

시화호의 배수갑문 운용에 따른 수질변화

김종구·김준우·조은일*
군산대학교 토목환경공학부·제주대학교 환경공학과
(2002년 4월 4일 접수; 2002년 12월 7일 채택)

The Variation of Water Quality due to Sulice Gate Operation in Shihwa Lake

Jong-Gu Kim, Joon-Woo Kim and Eun-Il Cho*

School of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

*Environmental Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

(Manuscript received 4 April, 2002; accepted 7 December, 2002)

To evaluate the change for water quality after the water gate operation in Shihwa lake, in situ survey were conducted on september in 2000 and January, march, june in 2001. Chemical characteristics and eutrophication level was estimated from the survey data. The water quality of the Shihwa lake was greatly affected by pollutant load from rainfall, and formation of stratification in summer and winter was increased to effect on nutrient release from sediment. Especially, high concentration of chlorophyll-a was occurred in autumn, due to increased nutrient, high water temperature and low salinity after rainfall runoff. The mean concentration of DIN, DIP were 0.346mg/L, 0.0217mg/L in surface water and 0.826mg/L, 0.0415mg/L in bottom water, respectively, which were over III grade of seawater standard. Also high percentage of ammonia nitrogen to DIN in bottom water for autumn and winter was affected by released nutrient from sediment. Correlation analysis of chlorophyll-a versus TSS was shown that organic matter was affected by autochthonous organic matter stem from the algae, these factor showed reverse correlation about salinity. Closely correlations among to the water quality constituent in continuity survey was appeared. The results of eutrophication index estimation showed the high potentiality of red tide occurrence in Shihwa lake, particularly in summer or fall. Overall water quality was greatly improve to compared with measuring data during 1997~1998 at the beginning water gate operation, which reported by KORDI. Therefore, to improve of water quality in Shihwa lake, we need to establish of management plan about nutrient release from sediment, rainfall runoff, maximum of seawater exchange.

Key words : Shihwa lake, Correlation analysis, Eutrophication index, Nutrient release, Rainfall runoff

1. 서론

시화호의 개발은 시화 1단계 공단 및 배후도시를 개발하여 수도권인 인구분산 및 공업용지의 확보에 기여하고 방조제 축조에 따른 사업효과로 수도권내 도시 및 농지조성 등을 마련하고 인근 도시지역의 개발, 특히 2천년대 식량의 안정적 공급을 위한 농지조성과 수자원을 확보를 목적으로 1987년 4월 방

조제 공사가 시작되어 1994년 1월 호수면적 6,100ha, 총저수량 3억 2천만 톤의 인공호가 조성되었고, 해수유입이 억제된 상태에서 담수화가 추진되었다. 또한 시화호의 배후도시인 안산시와 시흥시에 주거단지가 조성되고 반월공단 및 시화공단이 같은 시기에 조성되었다.

시화담수호는 유역으로부터의 과다한 오염물질의 유입과 호수의 정체성으로 인한 오염물질의 축적심화, 호수화에 따른 수온, 염분차에 의한 성층현상과 녹조현상의 심화로 인하여 목표하였던 수질을 유지할 수 없는 심각한 상태에 이르렀다. 이러한 원인은 시화호 유역에서 유입되는 6개 하천을 통한 도시하

Corresponding Author : Jong-Gu Kim, School of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea
Phone : +82-63-469-1874
E-mail : kjg466@kunsan.ac.kr

수의 유입, 가축 사육장, 공단 등에서의 폐수유입으로 볼 수 있으며, 특히 하수량의 98.5%에 해당하는 폐수를 발생하는 안산시 반월공단과 시화공단에 기인한 폐수유입이 시화호의 오염을 가중시켜 온 것이다. 이처럼 유입수의 총량이 적은데다 소하천의 정화와 공단의 무단 방류에 대한 정화대책도 없이 조성된 이 시화호의 오염은 조성 당시부터 잉태되어 있었다. 이러한 결과 오염은 점차 심화되어 1997년 6월 담수호를 포기하고 해수 유입을 결정하게 되었다.

시화호와 관련된 연구를 보면, 담수호화된 시기인 1994년부터 1997년 동안 연구에서는 산화-환원환경을 가진 성층화된 구조에서의 영양염, 중금속과 유기물의 수직분포에서 6m 이하 수심에 염분으로 인한 강한 밀도성층이 존재한다고 보고 하고 있으며¹⁾, 시화호의 식물플랑크톤 증식과 일차생산력 조사에서 급속한 부영양화로 인하여 조류의 현존량이 약 250배나 증가하였다고 보고하였다²⁾. 또한 퇴적물에서의 암모니아와 납용출 조사를 통하여 퇴적물에 기인한 오염기원이 수질오염을 시킨다고 보고 하고 있으며³⁾, 시화호 퇴적물에 대한 시공간적인 변화와 중금속 오염도의 평가를 통한 지화학적특성을 보고 하였다⁴⁾. 그 외 생태학적 연구로써 어류 종 조성의 변화⁵⁾, 저서 다모류의 조성변화⁶⁾, 과영양 상태하에서의 박테리아 변화⁷⁾에 관한 연구 등 다수^{8,9)}의 연구가 있다.

1997년 6월 담수화를 포기하고 해수유입을 시작한 후 연구를 보면, 시화호 배수갑문 운용에 따른 수온 및 염분변화에서 해수유입 후 저층에 고염 저온수가 나타났고, 해수유입시 수온과 염분의 비대칭적 분포를 보였으며, 성층이 크게 약화되었다고 보고 하고 있으며¹⁰⁾, 해수유입 전·후의 수환경요인과 식물플랑크톤 분포에서 담수화전에는 과영양상태에서 생물생산량이 높았으나, 해수유입 후 수질이 개선되고 식물플랑크톤의 식물상 변화도 크게 나타났다고 하였다^{11,12)}. 또한 배수갑문 운용에 따른 표층과 주상시료 퇴적물에 대한 유기탄소, 유기질소 및 중금속의 시공간적인 변화 조사에서 유기탄소와 유기질소는 시화호 내부로 갈수록 높았고, 퇴적물의 중금속에서는 큰 변화는 나타나지 않았다고 보고하고 있다¹³⁾.

그리고 시화호의 수질개선을 위하여 한국수자원공사에서 시화호수질관리 대책수립 연구¹⁴⁾가 수행되었고, 담수방류에 따른 외해역의 영향을 평가하기 위하여 한국해양연구소에서 외해 연안환경영향조사¹⁵⁾를 수행한 바가 있다.

1997년 6월 이후 시화호의 담수화를 포기하고 해

수화를 위하여 배수갑문을 운용한지 3년이 지난 이 시점에서 시화호의 수질변화에 대한 고찰이 필요하며, 해수호와 과정에서 생기는 수질의 변화특성 및 관리방안 도출을 위한 평가가 필요한 시점이다.

본 연구는 시화호의 배수갑문 운용 후 3년이 지난 시점에서의 시화호 수질특성을 평가하기 위하여, 2000년 9월, 2001년 1월, 4월, 6월에 지점별 표·저층수에 대한 수질을 조사하여 일반수질 및 영양염류의 특성을 파악하고 부영양도를 평가하고자 한다. 또한 만입구부와 만내측의 2개 정점에서 수질모니터링시스템(YSI 6920)을 이용하여 수질의 연속변화를 계절별로 측정하여 수질변화추이를 파악하였다. 본 연구 결과는 시화호의 수질관리를 위한 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 시료채취

시화호 배수갑문 운용 후의 호내 수질변화를 평가하기 위하여 2000년 9월부터 2001년 6월까지 계절별(9월 24일, 1월 20일, 3월 31일, 6월 30일) 수질 조사를 행하였다. 조사지점은 배수갑문 입구부에서 호내로 직선적으로 4지점을 선정하여 표층수와 저층수를 채수하여 수질조사를 행하였다(Fig.1). 그리고 수문개방에 따른 수질의 연속적인 변화특성을 보기 위하여 배수갑문 입구인 지점 A와 가장 안쪽 지점인 지점 D에 수질모니터링시스템(YSI-6920)을 설치하여 계절별 조사시점부터 보름동안 수질의 연속적인 변화특성을 조사하였다.

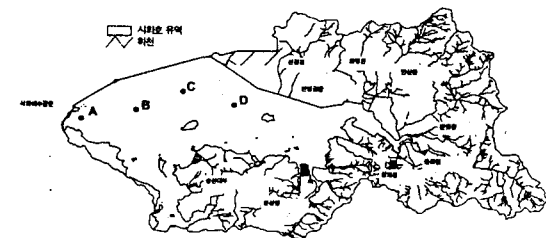


Fig. 1. Locations of sampling stations.

2.2. 수질분석

수질조사항목은 일반항목과 영양염류를 분석하였으며, 연속관측에서는 수온, 염분, 용존산소, pH를 관측하였다. 분석방법은 해양오염공정시험법¹⁶⁾ 및 그에 준하는 시험방법을 적용하였다. 수온, pH, 염분, 용존산소(DO)는 현장에서 측정하였다. 화학적 산소요구량(COD)은 알칼리성 $KMnO_4$ 법으로, 총부유물질(TSS)은 시수 일정량을 GF/C로 여과하여 건조 후 여과지의 중량차로 측정하였다. 암모니아질소

는 인도페놀청법에 의해 측정하였고, 아질산질소는 NED법으로, 질산질소는 Cd-Cu 환원법으로 측정하였다. 총무기질소(DIN)는 암모니아질소와 아질산질소 그리고 질산질소의 합으로 구하였다. 인산염(DIP)은 Ascorbic acid법으로 비색정량 하였으며, 클로로필a는 Strickland & Parsons¹⁷⁾로 측정하였다.

2.3. 상관성 분석 및 부영양도(Eutrophication Index) 평가

수질인자간의 상관성 분석을 위하여 SPSSwin 7.50을 이용하여 단순상관분석을 행하였다. 그리고 조사해역의 부영양도 평가를 위해 조사된 자료를 이용하여 Okaichi¹⁸⁾ 및 岡市友利¹⁹⁾가 제안한 식을 사용하여 해역의 부영양도를 평가해 보았다.

이는 적조를 유발시키는 한계를 고려한 방법으로, 여기서는 적조 초기로 보여지는 규조의 세포수 103 개체/mL를 한계로 해서 여기에 함유된 C량인 0.83mg/L (COD=1mg/L)를 고려하고 N은 7.14 μ g-at/L, P는 0.48 μ g-at/L를 기준으로 해서 평가한다. 해역의 부영양화 지수는 다음 식으로 표현되며, 부영양도가 1 이상이면 적조발생 가능성이 있음을 의미한다.

$$\text{부영양도}(EI) = \frac{\text{COD}(\text{mg}/\ell) \times \text{DIN}(\text{mg}/\ell) \times \text{DIP}(\text{mg}/\ell)}{1500}$$

3. 결과 및 고찰

시화호 배수갑문 운용에 따른 호 내 수질특성을 평가하기 위한 계절별 현장조사시 강우의 영향을 평가하기 위하여 2000년 8월부터 2001년 7월까지 조사지역의 강우특성을 Fig. 2에 나타내었다²⁰⁾. 그리고 수질조사 결과에 대한 계절별 표층수와 저층수의 농도범위 및 평균값을 Table 1과 2에 나타내었고, 주요 수질항목에 대한 지점별, 계절별 변동을 Fig. 3~9에 나타내었다.

수질조사 시점에 강우의 영향을 보면, 동계와 춘계에는 강우의 영향을 받지 않았으나, 하계와 추계

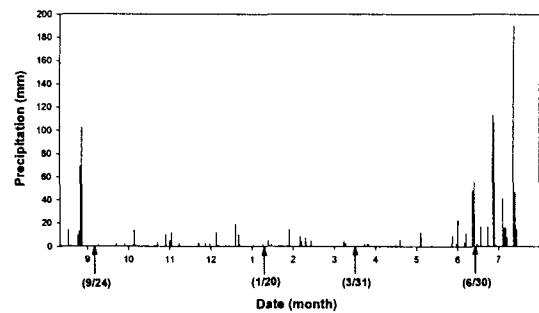


Fig. 2. Variation of precipitation during survey period.

Table 1. Seasonal range and mean values of water quality in the Shihwa Lake(Surface water)

Item	Unit		Spring	Summer	Autumn	Winter
Temp.	℃	Range	7.60~8.60	21.60~24.00	21.30~23.80	6.50~7.50
		Mean	8.28	23.00	22.88	6.37
Salinity	‰	Range	28.62~29.05	18.90~29.28	14.66~26.23	27.85~28.48
		Mean	28.81	26.08	17.65	28.23
pH		Range	7.79~7.99	7.54~8.17	7.96~9.06	8.25~8.37
		Mean	7.89	7.87	8.51	8.31
DO	mg/L	Range	8.83~10.41	6.04~8.76	11.57~15.90	11.25~14.81
		Mean	9.71	7.82	13.56	12.73
COD	mg/L	Range	1.29~1.45	0.54~3.56	2.05~2.56	1.30~1.55
		Mean	1.33	2.25	2.28	1.42
Chl.a	mg/m ³	Range	4.51~7.53	0.88~26.05	48.53~62.68	5.94~24.57
		Mean	5.85	7.62	56.36	16.04
TSS	mg/L	Range	1.8~3.8	2.6~9.4	21.0~22.2	4.4~7.8
		Mean	2.7	6.8	21.9	6.0
VSS	mg/L	Range	1.2~1.6	2.0~4.8	10.6~13.0	3.6~5.4
		Mean	1.5	3.5	11.9	4.5
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	Range	0.03~0.08	0.05~1.34	0.01~0.06	0.01~0.18
		Mean	0.05	0.41	0.03	0.05
NO ₂ ⁻ -N	mg/L	Range	0.013~0.017	0.000~0.012	0.065~0.089	0.008~0.012
		Mean	0.015	0.003	0.077	0.010
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	Range	0.142~0.164	0.015~0.085	0.188~0.545	0.139~0.257
		Mean	0.152	0.045	0.333	0.206
DIN	mg/L	Range	0.189~0.260	0.064~1.443	0.289~0.693	0.155~0.405
		Mean	0.214	0.462	0.442	0.268
DIP	mg/L	Range	0.0000~0.0182	0.0268~0.1234	0.0033~0.0249	0.0004~0.0157
		Mean	0.0083	0.0574	0.0144	0.0068

Table 2. Seasonal range and mean values of water quality in the Shiwha Lake(bottom water)

Item	Unit		Spring	Summer	Autumn	Winter
Temp.	℃	Range	7.5~8.2	21.5~23.7	21.1~21.7	6.7~7.8
		Mean	8.0	22.7	21.4	7.1
Salinity	‰	Range	28.67~29.16	28.13~29.49	22.76~27.46	27.45~28.55
		Mean	29.01	28.61	24.63	28.10
pH		Range	7.75~7.96	7.75~8.03	7.68~9.03	8.21~8.34
		Mean	7.86	7.90	8.34	8.28
DO	mg/L	Range	9.06~10.49	4.69~7.37	3.20~10.26	10.00~14.26
		Mean	9.83	5.75	6.34	11.66
COD	mg/L	Range	1.30~1.51	0.91~2.20	0.70~1.95	0.96~1.45
		Mean	1.42	1.71	1.04	1.19
Chl.a	mg/m ³	Range	1.80~7.77	0.68~15.10	3.00~57.44	7.94~17.92
		Mean	4.45	5.26	17.61	12.61
TSS	mg/L	Range	1.00~3.20	2.40~4.20	8.60~33.20	4.40~5.40
		Mean	2.60	3.30	23.01	4.90
VSS	mg/L	Range	0.80~2.00	2.00~3.80	6.80~9.60	3.60~4.20
		Mean	1.50	2.75	8.35	3.90
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	Range	0.08~0.10	0.043~0.271	0.577~0.732	1.14~1.42
		Mean	0.11	0.172	0.655	1.33
NO ₂ ⁻ -N	mg/L	Range	0.013~0.015	0.000	0.090~0.105	0.009~0.011
		Mean	0.014	0.000	0.091	0.010
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	Range	0.140~0.154	0.013~0.052	0.401~0.560	0.166~0.340
		Mean	0.160	0.028	0.500	0.237
DIN	mg/L	Range	0.252~0.330	0.056~0.324	1.090~1.349	1.376~1.769
		Mean	0.286	0.200	1.246	1.574
DIP	mg/L	Range	0.0000~0.0215	0.0188~0.0413	0.0882~0.1863	0.0038~0.0225
		Mean	0.0091	0.0313	0.1135	0.0123

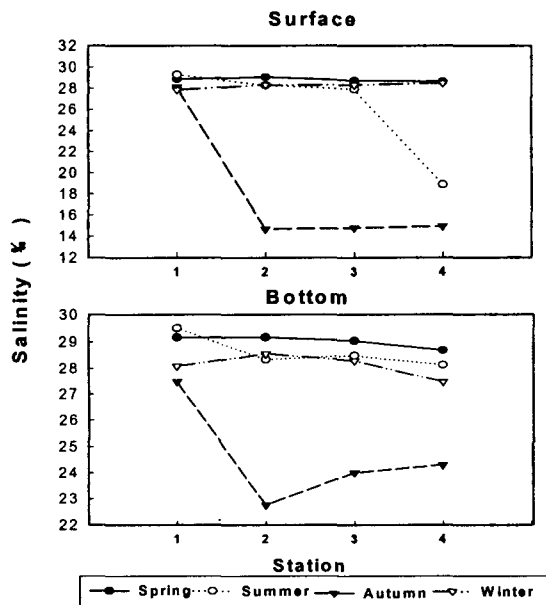


Fig. 3. Seasonal variation of Salinity at each station.

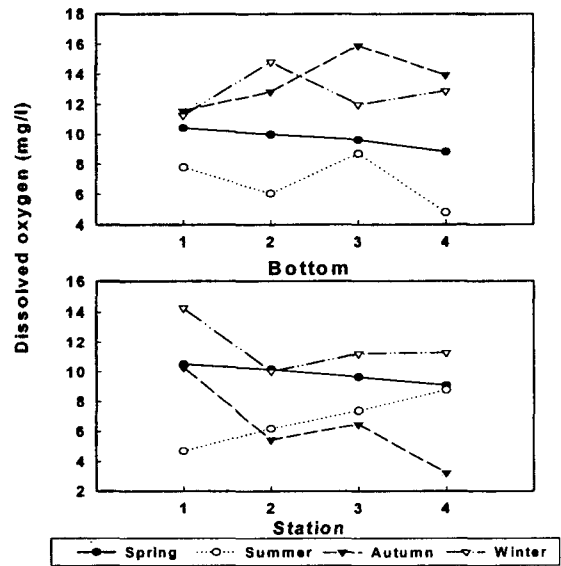


Fig. 4. Seasonal variation of Dissolved oxygen at each station.

에 강우의 영향을 받고 있으며, 특히 추계의 경우 집중호우 후 육역에서의 강우유출에 의한 영향을

크게 받았고, 하계에는 강우초기에 해당되어 전체적인 영향은 나타나지 않았다.

시화호의 배수갑문 운용에 따른 수질변화

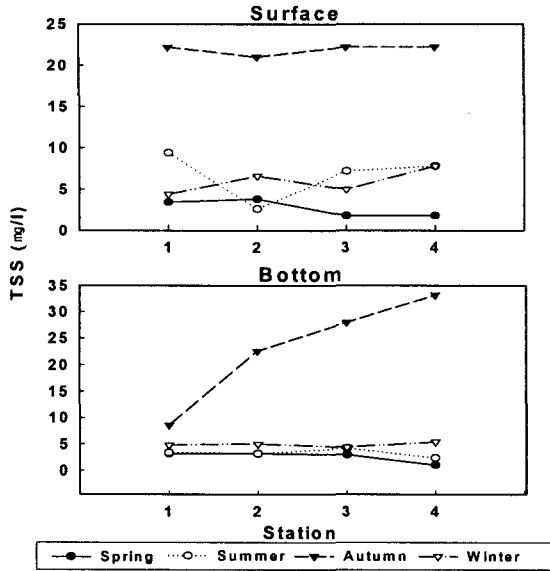


Fig. 5. Seasonal variation of TSS at each station.

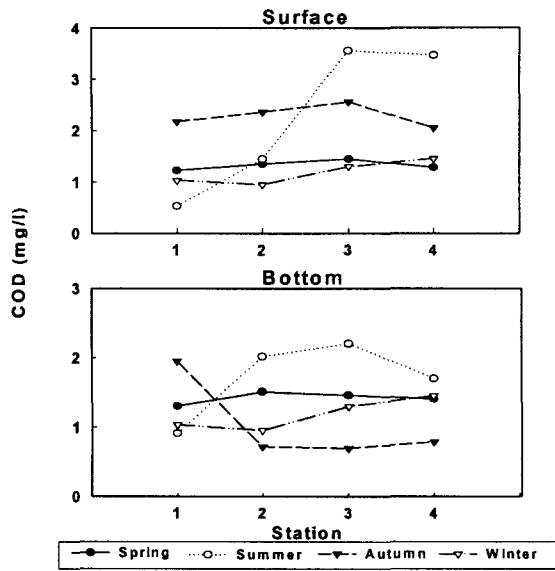


Fig. 6. Seasonal variation of COD at each station.

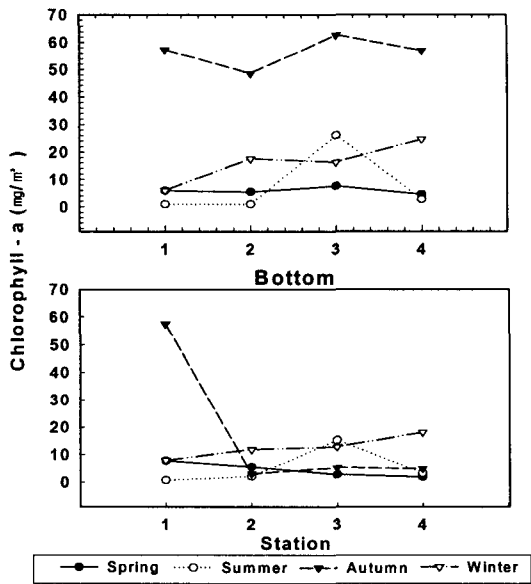


Fig. 7. Seasonal variation of Chlorophyll a at each station.

3.1. 일반수질특성

수괴의 특성을 규명하는 인자인 염분은 표층에서 14.66~29.28(25.19)‰, 저층에서 22.76~29.49(27.59)‰의 범위를 나타내었다. 봄과 겨울의 경우 큰 변화 없이 고르게 분포되어 있으나 여름은 강우의 직접적인 영향으로 연안에 가깝게 위치한 4지점에서만

낮은 농도를 나타내었으나, 가을에는 집중호우에 의한 강우유출의 영향으로 호내 전체적으로 낮은 염분농도를 나타내어 표층에서 평균 17‰의 염분농도를 보였다.

용존산소(DO) 농도는 수산생물 특히 어패류 산란 및 성장에 있어 중요한 제한요인으로 작용할 뿐만 아니라 수괴의 이동이나 혼합과정을 구명하는 중요한 요인이다. 시화호에서의 용존산소 농도분포를 포화도를 기준으로 한 백분율로 보면, 표층에서 54.7~186(106.9)%, 저층에서 36~116(80.2)% 범위를 나타내고 있으며, 표층수는 과포화 되어있고 저층수는 불포화되어 있음을 알 수 있다. 용존산소 농도는 수중의 물리적, 화학적 및 생화학적 활동에 따라서 변동하는데, 일반적인 용존산소의 감소요인은 온도상승에 의한 포화도 감소와 유기물 분해에 의한 용존산소의 소비이며, 증가요인은 식물플랑크톤의 광합성과 물리적 작용에 의한 재폭기에 의한 다. 본 조사에서 하계와 추계에 표층에서 높은 용존산소 농도를 나타내었고, 이 시점에서의 식물플랑크톤 농도인 Chl.a가 크게 증가한 것으로 보아 식물플랑크톤의 광합성에 의한 것으로 판단할 수 있다. 또한 저층수에서의 낮은 용존산소 농도는 염분에 의한 밀도성층이 존재한 조건하에서 저층으로 침강된 유기오염물질이 분해하면서 용존산소를 소비하기 때문에 나타난 것으로 해석할 수 있다. 이 또한 시화호의 수질오염 원인 중 퇴적물에 기인한다는 보고³⁾와 일치하고 있었다.

해역의 유기오염의 지표로 이용되는 화학적 산소 요구량(COD)은 인간활동에 유래하는 육상부하로 인하여 나타나는 외래성 유기물과 해수고유의 유기물 및 식물플랑크톤 성장에 의하여 유래되는 자생 유기물로 구분할 수 있다. 본 조사에서 COD의 농도 범위는 표층에서 0.54~3.56(1.82)mg/L, 저층에서 0.70~2.20(1.34)mg/L의 범위를 나타내었다. 표층의 경우, 하계 지점 3과 4를 제외하고는 전체적으로 해양환경기준 II등급(3mg/L 이하)의 수질을 나타내었다. 추계에는 전 지점에서 2mg/L 이상의 농도를 나타내었는데 이는 Chl.a의 농도가 높은 것으로 보아 식물플랑크톤의 증가에 기인한 자생COD로 판단된다. 지점별로는 육상 오염부하를 받기 쉬운 지점 3과 4에서 높은 경향은 있으나 강우의 영향이 적은 시기에는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 본 조사결과를 시화호를 해수화하기 시작한 1997년 6월부터 1998년 6월 1년 동안에 유사지점에서 조사된 자료¹⁴⁾의 연평균치인 상층에서 17.8mg/L, 하층에서 11.0mg/L 보다는 상당히 개선된 수질을 나타내고 있었다.

해역의 투명도와 직접적인 상관성이 있는 총부유물질(TSS)의 농도범위는 표층에서 1.8~22.2(9.4)mg/L, 저층에서 1.00~33.2(8.5)mg/L로 나타났다. 계절별로는 추계에 평균 22mg/L로 다른 계절에 비하여 약 3배 정도 높은 농도를 보였는데, 이는 식물플랑크톤의 증식에 기인한 것으로 판단된다. 총부유물질 중 유기물질의 성분을 나타내는 휘발성 부유물질(VSS)이 차지하는 비율은 표층에서 41.0~84.0%(61.4%), 저층에서 27.7~90.9%(67.1%)로써 높은 유

기물 함량을 나타내었고, 계절별로는 동계에 높은 비율을 보였다. 본 결과는 1997년~1998년 동안 한국수자원공사¹⁴⁾에서 조사된 상층에서 26.8mg/L, 하층에서 19.57mg/L 보다 2배 이상 낮은 농도를 나타내었다.

일차생산력의 지표로써 사용되는 식물플랑크톤 농도를 나타내는 Chl.a의 농도는 표층에서 0.88~62.68(21.47)mg/m³, 저층에서 0.68~57.44(9.98)mg/m³를 나타내었다. 계절별 큰 차이를 보였는데, 추계에는 강우 유출수에 의한 육상으로부터의 영양염류 공급에 의하여 식물플랑크톤이 일시에 번식함으로써 전 지점에서 높은 Chl.a의 농도를 나타내었고, 동계에도 지점 2~4에서 높은 농도를 보였다. 이는 시화호 담수화 과정에서 식물플랑크톤의 생산성이 크게 증가했다는 보고²⁾를 잘 설명하고 있다. 이는 시화호의 담수화 포기 이후인 1997년 6월부터 1998년 6월까지 한국수자원공사¹⁴⁾에서 본 조사와 유사한 지점에서 조사된 평균농도인 표층 91.96~231.55(평균 148.2)mg/m³, 저층 43.76~134.29(평균 71.6)mg/m³와 비교하면 상당히 개선된 농도를 나타내고 있었다.

3.2. 영양염류특성

시화호에서의 영양염류 변화특성을 Fig. 8~9에 나타내었다. 또한 질소의 거동특성을 파악하기 위하여 각 태 질소의 변화비율을 지점별, 계절별로 평가해 보았다(Fig.10).

총무기질소(DIN)의 농도범위는 표층에서 0.064~1.443(0.346)mg/L, 저층에서 0.056~1.769(0.826)mg/L로 나타났다. 이들 농도의 대부분은 해양수질환경기

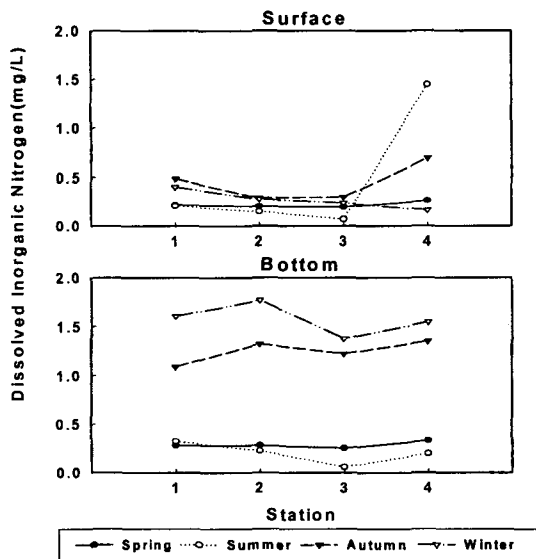


Fig. 8. Seasonal variation of DIN at each station.

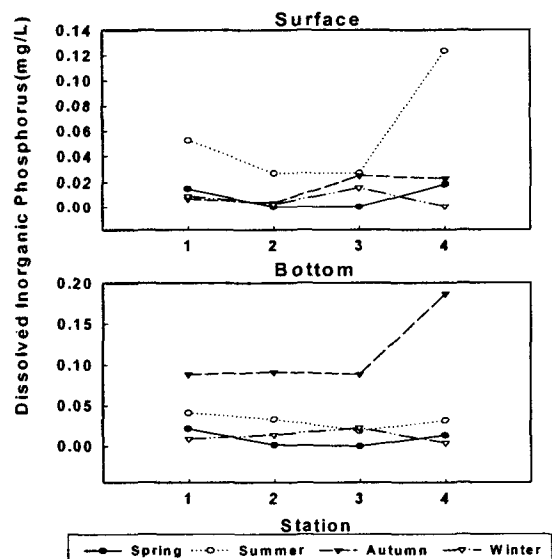


Fig. 9. Seasonal variation of DIP at each station.

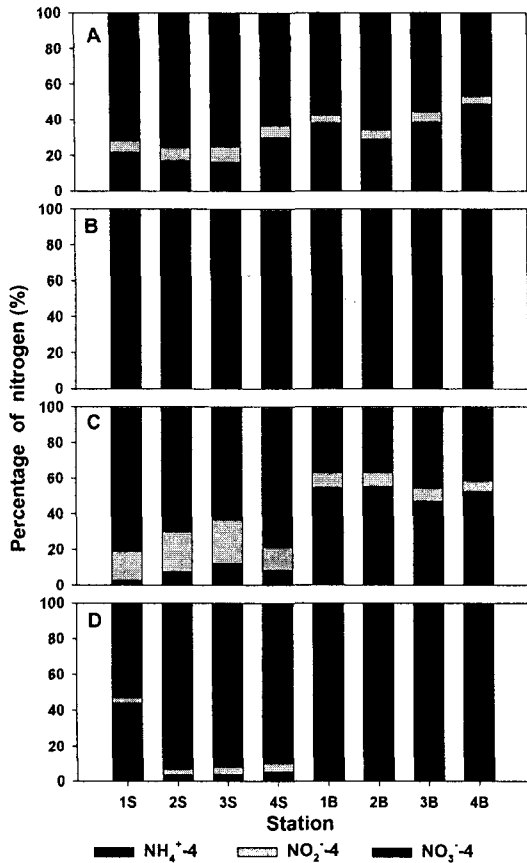


Fig. 10. Stational variation of inorganic nitrogen.
(A: Spring, B: Summer, C: Autumn, D: Winter)

준 III등급을 초과하는 것으로 나타나 부영양화가 심화된 것을 알 수 있으며, 특히 저층에서의 총무기질소 농도는 저질 영양염류의 용출에 기인하여 아주 높은 농도를 나타내고 있었는데 특히 추계와 동계에 높은 값을 보였다. 계절별 특성을 보면, 하계 지점 4의 표층에서 갑자기 높은 총무기질소 농도를 나타내었는데 이는 강우의 직접유출에 기인한 영향으로 판단된다.

이는 1997년~1998년 동안 한국수자원공사¹⁴⁾에서 조사된 연평균치인 상층에서 1.0073mg/L, 하층에서 0.9633mg/L 보다 개선된 농도를 보였고, 특히 상층에서 배수갑문 운용 후 수질이 많이 개선된 것을 알 수 있다. 각 무기태질소별 개선효과에서 아질산질소와 질산질소의 경우 큰 변화는 나타나지 않았으나, 암모니아질소의 경우 한국수자원공사 자료¹⁴⁾에서는 연평균 상층에서 0.759mg/L, 하층에서 0.732mg/L이었으나, 본 조사에서는 상층에서 0.136mg/L, 하층에서 0.566mg/L로 나타나 표층수에 대한 암모니아의 개선효과가 아주 크게 나타났다. 이는 해수유입

에 따른 저층 용존산소의 공급과 상하층간에 성층형성에 의한 퇴적물로부터 용출된 영양염의 상층으로의 이동감소 등에 의해 나타난 것으로 판단된다.

총무기질소 중 각 태 질소가 차지하는 비율을 보면, 계절별로는 하계에 거의 80%정도가 암모니아질소가 차지하고 있어 온도성층이 존재한 조건하에서 퇴적물로부터의 용출에 의한 영향을 크게 받고 있었다. 그리고 추계에 암모니아질소가 표층에서 급격히 감소하고 아질산질소 농도가 크게 증가하고 있어 이 시기에 활발한 분해가 일어나고 있었다. 표층과 저층의 경우 온도성층과 밀도성층이 발달하는 하계와 동계에 아주 높은 암모니아질소 농도를 보여 퇴적물에 기인한 수질오염의 영향이 큼을 평가할 수 있다.

전체적으로도 저층이 표층보다 높은 암모니아질소 농도를 나타내었다. 또한 추계 표층에서 암모니아질소 농도의 급격한 감소는 식물플랑크톤 증식에 의하여 암모니아질소가 섭취되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 그러나 지점별 변화특성에서 뚜렷한 특징을 나타내지 않았다.

식물플랑크톤의 제한인자로 작용하는 용존무기인의 농도를 보면, 표층에서 ND~0.1234(0.0217)mg/L, 저층에서 ND~0.1863(0.0415)mg/L로 나타났다. 이는 해양수질환경기준 II~III등급에 해당되며, 일부 지점에서는 아주 높은 인산염의 농도를 나타내었다. 추계 저층에서 높은 인산염 농도를 나타내어 저질에서의 용출에 의한 영향을 판단된다. 또한 하계 초기강우에 의한 오염물질 유입으로 지점 4에서 높은 인산염 농도를 나타내었다. 이는 1997년~1998년 동안 한국수자원공사¹⁴⁾에서 조사된 자료에서 상층 0.0325mg/L, 하층 0.0553mg/L 보다는 개선된 수질을 보였고, 총무기질소와 마찬가지로 표층수에 대해서 높은 개선효과를 나타내었다.

3.3. 수질항목간의 상관분석

시화호 배수갑문 운용에 따른 호수 수질변화 특성을 파악하기 위하여 수질인자간의 상호 관련성을 조사하였다. 관측된 수질자료를 표층수와 저층수로 구분하여 인자간의 상관분석을 SPSSwin 7.50으로 분석하고, 수질항목간의 단순상관행렬을 Table 3~4에 나타내었고, 인자간의 상관성이 높은 항목에 대한 상관도를 Fig. 11~12에 나타내었다.

수질인자간의 상관분석 결과를 보면, 표층에서 식물플랑크톤을 나타내는 Chl.a와 총부유물질 및 휘발성 부유물질 농도와 상관관계수 0.90 이상의 높은 정의 상관성을 나타내어 시화호 내 부유물질의 증가는 식물플랑크톤의 성장과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 배수갑문을 통한 해수유입에 의한

Table 3. Correlation matrix of water quality items at surface water

	Temp.	Sal.	pH	DO	COD	DIN	DIP	Chl.a	TSS	VSS
Temp.										
Sal.	-0.619									
pH	0.067	-0.188								
DO	-0.178	-0.350	0.523							
COD	0.587	-0.556	0.108	-0.070						
DIN	0.316	-0.503	-0.268	-0.265	0.489					
DIP	0.472	-0.279	-0.551	-0.609	0.444	0.776				
Chl.a	0.483	-0.703	0.601	0.696	0.430	0.061	-0.240			
TSS	0.637	-0.788	0.521	0.540	0.396	0.245	-0.008	0.932		
VSS	0.562	-0.716	0.640	0.618	0.395	0.148	-0.119	0.962	0.977	

Table 4. Correlation matrix of water quality items at bottom water

	Temp.	Sal.	pH	DO	COD	DIN	DIP	Chl.a	TSS	VSS
Temp.										
Sal.	-0.441									
pH	0.014	-0.270								
DO	-0.763	0.493	0.323							
COD	0.140	0.533	-0.036	0.232						
DIN	-0.241	-0.499	0.502	0.216	-0.568					
DIP	0.508	-0.763	0.071	-0.676	-0.397	0.306				
Chl.a	0.078	0.026	0.726	0.313	0.400	0.262	0.132			
TSS	0.443	-0.421	0.042	-0.590	-0.598	0.456	0.888	-0.051		
VSS	0.478	-0.331	0.344	-0.429	-0.448	0.599	0.829	0.263	0.922	

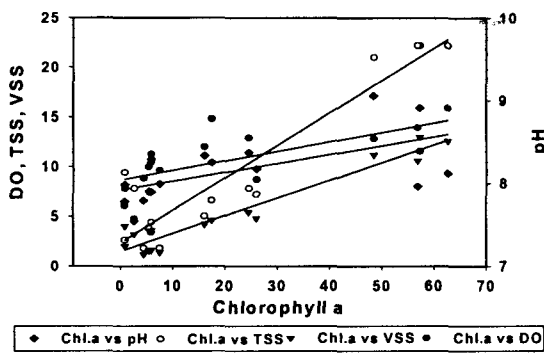


Fig. 11. Correlation between DO, TSS, pH, VSS and Chl.a at surface water.

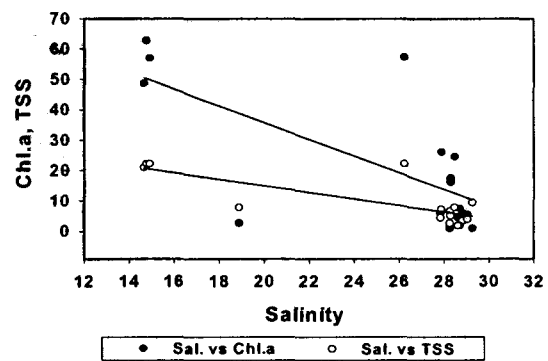


Fig. 12. Correlation between Chl.a, TSS and salinity at surface water.

영향으로 염분농도와 관련된 상관분석에서 염분과 chl.a, 총부유물질과 0.70 이상의 좋은 역상관성을 나타내고 있어 염분의 영향이 적고 육상의 영향을 많이 받는 지점으로 갈수록 식물플랑크톤의 성장이 좋음을 알 수 있다.

저층수에서는 염분농도와 총부유물질 및 휘발성 부유물질간에 약 0.90 정도의 아주 좋은 역상관성을 나타내어 염분의 영향이 적을수록 부유물질의 농도가 높아지며, 이는 표층에서 식물플랑크톤과 염분과의 관계에서 나타난 저염분에서 높은 식물플랑크톤 농도를 보인 것과 깊은 관련성이 있었다. 그리고 염

분과 인산염 사이에는 0.768의 역상관성을 나타내어 염분의 영향이 적은 내측 저층수에서 인산염 용출에 의한 영향으로 나타난 것으로 판단된다.

3.4. 연속관측 분석

시화호 배수갑문 운용에 따른 해수유입의 영향으로 인한 시화호내 수질의 변동 특성을 조사하기 위하여 Fig. 1의 지점 A과 D에서 환경모니터링시스템(YSI-6290)을 이용하여 보름간 연속관측을 계절별로 실시하였고, 측정된 항목의 범위 및 평균값을 Table 5에 나타내었으며, 측정인자간의 상관분석 결

Table 5. Seasonal range and mean values of water quality acquired by continuity survey in the Shihwa Lake

Station	1				4			
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter
Temp (°C)	5.8~9.65 7.62	20.03~26.11 23.04	19.6~21.56 20.80	-0.51~1.31 0.36	7.0~13.77 10.34	21.99~27.99 24.51	20.81~23.63 21.87	-0.73~1.37 0.39
Salinity (‰)	29.41~30.44 29.80	-	17.31~26.84 21.61	29.95~30.42 30.12	29.24~30.09 29.74	20.31~28.52 26.11	15.49~25.16 20.44	30.62~30.95 30.76
pH	7.92~8.13 8.04	7.32~8.87 8.28	7.55~8.77 8.31	-	7.33~7.97 7.74	7.19~8.66 7.88	7.49~9.14 8.21	8.18~8.52 8.41
DO (mg/L)	8.18~10.68 9.51	0.99~11.3 6.76	5.78~12.83 8.78	13.15~16.31 14.71	8.98~17.24 13.68	1.17~12.0 7.16	-	14.23~17.98 15.9

과를 Table 6에 나타내었다.

연속관측 결과에서 계절별 변화가 뚜렷하게 나타났고, 갑문입구와 내측과는 큰 차는 나타나지 않았다. 염분의 경우 추계 두 지점 모두 낮은 염분농도를 나타내어 강우 유출수에 의한 영향을 볼 수 있고 염분농도와 밀접한 관련이 있는 수질인자인 pH와 용존산소는 유사한 변동특성을 나타내었다. pH는 해수가 유입하는 지점 1에서 전체적으로 높은 값을 보였고, 갈수기인 추계 내측에서 높은 pH를 나타내었다. 용존산소는 하계에 낮고 동계에 높은 전형적인 변화를 나타내었다.

연속 관측된 수질인자간의 변화의 유사성을 평가하기 위하여 계절별, 지점별 상관관계를 분석하였다. 계절별 변화특성에서 하계와 동계에는 상하층간에 발생하는 성층의 영향을 볼 수 있는 지점 4에서 측정된 수질인자간에는 좋은 상관성을 나타내어 유사한 변화특성을 가짐을 알 수 있다. 혼합특성이 복잡한 지점 1에서는 인자간의 상관성이 잘 나타나지 않았다.

염분과 용존산소의 관계를 보면, 전체적으로 역(-)의 상관을 볼 수 있으며, 춘계를 제외하고는 어느 정도 상관성이 있는 것이 확인되며 특히 갈수기인 동계에 높은 상관성을 나타내었다. 이는 용존산소 포화도가 낮은 해수와 포화도가 높은 담수의 혼합으로 인한 역관계에 의해서 설명되어 진다.

염분과 pH는 일반적으로 정(+)의 상관성을 나타내지만 유역으로부터 과다하게 유입된 영양염류에 의한 식물플랑크톤의 성장에 따른 pH의 증가로 인하여 역(-)의 상관관계를 나타내게 된다. 본 관측결과 지점 4에서는 춘계를 제외하고는 대부분 역의 상관성을 나타내고 있어 식물플랑크톤 성장 및 기타 외부요인에 의한 것으로 판단된다.

식물플랑크톤이 번식함으로써 수중의 용존산소는 증가하게 되며, pH도 증가하게 된다. 따라서 용존산소의 증가와 pH의 증가는 식물플랑크톤에 기인한 영향으로 해석할 수 있으며, 연속관측 결과에서도

지점 4의 추계를 제외하고는 용존산소와 pH가 높은 정(+)의 상관관계를 나타내어 식물플랑크톤 성장과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3.5. 부영양도(Eutrophication Index) 평가

시화호 배수갑문 운용에 따른 시화호 내 수질을 평가하기 위해 부영양도 평가식을 이용하여 호소 수질의 부영양도를 평가하였다. 수질자료는 계절별 표층수와 저층수에 대해서 적용하여 Table 7에 나타내었고, 이를 한국수자원공사¹⁴⁾에서 배수갑문을 최초로 가동한 1997년 6월부터 1998년 6월 사이에 조사된 호내 수질자료로 산출한 부영양도지수 값과 비교 평가하였다.

부영양도 지수를 보면 표층수에서 0~414.5(30.03), 저층에서 0~132.3(28.91)으로 계산되었다. 계절별로는 봄(지점 2, 3)을 제외하고는 전 계절 거의 모든 지점에서 1이상의 지수 값을 나타내고 있어 항상 식물플랑크톤이 대량으로 증식할 수 있는 가능성을 가지고 있었다.

1997~1998년 동안 호내 유사지점에서 상·하층수에 대해 조사된 평균농도로 계산한 결과 상층에서 191.6~676.6(평균 399.0), 하층에서 322.5~409.7(평균 382.7)으로 나타났으며, 본 조사에서 나타난 결과는 배수갑문 운용 후 오염물질의 유출이 증가하고 해수유입으로 인한 희석효과에 의하여 부영양화 정도가 상당히 개선되었다고 평가할 수 있다. 그러나 이러한 효과는 해수의 영향을 받는 배수갑문과 가까운 쪽에서 나타났으며, 내측으로 갈수록 그 영향이 크게 줄어들을 수 있다. 특히 저층수의 경우 상당부분 개선되었지만 퇴적물에서의 영양염 용출로 인하여 여전히 높은 부영양도지수 값을 나타내고 있었다.

강우가 유입되는 시기인 하계와 추계에 높은 부영양도 지수는 강우를 통한 다량의 영양염류 유입으로 인한 것으로, Fig. 2에 나타난 강우자료에서 나타나듯이 추계 집중호우가 발생하지 일주일 후 식

Table 6. Correlation among to water quality constituent acquired by continuity survey

Station	1				4			
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter
Temp.-Sal.	-0.535	-	0.474	0.046	-0.089	-0.909	-0.500	0.824
Temp.-DO	-0.021	0.198	-0.504	-0.379	0.167	0.692	-	-0.633
Temp.-pH	-0.477	0.758	-0.293	-	0.900	0.856	0.633	-0.358
Sal.-DO	-0.108	-	-0.585	-0.805	-0.289	-0.881	-	-0.901
Sal.-pH	-0.086	-	-0.766	-	0.044	-0.870	-0.954	-0.738
DO.-pH	0.753	0.435	0.717	-	0.110	0.891	-	0.831

Table 7. Seasonal eutrophication index for each station in the Shihwa Lake

Season Station	Summer	Autumn	Winter	Spring
	1 S	3.8	4.7	3.2
B	8.2	126.1	9.9	5.3
2 S	3.7	1.5	0.6	-
B	10.1	58.2	15.9	0.5
3 S	4.1	12.8	3.3	-
B	1.6	50.4	27.1	-
4 S	414.5	21.5	0.1	4.1
B	7.1	132.3	5.7	4.1

물플랑크톤이 대량으로 증식한 결과로 충분히 추론할 수 있다.

따라서 시화호의 수질관리에 있어 중요한 요소로는 빠른 시일내 해수교환을 극대화하여 호내 오염물질의 유출을 시킴과 동시에 강우를 통해 유입되는 점원 및 비점원 오염물질에 대한 관리대책을 수립하여야 한다. 또한 저층 퇴적물에 의한 영양염 회귀에 의한 영향도 상당 부분 차지하고 있어 퇴적물에 대한 관리대책이 필요하다고 판단된다.

시화호내 해수교환의 극대화를 위해서는 현재 운용중이 배수갑문으로는 시화호 전체의 해수를 교환할 수 없으며, 해수교환이 극대화 될 수 있는 구간을 선정하여 배수갑문을 조성하는 것이 중요하다고 판단된다. 그리고 내측으로 유입되거나 현재 축적된 오염물질을 제거하기 위해서는 오염물질이 유입하는 육역 오염부하를 줄이기 위하여 하수 및 산업폐수 종말처리장의 확대 운영이 필요하며, 강우를 통하여 유입되는 비점오염부하가 큰 비중을 차지하고 있어 비점오염원 관리를 위한 대책수립이 필요하다. 또한 내부오염부하인 저층 퇴적물에 대해서는 준설을 통하여 제거하고, 호저층수 폭기와 같은 방법을 통하여 오염물질의 분해를 극대화하는 방안도 고려할 수 있다.

4. 결 론

시화호 수질개선을 위한 배수갑문 운용에 따른 이화학적 수질특성 및 부영양도를 평가하기 위하여 2000년 9월부터 2001년 7월까지 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

시화호의 수질은 1997년 6월 배수갑문 수문 개방 때 보다 상당히 수질이 개선된 것으로 보이며, 강우에 의한 오염부하의 영향을 크게 받고 있고, 하계와 동계에 성층이 발달하여 저층 퇴적물로부터의 오염 기여도가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 특히 추계에 강우유출수의 영향으로 식물플랑크톤의 농도가 대량 번식하여 항시 적조발생 가능성을 내포하고 있었다.

시화호의 무기영양염 수준은 해역수질환경기준 III을 상회하는 농도를 보였으며, 이는 강우 유출수와 저층 퇴적물로부터의 용출에 기인한 것으로 판단된다. 특히 하계 전 지점과 추계 및 동계 저층에서 무기질산염 중 암모니아질소가 차지하는 비율이 아주 높은 것으로 보아 퇴적물로부터의 영양염 용출의 영향을 심각하게 받고 있음을 알 수 있다.

수질인자와의 상관분석에서 식물플랑크톤과 총부유물질 간에 좋은 상관성을 보여 식물플랑크톤에 의한 자생유기물의 영향이 크게 나타났고, 이들 인

자는 염분농도와 역상관성을 보여 담수의 영향을 받는 육역으로 갈수록 식물플랑크톤 성장이 좋음을 알 수 있다.

연속관측 결과는 상하층간의 혼합이 약한 지점 4에서 좋은 상관성을 나타내었고, 수질인자간의 상관성에서 식물플랑크톤과 관련된 수질인자 간에 밀접한 상관성을 나타내는 것을 알았다.

시화호의 부영양도지수를 보면, 표층에서 0~414.5 (평균 30.03), 저층에서 0~132.3 (평균 28.91)로 나타났고, 계절별로는 봄(지점 2, 3)을 제외하고는 전 계절 거의 모든 지점에서 1이상의 지수 값을 나타내고 있어 항시 식물플랑크톤이 대량으로 증식할 수 있는 가능성을 가지고 있었다. 이는 1997~1998년 동안 호내 유사지점에서 조사된 부영양도 지수보다 훨씬 개선된 지수값을 나타내고 있었다.

시화호의 수질은 1997년 6월 배수갑문 수문 개방 이후 3년이 지난 현 시점에서 상당한 수질개선효과가 나타났으나 호수가 가지는 성층에 의한 수질악화와 배수갑문에 의한 해수교환 효과가 내측부까지 미치지 못하여 입구부와 내측간에는 큰 수질차이로 보이고 있어 이에 대한 대책수립이 필요할 것으로 판단된다. 또한 높은 부영양화지수는 강우 유출수에 포함된 오염물질의 유입 뿐 만 아니라 저층 퇴적물에서의 영양염 용출이 중요한 역할을 하고 있어, 해수교환의 극대화를 위한 배수갑문의 확대는 물론이고 호수내에 축적된 오염원에 대하여 적절한 관리 대책 수립이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 논문실험을 위해 수고한 군산대학교 수질관리실험실원 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997, 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유,무기 화합물의 생지화학적 연구, 한국해양학회지, 2(2), 53-68.
- 2) 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희, 1997, 시화호와 시화호 주변해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구, 한국해양학회지, 2(2), 78-86.
- 3) 한명우, 박용철, 허성희, 1997, 시화호에서 암모니아와 납의 저질 용출, 한국해양학회지, 2(2), 69-77.
- 4) 현상민, 천종화, 이희일, 1999, 시화호의 퇴적환경과 중금속오염, 한국해양학회지, 4(3), 198-207.

시화호의 배수갑문 운용에 따른 수질변화

- 5) 이태원, 문형태, 허성희, 1997, 시화호 수질악화에 따른 주변해역 어류의 종조성 변화, 한국해양학회지, 2(2), 110-116.
- 6) 류종성, 최진우, 강성길, 고철환, 허성희, 1997, 시화 방조제 건설 이후 시화호 다모류의 종조성 및 서식밀도 변화, 한국해양학회지, 2(2), 101-109.
- 7) 최동한, 강석원, 송기돈, 허성희, 조병철, 1997, 과영양성 시화호에서 박테리아의 분포 및 성장, 한국해양학회지, 2(2), 92-100.
- 8) 허성희, 오임상, 1997, 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구; 서문, 한국해양학회지, 2(2), 49-52.
- 9) 박철, 허성희, 1997, 시화호와 인근해역의 동물플랑크톤 분포로 본 시화호의 생태적 안정성, 한국해양학회지, 2(2), 87-91.
- 10) 최정훈, 강정원, 홍대벽, 박용안, 2000, 시화호 퇴적물의 유기탄소, 유기질소 및 중금속 함량과 분포, 한국해양학회지, 5(4), 276-284.
- 11) 신재기, 김동섭, 조경제, 2000, 시화호에서 해수 유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태, 한국환경과학회지, 9(2), 115-123.
- 12) 신재기, 김동섭, 조경제, 2000, 시화호에서 무기 영양염과 식물플랑크톤의 동태, 한국호소학회지, 33(2), 109-118.
- 13) 최정훈, 김계영, 홍대벽, 2000, 배수갑문 운용에 따른 시화호의 수온과 염분변화, 한국지구과학회지, 21(5), 541-552.
- 14) 수자원연구소, 1998, 시화호 수질 관리 대책수립 연구 - 최종 보고서-, 한국수자원공사.
- 15) 수자원연구소, 1998, 시화호 외해 연안 환경영향 조사 - 최종 보고서-, 한국수자원 공사.
- 16) 해양수산부, 1998, 해양환경공정시험법, 고시 제 1998-4호, 1-132.
- 17) Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1972, A practical handbook of seawater analysis, 2nd ed.
- 18) Okaichi, T., 1985, The cause of red tide in neutric water, Japan Fisheries ves. Convers. Ass, 58-75.
- 19) 岡市友利, 1972, 内灣赤潮の發生機構 -III 淺海の汚染と赤潮の發生, 水産研究叢書 23, 日本水産資源保護協會, 58-76.
- 20) 기상청, 2000-2001, 기상연보.