

## 시화호의 수환경 진단과 수질회복 평가

### Diagnosis of Water Environment and Assessment of Water Quality Restoration in Lake Shihwa

김 동 섭\* / 고 석 구\*\*  
Kim, Dong-Sup / Ko, Seok Ku

#### Abstract

In order to diagnose the water environment and assess the water quality restoration, long term trend of water environment has been surveyed at 3~8 stations from 1994 to 1999 in Lake Shihwa. Annual mean values of COD<sub>Mn</sub>, Chlorophyll *a*, total nitrogen, total phosphorus and Secchi depth are ranged in 5.2~15.1 mg/L, 7.3~148.1 µg/L, 1.50~4.84 mgN/L, 0.055~0.281 mgP/L and 0.5~1.4 m, respectively, during the study periods. Carson's trophic state indeies were varied from mesotrophy in 1994 and 1995, hyper-eutrophy in 1996 and 1997, to meso-eutrophy in 1998 and 1999. After dike construction, water quality were rapidly deteriorated by allochthonous and autochthonous loading of high nutrients and organic carbon. Eutrophication phenomena were characterized by massive phytoplankton blooms and high concentration of COD. However, after onset of restoration program, lake water quality was rapidly restored to the level of just after sea-dike construction. The diversion of waste water inflowing from the Panwol and the Sihwa industrial districts which was started from March, 1997 has contributed to improve water quality in the surface layer. And the tidal mixing (sea water inflowing) through the continuous gate operation was the most effective measure to the whole lake restoration.

*keywords* : Shihwa Lake, Sea-Dike construction, water quality restoration, Eutrophication, diversion of waste water

#### 요 지

서해안의 신도시 및 산업단지 근교에 위치한 인공 시화호에서 유입지천 부근의 상류부터 최하류의 수문부근까지 3~8개 지점에서 1994년~1999년에 걸쳐 수환경 요인을 매월 1~2회 조사하였다. 환경요인은 연평균 COD<sub>Mn</sub>, 엽록소 *a*, 총질소, 총인농도 및 투명도가 각각 5.2~15.1 mg/L, 7.3~148.1 µg/L, 1.50~4.84 mgN/L, 0.055~0.281 mgP/L 및 0.5~1.4 m로서 중영양단계에서 과영양단계까지의 수질을 보였다. 시화호가 조성된 1994년부터 1997년 3월 이전까지의 수질은 외부 또는 내부의 지층으로부터 부하되는 오염물질이 지속적으로 호소내에 축적되어 극도로 악화되었다. 수질오염은 연중 식물플랑크톤이 대발생하는 생물학적 현상으로 뚜렷하게 나타났다. 반면에 1997년 3월부터 1999년까지는 다양한 수질개선대책의 시행으로 빠른 속도의 수질회복이 관찰되었고, 1999년의 수질은 담수화 초기의 수질로 회복된 것으로 조사되었다. 시화호의 수질회복은 1997년 7월부터 시행한 해수유통에 의해 가장 큰 효과를 보였고, 1997년 3월부터 운영한 반월공단 및 시화공단의 차집수조에 의한 유입부하량 저감으로 수질회복효과를 더욱 향상시킨 것으로 평가되었다.

**핵심용어** : 시화호, 방조제건설, 수질회복, 부영양화

\* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원  
Senior Researcher, Division of Environmental Science and Technology, Water Resources Reswarch Institute, Kowaco, Taejon, 305-390, Korea (E mail : kimds@kowaco.or.kr)

\*\* 한국수자원공사 부사장  
Executive Vice President, Korea Water Resources Corporation, Taejon, 306 711, Korea

## 1. 서 론

시화호는 국토확장의 일환으로 추진된 서해안 매립 계획에 의해 경기도 안산시, 시흥시 및 화성군 일대의 간석지 매립을 목적으로 12.7 km에 이르는 방조제 건설에 의해 형성된 호수이다. 방조제 공사는 1987년 4월에 착공하여 1994년 4월에 완공되었으며, 이 기간 동안 내륙의 배후도시인 안산시와 시흥시를 중심으로 주거단지 및 반월공단, 시화공단을 포함하는 산업단지가 함께 조성되었다. 시화호는 방조제 건설에 따라 생성되는 간석지의 일부를 농경지로 개발한다는 계획하에 농업용수 공급을 목적으로 담수화하였다(고석구, 1996). 그러나, 방조제 완공 후에 유역의 도시와 공단으로부터 고농도의 유기물과 영양염을 포함하는 하·폐수가 유입되었고, 담수화과정에서 체류시간의 증가에 따라 물이 장기간 정체되면서 다양한 수질오염 현상이 관찰되었다(허성희와 오임상, 1997). 담수화 초기의 수질오염 현상은 식물플랑크톤의 대발생(최중기 등, 1997), 심층에 무산소층 형성 및 이에 따른 호저생태계의 교란(박용철 등, 1997; 한국수자원공사, 1996a) 등이 조사 보고되었다. 또한, 이러한 상황에서 강우시에 상류유역의 범람을 방지하기 위한 호수수의 해양방류시 연안을 비롯한 해양생태계에의 악영향이 우려되었다(한국수자원공사, 1997a). 환경부와 한국수자원공사는 시화호 수질개선을 위하여 1996년 5월~7월에 시화호 수질개선종합대책을 수립하여 시행하였다(한국수자원공사, 1996b).

시화호 수질개선대책은 장·단기대책으로 구분하여 수립되었으며, 장기대책으로는 안산시와 시흥시의 하수처리장을 점진적으로 증설하여 유역의 도시와 공단지에서 발생하는 하·폐수를 전량 처리할 수 있도록 계획하였고, 인·질소를 저감하는 고도처리시설을 도입하도록 하였다. 또한 상류 유역에 산재하여 있는 축산농가로부터 발생하는 오염물질 처리를 위한 축산폐수처리장의 신설을 계획하였다. 중·단기 대책은 유역오염원에 대한 오염물질 저감대책과 호수내의 식물플랑크톤 제어대책으로 나누어 수립되었다. 유역대책으로는 도시 하천에 산화지를 설치하는 것과 오염도가 가장 심한 시화·반월공단 배출수를 차집·처리 후 해양방류, 농·축산 등 비점오염원의 오염부하 저감을 위한 인공습지 조성이 있다. 호수내 대책으로는 인공폭기를 통한 심층 무산소층 해소 및 식물플랑크톤 제어, 약품살포를 통한 식물플랑크톤 발생억제, 배수갑문운영을

통한 호수의 유·출입을 계획하고 추진하였다(고석구, 1996).

본 연구는 방조제 건설에 따른 시화호의 형성초기부터 최근까지의 장기적인(6년간) 수질모니터링의 결과로서 담수화 과정에서의 수질악화에 대한 수환경변화를 진단하고 해수유입을 중심으로하는 수질개선대책 시행에 따른 수질회복추이를 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

시화호는 경기도 안산시, 시흥시 및 화성군에 걸친 476.5 km<sup>2</sup>의 유역면적을 가지고 있으며, 한반도의 중서부인 동경 126° 31' ~ 127° 00', 북위 37° 11' ~ 37° 23' 에 위치한다. 유역은 얇은 구릉지대로 지세는 비교적 완만하며, 주요 유입하천들은 유로연장이 10 km내외로 짧다. 유역의 오염원으로는 반월공단과 시화공단이 위치하고 있으며, 안산·시흥 신도시를 관통하는 도시하천 그리고 비점오염원의 농경지 및 축산시설이 산재하고 있는 농촌 하천이 있다. 시화호는 수표면적이 56.5 km<sup>2</sup>이고, 총저수량과 유효저수량은 각각 332×106 m<sup>3</sup>과 181×106 m<sup>3</sup>이다. 시화호는 유역면적에 비해 호수의 용량이 비교적 큰 편으로 수리학적 체류시간이 약 300~400일로 매우 길고, 평균수심이 약 5.8 m로 얕다. 이러한 수리적·형태적 특성은 수질의 부영양화가 비교적 쉽게 일어날 수 있을 것으로 예측되었다(공동수, 1996).

수질조사는 시기에 따라 정점 수에서 다소 차이가 있었으나, Fig. 1과 같이 총 8개 지점에서 COD<sub>Mn</sub>, 엽록소 *a*농도, 총인농도, 총질소농도, 투명도, 염분도 및 식물플랑크톤을 조사하였다. 1994년~1996년 6월까지의 환경부의 수질측정망 자료를 사용하였으며, 이 시기의 측정지점은 정점 2, 4 및 6로서 총 3개 지점이었다. 1994년과 1995년의 염분도와 투명도 그리고 1994년의 엽록소 *a*농도는 한국수자원공사·농어촌진흥공사(1994, 1995)의 측정자료를 사용하였으며, 조사지점은 1, 2, 3, 4 및 6이었다. 1996년 7월부터 1997년 12월까지의 정점 1, 2, 3, 4, 6 및 8의 6개 지점에서, 1998년 1월부터 7월까지의 정점 1, 2, 3, 4, 6, 7 및 8의 7개 지점에서 측정하였고, 이후부터는 8개 지점에서 측정하였다. 수질분석을 위한 채수는 1 m 수심에서 하였고, 분석결과는 전체 조사지점의 산술평균값을 사용하였다.

염분도와 투명도는 현장에서 각각 수환경측정기(YSI-600XL)와 직경 25 cm의 흰색 원판으로 측정

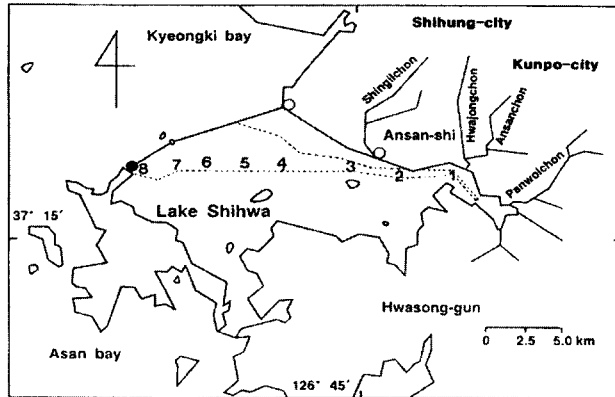


Fig. 1. Map showing the sampling locations for surveys of water quality in Lake Shihwa from 1994 to 1999. A Closed circle is watergate of the lower part and open circles are district sewage treatment plant of the Shihwa and Ansan-city

하였다. 반톤(Van Dorn) 채수기를 이용하여 채수한 시료는 즉시 아이스박스에 보관하여 3~6시간 내에 실험실로 운반하였고, 즉시 엽록소 *a* 분석을 위하여 여과하였다. COD<sub>Mn</sub>는 당일 분석하는 것을 원칙으로 하였으며, 당일 분석이 불가능할 경우에는 -20℃에서 냉동보관 후 1일 이내에 분석하였다. 총인, 총질소는 냉동보관후 2주내에 분석을 완료하였다. 수질분석은 수질오염공정시험법(환경부, 1993)과 Standard method (APHA, 1992)에 따랐다. COD<sub>Mn</sub>는 염분도가 높은 기수역에 적용할 수 있는 알카리-망간 분해법으로 분석하였다. 엽록소 *a*는 시료를 0.45 μm membrane filter로 여과하여, 90% 아세톤 10ml을 가지고 강하게 흔들어 분쇄한 다음 4℃의 냉암소에서 24시간 추출 후에 측정하였다. 총인은 원시료를 과황산칼륨으로 autoclave에서 산화시킨 후에 아스코르빈산(ascorbic acid) 환원법으로 측정하였다. 총질소는 알카리성 과황산칼륨으로 autoclave에서 산화시킨 후에 자외선흡광도법으로 측정하였다. 식물플랑크톤 관찰을 위한 정량 시료는 현장에서 Lugol 용액으로 고정된 후 실험실로 옮겨 2~3일 이상 침강시킨 뒤 상등액을 제거하고 10배로 농축시켰고 1% formalin으로 재고정하였다. 먼저 계수하기 전에 종의 동정은 광학현미경의 ×400배 또는 ×1,000배의 고배율로 관찰하였다. 농축시료 1 ml를 Sedgwick-Rafter chamber에 골고루 분산시킨 뒤 ×200배율에서 검경하면서 종별 세포수를 계수하였다. 식물플랑크톤의 동정은 Jensen(1984),

Fukuyo 등(1990), Hallegraef(1991), Thomas (1993) 및 Thomas 등(1995)의 문헌을 주로 참고하였다. 호수의 영양상태 평가는 Carlson(1977)이 제시한 trophic state index (TSI)를 사용하였으며, 계산에 적용한 농도는 당해 년도의 모든 측정치에 대한 산술평균값을 사용하였다.

### 3. 결 과

시화호에서 97년 1월부터 99년 12월까지 수문조작에 따른 호수의 유출량과 해수의 유입량을 Fig. 2에 나타내었다. 호수가 조성된 1994년에는 방조제가 건설되었으나 방조제 사석사이로 어느정도의 해수 유·출입이 가능하였으며, 건설공사, 방재, 수질개선을 목적으로 수문조작을 통한 해수의 유출입이 있었다. 1995년부터는 홍수기에 방재를 위한 방류 및 수질개선을 위한 방류가 있었으며, 유입은 거의 없었다. 1997년 7월부터는 시화호 수질개선을 위하여 수문조작을 통한 해수의 유·출입을 시도하였다. 해수 유·출입 초기에는 연안생태계에의 영향을 최소화하기 위하여 소량으로 유통시켰고, 점차 양을 늘려 나갔으며, 1998년 3월부터 조석주기에 따라 1회 방류량 2,000만톤 이내에서 상시개방하였다. 6월 15일부터 10월 15일까지는 상류 유역의 침수를 방지하기 위한 방제기간으로 시화호 수위를 해발고도 -2 m로 유지하였으므로 조석간만의 차이가 작아짐으로써 해수 유출입량이 감소되었고, 강우 시에는 해수유입없이 방류만 실시하였으므로 여름철

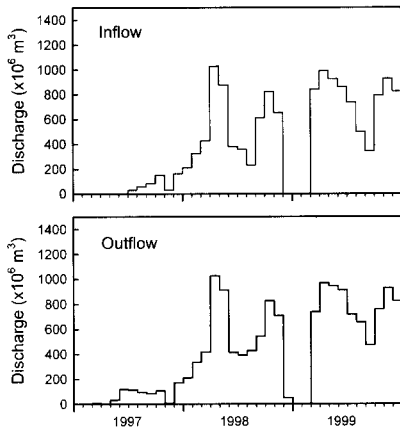


Fig. 2. Monthly variations of water discharge in Lake Shihwa from 1997 to 1999. Inflow of seawater into lake for water quality restoration began at July, 1997

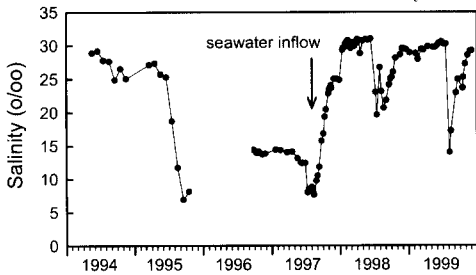


Fig. 3. Long-term trend of surface water salinity in the center of Lake Shihwa from 1994 to 1999

홍수기에는 해수유입량이 크게 감소하였다. 1997년 11월에는 인명사고로 인하여 배수갑문운영이 중단되었으며, 1999년 1월과 2월에는 배수갑문 보강공사로 인하여 해수유출입이 없었다. 해수 유입량은 1997년에  $512 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 1998년에는  $5,914 \times 10^6 \text{ m}^3$  및 1999년에는  $7,732 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다.

방조제 건설 및 수문조작에 따른 해수의 유·출입은 시화호의 생태계를 해수환경에서 기수환경으로 기수환경에서 해수환경으로 변화시켰다. Fig. 3은 호수의 중앙부인 정점 6에서의 염분도 변화를 나타낸 것으로 1994년부터 1995년 초까지는 25~30‰의 범위를 유지하였고, 1995년 7월부터 급격히 담수화되면서 1995년

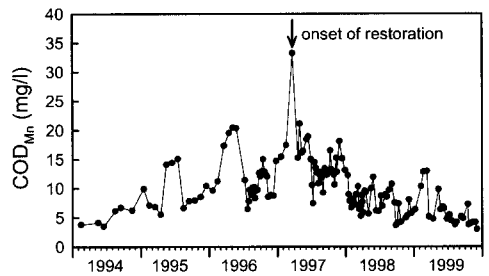


Fig. 4. Long-term trend of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  by lake mean value before and after onset of restoration in Lake Shihwa from 1994 to 1999

말에는 7~10‰로 감소하였다. 1996년부터 1997년 6월까지 7월~8월에 집중강우에 의해 일시적인 감소가 관찰되었으나, 전반적으로 담수와 해수의 중간수준인 약 15‰를 유지하였다. 이 시기까지는 해수유입이 통제되면서 표층에서는 상류에서 유입되는 담수와 혼합되면서 염분도가 낮아졌으나, 심층에서는 방조제 건설초기의 수위가 높은 염분도 상태로 존속함에 따라 표·심층간에 염분도에 의한 성층이 관찰되었다. 그러나, 1997년 7월 이후에 수질개선을 위한 해수유입의 영향으로 염분도가 급격히 상승하였다. 1998년부터는 여름철 홍수기에 일시적으로 15~20‰로 감소되는 것을 제외하면 약 30‰로 방조제 외해역의 수준을 유지하였다.

COD는 조사기간 동안에 1997년을 경계로 하여 변화의 추이가 크게 반전되었다(Fig. 4).

1994년은 방조제가 준공된 해로 소량의 해수 유출입이 가능하였던 시기로 COD가 연평균 5.2mg/L로 조사되었다. 그후에 해수의 유입이 차단되었고 담수가 계속되면서 COD의 급격한 증가가 관찰되었으며, 계절에 따라 양적인 차이는 있었으나, 경년에 따른 변화는 거의 직선적으로 증가하였다. COD는 1997년 3월에 조사기간을 통하여 최대값을 기록하였고 이후부터는 반대로 COD가 급격히 감소하였다. COD의 연평균 변화로 보면 수질이 가장 악화되었던 1997년에 15.1mg/L에서 1998년과 1999년에는 각각 7.5mg/L, 6.1mg/L로 감소하였다. 특히, 1999년도의 COD는 방조제 완공 초기인 1994년의 수질과 거의 같은 수준으로 회복된 것으로 볼 수 있다. 조사기간 동안에 COD의 증가추이와 수질개선대책 후의 감소추이를 구분하여 변화속도를 계산하면 1994년 1월~1997년 3월 사

이에는  $3.3 \text{ mg L}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 증가하였고, 1997년 3월~1999년 12월 사이에는  $4.6 \text{ mg L}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 감소하였다.

식물플랑크톤 현존량을 간접적으로 평가할 수 있는 엽록소 a 농도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 엽록소 a 농도는 COD보다 계절적인 변화의 폭이 컸으며, 1994년부터 1997년까지 peak의 높이가 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 1997년을 최대로 하여 1998년에는 급격한 감소경향을 보였고, 1999년에는 더욱 낮아졌다. 1994년의 연평균 엽록소 a 농도는  $7.3 \mu\text{g/L}$ 로 매우 낮은 수준이었으나, 1995년, 1996년과 1997년에는 각각  $76.6 \mu\text{g/L}$ ,  $96.0 \mu\text{g/L}$  및  $148.1 \mu\text{g/L}$ 로 지속적으로 증가하였다. 그러나 엽록소 a 농도는 COD와 마찬가지로 1997년을 기점으로 감소되기 시작하여 1998년에는 연평균 농도가  $43.5 \mu\text{g/L}$ 로서 1997년의 약 30% 수준으로 큰 감소를 보였으며, 1999년에는 연평균  $40.5 \mu\text{g/L}$ 로서 1998년보다도 조금 더 낮은 수준으로 유지되었다.

시화호가 형성되기 전과 후의 식물플랑크톤은 양적인 변화뿐만 아니라 종조성에 있어서도 매우 뚜렷한

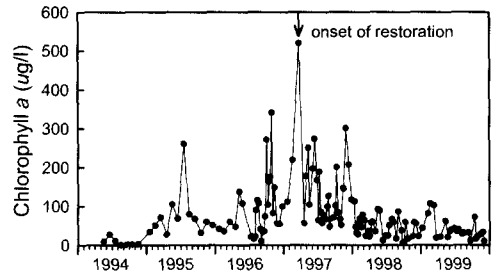


Fig. 5. Long-term trend of Chlorophyll a concentration by lake mean value before and after onset of restoration in Lake Shihwa from 1994 to 1999

변화가 관찰되었다(Table 1). 시화호가 완성되기 직전의 시기에는 수온이 상승하는 하계를 제외하고는 규조류가 풍부하였으나 담수 시작 후 약 2년이 지난 시점과 담수 후 수질이 매우 악화된 시기에는 담수종의 영향과 함께 기수 및 해양종의 혼합형태를 보였다. 시간이 경과함에 따라 담수종의 우점현상이 뚜렷한 것으로

Table 1. The change of phytoplankton phylum and dominant species at before and after dike construction in the water ecosystem of Lake Shihwa

Phylum/Phase*	I	II	III	IV	Dominant species
Bacillariophyceae	■	■	■	■	Cyclotella atomus, Skeletonema costatum
Cyanophyceae			■		Microcystis spp.
Chlorophyceae		■	■		Selenastrum capricornutum
Dinophyceae		■	■		Prorocentrum minimum
Euglenophyceae			■	■	Eutreptiella gymnastica
Cryptophyceae		■	■		Chroomonas spp., Cryptomonas spp.
Prasinophyceae			■	■	Pyramimonas 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).

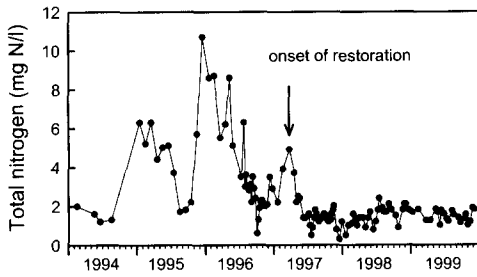


Fig. 6. Long-term trend of total nitrogen concentration by lake mean value before and after onset of restoration in Lake Shihwa from 1994 to 1999

관찰되었고 대발생 양상이 빈번하였다. 반면에 수질개선대책의 일환으로 해수유입을 위해 수문을 개방한 이후에 세포밀도는 현저하게 감소하였고 종조성은 *Proocentrum minimum*을 중심으로 다시 기수 또는 해양종이 우점하는 수환경으로 전환되었다. 결과적으로 호수조성 전과 해수유입 전·후에 식물플랑크톤의 천이양상을 정리하면 연안기수종→복합형(연안기수종+담수종)→연안기수종의 순이었다.

총질소는 담수화 후에 현저한 증가가 뚜렷하게 관찰되었으나, COD, 엽록소 a농도 및 총인농도와는 다르게 1995년에 가장 높았고, 1996년부터 다시 감소하기 시작하였다(Fig. 6). 방조제 체철 직후인 1994년에 연평균 농도가 1.53 mg/L이었고, 1995년에는 4.84 mg/L이었다. 1996년과 1997년에 걸쳐 급격한 감소가 있었고, 1997년 7월 이후에는 변화가 크지 않았다. 1996년~1999년의 연평균 농도는 각각 3.23 mg/L, 1.83 mg/L, 1.53 mg/L 및 1.50 mg/L이었다.

총인은 1994년에 연평균 0.055 mg/L에서 지속적으로 증가하여 1995년에 0.161 mg/L, 1996년에는 0.204 mg/L이었으며, 1997년 3월에는 0.754 mg/L로 최대값을 보였다(Fig.7). 1997년의 연평균 농도는 0.281 mg/L로 조사되었다. 반면에 1997년 4월 이후에 큰 폭으로 감소하여 0.2~0.3 mg/L를 유지하였고, 1998년 1월에 다시 약 0.1 mg/L 수준으로 더욱 감소하였다. 1998년과 1999년에는 각각 연평균 0.115 mg/L과 0.093 mg/L로 낮은 농도로 유지되었다.

투명도의 증감은 해수 유입전·후에 수색변동을 육안으로 구별할 수 있을 정도로 뚜렷한 변화를 보였고, 이러한 결과는 다른 수환경요인 분석결과와 유사한 경향을 보였다

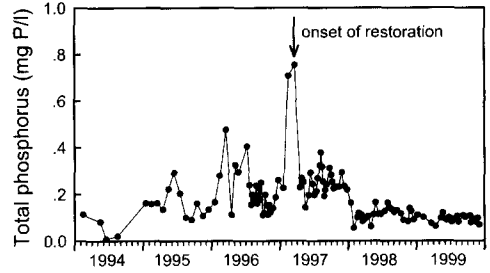


Fig. 7. Long-term trend of total phosphorus concentration by lake mean value before and after onset of restoration in Lake Shihwa from 1994 to 1999

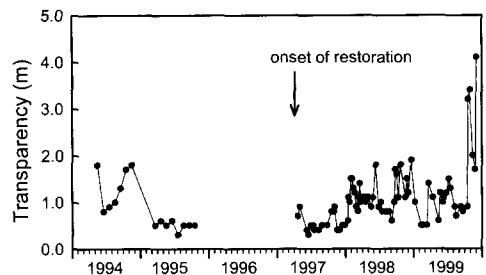


Fig. 8. Long-term trend of transparency by lake mean value before and after onset of restoration in Lake Shihwa from 1994 to 1999

(Fig. 8). 연변동은 1994년과 1995년에 각각 1.3 m와 0.5 m로 담수화에 따라 크게 감소하였다. 반면에 1997년, 1998년 및 1999년에는 각각 0.6 m, 1.3 m 그리고 1.8 m로서 매년 큰 폭으로 증가하였다. 특히 1999년 12월에는 하류수역에서 6.0 m~6.5 m를 기록하였다.

Table 2은 Carlson(1977)이 제안한 부영양화도 지수를 연평균한 엽록소 a농도, 총인농도와 투명도로부터 계산한 것이다. Carlson의 지수는 부영양화도를 1에서 100까지로 분류한 것으로서 일반적으로 60 이상을 부영양화단계로 보고 있다. 시화호에서의 TSI(Chl)는 1994년에 50으로 중영양호의 수준을 보였으나, 1995년, 1996년 및 1997년에는 각각 73, 75 및 80으로 과영양 수준으로 평가되었다. 1998년과 1999년에는 각각 68과 67로 감소하여 중·부영양호의 수준을 유지하였다. TSI(TP)와 TSI(SD)는 각각 62~85와 56~70의

Table 2. Summary of annual mean concentration and Carlson's trophic state indices(TSI) for chlorophyll a(Chl), total phosphorus(TP) and Secchi depth(SD) in Lake Shihwa from 1994 to 1999

Years	Mean value			TSI		
	Chl ( $\mu\text{g/L}$ )	TP (mgP/L)	SD (m)	Chl	TP	SD
1994	7.3	0.055	1.3	50	62	56
1995	76.6	0.161	0.5	73	77	70
1996	98.0	0.204	-	75	81	-
1997	148.1	0.281	0.6	80	85	67
1998	43.5	0.115	1.1	68	73	59
1999	40.5	0.093	1.4	67	70	55

범위를 보였고, TSI(Chl)의 경향과 동일하였다. TSI의 분류에 의한 영양단계평가는 1997년부터 시작된 수질개선대책의 시행시기를 전환점으로 하여 뚜렷한 변화를 보였고, 1994년은 중영양단계, 1995년~1997년은 과영양단계 그리고 1998년~1999년은 중·부영양단계로 볼 수 있다.

#### 4. 고 찰

시화호는 서해안 반월만 입구에 방조제를 건설하고 바닷물의 유입을 인위적으로 차단함으로써 형성된 호수이다. 시화호의 당초 이용 목적은 방조제 건설로 노출되는 간사지의 일부를 농경지로 개발하고 이곳에 농업용수를 공급하는 것이었다. 그러므로 방조제 건설이 완료된 1994년부터 해수의 유입을 통제하고 담수화를 추진하였으며, 담수화 과정에서 극심한 부영양화 현상이 관찰되었다. 이러한 양상은 시화호가 용량에 비하여 유역면적이 작아서 300~400일의 긴 체류시간을 갖는 수리학적특성과 유역으로부터의 과다한 오염물질 유입이 수질악화 속도를 가속시킨 것으로 볼 수 있다(공동수, 1996; 한국수자원공사, 1996).

시화호는 담수화 초기에 해수와 담수가 공존하는 수체를 형성하면서 상층에는 밀도가 작고 염분도가 낮은 수체가 존재하고, 하층에는 기존의 해수가 그대로 머물면서 상·하층간에 염분도 차이에 의한 강력한 성층(halocline)이 형성되었다(한국수자원공사, 1996b; 1997b). 그러므로 두 층에서는 서로 혼합이 극히 제한되었고, 상·하층간에 뚜렷한 수질오염 특성을 보였다. 표층에서는 상류에서 유입되는 고농도 영양염의 영향으로 극심한 식물플랑크톤 대발생 현상을 유발하였고(최중기 등, 1997; 신재기 등, 2000), COD로 볼 때 유기물농도가 급증하였다(해양연구소, 1999; 한국수자원공사, 1997b). 또한 저층에서는 저질토에서의 활발한

유기물 분해로 인하여 용존산소가 장기간 결핍되었으며(한국수자원공사, 1996b; 1997b), 저질토로부터 영양염 및 유기물의 용출이 왕성한 것으로 관찰되었다(박용철 등, 1997; 한국수자원공사, 1996b; 1997b; 한명우 등, 1997).

시화호 수질개선대책은 1996년 7월부터 시행되어 9월에 도시하수가 주를 이루는 안산천, 시화공단 내의 간선수로 및 유수지에 부레옥잠을 이용한 산화지를 설치 운영하였고(한국수자원공사, 1997b; 1998), 호수 내부 수역에서는 심층의 용존산소 회복과 식물플랑크톤 제어를 위하여 인공폭기를 설치 운영하였다(한국수자원공사, 1996b). 1997년 3월부터는 시화호로 유입되는 유입수중에서 가장 오염도가 심한 반월공단 7개 수로, 신길천 및 시화공단 2개 간선수로를 통한 유입수를 차집하여 시화호수처리장에서 처리 후 해양으로 방류하였다(한국수자원공사, 1997b; 1998). 차집수로에 의한 유입수 처리는 비강우시에는 전량 차집하였으나, 강우시에는 시화호수처리장의 용량을 초과하게 되므로 호내로 그대로 유입되었다. 상기한 바와 같이 시화호의 수질개선대책이 다양하게 추진되었으나 단기대책으로 시행한 방법으로는 단기간에 획기적인 수질개선 효과를 기대하기는 어렵고, 계획중인 대책들이 장기간의 건설시간이 소요되는 점을 감안하여 1997년 7월부터 해수의 유입을 통한 단기적인 수질개선이 시도되었다(한국수자원공사, 1997b, 1998).

시화호의 수질변화추이는 COD, 엽록소 a농도, 총인 및 투명도에서 모두 수질개선대책이 시작된 1997년을 중심으로 빠른 속도의 수질악화 경향에서 수질회복추이로 반전되었다. 주요 수질항목들의 1차적인 변화는 1997년 3월의 최대치를 기점으로 감소하였고, 2차적으로는 1998년 1월을 기점으로 더욱 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4~8).

1997년 3월에 가동이 시작된 반월공단 수로의 차집은 1998년에 시화호로 유입되는 연간 총유입부하량 중에서 COD, 총인 및 총질소를 각각 30%, 15% 및 26% 저감하는 것으로 조사되었다(한국수자원공사, 1998). 결과적으로 시화호의 수질이 1997년 3월을 기점으로 큰 폭으로 개선된 것은 수질개선대책 사업으로 시행된 차집수로에 의한 효과로 볼 수 있다. 즉, 차집수로에 의한 유기물 및 영양염의 저감은 시화호내의 수질오염도의 회복에 기여한 것으로 평가되었다. 그러나 차집수로에 의한 오염물질저감은 상층수의 수질개선에는 효과적으로 기여한 것으로 평가할 수 있었으나, 염분도성층에 의해 상·하층이 격리된 상태에서 저층의 무산소층 형성에 따른 오염현상은 해소되지 않았다(한국수자원공사, 1997b).

시화호의 수질 및 수환경 회복에 가장 큰 영향을 준 또 다른 요인은 1997년 7월말부터 실시한 해수유통에 의한 수질개선으로 볼 수 있다. 해수 유·출입 초기에는 조석주기에 따라 1회 250만톤으로 1일 2회 유입하였다. 초기에는 양적으로 소량이 유입되었고, 해수가 호수내로 유입된 후에 상·하층의 염분도차에 의해 심층으로 밀도류를 형성하였다. 그러므로 해수유입 초기에는 표층수의 수질개선보다는 심층수의 수질개선이 선행되어 일어났으며(한국수자원공사, 1997b; 1998), 표층수의 수질개선은 표층의 염분도가 증가하여 해수의 직접적인 영향을 받았던 시기인 1997년말부터로 볼 수 있다. 이 시기는 호내로 유입된 해수가 계속적으로 누적되어 표층까지 전달되었고 수체 진층에서 염분도가 거의 해수수준으로 상승하면서 강력하게 형성되었던 성층이 소멸되고 수체의 혼합이 원활이 일어날 수 있는 조건이 되었다(Fig. 3). 이러한 조건이 형성됨과 동시에 해수 유입량을 증가시킨 결과가 1998년 1월을 기점으로 큰 폭으로 수질이 개선된 계기가 되었다. 해수 유통을 통한 수질개선 시도는 심층수의 수질개선뿐만 아니라 표층수의 수질을 동시에 개선함으로써 다른 대책보다도 가장 효과적인 개선책으로 평가되었다(한국수자원공사, 1998, 1999).

담수화 시기부터 현재까지 수질에 관한 결과를 종합해 볼 때, 1998년~1999년의 시화호 수질은 방조제 건설 초기의 수질상태로 개선된 것으로 조사되었으며, 이는 1997년부터 본격적으로 시행된 반월공단과 시화공단의 차집수로에 의한 오염물질 저감과 해수유입에 의한 오염물질 희석 및 자연정화능력의 향상 등에 의한 결과로 볼 수 있었다. 유역의 공단에서 유출되는

오염물질은 비강우시에는 대부분 차집되었으므로 해수 유입에 의한 효과를 최대한으로 향상시키는데 결정적인 역할을 한 것으로 볼 수 있었다. 본 연구에 사용된 자료는 시화호 최상류부터 배수갑문 앞의 최하류까지의 모든 정점에서의 자료를 산술평균하여 사용한 것이므로 상·하류간의 수질차이를 고려하지는 못하였다. 해수유입이 원활히 진행되고 있는 1999년에도 최상류의 일부수역에서 식물플랑크톤 대발생이 지속적으로 관찰되는 것을 감안한다면 시화호 수체의 대부분을 차지하는 중·하류의 수질은 본 연구결과에서 제시한 결과보다 더욱 낮은 수질분포를 보일 것이다(한국수자원공사, 1999).

그러나, 현재까지 강우시에는 공단을 포함한 유역으로부터 다량의 오염물질이 지속적으로 유입되므로 이 시기 직후에 조류의 대발생은 피할 수 없는 실정에 있다(한국수자원공사, 1999). 따라서 향후 상류에 인공 습지 조성, 해수유입에 의한 자연정화능력향상 및 수문 조작의 원활한 운영 등으로 중·하류의 수역에서 식물플랑크톤 발생 완화 및 감소를 기대할 수는 있으나, 보다 근본적으로 유역의 공단배수와 생활하수가 포함된 유입하천에 대한 우기시 대책이 없이는 상류수역에서의 식물플랑크톤 발생은 당분간 지속될 것으로 판단된다.

## 5. 결론

시화호에서 방조제 건설 초기부터 6년간 장기적인 수질변화를 모니터링하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 조사기간동안 연평균 COD<sub>Mn</sub>, 엽록소 a, 총질소, 총인농도 및 투명도는 각각 5.2~15.1 mg/L, 7.3~148.1 µg/L, 1.50~4.84 mgN/L, 0.055~0.281 mgP/L 및 0.5~1.4 m의 범위를 보였다.

(2) 시화호가 조성된 1994년부터 1997년 3월까지의 외부 또는 내부의 저층으로부터 부하되는 오염물질이 지속적으로 호수내에 축적됨으로서 빠른 수질악화가 관찰되었으며, 수질오염은 연중 식물플랑크톤이 대발생하는 생물학적 현상으로 나타났다.

(3) 1997년 3월부터 1999년까지는 다양한 수질개선 대책의 시행으로 빠른 속도의 수질회복이 관찰되었고, 1999년의 수질은 담수화 초기의 수질로 회복된 것으로 조사되었다.

(4) 시화호의 수질회복은 1997년 7월부터 시행한 해수유통에 의해 가장 큰 효과를 보였고, 1997년 3월



부터 운영한 반월공단 및 시화공단의 차집수로에 의한 유입부하량 저감이 수질회복 효과를 더욱 향상시킨 것으로 평가되었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 지원으로 수행되었습니다. 현장조사 및 분석에 도움을 주신 한국수자원공사 안덕건설단 여러분들께 감사드립니다.

### 참고 문헌

고석구 (1996). "시화호의 수질개선대책 및 재원조달 방안", 한국물학술단체연합회 심포지움, 시화호를 어떻게 할 것인가?. pp. 81~105.

공동수 (1996). "시화호의 물질순환구조 및 처리대안 별 수질 시나리오 분석", 한국물학술단체연합회 심포지움, 시화호를 어떻게 할 것인가?. pp. 65~76.

박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희 (1997). "시화호 산화-환원 환경하의 용존 유기 화합물의 생지화학적 연구." 한국해양학회지(바다), 한국해양학회, 제2권, 제2호, pp. 53~68.

신재기, 김동섭, 조정제 (2000). "시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태." 한국환경과학회지, 한국환경과학회, 제9권, 제2호, pp. 109~117.

최중기, 이은희, 노재훈, 허성희 (1997). "시화호와 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구." 한국해양학회지(바다), 한국해양학회, 제2권, 제2호, pp. 78~86.

한국수자원공사 (1996a). 시화호 수질개선 종합관리 대책 기본계획보고서. pp. 130.

한국수자원공사 (1996b). 시화호 수질현황 및 조류 제어 연구보고서. pp. 163.

한국수자원공사 (1997a). 시화호 외해 연안환경영향 조사(중간보고서). pp. 466.

한국수자원공사 (1997b). 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이에 관한 연구(1차년도). pp. 360.

한국수자원공사 (1998). 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이에 관한 연구(2차년도). pp. 288.

한국수자원공사 (1999). 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이에 관한 연구(3차년도). 인쇄중.

한국수자원공사·농어촌진흥공사 (1994). 시화지구

담수호 수질보전대책수립 조사보고서(1). pp. 464.

한국수자원공사·농어촌진흥공사 (1995). 시화지구 담수호 수질보전대책수립 조사보고서(2). pp. 641.

한명우, 박용철, 허성희 (1997). "시화호에서 암모니아와 납의 저층용출." 한국해양학회지(바다), 한국해양학회, 제2권, 제2호, pp. 69~77.

허성희, 오임상 (1997). "인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구 : 서문." 한국해양학회지(바다), 한국해양학회, 제2권, 제2호, pp. 49~52.

환경부 (1993). 수질오염 공정시험법. 도서출판 동화기술. pp. 16~408.

해양연구소 (1999). 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(3차년도). pp. 363.

APHA, AWWA, WEF (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Carlson, R. E. (1977). "A trophic state index for lakes." *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 22, pp. 361~369.

Fukuyo, Y., H. Takano, M. Chihara, and K. Matsuoka (1990). *Red-tide organisms in Japan, An illustrated taxonomic guide*, Uchida Rokakuho, Tokyo, Japan, pp. 430.

Hallegraeff, G.M. (1991). *Aquaculturists' guide to harmful Australian microalgae*, CSIRO Australia, pp. 112.

Jensen, N.G. (1984). *The pennate diatoms: A translation of Hustedt's "Die Kieselalgen, 2. Teil"* published by Jensen, N.G. Strauss & Cramer GmbH, pp. 918.

Thomas, C.R. (1993). *Marine phytoplankton: a guide to naked flagellates and coccolithophorids*, Academic Press, Inc., California, pp. 263.

Thomas, C.R., G.R. Hasle, E.E. Syvertsen, K.A. Steidinger and K. Tangen (1995). *Identifying marine diatoms and dinoflagellates*, pp. 570.

(논문번호:00-036/접수:2000.06.05/심사완료:2000.08.01)