the water column was dominated by diatom (autumn), prasinoid (winter) and dinoflagellate (summer). Dominant phytoplankton were composed to *Skeletonema costatum* of diatom, *Prorocentrum minimum* of dinoflagellate, *Chroomonas* spp. of cryptomonad, *Eutreptiella gymnastica* of euglenoid and *Pyramimonas* spp. of prasinoid. The large bloom of phytoplankton at the upper zone of the Shihwa Reservoir after inflow of a seawater were consistently observed. In consequence, water quality management of the inlet stream was assessed to be very important and urgent.

Key words : Shihwa Reservoir, NH₄, SRP, SRSi, Chlorophyll-*a*, Phytoplankton

서 론

우리나라 내륙의 담수 및 연안의 부영양화는 상류 또는 주변 유역으로부터 과다한 영양염 유입으로 인해 초래되고 있을 뿐만 아니라 그 수준은 급속도로 빠르게 진행되고 있으며, 그 결과는 무엇보다도 식물플랑크톤의 대량 발생과 연관되어 경관저하, 이취미 및 독성 등에

이르기까지 다양한 악영향의 양상이 뚜렷하게 나타나고 있다(국립환경연구원, 1993; 국립수산진흥원, 1997). 이러한 양상은 제한된 수자원의 효율적인 이용을 저해하고 있으며 특히 환경의 위해성이 제기되면서 인간의 안정된 생활영위에 이롭지 못한 방향으로 진전되고 있다. 또한 경제의 급속한 발전과 비대한 도시화의 팽창에 따른 위성도시의 생성은 수질오염의 양과 질적인 면을 증가시켰고, 그 수준은 매우 심각한 실정에 이르게 되었다

* Corresponding author: Tel: 011-870-6121, Fax: 042) 860-0375, E-mail: jaeki@kowaco.or.kr.

(한국수자원공사, 1996a).

시화호는 담수 후 이내 과영양상태의 수질악화 현상이 각종 수환경 요인에서 극명하게 대두되었다(허와 오, 1997). 특히 95년~97년의 연평균 chl-a 농도가 107 µg/l 수준으로 만성적인 식물플랑크톤의 대발생이 연중 전개되었다. 또한 식물플랑크톤의 종조성은 빈약하여 소수종이 우점하였고 이들 주요종은 호소의 내·외부로부터 공급되는 수중의 풍부한 영양염에 대한 생물학적 오염 지표로 볼 수 있었다(Grzebyk and Berland, 1996; 신 등, 2000).

식물플랑크톤은 광합성을 통하여 유기물을 생산함으로써 수생태계에서 에너지를 공급하는 중요한 역할을 한다. 수중에서 미세조류의 생장에 영향을 미치는 것은 이화학 및 생물학적 요인들이 있으나 수질오염이 가중될수록 영양염 요소가 가장 중요한 것으로 나타나고 있다(신 등, 2000). 특히 N·P의 유입량이 늘면서 농도가 증가하면 우선적으로 식물플랑크톤의 생장이 촉진되고 그 결과 생물량이 급증한다. 과도한 생물량의 증가는 물의 투명도를 떨어뜨리고 수체를 혼탁하게 하며 특히 표층에 밀집될 때는 상·하층간의 DO 성층이 형성되어 저층은 빈산소 또는 무산소 환경을 촉진시키고 침적된 유기물의 분해가 왕성해진다(홍 등, 1996; 박 등, 1997;

한 등, 1997). 이러한 현상은 부영양화 과정 중 수질오염의 전형적인 한 형태로 볼 수 있다(Vollenweider and Kerekes, 1982). 따라서 수질오염도의 평가에서 식물플랑크톤이 주요 대상이 되고 있으며, 종조성이나 개체군 변동, 군집구조 및 생물량 등은 N, P 및 Si 영양염을 비롯하여 수질을 간접적으로 평가할 수 있는 좋은 지표가 될 수 있다.

본 연구는 시화호에서 수질개선의 한 방안으로 해수 유입을 시도한 이후에 무기영양염과 주요 식물플랑크톤의 변동을 파악하고자 하였다. 또한 기존의 시화호에서 이에 관한 조사가 미흡하였으므로 본 연구결과는 시화호의 수질을 평가하고 생태계의 변화를 고찰함에 있어 향후 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 본다.

조사지 개황

본 연구 대상지인 시화호는 서해안 경기만과 아산만 사이에 위치하고 있다(Fig. 1). 시화호는 1987년에 착공하여 1994년 1월에 방조제 공사가 완료됨에 따라 형성되었으며 대규모 간척사업으로 새로이 조성되는 농경지에 농업용수를 공급할 목적으로 만들어졌다(한국수자원공사, 1996b). 시화호의 전체 유역면적은 476.5 km²이고



Fig. 1. Map showing sampling locations for surveys of water quality and phytoplankton population in Shihwa Reservoir from January to December 1999. Dotted contour lines indicate 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).

담수호 면적은 56.5 km²에 해당하여 11.9%를 차지한다. 총저수량은 332 × 10⁶ m³이고 유효저수량은 181 × 10⁶ m³이다. 유역의 내륙면적 249 km² 중에서 산림은 101.6 km² (40.8%), 논과 밭의 경작지는 89.9 km² (36.1%), 도시 공간 및 주거면적은 57.5 km² (23.1%)에 해당한다(한국수자원공사, 1996b).

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 주요 오염물질을 공급하는 전형적인 도시 및 농촌의 소하천에 해당한다(Fig. 1). 시화호의 유역내 인구에 의한 생활하수와 농촌지역의 오수 및 축산폐수, 도시와 공단에서 생성되는 각종 오·폐수가 하수처리장으로 차집되어 처리되고 있으나 일부 많은 양의 미처리 오·폐수가 도시하천 및 공단배수로를 통해 직접 유입되고 있기 때문에 시화호의 상류부 수질은 현재 해수유입 후에도 여전히 악화된 상태를 보이고 있다.

시화호 유역은 현재 농경지와 임야의 비율이 줄고 주거면적이 증가하고 있는 추세에 있기 때문에 안산·시화 환경기초시설의 증설에도 불구하고 오염물 처리량에 비해 발생량이 급증할 것이 예상되며, 수질오염은 더욱 가중될 가능성이 높아 이에 대한 적절한 대책이 없이는 수질오염도의 양상은 좀처럼 개선되기 어려울 것으로 본다.

재료 및 방법

수환경 및 식물플랑크톤의 조사는 1999년 1월부터 12월까지 매월 1~2회씩 수행하였으며 본 연구는 악화된 시화호 수질개선을 목적으로 한 해수유입 이후에 주요 식물플랑크톤 변동을 수질환경과 관련지어 파악하고자 하였다. 조사지점은 시화호 수문 조작시 물의 흐름방향을 고려하여 상류의 SR1에서 수문 부근의 SR8까지 8개 지점으로 선정하였다(Fig. 1). 현장조사를 매회 수행할 때 동일한 지점을 확인하기 위해 GPS III (Garmin, USA)를 이용하였고 동계에 결빙되거나 하계의 홍수 유입시 채수가 어려운 지점은 제외시켰다.

조사기간동안 강수량과 배수갑문을 통해 호소수 방류 및 해수의 유입에 대한 수문자료는 한국수자원공사의 자료를 이용하였다(한국수자원공사, 1999). 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 평균값

을 사용하였다. 수질분석을 위한 시료는 수심 1 m의 상층수를 채수한 후 아이스팩이 담긴 박스에 담아 실험실로 운반하였고 즉시 분석하였다. 유기물과 chl-*a*의 분석은 원수를 그대로 사용하였으나 무기물은 GF/C (Whatman)로 여과한 후 분석하였다. 수질항목은 Strickland and Parsons (1972), APHA (1992) 및 환경부(1993a)의 방법에 따라 분석하였다. DIN은 NH₄와 NO₃의 합으로 계산하였고 NO₂는 질소 성분 중 상대적으로 농도가 현저하게 낮아 제외시켰다. 유기질소 및 인은 각각 Total-N과 Total-P에서 무기농도를 뺀 값으로 간주하였다. Chl-*a*는 membrane filter (0.45 μm, Millipore)로 여과한 후 90% 아세톤을 사용하여 색소를 추출하는 Lorenzen (1967)법으로 정량하였다.

식물플랑크톤을 관찰하기 위한 정량시료는 현장에서 Lugol 용액으로 고정한 후 실험실로 옮겨 2~3일 이상 침강시킨 뒤 상등액을 제거하고 10배로 농축시켰다. 농축 시료는 광학현미경(×400배 또는 ×1,000배)으로 종조성을 파악하였고 시료 1 ml을 Sedgwick-Rafter chamber에 골고루 분산시킨 뒤 ×200배율에서 검경하면서 종별 세포수를 계수하였으며 현존량은 단위부피(ml)당 세포수로 산출하였다. 다른 분류군은 시료를 그대로 사용하였으나 규조류는 산(HNO₃⁺ K₂Cr₂O₇)처리 후 Pleurax 봉입제로 영구표본을 제작하여 동정하였다. 식물플랑크톤의 동정은 Jensen (1984), Fukuyo (1990), Hallegraeff (1991), Thomas (1993) 및 Thomas *et al.* (1995)의 문헌을 주로 참고하였다.

결과 및 고찰

1. 수환경 요인

시화호는 97년 7월부터 해양의 조석주기를 중심으로 외해수가 하루 중 1~2회 주기적으로 유입되고 있으며 유입된 해수의 양과 거의 유사하게 호소수를 방류하고 있다(한수공, 1999). 해수의 유입과 호소수의 방류과정은 종조성의 변화와 세포밀도의 감소 등 수중생태계 변화에 중요한 요인이 될 수가 있다(신 등, 2000). 수문변동의 주된 요인은 강우와 배수갑문 조작의 영향으로 구분되었다. 조사기간 동안 유역의 강우는 0~469.0 mm 범위로서 평균값은 50.1 mm였으며 연간 총강우량의 72%를 차지하는 최대 강우는 8월 초순에 있었다. 배수갑문의 조작에 의한 물의 유·출입량으로 고려한 호소내의 수문 현황에서 월별 유입 및 유출량의 평균값은 각각 31.5 × 10⁶, 23.1 × 10⁶ m³/s로서 계절에 따라 다소 차이가 있었고 연간 유출량(277.0 × 10⁶ m³/s)은 유입량(374.6 ×

Table 1. Water environmental conditions of each station by average value on the surface water (1 m) of an artificial Shihwa Reservoir (SR) from January to December 1999. \pm : Standard deviation.

Factors\Stations	SR1	SR2	SR3-SR6	SR7-SR8
Temperature (°C)	19.0±8.6	17.9±9.5	16.7±9.1	15.9±8.6
DO (mg O ₂ /l)	11.6±4.4	11.4±2.7	10.5±2.1	9.9±1.7
pH	8.3±0.3	8.4±0.3	8.4±0.2	8.3±0.2
Conductivity (mS/cm)	35.0±9.2	37.3±7.5	40.6±7.7	41.3±7.0
Salinity (‰)	22.1±6.2	23.5±5.1	25.9±5.2	26.4±4.8
TSS (mg SS/l)	24.7±10.3	22.4±7.7	22.1±7.3	19.6±7.6
Transparency (m)	0.6±0.3	0.8±0.4	1.6±1.3	1.9±1.3
COD _{Mn} (mg O ₂ /l)	6.8±3.1	5.9±2.4	5.3±2.5	4.7±2.4
Chlorophyll- <i>a</i> (µg/l)	56.3±51.7	38.8±26.8	31.4±26.4	22.4±20.9
Total-N (mg N/l)	2.22±0.80	1.67±0.60	1.32±0.41	1.23±0.39
Org-N (mg N/l)	1.13±0.80	0.89±0.57	0.68±0.45	0.56±0.41
DIN (mg N/l)	1.04±0.39	0.81±0.19	0.68±0.19	0.69±0.21
Ammonium (µg N/l)	750.7±350.2	534.7±145.4	401.1±72.8	404.1±107.8
Nitrate (µg N/l)	302.6±135.3	289.8±140.3	297.1±157.6	327.8±181.0
Total-P (µg P/l)	157.6±66.8	109.7±25.6	82.4±26.3	71.3±21.0
Org-P (µg P/l)	136.3±68.2	100.1±25.4	76.6±28.1	67.2±22.4
SRP (µg P/l)	21.3±34.2	9.6±18.9	4.1±7.6	4.2±6.2
SRSi (mg Si/l)	0.25±0.24	0.17±0.24	0.11±0.19	0.12±0.21
TN/TP ratio	16.5	15.7	16.8	17.6
DIN/SRP ratio	2,929.8	3,167.4	3,310.9	2,870.3
SRSi/SRP ratio	624.1	182.3	266.5	472.5
Precipitation (mm)	50.1±127.7 (0~469.4)			
Discharge (m ³ /s)	31.5 × 10 ⁶ (14.3~49.9 × 10 ⁶)*		23.1 × 10 ⁶ (11.8~40.2 × 10 ⁶)**	

Inflow (*) and outflow (**) of the seawater into a reservoir.

10⁶ m³/s)보다 26%가 적었다. 수문 개폐에 따른 해수의 영향은 수환경 조사결과로 볼 때 SR2까지 미치는 것으로 추정되었고 해수의 유입으로 인해 호소의 수질은 희석효과가 뚜렷하였다. 수문요인에 의한 수질악화의 영향은 선행 강우가 장기간(2주 이상) 없고 해수의 유입량이 유출량보다도 적은 시기로 판별되었다.

수환경 요인을 정점별 평균값과 표준편차로서 정리한 것은 Table 1과 같다. 수온은 분포 범위가 0.5~29.1°C였고 정점별 평균값으로 볼 때 8월에 28.6°C로 높았고 2월에 평균 1.3°C로 낮았으며 연평균은 17.4°C였다. 호소내 수온 분포는 매년 상류에서 하류의 배수갑문으로 갈수록 하강하는 경향을 보였다. DO 농도는 연간 최대 및 최소의 차이가 15.6 mg O₂/l (6.0~21.6 mg O₂/l)로 클 뿐만 아니라 동일한 시기에 정점별 차이도 8.6 mg O₂/l로 매우 컸다. 정점별 평균 DO 농도는 9.9~11.6 mg O₂/l 범위였고 연평균은 10.9 mg O₂/l로서 2월을 제외하고는 표층에서 대부분 포화수준 이상이였다. DO 변동은 상류에서 높고 하류로 갈수록 감소하는 경향이 뚜렷하였고 식물플랑크톤의 생물량(chl-*a*)과 연관성이 있었다. pH는 다른 항목에 비해 정점간에 큰 차이가 없었고 평균값이 8.4이었으며 그 범위는 7.9~9.0이었다. 전기전도

도는 평균값이 38.6 mS/cm (15.1~46.8 mS/cm 범위)였고 전기전도도의 증감 변동은 수체의 염분도 변화와 관련이 컸다.

염분도의 최고 및 최저값은 각각 30.4‰, 8.8‰이었고 평균값은 24.5‰이였다(Table 1). 계절에 따라 상·하류간에 큰 차이(16‰)를 보이거나 표층에서 일정한 분포를 유지하는 경향으로 대별되었다. 염분의 증감에 영향을 미치는 원인에는 크게 2가지로서 간헐적이거나 지속적인 강우로 인해 담수 유량의 증가에 의한 유입하천의 영향이 큰 시기와 주기적인 해수의 유입에 의한 것으로 볼 수 있었다.

TSS와 투명도는 평균값과 범위가 각각 22.2 mg SS/l (5.0~43.0 mg SS/l 범위), 1.2 m (0.3~6.5 m 범위)였다. TSS는 상류에서 하류로 갈수록 감소되었고 반면에 투명도는 배수갑문으로 갈수록 현저하게 증가하였다(Table 1). 특히 chl-*a*는 TSS와 투명도에 미치는 영향이 커 상호 관련성을 보였다(신 등, 2000). 따라서 호소의 수질에서 내부생성 유기물이 차지하는 비중이 매우 큰 것으로 판단되었고 이에 대한 저감 노력이 중요한 것으로 볼 수 있었다.

COD는 1.3~14.1 mg O₂/l 범위로서 평균값은 5.7 mg

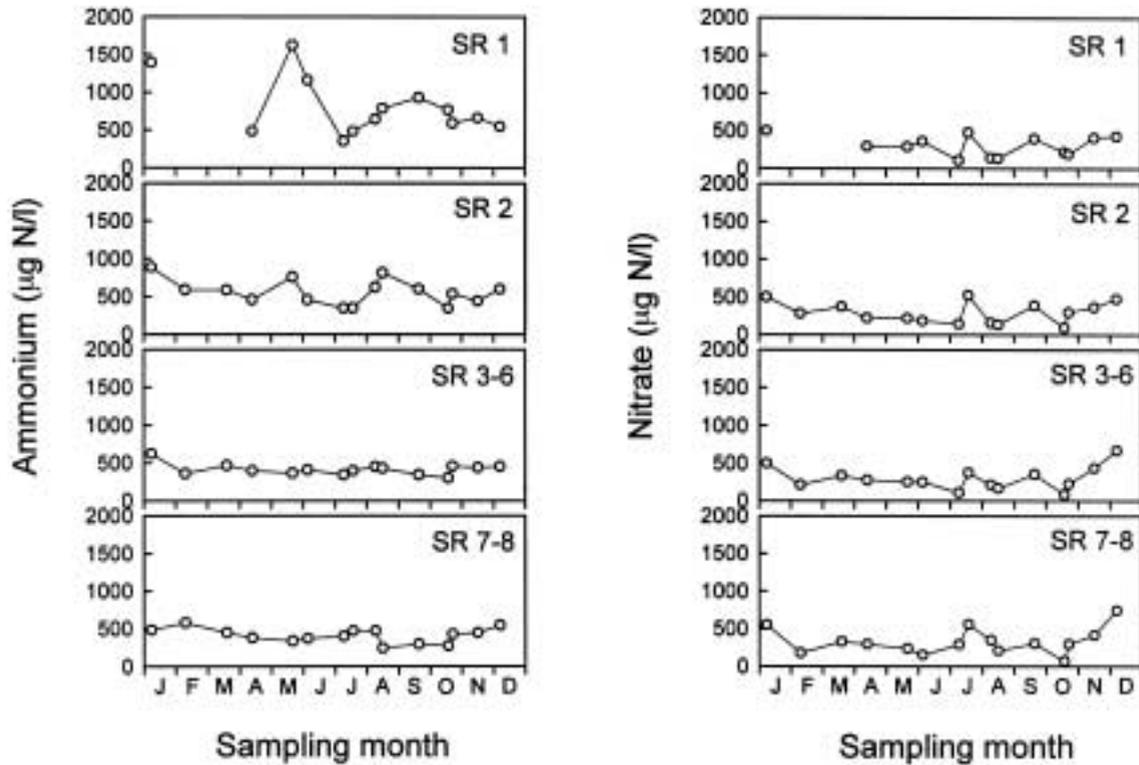


Fig. 2. Monthly variation of ammonium and nitrate concentration in Shihwa Reservoir from January to December 1999.

O₂/l였다 (Table 1). 수질의 오염도를 판정하는 항목의 하나인 COD를 환경부(1993b)에서 제시하고 있는 기준에 적용시켜보면 III 등급에 해당하였다. 또한 TN/TP 및 무기 N/P 비의 평균값은 각각 17과 3,070으로서 무기 영양염 비가 더욱 중요하였다.

2. 무기영양염

호소의 전 정점에서 TN은 0.67~3.99 mg N/l 범위로서 평균값은 1.61 mg N/l이었다. 그 중 유기질소와 무기질소(DIN)는 각각 50.9%, 49.1%를 차지하였다. 또한 TN과 DIN 중 NH₄ 각각 32.3%, 64.2%였고 NO₃는 각각 18.6%, 37.0%에 해당하였으며 NO₃는 NH₄의 58.2% 수준으로 NH₄가 월등히 풍부하였다 (Table 1). NH₄는 SR1~SR2구간에서만 뚜렷한 변동을 보였을 뿐 그 하류에서는 평균 402.6 µg N/l수준을 유지하였다. SR1에서 5월에 1,622 µg N/l으로 가장 높았고 7월에 351 µg N/l로 급감한 후 9월에 928 µg N/l로 다시 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2). 5월과 9월에 NH₄가 높았던 것은 춘계와 하계의 강우에 의한 영향이 컸으며 특히 5월의 경우 SR1의 상류가 장기간 갈수 및 결빙으로 인해 축적되었던 것이 일시적으로 다량 유입된 영향으로 볼 수 있었다.

반면에 NO₃는 NH₄와는 달리 상류에서는 낮고 하류로 갈수록 다소 높은 경향이이었으나 그 차이는 평균값으로 볼 때 32 µg N/l 정도로서 큰 차이는 아니었다 (Fig. 2). 또한 계절적으로는 다른 시기에 비해 동계(1월과 12월)에 500~761 µg N/l 범위로서 SR3~SR8 구간에서 높았다.

TP는 전 정점에서 36.0~249.0 µg P/l 범위였고 평균 농도는 105.3 µg P/l로서 상류에서 높고 하류로 갈수록 감소하였다. SRP는 0~105.2 µg P/l 범위로서 평균은 9.8 µg P/l였으며 TP의 9.3%를 차지하여 유기인(90.7%)에 비해 매우 적었다. SRP는 다른 시기에 비해 8월과 9월에 각각 34.1 µg P/l (12.7~83.9 µg P/l 범위), 20.9 µg P/l (0~105.2 µg P/l 범위)로서 비교적 높았다 (Fig. 3). 8월에는 SR1에서부터 SR8까지 그 영향이 더욱 큰 것으로 관찰되었으나 9월에는 8월보다 다소 높은 농도이긴 하나 SR2의 하류에서는 그 영향이 없었다. 8월에는 상류로부터 SRP를 동반한 다량의 유입수가 유입되어 장기간 탁수환경을 형성하였으며 9월에는 그 영향이 감소되어 식물플랑크톤의 성장에 직접적으로 영향을 주었다고 판단된다.

SRSi는 SRP의 증감과 관련성을 보였으며 전 정점에

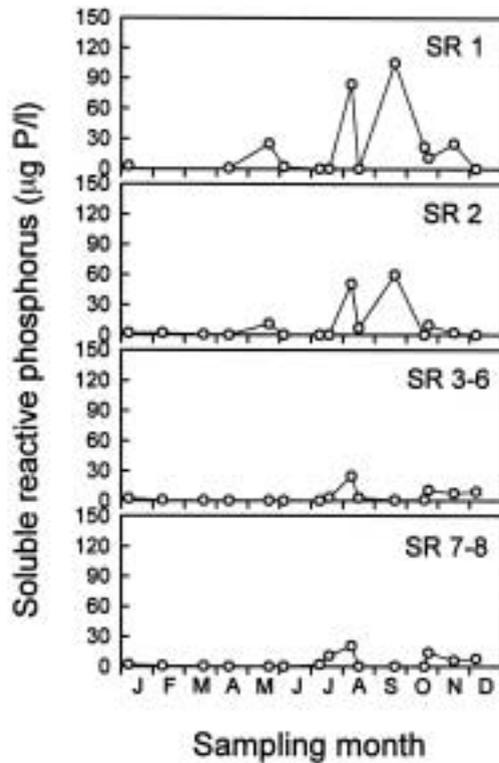


Fig. 3. Monthly variation of soluble reactive phosphorus concentration in Shihwa Reservoir from January to December 1999.

서 0~0.77 mg Si/l 범위였고 평균값은 0.16 mg Si/l였다. 5월과 8월에 최고 농도는 각각 0.39 mg Si/l, 0.77 mg Si/l로서 8월의 장마기에 유입되는 농도가 2배 더 높았다 (Fig. 4). SRSi의 감소는 다른 시기보다도 10월에 SR3부터 그 하류에 식물플랑크톤의 성장과 관련성이 있었으며 하류로 갈수록 그 영향은 더욱 커서 Si가 P와 동시에 고갈되는 구간에서 생물량은 현저하게 감소하였다. 따라서 SRSi는 P와 더불어 규조류와 같은 식물플랑크톤의 제한영양염으로 작용할 수 있음을 시사하였다(최 등, 1997; 양 등, 2000).

3. Chl-*a* 농도

연중 chl-*a* 농도는 0.6~142.5 µg/l 범위로서 평균값은 37.2 µg/l였다. Chl-*a*는 계절 및 정점간에 차이가 컸고 전반적으로 볼 때 상류에서 매우 높은 양상을 보였으며 불규칙적이었다. 정점간에 chl-*a*의 평균농도를 비교해보면 SR1, SR2, SR3 및 SR4~SR8에서 각각 56.3 µg/l, 38.8 µg/l, 44.7 µg/l 및 25.2 µg/l로서 SR1이 월등히 높았다 (Fig. 5). 다른 정점에 비해 SR1에서 chl-*a*가 높은 것은 상류의 유입지천에 인접하고 있기 때문에 고농도의

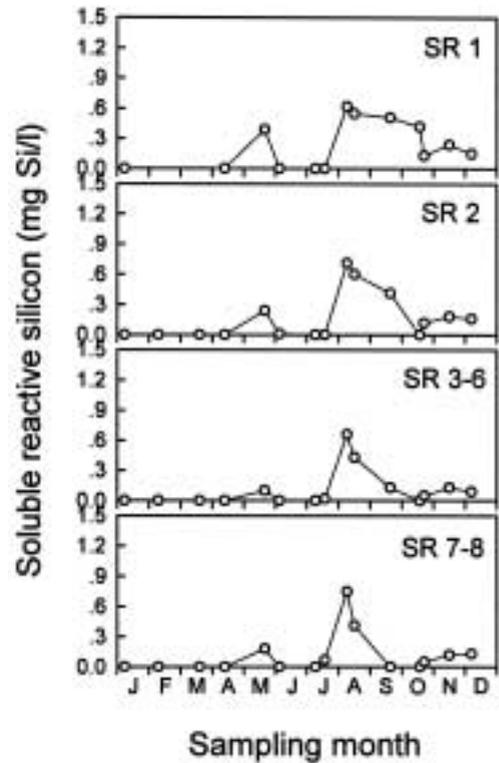


Fig. 4. Monthly variation of soluble reactive silicon concentration in Shihwa Reservoir from January to December 1999.

무기영양염을 포함하는 유입수의 영향과 수문학적으로 볼 때 정체성이 강한 수역으로 식물플랑크톤의 성장에 유리한 조건을 형성하기 때문이다. 또한 하류의 갑문으로부터 유입되는 해수에 의한 영향이 SR2까지 미치며 SR1에는 매우 미약하기 때문이다(신 등, 2000). 월별 chl-*a* 변동은 SR1~SR6구간에서 2월과 10월에는 평균값이 각각 94.3 µg/l, 85.7 µg/l로서 매우 높았고 그 외 기간에는 SR1에서 6월, 7월 및 11월에 평균농도가 120.1 µg/l로서 높았다. 2월과 10월에 chl-*a*가 높았던 것은 SR1에서 식물플랑크톤의 폭발적인 대발생이 있을 후 주기적인 호소수의 방류에 따른 하류까지 확산이 있었던 것으로 추정되며 이러한 결과는 무기영양염의 영향도 컸던 것으로 판단되었다. 전술한 바와 같이 지속적인 강우가 유지되는 시기를 제외하고는 하류로 갈수록 SRP와 SRSi 농도가 급감하거나 고갈되는 양상이 뚜렷하여 이에 대한 결과를 뒷받침하였다.

4. 식물플랑크톤

1999년 1월에서 12월까지 정량조사로 관찰된 식물플랑크톤의 분류군은 37속 52종으로 동정되었다. 연중 분

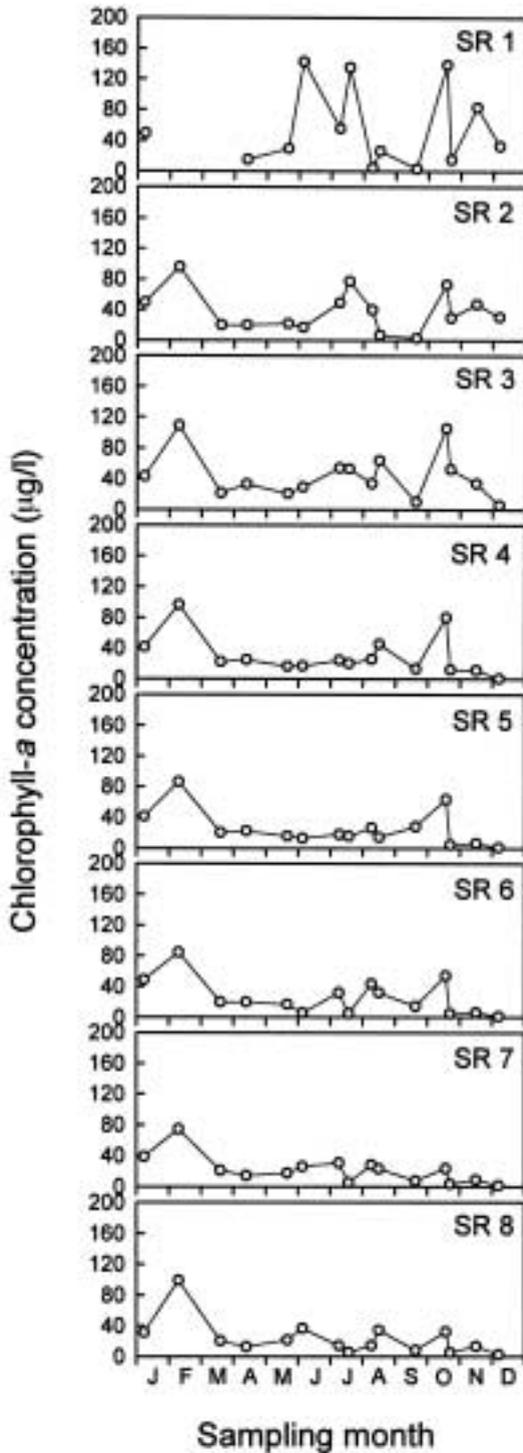


Fig. 5. Monthly variation of chlorophyll-a concentration in Shihwa Reservoir from January to December 1999.

류군별 출현빈도로 볼 때 규조류가 46%로 가장 많았고, 와편모조류가 37%, 나머지 다른 분류군은 17%를 차지

하여 앞선 두 분류군이 전체의 80% 이상을 점유하였다. 또한 월별 출현 종수로 보면 동계에는 규조류가 많았고 하계에는 와편모조류가 풍부하였다. 시기별로는 1월과 7월에 규조류와 와편모조류가 각각 11종으로서 상대적으로 많았다.

세포밀도로 본 정점별 식물플랑크톤의 평균 세포수는 1.3×10^4 cells/ml로서 정점간에 세포밀도의 차이가 있었다. 8개 정점 중 SR1, SR3, SR4, SR5 및 SR6에서 평균값을 상회하였고 편차로 볼 때 SR4와 SR6에서 다소 컸다. 또한 정점별 평균 세포수로서 계절별로 비교해 보면 매우 불규칙적임을 관찰할 수 있었고 특히 1월~2월, 5월 및 10월에 식물플랑크톤이 대량 발생하는 양상을 보였다. 이때 평균 세포밀도는 각각 $3.3 \sim 3.5 \times 10^4$, 1.5×10^4 및 2.3×10^4 cells/ml였다.

규조류는 연중 관찰되었던 분류군에 해당하였다(Fig. 6). 4월~5월, 7월 및 10월에 평균세포수가 각각 $5.4 \sim 7.0 \times 10^3$, 5.8×10^3 및 2.0×10^4 cells/ml로서 다른시기에 비해 상대적으로 많았고 10월에는 폭발적인 번무가 있었다. 조사시기별 주요종과 세포밀도는 4월과 5월에 *Skeletonema costatum*이 각각 7.0×10^3 , 5.3×10^3 cells/ml, 7월에 *Chaetoceros curvisetus*가 3.0×10^3 cells/ml 및 10월에 *S. costatum*과 *Cyclotella atomus*가 각각 1.6×10^4 , 2.6×10^3 cells/ml로서 *S. costatum*이 월등히 많았다. 또한 규조류 *S. costatum*의 발생으로 관찰된 시기와 규모는 Si 영양염과 밀접한 관련이 있었으며 수중 Si 농도에 비례하여 그 수가 증가하였다.

와편모조류는 연중 2차례의 높은 밀도가 관찰되었는데 그 시기는 5월과 9월이었다(Fig. 6). 5월과 9월 모두 *Prorocentrum minimum*이 평균세포수가 각각 1.3×10^4 과 3.7×10^3 cells/ml로서 다른 종에 비해 우점하였다. *P. minimum*은 시화호 조성 후 가장 중요종으로서 만성적인 적조종이었고 이 종이 발생할 때는 호소 전체가 검붉은 색으로 물들일 정도의 수준이었다(한국수자원공사, 1996, 1997; 최 등, 1997; 신 등, 2000). *P. minimum*은 광온성 ($3 \sim 30.4^\circ\text{C}$ 범위) 또는 광염성 ($9 \sim 29.3\text{‰}$) 조류(Kondo et al., 1990)로서 특히 정체성이 강한 곳에서 항상 대발생할 수 있는 잠재력을 지니고 있으며 *P. minimum*의 적조(red-tide)를 야기할 수 있는 요인은 다양하다(Kondo et al., 1990). 그 중 수광량, 무기질소 및 용존유기탄소 등에 의한 영향이 큰 것으로 보고되고 있으며 질소원으로 NH_4 에 대한 Ks값($43.4 \sim 103.6 \mu\text{g N/l}$ 범위)이 다른 조류에 비해 월등히 커 NH_4 에 대한 요구도가 높은 종에 해당한다(Iwasaki, 1979; Seike et al., 1986; Kondo et al., 1990). 따라서 본 연구결과로 볼 때

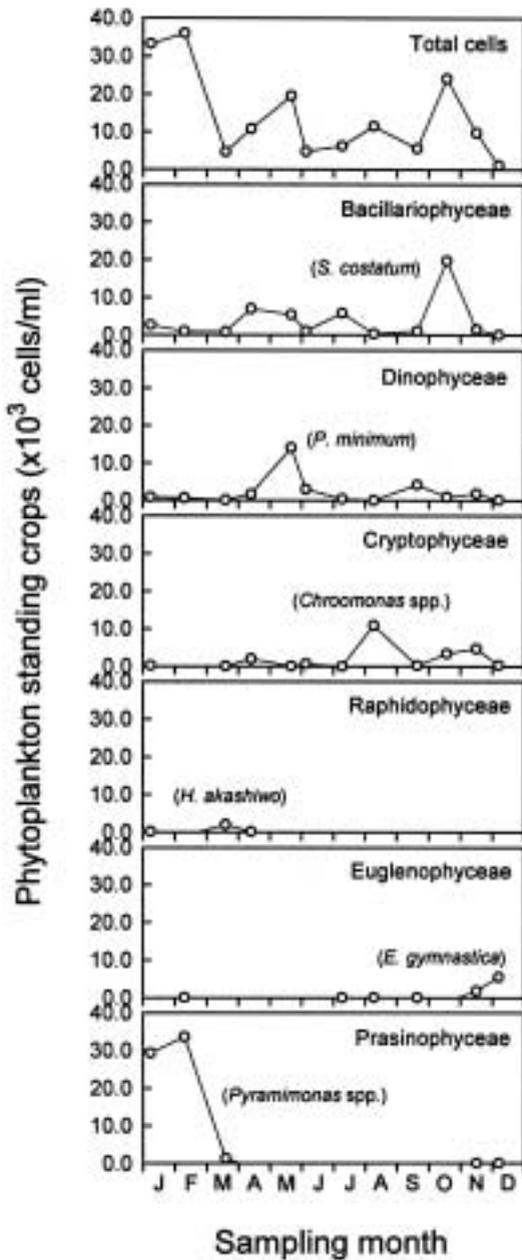


Fig. 6. Seasonal variation of the phylum and dominant species of phytoplankton in Shihwa Reservoir from January to December 1999.

상류부에서 *P. minimum*이 연중 장기적으로 관찰되고 5월에 폭발적인 발생을 보인 것은 이 시기 전에 NH_4 와 SRP가 풍부하게 공급되었고 비교적 안정된 수층을 형성함으로써 *P. minimum*의 생육에 충분조건을 제공하였기 때문으로 볼 수 있었다 (Figs. 2, 3 참조).

라피도조류는 *Heterosigma akashiwo*가 해당하였고 세포밀도는 크지 않았으며 1월과 3월~4월에만 관찰되

었다. 세포밀도로 볼 때 3월에 2.0×10^3 cells/ml로서 많았고 그 외 기간에는 200 cells/ml 이하였다. 유글레나조류에는 *Eutreptiella gymnastica*가 해당하였으며 출현양상이 불규칙하였고 세포밀도도 크지 않았다. *E. gymnastica*는 11월과 12월에 각각 1.8×10^3 cells/ml, 5.5×10^3 cells/ml로서 많은 양이 관찰되었으나 다른 기간에는 < 100 cells/ml 수준이었다 (Fig. 6).

은편모조류에는 *Chroomonas* spp., *Cryptomonas* spp. 및 *Rhodomonas* spp.가 주종을 이루었고 연중 분포하였다. 다른 시기에 비해 8월과 10월~11월에 각각 1.1×10^4 , $3.4 \sim 4.7 \times 10^3$ cells/ml로 풍부하였다 (Fig. 6). 특히 8월의 경우 *Chroomonas* spp.가 총세포수에 대해 99%를 차지하는 우점종을 나타내 이 시기에 중요종으로 볼 수 있었다. *Chroomonas* spp.를 비롯한 은편모조류는 발생양상이 매우 불규칙적이긴 하나 다른 종의 번무 직후에 항상 출현하는 경향을 보였다 (신 등, 2000).

프라시노조류는 *Pyramimonas* spp.였고 은편모조류와 더불어 소형 편모조류에 속하며 그 크기는 $5 \mu\text{m}$ 이하로서 시화호에서 2월에 정점별 평균밀도가 최대 3.4×10^3 cells/ml로 우점정도가 매우 큰 조류로서 분류되었다 (Fig. 6). *Pyramimonas* spp.는 11월~3월에만 관찰되어 전형적인 저온성 조류로 볼 수 있었고 특히 SR1부근에서 오염도가 높은 갈수기에 다량의 밀도로 관찰되어 수질 오염의 지표종으로 추정되고 있으나 이에 대한 생리생태학적 후속 연구가 더욱 필요한 것으로 본다.

수질개선의 목적으로 97년 7월 이후부터 해수의 유입을 시도하여 수질의 희석효과 뿐만 아니라 미세조류의 식물상 변화도 초래하여 99년에는 기수 또는 해양종이 대부분을 차지하였다. 식물플랑크톤의 연중 전개양상은 우점종으로 볼 때 프라시노조류 → 라피도조류 → 와편모조류 → 은편모조류 및 규조류의 순으로 천이되었다 (Fig. 6).

인공호의 조성후 97년 7월 이전까지 수질은 외해수의 유입은 없이 외부 또는 내부의 저층으로부터 부하되는 오염물질이 지속적으로 호소내에 축적되어 극도로 악화되었다 (박 등, 1997). 수질의 오염양상은 연중 식물플랑크톤이 대발생하는 생물학적 현상에서 뚜렷하였고 93년~97년까지 식물플랑크톤의 현존량 증가율은 $2.4/\text{yr}$ 이었으나 (신 등, 2000), 현재는 현존량이 급감하였다. 또한 수환경에서 식물플랑크톤의 발생양상은 이화학 인자의 증감과 밀접한 관련성을 보였고 그 규모는 영양염 농도에 의해 지배적인 것으로 볼 수 있어 오염원의 관리에 대한 적극적인 노력이 없이는 근본적인 해결은 어려울 것으로 예상되어진다.

시화호에서 식물플랑크톤 변동양상은 풍부한 영양염을 기초로하여 계절별로 단순하였고 소수종의 우점현상이 뚜렷한 수계로 평가되었다. 또한 현재의 식물플랑크톤 출현 수준은 해수 유입전에 비해 매우 감소되긴 하였으나 여전히 적조 (red-tide) 수준인 ml당 1,000개체를 훨씬 상회하고 있고 연중 출현되는 주요종은 우리나라 연안에서 계절적으로 대량 번무하는 해양적조 원인종이 대부분이어서 이에 대한 지속적인 생태학적 모니터링이 필요할 것으로 본다.

적 요

서해안의 신도시 및 산업단지 근교에 위치한 시화호에서 유입지천 부근의 상류부터 최하류에 해당하는 수문까지 8개 지점에서 1999년에 수중 무기영양염과 식물플랑크톤 변동을 매월 1~2회씩 조사하였다. 수환경 요인 중 NH_4 , SRP 및 SRSi의 평균농도는 각각 522.7 $\mu\text{g N/l}$, 9.8 $\mu\text{g P/l}$ 및 0.16 mg Si/l 수준이었다. 무기영양염은 유역에서 강우가 있는 직후에 호소내부로 다량 유입되어 수질을 매우 악화시켰고 상류에서 하류로 갈수록 급격하게 감소되는 경향을 보였다. 반면에 NO_3 는 상·하류간에 큰 차이가 없었고 동계에 비교적 높았다. Chl-*a*는 평균값이 37.2 $\mu\text{g/l}$ (최대 142.5 $\mu\text{g/l}$)로서 상류부에서 높았고 증감 양상으로 볼 때 NH_4 , SRP 및 SRSi 영양염의 변동과 밀접한 관련성이 있었다. 식물플랑크톤은 추계와 동계에 규조류와 프라시노조류가 많았고 하계에는 와편모조류가 풍부하였다. 계절에 따른 주요 우점종은 규조류 *Skeletonema costatum*, 와편모조류 *Prorocentrum minimum*, 은편모조류 *Chroomonas* spp., 유글레나조류 *Eureptiella gymnastica* 및 프라시노조류 *Pyramimonas* spp.가 해당하였다. 시화호는 해수유입 후에 중·하류와는 달리 상류부에서 풍부한 영양염을 기반으로 만성적인 식물플랑크톤의 대발생이 지속적으로 관찰되고 있어 생태학적 관점으로 볼 때 이에 대한 유입하천의 수질관리가 매우 중요하고 시급한 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구를 위해 현장조사에 도움을 준 한국수자원공사 안덕건설단 연구지원팀 여러분들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

국립수산진흥원. 1997. 한국연안의 적조: 최근 적조의 발생원

- 인과 대책. 280pp.
- 국립환경연구원. 1993. 호소 만입부에서의 조류 대량증식 제어기술 개발 (III). pp. 65-67.
- 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희. 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유·무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 (바다) 2: 53-68.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000. 시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태. 한국환경과학회지 9: 115-123.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리·화학적인 특성. 한국해양학회지 (바다) 5: 16-26.
- 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희. 1997. 시화호와 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구. 한국해양학회지 (바다) 2: 78-86.
- 한국수자원공사. 1996a. '96년도 시화호 수질현황 및 조류제어 연구 보고서. 163pp.
- 한국수자원공사. 1996b. 시화호 수질개선 종합관리대책 기본 계획보고서 (요약). 130pp.
- 한국수자원공사. 1999. 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이에 관한 연구 3차년도 보고서 (인쇄중).
- 한명우, 박용철, 허성희. 1997. 시화호에서 암모니아와 남의 저층용출. 한국해양학회지 (바다) 2: 69-77.
- 허성희, 오임상. 1997. 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구 : 서문. 한국해양학회지 (바다) 2: 49-52.
- 홍기훈, 박선규, 홍대벽, 이상한. 1996. 시화호인공호수 입자성 침강유기물. 해양연구지 18: 89-92.
- 환경부. 1993a. 수질오염 공정시험법. 도서출판 동화기술. 561pp.
- 환경부. 1993b. 수환경정책자료집. pp. 46-53.
- APHA, AWWA, WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Fukuyo, Y., H. Takano, M. Chihara and K. Matsuoka. 1990. Red-tide organisms in Japan, An illustrated taxonomic guide. Uchida Rokakuho, Tokyo, Japan. 430pp.
- Grzebyk, D. and B. Berland. 1996. Influences of temperature, salinity and irradiance on growth of *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae) from the Mediterranean Sea. *J. Plankton Research* 18: 1837-1849.
- Hallegraef, G.M. 1991. Aquaculturists' guide to harmful Australian microalgae. CSIRO Australia. 112pp.
- Iwasaki, H. 1979. The physiological characteristics of neritic red tide flagellates. In, Toxic dinoflagellate blooms, Taylor, D.L. and H.H. Seliger, eds. Elsevier, North-Holland. pp. 95-98.
- 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.

- Kondo, K., Y. Seike and Y. Date. 1990. Red tides in the brackish Lake Nakanoumi (II), Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. *Bull. Plank. Soc. Jpn.* **37**: 19-34.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343-346.
- 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.
- Strickland, J.D. and T.R. Parsons. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bulletin of Fisheries Research Board of Canada, No. 167. 310pp.
- Thomas, C.R. 1993. Marine phytoplankton: a guide to naked flagellates and coccolithophorids. Academic Press, Inc., California, 263pp.
- Thomas, C.R., G.R. Hasle, E.E. Syvertsen, K.A. Steidinger and K. Tangen. 1995. Identifying marine diatoms and dinoflagellates. 570pp.
- Vollenweider, R.A. and J.S. Kerekes. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris. France.